

X帯汎用型気象レーダーに 求められる諸元について

株式会社ウェザーニューズ
古野電気株式会社

目次

1. 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
 - 2.1 気象レーダーに求められる必要なパラメータ
 - 2.2 気象レーダーで観測するレーダーパラメータ
 - 2.3 気象レーダーの観測手法
3. 気象現象把握に必要な気象レーダーの諸元
 - 3.1 必要な分解能から求まる気象レーダーのパラメータ
 - 3.2 汎用型気象レーダーに必要な諸元
 - 3.3 占有周波数帯幅について
 - 3.4 周波数離隔及び減衰量について
4. 汎用型気象レーダーに必要な諸元のまとめ

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

2.1 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、地方官署で最小0.5 mm/hr、アメダスにて最小1mm/hrから観測が可能

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

2.2 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

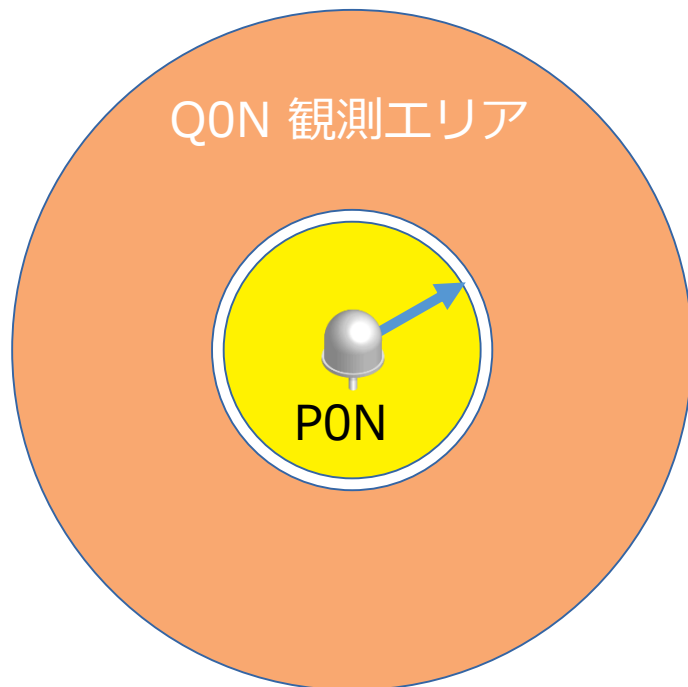
これらのレーダーパラメータを精度良く観測できれば、気象現象の正しい把握に繋がる

2.3 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

2.3 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。

2.3 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

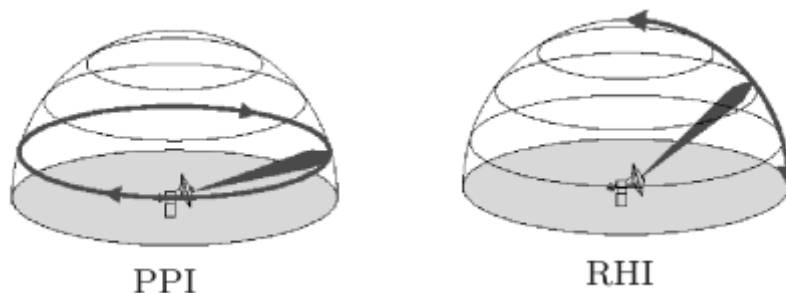
気象レーダーは、パラボラアンテナ等を用いたペンシルビームを用いており、雲の全体構造を捉えるためには、アンテナの仰角や方位角を変えながらスキャンするのが一般的である。

