

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

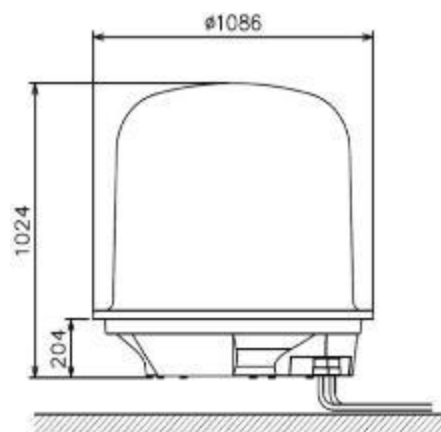
5.1.4 レーダー諸元

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。



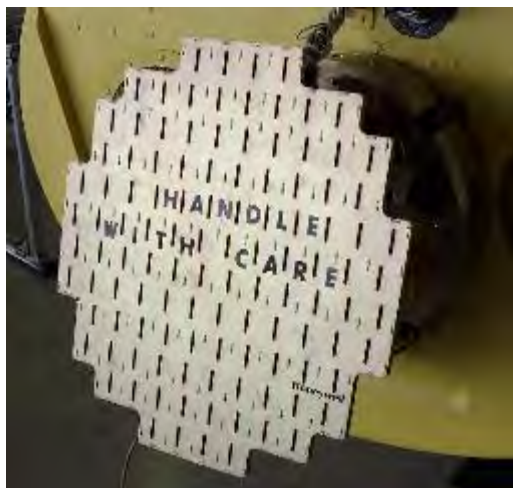
5.1.4-図 130 船舶用レーダー

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。



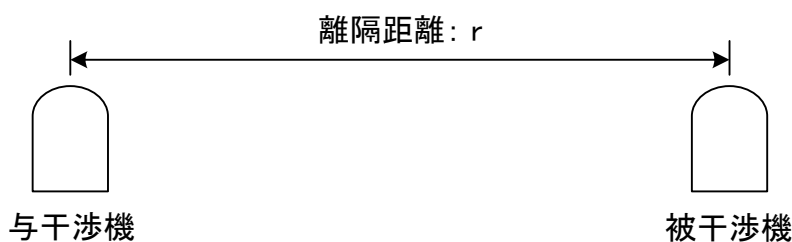
5.1.4-図 131 航空機用レーダー

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 μ s
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

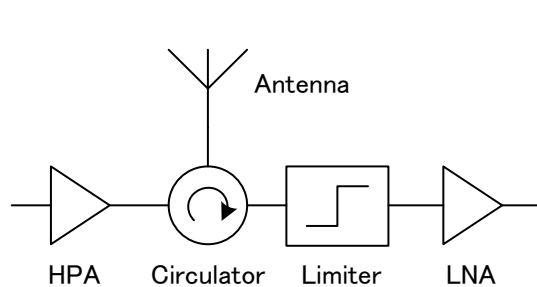
減衰量[dB]	メインローブ 対 メインローブ		メインローブ 対 サイドローブ	
	116 m※1	800 m※2	116 m※1	800 m※2
0	140 m	967 m	19.8 m	137 m
8.5	372 m	2.57 km	52.5 m	363 m
18.6	1.20 km	8.26 km	170 m	1.17 km
28.1	3.55 km	24.5 km	502 m	3.46 km
38.3	11.5 km	79.1 km	1.62 km	11.2 km
43.5	20.5 km	142 km	2.90 km	20.1 km
48.5	37.3 km	257 km	5.27 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

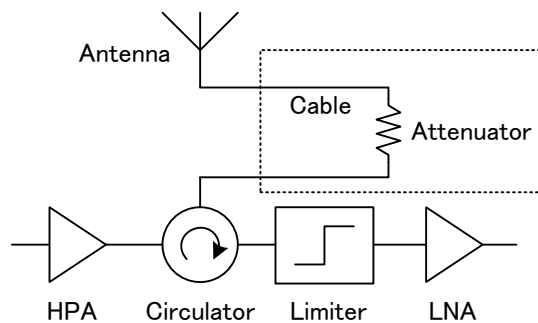
※2：実証試験 3 での実距離

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

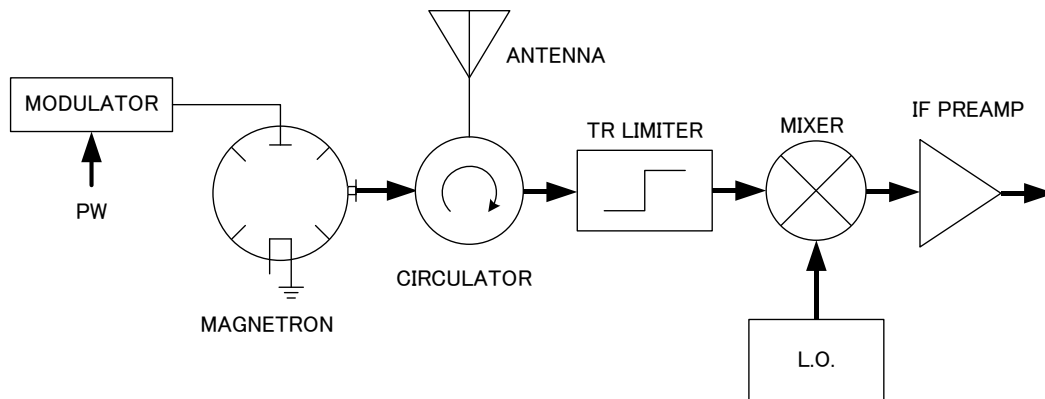


5.2.2-図 134 減衰付与時の送受信機

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。

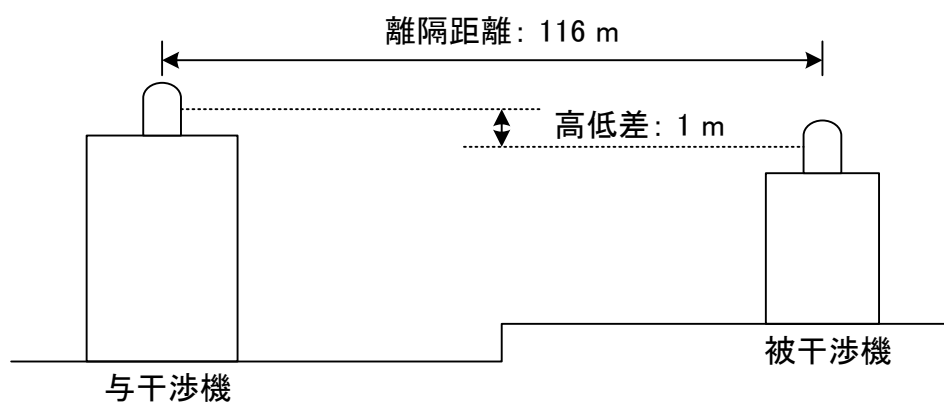
与干渉機、被干渉機をそれぞれ車両上に設置し、116 m の離隔距離で配置して実験を行った。試験時の設置状況写真を 5.3.1.1-図 136、5.3.1.1-図 137 に示す。



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

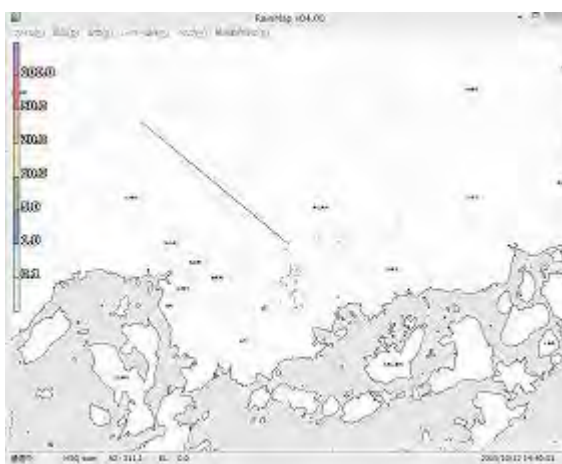
与干渉機・被干渉機双方の周波数を 9470 MHz とし、与干渉機の空中線を被干渉機に正対させて停止させた条件において、離隔距離を変化させた場合の干渉状況変化を示す。なお、離隔距離はメインローブ 対 サイドローブとして評価する。

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



5.3.1.2-図 143 離隔距離 : 1.62 km



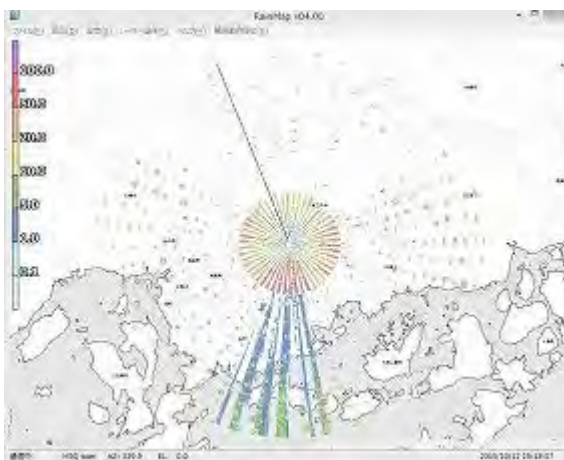
5.3.1.2-図 144 離隔距離 : 2.90 km



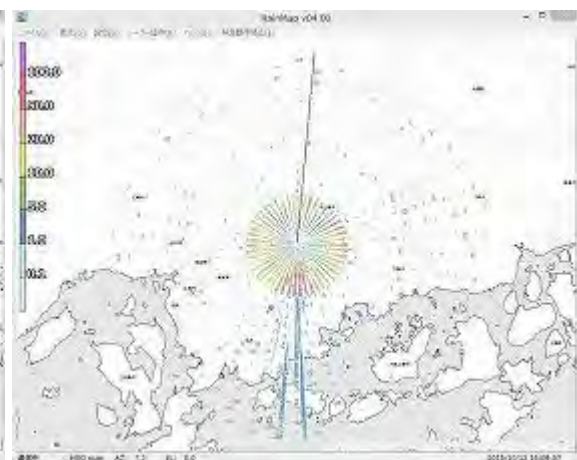
5.3.1.2-図 145 離隔距離 : 5.27 km



5.3.1.2-図 146 離隔距離 : 9.44 km



5.3.1.2-図 147 離隔距離 : 16.4 km



5.3.1.2-図 148 離隔距離 : 161 km

(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。

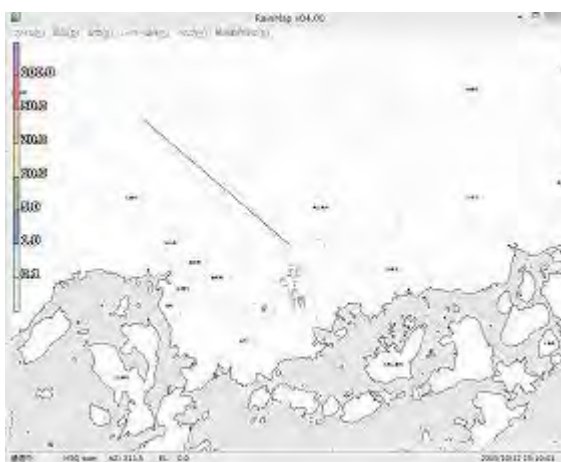
実際の運用では、随時仰角を変更しての三次元走査が主流であるため、本章で示す条件となるのは稀であると考えられる。

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。

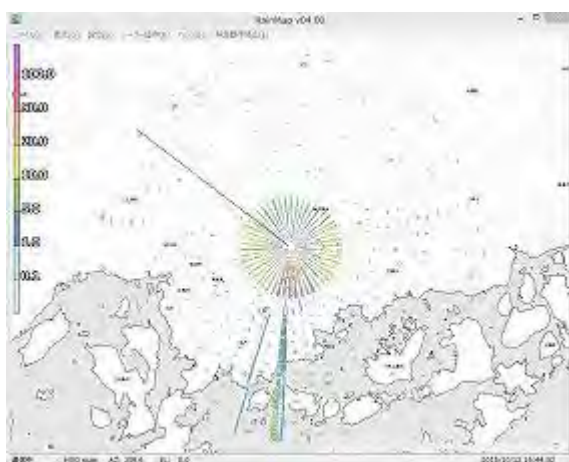
与干渉機：9470 MHz、PPI、被干渉機：9470 MHz、PPI



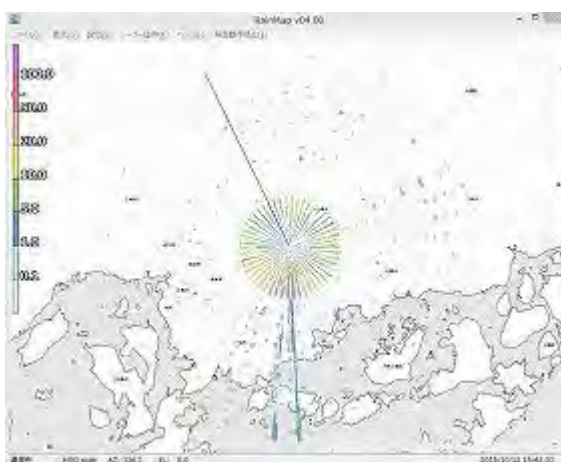
5.3.1.2-図 149 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



