

X帯汎用型気象レーダーに 求められる諸元と展開計画について

株式会社ウェザーニューズ
古野電気株式会社

目次

1. はじめに
 - 汎用型気象レーダーの観測目的について
2. 気象レーダーとしての技術条件の考え方
 - 気象現象把握に必要な気象パラメータ
 - 気象レーダーで観測するレーダーパラメータ
 - 気象レーダーの観測手法
 - 気象現象把握に必要な気象レーダーの諸元
 - 与干渉低減に必要な気象レーダーの諸元
3. 汎用型気象レーダーの展開計画について
 - 諸元
 - 展開イメージと設置期間について

1. はじめに

本資料は、現在展開されている9.7GHz帯「高性能型」気象レーダー（XRAINや自治体設置のレーダー）とは異なる「汎用型」気象レーダーについて、必要な諸元と現在考えられている将来計画についてまとめたものである。

1. 汎用型気象レーダーの観測目的

○近年、気象情報のユーザーである運輸機関（高速、鉄道、航空）に対する安全確保のための気象情報を観測することを目的とした気象レーダーが開発され、9.4GHz帯で実験試験局として実験が行われている。

気象レーダーによる観測のニーズは以下の通りである。

- ◆高速道路維持管理向けには、天候の急変（ゲリラ豪雨や竜巻、突風を引き起こす発達した積乱雲の予測、冬季におけるあられの予測、地形効果により強まる雨雲や雪雲）や災害対応の重点地域への気象レーダーの配置や、既存気象レーダーのブラインドエリアでの観測
- ◆航空運航管理向けでは、空港周辺での雷雲の監視から、主にドクターヘリに対し、有視界飛行の妨げになる、峠や山間部の谷筋を通過する雨雲や雪雲を監視するため。
- ◆鉄道管理向けには、運行に支障をきたす竜巻、突風を引き起こす発達した積乱雲を監視するため。

（第4回X帯サブワーキンググループの資料より）

2. 気象レーダーとしての技術条件の考え方

2. 気象レーダーに求められる必要なパラメータ

○気象レーダーとして気象現象を把握するためには、雨や雪の強さ、その雨や雪の水平分布、雲の中の雨・雪の分布、雨雲や雪雲の移動速度を観測できる必要がある。

◆ 気象現象を把握するために、以下のような気象パラメータを観測する。

1. 雨や雪の強さ

→ 雨については、地方官署やアメダスにて、最小1mm/hrから観測が可能
(地方官署は最小0.5 mm/hr)

気象レーダーとして機能するために、最低限の必要な性能

2. 雨や雪の分布

→ 雨や雪の水平の広がり、及び雲内の雨・雪の分布を調べる

3. 雨や雪の移動速度

→ 雲の発達・衰弱傾向や移動を把握し、短時間でのこれらの推定を行う

2. 気象レーダーで観測するレーダーパラメータ

- ◆ 気象レーダーで観測できるパラメータをまとめると以下の通りになる。

すべての気象レーダーで観測できるパラメータ	偏波レーダーで観測できるパラメータ
反射強度 Z ドップラー速度 V_r スペクトル幅 σ	反射強度差 Z_{dr} 偏波間相関係数 ρ_{hv} 偏波間位相差 ϕ_{dp} 伝搬位相差変化率 K_{dp}

- ◆ 気象現象を把握するために必要な要素（3種類）について、気象レーダーを用いた観測から得られるパラメータと対応させると以下の通りになる。

気象パラメータ	雨や雪の強さ	雨や雪の分布	雨や雪の移動速度
対応するレーダーパラメータ	Z, K_{dp}	$Z, Z_{dr}, \rho_{hv}, K_{dp}$	V_r, σ

これらのレーダーパラメータを精度良く観測できれば、気象現象の正しい把握に繋がる

2. 気象レーダーの観測手法

- ◆ 偏波パラメータの活用事例として
偏波パラメータを用いて、以下のようなプロダクトが作成され、
実況把握に利用されている。
 - ・ Kdp-R関係式による降雨強度推定
→反射強度Zとの関係よりもより良い推定が可能
 - ・ phvを用いた、融解層の検出
→雨と雪の境目である融解層の存在やその高度を観測する
 - ・ 降水粒子判別
→MPレーダーで観測された種々のパラメータや気温などの環境条件から、
雨・雪・あられ等の降水粒子の種類を判別する

引用：情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 気象レーダー作業班 X帯サブ・ワーキング・グループ
(第2回) 気レX 2-3 Xバンドマルチパラメータ(MP)レーダー

2. 気象レーダーの観測手法

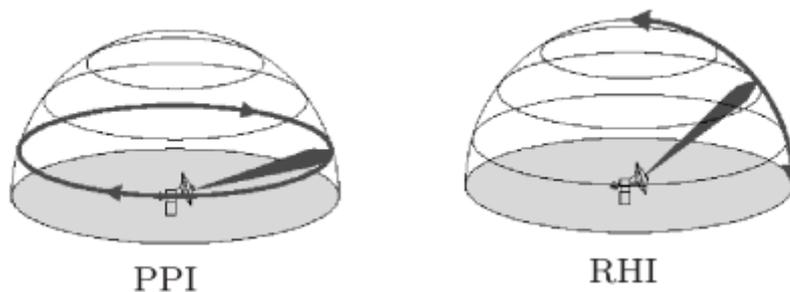
- ◆ 電波型式 PON・QONの使い分けについて
パルス幅を長くすると、感度を維持したまま尖頭電力を下げる事ができる。
(おおむね10~100usが使われる)
パルス幅が長いとレンジ方向の分解能が悪化するため、パルスに対してチャープ変調をかけ(QON)、レンジ方向の分解能の改善を図る。
一方で、パルス幅が長いと、レーダー近傍が観測できない(ブラインドレンジと呼ばれる)ため、レーダー近傍については、無変調パルス(PON)にて観測する。



無変調パルス(PON)とチャープ変調パルス(QON)の感度の差があると、レーダーの変調方式による性能差が発生し、最終プロダクトで両者の差が発生するので、PONの感度がQONの感度と同程度、あるいは良い性能としたい。

