

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豪雨イベントの 時空間相関特性について

戸野塚 章宏^{1*}・河村 明¹・米勢 嘉智²・天口 英雄¹

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

²株式会社建設技術研究所（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1）

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

本研究では、神田川上流域の5観測地点における16年間の1分値地上観測雨量データを用いて豪雨イベントを抽出し、豪雨イベントの時空間的な相関特性について検討を行った。各観測地点で抽出された豪雨イベントの比較により、抽出される豪雨イベントは多様性を持つことを確認した。また、豪雨イベントの自己相関による検討結果から、降雨継続時間が短い場合、遅れ時間の増加に伴い相関を下げる傾向が強いことを示した。さらに、豪雨イベントの相互相関による検討結果から、観測地点間の相関特性は、豪雨イベントにより大きく異なることが確認でき、都市中小河川流域における豪雨時には複数の地上雨量観測地点等を活用し、流域内における空間分布を詳細に把握することが必要であることを示した。

Key Words : 1-minute data, a small urban watershed, heavy rainfall event, spatio-temporal correlation-characteristic, Kanda river

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる局所的かつ短時間の集中豪雨により洪水被害が頻発しており、都市域の中小河川では、短時間の集中豪雨や都市化の影響により都市型水害が発生し、浸水被害が甚大なものとなっている。都市域の中小河川においては、短時間の集中豪雨による河川の氾濫や内水による浸水被害の危険性が高いため、詳細な1分値地上観測雨量や水位データを用いた流出解析¹⁾やレーダ雨量の精度評価²⁾が行われている。流出実態に即した治水計画、洪水調節施設等の適正な管理、迅速・確実な水防活動等が求められるなかで、狭い範囲での雨量の変動や分布の特性、それに伴う洪水流出特性の解明が必要となっている。

東京都では、豪雨による浸水被害対策として時間50ミリ降雨による洪水に対して安全を確保するために、市街化の進展が著しく浸水の危険性の高い神田川や野川等を中心に、護岸や調節池の整備を進めてきた。しかし、近年時間50ミリを超える豪雨が増加

しており、東京都は平成26年に目標整備水準を区部では時間最大75ミリ、多摩部では時間最大65ミリに引き上げた³⁾。このような現状もあり、都市域における狭い範囲での降雨の空間・時間分布を的確に把握することが重要な課題となっている。

降雨特性に関しては、2地点間の距離と降雨量の空間相関構造の検討⁴⁾や、洪水時における降雨時系列の検討⁵⁾、短時間雨量の特性に関する検証⁶⁾等の研究が行われている。しかし、これらの研究においては、多くの場合が10分値や1時間のデータを用いており、1分値データを用いた研究はあまり見受けられない。

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の上流域を対象に、東京都に高密度に配置された地上降雨観測ネットワークシステム（東京都水防災総合情報システム）の1999年4月から2015年3月までの16年間の1分値雨量データを用いて豪雨イベントを抽出し、抽出した豪雨イベントの時空間的な相関特性について検討を行った。

2. 対象流域及び使用データの概要

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⁸⁾。本研究では、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を対象流域とした。

今回使用したデータは、東京都水防災総合情報システムによる1分値地上観測雨量データである。東京都水防災総合情報システムは東京都が独自に都内の雨量、河川水位、潮位などの観測情報をリアルタイムで自動収集し、水害防止活動を行う関係防災機関に提供するものである⁹⁾。また、洪水時のデータの観測・収集・情報発信を目的としており、非洪水時に雨量計に水を注いで動作確認等を行っていることから、1分値降雨量が10 mm以上と記録される等の明らかな異常値や、回線異常等の欠測を表すコードとしてマイナスの値も記録されているため、データを扱う場合には注意が必要となる¹⁰⁾。

