

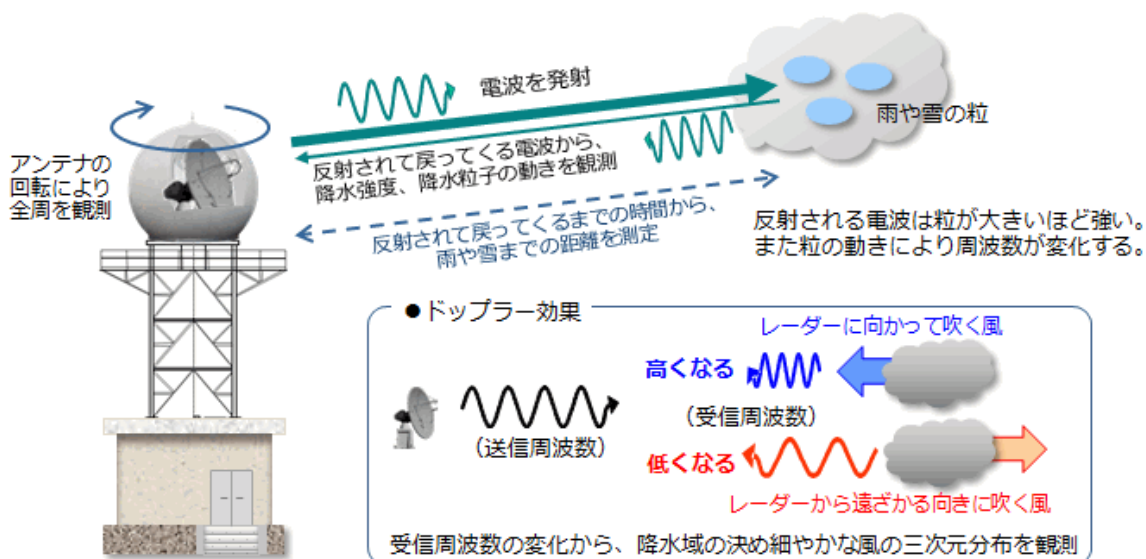
## 第2章 気象レーダーの現状と課題

### 2.1 気象レーダーの概要

気象レーダーは、電波で雨や雪の分布と強度を測る装置である。気象レーダーによっては、半径数百 km の範囲を観測することも可能である。一般に利用できる例として、「レーダー・アメダス解析雨量」、「降水短時間予報」、「降水ナウキャスト」、「XRAIN（エクストレイン）」等がある。

具体的には、空中線を回転させながら電波（マイクロ波）を発射し、半径数百 km の広範囲内に存在する雨や雪を観測する。発射した電波が戻ってくるまでの時間から雨や雪までの距離を測り、戻ってきた電波（レーダーエコー）の強度から雨や雪の強度を観測する。

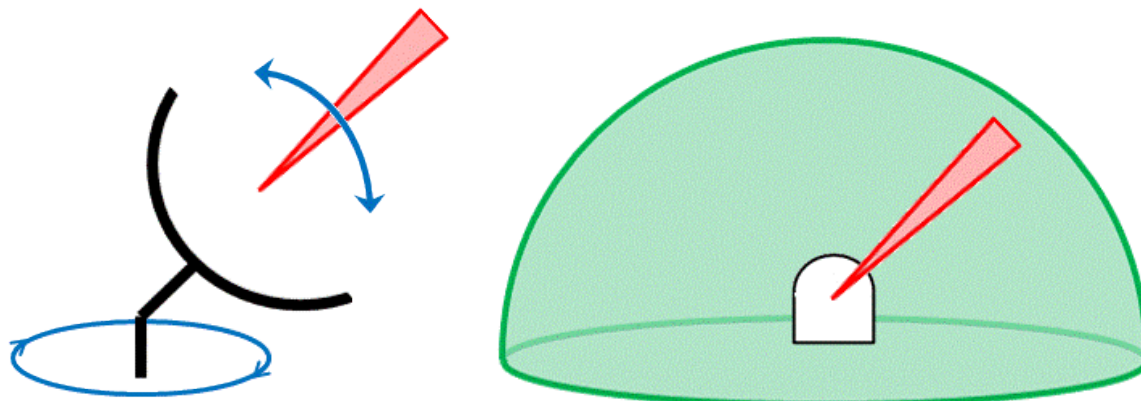
気象ドップラレーダーは、雨や雪の強度に加え、戻ってきた電波の周波数のずれ（ドップラ効果）を利用して、雨や雪の動きを観測することが可能である。2.1-図 1 に気象レーダーによる観測の概要を示す。



