

雨量計の観測値を用いた降水量の空間代表性の解析

SPATIAL REPRESENTATIVENESS OF PRECIPITATION
BASED ON DATA OBSERVED BY RAIN GAUGES

鈴木博人¹・中北英一²・高橋日出男³

Hiroto SUZUKI, Eiichi NAKAKITA, Hideo TAKAHASHI

¹正会員 理修 東日本旅客鉄道株式会社千葉支社設備部(〒260-0031 千葉県千葉市中央区新千葉 1-3-24)

²正会員 工博 京都大学防災研究所教授(〒606-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³非会員 理博 首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

Detecting the spatial representativeness of rainfall is important for establishing the proper method of distributing rain gauges. This study analyzed the meso-scale spatial representativeness of 1-hour precipitation, by using the data from 347 rain gauges set up in the Kanto Plains. The results are summarized as follows: (1) Authors designed an equation for the relationship between the ratio of 1-hour precipitation at two arbitrary chosen points and the distance between these points. (2) For ordinary rainfall, the higher the rainfall intensity is, the lower the spatial representativeness of 1-hour precipitation is. For local rainfall, however, that is almost constant regardless of the rainfall intensity. (3) The spatial representativeness of 1-hour precipitation in typhoons and lows is higher than that in thunderstorms and stationary fronts. (4) The spatial representativeness of 1-hour precipitation depends highly on the meteorological disturbance which causes rainfall. In the Kanto Plains, however, the influence of geographical conditions on the spatial representativeness is small.

Key Words : spatial representativeness, meso-scale, 1-hour precipitation, rainfall intensity, disturbance, geographical conditions

1 はじめに

鉄道や道路では、降雨災害に伴う事故を防止するために、地上雨量計の観測値に基づいて列車運転規制や通行規制を行っている¹⁾。鉄道や道路における降雨災害は主に沿線や沿道で発生する土砂災害で、土砂災害の発生には降雨強度と累積雨量の両者が関係している¹⁾。大雨は台風や雷雨などのさまざまな時間的・空間的スケールの気象擾乱によって発生するが、1 時間降水量を代表とする降雨強度は個々の積乱雲の影響を大きく受けている。そのため、雨量計の観測値に基づいて土砂災害の発生をより正確に予測するには、個々の積乱雲の空間スケールに相当する数 km から 10 数 km (メソ スケール) の範囲において、実際の降水量が雨量計の観測値によって代表可能である空間範囲を把握することが重要である。そして、それに基づいて雨量計の配置間隔 (密度) を決めることが望ましい。

このような降水量の空間代表性を論じるにあたり、例えば、井良沢・田口²⁾や佐溝ら³⁾などは 2 地点の相関係数、仙台管区気象台調査課⁴⁾や著者ら⁵⁾などは 2 地点の降水量比を用いて解析している。本研究では、2 地点の降水量の相関が高くても降水量に差異がある場合があり得

ると考えて、著者ら⁵⁾と同様に 2 地点の降水量比を用いて降水量の空間代表性を評価することにし、降水量比が 1 に近い場合を降水量の空間代表性が高いと考えた。

メソ スケールにおける降水量の空間代表性を調べた事例として、例えば仙台管区気象台調査課⁴⁾は、ほぼ同一地点とみなされる一辺 15m の正三角形内でも、ひと雨の降水量は±6%のばらつきがあり、3km 四方の広さでは±14%のばらつきがあるとしている。佐溝ら³⁾は、4 箇所における降水量の観測から、1 時間降水量の相関は 2 地点の距離が 5km 以内では高いが、5km 以上では著しく低下するとしている。以上は事例解析であるが、著者ら⁵⁾による東日本旅客鉄道株式会社 (以下、JR 東日本とする) 及び気象庁の雨量計で観測された降水量データを用いた 2 地点の降水量比の統計解析によると、関東平野では一般的な降雨における 1 時間降水量の空間代表性が高い範囲は 5km 程度、局地性の高い降雨は 2.5km 程度である。

