

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報告

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

「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーに関する技術的条件」

平成30年2月13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

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
1 航空・海上無線通信委員会.....	3
2 9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班.....	4
IV 審議概要.....	5
第1章 検討の背景.....	5
1 9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーの特徴.....	5
2 9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーの利用動向.....	6
3 今回の検討対象無線システム等.....	18
第2章 同一周波数帯を利用する他の無線システムとの共用に関する検討.....	21
1 航空機気象レーダーとの共用検討.....	21
2 海上利用のレーダーとの共用検討.....	22
3 衛星搭載型合成開口レーダーとの共用検討.....	23
4 地上の気象レーダー（固定局）との共用検討.....	23
5 地上の気象レーダー（移動局）との共用検討.....	25
6 精密進入レーダーとの共用検討.....	26
7 BS／CS受信設備との共用検討.....	27
第3章 9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーに関する技術的条件.....	29
第4章 今後の検討課題.....	31
V 審議結果.....	32
別表1 航空・海上無線通信委員会 構成員.....	33
別表2 9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班 構成員.....	35
別添.....	37
参考資料.....	41
参考資料1 航空機気象レーダーとの共用検討（詳細）.....	42
参考資料2 海上利用のレーダーとの共用検討（詳細）.....	62
参考資料3 地上の気象レーダー（固定局）との共用検討（詳細）.....	67
参考資料4 精密進入レーダーとの共用検討（詳細）.....	92
参考資料5 BS／CS受信設備との共用検討（詳細）.....	101

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、「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」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「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班」を設けて「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」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14回会合（平成27年3月24日）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」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「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班」の設置、作業方針及び検討スケジュールを定めた。また、「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」の検討開始に当たり、関係者からの意見の聴取の機会を設けたが、所定の期日までに意見陳述の申し出はなかった。

(2) 第18回会合（平成29年12月12日）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」に関する委員会報告案をとりまとめ、これについて意見募集を行うこととした。

(3) 第19回会合（平成30年1月29日～同年2月1日）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」に関する委員会報告及び答申案をとりまとめた。なお、当該報告案について、平成29年12月20日から平成30年1月19日までの間、意見募集を行った。

2 9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班

(1) 第1回会合（平成27年3月31日）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的条件」について、作業方針及び調査スケジュールを定めた。また、実験試験局で運用中のシステム概要及び共用となる無線システムの概要並びに平成24年度から平成25年度まで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（平成27年6月1日）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的条件」の中で、9GHz帯の周波数で共用となる各種レーダーの概要及び船舶及び航空機に開設するレーダーシステム及び9GHz帯を利用する地上に固定して運用するレーダーシステムとの共用に関する調査を行った。

(3) 第3回会合（平成27年9月15日）

当該周波数帯で共用となる地上に固定して運用するレーダーシステムとの共用に関する調査並びに当該周波数帯がイメージ周波数となる放送衛星及び通信衛星の受信機との共用に関する調査を行った。

(4) 第4回会合（平成27年12月22日）

当該周波数帯で共用となる航空機に開設するレーダーシステム及び隣接周波数帯で利用する精密進入レーダーシステムとの共用に関する調査を行った。

(5) 第5回会合（平成29年11月1日）

当該周波数帯で共用となる地上に設置する気象レーダーとの共用に関する調査、隣接周波数帯で利用する精密進入レーダーシステムとの共用に関する調査及び当該周波数帯がイメージ周波数となる放送衛星及び通信衛星の受信機との共用に関する調査を行った。

(6) 第6回会合（平成29年12月1日）

「航空無線通信の技術的諸問題について」のうち「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的条件」に関する作業班報告書を取りまとめた。

IV 審議概要

第1章 検討の背景

我が国では、平成23年の東日本大震災、平成26年の御嶽山噴火や平成28年熊本地震など被害の状況把握が危険かつ広範囲にわたる大規模な自然災害が多発している。

航空機に搭載した9GHz帯合成開口レーダー（SAR: Synthetic Aperture Radar）は、夜間や噴煙など視界がきかない状況下においても、上空から電波を用いて広範囲に被災・災害の情報収集が可能であり、官民で実用化に向けた実用検証が行われている。

一方で、利用する周波数帯には、気象レーダーや船舶航行レーダーなど各種レーダーシステムが存在し、共用するための技術的検討が必要である。

このような背景を踏まえ、今般、9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの実用化に向けて、必要な技術的条件について検討を行ったものである。

本検討にあたっては、総務省が平成24年度から平成25年度まで実施した技術試験事務「9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討」の報告内容のうち必要な内容について参照した。

1 9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーの特徴

9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダー（以下「航空機SAR」という。）は、航空機に合成開口レーダーを搭載したシステムである。

航空機SARは、大規模災害時の状況把握の手段の一つとして、注目されている。

大規模災害時などの豪雨、火山噴火等の発災時に求められる情報として考えられるのが、①地滑り、斜面崩壊、土砂災害、河川増水、浸水／冠水等の状況、②火口、噴火、溶岩流／火砕流、噴煙／噴石等の状況、③被災者／家屋やインフラ設備等の状況、④災害発生地域へのアクセスに必要な道路、鉄道、港湾、飛行場の状況、⑤空地（ヘリコプターの離発着用、避難場所や現地対策本部等の設置場所用

SARの特徴

- 一見航空写真
直下でなく斜め横を観測
- 全天候
雲・雨・噴煙を透過
- 夜でも昼でも
- 高高度からも高分解能
- 広域の観測幅

- 立体視(インターフェロメトリ)
- 偏波を使った詳細な識別(ポラリメトリ)

図1-1 SARの特徴

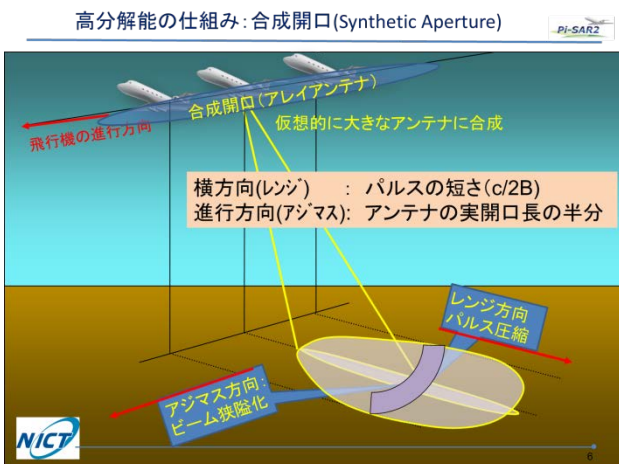


図1-2 高分解能の仕組み

航空機だからできること

	航空機SAR	衛星SAR
分解能	30cm~2m	1m~10m
観測領域(観測幅)	リージョナル(国内) 5km~10km	グローバル 10km~100km
観測(プラットフォーム)高度	3km~12km	400km~800km
観測機会	即時・毎日	回帰周期による 数日の遅れの可能性
データの即時性	リアルタイムに画像を提供	衛星からのダウンリンク以降に処理
入射角	自由に選べる	軌道の条件により決まる
観測(電波照射)方向	自由に選べる	基本的にほぼ東西
軌道の安定度	大気の状態に左右	安定な軌道
ポラリメトリ	実現済み	アンテナ設計/データ容量のため 試験的
インターフェロメトリ	常時可能 ただしレポートパスは困難	シングルパスは困難 レポートパス・差分に有利

図1-3 航空機SARと衛星SARの比較

等)の状況等であり、そのための情報は、画像による情報が効果的である。合成開口レーダーでは、可視カメラなどの光学カメラと異なり、イメージングレーダーのレーダー画像により撮影を行うこととなり、航空機や人工衛星を利用することで、高い高度から、広範囲な観測ができる特徴がある。また、光学カメラでは観測困難な天候(雲、霧、靄などや煙)でも影響を受けず観測が可能となる。その他に、地表面の状況だけでなく、海面の状況把握や人命救助などにも利用されている。

なお、衛星搭載型合成開口レーダー(以下「衛星SAR」という。)は、既に民生利用が進んでおり、高い高度から観測が可能という点では同様であるが、周回衛星であるため衛星が観測対象地域の上空付近に飛来した時しか撮像できないのに対し、航空機SARは、航空機が運航できれば撮像できる。また、衛星SARは、撮像方向の自由度が小さく、最適な方向からの撮像が困難であるが、航空機SARは、航空機の機動力により起伏が激しい山岳地域でも適した位置から観測することが可能である。

2 9 GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーの利用動向

(1) 国内の利用動向

現在、航空機SARは日本国内において実験目的で利用されており、その利用者一覧は表1-1のとおりである。

Xバンドの航空機SARを利用している機関が多いが、他の周波数を利用している機関もある。主な機関の状況は次のとおりである。

表1-1 航空機SARの運用機関

項目	情報通信研究機構	国土地理院	アルウェットテクノロジー	日本電気、首都大学東京	三菱電機	パスコ	宇宙航空研究開発機構
周波数帯	X	X	L, X, Ku	X	X, Ku	X	L
利用目的	機器開発・観測データを用いた研究	災害直後の被害状況把握・火山の定常的な観測	機器開発	機器開発・観測データを用いた研究	機器開発	災害直後の被害状況把握	衛星の校正検証
利用頻度	3回/年	災害発生時	-	研究に応じて使用	-	業務・研究に応じて使用	3~4回/年
海外における利用頻度	なし	なし	-	なし	-	-	あり(タイ・インドネシア)
夜間観測	可能	-	-	可能	-	-	可能
光学センサーの搭載の有無	無	有	-	無	-	-	無
機内での処理	可能	可能	可能	可能	可能	-	可能

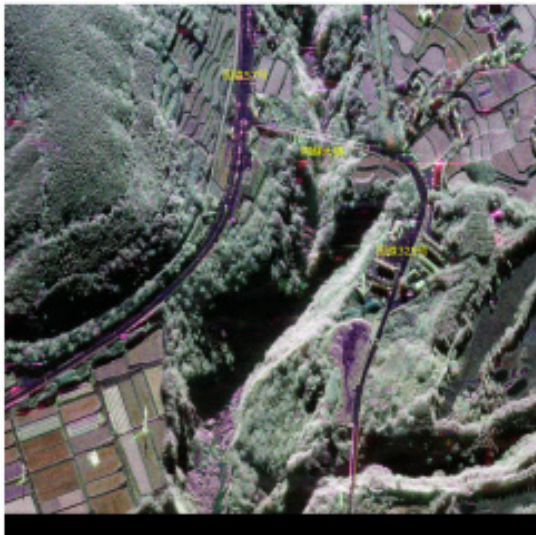
ア 情報通信研究機構

同機構は、平成8年に宇宙航空研究開発機構と共同で、Pi-SAR (Polarimetric and Interferometric Airborne Synthetic Aperture Radar) を開発、平成20年に高分解能化を目的として、Pi-SAR2 を開発した。Pi-SAR2 の特徴は高分解能性(分解能0.3m)、高機能性(ポラリメトリ¹機能、クロストラック²・アロングトラック³イン

¹ 水平偏波や垂直偏波等の電波を地表面に照射し、地表面で散乱される電波の偏波情報を利用して、観測対象物の物理的性質を計測する技術。

² 航空機SARの機器を搭載した航空機の進行方向に対して水平面で直行する方向。

³ 航空機SARの機器を搭載した航空機の進行方向。



熊本地震前（平成 27 年 12 月 5 日、阿蘇大橋）熊本地震後（平成 28 年 4 月 17 日、阿蘇大橋）

図 1-4 平成 28 年熊本地震前後の比較

ターフェロメトリ⁴機能）及びリアルタイム性（機上及び地上での処理の高速化）である。これまでに、機能・性能を確認するための試験観測実験を実施するとともに、高分解能・高機能航空機搭載合成開口レーダーの活用方法に関する試験観測を行っている。また、災害発生時における被災地の状況把握のための緊急観測を実施している。

イ 国土地理院

同院では、火山噴火等の現況把握のため航空機SARを運用しており、平成23年度に現行機材（アルウェットテクノロジー社製）を導入した。それ以降の主な観測は以下のとおりである。この他にも土砂災害箇所や湛水域において試験的な観測を実施しており、年間の観測日数は5日～10日程度である。

（ア）桜島

活発な火山活動が継続していることから平成24年12月、平成25年9月、平成26年7月に観測を実施した。観測結果は火山噴火予知連絡会に報告した。

（イ）御嶽山

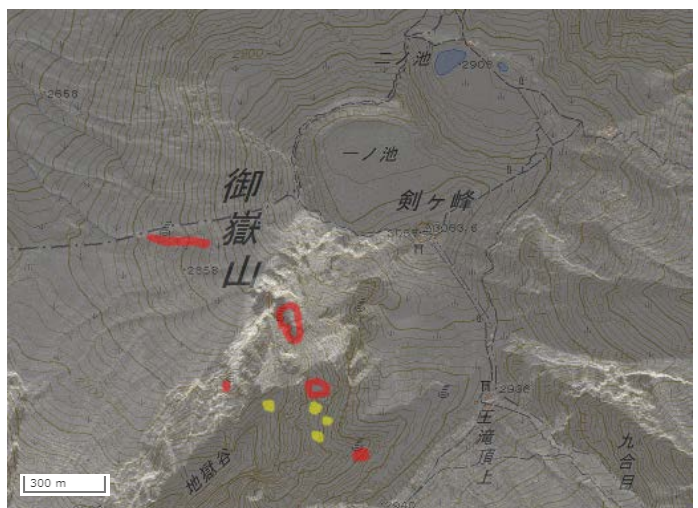
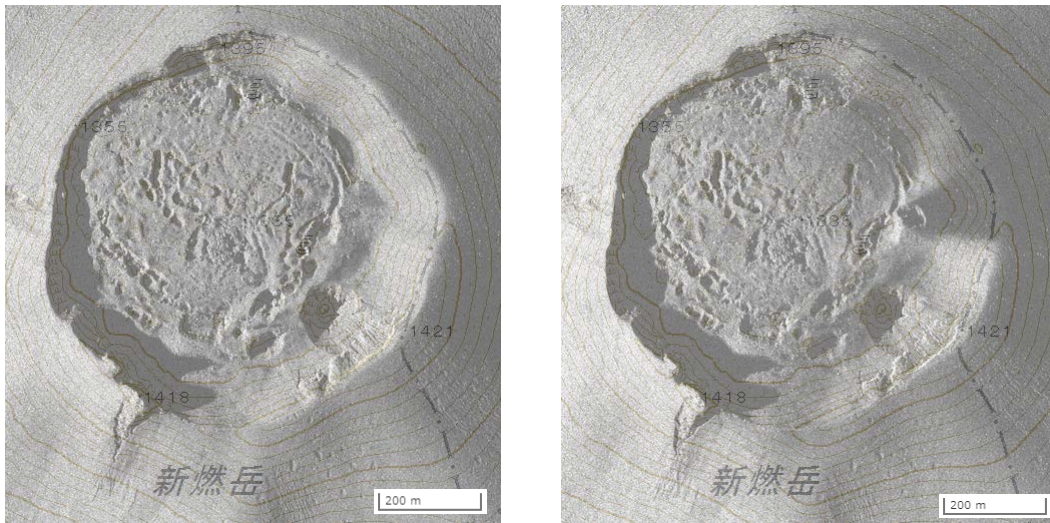


図 1-5 航空機 SAR 強度画像及び御嶽山の推定火口位置（平成 26 年 9 月 29 日観測）

⁴ 観測対象物から散乱される電波を2つの離れた場所で観測し、観測した信号間の位相差から、三角測量と類似した原理により観測対象物の方位や距離を計測する技術。

平成26年9月27日の噴火の翌々日（9月29日）に観測を実施した。観測結果から火口位置の推定を行い、火山噴火予知連絡会に報告するとともに、同院のホームページで公開した。



平成 24 年 11 月 5 日 観 測

平成 29 年 10 月 12 日 観 測

図 1 - 6 新燃岳の噴火前後の比較

(ウ) 新燃岳

平成29年10月11日の噴火の翌日（10月12日）に観測を実施した。火山噴火予知連絡会に報告するとともに、同院のホームページで公開した。

ウ アルウェットテクノロジー株式会社

同社では、従来の航空機SARに比べ小型化・軽量化した高性能航空機SARの開発を行っている。同社の航空機SARは、小型化・軽量化することで様々な航空機（回転翼も含む）やUAV（Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機（固定翼））に搭載可能

表 1 - 2 NEC-SAR と Pi-SAR2 との比較

項目	Pi-SAR2	NEC-SAR
周波数帯	Xバンド	Xバンド
偏波	フルポラリメトリ ⁵	フルポラリメトリ
最高分解能	約 30cm	約 30cm
質量	約 440kg	～約 100kg
体積	約 1.2 立方 m	～約 0.2 立方 m
消費電力	約 5kW	<約 2.5kW
搭載プラットフォーム	ビジネスジェット機 (ガルフストリーム II)	小型航空機 (ビーチクラフト 200T)

⁵ 垂直偏波と水平偏波の電波を送信して、地表面から散乱されてくる垂直偏波と水平偏波を計測し、観測対象の4偏波特性を取得する技術。

であり、機器の設置の自由度が高い。また、ノートパソコン1台で航空機SARの制御、データ記録及びリアルタイム処理の全てを実現している。利用する周波数帯としては、L、X、Kuバンドのシステムがあり、使用用途に合わせたシステムを選択することが可能である。

御嶽山
(平成26年
10月23日)

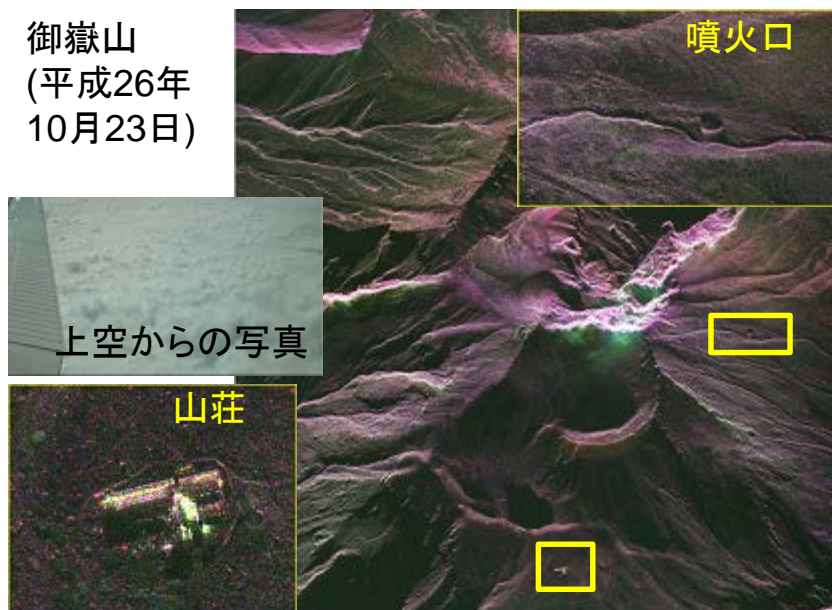


図1-7 御嶽山観測画像

エ 日本電気株式会社

同社では、平成4年に国内で初めて航空機SARを開発し、平成26年に総務省の委託研究で小型航空機SAR (NEC-SAR) を開発した。NEC-SARは、Pi-SAR2の30cm分解能・多偏波観測といった高画質観測を維持しつつ、小型化・軽量化を達成することに成功している(表1-2)。

NEC-SARでは、悪天候かつ噴火中の御嶽山の火口や山荘周辺を観測(平成26年10月23日)し、山荘の周囲に噴石と推測される点が広く分布している様子を確認している。また、この他にも土砂災害、冠水域等での実証観測を行い、実際の災害状況把握に利活用可能であることも確認している。

オ 三菱電機株式会社

三菱電機株式会社は、次に示す3種類の航空機SARのシステム開発を行っている。

(ア) MELCO-SAR1 (Kuバンド)

航空機SARとして、平成19年度に国内で初めて分解能10cm(帯域幅1,500MHz)を達成し、車両などの詳細な状況把握が可能である。また、高精度のリピートパス⁶技術を組み合わせ、車両の轍等の微小変化を抽出可能なCCD (Coherent Change Detection) 技術の実証検

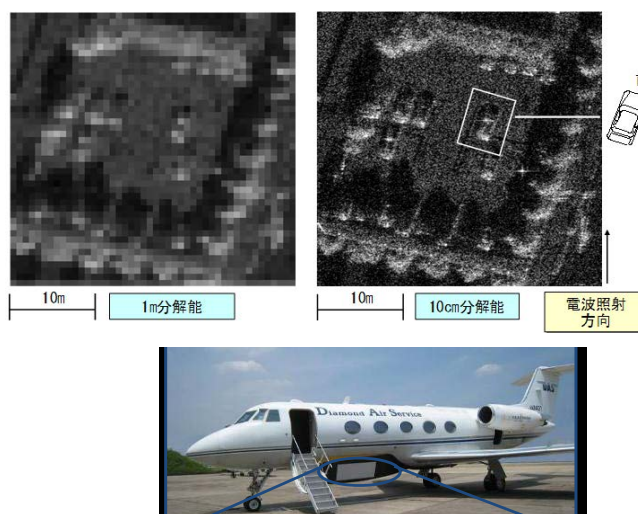


図1-8 MELCO-SAR1

⁶ 航空機 SAR を搭載した飛翔体が、2回以上同じ飛行コースを飛行した時の飛行コース。

証を行った。

(イ) MELCO-SAR2 (Kuバンド)

高機能化を目的として平成23年度に開発した。受信チャンネルを3chに増加、MTI (Moving Target Indicator)-SAR、複数受信開口によるアジマスアンビギュイティ抑圧機能⁷を有する。また、本航空機SARを用いてバイスタティック観測⁸の実証実験を実施した。



図1-9 アンビギュイティ抑圧機能

(ウ) MELCO-SAR3 (Xバンド)

高分解能／小型軽量化を目的に平成28年度に開発した。本航空機SARの主要構成部品であるSARコアは、寸法約150×430×290mm (H×W×D)、質量約17kgと小型・軽量化されていることに加え、励振部、受信部、信号処理部を一体化した構造のため、従来のように機器間接続の手間を省き、搭載性を向上させている。

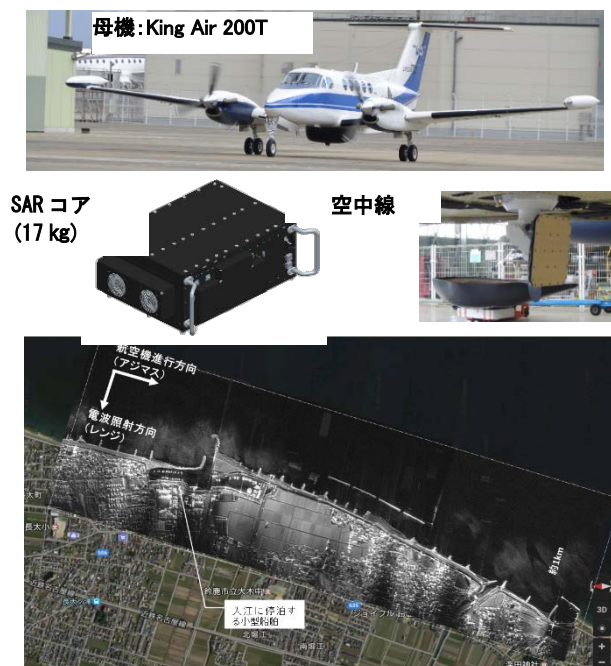


図1-10 MELCO-SAR3

カ 宇宙航空研究開発機構

同機構は、9 GHz帯と異なり、L帯航空機SARを運用している。前述のとおり平成8年に情報通信研究機構と共同でPi-SARを開発した。さらに、同機構は平成26年度に打ち上げられたALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite-2) に分解能や感度を対応させるために、平成24年に新しくポラリメトリ機能とリピートパスインターフェロメトリ機能を有するPi-SAR-L2を開発した。

現在は、桜島・新燃岳・阿蘇山・御嶽山等の噴火モニタリングや公募研究による応用研究等で利用している。

(2) 需要予測 (動向)

ア 農業分野 (水稻作付の把握)

農地の作付状況、農作物の種類及び生育度の調査は、現地観測により実施されて

⁷ アジマス方向 (航空機 SAR を搭載した航空機の進行方向) に発生するアンビギュイティ (偽像) を低減させるために、複数の受信アンテナで地表面からの散乱波を受信・信号処理する機能。

⁸ 通常の合成開口レーダーの観測では、電波の送信アンテナと受信アンテナが同じであるが、バイスタティック観測では、送信アンテナとは別の場所に設置されている受信アンテナで地表面からの散乱される電波を受信する。

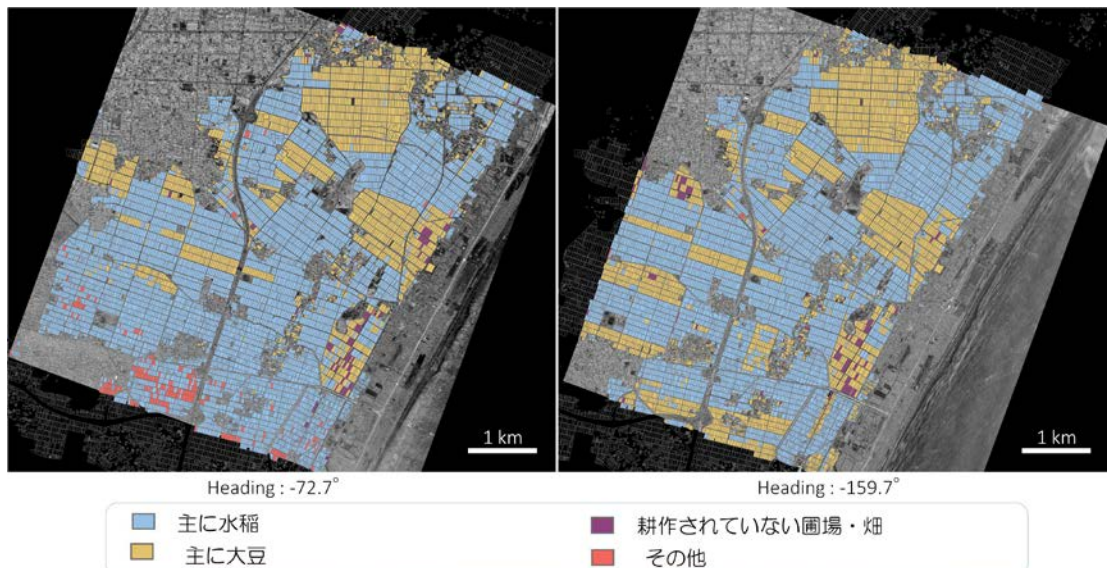


図 1-11 航空機 SAR (Pi-SAR2) を用いた耕作状況判別例 (出典: 米澤ら, 津波被災農地における耕作状況判別のための Pi-SAR2 データの固有値解析)

きた。この方法は多くの労力を必要とするため、調査労力軽減と効率的な調査体系の改善が求められており、その中でリモートセンシング技術の活用が注目されている。既に、光学センサーを用いた研究が数多くなされ、実用利用に耐えられる手法が開発されている。しかしながら、光学センサーの場合、被雲時の観測ができないという欠点があるため、定常的に作付状況、農作物の種類及び生育度を計測することは難しい。このため、雲の影響を受けずに地表面の観測が可能な合成開口レーダーによって被雲時でもこれらの計測が行える手法の開発が期待されている。衛星 SAR では既に実用が実施されているが、航空機 SAR が実用化された際には、照射方向を変えられる特徴を生かし、衛星 SAR ではシャドウになる部分の観測も可能になる。また、航空機 SAR は衛星 SAR に比べ分解能が高いため、作付状況、農作物の種類及び生育度を精度良く推定することが可能となる。

イ 運輸分野

(ア) 海氷モニタリング

海上保安庁では、流氷による海難事故を防ぐため光学衛星を用いて海氷情報の配信を冬季に行っている。しかしながら、冬季のオホーツク海は荒天の日が多く、ほぼ毎日のように雲に覆われることから海氷の分布状況を定常的に把握することが困難であった。そこで、被雲時でも観測が可能な合成開口レーダーに着目し、宇宙航空研究開発機構と共同で ALOS-PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) を試験的に併用した。さらに、海上保安庁では、ALOS-PALSAR の後継機である ALOS-2 のオホーツク海の流氷画像を海氷速報作成に活用 (活用頻度 3~4 回/週) している。航空機 SAR が実用化された際には、衛星 SAR との併用による利用が想定される。具体的には、広範囲の状況把握を衛星 SAR で行い、詳細な状況把握や緊急時の調査時に航空機 SAR を代用することが想定される。

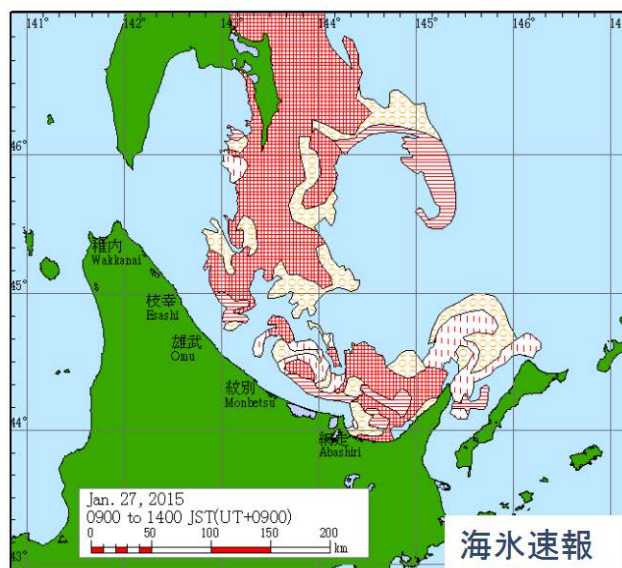
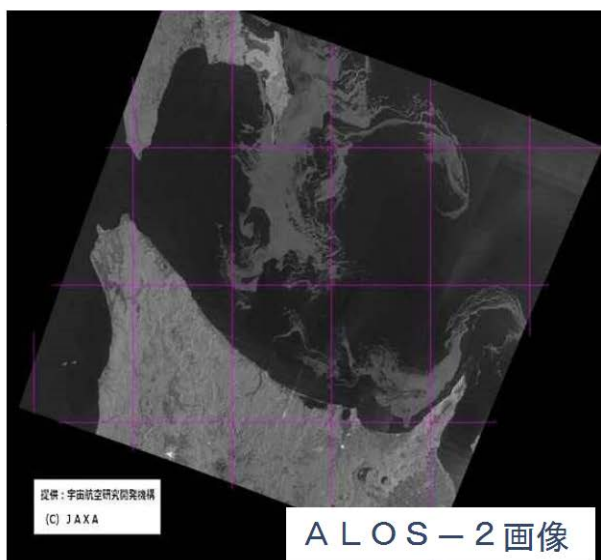


図 1-12 ALOS-2 によって観測されたオホーツク海の流氷の画像（左図）と海上保安庁が作成している海水速報。ALOS-2 による流氷観測では、観測画像の濃淡から海水域と海氷域を判別し、氷縁と海氷密集度（密接度）に注視し、海氷分布状況をモニタリングする。

（出典：http://www.sapc.jaxa.jp/topics/2015/ALOS2_pdf/12.pdf）。

（イ）オイルスピル

衛星を使った観測は既に実施されている。航空機SARが実用化された際には、衛星SAR との併用による利用が想定される。具体的には、広範囲の概要把握を衛星SARで行い、範囲を特定したところで詳細な状況把握を航空機SARで行うという使い方や緊急時に衛星SARで都合よく観測できない場合に航空機SARを代用するという使い方が想定される。また、小型化が実現すれば、状況把握用又は油処理剤空中散布用のヘリコプターに合成開口レーダーのセンサーを載せることも可能となり、状況把握の精度向上又は迅速な処置に対する効果が期待される。

ウ 地形図作成分野（DEM作成）

現在、国内の詳細な地形データ（DEM）の作成は航空機搭載型レーザースキャナー等により実施されている。しかしながら、センサーの特性上天候の影響を受けやすく、コストが高い等の課題を有している。

国内全土におけるDEMのうち、航空機搭載型レーザースキャナーにより作成されたDEMは、全土の70%程度であり、DEMの更新の際のコスト削減が課題である。航空機SARが実用化された場



図 1-13 IFSAR を用いた DEM 作成、（左）DSM、（中）DTM、（右）オルソ化画像（出典：INTERMAP 社）

合、現在、航空機を保有し、航空機搭載型レーザースキャナー等の測量業務を実施している民間測量業者が運用の主体として想定される。現在国内の測量業の登録者数は12,566業者⁹であり、日本測量協会には法人会員が2000社以上存在¹⁰する。また、航空機搭載型レーザースキャナーを有している企業は8社存在する。航空機SARで作成したDEMIは航空機搭載型レーザースキャナーに比べ解像度は低いが、航空機搭載型レーザースキャナーに比べコストを安く抑えられることが予想されるため、航空機SARの実用化による活用が期待される。

エ 防災分野

国内ユーザー機関で活用事例があり、また、今後も多くの機会での活用が期待される分野である。現在、災害時の災害状況把握は、小型航空機等からの光学カメラによる撮影が主体となっているが、小型、軽量かつ低電力な合成開口レーダーの開発が進むことにより、被雲時や夜間における航空機SARの利用が拡大することが期待される。民間測量会社24社は、日本測量調査技術協会を通じ、国土院との空中写真の緊急撮影等の災害協定を締結している。航空機SARの実用化後は水害・地震・地滑り等の災害における活用が期待される。

(ア) 被災状況把握（人工構造物）

平成28年4月16日に発生した平成28年熊本地震（本震）では、道路や河川堤防等のインフラ構造物に被害が発生した。衛星SAR（ALOS-2）の干渉解析を用いて、観測範囲内に含まれる人工構造物である2基のフィルダムについて、熊本地震に起因する被災状況の把握を実施した（解析：株式会社パスコ）。解析の結果、震度6の分布域に位置するダムでは、地震の影響で天端部が若干沈下した現象を捉えた。一方で、震度4の分布域に位置するダムでは、堤体の変位を確認できなかった。以上の結果から、衛星SARや航空機SARの干渉解析を用いることで、広域に分布するフィルダム（人工構造物）について、迅速かつ安全に被災状況の把握が可能となると考えられる。

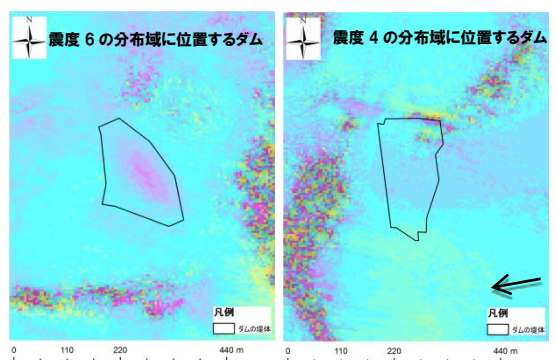
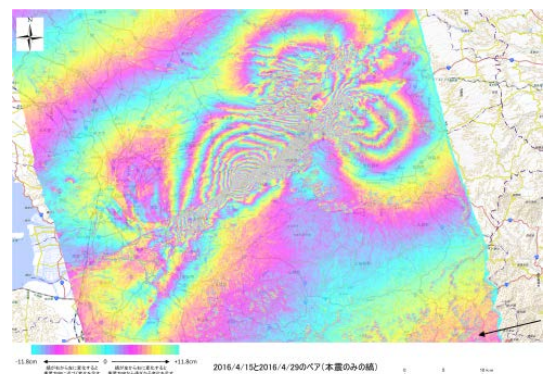


図1-14 広域の人工構造物の被災状況を把握した例（出典：株式会社パスコ）

(イ) 被災状況把握（土砂）

⁹ 国土交通省 土地・建設産業局市場整備課の調査による

¹⁰ <http://www.jsurvey.jp> による

平成23年8月30日から9月5日にかけて発生した紀伊半島大水害では、紀伊半島の一部の地域で解析雨量が2,000mmとなる等の記録的な大雨となった。広域にわたる被災状況の全容を把握するため、降雨状況の中、9月5日に衛星SAR (TerraSAR-X) の観測を行い、土砂災害の把握を実施した(解析:株式会社パスコ)。解析の結果、赤谷地区、長殿地区を始め、観測範囲内で複数の土砂災害及び河道閉塞箇所を特定した。以上の結果から、降雨等の悪天候であっても、衛星SARや航空機SARを用いることで、広域で発生が疑われる土砂災害について、迅速かつ安全に被災状況の把握が可能となると考えられる。