2.1-図 1 気象レーダーによる観測の概要

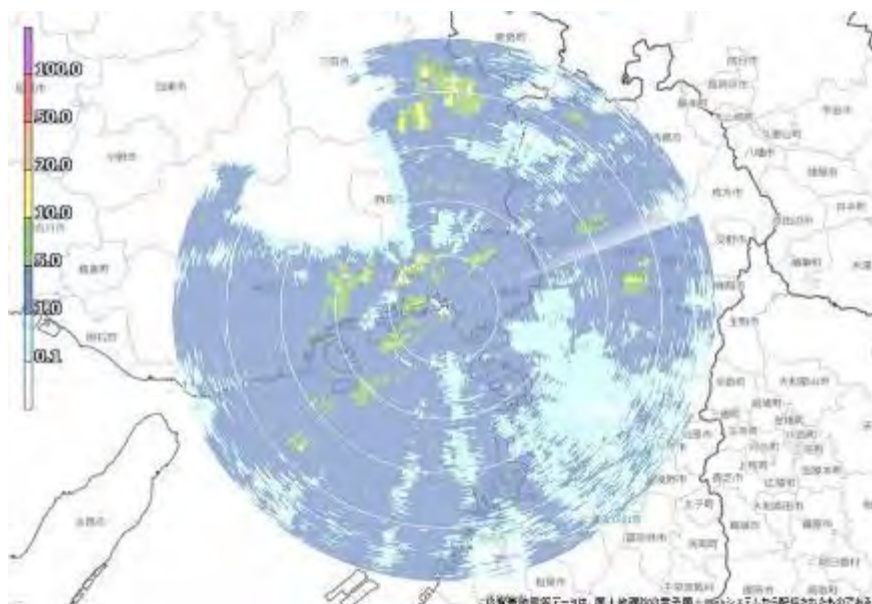
出典：気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>)

気象レーダーは、仰角を変更しながら水平回転し、気象レーダー設置位置を中心とした半球内の降雨分布を三次元的に走査・測定する。2.1-図 2 に走査のイメージを示す。アウトプットとして降雨量を算出するため、反射係数（絶対値）を測定する一種の測定器という見方も可能である。観測範囲は主として使用周波数に依存し、C 帯（5 GHz 帯）、X 帯（9.7 GHz 帯）の電波が使用されている。世界的には S 帯（2.8 GHz 帯）も使用されている。



2.1-図 2 気象レーダーの走査のイメージ

観測結果の表示としては、降雨域の強度分布を色分けして表示する方法が主流である。観測結果の表示例を 2.1-図 3 に示す。



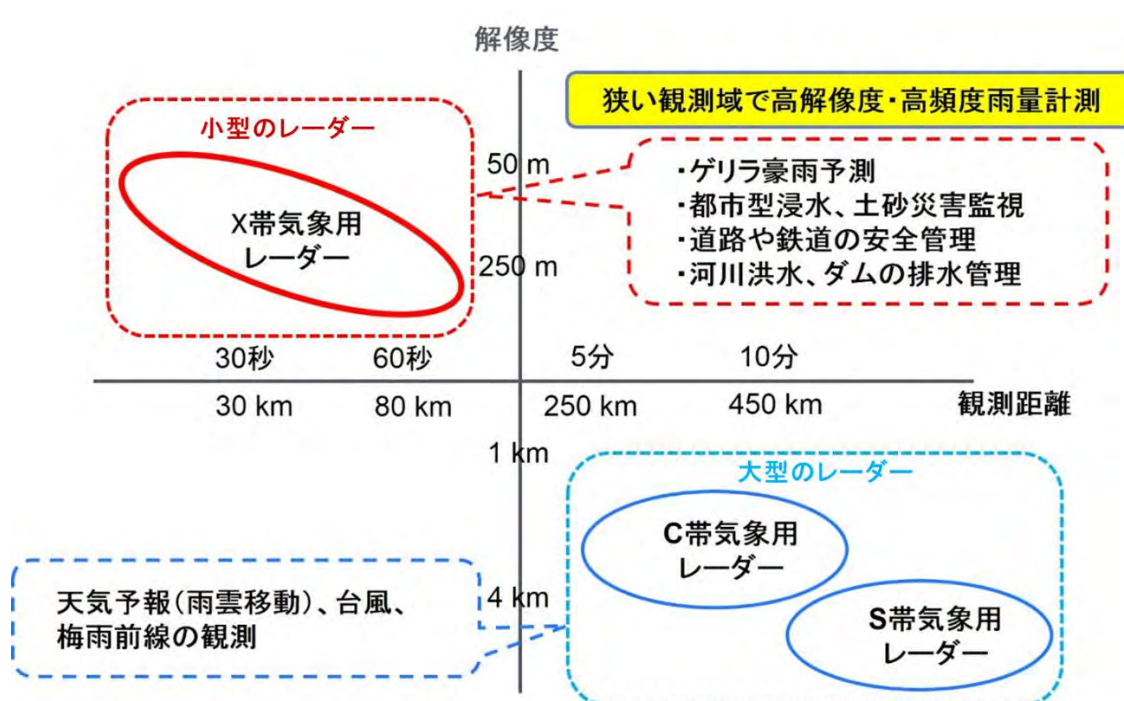
2.1-図 3 観測結果の表示例（2015 年 11 月 17 日の降雨状況）

雨滴は、粒径が大きいほど水平・垂直寸法差が大きくなるという性質がある。この性質を利用して、水平偏波（電場が水平方向に振動する電波）、垂直偏波（電場が垂直方向に振動する電波）の両方を使用して寸法差を測定し、高精度に降雨量を算出する技術もある。この技術は、大型のレーダーでは主流となっている。このように、水平偏波と垂直偏波の2種類の電波を同時に送信・受信する気象レーダーは二重偏波レーダー（または、マルチパラメータ（MP）レーダー）といわれている。水平・垂直の両偏波を同時に使用するため、一般的には回転対称形の空中線（パラボラ等）が用いられる。

