

1分値地上観測雨量データを用いた都市中小河川流域におけるXバンドMPレーダ雨量の精度評価

PRECISION EVALUATION OF X-BAND MP RADAR RAINFALL IN A SMALL URBAN WATERSHED BY COMPARISON TO 1-MINUTE GROUND OBSERVATION RAINFALL DATA

米勢嘉智¹・河村明²・天口英雄³・戸野塚章宏⁴

Yoshitomo YONESE, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI and Akihiro TONOTSUKA

¹正会員 工修 (株) 建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

²正会員 工博 首都大学東京教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³正会員 工博 首都大学東京助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴学生会員 首都大学東京 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

Under the frequent floods caused by localized concentrated heavy rainfall, it becomes considerably important to achieve detailed rainfall, especially localized concentrated heavy rainfall in a small urban watershed. X-band MP-radar, providing space-time distribution rainfall data, is expected to be made effective use of its advanced detailed data, while few studies on the precision evaluation of 1-minute X-band MP radar data were conducted. This paper discusses results on the precision evaluation of X-band MP radar data by comparison to 1-minute ground observation rainfall data, installed in high density at the upper basin of Kanda river in Tokyo. The results showed that 1-minute data of X-band MP radar realized detailed space and time scale rainfall distribution, though it was hardly met by 10-minutes data, and sufficiently described localized concentrated heavy rainfall in a small urban watershed.

Key Words : 1-minute data, X-band MP radar, XRAIN, ground observation rainfall data, small urban watershed, Kanda river

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な集中豪雨により洪水被害が頻発している。特に首都圏においては、人口や生産基盤等の集中、都市化や気候変動等に起因した洪水流量の増大などの社会・環境条件により水害リスクが一層増大している。都市域の中小河川では、短時間における集中豪雨により、河川の氾濫や内水による浸水被害の危険性が高いため、都市流出解析では詳細な1分値降雨や水位観測データを用いた流出解析が行われている¹⁾²⁾。このような流出解析による河川水位の推定のためには、第一に詳細な降雨の空間・時間分布を的確に把握することが重要となる。

国土交通省が整備するXバンドMPレーダネットワーク(XRAIN)は、2010年からの試験運用期間を経て2014年3月に本格運用を開始し、詳細な降雨の時空間分布の情報が入手できる環境が整備されている。レーダによる降雨観測特性や高精度な降雨量推定についての研究

も進められてきており、XバンドMPレーダ雨量の精度向上が図られている^{3)~5)}。また、XバンドMPレーダによる解像度の高い降雨観測データを活用した取り組みとしては、地上雨量観測所による降水量および降雪量推定精度の検証⁶⁾や、名古屋地区における雨域解析による地上雨量計との比較⁷⁾、時間分解能の長い降水イベントにおける降雨量推定や詳細な空間精度に関する検証⁸⁾などが挙げられる。これらはレーダ雨量における観測特性を活かして、数十km²程度の比較的広域を対象としているものが多い。小流域における研究事例⁹⁾としては、二級河川流域(21km²)を対象とした精度検証が行われ、空間的な変動が大きい局地豪雨において、地上雨量計による流域平均降雨とXバンドMPレーダ雨量との差が大きくなることが指摘されている。

上述したXバンドMPレーダ雨量の精度検証では、地上雨量の観測時間間隔との整合にも考慮して1分間隔の観測データを10分値などに換算したものを用いている。しかし、都市域の中小河川のような詳細なエリアを対象

とする場合には、より短い時間間隔における降雨量の精度が重要となるため1分データそのものの精度評価を把握しておくことが重要となる。しかし、そのような精度検証を行った既往の研究事例は見受けられない。

本研究では、東京都の代表的な都市中小河川である神田川上流域における2013年の豪雨として10イベントを抽出し、東京都に高密度に配置された地上降雨観測データ（東京都水防災総合情報システム）における雨量値を基準とした比較によるXバンドMPレーダの精度評価を実施した。

2. 対象流域および対象降雨

検証対象流域とする神田川は、東京都三鷹市の井の頭池にその源を発生し、中野区の区境付近で善福寺川と合流し、新宿区に流入する流域面積105.0km²、流路延長25.48kmの東京都内の中小河川としては最大規模の一級河川である¹⁰。本論文では、図-1に示す神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの上流域約11.5km²、流路延長約9kmを対象流域として設定した。

