

X帯無線航行レーダー帯域における気象レーダーの
利用に関する調査検討

報告書

平成28年3月

X帯無線航行レーダー帯域における気象レーダーの利用に関する調査検討会

はじめに

近年、毎年のように、日本列島の各地で甚大な豪雨災害が報告されている。平成 26 年 8 月の広島市において、深夜に同時多発的に発生した土石流やがけ崩れが住宅地を襲い災害関連死を含め 76 名の尊い命が失われるなど、大きな被害が発生した。また、平成 27 年 9 月に記録的な豪雨が関東・東北地方を襲い、多くの河川堤防の決壊を招き、広域にわたる浸水被害が発生したことも記憶に新しい。さらに、今後の気候変動に伴って、豪雨が一層頻発化や激甚化することが予想されている。そのため、一定の規模までの豪雨に対するハード対策を着実に進展させるとともに、ソフト対策の充実、実効性の向上を図ることが急務と考えられている。

豪雨災害に対するソフト対策の要点は災害情報の的確な取得・配信にある。とりわけ、気象情報の果たす役割は大きい。現在、気象情報は、気象衛星、気象レーダー、AMeDAS に代表される地上観測等の観測と数値予報に基づいて発信されている。その中でも気象レーダーは、地表面に近い高度における降雨の面的な情報を時系列的に提供するという点において、極めて重要な情報を提供している。

現在、国や自治体等が運用する気象レーダーには大型の 5 GHz 帯（C 帯の一部）と小型の 9.7 GHz 帯（X 帯の一部）が割当てられ、比較的広範囲の降雨を観測している。一方、船舶や航空機に搭載されている航行用レーダーは X 帯の一部である 9.4 GHz 帯を利用している。この航行用レーダーの製品には時間的・空間的分解能が高い上に小型で低価格であるものが多いことから、局地的な豪雨や竜巻等の気象観測に活用して地域防災・減災に役立terるという自治体関係者の要望もある。

このような社会的なニーズと技術的な進展を踏まえて、本調査検討会では、船舶や航空機が使用している 9.4 GHz 帯を小型気象レーダーとして使用する際の課題と対応策を検討した。特に、船舶用、小型気象用レーダーとの共用に関する干渉シミュレーションを行うと同時に、船舶用、航空機用レーダーとの相互干渉実証試験を通して、干渉除去機能の有効性や干渉シミュレーションの妥当性の検討を行った。すなわち、小型気象用レーダーを実用局として利用するための運用条件や技術的な検証を実施した。

本報告書が、9.4 GHz 帯を使用する小型気象用レーダーの無線局免許に係る技術的条件等の策定に資するとともに、小型気象用レーダーが地域防災・減災を支える重要な機器として活用される途を開くことに役立つことを期待している。

平成 28 年 3 月

X 帯無線航行レーダー帯域における気象レーダーの利用に関する調査検討会
座長 河原能久

目次

第1章 調査検討の概要.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 調査検討項目.....	1
第2章 気象レーダーの現状と課題.....	3
2.1 気象レーダーの概要.....	3
2.2 小型・軽量化のメリットと課題.....	6
2.3 9.4 GHz 帯を使用するメリットと課題.....	10
2.4 国内の9.7 GHz 帯気象レーダー等の利用状況.....	14
2.5 海外の動向.....	19
第3章 小型気象用レーダーの実用化に向けた検討.....	21
3.1 小型気象用レーダーの需要.....	21
3.2 小型気象用レーダーの実証のための検討.....	22
第4章 机上検討.....	26
4.1 既存システムとの共用検討（机上検討）.....	26
4.1.1 干渉波データ生成.....	32
4.1.2 実証試験との比較.....	34
4.1.3 机上検討.....	37
4.1.3.1 検証1：離隔周波数による干渉状況変化.....	38
4.1.3.2 検証2：観測レンジによる干渉状況変化.....	46
4.1.3.3 検証3：与干渉機増加時の干渉状況変化.....	53
4.1.3.4 検証4：離隔距離による干渉状況変化.....	70
4.1.4 SART 応答波への干渉影響.....	74
第5章 実証試験.....	79
5.1 実証試験の概要.....	79
5.1.1 実証試験項目.....	79
5.1.2 実施期間.....	80
5.1.3 実施場所.....	80
5.1.4 レーダー諸元.....	80
5.2 実証試験の実施手順等.....	84
5.2.1 測定の条件・手順.....	84
5.2.2 減衰量の距離換算の検討.....	85
5.2.3 破壊入力電力の検討.....	87
5.3 実証試験結果.....	88
5.3.1 実証試験1（小型気象用レーダー相互干渉状況）.....	88
5.3.1.1 実証試験1の概要.....	88

5.3.1.2	実証試験 1 の結果	89
5.3.1.3	実証試験 1 の考察	93
5.3.2	実証試験 2 (小型気象用レーダーと船舶用レーダーの干渉状況)	100
5.3.2.1	実証試験 2 の概要	100
5.3.2.2	実証試験 2 の結果	101
5.3.2.3	実証試験 2 の考察	111
5.3.3	実証試験 3 (小型気象用レーダーと航空機用レーダーの干渉状況)	118
5.3.3.1	実証試験 3 の概要	118
5.3.3.2	実証試験 3 の結果	119
5.3.3.3	実証試験 3 の考察	129
5.3.4	実証試験 4 (小型気象用レーダーの運用実力値検証)	130
5.3.4.1	実証試験 4 の概要	130
5.3.4.2	実証試験 4 の結果	131
5.3.4.3	実証試験 4 の考察	132
第 6 章	小型気象用レーダーの実現に向けた技術的条件の検討	133
6.1	小型気象用レーダーに求められる技術的条件	133
6.2	既存システムとの共用条件	136
6.2.1	周波数プラン	136
6.2.2	船舶用レーダーへの干渉	137
6.2.3	航空機用レーダーへの干渉	139
6.2.4	小型気象用レーダーの相互干渉	140
6.2.5	BS 放送受信機への干渉	141
6.3	技術的条件	142
第 7 章	運用条件の検討	149
第 8 章	調査検討のまとめ	150
おわりに		156

資料編

資料 1	調査検討体制	資 1
資料 2	審議経過	資 2
資料 3	構成員一覧	資 3
資料 4	用語集	資 5

第1章 調査検討の概要

1.1 目的

我が国では、国、自治体、企業などの気象用レーダーとして、C帯の一部（5 GHz帯）を用いる大型の気象用レーダーや、X帯の一部（9.7 GHz帯）を用いる小型の気象用レーダーがこれまでに利用されてきた。

9.7 GHz帯の気象用レーダーについては、『平成22年度 5 GHz帯及び9 GHz帯レーダーの周波数有効利用技術に係る調査検討』において検討がなされている。既に国土交通省河川局や地方自治体等で河川管理、下水道管理や防災活動等に役立てるために運用されているが、需要の増加・多様化とともに、既存の枠組みでは対応できなくなっている。

他方、X帯の他の一部（9.4 GHz帯）は、長く船舶航行支援用レーダー（以下、船舶用レーダー）及び航空機用気象レーダー（以下、航空機用レーダー）として割当てられて利用されており、小型かつ低価格の製品が多いことから、これらの設備や派生技術を利用して、いわゆるゲリラ豪雨や竜巻等の局地的に短時間で変化する、極端気象と呼ばれるような気象観測や、移動型の気象観測レーダー等の需要に応えるべく実験が行われており、その有用性から、実用局としての利用要望が高まっている。また、これに対応すべくメーカーによる気象観測レーダーの開発も行われている。

本件は、これらの期待に応えるため電波有効利用技術に関する動向調査として、現在、主に船舶及び航空機のレーダーに使用されている9.4 GHz帯において、気象用レーダーを実用局として利用するための技術的条件、運用条件及び技術的な検証等を実施する。

なお、これ以降本文中に記載する『小型気象用レーダー』とは、特に断りのない限り9.4 GHz帯の気象用レーダーを示す。

また、本検討の中で、9.4 GHz帯の気象用レーダーの実験試験局は対象外とする。

1.2 調査検討項目

（1）周辺情報の整理

「周辺情報の整理」では気象レーダーの現状と課題を整理する。具体的には気象レーダーの概要、小型化・軽量化のメリット及び9.4 GHz帯を使用することのメリットについて述べる。また、国内での9.7 GHz帯を用いた気象レーダーの利用状況や海外の動向についても整理する。

（2）机上検討

「机上検討」では、実験を行うことが困難な状況をシミュレーションし、小型気象用レーダーを実用局として利用するための検証を行う。

(3) 実験試験局による実証試験

「実験試験局による実証試験」では、船舶用レーダー、航空機用レーダー及び、小型気象用レーダーの相互間干渉について、実機を用いた実地検証を行う。また、小型気象用レーダーを実際に運用し、その能力を評価する。

(4) 技術的条件

「技術的条件」では、小型気象用レーダーに求められる技術的な条件の検討を行う。

(5) 運用条件

「運用条件」では、小型気象用レーダーに求められる運用条件について記載する。

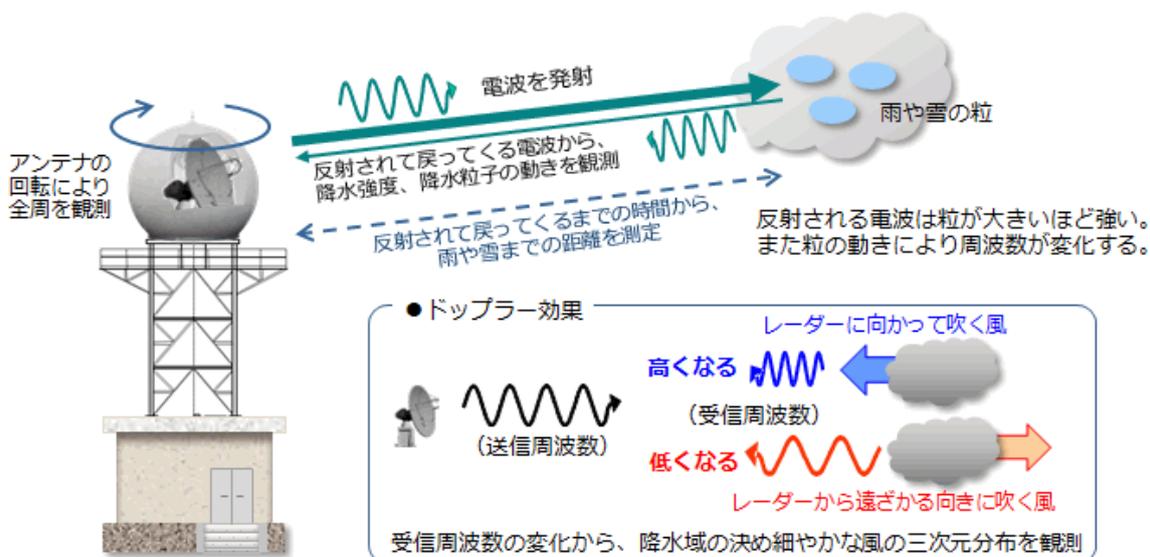
第2章 気象レーダーの現状と課題

2.1 気象レーダーの概要

気象レーダーは、電波で雨や雪の分布と強度を測る装置である。気象レーダーによっては、半径数百 km の範囲を観測することも可能である。一般に利用できる例として、「レーダー・アメダス解析雨量」、「降水短時間予報」、「降水ナウキャスト」、「XRAIN（エクストレイン）」等がある。

具体的には、空中線を回転させながら電波（マイクロ波）を発射し、半径数百 km の広範囲内に存在する雨や雪を観測する。発射した電波が戻ってくるまでの時間から雨や雪までの距離を測り、戻ってきた電波（レーダーエコー）の強度から雨や雪の強度を観測する。

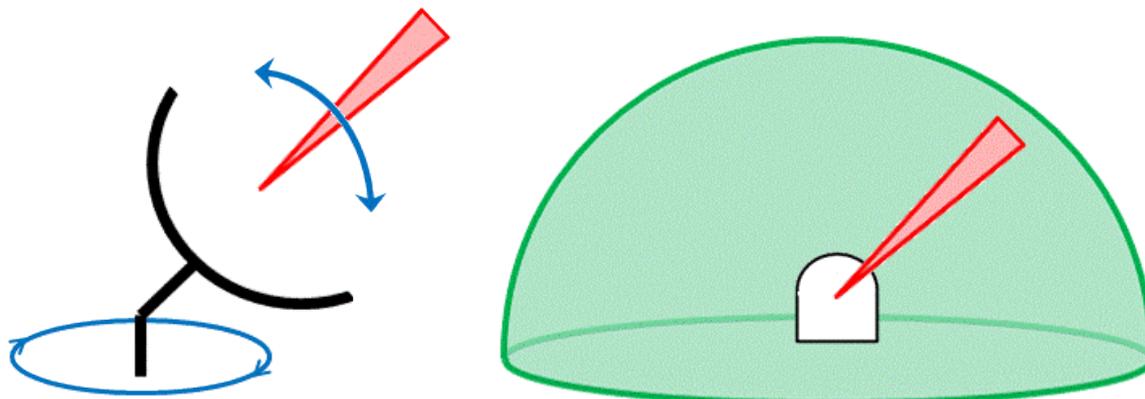
気象ドップラレーダーは、雨や雪の強度に加え、戻ってきた電波の周波数のずれ（ドップラ効果）を利用して、雨や雪の動きを観測することが可能である。2.1-図 1 に気象レーダーによる観測の概要を示す。



2.1-図 1 気象レーダーによる観測の概要

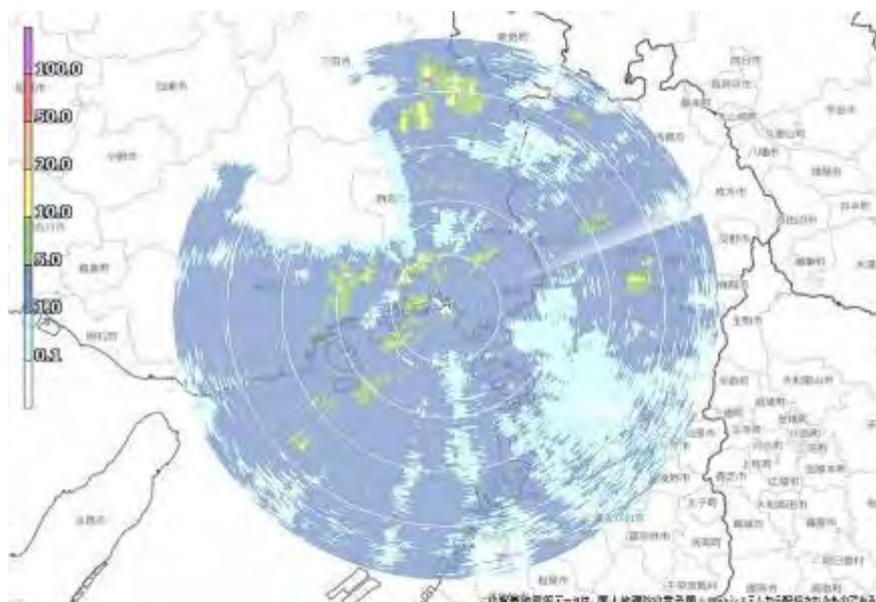
出典：気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>)

気象レーダーは、仰角を変更しながら水平回転し、気象レーダー設置位置を中心とした半球内の降雨分布を三次元的に走査・測定する。2.1-図 2 に走査のイメージを示す。アウトプットとして降雨量を算出するため、反射係数（絶対値）を測定する一種の測定器という見方も可能である。観測範囲は主として使用周波数に依存し、C 帯（5 GHz 帯）、X 帯（9.7 GHz 帯）の電波が使用されている。世界的には S 帯（2.8 GHz 帯）も使用されている。



2.1-図 2 気象レーダーの走査のイメージ

観測結果の表示としては、降雨域の強度分布を色分けして表示する方法が主流である。観測結果の表示例を 2.1-図 3 に示す。



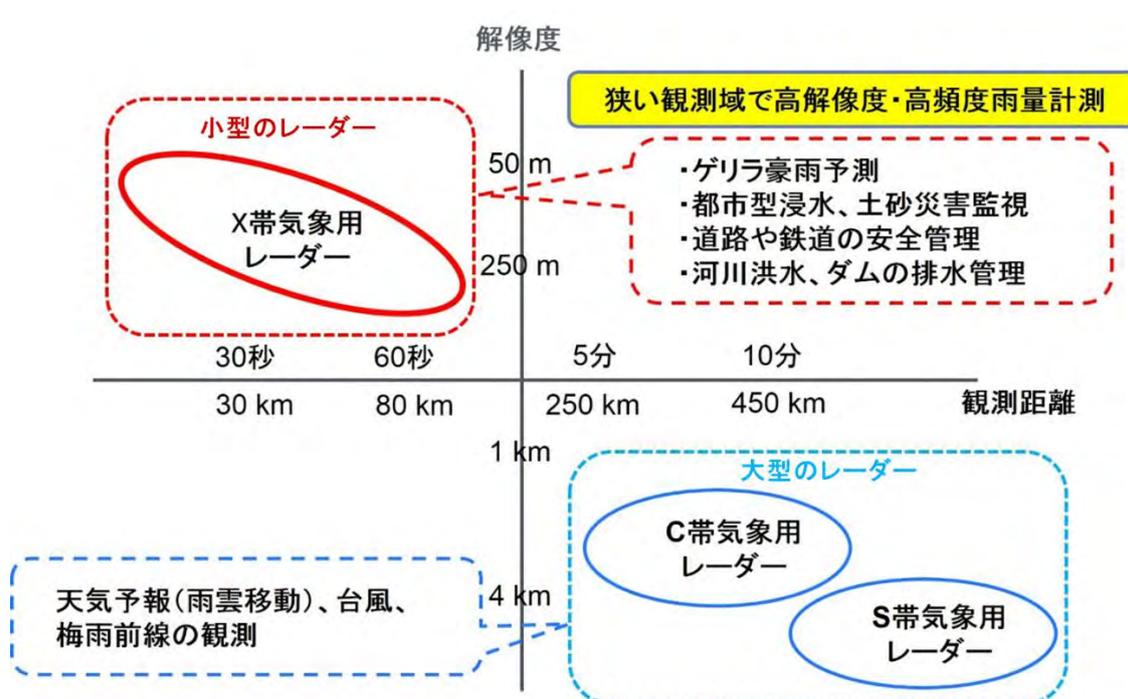
2.1-図 3 観測結果の表示例（2015 年 11 月 17 日の降雨状況）

雨滴は、粒径が大きいほど水平・垂直寸法差が大きくなるという性質がある。この性質を利用して、水平偏波（電場が水平方向に振動する電波）、垂直偏波（電場が垂直方向に振動する電波）の両方を使用して寸法差を測定し、高精度に降雨量を算出する技術もある。この技術は、大型のレーダーでは主流となっている。このように、水平偏波と垂直偏波の2種類の電波を同時に送信・受信する気象レーダーは二重偏波レーダー（または、マルチパラメータ（MP）レーダー）といわれている。水平・垂直の両偏波を同時に使用するため、一般的には回転対称形の空中線（パラボラ等）が用いられる。

X帯(9 GHz帯)の電波は、降雨減衰が大きいため、気象レーダーの設置場所の上空に強雨が降っている場合などでは、本来の高精度な観測が困難となる。このような、強雨の後方にある弱雨を高精度観測したい場合には、二重偏波レーダーを用いることによってある程度の精度補正が可能となる。

2.2 小型・軽量化のメリットと課題

気象用レーダーの位置付けを 2.2-図 4 に示す。



2.2-図 4 気象用レーダーの位置付け

2.2-図 4 は、横軸を観測距離、縦軸を解像度に取り、各気象用レーダーの特徴を分布した図である。例として、右下の S 帯の気象用レーダーでは、通常 500~600 km の範囲を観測することが可能であるが、空中線のサイズは 8.5 m 程度と大型になる。空中線のサイズは、周波数が低いほど大きくなる関係にある。

X 帯の気象用レーダーは、2.2-図 4 の左上に位置付けされ、高密度配置することにより、半径 30~80 km の狭い観測域で高解像度・高頻度雨量計測が可能であるという特徴がある。これにより、「ゲリラ豪雨予測」、「都市型浸水、土砂災害監視」、「道路や鉄道の安全管理」、「河川洪水、ダムの排水管理」などに有効活用することが期待される。

また、小型であるため設置が容易であるというメリットがある。例えば、9.4 GHz 帯の気象用レーダーは、空中線の直径が 0.5~2.4 m 程度 (2.2-図 5) であるため、設置場所の自由度も高い。例として、2.2-図 6 に空港設置時の写真を示す。2.2-図 6 の右の写真に示すように、軽量であるため人力での設置が可能である。また、短時間での設置が可能であるため、移設も容易に行うことができる。さらに、空中線を小型化することによるコストダウンも可能となる。ただし、空中線の小型化には、空中線指向角が広がることによる角度方向の解像度が低下するという課題もある。

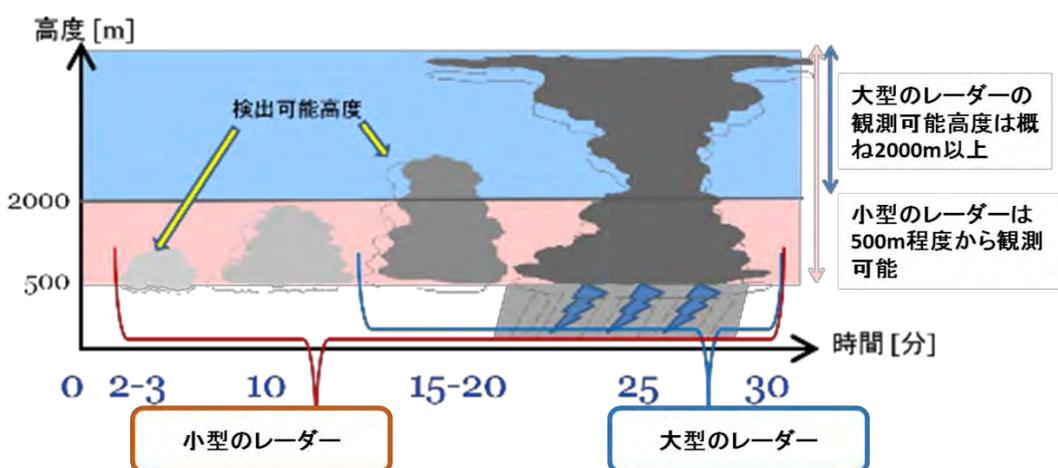


2.2-図 5 小型気象用レーダー



2.2-図 6 空港に設置した小型気象用レーダー

また、小型の気象用レーダーは低高度の観測に期待されている。2.2-図 7 に示すのは、横軸を時間にとった積乱雲の成長過程である。



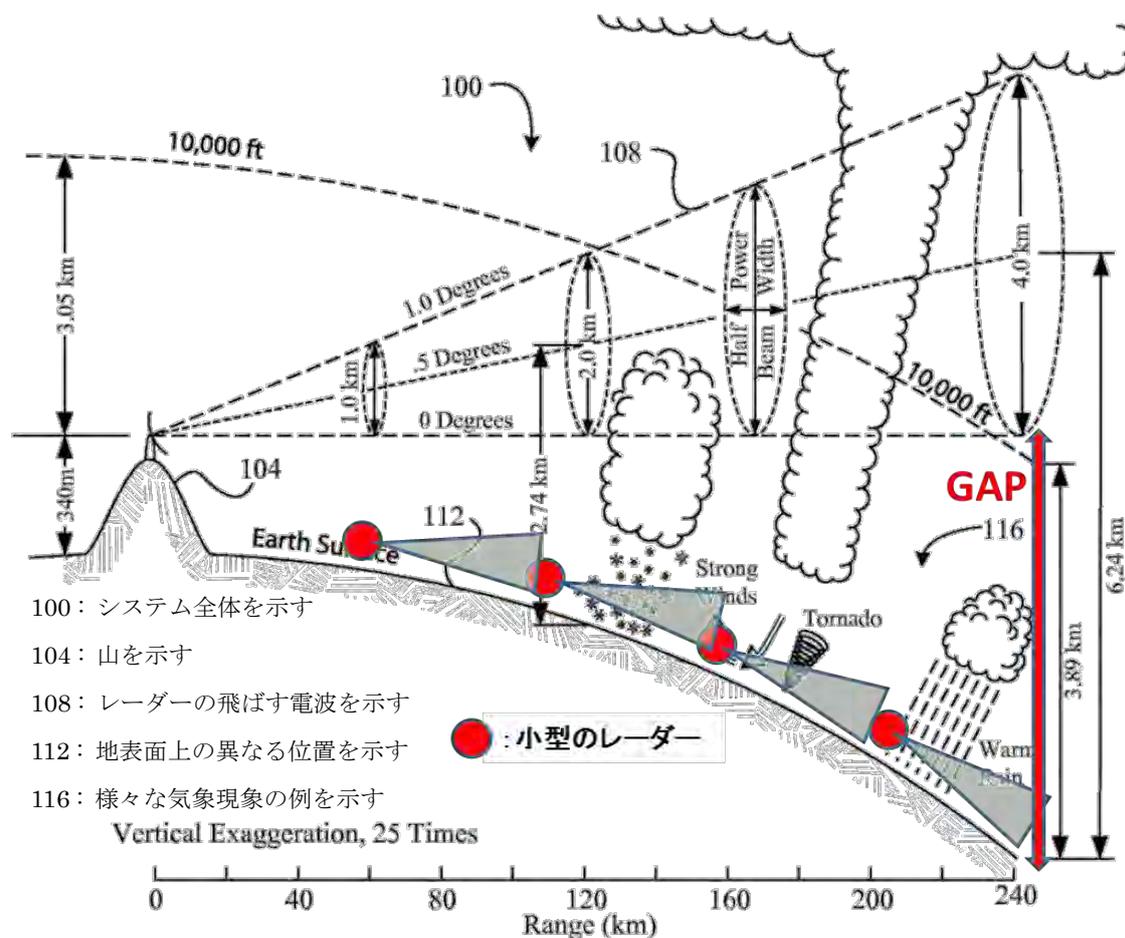
2.2-図 7 積乱雲の成長過程とレーダーの観測領域

(株) ウェザーニューズのプレスリリース

(<https://weathernews.com/ja/nc/press/2010/100803.html>) をもとに作成

大型のレーダーは、広い範囲を観測する目的で設置されるため、高い高度に設置されることが多い。一方小型のレーダーは、ビルの上など低い高度に設置が可能であるため、大型のレーダーより十数分早く雨雲の発達を観測可能であると期待されている。

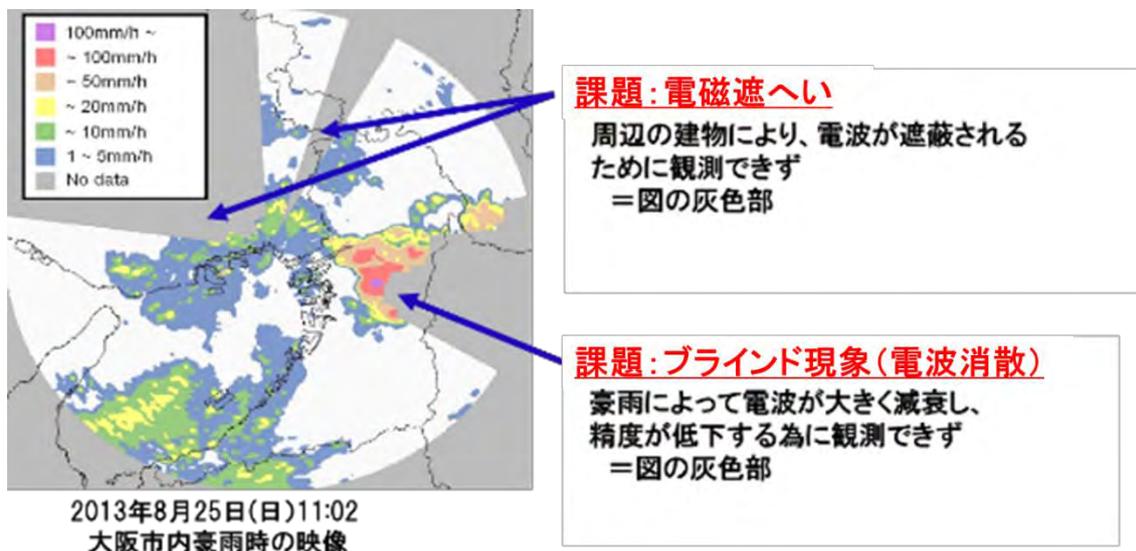
また、実際には地球は球体であるため、気象用レーダーを一定の仰角で操作した場合に、1 km 以下の高度を観測できる範囲は半径 45 km 程度である。地球の湾曲と気象用レーダーの観測範囲を 2.2-図 8 に示す。このため、低い高度を観測する場合には、大型のレーダーでは観測が困難な範囲を小型のレーダーで埋めることが求められる。



2.2-図 8 地球の湾曲とレーダーの観測範囲

"Chandrasekaran Venkatachalam, Yanting Wang :(PCT/US2009/048576) US8928521 B2 " を元に作成

加えて、2.2-図 9 に大阪市内の豪雨時の気象用レーダーの映像を示す。現状の気象用レーダーでは、周辺の建物によって電波が遮断（電波遮へい）されたり、豪雨によって電波が大きく減衰し精度が低下する状態（ブラインド現象）が生じた場合には、その地点より後方においては観測できない。このような観測データの欠落は、設置が容易である小型のレーダーを高密度配置することにより補完が可能である。



2.2-図 9 従来型レーダーの課題

小型のレーダーは空中線の直径が 0.5~2.4 m 程度と、様々なサイズのものを利用して
いる。S 帯・C 帯の大型のレーダーと同等 (1° 程度) の空中線指向角を確保するには、2.2
m 程度の開口が必要となる。

これより小型な、空中線の直径が 1.2 m 以下となるような気象用レーダーは、空中線を
小型化しているため、空中線指向角が広がることによって角度方向の解像度が低下する
という欠点がある。しかし、より短距離の観測範囲に限ったり、複数台の観測結果を合成
するといった対応により補う試みも行われている。

2.3 9.4 GHz 帯を使用するメリットと課題

メリット

現在の 9 GHz 帯における各種レーダーの割当周波数を 2.3-図 10 に示す。



※無線標定：無線航行の目的以外のために使用する無線測位のこと。

2.3-図 10 9 GHz 帯レーダーの割当周波数

2.3-図 10 において 9300～9500 MHz の間には、海上無線航行 / 航空無線航行 / 無線標定のために使用する周波数が割当てられており、それぞれの目的や周波数の使用に関する条件は 2.3-表 1 のように定められている。

2.3-表 1 無線局の目的と周波数の使用に関する条件

国内分配	無線局の目的	周波数の使用に関する条件
海上無線航行	公共業務用 一般業務用	探索救助用レーダートランスポンダ用及び船舶無線航行用レーダー用とする。
航空無線航行	公共業務用 一般業務用	航空機無線航行用レーダー用とする。
無線標定	公共業務用 一般業務用	

また、日本国内における既存無線局数の内訳は 2.3-表 2 のとおりである。なお、2.3-表 2 は、無線局等情報検索による 2016 年 3 月 1 日現在のデータ（公開局データ）を集計したものである。（広帯域で免許されている局は重複計上）

2.3-表 2 日本国内における既存無線局数

周波数 [MHz]	船舶局	特定船舶局	遭難自動 通報局	航空機局	無線航行 陸上局	無線航行 移動局	無線標定 陸上局	無線標定 移動局	実験試験局	合計
9300～ 9349.999				733					77	810
9350	4864	344	20			200			1	5429
9350.001～ 9374.999				68					1	69
9375	32	31		261		5			30	359
9375.001～ 9409.999									4	4
9410	6934	26350			9	9153	20	76	298	42840
9410.001～ 9414.999									3	3
9415	36	1							3	40
9415.001～ 9444.999									3	3
9445	32	499				552			10	1093
9445.001～ 9499.999									44	44
9500									1	1
合計	11898	27225	20	1062	9	9910	20	76	475	50695

2.3-表 2 より、既設局の 84.5%が 9410 MHz で開設されており、また、既設局の 99.9%が 9445 MHz 以下の周波数で開設されていることが分かる。

9300～9500 MHz における、周波数割当は全世界共通であり、ITU-R（国際電気通信連合無線通信部門）の RR（無線通信規則）による業務間の優先順位は 2.3-表 3 のとおりとなっている。

2.3-表 3 国際規定

優先順位	業務
1 位	無線航行業務（船舶、航空機用）
2 位	地上に設置した気象用レーダー（無線標定業務）
3 位	その他無線標定業務

2.3-表 3 に関し、さらに RR においては、2.3-表 4 のとおり優先順位が定められている。

2.3-表 4 国際規定詳細

優先順位	業務（）内は無線通信規則の条文番号
1 位	無線航行業務（5.475B）
2 位	地上に設置したレーダービーコン （航空無線航行業務）（5.475）
3 位	地上に設置した気象用レーダー（無線標定業務）（5.475B）
4 位	その他の無線標定業務（5.475A）
5 位	地球探査衛星業務、宇宙研究業務（5.476A）

以上のように、9.4 GHz 帯は特に生産台数の多い船舶用レーダーに使用されており、それらの部品も流用可能である。よって、低コストでの製造が可能となり、保守部品の調達も容易というメリットが挙げられる。また、技術的な面では小型化に関する製品技術を転用しやすいという点も大きい。

さらに国際展開を考えると、海外で活用されている X 帯の気象用レーダーと同帯域のものを輸出用・国内用ともに同仕様で製造できることが輸出の促進に繋がり、日本経済を活性化させるためにも理想的である。

課題

前述のとおり 9.4 GHz 帯を使用した気象用レーダーには多くのメリットがある一方で、課題も存在する。2.3-表 4 で触れた ITU-R の RR の 5.475B には下記のように規定されている。

“In the band 9300-9500 MHz, stations operating in the radiolocation service shall not cause harmful interference to, nor claim protection from, radars operating in the radionavigation service in conformity with the Radio Regulations. Ground based radars used for meteorological purposes have priority over other radiolocation uses. (WRC-07)”

このように 9.4 GHz 帯で運用する無線標定業務の局は無線航行業務のレーダー（以下、航行用レーダー）に有害な混信を生じさせてはならず、また、そのレーダーからの保護を要求してはならない。そのため、技術的条件、運用条件及び技術的検証が必要である。

混信を生じさせない技術的条件、運用条件を見つけるためには、離隔周波数（航行用レーダーとの周波数をどの程度離せば良いか）、気象用レーダーの数（干渉の頻度による影響）、航行用レーダーと気象用レーダーの離隔距離（出力の違いによりどの程度干渉源として影響を及ぼすか）等を検証する必要がある。

具体的な技術的条件、運用条件及び技術的検証については、後章で述べる。

2.4 国内の 9.7 GHz 帯気象レーダー等の利用状況

日本国内における 9.7 GHz 帯の既存無線局数を 2.4-表 5 に示す。2.4-表 5 は 2016 年 3 月 1 日現在のデータ（公開局データ）を集計している。

2.4-表 5 日本国内における 9.7 GHz 帯の既存無線局数

周波数[MHz]	無線局数
9700	2
9705	1
9710	2
9715	1
9720	2
9725	1
9730	2
9735	1
9740	93
9745	1
9750	1
9755	1
9760	1
9765	1
9770	3
9775	1
9780	1
9785	1
9790	1
9795	1
9800	1
合計	119

※気象用レーダー以外の無線局も含む

本章では日本国内で 9.7 GHz 帯を用いて運用されている気象用のマルチレーダーシステムについて述べる。

首都圏 X バンド気象レーダーネットワーク (X-NET)

首都圏 X バンド気象レーダーネットワーク (X-NET) は国立研究開発法人防災科学技術研究所により、2006 年から首都圏の大学や試験研究機関の所有する X 帯の気象用レーダーをネットワーク化し、首都圏における豪雨・強風の監視に関する研究のために行われている。

首都圏には、X 帯のドップラレーダーや MP レーダーを所有している大学や研究機関が複数ある。これら複数のドップラレーダーでネットワークを構成することにより、それぞれのレーダーで合成されたドップラ速度を合成し、風向・風速の分布を求めることが可能となっている。その例を 2.4 表 6 に示す。

2.4 表 6 X-NET 参画機関及びレーダー所在地

レーダー所在地	レーダー運用機関	レーダーの種類	観測半径
神奈川県海老名市	防災科学技術研究所	X バンド MP	80 km
東京都文京区	中央大学	X バンドドップラ	64 km
神奈川県横須賀市	防衛大学校	X バンドドップラ	64 km
千葉県木更津市	防災科学技術研究所	X バンド MP	80 km
埼玉県羽生市	日本気象協会	X バンド MP	80 km
山梨県甲府市	山梨大学	X バンド MP	64 km
千葉県我孫子市	電力中央研究所	X バンド MP	64 km

国立研究開発法人防災科学技術研究所ホームページより

<http://mp-radar.bosai.go.jp/xnet.html>

例として、海老名市及び木更津市で使用されている気象用レーダーの諸元を 2.4-表 7 に示す。このうち、木更津市の気象用レーダーは 9.7 GHz 帯を使用している。

2.4-表 7 海老名市及び木更津市で使用されている気象用レーダーの諸元

気象用レーダー	海老名レーダー	木更津レーダー
送信周波数	9468.7 MHz / 9471.2 MHz	9700 MHz
空中線	パラボラ (φ2.0 m)	パラボラ (φ2.2 m)
空中線利得	43.4 dBi	44.4 dBi
ビーム幅	1.15 °	1.0°
送信管	固体素子	クライストロン
送信出力 (デューティー比)	800 W (49.5%)	50 kW (0.8%)
パルス幅	1.0 / 32 μs	0.5/1.0/2.0 μs
パルス繰り返し周波数	1500 Hz 以下	1800 Hz 以下
偏波	H/V 同時送受信	H/V 同時送受信
最大ドップラ速度 (PRF 5:4)	11.87 m/s (47.5 m/s)	13.9 m/s (55.7 m/s)
最小受信感度	-114.6 dBm	-119 dBm
観測半径	80 km 以上	80 km 以上
観測パラメータ	REF, VEL, WIDTH, ZDR, PHIDP, RHOHV, KDP 他	

国立研究開発法人防災科学研究所ホームページより

<http://mp-radar.bosai.go.jp/niedradar.html>

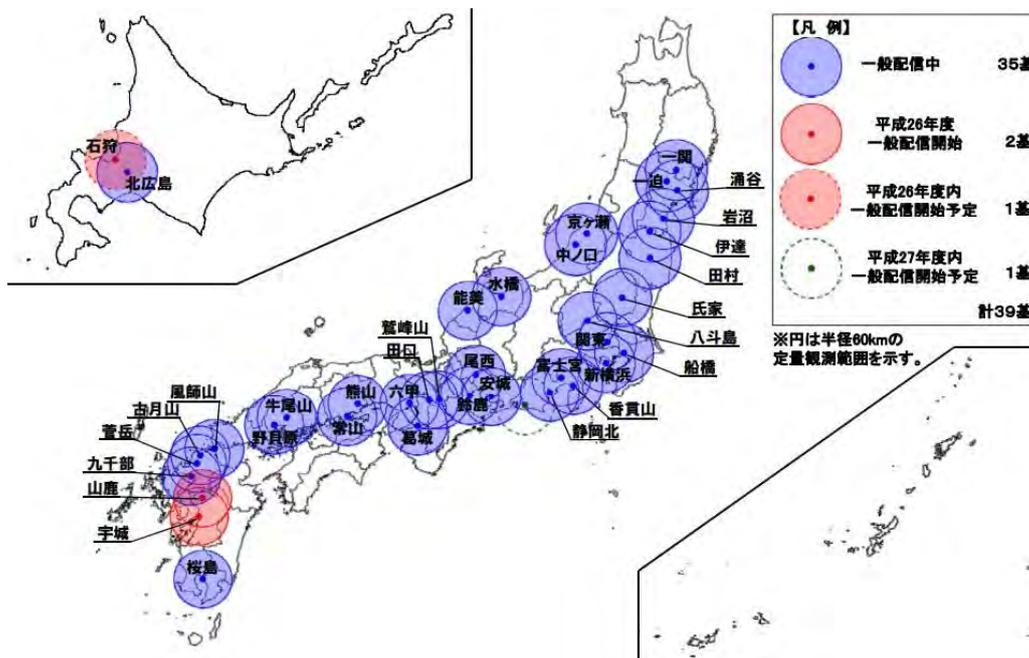
X バンド MP レーダーネットワーク (XRAIN)

X バンド MP レーダーネットワーク (XRAIN [X-band polarimetric (multi parameter) RAdar Information Network の略]) は、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、適切な河川管理や防災活動等に役立てるために、国土交通省が整備を進めているシステムである。

高密度配置した X 帯の MP レーダーを用い、従来の C 帯の気象用レーダーに比べ高頻度 (5 倍)、高分解能 (16 倍) での観測が可能である。また、地上雨量計による補正を行わずに高精度な雨量データをほぼリアルタイム (1~2 分程度) で配信することが可能となっている。

X 帯の電波は非常に強い降雨域の後方において電波が減衰・消散してしまうため、観測不能となる場合があるが、ネットワークを構築し観測地域を複数の気象用レーダーで囲むよう配置することで、より安定した観測が可能となる。

2.4-図 11 に XRAIN の整備状況を示す。



2.4-図 11 XRAIN の整備状況 (平成 27 年度一般配信開始予定含む)

国土交通省ホームページ XRAIN の概要より <http://www.mlit.go.jp/common/001046714.pdf>

XRAIN により得られたデータは様々な分野で利活用されている。その一部を 2.4-表 8 に示す。

2.4-表 8 XRAIN で取得した雨量情報の利活用例

利用者	活用先	概要
(一財) 日本気象協会等	スマートフォン向けのアプリ等の開発	XRAIN の観測データを利用して、スマートフォン向けのアプリ (応用ソフト) 等を開発し一般に提供。
東海旅客鉄道 (株) 京阪電気鉄道 (株)	列車の安全運行に活用	<ul style="list-style-type: none"> ・ XRAIN の雨量情報を東海道新幹線の路線図に重ね合わせたシステムを開発し、集中豪雨時における早期の警備体制構築に活用。 ・ 京阪電気鉄道 (株) において、XRAIN を列車の運転保安の確保に活用 (現在検証中)。
東日本放送 福島中央テレビ	テレビ局での活用	・ 東日本放送では、平成 24 年 6 月にテレビ局として初めて

		<p>XRAIN の情報の放送を開始。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・福島中央テレビでは、平成 26 年 3 月から XRAIN の情報の放送を開始。
東京消防庁	水防活動等に活用	<p>東京消防庁では、内部システムに XRAIN の雨量情報を導入し、警戒地域の早期把握や土砂災害危険区域等の図面と重ね合わせるにより防災活動の判断に活用。</p>
東京都江戸川区 (国研) 防災科学技術研究所 愛知県 神奈川県横浜市	地方公共団体の電子地図サービスでの活用	<ul style="list-style-type: none"> ・江戸川区内の各施設・情報を案内する HP 上の電子地図サービス「えどがわマップ」に、XRAIN 等のデータを重ね合わせ、リアルタイムの降雨情報を提供 ((国研) 防災科学技術研究所と連携し社会実験を実施中)。 ・各地方公共団体の各施設・情報を案内する電子地図に XRAIN の観測データを重ね合わせ、リアルタイムの降雨情報を提供。

国土交通省ホームページ 報道発表資料より <http://www.mlit.go.jp/common/001046713.pdf>

2.5 海外の動向

2.3 章では 9.4 GHz 帯を使用するメリットと課題について述べたが、海外においては気象用レーダーとして、既に 9.4 GHz 帯を使用している事例も多い。海外製の X 帯の気象用レーダーの例を 2.5-表 9 に示す。

2.5-表 9 海外製の X 帯の気象用レーダーの例

メーカー	Selex		DHI	Eldes	EWR	EEC		
機種	Rainscanner	60DX	LAWR	WRX-10	E600	Ranger X1	Ranger X5	DWSR -2001X
周波数 [MHz]	9410	9300 -9500	9410	9375 or 9410	9320 -9400	9200 -9700	9200 -9700	8500- 9600
出力電力 [kW]	25	75	25	10	3.3	0.1	0.5	200
電子管/ 固体素子	電子管	電子管	電子管	電子管	電子管	固体素子	固体素子	電子管

固体素子を用いる気象用レーダーは普及の途上であり、電子管（マグネトロン等）を用いているものが現状では大多数である。また、低価格のものは船舶用レーダーの改造品である場合が多く、その全てが 9410 MHz のマグネトロンレーダーとなっている。

以下に X 帯の気象用レーダーを用いた海外でのプロジェクト事例を示す。

米国 CASA (the Center Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere)

米国連邦機関 NSF (National Science Foundation) のプロジェクトの 1 つとして 2003 年に設立された。DCAS (Distributed Collaborative Adaptive Sensing) ネットワークと呼ばれる小型レーダーネットワークを、高性能な X 帯小型ドップラレーダーを配置することで構成している。これにより、現在運用されているレーダーでは観測することが難しかった現象を捉える観測システムの開発及びその利用方法の研究を目的としている。

Dallas Fort Worth (現状 6 台、最終的に 8 台)、Puerto Rico (7 台)、Oklahoma、Massachusetts の 4 箇所で現在稼働している。

欧州 RAINGAIN

RAINGAIN は都市域の洪水予測精度の向上を目的として Leuven、London、Paris、Rotterdam に X 帯小型レーダーを設置し、水管理の高度化を研究するプロジェクトである。RAINGAIN プロジェクトで使用されている気象用レーダーを 2.5-表 10 に示す。このようにそれぞれにおいて異なったタイプの気象用レーダーを用いた有効性の検証も行っている。

2.5-表 10 RAINGAIN プロジェクトで使用されているレーダー

都市名	使用レーダー
Leuven	DHI 製 水平偏波マグネトロンレーダー
London	SELEX 製 水平偏波マグネトロンレーダー
Paris	SELEX 製 二重偏波クライストロンレーダー
Rotterdam	SSBV 製 二重偏波レーダー

フランス RHYTMME (the Risques HYdrométéorologiques en Territoires de Montagnes et MEditerranéens)

フランスでは24台設置されているS帯及びC帯の電波を用いた気象用レーダーにより国土の90%はカバーされている。しかしながら地中海側の山岳地帯（フランス南西部）においては、このネットワークの空白地帯が存在する。

RHYTMMEはこの地域を補完することを目的とし、X帯気象用レーダーをマルチレーダーシステムとして使用している。このX帯気象用レーダーは二重偏波クライストロンレーダーを使用しており、2013年時点で3台稼働している。

第3章 小型気象用レーダーの実用化に向けた検討

3.1 小型気象用レーダーの需要

2.2章「小型・軽量化のメリットと課題」で述べたとおり、小型気象用レーダーは従来のレーダーでは観測していない場所を補完する役割を持つ。

小型気象用レーダーの需要が見込まれるシーンの例を 3.1-表 11 に示す。

3.1-表 11 小型気象用レーダーの活用例（将来展望）

利用分野	活用例
気象観測分野	都市部における集中的な降雨モニタリングや大型レーダーの補完
防災分野	山間部、地滑り及び浸水常襲地域における早期警報システム
水処理・管理分野	下水道、ダム及び河川における関連設備制御
運行支援分野	高速道路、鉄道、空港
試用 / 一時利用	・実証実験、研究開発及び気象関係者向け教育トレーニング ・移動観測車による災害現場、屋外イベント及び工事現場向けの気象観測サービス

運行支援分野への活用例では、既に冬季の稚内空港において、二重偏波ドップラ気象レーダー1台を実験試験局として設置し、稚内周辺の気象観測が行われている。この実証試験では、就航率改善や異常気象による影響の軽減を目的としている。

また、水処理・管理分野では、国土交通省が行う下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）のうちの1つとして、都市域における局所集中豪雨に対する雨水管理技術実証事業という名目で小型気象用レーダーの実証試験が行われている。この実証試験は2015年秋から富山市及び福井市において行われており、目的は市民の自助・共助の促進や、雨水排除施設への支援情報提供による施設能力の最大限活用などによる被害縮減効果を実証することである。設置場所及び概念図を 3.1-図 12 に示す。15 km 程度の離隔距離かつ同一周波数（9.47 GHz）で3台の小型気象用レーダーを配置するマルチレーダーシステムにより構築されている。この試験によって同一周波数における観測成果を実証しており、逼迫する周波数の有効利用という観点で意義のある試みといえる。周波数共用によって干渉増加を招くアプローチは観測精度への影響は否めないが、観測精度の低下を許容してでも周波数を共用するというやり方は、多様化する需要に対する一つの方法であると考えられる。



3.1-図 12 都市域における局所集中豪雨に対する雨水管理技術実証事業

また、X 帯は降雨減衰が大きいことが知られており、観測域との間に豪雨が降る状況であれば、目的の領域を観測することができない。このような状況についても、複数のレーダーを用いて相互に補完し合えば観測を継続できるというメリットがある。

さらに、ドップラ観測を行う場合、1 台では観測対象がレーダーへ近付いているか遠ざかっているかというデータしか得ることができない。しかし、複数台の観測結果を合成すれば合成ベクトルが求まるため、2 台用いれば 2 次元、3 台用いれば 3 次元のドップラ速度を観測することが可能となる。

上記や 2.5 章「海外の動向」でも示したように、小型気象用レーダーは実証試験でも一定の成果を挙げており、かつ、既存の 9.7 GHz 帯のレーダーによるマルチレーダーシステムと比べて安価に開設できる。これは、空中線の小型化や、船舶用・航空機用との部品共用によるコストダウンが可能のためであり、ユーザー層を拡大し、新たな価値を生むことが予想される。ただし、空中線の小型化には、空中線指向角が広がることによる角度方向の解像度が低下するという課題もある。

3.2 小型気象用レーダーの実証のための検討

小型気象用レーダーの実証のための検討は、実証試験と机上検討によって行う。

実証試験は、船舶用レーダー、航空機用レーダー及び、小型気象用レーダーの相互間干渉について、実際にレーダー実機を用いてフィールドで行う試験である。しかし、実際に準備が可能なレーダーの実機は 1 台か多くても 2 台である。そのため、複数台の干渉に対する検証として、机上検討を行う。

机上検討は、干渉波をコンピュータで作成し、RF 帯域で再生した干渉波をレーダー実機

に入力するものである。レーダーからの干渉波をコンピュータで作成するため、複数台の干渉等、複雑な状況の評価することが可能である。

実証試験及び机上検討では、与干渉機からの干渉がある状況で被干渉機の干渉除去機能の効果を確認し、被干渉機における業務遂行の可能性を検討する。干渉除去機能は、隣り合ったスイープをデータ点毎に比較し、低強度のデータを採用する処理を使用している。

3.2-表 12 に実証試験と机上検討の実施項目を示す。机上検討で実施する項目は、後述する実証試験との比較が可能であり、実証試験によって机上検討の妥当性を確認することが可能である。航空機用レーダーに関しては、机上検討用の実機を入手できないため、実際の航空機に搭載された実機を用いて実証試験のみ行う。

3.2-表 12 に示した実施項目の実証試験①～③について、さらにレーダーの空中線回転条件で区分した実施項目を 3.2-表 13 に示す。同様に、机上検討①と②について、レーダーの回転条件で区分した実施項目を 3.2-表 14 に示す。

3.2-表 12 実証試験と机上検討の実施項目

		与干渉機		
		小型気象用レーダー	船舶用レーダー	航空機用レーダー
被干渉機	小型気象用レーダー	実証試験① 机上検討①	実証試験② 机上検討②	実証試験③
	船舶用レーダー	実証試験② 机上検討②	小型気象用レーダーの利用に関する調査検討であるため、検討対象外。	
	航空機用レーダー	実証試験③		

3.2-表 13 空中線回転条件と実証試験の実施項目

実証試験①		小型気象用レーダー		
		正対停止	定仰角回転 (PPI)	ボリュームスキャン
気象	正対停止	—	実施	実施
	定仰角回転 (PPI)		実施	実施
	ボリュームスキャン			実施

実証試験②		船舶用レーダー	
		正対停止	水平回転 (PPI)
気象	正対停止	—	実施
	定仰角回転 (PPI)	—	実施

実証試験③		航空機用レーダー	
		正対停止	水平往復走査
気象	正対停止	—	—
	定仰角回転 (PPI)	—	実施

3.2-表 14 空中線回転条件と机上検討の実施項目

机上検討①		小型気象用レーダー		
		正対停止	定仰角回転	ボリュームスキャン
気象	正対停止	—	—	—
	定仰角回転 (PPI)		実施	—
	ボリュームスキャン			—

机上検討②		船舶用レーダー	
		正対停止	水平回転 (PPI)
気象	正対停止	—	—
	定仰角回転 (PPI)	—	実施
	ボリュームスキャン	—	—

※気象：小型気象用レーダーを指す

正対停止：もう一方のレーダーの方向に空中線指向中心を向けて静止している状態

定仰角回転（PPI）：仰角 0°で水平回転する状態

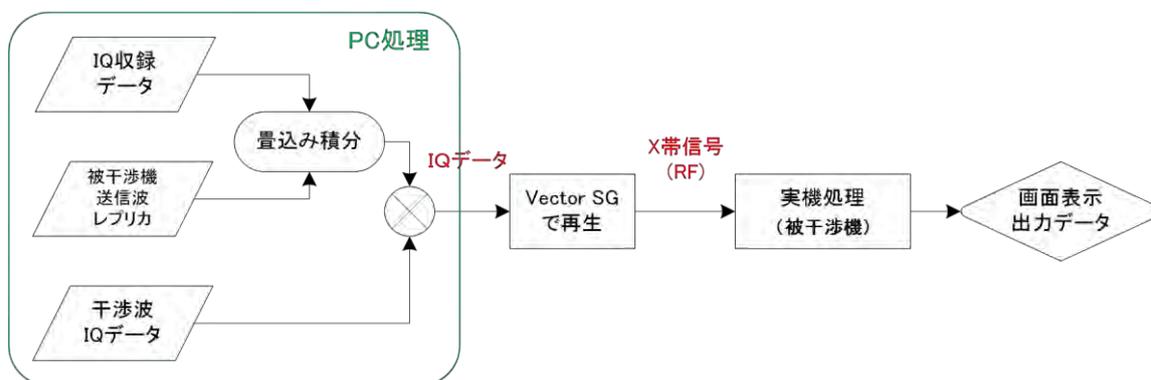
ボリュームスキャン：仰角を変化させながら水平回転する状態であり、気象レーダーの通常の利用状態

第4章 机上検討

4.1 既存システムとの共用検討（机上検討）

既存システムとの共用条件を検討するにあたり、パラメータの変更による影響や、実証試験を行うことが不可能な多数のレーダーからの干渉といった条件を検討するため、机上検討を行う。

机上検討の処理の概略を 4.1-図 13 に示す。条件を設定して計算機でシミュレーションを行った干渉波のデータと、実環境で収録した基準画像を重畳して評価データを作成する。データをベクトル信号発生器によって RF 帯域で再生し、実機へ入力する。実機では通常の信号処理を行い、通常どおりに画面表示やデータ出力を行い、これを評価する。



