

◆ 観測技術特集 ◆

レーダ雨量計の降雨・洪水予測への利用

松浦 直* 深見和彦** 金木 誠***

1. はじめに

建設省は、1975年にレーダ雨量計の実用第1号機を赤城山に導入して以来、全国に26機のレーダ雨量計を配備し、全国土をほぼ網羅した降水量観測を行っている。建設省レーダ雨量計により得られた情報は、全国の工事事務所や自治体など、防災担当機関・部局に配信され、広域にわたる降水情報をリアルタイムに把握することにより、河川、ダム、道路等の管理及び水防活動に対する準備体制の確立などに広く利用されている。また、ここ数年、中小河川流域や都市河川流域において局地的な集中豪雨による河川・土砂災害が頻発しており、地上雨量計と比較して時空間分解能が高いレーダ雨量情報を活かした降雨・洪水予測、避難警戒システムの構築が求められている。

土木研究所では、これまで、現場における管理・防災業務の支援を目的として、レーダ雨量計の観測精度向上と観測データの高度利活用方策に関する検討を実施してきた^{1),2)}。観測精度向上に関しては、建設省や気象庁がこれまで配備してきた従来型の単偏波レーダ雨量計に対して、より多くの情報を取得することができる二偏波レーダ雨量計の研究開発を行い、1997年にその実用第1号機が九州地方建設局に配備された。レーダデータの高度利活用に関しては、二偏波レーダを利用した新たな降雨予測手法の開発や降水粒子形態識別手法の開発の他、長年にわたり全国的に蓄積されてきた建設省レーダ雨量計の貴重なデータを統計的に解析することにより各河川・流域における洪水危険度を評価する手法の開発などを行っている。

本稿では、まず、九州駿河岳二偏波レーダの実運用レベルでの精度評価を行った。次に、二偏波レーダを降雨予測へ適用する手法として、二偏波レーダデータから上空の雨滴粒径分布の時空間分布変動を推測し、降雨の発達・減衰を捉える方法

を試みた。また、中小河川での流況予測支援システムの開発を目的として、レーダデータから擬似河道網と修正合理式を用いて流出を計算する方法に関して初期検討を行った。

2. 二偏波レーダによる降水観測原理

従来のレーダ雨量計(単偏波レーダ雨量計)による降水観測($B\beta$ 法)は、レーダ毎に一定の降雨換算定数を用いているが、実際の雨ではその定数の値が降雨毎もしくは一雨の間でも時空間的に変動するため、それが観測誤差を生む要因となっている。そこで、土木研究所では、雨滴が落下する際に空気抵抗を受けて横長に扁平していることに着目し、レーダ観測値から大気中の雨滴粒径分布を推定することにより降水観測精度の向上を図る直交二偏波レーダの研究開発を行ってきた。

直交二偏波レーダによる降水観測(Z_{DR} 法)は、(1)水平・垂直2方向の偏波を交互に送信し、(2)雨滴による反射因子の水平偏波成分 Z_H と垂直偏波成分 Z_V を受信する。(3) Z_H 及び式(1)で定義される反射因子差 Z_{DR} から雨滴の扁平度合いを調べ、降水粒子形態の識別及び雨滴粒径分布の推定を行う。

$$Z_{DR} = 10 \log(Z_H/Z_V) \quad (1)$$

(4)推定した雨滴粒径分布と粒径別の雨滴落下速度の積を積分することにより、降雨強度 R を求める。

以上の観測原理からわかるように、直交二偏波レーダは、固定された降雨換算定数を用いずに直接大気中の雨滴粒径分布を推定することができ、また降水粒子形態毎にその形状や誘電率が異なることを利用して、 Z_H , Z_{DR} などの情報から降水粒子形態を判別することが理論的に可能になることから、レーダによる降水観測精度の向上を図ることができる。