降水量の空間代表性に基づいて雨量計を配置するためには、降水量の空間代表性に関するモデル化が必要である。そこで、本研究では著者ら⁵⁾が用いた JR 東日本及び気象庁の降水量データに、国土交通省 (以下、国交省とする) 及び東京都の降水量データを加えることで、より密な配置の雨量計で観測された降水量データを用いて、メソ

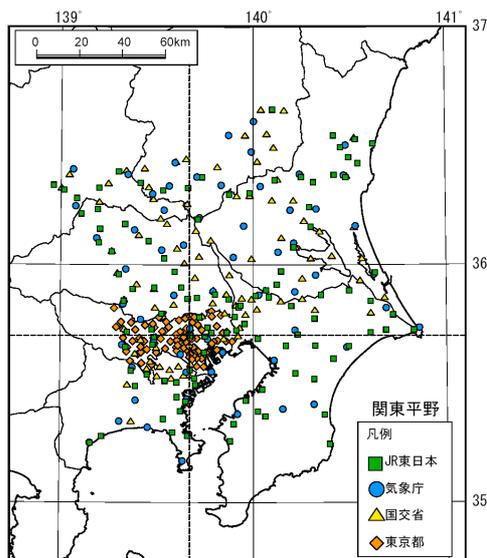


図-1 解析に用いた雨量計の位置．点線は東西及び南北地域の境界．

スケールにおける2地点の1時間降水量の降水量比について解析を行うとともに、2地点の降水量比と距離との関係式を求めた。また、降雨強度、降雨を発生させた気象擾乱、及び地理的条件が2地点の1時間降水量の降水量比と距離との関係に与える影響を調べた。

2 解析方法

(1) 対象地域

対象とする地域は、日本最大の平野である関東平野の標高150m以下の地域とした。関東平野における各観測地点は、基本的に起伏が小さい平坦面が連続する平野上に位置している。そのため、降水量に与える地形の影響が小さい地域と考えられることから、本研究の目的とする降水量の空間代表性の解析に適した地域と考えた。

(2) 降水量データ

本研究では、降水量データにJR東日本、気象庁、国交省、及び東京都の雨量計で観測された正時における1時間降水量を用いた。JR東日本の降水量データは、鉄道沿線に約10km間隔で設置された雨量計による観測データである⁶⁾。気象庁は地域気象観測システム(アメダス)、国交省は水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/contents.html>)、東京都は東京都水防災総合情報システム(<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/suibo/display/toppage.html>)の降水量データを用いた。解析に用いた地点は、図-1に示す347地点で、データソース別の地点数は表-1のとおりである。解析の対象期間は、これらの降水量データがそろった1991年から2007年の17年間の暖候期(5月～10月)とし、この期間で延べ10年以上の降水量データのある地点を対象にした。なお、JR東日本、国交省、及び東京都の降水量データについては、近隣3地点の気象庁の雨量計で観測された降水量データと比較することで異常値や欠測に関する品質チェックを行った。

表-1 解析に用いた雨量計の地点数及び観測年数。観測年数は、1991年から2007年の暖候期における欠測や観測の未実施期間を除いた1時間降水量が存在する延べ年数。

	雨量計の地点数	観測年数(年)		
		最大	最小	平均
JR 東日本	110	16.3	12.3	14.9
気象庁	60	17.0	15.8	16.9
国交省	87	17.0	11.3	16.1
東京都	90	16.0	10.6	15.1
合計	347	17.0	10.6	15.6

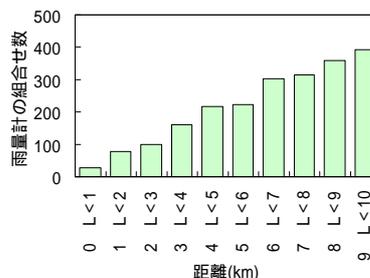


図-2 1kmごとの雨量計の組合せ数。

(3) 雨量計の位置と2地点の距離

雨量計の設置地点の緯度・経度は、JR東日本の雨量計については地理情報システムを用いて秒単位で読み取った。気象庁の雨量計の緯度・経度は地域気象観測所一覧表(地域気象観測所一覧表FD)、国交省の雨量計は水文水質データベースで公開されている位置情報、東京都の雨量計は東京都から入手した位置情報を用いた。なお、国交省及び東京都の雨量計の緯度・経度については地理情報システムで位置の確認を行うことで品質チェックを行った。