図-2に、対象流域内の東京都水防災総合情報システムの観測地点を示す。小流域であるが、流域内には5地点の地上雨量観測地点（久我山、久我山橋、池袋橋、番屋橋、和田見橋）が配置されている。なお、気象庁のアメダス観測地点は流域内に存在しない。

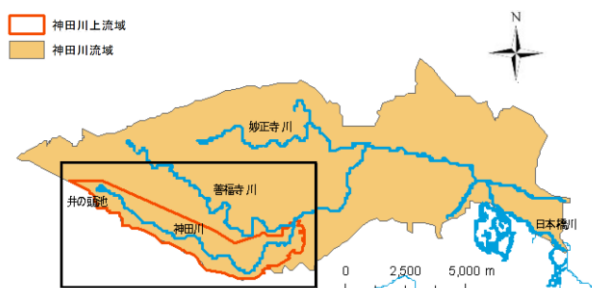


図-1 対象とした神田川上流域位置



図-2 対象流域の地上観測地点位置図

3. 対象豪雨イベント

対象豪雨イベントは、1分値降雨量データの観測が始まった1999年4月から2015年3月までの16年間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。2008年の都賀川水害の例では、7月28日14:30～15:00の30分間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。

また、検証対象流域の神田川では1時間当たり75mmの降雨量に対応する整備を進めている⁴⁾。これを踏まえ、本研究では対象とする豪雨イベントの抽出に際しては、神田川上流域に位置する5観測地点を対象に、30分累加雨量値が40mm以上の豪雨として表-1に示す22イベントを抽出した。なお、一降雨イベントは、1時間以上の無降雨状態を伴わない一連の降雨を一降雨として設定した。表-1に、豪雨イベントを抽出した対象観測地点、豪雨イベント名、各豪雨イベントの最大30分累加雨量及び抽出開始時刻、降雨開始時刻、降雨終了時刻、降雨継続時間、総雨量、降雨要因及び同イベントの有無を示す。なお、同イベントの有無とは、複数観測地点（2地点以上）において降雨期間が重なるイベントが存在する場合に「○」を記した。

表-1より、対象とした16年間において、各観測地点で抽出した豪雨イベント数は、和田見橋で6イベント、和田見橋以外の観測地点では4イベントであった。同イベントに関しては、久我山、久我山橋は対象流域の上流側の観測地点であり、下流側に位置する番屋橋、和田見橋よりも、比較的に同イベントとして抽出されるイベント数が多くなっている。これは、久我山と久我山橋が空間的に近接していることが要因である。また、全ての観測地点で抽出された豪雨イベントは2005年9月4日のイベントのみであ