使用する地上雨量観測所は、東京都水防災総合情報システムによる地上雨量観測データを用いた。対象流域付近における観測所は図-2に示すとおりである。ティーセン分割法による流域内の1観測所あたりの支配面積は平均で1.3km²程度、最大でも3km²以下と、非常に高密度に配置されており、これらの観測所毎に1分間隔、最小単位1mmにて雨量データを計測している。

検証対象降雨は、2013年に発生した降雨から対象流域に豪雨をもたらした降雨を対象として抽出することとした。中小河川では、短時間の強降雨が河川水位を上昇させる。平成20年の都賀川水害の例では7月28日14:30～15:00の30分に流域周辺に強い降雨が発生し、河川水位は10分間で1.34mもの急激な上昇を示している。そのため、検証対象降雨イベントの抽出にあたっては、対象流域中央付近に位置し水位観測も実施している久我山橋観測所を対象として、30分累加雨量値が10mm以上の豪雨として表-1に示す10イベントを抽出した。なお、一降雨イベントは、6時間以上の無降水状態を伴わない一連の降雨を一降雨として設定した¹¹。また、表-1には、ティーセン分割法による流域平均総雨量の一降雨総雨量、検証降雨期間、降雨要因についても示した。

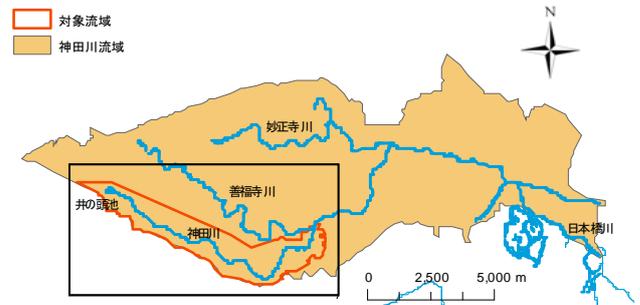


図-1 対象とした神田川上流域位置



図-2 対象流域の地上雨量観測所とティーセン分割

3. 地上雨量データとXバンド雨量データの特性

対象流域におけるXバンドMPレーダ雨量の精度を把握するため、流域内に存在する5箇所の地上雨量観測所（久我山、久我山橋、池袋橋、番屋橋、和田見橋）の各地上雨量と当該観測所メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量をもとに精度を検証した。図-3には、降雨イベントNo.1に対する久我山橋、池袋橋、番屋橋観測所の地上雨量とXバンドMPレーダ雨量のハイトグラフおよび総雨量の比較図を示した。また、同図にはRMSE（平均二乗誤差の平方根）とともに「9/5 7:00～9:00」の拡大図も示した。図-3より、地上雨量観測データは、最小単位が1mmであり、かつ単位をmm/hrに換算しているため、XバンドMPレーダ雨量と比べてと値の変動が大きくなっている。本降雨イベントNo.1は、9/5 0:00～1:30の小降雨後5:00～6:00に1山目、7:30～8:30に2山目の降雨が発生する降雨波形を示しているが、XバンドMPレーダをみると地上雨量において観測しているタイミングとほぼ同じかやや早い時間帯に降雨を観測している。また、累加雨量で見ると、久我山橋では2割程度の

表-1 選定した降雨イベント

降雨イベント No.	30分累加雨量(久我山橋)		一降雨継続時間および流域平均総雨量			検証降雨期間			降雨要因
	抽出開始時刻	雨量 (mm)	降雨開始時刻	降雨継続時間(時:分)	総雨量 (mm)	開始時刻	終了時刻	時間 (hr)	
1	2013/09/05 07:44	32	2013/09/04 21:11	13:46	66.3	2013/09/04 21:00	09/05 11:00	14	低気圧
2	2013/06/25 12:22	32	2013/06/25 07:33	7:07	39.7	2013/06/25 07:00	06/25 15:00	8	大気状態不安定
3	2013/08/12 17:53	31	2013/08/12 17:44	12:54	44.3	2013/08/12 17:00	08/13 07:00	14	大気状態不安定
4	2013/09/15 06:49	30	2013/09/15 03:50	17:31	135.2	2013/09/15 03:00	09/15 22:00	19	台風18号
5	2013/07/23 15:45	25	2013/07/23 15:36	2:55	21.2	2013/07/23 15:00	07/23 19:00	4	大気状態不安定
6	2013/10/16 03:42	19	2013/10/15 11:48	19:40	195.6	2013/10/15 11:00	10/16 08:00	21	台風・停滞前線
7	2013/08/21 15:55	16	2013/08/21 15:36	6:40	17.9	2013/08/21 15:00	08/21 23:00	8	前線
8	2013/04/06 22:41	16	2013/04/06 15:18	11:36	88.7	2013/04/06 15:00	04/07 03:00	12	低気圧
9	2013/08/26 23:48	12	2013/08/26 22:33	9:40	45.1	2013/08/26 22:00	08/27 09:00	11	前線
10	2013/08/11 15:16	11	2013/08/11 15:01	0:46	8.0	2013/08/11 15:00	08/11 16:00	1	大気状態不安定