◆ 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）



抜粋：深尾、浜津（2005）

気象と大気のレーダーリモートセンシング

2.3 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。

2.3 気象レーダーの観測手法

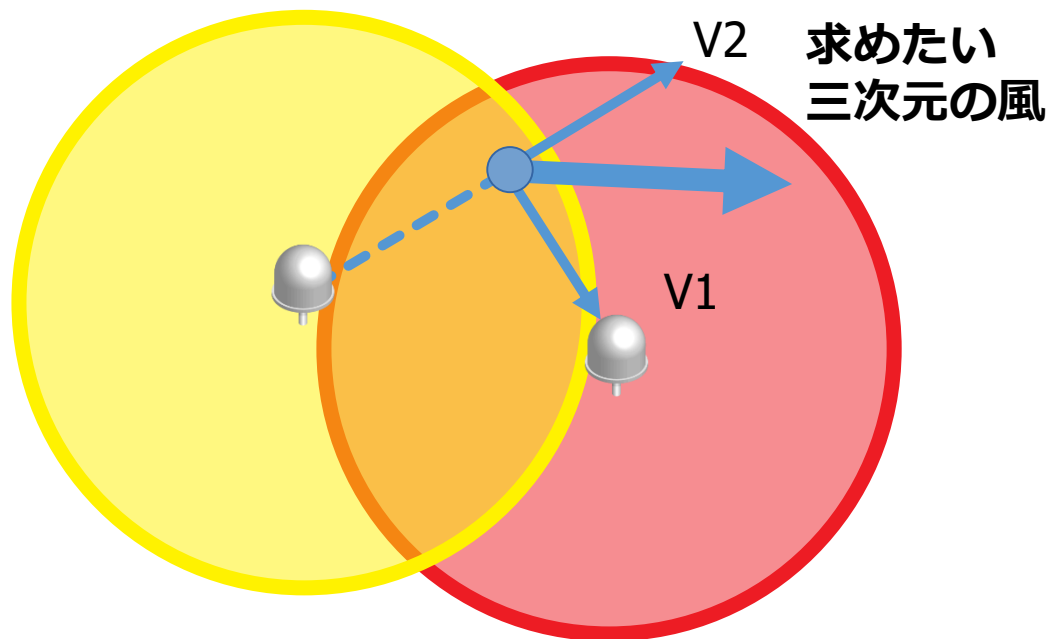
◆ 複数台のレーダーによる協調観測

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。



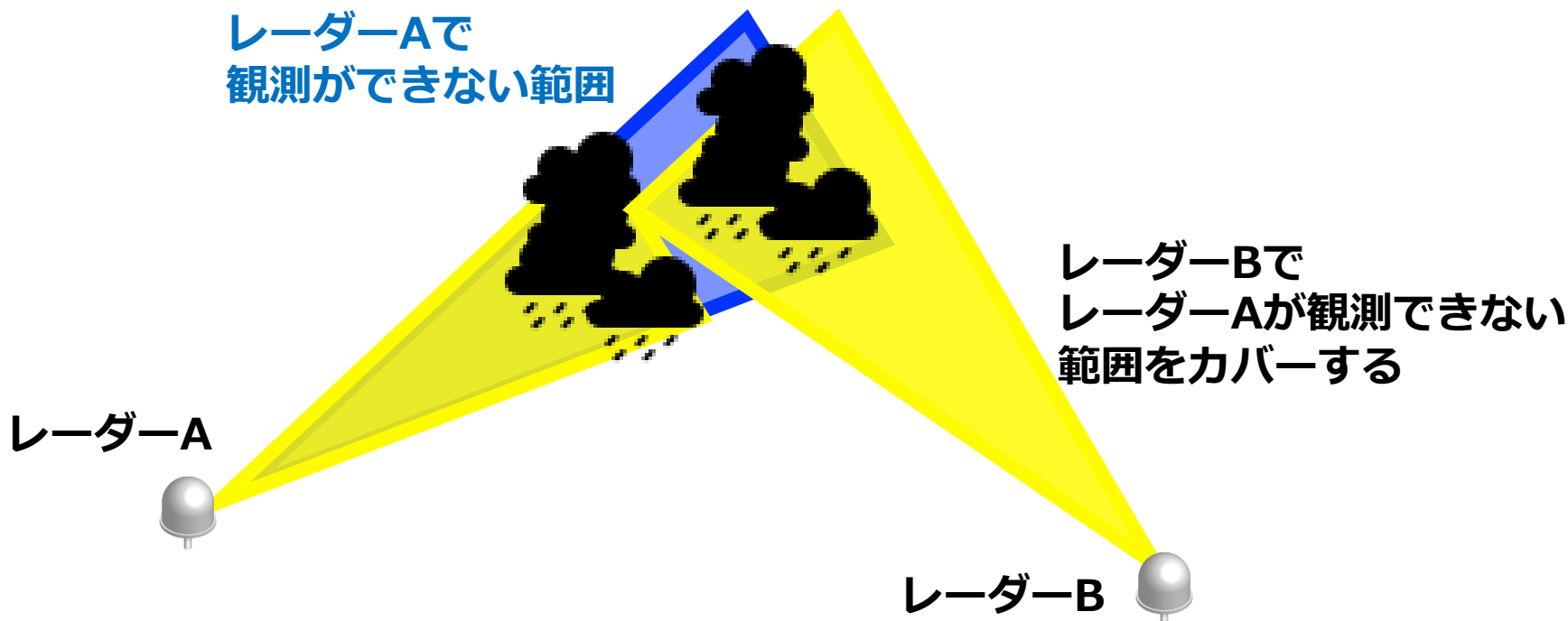
2.3 気象レーダーの観測手法

◆ 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。



3. 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 タイプ a : 50 km 以上、タイプ b : 30 km 以上
4. 必要な感度は タイプ a : 50 km 先、タイプ b : 30 km 先までの全域でタイプ a : 0.5mm/hr タイプ b : 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3dB程度（常温）
- ◆ 距離分解能を150 mとすると、P0Nのパルス半値幅は 1 μ s
⇒ 標準的な受信帯域幅は1.2MHz程度
- ◆ 距離分解能が150 mのとすると、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 ~ 2.5 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 2.5 MHz 離隔して送信し、占有周波数帯幅は それぞれ2.5 MHz 以下とする

