

# RADAR for Meteorologists

## あなたもレーダ気象学者になれる パートⅢ

Third Edition

R.E. Rinehart

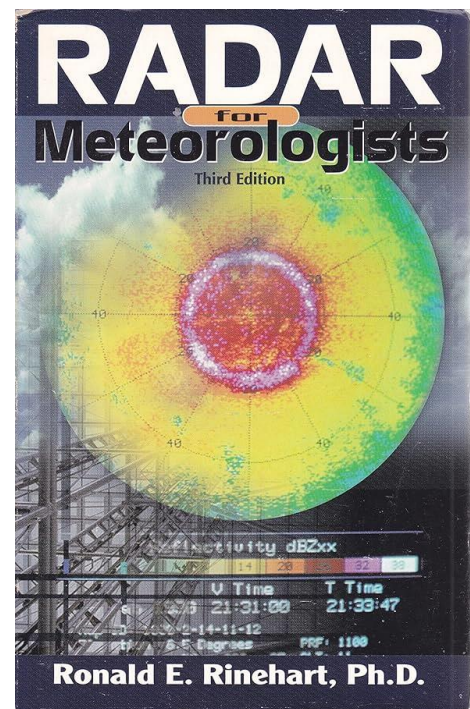
### 著者

R.E. Rinehart がレーダを利用した研究プロジェクトに初めて参加したのは学部学生の頃である。それ以来、イリノイ州立水資源管理、NCAR（大気科学研究所）、MIT リンカーン研究所の研究者として従事した後 North Dakota 大学大気科学部教授を務めた。Rinehart は多くの州のプロジェクトやケニヤ、南アフリカ、カナダアルバータ州のプロジェクトで行われた人工降雨プロジェクトに参加した。

### 本書のねらい

将来レーダ気象学を専攻する学部学生を対象としたレーダ気象学の入門書である。また、レーダマニュアルとレーダ気象学の専門書のギャップを埋める書籍として位置付けられる。

NEXTRAD が全米展開されドップラーレーダデータが配信されるようになったが、データの利用に当たって多くのユーザはレーダに関する基礎的な知識が必要であった。



参考書として以下がある（真木）。

- 1) 吉野文雄、2002：レーダ水文学、森北出版（ISBN4-627-49511-0）。 学部・大学院
- 2) Rinehart, R.E., 1997: *Radar for Meteorologists*, Rinehart Publications, North Dakota, 428pp. (ISBN0-9658002-0-2) . 学部・一般
- 3) Collier, C.G., 1989: *Applications of Weather Radar Systems, A Guide to Use of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. John Wiley & Sons, New York, 294pp. 学部・実務
- 4) Battan, L.J., 1973: *Radar Observations of the Atmosphere*, University of Chicago Press, Chicago, 324pp. 学部
- 5) Doviak, R.J. and D.S. Zrnic, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations, Second Edition*. Academic Press, San Diego, 562pp. 学部・大学院・研究
- 6) 深尾昌一郎・浜津享助、2005：気象と大気のレーダーリモートセンシング、京都大学出版会、479pp. 学部・研究・実務

- 7) Bringi, V.N. and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar*, Cambridge Univ. Press, New York, 636 pp. 大学院・研究
- 8) Sauvageot, H., 1991: *Radar Meteorology*, Artech House, London, 315 pp. 学部・大学院
- 9) Meischner P. (ed), 2004: *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*, Springer, 337 pp. 学部・大学院
- 10) Silas, M. (ed), 2008: *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*, Springer, 540 pp. 学部・大学院
- 11) Sene, K., 2009: *Hydrometeorology*, Springer, 355 pp. 学部, 大学院
- 12) 大内和夫編著 2017: レーダの基礎-探査レーダから合成開口レーダまで-, コロナ社, 292 pp. 学部

## 第1章 はじめに

### レーダの歴史

レーダの歴史は無線通信の歴史と密接に関係している。Radar (Radio detection and Ranging) はその名前の一部が示すように無線 (radio) に起源を持つ。レーダの発展の歴史は 18 世紀から 19 世紀初期にかけての様々な実用的あるいは理論的な発見から始まる (資料 1)。The Invention That Changed the World (Buderi, 1996) にレーダ技術の発展の様子およびそれに携わった人がまとめられており、レーダがいかに世界を変えたかを興味深くレビューしている。

無線は通信への利用が昔も今もメインテーマである。無線通信の研究や実験の過程でレーダの概念が登場し実用化されていく。無線通信に関する実験からレーダの可能性が見えてきた例を紹介する。

1922 年 9 月にポトマック川において米国海軍高周波無線通信実験が行われていた。川を挟んで設置された送信機と受信機の間を木造蒸気船が通過する際に無線通信の遮断が発生することが二人の研究者 Albert Hoyt Taylor と Leo C. Young によって確認された。Taylor と Young はこの結果を港に侵入する敵艦船の監視に利用できると考えて軍に提案するがポジティブな反応は無かった。

1934 年に Taylor と Young は航空機の通過が無線通信を遮断するかどうかの実験を行った。この結果をもとにパルス状の電波による航空機の検出を提案した。

