

XRAINを用いた 流出予測精度向上に係る手法の研究

Improvement of Accuracy of Runoff Estimation
by using XRAIN(X-band polarimetric multi parameter Radar Information Network)

荒木智三¹・越田智喜²・滝口大樹³・吉田一全⁴・三浦裕司⁵

Tomokazu ARAKI, Tomoki KOSHIDA, Hiroki TAKIGUCHI, Kazumasa YOSHIDA, Yuji MIURA

¹非会員 学士 いであ株式会社 水圏事業本部河川部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

²正会員 修士 (理学) いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕2-2-2)

³非会員 修士 (工学) いであ株式会社 水圏事業本部河川部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

⁴非会員 修士 (理学) いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕2-2-2)

⁵正会員 学士 いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕2-2-2)

X-band Multi Parameter radars (XMP) have been installed quickly in Japan in purpose of heavy rain disaster prevention around metropolitan area. XMP have an advantage in observational accuracy over conventional C-band radars. So they are expected to provide accurate rain fall information which improves the accuracy of runoff model about flood prevention around mountainous areas. In this study we examined to apply rain amount observed by XMP to a distributed rainfall-runoff model to analysis typhoon runoff. XMP showed good accuracy in comparison of ground rain gauge especially the area near radar sites but the results of runoff analysis was underestimated by attenuation. The method to correct low accuracy areas due to attenuation in XMP by C-band radars are proposed.

Key Words: MP Radar, Runoff Analysis, Distributed rainfall-runoff model, K_{DP} , Radar Rain Gauge

1. はじめに

(1) XバンドMPレーダ導入の背景

近年、気候変化による豪雨や台風の強度増大などにより浸水被害(2008年度神戸市の都賀川、金沢市の浅野川、岡崎市の伊賀川等)が頻発していることを受け、国土交通省は2009年度に小規模な流域や雨域の状況を精緻に観測するためのシステムとしてXバンドMPレーダ(以下、XMP)を導入しリアルタイムで詳細な降雨状況を把握する体制を強化している¹⁾。2012年には土砂災害が懸念される地域(宮城・岩手内陸地震や桜島等)にもXMPが設置され2013年度から全国35基で本格運用が開始された²⁾。さらに、2014年度には新たに3基が一般配信に追加予定されており今後利用範囲が広がることが期待される。

XMPは2つの偏波を用いた観測に特長があり、二偏波の位相差の距離変化量である K_{DP} (比偏波間位相差あるいは偏波間位相差変化率)を活用することによって、従来のレーダ雨量計に比べて地上雨量計の観測結果による補正を用いなくても高い精度が得られることがわかっている³⁾。

(2) 分布型流出モデルの背景

分布型流出モデルは、従来の集中型モデルと比較し、流域の地形、降雨の空間分布、土壌特性の空間的な分布を直接モデルに考慮することにより流出予測の精度向上が図られている。流出解析精度は入力情報の空間分布に依存する⁴⁾が、XMPでは時間空間分解能の高い、格子状の定量的な雨量が得られることから、XMPを用いることで流出モデルの精度が高まることが期待される。

(3) 本研究の目的

本研究では、2013年度に本格運用が始まったXMPレーダを利用する上での技術的な特徴を整理し、流出モデルや氾濫モデルへ活用した場合の精度、課題を検討することを目的とする。

2. データと検証

(1) 検討対象領域

本研究における検討対象領域は流出量を換算するため、

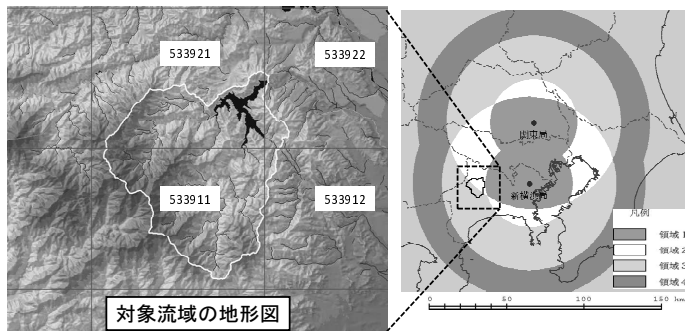


図-1 宮ヶ瀬ダム位置図およびXMP観測範囲
左図の数字は2次区画コードを示す。

ダム流域とし、XMPからの距離を考えて、宮ヶ瀬ダム流域とした。宮ヶ瀬ダムは一級水系の相模川水系中津川に建設された、流域面積が213.9km²の多目的ダムである。対象流域図を図-1に示す。