ここで、実際の業務用二偏波レーダにおいては、計算機の負荷を軽減するため、以下の式を用いて降雨強度を算出している(簡易 Z_{DR} 法)。

$$R = Z_H / B \quad (2)$$

$$B = 10^{2.650} \cdot Z_{DR}^{0.885} \quad (Z_{DR} \leq 0.4 \text{dB})$$

$$B = 10^{2.792} \cdot Z_{DR}^{1.211} \quad (Z_{DR} > 0.4 \text{dB})$$

また、二偏波レーダは、観測データのうち水平偏波成分のみを計算に使うことにより、従来の単偏波レーダと同じ $B\beta$ 法による降雨強度算出も可能であるという特徴を持っている。

3. 二偏波レーダの降水観測精度に関する検討

3.1 種別岳二偏波レーダ観測結果

著者らは、二偏波レーダ実用第 1 号機として 1997 年度から本格運用を開始した九州種別岳二偏波レーダの観測精度評価を行った³⁾。評価に用いたデータは、試験運用期間中の 1996 年 4~9 月に観測された降雨のうち、代表的な 3 降雨である。種別岳二偏波レーダにより観測された Z_H と Z_V のデータを使用して、 $B\beta$ 法と Z_{DR} 法により降水強度を算出し、両者ならびに、地上雨量計データとの比較を行った。比較に用いた地上雨量値は、建設省テレメータ及び気象庁アメダスの 1 時間雨量値である。

3.2 精度指標値比較結果

表-1 に反射因子 Z_H 強度別に求めた Z_{DR} 法と $B\beta$ 法の精度指標値の比較を示す。表-1 より、 Z_H 強度が大きくなるに従い $B\beta$ 法に対する Z_{DR} 法の精度向上率が上昇 (Z_{DR} 法の方が地上値との相関が高く、誤差が少ない) し、 $Z_H \geq 35 \text{dB}$ (降雨強度 $R \geq 5 \text{mm/h}$ 相当)においては相関係数、自乗平均誤差など全ての精度指標値に関して Z_{DR} 法の方が良好な精度を示していることがわかる。

また、本格運用開始後の 1997 年度の観測結果においても、1996 年度同様、降雨強度が強くなるほど Z_{DR} 法の方が $B\beta$ 法よりも観測精度が向上

表-1 Z_{DR} 法と $B\beta$ 法の精度指標値の比較 (地上観測雨量に対する精度指標)

| 手法 | | 強度 | | | | |
|------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | $Z_H \geq 23 \text{dB}$ | $Z_H \geq 30 \text{dB}$ | $Z_H \geq 35 \text{dB}$ | $Z_H \geq 40 \text{dB}$ | $Z_H \geq 45 \text{dB}$ |
| 相関係数 | Z_{DR} 法 | 0.572 | 0.564 | 0.512 | 0.416 | 0.291 |
| | $B\beta$ 法 | 0.576 | 0.566 | 0.509 | 0.388 | 0.158 |
| 平均誤差 (%) | Z_{DR} 法 | 4.72 | 4.82 | 5.53 | 7.36 | 11.19 |
| | $B\beta$ 法 | 5.44 | 5.55 | 6.48 | 9.03 | 15.81 |
| 自乗平均誤差 (%) | Z_{DR} 法 | 7.18 | 7.28 | 8.06 | 10.15 | 14.99 |
| | $B\beta$ 法 | 7.71 | 7.83 | 8.74 | 11.41 | 18.80 |

する結果が得られており、これは土木研究所二重偏波ドップラーレーダ (DND レーダ) を用いた過去の研究結果とも一致するものである。

3.3 二偏波レーダ最適運用方式の検討

これらの観測結果を総合して、二偏波レーダによる最適観測方式に関する検討を実施した。強降雨強度域において $B\beta$ 法より Z_{DR} 法の方が精度が高いこと、G.C.(グランドクラッター: レーダ反射因子のうち、降水以外の山やビルなどからの反射成分) が強い場所においては $B\beta$ 法の方が算出精度が高いことなどを考慮して、地形的特徴や降雨強度別に算出方法を変更する表-2 のような最適観測方式に従って二偏波レーダを運用することにより、より精度の高い降水観測が可能となると考えられる。

