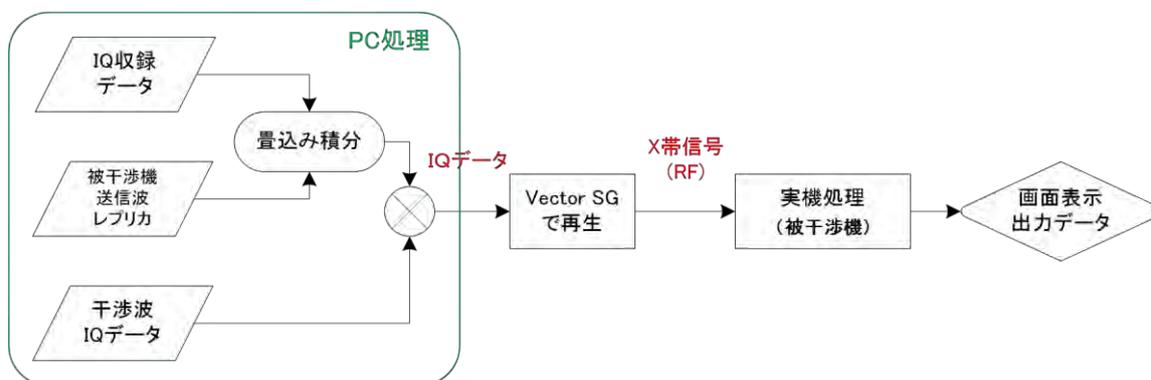


第4章 机上検討

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。



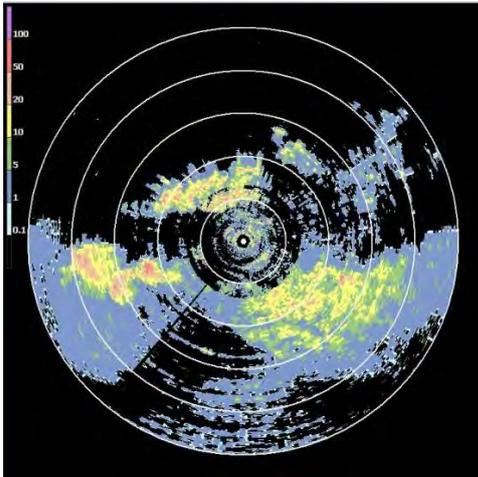
4.1-図 13 机上検討説明図

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。

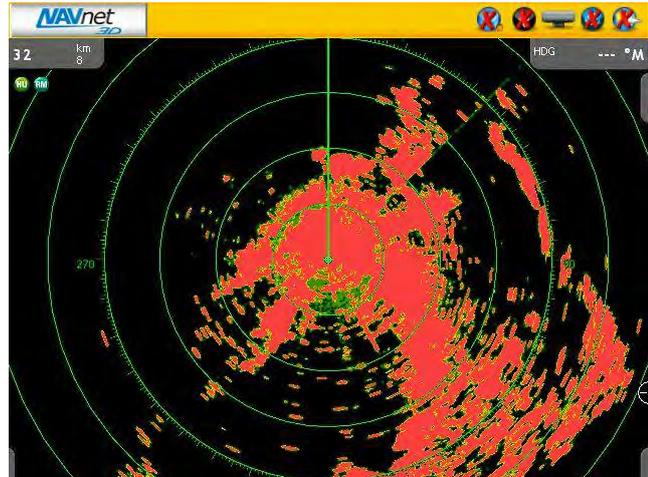
ただし、船舶用レーダーは陸上用気象レーダーよりも優先度が上位の業務で使用されるため、本検討によって示した干渉軽減効果については、今後、被干渉側である船舶用レーダーの使用者や製造者との調整等を経て対応することが望ましい。

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）



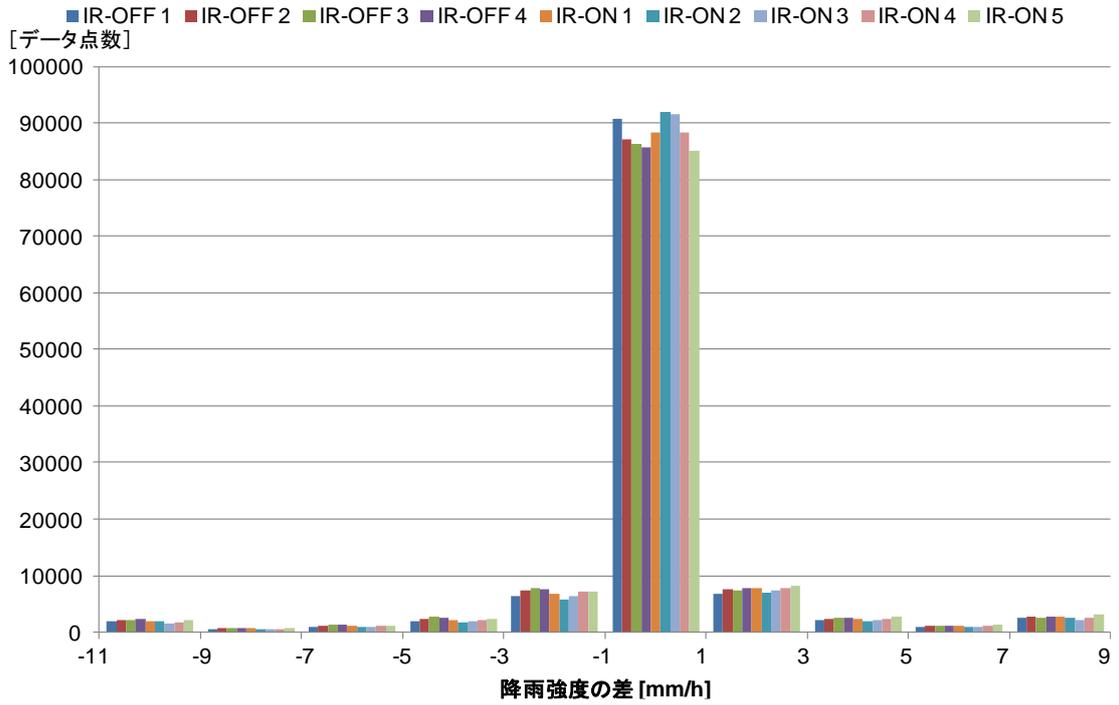
4.1-図 15 船舶用基準画像（地形+船舶）

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。

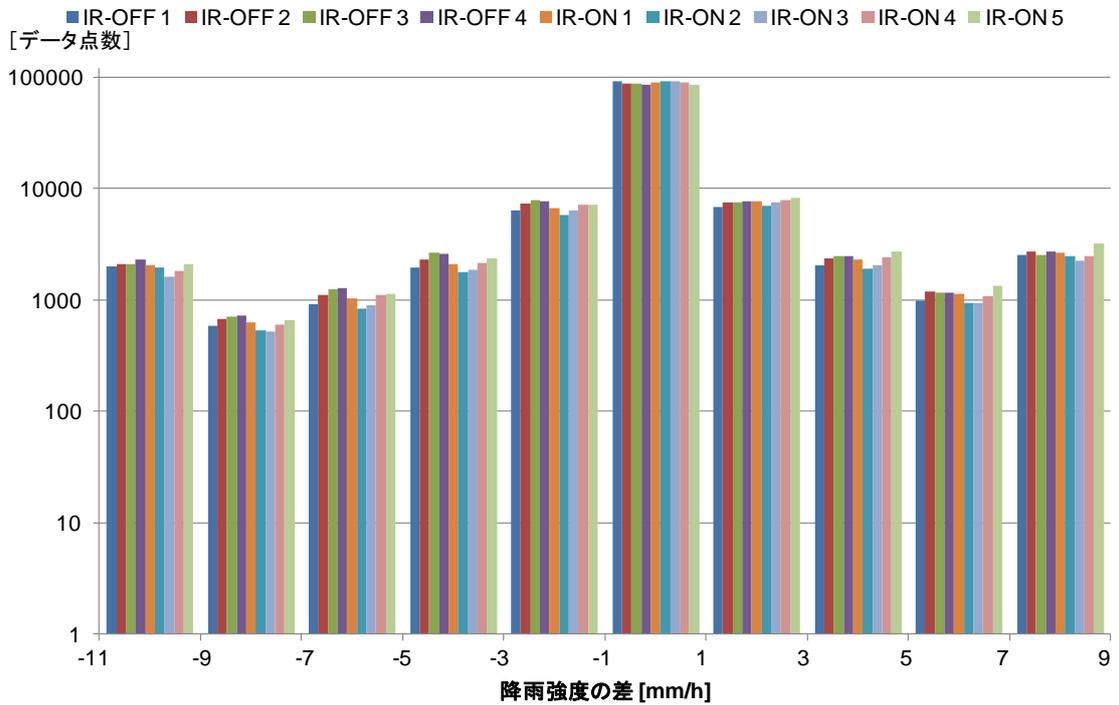
測定系の安定度及び、干渉除去後のデータ劣化を評価するため、4.1-図 13 に示した処理系で 10 回連続測定した場合を評価する。初回の取得データを基準とし、2 回目以降のデータとの差分をヒストグラムで評価した結果を 4.1-図 16 から 4.1-図 21 に示す。

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。

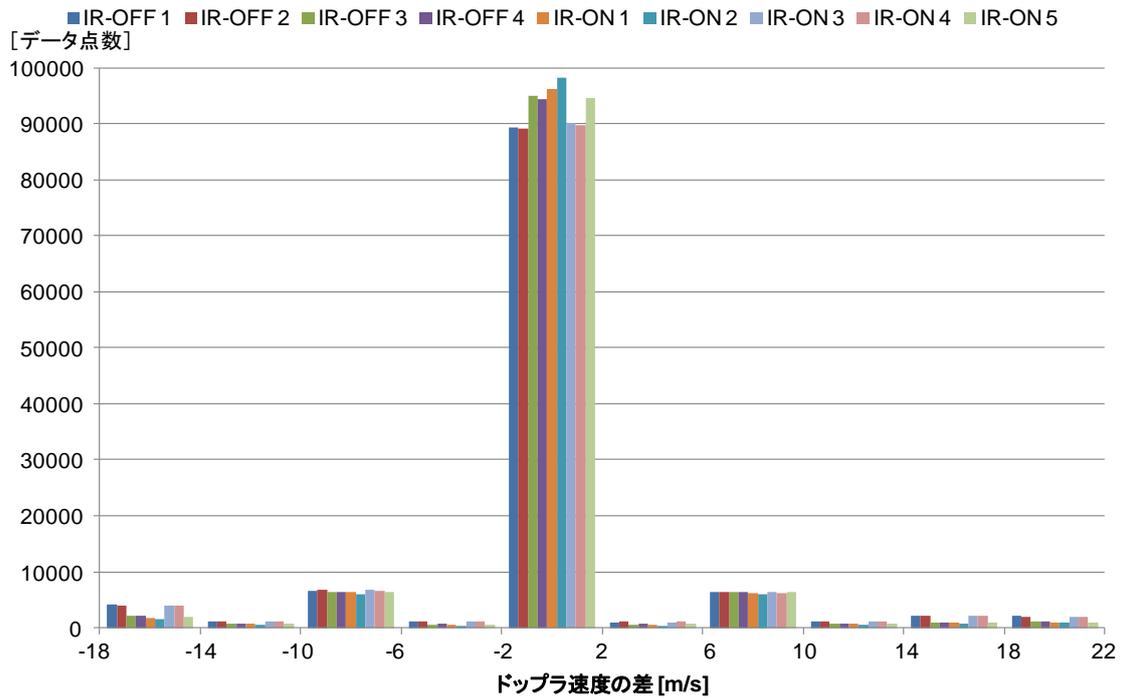
同様に、4.1-図 15 に示した船舶用基準画像を表示階調で評価した結果を、4.1-図 22 及び、4.1-図 23 に示す。こちらも、干渉除去機能の ON/OFF で有意な差は見られないことが分かる。



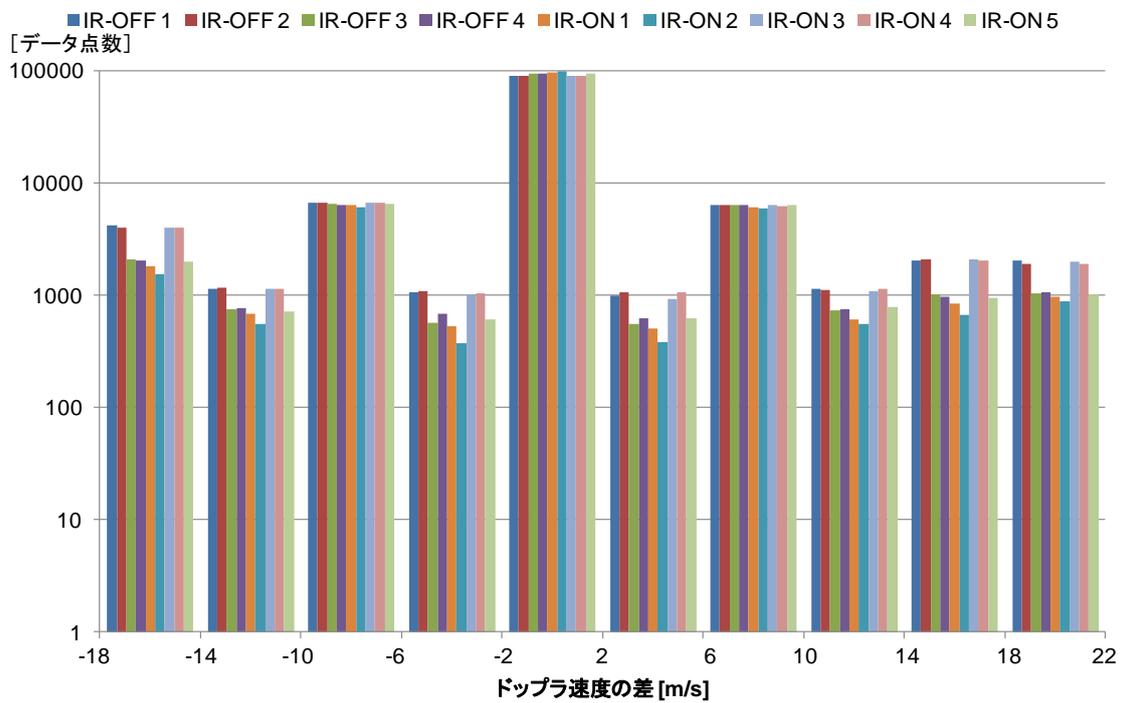
4.1-図 16 降雨強度差のヒストグラム（気象用基準画像、縦軸：線形）



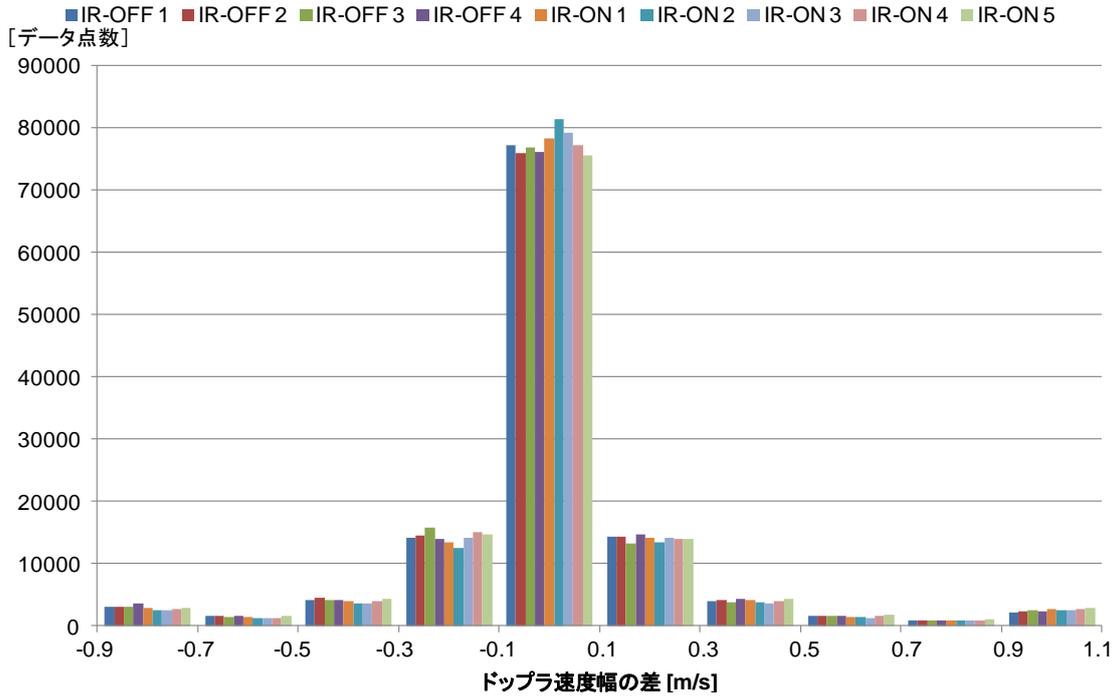
4.1-図 17 降雨強度差のヒストグラム（気象用基準画像、縦軸：対数）



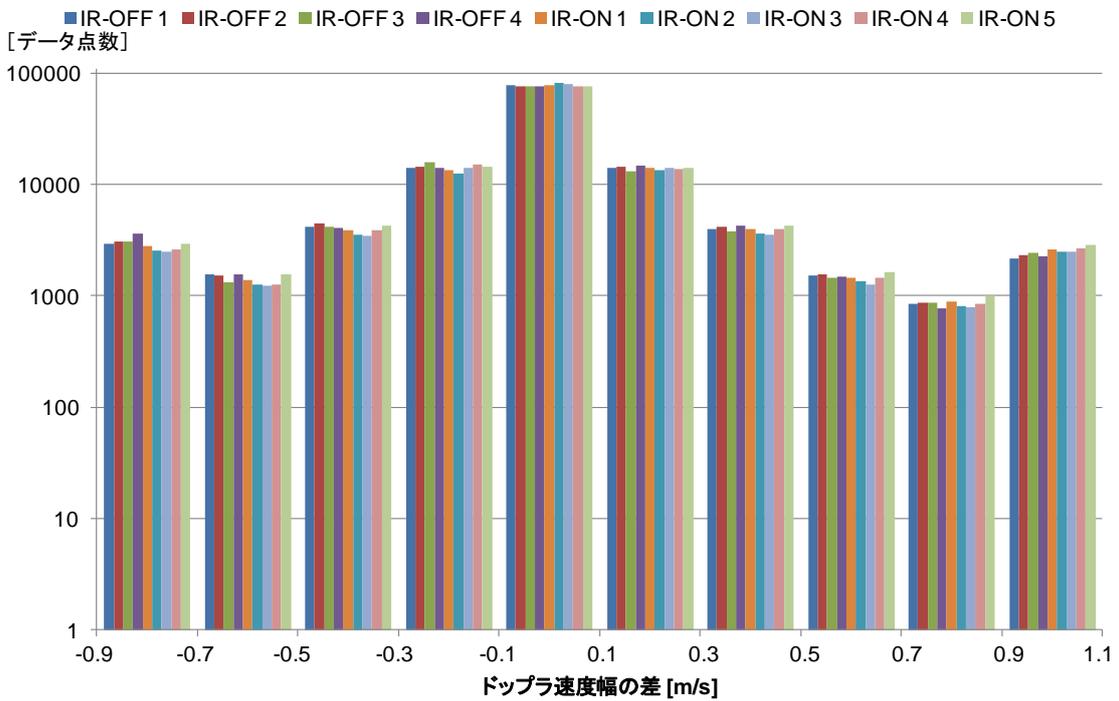
4.1-図 18 ドップラ速度差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：線形)



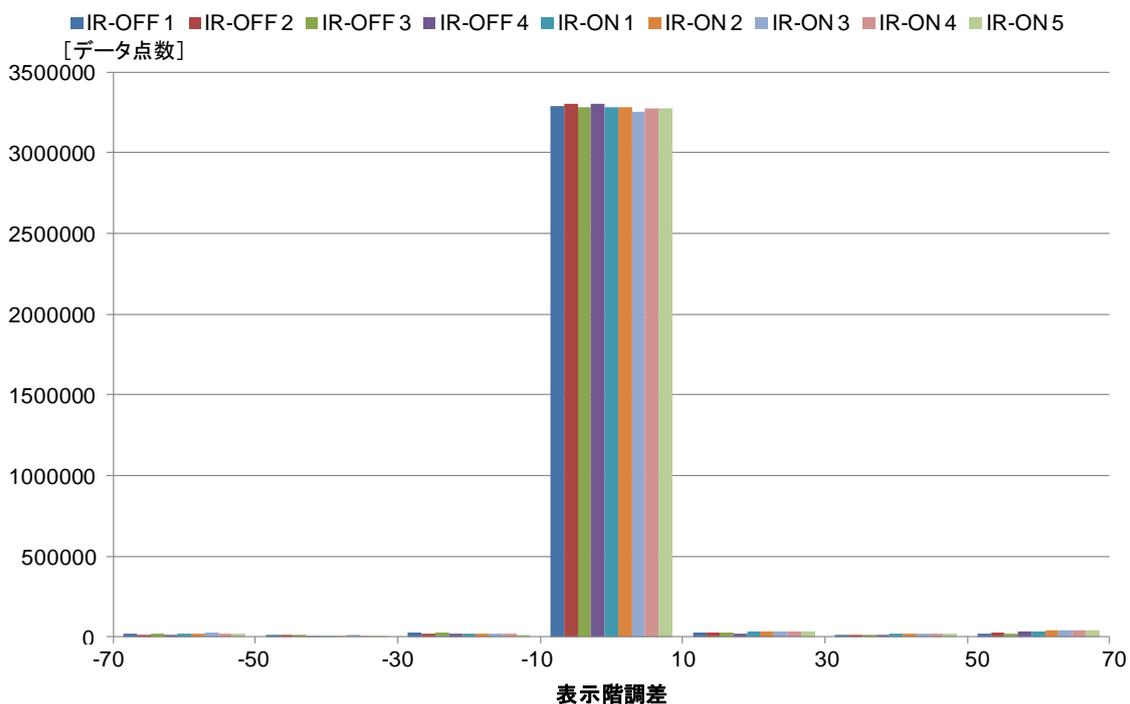
4.1-図 19 ドップラ速度差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：対数)