XMPを用いた雨量推定は、レーダサイトからの距離が30km 以内であれば現業で用いられているC バンドレーダよりも精度が高いことが知られている⁵⁾。しかし、遠方では降雨減衰に伴う電波消散により、精度が低下する場合があります。異なる方向から複数基のレーダで観測することにより精度低下を抑えている⁶⁾。そこで、最寄のレーダからの距離および異なるレーダからの距離により下記①～④のように領域分類することで精度を評価している。

①領域1<精度が非常に良い>

「あるレーダから半径30km以内
かつ異なるレーダから半径60km以内」

②領域2<精度が良い>

「あるレーダから半径30～60km
かつ異なるレーダから半径30～60km」
または、「あるレーダから半径30km以内
かつ異なるレーダから半径60km以遠」

③領域3<定量観測範囲>

「あるレーダから半径30～60km
かつ異なるレーダから半径60km以遠」

④領域4（領域1～3以外）<定性観測範囲>

「どのレーダからも半径60km以遠となる領域」

(2) 解析に使用したデータ

レーダ雨量の精度評価に用いたレーダデータの仕様を表-1に示す。XMP、Cバンドともコンソーシアム⁷⁾から提供されるデータをサーバよりダウンロードして用いた。ともにレーダ間の合成を行いXMPは250m、Cバンドは1kmの格子データである。XMPのデータは地上雨量による補正なしであるのに対し、Cバンド雨量はオンラインによる地上雨量の補正⁷⁾を行なわれている。

地上雨量は国土交通省のデータはWebで公開されている水文水質データベース⁸⁾からダウンロードし、アメダ

表-1 XMPとCバンドレーダの仕様比較

レーダ種類	Xバンドレーダ (XRAIN)	国土交通省 Cバンドレーダ
観測間隔	1分	5分
情報発表までのタイムラグ	1～2分	5～10分
提供するデータの分解能	250m	1km
定量範囲	60km	120km
運用目的	都市型豪雨対策	全国の雨量監視
二重偏波の有無	○	△ ¹⁾
ドップラー観測	○	△ ¹⁾
ポリウムスキャン	○	△ ¹⁾

*1:一部のレーダサイトで実施

表-2 検討対象洪水

降雨	計算対象期間	降雨成因	宮ヶ瀬ダム	
			最大流入量(m ³ /s)	発生日時
1	2011 7/18 0:00 ～ 7/22 0:00	台風6号	371	2011 7/20 1:00
2	2011 9/19 0:00 ～ 9/23 0:00	台風15号	644	2011 9/21 17:00

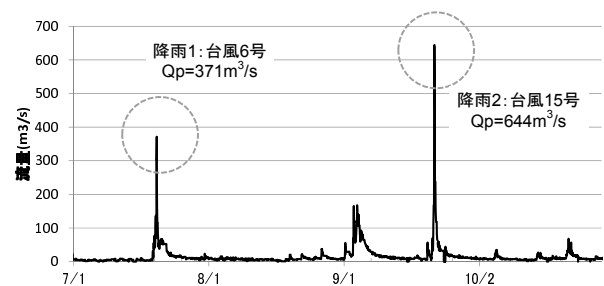


図-2 解析対象降雨の抽出

ス雨量は、(一財)気象業務支援センターから気象庁月報CD⁹⁾を購入した。

(3) 検討対象降雨

検討対象洪水は2011年の4月～10月までのダム流入量から特に大きな値を示した期間を2事例抽出した。図-2に示すダム流量の時系列より流出量の多い洪水を2事例選んだ。

