

第 10 章 気象レーダの高度な利用

M. Maki, 2025.01.05

要約

これまで気象レーダの基礎理論と気象学での利用について述べてきた。気象レーダの利用に関しては単純な記載を遥かに超えたものがほとんどであった。多くのジャーナルやコンファレンス論文を読むと研究者が様々な目的で気象レーダを利用してきたかがわかる。以下の節では気象レーダの高度な利用例のいくつかについて少し詳しく見ていく。

気象レーダの高度な利用例として「降雨の測定」、「二波長レーダ」、「偏波ダイバーシティ」、「デュアルドップラーレーダ処理」が挙げられている。本書が出版された年が 1999 年であるため「降雨の測定」と「偏波」に関する記述が極めて限定的である。2000 年代は Xバンドの偏波レーダが実用化され降雨の測定に関する Xバンドレーダのそれまでの評価が 180° 変わった時期である。このあたりのことは日本気象学会岸保（がんば）賞の受賞記念講演にまとめられているので参照してほしい。

真木・上田・中北(2017): X-バンド偏波レーダーによる降水観測技術の開発及び社会実装 : 2016 年度岸保賞受賞記念講演. 天気 64 (12), 849-872, 2017-12

Web Site : <http://id.ndl.go.jp/bib/028773581>

または <https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R000000004-I028773581>

降雨の測定

○第二次世界大戦が終了して軍事用レーダが大学や研究機関に払い下げられ気象レーダとしての利用が開始される。気象レーダの最初の定量的利用が降雨の推定 (QPE : Quantitative Precipitation Estimate) であった。それから約半世紀にわたる研究の中で調べられたテーマを挙げると以下のようなものがある。

▶ 気象学での利用

- 降雨のタイプ (層状性、対流性、山岳性など) による Z-R 関係式の違い
- Z-R 関係式の変動とその理由 サンプリングボリューム・場所の違い、レーダハードウェアの調整不足
- 気象学的な必然理由 雨滴の粒径分布の変動
- メソガンマ~メソベータスケールの現象 (積乱雲、スコールライン、台風のレインバンドなど)、強風や突風 (シビアストーム、竜巻、ダウンバースト、ガストなど) の理解

▶ 水文学での利用

- 地上雨量計との比較結果、「レーダで求めた雨量は信頼できない。地上雨量計による校正が必要不可欠」という常識が約半世紀の間続く。
- 地上雨量計ネットワークの展開 (アメダス、東京都、国土交通省河川局など)
- レーダアメダス解析雨量 (気象庁)

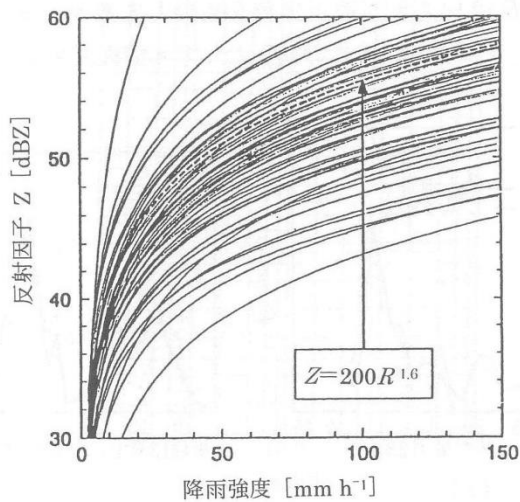


図7.2 69種類のZ~R関係 [Battan, 1973より引用]

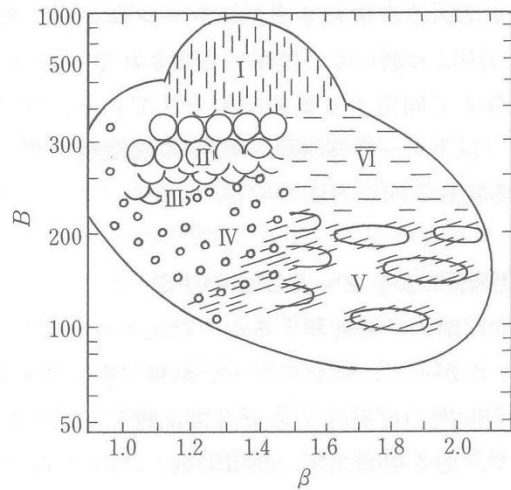


図7.1 雨滴のレーダ反射定数 [Fujiwara, 1965より引用]

$$Z = \alpha R^\beta$$

(Z[mm⁶m⁻³], R[mmh⁻¹])

