

沿岸監視レーダーと気象レーダーの相互干渉試験報告

古野電気株式会社

ソリューション営業課

廣瀬 孝睦

1. 試験概要

運用中の沿岸監視レーダーと相互干渉試験を実施した。

気象レーダーは古野電気製二重偏波、ウェザーニューズ社単偏波の2種類で実施し、本稿は前者の古野電気製二重偏波レーダーの被干渉状況について報告する。

2. 実施日・場所

実施日：2019年12月11日及び12日

場所：奄美少年自然の家（鹿児島県奄美市名瀬朝仁字赤崎 1096-2）

3. 機器設置状況

機器設置状況を図1に示す。

試験中の人体被爆を防止するためにトラックの屋上へ設置し、また、監視レーダー方向を特定して試験条件を変更する必要があるため、水平出しを行った上で運用した。



図1 二重偏波気象レーダー設置状況

4. 気象レーダー諸元

実験に使用した気象レーダーの特性値を示す。

送信周波数は2種類、パルスの送信パターンも2種類用意し、これらの組み合わせによる状況変化を試験している。

送受信周波数：9750 MHz 帯, 9795 MHz 帯

※上記周波数を中心として、Q0N は-1.25 MHz、P0N は+1.25 MHz で送受信

送信パターン：P0N: 1 μ s、Q0N: 30 μ s, 2 MHz、PRF: 2000/1600 Hz (30 km 観測)

P0N: 1 μ s、Q0N: 50 μ s, 2 MHz、PRF: 1300/1040 Hz (70 km 観測)

表 1 空中線特性値 (実測値)

	周波数帯	9750 MHz		9795 MHz	
	偏波	水平	垂直	水平	垂直
空中線 特性値	空中線利得 [dBi]	32.5	32.4	33.2	33.3
	±3 度以上離れた サイドローブ [dBi]	14.3	12.0	15.1	15.0
	±6 度以上離れた サイドローブ [dBi]	6.6	7.6	8.7	8.6
	±15 度以上離れた サイドローブ [dBi]	6.3	6.3	7.6	7.4
	交差偏波抑圧比 [dB]	30.5	30.0	32.3	32.2
空中線 電力	P0N 1 μ s	220 W		197 W	
	Q0N 30 μ s	226 W		196 W	
	Q0N 50 μ s	237 W		209 W	
	給電線等損失 [dB]	1.75		1.30	

5. 被干渉電力測定結果

気象レーダーが監視レーダーから被る干渉電力を測定した。

気象レーダー実機の空中線を監視レーダーと正対させて停止、空中線から出力される電力を方向性結合器で低減し、スペクトラムアナライザで実測した。結果を表 2 に示す。表中の数字は測定系の損失や方向性結合器の結合度を補正した後の、実際に空中線から出力されている電力である。

表 2 被干渉電力測定値（空中線出力電力）

	メインローブ	サイドローブ
9740 MHz	4.3 dBm	-27.3 dBm
9750 MHz	-23.2 dBm	-33.73 dBm
9795 MHz	-40.0 dBm	-48.6 dBm 以下 (検出できず)

監視レーダーは周波数に手を加えず概ね 9740 MHz 付近で送信しており、表 2 の観測値には周波数離隔効果と気象レーダーの空中線特性が表れている。「メインローブ」とあるのは通常の運用状態、「サイドローブ」とあるのは監視レーダーが気象レーダー方向の±6 度で送信を停止し、サイドローブのみが気象レーダーに照射されている状態である。

方向性結合器の結合度が低いため、9795 MHz のサイドローブではスペクトラムアナライザの検出限界値を下回り、値を確定することはできなかった。9740 MHz の検出値におけるメイン-サイド差及び、9795 MHz のメインローブの検出値から推測して、-72 dBm 程度ではないかと考えられる。

したがって、いずれについても雑音より十分高い電力となり、これらを干渉除去機能によって除去できるか否かが争点となる。

6. 被干渉状況

本項では、気象レーダーの実機に現れる干渉影響について報告する。データは雨量強度表示で評価し、二重偏波情報を利用して品質管理を適用したのもも適用している。

なお、表示画面は大部分が Q0N の送受信領域であり、今回実験に用いた設定では 30 km 観測モードで 97.7 %、70 km 探知モードで 98.9 %となる。

なお、監視レーダーは相互干渉を除去する目的で PRF を自動的に変動させる機能を有しており、当該機能の影響も検証した。本稿では海上保安庁での呼称に倣って、本機能をジッタと称する。

6.1. 等仰角回転（メインローブ干渉）

監視レーダーは通常回転、気象レーダーは予干渉強度が最大となる仰角-0.4 度で運用した場合の結果を示す。気象レーダーは 6 rpm で走査、70 km 探知モード(P0N: 1 μs, Q0N: 50 μs, 2MHz, PRF: 1300/1040 Hz)で運用し、最低 5 分間のデータを収録している。

6.1.1. 9795 MHz で運用した場合（監視レーダー：ジッタ停止）

気象レーダーは 9795 MHz で運用、監視レーダーはジッタ停止で運用した場合（初日の No.11）の最悪状態（38 走査中）を図 2、これに品質管理を適用したものを図 3 に示す。