計算期間は最大流出量を含む4日間とした。流出量の計算期間を表-2に示す。

また、流出解析に用いる入力値としてレーダ雨量が適当であるかを確認するために、流出解析を行った期間についてレーダ雨量の精度評価を行った。

(4) 観測精度

入力値に用いるXMPの雨量の精度を確認した。

観測範囲内の地上雨量観測地点別に、地上雨量と直上メッシュのレーダ雨量(1時間)の強度を比較し、地上雨量(x_i)とレーダ雨量(y_i)から、下記の式により精度指標値を算出する。これらにより、レーダ雨量の精度を評価する。ここで、 x_i :時刻iの地上雨量(mm)、 y_i :時刻iのレーダ雨量(mm)、 x :平均地上雨量(mm)、 y :平均レーダ雨量(mm)、 N :データ数である。

① 相関係数

地上雨量とレーダ雨量の類似性を評価する。

$$\text{相関係数} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

② 二乗平均誤差

地上雨量とレーダ雨量の誤差の絶対値を評価する。

$$\text{二乗平均誤差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (2)$$

③ 総雨量比

地上雨量とレーダ雨量の量的な大小を評価する。

$$\text{総雨量比} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i} \quad (3)$$

④ 回帰係数

回帰係数は一次回帰式 $Y = aX$ の a であり地上雨量とレーダ雨量の量的な一致度を評価する。

$$\text{回帰係数} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}} \quad (4)$$

地上とレーダの比較散布図を図-3に示す。精度指標値は図中に記載した。用いたデータは複数のレーダを合成した雨量であるが、XMPの精度はレーダサイトから遠方になると低下することがわかっており^{10), 11)}今回も同様の結果が得られた。

宮ヶ瀬ダム領域は領域2および領域3に位置しているため、回帰係数が距離とともに小さくなるが、Cバンドと同様の精度が確保できていることが確認された。

(5) 流出解析の結果

本研究ではセル分布型流出モデル¹²⁾を用いた。このモデルは、国土地理院の数値地図のメッシュ標高データをもとに、最急勾配方向に雨水が流れると考える落水線図を作成し、落水線を持つ矩形斜面の集合体として、流域表現する。その後、各矩形斜面に降雨流出モデルを適用し、流域地形に即して上流側から下流側へと順次流出計算を行う。表層土壌内のモデルは、立川¹³⁾によって開発された飽和・不飽和流れを考慮したモデルを使用した。このモデルはマトリックス部を流れる不飽和流、大空隙部を流れる飽和中間流、地表部を流れる表面流の3種類の流れを考慮している。

