

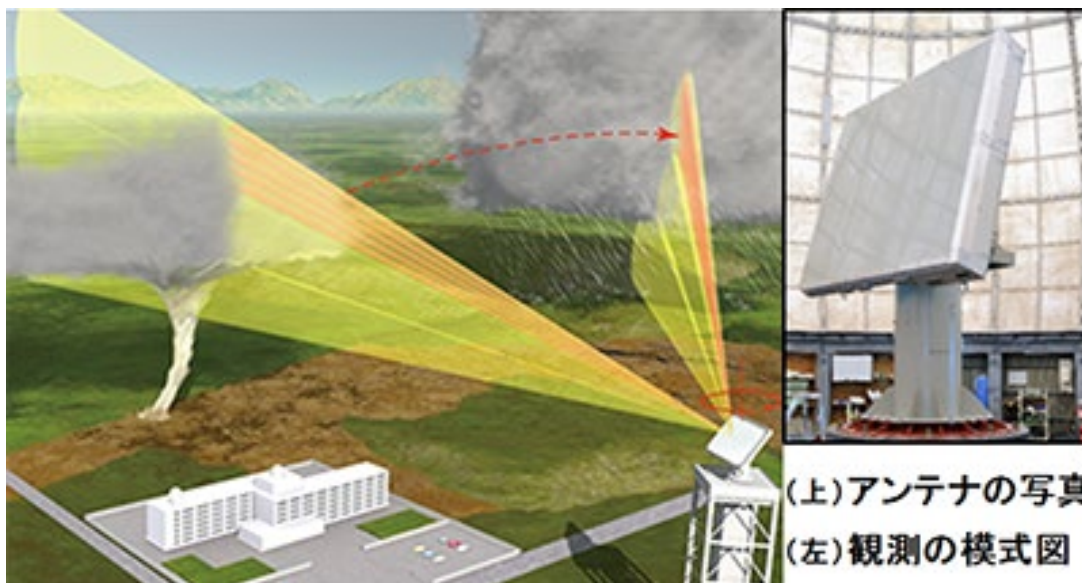
次世代高機能レーダー等の導入による周波数の有効利用のための技術的条件に関する調査検討の成果(X帯)

令和4年4月

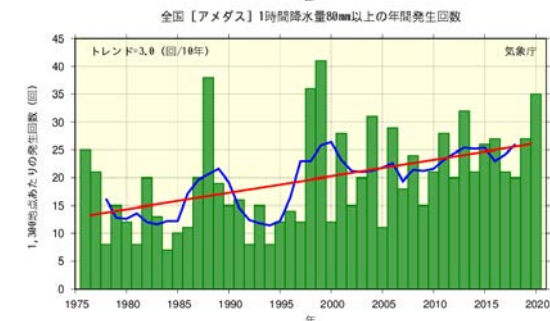
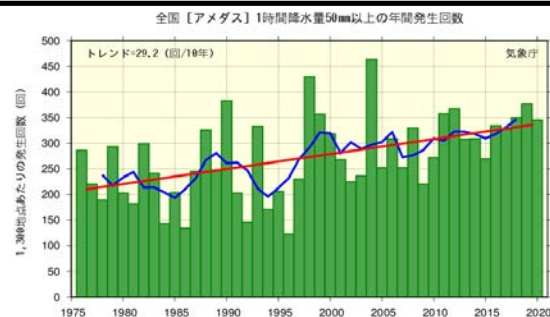
# 検討の背景 (X帯)

- 現在、気象レーダーは、その観測結果を基にした気象予報や災害情報が国民に広く提供され、国民生活の安心と安全に寄与。また、局地的大雨や大規模な水害の増加等を背景に、その重要性が更に高まっている。
- 従来から主に国の機関によって運用されている9.7GHz帯の気象レーダーは、従来の電子管型から、狭帯域かつ低出力で安定性の高い固体素子型への移行が進んでおり、併せてパルスの送信方法等が多様化している。
- ゲリラ豪雨等の発生をいち早く検知し、予報の信頼度を高めるために、より高性能な次世代気象レーダー（フェイズドアレイレーダー）の導入が求められている。

## フェーズドアレイ気象レーダー



(出典 気象研究所, <https://www.mri-jma.go.jp/Facility/phasedarrayradar.html>)



(出典 気象庁)