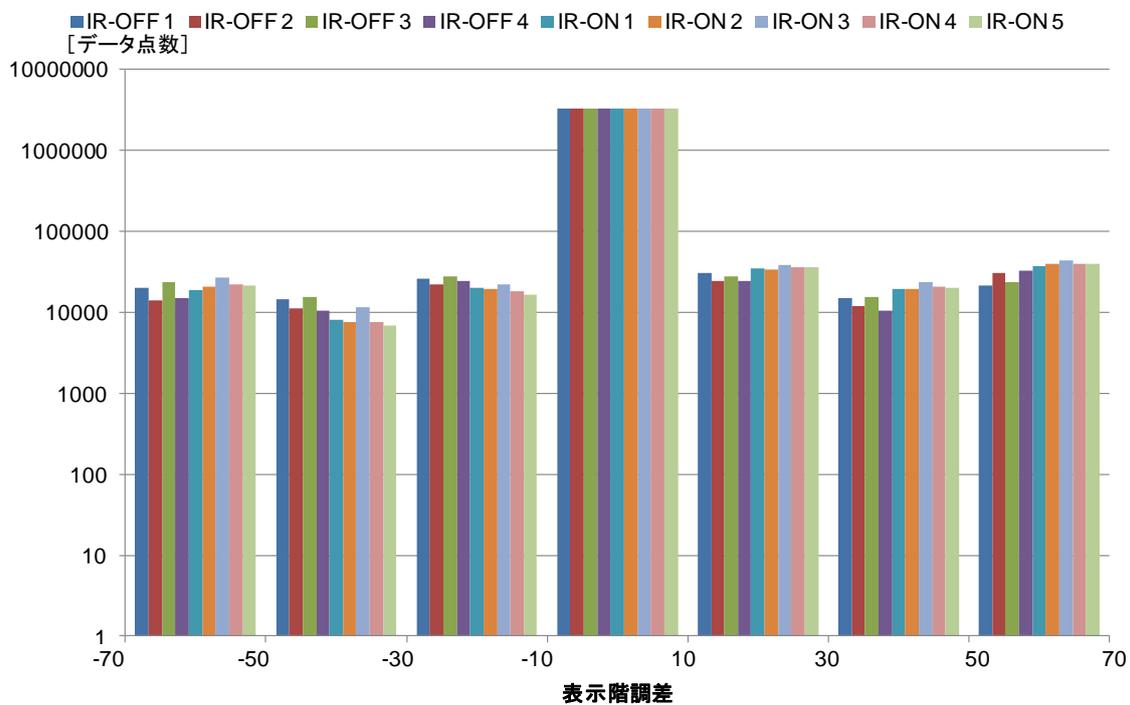
4.1-図 20 ドップラ速度幅差のヒストグラム (気象用基準画像、縦軸：線形)



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）

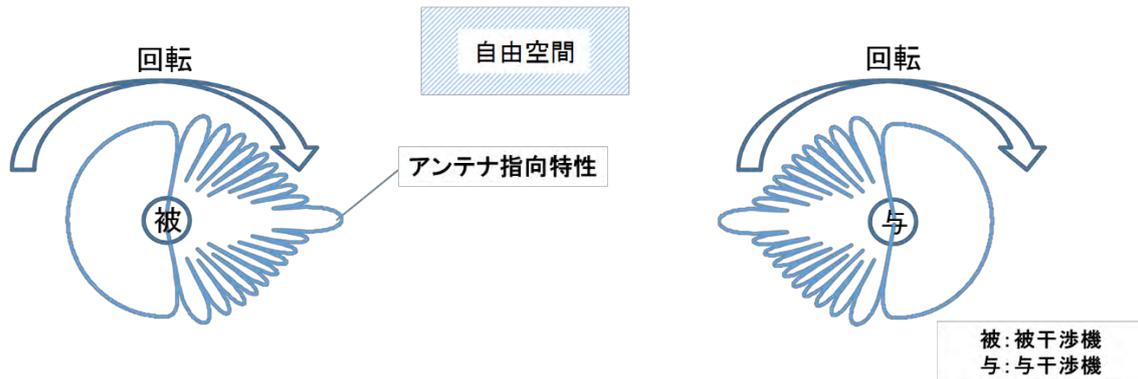


4.1-図 23 表示階調差のヒストグラム（船舶用基準画像、縦軸：対数）

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。

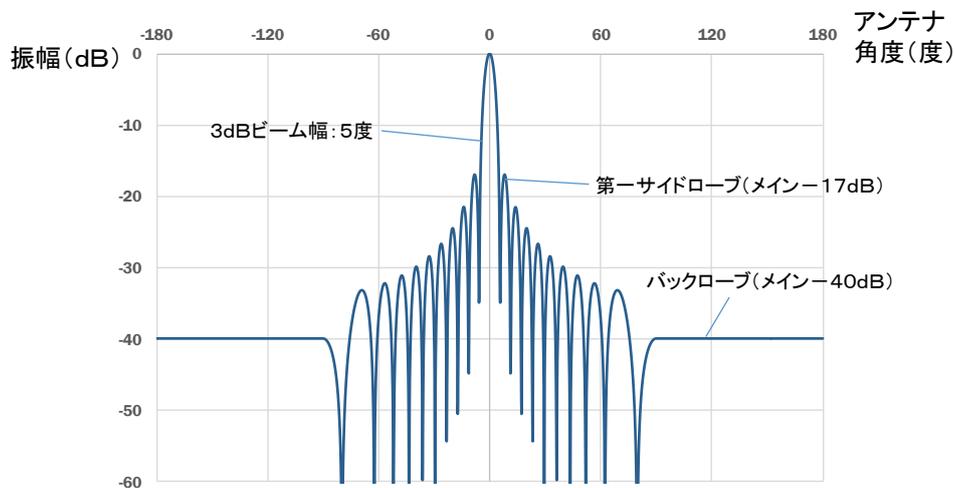
4.1.1-表 15 机上検討①の空中線回転条件

		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

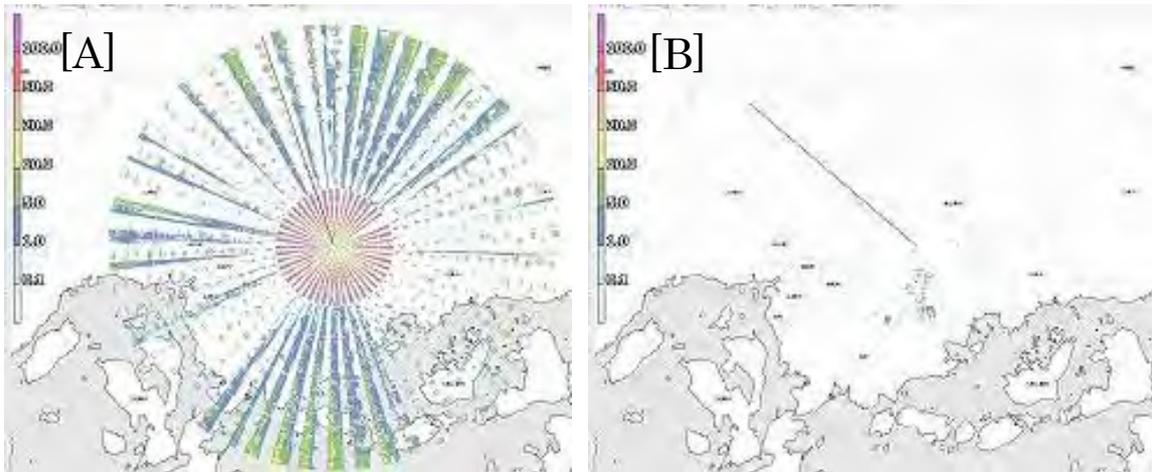
シミュレーションによる検討を行う前に、実証試験時の仕様と合わせた机上検討結果と実証試験結果とを比較し、その妥当性を検証する。実証試験時の設定を4.1.2-表 17に示す。

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。

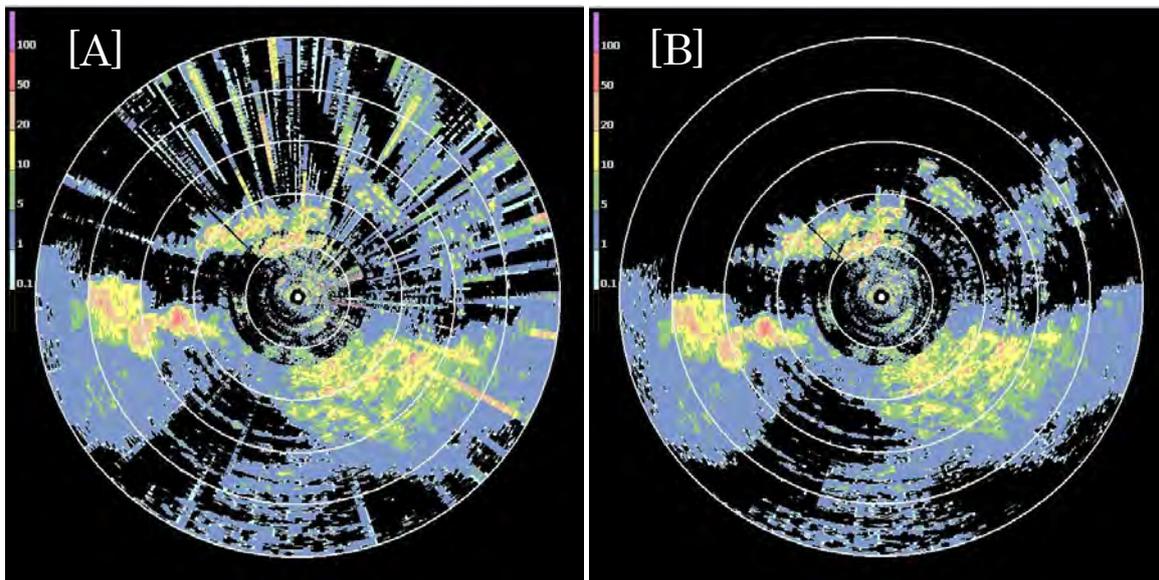
4.1.2-表 17 実証試験時の設定

	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

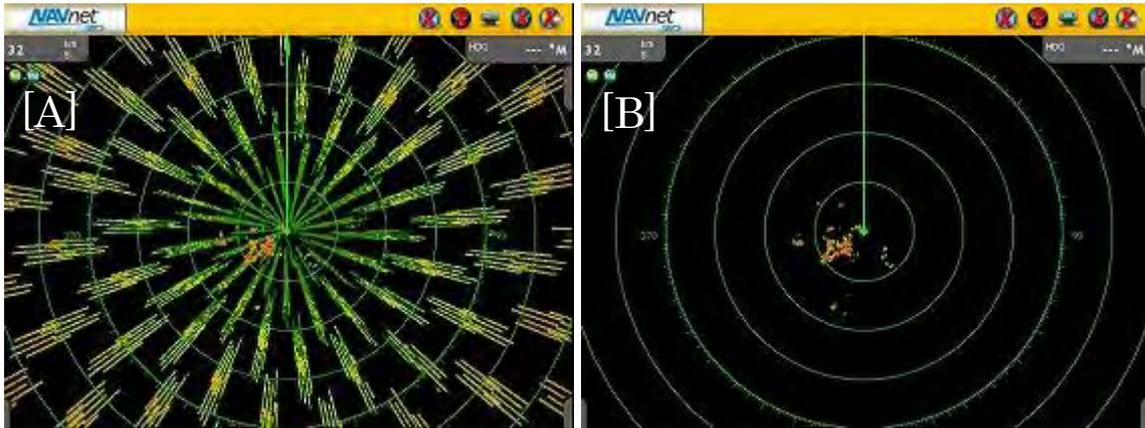
小型気象用レーダーの相互干渉実測結果を4.1.2-図 26、同様の机上検討結果を4.1.2-図 27に示す。また、被干渉機が船舶用レーダー、与干渉機が気象用レーダーの結果を4.1.2-図 28、4.1.2-図 29に示す。いずれも[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ONの状態を示している。基準画像が異なる等の違いはあるものの、概ね干渉の様子は模擬できており、また、干渉除去機能も正常に機能していることが分かる。



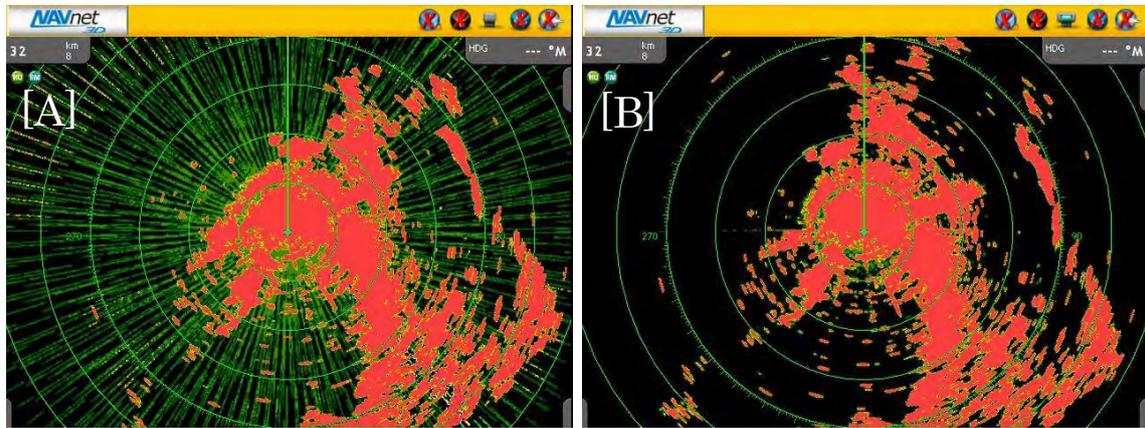
4.1.2-図 26 小型気象用レーダー相互干渉実測結果（離隔距離：373 m, 二重偏波）



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

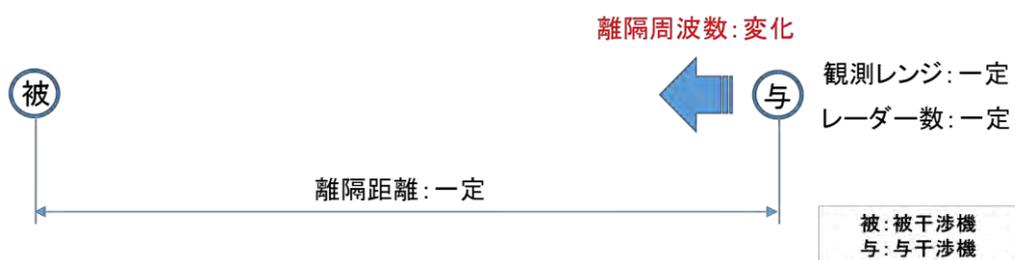
離隔距離を 100 m とし、与干渉機の台数が増加した場合の干渉状況について検討を行う。与干渉機の台数を 3~6 台とし、正多角形の頂点に与干渉機、重心に被干渉機がそれぞれ配置されているとして検証を行う。

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

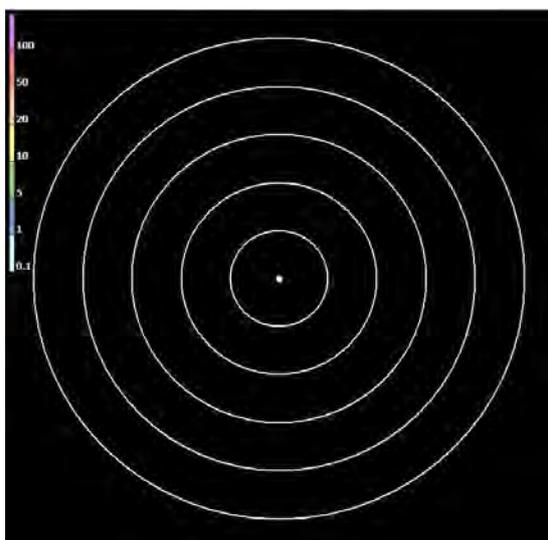
検証1のモデル図を4.1.3.1-図30に示す。



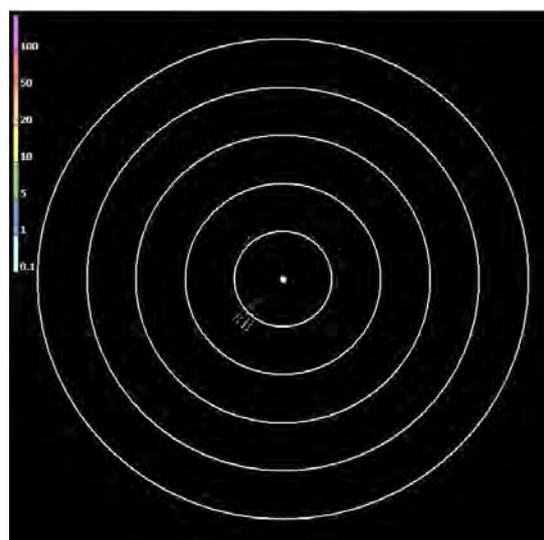
4.1.3.1-図30 検証1のモデル図

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。

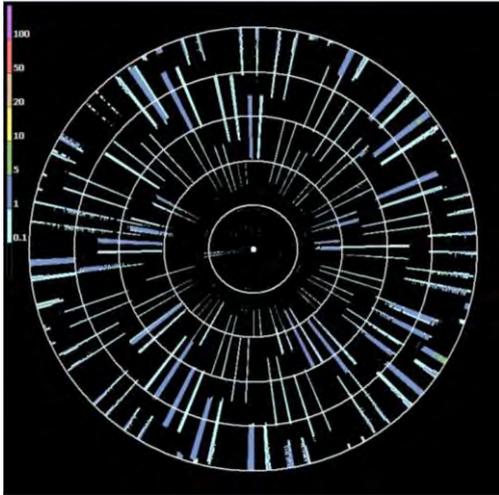
なお、本検討は干渉波の周波数のみを変化させる必要があるため、実験機材の制約から、干渉波のみを用いて行っている。また、干渉除去機能はOFFとして検証を行っている。



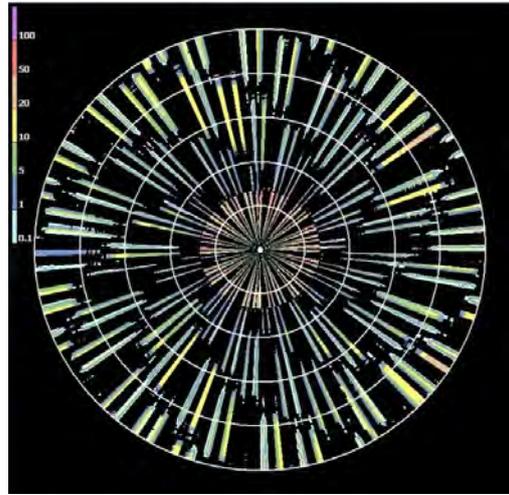
4.1.3.1-図31 離隔周波数：-15 MHz
(9455 MHz)



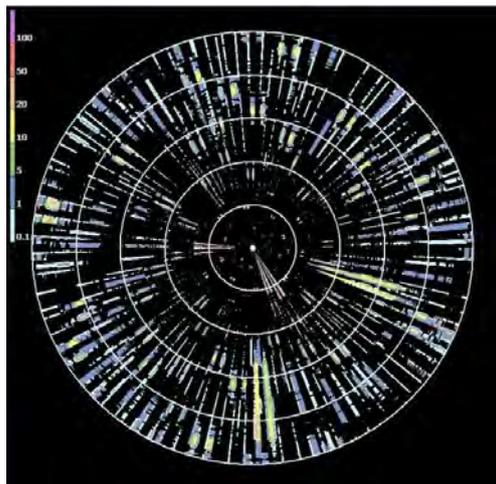
4.1.3.1-図32 離隔周波数：-10 MHz
(9460 MHz)



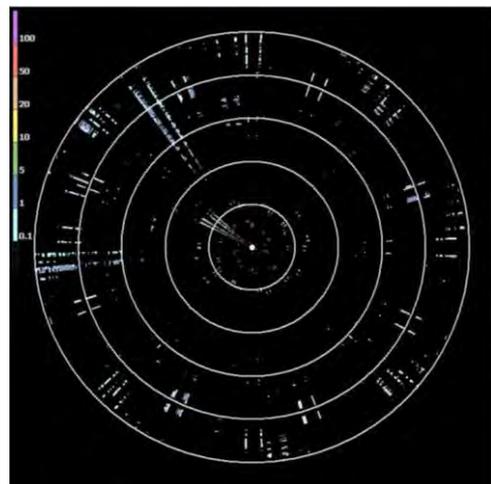
4.1.3.1-図 33 離隔周波数 : -7 MHz
(9463 MHz)



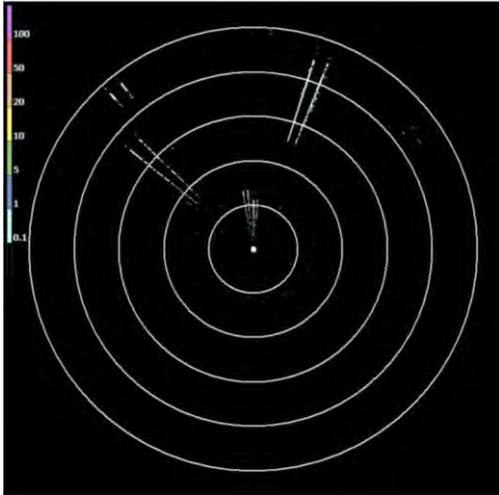
4.1.3.1-図 34 離隔周波数 : -5 MHz
(9465 MHz)



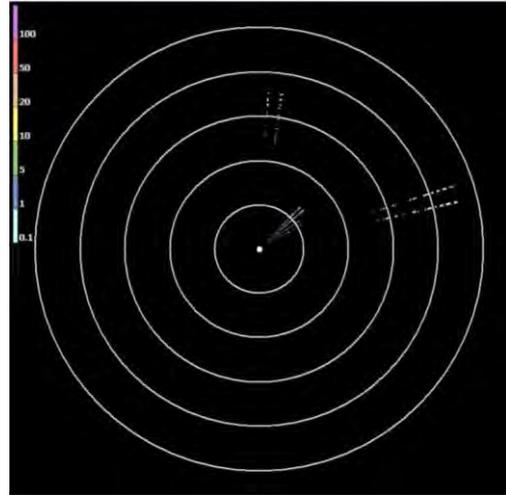
4.1.3.1-図 35 離隔周波数 : 0 MHz
(9470 MHz)



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)