4. レーダデータ利活用手法に関する検討

4.1 雨滴粒径分布の時空間分布観測

著者らは、二偏波レーダがレーダデータのみから上空の雨滴粒径分布を直接的に推定することができる点に着目し、これを降雨予測等に活用する手法に関して検討を行った。まず、種別岳二偏波レーダと地上雨滴計による同期観測を行い、得られたデータから雨滴粒径分布の時空間分布変動を解析した。次に、その変動と、降雨の発達・減衰傾向との関係を調査することにより、二偏波レーダを用いて降雨の発達・減衰傾向を判断する手法の開発可能性に関して考察を行った²⁾。

4.1.1 観測概要

図-1 に地上雨滴計設置地点 (4 カ所) を、写真-1 にそのうちの 1 地点の様子を示す。レーダとの同期観測に用いた雨滴計はディスクロメーターで、その検証用として、近くにレーザー雨滴計と転倒ます型雨量計を設置し、観測を行った⁴⁾。

表-2 直交二偏波レーダ最適運用方式例

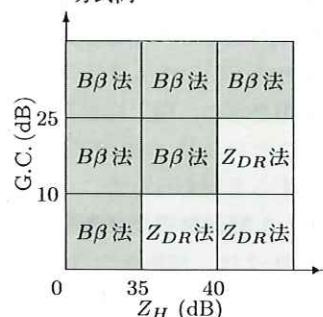


表-3 解析データ

| No. | 降雨データ解析期間 | 降雨成因 |
|-----|-----------------------------|-----------|
| 1 | '97/12/29/15:00~12/30/03:00 | 温帯低気圧 |
| 2 | '98/01/15/00:00~ 09:00 | 前線性と温帯低気圧 |
| 3 | '98/03/20/00:00~ 12:00 | 温帯低気圧 |
| 4 | '98/03/04/20:00~03/05/04:00 | 前線性のち低気圧 |
| 5 | '98/03/25/00:00~ 08:00 | 停滞前線 |



図-1 积迦岳レーダーサイト概略図

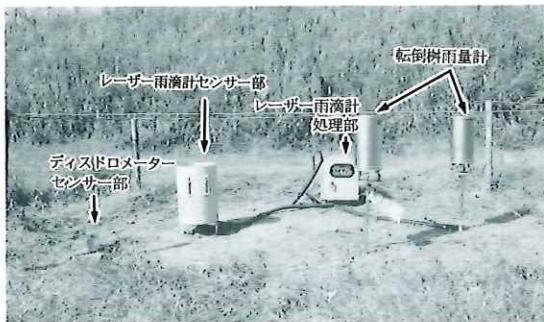


写真-1 地上雨滴粒径分布観測の様子(湯ノ谷観測地点)

4.1.2 解析方法

本研究では、雨滴粒径分布式として、式(3)に示すガンマ分布式を用いた。

$$N(D) = N_0 D^m \exp(-\Lambda D) \quad (3)$$

ここに、 $N(D)$ は雨滴の空間密度 ($\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$)、 D は雨滴粒径 (mm)、 m 、 N_0 、 Λ は雨滴粒径分布パラメータである。まずパラメータ m の値を $m = 2$ に固定した。これは、土木研究所でこれまでに行った地上雨滴計による雨滴粒径分布観測の結果、 $m = 2$ が多くの降雨成因に適応可能で、最も出現頻度が高いことが観測されたためである¹⁾。次に、二偏波レーダーによる Z_H 、 Z_V の観測値から N_0 、 Λ の値を求め、 N_0 、 Λ と降水強度 R ならびに降雨状態との関係を調査した。また、 N_0 、 Λ の値を式(3)に代入することにより上空の雨滴粒径分布を求め、地上雨滴計による観測結果と比較することにより、雨滴粒径分布の時空間分布特性に関する考察を行った。