この頃、米国、英国、フランス、イタリア、ドイツ、オランダ、ロシア、日本など多くの国でレーダもどきの機器の開発が行われた。米国と英国が共同でレーダ開発を行ったのは第二次世界大戦の初期であり、レーダの実用化に成功する。レーダの発展の歴史を資料 2 にまとめた (真木)。

レーダの実用化の鍵となったのはマグネトロン送信管の発明と実用化である。マイクロ波の電波を安定して発生させることが出来る送信管の開発はレーダ装置全体のサイズを小さく出来ることに加えてターゲットの位置を正確に求めることにつながった。送信管の改良は戦時中に連合国軍によって成功し、レ

### 電磁波の発見～RADARの概念の登場 ELECTROMAGNETIC WAVES AND RADAR

1865年: マックスウェルによる電磁波の理論的な研究  
Theory of electromagnetic waves by J.C. Maxwell (Germany)

1888年: ヘルツの実験により電磁波の存在が確認  
Proof of existence of electromagnetic waves by H.R. Herz (Germany)

1897年: マルコーニが初めて無線通信に成功  
First wireless communication by G. Marconi (Italy)

1904年: ヒュルスメイヤが“telemobilscope”を発明, レーダの起源?  
Invention of “Telemobilscope” by C. Hülsmeyer, origin of radar?

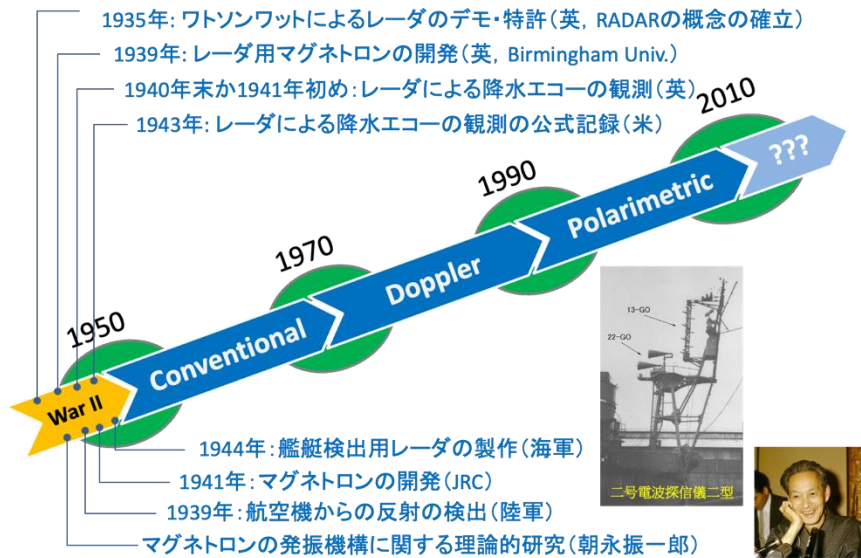
1926年: 八木・宇田が指向性アンテナを発明(八木・宇田アンテナ)  
Invention of “Yagi-Uda Antenna”, directional antenna (Japan)

1935年: ワトソン・ワットによるレーダのデモ, 航空機の検出  
The first demonstration of “radar” by Watson Watt et al. (Great Britain)

資料 1 電磁波の発見から Radar 概念の登場

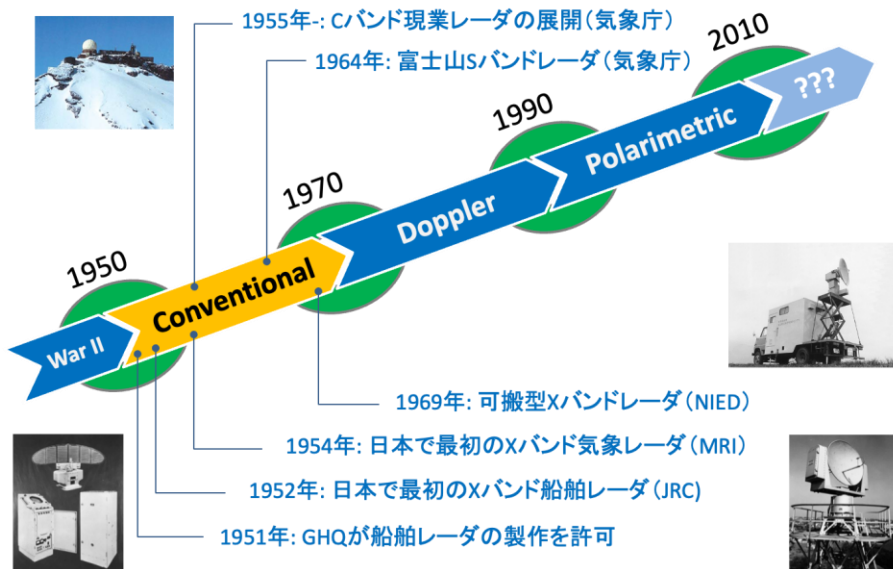
ーダ技術は戦時中の敵航空機の発見に大きく貢献した。戦後、多くの軍事用機器が民事用に払い下げられたが軍事用レーダも例外ではなかった。大学や研究所に払い下げられた軍事用レーダは気象レーダとして活用されるようになる（真木，資料3）。