2地点の距離は、平面直角座標系(19座標系)⁷⁾を用いて、雨量計の設置地点の緯度・経度を平面直角座標に変換した上で求めた。本研究の目的は、メソスケールにおける雨量計で観測される降水量の空間代表性を明らかにすることであることから、2地点の距離が10kmまでの場合を対象にした。図-2は関東平野における雨量計の1kmごとの組合せ数で2地点の距離が2, 5, 10km以下の雨量計の組合せはそれぞれ105, 582, 2175組である。

(4) 解析方法

雨量計で観測される1時間降水量の空間代表性の解析は、著者ら⁵⁾による2地点の降水量比に関するパーセンタイル値を用いる方法で行った。本研究では、2地点の正時の1時間降水量を R_i 及び R_j 、降水量のしきい値を10mmから30mmまでの5mm刻みとしたときに、2地点の降水量比 R_i/R_j は2地点のうちの1地点以上で1時間降水量がしきい値以上の場合のデータを用いて計算し、75及び95パーセンタイル値に着目する。図-3は、2地点の距離が0, 2, 5, 10kmに近い組合せについて2地点の正時における1時間降水量の関係を散布図で示したものである。図中には、1時間降水量が10mm以上のデータを用いて、横軸の地点に対する縦軸の地点の降水量比

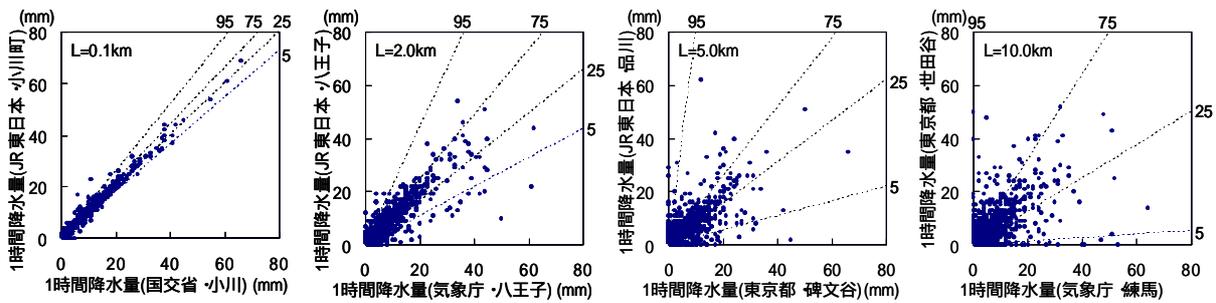
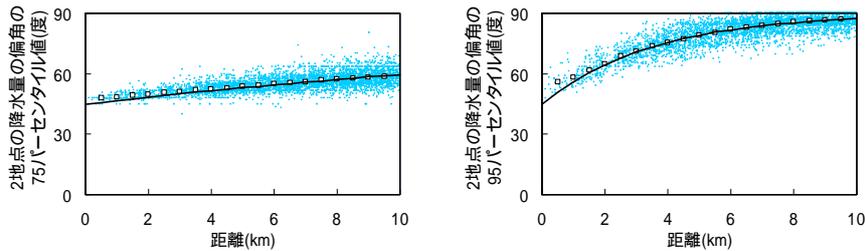


図-3 2地点の正時における1時間降水量の関係. 図中のLは2地点の距離, 点線は横軸の地点に対する縦軸の地点の降水量比の5, 25, 75, 95パーセンタイル値に対応し, 数値はそれぞれのパーセンタイル値.



(a) 75パーセンタイル値

(b) 95パーセンタイル値

図-4 2地点のうち1地点以上で1時間降水量が10mm以上のデータを用いた場合の2地点の1時間降水量の偏角に関する75及び95パーセンタイル値と距離との関係. 図中の□はある距離±0.5kmの1kmの範囲に含まれる組合せの1時間降水量の偏角に関するパーセンタイル値の平均値, 実線は式(1)から算出される2地点の1時間降水量の偏角に関するパーセンタイル値.