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

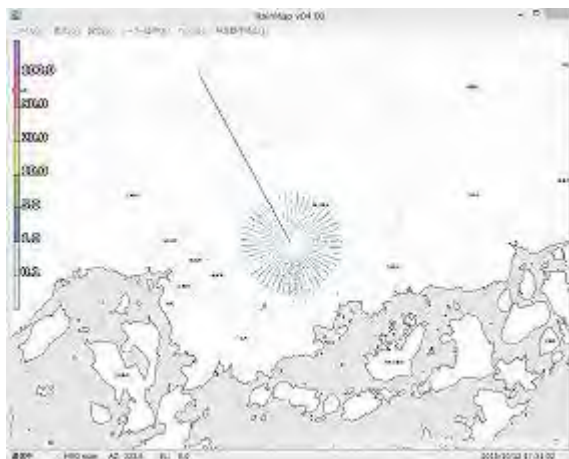


5.3.1.2-図 152 離隔距離：16.4 km

(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



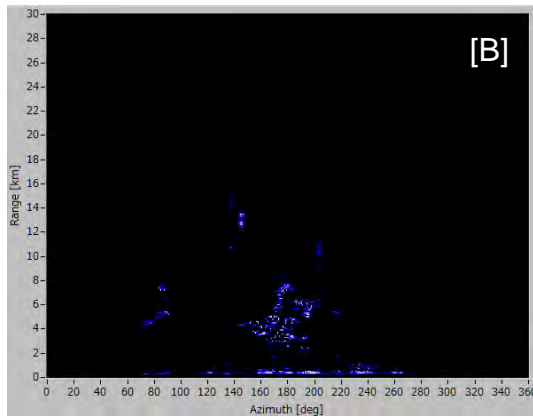
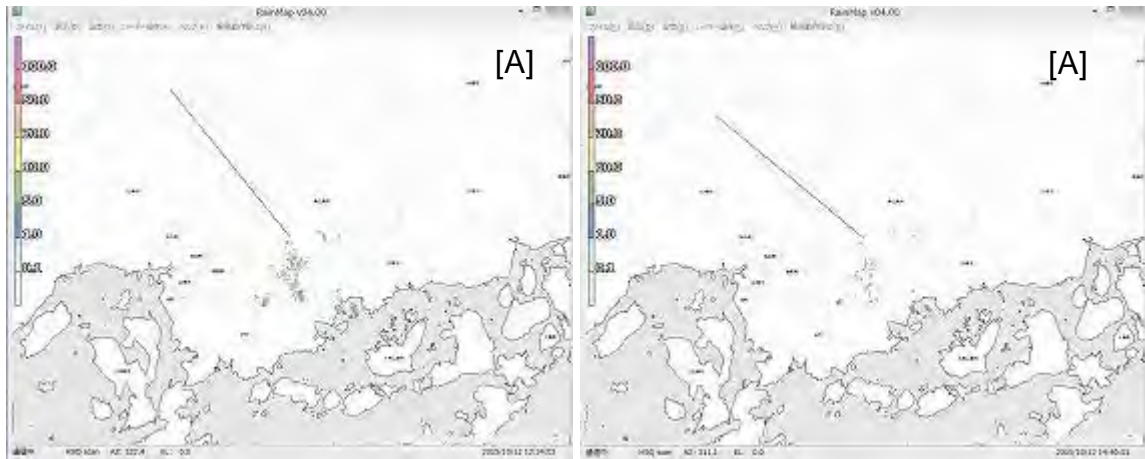
5.3.1.2-図 156 離隔距離：170 m
干渉除去機能：ON

5.3.1.3 実証試験1の考察

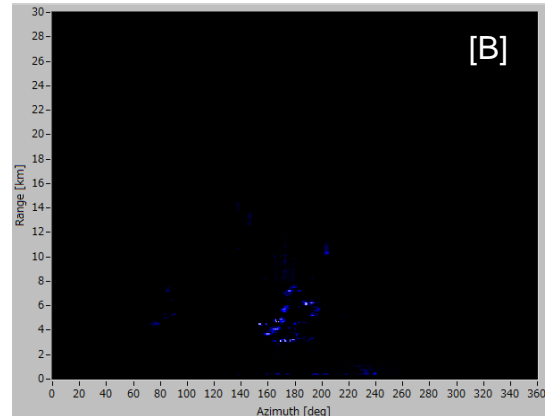
与干渉機が無い場合に、0 dB の設定で干渉除去機能を OFF とした場合の観測結果を 5.3.1.3-図 157、被干渉強度が最も高くなる状態（同一周波数、正対停止、372 m 離隔）から干渉除去した結果を 5.3.1.3-図 158 に示す。5.3.1.3-図 158 の状態の理想形が 5.3.1.3-図 157 であり、この乖離度を評価する。なお、各図の[A]は通常用いる極座標表示であるが、[B]は縦軸をレーダーからの距離、横軸を空中線指向角度として表示したものである。

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。



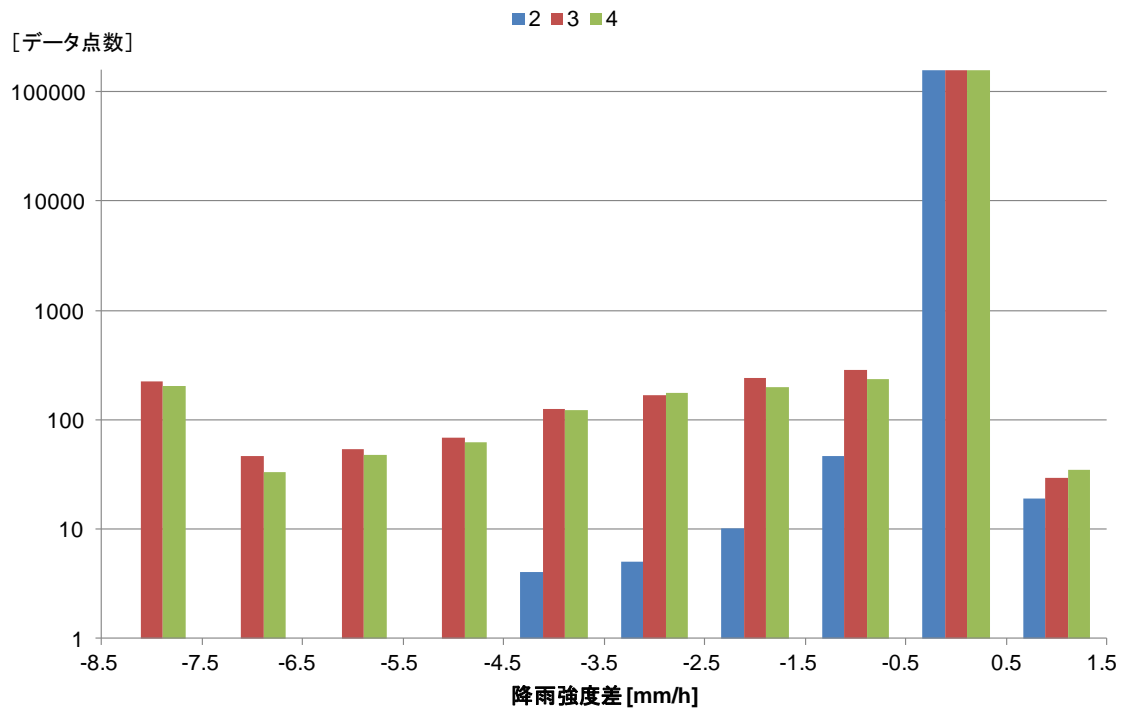
5.3.1.3-図 157 与干渉機無し
干渉除去機能 : OFF



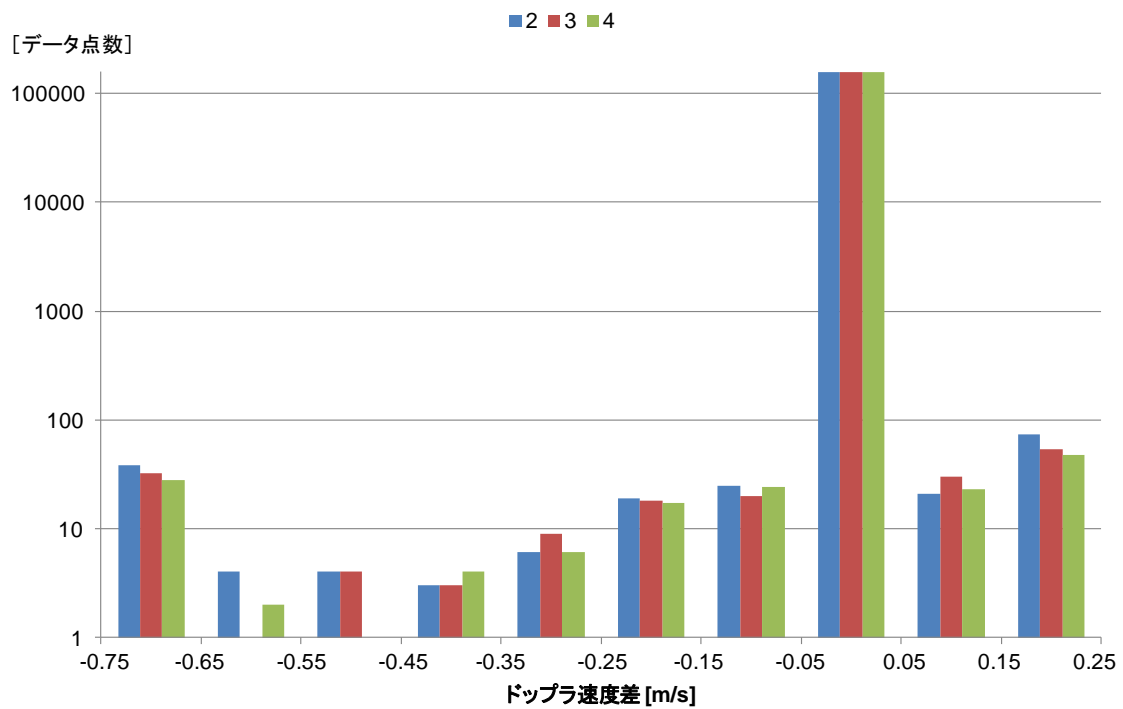
5.3.1.3-図 158 干渉強度最高状況
干渉除去機能 : ON

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。

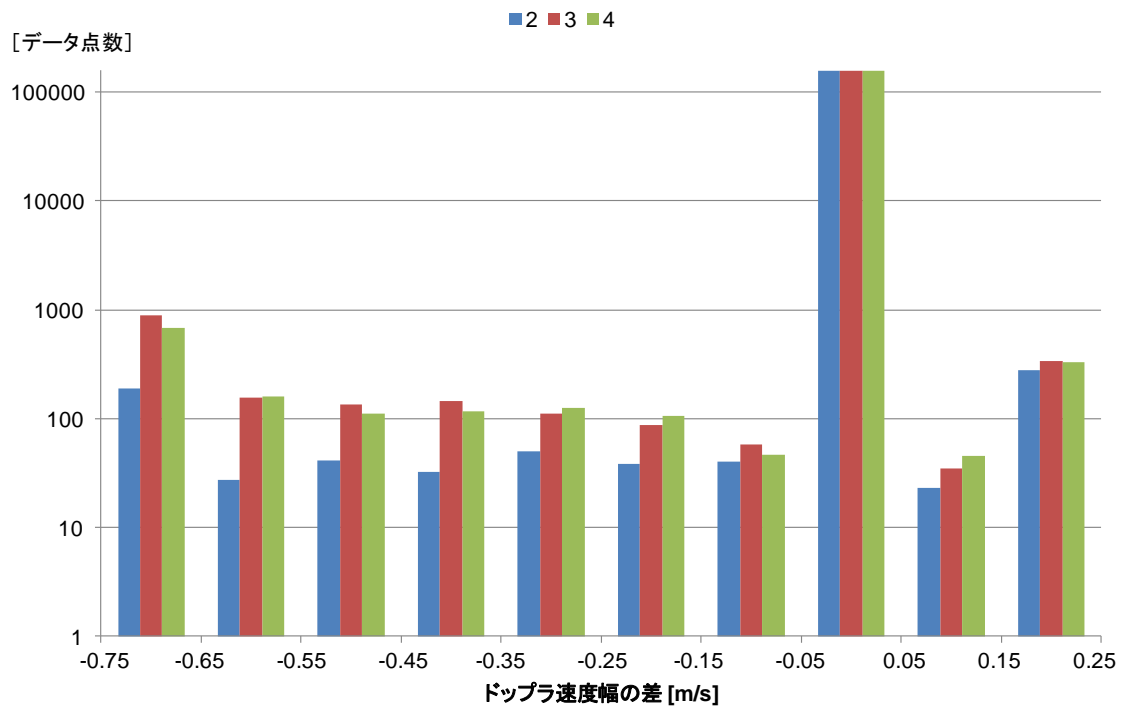
このような懸念を評価するため、干渉源の無い状態で複数回のデータ収録を行い、基準画像との差を評価した。結果を 5.3.1.3-図 159 から 5.3.1.3-図 161 に示す。完全に同一画像であれば中央区間のみデータが存在するが、実際は中央区間以外にも懸念した分布が見られる。しかし、中央区間に対して降雨強度差では 3 桁弱、ドップラ速度差では 4 桁程度、ドップラ速度幅の差では 3 桁程度少ないデータ点数であり、評価に値する程度の誤差であるといえる。