X帯(9 GHz帯)の電波は、降雨減衰が大きいため、気象レーダーの設置場所の上空に強雨が降っている場合などでは、本来の高精度な観測が困難となる。このような、強雨の後方にある弱雨を高精度観測したい場合には、二重偏波レーダーを用いることによってある程度の精度補正が可能となる。

## 2.2 小型・軽量化のメリットと課題

気象用レーダーの位置付けを 2.2-図 4 に示す。



2.2-図 4 気象用レーダーの位置付け

2.2-図 4 は、横軸を観測距離、縦軸を解像度に取り、各気象用レーダーの特徴を分布した図である。例として、右下の S 帯の気象用レーダーでは、通常 500~600 km の範囲を観測することが可能であるが、空中線のサイズは 8.5 m 程度と大型になる。空中線のサイズは、周波数が低いほど大きくなる関係にある。

X 帯の気象用レーダーは、2.2-図 4 の左上に位置付けされ、高密度配置することにより、半径 30~80 km の狭い観測域で高解像度・高頻度雨量計測が可能であるという特徴がある。これにより、「ゲリラ豪雨予測」、「都市型浸水、土砂災害監視」、「道路や鉄道の安全管理」、「河川洪水、ダムの排水管理」などに有効活用することが期待される。

また、小型であるため設置が容易であるというメリットがある。例えば、9.4 GHz 帯の気象用レーダーは、空中線の直径が 0.5~2.4 m 程度 (2.2-図 5) であるため、設置場所の自由度も高い。例として、2.2-図 6 に空港設置時の写真を示す。2.2-図 6 の右の写真に示すように、軽量であるため人力での設置が可能である。また、短時間での設置が可能であるため、移設も容易に行うことができる。さらに、空中線を小型化することによるコストダウンも可能となる。ただし、空中線の小型化には、空中線指向角が広がることによる角度方向の解像度が低下するという課題もある。