の5, 25, 75, 95パーセンタイル値に対応する直線の傾きを示してある. なお, この5及び25パーセンタイル値は縦軸の地点に対する横軸の地点の降水量比の95及び75パーセンタイル値に相当する. このように, 2地点の降水量比に関する75及び95パーセンタイル値は, 1つの雨量計の組合せから2つの値が求まる. したがって, 解析に用いる延べ地点数は表-2に示した雨量計の組合せ数の2倍である.

ここで, 2地点の降水量比に関する95パーセンタイル値には全体の95%の降雨事例が含まれる. したがって, 95パーセンタイル値以上には降水量比が大きい上位5%の降雨事例のみが含まれることから, 95パーセンタイル値を局地性の高い降雨の代表とみなすことにする. また, 75パーセンタイル値には全体の75%の降雨事例が含まれることから, 75パーセンタイル値を一般的な降雨と考えることにする.

雨量計の各組合せのパーセンタイル値の計算にあたっては, 1時間降水量のしきい値が低いほど, その値以上のデータ数が多くなり, 統計解析を行う上で有利である. 一方, 降水量のしきい値が高いほど, その値以上のデータ数が少なくなるが, 防災の観点から重要である. そこで本研究では95パーセンタイル値を算出することから, 1時間降水量がしきい値を超過した回数(データ数)が20回以上の雨量計の組合せを計算対象にした.

2地点の降水量比は, ある地点でしきい値以上の降雨があり, もう一方の地点で降雨がない場合があるため, 0から無限大の値をとる. そのため, 降水量比に関する75及び95パーセンタイル値が無限大になる場合があり, こ

のような場合が含まれると降水量比に関するパーセンタイル値と距離との関係を求めることが困難である. そこで, 著者ら⁵⁾は以下の方法を提案した. 初めに, 2地点の降水量 R_i 及び R_j の関係を直交座標 (R_i, R_j) から極座標 (r, θ) に変換すると, 偏角 $(\theta = \arctan(R_a/R_b))$ は0から $\pi/2$ の有限の値をとる. そして, ある距離の範囲に含まれる組合せについて偏角の平均値を求めて, 最後に直交座標に再変換することで降水量比の平均値を求めた. 本研究では, この方法を応用して, 2地点の降水量の偏角に関するパーセンタイル値と距離との関係式を求めて, 最後に直交座標に再変換することで, 2地点の降水量比に関するパーセンタイル値と距離との関係式を求めた.

(5) 気象擾乱の分類

2地点の降水量比と距離との関係について, 降雨をもたらす気象擾乱による影響を把握するために, 対象とした全地点のうち1地点以上で正時において1時間降水量が30mm以上の大雨が観測された日の降水量データを用いた解析を行った.

大雨事例については, 天気図と衛星写真から, 大雨をもたらした気象擾乱を台風(熱帯低気圧を含む), 停滞前線, 低気圧, 雷雨の4つに区分した. ただし, 台風と停滞前線が共存する場合には, 衛星画像によって台風本体のスパイラル状の雲群を判別し, それによる降雨を台風に, そうでない場合を停滞前線に区分した. また, 梅雨季や秋雨季などみられる活発な停滞前線は低気圧の連なりとして認識できる⁸⁾ことから, 停滞前線上に解析されたメソ低気圧に伴う降雨は停滞前線に区分した.

