

(案)  
情報通信審議会 情報通信技術分科会  
航空・海上無線通信委員会  
90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー  
作業班報告書

電気通信技術審議会諮問第 10 号

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち

「90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーに関する技術的条件」

令和 6 年 1 月 24 日

情報通信審議会情報通信技術分科会

航空・海上無線通信委員会

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー作業班

# 目次

I	検討事項	3
II	委員会及び作業班の構成	3
III	検討経過	3
IV	検討概要	4
第1章	検討の背景	4
1.1	90GHz帯滑走路路面異物検知レーダーの概要	4
1.2	検討の背景及び目的	5
1.3	国内及び国際における実証動向	6
1.4	国内導入検討動向	12
1.5	国際標準化動向	13
第2章	周波数の共用に関する検討	18
2.1	同一システムとの共用検討	19
2.2	電波天文業務との共用検討	20
2.3	地球探査衛星業務（受動）との共用検討	21
2.4	地球探査衛星業務（能動）との共用検討	22
2.5	電波防護指針への適合性について	23
第3章	90GHz帯滑走路路面異物検知レーダーに関する技術的条件	25
3.1	一般条件	25
3.2	無線設備の技術的条件	25
3.3	測定法	26
3.4	干渉回避のための機能、設置、運用、その他の留意点	27
第4章	今後の検討課題	27
V	審議結果	28
別表1	情報通信技術分科会 航空・海上無線通信委員会 構成員一覧	29
別表2	90GHz帯滑走路路面異物検知レーダー作業班 構成員一覧	30
別 添		31
参考資料		35

## I 検討事項

航空・海上無線通信委員会は、電気通信技術審議会諮問第10号「航空無線通信の技術的諸問題について」（昭和60年4月23日）を所掌しており、今般、「90GHz帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件」について検討を行った。

## II 委員会及び作業班の構成

委員会の構成は別表1のとおりである。

委員会における検討の促進を図るため、委員会の下に「90GHz帯滑走路面異物検知レーダー作業班」を設けて「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「90GHz帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件」について調査を行った。作業班の構成は別表2のとおりである。

## III 検討経過

### 1 航空・海上無線通信委員会

#### (1) 第24回会合（令和5年10月25日(水)）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「90GHz帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件」について検討を開始することとし、検討を促進させるための「90GHz帯滑走路面異物検知レーダー作業班の検討」の設置、作業方針及び検討スケジュールを定めた。

#### (2) 第25回会合（令和6年x月x日(x)）

### 2 90GHz帯滑走路面異物検知レーダー作業班

#### (1) 第1回会合（令和5年11月1日(水)）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「90GHz帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件」について作業方針及び調査スケジュールを定めた。また、電波天文業務及び地球探査衛星業務との共用に関する詳細報告、国内実証結果、国際標準化動向及び国際展開等の報告並びに令和元年度に総務省が実施した技術試験事務の調査結果の報告を受けて調査を行った。

#### (2) 第2回会合（令和5年12月5日(火)）

滑走路面異物検知装置の導入検討状況及び90GHz帯滑走路面異物検知レーダー技術的条件に関する調査を行った。

#### (3) 第3回会合（令和6年1月24日(水)）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「90GHz帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件」に関する作業班報告書を取りまとめた。

## IV 検討概要

### 第1章 検討の背景

#### 1.1 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの概要

90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーのシステム基本仕様は、滑走路の FOD (Foreign Object Debris : 異物) 検知に関する FAA ADVISORY CIRCULAR (FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION : 米国連邦航空局) が航空関係者に情報を伝えるための刊行物。米国航空法のサポート的な役割を果たす。)、滑走路周辺に機器を設置する際の航空法に基づく各種の制限事項、実証フィールドの諸条件等を参考に決定した。システム系統図を図 1、基本仕様を表 1 に示す。

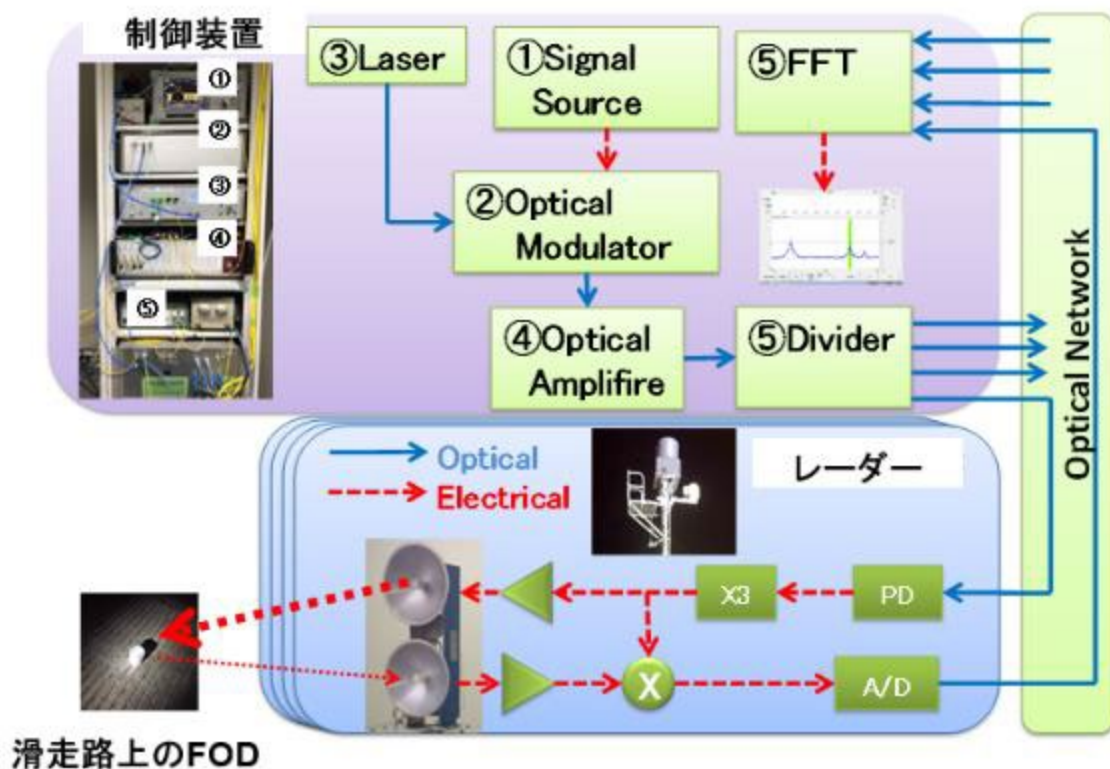


図 1 基本システム系統図

制御装置は 30GHz 帯で 3GHz 幅のチャープ信号を生成した後、光変調器と光増幅器を介して空港の既存光ネットワークに接続しレーダーに伝送する構成である。レーダーでは Photo Detector (PD) で電気信号に変換した後、3 通倍・増幅しアンテナに給電、反射波は増幅後、送信波と混合し AD 変換の後、制御装置まで光ファイバー経由で伝送され、FFT 処理や各種の信号処理の後、端末にレーダー情報として表示される構成となっている。制御装置とレーダー間の信号は、既存の光ファイバー網の一部を利用できるため、本システムのために空港内のファイバー網を別途用意する必要はない。

表1 90GHz帯滑走路路面異物検知レーダーの基本仕様

Antenna unit type	Wide band
Frequency	92 GHz - 100GHz
Bandwidth	8 GHz
Transmitting power	20 dBm
Ranging method	FMCW
Frequency modulation method	Linear triangle
Frequency modulation chirp rate	Up to 1.25kHz
Antenna gain	44 dBi
Maximum number of radars per a runway	48(※)

(※) 1滑走路当たりの最大90GHz帯滑走路路面異物検知レーダー数は建築限界により48。

## 1.2 検討の背景及び目的

2000(平成12)年、フランスの空港において、滑走路上の金属片が原因による超音速旅客機コンコルドの墜落事故が発生した。以降、同様な事故防止のため、航空機の離発着時に滑走路面に落下した金属片をはじめとしたFODを検知するシステムの導入が求められてきた。その結果、近年では光学監視カメラに加え、測距性能、距離分解能及び夜間の検出性能等で優れたレーダー方式の検知システムが世界的に導入されてきたところである。

しかし、それら現行の検知システムでは遠方から検出できるFODの大きさに限界があること、システムを滑走路近辺に配置する際には安全性の観点から小型化の向上が必要であること等から、遠方から正確にFODを検出できる新しい小型の検知システムの実用化が望まれている。

図2に示すように、近年光ファイバー技術と90GHz帯の周波数におけるイメージング技術を融合したリニアセル方式の90GHz帯滑走路路面異物検知レーダーが開発された。これは、小さなFODを正確に検知でき、検知時間、空港滑走路程度の検知範囲を自由に設定できることから、早期に、大規模な空港滑走路に90GHz帯滑走路路面異物検知レーダーを導入することが期待されている。

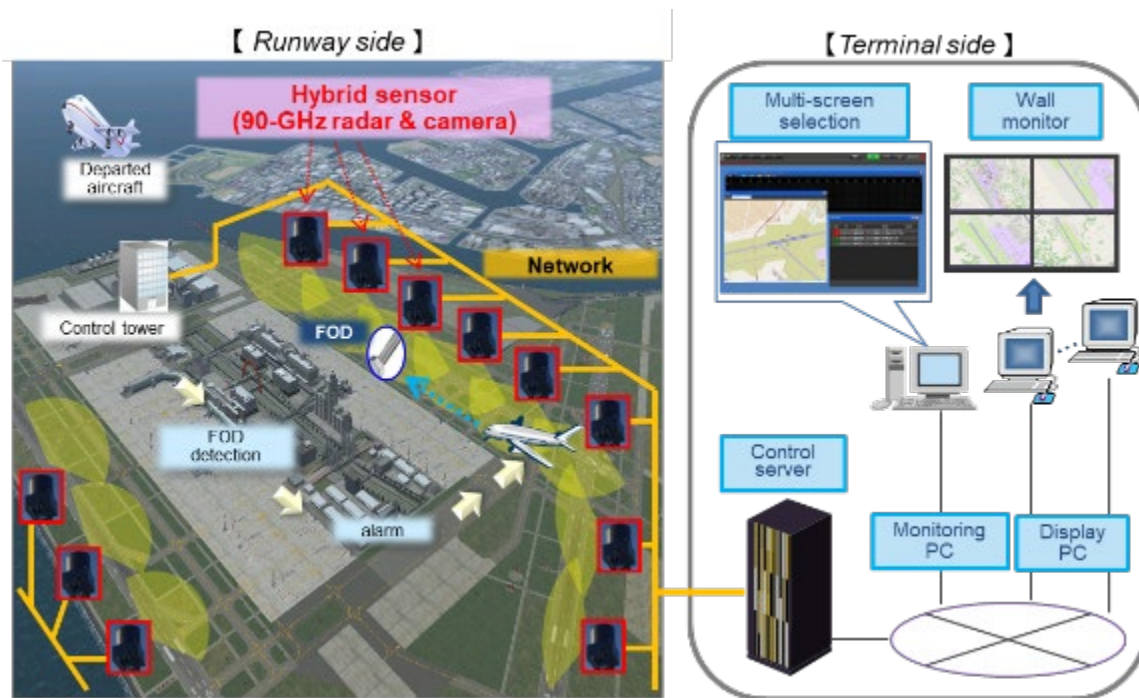


図 2 システムの応用イメージ（滑走路監視）

### 1.3 国内及び国際における実証動向

#### (1) 国内における実証動向

平成 27 年から令和 5 年(同年度以降も継続中)まで実施した実証実験について示す。

表 2 平成 27 年以降実施した実証実験一覧

時期	場所	内容
平成 27 年度～令和元年度	成田国際空港	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ B 滑走路に 4 台のレーダー装置及びカメラ、空港ビル内に中央局装置を設置したシステムを構築</li> <li>・ 構築したシステムを使用した各種実証試験及び諸外国(マレーシア、ベトナム等)に向けデモンストレーションを実施</li> </ul>
令和 3 年度	仙台空港、大樹町多目的航空公園	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 滑走路環境を使用してアンテナ高と検知エリアの関係等を実測により詳細に確認</li> <li>・ レーダー信号発生器及び信号処理ボードの改良によりシステム雑音を低減し、滑走路環境で実測確認</li> </ul>
令和 4 年度	仙台空港	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ FOD 検知システムの国際技術基準である最低性能要件 (EUROCAE<sup>※1</sup> MASPS<sup>※2</sup> ED-235<sup>※3</sup>) で規定された探知率試験を実施</li> </ul>
令和 5 年度	東京国際空港	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ C 滑走路付近に路面局 1 局 (レーダー : 1 台、カメラ : 1 台) を設置</li> <li>・ 24 時間の連続運転で現在も継続試験中</li> </ul>

※1 EUROCAE (European Organization for Civil Aviation Equipment) : 欧州民間航空機器機構

※2 MASPS (Minimum Aviation System Performance Standard) : 最低性能要件

※3 ED-235 (MASPS for Foreign Object Debris Detection System)

成田国際空港での実証実験は、総務省の電波資源拡大のための研究開発「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」(平成 24 年度～27 年度) 及び「90GHz 帯協調制御型リニアセルレーダーシステムの研究開発」(平成 29 年度～令和元年度) の一環として行われ、成田国際空港株式会社の協力のもとに実施し、仙台空港及び大樹町多目的航空公園での実証実験は、電子航法研究所の研究の一環として行われ、仙台空港事務所、仙台国際空港株式会社及び大樹町役場の協力のもとに実施し、東京国際空港での評価試験は電子航法研究所の研究の一環として行われ、国土交通省航空局、東京航空局及び東京空港事務所の協力のもと実施した。

a. 成田国際空港

90GHz 帯周波数を利用し以下のとおり実証実験を実施した。

- ①B 滑走路に 4 台のレーダー装置とカメラ、空港ビル内に中央局装置を設置したシステムを構築。
- ②最大距離 500m において 1 インチ金属円柱(RCS: -20dBsm)を検知可能なレーダー性能を達成。



図 3 成田国際空港における実証実験サイト

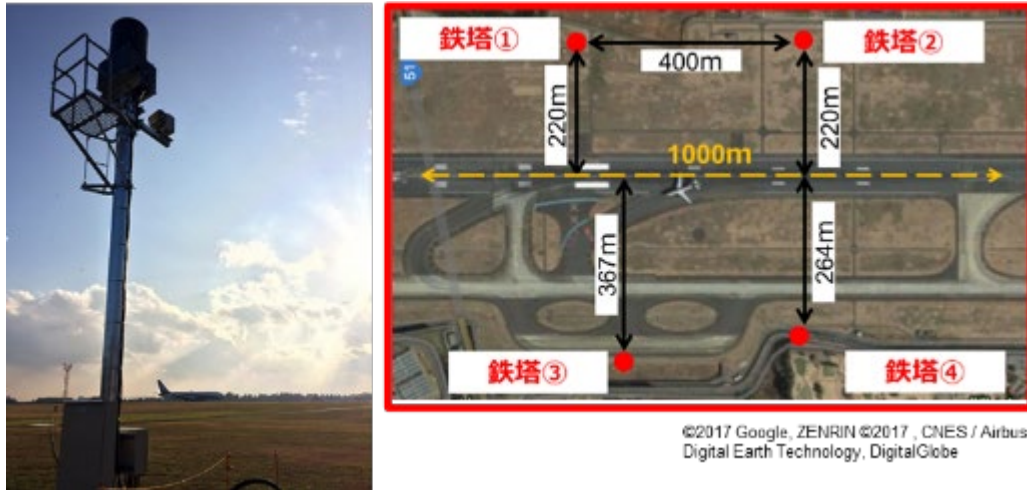
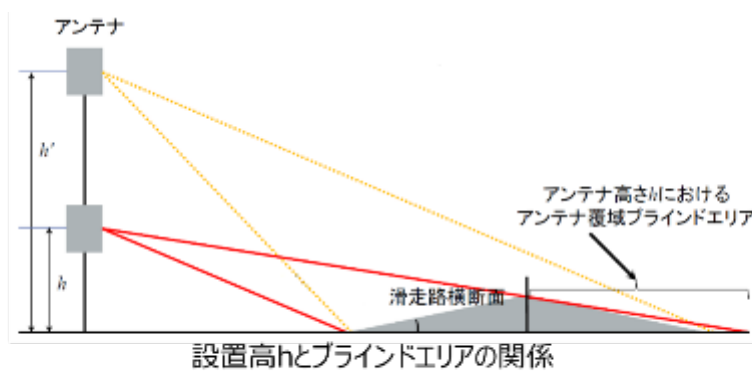


図 4 実証実験における 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの配置 (平成 27 年～令和元年)

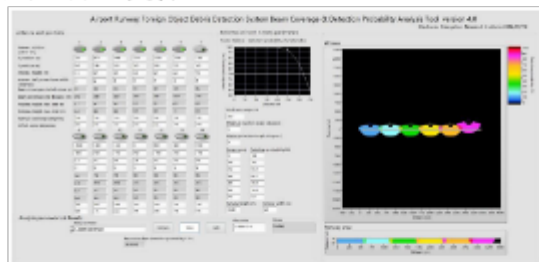
b. 仙台空港/大樹町多目的航空公園

レーダーの精度を向上し実用にむけた実験を実施した。

- ①アンテナ高によるブラインドエリア解消及び電波照射角度による路面クラッタ低減のため、アンテナ高と最適検知エリアの関係を実測により詳細に確認。
- ②実測結果を反映した検知エリア覆域解析ツールを開発。



大型昇降車を用いた実験 (仙台空港)

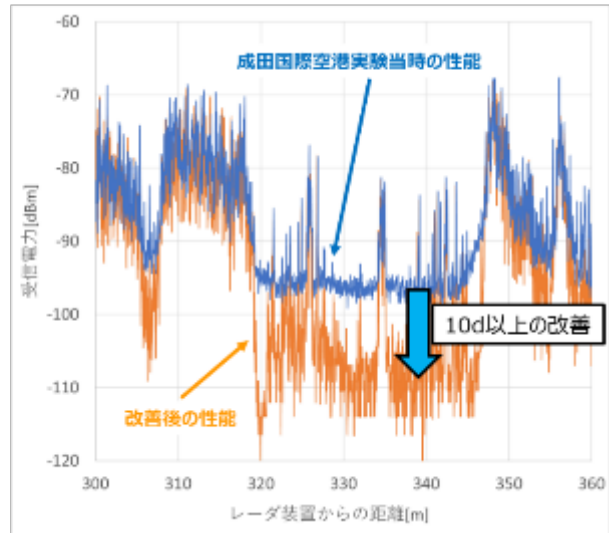
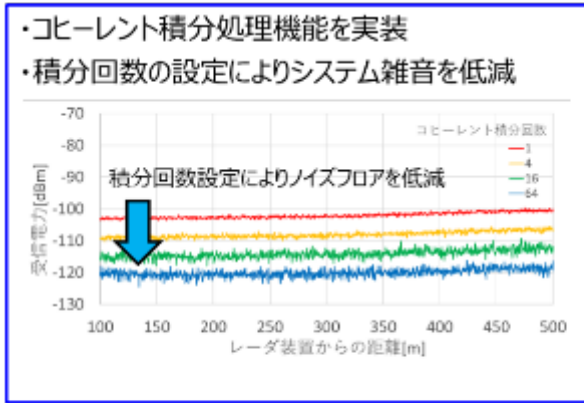


検知エリア覆域解析ツール(電子航法研究所による開発)

図 5 仙台空港にける実証実験

- ③レーダー信号発生器及び信号処理ボードを改良後、コヒーレント積分処理を実装しシステム雑音を低減。成田国際空港実験時に比べ、検知感度を 10dB 以上改善。





上記の効果を滑走路環境で実測確認 →

図 6 積分処理によるシステム雑音低減効果

c. 仙台空港

①上記 b における性能改善システムを用いて、最低性能要件探知率試験 (EUROCAE MASPED-235) で規定された FOD 探知率試験を実施。



図 7 最低性能要件探知率試験の様子

d. 東京国際空港

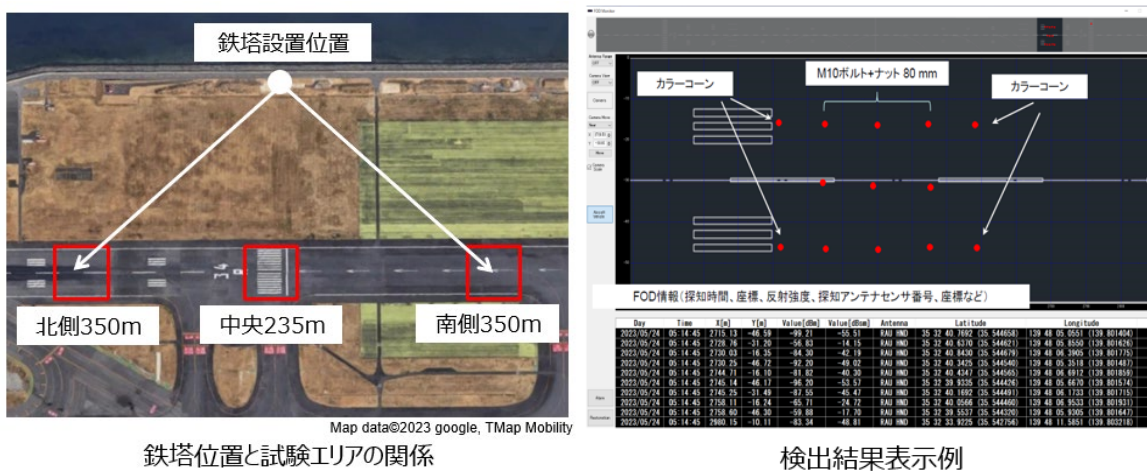
レーダー動作の安定性を向上させ実証実験を実施した。

①東京国際空港 C 滑走路付近に路面局装置 1 局 (レーダー 1 台、カメラ 1 台) を設置し、東京空港事務所庁舎内に中央局を設置した。令和 5 年 3 月の設置工事完了後、24 時間連続運転を実施し、現在も継続運転中。



図 8 東京国際空港に構築した実証実験システム

②最低性能要件探知率試験 (EUROCAE MASPS ED-235) で規定された FOD 探知率試験を実施し、全ての試験エリアにおいて、全種類検知率 95%以上を確認。



鉄塔位置と試験エリアの関係

検出結果表示例

図 9 東京国際空港における最低性能要件探知率試験

③反射率の大きい航空機から反射率の小さい鳥まで、同一のレーダー装置により検知しカメラでの自動撮影が可能なことを確認。



図 10 レーダー検知後のカメラ自動撮影画像結果

④特定の灯火からの反射電力を設置後7カ月間にわたり24時間モニタリングし、受信電力に大きな変動はなく安定動作を確認済み。

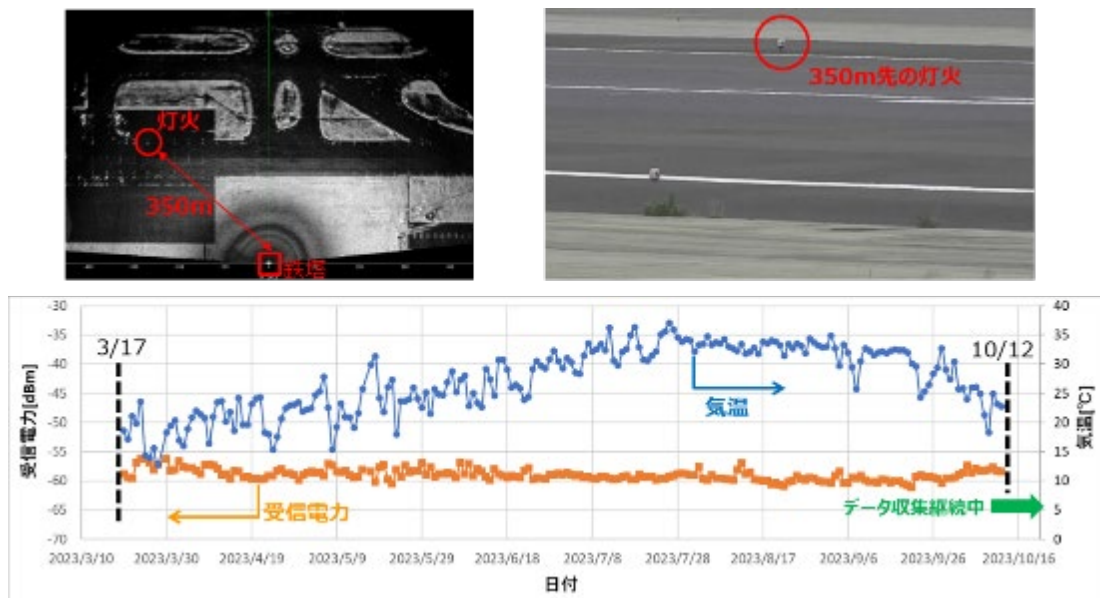


図 11 レーダー稼働状況

(2) 海外における実証動向

高温多湿の環境下など海外における周波数利用について実験を実施した。

a. マレーシア

- ①6基のレーダーから構成される評価システムを設置。
- ②東南アジアを中心とした空港関係者に対してショーケースとして活用。
- ③マレーシアが主体となって運用評価に移行するための準備中。

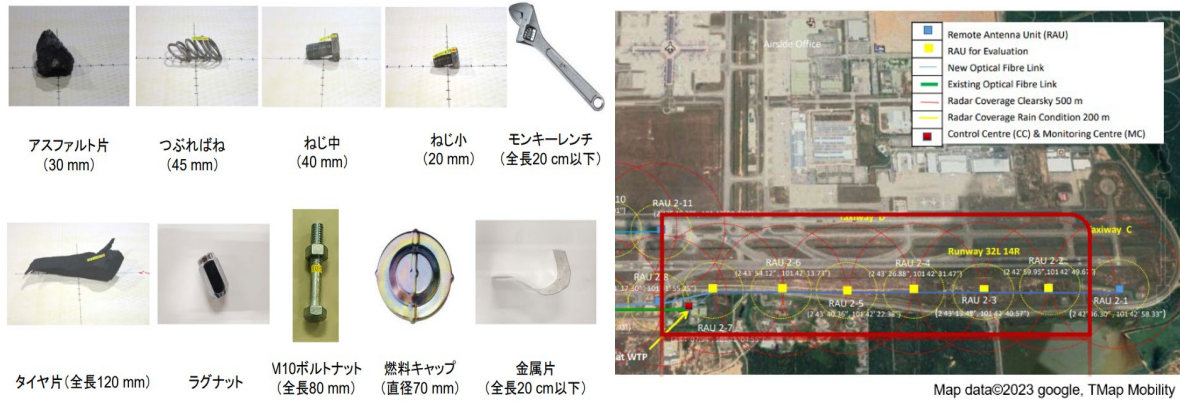


図 12 クアラルンプール空港における実証実験

b. 国際展開

今後以下のような国際展開が期待される。

- ①マレーシア管轄のマレーシア国内空港における実証実験の展開。
- ②マレーシアから、東南アジア、西南アジア及び中東に展開。



図 13 国際展開予定

1.4 国内導入検討動向

FODは、航空機若しくはその関連システムに損傷を及ぼす可能性があることから、空港管理者はFODの存在又はその可能性がある事態（航空機部品欠落の発生等）の覚知の都度、滑走路を閉鎖して臨時点検を行っている。これらの臨時点検の判断は、操縦士等からの通報等をもとに行っており、実際にFOD発見の通報等から点検を開始するまでに一定の時間が経過してしまっていること、また点検の結果、FOD発見に至らないことも多いことから、通報等によらないFODの常時監視及び臨時点検の確立が課題となっている。これら課題を踏まえ、国土交通省

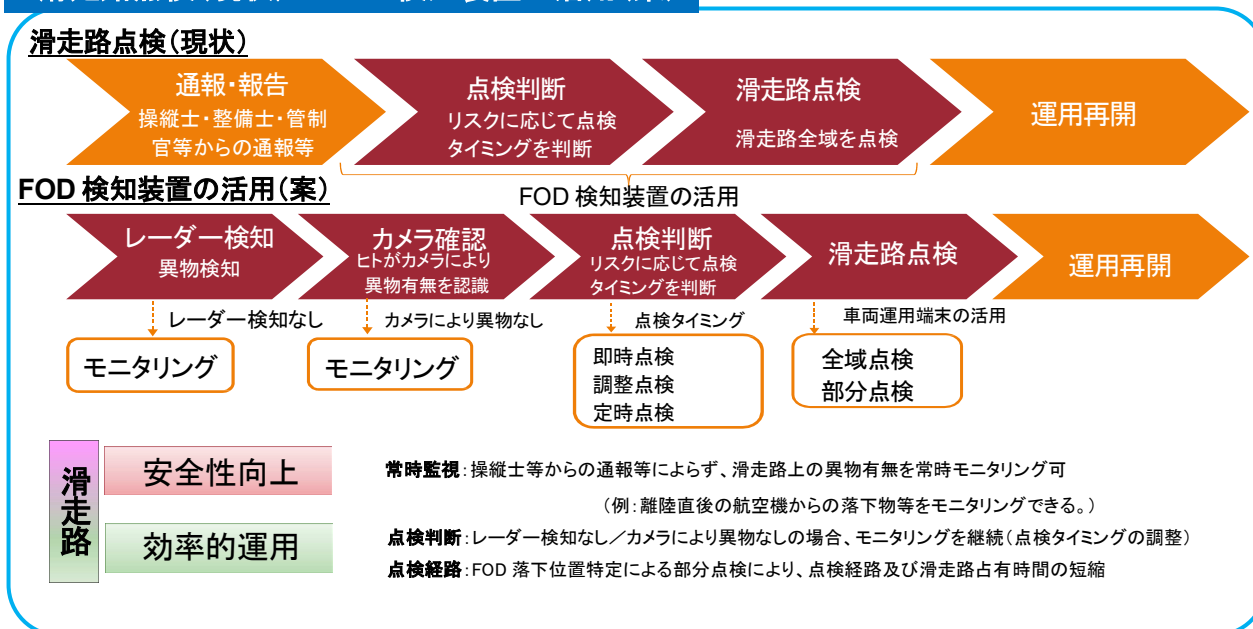
において滑走路の安全性の向上及び効率的な運用に資することを目的とし、関係機関からなる「滑走路面異物（FOD）検知装置導入検討会」を令和3年度に設置し、発着回数及び滑走路臨時点検回数が多い空港へのFOD検知装置導入について検討を行っている。

**滑走路面異物(FOD)検知装置導入検討会(令和3年度 設置)**

- (1) 運用要件(障害時及び悪天候時の対応等)
- (2) 仕様要件(検知すべき異物の定義、装置性能等)
- (3) 設置台数及び配置(導入滑走路選定)
- (4) その他、検知装置の導入検討に関する事項

(レーダー+カメラ)

**滑走路点検(現状)とFOD 検知装置の活用(案)**



ることが求められる。このため、製品システムの国際標準化活動は、国際調達に応募する際の重要な基本条件となる。更に、ASEAN 諸国では各国独自の電波法制が定められることは稀で、多くの場合、無線分野では ITU-R に定められた諸規則をそのまま国内基準として転用することが多い。このため、我が国における 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーシステムに沿った国際標準化を進めることで、各国において個別の法制化を進める必要がなくなり、どの国に輸出する場合でも、基本的な法整備は完了した状態となる。

図 15 は ITU-R 全体の会議体構成を示す系統図である。地上業務を統括する SG5 のもとに、無線測位業務を統括する WP5B、更にその下に無線標定業務を統括する 5B1 が常設の会議体として全体が構成されている。90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーシステムに関する寄書は国内委員会で審査・承認を受けたうえで、総務省が ITU-R に提出する。初回の現地会合で 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーシステムの寄書を審議するための Drafting Group (DG) を設置して実務的な議論をする旨が 5B1 議長によって提案・承認され、柴垣信彦氏（日立国際電気）が DG5B1 FOD の議長を会期毎に指名され務めている。

DG5B1 FOD では FOD に関する各国からの寄書の審議を行うほか、図 15 に示すように同一帯域を使用している他業務である WP7C（リモートセンシング）、WP7D（電波天文）及び WP5A（陸上移動）傘下の 5A2（システムと標準）、5A4（周波数共用）からのリエゾン文書を適切に処理しつつ、周波数共用のための文書作成を行っている。

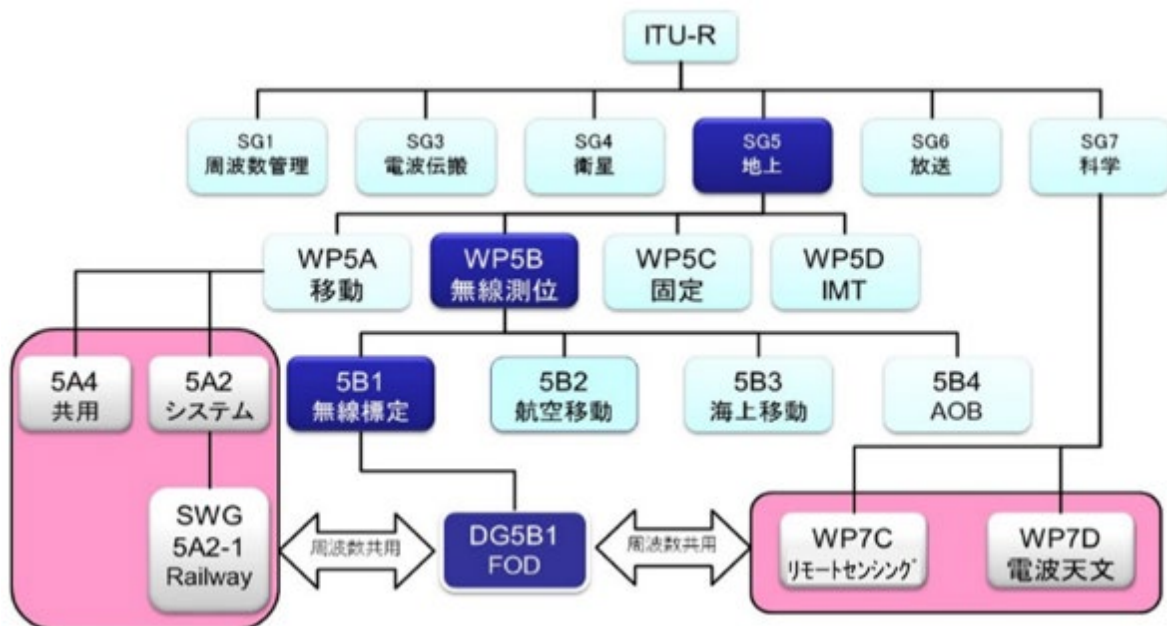


図 15 会議体系

表 3 ITU-R における 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー関連文書の検討状況

#	文書名	文書概要	審議・承認の状況
1	ITU-R 研究課題 260/5	90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー 新研究課題	発行済み
2	ITU-R 報告 M. 2501-0	90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー 技術仕様に関するレポート	発行済み
3	ITU-R 勧告 M. 2162-0	90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー、 気象レーダーに関する勧告	発行済み
4	Working document towards a preliminary draft new Report ITU-R M. [FOD_EESS_SHARE]	90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー と地球探査衛星との周波数共用に関する 技術レポート	継続審議、2024（令和6） 年度の完成を目指す

(2024（令和6）年1月現在のステータス)

ITU-R 報告 M. 2501-0 は 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの技術仕様を文書としてまとめたものであり、以下の事項が記載されている。

- ①システム概要、システム特性(周波数帯域、チャンネルプラン、レーダー性能、アンテナ特性)
- ②Annex1：成田国際空港での実証内容
- ③Annex2：スペクトラムエンベロープ(実測)
- ④Annex3：アンテナ仰角と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーへの入射角の関係
- ⑤Annex4：クアラルンプール空港での実証内容

なお、ITU-R 勧告 M. 2162-0 は 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー及び気象レーダーに関する勧告であるが、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーについては ITU-R 報告 M. 2501-0 に記載されている内容と同じ諸元が勧告として記載されている。

表 4 ITU-R 報告 M. 2501-0 に記載されている主要技術仕様

Parameters	Values
Frequency range (GHz)	92-100
Channel plan	See Fig. 3 (図 16)
Channel bandwidth (GHz)	0.58-7.98
Output power (mW)	100-200
Spectrum envelope	See Annex 2
Sweep frequency (kHz)	1.25
Antenna type	Cassegrain

Antenna gain (dBi)	44
Antenna pattern	Recommendation ITU-R F. 699
Antenna height (m)	4-8
Full width at half maximum antenna gain (3 dB beamwidth) (degrees)	Elevation: 1.0, Azimuth: 1.0
Antenna rotation speed (rpm)	15
Detection distance (m)	200-500
Antenna elevation angle (degrees)	-1.8 (see Annex 3)
Radiated rotation angle in azimuth (degrees)	$\pm 60$
Radar cross section specification (dBsm)	-20
Emission bandwidth (-3 dB) (MHz)	1 (see Annex 2)
Emission bandwidth (-20 dB) (MHz)	3.5 (see Annex 2)
Adjacent channel leakage ratio (dBc)	$< -70$
Receiver noise figure (dB)	10
I/N protection criteria (dB)	-6

**Channel plan for foreign object debris detection system operating in the frequency range 92-100 GHz**

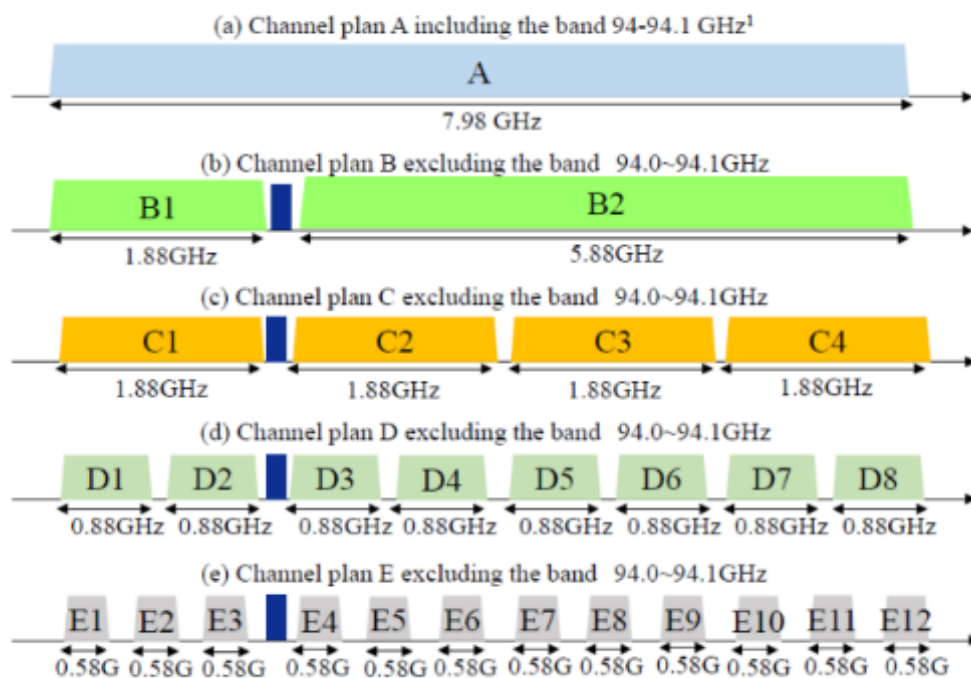


図 16 ITU-R M. 2501-0 に記載されているチャンネルプラン

Working document towards a preliminary draft new Report ITU-R M. [FOD\_EESS\_SHARE]は 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーと地球探査衛星の共用検討レポートであり、図 17 に示す構成となっている。地球探査衛星（能動）の干渉検討については動的解析の結果、共用可能となり、



地球探査衛星（受動）の干渉検討については静的解析の結果、共用可能となっている。なお、ITU-R のレポート案 ITU-R M. [FOD\_EESS\_SHARE] は 2024（令和 6）年 5 月の会合でアップデートされ、2024（令和 6）年度中の完成予定である。

#### Working Document toward a PDNR ITU-R M.[EESS\_SHARE]

##### ・90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーと地球探査衛星の共用検討レポート

- ✓ 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの技術特性
- ✓ 地球探査衛星（受動・能動）の特性
- ✓ 地球探査衛星（受動・能動）の保護基準
- ✓ 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーシステムの展開シナリオ
- ✓ 共用検討
- ✓ Annex1：地球探査衛星（能動）の干渉検討
  - ✓ 静的解析
  - ✓ 動的解析
- ✓ Annex2：地球探査衛星（受動）の干渉検討
  - ✓ 静的解析
  - ✓ 動的解析

図 17 Working Document toward a PDNR ITU-R M. [EESS\_SHARE] の概要

## 第2章 周波数の共用に関する検討

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーとしては、世界的に一次業務として無線標定業務に分配されている 92~100GHz の周波数帯を用いる予定である。当該 90GHz 帯の周波数を用いる 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーと他システムとの周波数共用条件を検討する帯域として、図 18 に示すとおり帯域外発射の影響が想定される隣接周波数である 81~92GHz 及び 100~109.5GHz を含む 81~109.5GHz を対象とした。



図 18 検討対象周波数及び隣接周波数の状況

図 19 に、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーと共用するシステムとの関係に関する概略図を示す。同図は、1 滑走路あたり 12 台を滑走路両脇に設置したことを想定した場合の 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの配置イメージである。令和 2 年 3 月電波利用料技術試験事務「空港滑走路における 90GHz 帯 FOD レーダーの導入に向けた周波数有効利用に関する調査検討報告書」(以下、「90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー技術調査報告書」という。)における共用検討では、1 滑走路あたり 48 台の 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの各出力電力を 20dBm とし、出力電力は空港滑走路面で反射すると 22dB 減衰するため、反射後の電力を -2dBm とした。ただし、空港内の滑走路の配置によっては、滑走路片側のみのレーダーの配置や、両側と片側配置の組み合わせも想定できることとした。

なお、最大設置数を 48 台と想定したのは、滑走路付近のレーダー鉄塔に脆弱性物件としての性能が必要であり、最大でも 48 台以下であることが望ましいためである。

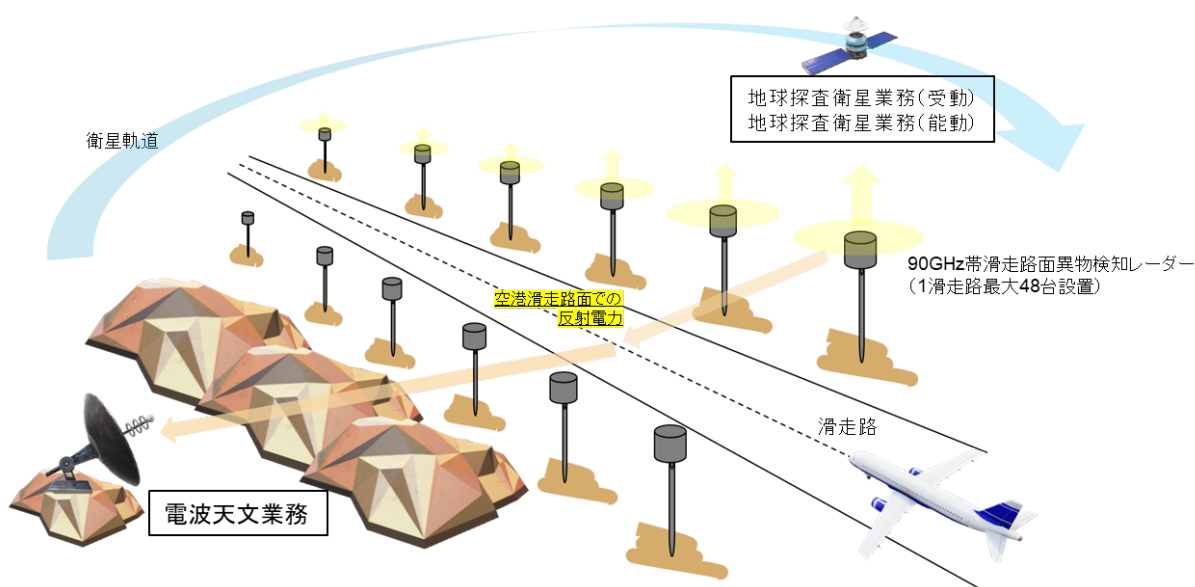


図 19 90GHz 帯滑走路面异物検知レーダーと共用システムの概要(滑走路両側配置の場合)

空中線について、90GHz 帯滑走路面异物検知レーダー技術調査報告書では、最大空中線利得は 44dBi、空中線の半値幅は 1 度以下の想定した検討を実施したが、90GHz 帯滑走路面异物検知レーダーの覆域を向上させることを想定し、最大空中線利得は変更せず、空中線の垂直面又は水平面の半値幅が 5 度以下の空中線を想定することとした。このため、90GHz 帯滑走路面异物検知レーダー技術調査報告書では送信波を滑走路面に向ける前提の運用であるため、主輻射方向は 1 度以上下方に向けることを想定していたが、1 度より広い半値幅に対応するため、主輻射方向は、水平面より主輻射の角度の幅以上下方とすることとした。また、偏波面について、90GHz 帯滑走路面异物検知レーダー技術調査報告書においては、直線偏波（垂直及び水平偏波）を想定していたが、異物の多様な形状に対応することを想定し、偏波を指定しないこととした。

なお、共用検討においては、これらの空中線及び偏波面の想定の変更に伴う特段の追加検討事項はない。

## 2.1 同一システムとの共用検討

90GHz 帯滑走路面异物検知レーダー同士は、同一周波数帯である 92-100GHz を用いるため、共用検討を行う必要がある。条件として、1 つの空港にある複数台の 90GHz 帯滑走路面异物検知レーダーが、他の 90GHz 帯滑走路面异物検知レーダーに与える干渉を検討した。

### 2.1.1 技術試験事務の検討結果

90GHz 帯滑走路面异物検知レーダー技術調査報告書第 6 章 6.4 に記載のとおりである。

検討の結果、最大で滑走路 6 本の空港を想定した場合、同一周波数帯を用いた場合の空港間所要離隔距離は 78km となり、異なる周波数帯を用いた場合の空港間所要離隔距離は 7.6km で共用可

能となる。なお、同一空港内の複数滑走路において、空港内の全ての 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの回転同期を実施することで同一周波数帯を用いることが可能となる。

各空港において、滑走路が 6 本より少ない空港を想定した場合の離隔距離を表 5 に示す。

表 5 空港の滑走路数と離隔距離

空港の滑走路数	各空港が使用する周波数	離隔距離 (km)
滑走路 1 本の空港	同一周波数	63
滑走路 2 本の空港	同一周波数	68
滑走路 3 本の空港	同一周波数	72
滑走路 4 本の空港	同一周波数	74
滑走路 5 本の空港	同一周波数	76
滑走路 6 本の空港	同一周波数	78
滑走路 1 本の空港	異なる周波数	3.7
滑走路 2 本の空港	異なる周波数	5.0
滑走路 3 本の空港	異なる周波数	5.8
滑走路 4 本の空港	異なる周波数	6.5
滑走路 5 本の空港	異なる周波数	7.1
滑走路 6 本の空港	異なる周波数	7.6

### 2.1.2 同一システムとの追加の共用検討

90GHz 帯滑走路面異物検知レーダー技術調査報告書以降に追記すべき情報は特になく、90GHz 帯滑走路面異物検知レーダー同士の共用に関する結果は変わらない。

## 2.2 電波天文業務との共用検討

81-109.5GHz 帯には、電波天文業務に分配されており、このうち 85.5-92GHz 帯については電波天文業務の用に供する受信設備として総務省告示で総務大臣が指定した周波数となっている。共用検討については、81-109.5GHz 帯を対象として実施した。

### 2.2.1 技術試験事務の検討結果

90GHz 帯滑走路面異物検知レーダー技術調査報告書第 5 章及び第 6 章 6.1 に記載のとおりである。

共用検討の条件として、電波天文業務の受信設備と反対方向に 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーを設置する場合には 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの背面からの漏洩電力は-89.7dBm とした。

検討の結果、空港と電波天文業務の受信設備が正対する場合には離隔距離 112km を確保すること、離隔距離 112km が確保できない場合には 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーを電波天文の受信設備に対して背面に設置することにより、電波天文業務の受信設備との共用が可能となる。電波天文業務の受信設備への有害干渉を回避するため、90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの設置

場所を中心として半径 112km 以内に、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの送信周波数と同一周波数を受信する電波天文業務の受信設備がある場合には、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーから電波天文業務の受信設備の方向を基点(0°)として、水平方向に 0° から+80° 及び 0° から-80° の方向における放射電力が-89.7dBm 以下となるよう、遮蔽板を設ける等の対策を行う必要がある。

## 2.2.2 電波天文業務との追加の共用検討

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー技術調査報告書以降、平成 24 年総務省告示第 52 号(電波法第五十六条第一項の規定による電波天文業務の用に供する受信設備)が廃止されたが、電波天文業務の受信設備との共用に関する結果は変わらない。なお、電波天文業務の受信設備に対して 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーを背面に向けて設置した場合や、隣接帯域となる場合を含む離隔距離の検討結果を表 6 に示す。電波天文業務の受信設備である入来観測局(鹿児島県薩摩川内市)・石垣島観測局(沖縄県石垣市)・水沢観測局(岩手県奥州市)は本報告書作成時点では 92GHz 以下の観測を行っているが、より高い周波数の観測を目指した開発が行われている。このため、これらの観測局についても 92-100GHz を受信することを想定し、112km の離隔距離を確保することが望ましい。また、112km の離隔距離が確保できない場合は 2.2.1 の記載のとおり遮蔽板を設ける等の対策を行うことが望ましい。

表 6 共用を可能とする離隔距離

レーダーのアンテナ方向	与干渉周波数	離隔距離
電波天文業務の受信設備と正対する設置	同一周波数	112km
電波天文業務の受信設備と正対する設置	隣接周波数	6.0km
電波天文業務の受信設備に背面向きに設置	同一周波数	5m 未満
電波天文業務の受信設備に背面向きに設置	隣接周波数	1m 未満

## 2.3 地球探査衛星業務(受動)との共用検討

対象となる地球探査衛星業務(受動)のセンサーは、水循環観測技術衛星(GOSAT-GW)に搭載されている AMSR3 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 3)で、本センサーの使用周波数は隣接周波数である 86-92GHz であるため、隣接チャンネルとして共用検討を行う必要がある。

### 2.3.1 技術試験事務の検討結果

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー技術調査報告書第 6 章 6.2.1 に記載のとおりである。

本センサーは仰角 35° 方向からの観測で、東京国際空港を例にとると、今後滑走路が増設されたとしても、5km×3km の観測範囲には最大 4 滑走路しか含まれない。そのため 4 滑走路で共用検討した。

干渉電力は、空港滑走路面での反射電力と、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーから直接上空 35° 方向への電力の合計であり、この合計値が干渉許容電力密度(-169dBW)を下回ったため、地球探査衛星業務(受動)のセンサーとの共用は可能である。

### 2.3.2 地球探査衛星業務（受動）との追加の共用検討

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー技術調査報告書以降に追記すべき情報は特になく、地球探査衛星業務（受動）との共用に関する結果は変わらない。

### 2.4 地球探査衛星業務（能動）との共用検討

対象となる地球探査衛星業務（能動）のセンサーは、EarthCARE (Earth Clouds Aerosols and Radiation Explorer)衛星に搭載されている CPR (Cloud Profiling RADAR)である。CPR が使用する周波数は、94.0-94.1GHz なので、同一周波数帯との共用検討を行う必要がある。なお、EarthCARE については 2024（令和 6）年度以降打ち上げ予定である。

#### 2.4.1 技術試験事務の検討結果

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー技術調査報告書第 6 章 6.2.2 に記載のとおりである。

CPR の使用周波数は、94-94.1GHz で、瞬時観測域は 750m×750m であるが、10km 積分モードでの観測となるため、750m×10km で検討した。

地球探査衛星（受動）の共用検討と同様に、東京国際空港を例にとり、今後滑走路が増設され最大 6 滑走路のうち 4 滑走路（うち、2 滑走路は全域、残り 2 滑走路は 1/3）が観測範囲に含まれることを想定し、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー数は最大値として 128 台で検討した。

その結果、CPR の帯域内(94-94.1GHz)で 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの電波を送信した場合には共用不可となり、CPR の帯域外 (92-100GHz のうち 94-94.1GHz 以外の周波数) で 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの電波を送信した場合には共用可能となった。

#### 2.4.2 地球探査衛星業務（能動）との追加の共用検討

90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダー技術調査報告書で検討された令和 2 年 3 月以降、更に検討が進んだ内容について示す。ITU-R における議論では静的解析で共用条件が見出せない場合は、動的解析で共用可能性を探ることが一般的であり議論が進んでいる。表 7 のとおり、動的解析での許容条件は地球探査衛星（受動）の場合、勧告 ITU-R RS. 2017 において干渉を受ける時間率が 0.01%、地球探査衛星（能動）の場合、勧告 ITU-R RS. 1166-4 において干渉を受ける時間率が 1%であることが規定されている。

表 7 地球探査衛星の保護基準

地球探査衛星業務	参照勧告	静的許容条件（電力）	動的許容条件（時間率）
受動	ITU-R 勧告 RS. 2017	-169 dBW	0.01%
能動	ITU-R 勧告 RS. 1166-4	-155 dBW over 300kHz	1%

## 地球探査衛星と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの共用検討結果

### ・ITU-R での議論を参考にした地球探査衛星と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの共用検討

- ✓ 地球探査衛星（受動）と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーは技術試験事務で実施した静的解析で共用可能
- ✓ 地球探査衛星（能動）と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーは ITU-R における動的解析で共用可能

技術試験事務（令和 2 年 3 月報告）

今回の検討

	静的許容条件 (電力)		静的許容条件 (電力)	動的許容条件 (時間率)
受動	-169 dBW 共用可能	⇒	受動	-169 dBW 共用可能 0.01%
能動	-155 dBW over 300kHz FOD レーダーが禁止帯 (94-94.1GHz)を採用し共用可能		能動	-155 dBW over 300kHz 静的検討では 共用不可能 1% 共用可能

図 20 地球探査衛星業務と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの共用検討

共用検討結果の概要を図 20 に示す。ITU-R においては、動的解析の結果から地球探査衛星（能動）と 90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーの共用は可能と考えられている。当該議論は、Working document towards a preliminary draft new Report ITU-R M. [FOD\_EESS\_SHARE]としてレポート化が進んでいる。令和 6 年 1 月時点では作業文書としてキャリアフォワードされている。

静的解析で共用不可となった地球探査衛星（能動）に対する動的解析の結果、干渉を受ける時間率の許容値 1% に対し約 0.01% の解析結果が示されており、国内関係者との調整の結果、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーは地球探査衛星（能動）と共用可能となった。

## 2.5 電波防護指針への適合性について

### 2.5.1 電波防護指針

電波防護指針では、電波のエネルギー量と生体への作用との関係が定量的に明らかにされており、これに基づき、システムの運用形態に応じて、電波防護指針に適合するようシステム諸元の設定に配慮する必要がある。今回、電波防護指針の基準値（電気通信技術審議会答申 諮問第 38 号「電波利用における人体の防護指針」（平成 2 年 6 月））への適合性について検討を行った。

電波防護指針では、評価する対象が、電波利用の実情が認識されていると共に、防護対象を特定することができる状況下であり、注意喚起など必要な措置可能であり、電波利用の実情が認識され防護指針の主旨に基づいた電波利用を行うことが可能な場合は、管理環境を適用し、このような条件が満たされない場合は、一般環境を適用することとしている。各条件における指針値を

次に示す。

表 8 管理環境の電磁界強度（6分間平均値）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力密度 S [mW/cm <sup>2</sup> ]
1.5GHz-300GHz	137	0.365	5

表 9 一般環境の電磁界強度（6分間平均値）の指針

周波数 f	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力密度 S [mW/cm <sup>2</sup> ]
1.5GHz-300GHz	61.4	0.163	1

電波の強度の算出については、「無線設備から発射される電波の強度の算出方法及び測定方法を定める件」（平成 11 年郵政省告示第 300 号）において、以下の式が定められている。

$$S = \frac{PG}{40\pi R^2} \cdot K \cdots \cdots \text{(式)}$$

S：電力束密度 [mW/cm<sup>2</sup>]

P：空中線入力電力 [W]

G：送信空中線の最大輻射方向における絶対利得

R：算出にかかる送信空中線と算出を行う地点との距離 [m]

K：反射係数

すべての反射を考慮しない場合：K=1

大地面の反射を考慮する場合：K=2.56

また、電波法施行規則第 21 条の 4 において、一般環境の電波防護指針を超える範囲においては人が立ち入らないよう施設をしなければならないこととなっている。

## 2.5.2 電波防護指針への適合性の検討結果

90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーは、通常、飛行場内の管理区域に設置されるため、電波防護指針値への適合性については、管理環境の表 8 へ適合する必要がある。

90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの無線設備の諸元について、

- ・空中線電力：100mW（最大）
- ・空中線利得：44dBi（最大）

と想定し、大地面の反射を考慮した場合、離隔距離は 3.2m となり、当該無線設備は、滑走路に平行して設置される状況から、電波防護指針に適合しているものと言える。

なお、90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーを一般環境に設置する場合の離隔距離は 7.15m であり、当該距離の範囲内に人が立ち入らないよう施設をするなど、電波法施行規則第 21 条の 4 に適合することが必要である。



## 第3章 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件

以上の検討から、90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件を次のとおり整理する。

### 3.1 一般条件

#### (1) 周波数

92GHz から 100GHz までとする。

#### (2) 変調方式

FM-CW（周波数変調連続波）方式とする。

#### (3) 電波防護指針への適合

電波法施行規則第 21 条の 4 を満足すること。

### 3.2 無線設備の技術的条件

#### (1) 周波数の許容偏差

指定周波数帯によるため規定しない。

#### (2) 占有周波数帯域幅の許容値

指定周波数帯によるため規定しない。

#### (3) 指定周波数帯域幅

最大 8,000MHz（92GHz から 100GHz まで）とする。

#### (4) 空中線電力

最大 100mW とする。

#### (5) 等価等方輻射電力

規定しない。

#### (6) 空中線系

##### ① 送信空中線の絶対利得

44dBi 以下とすること。なお、送信空中線の水平面及び垂直面の主輻射の角度の幅は、5 度以下であることとし、主輻射方向は、水平面より主輻射の角度の幅以上下方となること。

##### ② 偏波面

偏波は規定しない。

(7) 空中線電力の許容偏差

上限 50%、下限 50%以内であること。

(8) 送信スペクトラムマスク

同一帯域及び隣接帯域を使用する全ての他業務との共用検討に基づく保護の観点により、帯域外領域については、必要周波数帯域内の上限周波数及び下限周波数の電力値に対して-70dBcの電力比とする。

(9) チャネル配置

チャネル配置は、特段規定しない。なお、92-100GHzのうち、5.9GHz以下の帯域幅を使用する場合、94-94.1GHzを避ける周波数配置が望ましい。

(10) 帯域外領域における不要発射の強度の許容値

搬送波の平均電力より 70dB 低い値とする。

(11) スプリアス領域における不要発射の強度の許容値

搬送波の平均電力より 70dB 低い値とする。

### 3.3 測定法

(1) 周波数の偏差及び使用周波数帯域幅

許容値が指定周波数帯で規定される場合は、試験機器を占有周波数帯幅が最大となる状態に設定して、占有周波数帯幅の測定においてスペクトル分布の上限及び下限周波数が指定周波数帯内にあることをもって確認する。使用周波数帯幅の測定は、スペクトル分布の全電力についてスペクトルアナライザ等を用いて測定し、スペクトル分布の上限及び下限の部分における電力の和が、それぞれ全電力の 99%となる周波数幅を測定する。

(2) 空中線電力

空中線電力の測定については、試験機器を通常の変調状態で空中線電力が最大となる状態に設定して、空中線測定端子にて、平均電力を、高周波電力計等を用いて測定する。また、連続送信波により測定することが望ましいが、バースト送信波にて測定する場合は、送信時間率が最大となるバースト繰り返し周期よりも十分長い期間における平均電力を測定し、その測定値に最大の送信時間率の逆数を乗じて平均電力とすることが適当である。

(3) 帯域外領域及びスプリアス領域における不要発射の強度

帯域外領域とスプリアス領域の境界周波数を 92GHz 及び 100GHz とし、以下によって測定を行うことが適当である。

試験機器を通常の変調状態に設定して、スペクトルアナライザを用いて不要発射の平均電力（バースト波にあつてはバースト内の平均電力）を測定する。この場合、スペクトルアナライザの分解能帯域幅は参照帯域幅を算出（ITU-R 勧告 M. 1177）して設定することが適当である。

ただし、参照帯域幅が 1MHz を超える場合は、分解能帯域幅を 1MHz に設定して測定することも可能である。不要発射の強度の測定を行う周波数範囲は、可能な限り 9kHz から 110GHz までとすることが望ましいが、30MHz から 110GHz までとすることができる。

### 3.4 干渉回避のための機能、設置、運用、その他の留意点

90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの無線設備に関して、同一システム・他システムとの共用の促進及び周波数有効利用に資するため以下の機能等を具備することが適当である。

#### (1) 干渉回避のための補助機能

##### ①90GHz 帯滑走路面異物検知レーダー相互間の同期機能

同一空港内の同一滑走路又は複数滑走路において、同一の周波数を利用した 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーを設置する場合、同一システム間の周波数を共用するため、全ての 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの回転同期を実施する機能を設けること。なお、当該基準については、民間標準規格に規定することが適当と考えられる。

##### ②90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの不要な電波発射の停止

90GHz 帯の他システムとの共用の促進及び周波数有効利用の観点から、90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの空中線が検知しようとする方向以外の方向を向いた際には、電波の発射を停止する機能を設けること。なお、当該基準については、民間標準規格に規定することが適当と考えられる。

## 第 4 章 今後の検討課題

本検討では、92～100GHz の周波数帯を対象として 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの技術的条件の検討を行った。当該周波数帯は、92～100GHz 帯が無線標定業務に分配されており、また、95～100GHz が無線航行業務に分配されている。90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーの技術的条件は、無線標定業務である滑走路面の異物検知以外にも、例えば、無線航行業務の用途にも利用することが可能と考えられる。

無線標定業務以外の用途に用いる際、新たな技術的条件等が必要になった場合には、追加の検討を行う必要があると考えられる。

## V 審議結果

電気通信技術審議会諮問第 10 号「航空無線通信の技術的諸問題について」（昭和 60 年 4 月 23 日）のうち「90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーに関する技術的条件」について、別添のとおり答申（案）をとりまとめた。

別表 1

## 情報通信技術分科会 航空・海上無線通信委員会 構成員一覧

(敬称略)

氏 名	主 要 現 職
主査 専門委員	小瀬木 滋 一般財団法人航空保安無線システム協会 技術顧問
主査代理 委員	森川 博之 東京大学 大学院 工学系研究科 教授
専門委員	石井 義則 一般社団法人情報通信ネットワーク産業協会 常務理事
〃	井手 麻奈美 MOL マリン&エンジニアリング株式会社 海洋技術事業部 主任研究員
〃	伊藤 功 株式会社モコス・ジャパン 取締役
〃	大槻 秀夫 日本無線株式会社 マリンシステム事業部 マリンシステ ム技術部 担当部長
〃	竹内 康夏 ANA システムズ株式会社 ITアーキテクチャ部 マネジャー
〃	山口 茂彦 国土交通省 航空局 交通管制部 管制技術課長
〃	栗田 和博 日本航空株式会社 IT企画本部 IT運営企画部長
〃	児玉 俊介 一般社団法人電波産業会 専務理事
〃	齋藤 絵里 東芝インフラシステムズ株式会社 電波システム事業部 小向工場 センサシステム技術部 主務
〃	高橋 裕之 海上保安庁 総務部 情報通信課長
〃	竹之下 早苗 スカパーJSAT 株式会社 宇宙事業部門 専任部長
〃	豊嶋 守生 国立研究開発法人情報通信研究機構 ネットワーク研究所 ワイヤレスネットワーク研究センター 研究センター長
〃	生田目 瑛子 欧州ビジネス協会 電気通信機器委員会委員
〃	南風立 千枝 子 一般社団法人全国漁業無線協会 参与
〃	福田 巖 東京海洋大学 学術研究院海事システム工学部門 海洋工 学部 海事システム工学科 准教授
〃	藤井 威生 電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究 センター 教授

別表 2

## 90GHz 帯滑走路面異物検知レーダー作業班 構成員一覧

(敬称略)

氏名	所属
主任 福島 荘之介	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所 特別研究主幹
構成員 栗田 和博	日本航空株式会社 IT 企画本部 IT 運営企画部長
〃 柴垣 信彦	株式会社日立国際電気プロダクト本部プロダクト部 部員
〃 竹内 康夏	ANA システムズ株式会社 IT アーキテクチャ部 マネジャー
〃 中村 一城	公益財団法人鉄道総合技術研究所情報通信技術研究部通信ネットワーク研究室長
〃 中村 元	防衛省整備計画局サイバー整備課 防衛部員
〃 西村 公佐	株式会社 KDDI 総合研究所フォトニクスイノベーション G
〃 野尻 英行	一般社団法人電波産業会研究開発本部 担当部長
〃 橋田 芳男	東芝インフラシステムズ株式会社小向事業所 フェロー
〃 平松 正顕	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台天文情報センター周波数資源保護室長 講師
〃 二ッ森 俊一	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所 上席研究員
〃 細川 貴史	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 周波数管理室室長
〃 堀江 宏昭	国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所電磁波伝搬研究センター リモートセンシング研究室
〃 牧野 仁	国土交通省航空局交通管制部運用課 航空管制運航情報調査官

## 別 添

電気通信技術審議会諮問第 10 号

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち

「90GHz 帯滑走路面異物検知レーダーに関する技術的条件」(案)

電気通信技術審議会諮問第 10 号「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーに関する技術的条件」に対する一部答申（案）

航空無線通信の技術的諸問題のうち、90GHz 帯滑走路路面異物検知レーダーに関する技術的条件については、以下のとおりとすることが適当である。

1 一般条件

(1) 周波数

92GHz から 100GHz までとする。

(2) 変調方式

FM-CW（周波数変調連続波）方式とする。

(3) 電波防護指針への適合

電波法施行規則第 21 条の 4 を満足すること。

2 無線設備の技術的条件

(1) 周波数の許容偏差

指定周波数帯によるため規定しない。

(2) 占有周波数帯域幅の許容値

指定周波数帯によるため規定しない。

(3) 指定周波数帯域幅

最大 8,000MHz（92GHz から 100GHz まで）とする。

(4) 空中線電力

最大 100mW とする。

(5) 等価等方輻射電力

規定しない。

(6) 空中線系

① 送信空中線の絶対利得

44dBi 以下とすること。なお、送信空中線の水平面及び垂直面の主輻射の角度の幅は、5 度以下であることとし、主輻射方向は、水平面より主輻射の角度の幅以上下方向となること。

② 偏波面

偏波は規定しない。



(7) 空中線電力の許容偏差

上限 50%、下限 50%以内であること。

(8) 送信スペクトラムマスク

同一帯域及び隣接帯域を使用する全ての他業務との共用検討に基づく保護の観点により、帯域外領域については、必要周波数帯域内の上限周波数及び下限周波数の電力値に対して-70dBcの電力比とする。

(9) チャネル配置

チャネル配置は、特段規定しない。なお、92-100GHz のうち、5.9GHz 以下の帯域幅を使用する場合、94-94.1GHz を避ける周波数配置が望ましい。

(10) 帯域外領域における不要発射の強度の許容値

搬送波の平均電力より 70dB 低い値とする。

(11) スプリアス領域における不要発射の強度の許容値

搬送波の平均電力より 70dB 低い値とする。

### 3 測定法

(1) 周波数の偏差及び使用周波数帯域幅

許容値が指定周波数帯で規定される場合は、試験機器を占有周波数帯幅が最大となる状態に設定して、占有周波数帯幅の測定においてスペクトル分布の上限及び下限周波数が指定周波数帯内にあることをもって確認する。使用周波数帯幅の測定は、スペクトル分布の全電力についてスペクトルアナライザ等を用いて測定し、スペクトル分布の上限及び下限の部分における電力の和が、それぞれ全電力の 99%となる周波数幅を測定する。

(2) 空中線電力

空中線電力の測定については、試験機器を通常の変調状態で空中線電力が最大となる状態に設定して、空中線測定端子にて、平均電力を、高周波電力計等を用いて測定する。また、連続送信波により測定することが望ましいが、バースト送信波にて測定する場合は、送信時間率が最大となるバースト繰り返し周期よりも十分長い期間における平均電力を測定し、その測定値に最大の送信時間率の逆数を乗じて平均電力とすることが適当である。

(3) 帯域外領域及びスプリアス領域における不要発射の強度

帯域外領域とスプリアス領域の境界周波数を 92GHz 及び 100GHz とし、以下によって測定を行うことが適当である。

試験機器を通常の変調状態に設定して、スペクトルアナライザを用いて不要発射の平均電力（バースト波にあってはバースト内の平均電力）を測定する。この場合、スペクトルアナライ

ザの分解能帯域幅は参照帯域幅を算出（ITU-R 勧告 M. 1177）して設定することが適当である。ただし、参照帯域幅が 1MHz を超える場合は、分解能帯域幅を 1MHz に設定して測定することも可能である。不要発射の強度の測定を行う周波数範囲は、可能な限り 9kHz から 110GHz までとすることが望ましいが、30MHz から 110GHz までとすることができる。

## 参考資料

参考資料 1 : (一社)電波産業会, “空港滑走路における 90GHz 帯 FOD レーダーの導入に向けた周波数有効利用に関する調査検討報告書,” (一社)電波産業会, 2020.

参考資料 2 : ITU-R, “Protection criteria used for radio astronomical measurements,” Rec. ITU-R RA.769-2, 2003.

参考資料 3 : ITU-R, “Levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis,” Rec. ITU-R RA.1513-2, 2015.