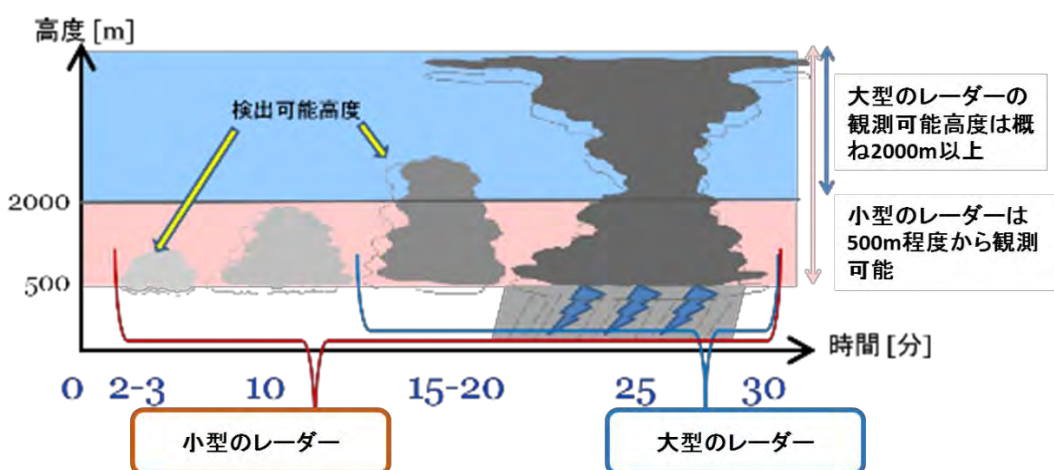


2.2-図 5 小型気象用レーダー



2.2-図 6 空港に設置した小型気象用レーダー

また、小型の気象用レーダーは低高度の観測に期待されている。2.2-図 7 に示すのは、横軸を時間にとった積乱雲の成長過程である。



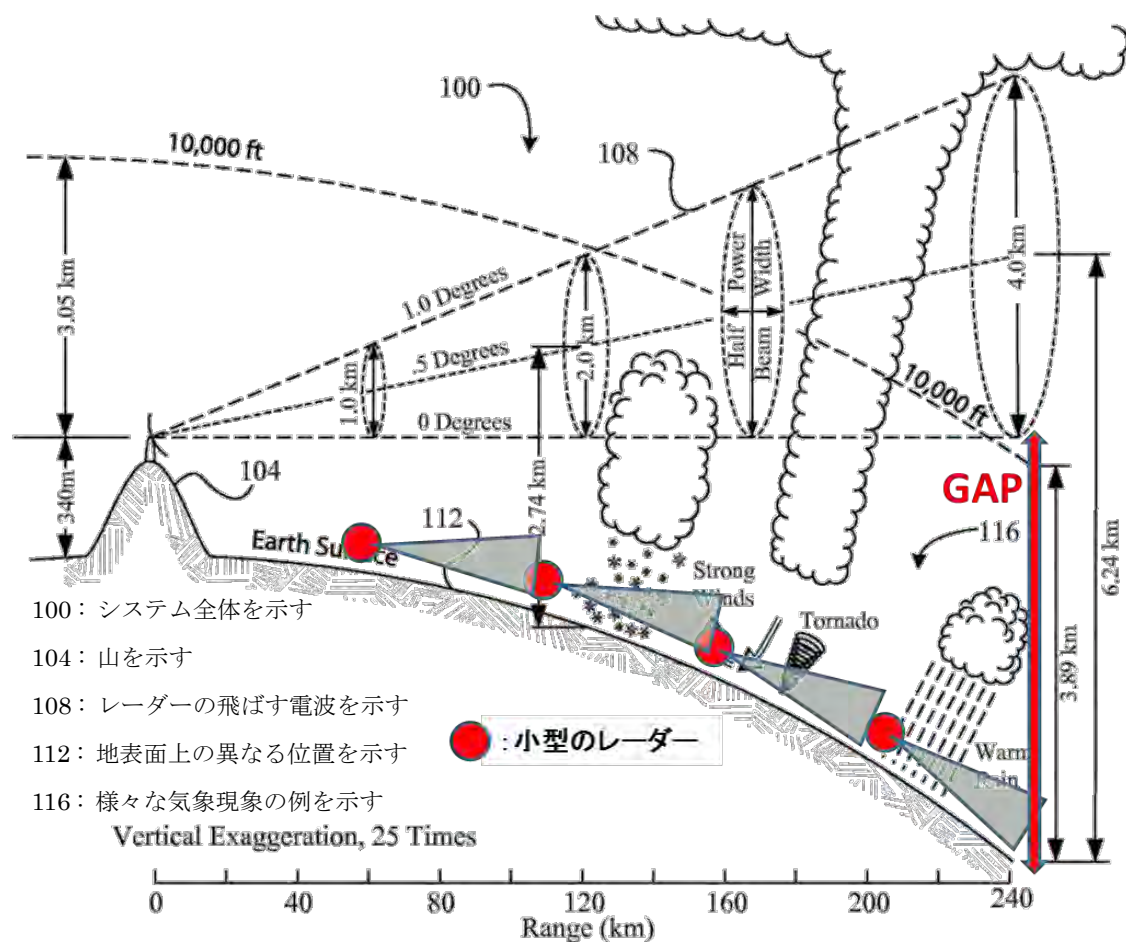
2.2-図 7 積乱雲の成長過程とレーダーの観測領域

(株) ウェザーニューズのプレスリリース

(<https://weathernews.com/ja/nc/press/2010/100803.html>) をもとに作成

大型のレーダーは、広い範囲を観測する目的で設置されるため、高い高度に設置されることが多い。一方小型のレーダーは、ビルの上など低い高度に設置が可能であるため、大型のレーダーより十数分早く雨雲の発達を観測可能であると期待されている。

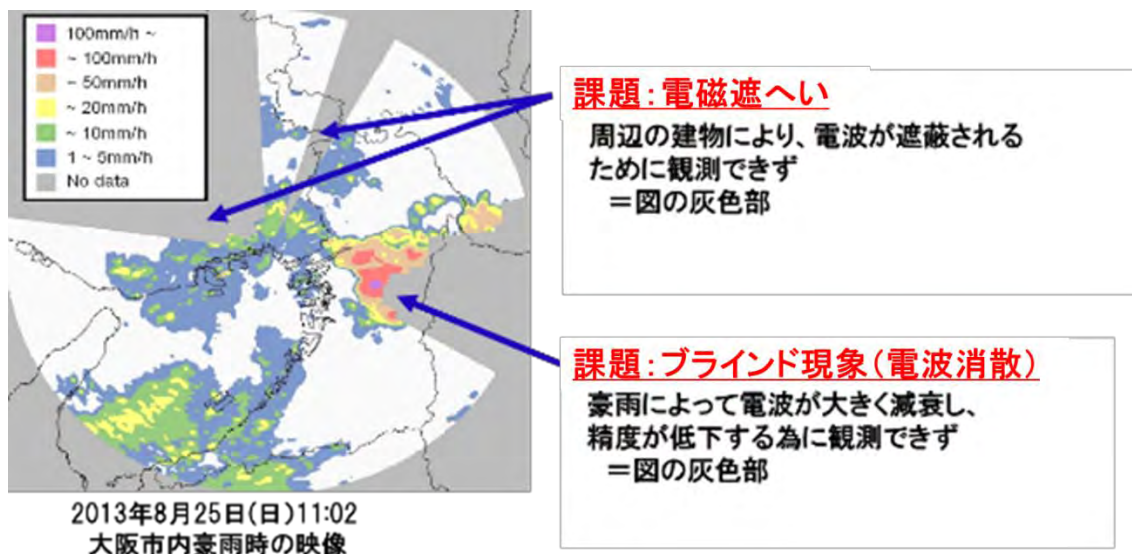
また、実際には地球は球体であるため、気象用レーダーを一定の仰角で操作した場合に、1 km 以下の高度を観測できる範囲は半径 45 km 程度である。地球の湾曲と気象用レーダーの観測範囲を 2.2-図 8 に示す。このため、低い高度を観測する場合には、大型のレーダーでは観測が困難な範囲を小型のレーダーで埋めることが求められる。