### 気象レーダ夜明け前 THE PRE-DAWN OF WEATHER RADAR



資料2 気象レーダの歴史 (夜明け前)

### 在来型気象レーダ CONVENTIONAL WEATHER RADAR

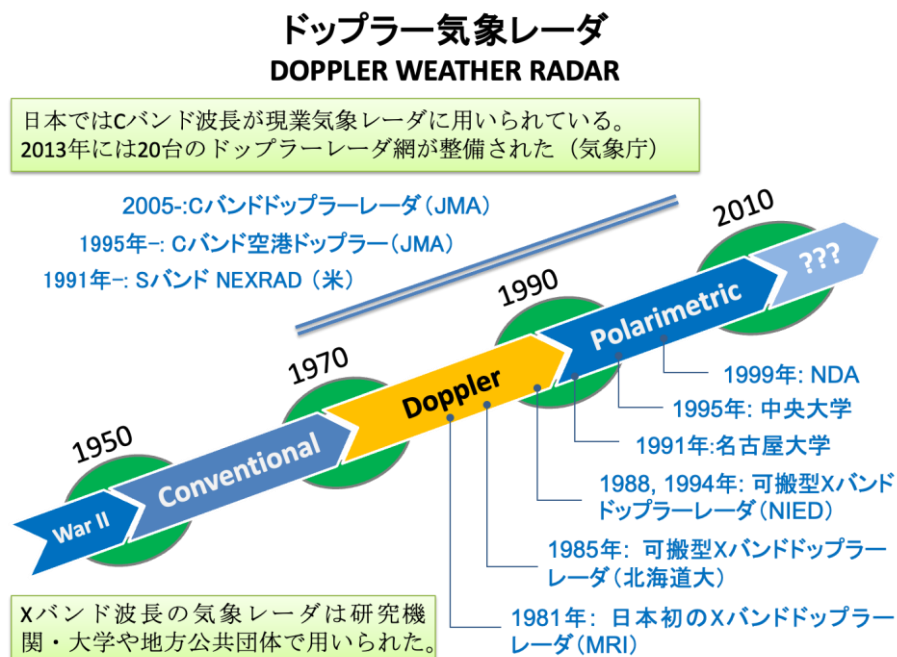


資料3 気象レーダの歴史 (在来型気象レーダ)

第2次世界大戦後、レーダの全ての構成物が進化しレーダ全体としても発展した。例えば送信管はマグネトロンから固体素子へ、アンテナはパラボラアンテナからフェーズドアレイに、ディスプレイはブラ

真空管 CRT からデジタル液晶へ、信号処理やアンテナの制御などにはコンピュータが使用されるようになってきている。計算機とネットワークの発展はリアルタイムでのデータ解析と伝送を可能にした。レーダのプラットフォームも地上から航空機、衛星搭載へと多様になっている。レーダの進化にはレーダ本体の発展に加えて関連した技術の進化も大きく影響している。

レーダ技術の発展において最も偉大な技術の一つがドップラレーダデータであろう。在来型レーダと呼ばれるレーダが受信電力しか測定できなかったのに対してターゲットの移動速度を測定できるようになったことである。1台のレーダでは動径方向の速度成分しか測定できないが複数台のドップラレーダを用いることでターゲットの三次元的な動きを捉えることができるようになった。ターゲットである降水粒子が無数に存在する雲がターゲットの場合には雲の中の粒子の相対的な動きから気流に関する情報が得られる。これにより積乱雲や台風などの激しい大気現象の構造を調べることができるようになった。動径成分のみの情報でもデータ同化技術を利用して降水予報の精度向上が図られるようになり、現在の気象レーダはドップラ機能が標準として備えられている（資料4）。



資料4 気象レーダの歴史（ドップラレーダ）

もう一つのレーダ技術の発展は偏波レーダの開発であろう。従来の短偏波レーダから得られる情報に加えてターゲット粒子の種類（雨か氷か）、形状、大きさ、粒径分布に関する情報が得られるようになり、特に降雨強度の精度良い推定が可能になった（資料5）。

下記の関連ウェブサイトなども参考になる。

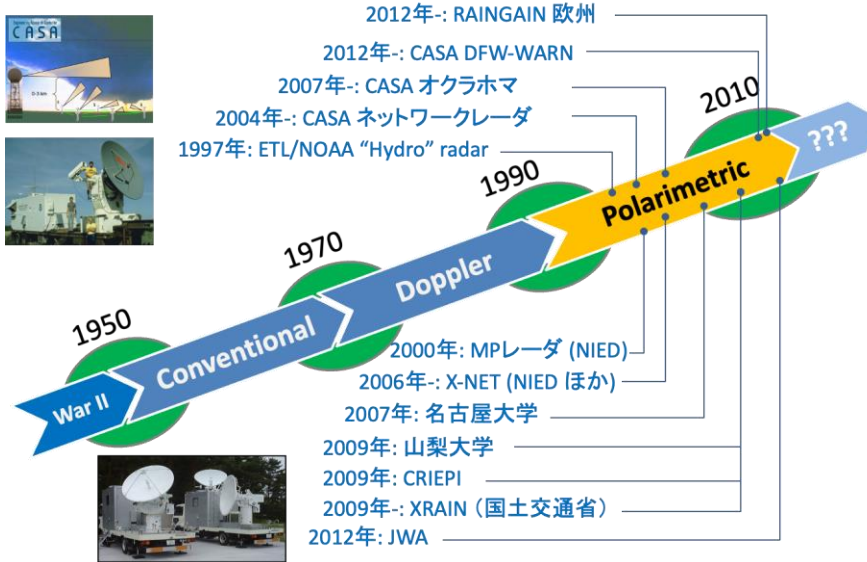
防災科研での研究用レーダの歴史（資料6）

総務省気象レーダの現状と課題 ([https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000413485.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000413485.pdf))