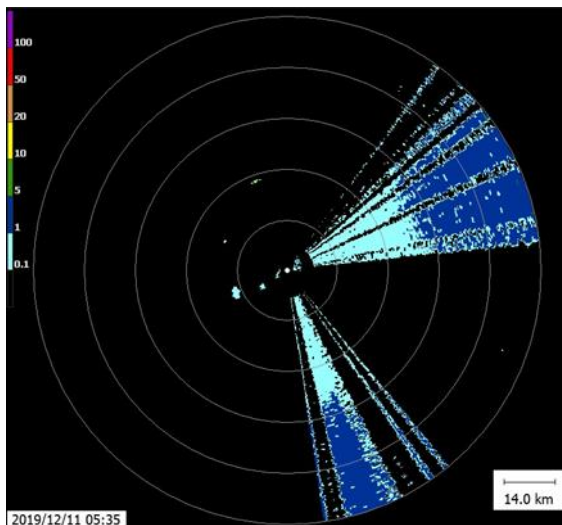


図 2 干渉除去：弱

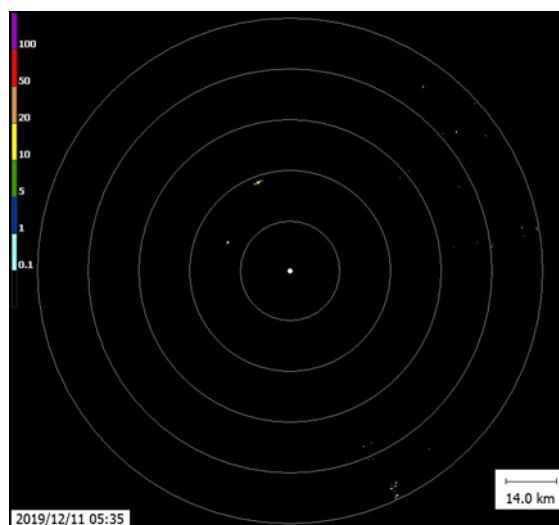


図 3 干渉除去：弱，品質管理適用

干渉の消え残りが見られるが、品質管理によって除去できることを確認できる。

6.1.2. 9795 MHz で運用した場合（監視レーダー：ジッタ動作）

気象レーダーは 9795 MHz で運用、監視レーダーはジッタ動作（通常状態）で運用した場合（初日の No.12）の最悪状態（36 走査中）を図 4、これに品質管理を適用したものを図 5 に示す。

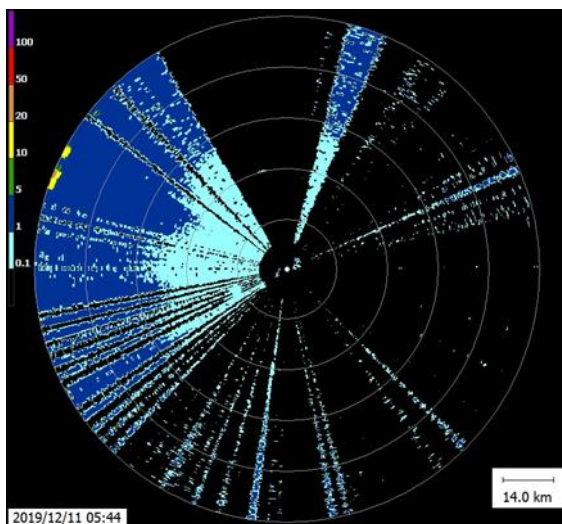


図 4 干渉除去：弱

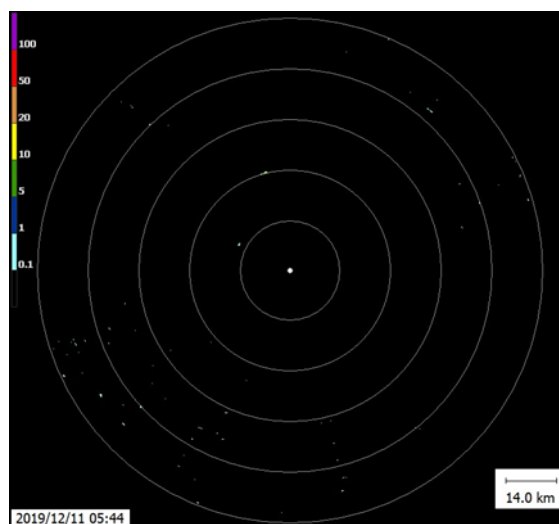


図 5 干渉除去：弱，品質管理適用

干渉の消え残りが見られるが、品質管理によって除去できることを確認できる。

監視レーダーのジッタ動作は、スイープ間相関による干渉除去を効果的に行うことを目的として、送信パルス幅（高々 1.2 μs 程度）以上 PRT を変化させるという対応であるが、気象レーダーの干渉除去には有意な改善効果が見られなかった。これは、古野電気製気象レーダーがパルススタガ二重 PRF で動作しているため同じ PRT が連続せず、監視レーダーの 40 倍以上パルス幅の長い気象レーダーにとってはこちらの動作が支配的になっているからであると考えられる。