2. 気象レーダーの観測手法

- ◆ 気象レーダーのスキャンの仕方について
気象レーダーは、パラボラアンテナ等を用いたペンシルビームを用いており、雲の全体構造を捉えるためには、アンテナの仰角や方位角を変えながらスキャンするのが一般的である。
- ◆ 広範囲での雨量の推定、降雨・降雪域の水平方向の広がりやその移動を知り、短時間での予測に使いたい
→ 仰角を一定にし、方位角を変化させた観測（PPI スキャン）
- ◆ 今後、雲が発達するのか衰弱するのか、降水・降雪が今後どの程度見込まれるか、雨や雪の鉛直構造がどのようになっているか、を知りたい
→ 方位角を一定にし、仰角を変化させた観測（RHIスキャン）



2. 気象レーダーの観測手法

- ◆ ドップラー速度の折り返し自動補正（Dual PRF法）について
パルス繰り返し周波数（PRF）は、次のパラメータに対して影響する
 - ・ 気象レーダーの観測範囲
 - ・ ドップラー速度の折り返し速度

「ドップラー速度の折り返し速度」以上の風が吹いている時、そのPRFでは正しく観測できないため、PRFを変えるなどして正しく観測できるようにする。

X帯気象レーダーにおける典型的なPRFと、
観測範囲及び折り返し速度との関係

PRF	観測範囲	折り返し速度
2 kHz	~75 km	~16 m/s
3 kHz	~50 km	~24 m/s
5 kHz	~30 km	~38.5 m/s

- ◆ また、複数のPRFで観測すると、ドップラー速度の折り返し速度がPRF毎に変化するため、折り返しの効果の補正が可能となる。PRFの変化方法としては、ある角度幅内で同じPRFを用いる「グループスタガ」方式、送信毎にPRFを切り替える「パルススタガ」方式の二種類がある。

