第32回水理講演会論文集　1988年２月

# 二重偏波・ドップラレーダによる降水観測について

Obsavation of Precipitaion Using Dual-Polarization Doppler Radar

建設省土木研究所　吉野文雄　F.Yoshino
建設省土木研究所　水野雅光　M.Mizuno
建設省土木研究所　水野秀幸　H.Mizuno
日本無線株式会社　五十嵐久敬　H.Igarashi

## 1．はじめに

洪水時の河川管理及び積雪地域の冬期の道路管理を適切に行うには，広域的でかつ面的でかつ正確な降水量の情報を入手する必要がある。現在この情報を入手する測定器として気象レーダが用いられている。

しかし，現在のレーダシステムによる降雨観測は，得られる情報が１つしかないため，①降水粒子の形態の判別が不可能，②レーダの情報だけではＢ，βの推定が困難，という問題があり，これ以上の観測精度の向上が望めない。また，降雪観測は，①降雪現象は降雨現象に比べ電波の反射強度が弱い，②雪片は風の移流を受けるため上空と地上の対応がとり難い，ため定量的な観測が難しい。

降水粒子群から得られる情報を複数にすることにより，前記の問題を解決し，より精度の良い降水量の観測が可能なレーダの一つとして二重偏波・ドップラレーダ（ＤＮＤレーダと称する）がある。本論文は，ＤＮＤレーダによる降雨及び降雪の現地観測を行い，レーダによる降水量の測定方法並びにＤＮＤレーダによる降水量及び風向・風速の測定精度について検討した結果について報告する。

なお，このＤＮＤレーダの開発研究は，建設本省電気通信室の協力を得て，㈱東芝，日本無線㈱，三菱電機㈱の３社と共同して行っている。

## 2．ＤＮＤレーダの仕様

ＤＮＤレーダは，二重偏波レーダとドップラレーダの２つの機能を有している。

二重偏波レーダは，水平偏波と垂直偏波の反射因子の差を計測するもので，降水物質の形状の推定及び形態の判別並びに降水粒子群の粒径分布の推定等が可能なレーダで，海外の研究に依れば偏波レーダによる降水強度の測定精度は既存型レーダより非常に良いと言われている。

二重偏波レーダは世界各国に約15機あり，日本ではＤＮＤレーダのみである。このレーダの特徴である偏波切替装置は，切替スイッチにフェライト（磁性体の一種）を用い，偏波面を約1/30秒毎に切り替えることができる。また，二重偏波レーダを用いて降水強度の測定を10％以内の誤差で測定するには，水平偏波と垂直偏波の反射因子の差 $Z_{DR}$ を0.1dBの精度で測定する必要がある。このため，アンテナへの給電方法をRear Feed 方式にし，空中線は水平偏波と垂直偏波のアンテナパターンが一致するように精巧に作られている。

ドップラレーダは，ドップラ効果を利用して，上空の水平風，鉛直風の測定並びに降水物質の形態の判別が可能なレーダである。風速の分解能は0.125m/sで，仰角を20°にして観測すれば，高度約170m毎の上空の風向･風速が測定でき，降雨予測や雪片の移流の推定が精度良く行えるようになる。

表―１に，ＤＮＤレーダの主な仕様を示している。二重偏波レーダの送信周波数，送信パルス幅，繰り返し周波数は既存のレーダ雨雪量計とほぼ同じで，これは，将来の実用化を考慮したものである。ＭＴ収録データは，ＭＴＩ装置で大地クラッタを除去したものと除去しないもの２種類である。また，反射電力の弱い降雪現象も正確に観測ができるように，最小受信電力は −107.5dBmと既存型レーダよ