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)

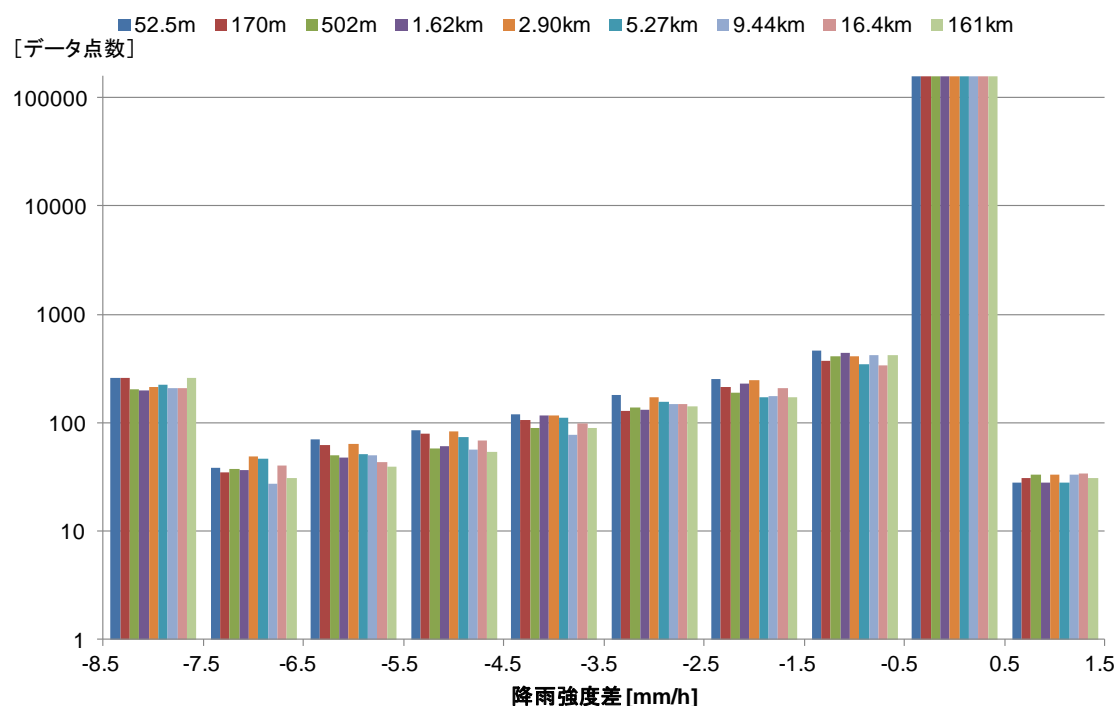


5.3.1.3-図 161 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 m/s、縦軸 : 対数)

(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。

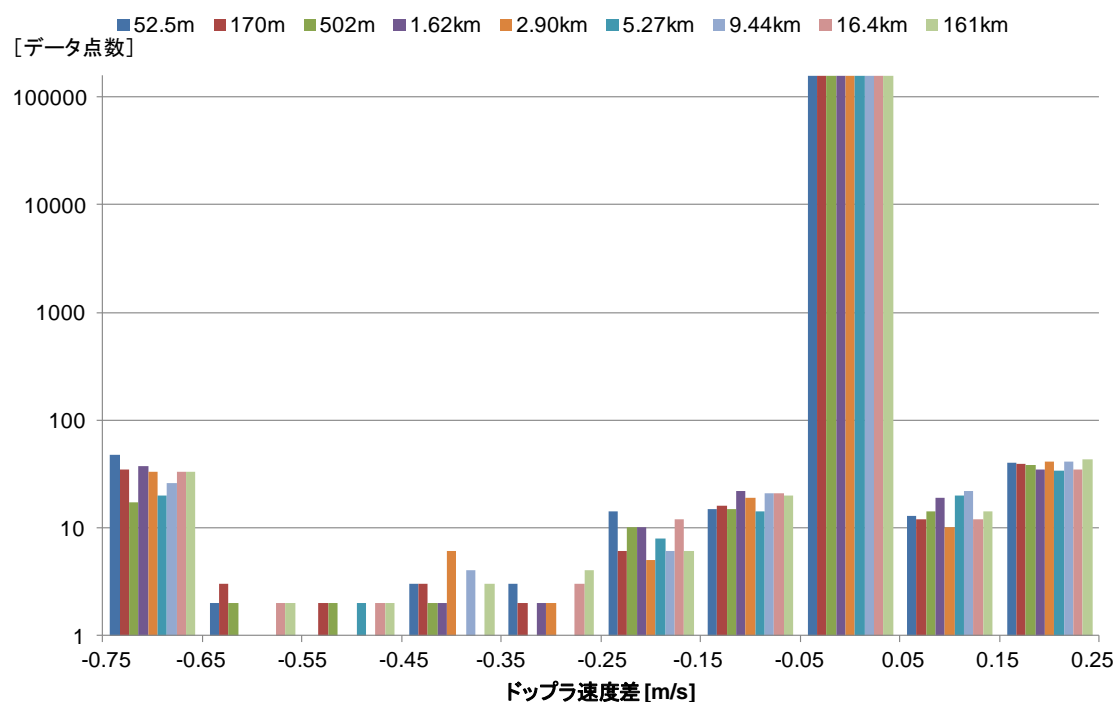


5.3.1.3-図 162 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 mm/h、縦軸 : 対数)

(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。

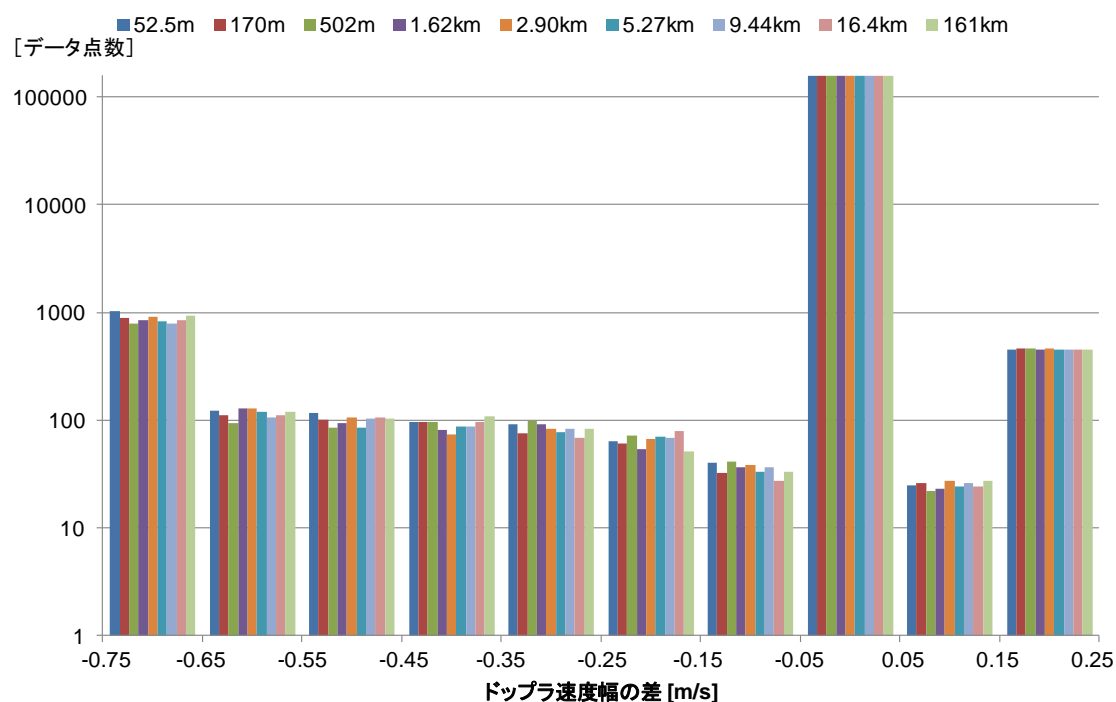


5.3.1.3-図 163 基準画像との差のヒストグラム (理想値 : 0 m/s、縦軸 : 対数)

(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。

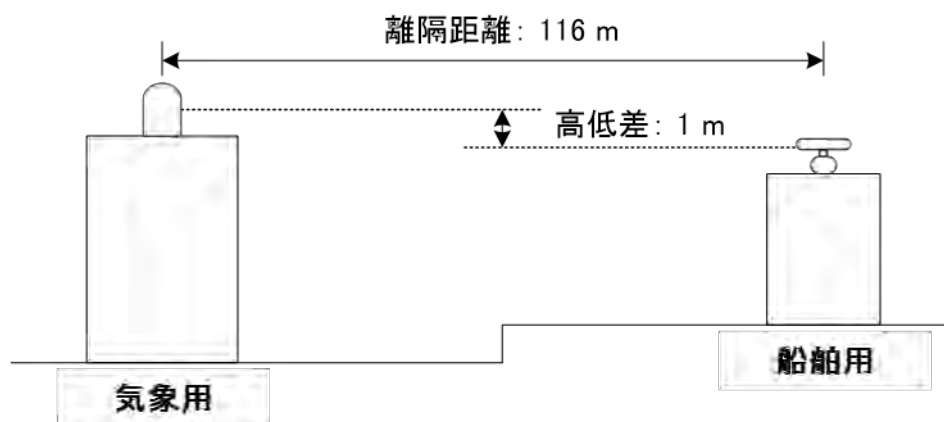


5.3.2.1-図 165 気象用設置状況



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。

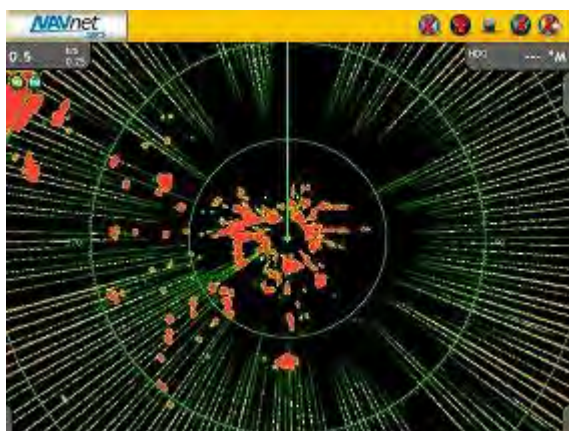
与干渉機（気象用）：9415 MHz、正対停止、被干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



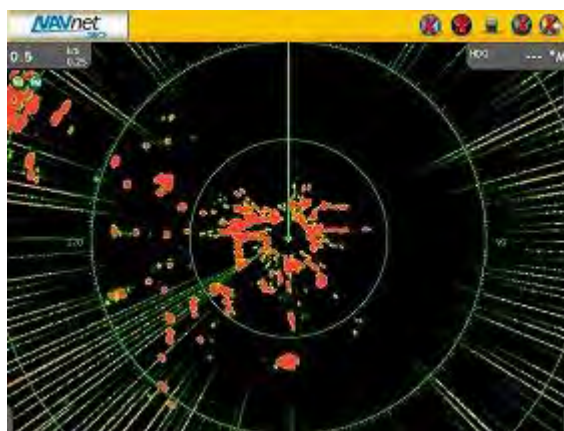
5.3.2.2-図 168 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