2. 気象レーダーの観測手法

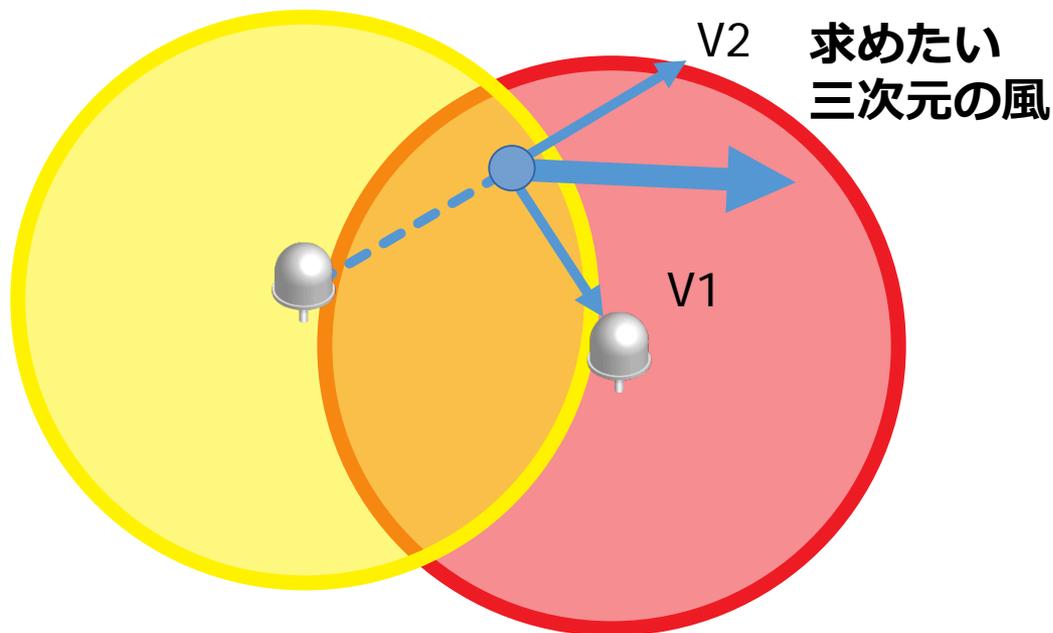
◆ 複数台のレーダーによる協調観測

1. Dual Doppler解析

2つのレーダーによるドップラー速度の観測データを用いて、
三次元での風分布を求める手法

複数のレーダー観測領域をお互いにオーバーラップしている領域で
Dual Doppler解析ができる

この解析を行うためには
「気象レーダー同士の観測範囲
がなるべく重なること」
「気象レーダー同士の定常的な
干渉が少ないこと」
が必要である。



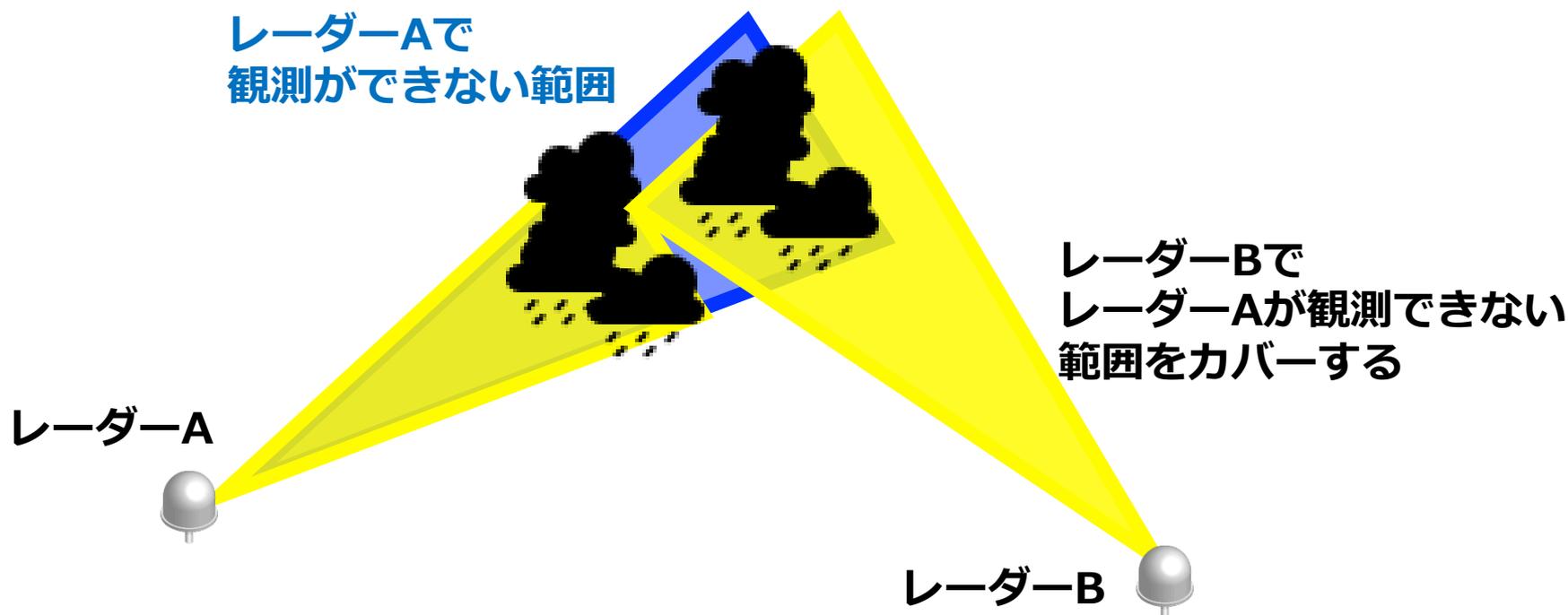
2. 気象レーダーの観測手法

◆ 複数台のレーダーによる協調観測

2. 降雨減衰による観測範囲の補完

X帯の場合、強雨による降雨減衰が大きいと、それより遠い場所の観測ができない。

観測ができない場所を他のレーダーで観測することにより、観測範囲を維持することができる。



2.1. 気象現象把握に必要な気象レーダーの諸元

○X帯汎用型気象レーダーに必要な諸元は以下のようにまとめることができる。

1. 送信機に固体素子を用いる
2. 距離分解能は 150 m
3. 必要な観測範囲は 25 km 以上
4. 必要な感度は 25 km 先までの全域で 1 mm/hrの雨が観測できる
5. 気象現象に対する安全確保がなされるよう、気象レーダーの配置やスキャンパターン等が選択できること

一般的な機器諸元を用いて、必要な諸元を考察する

- ◆ 受信機の雑音指数は3~4.5dB程度（常温）
- ◆ 距離分解能が150 mの時、P0Nのパルス幅は 1 μ s が標準的
⇒ 標準的な受信帯域幅は1.2MHz程度
- ◆ 距離分解能が150 mの時、Q0Nの変調帯域幅は 1 MHz 以上必要
⇒ 実際は各社の設計に依存し、1 ~ 2 MHz 程度
- ◆ 観測に必要な最低限の信号対雑音比（SN比）は 5 dB 程度
- ◆ パルス間干渉を避けるためにP0N, Q0Nを ± 1.25 MHz 離隔して送信し、占有周波数帯幅は 4.4 MHz 以下とする

2.1. 必要な分解能から求まる気象レーダーのパラメータ

○ 「距離分解能は 150 m」より決まるレーダーパラメータは以下の通り。

P0N パルス幅	1 μ s
Q0N 変調幅	1~2 MHz (設計に依存する)
熱雑音電力	-108.5 dBm
最小受信感度 (MDS)	-103.5 dBm (SN比: 5dB)

- ◆ 受信帯域幅を1.2MHz、受信機の雑音指数を 4.5 dBとすると、常温 (27°C) における熱雑音電力は -108.5 dBm となる
 - ⇒ SN比 : 5dBを検出下限とすると、-103.5 dBm以上の反射電力が必要
 - ⇒ この諸元から最低限の探知性能を計算する
- ◆ 受信帯域幅を1.2MHz、受信機の雑音指数を 3 dBとすると、常温 (27°C) における熱雑音電力は -110 dBm となる
 - ⇒ 干渉検討には、こちらの諸元を用いる

2.1. 必要な分解能から求まる気象レーダーのパラメータ

○ 「距離分解能は 150 m」より決まるレーダーパラメータは以下の通り。

P0N パルス幅	1 μ s
Q0N 変調幅	1~2 MHz (設計に依存する)
熱雑音電力	-108.5 dBm
最小受信感度 (MDS)	-103.5 dBm (SN比: 5dB)

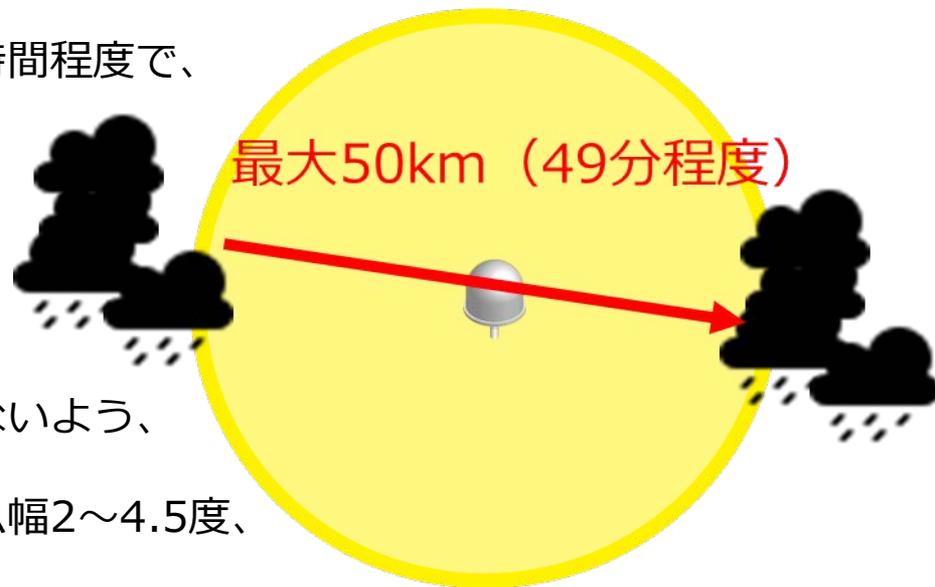
- ◆ ゲリラ豪雨を伴う積乱雲の大きさは数km。雲の内部構造を観測するには、1/10程度の水平分解能が必要となり、数百mより細かい観測が必要。
- ◆ 干渉による欠測があると、周辺値から補完して値を求めることができ、(XRAINの場合には、最大1200m程度の範囲のデータの重み付け平均) 数百mよりも細かい観測を行うと、受信データ処理により干渉の影響を減らすことができる。
- ◆ 尖頭電力を少なく、かつ送信スプリアスが少ない電波にするために、送信機に固体素子を用いる。
 - ー Q0N (周波数変調したパルス変調) を用いることができ、周波数掃引による距離分解能の向上と感度の向上が期待できる。