3.1 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 パルス半値幅	1 μ s
Q0N 変調幅	1~2.5 MHz (設計に依存する)
熱雑音電力	-110 dBm
最小受信感度 (MDS)	-105 dBm (SN比: 5dB)

◆ 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

3.1 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 パルス半値幅	1 μ s
Q0N 変調幅	1~2.5 MHz (設計に依存する)
熱雑音電力	-110 dBm
最小受信感度 (MDS)	-105 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、(XMP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。

3.1 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30 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	5 kHz 以下
アンテナのビーム幅	4.5度 以下

◆ 観測レンジが30kmであると、観測可能な範囲は最大60kmであり、数km程度のサイズの積乱雲を50分観測できる。

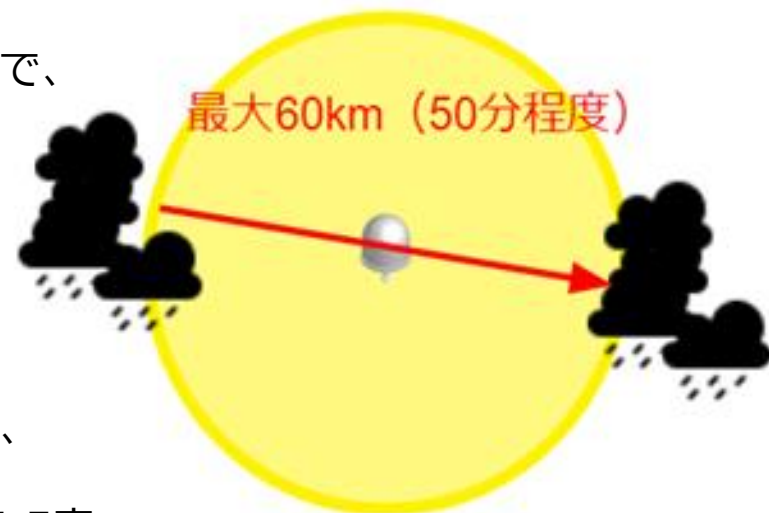
(移動速度は20m/s と仮定)

◆ 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、30km先で角度方向の分解能は2.4km 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



