

II-45

3次元ドップラーレーダによる降雨観測

北海道開発局開発土木研究所 正員 谷 昭彦

正員 西村 豊

正員 中津川 誠

まえがき

降雨域は、平面的な広がりだけではなく、その特性に応じて鉛直方向にもバラエティーのある3次元的な構造をもつ。一般的な業務用レーダは、種々の制約から固定仰角で運用されている PPI観測の例が多く、分解能も観測範囲が広いことやデータ処理量が莫大となるため粗くせざるを得ない。そこで、本研究では北海道大学低温科学研究所の3次元ドップラーレーダによって詳細な観測を行い、3次元的な降雨の構造をみた。さらに、業務用レーダの観測結果を検証する意味で北海道開発局道央レーダから得られたデータと、分解能の細かい3次元ドップラーレーダのデータを比較し、降雨場全体の降雨強度のばらつきに比べ、道央レーダの分解能である3km×3kmというスケールの中にも降雨強度に著しいばらつきが見られることを示した。また、分解能の異なるレーダが、流域スケールで降雨の平均値と空間的なばらつきをどの程度とらえ得るかを示し、業務用レーダが降雨分布特性を良く観測できていることを明らかにした。

1. 降雨観測の位置と方法

1-1 レーダ観測の諸元

3次元ドップラーレーダは、北大低温科学研究所が所有しているもので、北海道開発局開発土木研究所石狩水理実験場（緯度 43° 12' 46.7"、経度 141° 23' 47.8"）内に設置して観測を行っている。3次元ドップラーレーダは、観測範囲が半径40km（平成2年度の観測からは64kmにバージョンアップされている。）であり、方位方向に1°、動径方向に250mの空間分解能を有し、観測時間間隔は約8秒である。その名称は、様々なアンテナの走査によって PPI（ある仰角で水平断面の反射電波を受信）、RHI（鉛直断面の反射電波を受信）、ASI（任意高度・任意位置の電波を仰角を変えることで受信）および VAD（ある仰角のドップラー速度を受信）などのモードを自由に選んで、3次元的な観測ができることを意味する。観測範囲を図1に示す。

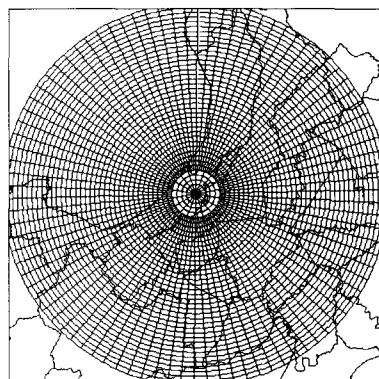


図-1 3次元ドップラーレーダの観測範囲と観測メッシュ系

1-2 レーダデータの処理方法

レーダの電波受信電力は、下記のレーダ方程式によって表される。

$$P_r = R_c \cdot \frac{F \cdot Z \cdot 10^{-12}}{(r \cdot 10^5)^2} \cdot 10^{-0.2K_R \cdot r} \cdot 10^{-0.1L} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\pi^3}{2^{10} \cdot l \cdot n 2} \cdot \frac{P_t \cdot h}{\lambda^3} \cdot 10^{0.2G} \cdot \theta \cdot \phi \cdot \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \quad (2)$$

Investigation of Rainfall Characteristics using Three-dimensional Doppler Radar

by Akihiko TANI, Yutaka NISIMURA and Makoto NAKATUGAWA

ここで、 P_r は平均受信電力 (dB)、 R_e はレーダ定数項 (dB)、 P_t は送信尖頭電力、 h はパルス幅 ($h=c\tau$ 、 c は光速) (μs)、 λ は送信波長 (cm)、 G は空中線利得 (dB)、 θ と ϕ は各々水平・垂直方向のビーム幅 ($^\circ$)、 r はレーダサイトからの距離 (cm)、 ϵ は誘電率 (ファラッド/m)、 Z はレーダ反射強度因子 (dB)、 R は雨量強度 (mm/h)、 k_g は大気ガスによる減衰 (dB/km)、 L は給電系損失 (dB)、 F は補正係数を表す。以上の定数