2.1. 必要な分解能から求まる気象レーダーのパラメータ

○ 「必要な観測範囲は25 km以上」から求まるレーダーパラメータは以下の通りである

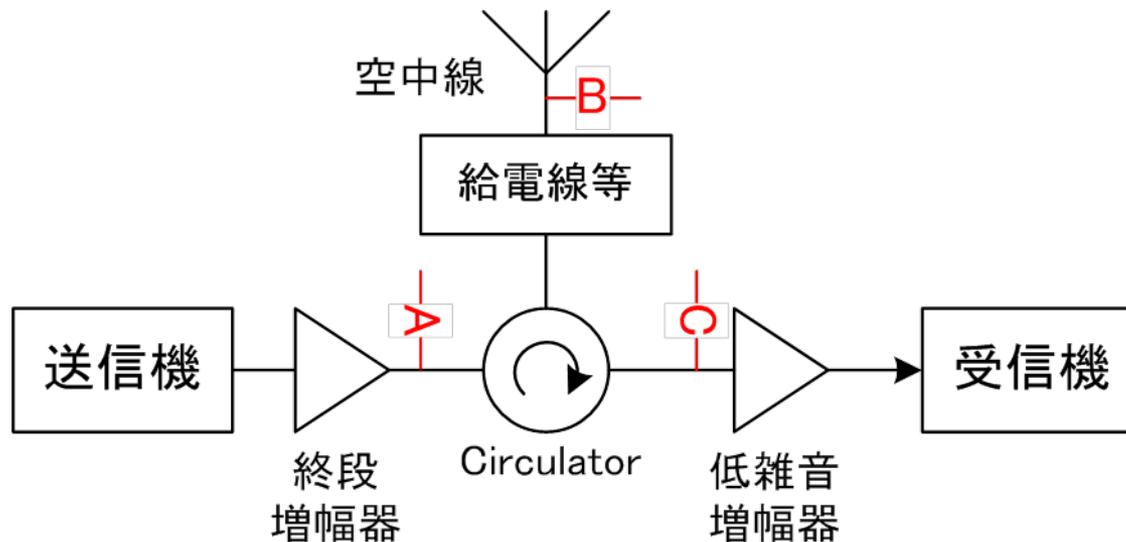
PRF	6kHz 以下
アンテナのビーム幅	4.5度 以下

- ◆ 観測レンジが25kmであると、観測可能な範囲は最大50kmあり、数km程度のサイズの積乱雲を49分観測できる。
(移動速度は17m/s と仮定)
- ◆ ゲリラ豪雨をもたらす雲の寿命が最大1時間程度で、観測可能時間と雲の寿命が同程度となる。
- ◆ アンテナのビーム幅が4.5度の場合、25km先で角度方向の分解能は2km 積乱雲の水平サイズが数kmで、角度方向の分解能と同程度となる。
- ◆ これよりも角度方向の分解能を低下させないよう、アンテナのビーム幅は4.5度以下とする。
 - ー 現状使用されているアンテナは、ビーム幅2~4.5度、利得30~38 dBiのものが使われている
 - ⇒ 最低限の探知性能は、30 dBi (ビーム幅4.5度) で計算する



2.1. 気象現象の把握のための計算に必要な仮定について

- ◆ 1 mm/hrの雨は、MP*分布を仮定し、反射強度 23 dBzとする
- ◆ 1パルスあたりのSN比が5 dB以上で信号検出とする \Rightarrow -103.5 dBm 以上 (C点)
- ◆ 空中線利得を30 dBi (ビーム幅4.5度) とする
- ◆ 終段増幅器から空中線までの損失 (下図A-B間)、空中線から低雑音増幅器 (LNA) までの損失 (下図B-C間) はいずれも 2.0 dB、LNA以降 (下図C点以降) の受信機雑音指数は 4.5 dB として計算を行った。



* Marshall and Palmer (1948)

2.1. 必要な探知性能から求まるレーダーパラメータ

◆ パルス幅を変えることで平均電力が変化し、感度にも影響をあたえるため、必要な感度を満たすためのトレードオフについてまとめると、以下の通りになる。

*** 距離分解能を150m / BW=1.2MHz / MDS=-103.5dBm としたとき ***

QONの パルス幅	QONのSNR @25km	給電線 損失	受信機 雑音指数	必要な 空中線電力	ブラインド エリア	ブラインドエリア 端における PONのSNR	EIRP
20 μ s	5.0 dB	2.0 dB	5.0 dB	54.6 dBm	3.00 km	10.9 dB	82.6 dBm
25 μ s	5.0 dB	2.0 dB	5.0 dB	53.6 dBm	3.75 km	8.0 dB	81.6 dBm
30 μ s	5.0 dB	2.0 dB	5.0 dB	52.8 dBm	4.50 km	5.6 dB	80.8 dBm
35 μ s	5.9 dB	2.0 dB	5.0 dB	53.6 dBm	5.25 km	5.0 dB	81.6 dBm
40 μ s	8.1 dB	2.0 dB	5.0 dB	54.7 dBm	6.00 km	5.0 dB	83.2 dBm