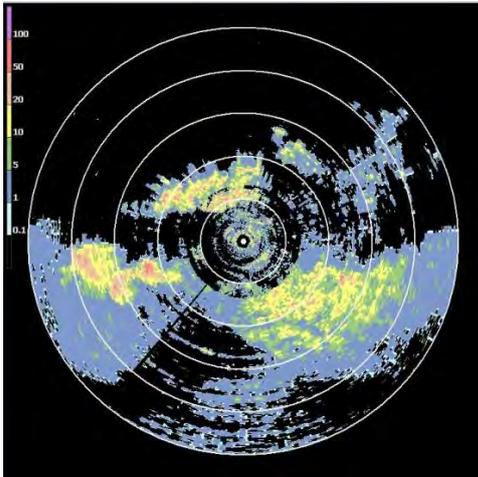
4.1-図 13 机上検討説明図

机上検討の目的は、多様な干渉波に対して、実機の干渉除去機能の性能を評価することである。干渉波のみを除去し、基準画像は完全に復元されるのが理想状態である。このような理想に近い状態を達成できれば、干渉波が到来したとしても物標探知能力を損なうことは無いと考えられる。

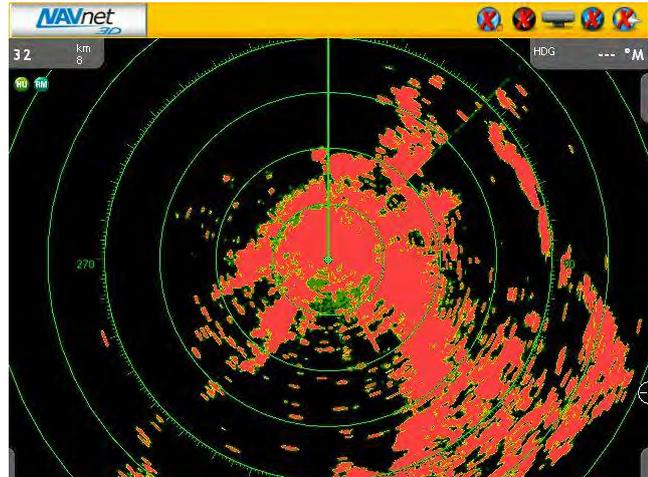
ただし、船舶用レーダーは陸上用気象レーダーよりも優先度が上位の業務で使用されるため、本検討によって示した干渉軽減効果については、今後、被干渉側である船舶用レーダーの使用者や製造者との調整等を経て対応することが望ましい。

実際に、多数の干渉源を任意の位置に配置した実験を十分な規模で実施するのは困難を極めるため、シミュレーションによって条件の検討を行う。基準画像としては、小型気象用レーダーが被干渉機となるときは、実際の降雨画像（4.1-図 14）を用い、船舶用レーダーが被干渉機となるときは、大阪湾で収録した地形と船舶の映像（4.1-図 15）を用いる。

いずれも一周（360°）が丁度 8192 本の走査線となるように調整し、評価している。



4.1-図 14 気象用基準画像（雨域）



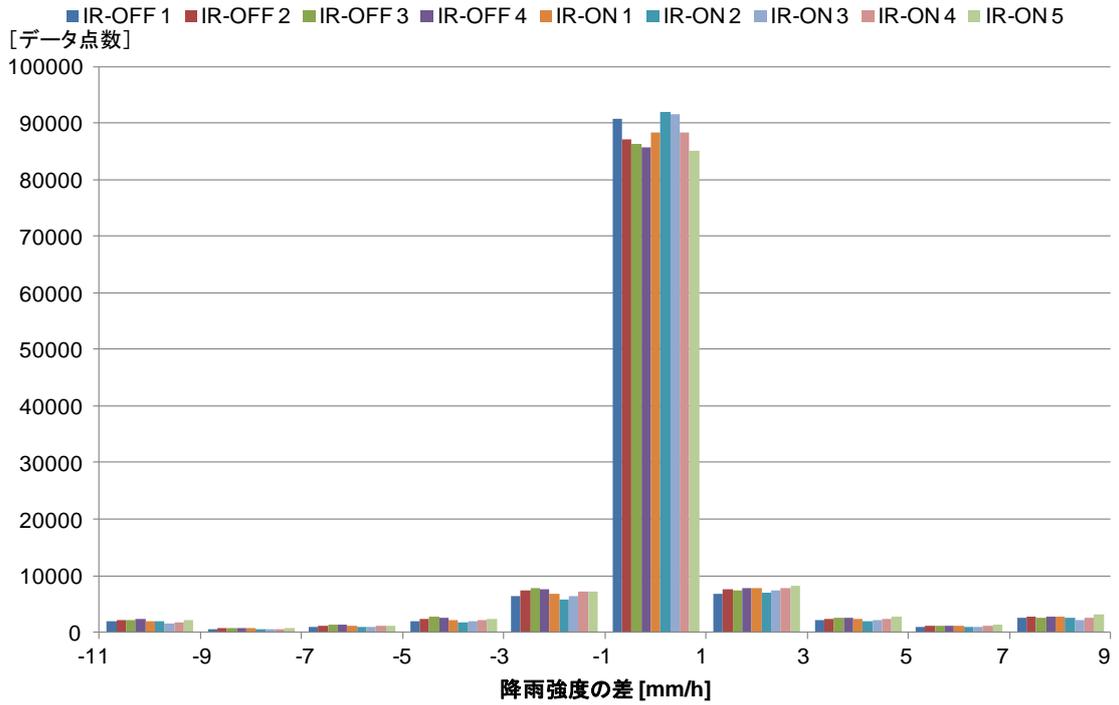
4.1-図 15 船舶用基準画像（地形+船舶）

本章では、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について検討を行う。近年大型のレーダーを中心に普及し始めている、マルチパラメータレーダーのような高度なレーダーでは干渉の影響が異なってくる。そのため、本章の検討は限定的であり、高度なレーダーに適用する場合には更なる検討が必要となる。

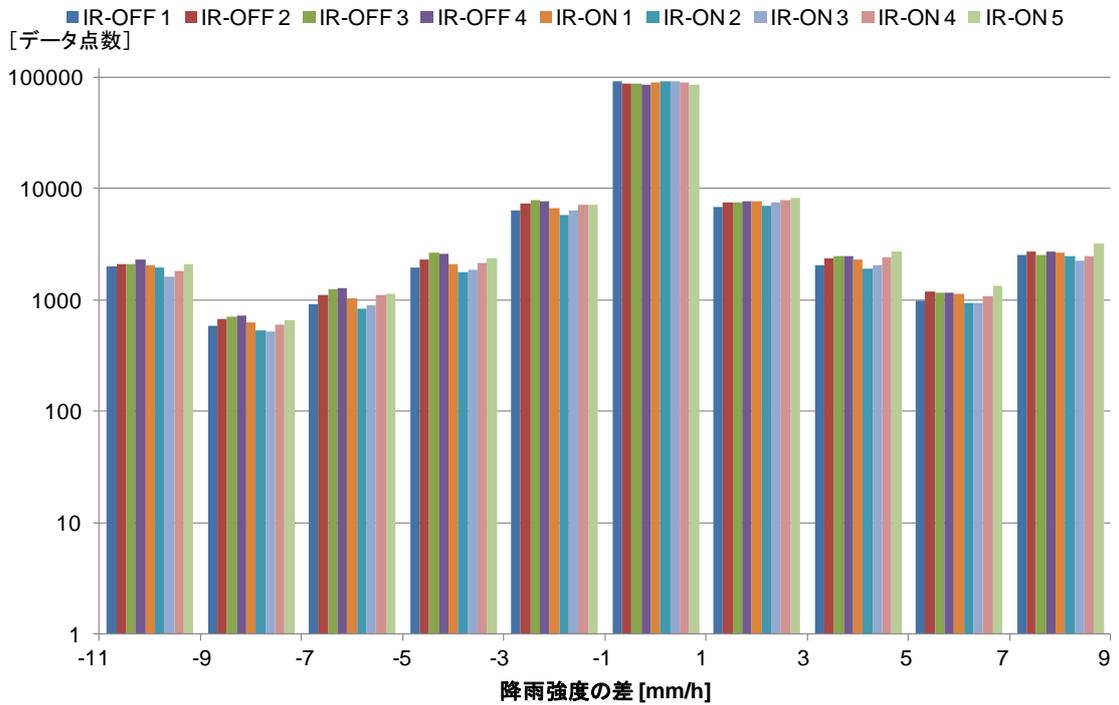
測定系の安定度及び、干渉除去後のデータ劣化を評価するため、4.1-図 13 に示した処理系で 10 回連続測定した場合を評価する。初回の取得データを基準とし、2 回目以降のデータとの差分をヒストグラムで評価した結果を 4.1-図 16 から 4.1-図 21 に示す。

なお、データ取得時に若干基準角度が回転しているため、ヒストグラムを計算する前に角度を調整した上で計算を行っている。また、2 回目以降の 4 回は干渉除去機能 OFF (IR-OFF)、5 回は干渉除去機能 ON (IR-ON) とし、違いが出るか否かも同時に確認しているが、有意な差は見られないことが分かる。

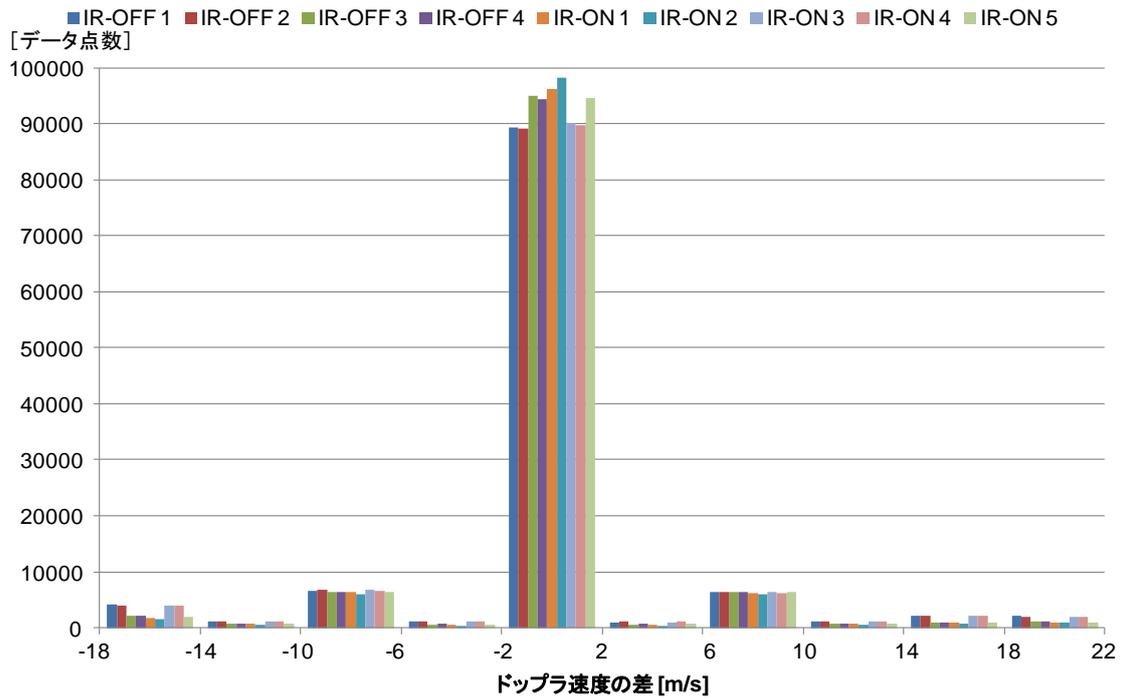
同様に、4.1-図 15 に示した船舶用基準画像を表示階調で評価した結果を、4.1-図 22 及び、4.1-図 23 に示す。こちらも、干渉除去機能の ON/OFF で有意な差は見られないことが分かる。



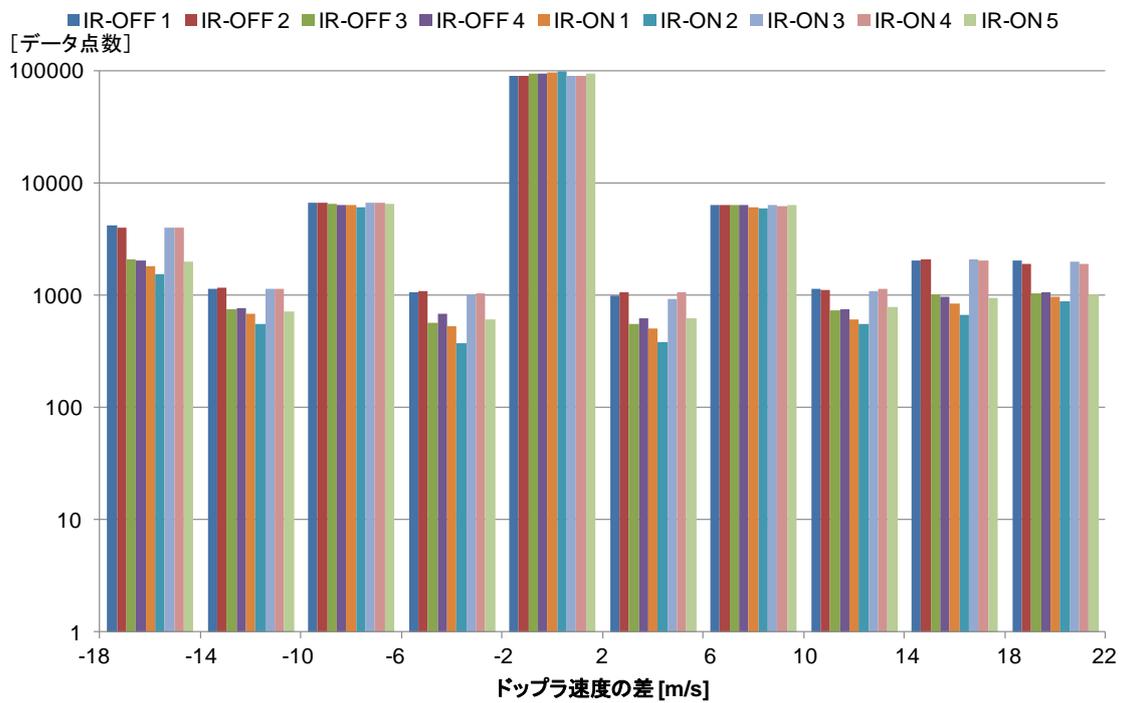
4.1-図 16 降雨強度差のヒストグラム（気象用基準画像、縦軸：線形）



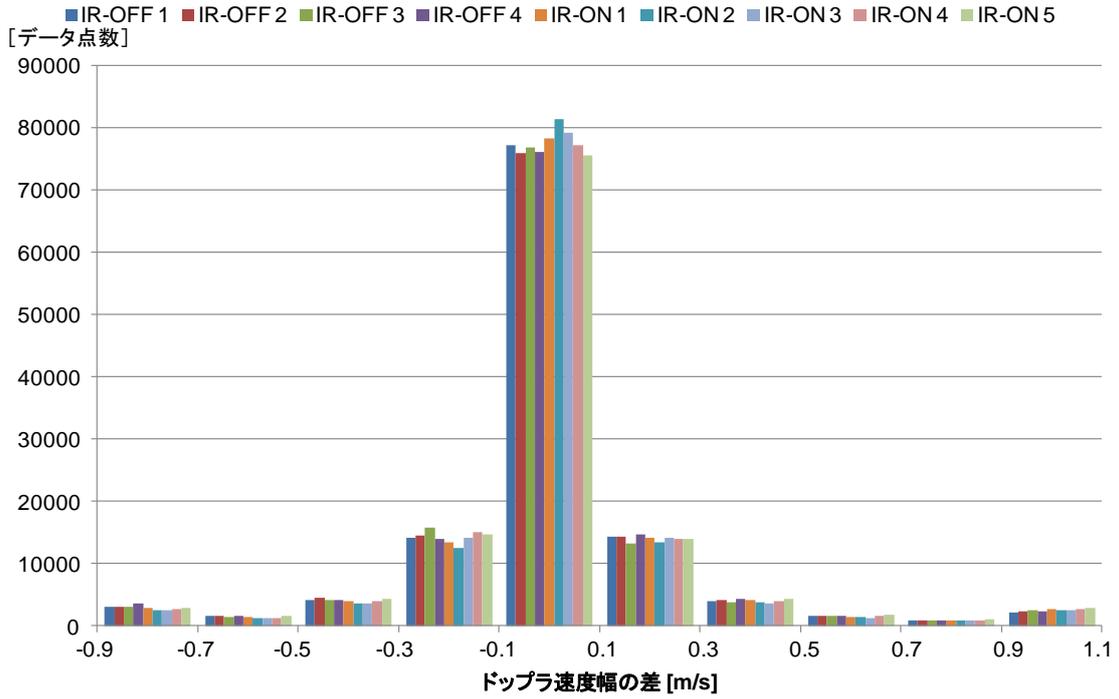
4.1-図 17 降雨強度差のヒストグラム（気象用基準画像、縦軸：対数）



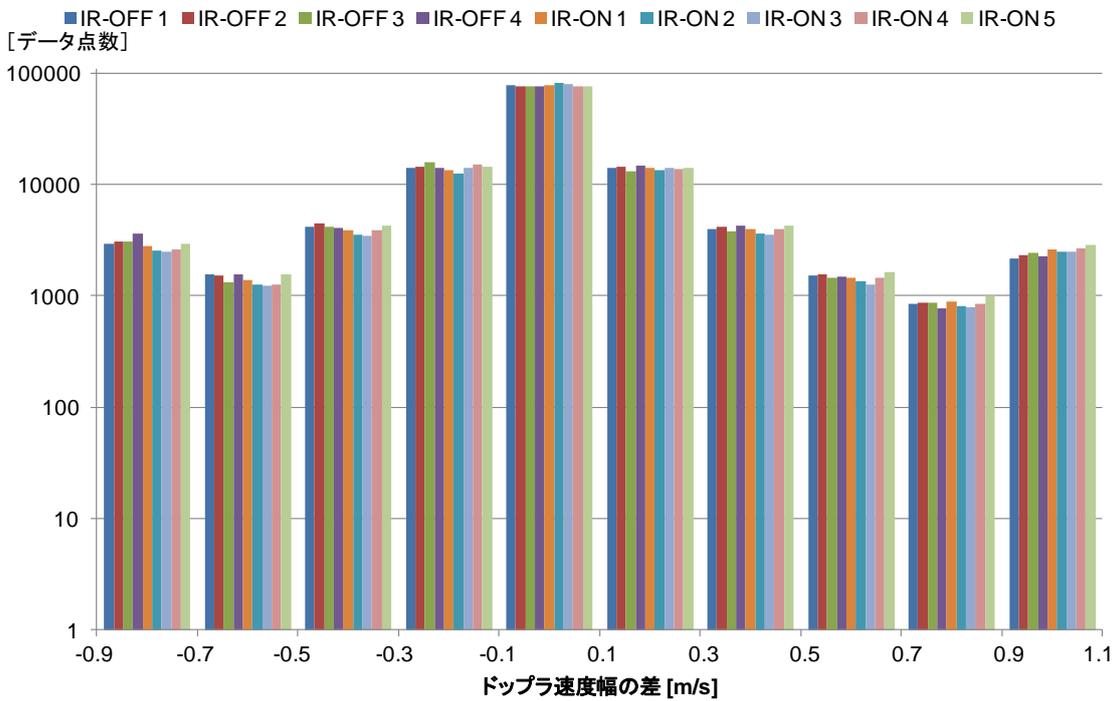
4.1-図 18 ドップラ速度差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：線形)



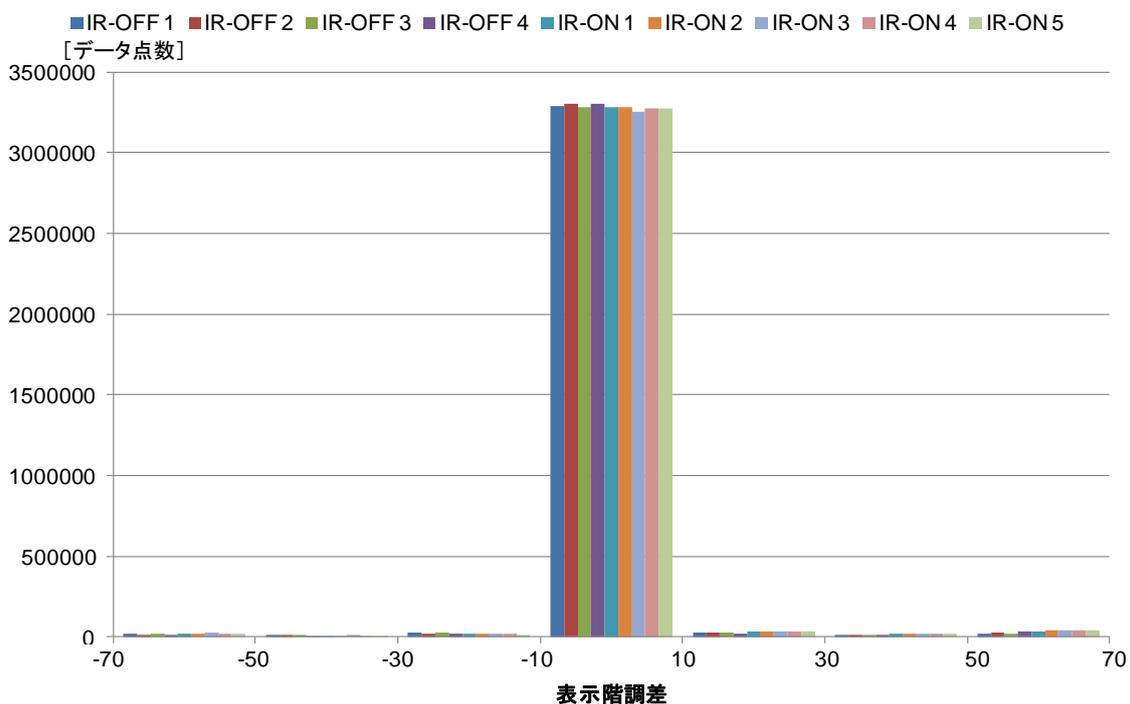
4.1-図 19 ドップラ速度差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：対数)



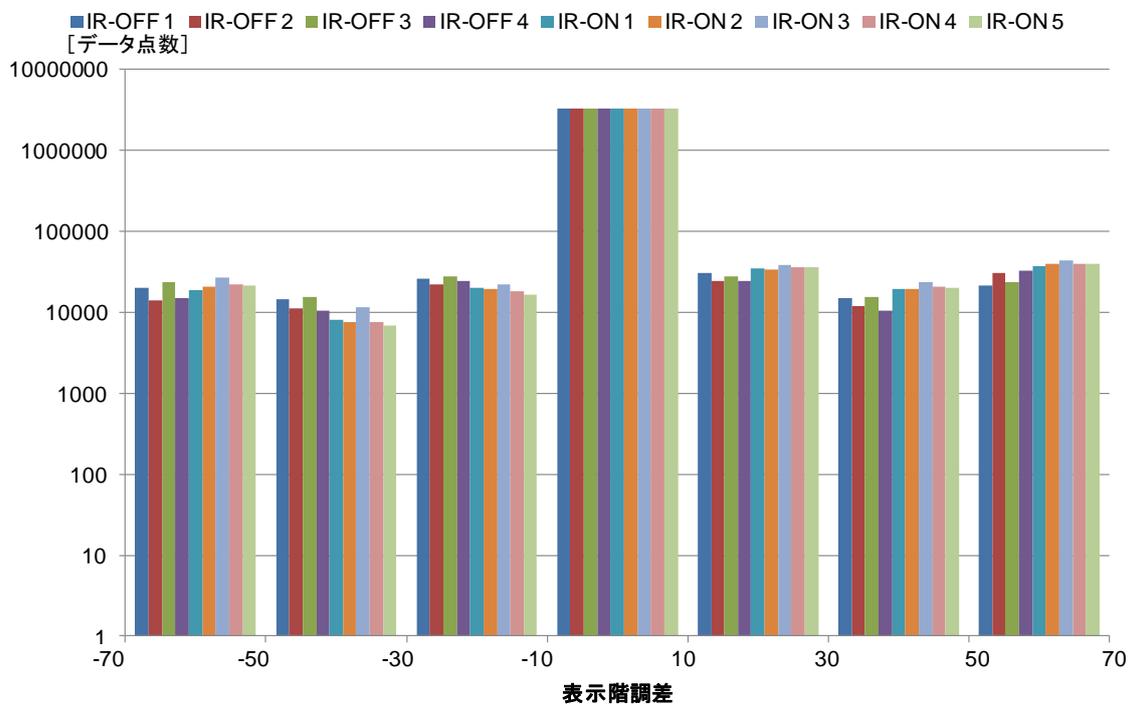
4.1-図 20 ドップラ速度幅差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：線形)



4.1-図 21 ドップラ速度幅差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：対数)



4.1-図 22 表示階調差のヒストグラム（船舶用基準画像、縦軸：線形）

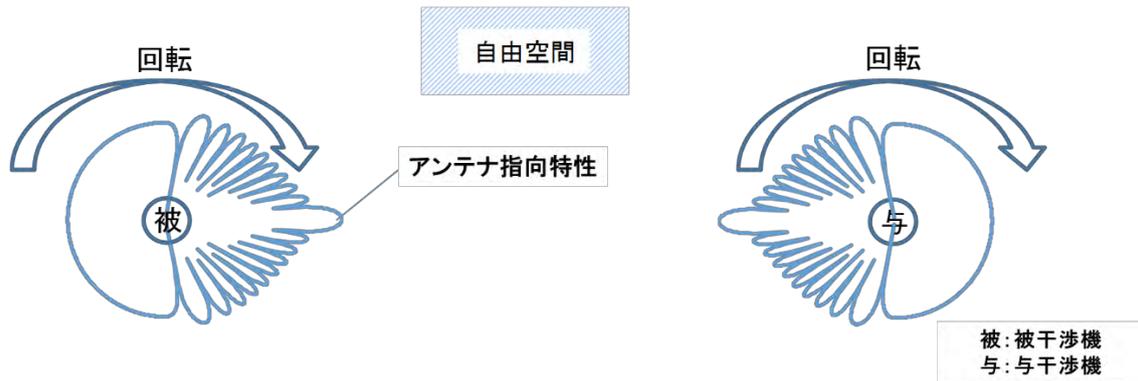


4.1-図 23 表示階調差のヒストグラム（船舶用基準画像、縦軸：対数）

4.1.1 干渉波データ生成

計算機による干渉波データの生成方法と、状況設定について解説する。

シミュレーション概念図を 4.1.1-図 24 に示す。被干渉機と与干渉機の 2 台の組合せが基本単位となる。テストフィールドは無限の広さを持つ自由空間であり、試験機は両方とも宙に浮いている状態であるとする。



4.1.1-図 24 シミュレーション概念図

気象用レーダーは、観測対象の三次元的な位置（高度、緯度、経度）を測定することも目的の一つであり、ペンシルビームの空中線を使用して、地表からある程度の高さをもった空間内を走査する事が求められる。そのため、仰角を変更しながら水平回転する、ボリュームスキャンと呼ばれる走査方法が基本である。

相互干渉を考える場合、強度が最大となるのは、メインローブ同士が正対するときである。前述のように、空中線を停止して送信を続けることは考えられず、等高度設置で仰角がゼロ度の水平回転をしている状態が、干渉強度を考える上での最悪条件である。仰角がこの状態から変化する場合、空中線の指向性としては中心から外れていくこととなるため、干渉強度としては減少方向になる。

空中線走査条件の組み合わせを、4.1.1-表 15 及び、4.1.1-表 16 に示す。この内、片方または双方が正対停止している状態は通常観測時は起こり得ない過剰な条件であるため、除外する。また、片方または双方がボリュームスキャンの時は緩和方向となる条件であるため、これも除外する。

したがって、机上検討では等高度設置、仰角ゼロ度、水平連続回転という条件のみでの検討を行う。

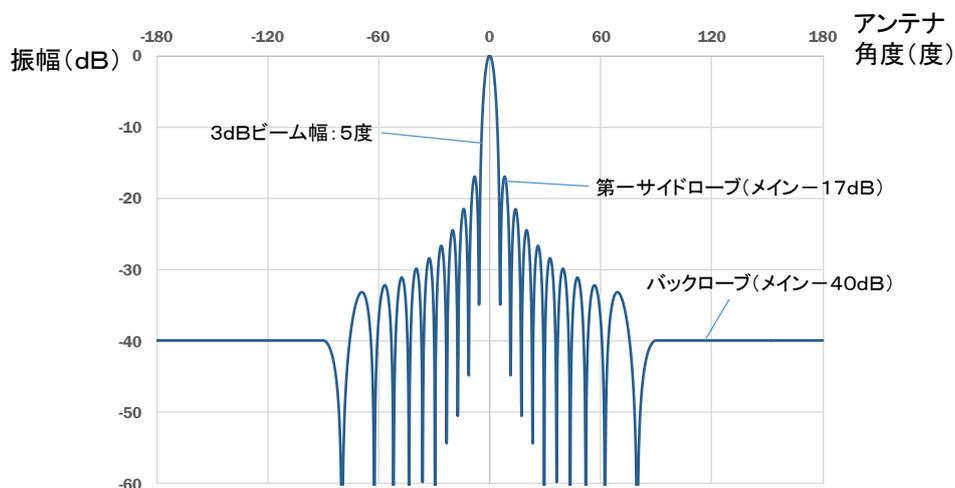
4.1.1-表 15 机上検討①の空中線回転条件

		小型気象用レーダー		
		正対停止	定仰角回転(PPI)	ボリュームスキャン
小型気象用レーダー	正対停止	— (過剰条件のため)	— (過剰条件のため)	— (過剰条件のため)
	定仰角回転(PPI)	—	実施	— (緩和条件のため)
	ボリュームスキャン	—	—	— (緩和条件のため)

4.1.1-表 16 机上検討②の空中線回転条件

		船舶用レーダー	
		正対停止	水平回転(PPI)
小型気象用レーダー	正対停止	— (過剰条件のため)	— (過剰条件のため)
	定仰角回転(PPI)	— (過剰条件のため)	実施
	ボリュームスキャン	— (過剰条件のため)	— (緩和条件のため)

検討に用いる空中線指向特性を 4.1.1-図 25 に示す。本報告では相互干渉を検討するため、主として問題になる仕様としては、利得、指向性半値幅、第一サイドローブレベル、バックローブレベルが挙げられる。第一サイドローブレベルは-17 dB、バックローブレベルは-40 dB となるように調整した sinc 関数を用いて模擬する。



4.1.1-図 25 空中線指向特性図

4.1.2 実証試験との比較

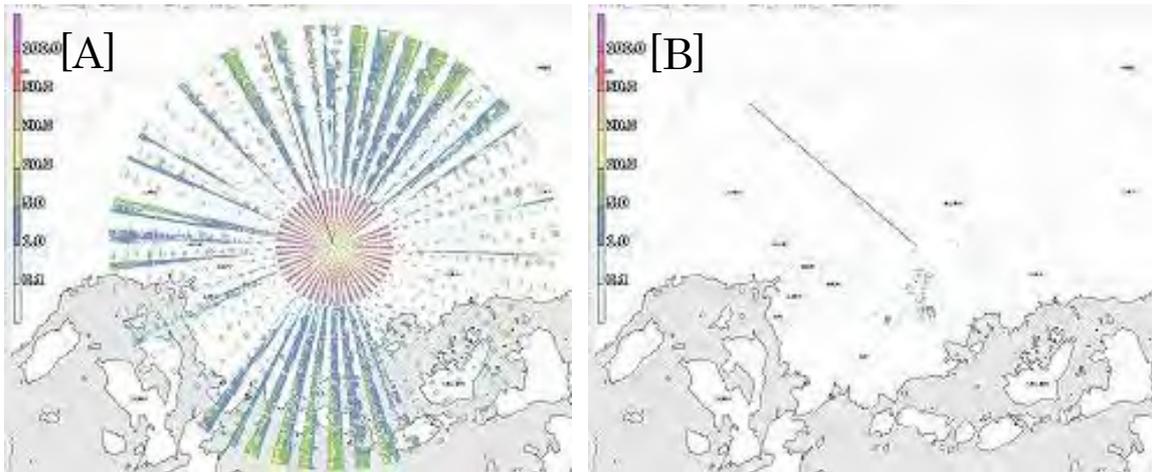
シミュレーションによる検討を行う前に、実証試験時の仕様と合わせた机上検討結果と実証試験結果とを比較し、その妥当性を検証する。実証試験時の設定を4.1.2-表 17に示す。

なお、「空中線電力」とは電波法施行規則第二条によれば「空中線系の給電線に供給される電力」をいうが、本検討では EIRP を論じる都合上、給電線損失を全て含んだ、空中線に供給される電力で表示している。

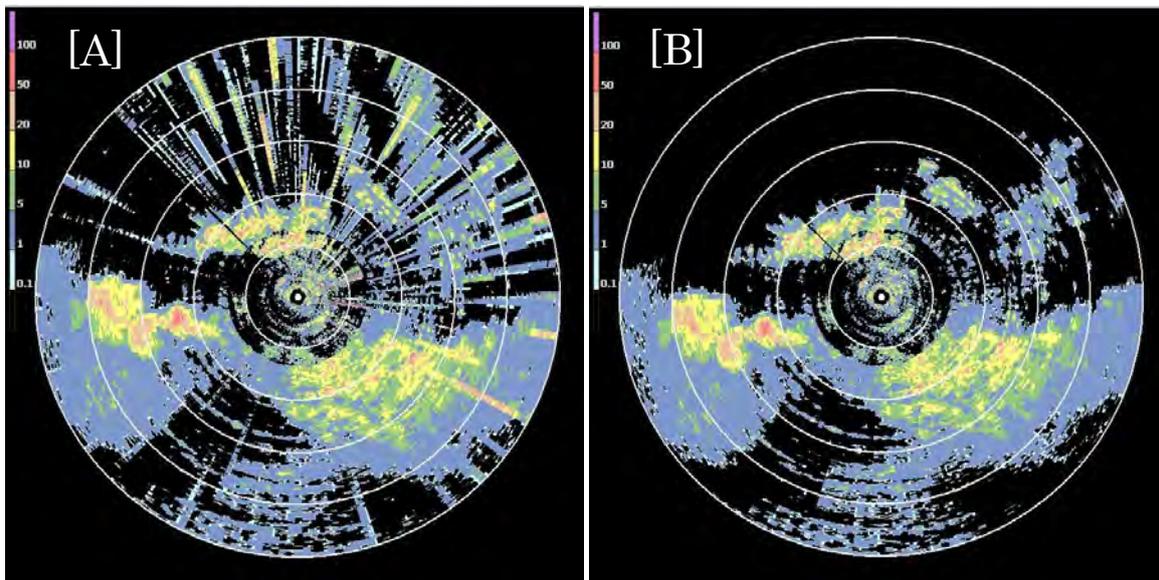
4.1.2-表 17 実証試験時の設定

	気象用 1	気象用 2 (与干渉専用)	船舶用	
			500 m レンジ	32 km レンジ
送信周波数 [MHz]	9470 / 9415	9470 / 9415	9414.38	
回転速度 [rpm]	10	10	48	36
PRF1 [Hz]	1000	950	3000	1000
PRF2 [Hz]	800	760	—	—
P0N パルス幅 [μ s]	0.33	0.33	0.08	0.5
Q0N パルス幅 [μ s]	50	50	—	—
Q0N 変調幅 [MHz]	6.06	6.06	—	—
空中線利得 [dBi]	33.7	33.7	28	
空中線水平面内指向角 [deg]	2.7	2.7	1.9	
空中線垂直面内指向角 [deg]	2.7	2.7	22	
空中線供給電力 [W]	68.4	66.5	7750	9790

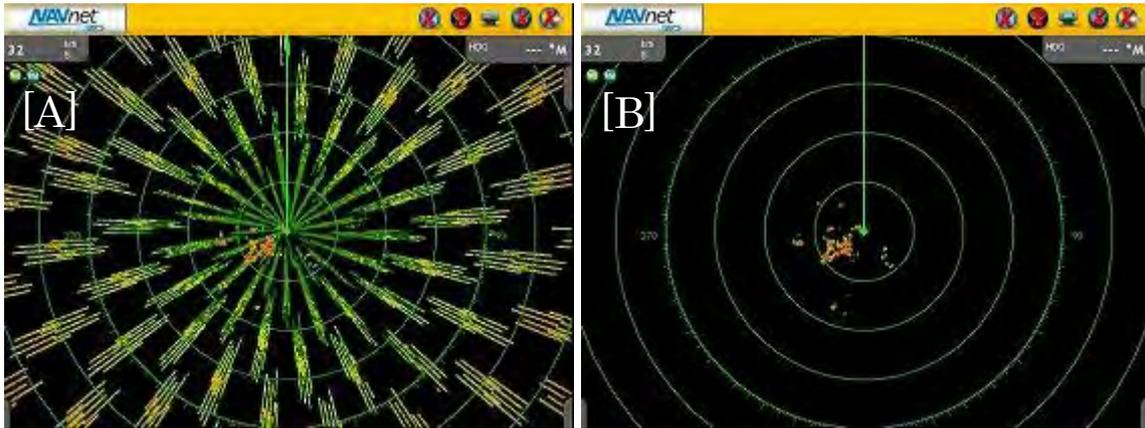
小型気象用レーダーの相互干渉実測結果を4.1.2-図 26、同様の机上検討結果を4.1.2-図 27に示す。また、被干渉機が船舶用レーダー、与干渉機が気象用レーダーの結果を4.1.2-図 28、4.1.2-図 29に示す。いずれも[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON の状態を示している。基準画像が異なる等の違いはあるものの、概ね干渉の様子は模擬できており、また、干渉除去機能も正常に機能していることが分かる。



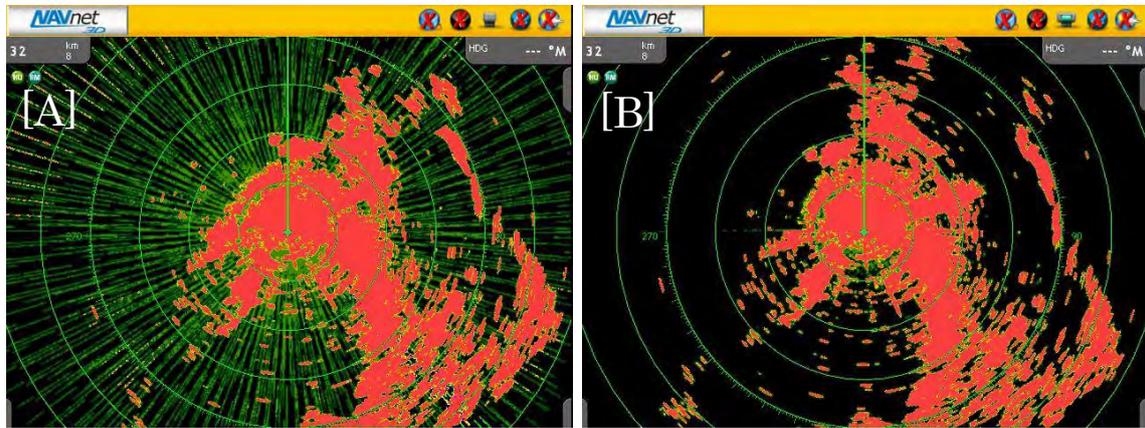
4.1.2-図 26 小型気象用レーダー相互干渉実測結果（離隔距離：373 m, 二重偏波）



4.1.2-図 27 小型気象用レーダー相互干渉机上検討結果（離隔距離：373 m, 水平偏波）



4.1.2-図 28 船舶用レーダー干渉実測結果（離隔距離：373 m, 水平偏波）



4.1.2-図 29 船舶用レーダー干渉机上検討結果（離隔距離：373 m, 水平偏波）

4.1.3 机上検討

机上検討を行う条件を 4.1.3-表 18 に示す。探知モードを、大きく近距離レンジと遠距離レンジに分け、干渉量が増加する設定を重点的に検証する。

4.1.3-表 18 机上検討を行う条件

	気象用		船舶用	
	近距離レンジ	遠距離レンジ	近距離レンジ	遠距離レンジ
回転速度 [rpm]	2		20	
PRF1 [Hz]	3000	500	3000	500
PRF2 [Hz]	2000	400		
P0N パルス幅 [μ s]	0.1	2	0.03	2
Q0N パルス幅 [μ s]	5	50		
Q0N 変調幅 [MHz]	5	5		
空中線利得 [dBi]	33		28	
空中線水平面内指向角 [deg]	2.7		1.9	
空中線電力 [W]	500		75000	

※これ以降の図表において、「小型気象用レーダー」を単に「気象用」、「船舶用レーダー」を単に「船舶用」と表記する場合がある。

検証 1：離隔周波数による干渉状況変化

離隔距離を 100 m とし、与干渉機が遠距離レンジ、被干渉機が近距離レンジという最悪の組み合わせで観測している場合において、離隔周波数を変化させた場合の干渉状況変化について検証する。

検証 2：観測レンジによる干渉状況変化

離隔距離を 100 m とし、観測レンジを切り替えた場合の干渉状況について検討を行う。

検証 3：与干渉機増加時の干渉状況変化

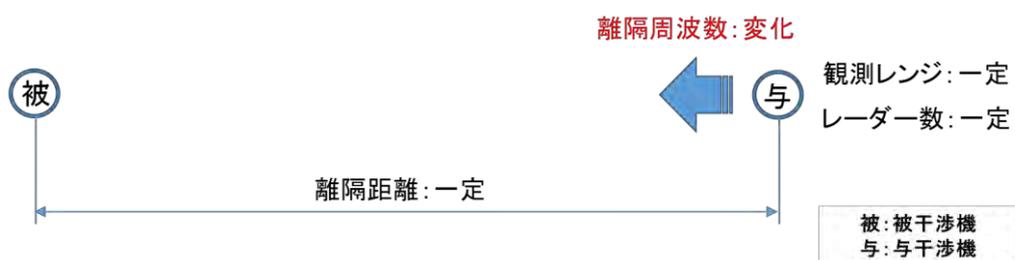
離隔距離を 100 m とし、与干渉機の台数が増加した場合の干渉状況について検討を行う。与干渉機の台数を 3~6 台とし、正多角形の頂点に与干渉機、重心に被干渉機がそれぞれ配置されているとして検証を行う。

検証 4：離隔距離による干渉状況変化

離隔距離を 100 m, 1, 5, 10, 20, 50 km と変化させた場合の干渉状況について検討を行う。

4.1.3.1 検証1：離隔周波数による干渉状況変化

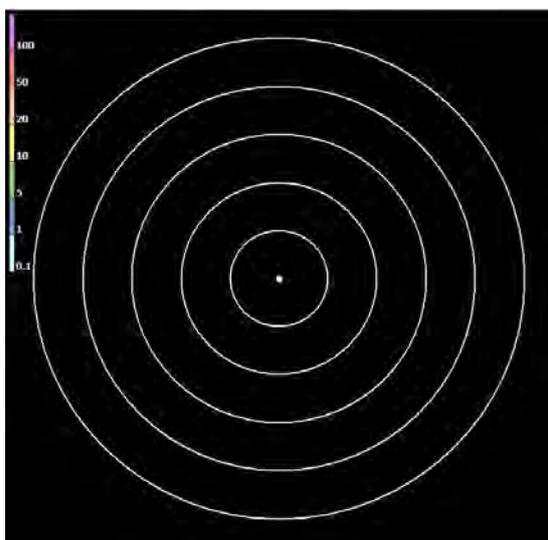
検証1のモデル図を4.1.3.1-図30に示す。



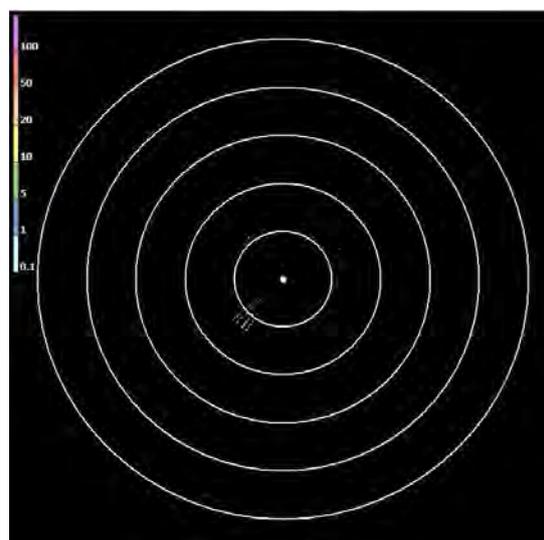
4.1.3.1-図30 検証1のモデル図

離隔周波数は被干渉機である気象用(9470 MHz)を基準として、-15, -10, -7, -5, 0, +5, +7, +10 MHzの8状態について検討を行った。与干渉機を小型気象用レーダー(遠距離レンジ)、被干渉機を小型気象用レーダー(近距離レンジ)とした場合の結果を4.1.3.1-図31から4.1.3.1-図38に示す。離隔周波数が増加するにつれ、干渉量は概ね減少傾向にある。正負両側について、10 MHz離隔すればほぼ影響はないという結果になった。

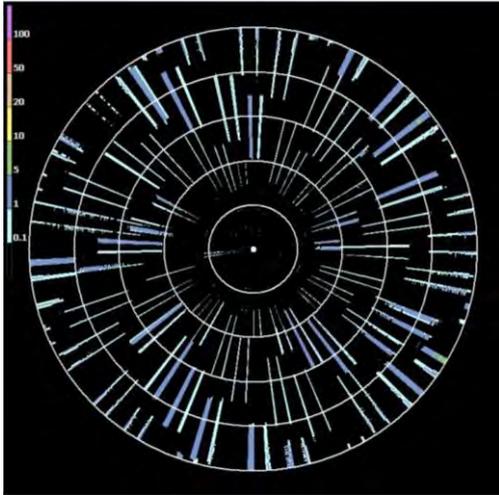
なお、本検討は干渉波の周波数のみを変化させる必要があるため、実験機材の制約から、干渉波のみを用いて行っている。また、干渉除去機能はOFFとして検証を行っている。



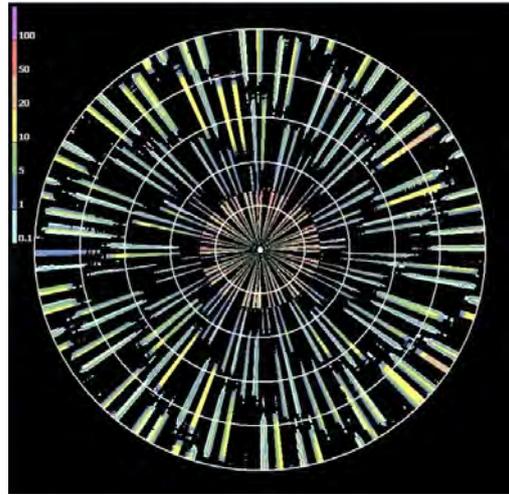
4.1.3.1-図31 離隔周波数：-15 MHz
(9455 MHz)



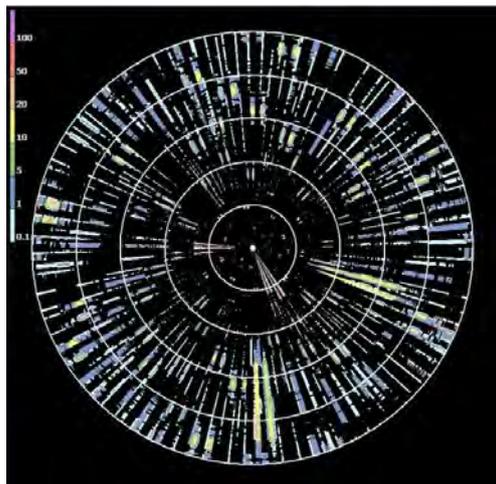
4.1.3.1-図32 離隔周波数：-10 MHz
(9460 MHz)



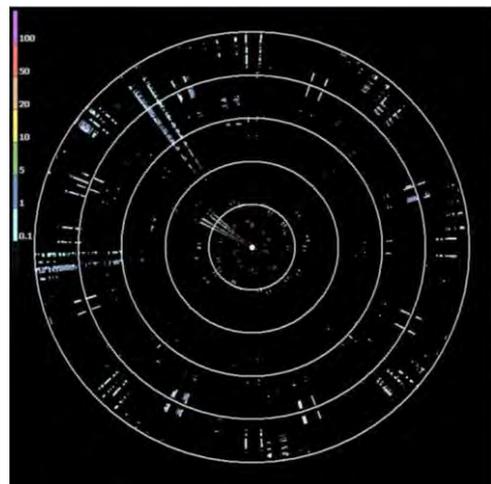
4.1.3.1-図 33 離隔周波数 : -7 MHz
(9463 MHz)



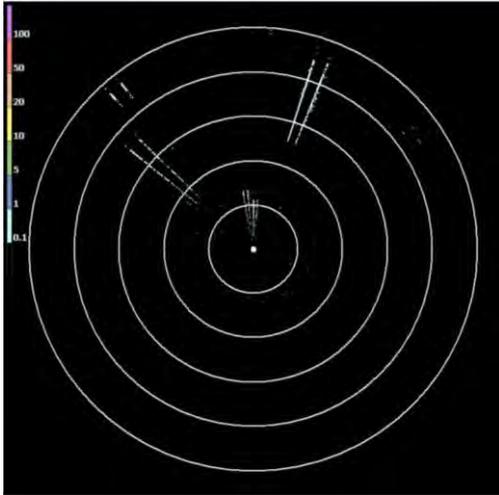
4.1.3.1-図 34 離隔周波数 : -5 MHz
(9465 MHz)



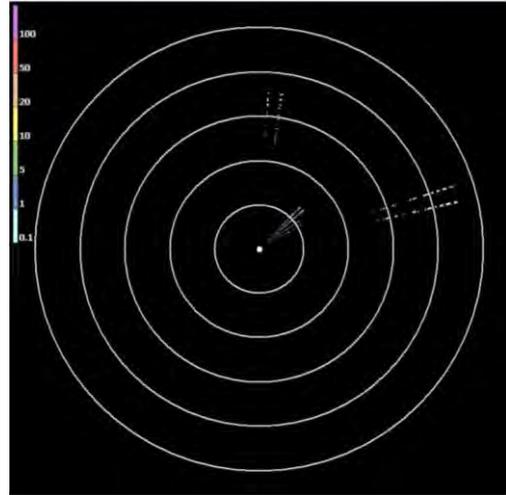
4.1.3.1-図 35 離隔周波数 : 0 MHz
(9470 MHz)



4.1.3.1-図 36 離隔周波数 : +5 MHz
(9475 MHz)



4.1.3.1-図 37 離隔周波数 : +7 MHz
(9477 MHz)

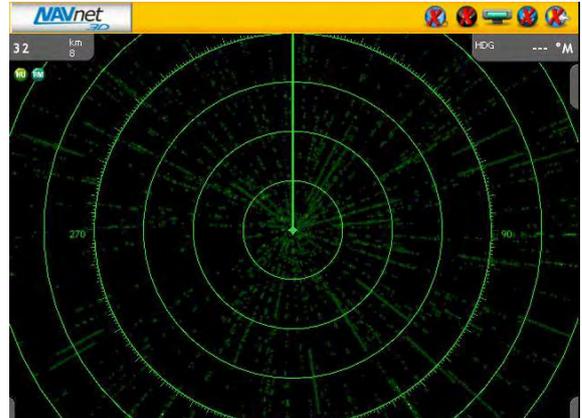


4.1.3.1-図 38 離隔周波数 : +10 MHz
(9480 MHz)

同様に、離隔距離を 100 m とし、与干渉機を小型気象用レーダー（遠距離レンジ）、被干渉機を船舶用レーダー（近距離レンジ）とした時の周波数の離隔結果を 4.1.3.1-図 39 から 4.1.3.1-図 53 に示す。この条件だと、55 MHz 程度離隔しないと顕著に干渉が減少しないことが分かる。これは、遠距離受信領域は高感度であるため、受信機が飽和しており、周波数特性が見られなくなってしまうのが原因であると考えられる。



4.1.3.1-図 39 離隔周波数 : -55 MHz
(9360 MHz)



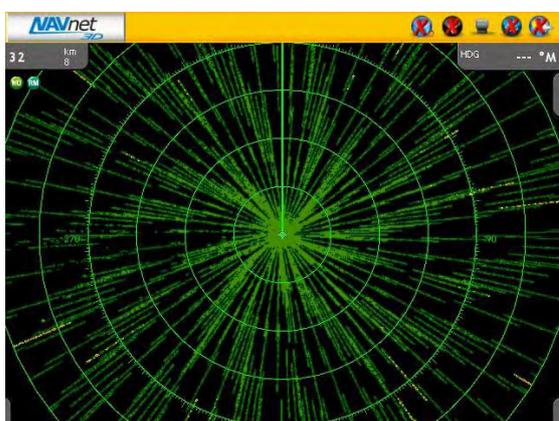
4.1.3.1-図 40 離隔周波数 : -50 MHz
(9365 MHz)



4.1.3.1-図 41 離隔周波数 : -45 MHz
(9370 MHz)



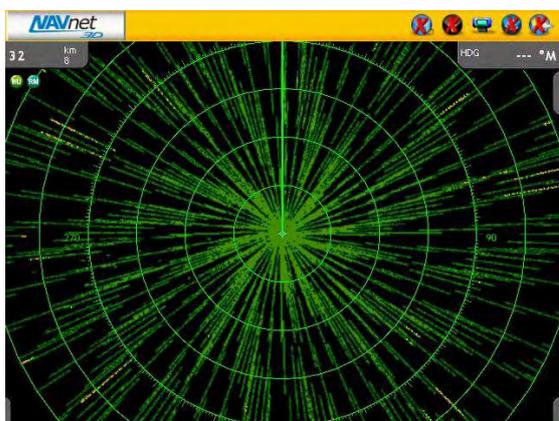
4.1.3.1-図 42 離隔周波数 : -40 MHz
(9375 MHz)



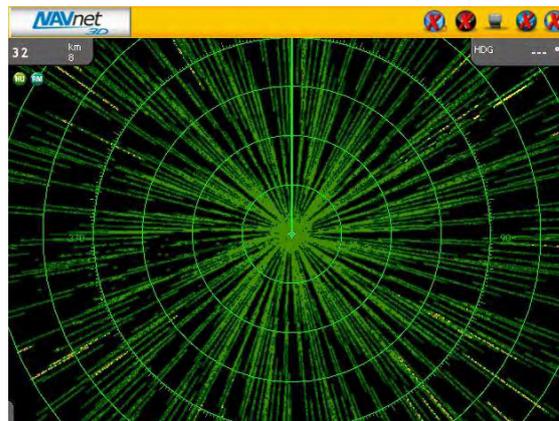
4.1.3.1-図 43 離隔周波数 : -30 MHz
(9385 MHz)



4.1.3.1-図 44 離隔周波数 : -20 MHz
(9395 MHz)



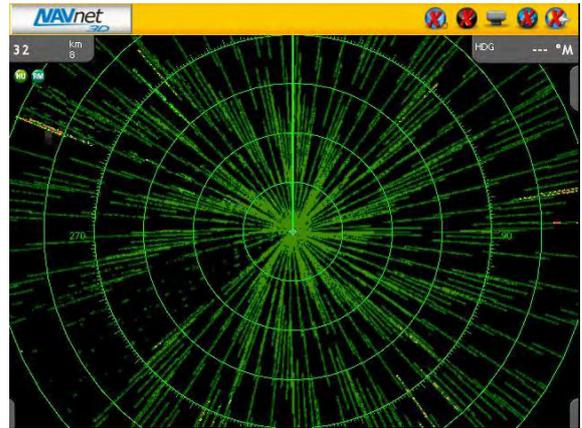
4.1.3.1-図 45 離隔周波数 : -10 MHz
(9405 MHz)



4.1.3.1-図 46 離隔周波数 : 0 MHz
(9415 MHz)



4.1.3.1-図 47 離隔周波数 : +10 MHz
(9425 MHz)



4.1.3.1-図 48 離隔周波数 : +20 MHz
(9435 MHz)