表-1 観測地点毎に抽出した豪雨イベント

観測地点	豪雨イベント名	30分累加雨量		一降雨継続時間及び総雨量				降雨要因	同イベントの有無
		降雨抽出開始時刻	雨量(mm)	降雨開始時刻	降雨終了時刻	継続時間(mm)	総雨量(mm)		
久我山	K-1	2005/9/4 21:55	54	2005/9/4 19:32	2005/9/5 1:09	338	237	大気状態不安定	○
	K-2	2007/7/29 14:18	41	2007/7/29 13:07	2007/7/29 14:50	104	50	大気状態不安定	○
	K-3	2014/6/24 14:43	47	2014/6/24 14:42	2014/6/24 17:25	164	82	大気状態不安定	○
	K-4	2014/9/10 15:51	40	2014/9/10 15:50	2014/9/10 18:13	144	81	低気圧	○
久我山橋	Kb-1	2005/9/4 22:25	52	2005/9/4 19:33	2005/9/5 1:29	353	238	大気状態不安定	○
	Kb-2	2006/7/15 13:16	40	2006/7/15 13:16	2006/7/15 13:43	28	40	大気状態不安定	○
	Kb-3	2007/7/29 14:20	41	2007/7/29 13:14	2007/7/29 14:53	100	49	大気状態不安定	○
	Kb-4	2014/9/10 15:54	40	2014/9/10 15:52	2014/9/10 17:24	93	85	低気圧	○
池袋橋	I-1	1999/7/21 16:03	64	1999/7/21 16:03	1999/7/21 17:19	77	68	大気状態不安定	○
	I-2	2003/10/13 13:38	44	2003/10/13 13:22	2003/10/13 14:26	64	63	低気圧	○
	I-3	2005/9/4 22:28	53	2005/9/4 19:59	2005/9/5 1:17	319	186	大気状態不安定	○
	I-4	2014/6/24 14:50	45	2014/6/24 14:47	2014/6/24 16:58	132	57	大気状態不安定	○
番屋橋	B-1	2002/8/2 15:38	40	2002/8/2 15:20	2002/8/2 18:15	176	80	大気状態不安定	○
	B-2	2003/10/13 13:41	40	2003/10/13 12:51	2003/10/13 14:27	97	61	低気圧	○
	B-3	2005/9/4 22:39	57	2005/9/4 21:35	2005/9/5 1:35	241	114	大気状態不安定	○
	B-4	2008/9/6 21:23	42	2008/9/6 21:23	2008/9/6 22:03	41	46	大気状態不安定	○
和田見橋	W-1	1999/8/29 19:19	43	1999/8/29 18:38	1999/8/29 20:33	116	62	低気圧	○
	W-2	2003/10/13 13:44	48	2003/10/13 13:39	2003/10/13 14:42	64	69	低気圧	○
	W-3	2004/9/4 18:16	44	2004/9/4 18:09	2004/9/4 23:47	339	109	大気状態不安定	○
	W-4	2005/9/4 22:46	44	2005/9/4 21:37	2005/9/5 1:38	242	85	大気状態不安定	○
	W-5	2011/2/26 15:25	44	2011/2/26 14:39	2011/2/26 16:11	93	79	前線	○
	W-6	2014/6/29 16:02	42	2014/6/29 16:02	2014/6/29 16:20	19	42	大気状態不安定	○

った．このことから，対象とした小流域においても，観測地点毎に降雨量や降雨特性が異なることが確認された．

ここで，複数観測地点において同イベントがある
と判断した豪雨イベントは，30分累加雨量が最も大
きいイベントを代表豪雨イベントとした13イベント
を表-2に示す．なお，表-2に豪雨イベントNo.，豪
雨イベント名，各豪雨イベントの最大30分累加雨量
及び抽出開始時刻，降雨継続時間，総雨量，降雨要
因を示した．表-2より，30分累加雨量が最も大きい
豪雨イベントNo.1は，30分間に64mmもの降雨量を
観測している．No.2が30分間に57mmであり，No.1
は非常に強い降雨であることがわかる．また表-1，
2より，複数観測地点における同イベントの有無に
関しては，抽出した豪雨イベントの中でも強降雨で
あった上位4イベント（30分累加雨量が45mm以上）
において，最も30分累加雨量が大きい豪雨イベント
No.1以外は，他の観測地点でも同イベントが抽出さ
れている．

図-3 a)～d)に30分累加雨量が大きい上位4イベン
トのハイトグラフを示す．なお，豪雨イベントを
抽出した観測地点には「○」を記し，また豪雨イベ
ント期間の他観測地点のハイトグラフも併記した．

図-3 a)より，豪雨イベントNo.1は池袋橋で他観
測地点と比べ強い降雨があることが確認できる．
また，池袋橋以外に番屋橋においても強い降雨が確
認される．ここで，豪雨イベント期間の番屋橋の最
大30分累加雨量は37mmであった．今回は30分間で
40mm以上の豪雨を抽出対象としたため，豪雨イベ
ントには含まれなかったが，大きい降雨が他観測地
点においても観測されていることが確認できた．し
かし，池袋橋，番屋橋以外の観測地点では雨があまり
降っていないことも確認できた．16年間で最も30
分累加雨量が大きい豪雨イベントNo.1においても，
観測地点間で降雨特性が大きく異なっており，流域
内に雨域の偏りある豪雨であると判断される．

