

雨域移動に着目した都市流域におけるXバンドMPレーダ雨量の時空間相関特性

米勢嘉智¹・河村明²・天口英雄³・戸野塚章宏⁴

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)

E-mail:yonese@ctie.co.jp

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)

E-mail:kawamura@tmu.ac.jp

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)

E-mail:amaguchi@tmu.ac.jp

⁴学生会員 首都大学東京都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail:tonotsuka-akihiro@ed.tmu.ac.jp

本論文では、神田川上流域を対象としてXバンドMPレーダ雨量と地上雨量観測所1分値データを用いた時空間相関特性解析を実施するとともに、移流モデルによる雨域移動特性を分析し、雨域移動特性と時空間相関特性の関係性を明らかにした。台風性降雨など特定方向への雨域移動がみられる場合、地上観測所雨量とXバンドMPレーダ雨量との相関性の高いエリアは、雨域移動に伴った時空間的な移動が確認できた。また、大気状態不安定による降雨の場合は、相関性の高いエリアには特定の時空間的な移動傾向が現れず、観測所直上メッシュよりも周辺メッシュにおける相関性が高くなることを示した。

Key Words : 1-minute data, X-band MP radar, XRAIN, spatiotemporal characteristic analysis, small urban watershed, movement of rainfall area, advection model

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分値雨量や水位観測データを用いた流出解析が行われている¹⁾。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²⁾。また、XバンドMPレーダ雨量の精度に関しては、地上観測所雨量を用いて数百km²程

度の比較的広域を対象とした研究³⁾や二級河川の小流域を対象とした研究⁴⁾が実施されている。これらのXバンドMPレーダ雨量を用いた研究では、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を用いている。

著者らは、東京都の代表的な都市中小河川である神田川上流域を対象として、東京都に高密度に配置された地上雨量観測データ(東京都水防災総合情報システム)の1分値によるXバンドMPレーダ雨量の精度評価を実施し、XバンドMPレーダ雨量の詳細な時間分解能に関する観測精度の有効性を確認する一方で、1分値によるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量観測データには、観測時差があることを指摘した⁵⁾。さらに、地上雨量データと観測所周辺メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量を用いた時空間解析により、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量の相関性は、必ずしも観測所直上メッシュでなく周辺メッシュ範囲において高いことを確認している⁶⁾。

しかしながら、これらのXバンドMPレーダ雨量と地上観測所雨量が示す時空間的な相関性については、雨滴落下時間のみならず、降雨により様々な形態を示す雨域移動の影響を受けると考えられるが、雨域移動がこれら

の時空間特性に及ぼす影響について検討した事例はほとんどない。

そのため、本論文では、都市域の流出解析や河川水位推定に求められる詳細な時空間分解能を有する X バンド MP レーダ雨量の精度把握、精度確保を目的として、東京都の代表的な都市中小河川流域である神田川上流域における降雨イベントを対象に、地上雨量観測データ（東京都水防総合情報システム）と X バンド MP レーダ雨量の観測所周辺メッシュの降雨データをもとに、時空間相関特性解析を実施するとともに、移流モデルによる雨域移動特性を分析し、雨域移動特性と時空間相関特性の関係性を明らかにした。

2. 対象地上雨量観測所および対象降雨

検証対象とする地上雨量観測所は、図-1に示す東京都内の中小河川である神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの神田川上流域（約 11.5km²）の中央に位置する池袋橋地上雨量観測所を対象とした。使用する雨量デー