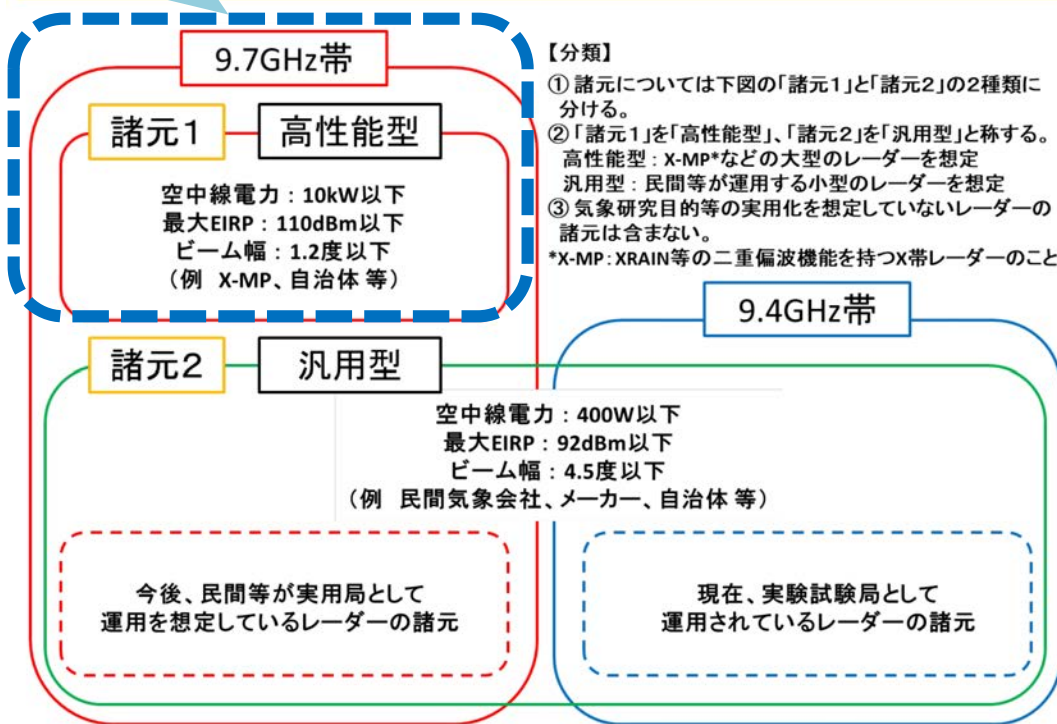
全国の1時間降水量50mm以上及び80mm以上の年間発生回数の経年変化 (1976~2020年)

- 今後の導入が見込まれるフェーズドアレイ気象レーダーを含む9.7GHz帯高性能型気象レーダーについて、同一システム間及び他システムとの共用条件を含めた技術的条件について検討。

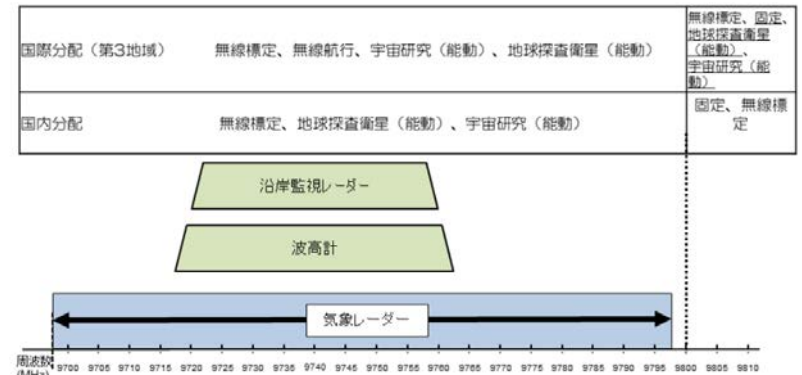
# X帯気象レーダーの現状

- X帯気象レーダーには9.4GHz帯と9.7GHz帯があり、両帯域での利用が想定されている。
- 9.7GHz帯の気象レーダーのうち「高性能型」については、主に国や研究機関において運用を行っている。
- 「高性能型」に分類されるフェーズドアレイ型気象レーダーについては、今後の段階的導入（台数の増加）が見込まれている。
- フェーズドアレイ型気象レーダーは、これまでの観測に比べ、縦方向の広い範囲に電波を発射するため、他のレーダー等への影響が生じないように適切な対策が求められている。