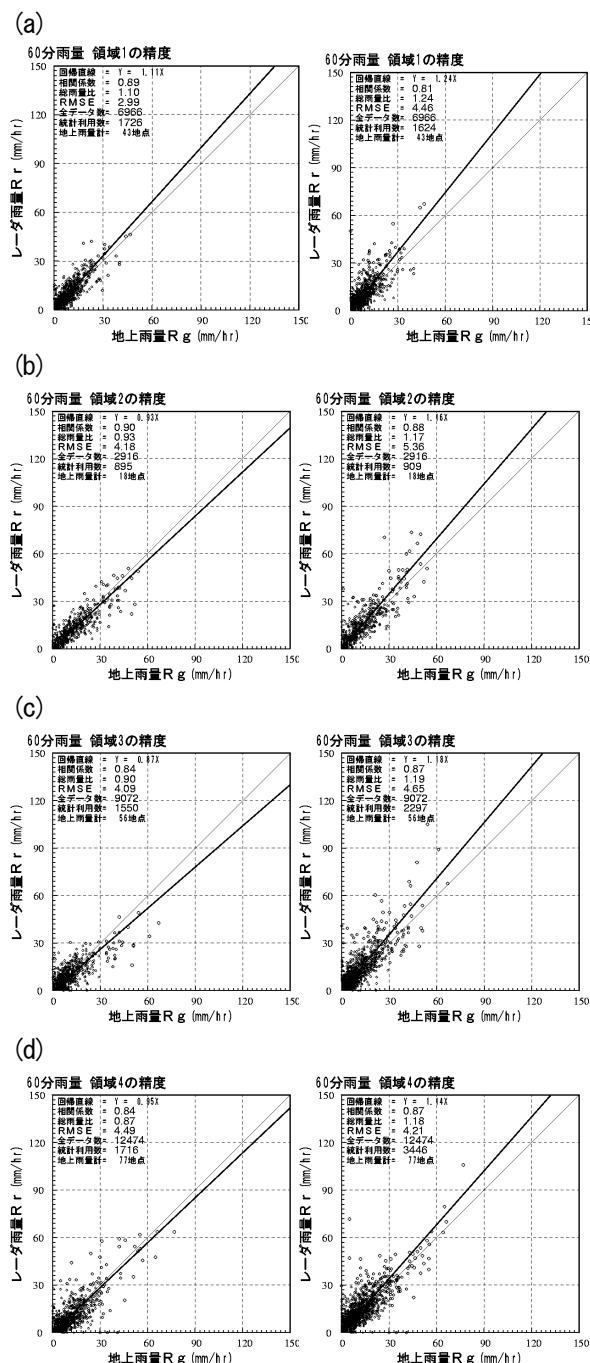


図-3 XMPと地上雨量の散布図 (a)領域1, (b)領域2, (c)領域3, (d)領域4, 左がXMP, 右がCバンドと地上の比較

対象降雨に対して流出解析を行った結果を図-4に示す。流出解析にあたり、XMPとCバンドそれぞれについて降雨1と降雨2の洪水の立上り部からピーク付近の再現性に着目し、モデルパラメータ（土層厚、透水係数、斜面粗度係数）を設定した。ただし、XMPについては降雨2で電波消散域の影響が大きいと考え降雨1の再現性を重視した。流出解析の結果、洪水規模が大きくない降雨1ではXMP、Cバンドともよい再現結果が得られたが、洪水規模の大きい降雨2ではXMPが流量をかなり過小評価していた。

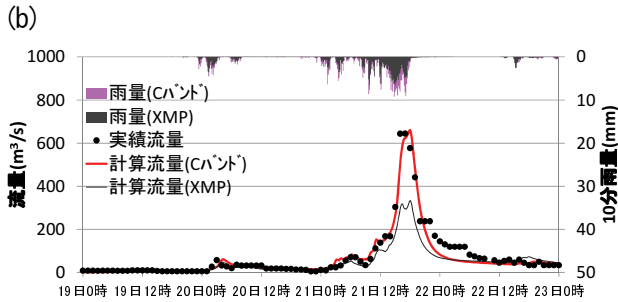
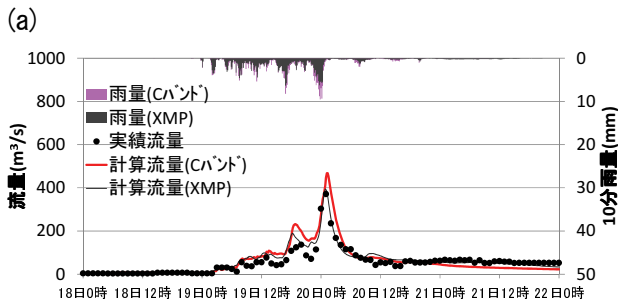


図-4 流出解析結果

(a)降雨1 (2011年7月), (b)降雨2 (2011年9月)

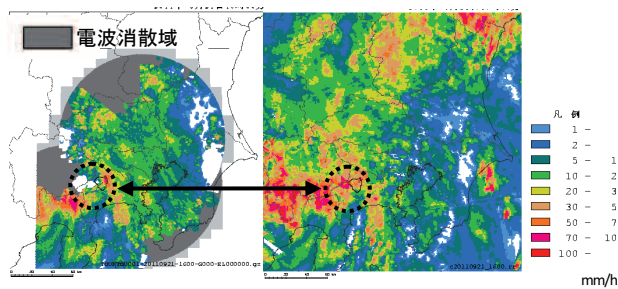


図-5 XMPとCバンドの合成雨量比較

(左: XMP, 右: Cバンドレーダ)

XMPを用いた流出解析には鶴見川流域¹⁴⁾, 日吉ダム流域¹⁵⁾があるが, 今回対象とする宮ヶ瀬ダムはやや遠方に位置しており, 日吉ダムの結果と類似していた。また降雨2については, 電波消散域によって十分な雨量が観測できていないことが考えられる。