表―１　ＤＮＤレーダの主な仕様

| 項目 | ＤＮＤレーダ | |
|---|---|---|
| | 二重偏波レーダ | ドップラレーダ |
| 送信尖頭出力 | ７５ｋＷ | ７５ｋＷ |
| 定量観測範囲 | ４０ｋｍ | ４０ｋｍ |
| 送信周波数 | ５２８０ＭＨｚ | ５２８０ＭＨｚ |
| 空中線径 | ２ｍ | ２ｍ |
| ビーム幅 | １.８° | １.８° |
| 主方向利得 | ３６ｄＢ以上 | ３６ｄＢ以上 |
| 副ビーム減衰量 | ２３ｄＢ以上 | ２３ｄＢ以上 |
| 偏波面 | 水平，垂直 | 水平 |
| 偏波切替間隔 | 10秒，0.032秒 | ――― |
| 送信パルス幅 | ２.０μｓ | ０.５μｓ |
| 繰返し周波数 | ２８０ｐｐｓ | １１２０ｐｐｓ |
| 空中線回転数 | ６ｒｐｍ | １ｒｐｍ |

り5～10dBm低く，降水強度の測定分解能も降水強度の約１％で，既存型レーダの1/3程度である。

## ３．ＤＮＤレーダによる降雪及び降雨の現地観測

富山県立山町芦原（東経137°17'08",北緯36°41'27"）をレーダサイトとし降雪及び降雨の現地観測を実施した。降雪観測は昭和62年1月17日～3月6日までの約50日間，降雨観測は昭和62年6月16日～10月19日の内の約50日間実施した。昭和62年の降雪量及び降雨量は例年より少なかった。地上降水量の観測は，レーダサイトから約15km以内の地点に，0.5mmのヒーター付き転倒桝雨量計を，降雪観測時には12箇所，降雨観測時には8箇所設置して実施した。

## ４．ドップラレーダによる上層風の測定精度

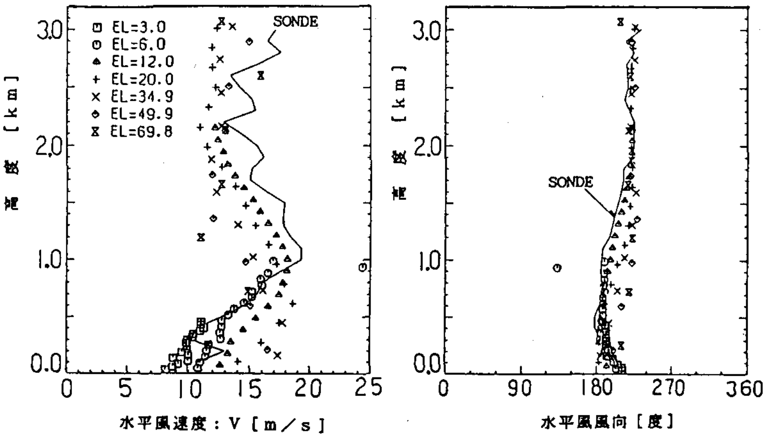
図－１に昭和62年7月17日17時09～15分の仰角3°,6°,12°,20°,35°,50°,70°のドップラレーダによる観測値（水平風速度と水平風風向）と同時刻のレーウィンゾンデによる観測値の鉛直プロファイルを示す。なお，レーダのドップラ信号の処理は，パルスペア方式で，折り返し補正前の最大測風速度は±16m/sである。

これから次のことが分かった。

① ゾンデ観測とレーダ観測では，風速が 2～3m/s程度の相違がある場合もあるが，全般的にはゾンデ観測とレーダ観測による風向・風速は，良く一致する。

② 風速の鉛直プロファイルを比較すると，レーダ観測値は滑らかに変化するが，ゾンデ観測値は変化が激しい。これは，ゾンデが地点観測であるのに対し，レーダは観測面の平均値であることと，ゾンデの観測精度によるものと考えられる。

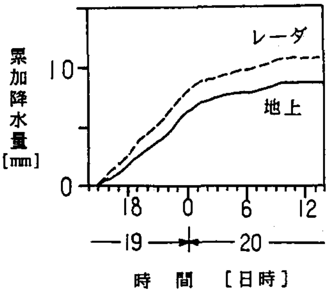
③ これから，ドップラレーダによる上空の風向・風速の測定精度は良いと言えるので，ドップラレーダによる測風結果を用いれば，雪片の移流が推定できると考えられる。