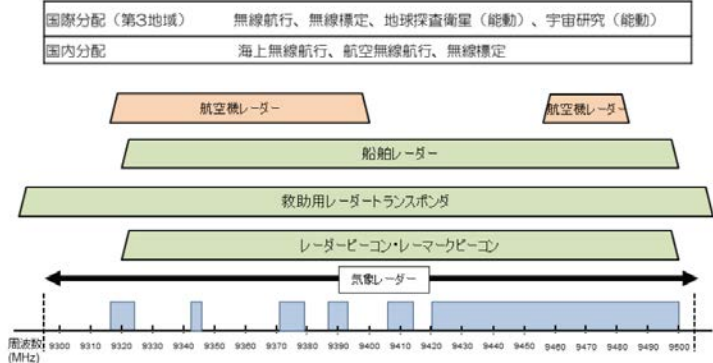
## 検討対象



## 9.7GHz帯の周波数割当状況



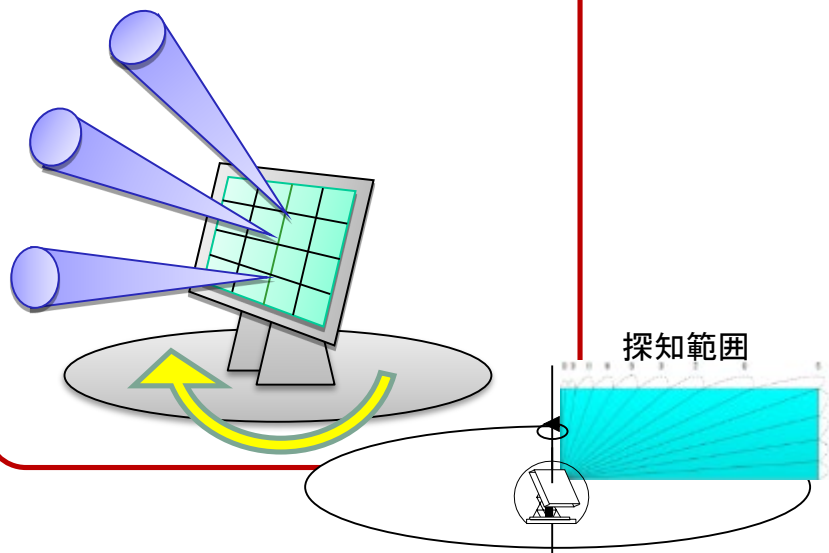
## 9.4GHz帯の周波数割当状況



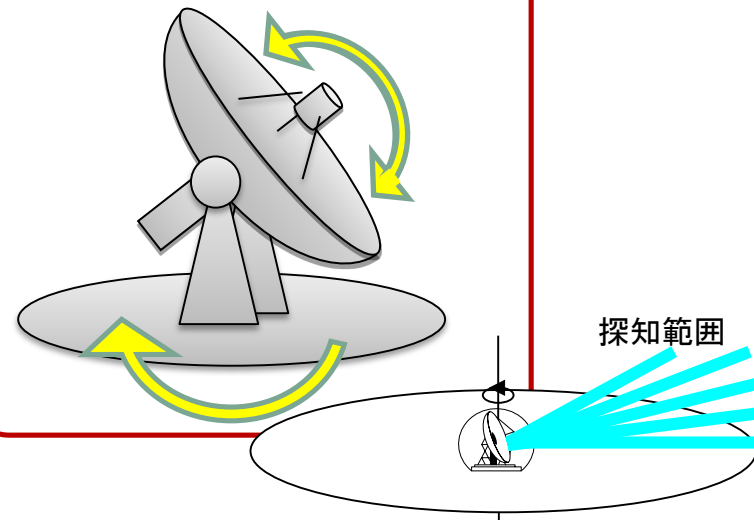
- 今回の検討については9.7GHz帯高性能型を対象とし、諸元等の技術的条件を検討する

# フェーズドアレイ型気象レーダーとパラボラ型気象レーダー

## フェーズドアレイ型気象レーダー



## パラボラ型気象レーダー



## フェーズドアレイ型気象レーダー

## パラボラ型気象レーダー

フェーズドアレイアンテナ

空中線タイプ

パラボラアンテナ

単偏波／二重偏波

偏波

単偏波／二重偏波

仰角：電子走査  
方位角：機械走査

走査方法

仰角：機械走査  
方位角：機械走査

三次元スキャン(約100仰角)  
／30秒～1分程度

観測空間  
／観測時間

三次元スキャン(約15～20仰角)  
／5～10分程度

60 km～80km

観測範囲

60 km～80km

フェーズドアレイ気象レーダは時間的空間的に密度の高い観測を実施

# フェーズドアレイ型気象レーダーの技術仕様(例)

項目	仕様	備考
レーダタイプ	二重偏波フェーズドアレイ気象レーダー	
空中線	フェーズドアレイアンテナ	
送信利得	30 dBi以上	
送信ビーム幅	(方位)1.2° (仰角)送信素子・観測仰角により可変	
送信周波数	P0N: $f_0+1.25$ MHz, Q0N: $f_0-1.25$ MHz	$f_0$ は9700-9800MHzの1波 5MHzステップで設定可能
送信電力	4800 W(H/V各2400W)	最大出力時
パルス幅	1 $\mu$ s / 32 $\mu$ s	
電波形式	短パルス(P0N) / 長パルス(Q0N)	
給電線損失	送信: 2 dB / 受信: 4 dB	
レドーム損失	片道0.5dB	
最大観測範囲	80 km	
処理分解能	150 m (最小分解能 75 m)	
パルス繰返し周波数	最大 3690 Hz	
占有周波数帯幅	P0N / Q0Nそれぞれ2.5 MHz以下	
発射範囲	方位: 0 ~ 360° 、仰角: 0 ~ +90°	