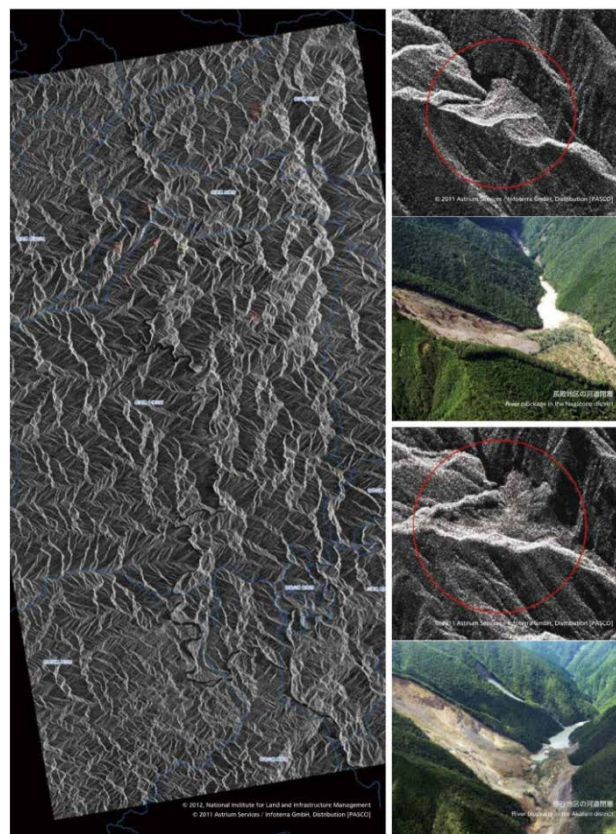


図1-15 広域の土砂災害(河道閉塞箇所)を把握した例(出典:株式会社パスコ)

(ウ) 被災状況把握(浸水・洪水)

平成23年3月11日に発生した東日本大震災では、青森県から千葉県に至る沿岸を襲った巨大な津波により、大きな被害が発生した。3月13日の早朝に衛星SAR (TerraSAR-X) による観測を行い、震災前の画像(平成22年10月21日に観測)を用いた差分解析法により、津波の到達範囲を抽出した(解析:株式会社パスコ)。解析の結果、震災前後で大きな変化(右上図の濃い青)が広域で抽出され、津波による被害範囲が推定できた。また、国土地理院の空中写真より判読した津波の到達範囲(痕跡、湛水範囲)と比較した結果、概ね8割の抽出精度を持つことが確認できた。以上の結果から、衛星SARや航空機SARを活用することで、広域の湛水範囲を迅速かつ安全に把握できると考えられる。

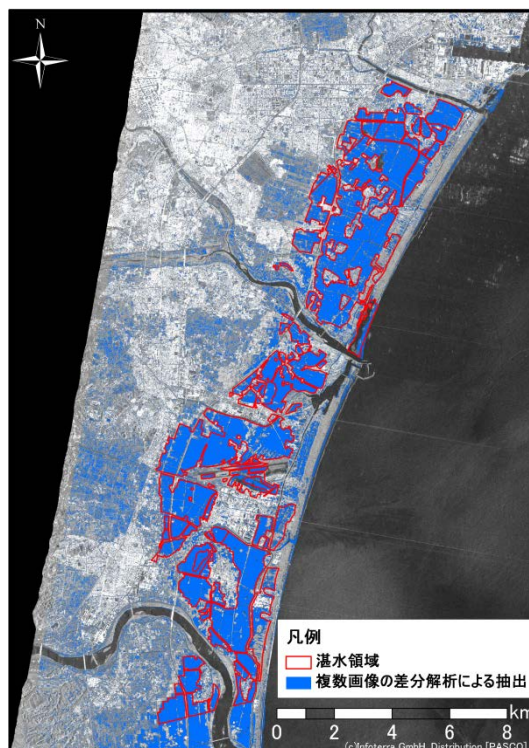


図1-16 広域の浸水による被災状況を把握した例(出典:株式会社パスコ)

オ 国土モニタリング分野

(ア) 地殻変動モニタリング

平成28年4月16日に発生した平成28年熊本地震（本震）では、多くの地表地震断層が発生した。広域に分布する地表地震断層をモニタリングするために、衛星SAR（ALOS-2）の干渉解析で生成される干渉縞、コヒーレンス情報及び地理情報を組み合わせて解析を実施した（解析：株式会社パスコ）。解析の結果、地表地震断層が干渉縞の不連続と低コヒーレンス値の連続する箇所として表現され、広域に分布する複数の地表地震断層をモニタリングできた（図1-17中の矢印）。また、益城町福原から砥川付近（図1-17下図）では、現地では確認しづらい程度の微小な変位と想定される地表地震断層を検出した。以上の結果から、衛星SARや航空機SARの干渉解析を用いることで、地殻変動モニタリングが可能となると考えられる。

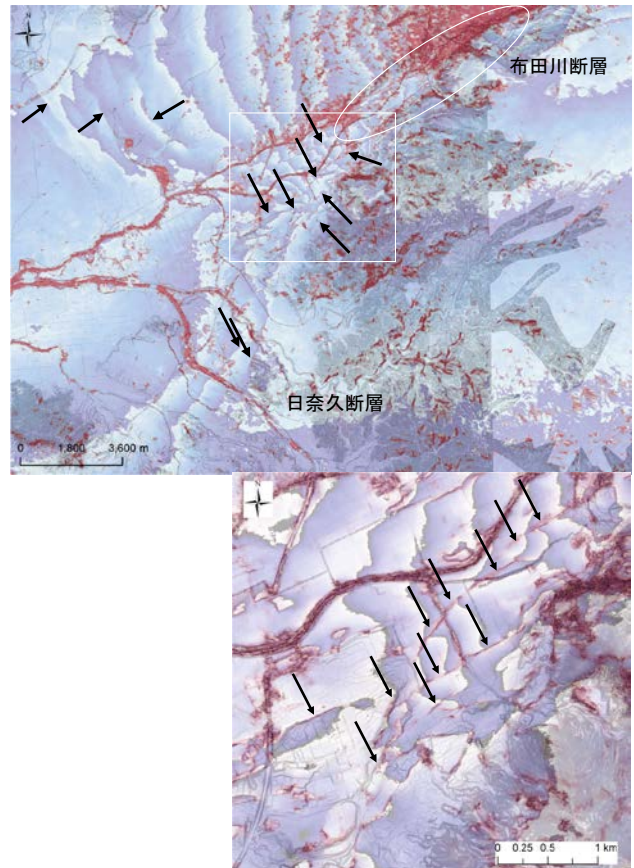


図1-17 地殻変動モニタリング（地表地震断層）モニタリング例（出典：株式会社パスコ）

(イ) 火山監視

平成25年11月20日に、小笠原諸島・西之島周辺で噴火が確認され、西之島南東500m付近に新たな陸地が確認された。現地では活発な火山活動が続き、現地での継続モニタリングは困難であった。衛星SAR（TerraSAR-X）を用いて、平成25年11月22日から平成27年4月12日まで約500日間の継続監視を行った（解析：株式会社パスコ）。解析の結果、新たな陸地は継続的に拡大し、平成25年12月下旬には西之島と繋がったことが確認できた。また、西之島と繋がった新たな陸地はその後も継続的に拡大し、平成27年4月12日には約549,650m²

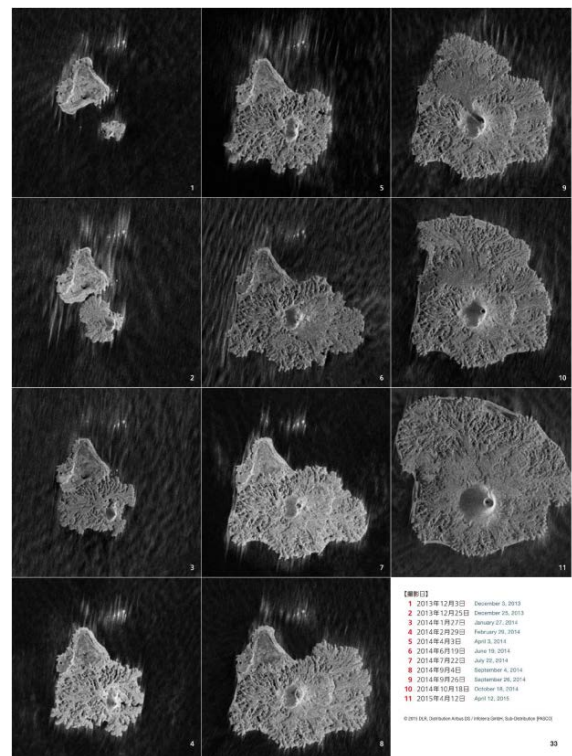


図1-18 火山監視（西之島）の例（出典：株式会社パスコ）

(概算値)まで面積が拡大したことが確認できた。以上の結果から、航空機SARを活用することで、火山活動を継続的かつ安全に把握できると考えられる。

(ウ) 海岸線モニタリング

土砂供給量の減少や人工構造物による沿岸漂砂の阻止・遮蔽域の形成等によって砂浜が後退、消失し、護岸の被災、浸水被害、動植物への影響が懸念されており、海岸線のモニタリングのためのツールとして合成開口レーダーが着目されている。衛星SARを用いた海岸線の把握に関する研究が進められ、例えば国土技術政策総合研究所や東京大学では、従来の空中写真や光学衛星画像によるモニタリングを合成開口レーダーによって補完するための技術開発が行われている。航空機SARが実用化されれば航空機の特徴を活かし海岸線上を航行しながら効率的にデータの取得を行える可能性がある。また、観測したいときに撮影できるため震災直後や台風襲来直後の状況把握も可能になる。

カ 安全保障分野

(ア) 小物標検知

小物標、具体的には救命いかだの検知は今後の活用として期待される場所である。航空機SARが実用化されれば、緊急時の状況把握が期待される。

(イ) 船舶検出

不審船の識別で衛星SARが活用されている。航空機SARが実用化された際には、衛星SARとの併用による利用が想定されている。具体的には、広範囲の概要把握を衛星SARで行い、範囲を特定したところで詳細な状況把握を航空機SARで行うという使い方や、緊急時に衛星SARでただちに観測できない場合に航空機SARを代用するという使い方が期待されている。また、航空機SARではアロングトラックインターフェロメトリ機能によって、視線方向の船舶の速度を計測することができ、船舶の検出に加えてその速度の抽出が可能である。



図1-19 TerraSAR-Xによるジブラルタル海峡における船舶検出(出典:株式会社パスコ)

(3) 諸外国の利用状況及び技術動向

ア 諸外国の利用状況

諸外国では既に航空機SARが民間で実用されている事例がある。これらのサービスは今後国内でも展開される可能性がある。諸外国で航空機SARの民間利用を行っている企業について、文献等により調査を行った。対象はIntermap(アメリカ)、Fugro-EarthData(オランダ)、Metasensing(オランダ)、Orbisat da Amazônia SA(ブラジル)の4社である。それぞれのサービス内容の概要を表1-3と表1-4に示す。

表1-3 IFSAR、GeoSAR及びOrbiSAR-1の諸元

機関	Intermap (アメリカ)		Fugro-EarthData (オランダ)		Orbisat da Amazônia SA (ブラジル)	
航空機SAR の名称	IFSAR		GeoSAR		OrbiSAR-1	
周波数帯	X	P	X	P	X	P
分解能	1.1/0.55	2.23m	1.875/0.9375m		-	-
偏波	HH	HH, HV, VH, VV	HH, HV or VV, VH		-	-
DSM解像度	0.5~3.0m		2.5~5.0m		2m	
観測幅	6~15km	4~10km	12~14km		7km	
適用事例	インドネシアにおいて、ガス油田開発で利用され、掘削場所やパイプラインの設置場所の選定で活用された。また、アラスカを除くアメリカ全土で観測を行いデータの販売を行っている。		平成14年以降、世界で70万km ² 以上のDEMを作成した。これらのデータは、地域の陸地管理事業への支援として、既存の地形図を更新するのに使われている。		ベネズエラにおいて26万km ² のDEMを作成している。	

表1-4 MetaSARの諸元

機関	Metasensing(オランダ)					
航空機SAR の名称	MetaSAR					
周波数帯	P	L	C	X	Ku	Ka
分解能	0.75m	0.75m	0.75m	0.3m	0.5m	0.3m
偏波	-					
DSM解像度	-					
観測幅	-					
適用事例	災害時の被災地の状況把握、オイルスピルの検出、地図作成、森林監視、都市計画への利用、農作物の状況把握等を目的に、多周波SARの開発を行い、そのシステムの販売やそのシステムを使用した観測業務を請負っている。					

イ 諸外国の技術動向

諸外国の技術動向については、表 1-5 のとおりである。

海外においても高分解能化 (F-SAR)、小型化 (NanoSAR, picoSAR) の動きがある。また、無人化 (UAVSAR) についての動きもある。

表 1-5 諸外国の技術動向

機関	DLR (ドイツ)	NASA/JPL (アメリカ)	imSAR (アメリカ)	SELEX GALILEO (イギリス)
SARの名称	F-SAR	UAVSAR	NanoSAR	picoSAR
搭載機	D0228-212	Gulfstream III Global Hawk	-	-
周波数帯	P, L, S, C, X	P, L, C, Ka	X	X
帯域幅	800MHz (X)	80MHz (L)	-	768MHz
空間分解能	0.1875m (X)	1.875m (L)	1m	0.1953m
機能	ポラリメトリ、 インターフェロ メトリ	ポラリメトリ、 インターフェロ メトリ	-	単偏波 (VV)
重量	-	-	0.9/1.6kg	10kg
備考	E-SARの後継	AIRSARの後継機	-	-

3 今回の検討対象無線システム等

(1) 利用を想定する航空機SARの要求条件 (スペック) について

総務省では、平成27年度から実施している「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 9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班」において、技術動向の調査を実施した。表 1-6 及び表 1-7 にその結果を示す。

各共用検討では、パルス方式¹¹とFM-CW方式¹²の航空機SARを対象にして実施し、それぞれの方式での検討は表 1-6 の航空機SARの諸元をベースにして実施した。ただし、実機を用いた検証では、表 1-6 の諸元に近いシステムとして表 1-7 のいずれかを用いて干渉実験を実施し、共用条件に関する検討を行った。

¹¹ 送信パルスとして、パルス内に特殊な変調を施したパルス幅の広い送信信号を用い、受信後の処理においてその復調を実施して狭いパルス幅に変換するもの。(出典：電子情報通信学会・吉田孝監修 (平成8年)「改訂 レーダ技術」11.2 パルス圧縮レーダ)

¹² 連続波 (CW) 信号に周波数変調 (FM) を施した送信信号を用いるもの。(出典：電子情報通信学会・吉田孝監修 (平成8年)「改訂 レーダ技術」11.1.2 FM-CW レーダ)

表 1 - 6 共用検討で使用した航空機SARのベース諸元

方式	パルス方式	FM-CW方式
中心周波数 (周波数帯域)	9, 500MHz (9, 200MHz~9, 800MHz)	9, 500MHz (9, 200MHz~9, 800MHz)
周波数帯域幅	600MHz	600MHz
空中線電力	8kW (尖頭電力)	10W
等価等方輻射電力	63. 5dBW	30. 0dBW
飛行速度	200m/s	100m/s
飛行高度	8, 382m	3, 048m
アンテナ利得	26dBi	20dBi
パルス幅	30μs	1ms
Duty比	10%	100%
ビーム幅 (飛行機の進行方向)	5. 0度	5. 0度
ビーム幅 (飛行機の垂直方向)	20. 0度	20. 0度

表 1 - 7 実機を用いた共用検討で使用した航空機SARの諸元

方式	パルス方式	パルス方式	パルス方式	FM-CW方式	FM-CW方式
中心周波数 (周波数帯域)	9, 450MHz (9, 200MHz~ 9, 700MHz)	9, 550MHz (9, 300MHz~ 9, 800MHz)	9, 450MHz (9, 200MHz~ 9, 700MHz)	9, 450MHz (9, 200MHz~ 9, 700MHz)	9, 600MHz (9, 450MHz~ 9, 750MHz)
周波数帯域幅	500MHz	500MHz	500MHz	500MHz	300MHz
空中線電力	3. 5kW (尖頭電力)	8kW (尖頭電力)	1kW (尖頭電力)	20W	10W
等価等方 輻射電力	65. 5dBW	63. 5dBW	47. 1dBW	43. 0dBW	30. 0dBW
飛行速度	-	200m/s	120m/s	-	100m/s
飛行高度	-	8, 382m	3, 048m	-	3, 048m

(2) 9 GHz帯既存無線システムの概要と利用形態について

航空機SARが利用を希望する周波数（9 GHz帯）は、気象レーダーや船舶航行レーダーなどをはじめ各種レーダーシステムが存在し、共用するための技術的検討が必要となる。

我が国では、これまで、航空機SARを利用する各種研究機関が、9,200MHzから9,800MHzまで（600MHz幅）の間で実証実験等を実施してきている。また、諸外国は、9,200MHzから10GHzまで（最大800MHz幅、F-SAR）、8,750MHzから10.25GHzまで（1.5GHz幅、SETHI）、7,500MHzから11.5GHzまで（最大4GHz幅、RAMSES NG）を利用している事例がある。

また、平成27年の世界無線通信会議（WRC-15）において、地球探査衛星業務（能動）の周波数分配が9,200MHzから10.4GHzまでに拡大された。当面、当該周波数帯を利用する航空機SARは存在せず、また、その計画もないため、本検討では検討対象としない。しかしながら、これまで、航空機SARと衛星SARは同一の周波数を利用することが多かったため、将来的には航空機SARにおいても利用の要望が出る可能性がある。

平成24年度から平成25年度までの技術試験事務においては、9,200MHzから9,700MHzまで（500MHz幅）を対象に共用の可能性を検討しているが、本検討においては、要望の強い9,700MHzから9,800MHzまでを含めて共用の可能性について検討を実施した。

さらに当該周波数帯は、BS／CS放送受信装置のイメージ周波数となることから混信する可能性があるため、共用検討を実施した。

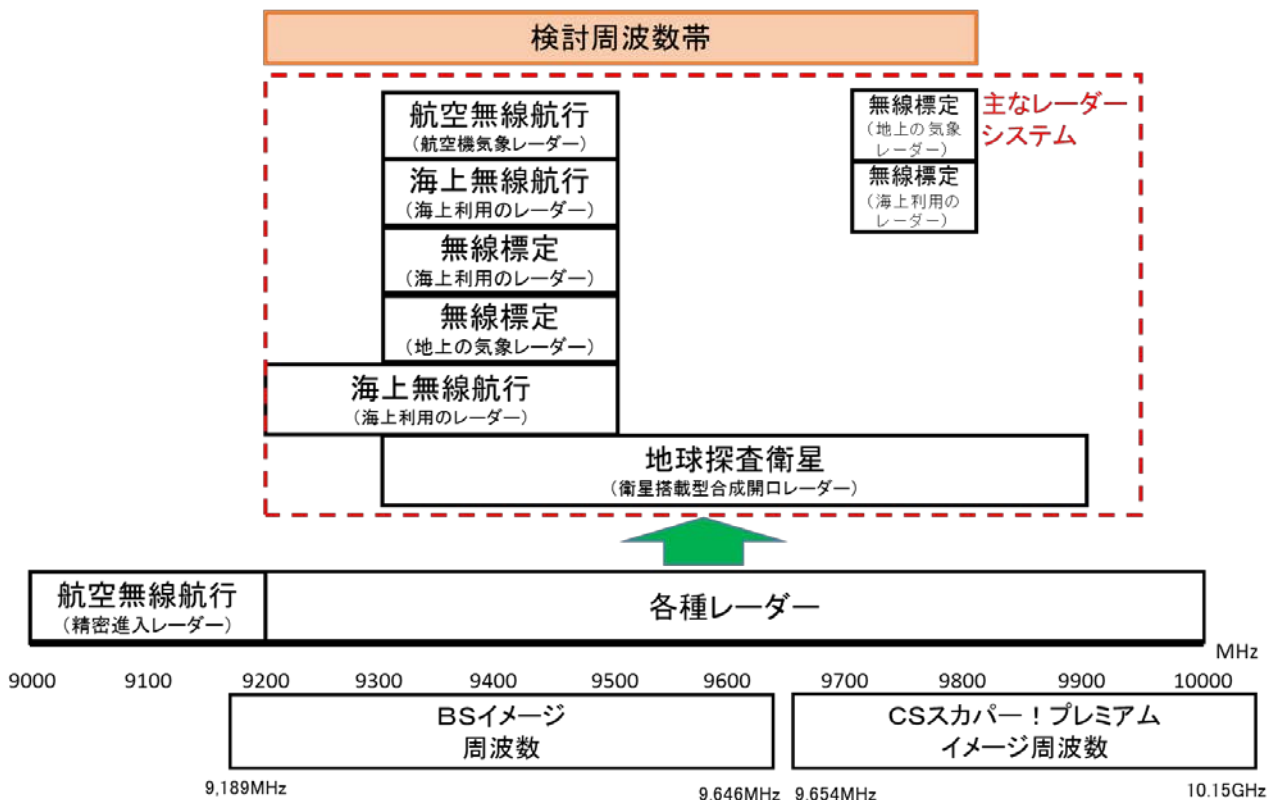


図 1-20 9 GHz 帯における周波数利用の形態

第2章 同一周波数帯を利用する他の無線システムとの共用に関する検討

1 航空機気象レーダーとの共用検討

(1) システムの概要

航空機気象レーダーは、航空機の前方向に取り付けられ、進行方向の気象現象等を観測、運行安全を確認するためのレーダーである(図2-1参照)。前提とした諸元は、表2-1のとおりである。

表2-1 航空機気象レーダー諸元

項目	諸元
周波数帯	9,300MHz
走査範囲	±90°程度
チルト角	±15°
受信感度	-120dBm
パルス幅	25μs

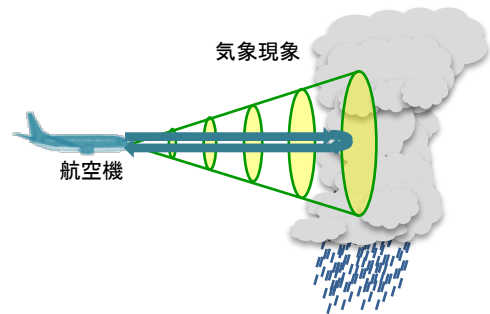


図2-1 航空機気象レーダーの概要

(2) 共用検討

周波数帯が合成開口レーダーの送信帯域内に含まれるため、干渉は避けられない。干渉状況は以下のとおりである。

- ・ 5km以内で干渉した場合、位置関係によっては、受信機が飽和し、航空機気象レーダー側の画面に大きく影響する。
- ・ 航空機SARの干渉波は、航空機気象レーダー画面に、線状の干渉波(例：500m未満のレンジ幅×1°～2°程度の方位幅)として現れる。ただし、二次元的な広がりを持つ気象現象の画像とは異なり、運用者が判別可能と考えられる。また、最悪でも画面上の占有は3%未満となるため、気象現象が埋没することはないと考える。

(3) 結論

航空機SARから航空機気象レーダーへの干渉は避けられないが、その干渉波は運航者が判別可能であり、気象現象を誤認することはないと考えられる。また、干渉波によって気象現象が埋没し見逃すことはないと考えられる。よって、航空機気象レーダーの受信機が飽和しない限り、共用することは可能である。

(4) その他

気象現象の視認性に影響を与えるノイズが乗ることから、予防的な運行安全のため、運航者に対してノータムを出すなど、航空機SARが飛行している事実を周知することが望ましい。

また、運用の条件は、航空機気象レーダーの受信機が飽和しない条件として以下の条件を満足することが必要である。

許容等価等方輻射電力：

- ・ 高度3,000m未満(近接時の高度差150m以上)：59.5dBW以下

2 海上利用のレーダーとの共用検討

(1) システムの概要

対象となるシステムは、船舶航行レーダー¹³、沿岸監視レーダー¹⁴、レーダービーコン¹⁵及びSART¹⁶である。

(2) 共用検討

共用検討の概要を表2-2に示す。

表2-2 海上利用の各レーダーシステムとの共用検討の概要

システム	船舶航行レーダー 沿岸監視レーダー	レーダービーコン SART
共用検討の方法	地上試験：評価用のレーダーと航空機 SAR をケーブルで直接接続し、干渉を確認した。 フィールド試験：実運用のレーダーに航空機 SAR からレーダー波を照射し、干渉の有無を確認した。	机上検討を行った。

(3) 結論

結論を表2-3に示す。

表2-3 海上利用の各レーダーシステムとの共用検討の結論

システム	船舶航行レーダー 沿岸監視レーダー	レーダービーコン SART
検討又は試験の結果	地上試験、フィールド試験ともに、航空機 SAR からの与干渉が確認された。しかし、通常運用モードである干渉除去機能 ON で干渉が除去されることが確認された。	これらのシステムはレーダー波を受けて応答信号を送信又は常時信号を送信する。他レーダーに対する応答信号は表示されないため、影響はない。
共用条件	共用に問題はない。	共用に問題はない。

¹³ 船舶に搭載され、海上の他船やブイ、陸地の物標を画像化し、船舶が安全に航行するために使用されるシステム。

¹⁴ 船舶航行レーダーとほぼ同じシステムを陸上に設置し、港湾や漁場の船舶動静の把握・監視等に用いられるシステム。

¹⁵ 船舶航行レーダーの電波に反応して、標識信号を送信し、船舶航行レーダー画面上にビーコン局の符号と位置を示すシステム。

¹⁶ 搜索救助用レーダートランスポンダ (Search and Rescue Radar Transponder)。船舶が遭難した場合に搜索者のレーダー波に反応し、遭難船舶の方位や位置情報を搜索者のレーダー画面上に表示させるよう、応答信号を送信するシステム。

3 衛星搭載型合成開口レーダーとの共用検討

(1) システムの概要

衛星SARは、地球を周回する人工衛星に搭載された合成開口レーダーであり、高度500km～700km程度の上空から地表面を観測する。9GHz帯を利用する民間利用の衛星SARとしては、イタリアのCosmoSkymedやドイツのTerraSAR-Xが有名である。例として、TerraSAR-Xの諸元を示す。

表2-4 衛星搭載 SAR 諸元(例:TerraSAR-X)

項目	諸元
周波数帯	9, 650MHz±150MHz
入射角範囲	15° ~60°
パルス繰返し周波数	3kHz~6.5kHz
Duty比	18%~20%
送信尖頭電力	2, 260W
衛星対地速度	約7km/s

(2) 共用検討

航空機SAR及び衛星SARとも、地表面側を観測するため、干渉する配置は、同じ領域を両センサーが同時に観測する場合であり、非常にまれであると推測する。

航空機SAR側の信号は、衛星SAR側のノイズレベルを超える(海面等の強い前方反射で干渉した場合、干渉波は衛星SAR側のノイズレベルより40dB程度高い)。ただし、合成開口時間に差があり非同期関係となるため、無相関信号となり信号処理後に干渉波は見えなくなると推測される。

(3) 結論

衛星SARへの航空機SARからの干渉は避けられないが、非常にまれであるとともに、干渉しても信号処理で低減するため、影響は軽微である。

よって、衛星SARと航空機SARの共用は可能である。

4 地上の気象レーダー(固定局)との共用検討

(1) システム概要

気象レーダー(固定局)は、降水強度の面的分布の観測が可能なレーダーで、近年、増加する集中豪雨や局所的な大雨による水害や土砂災害等に対して、適切な施設

表2-5 XRAINの主な諸元

中心周波数	9, 700MHz~9, 800MHz
受信帯域幅	4 MHz
ビーム幅	約1度
観測距離	80 km
送信機	クライストロン・ 固体化送信機
送信偏波	水平・垂直偏波
方位角回転速度	3 RPM
観測仰角数	12
観測サイクル	5分 低い二つの仰角は 1分毎に複数回観測

管理や防災活動等に役立てるため、国土交通省が全国に展開している高性能レーダ雨量計ネットワーク（以下「XRAIN(eXtended RAdar Information Network)」という。）が該当する。表2-3に気象レーダー（固定局）の例として、XRAINの主な諸元を示す。

(2) 共用検討

共用検討では、データ統合・解析システムDIAS¹⁷で運用されているXRAIN原データ検索・ダウンロードシステムから一般公開されている各レーダー局での原データと一次処理データを使用した。航空機 SAR がレーダー局上空で観測実施時の上記2種類のデータを画像化し、干渉影響の評価を実施した。表2-4に航空機SARの諸元を示す。

表2-6 共用検討を行った航空機SARの諸元

所有機関	A	B	C
方式	パルス方式	FM-CW方式	FM-CW方式
機種	ジェット機	プロペラ機	プロペラ機
飛行速度	約220m/秒	約72m/秒	約100m/秒
飛行高度	約13,000m以下	約5,000m以下	約8,000m以下
中心周波数	9,550MHz	9,400MHz	9,600MHz
周波数帯域幅	500MHz	300MHz	300MHz
空中線電力	8kW（尖頭電力）	10W	10W
偏波	HV送信 HV受信	H送信 H受信	H送信 HV受信
オフナディア角 ¹⁸	10°～65°	55°～75°	45°～65°

XRAINは気象レーダー（移動局）と異なり干渉除去機能を有しているが、信号処理の違いによる干渉除去機能に差がある可能性を考え、干渉評価は所有機関A～Cのそれぞれについて実施した。その結果、XRAINと航空機SARは周波数を共用していることから、原データへの航空機SARからの干渉波が確認された。しかし、原データを一次処理データへ変換する処理により、航空機SARからの干渉波はほぼ除去されることが確認された。また、除去できなかった干渉波は、1PPI¹⁹（20秒）の観測中の5秒程度で発生し、その影響範囲は限定的（わずかな範囲）である。このため、気象レーダーで観測・処理された一次処理データを気象モデルに入力し降水予報を行う場合には、ほとんどその影響がないと考えられる。

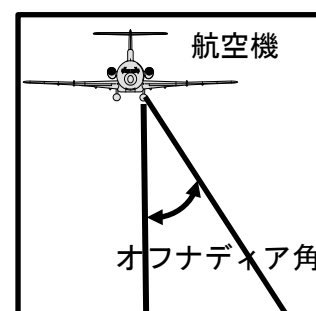


図2-2 オフナディア角

¹⁷ データ統合・解析システム DIAS : <http://www.dias.jp.net/>

¹⁸ 電波が照射される方向のアンテナ直下からの角度。図2-2参照。

¹⁹ 「Plan Position Indicator」の略。1PPIとは、気象レーダーのアンテナが1回回転することを意味する。

(3) 結論

気象レーダー（固定局）の原データで確認された干渉は一次処理データへの変換処理でほぼ除去される。今回の観測条件の範囲において両システムは共用可能と考えられる。

5 地上の気象レーダー（移動局）との共用検討

(1) システムの概要

気象レーダー（移動局）は、雲の形成過程と降水機構に関する実験的・観測的・数値的研究を行うことを目的としている。気象レーダー（移動局）は、気象レーダー（固定局）とは異なり仰角90°方向のみの雲や降水を連続的に観測し、高度方向ごと（最大測定高度：20km、高度分解能：60m）の雲や降水の強度やその動きを観測している。なお、気象レーダー（移動局）は、雲や降水からの微弱な散乱を受信する必要があるため、気象レーダー（固定局）に具備されている干渉除去機能を有していない。表2-7に気象レーダー（移動局）の諸元を示す。

(2) 共用検討

共用検討では、平成25年度に実施された「9GHz帯航空機搭載合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討」で実施された気象レーダー（移動局）

と航空機SARとの干渉実験結果をもとに、航空機SARの気象レーダー（移動局）への干渉評価を実施するとともに、共用条件について検討した。干渉実験は、パルス方式及びFM-CW方式の航空機SAR（表5-2に諸元を示す）を用いて実施された。航空機SARと気象レーダー（移動局）のメインローブは正対しないため、最悪条件下における干渉は、航空機SARのメインローブの送信波が気象レーダー（移動局）のサイドローブで受信されるときに発生する。干渉は、航空機SARの送信周期と気象レーダー（固定局）の受信タイミングが同期した時に起きるため、不連続に発生する。観測実験の結果、干渉波が許容干渉レベル（-80dBm）を超えている時間は、1分以内（パルス方式で最大56s、FM-CW方式で最大31s）であった。気象レーダー（移動局）で確認された干渉は、気象レーダー（固定局）で確認された干渉と同じメカニズムで発生し、その性質（気象レーダー画面の干渉のパターン）も同一である。なお、干渉は不連続に発生し、そ

表2-7 気象レーダー（移動局）の諸元

中心周波数	9,770MHz
受信帯域幅	6.5MHz
ビーム幅	2°（水平）/ 天頂±1°（垂直）
利得	38dBi
空中線電力	20kW
飽和レベル	-20dBm
許容干渉レベル	-80dBm以下
パルス繰返周波数	700Hz～1,200Hz
パルス幅	0.2μs～1.0μs

表2-8 航空機SARの諸元

	パルス方式	FM-CW方式
中心周波数	9,500MHz	9,500MHz
帯域幅	600MHz	600MHz
利得	20dBi	20dBi
オフナディア角	60°	60°
空中線電力	200W	10W
パルス繰返周期	2,500Hz	2,000Hz
パルス幅	40μs	-

の影響は短時間かつ限定的である。

(3) 結論

気象レーダー（移動局）で確認された干渉は、気象レーダー（固定局）と同じ信号処理（干渉除去処理）を実施することで、その影響をほぼ除去することが可能であり、航空機SARと気象レーダー（移動局）は共用可能であると考えられる。

6 精密進入レーダーとの共用検討

(1) システム概要

精密進入レーダー（以下「PAR (Precision Approach Radar)」という。）は、航空監視レーダーによって滑走路の延長線上、約10海里に誘導された航空機を滑走路の至近距離まで誘導するシステムである。PARは、滑走路の接地基準点からの航空機的位置を鉛直方向と水平方向のそれぞれで表示する。管制員はPARの画面を見ながら航空機的位置が誘導進路からどれだけ離れているのかを無線によってパイロットに連絡することで、航空機を適正な進入路に誘導する。

(2) 共用検討

共用検討では、最初に、国際電気通信連合 無線通信部門（以下「ITU-R(International Telecommunication Union Radiocommunication Sector)」という。）によって調査された衛星SAR（Xバンド）と電波航法・電波測位の共用に関する検討（PARとの共用検討も含む）の報告書（ITU-R報告M. 2081-0、平成18年）をもとに、干渉が発生する受信信号レベルと干渉の影響を調査した。その結果、与干渉は、PARの帯域における航空機SARの送信波パワー（I）とPARのノイズレベル（N）の比（I/N比）が30dB以上で発生する。干渉が発生した場合、PARの画面上には航空機と別の場所に単一又は複数のターゲット（偽像）が表示されるが、偽像のパターンは明らかに航空機のものとは異なる。このため、管制員は偽像と航空機とを識別することが可能である。

次に、国内で運用されている航空機SARが、PARに対して干渉を発生させる可能性があるかどうかを検討した。検討では、国内で運用されているパルス方式とFM-CW方式の航空機SARを対象に干渉の有無を確認するとともに、干渉が発生した際に干渉を回避する運用についても検討した。検討の結果、航空機SARで使用する帯域の下限がPARで使用する帯域の上限（9,180MHz）に近くなると、航空機SARの送信波のPARの帯域における減衰量が小さいため干渉を起こす可能性が高くなる。運用されている航空機SARでは、9,200MHz～9,800MHzの帯域を使用しているシステムが干渉を引き起こす可能性がある。このシステムに対して干渉を回避する運用を検討した結果、方位方向において航空機SARのメインビームとPARのメインビームが正対する状態（航空機SARがPARの真横にあるとき）から±1.5°以上ずらすことで干渉を回避することができる。航空機SARの干渉が問題となる場合には、正対する状態（航空機SARがPARの真横にあるとき）から±1.5°以上ずれるように航空機SARを運用することで、干渉の問題を解決することが可能である。

(3) 結論

PARの画面で表示される航空機SARの干渉波の偽像のパターンは、航空機から反射波のパターンと異なるため、識別することは可能である。また、干渉が発生した場合、PARの画面に影響を及ぼす時間は数秒から数十秒であり、その影響は限定的である。ただし、航空機の状態把握に一時的に影響を与えるリスクがあるため、干渉が発生しないようにPARの帯域内における航空機SARの送信波の出力を低減させられない場合には、管制を行う機関に対して事前に航空機SARを運用する事実を周知するか、干渉が発生しないように航空機SARの運用を調整することで、共用は可能と考えられる。