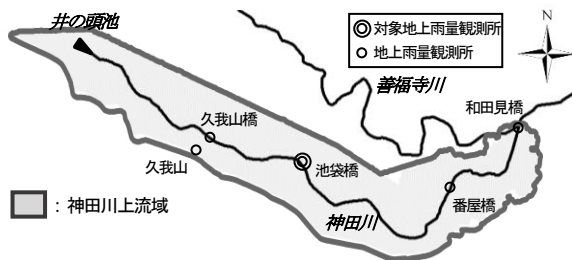


図-1 地上雨量観測所位置図

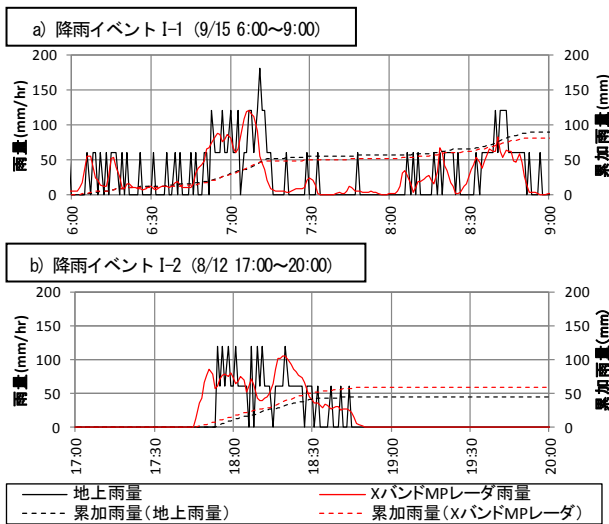


図-2 地上雨量とXバンドMPレーダ雨量のハイエトグラフ

タは、東京都水防総合情報システムによる 1 分間隔、最小単位 1mm にて計測している地上雨量観測データを用いた。

対象降雨は、2013 年に対象流域において発生した豪雨を対象として選定することとした。中小河川では、短時間の強降雨が河川水位を上昇させるため、対象降雨の累加期間は 30 分とし、対象観測所の 30 分累加雨量値が 25mm 以上の降雨を抽出し、その降雨期間を含み、1 時間以上の無降雨状態を伴わない一連の降雨を降雨イベントとして設定した。表-1には、対象観測所において抽出した降雨イベント、30 分累加雨量の抽出開始時刻および 30 分累加雨量、降雨継続時間、総雨量を示した。また、図-2は、降雨イベント I-1, I-2 における地上雨量と X バンド MP レーダ雨量のハイエトグラフおよびそれぞれの累加雨量を示した。これより、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値の変動が大きく、また、既往の研究⁹⁾に指摘されるとおり、X バンド MP レーダ雨量は、雨滴落下時間等の影響により地上雨量に対して観測が早い傾向が確認される。

3. XバンドMPレーダ雨量と地上雨量との時空間相関特性

(1) 時空間解析の概要

地上雨量観測所における雨量データと観測所直上およびその周辺メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量を用いて、時空間的な相関特性について検討する。検討対象範囲は、図-3に示すとおり、地上観測所とその周辺メッシュとして、(1)時間方向の遅れ時間「-30~+30分（1

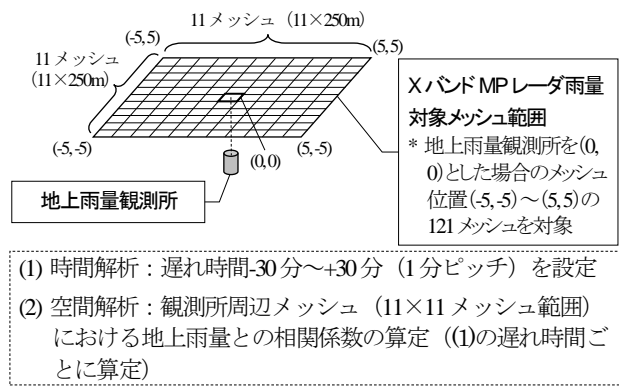


図-3 地上雨量とXバンドMPレーダ雨量の時空間解析の概要

表-1 選定した降雨イベント

降雨イベント	30分累加雨量(池袋橋)		1降雨継続時間及び総雨量			検証降雨期間		時間 (hr)	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 (min)	総雨量 (mm)	開始時刻	終了時刻		
I-1	2013/09/15 06:47	36	2013/09/15 03:58	535	144	2013/09/15 03:00	09/15 13:00	10	台風18号
I-2	2013/08/12 17:54	35	2013/08/12 17:54	51	45	2013/08/12 17:00	08/12 19:00	2	大気状態不安定
I-3	2013/06/25 12:17	31	2013/06/25 12:17	95	48	2013/06/25 12:00	06/25 14:00	2	大気状態不安定
I-4	2013/09/05 07:48	26	2013/09/05 07:41	122	39	2013/09/05 07:00	09/05 10:00	3	低気圧
I-5	2013/04/06 22:40	25	2013/04/06 15:22	599	94	2013/04/06 15:00	04/07 02:00	11	低気圧