表-2 抽出した豪雨イベント

豪雨 イベント No.	豪雨 イベント 名	降雨抽出開始時刻	30分 累加 雨量 (mm)	降雨 継続 時間 (min)	総雨量 (mm)	降雨要因
1	I-1	1999/7/21 16:03	64	77	68	大気状態不安定
2	B-3	2005/9/4 22:39	57	241	114	大気状態不安定
3	W-2	2003/10/13 13:44	48	64	69	低気圧
4	K-3	2014/6/24 14:43	47	164	62	大気状態不安定
5	W-3	2004/9/4 18:16	44	339	109	大気状態不安定
6	W-5	2011/8/26 15:25	44	93	79	前線
7	W-1	1999/8/29 19:19	43	116	62	低気圧
8	B-4	2008/9/6 21:23	42	41	46	大気状態不安定
9	W-6	2014/6/29 16:02	42	19	42	大気状態不安定
10	K-2	2007/7/29 14:18	41	104	50	大気状態不安定
11	K-4	2014/9/10 15:51	40	144	81	低気圧
12	Kb-2	2006/7/15 13:16	40	28	40	大気状態不安定
13	B-1	2002/8/2 15:38	40	176	60	大気状態不安定

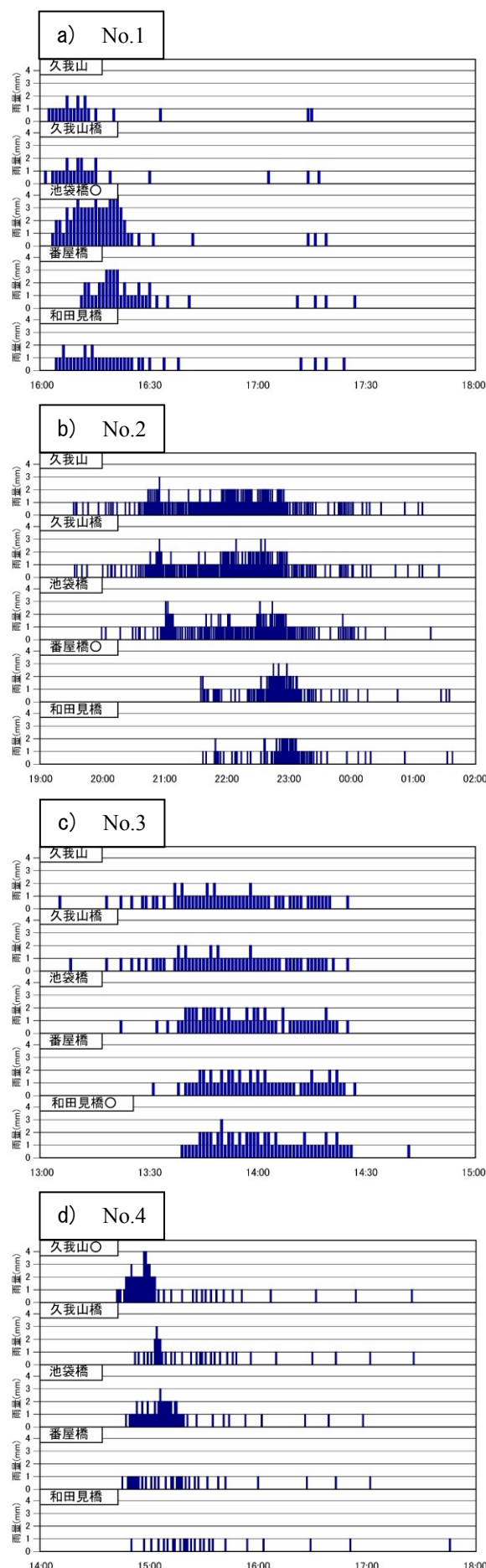


図-3 上位4イベントのハイトグラフ

図-3より、観測地点間で降雨量の差は大きく、特に豪雨イベントNo.1, No.4ではその特徴が顕著に現れていることがわかる。

今回抽出した豪雨イベントを示す表-2のうち、豪雨イベントNo.9, No.12は、それぞれ降雨継続時間が19分、28分、総雨量が42mm、40mmと、非常に短時間かつ強降雨の豪雨イベントである。この豪雨はどちらも大気状態不安定による豪雨であり、ほんの30分程度の短時間で強降雨が発生していることがわかる。