7 BS/CS受信設備との共用検討

(1) システムの概要

BS/CS放送受信装置は、BS/CSアンテナで受信した信号をコンバーターによって、受信周波数(12GHz帯)と局部発振周波数(10.678GHz)の差である中間周波数(以下「IF周波数」という。)に変換(スーパーヘテロダイン方式)する。例えば、BS15チャンネル(中心周波数:11.996GHz、11.97875GHz~12.01325GHz)の場合、IF周波数に変換後の中心周波数は1.318GHz(=11.996GHz-10.678GHz)となる。一方、BS/CSアンテナで受信された航空機SARの電波も、コンバーターによってIF周波数に変換される。例えば、送信周波数が9.36GHzの航空機SARの電波は、原理上、BS/CS放送受信装置のコンバーターによって中心周波数が-1.318GHz(=9.36GHz-10.678GHz)のIF周波数に変換されるが、そのイメージ周波数として正負が反転した+1.318GHzが発生する。このため、航空機SARの送信周波数とBS/CS放送の受信周波数は2GHz近く離れているにもかかわらず、混信を起こす可能性がある。ただし、BS/CS放送受信装置では、イメージ妨害抑圧フィルタ(イメージ混信を避けるためのフィルタ)によって、所望の放送波以外の電波の強度を低減させている。

(2) 共用検討

本検討では、イメージ混信が発生し映像破綻が発生するBS/CS受信波電力と航空機SARの干渉波電力との比(以下「映像破綻C/I比」という。)を明らかにするとともに、現在、運用されている航空機SARを用いた干渉実験を実施することで、イメージ混信による映像破綻の有無を調査した。

室内実験では、レーダー信号発生器で発生させた航空機SARの送信信号をIF周波数で混合させることで映像破綻C/I比(航空機SARの送信波電力と放送受信の遮断の関係)及びエラーフリーとなるBS/CS受信波電力と航空機SARの干渉波電力の比(以下「エラーフリーC/I比」という。)を明らかにした。

一方、室外実験では、実験局として運用されている航空機SARを用いて、航空機SARのアンテナとBS/CS放送受信装置のアンテナが対向する条件でのBS/CS放送受信装置への干渉波の影響をRF周波数で調査した。BS/CS放送受信装置は、IF周波数において室内実験で求めた受信映像の破綻レベルをBS/CS受信アンテナ放射パターン(ITU-R勧告B0.1213)とイメージ妨害抑圧比(55dB)を仮定してR

F周波数に変換した値について、これを超える航空機SARの送信波を受信したが、映像破綻は確認されなかった。

これは、BS／CS放送受信装置のアンテナと航空機SARの送信波との周波数の差等により、航空機SARからの受信レベルの計算に誤差を含んでいるためと考えられる。実験に用いたBS／CSアンテナの9GHz帯におけるアンテナ利得・放射パターンはITU-R勧告B0.1213を適用する仮定を行ったが、実際のBS／CSアンテナは12GHz帯用に製作されるため、特に給電ホーンは9GHz帯用とは異なり、ITU-R勧告B0.1213をそのまま適用することができないと思われる。また、LNBとフィルタのイメージ妨害抑圧比の55dBは、ARIB規格B63に基づき仮定したが、同じく誤差が含まれる可能性がある。

(3) 結論

室外実験の結果においては、BS／CS放送受信装置は航空機SARからの干渉波による映像破綻はなく、今回の実験条件の範囲内において、両システムの共用は可能である。しかしながら、航空機SARの運用にあたり、BS／CS放送受信装置において航空機SARからの干渉の影響が確認された場合には、運用見直し等の干渉回避に関して協議するものとする。

第3章 9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーに関する技術的条件

第2章の共用検討を踏まえ、9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーに関する技術的条件を以下のとおりとりまとめた。

1 一般的条件

(1) 周波数帯

使用する周波数帯は9,200MHzから9,800MHzまでとする。

2 送信装置

(1) 変調方式

パルス変調又は角度変調（FM-CW変調（周波数変調））とする。

(2) 周波数の許容偏差

指定周波数帯によるため規定しない。

(3) 占有周波数帯幅の許容値

指定周波数帯によるため規定しない。

(4) 指定周波数帯幅

最大600MHz（9,200MHzから9,800MHzまで）とする。

(5) 空中線電力

等価等方輻射電力によるため規定しない。

(6) 等価等方輻射電力

パルス変調の場合63.5dBW以下、角度変調（FM-CW変調（周波数変調））の場合30.0dBW以下とする。

(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20%、下限50%とする。

(8) スプリアス発射又は不要発射の強度の許容値

スプリアス発射又は不要発射の強度は、以下のとおりとする。なお、参照周波数帯幅及び帯域外領域とスプリアス領域の境界の周波数は、ITU-R勧告SM.1541 Annex 8の条件に適合すること。

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
50W超	基本周波数の平均電力より40dB低い値	基本周波数の尖頭電力より60dB低い値
50W以下		50μW以下

3 測定法

(1) 周波数の偏差及び占有周波数帯幅

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。

占有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0.5%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、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スプリアス発射の強度

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。

第4章 今後の検討課題

第2章の「1 航空機気象レーダーとの共用検討」においては、「気象現象の視認性に影響を与えるノイズが乗ることから、予防的な運行安全のため、運航者に対してノータムを出すなど、航空機SARが飛行している事実を周知することが望ましい。」とあり、共用にはほとんど影響ないと考えられるが、航空機SARを運行する際には、ノータムを出してもらうことが望ましい。

また運用の条件として、航空機気象レーダーの受信機が飽和しない条件として以下の条件を満足することが望ましい。

許容等価等方輻射電力：

- ・ 高度3,000m未満(近接時の高度差150m以上)：59.5dBW以下

第2章の「6 精密進入レーダーとの共用検討」においては、「干渉が発生しないようにPARの帯域内における航空機SARの送信波の出力を低減させられない場合には、管制を行う機関に対して事前に航空機SARを運用する事実を周知するか、干渉が発生しないように航空機SARの運用を調整する」との条件があり、共用にはほとんど影響ないと考えられるが、航空機SARの送信波の出力を低減させられない場合には、事実の周知又は調整が必要である。

また、第2章の「7 BS/CS受信設備との共用検討」においては、「航空機SARの運用にあたり、BS/CS放送受信装置において航空機SARからの干渉の影響が確認された場合には、運用見直し等の干渉回避に関して協議するものとする。」とあり、航空機SARが飛行している事実を周知するとともに、航空機SARが原因でBS/CS放送受信装置に干渉を与えた場合には運用条件を見直すなど干渉回避に関して協議を行うものとする。

今後、技術の進展により、今回の検討の諸元を超えるものが想定される。この場合は、個別に共用検討を実施し無線局免許を行うか、必要に応じ技術的条件を見直す等を行うことが望ましい。

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「9GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的条件」について、別添のとおり答申（案）をとりまとめた。

別表 1 航空・海上無線通信委員会 構成員

(敬称略)

氏 名		所 属
主 査 専門委員	三木 哲也	電気通信大学 企画調査室 特任教授
主査代理 専門委員	矢野 博之	独立行政法人 情報通信研究機構 ワイヤレスネットワ ーク研究所所長 (第 16 回まで)
〃	門脇 直人	独立行政法人 情報通信研究機構 執行役/ワイヤレス ネットワーク総合研究センター長/オープンイノベーシ ョン推進本部長 (第 17 回のみ)
〃	浜口 清	国立研究開発法人情報通信研究機構 ワイヤレスネットワ ーク総合研究センター総合研究センター長 (第 18 回から)
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	井手 麻奈美	株式会社 MOL マリン 海洋技術事業部 研究員
〃	伊藤 功	株式会社モコス・ジャパン 取締役
〃	今宮 清美	株式会社東芝 社会システム社 小向工場 電波応用技術 部 技術第二担当主務
〃	内田 美佳	全日本空輸株式会社 業務プロセス改革室 企画推進部 情報セキュリティ・基盤戦略チーム 主席部員 (第 15 回 から第 17 回まで)
〃	ト部 美緒	全日本空輸株式会社 業務プロセス改革室 開発推進部 旅客チーム主席部員 (第 14 回まで)
〃	大木 一夫	一般社団法人 情報通信ネットワーク産業協会 専務理事 (第 14 回まで)
〃	小瀬木 滋	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法 研究所研究統括監
〃	片山 泰祥	一般社団法人情報通信ネットワーク産業協会 専務理事 (第 15 回から)
〃	加藤 真子	全日本空輸株式会社 業務プロセス改革室 イノベーショ ン推進部 サービスイノベーションチーム主席部員 (第 18 回から)
〃	鹿庭 義久	海上保安庁 総務部 情報通信課長 (第 15 回、第 16 回)
〃	工藤 正博	国土交通省 航空局 交通管制部 管制技術課長 (第 16 回まで)

〃	小山 英之	日本航空株式会社 IT企画本部 IT運営企画部 部長（第17回から）
〃	佐々木 伸	一般社団法人 全国漁業無線協会 業務部長（第16回まで）
〃	荘司 敏博	日本航空株式会社 IT企画本部 IT運営企画部 部長（第16回まで）
〃	庄司 るり	東京海洋大学大学院 海洋工学系 教授
〃	杉崎 明弘	一般社団法人全国漁業無線協会 業務部長（第17回から）
〃	勢良 俊也	海上保安庁 総務部 情報通信課長（第14回まで）
〃	田北 順二	一般社団法人全国船舶無線協会 水洋会部会 事務局長
〃	林 尚吾	東京海洋大学 名誉教授
〃	本多 美雄	欧州ビジネス協会 電気通信機器委員会 委員長
〃	増田 紀子	スカパーJSAT株式会社 技術運用本部 衛星運用部長
〃	松井 淳	国土交通省 航空局 交通管制部 管制技術課長（第17回から）
〃	森 征人	海上保安庁 総務部 情報通信課長（第17回から）
〃	若尾 正義	元 一般社団法人電波産業会 専務理事

別表2 9GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステム作業班 構成員

氏名	所属
【主任】 若尾 正義	元 一般社団法人電波産業会 専務理事
【主任代理】 福地 一	首都大学東京 名誉教授
秋葉 雅章	国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画室 課長補佐（第5回から）
安澤 徹	防衛省 運用企画局 情報通信・研究課 防衛部員（第2回まで）
今宮 清美	東芝インフラシステムズ株式会社小向事業所 センサシステム技術部 システム第一担当
大塚 力	国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室 室長補佐（第1回のみ）
小竹 信幸	一般財団法人 テレコムエンジニアリングセンター技術部 部長
鬼山 昭男	株式会社パスコ 衛星事業部 顧問
菊田 友弥	国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画室 課長補佐（第2回から第4回まで）
児島 正一郎	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 リモートセンシング研究室 研究マネージャー
清水 弘樹	海上保安庁 装備技術部 航空機課 専門官（第5回から）
正源 和義	株式会社放送衛星システム 総合企画室 専任部長（第2回から）
須藤 昇	東海大学 情報教育センター 情報技術センター 准教授
田北 順二	一般社団法人 全国船舶無線協会 水洋会部会 事務局長
田尻 拓也	気象庁 気象研究所 予報研究部 第四研究室 主任研究官
谷岡 日斗志	海上保安庁 装備技術部 航空機課 専門官（第4回まで）
富澤 洋介	国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 河川情報企画室 課長補佐（第1回のみ）

能美 仁	アルウェットテクノロジー株式会社 代表取締役
野口 真弓	国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室 室長補佐(第5回から)
原 芳久	三菱電機株式会社 執行役員 鎌倉製作所 所長
藤沼 広一	防衛省 運用企画局 情報通信・研究課 防衛部員(第3回、第4回)
藤村 卓史	日本電気株式会社 電波・誘導事業部 レーダシステム部 シニアエキスパート(第5回から)
増田 紀子	スカパーJSAT 株式会社 衛星技術本部長代行 兼 衛星運用部長
松田 圭太	防衛省 運用企画局 情報通信・研究課 防衛部員(第5回から)
村田 稔	日本電気株式会社 電波・誘導事業部 主席技師長(第4回まで)
山田 美隆	国土地理院 基本図情報部 地図情報技術開発室 室長補佐(第2回から第4回まで)
米本 成人	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

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

「9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的条件」(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「9 GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件」に対する答申（案）

航空無線通信の技術的諸問題のうち、9 GHz帯航空機搭載型合成開口レーダーシステムの技術的條件については、以下のとおりとすることが適当である。

1 一般的条件

（1）周波数帯

使用する周波数帯は9,200MHzから9,800MHzまでとする。

2 送信装置

（1）変調方式

パルス変調又は角度変調（FM-CW変調（周波数変調））とする。

（2）周波数の許容偏差

指定周波数帯によるため規定しない。

（3）占有周波数帯幅の許容値

指定周波数帯によるため規定しない。

（4）指定周波数帯幅

最大600MHz（9,200MHzから9,800MHzまで）とする。

（5）空中線電力

等価等方輻射電力によるため規定しない。

（6）等価等方輻射電力

パルス変調の場合63.5dBW以下、角度変調（FM-CW変調（周波数変調））の場合30.0dBW以下とする。

（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20%、下限50%とする。

（8）スプリアス発射又は不要発射の強度の許容値

スプリアス発射又は不要発射の強度は、以下のとおりとする。なお、参照周波数帯幅及び帯域外領域とスプリアス領域の境界の周波数は、ITU-R勧告SM.1541 Annex 8の条件に適合すること。

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
50Wを超えるもの	基本周波数の平均電力より40dB低い値	基本周波数の尖頭電力より60dB低い値
50W以下		50μW以下

3 測定法

(1) 周波数の偏差及び占有周波数帯幅

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。

占有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0.5%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、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スプリアス発射の強度

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。

参考資料

参考資料 1 航空機気象レーダーとの共用検討（詳細）

参考資料 2 海上利用のレーダーとの共用検討（詳細）

参考資料 3 地上の気象レーダーとの共用検討（詳細）

参考資料 4 精密進入レーダーとの共用検討（詳細）

参考資料 5 BS／CS受信設備との共用検討（詳細）

参考資料 1 航空機気象レーダーとの共用検討（詳細）

1 はじめに

本検討では、航空機気象レーダーに与える航空機 SAR の影響及び共用条件について検討するものである。

2 経緯

平成 24 年度及び平成 25 年度に実施された技術試験事務「9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーの周波数有効利用に関する調査検討」の検討結果を整理した。

実験、机上検討等から、航空機 SAR から航空機気象レーダーへの干渉は避けられないという内容であることから、実際の航空機気象レーダーで干渉が問題となるかについて追加検討を実施し、共用条件を探ることとなった。

本追加検討では、実際の搭載レーダーの調査や、航空機気象レーダー上での航空機 SAR の干渉の振舞い等について実運用への影響確認等を航空運送事業者の協力のもと、調査を実施した。

3 航空機気象レーダーとの共用条件についての中間報告までのまとめ

(1) 平成 24 年度「9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーの周波数有効利用に関する調査検討」の検討概要

調査した航空機 SAR 諸元、航空機気象レーダー諸元に基づき、机上の干渉解析を実施した。表参考 1-1 に検討概要を示す。

表参考 1-1 平成 24 年度 航空機気象レーダー共用検討結果

与干渉解析		検討結果
1	遭遇可能性の評価	<p>■ <u>遭遇の可能性あり</u></p> <p>(いずれも移動しており、SAR の高オフナディア角観測時に正対する可能性あり)</p>
2	会合確率の評価	—
	会合確率 (水平面) (合成開口時間 (SAR) × 掃引速度 (気) × 回転方向ビーム幅 (気) / 掃引範囲 (気) ²)	$3.9 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-1}$ (サイドローブを考慮せず) ※ <u>メインローブのみでは会合率は低いものと予想</u>
	インバンド確率 (帯域幅 (気) / 帯域幅 (SAR))	1.7×10^{-2}
3	干渉電力の評価	<p>■ <u>飽和する</u></p> <p>GII 級、プロペラ機級とも、パルス方式では破壊レベル以下であるが、飽和レベルを超える。当然画面へ影響する。FM-CW 方式は飽和レベル以下であるが、画面への影響が予想される。(600m 程度の高度差で航空機 SAR が上方となる場合を想定)</p>
4	総合評価	<p>■ <u>影響あり</u></p> <p>ただし、飽和レベルを超える可能性があるが、会合した瞬間のみの影響であり、その後は自動復帰するため、影響は限定的と推測される。航空機 SAR から既存レーダーへのサイド/バックローブへの影響は平成 25 年度に確認する。</p>
被干渉解析		検討結果
5	遭遇可能性の評価	<p>■ <u>遭遇の可能性あり</u></p>
6	会合確率の評価	<p>□ <u>実運用上問題なし</u></p>

(2) 平成 25 年度「9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーの周波数有効利用に関する調査検討」の検討概要

機関 A の航空機 SAR を用いたフライト試験による評価を実施した。概ね、前年度の予想どおりであった。会合確率については、サイドローブの影響により比較的高い割合となった。表参考 1-2 に検討概要を示す。

表参考 1-2 平成 25 年度 航空機気象レーダー共用検討結果

与干渉試験		試験結果
1	FM-CW モードで航空機気象レーダーとの干渉試験を実施 - 水平距離 : 3.4km - 航空機 SAR 高度 : 1,200m - 航空機気象レーダー高度 : 600m - 航空機 SAR 出力 : 20W	<p>■ 干渉を確認し、振舞いも推測と一致</p> <p>航空機気象レーダーの試験結果では、全ての条件において約 56 秒間における航空機 SAR の干渉が確認できた。</p> <p>航空機 SAR の干渉による偽像は、航空機気象レーダー画面上、航空機 SAR が存在する方向のスラントレンジ上にランダム様に確認された (SAR 側の PRF がより高く、かつ非同期であるため)。</p>
2	・ 総合評価	<p>■ 干渉する。ただし、判別可能</p> <p>FM-CW / パルス共に干渉を確認できた。干渉による偽像の振舞いは、気象クラッタと異なるため運用者で容易に判別可能と推測される。</p>
被干渉試験		検討結果
3	・ 再生前後のデータで干渉を評価	<p>□ 干渉を確認したが軽微</p> <p>・ FM-CW では再生前後のデータで干渉を確認できず。</p> <p>・ パルスでは再生前のデータでのみ干渉を確認できた。</p>
4	・ 総合評価	□ 問題なし (平成 24 年度の結論と同じ)

4 調査結果：航空機気象レーダーの例（航空運送事業者へのヒアリング結果）

(1) 航空機気象レーダーの諸元例

航空運送事業者にて使用しているレーダーシステムは以下のとおり。Web に公開されている情報等から情報収集を行った結果を以下に示す。なお、機種Eも使用しているとのことであったが、旧式のためか、まとまった情報がなかったため調査の対象外とした。表参考1-3に概要を示す。

表参考1-3 航空機気象レーダー諸元

機種	A	B、C	D
所有機関	A	B	B
中心周波数	9,330MHz	9,345MHz	9,375 ± 25MHz
走査範囲(Scan)	±90° (想定)	±90°	±60°
走査範囲(Tilt)	±15°	±15°	±15°
レンジ	320NM	320NM	300NM
受信感度	-124dBm (NF:3.8dB, Bw:32MHz)	不明	-118dBm
空中線電力	150W. nom	125W. nom	10kW . nom
Gain	34.5dB. nom	33dB (A) ~ 35dB (B)	26.5dB (10") ~ 28dB (12")
パルス幅	1μs ~ 25μs	1.5μs, 6μs, 18μs	1μs, 2μs
PRF	100Hz ~ 1,000Hz (想定)	100Hz ~ 1,000Hz (想定)	100Hz ~ 1,000Hz (想定)
Beam width	10°	10°	10° ~ 7.9°
干渉波対応の機能等	Alien radar rejection algorithm	特になし	不明

(2) その他

- パイロットの判断によるが、気象レーダーは、ランウェイで ON にする。つまり、常時 ON での運用が基本である。
- 最新型の気象レーダーは、他のレーダーからの干渉波を除去することが可能であるが、搭載しているのは一部の機体である（地上クラッタも除去可能）。
- 旧式のレーダー（B）は、気象・地上・干渉波問わずクラッタをそのまま表示しており、信号処理による自動検出、抑圧等を行われていない（航空機 SAR などの、他のレーダーが干渉した場合は、そのまま表示される）。
- 気象レーダー（A）画面上の気象クラッタ表示は、以下のとおりである。
 - > 40dBZ : RED
 - 40dBZ~30dBZ : YELLOW
 - 30dBZ~20dBZ : GREEN
 - < 20dBZ : BLACK

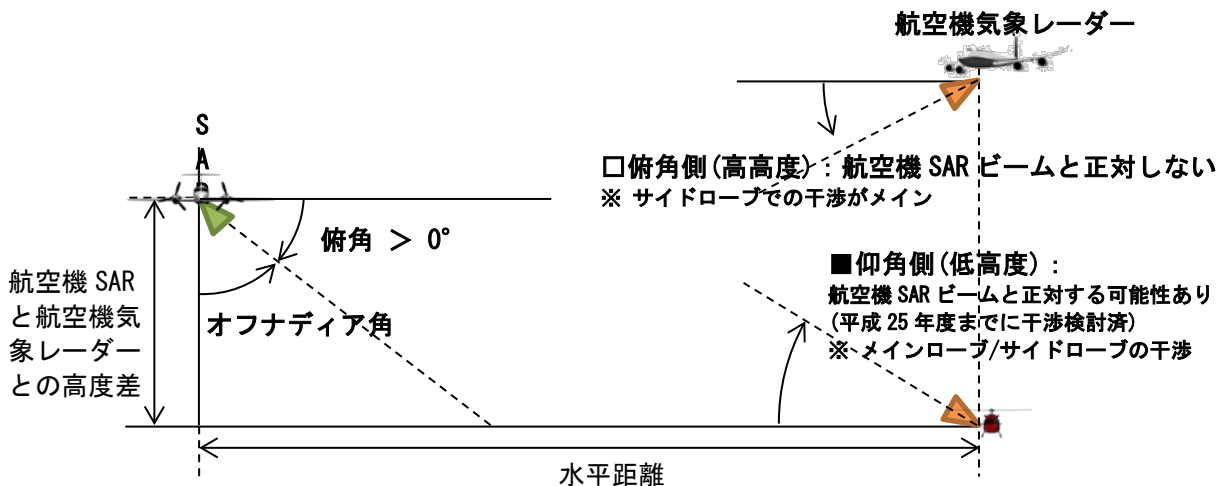
5 影響解析

(1) 影響解析ケース 1：航空機気象レーダーの航空機 SAR 干渉範囲の評価

航空機気象レーダーの S/N が 0dB となる場合の航空機 SAR の位置範囲について解析する。

ア 解析条件

- 航空機 SAR は、必ず地表面側にビームを向けて観測する。一方で、航空機気象レーダーは、仰俯角にチルトし、方位方向に走査する(図参考 1-1 参照)。
- 航空機 SAR のビームと、航空機気象レーダーのビームが正対する可能性があるのは、航空機 SAR より気象レーダーが下にあり、気象レーダーが仰角側に向けている場合である。
- 気象レーダーが高高度を飛行する場合は、気象レーダーのメインビーム内に航空機 SAR が入るような場合は干渉するものの、その干渉レベルは、正対する場合に比べ緩和される。



図参考 1-1 航空機 SAR 及び航空機気象レーダービーム走査方向の概念図

イ 航空機気象レーダー及び航空機 SAR の諸元

ヒアリングした機材の諸元情報から、航空機気象レーダーの諸元を表参考 1-4 のように再設定した。受信帯域は情報がなかったが、S/N を稼ぐために航空機気象レーダー側で必要最小限に受信帯域を制限していると考え、信号の帯域幅としてパルス幅の逆数×1.2 倍とし、受信フィルタの広がりとして 1.5 倍を仮定し、最大 1.8MHz とした。

表参考 1-4 航空機気象レーダー及び航空機 SAR の諸元設定

項目	航空機気象レーダー諸元	航空機 SAR 諸元	備考
中心周波数	9,300MHz～ 9,400MHz (受信帯域幅:1.8MHz とする)	- (左記帯域を含む 500MHz)	
走査範囲 (Scan)	±90°	0°	
走査範囲 (Tilt)	±15° (考慮せず)	-10° ~ -65° (オフナディア角 80° ~ 25°)	
レンジ	320NM	- (与干渉解析のため不要)	
受信感度	-120dBm	- (与干渉解析のため不要)	
空中線電力	150W	3,500W	
指向性利得	35dBi	30dBi (等価等方輻射電力 で: 65.5dBW)	
パルス幅	25μs	Rf Duty: 10%~100%	10%はパルス方式、100%はFM-CW方式を仮定。解析は最悪の100%を想定する
ビーム幅	10°	5° (アジマス) 20° (エレベーション)	

ウ 航空機気象レーダーへの干渉量計算

航空機気象レーダーへの干渉量は以下の式による。

$$P_{RxW} [dBm] = 10 \log_{10} P_{TxS} + 30 + G_{TxS0} + g_{TxSEL}(\theta_S) + g_{TxSAz}(\phi_S) + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) + G_{RxW0} + 10 \log_{10}(Duty)$$

$$g_{TxSEL}(\theta_S) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sin(\theta_S/1.2\theta_{BSAREL})}{\theta_S/1.2\theta_{BSAREL}} \right)$$

$$g_{TxSAz}(\phi_S) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sin(\phi_S/1.2\theta_{BSARAZ})}{\phi_S/1.2\theta_{BSARAZ}} \right)$$

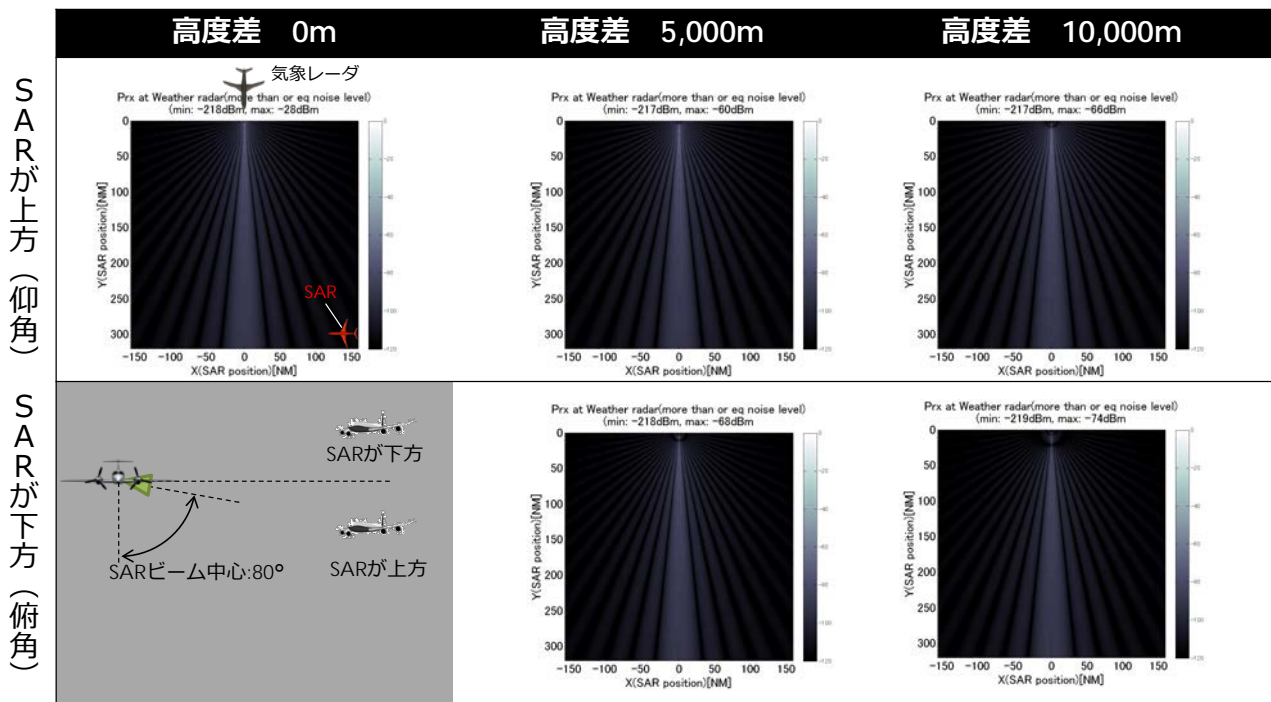
表参考 1-5 記号の定義

記号	定義
λ	波長[m]
R	スラントレンジ[m]
P_{TxS}	航空機 SAR 側送信尖頭電力[W]
G_{TxS0}	航空機 SAR 側送信指向性利得[dBi]
g_{TxSEL}	航空機 SAR 側送信アンテナパターン損失(EL) (dB) : El 角 θ_S [rad]
g_{TxSAZ}	航空機 SAR 側送信アンテナパターン損失(Az) (dB) : Az 角 ϕ_S [rad]
θ_{BSAREL}	航空機 SAR アンテナビーム幅(3dB 幅) (EL) [rad]
θ_{BSARAZ}	航空機 SAR アンテナビーム幅(3dB 幅) (Az) [rad]
Duty	航空機 SAR 側の RF Duty サイクル
G_{RxW0}	気象レーダー側受信指向性利得[dBi]
-	気象レーダー側のアンテナパターン損失は 0dB (無)

エ 解析結果

(ア) 航空機 SAR の観測オフナディア角 : 80°

正面方向で強い影響を受けるが、航空機気象レーダー側のサイドローブ方向でも感度があることが確認できた。



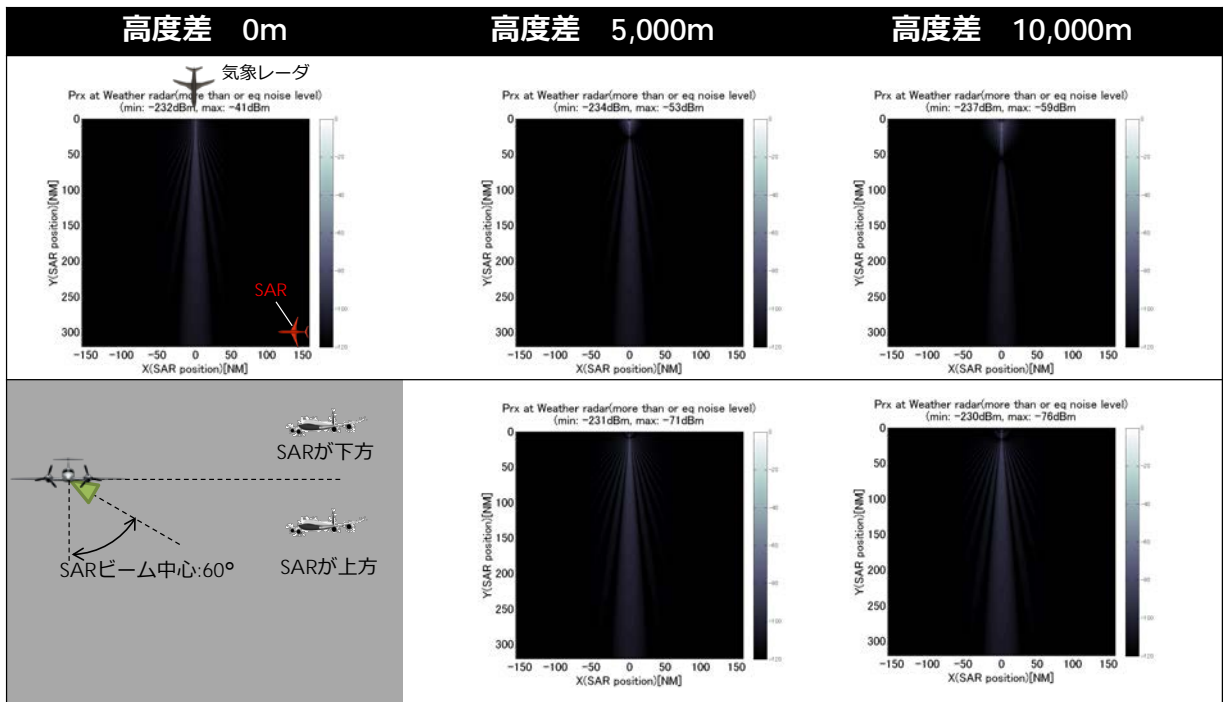
図参考 1-2 航空機気象レーダーの S/N が 0dB となる場合の航空機 SAR の位置 (観測オフナディア角 : 80°)

(イ) 航空機 SAR の観測オフナディア角 : 60°

80° と同様の傾向であるが、航空機気象レーダー側のサイドローブ側の感度は低下している。

SARが上方
(仰角)

SARが下方
(俯角)

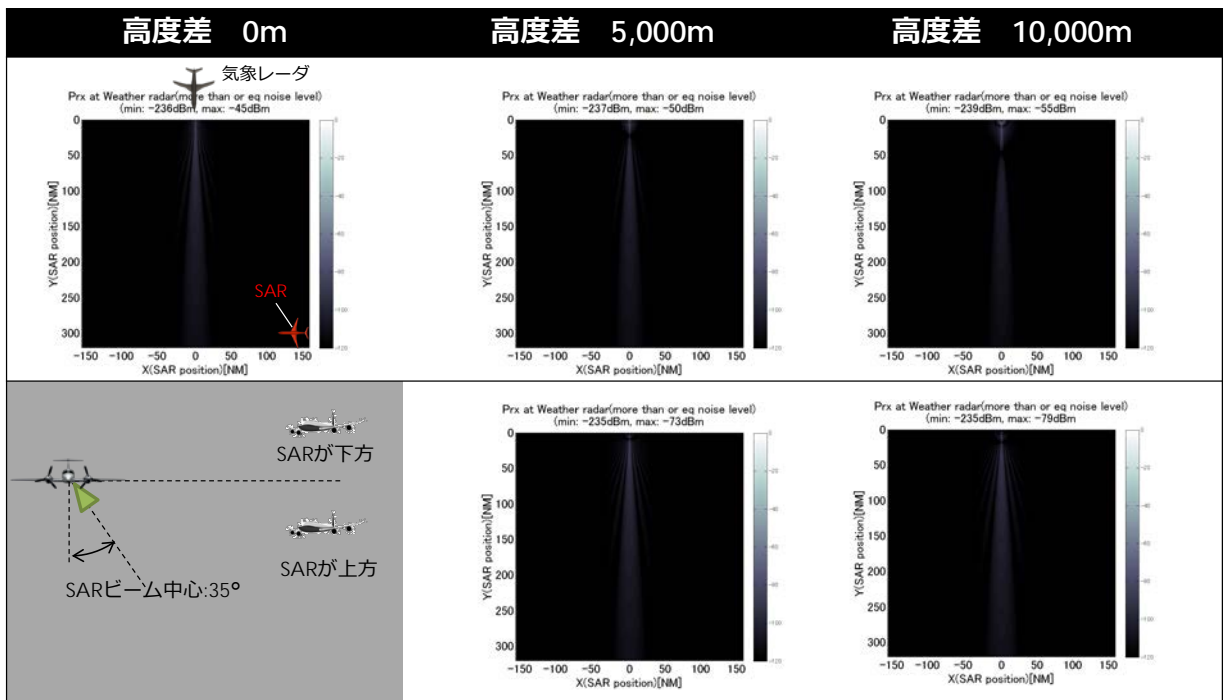


図参考 1-3 航空機気象レーダーの S/N が 0dB となる場合の航空機 SAR の位置 (観測オフナディア角 : 60°)

(ウ) 航空機 SAR の観測オフナディア角 : 35°
60° と同様の傾向で、さらに低下する。

SARが上方
(仰角)

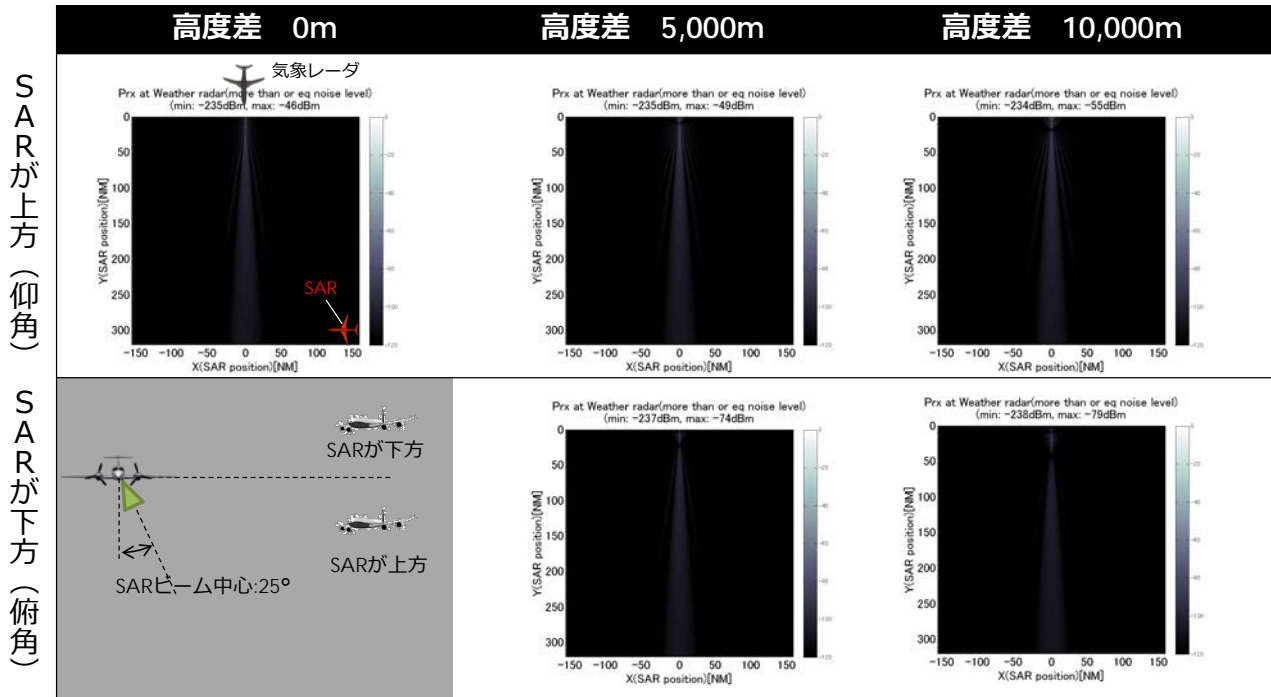
SARが下方
(俯角)