## ■ 背景と課題

- 国内で開発されたフェーズドアレイ気象レーダーは、従来のパラボラ型レーダーと異なり、送信時に広いファンビームを用いるDBF技術が採用されている。
- これにより、高速三次元観測という利点をもたらすが、一方で電波干渉の増大をもたらすという懸念がある。
- また、台数の増加に伴い隣接レーダー間での電波干渉の懸念が増大するため、これに備えて干渉低減方式の検討が必要である。

## ■ 検討する共用方式

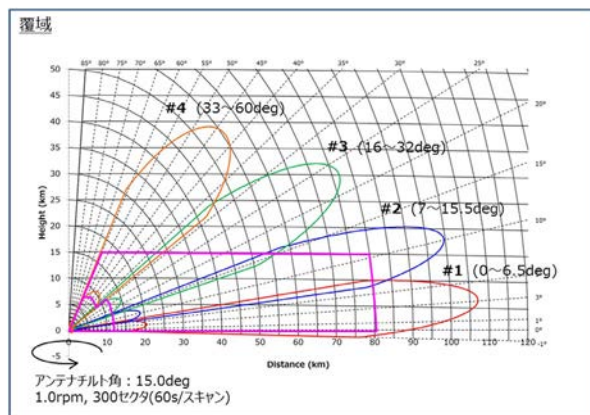
- 共用のための送信対策や受信対策として、フェーズドアレイ気象レーダーにおける送信アンテナの鉛直面指向性にヌル形成を形成し、与干渉方向への放射量を低減する手法（送信ヌル形成）や、受信アンテナの重みづけにより受信ヌル制御を行い被干渉量を低減する手法（受信ヌル形成）を検討する。
- 対向レーダーのパルス情報と広帯域受信機を用いた干渉低減方式を検討する。



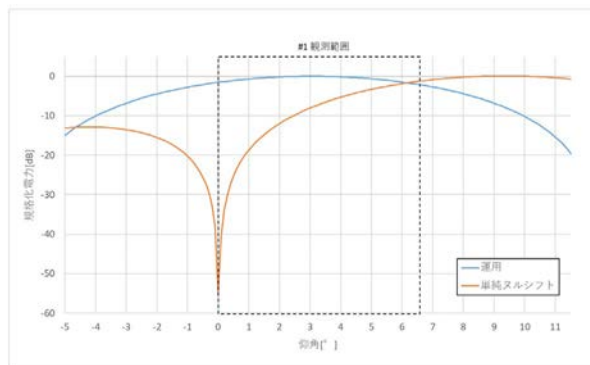
# X帯気象レーダー間の共用条件

## ■ 送信ヌル形成

現行のMP-PAWRの送信ビームの放射強度を評価し、送信アンテナの鉛直面指向性にヌルを形成し、与干渉方向への放射量低減を屋外実機による空間伝搬実験にて検証を実施

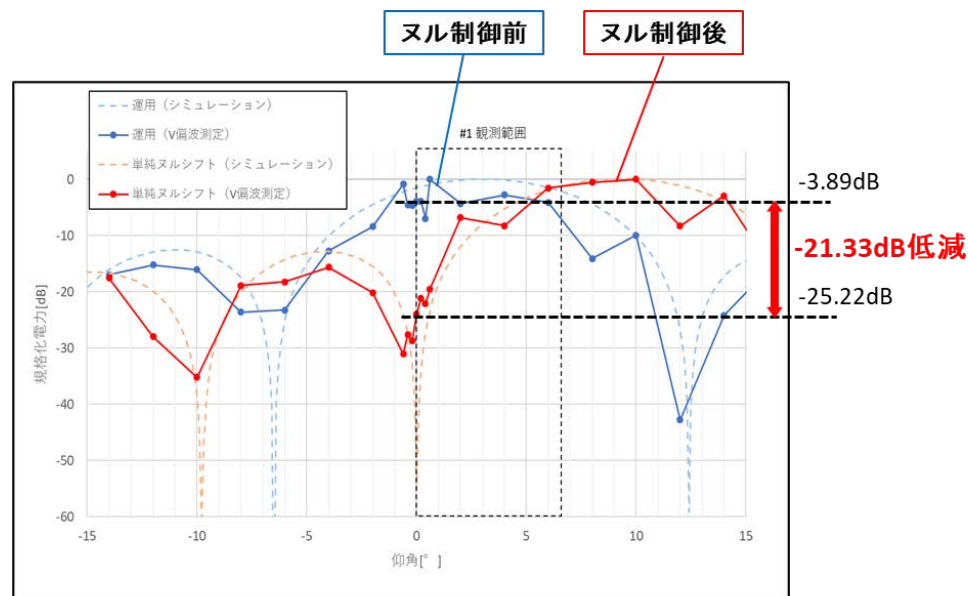


MP-PAWR運用モードの送信ビーム



送信ビーム#1の仰角方向送信電力パターン  
(送信ヌルシミュレーション)