ここで、干渉頻度について考察を加える。図 2 及び図 4 に示したものは最悪状態であり、これら以外の時間における干渉状況を示しておく。

図 2 と同条件における最良状態を図 6、図 4 と同条件における最良状態を図 7 に示す。

図 6 は図 2 の 4 分後 (24 スキャン後) の状況を示している。レーダー内臓の干渉除去機能によって干渉波を完全に除去できていることがわかる。

図 7 は図 4 の 40 秒後 (4 スキャン後) の状況を示しており、南東方向にごく限られた干渉波を確認できるが、非常に近接した時間であってもこれだけの差が出るということを示している。このように、干渉の現れる方位・距離・量はランダムに変化する。

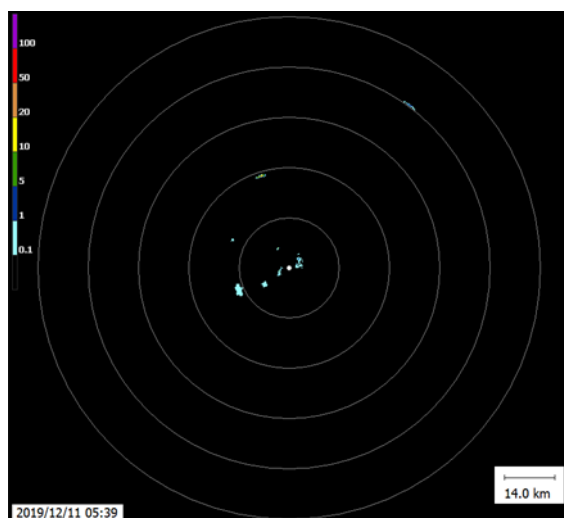


図 6 図 2 の最良状態

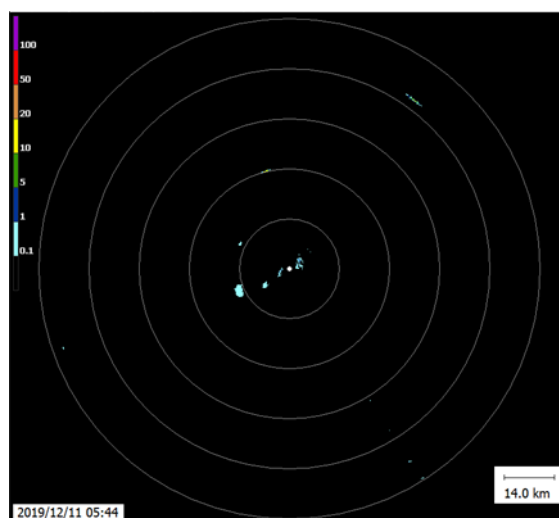


図 7 図 4 の最良状態

このことを、干渉波が全データ中に占める割合で評価する。およそ 5 分半のデータについて集計した結果を図 8 及び図 9 に示す。図 8 についてはここまで画像に示している 0.1 mm/h 以上のデータ数、図 9 については汎用型レーダーの観測対象としている 1 mm/h 以上の干渉波について集計した結果である。

それぞれ図中に「図 4」と表示しているが、この最悪値はかなり突出した値であり、レーダーの実用域である 1 mm/h に限れば概ね 5 % 以下程度の占有率であることがわかる。この 5 分半でのデータ占有率平均値を表 3 に示す。

表 3 干渉波データ占有率の平均値

閾値	6.1.1 の条件	6.1.2 の条件
0.1 mm/h 以上	3.21 %	8.26 %
1 mm/h 以上	1.04 %	3.48 %

ここで品質管理と表示しているのは、実際には SQI 及び ρ_{hv} を併用して除去している。

したがって、監視レーダーからの干渉波は水平偏波であるため、干渉波より高強度の降水データが同位置にあったとしても判別可能であり、基本的に除去されない。干渉波と共に除去されたとしても 3.5 % 程度の割合に留まり、また、次のスキャンでは除去される位置が移動するため連続して欠損する確率は低く、実用上は許容できると考えられる。