3. XMPのCバンド雨量による補正

(1) 補正方法の提案

XMPの K_{DP} 法を用いない弱雨域をCバンドで置き換えることで, 強雨に強いXMPの特長, 山地部でも安定した精度を確保するCバンドの特長を合わせたレーダ雨量が得られると考えた。合成雨量をCXコンポジット雨量と呼ぶ。強雨域の判定には, K_{DP} 法を用いているメッシュをXMP合成レーダに記録されている品質情報より判断した。

表-1に示すようにCバンドとXMPには観測時間の違いがあり, 雨量分布の見た目を重視すれば, 両者の雨量分布の位置ずれは問題であるが, 流出解析に用いる雨量は

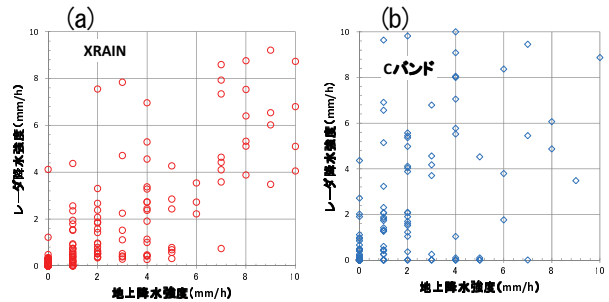


図-6 弱雨域における精度比較 (早戸)

(a)XMP, (b)Cバンド

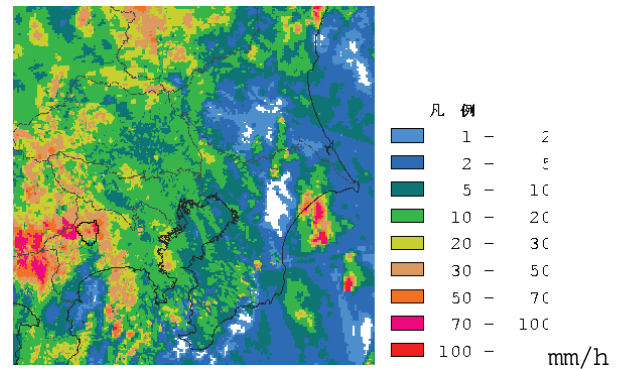


図-7 CX合成雨量分布図 2011年9月21日16:00

計算ステップごとに積算雨量があればよいので, CバンドとXMPのずれはそれほど大きくないと考えた。

合成にあたって, XMPは電波消散域を判定しており, 電波消散域以外をCバンド雨量で置き換えることを考えられるが, 雨量分布 (図-5) をみると電波消散域 (図-5で示されるグレー領域) ではないところでも雨量が小さい (図-5中破線)。

したがって, 電波消散域のみをCバンドで置き換えるのは十分でないと判断した。メッシュごとの品質フラグを読み取り, K_{DP} 法による雨量は精度が高いので K_{DP} 法による算出雨量は採用し, それ以外をCバンド雨量で置き換えた。

さらに, Cバンド雨量が0mmの領域は, MTI (グランドクラッタ処理) により減算されている恐れがある。図-6に流域内の雨量観測所, 早戸におけるXMPとCバンドの散布図を示す。XMPでは10mm/h以下の弱い降水強度についても地上雨量と良い対応を示すが, Cバンドは時間4mm以上の降水の場合においてもレーダ降水強度が0mm/hを示す場合がある。したがって, Cバンドの降水強度が0mm/hの場合には, XMPの雨量により置き換えることとした。