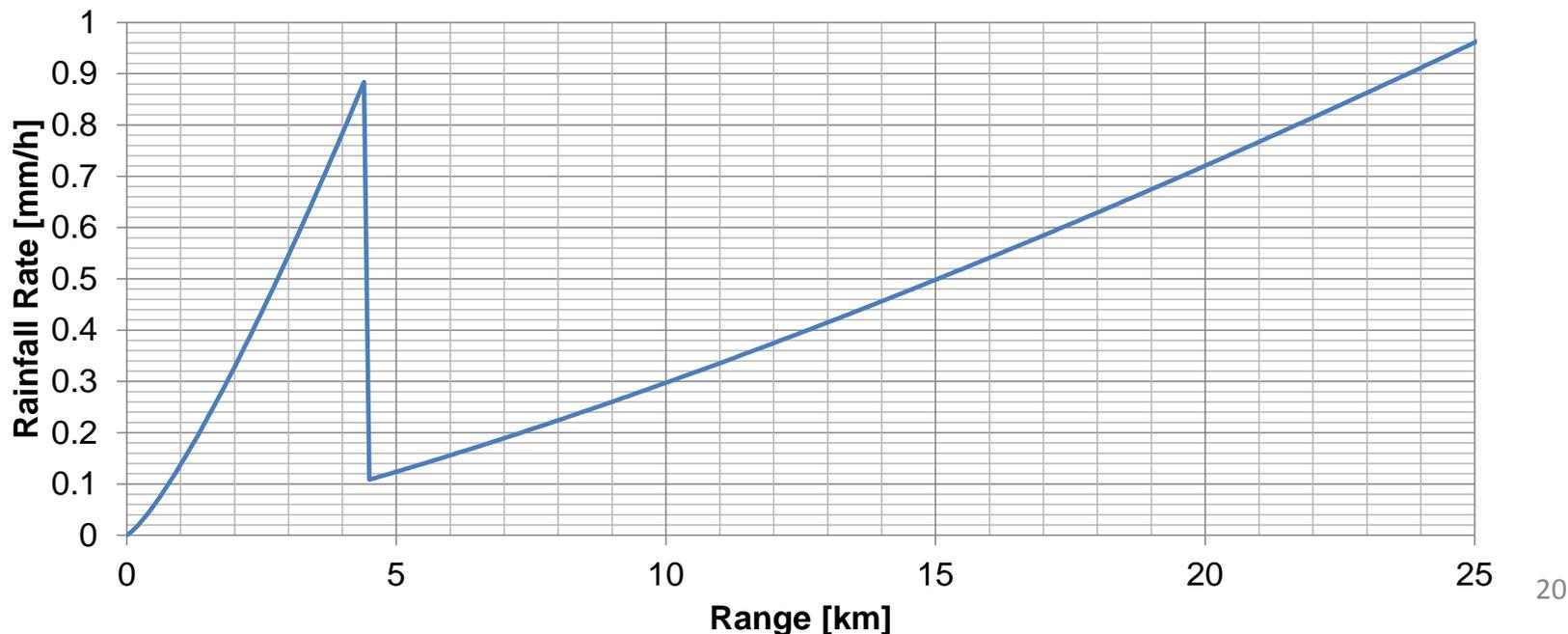
◆ 必要な条件を満たすために必要な空中線電力は 52.8 dBm 以上

◆ そのときのEIRPは、80.8 dBm 以上 となる。

2.1. 汎用型気象レーダーに必要な諸元

- 汎用型気象レーダーに求められる探知性能を実現する為に必要な諸元は下表のようになり、観測距離と最小検出時間降雨量の関係は下図のようになる。

項目	諸元	備考
空中線電力	52.8 dBm 以上	各偏波
水平面の主輻射の角度の幅(ビーム幅)	4.5 度 以下	Φ45cmを想定
最大等価等方輻射電力(最大EIRP)	80.8 dBm 以上	各偏波
占有周波数帯幅	4.4 MHz 以下	
周波数オフセット	±1.25 MHz 以上	