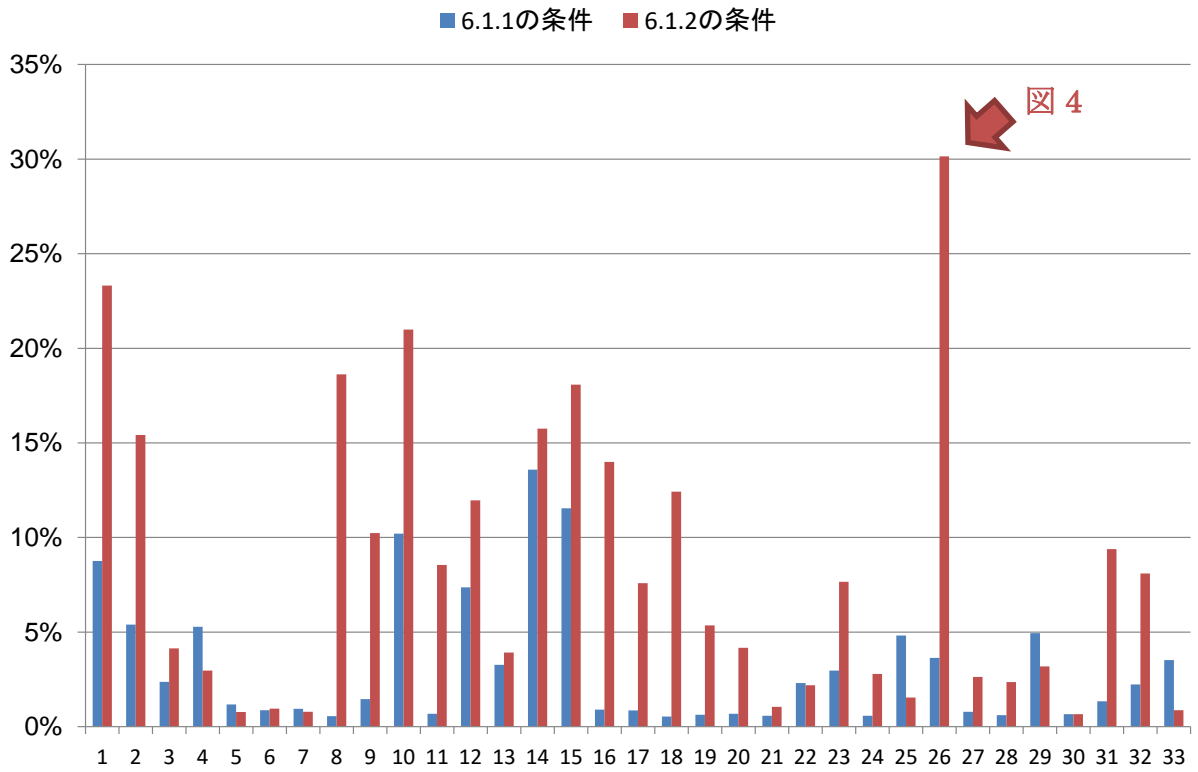


図 8 干渉波のデータ占有率 (0.1 mm/h 以上)

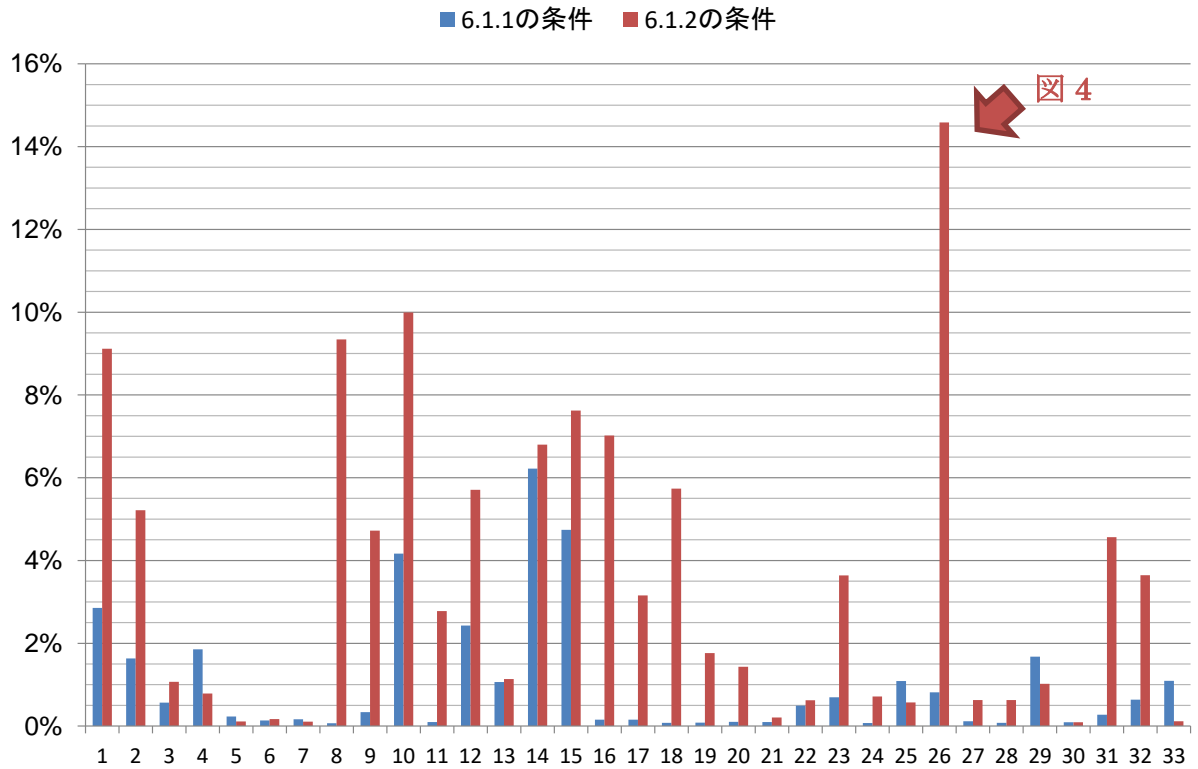


図 9 干渉波のデータ占有率 (1 mm/h 以上)

