中小河川流域における地上雨量データと高解像度レーダデータを用いた面積雨量の比較検討

STUDY ON AREAL RAINFALL USING RAIN-GAUGE DATA AND HIGH-RESOLUTION RADAR DATA IN MEDIUM AND SMALL RIVER BASINS

林義晃¹・手計太一²・山崎惟義³

Yoshiaki HAYASHI, Taichi TEBAKARI and Koreyoshi YAMASAKI

¹正会員 学士 福岡大学教育技術職員 工学部社会デザイン工学科
(〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

²正会員 博(工) 富山県立大学大学院准教授 工学研究科環境工学専攻
(〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

³フェロー会員 工博 福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科
(〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

The purpose of this study is to clarify the comparative study of areal rainfall of rain-gauge data and high-resolution radar data in medium and small river basins. This analysis used QPE of C-band radar and X-band MP radar as areal rainfall of radar data. As estimated of areal rainfall of rain-gauge data, this study has divided numbers of each watershed by Thiessen method.

As a result of several analyses, areal rainfall of each radar data was similar to that of rain-gauge data. Areal rainfall of radar data haven't depended on domination area of a rain-gauge station. Areal rainfall of X-MP data wasn't difference from that of rain-gauge data in less than average altitude 300m of sub river basin.

Key Words : areal rainfall, C-band radar, X-band MP radar, Kakehashi River, Tedori River.

1. はじめに

河川計画や洪水予報において、流域内の雨量分布や流出特性を把握しておくことは非常に重要である。しかし、実際の雨量分布の再現や、流出解析における地形や地質など様々な条件の同定が複雑であるため、流出特性を正確かつ詳細に把握することは困難な場合が多い¹⁾。

レーダによる雨量観測がはじまる以前において、雨量データは地上雨量観測所による地点データしか存在しなかった。そのため、流出解析に必要な面的な雨量分布は、ティーセン法や等雨量線法などを用いて流域平均雨量(面積雨量)を算出していた。その後、Cバンドレーダ(以下、レーダ雨量計)による面的な雨量分布を推定できるようになり、近年では高解像度かつ高頻度で雨量推定ができるXバンドMPレーダ(同、X-MP)の雨量観測が開始され、より精密な雨量分布の把握が期待される。

そのため、これまでに面積雨量に関する多くの研究が実施されている。地上雨量観測所による面積雨量に関す

る既往研究例として、宝満川と小石原川流域における面積雨量と最適観測密度に関する検討²⁾、標本論的方法を適用した流域面積、観測点数と面積雨量の誤差の関係を明らかにした研究³⁾、都市中小河川流域における観測密度が面積雨量の精度に与える影響を明らかにした研究⁴⁾、様々な降水イベントの時間分解能別の面積雨量の統計的検討⁵⁾などが挙げられる。

レーダによる面積雨量に関する既往研究例は、千歳川流域におけるレーダ雨量計データを用いた流域平均雨量推定法のティーセン法による精度検証⁶⁾、様々な降雨パターン別における地上観測の面積雨量とレーダ雨量計の観測データを比較した研究⁷⁾、天塩川流域の局地豪雨を対象とした流域平均雨量とレーダ雨量計と比較した研究⁸⁾、地上観測とCバンドレーダの雨量データを用いた平均面積雨量を推定する面積限界法の性能を検証した研究⁹⁾、都市河川において地上観測所の流域平均雨量とX-MPの雨量データを比較検証した研究¹⁰⁾などが挙げられる。

このように、これまでの研究では、地上雨量観測所による各手法を用いた面積雨量の精度検証や流域内におけ

図-1 本研究の解析対象流域.