表-1 レーダ諸元

項 目	道央レーダ	3次元ドップラーレーダ
送信尖頭電力 P_t	250 km	40 km
パルス幅 τ	2 μs	0.5 μs
送信波長 λ	5.7 cm	3.18 cm
空中線ビーム幅 垂直	1.02°	1.1°
水平	1.03°	1.1°
空中線利得 G	45 dB	43 dB
給電系損失 L	5.1+2.5 dB	5 dB
大気減衰 K_g	0.01 dB/km	0.01 dB/km
補正係数 F	1/4	1
最小受信電力 S_{min}	-110 dB	-110 dB

に関するレーダの諸元を表1に示す。なお、参考として北海道開発局道央レーダの諸元も示してある。また、上式中の誘電係数 $|\epsilon - 1|/(\epsilon + 2)$ は雨の場合0.93である。以後の検討においては基本的に上式で求めるレーダ反射強度因子 Z を比較の対象とする。因みに Z は実際上dB (デシベル) 値として得られるが、慣例的にその値を dBz (デシベルゼット) 値と称している。この値はいわばレーダの機械性能の違いによる影響を除いて同一の基準のもとで表した反射電波強度と言える。なお、これを実際の雨量強度に変換するときは、次のレーダ方程式による。

ここで、 B 、 β はレーダ定数で、雨や雪のタイプによって異なり、実際の降雨量との対応関係から決めていかなければならない。ちなみに実運用上の観点から北海道開発局道央レーダでは降雨時に $B=180$ 、 $\beta=1.6$ ($Z \leq 36.99$ dBz) ないし $B=410$ 、 $\beta=1.2$ ($Z \geq 36.99$ dBz) という値が用いられており、本レーダの反射強度因子を雨量に換算する際もこれを参考値として使うこととする。3次元レーダの大きな特徴は ASI (Arbitrary Section Indicating) モードの観測ができるということにある。これは30 rpmの高速でアンテナを360°回転させ、仰角を0°から30°まで1°間隔で繰り返すことによって3次元データを得るものである。観測した際の生データは極座標系で得られるが、データの処理過程において直交座標に変換され、さらにフィルタリング操作によって平滑化されて表示される。この時、任意等高度データ (CAPPI) を抽出して表示することも可能である。なお、設定仰角に応じてグラウンドクラッターや遮蔽の現れる個所は解析の対象からは除いている。

2. 観測結果

2-1 観測された場の状況

ここでは、1989年9月3日と10月17日の降雨事例について検討した。図2には地上天気図を示す。9月3日には太平洋高気圧から暖かく湿った空気が吹き出し、日本列島上に前線帯が形成される中、特に温暖前線の進行方向前面に強い降雨がみられ、石狩川流域においては夜半に降雨のピークをむかえた。一方10月17日には、日本海西部に発生した低気圧が発達しながら北東方向に進み、北海道上を通過した後、寒気が南下し冬型の気圧配置となっており、午後にはそれに伴う降雨が石狩川流域にもたらされていた。図3にはゾンデデータから得られた温位の鉛直分布を示す。9月3日21時には500mb (約5500m) 面より下層の大気は飽和状態 (偽相当温位が飽和相当温位のラインと一致する状態) にあり、鉛直方向に高い地点まで及ぶ対流現象によって降雨のもたらされていることが推察できる。また、10月17日9時のゾンデデータからは、気圧高度700mb (およそ3000m) 以下に湿潤な大気が観測されており、比較的下層での対流現象によって降雨がもたらされていることが類推できる。なお、観測を行った時間帯 (17日14時前後) の地上気温は、当所石狩水理実験場の総合気象観測システムで6℃程度の値が観測されており、気温減率の概略値0.6℃/100mからすると0℃線、すなわちブライトバンドは高度1000m付近にあることが推定される。