図参考 1-4 航空機気象レーダーの S/N が 0dB となる場合の航空機 SAR の位置 (観測オフナディア角 : 35°)

(エ) 航空機 SAR の観測オフナディア角 : 25°

航空機 SAR 側のメインローブから大きく外れるが、航空機気象レーダーの正面近傍ではやはり干渉する。



図参考 1-5 航空機気象レーダーの S/N が 0dB となる場合の航空機 SAR の位置 (観測オフナディア角 : 25°)

オ まとめ

- 航空機 SAR 側のメインビームが水平に近くなるほど、つまり観測オフナディア角が 80° の時が最悪条件となる。これは、航空機 SAR のメインビームが航空機気象レーダーに正対に近い状態になるためである。
- 従来の報告どおり、航空機気象レーダーのレンジ内のどこに航空機 SAR があっても、正対するような方向に入る場合は、航空機気象レーダーに干渉する可能性があることを確認した。

(2) 影響解析ケース2：気象クラッタとの比較

航空機 SAR 干渉信号を航空機気象レーダーが検出する気象クラッタレベルに換算し、評価する。

ア 解析条件

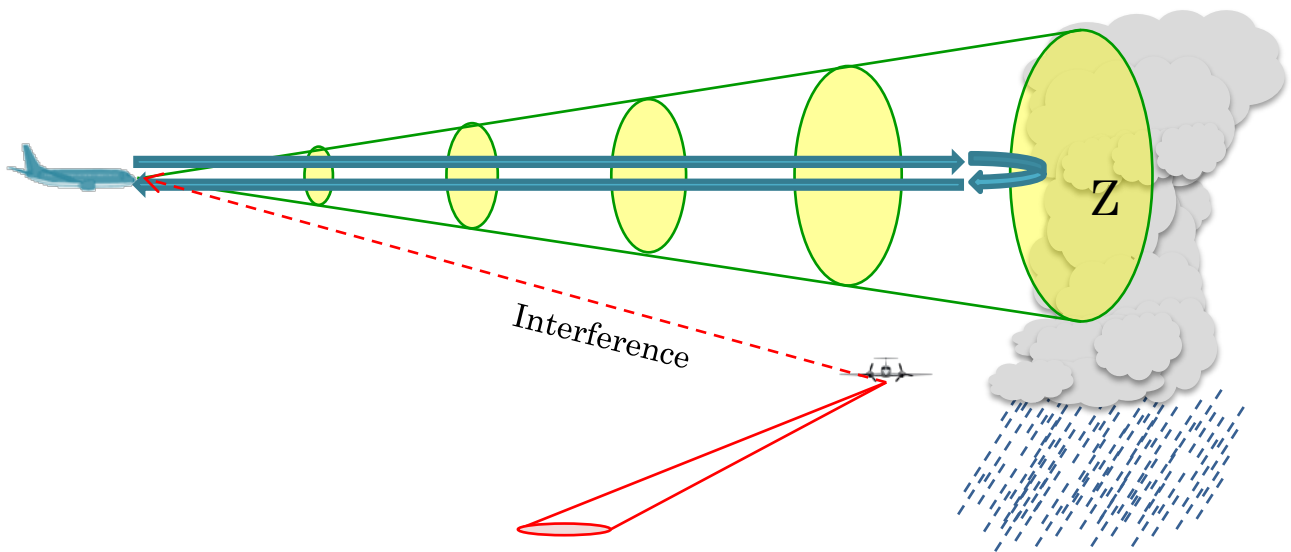
- 航空機気象レーダー及び航空機 SAR の諸元は、解析ケース 1 と同様とする(図参考 1-1)。航空機 SAR 観測オフナディア角は 80°、60°、35°、25°、高度差は 0m とする。
- ある干渉レベルより大きな信号を受信するための気象クラッタレベル(ボリュームクラッタ)を算出する。

$$Z[dBZ] = P_{SARInterfere} + 10 \log_{10} \left(\frac{512 \times 2 \ln 2 \times \lambda^2 R^2}{P_{TxW} \theta_{BWREL} \theta_{BWRaz} c \tau_W \pi^3 |K|^2} \right) - G_{TxW0} - G_{RxW0} + 180$$

* M. Skolnik: Radar Handbook 2nd Edition, eqn (23.13)

表参考 1-6 記号の定義

記号	定義
P_{TxW}	気象レーダー側送信尖頭電力[W]
G_{TxW0}	気象レーダー側送信指向性利得[dBi]
θ_{BWREL}	気象レーダーアンテナビーム幅(3dB幅)(EL)[rad]
θ_{BWRaz}	気象レーダービーム幅(3dB幅)(Az)[rad]
τ_W	気象レーダー側の送信パルス幅[s]
$ K ^2$	減衰量: 0.2 (ice phase) と置く
$P_{SARInterfere}$	気象レーダーの受信機端での SAR 干渉レベル[dBm]

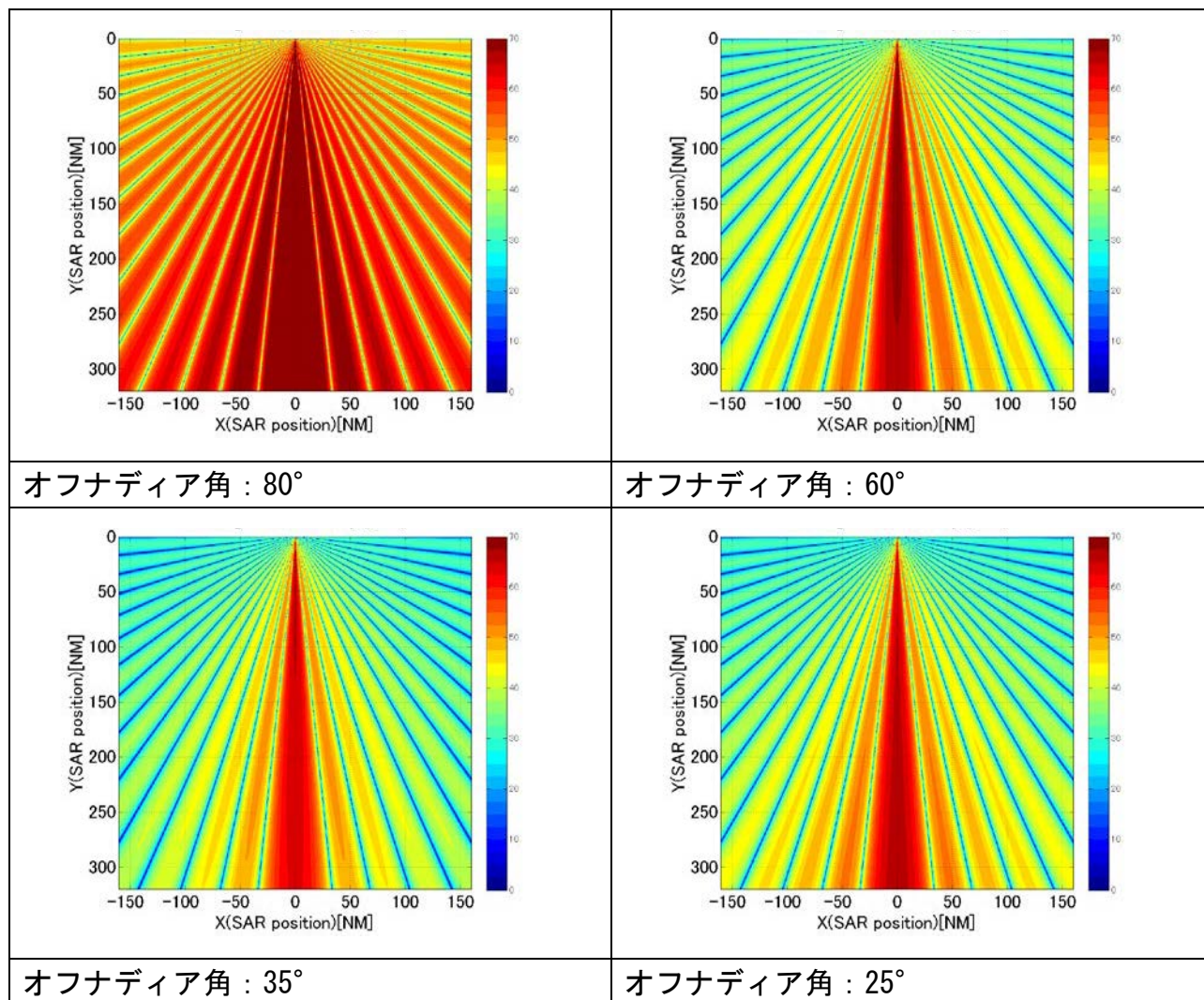


図参考 1-2 気象クラッタと航空機 SAR 干渉の関係

イ 解析結果

航空機 SAR の航空機気象レーダーへの干渉レベルを、気象クラッタの Reflectivity (反射係数) に換算した場合を以下に示す。

図参考 1-6 に示すように、オフナディア角が 80° で航空機 SAR が観測する場合、気象現象に比べ、非常に強い信号を返す可能性が高い。観測オフナディア角が小さいほど、信号は小さく、気象現象への反射への影響は小さくなり、航空機気象レーダーと航空機 SAR のビームが (平面内で) 正対する方向に限定されていく。



注：上図のカラーマップは、気象の脅威度に従った表記ではない。

図参考 1-6 航空機 SAR の干渉信号の気象クラッタ反射係数換算結果

ウ まとめ

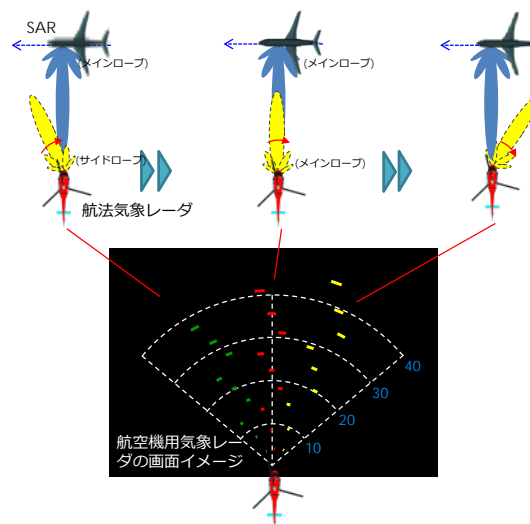
- 想定する航空機 SAR システムの場合は、気象クラッタより大きな干渉信号 (40dBZ 以上) で干渉する可能性がある。
- 補足：旧式の航空機気象レーダーの場合、気象クラッタは信号処理などを経ずにそのまま表示されるため、干渉波により、気象現象以外の像を発生することは避けられない。一方、最新の航空機気象レーダー (機種 A 等) には、航空機搭載ク

ラスの航空機気象レーダーの干渉波を取り除く機能は有しているものの、大電力の軍用レーダーには効果がないとされている。軍用レーダーに比べ、航空機 SAR システムの電力は小さく、除去機能が対応している可能性があるが、航空機気象レーダー同士の干渉波同様に除去可能かは不明である。

(3) 影響解析ケース 3：航空機 SAR 干渉波の現れ方

ア 航空機気象レーダーへの航空機 SAR 干渉の概念

- 航空機 SAR の干渉は、航空機気象レーダー・航空機 SAR それぞれのアンテナビームの合成パターンで生じるため、サイドローブの影響も受ける。そのため、航空機 SAR のメインローブ内に気象レーダーが入る場合のほか、気象レーダーのメインローブにあたる期間に現れる。十分距離が離れるか、それぞれメインローブから大きく外れない限りは現れる。
- 航空機 SAR は機体舷側方向にビームを固定するため、航空機 SAR と航空機気象レーダーの位置関係と、航空機気象レーダーのビームサーチの位置によって干渉レベルが変動する。
- 図参考 1-7 に干渉波の画面イメージを示す（左から右に航空機気象レーダーが PPI サーチすると、航空機 SAR の存在方向で最大の干渉となり、その他の方向ではそれより小さくなるか、影響がなくなる。）。
- 航空機気象レーダー側で、受信信号をヒット方向に平均化するフィルタをかけている場合は、干渉波は方位方向に引き伸ばされて現れる。



図参考 1-7 航空機気象レーダー上の航空機 SAR の干渉波のイメージ

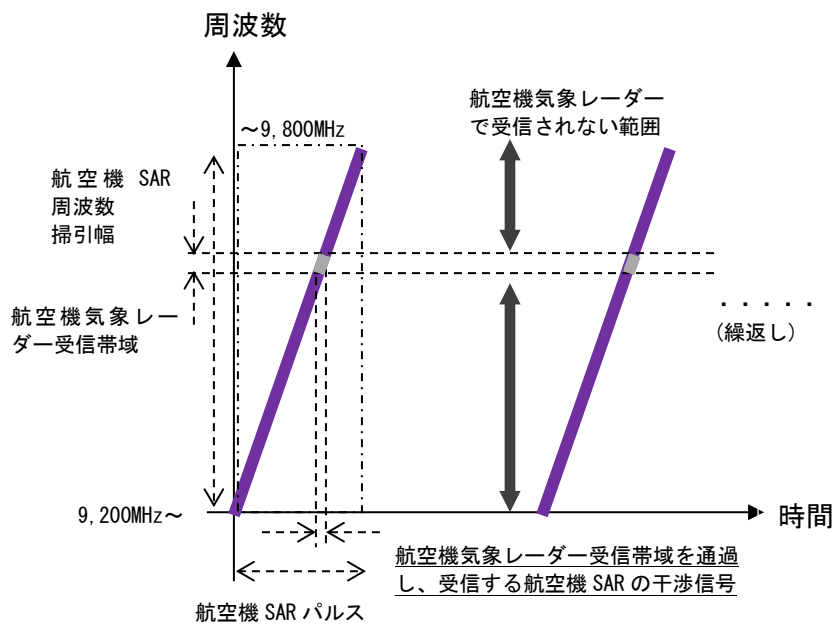
イ シミュレーション条件

- 5 (1)、5 (2) と同様とする。

ウ 航空機 SAR 干渉波が気象現象と重畳した場合についての考察

- 航空機気象レーダー上での干渉波の現れ方は、自機を中心とした、破線状となる。これは、周期的に出力される航空機 SAR 信号を航空機気象レーダー側で繰り返し受信することにより発生する。
 - 航空機 SAR パルス送信間隔：500 μ s \sim 1ms \rightarrow 40NM \sim 80NM
- 破線の周期は航空機 SAR のパルス送信間隔により、破線の幅は航空機 SAR のパルス幅及び航空機気象レーダーの受信帯域幅に依存する。航空機 SAR パルス幅 \div 航空機 SAR 帯域幅 \times 航空機気象レーダー受信帯域幅と近似できる。
 - パルス方式航空機 SAR : 0.05km 程度 (航空機 SAR パルス幅 100 μ s 時)
 - FM-CW 方式航空機 SAR : 0.5km 程度

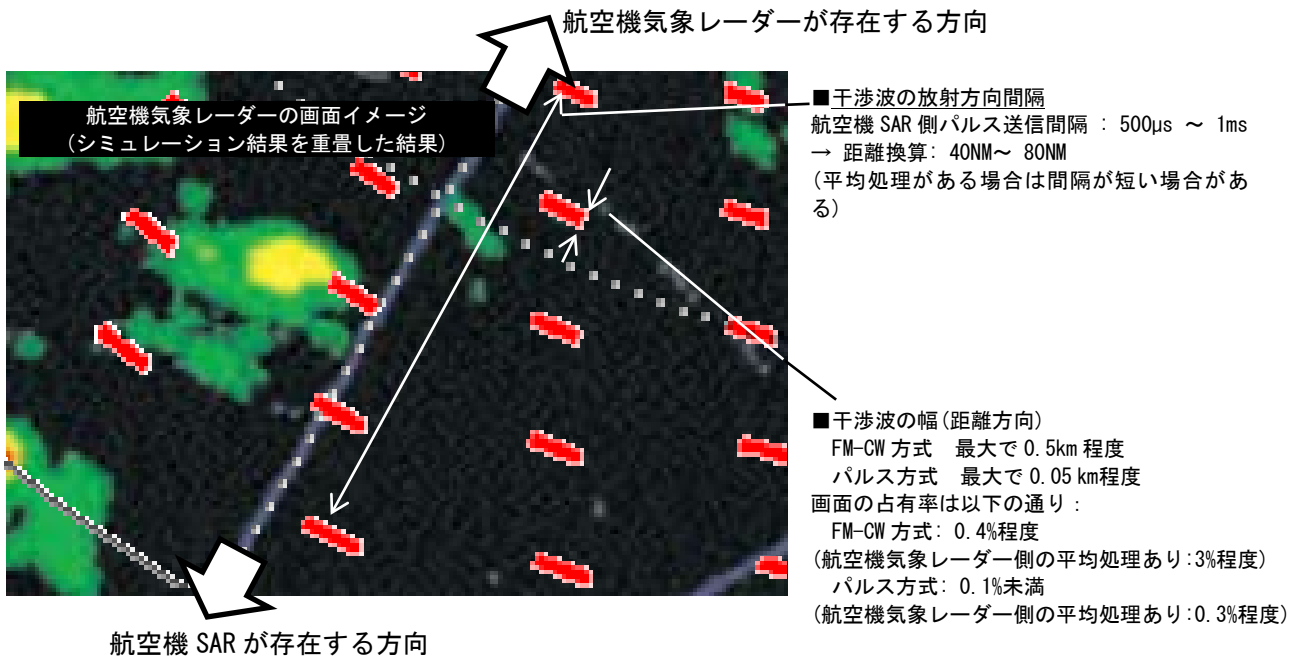
これは、航空機 SAR の送信信号は、パルス方式及び FM-CW 方式問わず、9,200MHz \sim 9,800MHz の範囲で周波数を掃引することにより起因する。航空機気象レーダーの受信帯域は狭く、干渉するのは、これを通過する航空機 SAR 送信信号の一部となる。図参考 1-8 に航空機気象レーダーで受信する航空機 SAR の送信信号による干渉信号の概念図を示す。なお、航空機 SAR の送信信号は帯域内で均等にエネルギーが分散するため、本現象は、航空機 SAR の送信帯域内にある限り、航空機気象レーダーの中心周波数(受信周波数)には依存しない。



図参考 1-8 航空機気象レーダーで受信する航空機 SAR の信号 概念図

- 方位方向の幅は、航空機気象レーダーの走査角分解能と平均処理区間に依存する。走査角分解能 \times 平均処理区間と近似できる。長さとしては約 2 $^{\circ}$ である。
- 航空機 SAR の干渉波は線状かつ離散的であるため、二次元的広がりをもつ気象現象との誤認はほとんどないと推測する。なお、画面内のノイズ占有率は、サイドローブ方向も含めて干渉が全方位で発生する最も厳しい場合でも、以下のようにになると推測する。

- パルス方式航空機 SAR : 0.04%程度 (平均処理あり:約0.3%程度)
- FM-CW 方式航空機 SAR : 0.4%程度 (平均処理あり:約3%程度)

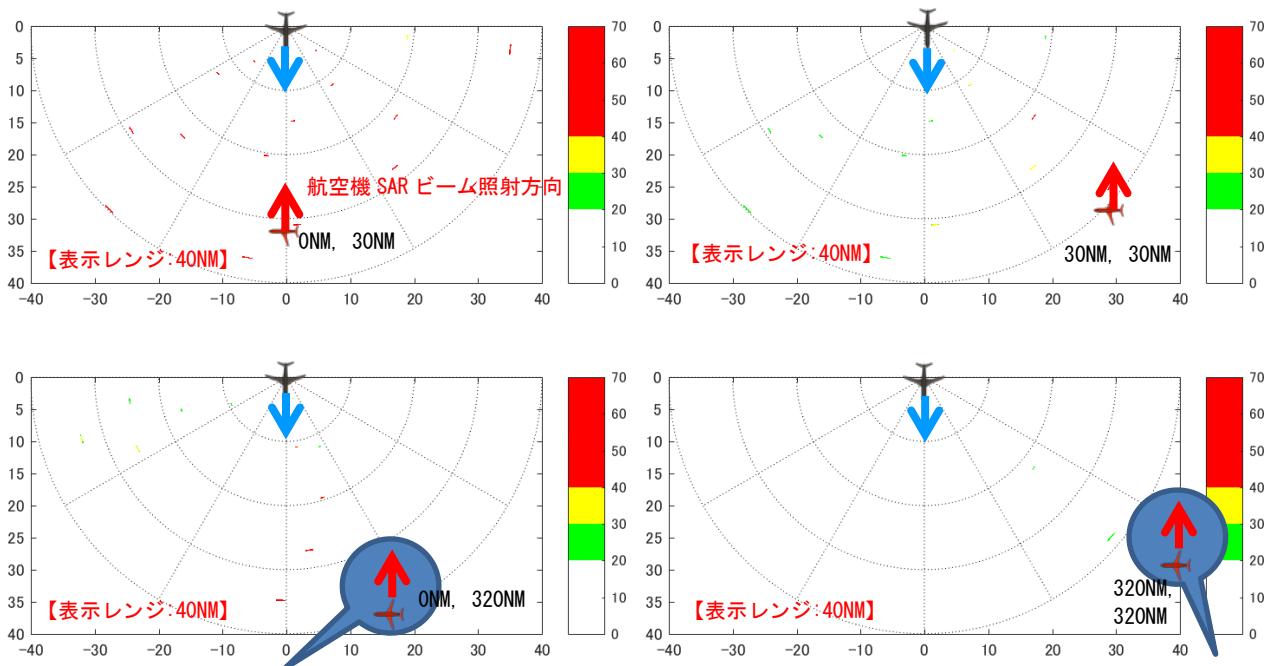


図参考 1-9 航空機 SAR 干渉信号の航空機気象レーダーへの現れ方について

エ シミュレーション結果

(ア) 航空機 SAR (パルス方式) を想定したケース

航空機 SAR 干渉波の航空機気象レーダー上での見え方をシミュレーションした結果を示す。パルスレーダーである航空機 SAR の干渉波は、気象レーダーの画面上に離散的に模様で現れるが、広がりを持った気象クラッタとは明らかに異なる

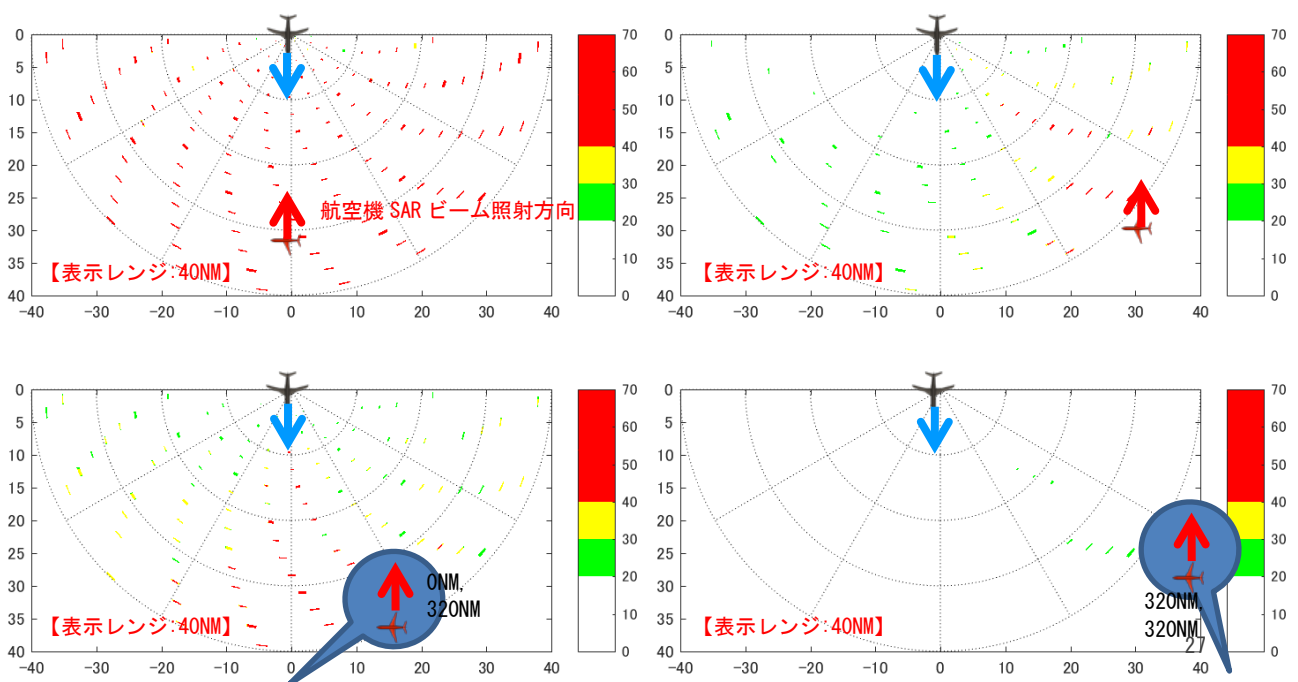


図参考 1-10 航空機 SAR 干渉信号の現れ方のシミュレーション結果 (パルス方式)

る。また、ノイズの画面占有率は低く、気象クラッタの視認性は維持できると推測される。

(イ) 航空機 SAR (FM-CW 方式) を想定したケース

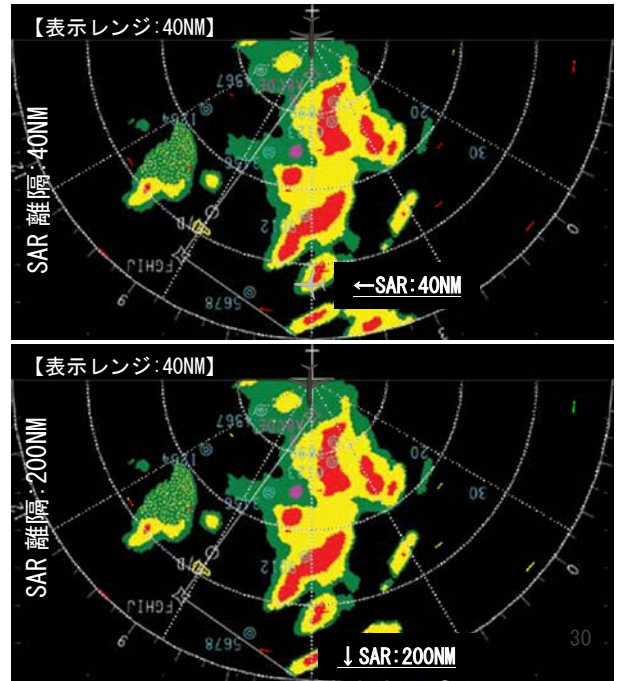
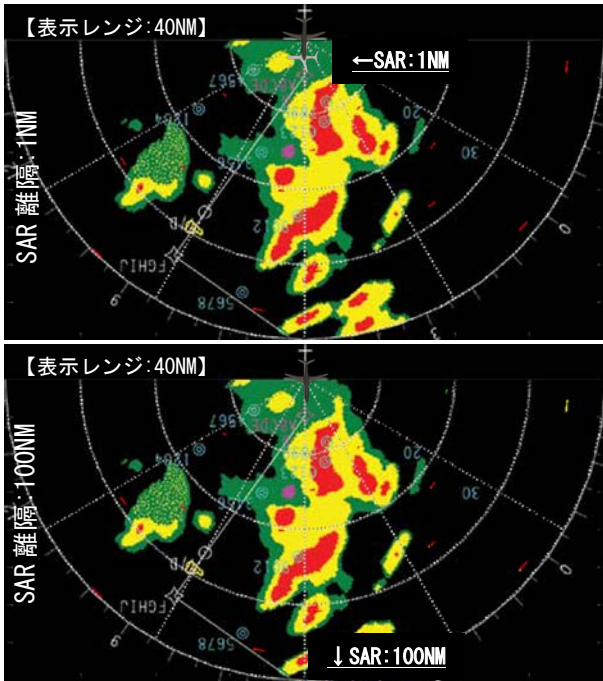
航空機 SAR 干渉波の航空機気象レーダー上での見え方をシミュレーションした結果を示す。パルス方式同様の傾向であった。パルス方式の航空機 SAR より送信デューティサイクルが高いため、レンジ方向への干渉波の広がり拡大する。ただし、二次元的な広がりを持つ気象クラッタと比べ、線的に表示される航空機 SAR 干渉波は明らかに形状が異なり、気象現象と誤認することはないと推測される。



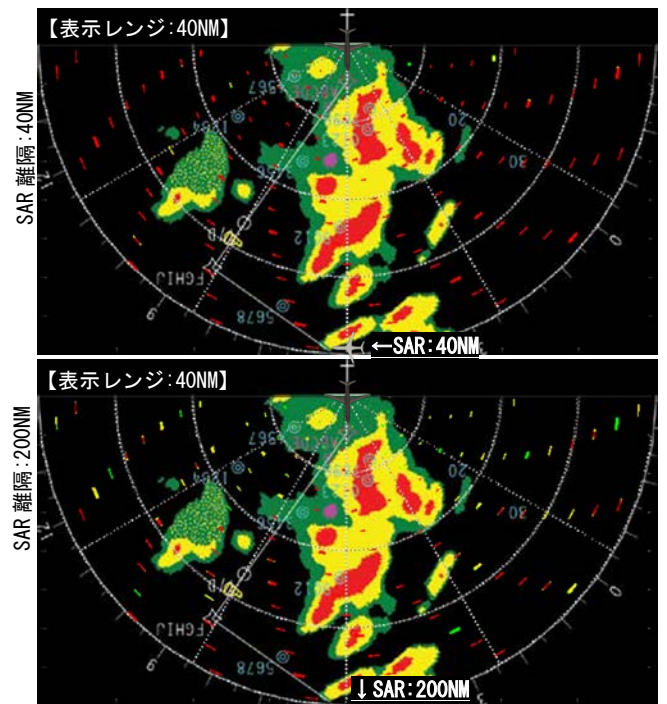
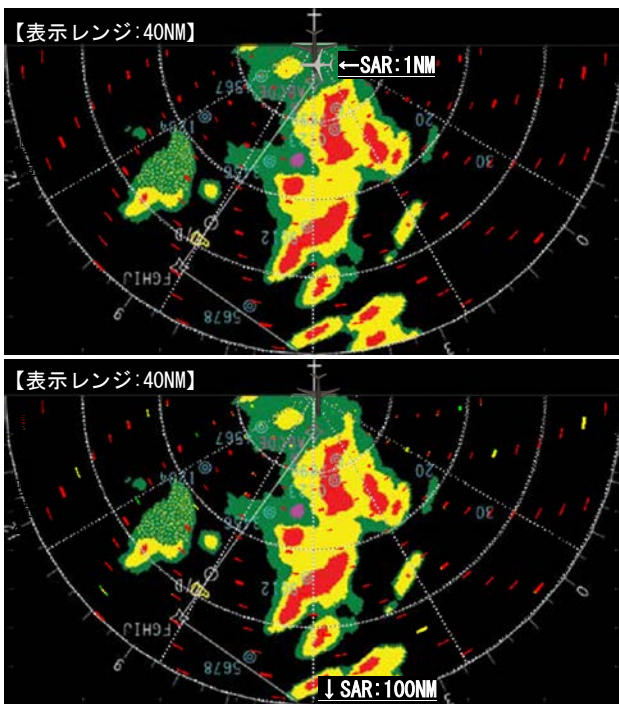
図参考 1-11 航空機 SAR の干渉信号の現れ方のシミュレーション結果 (FM-CW 方式)

(ウ) 航空機 SAR 干渉波を航空機気象レーダーに重畳した場合のイメージ

参考として、航空機気象レーダー画面に、航空機 SAR 干渉波シミュレーション結果を重畳した画像例を示す。



図参考 1-12 航空機 SAR 干渉信号シミュレーションの重畳例 (パルス方式)



図参考 1-13 航空機 SAR 干渉信号シミュレーションの重畳例 (FM-CW 方式)

オ まとめ

- 航空機 SAR の干渉波は、航空機気象レーダーの画面上に破線の放射線状に現れる。
- 近距離のみならず、遠距離でも比較的強く干渉するが、干渉波の形状は、気象クラッタとは明らかに異なり(幅 500m×方位角幅 2° 未満の線状)、誤認することはないと推測される。
- 干渉波の航空機気象レーダー画面の占有率は多くとも 3%未満であり、気象現象が埋没するリスクは小さいと考える。

6 航空機気象レーダーとの共用検討まとめ

(1) 共用条件に対する考察

航空機 SAR から航空機気象レーダーへの干渉は避けられず、レーダー画面に、干渉波が重畳する形で影響を与える。

しかし、重畳する航空機 SAR の干渉波は、気象クラッタとは明らかに異なる形状であり、気象現象と誤認することはほとんどないと推測する。特に、大きな気象脅威を誤認することはないと思われ、運航への影響は限定的で、共用することは可能であると考えられる。

航空機 SAR の方式によっては、気象現象の視認性に一時的に影響を与えるリスクが残っていることから、また、予防的な意味も含めた運航者の安全を確保するために、運航者に対してノータムを出すなど、航空機 SAR が飛行している事実を周知することが望ましいと考えられる。

(2) 航空機気象レーダーの共用条件について

前項の結果より、航空機気象レーダーの共用条件は、航空機気象レーダー側の受信機が飽和しないことである。航空機 SAR から航空機気象レーダーの与干渉は、運用高度とオフナディア角によって変化し、最大となる条件は、高度 3,000m 以上で高度差 300m、高度 3,000m 未満で高度差 150m、オフナディア角で 55 度である。この条件における等価等方輻射電力は、以下のとおりとなる。

航空機気象レーダー飽和時航空機 SAR 側等価等方輻射電力：

- 高度 3,000m 以上(高度差 300m) : 65.5dBW
- 高度 3,000m 未満(高度差 150m) : 59.5dBW

なお、高度差は、有視界外からの干渉を想定し、航空法施行規則第五条の有視界気象状態より設定した。

(参考) 航空法施行規則(昭和二十七年運輸省令第五十六号)抄
(計器気象状態)

第五条 法第二条第十五項の国土交通省令で定める視界上不良な気象状態は、次の各号に掲げる航空機の区分に応じ当該各号に掲げる気象状態(以下「有視界気象状態」という。)以外の気象状態とする。

- 一 三千メートル以上の高度で飛行する航空機(第三号及び第四号に掲げる航空機を除く。) 次に掲げる条件に適合する気象状態
 - イ 飛行視程が八千メートル以上であること。
 - ロ 航空機からの垂直距離が上方及び下方にそれぞれ三百メートルである範囲内に雲がないこと。
 - ハ 航空機からの水平距離が千五百メートルである範囲内に雲がないこと。
- 二 三千メートル未満の高度で飛行する航空機(次号及び第四号に掲げる航空機を除く。) 次に掲げる航空機の区分に応じそれぞれに掲げる気象状態
 - イ 航空交通管制区(以下「管制区」という。)、航空交通管制圏(以下「管制圏」という。)又は航空交通情報圏(以下「情報圏」という。)を飛行する航空機 次に掲げる条件に適合する気象状態
 - (1) 飛行視程が五千メートル以上であること。
 - (2) 航空機からの垂直距離が上方に百五十メートル、下方に三百メートルである範囲内に雲がないこと。
 - (3) 航空機からの水平距離が六百メートルである範囲内に雲がないこと。
 - ロ 管制区、管制圏及び情報圏以外の空域を飛行する航空機 次に掲げる条件に適合する気象状態
 - (1) 飛行視程が千五百メートル以上であること。
 - (2) 航空機からの垂直距離が上方に百五十メートル、下方に三百メートルである範囲内に雲がないこと。
 - (3) 航空機からの水平距離が六百メートルである範囲内に雲がないこと。

算出の条件は以下のとおり。

$$\text{航空機 SAR 許容等価等方輻射電力 (EIRP)} : P_{SAR\ EIRP} = P_{Saturation\ WXR} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_{rx\ WXR}}$$