- I: 雷雨(中程度の強さ)
- II: 雷雨(強い団塊状)
- III: 発達段階初期の対流性セル
- IV: 線状に配置する小さな対流セル
- V: 層状性エコー
- VI: 雷雨(消滅期)

- ① レーダビームが雲頂以上になる
- ② レーダビームより下のところで水滴が蒸発する
- ③ レーダビームの下のところで地形の影響で降雨量が増加する
- ④ 雪片の融解により大きなレーダ信号を受ける
- ⑤ 大きな水滴が不足しているために霧雨の強度を過小評価する

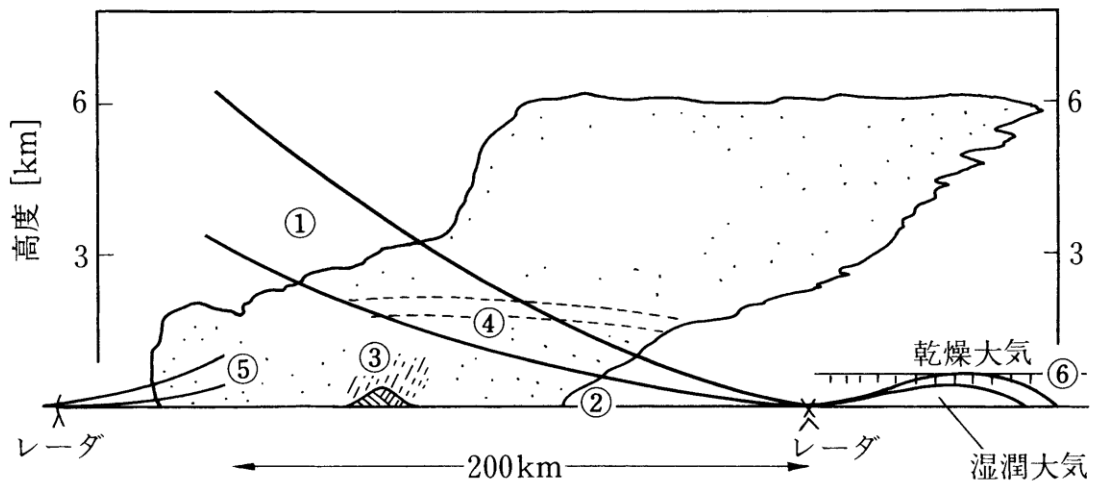


図6.15 レーダ観測における誤差要因を示す概要図 [Browning, 1981より引用]

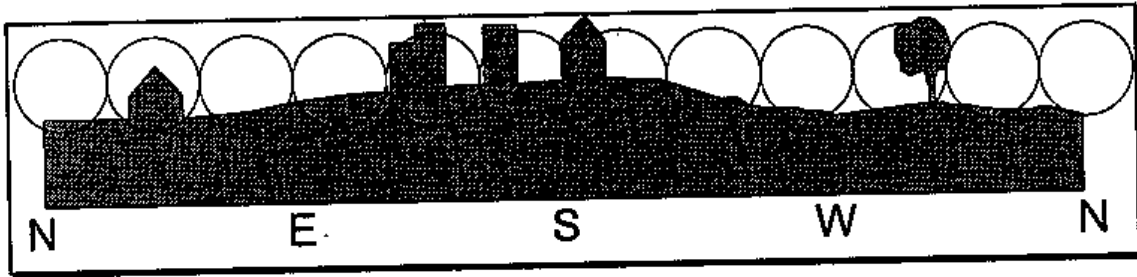


Figure 10.1 Schematic of the beam blockage that might occur for a radar scanning horizontally around a radar. Each circle represents the size of the mainlobe of a radar antenna beam pattern looking in each direction. For real radars, there might be as many as 360 beams, not just the dozen shown here.