図－１　ドップラレーダ観測値とゾンデ観測値の対比
(昭和62年7月17日17時9～15分)

## ５．二重偏波レーダによる降雪量の測定精度

図－２に，昭和62年1月19日14時～20日14時までのＤＮＤレーダと地上雨雪量計で観測した累加降水量を示す。図－３に1月19日降雪と1月31日降雪のレーダ降雪量と地上降雪量の相関図を示す。レーダによる観測値は約150km²の平均値，地上の観測値は13箇所の観測所（ヒーター付き0.5mmの転倒桝雨量計12箇所とAMeDASの富山観測所）の平均値である。13箇所の観測所はレーダサイトから約15km以内にあり，ビーム高度1000m以下で，レーダ観測値と地上観測値を対比させるには非常に良い地点である。なお，レーダによる降水量の算出方法は，$Z=BR^{\beta}$ という関係




図－2　累加降雪量(S. 62年1月)

式を用い，B，$\beta$は降雪毎に同定した。

これから，レーダ降雪量と地上降雪量の相関は 0.8以上と良い。また，時間降雪量の変化図を見ると，地上降雪量値とレーダ降雪量値は良く一致している。したがって，DNDレーダで広域の面積平均の降雪量の定量観測は可能であると考えられる。

## 6．$Z_{DR}$の算出方法

レーダは降水粒子群から散乱される電波の強度を測定するものである。降水粒子の位置は時間と共に不規則に変動しているため，降水粒子群からの電波の反射強度（反射因子）は図—4に示すように大きく変動する。水平偏波と垂直偏波の反射因子差$Z_{DR}$に到っては，この変動は，更に増すこととなる。図—5は，周波数解析で求めた$Z_H$と$Z_V$の変動成分（雑音信号）から算出した$Z_{DR}$の確率密度関数である。これは，標準偏差$\sigma$が2.15dBと非常に大きい正規分布をしており，まさしく$Z_{DR}$の測定誤差となる。ここで，使用した$Z_H$，$Z_V$のデータは9パルス平均値（0.032秒平均値）である。

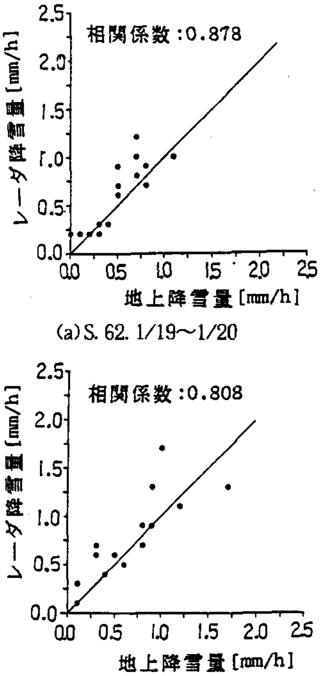
海外の研究[3),4)]に依れば，$Z_{DR}$を用いて降水強度を推定する場合，降雨強度の測定精度を10%以内にするには$Z_{DR}$の測定精度が0.1dB以内でなければならない，また，$Z_H$と$Z_V$の相関係数が 0.995以上でないと$Z_{DR}$の値は意味を有しない，ということが報告されている。

図—5のような$Z_{DR}$の測定誤差は，非常に大きな降水強度の測定誤差を発生させるので，何等かの方法によりこの変動を取り除かねばならない。通常，その方法として信号を平均化する方法が用いられている。標準偏差$\sigma$の正規分布のデータをN個平均したデータは，標準偏差が$\sigma/\sqrt{N}$の正規分布になる。したがって，$Z_{DR}$の測定誤差（変動成分の標準偏差）を0.1dB以下にするには，9パルス平均データを450個以上平均する必要があることが分かる。また，$Z_H$と$Z_V$の相関係数は，9パルス平均データ見ると0.85で，平均するデータ数を増やすにつれて大きくなり，9パルス平均データを128以上平均すると0.995以上になる。したがって，$Z_{DR}$を用いて降水強度を10%の精度で測定するには9パルス平均データを450個以上平均する必要がある。