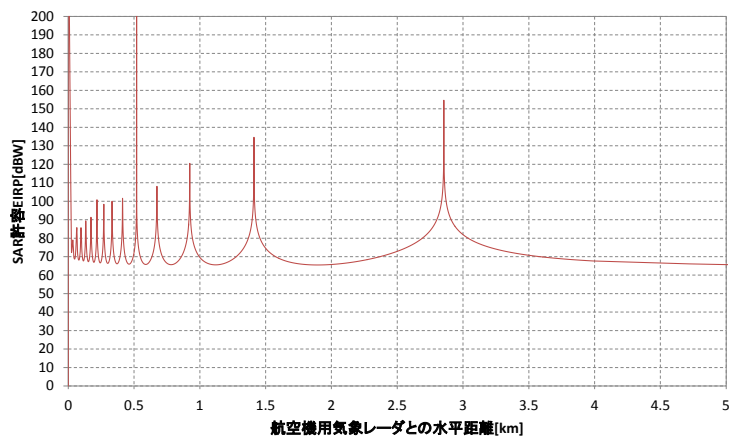
航空機気象レーダー諸元：

$P_{Saturation\ WXR}$ ：飽和電力(-30dBW)、

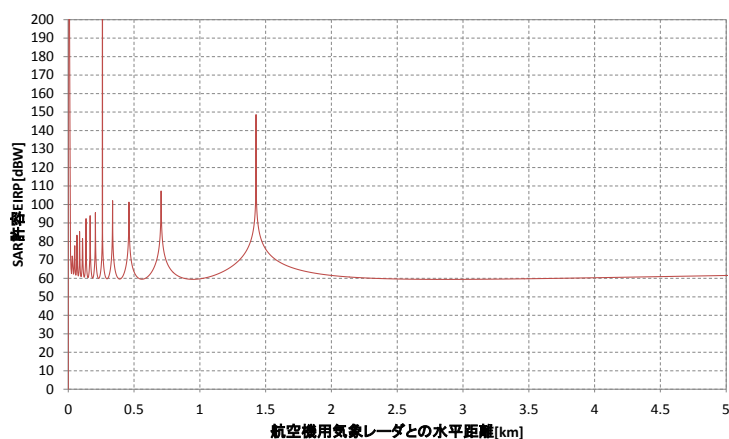
$G_{rx\ WXR} = G_{rx0_WXR} \left(\frac{\sin X(\theta)}{X(\theta)} \right)^2$ ：受信時アンテナ利得

ここで、 $X(\theta) = \frac{\pi\theta}{1.2\theta_{bw}}$ 、 θ ：アンテナ指向角度、 θ_{bw} ：ビーム幅

図参考 1-14、図参考 1-15 にそれぞれの高度の航空機気象レーダーとの共用条件における、航空機 SAR の等価等方輻射電力を示す。



図参考 1-14 航空機気象レーダーとの共用条件における航空機 SAR の等価等方輻射電力 (EIRP) (高度 3,000m 以上 (高度差 300m))



図参考 1-15 航空機気象レーダーとの共用条件における航空機 SAR の等価等方輻射電力 (EIRP) (高度 3,000m 未満 (高度差 150m))

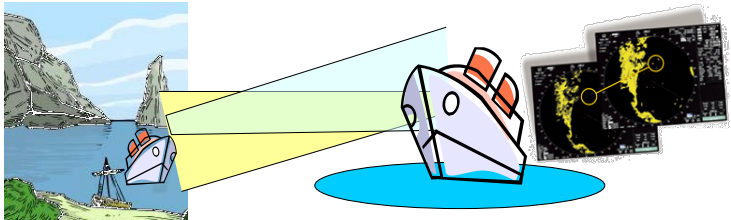
参考資料 2 海上利用のレーダーとの共用検討（詳細）

1 システム

(1) 船舶航行レーダー

船舶航行レーダーは、自ら電波を発射してその反射波をとらえることにより、海上の他船やブイ、島等の物標を陸地の物標を画像化し、船舶が安全に航行するために使用されるシステムである。

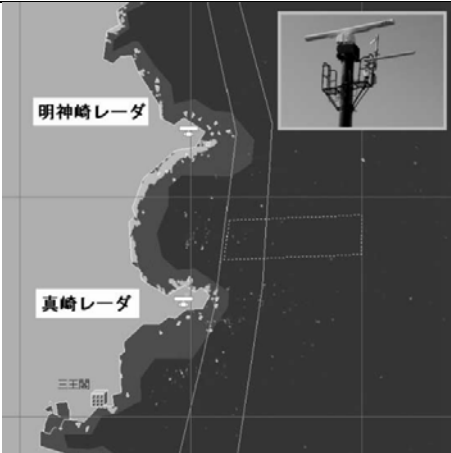
表参考 2-1 船舶航行レーダーの概要

項目	内容
送信出力	2kW～30kW
送信周波数	9,380MHz～9,475MHz
ビーム幅 3dB	水平 0.75°～6.0° 垂直 20°～25°
回転速度	21rpm～48rpm
動作イメージ	

(2) 沿岸監視レーダー

沿岸監視レーダーは、船舶航行レーダーとほぼ同じシステムを陸上に設置し、港湾や漁場の船舶動静の把握・監視等に用いられる。

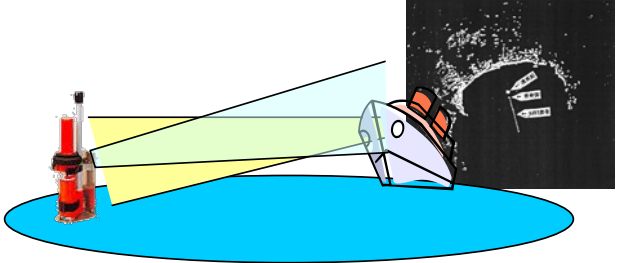
表参考 2-2 沿岸監視レーダーの概要

項目	内容
アンテナ利得	30dB 以上
送信周波数	9,410MHz±57MHz
尖頭出力	4.9kW～25kW
動作イメージ	

(3) 捜索救助用レーダートランスポンダ (SART)

SART は船舶が遭難した場合に捜索者のレーダー波に反応し、遭難船舶の方位や位置情報を捜索者のレーダー画面上に表示させるよう、応答信号を送信するシステムである。

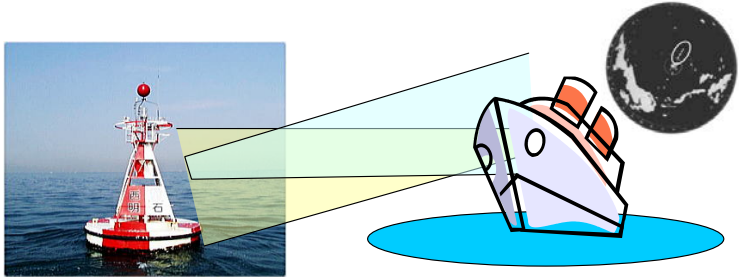
表参考 2-3 SART の概要

項目	内容
周波数範囲	9,200MHz~9,500MHz
幅射電力 (e. i. r. p)	400mW 以上
実行受信感度 (e. r. s)	-50dBm 以下
アンテナ指向性	垂直面：±25° 水平面：無指向性
動作イメージ	

(4) レーダービーコン

レーダービーコンは、船舶航行用レーダーにビーコン局の位置を示すマイクロ波標識として機能する装置である。

表参考 2-4 レーダービーコンの概要

項目	内容
送信周波数範囲	9,300MHz~9,500MHz
送信電力	400mW
空中線利得	8dB 以上：灯台・灯標用 3dB 以上：灯浮標用
最小トリガ感度	-40dBm 以下
動作イメージ	

2 共用検討

(1) 船舶航行用レーダー及び沿岸監視レーダー

共用検討結果を表参考 2-5 に示す。

ア 事前試験

沿岸監視レーダー及び船舶航行用レーダーは同一システムを使用している。評価用の船舶航行レーダー及び航空機 SAR をケーブルで直接接続し、入力信号レベル、干渉の状況及び干渉除去機能のアルゴリズムを確認した。

(ア) 干渉除去機能のアルゴリズム

- A アジマス方向 5 ピクセルの信号値を比較判定し出力信号を決める。
- B 干渉除去機能が OFF の時は 5 ピクセルの最大値を出力する。
- C 干渉除去機能 ON (LOW) の時は 2 番目に強力な信号を出力する。これはパルス繰返し周期で 2 周期以上連続した信号のみ表示される。
- D 干渉除去機能 ON (MID) の時は 3 番目の信号値、(HIGH) の時は 4 番目の信号値を出力する。これはそれぞれ、パルス繰返し周期で 3 周期、4 周期以上連続した受信信号のみ表示される。
- E これにより、航空機 SAR と被干渉レーダーの PRF が完全に同期していない限り、SAR による干渉波は除去される。

(イ) 地上試験

画面全体に干渉が生じたが、干渉波入力レベルにかかわらず干渉除去機能 ON で干渉がなくなることが判明した。

(ウ) 飛行試験

パルス方式では干渉除去機能 OFF 時にも干渉は確認されなかった。

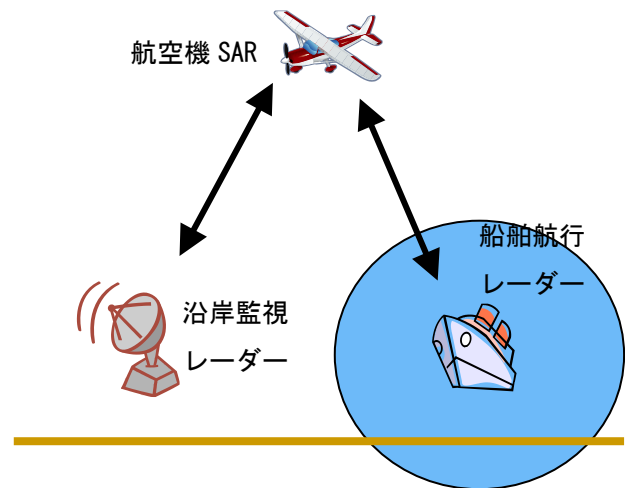
FM-CW 方式では干渉除去機能 OFF 時に航空機 SAR による干渉が確認されたが、干渉除去機能 ON 時には干渉がレーダー画面から消えていることが確認された。

イ フィールド試験

(ア) 船舶航行レーダー

フィールド試験において、航空機 SAR による船舶航行レーダーへの干渉はメインローブの対向だけでなく、サイドローブからの受信も含めて、長時間にわたり確認された。

しかし、船舶航行レーダーの通常運用モードである干渉除去機能 ON にすることで、干渉波が除去されることが確認された。



図参考 2-1 各レーダーシステムの関係

(イ) 沿岸監視レーダー

フィールド試験ではパルス方式、FM-CW 方式ともに干渉が確認されなかった。

飛行条件が変更され、当初計画よりも遠距離からの電波照射となったため、干渉除去機能 OFF でも、通常運用状況での感度設定で受信レベル以下であり、表示されなかった。

しかし、事前試験結果から、当初計画通りの干渉電力が沿岸監視レーダーに照射されたとしても、通常運用の干渉除去機能（MID）では航空機 SAR による沿岸監視レーダーへの干渉は除去されることが判明しており、干渉はないと判断される。

(2) レーダービーコン及び SART

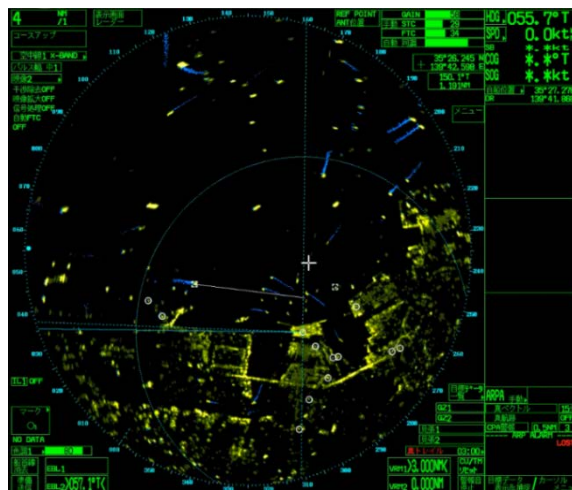
レーダービーコン及び SART との干渉検討は、平成 24 年度の技術試験事務「9 GHz 帯航空機搭載型合成開口レーダーの周波数有効利用に関する調査検討」で行われた。

レーダービーコン及び SART はレーダー波を受けて応答信号を送信する仕組みである。

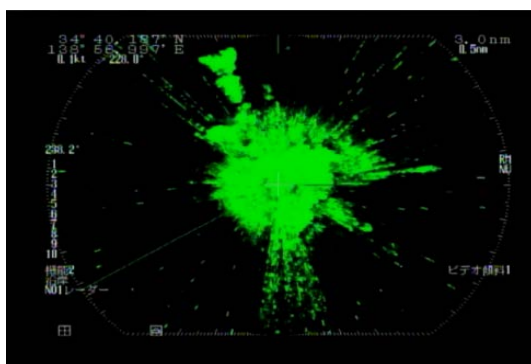
レーダービーコン及び SART からの信号は船舶航行レーダー自身からの発信に対する応答のみが船舶航行レーダー画面上に表示されるため、レーダービーコン及び SART 自体には他レーダーに対する応答信号は表示されない。

また、被干渉は画像再生処理の過程で不要波は除去される。

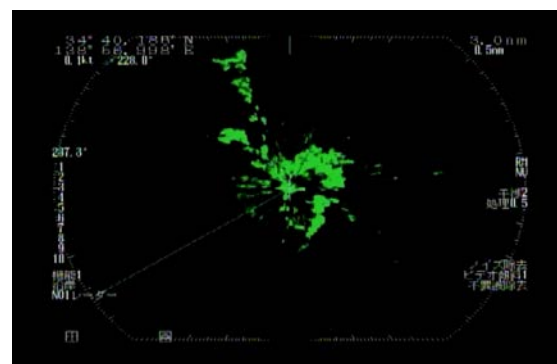
従って、レーダービーコン及び SART と航空機 SAR との周波数共用は、問題ないと判断される。



図参考 2-2 パルス方式 H 偏波の与干渉試験結果



(a) 干渉除去処理前



(b) 干渉除去処理後

図参考 2-3 パルス方式 H 偏波の与干渉試験結果

表参考 2-5 沿岸監視レーダーと船舶航行用レーダー共用検討試験結果

		航空機 SAR の方式	距離 km	電力 dBm	偏波	干渉除去 機能	与干渉				
事前試験	有線接続試験	パルス方式	N/A	-3	N/A	OFF	有り	画面全体に干渉が表示される。			
				-33	N/A	OFF	有り				
				-73	N/A	OFF	有り				
				-3	N/A	ON (LOW)	無し				
				-33	N/A	ON (LOW)	無し				
				-73	N/A	ON (LOW)	無し				
		FM-CW 方式	N/A	-23	N/A	OFF	有り	画面全体に干渉が表示される。			
				-43	N/A	OFF	有り				
				-73	N/A	OFF	有り				
				-23	N/A	ON (LOW)	有り				
				-43	N/A	ON (LOW)	有り				
				-73	N/A	ON (LOW)	有り				
				-23	N/A	ON (MID)	無し				
				-43	N/A	ON (MID)	無し				
事前飛行試験	パルス方式		5.7		H	OFF	無し	受信時間と航空機 SAR 送信パルスの会合確率が低く、干渉波は観測されなかった、			
			5.7		H	ON	無し				
			5.7		V	OFF	無し				
			5.7		V	ON	無し				
			FM-CW 方式		5.7		H		OFF	有り	干渉除去 ON で干渉はなくなる。
					5.7		H		ON	無し	
					5.7		V		OFF	有り	
					5.7		V		ON	無し	
	パルス方式				5.7	-20.4	H	OFF	有り (図参考 2-3 (a))	干渉除去機能 ON (MID) で干渉はなくなる。	
					5.7	-20.4	H	ON (MID)	無し (図参考 2-3 (b))		
	フィールド試験	沿岸監視レーダー	パルス方式	17.3	-27	H	OFF	無し (図参考 2-2)	干渉は観測されていない。		
					-27	H	ON	無し			
					-51	V	OFF	無し			
					-51	V	ON	無し			
FM-CW 方式			17.3	-41	H	OFF	無し	干渉は観測されていない。			
				-41	H	ON	無し				
				-66	V	OFF	無し				
				-66	V	ON	無し				
				パルス方式	5.7	-20.4	H		OFF	有り (図参考 2-3 (a))	干渉除去機能 ON (MID) で干渉はなくなる。
						-20.4	H		ON (MID)	無し (図参考 2-3 (b))	
-37.5	V	OFF	有り								
-37.5	V	ON (MID)	無し								
FM-CW 方式	5.7	-33.5	H	OFF	有り	干渉除去機能 ON (MID) で干渉はなくなる。					
		-33.5	H	ON (MID)	無し						
		-54.5	V	OFF	有り						
		-54.5	V	ON (MID)	無し						

参考資料3 地上の気象レーダー（固定局）との共用検討（詳細）

1 検討に使用した航空機 SAR の詳細

本検討では、国内で運用されているパルス方式と FM-CW 方式の航空機 SAR を使用した。表参考3-1にその諸元を示す。

表参考3-1 検討に使用した航空機 SAR の諸元

検討した航空機 SAR	A	B	C
方式	パルス方式	FM-CW 方式	FM-CW 方式
機種	ジェット機	プロペラ機	プロペラ機
飛行速度	約 220m/s	約 72m/s	約 100m/s
飛行高度	約 13,000m 以下	約 5,000m 以下	約 8,000m 以下
中心周波数	9,550MHz	9,400MHz	9,600MHz
周波数帯域幅	500MHz	300MHz	300MHz
空中線電力	8kW（尖頭電力）	10W	10W
偏波	HV 送信 HV 受信	H 送信 H 受信	H 送信 HV 受信
オフナディア角	10° ~65°	55° ~75°	45° ~65°

2 検討に使用した気象レーダー（固定局）の詳細

本検討では、表参考3-2に示す国内で運用されている気象レーダー（固定局）を対象に干渉検討を実施した。国内で運用されている気象レーダー（固定局）は、3社の製造メーカーで製造され、2種類の送信方式（パルス圧縮方式、短パルス方式）がある。

表参考3-2 検討に使用した気象レーダー（固定局）の諸元

中心周波数	9,700MHz~9,800MHz
受信帯域幅	4 MHz
ビーム幅	約 1°
観測距離	80km
送信機	クライストロン・固体化送信機
送信方式	パルス圧縮方式・短パルス方式
送信偏波	水平・垂直偏波
方位角回転速度	3 RPM
観測仰角数	12
観測サイクル	5分 低い二つの仰角は1分毎に複数回観測
製造メーカー	国内で運用されている気象レーダーは、3社で製造されている。

検討に使用した気象レーダー（固定局）は、3RPM（一回転 20 秒）でアンテナを方位角方向に回転させ、仰角を表参考 3-3 の順番で変化させることにより、5 分で 12 方向の仰角（No. 01 と No. 02 は複数回観測）のボリュームスキャンを実施する。また、No. 01 と No. 02 は 2 分間隔で観測しているため、10 分が 1 サイクルのシーケンスとなっている。

表参考 3-3 検討で使用した気象レーダー（固定局）の運用例

仰角番号	仰角	0:00	0:01	0:02	0:03	0:04	0:05	0:06	0:07	0:08	0:09	0:10
01	1.6 °		1		1		1		1		1	
02	2.6° or 2.7°	1		1		1		1		1		1
03	0.6° or 0.7°		2					2				
04	3.8 °		3					3				
05	5.1 °			2					2			
06	6.5 °			3					3			
07	8.1 °				2					2		
08	9.8° or 9.9°				3					3		
09	11.9 °					2					2	
10	14.2 °					3					3	
11	16.9 °	2					2					2
12	20.0 °	3					3					3

本検討では、表参考 3-4 に示す観測プロダクトを対象に航空機 SAR の与干渉の有無を調査した。

表参考 3-4 検討で使用した気象レーダー（固定局）の観測プロダクト

種類	内容(プロダクト)	
原データ (8種類)	受信電力(H/V ch, NOR/MTI) ドップラー(速度/幅)&偏波(ρ HV(0), Φ DP) PPDP	4個 PHN0, PHM0, PVN0, PVM0 4個 PV00, PW00, PRHV,
一次処理 データ (5種類)	レーダー反射因子 比偏波間位相差 降雨強度 品質フラグ	2個 RZH0, RZDR 1個 RKDP 1個 RRR0 1個 RQF0

3 干渉検討の方法

干渉検討では、国内で運用されている航空機 SAR がこれまで気象レーダー（固定局）の周辺を観測した時に、気象レーダー（固定局）で干渉が発生したかどうかを目視によって検証した。また、航空機 SAR の与干渉が発生した際に、気象レーダー（固定局）で

の最終プロダクト（一次処理データ）への影響の有無を確認することで、航空機 SAR と気象レーダー（固定局）との共用条件について検討した。

本検討では、航空機 SAR の送信方式、気象レーダー（固定局）の送信方式及び気象レーダー（固定局）の製造メーカーごとに、航空機 SAR の気象レーダー（固定局）に対する与干渉を検討した。表参考 3-5 に検討を行った組み合わせを示す。

表参考 3-5 航空機 SAR と気象レーダー（固定局）との干渉検討

送信方式		気象レーダー（固定局）					
		パルス圧縮方式（固体化送信機）			短パルス方式（クライストロン）		
製造メーカー		A	B	C	A	B	C
航空機 SAR	パルス方式	検討 1 降雨なし	検討 2 降雨あり	検討 3 降雨なし	検討 1 降雨なし	検討 2 降雨あり	検討 3 降雨なし
	FM-CW方式	-	検討 4 降雨あり	検討 5 降雨なし	検討 6 降雨なし	-	-

本検討では、表参考 3-5 の全ての組み合わせで降雨がある場合とない場合の実測値を用いて与干渉の有無を調査することができなかった。このため、理論的な解析を行うことですべての組み合わせでの干渉評価を行った。理論的な解析では、以下に示す考え方で解析を行った。

(1) 気象レーダー（固定局）の送信方式の違いについて

パルス圧縮方式の気象レーダー（固定局）は、レーダーから遠い領域では周波数変調された長パルスを送信し、受信時の復号処理でパルス圧縮し、高出力のクライストロン型気象レーダー（固定局）と同等の感度を確保している。一方、レーダーから近い領域では、送信と同じタイミングでは受信できないことで発生する観測不能な領域を小さくするために、単純なパルス変調された短パルスの送信波を用いて観測を行っている。このため、レーダーから近い領域ではパルス圧縮処理は実施されておらず、信号処理としては短パルス方式と同様の処理が行われている。本検討では、短パルス方式の気象レーダー（固定局）の干渉評価を行うために、パルス圧縮方式の気象レーダー（固定局）のパルス圧縮されていない近傍範囲（6 km 以内）のデータを用いた。

(2) 気象レーダー（固定局）の製造メーカーの違いについて

気象レーダー（固定局）の製造メーカーは 3 社あり、それぞれのメーカーで信号処理の違いによる干渉除去機能に差がある可能性がある。しかしながら、原データ（受信電力、ドップラー速度、スペクトル幅、水平・垂直偏波間位相差、水平・垂直偏波間相関）を処理して得られる一次処理データ（レーダー反射因子、偏波間レーダー反射因子差、偏波間位相差変化率、降雨強度）の処理は、すべて同じアルゴリズムが用いられている。このため、最終プロダクトである一次処理データに干渉の影響が確認されなければ、製造メーカーに関わらず航空機 SAR の与干渉は除去されると考えられる。

4 干渉検討の結果

干渉検討では、表参考 3-5 で示した 6 つのケースに対して航空機 SAR の気象レーダー（固定局）に対する与干渉の有無を調査した。以下にその結果を示す。

(1) 検討 1

検討 1 では、パルス方式の航空機 SAR が製造メーカー A の気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えるかどうかについて調査した。表参考 3-6 に干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件を示す。

表参考 3-6 干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件

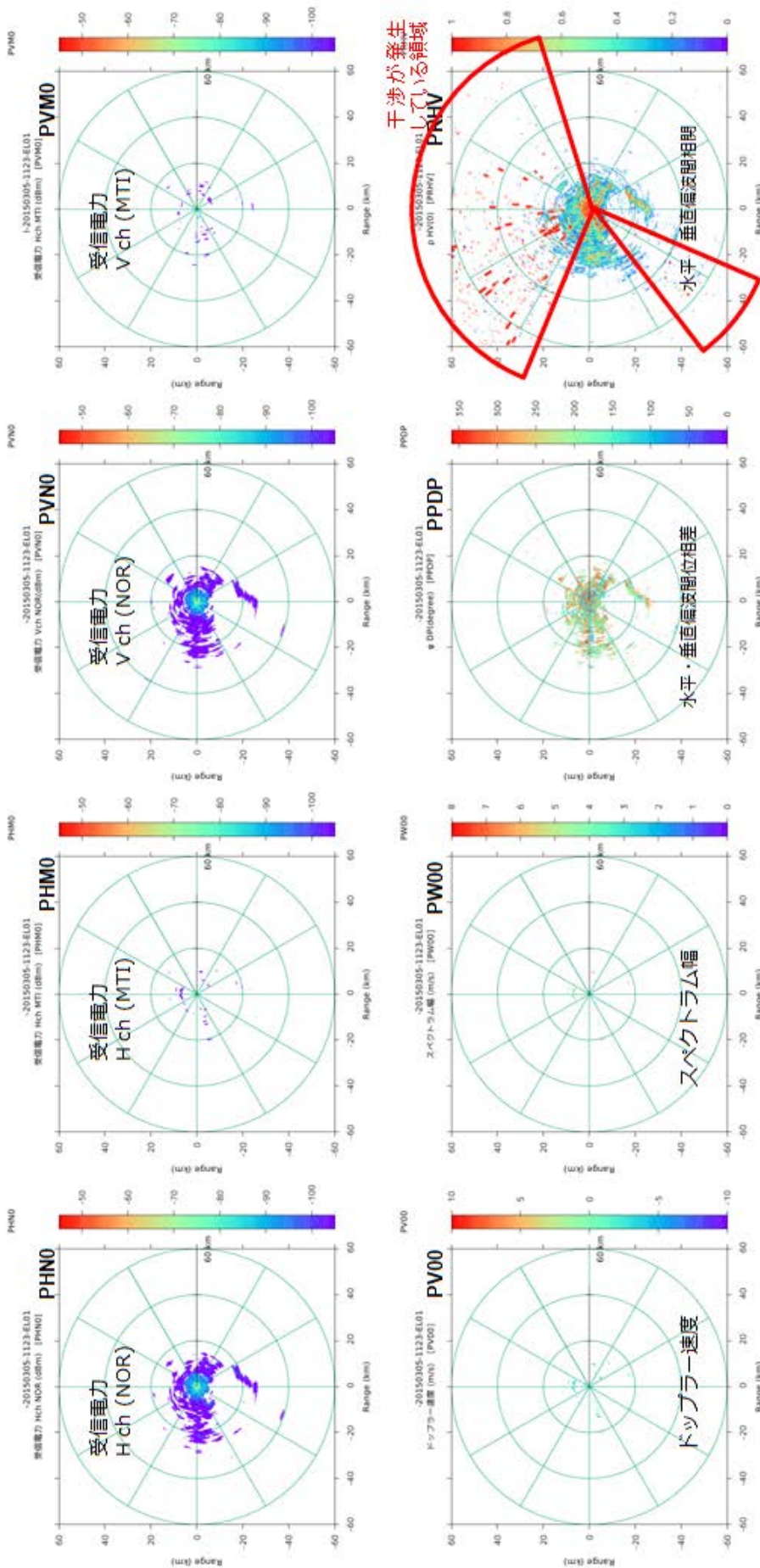
観測高度	気象レーダー（固定局）までの距離	気象レーダー（固定局）80km 圏内の滞空時間	飛行条件	備考
8,732m	10,647m (最接近時)	6分35秒	飛行速度：159m/s 飛行方向：東→西	滞空時間は、気象レーダー（固定局）の80km圏内で電波を照射していた時間で定義

表参考 3-7 に航空機 SAR の与干渉の調査結果を示す。

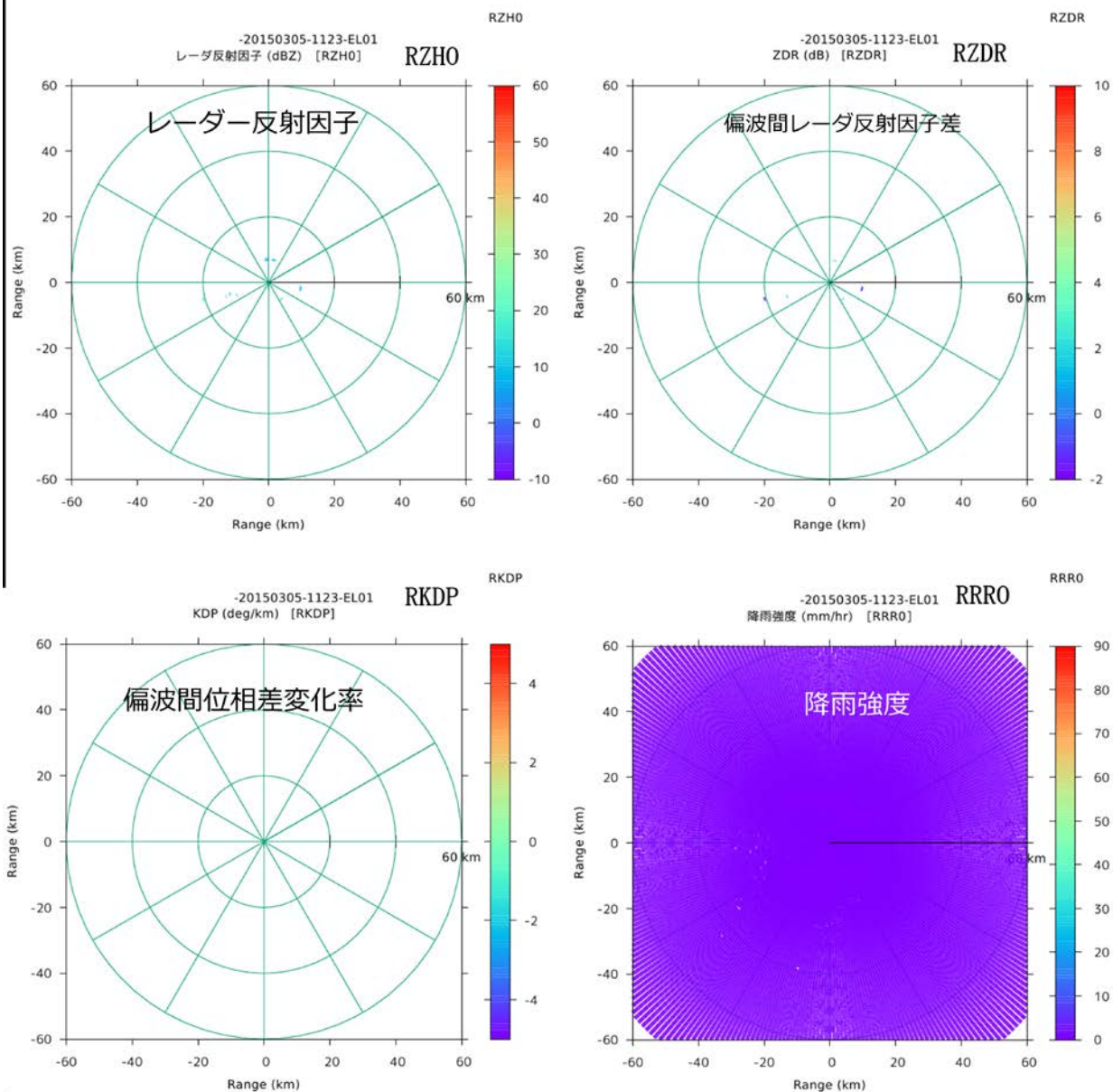
表参考 3-7 航空機 SAR の与干渉の調査結果

気象レーダー（固定局）の仰角番号	干渉の有無		影響時間	備考
	原データ	一次処理データ		
01	有	無	15.3s	干渉波の影響は、原データの水平・垂直偏波間相関のPPI画像で確認された。
02	有	無	6.7s	
09	有	無	3.3s	
11	有	無	3.3s	

干渉が発生した時の仰角番号 01 の原データと一次処理データの PPI 画像を図参考 3-1 と図参考 3-2 に示す。



図参考 3-1-1 干渉が発生した時の原データの PPI 画像（干渉は、水平・垂直偏波間相関で発生（赤線の扇形の部分））



図参考 3-2 干渉が発生した時の一次処理データの PPI 画像

図参考 3-1 より、与干渉の影響が、水平・垂直偏波間相関の PPI 画像（赤線の扇部分）上で確認された。しかしながら、図参考 3-2 の一次処理データには、与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。また、パルス圧縮されていない近傍範囲（6 km 以内）のデータを解析した結果、原データでは与干渉の影響を確認できるが、一次処理データでは与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、短パルス方式の気象レーダー（固定局）に対する航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。

(2) 検討2

検討2では、パルス方式の航空機 SAR が製造メーカーBの気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えるかどうかについて調査した。表参考3-8に干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件を示す。

表参考3-8 干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件

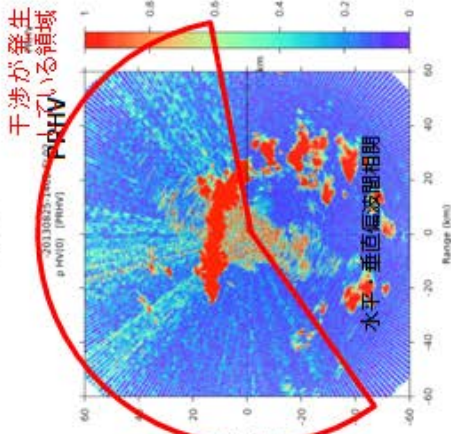
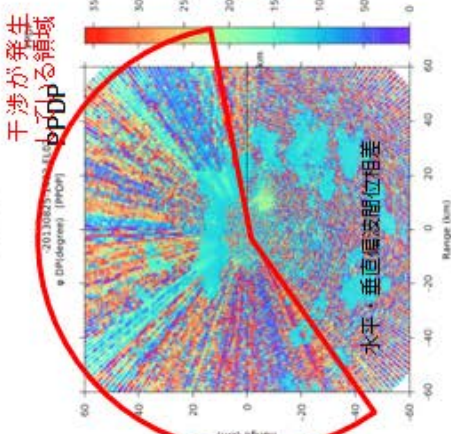
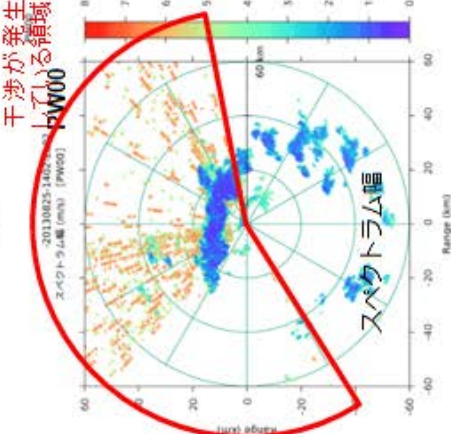
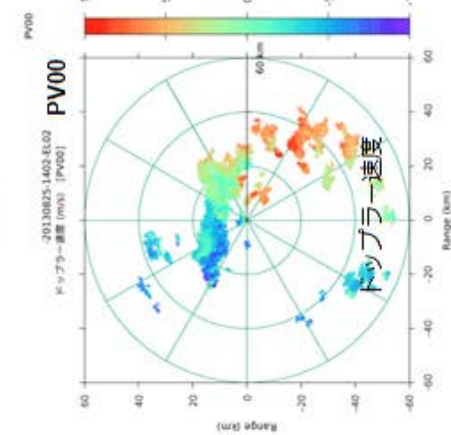
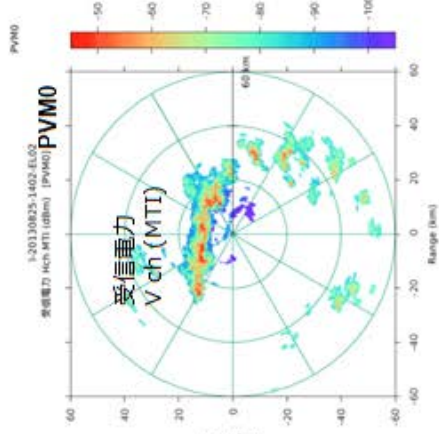
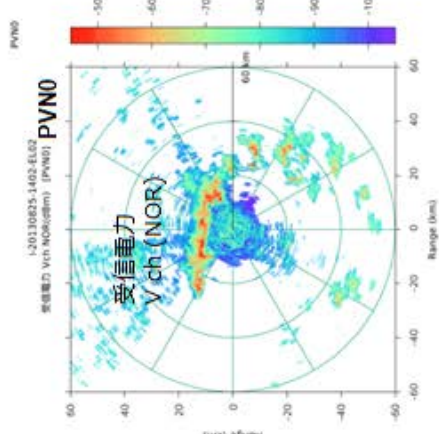
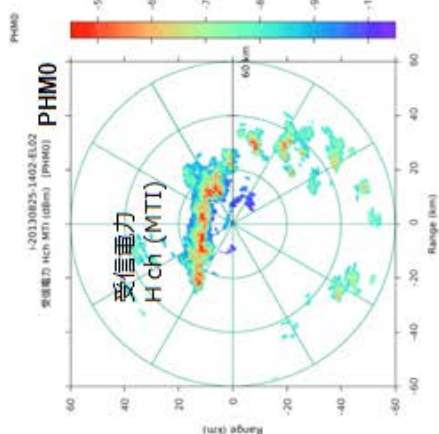
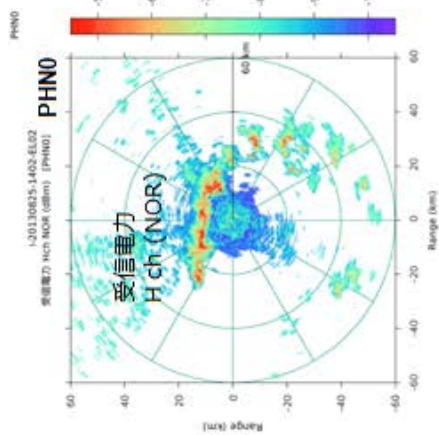
観測高度	気象レーダー（固定局）までの距離	気象レーダー（固定局）80km圏内の滞空時間	飛行条件	備考
8,747m	28,229m (最接近時)	4分00秒	飛行速度：167m/s 飛行方向：東→西	滞空時間は、気象レーダー（固定局）の80km圏内で電波を照射していた時間で定義