4. 観測地点間の時空間相関特性

抽出した豪雨イベントについて、時空間な相関特性について把握するため、遅れ時間を設定し、各豪雨イベントの自己相関関数と、他観測地点との相互相関関数を算出した。「遅れ時間 k 」は、図-4に示すとおり、豪雨イベントの降雨を基準とし、同時刻の同観測地点または他観測地点の降雨を $k=0$ の波形として、この降雨波形に対しての遅れ時間 $k=-30\sim 30$ 分の1分間隔を設定した。

(1) 自己相関

抽出した豪雨イベントにおいて、30分累加雨量値が大きい上位4イベント（No.1～No.4）の自己相関関数 $r_x(k)$ を図-5に示す。図-5より、各豪雨イベントの自己相関関数は、遅れ時間の絶対値が大きくなるにつれて相関係数が小さくなる傾向が確認できる。

豪雨イベントNo.1では、 $k=-6\sim 8$ 分の範囲で $r_x=0.6$ 以上となり、 $k=-11\sim 16$ 分で $r_x=0.2$ 以上を保持し、そして $k=-14$ 及び $k=25$ 分程度で相関が0となっている。正負の遅れ時間に対して左右対称となっておらず、正の遅れ時間に対して相関を長く保持していることが確認できる。遅れ時間が正の方で相関を長く持続している理由としては、豪雨は降雨開始時点で集中的に生起し、その後は降雨強度が弱まり無降雨の期間を伴いながら継続する傾向となる特性があるためと考えられる。また、豪雨イベントNo.3, No.4においても、相関を保持する時間はそれぞれ異なるが、No.1と同様の傾向が確認できる。

豪雨イベントNo.2では、他の豪雨イベントに比べ負の遅れ時間に対しても長く相関を保持しており、遅れ時間の絶対値が大きい場合においても設定した k の範囲では正の相関を保持している。これは、比較した豪雨イベントNo.2が、豪雨イベントNo.1, No.3, No.4と比べて降雨継続時間が241分と、比較