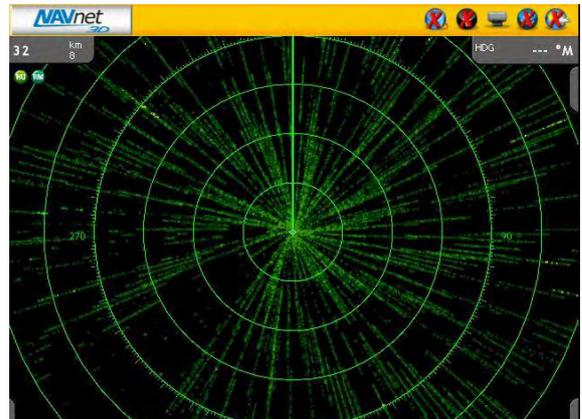
4.1.3.1-図 49 離隔周波数 : +30 MHz
(9445 MHz)



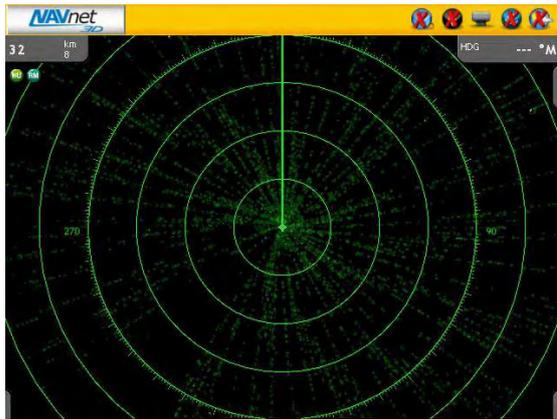
4.1.3.1-図 50 離隔周波数 : +40 MHz
(9455 MHz)



4.1.3.1-図 51 離隔周波数 : +50 MHz
(9465 MHz)



4.1.3.1-図 52 離隔周波数 : +55 MHz
(9470 MHz)



4.1.3.1-図 53 離隔周波数 : +60 MHz
(9475 MHz)

この仮説を検証するため、受信機が飽和しないような電力での検証も行う。離隔距離を 17.8 km に設定し、干渉最大電力を 45 dB 低減した時の結果を 4.1.3.1-図 54 から 4.1.3.1-図 62 に示す。

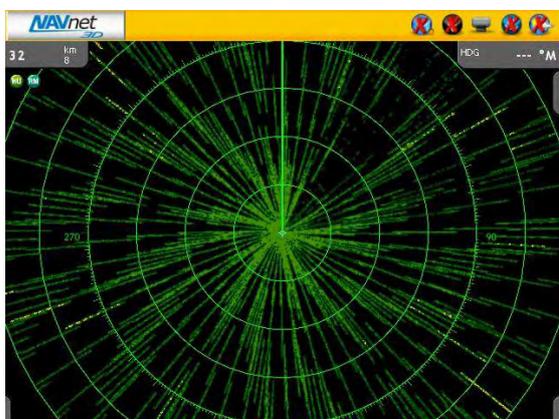
この条件下であれば、 ± 20 MHz 程度離隔することによって、干渉除去機能 OFF でも干渉が見られないことが分かる。



4.1.3.1-図 54 離隔周波数 : -25 MHz
(9390 MHz)



4.1.3.1-図 55 離隔周波数 : -20 MHz
(9395 MHz)



4.1.3.1-図 56 離隔周波数 : -15 MHz
(9400 MHz)



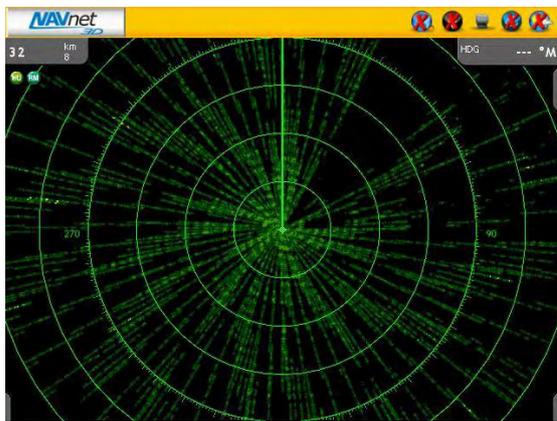
4.1.3.1-図 57 離隔周波数 : -10 MHz
(9405 MHz)



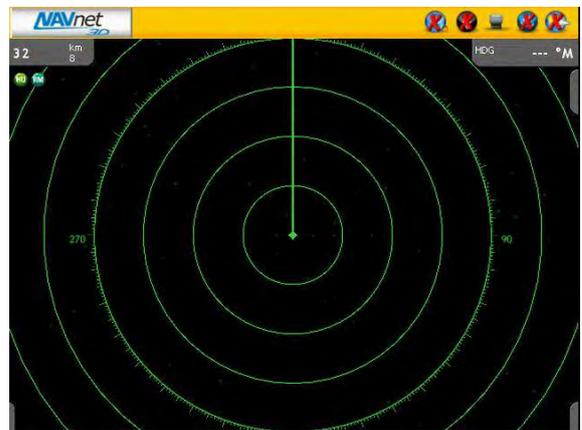
4.1.3.1-図 58 離隔周波数 : 0 MHz
(9415 MHz)



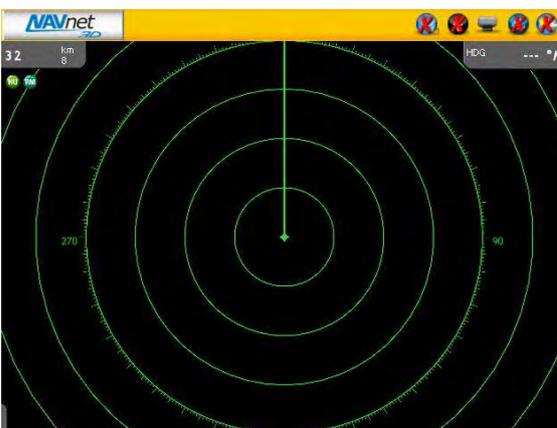
4.1.3.1-図 59 離隔周波数 : +10 MHz
(9425 MHz)



4.1.3.1-図 60 離隔周波数 : +15 MHz
(9430 MHz)



4.1.3.1-図 61 離隔周波数 : +20 MHz
(9435 MHz)



4.1.3.1-図 62 離隔周波数 : +25 MHz
(9440 MHz)

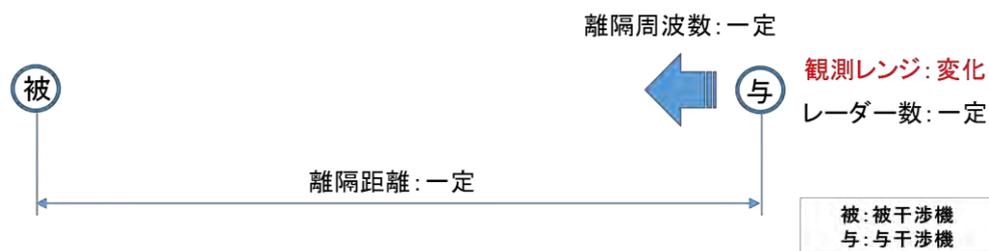
4.1.3.2 検証2：観測レンジによる干渉状況変化

観測レンジによって変化する干渉状況を検討する。

与干渉側で考えると、送信するパルスの諸元が変化する。一般に、遠距離レンジの方が長いパルスを送信するために干渉を与える時間は長くなるが、PRFは低下するため、干渉頻度は低下する。近距離レンジの場合はこの逆で、与干渉時間は短くなるが、干渉頻度は高くなる。

被干渉側で考えると、一般に、遠距離レンジは受信帯域が狭くなるために離隔周波数の効果が大きくなる。また、同じパルス幅の干渉波であっても、画面に表示される長さは短くなる。近距離レンジはこの逆で、受信帯域が広がるために離隔周波数の効果が小さく、同じ干渉波を受信しても、画面に表示される長さは遠距離レンジより長くなる。被干渉機が固体素子レーダーの場合はパルス圧縮を行うために、状況はもう少し複雑になり、変調仕様の組み合わせで状況が変化する。

検証2のモデル図を4.1.3.2-図63に示す。

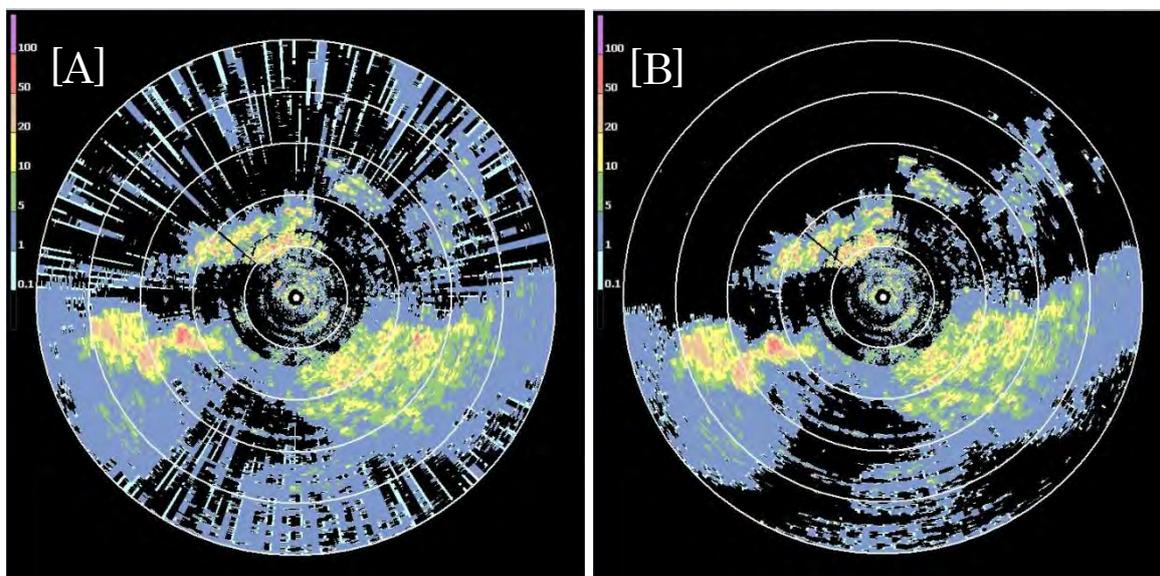


4.1.3.2-図 63 検証2のモデル図

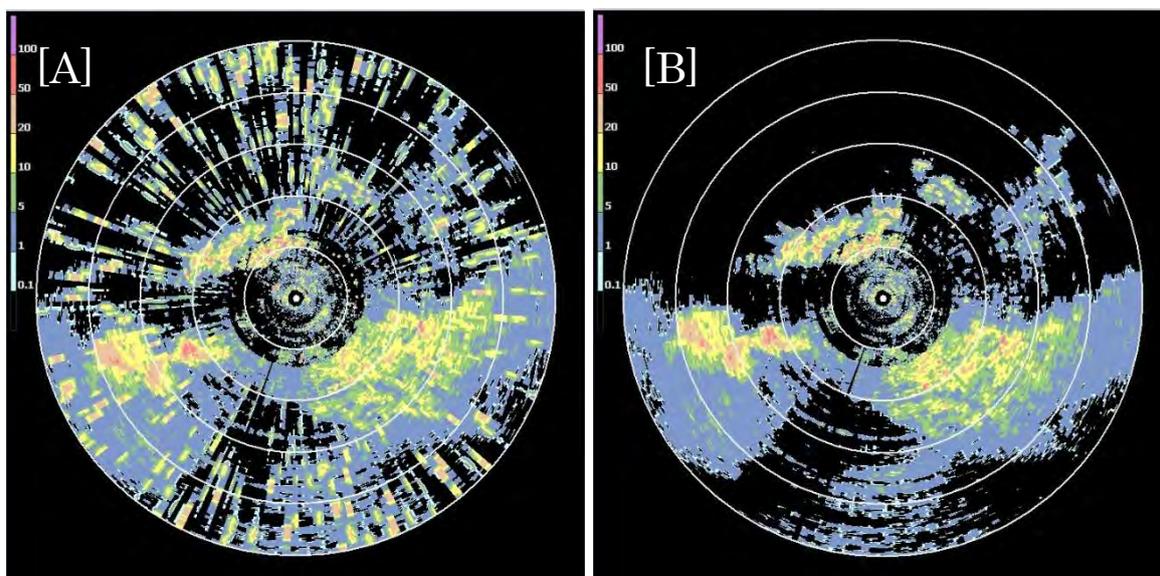
離隔距離を 100 m とし、与干渉機が船舶用レーダー、被干渉機が小型気象用レーダーの場合を 4.1.3.2-図 64、4.1.3.2-図 65 に示す。いずれも、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON の場合を示している。

両者を比較すると、遠距離レンジの方が干渉の占有面積が大きく、強度も高いという結果になっている。これは、ミスマッチなマッチドフィルタで無変調波のパルス圧縮処理を行ったため、圧縮結果はエネルギー差が支配的となったためであると考えられる。

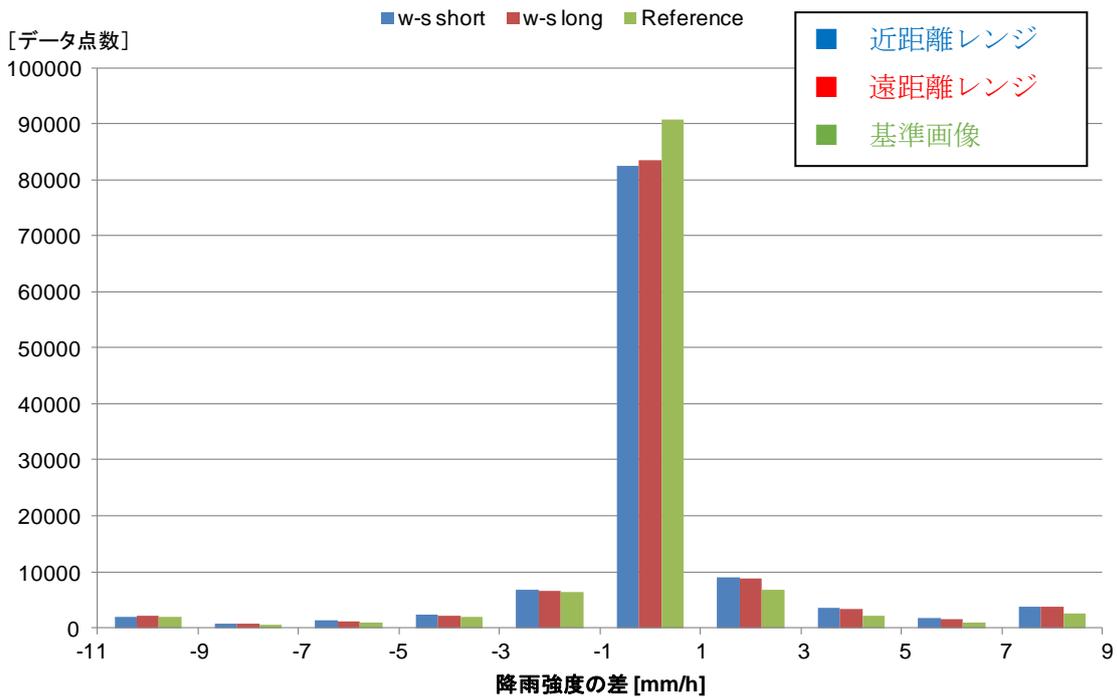
また、干渉除去後の画像と基準画像の差のヒストグラムを 4.1.3.2-図 66 から 4.1.3.2-図 71 に示す。



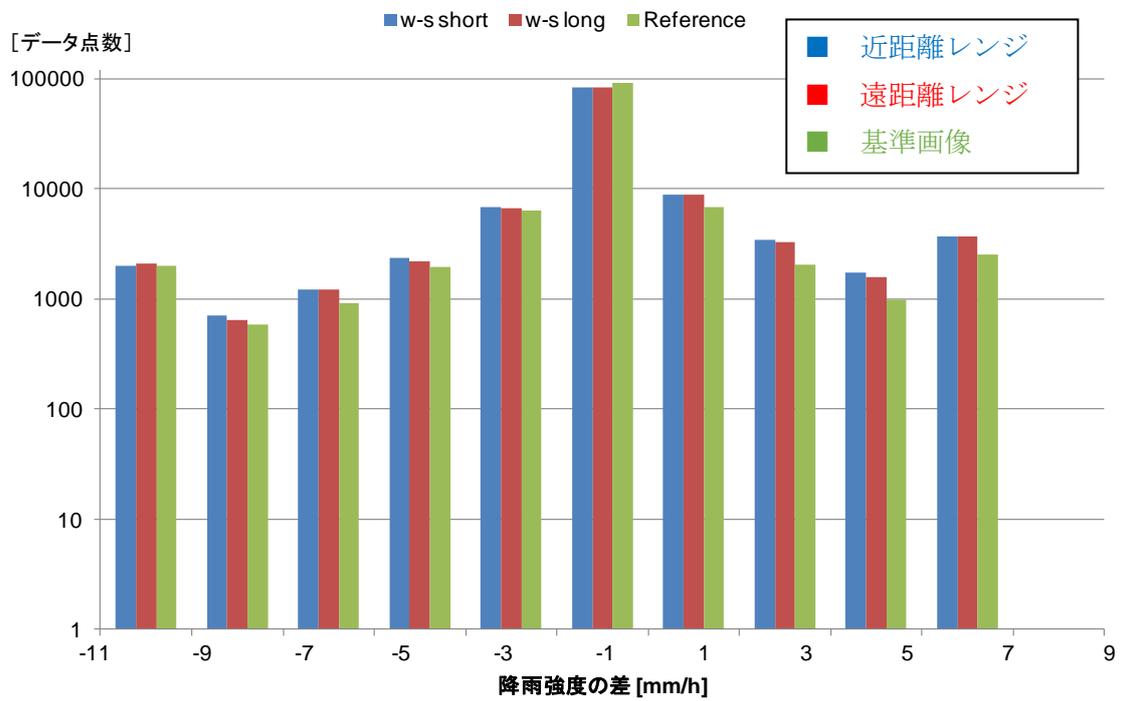
4.1.3.2-図 64 与干渉機：近距離レンジ（船舶用）、被干渉機：気象用



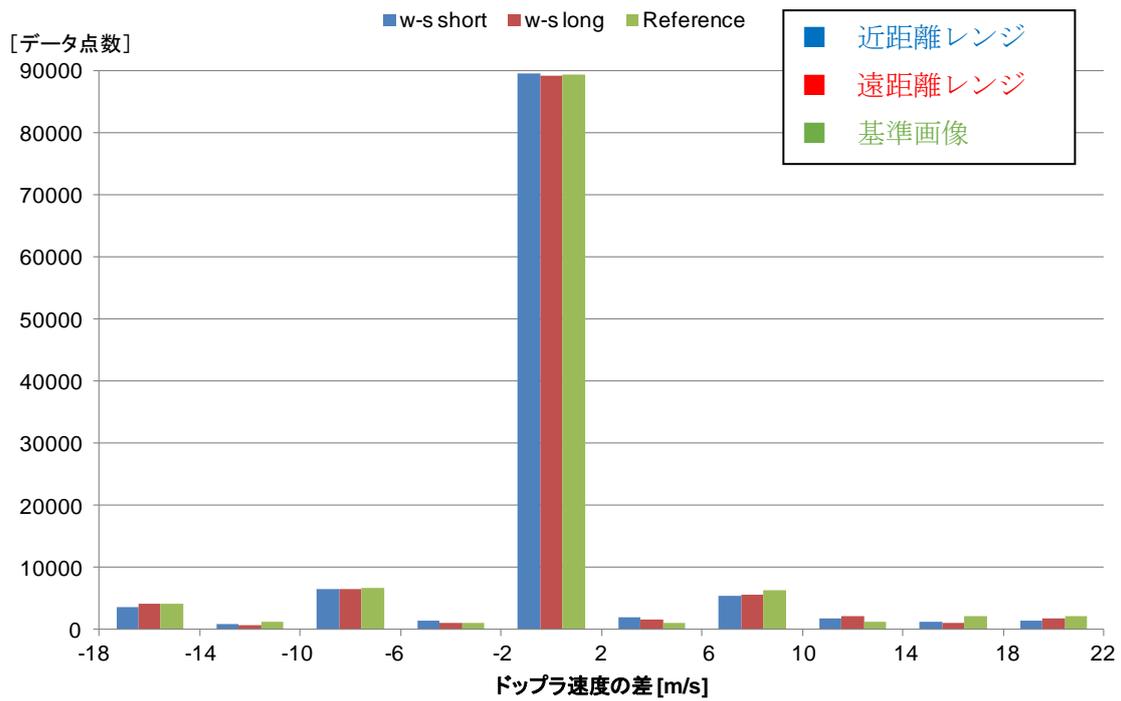
4.1.3.2-図 65 与干渉機：遠距離レンジ（船舶用）、被干渉機：気象用



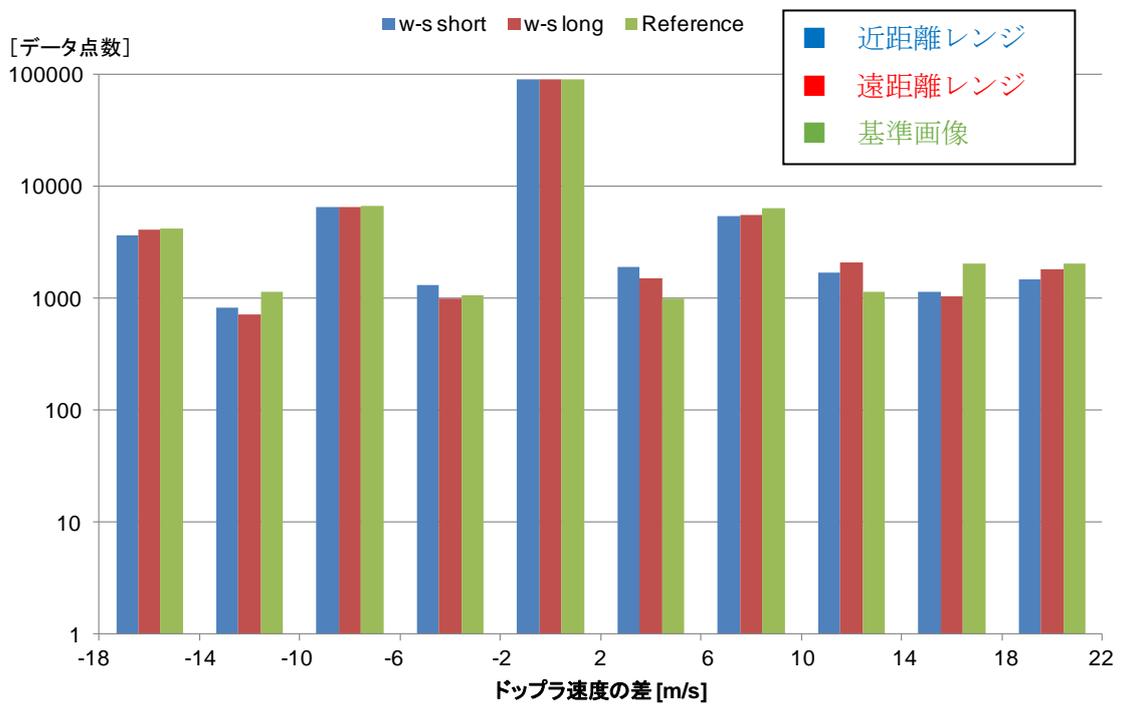
4.1.3.2-図 66 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：線形)



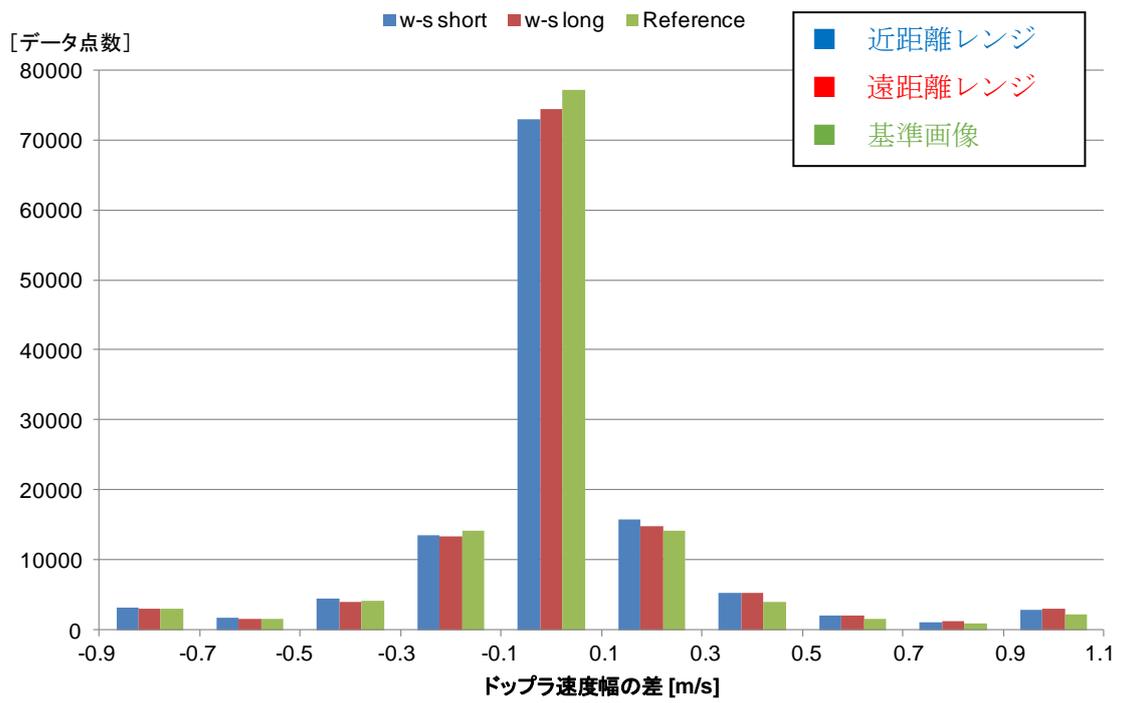
4.1.3.2-図 67 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：対数)



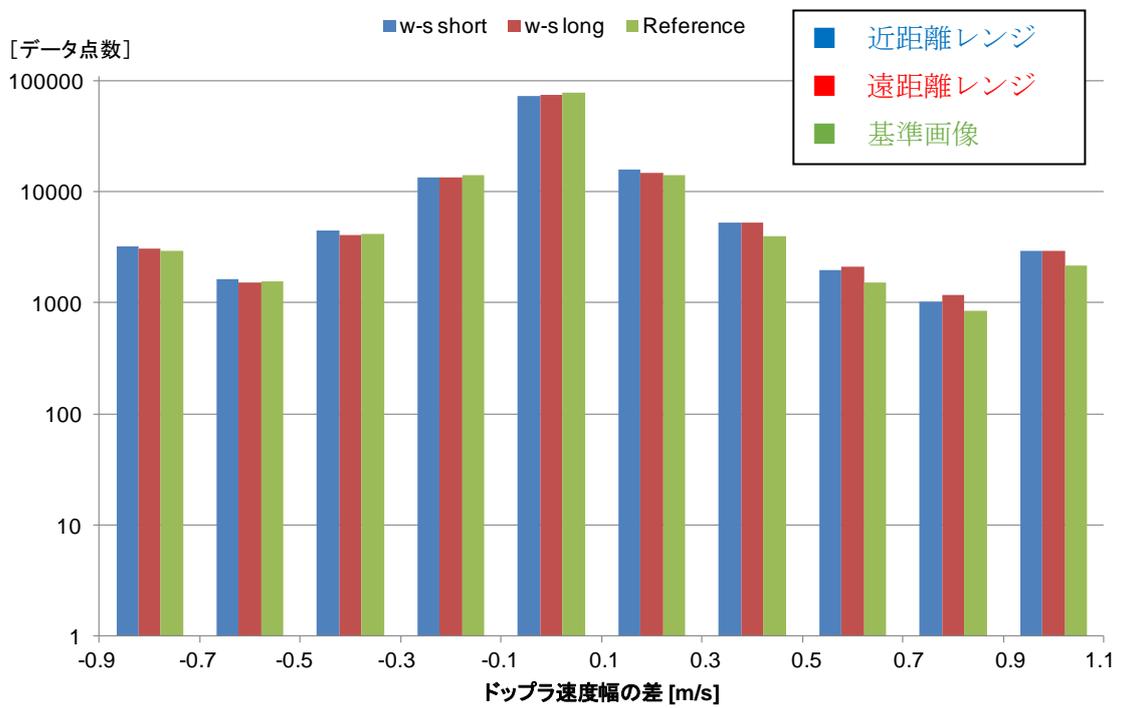
4.1.3.2-図 68 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：線形)



4.1.3.2-図 69 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：対数)



4.1.3.2-図 70 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：線形)

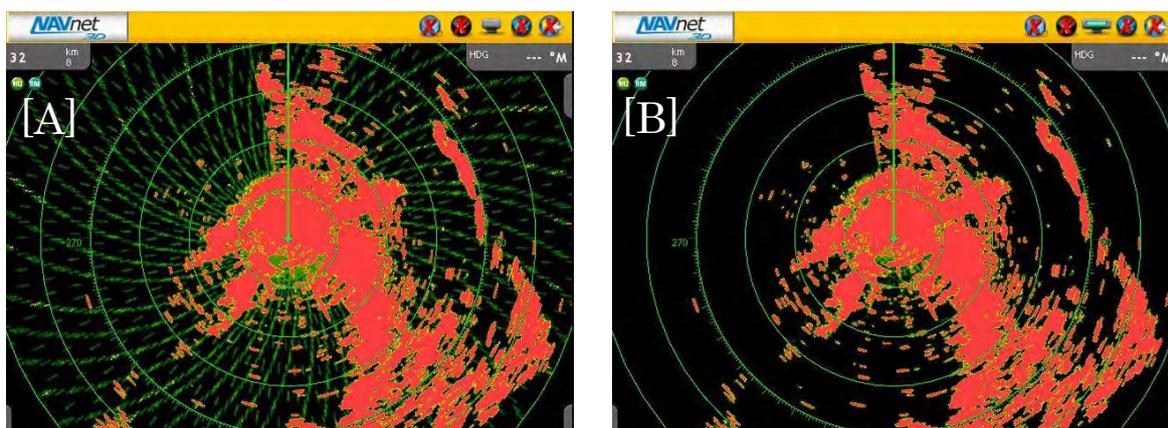


4.1.3.2-図 71 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：対数)

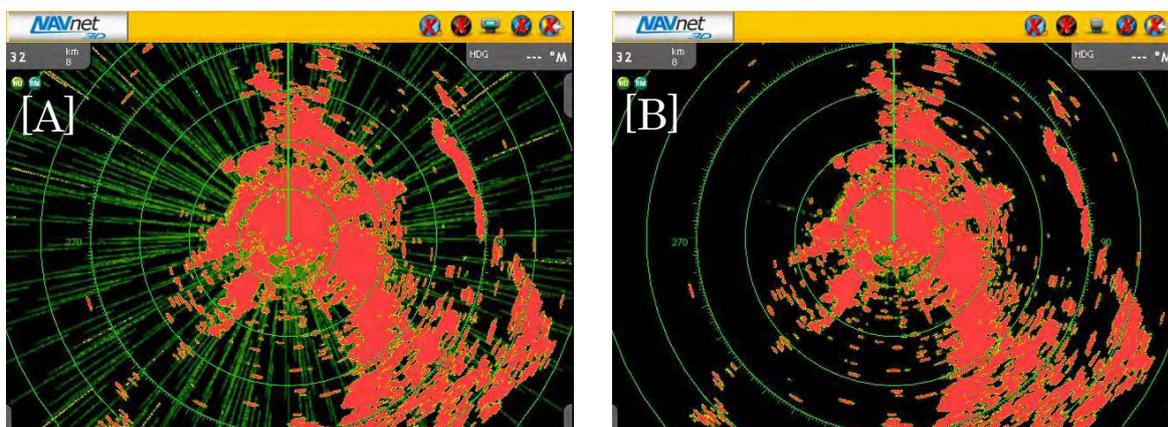
離隔距離を 100 m とし、与干渉機が小型気象用レーダー、被干渉機が船舶用レーダーの場合を 4.1.3.2-図 72、4.1.3.2-図 73 に示す。いずれも、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON の場合を示している。

被干渉機が船舶用であるため、受信側での復調処理等は無く、送信パルスがアナログフィルタで帯域制限された物がそのまま表示される。つまり、遠距離レンジ用の長パルスの方が、画面では長く表示されることになる。

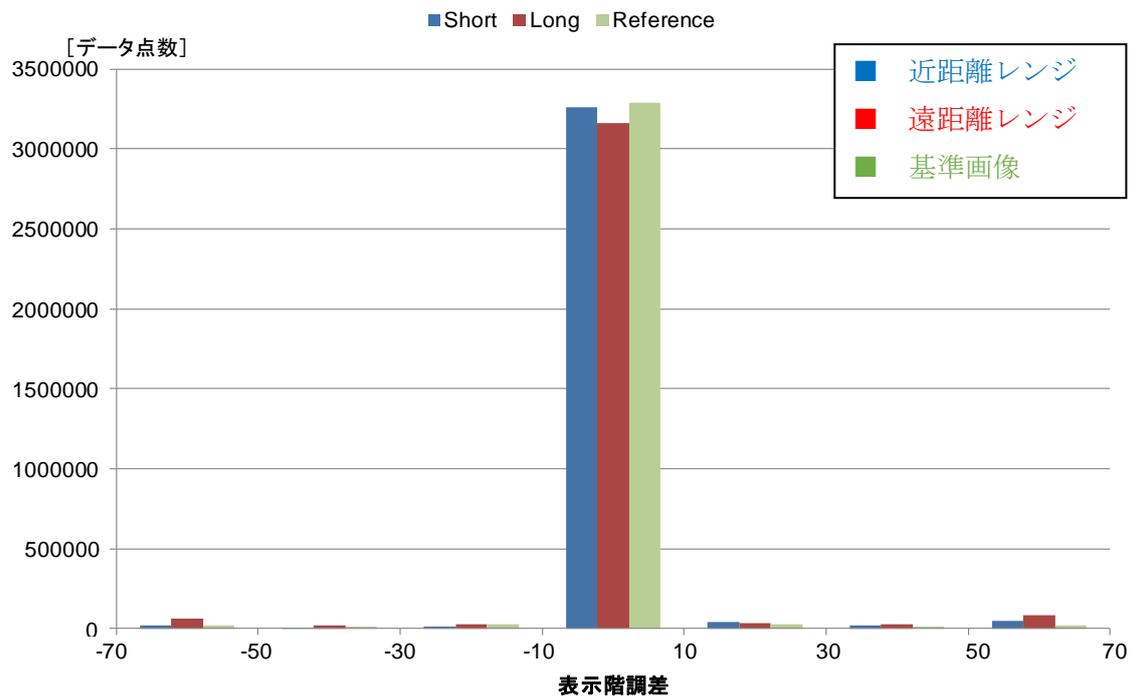
また、基準画像との差のヒストグラムを、4.1.3.2-図 74 及び、4.1.3.2-図 75 に示す。



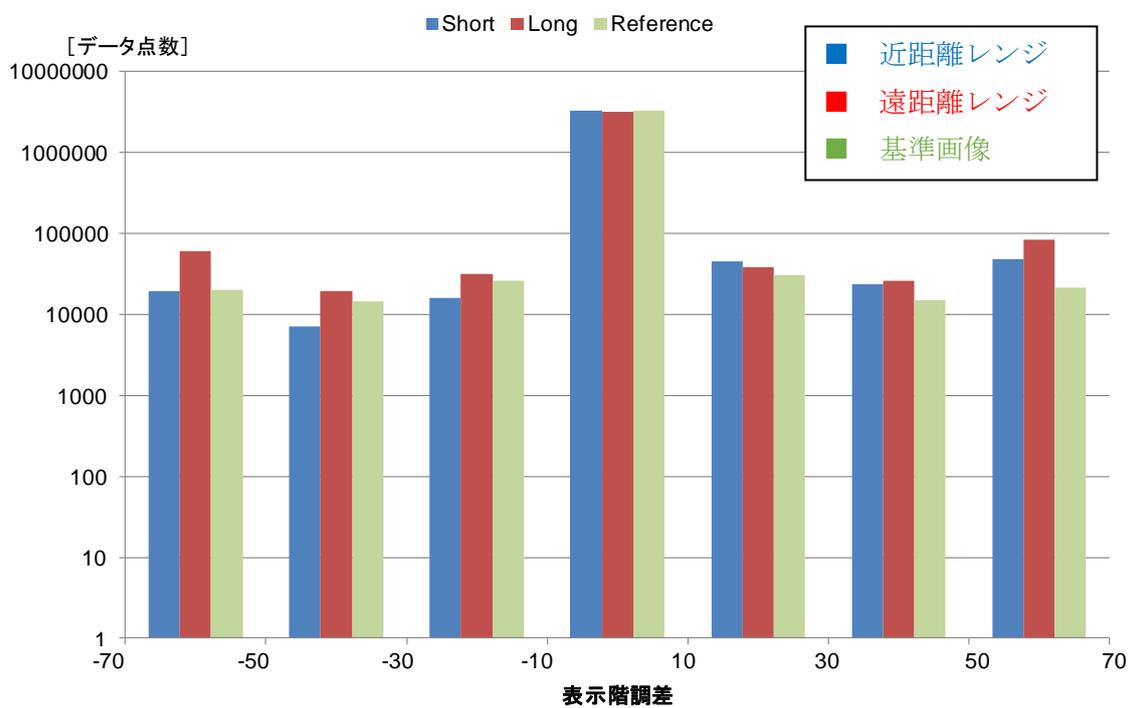
4.1.3.2-図 72 与干渉機：近距離レンジ（気象用）、被干渉機：船舶用



4.1.3.2-図 73 与干渉機：遠距離レンジ（気象用）、被干渉機：船舶用



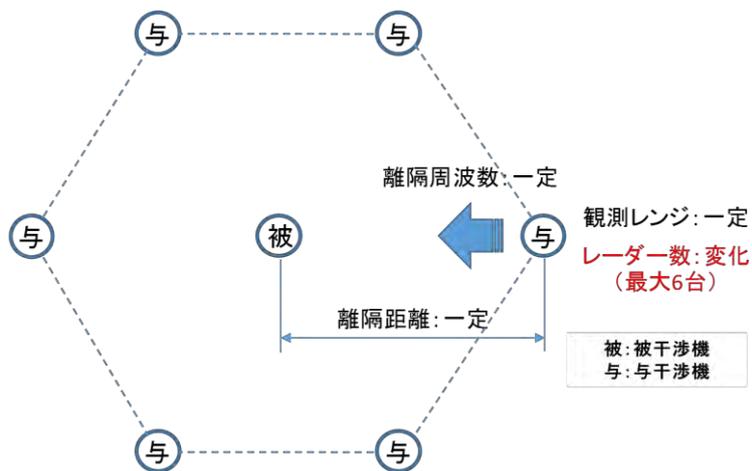
4.1.3.2-図 74 表示階調差のヒストグラム (縦軸：線形)



4.1.3.2-図 75 表示階調差のヒストグラム (縦軸：対数)

4.1.3.3 検証3：与干渉機増加時の干渉状況変化

与干渉機が増加した場合の干渉状況変化について、検討を行う。与干渉機は正多角形の頂点に配置し、被干渉機を重心に配置する。検討した最大数である6台の配置を4.1.3.3-図76に示す。

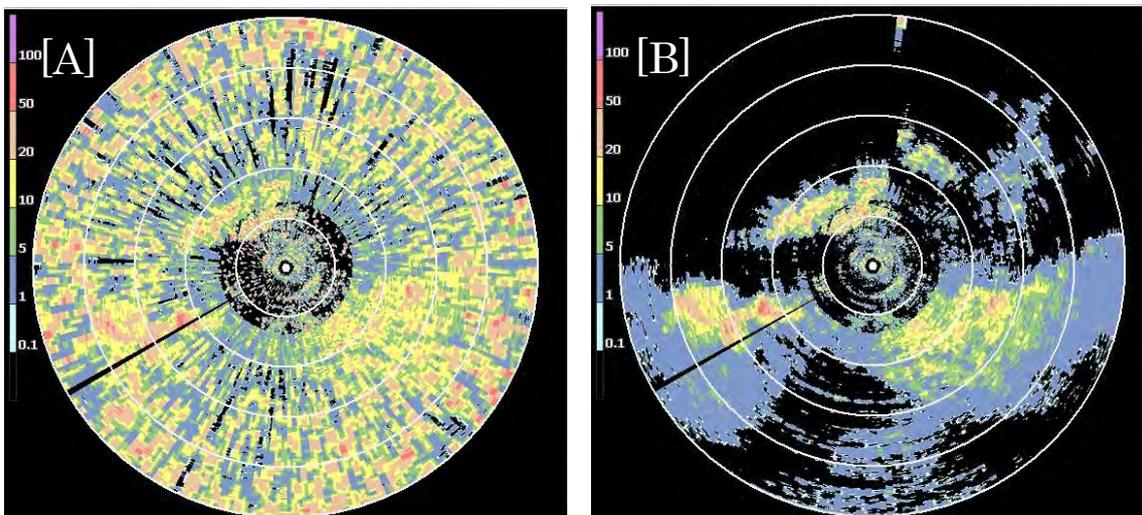


4.1.3.3-図76 レーダー配置図 (与干渉機:6台)

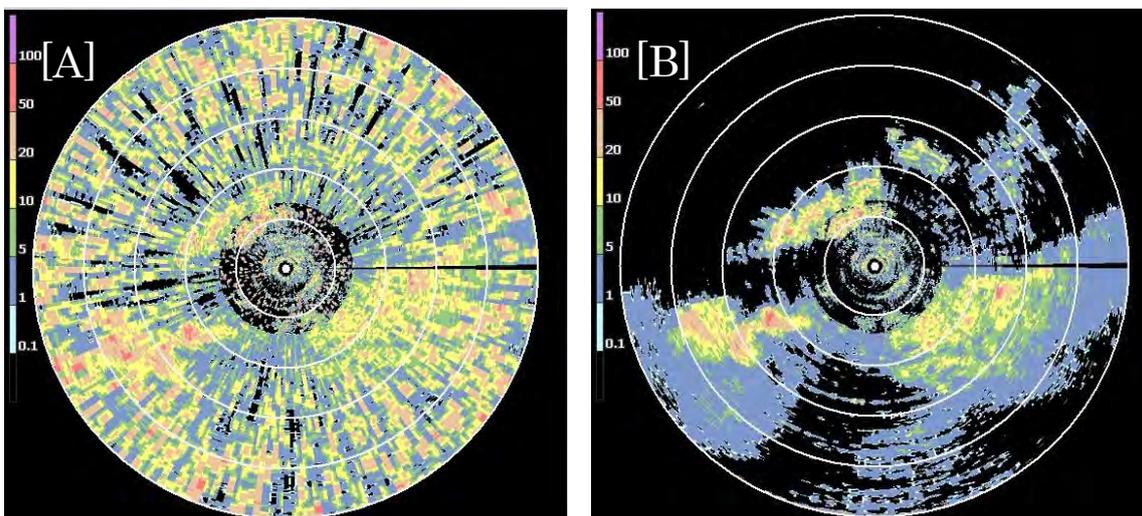
まず、与干渉機が船舶用レーダー6台、被干渉機が小型気象用レーダー、離隔距離が100mの場合の結果を4.1.3.3-図77に示す。[A]が干渉除去機能OFF、[B]が干渉除去機能ONである。

次に、同条件で与干渉機の台数のみ5台とした場合を4.1.3.3-図78に示す。

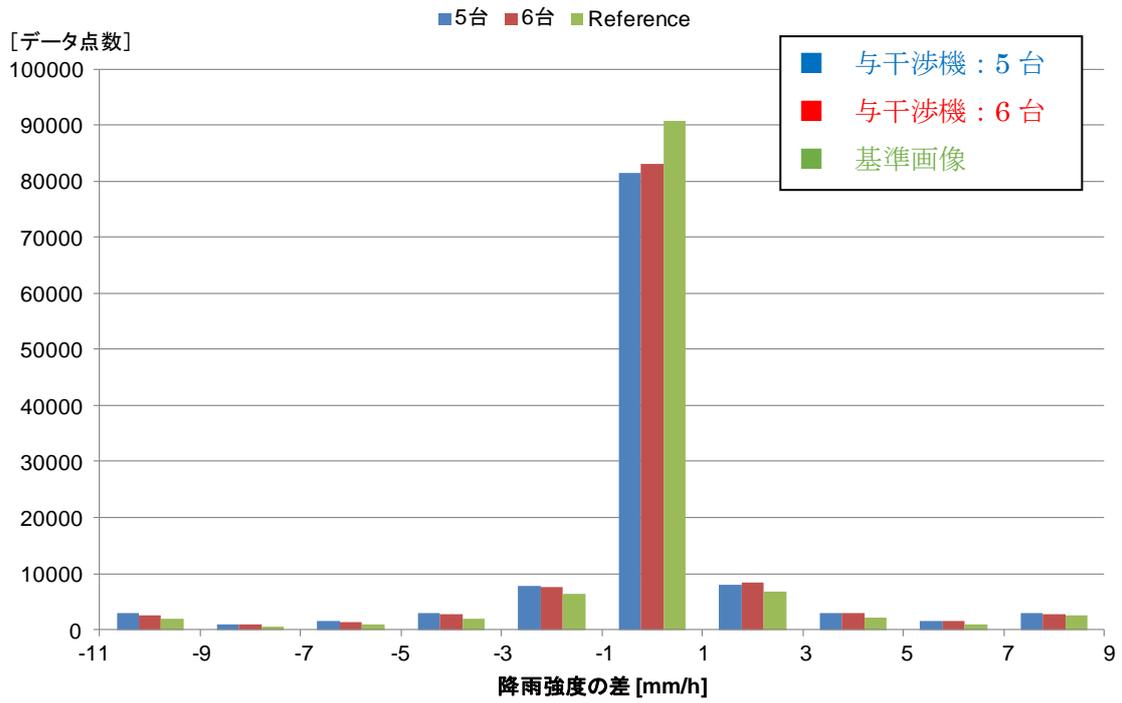
また、これらの干渉除去後の画像と基準画像の差のヒストグラムを4.1.3.3-図79から4.1.3.3-図84に示す。



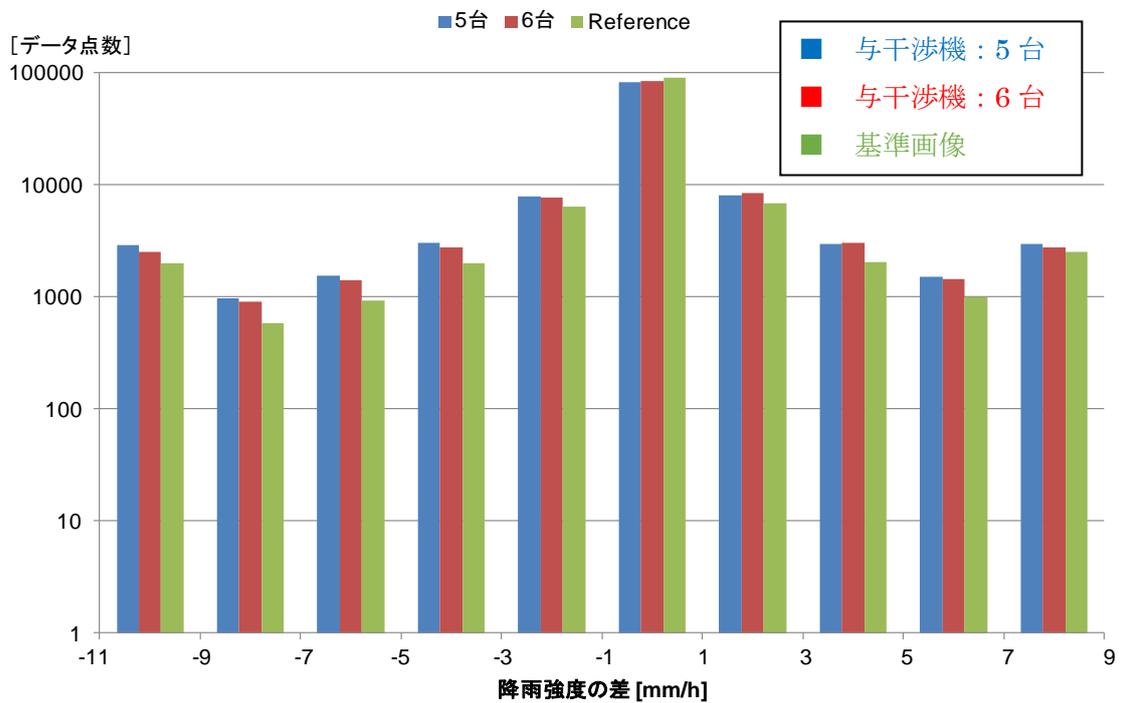
4.1.3.3-図 77 近距離レンジ、与干渉機：6 台（船舶用）、離隔距離：100 m



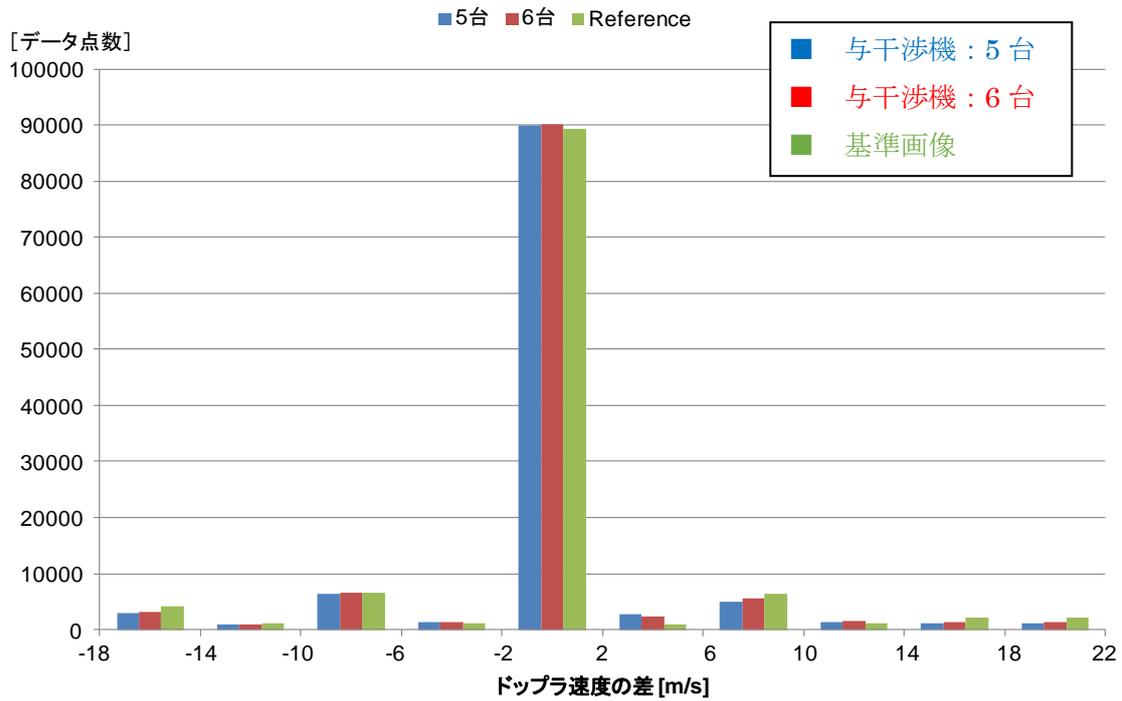
4.1.3.3-図 78 近距離レンジ、与干渉機：5 台（船舶用）、離隔距離：100 m



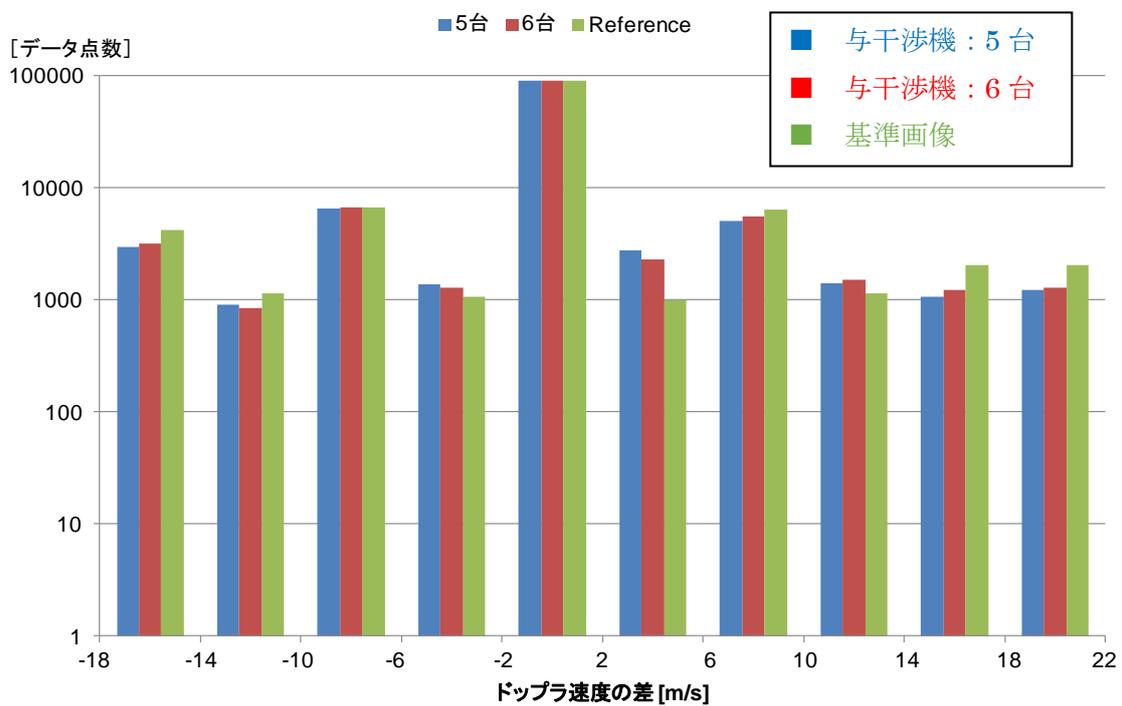
4.1.3.3-図 79 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：線形)



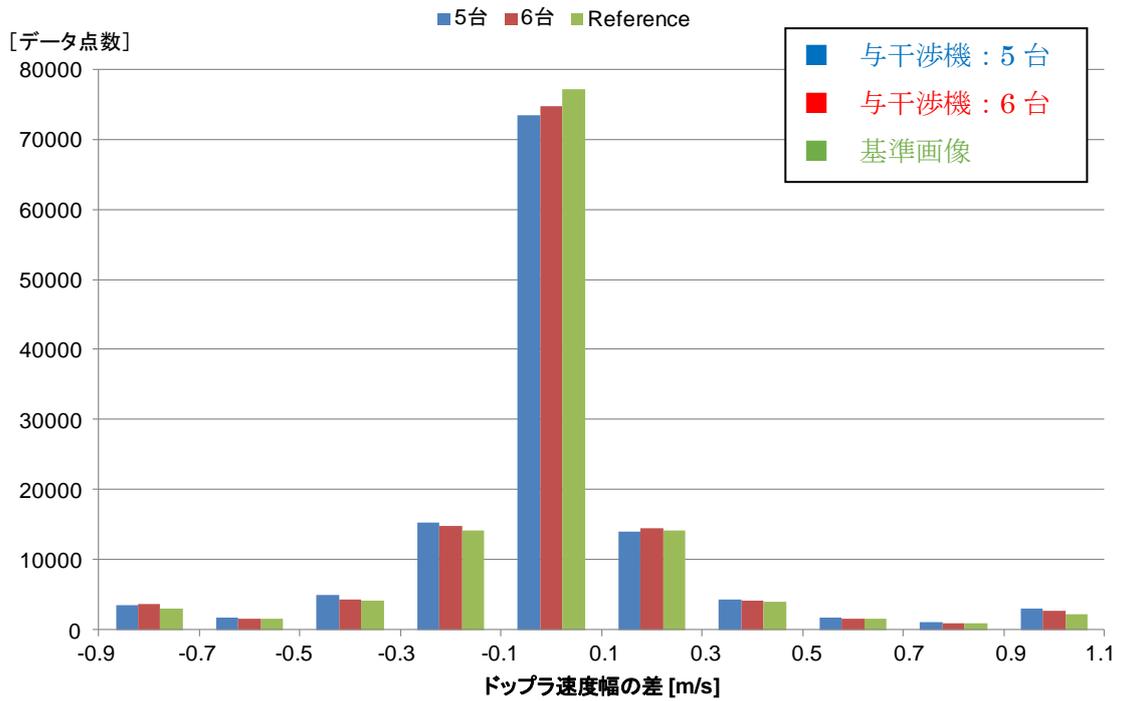
4.1.3.3-図 80 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：対数)