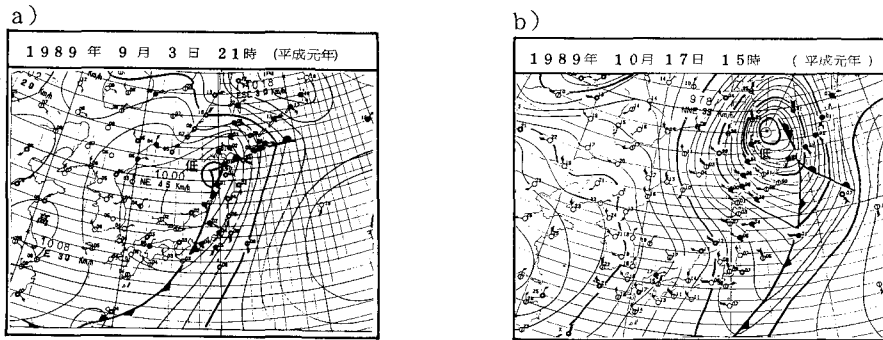


図-2 天気図

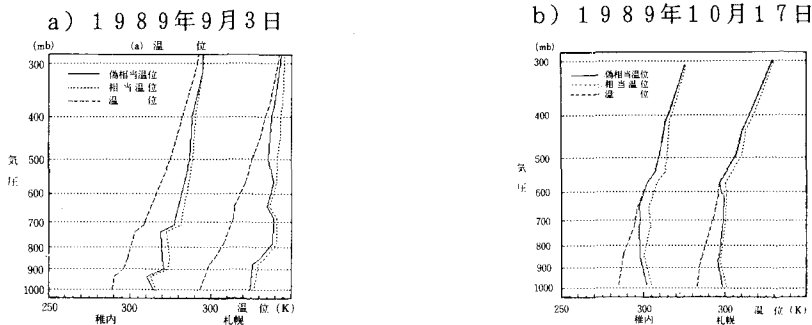


図-3 温位解析図

2-2 降雨場の3次元構造

3次元ドップラーレーダによる観測からは、雨域の平面的な広がりだけでなく、鉛直分布が明らかにされる。特に鉛直方向のプロファイルは、降雨の発達・減衰の過程、また層状性・対流性といった降雨のタイプによって大きく様相が異なるので、これを見ることで、降雨の特徴を踏まえた観測結果の評価が可能となる。図4にはこの時の降雨バンドに沿ったラインのRHI画像を示す。9月3日の事例では、鉛直方向に立ったエコーが現れていて、背の高い対流雲の存在が示されている一方、10月17日の事例では、対象的にエコーは下層を中心にみられ、その高さは約3000mであり、先に推察したようにブライトバンドも約1000mの高度に現れている。後者のような場合、固定仰角のPPI観測の場合、下層を捉えるか、上層を捉えるかで結果に顕著な違いの現れてくることが予想される。図5には高度0.5kmと2kmのCAPPIの画像を比較したもののだが、下層で現れている南北方向の強いバンドは、上層の2kmでは顕著でない。つまり、このようなタイプの降雨の場合、上層付近の観測のみでは雨域の捕捉が的確になし得ない場合があることを示唆するものである。これは、地上雨量を初期情報とする出水予測の精度に影響を及ぼす可能性がある。

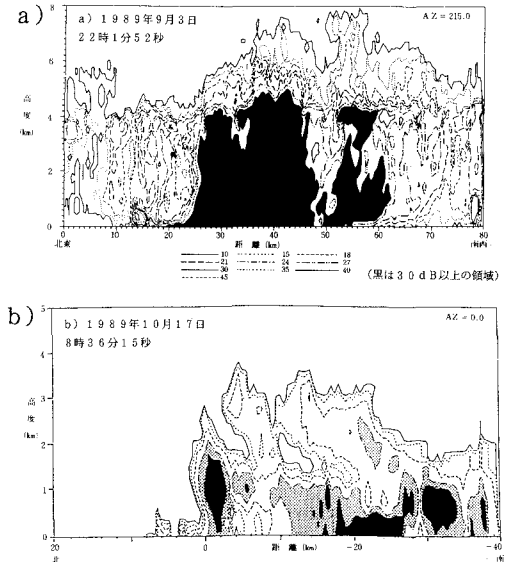
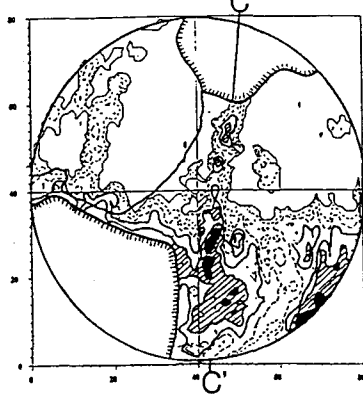