参考資料 4 : 電波天文業務の用に供する受信設備 総務省告示第三百六十三号 (平成 30 年 11 月 7 日)

参考資料 5 : 電波天文業務の用に供する受信設備 総務省告示第三号 (令和 2 年 1 月 16 日)

参考資料 6 : 電波天文業務の用に供する受信設備 総務省告示第四百十五号 (令和 2 年 12 月 25 日)

参考資料 7 : 電波天文業務の用に供する受信設備 総務省告示第百七号 (令和 5 年 5 月 30 日)

参考資料 8 : 参考送信スペクトラムマスク (ITU-R 勧告 SM.1541 Annex8 による計算結果)

# 参考資料1 空港滑走路における90GHz帯 FOD レーダーの導入に向けた周波数有効利用に関する調査検討報告書

## 第1章 空港滑走路における FOD 検知システムの現状と課題

### 1.1 空港 FOD レーダーシステムの必要性

2000年、フランスの空港において、滑走路上の金属片が原因による超音速旅客機コンコルドの墜落事故が起った。以降、同様な事故防止のため、航空機の離発着時に滑走路面に落下した金属片をはじめとしたFOD (Foreign Object Debris)を検知するシステムの導入が求められてきた。その結果、近年では光学監視カメラに加え、測距性能、距離分解能及び夜間の検出性能等で優れたレーダー方式の検知システムが世界的に導入されてきたところである。

しかし、それら現行の検知システムでは遠方から検出できるFODの大きさに限界があること、システムを滑走路近辺に配置する際には安全性の観点から小型化の向上が必要であること等から、遠方から正確にFODを検出できる新しい小型の検知システムの実用化が望まれている。

図1に示すように、近年光ファイバー技術と90GHz帯の周波数におけるイメージング技術を融合したRoF (Radio over Fiber) ベースのリニアセル方式の空港FODレーダーが開発された。これは、小さなFODを正確に検知でき、検知時間、空港滑走路程度の検知範囲を自由に設定できることから、早期に、大規模な空港滑走路に90GHz帯FODレーダーを導入することが期待されている。

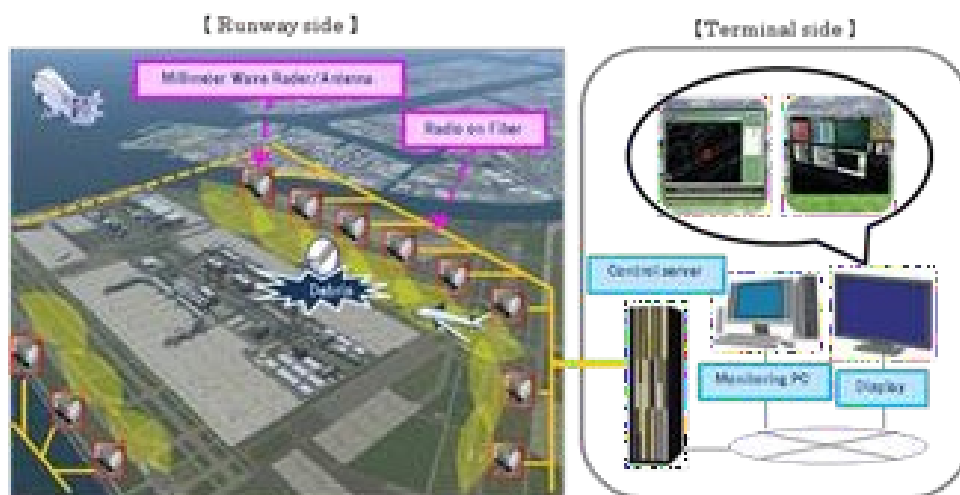


図1 システムの応用イメージ (滑走路監視)

## 1.2 空港 FOD レーダーシステム導入効果のある空港

空港滑走路における FOD 検知システムの導入効果のある空港に関しては、みずほ情報総研が総務省受託事業として調査した結果がある [1]。


資料によれば、FOD 検知システムの導入効果を評価するには、空港における発着数、滑走路上の FOD 及びバードストライクによる被害発生件数と、FOD 検知システム導入費用を総合的に考慮する必要がある。その結果、導入効果が期待できる空港は、海外では、日本から比較的近く導入後のサポートなどが容易なインドネシア ジャカルタのスカルノ・ハッタ国際空港、マレーシアのクアラルンプール国際空港、及び日本の東京国際空港であると記載されている。





日本国内においては、国土交通省の空港管理状況 [2]に記載されているように、東京国際空港、成田国際空港、関西国際空港が航空機の発着頻度が高いことがわかっている。発着頻度の高い空港ほど FOD が発見された際の離発着の一時的ストップによる遅延や、付随して発生する経済的損失が大きい。即ち、空港における離発着頻度が高ければ高いほど、FOD 検知システムを空港に導入する効果は大きくなる。






## 1.3 海外システムの状況


表 1に、空港滑走路における FOD 検知システムについて海外メーカーの取り扱い状況を示す。FOD 検知システムには、ミリ波レーダーを主体としたものと光学カメラを主体としたものがある。単独の光学カメラは、空港のみならず監視カメラとして一般的に普及はしているものの、ミリ波レーダー方式のほうが測距性能、距離分解能に加え、夜間での検出性能等の面で優れている傾向が強い。いずれのシステムにおいても、もともとは軍向けに開発されたシステムを応用しているものが多く、基本的に高性能である。

表 1 FOD 検知システムの状況

企業名	外観	実現技術	導入実績	参考
Moog Aircraft Group (US) QinetiQ (UK)	Tarsier 	Millimeter Wave Radar Night Camera (a near infrared illumination)	① London Heathrow Airport ② Vancouver Int'l Airport ③ Dubai Int'l Airport ④ Doha Int'l Airport ⑤ MoD Boscombe Down	[3] [4]
Xsight (Israeli)	RunWize (FODetect,	Millimeter Wave	① Bangkok Suvarnabhumi	[5] [6]

<p>Thales (France)</p>	<p>BirdWize, SnowWize, ViewWize)</p> 	<p>(77GHz)  High Resolution Camera</p>	<p>Airport ②Boston Logan Int' l Airport ③Tel-Aviv Ben Gurion Airport ④Seattle-Tacoma Int' l Airport</p>	
<p>Stratech (Singapore)</p>	<p>iFerret</p> 	<p>High Resolution Camera</p>	<p>① Chicago O' Hare Int' l Airport (taxiway) ②Düsseldorf Int' l Airport (apron)</p>	<p>[7]</p>
<p>Trex Aviation Systems (US)  Varec (US)</p>	<p>FOD Finder XF</p>  <p>FOD Finder XM</p> 	<p>Millimeter Wave (78-81GHz)</p>	<p>-----</p>	<p>[8] [9]</p>
<p>Rheinmetall (Italy)</p>	<p>DEB-RA</p>	<p>Millimeter Wave  High Resolution</p>	<p>-----</p>	<p>[10]</p>

		Camera		
ELVA-1 (Sweden)		Millimeter Wave (76-77GHz/FMCW)	-----	[11]
Plextek (UK)	Plextek's FOD Radar 	Millimeter Wave (78-81GHz)	①South Korea Incheon Airport	[12]
Pavemetrics (Canada)	LFOD  	High Speed Camera Laser Line Projectors	-----	[13]

ArgosAI (Turkey)	A-FOD (Ⅲ-A/Ⅲ-B) 	High Resolution Camera (Deep Learning)	-----	[14]
---------------------	---	--	-------	------

#### 1.4 空港 FOD レーダーシステムと他システムとの共用検討の必要性

90GHz帯空港FODレーダーを国内の空港に導入、利用できるようにするためには、他システムとの間で干渉の影響がないようにすることが必要である。

そこで本調査検討では、90GHz帯空港FODレーダーと同一又は隣接する周波数帯を利用する他システムとの干渉について実測及びシミュレーションをもとにした調査を行い、周波数共用及び両立性を確保するための条件等について検討し、技術基準の策定等により他システムとの共存を可能とすることを目的としている。



## 第2章 空港 FOD レーダーの性能

### 2.1 空港 FOD レーダーのシステム構成と基本仕様

システム基本仕様は、滑走路の FOD 検知に関する FAA ADVISORY CIRCULAR (FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION : 米国連邦航空局) が航空関係者に情報を伝えるための刊行物。米国航空法のサポート的な役割を果たす。)、滑走路周辺に機器を設置する際の航空法に基づく各種の制限事項、実証フィールドの諸条件等を参考に決定した。システム系統図を図 2、また、基本仕様を表 2 に示す。

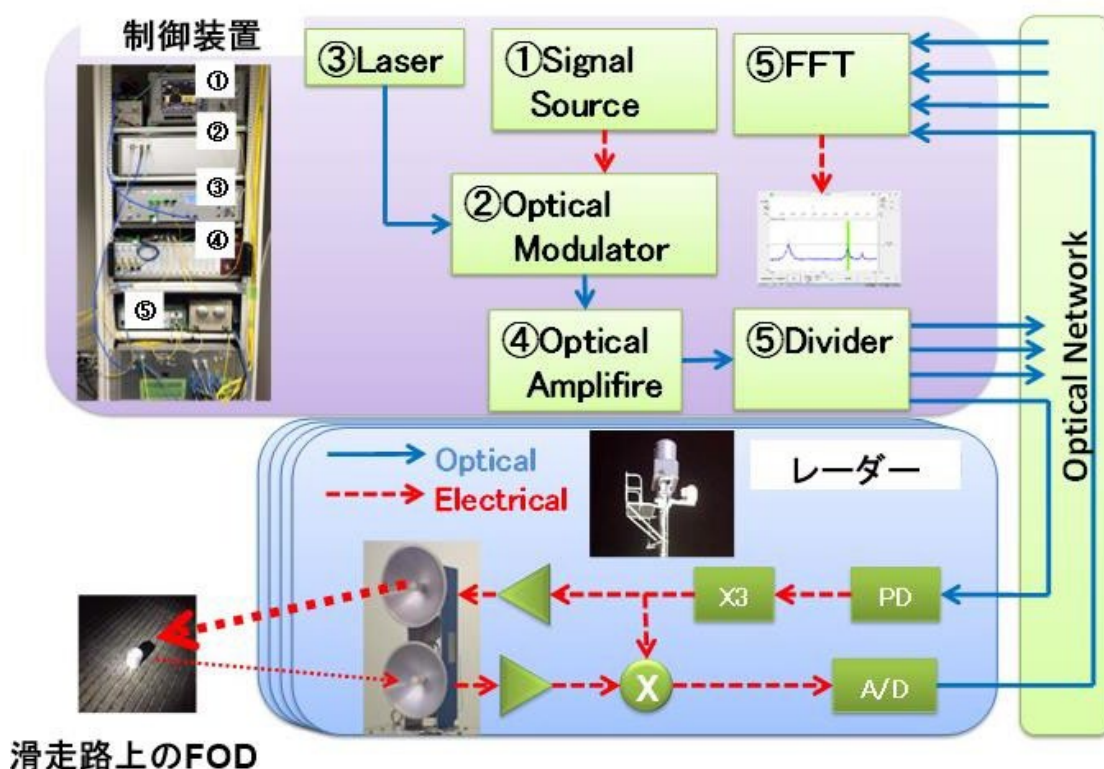


図 2 基本システム系統図

制御装置は 30GHz 帯で 3GHz 幅のチャープ信号を生成した後、光変調器と光増幅器を介して空港の既存光ネットワークに接続しレーダーに伝送する構成である。レーダーでは Photo Detector (PD) で電気信号に変換した後、3 通倍・増幅しアンテナに給電、反射波は増幅後、送信波と混合し AD 変換の後、制御装置まで光ファイバー経由で伝送され、FFT 処理や各種の信号処理の後、端末にレーダー情報として表示される構成となっている。制御装置とレーダー間の信号は、既存の光ファイバー網の一部を利用できるため、本システムのために空港内のファイバー網を別途用意する必要はない。この RoF 接続型による中央局集中型の特徴は、システムの拡張性を実現すると同時に、既設の滑走路にも比較的容易に導入ができるメリットがあることである。

表 2 空港 FOD レーダーの基本仕様

Antenna unit type	Wide band
Frequency	92 GHz - 100GHz
Bandwidth	8 GHz
Transmitting power	20 dBm
Ranging method	FMCW
Frequency modulation method	Linear triangle
Frequency modulation chirp rate	Up to 15kHz
Antenna gain	44 dBi
Maximum number of radars per a runway	48 (※)

(※) 1 滑走路当たりの最大 FOD レーダー数は建築限界による。標準的は 12。

## 2.2 空港 FOD レーダーによる FOD 検出例

平成 28 年度(2016 年度)に、成田国際空港において実証実験した例が、電波資源拡大のための研究開発成果発表会で報告されている [15]。

この実証実験結果を図 3 に示す。図には、設置された空港 FOD レーダーから、深夜、航空機の離発着がない時間帯に、空港滑走路内に模擬的に配置した FOD までの距離に対する検出強度を示した。一般的にレーダーで探知される FOD の特性は、レーダー反射断面積と言われる RCS (Radar Cross Section: レーダー波が反射すると仮定した場合の面積で 1 平方メートルを基準とした dB 値) で表示され、FOD が 1 平方メートルの場合が 0dBsm となる。

実験では、空港 FOD レーダーから最大 450m で、-20dBsm(1 インチのボルト)相当の FOD を検出できることを確認しており、更に、-10dBsm と -20dBsm 相当の 2 種類の FOD を直線状、或いは同じ位置に配置した場合においても検出可能であることを実証したとされている。

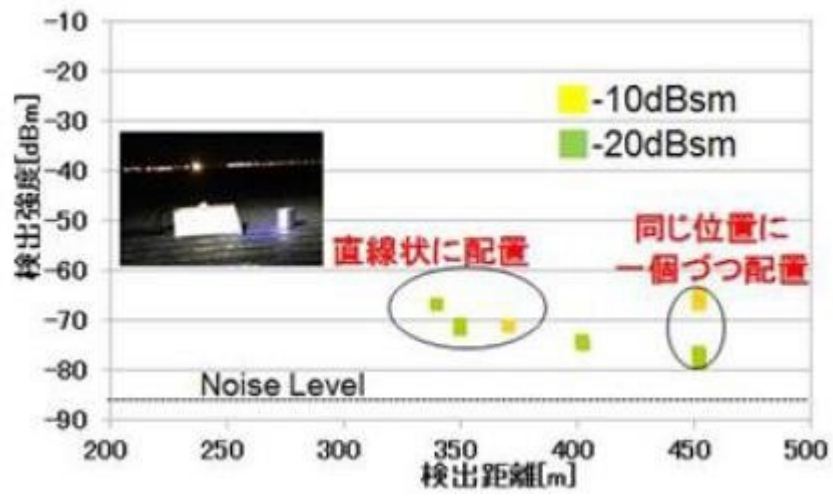


図 3 FOD に対する距離検知性能試験結果

### 第3章 成田国際空港における実証試験

#### 3.1 漏洩電力測定について

##### 3.1.1 測定目的等

###### (1) 測定目的

レーダーから電力が放射される際、目的の方向以外に漏洩している電力を測定、また、アンテナカバーの遮蔽効果を確認し、得られた結果を電波天文業務、及び地球衛星探査業務への与干渉電力評価に利用する。

###### (2) 測定場所

図4に示すように、成田国際空港のB滑走路の北東側に設置している実証実験システムのうち、路面装置A(レーダーA)を用いて測定を実施する。

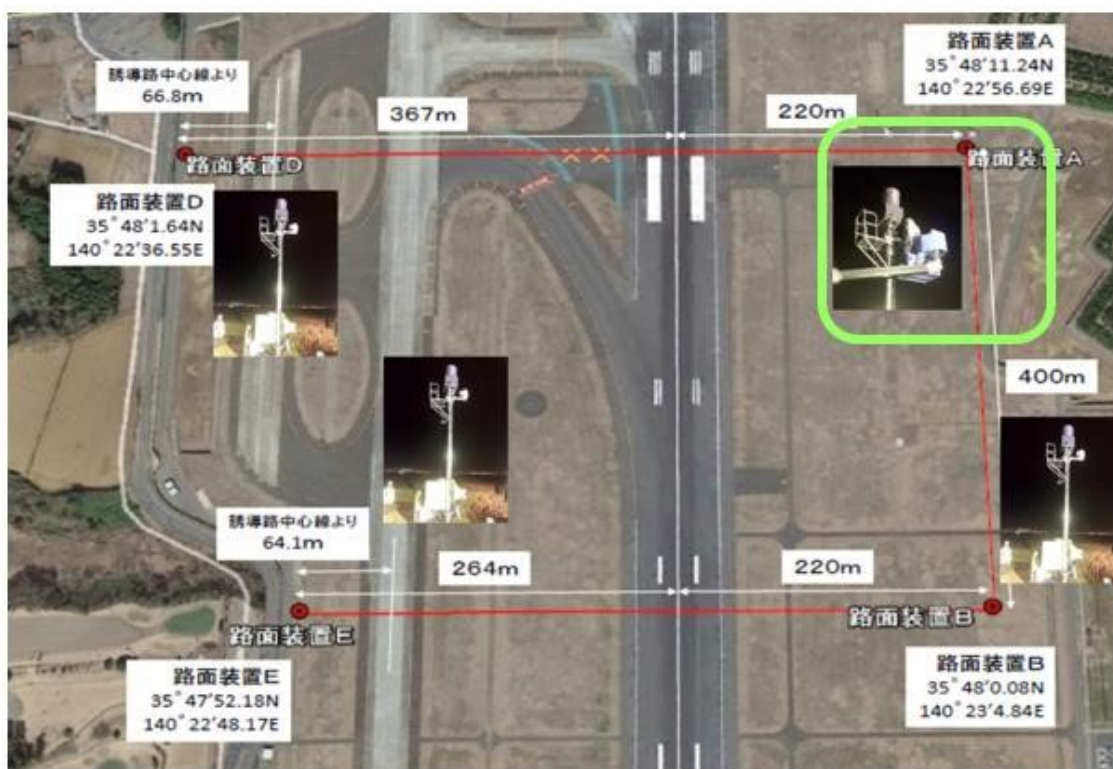


図4 成田国際空港における路面装置(レーダー装置)の配置

##### 3.1.2 測定方法等

###### (1) 測定方法等

図5に、レーダー周辺の測定点について示す。図中において、レーダーの発射方向は左であり、左方向には滑走路がある。赤で示す点が測定点であるが、測定する際、レーダーに

直接検出器を接触させることはできないため、レーダー装置の中心より 1.5m から2.12m 離れた箇所で測定を行う。

周波数は、空港 FOD レーダーとして予定している 92GHz から100GHz の中心周波数である96GHz に固定して実施する。アンテナビーム半値幅は1°（ビーム中心から 0.5° 離れて 3dB 以下）電波の発射方向は樹脂で覆われており、電波の発射方向中心に対して±100° は樹脂、発射方向と逆側中心に±80° 及び上下面は金属板で遮蔽している。

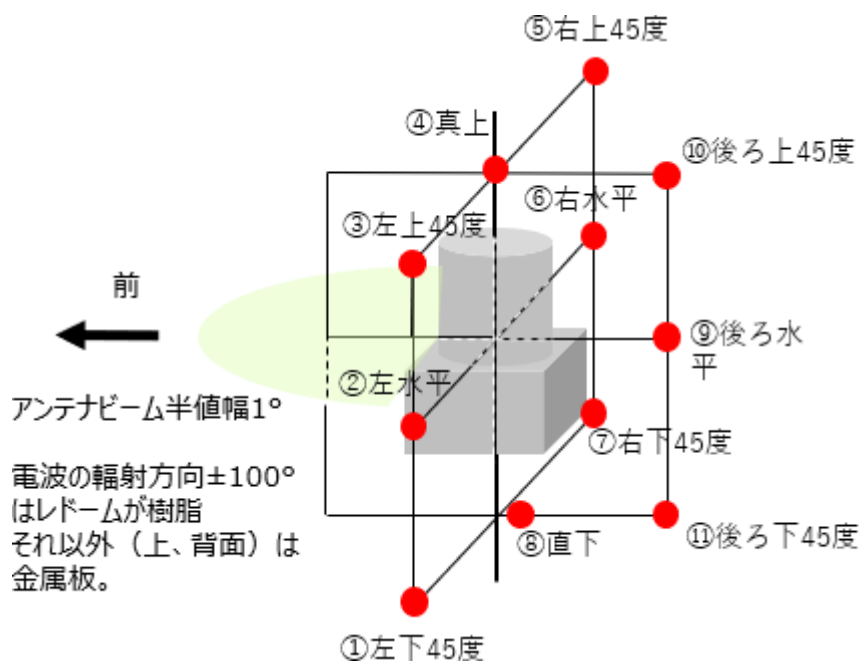


図5 レーダー周辺の測定点

## (2) 測定設備

図6に示すスペクトラムアナライザとホーンアンテナを接続したミキサを用いて漏洩電力測定を行う。



図6 漏洩電力測定設備

### (3) 測定条件

成田国際空港におけるレーダーの設置状態を、図 7 に示す。支柱の高さ約 4m の上にレーダーが配置され、漏洩電力測定時にはレーダーの回転を止め、滑走路方向に発射した状態で測定を実施する。レーダーを覆っているアンテナカバーが有る場合と、無い場合のそれぞれについて、測定を実施する。



図 7 レーダー設置状況と測定条件

### (4) 測定実施状況

図 8 に、測定点へ測定器を移動させるためバケット車を用いた測定の様子を示す。スペクトラムアナライザ、ミキサ、アンテナをバケット車の上に仮設して測定を実施した。レーダーの方向調整は、図 9 に示すようにスペクトラムアナライザの画面を見ながら行い、目的とする漏洩電力を測定した。測定は、MAX-HOLD モード、RBW=100kHz、VBW=1MHz で実施した。

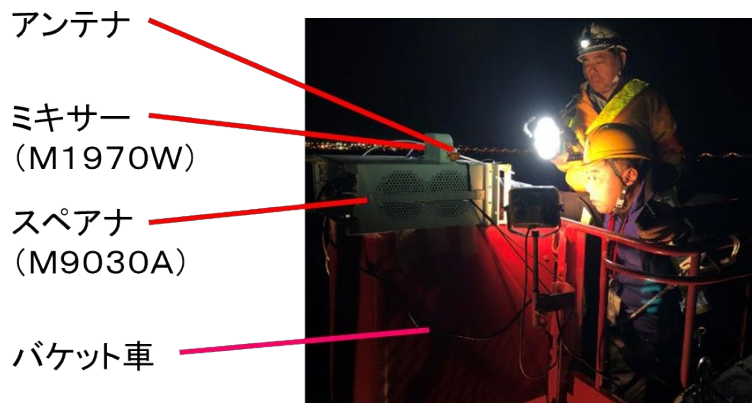


図 8 バケット車を用いた測定の様子

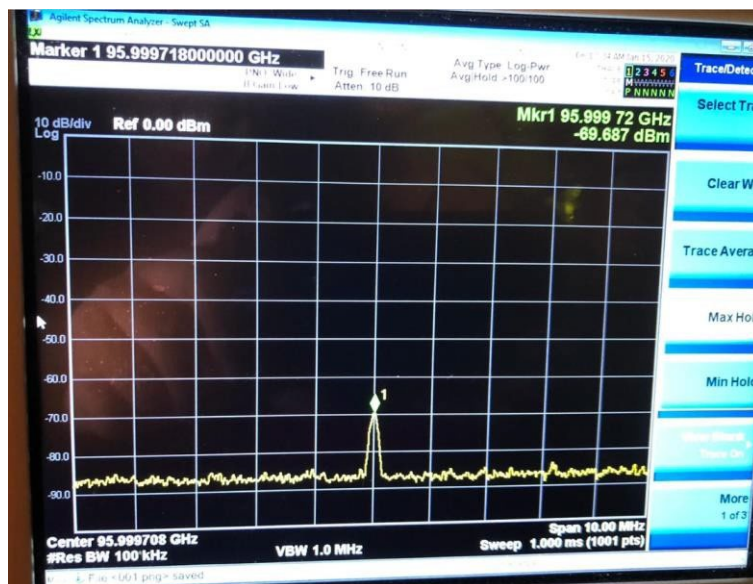


図 9 受信方向調整中のスペクトラムアナライザ画面

### 3.1.3 漏洩電力測定結果

図 5 に示す測定点毎に測定した漏洩電力を図 10 に示す。レーダーからは 20dBm の電波を放射しており、漏洩電力は平均-60dBm 程度であった。

アンテナカバーの背面側である測定点⑨⑩⑪においては、アンテナカバー有で-84.5dBmから-89.7dBm であり、期待された遮蔽効果が表れていることがわかる。しかし、レドーム上面の測定点④では-69.7dBm になっており、遮蔽効果が期待できないことがわかった。

位置	アンテナからの距離	受信レベル (カバー有) [dBm]	受信レベル (カバー無) [dBm]	カバー有無 の差 [dB]	位置	アンテナからの距離	受信レベル (カバー有) [dBm]	受信レベル (カバー無) [dBm]	カバー有無 の差 [dB]		
① 左下 45度	2.12m		-70.7	-69.5	-1.2	⑦ 右下 45度	2.12m		-70.1	-71.6	1.5
② 左水平	1.5m		-60.3	-56.7	-3.6	⑧ 直下	1.5m		-89.7以下	-89.7以下	-89.7以下
③ 左上 45度	2.12m		-59.7	-58.1	-1.6	⑨ 後ろ 水平	1.5m		-89.7以下	-68.1	-21.6以上
④ 真上	1.5m		-69.7	-59.2	-10.5	⑩ 後ろ上 45度	2.12m		-84.5	-71.3	-13.2
⑤ 右上 45度	2.12m		-65.5	-60.1	-5.4	⑪ 後ろ下 45度	2.12m		-89.7以下	-76.2	-13.5以上
⑥ 右水平	1.5m		-62.4	-60.4	-2	-89.7dBmは測定器の測定限界レベル ※測定限界: MAXHOLDした値					

図 10 レーダー漏洩電力の測定結果

レーダーのアンテナカバーとしては背面と上面に金属板を使用している。水平方向の背面では 20dB 程度の遮蔽効果を得ることができたが、上面における遮蔽効果は約 10dB 程度であり、背面と同程度の遮蔽効果を得ることができなかった。

### 3.2 滑走路面反射電力測定

#### 3.2.1 測定目的等

レーダーからの放射電力の滑走路面での反射電力を測定し、電波天文業務、地球探査衛星業務への与干渉電力の評価に利用する。

#### 3.2.2 測定方法等

測定装置は、図 6 に示すものと同様であるが、滑走路面での反射測定のため、図 11 に示すように成田国際空港において、レーダーA から出力された電波が、滑走路面で反射した電力をレーダーD 付近で受信することとした。



B滑走路北東側  
レーダー-A



B滑走路北東側  
レーダー-D

図 11 滑走路面反射電力測定におけるレーダー配置

滑走路面における反射電力測定においては、電力を送信するレーダーと、受信するスペクトラムアナライザの位置や高さが非常に重要である。そこで、反射電力測定の準備として、図 12 に示すように送受信装置の滑走路面中心からの距離と高さを正確に把握した。そして、送信する側のレーダー-A の高さと同じの高さになるように、レーダー-D 側にスペクトラムアナライザを配置した。測定は、MAX-HOLD モード、RBW=100kHz、VBW=1MHz で実施した。

レーダー-A からレーダー-D の距離 587m に対応する自由空間伝搬損を用いて算出される受信電力計算値は-64dBm である。レーダー-D 側に設置したスペクトラムアナライザでの受信電力実測値は-63dBm となったことから、計算値と実測値はほぼ一致していると言える。

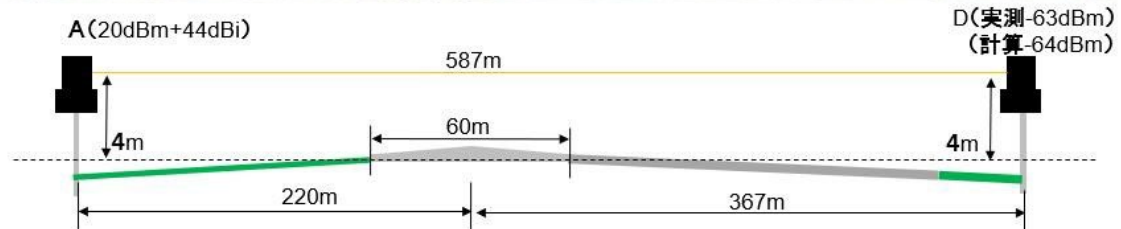
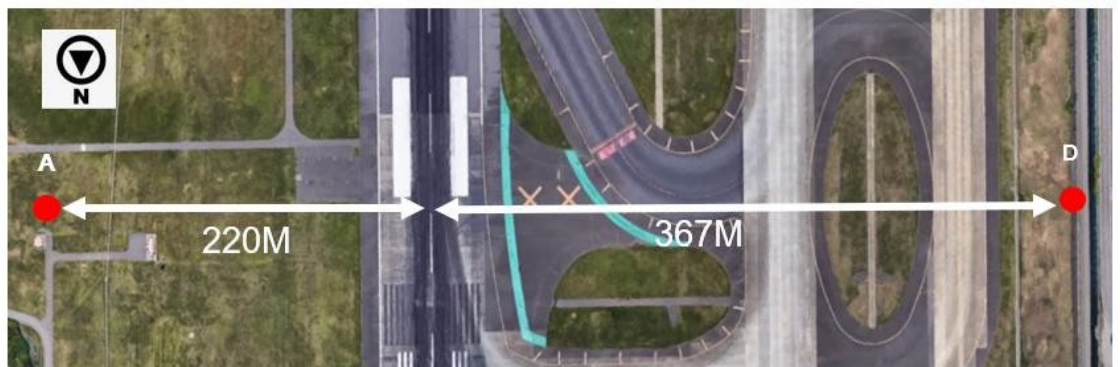


図 12 レーダー-A 及び D、滑走路面と高さ情報の詳細図

### 3.2.3 幅を持つビームの滑走路面反射

図 12 に従い、レーダー D 側に配置したスペクトラムアナライザの高さに関して詳細な検討を行った。レーダー A から送信するビームは、図 13 に示す②に合わせるため、ビームの中心は水平面から  $1.0^\circ$  下向きになる。ビーム半値幅は  $1^\circ$  (ビーム中心から  $0.5^\circ$  離れて 3dB 以下) であるため、主ビームは俯角  $0.5^\circ$  から  $1.5^\circ$  の間に存在するので、俯角  $0.5^\circ$  のビームは③に、 $1.5^\circ$  のビームは①の地点に発射されることになる。

このことを考慮すると、滑走路面における①、②、③で反射した電力は、D において、図 13 に示す高さに到達することとなるので、反射①、②、③の高さにおいて反射電力の評価を行った。

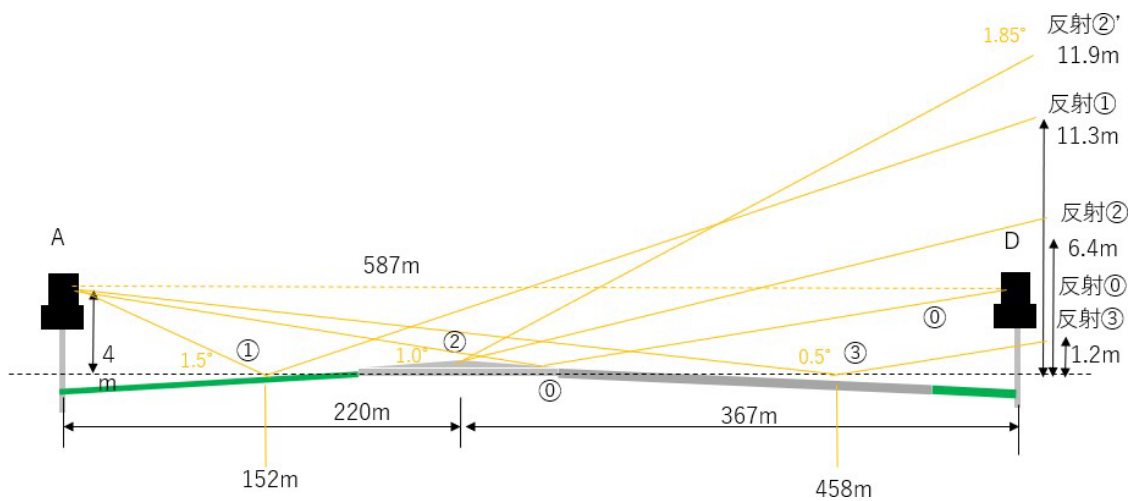


図 13 滑走路面反射モデル

### 3.2.4 滑走路面反射測定結果

図 14 に、滑走路面における反射電力測定結果を示す。主ビーム中心に対応する反射③の点における反射電力が  $-85\text{dBm}$  程度であり、上方向、下方向どちらに移動しても約 2dB 小さくなる結果が得られた。

なお、図 12 に示した電力実測値  $-63\text{dBm}$  と、③における電力実測値  $-85\text{dBm}$  を比較することにより、レーダー A から発射される電波を  $1^\circ$  下に向け、滑走路面で反射した場合には、 $-63 - (-85) = 22$  における受信電力は 22dB 下がることが分かった。



図 14 滑走路面反射電力測定結果

### 3.2.5 レーダー出力信号(FMCW 方式の CW 信号)の実測

出力される信号に関して以下の系統で測定を実施した。

特に、FMCW 方式の CW 信号に対して離調周波数 10MHz のノイズレベルは帯域内外にある電波天文業務及び地球探査衛星業務への干渉波としても影響するため確認が必要である。

ここではスペクトラムアナライザとその付属ミキサ及び基本波ミキサにより測定系統を構築した。

また、より精度の高い組み合わせについても確認するため、4 つの測定系統について実測した。

#### (1) 系統 1

スペクトラムアナライザはキーサイト社製を使用し、専用のスマートミキサ経由でレーダーと接続した。

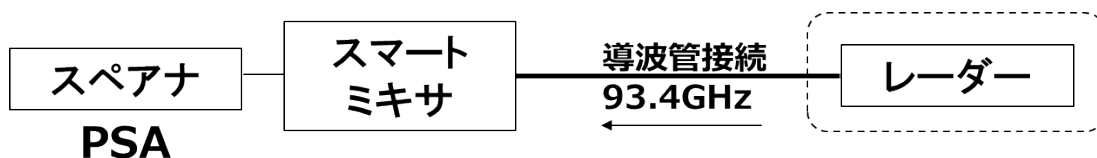


図 15 レーダー出力信号測定接続図 (系統 1)

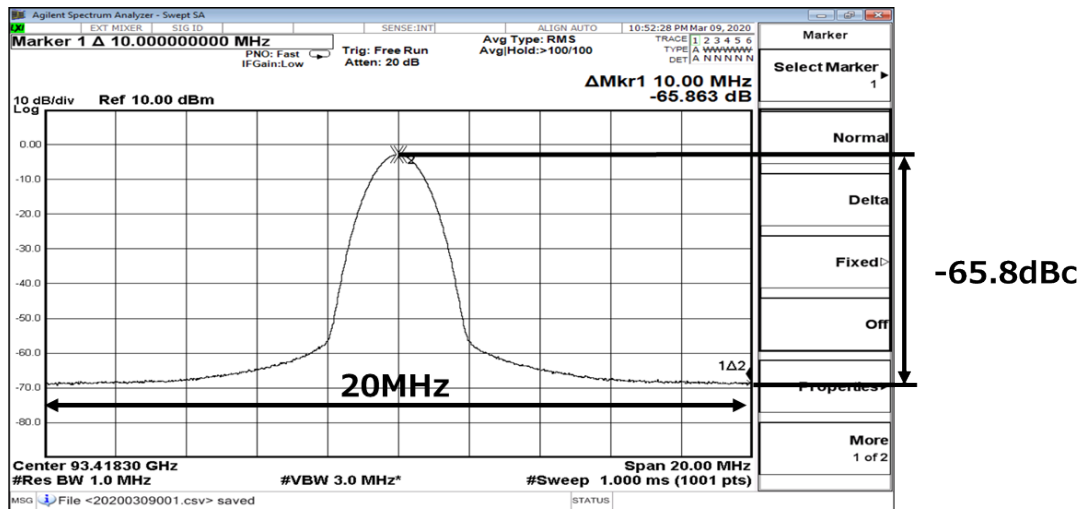


図 16 システム 1 における測定結果

スペクトラムアナライザの設定については、スパンは 20MHz、RBW=1MHz、VBW=3MHz とし、検波モードはノイズ測定のためサンプル設定とする。CW 信号の最大電力値に対して、離調周波数 10MHz ではノイズレベルは-65.8dBc であった。

(2) システム 2

スペクトラムアナライザはローデシュワルツ社製を使用し専用のミキサ経由でレーダーと接続した。

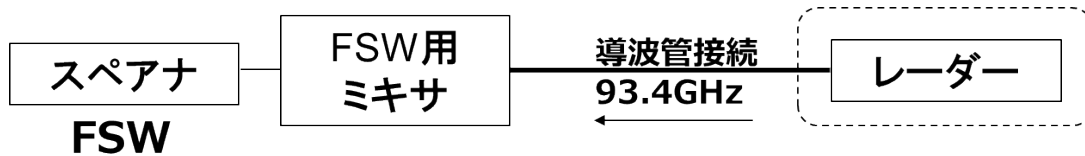


図 17 レーダー出力信号測定接続図 (システム 1)

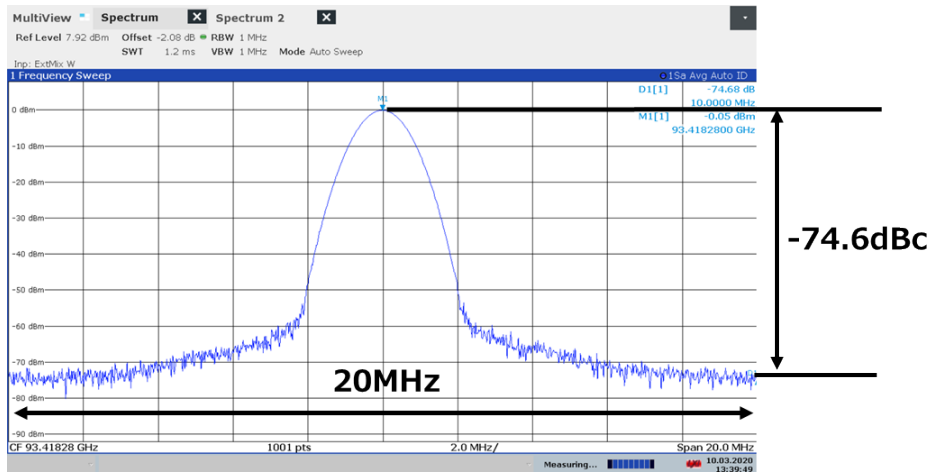


図 18 系統 2 における測定結果

スペクトラムアナライザの設定については、スパンは 20MHz、RBW=1MHz、VBW=1MHz とし、検波モードはノイズ測定のためサンプル設定とする。CW 信号の最大電力値に対して、離調周波数 10MHz ではノイズレベルは-74.6dBc であった。

(3) 系統 3

スペクトラムアナライザはキーサイト社製を使用し基本波ミキサ経由でレーダーと接続した。基本波ミキサへのローカル入力には信号発生器と逡倍器を使用した。

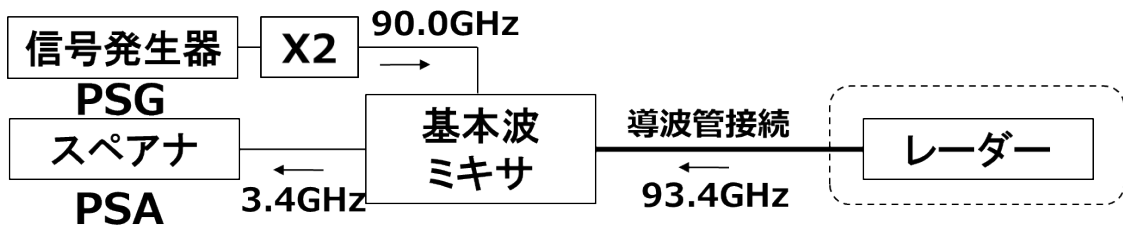


図 19 レーダー出力信号測定接続図 (系統 3)

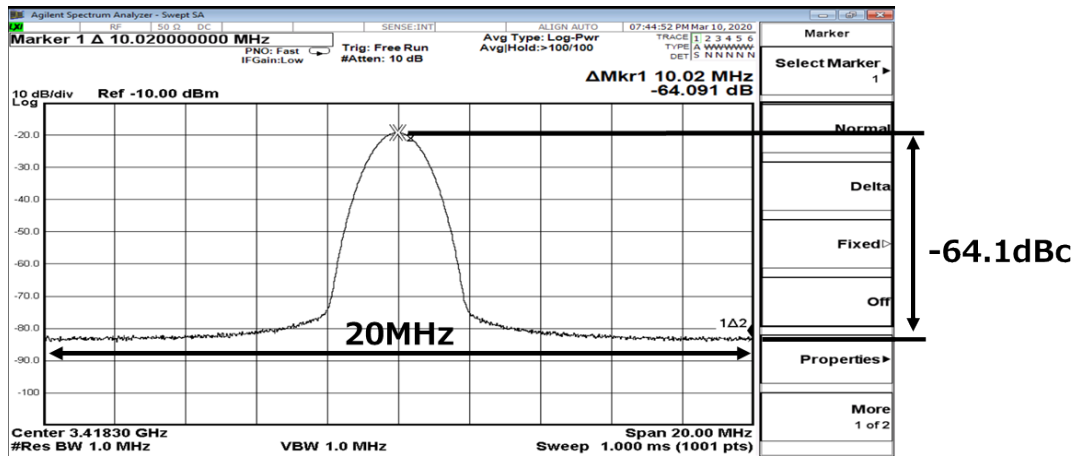


図 20 系統 3 における測定結果

スペクトラムアナライザの設定については、スパンは 20MHz、RBW=1MHz、VBW=3MHz とし、検波モードはノイズ測定のためサンプル設定とする。CW 信号の最大電力値に対して、離調周波数 10MHz ではノイズレベルは-64.1dBc であった。

(4) 系統 4

スペクトラムアナライザはローデシュワルツ社製を使用し基本波ミキサ経由でレーダーと接続した。基本波ミキサへのローカル入力には信号発生器と逡倍器を使用した。

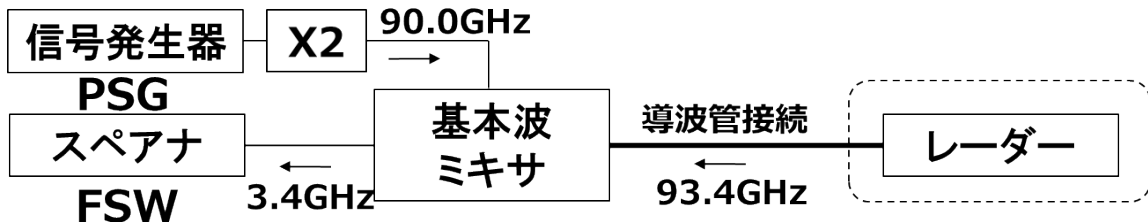


図 21 レーダー出力信号測定接続図 (系統 4)

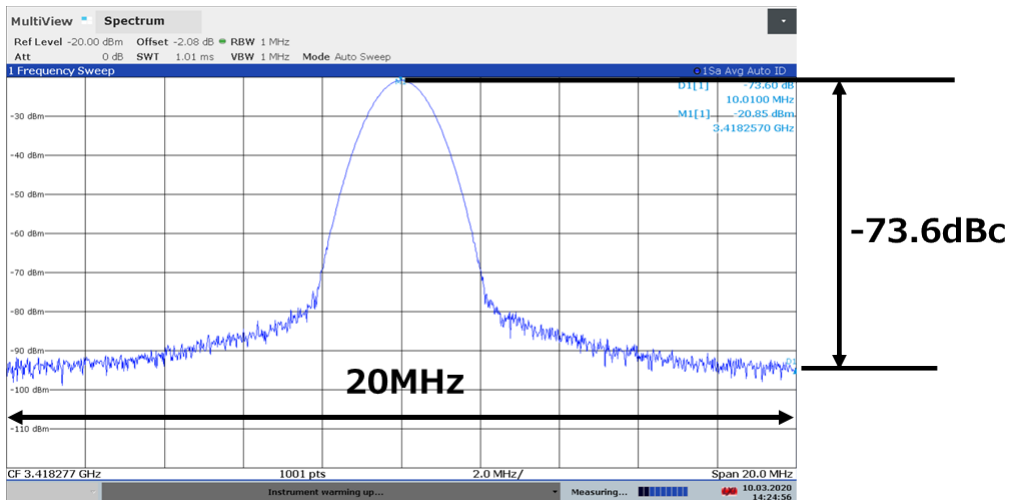


図 22 系統 4 における測定結果

スペクトラムアナライザの設定については、スパンは 20MHz、RBW=1MHz、VBW=1MHz とし、検波モードはノイズ測定のためサンプル設定とする。CW 信号の最大電力値に対して、離調周波数 10MHz ではノイズレベルは-73.6dBc であった。

以上の測定結果をまとめた結果を表 3に示す。レーダーより出力される信号については、離調周波数 10MHz において出力信号に対して、キーサイトの測定器の場合-60dBc 以下、ローデシュワルツの測定器の場合-70dBc 以下の値がノイズレベルであることが分かった。

表 3 離調周波数 10MHz におけるノイズレベル

レーダー出力(CW信号)の 離調周波数10MHzにお けるノイズレベル (出力20dBm時)	PSAシリーズ (キーサイト社)	FSWシリーズ (ローデシュワルツ社)
測定設備付属ミキサによる 測定結果	-65.8dBc	-74.6dBc
外部ローカルと基本波ミキサ の組み合わせによる測 定結果	-64.1dBc	-73.6dBc

また、スペクトラムアナライザ付属のミキサを使用することと、基本波ミキサにて外部ローカル信号を使用する場合においてノイズレベルに大差はなかった。ただし、スペクトラムアナライザの内部ノイズレベルには大きな差があるため、使用する測定器により測定結果 が大きく異なる。CW 信号の離調周波数 10MHz におけるノイズ成分は測定器の内部ノイズ特性に依存しており、精度よく測定するにはローデシュワルツ社製を用いることが望ましい。

なお、出力信号の帯域外に対する漏洩電力については、必要周波数帯域の 10MHz 内側に使用する CW 信号を発生させ、その信号の帯域外領域と必要周波数帯域の境界のノイズを測定し、帯域外領域の出力レベルとして測定する。



#### 第4章 電磁界シミュレーション

電磁界シミュレーションは、アンテナの利得特性を3次元的に解析するものである。空港FODレーダーから発射される電力及び漏洩電力をシミュレーションし、実証実験の結果を理論的に裏付けるとともに、共用条件に用いる値を導き出すために実施した。

図23は電磁界解析で用いた3Dモデルを示している。図24に示すような一次放射器（円型導波管）からの電界が放物面の完全導体に発射・反射されて収束することによりアンテナの利得特性が計算される。

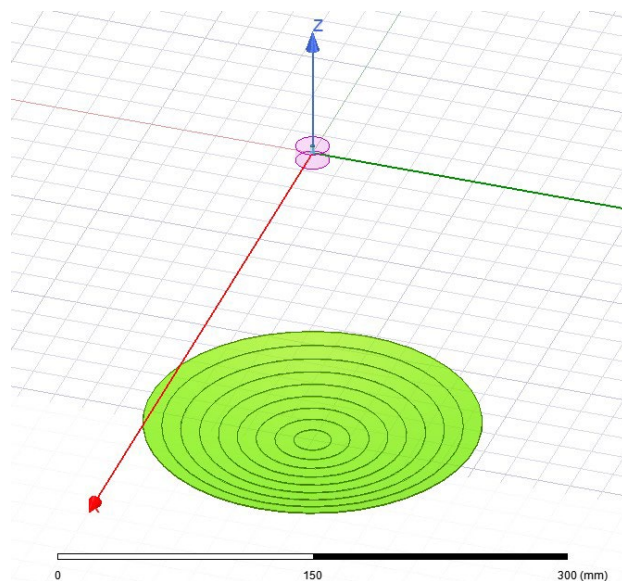


図23 電磁界解析の3Dモデル

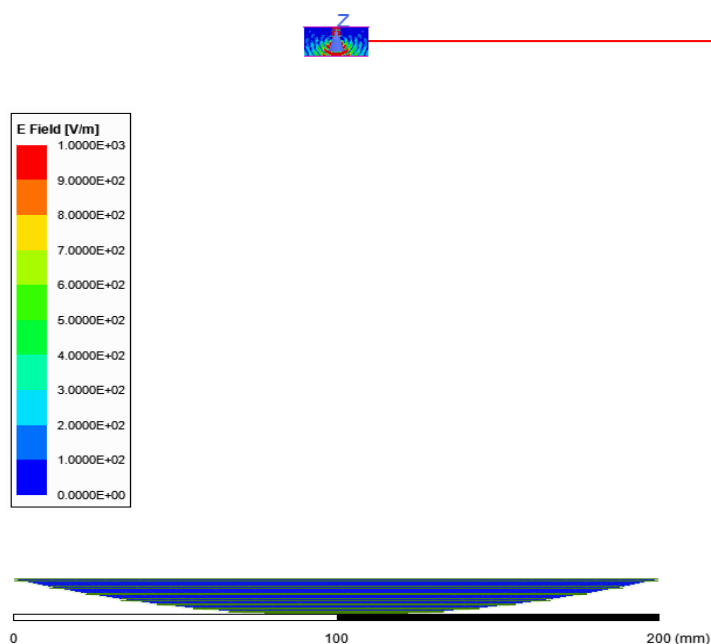


図24 一次放射器（円型導波管）近傍の電界分布

図 25及び図 26は一次放射器のみの利得パターンを 3D 及び2D で示したものである。一次放射器の段階でH 偏波とV 偏波で僅かな利得特性の差が観測され、図 27に示す反射器込みの 3D アンテナ特性でも偏波の差は観測されるが、差が顕著に現れるのは放射方向である $0^\circ$  から離れた角度域である。ITU-R 勧告のなかで 100GHz までの周波数をモデル化しているもののうち、本検討のレーダーで採用している反射型レーダーの Reference 特性を示している勧告 ITU-R RS.1813-1 を参照して検討を行う。勧告 ITU-R RS.1813-1 に示されるアンテナパターンの数学モデル（以下、ITU-R モデルという）では、偏波の差はモデル化されていない。また ITU-R モデルでは仰角が  $69^\circ$  以上  $180^\circ$  以下の範囲においては主反射面の直径と波長のみで定まる利得が採用されている。これは数学モデルが  $0^\circ$  から  $69^\circ$  の角度域を主な対象としてモデル化されているとも考えられる。今回の検討で必要となる高利得反射型アンテナの  $90^\circ$  方向利得の高精度測定は、周波数が高いこともあり学術的にも定まった測定法がないのが現状である。このため実測、ITU-R モデル、電磁界解析など異なる手法で確認することが必要になってくる。後述するように実測値、ITU-R モデル、電磁界解析は主ビーム近傍の角度域では十分な一致を示している。

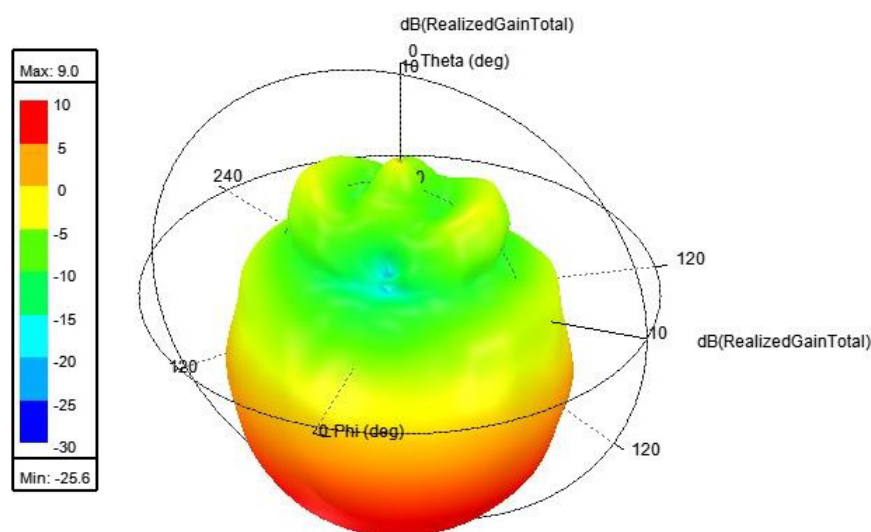


図 25 一次放射器（円型導波管）の3D アンテナ Gain パターン

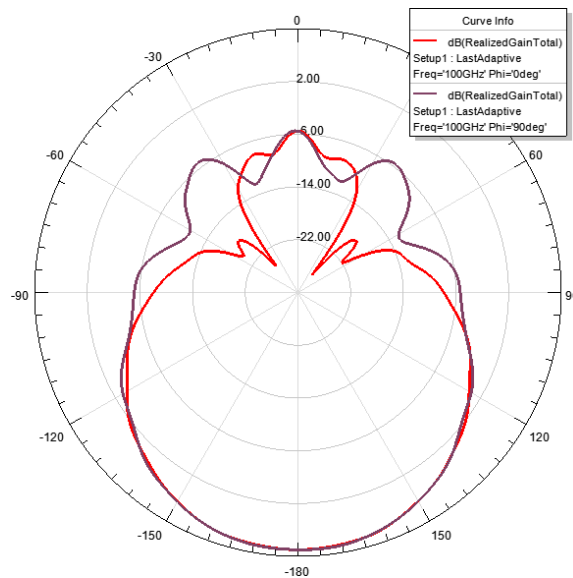


図 26 一次放射器（円型導波管）の 2D アンテナ Gain パターン

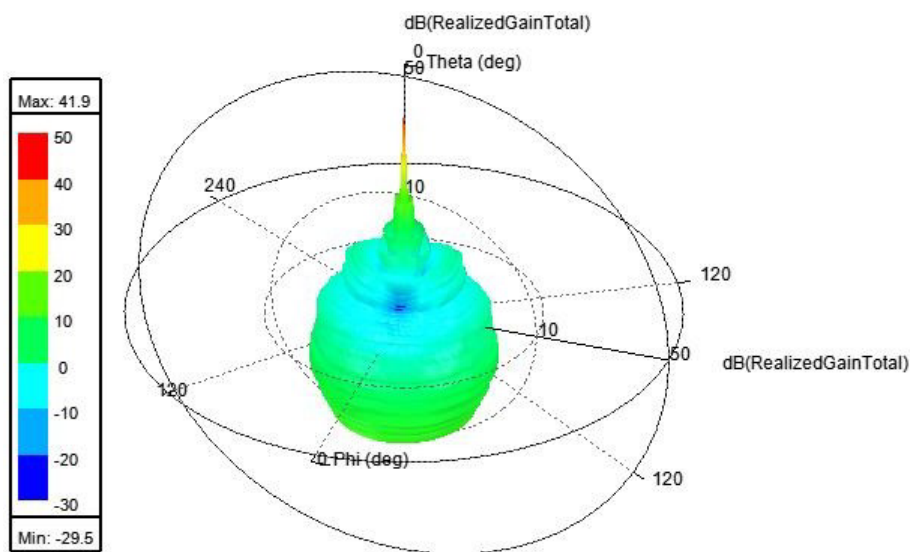


図 27 電磁界解析で求めたアンテナ Gain の 3D 指向性パターン

図 28 と図 29 に ITU-R モデルと実測されたアンテナ利得を重ねて示す。角度範囲は  $\pm 120^\circ$  と  $\pm 10^\circ$  である。両図に見られるように放射方向近傍ではアンテナ利得の絶対値・角度依存性ともに十分な一致を確認することができる。一方で  $\pm 90^\circ$  方向近傍では ITU-R モデルが一定値を示すのに対し、実測値は利得の低い領域で激しく変動している。この変動は、アンテナ測定システムのノイズフロアを勘案すると標準的な変動であると思われる。

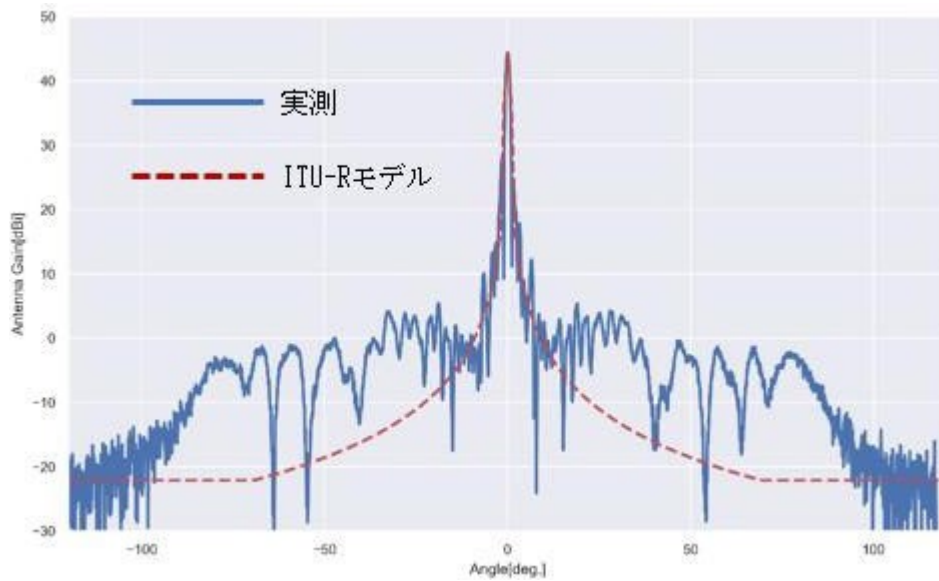


図 28 アンテナの測定結果と ITU-R モデルの比較 (±120° )

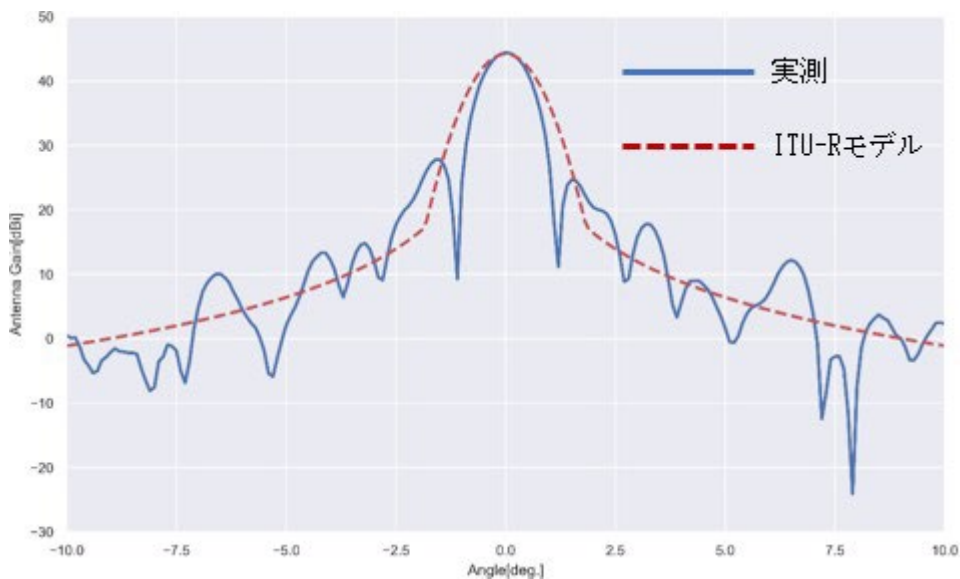


図 29 アンテナの測定結果と ITU-R モデルの比較 (±10° )

図 30 と図 31 は同様の比較をアンテナ実測値と電磁界解析の H 偏波成分で行ったもので、図 32と図 33は同様の比較をアンテナ実測値と電磁界解析の V 偏波成分で行ったものである。いずれの比較も±60° まで是一致的しているが、それ以上の角度範囲では乖離が大きくなる傾向にある。図 34と図 35は同様の比較をアンテナモデルと電磁界解析の H 偏波成分で行ったもので、図36と図 37は同様の比較をアンテナモデルと電磁界解析の V 偏波成分で行ったものである。これらの比較も±60° まで是一致的する傾向があるが、それ以上の角度範囲では乖離が大きくなる。

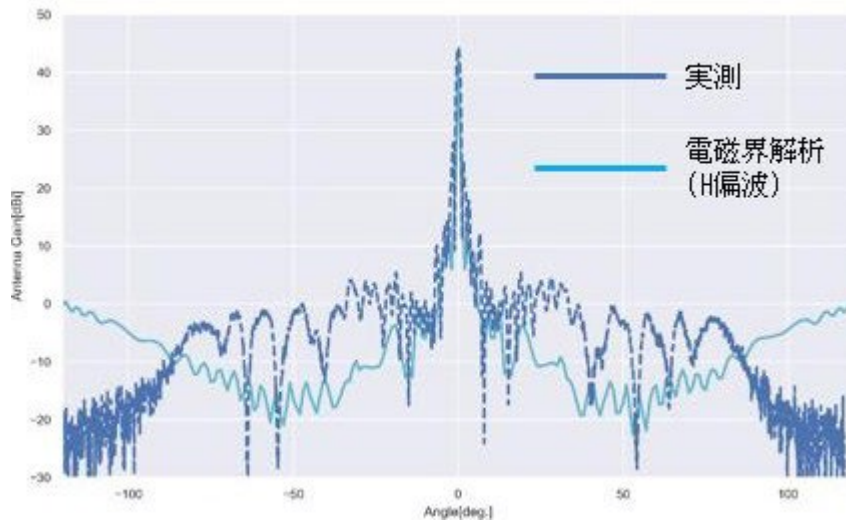


図 30 アンテナの測定結果と電磁界解析[H 偏波] (±120° )

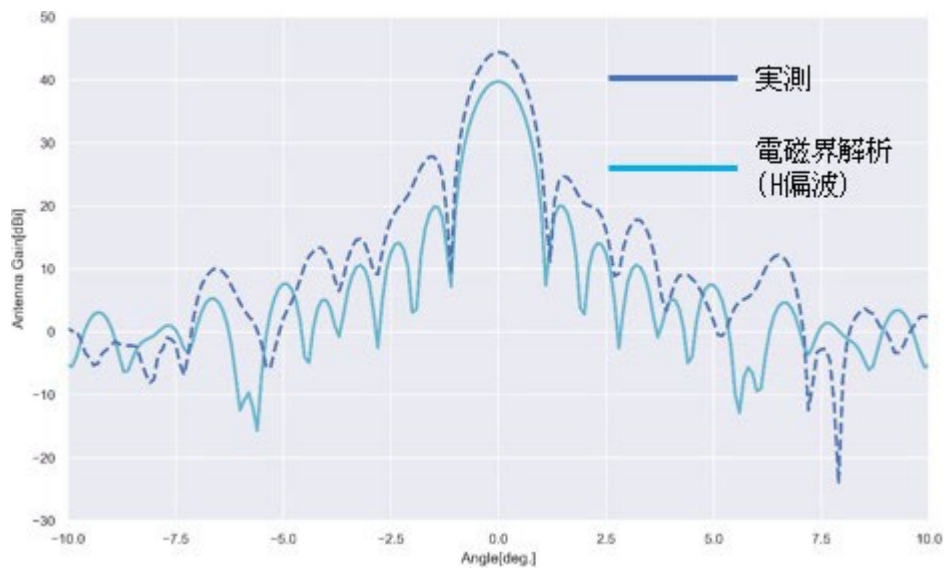


図 31 アンテナの測定結果と電磁界解析[H 偏波] (±10° )

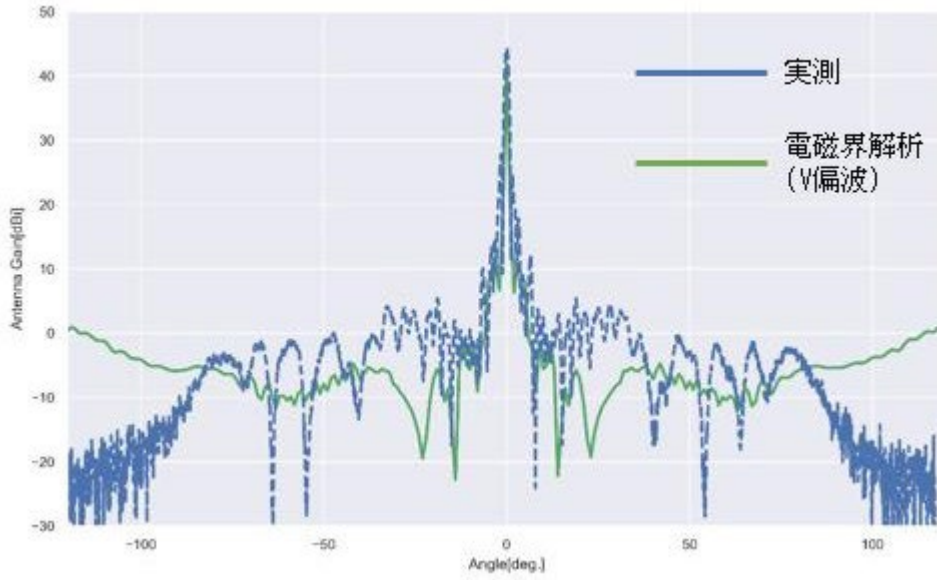


図 32 アンテナの測定結果と電磁界解析[V 偏波] (±120°)

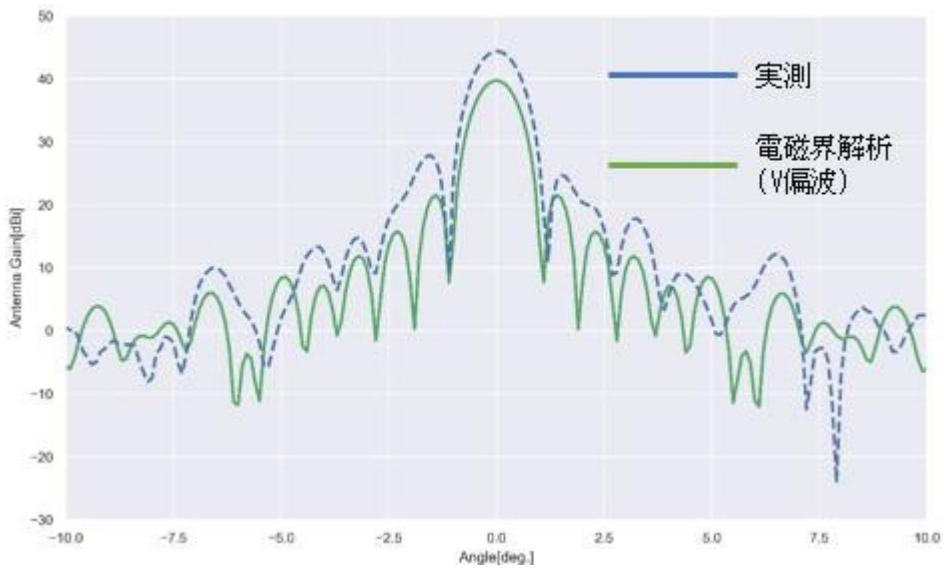


図 33 アンテナの測定結果と電磁界解析[V 偏波] (±10°)

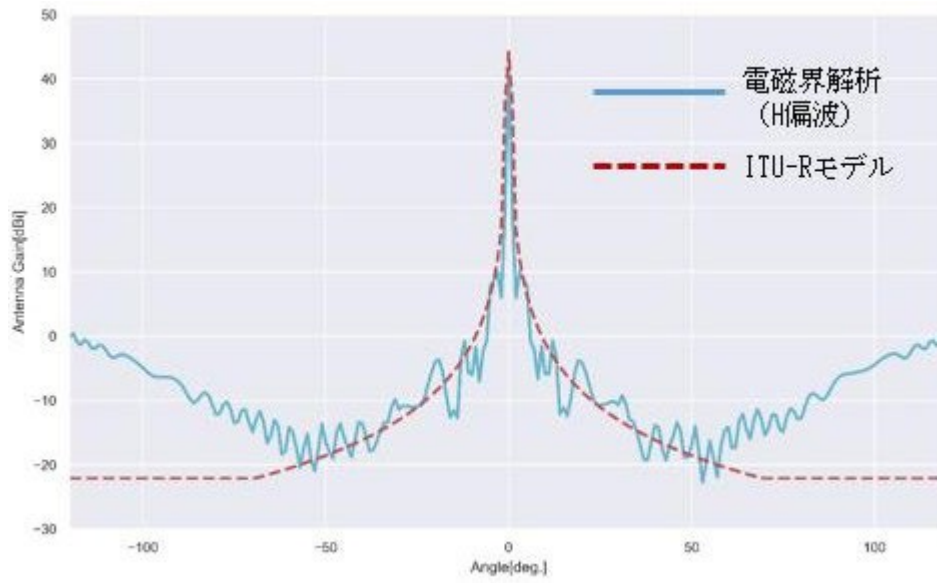


図 34 アンテナの ITU-R モデルと電磁界解析[H 偏波] (±120°)

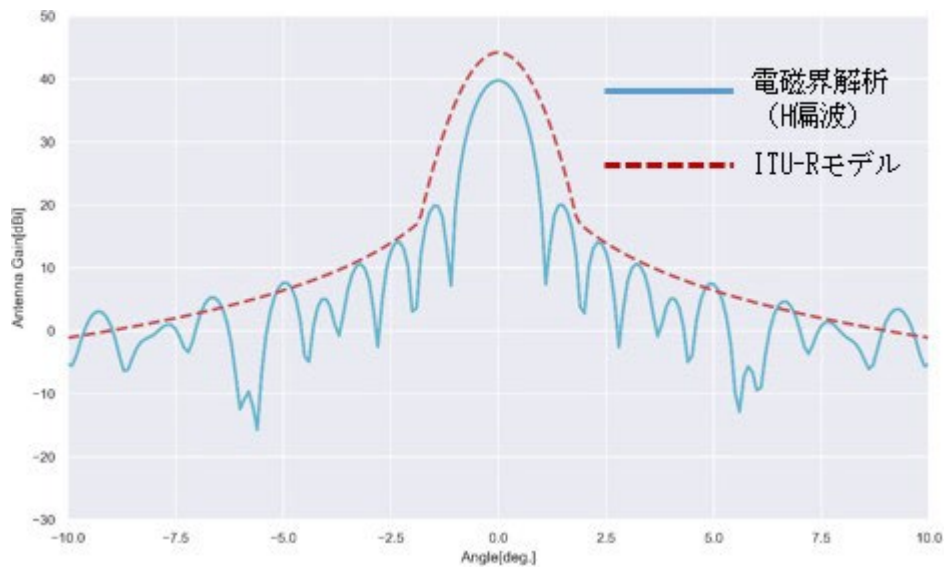


図 35 アンテナの ITU-R モデルと電磁界解析[H 偏波] (±10°)

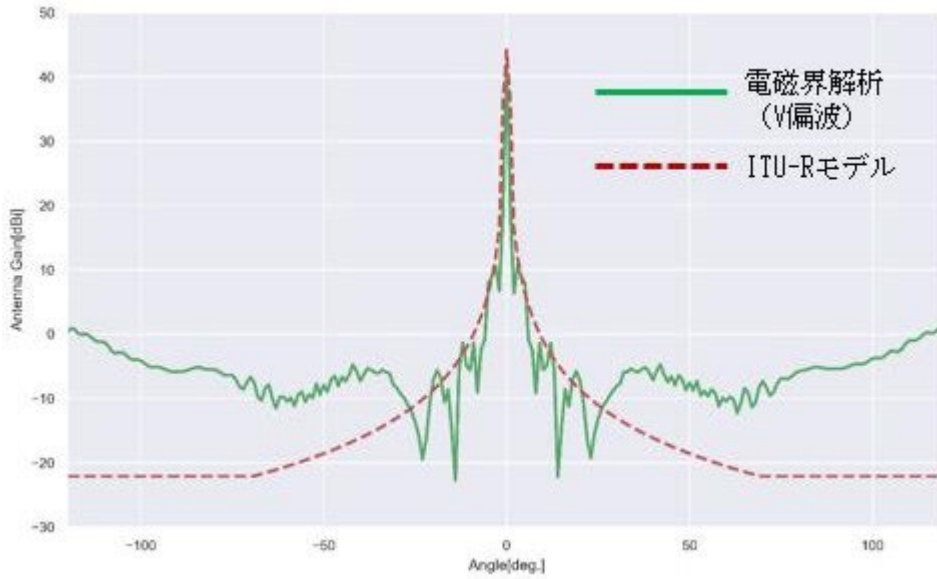


図 36 アンテナの ITU-R モデルと電磁界解析[V 偏波] (±120°)

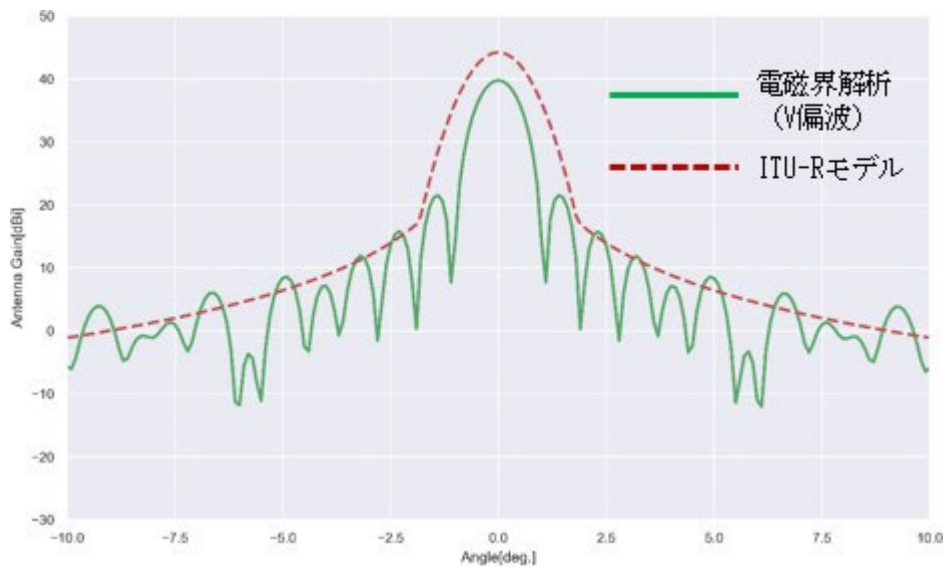


図 37 アンテナの ITU-R モデルと電磁界解析[V 偏波] (±10°)

図 38、図 39にアンテナモデル、実測、電磁界解析を重ねて示す。既に述べたように±60°以内ではいずれも精度の範囲内で一致していると言えるが、±90°方向近傍に着目すると、電磁界解析もアンテナモデルよりも利得が10dB程度高い点では傾向が一致している。ITU-Rのアンテナモデルは、ある角度以上では定数値を取るよう定義されており、±90°方向の利得に関しては、ITU-Rモデルよりも実測値及び電磁界解析の値を用いて干渉検討することが望ましいと考えられる。



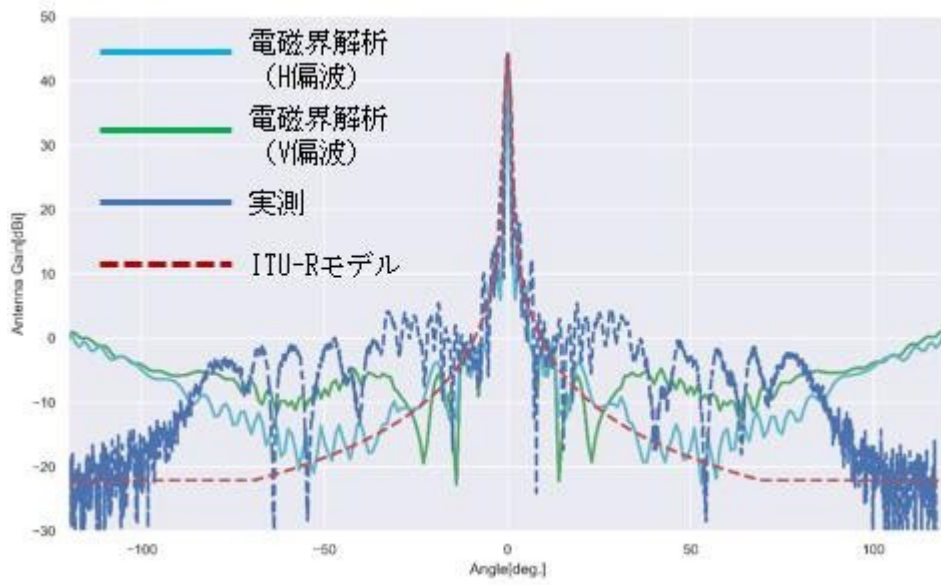


図 38 ITU-R モデル・測定結果・電磁界解析[H/V 偏波] (±120°)

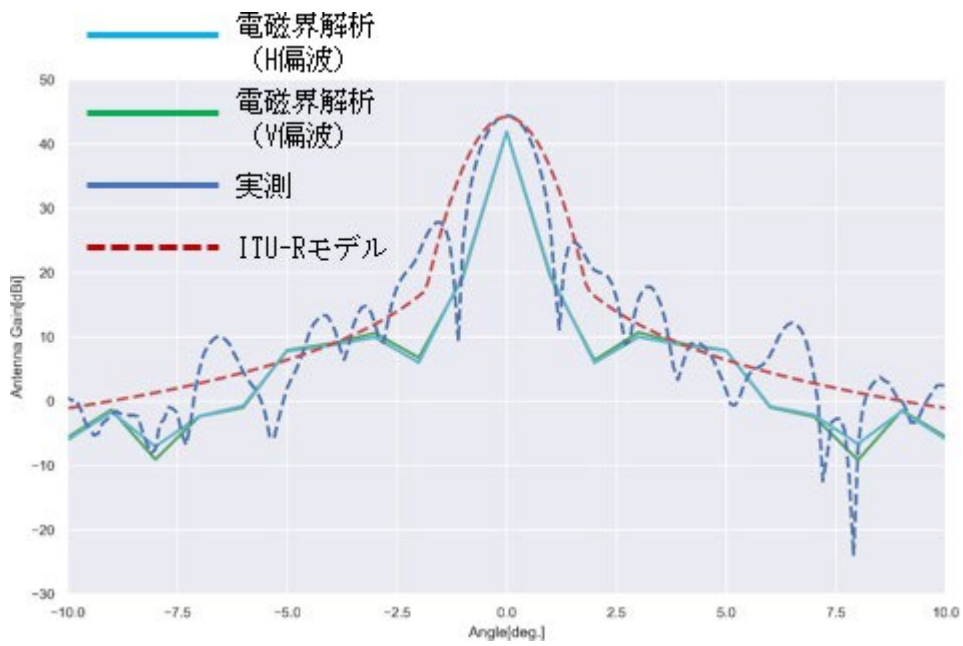


図 39 ITU-R モデル・測定結果・電磁界解析[H/V 偏波] (±10°)