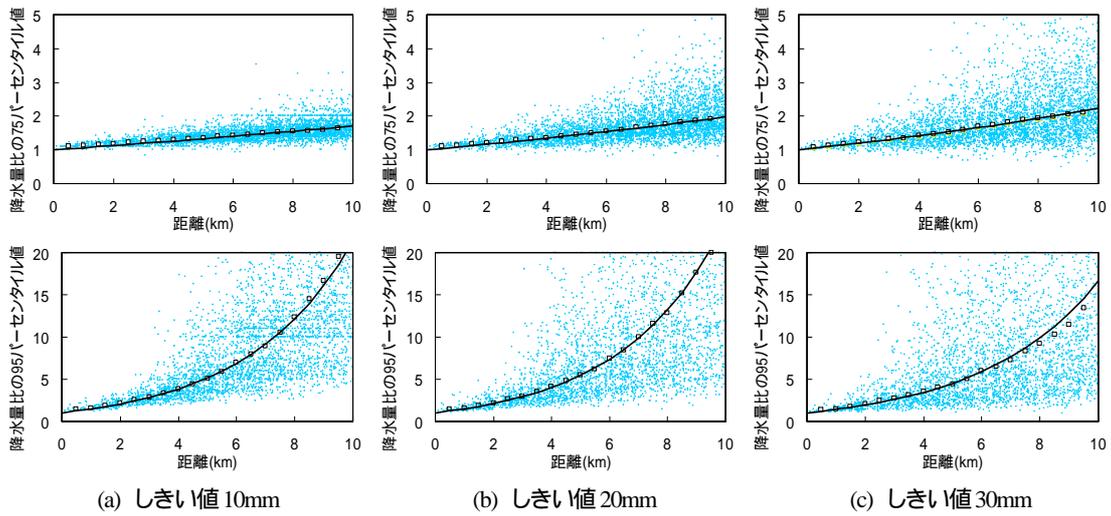


図-5 2地点のうち1地点以上で1時間降水量が10, 20, 30mm以上のデータを用いた場合の2地点の降水量比に関する75パーセントイル値(上段)及び95パーセントイル値(下段)と距離との関係。図中の はある距離±0.5kmの1kmの範囲に含まれる組合せの降水量比に関するパーセントイル値の平均値, 実線は式(2)から算出される降水量比に関するパーセントイル値。

(6) 地理的条件の分類

2地点の降水量比と距離との関係について,雨量計の位置する地点の地理的条件の影響を把握するために,2地点の方位別と雨量計の位置する地域別の解析を行った。2地点の方位別の解析では,一方の地点から他方の地点をみた場合の方位によって,2地点の組合せを南-北,南東-北西,東-西,北東-南西の4方位に区分した。また,雨量計の位置する地域別の解析では,それぞれの地域に位置する雨量計の地点数なるべく均等になるように関東平野を図-1に示す4つの地域に区分した。

3 降雨の空間代表性の分析

2地点の1時間降水量の降水量比と距離との関係について降水量のしきい値を10mmから30mmまでの5mm刻みとして解析を行うとともに関係式を求めた。

(1) 2地点の降水量比と距離との関係

2地点の1時間降水量の差異は,図-3に示すように2地点の距離が離れるほど大きくなり,2地点の降水量比に関する75及び95パーセントイル値が大きくなる傾向にある。図-4は,2地点のうち1地点以上で1時間降水量が10mm以上の場合のデータを用いて,極座標における2地点の1時間降水量の偏角に関する75及び95パーセントイル値と距離との関係を示したものである。また,図-5は同様に10,20,30mm以上の場合のデータを用いて,2地点の1時間降水量の降水量比に関するパーセントイル値と距離との関係を示したものである。なお,図-4及び図-5中の は,ある距離±0.5kmの1kmの範囲に含まれる組合せについて,2地点の1時間降水量の偏角及び降水量比に関する75及び95パーセントイル値の平均値を0.5kmごとに示したものである。

図-5によると,2地点の1時間降水量の降水量比に関する75パーセントイル値は距離の増加に伴って緩やか

表-2 降水量のしきい値,気象擾乱,2地点の方位,及び地域別の定数a。

擾乱	地域	方位	降水量のしきい値(mm)	延べ地点数	定数a		
					75	95	
全擾乱	全域	全方位	10	4,350	3.92E-02	2.83E-01	
			15	4,350	4.52E-02	2.92E-01	
			20	4,350	5.16E-02	2.93E-01	
			25	4,332	5.83E-02	2.73E-01	
			30	3,884	6.21E-02	2.57E-01	
台風	全域	全方位	10	4,350	2.44E-02	1.08E-01	
低気圧				4,186	2.27E-02	1.28E-01	
停滞前線				4,350	5.76E-02	3.07E-01	
雷雨				4,322	1.14E-01	5.25E-01	
全擾乱	全域	東-西	10	1,076	4.14E-02	2.92E-01	
		南東-北西		1,052	4.49E-02	3.16E-01	
		南-北		1,098	3.65E-02	2.72E-01	
		北東-南西		1,124	3.47E-02	2.56E-01	
全擾乱	全域	全方位	10	1,221	3.73E-02	2.73E-01	
				南東	965	3.76E-02	2.71E-01
				北西	956	4.38E-02	3.19E-01
				北東	1,208	3.88E-02	2.78E-01