5.3.2.2-図 169 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：ON

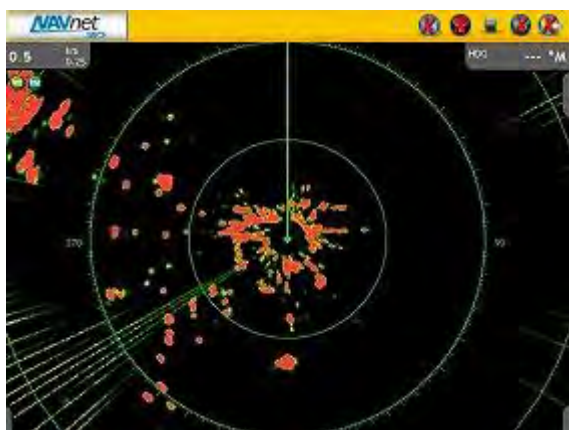


5.3.2.2-図 170 離隔距離：170 m



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



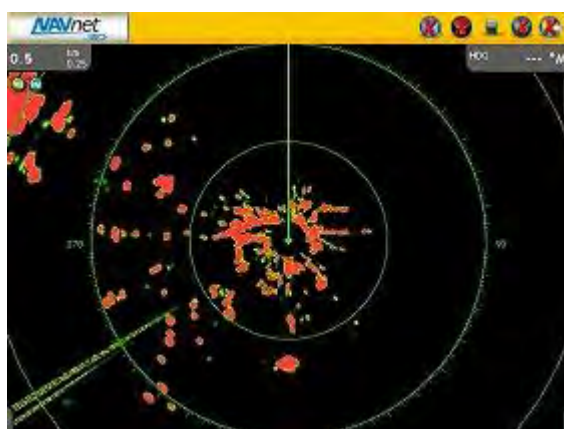
5.3.2.2-図 172 離隔距離：1.62 km



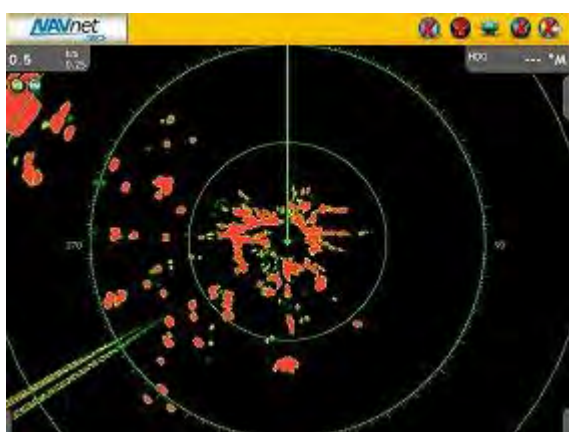
5.3.2.2-図 173 離隔距離：5.27 km



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

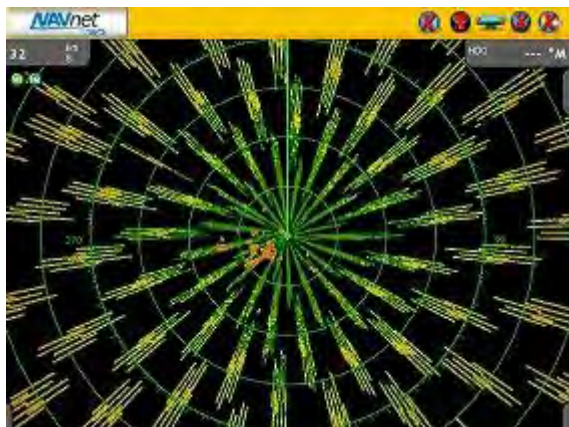


5.3.2.2-図 179 離隔距離 : 170 m

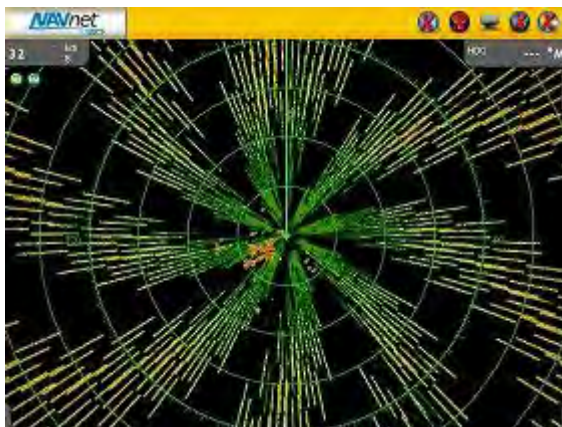


5.3.2.2-図 180 離隔距離 : 502 m

与干涉機（气象用）：9415 MHz、正対停止、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

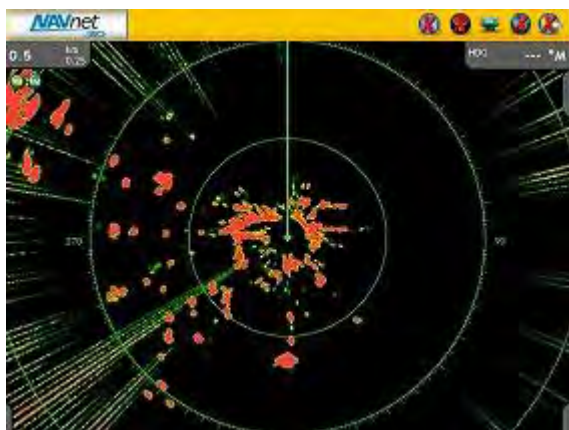
前項では、与干渉機である気象用の空中線を正対停止するという、通常運用時には生じない条件での検証を行った。本章では、現実的に起こり得る条件として、与干渉機・被干渉機双方が仰角零度で水平回転している場合(PPI)の結果を示す。

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。

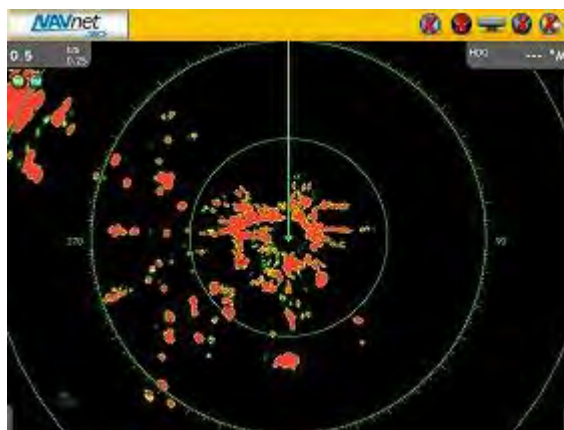
(A) 与干渉機：小型気象用レーダー、被干渉機：船舶用レーダーの場合

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



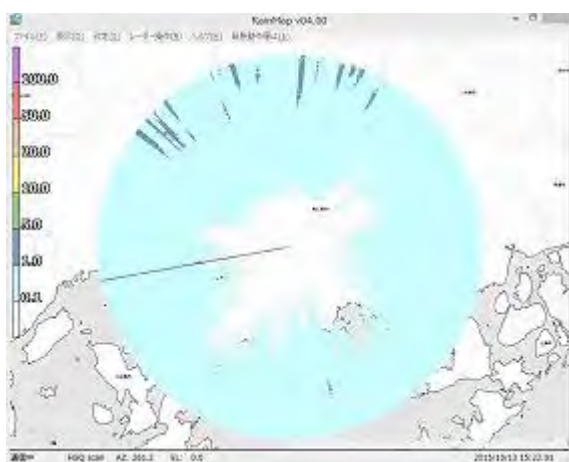
5.3.2.2-図 193 離隔距離：161 km

(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

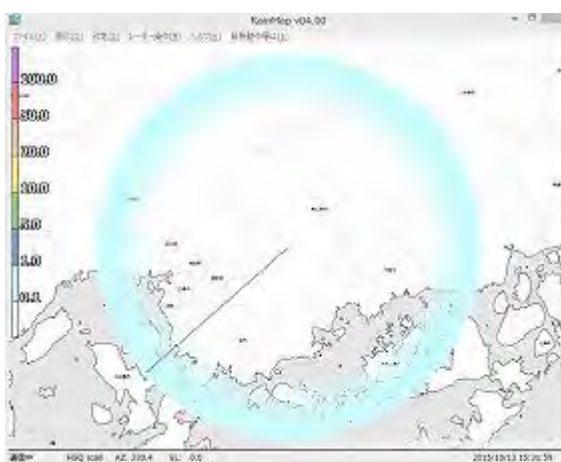
離隔距離が最も小さい場合を 5.3.2.2-図 194、同条件で干渉除去機能を ON にした場合を 5.3.2.2-図 195 に示す。また、離隔距離を大きくした場合を 5.3.2.2-図 196、5.3.2.2-図 197 にそれぞれ示す。

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。

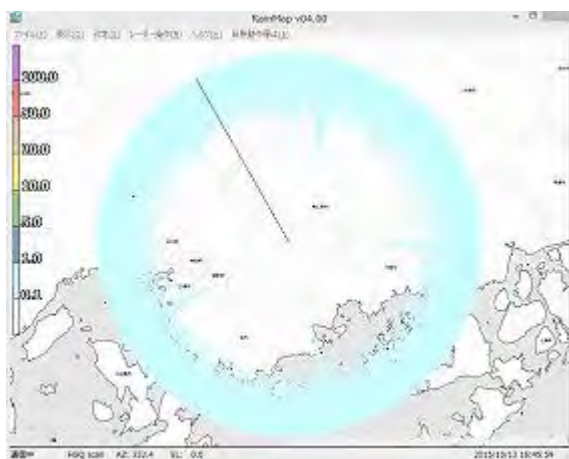
与干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI、被干渉機（気象用）：9415 MHz、PPI



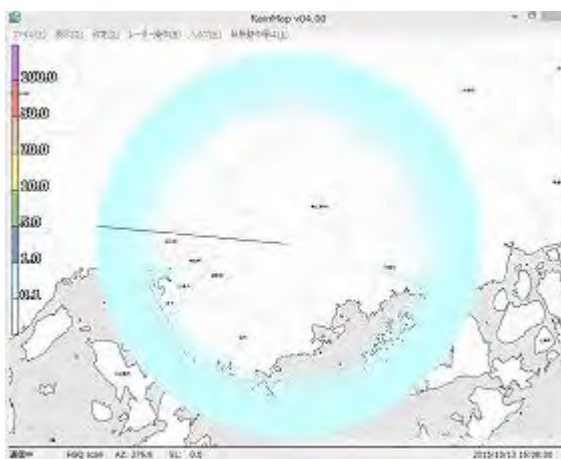
5.3.2.2-図 194 離隔距離：52.5 m
干渉除去機能：OFF



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

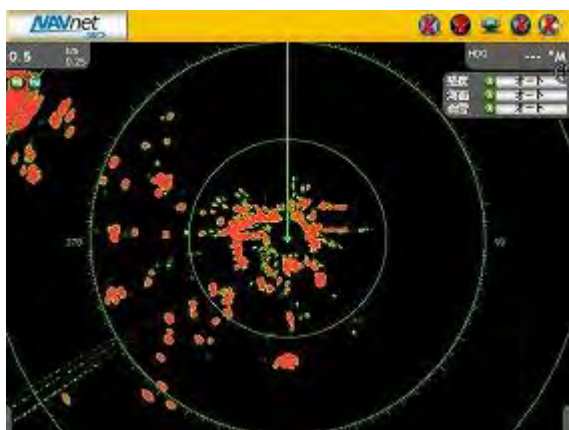
(2) 離隔周波数の増加に伴う干渉状況の変化

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。

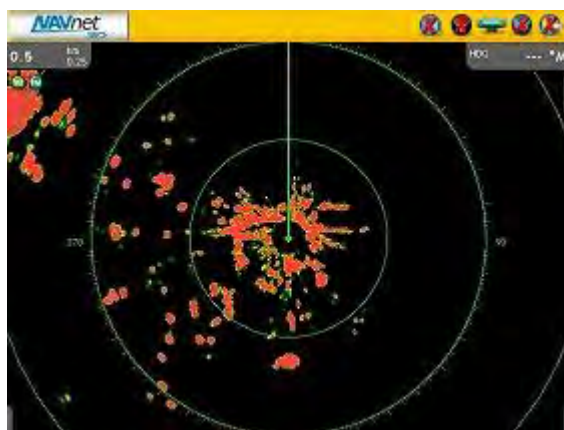
(A) 与干渉機：小型気象用レーダー、被干渉機：船舶用レーダーの場合

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。

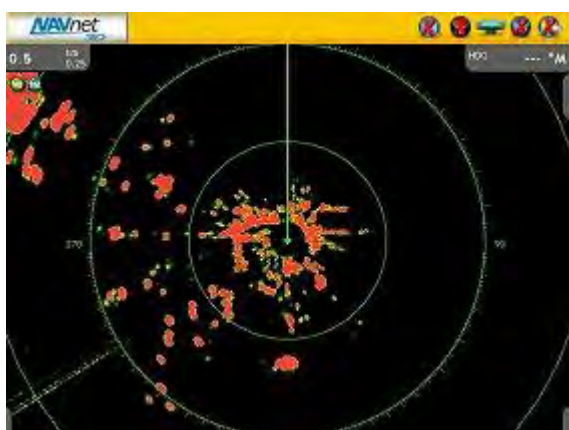
与干渉機 (気象用) : 9470 MHz、正対停止、被干渉機 (船舶用) : 9414.38 MHz、PPI



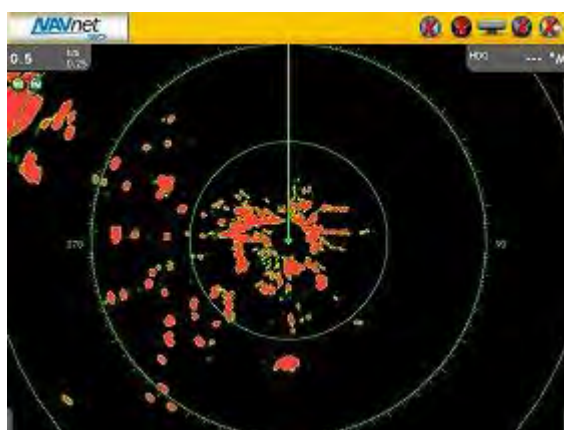
5.3.2.2-図 198 離隔距離 : 52.5 m
干渉除去機能 : OFF



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



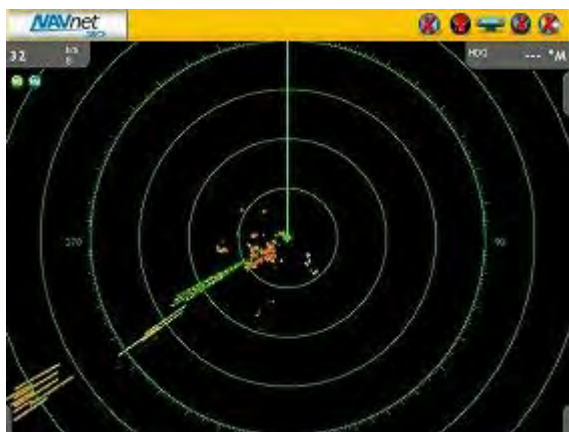
5.3.2.2-図 200 離隔距離 : 170 m



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。

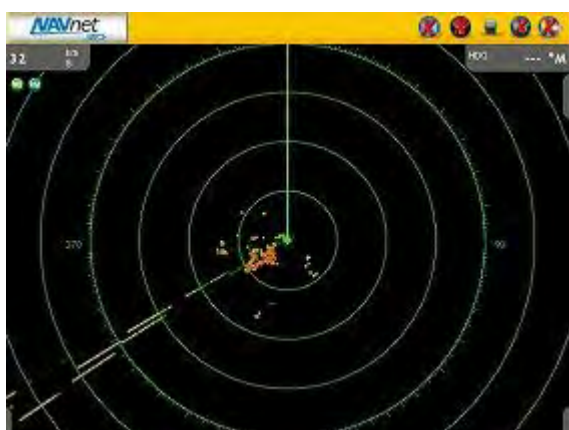
与干渉機（気象用）：9470 MHz、正対停止、被干渉機（船舶用）：9414.38 MHz、PPI