## 検証結果



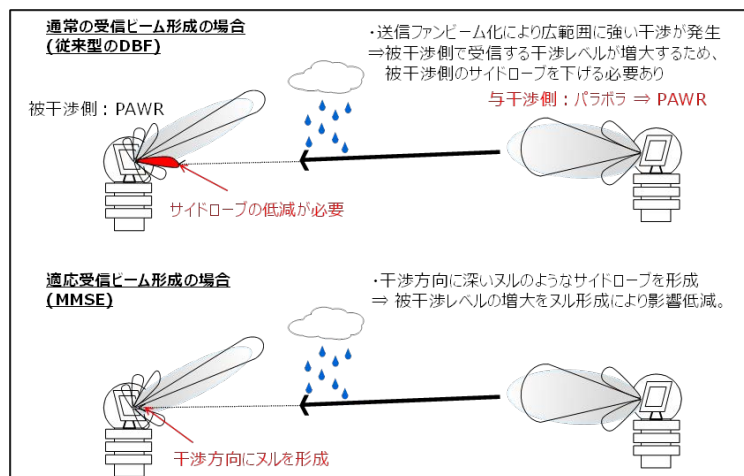
送信ビーム#1 干渉レベル測定結果

送信ヌル形成及びヌル制御により、水平方向(0度方向)の放射量が低減され、干渉低減量の目標値である 16 dBを超える20 dB以上の干渉低減を達成

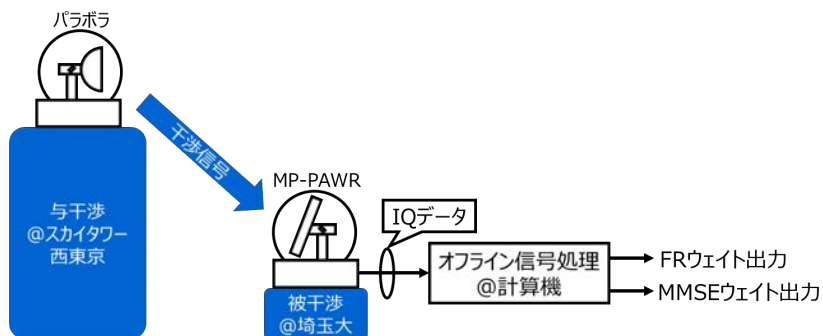
# X帯気象レーダー間の共用条件

## ■ 受信ヌル形成

PAWRの被干渉対策として検討されている、MMSE規範に基づく受信ヌル制御の効果を、実機を用いた屋外実験にて検証を実施

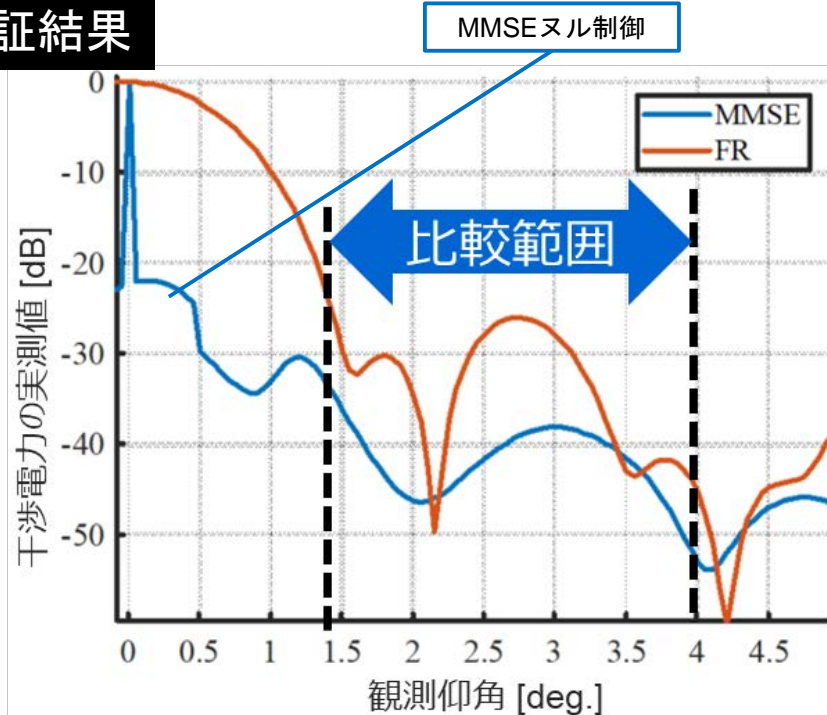


適応受信ビーム形成の概念図



実験系統概要図

## 検証結果



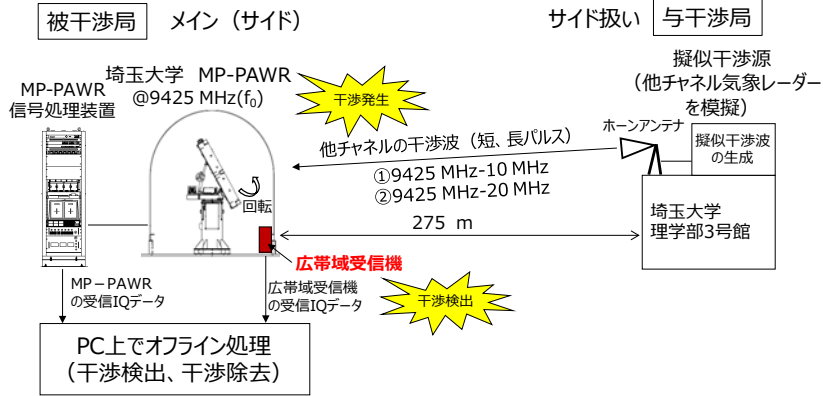