## 7．反射電力のサンプリング方法と測定誤差の関係

1分間平均の時系列データの用いて，1時間平均の反射因子及び降水強度を測定する場合の，サンプリング時間と測定誤差の関係について検討した。

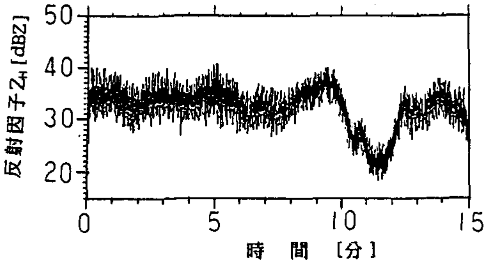
サンプリング方法を，図—6に示す。たとえば，1／3とは，3分間の内最初の1分間だけデータを収集することを繰り返す方法である。したがって，1時間平均値の場合，データ収集総時間は，1／1で60分間，1／2で30分間，1／3で20分間，3／5で36分間である。また，データ収集間隔（データを収集しない時間）は，1／1で0分間，1／2で1分間，1／3で2分間，3／5で2分間である。なお，測定誤差は，1／1の観測値を真値とし評価した。



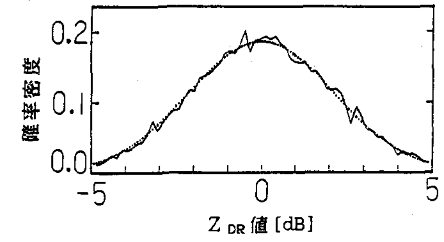

(a)S. 62. 1/19～1/20

(b)S. 62. 1/31～2/1

図—3　時間降雪量の相関図




図—4　レーダ受信信号の時間変化（昭和62年7月12日7:55～8:10）




図—5　$Z_{DR}$値の確率密度分布図

図－７にサンプリング方法と反射因子の測定誤差の関係を，図－８にサンプリング方法と降水強度の測定誤差の関係を示す。これらから，次の結論が得られた。なお，今回対象とした降雨は，１分間平均の反射因子の自己相関が，５分後に0.6，10分後に0.4になるような降雨であった。

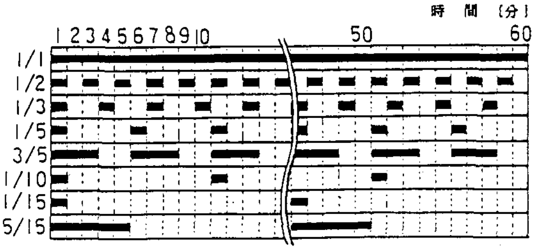
① 相対誤差及び標準偏差は，データ収集総時間とは一義的な関係がないが，データ収集間隔と線形の関係がある。これは，降雨状況が時々刻々と変化しているためで，測定誤差を小さくするには，１回当りの観測時間は短くても良いが，頻繁に観測するのが良いということを意味している。

② 反射因子の測定における相対誤差：$E_Z$（%）及び標準偏差：$\sigma_Z$（dBZ）とデータ収集間隔：T（分）との間には，$E_Z = 0.62T$，$\sigma_Z = 0.17T$という関係がある。