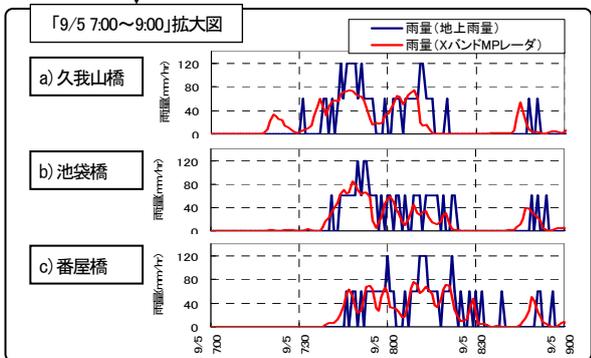
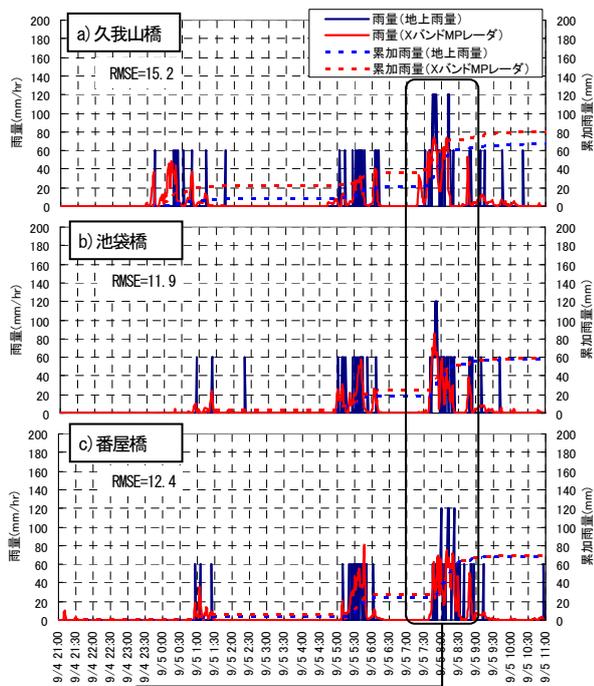


図-3 地上雨量・XバンドMPレーダハイトグラフ比較図(降雨イベントNo. 1)

差があるものの再現性は概ね良好といえる。

なお、総雨量ボリュームの精度評価には、既往研究³⁾などでも使用されている基礎的指標である総雨量比(XバンドMPレーダ総雨量/地上雨量総雨量)を用いて整理する。総雨量比の1.0から2割程度の乖離は、既往研究においても認められる差の範囲内である。

図-4 a), b)には、各降雨イベントの総雨量比および1分雨量値の相関係数を示す。この図より、和田見橋では大きめの総雨量比、低めの相関係数といった傾向が見受けられるものの、必ずしも明確な傾向は確認できない。一方、降雨イベント毎の総雨量比をみると、総雨量比が1.0に近い降雨イベントとして、No.1, No.4, No.6, No.8が挙げられるが、これらは、台風性もしくは低気圧による降雨イベントであり、降雨期間が長くかつ総雨量が大きい降雨となっている。すなわち、降雨量が大きい場合には、総雨量比の精度が確保しやすい傾向があると考えられる。図-4 b)より、降雨イベント毎の1分雨量値の相関係数をみると、降雨イベントおよび地点間のばらつきはみられるが、降雨イベントNo.1~No.5は相関が高く、No.6以降になるにつれて相関係数の値が低下する傾向が