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



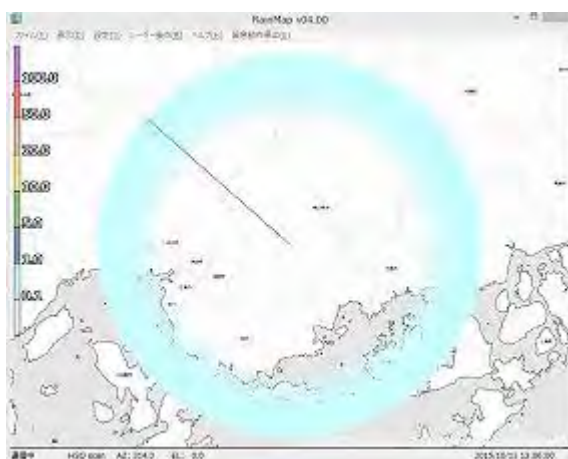
5.3.2.2-図 205 離隔距離：502 m

(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。

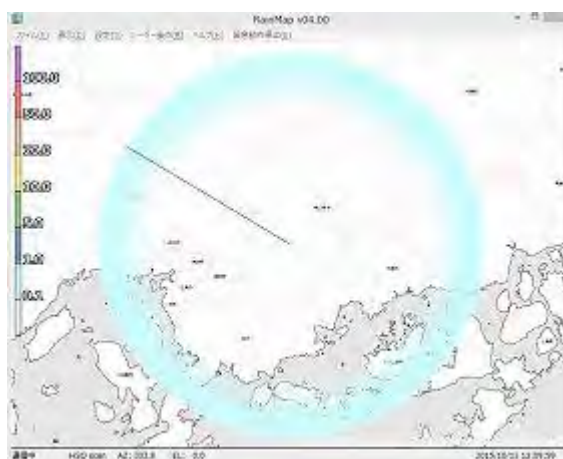
なお、与干渉機の船舶用レーダーはマグネトロン送信機である。

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



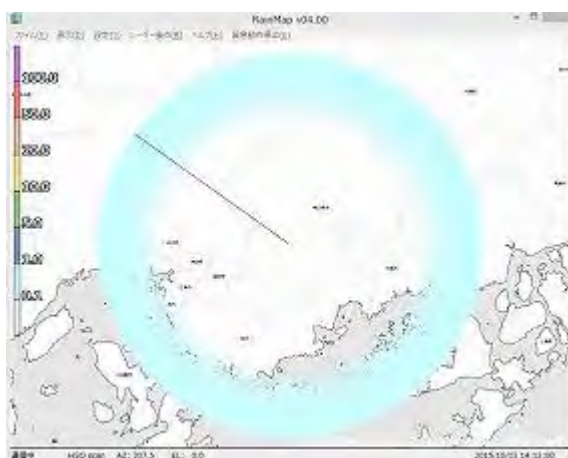
5.3.2.2-図 206 離隔距離：52.5 m

干渉除去機能：OFF



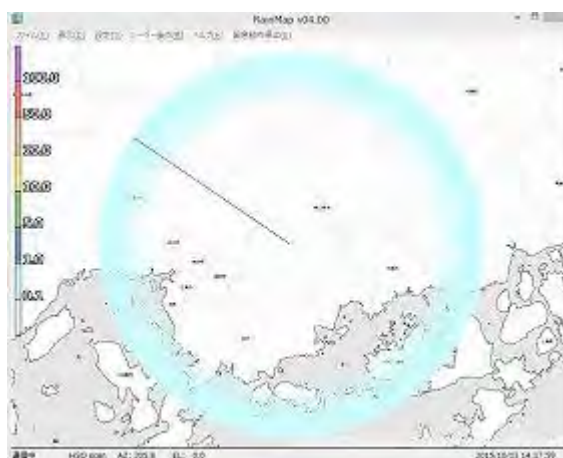
5.3.2.2-図 207 離隔距離：52.5 m

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

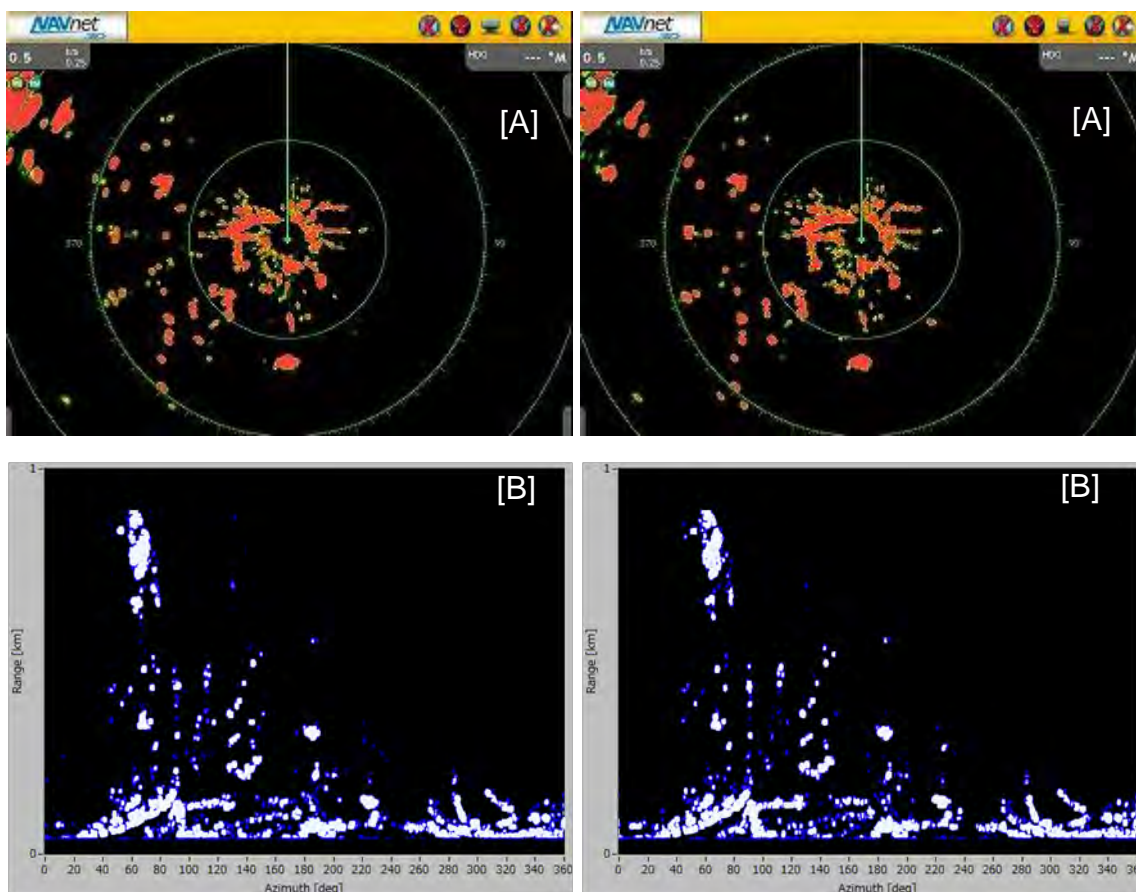
干渉除去機能：ON

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

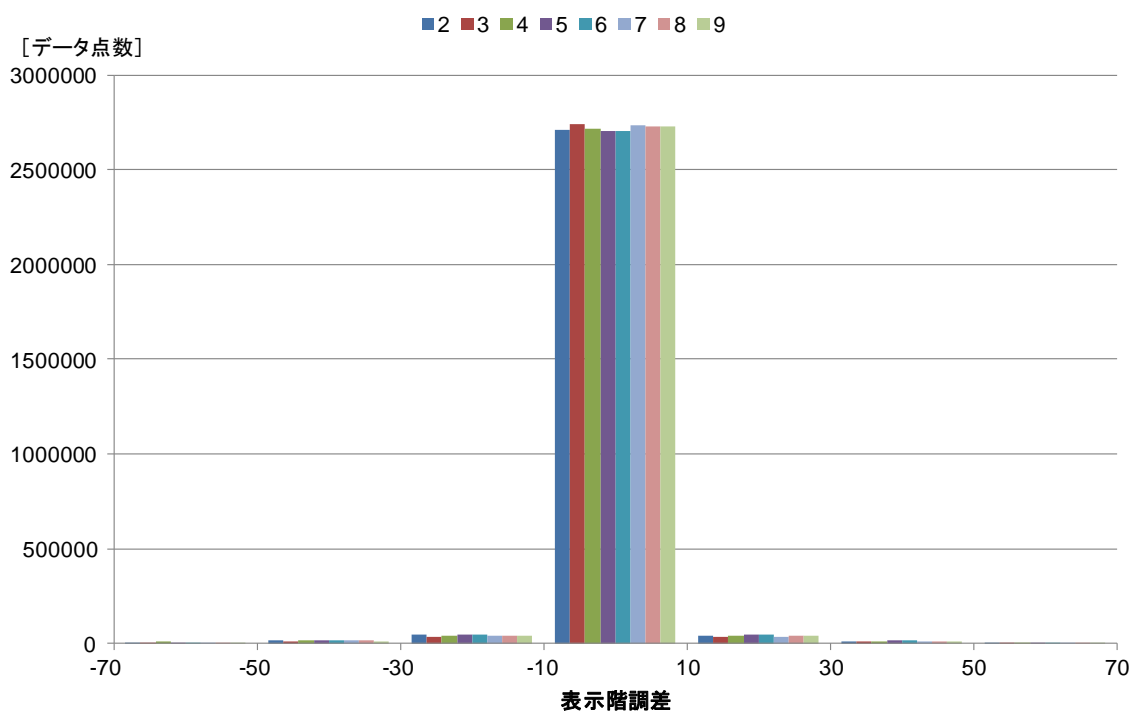
5.3.2.3-図 211 干渉強度最高状態
干渉除去機能：ON

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

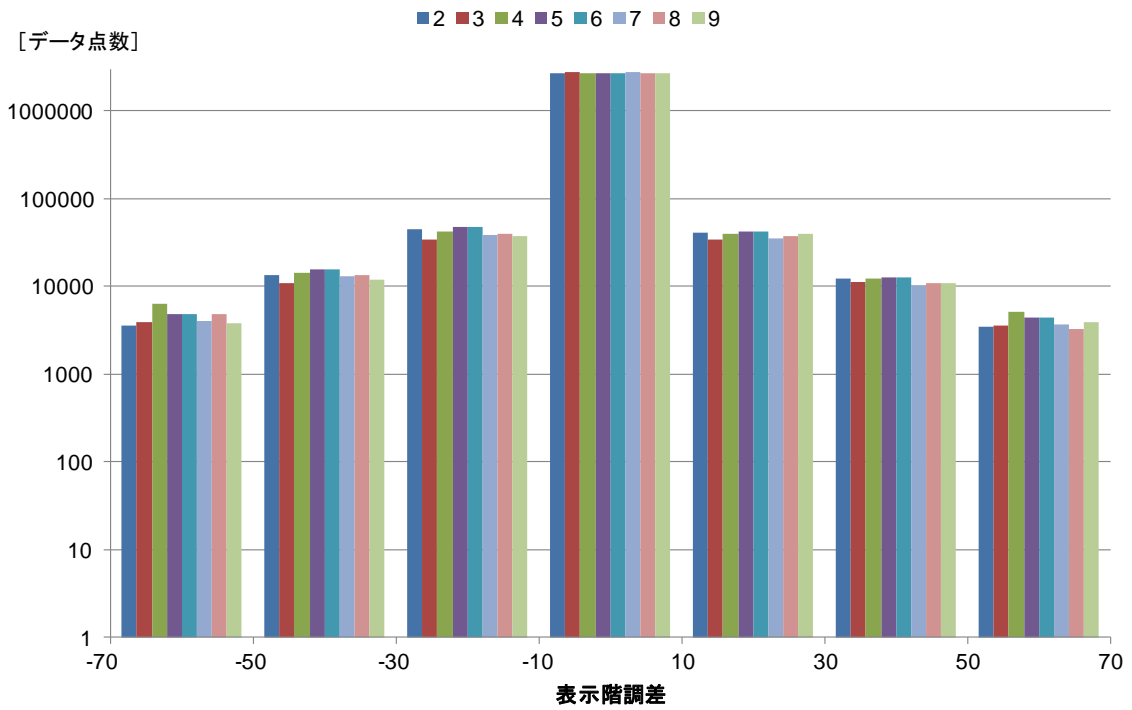
じ物体であっても必ずしも同強度で反射波を観測できるとは限らず、さらに、航空機等の移動物体が映り込んでしまうことも考えられ、これらが誤差要因となる。