図-4 RHI画像

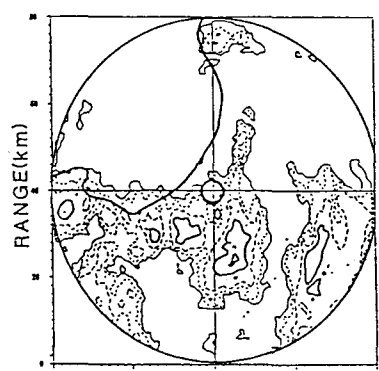
CAPPI 89/10/17, 8:49:30 HEIGHT= 0.5KM



a) 高度 0.5 km

10
25

CAPPI 89/10/17, 8:49:30 HEIGHT= 2.0KM



b) 高度 2 km

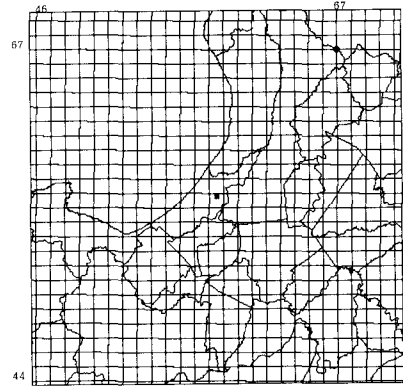
15 20
30 35 dBZ

図-5 CAPPI 画像

3. 実用型レーダで得られたデータとの比較

3-1 両レーダの観測位置関係

今回実用型レーダとして北海道開発局道央レーダを検討対象にとりあげ、その空間分解能で捉えられ得る降雨特性について3次元ドップラーレーダとの比較によって考察した。本レーダは、滝川市の南西約17kmにあるピンネシリ山の山頂（標高1,100m）に設置されており、レーダサイトを中心に定性観測の半径198km、定量観測の半径120kmの範囲をカバーしている。この定量観測範囲内では方位方向に 2.8125° （ 360° を128等分）、動径方向には3kmの空間分解能をもち、降雨観測時には仰角が 0.4° のPPI観測がおこなわれている。データは5分間平均値として出力され、先に示したレーダ方程式などによって処理されて、矩形メッシュの降雨情報として業務用に提供される。ところで両レーダの比較を容易にするためには図6に示すようにデータは直交メッシュに変換した方がよい。すなわち水平方向においては、道央レーダデータは $3\text{km} \times 3\text{km}$ の直交メッシュであらわされ、そこに含まれる $0.25\text{km} \times 0.25\text{km}$ メッシュの3次元ドップラーレーダの結果と比較することとなる。加えて、道央レーダは固定仰角で運用されているので、観測高度は定まっており、鉛直方向にも同一の対象を観測するならば、3次元ドップラーレーダの仰角を走査して観測高度を一致させるようなことをしなければならない。図7に



●：道央レーダサイト ■：低温研レーダサイト

道央レーダ3km直交メッシュ

図-6 レーダ直交メッシュ系

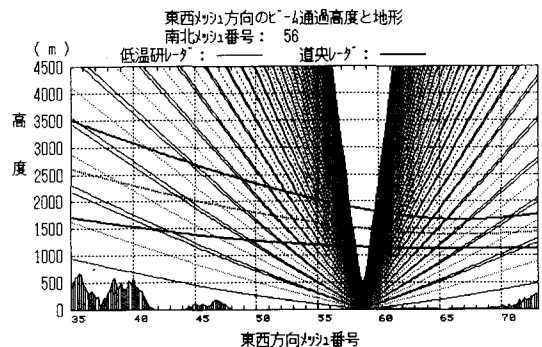


図-7 レーダのビーム通過位置

は道央レーダのビーム通過個所と、3次元ドップラーレーダのASIモードでのビームの位置を示している。図中のメッシュ番号は、図6と対応している。これを見ると道央レーダビームの通過位置は札幌、石狩近辺で1000～2000m 付近にあり、比較の際は両レーダのビーム高度の位置関係を明らかにしておく必要がある。