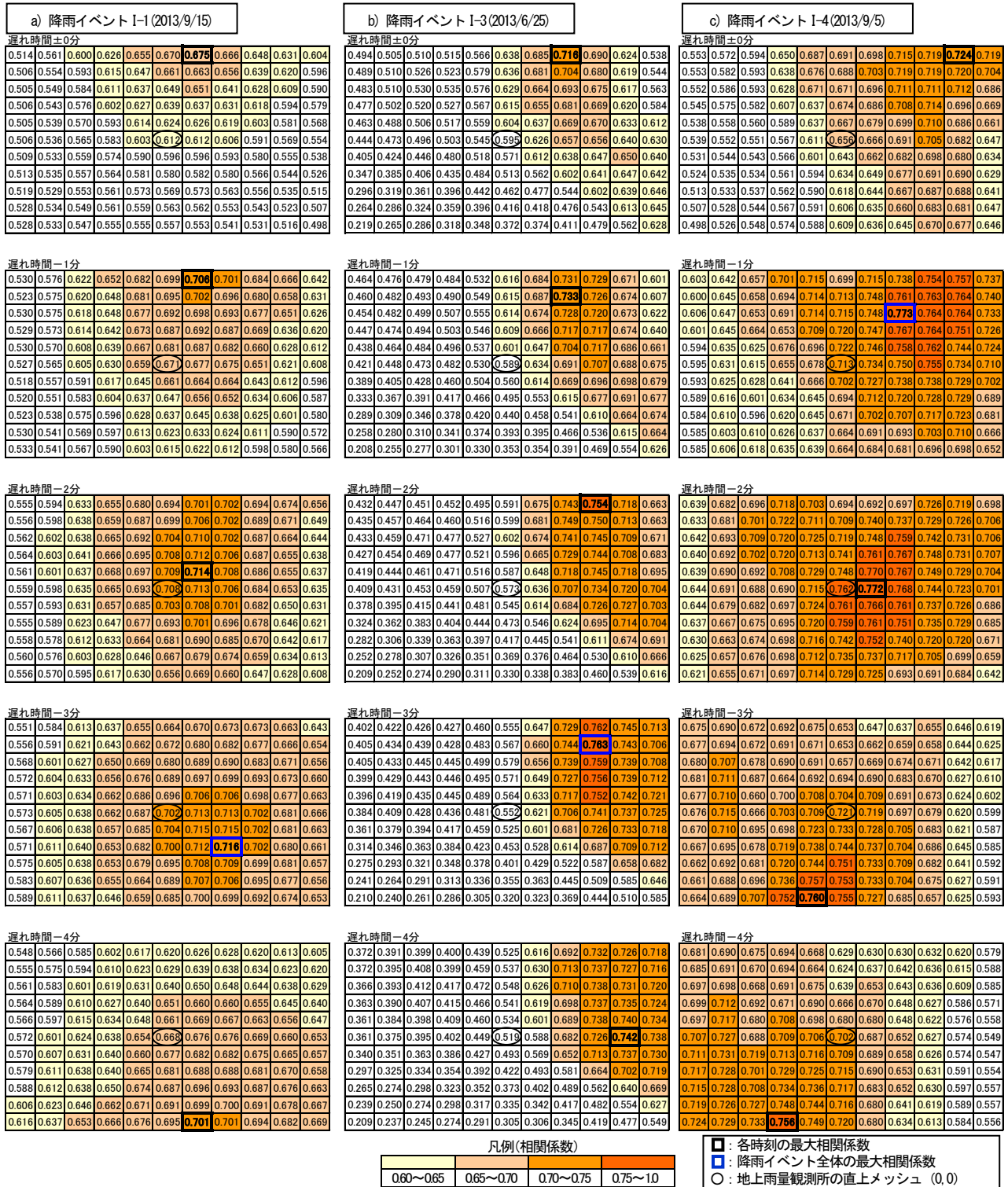


図-4 地上雨量と観測所周辺メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量の相関係数の時空間分布

分ピッチ)」と、(2)地上雨量観測所周辺メッシュにおいて、それぞれ組み合わせた場合ごとに相互相関係数を算出した。対象とする周辺メッシュ範囲は、地上観測所の直上メッシュを(0, 0)として、その周辺メッシュ(-5, -5) ~ (5, 5)の11×11メッシュ=121メッシュとした。XバンドMPレーダ雨量は、250mメッシュの詳細な空間分解能を有しており、対象とするエリアは、11×11メッシュ=約2.75km×2.75km範囲となる。なお、今回使用する地上雨量は、1分間隔、最小単位1mmによる観測値で