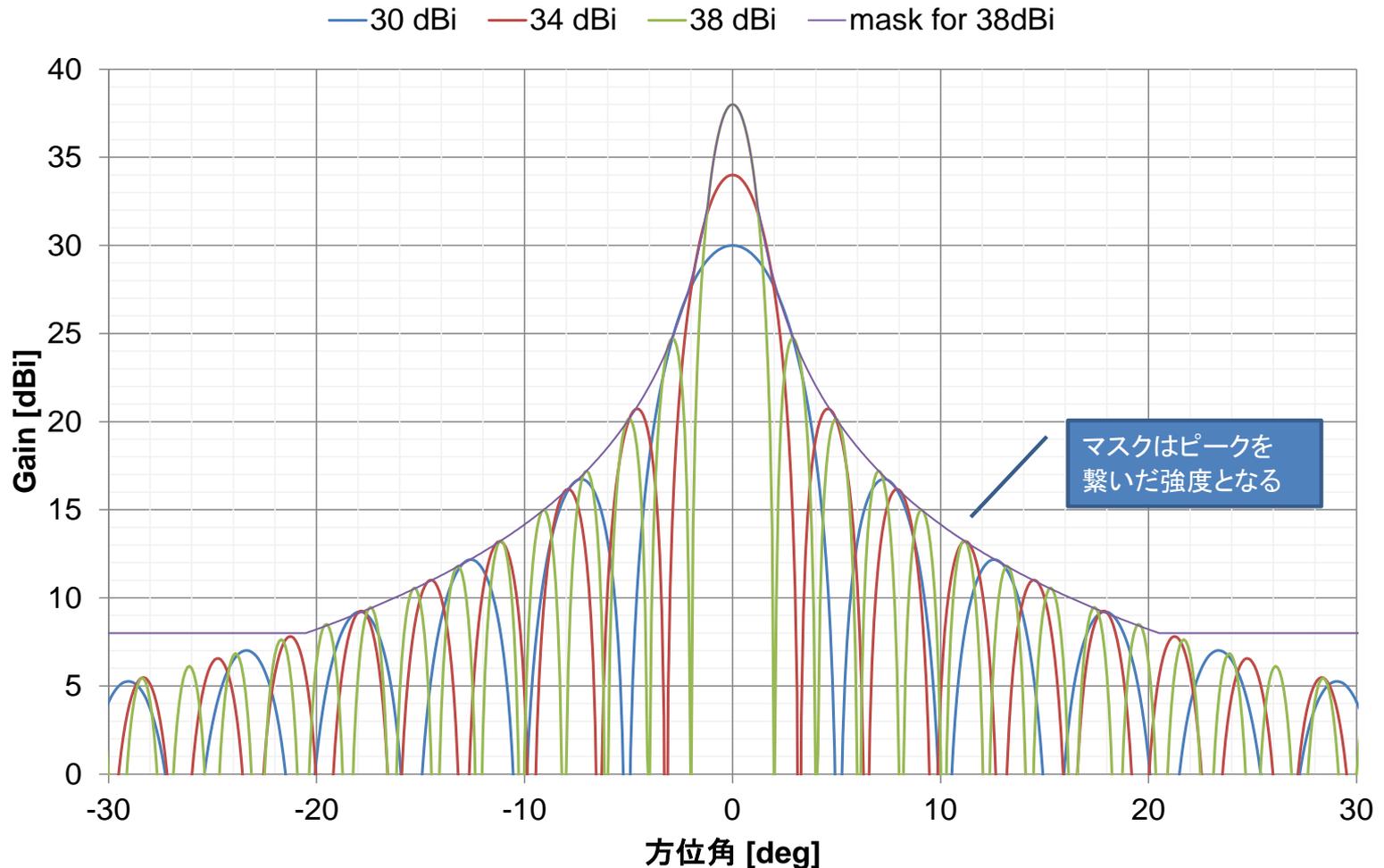


2.2. その他の気象レーダーのパラメータ

- ◆ 隣接チャネル漏洩電力は、空中線電力を基準とした以下の減衰量で管理する。
 - 中心周波数から 5 MHz 以上 離れたところでの減衰量： 50 dB 以上
 - 中心周波数から 10 MHz 以上 離れたところでの減衰量： 60 dB 以上
- ◆ デューティ比を 10% 以下とする。
 - ・送信平均電力を上げるため、デューティ比はなるべく大きくしたい
 - ・複数台の隣接レーダーによる協調観測を行うには、それぞれのレーダーの受信時間を確保する必要がある
 - ・自局以外に2台程度設置され、それぞれの送信タイミングを調整した上で受信時間を確保するために、デューティ比は10%以下としたい。
- ◆ 汎用型気象レーダーについては、I/Nが0dB以上で干渉ありとし、サイドローブーサイドローブでの干渉のみを考慮する。
- ◆ それぞれの地域に特有な気象現象があり、気象情報に対するニーズは、地域毎に様々であるため、それぞれの設置場所で適切なレーダーの配置、スキャンパターンが選択できることが必要である。
- ◆ 観測範囲を維持しつつ、一方で定常的なレーダー間の相互干渉は避けるべきであるので、探知性能から求まる必要なサイドローブレベルを検討する。

2.2. サイドローブレベルの検討

- ◆ 観測性能や実現性に無理の無い範囲で上限値を管理するのが現実的対応
- ◆ 空中線の指向性モデルが必要 ⇒ ITU-R M.1851-1のsincモデルで考える



2.2. サイドローブレベルの検討

◆ ITU-R M.1851-1^{*1}のsincモデルで考える

- ・M.1849-1^{*2}によれば、第一サイドローブレベルが-13.2~-19 dBppの範囲を想定したモデルであり、Φ1m以下程度の小型アンテナに適する

$$F(\mu) = \frac{\sin \mu}{\mu} \quad (\text{放射パターン})$$

$$\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda} \right) \sin \theta = \frac{\pi \cdot 50.8 \cdot \sin \theta}{\theta_3} \quad \begin{array}{l} \theta: \text{利得計算角度 [deg]} \\ \theta_3: \text{ビーム幅 [deg]} \end{array}$$

$$\text{サイドローブ方向のマスク: } -8.584 \cdot \ln \left(2.876 \cdot \frac{|\theta|}{\theta_3} \right) \text{ [dB]}$$

※ただし -30dB以下の部分は -30dB

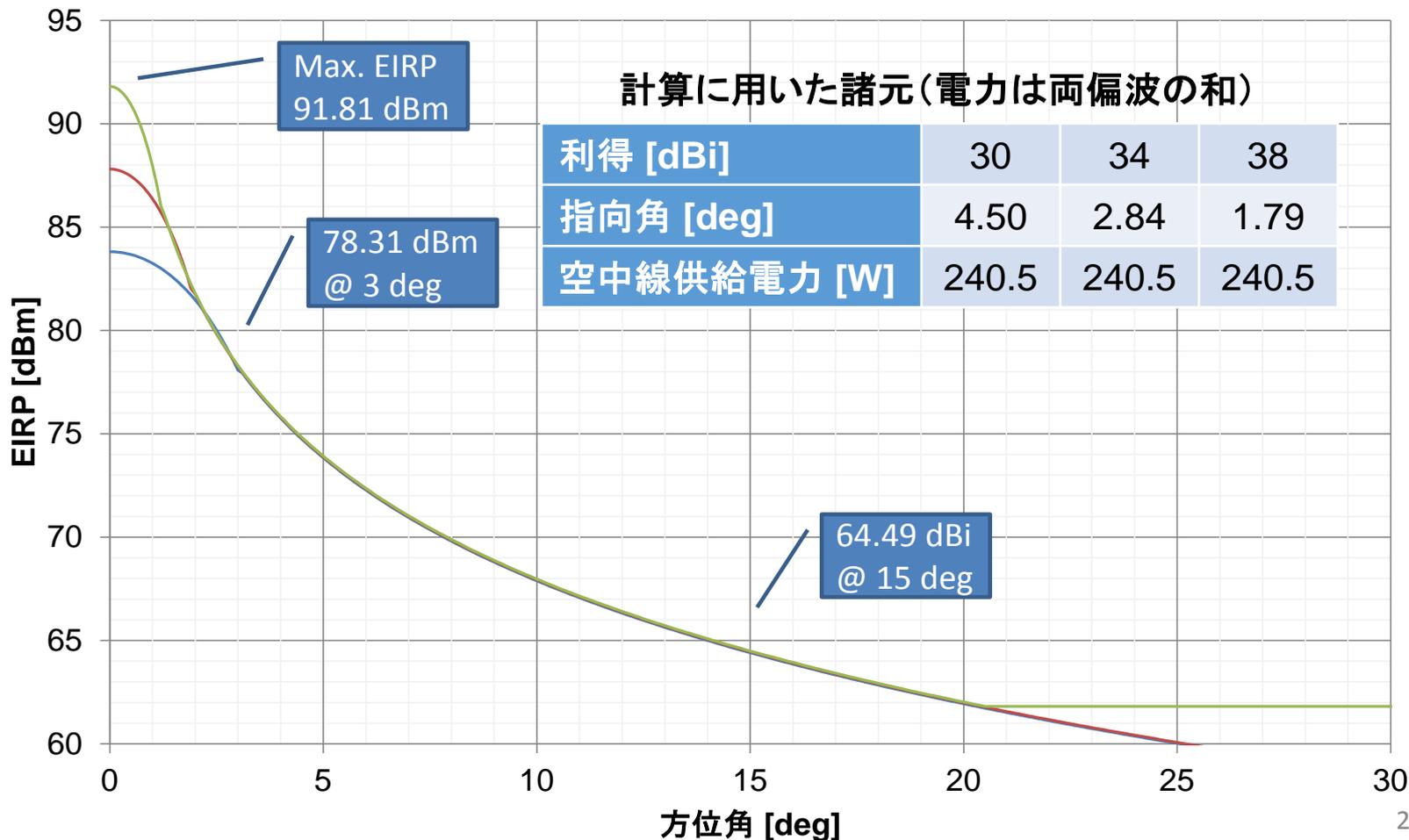
^{*1} ITU-R M.1851-1 “Mathematical models for radiodetermination radar systems antenna patterns for use in interference analyses”

