

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 -

SPATIAL REPRESENTATIVENESS OF RAINFALL:
ANALYSIS USING DATA OBSERVED
AT RAILWAY STATIONS AND METEOROLOGICAL STATIONS

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 JR 東日本研究開発センター防災研究所(〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-0)

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)

Detection of spatial representativeness of rainfall is important for the prevention of disaster. This study analyzed the spatial representativeness of rainfall based on observed data at the railway observational stations and the meteorological stations of Japan Meteorological Agency in Kanto Plain and the mountains region of Koshin-etsu. The results can be summarized as follows:

The 95th percentile of the 1-hour (24-hour) precipitation ratio between two stations is about 1.5 (1.2) at the distance of two stations is one kilometer. The high spatial representativeness area of ordinary 1-hour (24-hour) precipitation is about five (ten) kilometers, and one of local 1-hour (24-hour) precipitation is about two (five) kilometers. The spatial representativeness is higher in the plain than in the mountainous region. The orographic effects become larger when the distance of two stations exceeds two kilometers.

Key Words : spatial representativeness, 1-hour precipitation, 24-hour precipitation, plain, mountain region

1 はじめに

降雨の空間分布特性を把握することは、降雨災害の防止にとって重要である。鉄道や道路では、降雨災害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^{1,2)}。これらの雨量計をより適切に配置するためには、雨量計で観測される降水量の空間代表性を明確にすることが不可欠である。また、降雨の空間分布特性を知ることは、防災だけでなく、水資源の観点からは流域の降水量の把握、気象学においては降雨の特性や機構の解明などに対して重要である。

降雨の空間分布特性に関しては、河川災害の防止の観点から比較的広い範囲を対象とした研究が数多く行われている。例えば、宝ら³⁾は DAD (Depth-Area-Duration) 解析、井良沢・田口⁴⁾は 2 地点の降水量の相関係数、葛葉ら⁵⁾は 2 地点で同時に大雨が生起している条件付確率(大雨の同時生起率)を用いて降雨の空間分布特性を分析している。また、谷岡ら⁶⁾は都市の中小河川流域を対象にした大雨の空間分布の事例解析を行っている。

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ある。雨量計の観測値から土砂災害の発生をよりの確に予測するためには、流域スケールを考える河川災害の場合に比べて小さい空間スケールにおける降雨分布の把握が必要で、個々の積乱雲に対応するメソスケールの降雨を精度良く把握することが要求される。このような空間スケールを対象にして降雨の空間分布特性を調べた事例として、例えば仙台管区気象台調査課⁷⁾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。また、佐溝ら⁸⁾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 地点間の距離が 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。

本研究の目的は、鉄道などにおける雨量計をより適切に配置するために、メソスケールの降雨現象を含めて、雨量計で観測される降水量の空間代表性を統計的に明らかにすることである。降雨の空間代表性を評価するにあ

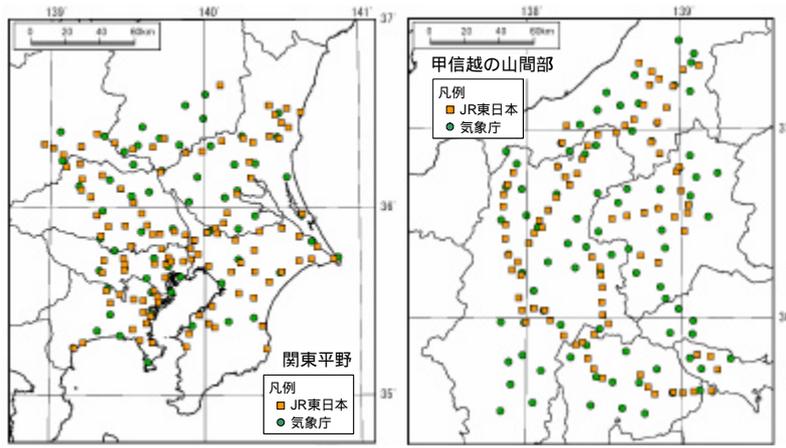


図-1 解析に用いた関東平野と甲信越の山間部における雨量計の位置

たり、本研究ではある地点である降水量が観測された場合に、そこからある距離離れた地点における降水量に注目する。このような2地点間の距離と両地点の降水量の比との関係を調べるために、東日本旅客鉄道株式会社(以下、JR 東日本とする)と気象庁の降水量データを併用し、密な観測地点網に基づく統計的な解析を行った。