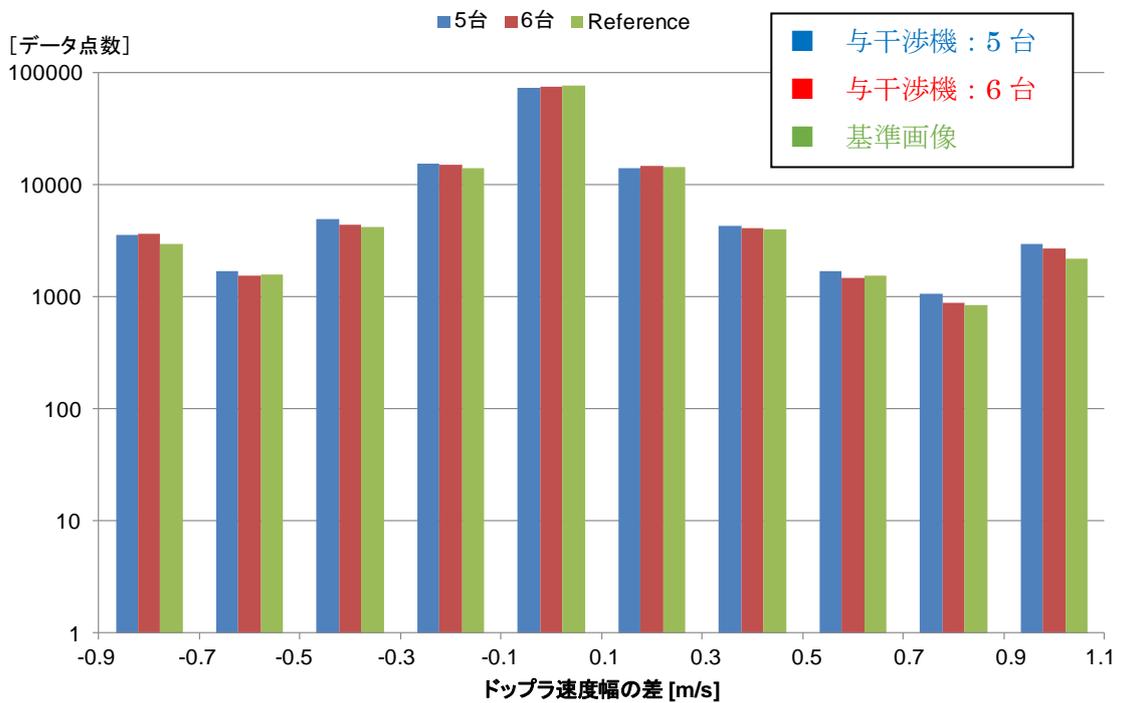
4.1.3.3-図 81 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：線形)



4.1.3.3-図 82 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：対数)



4.1.3.3-図 83 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：線形)



4.1.3.3-図 84 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：対数)

同一周波数で運用する場合、干渉除去を容易にするため PRF を変更する必要がある。

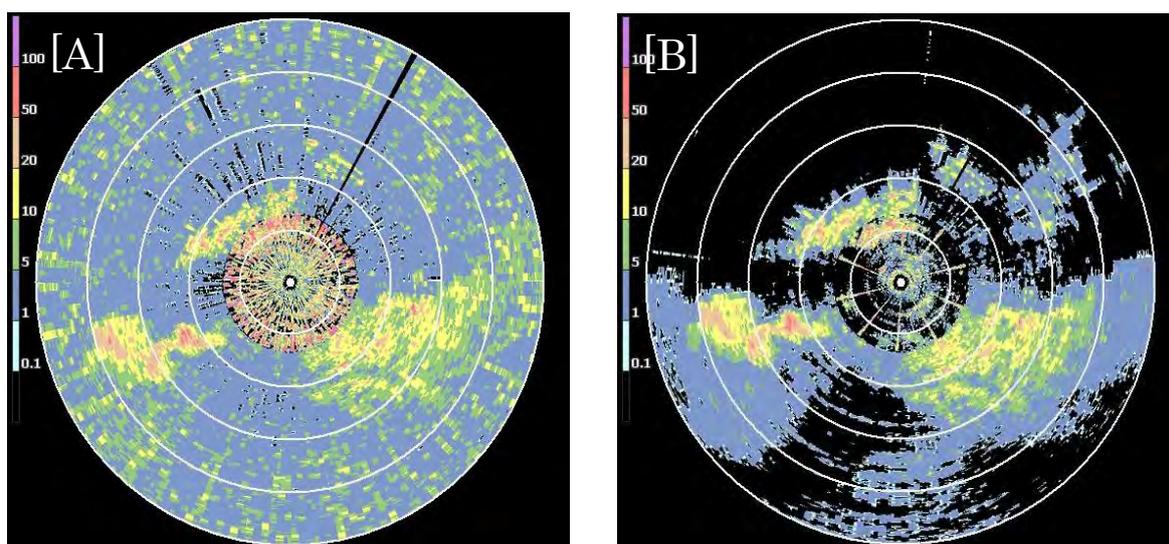
ここでは、変移割合を 3%から 7%まで変化させた場合の比較を行う。変移が 3%の時の PRF 設定を 4.1.3.3-表 19、小型気象用レーダー対小型気象用レーダーの結果を 4.1.3.3-図 85 から 4.1.3.3-図 92 に示す。それぞれ、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON である。近距離レンジの変移割合 7%と遠距離レンジの変移割合 4%は掲載していない。

なお、離隔周波数はゼロとして、与干渉・被干渉共に、全てのレーダーが同一周波数で動作している。

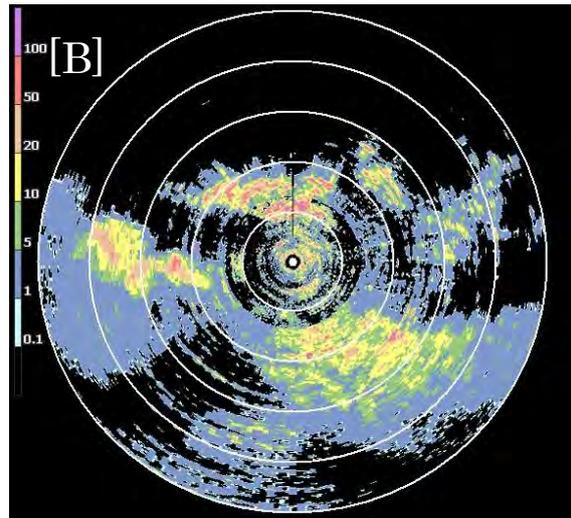
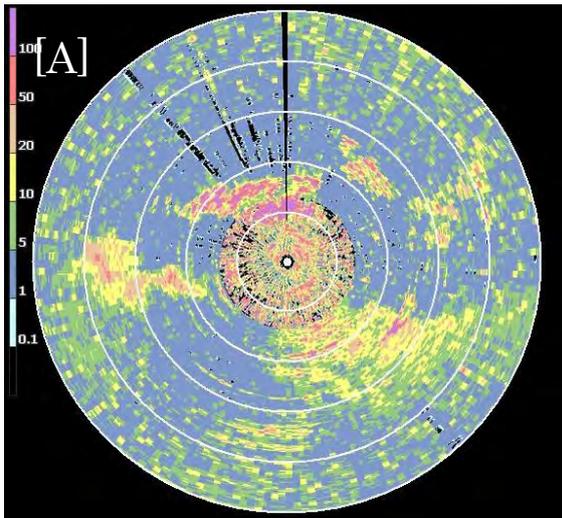
4.1.3.3-表 19 PRF 設定値例 (3%変移)

	台数	1 台目	2 台目	3 台目	4 台目	5 台目	6 台目
近距離レンジ	1	3000, 2000					
	3	3000, 2000	2910, 1940	2820, 1880			
	6	3000, 2000	2910, 1940	2820, 1880	2730, 1820	2640, 1760	2550, 1700
遠距離レンジ	1	500, 400					
	3	500, 400	485, 388	470, 376			
	6	500, 400	485, 388	470, 376	455, 364	440, 352	425, 340

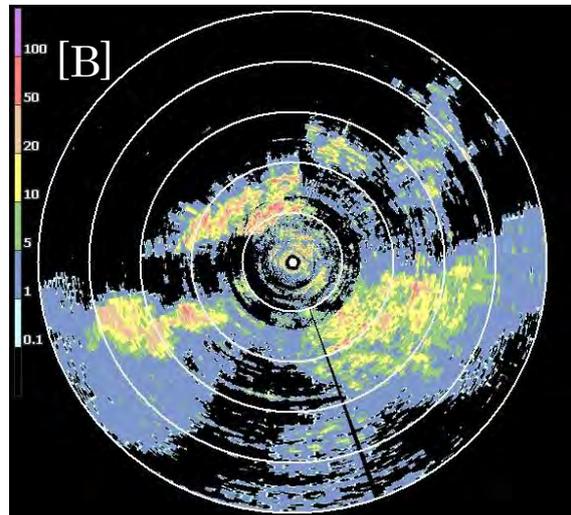
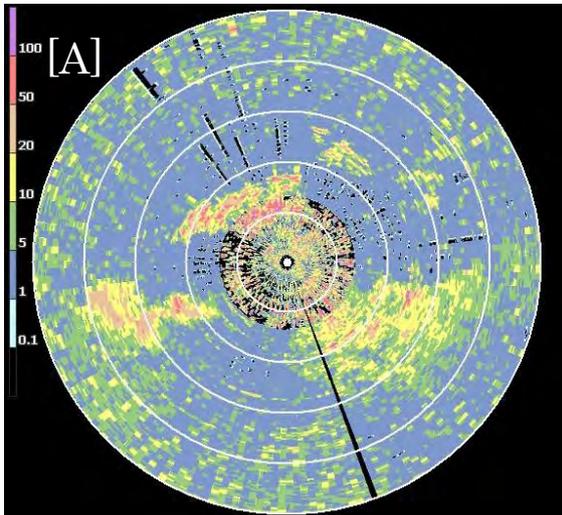
※単位は[Hz]



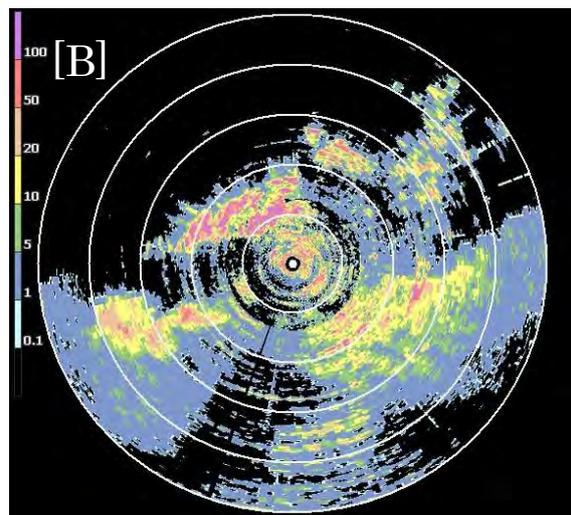
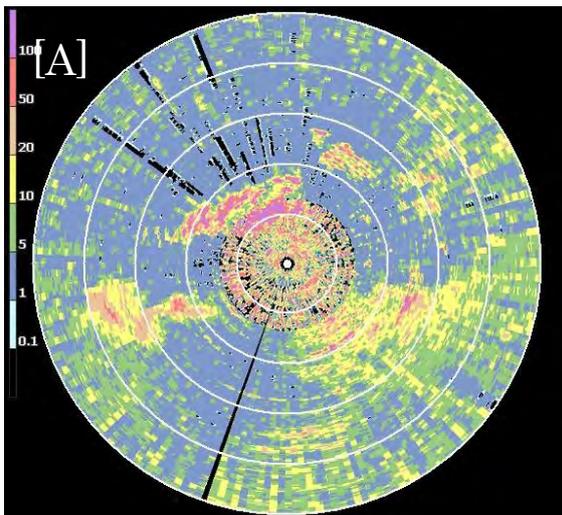
4.1.3.3-図 85 与干渉機：気象用 6 台 (近距離レンジ)、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)



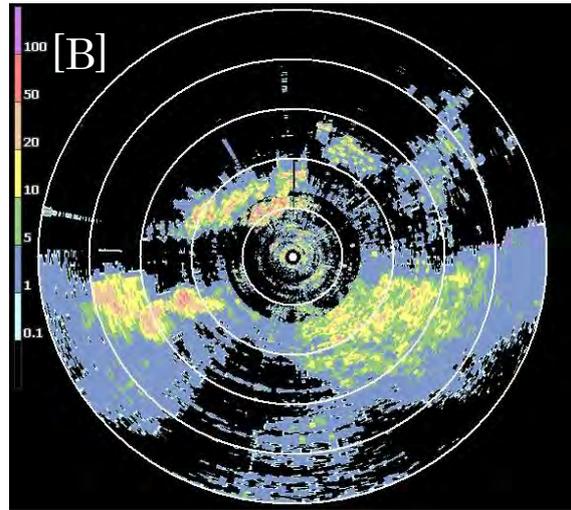
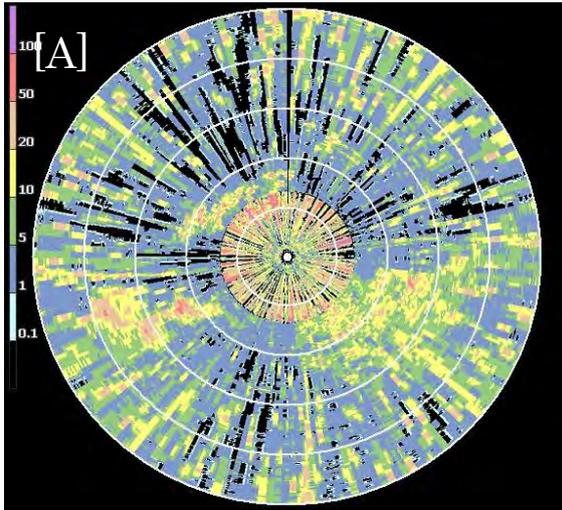
4.1.3.3-図 86 与干渉機：気象用 6 台（近距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:4%)



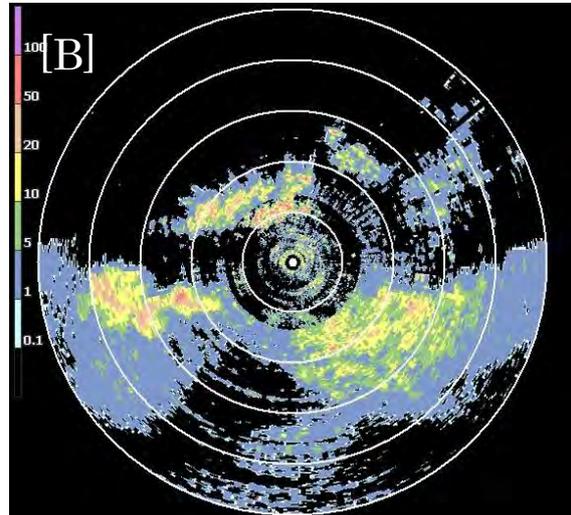
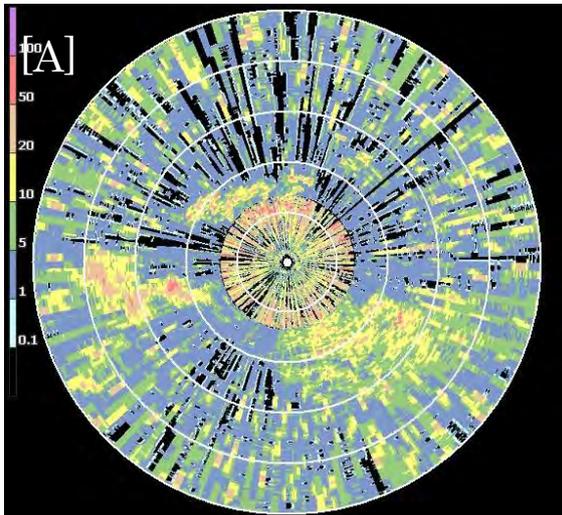
4.1.3.3-図 87 与干渉機：気象用 6 台（近距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:5%)



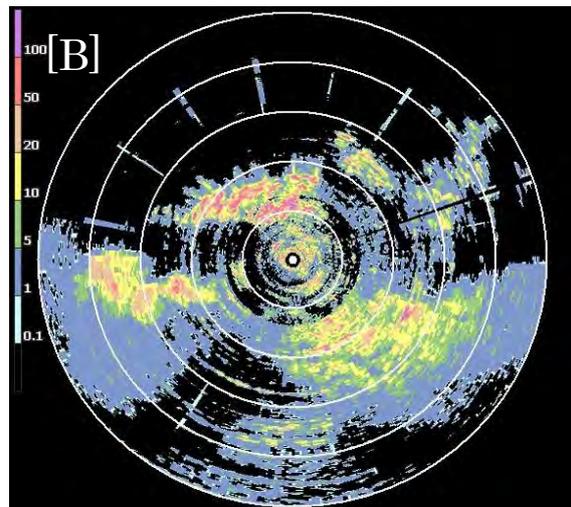
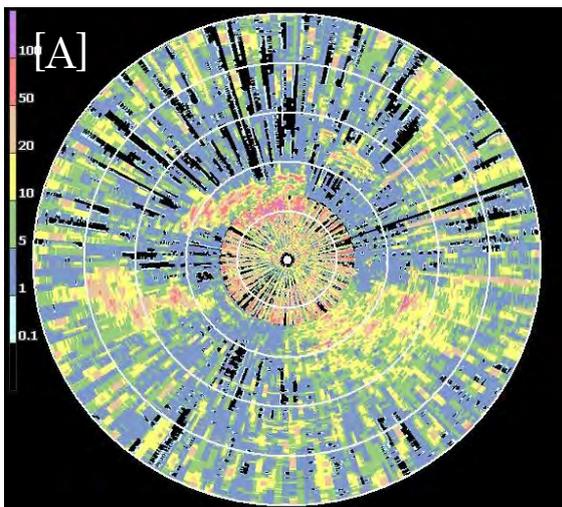
4.1.3.3-図 88 与干渉機：気象用 6 台（近距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:6%)



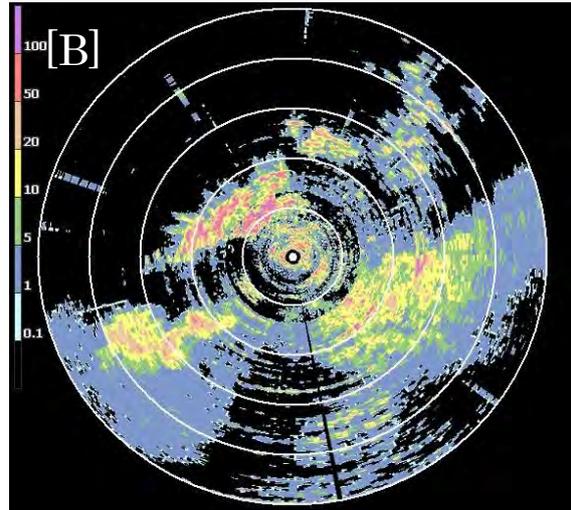
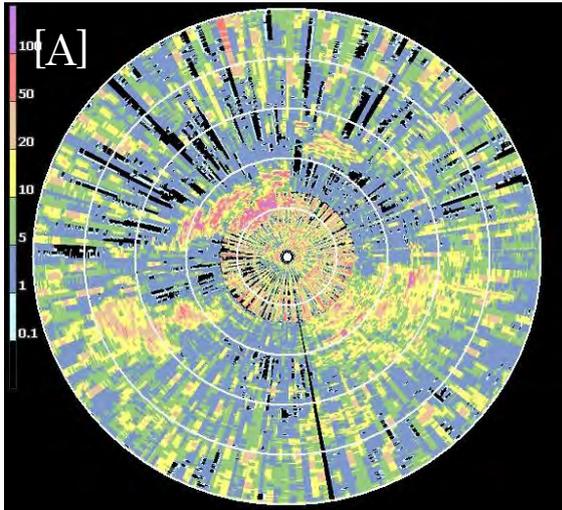
4.1.3.3-図 89 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)



4.1.3.3-図 90 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:5%)



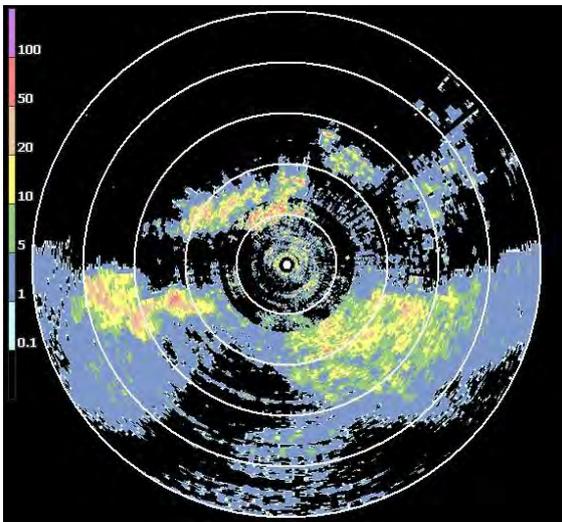
4.1.3.3-図 91 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:6%)



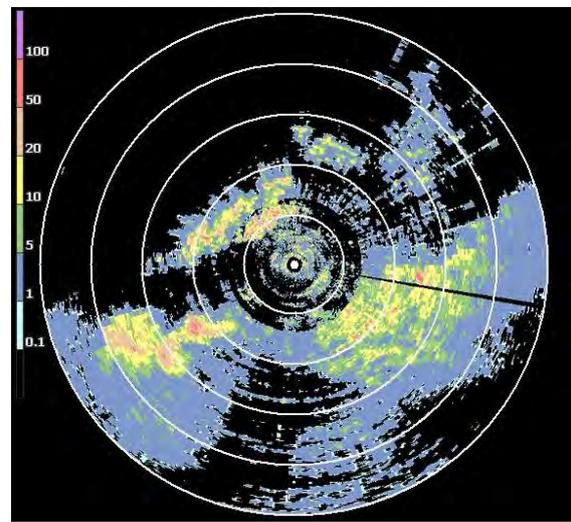
4.1.3.3-図 92 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:7%)

また、離隔距離を 500 m とした場合の干渉除去機能を ON にした結果を 4.1.3.3-図 93 に示す。

与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、PRF 変移:5%、干渉除去機能：ON



4.1.3.3-図 90 [B] (再掲) 離隔距離：100 m

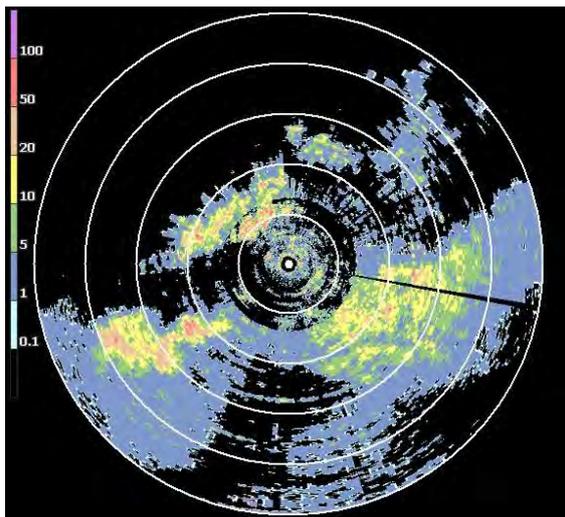


4.1.3.3-図 93 離隔距離：500 m

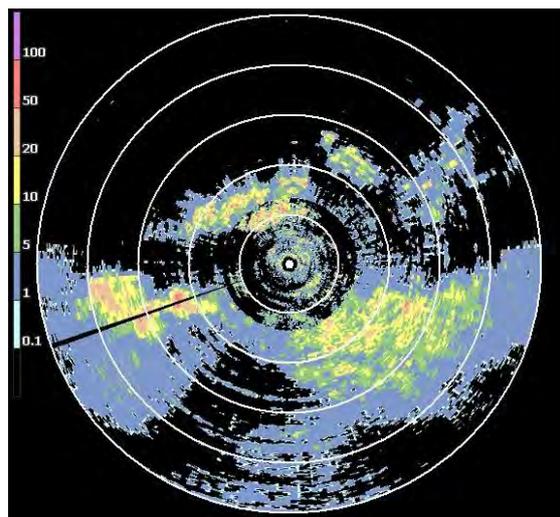
次に、離隔距離 500 m で与干渉機の台数を 4~6 台まで変化させた場合の干渉除去結果を 4.1.3.3-図 94 及び 4.1.3.3-図 95、4.1.3.3-図 93 (再掲) に示す。

また、これらの画像と基準画像の差のヒストグラムを 4.1.3.3-図 96 から 4.1.3.3-図 101 に示す。

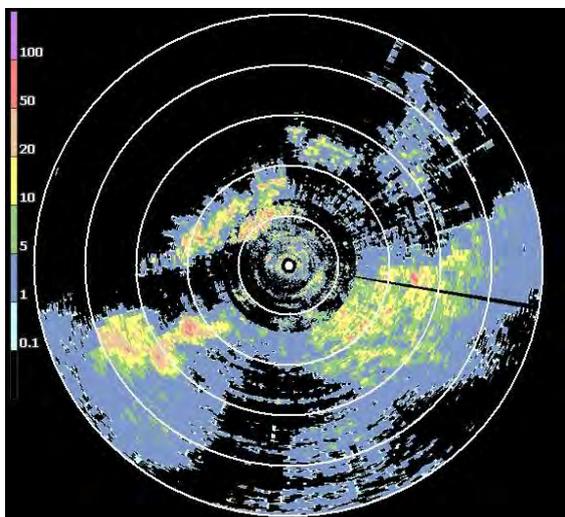
与干渉機：気象用 (遠距離レンジ)、PRF 変移:5%、離隔距離：500 m、干渉除去：ON



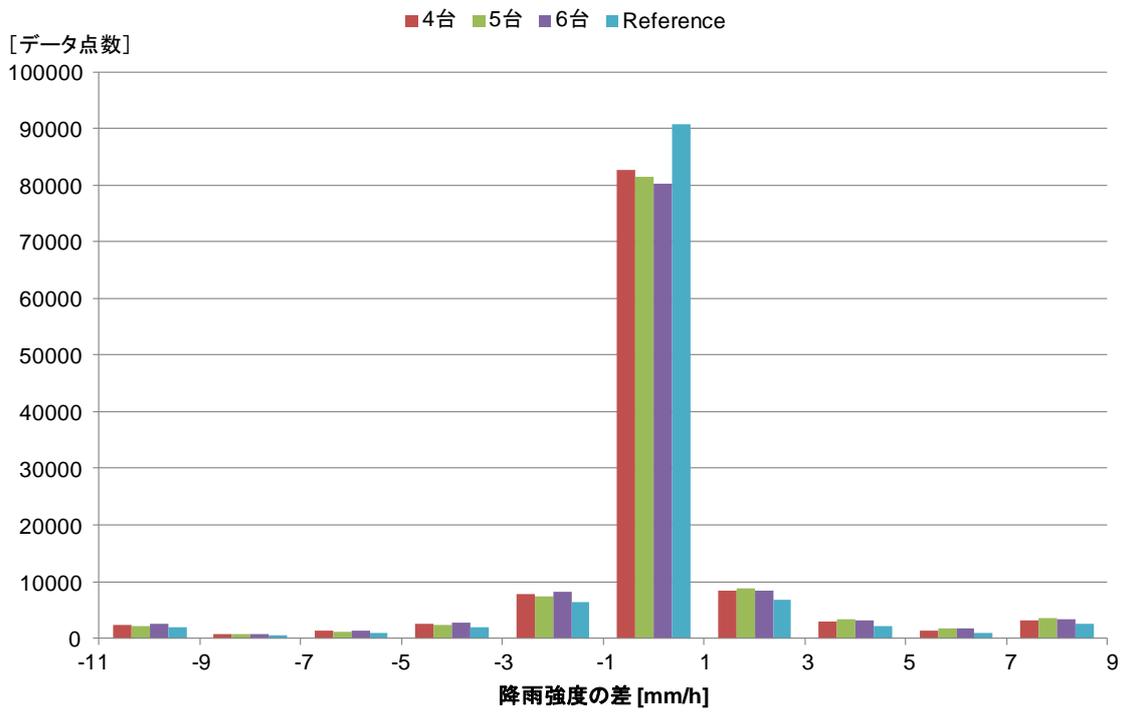
4.1.3.3-図 94 与干渉機：4 台



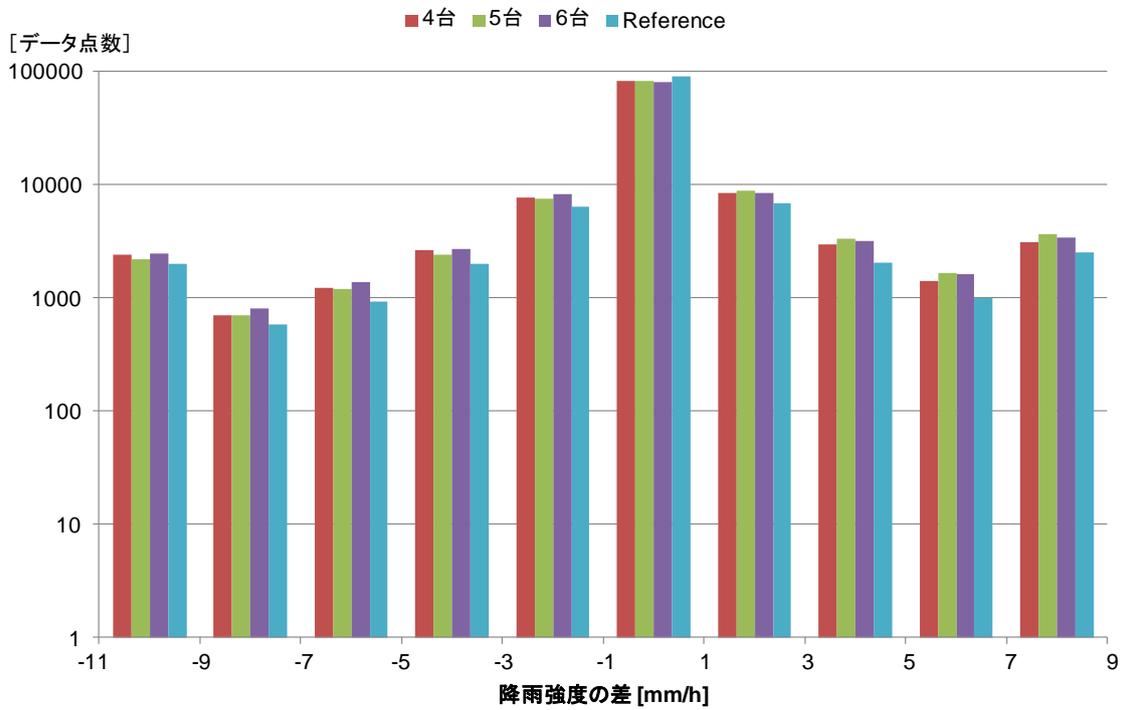
4.1.3.3-図 95 与干渉機：5 台



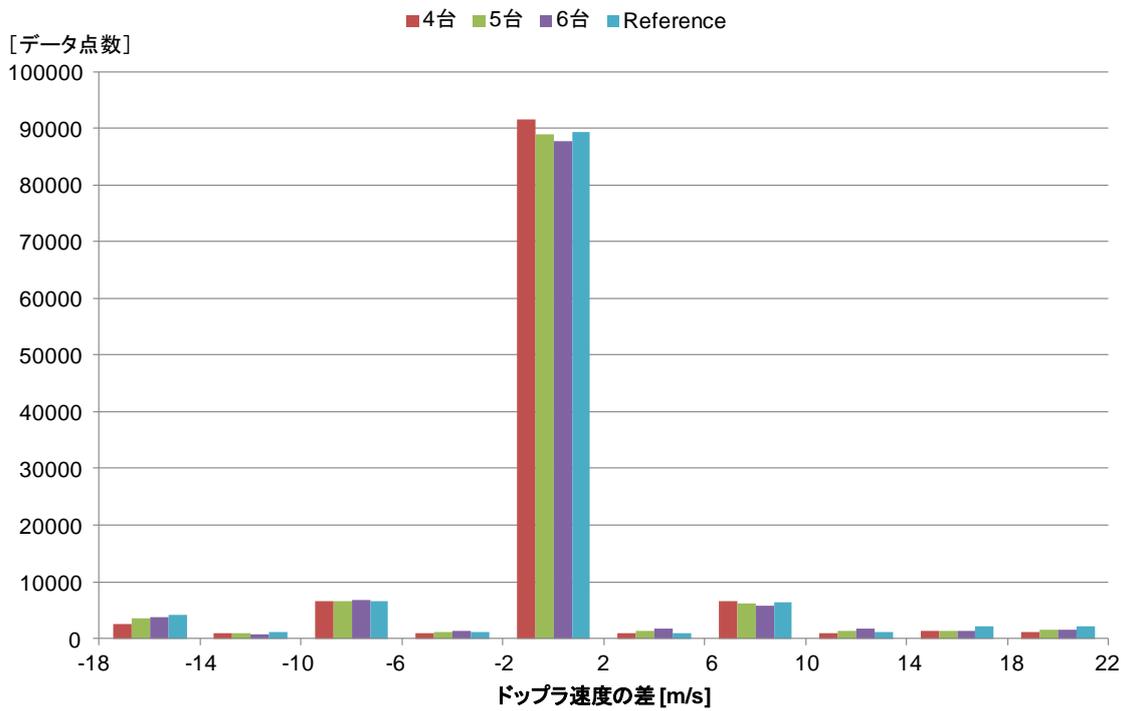
4.1.3.3-図 93 (再掲) 与干渉機：6 台



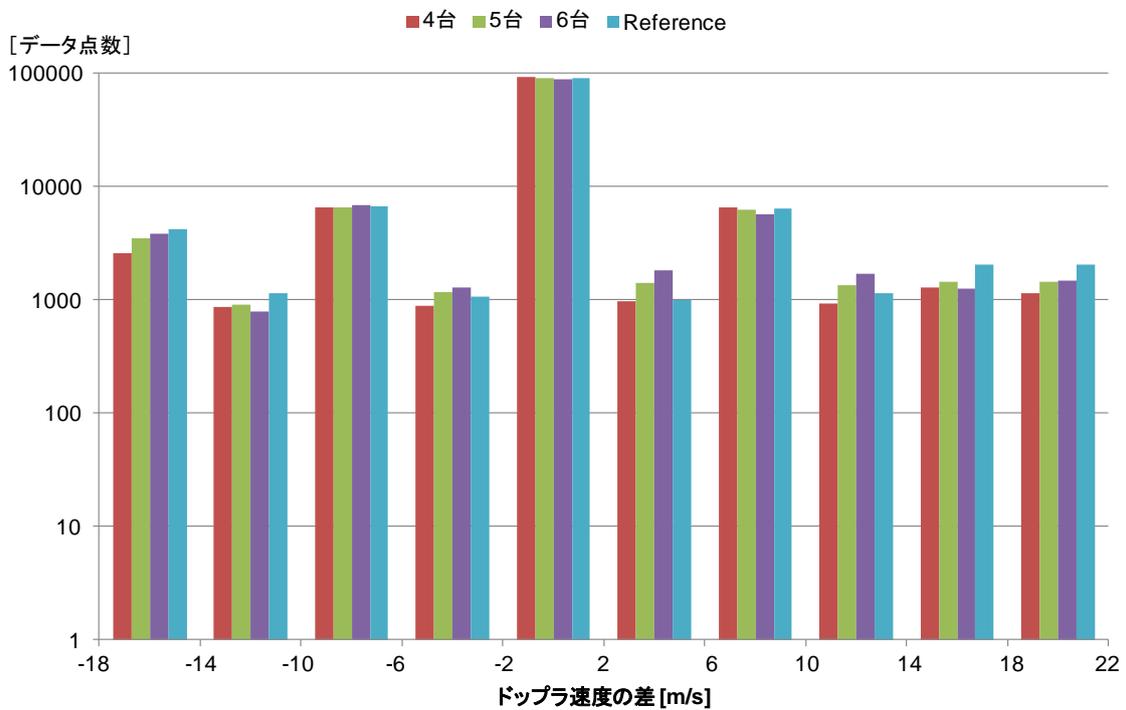
4.1.3.3-図 96 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：線形)



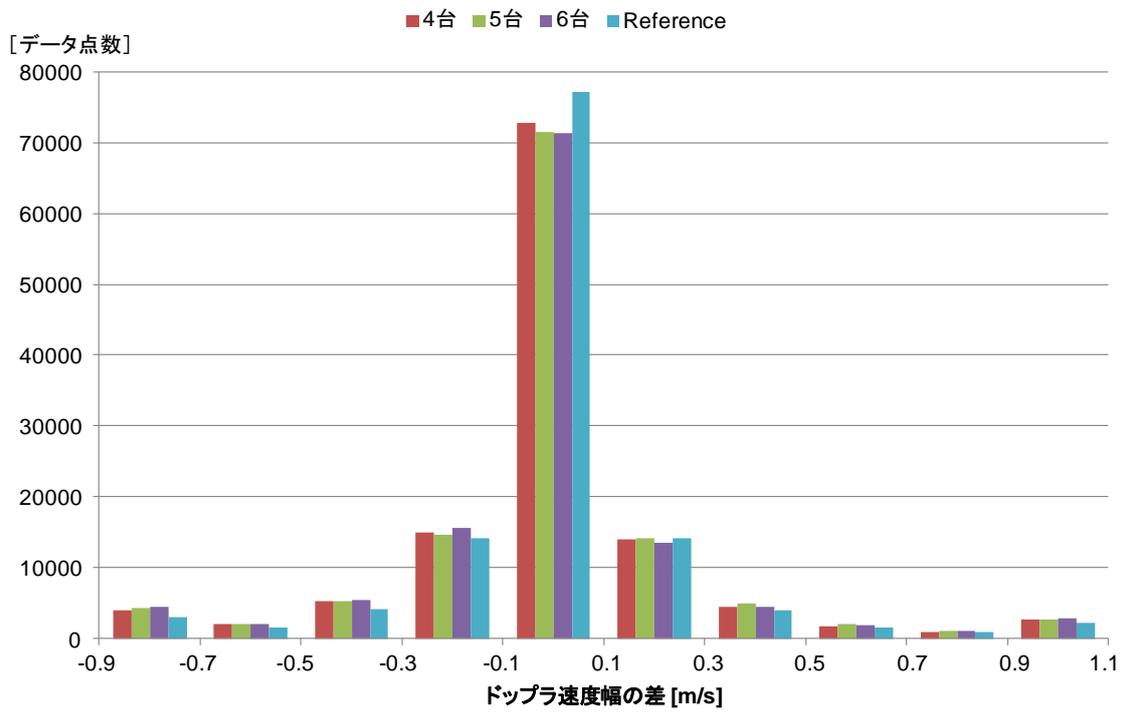
4.1.3.3-図 97 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：対数)



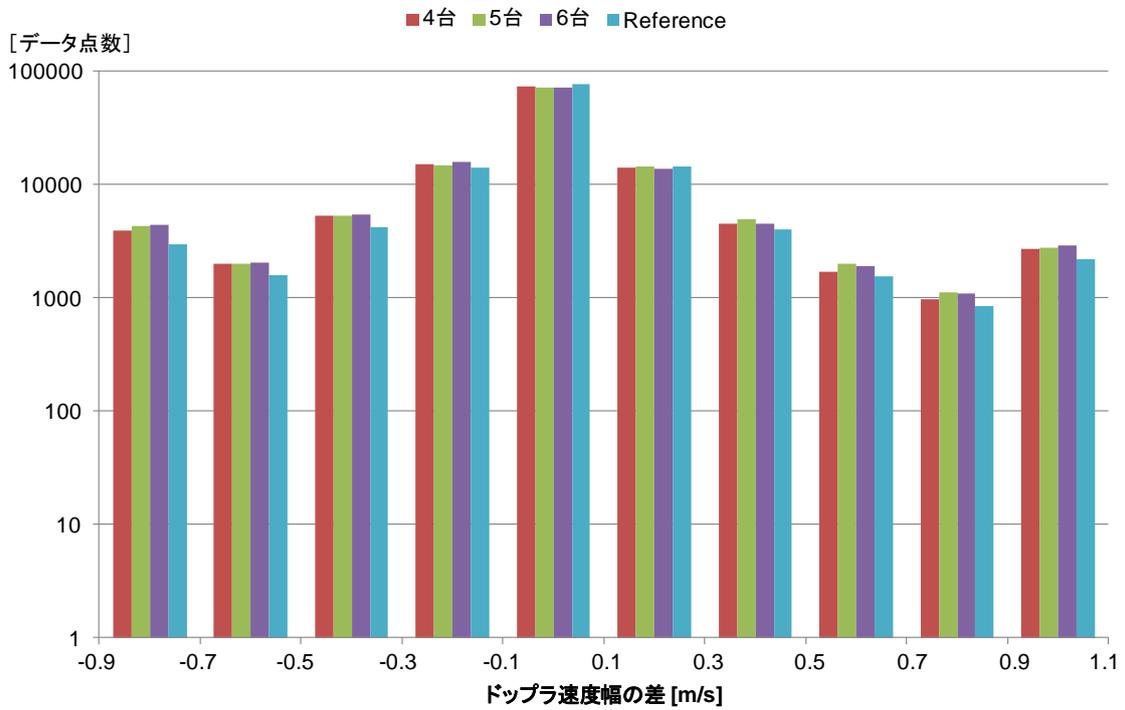
4.1.3.3-図 98 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：線形)



4.1.3.3-図 99 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：対数)



4.1.3.3-図 100 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：線形)

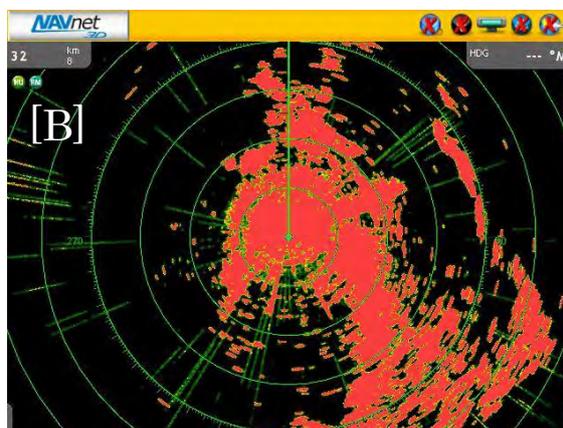


4.1.3.3-図 101 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：対数)

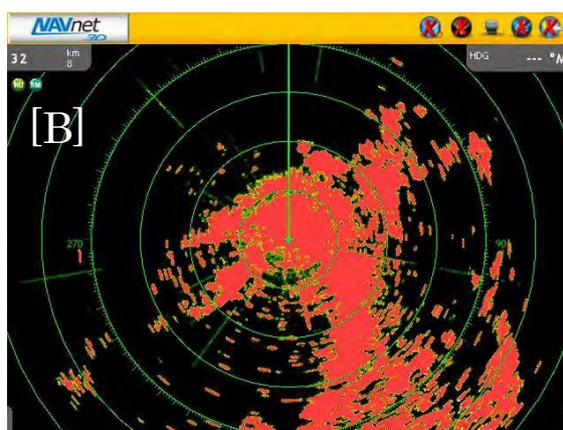
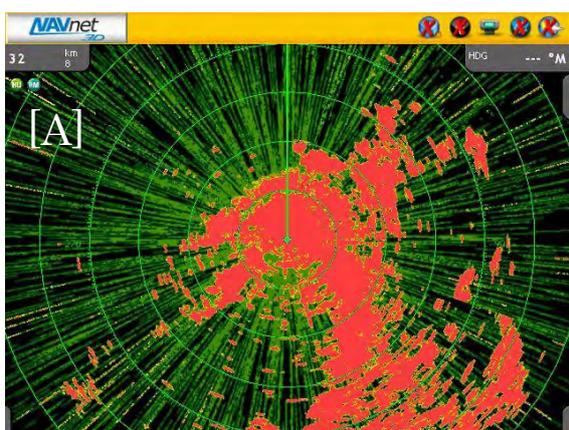
次に、与干渉機が小型気象用レーダー、被干渉機が船舶用レーダーの場合を検討する。与干渉機は遠距離レンジで送信し、船舶用レーダーは受信帯域を最大として検討を行った。

なお、本来受信帯域が最大となる最大距離設定では基準画像で画面が埋まってしまうため、ある程度遠い 32 km レンジにおいて強制的に受信帯域を最大とした状態で測定を行っている。本来のレンジでは STC も効いているため干渉除去はし易いが、32 km レンジでは大部分が最大感度となっているため、その点でも不利な条件で検討を行った。

まず、与干渉機を 6 台、離隔距離を 100 m とし、全て同一周波数で運用した場合の結果を 4.1.3.3-図 102、与干渉機を 3 台としたものを 4.1.3.3-図 103 に示す。[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON の状態を示している。かなり干渉が低減しているものの、消え残りが見られる。



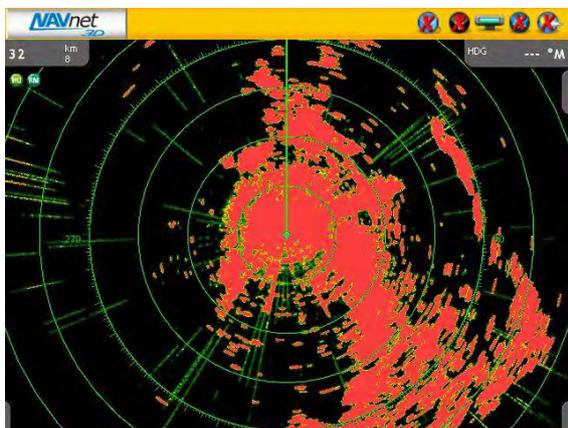
4.1.3.3-図 102 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)



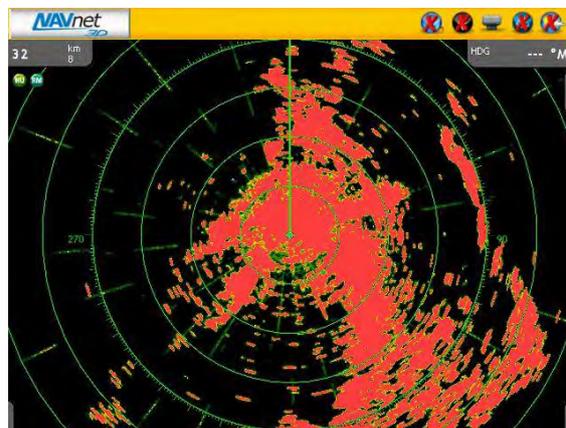
4.1.3.3-図 103 与干渉機：気象用 3 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)

次に、離隔距離を 500 m とした時の結果を 4.1.3.3-図 104 に示す。消え残りは減ったものの、まだ不十分であることが分かる。

与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、PRF 変移:5%、干渉除去：ON



4.1.3.3-図 102 [B] (再掲) 離隔距離：100 m

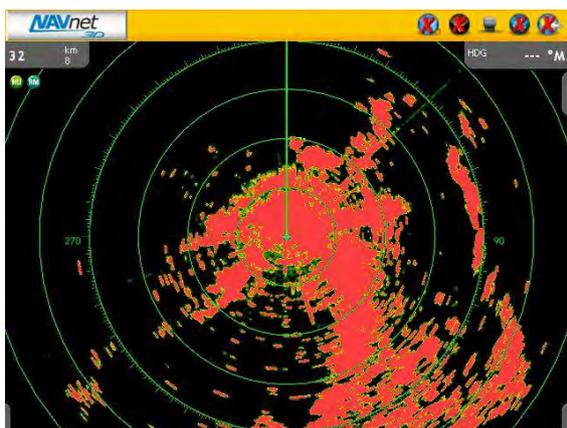


4.1.3.3-図 104 離隔距離：500 m

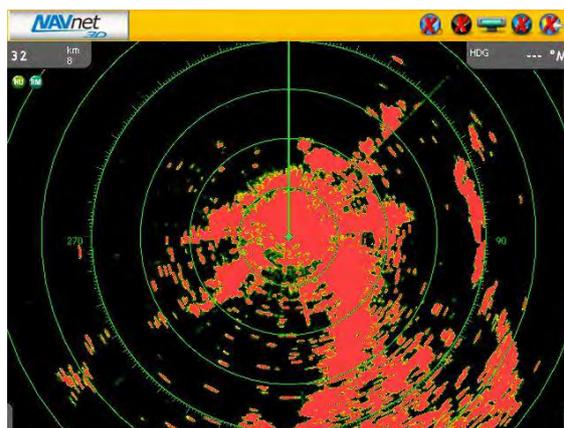
そこで、離隔距離 500 m で与干渉機の台数を 3~6 台まで変化させた場合の干渉除去機能 ON の結果を 4.1.3.3-図 105 から 4.1.3.3-図 107 及び、4.1.3.3-図 104 (再掲) に示す。

また、これらの画像と基準画像の差のヒストグラムを 4.1.3.3-図 108 及び 4.1.3.3-図 109 に示す。

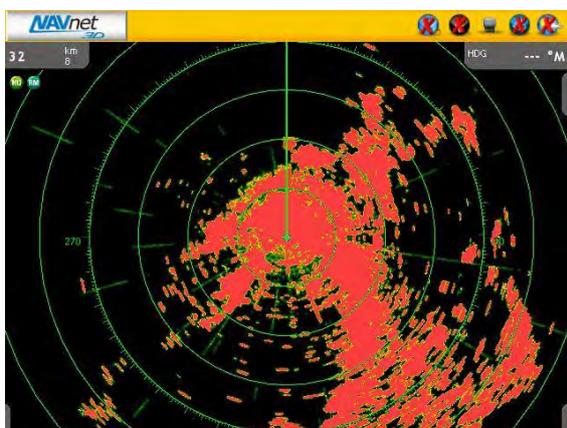
与干渉機：気象用 (遠距離レンジ)、PRF 変移:5%、離隔距離：500 m、干渉除去：ON



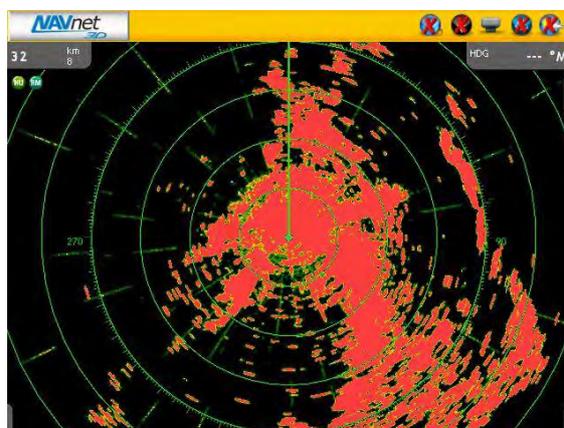
4.1.3.3-図 105 与干渉機：3 台



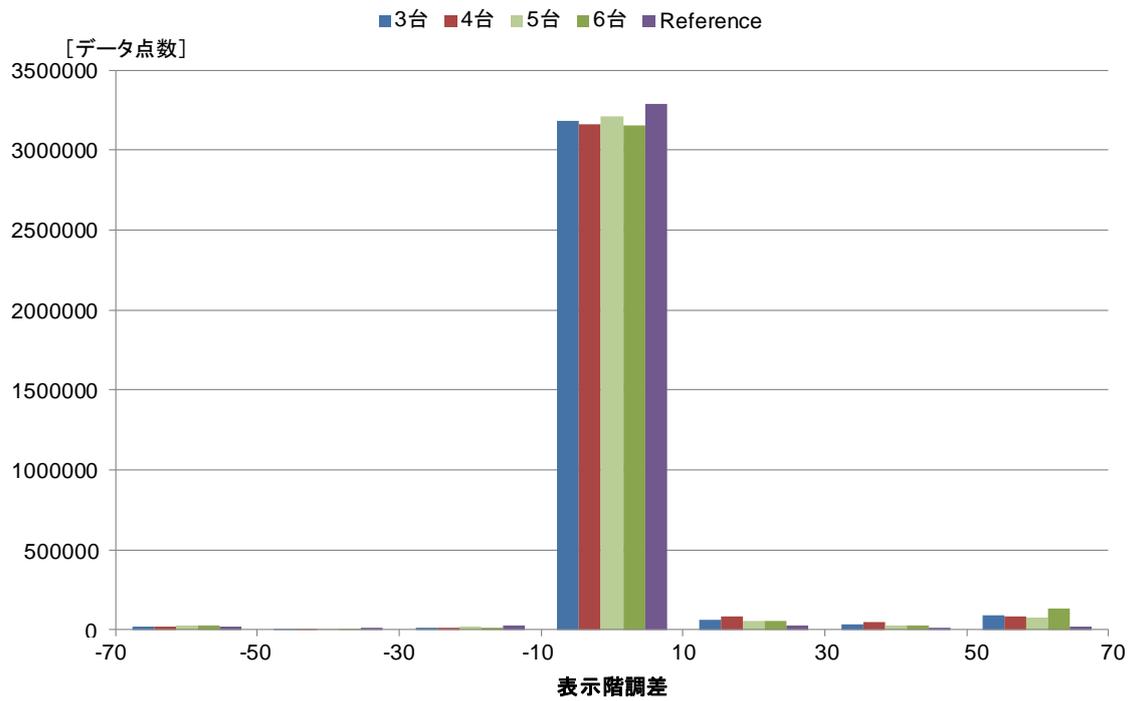
4.1.3.3-図 106 与干渉機：4 台



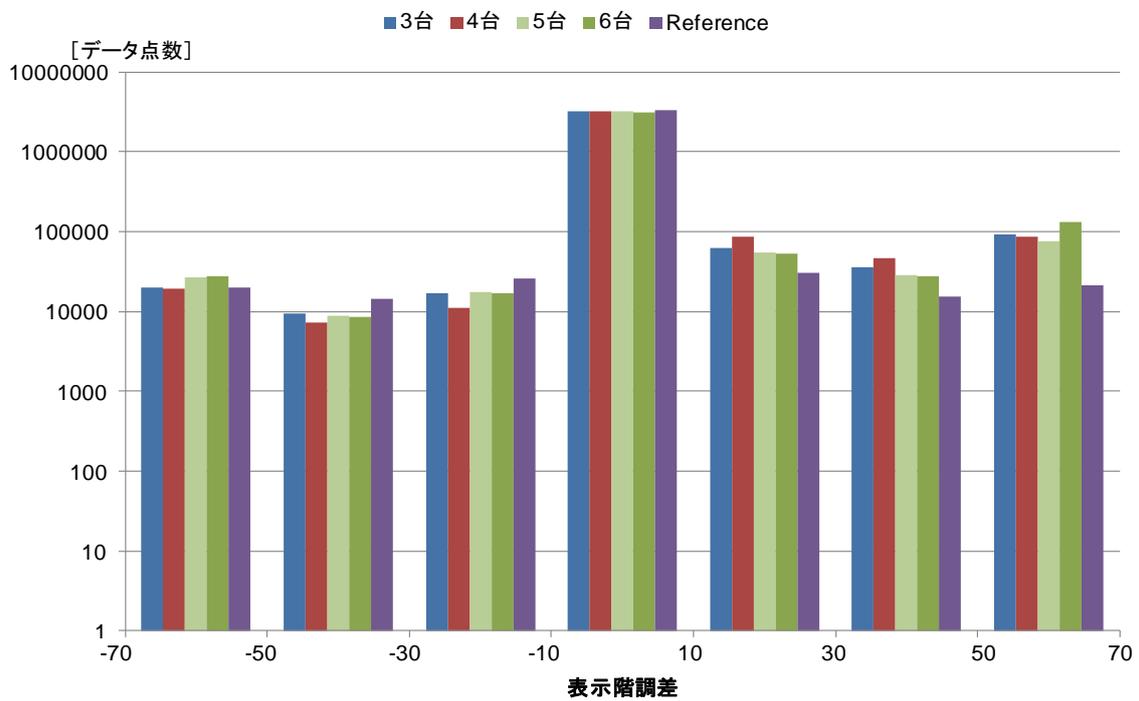
4.1.3.3-図 107 与干渉機：5 台



4.1.3.3-図 104 (再掲) 与干渉機：6 台



4.1.3.3-図 108 表示階調差のヒストグラム (縦軸：線形)