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。

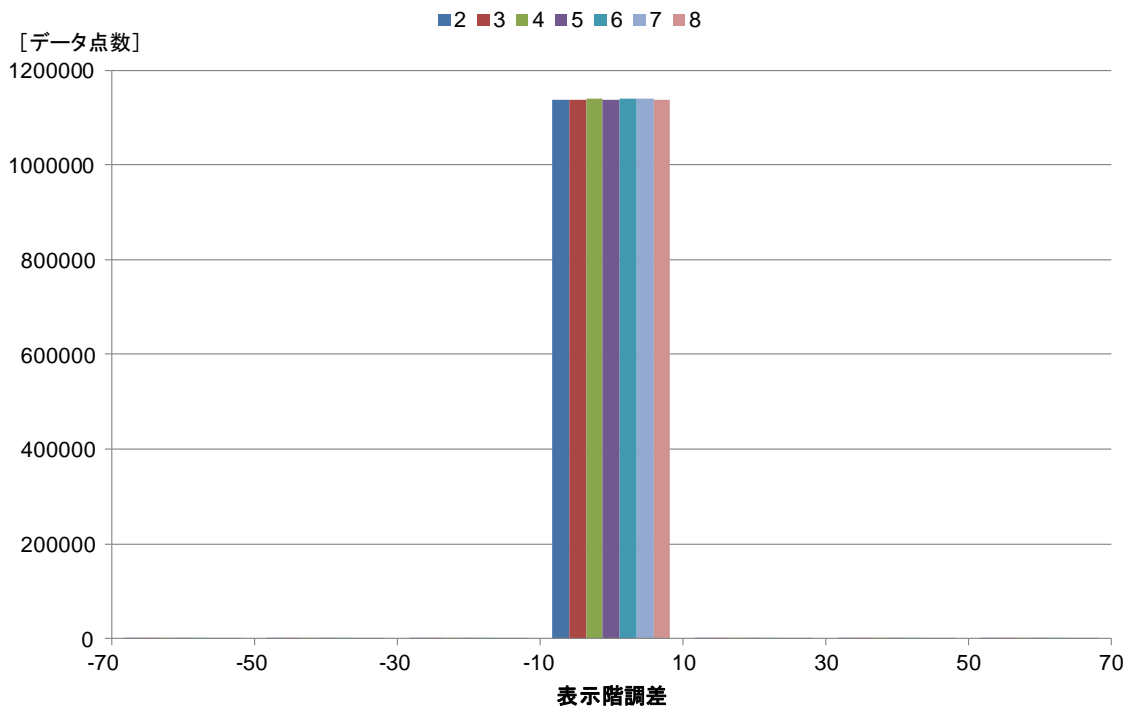
なお、横軸は表示機の表示階調であり、値域は-63~+63 である。



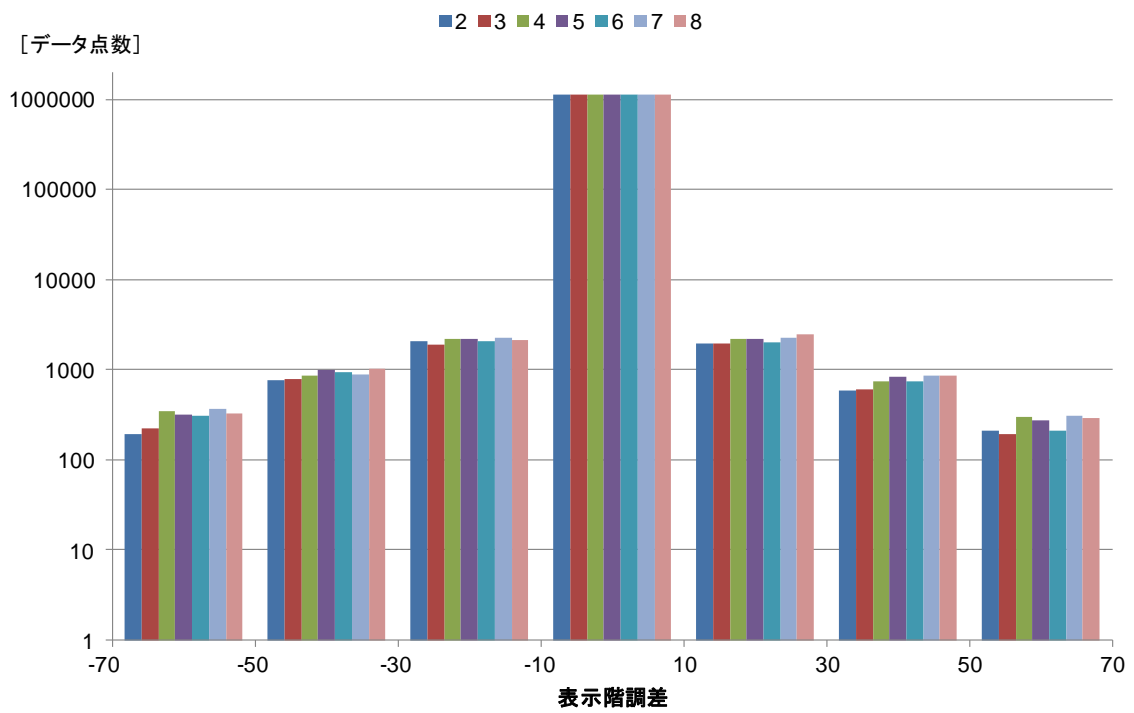
5.3.2.3-図 212 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 線形、0.5 km レンジ)



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



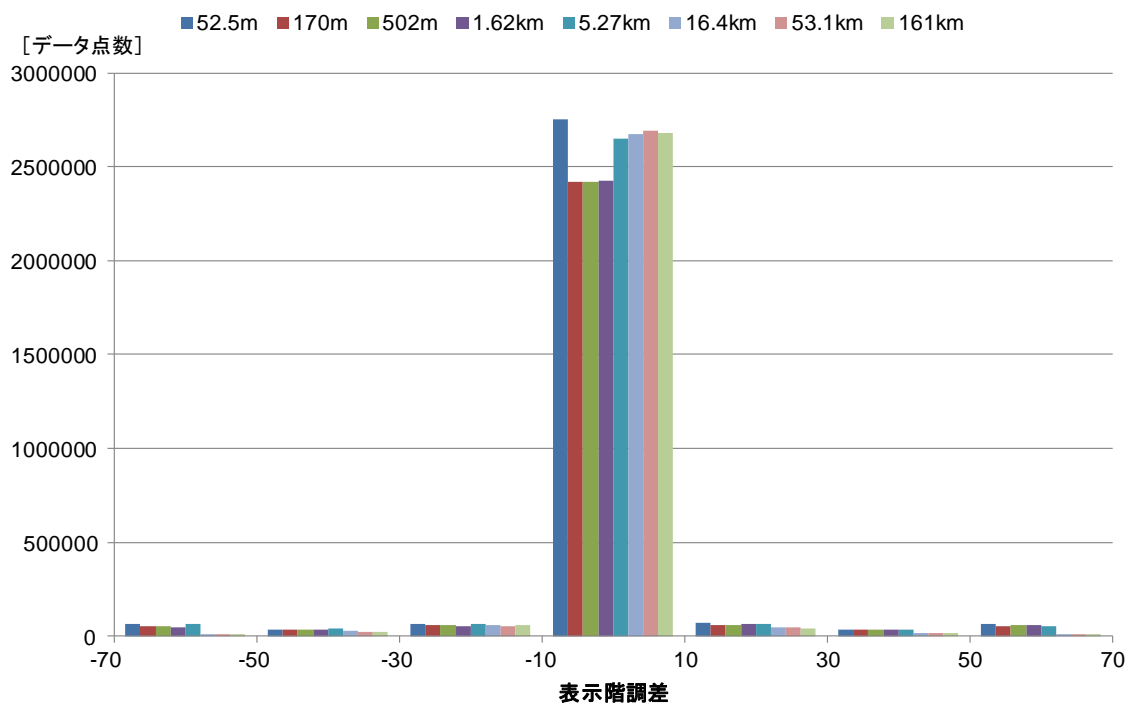
5.3.2.3-図 214 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 線形、32 km レンジ)



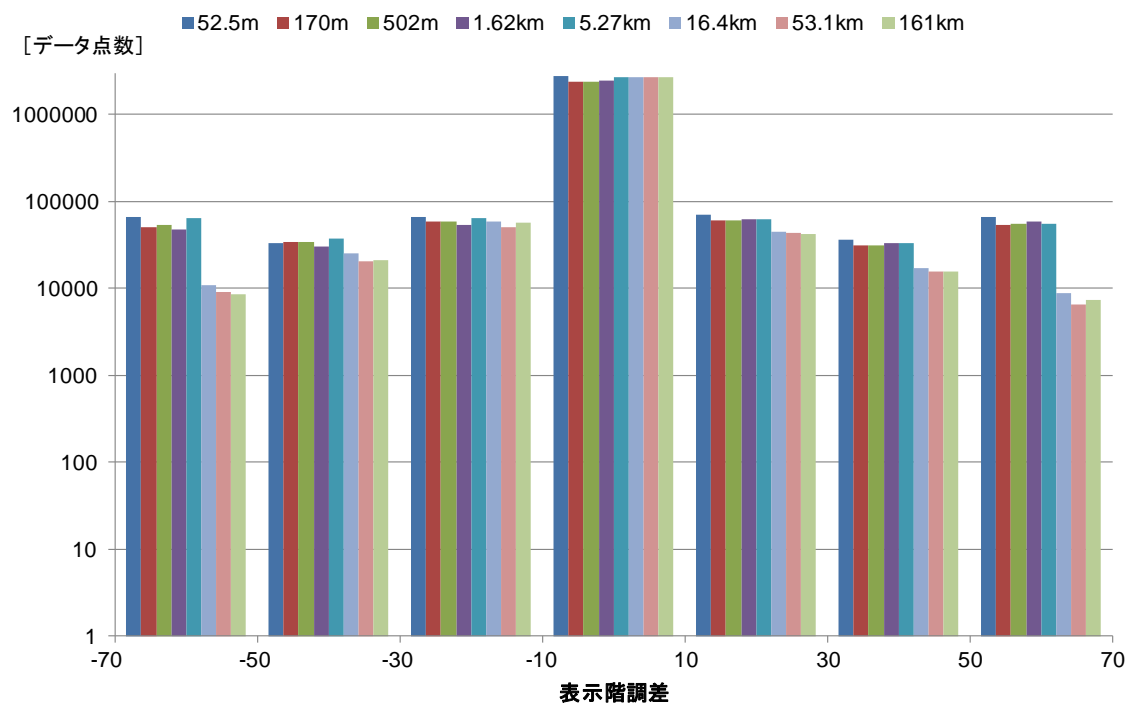
5.3.2.3-図 215 評価誤差 (理想値 : 0、縦軸 : 対数、32 km レンジ)

次に、実際の観測結果を評価する。

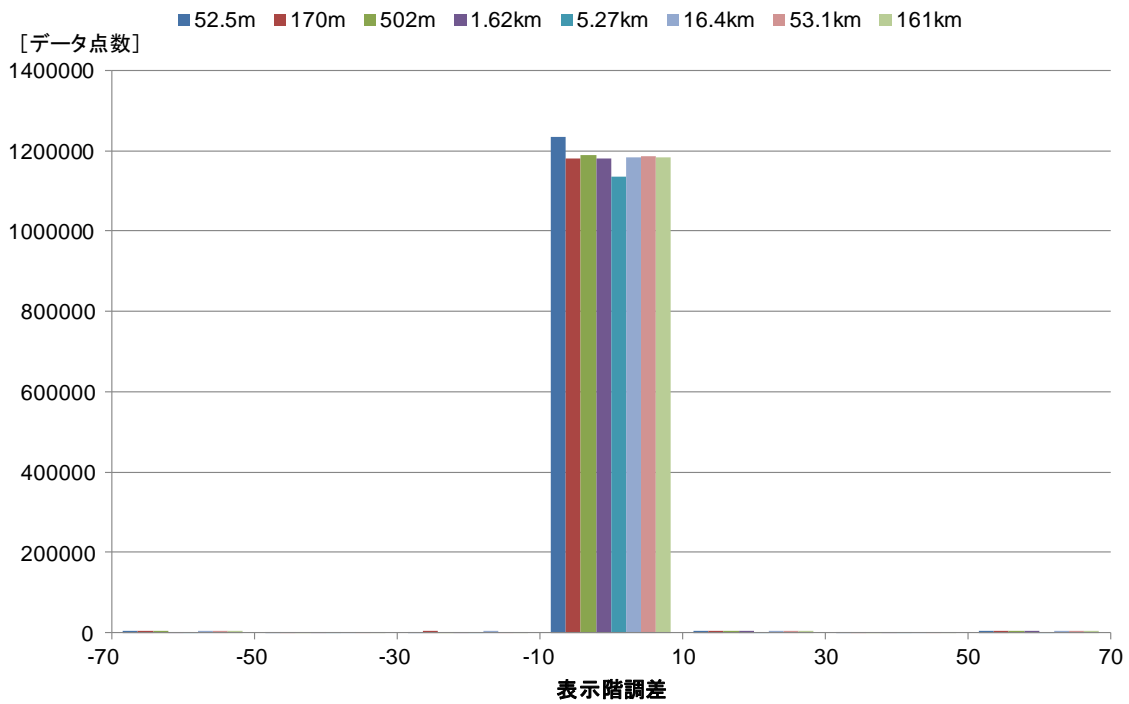
与干渉機（小型気象用レーダー）の空中線を正対停止させた状態で送信電力を低減していき、離隔距離の増加を模擬した場合について、干渉除去後のデータと基準画像の差をヒストグラムで表したものを 5.3.2.3-図 216 から 5.3.2.3-図 219 に示す。