図-7にCXコンポジット雨量分布を示す。図-5において, XMPで雨量が小さくなっていた領域がCバンドによって補填されていたことがわかる。

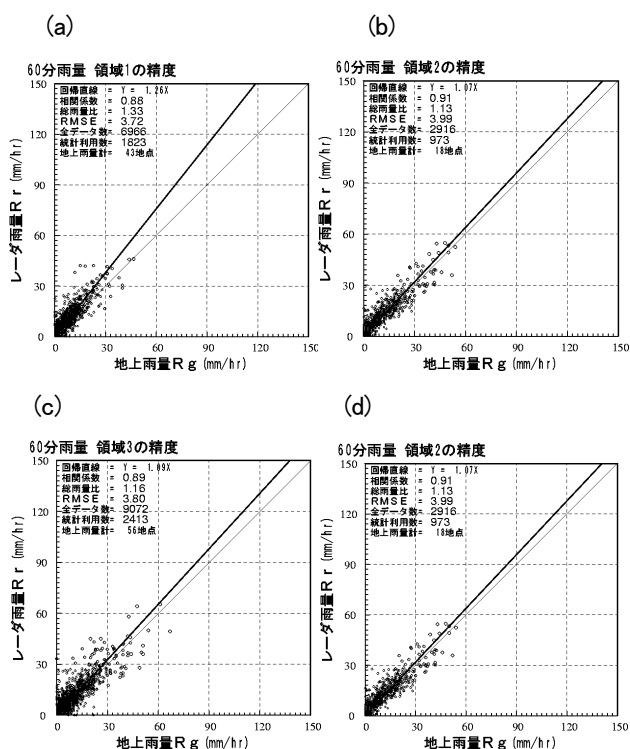


図-8 CXコンポジット雨量と地上雨量の散布図

(a) 領域1, (b) 領域2, (c) 領域3, (d) 領域4

表-3 各雨量の領域ごとの精度指標値

(3種の中でもっとも精度が高いものに影を付けた)

(a) XMP

XRAIN	相関係数	RMSE	総雨量比	回帰係数
領域1	0.89	2.99	1.10	1.11
領域2	0.90	4.18	0.93	0.93
領域3	0.84	4.09	0.90	0.87
領域4	0.84	4.49	0.87	0.95

(b) Cバンド雨量

Cバンド	相関係数	RMSE	総雨量比	回帰係数
領域1	0.81	4.46	1.24	1.24
領域2	0.88	5.36	1.17	1.16
領域3	0.87	4.65	1.19	1.18
領域4	0.87	4.21	1.18	1.14

(c) CXコンポジット雨量

CXコンポ	相関係数	RMSE	総雨量比	回帰係数
領域1	0.88	3.72	1.33	1.26
領域2	0.91	3.99	1.13	1.07
領域3	0.89	3.80	1.16	1.09
領域4	0.88	3.90	1.17	1.10

(2) CXコンポジット雨量の精度

CXコンポジット雨量により改善された雨量を確認する。CXコンポジット雨量について地上雨量とレーダ雨量の散布図を図-8に示す。精度指標値は表-3にまとめた。XMPとCバンドの両方の精度が高いところを合成しているので領域1を除いて精度が高くなっている。

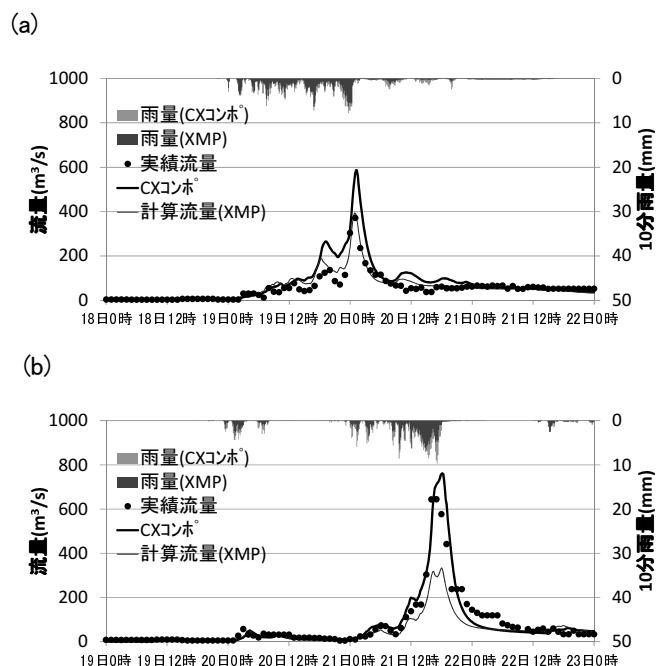


図-9 CXコンポジット雨量による流出解析結果

(a)降雨1, (b)降雨2

(3) CXコンポジット雨量による流出解析結果

XMPレーダ雨量, Cバンド雨量, CXコンポジット雨量を入力値とした, 流出解析結果を図-9に示す。

降雨2についてはCXコンポジット雨量を入力値とすることで, XMPのピーク流量の過小評価傾向が改善され, ピークの出力が再現できるように改善されたことが示された。降雨1ではやや過大傾向となった。