実験の結果、埼玉大学MP-PAWRでMMSE受信ヌル制御を行った場合、仰角 $1.4^{\circ} \sim 4.0^{\circ}$ の範囲の積分値を比較するとFRやパラボラレーダーよりも**10.5 dB高い干渉低減量を確認できた**



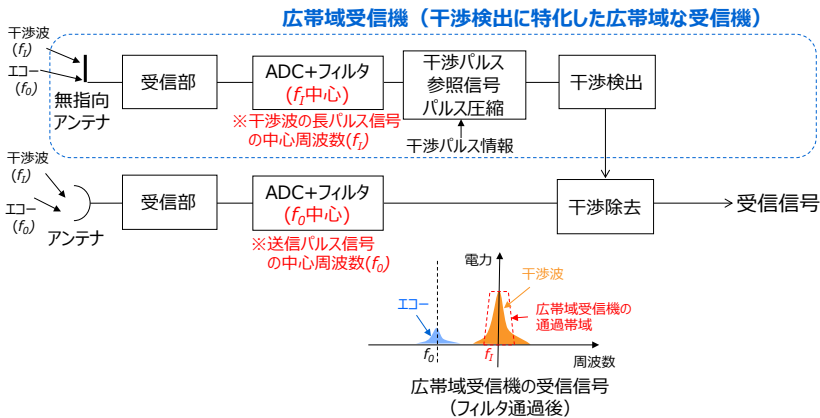
# X帯気象レーダー間の共用条件

## ■ 広帯域受信機を用いた干渉除去

### 広帯域受信機を用いた干渉無効値化方式による干渉除去性能屋外試験を実施

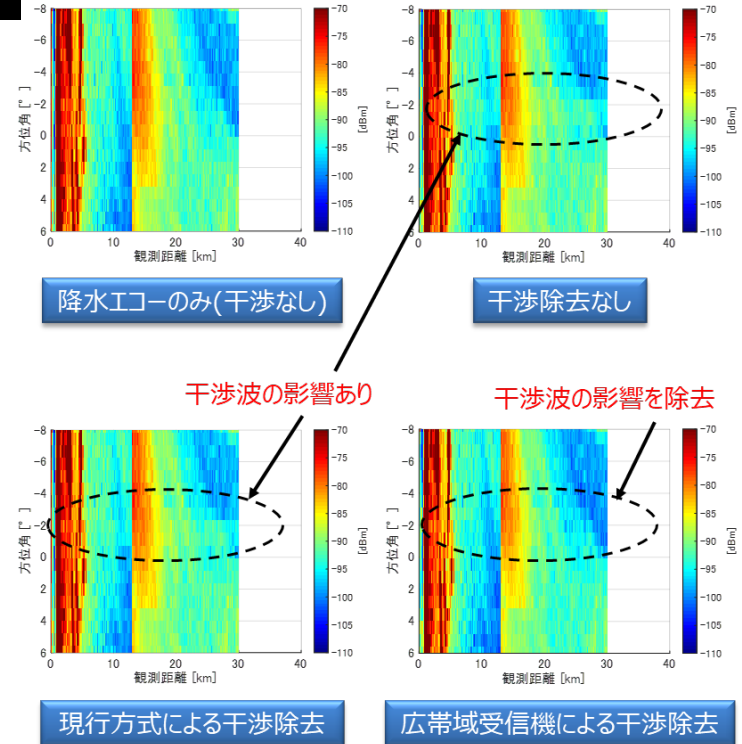


屋外試験概要図



広帯域受信機を用いた干渉検出、干渉除去

## 検証結果



電力、反射因子差、偏波間相関係数、偏波間位相差において、干渉箇所を十分に低減できることを確認した。ただし、速度幅については精度劣化が生じることもあるため、速度幅の算出式に留意する必要がある。