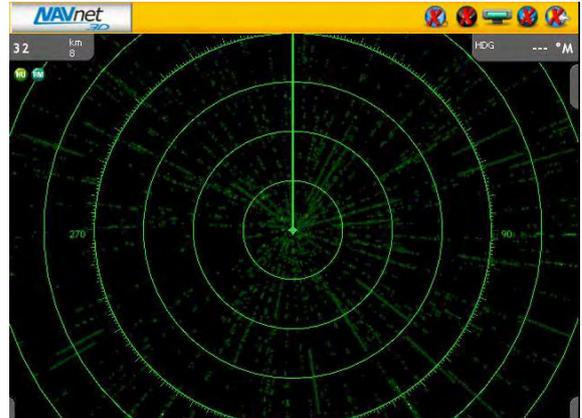


4.1.3.1-図 38 離隔周波数 : +10 MHz
(9480 MHz)

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)



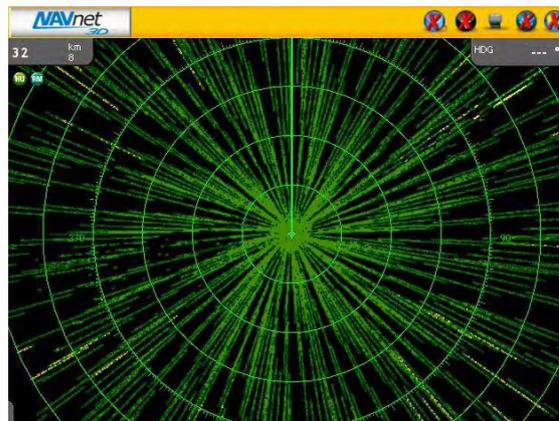
4.1.3.1-図 43 離隔周波数 : -30 MHz
(9385 MHz)



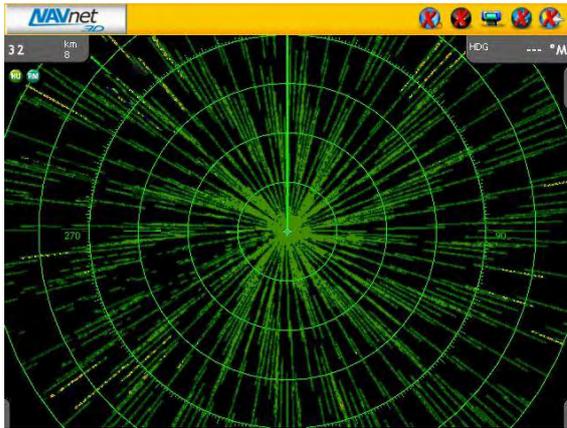
4.1.3.1-図 44 離隔周波数 : -20 MHz
(9395 MHz)



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)



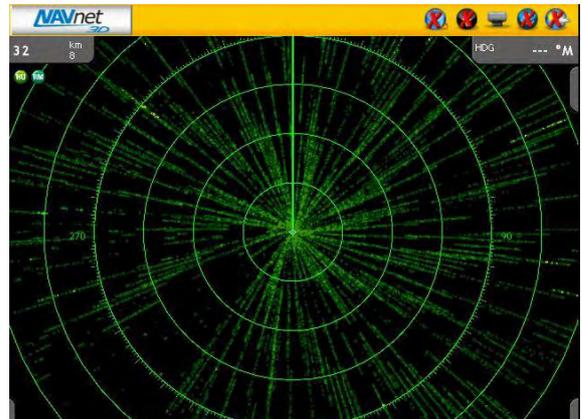
4.1.3.1-図 49 離隔周波数 : +30 MHz
(9445 MHz)



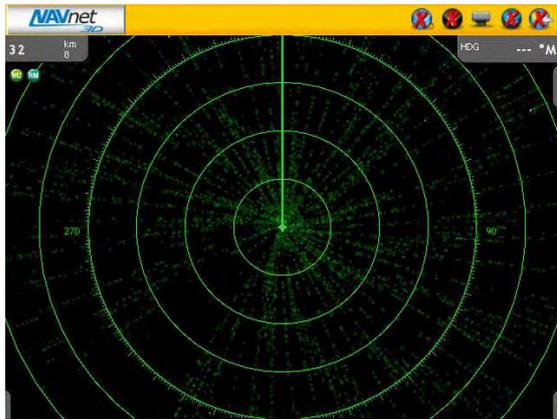
4.1.3.1-図 50 離隔周波数 : +40 MHz
(9455 MHz)



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



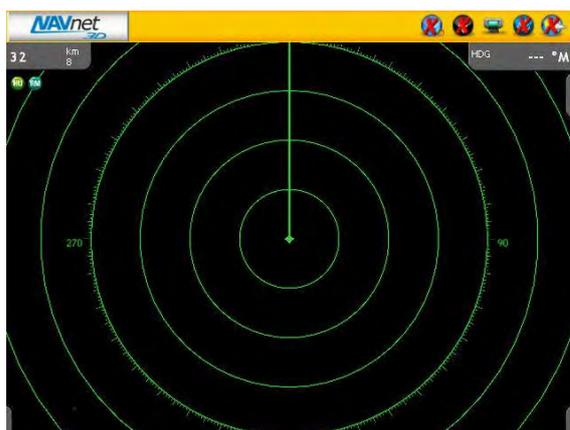
4.1.3.1-図 52 離隔周波数 : +55 MHz
(9470 MHz)



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。

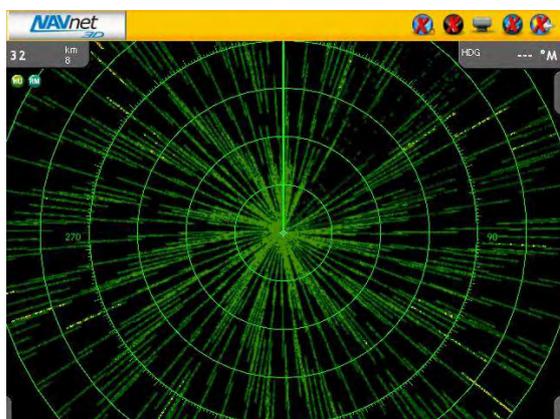
この条件下であれば、 ± 20 MHz 程度離隔することによって、干渉除去機能 OFF でも干渉が見られないことが分かる。



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)



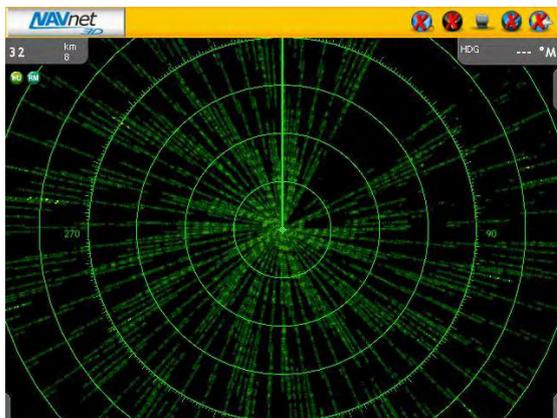
4.1.3.1-図 57 離隔周波数 : -10 MHz
(9405 MHz)



4.1.3.1-図 58 離隔周波数 : 0 MHz
(9415 MHz)



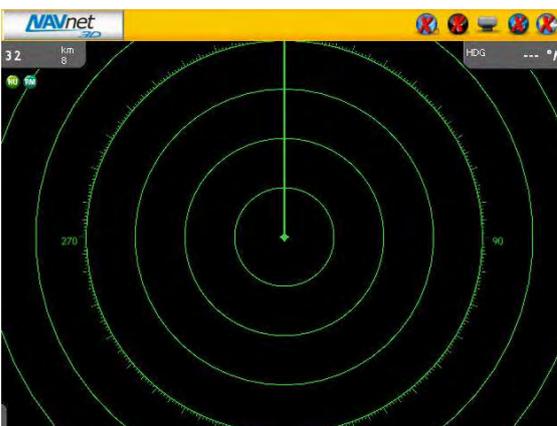
4.1.3.1-図 59 離隔周波数 : +10 MHz
(9425 MHz)



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)

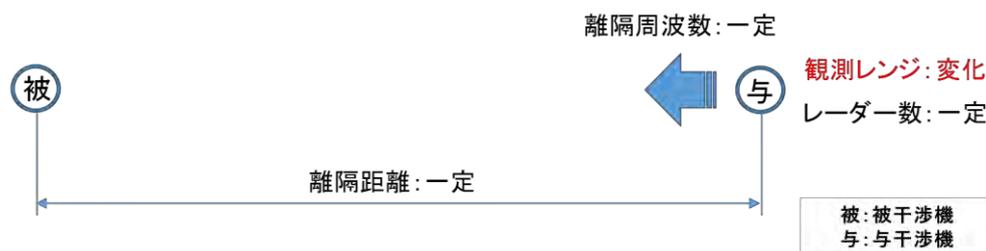
4.1.3.2 検証2：観測レンジによる干渉状況変化

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。

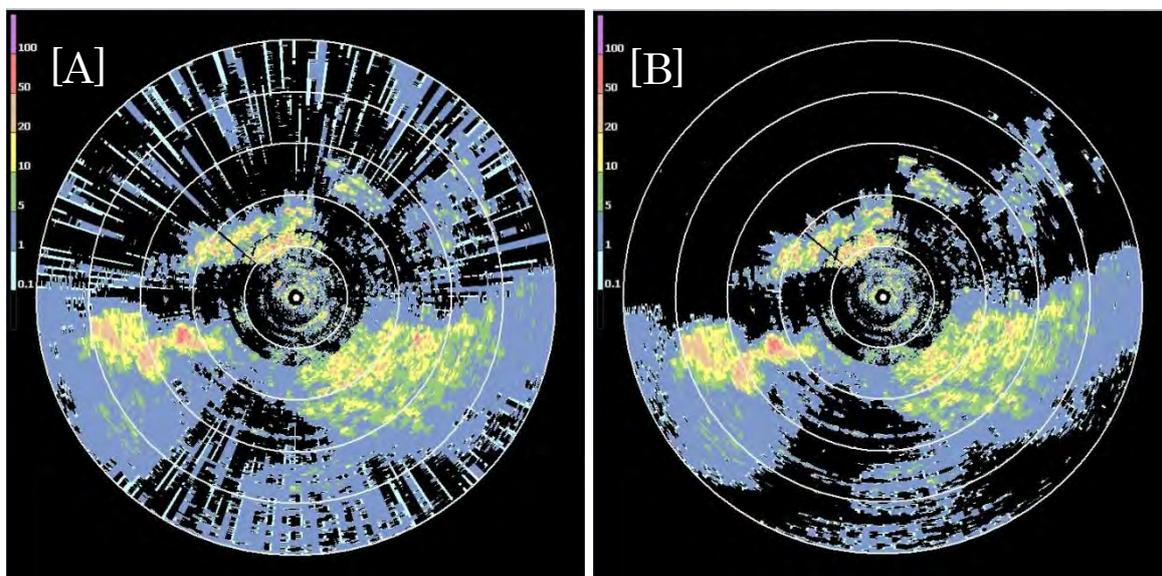


4.1.3.2-図 63 検証2のモデル図

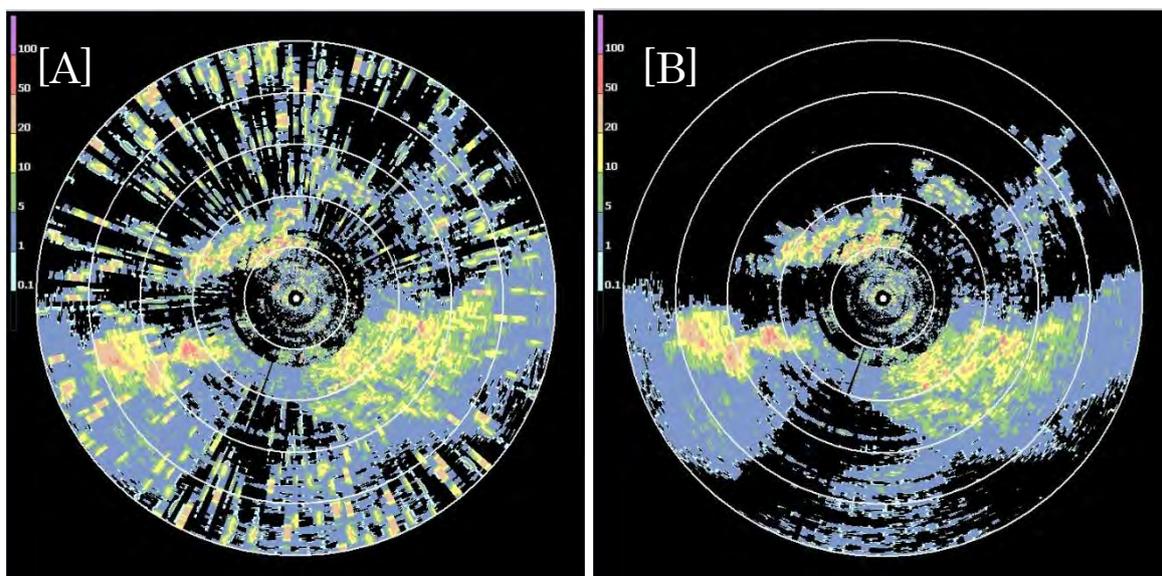
離隔距離を 100 m とし、与干渉機が船舶用レーダー、被干渉機が小型気象用レーダーの場合を 4.1.3.2-図 64、4.1.3.2-図 65 に示す。いずれも、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON の場合を示している。

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。

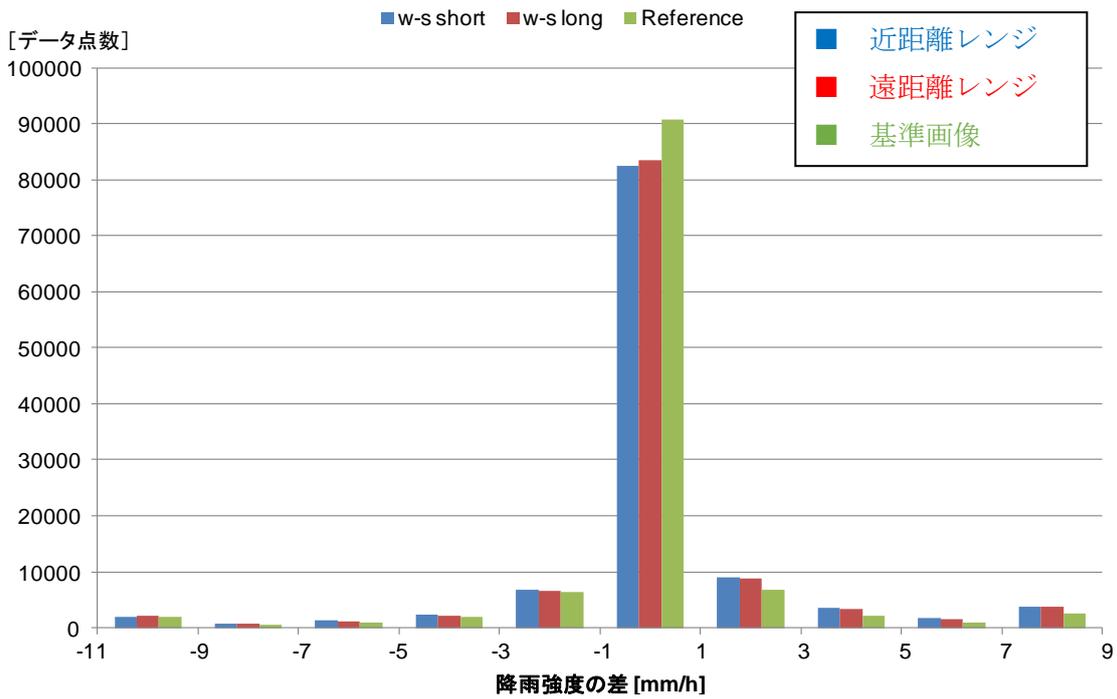
また、干渉除去後の画像と基準画像の差のヒストグラムを 4.1.3.2-図 66 から 4.1.3.2-図 71 に示す。



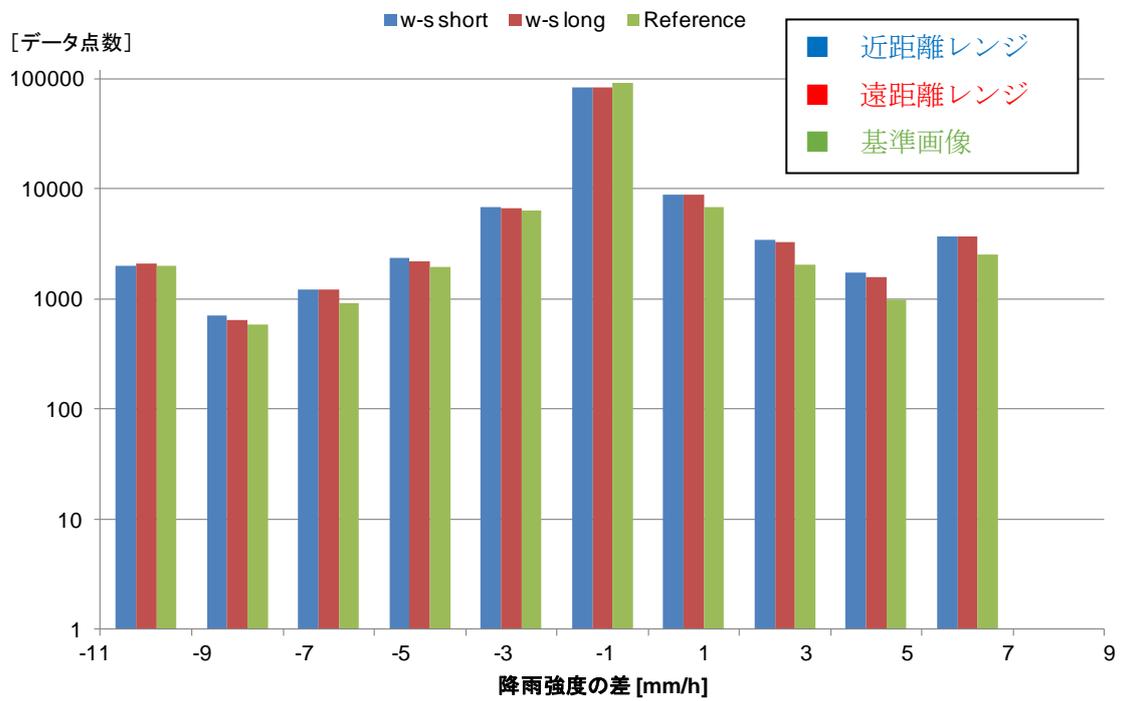
4.1.3.2-図 64 与干渉機：近距離レンジ（船舶用）、被干渉機：気象用



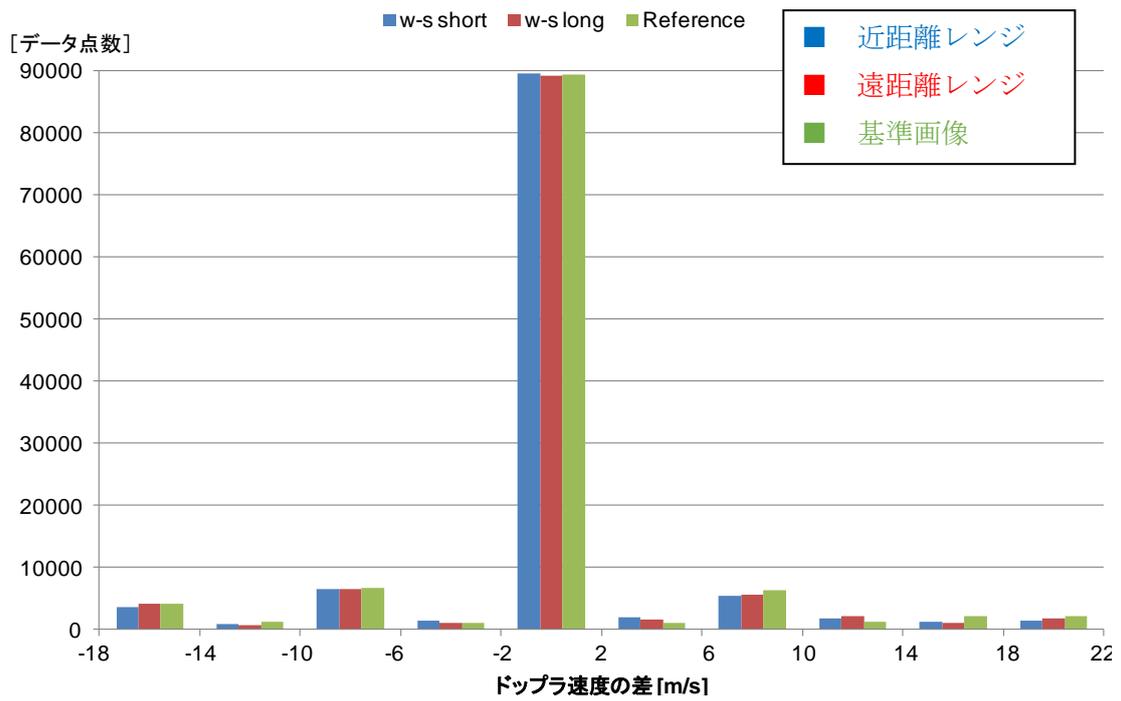
4.1.3.2-図 65 与干渉機：遠距離レンジ（船舶用）、被干渉機：気象用



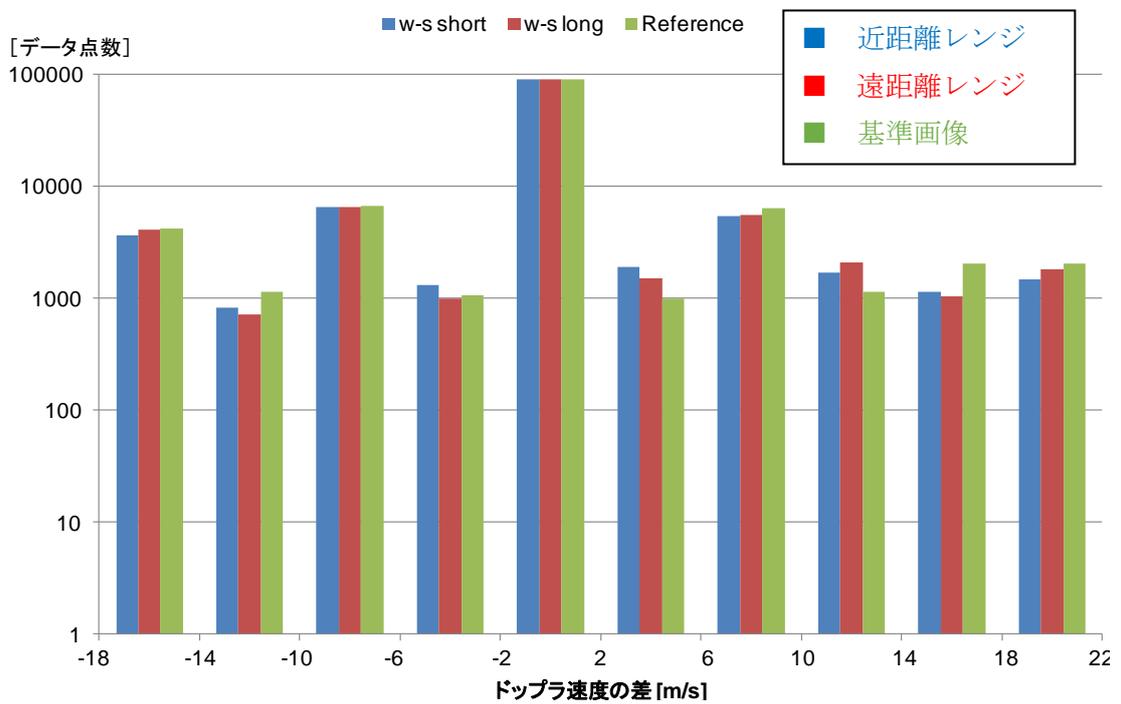
4.1.3.2-図 66 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：線形)