に増加するが,95パーセントイル値は急激に増加する。2地点の降水量比のとり得る範囲は,距離が同じときに,降水量のしきい値が高い場合ほど大きく,95パーセントイル値が75パーセントイル値に比べて大きい。

(2) 2地点の降水量比と距離との関係式

2地点の1時間降水量の偏角は,2地点の距離が0km(同地点)のとき /4(降水量比は1)である。図-4によると,2地点の降水量の偏角に関する75及び95パーセントイル値は距離に対して上に凸の分布をし,距離が無限大のとき /2(降水量比は無無限大)に漸近する。そこで,2地点の1時間降水量の偏角に関するパーセントイル値 r(X)と距離 X との関係は, a を定数として次式で近似することにした。

$$r(X) = \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \exp(-a \cdot X) \quad (1)$$

図-4には,2地点のうち1地点以上で1時間降水量が10mm以上のデータを用いた場合に,最小二乗法により

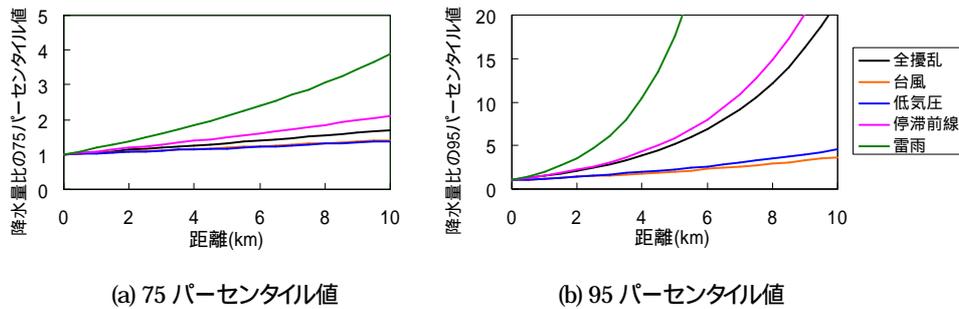


図-6 2地点における1時間降水量の降水量比に関する気象擾乱別の75及び95パーセンタイル値と距離との関係. 2地点のうちの1地点以上で1時間降水量が10mm以上のデータを用いて求めた定数aにより式(2)から算出.

推定される定数 a を用いて、式(1)から算出される2地点の1時間降水量の偏角に関する75及び95パーセンタイル値を実線で示した. 図-4で図示を省略した降水量のしきい値以上のデータを用いた場合を含めて、式(1)から算出される2地点の降水量の偏角に関するパーセンタイル値は1kmの範囲ごとの平均値と良く一致する. したがって、2地点の1時間降水量の偏角に関するパーセンタイル値と距離との関係は式(1)で表せると考えた.

2地点の1時間降水量の降水量比に関するパーセンタイル値 $R(X)$ と距離 X との関係は、式(1)を直角座標に変換することで、次式で表すことができる.

$$R(X) = \tan \left[\frac{\pi}{4} - \frac{1}{4} \exp(-a * X) \right] \quad (2)$$

図-5には、最小二乗法により推定される定数 a を用いて式(2)から算出される2地点の降水量比に関する75及び95パーセンタイル値を実線で示した. 図-5で図示を省略した降水量のしきい値以上のデータを用いた場合を含めて、式(2)から算出される2地点の降水量比に関するパーセンタイル値は1kmの範囲ごとの平均値と良く一致する. したがって、2地点の1時間降水量の降水量比に関するパーセンタイル値と距離との関係は式(2)で表せると考えた. ここで、定数 a は2地点の降水量比に関するパーセンタイル値が2地点の距離の増大に伴う増加の割合を規定する定数である. つまり、2地点の降水量比に関するパーセンタイル値は、定数 a が大きい(小さい)ほど、2地点の距離が離れるのに伴って大きく(小さく)なる.