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

バイスタティックレーダネットワーク (<https://okinawa.nict.go.jp/COBRA/index5.html>)

# 偏波気象レーダ POLARIMETRIC WEATHER RADAR



資料5 気象レーダの歴史 (偏波気象レーダ)

## 防災科研の研究用気象レーダの歴史

観測・予測研究領域 水・土砂防災研究ユニット

**AD1969**  
初代レーダ

**人工降雨, 降雹**

利点を活かして、様々な場所へ移動して観測することができました。

**AD1988**  
**AD1994**

**ドップラーレーダ**

吹雪の発生機構の解明を目的としたレーダが導入されました。レーダが導かれた観測が特徴的でした。

**人工降雪**

**つくば域降雨実験**

**AD2000**

**MPレーダシステム**

マルチ偏極化 (MP) レーダの開発が完了しました。

**レーダ開発**

**雲レーダ**

**土砂災害発生予測**

**降雨量推定**

**MPレーダシステム**

**AD2006** X-NET

関東地方にある研究機関、大学が連携して、集中豪雨や突風を監視するレーダネットワーク (X-NET) の構築を進めています。参加機関は防災科学技術研究所、中央大学、防衛大学校、山梨大学、電力中央研究所、気象庁です。

**レーダネットワーク**

**首都圏**

**ゲリラ豪雨・都市型水害**

極端気象に強い都市創り

**X-NET**

**地吹雪の発生機構**

吹雪を引き起こす雷雲

**熱帯降水システム**

日豪共同研究

吹雪観測用ドップラーレーダ X-DOP (1988)

大都市は、局地的な豪雨 (いわゆる「ゲリラ豪雨」) に対して脆弱といえます。舗装道路や密集したコンクリート建物のために、局地的な豪雨が降ると雨水が一気に下水道へ流れ込み、排水処理機能がこれに追いつかないと雨水が下水道からあふれ出し、被害が発生します。

防災科研では、局地的な豪雨の監視と予測技術を開発するために、XバンドMPレーダを用いた研究開発をおこなってきました。2008年8月に東京都豊島区雑司が谷で豪雨災害が生じた際、MPレーダによって、従来レーダでは困難だった局地的な豪雨を捉えることに成功しました。現在、この成果を活用して、国土交通省河川局により、MPレーダネットワークが全国の主要都市圏等に整備されつつあります。

資料6 防災科学技術研究所の研究用レーダの歴史

## レーダの動作原理

レーダの動作原理の詳細は第2章で述べる。ここでは第1章の以下のページに出てくるレーダのタイプについて理解しやすい必要最小限のレーダ原理について説明する。

レーダの主な構成要素は次の4つである。

送信機：高周波信号を発生される装置

アンテナ：発生した信号を大気空間へ射出する装置

受信機：ターゲットから帰ってくる微弱信号を検出し増幅する装置

ディスプレイ：検出したターゲットの情報を表示する装置

初期のレーダではアンテナが送信機と受信機の両方に備えられたバイスタティックレーダが用いられた (Fig.1.1)。その理由の一つが送信波と連続波が用いられたために受信用のアンテナが必要だったためである。送信用アンテナからの高出力の電波が入ってこないように、受信用アンテナは通常ある距離をおいて配置されるか隣接して送信機アンテナ受信機がおかれる場合は両者の間に防護用の仕切り板がおかれる。Fig.1.1は電離層を検出するために用いられたバイスタティックレーダの模式図。

近代的なレーダでは送信信号をパルス状に整形して射出する。一つのパルスを射出後のわずかな空き時間を使ってターゲットから帰ってくる信号を受信できるので、送信アンテナと同じアンテナを受信アンテナとして利用できる。このようなタイプのレーダをモノスタティックレーダと呼ぶ。

1秒間に射出されるパルスの数は数百から数千個である。これにより極めて短時間でターゲットの位置を同定することができる。音速で飛行する航空機やミサイルを検出に必要な機能である (Fig. 1.2)。また、変動が激しい積乱雲や噴煙柱がターゲットの場合には数十個の～数百個のパルスからの信号を平均して有意な情報を取り出す。

アンテナには様々なタイプのモノがあるが、気象用にはパラボラアンテナが用いられる。アンテナを機械的に回転させることで3次元に分布するターゲットの情報を得ることができる。アンテナのスキャン方法として代表的なものを資料7に示す。なおスキャン方式の名前はレーダデータの表示方法から名付けられている。