る観測所の最適設置数の検討をはじめ、レーダによる面積雨量と地上観測所の面積雨量と対比させた検討がほとんどである。しかし、地上雨量観測所の観測所数を変化させて地上雨量とレーダ雨量の面積雨量を時間分解能別で対比させるとともに様々な条件下で検討した研究は少なく、本運用が開始されたばかりのX-MPによる面積雨量の同様な研究はほとんどない。

以上を鑑み、本研究では北陸地方のX-MPにおける定量観測範囲内に位置する手取川と梯川を解析流域として、地上雨量観測所による雨量データと、レーダ雨量計及びX-MPの雨量データを用いて面積雨量の比較検討を行う。その際、両流域で間引き法を適用し、流域内の地上雨量観測所の設置数を変化させて、地上雨量データによる面積雨量と各レーダの雨量データによる面積雨量を時間分解能別で比較する。特に、X-MPの高解像・高頻度な雨量データによる面積雨量への影響にも着目する。また、地上雨量観測所1箇所あたりの支配面積と面積雨量の誤差推定について、レーダ雨量計とX-MPも含めて検討することで、観測方法の違いが地上雨量観測所の支配面積に与える影響を明らかにする。さらに、局地的降雨の一つである地形性降雨に着目し、サブ流域の平均標高値を用いて、地点観測である地上雨量の面積雨量と面的観測であるX-MPの面積雨量との相違について検討する。

2. 解析データについて

(1) 解析対象となる流域

図-1は、本研究の対象流域として、石川県の中央部を流れる手取川流域(青色の流域界)と西側に隣接する梯川流域(赤色の流域界)の2つの中小河川流域とした。手取川流域は、幹線流路延長72km、流域面積809km²の一級河川であり、流域内の平均標高は約849mである。梯川流域は、幹線流路延長42km、流域面積271km²の一級河

川であり、流域内の平均標高は約134mである。

(2) 解析に使用したデータと降水イベント

解析に用いた地上雨量観測所は、気象庁と国土交通省水管理・国土保全局が管理する観測所とし、データ欠測が少なく連続観測が行われている観測所として、手取川流域で12箇所、梯川流域で6箇所とした。サブ流域の作図には、多くの流域で実績のあるティーセン法を用い、流域内を満遍なく配置されるような観測所を抽出して作成した。なお、面積雨量は、以下の(1)式から算出した。

$$R_T = \frac{\sum_{i=1}^N T_i r_i}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad T_i = \frac{a_i}{A} \quad (1)$$

ここで、 R_T は面積雨量(mm/h)、 T_i はサブ流域*i*のティーセン比、 r_i はサブ流域*i*の雨量(mm/h)、 N は対象流域の分割数、 a_i はサブ流域*i*の支配面積(km²)、 A は流域面積(km²)を示す。

レーダ雨量計については、国土交通省が全国に26基設置・観測しているCバンドレーダであり、その降水量推定値に、地上雨量観測所の観測データの補正を加えた合成処理データを用いた。降水量は、以下の(2)式に示すZ-R関係式から算出されており、空間解像度は1km、時間分解能は5分である。

$$Z_h = BR^\beta \quad (2)$$

ここで、 R は降水強度(mm/h)、 Z_h は反射因子(mm⁶/mm³)、 B 、 β はZ-R関係式の雨滴定数を示す。

XバンドMPデータについては、北陸地方に設置されている水橋・能美の2基のレーダで観測された合成処理データを用いた。降水量推定については、以下の(3)式に示すZ-R及び K_{DP} -R関係式を、比偏波間位相差 $K_{DP}=0.1$ (deg/km)を閾値として使い分けられており¹⁾、空

図-2 手取川流域におけるティーセン法を用いた流域分割図(左より3, 6, 12分割)。

図-3 梯川流域におけるティーセン法を用いた流域分割図(左より3, 6分割)。

間解像度は250m, 時間分解能は1分である。

$$Z_h = BR^\beta \quad (K_{DP} \leq 0.1)$$

$$R = 1.2 \times a_1 \times K_{DP}^{0.815} \quad (3)$$

$$(K_{DP} \geq 0.1 \text{ かつ } Z_h \geq 30)$$

ここで, R は降水強度(mm/h), Z_h は反射因子(mm^6/mm^3), K_{DP} は比偏波間位相差(deg/km), a_1 は観測仰角による定数¹⁾, B, β はZ-R関係式の雨滴定数を示す。また, 両流域とも能美レーダの定量観測範囲(半径60km圏内)に含まれている。さらに, X-MPにおいて強雨域の後背地に生じる電波消散域に起因したデータ欠測については, データ補完を行わず, 観測できているデータのみを使用した。そのため, X-MPの面積雨量は, 降水イベントによって過小になっている場合がある。