3.2 汎用型気象レーダーに必要な諸元

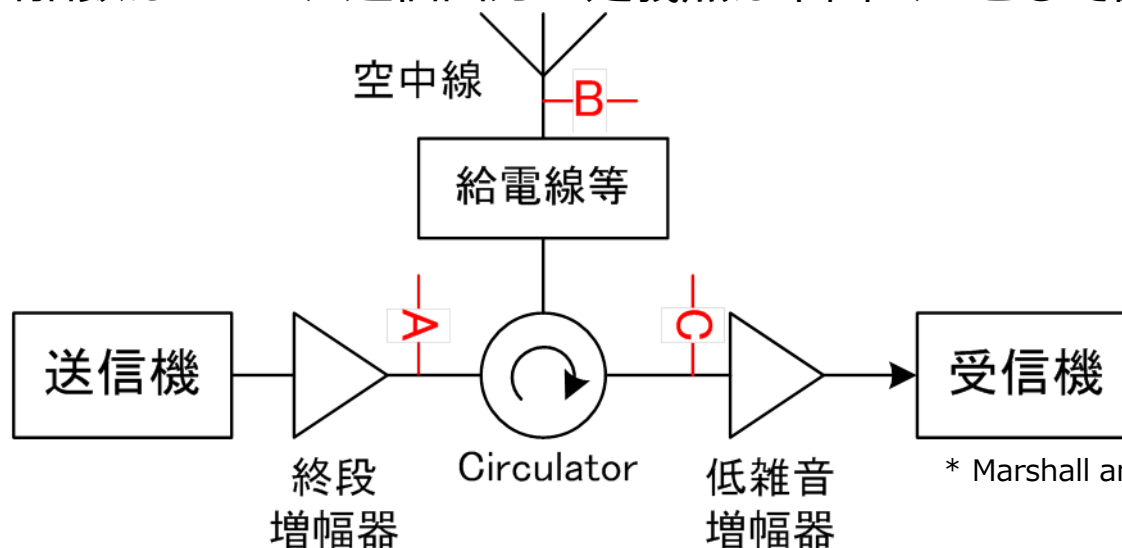
- 汎用型気象レーダーの諸元の例として、下記の二種類があり、それぞれには、観測目的に応じた観測性能の違いがある。

項目	タイプ a	タイプ b
観測目的と 要求性能	より高機能な観測を行う 目的で、半径50kmの 範囲で降水強度 0.5mm/hr以上を捕捉	小型化により設置を容易 にし、半径30kmの範囲 で降水強度1.0mm/hr以 上を捕捉
アンテナ径	1.2m	0.5m
送信出力	200 W	200 W
最大 EIRP	92 dBm	84 dBm

3.2 汎用型気象レーダーに必要な諸元

気象現象の把握のための計算に必要な仮定については、次のとおりとする。

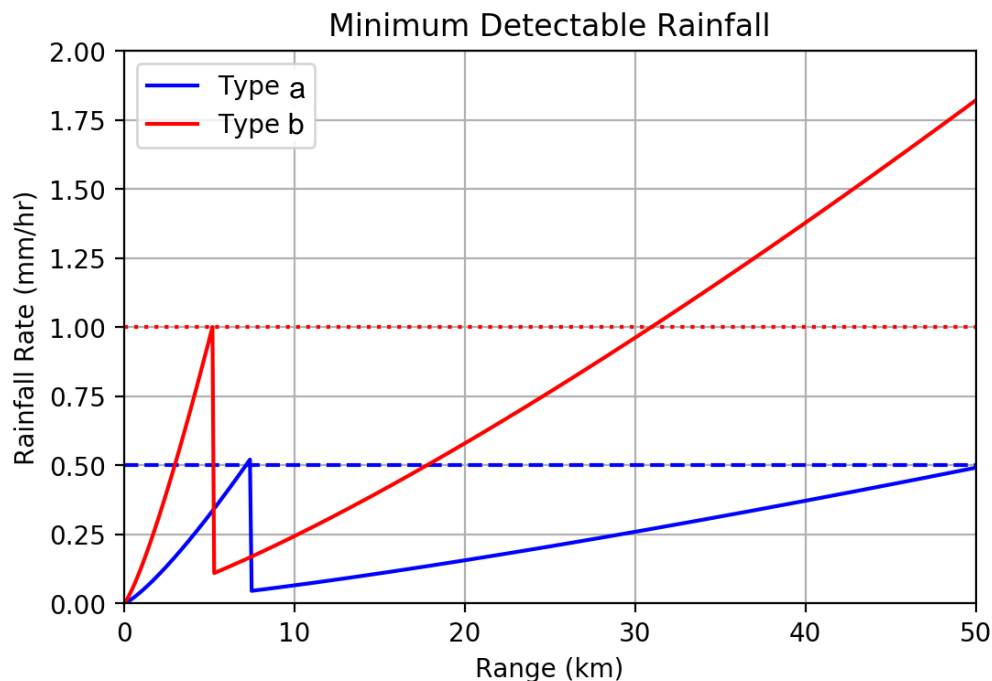
- ◆ MP*分布を仮定し、1 mm/hrの雨は反射強度 23 dBz、0.5mm/hrの雨は反射強度 18.2 dBz
- ◆ 1パルスあたりのSN比が5 dB以上で信号検出とする \Rightarrow -105 dBm 以上 (C点)
- ◆ 空中線利得を38 dBi (ビーム幅2度; タイプ 1)、30 dBi (ビーム幅4.5度; タイプ 2)
- ◆ 終段増幅器から空中線までの損失 (下図A-B間)、空中線から低雑音増幅器 (LNA) までの損失 (下図B-C間) はいずれも 2.0 dB、LNA以降 (下図C点以降) の受信機雑音指数は 3 dB、送信出力の定義点は下図B、として計算を行った。