二波長レーダ

➤ 電の検出

- 米国で 1960 年代に研究用途に開発 (ロシアでは現業に近い形で運用)
- S バンド (10cm) と X バンド (3cm) の二波長 理由: レーラー散乱とミー散乱を利用
- 電シグナル H の提案

$$H = 10 \log_{10}(z_{10}/z_3) \quad (10.1)$$

ここで z_{10} 、 z_3 はそれぞれ 10cm 波長、3cm 波長のレーダ反射因子 (単位は mm^6/m^3)

- レーダアンテナの製作や観測方法に高度な技術が求められる。
ビームパターン, サイドロブ, 同じサンプリングボリュームを照射する必要がある

➤ 降雨量の推定

- 降雨減衰の影響を受けない S バンドと減衰の影響を受ける X バンドを利用
- S バンドの代わりに C バンドを利用する場合もある
- 両波長のレーダ反射因子の減衰差から降雨強度を求める
- 減衰差は雨滴粒径分布の変動の影響を受けにくいという利点

➤ 火山岩塊や礫の検出 (レーダマルチセンシング)

- S バンドと X バンドの船舶レーダ (PPI 観測) と X バンド船舶レーダ (RHI 観測)
X バンド MP レーダ (RHI 観測)
- PPI 観測で岩塊・礫の緯度経度座標を, RHI 観測で高度情報を, MP レーダで形状を
- 可能かどうかの検証を計画 (ヘリコプタ, 疑似岩塊, コーナリフレクタ)

偏波ダイバーシティ

- 偏波面の定義：電場の振動方向
- ダイバーシティ = 多様性
- 円偏波（右回転、左回転）、直線偏波（水平、垂直）
- 円偏波抑圧比 $CDR = 10 \log_{10}(z_{\parallel}/z_{\perp})$ ； $CDR = 0$ （板状、針状）， $-\infty \text{dB}$ （球）
- 直線偏波抑圧比 $LDR = 10 \log_{10}(z_H/z_V)$ ； $LDR = 0$ （板状、針状）， -40dB （球）
- LDR の利用 融解層の検出： 氷粒子 (-25dB)， 融解層 (-15dB)， 雨 (-30dB)
- レーダ反射因子差 $Z_{DR} = 10 \log_{10}(z_h/z_v)$ $Z_{DR} = 0$ （小さな雨滴） $\sim +5 \text{dB}$ （大きな雨滴）
- Z_{DR} の測定原理 図 10.2（偏波切り替えスイッチ， 1台の受信機を使う古いタイプ）
- 偏波レーダが実用化され， 降水粒子の判別アルゴリズムが提案され実用化されている。
- 降下火砕物の判別はまだ（火山岩塊や軽石などは可能ではないか？凝集粒子を検出できるか？）

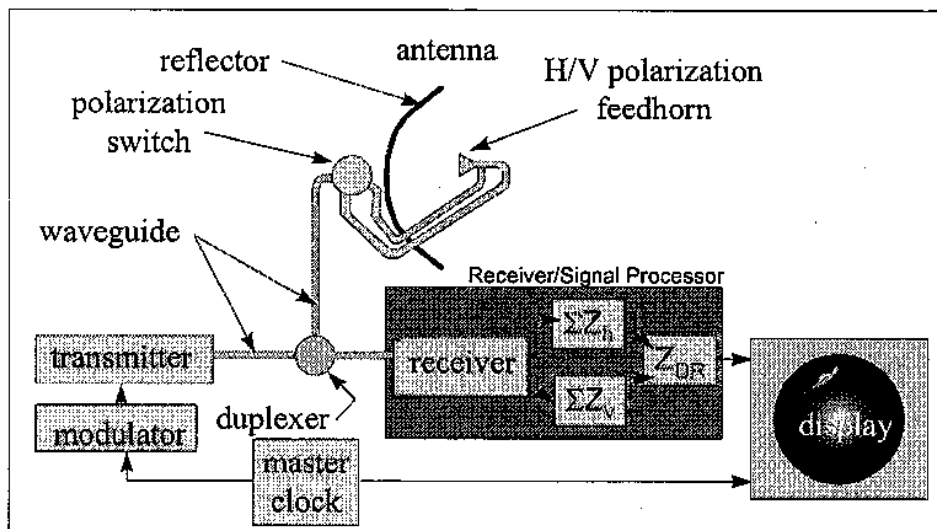


Figure 10.2 Block diagram of a radar to measure Z_{DR} .