解析に使用した降水イベントは, 強い降水強度を伴う降雨が生じたイベントを中心に, 2011年では7月4日, 8月18, 25日, 9月20, 21, 22日とし, 2012年では7月1, 6, 7, 13, 21日, 8月13, 14日, 9月11日, 10月11, 23日の計16イベントの降水現象を解析対象とした。

(3) 解析方法

本論では, 主に3つの観点から地上雨量データによる面積雨量とレーダ雨量計及びX-MPの雨量データによる面積雨量の比較検討を行う。

1つ目は, 解析流域において間引き法を適用し, 地上

雨量観測所数を変化させた場合の面積雨量と各レーダによる面積雨量を時間降水量と日降水量の2つの時間分解能で比較する。手取川流域では, 図-2のように流域内の地上雨量観測所を3, 6, 12箇所の3パターン, 梯川流域では, 図-3のように3, 6箇所の2パターンで検討を行う。

2つ目は, 上記の間引き法の解析結果から得られた各パターンによるサブ流域面積と面積雨量を用いて, 地上雨量観測所1箇所あたりの支配面積と面積雨量による相対推定誤差の関係を明らかにする。その際, 各レーダによる面積雨量は, 地上雨量データの面積雨量と解析条件を一致させるため, 各パターンで作成されたサブ流域にあわせて雨量データを抽出して解析する。なお, 相対推定誤差は既往研究⁶⁾に従って, 以下の(4)式より算出した。

$$\sigma^2 = \int_A (p - P)^2 dA / A$$

$$\frac{\Delta P}{P} = 0.819 \frac{\sigma}{P} n^{-0.636} \quad (4)$$

ここで, σ は降雨の面積的な標準偏差, A は流域面積で $A = \int_A dA$, P は面積雨量で $P = \int_A P dA / A$, p は地点雨量, n は雨量観測所数を示す。

3つ目は, 地形性降雨における地上雨量データとX-MPの面積雨量の比較を行う。そこで, 地形性降雨の現象発生に最も影響を与える地形の標高値に着目し, 各サブ流域の平均標高値を用いて検証する。サブ流域の平均標高値の算出にあたり, 標高データは, 国土地理院が発行し

図-4 地上雨量と各レーダによる面積雨量の比較
(日降水量，梯川流域を3分割した場合)。

表-1 時間降水量の階級別における相関係数。

梯川	地上 vs. レーダ雨量計	地上 vs. X-MP
～1mm/h	3 0.461	3 0.431
	6 0.614	6 0.590
1～5mm/h	3 0.419	3 0.470
	6 0.456	6 0.581
5～10mm/h	3 0.571	3 0.412
	6 0.478	6 0.436
10mm/h～	3 0.703	3 0.740
	6 0.810	6 0.890
全体	3 0.925	3 0.934
	6 0.946	6 0.959

ている数値地図50mメッシュ（標高）のデータを用いた。それにより，各サブ流域内に含まれる全ての標高データを抽出して算術平均した値を平均標高値と定義した。対象流域は，X-MPが高精度で雨量推定が可能なレーダサイトから30km圏内¹²⁾にほぼ全域が含まれる梯川流域を対象とし，流域内に地上雨量観測所を3箇所と6箇所配置した場合で解析を行う。それにより，地上雨量データによる面積雨量と，高解像度で雨量推定ができるX-MPの面積雨量との推定誤差(NE)を算出して比較検討を行う。なお，NEは以下の(5)式から算出した。

$$NE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N |R_i(r) - R_i(g)|}{\sum_{i=1}^N R_i(g)} \times 100 \quad (5)$$