表参考3-9に航空機 SAR の与干渉の調査結果を示す。

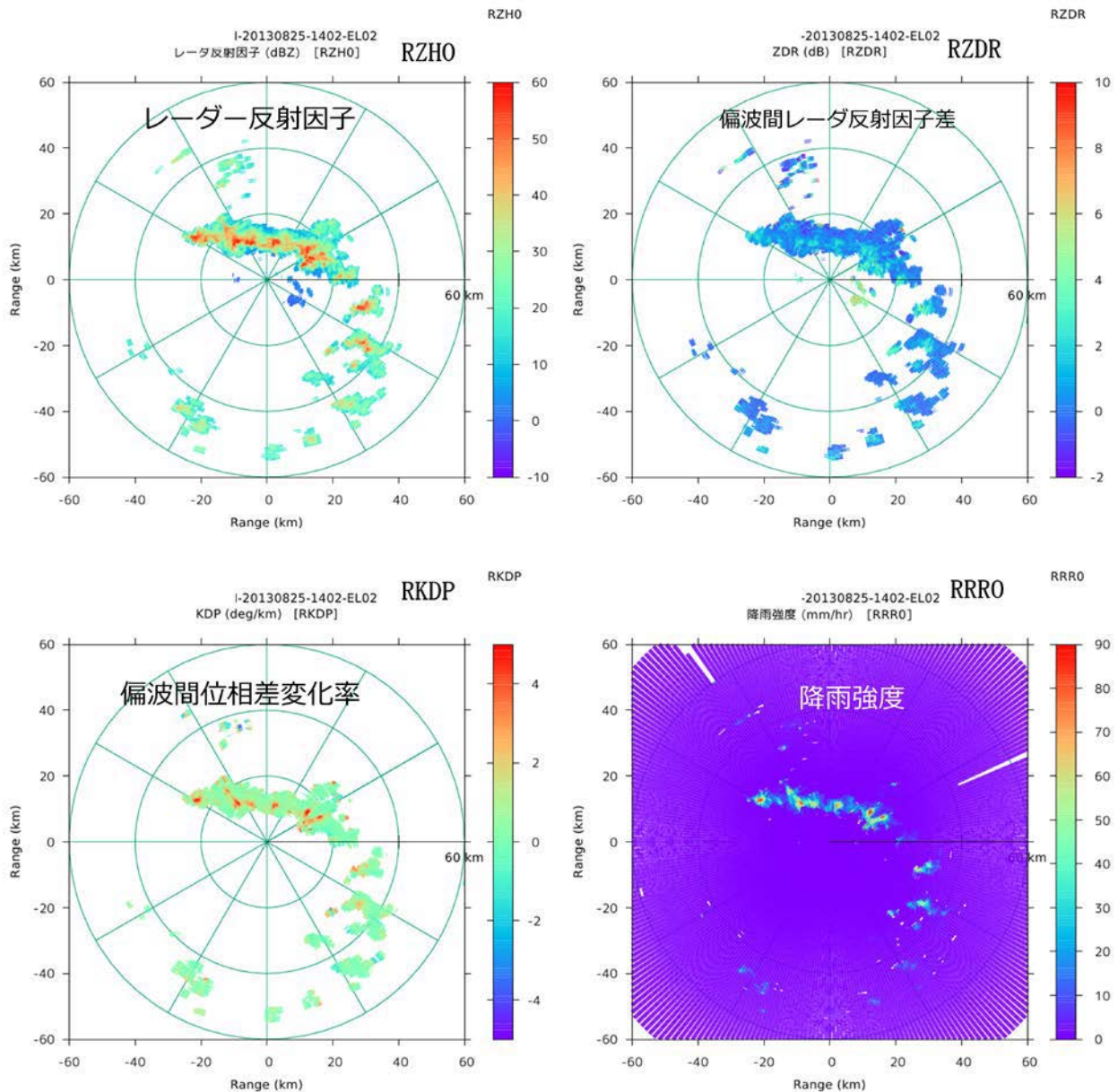
表参考3-9 航空機 SAR の与干渉の調査結果

気象レーダー（固定局）の仰角番号	干渉の有無		影響時間	備考
	原データ	一次処理データ		
01	無	無	0.0s	干渉波の影響は、原データの水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関のPPI画像で確認された。
03	無	無	0.0s	
04	無	無	0.0s	
02 (14:02)	有	無	12.0s	
02 (14:30)	有	有	12.0s	

干渉が発生した時の仰角番号02（14:02）の原データと一次処理データのPPI画像を図参考3-3と図参考3-4に示す。



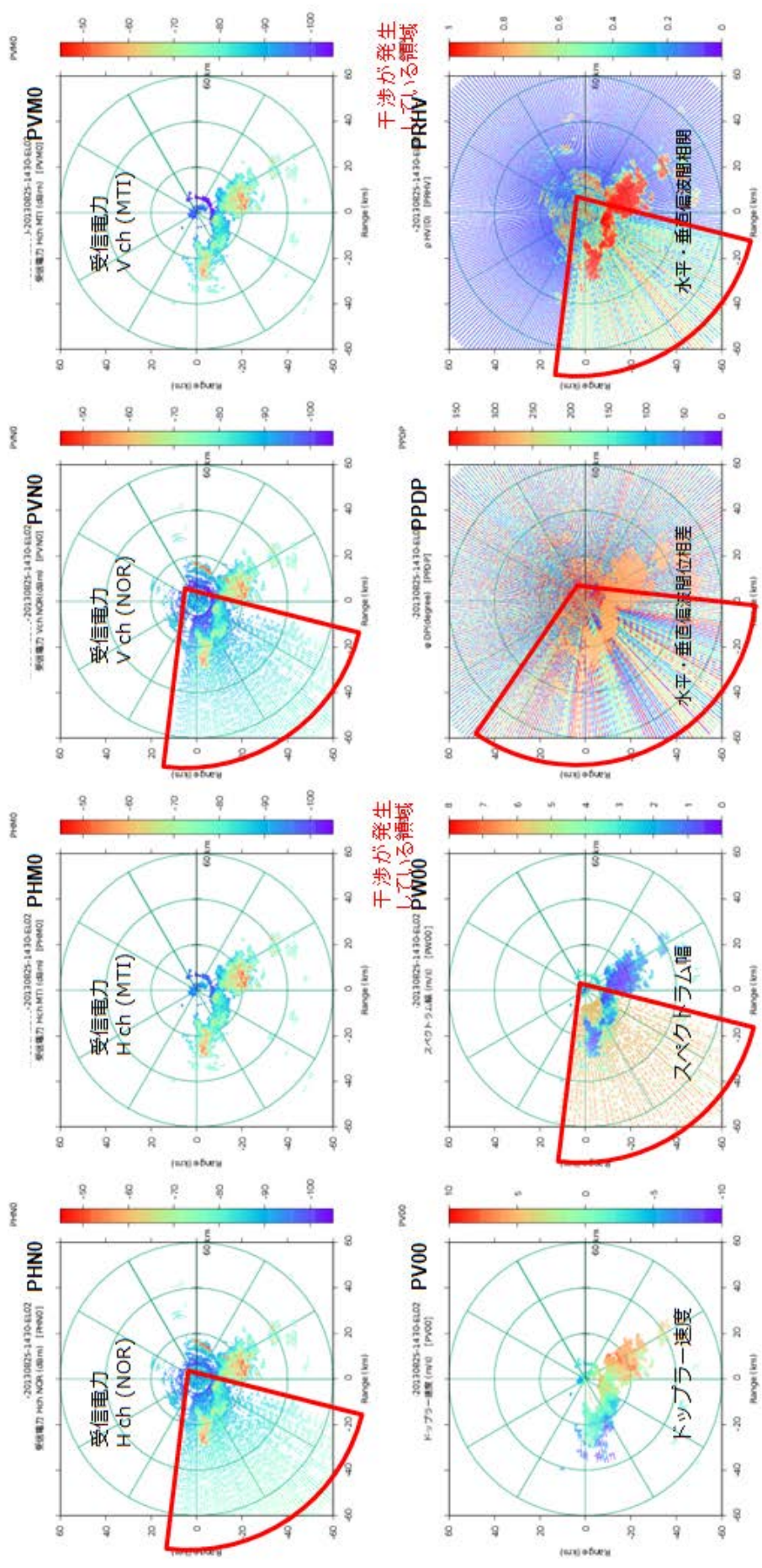
図参考3-1-3 干渉が発生した時の原データのPPI画像（干渉は、スペクトラム幅、水平・垂直偏波間位相差及び水平・垂直偏波間
 相関で発生（赤線の扇形の部分））



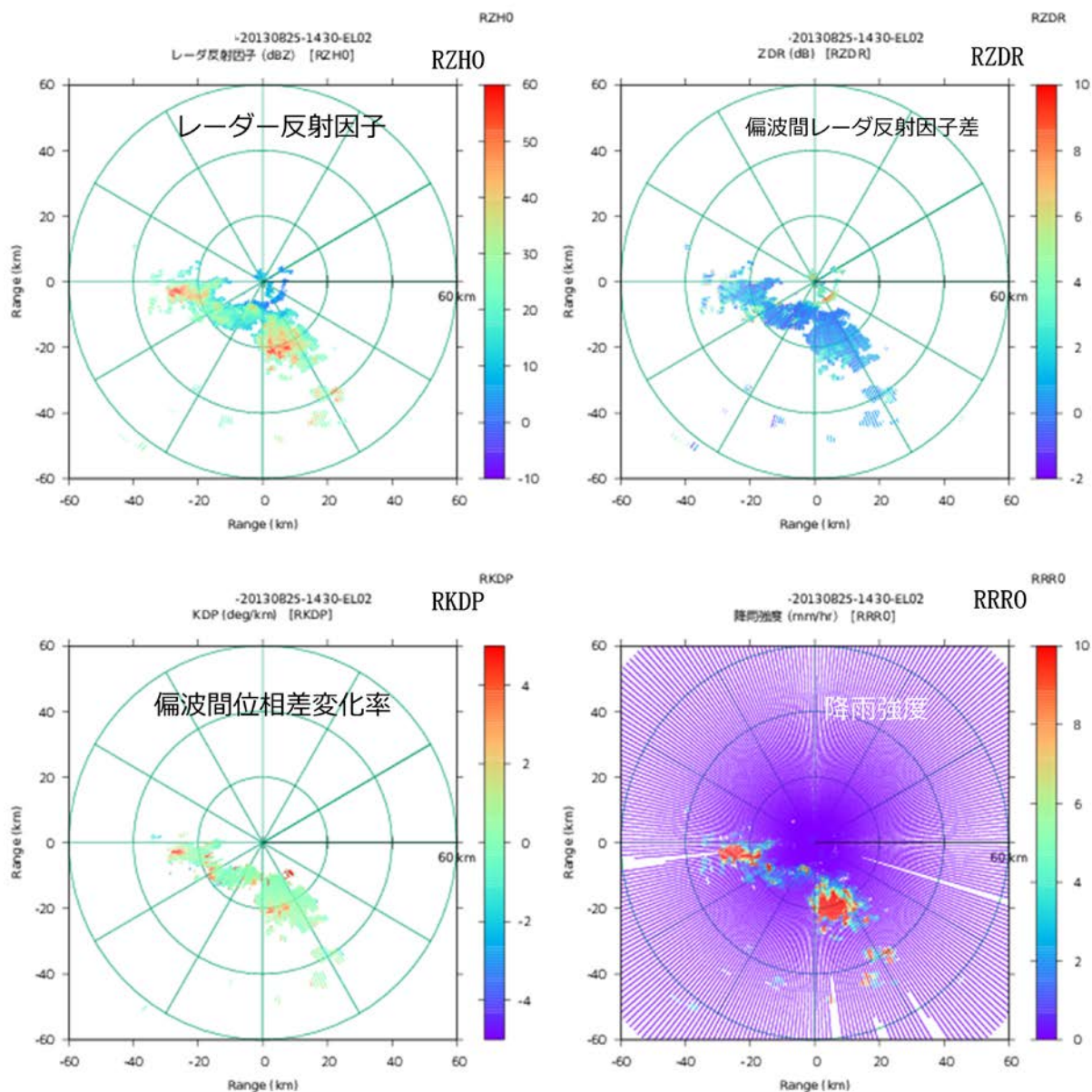
図参考 3-4 干渉が発生した時の一次処理データの PPI 画像

図参考 3-3 より、与干渉の影響が、スペクトル幅、水平・垂直偏波間相関及び水平・垂直偏波間位相差の PPI 画像上で確認された。しかしながら、図参考 3-4 の一次処理データには、与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。また、パルス圧縮されていない近傍範囲（6 km 以内）のデータを解析した結果、原データでは与干渉の影響を確認できるが、一次処理データでは与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、短パルス方式の気象レーダー（固定局）に対する航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。

一方、仰角番号 02（14:30）の原データと一次処理データの PPI 画像を図参考 3-5 と図参考 3-6 に示す。



図参考 3-5 干渉が発生した時の原データの PPI 画像 (干渉は、受信電力 H ch (NOR)、受信電力 V ch (NOR)、スペクトル幅、水平・垂直偏波間位相差及び水平・垂直偏波間相関で発生 (赤線の扇形の部分))

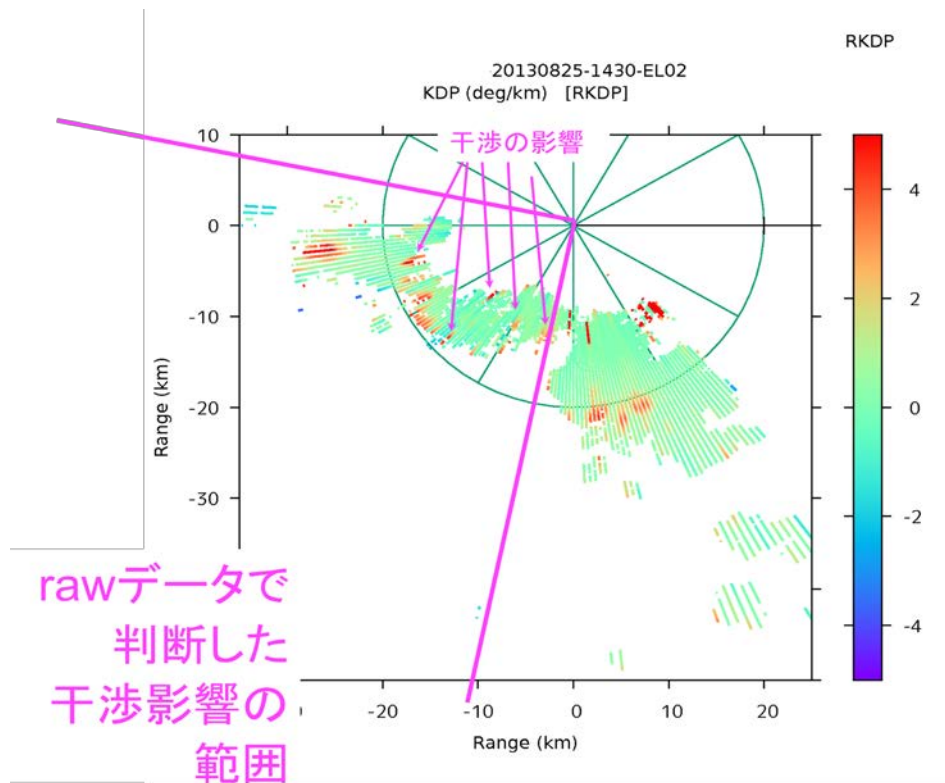


図参考 3-6 干渉が発生した時の一次処理データの PPI 画像

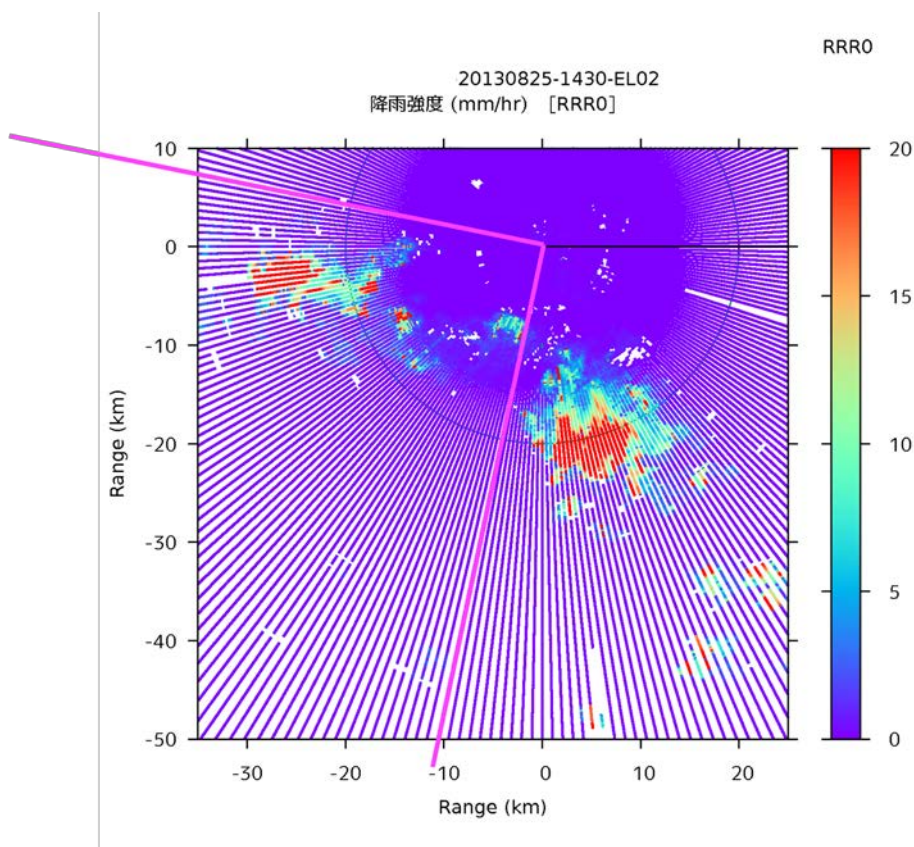
図参考 3-5 より、与干渉の影響が、受信電力 H ch(NOR)、受信電力 V ch(NOR)、スペクトル幅、水平・垂直偏波間位相差及び水平・垂直偏波間相関の PPI 画像上で確認された。さらに、一次処理データ（降雨に関する最終プロダクト）のうち、偏波間位相差変化率と降雨強度にわずかに与干渉の影響が認められた（図参考 3-6）。また、パルス圧縮されていない近傍範囲（6 km 以内）のデータを解析した結果、原データでは与干渉の影響を確認できるが、一次処理データでは与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、短パルス方式の気象レーダー（固定局）に対する航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。

図参考 3-7 と図参考 3-8 に干渉が確認された偏波間位相差変化率と降雨強度の拡大図を示す。除去できなかった干渉波は、1PPI（20 秒）の観測中の 5 秒程度で発生

し、その影響範囲は限定的（わずかな範囲）である。このため、気象レーダーで観測・処理された一次処理データを気象モデルに入力し降水予報を行う場合には、ほとんど影響がないと考えられる。



図参考 3-7 干渉が発生した時の偏波間位相差変化率の PPI 画像



図参考 3-8 干渉が発生した時の降雨強度の PPI 画像

(3) 検討3

検討3では、パルス方式の航空機 SAR が製造メーカーCの気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えるかどうかについて調査した。表参考3-10 に干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件を示す。

表参考3-10 干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件

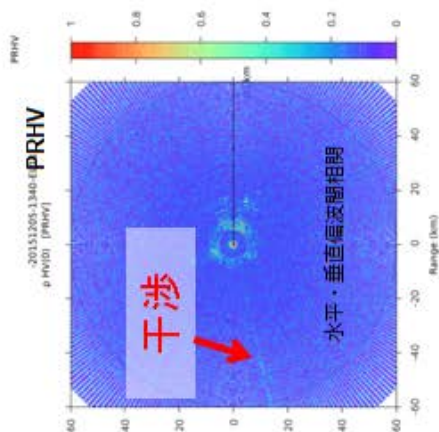
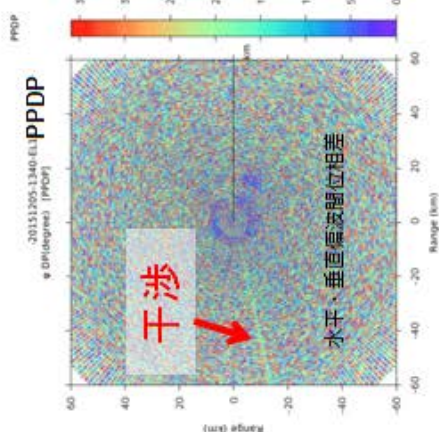
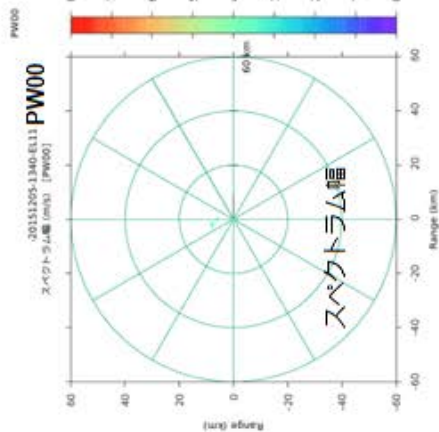
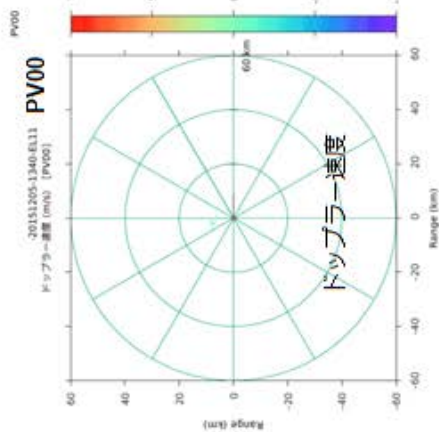
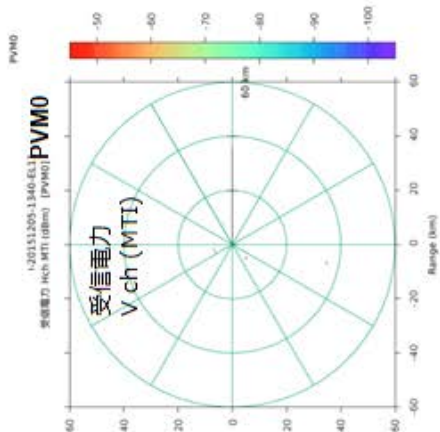
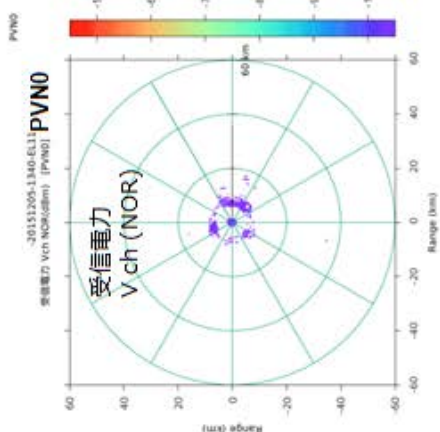
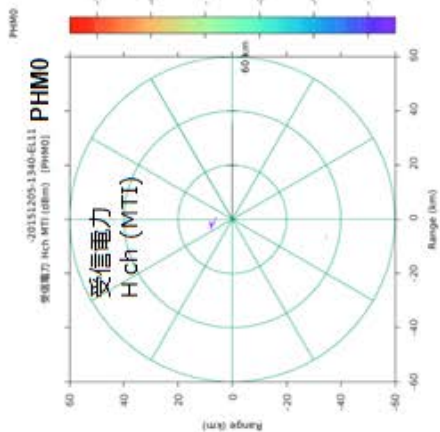
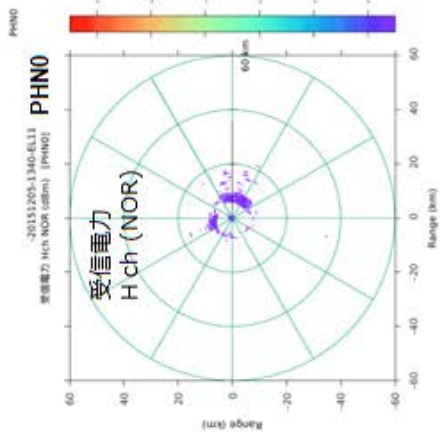
観測高度	気象レーダー（固定局）までの距離	気象レーダー（固定局）80km圏内の滞空時間	飛行条件	備考
8,887m	10,262m (最接近時)	4分45秒	飛行速度：145m/s 飛行方向：北東→南西	滞空時間は、気象レーダー（固定局）の80km圏内で電波を照射していた時間で定義

表参考3-11 に航空機 SAR の与干渉の調査結果を示す。

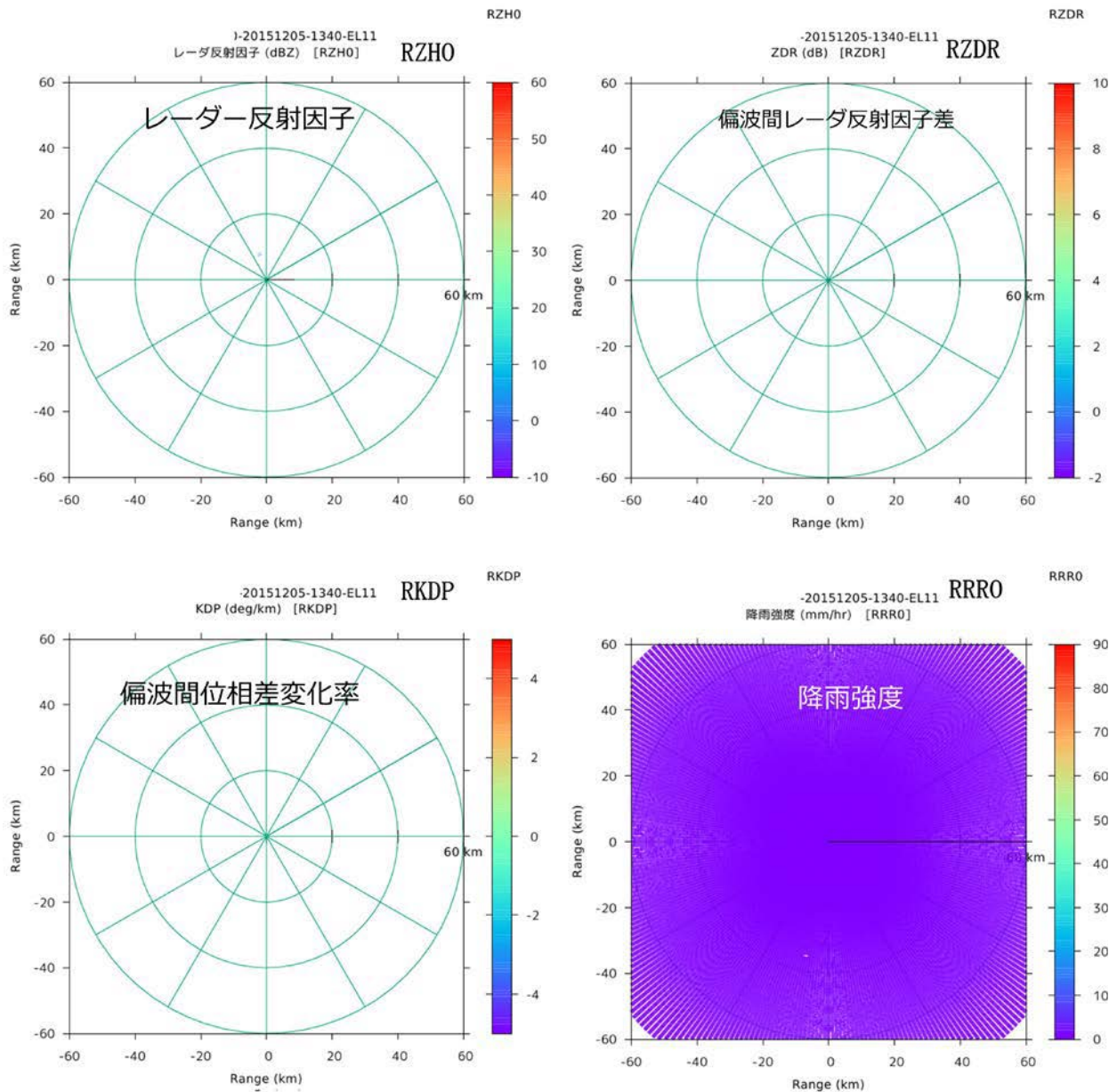
表参考3-11 航空機 SAR の与干渉の調査結果

気象レーダー（固定局）の仰角番号	干渉の有無		影響時間	備考
	原データ	一次処理データ		
02	無	無	0.0s	干渉波の影響は、原データの水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関のPPI画像で確認。
11	有	無	1.0s以下	
12	無	無	0.0s	
01	無	無	0.0s	

干渉が発生した時の仰角番号11の原データと一次処理データのPPI画像を図参考3-9と図参考3-10に示す。



図参考 3-9 干渉が発生した時の原データの PPI 画像（干渉は、水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関で発生）



図参考 3-10 干渉が発生した時の一次処理データの PPI 画像

図参考 3-9 より、与干渉の影響が、水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関の PPI 画像上で確認された。しかしながら、図参考 3-10 の一次処理データには、与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。また、パルス圧縮されていない近傍範囲（6 km 以内）のデータを解析した結果、原データでは与干渉の影響を確認できるが、一次処理データでは与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、短パルス方式の気象レーダー（固定局）に対する航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。

(4) 検討4

検討4では、FM-CW方式の航空機SARが製造メーカーBの気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えるかどうかについて調査した。表参考3-12に干渉検討を行ったときの航空機SARの観測条件を示す。

表参考3-12 干渉検討を行ったときの航空機SARの観測条件

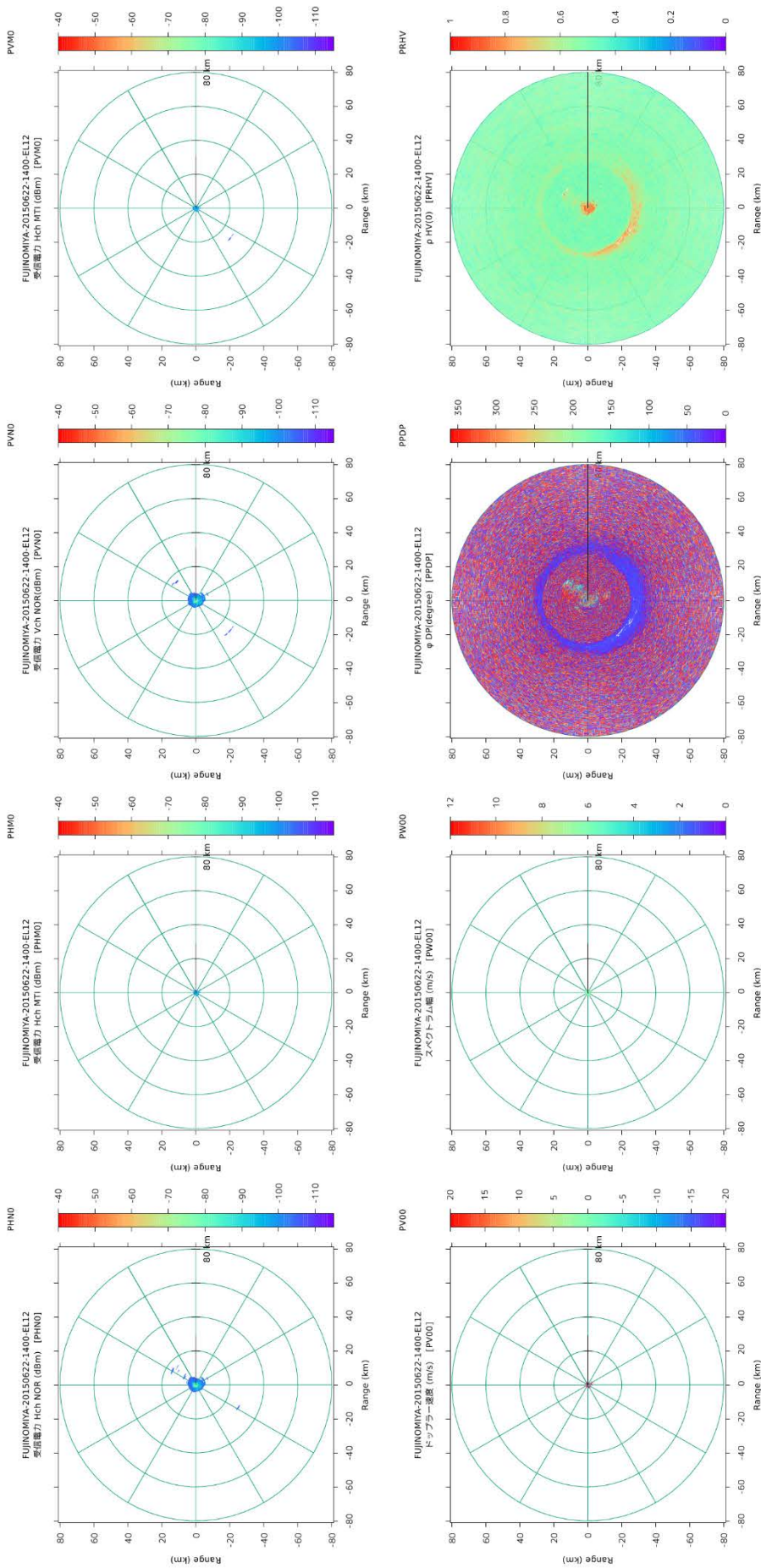
観測高度	気象レーダー（固定局）までの距離	気象レーダー（固定局）80km圏内の滞空時間	飛行条件	備考
4,976m	16,000m	2時間30分	飛行速度：74m/s	-

表参考3-13に航空機SARの与干渉の調査結果を示す。

表参考3-13 航空機SARの与干渉の調査結果

気象レーダー（固定局）の仰角番号	干渉の有無		影響時間	備考
	原データ	一次処理データ		
12	無	無	0.0s	-

FM-CW方式の航空機SARは、製造メーカーBの気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えない。航空機SARが製造メーカーBの気象レーダー（固定局）に最接近した時の原データのPPI画像を図参考3-11に示す。原データのPPI画面上に、与干渉の影響を確認することができなかった。



図参考 3-11 航空機 SAR が B 社の気象レーダー（固定局）に最接近した時の原データの PPI 画像

(5) 検討5

検討5では、FM-CW方式の航空機 SAR が製造メーカーCの気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えるかどうかについて調査した。表参考3-14に干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件を示す。