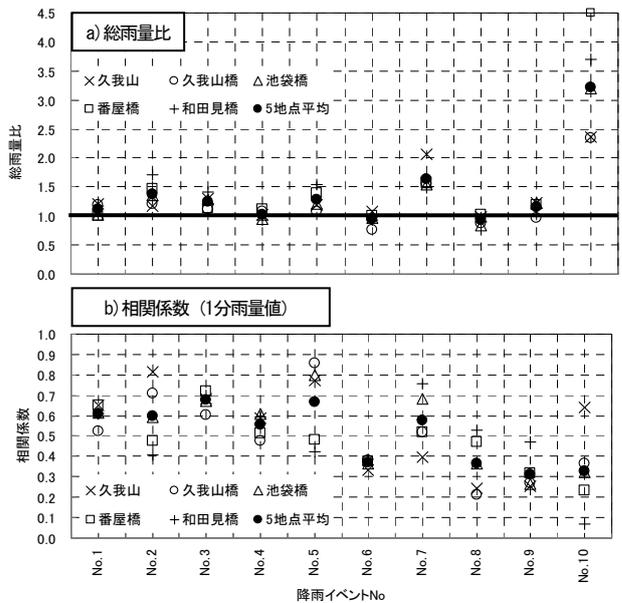


図-4 地上雨量とXバンドMPレーダ雨量の総雨量比(XバンドMPレーダ雨量/地上雨量)と相関係数

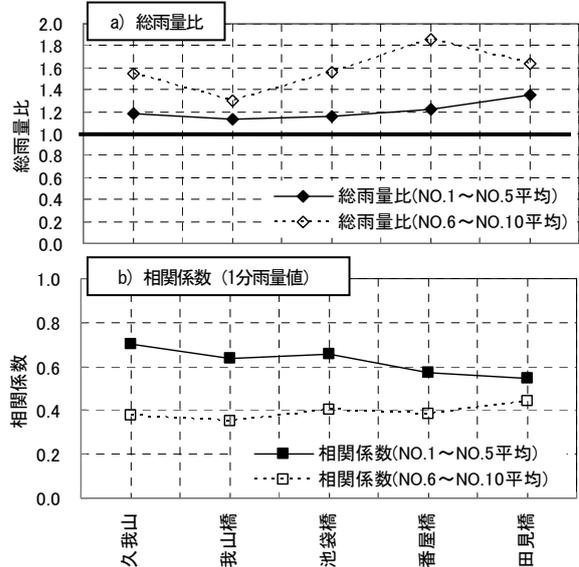


図-5 降雨イベントNo. 1~5とNo. 6~10の総雨量比および1分雨量値の相関係数

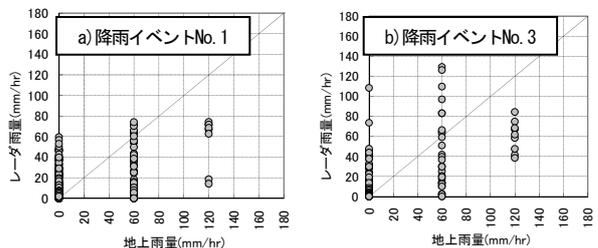


図-6 XバンドMPレーダと地上雨量1分値の散布図(久我山橋地点)

みられる。No.3, No.5, No.7は、前線や大気状態不安定に起因する降雨イベントであり、相関係数が相対的に高く降雨波形を良くとらえていると判断できる。

次に、図-5 a), b)は、30分雨量の大きい降雨イベントNo.1~No.5と比較的小さいNo.6~No.10に分けて、総雨量比と1分雨量値の相関係数を示したものである。図-5 a)より総雨量比についてみると、降雨イベント

No.1~No.5の平均値は約1.21, No.6~No.10の平均値は約1.59であり, 30分雨量が大きい場合は総雨量比が1.0に近い。図-5 b)より, 降雨イベントNo.1~No.5平均値で0.62, No.6~No.10平均値で0.39となり, いずれも相関が低い結果となった。XバンドMPレーダは地上雨量による降雨発生タイミングを概ねとらえていると考えられるが, これは, 図-6の散布図に示すように地上雨量の観測最小単位が1mmであるため, 滑らかな値の変動がとらえられず値に段差ができ, 相関係数が低下する要因となったと考えられる。

4. 流域平均雨量を用いたXバンドMPレーダ雨量精度の評価

(1) 1分値データによる精度評価

対象流域における1分値による流域平均雨量について精度検証を行った。地上雨量による流域平均雨量は, ティーセン分割法により算出し, XバンドMPレーダ雨量による流域平均雨量は, 図-7に示す流域メッシュ範囲における平均雨量とした。