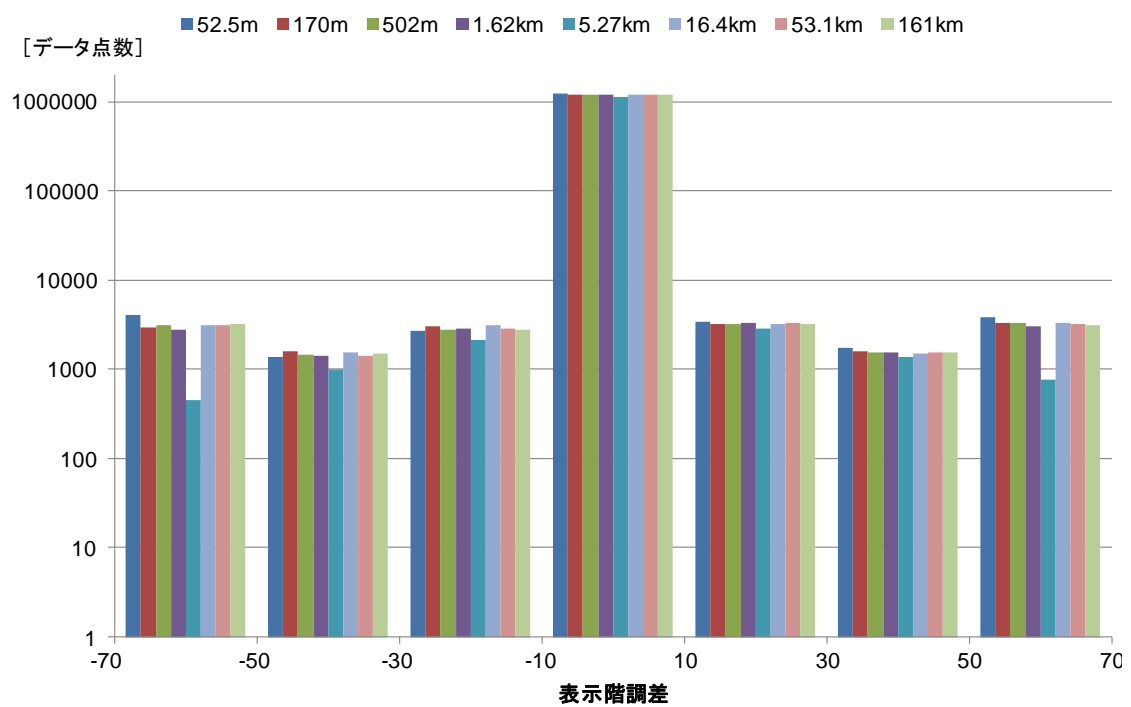
5.3.2.3-図 216 基準画像との差のヒストグラム（理想値：0、縦軸：線形、0.5 km レンジ）



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)

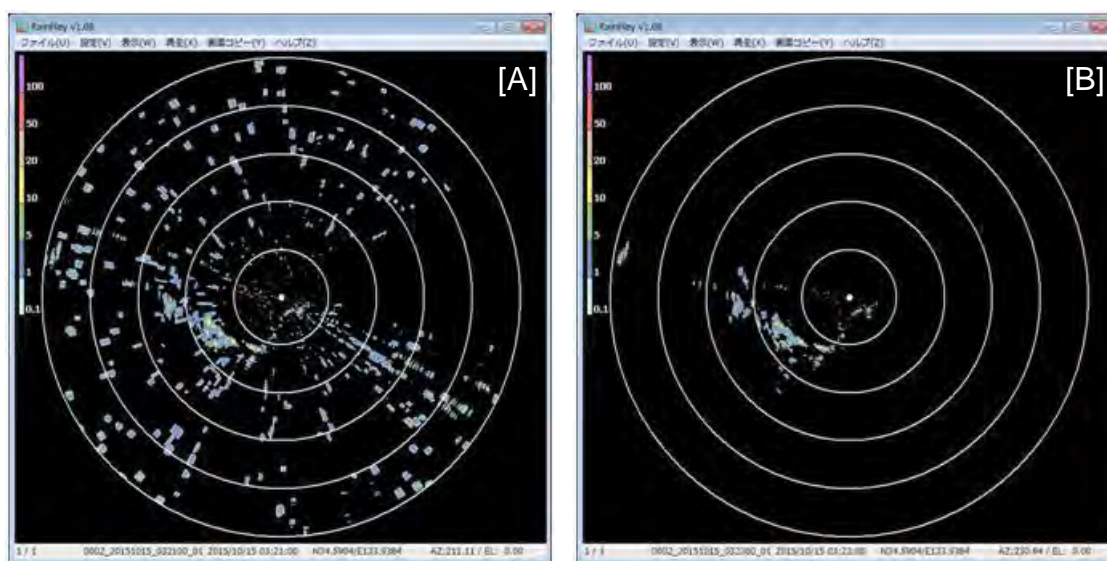


5.3.3.2-図 234 300 NM レンジ、
離隔周波数 2.5 MHz

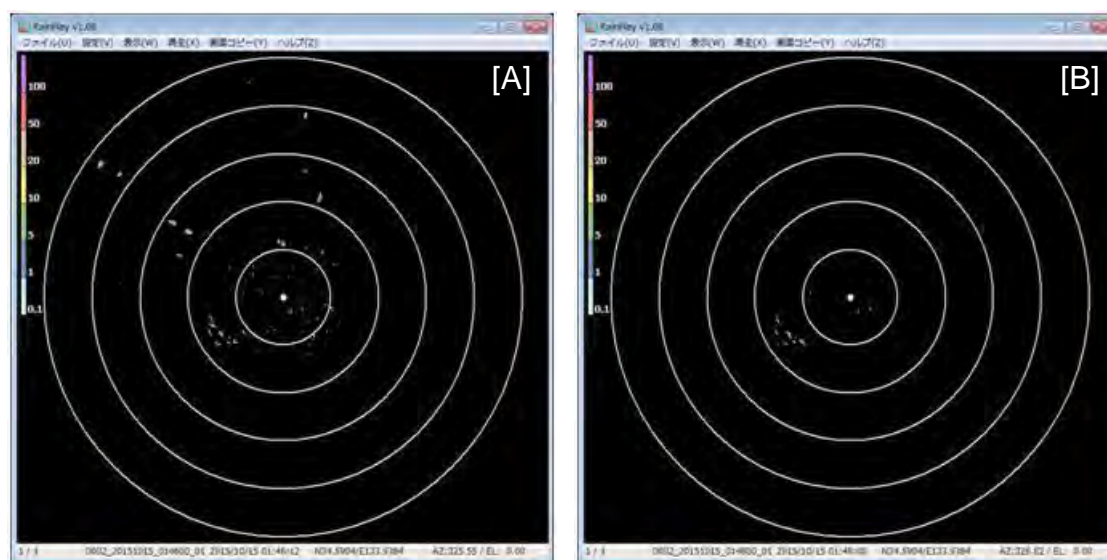
(2) 与干渉機：航空機用レーダー、被干渉機：小型気象用レーダー

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。

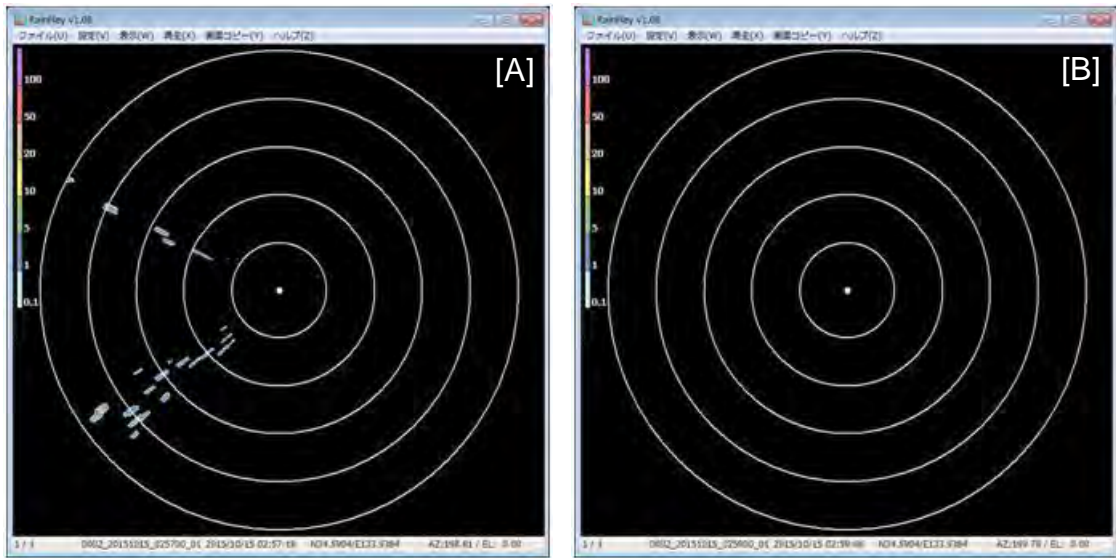
与干渉機を最小レンジである 5 NM に設定した時の結果を 5.3.3.2-図 235 から 5.3.3.2-図 238、最大レンジである 300 NM に設定した時の結果を 5.3.3.2-図 239 から 5.3.3.2-図 242 に示す。いずれも、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON である。