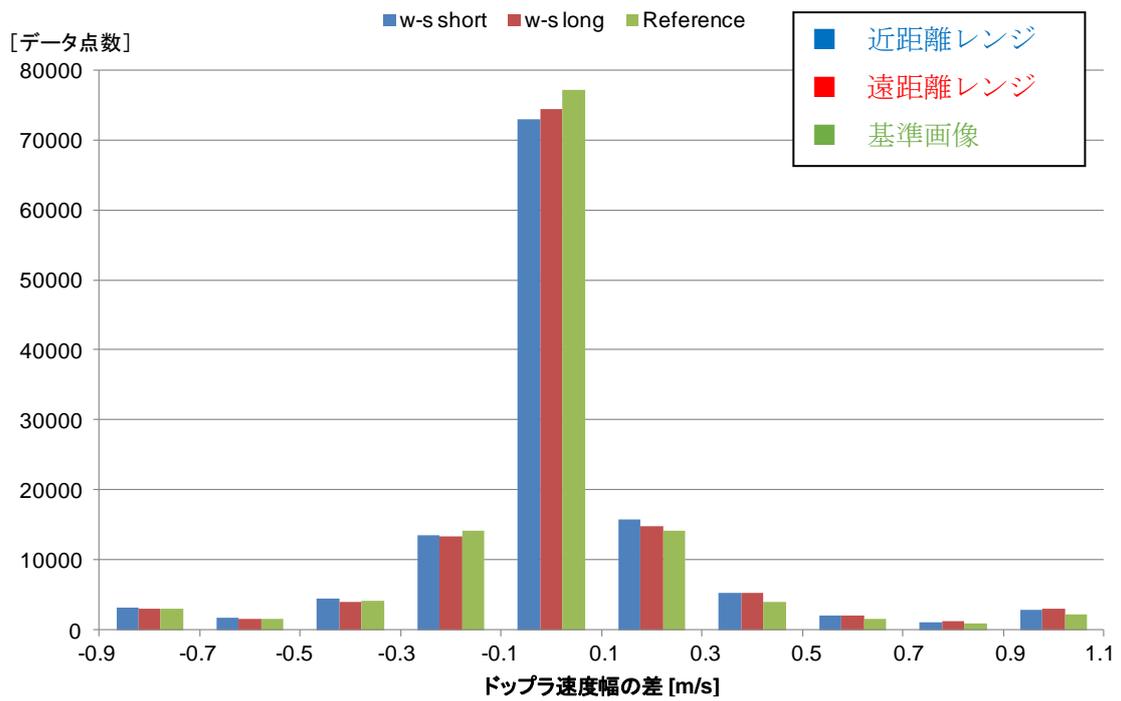
4.1.3.2-図 67 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：対数)



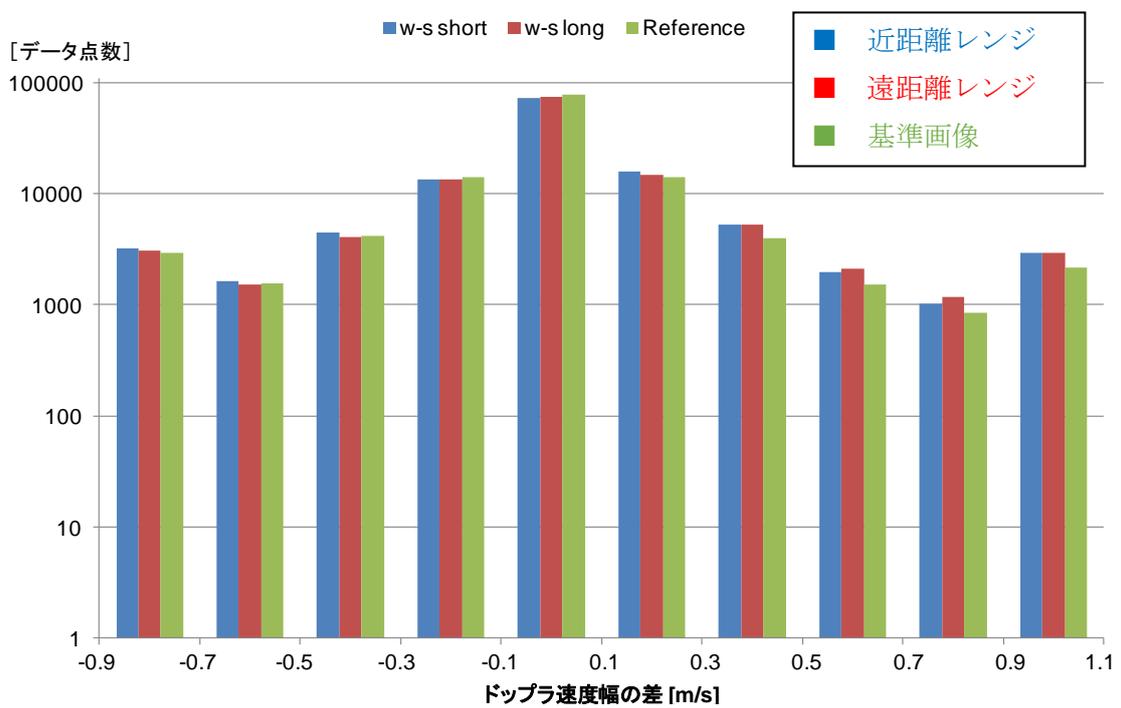
4.1.3.2-図 68 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：線形)



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)

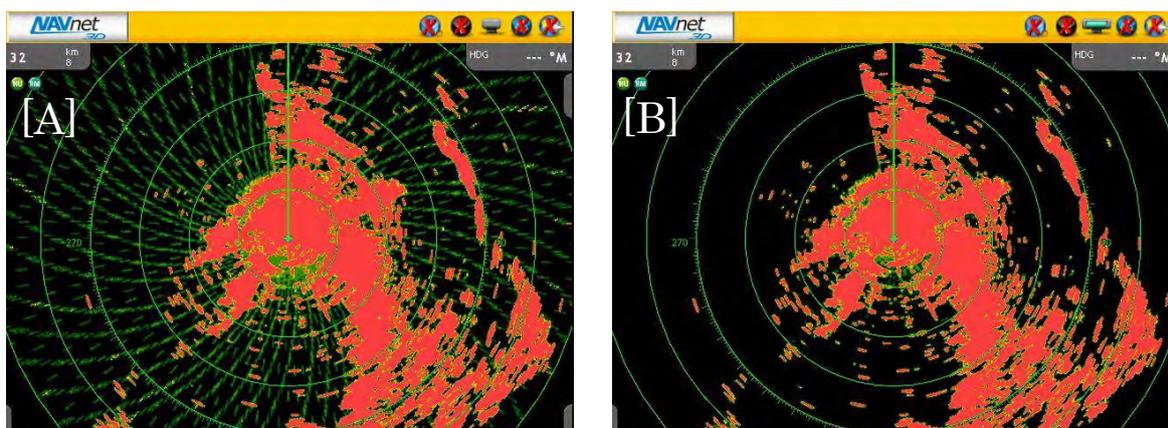


4.1.3.2-図 71 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：対数)

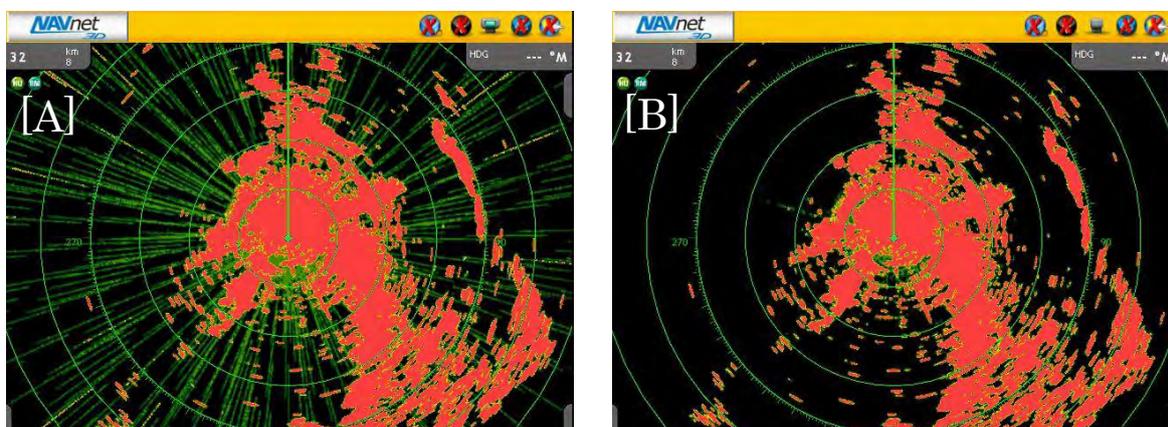
離隔距離を 100 m とし、与干渉機が小型気象用レーダー、被干渉機が船舶用レーダーの場合を 4.1.3.2-図 72、4.1.3.2-図 73 に示す。いずれも、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON の場合を示している。

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。

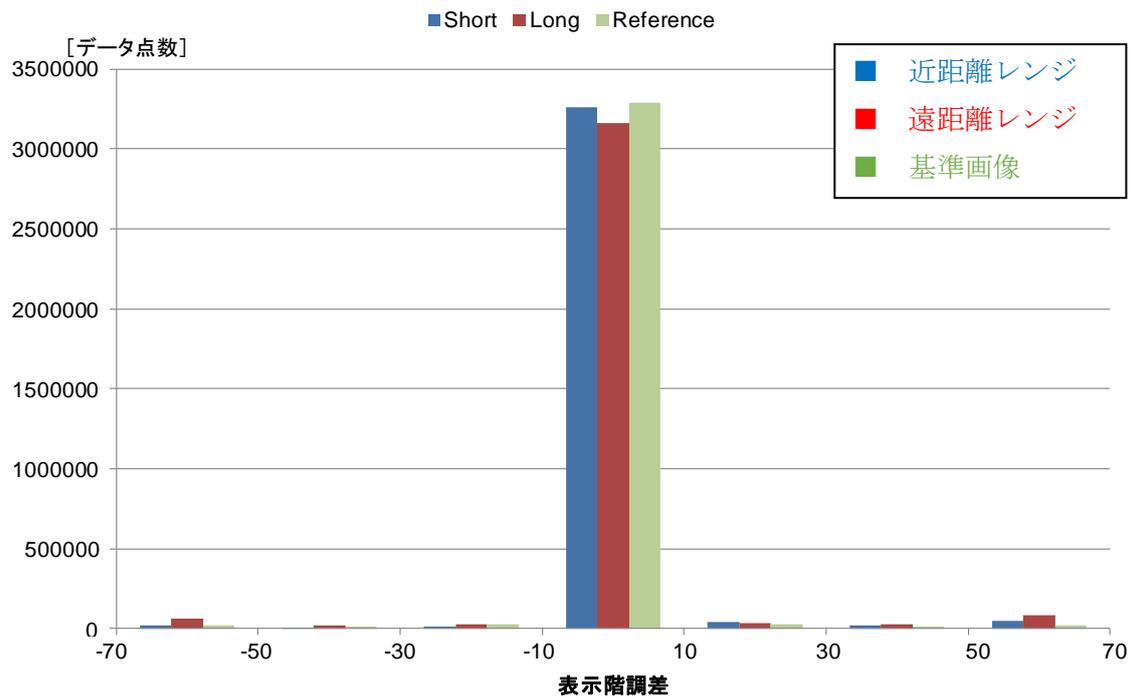
また、基準画像との差のヒストグラムを、4.1.3.2-図 74 及び、4.1.3.2-図 75 に示す。



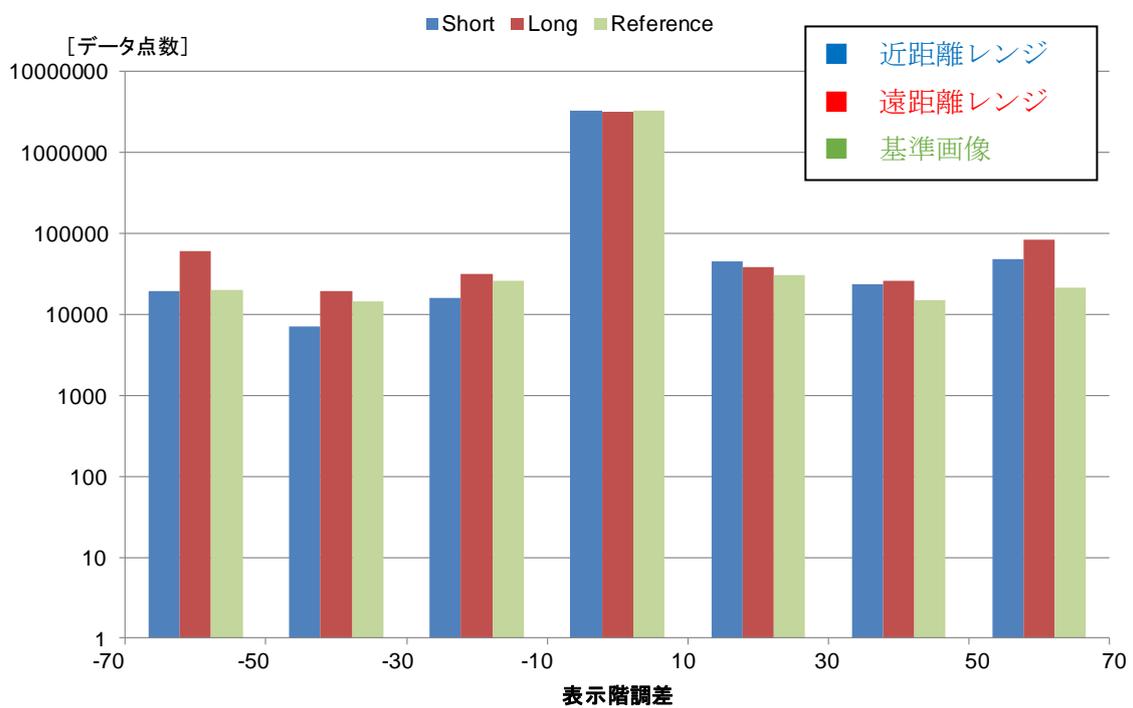
4.1.3.2-図 72 与干渉機：近距離レンジ（気象用）、被干渉機：船舶用



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



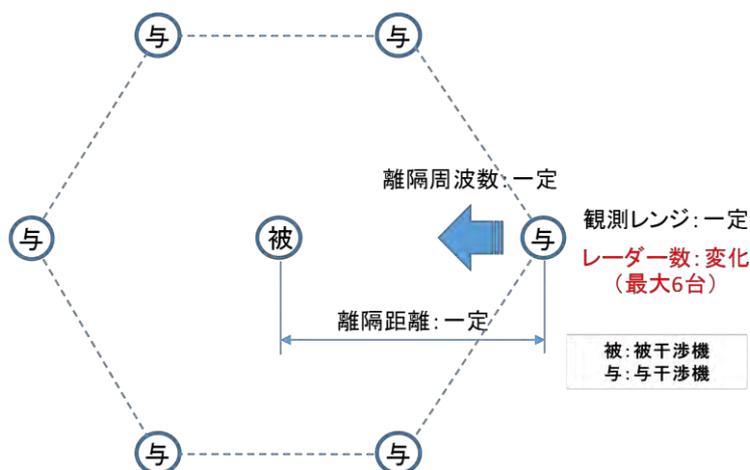
4.1.3.2-図 74 表示階調差のヒストグラム (縦軸：線形)



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。

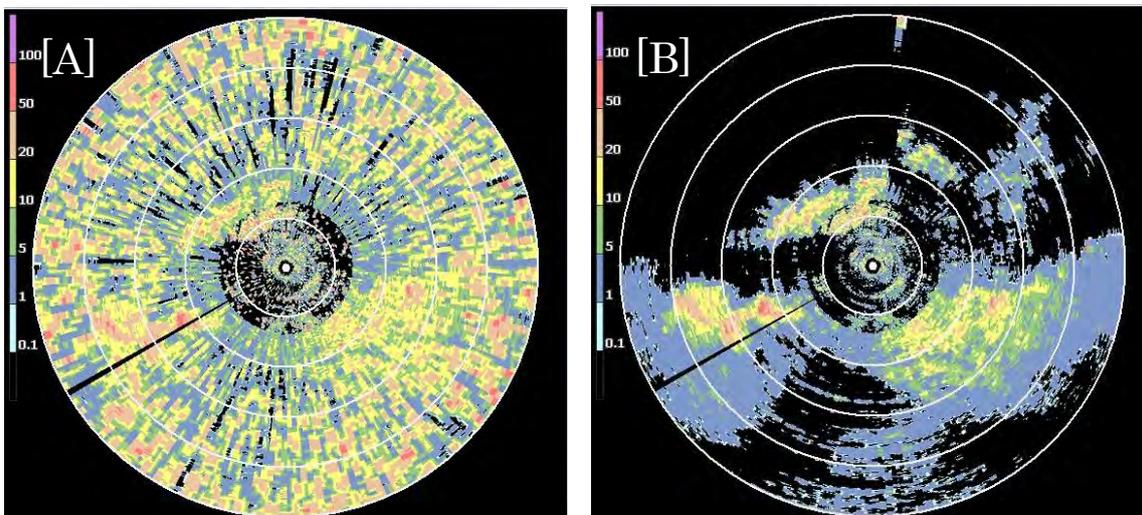


4.1.3.3-図76 レーダー配置図(与干渉機:6台)

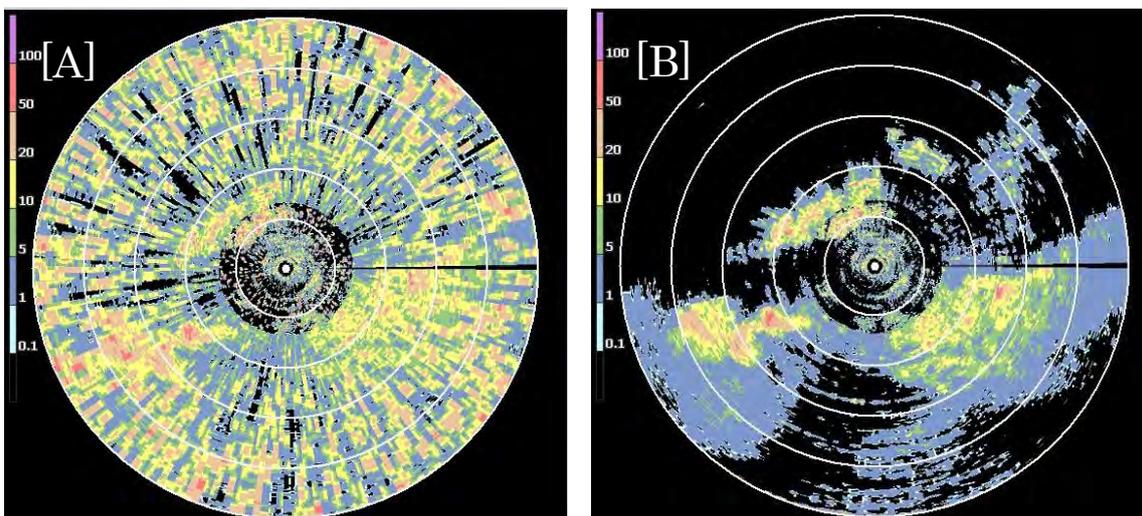
まず、与干渉機が船舶用レーダー6台、被干渉機が小型気象用レーダー、離隔距離が100mの場合の結果を4.1.3.3-図77に示す。[A]が干渉除去機能OFF、[B]が干渉除去機能ONである。

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。

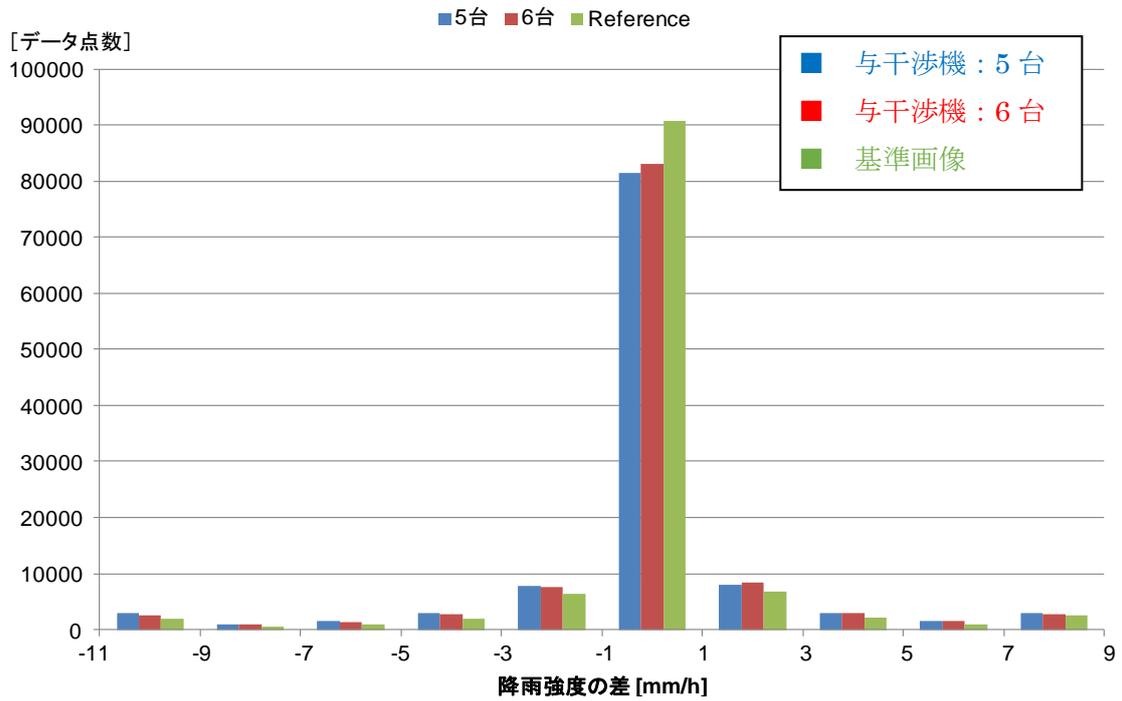
また、これらの干渉除去後の画像と基準画像の差のヒストグラムを4.1.3.3-図79から4.1.3.3-図84に示す。