4.1.3 観測結果及び考察

図-2 は、解析した5降雨(表-3)のレーダーデータから求めた N_0 、 Λ と降水強度 R との関係を示

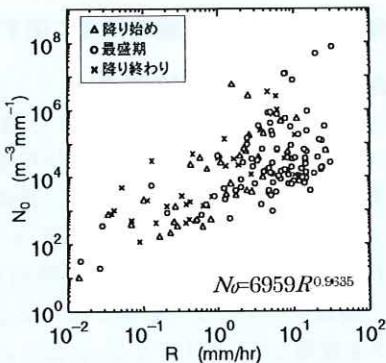
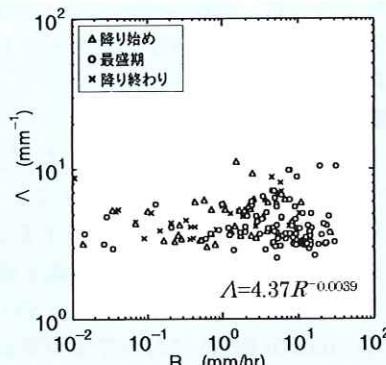
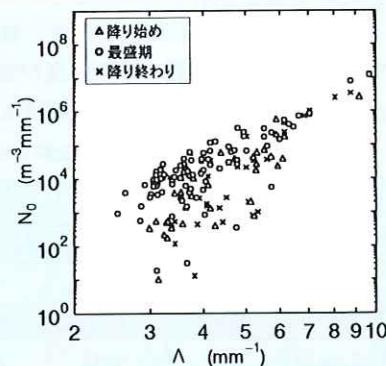
(a) N_0 と R の関係(b) Λ と R の関係(c) N_0 と Λ の関係

図-2 レーダーにより観測されたパラメータ N_0 、 Λ と降水強度 R との関係 ('97/12/29~'98/03/25 の主要 5 降雨
：緑川下流出張所直上メッシュ：高度 約 2,000m)

したものである。使用したレーダデータは5分間平均値である。これより、 N_0 、 Λ と R の関係は図-2(a)、(b)に示した式で表され、全体的な傾向は地上雨滴計を用いて地上雨滴粒径分布の N_0 、 Λ の降水強度依存性を調べた過去の研究結果と概ね一致した^{5),6)}。また、図-2(c)より、降雨最盛期の N_0 の値は、雨の降り始め、降り終わり時の N_0 と比較して全体的に大きな値を示すことがわかった。その時の Λ の値は、 $\Lambda=3\sim 5$ の比較的小さな値をとる。一方、 Λ が大きくなるにつれて N_0 も大きくなり、各降雨イベント中の降り始め、降り終わり時において、 N_0 、 Λ がともに大きくなる点が存在することも確認された。

図-3は、レーダデータより求めた N_0 、 Λ を式(3)に代入して求めた上空の雨滴粒径分布と、緑川下流出張所に設置したディスドロメーターによる観測値を高度別、降雨状態別に示したものである。この図より、雨の降り始め、途中、降り終わりの各時刻における雨滴粒径分布形状の高度変化は、時系列方向の変化と比較すると小さいことがわかる。雨滴粒径分布の時系列変化については、雨の降り始めにおいては3高度とも時間の経過に伴い大粒径の雨滴の個数が増加し、グラフの傾き

が緩やかになっていくことがわかる。さらに降雨途中においては小粒径の雨滴から大粒径の雨滴まで個数が多く、降り終わりにかけては最盛期よりも大粒径の雨滴は少ないが、逆に小粒径の雨滴は多く存在し、その後全体的に雨滴個数が減少して降雨が終息していくことが観測された。

以上より、二偏波レーダを用いることにより、降雨の発達・減衰に伴い形状が変化する雨滴粒径分布の時空間分布特性を観測できることがわかり、二偏波レーダを用いて広域の雨滴粒径分布形状とその変化傾向をリアルタイムで観測することにより、降雨の発達・減衰傾向を把握し、降雨予測へ応用できる可能性が示されたと言える。