6.1.3. 9750 MHz で運用した場合（監視レーダー：ジッタ停止）

気象レーダーは 9750 MHz で運用、監視レーダーはジッタ停止で運用した場合(初日の No.19)の最悪状態（37 走査中）を図 10、これに品質管理を適用したものを図 11 に示す。

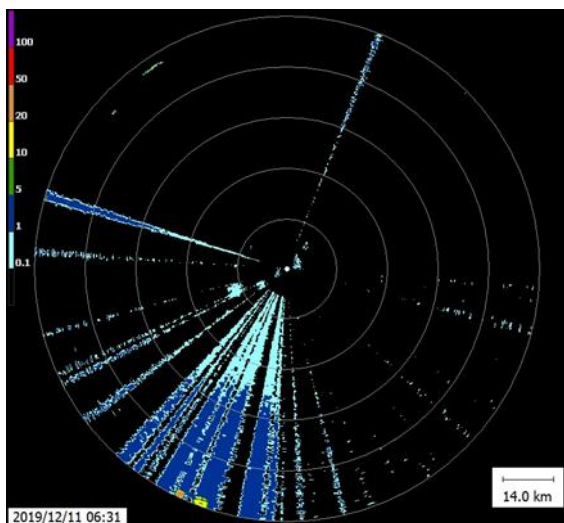


図 10 干渉除去：弱

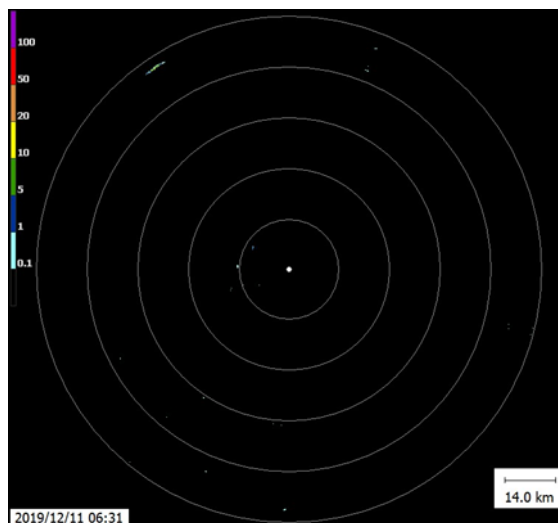


図 11 干渉除去：弱，品質管理適用

干渉の消え残りが見られるが、品質管理によって除去できることを確認できる。

6.1.4. 9750 MHz で運用した場合（監視レーダー：ジッタ動作）

気象レーダーは 9750 MHz で運用、監視レーダーはジッタ停止で運用した場合(初日の No.20)の最悪状態（38 走査中）を図 12、これに品質管理を適用したものを図 13 に示す。

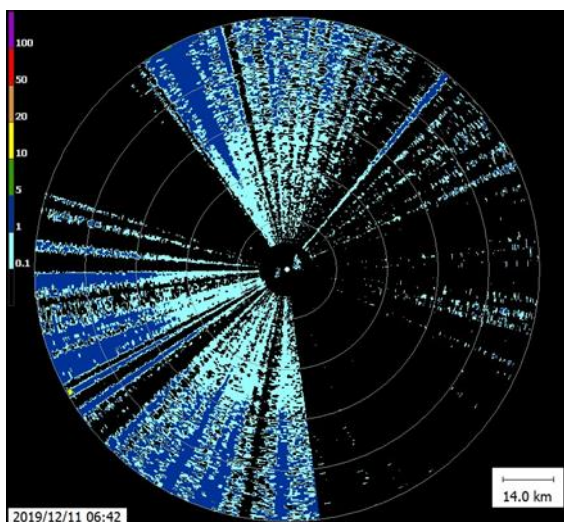


図 12 干渉除去：弱

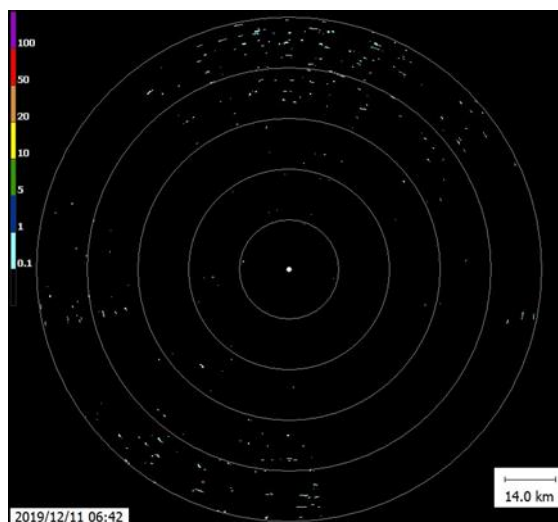


図 13 干渉除去：弱，品質管理適用

干渉の消え残りが見られるが、品質管理によって概ね除去できることを確認できる。

6.2. 等仰角回転（サイドーサイド干渉）

6.1 の状態から、双方とも対向方向のメインローブ送信を停止した、サイドーサイド干渉状態での試験例を示す。

6.2.1. 9795 MHz で運用した場合

気象レーダーが 9795 MHz で運用した場合（初日の No.25）について、最悪状態（53 走査中）における雨量表示例を図 14 に示す。離隔距離が小さいため全周に影響が及び、干渉除去が弱設定のため、かなりの干渉が消え残っていることが分かる。ここから取り得る対策としては、次の 3 つが考えられる。