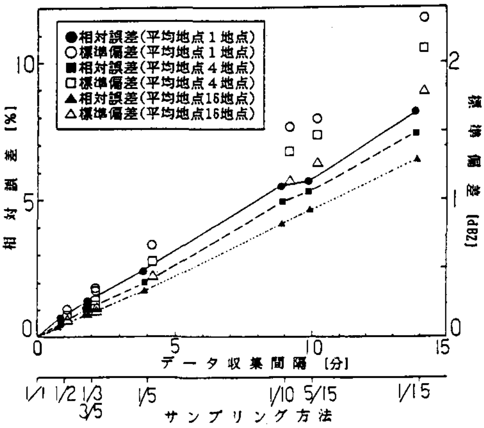
③ 降水強度の測定における相対誤差：$E_R$（%）及び標準偏差：$\sigma_R$（mm/h）とデータ収集間隔：T（分）との間には，$E_R = 2.8T$，$\sigma_R = 0.15T$という関係がある。

④ 平均地点を，１地点から16地点にすることにより，相対誤差および標準偏差は，データ収集間隔が短い場合は30～40％程度減少するが，平均で20～30％程度しか減少しない。したがって，平均地点を増やすことによって測定誤差を減少させる効果はあまり大きくない。

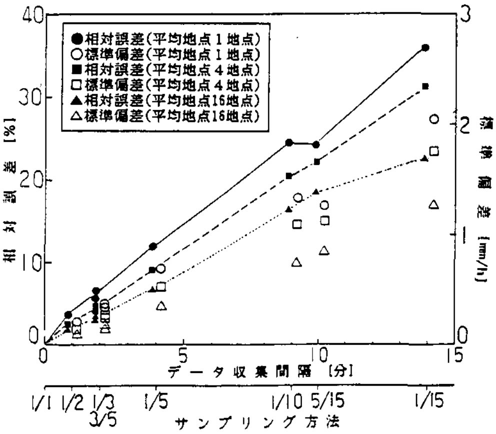
⑤ １時間降水強度の測定誤差を10％以内にするには，データ収集間隔を，１地点平均の場合で３分間以内，４地点平均で４分間以内，16地点平均で５分間以内にする必要がある。




図－6　サンプリング方法




図－7　サンプリング方法と反射の測定誤差の関係




図－8　サンプリング方法と降水強度の測定誤差の関係

## 8．二重偏波レーダによる降雨量の測定精度

二重偏波レーダによる降雨量は，$Z_{DR}$法とB $\beta$法の２種類で求めた。

（1）$Z_{DR}$法による降雨量の測定原理

$Z_{DR}$から降水強度を推定する方法は，水平偏波と垂直偏波の反射因子の差$Z_{DR}$を用いて雨滴の粒径分布を推定し，それから降水強度を算出するものである。測定原理を以下に示す。

水平及び垂直偏波によって得られるレーダ反射因子$Z_H$，$Z_V$はそれぞれ次式で表される。

$$Z_{H,V} = C \cdot \int_0^{D_{max}} \sigma_{H,V}(D) \cdot N(D) dD \qquad \cdots\cdots(1)$$

ここで，D：雨滴の直径，C：レーダシステムによって決まる定数，$\sigma_{H,V}$：雨滴の水平,垂直偏波に対する後方散乱断面積，N(D)：雨滴の粒径分布である。

雨滴の粒径分布は，$N(D)=N_0\cdot D^m\exp(-\Lambda\cdot D)$ で表される。

ここで，$N_0$，m，Λは降雨状態を示す定数で，粒径分布はm＝0で指数分布になる。

したがって，$Z_H$と$Z_V$との差$Z_{DR}$は，次式で表せる。

$$Z_{DR}=10\log(Z_H/Z_V)=10\log\{\int_0^{D_{MAX}}\sigma_H\cdot D^m\cdot\exp(-\Lambda\cdot D)dD/\int_0^{D_{MAX}}\sigma_V\cdot D^m\cdot\exp(-\Lambda\cdot D)dD\} \quad \cdots\cdots(2)$$

m,$D_{MAX}$を設定し，$\sigma_H$,$\sigma_V$をあらかじめ理論計算によって求めておけば，式(2)よりΛが求まり，続いて式(1)から$N_0$が求まる。こうして二重偏波レーダによって上空の雨滴の粒径分布が推定できる。