## 第5章 空港 FOD レーダーと共用するシステム

### 5.1 想定される共用システム

空港 FOD レーダーとしては、世界的に一次業務として無線標定に分配されている 92～100GHz の周波数帯を用いる予定である。当該 90GHz 帯の周波数を用いる空港 FOD レーダーと他システムとの周波数共用条件を検討する帯域として、帯域外発射の影響が想定される隣接周波数である 81～92GHz 及び92～109.5GHz を対象とした（表 4を参照） [16] [17]。これらの周波数帯域内で該当する業務は、電波天文業務 [18]、地球探査衛星業務/宇宙研究業務（受動及び能動）、固定及び移動業務である [19]。

表 4 総務省 周波数割当(10-275GHz)から抜粋

国内分配 (GHz) (4)		92-94 J36	固定 移動	国内分配 (GHz) (4)	
	アマチュア アマチュア衛星 電波天文		無線標定	J107	宇宙研究 (受動) 電波天文
79-81 J36	無線標定	94-94.1 J284 J285	電波天文	102-105 J36	固定 移動 電波天文
	電波天文 (宇宙から地球) アマチュア アマチュア衛星		無線標定 地球探査衛星 (能動) 宇宙研究 (能動) 電波天文	105-109.5 J36	固定 移動 宇宙研究 (受動) J286 電波天文
81-84 J36 J281	固定 移動	94.1-95 J36	固定 移動	109.5-111.8 J107	地球探査衛星 (受動) 宇宙研究 (受動) 電波天文
	固定衛星 (地球から宇宙) 移動衛星 (地球から宇宙) 電波天文 (宇宙から地球) アマチュア衛星		無線標定	111.8-114.25 J36	固定 移動 電波天文 (受動) J286 宇宙研究 (受動)
84-86 J36	固定 移動	95-100 J36 J268	固定 移動	114.25-116 J107	地球探査衛星 (受動) 宇宙研究 (受動) 電波天文
	固定衛星 (地球から宇宙) J283 電波天文		無線航行 無線航行衛星 無線標定 電波天文		
86-92 J107	地球探査衛星 (受動) 宇宙研究 (受動) 電波天文	100-102	地球探査衛星 (受動)		

### 5.2 共用モデル

図 40 に、空港 FOD レーダーと共用するシステムとの関係に関する概略図を示す。同図は、1 滑走路あたり 12 台を滑走路両脇に設置したことを想定した場合の空港 FOD レーダーの配置イメージである。本検討では、最大 48 台が配置されると仮定した。ただし、空港内の滑走路の配置によっては、片側のみのレーダーの配置や、両側と片側配置の組み合わせも想定できる。FOD を検知するため、滑走路に向けて発射される電波は、滑走路面で反射し、その後、電波天文業務用のパラボラアンテナに到達する。この際、空港と電波天文業務用のパラボラアンテナ間に、山などがある場合には、回折損失などにより減衰することもある。空港 FOD レーダーから上方に向かっては、地球探査衛星業務の人工衛星に対して電波が到達する。

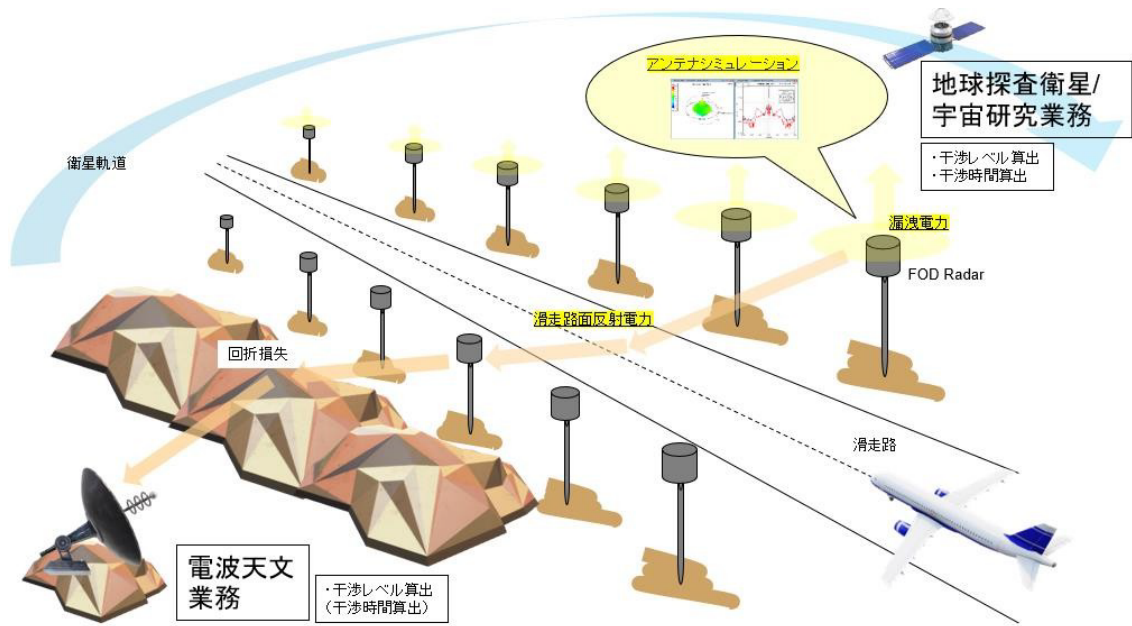


図 40 空港 FOD レーダーと共用システムの概要(両側配置の場合)

### 5.2.1 電波天文業務との共用検討

表 4 に示されるように、81-109.5GHz 帯には、電波天文業務の割当てがあり、このうち85.5-92GHz 帯については電波天文業務の用に供する受信設備として総務省告示で総務大臣が指定した周波数であることから共用検討が必要である。

また、電波天文業務との干渉検討には、勧告 ITU-R RA769-2 にある干渉閾値 [20]と RA.1513-2 にある干渉許容データ損率 [21]を用いた。

成田国際空港における実証実験において、空港 FOD レーダーの周囲の漏洩電力と、空港滑走路面の反射損失を測定した。その結果を用いて電波天文観測局と、日本国内の空港間の距離、距離による自由空間損失、回折効果、大気中の水蒸気による減衰量などを考慮して、離隔距離を算出した。

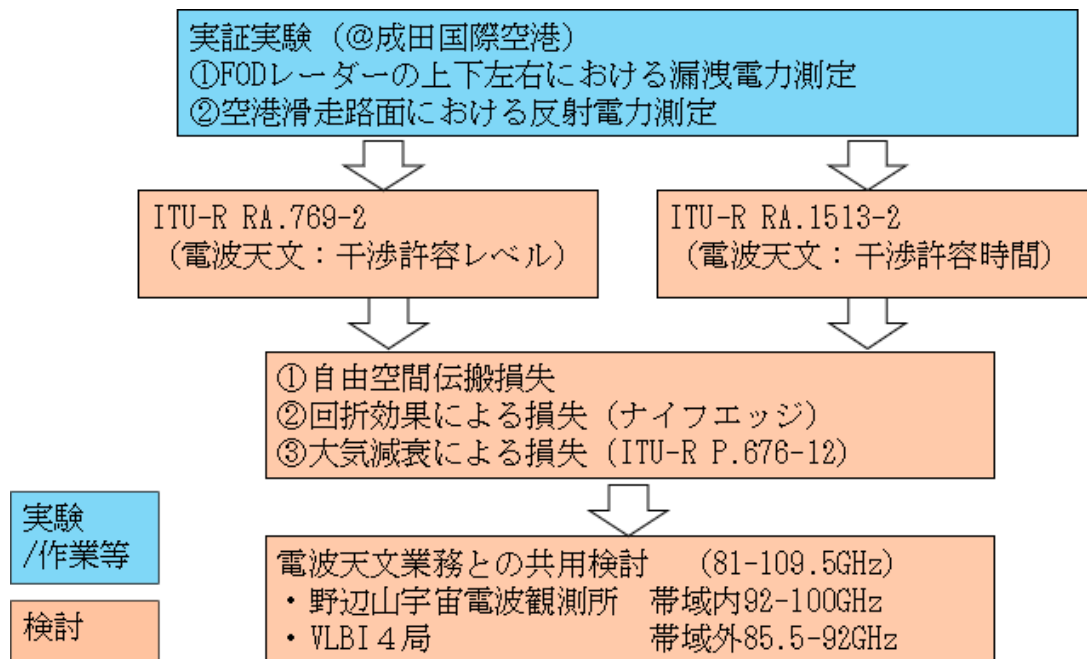


図 41 電波天文業務との共用検討

### 5.2.2 地球探査衛星業務(受動及び能動)との共用検討

我が国では、90GHz 帯を用いる地球探査衛星業務（受動）については、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が2012 年に打ち上げた水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載された受動センサーである高性能マイクロ波放射計 2（AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2）と、同じく JAXA が2023 年度に打上げ予定である温室効果ガス・水循環観測技術衛星（GOSAT-GW）に搭載される受動センサーである高性能マイクロ波放射計 3（AMSR3: Advanced Microwave Scanning Radiometer 3）が該当する。

また、90GHz帯を用いる地球探査衛星業務（能動）については、宇宙航空研究開発機構（JAXA）及び情報通信研究機構（NICT）と、欧州宇宙機関（ESA）とが共同で開発し、2022 年度に打上げを予定している雲エアロゾル放射ミッション（EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer）に搭載される能動センサーである雲プロファイリングレーダー（CPR: Cloud Profiling Radar）が該当する。

これら各々の受動及び能動センサーについては、関連する ITU-R 勧告にシステム諸元 [22] [23] 及び干渉許容基準 [24] [25] が規定されている。

地球探査衛星業務（受動）である AMSR2 及び AMSR3 が使用する周波数は 86-92GHz、地球探査衛星業務（能動）である CPR が使用する周波数は 94-94.1GHz となっている。

電波天文業務の場合と同様に、成田国際空港における実証実験で得た空港 FOD レーダー周囲の漏洩電力と空港滑走路面の反射電力を用いて、これらの地球探査衛星業務（受動）及び（能動）との共用検討を実施した。なお、地球探査衛星業務（受動）については、衛星高

度が低く、干渉の影響をより受けやすい「AMSR3」の方を採用した。

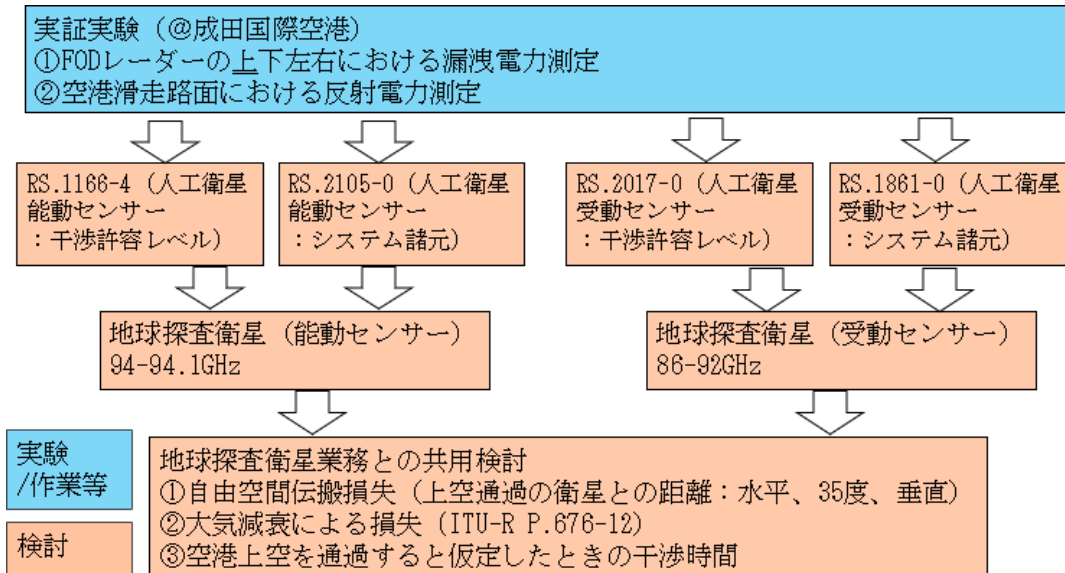


図 42 地球探査衛星業務との共用検討

### 5.2.3 固定通信及び移動通信業務との共用検討

固定通信及び移動通信業務との共用検討対象としては、該当する周波数において、81～86GHz を利用する 80GHz 帯高速無線伝送システムがある。

80GHz 帯高速無線伝送システムとの共用検討は、無線伝送システムの受信レベル(受信感度)を調査し、その電力値を基準として、空港 FOD レーダーがどの程度干渉を与えるかを算出し検討した。

### 5.2.4 電磁界シミュレーション

電磁界シミュレーションと実証実験の関係について、図 43に示す。勧告 ITU-R RS.1813-1のアンテナモデルを参照し、レーダーを覆っているアンテナカバーの効果確認や電波吸収体の効果確認を行った。更に、成田国際空港における実証実験とあわせて、実証実験結果との整合性を整理し、電波天文業務と地球探査衛星業務との共用を可能とする方式の提案を行った。

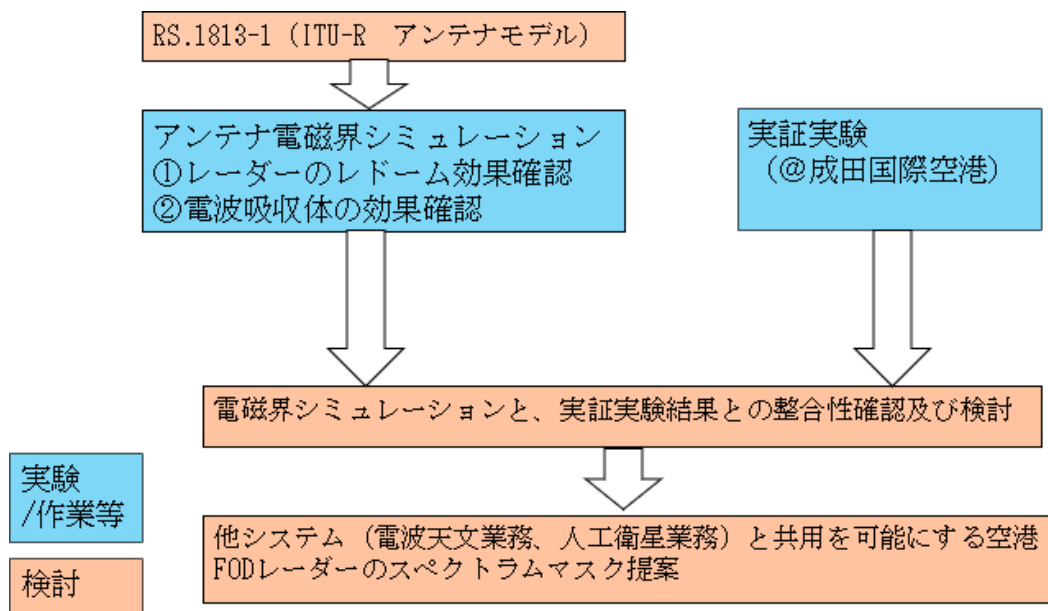


図 43 電磁界シミュレーションと実証実験の関係

## 第6章 共用検討

### 6.1 電波天文業務との共用検討

図 44 に電波天文業務との共用検討モデルを示す。レーダーからの電波の放射方向は水平より 1° 下方に向いている。図 12 中に示すビームが水平方向の場合（直接波）の実測値-63dBm と、図 14中の正面における測定値を比較することにより、レーダーからの 1° 下方に発射された電波が滑走路面で反射することによって 22dB 程度減衰していることが分かる。そこで、図 12中に示す実測結果の出力電力 20dBm より22dB 減じた値である-2.0dBm を滑走路面で反射したことによる水平方向の干渉電力として共用検討を行った。

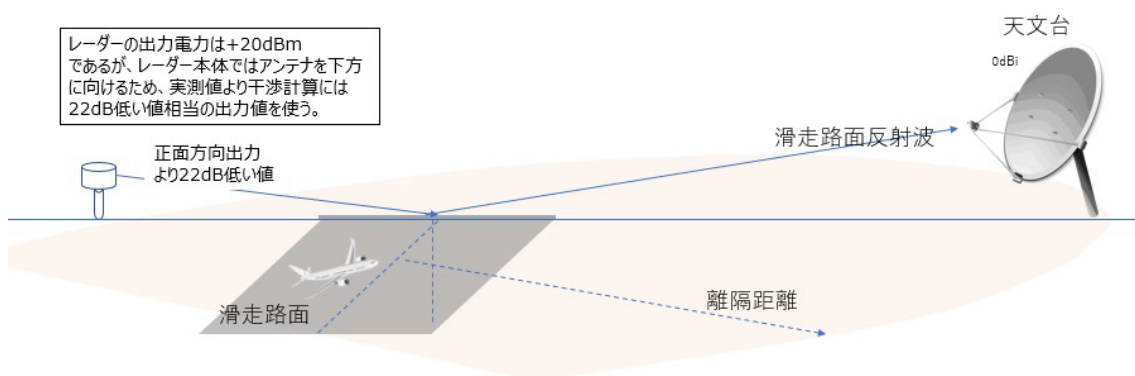


図 44 電波天文業務との共用検討モデル

共用検討の計算では、自由空間伝搬損失の計算式として数式 1（勧告 ITU-R P. 525 の(4)式）を用いた。空港 FOD レーダーの数については、標準的には1滑走路当たりの最大 FOD レーダー数は12基である。しかし本検討では、将来の設置可能性を鑑み、より共用が厳しくなる値である、建築限界による1滑走路あたり48基を設置したと仮定し計算を行った。計算結果を表 5に示す。

数式 1 自由空間伝搬損失の計算式

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{dB}$$

where:

$f$ : frequency (MHz)

$d$ : distance (km).

表 5 空港と電波天文観測局との共用検討

	項目	Unit	鹿児島空港～ VERA入来観測局 (In-Band / 92-100GHz)	鹿児島空港～ VERA入来観測局シ ールド措置版 (In-Band)	空港から観測局まで の距離が112km以上 (In-Band / 92-100GHz)	東京国際空港～ 野辺山宇宙電波 観測所(In-Band / 92-100GHz)	備考
Radar (TX) @ 空港	送信電力	dBm	-2.00	-89.70	-2.00	-2.00	アンテナから輻射される電力は、出力+20dBmとカセグレンアンテナ利得44dBiを含めた実測値を使用する。
	設置台数	台	48.00	48.00	48.00	48.00	滑走路あたり最大設置数
	滑走路数	-----	1.00	1.00	1.00	6.00	国交省様情報による。
	合計設置台数	台	48.00	48.00	48.00	288.00	
		dB	16.81	16.81	16.81	24.59	
	対象周波数	GHz	92-100	92-100	92-100	92-100	
	中心周波数	GHz	96	96	96	96	
	占有帯域幅B	MHz	8000	8000	8000	8000	
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	44	0	44	44	
	帯域内輻射電力	dBm	58.81	-72.89	58.81	66.59	eirp
帯域内輻射電力密度	dBm /MHz	19.78	-111.92	19.78	27.56	eirp-10*log(BW)	
Radar-天文台距離	km	27.167	27.1655	112	126.6		
伝搬路(損失)	自由空間伝搬損 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	160.7263	160.7258	173.03	174.09	1.5m地点の測定値を用いる時は伝搬距離から距離1.5m分差し引く。
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 p.23 fig.10)	dB/km	10.87	10.87	44.80	50.64	・0.4dB/km @ 96GHz
	回折損失 (itu-r p.526-14 p.18 eq.31 or p.452-16 p.10 eq.13)	dB	0.00	0.00	0.00	61.161	国土地理院ホームページによる
RAS (interference RX)	アンテナ利得 (itu-r ra.769)	dBi	0.00	0.00	0.00	0.00	
	到達受信電力	dBm /MHz	-151.81	-283.51	-198.05	-258.33	
		dBW	-189.00	-189.00	-189.00	-189.00	
	許容干渉受信電力 (itu-r ra.769-2より)	dBm	-159.00	-159.00	-159.00	-159.00	国立天文台様よりご意見
	dBm /MHz	-198.03	-198.03	-198.03	-198.03		
マージン	dB	-46.22	85.48	0.02	60.30		



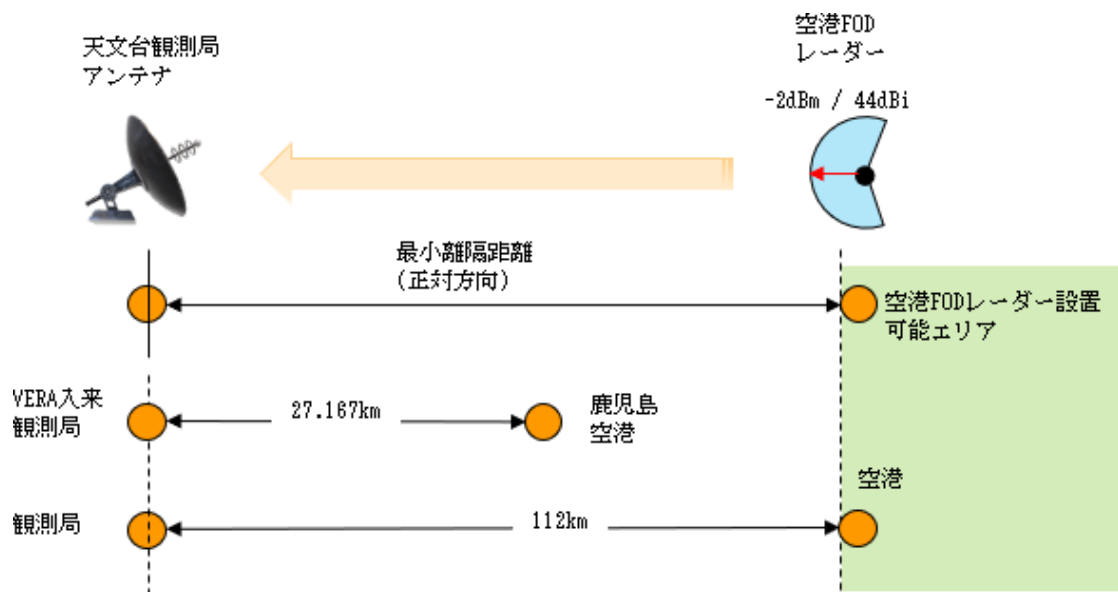


図 45 天文台観測局に対して空港 FOD レーダーが正面で向き合う場合

図 45に、天文台観測局に対して、空港 FOD レーダーが正面で向き合う場合のイメージ図を示す。この場合、干渉マージンを確保し共用可能とするためには、最小離隔距離 112kmを確保して、空港 FOD レーダーを設置することが必要である（表 5の第 6 列）

共用検討においては、レーダーを設置する空港と最も近い距離にある電波天文業務の観測局の干渉検討が最悪ケースとなる。電波天文局と空港の位置情報から空港と観測局の離隔距離を求めた結果、鹿児島空港と国立天文台入来観測局の 27.167km が最短であることがわかった。表 5 の第 4 列より、鹿児島空港と入来観測所間において、干渉許容電力に対する干渉マージンが-46.22dB となりマージン不足であることが分かった。そこで図 46 に示す結果からアンテナカバー背面方向への漏洩電力-89.7dBm 以下を使用し、背面方向に電波天文局が来るようにレーダーの配置を変更した場合の干渉電力を再度試算した。観測所方向にシールド措置を実施した場合のレーダーの輻射イメージを図 47に示す。赤線が電波輻射方向の中心を示し、水色が電波の輻射範囲である。その結果（表5の第5列）干渉マージンが正の大きな値（約86dB）となり、共用可能であることが分かった。

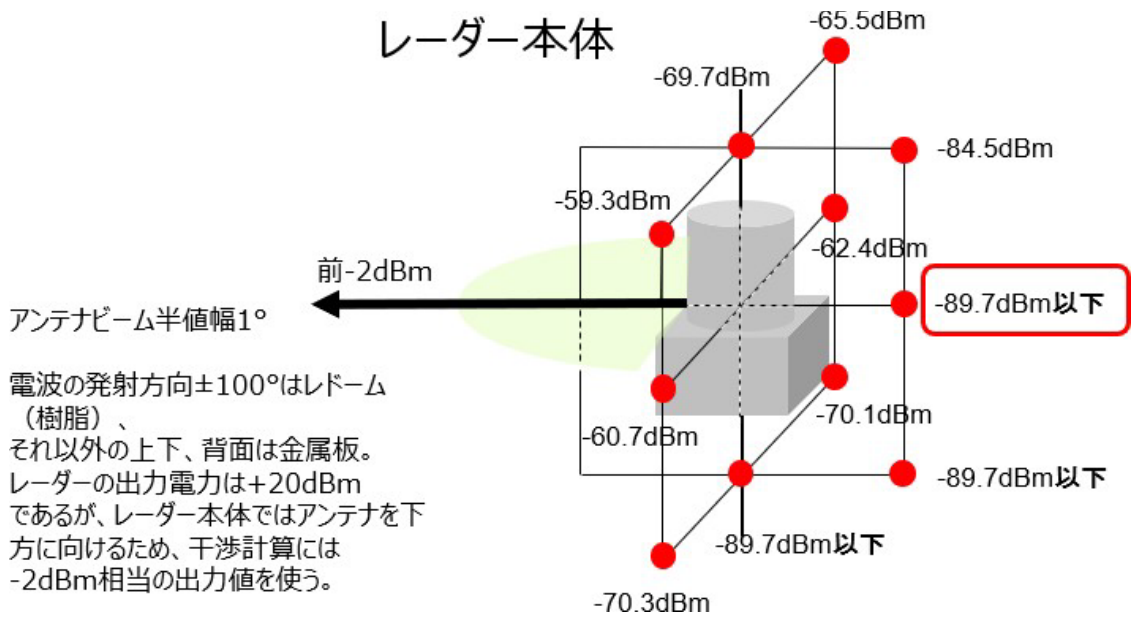


図 46 レーダー周囲の漏洩電力結果

レーダーの電波の  
輻射イメージ（赤線は輻射方向）

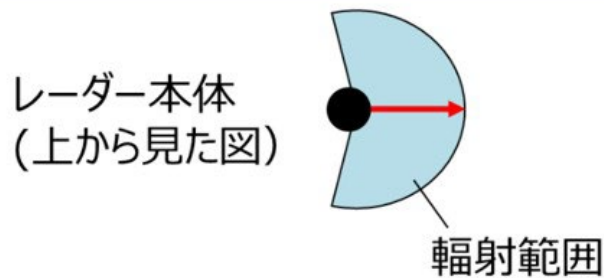


図 47 レーダー用アンテナの輻射範囲

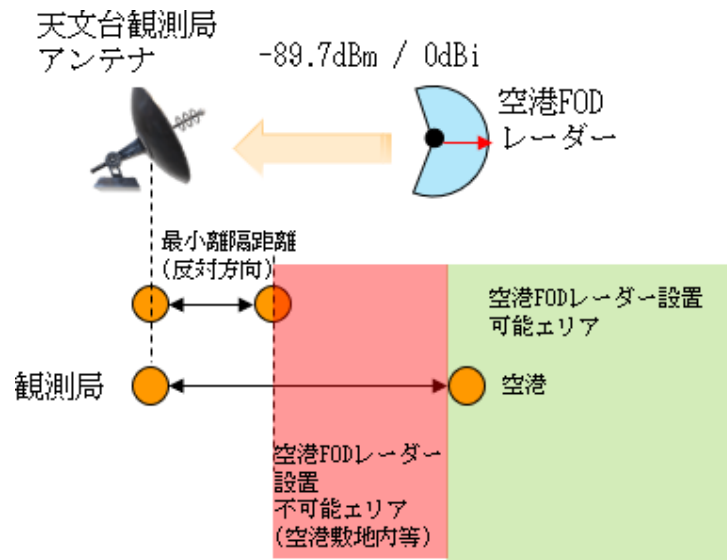


図 48 天文台観測局に対して空港 FOD レーダーが背面向きに位置する場合

干渉検討結果をまとめる。電波天文台と空港間の距離が 112km 以上ある場合は、特段の問題がなく共用可能である。一方、電波天文台から 112km 以内に空港 FOD レーダーを設置する場合、電波の輻射を抑圧する必要がある。その場合のイメージを図 48に示す。天文台観測局に対して空港 FOD レーダーを背面向きに位置させることにより、電波天文観測局に対する輻射電力を低減させることが可能である（表 5の第5列）

参考として、東京国際空港（羽田空港）と国立天文台野辺山宇宙電波観測所間の干渉検討結果を表 5の第7列に示した。空港と観測所間の回折損失を考慮すれば、現在滑走路数は 4 であるが、将来の拡張性も考慮し滑走路数 6 がかつ正面方向での設置の場合においても、マージンを確保できていることがわかる。

従って、空港にレーダーを設置した場合には、電波天文業務を保護する目的で以下の共用条件を導出できた。

空港と観測局の 離隔距離（※）	112km 以上	112km 未満
アンテナの使用方法	水平 360° に放射可能	メインビームは観測局に向けず、アンテナ放射方向の背面にシールド等で電波を遮蔽する。

（※）観測局と空港間の地形により回折損失がない場合に限る。地形情報については付属資料 23 を参照のこと。

図 49に鹿児島空港におけるレーダーの設置例を示す。

鹿児島空港と国立天文台入来観測局の位置関係が東西方向のため、観測局方向にメインビームが向かず、シールド等で電波を遮蔽するようにレーダーを配置することにより、空港 FOD レーダーシステムを構築することが可能となる。

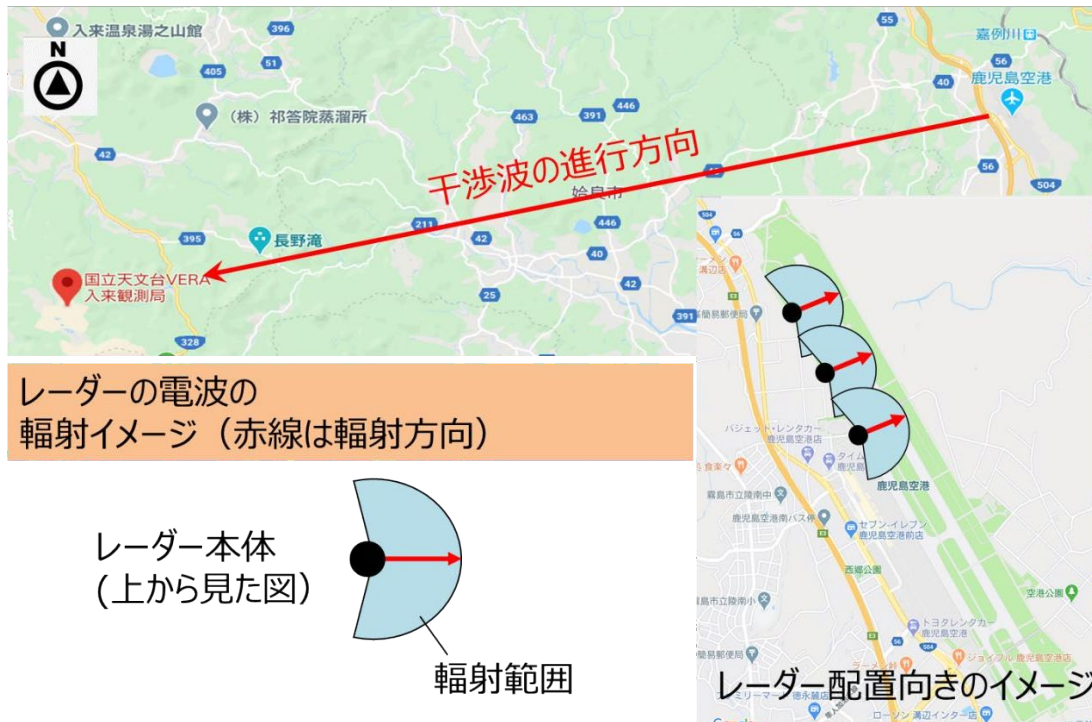


図 49 鹿児島空港でのレーダー設置例

なお、航空機の機体反射に関しては、空港の航空ダイヤ等を参照し、航空機が電波の放射範囲内に存在するときは、放射を停止する出力制御機能を設け回避することができる。

## 6.2 地球探査衛星業務(受動及び能動)との共用検討

### 6.2.1 地球探査衛星業務(受動)との共用検討

共用検討の対象となる人工衛星は、2023 年度に打上げが予定されている温室効果ガス・水循環観測技術衛星 (GOSAT-GW) であり、搭載されている受動センサーは AMSR3 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 3) である。

地球探査衛星業務 (受動) については、2012 年に打ち上げられ、運用中である水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) という人工衛星に搭載された受動センサーである AMSR2 もあり、これは、86-92GHz を利用する現行の受動センサーの中では、最も干渉を受けやすいセンサーであるが、GOSAT-GW は、GCOM-W よりも軌道高度が低くなるため、AMSR3 は AMSR2 と比較してより干渉を受けやすくなることから、GOSAT-GW の AMSR3 を共用検討の対象として採用することとした。

地球探査衛星業務 (受動) と空港 FOD レーダーとの共用検討を行うにあたり、衛星の軌道高度と地上のある地点の仰角が与えられた場合のスラントレンジ (地上のある地点から衛星までの距離) は、数式 2 にて計算できる。

数式 2 においては、 $h$  は軌道高度 (m)  $\theta$  は仰角 (deg)  $r$  は地球半径 (m) であるため、AMSR3 を共用検討の対象とする場合、GOSAT-GW の軌道高度は 666km、AMSR3 は地上から見て仰角 35deg の方向にあり、そこから観測を行っているため、それぞれの値は、 $h=666000\text{m}$ 、 $\theta=35\text{deg}$  又は  $0\text{deg}$  (GOSAT-GW が空港 FOD レーダーの設置場所をちょうど観測している場合又は空港 FOD レーダーから見て GOSAT-GW が水平方向にある場合)  $r=6378137\text{m}$  である。

数式 2 スラントレンジの簡易近似式

$$d = \sqrt{(r+h)^2 + r^2 - 2(r+h)r \sin\left\{\theta + \sin^{-1}\left(\frac{r}{r+h} \cos \theta\right)\right\}}$$

結果として、 $\theta=35\text{deg}$  のときは  $d=1066\text{km}$ 、 $\theta=0\text{deg}$  のときは  $d=2990\text{km}$  となる。

図 50 に、人工衛星 (GOSAT-GW) の仰角と空港 FOD レーダーの位置関係を示す。GOSAT-GW に搭載された受動センサーである AMSR3 は、地上から見て仰角 35deg の方向で地球からの電波を受信するため、仰角 35deg 方向が AMSR3 のメインローブとなる。空港 FOD レーダーは、滑走路方向に向かって発射されるため、仰角 35deg 方向はサイドローブ、 $0\text{deg}$  方向はメインローブとなる。

そのため、①は AMSR3 のメインローブと空港 FOD レーダーのサイドローブの組み合わせ、②は AMSR3 のサイドローブと空港 FOD レーダーのメインローブの組み合わせ、③は AMSR3 のサイドローブと空港 FOD レーダーのサイドローブの組み合わせとなっている。

これらのうち、空港 FOD レーダーから AMSR3 への干渉が最も大きくなるのは①であるため、最悪ケースとして①の場合のみを検討することとする。

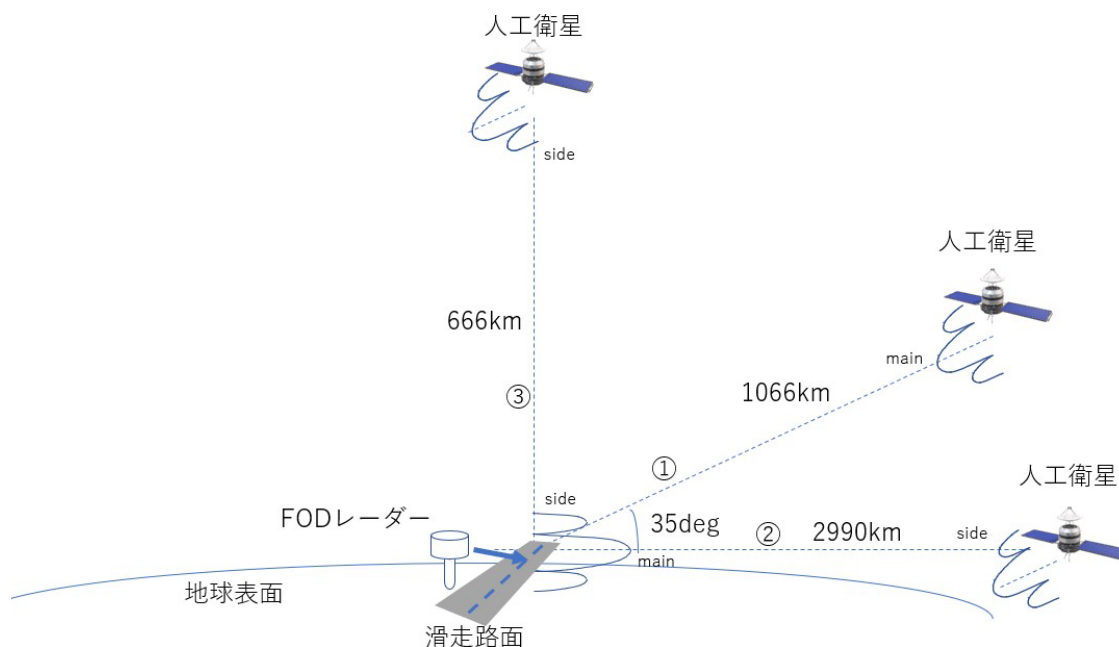


図 50 人工衛星 (GOSAT-GW) の仰角と空港 FOD レーダーの位置関係

AMSR3 は、地上から見て仰角 35deg の方向にあり、そこから地球を観測しているが、その際の瞬時可視範囲は、5km×3km となっている。我が国において、滑走路が最も密に設置されているのは、東京国際空港であると考えられるため、東京国際空港を例にとり、瞬時可視範囲と空港の関係を図 51に示す。同図に示すように、今後滑走路が増設され、最大 6 滑走路になるとしても、瞬時可視範囲内にさらに滑走路が入ってくる可能性は極めて低いものと想定されるため、瞬時可視範囲内には最大で 4 滑走路が入ることを考慮すれば十分である。



図 51 東京国際空港における AMSR3 の瞬時可視範囲

図 52に、地球探査衛星業務（受動）である AMSR3（仰角 35deg）と空港 FOD レーダーとの共用検討モデルを示す。最悪ケースとなる仰角 35deg の場合のみを示しているが、この場合、干渉を与えるのは、直接波（空港 FOD レーダーから発射され、直接 AMSR3 に到達する電波）及び滑走路面反射波（空港 FOD レーダーから発射され、滑走路面で反射して AMSR3 に到達する電波）が想定される場所、その各々の状況について図示している。

滑走路面反射波の電力については、「3.2 滑走路面反射電力測定」で示されている、成田国際空港における実証実験結果をもとに算定している。「3.2.4 滑走路面反射測定結果」によると、基準からの高さが 4m から 12m の間では、2dB 減衰するという結果が提示されている。また、「3.2.4 滑走路面反射測定結果」のレーダーD の位置における仰角 35deg 方向の滑走路面反射波の高さは、257m と算定される。「3.2.4 滑走路面反射測定結果」の結果をもとに、滑走路面反射波の電力が、基準からの高さに比例して減衰するものと考え、基準からの高さが 257m の場合、滑走路面反射波の電力は、基準からの高さ 4m から 64dB 減衰することが計算でき、これが図 52 に示されている。

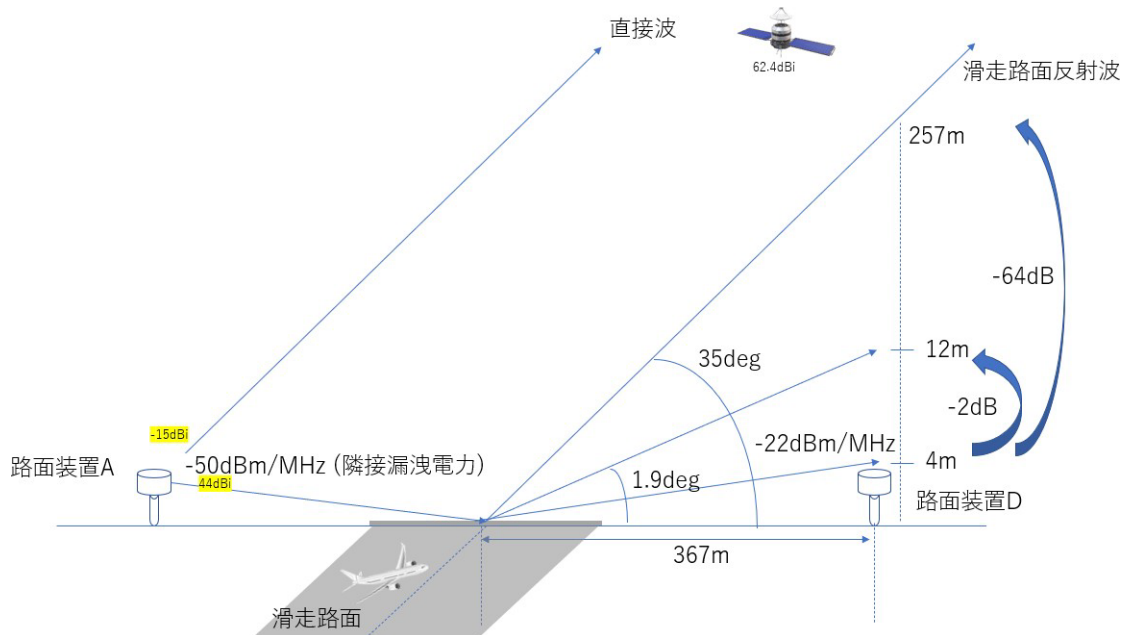


図 52 AMSR3 (仰角 35deg) と空港 FOD レーダーとの共用検討モデル

上記の共用検討モデルを用いて共用検討を行った結果を表 6 に示す。表では、直接波による干渉電力及び滑走路面反射波による干渉電力を独立に算出し、合算して総干渉電力を算定する方法をとった。

「3.2.5 レーダー出力信号 (FMCW 方式の CW 信号) の実測」の結果、CW から 1MHz 離れると -70dBc/MHz の電力が漏れていることが判明しているため、空港 FOD レーダーのもともとの送信電力が 100mW つまり 20dBm であることから、地球探査衛星業務 (受動) は、空港 FOD レーダーの隣接帯域で運用されることを踏まえ、隣接帯域への送信電力密度を計算すると、-50dBm/MHz となる。

上記により、空港 FOD レーダー 1 台当たりについて、直接波の送信電力密度は -50dBm/MHz であり、滑走路面反射波に関しては、水平に輻射した電力から 22dB 減衰し、かつ仰角 35deg 方向の高さ 257m においては、さらにここから 64dB 減衰するため、仰角 35deg 方向への滑走路面反射波の送信電力密度は、 $-50-22-64=-136$ dBm/MHz となる。

また、前述のとおり、AMSR3 の瞬時可視範囲内に入るのは 4 滑走路であり、かつこれらの滑走路の両側から、空港 FOD レーダーが発射されるため、直接波による干渉と、滑走路面反射波による干渉のそれぞれについて、干渉を発生させる対象となる、空港 FOD レーダーの数を算定すると、いずれの場合も、 $48 \times 4=192$  台となる。これを用いると、瞬時可視範囲内の全ての空港 FOD レーダーからの直接波及び滑走路面反射波の送信電力密度が算定できる。

上記の算定結果と、空港 FOD レーダーの送信アンテナ利得、数式 2 により、空港 FOD レーダーと人工衛星 (GOSAT-GW) の距離を計算した結果、得られる距離 1066km から算定される、ITU-R 勧告の P. 525-3 に基づく自由空間伝搬損失及び P. 676-12 に基づく大気中ガス



による損失、AMSR3 の受信アンテナ利得 62.4dBi により、AMSR3 が受信する直接波及び滑走路面反射波からの干渉電力密度を算定する。

その結果、AMSR3 が受信する直接波からの干渉電力密度は-172.16dBm/MHz(表 6 の 4 列目)、滑走路面反射波からの干渉電力密度は-199.16dBm/MHz(表 6 の 5 列目)であるため、AMSR3 が受信する全ての干渉電力密度を算定すると、-172.15dBm/MHz(表 6 の 6 列目)となった。一方で、受動センサーの干渉許容基準を定めた ITU-R 勧告のRS. 2017 に規定されている干渉許容電力密度は-159dBm/MHz であり、AMSR3 が受信する干渉電力密度は、この干渉許容電力密度を下回ることから、結果として、共用可能であることが示された。

参考までに、空港 FOD レーダー数が 6 滑走路相当の  $48 \times 6 = 288$  台になった場合の結果を表7に示す。この条件であっても、共用可能であることが示された。

表 6 地球探査衛星業務（受動）との干渉検討結果

	項目	Unit	地球探査衛星業務(受動) [直接波] (86-92GHz) <仰角35度>	地球探査衛星業務(受動) [滑走路面] 反射波] (86-92GHz) <仰角35度>	地球探査衛星業務(受動) [合計] (86-92GHz) <仰角35度>
Radar (Tx)	送信電力	mW	100	100	----
	隣接チャンネル送信電力密度	dBm/MHz	-50	-136	----
	検討対象台数	台	192	192	----
		dB	22.83	22.83	----
	対象周波数	GHz	86-92	86-92	----
	中心周波数	GHz	89	89	----
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	-15	44	----
帯域外輻射電力密度	dBm/MHz	-42.17	-69.17	----	
伝搬路 (損失)	Radar-衛星距離	km	1066	1066	----
	自由空間伝搬損失 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	191.94	191.94	----
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 )	dB	0.45	0.45	----
人工衛星 (RX)	使用周波数 (L8)		87.5-90.5GHz		----
	アンテナ利得	dBi	62.4	62.4	----
	ビーム幅 (3dB)	degree	0.15	0.15	----
	周期	days	3		----
	1日の周回回数	回/day	14.6666		----
	人工衛星速度	km/s	6.802680726		----
	受信電力密度	dBm/MHz	-172.16	-199.16	-172.15
	干渉許容電力密度	dBW/100MHz	-169	-169	-169
	干渉許容電力密度	dBm/100MHz	-139	-139	-139
干渉許容電力密度	dBm/MHz	-159	-159	-159	
マージン	----	dB	13.16	40.16	13.15

表 7 地球探査衛星業務（受動）との干渉検討結果（参考）

	項目	Unit	地球探査衛星業務(受動) [直接波] (86-92GHz) <仰角35度>	地球探査衛星業務(受動)[滑走路面] 反射波] (86-92GHz) <仰角35度>	地球探査衛星業務(受動) [合計] (86-92GHz) <仰角35度>
Radar (Tx)	送信電力	mW	100	100	----
	隣接チャンネル送信電力密度	dBm/MHz	-50	-136	----
	検討対象台数	台	288	288	----
		dB	24.59	24.59	----
	対象周波数	GHz	86-92	86-92	----
	中心周波数	GHz	89	89	----
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dB <sub>i</sub>	-15	44	----
帯域外輻射電力密度	dBm/MHz	-40.41	-67.41	----	
伝搬路(損失)	Radar-衛星距離	km	1066	1066	----
	自由空間伝搬損失 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	191.94	191.94	----
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12)	dB	0.45	0.45	----
人工衛星 (RX)	使用周波数 (L8)		87.5-90.5GHz		----
	アンテナ利得	dB <sub>i</sub>	62.4	62.4	----
	ビーム幅 (3dB)	degree	0.15	0.15	----
	周期	days	16		----
	1日の周回回数	回/day	16.24506218		----
	人工衛星速度	km/s	7.52		----
	受信電力密度	dBm/MHz	-170.40	-197.40	-170.39
	干渉許容電力密度	dBW/100MHz	-169	-169	-169
	干渉許容電力密度	dBm/100MHz	-139	-139	-139
干渉許容電力密度	dBm/MHz	-159	-159	-159	
マージン	----	dB	11.40	38.40	11.39

## 6.2.2 地球探査衛星業務(能動)との共用検討

### (1) 空港FOD レーダーから地球探査衛星業務(能動)への干渉

共用検討の対象となる人工衛星は、2022年度に打上げが予定されている雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE: Earth Clouds Aerosols and Profiling RADAR) であり、搭載されている能動センサーは CPR (Cloud Profiling RADAR) である。

CPR の瞬時可視範囲は  $750\text{m} \times 750\text{m}$  であるが、CPR には、観測データを  $10\text{km}$  にわたって積分する観測モードがあり、これが最も干渉を受けるケースであるため、対象となる観測範囲を  $750\text{m} \times 10\text{km}$  として検討を行う。

地球探査衛星業務(受動)との共用検討と同様に、東京国際空港を例にとり、観測範囲と空港の関係を図 53に示す。ここでは、今後滑走路が増設され、最大6滑走路になる場合に、観測範囲に入る滑走路の数が最大となるように建設されるケースを想定した。観測範囲に入る滑走路の数が最大となるのは、図 53のとおり、2滑走路が観測範囲の長辺と平行になることにより、全て観測範囲に入り、さらに2滑走路が一部ずつ観測範囲に入る場合である

(図 53では、2滑走路の一部として約3分の1ずつが観測範囲に入っている。)

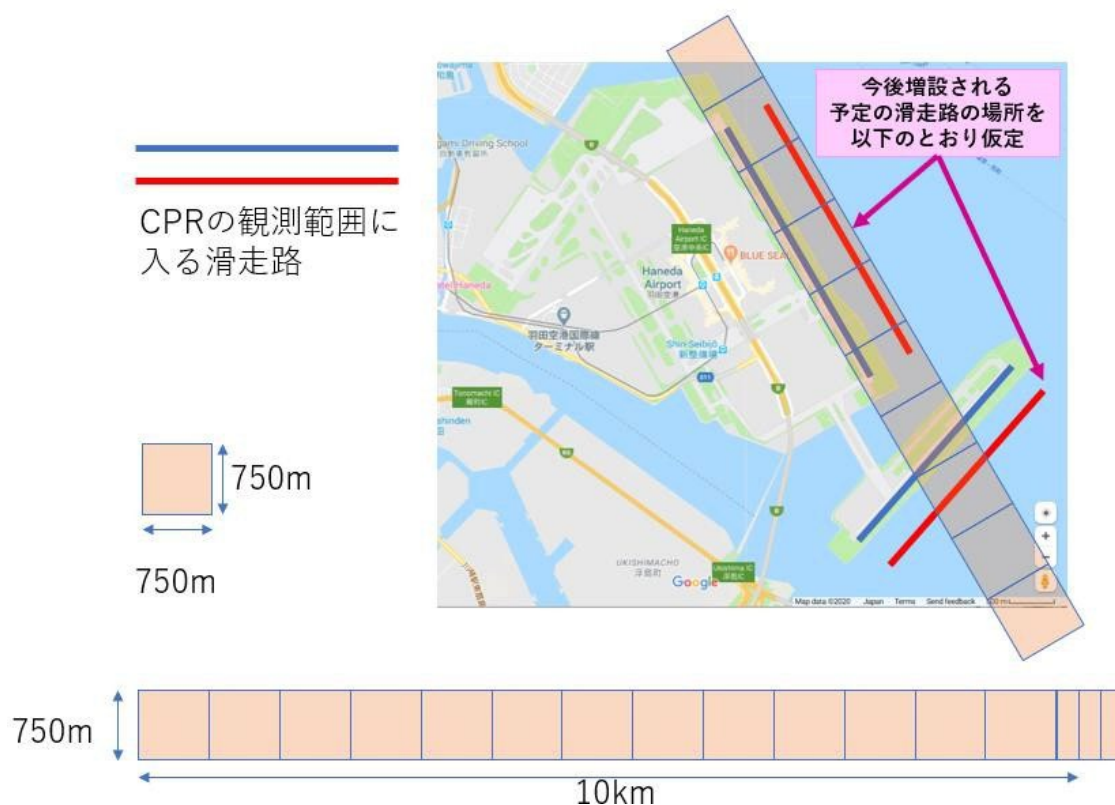


図 53 東京国際空港における CPR の観測範囲

図 54に、地球探査衛星業務（能動）である CPR（仰角 90deg）と空港 FOD レーダーとの共用検討モデルを示す。CPR は直下を観測するため、空港 FOD レーダーの真上に CPR があり、CPR のメインローブと空港 FOD レーダーのサイドローブの組み合わせとなるのが最悪ケースであるため、この最悪ケースとなる仰角 90deg の場合のみを示している。この場合、干渉を与えるのは、直接波（空港 FOD レーダーから発射され、直接 CPR に到達する電波）のみとなり、滑走路面反射波（空港 FOD レーダーから発射され、滑走路面で反射する電波）は、CPR が位置する仰角 90deg 方向には到達しないことが想定されるところ、その各々の状況について図示している。

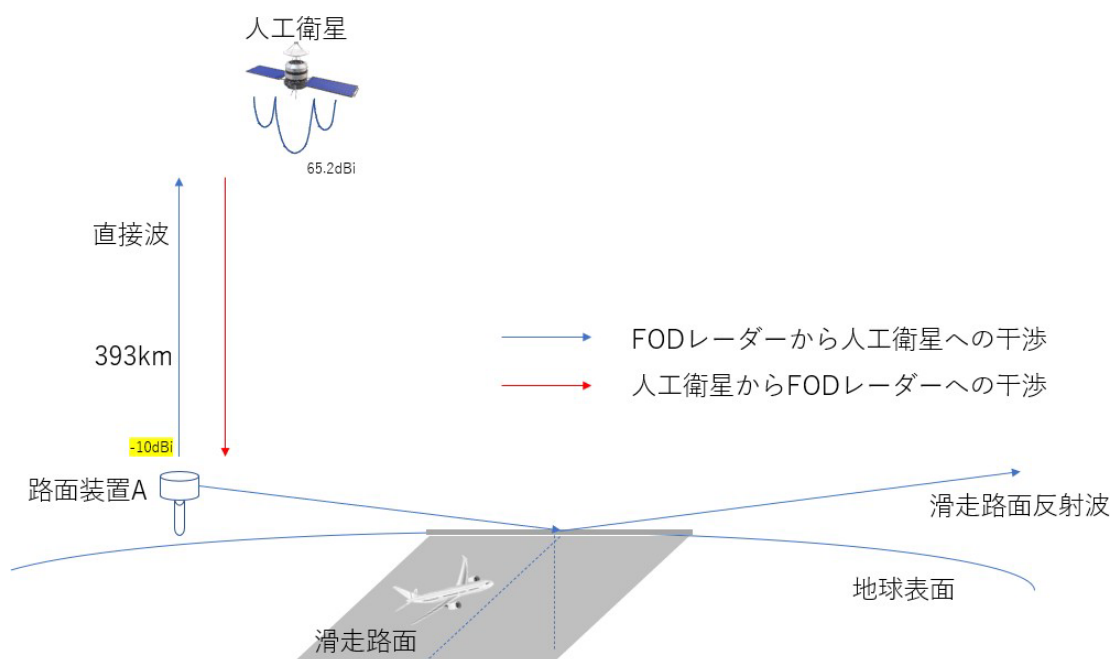


図 54 CPR（仰角 90deg）と空港 FOD レーダーとの共用検討モデル

上記の共用検討モデルを用いて、94-94.1GHz を空港 FOD レーダーで使用した場合について、共用検討を行った結果を表 8に示す。空港 FOD レーダーの送信電力が 100mW つまり20dBm であることから、空港 FOD レーダー1 台当たりについて、直接波の送信電力は 20dBm である。

また、前述のとおり、CPR の観測範囲に入るのは、2 滑走路の全てと、さらに 2 滑走路の3 分の 1 ずつであり、かつこれらの滑走路の両側から、空港 FOD レーダーが発射されるため、直接波による干渉を発生させる対象となる、空港 FOD レーダーの数を算定すると、 $48 \times 2 + (48/3) \times 2 = 128$  台となる。これを用いると、観測範囲内の全ての空港 FOD レーダーからの直接波の送信電力が算定できる。

上記の算定結果と、空港 FOD レーダーの送信アンテナ利得、空港 FOD レーダーと人工衛

星 (EarthCARE) の距離が衛星高度と同じ 393km であることから算定される、ITU-R 勧告の P. 525-3 に基づく自由空間伝搬損失及び P. 676-12 に基づく大気中ガスによる損失、CPR の受信アンテナ利得 65.2dBi により、CPR が受信する直接波からの干渉電力を算定する。

その結果、CPR が受信する直接波からの干渉電力は-87.74dBm(表 8)であり、これが CPR の受信する全ての干渉電力となる。一方で、能動センサーの干渉許容基準を定めた ITU-R 勧告の RS. 1166-4 に規定されている干渉許容電力をもとに、既存の雲プロファイリングレーダーと比較して、CPR の性能が向上したこと、CPR では 10km にわたってデータを積分する観測モードがあることを勘案した結果、CPR の干渉許容電力は-128dBm となった。CPR が受信する干渉電力は、この干渉許容電力を上回ることから、結果として、共用ができないことが示された。

そこで、空港 FOD レーダーでは、CPR が運用される 94-94.1GHz を使用しないというチャンネル回避策を適用することとして、共用検討を行った結果について、表 9 に示す。

この場合には、CPR が使用する 94-94.1GHz は、空港 FOD レーダーが使用する周波数の帯域外となることから、「6.2.1 地球探査衛星業務(受動)との共用検討」と同様に、空港 FOD レーダーの送信電力密度は、隣接帯域への送信電力密度である-50dBm/MHz を適用可能であるため、空港 FOD レーダー1 台当たりについて、直接波の送信電力密度は-50dBm/MHz となる。

これをもとに、CPR が受信する直接波の干渉電力密度を算定すると、-157.74dBm/MHz であり、これが CPR の受信する全ての干渉電力密度となる。一方で、前述のとおり、CPR の干渉許容電力は-128dBm であり、その受信帯域幅は 300kHz (0.3MHz) であるため、干渉許容電力密度は-128dBm/0.3MHz、すなわち-122.77dBm/MHz となる。よって、CPR が受信する干渉電力密度は、この干渉許容電力密度を下回るため、チャンネル回避策を適用した場合には、共用可能であることが示された。

参考までに、空港 FOD レーダー数が 6 滑走路相当の 48x6=288 台になった場合の結果を表 10 に示す。この条件であっても、共用可能であることが示された。

表 8 地球探査衛星業務（能動）との干渉検討結果（チャンネル内）

	項目	Unit	地球探査衛星業務（能動） [直接波] (94-94.1GHz) <仰角90度>
Radar (Tx)	送信電力	mW	100
		dBm	20
	検討対象台数	台	128
		dB	21.07
	中心周波数	GHz	94.05
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dB <i>i</i>	-10
帯域内輻射電力	dBm	31.07	
伝搬路 (損失)	Radar-衛星距離	km	393
	自由空間伝搬損失 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	183.76
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 )	dB	0.26
人工衛星 (RX)	使用周波数 (CPR-L2)		94.0465- 94.0535GHz
	アンテナ利得	dB <i>i</i>	65.2
	ビーム幅 (3dB)	degree	0.095
	周期	days	25
	1日の周回回数	回/day	16.60926091
	人工衛星速度	km/s	7.69
	受信電力	dBm	-87.74
	干渉許容電力	dBW	-158
dBm		-128	
マージン	----	dB	-40.26

表 9 地球探査衛星業務（能動）との干渉検討結果（チャンネル回避）

	項目	Unit	地球探査衛星業務（能動） [直接波] (94-94.1GHz) <仰角90度>
Radar (Tx)	送信電力	mW	100
	隣接チャンネル送信電力密度	dBm/MHz	-50
	検討対象台数	台	128
		dB	21.07
	中心周波数	GHz	94.05
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	-10
	帯域外輻射電力密度	dBm/MHz	-38.93
伝搬路 (損失)	Radar-衛星距離	km	393
	自由空間伝搬損失 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	183.76
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 )	dB	0.26
人工衛星 (RX)	使用周波数 (CPR-L2)		94.0465- 94.0535GHz
	アンテナ利得	dBi	65.2
	ビーム幅 (3dB)	degree	0.095
	周期	days	25
	1日の周回回数	回/day	16.60926091
	人工衛星速度	km/s	7.69
	受信電力密度	dBm/MHz	-157.74
	干渉許容電力密度	dBW/0.3MHz	-158
		dBm/0.3MHz	-128
干渉許容電力密度	dBm/MHz	-122.77	
マージン	----	dB	34.97



表 10 地球探査衛星業務（能動）との干渉検討結果（チャンネル回避）（参考）

	項目	Unit	地球探査衛星業務（能動） [直接波] (94-94.1GHz) <仰角90度>
Radar (Tx)	送信電力	mW	100
	隣接チャンネル送信電力密度	dBm/MHz	-50
	検討対象台数	台	288
		dB	24.59
	中心周波数	GHz	94.05
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	-10
	帯域外輻射電力密度	dBm/MHz	-35.41
伝搬路 (損失)	Radar-衛星距離	km	393
	自由空間伝搬損失 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	183.76
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 )	dB	0.26
人工衛星 (RX)	使用周波数 (CPR-L2)		94.0465- 94.0535GHz
	アンテナ利得	dBi	65.2
	ビーム幅 (3dB)	degree	0.095
	周期	days	25
	1日の周回回数	回/day	16.60926091
	人工衛星速度	km/s	7.69
	受信電力密度	dBm/MHz	-154.22
	干渉許容電力密度	dBW/0.3MHz	-158
		dBm/0.3MHz	-128
干渉許容電力密度	dBm/MHz	-122.77	
マージン	----	dB	31.45

(2) 地球探査衛星業務（能動）から空港 FOD レーダーへの干渉

これまで、空港 FOD レーダーが与干渉となる場合について、前述のとおり、電波天文業務、地球探査衛星業務（受動）及び（能動）との間の共用検討を行ってきたが、地球探査衛星業務（能動）からは、94-94.1GHz において、逆に空港 FOD レーダーが干渉を受ける可能性がある。

ただし、(1)で述べたように、空港 FOD レーダーでは、地球探査衛星業務（能動）である CPR が運用される 94-94.1GHz を使用しないというチャンネル回避策を適用することとして共用検討を行うと、結果は表 11のとおりとなる。

地球探査衛星業務（能動）である CPR については、送信電力が 1430W である。一方で、無線設備規則の別表第三号により、一次レーダーのスプリアス領域における不要発射の強度の許容値は、空中線電力が 50W を超えるものについては、基本周波数の尖頭電力より 60dB低い値とするものと規定されている。さらに総務省告示第 1232 号により、非符号化パルス変調の一次レーダーの場合には、参照帯域幅は 1/パルス幅 ( $\mu s$ ) となっている。これらを勘案すると、CPR においては、帯域外送信電力は最大で 1.55dBm、その参照帯域幅は 0.3MHzとなるため、帯域外送信電力密度は最大で 6.78dBm/MHz となり、CPR の送信アンテナ利得65.2dBi を入れると、CPR から帯域外に送信される eirp 密度は、最大で 71.98dBm/MHz となる。

CPR は真下を観測するため、空港 FOD レーダーが最も大きな干渉を受けるのは、CPR が真上に来るケースである。この場合、空港 FOD レーダーは上空からの電力を受信することから、空港 FOD レーダーの受信アンテナ利得は 0dBi として検討を行う。

また、CPR の CPR の瞬時可視範囲である 750m×750m ではあるが、CPR の 3dB ビーム幅 0.095° を考慮すると、空港 FOD レーダー1 台に対して検討すれば十分である。

これらを踏まえ、CPR から空港 FOD レーダーが受信する干渉電力密度を算定すると、-112.03dBm/MHz となるが、空港 FOD レーダーの干渉許容電力密度は-90dBm/MHz であるため、これを下回ることとなり、共用可能であることが示された。

表 11 地球探査衛星業務(能動)から空港 FOD レーダーへの干渉検討結果

	項目	Unit	地球探査衛星業務(能動) [直接波] (94-94.1GHz) <仰角90度>
人工衛星 (Tx)	送信電力	W	1430
		dBm	61.55336037
	中心周波数	GHz	94.05
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dB <sub>i</sub>	65.2
	帯域外送信電力密度	dBm/0.3MHz	1.55
		dBm/MHz	6.78
帯域外送信電力密度 (eirp)	dBm/MHz	71.98	
伝搬路 (損失)	Radar-衛星距離	km	393
	自由空間伝搬損失 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	183.76
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 )	dB	0.26
Radar (Tx)	アンテナ利得	dB <sub>i</sub>	0
	検討対象台数	----	1
		dB	0
	受信電力密度	dBm/MHz	-112.03
干渉許容電力密度	dBm/MHz	-90.00	
マージン	----	dB	22.03

### 6.3 80GHz 帯高速無線伝送システムとの干渉検討

情報通信審議会 情報通信技術分科会 移動通信システム委員会において、80GHz 高速線伝送システムについての報告によれば、受信感度は $-88.5\text{dBm/MHz}$  と規定されている。表 2の空港 FOD レーダーの仕様である出力電力  $20\text{dBm}$  と表 3の隣接周波数におけるノイズレベルである $-70\text{dBc}$  (数 dB マージンを確保し $-70\text{dBc}$  とする) から、空港 FOD レーダーの隣接チャンネル電力は $-50\text{dBm}$  となり、これを $-50\text{dBm/MHz}$  と置き換えても、差分は  $38.5\text{dB}$  である。86GHz において、数式 1を適用し、 $1\text{m}$  離隔したと仮定しても、 $71\text{dB}$  の損失となるため、 $-50-71=-121\text{dBm}$  となり、80GHz 高速無線伝送システムの受信感度以下になるため、共用可能である。

#### 6.4 空港 FOD レーダー同士の干渉検討

空港 FOD レーダー同士の干渉には自由空間伝搬損失の数式で計算可能である。ただし、国内すべての空港に設置できることも考えられるようにすることと、将来的に見て 1 空港あたり滑走路 6 本となる可能性もあることから、最短離隔距離の空港及び東京国際空港-成田国際空港間等について検討した。ある空港に設置された与干渉側の全空港 FOD レーダーの電力が、隣接する空港に設置された被干渉側の空港 FOD レーダーの 1 台に集中して干渉を与える場合が最悪条件として検討した。

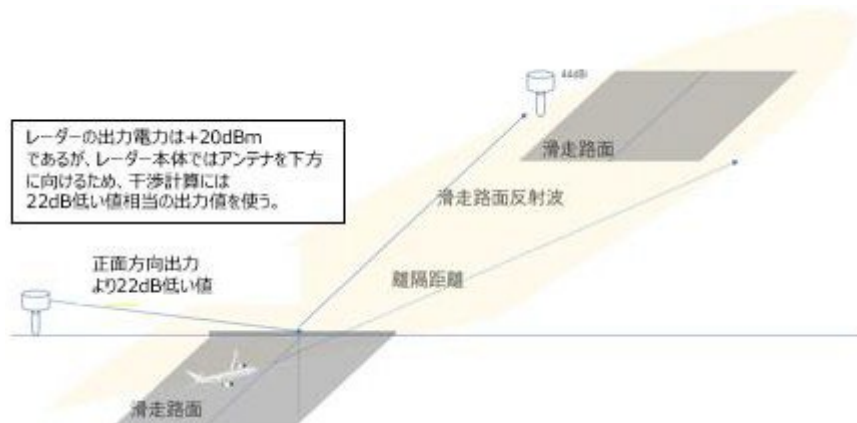


図 55 空港 FOD レーダー同士の干渉モデル

表 12に空港 FOD レーダー同士の干渉検討結果を示す。空港間の最短距離は、南大東空港と北大東空港間の 7.2km であり、この離隔距離で同一周波数を用いてシステム構築すると、干渉許容電力に対する受信電力のマーヅンが-40.74dB となり干渉する結果となる。ただし、異なる周波数帯を用いるなど、使用する適切なチャネル配置により干渉を回避できる場合には、マーヅンは 7.26dB となりシステム間干渉はなくなる。

1 空港に6 滑走路を想定した場合で、かつ同一周波数帯を用いてシステムを構築し、地形的に空港間の回折損失がない場合においては、離隔距離を 78km 確保することによって、システム間干渉が回避できる。同様の位置関係で、異なる周波数帯を用いた場合には、空港間の離隔距離を 8km にまで接近可能となる。

参考として、東京国際空港-成田国際空港間について同一周波数システムとして検討した。この場合、両空港間の位置が分かっているため、回折損失 26.12dB(付属資料 24 参照)が考慮でき、両者の離隔距離 59km でシステムの共用が可能となった。

上記で示したように、距離が比較的近い空港同士で空港 FOD レーダーを設置する場合、使用するチャネル配置や遮蔽板等によるシールド、設置台数の制限等により、システム間干渉の回避は可能であり、干渉を回避するためにはこれらの措置が必要となるものと考えられる。

表12 空港 FOD レーダー同士の干渉検討結果

項目	Unit	南大東島～北大東島 同一周波数帯	南大東島～北大東島 異なる周波数帯	最大想定滑走路数～ 同一周波数	最大想定滑走路数～ 異なる周波数	東京国際空港 ～成田国際空港 同一周波数	備考
送信電力	dBm	-2.00	-50.00	-2.00	-50.00	-2.00	
設置台数	台	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	滑走路あたり最大設置数
滑走路数	----	1.00	1.00	6.00	6.00	6.00	国交省様情報による。
合計設置台数	台	48.00	48.00	288.00	288.00	288.00	
	dB	16.81	16.81	24.59	24.59	24.59	
対象周波数	GHz	92-100	92-100	92-100	92-100	92-100	
中心周波数	GHz	96	96	96	96	96	
アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	44	44	44	44	44	
帯域内輻射電力	dBm	58.81	10.81	66.59	18.59	66.59	eirp
システム間距離	km	7.2	7.2	78	8	59	南北大東島間：7.2km 成田-羽田間：59km
自由空間伝搬損 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	149.19	149.19	169.89	150.11	167.46	
大気中ガスによる損 失(itu-r p.676-12 p.23 fig.10)	dB/km	2.88	2.88	31.20	3.20	23.60	・0.4dB/km @ 96GHz
回折損失 (itu-r p.526-14 p.18 eq.31 or p.452-16 p.10 eq.13)	dB	0.00	0.00	0.00	0.00	26.12	国土地理院ホームページによる
アンテナ利得 (itu-r ra.769)	dBi	44.00	44.00	44.00	44.00	44.00	
到達受信電力	dBm	-49.26	-97.26	-90.49	-90.71	-106.59	
干渉許容電力	dBm	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	
マージン	dB	-40.74	7.26	0.49	0.71	16.59	

なお、同様に、空港 FOD レーダーを設置するにあたり、地形的に空港間の回折損失がない場合において、干渉を与えない空港間同士の離隔距離を計算結果について、同一周波数同士の場合を表 13 に、異なる周波数同士の場合を表 14 に示す。

表 13 同一周波数帯を用いた場合の空港間離隔距離

	項目	Unit	①	②	③	④	⑤	⑥	備考
Radar (TX) @空港	送信電力	dBm	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	
	設置台数	台	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	滑走路あたり最大設置数
	滑走路数	-----	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	国交省様情報による。
	合計設置台数	台	48.00	96.00	144.00	192.00	240.00	288.00	
		dB	16.81	19.82	21.58	22.83	23.80	24.59	
	対象周波数	GHz	92-100	92-100	92-100	92-100	92-100	92-100	
	中心周波数	GHz	96	96	96	96	96	96	
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	44	44	44	44	44	44	
帯域内輻射電力	dBm	58.81	61.82	63.58	64.83	65.80	66.59	eirp	
伝搬路(損失)	システム間距離	km	63	68	72	74	76	78	
	自由空間伝搬損 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	168.03	168.70	169.19	169.43	169.66	169.89	
	大気中ガスによる損失 (itu-r p.676-12 p.23 fig.10)	dB/km	25.20	27.20	28.80	29.60	30.40	31.20	・0.4dB/km @ 96GHz
	回折損失 (itu-r p.526-14 p.18 eq.31 or p.452-16 p.10 eq.13)	dB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
受信システム	アンテナ利得 (itu-r ra.769)	dBi	44.00	44.00	44.00	44.00	44.00	44.00	
	到達受信電力	dBm	-90.42	-90.07	-90.41	-90.20	-90.26	-90.49	
	干渉許容電力	dBm	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	
	マージン	dB	0.42	0.07	0.41	0.20	0.26	0.49	

① は、同一周波数帯を用いた場合で、滑走路を 1 有する空港と隣接する空港間距離は 63km の離隔を確保すること。

② は、同一周波数帯を用いた場合で、滑走路を 2 有する空港と隣接する空港間距離は 68km の離隔を確保すること。

③ は、同一周波数帯を用いた場合で、滑走路を 3 有する空港と隣接する空港間距離は 72km の離隔を確保すること。

④は、同一周波数帯を用いた場合で、滑走路を 4 有する空港と隣接する空港間距離は 74km の離隔を確保すること。

⑤は、同一周波数帯を用いた場合で、滑走路を 5 有する空港と隣接する空港間距離は 76km の離隔を確保すること。

⑥は、同一周波数帯を用いた場合で、滑走路を 6 有する空港と隣接する空港間距離は 78km の離隔を確保すること。

表 14 異なる周波数帯を用いた場合の空港間離隔距離

	項目	Unit	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	備考
Radar (TX) @ 空港	送信電力	dBm	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	
	設置台数	台	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	48.00	滑走路あたり最大設置数
	滑走路数	-----	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	国交省様情報による。
	合計設置台数	台	48.00	96.00	144.00	192.00	240.00	288.00	
		dB	16.81	19.82	21.58	22.83	23.80	24.59	
	対象周波数	GHz	92-100	92-100	92-100	92-100	92-100	92-100	
	中心周波数	GHz	96	96	96	96	96	96	
	アンテナ利得 (itu-r rs.1813-1 pp.1-2)	dBi	44	44	44	44	44	44	
帯域内輻射電力	dBm	10.81	13.82	15.58	16.83	17.80	18.59	eirp	
伝搬路(損失)	システム間距離	km	3.7	5	5.8	6.5	7.1	7.6	
	自由空間伝搬損 (itu-r p.525-3 p.2 eq.4)	dB	143.41	146.02	147.31	148.30	149.07	149.66	
	大気中ガスによる損 失(itu-r p.676-12 p.23 fig.10)	dB/km	1.48	2.00	2.32	2.60	2.84	3.04	・0.4dB/km @ 96GHz
	回折損失 (itu-r p.526-14 p.18 eq.31 or p.452-16 p.10 eq.13)	dB	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
受信システム	アンテナ利得 (itu-r ra.769)	dBi	44.00	44.00	44.00	44.00	44.00	44.00	
	到達受信電力	dBm	-90.08	-90.20	-90.05	-90.07	-90.11	-90.11	
	干渉許容電力	dBm	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	-90.00	
	マージン	dB	0.08	0.20	0.05	0.07	0.11	0.11	