- PRF 変更
- 干渉除去機能の強化
- 品質管理による除去（後処理）

消え残りの要因としては、偶然に PRF が不利な設定（監視レーダーの PRF と整数比関係）となっているために干渉除去機能が有効に働いていないことも懸念されるが、今回は PRF を事前に取り決めて実施していたため、他の 2 手法による対応を検討した。干渉除去設定のみを強化して再実施した場合の最悪状態（47 走査中）を図 15、品質管理で除去した場合を図 16 に示す。

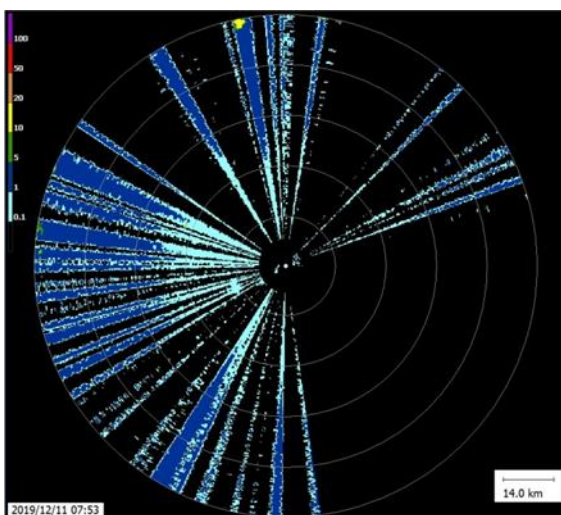


図 14 干渉除去：弱

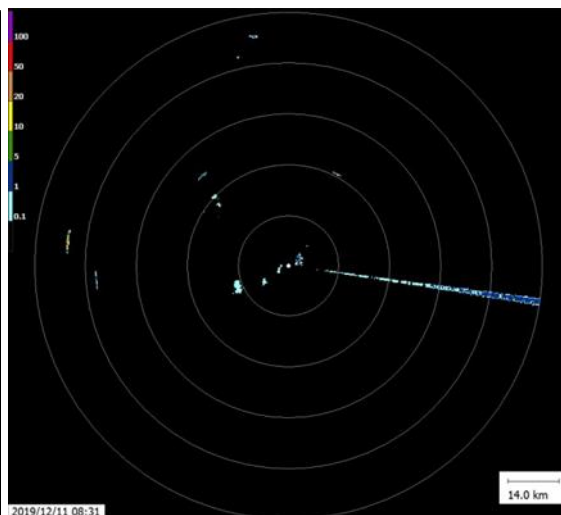


図 15 干渉除去：強

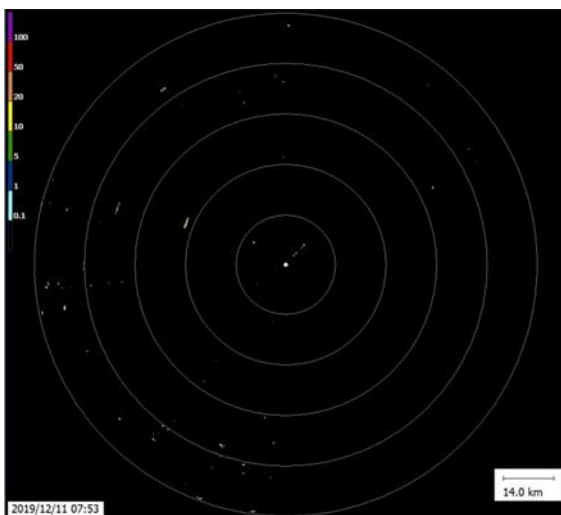


図 16 干渉除去：弱，品質管理適用

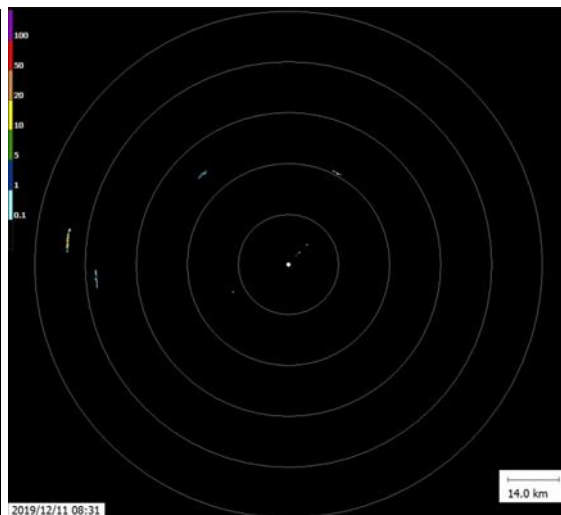


図 17 干渉除去：強，品質管理適用

6.2.2. 9750 MHz で運用した場合

前項と同様の状況で、気象レーダーの運用周波数のみ 9750 MHz とした場合（初日の No.28）を示す。監視レーダーが 9740 MHz 付近で運用しているために干渉状況悪化が予想されるが、実際には状況が改善してしまう結果となった。