3-2 データの空間的ばらつきについて

道央レーダのデータは、空間的におよそ 3km 四方のデータが平均化されて出力されているが、対流セルのスケールは数百メートルのオーダー（メソγ）であり、観測メッシュ内にも降雨強度にかなりのバラエティーが内在されることが予想される。これを水平方向メッシュで0.25km と分解能の細かい3次元ドップラーレーダによって調べることとする。図8には 9月3日の事例について両レーダの反射強度因子の時間変化を示している。この時3次元ドップラーレーダ

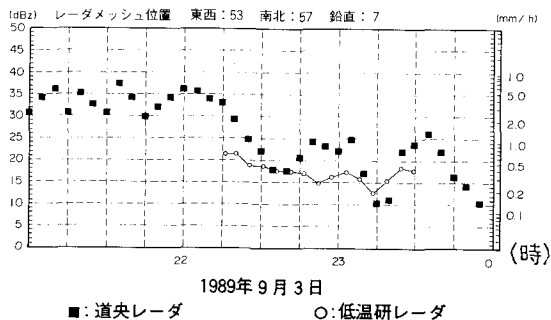


図-8 レーダ反射強度因子の時間変化

のデータについては ASIで得られたデータから道央レーダのビーム高度と一致する位置、広がり（ビーム幅）を抽出して比較の対象としている。これを見ると平均値としては互いの結果が良く一致していることが確認できる。これは同一の対象を観測しているので当然とも言えるが、3次元的な観測を行わない限りはこのような検討は実現できない。ただし、ある程度観測高度に差があっても、反射強度因子の平均値についてはおおよその一致がみられていた。そこで、次に3次元ドップラーレーダの結果を用い、一辺 3kmのメッシュにどの程度反射強度因子の空間的ばらつきがみられるかを平均値比 $Rave_i$ と変動係数比 Rcv_i の関係でみてみた。これらは次のように定義される。

$$Rave_i = \mu_i / \mu_T, \quad Rcv_i = Cv_i / Cv_T \quad (4)$$

ここで、 i はメッシュ番号、 μ_i は個々の3kmメッシュの反射強度因子平均値、 μ_T は全メッシュの反射強度因子平均値、 Cv_i は個々のメッシュデータの変動係数、 Cv_T は全メッシュデータの変動係数を示す。なお変動係数とは標準偏差と平均値の比で示される無次元量である。これらの指標は、全体の平均値と比べて個々のメッシュ平均値やばらつきがどの程度異なっているかをみたものとなっている。よって、 $Rave_i$ が1に近いほどそのメッシュは平均的に全体と類似しており、 Rcv_i が1に近いほどそのメッシュは全体と同じばらつきを示し、また1より大きければメッシュ内では全体の場で代表し得ない程度のばらつきが含まれていることを意味する。図9は 9月3日の事例について両者の関係をみたものである。この場合、 $Rave_i$ は1近傍に集まっているので、平均的には個々のメッシュと全体の場に類似性があるとして、雨は空間的に一様に降っているように

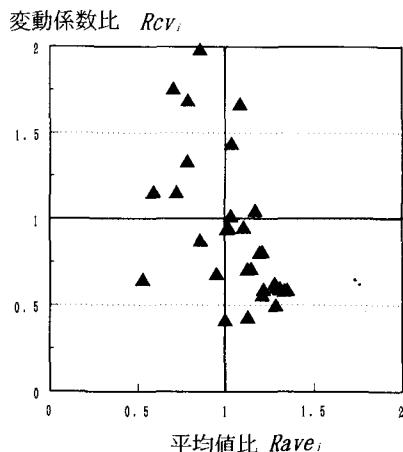


図-9 3次元ドップラーレーダ観測値の平均比と変動係数比 (1989年9月3日)