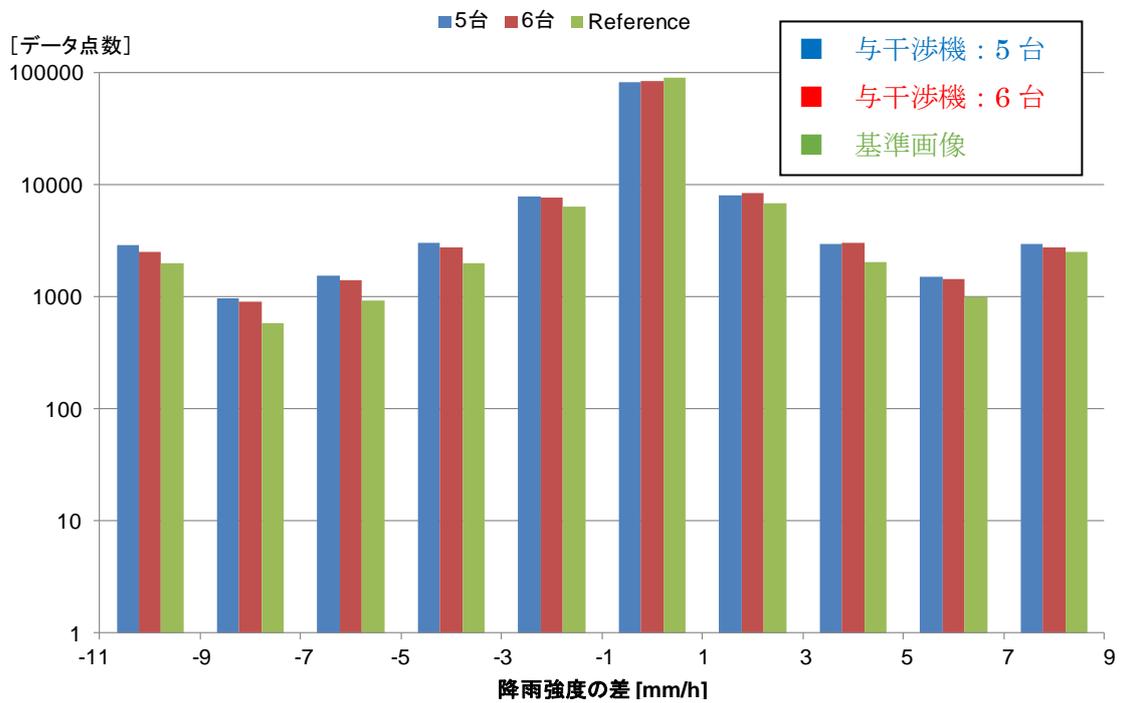
4.1.3.3-図 77 近距離レンジ、与干渉機：6 台（船舶用）、離隔距離：100 m



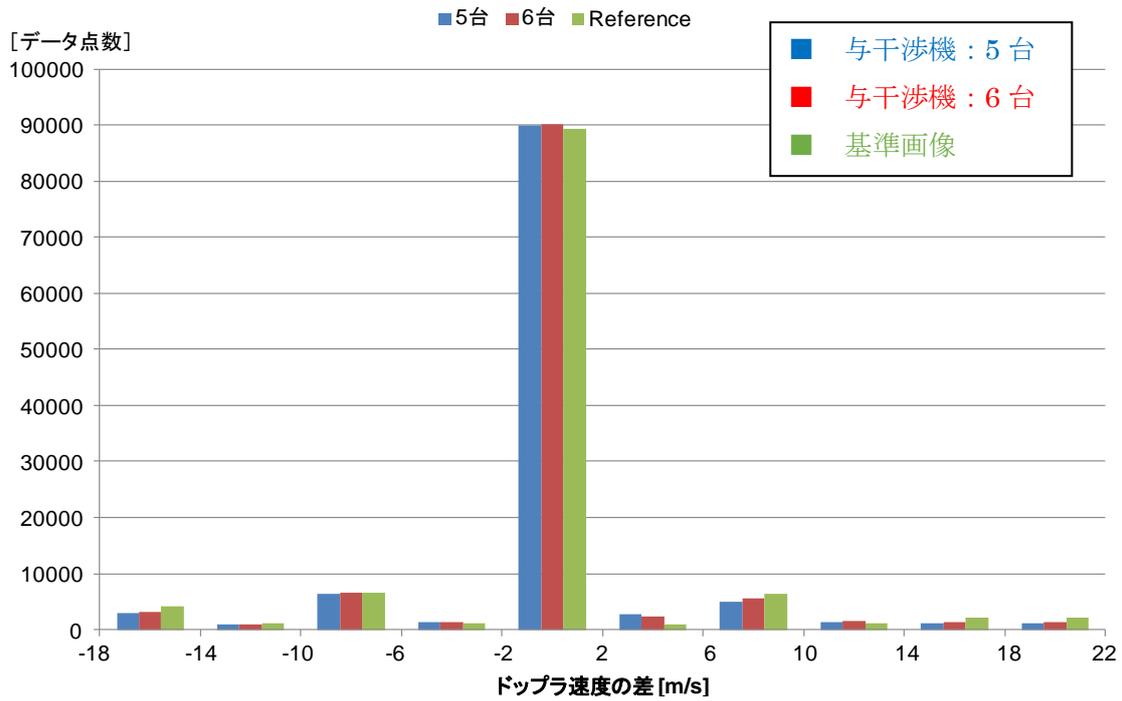
4.1.3.3-図 78 近距離レンジ、与干渉機：5 台（船舶用）、離隔距離：100 m



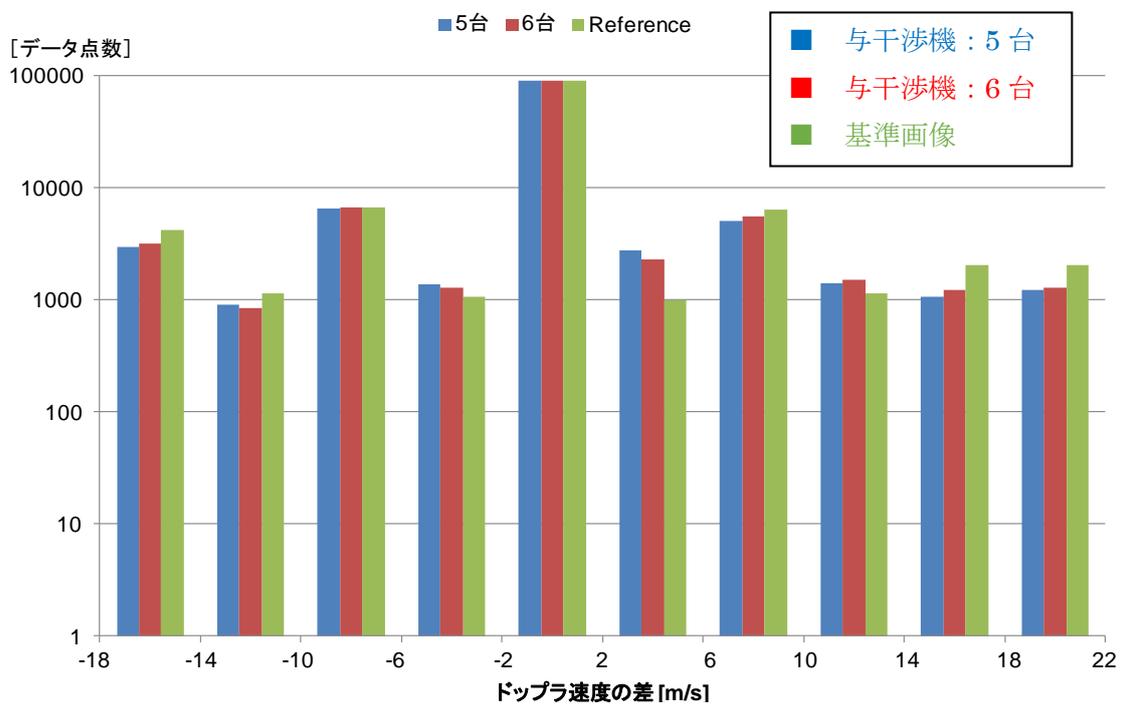
4.1.3.3-図 79 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：線形)



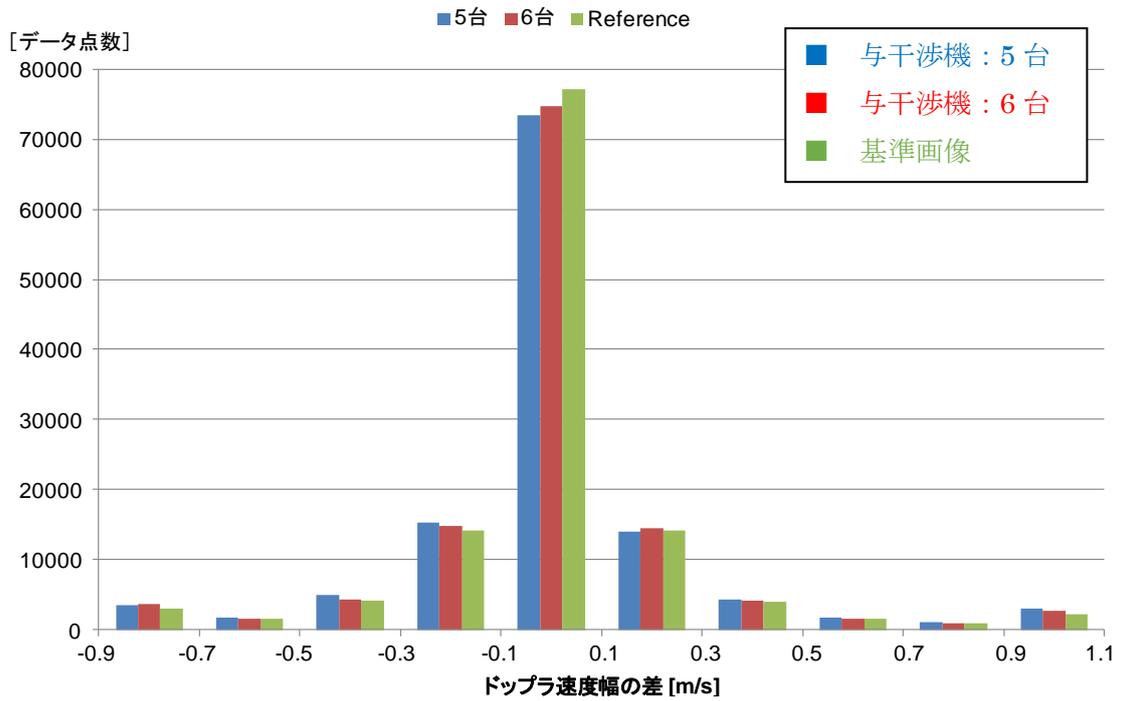
4.1.3.3-図 80 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：対数)



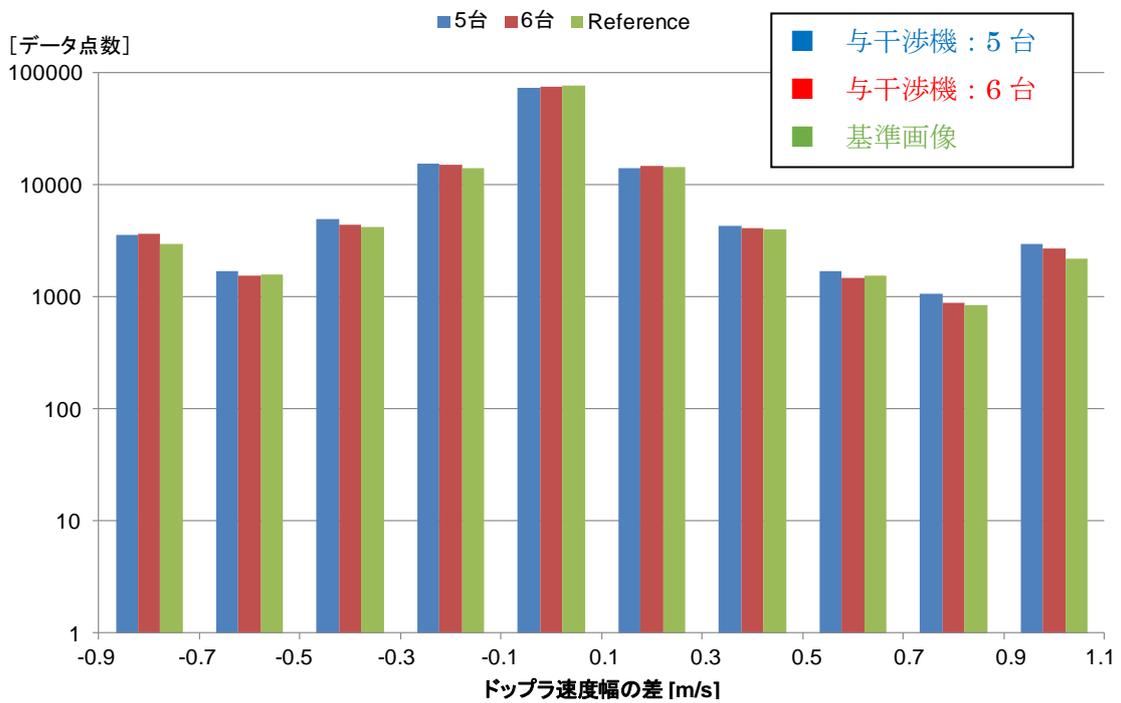
4.1.3.3-図 81 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：線形)



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。

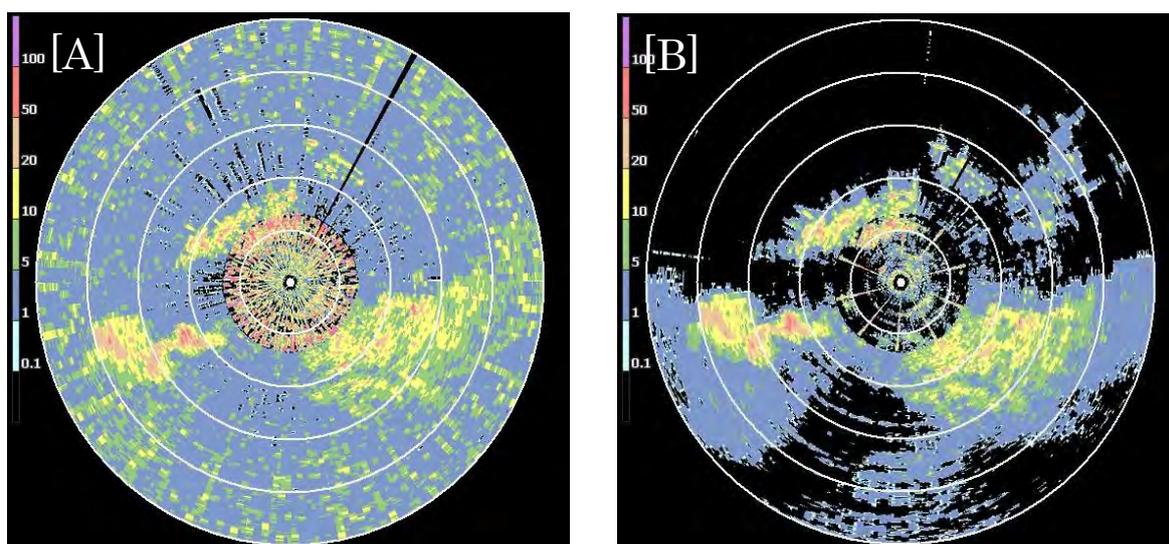
ここでは、変移割合を 3%から 7%まで変化させた場合の比較を行う。変移が 3%の時の PRF 設定を 4.1.3.3-表 19、小型気象用レーダー対小型気象用レーダーの結果を 4.1.3.3-図 85 から 4.1.3.3-図 92 に示す。それぞれ、[A]が干渉除去機能 OFF、[B]が干渉除去機能 ON である。近距離レンジの変移割合 7%と遠距離レンジの変移割合 4%は掲載していない。

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。

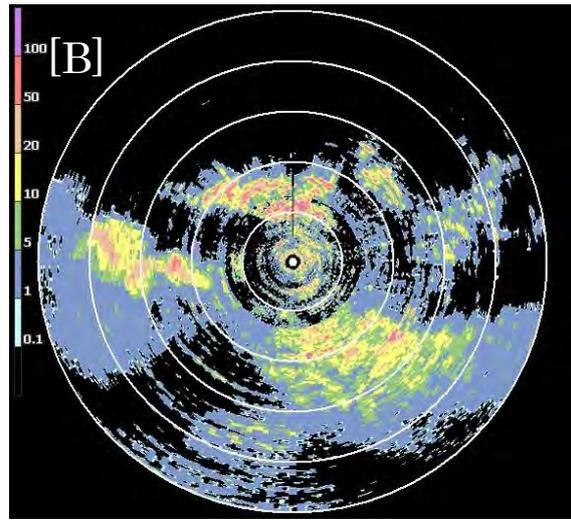
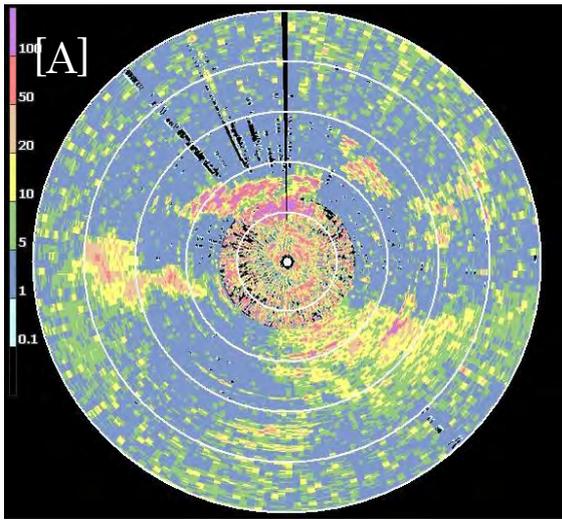
4.1.3.3-表 19 PRF 設定値例 (3%変移)

	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

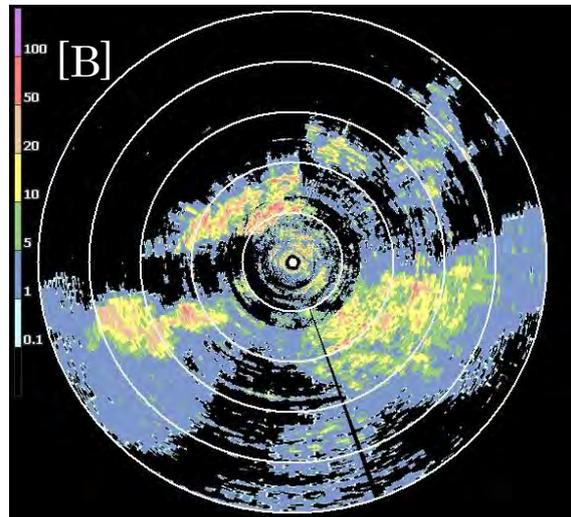
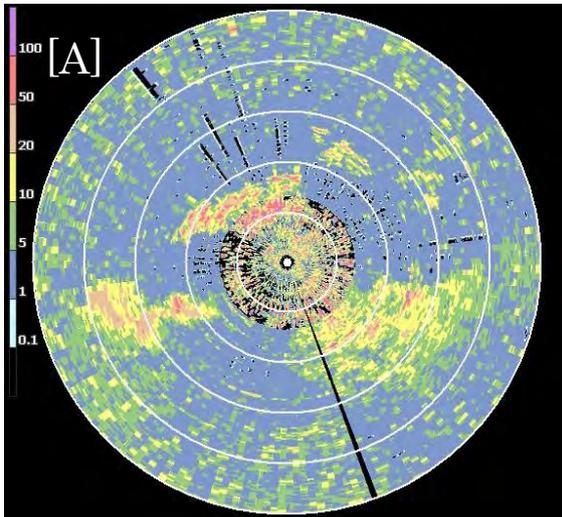
※単位は[Hz]



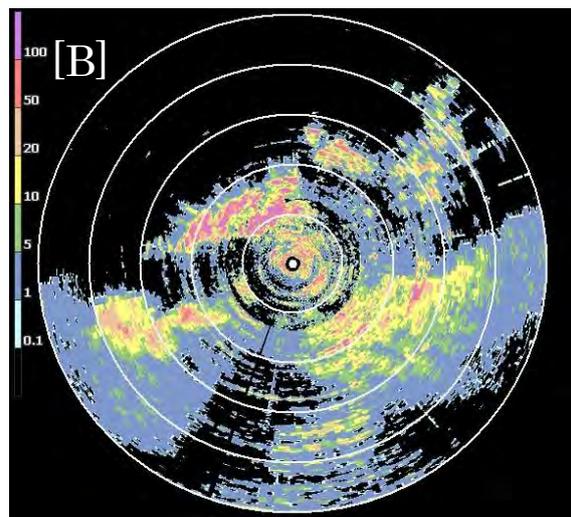
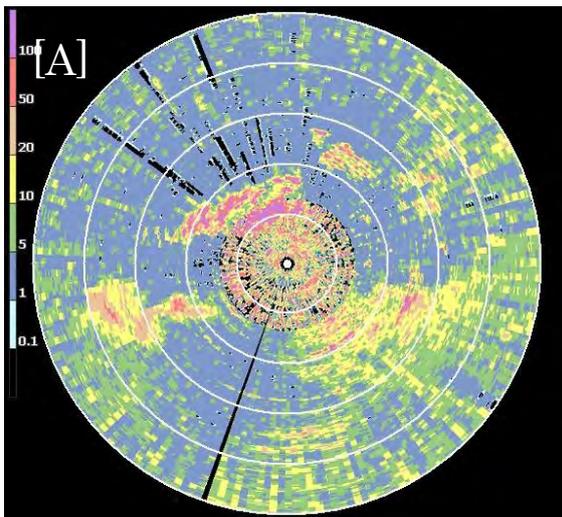
4.1.3.3-図 85 与干渉機：気象用 6 台 (近距離レンジ)、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)