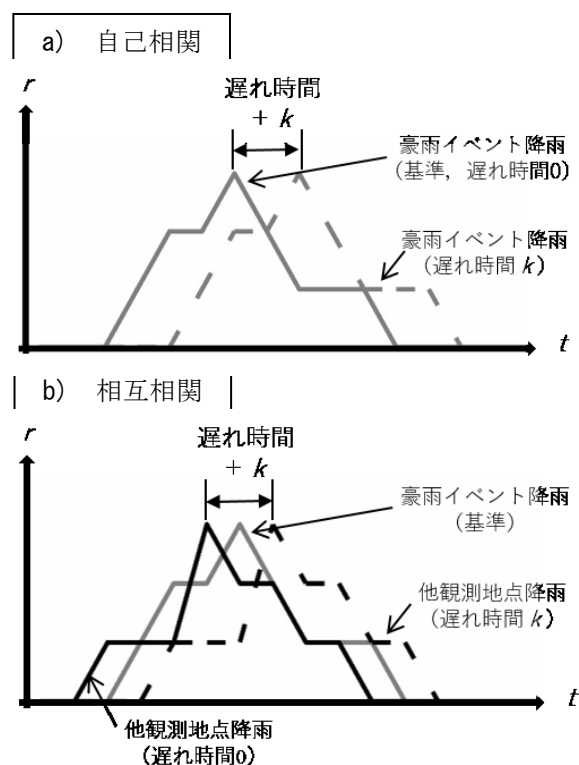


図-4 遅れ時間 k の概念

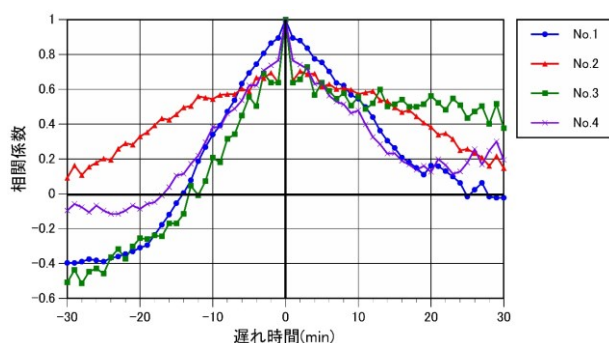


図-5 上位4イベントの自己相関関数

的長いためであると考えられる。他の抽出した豪雨イベントにおいても、降雨継続時間が長い豪雨イベント（No.5, No.13等）では同様の傾向が確認できた。

以上より、自己相関関数は全体的に正の遅れ時間に対して長く相関を保持することや、降雨継続時間が長いイベントでは、遅れ時間の絶対値が大きくなる場合でも長く相関を保持することが示された。また一方で、降雨継続時間が短い場合（No.9, No.12等）、遅れ時間の増加に伴い、相関を下げる傾向が強いことも確認した。

(2) 相互相関

抽出した豪雨イベントにおいて、30分累加雨量値が大きい上位4イベント（No.1～No.4）を対象として、抽出観測地点と他4観測地点間の相互相関関数

$r_{xy}(k)$ を図-6 a)～d)に示す。また、表-3に上位4イベントにおける各観測地点間の最大相関係数とその時の遅れ時間を示す。なお、豪雨イベントを抽出した観測地点は斜線で示し、イベント毎に最大となった相関係数は太線で囲った。

図-6 a)より、豪雨イベントNo.1では、遅れ時間の絶対値が大きくなるにつれて相関係数が低下する傾向が確認でき、また相関ピークが明確に確認できる。表-3に示すとおり、相関係数は番屋橋で $k=8$ 分で $r_{xy}=0.79$ と最も高く、次いで久我山橋で $k=-6$ 分で $r_{xy}=0.75$ 、和田見橋で $k=3$ 分で $r_{xy}=0.74$ 、久我山で $k=7$ 分で $r_{xy}=0.73$ の相関ピークとなっている。各観測地点間の相関ピークは0.7以上であり、どの観測地点においても最大となる相関係数が大きいことを確認した。豪雨イベントNo.1は、大気状態不安定に起因する降雨であり、この大気状態不安定は前線の影響である。図-3 a)より、前線が対象流域を北から南に下ることで降雨がもたらされたと推察でき、雨域の移動経路に沿って相関ピークが現れていることを確認した。

図-6 b)より、豪雨イベントNo.2においても、No.1と同様に遅れ時間の絶対値が大きくなるにつれて相関係数が低下する傾向と相関ピークが確認できる。表-3に示すとおり、相関ピークとなる遅れ時間が対象流域の西から東の観測地点へと順に生起している。図-3 b)に示すとおり、豪雨の雨域は対象流域内を西から東の方向へ移動したことが推察されるため、No.1と同様に雨域の移動経路に沿って相関ピーク現れていた。また表-3より、番屋橋と空間的に近接している池袋橋や和田見橋であるが、相関が最大となる観測地点は久我山橋で $k=-15$ 分で $r_{xy}=0.77$ である。このことから空間的に近接している観測地点が必ずしも相関が最大となるわけではないことがわかる。