4.1.3.3-図 109 表示階調差のヒストグラム (縦軸：対数)

4.1.3.4 検証4：離隔距離による干渉状況変化

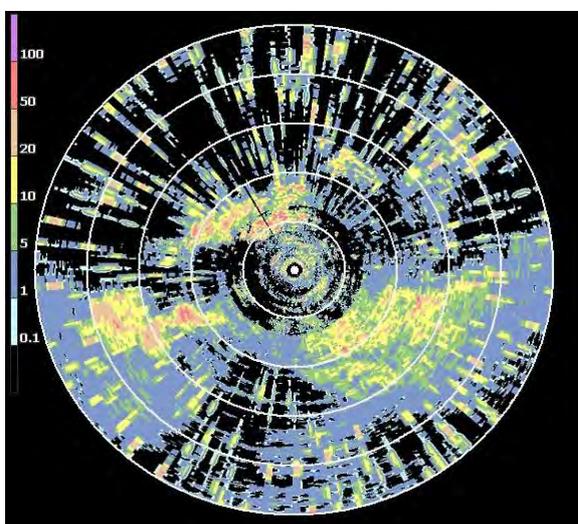
同一周波数で離隔距離を 100 m, 1, 5, 10, 20, 50 km と変化させた場合の影響を検討した。検証4のモデル図を 4.1.3.4-図 110 に示す。



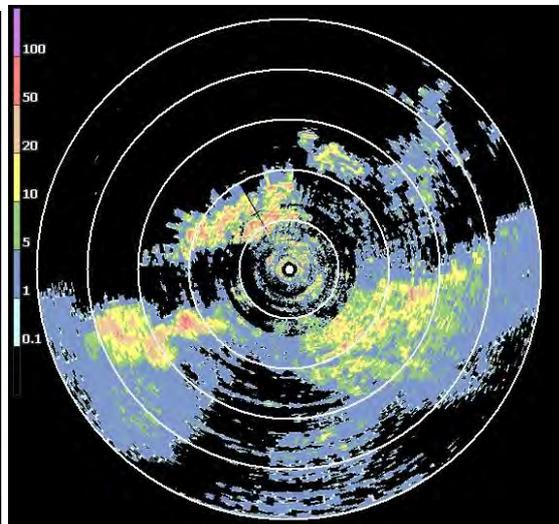
4.1.3.4-図 110 検証4のモデル図

与干渉機・被干渉機ともに小型気象用レーダーの結果を 4.1.3.4-図 111 から 4.1.3.4-図 117 に示す。

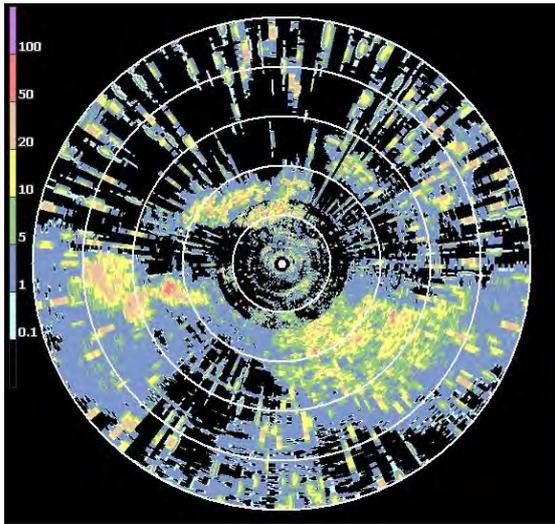
4.1.3.4-図 111 において干渉除去機能を ON にした場合の結果を 4.1.3.4-図 112 に示す。離隔距離が増加するに従って干渉が減少していることが分かる。



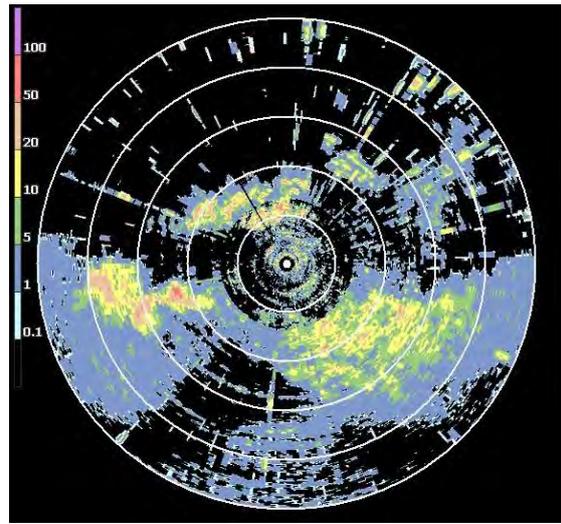
4.1.3.4-図 111 離隔距離：100 m



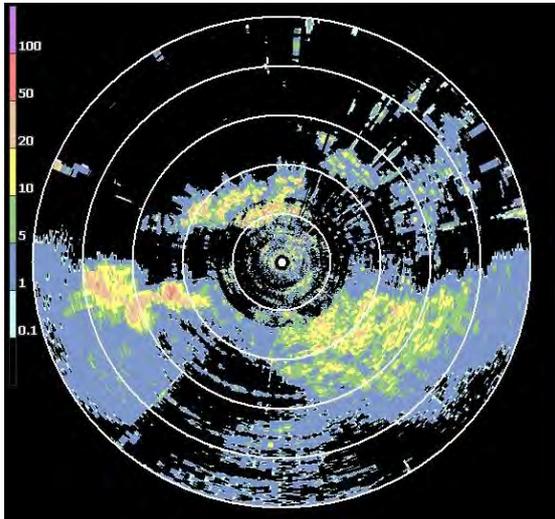
4.1.3.4-図 112 離隔距離：100 m
(干渉除去機能 ON)



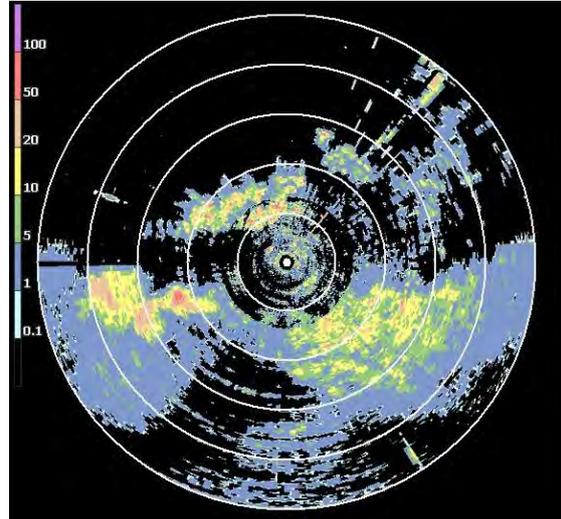
4.1.3.4-図 113 離隔距離 : 1 km



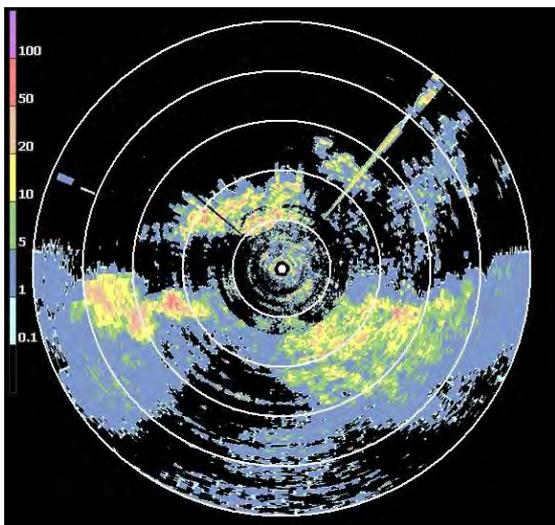
4.1.3.4-図 114 離隔距離 : 5 km



4.1.3.4-図 115 離隔距離 : 10 km



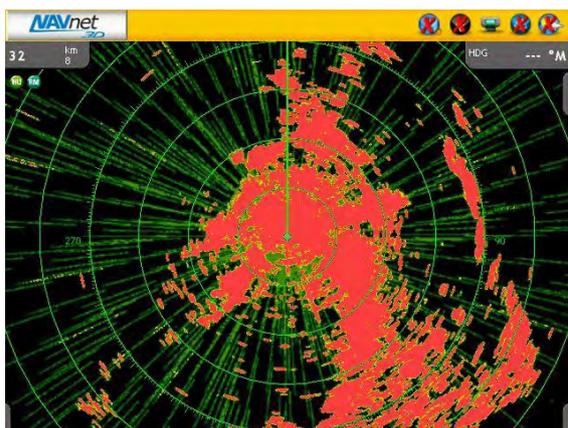
4.1.3.4-図 116 離隔距離 : 20 km



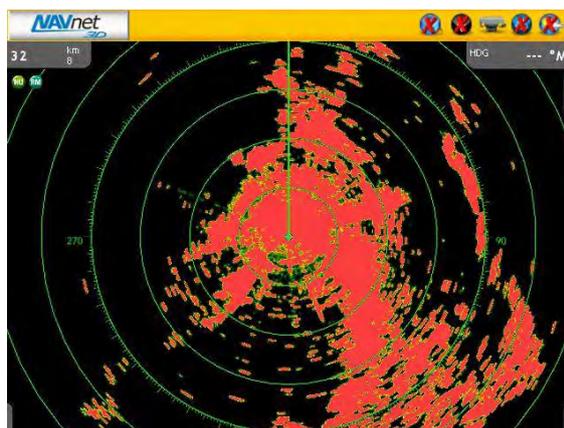
4.1.3.4-図 117 離隔距離 : 50 km

次に、与干渉機が小型気象用レーダー、被干渉機が船舶用レーダーの結果を 4.1.3.4-図 118 から 4.1.3.4-図 124 に示す。4.1.3.4-図 118 において干渉除去機能を ON にした場合の結果を 4.1.3.4-図 119 に示す。

この場合、50 km 程度の離隔距離では顕著な干渉の低下は見られない。これは、画面表示の最大輝度に対して、干渉波の電力が十分に大きいためであると考えられる。



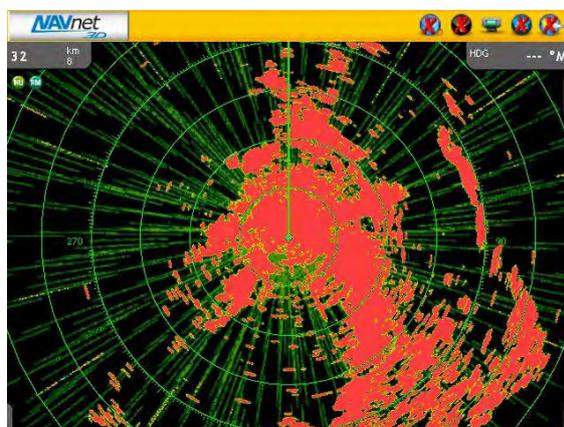
4.1.3.4-図 118 離隔距離：100 m



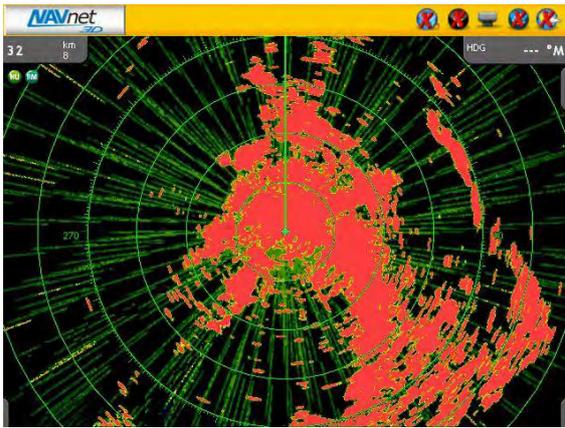
4.1.3.4-図 119 離隔距離：100 m
(干渉除去機能 ON)



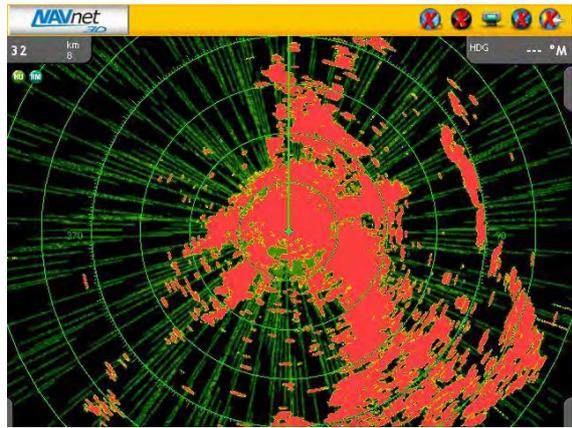
4.1.3.4-図 120 離隔距離：1 km



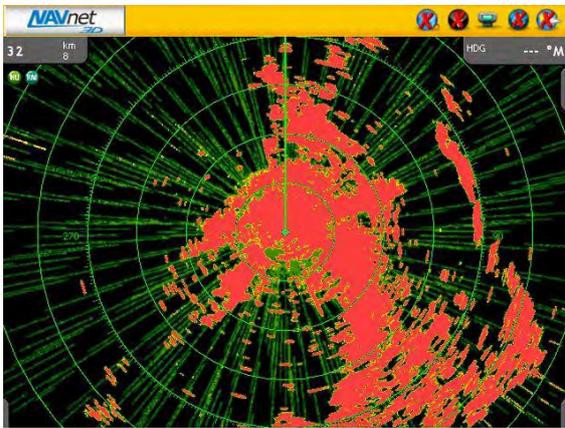
4.1.3.4-図 121 離隔距離：5 km



4.1.3.4-図 122 離隔距離：10 km



4.1.3.4-図 123 離隔距離：20 km



4.1.3.4-図 124 離隔距離：50 km

本章では、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について検討を行ってきた。検討は干渉波が気象エコーに比べて著しく強い場合に対して行ったが、干渉波が気象エコーと同程度のレベルで入力された場合は干渉波が除去されず、ドップラ速度はさらに大きな誤差を含む可能性がある。また、近年普及が進むマルチパラメータレーダーのような偏波間の特性差を解析するようなレーダーでは、原理的にさらに大きな干渉が生じることとなる。そのため、本章の検討は限定的であり、マルチパラメータレーダーに適用する場合には更なる検討が必要となる。

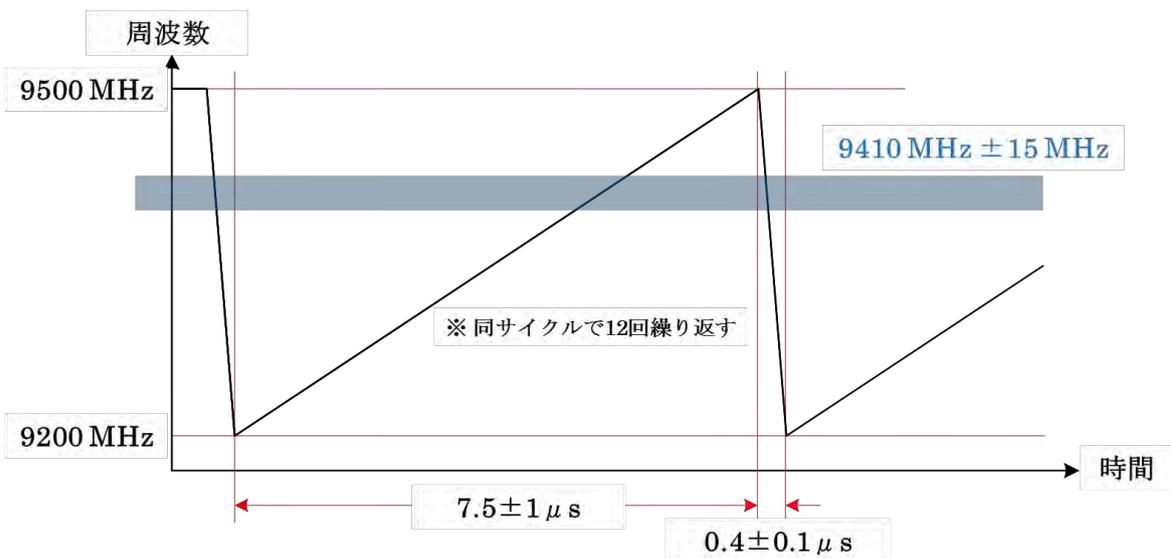
4.1.4 SART 応答波への干渉影響

X 帯の義務船舶用レーダーについては、SART (Search And Rescue Transponder) への対応が義務付けられている。仕様を IEC 61097-1 及び、ITU-R M.628-5 から抜粋し、4.1.4-表 20 ように定義する。

4.1.4-表 20 SART 仕様

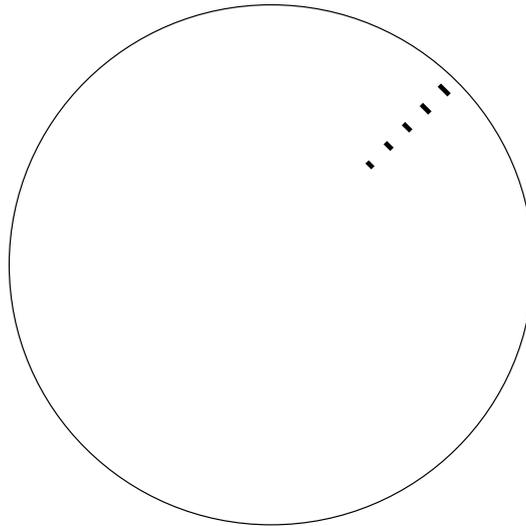
項目	規格仕様	検討仕様	備考
空中線垂直指向角	±12.5°以上	±12.5°	
空中線水平指向角	無指向性	無指向性	
空中線利得	0.95 dBi	0.95 dBi	
送受信偏波	水平または円	水平偏波	
EIRP	400 mW 以上	400 mW	
最小起動感度	-50 dBm	-50 dBm	パルス幅 400 ns 以上
最低検出距離	5 NM 以上	5 NM (9260 m)	
送信諸元	4.1.4-図 125 参照		
応答時間	0.5 μs 以下	0.5 μs	

※1 NM(nautical mile) = 1852 m



4.1.4-図 125 SART 送信波説明図

横軸を時間、縦軸を周波数として図示すると、SART 送信波は 4.1.4-図 125 のようになる。例えば、9410 MHz において帯域幅 30 MHz の受信系で受信したとすると、図中に青色の帯で示した範囲が受信可能帯域となり、断続したチャープ信号として受信される。この場合、パルス幅 750 ns、周波数変調幅 30 MHz の QON 波が $7.9 \mu\text{s}$ 毎に 12 点並ぶ信号となる。SART 信号の画面表示例を 4.1.4-図 126 に示す。



4.1.4-図 126 SART 信号の画面表示例

船舶用レーダーの画面に受信信号が現れる位置を考える。レーダー送信波が SART へ到達するまでに要する時間は $30.888 \mu\text{s}$ で応答に $0.5 \mu\text{s}$ 要し、QON 波の周波数走査が 9395 MHz へ最初に達するまでに $4.875 \mu\text{s}$ 、帰路も同じだけ時間がかかるため、 5.435 NM から 12 点の信号が現れる。

SART は救難用の装置であり、実際にフィールドで試験することはできないため、机上計算による検討を行う。SART 応答信号に干渉波が重畳された場合、スイープ相関による干渉除去を考慮すると、SART 応答波が 5 スイープ以上連続するかどうか、干渉除去機能によって除去し得るか否かの判断基準となる。

被干渉機（船舶用レーダー）の検討仕様を下記に設定する。

- ・送信電力：10 kW
- ・空中線指向性半値角： 1.2°
- ・メインローブ利得：28 dBi
- ・回転数：20 rpm
- ・PRF：2000 Hz

フリスの伝達公式より、4.1.4-表 20 の仕様で計算すれば、

$$G_t = P_r \cdot (4 \cdot \pi \cdot d / \lambda)^2 / (G_r \cdot P_t)$$

P_r ：最小起動感度

d ：9260 m

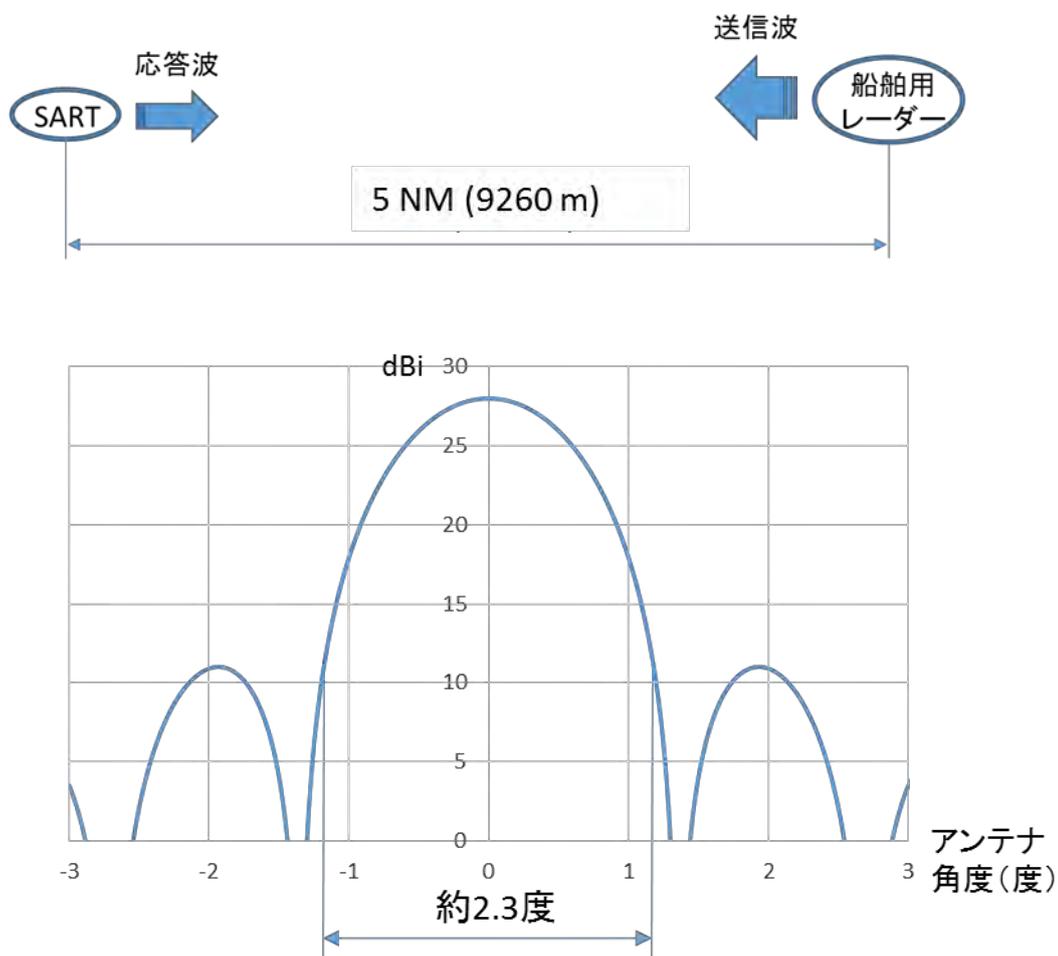
λ ：光速/9410 MHz

G_r ：0.95 dBi

P_t ：10 kW

として、SART 起動のための船舶用レーダーの利得を計算した結果、 $G_t = 10.7 \text{ dBi}$ 以上の利得を持つ角度で SART が起動する。船舶用レーダーの空中線指向特性を、メインローブ利得 28 dBi 、 3 dB ビーム幅 1.2° の sinc 関数としてモデル化すると、 10.7 dBi 以上の利得を持つメインローブの範囲は、約 2.3° である (4.1.4-図 127)。

船舶用レーダーを PRF 2000 Hz 、 20 rpm とすると、 2.3° の範囲で約 38 回の SART から
の応答波がある。これは干渉除去機能を使用していた場合でも、除去されない頻度である。
そのため、SART 信号は除去されないといえる。



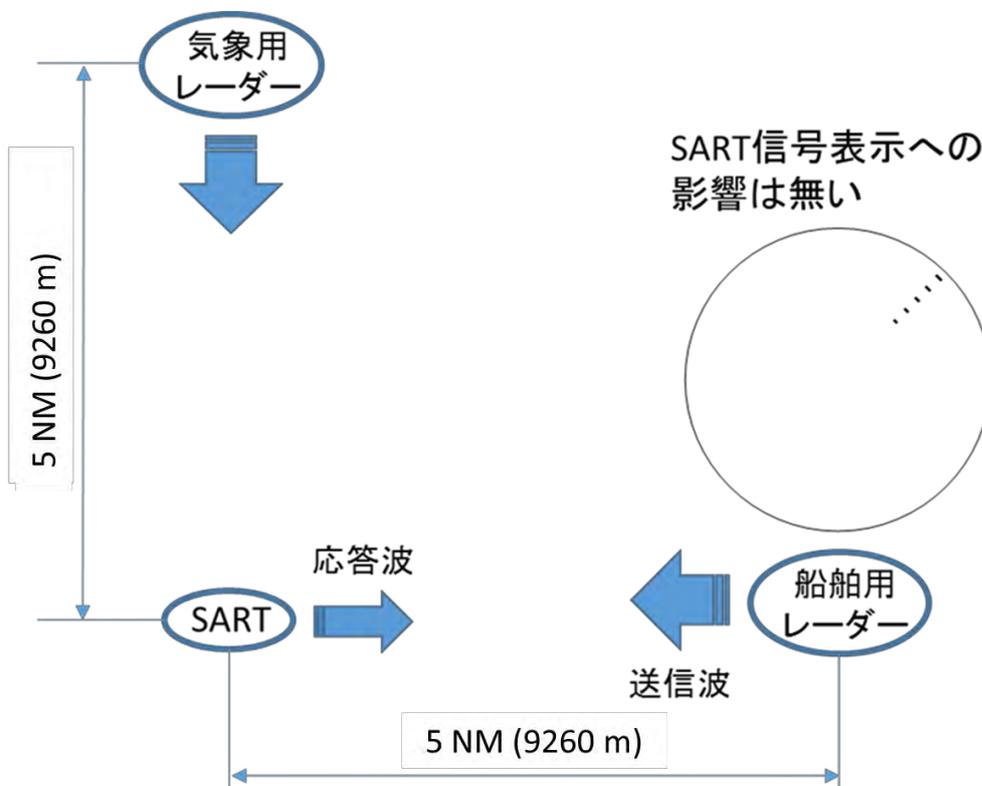
4.1.4-図 127 検討モデルと SART 起動条件を満たす船舶用レーダーの空中線角度

また、起動条件を満たせば小型気象用レーダーによっても SART は起動することが考えられる。小型気象用レーダーの検討仕様を下記に設定し同様の計算を行うと、 $G_t = 23.3 \text{ dBi}$ 以上の利得を持つ約 4.6° の空中線角度で SART が起動する。

- ・送信電力：500 W
- ・空中線指向性半値角： 2.7°
- ・メインローブ利得：33 dBi
- ・PRF：1000 Hz

ITU-R M.628-5 の規定によると、SART の最低連続起動時間は 8 時間、最低待機可能時間は 96 時間となっている。小型気象用レーダーの空中線角度 4.6° の範囲で 8 時間分 SART が起動した場合、全体の時間は 626 時間となる。これは送信待ち時間の 96 時間よりも十分大きな値であるため、実用上問題無いといえる。

加えて、このような状況下でも船舶用レーダーが受信する SART 応答波には影響は無いと考えられる (4.1.4-図 128)。SART はレーダーを個体識別して 1 台のみに応答するわけではなく、条件を満たした入力へ無差別に応答する。したがって、船舶用レーダーでは応答波以外を受信のタイミングがずれるため、干渉除去機能で除去され、SART 信号表示への影響は無いと考えられる。



4.1.4-図 128 小型気象用レーダーが存在する場合の船舶用レーダー画面の SART 信号

以上、SART への影響について検討を行ったが、これは双方が同高度、仰角 0°で連続回転しているという最悪条件で計算を行っているため、実際の設置時にはこれより緩和された状況での運用となる。したがって、SART に対する影響としては、実用上問題無いと考えられる。

ただし、これはあくまでも机上検討である。実際の運用時には不測の事態が起こらないとも限らないため、船舶用固体素子レーダーの検証結果等も参照しながら、別途、実機検証を行うことで、実用上問題ないことを確認することが必要となると考えられる。

第5章 実証試験

5.1 実証試験の概要

船舶用レーダー、航空機用レーダー及び、小型気象用レーダーの相互間干渉について、実機を用いた実地検証を行った。

試験結果については、船舶用レーダー及び航空機用レーダーが被干渉機の場合は、「有害な混信」であるかという観点で評価する。また、小型気象用レーダーが被干渉機となる場合は、業務遂行可能性を阻害しないかという観点で評価する。

さらに、小型気象用レーダーを実際に運用し、その能力を評価する。

5.1.1 実証試験項目

被干渉・与干渉の組み合わせで整理したものを 5.1.1-表 21 に示す。既に述べたように、航行用レーダー相互間の干渉検討は行わない。

5.1.1-表 21 実証試験組み合わせ

		与干渉側		
		小型気象用 レーダー	船舶用 レーダー	航空機用 レーダー
被干渉側	小型気象用 レーダー	実証試験①	実証試験②	実証試験③
	船舶用 レーダー	実証試験②		
	航空機用 レーダー	実証試験③		

また、空中線の走査方法による干渉の頻度変化を検証するため、平面的な走査(PPI)と三次元的な走査(ボリュームスキャン)の比較を行う。走査仕様としては、次のようになる。

5.1.1-表 22 各試験機の空中線走査仕様

	PPI	ボリュームスキャン	備考
小型気象用レーダー	10 rpm	10 rpm, 0~30°, 3°step	
船舶用レーダー	24 rpm	機能無し	
航空機用レーダー	約 3 rpm	機能無し	80°を往復

5.1.2 実施期間

実機による実証試験

- 実証試験 1. 小型気象用レーダー 対 小型気象用レーダー： 2015 年 10 月 12 日
実証試験 2. 小型気象用レーダー 対 船舶用レーダー： 2015 年 10 月 13 日
実証試験 3. 小型気象用レーダー 対 航空機用レーダー： 2015 年 10 月 14,15 日
なお、上記の実証試験は、降雨の無い状況で実施した。
実証試験 4. 小型気象用レーダーの運用実力値検証： 2015 年 11 月 1 日～12 月 1 日

5.1.3 実施場所

実機による実証試験

- 実証試験 1. 小型気象用レーダー 対 小型気象用レーダー：
国立大学法人 広島大学 東広島キャンパス 南第 2 駐車場
実証試験 2. 小型気象用レーダー 対 船舶用レーダー：
国立大学法人 広島大学 東広島キャンパス 南第 2 駐車場
実証試験 3. 小型気象用レーダー 対 航空機用レーダー：
岡山県 岡南飛行場
実証試験 4. 小型気象用レーダーの運用実力値検証：
国立大学法人 広島大学 東広島キャンパス 校舎屋上

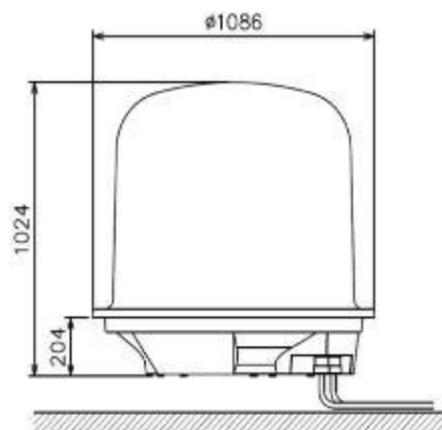
5.1.4 レーダー諸元

レーダーの諸元について、以下に記す。

小型気象用レーダーの諸元

本実証試験では小型気象用レーダーとして市販されている小型 X バンド 二重偏波ドップラ気象レーダーを使用する。本レーダーの装置諸元は 5.1.4-図 129 及び 5.1.4-表 23 のとおりである。

今回用いた装置は、本報告で提言している技術的条件を満たす中では比較的小型なものであり、全ての気象レーダーを代表するものではない。小型であるため空中線指向角も広く、干渉を与える／受ける時間としては不利に働く。また、空中線利得は低いため、被干渉の強度としては低下する。



5.1.4-図 129 小型気象用レーダー寸法図

5.1.4-表 23 小型気象用レーダー諸元

偏波方式	水平 (H)、垂直 (V) の偏波を同時に送受信
周波数	9.4 GHz 帯
ビーム幅	2.7° (H, V とともに)
送信出力	100 W (H, V とともに)
仰角可変範囲	-2~90°可変
空中線回転数	最大 16 rpm 可変
観測距離	約 30~50 km
観測機能	PPI、CAPPI、RHI (セクタスキャン可能)
データ処理 ユニット	外部に付属
出力データ	反射強度 Z_h [dBZ]、折り返し補正速度 V [m/s]、速度幅 W [m/s]、 偏波間位相差 ϕ_{dp} [deg]、伝搬位相差変化率 K_{dp} [deg/km]、 偏波間相関係数 ρ_{HV} 、偏波間レーダー反射因子差 Z_{dr} [dB]、 降水強度 R [mm/h]
補正処理	距離減衰補正、降雨減衰補正、速度折り返し補正、地形エコー除去、 干渉除去
入力電源	AC 100-240 V 単相, 50/60 Hz
消費電力	650 W 以下

船舶用レーダーの諸元

本実証試験では市販されている船舶用レーダーを使用する。本レーダーの装置諸元は5.1.4-図 130 及び 5.1.4-表 24 のとおりである。



5.1.4-図 130 船舶用レーダー

5.1.4-表 24 船舶用レーダー諸元

周波数	9410±30 MHz
ビーム幅(H)	1.9 °
ビーム幅(V)	22 °
空中線電力	12 kW
空中線利得	28.5 dBi
終段管	マグネトロン
パルス幅	0.08～1.0 μs
PRF	600～3000 Hz
空中線回転数	24/36/48 回転

航空機用レーダーの諸元

本実証試験では航空機用レーダーとして Honeywell 社製の WU-650 を使用する。本レーダーの装置諸元は 5.1.4-図 131 及び 5.1.4-表 25 のとおりである。



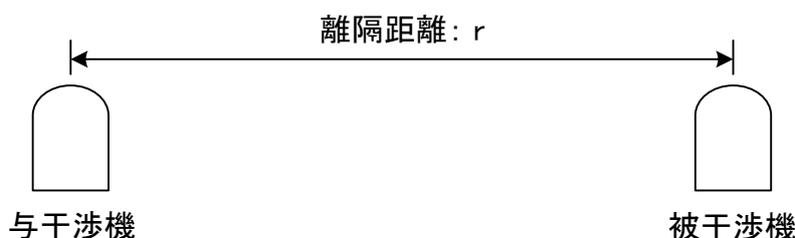
5.1.4-図 131 航空機用レーダー

5.1.4-表 25 航空機用レーダー諸元

周波数	9345±30 MHz
送信出力	1.3 kW
終段管	マグネトロン
チルト角	±15°
利得	28 dB
パルス幅	1.2, 1.5, 2.4, 4.8, 9, 18, 27 μs
PRF	120, 240, 360, 480 Hz

5.2 実証試験の実施手順等

ある離隔距離 r を設定してレーダーを配置し、相互干渉を評価する。位置関係を 5.2-図 132 に示す。離隔距離の基準位置は空中線開口端で定義する。



5.2-図 132 離隔距離の定義図

また、後述するように、本検討では等価的に離隔距離を変化させて評価を行うため、空中線の指向角が距離に依存しない条件で評価する必要がある。したがって、距離 r は各測定条件において遠方界となるように設定しなければならない。つまり、空中線の開口長を D 、波長を λ とすると、次式を満たすように設定する。

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

この条件において、干渉強度が最も高くなるような状況を設定し、試験を行う。空中線の動作としては、中心が同じ高さで正対する場合となる。実際は、空中線を停止して観測することは基本的に無いため、仰角 0° で水平回転する場合が実質的に干渉強度が最も高くなるような条件となる。

5.2.1 測定の条件・手順

与干渉機の設定を変化させた場合の、被干渉機出力を評価する。

気象レーダーは数値データを保存して利用するものであるため、通常の機能で定量データを記録できる。また、画面表示も同時に記録しておく。送信機は固体素子である。

船舶用レーダーはモニターでの確認で完結し、数値データの確認を行わないのが通常の利用方法である。しかし今回は、このモニター出力に加え、開発用ツールを用いて数値データも記録して評価を行う。送信機はマグネトロンである。

航空機用レーダーについても船舶用レーダーと同等であるが、航空機搭載状態で使用せざるを得ないために数値データを記録することはできない。そのため、ビデオカメラを用いて画面表示のみ収録する。送信機はマグネトロンである。

5.2.2 減衰量の距離換算の検討

干渉の強度を変化させて影響度合いを検証するため、減衰器を用いて離隔距離を模擬する。例えば、減衰器を使用しない場合(0 dB)には、実際の機器配置距離が離隔距離であり、6 dB の減衰器を用いる場合は、0 dB の 2 倍の距離を模擬していることとなる。これらの関係を 5.2.2-表 26 に示す。なお、実機の空中線電力は 100 W を下回っており、100 W 相当となる距離として計算しているため、0 dB の距離が実距離より長くなっている。

5.2.2-表 26 減衰量と等価距離の関係

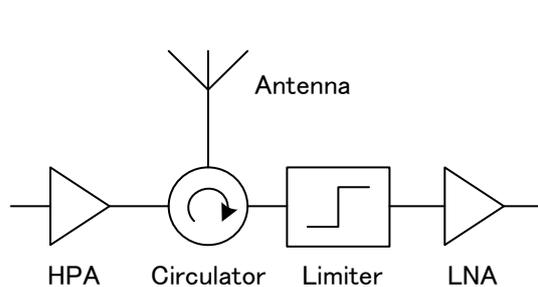
減衰量[dB]	メインローブ 対 メインローブ		メインローブ 対 サイドローブ	
	116 m※1	800 m※2	116 m※1	800 m※2
0	140 m	967 m	19.8 m	137 m
8.5	372 m	2.57 km	52.5 m	363 m
18.6	1.20 km	8.26 km	170 m	1.17 km
28.1	3.55 km	24.5 km	502 m	3.46 km
38.3	11.5 km	79.1 km	1.62 km	11.2 km
43.5	20.5 km	142 km	2.90 km	20.1 km
48.5	37.3 km	257 km	5.27 km	36.3 km
53.8	66.8 km	461 km	9.44 km	65.1 km
58.4	116 km	800 km	16.4 km	113 km
68.6	376 km	2593 km	53.1 km	366 km
78.2	1139 km	7858 km	161 km	1110 km

※1：実証試験 1 及び 2 での実距離

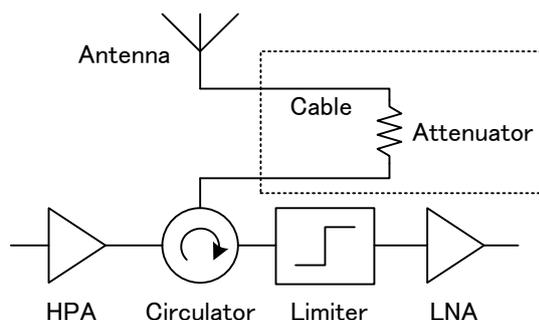
※2：実証試験 3 での実距離

実装方法としては、小型気象用レーダーのみに減衰を与え、所望の状態を作り出す。標準状態は製品に改造を加えていない状態であるため、これを基準(0 dB)としている (5.2.2-図 133)。

また、減衰付与時は同軸ケーブルで引き下ろし、その先に広帯域減衰器を挿入する形で試験を行った (5.2.2-図 134)。こうすることで送受信系へ同時に減衰を与えることができるため、与干渉機・被干渉機両方の立場で等しい距離を模擬することができる。



5.2.2-図 133 標準状態(0dB)の送受信機

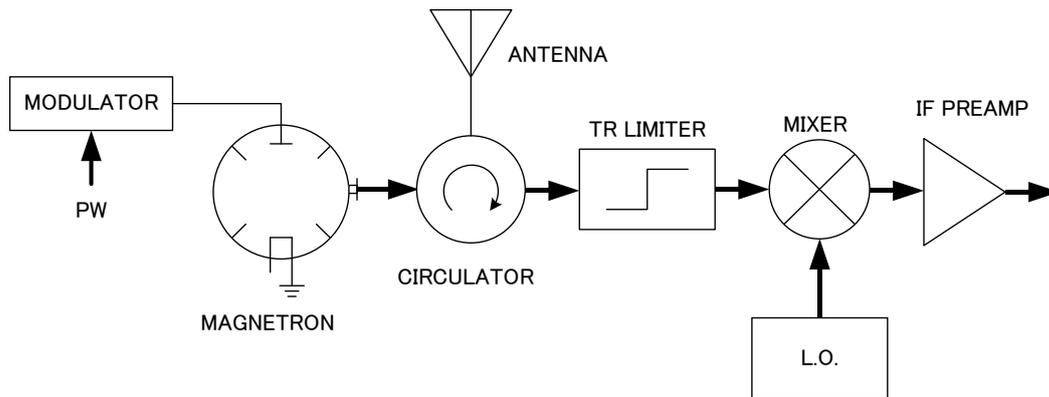


5.2.2-図 134 減衰付与時の送受信機

5.2.3 破壊入力電力の検討

航空機用として用いた、Honeywell 社製 WU-650 の送受信機ブロック図を 5.2.3-図 135 に示す。

受信機の過入力保護回路として TR リミッターが設けられ、e2v 社製 B3LT1605 が使用されている。最大定格は 5 kW であり、気象用の 100 W に対して尖頭電力としては十分余裕があるが、実証試験を行うことによって破壊することがないか検討しておく。



5.2.3-図 135 WU-650 の送受信機ブロック図 (空中線周辺部分)

受信機保護回路は外来波に対しても機能するが、同時に、自機の送信波からの保護という機能も果たしている。つまり、外来波の危険性を検討する場合、自機の送信波漏洩電力を基準とし、同等以下であれば安全であると考えられる。

送信波漏洩電力は主として、2 経路で生じる。ひとつはサーキュレーターの逆方向結合に起因し、通常は-20~-30 dB 程度の電力となる。もうひとつは空中線で反射する電力であり、これも正常品であれば-20~-30 dB 程度である。基準が厳しくなる方として-30 dB を採用すると、WU-650 の定格出力電力は 1.3 kW であるから、漏洩波の電力は 1.3 W となる。

小型気象用レーダーの干渉波が 1.3 W となる距離をフリスの伝達公式から求めると、次のようになる。

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t G_t G_r$$

$$P_r = 1.3 \text{ [W]}, \lambda = 0.03166 \text{ [m]}, P_t = 100 \text{ [W]}, G_t = 33 \text{ dBi}, G_r = 28 \text{ dBi より、} d = 24.8 \text{ [m]}$$

つまり、離隔距離を 24.8 m 以上としたときが十分安全な距離であるといえる。実証試験は約 800 m の距離で実施するため、十分に安全であるといえる。

5.3 実証試験結果

5.3.1 実証試験 1（小型気象用レーダー相互干渉状況）

5.3.1.1 実証試験 1 の概要

小型気象用レーダー相互間の干渉について実証試験を行った。

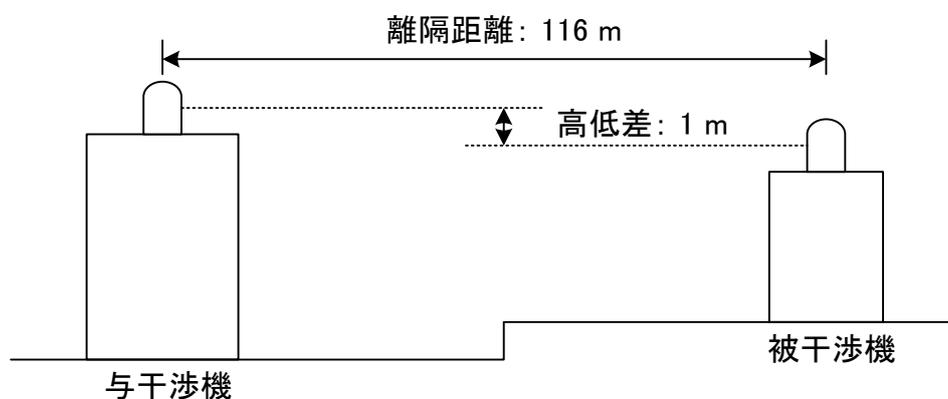
与干渉機、被干渉機をそれぞれ車両上に設置し、116 m の離隔距離で配置して実験を行った。試験時の設置状況写真を 5.3.1.1-図 136、5.3.1.1-図 137 に示す。



5.3.1.1-図 136 与干渉機設置状況

5.3.1.1-図 137 被干渉機設置状況

両試験機の位置関係を 5.3.1.1-図 138 に示す。駐車場内に段差があり、空中線相互の高低差は約 1 m であった。これは空中線の指向角に換算して 0.49° であり、試験機空中線の半値角 1.5° に対して十分小さいといえる。また、空中線の直径は 0.75 m であるため、遠方界の基準距離は 35.54 m となり、116 m は評価に十分な離隔距離である。



5.3.1.1-図 138 試験機の相互位置関係

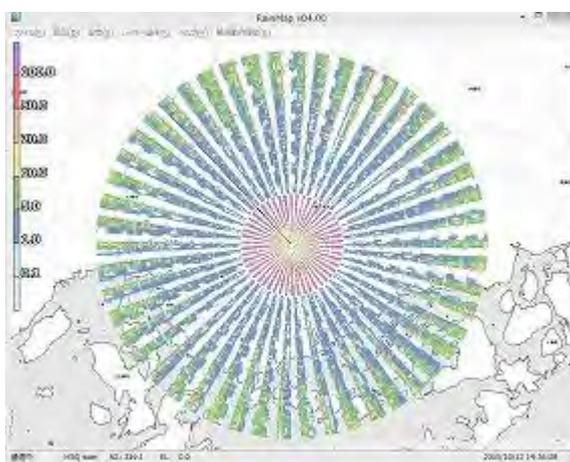
5.3.1.2 実証試験1の結果

(1) 離隔距離の増加に伴う干渉状況の変化

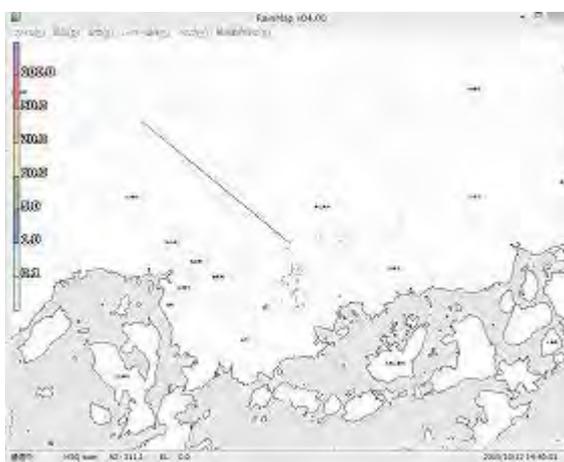
与干渉機・被干渉機双方の周波数を 9470 MHz とし、与干渉機の空中線を被干渉機に正対させて停止させた条件において、離隔距離を変化させた場合の干渉状況変化を示す。なお、離隔距離はメインローブ 対 サイドローブとして評価する。

この中で最も短距離設定の場合（最強の干渉波を与える条件）を 5.3.1.2-図 139、同状態で干渉除去機能を ON にした場合を 5.3.1.2-図 140 に示す。また、その他状況については干渉除去機能を OFF にした状態のみとし、それらを 5.3.1.2-図 141 から 5.3.1.2-図 148 に示す。

与干渉機：9470 MHz、正対停止、被干渉機：9470 MHz、PPI



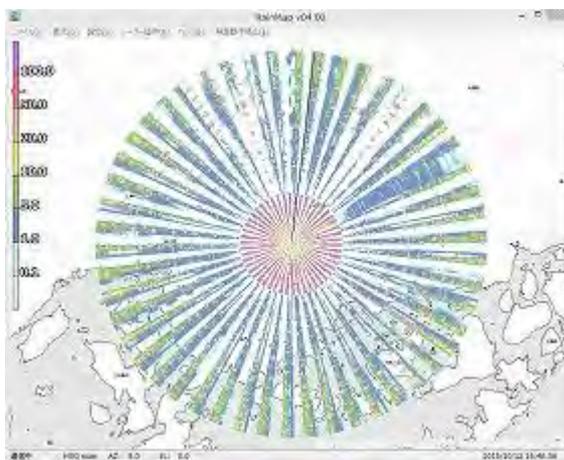
5.3.1.2-図 139 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.1.2-図 140 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.1.2-図 141 離隔距離：170 m



5.3.1.2-図 142 離隔距離：502 m

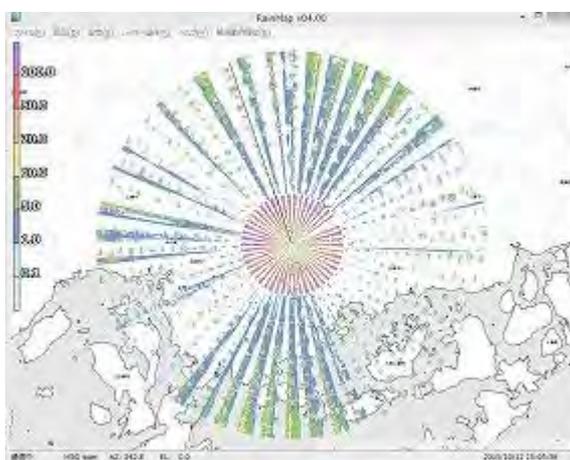
(2) 空中線走査方法の変化に伴う干渉状況の変化

前項では、与干渉機の空中線を正対停止するという、通常運用時には生じない条件での検証を行った。本章では、現実的に起こり得る条件として、与干渉機・被干渉機双方が仰角零度で水平回転している場合(PPI)の結果を示す。

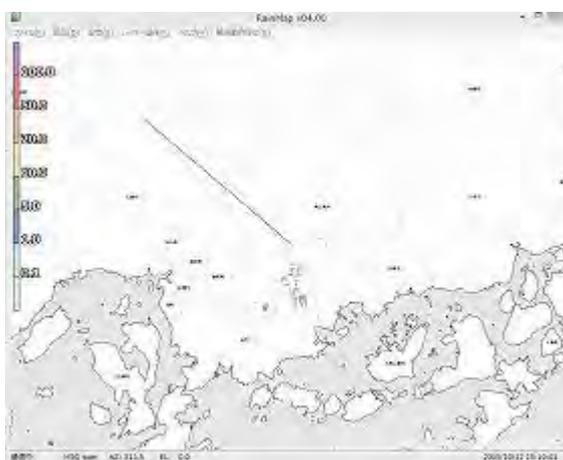
実際の運用では、随時仰角を変更しての三次元走査が主流であるため、本章で示す条件となるのは稀であると考えられる。

離隔距離が最も小さい場合を 5.3.1.2-図 149、同条件で干渉除去機能を ON にした場合を 5.3.1.2-図 150 に示す。また、離隔距離を大きくした場合を 5.3.1.2-図 151、5.3.1.2-図 152 にそれぞれ示す。正対停止と比べて、離隔距離がそれぞれ数十倍程度の時と近い状態まで干渉が緩和されていることが分かる。

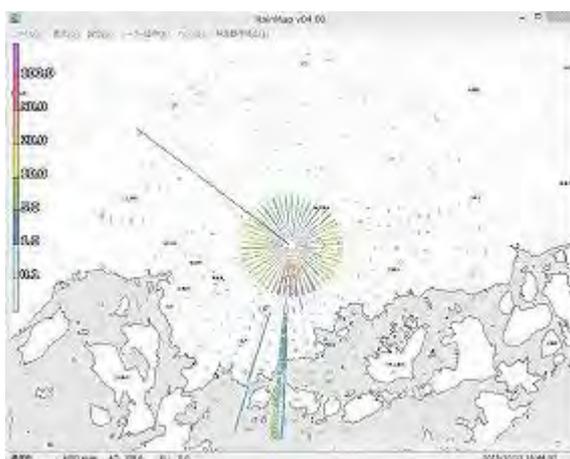
与干渉機：9470 MHz、PPI、被干渉機：9470 MHz、PPI



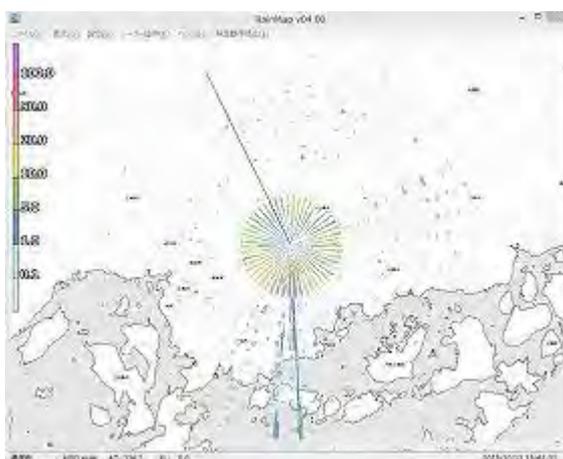
5.3.1.2-図 149 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.1.2-図 150 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.1.2-図 151 離隔距離：1.62 km

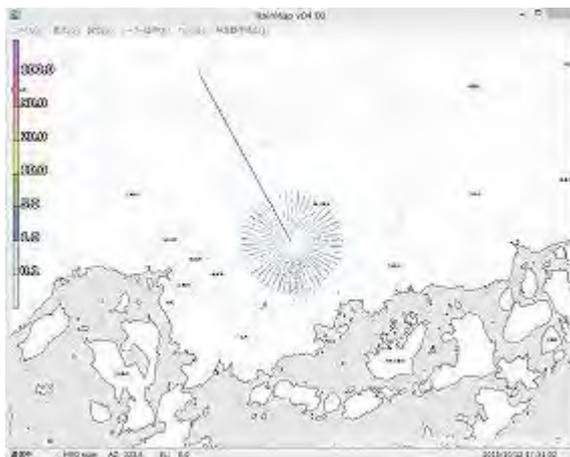


5.3.1.2-図 152 離隔距離：16.4 km

(3) 離隔周波数の増加に伴う干渉状況の変化

与干渉機の周波数を 9415 MHz、被干渉機の周波数を 9470 MHz とし、離隔周波数を 55 MHz 確保した場合の干渉状況の変化を 5.3.1.2-図 153 から 5.3.1.2-図 156 に示す。