図-8は, XバンドMPレーダおよび地上雨量により算出した流域平均雨量による総雨量を, 図-9には降雨イベントNo.1~No.5のXバンドMPレーダ雨量によるメッシュ累加雨量図を示す。図-9より, No.1やNo.4などの上流域多雨のものやNo.2のように中流域多雨降雨のものなど, 小規模な流域であるが降雨の分布は一樣ではなく差が大きいことがわかる。また, 図-8よりXバンドMPレーダと地上雨量の総雨量は, 雨量が小さい場合に多少ばらつきが見られるものの概ね一致しており, 様々な降雨の降り方においても総雨量は適切に把握できていると考えられる。

次に, 図-10には, 地上雨量およびXバンドMPレーダ雨量による流域平均雨量のハイトグラフを示す。これより地上雨量による流域平均雨量は, 観測所毎の地上雨量に比べて値の変動が抑えられており, XバンドMP

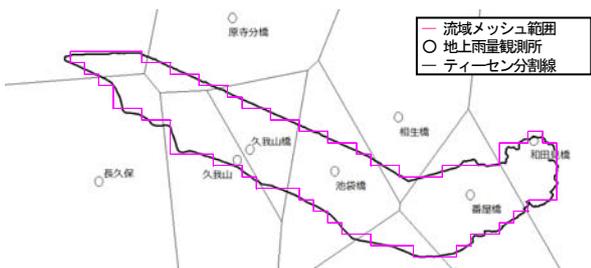


図-7 対象流域のメッシュエリア

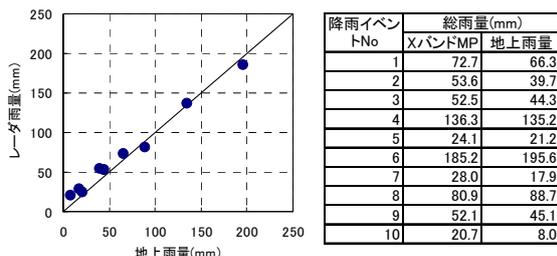


図-8 降雨イベント毎のXバンドMPレーダと地上雨量による流域平均総雨量

レーダ雨量と地上雨量は, ほぼ同様の降雨波形を表現できているといえる。

図-11 a), b)には, それぞれ流域平均雨量による降雨イベント毎の総雨量比および1分雨量値の相関係数を示した。総雨量比に関しては, 前述した観測所毎の総雨量比と同様, 総雨量が大きいほど総雨量比は1.0に近い値となる。なお, 総雨量が小さい降雨イベントNo.10を除いたNo.1~No.9の総雨量比の平均値は1.15であり, 良好な精度を確保していると判断できる。

図-11 b)より, 流域平均雨量による1分雨量値の相関係数は, 降雨イベントNo.1~No.5の平均値として0.88, No.6~No.10は0.71である。これらは, 5地点平均の相関係数 (No.1~No.5平均値で0.62) と比較して, 大幅に高い値となっている。これは, 図-12の流域平均雨量1分値の散布図に示すように, 図-6にみられた地上雨量観測の最小単位1mmの段差が平均化され滑らかな波形となったことが主要因であると考えられる。

次に, 図-10 e)の降雨イベントNo.5をみると, XバンドMPレーダ雨量は地上雨量よりも3分程度早く降雨を観測しており, 降雨波形に位相差がみられる。他の降雨イベントにおいてもNo.5ほど差は顕著ではないものの, XバンドMPレーダ雨量は地上雨量より1分程度早い傾向が見られる。この観測時差は, レーダ観測高度から地上雨量計に到達するまでの雨滴落下時間が主要因と推測される。例えば, 一般的に, XバンドMPレーダで上空600mを観測し, 観測した降雨が50mm/hr, 雨滴直径2mm程度, 落下速度は6.6m/sとすると, 地上までの落下時間は約1.5分となる。

しかし, 降雨イベントNo.5を詳細に調べると, 流域中央部のみで降雨強度100mm/hrを超える豪雨が発生しており, 非常に局所的な積乱雲と強い上昇気流の発生により, 特に流域周辺部において雨滴落下時間が長くなったと推察される。なお, これら観測時差については10分間隔の降雨データでみた場合や流域からの流出時間で考えた場合にそれほど問題とならない場合もあるが, 今後,