また，降水強度Rは次式で表せる。

$$R=3.6\times10^{-3}\ \frac{4}{3}\ \pi\int_0^{D_{MAX}}\left(\frac{D}{2}\right)^3\cdot N(D)\cdot V(D)dD \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに，R：降水強度(mm/h)，D：雨滴の直径(mm)，N：粒径分布($1/mm\cdot m^3$)，V：落下速度(m/s)である。

したがって，式(1),(3)から，次式が得られる。

$$Z_H/R=C'\cdot\int_0^{D_{MAX}}\sigma_H\cdot D^m\cdot\exp(-\Lambda\cdot D)dD/\int_0^{D_{MAX}}(D/2)^3\cdot V(D)\cdot D^m\cdot\exp(-\Lambda\cdot D)dD \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，C'はレーダのシステム等で決まる定数である。

よって，m，$D_{MAX}$，V(D)を設定し，$\sigma_H$，$\sigma_V$をあらかじめ理論計算によって求めておけば，式(3)，(4)から$Z_{DR}$～$Z_H/R$の関係が求まり，$Z_{DR}$，$Z_H$の測定値から降水強度Rが推定できる。

本論文で用いた雨滴の後方散乱断面積は，雨滴形状をPruppacher-Pitter型として，ポイントマッチング法[5]で計算した。なお，この計算プログラムは郵政省電波研究所小口知宏室長より提供して頂いた。雨滴の粒径分布の定数は，m=0，$D_{MAX}$=6mmとし，雨滴の落下速度はGun-Kinzerの測定値を用いた。

また，$Z_{DR}$が小さい場合，レーダで得られる$Z_{DR}$値は粒径分布式から推定される値より若干小さいことが知られている。そこで，$Z_{DR}$が1.5dB以下の場合はLipshutz等[6]が提案した次式で修正した。

$$Z_{DR}\ (dB)=0.6Z_{DR\text{レーダ}}+0.6$$
$$(-0.3\leqq Z_{DR\text{レーダ}}\leqq 1.5dB) \quad \cdots\cdots(5)$$

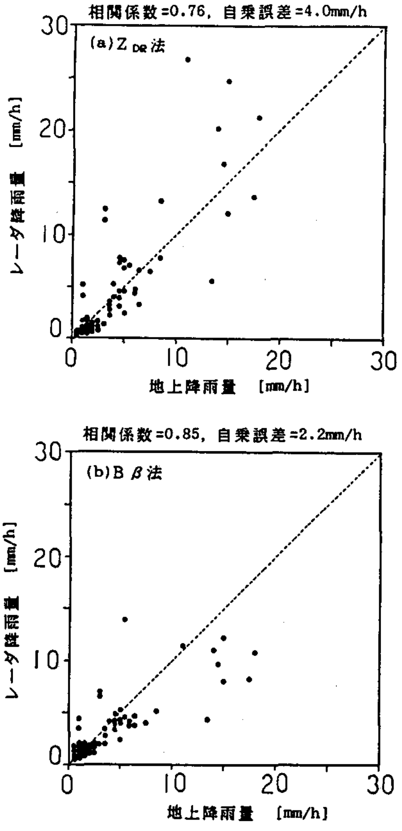
ここに，$Z_{DR\text{レーダ}}$：レーダ観測値，$Z_{DR}$：理論式で予測される値である。

（2）Bβ法による降雨量の測定原理

Bβ法とは，既存型のレーダによる降雨観測と同じ方法で，反射因子Zと降水強度Rの関係式$Z=BR^\beta$を用いて求める方法である。本論文では，B，βは検討対象降雨で同定したものを用いた。