与干渉機：9415 MHz、正対停止、被干渉機：9470 MHz、PPI



5.3.1.2-図 153 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.1.2-図 154 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.1.2-図 155 離隔距離：170 m
干渉除去機能：OFF



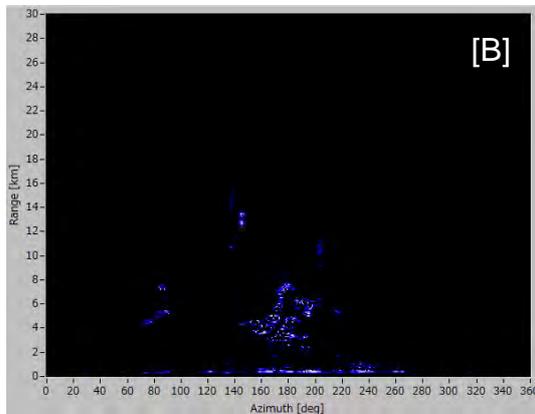
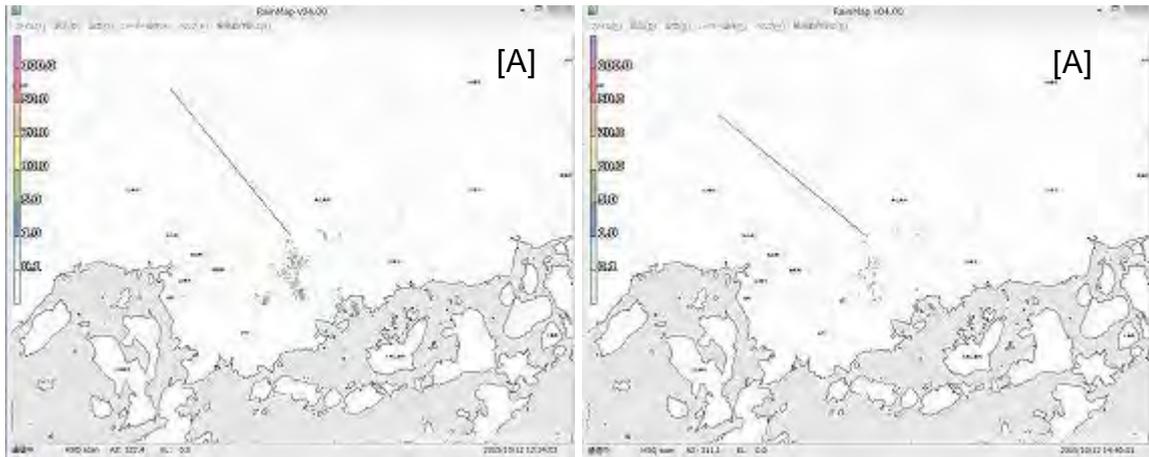
5.3.1.2-図 156 離隔距離：170 m
干渉除去機能：ON

5.3.1.3 実証試験1の考察

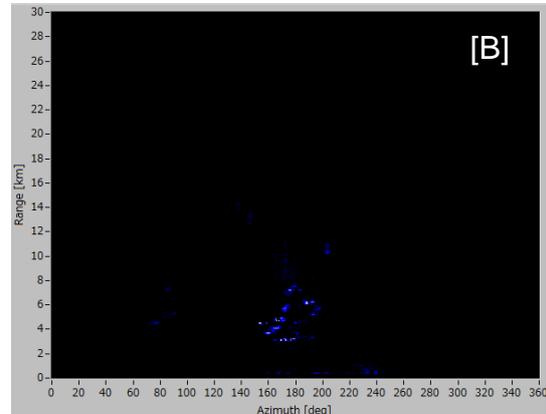
与干渉機が無い場合に、0 dB の設定で干渉除去機能を OFF とした場合の観測結果を 5.3.1.3-図 157、被干渉強度が最も高くなる状態（同一周波数、正対停止、372 m 離隔）から干渉除去した結果を 5.3.1.3-図 158 に示す。5.3.1.3-図 158 の状態の理想形が 5.3.1.3-図 157 であり、この乖離度を評価する。なお、各図の[A]は通常用いる極座標表示であるが、[B]は縦軸をレーダーからの距離、横軸を空中線指向角度として表示したものである。

評価方法としては、両者の観測データをデータ点毎に比較し、残すべきもの（陸地）を消さずに干渉のみを消しているかどうかを指標として考察する。

また、小型気象用レーダーが被干渉機となる場合については、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について検討を行ってきた。検討は干渉波が気象エコーに比べて著しく強い場合に対して行ったが、干渉波が気象エコーと同程度のレベルで入力された場合は干渉波が除去されず、ドップラ速度はさらに大きな誤差を含む可能性がある。また、近年普及が進むマルチパラメータレーダーのような偏波間の特性差を解析するようなレーダーでは、原理的にさらに大きな干渉が生じることとなる。そのため、本章の検討は限定的であり、マルチパラメータレーダーに適用する場合には更なる検討が必要となる。



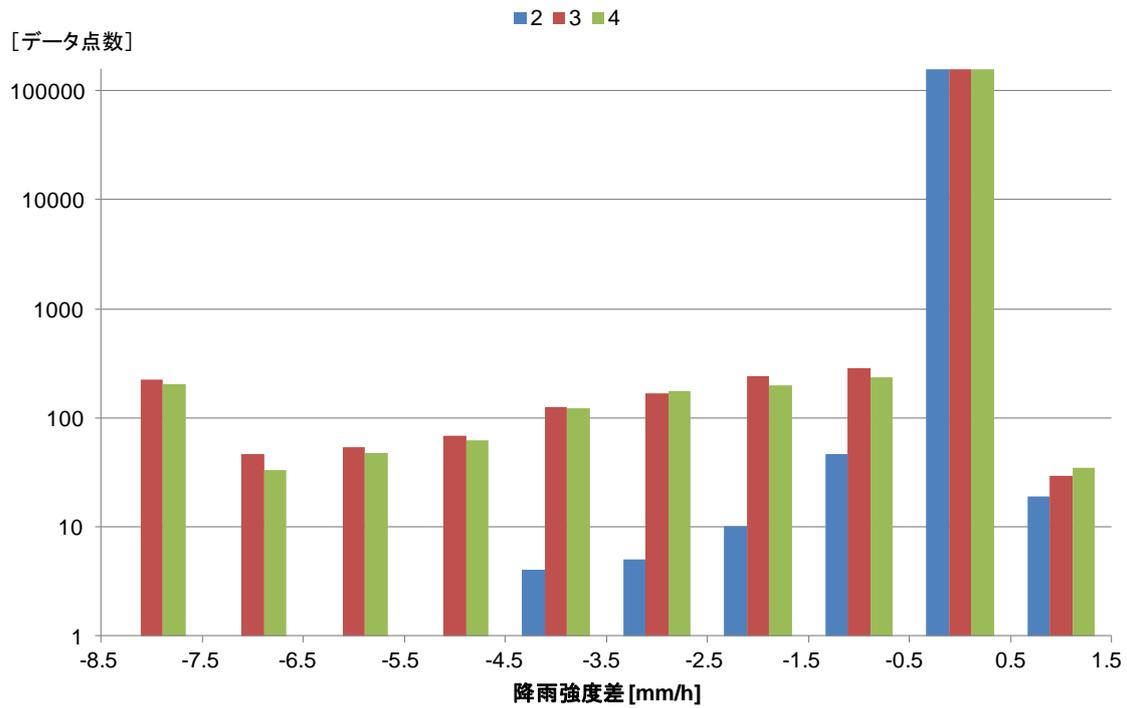
5.3.1.3-図 157 与干渉機無し
干渉除去機能 : OFF



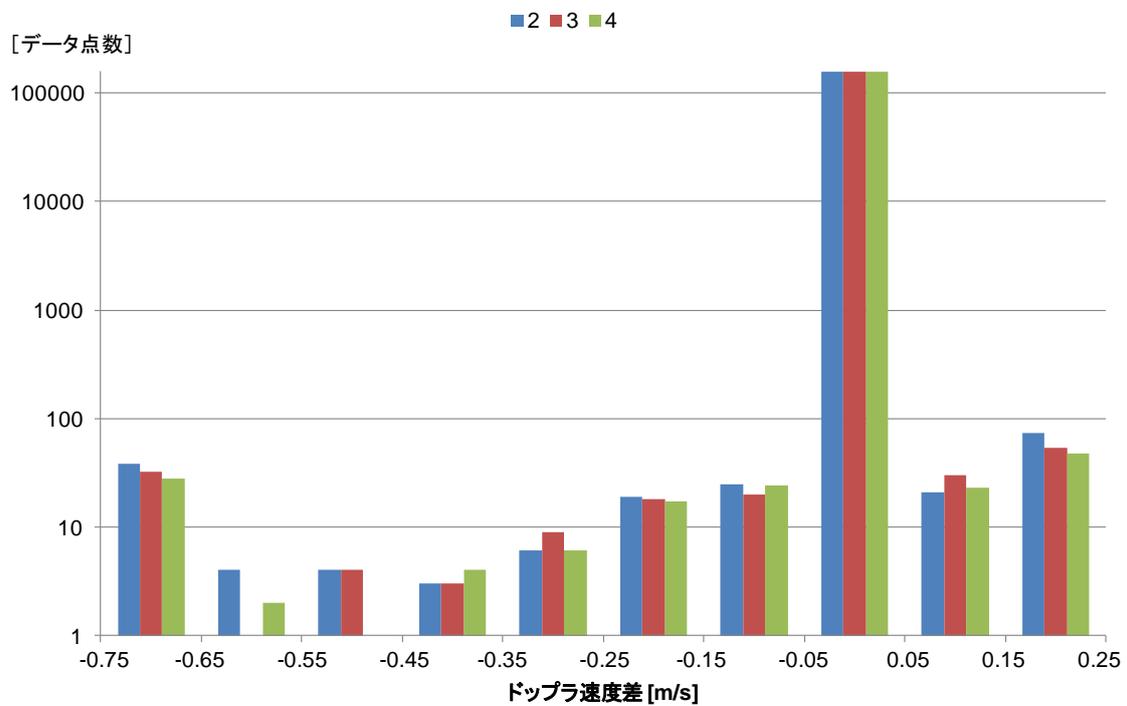
5.3.1.3-図 158 干渉強度最高状況
干渉除去機能 : ON

まず、評価系の安定性について考察を行う。本実験系では送受信タイミングと空中線の指向角度は厳密に言えば非同期であり、各周における同一スイープでも同一方向とは限らず、多少の誤差が生じると考えられる。また、実際に空間へ電波を放射しているため、同じ物体であっても必ずしも同強度で反射波を観測できるとは限らず、さらに、航空機等の移動物体が映り込んでしまうことも考えられ、これらが誤差要因となる。

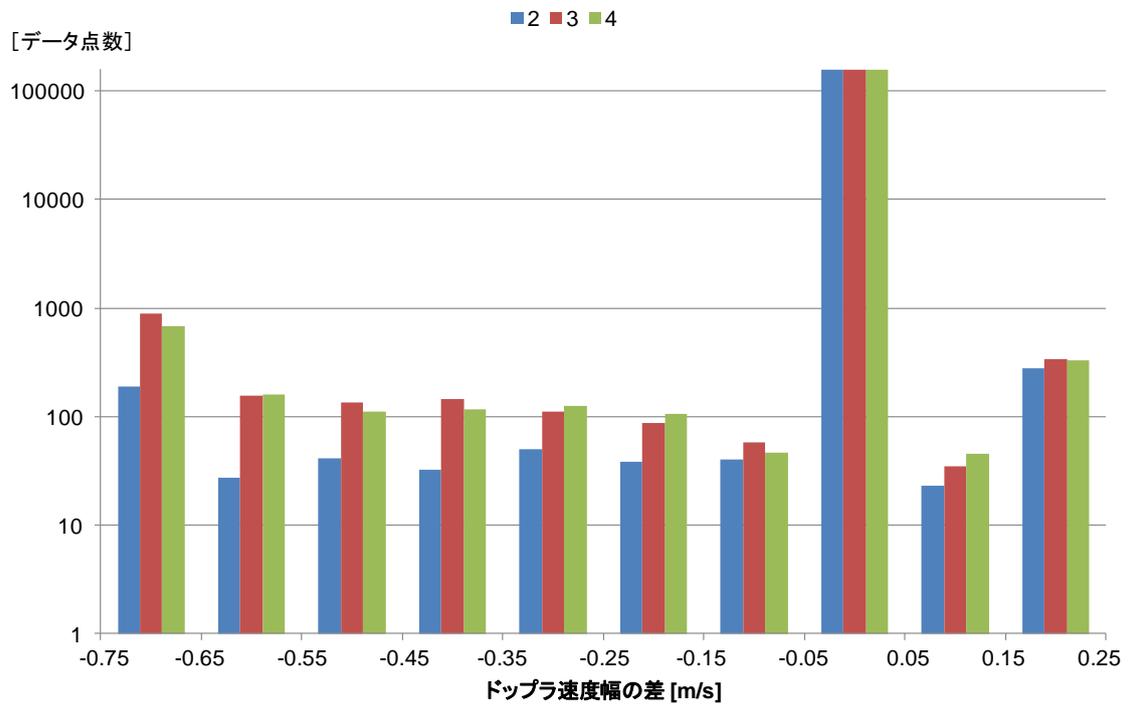
このような懸念を評価するため、干渉源の無い状態で複数回のデータ収録を行い、基準画像との差を評価した。結果を 5.3.1.3-図 159 から 5.3.1.3-図 161 に示す。完全に同一画像であれば中央区間のみデータが存在するが、実際は中央区間以外にも懸念した分布が見られる。しかし、中央区間に対して降雨強度差では 3 桁弱、ドップラ速度差では 4 桁程度、ドップラ速度幅の差では 3 桁程度少ないデータ点数であり、評価に値する程度の誤差であるといえる。



5.3.1.3-図 159 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 mm/h、縦軸 : 対数)



5.3.1.3-図 160 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 m/s、縦軸 : 対数)

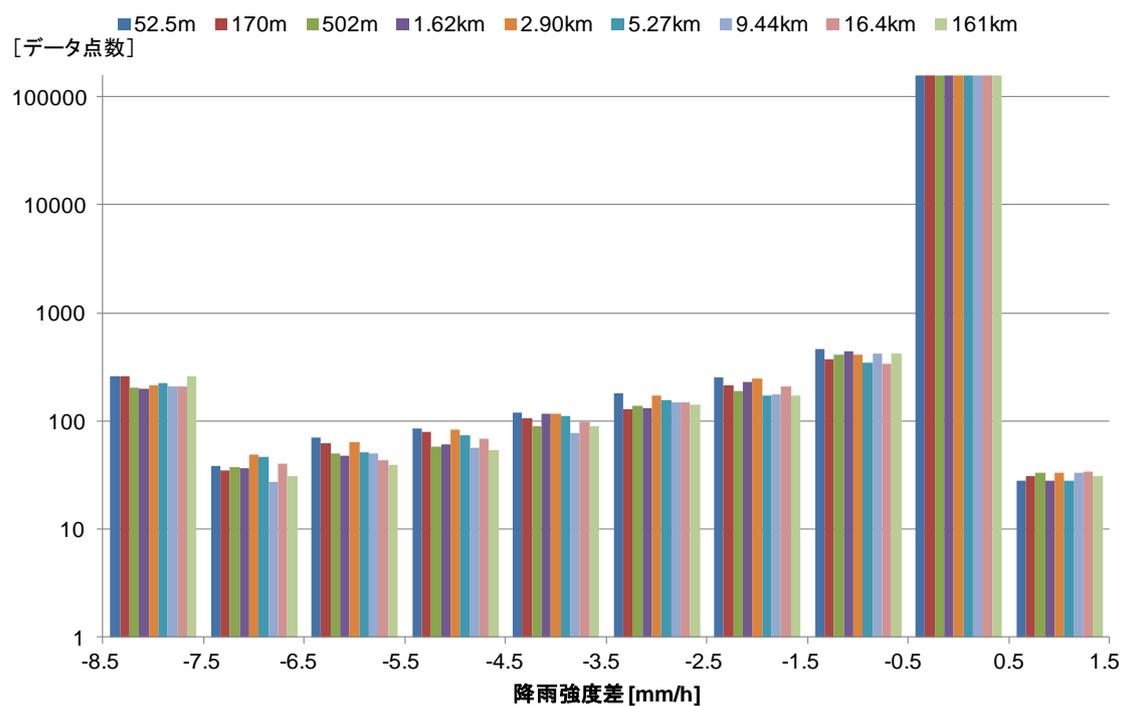


5.3.1.3-図 161 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 m/s、縦軸 : 対数)

(1) 降雨強度差の評価

正対停止で干渉除去を ON とした場合の各測定結果から与干渉機が無い状態 (5.3.1.3-図 157) を減じた後、離隔距離別に降雨強度差のヒストグラムを作成した。つまり、完全に基準画像と一致した場合の理想状態は、全てのデータが 0 mm/h へ集まる。

データ量の少ない区間を詳細に見るため、縦軸を対数として微小値を拡大したものを 5.3.1.3-図 162 に示す。

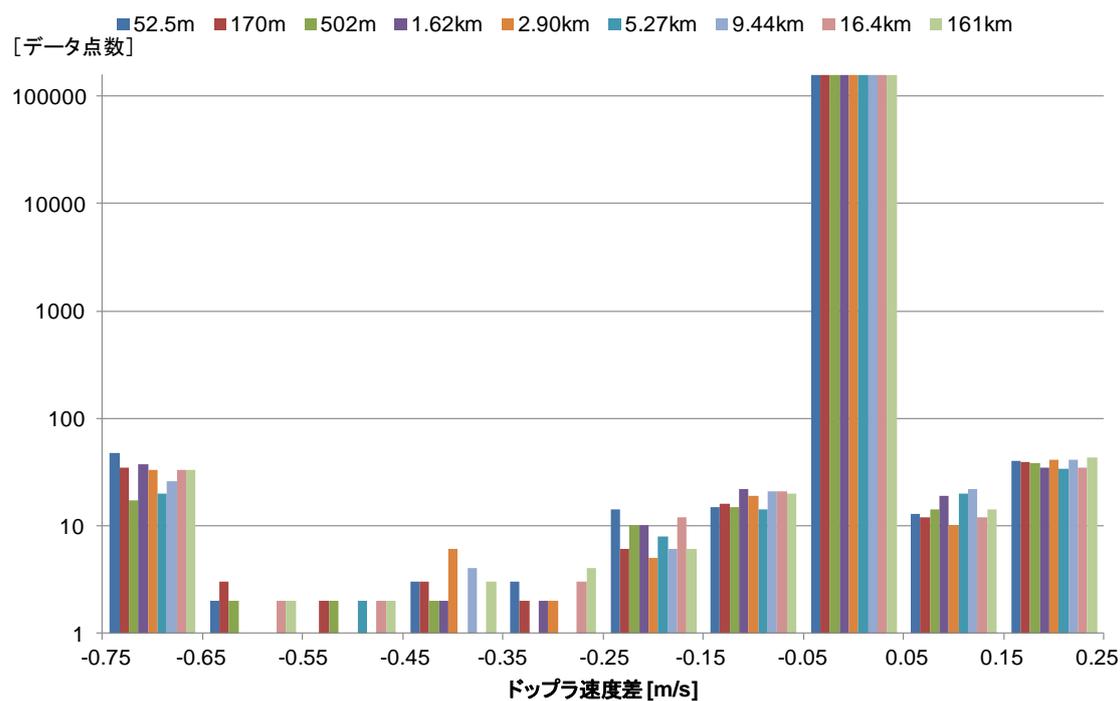


5.3.1.3-図 162 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 mm/h、縦軸 : 対数)

(2) ドップラ速度差の評価

正対停止で干渉除去を ON とした場合の各測定結果から与干渉機が無い状態 (5.3.1.3-図 157) を減じた後、離隔距離別にドップラ速度差のヒストグラムを作成した。つまり、完全に基準画像と一致した場合の理想状態は、全てのデータが 0 m/s へ集まる。

データ量の少ない区間を詳細に見るため、縦軸を対数として微小値を拡大したものを 5.3.1.3-図 163 に示す。

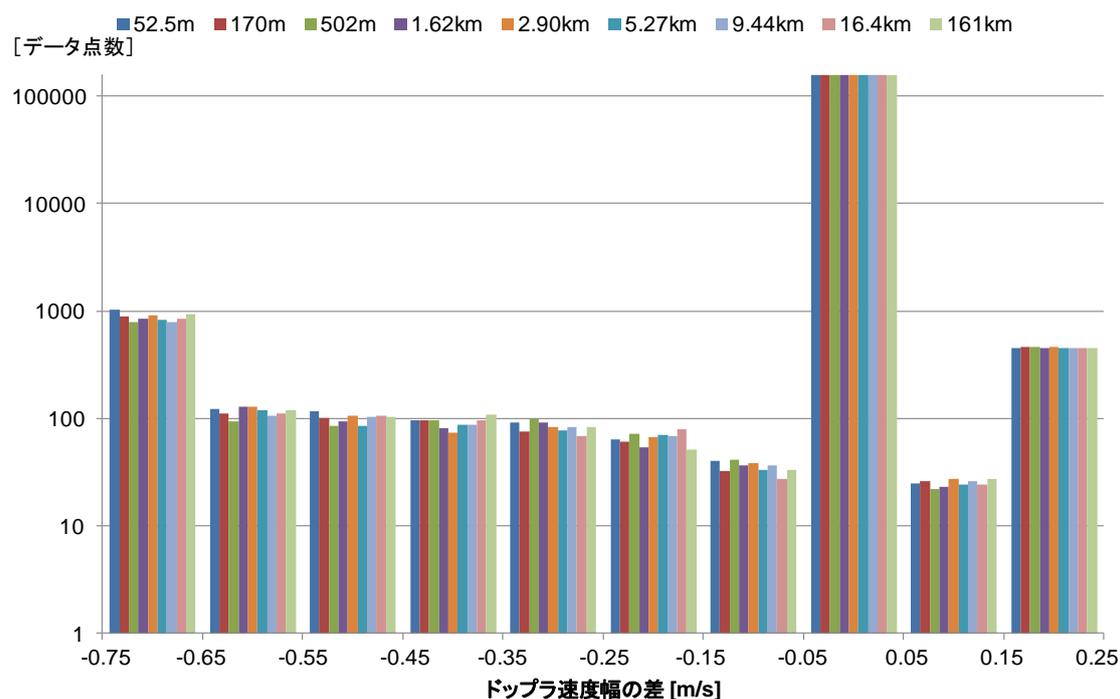


5.3.1.3-図 163 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 m/s、縦軸 : 対数)

(3) ドップラ速度幅の差の評価

正対停止で干渉除去を ON とした場合の各測定結果から与干渉機が無い状態 (5.3.1.3-図 157) を減じた後、離隔距離別にドップラ速度幅の差のヒストグラムを作成した。つまり、完全に基準画像と一致した場合の理想状態は、全てのデータが 0 m/s へ集まる。

データ量の少ない区間を詳細に見るため、縦軸を対数として微小値を拡大したものを 5.3.1.3-図 164 に示す。



5.3.1.3-図 164 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 m/s、縦軸 : 対数)

5.3.2 実証試験2（小型気象用レーダーと船舶用レーダーの干渉状況）

5.3.2.1 実証試験2の概要

小型気象用レーダーと船舶用レーダーの干渉状況について実証試験を行った。

基本的には実証試験1と同様であり、片方を船舶用レーダーに置換して試験を行った。試験機の設置状況を5.3.2.1-図165、5.3.2.1-図166に示す。

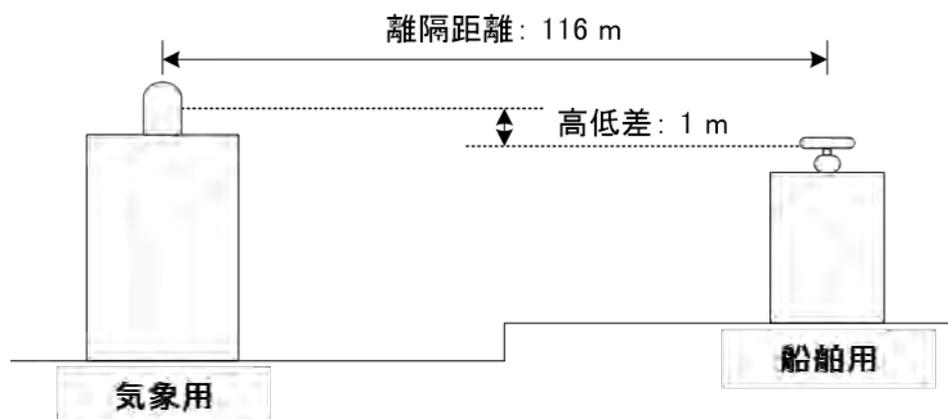


5.3.2.1-図 165 気象用設置状況



5.3.2.1-図 166 船舶用設置状況

両試験機の位置関係は実証試験1と同様である（5.3.2.1-図167）。駐車場内に段差があり、空中線相互の総合的な高低差は約1mであった。これは空中線の指向角に換算して 0.49° であり、小型気象用レーダーの空中線の半値角 1.5° 、船舶用レーダーの空中線の半値角 12° に対して十分小さいといえる。また、小型気象用レーダーの空中線の直径が0.75m、船舶用レーダーの空中線の長辺が1.20mであるので、遠方界の基準距離は90.4mとなり、116mは評価に十分な離隔距離である。



5.3.2.1-図 167 試験機の相互位置関係

5.3.2.2 実証試験 2 の結果

船舶用レーダーの周波数を実測し、小型気象用レーダーの周波数をこれにできるだけ近付ける。また、小型気象用レーダーの空中線を船舶用に正対させて停止させるという条件において、離隔距離を変化させた場合の干渉状況変化を示す。なお、離隔距離はメインローブ 対 サイドローブで評価する。

この中でも最も短距離設定の場合を 5.3.2.2-図 168、この状態で干渉除去機能を ON にした場合を 5.3.2.2-図 169 に示す。状況が緩和される他状況については干渉除去機能を OFF にした状態のみを 5.3.2.2-図 170 から 5.3.2.2-図 176 に示す。離隔距離が増加するに従って干渉の強度・頻度が低下していくが、概ね 15 km を超えると差が無くなっていくことが分かる。これは、減衰量が大きくなりすぎたために空中線以外（外部引き出し部分の同軸ケーブル等）からの放射等、他要因が支配的となっているのだと考えられる。つまり、少なくとも 5 km 程度までは十分に離隔距離を模擬出来ていると考えて良い。

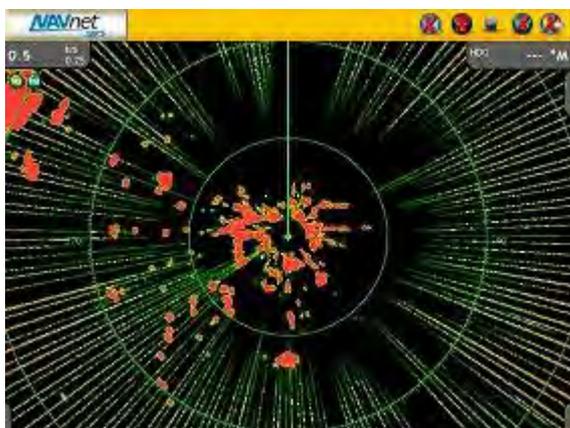
与干渉機（気象用）：9415 MHz、正対停止、被干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



5.3.2.2-図 168 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 169 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON

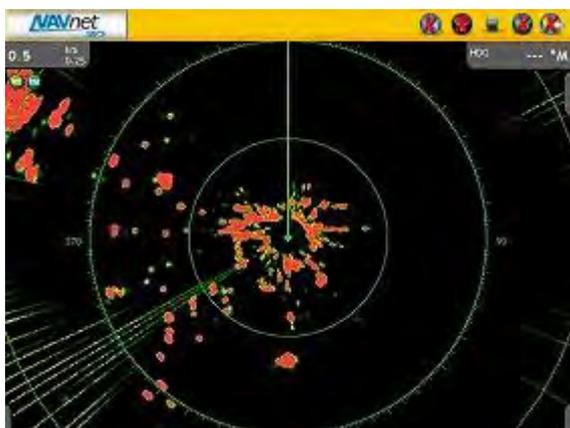


5.3.2.2-図 170 離隔距離：170 m



5.3.2.2-図 171 離隔距離：502 m

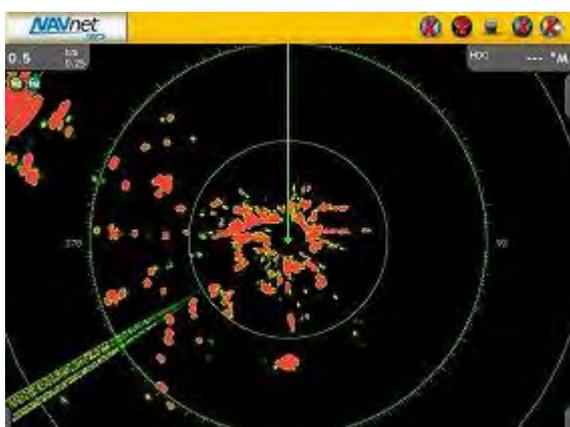
与干涉機（气象用）：9415 MHz、正対停止、被干涉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



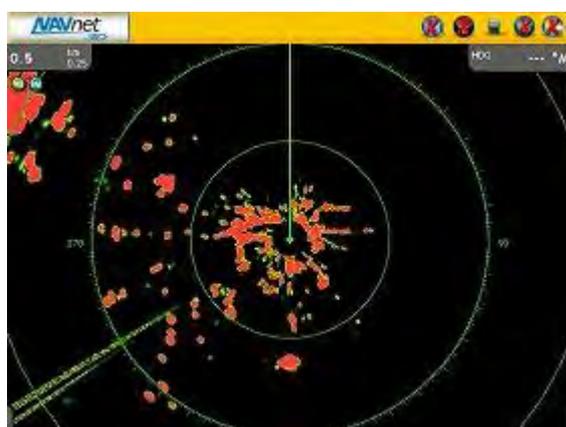
5.3.2.2-図 172 離隔距離：1.62 km



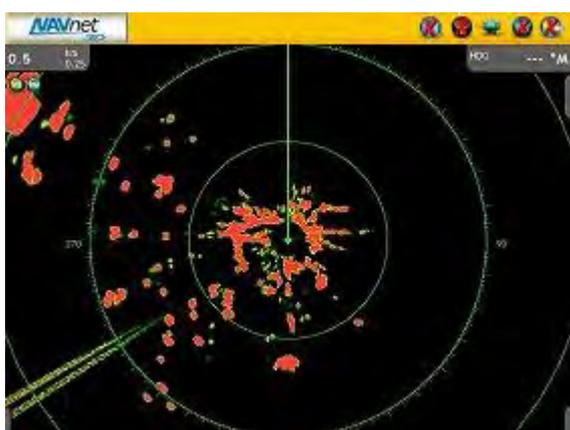
5.3.2.2-図 173 離隔距離：5.27 km



5.3.2.2-図 174 離隔距離：16.4 km



5.3.2.2-図 175 離隔距離：53.1 km



5.3.2.2-図 176 離隔距離：161 km

同条件において、表示距離レンジを 32 km とした場合を 5.3.2.2-図 177 から 5.3.2.2-図 185 に示す。

なお、0.5 km レンジの場合と比べて全体的に干渉が増加しているように見えるのは、STC (Sensitivity Time Control) と呼ばれる機能の効果である。これは、表示範囲内での物標反射波に対する感度を均等にする目的で、近距離ほど受信機の感度を低下させるという機能であり、概ね数 km 程度まで効果が及ぶ。そのため、0.5 km レンジでは全体的に感度が低下しているが、32 km レンジでは中心付近のみに効果が及んでいるため、このような差異が生じる。

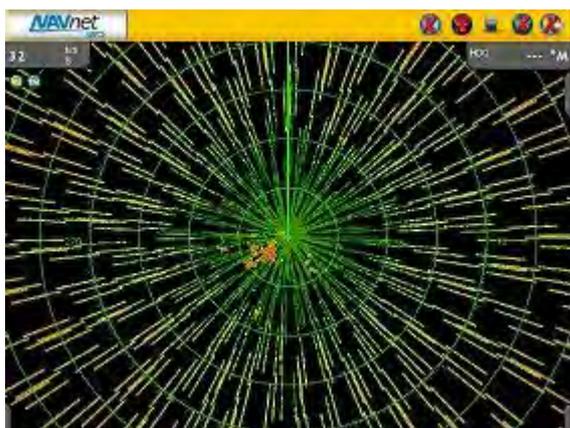
与干渉機 (気象用) : 9415 MHz、正対停止、被干渉機 (船舶用) : 9414.38 MHz、PPI



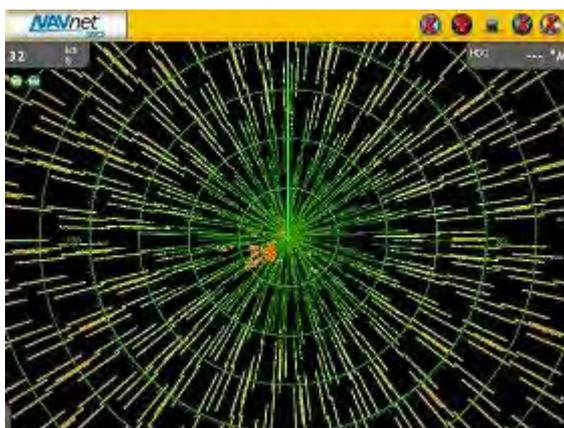
5.3.2.2-図 177 離隔距離 : 52.5 m
干渉除去機能 : OFF



5.3.2.2-図 178 離隔距離 : 52.5 m
干渉除去機能 : ON



5.3.2.2-図 179 離隔距離 : 170 m

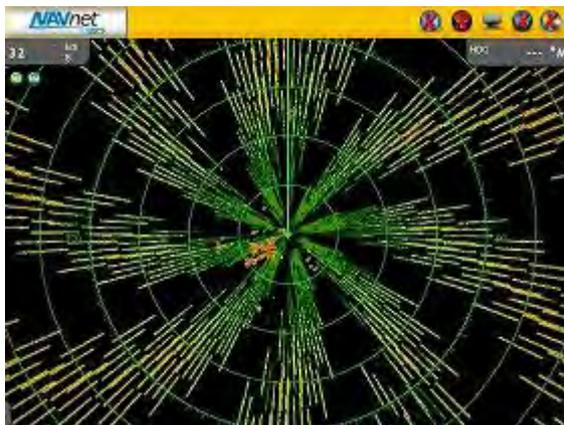


5.3.2.2-図 180 離隔距離 : 502 m

与干涉機（气象用）：9415 MHz、正对停止、被干涉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



5.3.2.2-図 181 離隔距離：1.62 km



5.3.2.2-図 182 離隔距離：5.27 km



5.3.2.2-図 183 離隔距離：16.4 km



5.3.2.2-図 184 離隔距離：53.1 km



5.3.2.2-図 185 離隔距離：161 km

(1) 空中線走査方法の変化に伴う干渉状況の変化

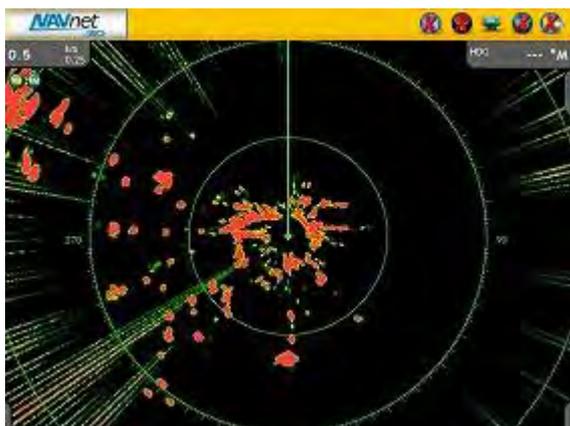
前項では、与干渉機である気象用の空中線を正対停止するという、通常運用時には生じない条件での検証を行った。本章では、現実的に起こり得る条件として、与干渉機・被干渉機双方が仰角零度で水平回転している場合(PPI)の結果を示す。

気象用レーダーの実運用では、随時仰角を変更しての三次元走査が主流である。また、大地反射を除去するために空中線の利得半値角以上の仰角のみを使用するのが通常状態であるため、本章で示す条件となるのは稀であると考えられる。

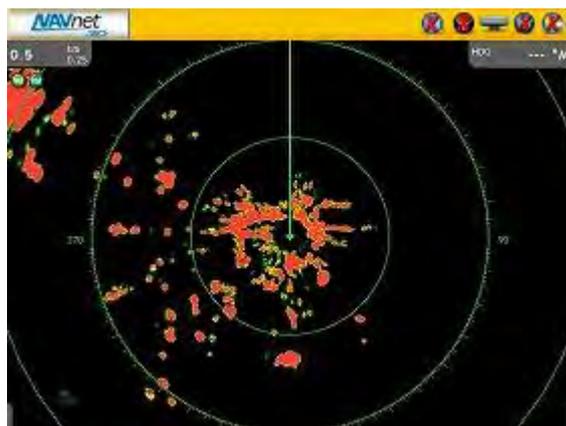
(A) 与干渉機：小型気象用レーダー、被干渉機：船舶用レーダーの場合

離隔距離が最も小さい場合を 5.3.2.2-図 186、同条件で干渉除去機能を ON にした場合を 5.3.2.2-図 187 に示す。また、離隔距離を大きくした場合を 5.3.2.2-図 188、5.3.2.2-図 189 にそれぞれ示す。正対停止と比べて、離隔距離がそれぞれ数十倍程度の時と近い状態まで干渉が緩和されていることが分かる。

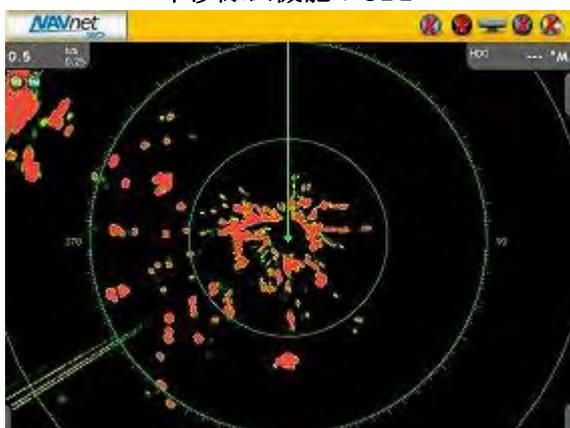
与干渉機（気象用）：9415 MHz、PPI、被干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



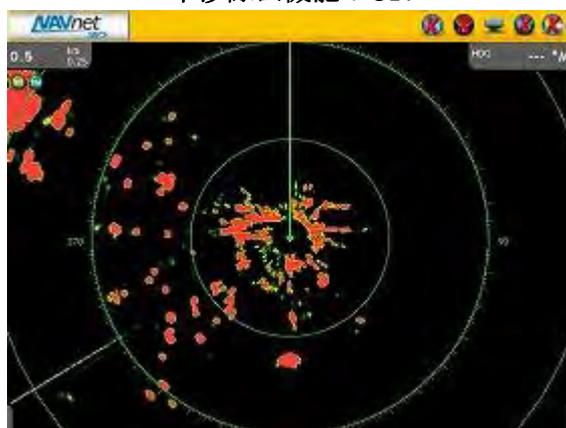
5.3.2.2-図 186 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 187 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.2.2-図 188 離隔距離：5.27 km



5.3.2.2-図 189 離隔距離：161 km

同条件で、表示距離レンジを 32 km とした場合を 5.3.2.2-図 190 から 5.3.2.2-図 193 に示す。

与干渉機（気象用）：9415 MHz、PPI、被干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



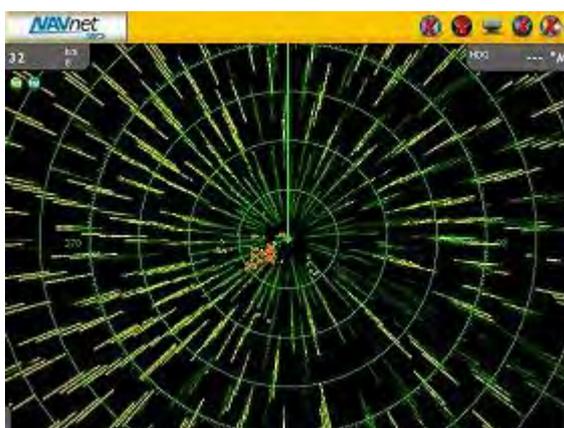
5.3.2.2-図 190 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 191 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.2.2-図 192 離隔距離：5.27 km



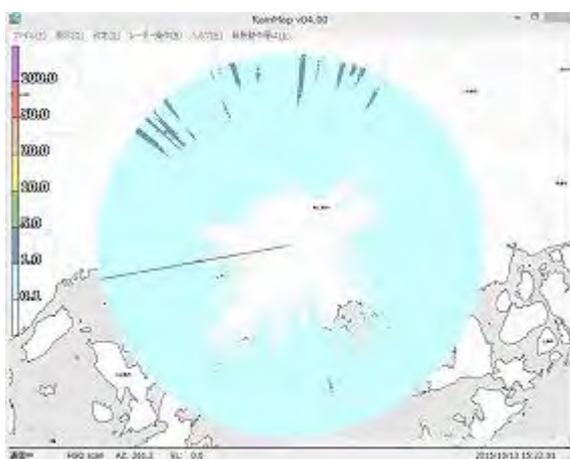
5.3.2.2-図 193 離隔距離：161 km

(B) 与干渉機：船舶用レーダー、被干渉機：小型気象用レーダーの場合

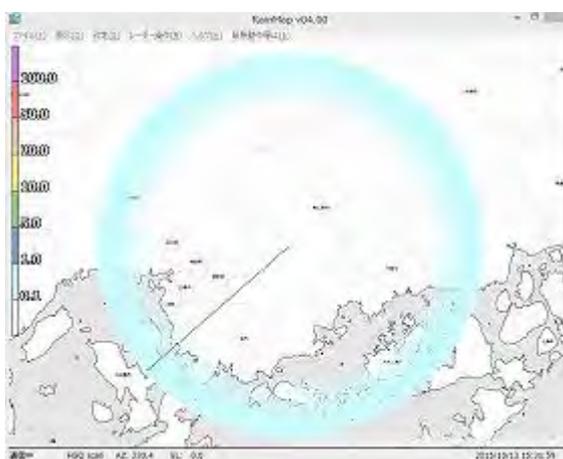
離隔距離が最も小さい場合を 5.3.2.2-図 194、同条件で干渉除去機能を ON にした場合を 5.3.2.2-図 195 に示す。また、離隔距離を大きくした場合を 5.3.2.2-図 196、5.3.2.2-図 197 にそれぞれ示す。

なお、外縁部の水色になっている領域はシステム雑音である。距離を模擬するために受信機へも減衰器を挿入しているため、雑音電力が増加し、このように見えている。

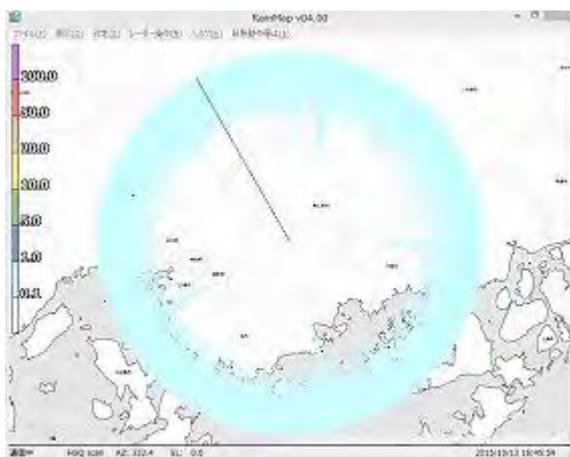
与干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI、被干渉機（気象用）：9415 MHz、PPI



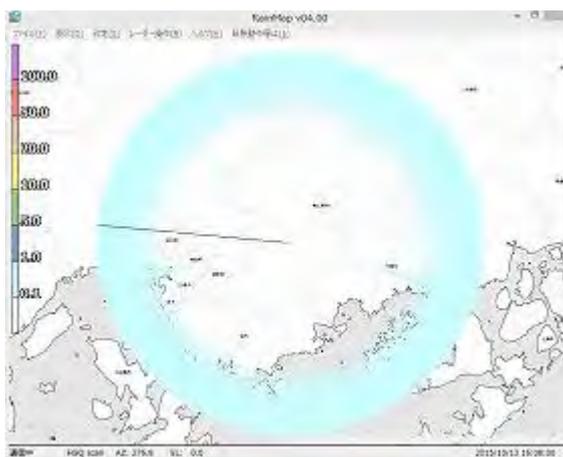
5.3.2.2-図 194 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 195 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.2.2-図 196 離隔距離：5.27 km



5.3.2.2-図 197 離隔距離：161 km

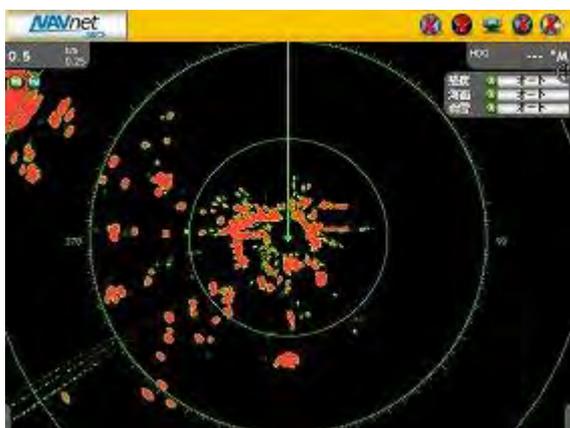
(2) 離隔周波数の増加に伴う干渉状況の変化

船舶用レーダーの周波数は手を加えず、(実測で 9414.38 MHz)、小型気象用レーダーの周波数を通常の 9470 MHz とし、離隔周波数を 55.62 MHz 確保した場合の干渉状況の変化を、各々与干渉機・被干渉機となる場合の双方について示す。

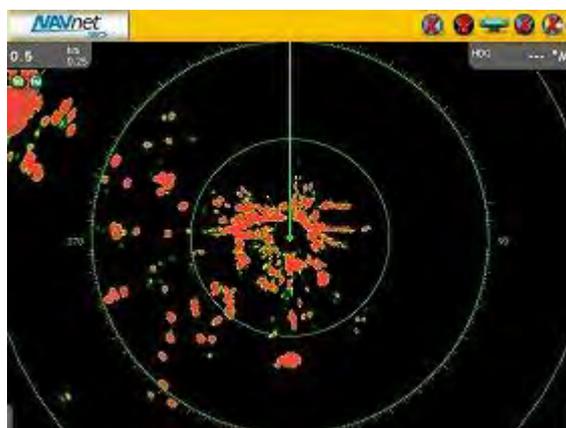
(A) 与干渉機：小型気象用レーダー、被干渉機：船舶用レーダーの場合

結果を 5.3.2.2-図 198 から 5.3.2.2-図 201 に示す。また、502 m とした場合 (5.3.2.2-図 201) には干渉が見えないレベルまで低減していることが分かる。

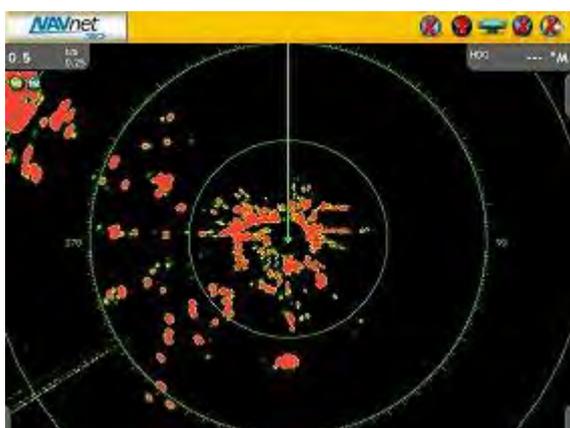
与干渉機 (気象用) : 9470 MHz、正対停止、被干渉機 (船舶用) : 9414.38 MHz、PPI



5.3.2.2-図 198 離隔距離 : 52.5 m
干渉除去機能 : OFF



5.3.2.2-図 199 離隔距離 : 52.5 m
干渉除去機能 : ON



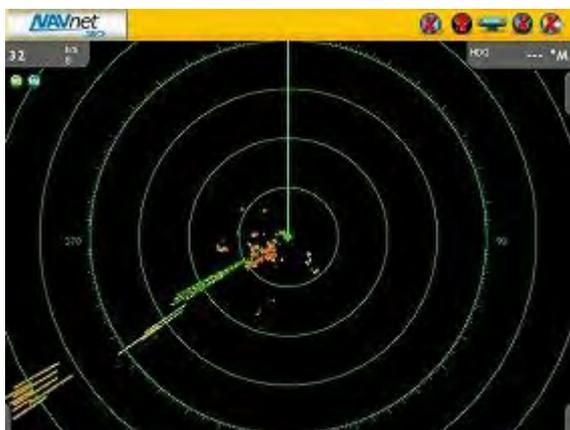
5.3.2.2-図 200 離隔距離 : 170 m



5.3.2.2-図 201 離隔距離 : 502 m

同条件で、表示距離レンジを 32 km とした場合を 5.3.2.2-図 202 から 5.3.2.2-図 205 に示す。

与干渉機（気象用）：9470 MHz、正対停止、被干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



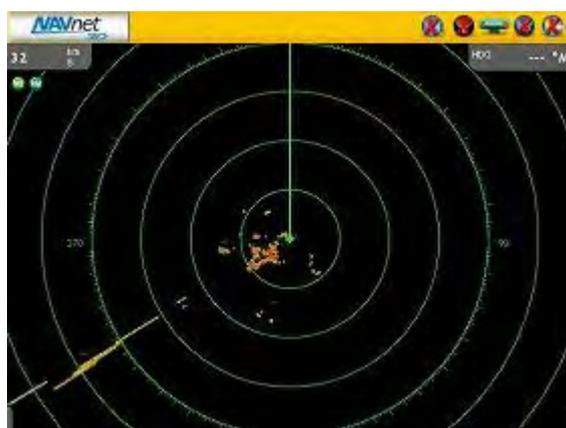
5.3.2.2-図 202 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 203 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON



5.3.2.2-図 204 離隔距離：170 m



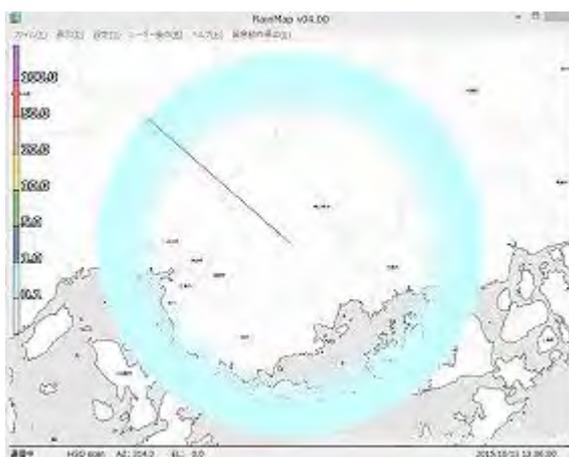
5.3.2.2-図 205 離隔距離：502 m

(B) 与干渉機：船舶用レーダー、被干渉機：小型気象用レーダーの場合

結果を 5.3.2.2-図 206 から 5.3.2.2-図 209 に示す。

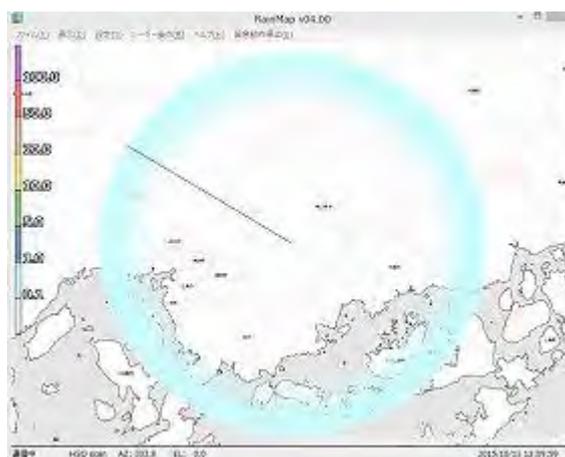
なお、与干渉機の船舶用レーダーはマグネトロン送信機である。

与干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI、被干渉機（気象用）：9470 MHz、PPI



5.3.2.2-図 206 離隔距離：52.5 m

干渉除去機能：OFF



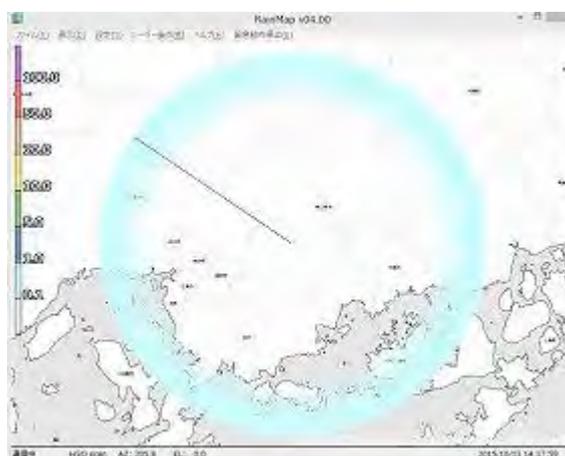
5.3.2.2-図 207 離隔距離：52.5 m

干渉除去機能：ON



5.3.2.2-図 208 離隔距離：170 m

干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 209 離隔距離：170 m

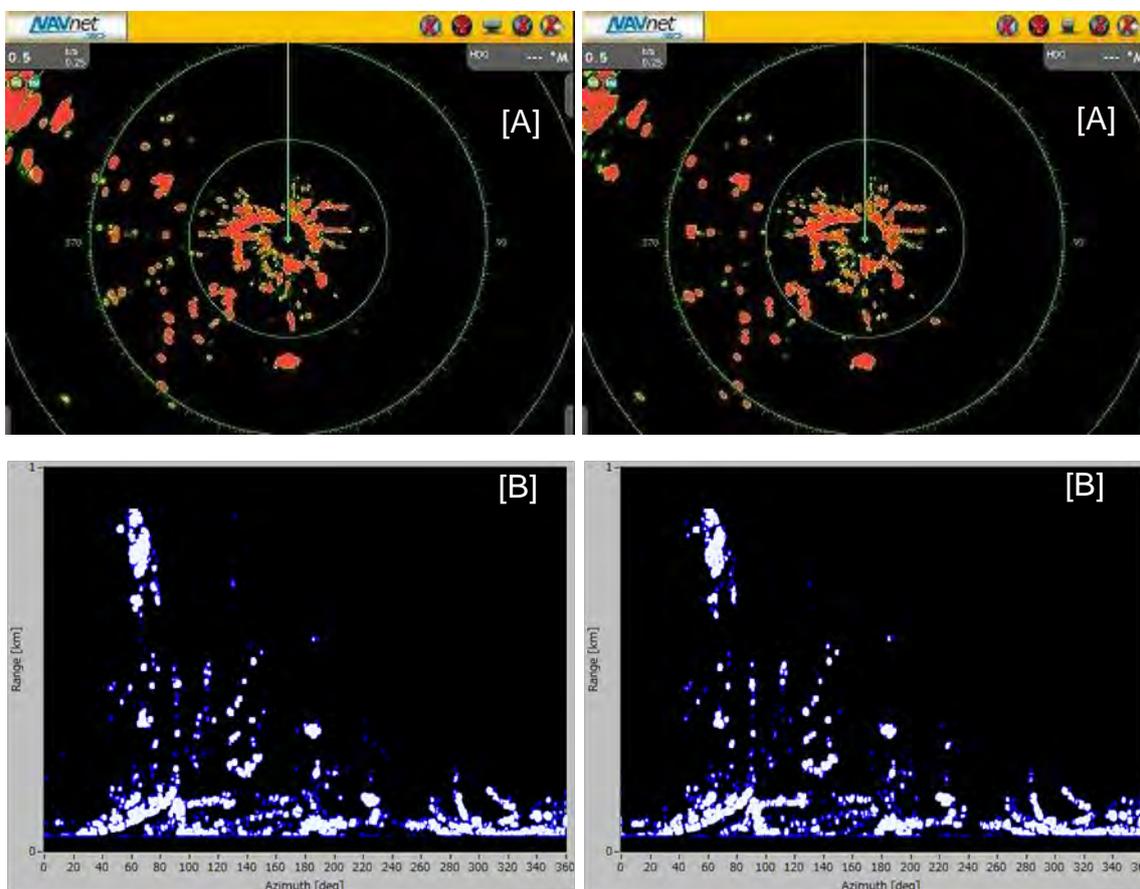
干渉除去機能：ON

5.3.2.3 実証試験2の考察

(1) 与干渉機：小型気象用レーダー、被干渉機：船舶用レーダーの場合

与干渉機が無い場合に、0 dB の設定で干渉除去機能を OFF とした場合の観測結果を 5.3.2.3-図 210、被干渉としては、同一周波数、正対停止、372 m 離隔の条件で干渉除去機能を ON にした結果を 5.3.2.3-図 211 に示す。5.3.2.3-図 211 の状態の理想形が 5.3.2.3-図 210 であり、この乖離度を評価する。なお、各図の[A]は通常用いる極座標表示であるが、[B]は縦軸をレーダーからの距離、横軸を空中線指向角度として表示したものである。