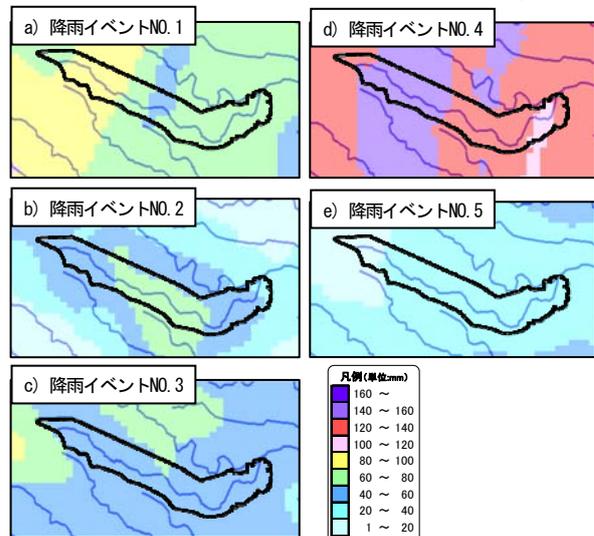


図-9 XバンドMPレーダによるメッシュ累加雨量図

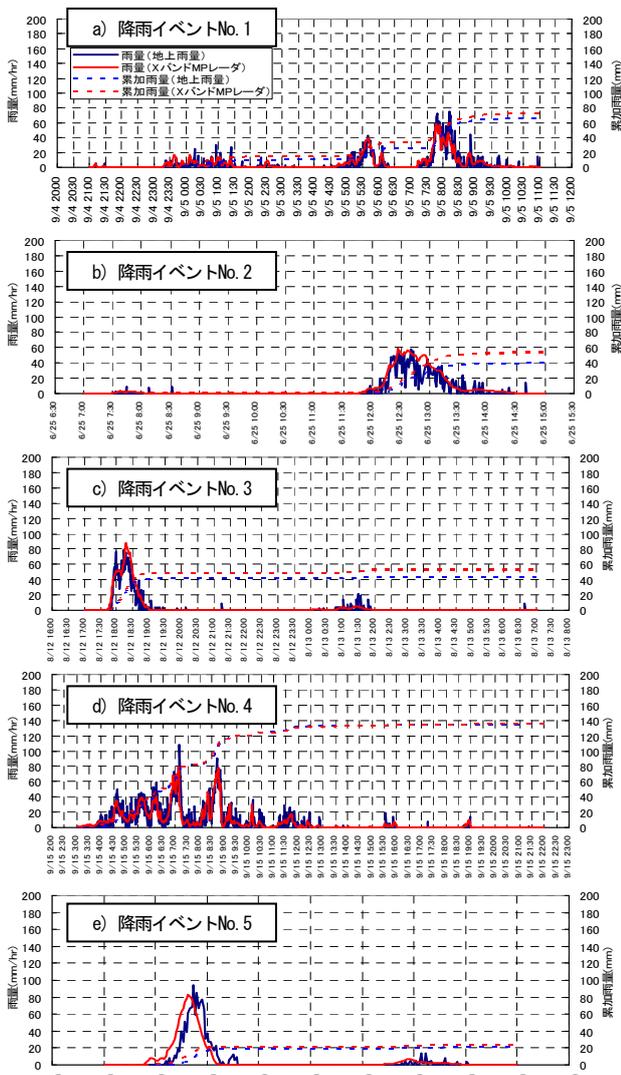


図-10 流域平均雨量1分値（地上雨量・XバンドMPレーダ）のハイトグラフ比較図

XバンドMPレーダ雨量をより詳細な時空間情報として取り扱っていく場合には注意が必要である。

(2) 10分値データによる精度評価

これまで降雨データを評価する場合には、地上雨量データの観測時間間隔に合わせて10分雨量等を用いることが多いため、地上雨量およびXバンドMPレーダ雨量を10分間隔データとした場合について精度を確認した。10分値データは、1分値データを元に作成した。図-13には、地上雨量およびXバンドMPレーダ雨量による10分値流域平均雨量のハイトグラフについて、降雨イベントNo.1～No.5のうち30分累加雨量が最大のNo.1と総雨量が大きいNo.4を示した。これより、10分値による両者の降雨波形は、1分値の場合（図-10）と比較して相似性が高くなっている。

図-14には、地上雨量とXバンドMPレーダ雨量の10分値流域平均雨量の相関係数を、1分値流域平均雨量の相関係数とともに示す。これより、10分値流域平均雨量は、1分値のそれと比較し、全ての降雨イベントにおいて、