⑦は、異なる周波数帯を用いた場合で、滑走路を1 有する空港と隣接する空港間距離は3.7kmの離隔を確保すること。

⑧は、異なる周波数帯を用いた場合で、滑走路を2 有する空港と隣接する空港間距離は5kmの離隔を確保すること。

⑨は、異なる周波数帯を用いた場合で、滑走路を3 有する空港と隣接する空港間距離は5.8kmの離隔を確保すること。

⑩は、異なる周波数帯を用いた場合で、滑走路を4 有する空港と隣接する空港間距離は6.5kmの離隔を確保すること。

⑪は、異なる周波数帯を用いた場合で、滑走路を5 有する空港と隣接する空港間距離は7.1kmの離隔を確保すること。

⑫は、異なる周波数帯を用いた場合で、滑走路を6 有する空港と隣接する空港間距離は7.6kmの離隔を確保すること。



## 第7章 提言

### 7.1 技術的条件

検討結果を踏まえて、空港滑走路における 90GHz 帯 FOD レーダーの技術的条件を次の通り整理する。

#### 7.1.1 一般条件

##### (1) 干渉検討基準

本技術基準は、同一帯域である 92GHz から 100GHz 及び隣接帯域である 81GHz から 92GHz 及び 100GHz から 109.5GHz を使用する他業務との共用検討に基づくものである。

##### (2) 周波数

92GHz から 100GHz までとすること。

ただし、94GHz から 94.1GHz までについては、地球探査衛星業務のうち能動業務を保護する観点から電力を出力しないことが必要とされる。

##### (3) 変調方式

FM-CW 変調（周波数連続変調）方式とする。

##### (4) 電波防護指針への適合

電波法施行規則第 21 条の3 を満足すること。

#### 7.1.2 無線設備の技術的条件

##### (1) 周波数の許容偏差

指定周波数帯幅によるため規定しない。

##### (2) 占有周波数帯域幅の許容値

指定周波数帯幅によるため規定しない。

##### (3) 指定周波数帯幅

最大 8,000MHz（92GHz から 100GHz まで）とする。

##### (4) 空中線電力

等価等方輻射電力によるため規定しない。

(5) 等価等方輻射電力

空港内の滑走路付近に送信点を設置した条件において、1 送信点からの実効輻射電力は 64dBm 以下となるようにすること。

(6) 空中線系

(ア) 送信空中線の絶対利得

44dBi 以下とすること。

(イ) 偏波面

直線偏波（垂直及び水平偏波）とすること。

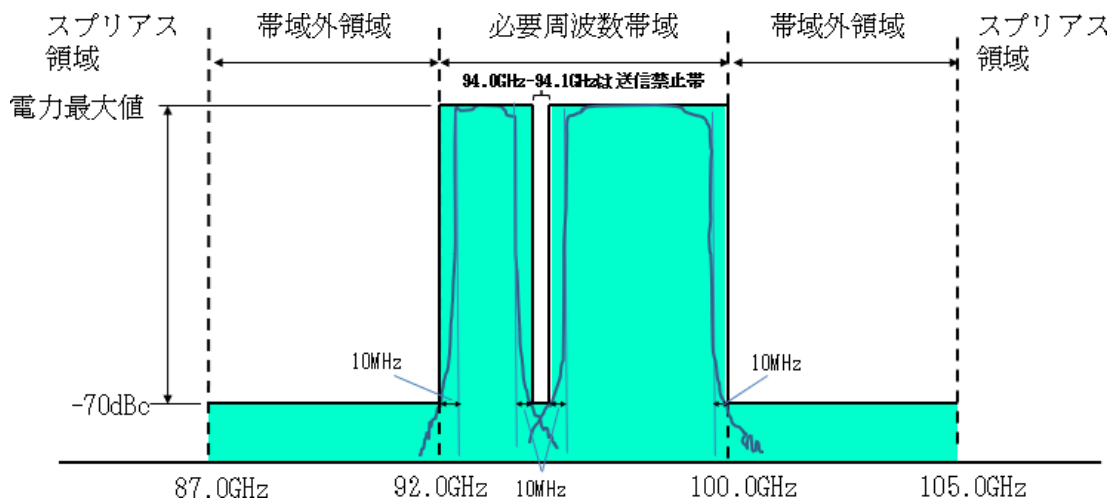
(7) 空中線電力の許容偏差

送信設備に使用する電波の空中線電力の偏差は、上限 50%、下限 50%以内であること。ただし、空中線電力を自動的に制御する機能を有する場合には、電力低減時には許容偏差の下限は適用しない。

(8) 送信スペクトラムマスク

同一帯域及び隣接帯域を使用するすべての他業務との共用検討に基づく保護の観点により、帯域外領域については、必要周波数帯域内の上限周波数及び下限周波数の電力値に対して-70dBc の電力比とする。

現状入手可能な地球探査衛星の仕様等を考慮し、94GHz から94.1GHz は送信禁止帯とする。ただし、動的な干渉回避等により地球探査衛星との周波数共用が可能となる場合にはこの限りではない。



(9) チャンネル配置

指定周波数帯域幅内におけるチャンネル配置を、以下のように規定する。

(ア) 2ch 配置

92.01GHz から93.99GHz までと94.11GHz から99.99GHz まで。

(イ) 4ch 配置

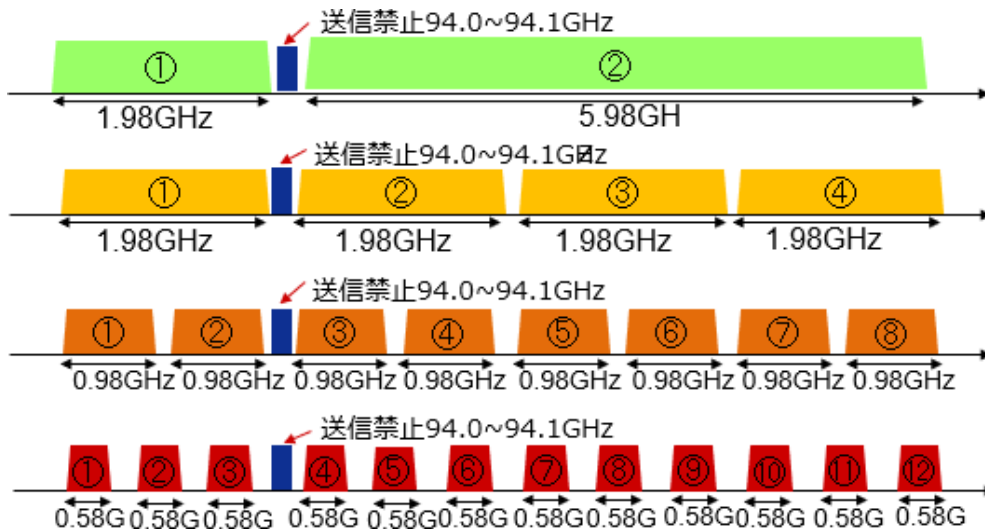
92.01GHz から93.99GHz までと、94.11GHz から95.99GHz までと、  
96.01GHz から97.99GHz までと、98.01GHz から99.99GHz まで。

(ウ) 8ch 配置

92.01GHz から92.99GHz までと、93.01GHz から93.99GHz までと、  
94.11GHz から94.99GHz までと95.01GHz から95.99GHz までと96.01GHz から  
96.99GHz までと、97.01GHz から97.99GHz までと、98.01GHz から98.99GHz までと、  
99.01GHz から99.99GHz まで。

(エ) 12ch 配置

92.01GHz から92.59GHz までと、92.71GHz から93.29GHz までと、  
93.41GHz から93.99GHz までと、94.11GHz から94.69GHz までと、94.71GHz から  
95.29GHz までと、95.31GHz から95.89GHz までと、95.91GHz から96.49GHz までと、  
96.51GHz から97.09GHz までと、97.11GHz から97.69GHz までと、97.71GHz から  
98.29GHz までと、98.31GHz から98.89GHz までと、98.91GHz から99.49GHz まで。



(10) 帯域外領域における不要発射の強度の許容値

帯域外領域とスプリアス領域において、同一の強度であるため、スプリアス領域における不要発射の強度の許容値を参照のこと。

(11) スプリアス領域における不要発射の強度の許容値

スプリアス領域における不要発射の強度は、以下のとおりとする。

空中線電力	帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値	スプリアス領域における不要発射の強度の許容値
100mW 以下	送信周波数の最大出力電力より70dB 低い値	送信周波数の最大出力電力より70dB 低い値

(12) 隣接チャンネル漏洩電力比

87GHz から92GHz までは、-70dBc 以下とする。100GHz から105GHz までは、同じく-70dBc以下とする。

### 7.1.3 測定法

(1) 周波数の偏差及び使用周波数帯域幅

許容値が指定周波数帯で規定される場合は、試験機器を占有周波数帯幅が最大となる状態に設定して、占有周波数帯幅の測定においてスペクトル分布の上限及び下限周波数が指定周波数帯内にあることをもって確認する。

使用周波数帯幅の測定は、スペクトル分布の全電力についてスペクトルアナライザ等を用いて測定し、スペクトル分布の上限及び下限の部分における電力の和が、それぞれ全電力の99%となる周波数幅を測定する。

(2) 空中線電力

空中線電力の測定については、試験機器を通常の変調状態で空中線電力が最大となる状態に設定して、空中線測定端子にて、平均電力（尖頭電力で表示する無線設備の場合は尖頭電力）を、高周波電力計等を用いて測定する。

また、連続送信波により測定することが望ましいが、バースト送信波にて測定する場合（尖頭電力で表示する無線設備の場合を除く）は、送信時間率が最大となるバースト繰り返し周期よりも十分長い期間における平均電力を測定し、その測定値に最大の送信時間率の逆数を乗じて平均電力とすることが適当である。

### (3) スプリアス発射又は不要発射の強度

帯域外領域とスプリアス領域の境界周波数を算出（ITU-R 勧告SM.1541 Annex 8）し、以下の（ア）及び（イ）によって測定を行うことが適当である。

#### （ア）帯域外領域における不要発射の強度

試験機器を無変調状態に設定して、スペクトルアナライザを用いて帯域外領域におけるスプリアス発射の平均電力を測定する。

この場合、スペクトルアナライザの分解能帯域幅は参照帯域幅を算出（ITU-R 勧告M.1177）して設定することが適当である。ただし、参照帯域幅が 1MHz を超える場合は、分解能帯域幅を 1MHz に設定して測定することも可能である。

#### （イ）スプリアス領域における不要発射の強度

試験機器を通常の変調状態に設定して、スペクトルアナライザを用いて不要発射の平均電力（バースト波にあってはバースト内の平均電力）を測定する。

この場合、スペクトルアナライザの分解能帯域幅は参照帯域幅を算出（ITU-R 勧告M.1177）して設定することが適当である。ただし、参照帯域幅が 1MHz を超える場合は、分解能帯域幅を 1MHz に設定して測定することも可能である。

スプリアス領域における不要発射の強度の測定を行う周波数範囲は、可能な限り 9kHz から 110GHz までとすることが望ましいが、30MHz から 26GHz までとすることができる。

#### （ウ）帯域外領域およびスプリアス領域における不要発射強度の測定

現状 90GHz 帯においては、平成 17 年総務省告示 1232 号にある測定手法を精度よく実施できる測定設備がないため、不要発射強度の測定は、以下に示すキャリア周波数において、変調等をかけずに電力を出力し、キャリア周波数から 10MHz 離調した周波数において、スペクトラムアナライザをサンプル設定し測定を行う。

## 7.1.4 干渉回避のための機能、設置、運用、その他の留意点

### (1) 干渉回避のための補助機能

#### （ア）送信設備に対する対策等

空港 FOD レーダーの出力による他共用システムに対する干渉を回避するため、輻射を停止する出力機能を設けること。

#### （イ）同期機能

同一空港内の複数滑走路において、空港内のすべての空港 FOD レーダーの回転同期を実施すること。

### (3) 設置等の条件

設置等にあたり、以下の条件を満足することが望まれる。

#### (ア) ビーム放射方向

空港 FOD レーダーは、そのビーム正面の放射方向が水平面より  $1^{\circ}$  以上 下方になるように設置すること。

#### (イ) 電波天文の受信設備への干渉回避

設置場所を中心として周辺半径 112km 以内に、81GHz から 109.5GHz までの周波数を受信する電波天文の受信設備がある場合には、空港 FOD レーダーから電波天文局方向を基点 ( $0^{\circ}$ ) として、水平方向に  $0^{\circ}$  から  $+80^{\circ}$  及び  $0^{\circ}$  から  $-80^{\circ}$  の方向における放射電力が  $-89.7\text{dBm}$  以下となるよう、遮蔽板を設ける等の対策を行い、電波天文の受信設備への有害干渉を回避すること。

#### (ウ) 空港間同士の干渉回避

相互に干渉がない離隔距離を考慮し、空港 FOD レーダーを設置すること。  
必要とされる離隔距離に満たない場合は、使用するチャンネル配置や遮蔽板等によるシールド、設置台数の制限等により干渉を回避すること。

#### (エ) 干渉を回避するための設置とその性能の維持

位置精度の向上や干渉回避のため、滑走路内の定位置にある目標物からの反射電力に対してキャリブレーションができるようにし、常に空港 FOD レーダー性能の維持を図ること。

キャリブレーションが不可能になった場合、アラームを出力し、空港 FOD レーダーの設置向きを調整することで、ビームの方向を保つ施策が望ましい。例えば、コンクリート柱や三角鉄塔などの極めて揺れの少ない構造物にレーダーを設置し、ビームの方向を維持する方法がある。

## 7.2 実用化・普及にむけて

### 7.2.1 空港 FOD レーダー開発の経緯

ミリ波帯を利用した新しい電波システムの実現を目指して、わが国では、空港 FOD レーダーシステムの開発が行われてきている。平成 24 年（2012 年）から 4 年間の総務省委託研究「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」で基本性能を確認した空港 FOD レーダーシステムは、委託研究の最終年度に成田国際空港 B 滑走路に 4 基のアンテナ装置と中央制御装置からなる実証システムを構築して終了した。関係機関の協力のもと、委託研究終了後も実証システムは維持され、実証試験システムの運用実績を重ねている。また、システムの更なる高度化を目的に平成 29 年度からは空港 FOD レーダーシステム第二期の委託研究である「90GHz 帯協調制御型リニアセルレーダーシステムの研究開発」を受託中である。更に、この委託研究と並行して第一期「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」の成果を海外展開するための「リニアセルレーダーシステムの海外展開を通じた周波数の国際協調利用促進に関する調査の請負」も推進中である。

### 7.2.2 ITU-R における国際標準化活動

空港 FOD レーダーシステムが利用を予定している周波数帯域（92-100GHz）は国際的に無線標定業務（Radio Location Service : 92-100GHz）及び無線航行業務（Radio Navigation Service : 95-100GHz）に分配されている。更に、この帯域及び隣接帯域は、移動業務、固定業務、地球探査衛星業務（受動及び能動）並びに電波天文業務にも割り当てられているため、空港 FOD レーダーシステムを海外展開するうえでは、他業務との周波数共用条件を明確化する必要がある。このため、2017 年 5 月より、ITU-R WP5B にて空港 FOD レーダーシステムの国際標準化の取り組みが始まっている。空港 FOD レーダーシステムの調達は、各国の空港あるいは政府機関からの国際調達となる。国際調達では世界貿易機構（WTO : World Trade Organization）の定める国際調達基準を満たす必要がある。更に WTO 基準では国際標準化に沿ったシステムであることが求められる。このため、製品システムの国際標準化活動は、国際調達に応募する際の重要な基本条件となる。更に、ASEAN 諸国では各国独自の電波法制が定められることは稀で、多くの場合、無線分野では ITU-R に定められた諸規則をそのまま国内基準として転用することが多い。このため、我が国における空港 FOD レーダーシステムに沿った国際標準化を進めることで、各国において個別の法制化を進める必要がなくなり、どの国に輸出する場合でも、基本的な法整備は完了した状態となる。

図 56 は ITU-R 全体の会議体構成を示す系統図である。地上業務を統括する SG5 のもとに、無線測位業務を統括する WP5B、更にその下に無線評定業務を統括する WP5B1 が常設の会議体として全体が構成されている。空港 FOD レーダーシステムに関する寄書は国内委員会では審査・承認を受けたうえで、総務省が ITU-R に提出する。初回の現地会合で空港 FOD

レーダーシステムの寄書を審議するための Drafting Group (DG) を設置して実務的な議論をする旨が WP5B1 議長によって提案・承認され、柴垣信彦氏（日立国際電気）が DG-5B1 FOD の議長を務めることになった。

DG-5B1 FOD では FOD に関する各国からの寄書の審議を行うほか、図 56 に示すように同一帯域を使用している他業務である WP7C（リモートセンシング）、WP7D（電波天文）及び WP5A（移動）傘下の 5A2（システム）、5A4（周波数共用）からのリエイゾン文書を適切に処理しつつ、周波数共用のための文書作成を行っている。

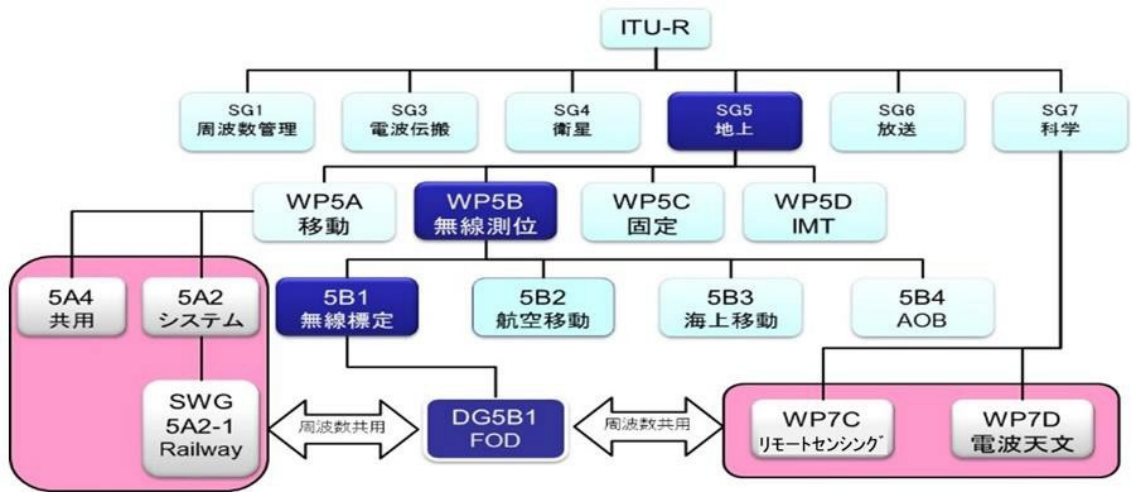


図 56 会議体系



図 57 は、DG-5B1 FOD が 2017 年の 5 月会合以来審議してきた寄書を時系列でまとめたものである。2018 年の 11 月会合時点で 4 本の文書を取り扱っている。

4 本の文書は

- ① M. [FOD92] Technical & Operation Characteristics Report
- ② M. [FOD\_EESS\_SHARE] SHARING & COMPATIBILITY STUDIES REPORT
- ③ M. [Rad92GHz] Preliminary New Draft toward Recommendation
- ④ New Question [FOD\_COMP1]/5

でFOD関係の新研究課題を提案する④以外は、次回会合に引き継がれ（carry forward）2019年5月会合は終了している。

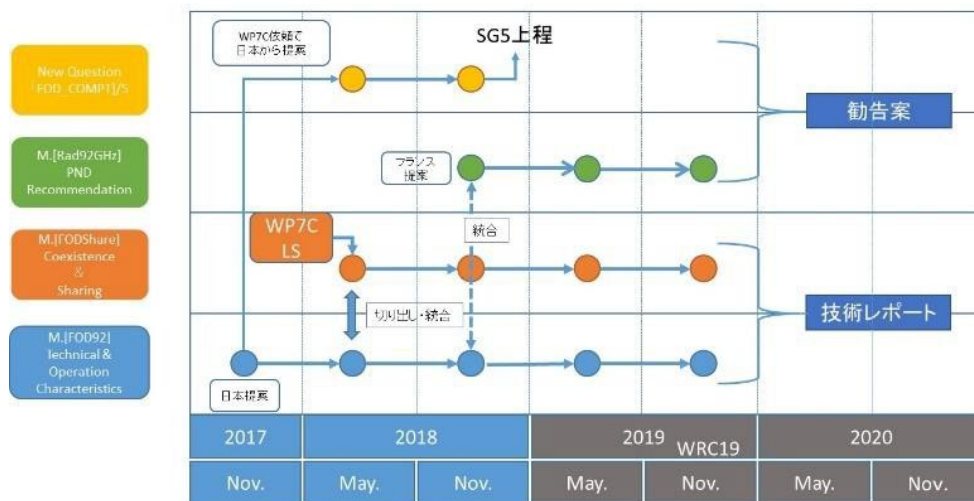


図 57 提案文書の関連図

① の M. [FOD92] は 2017 年 5 月会合で最初に提案した文書であり、「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」で構築した成田国際空港の実証実験の内容や、開発した空港 FOD レーダーの基本特性をまとめている。ITU-R では新しいアプリケーションの「Technical & Operation Characteristics Report」が提出されると、同一周波数帯域を使用した他業務（例えば電波天文や地球探査衛星）を扱う作業部会からリエイゾン文書が提出される。提出されたリエイゾン文書に対する応答を DG-5B1 FOD で審議し、上位会合である WP5B1、WP5B に提案・承認を受けたうえでリエイゾン文書の発信元にリエイゾン応答文書を返す形で周波数共用の実務が行われる。

② の M. [FOD\_EESS\_SHARE] は上述のような手順で WP7C（リモートセンシング）のグループとのリエイゾン文書の交換から派生した文書である。具体的には WP7C から求められた共用計算を進めるうえでのアンテナ放射特性や送信電力を元に WP7C 側から提案された共用検討の寄書と③の M. [FOD92] の該当部分を結合して現地会合期間中に作成した

文書が基本となっている。2018 年 5 月会合で起案した文書を 2018 年 11 月会合で審議したうえで、次回会合に引き継がれる。

④は 2018 年 11 月会合でフランスが ITU-R 勧告草案として 94-100GHz の気象レーダーに関する寄書を提出してきた寄書を元にしたものである。DG-5B1F0D での審議の結果、気象レーダーと FOD レーダーを統合して範囲の広い勧告草案として進めていくことに合意した。フランス提案に日本提案③の M. [F0D92]からFOD レーダーの基本パラメータを追加した文書を現地で作成したうえ DG-5B1F0D で審議し上位会合である WP5B1、WP5B に提案・承認を受けたうえで、次回会合に引き継いでいる。

④は 2017 年 5 月会合で最初に①の M. [F0D92]を提案した際に、新たな周波数での共用検討を進めるためには、新規研究課題があると、共用検討作業を進めやすいとの指摘が米国からあり、またその研究課題の提案を求められたことによる。これを受けて、総務省とも相談の上 2018 年 5 月会合で提案した文書である。

2018 年 5 月会合で審議した新研究課題は 2018 年 11 月会合で上位会合である WP5B1、WP5B に提案・承認され、更に上位の SG5 での承認を受けて、各国の主管庁に対しての承認処理が終了次第、ITU-R の正式文書として発行される。

DG-5B1 F0D には FOD レーダーに関心のある米国の NASA、商務省及びボーイング、フランスの主管庁及び気象局、ドイツのマックス・プランク研究所、カナダ、中国、韓国の各主管庁などから約 20 名のエキスパートが毎回参加している。ITU-R 会合全体としては SG5 傘下の WP5A, 5B, 5C, 5D の各国代表団 400 名程度がジュネーブの ITU 本部に集まり 2 週間の会期中、活発な議論が行われる。

### 7.2.3 今後の展開

- (1) FOD レーダーを日本国外へ展開する場合、設置予定の国での気象条件、生態系などを考慮する必要があり、少なくとも 1 年以上の事前調査は必要である。
- (2) 総務省委託研究「90GHz 帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」の成果を海外展開するための「リニアセルレーダーシステムの海外展開を通じた周波数の国際協調利用促進に関する調査の請負」事業の一環として行っている、マレーシアのクアラルンプール空港での実証システム構築に向けた取り組みと、関連する ITU-R での国際標準化活動が行われている。

空港 FOD レーダーシステムは、国内では国土交通省航空局の指導の下、基本性能の確認試験に向けた準備が進行中であり、海外ではマレーシア以外の第三国に対しても、総務省イベントを契機とした人脈形成が進められている。今後も、総務省や関連する共同

研究機関と協力し、空港の安全を高めるためのシステム実用化に向けた取り組みの推進が期待される。

今後は、我が国における検討と ITU-R における検討に齟齬が生じないように、今回の調査検討報告書における空港 FOD レーダーと電波天文業務、地球探査衛星業務（受動及び能動）の共用検討の結果について、この技術レポートに反映していく必要がある。空港 FOD レーダーを設置する段階では、本調査検討会で検討した他業務との共用や空港 FOD レーダー同士の共用が必要なだけでなく、該当する滑走路同士で運用する際には、運用時間、空間及び周波数調整が必要であり、この調整に関する取り決めの策定等が必要となる。

付属資料

### 開催趣旨

2000年、フランスの空港において、滑走路上の金属片が原因による超音速旅客機コンコルドの墜落事故がおこった。以降、同様な事故防止のため、航空機の離発着時に滑走路面に落下した金属片をはじめとした異物を検知するシステムの導入が求められてきた。その結果、近年では光学監視カメラに加え、測距性能、距離分解能および夜間の検出性能等で優れたレーダー方式の検知システムが世界的に導入されてきたところである。

しかし、それら現行の検知システムでは遠方から検出できる異物の大きさに限界があること、システムを滑走路近辺に配置する際には安全性の観点から小型化の向上が必要であること等から、遠方から正確に異物を検出できる新しい小型の検知システムの実用化が望まれている。

そこで、近年光ファイバー技術と90GHz帯の周波数におけるイメージング技術を融合したRoF (Radio over Fiber) 技術を活用したリニアセル方式の異物検知レーダー（以下、「90GHz帯FODレーダー (Foreign Object Debris detection Radar)」と言う。）が開発された。これは、小さな異物を正確に検知でき、検知時間、空港滑走路程度の検知範囲を自由に設定できることから、早期に、大規模な空港滑走路に90GHz帯FODレーダーを導入することが期待されている。

上記を踏まえ、本調査検討では、90GHz帯FODレーダーを国内の空港で利用するために、90GHz帯FODレーダーと同一又は隣接する周波数帯を利用する他システムとの干渉について実測及びシミュレーションにより調査を行い、周波数共用の条件等について検討し、技術基準の策定等による周波数の有効利用に資することを目的とする。

空港滑走路における90GHz帯FODレーダーの導入に向けた周波数有効利用に関する調査検討会  
設置要綱

2019年10月3日

一般社団法人電波産業  
会

(名称)

第1条 この調査検討会は、「空港滑走路における90GHz帯FODレーダーの導入に向けた周波数有効利用に関する調査検討会」（以下「調査検討会」という。）と称する。

(目的)

第2条 この調査検討会では、90GHz帯FODレーダーの早期導入に向け、国内の空港での技術実証や90GHz帯FODレーダーと同一又は隣接する周波数帯を利用する他システムとの干渉について実測及びシミュレーションによる調査結果を踏まえ、周波数共有の条件等について検討し、技術基準の策定等による周波数の有効利用に資することを目的とする。

(調査検討事項)

第3条 調査検討会は、前条の目的を達成するために、次の事項について調査検討を行う。

(1) 同一及び隣接周波数帯を利用した既存無線システムへの共有条件の検討等

以下の既存無線システムとの共有検討を行い、90GHz帯FODレーダーを空港滑走路脇に複数配置して使用する場合における各システムとの共有条件を整理する。

具体的には、電波資源拡大のための研究開発「90GHz帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」(平成24年度から27年度まで)及び「90GHz帯凝縮型リニアセルレーダーシステムの研究開発」(平成29年度から令和元年度まで)の成果を踏まえ、90GHz帯FODレーダーの要求要件(出力、必要帯域、不要帯域等)を整理すると共に、共有対象である以下(ア)～(エ)までの各システムの受信感度や許容干渉レベル、各システムの使用状況に応じた電波環境を整理する。また、これらの整理結果をもとに90GHz帯FODレーダーと各システムとの干渉モデルを検討する。当該検討に当たっては、ITU-R勧告等の国際標準や各システムの過去の共有検討手法等を考慮するものとする。

(ア) 衛星システム(地球探査衛星業務地球局、地球探査衛星業務人工衛星局)

(イ) 電波天文

(ウ) 固定業務

(エ) 移動業務

更に90GHz帯FODレーダーの放射パターンフィールド測定を行うとともに、当該干渉モデルに従い関係機関と調整し、日本国内の主要空港に90GHz帯FODレーダーを導入した場合における上記(ア)～(エ)までの各システムへの影響をシミュレーション評価し、

それぞれの共用条件の分析を行う。

(2) 技術的条件の検討

上記(1)の検討結果を踏まえ、使用可能周波数帯、占有周波数帯幅の許容値、最大空中線電力、スペクトラムマスク等の技術的条件案や制度化方針等について検討を行い、素案を取りまとめる。

(構成)

第4条 調査検討会は、主査、副主査、委員、オブザーバー及び事務局で構成し、別紙のとおりとする。

(組織)

第5条 調査検討会には主査を置く。

- 2 主査は、構成員の互選により選出する。
- 3 主査は、構成員の中から副主査を指名する。
- 4 主査は、調査検討会の審議を促進するため、作業部会を設置することができる。

(運営)

第6条 調査検討会は、主査が招集し、主宰する。なお、主査が不在のときは、副主査がこれを代行する。

- 2 主査は、必要があると認める時、調査検討会に必要と認める者の出席を求め、意見を述べさせ、又は説明させることができる。
- 3 その他、調査検討会の運営に関する事項は、主査が認めるところによる。

(事務局)

第7条 調査検討会の事務局は、一般社団法人 電波産業会が行う。

(調査検討会設置期間)

第8条 調査検討会の設置期間は、2019年10月18日(第1回会議開催日)から2020年3月31日までとする。

(成果の公表等)

第9条 調査検討会における調査検討事項に関する成果を公表する場合には、原則として一般社団法人電波産業会及び総務省の承認を得るものとする。

- 2 調査検討会の報告書に関する全ての著作権は、総務省に帰属する。

(敬称略・順不同)

区分	機関名	所属等	氏名
主査	学校法人 早稲田大学	理工学術院 電子物理システム学科 教授	川西 哲也
副主査	学校法人 千葉工業大学	工学部 情報通信システム工学科 教授	枚田 明彦
委員	国土交通省	航空局 交通管制部 管制技術課 航行支援技術高度化企画室 管制技術調査官	往谷 康弘
委員	国土交通省	航空局 交通管制部 運用課 航空管制運航情報調査官	徳井 隆宏
委員	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構	周波数管理室 室長	市川 麻里
委員	国立研究開発法人 海上・港湾・航空 技術研究所	電子航法研究所 監視通信領域 上席研究員	米本 成人
委員	一般財団法人 航空保安無線システム協会	衛星技術部 調査役	石井 秀幸
委員	大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台	天文情報センター 周波数資源保護室 室長・特任教授	大石 雅寿
委員	公益財団法人 鉄道総合技術研究所	信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室 室長	中村 一城
委員	株式会社 KDDI総合研究所	光アクセスネットワークグループ グループリーダー	西村 公佐
委員	東芝インフラシステムズ株式会社	電波システム事業部 主幹	和田 将一
委員	日本無線株式会社	マリンシステム事業部 企画推進部 事業企画グループ 課長	宮寺 好男
委員	株式会社 日立国際電気	ソリューション統括本部 ソリューション本部 エンタープライズソリューション本部 主任技師	柴垣 信彦
オブザーバー	総務省	総合通信基盤局 電波部 基幹・衛星移動通信課 課長補佐	河間 善之



オブザーバー	総務省	総合通信基盤局 電波部 基幹・衛星移動通信課 振興係長	長澤 輝明
--------	-----	-----------------------------	-------

オブザーバー	総務省	総合通信基盤局 電波部 基幹・衛星移動通信課 衛星推進係長	郷藤新之助
オブザーバー	総務省	総合通信基盤局 電波部 基幹・衛星移動通信課 航空係長	黒川 理雄
オブザーバー	総務省	総合通信基盤局 電波部 基幹・衛星移動通信課 振興係 総務技官	山本 隆大
オブザーバー	国土交通省	東京航空局東京空港事務所管制保安部 次席航空管制運航情報官	井上 浩二
オブザーバー	防衛省	整備計画局 情報通信課 電磁波政策室防衛部員	阿部 敏和
オブザーバー	防衛省	陸上幕僚監部 指揮通信システム情報部指揮通信システム課 指揮通信システム班 3等陸佐	村尾 俊輔
オブザーバー	防衛省	陸上幕僚監部 指揮通信システム情報部指揮通信システム課 指揮通信システム班 3等陸佐	北川 明伸
オブザーバー	防衛省	防衛装備庁 プロジェクト管理部 事業計画官付 電波専門官	中濱 大晶
オブザーバー	成田国際空港株式会社	空港運用部門 総合安全推進部 運用計画グループ マネージャー (第2回から参加)	野澤 山路
オブザーバー	成田国際空港株式会社	空港運用部門 総合安全推進部 運用計画グループ アシスタントマネージャー (第1回まで参加)	玉造 繁
オブザーバー	成田国際空港株式会社	空港運用部門 総合安全推進部 運用計画グループ 主任	小宮山大樹
事務局	一般財団法人電波産業会	研究開発本部 開発センター センター長	星 克明
事務局	一般財団法人電波産業会	研究開発本部 参与	山田 和晴
事務局	一般財団法人電波産業会	研究開発本部 開発センター 担当部長	清水 良真
事務局	一般財団法人電波産業会	研究開発本部 開発センター 担当部長	石川 恭輔

### 1. 第1回会合

日時：2019年0月18日(金) 13:30-15:00

場所：(一社)電波産業会 第4会議室

議事：

- (1) 空港FODレーダー調査検討会の進め方(事務局)
- (2) 検討課題
  - ◎干渉モデルについて(日立国際電気)
  - ◎アンテナシミュレーションと実測比較について(セルコ)
  - ◎国際標準化活動と実証実験について(日立国際電気)
- (3) その他
  - 空港FODレーダーの海外展開状況について(日立国際電気)

概要：設置要綱についての説明、主査の選出及び副主査の指名が行われた。

空港FODレーダー調査検討会の進め方、検討課題(干渉モデル、アンテナシミュレーションと実測比較、国際標準化活動と実測比較) 空港FODレーダーの海外展開状況について説明が行われた。

### 2. 第2回会合

日時：2020年2月17日(月) 15:00-17:00

場所：(一社)電波産業会 第3会議室

議事：

- (1) 共用検討の概要について(事務局)
- (2) 成田国際空港における実証実験について(日立国際電気)
- (3) アンテナシミュレーションについて(セルコ)
- (4) 実証実験とシミュレーション結果検討について(日立国際電気)

概要：共用検討の概要、成田国際空港における実証実験、アンテナシミュレーションについて説明が行われた。

### 3. 第3回会合

日時：2020年3月2日(月) 15:30-17:00

場所：(一社)電波産業会 第6会議室

議事：

- (1) 実証実験に対する再検討結果について(日立国際電気)
- (2) 報告書(案)について(事務局)
- (3) 報告書作成にむけての今後の進め方(事務局)

概要：実証実験に対する検討結果の報告、報告書骨子案、報告書作成に向けての今後の進め方について説明が行われた。

#### 4. アドホック作業班

日時：2020年3月6日(金) 15:00-16:30

場所：(一社)電波産業会 第3会議室

概要：臨時の作業班により、地球探査衛星業務との共用、技術的条件についての検討が行われた。

以降、メールにて報告書案の審議が行われた。

## ARTICLE 5

### Frequency allocations

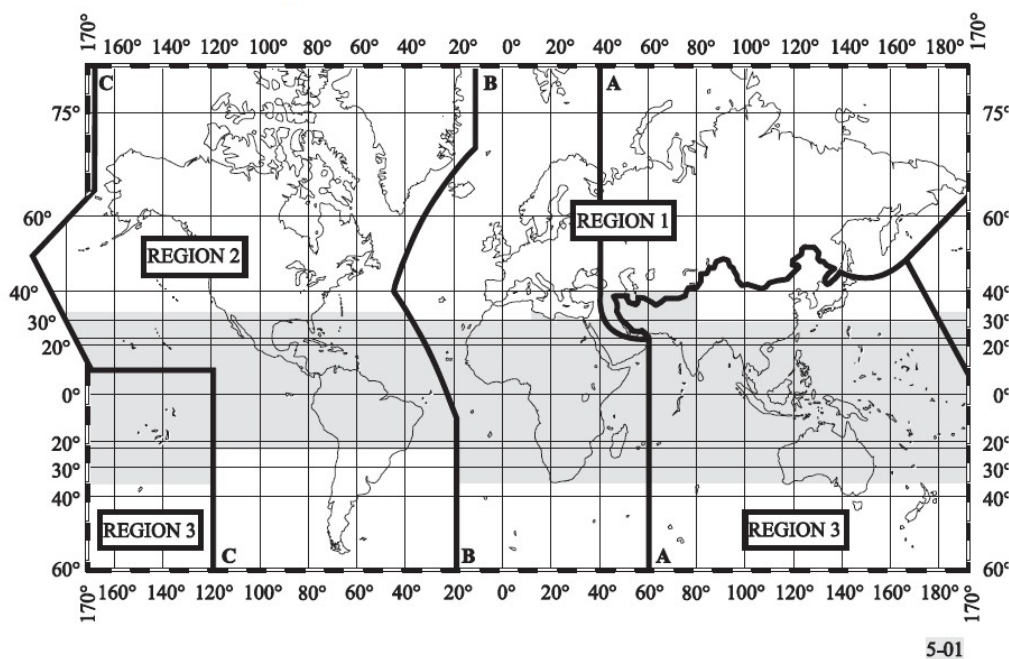
#### Introduction

5.1 In all documents of the Union where the terms *allocation*, *allotment* and *assignment* are to be used, they shall have the meaning given them in Nos. 1.16 to 1.18, the terms used in the six working languages being as follows:

Frequency distribution to	French	English	Spanish	Arabic	Chinese	Russian
Services	Attribution (attribuer)	Allocation (to allocate)	Atribución (atribuir)	توزيع (بوزع)	划分	распределение (распределять)
Areas or countries	Allotissement (allotir)	Allotment (to allot)	Adjudicación (adjudicar)	تعيين (يعين)	分配	выделение (выделять)
Stations	Assig nation (assigner)	Assignment (to assign)	Asignación (asignar)	تخصيص (يخصص)	指配	присвоение (присваивать)

#### Section I – Regions and areas

5.2 For the allocation of frequencies the world has been divided into three Regions<sup>1</sup> as shown on the following map and described in Nos. 5.3 to 5.9:



The shaded part represents the Tropical Zones as defined in Nos. 5.16 to 5.20 and 5.21.

<sup>1</sup> 5.2.1 It should be noted that where the words “regions” or “regional” are without a capital “R” in these Regulations, they do not relate to the three Regions here defined for purposes of frequency allocation.

**5.3** *Region 1:* Region 1 includes the area limited on the east by line A (lines A, B and C are defined below) and on the west by line B, excluding any of the territory of the Islamic Republic of Iran which lies between these limits. It also includes the whole of the territory of Armenia, Azerbaijan, the Russian Federation, Georgia, Kazakhstan, Mongolia, Uzbekistan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, Turkey and Ukraine and the area to the north of Russian Federation which lies between lines A and C.

**5.4** *Region 2:* Region 2 includes the area limited on the east by line B and on the west by line C.

**5.5** *Region 3:* Region 3 includes the area limited on the east by line C and on the west by line A, except any of the territory of Armenia, Azerbaijan, the Russian Federation, Georgia, Kazakhstan, Mongolia, Uzbekistan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, Turkey and Ukraine and the area to the north of Russian Federation. It also includes that part of the territory of the Islamic Republic of Iran lying outside of those limits.

**5.6** The lines A, B and C are defined as follows:

**5.7** *Line A:* Line A extends from the North Pole along meridian 40° East of Greenwich to parallel 40° North; thence by great circle arc to the intersection of meridian 60° East and the Tropic of Cancer; thence along the meridian 60° East to the South Pole.

**5.8** *Line B:* Line B extends from the North Pole along meridian 10° West of Greenwich to its intersection with parallel 72° North; thence by great circle arc to the intersection of meridian 50° West and parallel 40° North; thence by great circle arc to the intersection of meridian 20° West and parallel 10° South; thence along meridian 20° West to the South Pole.

**5.9** *Line C:* Line C extends from the North Pole by great circle arc to the intersection of parallel 65° 30' North with the international boundary in Bering Strait; thence by great circle arc to the intersection of meridian 165° East of Greenwich and parallel 50° North; thence by great circle arc to the intersection of meridian 170° West and parallel 10° North; thence along parallel 10° North to its intersection with meridian 120° West; thence along meridian 120° West to the South Pole.

**5.10** For the purposes of these Regulations, the term “African Broadcasting Area” means:

**5.11** a) African countries, parts of countries, territories and groups of territories situated between the parallels 40° South and 30° North;

**5.12**      *b)*      islands in the Indian Ocean west of meridian 60° East of Greenwich, situated between the parallel 40° South and the great circle arc joining the points 45° East, 11° 30' North and 60° East, 15° North;

**5.13**      *c)*      islands in the Atlantic Ocean east of line B defined in No. 5.8 of these Regulations, situated between the parallels 40° South and 30° North.

**5.14**                      The “European Broadcasting Area” is bounded on the west by the western boundary of Region 1, on the east by the meridian 40° East of Greenwich and on the south by the parallel 30° North so as to include the northern part of Saudi Arabia and that part of those countries bordering the Mediterranean within these limits. In addition, Armenia, Azerbaijan, Georgia and those parts of the territories of Iraq, Jordan, Syrian Arab Republic, Turkey and Ukraine lying outside the above limits are included in the European Broadcasting Area. (WRC-07)

**5.15**                      The “European Maritime Area” is bounded to the north by a line extending along parallel 72° North from its intersection with meridian 55° East of Greenwich to its intersection with meridian 5° West, then along meridian 5° West to its intersection with parallel 67° North, thence along parallel 67° North to its intersection with meridian 32° West; to the west by a line extending along meridian 32° West to its intersection with parallel 30° North; to the south by a line extending along parallel 30° North to its intersection with meridian 43° East; to the east by a line extending along meridian 43° East to its intersection with parallel 60° North, thence along parallel 60° North to its intersection with meridian 55° East and thence along meridian 55° East to its intersection with parallel 72° North.

**5.16**                      1) The “Tropical Zone” (see map in No. 5.2) is defined as:

**5.17**      *a)*      the whole of that area in Region 2 between the Tropics of Cancer and Capricorn;

**5.18**      *b)*      the whole of that area in Regions 1 and 3 contained between the parallels 30° North and 35° South with the addition of:

**5.19**                      *i)*      The area contained between the meridians 40° East and 80° East of Greenwich and the parallels 30° North and 40° North;

**5.20**                      *ii)*      that part of Libya north of parallel 30° North.

**5.21**                      2) In Region 2, the Tropical Zone may be extended to parallel 33° North, subject to special agreements between the countries concerned in that Region (see Article 6).

**5.22**                      A sub-Region is an area consisting of two or more countries in the same Region.

**81-86 GHz**

Allocation to services		
Region 1	Region 2	Region 3
<b>81-84</b>	FIXED 5.338A FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) MOBILE MOBILE-SATELLITE (Earth-to-space) RADIO ASTRONOMY Space research (space-to-Earth) 5.149 5.561A	
<b>84-86</b>	FIXED 5.338A FIXED-SATELLITE (Earth-to-space) 5.561B MOBILE RADIO ASTRONOMY 5.149	

**5.149** In making assignments to stations of other services to which the bands:

13 360-13 410 kHz,	4 950-4 990 MHz,	102-109.5 GHz,
25 550-25 670 kHz,	4 990-5 000 MHz,	111.8-114.25 GHz,
37.5-38.25 MHz,	6 650-6 675.2 MHz,	128.33-128.59 GHz,
73-74.6 MHz in Regions 1 and 3,	10.6-10.68 GHz,	129.23-129.49 GHz,
150.05-153 MHz in Region 1,	14.47-14.5 GHz,	130-134 GHz,
322-328.6 MHz,	22.01-22.21 GHz,	136-148.5 GHz,
406.1-410 MHz,	22.21-22.5 GHz,	151.5-158.5 GHz,
608-614 MHz in Regions 1 and 3,	22.81-22.86 GHz,	168.59-168.93 GHz,
1 330-1 400 MHz,	23.07-23.12 GHz,	171.11-171.45 GHz,
1 610.6-1 613.8 MHz,	31.2-31.3 GHz,	172.31-172.65 GHz,
1 660-1 670 MHz,	31.5-31.8 GHz in Regions 1 and 3,	173.52-173.85 GHz,
1 718.8-1 722.2 MHz,	36.43-36.5 GHz,	195.75-196.15 GHz,
2 655-2 690 MHz,	42.5-43.5 GHz,	209-226 GHz,
3 260-3 267 MHz,	48.94-49.04 GHz,	241-250 GHz,
3 332-3 339 MHz,	76-86 GHz,	252-275 GHz
3 345.8-3 352.5 MHz,	92-94 GHz,	
4 825-4 835 MHz,	94.1-100 GHz,	

are allocated, administrations are urged to take all practicable steps to protect the radio astronomy service from harmful interference. Emissions from spaceborne or airborne stations can be particularly serious sources of interference to the radio astronomy service (see Nos. **4.5** and **4.6** and Article **29**). (WRC-07)

**5.338A** In the frequency bands 1 350-1 400 MHz, 1 427-1 452 MHz, 22.55-23.55 GHz, 30-31.3 GHz, 49.7-50.2 GHz, 50.4-50.9 GHz, 51.4-52.6 GHz, 81-86 GHz and 92-94 GHz, Resolution **750 (Rev.WRC-15)** applies. (WRC-15)

**5.561A** The 81-81.5 GHz band is also allocated to the amateur and amateur-satellite services on a secondary basis. (WRC-2000)



**86-111.8 GHz**

Allocation to services		
Region 1	Region 2	Region 3
86-92	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (passive) 5.340	
92-94	FIXED 5.338A MOBILE RADIO ASTRONOMY RADIOLOCATION 5.149	
94-94.1	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) RADIOLOCATION SPACE RESEARCH (active) Radio astronomy 5.562 5.562A	
94.1-95	FIXED MOBILE RADIO ASTRONOMY RADIOLOCATION 5.149	
95-100	FIXED MOBILE RADIO ASTRONOMY RADIOLOCATION RADIONAVIGATION RADIONAVIGATION-SATELLITE 5.149 5.554	
100-102	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (passive) 5.340 5.341	
102-105	FIXED MOBILE RADIO ASTRONOMY 5.149 5.341	
105-109.5	FIXED MOBILE RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (passive) 5.562B 5.149 5.341	
109.5-111.8	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (passive) 5.340 5.341	

**5.149** In making assignments to stations of other services to which the bands:

13 360-13 410 kHz,	4 950-4 990 MHz,	102-109.5 GHz,
25 550-25 670 kHz,	4 990-5 000 MHz,	111.8-114.25 GHz,
37.5-38.25 MHz,	6 650-6 675.2 MHz,	128.33-128.59 GHz,
73-74.6 MHz in Regions 1 and 3,	10.6-10.68 GHz,	129.23-129.49 GHz,
150.05-153 MHz in Region 1,	14.47-14.5 GHz,	130-134 GHz,
322-328.6 MHz,	22.01-22.21 GHz,	136-148.5 GHz,
406.1-410 MHz,	22.21-22.5 GHz,	151.5-158.5 GHz,
608-614 MHz in Regions 1 and 3,	22.81-22.86 GHz,	168.59-168.93 GHz,
1 330-1 400 MHz,	23.07-23.12 GHz,	171.11-171.45 GHz,
1 610.6-1 613.8 MHz,	31.2-31.3 GHz,	172.31-172.65 GHz,
1 660-1 670 MHz,	31.5-31.8 GHz in Regions 1 and 3,	173.52-173.85 GHz,
1 718.8-1 722.2 MHz,	36.43-36.5 GHz,	195.75-196.15 GHz,
2 655-2 690 MHz,	42.5-43.5 GHz,	209-226 GHz,
3 260-3 267 MHz,	48.94-49.04 GHz,	241-250 GHz,
3 332-3 339 MHz,	76-86 GHz,	252-275 GHz
3 345.8-3 352.5 MHz,	92-94 GHz,	
4 825-4 835 MHz,	94.1-100 GHz,	

are allocated, administrations are urged to take all practicable steps to protect the radio astronomy service from harmful interference. Emissions from spaceborne or airborne stations can be particularly serious sources of interference to the radio astronomy service (see Nos. **4.5** and **4.6** and Article **29**). (WRC-07)

**5.338A** In the frequency bands 1 350-1 400 MHz, 1 427-1 452 MHz, 22.55-23.55 GHz, 30-31.3 GHz, 49.7-50.2 GHz, 50.4-50.9 GHz, 51.4-52.6 GHz, 81-86 GHz and 92-94 GHz, Resolution **750 (Rev.WRC-15)** applies. (WRC-15)

- 5.340** All emissions are prohibited in the following bands:
- 1 400-1 427 MHz,
  - 2 690-2 700 MHz, except those provided for by No. **5.422**,
  - 10.68-10.7 GHz, except those provided for by No. **5.483**,
  - 15.35-15.4 GHz, except those provided for by No. **5.511**,
  - 23.6-24 GHz,
  - 31.3-31.5 GHz,
  - 31.5-31.8 GHz, in Region 2,
  - 48.94-49.04 GHz, from airborne stations
  - 50.2-50.4 GHz<sup>2</sup>,
  - 52.6-54.25 GHz,
  - 86-92 GHz,
  - 100-102 GHz,
  - 109.5-111.8 GHz,
  - 114.25-116 GHz,
  - 148.5-151.5 GHz,
  - 164-167 GHz,
  - 182-185 GHz,
  - 190-191.8 GHz,
  - 200-209 GHz,
  - 226-231.5 GHz,
  - 250-252 GHz. (WRC-03)

---

<sup>2</sup> **5.340.1** The allocation to the Earth exploration-satellite service (passive) and the space research service (passive) in the band 50.2-50.4 GHz should not impose undue constraints on the use of the adjacent bands by the primary allocated services in those bands. (WRC-97)

**5.341** In the bands 1 400-1 727 MHz, 101-120 GHz and 197-220 GHz, passive research is being conducted by some countries in a programme for the search for intentional emissions of extraterrestrial origin.

**5.554** In the bands 43.5-47 GHz, 66-71 GHz, 95-100 GHz, 123-130 GHz, 191.8-200 GHz and 252-265 GHz, satellite links connecting land stations at specified fixed points are also authorized when used in conjunction with the mobile-satellite service or the radionavigation-satellite service. (WRC-2000)

**5.562** The use of the band 94-94.1 GHz by the Earth exploration-satellite (active) and space research (active) services is limited to spaceborne cloud radars. (WRC-97)

**5.562A** In the bands 94-94.1 GHz and 130-134 GHz, transmissions from space stations of the Earth exploration-satellite service (active) that are directed into the main beam of a radio astronomy antenna have the potential to damage some radio astronomy receivers. Space agencies operating the transmitters and the radio astronomy stations concerned should mutually plan their operations so as to avoid such occurrences to the maximum extent possible. (WRC-2000)

## Annex 1

### Sensitivity of radio astronomy systems

#### 1 General considerations and assumptions used in the calculation of interference levels

##### 1.1 Detrimental-level interference criterion

The sensitivity of an observation in radio astronomy can be defined in terms of the smallest power level change  $\Delta P$  in the power level  $P$  at the radiometer input that can be detected and measured. The sensitivity equation is:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (1)$$

where:

$P$  and  $\Delta P$ : power spectral density of the noise

$\Delta f_0$ : bandwidth

$t$ : integration time.  $P$  and  $\Delta P$  in equation (1) can be expressed in temperature units through the Boltzmann's constant,  $k$ :

$$\Delta P = k \Delta T; \quad \text{also} \quad P = k T \quad (2)$$

Thus we may express the sensitivity equation as:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (3)$$

where:

$$T = T_A + T_R$$

This result applies for one polarization of the radio telescope.  $T$  is the sum of  $T_A$  (the antenna noise temperature contribution from the cosmic background, the Earth's atmosphere and radiation from the Earth) and  $T_R$ , the receiver noise temperature. Equations (1) or (3) can be used to estimate the sensitivities and interference levels for radio astronomical observations. The results are listed in Tables 1 and 2. An observing (or integration) time,  $t$ , of 2000 s is assumed, and interference threshold levels,  $\Delta P_H$ , given in Tables 1 and 2 are expressed as the interference power within the bandwidth  $\Delta f$  that introduces an error of 10% in the measurement of  $\Delta P$  (or  $\Delta T$ ), i.e.:

$$\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f \quad (4)$$

In summary, the appropriate columns in Tables 1 and 2 may be calculated using the following methods:

- $\Delta T$ , using equation (3),
- $\Delta P$ , using equation (2),
- $\Delta P_H$ , using equation (4).

The interference can also be expressed in terms of the pfd incident at the antenna, either in the total bandwidth or as a spectral pfd,  $S_H$ , per 1 Hz of bandwidth. The values given are for an antenna having a gain, in the direction of arrival of the interference, equal to that of an isotropic antenna (which has an effective area of  $c^2/4\pi f^2$ , where  $c$  is the speed of the light and  $f$  the frequency). The gain of an isotropic radiator, 0 dBi, is used as a general representative value for the side-lobe level, as discussed under § 1.3.

Values of  $S_H \Delta f$  (dB(W/m<sup>2</sup>)), are derived from  $\Delta P_H$  by adding:

$$20 \log f - 158.5 \quad \text{dB} \quad (5)$$

where  $f$  (Hz).  $S_H$  is then derived by subtracting  $10 \log \Delta f$  (Hz) to allow for the bandwidth.

## 1.2 Integration time

The calculated sensitivities and interference levels presented in Tables 1 and 2 are based on assumed integration times of 2 000 s. Integration times actually used in astronomical observations cover a wide range of values. Continuum observations made with single-antenna telescopes (as distinct from interferometric arrays) are well represented by the integration time of 2 000 s, typical of good quality observations. On the other hand 2 000 s is less representative of spectral line observations. Improvements in receiver stability and the increased use of correlation spectrometers have allowed more frequent use of longer integration times required to observe weak spectral lines, and spectral line observations lasting several hours are quite common. A more representative integration time for these observations would be 10 h. For a 10 h integration, the threshold interference level is 6 dB more stringent than the values given in Table 2. There are also certain observations of time varying phenomena, e.g. observations of pulsars, stellar or solar bursts, and interplanetary scintillations for which much shorter time periods may be adequate.

## 1.3 Antenna response pattern

Interference to radio astronomy is almost always received through the antenna side lobes, so the main beam response to interference need not be considered.

The side-lobe model for large paraboloid antennas in the frequency range 2 to 30 GHz, given in Recommendation ITU-R SA.509 is a good approximation of the response of many radio astronomy antennas and is adopted throughout this Recommendation as the radio astronomy reference antenna. In this model, the side-lobe level decreases with angular distance (degrees) from the main beam axis and is equal to  $32 - 25 \log \phi$  (dBi) for  $1^\circ < \phi < 48^\circ$ . The effect of an interfering signal clearly depends upon the angle of incidence relative to the main beam axis of the antenna, since the side-lobe gain, as represented by the model, varies from 32 to  $-10$  dBi as a function of this angle. However, it is useful to calculate the threshold levels of interference strength for a particular value of side-lobe gain, that we choose as 0 dBi, and use in Tables 1 to 3. From the model, this side-lobe level occurs at an angle of  $19.05^\circ$  from the main beam axis. Then a signal at the detrimental threshold level defined for 0 dBi side-lobe gain will exceed the criterion for the detrimental level at the receiver input if it is incident at the antenna at an angle of less than  $19.05^\circ$ . The solid angle

within a cone of angular radius  $19.05^\circ$  is 0.344 sr, which is equal to 5.5% of the  $2\pi$  sr of the sky above the horizon that a radio telescope is able to observe at any given time. Thus if the probability of the angle of incidence of interference is uniformly distributed over the sky, about 5.5% of interfering signals would be incident within  $19.05^\circ$  of the main beam axis of an antenna pointed towards the sky. Note also that the 5.5% figure is in line with the recommended levels of data loss to radio astronomy observations in percentage of time, specified in Recommendation ITU-R RA.1513.

The particular case of non-GSO satellites presents a dynamic situation, that is, the positions of the satellites relative to the beam of the radio astronomy antenna show large changes within the time scale of the 2000 s integration time. Analysis of interference in this case requires integrating the response over the varying side-lobe levels, for example, using the concept of epfd defined in No. 22.5C of the Radio Regulations (RR). In addition it is usually necessary to combine the responses to a number of satellites within a particular system. In such calculations it is suggested that the antenna response pattern for antennas of diameter greater than  $100 \lambda$  in Recommendation ITU-R S.1428 be used to represent the radio astronomy antenna, until a model based specifically on radio astronomy antennas is available; see § 2.2 for further discussion.

#### **1.4 Bandwidth**

Equation (1) shows that observations of the highest sensitivity are obtained when radio astronomers make use of the widest possible bandwidth. Consequently, in Table 1 (continuum observations),  $\Delta f$  is assumed to be the width of the allocated radio astronomy bands for frequencies up to 71 GHz. Above 71 GHz a value of 8 GHz is used, which is a representative bandwidth generally used on radio astronomy receivers in this range. In Table 2 (spectral line observations) a channel bandwidth  $\Delta f$  equal to the Doppler shift corresponding to 3 km/s in velocity is used for entries below 71 GHz. This value represents a compromise between the desired high spectral resolution and the sensitivity. There are a very large number of astrophysically important lines above 71 GHz, as shown in Recommendation ITU-R RA.314 and only a few representative values for the detrimental levels are given in Table 2 for the range 71-275 GHz. The channel bandwidth used to compute the detrimental levels above 71 GHz is 1 000 kHz (1 MHz) in all cases. This value was chosen for practical reasons. While it is slightly wider than the spectral channel width customary in radio astronomy receivers at these frequencies, it is used as the standard reference bandwidth for space services above 15 GHz.

#### **1.5 Receiver noise temperature and antenna temperature**

The receiver noise temperatures in Tables 1 and 2 are representative of the systems in use in radio astronomy. For frequencies above 1 GHz these are cryogenically cooled amplifiers or mixers. The quantum effect places a theoretical lower limit of  $hf/k$  on the noise temperature of such devices, where  $h$  and  $k$  are Planck's and Boltzmann's constants, respectively. This limit becomes important at frequencies above 100 GHz, where it equals 4.8 K. Practical mixers and amplifiers for bands at 100 GHz and higher provide noise temperatures greater than  $hf/k$  by a factor of about four. Thus, for frequencies above 100 GHz, noise temperatures equal to  $4hf/k$  are used in Tables 1 and 2.

The antenna temperatures in the Tables are also representative of practical systems in use in radio astronomy. They include the effects of the ionosphere or the neutral atmosphere, ground pickup in side lobes resulting from spillover or scattering, ohmic losses, and the cosmic microwave background. At frequencies above 100 GHz the atmospheric losses due to water vapour in the neutral atmosphere become very important. For these frequencies the values given are typical of the terrestrial sites used for major millimetric-wave radio astronomy facilities, such as Mauna Kea, Hawaii, or the Llano de Chajnantor at an elevation of 5 000 m in Chile, which is the site chosen for a major international radio astronomy array for frequencies in the range 30 GHz to 1 THz.

TABLE 1  
Threshold levels of interference detrimental to radio astronomy continuum observations

Centre frequency <sup>(1)</sup> $f_c$ (MHz)	Assumed bandwidth $\Delta f$ (MHz)	Minimum antenna noise temperature $T_A$ (K)	Receiver noise temperature $T_R$ (K)	System sensitivity <sup>(2)</sup> (noise fluctuations)		Threshold interference levels <sup>(2) (3)</sup>		
				Temperature $\Delta T$ (mK)	Power spectral density $\Delta P$ (dB(W/Hz))	Input power $\Delta P_H$ (dBW)	pfd $S_H \Delta f$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))	Spectral pfd $S_H$ (dB(W/m <sup>2</sup> · Hz))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13.385	0.05	50 000	60	5 000	-222	-185	-201	-248
25.610	0.12	15 000	60	972	-229	-188	-199	-249
73.8	1.6	750	60	14.3	-247	-195	-196	-258
151.525	2.95	150	60	2.73	-254	-199	-194	-259
325.3	6.6	40	60	0.87	-259	-201	-189	-258
408.05	3.9	25	60	0.96	-259	-203	-189	-255
611	6.0	20	60	0.73	-260	-202	-185	-253
1 413.5	27	12	10	0.095	-269	-205	-180	-255
1 665	10	12	10	0.16	-267	-207	-181	-251
2 695	10	12	10	0.16	-267	-207	-177	-247
4 995	10	12	10	0.16	-267	-207	-171	-241
10 650	100	12	10	0.049	-272	-202	-160	-240
15 375	50	15	15	0.095	-269	-202	-156	-233
22 355	290	35	30	0.085	-269	-195	-146	-231
23 800	400	15	30	0.050	-271	-195	-147	-233
31 550	500	18	65	0.083	-269	-192	-141	-228
43 000	1 000	25	65	0.064	-271	-191	-137	-227
89 000	8 000	12	30	0.011	-278	-189	-129	-228
150 000	8 000	14	30	0.011	-278	-189	-124	-223
224 000	8 000	20	43	0.016	-277	-188	-119	-218
270 000	8 000	25	50	0.019	-276	-187	-117	-216

Rec. ITU-R RA.769-2

<sup>(1)</sup> Calculation of interference levels is based on the centre frequency shown in this column although not all regions have the same allocations.  
<sup>(2)</sup> An integration time of 2 000 s has been assumed; if integration times of 15 min, 1 h, 2 h, 5 h or 10 h are used, the relevant values in the Table should be adjusted by +1.7, -1.3, -2.8, -4.8 or -6.3 dB respectively.  
<sup>(3)</sup> The interference levels given are those which apply for measurements of the total power received by a single antenna. Less stringent levels may be appropriate for other types of measurements, as discussed in § 2.2. For transmitters in the GSO, it is desirable that the levels be adjusted by -15 dB, as explained in § 2.1.



RECOMMENDATION ITU-R RA.1513-2\*

**Levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis**

(2001-2003-2015)

**Scope**

This Recommendation addresses the levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis. It includes studies of sharing situations for terrestrial and space-based applications, as well as an extensive section on measurement of data loss from weak, pulsed interference.

**3.4.6 Summary**

These calculations show, on the assumption that the pulsed interference does not exceed the Recommendation ITU-R RA.769 detrimental interference threshold for a 2 000-second observation, the following:

- 1) Radar and other pulsed radiation, with periods less than 40 s, that average down to the detrimental level at 2 000 s set by Recommendation ITU-R RA.769 will not cause excess data loss > 2%.
- 2) For measurements with 40-second observing length, the worst-case pulse strength for > 2% excess data loss is 1.5 dB below the system noise, and then only for extremely infrequent pulses (1 in 2 000 s) in the absence of any mitigation effort that synchronizes data taking in anti-correlation to regular pulses.
- 3) Aperiodic and/or variable strength interference will cause data loss at or below periodic pulses of constant strength.

**4 Conclusions**

A practical criterion for the aggregate data loss resulting from interference to the RAS is considered to be 5% of time from all sources. The existence of multiple overlapping sources of interference is a practical aspect that should be accounted for. Further study of the apportionment of the aggregate interference between different networks is required.

The data loss from any one system should be significantly less than 5%. To comply with this requirement, 2% per system is a practical limit.

The ITU Radiocommunication Assembly,

*considering*

- a) that research in radio astronomy depends critically upon the ability to make observations at the extreme limits of sensitivity and/or precision, and that the growing use of the radio spectrum increases the possibility of interference detrimental to the radio astronomy service (RAS);
- b) that for some radio astronomy observations, such as those involving the passage of a comet, an occultation by the moon, or a supernova explosion, a high probability of success is desirable because of the difficulty or impossibility of repeating them;
- c) that since interference to radio astronomy can result from unwanted emissions of services in adjacent, nearby, or harmonically related bands, interference from several services or systems may occur in any single radio astronomy band;
- d) that burden sharing may be necessary to facilitate the efficient use of the radio spectrum;
- e) that mitigation techniques are a part of burden sharing, and more advanced techniques are being developed for future implementation, to allow more efficient use of the radio spectrum;
- f) that threshold levels of interference (assuming 0 dBi antenna gain) detrimental to the RAS for 2 000 s integration times are given in Recommendation ITU-R RA.769, but that no acceptable percentage of time has been established for interference from services with transmissions randomly distributed in time and either sharing a frequency band with the RAS, or producing unwanted emissions that fall within a radio astronomy band;
- g) that administrations may require criteria for evaluation of interference between the RAS and other services in shared, adjacent, nearby, or harmonically related bands;
- h) that methods (e.g. the Monte Carlo method) have been developed to determine the appropriate separation distance between radio astronomy sites and an aggregate of mobile earth stations, and that these methods require the specification of an acceptable percentage of time during which the aggregate interference power exceeds the threshold levels detrimental to the RAS;
- i) that studies of sharing scenarios and experience gained from long practice have led to values of tolerable time loss due to degradation of sensitivity, on time scales of a single observation, which are explained in more detail in Annex 1,

---

\* Radiocommunication Study Group 7 made editorial amendments to this Recommendation in the year 2017 in accordance with Resolution ITU-R 1.

*recommends*

- 1 that, for evaluation of interference, a criterion of 5% be used for the aggregate data loss to the RAS due to interference from all networks, in any frequency band allocated to the RAS on a primary basis, noting that further studies of the apportionment between different networks are required;
- 2 that, for evaluation of interference, a criterion of 2% be used for data loss to the RAS due to interference from any one network, in any frequency band, which is allocated to the RAS on a primary basis;
- 3 that the percentage of data loss, in frequency bands allocated to the RAS on a primary basis be determined by using one of the following: (1) Recommendation ITU-R S.1586; (2) Recommendation ITU-R M.1583, or (3) the percentage of integration periods of 2 000 s in which the average spectral pfd at the radio telescope exceeds the levels defined (assuming 0 dBi antenna gain) in Recommendation ITU-R RA.769, whichever is appropriate;
- 4 that the criteria described in § 3.3.2 of Annex 1 be used for evaluation of interference, in any frequency band allocated to the RAS on a primary basis, from unwanted emissions produced by any non-GSO satellite system at radio astronomy sites.

TABLE 2  
Interference criteria for satellite passive remote sensing up to 1 000 GHz

Frequency band(s) (GHz)	Reference bandwidth (MHz)	Maximum interference level (dBW)	Percentage of area or time permissible interference level may be exceeded <sup>(1)</sup> (%)	Scan mode (N, C, L) <sup>(2)</sup>
1.370-1.427	27	-174	0.1	N, C
2.64-2.70	10	-176	0.1	N
4.2-4.4	200	-166	0.1	N, C
6.425-7.25	200	-166	0.1	N, C
10.6-10.7	100	-166	0.1	N, C
15.2-15.4	50	-169	0.1	N, C
18.6-18.8	200	-163	0.1	N, C
21.2-21.4	100	-169	0.1	N
22.21-22.5	100	-169	0.1	N
23.6-24	200	-166	0.01	N, C
31.3-31.8	200	-166	0.01	N, C
36-37	100	-166	0.1	N, C
50.2-50.4	200	-166	0.01	N, C
52.6-59.3	100	-169	0.01	N, C
86-92	100	-169	0.01	N, C
100-102	10	-189	1	L
109.5-111.8	10	-189	1	L
114.25-116	10	-189	1	L
115.25-122.25	200/10 <sup>(3)</sup>	-166/-189 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
148.5-151.5	500/10 <sup>(3)</sup>	-159/-189 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
155.5-158.5 <sup>(4)</sup>	200	-163	0.01	N, C
164-167	200/10 <sup>(3)</sup>	-163/-189 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, C, L
174.8-191.8	200/10 <sup>(3)</sup>	-163/-189 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, C, L
200-209	3	-194	1	L
226-231.5	200/3 <sup>(3)</sup>	-160/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
235-238	3	-194	1	L
250-252	3	-194	1	L
275-285.4	3	-194	1	L
296-306	200/3 <sup>(3)</sup>	-160/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
313.5-355.6	200/3 <sup>(3)</sup>	-158/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, C, L
361.2-365	200/3 <sup>(3)</sup>	-158/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
369.2-391.2	200/3 <sup>(3)</sup>	-158/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L

TABLE 2 (end)

Frequency band(s) (GHz)	Reference bandwidth (MHz)	Maximum interference level (dBW)	Percentage of area or time permissible interference level may be exceeded <sup>(1)</sup> (%)	Scan mode (N, C, L) <sup>(2)</sup>
397.2-399.2	200/3 <sup>(3)</sup>	-158/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
409-411	3	-194	1	L
416-433.46	200/3 <sup>(3)</sup>	-157/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
439.1-466.3	200/3 <sup>(3)</sup>	-157/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, C, L
477.75-496.75	3	-194	1	L
497-502	200/3 <sup>(3)</sup>	-156/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
523-527	200	-156	0.01	N
538-581	200/3 <sup>(3)</sup>	-156/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
611.7-629.7	3	-194	1	L
634-654	200/3 <sup>(3)</sup>	-155/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
656.9-692	200/3 <sup>(3)</sup>	-155/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, C, L
713.4-717.4	3	-194	1	L
729-733	3	-194	1	L
750-754	3	-194	1	L
771.8-775.8	3	-194	1	L
823.15-845.15	200/3 <sup>(3)</sup>	-154/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, C, L
850-854	3	-194	1	L
857.9-861.9	3	-194	1	L
866-882	200	-154	0.01	C
905.17-927.17	200/3 <sup>(3)</sup>	-153/-194 <sup>(3)</sup>	0.01/1 <sup>(3)</sup>	N, L
951-956	3	-194	1	L
968.31-972.31	3	-194	1	L
985.9-989.9	3	-194	1	L

<sup>(1)</sup> For a 0.01% level, the measurement area is a square on the Earth of 2 000 000 km<sup>2</sup>, unless otherwise justified; for a 0.1% level, the measurement area is a square on the Earth of 10 000 000 km<sup>2</sup> unless otherwise justified; for a 1% level, the measurement time is 24 h, unless otherwise justified.

<sup>(2)</sup> N: Nadir, Nadir scan modes concentrate on sounding or viewing the Earth's surface at angles of nearly perpendicular incidence. The scan terminates at the surface or at various levels in the atmosphere according to the weighting functions. L: Limb, Limb scan modes view the atmosphere "on edge" and terminate in space rather than at the surface, and accordingly are weighted zero at the surface and maximum at the tangent point height. C: Conical, Conical scan modes view the Earth's surface by rotating the antenna at an offset angle from the nadir direction.

<sup>(3)</sup> First number for nadir or conical scanning modes and second number for microwave limb sounding applications.

<sup>(4)</sup> This band is needed until 2018 to accommodate existing and planned sensors.

TABLE 19  
EESS (passive) sensor characteristics operating between 86 and 92 GHz

	Sensor L1	Sensor L2	Sensor L3	Sensor L4	Sensor L5	Sensor L6	Sensor L7	Sensor L8
Sensor type	Conical scan			Mechanical nadir scan			Conical scan	
<b>Orbit parameters</b>								
Altitude	867 km	705 km	833 km	833 km 822 km*		824 km	835 km	700 km
Inclination	20°	98.2°	98.7°	98.6° 98.7°*		98.7°	98.85°	98.2°
Eccentricity	0	0.0015	0	0 0.001*		0		0.002
Repeat period	7 days	16 days	17 days	9 days 29 days*		9 days	N/A	16 days
<b>Sensor antenna parameters</b>								
Number of beams	1	2	1	30 earth fields per 8 s scan period	30 earth fields per 8 s scan period  1 beam (steerable in 90 earth fields per scan period)*	2		
Reflector diameter	0.65 m	1.6 m	2.2 m	0.15 m	0.3 m 0.22 m*	0.203 m	0.6 m	2 m
Maximum beam gain	50 dBi	60.5 dBi	56 dBi	34.4 dBi	47 dBi 44.8 dBi*	37.9 dBi	54 dBi	62.4 dBi
Polarization	H, V			H QV*		QV	H, V	
-3 dB beamwidth	0.43°	0.18°	0.39°	3.3°	1.1°	2.2°	0.4°	0.15°
Instantaneous field of view	10 km × 17 km	A: 6.2 km × 3.6 km B: 5.9 km × 3.5 km	16 km × 12 km	Nadir FOV: 48.5 km Outer FOV: 149.1 × 79.4 km 147 × 79 km*	Nadir FOV: 16 km (1.1°) Outer FOV: 53 × 27 km*	Nadir FOV: 31.6 km × 31.6 km Outer FOV: 136.7 × 60 km	12 km × 28 km	A: 5.1 km × 2.9 km B: 5.0 km × 2.9 km
Main beam efficiency	96.2%	96%	95%			N/A		91%

TABLE 2

Sensor type	Interference criteria		Data availability criteria (%)	
	Performance degradation	<i>I/N</i> (dB)	Systematic	Random
Synthetic aperture radar	10% degradation of standard deviation of pixel power	-6	99	95
Altimeter	4% degradation in height noise	-3	99	95
Scatterometer	8% degradation in measurement of normalized radar backscatter to deduce wind speeds	-5	99	95
Precipitation radar	7% increase in minimum rainfall rate	-10	N/A	99.8
Cloud profile radar	10% degradation in minimum cloud reflectivity	-10	99	95

TABLE 16  
Characteristics of EESS (active) missions in the 94-94.1 GHz band

Parameter	CPR-L1	CPR-L2
Sensor type	Cloud profiling radar	Cloud profiling radar
Type of orbit	SSO	SSO
Altitude (km)	705	393
Inclination (degrees)	98.2	97
Ascending Node LST	13:30	10:30 <sup>11</sup>
Repeat period (days)	16	25
Antenna type	Parabolic reflector to offset cassegrain antenna	Parabolic reflector
Antenna diameter	1.85-2.5 m	2.5 m
Antenna (transmit and receive) peak gain (dBi)	63.1-65.2	65.2
Polarization	linear	LHC, RHC
Incidence angle at Earth (degrees)	0	0
Azimuth scan rate (rpm)	0	0
Antenna beam look angle (degrees)	0	0
Antenna beam azimuth angle (degrees)	0	0
Antenna elev. beamwidth (degrees)	0.12	0.095
Antenna az. beamwidth (degrees)	0.12	0.095
Beam width (degrees)	0.095-0.108	0.095
RF centre frequency (MHz)	94.050	94.050
RF bandwidth (MHz)	0.36	7
Transmit Pk pwr (W)	1 000	1 430
Transmit Ave. pwr (W)	21.31	28.8
Pulsewidth (μs)	3.33	3.3
Pulse repetition frequency (PRF) (Hz)	4 300	6 100-7 500
Chirp rate (MHz/μs)	N/A <sup>12</sup>	2.1
Transmit duty cycle (%)	1.33	2.01
Minimum sensitivity (dBz)	-30 to -35	-30 to -35
Horizontal resolution	0.7-1.9 km	800 m
Vertical resolution	250-500 m	500 m
Doppler range	±10 m/s	±10 m/s
Doppler accuracy	1 m/s	1 m/s
System noise figure (dB)	7	7

<sup>11</sup> Descending.