ここで， $R_i(g)$ は地上雨量による面積雨量(mm/h)， $R_i(r)$ はX-MPによる面積雨量(mm/h)， N はデータ母数を示す。

3. 解析結果

(1) 梯川流域における面積雨量の比較検討

図-4に，流域を3分割した場合の日降水量における地上雨量と各レーダによる面積雨量の関係を示す。また，図中には同様な解析を行った既往研究のデータ⁶⁾も示す。これより，レーダ雨量計は，地上雨量データの面積雨量

図-5 地上雨量と各レーダによる面積雨量の比較
(時間降水量，梯川流域を3分割した場合)。

と比べて多少ではあるが過大傾向であることがわかる。X-MPの方は，電波消散域によるデータ欠測の影響もあり，レーダ雨量計と比べると過大と過小の間で多少ばらついたデータ分布になっているが，地上雨量とほぼ同等のデータ特性であることがわかる。また，約50(mm/day)を境に，それ以下では両レーダの面積雨量ともほぼ同じ値であるが，それ以上になると各レーダによって異なる値になっていることがわかった。これは流域を6分割した場合でも，同様な結果であった。この原因の一つとして，各レーダによる降水量推定方法の違いが考えられる。よって，日降水量を用いた各レーダの面積雨量は，地上雨量の面積雨量とほぼ同等であり，流域の分割数の影響も大きく受けないことがわかった。

図-5に，流域を3分割した場合の時間降水量における地上雨量と各レーダによる面積雨量の関係を示し，表-1に流域の分割数別における，各種面積雨量の相関係数をまとめた。これにより既往研究通り⁶⁾，流域を3分割より6分割した方が，ほとんどの階級において相関係数が改善することが確認できた。全体で見ると，レーダ雨量計とX-MPとも地上雨量データとの高い相関性があり，X-MPの方が多くの階級でわずかながら相関係数が高い。

階級別では，比較的降雨強度が弱い10(mm/h)未満までは，X-MPよりレーダ雨量計の方が相関係数が高く，これは既往研究¹²⁾においても弱雨ではX-MPよりレーダ雨量計の方が降水量推定精度が高いことが影響していると考えられる。そして，10(mm/h)以上では，X-MPの方がレーダ雨量計より多くの階級でわずかながら相関係数が高く，これも既往研究¹²⁾の結果通り，特に強い降水強度において高精度で降水量を推定できるX-MPの降水量データの影響が大きいことが考えられる。

(2) 手取川流域における面積雨量の比較検討

図-6に流域を3分割した場合の日降水量における地上雨量と各レーダによる面積雨量の関係を示す。手取川流域では，先述の梯川流域とは異なり，約30(mm/day)の境として，各レーダで異なるデータ特性が見られた。それ以外は，梯川流域の解析結果と類似する結果であった。

図-6 地上雨量と各レーダによる面積雨量の比較
(日降水量，手取川流域を3分割した場合)。

表-2 時間降水量の階級別における相関係数。

手取川	地上 vs. レーダ雨量計	地上 vs. X-MP
～1mm/h	3 0.502	3 0.405
	6 0.547	6 0.478
	12 0.619	12 0.507
1～5mm/h	3 0.600	3 0.519
	6 0.793	6 0.638
	12 0.778	12 0.604
5～10mm/h	3 0.405	3 0.400
	6 0.549	6 0.601
	12 0.679	12 0.641
10mm/h～	3 0.710	3 0.836
	6 0.905	6 0.958
	12 0.859	12 0.923
全体	3 0.918	3 0.889
	6 0.946	6 0.916
	12 0.952	12 0.922