^{*2} ITU-R M.1849-1 “Technical and operational aspects of ground-based meteorological radars”

2.2. サイドローブレベルの検討

- ◆ 必要諸元は、同規定のサイドローブマスクで考える
 - ・サイドローブーサイドローブ干渉のみを考えるため、高利得アンテナを用いた場合でも干渉強度は増加しない

— 30 dBi — 34 dBi — 38 dBi



2.2. 与干渉低減のための諸元

- 汎用型気象レーダーに求められる与干渉低減の為に必要な諸元は下表のようになる。

項目	諸元案	備考
空中線電力※	381.1 W	
最大等価等方輻射電力(最大EIRP)※	91.8 dBm 以下	
主指向方向から3度以上 離隔した方向における最大EIRP※	78.3 dBm 以下	
主指向方向から15度以上 離隔した方向における最大EIRP※	64.5 dBm 以下	
指定周波数から5 MHz以上 離隔した周波数における減衰量	50 dB 以上	空中線電力比
指定周波数から10 MHz以上 離隔した周波数における減衰量	60 dB 以上	空中線電力比
衝撃係数(デューティー比)	10% 以下	

※ 両偏波特性(水平、垂直)の合計値

2.3. 汎用型気象レーダーに必要な諸元

○ 汎用型気象レーダーに必要な諸元は、以下の通りにまとめることができる。

項目	諸元案	備考
空中線電力※	400 W 以下	
水平面の主輻射の角度の幅(ビーム幅)	4.5 度以下	
最大等価等方輻射電力(最大EIRP)※	92 dBm 以下	
主指向方向から3度以上 離隔した方向における最大EIRP※	79 dBm 以下	最大EIRP -13 dB
主指向方向から15度以上 離隔した方向における最大EIRP※	65 dBm 以下	最大EIRP -27 dB
指定周波数から5 MHz以上 離隔した周波数における減衰量	50 dB 以上	空中線電力比
指定周波数から10 MHz以上 離隔した周波数における減衰量	60 dB 以上	空中線電力比
占有周波数帯幅	4.4 MHz 以下 (TBD)	
周波数オフセット	±1.25 MHz以上 (TBD)	
衝撃係数(デューティー比)	10%以下	
交差偏波識別度	25 dB以上	

※ 両偏波特性(水平、垂直)の合計値

3. 汎用型気象レーダーの展開計画について

3.1. 民間気象会社用汎用型気象レーダーの展開計画について

○民間気象会社用汎用型気象レーダーは、気象情報のユーザーである高速道路管理や鉄道運行、航空運航向けに、高速道路や鉄道の路線沿い、空港周辺、航空路等において、既存の気象レーダーで観測しにくい遠端域や山間部、峠周辺などに全国で191台程度を展開したい。

◆ 民間気象会社用汎用型気象レーダーの設置については、優先順位をつけて配置していく

1. 既存X帯気象レーダーの観測範囲外の地域での観測
2. ニーズを満たすためには、積乱雲の発達や衰弱、雪雲の高さ等の雲の鉛直構造を詳細に観測する必要がある場所
3. 対象顧客数が多く、かつニーズが様々な場合
その観測対象地域において、気象情報のユーザーが3顧客以上等
(想定対象顧客は、高速道路、航空、鉄道)