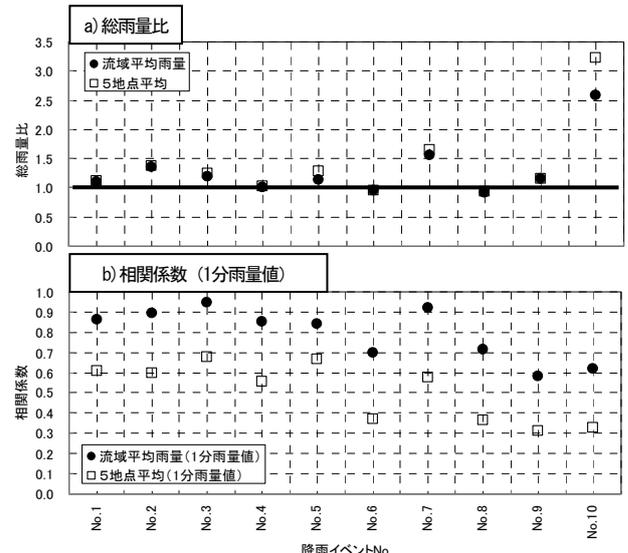


図-11 流域平均雨量における総雨量比（XバンドMPレーダ雨量/地上雨量）と相関係数

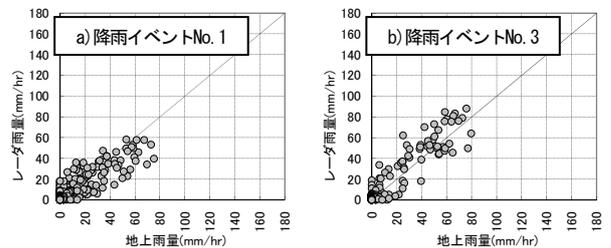


図-12 XバンドMPレーダと地上雨量による流域平均雨量1分値の散布図

高い相関を示す値となった。これは、10分データを用いた場合、データが平滑化され1分データ（図-10）でみられた降雨波形の詳細な差異が認識できなくなっているためである。