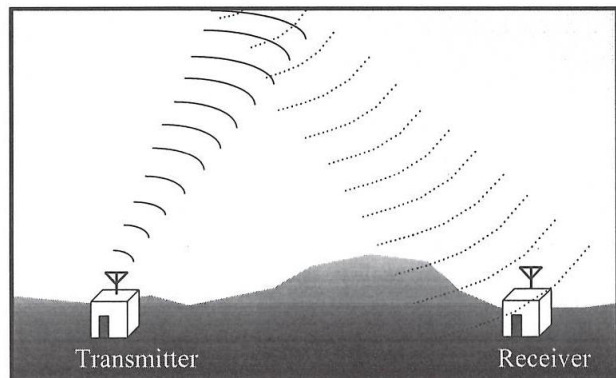


Figure 1.1 Bistatic radar sending its signal from one location and receiving it at another location. In this case, the target could be the ionosphere.

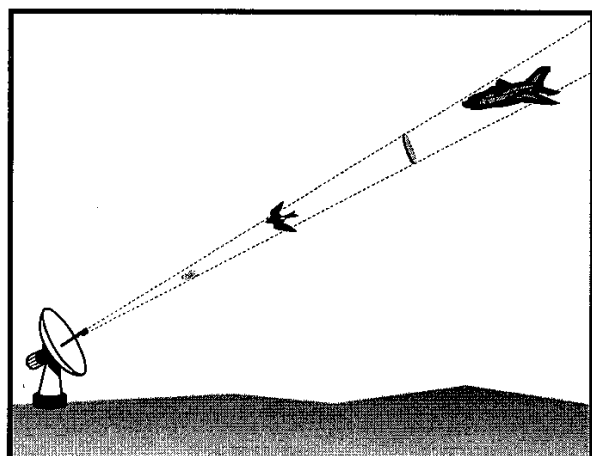


Figure 1.2 A radar looking in the direction of an insect, a bird, and an aircraft. Also shown is a short pulse of energy traveling outward at the speed of light (look fast). Note that nothing in this drawing is to the same scale!

PPI: Plan Position Indicator

SPPI: Sectoral PPI

CAPPI: Constant Altitude PPI

RHI: Range Height Indicator

SRHI: Sectoral RHI

POS: Positioning

このほかできるだけ観測時間を短くするための SPIRAL や 2 台のドップラーレーダビームの走査面を同じにするための COPLAN などのスキャン方法が提案されている。

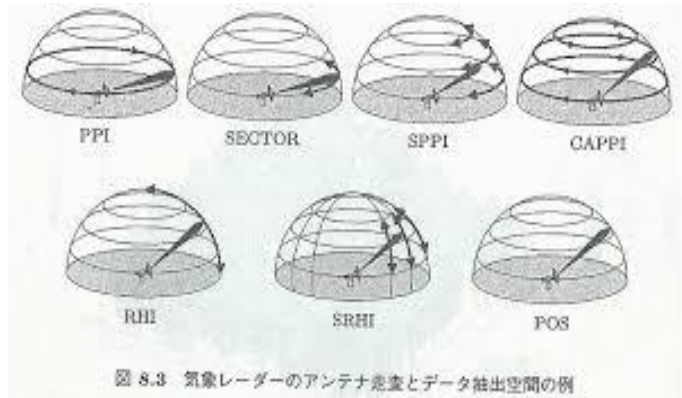


図 8.3 気象レーダのアンテナ走査とデータ抽出空間の例

資料7 アンテナの様々なスキャンモード (深尾・浜津, 2005: 気象と大気のリモートセンシング, 京都大学出版会). (図の SECTOR は必要ない? Maki)

受信信号はアンテナのスキャンモードに応じた表示方法により表示される (資料 8).

A-scope (または A-display)

- ・ 横軸に距離、縦軸に受信信号の強さをとり表示。
- ・ 特にレーダシステムのキャリブレーションに利用。

B-scope

- ・ 横軸に方位角、縦軸にレンジをとりレーダパラメータを表示。

PPI: Plan Position Indicator

- ・ 方位角を変えながら 360°全周をスキャンして得られる観測データを平面上に投影。
- ・ 降水の平面的な広がりを示すのに適している。
- ・ 観測仰角や地球表面の曲率のため、レーダから遠方に行く程、高い高度のデータが表示されることになる。

RHI: Range Height Indicator

- ・ ある方位角方向の鉛直断面にレーダパラメータを表示。
- ・ 特に対流性の降水の鉛直構造を示すのに適している。

CAPPI: Constant Altitude PPI

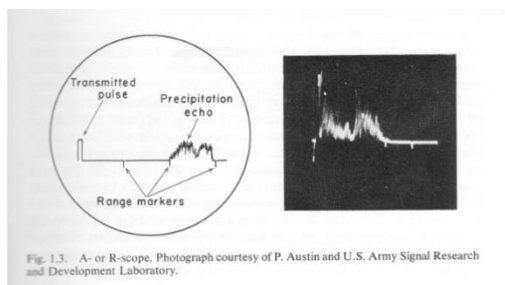
- ・ 等高度面上にレーダパラメータを表示。
- ・ 複数の CAPPI を表示することにより降水の3次元構造を表示。