* Marshall and Palmer (1948)

3.2 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を求め
るため、観測距離と最小検出時間降雨量の関係を示すと下図のようになる。



項目	諸元	備考
空中線電力	200 W	各偏波
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	各偏波

- ◆ EIRPを92 dBmとすると、距離50kmで降水強度0.5mm/hrを観測できる
- ◆ 一方、同じ送信出力で小さなアンテナを用いたとしても、最低限の観測性能である、距離30kmで降水強度1mm/hrの観測性能を担保できる
- ◆ 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EIRPは、最大92 dBmとなる。

3.2 汎用型気象レーダーに必要な諸元

- ◆ 搬送波の変調波スペクトルの許容範囲として、空中線電力を基準とした以下の減衰量で管理する。
 - P0N指定周波数から ± 3.75 MHz以上及びQ0N指定周波数から ± 3.75 MHz以上離隔した周波数における減衰量： 50 dB 以上
 - P0N指定周波数から ± 8.75 MHz以上及びQ0N指定周波数から ± 8.75 MHz以上離隔した周波数における減衰量： 60 dB 以上
- ◆ デューティー比を 10% 以下とする。
 - ・送信平均電力を上げるため、デューティー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、デューティー比は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自局含めた3局まで許容する。
- ◆ 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。

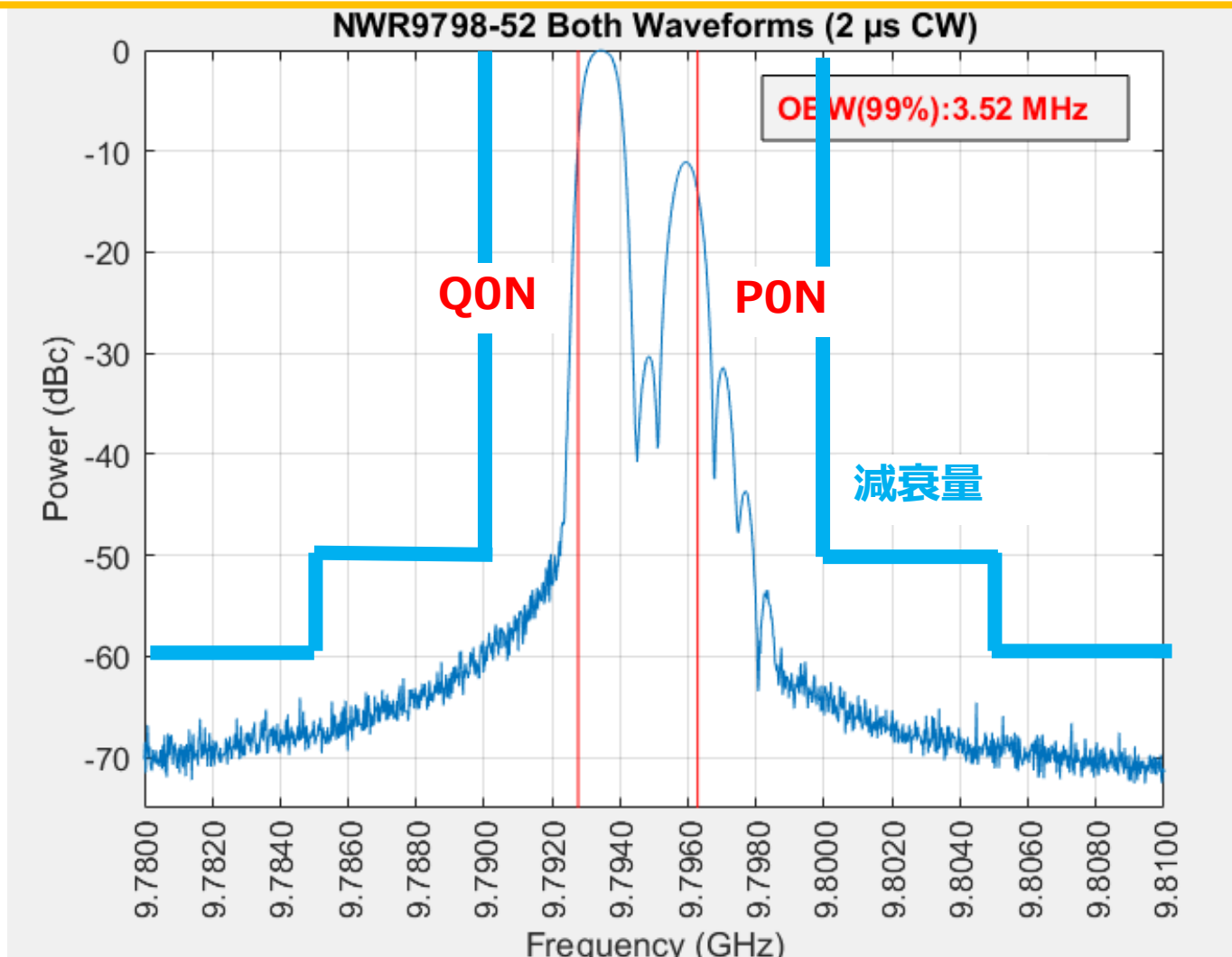
3.3 占有周波数帯幅について