最悪状況（30 走査中）を図 18、これに品質管理を適用したものを図 19 に示す。

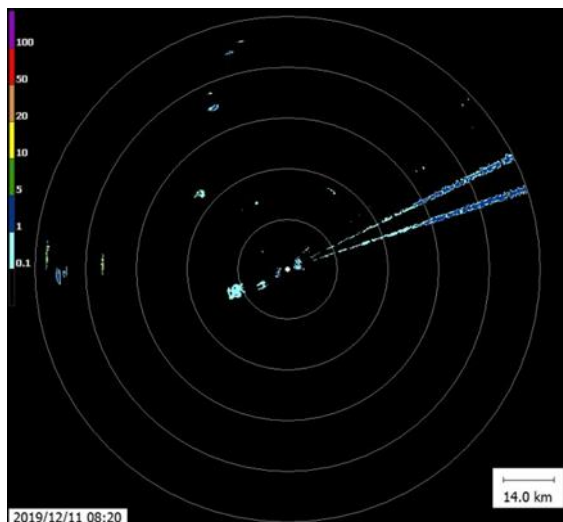


図 18 干渉除去：弱

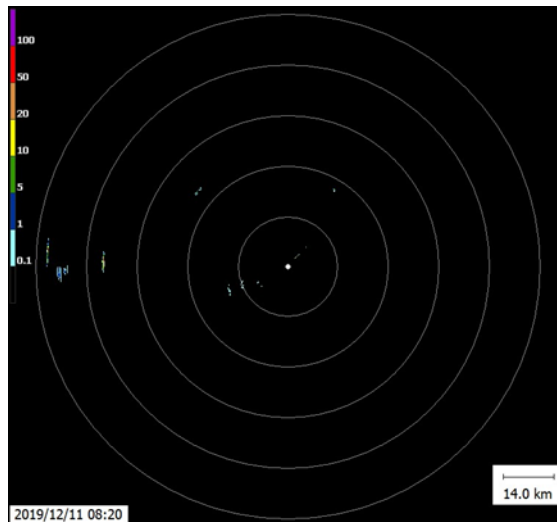


図 19 干渉除去：弱、品質管理適用

干渉除去設定は強化していないのだが、品質管理適用前でも 9795 MHz において強化した場合と同等に消えている。これは、監視レーダー側の状況が変化し、PRF 設定が干渉除去に有利となったのではないかと考えられる。

実際の設計は秘密である為に真相は不明であるが、当社製監視レーダーでは送信／停止処理を行う度に PRF ジッタパターンを自動変更し、干渉が消えない場合（PRF が一致してしまっている場合）に対応できるような仕様になっている。今回も同様の事象が生じたために、干渉除去機能が有効に機能したのではないかと考えられる。

したがって、非常に近接した 9750 MHz で運用したとしても、設定次第で被干渉を実用上問題無い状態とすることができることがわかった。

6.3. ボリュームスキャン（サイドーサイド干渉）

双方ともに通常運用状態で実施した試験の結果を示す。

監視レーダーは 10 rpm で運用し、気象レーダーは 6 rpm で毎分 5 仰角（3,5,7,12,16 度）を走査した。パルス設定は等仰角回転と同じ 70 km 探知モード(P0N: 1 μ s, Q0N: 50 μ s, 2MHz, PRF: 1300/1040 Hz)である。