2.2-図 8 地球の湾曲とレーダーの観測範囲

"Chandrasekaran Venkatachalam, Yanting Wang :(PCT/US2009/048576) US8928521 B2 " を元に作成

加えて、2.2-図 9 に大阪市内の豪雨時の気象用レーダーの映像を示す。現状の気象用レーダーでは、周辺の建物によって電波が遮断（電波遮へい）されたり、豪雨によって電波が大きく減衰し精度が低下する状態（ブラインド現象）が生じた場合には、その地点より後方においては観測できない。このような観測データの欠落は、設置が容易である小型のレーダーを高密度配置することにより補完が可能である。



2.2-図 9 従来型レーダーの課題

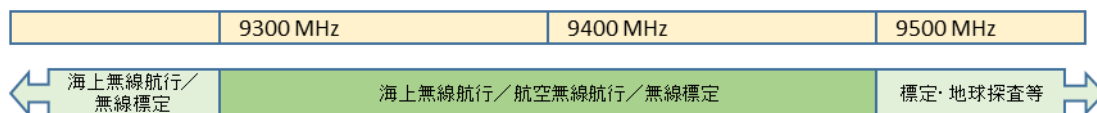
小型のレーダーは空中線の直径が 0.5~2.4 m 程度と、様々なサイズのものを利用して  
いる。S 帯・C 帯の大型のレーダーと同等 (1° 程度) の空中線指向角を確保するには、2.2  
m 程度の開口が必要となる。

これより小型な、空中線の直径が 1.2 m 以下となるような気象用レーダーは、空中線を  
小型化しているため、空中線指向角が広がることによって角度方向の解像度が低下する  
という欠点がある。しかし、より短距離の観測範囲に限ったり、複数台の観測結果を合成  
するといった対応により補う試みも行われている。

## 2.3 9.4 GHz 帯を使用するメリットと課題

### メリット

現在の 9 GHz 帯における各種レーダーの割当周波数を 2.3-図 10 に示す。



※無線標定：無線航行の目的以外のために使用する無線測位のこと。

2.3-図 10 9 GHz 帯レーダーの割当周波数

2.3-図 10 において 9300～9500 MHz の間には、海上無線航行 / 航空無線航行 / 無線標定のために使用する周波数が割当てられており、それぞれの目的や周波数の使用に関する条件は 2.3-表 1 のように定められている。

2.3-表 1 無線局の目的と周波数の使用に関する条件

国内分配	無線局の目的	周波数の使用に関する条件
海上無線航行	公共業務用 一般業務用	探索救助用レーダートランスポンダ用及び船舶無線航行用レーダー用とする。
航空無線航行	公共業務用 一般業務用	航空機無線航行用レーダー用とする。
無線標定	公共業務用 一般業務用	

また、日本国内における既存無線局数の内訳は 2.3-表 2 のとおりである。なお、2.3-表 2 は、無線局等情報検索による 2016 年 3 月 1 日現在のデータ（公開局データ）を集計したものである。（広帯域で免許されている局は重複計上）



2.3-表 2 日本国内における既存無線局数

周波数 [MHz]	船舶局	特定船舶局	遭難自動 通報局	航空機局	無線航行 陸上局	無線航行 移動局	無線標定 陸上局	無線標定 移動局	実験試験局	合計
9300～ 9349.999				733					77	810
9350	4864	344	20			200			1	5429
9350.001～ 9374.999				68					1	69
9375	32	31		261		5			30	359
9375.001～ 9409.999									4	4
9410	6934	26350			9	9153	20	76	298	42840
9410.001～ 9414.999									3	3
9415	36	1							3	40
9415.001～ 9444.999									3	3
9445	32	499				552			10	1093
9445.001～ 9499.999									44	44
9500									1	1
合計	11898	27225	20	1062	9	9910	20	76	475	50695

2.3-表 2 より、既設局の 84.5%が 9410 MHz で開設されており、また、既設局の 99.9%が 9445 MHz 以下の周波数で開設されていることが分かる。

9300～9500 MHz における、周波数割当は全世界共通であり、ITU-R（国際電気通信連合無線通信部門）の RR（無線通信規則）による業務間の優先順位は 2.3-表 3 のとおりとなっている。