- 汎用型気象レーダーとして想定されているレーダーについて測定を行った結果をまとめ、諸元案を作成すると以下の通りになった。

	占有周波数帯幅 (PON)	占有周波数帯幅 (QON)	送信パラメータ
A社	2.04 MHz	1.38 MHz (現在精査中)	PON: パルス半値幅 1us QON: 掃引幅 2MHz、 パルス幅 39us
B社	1.26 MHz	1.58 MHz	PON: パルス半値幅 1us QON: 掃引幅 2MHz、 パルス幅 50us (現在パラメータを精査中)
C社	2.5 MHz (現在精査中)	2.2 MHz	PON: パルス半値幅 1us QON: 掃引幅 2.3MHz、 パルス幅 50us
諸元案	2.5 MHz	2.5 MHz	(各社において値を精査中)

3.4 周波数離隔及び減衰量について

- PONを高周波数側、QONを低周波数側で送信する
- 基準をPON・QONそれぞれの中心周波数から、とする
- 減衰量の値については、これまでと変更はない



3.5 汎用型気象レーダーに必要な諸元のまとめ

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
搬送波の変調 スペクトルの 許容範囲	P0N指定周波数から±3.75 MHz以上及び Q0N指定周波数から±3.75 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
	P0N指定周波数から±8.75 MHz以上及び Q0N指定周波数から±8.75 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		P0N : 2.5 MHz 以下 Q0N : 2.5 MHz以下	精査中
チャンネル間隔		5 MHz	
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	
周波数の許容偏差		百万分率 20	
スプリアス領域における不要発射		60 dBc	精査中

赤字は、今回検討を行うべき項目

※ 両偏波特性（水平、垂直）の合計値