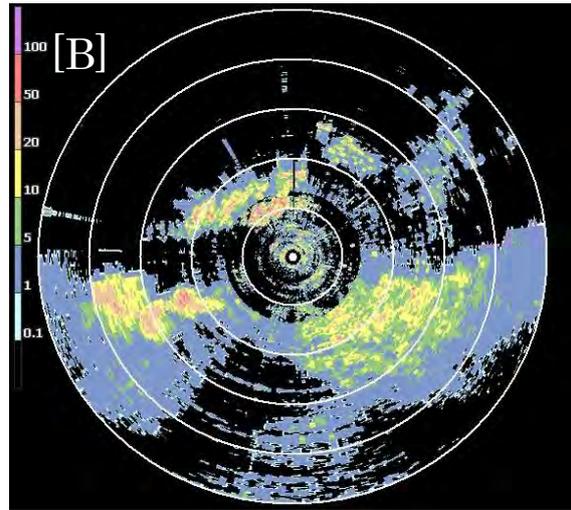
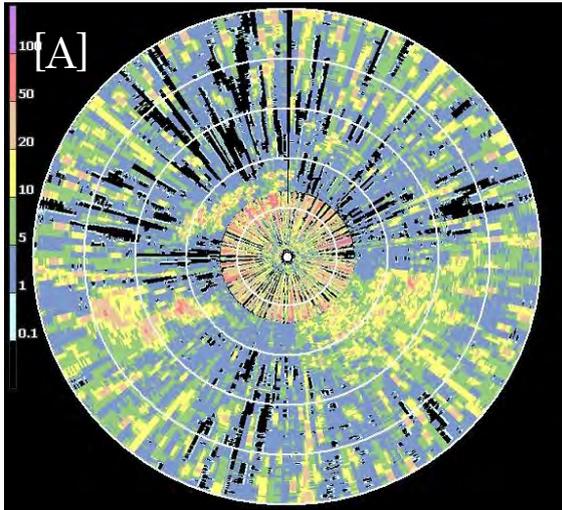
4.1.3.3-図 86 与干渉機：気象用 6 台（近距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:4%)



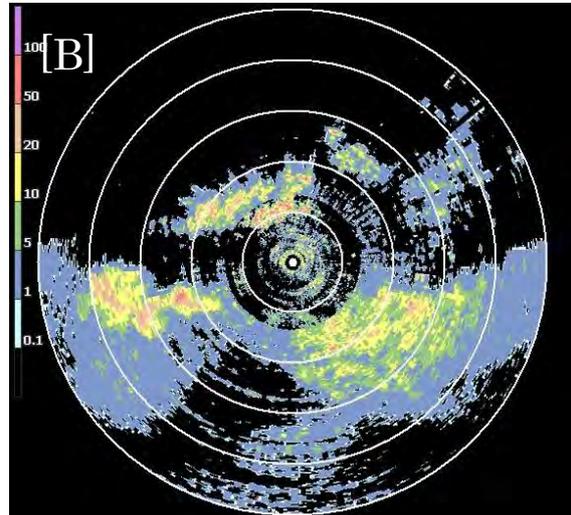
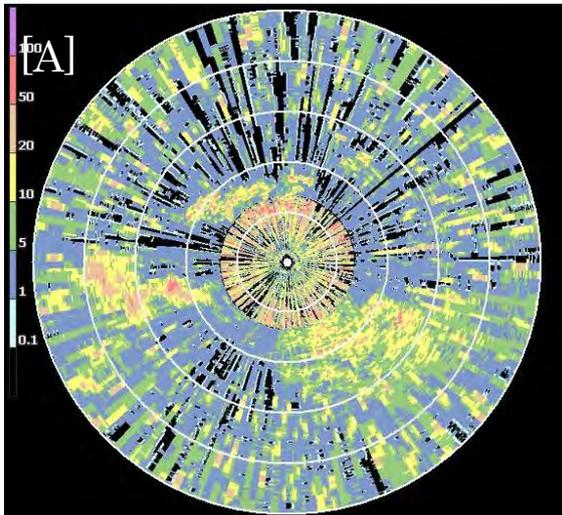
4.1.3.3-図 87 与干渉機：気象用 6 台（近距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:5%)



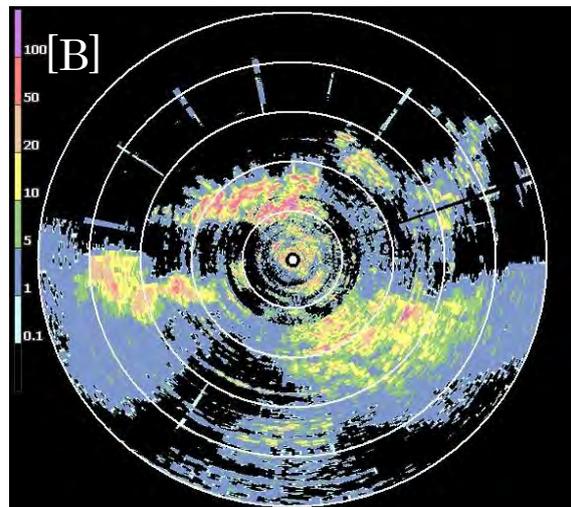
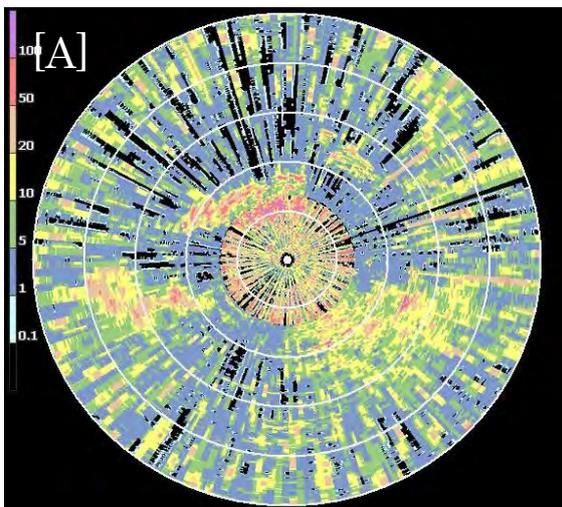
4.1.3.3-図 88 与干渉機：気象用 6 台（近距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:6%)



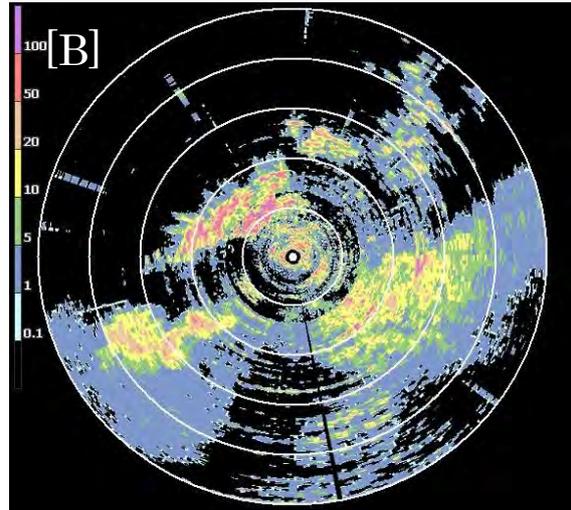
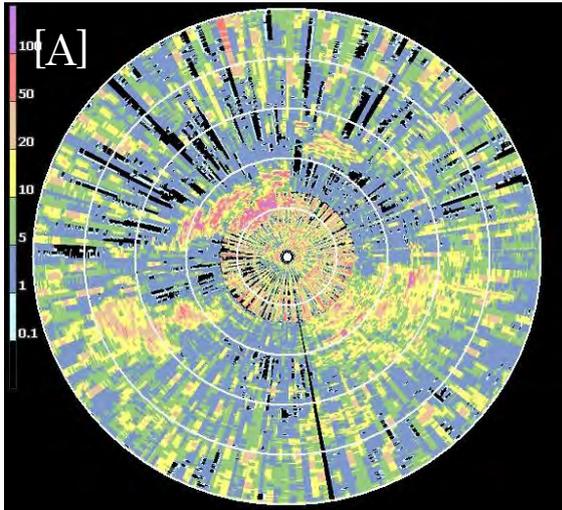
4.1.3.3-図 89 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)



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%)



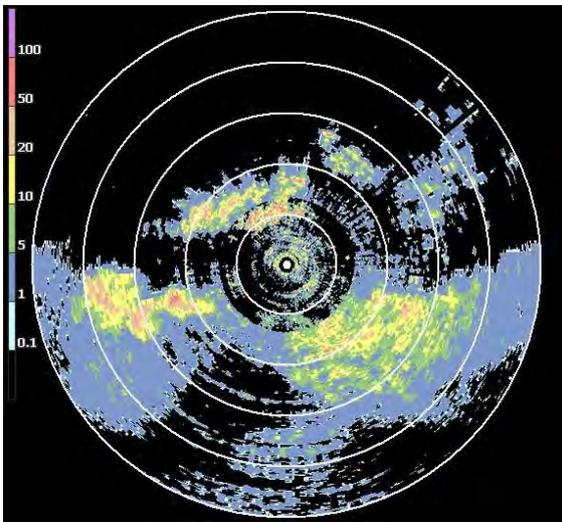
4.1.3.3-図 91 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:6%)



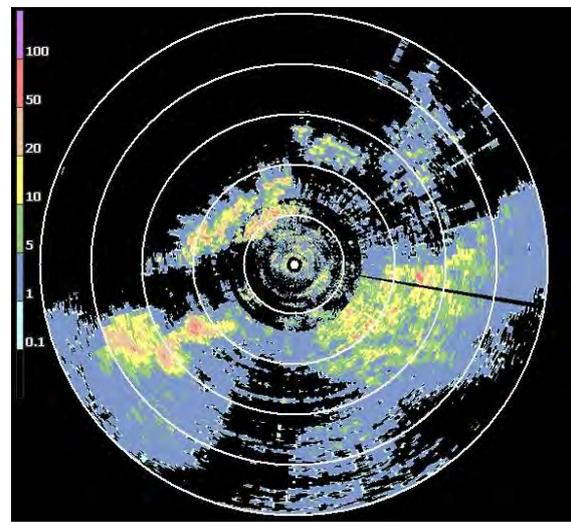
4.1.3.3-図 92 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:7%)

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

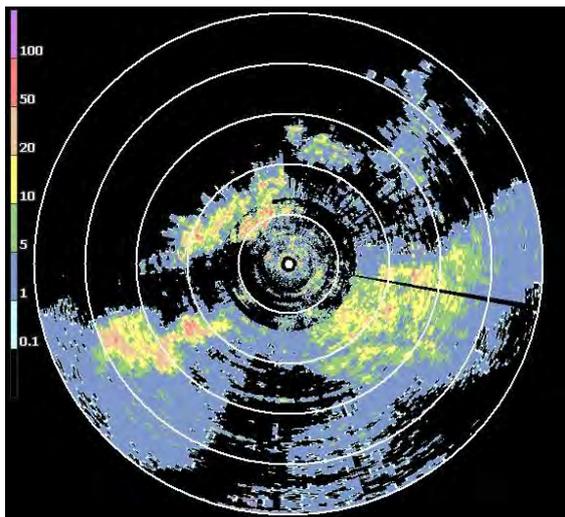


4.1.3.3-図 93 離隔距離：500 m

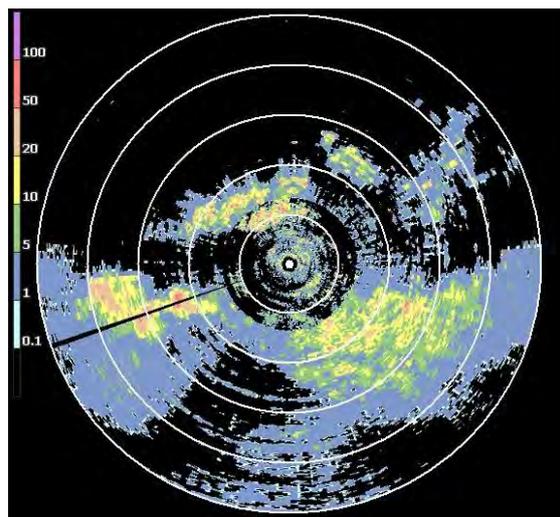
次に、離隔距離 500 m で与干渉機の台数を 4~6 台まで変化させた場合の干渉除去結果を 4.1.3.3-図 94 及び 4.1.3.3-図 95、4.1.3.3-図 93 (再掲) に示す。

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。

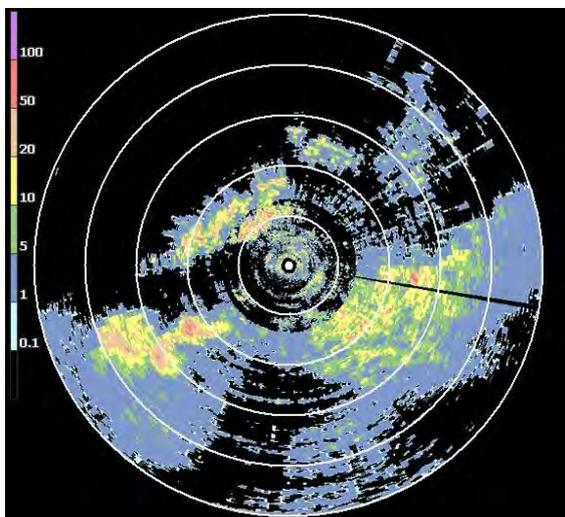
与干渉機：気象用 (遠距離レンジ)、PRF 変移:5%、離隔距離：500 m、干渉除去：ON



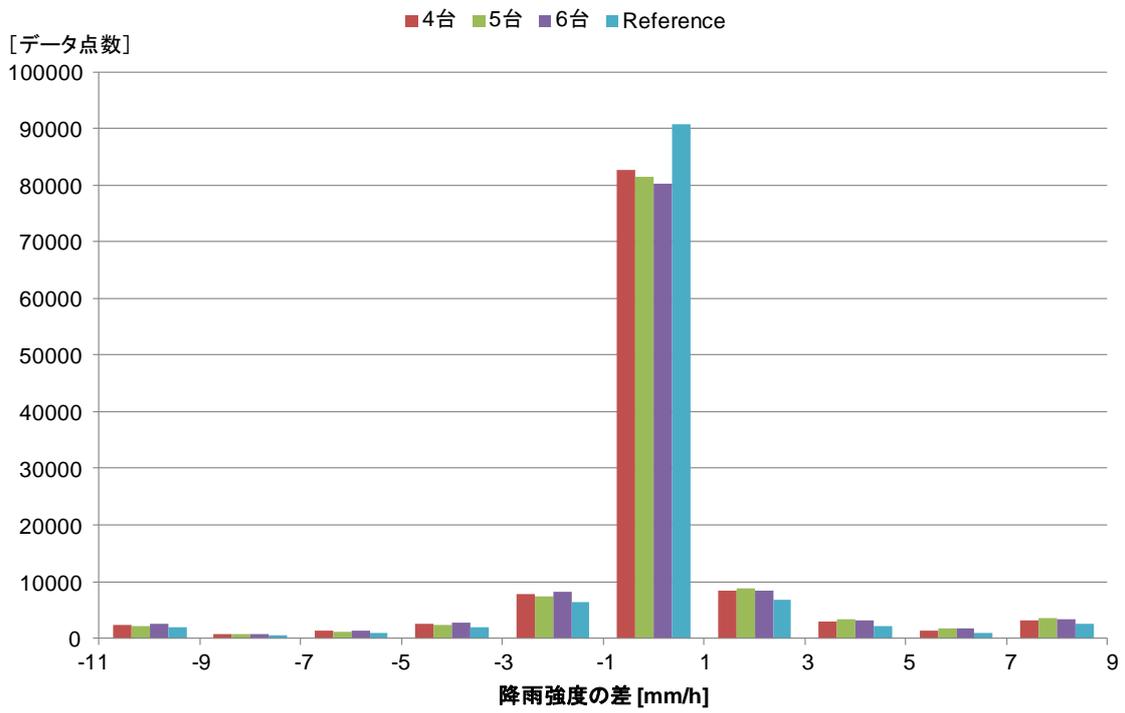
4.1.3.3-図 94 与干渉機：4 台



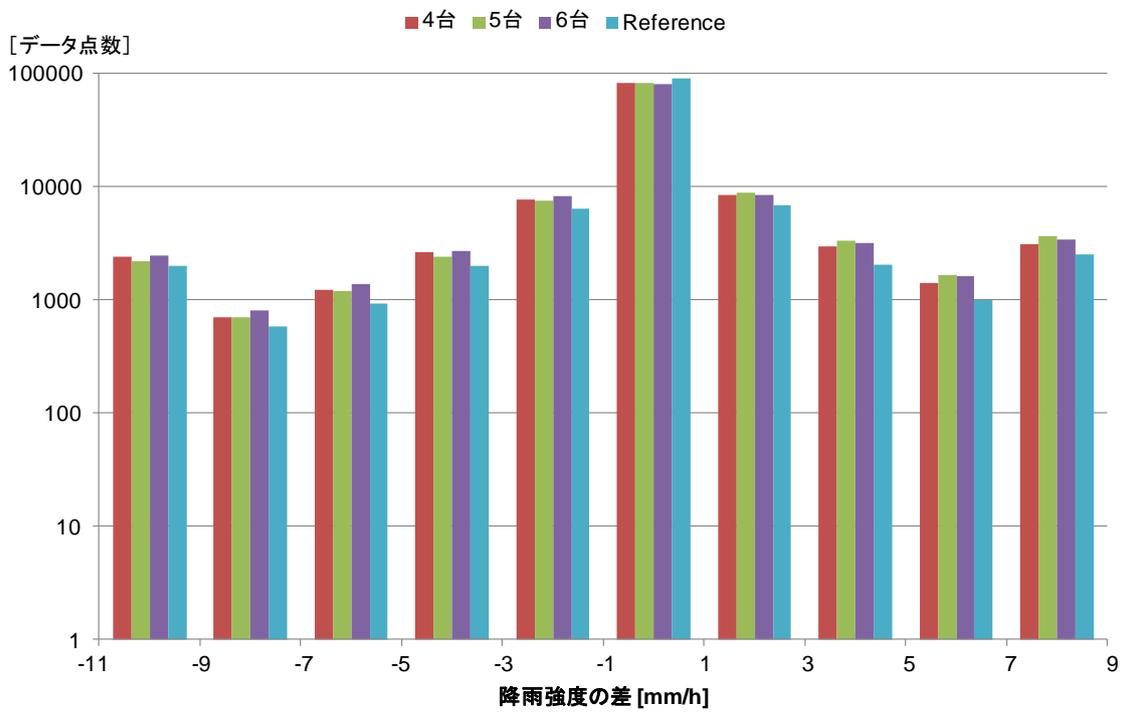
4.1.3.3-図 95 与干渉機：5 台



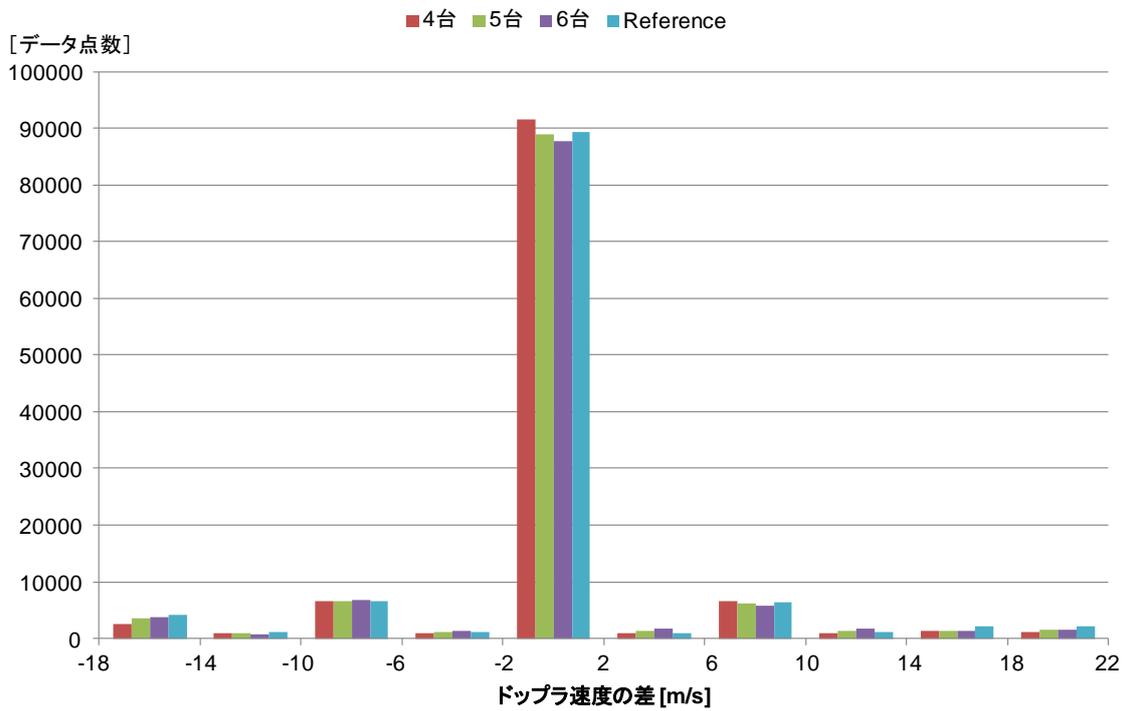
4.1.3.3-図 93 (再掲) 与干渉機：6 台



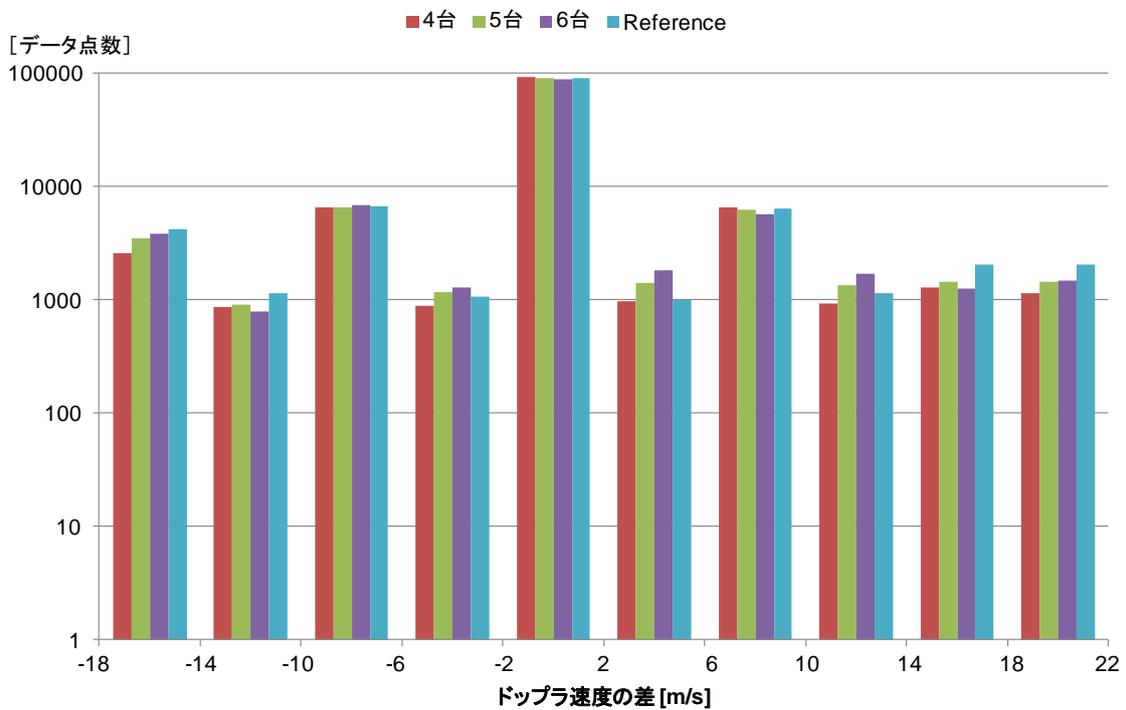
4.1.3.3-図 96 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：線形)