4. まとめ

今回, 都市型豪雨対策として開発されたXMPの雨量を山地部のダム流域の流出解析に応用し, 流出解析の精度確認を行った。検討結果を以下にまとめる。

- ① XMPの観測精度は60km範囲内においておおむね良好であり, Cバンドより高精度であった。
- ② 対象流域がレーダから30kmより遠方にある場合, 面的な雨量精度が求められる流出解析にXMP雨量を用いると, 電波消散域等の影響で, 流出量が過小になる傾向があった。
- ③ 電波消散域の影響を避けるためCXコンポジット雨量を作成した。CXの合成雨量はXMPの距離方向の低下を補正し, 特にレーダから30kmより遠方にある場合にXMP単体より高い精度が確認された。
- ④ CXコンポジット雨量はXMPの品質フラグを閾値としており, 他流域への適用が容易である。CXコンポジット雨量を流出解析に用いるとXMPの過小評価傾向が改善された。

XMPとCバンドの合成について、今回の手法はXMP雨量の精度が低いと考えられるメッシュを単純にCバンドで置き換えたが、合成した雨量分布を公開する場合には以下の改善案がある。

- ・Cバンド1kmメッシュをXMPと同様に250mに内挿する。
- ・Cバンド5分、XMP1分の時間ずれを、Cバンドを時間外挿することで、時間を一致させる。

今後は、低水管理にも用いることができるように、入力値であるCXコンポジット雨量の精度および、分布型流出モデルの精度を上げていく予定である。

謝辞：本研究で用いたXMPのデータは「国土交通省XバンドMPレーダに関する技術コンソーシアム」において受信した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：“XバンドMPレーダの整備，降雨・洪水予測の高度化等の技術研究開発により，局地的な大雨や集中豪雨対策を推進します”，報道発表資料，2009/6/25，http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000167.html.（参照：2012/9/30）.
- 2) 国土交通省：“XRAIN（エックスレイン）（XバンドMPレーダネットワーク）配信エリア拡大！”，報道発表資料，2009/9/3，http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000685.html.（参照：2013/9/6）.
- 3) 加藤敦，真木雅之，岩波越，三隅良平，前坂剛：Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト，水文・水資源学会誌，Vol.22，No. 5，pp.372-385，2009.
- 4) 立川康人・永谷言・寶馨：分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価，京都大学防災研究所年報第46号B-2 平成15年4月，2003
- 5) 高堀章，前坂剛，三隅良平：Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定—複数仰角PPIデータを用いた改善効果について—，防災科学技術研究所研究報告，（73），41-47，2009
- 6) 国土交通省：関東地域における雨量観測の強化，<http://www.mlit.go.jp/common/000165824.pdf>.（参照：2014/3/28）
- 7) 一般財団法人河川情報センター：レーダ雨量データのデータベース化，<http://www.river.or.jp/03reda/07.html>.（参照：2014/3/28）
- 8) 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>.（参照：2014/3/28）
- 9) 一般財団法人気象業務支援センター：資料一覧【オフラインデータ】，<http://www.jmbc.or.jp/hp/offline/cdoff1.html>.（参照：2014/3/28）
- 10) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料 1.1.3 XバンドMPレーダによる豪雨監視の強化について，<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0749pdf/ks0749.pdf>.（参照：2014/3/28）
- 11) 藤岡 奨，佐山 敬洋，三浦 裕司，越田 智喜，深見 和彦：レーダ雨量の不確実性を反映した降雨場の生成に関する研究，水工学論文集第57巻，pp.I_319-I_324，2013.
- 12) 児島利治・宝 馨・岡 太郎・千歳知礼：ラスタ型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響，水工学論文集，第42巻，pp. 157 - 162，1998.
- 13) 立川 康人，永谷 言，寶 馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，水工学論文集，第48巻，pp. 7 - 12，2004.
- 14) 山口悟史，菅 恒，蛇島伸吾，池田務，後藤祐輔：XバンドMPレーダによる洪水再現精度向上効果，土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度)，II-180，2011.
- 15) 南山晃一，Kim Sunmin，萬 和明，立川 康人，椎葉 充晴：実時間洪水予測システムへのXバンドMPレーダデータの導入，土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度)，II-180，2011

(2014. 4. 3受付)