**2.3-表 3 国際規定**

優先順位	業務
1 位	無線航行業務（船舶、航空機用）
2 位	地上に設置した気象用レーダー（無線標定業務）
3 位	その他無線標定業務

2.3-表 3 に関し、さらに RR においては、2.3-表 4 のとおり優先順位が定められている。

**2.3-表 4 国際規定詳細**

優先順位	業務（）内は無線通信規則の条文番号
1 位	無線航行業務（5.475B）
2 位	地上に設置したレーダービーコン （航空無線航行業務）（5.475）
3 位	地上に設置した気象用レーダー（無線標定業務）（5.475B）
4 位	その他の無線標定業務（5.475A）
5 位	地球探査衛星業務、宇宙研究業務（5.476A）

以上のように、9.4 GHz 帯は特に生産台数の多い船舶用レーダーに使用されており、それらの部品も流用可能である。よって、低コストでの製造が可能となり、保守部品の調達も容易というメリットが挙げられる。また、技術的な面では小型化に関する製品技術を転用しやすいという点も大きい。

さらに国際展開を考えると、海外で活用されている X 帯の気象用レーダーと同帯域のものを輸出用・国内用ともに同仕様で製造できることが輸出の促進に繋がり、日本経済を活性化させるためにも理想的である。

## 課題

前述のとおり 9.4 GHz 帯を使用した気象用レーダーには多くのメリットがある一方で、課題も存在する。2.3-表 4 で触れた ITU-R の RR の 5.475B には下記のように規定されている。

“In the band 9300-9500 MHz, stations operating in the radiolocation service shall not cause harmful interference to, nor claim protection from, radars operating in the radionavigation service in conformity with the Radio Regulations. Ground based radars used for meteorological purposes have priority over other radiolocation uses. (WRC-07)”

このように 9.4 GHz 帯で運用する無線標定業務の局は無線航行業務のレーダー（以下、航行用レーダー）に有害な混信を生じさせてはならず、また、そのレーダーからの保護を要求してはならない。そのため、技術的条件、運用条件及び技術的検証が必要である。

混信を生じさせない技術的条件、運用条件を見つけるためには、離隔周波数（航行用レーダーとの周波数をどの程度離せば良いか）、気象用レーダーの数（干渉の頻度による影響）、航行用レーダーと気象用レーダーの離隔距離（出力の違いによりどの程度干渉源として影響を及ぼすか）等を検証する必要がある。

具体的な技術的条件、運用条件及び技術的検証については、後章で述べる。

## 2.4 国内の 9.7 GHz 帯気象レーダー等の利用状況

日本国内における 9.7 GHz 帯の既存無線局数を 2.4-表 5 に示す。2.4-表 5 は 2016 年 3 月 1 日現在のデータ（公開局データ）を集計している。

2.4-表 5 日本国内における 9.7 GHz 帯の既存無線局数

周波数[MHz]	無線局数
9700	2
9705	1
9710	2
9715	1
9720	2
9725	1
9730	2
9735	1
9740	93
9745	1
9750	1
9755	1
9760	1
9765	1
9770	3
9775	1
9780	1
9785	1
9790	1
9795	1
9800	1
合計	119

※気象用レーダー以外の無線局も含む

本章では日本国内で 9.7 GHz 帯を用いて運用されている気象用のマルチレーダーシステムについて述べる。

### 首都圏 X バンド気象レーダーネットワーク (X-NET)

首都圏 X バンド気象レーダーネットワーク (X-NET) は国立研究開発法人防災科学技術研究所により、2006 年から首都圏の大学や試験研究機関の所有する X 帯の気象用レーダーをネットワーク化し、首都圏における豪雨・強風の監視に関する研究のために行われている。

首都圏には、X 帯のドップラレーダーや MP レーダーを所有している大学や研究機関が複数ある。これら複数のドップラレーダーでネットワークを構成することにより、それぞれのレーダーで合成されたドップラ速度を合成し、風向・風速の分布を求めることが可能となっている。その例を 2.4 表 6 に示す。

2.4 表 6 X-NET 参画機関及びレーダー所在地

レーダー所在地	レーダー運用機関	レーダーの種類	観測半径
神奈川県海老名市	防災科学技術研究所	X バンド MP	80 km
東京都文京区	中央大学	X バンドドップラ	64 km
神奈川県横須賀市	防衛大学校	X バンドドップラ	64 km
千葉県木更津市	防災科学技術研究所	X バンド MP	80 km
埼玉県羽生市	日本気象協会	X バンド MP	80 km
山梨県甲府市	山梨大学	X バンド MP	64 km
千葉県我孫子市	電力中央研究所	X バンド MP	64 km

国立研究開発法人防災科学技術研究所ホームページより

<http://mp-radar.bosai.go.jp/xnet.html>

例として、海老名市及び木更津市で使用されている気象用レーダーの諸元を 2.4-表 7 に示す。このうち、木更津市の気象用レーダーは 9.7 GHz 帯を使用している。