4.2 GIS を活用した河川流況予測システムの開発

頻発する中小河川流域での洪水災害を防止・軽減するためには、現況の気象・水文現象を正確に把握することはもちろん、現在の降雨が過去の既往災害事例と比較して、どの程度危険なものであるかを的確に判断することが重要である。しかしながら、大河川と比較して中小河川流域では地上水文観測網や過去の水文観測資料が十分に整っていない場合が多く、危険度を判断する際にも、経験に頼る部分が多いのが現状である。そこで著者ら

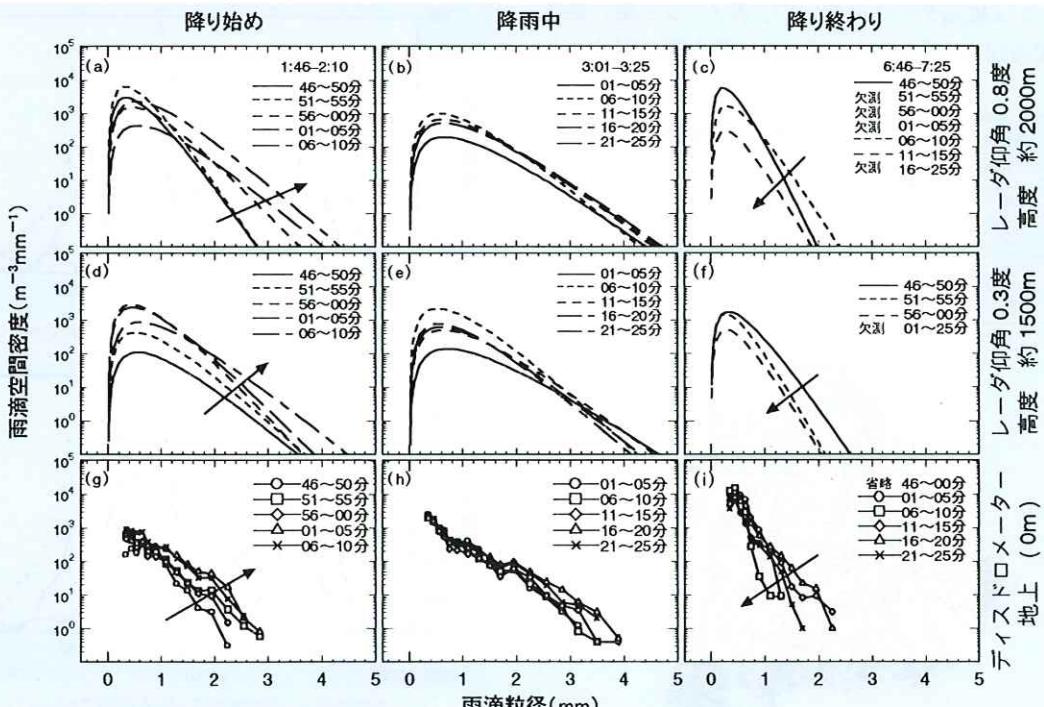


図-3 レーダおよび地上雨滴計により観測された雨滴粒径分布の時空間分布
1998年1月15日 緑川下流出張所

は、全国に配備されている建設省レーダ雨量計のデータを利用して、中小河川流域での流況予測を支援するシステムを開発することを目的として、レーダ雨量計データと擬似河道網、修正合理式を利用した流出計算に関する初期検討を実施した。

4.2.1 検討方法

著者らは、(a) 時々刻々の流域平均雨量を洪水到達時間内で移動平均してハイドログラフを算出する「修正合理式モデル」と、(b) 500m メッシュ標高データをもとに作成した擬似河道網から各メッシュ毎の洪水到達時間を計算し、その時間差を考慮に入れて、メッシュレーダ雨量の移動平均から合理式により評価地点のハイドログラフを算出する「擬似河道網+修正合理式モデル」の2つの方法で流出計算を行い、実測水位と H-Q 式から求めた換算流量との比較を行った。

検討対象流域は、ダム等の人为的流量調節の影響が少なく、流域スケールを種々に変化させて検証することが可能な九州遠賀川流域を選定した。解析に使用したレーダデータは表-4 に示す5降雨(九州糸田岳レーダ)である。