表-2には、降水量のしきい値別に最小二乗法により推定される定数 a を示した. 定数 a と降水量のしきい値は、75パーセンタイル値の場合に相関係数が0.99と有意水準5%で正の相関が有意であるが、95パーセンタイル値の場合には有意水準5%での有意な相関が認められない. このことから、一般的な降雨の代表とした2地点の降水量比に関する75パーセンタイル値は降雨強度が高いほど大きくなると考えられる. 一方、局地的な降雨の代表とみなす95パーセンタイル値は降雨強度によらずほぼ一定である.

4 気象擾乱及び地理的条件別の分析

2地点の1時間降水量の降水量比と距離との関係につ

いて、降雨を発生させた気象擾乱、2地点の方位、及び雨量計の位置する地域による影響を把握するために、2地点のうちの1地点以上で1時間降水量が10mm以上の場合のデータを用いた解析を行った.

(1) 気象擾乱別の解析

表-2には、降雨をもたらした気象擾乱別に最小二乗法により推定される式(2)の定数 a を示した. 図-6は、定数 a により式(2)から算出される気象擾乱別の2地点の1時間降水量の降水量比に関する75及び95パーセンタイル値を示したものである. これらから、2地点の降水量比に関する75及び95パーセンタイル値は台風や低気圧の場合には2地点の距離の増大に伴って緩やかに増加するが雷雨や停滞前線の場合には急激に増加する. これは、降雨をもたらす積乱雲群の水平スケールに関係していると考えられ、台風や低気圧の場合には広域に組織化された積乱雲群によって降雨がもたらされる場合が多く、雷雨や停滞前線による大雨は少数の積乱雲によって降雨がもたらされる場合が多いためと考えられる.

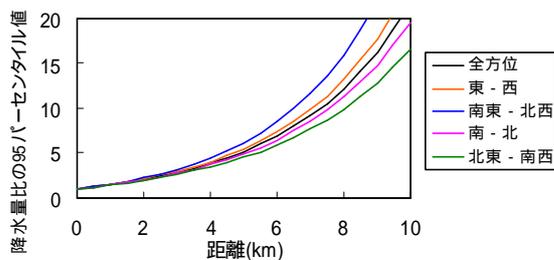
(2) 2地点の方位別の解析

表-2には、2地点の方位別に最小二乗法により推定される式(2)の定数 a を示した. これによると、2地点の1時間降水量の降水量比に関する75及び95パーセンタイル値の定数 a は、南東-北西方向で大きく、北東-南西方向で小さい傾向にある. ただし、2地点の方位の違いによる定数 a の差異は、気象擾乱による差異に比べると小さい.

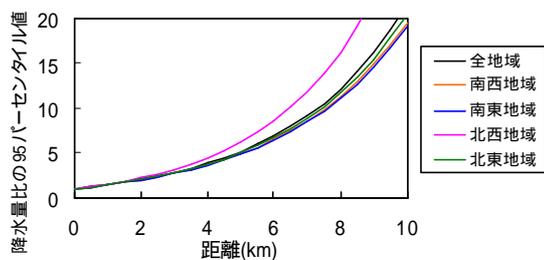
図-7(a)は、定数 a により式(2)から算出される2地点の1時間降水量の降水量比に関する方位別の95パーセンタイル値と距離との関係である. なお、2地点の降水量比に関する75パーセンタイル値は2地点の距離が10km以下では2地点の方位による差異がほとんどないことから図示を省略した. これから、2地点の降水量比は、2地点の距離が5km程度以上になると、95パーセンタイル値に南東-北西方向で大きく、北東-南西方向で小さい傾向が現れる. このような1時間降水量の降水量比の異方性には、降雨域の構造(形状)や移動方向が関係している可能性が考えられる.