次に図-6 c)より、豪雨イベントNo.3においては、視覚的には各観測地点間の相関ピークは判断しにくい。また、図-3 c)より、No.3の雨域はNo.2と同様に西から東へ移動したと推察されるが、表-3より、No.1、No.2と同様に雨域の移動経路に沿って相関ピークは現れていない。これらの理由は、No.3が低気圧に起因する豪雨であり、広範囲に渡り降雨をもたらしたためと考えられる。

次に図-6 d)では、池袋橋、久我山橋では相関ピークを確認できるが、番屋橋、和田見橋では明確に確認できない。ただし、図-3 d)に示すとおり、番屋橋、和田見橋では降雨量の絶対量が少ない。ここで、降雨量の絶対量が少ない番屋橋、和田見橋を除

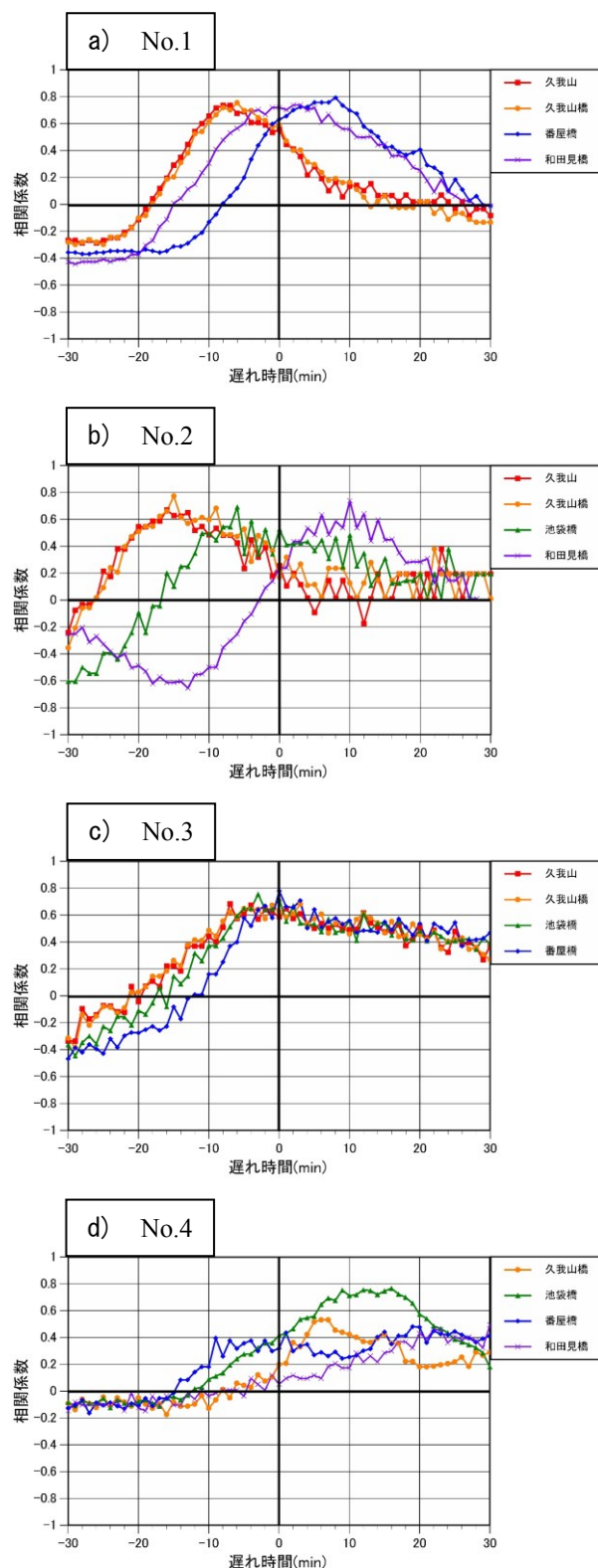


図-6 上位4イベントの相互相関関数

表-3 上位4イベントの最大相関係数及びその時の遅れ時間

観測地点	豪雨イベントNo.							
	No.1		No.2		No.3		No.4	
	最大相関係数	遅れ時間(min)	最大相関係数	遅れ時間(min)	最大相関係数	遅れ時間(min)	最大相関係数	遅れ時間(min)
久我山	0.73	-7	0.67	-16	0.88	-7	0.53	6
久我山橋	0.75	-6	0.77	-15	0.68	3	0.77	16
池袋橋	0.69	-6	0.75	-3	0.75	-3	0.77	16
番屋橋	0.79	8	0.78	0	0.78	0	0.48	19
和田見橋	0.74	3	0.74	10	0.74	10	0.49	30

いた3地点においては、相関のピークが西から東の観測地点へ順になっている。また、表-3より、池袋橋で $k=16$ 分で $r_{xy}=0.77$ の相関が最大となっており、空間的に近接している久我山橋よりも0.2以上相関係数が大きくなっている。これはNo.4は大気状態不安定に起因する豪雨イベントであるため、非常に狭い範囲で短時間の強降雨をもたらしたと推測される。

以上より、観測地点間における豪雨イベントの相関特性は、小流域であるが、豪雨イベント毎に大きく異なっており、雨域の移動経路に沿って相関ピークが現れる場合などにおいて、空間的に近接している観測地点間の相互相関係数が必ずしも $k=0$ 分付近において最大ではないことを示した。これは、降雨要因や、対象流域の形状が横長であることが影響していると考えられる。したがって、対象流域程度の小規模な流域であっても、豪雨時には1観測地点で代表した降雨データでは流域内の空間分布を十分に把握できないため、複数の地上雨量観測地点、もしくはレーダ雨量等を活用し、流域内の豪雨の空間分布を詳細に把握することが必要である。

5. むすび