2.4-表 7 海老名市及び木更津市で使用されている気象用レーダーの諸元

気象用レーダー	海老名レーダー	木更津レーダー
送信周波数	9468.7 MHz / 9471.2 MHz	9700 MHz
空中線	パラボラ (φ2.0 m)	パラボラ (φ2.2 m)
空中線利得	43.4 dBi	44.4 dBi
ビーム幅	1.15 °	1.0°
送信管	固体素子	クライストロン
送信出力 (デューティー比)	800 W (49.5%)	50 kW (0.8%)
パルス幅	1.0 / 32 μs	0.5/1.0/2.0 μs
パルス繰り返し周波数	1500 Hz 以下	1800 Hz 以下
偏波	H/V 同時送受信	H/V 同時送受信
最大ドップラ速度 (PRF 5:4)	11.87 m/s (47.5 m/s)	13.9 m/s (55.7 m/s)
最小受信感度	-114.6 dBm	-119 dBm
観測半径	80 km 以上	80 km 以上
観測パラメータ	REF, VEL, WIDTH, ZDR, PHIDP, RHOHV, KDP 他	

国立研究開発法人防災科学研究所ホームページより

<http://mp-radar.bosai.go.jp/niedradar.html>

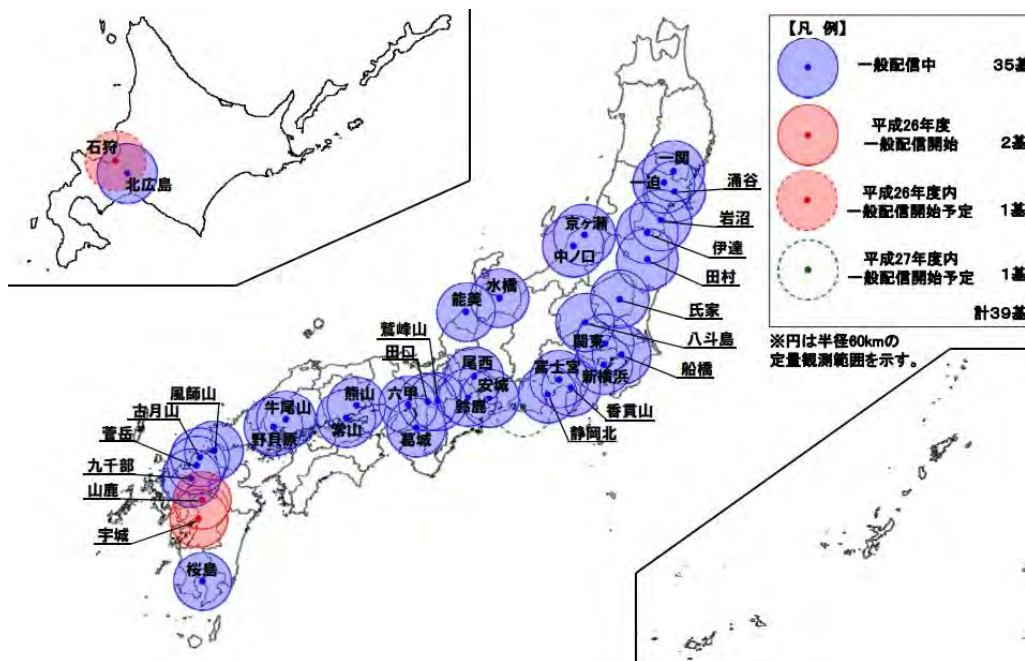
#### X バンド MP レーダーネットワーク (XRAIN)

X バンド MP レーダーネットワーク (XRAIN [X-band polarimetric (multi parameter) RAdar Information Network の略]) は、増加する集中豪雨や局所的な大雨による水害や土砂災害等に対して、適切な河川管理や防災活動等に役立てるために、国土交通省が整備を進めているシステムである。

高密度配置した X 帯の MP レーダーを用い、従来の C 帯の気象用レーダーに比べ高頻度 (5 倍)、高分解能 (16 倍) での観測が可能である。また、地上雨量計による補正を行わずに高精度な雨量データをほぼリアルタイム (1~2 分程度) で配信することが可能となっている。

X 帯の電波は非常に強い降雨域の後方において電波が減衰・消散してしまうため、観測不能となる場合があるが、ネットワークを構築し観測地域を複数の気象用レーダーで囲むよう配置することで、より安定した観測が可能となる。

2.4-図 11 に XRAIN の整備状況を示す。



2.4-図 11 XRAIN の整備状況 (平成 27 年度一般配信開始予定含む)