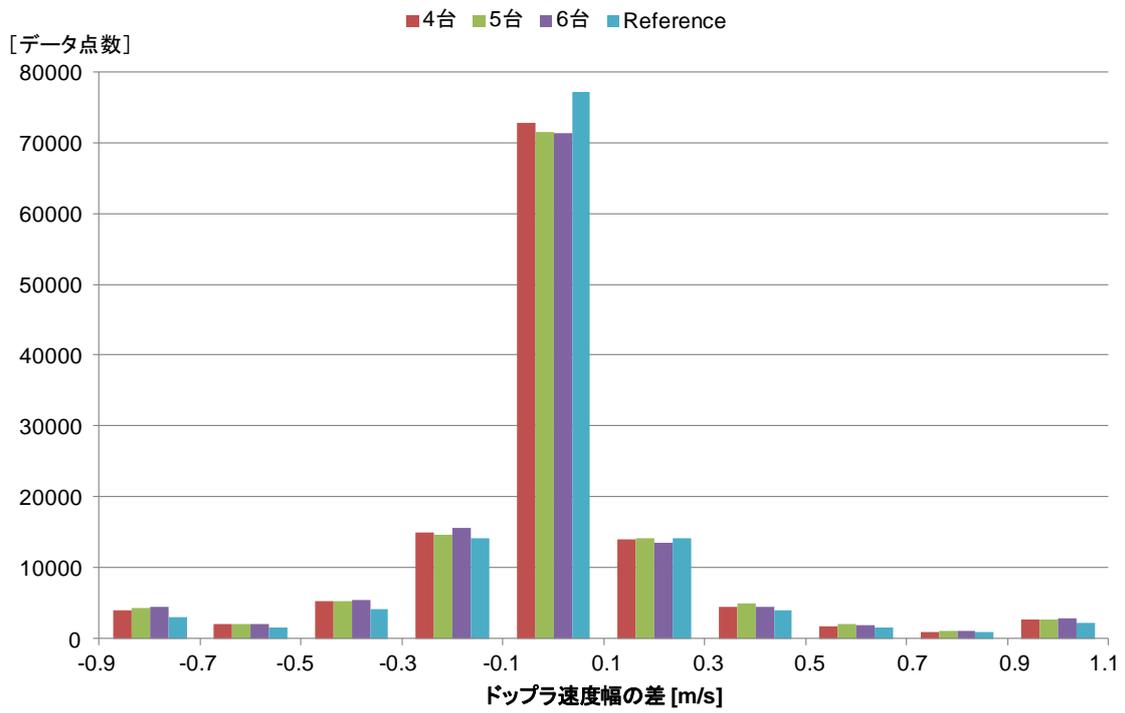
4.1.3.3-図 97 降雨強度差のヒストグラム (縦軸：対数)



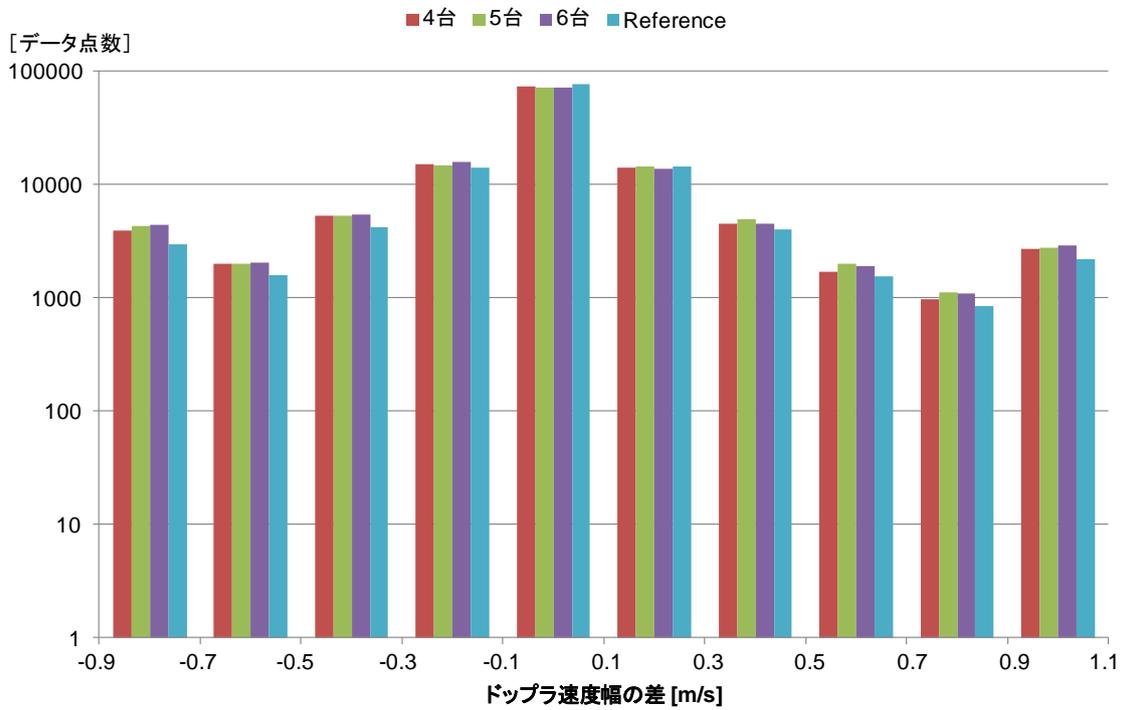
4.1.3.3-図 98 ドップラ速度差のヒストグラム (縦軸：線形)



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)

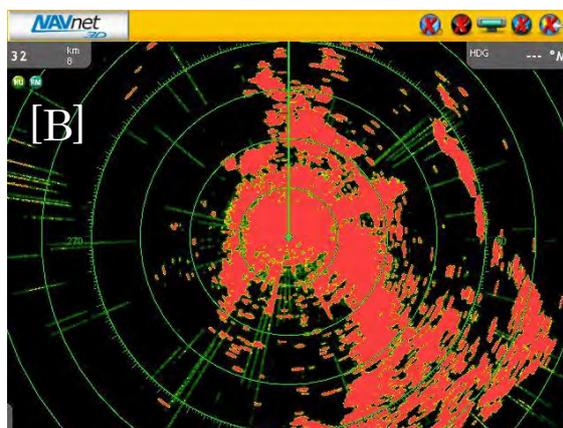


4.1.3.3-図 101 ドップラ速度幅差のヒストグラム (縦軸：対数)

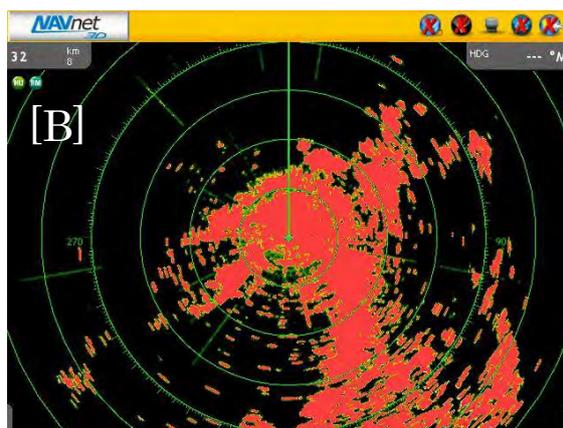
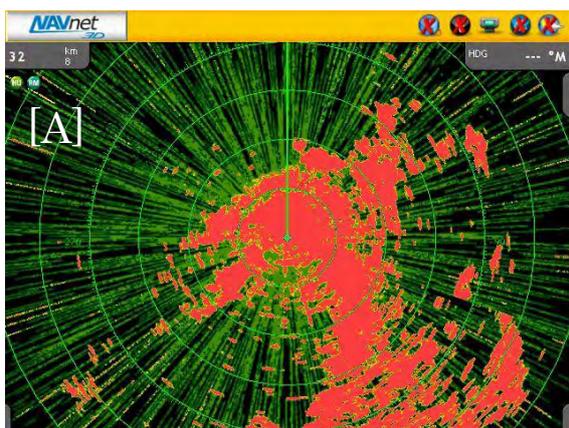
次に、与干渉機が小型気象用レーダー、被干渉機が船舶用レーダーの場合を検討する。与干渉機は遠距離レンジで送信し、船舶用レーダーは受信帯域を最大として検討を行った。

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。



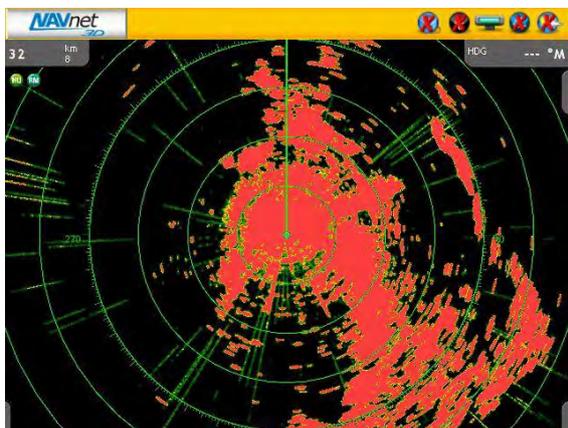
4.1.3.3-図 102 与干渉機：気象用 6 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)



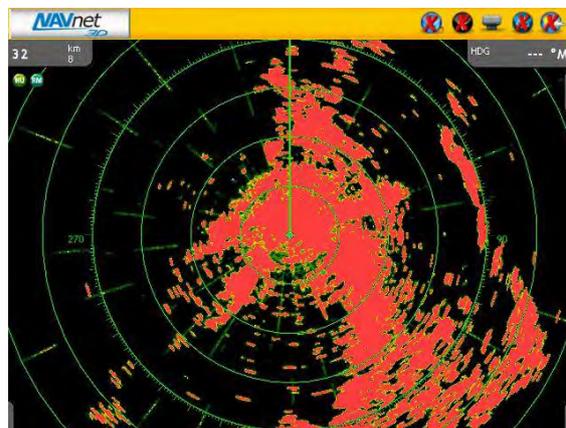
4.1.3.3-図 103 与干渉機：気象用 3 台（遠距離レンジ）、離隔距離：100 m (PRF 変移:3%)

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

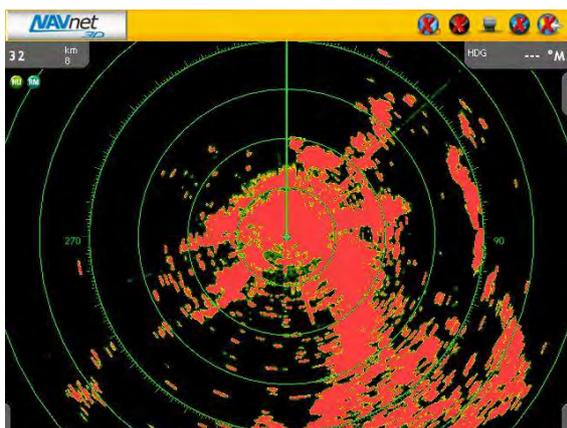


4.1.3.3-図 104 離隔距離：500 m

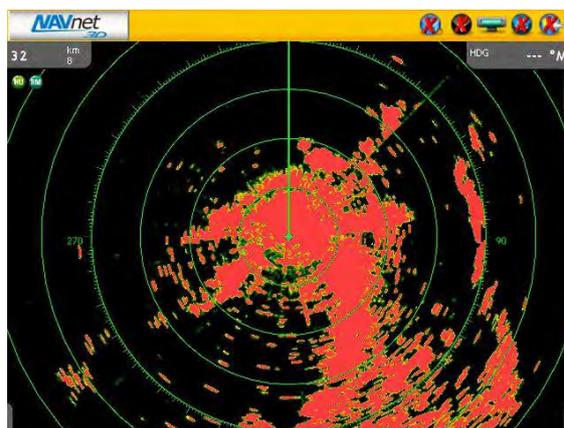
そこで、離隔距離 500 m で与干渉機の台数を 3~6 台まで変化させた場合の干渉除去機能 ON の結果を 4.1.3.3-図 105 から 4.1.3.3-図 107 及び、4.1.3.3-図 104 (再掲) に示す。

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。

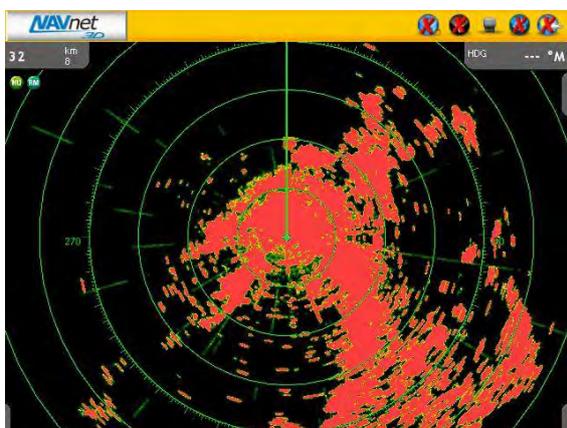
与干渉機：気象用 (遠距離レンジ)、PRF 変移:5%、離隔距離：500 m、干渉除去：ON



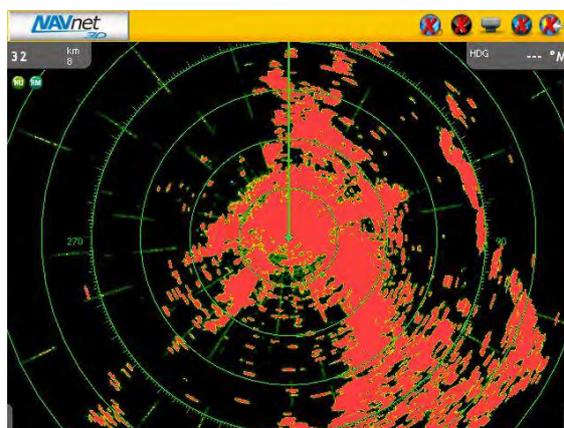
4.1.3.3-図 105 与干渉機：3 台



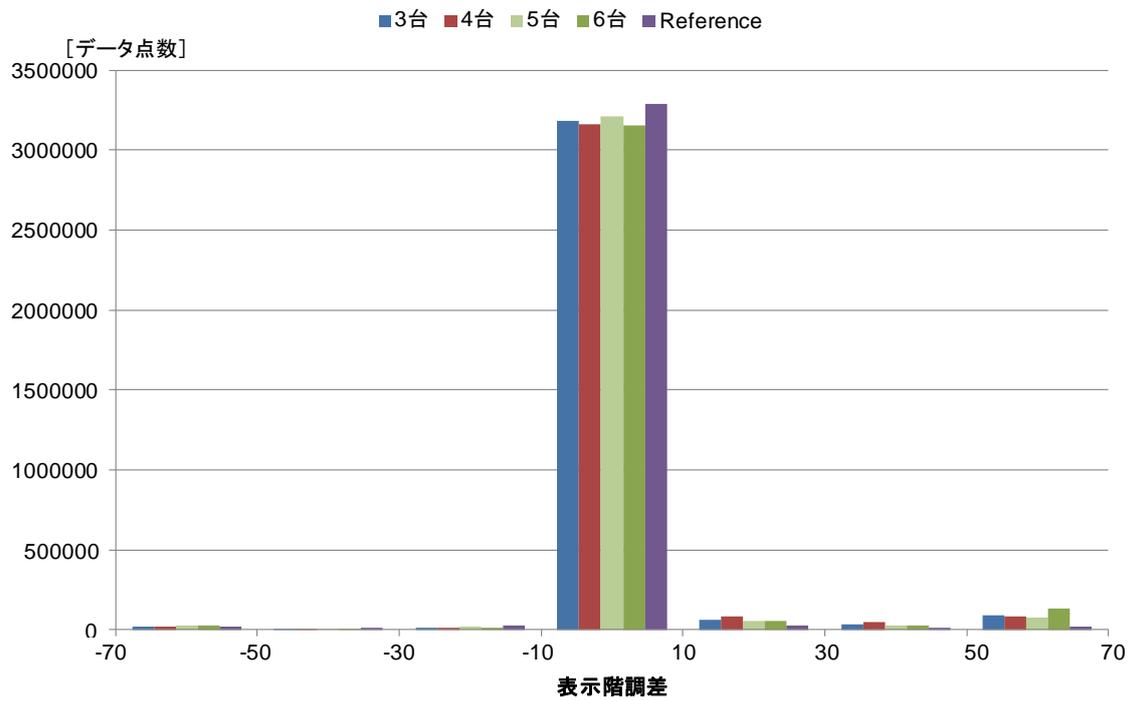
4.1.3.3-図 106 与干渉機：4 台



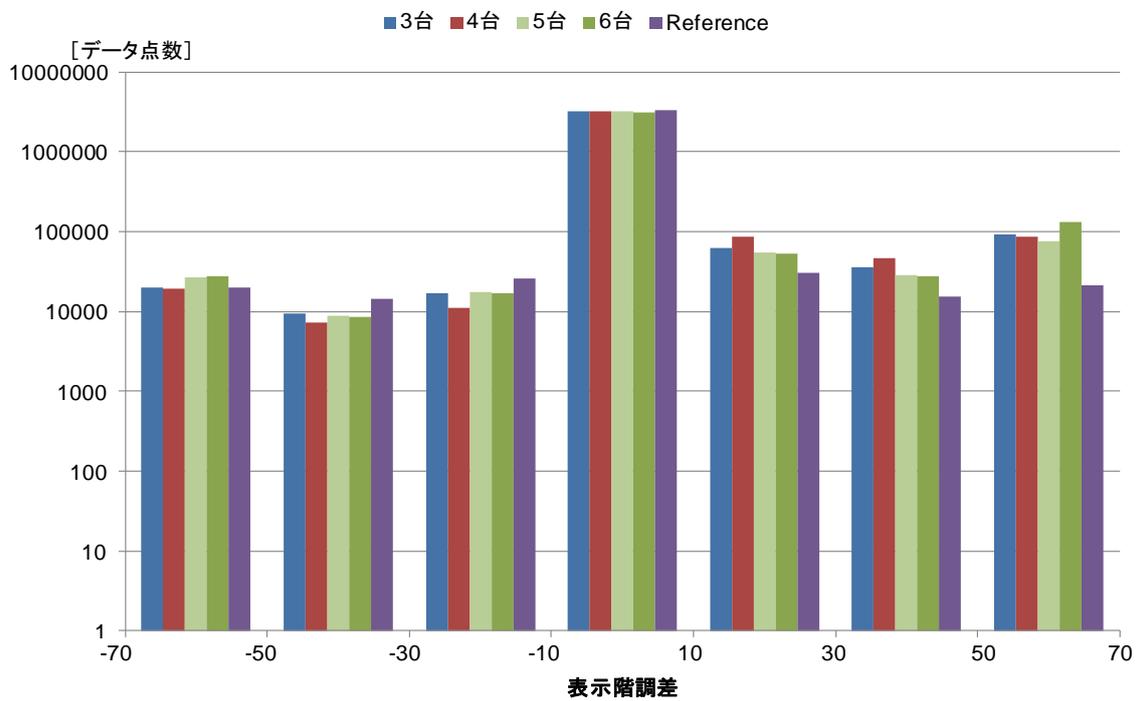
4.1.3.3-図 107 与干渉機：5 台



4.1.3.3-図 104 (再掲) 与干渉機：6 台



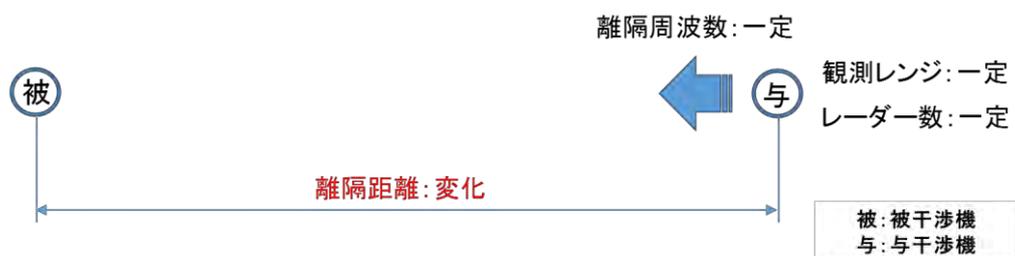
4.1.3.3-図 108 表示階調差のヒストグラム (縦軸：線形)



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

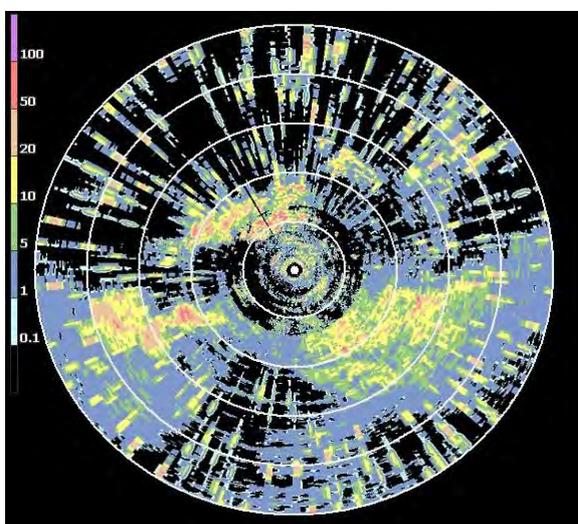
同一周波数で離隔距離を 100 m, 1, 5, 10, 20, 50 km と変化させた場合の影響を検討した。検証4のモデル図を 4.1.3.4-図 110 に示す。