あり、この量子化誤差によって全体的に相関係数が低めとなっていると推測される。

(2) 観測所直上メッシュと周辺メッシュにおける時空間相関特性

図-4は、地上観測所雨量と観測所周辺メッシュ(11×11メッシュ範囲)におけるXバンドMPレーダ雨量の相関係数の空間分布を、遅れ時間「0分~4分」について示したものである。これより、相関係数の最大値をみる

と降雨イベントI-Iで遅れ時間-3分の時に0.716, 降雨イベントI-3で遅れ時間-3分の時に0.763, 降雨イベントI-4で遅れ時間-1分の時に0.773であり, 最大相関係数は時空間的に変化している。

図-5は, 遅れ時間ごとの地上観測所雨量と観測所直上メッシュのXバンドMPレーダ雨量の相関係数と, 地上観測所雨量と観測所周辺メッシュ(11×11メッシュ範囲)のXバンドMPレーダ雨量の最大相関係数を, それぞれ黒丸と実線で示したものである。図-5 a), c)は, 台風もしくは低気圧に起因する降雨イベントI-I, I-4について示したものであり, 観測所直上および観測所周辺メッシュにおける最大相関係数の差は, それぞれ「0.716-0.708=0.008」「0.773-0.762=0.011」と小さい。一方, 図-5 b)は, 大気状態不安定に起因する降雨イベントI-3について示したものであり, 観測所直上と観測所周辺メッシュにおける最大相関係数の差は, 「0.763-0.595=0.168」と降雨イベントI-I, I-4と比べて大きい値となっている。

表-2は, 観測所直上メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量の最大相関係数とその遅れ時間, 観測所周辺メッシュ(11×11メッシュ範囲)におけるXバン

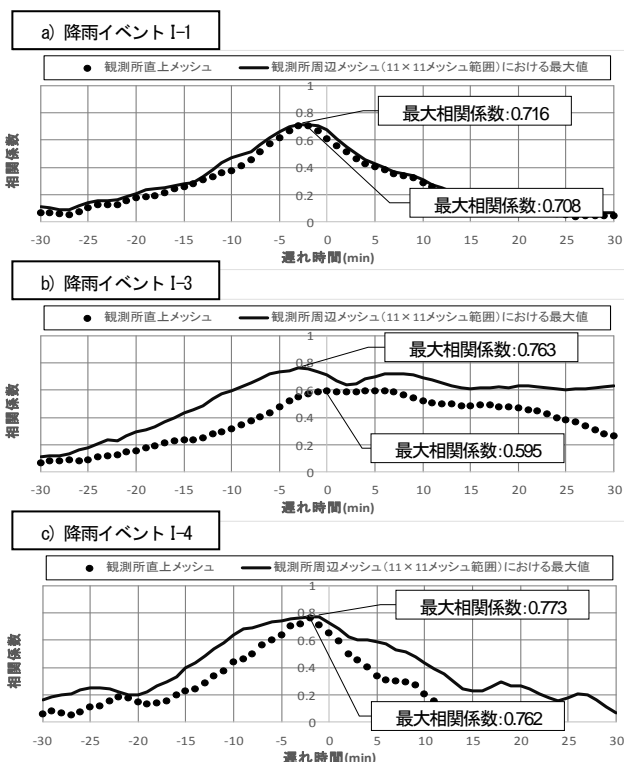


図-5 観測所直上メッシュと観測所周辺メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量との最大相関係数

表-2 観測所直上メッシュおよび観測所周辺メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量との最大相関係数とその遅れ時間および総雨量比

地点名	降雨イベント名	観測所直上メッシュ			観測所周辺メッシュ(11×11メッシュ範囲)			
		最大相関係数	遅れ時間(min)	総雨量比*1	最大相関係数	遅れ時間(min)	メッシュ位置	総雨量比*1*2
池袋橋	I-1	0.708	-2	0.945	0.716	-3	(2, -2)	0.944
	I-2	0.734	-4	1.283	0.797	-1	(5, -1)	1.073
	I-3	0.595	0	1.350	0.763	-3	(3, 4)	1.033
	I-4	0.762	-2	0.883	0.773	-1	(2, 3)	0.879
	I-5	0.437	-2	0.836	0.500	-2	(5, 1)	0.881