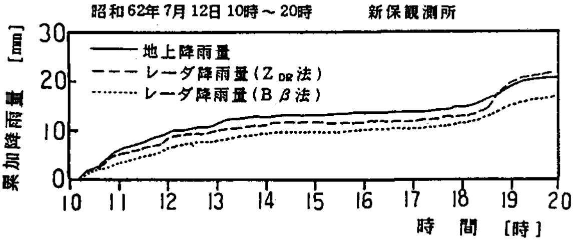
（3）降雨量の測定精度

図－9に，地上観測とレーダ観測の1時間降雨量の相関図を示す。(a)図は$Z_{DR}$法によるレーダ降雨量，(b)図はBβ法によるレーダ降雨量である。対象降雨は昭和62年6月～9月の間の




図－9　レーダ降雨量と地上降雨量の相関図
(昭和62年6月～9月の6降雨45時間)

６降雨45時間，対象観測所は新保観測所を含む8箇所で，検討に使用したデータ数は108個である。(a)図の相関係数は 0.76，自乗誤差は4.0mm/hである。(b)図の相関係数は0.85，自乗誤差は 2.2mm/hである。図－１０に，昭和62年 7月12日10時～20時の新保観測所地点の地上降雨量とレーダ降雨量の累加雨量曲線を示す。




図－１０　ＤＮＤレーダによる降雨観測結果
(昭和62年7月12日10時～20時，新保地点)

これから，$Z_{DR}$法の降雨強度の測定精度は，比較的良いと言える。また，一般に言われている[7]雨滴の粒径分布式のｍ及び最大粒径の設定が降水強度の測定精度に与える影響は，今回のデータでは見られなかった。

Ｂβ法による降水強度の測定精度は，$Z_{DR}$法より少し良かった。この理由は，①今回用いたデータは降雨強度が弱く，その上$Z_{DR}$の値及び変動量も小さかったため，$Z_{DR}$法の利点が十分に生かされなかった，②Ｂβ法はＢ，βを同定した降雨を用いて精度を検証しているので観測精度が実運用より良くなった，ためと考えられる。Ｂβ法は，実運用では降雨毎に最適なＢ，βの値を事前に求めることはできない。また，$Z_{DR}$法はどんな降雨でも観測精度は同じである。したがって，$Z_{DR}$法の方が降水強度を測定するのに適していると言える。

## ９．まとめ

現在までの研究は，まだ緒についたばかりの段階ではあるが，①ドップラレーダの測風精度は非常に良い，②Ｂβ方式による降雪の定量観測は可能である，③$Z_{DR}$法及びＢβ法による降雨量の測定精度は同じ程度で比較的良いと言える，ことが分かった。

今後，ＤＮＤレーダによる降雨及び降雪観測を続け，①$Z_{DR}$法による降雨観測の精度向上，②ドップラレーダの利用技術（雪片の移流量の推定法，降雨予測手法，降雪予測手法等）の開発，③二重偏波レーダの利用技術（降水粒子の形態判別手法，粒径分布の推定法）の開発を行っていく予定である。

最後に，富山における降雪観測並びに降雨観測で多大な協力をして頂いた，建設省北陸地方建設局河川管理課，電気通信課，道路管理課並びに富山工事事務所の皆様に，紙上を借りて謝意を表したい。

［参考文献］


1) 吉野等：降水現象のレーダ観測に関する調査報告書，土木研究所資料No.2353，1986

2) 吉野等：直交２偏波レーダによる降水観測に関する調査報告書，土木研究所資料No.2487，1987

3) J.W.F.Goddard et al.:Quantitative precipitation measurements with dual linear polalization radar, Proceeding of the 22nd conference on radar meteorology, 1984

4) V.N.Bringi, J.W.F.Goddard et al.:Dual-polalization radar;Techiques and applications, Atmospheric technology, No.13, 1981

5) T.Oguchi:Rain depolarization studies at centimeter and millimeter waves; Theory and mearsurement, Journal of radio research laboratories, No.109, 1975

6) R.C.Lipsschutz et al.:An operational ZDR-based precipitation type/intensity product, Proceeding of the 23rd conference on radar meteorology, 1986

7) M.Sachidananda et al.:Differential propagation phase shift and rainfall rate estimate, Radio science, Vol.21, 1986