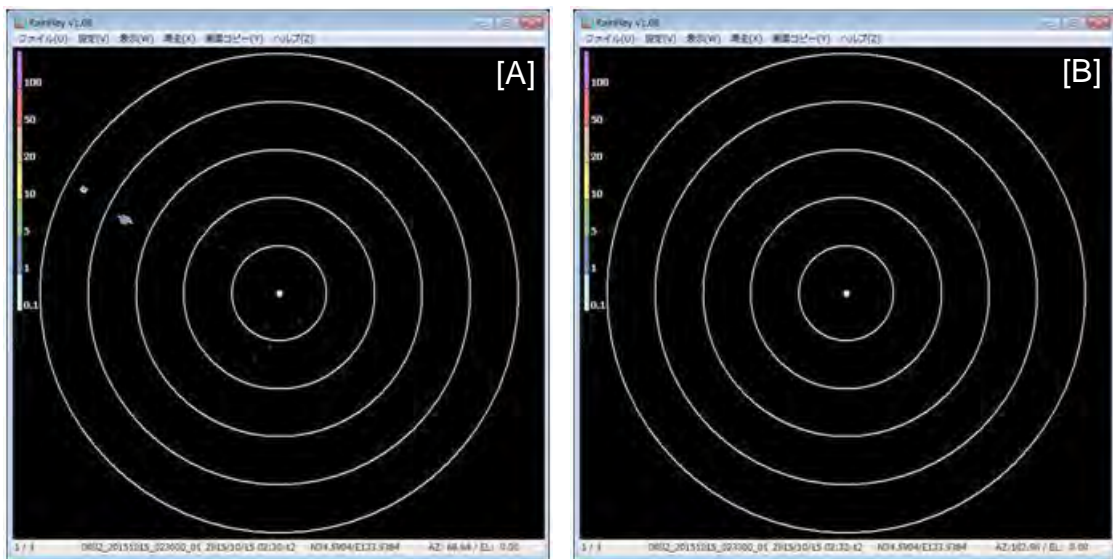
5.3.3.2-図 235 与干渉機：5 NM レンジ、離隔距離：137 m



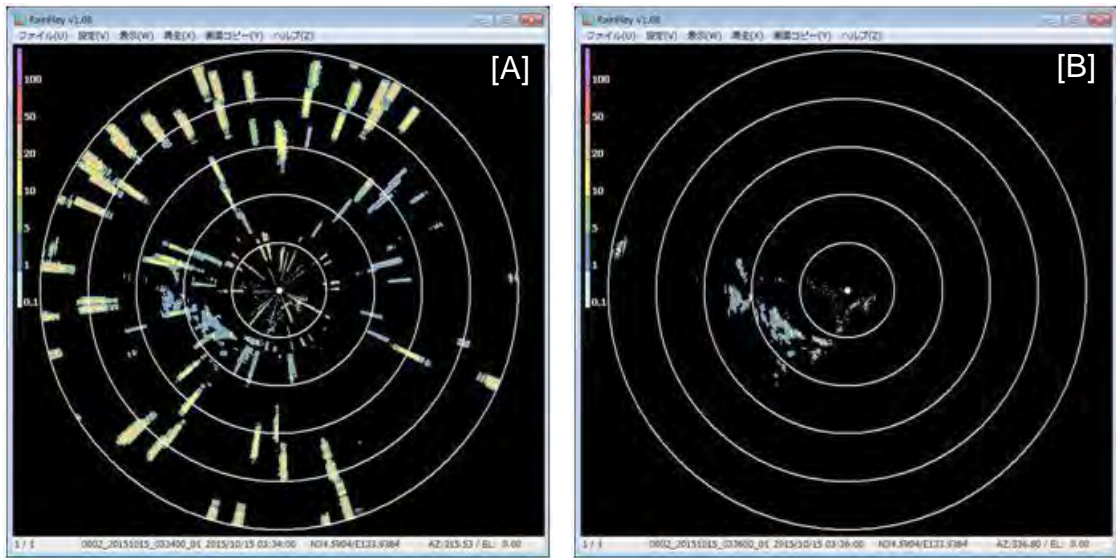
5.3.3.2-図 236 与干渉機：5 NM レンジ、離隔距離：363 m



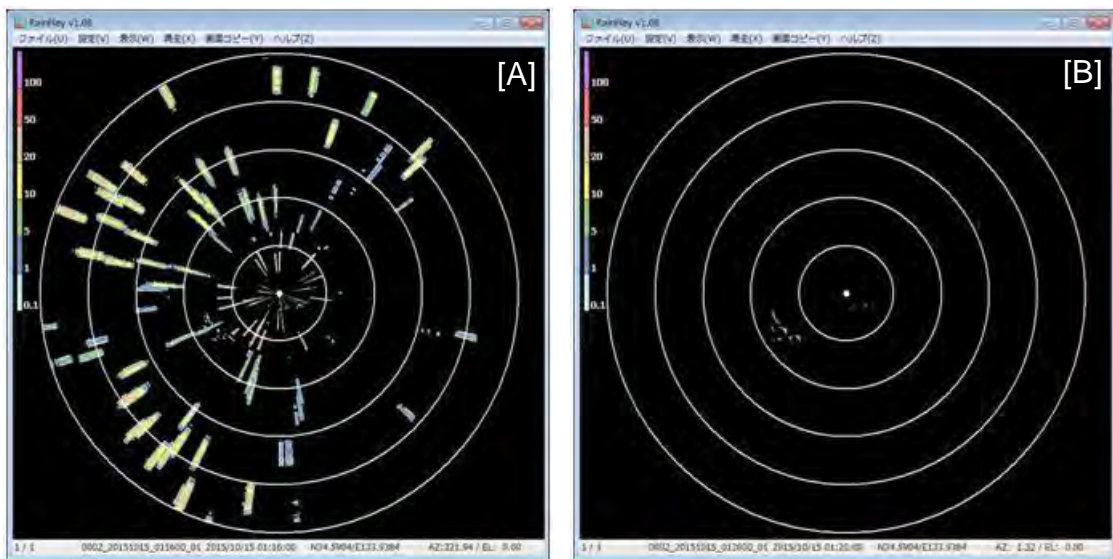
5.3.3.2-図 237 与干渉機 : 5 NM レンジ、離隔距離 : 3.46 km



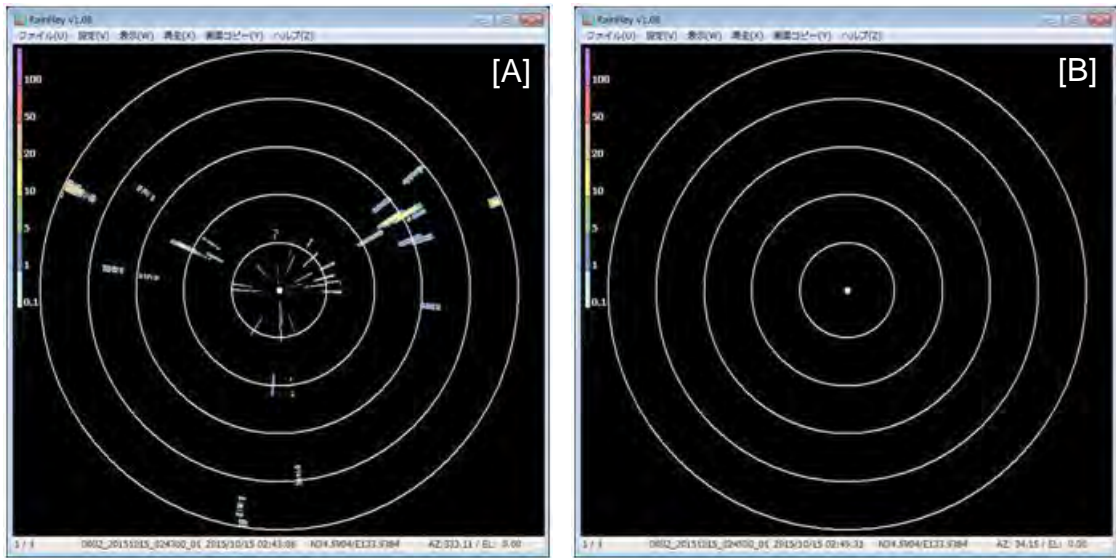
5.3.3.2-図 238 与干渉機 : 5 NM レンジ、離隔距離 : 36.3 km



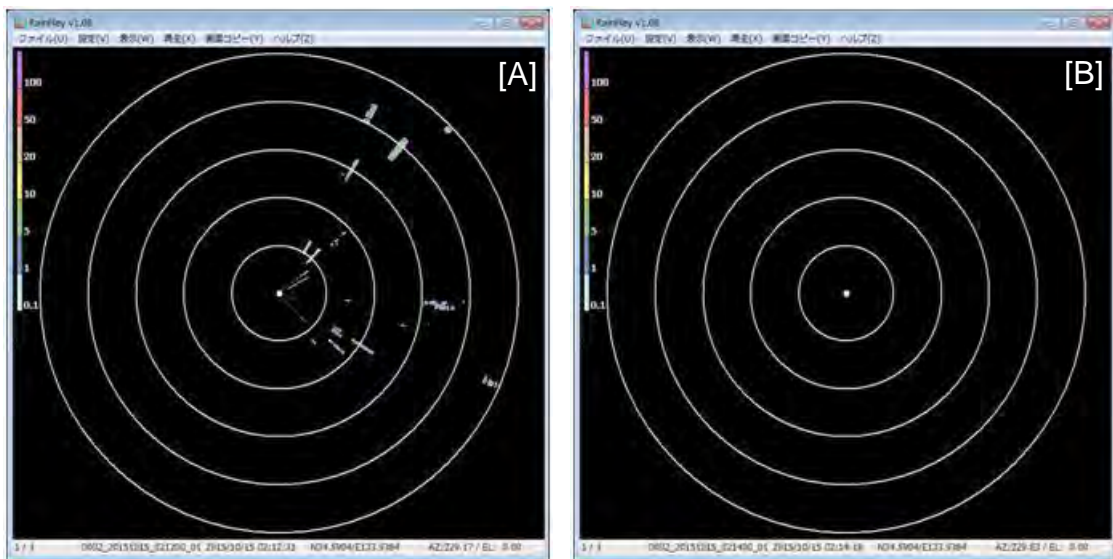
5.3.3.2-図 239 与干渉機 : 300 NM レンジ、離隔距離 : 137 m



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。

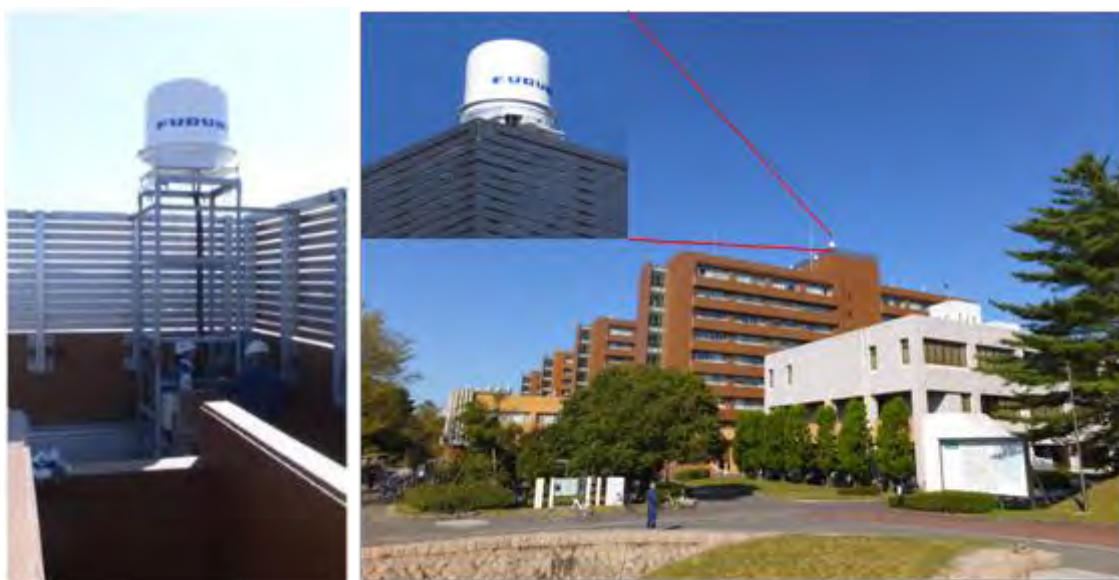
今回使用した50 μ s のパルスは、航空機用レーダー上では4 NM の長さで表示される。つまり、5 NM レンジでは距離方向に対して80%、300 NM レンジでは1.3%を占めることとなり、後者では疎らな点としてしか現れない。

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

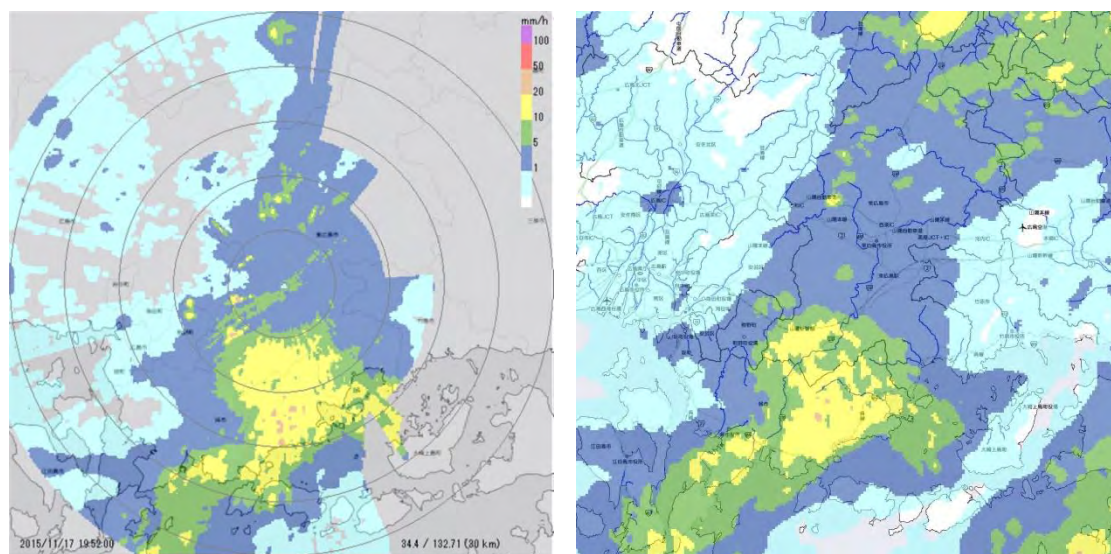
小型気象用レーダーを実際に運用し、その能力を評価する。国立大学法人 広島大学の校舎屋上へ設置（5.3.4.1-図 243）して運用してデータを収録する。この収録したデータを、国土交通省の XRAIN の観測結果及び、気象庁のアメダスと比較することによって評価する。



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。

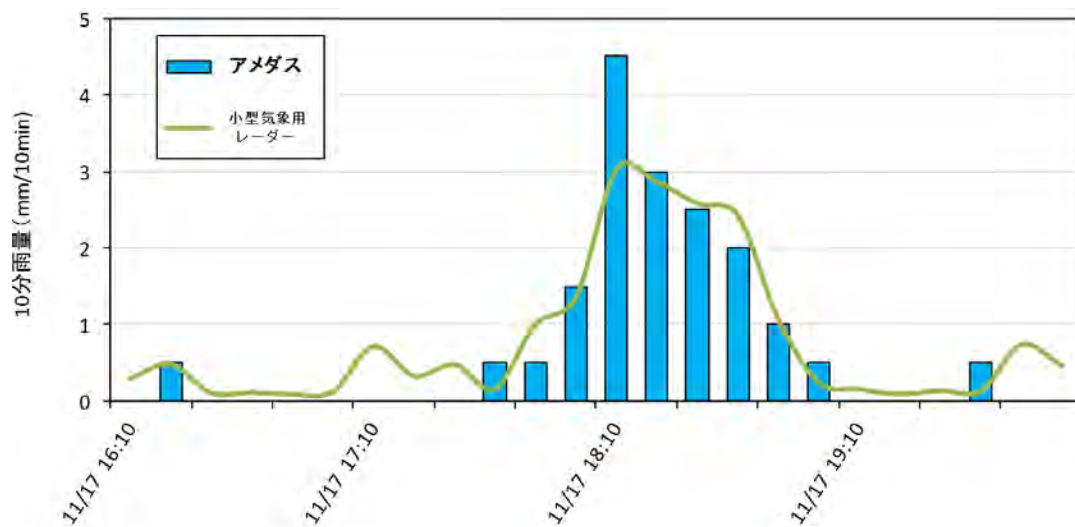


小型気象用レーダー

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。