みえるが、 Rcv_i にはバラエティーがあって、あるメッシュでは空間的に著しいばらつきがみられる。ただし、 Rcv_i は1を下回るものが比較的多いことから、事例によっては各メッシュ内部のばらつきよりも全体のばらつきが降雨の空間特性を代表するものとなる可能性も示唆される。これについては多くの事例をみて判断していく必要がある。以上のことを踏まえ、次に観測域全体で道央レーダが降雨特性をどのように捉えているかをみえる。図10はレーダ観測域のうち、解析対象とした数百km²の範囲において、両レーダの反射強度因子の平均値を比較している。図中には汎用性をみるため1989年の事例だけではなく、1990年の観測

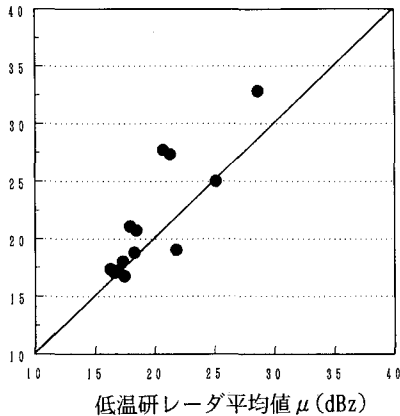
道央レーダ平均値 μ (dBz)

図-10 両レーダの反射強度因子平均値

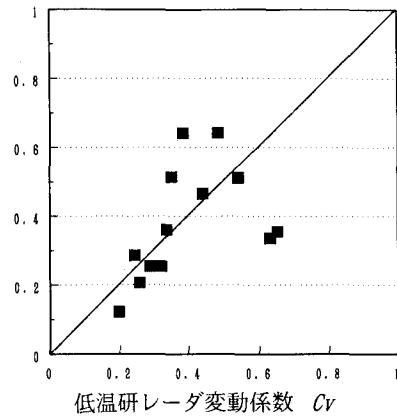
道央レーダ変動係数 Cv 

図-11 両レーダの変動係数

結果も含めてある。これから、道央レーダは平均値としては3次元ドップラーレーダと同様の結果を観測しているとみることができる。次に図11に両レーダの変動係数の関係を示したが、これについても一対一の対応が見いだされる。よって、広範囲の降雨特性（平均値とばらつき）については道央レーダの空間分解能でも3次元ドップラーレーダの分解能と同様に捉えることができていたといえる。

あとがき

本研究の要旨を以下に要約する。

- (1) 3次元ドップラーレーダによって降雨の3次元的な構造が観測され、下層の擾乱でもたらされるような雨、ないし10月以降に降るようなブライトバンドの低い雨では上層と下層で雨域の分布が大きく異なることが示された。
- (2) 業務用レーダと3次元ドップラーレーダの観測結果の比較により、業務用レーダの分解能である3kmメッシュの中にも、観測域全体の降雨強度ばらつきに比べて著しいばらつきがみられる場合がある。
- (3) 数百km²のスケールを観測対象域として両レーダの観測結果を比較すると、平均値と変動係数がほぼ同様の傾向で得られており、分解能が粗い業務用レーダでも全体的な降雨特性を捉えることができることを確認した。

以上の結果を踏まえ、さらに事例を増やして降雨の特徴を踏まえたデータの解析を進め、特に業務用レーダの観測結果の評価へと活用することを考えていきたい。なお、今回の調査・研究では、北海道大学低温科学研究所の遠藤助教他関係する方々にご指導をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小倉義光著：「一般気象学」、東京大学出版会
- 2) 日本気象学会：気象研究ノート第139号「気象レーダ特集」、1980.
- 3) 中北英一他：3次元レーダ雨量計情報の利用に関する基礎研究、京大防災研究所年報、第30号B-2、1987.
- 4) 佐藤晋介他：ドップラーレーダを用いたトランスパース型降雪雲の研究－形成メカニズムと構造－、日本気象学会春季大会講演予稿集、57、1990.
- 5) 藤吉康志他：レーダエコーの3次元立体表示、日本気象学会春季大会講演予稿集、57、1990.
- 6) 中津川誠、吉岡絃治、藤吉康志、宮下孝治：流域スケールの降雨特性の研究（その2）－レーダ雨量計の観測精度について－、開発土木研究所月報、No. 446、pp. 19-34、1990.7.