監視レーダーとの距離が近い干渉残りが顕著であることが初日の試験で判明していたため、気象レーダーの干渉除去機能は強設定で運用した。

6.3.1. 9795 MHz で運用した場合

9795 MHz で運用した場合の最悪状況(12 セット中)を図 20、品質管理を適用した結果を図 21 に示す。なお、仰角 5 度の結果である。

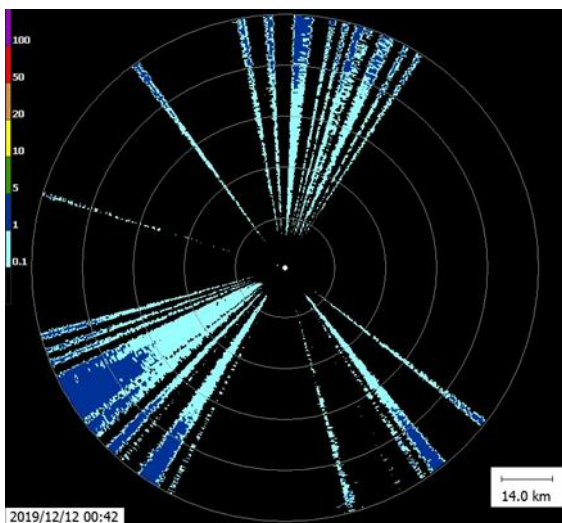


図 20 干渉除去：強

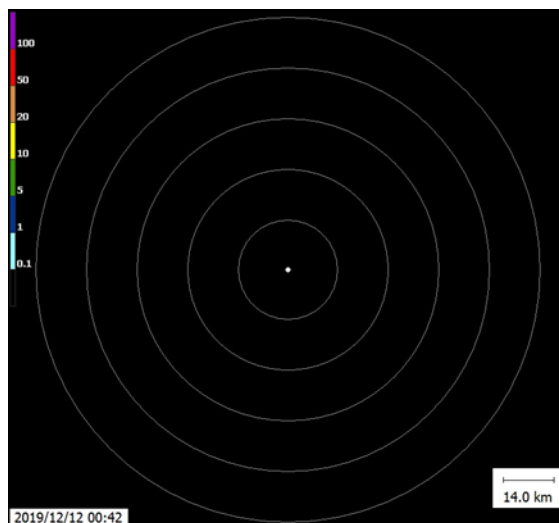


図 21 干渉除去：強，品質管理適用

干渉状況としては初日のサイドローブ干渉を模擬した場合と概ね同様であり、消え残りは見られるが、品質管理で消えていることがわかる。

6.3.2. 9750 MHz で運用した場合

9750 MHz で運用した場合の最悪状況(11 セット中)を図 22、品質管理を適用した結果を図 23 に示す。なお、仰角 3 度の結果である。

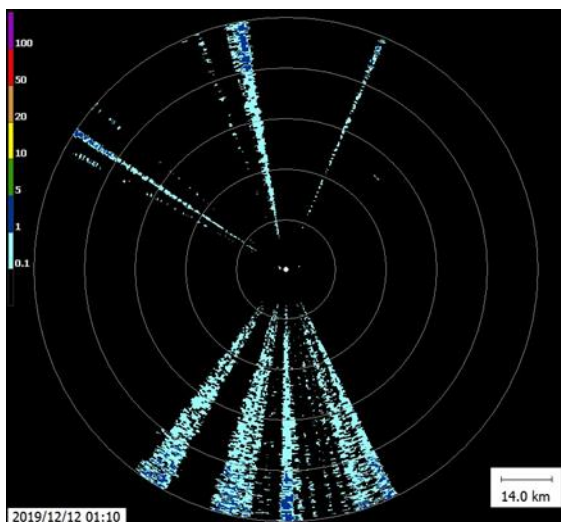


図 22 干渉除去：強

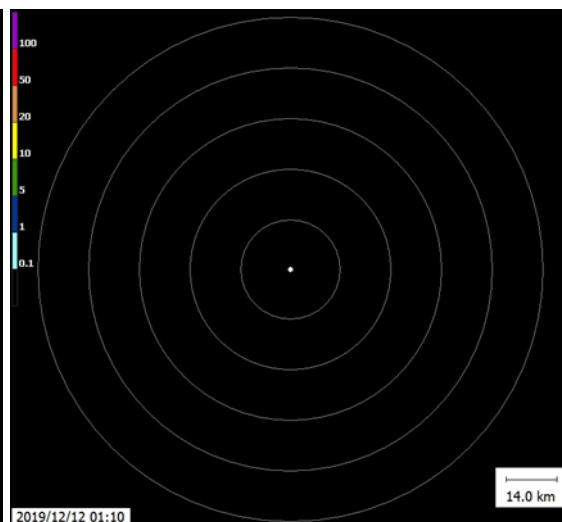


図 23 干渉除去：強，品質管理適用

消え残りは見られるものの、9795 MHz よりも干渉波の強度が低いように見える。初日と違い、前項から本項の間、監視レーダー側は操作せずに送信継続しており設定も変わっていないと考えられるため、周波数特性の差によって干渉状況が変化しているのだと考えられる。

7. まとめ

気象レーダーと沿岸監視レーダーの相互干渉試験について、古野電気製二重偏波レーダーの被干渉状況をまとめた。

干渉軽減が期待できる、監視レーダー側のジッタ動作有無については、気象レーダーの干渉除去機能にとっては特に効果が見られないことが分かった。これは、古野電気製気象レーダーがパルススタガ二重 PRF で動作しているため同じ PRT が連続せず、監視レーダーの 40 倍以上パルス幅の長い気象レーダーにとってはこちらの動作が支配的になっているからであると考えられる。

また、周波数離隔量の大きい 9795 MHz と小さい 9750 MHz の両方で試験を実施したが、到来波の実測強度には大きな差があるものの、気象レーダーの被干渉状況としては有意な差は見受けられなかった。これは、監視レーダーからの距離が近い為に気象レーダーの受信系が飽和していること、パルス圧縮領域では干渉波のエネルギーが時間軸で拡散されることが影響していると考えられる。

結局は、干渉除去機能の効果は PRF 等の相性によって変化するため、強設定で消え残ることもあれば、弱設定で概ね消えることもあるということがわかった。また、消え残った場合においても干渉波のデータ占有率は低く、汎用型気象レーダーの実用域である 1 mm/h では概ね 5 % 以下である。更には、この干渉も品質管理 (SQI 及び ρ_{hv} による判別) で除去できるため、干渉波を降雨と誤認することはなく、実運用上許容できる程度であることが確認できた。