擬似河道網(図-4)は、国土地理院発行の「数値地図 50m メッシュ標高」をもとに作成した 500m メッシュ標高データにおいて、各メッシュ毎に最急勾配方向(周囲 8 方向のうち)に落水線を引くこと

表-4 解析データ

| No. | レーダ雨量収集期間 |
|-----|-------------------------------|
| 1 | '97/08/29/12:05 ~ 09/16/03:55 |
| 2 | '98/05/10/12:05 ~ 05/16/09:45 |
| 3 | '98/05/16/09:50 ~ 05/29/05:30 |
| 4 | '98/06/13/23:35 ~ 06/21/18:35 |
| 5 | '98/10/14/16:25 ~ 10/20/23:50 |

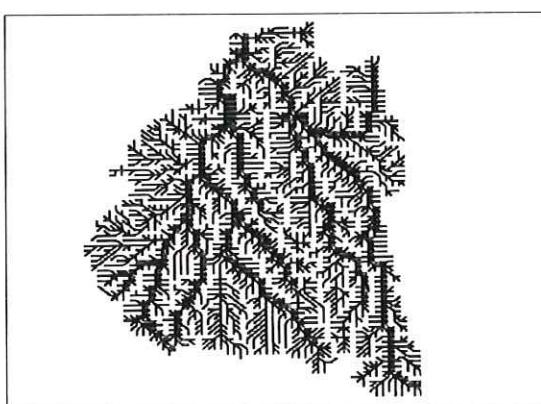
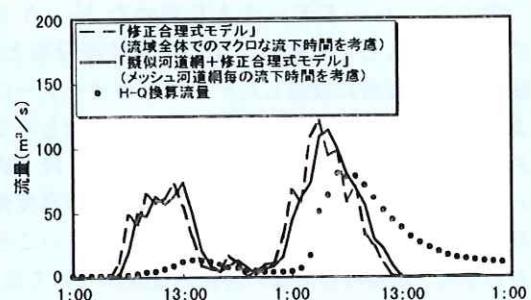


図-4 遠賀川(日の出橋上流) 河道網図 (500m メッシュ)

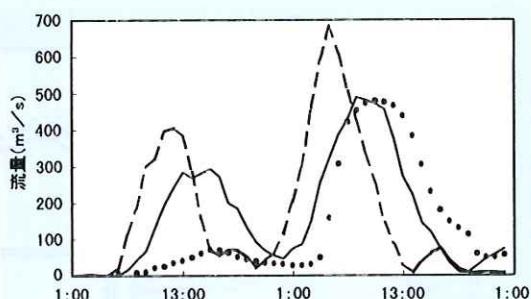
により作成した。メッシュ間の流下時間は Kraven 式により算出し、流出係数は流域の土地利用状況(大半が平地の水田)から 0.5(物部の式より)を用いた。ここで Kraven 式を使用したのは、土研式、ルチハ式との比較計算の結果、本ケースにおいては Kraven 式が最も実測値に近い計算結果を示したからである。また、実際の計算にあたっては、流路長 L を、メッシュ間距離 500m に実際の河道の蛇行や 1 メッシュ内での流下時間(メッシュの端から中心まで流下するのにかかる時間)を考慮して、 $L = 1,000\text{m}$ として計算を行った。

4.2.2 計算結果

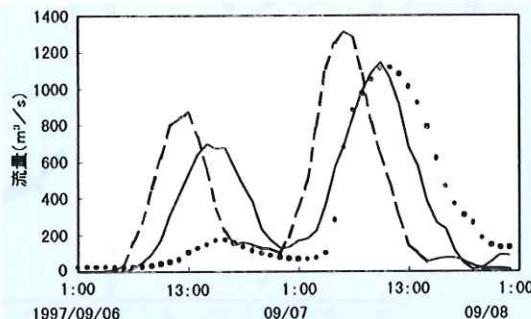
図-5 は、遠賀川流域内の 50~700km² の各ス



(a) 遠賀川水系金辺川夏吉観測所(集水面積 52km²)