*1 (総雨量比)=(XバンドMPレーダ総雨量)/(地上雨量総雨量), *2 メッシュ位置におけるXバンドMPレーダ雨量による総雨量比

ドMPレーダ雨量と地上雨量の最大相関係数とその遅れ時間およびメッシュ位置について, 降雨イベント別に示したものである。また, 観測所直上メッシュおよび観測所周辺で最大相関係数となるメッシュ位置における総雨量比(XバンドMPレーダ総雨量/地上雨量総雨量)も併せて示した。これより, 観測所周辺メッシュにおける最大相関係数は, 前述のとおり特に降雨イベントI-3では, 観測所直上メッシュにおける値と比べてその差が大きい。また, 観測所直上メッシュにおける総雨量比をみると, 降雨イベントI-2, I-3では, 総雨量比がそれぞれ1.28, 1.35であり比較的大きい値であるが, 観測所周辺メッシュにおける総雨量比でみるとそれぞれ1.07, 1.03と1.0に近い値となっている。すなわち, 大気状態不安定に起因する降雨イベントI-2, I-3では, 相関係数および総雨量比が1.0に近いメッシュは, 観測所直上メッシュではなく周辺メッシュに存在していると考えられる。

次に, 相関係数の時空間分布について図-4をみると, 図-4 a)では, 遅れ時間が増加するにしたがって, 最大相関係数となるメッシュ位置が北上しており, 概ね3~4メッシュ/min程度で移動していることが確認できる。また, 図-4 c)も, 同様に相関係数の高いエリアは北東方向に, 概ね3~5メッシュ/min程度で移動している。一方で, 図-4 b)をみると, 遅れ時間により相関係数高いメッシュが移動するような明確な傾向は確認できない。これは, 図-4 a), c)は, 台風もしくは低気圧に起因する降雨であり, 雨域の移動による影響を受け, 相関の高いメッシュも移動しているためと推察される。

4. 雨域移動特性の分析

(1) XバンドMPレーダ雨量による降雨移動特性

XバンドMPレーダ雨量の時系列データを用い, 移流モデル¹⁰⁾による移流ベクトルを解析した。移流モデルは, XバンドMPレーダ雨量におけるメッシュ座標(x, y)における時刻tの降雨強度分布をZ(x, y, t)として, Zは式(1)の移流方程式に従うものとし, 移動ベクトル(u, v)は, 座標の一次関数として定義する。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} = w, \quad \begin{aligned} u &= C_1 x + C_2 y + C_3 \\ v &= C_4 x + C_5 y + C_6 \\ w &= C_7 x + C_8 y + C_9 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに, u, vは移動ベクトルのx, y成分, wは発達衰弱項であり, C₁₋₉はパラメータである。