## ■ 背景と課題

- 9.7GHz帯気象レーダーの使用する周波数は、沿岸監視レーダーと帯域が重複していることから、共用条件の検討を行う。
- 9.7GHz帯気象レーダーの周波数帯は、CS放送受信機のイメージ周波数帯で重なっていることから、CS受信設備の共用条件の検討を行う。

## ■ 検討する共用方式

- 沿岸監視レーダーとの共用検討では、反射因子差を用いた干渉除去性能の屋外検証を実施（干渉抑圧技術の検証）
- 民間等が所有している沿岸監視レーダーと、X帯気象レーダーを対象に、沿岸監視レーダーから気象レーダーへの干渉電力を計算し、干渉が生ずる可能性のあるレーダーを整理（干渉条件の特定検討）
- 9.7GHz帯汎用型気象レーダーからCS放送受信設備への混信に関する実験を行い共用についての検証を実施

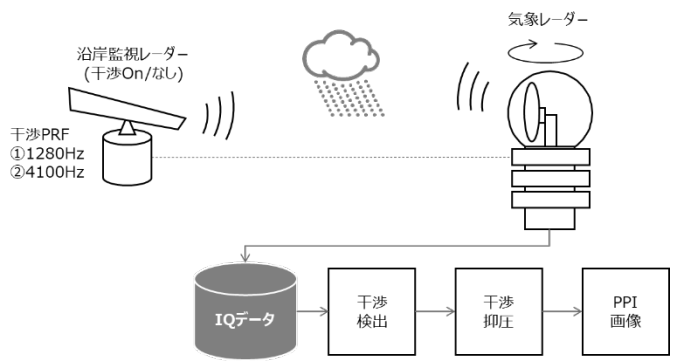
# 他システムとの共用検討:沿岸監視レーダー

## ■ 干渉抑圧技術の検証

沿岸監視レーダーが水平偏波を用いて監視を行っていることに着目し、沿岸監視レーダーからの干渉の反射因子差が大きくなりやすいという特徴に着目し、反射因子差を用いる干渉抑圧技術を屋外検証を実施



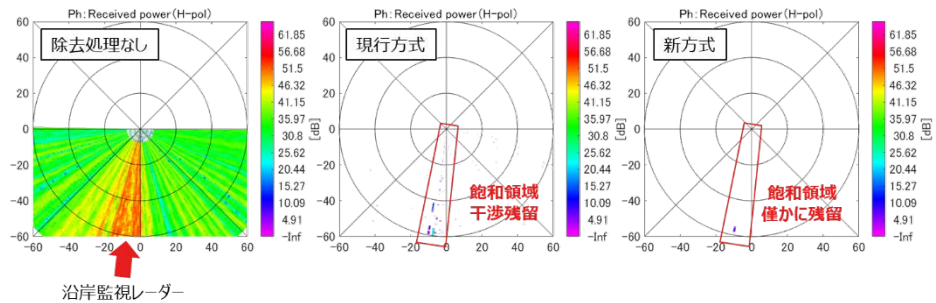
試験環境



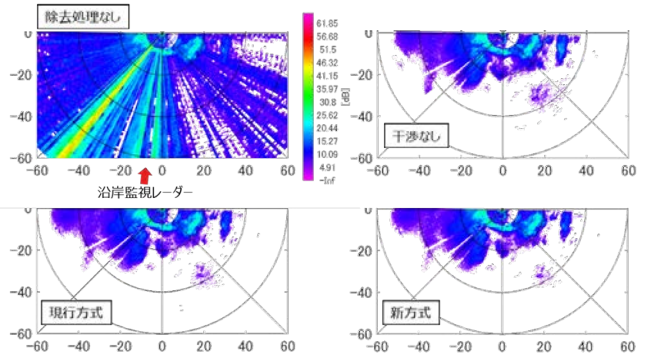
試験概要

## 検証結果

干渉除去結果例 (晴天時)



干渉除去結果例 (雨天時)



干渉除去後の観測誤差とシミュレーション結果の整合が高いことを確認した。ただし、ADCが飽和した場合、完全な干渉除去を保証するのは難しいため、ADC飽和を回避する周波数共用条件が必要になる。

## ■ 干渉条件の特定検討

今後の整備計画まで含めた沿岸監視レーダー70台に加え、民間等が整備している沿岸監視レーダー61台を含めて、X帯気象レーダー42台を対象に干渉を生ずる可能性のあるレーダーについて周波数共用基準（案）を整理した。