<sup>12</sup> The sensor uses an unmodulated pulse.



空港と電波天文間の断面図から、ナイフエッジによる回折損失の際に参考にした。

#### 4.1 Single knife-edge obstacle

In this extremely idealized case (see Figs 8a) and 8b)), all the geometrical parameters are combined together in a single dimensionless parameter normally denoted by  $v$  which may assume a variety of equivalent forms according to the geometrical parameters selected:

16

Rec. ITU-R P.526-14

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (26)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (27)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 h \theta}{\lambda}} \quad (v \text{ has the sign of } h \text{ and } \theta) \quad (28)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 d}{\lambda} \cdot \alpha_1 \alpha_2} \quad (v \text{ has the sign of } \alpha_1 \text{ and } \alpha_2) \quad (29)$$

where:

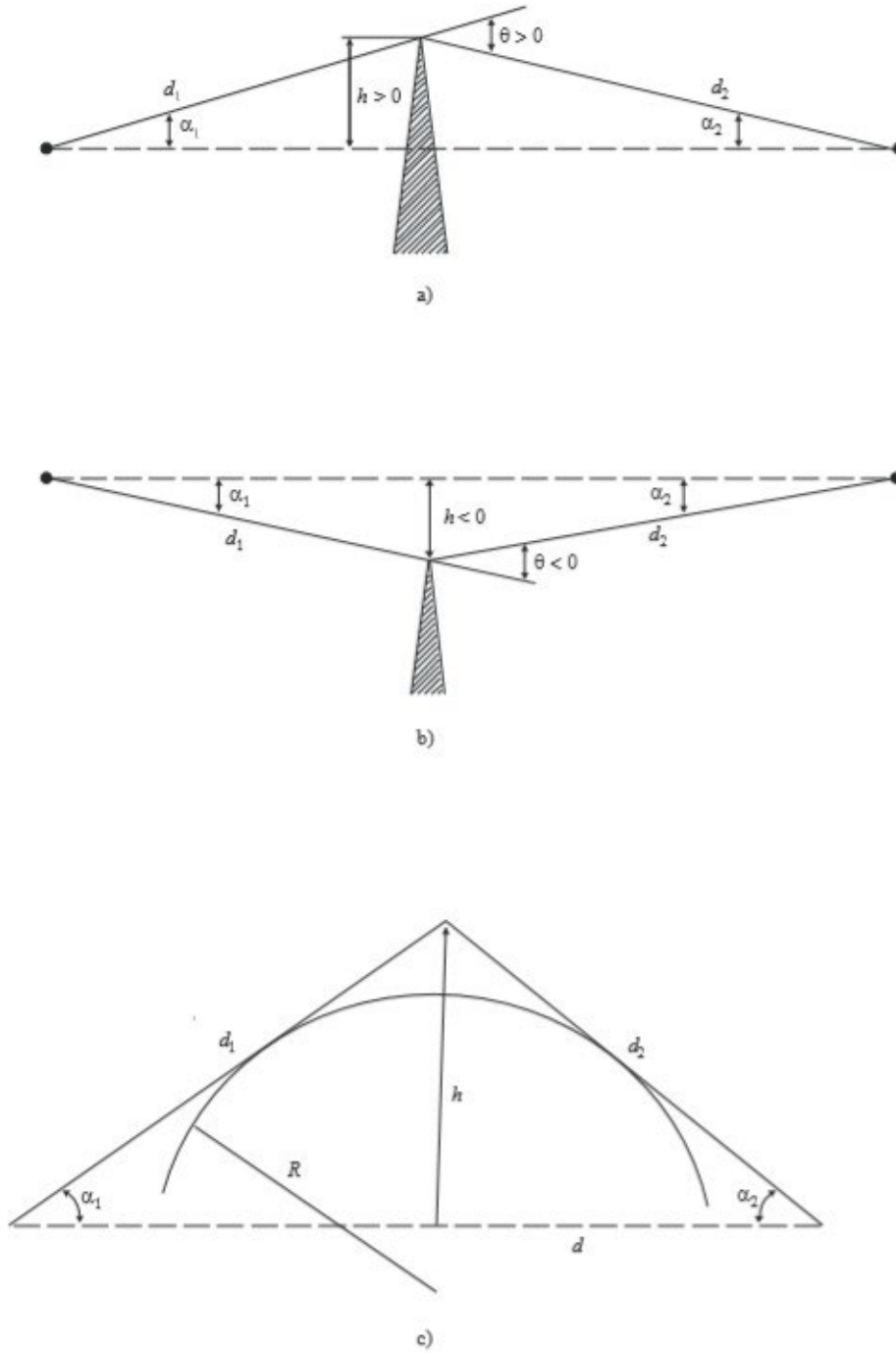
- $h$ : height of the top of the obstacle above the straight line joining the two ends of the path. If the height is below this line,  $h$  is negative
- $d_1$  and  $d_2$ : distances of the two ends of the path from the top of the obstacle
- $d$ : length of the path
- $\theta$ : angle of diffraction (rad); its sign is the same as that of  $h$ . The angle  $\theta$  is assumed to be less than about 0.2 rad, or roughly 12°
- $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ : angles in radians between the top of the obstacle and one end as seen from the other end.  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  are of the sign of  $h$  in the above equations.

NOTE 1 – In equations (26) to (29) inclusive  $h$ ,  $d$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  and  $\lambda$  should be in self-consistent units.

FIGURE 8

Geometrical elements

(For definitions of  $\theta$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $d$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  and  $R$ , see § 4.1 and 4.2)



P0526-08

Figure 9 gives, as a function of  $v$ , the loss  $J(v)$  (dB).

$J(v)$  is given by:

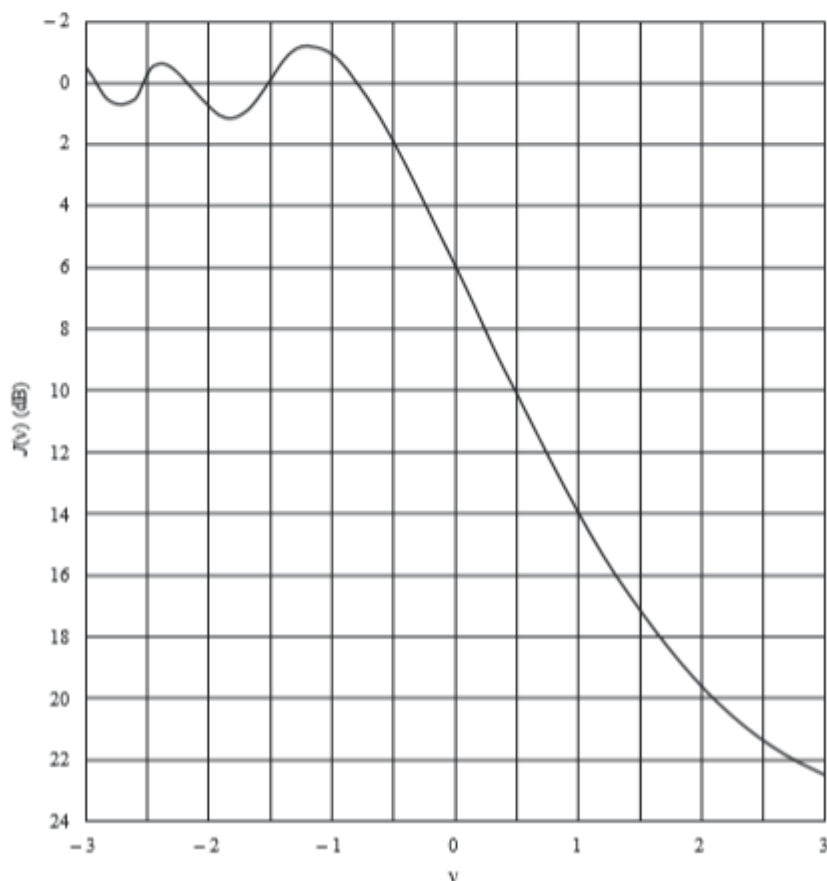
$$J(v) = -20 \log \left( \frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right) \quad (30)$$

where  $C(v)$  and  $S(v)$  are the real and imaginary parts respectively of the complex Fresnel integral  $F(v)$  defined in § 2.7.

For  $v$  greater than  $-0.78$  an approximate value can be obtained from the expression:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad \text{dB} \quad (31)$$

FIGURE 9  
Knife-edge diffraction loss



P0526-09

電波天文業務の用に供する受信設備

(電波法第五十六条第一項)

平成二十五年四月二十四日  
総務省告示第百九十五号

電波法(昭和二十五年法律第三百一十一号)第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項の規定により告示する。

なお、平成十五年総務省告示第二百八十七号(電波天文業務の用に供する受信設備を指定した件)は、廃止する。

一 受信の業務の種別

電波天文業務

二 その受信設備を設置している者の名称

大学共同利用機関法人自然科学研究機構

三 設置場所

長野県南佐久郡南牧村野辺山四六二番二号

東経 一三八度二八分二一秒

北緯 三五度五六分四〇秒

四 受信しようとする電波の周波数

一、四〇〇MHzから一、四二七MHzまで

一、六六〇・五MHzから一、六六八・四MHzまで

一五・三五GHzから一五・四GHzまで

二二・二GHzから二二・五GHzまで

告示一九五号(平二五・四・二四)電波法五六条

五 運用時間

常時

六 指定の有効期間

平成二十五年三月二十五日から平成三十五年三月二十四日まで

二三・六GHzから二四・〇GHzまで

三一・三GHzから三一・五GHzまで

四二・五GHzから四三・五GHzまで

八六・〇GHzから九二・〇GHzまで

一〇五・〇GHzから一一六・〇GHzまで

告示三六三号(平三〇・一一・七)電波法五六条

電波天文業務の用に供する受信設備

(電波法第五十六条第一項)  
平成三十年十一月七日  
総務省告示第三百六十三号

電波法(昭和二十五年法律第三百一十一号)第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則(昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号)第五十条の六第三項の規定により公示する。

- 一 受信の業務の種類  
電波天文業務
- 二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
国立大学法人名古屋大学
- 三 設置場所
  - (一) 山梨県南都留郡富士河口湖町富士ヶ嶺一三四七番地の二  
東経 一三八度三八分四二秒  
北緯 三五度二五分三六秒
  - (二) 長野県上田市菅平高原一二二三一―三七五三  
東経 一三八度一九分一六秒  
北緯 三六度三一分一二秒
  - (三) 長野県木曾郡上松町大字小川字才見山四六三九―一  
東経 一三七度三七分四九秒  
北緯 三五度四七分三四秒

- 四 愛知県豊川市穂ノ原三十一―三  
東経 一三七度二二分〇九秒  
北緯 三四度五〇分〇五秒  
受信しようとする電波の周波数  
三二五・七五MHzから三二八・六〇MHzまで
- 五 運用時間  
常時
- 六 指定の有効期間  
平成三十年十二月二日から平成四十年十二月一日まで
- 七 その他参考事項  
なし

六(追五二)

電波天文業務の用に供する受信設備

(電波法第五十六条第一項)  
平成二十二年十二月二十八日  
総務省告示第四百四十八号

電波法(昭和二十五年法律第百三十一号)第五十六条第一項の規定により、次とおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則(昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号)第五十条の六第三項の規定により告示する。

- 一 受信の業務の種類別  
電波天文業務
- 二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
- 三 設置場所
  - (一) 岩手県奥州市水沢区星ガ丘町二番一二号  
東経 一四一度〇七分五七秒  
北緯 三九度〇八分〇一秒
  - (二) 東京都小笠原村父島字旭山  
東経 一四二度一三分〇〇秒  
北緯 二七度〇五分三一秒
  - (三) 鹿児島県薩摩川内市入来町浦之名四〇一八番地三  
東経 一三〇度二六分二四秒

北緯 三一度四四分五二秒

四 沖縄県石垣市宇登野城嵩田二三八九番一

東経 一二四度一〇分一六秒

北緯 二四度二四分四四秒

四 受信しようとする電波の周波数

二二・二一GHzから二二・五GHzまで

二三・六GHzから二四・〇GHzまで

四二・五GHzから四三・五GHzまで

八五・五GHzから九二・〇GHzまで

五 運用時間

常時

六 指定の有効期間

平成二十二年十二月十日から平成三十二年十二月九日まで

告示四四八号(平三二・一二・二八)電波法五六条

六の二(進四六)

告示五二号(平二四・二・二七) 電波法五六条

電波天文業務の用に供する受信設備

(電波法第五十六条第一項)  
平成二十四年二月二十七日  
総務省告示第五十二号

電波法(昭和二十五年法律第三百三十一号)第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則(昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号)第五十条の六第三項の規定により告示する。

- 一 受信の業務の種別  
電波天文業務
- 二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
- 三 設置場所  
鹿児島県鹿児島市平川町字狐迫二一五五番地  
東経 一三〇度三〇分二六秒  
北緯 三一度二七分五一秒
- 四 受信しようとする電波の周波数  
二三・六GHzから二四・〇GHzまで  
八六・〇GHzから九二・〇GHzまで  
一〇五・〇GHzから一一六・〇GHzまで
- 五 運用時間

六 常時  
指定の有効期間

平成二十四年二月十一日から平成三十四年二月十日まで

六の三(通則六)

電波天文業務の用に供する受信設備

(電波法第五十六条第一項)

平成二十四年四月二十日

総務省告示第百七十四号

電波法(昭和二十五年法律第百三十一号)第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則(昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号)第五十条の六第三項の規定により告示する。

- 一 受信の業務の種類別  
電波天文業務
- 二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
- 三 設置場所  
岩手県奥州市水沢区星ガ丘町二番一二号  
東経 一四一度〇七分五七秒  
北緯 三九度〇八分〇〇秒
- 四 受信しようとする電波の周波数  
二三・六GHzから二四・〇GHzまで
- 五 運用時間  
常時
- 六 指定の有効期間  
平成二十四年三月十九日から平成三十四年三月十八日まで

告示一七四号(平二四・四・二〇)電波法五六条



システムの概要に関して多少の文言は異なるが、§ 6-8-7、§ 6-9-11 にも、下記 § 6-7-5 とほぼ同一の記述があり、電波天文業務保護の必要性を記載している。

### § 6-7-5 電波天文

#### (1) システムの概要

本システムは、天体から放射される電波を受信することにより、天体や宇宙空間の物理状態、さらには宇宙そのものの成因など、宇宙全体を観測するためのシステムである。

遠方の天体から放射される線スペクトルは、宇宙膨張のため長い波長にずれる(赤方偏移によって、最大7倍程度)。また微弱天体を感度よく観測するために広帯域で観測する。これらのため観測は可能な限り広帯域で行われている。

21.2GHz-23.6GHz帯は、22.235GHzの水分子メーザースペクトル線の観測が盛んに行われている重要な周波数帯のひとつである。国立天文台野辺山宇宙電波観測所ではこの周波数帯の観測で、巨大ブラックホールを検証した。また、VLBI観測も行われている。

#### (2) システムの構成イメージ



線スペクトル：原子のエネルギー準位間の遷移によって放射または吸収されて生じる線上の光のスペクトル

VLBI(Very Long Baseline Interferometry)：超長基線電波干渉法のこと、天体からの電波を利用してアンテナの位置を計測する技術

#### (3) 電波天文業務の受信設備の保護

電波天文業務の受信設備は非常に小さい強度の電波を計測しているため、円滑に観測を実施するためには、無線局が発射する電波や不要発射から保護する必要がある。

このため、無線通信規則(RR)では電波天文業務に分配された周波数の保護を各主管庁に対して求めており、これに基づいて、我が国は総務大臣の指定を受けた電波天文業務の受信設備を保護する旨の規定を設けている(電波法第56条)。

- (4) 指定を受けた電波天文業務の受信設備  
 今回の調査対象である3.4GHz帯を超える周波数帯域で(3)の保護指定を受けている受信設備の設置場所及び受信周波数は次のとおりである。

設置場所(※)	受信周波数 (単位:GHz)	(参考)告示番号
長野県南佐久郡南牧村	15.35～15.4 22.21～22.5 23.6～24.0 31.3～31.5 42.5～43.5 86.0～92.0 105.0～116.0	平成25年4月24日総務省告示第195号
岩手県奥州市	22.21～22.5	平成22年12月28日総務省告示第448号
東京都小笠原村	23.6～24.0	
鹿児島県薩摩川内市	42.5～43.5	
沖縄県石垣市	85.5～92.0	
鹿児島県鹿児島市	23.6～24.0 86.0～92.0 105.0～116.0	平成24年2月27日総務省告示第52号
岩手県奥州市	23.6～24.0	平成24年4月20日総務省告示第174号

(※) 告示された情報のうち、市名・村名までを記載。

## § 6-9-10 80GHz帯高速無線伝送システム

### (1) システムの概要

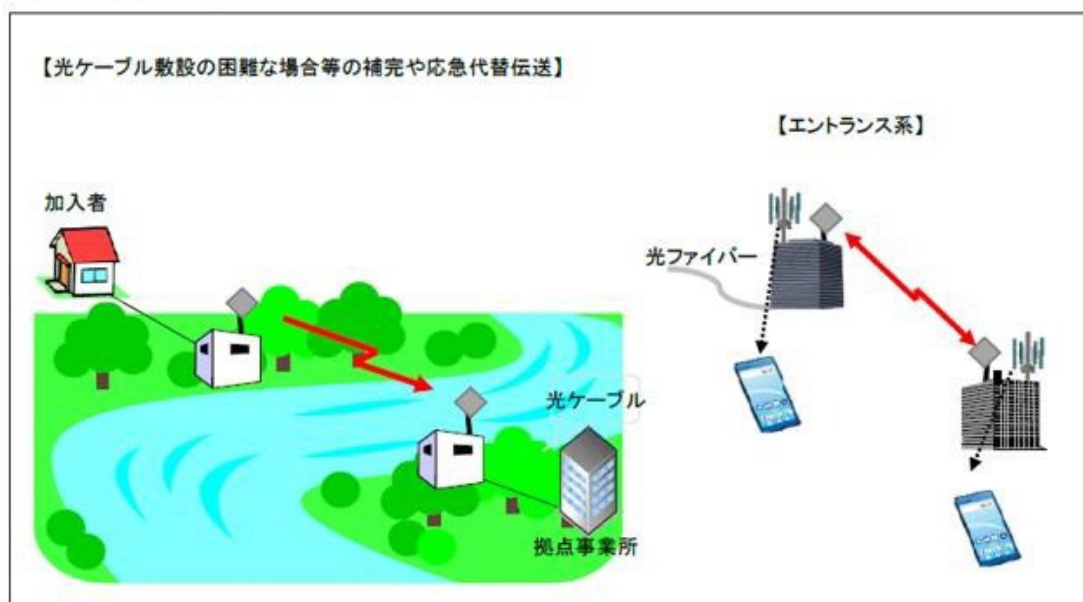
本システムは、電気通信事業者等が、河川・鉄道・入江等の横断、島嶼・山間地域等の光ケーブルの敷設が困難な場合の補間や応急代替に利用しており、2km程度までの伝送を想定している。

また、携帯電話等の基地局エントランスとして利用している。

高精細映像等の伝送用として使用する場合、低遅延伝送が可能である

なお、使用周波数帯は80GHz帯の5GHz×2(71GHz～76GHz及び81GHz～86GHz)である。

### (2) システムの構成イメージ



② 電波利用システムごとの免許人数と無線局数及び無線局数の割合

電波利用システム名	免許人数	無線局数	無線局数の割合
40GHz帯画像伝送(公共業務用)	3者	143局	4.1%
40GHz帯公共・一般業務(中継系)	13者	53局	1.5%
38GHz帯FWA	1者	100局	2.9%
40GHz帯映像FPU	1者	4局	0.1%
40GHz帯駅ホーム画像伝送	11者	574局	16.5%
47GHz帯アマチュア	553者	592局	17.0%
50GHz帯簡易無線	107者	937局	26.9%
55GHz帯映像FPU	1者	3局	0.1%
60GHz帯電気通信業務用(無線アクセスシステム)	1者	4局	0.1%
80GHz帯高速無線伝送システム	25者	463局	13.3%
77.75GHz帯アマチュア	207者	231局	6.6%
120GHz帯映像FPU	0者	0局	0.0%
135GHz帯アマチュア	139者	160局	4.6%
249GHz帯アマチュア	12者	17局	0.5%
実験試験局(36GHz-)	18者	197局	5.7%
その他(36GHz-)	0者	0局	0.0%
120GHz帯超高精細映像伝送システム	1者	3局	0.1%
合計	1,093者	3,481局	-

\*1 複数の電波利用システムを利用している免許人・無線局は、それぞれの電波利用システムで計上している。詳細は、第2章第2節を参照のこと。

\*2 0.05%未満については、0.0%と表示している。

○着陸回数(国際+国内)

順位	空港	着陸回数	
		年間	日平均
1	東京国際	227,631	624
2	成田国際	128,952	354
3	関西国際	94,833	260
4	福岡	90,723	249
5	那覇	81,963	225
6	新千歳	77,706	213
7	大阪国際	69,244	190
8	中部国際	51,654	142
9	鹿児島	34,992	96
10	仙台	27,690	76
11	熊本	22,153	61
12	宮崎	21,965	61
13	名古屋	21,711	60
14	松山	15,738	44
15	長崎	15,634	43
16	神戸	14,817	41
17	新潟	13,325	37
18	新石垣	12,893	36
19	八尾	12,748	35
20	広島	12,410	34

付属資料23 国内空港と天文台間の距離及び断面情報

92GHz から 100GHz を使用している野辺山宇宙電波観測所と、86GHz から 92GHz を使用している VERA 観測 4 局があり、それらと国内空港との距離及び断面情報について記載する。

23.1 電波天文観測所を起点とした国内空港に対する距離情報

(1) 野辺山宇宙電波観測所

図 A 1 に、野辺山宇宙電波観測所から、国内空港との距離を示した。図中にあるように、該当する空港がどの程度にあるかで、直線距離がどの程度あるかを把握できる。表には、詳細の距離と、併せて距離に対する自由空間損失及び大気減衰についても示した。

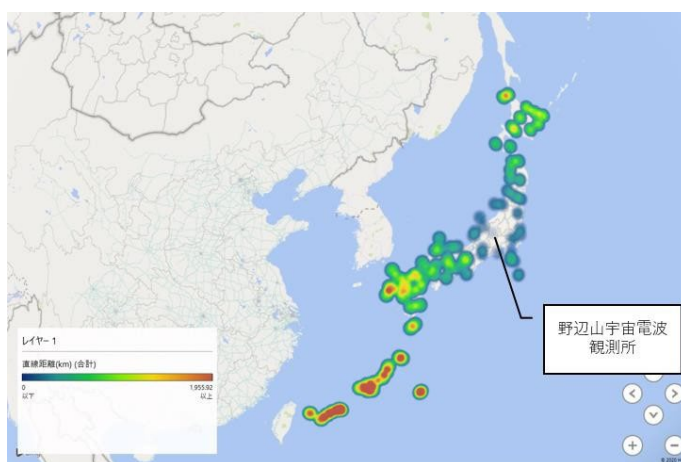


図 A 1 野辺山宇宙電波観測所と国内空港間距離

空港(from 野辺山天文台)	緯度	経度	直線距離(km)	自由空間損失(dB)	大気減衰(dB)
野辺山宇宙電波観測所	35.944448	138.472348	0	0	0
東京国際	35.549517	139.785472	126.595	174.0942444	50.638
成田国際	35.777116	140.382969	173.561	176.8347161	69.4244
関西国際	34.430525	135.231963	339.552	182.6636193	135.8208
福岡	33.585874	130.450823	779.275	189.8792524	311.71
那覇	26.194672	127.646002	1493.253	195.5280961	597.3012
新千歳	42.78602	141.679941	808.13	190.1950609	323.252
大阪国際	34.781943	135.440151	304.246	181.7100062	121.6984

中部国際	34.857858	136.805603	193.533	177.7807349	77.4132
鹿児島	31.803467	130.719292	851.329	190.6473927	340.5316
仙台	38.140129	140.913879	326.391	182.3202621	130.5564
熊本	32.837377	130.855112	780.35	189.8912263	312.14
宮崎	31.877093	131.448669	790.496	190.0034307	316.1984
名古屋	35.256324	136.92377	159.749	176.1144909	63.8996
松山	33.826553	132.700707	577.432	187.2754652	230.9728
長崎	32.917253	129.913	854.989	190.684646	341.9956
神戸	34.632652	135.224456	329.326	182.3980172	131.7304
新潟	37.956305	139.109947	230.379	179.2944309	92.1516
新石垣	24.396457	124.244999	1871.246	197.4880446	748.4984
八尾	34.596078	135.598251	301.254	181.6241667	120.5016
広島	34.435661	132.919671	532.606	186.5735778	213.0424
大分	33.479845	131.737191	674.645	188.626948	269.858
北九州	33.845754	131.035122	718.326	189.1718715	287.3304
高松	34.214153	134.015791	449.424	185.0985849	179.7696
函館	41.770294	140.8211439	678.035	188.6704833	271.214
高知	33.546083	133.669408	513.924	186.2634322	205.5696
秋田	39.615734	140.219085	435.539	184.8260028	174.2156
小松	36.394918	136.407557	192.375	177.7286087	76.95
宮古	24.782771	125.294979	1767.401	196.9921291	706.9604
青森	40.733797	140.689547	565.815	187.0989353	226.326
奄美	28.431822	129.713134	1172.08	193.4245755	468.832
丘珠(札幌)	43.117547	141.381123	834.589	190.474889	333.8356
帯広	42.732546	143.218076	857.158	190.7066515	342.8632
出雲	35.413514	132.889648	508.74	186.1753728	203.496
調布	35.67233	139.527681	100.044	172.0499922	40.0176
岡山	34.75678	133.855019	439.847	184.9114956	175.9388
花巻	39.429292	141.135419	452.465	185.1571589	180.986
佐賀	33.149668	130.302462	811.111	190.2270424	324.4444
釧路	43.040846	144.192979	928.382	191.3999672	371.3528
徳島	34.132769	134.606851	405.91	184.2140675	162.364
静岡	34.795916	138.189805	129.989	174.323955	51.9956
女満別	43.880168	144.164246	1005.971	192.0971413	402.3884
福島	37.228021	140.427863	225.624	179.1133924	90.2496
山形	38.412086	140.37149	321.6	182.1918123	128.64

山口宇部	33. 930009	131. 278983	693. 921	188. 8716416	277. 5684
岡南	34. 590858	133. 933323	439. 408	184. 9028248	175. 7632
富山	36. 648648	137. 187364	139. 38	174. 9298266	55. 752
米子(美保)	35. 493482	133. 239365	476. 074	185. 5989486	190. 4296
旭川	43. 670501	142. 447337	922. 596	191. 3456646	369. 0384
松本	36. 166751	137. 922647	55. 33	166. 9094581	22. 132
対馬	34. 284703	129. 330645	853. 115	190. 6655864	341. 246
福井	36. 142799	136. 223922	203. 812	178. 2302082	81. 5248
茨城(百里)	36. 181189	140. 415605	177. 024	177. 0063089	70. 8096
久米島	26. 363955	126. 713975	1542. 066	195. 8074872	616. 8264
徳之島	27. 835841	128. 881129	1276. 035	194. 1626812	510. 414
福江	32. 667182	128. 83333	958. 306	191. 6755169	383. 3224
屋久島	30. 385145	130. 659758	953. 959	191. 6360273	381. 5836
鳥取	35. 530101	134. 165294	392. 298	183. 917797	156. 9192
南紀白浜	33. 662534	135. 364255	380. 71	183. 6573607	152. 284
大島	34. 781532	139. 360019	152. 169	175. 6922735	60. 8676
岩国	34. 146344	132. 247268	601. 839	187. 6350529	240. 7356
庄内	38. 812362	139. 787039	338. 913	182. 6472558	135. 5652
八丈島	33. 115152	139. 786104	336. 224	182. 5780616	134. 4896
沖永良部	27. 430901	128. 705102	1320. 894	194. 4627884	528. 3576
種子島	30. 605345	130. 991057	914. 014	191. 2644969	365. 6056
但馬	35. 512871	134. 787023	336. 819	182. 5934521	134. 7276
喜界	28. 321694	129. 928165	1167. 057	193. 3872718	466. 8228
三沢	40. 703205	141. 369154	585. 733	187. 3994404	234. 2932
天草	32. 482195	130. 159284	856. 515	190. 7001342	342. 606
中標津	43. 577526	144. 960024	1012. 807	192. 1559657	405. 1228
能登	37. 29323	136. 961666	201. 645	178. 1373306	80. 658
与論	27. 043781	128. 401819	1372. 893	194. 7981626	549. 1572
与那国	24. 467324	122. 979483	1955. 924	197. 8724662	782. 3696
稚内	45. 404522	141. 802501	1087. 325	192. 7726188	434. 93
三宅島	34. 071994	139. 559758	230. 222	179. 2885077	92. 0888
新島	34. 369538	139. 268635	189. 191	177. 5836458	75. 6764
神津島	34. 189411	139. 133461	203. 83	178. 2309488	81. 532
石見	34. 676412	131. 78989	623. 643	187. 9441664	249. 4572
隠岐	36. 178421	133. 323571	464. 542	185. 3859624	185. 8168
杵岐	33. 748686	129. 785437	830. 641	190. 4337032	332. 2564



大館能代	40.19175	140.37156	499.994	186.024749	199.9976
南大東	25.846804	131.263481	1313.637	194.4149366	525.4548
多良間	24.653418	124.675463	1820.58	197.2496224	728.232
大分県央	33.026302	131.505465	716.902	189.1546367	286.7608
利尻	45.24188	141.187328	1057.533	192.53131	423.0132
紋別	44.303823	143.404055	1018.451	192.2042349	407.3804
北大東	25.944715	131.326787	1301.065	194.3314091	520.426
奥尻	42.071623	139.43268	685.27	188.7626748	274.108
下地島	24.825582	125.145344	1774.174	197.0253514	709.6696
粟国	26.592577	127.240358	1487.622	195.49528	595.0488
小値賀	33.190706	129.090335	913.055	191.2553728	365.222
佐渡	38.060525	138.414155	234.887	179.4627431	93.9548
上五島	33.013606	129.192354	911.892	191.2443017	364.7568
慶良間	26.167442	127.293201	1518.826	195.6755885	607.5304
波照間	24.059835	123.805629	1929.01	197.7521163	771.604
伊江島	26.722701	127.786999	1440.167	195.2136857	576.0668

## (2) VERA 水沢観測局

図 A 2 に、VERA 水沢観測局から、国内空港との距離を示した。図中にあるように、該当する空港がどの程度にあるかで、直線距離がどの程度あるかを把握できる。詳細の距離については表に示しており、併せて距離に対する自由空間損失及び大気減衰についても示した。

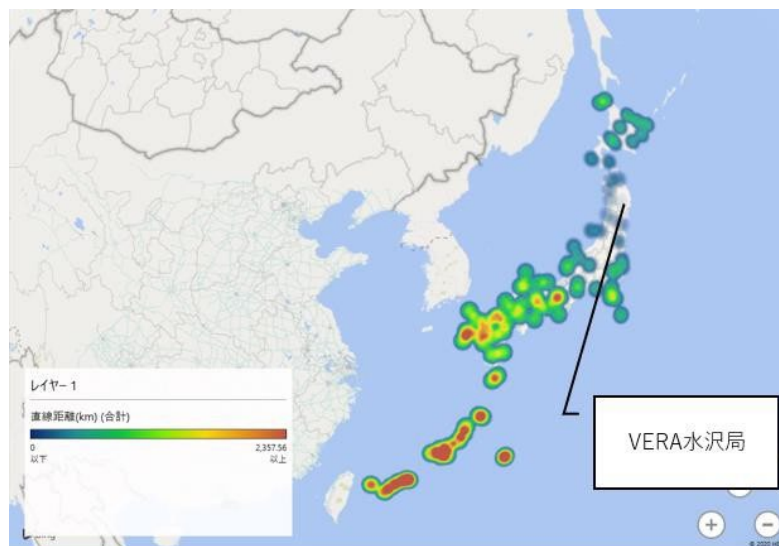


図 A 2 VERA 水沢観測局と国内空港間距離

空港 (from VERA 水沢局)	緯度	経度	直線距離 (km)	自由空間損失 (dB)	大気減衰 (dB)
VERA 水沢観測局	39.133543	141.132548	0	0	0
東京国際	35.549517	139.785472	415.282	184.4122869	166.1128
成田国際	35.777116	140.382969	378.371	183.6037817	151.3484
関西国際	34.430525	135.231963	741.165	189.4437227	296.466
福岡	33.585874	130.450823	1138.101	193.1690408	455.2404
那覇	26.194672	127.646002	1908.433	197.658963	763.3732
新千歳	42.78602	141.679941	408.223	184.2633742	163.2892
大阪国際	34.781943	135.440151	699.875	188.9458343	279.95
中部国際	34.857858	136.805603	610.985	187.7660357	244.394
鹿児島	31.803467	130.719292	1245.317	193.9510242	498.1268
仙台	38.140129	140.913879	111.911	173.0228815	44.7644
熊本	32.837377	130.855112	1159.325	193.3295301	463.73
宮崎	31.877093	131.448669	1190.309	193.558619	476.1236
名古屋	35.256324	136.92377	569.754	187.1591724	227.9016
松山	33.826553	132.700707	957.247	191.665905	382.8988
長崎	32.917253	129.913	1222.586	193.791013	489.0344
神戸	34.632652	135.224456	725.552	189.2587956	290.2208
新潟	37.956305	139.109947	219.462	178.8726117	87.7848
新石垣	24.396457	124.244999	2279.066	199.2005627	911.6264
八尾	34.596078	135.598251	704.76	189.0062496	281.904
広島	34.435661	132.919671	898.943	191.1200734	359.5772
大分	33.479845	131.737191	1050.5	192.4733458	420.2
北九州	33.845754	131.035122	1077.311	192.6922466	430.9244
高松	34.214153	134.015791	837.79	190.5081291	335.116
函館	41.770294	140.8211439	293.98	181.4117806	117.592
高知	33.546083	133.669408	912.231	191.2475212	364.8924
秋田	39.615734	140.219085	95.189	171.6171813	38.0756
小松	36.394918	136.407557	515.362	186.2876726	206.1448
宮古	24.782771	125.294979	2178.185	198.8073199	871.274
青森	40.733797	140.689547	181.669	177.2310643	72.6676
奄美	28.431822	129.713134	1587.102	196.0575214	634.8408
丘珠(札幌)	43.117547	141.381123	442.943	184.9723816	177.1772
帯広	42.732546	143.218076	436.532	184.8457522	174.6128
出雲	35.413514	132.889648	839.094	190.521637	335.6376
調布	35.67233	139.527681	409.559	184.2917544	163.8236

岡山	34.75678	133.855019	809.568	190.2104946	323.8272
花巻	39.429292	141.135419	32.837	162.3728271	13.1348
佐賀	33.149668	130.302462	1178.03	193.4685517	471.212
釧路	43.040846	144.192979	504.313	186.0994295	201.7252
徳島	34.132769	134.606851	804.92	190.1604791	321.968
静岡	34.795916	138.189805	548.006	186.821132	219.2024
女満別	43.880168	144.164246	584.681	187.3838044	233.8724
福島	37.228021	140.427863	220.341	178.9074139	88.1364
山形	38.412086	140.37149	103.872	172.3754432	41.5488
山口宇部	33.930009	131.278983	1053.578	192.4987585	421.4312
岡南	34.590858	133.933323	815.776	190.2768432	326.3104
富山	36.648648	137.187364	443.201	184.9774394	177.2804
米子(美保)	35.493482	133.239365	807.494	190.1882108	322.9976
旭川	43.670501	142.447337	515.716	186.2936435	206.2864
松本	36.166751	137.922647	434.292	184.8011099	173.7168
対馬	34.284703	129.330645	1182.507	193.5014993	473.0028
福井	36.142799	136.223922	545.645	186.7836283	218.258
茨城(百里)	36.181189	140.415605	333.723	182.5131476	133.4892
久米島	26.363955	126.713975	1952.343	197.8565471	780.9372
徳之島	27.835841	128.881129	1689.803	196.6021462	675.9212
福江	32.667182	128.83333	1320.091	194.4575026	528.0364
屋久島	30.385145	130.659758	1362.378	194.7313771	544.9512
鳥取	35.530101	134.165294	735.308	189.3748105	294.1232
南紀白浜	33.662534	135.364255	797.32	190.0780781	318.928
大島	34.781532	139.360019	508.093	186.164289	203.2372
岩国	34.146344	132.247268	967.563	191.7590097	387.0252
庄内	38.812362	139.787039	121.932	173.7677799	48.7728
八丈島	33.115152	139.786104	678.703	188.6790204	271.4812
沖永良部	27.430901	128.705102	1735.678	196.8348078	694.2712
種子島	30.605345	130.991057	1322.988	194.4765435	529.1952
但馬	35.512871	134.787023	690.935	188.8341705	276.374
喜界	28.321694	129.928165	1583.633	196.0385155	633.4532
三沢	40.703205	141.369154	175.454	176.9286909	70.1816
天草	32.482195	130.159284	1234.681	193.8765203	493.8724
中標津	43.577526	144.960024	588.214	187.4361325	235.2856
能登	37.29323	136.961666	418.449	184.4782849	167.3796

与論	27.043781	128.401819	1787.961	197.0925855	715.1844
与那国	24.467324	122.979483	2357.559	199.4946761	943.0236
稚内	45.404522	141.802501	698.753	188.9318984	279.5012
三宅島	34.071994	139.559758	579.012	187.299176	231.6048
新島	34.369538	139.268635	554.215	186.9189902	221.686
神津島	34.189411	139.133461	576.982	187.268671	230.7928
石見	34.676412	131.78989	967.712	191.7603474	387.0848
隠岐	36.178421	133.323571	762.783	189.6934454	305.1132
舌岐	33.748686	129.785437	1178.515	193.472127	471.406
大館能代	40.19175	140.37156	134.424	174.6149715	53.7696
南大東	25.846804	131.263481	1738.47	196.8487687	695.388
多良間	24.653418	124.675463	2229.194	199.008382	891.6776
大分県央	33.026302	131.505465	1099.408	192.8686048	439.7632
利尻	45.24188	141.187328	678.515	188.6766138	271.406
紋別	44.303823	143.404055	604.495	187.673279	241.798
北大東	25.944715	131.326787	1725.905	196.7857624	690.362
奥尻	42.071623	139.43268	356.558	183.0880289	142.6232
下地島	24.825582	125.145344	2184.13	198.8309943	873.652
粟国	26.592577	127.240358	1899.321	197.6173921	759.7284
小値賀	33.190706	129.090335	1266.75	194.0992429	506.7
佐渡	38.060525	138.414155	265.063	180.5124071	106.0252
上五島	33.013606	129.192354	1270.306	194.1235922	508.1224
慶良間	26.167442	127.293201	1932.624	197.768372	773.0496
波照間	24.059835	123.805629	2336.348	199.4161753	934.5392
伊江島	26.722701	127.786999	1853.821	197.4067806	741.5284

(3) VERA 小笠原観測局

図 A 3 に、VERA 小笠原観測局から、国内空港との距離を示した。図中にあるように、該当する空港がどの程度にあるかで、直線距離がどの程度あるかを把握できる。表には、詳細の距離と、併せて距離に対する自由空間損失及び大気減衰についても示した。

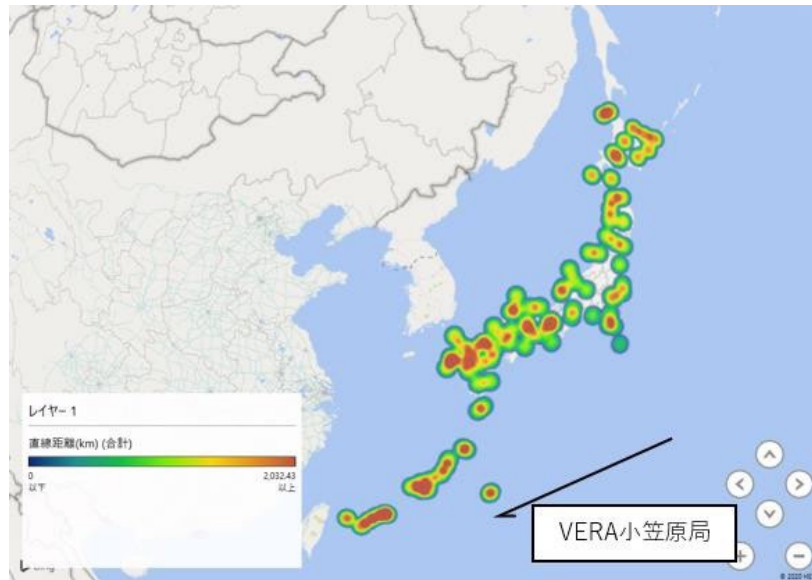


図 A 3 VERA 小笠原観測局と国内空港間距離

空港(from VERA 小笠原局)	緯度	経度	直線距離 (km)	自由空間損失 (dB)	大気減衰 (dB)
VERA 小笠原観測局	27.091796	142.216549	0	0	0
東京国際	35.549517	139.785472	965.773	191.7429261	386.3092
成田国際	35.777116	140.382969	978.594	191.8578378	391.4376
関西国際	34.430525	135.231963	1052.488	192.4897679	420.9952
福岡	33.585874	130.450823	1339.524	194.5844347	535.8096
那覇	26.194672	127.646002	1453.326	195.2926856	581.3304
新千歳	42.78602	141.679941	1741.822	196.8655001	696.7288
大阪国際	34.781943	135.440151	1069.987	192.6329948	427.9948
中部国際	34.857858	136.805603	1003.821	192.0785504	401.5284
鹿児島	31.803467	130.719292	1230.668	193.8482484	492.2672
仙台	38.140129	140.913879	1231.29	193.8526318	492.516
熊本	32.837377	130.855112	1266.968	194.1007451	506.7872
宮崎	31.877093	131.448669	1170.4	193.4121548	468.16
名古屋	35.256324	136.92377	1035.89	192.3516976	414.356
松山	33.826553	132.700707	1179.057	193.4761208	471.6228
長崎	32.917253	129.913	1349.955	194.6518106	539.982

神戸	34. 632652	135. 224456	1069. 897	192. 6322642	427. 9588
新潟	37. 956305	139. 109947	1239. 463	193. 9100961	495. 7852
新石垣	24. 396457	124. 244999	1826. 047	197. 2758081	730. 4188
八尾	34. 596078	135. 598251	1044. 852	192. 4265204	417. 9408
広島	34. 435661	132. 919671	1205. 168	193. 6663804	482. 0672
大分	33. 479845	131. 737191	1230. 904	193. 8499084	492. 3616
北九州	33. 845754	131. 035122	1307. 626	194. 3750957	523. 0504
高松	34. 214153	134. 015791	1113. 296	192. 9776407	445. 3184
函館	41. 770294	140. 8211439	1633. 301	196. 3067493	653. 3204
高知	33. 546083	133. 669408	1089. 005	192. 7860925	435. 602
秋田	39. 615734	140. 219085	1401. 336	194. 9762705	560. 5344
小松	36. 394918	136. 407557	1168. 589	193. 3986607	467. 4356
宮古	24. 782771	125. 294979	1712. 874	196. 7201458	685. 1496
青森	40. 733797	140. 689547	1519. 711	195. 6806459	607. 8844
奄美	28. 431822	129. 713134	1240. 886	193. 9200853	496. 3544
丘珠(札幌)	43. 117547	141. 381123	1779. 579	197. 0517702	711. 8316
帯広	42. 732546	143. 218076	1737. 588	196. 8443619	695. 0352
出雲	35. 413514	132. 889648	1279. 517	194. 186346	511. 8068
調布	35. 67233	139. 527681	985. 029	191. 9144059	394. 0116
岡山	34. 75678	133. 855019	1165. 593	193. 376366	466. 2372
花巻	39. 429292	141. 135419	1372. 032	194. 7927101	548. 8128
佐賀	33. 149668	130. 302462	1328. 744	194. 5142511	531. 4976
釧路	43. 040846	144. 192979	1778. 468	197. 0468021	711. 3872
徳島	34. 132769	134. 606851	1067. 791	192. 6151641	427. 1164
静岡	34. 795916	138. 189805	936. 564	191. 4773955	374. 6256
女満別	43. 880168	144. 164246	1870. 923	197. 486543	748. 3692
福島	37. 228021	140. 427863	1136. 53	193. 1570559	454. 612
山形	38. 412086	140. 37149	1267. 196	194. 1023019	506. 8784
山口宇部	33. 930009	131. 278983	1293. 607	194. 2814719	517. 4428
岡南	34. 590858	133. 933323	1147. 588	193. 2411448	459. 0352
富山	36. 648648	137. 187364	1161. 165	193. 3433035	464. 466
米子(美保)	35. 493482	133. 239365	1262. 999	194. 0734849	505. 1996
旭川	43. 670501	142. 447337	1839. 529	197. 3395586	735. 8116
松本	36. 166751	137. 922647	1085. 227	192. 7558654	434. 0908
対馬	34. 284703	129. 330645	1467. 808	195. 3788098	587. 1232
福井	36. 142799	136. 223922	1152. 808	193. 2805644	461. 1232

茨城（百里）	36. 181189	140. 415605	1022. 159	192. 2360691	408. 8636
久米島	26. 363955	126. 713975	1543. 529	195. 8157206	617. 4116
徳之島	27. 835841	128. 881129	1320. 057	194. 4572785	528. 0228
福江	32. 667182	128. 83333	1431. 408	195. 1606936	572. 5632
屋久島	30. 385145	130. 659758	1185. 75	193. 5255547	474. 3
鳥取	35. 530101	134. 165294	1208. 409	193. 6897038	483. 3636
南紀白浜	33. 662534	135. 364255	981. 487	191. 883118	392. 5948
大島	34. 781532	139. 360019	895. 061	191. 0824787	358. 0244
岩国	34. 146344	132. 247268	1233. 851	193. 8706791	493. 5404
庄内	38. 812362	139. 787039	1319. 417	194. 4530663	527. 7668
八丈島	33. 115152	139. 786104	707. 541	189. 0404781	283. 0164
沖永良部	27. 430901	128. 705102	1337. 839	194. 5736758	535. 1356
種子島	30. 605345	130. 991057	1161. 861	193. 3502566	464. 7444
但馬	35. 512871	134. 787023	1170. 457	193. 4125346	468. 1828
喜界	28. 321694	129. 928165	1219. 059	193. 7659193	487. 6236
三沢	40. 703205	141. 369154	1511. 824	195. 6354495	604. 7296
天草	32. 482195	130. 159284	1308. 806	194. 3829306	523. 5224
中標津	43. 577526	144. 960024	1845. 712	197. 3687037	738. 2848
能登	37. 29323	136. 961666	1234. 42	193. 8746845	493. 768
与論	27. 043781	128. 401819	1369. 678	194. 777876	547. 8712
与那国	24. 467324	122. 979483	1949. 345	197. 8432503	779. 738
稚内	45. 404522	141. 802501	2032. 434	198. 2057537	812. 9736
三宅島	34. 071994	139. 559758	814. 624	190. 2647728	325. 8496
新島	34. 369538	139. 268635	854. 689	190. 6815872	341. 8756
神津島	34. 189411	139. 133461	840. 397	190. 536536	336. 1588
石見	34. 676412	131. 78989	1302. 824	194. 3431398	521. 1296
隠岐	36. 178421	133. 323571	1312. 73	194. 408933	525. 092
舌岐	33. 748686	129. 785437	1402. 278	194. 9821072	560. 9112
大館能代	40. 19175	140. 37156	1462. 963	195. 3500917	585. 1852
南大東	25. 846804	131. 263481	1100. 508	192. 8776526	440. 2032
多良間	24. 653418	124. 675463	1777. 171	197. 0400091	710. 8684
大分県央	33. 026302	131. 505465	1223. 472	193. 7973175	489. 3888
利尻	45. 24188	141. 187328	2016. 106	198. 1356919	806. 4424
紋別	44. 303823	143. 404055	1912. 744	197. 6785617	765. 0976
北大東	25. 944715	131. 326787	1092. 493	192. 8139728	436. 9972
奥尻	42. 071623	139. 43268	1681. 035	196. 5569598	672. 414

下地島	24. 825582	125. 145344	1726. 663	196. 7896178	690. 6652
粟国	26. 592577	127. 240358	1488. 686	195. 5014868	595. 4744
小値賀	33. 190706	129. 090335	1432. 404	195. 1667353	572. 9616
佐渡	38. 060525	138. 414155	1267. 377	194. 1035412	506. 9508
上五島	33. 013606	129. 192354	1415. 599	195. 0642298	566. 2396
慶良間	26. 167442	127. 293201	1488. 69	195. 5015103	595. 476
波照間	24. 059835	123. 805629	1878. 242	197. 5205121	751. 2968
伊江島	26. 722701	127. 786999	1433. 18	195. 1714398	573. 272

(4) VERA 入来観測局

図 A 4 に、VERA 入来観測局からの国内空港との距離を示した。図中にあるように、該当する空港がどの程度にあるかで、直線距離がどの程度あるかを把握できる。表には、詳細の距離 と、併せて距離に対する自由空間損失及び大気減衰についても示した。

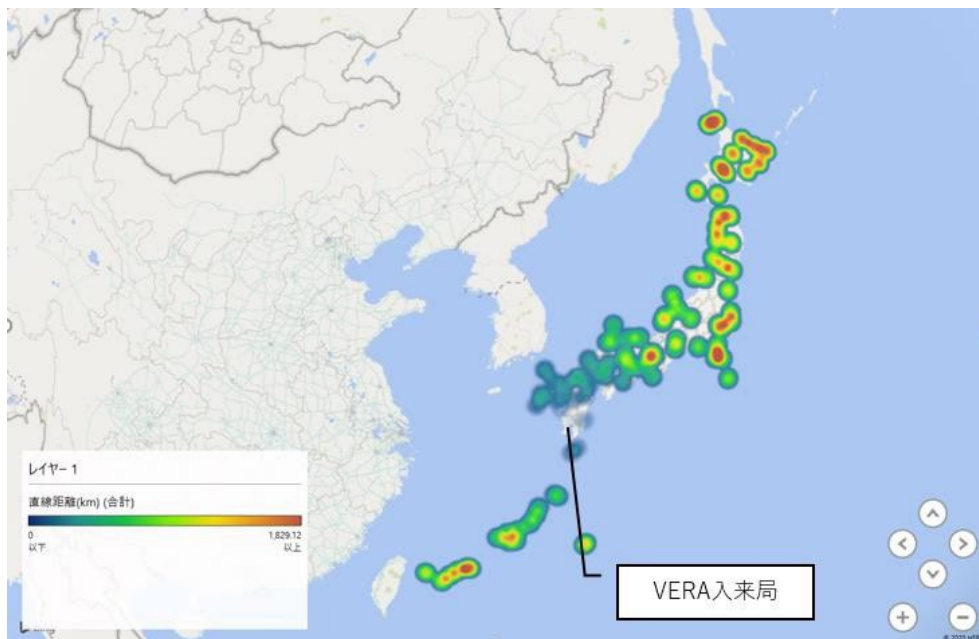


図 A 4 VERA 入来観測局と国内空港間距離

空港 (from VERA 入来局)	緯度	経度	直線距離 (km)	自由空間損失 (dB)	大気減衰 (dB)
VERA 入来観測局	31. 747879	130. 439906	0	0	0
東京国際	35. 549517	139. 785472	963. 435	191. 7218743	385. 374
成田国際	35. 777116	140. 382969	1023. 102	192. 2438044	409. 2408
関西国際	34. 430525	135. 231963	537. 168	186. 6476316	214. 8672



福岡	33. 585874	130. 450823	203. 838	178. 2311565	81. 5352
那覇	26. 194672	127. 646002	672. 957	188. 6051736	269. 1828
新千歳	42. 78602	141. 679941	1576. 428	195. 9989079	630. 5712
大阪国際	34. 781943	135. 440151	574. 573	187. 2323325	229. 8292
中部国際	34. 857858	136. 805603	685. 677	188. 7678189	274. 2708
鹿児島	31. 803467	130. 719292	27. 167	160. 7559601	10. 8668
仙台	38. 140129	140. 913879	1189. 61	193. 5535176	475. 844
熊本	32. 837377	130. 855112	126. 989	174. 120819	50. 7956
宮崎	31. 877093	131. 448669	96. 586	171. 7438368	38. 6344
名古屋	35. 256324	136. 92377	716. 957	189. 1552891	286. 7828
松山	33. 826553	132. 700707	313. 019	181. 956851	125. 2076
長崎	32. 917253	129. 913	138. 838	174. 8956547	55. 5352
神戸	34. 632652	135. 224456	548. 912	186. 8354831	219. 5648
新潟	37. 956305	139. 109947	1049. 355	192. 4638745	419. 742
新石垣	24. 396457	124. 244999	1016. 618	192. 188841	406. 6472
八尾	34. 596078	135. 598251	575. 419	187. 2451122	230. 1676
広島	34. 435661	132. 919671	377. 397	183. 5814111	150. 9588
大分	33. 479845	131. 737191	227. 407	179. 1815245	90. 9628
北九州	33. 845754	131. 035122	239. 237	179. 6220126	95. 6948
高松	34. 214153	134. 015791	431. 839	184. 7518688	172. 7356
函館	41. 770294	140. 8211439	1445. 537	195. 2460095	578. 2148
高知	33. 546083	133. 669408	362. 699	183. 2363609	145. 0796
秋田	39. 615734	140. 219085	1241. 755	193. 9261438	496. 702
小松	36. 394918	136. 407557	754. 102	189. 5940286	301. 6408
宮古	24. 782771	125. 294979	921. 981	191. 3402599	368. 7924
青森	40. 733797	140. 689547	1355. 633	194. 6882688	542. 2532
奄美	28. 431822	129. 713134	374. 21	183. 5078167	149. 684
丘珠(札幌)	43. 117547	141. 381123	1587. 601	196. 0602524	635. 0404
帯広	42. 732546	143. 218076	1661. 026	196. 4529551	664. 4104
出雲	35. 413514	132. 889648	465. 809	185. 4095878	186. 3236
調布	35. 67233	139. 527681	947. 644	191. 5783303	379. 0576
岡山	34. 75678	133. 855019	461. 069	185. 3207502	184. 4276
花巻	39. 429292	141. 135419	1288. 975	194. 2503154	515. 59
佐賀	33. 149668	130. 302462	155. 987	175. 9072429	62. 3948
釧路	43. 040846	144. 192979	1743. 021	196. 8714775	697. 2084

徳島	34.132769	134.606851	470.887	185.5037642	188.3548
静岡	34.795916	138.189805	796.921	190.0737334	318.7684
女満別	43.880168	144.164246	1804.378	197.1719755	721.7512
福島	37.228021	140.427863	1099.547	192.8697072	439.8188
山形	38.412086	140.37149	1167.918	193.3936725	467.1672
山口宇部	33.930009	131.278983	254.429	180.1567755	101.7716
岡南	34.590858	133.933323	453.361	185.1743138	181.3444
富山	36.648648	137.187364	825.582	190.3806307	330.2328
米子(美保)	35.493482	133.239365	489.912	185.8477912	195.9648
旭川	43.670501	142.447337	1690.956	196.6080718	676.3824
松本	36.166751	137.922647	847.258	190.6058527	338.9032
対馬	34.284703	129.330645	299.822	181.582706	119.9288
福井	36.142799	136.223922	723.287	189.2316401	289.3148
茨城(百里)	36.181189	140.415605	1044.132	192.4205338	417.6528
久米島	26.363955	126.713975	698.254	188.9257506	279.3016
徳之島	27.835841	128.881129	459.065	185.2829141	183.626
福江	32.667182	128.83333	182.579	177.2745466	73.0316
屋久島	30.385145	130.659758	152.533	175.7127477	61.0132
鳥取	35.530101	134.165294	543.442	186.7484926	217.3768
南紀白浜	33.662534	135.364255	508.127	186.164875	203.2508
大島	34.781532	139.360019	896.196	191.0934862	358.4784
岩国	34.146344	132.247268	315.136	182.0153972	126.0544
庄内	38.812362	139.787039	1155.241	193.2988774	462.0964
八丈島	33.115152	139.786104	891.65	191.0501913	356.66
沖永良部	27.430901	128.705102	507.15	186.1486188	202.86
種子島	30.605345	130.991057	137.141	174.7897445	54.8564
但馬	35.512871	134.787023	580.441	187.3205927	232.1764
喜界	28.321694	129.928165	382.992	183.7093099	153.1968
三沢	40.703205	141.369154	1395.282	194.9386651	558.1128
天草	32.482195	130.159284	85.627	170.6977766	34.2508
中標津	43.577526	144.960024	1829.116	197.29025	731.6464
能登	37.29323	136.961666	858.017	190.715345	343.2068
与論	27.043781	128.401819	557.637	186.9724601	223.0548
与那国	24.467324	122.979483	1089.457	192.7897186	435.7828
稚内	45.404522	141.802501	1806.616	197.1827421	722.6464

三宅島	34.071994	139.559758	890.848	191.0414983	356.3392
新島	34.369538	139.268635	873.903	190.8746908	349.5612
神津島	34.189411	139.133461	856.296	190.6979061	342.5184
石見	34.676412	131.78989	348.32	182.885002	139.328
隠岐	36.178421	133.323571	558.983	186.9933999	223.5932
舌岐	33.748686	129.785437	230.204	179.2877042	92.0816
大館能代	40.19175	140.37156	1294.548	194.2877886	517.8192
南大東	25.846804	131.263481	658.955	188.4225424	263.582
多良間	24.653418	124.675463	968.316	191.7658843	387.3264
大分県央	33.026302	131.505465	173.636	176.8382672	69.4544
利尻	45.24188	141.187328	1763.529	196.9730772	705.4116
紋別	44.303823	143.404055	1794.76	197.1255527	717.904
北大東	25.944715	131.326787	648.972	188.2899466	259.5888
奥尻	42.071623	139.43268	1396.32	194.9451244	558.528
下地島	24.825582	125.145344	926.102	191.3786025	370.4408
粟国	26.592577	127.240358	650.574	188.3113615	260.2296
小値賀	33.190706	129.090335	204.2	178.2468815	81.68
佐渡	38.060525	138.414155	1009.949	192.1314147	403.9796
上五島	33.013606	129.192354	182.975	177.2970681	73.19
慶良間	26.167442	127.293201	690.283	188.8265106	276.1132
波照間	24.059835	123.805629	1072.938	192.6570185	429.1752
伊江島	26.722701	127.786999	613.731	187.8049887	245.4924

(5) VERA 石垣島観測局

図 A 5 に、VERA 石垣島観測局からの国内空港との距離を示した。図中にあるように、該当する空港がどの程度にあるかで、直線距離がどの程度あるかを把握できる。表には、詳細の距離と、併せて距離に対する自由空間損失及び大気減衰についても示した。

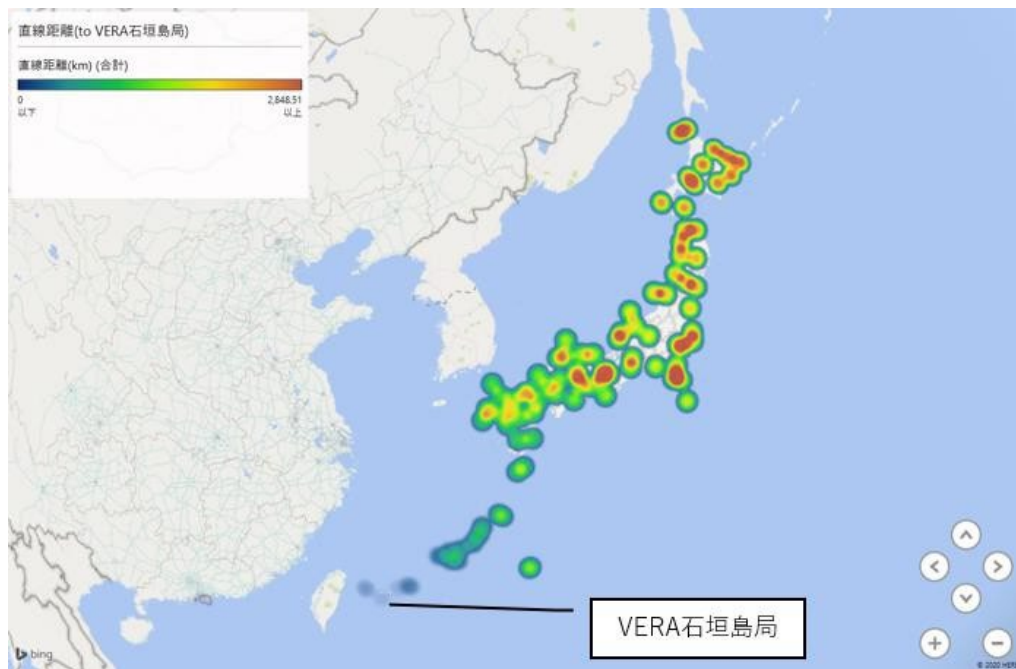


図 A 5 VERA 石垣島局と国内空港間距離

空港 (from VERA 石垣島局)	緯度	経度	直線距離 (km)	自由空間損失 (dB)	大気減衰 (dB)
VERA 石垣島観測局	24. 41219	124. 170904	0	0	0
東京国際	35. 549517	139. 785472	1943. 476	197. 8170083	777. 3904
成田国際	35. 777116	140. 382969	2002. 307	198. 076038	800. 9228
関西国際	34. 430525	135. 231963	1542. 297	195. 8087849	616. 9188
福岡	33. 585874	130. 450823	1186. 027	193. 5273162	474. 4108
那覇	26. 194672	127. 646002	401. 78	184. 125191	160. 712
新千歳	42. 78602	141. 679941	2595. 22	200. 3289083	1038. 088
大阪国際	34. 781943	135. 440151	1582. 935	196. 0346863	633. 174
中部国際	34. 857858	136. 805603	1681. 669	196. 560235	672. 6676
鹿児島	31. 803467	130. 719292	1041. 076	192. 3951625	416. 4304
仙台	38. 140129	140. 913879	2197. 327	198. 8833185	878. 9308
熊本	32. 837377	130. 855112	1139. 117	193. 1768284	455. 6468

宮崎	31. 877093	131. 448669	1092. 685	192. 8153243	437. 074
名古屋	35. 256324	136. 92377	1718. 579	196. 7488147	687. 4316
松山	33. 826553	132. 700707	1332. 19	194. 536748	532. 876
長崎	32. 917253	129. 913	1096. 554	192. 8460251	438. 6216
神戸	34. 632652	135. 224456	1557. 21	195. 8923683	622. 884
新潟	37. 956305	139. 109947	2063. 944	198. 3393829	825. 5776
新石垣	24. 396457	124. 244999	7. 711	149. 7879838	3. 0844
八尾	34. 596078	135. 598251	1579. 446	196. 0155203	631. 7784
広島	34. 435661	132. 919671	1396. 864	194. 9485089	558. 7456
大分	33. 479845	131. 737191	1245. 717	193. 9538125	498. 2868
北九州	33. 845754	131. 035122	1239. 944	193. 9134661	495. 9776
高松	34. 214153	134. 015791	1445. 74	195. 2472307	578. 296
函館	41. 770294	140. 8211439	2464. 775	199. 8809703	985. 91
高知	33. 546083	133. 669408	1370. 355	194. 7820864	548. 142
秋田	39. 615734	140. 219085	2259. 984	199. 127532	903. 9936
小松	36. 394918	136. 407557	1770. 795	197. 0087904	708. 318
宮古	24. 782771	125. 294979	121. 017	173. 7024048	48. 4068
青森	40. 733797	140. 689547	2375. 084	199. 5590043	950. 0336
奄美	28. 431822	129. 713134	709. 75	189. 0675327	283. 9
丘珠(札幌)	43. 117547	141. 381123	2605. 308	200. 3626061	1042. 1232
帯広	42. 732546	143. 218076	2680. 569	200. 6099655	1072. 2276
出雲	35. 413514	132. 889648	1480. 362	195. 4527832	592. 1448
調布	35. 67233	139. 527681	1932. 414	197. 7674282	772. 9656
岡山	34. 75678	133. 855019	1479. 847	195. 4497616	591. 9388
花巻	39. 429292	141. 135419	2304. 288	199. 2961599	921. 7152
佐賀	33. 149668	130. 302462	1137. 915	193. 1676211	455. 166
釧路	43. 040846	144. 192979	2762. 379	200. 87109	1104. 9516
徳島	34. 132769	134. 606851	1477. 831	195. 4379201	591. 1324
静岡	34. 795916	138. 189805	1776. 7	197. 0377139	710. 68
女満別	43. 880168	144. 164246	2823. 872	201. 0623248	1129. 5488
福島	37. 228021	140. 427863	2100. 775	198. 4930169	840. 31
山形	38. 412086	140. 37149	2180. 226	198. 815455	872. 0904
山口宇部	33. 930009	131. 278983	1260. 465	194. 0560405	504. 186
岡南	34. 590858	133. 933323	1471. 017	195. 3977785	588. 4068
富山	36. 648648	137. 187364	1840. 33	197. 3433388	736. 132
米子(美保)	35. 493482	133. 239365	1506. 677	195. 6058278	602. 6708

旭川	43. 670501	142. 447337	2709. 272	200. 702477	1083. 7088
松本	36. 166751	137. 922647	1853. 042	197. 4031514	741. 2168
対馬	34. 284703	129. 330645	1203. 031	193. 6509619	481. 2124
福井	36. 142799	136. 223922	1739. 326	196. 8530444	695. 7304
茨城（百里）	36. 181189	140. 415605	2030. 437	198. 1972151	812. 1748
久米島	26. 363955	126. 713975	335. 002	182. 5463728	134. 0008
徳之島	27. 835841	128. 881129	604. 687	187. 6760373	241. 8748
福江	32. 667182	128. 83333	1022. 031	192. 2347135	408. 8124
屋久島	30. 385145	130. 659758	921. 5	191. 3353319	368. 6
鳥取	35. 530101	134. 165294	1563. 006	195. 9246376	625. 2024
南紀白浜	33. 662534	135. 364255	1494. 674	195. 536359	597. 8696
大島	34. 781532	139. 360019	1863. 186	197. 4505489	745. 2744
岩国	34. 146344	132. 247268	1333. 023	194. 5421775	533. 2092
庄内	38. 812362	139. 787039	2171. 795	198. 7818012	868. 718
八丈島	33. 115152	139. 786104	1801. 123	197. 1562954	720. 4492
沖永良部	27. 430901	128. 705102	563. 992	187. 0708845	225. 5968
種子島	30. 605345	130. 991057	961. 329	191. 7028708	384. 5316
但馬	35. 512871	134. 787023	1599. 033	196. 1225751	639. 6132
喜界	28. 321694	129. 928165	719. 376	189. 1845436	287. 7504
三沢	40. 703205	141. 369154	2414. 1	199. 7005298	965. 64
天草	32. 482195	130. 159284	1069. 039	192. 6252998	427. 6156
中標津	43. 577526	144. 960024	2848. 507	201. 1377705	1139. 4028
能登	37. 29323	136. 961666	1876. 585	197. 5127898	750. 634
与論	27. 043781	128. 401819	514. 956	186. 2808279	205. 9824
与那国	24. 467324	122. 979483	120. 966	173. 6986921	48. 3864
稚内	45. 404522	141. 802501	2818. 087	201. 0445126	1127. 2348
三宅島	34. 071994	139. 559758	1835. 967	197. 3227221	734. 3868
新島	34. 369538	139. 268635	1830. 953	197. 2989686	732. 3812
神津島	34. 189411	139. 133461	1809. 64	197. 1972685	723. 856
石見	34. 676412	131. 78989	1355. 262	194. 6858899	542. 1048
隠岐	36. 178421	133. 323571	1571. 864	195. 9737241	628. 7456
壱岐	33. 748686	129. 785437	1169. 784	193. 4075383	467. 9136
大館能代	40. 19175	140. 37156	2313. 696	199. 3315506	925. 4784
南大東	25. 846804	131. 263481	732. 571	189. 3424243	293. 0284
多良間	24. 653418	124. 675463	57. 687	167. 2669926	23. 0748
大分県央	33. 026302	131. 505465	1192. 894	193. 5774649	477. 1576

利尻	45.24188	141.187328	2773.354	200.9055308	1109.3416
紋別	44.303823	143.404055	2813.233	201.0295387	1125.2932
北大東	25.944715	131.326787	740.931	189.4409811	296.3724
奥尻	42.071623	139.43268	2412.233	199.6938098	964.8932
下地島	24.825582	125.145344	108.775	172.7760085	43.51
粟国	26.592577	127.240358	391.852	183.9078674	156.7408
小値賀	33.190706	129.090335	1084.624	192.7510089	433.8496
佐渡	38.060525	138.414155	2027.386	198.1841535	810.9544
上五島	33.013606	129.192354	1071.742	192.6472369	428.6968
慶良間	26.167442	127.293201	369.688	183.4021493	147.8752
波照間	24.059835	123.805629	53.854	166.6697863	21.5416
伊江島	26.722701	127.786999	444.409	185.0011159	177.7636

## 23.2 国内空港を起点とした電波天文観測所に対する距離及び断面情報

上述の緯度、経度情報を用いて、国土地理院のホームページから断面情報を入手し、空港と天文台間に障害物としての山等がある場合には、ナイフエッジによる回折損失があるため、既に 24.1 に述べた自由空間損失、大気損失に加え、回折損失を算出し、参考値として損失合計値を算出した。

### (1) ナイフエッジによる回折損失の算出方法と参考例

以下に、ITU-R P.526-14 を参考にした回折損失の算出方法を図 A 6 に示す。start と stop は、回折損失を算出するときの、各々スタート地点とストップ地点である。start と stop の間に、図に示すような山があった場合、最も高い箇所を回折ポイント obs としておく。ここで、start と stop を結んだ直線の傾きを slope\_a とし、それと直交する直線の傾きを slope\_b とし、slope\_b が obs を通過するような直線において、start から上方向に延長した直線との交点を intercept\_y としておき、slope\_b が obs を通過する直線において逆に延長し slope\_a との交点を diffraction base point とし、obs と diffraction base point の距離を H、start と diffraction base point との距離を D1、diffraction base point と stop との距離を D2 とする。これらのパラメータから、factor  $\nu$  を計算、回折損失 Gdiff(dB)を得る。

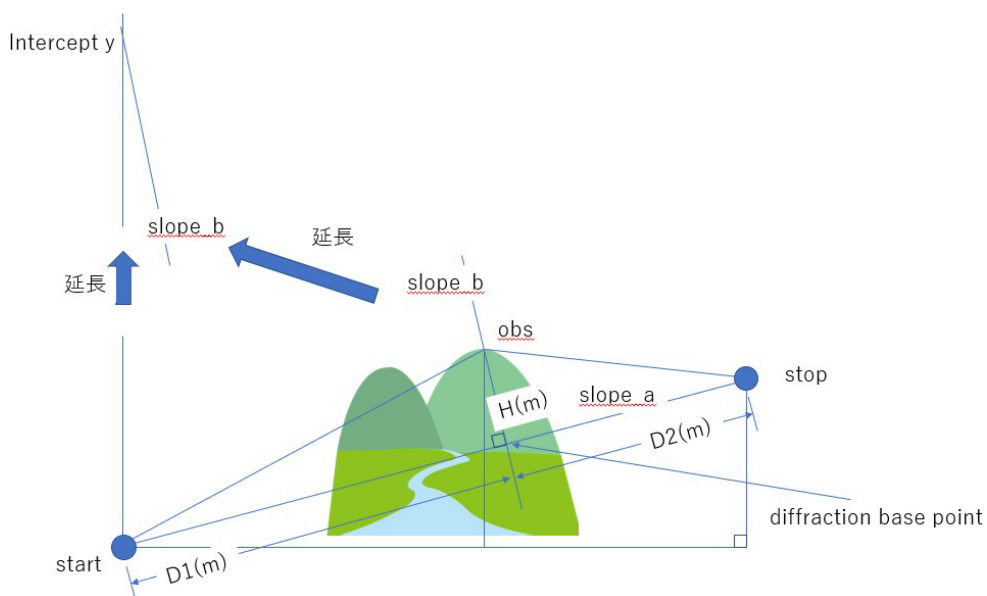


図 A 6 ナイフエッジによる回折損失算出方法

例として、東京国際空港と、野辺山宇宙電波観測所間の結果を表 A 1 に示す。算出したD1(m)、D2(m)、H(m)を用いて、factor  $\nu$  を計算し、回折損失  $G_{diff}(dB)=61.16dB$  の結果を得た。

表 A 1 東京国際空港～野辺山宇宙電波観測所間の回折損失

(1) 空港FODレーダーの中心周波数

freq (GHz)	96.00
$\lambda$ (m)	0.00

(2) スタート及びストップ地点、回折地点

	距離	高さ	
start(m)	0.00	5.37	
obs(m)	113470.00	2310.9	水平方向での回折地点座標
stop(m)	126595.00	1348.2	