表参考3-14 干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件

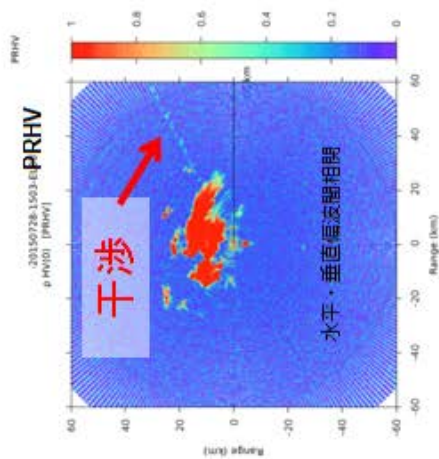
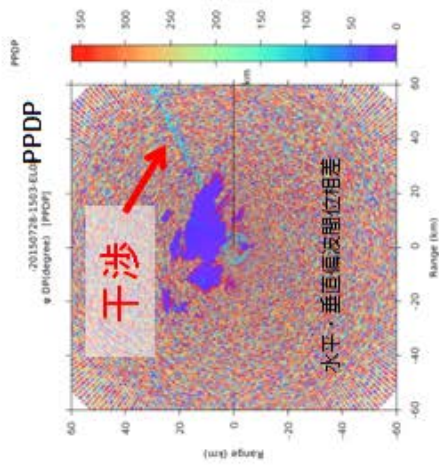
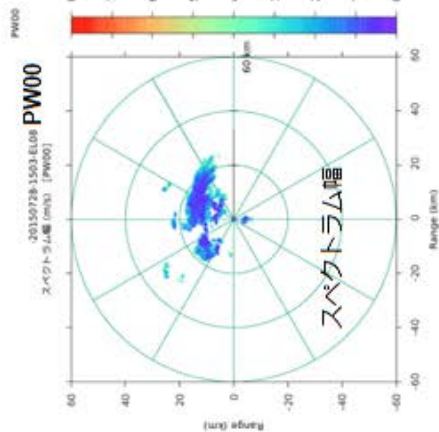
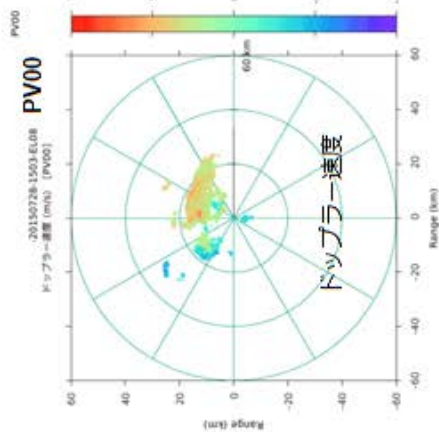
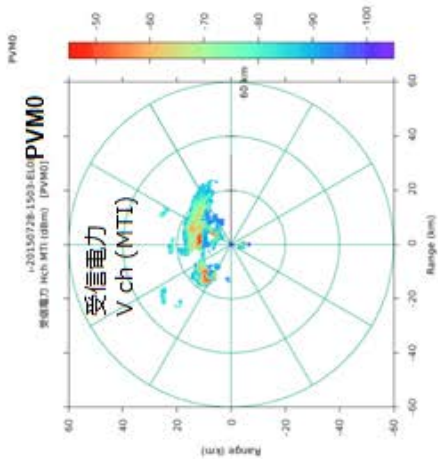
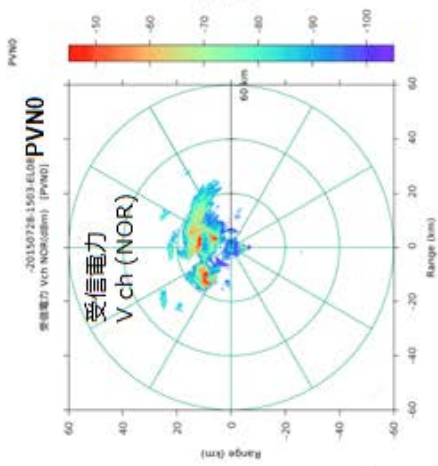
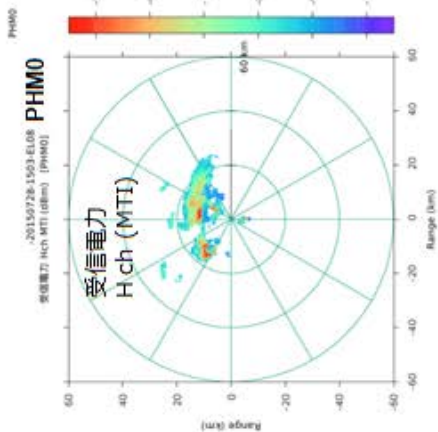
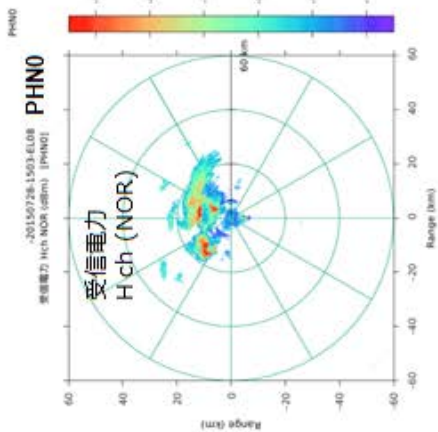
観測高度	気象レーダー（固定局）までの距離	気象レーダー（固定局）80km圏内の滞空時間	飛行条件	備考
4,939m	28,942m	3時間	飛行速度：107m/s 飛行方向：南→北	-

表参考3-15に航空機 SAR の与干渉の調査結果を示す。

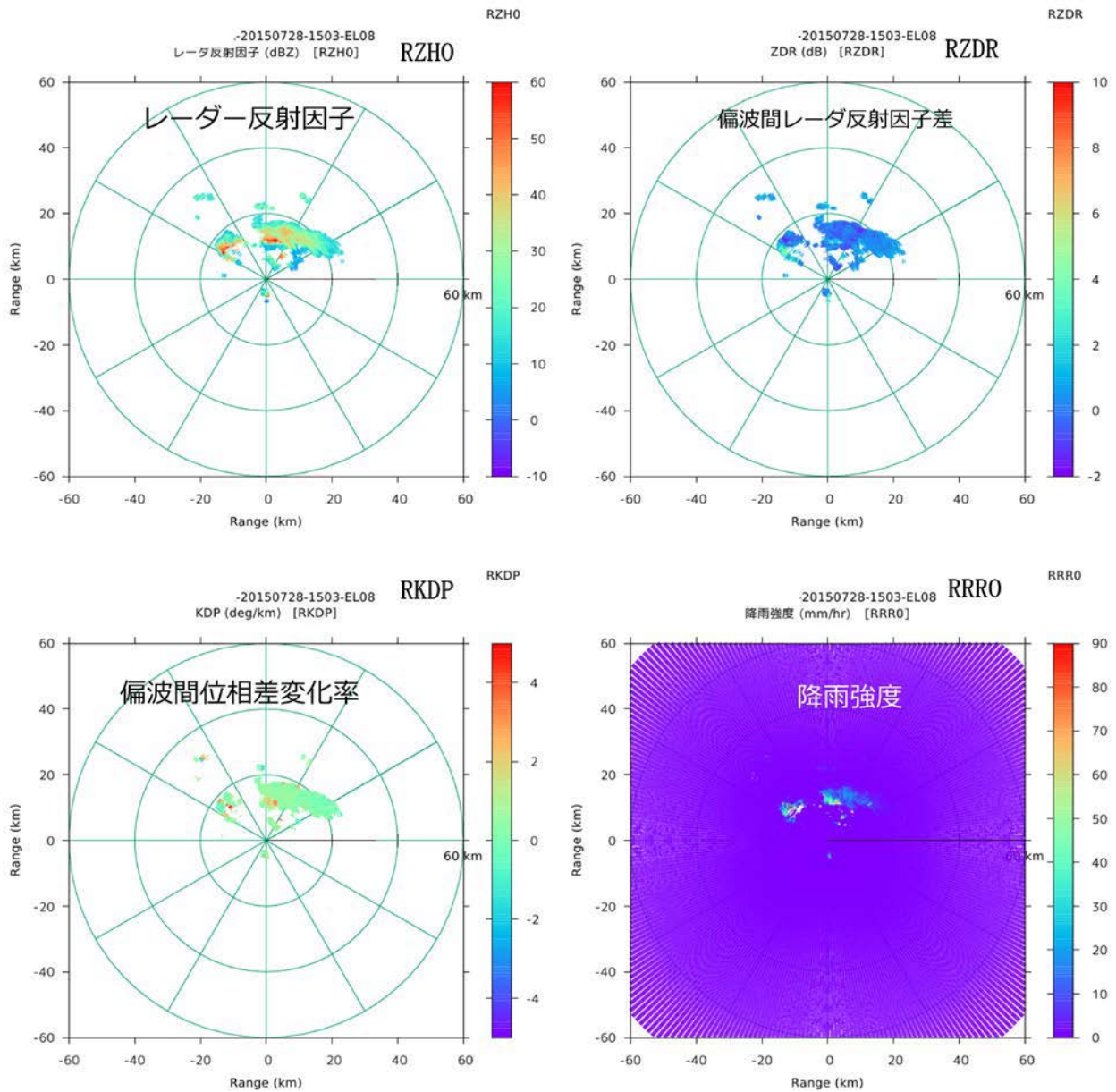
表参考3-15 航空機 SAR の与干渉の調査結果

気象レーダー（固定局）の仰角番号	干渉の有無		影響時間	備考
	原データ	一次処理データ		
08	有	無	1ビーム方向のみ	干渉波の影響は、原データの水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関のPPI画像で確認。

干渉が発生した時の仰角番号08の原データと一次処理データのPPI画像を図参考3-12と図参考3-13に示す。



図参考 3-12 干渉が発生した時の原データの PPI 画像 (干渉は、水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関で発生)



図参考 3-13 干渉が発生した時の一次処理データの PPI 画像

図参考 3-12 より、与干渉の影響が、水平・垂直偏波間位相差と水平・垂直偏波間相関の PPI 画像上で確認された。しかしながら、図参考 3-13 の一次処理データには与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。

(6) 検討6

検討6では、FM-CW方式の航空機 SAR が製造メーカーCの気象レーダー（固定局）に対して与干渉を与えるかどうかについて調査した。表参考3-16に干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件を示す。

表参考3-16 干渉検討を行ったときの航空機 SAR の観測条件

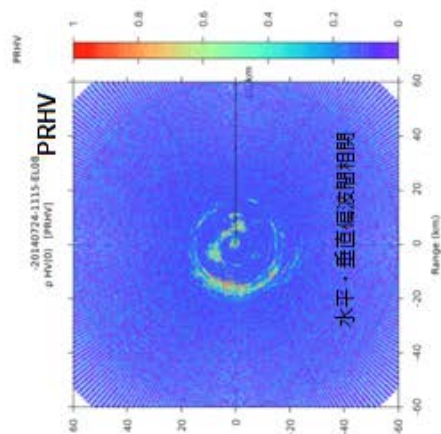
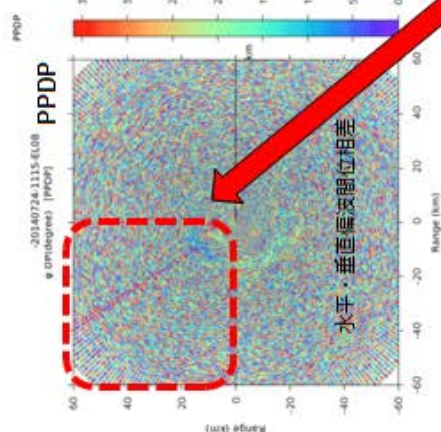
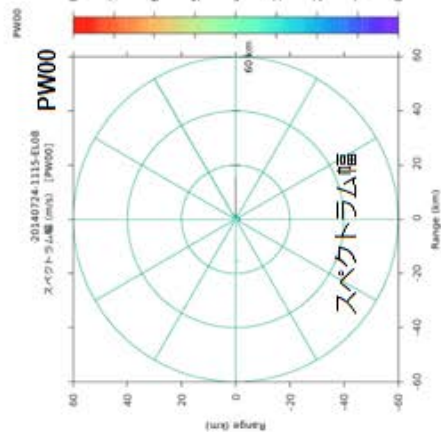
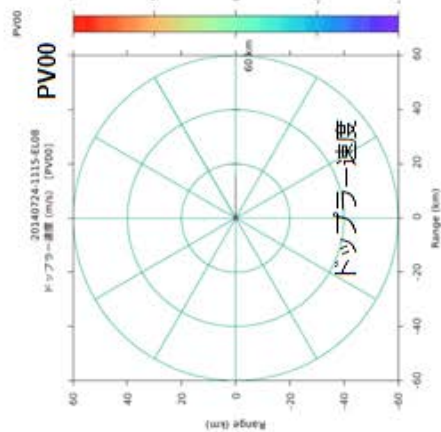
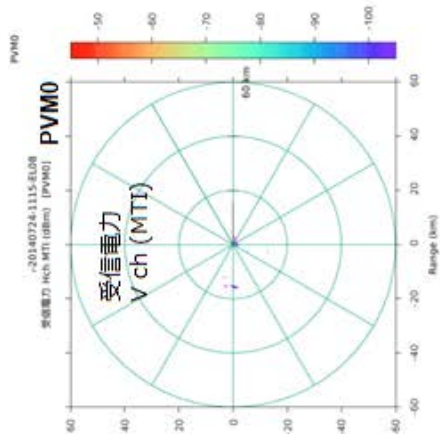
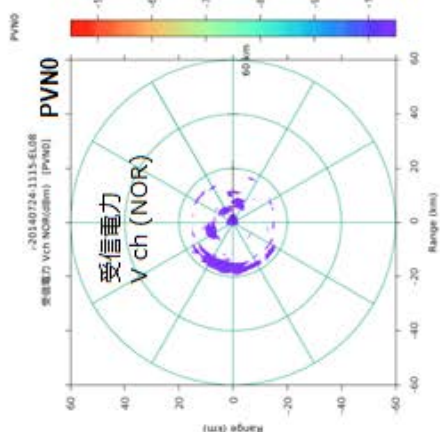
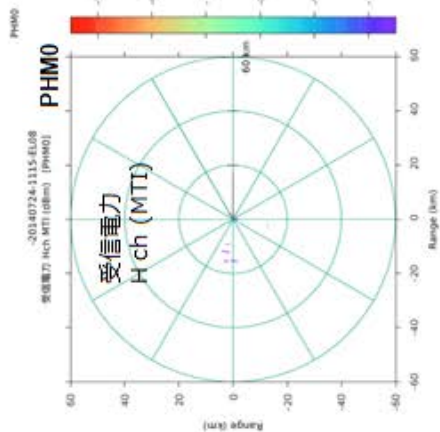
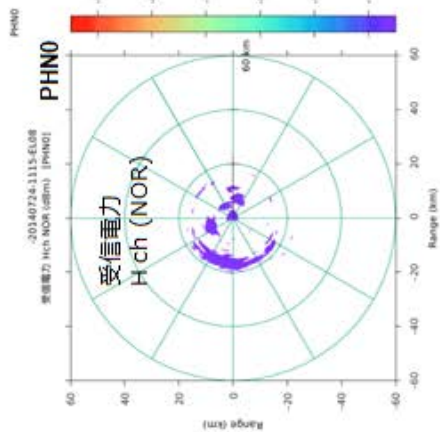
観測高度	気象レーダー（固定局）までの距離	気象レーダー（固定局）80km圏内の滞空時間	飛行条件	備考
2,340m	40,118m	1時間8分	飛行速度：78m/s 飛行方向：北西→南東	-

表参考3-17に航空機 SAR の与干渉の調査結果を示す。

表参考3-17 航空機 SAR の与干渉の調査結果

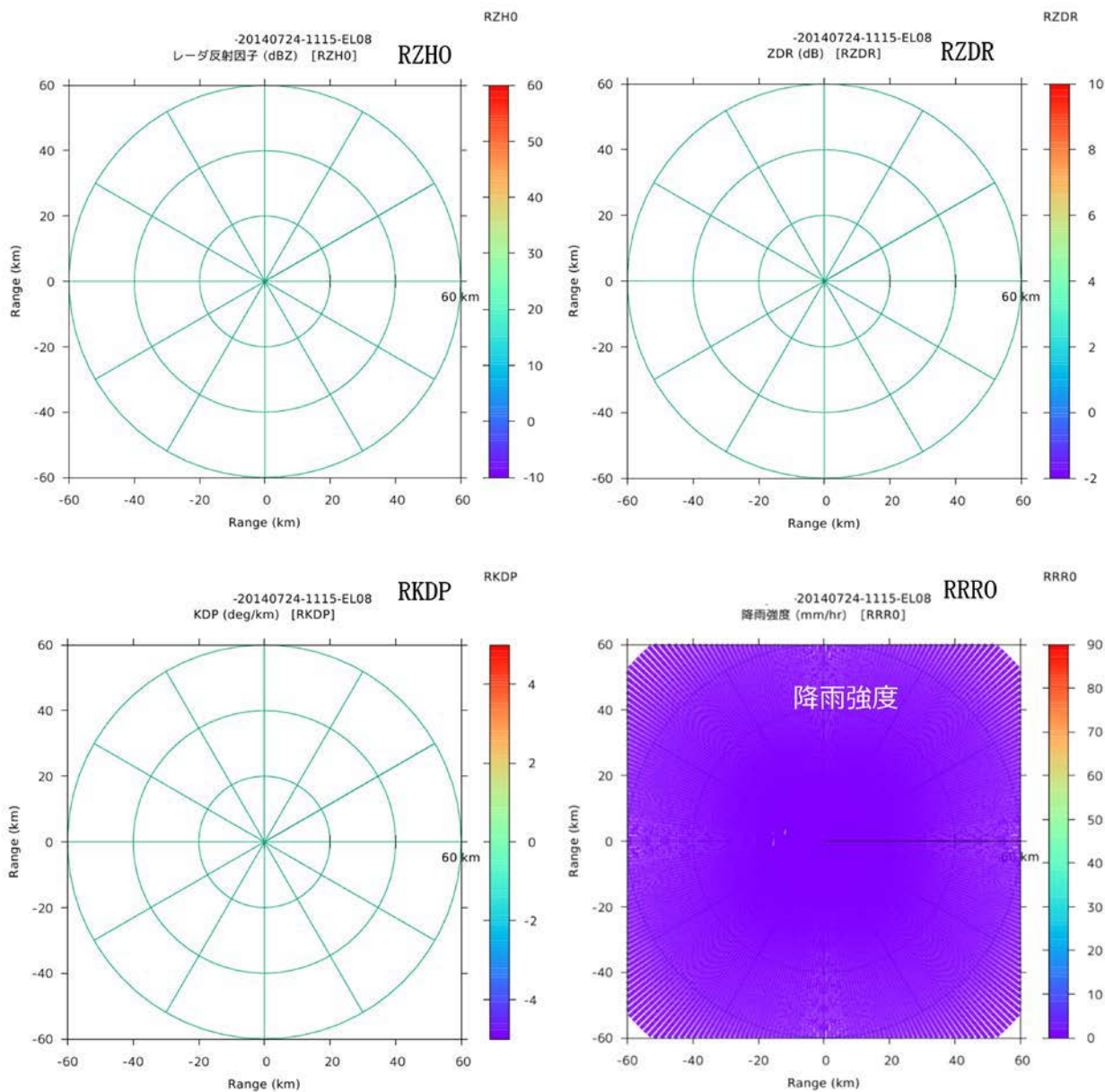
気象レーダー（固定局）の仰角番号	干渉の有無		影響時間	備考
	原データ	一次処理データ		
09	有	無	1ビーム方向のみ	干渉波の影響は、原データの水平・垂直偏波間位相差のPPI画像のみで確認。

干渉が発生した時の仰角番号09の原データと一次処理データのPPI画像を図参考3-14と図参考3-15に示す。



航空機SARによる干渉信号

図参考3-14 干渉が発生した時の原データのPPI画像（干渉は、水平・垂直偏波間位相差で発生）



図参考 3-15 干渉が発生した時の一次処理データの PPI 画像

図参考 3-14 より、与干渉の影響が、水平・垂直偏波間位相差の PPI 画像上で確認された。しかしながら、図参考 3-15 の一次処理データには与干渉の影響を確認することができなかった。このことより、航空機 SAR の干渉波の影響は、原データから降雨に関する物理量に変換する信号処理によって除去される。

(7) 干渉検討結果

検討 1～検討 6 の結果、気象レーダー（固定局）に対する航空機 SAR の与干渉は表参考 3-18 のようになる。

表参考 3-18 気象レーダー（固定局）に対する航空機 SAR の与干渉

送信方式		気象レーダー（固定局）					
		パルス圧縮方式			短パルス方式		
製造メーカー		A	B	C	A	B	C
航空機SAR	パルス方式	※1	※2	※1	※1	※1	※1
	FM-CW方式	-	※3	※3	※4	-	-

※1：原データには干渉の影響を確認できるが、一次処理データには干渉の影響が確認されない。

※2：原データには干渉の影響を確認でき、一次処理データにわずかな干渉の影響が確認される。

※3：原データにわずかな干渉の影響を確認できるが、一次処理データには干渉の影響が確認されない。

※4：原データと一次処理データに干渉の影響が確認されない。

また、パルス圧縮方式の気象レーダー（固定局、製造メーカーA社）に対するFM-CW方式の航空機SARの与干渉は、他の検討ケースの結果から原データでは発生するが一次処理データでは信号処理によって除去されると思われる。また、短パルス方式の気象レーダー（固定局、製造メーカーB社とC社）に対するFM-CW方式の航空機SARの与干渉は、他の検討ケースの結果から発生しないと思われる。表参考3-19に、最終的な干渉検討結果を示す。

表参考 3-19 最終的な干渉検討結果

送信方式		気象レーダー（固定局）					
		パルス圧縮方式			短パルス方式		
製造メーカー		A	B	C	A	B	C
航空機SAR	パルス方式	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	FM-CW方式	○	◎	◎	◎	○	○

◎：検討結果に基づき共用可能

○：他ケースの検討結果から共用可能と推定

5 結論

気象レーダー（固定局）の製造メーカー3社のデータ（雨天時含む。）を確認したところ、気象レーダー（固定局）においては、周波数を共用しているため、アンテナで取得された原データでは航空機SARの与干渉を確認した。しかしながら、気象レーダー（固定局）の原データを解析して得られる一次処理データ（降雨に関する最終プロダクト）では、航空機SARからの干渉波はほぼ除去される。このことから、今回の観測条件の範囲において両システムは共用可能である。しかしながら、今後、航空機SARの運用に起因する影響が確認された場合は、運用見直し等の干渉回避に関して協議する必要があると思われる。

参考資料 4 精密進入レーダーとの共用検討（詳細）

1 検討に使用した航空機 SAR の詳細

検討に使用した航空機 SAR は、国内で運用されているパルス方式と FM-CW 方式の航空機 SAR とした。表参考 4-1 にその諸元を示す。

表参考 4-1 検討に使用した航空機 SAR の諸元

検討航空機 SAR	A	B	C	D
方式	パルス方式	パルス方式	FM-CW 方式	FM-CW 方式
中心周波数	9,550MHz (9,300~ 9,800MHz)	9,450MHz (9,200~ 9,700MHz)	9,650MHz (9,500~ 9,800MHz)	9,600MHz (9,450~ 9,750MHz)
周波数帯域幅	500MHz	500MHz	300MHz	300MHz
空中線電力	8kW（尖頭電力）	1kW（尖頭電力）	10W	10W
等価等方輻射電力	63.5dBW	47.1dBW	30.0dBW	30.0dBW
偏波	HH, VV, HV, VH	HH, VV, HV, VH	HH	HH, VV, HV, VH
オフナディア角	10° ~65°	45° ~75°	55° ~75°	55° ~80°
飛行速度	200m/s	120m/s	72m/s	100m/s
飛行高度 (運用高度)	13,000m 以下 (8,382m)	8,000m 以下 (3,048m)	5,000m 以下 (3,048m)	8,000m 以下 (3,048m)
9,180MHz に おける減衰量	-55dB	-28dB	-42dB	-42dB

2 検討に使用した精密進入レーダー（PAR）の詳細

検討に使用した PAR の諸元は、ITU-R によって調査された衛星 SAR（Xバンド）と電波航法・電波測位の共用に関する検討（PAR との共用検討も含む）の報告（ITU-R 報告 M.2081-0、平成 18 年）の値を用いた。表参考 4-2 にその詳細を示す。

表参考 4-2 検討に使用した PAR の諸元

項目	仕様
周波数	9,000MHz~9,180MHz
アンテナゲイン	42dBi
受信帯域幅	2MHz
NF	3.25dB
仰角範囲	-1° ~7°
方位範囲	-10° ~10°
AZ ビーム幅	1.3°
EI ビーム幅	0.75°
偏波	円偏波
ノイズレベル	-107.57dBm

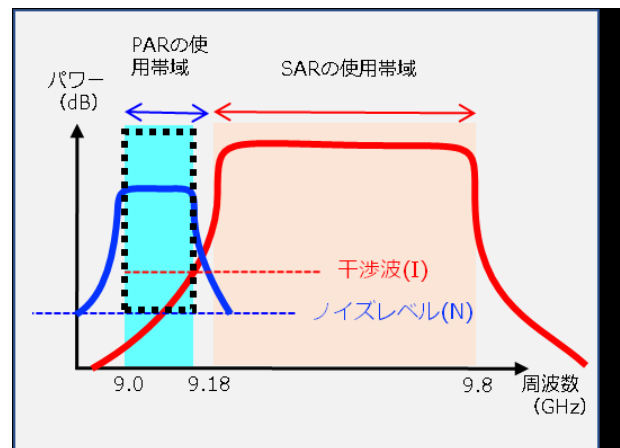
3 航空機 SAR の干渉

航空機 SAR の与干渉は、図参考 4-1 に示すように航空機 SAR の送信波のパワーが PAR の帯域内で干渉許容レベルを超える時に発生する。

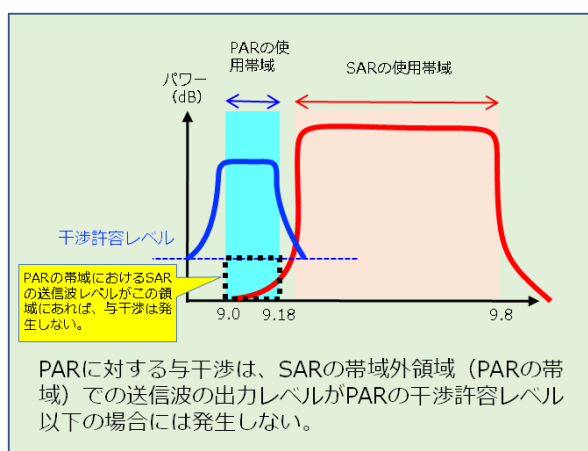
ITU-R では、平成 18 年に衛星 SAR (Xバンド) と電波航法・電波測位の共用に関する検討 (PAR との共用検討も含む) を行い、ITU-R 報告 M.2081 として取りまとめている。本報告によれば、衛星 SAR の送信波のパワー (I) と PAR のノイズレベル (N) の比 (I/N 比) が 30dB 以下であれば、PAR への与干渉はない。図参考 4-1 に合成開口レーダーの送信波のパワーと PAR のノイズレベルの関係を示す。また、本報告書では、I/N 比の大きさによって PAR への影響評価を下記のように分類している。なお、本報告書の検討で使用した PAR には、干渉除去機能は具備されていなかった。

- (1) I/N 比 < 30dB : 干渉なし
- (2) 30dB < I/N 比 < 50dB : 弱い干渉
- (3) I/N 比 > 50dB : 強い干渉

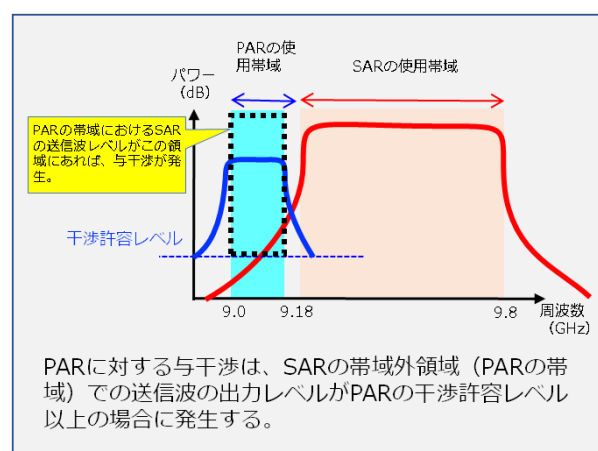
図参考 4-3 に干渉がない時の画面を示し、図参考 4-4 ~ 図参考 4-6 に干渉が発生した時の画面の例を示す。



図参考 4-1 合成開口レーダーの送信波のパワーと PAR のノイズレベルの関係

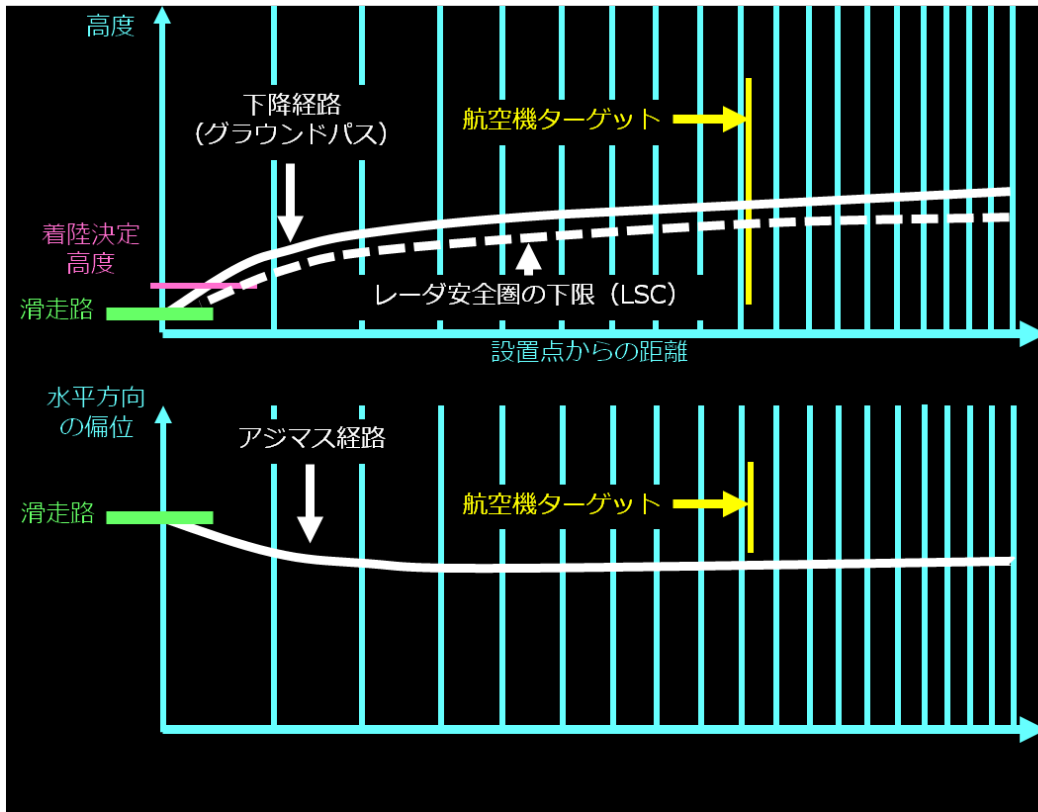


(a) 干渉が発生しない場合

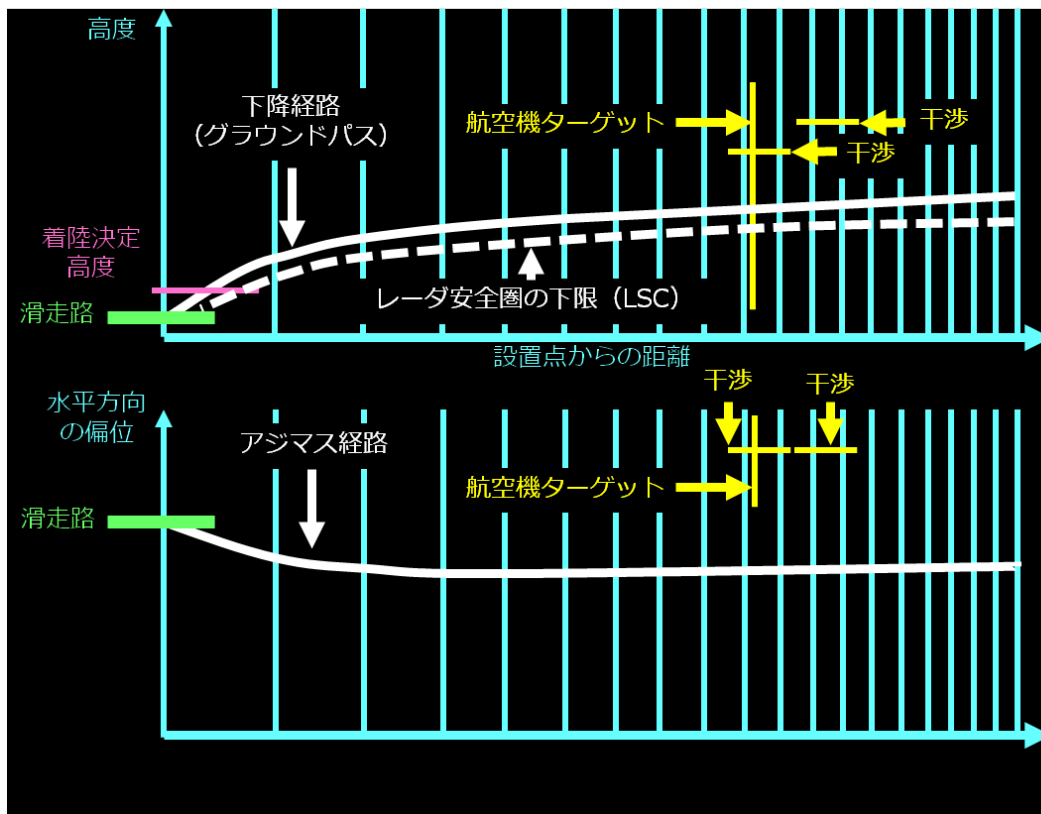


(b) 干渉が発生する場合

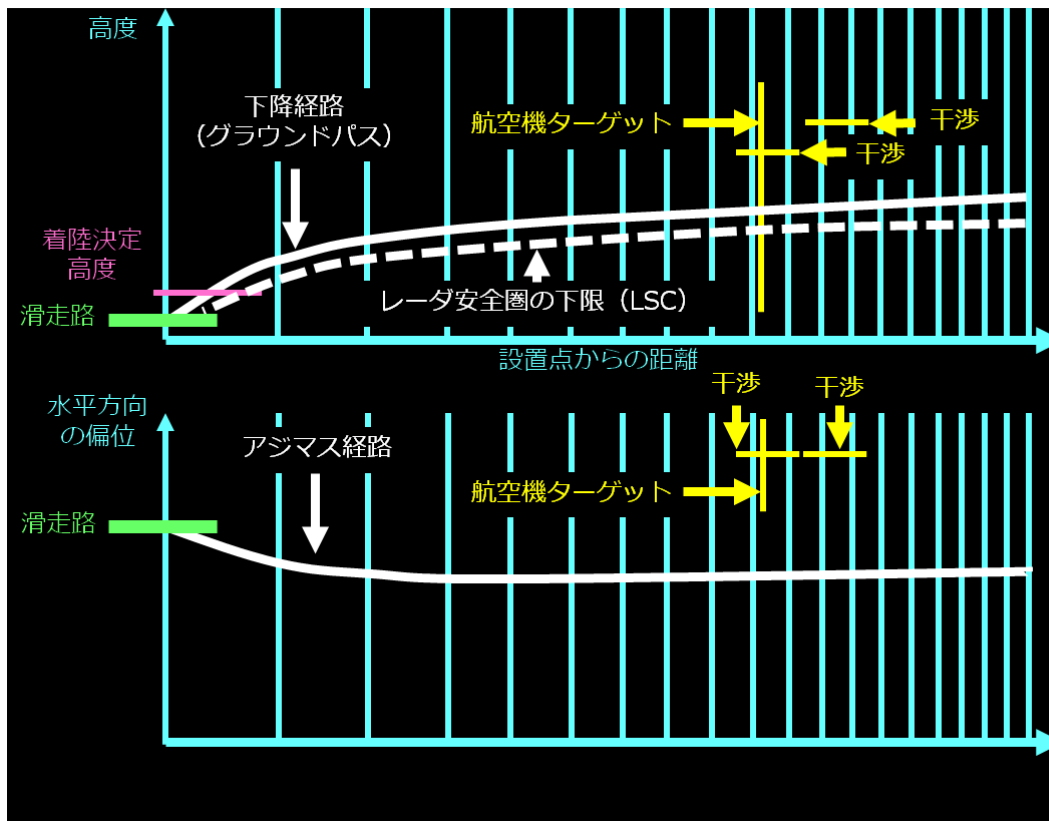
図参考 4-2 干渉発生メカニズム



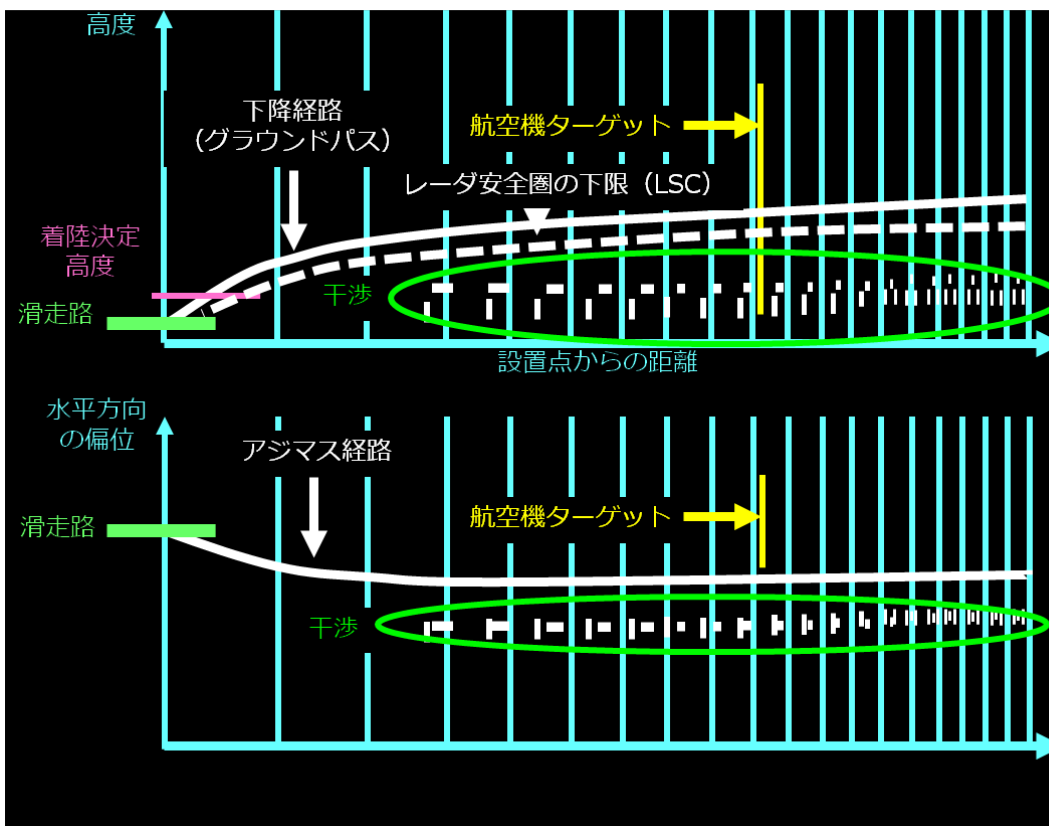
図参考 4-3 干渉が無い時の PAR の画面 (ITU-R 報告 M. 2081)