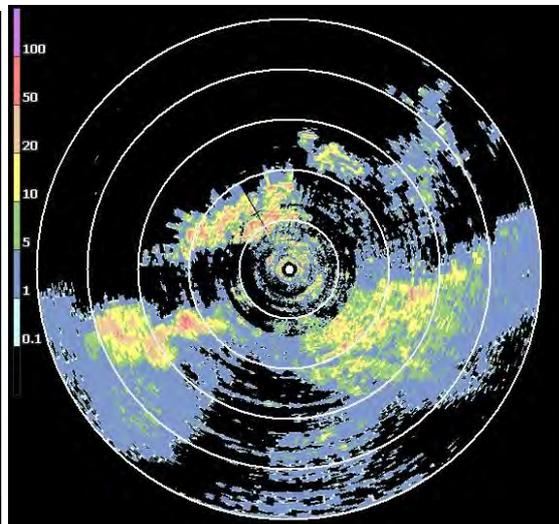
4.1.3.4-図 110 検証4のモデル図

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。

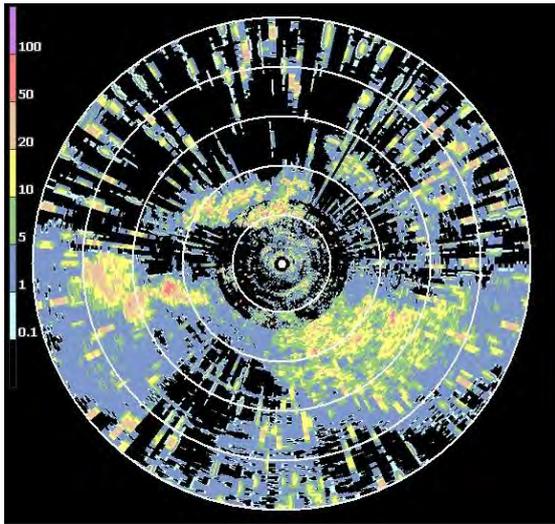
4.1.3.4-図 111 において干渉除去機能を ON にした場合の結果を 4.1.3.4-図 112 に示す。離隔距離が増加するに従って干渉が減少していることが分かる。



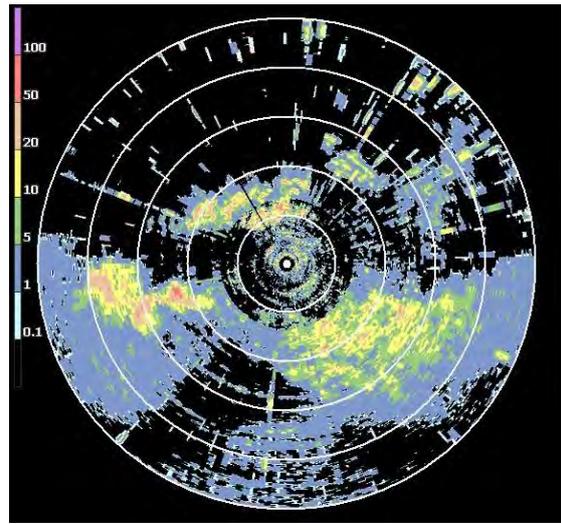
4.1.3.4-図 111 離隔距離：100 m



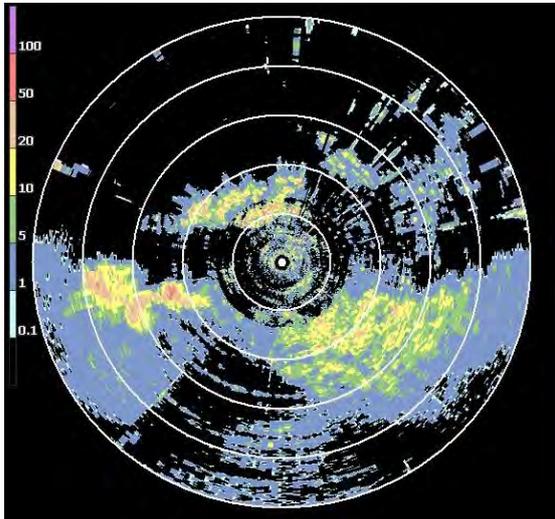
4.1.3.4-図 112 離隔距離：100 m
(干渉除去機能 ON)



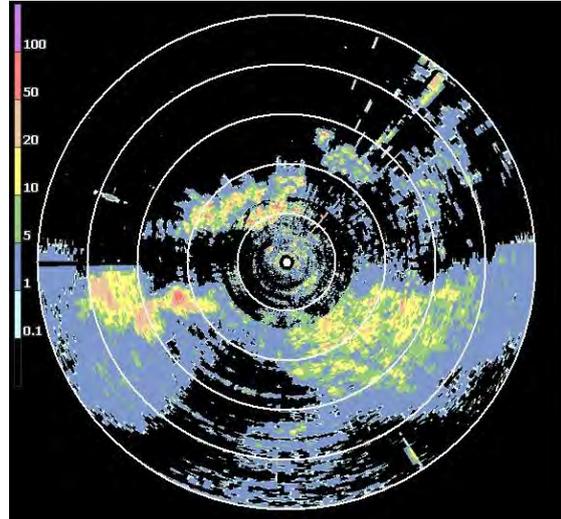
4.1.3.4-図 113 離隔距離 : 1 km



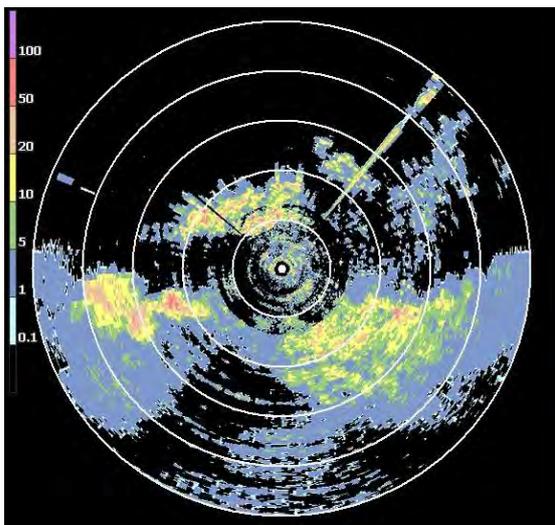
4.1.3.4-図 114 離隔距離 : 5 km



4.1.3.4-図 115 離隔距離 : 10 km



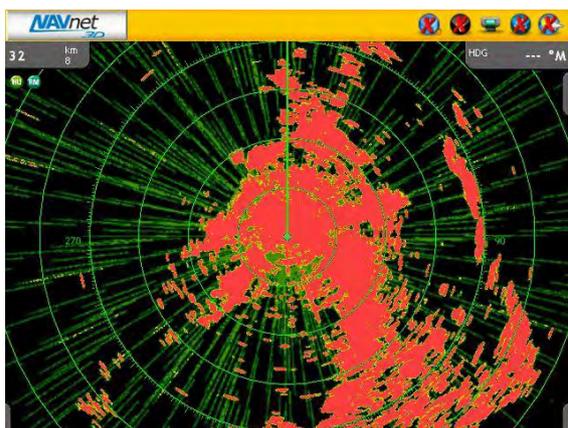
4.1.3.4-図 116 離隔距離 : 20 km



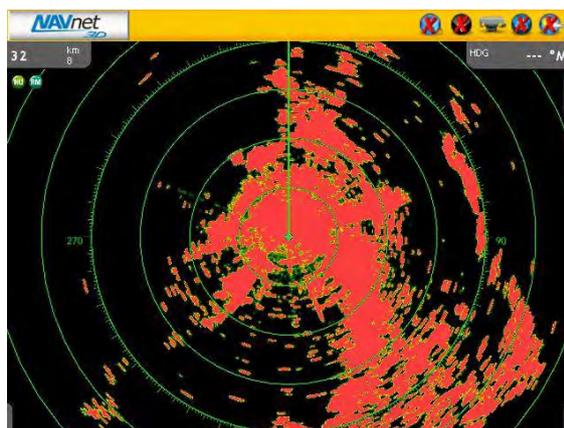
4.1.3.4-図 117 離隔距離 : 50 km

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。

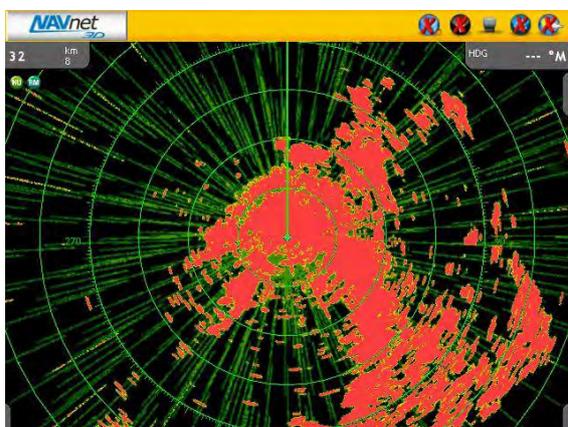
この場合、50 km 程度の離隔距離では顕著な干渉の低下は見られない。これは、画面表示の最大輝度に対して、干渉波の電力が十分に大きいためであると考えられる。



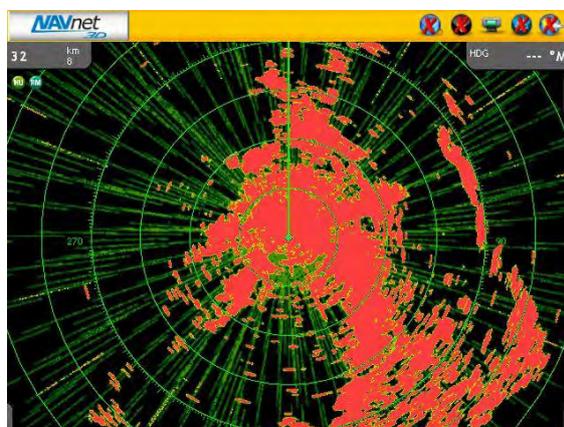
4.1.3.4-図 118 離隔距離：100 m



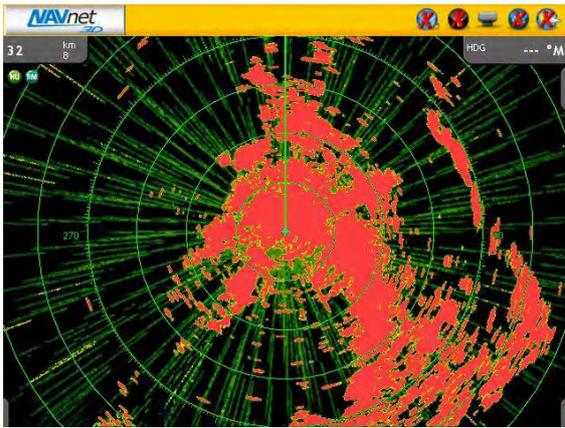
4.1.3.4-図 119 離隔距離：100 m
(干渉除去機能 ON)



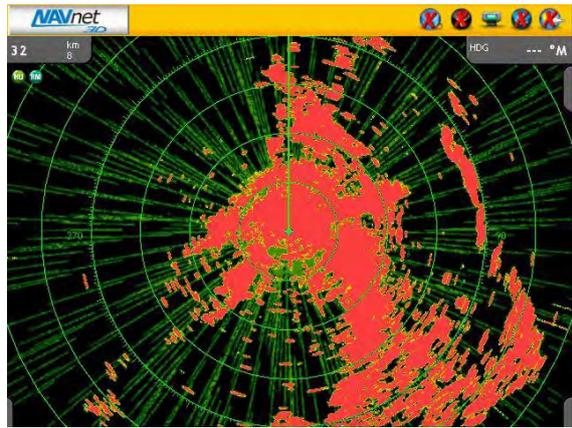
4.1.3.4-図 120 離隔距離：1 km



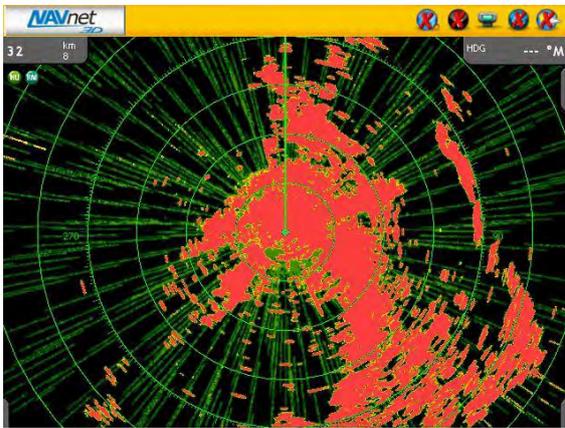
4.1.3.4-図 121 離隔距離：5 km



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。

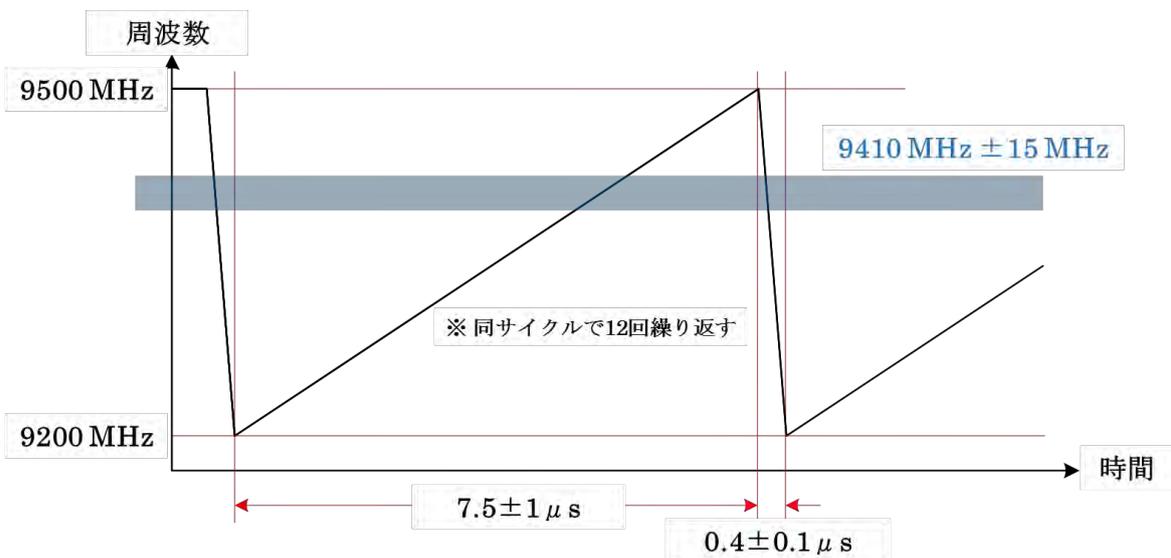
4.1.4 SART 応答波への干渉影響

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

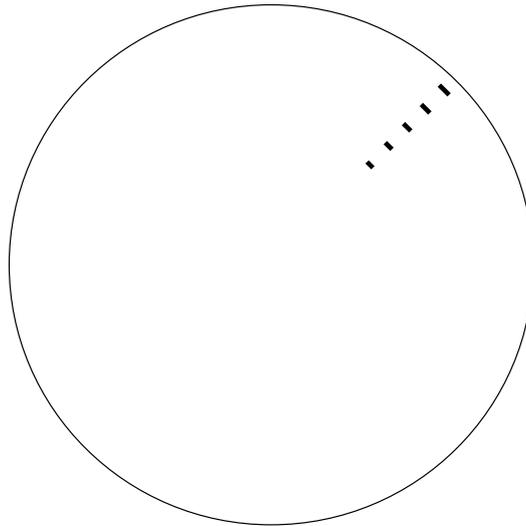
項目	規格仕様	検討仕様	備考
空中線垂直指向角	±12.5°以上	±12.5°	
空中線水平指向角	無指向性	無指向性	
空中線利得	0.95 dBi	0.95 dBi	
送受信偏波	水平または円	水平偏波	
EIRP	400 mW 以上	400 mW	
最小起動感度	-50 dBm	-50 dBm	パルス幅 400 ns 以上
最低検出距離	5 NM 以上	5 NM (9260 m)	
送信諸元	4.1.4-図 125 参照		
応答時間	0.5 μs 以下	0.5 μs	

※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 μs 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

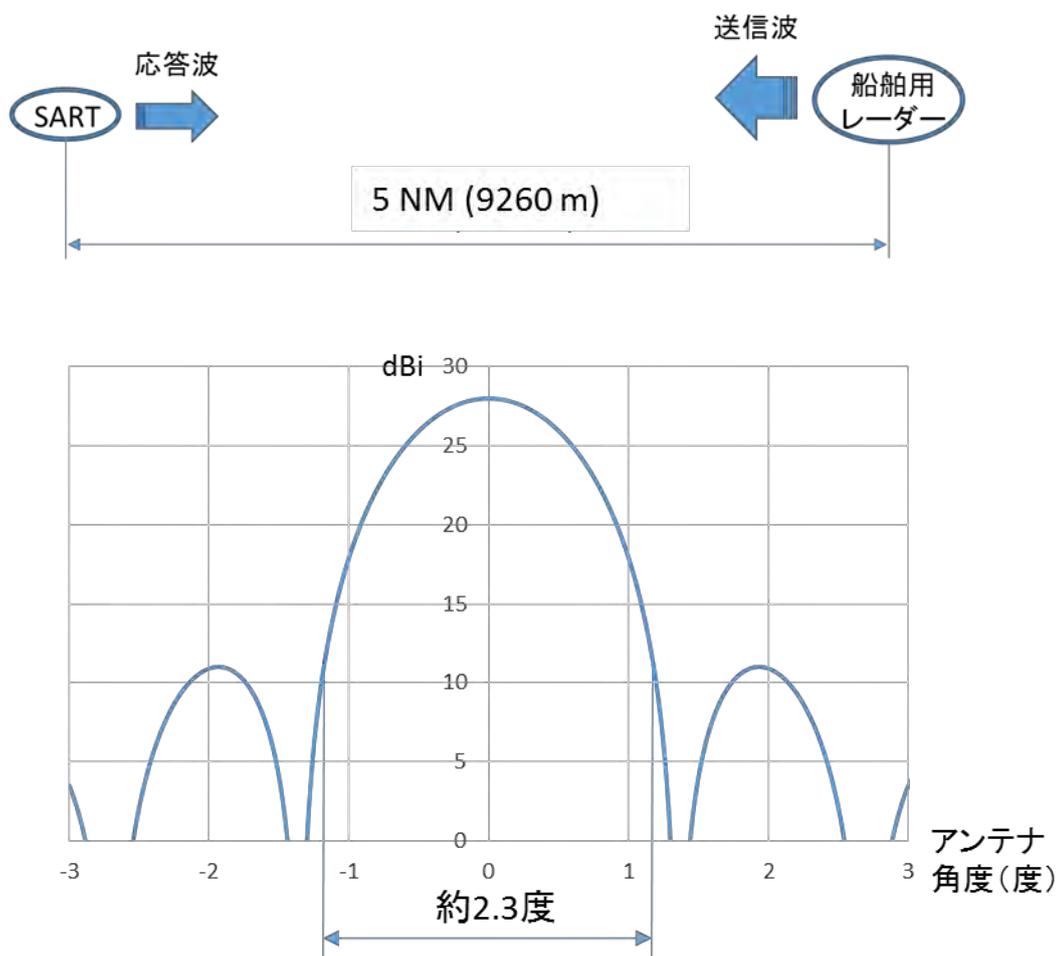
λ ：光速/9410 MHz

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。



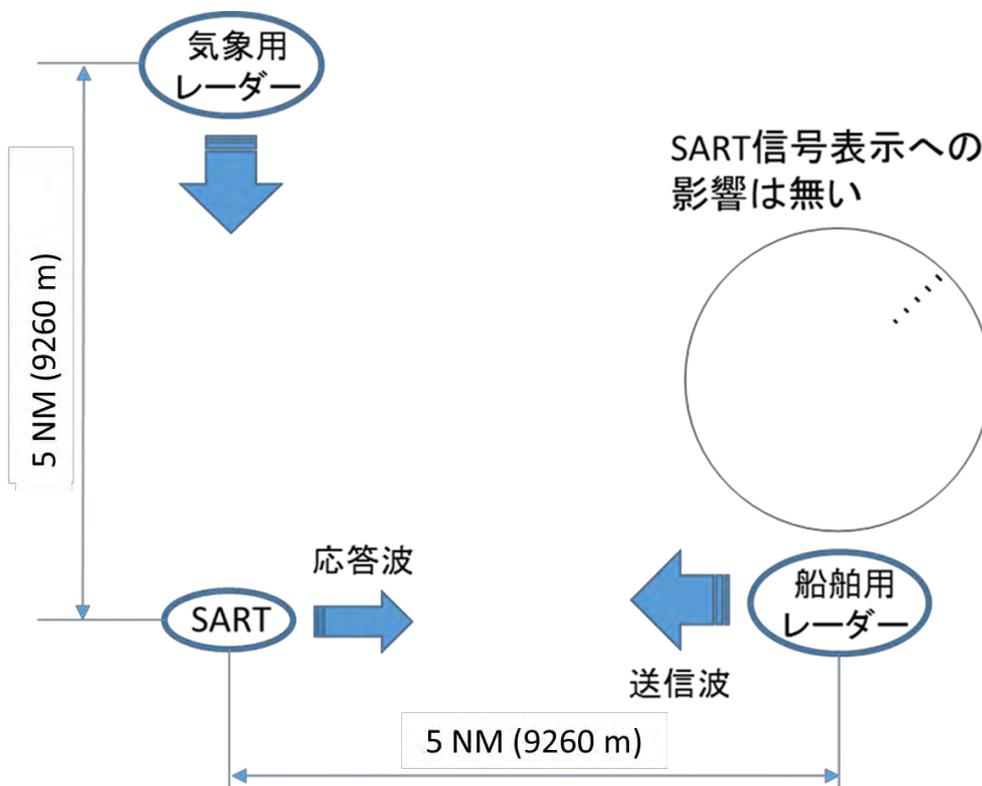
4.1.4-図 127 検討モデルと SART 起動条件を満たす船舶用レーダーの空中線角度

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。