### 検討結果

#### 干渉ペア数

メイン-メイン	メイン-サイド	サイド-メイン	サイド-サイド
153 パス	111 パス	89 パス	67 パス

#### 周波数共用基準 (案)

メイン-メイン	メイン-サイド	サイド-メイン	サイド-サイド
許容する	I/N 0dB 未満	I/N 0dB 未満	I/N 0dB 未満

固体素子型の沿岸監視レーダーに対しては、ADCの飽和を回避するための以下の基準を規定する。

$$I + Lossf < 80 + N$$

レーダーが集中している都市部で多く発生しているが、運用に支障を与えている事象が発生していないことから、実際にはビル等の遮蔽によって干渉が少ない状況であると考えられるため、周波数共用基準（案）としては、**メイン-メイン干渉を許容することとし、その他の干渉についてはI/N=0 dB未満とする。**また、固体素子型の沿岸監視レーダーについては、**気象レーダーのADC飽和をしないことを条件とする。**

# 他システムとの共用検討: 衛星放送受信設備

9.7GHz帯汎用型気象レーダーからCS放送受信設備への混信に関する実験を行い共用についての検証を実施

## 検討結果

### 気象レーダー



関連主要性能

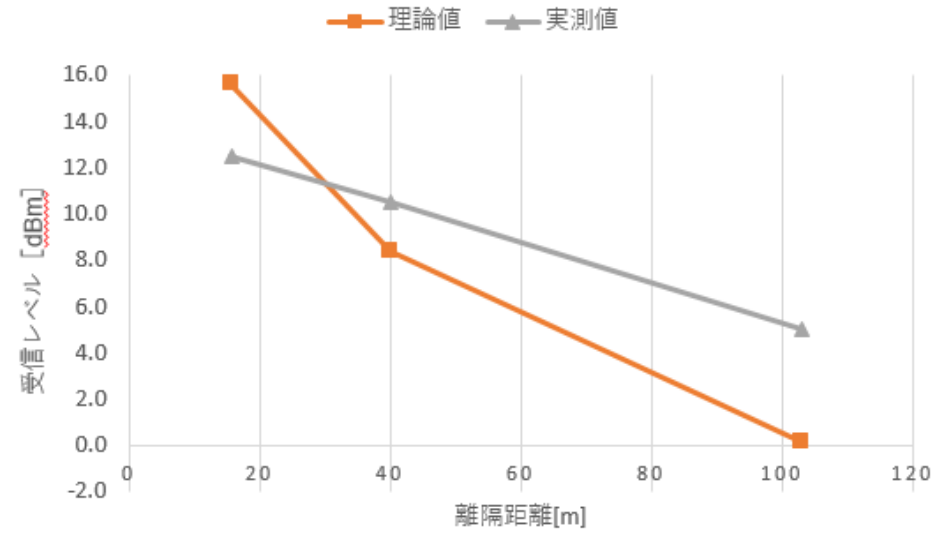
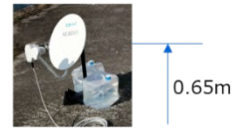
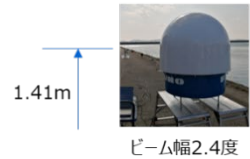
項目	性能	備考
中心周波数	9.795 GHz	
送信電力	48.7 dBm (74.1W)	18.7 dBW
アンテナ利得	33.2 dBi	
EIRP	81.9 dBm	51.9 dBW

### 受信アンテナへの許容干渉波 $pfd_{Ir}$ モデル

$$pfd_{Ir} = CS \text{ 受信 } pfd - \frac{Cave}{I_{peak}} - M + S + D$$

Pfd Ir: レーダー許容値  
 M: マージン (dB)  
 S: イメージ妨害抑圧比 (ボアサイト) (dB)  
 D: アンテナ識別度 (dB)

項目	諸元等	備考
124/128 CS信号	DVB-S2	
124/128 CS pfd (dBW/m2)	-108	東京晴天時
所要Cave/Ipeak (dB)	-1.7	気象レーダー実験より
マージン (dB)	0	遮断確認のためマージン無
イメージ妨害抑圧比 (dB)	93.5	気象レーダー実験より
アンテナ識別度 (dB)	15	最悪条件 (通常は20dB程度)
レーダーpfd Ir 許容値 (dBW/m2/CS BW)	2.2	遮断確認干渉波pfd



### 受信レベルにおける理論値と実測値の結果

実験では、マルチパスの影響が顕著であったため、離隔距離を増やした場合の結果については理論値との乖離がみられたが、近距離では近似していることを確認した。

**実験結果を踏まえ、適切な許容干渉レベルを設定する必要があります。**