(b) 遠賀川水系彦山川中島観測所(集水面積 315km²)



(c) 遠賀川日の出橋観測所(集水面積 706km²)

図-5 レーダ雨量と擬似河道網、修正合理式を用いた計算結果(几例項目および時刻軸は (a),(b),(c) とも共通)

ケール流域においてモデルを適用した結果である。図-5(a), (b), (c)より、いずれの流域スケール(集水面積)においても、「擬似河道網+修正合理式」による計算結果は、一山目のピークは H-Q 換算流量を大きく上回っているものの、二山目のピークではピークの生起時刻、ピーク流量値ともによく表現できていることがわかる。本研究において解析した 5 降雨のうち、レーダ雨量と地上雨量が大きく異なる 1 事例を除いて全ての例で同様の計算結果が得られており、これは、流出に対する降雨の初期損失量を正確に見積もることの重要性を示しているとともに、今後の改良次第では本研究で作成したレーダ雨量と擬似河道網、修正合理式を用いた流出計算手法により、水文観測資料の少ない中小河川においても洪水の危険度を適切に評価できる可能性があることを示している。

また、2 つのモデルの再現特性を比較すると、 300km^2 以上のスケールで、「擬似河道網+修正合理式モデル」の方が「修正合理式モデル」よりも適合性が良いことがわかる。これは、一般に合理式適用の限界とされる流域面積(概ね 200km^2)以上の流域で修正合理式を適用する場合に、河道網による流量波形合成手法が有効となる可能性を示すものと言える。

以上の初期検討結果に関して、今後は検証事例を増やして考察を加えるとともに、他の流出解析手法も含めて、追加検討を行っていく必要がある。

5. まとめ

本研究により、1) 降雨強度の強い雨に対しては、従来のレーダ雨量計よりも二偏波レーダ雨量計の方が相対的に観測精度が高いこと、2) 二偏波レーダを用いて雨滴粒径分布の時空間分布変動を捉え

ることにより、降雨の発達・減衰傾向をつかみ、降雨予測へ応用できる可能性があること、3) レーダ雨量データと擬似河道網、修正合理式を用いた流出解析手法により、水文観測資料の少ない中小河川においても洪水の危険度を適切に評価できる可能性があることが示された。

レーダ観測値と地上雨量計による観測値とは、その観測原理・対象の違い(観測高度・面積等)などから必ずしも一致するものではない。しかしながら、その観測原理の違いを明確に認識したうえで、それぞれの長所を生かした観測・利用法を検討していくことで、より精度の高い降雨・洪水予測につながるものと期待される。

謝辞: 本研究で使用したレーダデータは建設省九州地方建設局より提供されたものである。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 建設省土木研究所: DND レーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書(第 1 報～第 4 報), 1988.3～1991.3.
- 松浦直、佐藤武司、深見和彦、金木誠：直交二偏波レーダにより観測された雨滴粒径分布の時空間分布特性、水文・水資源学会 1999 年研究発表会要旨集, 18-19, 1999.8.
- 九州地方建設局：平成 8 年度筑豊レーダ雨量計システム運用計画策定外 1 件業務報告書, 1997.3.
- 松浦直：雨滴粒径分布の計測、土木技術資料, Dec-40, 4-5, 1998.12.
- 山田正、日比野忠史、鈴木敦、簗島弥成、中津川誠：新しいタイプのレーザー雨滴計の開発とこれを用いた降雨の雨滴粒径分布の観測、土木学会論文集, No.539, II-35, 15-30, 1996.5.
- 沖大幹、虫明功臣：雨滴粒径分布データを用いたレーダ換算定数の同定、水工学論文集, 第 37 卷, 9-14, 1993.2.

松浦 直*



建設省土木研究所河川部
水文研究室研究員
Tadashi MATSUURA

深見和彦**



同 水文研究室主任研究員
Kazuhiko FUKAMI

金木 誠***



同 水文研究室長
Makoto KANEKI