本研究では、神田川上流域に位置する5地上雨量観測地点の1分値データを用いて、対象とした16年間に発生した豪雨イベントを抽出し、豪雨イベントの時空間的な相関特性についての検討を行った。対象とした5観測地点において抽出した豪雨イベントの比較により、豪雨イベントは時空間分布に多様性を持つことを確認した。

また、豪雨イベントの自己相関による検討により、全体的に正の遅れ時間に対して相関を長く保持することや、降雨継続時間が短い場合、遅れ時間の増加に伴い相関を下げる傾向が強いことを確認した。加えて豪雨イベントの相互相関による検討により、観測地点間における豪雨イベントの相関特性は、雨域の移動経路に沿って相関ピークが現れる場合などにおいて、空間的に近接している観測地点間の相互相関係数が必ずしも高くないことから、豪雨時には複数の地上雨量観測地点、もしくはレーダ雨量等を活用し、流域内における空間分布を詳細に把握することが必要であることを示した。

今後は、1分間で1mm単位のデータのほか、レーダ雨量のようなより詳細かつ空間的に密なデータを用い、流域内における豪雨時の時空間特性について研究を行う予定である。

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) 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, I_217-I_222, 2016.
- 4) 中小河川における今後の整備のあり方検討委員会: 東京都内の中小河川における今後の整備のあり方について 最終報告書, 2012
- 5) 葛葉泰久, 友杉邦雄, 岸井徳雄: 降水量の空間相関構造, 水工学論文集, 46, pp. 127-132, 2002.
- 6) 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.
- 7) 谷岡 康, 福岡捷二, 伊藤繁之, 小山幸也, 傅雲飛: 都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の特性, 土木学会論文集 No.579/ II - 41, 29-45, 1997.11
- 8) 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.
- 9) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝, 荒川大樹: 東京都水防災システム降水データの特性, 水文・水資源学会 2007 年度研究発表会要旨集, pp.14-15, 2007.
- 10) 坊田裕美, 河村明, 天口英雄: 東京都水防災システム 1 分降水量データの補正および欠測値時空間特性, 第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会公演概要集, CD-ROM 版(II -38), 2008.