図参考 4-4 弱い干渉 ($30\text{dB} < I/N \text{ 比} < 50\text{dB}$) が発生した時の PAR の画面 (ITU-R 報告 M. 2081)



図参考 4-5 強い干渉 (I/N 比 > 50dB) が発生した時の PAR の画面 (ITU-R 報告 M. 2081)

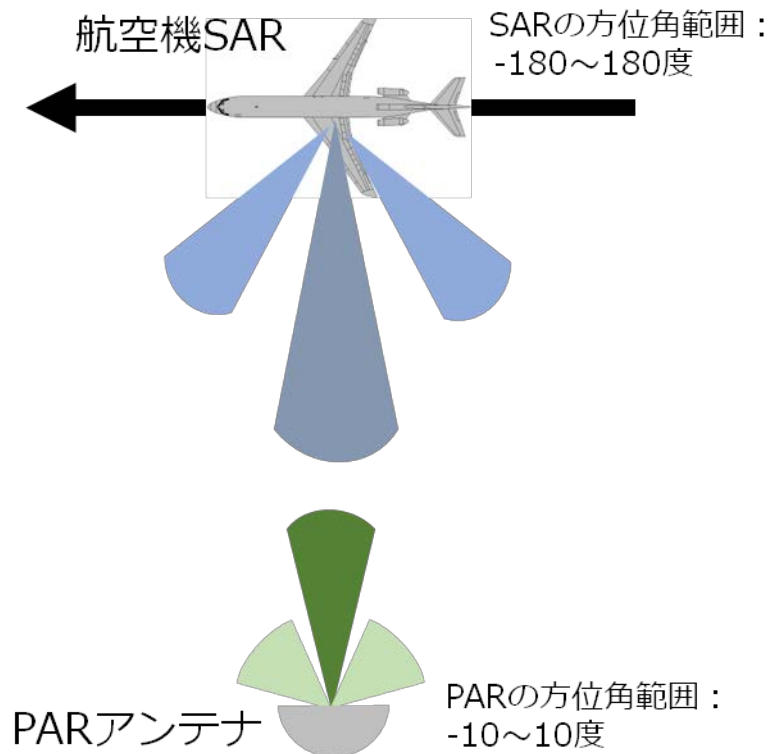


図参考 4-6 距離方向に連続する干渉が発生する時の PAR の画面 (ITU-R 報告 M. 2081)

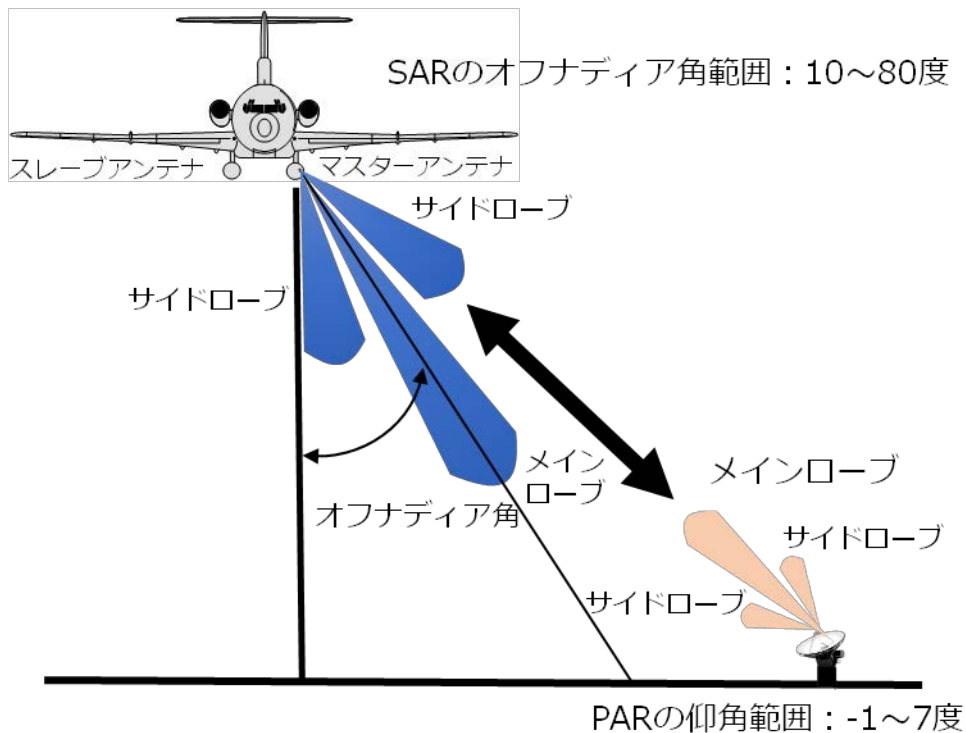
PARにおいて干渉が発生すると、干渉波によって航空機とは別の位置に反射物（偽像）がPARの画面上に映像化される。しかしながら、航空機SARの与干渉によって発生する偽像は、航空機からの反射パターンと異なり、さらに、その偽像は、航空機SARがPARの正面を通過する数秒～数十秒の間、PARの画面上に出現したり消えたりするため、両者を識別することは可能である。偽像が出現するタイミングは、航空機SARの送信周期とPARの受信周期との関係で決まり、両者の周期が同期した際に連続して発生するが、同期する可能性は極めて低い。以上より、偽像によってPARの運用が大きな影響を受けることはないと思われる。また、一部のPARに具備される干渉除去機能（船舶航行レーダーで具備されている干渉除去機能と同様の機能）が有効な場合には、干渉波の影響は低減、又は完全に除去されると思われる。

4 既存の航空機SARの与干渉

国内で運用されている航空機SARが、PARに与干渉を発生させるのかを机上検討した。検討では、国内で運用されているパルス方式とFM-CW方式の航空機SAR（それぞれ2式ずつ）を対象に、PARに与干渉を発生させるかどうかを確認した。干渉検討では、方位方向と仰角方向の最悪条件下で検討した。方位方向の最悪条件は、図参考4-7に示す通り航空機SARがPARの真横（PARと航空機SARのメインビームが正対）にあるときである。一方、仰角方向では、PARと航空機SARのメインビームのピークは正対しない。仰角方向の最悪条件は、図参考4-8に示すとおり航空機SARのオフナディア角が最大時における航空機SARのサイドローブがPARのメインビームで受信されるときである。



図参考4-7 方位方向の最悪条件

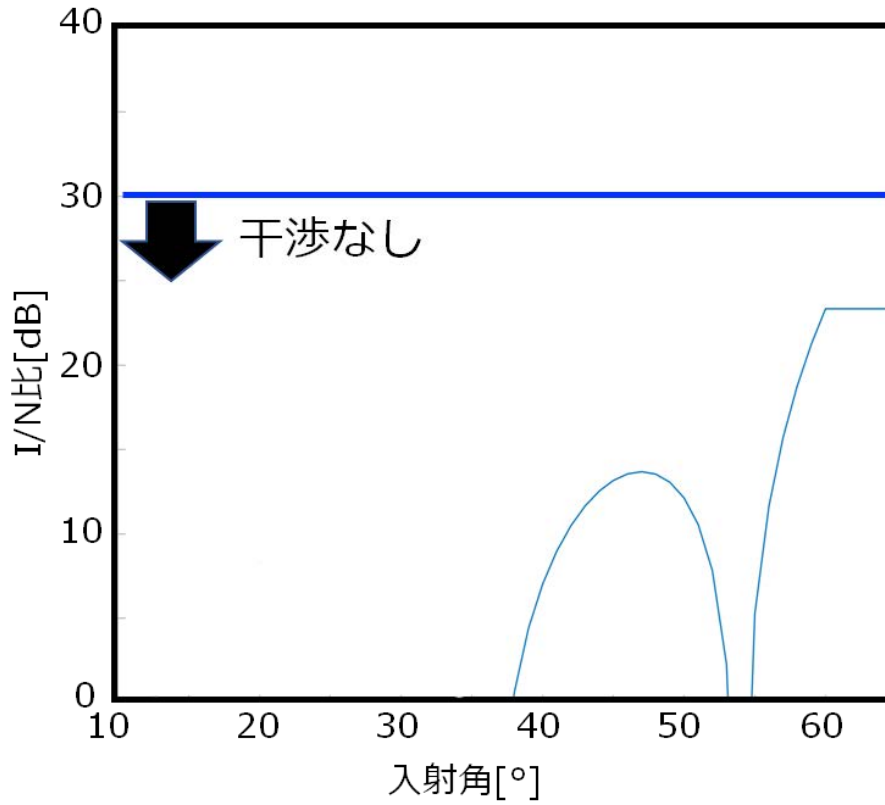


図参考4-8 仰角方向の最悪条件

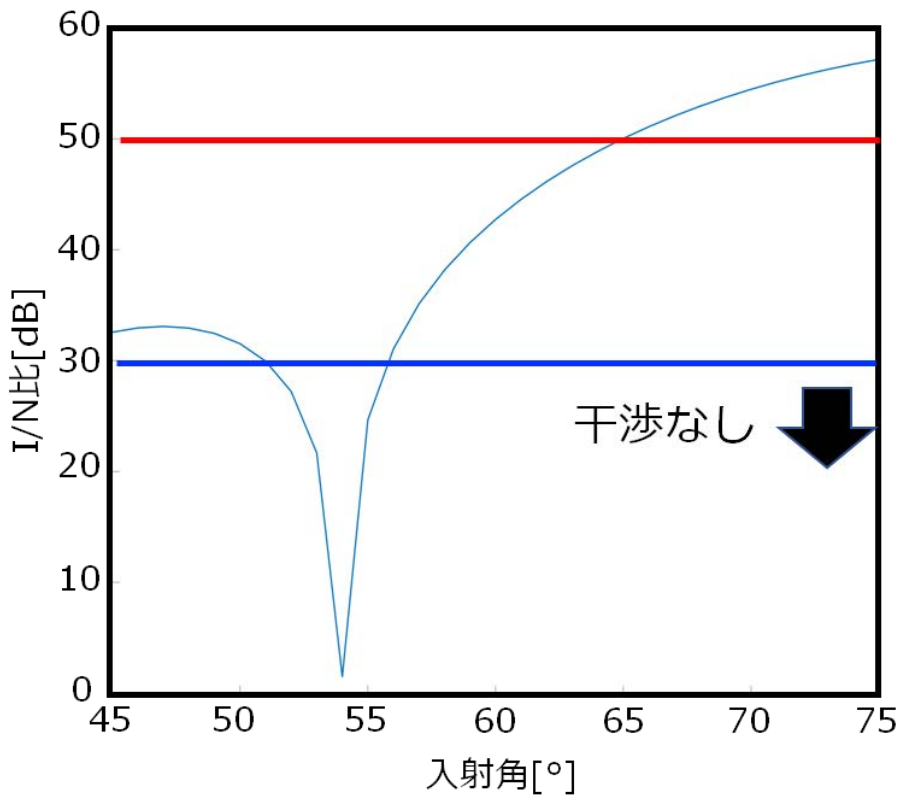
図参考4-9～図参考4-11に、各航空機 SAR システムに対する航空機 SAR の地表面に対する入射角ごとの I/N 比の値を示す。航空機 SAR は、目的とする入射角に合わせてボアサイトの方向を操作する。

通常は、入射角とボアサイトの方向は同じであるが、システムによっては両者が異なる場合がある。例えば、システム A では、入射角が 60° 以上になるとボアサイトの方向と入射角の方向が異なる。システム A のボアサイトの運用範囲は、 $35^\circ \sim 60^\circ$ である。このため、入射角 60° 以上になると I/N 比の値が一定となる。

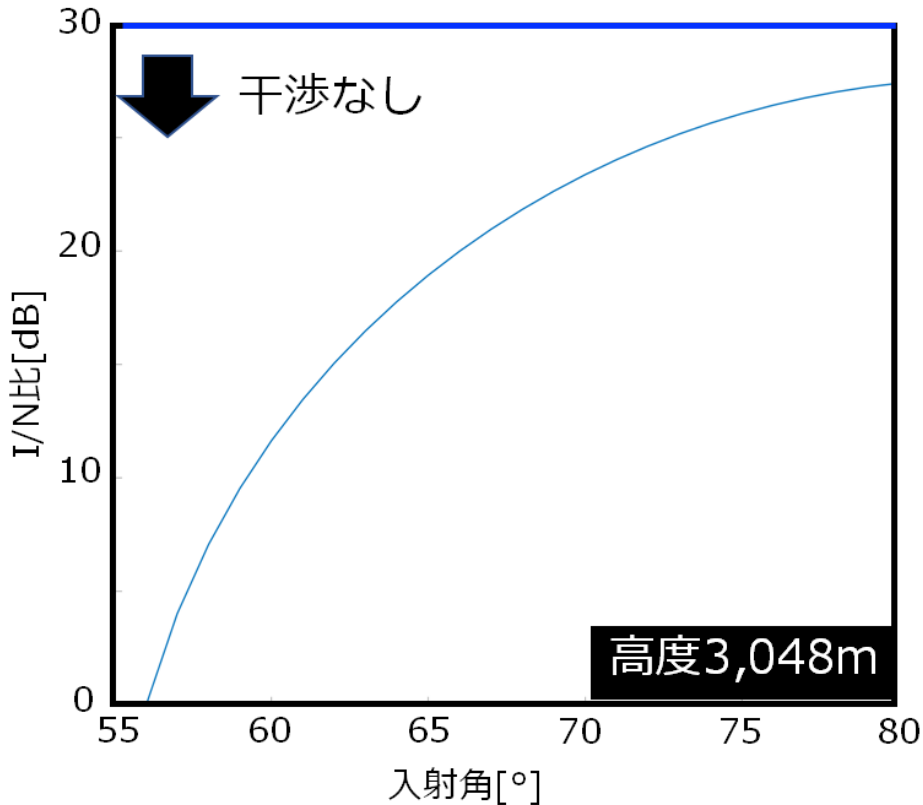
図参考4-9～図参考4-11より、システム A、C 及び D では、与干渉は発生しない。一方、システム B では、入射角 $45^\circ \sim 52^\circ$ 、 $56^\circ \sim 64^\circ$ で弱い干渉が発生し、入射角 $64^\circ \sim 75^\circ$ で強い干渉が発生する可能性がある。



図参考 4-9 システムAにおける入射角と I/N 比の関係



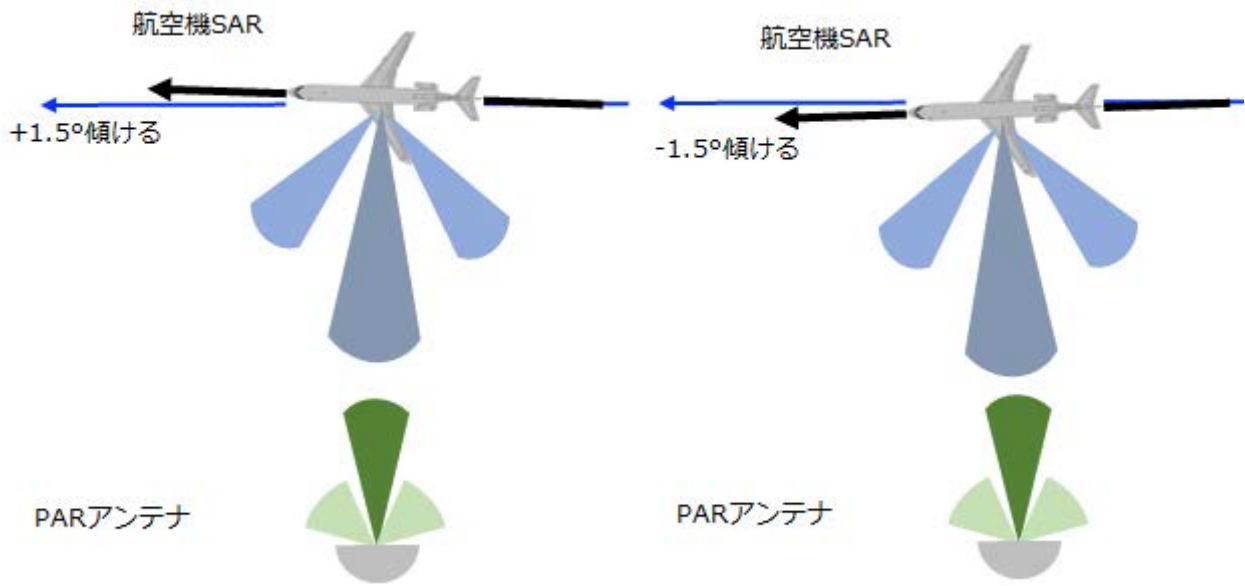
図参考 4-10 システムBにおける入射角と I/N 比の関係



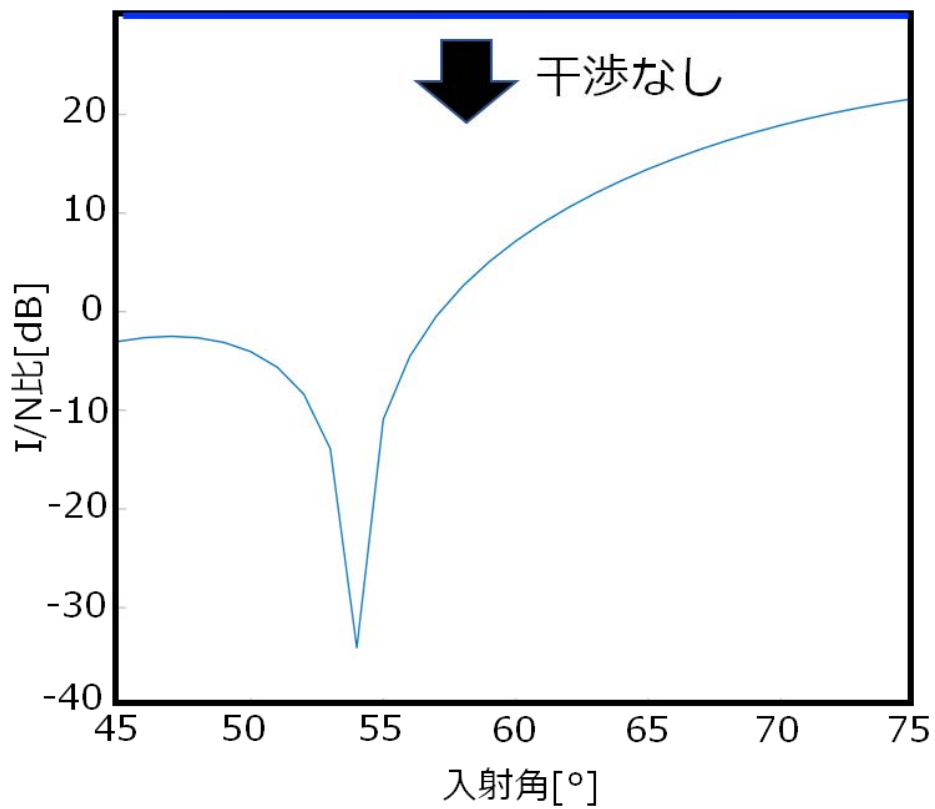
図参考 4-11 システム C と D における入射角と I/N 比の関係

5 与干渉回避のための運用

システム B では、入射角によっては与干渉を発生させる可能性がある。ここでは、システム B を対象に PAR に対する与干渉を回避する運用について検討する。PAR のメインビームは非常に鋭く、また、ビーム操作範囲が限定されている。このため、方位方向において SAR のメインビームと PAR のメインビームが正対しないようにすることで、干渉を回避することができる。本検討では、方位方向において航空機 SAR のメインビームと PAR のメインビームが正対する状況（航空機 SAR が PAR の真横にあるとき）からどれくらい航空機 SAR の進行方向を変化させられるのかを数値シミュレーションによって調査した。数値シミュレーションによって、方位方向において航空機 SAR のメインビームと PAR のメインビームが正対する状態（航空機 SAR が PAR の真横にあるとき）から $\pm 1.5^\circ$ 以上ずらすことで干渉を回避することができることがわかった。図参考 4-12 に干渉回避のための運用方法を示す。また、干渉を回避する運用を実施した時のシステム B の入射角と I/N 比の関係を図参考 4-13 に示す。干渉を回避する運用を実施することで、干渉が発生しないことを確認できる。

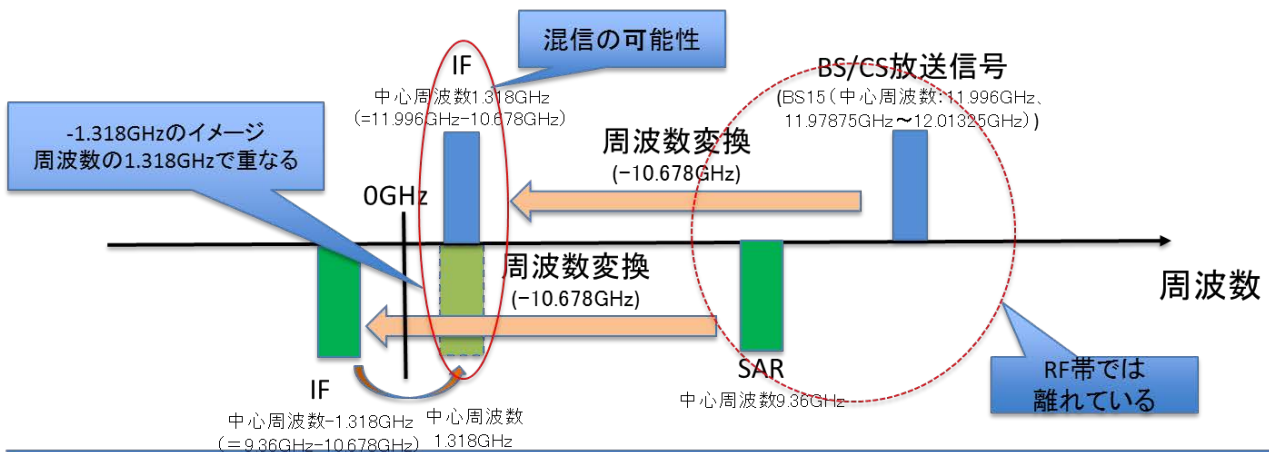


図参考 4-12 干渉を回避する運用（干渉を回避する航空機 SAR の運用）



図参考 4-13 干渉を回避する運用後のシステムBにおける入射角と I/N 比の関係

参考資料5 BS/CS受信設備との共用検討（詳細）



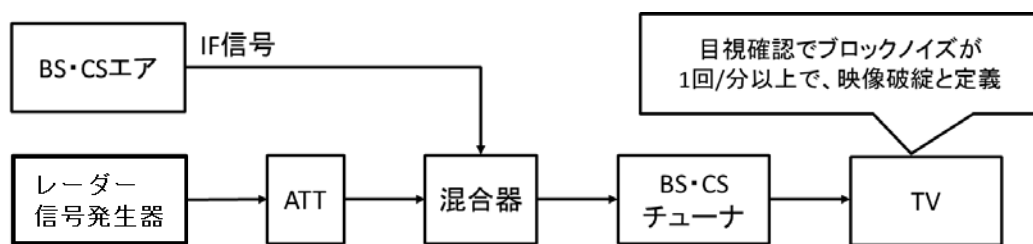
図参考5-1 イメージ混信について

図参考5-1のとおり、航空機 SAR の送信周波数と BS/CS 放送の受信周波数は 2GHz 近く離れているにもかかわらず、イメージ混信を起こす可能性がある。そのため、本検討では、映像破綻 C/I 比を明らかにするとともに、現在、運用されている航空機 SAR を用いた干渉実験を実施することで、イメージ混信による映像破綻の有無を調査した。

1 室内実験

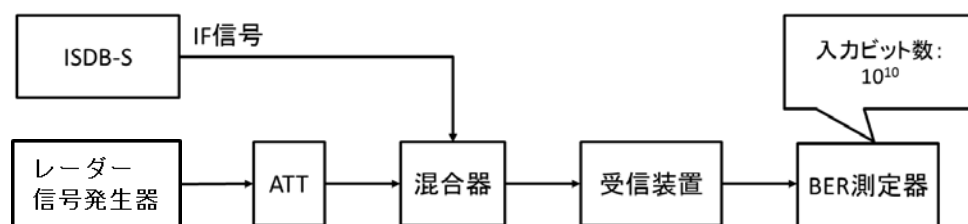
(1) 実験の目的

室内実験は、航空機 SAR の送信波に対する BS/CS 放送受信装置の許容干渉電力を決めるために、映像破綻を起こすときの BS 受信機入力端での映像破綻 C/I 比を調査することを目的に実施した。また、エラーフリー C/I 比を明らかにすることも目的とする。



SAR送信信号模擬 レベル変化

図参考5-2 【実験1】映像破綻を引き起こす送信波のレベルの調査



SAR送信信号模擬 レベル変化

図参考5-3 【実験2】エラーフリーとなる送信出力の計測

(2) 実験方法

本実験では、2種類の実験を実施した。実験1では、レーダー信号発生器で発生させたBS/C S放送受信装置のIF段での航空機 SAR の送信信号とBS/C S放送受信装置で受信した信号を混合器によって合成させることで映像破綻C/I比を調査した。本調査では、BS/C S受信波電力(C)として帯域幅28.86MHz当たりの平均電力 C_{ave} と干渉電力(I)として航空機 SAR の送信波のピーク電力 I_{peak} として評価した。実際には、混合器に入力する航空機 SAR の送信波の出力を変化させ、映像上で破綻が発生する送信波レベルを目視で確認した。また、航空機 SAR の送信波のパルス幅もパラメータとして評価した。映像破綻は、航空機 SAR の送信波を混合した映像中にブロックノイズ等が1回/分以上発生したものを映像破綻と定義した。実験2では、同じくIF段で、エラーフリー(入力ビット数は10の10乗)となる航空機 SAR の送信出力をBER測定器によって計測した。

航空機 SAR の送信信号(波形)について、パルス方式とFM-CW方式における変調形式は線形周波数変調を使用し、レーダー波のパルス幅を変えることで両者の評価を行った。パルス方式の実験では、レーダー波のパルス幅を5 μ s、15 μ s、30 μ s、40 μ sとし、FM-CW方式の実験では、レーダー波のパルス幅を100 μ sとした。パルス繰返し周波数は2kHz(周期は500 μ s)とした。

(3) 測定結果

実験より明らかになった航空機 SAR の送信波のパルス幅と映像破綻又はエラーフリーとなる C_{ave}/I_{peak} のレベルの関係を表参考5-1に示す。本実験条件の範囲内において、航空機 SAR の送信出力をBS受信機入力端での C_{ave}/I_{peak} が本表の値より大きくなるようにすれば映像破綻は回避することができる。

表参考5-1 航空機 SAR 送信波のパルス幅と映像破綻C/I比及びエラーフリーC

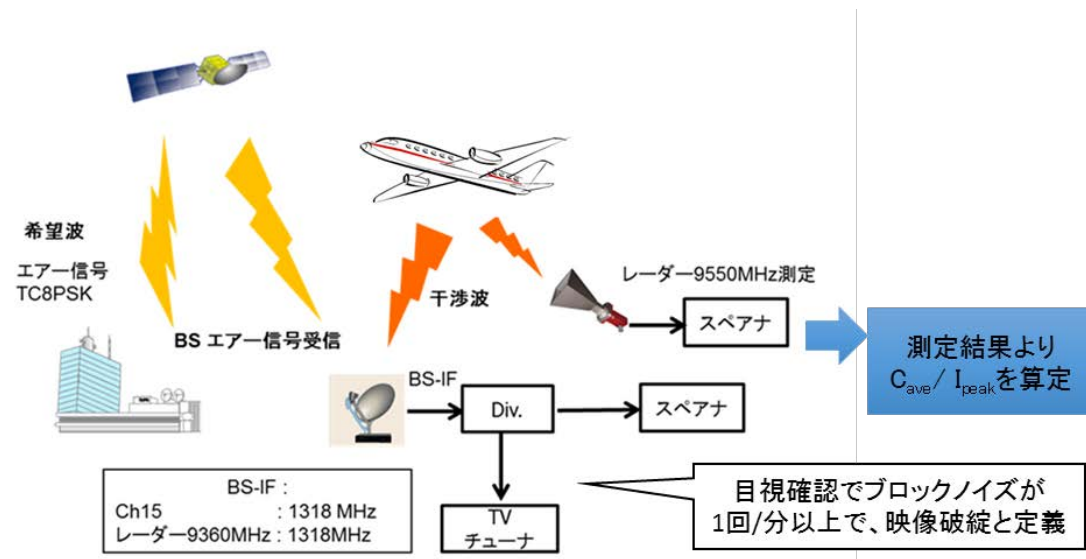
航空機 SAR 送信波の パルス幅	[実験1結果] BSエアの映像破綻	[実験1結果] CSエアの映像破綻	[実験2結果] エラーフリー
5 μ s	0.4dB	-6.6dB	<-11.6dB
15 μ s	0.4dB	-2.6dB	-5.6dB
30 μ s	3.4dB	-0.6dB	-1.6dB
40 μ s	2.4dB	-1.6dB	1.4dB
100 μ s	2.4dB	-0.6dB	1.4dB

2 室外実験

(1) 実験の目的

室外実験は、機関Aの航空機 SAR を用いて、RF段において、航空機 SAR のアンテナとBS/C S放送受信装置のアンテナが対向する条件でのBS/C S放送受信装置への干渉波の影響を調査することを目的に実施した。

(2) 実験方法



3つのBSアンテナ(A社製、B社製、C社製)と1つのCSアンテナ(B社製)を設置

図参考5-4 実験方法の概要

室外実験では、3つのBSアンテナと1つのCSアンテナを設置し、設置されたBS/CSアンテナと航空機 SAR の送信アンテナが対向するように航空機を飛行（高度：28,500ft）させた。干渉調査では、航空機の位置をリアルタイムに確認しながら、それぞれのアンテナで受信したBS（BS15ch）・CS放送のモニター上で映像破綻の有無を目視で確認した。映像破綻の定義は、室内実験と同じ定義とした。また、ホーンアンテナとスペクトルアナライザを用いて航空機 SAR からの送信波の受信電力を測定した。室外実験における航空機 SAR の条件を表参考5-2に、BS/CS放送の受信機材を表参考5-3に示す。

C_{ave}/I_{peak} は、表参考5-4に示す数値を用いて算定した。BSアンテナの9,550MHzにおけるアンテナ利得は、アンテナ径を45cmとして、ITU-R 勧告B0.1213の値を用いた。ただし、実験に用いたBSアンテナは12GHz帯用に製作されているため、特に給電ホーンは9GHz帯とは特性が異なることから、アンテナ利得、放射パターンはITU-R 勧告B0.1213の値をそのまま適用することができず、結果は誤差を含んでいる。LNBとフィルタのイメージ妨害抑圧比は、ARIB規格B63に記載されている55dBを仮定した。

表参考5-2 室外実験における航空機 SAR の条件

項目	値
方式	パルス方式
中心周波数	9,550MHz
周波数帯域幅	500MHz
空中線電力	8 kW (尖頭電力)
等価等方輻射電力	63.5dBW
パルス幅	30 μ s
掃引繰り返し周波数	1kHz
飛行高度	28,500ft (8686m)

表参考5-3 室外実験におけるBS/CSアンテナ及び受信機

項目	台数	備考
BS アンテナ	3台	A社2010年製、B社2008年製、 C社2016年製
BS 受信機・モニター	4台	D社2008年製 2種類、 D社2011年製 2種類
CS アンテナ	1台	B社2014年製
CS 受信機	1台	D社2011年製

表参考5-4 C_{ave}/I_{peak} の算定で使用了パラメータ

BS EIRP (dBW/34.5MHz)	$4\pi d^2$ (dBm ²)	BS pfd (dBW/m ² /34.5MHz)	BS Gant 12GHz (dBi)	BS Gant 9.55GHz (dBi)	イメージ妨害 抑圧比 (LNB) (dB)
60	162.57	-102.57	33.5	31.5	55

(3) 測定結果

表参考5-5に、機関Aの航空機 SAR がBS/CS受信アンテナに最接近した時(15時18分19秒~15時18分37秒の18秒間)の C_{ave}/I_{peak} の時系列変動を示す。この C_{ave}/I_{peak} は、1F周波数において室内実験で求めた受信映像の破綻レベルをBS/CS受信アンテナ放射パターン(ITU-R 勧告B0.1213)とイメージ妨害抑圧比(55dB)を仮定してRF周波数に変換した値である。本観測では、6秒の間、閾値の計算値を下回った。しかし、本観測中に、BS及びCS放送の映像に機関Aの航空機 SAR の干渉波による映像破綻は確認されなかった。

表参考5-5 C_{ave}/I_{peak} の時系列変動

北緯(°)	東経(°)	高度(m)	通過時刻	C_{ave}/I_{peak} (dB)
35.5796850	139.5197150	8387.4069360	15:18:19.000	39.77
35.5782800	139.5214930	8387.7567970	15:18:20.000	38.35
35.5768720	139.5232710	8388.1264700	15:18:21.000	33.89
35.5754660	139.5250450	8388.5270770	15:18:22.000	28.14
35.5740570	139.5268200	8389.0534270	15:18:23.000	22.29
35.5726480	139.5285930	8389.6538770	15:18:24.000	3.21
35.5712390	139.5303640	8390.3448820	15:18:25.000	-6.45
35.5698290	139.5321350	8391.0607620	15:18:26.000	-12.25
35.5684210	139.5339050	8391.7015960	15:18:27.000	-14.95
35.5677820	139.5347070	8392.0169840	15:18:27.453	-14.70
35.5670110	139.5356750	8392.3872640	15:18:28.000	-14.83
35.5656020	139.5374430	8392.9490390	15:18:29.000	-11.07
35.5641920	139.5392130	8393.4070500	15:18:30.000	-4.55
35.5627830	139.5409820	8393.8081840	15:18:31.000	6.10
35.5613730	139.5427520	8394.1077800	15:18:32.000	23.92