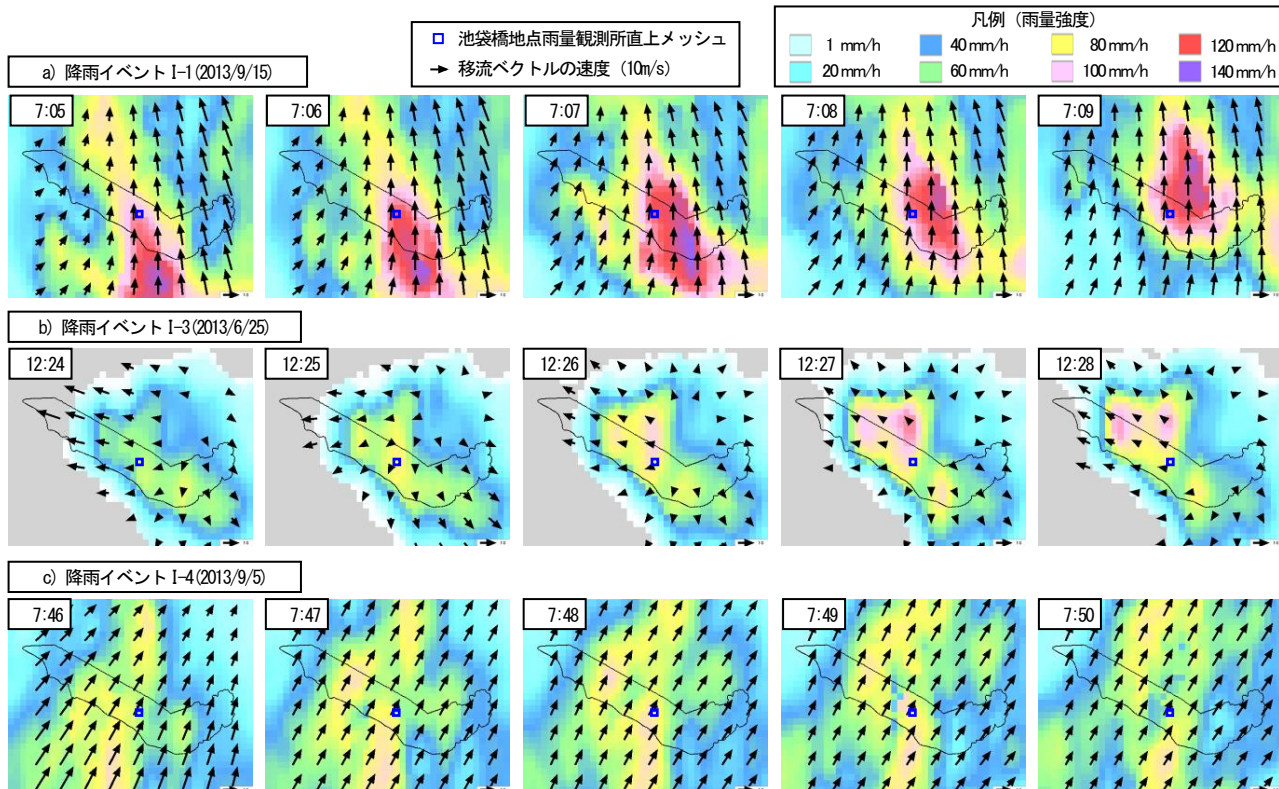


図-6 XバンドMPレーダ雨量画像および移流ベクトル (1分ピッチ)

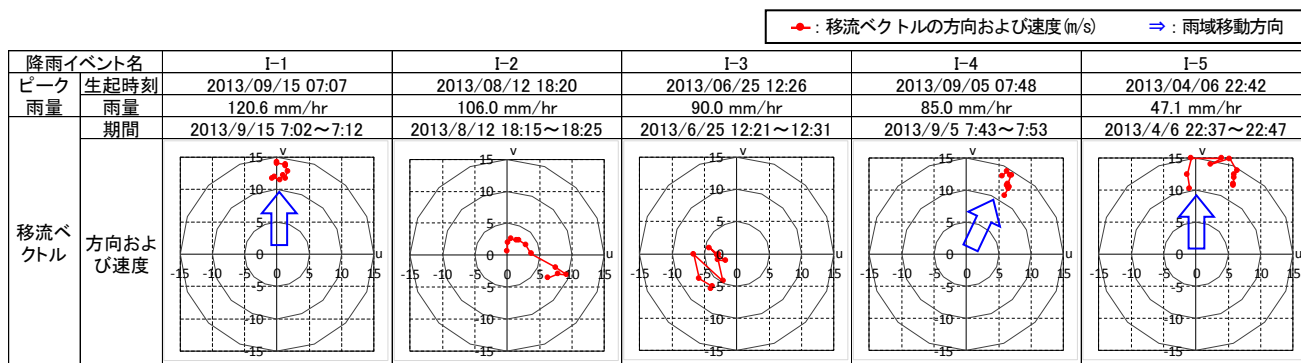


図-7 観測所直上メッシュにおける移流ベクトルの方向および速度 (1分ピッチ)

図-6は、観測所直上メッシュにおけるピーク雨量付近のXバンドMPレーダ雨量の1分ピッチの時系列画像と、移流ベクトル算出結果を重ねて示したものである。これより、図-6 a), c)は、台風もしくは低気圧に起因する降雨イベントであり、南から北方向への雨域の移動が確認できる。特に降雨イベントI-1では、120mm/hrを超える強雨域が存在しており、この雨域が2~4メッシュ/min程度の速度で北上している。それに対して、図-6 b)は、大気状態不安定による降雨イベントであり、雨域の移動については明確な方向性を持っておらず、積乱雲等の発達・衰弱による影響を強く受け、強雨域の発生箇所が変化している様子がうかがえる。