3-D display

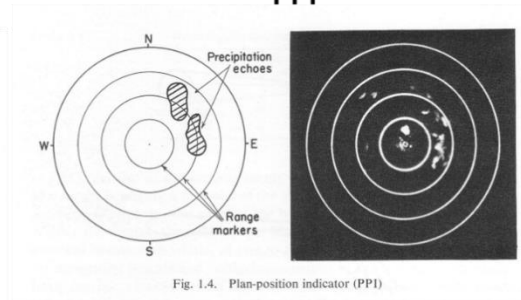
- ・ 3次元CGを利用した表示方法。

## レーダデータの表示方法

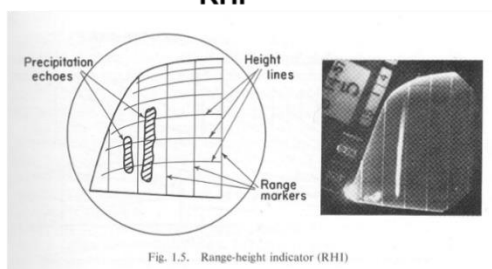
**Aスコープ**



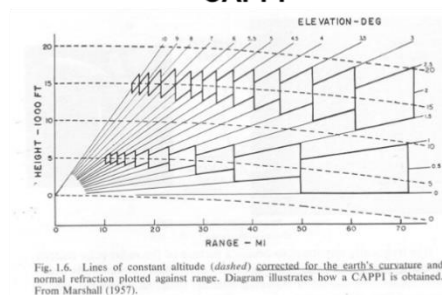
**PPI**



**RHI**



**CAPPI**



Battan (1973) Radar observation of the atmosphere

資料 8 代表的なレーダデータの表示方法 (Battan, 1973 より)

### レーダのタイプ

レーダのタイプを説明する場合、次の項目をもとに分類出来る。

アンテナの数：バイスタティック、モノスタティック

送信電波：CW, FMCW, パルス

発信器：マグネトロン, 固体素子

使用する周波数：Lバンド, Sバンド, Cバンド, Xバンド, Kuバンド, Kaバンド, Wバンド, 等

機能：ドップラーレーダ, 偏波レーダ, 二周波, 在来型 (最近は使われない)

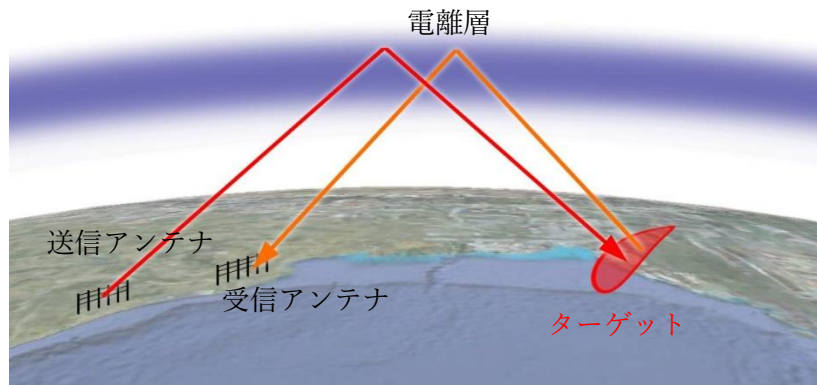
アンテナタイプ：パラボラアンテナ, フェーズドアレイ, スロットアンテナ

プラットフォーム：地上設置, 航空機搭載, 衛星搭載, 船舶

### モノスタティック vs. とバイスタティックレーダ:

前述したように送信アンテナを受信用にも使用するかどうかで分類される。モノスタティックレーダは送受信で同じアンテナを使用する。このため、送信電波はパルス状である。アンテナをスキャンすることでターゲットの3次元的な分布情報を取得できる利点がある。気象レーダはほぼモノスタティックタイプである。これに対してバイスタティックレーダでは連続波を使用するために送信アンテナと受信アンテナは別になる。その例としては、軍事目的で水平以遠のターゲットを検出する超水平線レーダ (Over the horizon: OTH) がある。OTHレーダは斜め上に向けて射出し、電離層によって反射する電波を利用して水平以遠のターゲットの有無を検出する (資料9)。





資料9 OTHの原理

CW vs. パルスレーダ

通常の気象レーダはパルスレーダである。CWレーダは野球やテニスの球速の測定や速度違反車の計測に用いられている。FMCWレーダは高感度、高空間分解能の観測が必要なレーダに用いられる。例えば、雲レーダ、Kuバンド高速スキャンレーダ (Maki et al. 2019,

<https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0630>)

など。

ドップラーレーダ:

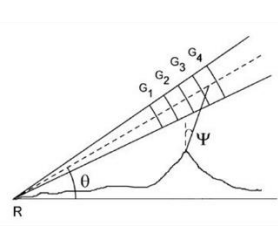
ドップラーレーダは気象レーダの歴史上 1960年代に開発が始まり 1980年代後半には現業化されており現在ではあたりまえに利用出来る技術となっている。火山噴火の噴煙柱の観測では VOLDRAD (資料 10) が有名である。

Donnadieu, F., G. Dubosclard, R. Cordesses, T. Druitt, C. Hervier, J. Komprobst, J.-F. Lénat, P. Allard, and M. Coltelli (2005). Remotely monitoring volcanic activity with ground-based Doppler radar. *Eos Trans. AGU*, 86, 201–204. doi:10.1029/2005EO210001.  
 Dubosclard, G., F. Donnadieu, P. Allard, R. Cordesses, C. Hervier, M. Coltelli, E. Privitera, and J. Komprobst (2004). Doppler radar sounding of volcanic eruption dynamics at Mount Etna. *Bull. Volcanol.* 66, 443–456.