デュアルドップラー処理

注意 Figure 10.1 (p.215) は Figure 10.3 の間違い, Figure 10.2 (p.216) は Figure 10.4 の間違い

- 1台のドップラーレーダ観測から求まる風の場合：一様な（線形な変化）風で VAD や VVP などのアルゴリズムが開発されている。但し、現在ではあまり使われなくなっている。
- 3次元空間の風を求めるためには複数台のドップラーレーダによる観測が必要。
- 2台の場合：水平風成分は2台のドップラー速度から推定, 鉛直成分は連続の式から推定する。この時、粒子の落下速度は反射因子から推定する。
- 3台以上の場合、水平成分、鉛直成分は観測されたドップラー速度から推定。
- 根本的な問題点としてパラボラアンテナを使った従来のドップラーレーダの場合、3次元空間の観測に5分~10分程度の時間がかかるがこの間に風の場合は変化している。
- これを解決するレーダとしてフェイズドアレイレーダが開発された。30秒程度で三次元空間のデータを取得できるようになった。
- 火山噴煙柱の場合、複数台の船舶レーダあるいは SVO の XMP レーダの RHI 観測から噴煙柱内の鉛直流に関する情報が出せるかもしれない。

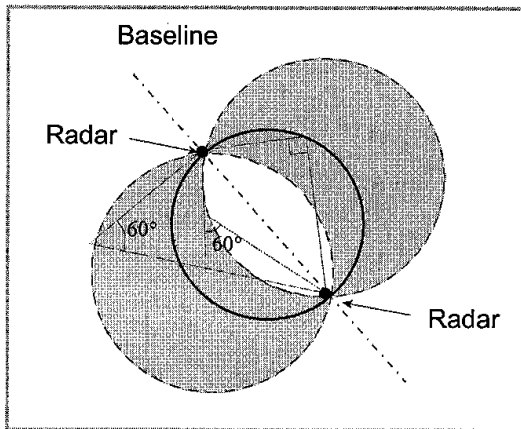


Figure 10.1 Schematic of the location of dual-Doppler lobes for a pair of Doppler radars. Useful data would be limited to the shaded area within the larger circles (except for the area within these circles which is along the baseline). The radar beam intersects at 90° along the central circle. The beams intersect at 60° along the dashed circles. Useful data can sometimes be obtained by enlarging the circles so the beams intersect at 30° .

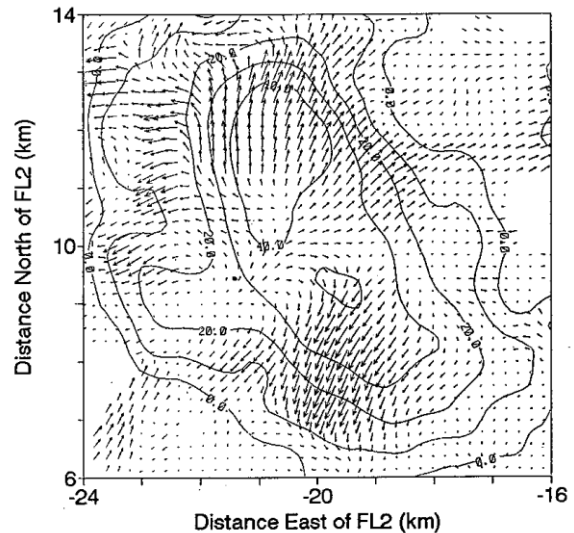


Figure 10.2 Dual-Doppler analysis of a microburst near Memphis, Tennessee, at 144035 CST on 9 August 1985. The data for this came from the Lincoln Laboratory FL2 and the UND radars.