(3) XバンドMPレーダの1分値と10分値雨量の差異

XバンドMPレーダ雨量による1分値と10分値雨量の差異について、降雨波形からそれぞれの特徴を分析した。

図-15は、降雨イベントNo.1の流域平均雨量における2山目期間（9/5 7:00～10:00）を示したものである。地上雨

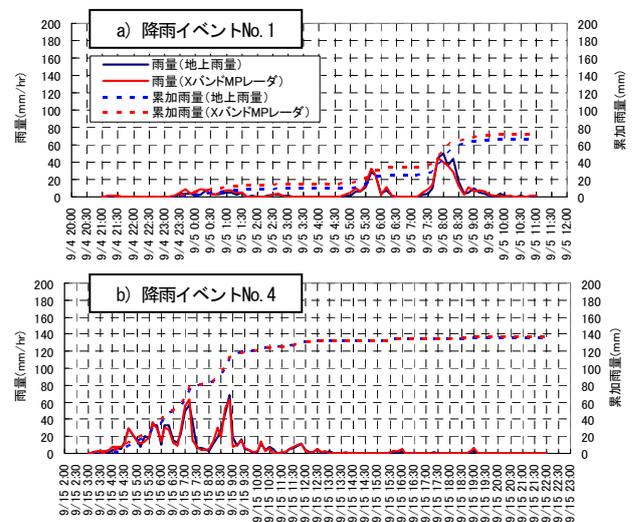


図-13 流域平均雨量10分値（地上雨量・XバンドMPレーダ）のハイトグラフ比較図

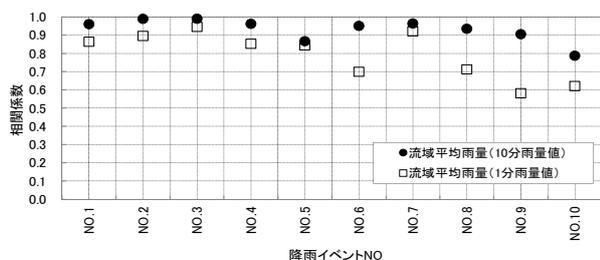


図-14 地上雨量とXバンドMPレーダ雨量の相関係数

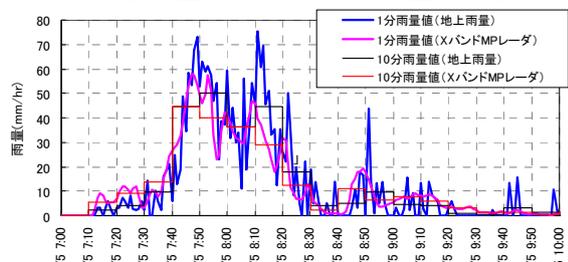


図-15 降雨イベントNo. 1 (後半) の流域平均雨量の比較図

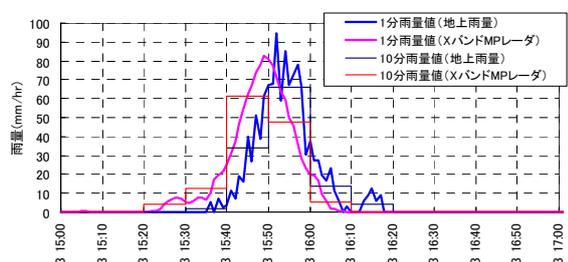


図-16 降雨イベントNo. 5の流域平均雨量の比較図

量による流域平均1分値では、7:50付近でピーク雨量70mm/hrとなっているが、流域平均雨量10分値でみるとXバンドMPレーダ、地上雨量ともに平滑化されピークが低減していることがわかる。

次に、図-16には、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量の観測時差が大きかった降雨イベントNo.5の流域平均雨量を示した。降雨イベントNo.5は、短時間における一山降雨波形であり、流域平均雨量10分値では、XバンドMPレーダ、地上雨量ともにピーク雨量が低減しており、鋭敏な降雨波形の情報は失われていることがわかる。また、1分値のXバンドMPレーダと地上雨量の約3分の観測時差が、10分値でみると10分の差として表れている。降雨イベントNo.5は、大気状態不安定に起因する降雨であり、降り始めから降り終わりまでが30分程度といった非常に短時間の豪雨である。都市中小河川では、このような短時間強雨による内水被害等が増加しているため、詳細な降雨波形の把握が重要であり、XバンドMPレーダ雨量1分値を用いることで10分値と比べてピーク降雨量やピーク雨量生起時刻を高い精度で把握することが可能であると考えられる。

5. むすび

本論文では、XバンドMPレーダ雨量について、神田川上流域を対象として、高密度に配置された1分値地上雨量観測データを用いて精度評価を実施した。その結果、XバンドMPレーダ雨量の1分値データは、十分に高い

精度を有しており、中小河川流域における空間分布、時間分布ともに高精度に表現可能な降雨データであることを確認した。また、10分値データではピーク雨量およびその生起時刻を正確にとらえきれないが、XバンドMPレーダの1分値データを用いることで詳細な降雨を把握することが可能である。今後は、XバンドMPレーダによる詳細な降雨データをもとに、中小河川流域における流出現象や河道水位、浸水や内水等の推定に活用していく必要がある。それとともに、降雨の時空間分布が流域に及ぼす影響を分析し、対象とする流域や河川に対して必要となる降雨データの空間分解能や時間分解能を明確にしておくことが求められる。また、そのためにはより観測単位の細かい地上雨量観測データによる検証も必要である。

参考文献

- 1) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝: 地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 2) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 3) 土屋修一, 川崎将生, 五道仁実: 降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良によるXRAIN観測雨量の精度向上, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I_457-I_462, 2015.
- 4) 五道仁実, 内藤正彦, 土屋修一: Kdp-R関係式の適用範囲拡張によるXバンドMPレーダの観測精度の向上, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_505-I_510, 2014.
- 5) 土屋修一, 川崎将生, 深見和彦, 根本深, 内藤正彦, 五道仁実: 降雨・洪水予測技術の高度化に向けたレーダ雨量情報の高度化と活用の動向, 河川技術論文集20巻, pp.343-348, 2014.
- 6) 林義晃, 手計太一, 山崎惟義: 北陸地方における地上雨量観測所を用いたXバンドMPレーダの降水量(降雪量)推定精度の評価, 水文・水資源学会誌, Vol.27, No.2, Mar.2014, pp.67-76, 2014.
- 7) 庄建治朗, 谷口健司, 富永晃宏: 10分雨量データとXRAINデータを用いた名古屋における強雨事例の雨域特性解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_487-I_492, 2014.
- 8) 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, Mar.2015, pp.221-232, 2015.
- 9) 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.
- 10) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議: 神田川流域水循環系再生構想検討報告, p.2, 2003.
- 11) 岡田博至, 田中岳: 洪水時における降雨時系列の特性に関する研究, 平成13年度土木学会北海道支部論文報告集, 第58号, pp.350-353, 2001.

(2015. 9. 30受付)