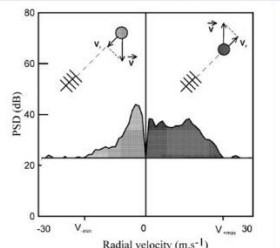


**VOLDRADの主な仕様**

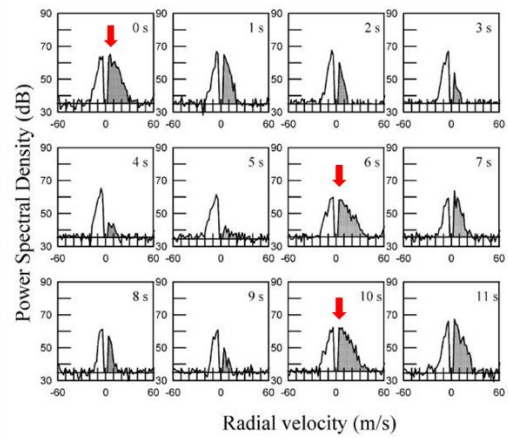
周波数	: Lバンド (1274MHz), 波長: 24cm
出力	: 200 W (平均), 60 W (ピーク)
パルス幅	: 0.4-1.5 μs
PRF	: 10 <sup>4</sup> または2x10 <sup>4</sup> Hz
アンテナ	: 八木アンテナ
観測距離	: 0.4~数km 距離分解能: 60 m-220m
データ収録	: 0.1秒毎
輸送・設置	: 金属箱 (60cm, 50kg) に収納
備考	: 2001年 (プロトタイプは1998年)



観測の模式図



火砕物の動きとドップラースペクトラム



VOLDRADによる観測から得られたドップラースペクトルの例 (Mt. Etna, 1秒毎)

資料10 VOLDRAD による噴煙観測

## 航空に用いられるレーダ

### ARSR : Air root surveillance radar 航空路監視レーダ

航空路を飛行する航空機を完成するための監視用レーダで、半径約 110km 以内の空域にある航空機の位置を探知し航空機の誘導や航空機相互間の間隔設定などをおこなう管制業務に使用される。

### ASR: Airport surveillance radar 空港監視レーダ

航空路を飛行する航空機を完成するための監視用レーダで、半径約 370km 以内の空空域にある航空機の位置を探知し航空機の誘導や航空機相互間の間隔設定などをおこなう管制業務に使用される。

### TDWR: Terminal Doppler Weather Radar 空港ドップラーレーダ

航空機の離着陸の際に影響を与える積乱雲からのダウンバース現象やウィンドシアを検出するためのドップラー気象レーダ。最近では偏波機能が付加されアイシングの予測などにも利用されてきている。

### ASDE: Airport Surface Detection Equipment 空港面探知レーダ

地上を走行する航空機や車両の位置を探知するためのレーダで、視界不良の際などに完成業務で利用されている。

### レーダトランスポンダ:

航空機の搭載されているレーダで管制塔からの電波を受信した際に航空機の位置情報（緯度経度および高度）を知らせるレーダ。

### 航空機搭載レーダ:

航空機に搭載された小型の気象レーダである。通常は機体先頭部のレードーム内に収納される。レーダアンテナを小型化する必要があるより短い周波数を利用する場合には電波の降雨減衰に注意する必要がある。

## 気象レーダ:

次世代レーダネットワーク (Next Generation Radar: NEXRAD) : アメリカ国立気象局 : National Weather Service: NWS), 連邦航空局 (Federal Aviation Administration : FAA), 米国国防総省 (Department of Defense: DOD) が運用する全米を網羅する S バンドドップラーレーダ網で 1988 年に運用が開始された。レーダデータはオンラインで閲覧できるようになっており大学での教育や研究、民間での利用が可能になっている。リアルタイムの情報例は NOAA 国立環境情報センター (NOAA National Center for Environmental Information: NCEI, 大気、沿岸、地球物理学、海洋学に関する世界最大級の研究アーカイブを管理) で閲覧可能である。 <https://www.ncei.noaa.gov/maps/radar/> 我が国ではデータ文科省と気象庁が運用する統合・解析システム (Data Integration and Analysis System: DIAS, <https://diasjp.net/>) に相当?