の順に優先順位を設定すると、向こう5年程度の展開計画は次の通り。

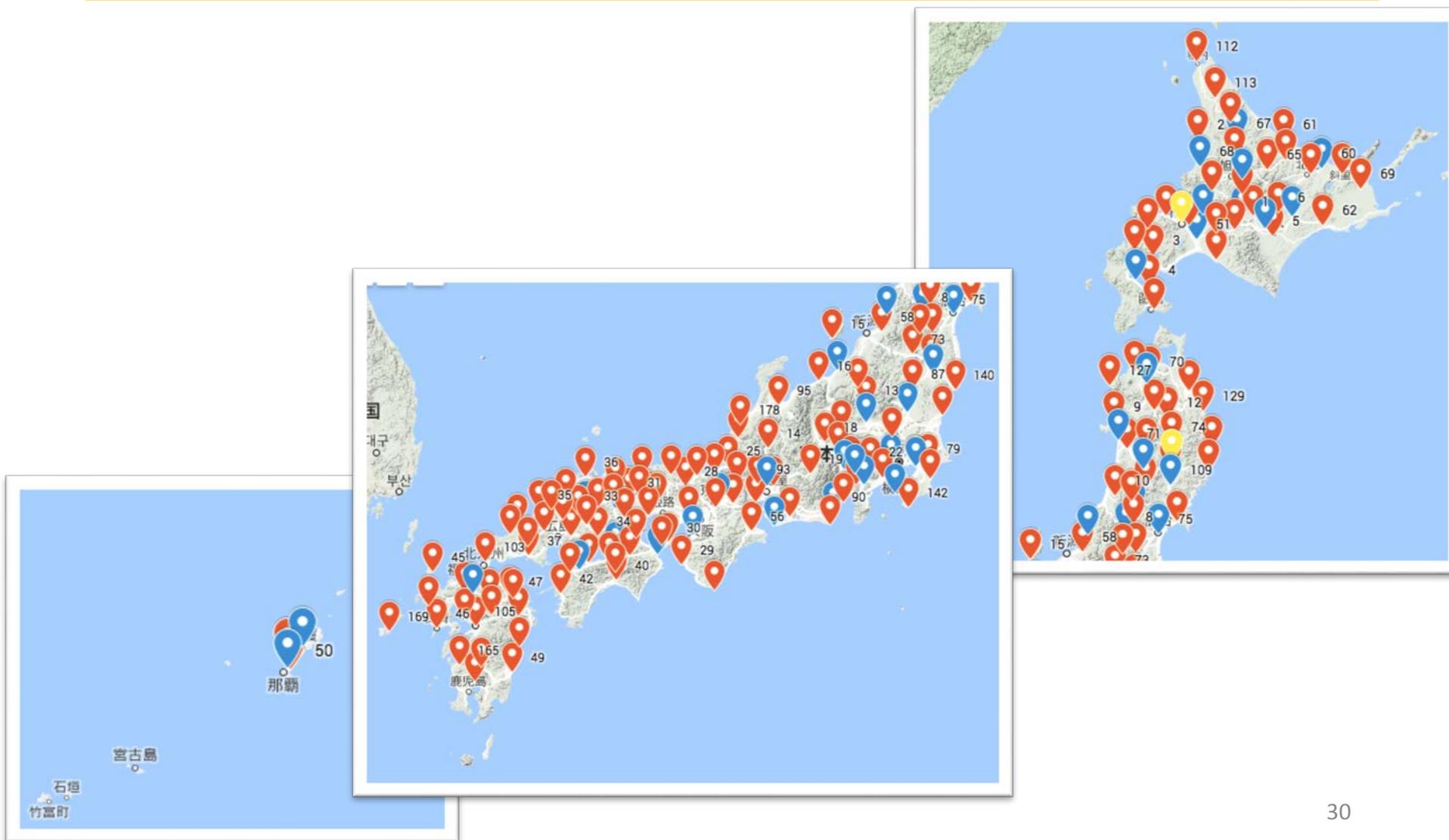
3.1. 民間気象会社用汎用型気象レーダーの展開計画について

○ 設置の優先順位に合わせ、設置計画をまとめると以下の通り。

1. 優先順位が高く、現在の試験局の位置に入れ替える形で設置したい場所
→ 59ヶ所
→ 実用局のルール制定後、1年程度で設置を進める
2. 現在、実験試験局は設置していないが、すでにニーズがあり、設置を進めたい場所
→ 32ヶ所
→ 実用局のルール制定後、2年程度を目処に設置を進める
3. XRAIN等の公共レーダーが設置されておらず、ニーズに対する効果が期待できる場所
→ 47ヶ所
→ 向こう3～5年程度をかけて設置を検討
4. すでにXRAIN等の公共レーダーが設置されているが、公共レーダーのデータ公開の進み具合やニーズの高まりに応じて、設置を検討したい場所
→ 53ヶ所
→ 引き続き設置を検討したい

3.1. 民間気象会社用汎用型気象レーダーの展開について

○ 設置の優先順位に合わせ、設置計画をまとめると以下の通り。



3.2. 都市水害対策用汎用型気象レーダーの展開計画について

○都市水害対策用汎用型気象レーダーは、既存のX帯気象レーダーで観測できない地域及び、観測しにくい遠端域や山間部などに全国で130台程度を展開したい。

◆ 都市水害対策用汎用型気象レーダーの設置については、補間を主として配置していく

1. 既存X帯気象レーダーの観測範囲外・遠端地域での観測（空間的需要）
X帯レーダーの観測範囲外はC帯レーダーで観測されているが、時間・空間分解能がX帯より低いため情報格差が生じている。観測域内であっても、遠端では特に豪雨の際に欠測が発生し易く、補間が必要とされている。
2. 既存X帯気象レーダーでは情報が不足する場合（用途的需要）
竜巻等や火山噴火等、局所的に短時間変化するような現象について、広域の降雨量を観測し続ける既存レーダーで観測するのは無理が生じる。特に時間分解能が不足しているため、特化型のレーダーが必要とされている。

向こう3~5年程度の展開計画は次の通り。

3.2. 都市水害対策用汎用型気象レーダーの展開計画について

○ 都市水害対策を主とし、既存レーダーを補間するための設置計画をまとめると以下の通り（合計130台程度）。

1. 都市水害対策（国交省ガイドライン※1 に基づき推進）
 - 1.1. 『下水道浸水被害軽減総合事業』の対象地域かつ人口10万人以上でXMP観測域外の自治体：38自治体
→ 各3台体制の観測で、合計114台 ※2
 - 1.2. 『下水道浸水被害軽減総合事業』の対象地域かつ人口10万人以上でXMP観測域遠端付近の自治体：16自治体
→ 各1台+XMPの合成観測で、合計16台 ※2
2. その他需要
 - 2.1. ダム・河川の管理・監視支援情報提供
 - 2.2. 鉄道管理支援、気象会社

※1 国土交通省国土技術政策総合研究所「都市域における局所的集中豪雨に関する雨水管理技術導入ガイドライン」
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0998.htm>

※2 プロジェクト共同研究体による算定

3.2. 都市水害対策用汎用型気象レーダーの展開計画について

○ 設置計画を図示すると下図の通り。