(3) 地域別の解析

表-2には、雨量計の位置する地域別に最小二乗法によ



(a) 2地点の方位別



(b) 地域別

図-7 2地点における1時間降水量の降水量比に関する方位別及び地域別の95パーセンタイル値と距離との関係 2地点のうち1地点以上で1時間降水量が10mm以上のデータを用いて求めた定数 a により式(2)から算出。

り推定される式(2)の定数 a を示した。これによると、定数 a は北西地域が他の地域に比べて大きい。関東平野では地域の違いによる定数 a の差異は、気象擾乱による差異に比べると小さい。

図-7(b)は、定数 a により式(2)から算出される2地点の1時間降水量の降水量比に関する地域別の95パーセンタイル値と距離との関係である。なお、2地点の降水量比に関する75パーセンタイル値は2地点の距離が10km以下では地域による差異がほとんどないことから図示を省略した。これから、2地点の1時間降水量の降水量比は、2地点の距離が5km程度以上になると、95パーセンタイル値に北西地域が他の地域に比べて大きい傾向が現れる。関東平野では、雷雨による大雨事例の割合は、北部が南部に比べて高く、特に北西地域が高い⁹⁾。雷雨による大雨は表-2及び図-6によると他の気象擾乱による大雨に比べて2地点の降水量比が大きい。そのため、降水量比の大きい雷雨の割合が高い北西地域は、その割合が低い他の地域に比べて、降水量比が大きいと考えられる。

以上のように、気象擾乱や地理的条件別の2地点の1時間降水量の降水量比と距離との関係の解析から、2地点の1時間降水量の降水量比は降雨をもたらす気象擾乱による影響を大きく受けるが、関東平野では雨量計の位置する地理的条件による影響は小さいと考えられる。

5 まとめ

本研究では、JR東日本、気象庁、国交省、及び東京都の降水量データを用いて、メソスケールにおける2地点の1時間降水量の降水量比と距離との関係を解析した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 2地点の1時間降水量の降水量比に関するパーセンタイル値と距離との関係式を提示した。
- (2) 一般的な降雨の代表とした2地点の1時間降水量の降水量比に関する75パーセンタイル値は降雨強度が高いほど大きくなる。一方、局地的な降雨の代表とみなす95パーセンタイル値は降雨強度によらずほぼ一定である。
- (3) 2地点の1時間降水量の降水量比に関する75及び95パーセンタイル値は、台風や低気圧の場合には2地

点の距離の増大に伴って緩やかに増加するが、雷雨や停滞前線の場合には急激に増加する。

- (4) 2地点の1時間降水量の降水量比は2地点の距離が5km程度以上になると、95パーセンタイル値に南東-北西方向で大きく、北東-南西方向で小さい傾向が現れる。また、関東平野の北西地域が他の地域に比べて大きい傾向が現れる。
- (5) 2地点の1時間降水量の降水量比は、降雨をもたらす気象擾乱による影響を大きく受けるが、関東平野では地理的条件による影響は小さいと考えられる。

謝辞：本研究では、気象庁、国交省、東京都、及びJR東日本の降水量データを利用しました。それぞれの機関において観測とデータの保存・整理に従事された方々に深く感謝申し上げます。また、貴重なご意見を頂きました査読者の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズム及び危険度予測，地盤工学 実務シリーズ23，丸善，184p.，2006。
- 2) 井良沢道也，田口隆男：降雨特性を考慮したテレメータ配置計画の検討，新砂防，Vol.49，pp.22-27，1996。
- 3) 佐溝昌彦，和田昭夫，紙田 茂，村石 尚，杉山友康：鉄道防災情報システムと雨量計配置に関する一考察，土木学会第48回年次講演会講演集，pp.340-341，1995。
- 4) 仙台管区気象台調査課：降雨特別調査観測について，研究時報，No.26，pp.16-17，1974。
- 5) 鈴木博人，中北英一，高橋日出男：降雨の空間代表性 - 鉄道と気象庁の降水量データを用いた解析 - ，水工学論文集，Vol.52，pp.187-192，2008。
- 6) 加藤 光：防災情報システムの導入，Japan Railway Engineers' Association，Vol.32，No.11，pp.18853-18856，1989。
- 7) 国土地理院，測量計算，<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html>，2008年9月30日。
- 8) 二宮洗三：雨とメソシステム，東京堂出版，242p.，1981。
- 9) 鈴木博人，高橋日出男：関東平野における大雨の空間スケール - 鉄道と気象庁の降水量データを用いた統計解析 - ，自然災害科学，Vol.27，pp.161-173，2008。

(2008.9.30 受付)