国土交通省ホームページ XRAIN の概要より <http://www.mlit.go.jp/common/001046714.pdf>

XRAIN により得られたデータは様々な分野で利活用されている。その一部を 2.4-表 8 に示す。

2.4-表 8 XRAIN で取得した雨量情報の利活用例

利用者	活用先	概要
(一財) 日本気象協会等	スマートフォン向けのアプリ等の開発	XRAIN の観測データを利用して、スマートフォン向けのアプリ (応用ソフト) 等を開発し一般に提供。
東海旅客鉄道 (株) 京阪電気鉄道 (株)	列車の安全運行に活用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ XRAIN の雨量情報を東海道新幹線の路線図に重ね合わせたシステムを開発し、集中豪雨時における早期の警備体制構築に活用。</li> <li>・ 京阪電気鉄道 (株) において、XRAIN を列車の運転保安の確保に活用 (現在検証中)。</li> </ul>
東日本放送 福島中央テレビ	テレビ局での活用	・ 東日本放送では、平成 24 年 6 月にテレビ局として初めて

		<p>XRAIN の情報の放送を開始。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・福島中央テレビでは、平成 26 年 3 月から XRAIN の情報の放送を開始。</li> </ul>
東京消防庁	水防活動等に活用	<p>東京消防庁では、内部システムに XRAIN の雨量情報を導入し、警戒地域の早期把握や土砂災害危険区域等の図面と重ね合わせるにより防災活動の判断に活用。</p>
東京都江戸川区 (国研) 防災科学技術研究所 愛知県 神奈川県横浜市	地方公共団体の電子地図サービスでの活用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・江戸川区内の各施設・情報を案内する HP 上の電子地図サービス「えどがわマップ」に、XRAIN 等のデータを重ね合わせ、リアルタイムの降雨情報を提供 ((国研) 防災科学技術研究所と連携し社会実験を実施中)。</li> <li>・各地方公共団体の各施設・情報を案内する電子地図に XRAIN の観測データを重ね合わせ、リアルタイムの降雨情報を提供。</li> </ul>

国土交通省ホームページ 報道発表資料より <http://www.mlit.go.jp/common/001046713.pdf>



## 2.5 海外の動向

2.3 章では 9.4 GHz 帯を使用するメリットと課題について述べたが、海外においては気象用レーダーとして、既に 9.4 GHz 帯を使用している事例も多い。海外製の X 帯の気象用レーダーの例を 2.5-表 9 に示す。

2.5-表 9 海外製の X 帯の気象用レーダーの例

メーカー	Selex		DHI	Eldes	EWR	EEC		
機種	Rainscanner	60DX	LAWR	WRX-10	E600	Ranger X1	Ranger X5	DWSR -2001X
周波数 [MHz]	9410	9300 -9500	9410	9375 or 9410	9320 -9400	9200 -9700	9200 -9700	8500- 9600
出力電力 [kW]	25	75	25	10	3.3	0.1	0.5	200
電子管/ 固体素子	電子管	電子管	電子管	電子管	電子管	固体素子	固体素子	電子管

固体素子を用いる気象用レーダーは普及の途上であり、電子管（マグネトロン等）を用いているものが現状では大多数である。また、低価格のものは船舶用レーダーの改造品である場合が多く、その全てが 9410 MHz のマグネトロンレーダーとなっている。

以下に X 帯の気象用レーダーを用いた海外でのプロジェクト事例を示す。

### 米国 CASA (the Center Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere)

米国連邦機関 NSF (National Science Foundation) のプロジェクトの 1 つとして 2003 年に設立された。DCAS (Distributed Collaborative Adaptive Sensing) ネットワークと呼ばれる小型レーダーネットワークを、高性能な X 帯小型ドップラレーダーを配置することで構成している。これにより、現在運用されているレーダーでは観測することが難しかった現象を捉える観測システムの開発及びその利用方法の研究を目的としている。

Dallas Fort Worth (現状 6 台、最終的に 8 台)、Puerto Rico (7 台)、Oklahoma、Massachusetts の 4 箇所で現在稼働している。

### 欧州 RAINGAIN

RAINGAIN は都市域の洪水予測精度の向上を目的として Leuven、London、Paris、Rotterdam に X 帯小型レーダーを設置し、水管理の高度化を研究するプロジェクトである。RAINGAIN プロジェクトで使用されている気象用レーダーを 2.5-表 10 に示す。このようにそれぞれにおいて異なったタイプの気象用レーダーを用いた有効性の検証も行っている。

2.5-表 10 RAINGAIN プロジェクトで使用されているレーダー

都市名	使用レーダー
Leuven	DHI 製 水平偏波マグネトロンレーダー
London	SELEX 製 水平偏波マグネトロンレーダー
Paris	SELEX 製 二重偏波クライストロンレーダー
Rotterdam	SSBV 製 二重偏波レーダー

フランス RHYTMME (the Risques HYdrométéorologiques en Territoires de Montagnes et MEditerranéens)

フランスでは24台設置されているS帯及びC帯の電波を用いた気象用レーダーにより国土の90%はカバーされている。しかしながら地中海側の山岳地帯（フランス南西部）においては、このネットワークの空白地帯が存在する。

RHYTMMEはこの地域を補完することを目的とし、X帯気象用レーダーをマルチレーダーシステムとして使用している。このX帯気象用レーダーは二重偏波クライストロンレーダーを使用しており、2013年時点で3台稼働している。