(3) 自由空間損失

損失 (dB)	174.09
---------	--------

(4) ナイフエッジによる回折損失

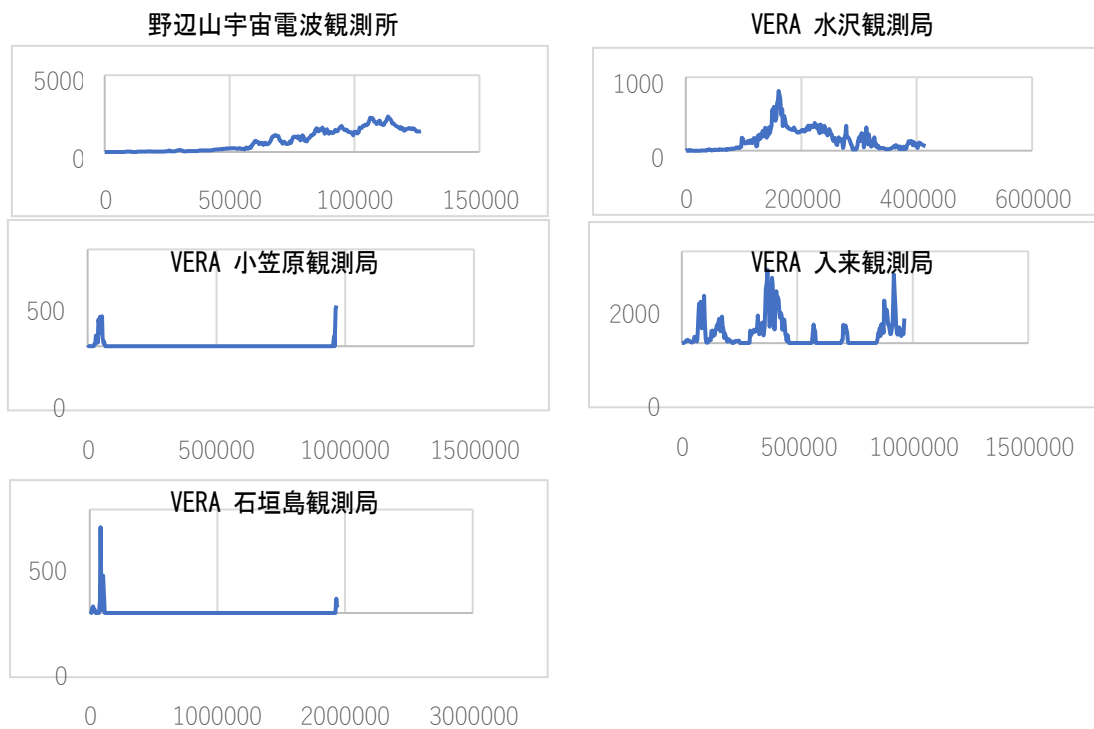
slope_a	0.01		
slope_b	-94.27		
intercept y(m)	10699669.95		
diffraction base point(m)	113481.74	1203.734	x, y座標
D1 (m)	113488.07		
D2 (m)	13114.05		
H (m)	1107.23		
factor $\nu$	258.35		
Gdiff (dB)	61.16		



(2) 国内空港と各電波天文観測局との断面情報

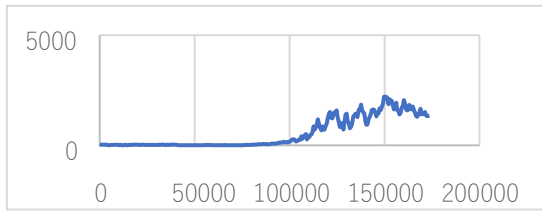
以下の情報は、横軸、縦軸ともに単位は m を示し、横軸の 0m は空港、横軸の一番右側が対象とする電波天文観測局の該当する空港からの距離である。空港から電波天文観測局を結んだときの断面情報を表しており、図により空港、電波天文観測局間に回折する地点があるかどうかを確認することができる。

◇東京国際空港

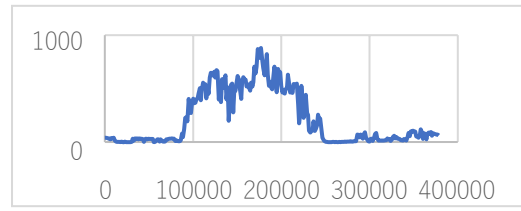


◇成田国際空港

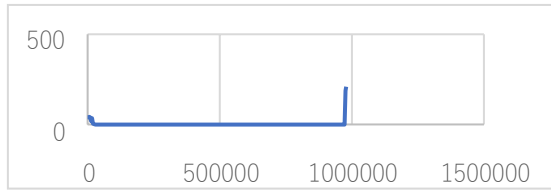
野辺山宇宙電波観測所



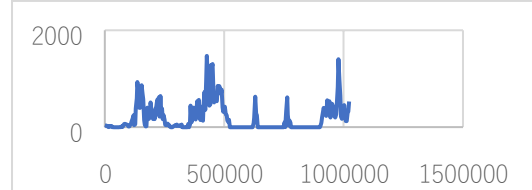
VERA 水沢観測局



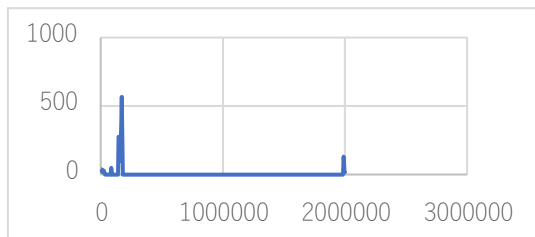
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

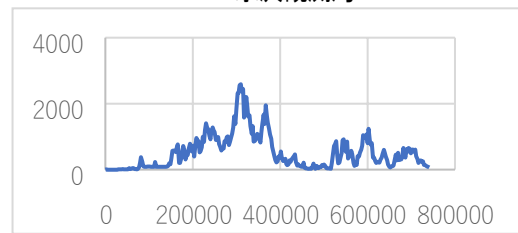


◇関西国際空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

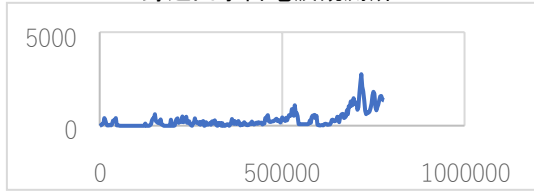


VERA 石垣島観測局

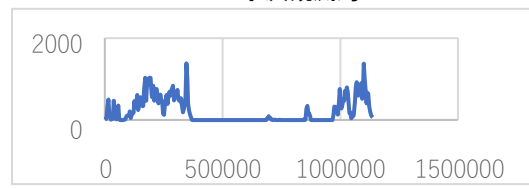


◇福岡空港

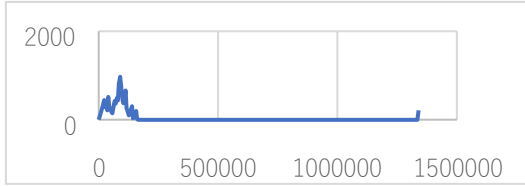
野辺山宇宙電波観測所



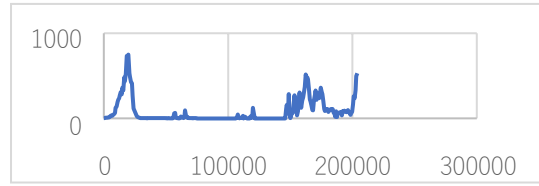
VERA 水沢観測局



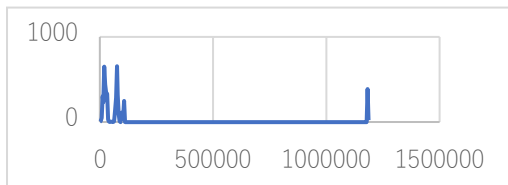
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

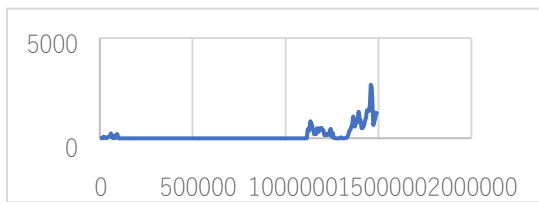


VERA 石垣島観測局

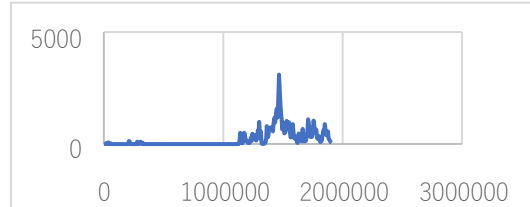


◇那覇空港

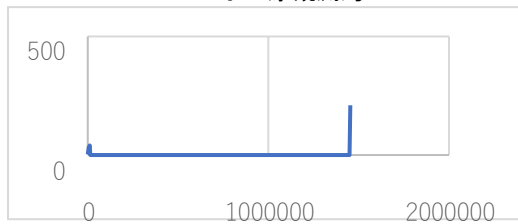
野辺山宇宙電波観測所



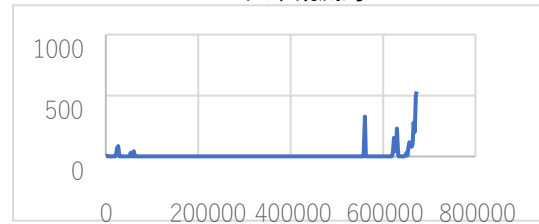
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

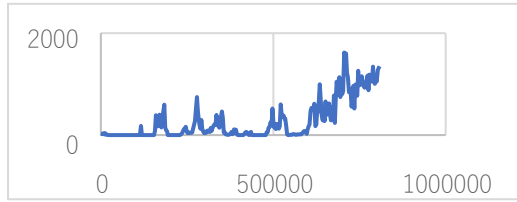


VERA 石垣島観測局

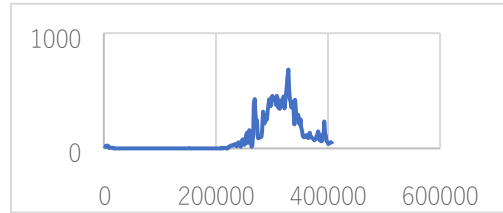


◇新千歳空港

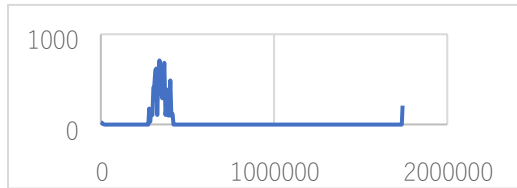
野辺山宇宙電波観測所



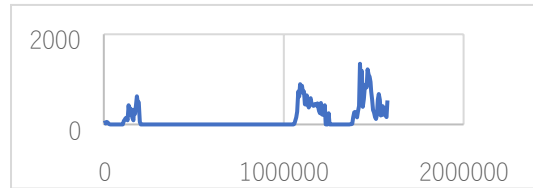
VERA 水沢観測局



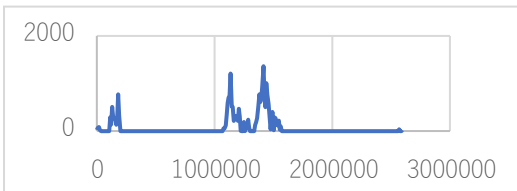
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

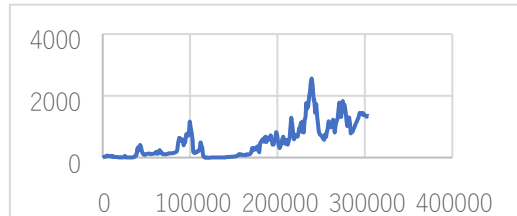


VERA 石垣島観測局

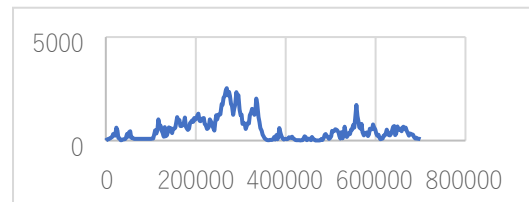


◇大阪国際空港

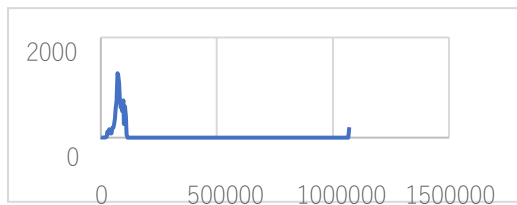
野辺山宇宙電波観測所



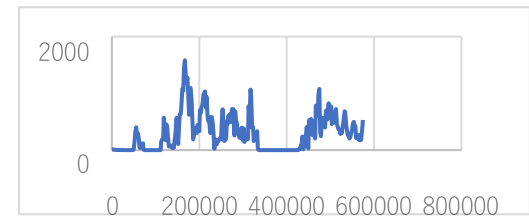
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

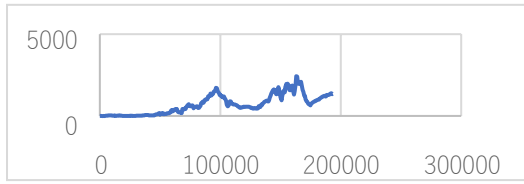


VERA 石垣島観測局

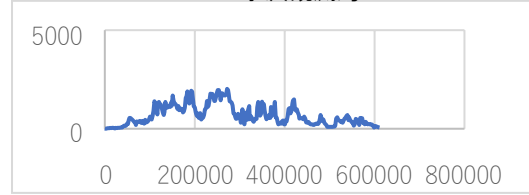


◇中部国際空港

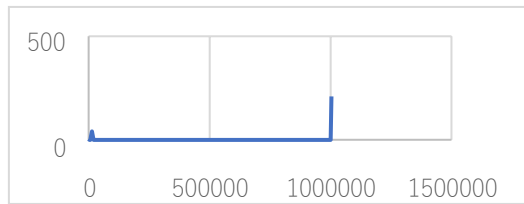
野辺山宇宙電波観測所



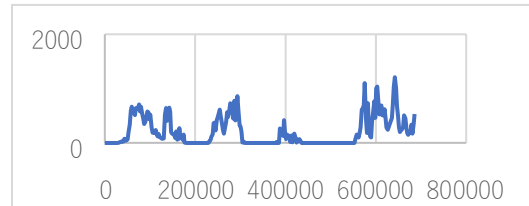
VERA 水沢観測局



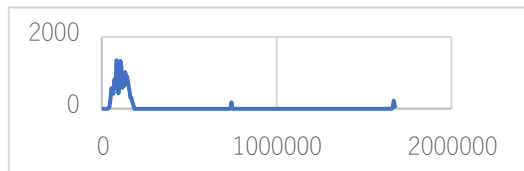
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

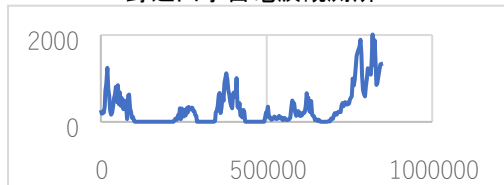


VERA 石垣島観測局

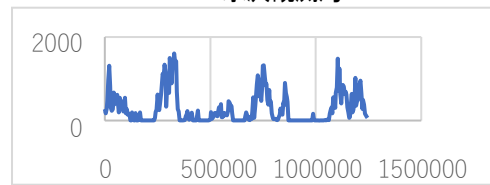


◇鹿児島空港

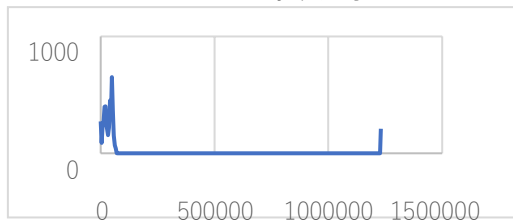
野辺山宇宙電波観測所



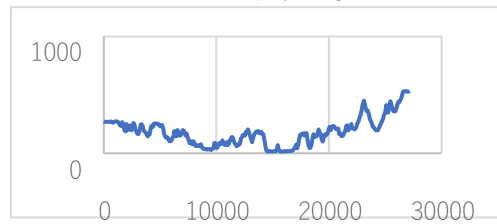
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

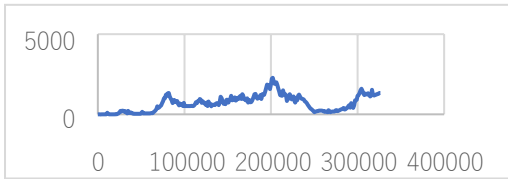


VERA 石垣島観測局

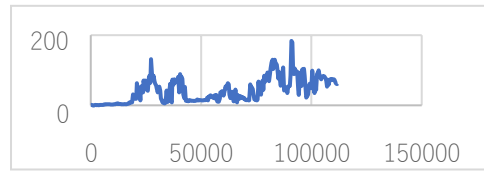


◇仙台空港

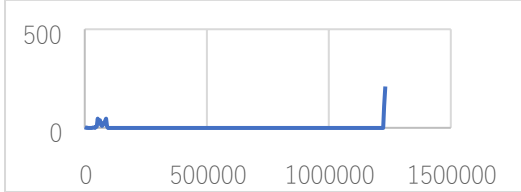
野辺山宇宙電波観測所



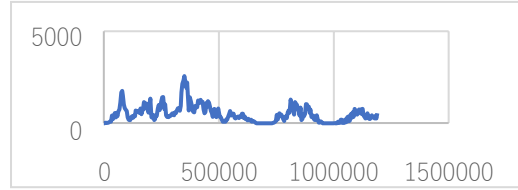
VERA 水沢観測局



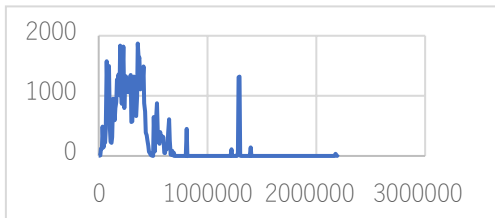
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

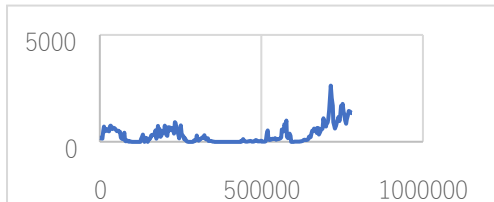


VERA 石垣島観測局

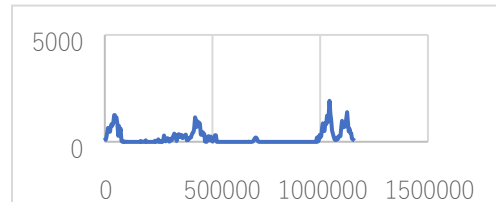


◇熊本空港

野辺山宇宙電波観測所



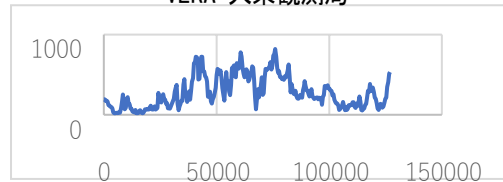
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



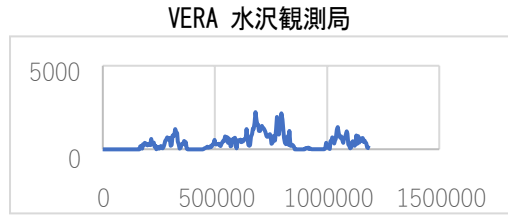
VERA 入来観測局



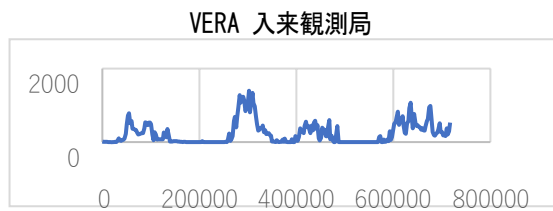
VERA 石垣島観測局



◇宮崎空港

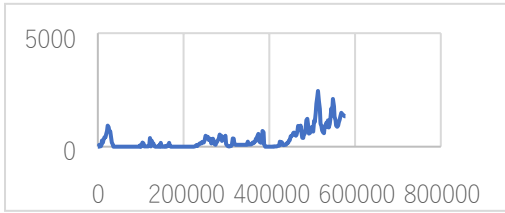


◇名古屋空港

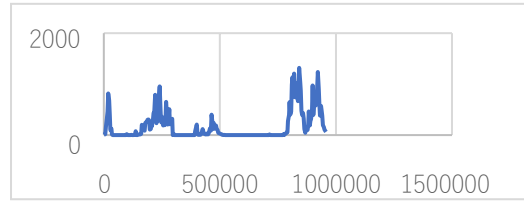


◇松山空港

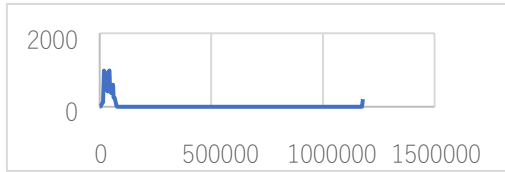
野辺山宇宙電波観測所



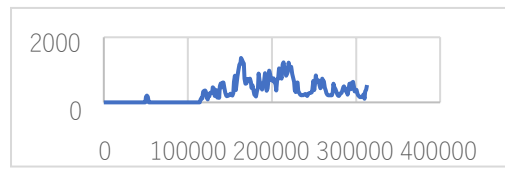
VERA 水沢観測局



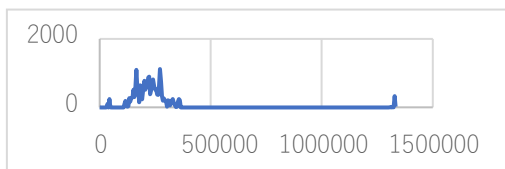
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

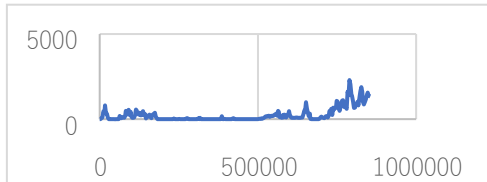


VERA 石垣島観測局

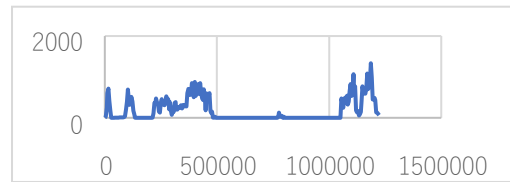


◇長崎空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



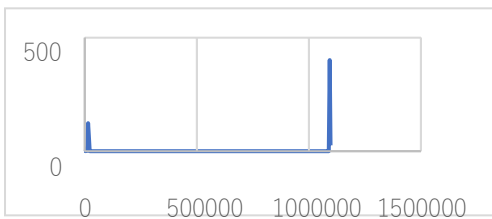
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局





◇神戸空港

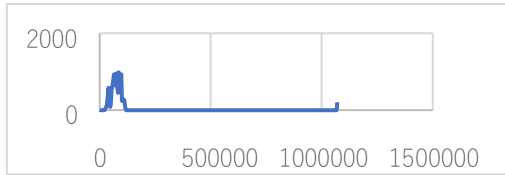
野辺山宇宙電波観測所



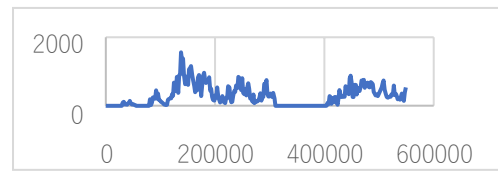
VERA 水沢観測局



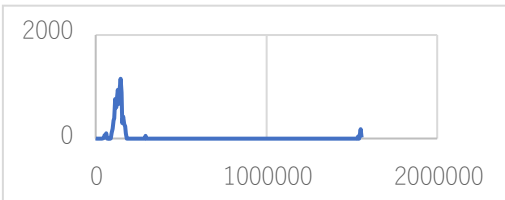
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

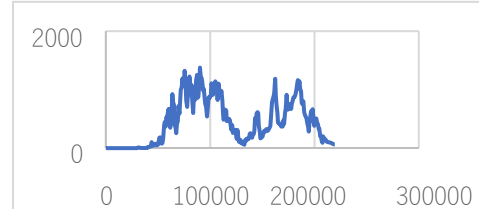


◇新潟空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



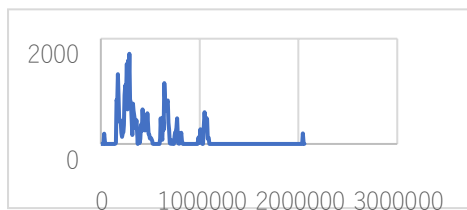
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

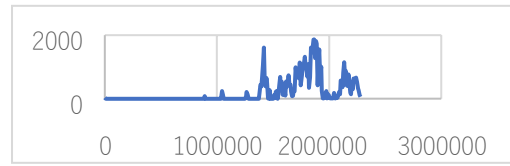


◇新石垣空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



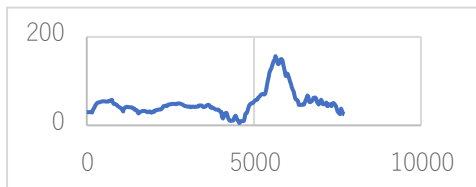
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

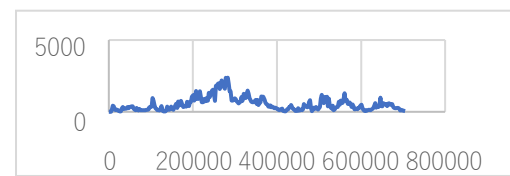


◇八尾空港

野辺山宇宙電波観測所



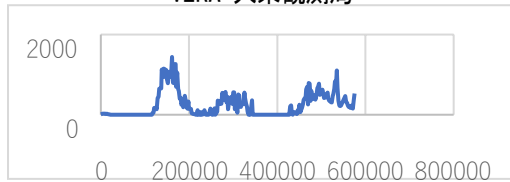
VERA 水沢観測局



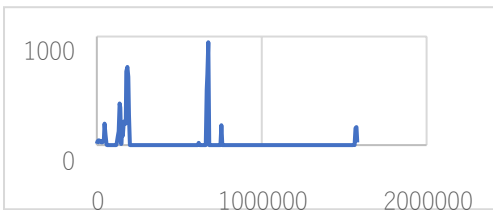
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



◇広島空港

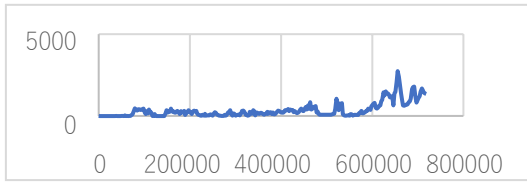


◇大分空港

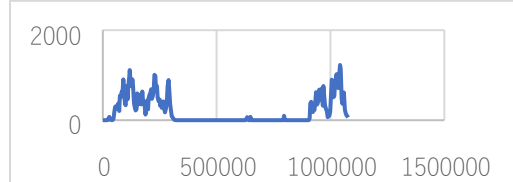


◇北九州空港

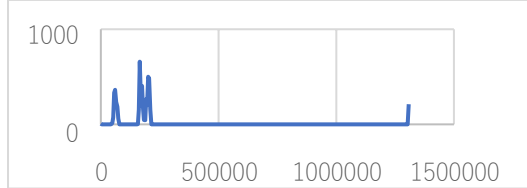
野辺山宇宙電波観測所



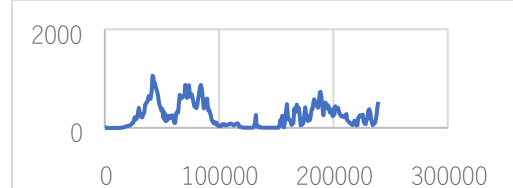
VERA 水沢観測局



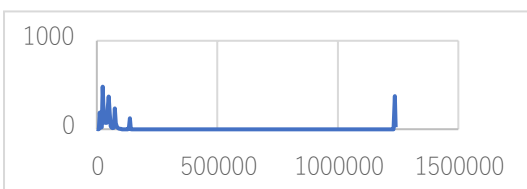
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



◇高松空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



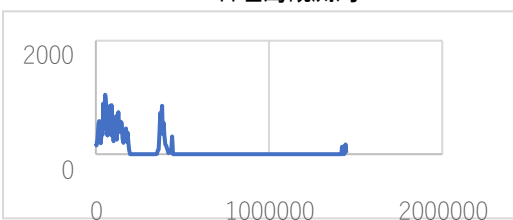
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

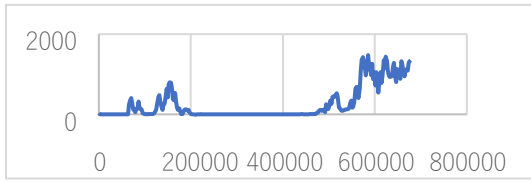


VERA 石垣島観測局

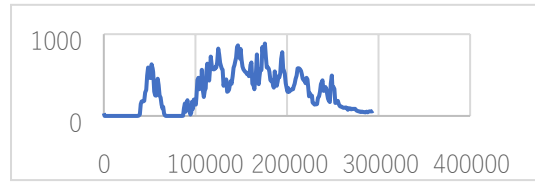


◇函館空港

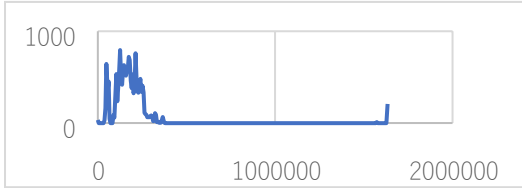
野辺山宇宙電波観測所



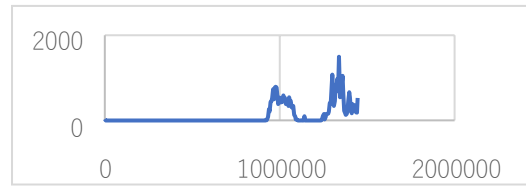
VERA 水沢観測局



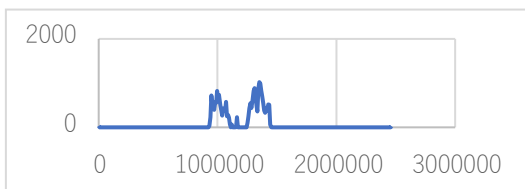
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

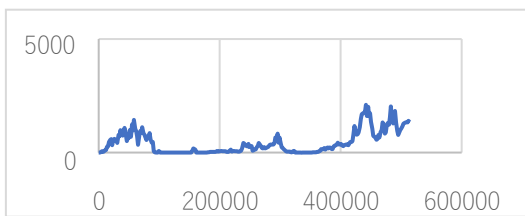


VERA 石垣島観測局

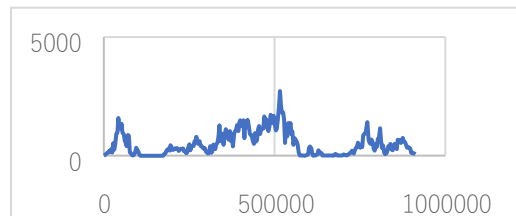


◇高知空港

野辺山宇宙電波観測所



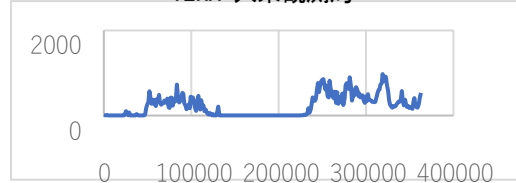
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

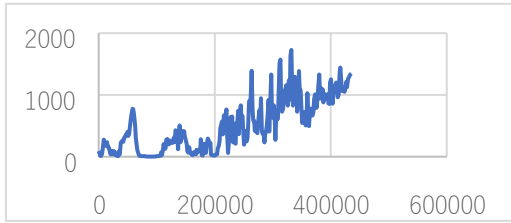


VERA 石垣島観測局

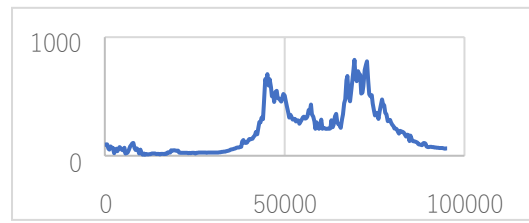


◇秋田空港

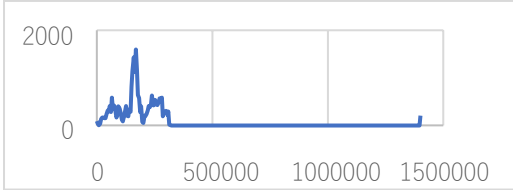
野辺山宇宙電波観測所



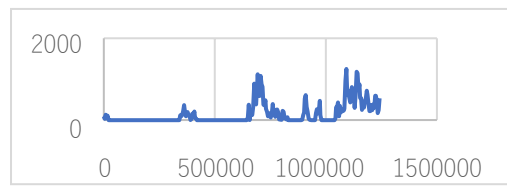
VERA 水沢観測局



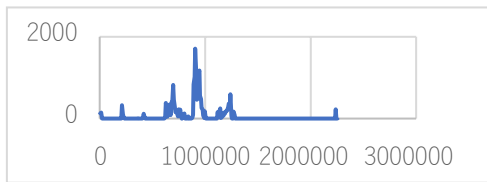
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

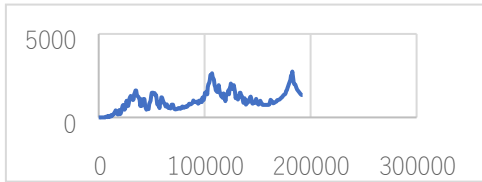


VERA 石垣島観測局

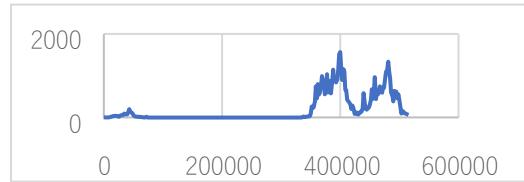


◇小松空港

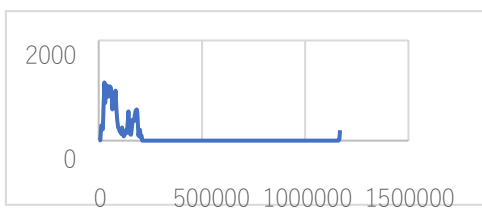
野辺山宇宙電波観測所



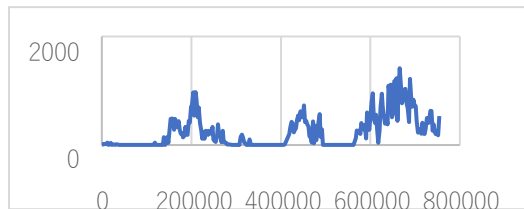
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

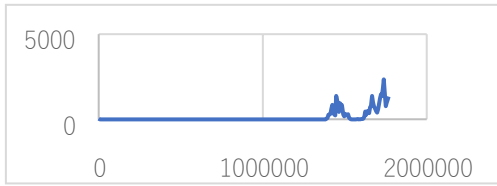


VERA 石垣島観測局

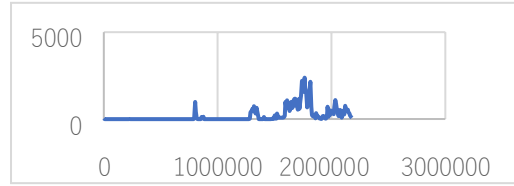


◇宮古空港

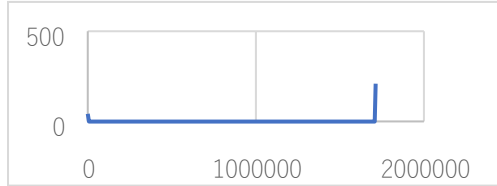
野辺山宇宙電波観測所



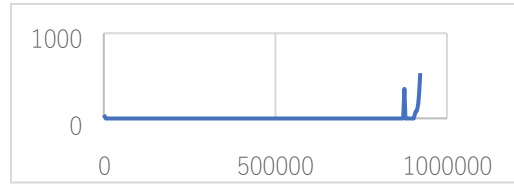
VERA 水沢観測局



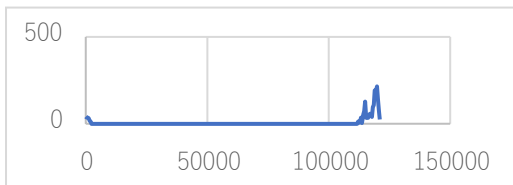
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

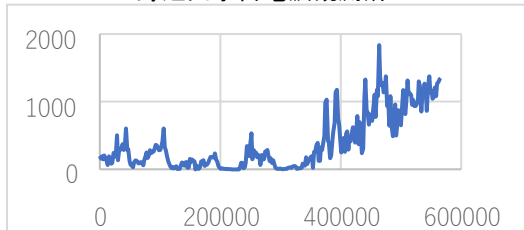


VERA 石垣島観測局

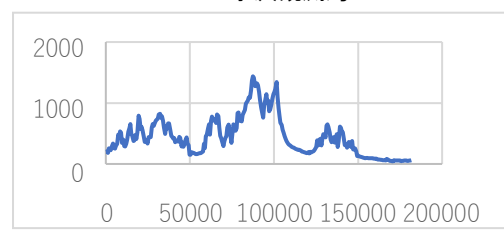


◇青森空港

野辺山宇宙電波観測所



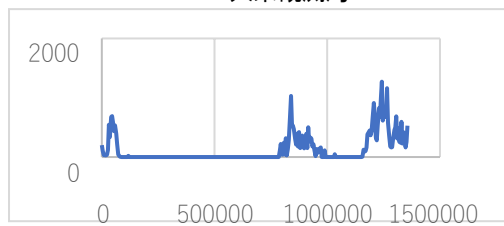
VERA 水沢観測局



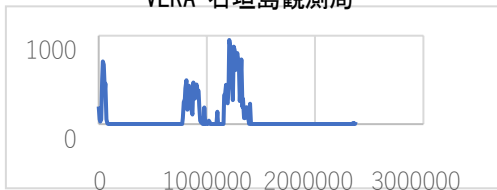
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

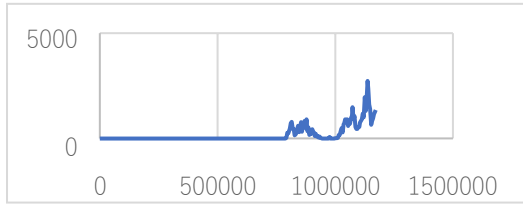


VERA 石垣島観測局

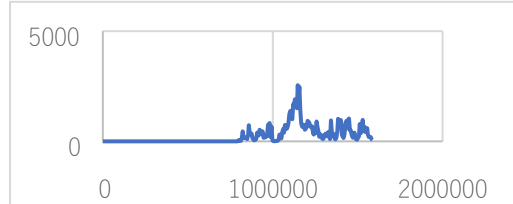


◇奄美空港

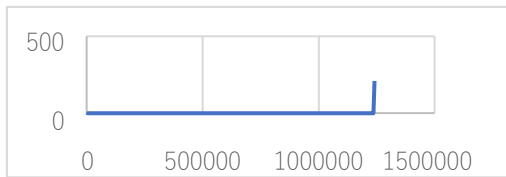
野辺山宇宙電波観測所



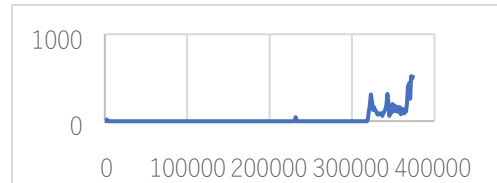
VERA 水沢観測局



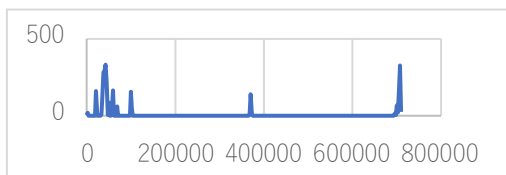
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

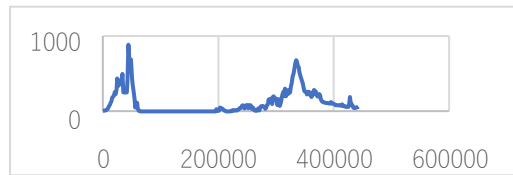


◇丘珠(札幌)空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



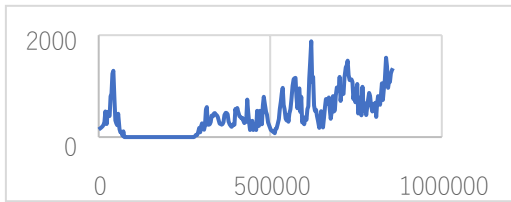
VERA 石垣島観測局



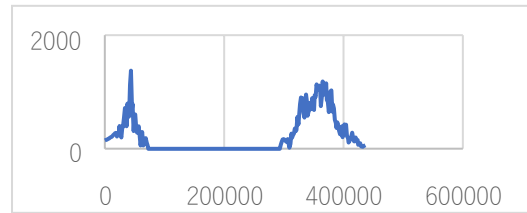


◇帯広空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



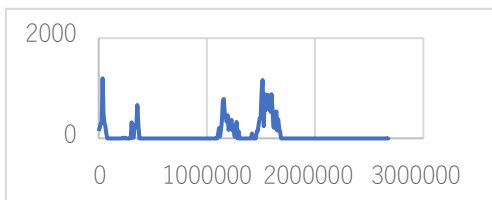
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

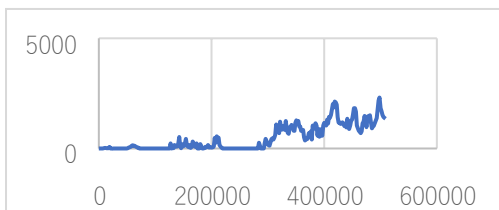


VERA 石垣島観測局

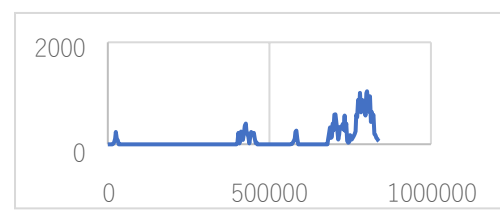


◇出雲空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

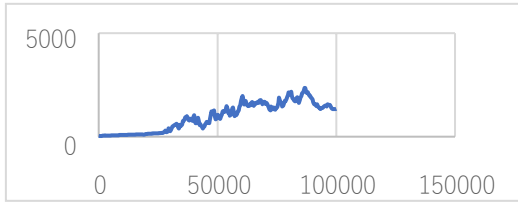


VERA 石垣島観測局

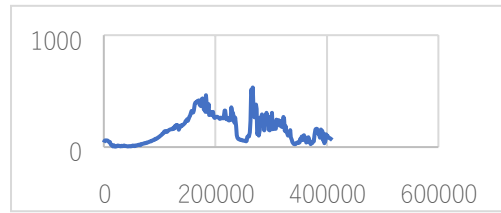


◇調布空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



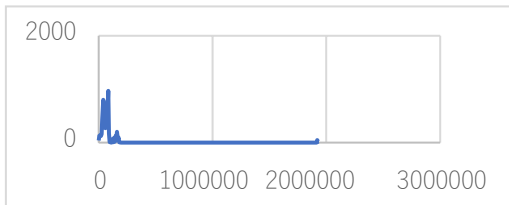
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



◇岡山空港

野辺山宇宙電波観測所



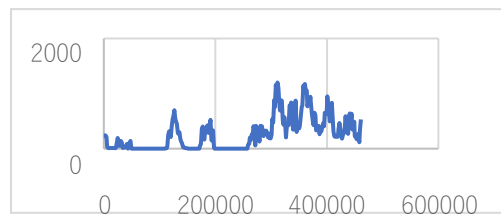
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



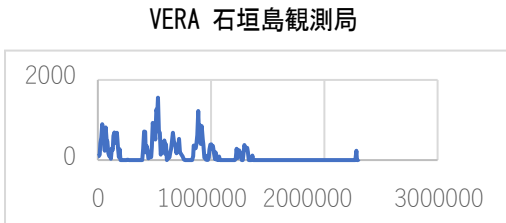
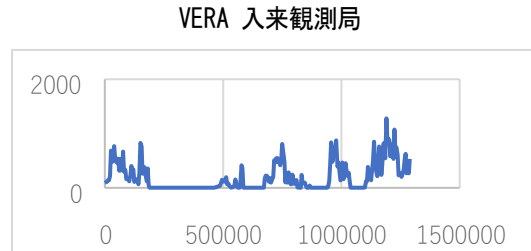
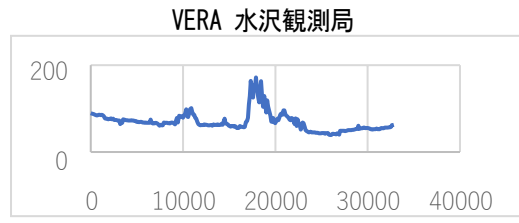
VERA 入来観測局



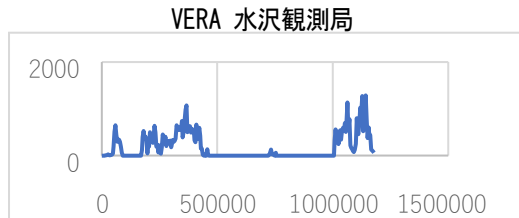
VERA 石垣島観測局



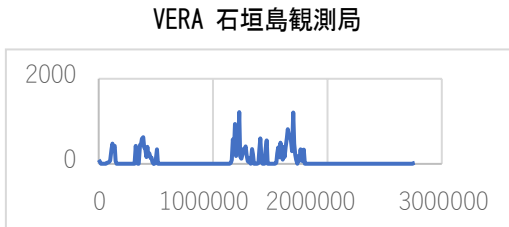
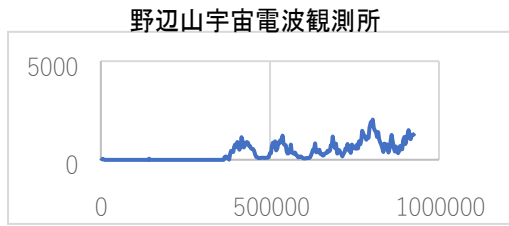
◇花巻空港



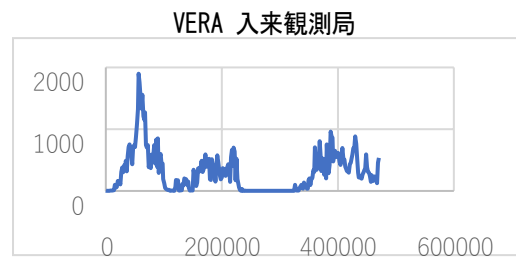
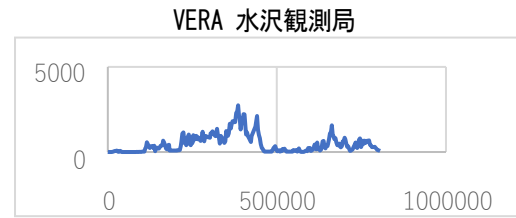
◇佐賀空港



◇釧路空港

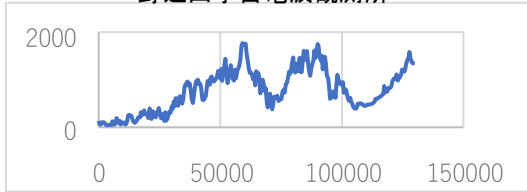


◇徳島空港

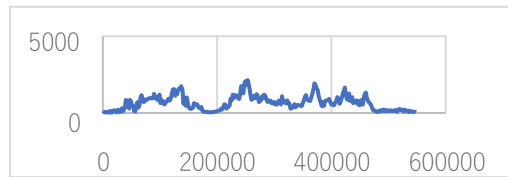


◇静岡空港

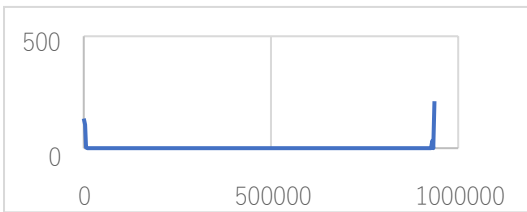
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



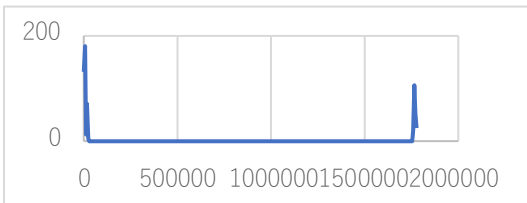
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

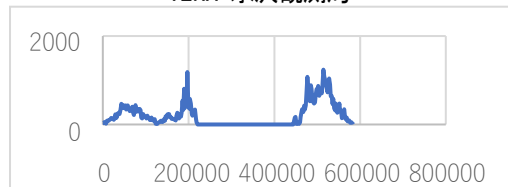


◇女満別空港

野辺山宇宙電波観測所



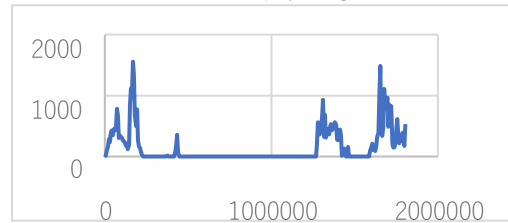
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

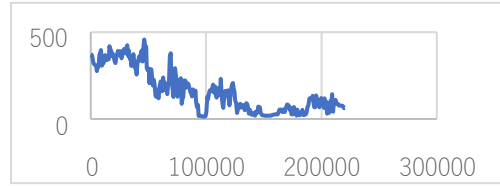


◇福島空港

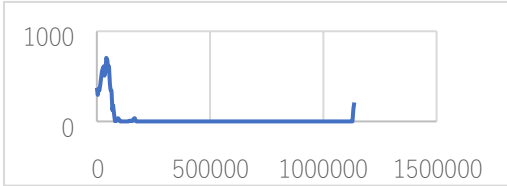
野辺山宇宙電波観測所



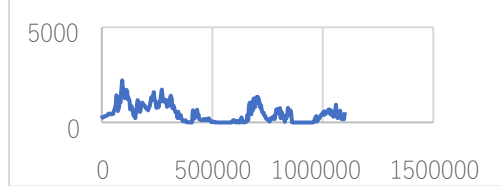
VERA 水沢観測局



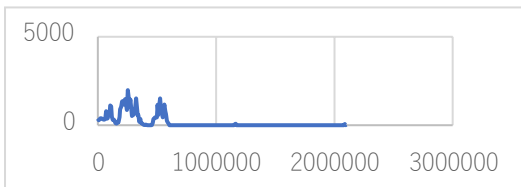
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

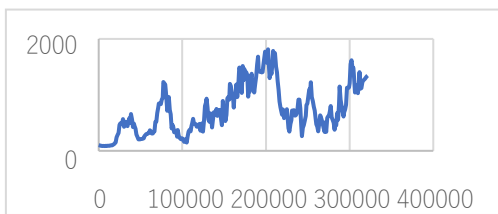


VERA 石垣島観測局

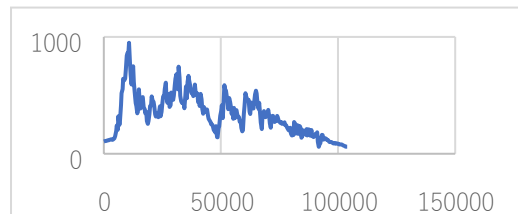


◇山形空港

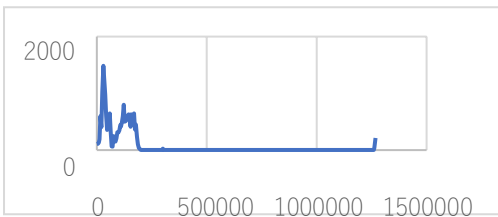
野辺山宇宙電波観測所



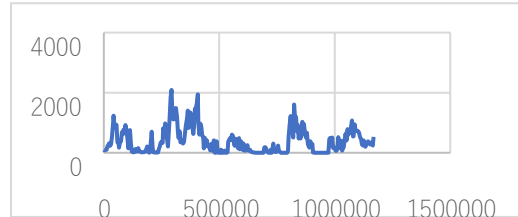
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

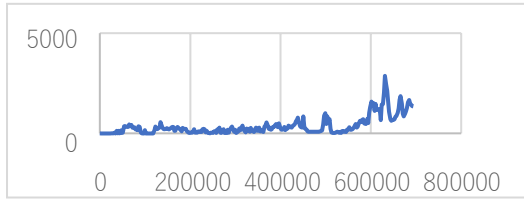


VERA 石垣島観測局

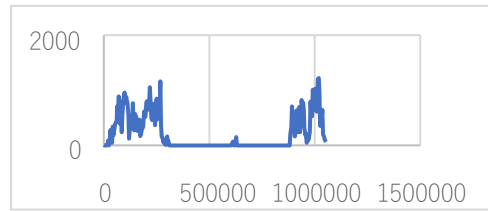


◇山口宇部空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



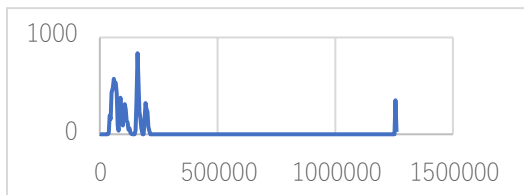
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



◇岡南空港

野辺山宇宙電波観測所



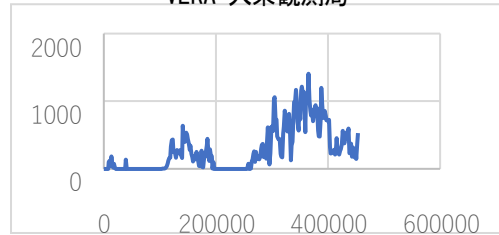
VERA 水沢観測局



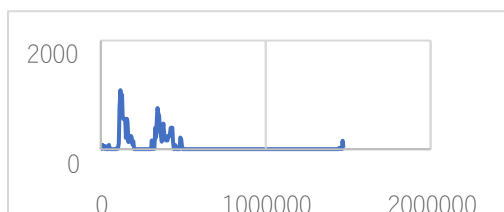
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

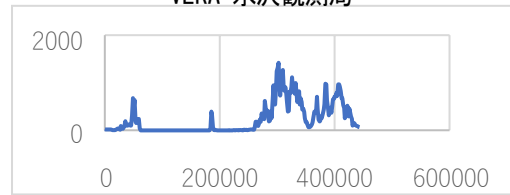


◇富山空港

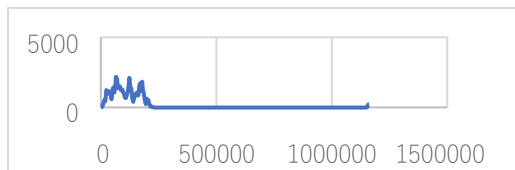
野辺山宇宙電波観測所



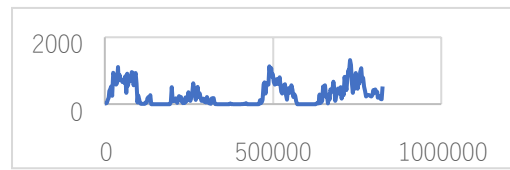
VERA 水沢観測局



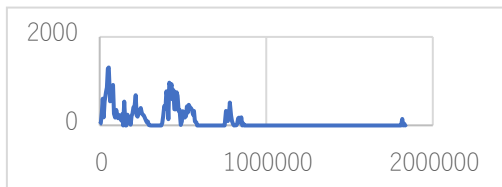
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

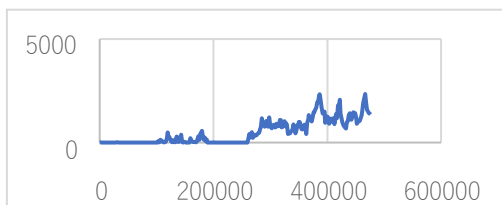


VERA 石垣島観測局

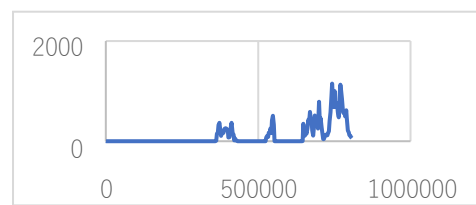


◇米子(美保)空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

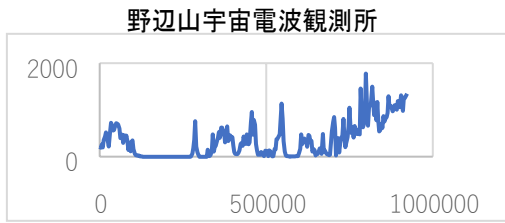


VERA 石垣島観測局

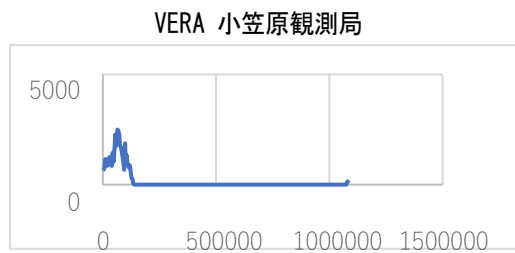




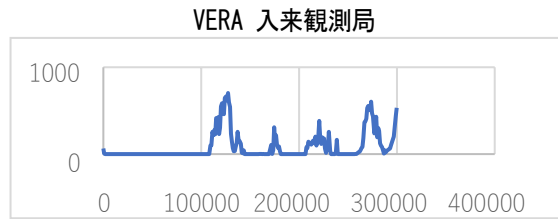
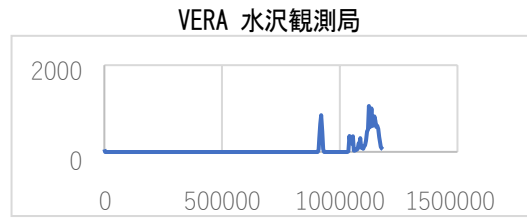
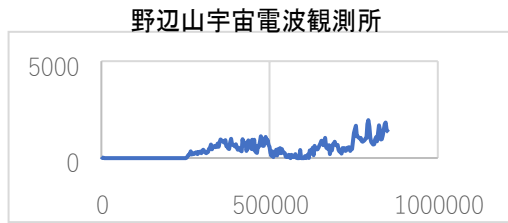
◇旭川空港



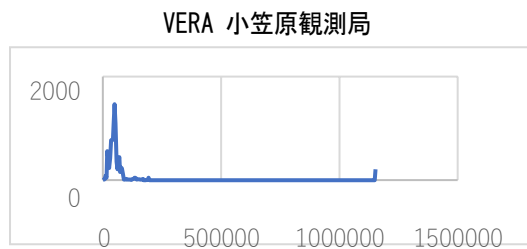
◇松本空港



◇対馬空港

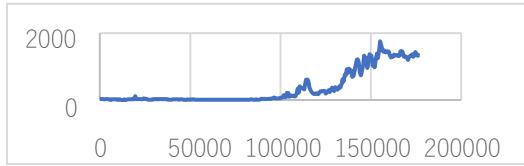


◇福井空港



◇茨城(百里)空港

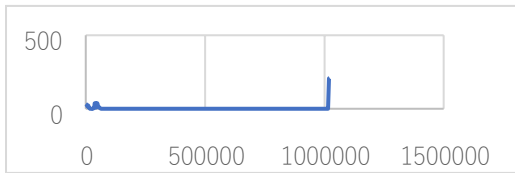
野辺山宇宙電波観測所



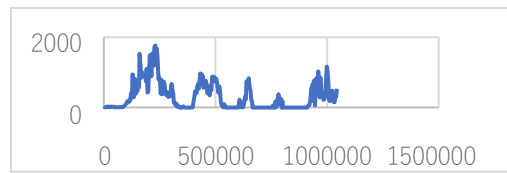
VERA 水沢観測局



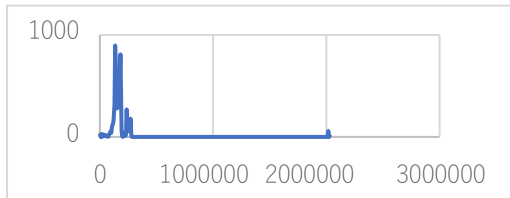
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

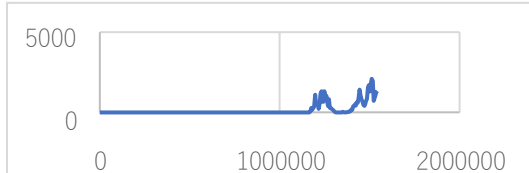


VERA 石垣島観測局

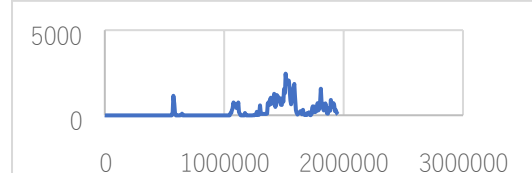


◇久米島空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



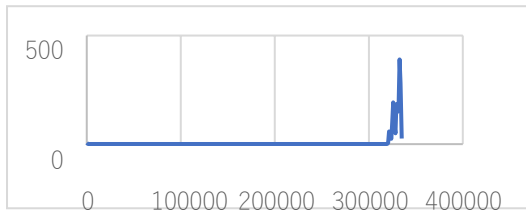
VERA 小笠原観測局



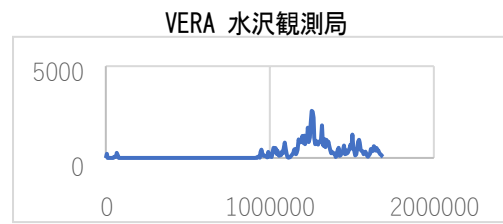
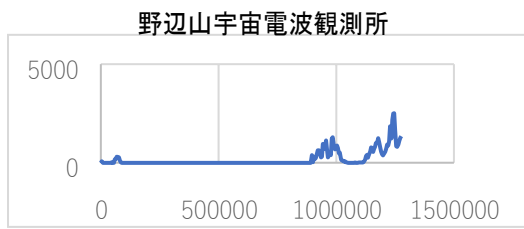
VERA 入来観測局



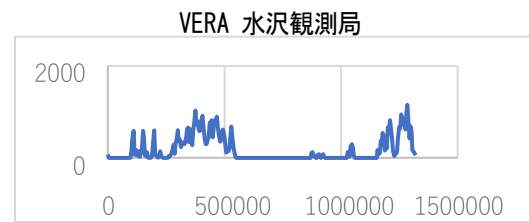
VERA 石垣島観測局



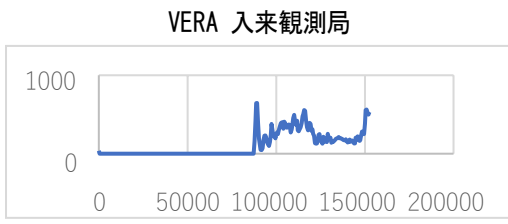
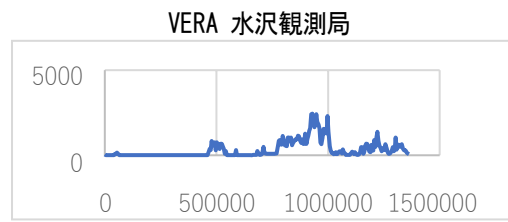
◇徳之島空港



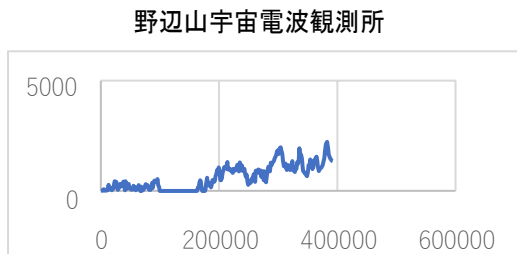
◇福江空港



◇屋久島空港

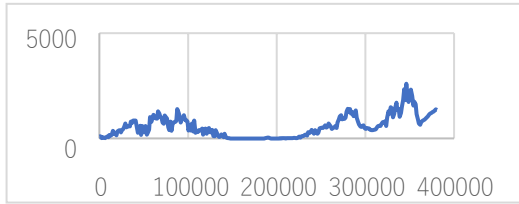


◇鳥取空港

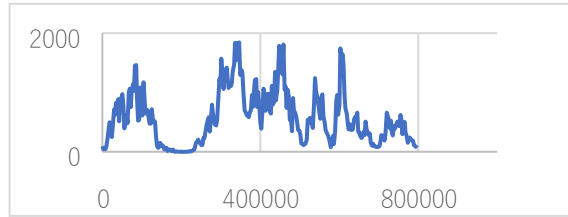


◇南紀白浜空港

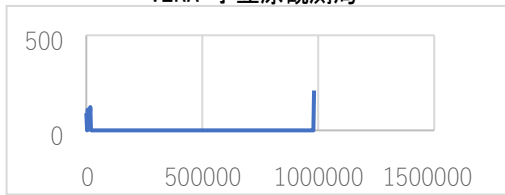
野辺山宇宙電波観測所



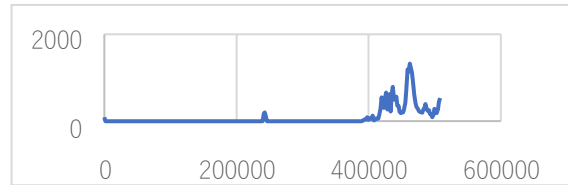
VERA 水沢観測局



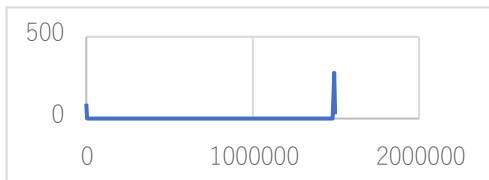
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

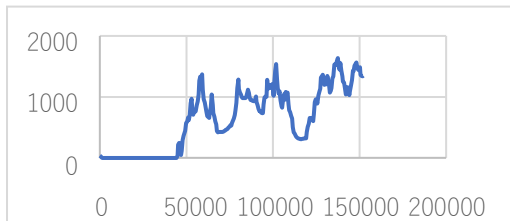


VERA 石垣島観測局

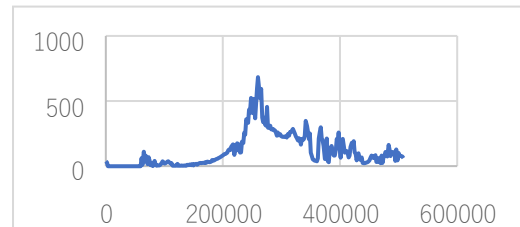


◇大島空港

野辺山宇宙電波観測所



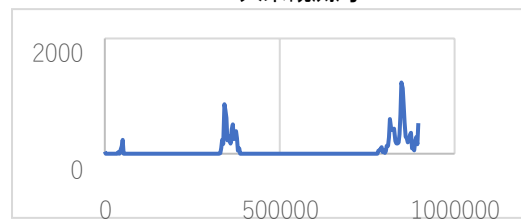
VERA 水沢観測局



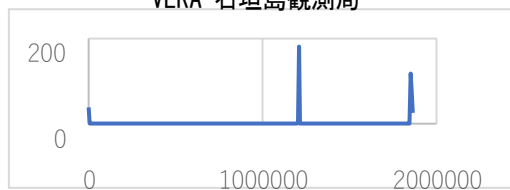
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

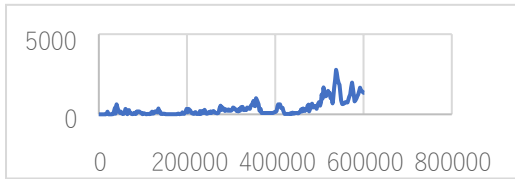


VERA 石垣島観測局

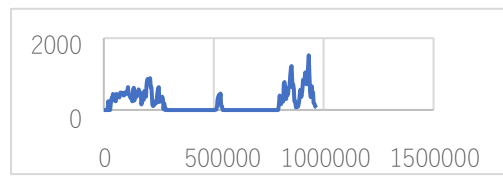


◇岩国空港

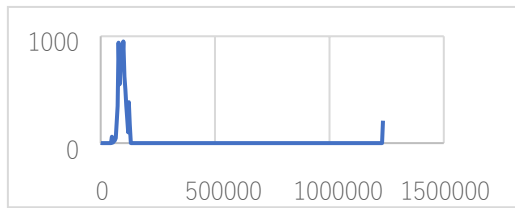
野辺山宇宙電波観測所



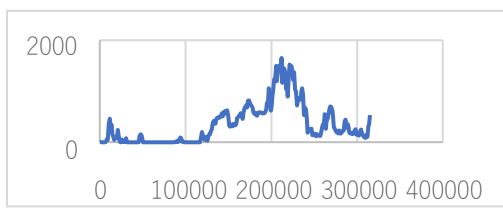
VERA 水沢観測局



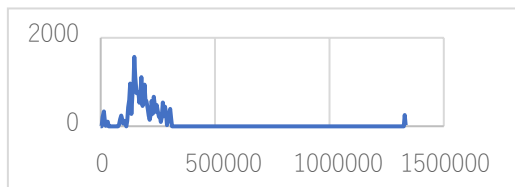
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

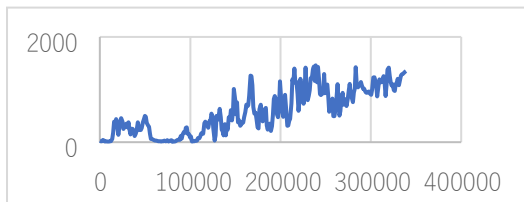


VERA 石垣島観測局

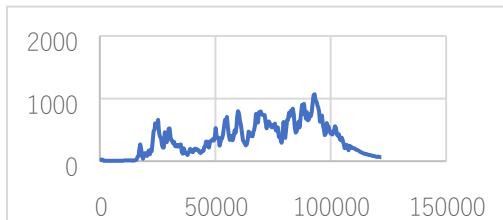


◇庄内空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



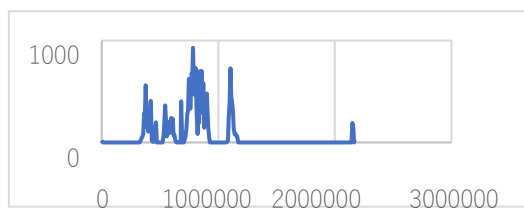
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

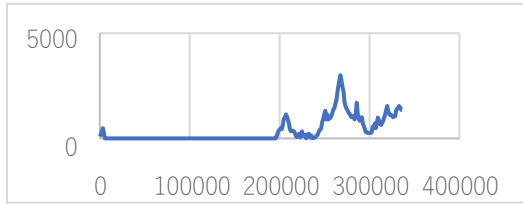


VERA 石垣島観測局

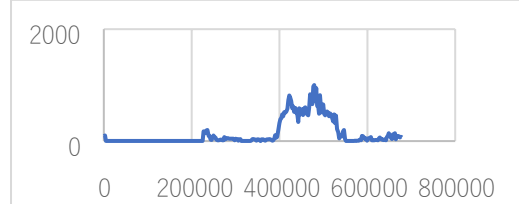


◇八丈島空港

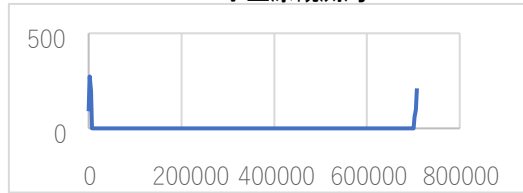
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



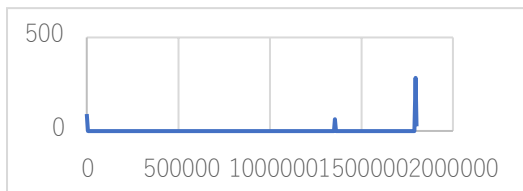
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

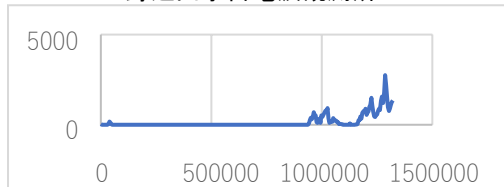


VERA 石垣島観測局

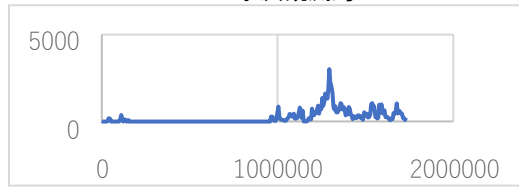


◇冲永良部空港

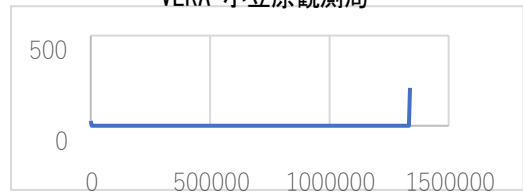
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



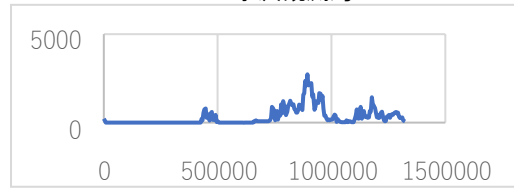


◇種子島空港

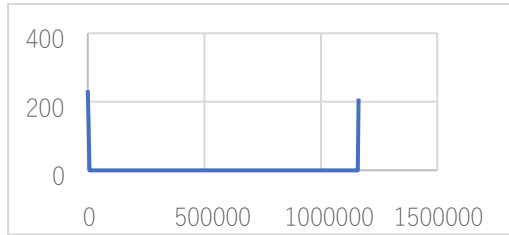
野辺山宇宙電波観測所



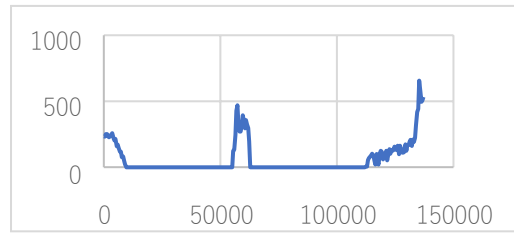
VERA 水沢観測局



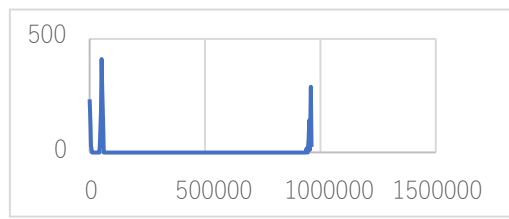
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

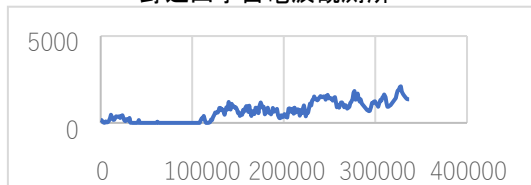


VERA 石垣島観測局

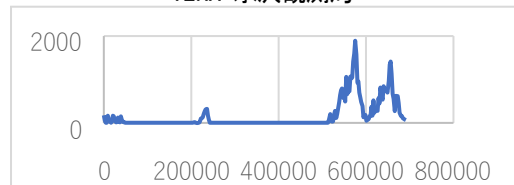


◇但馬空港

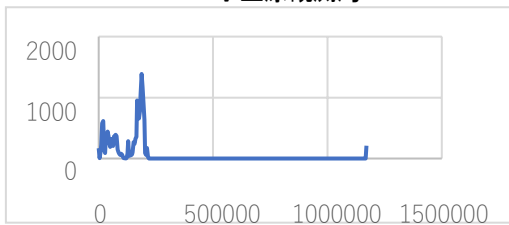
野辺山宇宙電波観測所



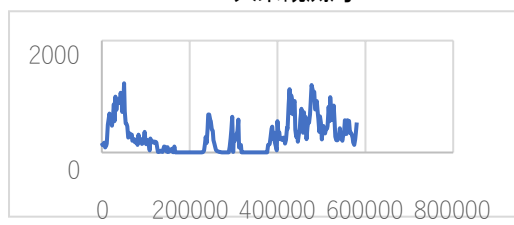
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