我が国の現業気象レーダネットワークとしては気象庁が展開する C バンド偏波レーダネットワークと河川局が運用するエックスレイン (Extended Radar Information Network: XRAIN) がある。エックスレインはゲリラ豪雨の監視を目的に 2009 年に X バンドマルチパラメータレーダの現業展開が始まり 2016 年には現業 C バンドマルチパラメータレーダの情報が加えられ、全国の合成雨量情報が提供されるようになった。データは前述の DIAS からダウンロードできるようになっている。京大防災研では過去の桜島噴火に伴う降灰情報データベース (Database of Sakurajima Volcanic Ash Fall Distribution: VASH) で公開されている (真木ほか (2023) 京大防災研年報 No.66B, 100-110) および web サイト <https://vash.jp/>).

## 火山噴煙に用いられた研究用レーダ

国内外で火山噴煙の観測に気象レーダが用いられるようになったのは1980年代後半である（資料11を参照）。桜島では様々なタイプのレーダによる噴煙観測（レーダマルチセンシング）が京大防災研一般共同研究（研究代表：鹿大中村教授）が進められている（資料12を参照）。

Radar	Main specifications	Volcano	Year	References
Modified Micro rain radar	Doppler, Pointing, K-band	Stromboli, Italy Merapi, Indonesia Mt. Erebus, Antarctica Santiaguito, Guatemala Colima, Mexico Yasur, Vanuatu	1996, 2000, 2001, 2008, 2011 2001-2006 2005/06 2007 2007- 2008	Hort and Seyfried (1998); Urbanski et al. (2002); Hort et al. (2003); Scharff et al. (2008); Hort et al. (2010); Hort et al. (2013) Voge et al. (2005); Hort et al. (2006); Voge and Hort (2008a, b, 2009) Gerst et al. (2008, 2013) Scharff et al. (2012, 2014) Scharff(2012) Meier (2014)
VOLDRAD VOLDRAD2	L-, Doppler, Pointing L-, Doppler, Pointing	Etna, Italy Arenal, Costa Rica Popocatepetl, Mexico Yasur, Vanuatu	1998, 2001 2004, 2005 2004- 2008 2009-	Dubosclard et al. (1999, 2004) Donnadieu et al. (2005), Gouhier and Donnadieu (2008, 2010, 2011) Valade and Donnadieu (2011), Donnadieu et al. (2011); Valade et al. (2012) Donnadieu et al. (2012) Donnadieu (2012) Donnadieu (2012); Gouhier et al. (2012a, b).
VOLDRAD2B				
Mobile MP-Ka KuRAD MP-X Small MP-X Marine	X-, Dop, scanning Ka-, Dop, scanning, NIED Ku-, Dop, rapid scanning, X-, Pol., Scanning, MRI X-, Pol. Scanning, DPR1 X-, RHI, 48 rpm X-, Dop., RHI, 24 rpm, solid	Sakurajima, Japan  Sakurajima etc.	2011 2015 2017- 2017- 2017- 2018, 2019, 2021- 2021-	安田ほか (2012), Sakai et al. (2013) Maki et al. (2016) Maki et al. (2019), 佐藤 (2018) MRI/JMA 中道ほか (2018) 真木ほか (2020), Maki et al. (2020) 西ほか (2022)

資料11 火山噴煙の観測に用いられた気象レーダのリスト

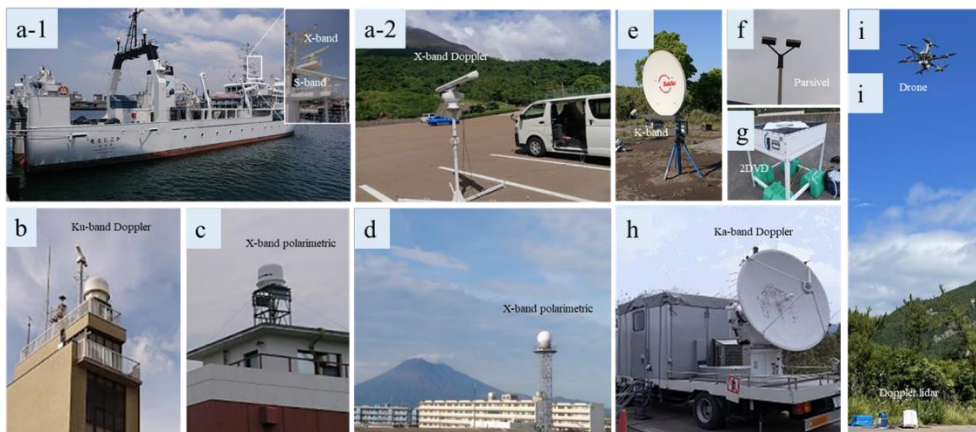


写真2 桜島火山の噴煙のモニタリングに利用されている様々なタイプの気象レーダ

- a-1. 練習船「かごしま丸」の2周波ドップラーレーダ（鹿大水産学部）； a-2. Xバンド固体化レーダ；
- b. Kuバンド高速スキャンドップラーレーダ（鹿大・阪大）； c. 小型X-band 偏波レーダ（京大防災研）
- d. 現業X-band 偏波レーダ（国土交通省）； e. Kバンドポインティングドップラーレーダ（ハンブルグ大学）
- f. パーシベル（京大防災研）； g. 2DVD（気象協会）； h. Kaバンドドップラーレーダ（防災科研）
- i. ドローンとドップラーライダー（京大防災研・気象協会）

資料12 桜島における噴煙のレーダマルチセンシング研究