評価方法としては、両者の観測データをデータ点毎に比較し、残すべきもの（陸地）を消さずに干渉のみを消しているかどうかを指標として考察する。



5.3.2.3-図 210 与干渉機無し
干渉除去機能：OFF

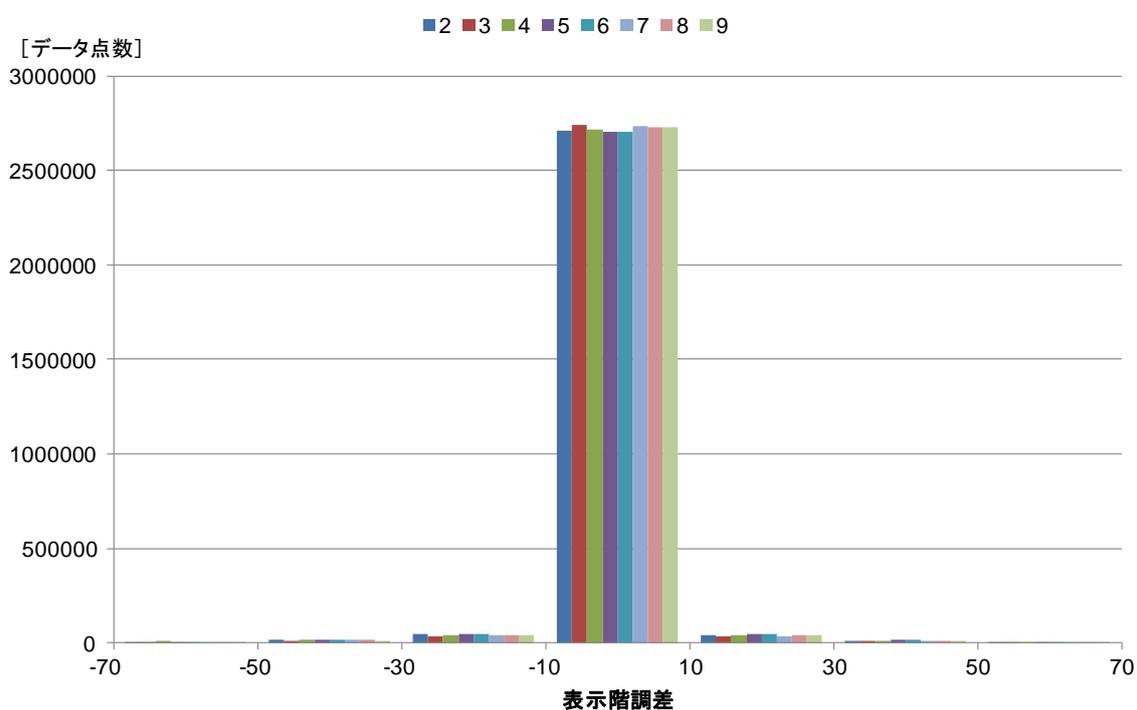
5.3.2.3-図 211 干渉強度最高状態
干渉除去機能：ON

まず、評価系の安定性について考察を行う。本実験系では送受信タイミングと空中線の指向角度は厳密に言えば非同期であり、各周における同一スイープでも同一方向とは限らず、多少の誤差が生じると考えられる。また、実際に空間へ電波を放射しているため、同

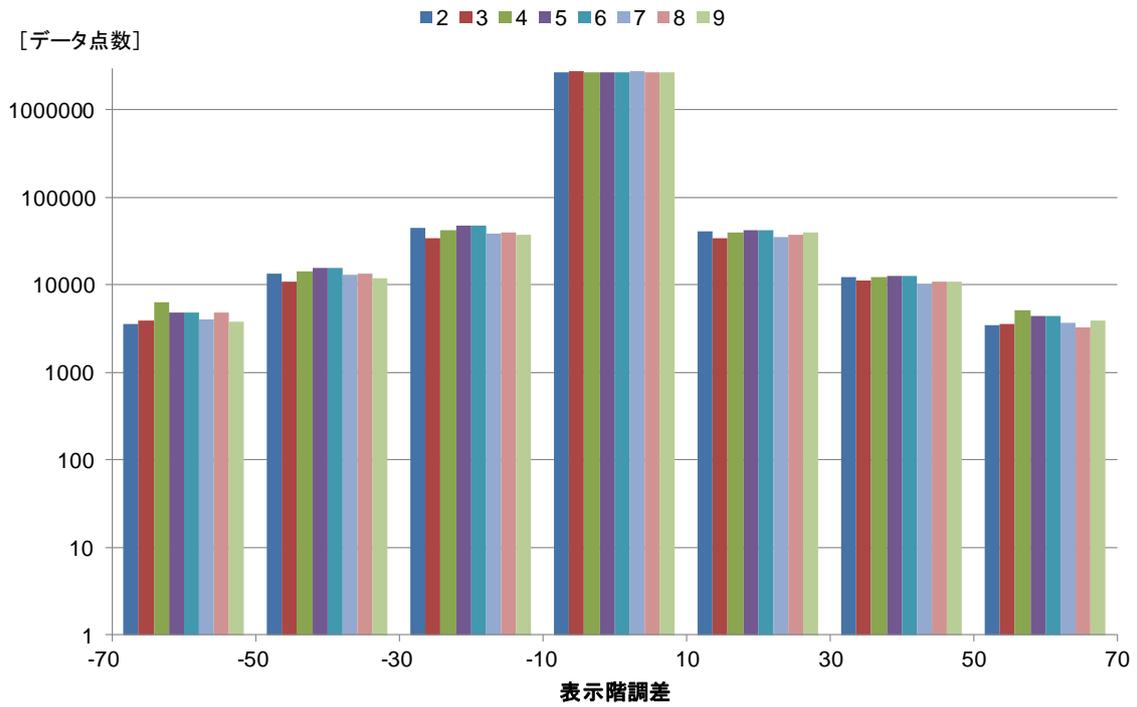
じ物体であっても必ずしも同強度で反射波を観測できるとは限らず、さらに、航空機等の移動物体が映り込んでしまうことも考えられ、これらが誤差要因となる。

このような懸念を評価するため、干渉源の無い状態で複数回のデータ収録を行い、基準画像との差を評価した。結果を 5.3.2.3-図 212 から 5.3.2.3-図 215 に示す。完全に同一画像であれば中央区間のみデータが存在するが、実際は中央区間以外にも懸念した分布が見られる。しかし、中央区間に対して 0.5 km レンジでは 2 桁程度、32 km レンジでは 3 桁弱少ないデータ点数であり、評価に値する程度の誤差であるといえる。

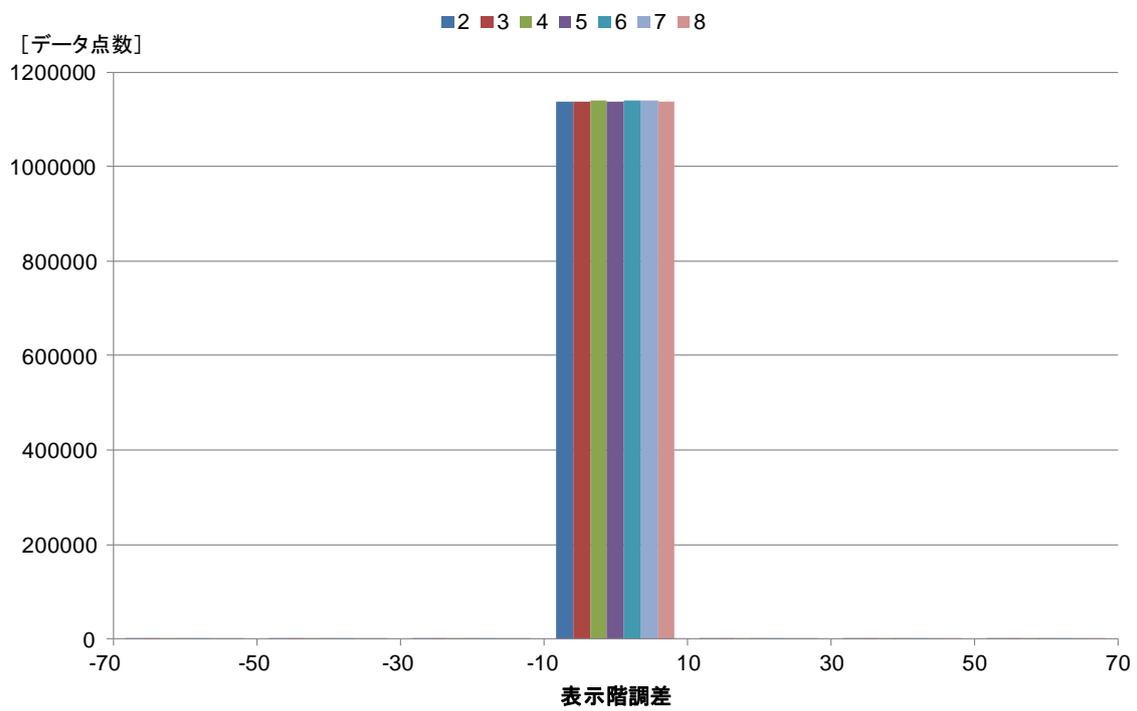
なお、横軸は表示機の表示階調であり、値域は-63~+63 である。



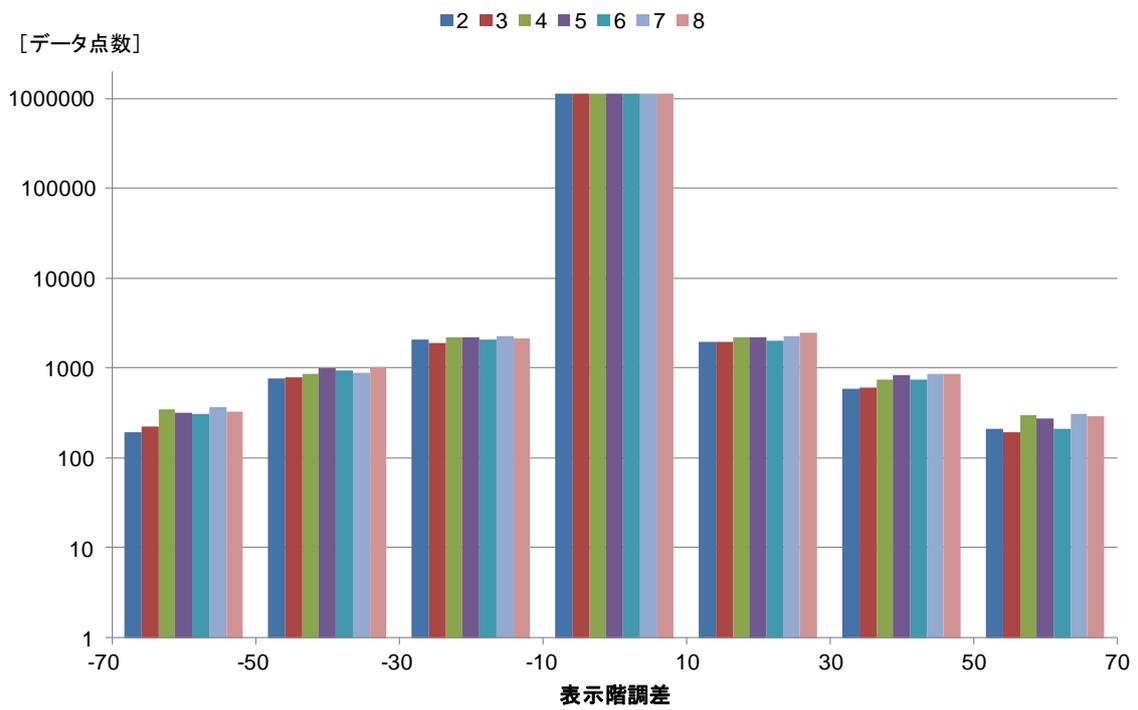
5.3.2.3-図 212 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 線形、0.5 km レンジ)



5.3.2.3-図 213 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 対数、0.5 km レンジ)



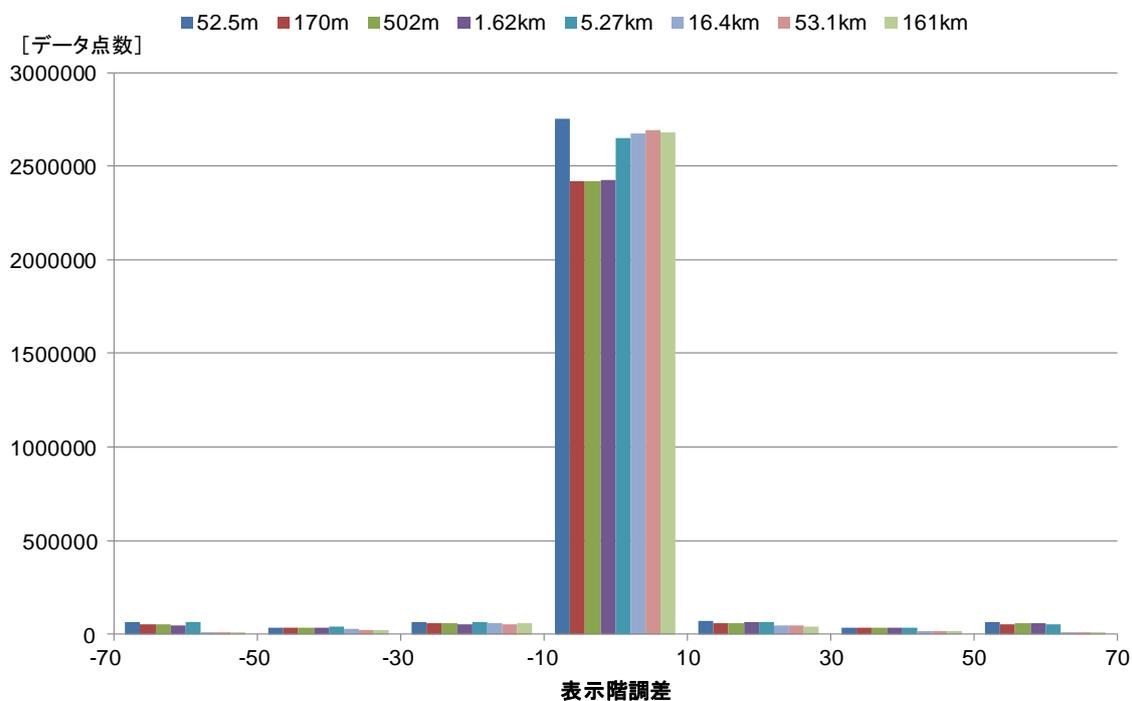
5.3.2.3-図 214 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 線形、32 km レンジ)



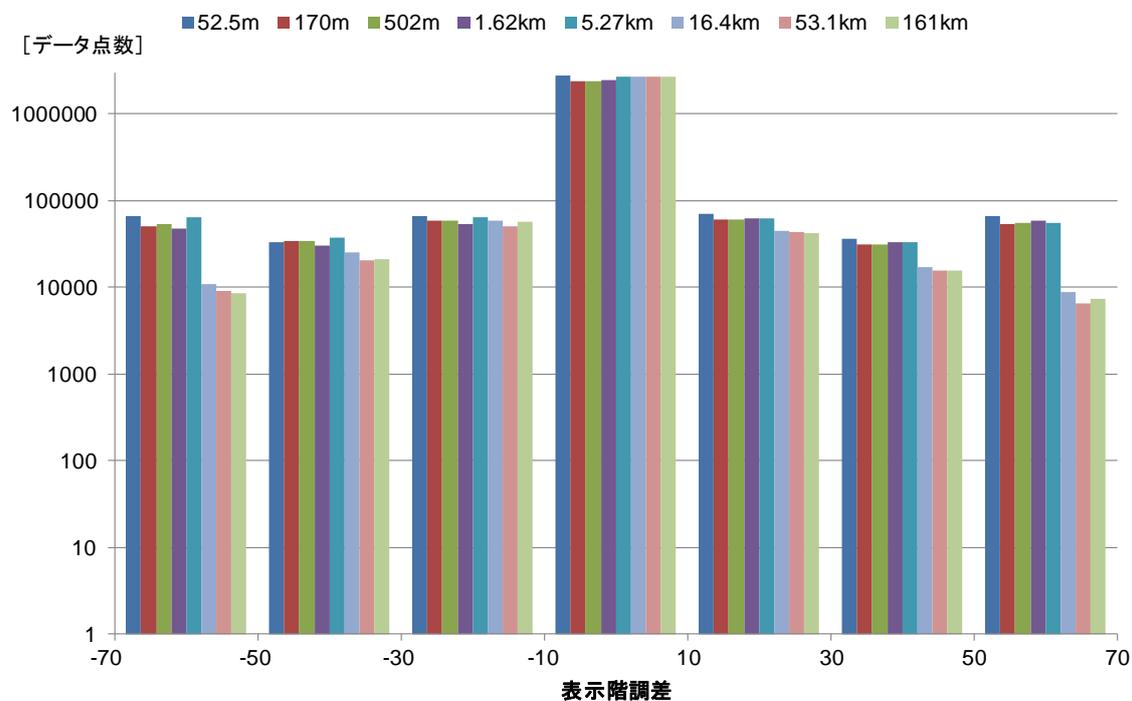
5.3.2.3-図 215 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 対数、32 km レンジ)

次に、実際の観測結果を評価する。

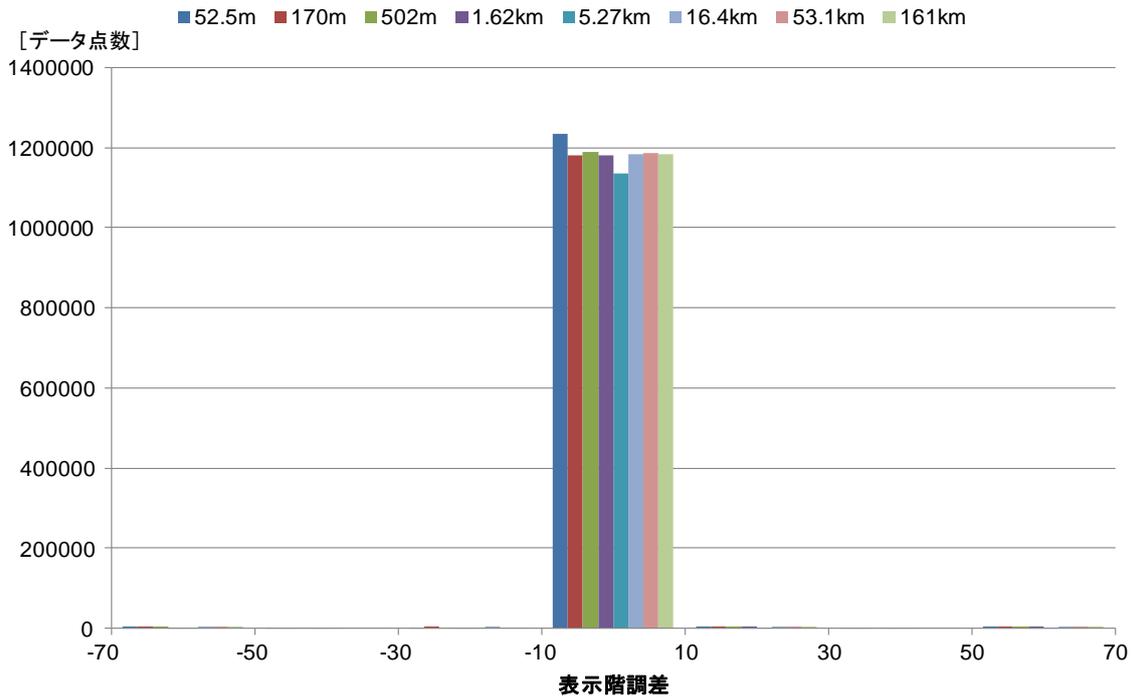
与干渉機（小型気象用レーダー）の空中線を正対停止させた状態で送信電力を低減していき、離隔距離の増加を模擬した場合について、干渉除去後のデータと基準画像の差をヒストグラムで表したものを 5.3.2.3-図 216 から 5.3.2.3-図 219 に示す。



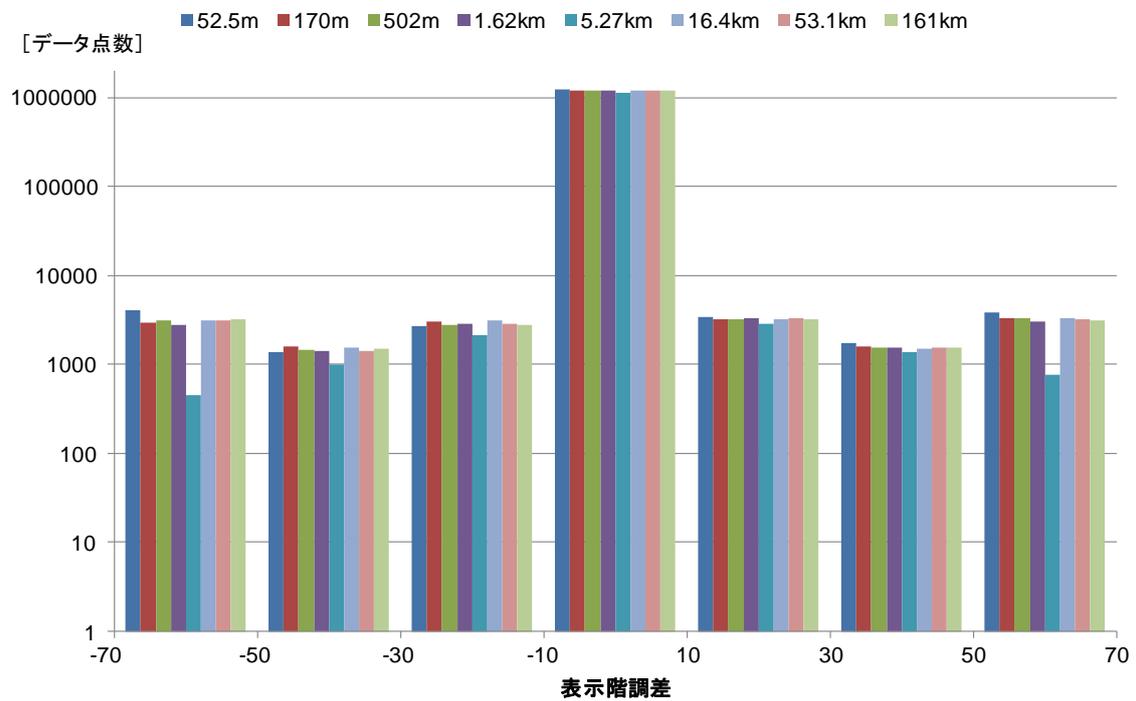
5.3.2.3-図 216 基準画像との差のヒストグラム（理想値：0、縦軸：線形、0.5 km レンジ）



5.3.2.3-図 217 基準画像との差のヒストグラム（理想値：0、縦軸：対数、0.5 km レンジ）



5.3.2.3-図 218 基準画像との差のヒストグラム (理想値: 0、縦軸: 線形、32 km レンジ)



5.3.2.3-図 219 基準画像との差のヒストグラム (理想値: 0、縦軸: 対数、32 km レンジ)

(2) 与干渉機：船舶用レーダー、被干渉機：小型気象用レーダーの場合

小型気象用レーダーが被干渉機となる場合については、本章では、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について検討を行ってきた。ただし、マルチパラメータレーダーのような、偏波間の特性差を解析するような高度なレーダーでは干渉の影響が異なってくる。そのため、本章の検討は限定的であり、高度なレーダーに適用する場合には更なる検討が必要となる。

5.3.3 実証試験3（小型気象用レーダーと航空機用レーダーの干渉状況）

5.3.3.1 実証試験3の概要

小型気象用レーダーと航空機用レーダーの相互干渉について実証試験を行った。

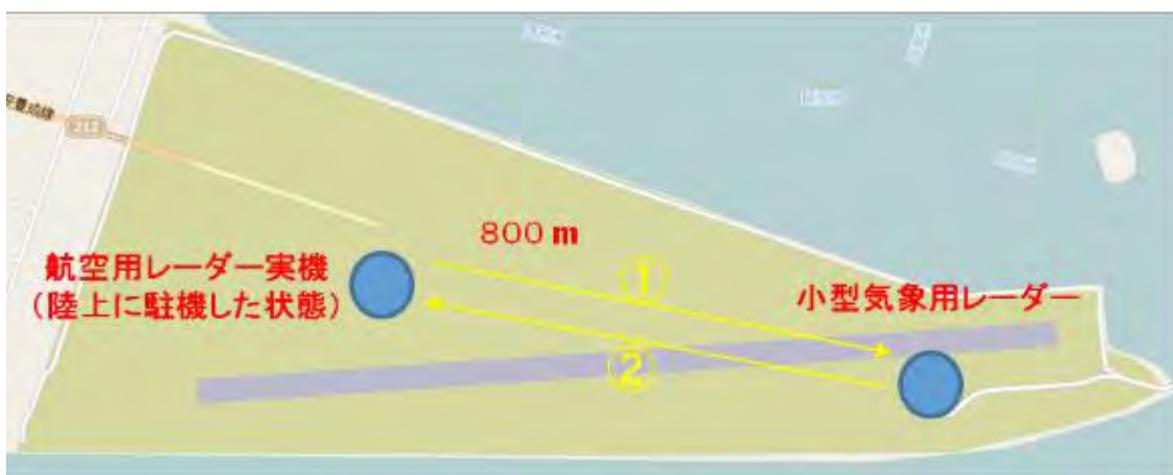
小型気象用レーダーはトラックの屋根に設置し、航空機用レーダーは航空機搭載状態を保ったまま、陸上に駐機している状態で試験を行った。試験時の設置状況を 5.3.3.1-図 220、5.3.3.1-図 221 に示す。航空機用レーダーは機首部分に搭載されているため、小型気象用レーダーの方へ機首を向けた状態で試験を実施した。配置図を 5.3.3.1-図 222 に示す。



5.3.3.1-図 220 小型気象用レーダー
設置状況



5.3.3.1-図 221 航空機用レーダー設置状況



5.3.3.1-図 222 岡南飛行場配置図（OpenStreetMap より）

5.3.3.2 実証試験3の結果

(1) 与干渉機：小型気象用レーダー、被干渉機：航空機用レーダー

与干渉機を小型気象用レーダー、被干渉機を航空機用レーダーとした場合の評価結果を示す。小型気象用レーダーについては仰角 0° で定常回転させ、航空機用レーダーは仰角 0° で往復走査を行った。ただし、小型気象用レーダーの無線局免許条件は、北を 0° として、 285° から 90° (0° を含む)の区間は送信禁止であったため、これに従って実験を行った。

今回用いた航空機用レーダー (Honeywell 社製 WU-650) は 1.3 kW のマグネトロンレーダーであり、周波数の時間変化が見られたため、試験条件を変更する度にスペクトラムアナライザで送信周波数を実測し、小型気象用レーダーの周波数をそれに極力近づけた状態で実験を行った。離隔距離は、メインローブ 対 サイドローブで評価する (5.2.2-表 26 参照)。

(A) 離隔距離の評価

次に、離隔周波数を 0 MHz とした場合の離隔距離を検討する。5 NM レンジにおいて、無干渉状態を 5.3.3.2-図 223、干渉を与えながら離隔距離を変化させた結果を 5.3.3.2-図 224 から 5.3.3.2-図 227 に示す。同様に、300 NM レンジにおいて無干渉状態を 5.3.3.2-図 228、離隔距離の変化を 5.3.3.2-図 229 から 5.3.3.2-図 232 に示す。



5.3.3.2-図 223 無干渉状態



5.3.3.2-図 224 離隔距離：137 m



5.3.3.2-图 225 離隔距離：363 m



5.3.3.2-图 226 離隔距離：3.46 km



5.3.3.2-图 227 離隔距離：36.3 km



5.3.3.2-図 228 無干渉状態



5.3.3.2-図 229 離隔距離 : 137 m



5.3.3.2-図 230 離隔距離 : 363 m



5.3.3.2-図 231 離隔距離 : 3.46 km



5.3.3.2-図 232 離隔距離 : 36.3 km

(B) 離隔周波数の評価

5 NM レンジにおいて、離隔距離を 137 m、離隔周波数を 0 MHz とした時（同周波数運用）の結果を 5.3.3.2-図 224、離隔周波数を 2.5 MHz としたときの結果を 5.3.3.2-図 233 に示す。



5.3.3.2-図 224 5 NM レンジ、
同周波数運用 (再掲)



5.3.3.2-図 233 5 NM レンジ、
離隔周波数 2.5 MHz

また、同条件において 300 NM レンジで観測した結果を、5.3.3.2-図 229 及び 5.3.3.2-図 234 に示す。これは最大レンジであり、感度としては最大になる。いくつかの小さな輝点が見られるが、これが干渉波である。表示レンジが拡大したことで干渉波の占有面積は低下している。



5.3.3.2-図 229 300 NM レンジ、
同周波数運用 (再掲)

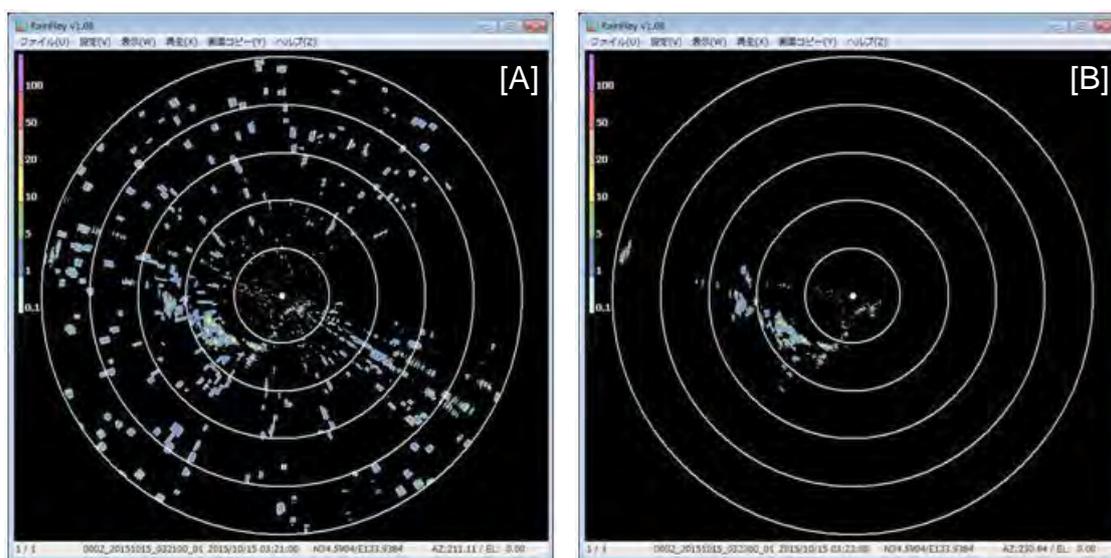


5.3.3.2-図 234 300 NM レンジ、
離隔周波数 2.5 MHz

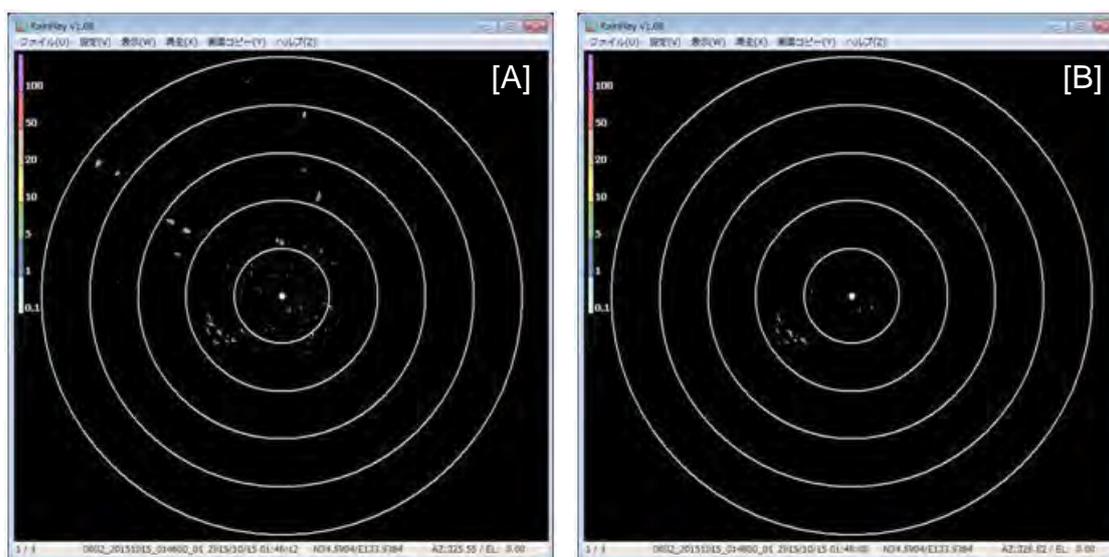
(2) 与干渉機：航空機用レーダー、被干渉機：小型気象用レーダー

次に、与干渉機を航空機用レーダー、被干渉機を小型気象用レーダーとして評価した結果を示す。

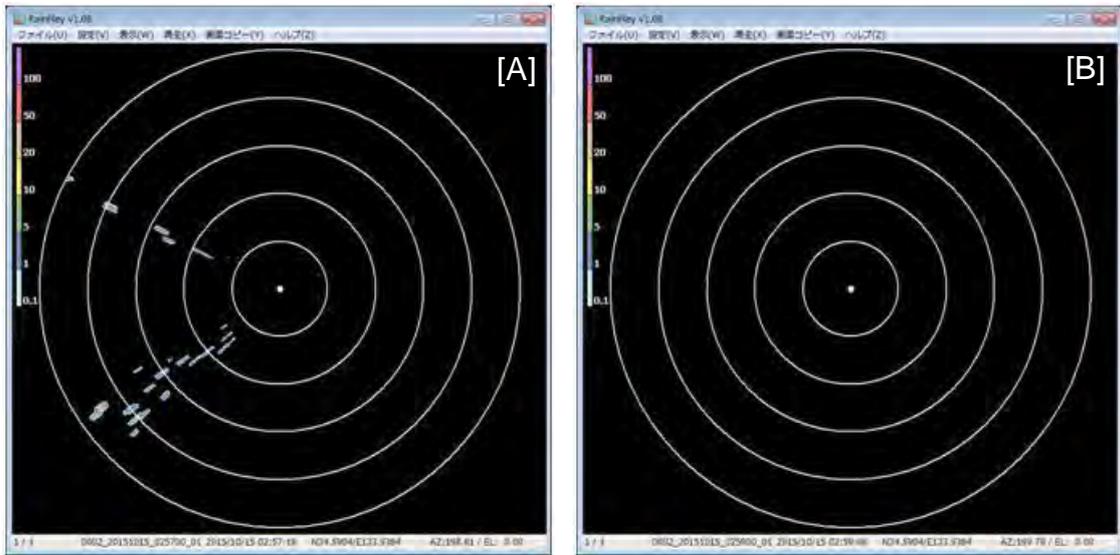
与干渉機を最小レンジである 5 NM に設定した時の結果を 5.3.3.2-図 235 から 5.3.3.2-図 238、最大レンジである 300 NM に設定した時の結果を 5.3.3.2-図 239 から 5.3.3.2-図 242 に示す。いずれも、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON である。



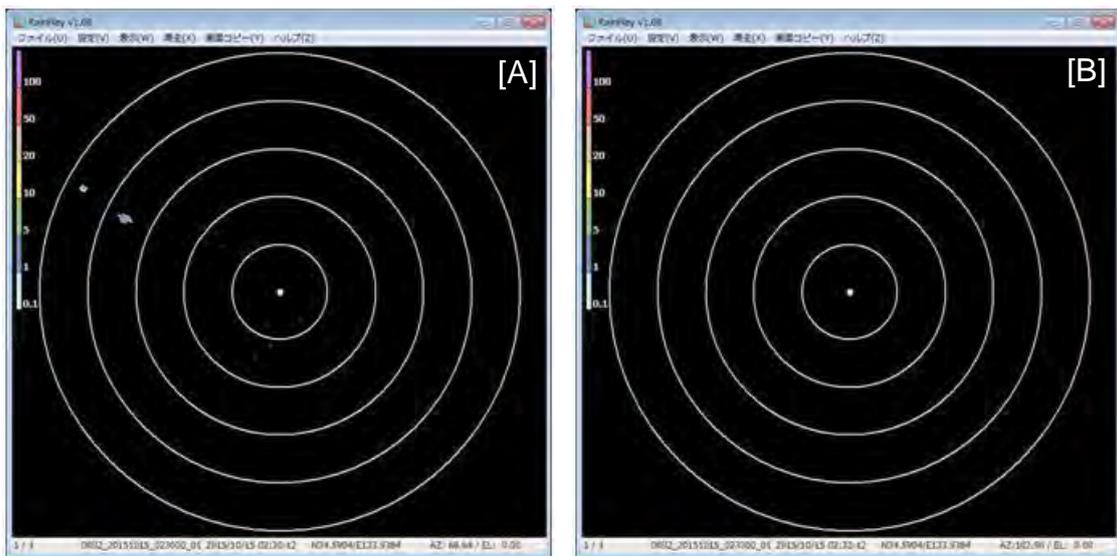
5.3.3.2-図 235 与干渉機：5 NM レンジ、離隔距離：137 m



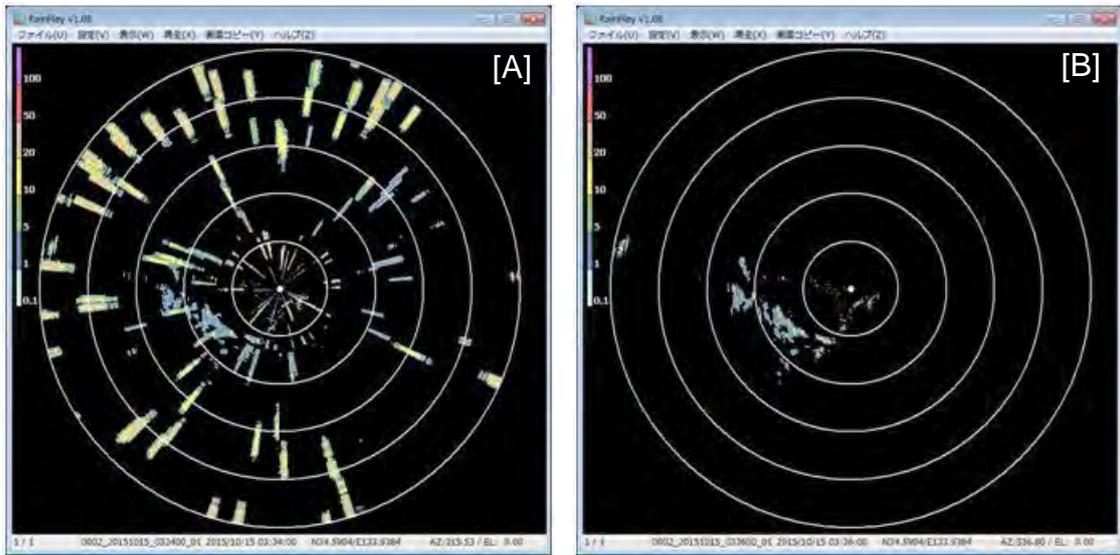
5.3.3.2-図 236 与干渉機：5 NM レンジ、離隔距離：363 m



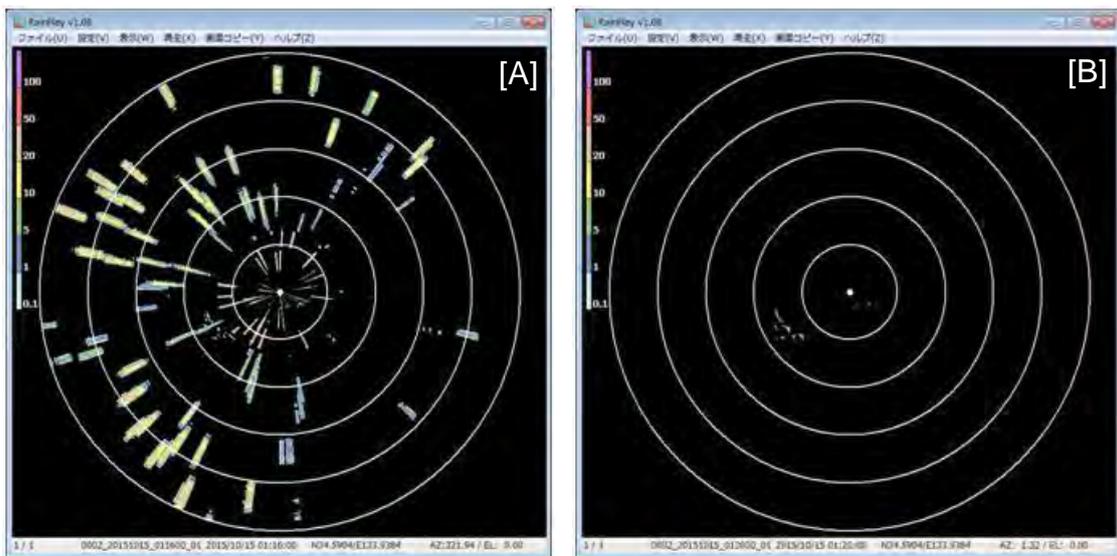
5.3.3.2-図 237 与干渉機 : 5 NM レンジ、離隔距離 : 3.46 km



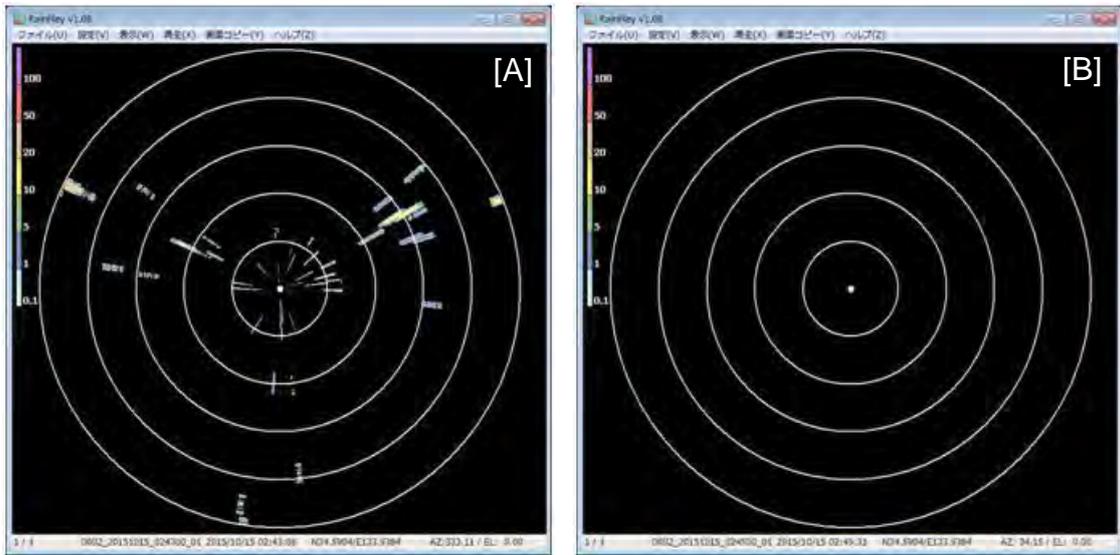
5.3.3.2-図 238 与干渉機 : 5 NM レンジ、離隔距離 : 36.3 km



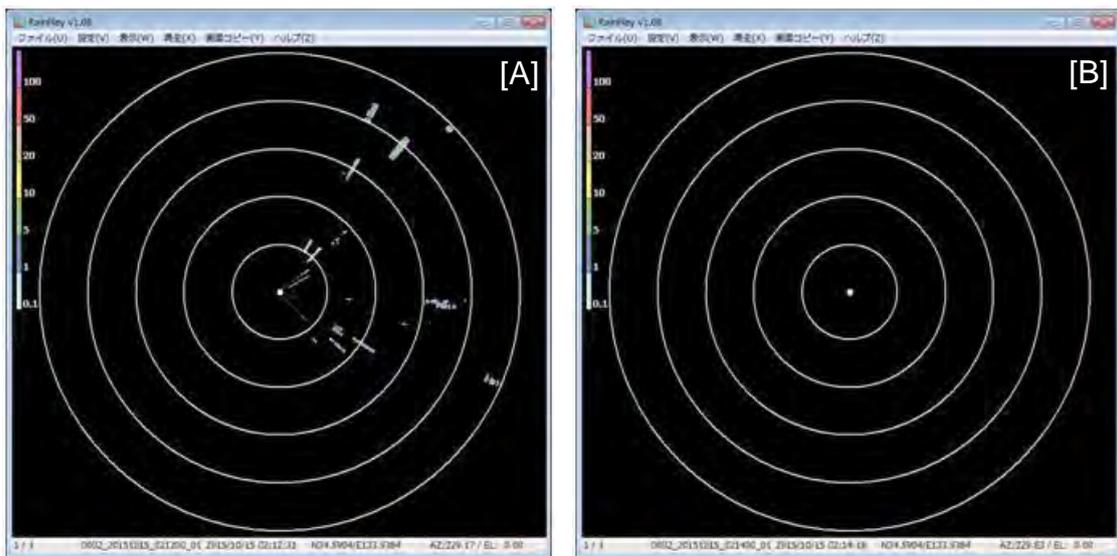
5.3.3.2-図 239 与干渉機 : 300 NM レンジ、離隔距離 : 137 m



5.3.3.2-図 240 与干渉機 : 300 NM レンジ、離隔距離 : 363 m



5.3.3.2-図 241 与干渉機 : 300 NM レンジ、離隔距離 : 3.46 km



5.3.3.2-図 242 与干渉機 : 300 NM レンジ、離隔距離 : 36.3 km

5.3.3.3 実証試験3の考察

今回試験に用いた航空機用レーダーには、干渉除去機能が搭載されていない。また、改造を行うことができないため、画面表示の定性的評価しか行うことができない。

小型気象用レーダーは同一の諸元で送信し、航空機用レーダーは最小レンジ(5 NM)、最大レンジ(300 NM)の2状態で試験を行ったが、画面に表示される干渉波の様相は大きく異なった。この理由としては、1画素あたりの担当する距離が60倍違うため、同じ長さの干渉波でも60倍異なって見えるためである。

今回使用した50 μ s のパルスは、航空機用レーダー上では4 NM の長さで表示される。つまり、5 NM レンジでは距離方向に対して80%、300 NM レンジでは1.3%を占めることとなり、後者では疎らな点としてしか現れない。

また、小型気象用レーダーが被干渉機となる場合については、本章では、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について検討を行ってきた。ただし、マルチパラメータレーダーのような、偏波間の特性差を解析するような高度なレーダーでは干渉の影響が異なってくる。そのため、本章の検討は限定的であり、高度なレーダーに適用する場合には更なる検討が必要となる。

5.3.4 実証試験4（小型気象用レーダーの運用実力値検証）

5.3.4.1 実証試験4の概要

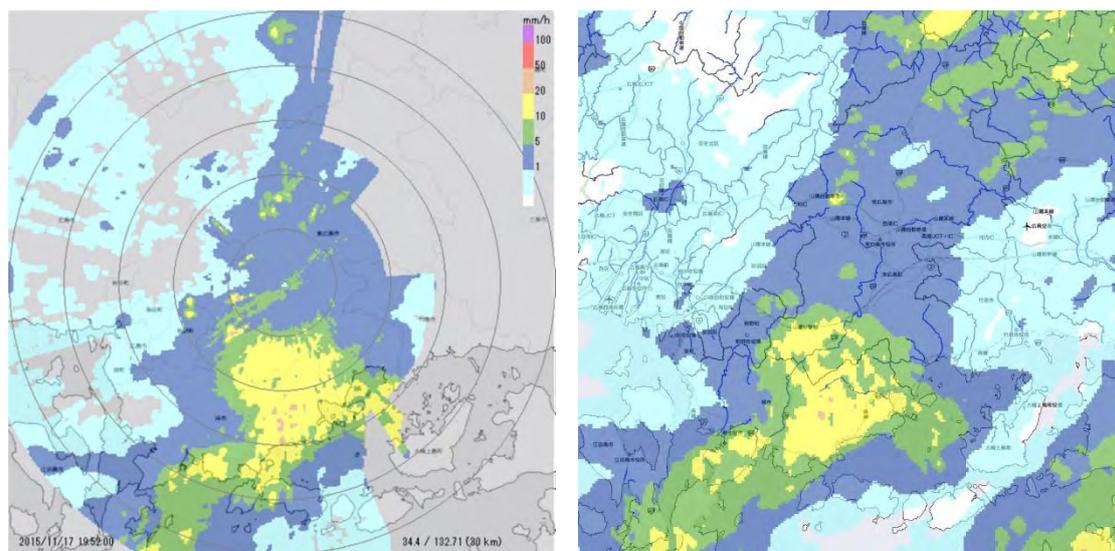
小型気象用レーダーを実際に運用し、その能力を評価する。国立大学法人 広島大学の校舎屋上へ設置（5.3.4.1-図 243）して運用してデータを収録する。この収録したデータを、国土交通省の XRAIN の観測結果及び、気象庁のアメダスと比較することによって評価する。



5.3.4.1-図 243 実証試験機設置状況

5.3.4.2 実証試験4の結果

両者の観測結果を同範囲で比較したものを 5.3.4.2-図 244 に示す。小型気象用レーダーは1台での観測結果、XRAINは2台の観測結果を合成した結果である。東側は建築物や地形の遮へいにより観測できていないが、西側については概ね、雨域を定性的に評価できていることが分かる。

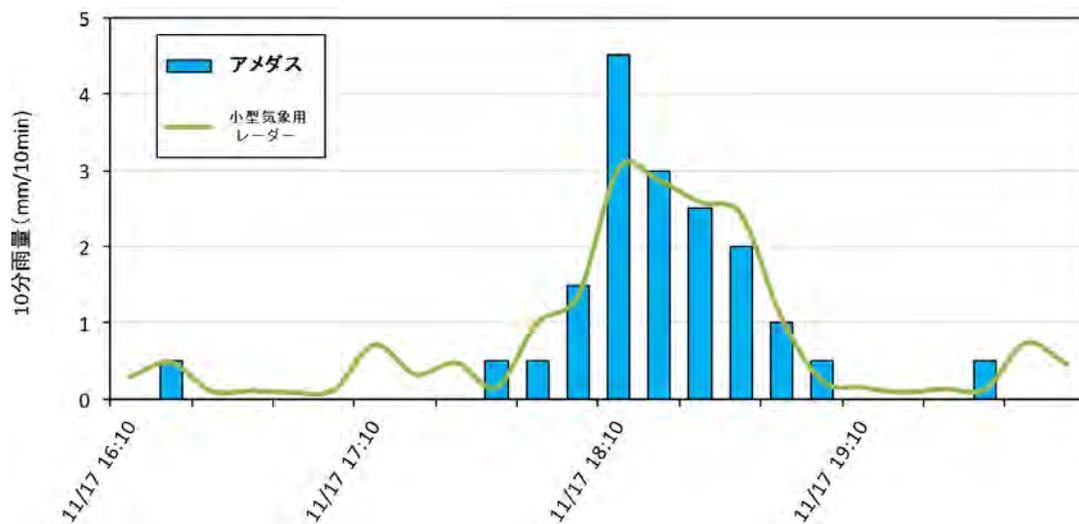


小型気象用レーダー

XRAIN (2台合成)

5.3.4.2-図 244 2015年11月17日 19:52の観測結果

また、気象庁のアメダス観測結果との比較を 5.3.4.2-図 245 に示す。10分値を用いて10分間雨量で比較しているが、4 mm/10 min すなわち 24 mm/h を超える強雨については過小評価しているものの、20 mm/h 以下の降雨については概ね変化を捉えられていることが分かる。



5.3.4.2-図 245 アメダス（東広島）との比較

5.3.4.3 実証試験 4 の考察

本検討で使用した小型気象用レーダーは、XRAIN と比較した場合にはその仕様差から、本質的な感度差や分解能差が生じる。5.3.4.2 章の結果を比較すると多少の差異が見られるが、比較対象である XRAIN は 2 台を合成した結果であり、雨域の分布を観測するという気象レーダーの使命としては、ある一定の成果を得られており、気象レーダーとして使用可能といえる。

第6章 小型気象用レーダーの実現に向けた技術的条件の検討

6.1 小型気象用レーダーに求められる技術的条件

9.7 GHz 帯の気象レーダーを参考とし、9.4 GHz 帯で求められる技術的条件の検討を行う。

本検討で想定している小型気象用レーダーは 9.7 GHz 帯の気象レーダーの補完が大きな目的であるため、本検討では観測距離を半分に設定する。

A 社製 9.7 GHz 帯の気象レーダーの代表的な仕様と、これを基にした小型気象用レーダー一諸元の計算結果を 6.1-表 27 に示す。

6.1-表 27 諸元の計算結果

	本検討の レーダー	A 社仕様	備考
空中線指向角（半値幅）	2.4°	1.2°	
空中線利得	36 dBi	42 dBi	
最大探知距離 ※1	40 km	80 km	
空中線電力	400 W	400 W	両偏波合計
EIRP	92.0 dBm	98.0 dBm	
最小距離分解能 ※2	58.0 m	150 m	
最大占有周波数帯幅(QON)	4.4 MHz	1.7 MHz	
最大占有周波数帯幅(VON)	4.4 MHz	4.4 MHz	
チャンネル間隔	5.0 MHz	5.0 MHz	