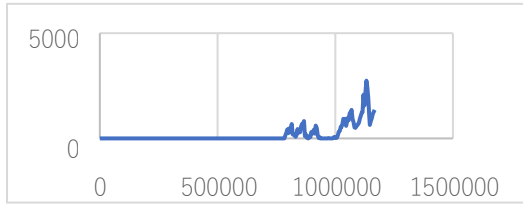


VERA 石垣島観測局

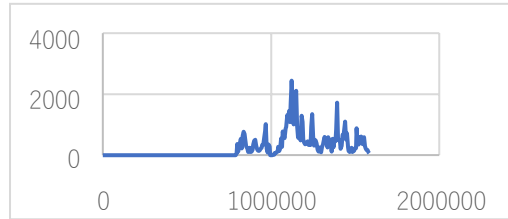


◇喜界空港

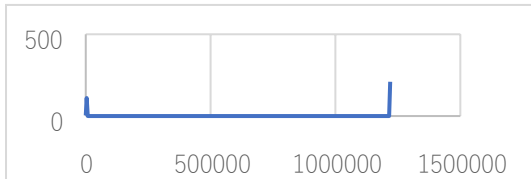
野辺山宇宙電波観測所



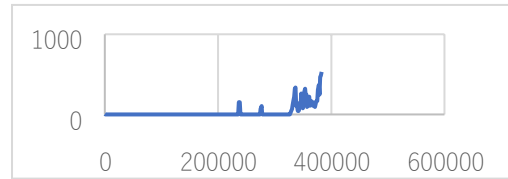
VERA 水沢観測局



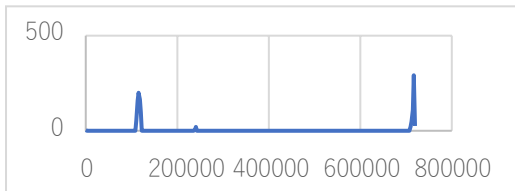
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

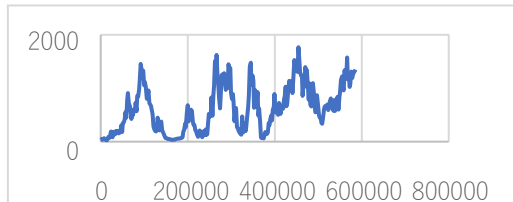


VERA 石垣島観測局

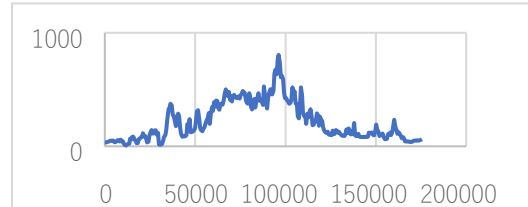


◇三沢空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

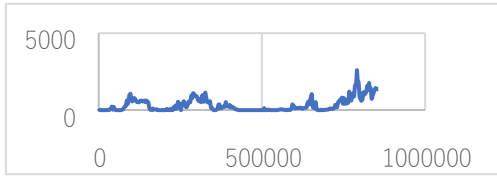


VERA 石垣島観測局

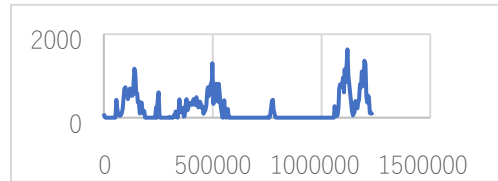


◇天草空港

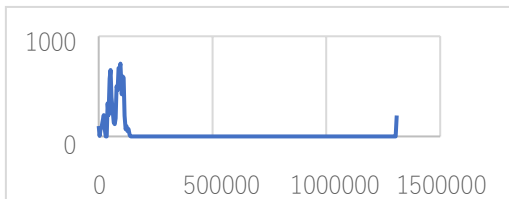
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



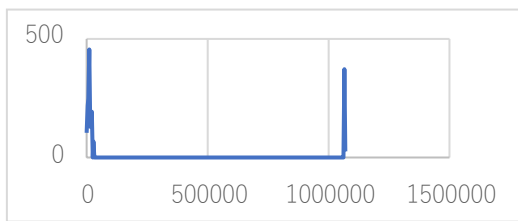
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

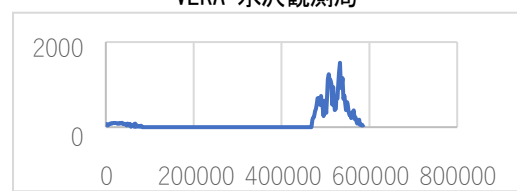


◇中標津空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

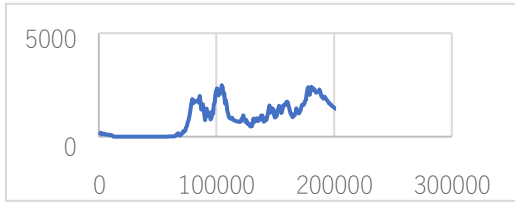


VERA 石垣島観測局

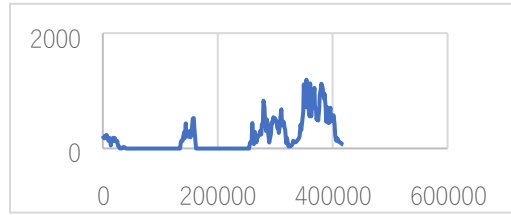


◇能登空港

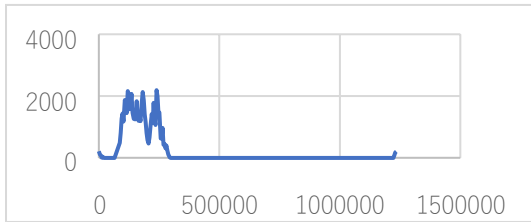
野辺山宇宙電波観測所



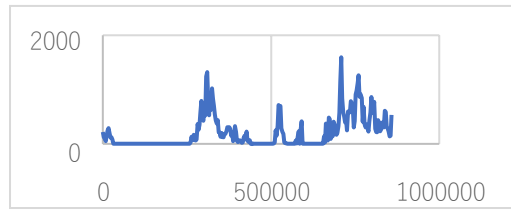
VERA 水沢観測局



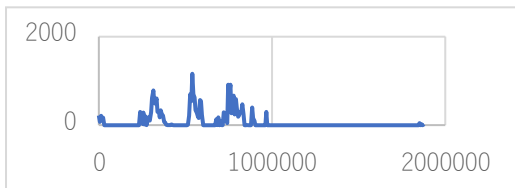
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



◇与論空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



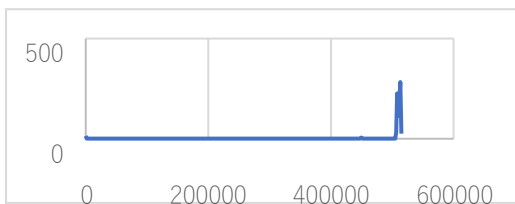
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

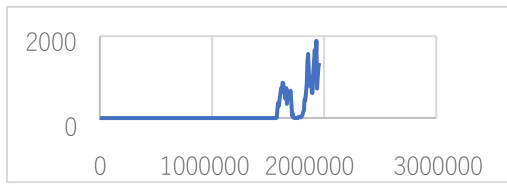


VERA 石垣島観測局

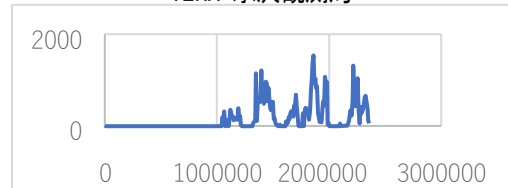


◇与那国空港

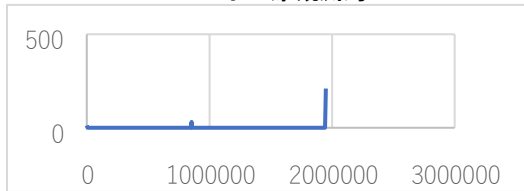
野辺山宇宙電波観測所



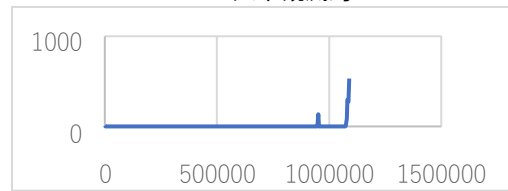
VERA 水沢観測局



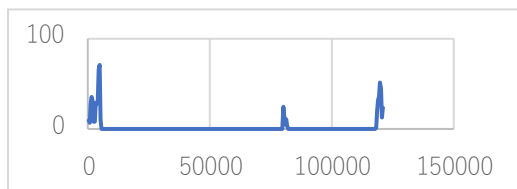
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

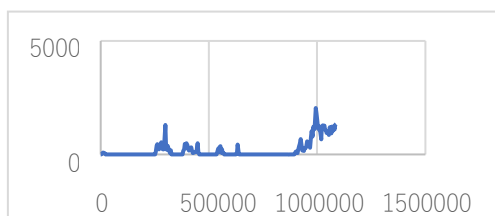


VERA 石垣島観測局

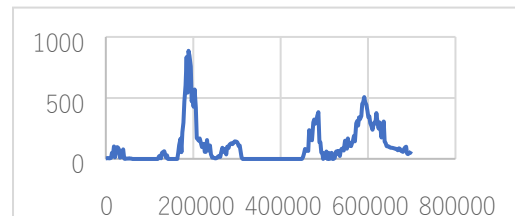


◇稚内空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

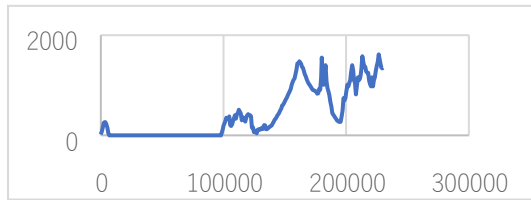


VERA 石垣島観測局

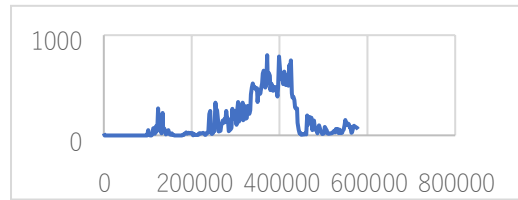


◇三宅島空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



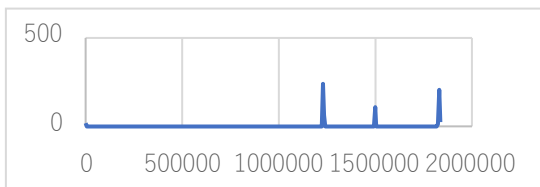
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

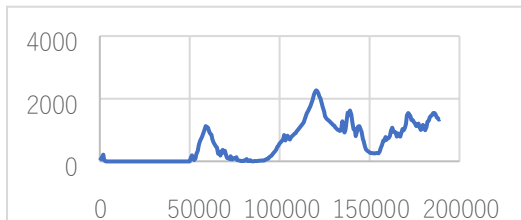


VERA 石垣島観測局

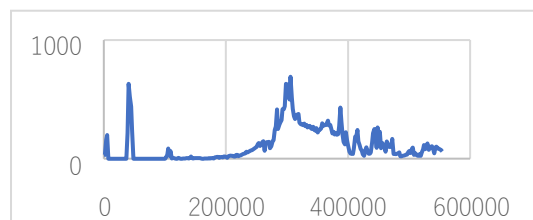


◇新島空港

野辺山宇宙電波観測所



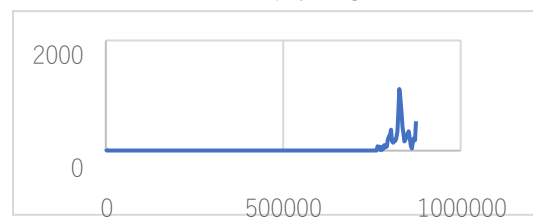
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

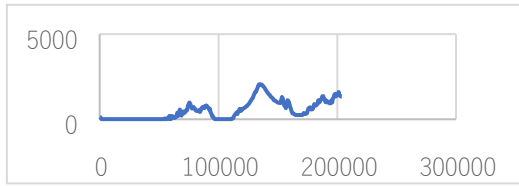


VERA 石垣島観測局

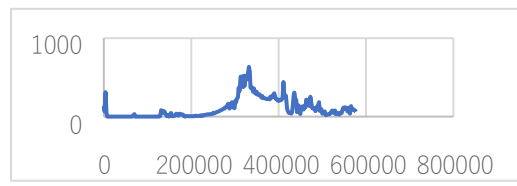


◇神津島空港

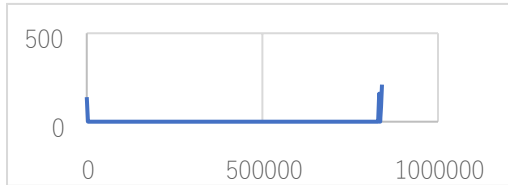
野辺山宇宙電波観測所



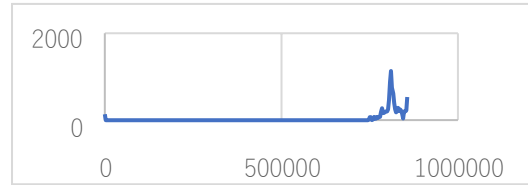
VERA 水沢観測局



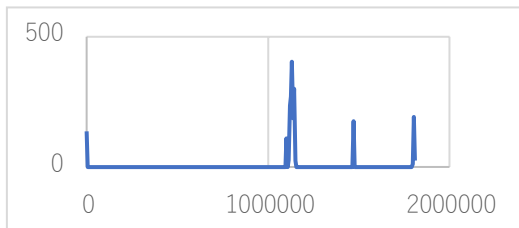
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

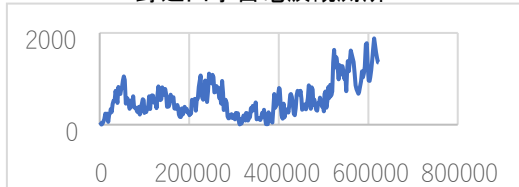


VERA 石垣島観測局

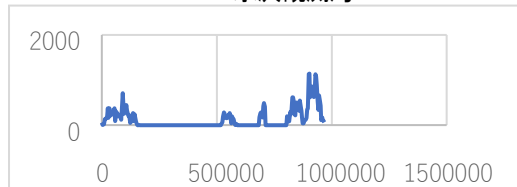


◇石見空港

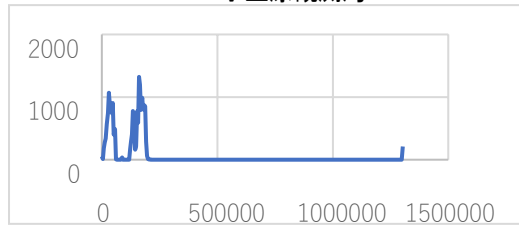
野辺山宇宙電波観測所



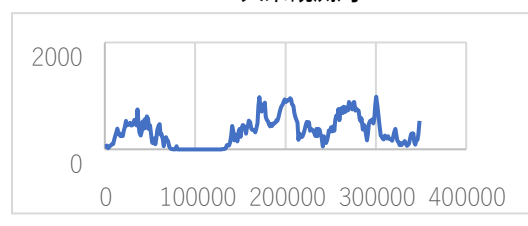
VERA 水沢観測局



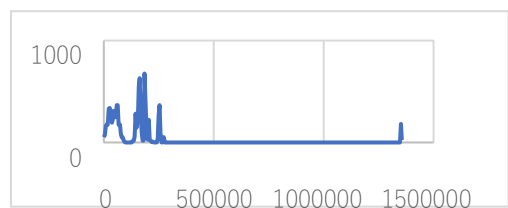
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

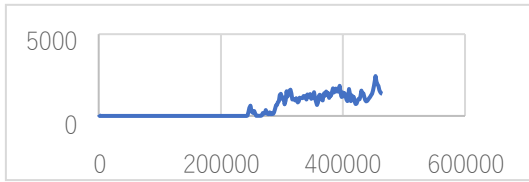


VERA 石垣島観測局



◇隠岐空港

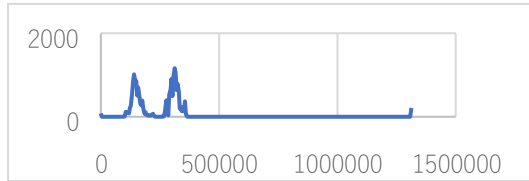
野辺山宇宙電波観測所



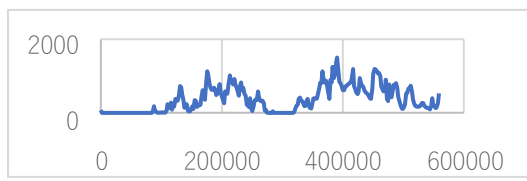
VERA 水沢観測局



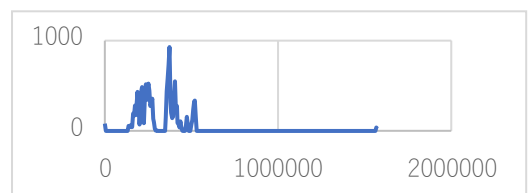
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

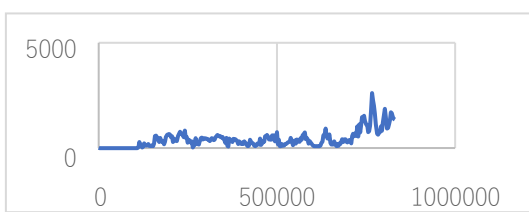


VERA 石垣島観測局

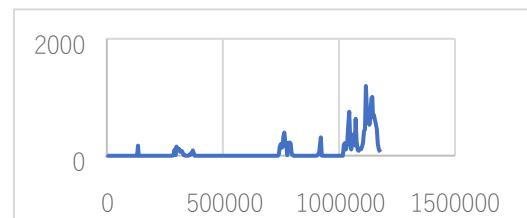


◇老岐空港

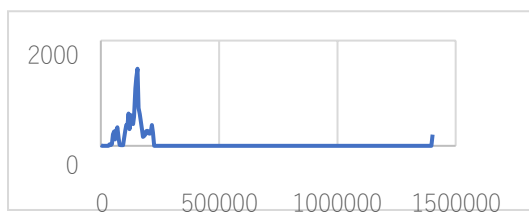
野辺山宇宙電波観測所



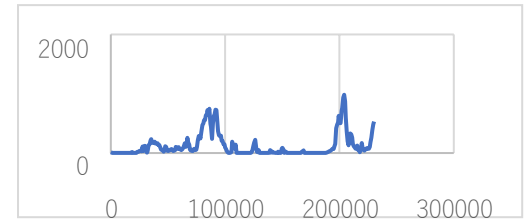
VERA 水沢観測局



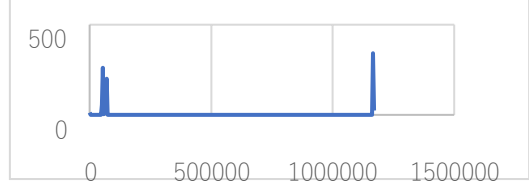
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



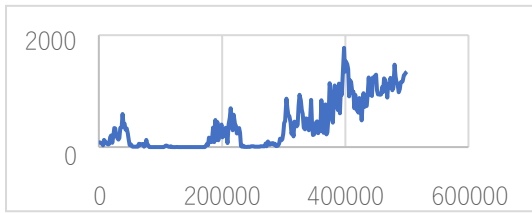
VERA 石垣島観測局



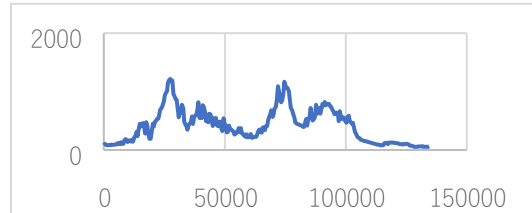


◇大館能代空港

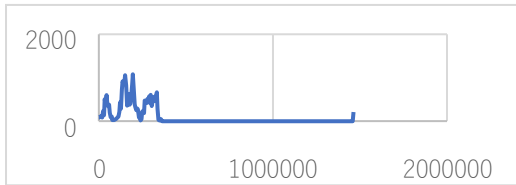
野辺山宇宙電波観測所



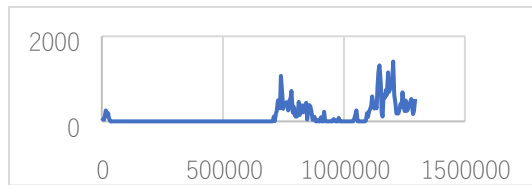
VERA 水沢観測局



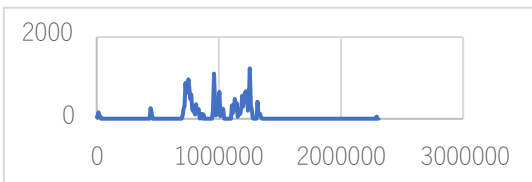
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

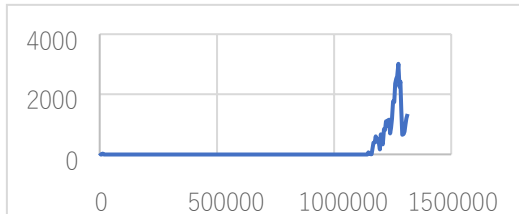


VERA 石垣島観測局

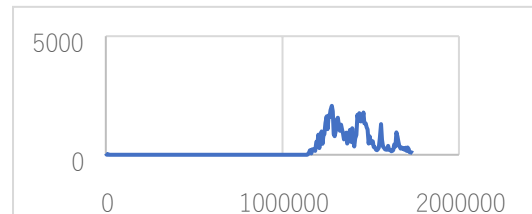


◇南大東空港

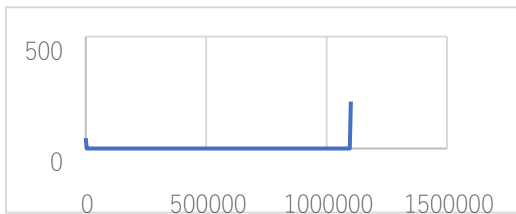
野辺山宇宙電波観測所



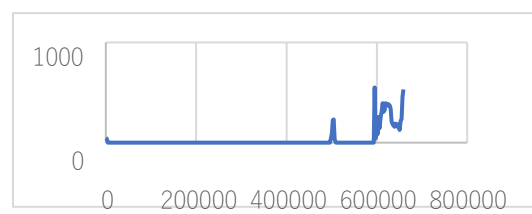
VERA 水沢観測局



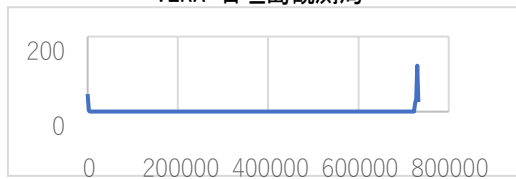
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

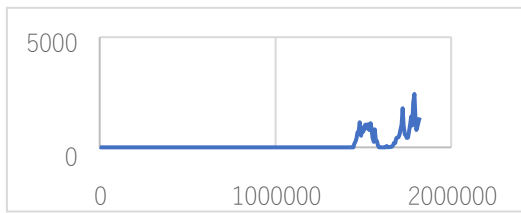


VERA 石垣島観測局

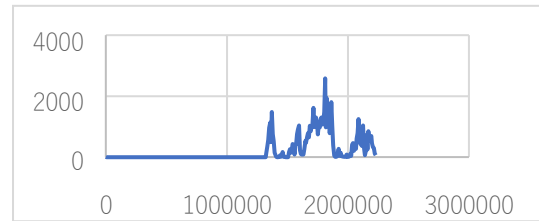


◇多良間空港

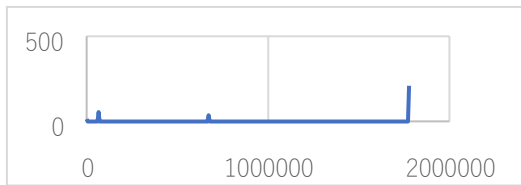
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



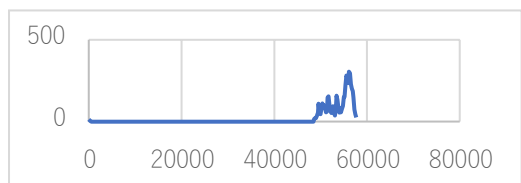
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

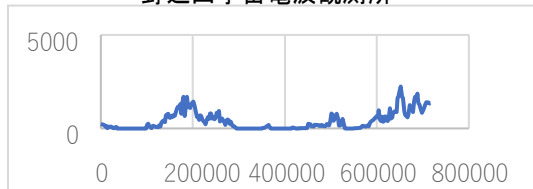


VERA 石垣島観測局

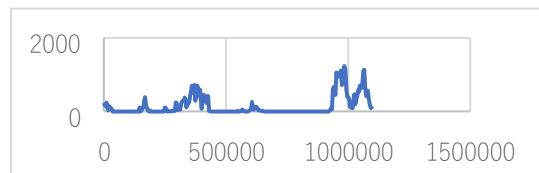


◇大分県央空港

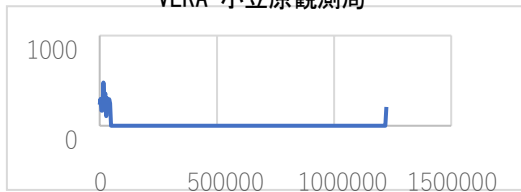
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

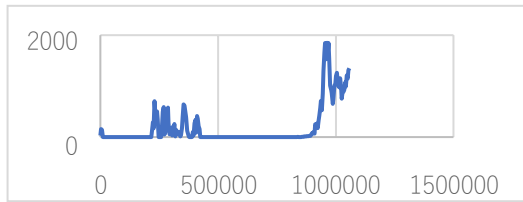


VERA 石垣島観測局

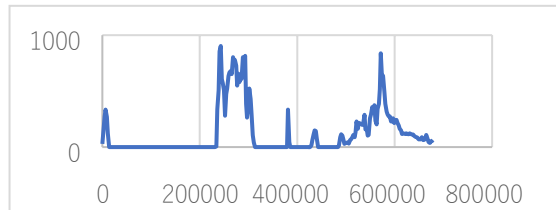


◇利尻空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



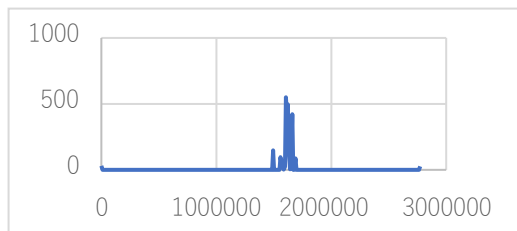
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

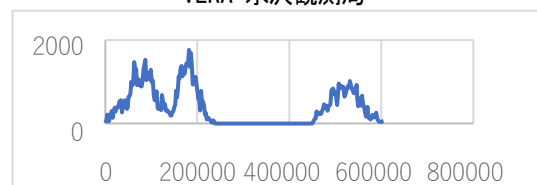


◇紋別空港

野辺山宇宙電波観測所



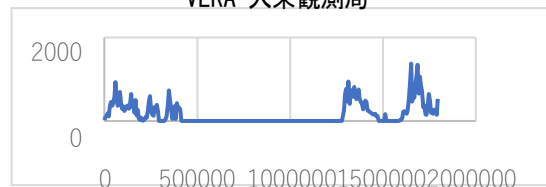
VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

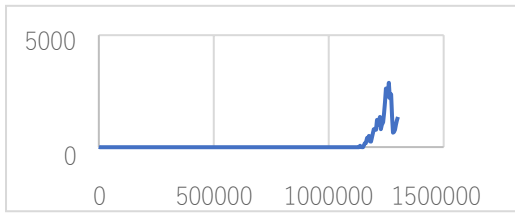


VERA 石垣島観測局

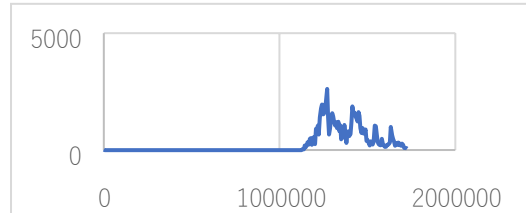


◇北大東空港

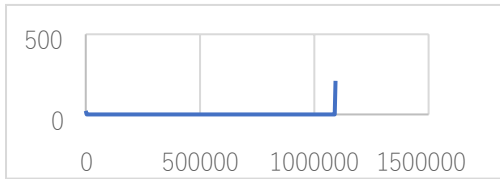
野辺山宇宙電波観測所



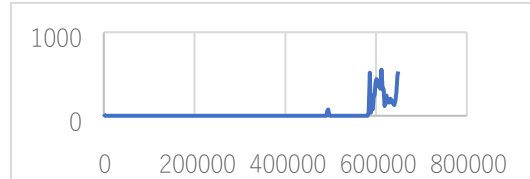
VERA 水沢観測局



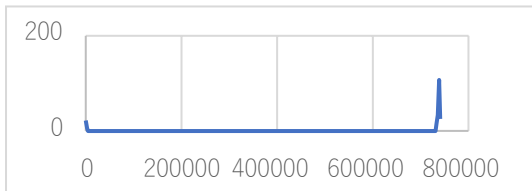
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局

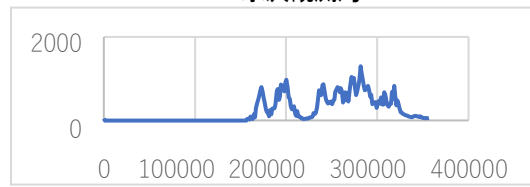


◇奥尻空港

野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



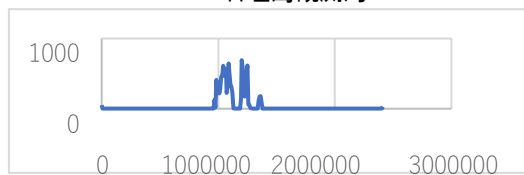
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

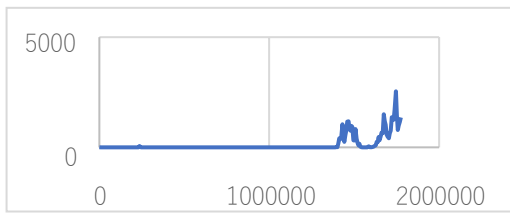


VERA 石垣島観測局

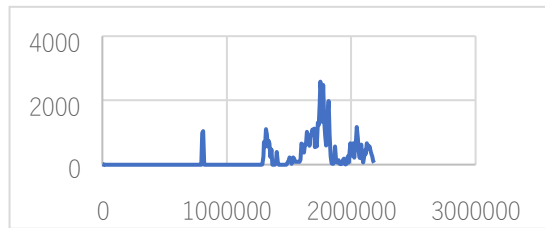


◇下地島空港

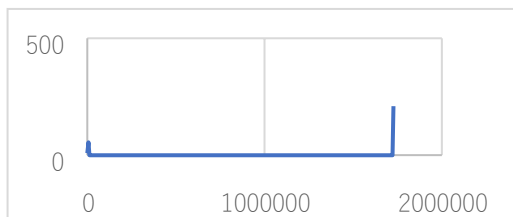
野辺山宇宙電波観測所



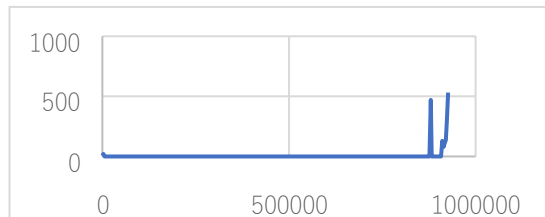
VERA 水沢観測局



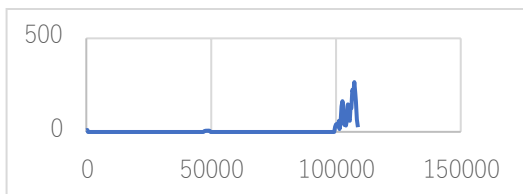
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

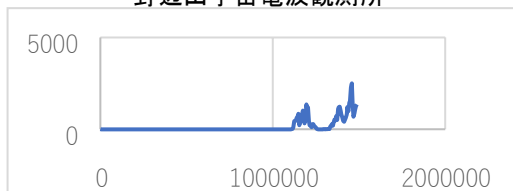


VERA 石垣島観測局



◇栗国空港

野辺山宇宙電波観測所



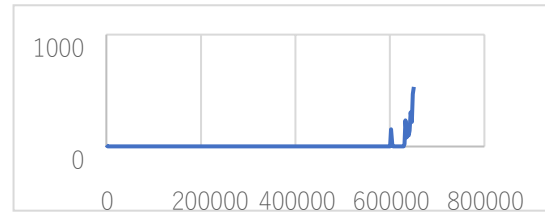
VERA 水沢観測局



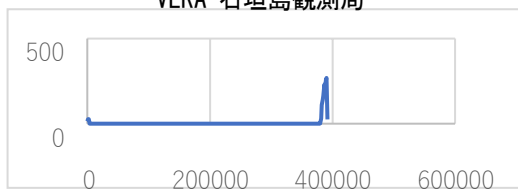
VERA 小笠原観測局



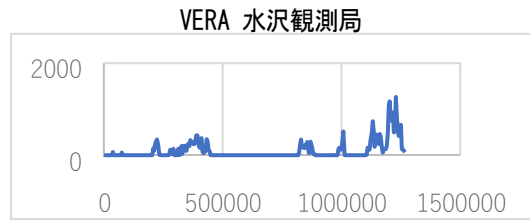
VERA 入来観測局



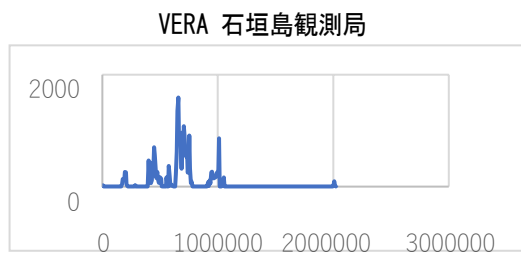
VERA 石垣島観測局



◇小値賀空港

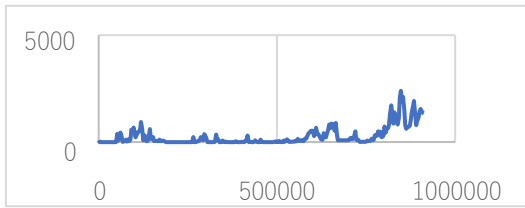


◇佐渡空港

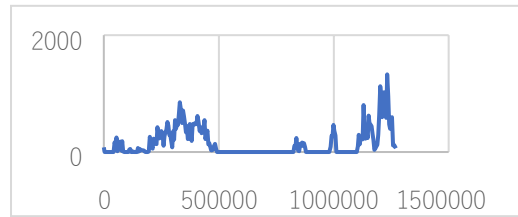


◇上五島空港

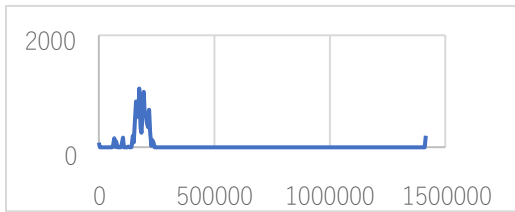
野辺山宇宙電波観測所



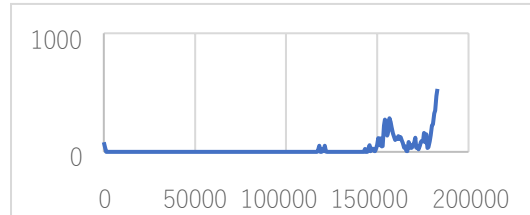
VERA 水沢観測局



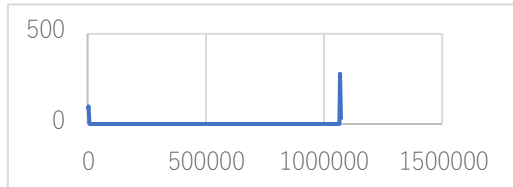
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局



◇慶良間空港

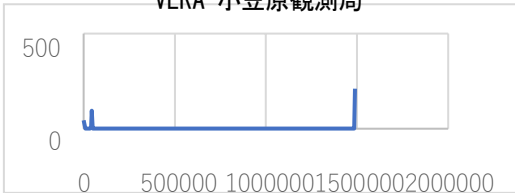
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

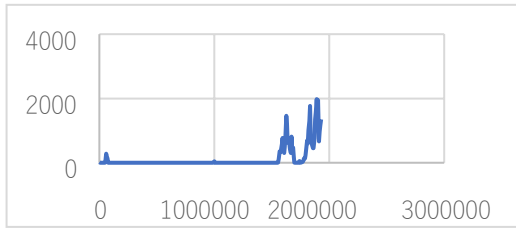


VERA 石垣島観測局

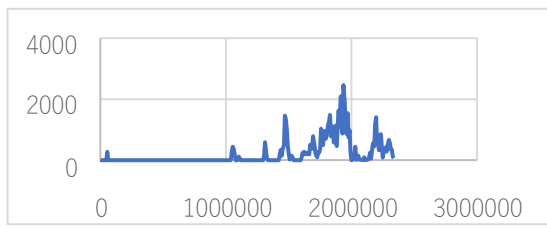


◇波照間空港

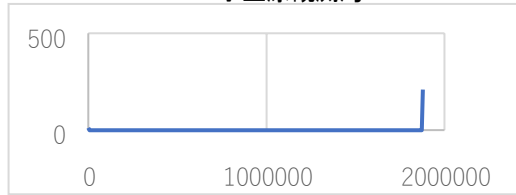
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



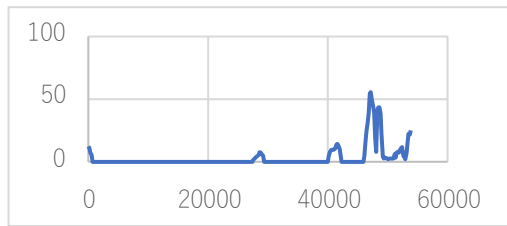
VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局

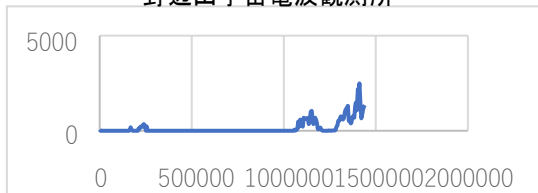


VERA 石垣島観測局



◇伊江島空港

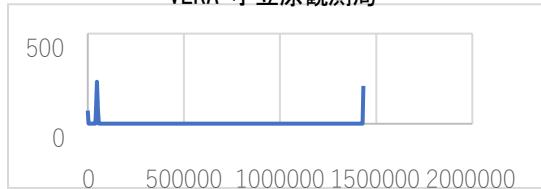
野辺山宇宙電波観測所



VERA 水沢観測局



VERA 小笠原観測局



VERA 入来観測局



VERA 石垣島観測局





上記の断面情報から、他の空港と他の電波天文観測局との回折損失を求めた結果を、一覧にして表に示す。

No.	空港	直線 距離 (km)	自由空 間損失 (dB)	大気 減衰 (dB)	回折 損失 (dB)	損失 合計 (dB)	天文台
1	東京国際	126.6	174.1	50.6	61.2	285.9	野辺山宇宙電波観測所
		415.3	184.4	166.1	49.0	399.5	VERA 水沢観測局
		965.8	191.7	386.3	36.8	614.9	VERA 小笠原観測局
		963.4	191.7	385.4	50.3	627.4	VERA 入来観測局
		1943.5	197.8	777.4	44.2	1019.4	VERA 石垣島観測局
2	成田国際	173.6	176.8	69.4	58.5	304.8	野辺山宇宙電波観測所
		378.4	183.6	151.3	50.0	385.0	VERA 水沢観測局
		978.6	191.9	391.4	0.0	583.3	VERA 小笠原観測局
		1023.1	192.2	409.2	49.1	650.6	VERA 入来観測局
		2002.3	198.1	800.9	44.0	1043.0	VERA 石垣島観測局
3	関西国際	339.6	182.7	135.8	54.8	373.2	野辺山宇宙電波観測所
		741.2	189.4	296.5	56.6	542.5	VERA 水沢観測局
		1052.5	192.5	421.0	55.9	669.3	VERA 小笠原観測局
		537.2	186.6	214.9	54.6	456.1	VERA 入来観測局
		1542.3	195.8	616.9	46.4	859.1	VERA 石垣島観測局
4	福岡	779.3	189.9	311.7	57.0	558.6	野辺山宇宙電波観測所
		1138.1	193.2	455.2	49.9	698.3	VERA 水沢観測局
		1339.5	194.6	535.8	51.4	781.8	VERA 小笠原観測局
		203.8	178.2	81.5	55.3	315.1	VERA 入来観測局
		1186.0	193.5	474.4	48.8	716.7	VERA 石垣島観測局
5	那覇	1493.3	195.5	597.3	58.3	851.1	野辺山宇宙電波観測所
		1908.4	197.7	763.4	55.4	1016.4	VERA 水沢観測局
		1453.3	195.3	581.3	32.7	809.4	VERA 小笠原観測局
		673.0	188.6	269.2	32.6	490.4	VERA 入来観測局
		401.8	184.1	160.7	58.7	403.6	VERA 石垣島観測局
6	新千歳	808.1	190.2	323.3	44.8	558.2	野辺山宇宙電波観測所
		408.2	184.3	163.3	49.2	396.8	VERA 水沢観測局
		1741.8	196.9	696.7	43.2	936.8	VERA 小笠原観測局
		1576.4	196.0	630.6	48.5	875.1	VERA 入来観測局

		2595.2	200.3	1038.1	45.6	1284.0	VERA 石垣島観測局
7	大阪国際	304.2	181.7	121.7	57.5	360.9	野辺山宇宙電波観測所
		699.9	188.9	280.0	56.8	525.7	VERA 水沢観測局
		1070.0	192.6	428.0	54.8	675.4	VERA 小笠原観測局
		574.6	187.2	229.8	53.4	470.4	VERA 入来観測局
		1582.9	196.0	633.2	51.5	880.7	VERA 石垣島観測局
8	中部国際	193.5	177.8	77.4	59.2	314.4	野辺山宇宙電波観測所
		611.0	187.8	244.4	55.2	487.4	VERA 水沢観測局
		1003.8	192.1	401.5	31.5	625.1	VERA 小笠原観測局
		685.7	188.8	274.3	52.0	515.0	VERA 入来観測局
		1681.7	196.6	672.7	54.5	923.8	VERA 石垣島観測局
9	鹿児島	851.3	190.6	340.5	56.0	587.1	野辺山宇宙電波観測所
		1245.3	194.0	498.1	51.5	743.6	VERA 水沢観測局
		1230.7	193.8	492.3	50.5	736.6	VERA 小笠原観測局
		27.2	160.8	10.9	0.0	171.6	VERA 入来観測局
		1041.1	192.4	416.4	61.3	670.2	VERA 石垣島観測局
10	仙台	326.4	182.3	130.6	55.3	368.2	野辺山宇宙電波観測所
		111.9	173.0	44.8	41.2	259.0	VERA 水沢観測局
		1231.3	193.9	492.5	22.0	708.3	VERA 小笠原観測局
		1189.6	193.6	475.8	54.7	724.1	VERA 入来観測局
		2197.3	198.9	878.9	51.6	1129.4	VERA 石垣島観測局
11	熊本	780.4	189.9	312.1	57.1	559.2	野辺山宇宙電波観測所
		1159.3	193.3	463.7	56.9	714.0	VERA 水沢観測局
		1267.0	194.1	506.8	57.9	758.7	VERA 小笠原観測局
		127.0	174.1	50.8	51.9	276.9	VERA 入来観測局
		1139.1	193.2	455.6	60.5	709.4	VERA 石垣島観測局
12	宮崎	790.5	190.0	316.2	52.2	558.5	野辺山宇宙電波観測所
		1190.3	193.6	476.1	53.2	722.8	VERA 水沢観測局
		1170.4	193.4	468.2	0.0	661.6	VERA 小笠原観測局
		96.6	171.7	38.6	50.7	261.1	VERA 入来観測局
		1092.7	192.8	437.1	52.8	682.7	VERA 石垣島観測局
13	名古屋	159.7	176.1	63.9	58.4	298.4	野辺山宇宙電波観測所
		569.8	187.2	227.9	57.5	472.5	VERA 水沢観測局
		1035.9	192.4	414.4	41.5	648.2	VERA 小笠原観測局
		717.0	189.2	286.8	50.0	525.9	VERA 入来観測局

		1718.6	196.7	687.4	46.3	930.4	VERA 石垣島観測局
14	松山	577.4	187.3	231.0	55.5	473.7	野辺山宇宙電波観測所
		957.2	191.7	382.9	53.0	627.5	VERA 水沢観測局
		1179.1	193.5	471.6	54.6	719.7	VERA 小笠原観測局
		313.0	182.0	125.2	52.8	360.0	VERA 入来観測局
		1332.2	194.5	532.9	48.6	776.0	VERA 石垣島観測局
15	長崎	855.0	190.7	342.0	53.6	586.3	野辺山宇宙電波観測所
		1222.6	193.8	489.0	57.6	740.4	VERA 水沢観測局
		1350.0	194.7	540.0	54.0	788.7	VERA 小笠原観測局
		138.8	174.9	55.5	45.6	276.1	VERA 入来観測局
		1096.6	192.8	438.6	56.9	688.4	VERA 石垣島観測局
16	神戸	329.3	182.4	131.7	56.5	370.6	野辺山宇宙電波観測所
		725.6	189.3	290.2	56.3	535.8	VERA 水沢観測局
		1069.9	192.6	428.0	51.7	672.3	VERA 小笠原観測局
		548.9	186.8	219.6	53.9	460.3	VERA 入来観測局
		1557.2	195.9	622.9	51.0	869.8	VERA 石垣島観測局
17	新潟	230.4	179.3	92.2	55.2	326.6	野辺山宇宙電波観測所
		219.5	178.9	87.8	56.3	323.0	VERA 水沢観測局
		1239.5	193.9	495.8	57.0	746.7	VERA 小笠原観測局
		1049.4	192.5	419.7	47.8	660.0	VERA 入来観測局
		2063.9	198.3	825.6	51.7	1075.6	VERA 石垣島観測局
18	新石垣	1871.2	197.5	748.5	54.8	1000.7	野辺山宇宙電波観測所
		2279.1	199.2	911.6	51.0	1161.8	VERA 水沢観測局
		1826.0	197.3	730.4	0.0	927.7	VERA 小笠原観測局
		1016.6	192.2	406.6	0.0	598.8	VERA 入来観測局
		7.7	149.8	3.1	53.3	206.2	VERA 石垣島観測局
19	八尾	301.3	181.6	120.5	54.8	356.9	野辺山宇宙電波観測所
		704.8	189.0	281.9	56.2	527.1	VERA 水沢観測局
		1044.9	192.4	417.9	57.4	667.7	VERA 小笠原観測局
		575.4	187.2	230.2	52.6	470.0	VERA 入来観測局
		1579.4	196.0	631.8	44.6	872.4	VERA 石垣島観測局
20	広島	532.6	186.6	213.0	58.6	458.3	野辺山宇宙電波観測所
		898.9	191.1	359.6	56.1	606.8	VERA 水沢観測局
		1205.2	193.7	482.1	53.8	729.5	VERA 小笠原観測局
		377.4	183.6	151.0	55.2	389.7	VERA 入来観測局

		1396.9	194.9	558.7	51.3	805.0	VERA 石垣島観測局
21	大分	674.6	188.6	269.9	55.3	513.8	野辺山宇宙電波観測所
		1050.5	192.5	420.2	56.5	669.2	VERA 水沢観測局
		1230.9	193.8	492.4	45.2	731.4	VERA 小笠原観測局
		227.4	179.2	91.0	55.8	325.9	VERA 入来観測局
		1245.7	194.0	498.3	50.8	743.0	VERA 石垣島観測局
22	東京都東京 H						
23	北九州	718.3	189.2	287.3	57.1	533.6	野辺山宇宙電波観測所
		1077.3	192.7	430.9	56.9	680.6	VERA 水沢観測局
		1307.6	194.4	523.1	45.4	762.8	VERA 小笠原観測局
		239.2	179.6	95.7	55.3	330.6	VERA 入来観測局
		1239.9	193.9	496.0	50.7	740.6	VERA 石垣島観測局
24	高松	449.4	185.1	179.8	58.2	423.0	野辺山宇宙電波観測所
		837.8	190.5	335.1	52.0	577.6	VERA 水沢観測局
		1113.3	193.0	445.3	53.7	692.0	VERA 小笠原観測局
		431.8	184.8	172.7	53.7	411.2	VERA 入来観測局
		1445.7	195.2	578.3	54.3	827.9	VERA 石垣島観測局
25	函館	678.0	188.7	271.2	42.7	502.5	野辺山宇宙電波観測所
		294.0	181.4	117.6	51.3	350.3	VERA 水沢観測局
		1633.3	196.3	653.3	48.2	897.8	VERA 小笠原観測局
		1445.5	195.2	578.2	51.3	824.8	VERA 入来観測局
		2464.8	199.9	985.9	43.3	1229.1	VERA 石垣島観測局
26	高知	513.9	186.3	205.6	52.7	444.5	野辺山宇宙電波観測所
		912.2	191.2	364.9	56.1	612.2	VERA 水沢観測局
		1089.0	192.8	435.6	0.0	628.4	VERA 小笠原観測局
		362.7	183.2	145.1	49.3	377.6	VERA 入来観測局
		1370.4	194.8	548.1	47.9	790.8	VERA 石垣島観測局
27	秋田	435.5	184.8	174.2	49.8	408.8	野辺山宇宙電波観測所
		95.2	171.6	38.1	56.6	266.3	VERA 水沢観測局
		1401.3	195.0	560.5	53.3	808.8	VERA 小笠原観測局
		1241.8	193.9	496.7	48.5	739.2	VERA 入来観測局
		2260.0	199.1	904.0	48.4	1151.5	VERA 石垣島観測局
28	小松	192.4	177.7	77.0	64.8	319.4	野辺山宇宙電波観測所
		515.4	186.3	206.1	55.1	447.5	VERA 水沢観測局

		1168.6	193.4	467.4	58.0	718.8	VERA 小笠原観測局
		754.1	189.6	301.6	51.6	542.8	VERA 入来観測局
		1770.8	197.0	708.3	47.4	952.7	VERA 石垣島観測局
29	宮古	1767.4	197.0	707.0	56.9	960.8	野辺山宇宙電波観測所
		2178.2	198.8	871.3	53.2	1123.3	VERA 水沢観測局
		1712.9	196.7	685.1	0.0	881.9	VERA 小笠原観測局
		922.0	191.3	368.8	0.0	560.1	VERA 入来観測局
		121.0	173.7	48.4	57.5	279.6	VERA 石垣島観測局
30	青森	565.8	187.1	226.3	50.8	464.2	野辺山宇宙電波観測所
		181.7	177.2	72.7	58.0	307.9	VERA 水沢観測局
		1519.7	195.7	607.9	53.0	856.6	VERA 小笠原観測局
		1355.6	194.7	542.3	50.5	787.4	VERA 入来観測局
		2375.1	199.6	950.0	43.6	1193.1	VERA 石垣島観測局
31	奄美	1172.1	193.4	468.8	58.7	721.0	野辺山宇宙電波観測所
		1587.1	196.1	634.8	53.9	884.8	VERA 水沢観測局
		1240.9	193.9	496.4	0.0	690.3	VERA 小笠原観測局
		374.2	183.5	149.7	0.0	333.2	VERA 入来観測局
		709.8	189.1	283.9	45.3	518.3	VERA 石垣島観測局
32	丘珠(札幌)	834.6	190.5	333.8	39.8	564.1	野辺山宇宙電波観測所
		442.9	185.0	177.2	53.8	416.0	VERA 水沢観測局
		1779.6	197.1	711.8	45.0	953.9	VERA 小笠原観測局
		1587.6	196.1	635.0	51.5	882.6	VERA 入来観測局
		2605.3	200.4	1042.1	54.4	1296.9	VERA 石垣島観測局
33	帯広	857.2	190.7	342.9	48.7	582.3	野辺山宇宙電波観測所
		436.5	184.8	174.6	57.9	417.3	VERA 水沢観測局
		1737.6	196.8	695.0	52.2	944.1	VERA 小笠原観測局
		1661.0	196.5	664.4	56.7	917.6	VERA 入来観測局
		2680.6	200.6	1072.2	57.1	1329.9	VERA 石垣島観測局
34	出雲	508.7	186.2	203.5	60.9	450.6	野辺山宇宙電波観測所
		839.1	190.5	335.6	55.4	581.6	VERA 水沢観測局
		1279.5	194.2	511.8	53.9	759.9	VERA 小笠原観測局
		465.8	185.4	186.3	50.1	421.8	VERA 入来観測局
		1480.4	195.5	592.1	51.0	838.6	VERA 石垣島観測局
35	調布	100.0	172.0	40.0	62.1	274.2	野辺山宇宙電波観測所
		409.6	184.3	163.8	45.6	393.7	VERA 水沢観測局

		985.0	191.9	394.0	39.1	625.1	VERA 小笠原観測局
		947.6	191.6	379.1	62.7	633.4	VERA 入来観測局
		1932.4	197.8	773.0	51.7	1022.4	VERA 石垣島観測局
36	岡山	439.8	184.9	175.9	57.9	418.7	野辺山宇宙電波観測所
		809.6	190.2	323.8	56.1	570.2	VERA 水沢観測局
		1165.6	193.4	466.2	42.4	702.0	VERA 小笠原観測局
		461.1	185.3	184.4	51.0	420.7	VERA 入来観測局
		1479.8	195.4	591.9	47.6	835.0	VERA 石垣島観測局
37	花巻	452.5	185.2	181.0	52.5	418.6	野辺山宇宙電波観測所
		32.8	162.4	13.1	47.3	222.8	VERA 水沢観測局
		1372.0	194.8	548.8	48.1	791.7	VERA 小笠原観測局
		1289.0	194.3	515.6	50.2	760.0	VERA 入来観測局
		2304.3	199.3	921.7	48.8	1169.8	VERA 石垣島観測局
38	佐賀	811.1	190.2	324.4	54.6	569.3	野辺山宇宙電波観測所
		1178.0	193.5	471.2	57.4	722.1	VERA 水沢観測局
		1328.7	194.5	531.5	48.8	774.8	VERA 小笠原観測局
		156.0	175.9	62.4	50.3	288.6	VERA 入来観測局
		1137.9	193.2	455.2	56.8	705.1	VERA 石垣島観測局
39	釧路	928.4	191.4	371.4	50.2	613.0	野辺山宇宙電波観測所
		504.3	186.1	201.7	56.9	444.7	VERA 水沢観測局
		1778.5	197.0	711.4	0.0	908.4	VERA 小笠原観測局
		1743.0	196.9	697.2	50.9	945.0	VERA 入来観測局
		2762.4	200.9	1105.0	44.5	1350.4	VERA 石垣島観測局
40	徳島	405.9	184.2	162.4	54.7	401.3	野辺山宇宙電波観測所
		804.9	190.2	322.0	56.6	568.7	VERA 水沢観測局
		1067.8	192.6	427.1	0.0	619.7	VERA 小笠原観測局
		470.9	185.5	188.4	59.3	433.1	VERA 入来観測局
		1477.8	195.4	591.1	54.2	840.7	VERA 石垣島観測局
41	静岡	130.0	174.3	52.0	57.6	283.9	野辺山宇宙電波観測所
		548.0	186.8	219.2	56.4	462.4	VERA 水沢観測局
		936.6	191.5	374.6	0.0	566.1	VERA 小笠原観測局
		796.9	190.1	318.8	56.6	565.5	VERA 入来観測局
		1776.7	197.0	710.7	48.4	956.1	VERA 石垣島観測局
42	女満別	1006.0	192.1	402.4	48.7	643.2	野辺山宇宙電波観測所
		584.7	187.4	233.9	54.7	476.0	VERA 水沢観測局

		1870.9	197.5	748.4	51.1	996.9	VERA 小笠原観測局
		1804.4	197.2	721.8	52.7	971.6	VERA 入来観測局
		2823.9	201.1	1129.5	52.0	1382.6	VERA 石垣島観測局
43	福島	225.6	179.1	90.2	59.6	329.0	野辺山宇宙電波観測所
		220.3	178.9	88.1	49.7	316.7	VERA 水沢観測局
		1136.5	193.2	454.6	52.0	699.7	VERA 小笠原観測局
		1099.5	192.9	439.8	58.6	691.3	VERA 入来観測局
		2100.8	198.5	840.3	53.6	1092.4	VERA 石垣島観測局
44	山形	321.6	182.2	128.6	52.5	363.3	野辺山宇宙電波観測所
		103.9	172.4	41.5	60.7	274.7	VERA 水沢観測局
		1267.2	194.1	506.9	59.8	760.7	VERA 小笠原観測局
		1167.9	193.4	467.2	53.5	714.1	VERA 入来観測局
		2180.2	198.8	872.1	54.8	1125.7	VERA 石垣島観測局
45	山口宇部	693.9	188.9	277.6	57.8	524.2	野辺山宇宙電波観測所
		1053.6	192.5	421.4	57.0	670.9	VERA 水沢観測局
		1293.6	194.3	517.4	49.1	760.9	VERA 小笠原観測局
		254.4	180.2	101.8	49.7	331.6	VERA 入来観測局
		1260.5	194.1	504.2	47.9	746.2	VERA 石垣島観測局
46	岡南	439.4	184.9	175.8	56.7	417.4	野辺山宇宙電波観測所
		815.8	190.3	326.3	52.3	568.9	VERA 水沢観測局
		1147.6	193.2	459.0	38.7	690.9	VERA 小笠原観測局
		453.4	185.2	181.3	52.3	418.8	VERA 入来観測局
		1471.0	195.4	588.4	51.3	835.1	VERA 石垣島観測局
47	富山	139.4	174.9	55.8	63.9	294.6	野辺山宇宙電波観測所
		443.2	185.0	177.3	54.0	416.3	VERA 水沢観測局
		1161.2	193.3	464.5	59.8	717.6	VERA 小笠原観測局
		825.6	190.4	330.2	50.5	571.1	VERA 入来観測局
		1840.3	197.3	736.1	56.0	989.5	VERA 石垣島観測局
48	米子(美保)	476.1	185.6	190.4	61.5	437.5	野辺山宇宙電波観測所
		807.5	190.2	323.0	54.0	567.2	VERA 水沢観測局
		1263.0	194.1	505.2	52.4	751.7	VERA 小笠原観測局
		489.9	185.8	196.0	52.7	434.5	VERA 入来観測局
		1506.7	195.6	602.7	53.1	851.4	VERA 石垣島観測局
49	旭川	922.6	191.3	369.0	48.7	609.0	野辺山宇宙電波観測所
		515.7	186.3	206.3	55.0	447.6	VERA 水沢観測局

		1839.5	197.3	735.8	47.9	981.1	VERA 小笠原観測局
		1691.0	196.6	676.4	52.1	925.1	VERA 入来観測局
		2709.3	200.7	1083.7	42.6	1327.0	VERA 石垣島観測局
50	松本	55.3	166.9	22.1	68.9	258.0	野辺山宇宙電波観測所
		434.3	184.8	173.7	58.3	416.8	VERA 水沢観測局
		1085.2	192.8	434.1	61.2	688.0	VERA 小笠原観測局
		847.3	190.6	338.9	64.9	594.4	VERA 入来観測局
		1853.0	197.4	741.2	60.5	999.1	VERA 石垣島観測局
51	対馬	853.1	190.7	341.2	51.2	583.1	野辺山宇宙電波観測所
		1182.5	193.5	473.0	54.0	720.5	VERA 水沢観測局
		1467.8	195.4	587.1	48.5	831.0	VERA 小笠原観測局
		299.8	181.6	119.9	46.4	347.9	VERA 入来観測局
		1203.0	193.7	481.2	51.1	725.9	VERA 石垣島観測局
52	福井	203.8	178.2	81.5	63.3	323.0	野辺山宇宙電波観測所
		545.6	186.8	218.3	52.6	457.6	VERA 水沢観測局
		1152.8	193.3	461.1	57.4	711.8	VERA 小笠原観測局
		723.3	189.2	289.3	50.8	529.3	VERA 入来観測局
		1739.3	196.9	695.7	47.9	940.4	VERA 石垣島観測局
53	広島 H						
54	茨城（百里）	177.0	177.0	70.8	53.8	301.6	野辺山宇宙電波観測所
		333.7	182.5	133.5	51.4	367.4	VERA 水沢観測局
		1022.2	192.2	408.9	0.0	601.1	VERA 小笠原観測局
		1044.1	192.4	417.7	52.8	662.9	VERA 入来観測局
		2030.4	198.2	812.2	49.0	1059.4	VERA 石垣島観測局
55	久米島	1542.1	195.8	616.8	54.0	866.6	野辺山宇宙電波観測所
		1952.3	197.9	780.9	53.3	1032.1	VERA 水沢観測局
		1543.5	195.8	617.4	48.3	861.5	VERA 小笠原観測局
		698.3	188.9	279.3	47.4	515.6	VERA 入来観測局
		335.0	182.5	134.0	58.8	375.4	VERA 石垣島観測局
56	徳之島	1276.0	194.2	510.4	57.9	762.4	野辺山宇宙電波観測所
		1689.8	196.6	675.9	53.9	926.4	VERA 水沢観測局
		1320.1	194.5	528.0	45.0	767.4	VERA 小笠原観測局
		459.1	185.3	183.6	39.4	408.3	VERA 入来観測局
		604.7	187.7	241.9	59.4	488.9	VERA 石垣島観測局
57	福江	958.3	191.7	383.3	54.8	629.8	野辺山宇宙電波観測所



		1320.1	194.5	528.0	57.0	779.5	VERA 水沢観測局
		1431.4	195.2	572.6	50.2	817.9	VERA 小笠原観測局
		182.6	177.3	73.0	57.7	308.0	VERA 入来観測局
		1022.0	192.2	408.8	55.1	656.2	VERA 石垣島観測局
58	屋久島	954.0	191.6	381.6	52.8	626.0	野辺山宇宙電波観測所
		1362.4	194.7	545.0	54.0	793.7	VERA 水沢観測局
		1185.8	193.5	474.3	0.0	667.8	VERA 小笠原観測局
		152.5	175.7	61.0	46.3	283.0	VERA 入来観測局
		921.5	191.3	368.6	60.5	620.5	VERA 石垣島観測局
59	鳥取	392.3	183.9	156.9	60.7	401.6	野辺山宇宙電波観測所
		735.3	189.4	294.1	57.8	541.2	VERA 水沢観測局
		1208.4	193.7	483.4	49.3	726.3	VERA 小笠原観測局
		543.4	186.7	217.4	50.0	454.1	VERA 入来観測局
		1563.0	195.9	625.2	48.7	869.9	VERA 石垣島観測局
60	南紀白浜	380.7	183.7	152.3	59.3	395.2	野辺山宇宙電波観測所
		797.3	190.1	318.9	53.4	562.4	VERA 水沢観測局
		981.5	191.9	392.6	40.5	625.0	VERA 小笠原観測局
		508.1	186.2	203.3	54.1	443.5	VERA 入来観測局
		1494.7	195.5	597.9	54.7	848.1	VERA 石垣島観測局
61	大島	152.2	175.7	60.9	52.9	289.4	野辺山宇宙電波観測所
		508.1	186.2	203.2	46.5	435.9	VERA 水沢観測局
		895.1	191.1	358.0	57.8	606.9	VERA 小笠原観測局
		896.2	191.1	358.5	52.1	601.7	VERA 入来観測局
		1863.2	197.5	745.3	30.2	972.9	VERA 石垣島観測局
62	岩国	601.8	187.6	240.7	57.3	485.7	野辺山宇宙電波観測所
		967.6	191.8	387.0	59.0	637.7	VERA 水沢観測局
		1233.9	193.9	493.5	50.8	738.2	VERA 小笠原観測局
		315.1	182.0	126.1	54.8	362.9	VERA 入来観測局
		1333.0	194.5	533.2	53.7	781.5	VERA 石垣島観測局
63	庄内	338.9	182.6	135.6	46.9	365.1	野辺山宇宙電波観測所
		121.9	173.8	48.8	57.9	280.4	VERA 水沢観測局
		1319.4	194.5	527.8	55.1	777.3	VERA 小笠原観測局
		1155.2	193.3	462.1	51.8	707.2	VERA 入来観測局
		2171.8	198.8	868.7	43.3	1110.8	VERA 石垣島観測局
64	八丈島	336.2	182.6	134.5	59.6	376.7	野辺山宇宙電波観測所

		678.7	188.7	271.5	49.7	509.8	VERA 水沢観測局
		707.5	189.0	283.0	56.0	528.0	VERA 小笠原観測局
		891.7	191.1	356.7	0.0	547.7	VERA 入来観測局
		1801.1	197.2	720.4	54.0	971.7	VERA 石垣島観測局
65	舞洲 H						
66	沖永良部	1320.9	194.5	528.4	58.9	781.8	野辺山宇宙電波観測所
		1735.7	196.8	694.3	55.3	946.4	VERA 水沢観測局
		1337.8	194.6	535.1	0.0	729.7	VERA 小笠原観測局
		507.2	186.1	202.9	0.0	389.0	VERA 入来観測局
		564.0	187.1	225.6	53.5	466.1	VERA 石垣島観測局
67	種子島	914.0	191.3	365.6	58.0	614.9	野辺山宇宙電波観測所
		1323.0	194.5	529.2	55.5	779.1	VERA 水沢観測局
		1161.9	193.4	464.7	0.0	658.1	VERA 小笠原観測局
		137.1	174.8	54.9	59.6	289.2	VERA 入来観測局
		961.3	191.7	384.5	46.6	622.8	VERA 石垣島観測局
68	但馬	336.8	182.6	134.7	61.2	378.5	野辺山宇宙電波観測所
		690.9	188.8	276.4	57.1	522.3	VERA 水沢観測局
		1170.5	193.4	468.2	51.8	713.4	VERA 小笠原観測局
		580.4	187.3	232.2	56.0	475.4	VERA 入来観測局
		1599.0	196.1	639.6	55.6	891.3	VERA 石垣島観測局
69	喜界	1167.1	193.4	466.8	58.8	719.0	野辺山宇宙電波観測所
		1583.6	196.0	633.5	53.4	882.9	VERA 水沢観測局
		1219.1	193.8	487.6	45.7	727.1	VERA 小笠原観測局
		383.0	183.7	153.2	0.0	336.9	VERA 入来観測局
		719.4	189.2	287.8	55.8	532.8	VERA 石垣島観測局
70	三沢	585.7	187.4	234.3	48.4	470.1	野辺山宇宙電波観測所
		175.5	176.9	70.2	52.5	299.7	VERA 水沢観測局
		1511.8	195.6	604.7	51.9	852.2	VERA 小笠原観測局
		1395.3	194.9	558.1	47.7	800.8	VERA 入来観測局
		2414.1	199.7	965.6	42.7	1208.1	VERA 石垣島観測局
71	静岡 H						
72	天草	856.5	190.7	342.6	56.4	589.7	野辺山宇宙電波観測所
		1234.7	193.9	493.9	55.3	743.0	VERA 水沢観測局
		1308.8	194.4	523.5	48.6	766.5	VERA 小笠原観測局
		85.6	170.7	34.3	51.7	256.6	VERA 入来観測局

		1069.0	192.6	427.6	53.9	674.1	VERA 石垣島観測局
73	中標津	1012.8	192.2	405.1	46.8	644.1	野辺山宇宙電波観測所
		588.2	187.4	235.3	57.6	480.3	VERA 水沢観測局
		1845.7	197.4	738.3	32.7	968.3	VERA 小笠原観測局
		1829.1	197.3	731.6	50.0	978.9	VERA 入来観測局
		2848.5	201.1	1139.4	49.9	1390.5	VERA 石垣島観測局
74	能登	201.6	178.1	80.7	59.5	318.3	野辺山宇宙電波観測所
		418.4	184.5	167.4	56.1	407.9	VERA 水沢観測局
		1234.4	193.9	493.8	54.9	742.6	VERA 小笠原観測局
		858.0	190.7	343.2	52.6	586.5	VERA 入来観測局
		1876.6	197.5	750.6	46.8	995.0	VERA 石垣島観測局
75	与論	1372.9	194.8	549.2	57.0	800.9	野辺山宇宙電波観測所
		1788.0	197.1	715.2	52.7	965.0	VERA 水沢観測局
		1369.7	194.8	547.9	0.0	742.6	VERA 小笠原観測局
		557.6	187.0	223.1	25.9	435.9	VERA 入来観測局
		515.0	186.3	206.0	57.3	449.5	VERA 石垣島観測局
76	与那国	1955.9	197.9	782.4	51.9	1032.2	野辺山宇宙電波観測所
		2357.6	199.5	943.0	48.6	1191.1	VERA 水沢観測局
		1949.3	197.8	779.7	0.0	977.6	VERA 小笠原観測局
		1089.5	192.8	435.8	0.0	628.6	VERA 入来観測局
		121.0	173.7	48.4	41.2	263.3	VERA 石垣島観測局
77	稚内	1087.3	192.8	434.9	49.9	677.6	野辺山宇宙電波観測所
		698.8	188.9	279.5	48.4	516.8	VERA 水沢観測局
		2032.4	198.2	813.0	40.3	1051.5	VERA 小笠原観測局
		1806.6	197.2	722.6	47.8	967.6	VERA 入来観測局
		2818.1	201.0	1127.2	42.5	1370.7	VERA 石垣島観測局
78	三宅島	230.2	179.3	92.1	55.1	326.4	野辺山宇宙電波観測所
		579.0	187.3	231.6	47.5	466.4	VERA 水沢観測局
		814.6	190.3	325.8	0.0	516.1	VERA 小笠原観測局
		890.8	191.0	356.3	52.9	600.3	VERA 入来観測局
		1836.0	197.3	734.4	32.3	964.0	VERA 石垣島観測局
79	新島	189.2	177.6	75.7	57.7	310.9	野辺山宇宙電波観測所
		554.2	186.9	221.7	46.2	454.8	VERA 水沢観測局
		854.7	190.7	341.9	41.0	573.6	VERA 小笠原観測局
		873.9	190.9	349.6	50.7	591.1	VERA 入来観測局

		1831.0	197.3	732.4	33.7	963.4	VERA 石垣島観測局
80	栃木 H						
81	津市伊勢湾 H						
82	つくば H						
83	群馬 H						
84	奈良県 H						
85	神津島	203.8	178.2	81.5	56.4	316.1	野辺山宇宙電波観測所
		577.0	187.3	230.8	46.1	464.2	VERA 水沢観測局
		840.4	190.5	336.2	0.0	526.7	VERA 小笠原観測局
		856.3	190.7	342.5	52.2	585.4	VERA 入来観測局
		1809.6	197.2	723.9	38.2	959.3	VERA 石垣島観測局
86	石見	623.6	187.9	249.5	56.6	494.0	野辺山宇宙電波観測所
		967.7	191.8	387.1	54.3	633.1	VERA 水沢観測局
		1302.8	194.3	521.1	51.8	767.2	VERA 小笠原観測局
		348.3	182.9	139.3	49.9	372.2	VERA 入来観測局
		1355.3	194.7	542.1	45.6	782.4	VERA 石垣島観測局
87	隠岐	464.5	185.4	185.8	62.3	433.5	野辺山宇宙電波観測所
		762.8	189.7	305.1	55.9	550.7	VERA 水沢観測局
		1312.7	194.4	525.1	48.3	767.8	VERA 小笠原観測局
		559.0	187.0	223.6	51.8	462.4	VERA 入来観測局
		1571.9	196.0	628.7	45.9	870.6	VERA 石垣島観測局
88	香岐	830.6	190.4	332.3	56.1	578.8	野辺山宇宙電波観測所
		1178.5	193.5	471.4	54.4	719.3	VERA 水沢観測局
		1402.3	195.0	560.9	52.8	808.7	VERA 小笠原観測局
		230.2	179.3	92.1	51.7	323.0	VERA 入来観測局
		1169.8	193.4	467.9	55.4	716.7	VERA 石垣島観測局
89	大館能代	500.0	186.0	200.0	49.6	435.6	野辺山宇宙電波観測所
		134.4	174.6	53.8	59.3	287.7	VERA 水沢観測局
		1463.0	195.4	585.2	49.2	829.7	VERA 小笠原観測局
		1294.5	194.3	517.8	51.6	763.8	VERA 入来観測局
		2313.7	199.3	925.5	45.4	1170.2	VERA 石垣島観測局
90	南大東	1313.6	194.4	525.5	60.0	779.9	野辺山宇宙電波観測所
		1738.5	196.8	695.4	51.9	944.2	VERA 水沢観測局
		1100.5	192.9	440.2	0.0	633.1	VERA 小笠原観測局

		659.0	188.4	263.6	34.4	486.4	VERA 入来観測局
		732.6	189.3	293.0	50.2	532.6	VERA 石垣島観測局
91	多良間	1820.6	197.2	728.2	57.1	982.6	野辺山宇宙電波観測所
		2229.2	199.0	891.7	53.8	1144.5	VERA 水沢観測局
		1777.2	197.0	710.9	26.3	934.3	VERA 小笠原観測局
		968.3	191.8	387.3	0.0	579.1	VERA 入来観測局
		57.7	167.3	23.1	58.6	248.9	VERA 石垣島観測局
92	大分県央	716.9	189.2	286.8	55.1	531.0	野辺山宇宙電波観測所
		1099.4	192.9	439.8	53.7	686.4	VERA 水沢観測局
		1223.5	193.8	489.4	52.5	735.7	VERA 小笠原観測局
		173.6	176.8	69.5	58.2	304.5	VERA 入来観測局
		1192.9	193.6	477.2	57.1	727.8	VERA 石垣島観測局
93	利尻	1057.5	192.5	423.0	47.9	663.4	野辺山宇宙電波観測所
		678.5	188.7	271.4	48.1	508.1	VERA 水沢観測局
		2016.1	198.1	806.4	45.6	1050.2	VERA 小笠原観測局
		1763.5	197.0	705.4	49.2	951.5	VERA 入来観測局
		2773.4	200.9	1109.3	37.5	1347.7	VERA 石垣島観測局
94	紋別	1018.5	192.2	407.4	55.7	655.3	野辺山宇宙電波観測所
		604.5	187.7	241.8	54.8	484.3	VERA 水沢観測局
		1912.7	197.7	765.1	54.2	1017.0	VERA 小笠原観測局
		1794.8	197.1	717.9	48.8	963.9	VERA 入来観測局
		2813.2	201.0	1125.3	47.1	1373.4	VERA 石垣島観測局
95	北大東	1301.1	194.3	520.4	59.2	774.0	野辺山宇宙電波観測所
		1725.9	196.8	690.4	54.0	941.1	VERA 水沢観測局
		1092.5	192.8	437.0	0.0	629.8	VERA 小笠原観測局
		649.0	188.3	259.6	32.7	480.6	VERA 入来観測局
		740.9	189.4	296.4	47.4	533.2	VERA 石垣島観測局
96	奥尻	685.3	188.8	274.1	52.1	515.0	野辺山宇宙電波観測所
		356.6	183.1	142.6	55.5	381.2	VERA 水沢観測局
		1681.0	196.6	672.4	48.4	917.3	VERA 小笠原観測局
		1396.3	194.9	558.5	52.3	805.8	VERA 入来観測局
		2412.2	199.7	964.9	40.1	1204.7	VERA 石垣島観測局
97	枕崎 H						
98	下地島	1774.2	197.0	709.7	58.1	964.8	野辺山宇宙電波観測所
		2184.1	198.8	873.7	53.7	1126.2	VERA 水沢観測局

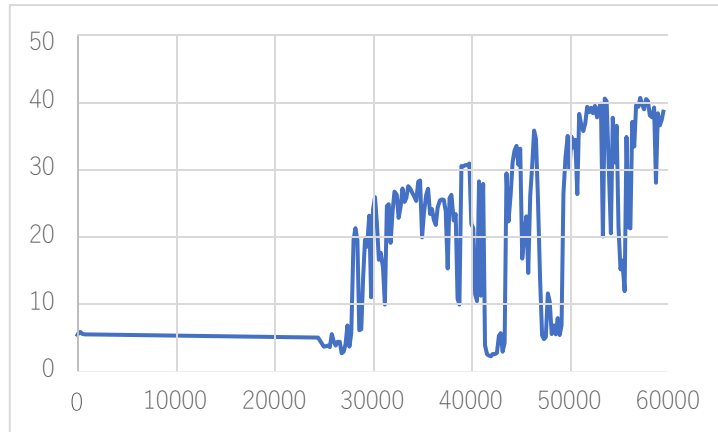
		1726.7	196.8	690.7	0.0	887.5	VERA 小笠原観測局
		926.1	191.4	370.4	23.3	585.1	VERA 入来観測局
		108.8	172.8	43.5	57.4	273.7	VERA 石垣島観測局
99	若狭 H						
100	粟国	1487.6	195.5	595.0	57.9	848.4	野辺山宇宙電波観測所
		1899.3	197.6	759.7	54.3	1011.7	VERA 水沢観測局
		1488.7	195.5	595.5	42.0	833.0	VERA 小笠原観測局
		650.6	188.3	260.2	0.0	448.5	VERA 入来観測局
		391.9	183.9	156.7	58.0	398.6	VERA 石垣島観測局
101	小値賀	913.1	191.3	365.2	56.1	612.5	野辺山宇宙電波観測所
		1266.8	194.1	506.7	57.0	757.8	VERA 水沢観測局
		1432.4	195.2	573.0	51.2	819.3	VERA 小笠原観測局
		204.2	178.2	81.7	0.0	259.9	VERA 入来観測局
		1084.6	192.8	433.8	53.6	680.2	VERA 石垣島観測局
102	高崎 H						
103	佐渡	234.9	179.5	94.0	55.3	328.7	野辺山宇宙電波観測所
		265.1	180.5	106.0	55.1	341.6	VERA 水沢観測局
		1267.4	194.1	507.0	53.6	754.6	VERA 小笠原観測局
		1009.9	192.1	404.0	50.0	646.1	VERA 入来観測局
		2027.4	198.2	811.0	48.5	1057.7	VERA 石垣島観測局
104	上五島	911.9	191.2	364.8	55.0	611.0	野辺山宇宙電波観測所
		1270.3	194.1	508.1	57.9	760.1	VERA 水沢観測局
		1415.6	195.1	566.2	49.4	810.7	VERA 小笠原観測局
		183.0	177.3	73.2	0.0	250.5	VERA 入来観測局
		1071.7	192.6	428.7	55.9	677.3	VERA 石垣島観測局
105	豊富 H						
106	米沢 H						
107	慶良間	1518.8	195.7	607.5	58.0	861.2	野辺山宇宙電波観測所
		1932.6	197.8	773.0	53.6	1024.4	VERA 水沢観測局
		1488.7	195.5	595.5	33.4	824.4	VERA 小笠原観測局
		690.3	188.8	276.1	0.0	464.9	VERA 入来観測局
		369.7	183.4	147.9	59.3	390.5	VERA 石垣島観測局
108	波照間	1929.0	197.8	771.6	51.7	1021.1	野辺山宇宙電波観測所
		2336.3	199.4	934.5	53.5	1187.4	VERA 水沢観測局
		1878.2	197.5	751.3	0.0	948.8	VERA 小笠原観測局

		1072.9	192.7	429.2	0.0	621.8	VERA 入来観測局
		53.9	166.7	21.5	36.2	224.4	VERA 石垣島観測局
109	伊江島	1440.2	195.2	576.1	58.3	829.6	野辺山宇宙電波観測所
		1853.8	197.4	741.5	52.7	991.6	VERA 水沢観測局
		1433.2	195.2	573.3	41.5	809.9	VERA 小笠原観測局
		613.7	187.8	245.5	31.8	465.1	VERA 入来観測局
		444.4	185.0	177.8	60.4	423.2	VERA 石垣島観測局
110	ニセコ H						

(※)グレーアウトしている箇所は、ヘリポートのため除外。

## 24.1 東京国際空港と成田国際空港間の断面情報

表は、東京国際空港から成田国際空港への距離に対する高さ方向の情報を示す。  
この情報に従って、ナイフエッジによる回折損失を算出した結果、26.16dB を得た。



### (1) 空港FODレーダーの中心周波数

freq (GHz)	96.00
$\lambda$ (m)	0.00

### (2) スタート及びストップ地点、回折地点

	距離	高さ	
start(m)	0.00	5.08	
obs(m)	57910.00	40.38	水平方向での回折地点座標
stop(m)	59707.00	38.82	

### (3) 自由空間損失

損失 (dB)	167.57
---------	--------

### (4) ナイフエッジによる回折損失

slope_a	0.000565		
slope_b	-1769.62		
intecept y(m)	102478770.97		
diffraction base point(m)	57910.00	32.72453	x, y座標
D1 (m)	57910.01		
D2 (m)	1797.01		
H (m)	7.66		
factor v	4.64		
Gdiff (dB)	26.16		



## 参考文献

- [1] みずほ情報総研, “リニアセル技術を活用した異物検知システムの空港への導入に際しての技術課題に関する調査,” [オンライン]. Available: <https://www.mizuho-ir.co.jp/case/research/fod2017.html>.
- [2] 国土交通省, “空港管理状況,” 平成 30 年. [オンライン]. Available: [http://www.mlit.go.jp/koku/15\\_bf\\_000185.html](http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000185.html).
- [3] “Moog Aircraft Group,” [オンライン]. Available: <https://www.tarsierfod.com/>.
- [4] “QinetiQ,” [オンライン]. Available: <https://www.qinetiq.com/sectors/aviation-and-aerospace/automatic-foreign-object-debris-detection>.
- [5] “X-sight,” [オンライン]. Available: <https://www.xsightsys.com/>.
- [6] “Thales,” [オンライン]. Available: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/fodetectr-automated-foreign-object-debris-detection-system>.
- [7] “Stratech,” [オンライン]. Available: <http://fod-detection.com/wp-content/uploads/2011/05/Stratech-iFerret-Patent-Announcement-May19.pdf>.
- [8] “Trex Aviation Systems,” [オンライン]. Available: [http://www.infologic.sg/Aviation-Solution/Foreign-Object-&-Debris-Detection-System-\(FOD\)--radar-based-solution-for-runway-monitoring](http://www.infologic.sg/Aviation-Solution/Foreign-Object-&-Debris-Detection-System-(FOD)--radar-based-solution-for-runway-monitoring).
- [9] “Varec,” [オンライン]. Available: <https://www.varec.com/resources/mobile-fod-solutions/>.
- [10] “Rheinmetall,” [オンライン]. Available: [https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall\\_defence/systems\\_and\\_products/aviation\\_systems/deb\\_r a/index.php](https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/aviation_systems/deb_r a/index.php).
- [11] “ELVA-1,” [オンライン]. Available: <http://elva-1.com/products/a40155>.
- [12] “Plextek,” [オンライン]. Available: <https://www.plextek.com/wp-content/uploads/Millimetre-Wave-Radar-for-Runway-FOD.pdf>.
- [13] “Pavemetrics,” [オンライン]. Available: <http://www.pavemetrics.com/applications/airfield-inspection/laser-fod-detection-system/>.
- [14] “ArgosAI,” [オンライン]. Available: <https://www.argosai.com/>.
- [15] 代表 柴垣信彦(日立国際電気), “電波資源拡大のための研究開発 第 9 回成果発表会

(平成 28 年),” 平成 28 年.