図-7に，流域を3分割した場合の時間降水量における地上雨量と各レーダによる面積雨量の関係を示し，表-2に流域の分割数別における，各データの面積雨量の相関係数をまとめた。これにより，先述通り3分割より6分割，さらに12分割した方が，多くの階級で相関係数が改善することが確認できた。ただし，本研究で作成したサブ流域は，地上雨量観測所の選択によって同分割数でも異なる形状となり，本結果と同様になるとは必ずしも言えないため，さらに検証していく必要がある。また，流域を3分割した場合と12分割した場合の相関係数を比較しても，極端な相関係数の低下は見られないため，手取川の流域規模であれば，流域を3分割した場合でも各レーダの面積雨量と高い相関性が確保できることが言える。

全体で見ると，先述通りレーダ雨量計とX-MPでは高い相関性を維持しており，梯川流域の場合とは異なり，多くの階級でX-MPよりレーダ雨量計の方が相関係数が高いことがわかる。これは，手取川の流域規模になると，X-MPのレーダサイトからの距離と降水量推定精度の関係¹²⁾の影響が無視できなくなることが考えられる。

階級別では，梯川流域と同様な結果が得られ，降雨強度が弱い階級ではレーダ雨量計が優位であり，降雨強度が強いほどX-MPの方が優位であることがわかった。よって，各レーダの雨量データは，レーダの観測仕様や推定方法により優位な降水強度の領域があるため，本解

図-7 地上雨量と各レーダによる面積雨量の比較
(時間降水量，手取川流域を3分割した場合)。

図-8 地上雨量観測所1箇所あたりの支配面積と面積雨量の
相対推定誤差の関係。

図-9 梯川流域における各サブ流域の平均標高値と地上雨量
とX-MPによる面積雨量の推定誤差。

析結果より降雨強度に応じて各レーダデータを使い分けることが，非常に有効であることが明らかになった。

(3) 地上雨量観測所1箇所あたりの支配面積と相対推定誤差の関係に関する検討

図-8に，両流域の各種面積雨量における地上雨量観測所1箇所あたりの支配面積と相対推定誤差の関係を示す。また，図中には既往研究^{3), 7), 13)}における，各流域の同様な解析結果も追加している。それにより，両流域とも，既往研究の解析結果より多少相対推定誤差が小さくなる結果となったが，データ特性が大きく異なることはなかった。地上雨量データによる面積雨量は，支配面積が増加すると相対推定誤差も増加する傾向であるが，各

レーダによる面積雨量では、支配面積の増加に対して緩やかに増加する傾向であることがわかった。この原因の一つとして、面的な雨量推定が可能であるレーダの観測方法の違いが最も大きな要因であることが考えられる。

(4) 地形性降雨における面積雨量の検討結果

図-9には、各サブ流域の平均標高値と地上雨量とX-MPの面積雨量から算出したNEの関係を示す。本解析では、2章(3)項で先述した通り、X-MPが高精度で観測可能な範囲である梯川流域を対象とした。これにより、今回の解析では、時間及び日降水量ともサブ流域の平均標高値と推定誤差に有意性は見られなかった。よって、サブ流域の平均標高値が約300mまでであれば、地上雨量とX-MPの面積雨量に相違性は見られないことがわかった。

今後は、より高い平均標高値を含むサブ流域で検討する必要がある。また、雨域の規模やその通過する経路などを把握した上で降水イベントを選択し、地上雨量観測所の位置関係も十分考慮しながら検証する必要がある。

4. 結論

X-MPの定量観測範囲内を流れる手取川流域と梯川流域を解析対象として、地上雨量データと高解像度のレーダデータを用いて、既往研究結果と比較しながら、様々な条件下で面積雨量の比較検討を行った。ここで、本研究によって得られた知見をまとめる。