※1 最大探知距離：観測領域までの間に雨域減衰等が無い理想的な状況において、設定した雨量を観測できる限界距離をいう。

※2 最小距離分解能：距離方向に2つの物標が並んだ際、これを2つの物標であると分離して認識できる、物標配置間隔の下限をいう。占有周波数帯幅と反比例関係にある。

以下、計算過程を解説する。

- 最大探知距離が $40 \text{ km} / 80 \text{ km} = 1 / 2$ であるため、この距離において空中線指向角が占める方位方向の距離を同等とすると、指向角は 2 倍となる。つまり、 1.2° に対して 2.4° である。
- 一般に、指向角度比の逆数の 2 乗が利得差となるため、指向角度比が 2 倍なら、利得差は $20 \log_{10}(1/2) = -6.02 \text{ dB}$ となる。つまり、 42 dBi に対して 36 dBi である。
- ここまで算出したパラメータを用いて、半分の距離で同等の感度となる空中線電力を気象レーダー方程式から計算すると、結局は変更点が打ち消しあうため、 400 W となる。

気象レーダー方程式：
$$P_r = \frac{P_t \pi G^2 \lambda^2 \Theta \Phi c \eta}{2^{10} \ln(2) \pi^2 r^2}$$

- 干渉電力で考える場合、結局作用するのは EIRP である。これは、 9.7 GHz 帯気象レーダーの 98.0 dBm に対し、 92.0 dBm と、 6 dB 低い値になる。
- 9.7 GHz 帯気象レーダーの審査基準では、占有周波数帯幅の上限が 4.4 MHz であり、周波数オフセットパルス方式(VON)の場合は、中心周波数からおおむね $\pm 1.25 \text{ MHz}$ オフセットしたところを中心として P0N, Q0N 波をそれぞれ送信することとなっている。これから計算すると、Q0N で使用できる帯域上限は $1.25 \sim 1.90 \text{ MHz}$ 程度となる。これより、 1.7 MHz とする。
 - 上記の周波数分離を行う目的は、パルス間干渉を回避するためである。しかし、最大観測距離を近距離に限った場合には同一周波数での運用が可能になる。このような可能性を排除しないため、パルスオフセット方式を採用するか否かはメーカーが選択できることが望ましい。そのため、本検討では Q0N の占有周波数帯幅上限も、VON と同じ 4.4 MHz とすることを提案する。

ここまでは瞬間的な諸元について論じてきたが、次に、送信中の時間変化について考察する。干渉を論じる上で大きな要素が 2 つ存在し、ひとつはここまで論じてきた瞬間的な干渉電力であり、もうひとつは、干渉の持続時間と時間軸で考えた時の強度変化である。

従来用いられてきたマグネトロンやクライストロンは、高電力（数 kW～数百 kW）の無変調パルス波を短時間（数十 ns～数 μ s）で送信するシステムであった。これに対し、現在普及が進んでおり、本報告でも論じている固体素子レーダーでは、低電力（数十 W～数 kW）で変調パルス波を長時間（概ね 100 μ s 以下）送信するというシステムである。

両者は、このように大きく異なるシステムではあるが、固体素子レーダーが既存の無線システムやサービスへ与える影響を考察し、技術的条件としてまとめる上では、これらの差異を吸収して同列に論じることが必要である。

システム全体として得られる性能を外部仕様の的に考えると、送信電力と空中線利得の積で得られる EIRP が瞬時的な干渉強度を決定し、EIRP と送信時間（パルス幅）の積で得られる送信エネルギーが最大探知距離と干渉エネルギーを決定し、占有周波数帯幅が最小距離分解能と離隔周波数の効果を決定する。そのため、諸元をこの 3 つに集約すれば、電子管を用いたシステムと固体素子を用いたシステムは本質的に等価であり、同列に論じることが可能となる。

6.2 既存システムとの共用条件

9.4 GHz 帯における既存システムで優先度が最高なのは、無線航行業務である。これは、船舶用レーダー（衝突防止用）と航空機用レーダー（気象観測用）に大別できる。

本報告で検討している小型気象用レーダー（無線標定業務）は ITU-R の RR では二番手の優先度であり、無線航行業務へは有害な混信を与えてはならないと規定されている。この観点で、共用条件を検討する。

6.2.1 周波数プラン

小型気象用レーダーに使用する周波数については、優先順位の上位にある船舶用レーダー及び航空機用レーダーに対して有害な混信を与えないように配慮する必要がある。

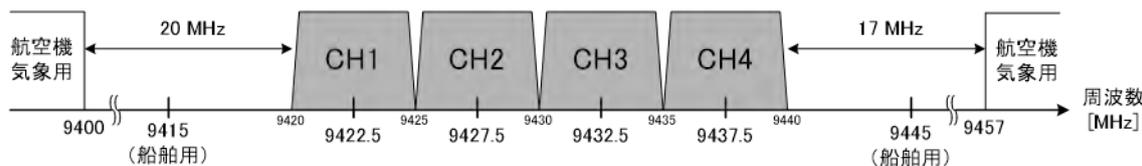
このことを踏まえると、船舶用レーダーは、9.4 GHz 帯のほぼ全域において運用されていることから、運用局数が極力少ない周波数でありかつ、現在運用されている航空機用気象レーダーに対して、十分な周波数離隔が取れる周波数に絞ることが必要となり、これらを満足する周波数は、9420～9440 MHz の範囲（※）となる。

※9420～9440 MHz の下限周波数の近傍では、9375 MHz で航空機用気象レーダー及び船舶用レーダーが、また、9410 MHz 及び 9415 MHz で船舶用レーダーが運用中。一方、上限周波数の近傍では 9445 MHz で船舶用レーダーが運用中。また、9457 MHz 以上で航空機用気象レーダーが運用中。したがって、下限及び上限において、既存レーダーとの間で、それぞれ 5 MHz の周波数離隔が確保される。

この周波数範囲において、上記に示す技術的条件を満足する小型気象用レーダーのための周波数指定の条件案を 6.2.1-表 28 に示す。また、これによるチャンネル配置案と他サービスとの離隔周波数との関係を 6.2.1-図 246 に示す。

6.2.1-表 28 周波数指定の条件案

チャンネル番号	中心周波数 [MHz]	占有周波数帯幅 [MHz]	チャンネル幅 [MHz]	チャンネル間隔 [MHz]
CH1	9422.5	4.4	5.0	5.0
CH2	9427.5	4.4	5.0	5.0
CH3	9432.5	4.4	5.0	5.0
CH4	9437.5	4.4	5.0	5.0



6.2.1-図 246 チャンネル配置案

6.2.2 船舶用レーダーへの干渉

実際に販売されている X 帯の船舶用レーダー（第一種レーダー）の諸元を、6.2.2-表 29 にまとめる。EIRP としては 105.5, 100 dBm、送信エネルギーとしては 42.6, 12.0 W・s となる。なお、占有周波数帯幅についてはいずれもマグネトロンを使用しており、数十 MHz 以上である。

6.2.2-表 29 X 帯の船舶用レーダーの諸元

型式	諸元例 1	諸元例 2
空中線実長 [m]	2.55	2.04
水平面指向角 [deg]	0.95	1.23
垂直面指向角 [deg]	20	20
サイドローブ (±10°未満)	-28 dB 以下	-28 dB 以下
サイドローブ (±10°以上)	-32 dB 以下	-32 dB 以下
空中線利得 [dBi]	31.5	30.0
空中線電力 [kW]	25	10
最大 EIRP [dBm]	105.5	100.0
最大パルス幅 [μs]	1.2	1.2
最大デューティサイクル [%]	0.072	0.072
EIRP・パルス幅積 (最大) [W・s]	42.6	12.0
1 秒間の平均 EIRP [dBm]	74.1	68.6

無線設備規則 第四十八条 2 ニ イには、「レーダーを適正に動作させるために必要な信号以外の信号を受信した場合にあつては、当該信号を抑制する機能を有するものであること。」と規定されている。義務レーダーには、この規定に基づいた干渉除去機能が設けられており、「有害な混信」であっても、この標準搭載機能で軽減又は除去できる。ただし、干渉除去機能の動作により、船舶レーダーの表示器（ディスプレイ）の解像度が低下する場合もあることを考慮すべきである。なお、干渉除去の度合いについては、6.2.2-表 29 の諸元が目安となる。特に、「EIRP・パルス幅積」及び、「1 秒間の平均 EIRP」が干渉の強度と画面占有率を決定する指標となるため、船舶用レーダーの値を超えることは許容されな

いと考える。

また、船舶用レーダーに対しては主としてサイドローブによる干渉が問題となるため、後述する技術的条件によって 17 dB 以上減衰する。ここまで実証してきたように、標準搭載されている干渉除去機能によって除去可能ではあるが、これは、被干渉側での対応であり、共用条件としては被干渉側で了解することが条件となることに留意する必要がある。このほか、不測の事態も想定しておく必要がある。

したがって、干渉エネルギーの上限値としては義務レーダーとして最低限のものを採用し、EIRP・パルス幅積については 12 W・s の 17 dB 増しで 601.4 W・s、1 秒間の平均 EIRP については、68.6 dBm の 17 dB 増しで 85.6 dBm となる。

なお、船舶用レーダーに割り当てられている指定周波数帯の中心周波数は、9375, 9410, 9415, 9445 MHz の 4 種類である。本報告で提示した周波数プランに対しては、上下共に 5 MHz ずつの離隔周波数が得られる (6.2.1-図 246 参照)。

干渉が問題になる場合の対応策として考えられるものを挙げておく。設置状況や被干渉機の状況、与干渉機の設計等によって最適解が異なると考えられるため、このような対策を適宜組み合わせることで実施することにより、効果が得られると考えられる。

- 周波数離隔
 - 与干渉機の運用周波数が分かっている場合には、割当てられるチャンネルの中から、最も干渉の少ないものを選択することによって、干渉エネルギーを低減する。

- 送信方位制限
 - 仰角、水平走査角度を組み合わせた送信禁止領域を設定する。基本的には、被干渉機へメインローブを向けないという対策である。

- サイドローブ抑圧フェンス
 - 送信方位制限は主としてメインローブによる干渉を抑制するものであるため、サイドローブによる干渉に充分対処できない場合が考えられる。この場合、問題となる方向（船舶用レーダーに対しては海面方向）へフェンスを設け、干渉エネルギーを低減することが考えられる。

6.2.3 航空機用レーダーへの干渉

航空機用レーダーについては干渉除去機能の搭載が義務付けられておらず、メーカーの自主対応に留まっている。一部、周波数変更機能を持つものも使用されており、当該機種の場合干渉波と判断した場合には、周波数を切り替えて運用が行われている。

航空機用レーダーは、無線設備規則 第四十五条の十二の九に基づく郵政省告示 昭和 51 年 第 235 号「無線設備規則第四十五条の十二の九の規定による航空機用レーダーの技術的条件」で技術的条件が定められている。同告示によれば、航空機前方 80°以上の範囲を 10 秒以内に往復する動作をすることとなっている。また、航空法関連法令により、空港直近以外では 150 m 以上の高度で飛行することとなっている。

小型気象用レーダーは 3 次元的な走査を基本としており、確率的には両者のメインローブが正対する可能性は非常に低く、生じたとしても、メインローブ 対 サイドローブの干渉に留まると考えられる。

しかし、本検討でも報告しているように、干渉強度としては無視できないため、航空機用レーダーに対しては、周波数の離隔で対応する必要があると考えられる。

後述の技術的条件で示す小型気象用レーダーの割当周波数は、航空機用レーダーの免許実績の無い帯域を選定している。しかし、将来にわたる利用を保証することは困難であるため、制度化後に状況変化が生じた場合、船舶用レーダーへの対策で述べたような対応が必要となると考えられる。

ここで、航空機用レーダーの使用する周波数帯について整理しておく。

現状の動向から、周波数が低い方の帯域については 9400 MHz が上限、周波数が高い方の帯域については 9457 MHz が下限となる。

したがって、小型気象用レーダーの周波数割当を本報告書での提案通りとすれば、下方については 20 MHz、上方に対しては 17 MHz の周波数離隔が得られる (6.2.1-図 246 参照)。

6.2.4 小型気象用レーダーの相互干渉

前述のように、気象レーダーは 3 次元的な走査を基本としているため、メインローブ同士が正対する可能性は非常に低いと考えられる。

また、近接する局は可能な限り周波数を離隔して運用することが望ましいため、チャンネル割当てを行う。ただし、基本的には他業務からの干渉を常時受けることが想定されるため、送信方位制限機能と干渉除去機能は必須とする。送信方位制限機能については、2 方向以上、干渉除去機能については、9.7 GHz 帯の周波数オフセットパルス方式以外と同様の機能を有するものとするのが妥当であると考えられる。

本検討で報告しているように、少なくとも振幅については、干渉源の用途（船舶用、気象用）を問わず干渉除去可能である。また、使用できるチャンネルが限られるため、免許人間で合意している場合には、近接した距離に設置するレーダーについても同一周波数の割当てを妨げない旨、規定することが妥当である。

- 特定の方向に対する電波の発射を停止し、又は特定の方向に対する送信電力を制限できる機能を有するものであること。
- 下記に代表される処理又は、同等の処理の組み合わせにより、干渉波を 17 dB 以上低減できる機能を有するものであること (9.7 GHz 帯気象レーダーの審査基準参照)。
 - 極座標画像孤立点処理
 - 多反射区間平均化処理
 - 干渉波情報参照除去処理

6.2.5 BS 放送受信機への干渉

BS 放送受信機はスーパーヘテロダイン構成であり、10678 MHz の局部発振周波数を用いて 12 GHz 帯の放送周波数をダウンコンバートし、1049.48～1471.44 MHz の IF 周波数として出力した後に処理している。BS 放送周波数とイメージ周波数の関係を 6.2.5-表 30 に示す。

6.2.5-表 30 BS 放送周波数とイメージ周波数の関係

トランスポンダ 番号	BS 中心周波数 [MHz]	BS-IF 帯中心周波数 [MHz]	イメージ中心周波数 [MHz]
BS-1	11727.48	1049.48	9628.52
BS-3	11765.84	1087.84	9590.16
BS-5	11804.20	1126.20	9551.80
BS-7	11842.56	1164.56	9513.44
BS-9	11880.92	1202.92	9475.08
BS-11	11919.28	1241.28	9436.72
BS-13	11957.64	1279.64	9398.36
BS-15	11996.00	1318.00	9360.00
BS-17	12034.36	1356.36	9321.64
BS-19	12072.72	1394.72	9283.28
BS-21	12111.08	1433.08	9244.92
BS-23	12149.44	1471.44	9206.56

本報告で割当を提案する 9420～9440 MHz は、BS-11 のイメージ帯域と重なることが分かる。

JEITA や ARIB の規格によって、BS 放送受信機はイメージ抑圧をできるような設計にすることと規格化されてはいるが、レーダーとの離隔距離や空中線の相互位置関係、受信機的设计によっては有害な干渉となることが懸念されている。

干渉の可能性と共用条件については、現在、情報通信審議会における 9 GHz 帯船舶用固体素子レーダーの技術的条件で、その検討が行われているが、有意な結論はまだ出ていない。小型気象用レーダーの制度化においては、その結果を踏まえつつ共用条件を検討していくことが望まれる。

現時点で判明している要因として、固体素子レーダーの干渉波、特にチャープ信号については周波数変調幅がほとんど寄与せず、送出パルス幅が支配的であるという報告が出ていることに留意する。

6.3 技術的条件

以上の検討を元に、技術的条件を提示する。

多少の余裕を見込んで調整した技術的条件を 6.3-表 31 に示す。実効的な干渉を抑制するという観点から、放射エネルギーは EIRP で管理し、また、与干渉時間は空中線指向角で管理しつつ電力・パルス幅積で制限するのが適切であると考え。この観点から無指向性空中線を許容することはできない為、指向性空中線の使用を要件とすべきである。

放射エネルギーについては、優先度が 2 番手であるために、既存業務への干渉をできるだけ低減する必要があるため、最小限の出力である 92 dBm とする。

また、スプリアスマスクに関しては、ITU-R RR の現行規定である -30 dB/dec を基準とする。

6.3-表 31 技術的条件

項目		基準案
空中線条件		指向性空中線 であること
空中線電力 (最大尖頭電力、二重偏波の場合は両偏波の合計)		400 W 以下
最大 EIRP		92 dBm 以下
±6°以上離れた指向方向の EIRP		75 dBm 以下
±20°以上離れた指向方向の EIRP		65 dBm 以下
±45°以上離れた指向方向の EIRP		60 dBm 以下
±20°以上離れた 指向方向において	±5 MHz 以上離隔した EIRP	10 dBm 以下
	±10 MHz 以上離隔した EIRP	-10 dBm 以下
割当周波数		6.2.1-表 28 のとおり
占有周波数帯幅 (P0N, Q0N, V0N)		4.4 MHz 以下
EIRP・パルス幅積		150 W・s 以下
一秒間の平均 EIRP		83 dBm 以下
送信方位制限機能		2 方向以上
干渉除去機能		17 dB 以上
スプリアスマスク		ITU-R RR に準じて -30 dB/dec
干渉基準電力 (注)		被干渉機受信電力が -93 dBm 以下
無線局種別		無線標定陸上局

注 免許人間で調整済みの場合はこの限りではない。

以下、6.3-表 31 の項目について解説する。

- EIRP・パルス幅積

6.2.2 章の「船舶用レーダーへの干渉」で論じた上限値から、 $601.4 \text{ W}\cdot\text{s}$ を上限と仮設定する。

最大 EIRP が $92 \text{ dBm} = 1.5849 \text{ MW}$ なので、この時取り得る最大パルス幅は、

$$601.4 \text{ W}\cdot\text{s} / 1.5849 \text{ MW} = 379.5 \mu\text{s}$$

となる。これは現状や将来動向を鑑みても過剰であるため、さらに 6 dB 強制限して $150 \text{ W}\cdot\text{s}$ とすると、この時の最大パルス幅は、

$$150 \text{ W}\cdot\text{s} / 1.5849 \text{ MW} = 94.6 \mu\text{s}$$

となり、実用上十分である。

- 一秒間の平均 EIRP

本章目についても、6.2.2 章の「船舶用レーダーへの干渉」で論じたように 85.6 dBm と仮設定すると、最大 EIRP が 92 dBm であるから、最大デューティ比は 22.9% となる。

これは過剰であり、干渉量増大が懸念されるので、実用上十分な範囲で最大デューティ比を 12.5% と設定すると、 92 dBm に対して 9 dB 落ち、 83 dBm となる。

- 無線局種別

本検討の結果、共用の可否については、距離や周波数の離隔を検討した上での運用調整が必要となる。使用者側の利便性としては移動できる無線局（無線標定移動局）での免許が望ましいが、その全てについて詳細な検討を行うのは不可能であり、限られた周波数で共用することも困難である。

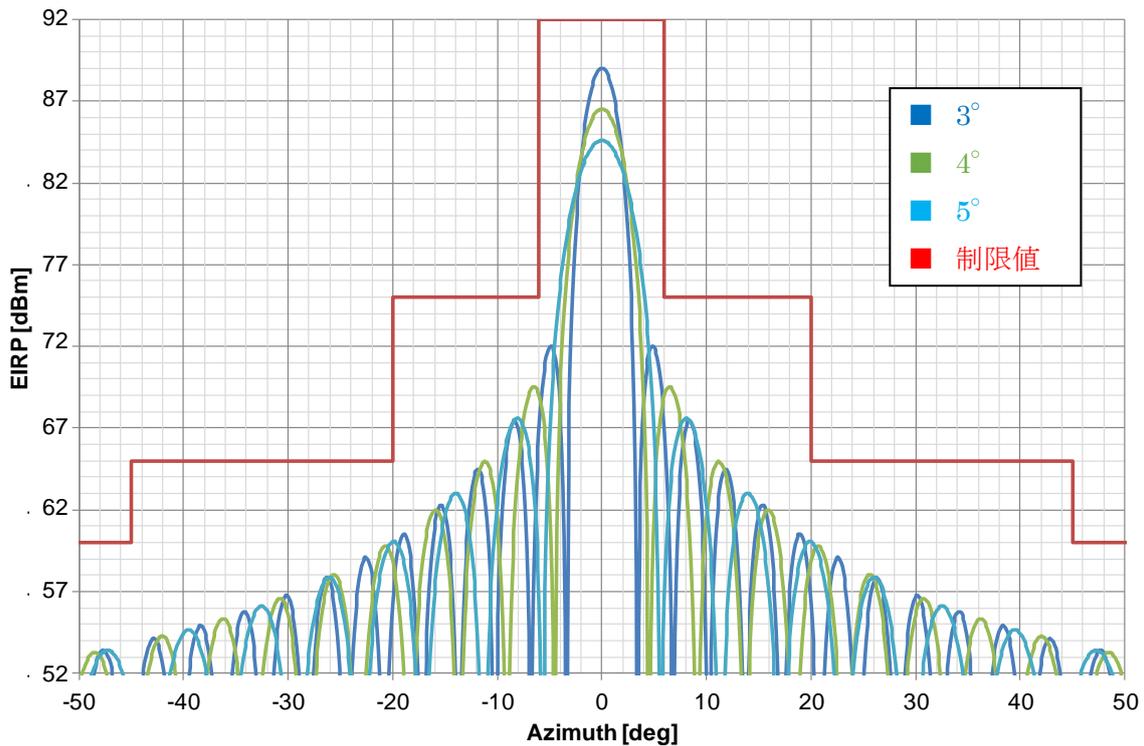
従って、移動しない局（無線標定陸上局）での実用化を提案する。

- 空中線指向特性

小型のレーダーを許容できるような規格とするため、算出した 2.4° の指向角に対して倍程度の 5° までの対応を検討する。机上検討で用いた、 sinc 関数を用いた空中線指向特性を用いて、半値幅を 3° , 4° , 5° として計算した結果を 6.3-図 247 に示す。

ここまでの検討結果から空中線電力の上限を 400 W としているため、このような広い指向角の空中線を用いる場合には、EIRP 制限値の 92 dBm までは到達し得ない。そのため、指向角比の常用対数をとって 20 倍したものが利得差であると仮定し、 9.7 GHz 帯レーダーの仕様値から計算値を補整している。

これはあくまで理想的な計算である為、実際の設計・製造・検査を考えると、 5 dB 程度の余裕が必要であると考えられる。そのため、6.3-表 31 で示した制限値（6.3-図 247 中の赤線）を設定する。



6.3-図 247 空中線指向特性計算結果

● 離隔距離

9.7 GHz 帯の審査基準に準じて混信保護の検討を行う。同基準の最小受信感度に設定すると、-110 dBm である。また、17 dB 以上の干渉除去機能を求めているのでこれを緩和し、干渉受信電力の基準は-93 dBm となる。

したがって、離隔距離の基準は被干渉局の干渉波受信電力 P_r' が-93 dBm 以下であることとする。ただし、与干渉局の免許人と被干渉局の免許人との間で調整が行われた場合は、この限りでない。

$$P_r' = P_t' - (L_p' + L_f' + L_e') + (GA_{t\theta} + GA_r)$$

P_r' : 被干渉局の干渉波受信電力 (dBm)

P_t' : 与干渉局の送信電力 (dBm)

L_p' : 与干渉局と被干渉局間の伝搬損失 (dB) (自由空間伝搬損失及び地形等の遮蔽による損失の合計値)

L_f' : 与干渉局及び被干渉局の給電線損失 (dB) (レドーム損失等を含む)

L_e' : 周波数離調による減衰量 (dB)

$GA_{t\theta}$: 与干渉局の空中線利得 (dBi) であって、主指向方向から 20° 以上離隔した方向における最大利得

GA_r : 被干渉局の空中線利得 (dBi)

実例での離隔距離を示しておく。

被干渉機の空中線は、指向角 2° のもの（開口 1.2 m、 $G_{Ar} = 38$ dBi）を基準とする。 $P_t' = 56$ dBm (400 W)、 $L_f' = 0$ dB とする。

隣接チャンネル（離隔周波数 5 MHz）に関しては、 $P_t' - L_e' + G_{At \theta} = 10$ dBm 以下であるので、 $L_p' > 141$ dB であり、これを自由空間伝搬損失のみで確保するには、フリスの伝達公式から 28.5 km 以上の距離が必要となる。つまり、離隔距離は 28.5 km である。

2 つ以上離れたチャンネル（離隔周波数 10 MHz 以上）に対しては、 $P_t' - L_e' + G_{At \theta} = -10$ dBm 以下であるので、 $L_p' > 121$ dB より、2.85 km となる。

同一チャンネルに関しては、 $P_t' - L_e' + G_{At \theta} = 65$ dBm 以下であるので、見通し距離だと仮定して計算すると、 $L_p' > 196$ dB より 16000 km となる。これはおよそ、地球の周長に対して 25%程度であり、実際には見通し外伝搬となるので双方の設置環境によって大きく変化し、一概に定義することは困難である。

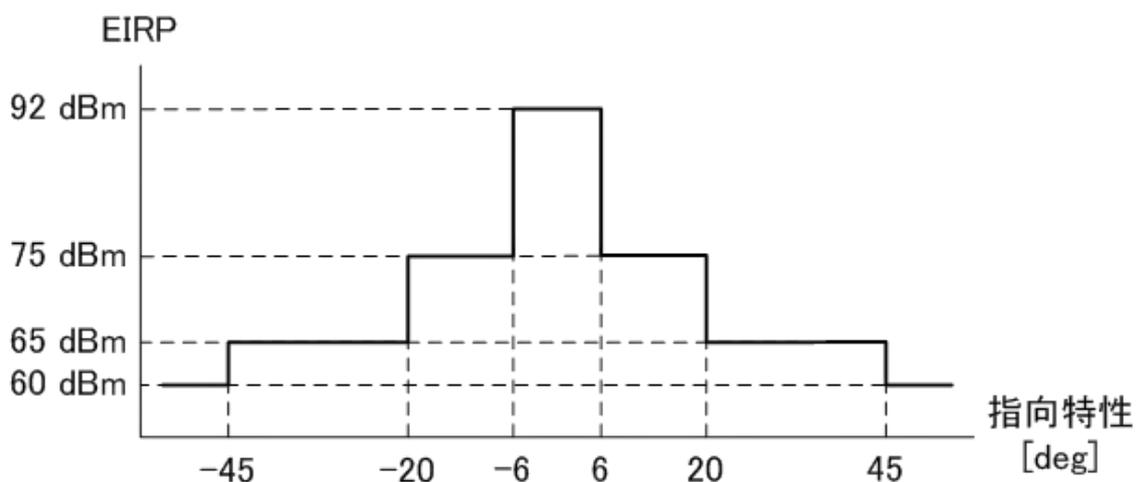
以上の特性を図示する。割当周波数を 6.2.1-表 28 及び、指向特性制限案を 6.3-図 248、周波数特性制限案を 6.3-図 249 から 6.3-図 252 にそれぞれ示す。

6.2.1-表 28 周波数配置 (案)

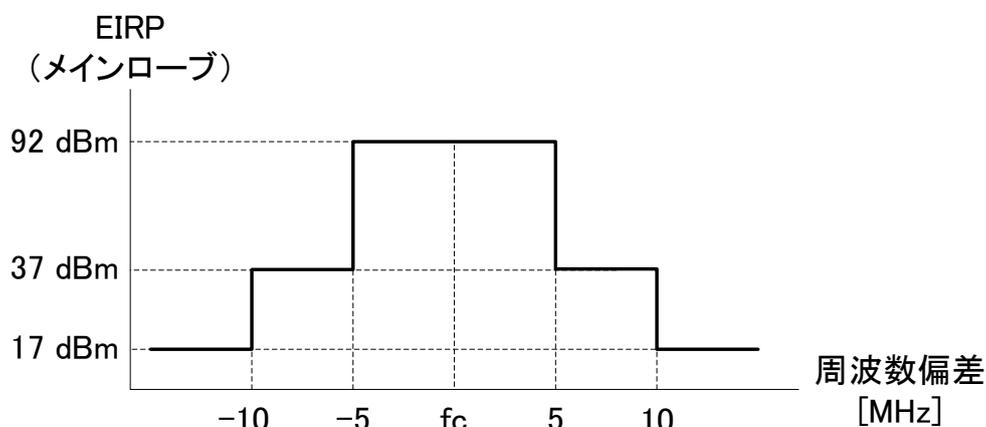
チャンネル 番号	中心周波数 [MHz]	占有周波数帯 幅 [MHz]	チャンネル 幅 [MHz]	チャンネル 間隔 [MHz]	備考
CH1	9422.5	4.4	5.0	5.0	※1,2
CH2	9427.5	4.4	5.0	5.0	※1,2
CH3	9432.5	4.4	5.0	5.0	※1,2
CH4	9437.5	4.4	5.0	5.0	※1,2

※1 この周波数の使用は、BS 放送受信設備に妨害を与えない場合に限る。

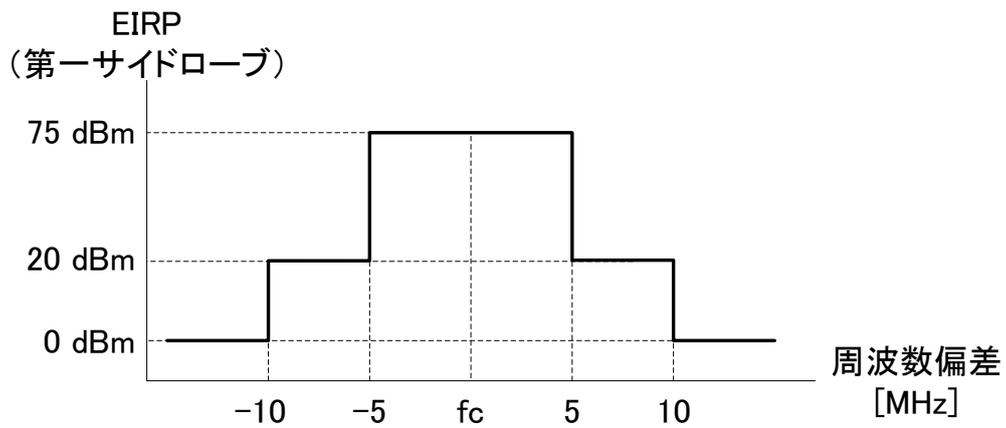
※2 免許人間で合意している場合には、近距離で同一チャンネルの割当も可能とする。



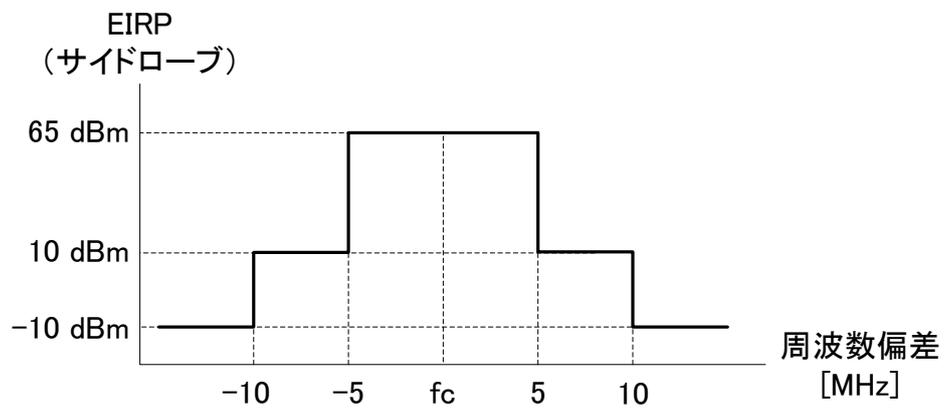
6.3-図 248 指向特性制限案



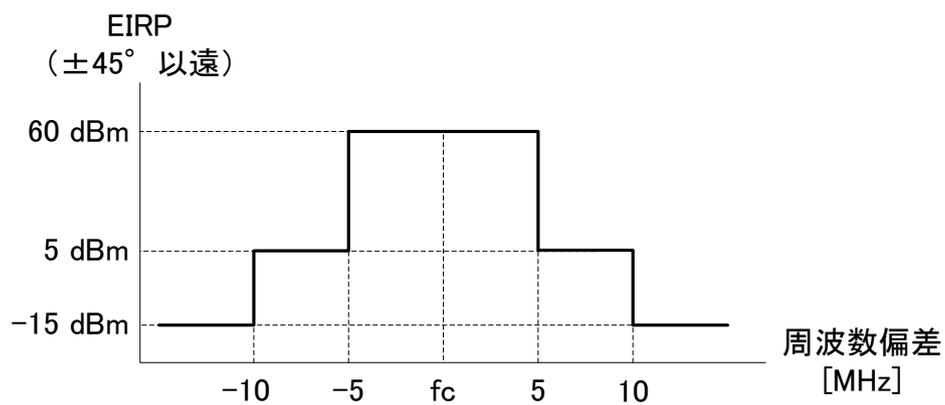
6.3-図 249 周波数特性制限案 (メインローブ)



6.3-図 250 周波数特性制限案 (第一サイドローブ)



6.3-図 251 周波数特性制限案 (サイドローブ)



6.3-図 252 周波数特性制限案 (±45° 以遠)

この技術的条件を満たす諸元例を、参考仕様として 6.3-表 32 に示す。

6.3-表 32 技術的条件を満足する諸元例

項目	仕様 1	仕様 2	仕様 3	備考
空中線指向角 [deg]	1.2	2.0	3.0	
空中線利得 [dBi]	42.0	38.0	33.0	
空中線電力 [W]	100	250	400	両偏波合計
最大 EIRP [dBm]	92.0	92.0	89.0	
PRF1 [Hz]	1500	1500	1500	
PRF2 [Hz]	1200	1200	1200	
P0N パルス幅 [μ s]	1.0	1.0	1.0	
Q0N パルス幅 [μ s]	50	50	50	
Q0N 周波数偏移幅 [MHz]	1.6	1.6	4.0	
最小距離分解能 [m]	150	150	50	
一秒間の平均 EIRP [dBm]	80.3	80.3	77.3	
EIRP・パルス幅積 (最大) [W・s]	79.8	79.8	39.7	

第7章 運用条件の検討

小型気象用レーダーは、既存の船舶用レーダーや航空機用レーダーの設備や派生技術を利用して小型かつ低価格で提供できることや、局地的に短時間で変化する極端気象と呼ばれるような気象観測や、移動型の気象観測レーダー等の需要に応えるべく実験が行われている。その有用性から、企業等からも実用局としての利用要望が高まっており、これらの期待に応えるためユーザーを広げることが必要である。

小型気象用レーダーの使用目的より、運用者は気象観測業務を行う法人又は団体等とするが、個人については不相当とする。

また、本調査検討では実験試験局は検討の対象外としているが、実験試験局を排除するものではない。

第8章 調査検討のまとめ

本調査検討会では「1.2 調査検討項目」で挙げたとおり、周辺情報の整理、机上検討、実験試験局による実証試験、技術的条件、及び運用条件について検討を行った。

本章ではそれらの結果についてまとめた。

周辺情報の整理

気象レーダーの現状と課題に関する下記の項目についての情報を整理した。

- 気象レーダーの概要
気象レーダーの仕組み及び使用されている周波数帯等について整理した。
- 小型化・軽量化のメリットと課題
従来の大型のレーダーに比して設置が容易であり、高密度配置することにより、半径 30～50 km の狭い観測域で高解像度・高頻度雨量計測が可能である点、及び大型のレーダーの役割を補完できる点について述べ、一方、電波遮へいやブラインド現象等の課題があることについて述べた。
- 9.4 GHz 帯を使用するメリットと課題
9.4 GHz 帯を使用するメリットとして、空中線の小型化や、現状の船舶用レーダーの部品が流用可能であり、技術的・経済的にメリットが大きいこと（ただし、空中線の小型化には、空中線指向角が広がることによる角度方向の解像度が低下するという欠点もある。）、及び無線航行業務のレーダーに有害な混信を与えないための検証の必要性について述べた。
- 国内の 9.7 GHz 帯におけるレーダー等の利用状況
日本国内で 9.7 GHz 帯を用いて運用されている気象用のマルチレーダーシステム (X-NET 及び XRAIN) の概要と取得されたデータの活用方法について述べた。
- 海外の動向
海外では既に 9.4 GHz 帯を使用している例も多いため、その中で米国の CASA、欧州の RAINGAIN、フランスの RHYTMME について概要を述べた。

机上検討

- 干渉除去後のパラメータ評価
本章では、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について気象エコーに比べて著しく強い干渉

波が与えられた場合の検討を行っており、干渉波が気象エコーと同程度のレベルで入力された場合は、ドップラ観測精度が悪化する可能性があり、マルチパラメータレーダーのような偏波間の特性差を解析するようなレーダーでは、原理的にさらに大きな干渉が生じることを述べた。

- 検証 1 離隔周波数による干渉状況変化

離隔距離を 100 m とし、互いが近距離レンジで観測している場合に離隔周波数を変化させた場合の干渉状況変化について検証した。

小型気象用レーダー同士については、正負両側について、10 MHz 離隔すればほぼ影響はないという結果になった。

与干渉機を小型気象用レーダー、被干渉機を船舶用レーダーとした場合、離隔距離が 100 m の場合は受信機が飽和するため、55 MHz 程度離隔しないと干渉が顕著に減少しないことが示された。また、受信機が飽和しない離隔距離 (17.8 km) の場合は 20 MHz 程度離隔することによって、干渉除去機能が OFF の場合でも干渉が問題にならない程度になることを確認した。

- 検証 2 観測レンジによる干渉状況変化

離隔距離を 100 m とし、観測レンジを切り替えた場合の干渉状況について検討した。

与干渉機が船舶用レーダー、被干渉機が小型気象用レーダーの場合、観測レンジが近距離・遠距離のいずれの場合でも干渉除去機能によって良好に干渉が除去できることを確認した。

与干渉機が小型気象用レーダー、被干渉機が船舶用レーダーの場合、観測レンジが近距離及び遠距離の場合で干渉の表示状況は異なるものの、いずれの場合も干渉除去機能によって良好に干渉が除去できることを確認した。

- 検証 3 与干渉機増加時の干渉状況変化

与干渉機を正多角形の頂点に配置するモデルで与干渉機が増加した場合の干渉状況変化について検証を行った。与干渉機が船舶用レーダー4台、被干渉機が小型気象用レーダー1台の場合、及び与干渉機が小型気象用レーダー4台、被干渉機が船舶用レーダー1台の場合において、それぞれの離隔距離を 100 m と 500 m とし検証した結果、いずれのケースでも干渉除去が可能であることを確認した。

- 検証 4 離隔距離による干渉状況変化

同一周波数で離隔距離を 100 m, 1, 5, 10, 20, 50 km と変化させた場合の影響を検討した。離隔距離 100 m の場合においても定性的には良好に干渉が除去されて

いることが確認され、50 km 離隔した場合には、干渉除去機能を OFF にしても干渉はごく少量であり、離隔距離による対策でも顕著に干渉を低減できることを確認した。

- SART 応答波への干渉影響

SART 及び小型気象用レーダーが同高度、仰角 0° で連続回転しているという最悪条件下で机上検討を行った。その結果、船舶用レーダーの干渉除去機能により SART 信号は除去されないこと、及び小型気象用レーダーによって SART が起動する可能性についても実用上問題無いと考えられることを確認した。

実験試験局による実証試験

実機を用いて以下の 4 つの実証試験を行った。

- ・実証試験 1 : 小型気象用レーダー相互の干渉状況
- ・実証試験 2 : 小型気象用レーダーと船舶用レーダーの干渉状況
- ・実証試験 3 : 小型気象用レーダーと航空機用レーダーの干渉状況
- ・実証試験 4 : 小型気象用レーダーの運用実力値検証

実証試験 1 及び 2 では広島大学東広島キャンパスの駐車場にて、下記の (1) ~ (3) の項目について干渉試験を行った。

- (1) 離隔距離の増加に伴う干渉状況の変化
- (2) 空中線走査方法の変化に伴う干渉状況の変化
- (3) 離隔周波数の増加に伴う干渉状況の変化

実証試験 3 では岡山県岡南飛行場にて小型気象用レーダーの周波数を航空機用レーダーの周波数に極力近づけた状態で干渉試験を行った。

実証試験 4 では広島大学東広島キャンパスの校舎屋上に小型気象用レーダーを実際に設置し、運用実力値の検証を行った。

- 評価基準について

机上検討と同様に、気象レーダーとして最低限の機能である単偏波の振幅情報を用いた、面的な強度分布測定とドップラ速度について、気象エコーに比べて著しく強い干渉波を与えた場合の検討を行っており、干渉波が気象エコーと同程度のレベルで入力された場合はドップラ観測精度が悪化する可能性があり、マルチパラメータレーダーのような、偏波間の特性差を解析するようなレーダーでは原理的にさらに大きな干渉が生じることを述べた。

- 実証試験 1 : 小型気象用レーダー同士の干渉状況
 - (1) ~ (3) のいずれのケースにおいても（最も干渉波が強くなる場合においても）干渉は除去されることが確認された。ただし、干渉波と気象エコーが同レベルになった場合のドップラ、マルチパラメータ観測の精度悪化については検討の対象外とした。

- 実証試験 2 : 小型気象用レーダーと船舶用レーダーの干渉状況
 - 与干渉機を小型気象用レーダー、被干渉機を船舶用レーダーとした(1)~(3)のいずれのケースにおいても干渉は除去されることが確認された。
 - また、与干渉機を船舶用レーダー、被干渉機を小型気象用レーダーとした(2)、(3)においても被干渉機側の干渉は除去されることが確認された。

- 実証試験 3 : 小型気象用レーダーと航空機用レーダーの干渉状況
 - 被干渉機が航空機用レーダーの場合、5 NM レンジで離隔周波数を 2.5 MHz とした場合は、離隔周波数が 0 MHz の場合に比べ干渉はかなり減少するものの、無くなるわけではないことが確認された。また、300 NM レンジで観測した場合はいくつかの小さな輝点が残りに、干渉波の占有面積が低下することが確認された。
 - 被干渉機が気象用レーダーの場合、(1)において被干渉機側の干渉は除去されることが確認された。

- 実証試験 4 : 小型気象用レーダーの運用実力値検証
 - XRAIN 及びアメダスの観測結果と比較し、20 mm/h を超える強雨時には過小評価の傾向があるものの、それ以下の降雨強度においては雨域の分布を定量的に観測するという役割において、一定の成果が得られることを確認した。

技術的条件

- 小型気象用レーダーに求められる技術的条件
 - 9.7 GHz 帯の気象レーダーを参考とし、9.4 GHz 帯で想定している条件を勘案し仕様検討を行った。

- 既存システムとの共用条件
 - 周波数プラン、船舶用レーダー及び航空機用レーダーとの干渉、小型気象用レーダー相互の干渉、BS 放送受信機への干渉について検討した。干渉への対応策として周波数離隔、送信方位制限、サイドローブ抑圧フェンスの設置等を挙げた。

- 技術的条件

実効的な干渉を抑制するという観点から、放射エネルギーは EIRP で管理し、また、与干渉時間は空中線指向角で管理しつつ電力・パルス幅積で制限するのが適切であるとした。この観点から無指向性空中線を許容することはできない為、指向性空中線の使用を要件とした。

放射エネルギーについては、優先度が 2 番手であるために、既存業務への干渉をできるだけ低減する必要があるため、最小限の出力である 92 dBm とした。

また、スプリアスマスクに関しては、ITU-R RR の現行規定である -30 dB/dec を基準とした。

以上の検討を元に、技術的条件及び参考となる諸元例を提示した。

6.3-表 32 技術的条件を満足する諸元例 (再掲)

項目	仕様 1	仕様 2	仕様 3	備考
空中線指向角 [deg]	1.2	2.0	3.0	
空中線利得 [dBi]	42.0	38.0	33.0	
空中線電力 [W]	100	250	400	両偏波合計
最大 EIRP [dBm]	92.0	92.0	89.0	
PRF1 [Hz]	1500	1500	1500	
PRF2 [Hz]	1200	1200	1200	
P0N パルス幅 [μ s]	1.0	1.0	1.0	
Q0N パルス幅 [μ s]	50	50	50	
Q0N 周波数偏移幅 [MHz]	1.6	1.6	4.0	
最小距離分解能 [m]	150	150	50	
一秒間の平均 EIRP [dBm]	80.3	80.3	77.3	
EIRP・パルス幅積 (最大) [W・s]	79.8	79.8	39.7	

なお、船舶用レーダーについては、現在、情報通信審議会において、9 GHz 帯船舶用固体素子レーダーの技術的条件の検討を行っている状況であることから、小型気象レーダーの技術的条件の策定にあたっては、当該船舶用レーダーの諸元について考慮したうえで、技術的条件を検討する必要があることに留意すべきと考えられる。

運用条件

小型気象用レーダーの使用目的より、運用者については、気象観測業務を行う法人又は団体とするが、個人については不適當であるとした。

なお、現に使用されているシステムへの干渉という観点において、今回の周波数案の妥当性について定量的な検討が今後の課題である。

おわりに

本調査検討会においては、固体素子を用いた小型気象用レーダーを実用局として利用するための技術的条件、運用条件及び技術的条件を検討するために、机上検討及び実証試験によって検証した。

第 8 章掲記のとおり、予定した検証項目についての検証がなされたものであり、今後本報告書が技術的条件の策定に有効に利用されることを期待する。

最後に、本調査検討会にご参加を賜り、貴重なご意見ならびに検討、審議をいただいた構成員及び実証試験等にご協力いただいた全ての方々に深甚なる感謝の意を表します。

【 資 料 編 】

調査検討体制

- (1) 調査検討会は中国総合通信局長の委嘱を受けた委員により構成する。
- (2) 調査検討会に座長及び座長代理を置く。
- (3) 座長は、調査検討会構成員の互選により定め、座長代理は座長が指名する。
- (4) 座長は、調査検討会を招集し、主宰する。
- (5) 座長代理は座長を補佐し、座長が不在のときは、座長に代わって調査検討会を招集し、主宰する。
- (6) 調査検討会は必要に応じ外部の関係者の出席を求め意見を聞くことができる。
- (7) 調査検討会には作業部会を設置することができる。
- (8) 調査検討会は原則公開とする。ただし、調査検討会の開催に際し、当事者又は第三者の権利・利益、公共の利益を害するおそれがある場合等、座長が必要と認める場合は、その全部又は一部を非公開とする。
- (9) その他、調査検討会の運営に必要な事項は、座長が定めるところによる。

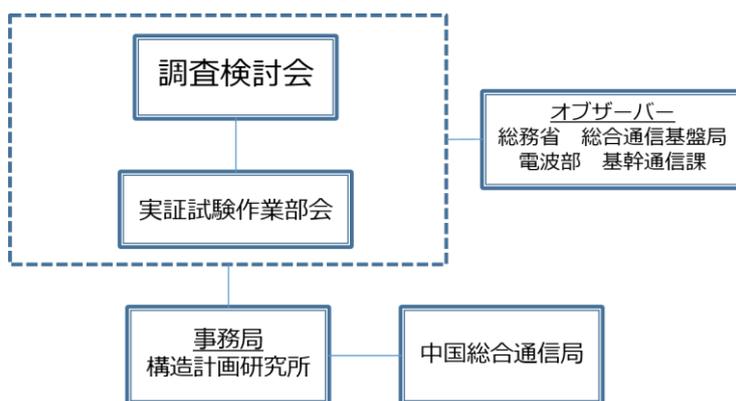


図 1 調査検討会 検討体制

審議経過

本年度は以下のように 3 回の調査検討会を開催した。

- 第 1 回：平成 27 年 7 月 6 日（月） 15 時 00 分～17 時 00 分
場所：中国総合通信局 第 1 会議室
調査検討の方向性を確認した。
- 第 2 回：平成 28 年 1 月 15 日（金） 13 時 00 分～15 時 30 分
場所：中国総合通信局 第 1 会議室
実証試験結果、机上検討結果、技術的条件の検討を行った。
- 第 3 回：平成 28 年 3 月 11 日（金） 15 時 00 分～16 時 15 分
場所：KKR ホテル広島 会議室
報告書の最終確認を行った。

各作業部会の開催は以下のとおりであった。

- 第 1 回：平成 27 年 7 月 6 日（月） 15 時 00 分～17 時 00 分
場所：中国総合通信局 第 1 会議室(調査検討会と同時開催)
調査検討の方向性を確認した。
- 第 2 回：平成 27 年 8 月 20 日（木） 14 時 00 分～16 時 00 分
場所：中国総合通信局 第 1 会議室
実証試験方針、机上検討方針の検討を行った。
- 第 3 回：平成 27 年 11 月 16 日（月） 13 時 00 分～15 時 00 分
場所：中国総合通信局 第 1 会議室
実証試験結果、机上検討方針の検討を行った。
- 第 4 回：平成 27 年 12 月 18 日（金） 13 時 00 分～15 時 20 分
場所：広島パシフィックホテル 会議室
実証試験結果、机上検討方針、報告書とりまとめ方針の検討を行った。
- 第 5 回：平成 28 年 2 月 9 日（火） 10 時 00 分～12 時 50 分
場所：(株) 構造計画研究所 セミナールーム
机上検討結果、技術的条件、報告書の確認を行った。
- 第 6 回：平成 28 年 3 月 3 日（木） 9 時 30 分～12 時 30 分
場所：中国総合通信局 第 1 会議室
報告書の確認を行った。

構成員一覧

表 1 調査検討会 委員一覧

	氏名	所属・役職
委員	河原 能久	国立大学法人広島大学 大学院 工学研究院 社会環境空間部門 副研究院長 教授
委員	下舞 豊志	国立大学法人島根大学 大学院 総合理工学研究科 機械・電気電子工学領域 准教授
委員	高橋 賢	広島市立大学 大学院 情報科学研究科 情報工学専攻 准教授
委員	(H27.7) 林 義也 (H27.8 から) 高橋 史昭	総務省 中国総合通信局 無線通信部長
委員	田村 英樹	日本無線株式会社 商品設計部 デジタルコアグループ 参事
委員	辻 雅生	三菱電機株式会社 鎌倉製作所 ミッション技術部 技術第一課課長
委員	手柴 充博	株式会社 ウェザーニューズ レーダープロジェクト チームリーダー
委員	花土 弘	国立研究開発法人 情報通信研究機構 電磁波計測研究所 センシングシステム研究室 研究マネージャー
委員	廣瀬 孝睦	古野電気株式会社 船用機器事業部 システムソリューション部 ソリューション開発課 主任
委員	山内 守	一般社団法人 全国船舶無線協会 中国支部 事務局長
委員	吉岡 正裕	広島市 危機管理室 災害対策課長
委員	米本 成人	国立研究開発法人 電子航法研究所 監視通信領域 上席研究員
委員	和田 将一	株式会社東芝 社会インフラシステム社 電波システム事業部 電波応用営業部 電波応用営業第二担当 課長
オブザーバー	総務省 総合通信基盤局 電波部 基幹通信課	
事務局	株式会社構造計画研究所	

表 2 作業部会 構成員一覧

	氏名	所属・役職
構成員	佐藤 祐子	株式会社東芝 社会インフラシステム社 電波システム事業部 電波応用営業部 電波応用営業第二担当 参事
構成員	下舞 豊志	国立大学法人島根大学 大学院 総合理工学研究科 機械・電気電子工学領域 准教授
構成員	高橋 賢	広島市立大学 大学院 情報科学研究科 情報工学専攻 准教授
構成員	(H27.7) 林 義也 (H27.8 から) 高橋 史昭	総務省 中国総合通信局 無線通信部長
構成員	辻 雅生	三菱電機株式会社 鎌倉製作所 ミッション技術部 技術第一課課長
構成員	花土 弘	国立研究開発法人 情報通信研究機構 電磁波計測研究所 センシングシステム研究室 研究マネージャー
構成員	羽田 利博	日本無線株式会社 ソリューション技術部 システム機器グループ 担当課長
構成員	廣瀬 孝睦	古野電気株式会社 船用機器事業部 システムソリューション部 ソリューション開発課 主任
構成員	米本 成人	国立研究開発法人 電子航法研究所 監視通信領域 上席研究員
オブザーバー	総務省 総合通信基盤局 電波部 基幹通信課	
事務局	株式会社構造計画研究所	

用語集

L 帯 (L バンド : L-band)

1 GHz 帯 (0.5~1.5 GHz) にあたり、主にレーダーや携帯電話や地球観測衛星の合成開口レーダーなどで利用されている。

S 帯 (S バンド : S-band)

3 GHz 帯 (2~4 GHz) にあたり、ISM バンドの 1 つとして無線 LAN などに利用される他、固定無線やレーダー等でも利用される。

C 帯 (C バンド : C-band)

6 GHz 帯 (4~8 GHz) にあたり、通信衛星、固定無線、レーダー等に利用されている。

X 帯 (X バンド : X-band)

9 GHz 帯 (8~12 GHz) にあたり、主にレーダー、気象衛星、高分解能の降雨レーダー、地球観測衛星の合成開口レーダーなどで利用されている。

メインローブ (main lobe)

空中線の指向性図において、放射が多くの方向に分かれている場合、放射が最大となる方向の放射指向性曲線をメインローブという。

サイドローブ (side lobe)

指向性空中線の利得（放射性能の良さ）は通常、最大放射方向からはずれると低下するが、最大方向以外にも複数の小さな放射のピークが生じる。これらをメインローブに対してサイドローブという。

バックローブ (back lobe)

メインローブに対して、後方への放射をバックローブという。

PPI

レーダーが一定仰角で水平回転した場合の表示画面に代表される、レーダーから物標までの距離を極座標系で二次元表示する方式をいう。

ボリュームスキャン

レーダーが仰角を変化させながら水平回転する状態をいう。気象用レーダーの通常の運用状態である。

PRF (Pulse Repetition Frequency)

パルスレーダーが送信するパルスの繰返し周波数をいう。

PRI (Pulse Repetition Interval)

パルスレーダーが送信するパルスの繰返し周期をいう。PRF とは逆数の関係にある。

sinc 関数

$\text{sinc}(x) = \sin(x) / x$ で定義される関数。空中線指向特性のモデル化の際には、

$\text{sinc}(t(\theta)) = \sin(t(\theta)) / t(\theta)$, θ は空中線角度

として、所望のビーム幅を得られるように θ の関数 $t(\theta)$ を調整している。

STC (Sensitivity Time Control)

距離に応じて強すぎる反射波を抑圧して、感度差を均す働きをする。

EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power)

等価等方輻射電力ともいう。送信系の性能を表す指標で、空中線に供給される電力と与えられた方向における送信空中線の絶対利得との積である。

ITU-R RR

ITU は、電気通信分野における国際連合の専門機関である国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) である。その中で ITU-R RR は、無線通信部門 (ITU-R: ITU Radiocommunication Sector) の、無線通信に関する国際的規則である無線通信規則 (RR: Radio Regulations) をいう。

P0N

ITU-R RR で定められている電波型式の表記である。一文字目は主搬送波の変調形式、二文字目は主搬送波を変調する信号の性質、三文字目は伝送情報を表す。P0N の場合は、それぞれ、無変調 (P)、変調信号無し (0)、無情報 (N) となる。

Q0N

Q0N の場合は、それぞれ、パルス期間中に角度変調 (Q)、変調信号無し (0)、無情報 (N) となる。本検討では、パルス期間中に周波数変調を行っている。

V0N

V0N は本検討で使用した小型気象用レーダーの場合、それぞれ、P と Q の組合せ (V)、

変調信号無し (0)、無情報 (N) となる。

極座標画像孤立点処理

注目メッシュの周囲においてエコーがあるメッシュの数がしきい値未満の場合に、注目メッシュの信号を除去する処理である。

多反射区間平均化処理

同一距離における複数の受信信号を平均化する処理である。

干渉波情報参照除去処理

同一距離における 3 つの受信強度を比較して、その値が突出している信号を除去する処理である。