- [16] 総務省, “第 4 章 周波数区分ごとの評価結果,” 2018. [オンライン]. Available: [https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/research/result/h30/H30\\_H\\_Chapter\\_4.pdf](https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/research/result/h30/H30_H_Chapter_4.pdf).
- [17] ITU 2016, “Radio Regulations (Articles),” 2016. [オンライン].
- [18] “電波天文業務の用に供する受信設備,” 電波関係告示集.
- [19] 総務省, “参考 2 各システムの概要,” 2018. [オンライン]. Available: [https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/research/result/h30/H30\\_H\\_sankou\\_2.pdf](https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/research/result/h30/H30_H_sankou_2.pdf).
- [20] ITU-R, “Protection criteria used for radio astronomical measurements,” Rec. ITU-R RA.769-2, 2003.
- [21] ITU-R, “Levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis,” Rec. ITU-R RA.1513-2, 2015.
- [22] ITU-R, “Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (active) systems using allocations between 432 MHz and 238 GHz,” Rec. ITU-R RS.2105-0, 2017.
- [23] ITU-R, “Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (passive) systems using allocations between 1.4 and 275 GHz,” Rec. ITU-R RS.1861, 2010.
- [24] ITU-R, “Performance and interference criteria\* for active spaceborne sensors,” Rec. ITU-R RS.1166-4, 2009.
- [25] ITU-R, “Performance and interference criteria for satellite passive remote sensing,” Rec. ITU-R RS.2017-0, 2012.
- [26] 宇宙航空研究開発機構, “EarthCARE、雲プロファイリングレーダー(CPR),” [オンライン]. Available: [https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/about/inst\\_cpr\\_j.html](https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/about/inst_cpr_j.html).
- [27] 宇宙航空研究開発機構, “GCOM-W1 (水循環変動観測衛星),” [オンライン]. Available: [https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_W/w\\_amsr2/amsr2\\_body\\_main\\_j.html](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/w_amsr2/amsr2_body_main_j.html).

参考資料 2 : ITU-R, “Protection criteria used for radio astronomical measurements,” Rec. ITU-R RA.769-2, 2003.

## RECOMMENDATION ITU-R RA.769-2

### **Protection criteria used for radio astronomical measurements**

(Question ITU-R 145/7)

(1992-1995-2003)

The ITU Radiocommunication Assembly,

*considering*

- a) that many of the most fundamental astronomical advances made in the past five decades, (e.g. the discovery of radio galaxies, quasars, and pulsars, the direct measurement of neutral hydrogen, the direct measurement of distances of certain external galaxies, and establishment of a positional reference frame accurate to ~20 arc  $\mu$ s) have been made through radio astronomy, and that radio astronomical observations are expected to continue making fundamental contributions to our understanding of the Universe, and that they provide the only way to investigate some cosmic phenomena;
- b) that the development of radio astronomy has also led to major technological advances, particularly in receiving and imaging techniques, and to improved knowledge of fundamental radio-noise limitations of great importance to radiocommunication, and promises further important results;
- c) that radio astronomers have made useful astronomical observations from the Earth’s surface in all available atmospheric windows ranging from 2 MHz to 1 000 GHz and above;
- d) that the technique of space radio astronomy, which involves the use of radio telescopes on space platforms, provides access to the entire radio spectrum above about 10 kHz, including parts of the spectrum not accessible from the Earth due to absorption in atmosphere;
- e) that protection from interference is essential to the advancement of radio astronomy and associated measurements;
- f) that radio astronomical observations are mostly performed with high-gain antennas or arrays, to provide the highest possible angular resolution, and consequently main beam interference does not need to be considered in most situations, except when there is the possibility of receiver damage;
- g) that most interference that leads to the degradation of astronomical data is received through the far side lobes of the telescope;
- h) that the sensitivity of radio astronomical receiving equipment, which is still steadily improving, particularly at millimetre wavelengths, and that it greatly exceeds the sensitivity of communications and radar equipment;
- j) that typical radio astronomical observations require integration times of the order of a few minutes to hours, but that sensitive observations, particularly of spectral lines, may require longer periods of recording, sometimes up to several days;

- k) that some transmissions from spacecraft can introduce problems of interference to radio astronomy and that these cannot be avoided by choice of site for an observatory or by local protection;
- l) that interference to radio astronomy can be caused by terrestrial transmissions reflected by the Moon, by aircraft, and possibly by artificial satellites;
- m) that some types of high spatial-resolution interferometric observations require simultaneous reception, at the same radio frequency, by widely separated receiving systems that may be located in different countries, on different continents, or on space platforms;
- n) that propagation conditions at frequencies below about 40 MHz are such that a transmitter operating anywhere on the Earth might cause interference detrimental to radio astronomy;
- o) that some degree of protection can be achieved by appropriate frequency assignments on a national rather than an international basis;
- p) that WRCs have made improved allocations for radio astronomy, particularly above 71 GHz, but that protection in many bands, particularly those shared with other radio services, may still need careful planning;
- q) that technical criteria concerning interference detrimental to the radio astronomy service (RAS) have been developed, which are set out in Tables 1, 2, and 3,

*recommends*

- 1 that radio astronomers should be encouraged to choose sites as free as possible from interference;
- 2 that administrations should afford all practicable protection to the frequencies and sites used by radio astronomers in their own and neighbouring countries and when planning global systems, taking due account of the levels of interference given in Annex 1;
- 3 that administrations, in seeking to afford protection to particular radio astronomical observations, should take all practical steps to reduce all unwanted emissions falling within the band of the frequencies to be protected for radio astronomy to the absolute minimum. Particularly those emissions from aircraft, high altitude platform stations, spacecraft and balloons;
- 4 that when proposing frequency allocations, administrations take into account that it is very difficult for the RAS to share frequencies with any other service in which direct line-of-sight paths from the transmitters to the observatories are involved. Above about 40 MHz sharing may be practicable with services in which the transmitters are not in direct line-of-sight of the observatories, but coordination may be necessary, particularly if the transmitters are of high power.

## Annex 1

### Sensitivity of radio astronomy systems

1 General considerations and assumptions used in the calculation of interference levels

1.1 Detrimental-level interference criterion

The sensitivity of an observation in radio astronomy can be defined in terms of the smallest power level change  $\Delta P$  in the power level  $P$  at the radiometer input that can be detected and measured. The sensitivity equation is:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (1)$$

where:

$P$  and  $\Delta P$ : power spectral density of the noise

$\Delta f_0$ : bandwidth

$t$ : integration time.  $P$  and  $\Delta P$  in equation (1) can be expressed in temperature units through the Boltzmann's constant,  $k$ :

$$\Delta P = k \Delta T; \quad \text{also} \quad P = k T \quad (2)$$

Thus we may express the sensitivity equation as:

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f_0 t}} \quad (3)$$

where:

$$T = T_A + T_R$$

This result applies for one polarization of the radio telescope.  $T$  is the sum of  $T_A$  (the antenna noise temperature contribution from the cosmic background, the Earth's atmosphere and radiation from the Earth) and  $T_R$ , the receiver noise temperature. Equations (1) or (3) can be used to estimate the sensitivities and interference levels for radio astronomical observations. The results are listed in Tables 1 and 2. An observing (or integration) time,  $t$ , of 2000 s is assumed, and interference threshold levels,  $\Delta P_H$ , given in Tables 1 and 2 are expressed as the interference power within the bandwidth  $\Delta f$  that introduces an error of 10% in the measurement of  $\Delta P$  (or  $\Delta T$ ), i.e.:

$$\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f \quad (4)$$

In summary, the appropriate columns in Tables 1 and 2 may be calculated using the following methods:

- $\Delta T$ , using equation (3),
- $\Delta P$ , using equation (2),
- $\Delta P_H$ , using equation (4).

The interference can also be expressed in terms of the pfd incident at the antenna, either in the total bandwidth or as a spectral pfd,  $S_H$ , per 1 Hz of bandwidth. The values given are for an antenna having a gain, in the direction of arrival of the interference, equal to that of an isotropic antenna (which has an effective area of  $c^2/4\pi f^2$ , where  $c$  is the speed of the light and  $f$  the frequency). The gain of an isotropic radiator, 0 dBi, is used as a general representative value for the side-lobe level, as discussed under § 1.3.

Values of  $S_H \Delta f$  (dB(W/m<sup>2</sup>)), are derived from  $\Delta P_H$  by adding:

$$20 \log f - 158.5 \quad \text{dB} \quad (5)$$

where  $f$ (Hz).  $S_H$  is then derived by subtracting  $10 \log \Delta f$ (Hz) to allow for the bandwidth.

### 1.2 Integration time

The calculated sensitivities and interference levels presented in Tables 1 and 2 are based on assumed integration times of 2000 s. Integration times actually used in astronomical observations cover a wide range of values. Continuum observations made with single-antenna telescopes (as distinct from interferometric arrays) are well represented by the integration time of 2000 s, typical of good quality observations. On the other hand 2000 s is less representative of spectral line observations. Improvements in receiver stability and the increased use of correlation spectrometers have allowed more frequent use of longer integration times required to observe weak spectral lines, and spectral line observations lasting several hours are quite common. A more representative integration time for these observations would be 10 h. For a 10 h integration, the threshold interference level is 6 dB more stringent than the values given in Table 2. There are also certain observations of time varying phenomena, e.g. observations of pulsars, stellar or solar bursts, and interplanetary scintillations for which much shorter time periods may be adequate.

### 1.3 Antenna response pattern

Interference to radio astronomy is almost always received through the antenna side lobes, so the main beam response to interference need not be considered.

The side-lobe model for large paraboloid antennas in the frequency range 2 to 30 GHz, given in Recommendation ITU-R SA.509 is a good approximation of the response of many radio astronomy antennas and is adopted throughout this Recommendation as the radio astronomy reference antenna. In this model, the side-lobe level decreases with angular distance (degrees) from the main beam axis and is equal to  $32 - 25 \log \varphi$  (dBi) for  $1^\circ < \varphi < 48^\circ$ . The effect of an interfering signal clearly depends upon the angle of incidence relative to the main beam axis of the antenna, since the side-lobe gain, as represented by the model, varies from 32 to -10 dBi as a function of this angle. However, it is useful to calculate the threshold levels of interference strength for a particular value of side-lobe gain, that we choose as 0 dBi, and use in Tables 1 to 3. From the model, this side-lobe level occurs at an angle of 19.05° from the main beam axis. Then a signal at the detrimental threshold level defined for 0 dBi side-lobe gain will exceed the criterion for the detrimental level at the receiver input if it is incident at the antenna at an angle of less than 19.05°. The solid angle

within a cone of angular radius  $19.05^\circ$  is 0.344 sr, which is equal to 5.5% of the  $2\pi$  sr of the sky above the horizon that a radio telescope is able to observe at any given time. Thus if the probability of the angle of incidence of interference is uniformly distributed over the sky, about 5.5% of interfering signals would be incident within  $19.05^\circ$  of the main beam axis of an antenna pointed towards the sky. Note also that the 5.5% figure is in line with the recommended levels of data loss to radio astronomy observations in percentage of time, specified in Recommendation ITU-R RA.1513.

The particular case of non-GSO satellites presents a dynamic situation, that is, the positions of the satellites relative to the beam of the radio astronomy antenna show large changes within the time scale of the 2000 s integration time. Analysis of interference in this case requires integrating the response over the varying side-lobe levels, for example, using the concept of epfd defined in No. 22.5C of the Radio Regulations (RR). In addition it is usually necessary to combine the responses to a number of satellites within a particular system. In such calculations it is suggested that the antenna response pattern for antennas of diameter greater than  $100\lambda$  in Recommendation ITU-R S.1428 be used to represent the radio astronomy antenna, until a model based specifically on radio astronomy antennas is available; see § 2.2 for further discussion.

#### 1.4 Bandwidth

Equation (1) shows that observations of the highest sensitivity are obtained when radio astronomers make use of the widest possible bandwidth. Consequently, in Table 1 (continuum observations),  $\Delta f$  is assumed to be the width of the allocated radio astronomy bands for frequencies up to 71 GHz. Above 71 GHz a value of 8 GHz is used, which is a representative bandwidth generally used on radio astronomy receivers in this range. In Table 2 (spectral line observations) a channel bandwidth  $\Delta f$  equal to the Doppler shift corresponding to 3 km/s in velocity is used for entries below 71 GHz. This value represents a compromise between the desired high spectral resolution and the sensitivity. There are a very large number of astrophysically important lines above 71 GHz, as shown in Recommendation ITU-R RA.314 and only a few representative values for the detrimental levels are given in Table 2 for the range 71-275 GHz. The channel bandwidth used to compute the detrimental levels above 71 GHz is 1 000 kHz (1 MHz) in all cases. This value was chosen for practical reasons. While it is slightly wider than the spectral channel width customary in radio astronomy receivers at these frequencies, it is used as the standard reference bandwidth for space services above 15 GHz.

#### 1.5 Receiver noise temperature and antenna temperature

The receiver noise temperatures in Tables 1 and 2 are representative of the systems in use in radio astronomy. For frequencies above 1 GHz these are cryogenically cooled amplifiers or mixers. The quantum effect places a theoretical lower limit of  $hf/k$  on the noise temperature of such devices, where  $h$  and  $k$  are Planck's and Boltzmann's constants, respectively. This limit becomes important at frequencies above 100 GHz, where it equals 4.8 K. Practical mixers and amplifiers for bands at 100 GHz and higher provide noise temperatures greater than  $hf/k$  by a factor of about four. Thus, for frequencies above 100 GHz, noise temperatures equal to  $4hf/k$  are used in Tables 1 and 2.

The antenna temperatures in the Tables are also representative of practical systems in use in radio astronomy. They include the effects of the ionosphere or the neutral atmosphere, ground pickup in side lobes resulting from spillover or scattering, ohmic losses, and the cosmic microwave background. At frequencies above 100 GHz the atmospheric losses due to water vapour in the neutral atmosphere become very important. For these frequencies the values given are typical of the terrestrial sites used for major millimetric-wave radio astronomy facilities, such as Mauna Kea, Hawaii, or the Llano de Chajnantor at an elevation of 5 000 m in Chile, which is the site chosen for a major international radio astronomy array for frequencies in the range 30 GHz to 1 THz.

## 2 Special cases

The levels given in Tables 1 and 2 are applicable to terrestrial sources of interfering signals. The detrimental pfd and spectral pfd shown in Tables 1 and 2 assume that interference is received through a 0 dBi side lobe, and should be regarded as the general interference criteria for high sensitivity radio astronomy observations, when the interference does not enter the near side lobes.

### 2.1 Interference from GSO satellites

Interference from GSO satellites is a case of particular importance. Because the power levels in Tables 1 and 2 were calculated based on a 0 dBi antenna gain, interference detrimental to radio astronomy will be encountered when a reference antenna, such as described in Recommendation ITU-R SA.509, is pointed within  $19.05^\circ$  of a satellite radiating at levels in accordance with those listed in the Tables. A series of such transmitters located around the GSO would preclude radio astronomy observations with high sensitivity from a band of sky  $38.1^\circ$  wide and centred on the orbit. The loss of such a large area of sky would impose severe restrictions on radio astronomy observations.

In general, it would not be practical to suppress the unwanted emissions from satellites to below the detrimental level when the main beam of a radio telescope is pointed directly towards the satellite. A workable solution is suggested by observing the projection of the GSO in celestial coordinates as viewed from the latitudes of a number of major radio astronomy observations (see Recommendation ITU-R RA.517). If it were possible to point a radio telescope to within  $5^\circ$  of the GSO without encountering detrimental interference, then for that telescope a band of sky  $10^\circ$  wide would be unavailable for high-sensitivity observations. For a given observatory this would be a serious loss. However, for a combination of radio telescopes located at northern and southern latitudes, operating at the same frequencies, the entire sky would be accessible. A value of  $5^\circ$  should therefore be regarded as the requirement for minimum angular spacing between the main beam of a radio astronomy antenna and the GSO.

In the model antenna response of Recommendation ITU-R SA.509, the side-lobe level at an angle of  $5^\circ$  from the main beam is 15 dBi. Thus, to avoid interference detrimental to a radio telescope meeting the antenna side-lobe performance of Recommendation ITU-R SA.509, pointed to within  $5^\circ$  of the transmitter, it is desirable that the satellite emissions be reduced 15 dB below the pfd given in Tables 1 and 2. When satellites are spaced at intervals of only a few degrees along the GSO, the emission levels associated with the individual transmitters must be even lower to meet the requirement that the sum of the powers of all the interfering signals received should be 15 dB below  $\Delta P_H$  in Tables 1 and 2.



It is recognized that the emission limitations discussed above cannot, in practice, be achieved so as to enable sharing of the same frequency band between radio astronomy and down-link transmissions from satellites to take place. The limitations are, however, applicable to unwanted emission from the satellite transmitters, which fall within the radio astronomy bands listed in Tables 1 and 2. These emission limitations have implications for the space services responsible for the interference, which require careful evaluation. Furthermore, the design of new radio astronomy antennas should strive to minimize the level of side-lobe gain near the main beam as an important means of reducing interference from transmitters in the GSO.

## 2.2 Interference from non-GSO satellites

In the case of non-GSO satellites, and in particular for low-Earth orbit satellites, the systems usually involve constellations of many individual satellites. Thus determination of interference levels requires analysis of the combined effect of many signals, most of which are received through far side lobes of the radio astronomy antenna. A more detailed side-lobe model than that of Recommendation ITU-R SA.509 is therefore desirable, and it is proposed that the model in Recommendation ITU-R S.1428 be used until such time as a more representative model for radio astronomy antennas is obtained. In using this proposed model the case for antennas with diameter greater than  $100 \lambda$  is generally appropriate for radio astronomy applications. It should be noted that Note 1 of Recommendation ITU-R S.1428, which allows cross-polarized components to be ignored, cannot be applied since radio astronomy antennas generally receive signals in two orthogonal polarizations simultaneously. The motion of non-GSO satellites across the sky during a 2000 s integration period requires that the interference level be averaged over this period, that is, the response to each satellite must be integrated as the satellite moves through the side-lobe pattern. One system of analysis that includes these requirements is the *epfd* method described in RR No. 22.5C. Values of *epfd* represent the *pdf* of a signal entering the antenna through the centre of the main beam that would produce an equivalent level of interference power. Since the threshold levels of detrimental interference in Tables 1 and 2 correspond to *pdf* received with an antenna gain of 0 dBi, it is necessary to compare them with values of  $(epfd + G_{mb})$ , where  $G_{mb}$  is the main beam gain, to determine whether the interference exceeds the detrimental level. Making use of the *epfd* method, Recommendation ITU-R S.1586 has recently been developed for interference calculations between radio astronomy telescopes and FSS non-GSO satellite systems. A similar Recommendation, Recommendation ITU-R M.1583 was developed for interference calculations between radio astronomy telescopes and MSS and radionavigation-satellite service non-GSO satellite systems. The applicability of the protection criteria given in Tables 1 and 2 is described in Recommendation ITU-R RA.1513.

## 2.3 The response of interferometers and arrays to radio interference

Two effects reduce the response to interference. These are related to the frequency of the fringe oscillations that are observed when the outputs of two antennas are combined, and to the fact that the components of the interfering signal received by different and widely-spaced antennas will suffer different relative time delays before they are recombined. The treatment of these effects is more complicated than that for single antennas in § 1. Broadly speaking, if the strength of the received interfering signal remains constant, the effect is reduced by a factor roughly equal to the

mean time of one natural fringe oscillation divided by the data averaging time. This typically ranges from some seconds for a compact array with the longest projected spacing  $L' \sim 10^3 \lambda$ , where  $\lambda$  is the wavelength, to less than 1 ms for intercontinental arrays with  $L' \sim 10^7 \lambda$ . Thus, compared to a single radio telescope, the interferometer has a degree of immunity to interference which, under reasonable assumptions increases with the array size expressed in wavelengths.

The greatest immunity from interference occurs for interferometers and arrays in which the separation of the antennas is sufficiently great that the chance of occurrence of correlated interference is very small (e.g. for very long baseline interferometry (VLBI)). In this case, the above considerations do not apply. The tolerable interference level is determined by the requirement that the power level of the interfering signal should be no more than 1% of the receiver noise power to prevent serious errors in the measurement of the amplitude of the cosmic signals. The interference levels for typical VLBI observations are given in Table 3, based on the values of  $T_A$  and  $T_R$  given in Table 1.

It must be emphasized that the use of large interferometers and arrays is generally confined to studies of discrete, high-brightness sources, with angular dimensions no more than a few tenths of a second of arc for VLBI. For more general studies of radio sources, the results in Tables 1 and 2 apply and are thus appropriate for the general protection of radio astronomy.

TABLE 1

## Threshold levels of interference detrimental to radio astronomy continuum observations

Centre frequency <sup>(1)</sup> $f_c$ (MHz)	Assumed bandwidth $\Delta f$ (MHz)	Minimum antenna noise temperature $T_A$ (K)	Receiver noise temperature $T_R$ (K)	System sensitivity <sup>(2)</sup> (noise fluctuations)		Threshold interference levels <sup>(2)(3)</sup>		
				Temperature $\Delta T$ (mK)	Power spectral density $\Delta P$ (dB(W/Hz))	Input power $\Delta P_H$ (dBW)	pdf $S_H \Delta f$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))	Spectral pdf $S_H$ (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13.385	0.05	50 000	60	5 000	-222	-185	-201	-248
25.610	0.12	15 000	60	972	-229	-188	-199	-249
73.8	1.6	750	60	14.3	-247	-195	-196	-258
151.525	2.95	150	60	2.73	-254	-199	-194	-259
325.3	6.6	40	60	0.87	-259	-201	-189	-258
408.05	3.9	25	60	0.96	-259	-203	-189	-255
611	6.0	20	60	0.73	-260	-202	-185	-253
1 413.5	27	12	10	0.095	-269	-205	-180	-255
1 665	10	12	10	0.16	-267	-207	-181	-251
2 695	10	12	10	0.16	-267	-207	-177	-247
4 995	10	12	10	0.16	-267	-207	-171	-241
10 650	100	12	10	0.049	-272	-202	-160	-240
15 375	50	15	15	0.095	-269	-202	-156	-233
22 355	290	35	30	0.085	-269	-195	-146	-231
23 800	400	15	30	0.050	-271	-195	-147	-233
31 550	500	18	65	0.083	-269	-192	-141	-228
43 000	1 000	25	65	0.064	-271	-191	-137	-227
89 000	8 000	12	30	0.011	-278	-189	-129	-228
150 000	8 000	14	30	0.011	-278	-189	-124	-223
224 000	8 000	20	43	0.016	-277	-188	-119	-218
270 000	8 000	25	50	0.019	-276	-187	-117	-216

<sup>(1)</sup> Calculation of interference levels is based on the centre frequency shown in this column although not all regions have the same allocations.

<sup>(2)</sup> An integration time of 2 000 s has been assumed; if integration times of 15 min, 1 h, 2 h, 5 h or 10 h are used, the relevant values in the Table should be adjusted by +1.7, -1.3, -2.8, -4.8 or -6.3 dB respectively.

<sup>(3)</sup> The interference levels given are those which apply for measurements of the total power received by a single antenna. Less stringent levels may be appropriate for other types of measurements, as discussed in § 2.2. For transmitters in the GSO, it is desirable that the levels be adjusted by -15 dB, as explained in § 2.1.

TABLE 2\*

## Threshold levels of interference detrimental to radio astronomy spectral-line observations

Frequency $f$ (MHz)	Assumed spectral line channel bandwidth $\Delta f$ (kHz)	Minimum antenna noise temperature $T_A$ (K)	Receiver noise temperature $T_R$ (K)	System sensitivity <sup>(2)</sup> (noise fluctuations)		Threshold interference levels <sup>(1)(2)</sup>		
				Temperature $\Delta T$ (mK)	Power spectral density $\Delta P_S$ (dB(W/Hz))	Input power $\Delta P_H$ (dBW)	pdf $S_H \Delta f$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))	Spectral pdf $S_H$ (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
327	10	40	60	22.3	-245	-215	-204	-244
1 420	20	12	10	3.48	-253	-220	-196	-239
1 612	20	12	10	3.48	-253	-220	-194	-238
1 665	20	12	10	3.48	-253	-220	-194	-237
4 830	50	12	10	2.20	-255	-218	-183	-230
14 488	150	15	15	1.73	-256	-214	-169	-221
22 200	250	35	30	2.91	-254	-210	-162	-216
23 700	250	35	30	2.91	-254	-210	-161	-215
43 000	500	25	65	2.84	-254	-207	-153	-210
48 000	500	30	65	3.00	-254	-207	-152	-209
88 600	1 000	12	30	0.94	-259	-209	-148	-208
150 000	1 000	14	30	0.98	-259	-209	-144	-204
220 000	1 000	20	43	1.41	-257	-207	-139	-199
265 000	1 000	25	50	1.68	-256	-206	-137	-197

\* This Table is not intended to give a complete list of spectral-line bands, but only representative examples throughout the spectrum.

<sup>(1)</sup> An integration time of 2 000 s has been assumed; if integration times of 15 min, 1 h, 2 h, 5 h or 10 h are used, the relevant values in the Table should be adjusted by +1.7, -1.3, -2.8, -4.8 or -6.3 dB respectively.

<sup>(2)</sup> The interference levels given are those which apply for measurements of the total power received by a single antenna. Less stringent levels may be appropriate for other types of measurements, as discussed in § 2.2. For transmitters in the GSO, it is desirable that the levels need to be adjusted by -15 dB, as explained in § 2.1.

## COLUMN DESCRIPTIONS FOR TABLES 1 AND 2

### Column

- (1) Centre frequency of the allocated radio astronomy band (Table 1) or nominal spectral line frequency (Table 2).
- (2) Assumed or allocated bandwidth (Table 1) or assumed typical channel widths used for spectral line observations (Table 2).
- (3) Minimum antenna noise temperature includes contributions from the ionosphere, the Earth's atmosphere and radiation from the Earth.
- (4) Receiver noise temperature representative of a good radiometer system intended for use in high sensitivity radio astronomy observations.
- (5) Total system sensitivity (mK) as calculated from equation (1) using the combined antenna and receiver noise temperatures, the listed bandwidth and an integration time of 2000 s.
- (6) Same as (5) above, but expressed in noise power spectral density using the equation  $\Delta P = k \Delta T$ , where  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K) (Boltzmann's constant). The actual numbers in the Table are the logarithmic expression of  $\Delta P$ .
- (7) Power level at the input of the receiver considered harmful to high sensitivity observations,  $\Delta P_H$ . This is expressed as the interference level which introduces an error of not more than 10% in the measurement of  $\Delta P$ ;  $\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f$ : the numbers in the Table are the logarithmic expression of  $\Delta P_H$ .
- (8) pfd in a spectral line channel needed to produce a power level of  $\Delta P_H$  in the receiving system with an isotropic receiving antenna. The numbers in the Table are the logarithmic expression of  $S_H \Delta f$ .
- (9) Spectral pfd needed to produce a power level  $\Delta P_H$  in the receiving system with an isotropic receiving antenna. The numbers in the Table are the logarithmic expression of  $S_H$ . To obtain the corresponding power levels in a reference bandwidth of 4 kHz or 1 MHz add 36 dB or 60 dB, respectively.

TABLE 3

**Threshold interference levels for VLBI observations**

<b>Centre frequency (MHz)</b>	<b>Threshold level (dB(W/m<sup>2</sup> · Hz))</b>
325.3	-217
611	-212
1413.5	-211
2695	-205
4995	-200
10650	-193
15375	-189
23800	-183
43000	-175
86000	-172

参考資料 3 : ITU-R, “Levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis,” Rec. ITU-R RA.1513-2, 2015.

## RECOMMENDATION ITU-R RA.1513-2\*

### **Levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis**

(2001-2003-2015)

#### **Scope**

This Recommendation addresses the levels of data loss to radio astronomy observations and percentage-of-time criteria resulting from degradation by interference for frequency bands allocated to the radio astronomy service on a primary basis. It includes studies of sharing situations for terrestrial and space-based applications, as well as an extensive section on measurement of data loss from weak, pulsed interference.

The ITU Radiocommunication Assembly,

#### *considering*

- a) that research in radio astronomy depends critically upon the ability to make observations at the extreme limits of sensitivity and/or precision, and that the growing use of the radio spectrum increases the possibility of interference detrimental to the radio astronomy service (RAS);
- b) that for some radio astronomy observations, such as those involving the passage of a comet, an occultation by the moon, or a supernova explosion, a high probability of success is desirable because of the difficulty or impossibility of repeating them;
- c) that since interference to radio astronomy can result from unwanted emissions of services in adjacent, nearby, or harmonically related bands, interference from several services or systems may occur in any single radio astronomy band;
- d) that burden sharing may be necessary to facilitate the efficient use of the radio spectrum;
- e) that mitigation techniques are a part of burden sharing, and more advanced techniques are being developed for future implementation, to allow more efficient use of the radio spectrum;
- f) that threshold levels of interference (assuming 0 dBi antenna gain) detrimental to the RAS for 2000 s integration times are given in Recommendation ITU-R RA.769, but that no acceptable

---

\* Radiocommunication Study Group 7 made editorial amendments to this Recommendation in the year 2017 in accordance with Resolution ITU-R 1.

percentage of time has been established for interference from services with transmissions randomly distributed in time and either sharing a frequency band with the RAS, or producing unwanted emissions that fall within a radio astronomy band;

*g)* that administrations may require criteria for evaluation of interference between the RAS and other services in shared, adjacent, nearby, or harmonically related bands;

*h)* that methods (e.g. the Monte Carlo method) have been developed to determine the appropriate separation distance between radio astronomy sites and an aggregate of mobile earth stations, and that these methods require the specification of an acceptable percentage of time during which the aggregate interference power exceeds the threshold levels detrimental to the RAS;

*i)* that studies of sharing scenarios and experience gained from long practice have led to values of tolerable time loss due to degradation of sensitivity, on time scales of a single observation, which are explained in more detail in Annex 1,

#### *recommends*

**1** that, for evaluation of interference, a criterion of 5% be used for the aggregate data loss to the RAS due to interference from all networks, in any frequency band allocated to the RAS on a primary basis, noting that further studies of the apportionment between different networks are required;

**2** that, for evaluation of interference, a criterion of 2% be used for data loss to the RAS due to interference from any one network, in any frequency band, which is allocated to the RAS on a primary basis;

**3** that the percentage of data loss, in frequency bands allocated to the RAS on a primary basis be determined by using one of the following: (1) Recommendation ITU-R S.1586; (2) Recommendation ITU-R M.1583, or (3) the percentage of integration periods of 2000 s in which the average spectral pfd at the radio telescope exceeds the levels defined (assuming 0 dBi antenna gain) in Recommendation ITU-R RA.769, [whichever is appropriate](#);

**4** that the criteria described in § 3.3.2 of Annex 1 be used for evaluation of interference, in any frequency band allocated to the RAS on a primary basis, from unwanted emissions produced by any non-GSO satellite system at radio astronomy sites.

#### 1 Introduction

An important parameter for all radiocommunication services is the percentage of time lost to interference. Administrations may need quantitative criteria relative to radio astronomy operations with active services operating in the same, adjacent, nearby, or harmonically related bands. For example, Recommendation ITU-R M.1316 uses this percentage of time lost to interference in the calculation of the separation distance by default between stations operating in the MSS (Earth-to-space) and a radio astronomy observatory, by using the Monte Carlo methodology.

Existing limits to the aggregate time losses tolerated by various other «science» services are given in Table 1, for comparison.



TABLE 1

**Example of criteria for aggregate percentage of time of  
data loss use for other science services**

Earth exploration-satellite service (EESS) (passive sensors) (%) (Recommendation ITU-R SA.1029-2):	
– 3-D atmospheric sounding	0.01
– All other sensors	1.0-5.0
Command and data transmission systems operating in the earth exploration-satellite and meteorological-satellite services (%) (Recommendation ITU-R SA.514-3)	0.1-1.0
EES and MetSat services using spacecraft in geostationary orbit (%) (Recommendation ITU-R SA.1161-1)	0.0025-0.1
Space operations systems $S/N > 20$ dB for $> 99\%$ of time (%) (Recommendation ITU-R SA.363-5)	1.0

Radio telescopes are designed to operate continuously, following a schedule of observing programs requested by astronomers. As a rule, access to radio telescopes is on a competitive basis, with research proposals often exceeding available telescope time by a factor of 2-3. Virtually all radio astronomy installations are operated out of public funds, and must be used very efficiently. Some loss of observing time resulting from maintenance or upgrading of hardware or software, however, cannot be avoided. Experience over many years of operation with major instruments by one administration shows that such losses need not exceed 5% of time, for example one 8 h day per week. Considerations of overall efficiency and cost of operation indicate that the additional aggregate time loss due to interference should be limited to a similar 5% figure.

In order to achieve the figures shown in Table 1, individual services should design their systems and control their operations to an appropriate fraction of these figures. Prudence dictates that individual systems be allowed only a fraction of the interference budget, depending on factors related to the actual allocation situation, such as band sharing and the interference potential due to unwanted emissions from other services.

It should be noted that the concept of aggregate data loss is not fully developed at present. Simulation tools, such as the one described in Recommendation ITU-R M.1316, allow the case of interference resulting from a single system to be considered. Other methodologies for single systems are also being developed. At this time there is no similar tool for the case of aggregate data loss resulting from several systems. A method that takes into account the characteristics of several systems may be difficult to develop. A particular difficulty is the apportionment of the aggregate

data loss among the various systems. Further studies of these problems are needed.

The advent of radio services using space stations and high-altitude platform stations requires reassessment of the measures by which the RAS is protected from interference. Frequency sharing with such services is normally impossible, but potentially negative effects upon the RAS by services in nearby bands arise through two factors:

- a) unwanted emissions falling in bands allocated to the RAS;
- b) intermodulation and departures from linearity in radio telescope systems due to strong signals in adjacent bands.

It is assumed that the satellite operators will use all practical means to minimize unwanted emissions, and radio astronomers all practical methods to minimize sensitivity to signals in adjacent or nearby bands. Nevertheless, item b) should be an important consideration when operating systems in bands adjacent or close to bands allocated to the RAS.

## 2 Data loss and sky blockage

Whenever data loss is mentioned in this Recommendation, it refers to data that have to be discarded because they are contaminated by the aggregate interference, from one or more sources that exceeds the levels of Recommendation ITU-R RA.769, under the assumptions stated therein. The term blockage is used here to indicate antenna directions in which the level of interference received exceed those given for detrimental interference in Recommendation ITU-R RA.769. In the presence of such interference, data useful for research at the frontiers of knowledge is generally not obtainable. Data loss may result from loss of part of the observing band, part of the observing time or from blockage of part of the sky. All of these can be expressed as loss of effective observing time.

It is stated in Recommendation ITU-R RA.1031 that many radio astronomy measurements can tolerate interference from a shared service which exceeds the thresholds given in Recommendation ITU-R RA.769, for 2% of time. It should be noted that such observations, which can tolerate enhanced measurement errors, represent observations such as solar radio flare patrols. Observations of significance in radio astronomy are those which result in new knowledge of astronomical phenomena, which either require making observations of objects not previously studied, or observing known objects with increased precision. Both such cases call for observations at the highest achievable sensitivity. As radio astronomy has matured, the usefulness of data which is limited in accuracy by the presence of interference has declined, and it is the usual practice of astronomers to delete data for which there is any evidence of interference. Thus it is a matter of practical reality that interference occurring at any identifiable level results in loss of the contaminated data.

The 0 dBi contour of the pattern for large antennas between 2 GHz and about 30 GHz defined in Recommendation ITU-R SA.509 has a radius of  $19^\circ$ . When a radio telescope points less than  $19^\circ$  from a transmitter, emitting in a radio astronomy band at the detrimental level defined in Recommendation ITU-R RA.769, interference results. This effectively blocks radio astronomy observation within a region of the sky  $19^\circ$  in angular radius. Fractional sky blockage is the ratio of

sky blockage (above the horizon), as defined above, to the solid angle of the visible hemisphere.

Figure 1 shows the effect of a hypothetical transmitter on the horizon at the origin of the azimuth scale, which just meets the spectral pfd level of Recommendation ITU-R RA.769 at a radio astronomy station. The contours in the figure show the decibel level by which the received power from the transmitter exceeds the level at which it is detrimental to radio astronomy, as a function of the pointing angle of the radio astronomy antenna. The received transmission causes detrimental interference when it is received in sidelobes of the radio astronomy antenna with gain greater than 0 dBi. Table 2 shows the percentage of sky receiving such detrimental interference, for pointing angles of the antenna at elevations above  $5^\circ$ . Since radio astronomy antennas are rarely pointed below  $5^\circ$ , this is the lowest elevation considered. For a source of interference above an elevation angle of  $19^\circ$  (such as an airborne or space transmitter) for which the spectral pfd at a radio astronomy station just meets the level in Recommendation ITU-R RA.769, a circular area of sky, with a radius of  $19^\circ$  centred on the source of interference, is blocked from radio astronomy observation at useful levels of sensitivity. This area subtends a solid angle of 0.344 sr, which is 5.5% of the  $2\pi$  sr of sky above the horizon.

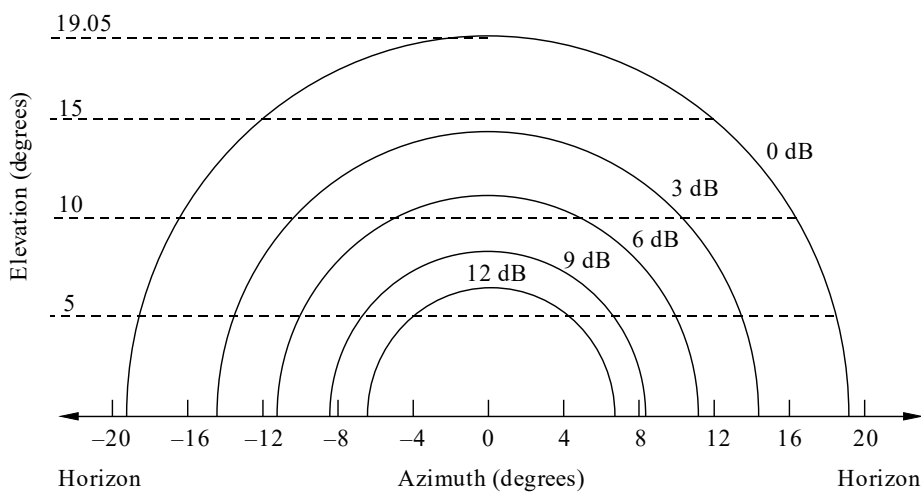
The application of the concept of sky blockage in a non-stationary environment (e.g. non-GSO satellite systems or mobiles) requires further study.

### 3 Sharing situations

In assessing interference it is useful to distinguish between transmissions of terrestrial origin, particularly in cases where there is no line-of-sight (LoS) path, and those coming from aircraft, high-altitude platforms and space-based transmitters in LoS of the affected radio telescope. Concerning the percentage of observing time lost, one should distinguish between interference from distant transmitters due to variable propagation conditions (i.e. beyond human control) and interference from active applications where the emission is effectively random with respect to the power level and the angle of arrival at a radio telescope (see § 3.1).

FIGURE 1

The effect of a source of interference at the detrimental level for the RAS, on the horizon at zero azimuth



RA.1513-01

The curves show the decibel level by which the interference received by the radio astronomy receiver exceeds the detrimental level for different pointing angles of the radio astronomy antenna. Note that radio astronomy observations are generally made with pointing angles above 5° elevation.

TABLE 2

Percentage of sky in which sensitive observations are precluded by interference received above the detrimental level, as a function of pointing elevation of the radio telescope, for the interfering source in Fig. 1

Minimum elevation (degrees)	Blockage (%)
5	2.0
10	1.3
15	0.6
20	0

3.1 Interference due to variable propagation conditions

3.1.1 Terrestrial applications

In cases where the strength of an interfering signal varies as a result of time-varying propagation conditions, a percentage of time must be specified for propagation calculations. A number of 2% is

given in Recommendation ITU-R RA.1031. However, this does not automatically lead to a 2% data loss for radio astronomy observations. Propagation conditions vary episodically, typically over periods of a few days. It should therefore be noted that over periods of weeks at a time, the period for which data are contaminated by interference may be only a few days. These effects occur primarily at longer wavelengths, i.e. below about 1 GHz. Periods of data loss can be reduced by dynamic rescheduling of radio astronomy observations.

### **3.1.2 Space-based applications**

Time variable tropospheric propagation conditions need not be considered under LoS conditions.

3.2 In-band sharing, where the transmission is variable in time and location

### **3.2.1 Terrestrial applications**

To maximize the efficiency with which radio telescopes are used, loss of observing time due to interference by other users of the spectrum should be avoided. However, some small loss may be inevitable. An example is unwanted emissions from mobile (earth) stations in the MSS. An acceptable practical level of data loss from such a system is 2%. Recommendation ITU-R M.1316 provides an example of coordination between the RAS and the MSS (Earth-to-space). In this Recommendation, the percentage of observing time loss is used in the calculation of the separation distance by default between mobile earth stations in the MSS (Earth-to-space) and the radio astronomy station, using the Monte Carlo methodology.

### **3.2.2 Space-based applications**

Sharing with satellite downlinks is not possible in bands where the RAS has a primary allocation.

### **3.2.3 Space-based radio astronomy applications**

Space-based radio astronomy requires individual analysis appropriate to the application.

3.3 Unwanted emissions into a radio astronomy frequency band, where the transmission is variable in time and/or direction of arrival

### **3.3.1 Terrestrial applications**

Time-sharing between terrestrial applications and radio astronomy is not usually considered operationally feasible. Filtering of transmitters and geographical separation are employed to suppress unwanted emission levels into the radio astronomical band to below the Recommendation ITU-R RA.769 threshold values at the location of a radio telescope. There is a potential for interference when the radio astronomy beam is pointed closer than  $19^\circ$  to a terrestrial source (see Fig. 1). The levels in Recommendation ITU-R RA.769 are based on the assumption that the interference source is at the isotropic contour. As shown in Fig. 1, a terrestrial source on the horizon (elevation =  $0^\circ$ ) can cause detrimental interference in up to 2% of the visible hemisphere for a telescope that can point within  $5^\circ$  of the horizon. However, as a rule, radio telescopes are pointed within  $5^\circ$  of the horizon for only a portion of their total observing time. Some sources of interference are known and can be avoided. In practice, a level of up to 2% data loss could be tolerated from one interfering system. It should be noted that as a radio telescope is pointed at very low elevation angles the system noise increases which reduces the sensitivity. This is not taken into

account in Recommendation ITU-R RA.769, since the usual elevation limit of 5° -10° results in very little time being spent in the region of degraded sensitivity.

The methodology described in Recommendation ITU-R M.1316 may also be used to evaluate the effect of terrestrial unwanted emissions into a radio astronomy band.

### 3.3.2 Space-based applications

Protection of radio astronomy in the presence of GSO satellites is covered by Recommendation ITU-R RA.769.

To address the compatibility between non-GSO constellations and RAS sites two Recommendations were developed by the ITU-R:

Recommendation ITU-R S.1586 – Calculation of unwanted emission levels produced by a non-geostationary fixed-satellite service system at radio astronomy sites.

Recommendation ITU-R M.1583 – Interference calculations between non-geostationary mobile-satellite service or radionavigation-satellite service systems and radio astronomy telescope sites.

These Recommendations provide a methodology to evaluate the levels of unwanted emissions produced by non-GSO constellations and some other systems at radio astronomy sites prior to their bringing into use. In particular, these Recommendations provide methods to determine compatibility between radio astronomy sites and satellite systems, during the construction phase and prior to the launch of the latter, in response to *resolves* 1 and 2 of Resolution **739 (Rev.WRC-07)**. The first step of this approach is to divide the sky into cells. First, a random choice is made for a pointing direction of the RAS antenna, which will lie within a specific cell on the sky. Then, the starting time of the constellation is randomly chosen. The average epfd corresponding to this trial is then calculated for the chosen pointing direction and starting time of the constellation using the following equation to determine epfd corresponding to each time sample:

$$epfd_{G_r = 0 \text{ dBi}} = 10 \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^{N_a} 10^{\frac{P_i}{10}} \cdot \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot G_r(\phi_i) \right] \quad (1)$$

where:

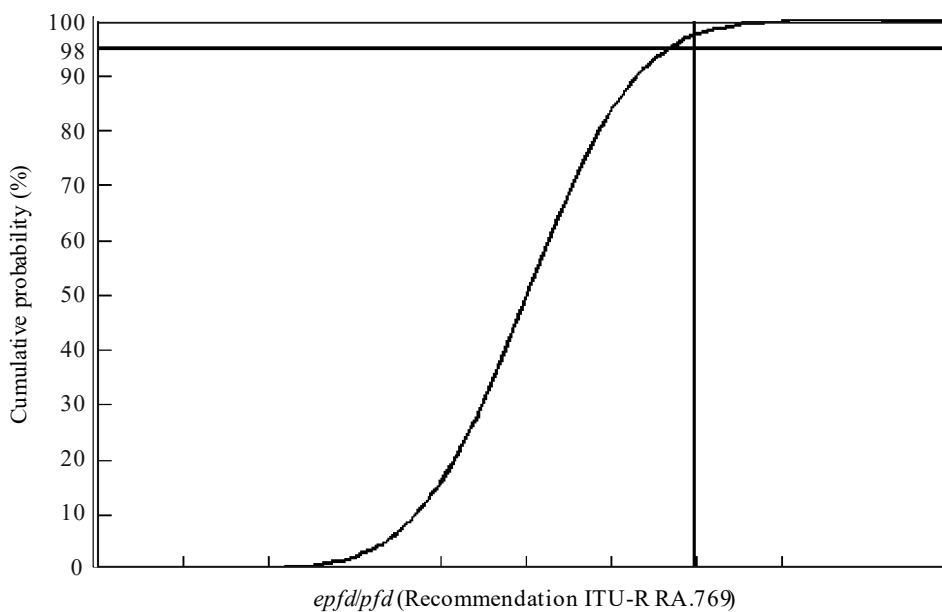
- $N_a$ : number of non-GSO space stations that are visible from the radio telescope;
- $i$ : index of the non-GSO space station considered;
- $P_i$ : RF power of the unwanted emission at the input of the antenna (or RF radiated power in the case of an active antenna) of the transmitting space station considered in the non-GSO satellite system (dBW) in the reference bandwidth;

- $\theta_i$ : off-axis angle between the boresight of the transmitting space station considered in the non-GSO satellite system and the direction of the radio telescope;
- $G_t(\theta_i)$ : transmit antenna gain (as a ratio) of the space station considered in the non-GSO satellite system in the direction of the radio telescope;
- $d_i$ : distance (m) between the transmitting station considered in the non-GSO satellite system and the radio telescope;
- $\phi_i$ : off-axis angle between the pointing direction of the radio telescope and the direction of the transmitting space station considered in the non-GSO satellite system;
- $G_r(\phi_i)$ : receive antenna gain (as a ratio) of the radio telescope, in the direction of the transmitting space station considered in the non-GSO satellite system.

For each of these cells, a statistical distribution of the epfd is determined. Then, these epfd distributions may be compared with pfd levels given in Recommendation ITU-R RA.769 (defined assuming a 0 dBi receiving antenna gain in the direction of interference and given a 2 000 s integration time) so that the percentage of trials during which this criterion is met may be determined for each of the cells which were defined.

FIGURE 2

**Comparison between the pfd levels given in Recommendation ITU-R RA.769  
and the epfd distribution given for a cell**



RA.1513-02

From the pfd threshold levels of interference detrimental to radio astronomy given in Recommendation ITU-R RA.769, epfd threshold levels can be derived taking into account the maximum radio astronomy antenna gain,  $G_{max}$ , assumed in the calculations, through the following equation:

$$epfd_{threshold} = pfd_{RA.769} - G_{max}$$

Over the sky, for elevations higher than the minimum operating elevation angle of the radio telescope, the epfd threshold level defined above should not be exceeded for more than 2% of the time.

This methodology was initially developed to cover the case of non-GSO satellite systems, however it may also be used for some airborne systems, e.g. in the aeronautical MSS.

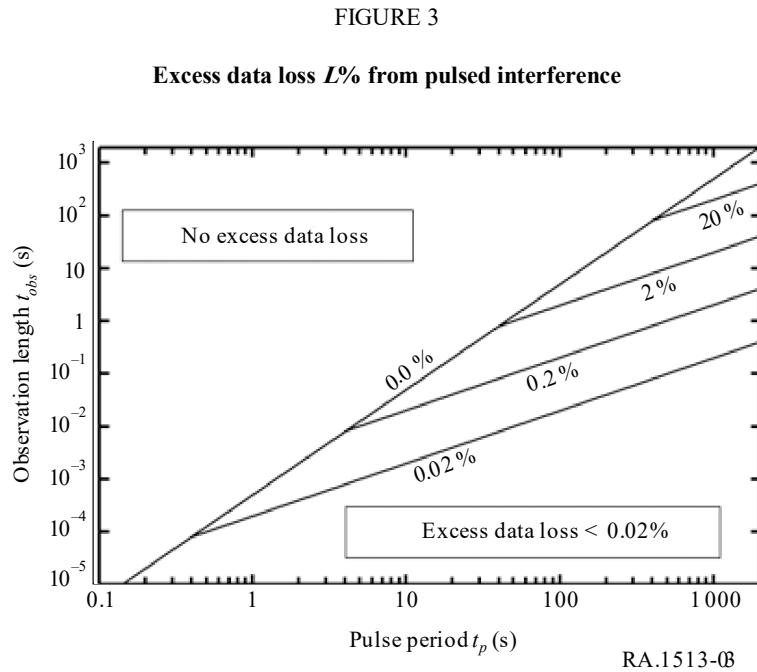
#### 3.4 Measurement of data loss from weak, pulsed interference

This section specifies the measurement of excess data loss from pulsed interference meeting the 2 000 s average detrimental spectral-line threshold level specified by Recommendation ITU-R RA.769. This is the weak interference case. There is a significant difference in the interference behaviour of pulsed and continuous signals. Continuous, time-invariant interference that falls at or below the detrimental level thresholds described in Recommendation ITU-R RA.769 for 2 000 second integrations will not harm shorter observations, as the interference to noise ratio is largest in long integrations. This is not always the case for time variable signals. We define here those situations in which pulsed signals satisfy the threshold level provided by a 2 000 s integration, while still causing some excess data loss for shorter observations.

For periodic interference, the excess data loss measurement depends on two time scales, the interfering pulse period,  $t_p$ , and the observing interval over which astronomical data are averaged,  $t_{obs}$ , making an individual measurement. Technical and scientific reasons determine  $t_{obs}$ , which is typically a few seconds in duration. In the case where  $t_{obs}$  is greater than 0.8 s, excess data loss > 2% is possible, but only if the interfering pulse period is longer than 40 s, as is shown by the calculations below.



The data loss measurements are summarized in Fig. 3.



Excess Data Loss depends only on the combination of pulse period and observation length, as shown in Fig. 3. An observation is considered to be lost when it contains a signal stronger than  $1/10^{\text{th}}$  of the system noise, averaged over the observation length. We find that the maximum excess data loss is less than the duration of one pulse period per 2 000 s. Therefore, radar and other short period pulsed signals do not create significant excess data loss.

### 3.4.1 Method

Consider the case of periodic pulses that average over time to the detrimental threshold levels for data loss over 2 000 s given in Recommendation ITU-R RA.769. It is apparent that, unlike the case of interference that is constant in time, observations that by their very nature are shorter than 2 000 s (e.g. pulsars, that are periodic emitters on time scales much shorter than 2 000 s) will suffer data loss in some cases, because the interfering pulse energy may be concentrated in one or a few of these shorter observations.

For example, a single interfering pulse every 2 000 s will fall in one out of every two observations in a series lasting 1 000 s each. The interference-to-noise ratio is no longer  $1/10$ , as required in Recommendation ITU-R RA.769, but  $\sqrt{2}/10$  in one observation and 0 in the other. This is an excess data loss of 50%. (The factor is  $\sqrt{2}$  as the average interference is twice as strong in the affected observation, but the shorter observation's rms noise is only  $\sqrt{2}$  higher.) This example gives the worst possible case of excess data loss, as will be shown below.

Excess Data Loss is derived as follows:

Let:

- $t_{obs}$  be the observation length, in seconds,
- $t_p$  be the pulse period, in seconds,
- $N_{obs}$  be the number of observations per 2 000 s, = 2 000/ $t_{obs}$ ,
- $N_p$  be the number of pulses per 2 000 s, = 2 000/ $t_p$ ,
- $P$  be the average pulse power during the observation time interval  $t_{obs}$ ,
- $P_{sys}$  be the undisturbed system noise power averaged over 2 000 s,
- $L$  be the excess data loss, in seconds and,
- $L\%$  be the percentage excess data loss.

The energy supplied by the pulse stream should be  $\leq 1/10$  of the undisturbed system energy (see Recommendation ITU-R RA.769), so:

$$N_p P t_{obs} \leq (2000 P_{sys})/10 \quad (2)$$

Now parameterize  $P$  as:

$$P = (a P_{sys}/10) \sqrt{(2000/t_{obs})} \quad (3)$$

so that the pulse average power is a factor above the detrimental threshold for RFI for the time interval  $t_{obs}$ .

From equations (2) and (3), one then derives an upper bound for the number of regular pulses in 2 000 s :

$$N_{p,max} = (1/a) \sqrt{(2000/t_{obs})} \quad (4)$$

and the corresponding shortest allowed pulse period:

$$t_{p,min} = a \sqrt{(2000 t_{obs})} \quad (5)$$

This shows that the interfering pulse period must be more than the geometric mean of the observation length and 2 000 s for it to cause excess data loss in shorter observations, while at the same time meeting the  $a = 1$  detrimental limit at 2 000 s set by Recommendation ITU-R RA.769. Thus, for example, there are exactly 100 observations with  $t_{obs} = 20$  s within a 2 000 s interval, whereon (5) guarantees  $t_{p,min} = 200$  s. As  $t_{p,min}$  is the longest period that satisfies the  $a = 1$  requirement, fewer than 10 pulses can result in data loss, from at most 9 of the 100 twenty second observations.

The data loss is then:

$$L = N_p t_{obs} \quad \text{in seconds,} \quad (6)$$

and the percentage data loss is:

$$L\% = 100 L/2000 \quad (7)$$

From equations (5) and (6), one derives:

$$L(\text{upper limit}) = t_{p,min} \text{ in seconds, and} \quad (8)$$

$$L\%(\text{upper limit}) = 100 (t_{p,min}/2000) \quad (9)$$

It is clear from this short-period pulsed signals ( $t_p < 40$  s) cannot cause significant excess data loss above the 2% limit.

The relationship between  $t_{obs}$ ,  $t_p$  and  $L\%$  is shown in Fig. 3, above, for excess data loss of 0, 0.02, 0.2, 2 and 20%.

### 3.4.2 Effect of regular pulses

Periodic pulses of interference of constant strength represent the worst case in terms of excess data loss. Pulses that are irregularly spaced in time or varying in strength cause at most the same level of data loss, again on the  $a = 1$  requirement that their average does not exceed the detrimental threshold level after 2 000 s. In some cases, more than one interfering pulse could occur during a single observation, which does not, however, increase the total number of lost observations, since just one pulse suffices for that.

Likewise, interfering pulses that vary in strength may decrease the number of lost observations. This occurs when pulses falls far enough below the average as not to exceed the detrimental level. Hence neither case can cause more loss than periodic, constant-strength pulses.

### 3.4.3 Long period pulses

The only interfering pulse periods that cause significant excess data loss are those with very long, tens to hundreds of second, periods. Such pulse strings are rare in commercial practice, though 'push-to-talk' applications may have irregularly spaced transmissions near these rates.

The reason for the limitation to long pulse periods is shown by the following example. From equation (5), to cause excess data loss the pulse period must be greater than the geometric mean of the observation length and 2 000 s. For example, there are one hundred 20-second integrations in 2 000 s. Hence a single pulse averaged over 20 s can be 100 times the 2 000-second detrimental threshold level and still average down to that level, and cause 1% excess data loss. This excess power can be reduced by a factor  $\sqrt{100}=10$  and distributed over at most 10 pulses before going below the 20-second detrimental level. That gives a minimum pulse period of 200 s.

### 3.4.4 Mitigation methods

Interference that is easily visible in an isotropic antenna at any integration interval of one second or longer already shows that the average power over 2 000 s will exceed the detrimental threshold level, as shown below.

For signals at or below the detrimental threshold ( $a \leq 1$ ), the maximum pulse strength giving 2% data loss is a single pulse every 2 000 s that is 1.5 dB below the average noise in 40 s. That will damage one 40-second integration out of every 50, for 2% loss. The average noise in 40 s is  $\sqrt{50}$  (8.5 dB) above the noise in 2 000 s, while the pulse can be 50 times (17 dB) above that level. The difference is 8.5 dB. This is still  $\sqrt{2}$  fainter than the noise average in 40 s, so it will not be detectable in normal observations. Only very short (millisecond) observations can achieve a significant pulse detection, five sigma or more above the noise.

In all cases, detection of pulsed interference will require an antenna gain in the direction of the interference that is well above isotropic or, in the case of very brief pulses, high time resolution. As a corollary, interference that is visible in an isotropic antenna with a few seconds integration is guaranteed to exceed the detrimental limit when averaged over 2 000 s, even if no further interference occurs.

The discussion in this section assumes that no attempt has been made to synchronize the data acquisition rate with the pulse period. However, regular pulsed signals offer an exceptionally powerful mitigation method if this option is exercised. It is well known from pulsar detection work that an interference to noise enhancement proportional to the square root of the ratio of the pulse width to pulse period, typically 10 to 20 dB for radar, can be achieved.

#### **3.4.5 Equivalence of rapid pulses and continuous emission**

Rapid pulses, such as radar, can be treated as continuous interference corresponding in strength to the average pulse strength. In particular, pulsed interference that does exceed the Recommendation ITU-R RA.769 limit for a 2 000-second integration can be below the detrimental limit computed for a shorter integration. For example, consider a pulsed signal with a 20-second period that is 15 dB below the noise in each 20-second integration. The noise after 2 000 s will be 10 times weaker. Hence this signal, which is innocuous in each 20-second integration, will be 5 dB above the detrimental level after 2 000 s.

In other words, the pulsed signal is behaving in just the same way as a continuous signal. It is only pulse periods longer than the geometric mean of the integration time and 2 000 s that can cause excess data loss in the short integrations, while the pulsed interference does not exceed the Recommendation ITU-R RA.769 detrimental interference threshold for a 2 000-second integration. This may be a rare occurrence in practice.

#### **3.4.6 Summary**

These calculations show, on the assumption that the pulsed interference does not exceed the Recommendation ITU-R RA.769 detrimental interference threshold for a 2 000-second observation, the following:

- 1) Radar and other pulsed radiation, with periods less than 40 s, that average down to the detrimental level at 2 000 s set by Recommendation ITU-R RA.769 will not cause excess data loss > 2%.
- 2) For measurements with 40-second observing length, the worst-case pulse strength for > 2% excess data loss is 1.5 dB below the system noise, and then only for extremely infrequent pulses (1 in 2 000 s) in the absence of any mitigation effort that synchronizes data taking in anti-correlation to regular pulses.
- 3) Aperiodic and/or variable strength interference will cause data loss at or below periodic pulses of constant strength.

#### 4 Conclusions

A practical criterion for the aggregate data loss resulting from interference to the RAS is considered to be 5% of time from all sources. The existence of multiple overlapping sources of interference is a practical aspect that should be accounted for. Further study of the apportionment of the aggregate interference between different networks is required.

The data loss from any one system should be significantly less than 5%. To comply with this requirement, 2% per system is a practical limit.

参考資料 4：電波天文業務の用に供する受信設備 総務省告示第三百六十三号（平成 30 年 11 月 7 日）

- 総務省告示第三百六十三号  
電波法（昭和二十五年法律第百三十一号）第五十六條第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則（昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号）第五十條の六第三項の規定により公示する。  
平成三十年十一月七日  
総務大臣 石田 真敏
- 一 受信の業務の種類  
電波天文業務
- 二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
国立大学法人名古屋大学
- 三 設置場所
- (一) 山梨県南都留郡富士河口湖町富士ヶ嶺一三  
四七番地の二  
東経 一三八度三八分四二秒  
北緯 三五度二五分三六秒
- (二) 長野県上田市菅平高原一二三―三七五三  
東経 一三八度一九分一六秒  
北緯 三六度三一分一二秒
- (三) 長野県木曾郡上松町大字小川字才見山四六  
三九―  
東経 一三七度三七分四九秒  
北緯 三五度四七分三四秒
- (四) 愛知県豊川市穂ノ原三一―一三  
東経 一三七度二二分〇九秒  
北緯 三四度五〇分〇五秒
- 四 受信しようとする電波の周波数  
三二五・七五MHzから三二八・六〇MHzまで
- 五 運用時間  
常時
- 六 指定の有効期間  
平成三十年十二月二日から平成四十年十二月  
一日まで
- 七 その他参考事項  
なし

○総務省告示第三号

電波法(昭和二十五年法律第百三十一号)第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則(昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号)第五十条の六第三項の規定により告示する。

令和二年一月十六日

総務大臣 高市 早苗

一 受信の業務の種別

電波天文業務

二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称

国立大学法人東北大学

三 設置場所

(一) 宮城県大崎市鳴子温泉藤田

東経 一四〇度四五分四五秒

北緯 三八度四五分〇五秒

(二) 宮城県登米市米山町字桜岡貝待井

東経 一四一度一四分二一秒

北緯 三八度三七分〇三秒

(三) 宮城県刈田郡蔵王町遠刈田温泉七日原

東経 一四〇度三一分三八秒

北緯 三八度〇六分一二秒

(四) 福島県相馬郡飯館村前田字前田

東経 一四〇度四〇分〇九秒

北緯 三七度四二分五五秒

四 受信しようとする電波の周波数

二五・五五MHzから二五・六七MHzまで

五 運用時間

常時

六 指定の有効期間

令和元年十二月二十日から令和十一年十二月十九日まで

七 その他参考事項

なし

○総務省告示第四百十五号  
 電波法（昭和二十五年法律第百三十一号）第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則（昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号）第五十条の六第三項の規定により告示する。  
 令和二年十二月二十五日  
 総務大臣 武田 良太

一 受信の業務の種類  
 電波天文業務

二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

7 令和2年12月25日 金曜日 官 報 第402号

- 三 設置場所
- (一) 岩手県奥州市水沢屋方丘町二番二二号  
 東経 一四一度〇七分五七秒  
 北緯 三九度〇八分〇一秒
- (二) 東京都小笠原村父島字旭山  
 東経 一四二度三分〇〇秒  
 北緯 二七度〇五分三一秒
- (三) 鹿児島県薩摩川内市入来町浦之名四〇一八番地三  
 東経 一三〇度二六分二四秒  
 北緯 三一度四分五二秒
- (四) 沖縄県石垣市字登野城嵩田二三八九番一  
 東経 一二四度一〇分一六秒  
 北緯 二四度二四分四秒
- 四 受信しようとする電波の周波数  
 二二・二二 GHz から 二二・五 GHz まで  
 二二・六 GHz から 二四・〇 GHz まで  
 四二・五 GHz から 四三・五 GHz まで  
 八五・五 GHz から 九二・〇 GHz まで
- 五 運用時間  
 常時
- 六 指定の有効期間  
 令和二年十二月十日から令和十二年十二月九日まで
- 七 その他参考事項  
 なし



3 令和5年3月30日 木曜日 官 報 第947号

- 総務省告示第百七号  
電波法（昭和二十五年法律第百三十一号）第五十六条第一項の規定により、次のとおり電波天文業務の用に供する受信設備を指定したので、同条第三項及び電波法施行規則（昭和二十五年電波監理委員会規則第十四号）第五十条の六第三項の規定により告示する。  
令和五年三月三十日  
総務大臣 松本 剛明
- 一 受信の業務の種類  
電波天文業務
- 二 その受信設備を設置している者の氏名又は名称  
大学共同利用機関法人 自然科学研究機構  
設置場所  
長野県南佐久郡南牧村野辺山四六二番二号  
東経 一三八度二八分二一秒  
北緯 三五度五六分四〇秒  
受信しようとする電波の周波数  
一五・三五GHzから一五・四GHzまで  
二二・二GHzから二二・五GHzまで  
二二・六GHzから二四・〇GHzまで  
三一・三GHzから三一・五GHzまで  
四二・五GHzから四三・五GHzまで  
八六・〇GHzから九二・〇GHzまで  
一〇五・〇GHzから一一六・〇GHzまで
- 五 運用時間  
常時
- 六 指定の有効期間  
令和五年三月二十五日から令和十五年三月二十四日まで
- 七 その他参考事項  
なし

参考資料 8 : 参考送信スペクトラムマスク (ITU-R 勧告 SM. 1541 Annex8 による計算結果)

送信スペクトラムマスクとして、ITU-R 勧告 SM. 1541 Annex8 に記載の FMCW 方式を適用して算出する。下記の数式において、BR は全周波数偏差(Hz)、T はチャープ周期(sec)となっている。

$$B_{-40} = 1.2B_R \left( 1 + \frac{200}{\pi\sqrt{B_RT}} \right)^{1/2}$$

この式から算出される 40dB 帯域幅  $B_{-40}=9.72\text{GHz}$ 、2.32 倍高調波周波数帯域  $2.32 \times B_{-40}=22.56\text{GHz}$  であり、図示すると下記のようなスペクトラムマスクとなる。