(1) 手取川流域及び梯川流域における各種面積雨量の解析結果

両流域とも既往研究の通り⁶⁾、流域の分割数が増やすことで、地上雨量による面積雨量は各レーダによる面積雨量に近づくことを確認できた。また、手取川の流域規模であれば、流域の分割数が3つでも、相関係数から地上雨量による面積雨量と各レーダによる面積雨量は、ほぼ同等であった。時間降水量別の比較では、降雨強度の弱い領域ではレーダ雨量計、強い領域ではX-MPの方が相関係数が高くなることが明らかになった。

(2) 地上雨量観測所1箇所あたりの支配面積と相対推定誤差の関係に関する解析結果

地上雨量による面積雨量は既往研究の通り^{3), 7), 13)}、支配面積が増加すると相対推定誤差も増加するが、レーダ雨量計やX-MPによる面積雨量では、緩やかに増加する傾向であった。その要因の一つとして、レーダでは面的な雨量観測が可能であるという観測方法の違いが最も大きく影響していることが考えられる。

(3) 地形性降雨における面積雨量の解析結果

サブ流域の平均標高値に着目して、地上雨量とX-MP

の面積雨量と比較した結果、サブ流域の平均標高値が約300mまでであれば、地上雨量とX-MPによる面積雨量には相違性は見られないことがわかった。

謝辞：本研究は、国土交通省「XバンドMPレーダに関する技術開発コンソーシアム」を通じてデータの提供を受けた。また、レーダ雨量計及びX-MPの観測仕様に関して、国土交通省国土総合政策技術研究所の土屋修一博士より助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 川畑幸夫：水文気象学，地人書館，268pp.，1960.
- 2) 中川吉雄：雨量観測点の密度と面積雨量，天気，Vol.3，No.2，pp.14-16，1955.
- 3) 橋本健，佐藤一郎：面積雨量の精度と雨量観測所数，土木技術資料，Vol.16，No.12，pp.35-41，1974.
- 4) 福岡捷二，谷岡康，高本正彦：都市中小河川流域における雨量観測所の密度が面積雨量精度に与える影響，水工学論文集，Vol.37，pp.27-32，1993.
- 5) U.S. Weather Bureau: The Reliability of Areal Rainfall Determination, *Hydrometeorological Report*, No.5, pp.234-259, 1974.
- 6) 山田正，日比野忠史，中津川誠，藤沢充哲，森永博史：レーダ雨量計情報の動画像解析による降雨予測手法の提案と流域平均雨量の推定法に関する研究，土木学会論文集，Vol.558/II-38，pp.13-30，1997.
- 7) 吉野文雄，水野雅光，井川貴史：レーダ雨量計から見た降雨の時空間特性について，水理講演会論文集，Vol.32，pp.1-6，1988.
- 8) 田中雅基，高柳和己，田中康寛：天塩川流域の局地豪雨における流域平均雨量の特性評価，国土交通省北海道開発局第54回(平成22年度)北海道開発技術研究発表会，AA21，2011.
- 9) Krajewski, W. F., Rexroth, D. T., Morrissey, M. L.: The Accuracy of the Area-Threshold Method: A Model-based Simulation Study, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.31, pp.1396-1406, 1992.
- 10) 原田守博，羽澄貴史：XバンドMPレーダ情報に基づく局地的短時間豪雨の雨域性状の確率論的評価，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.70，No.4，pp.I_511-I_516，2014.
- 11) Maesaka, T., Maki, M., Iwanami, K., Tsuchiya, S., Kieda, K. and Hoshi A.: Operational Rainfall Estimation by X-band MP Radar Network in MLIT, Japan, *Proceedings of 35th Conference on Radar Meteorology*, September 26-30, Pittsburgh, USA, 142, 2011.
- 12) 林義晃，手計太一，永島健，山崎惟義：北陸地方におけるXバンドMPレーダの降水量推定精度に関する時空間分布特性，水文・水資源学会誌，Vol.28，No.5，pp.165-175，2015.
- 13) 竹内俊雄，江川太郎，神谷隆太郎：山地流域における一雨雨量の降雨分布について，土木研究所報告，No.106，pp.45-61，1961.

(2015. 9. 30受付)