(2) 移流ベクトルの方向および速度

図-7は、観測所直上メッシュにおけるピーク雨量生起時刻前後10分間における移流ベクトルの方向および速度を1分ピッチで示したものである。これより、降雨イベ

ントI-1,I-4,I-5では、一様方向への雨域移動が確認でき、降雨イベントI-1,I-5では雨域の移動方向は北方向であり、その移動速度は約10~15m/s程度、降雨イベントI-4では、移動方向は北東方向であり、速度は約10~15m/s程度である。また、降雨イベントI-2,I-3をみると、比較的短い時間内にもかかわらず移動方向は様々に変化しており、かつ速度も比較的小さく、雨域の明確な移動傾向は確認できない。

5. おわりに

本論文は、神田川上流域の池袋橋地上雨量観測所1分値データとXバンドMPレーダ雨量を用いた時空間相関特性解析を実施するとともに、移流モデルによる雨域移動特性を分析し、雨域移動特性と時空間相関特性の関係を明らかにした。

台風や低気圧に起因する降雨では、雨域移動方向および速度により、地上観測所雨量とXバンドMPレーダ雨

量との相関の高いメッシュが時空間的に移動し、雨域移動が空間的な相関特性を支配する主要因となっていることがわかる。このような特定方向への広範囲の雨域移動がみられる場合、XバンドMPレーダ雨量は、遅れ時間を数分見込んだ上で、観測所直上メッシュを用いることで、地上観測所雨量と高い相関性を確保することが可能であることを示した。

また、大気状態不安定による対流性降雨などの場合、積乱雲等の発達・衰弱の影響が卓越し、相関性の高いエリアは、特定の時空間的な移動傾向は現れにくい。その場合、地上観測所雨量とXバンドMPレーダ雨量の相関性は、観測所直上メッシュよりも1km程度範囲の周辺メッシュにおける相関性が高くなる。これは、大気状態不安定による降雨の場合、地上付近に強い上昇気流や局地的な強風が吹き、このような風場の変動に影響を受けて相関性の高いメッシュが、移動している可能性がある。加えて、集中豪雨等の雨域が極めて小規模な場合、観測所直上メッシュと周辺メッシュによる相関性の差はより大きくなる傾向がみられる。

都市域中小河川における流出現象や河川水位の推定には、高精度な降雨が必要となる。本論文で対象とした神田川は、洪水到達時間は短く、かつ流域幅が1km程度であり数メッシュの空間位置の差が流域の内・外を分けるため、降雨データの時空間的な精度を把握することは非常に重要である。

今後、より多くの降雨イベントを対象して、広範囲におけるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量の時空間相関特性を把握し、本論文における雨域移動と相関特性における普遍性について検証していくことが必要である。また、観測単位がより細かい地上雨量観測データによる検討を実施していくとともに、風向・風速や上昇気流などの気象状況との関係性についても明らかにしていくことが望まれる。さらに、降雨の時空間分布が流域流出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いくことが重要である。

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) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 米勢嘉智, 河村明, 天口英雄, 戸野塚章宏: 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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.I_217-I_222, 2016.
- 9) 米勢嘉智, 河村明, 天口英雄, 戸野塚章宏: 都市中小河川流域におけるXバンドMPレーダ雨量の時空間特性解析, 土木学会論文集G(環境), Vol.72, No.5, pp.I_277-I_282, 2016.
- 10) 椎葉充晴, 高埴琢馬, 中北英一: 移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討, 水理講演会論文集, pp.423-428, 1984.

(2016.9.30 受付)

SPATIOTEMPORAL CHARACTERISTIC ANALYSIS OF X-BAND MP RADAR RAINFALL IN A SMALL URBAN WATERSHED FOCUSED ON THE MOVEMENT OF RAINFALL AREA

Yoshitomo YONESE, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI and Akihiro TONOTSUKA

This paper presents the analyses of the spatiotemporal characteristics, by comparison of X-band MP radar data with 1-minute ground observation rainfall data, and of the movement of rainfall area by means of advection model analysis, in the upper basin of Kanda river in Tokyo. These analyses established a relationship between the movement of the rainfall area and the spatiotemporal characteristics. In cases like a rainfall caused by a typhoon, where the rainfall area moved with a clear direction, the meshed area of X-band MP radar data containing higher correlation with the ground observation rainfall data described spatiotemporal movement associated with the movement of the rainfall area. In contrast, in cases of atmospheric instability, the meshed area of X-band MP radar did not show a specific spatiotemporal trend and the meshes surrounding the observation station showed a higher correlation instead of the overlapping mesh.