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(以下、関東平野とする)、及び中部山岳域を含む甲信越地方の平野部を除く地域(以下、甲信越の山間部とする)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。一方、甲信越の山間部にも盆地などの比較的平坦な場所が含まれる。しかし、複雑に配列する山脈によって観測地点が隔てられ、観測地点付近の地形条件も山地斜面や谷底、盆地底など多岐にわたる。したがって、関東平野と甲信越の山間部とでは観測地点が置かれた地形条件が対照的であり、両地域を比較することによって降雨の空間代表性に与える地形の影響を評価することが可能と考えられる。

(2) 降水量データ

本研究では、JR 東日本の雨量計(以下、JR 雨量計とする)で観測された降水量(以下、JR 降水量とする)と、気象庁の地域気象観測システム(以下、アメダスとする)の雨量計(JMA 雨量計とする)で観測された降水量(以下、JMA 降水量とする)を用いた。解析には、降雨災害が一般的に強い雨や大雨によって発生することから、それぞれの雨量指標として用いられることの多い1時間降水量と24時間降水量を取り上げた。解析の対象期間は、2つの降水量データがそろった1991年から2006年の16年間における暖候期(5月～10月)とした。

解析に用いた観測地点は、関東平野では図-1左に示したJR雨量計110箇所、JMA雨量計60箇所の合計170箇所である。また、甲信越の山間部については、図-1右に

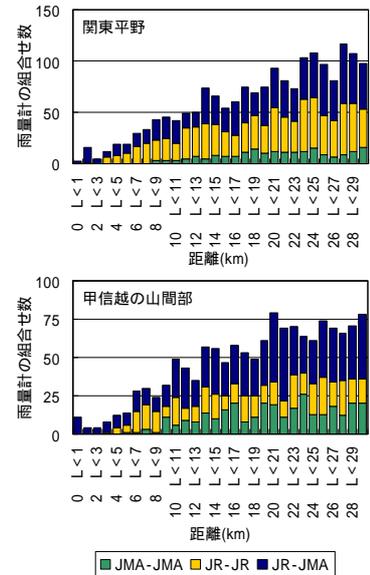


図-2 JR 雨量計と JMA 雨量計の組合せ別に集計した 1km ごとの組合せ数。

示した JR 雨量計 83 箇所、JMA 雨量計 86 箇所の合計 169 箇所である。なお、甲信越の山間部における標高 1,000m 以上の山岳域を除けば、標高別に集計した JR 雨量計と JMA 雨量計の地点数の比率は同程度であり、雨量計が位置する標高は両データ間で大きな差異はない。

a) JR 降水量

JR 東日本では、降雨による鉄道災害を防止するために、鉄道沿線に雨量計を概ね 10km 間隔で設置して降水量の観測を行っており、1991 年から 1mm 単位の降水量データが 5 分ごとに保存されている⁹⁾。なお、雨量計は転倒ます型雨量計で、転倒ますは 0.5mm である。また、JR 降水量の 1991 年から 2006 年の 16 年間の暖候期における欠測、観測の未実施、及び観測データの未保存を合わせた割合は、1 時間降水量でみると最大の箇所で 29.0%、最小の箇所で 4.1%、平均で 15.3% である。

b) JMA 降水量

JMA 降水量は、アメダス観測年報(アメダス再統計値 CD-ROM など)の 1 時間降水量を用いた JMA 降水量は、1991 年から 2006 年の 16 年間に於いて 10 年以上の観測期間がある箇所を対象とし、この期間で降水量の統計が切断されている箇所は別箇所として扱った。また、JMA 降水量の 1991 年から 2006 年の 16 年の暖候期における欠測と観測の未実施を合わせた割合は、1 時間降水量でみると最大の箇所で 18.4%、最小の箇所で 0.0%、平均で 1.2% である。

(3) 雨量計の位置と 2 地点の距離

JR 雨量計の設置箇所の緯度・経度は、地理情報システムを用いて秒単位で読み取った JMA 雨量計の位置情報は、地域気象観測所一覧表(地域気象観測所一覧表 FD)を用いた。また、2 地点間の距離は平面直角座標系(19 座標系)¹⁰⁾を用いて、2 地点の緯度・経度を平面直角座標に変換した上で求めた。

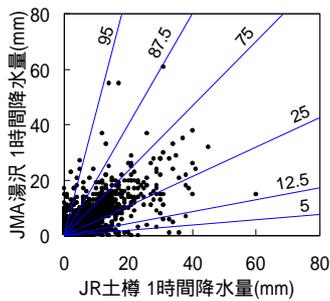


図-3 JMA 湯沢とJR 土樽の正時における 1 時間降水量の関係。図中の直線の傾きは JR 土樽に対する JMA 湯沢の 1 時間降水量の比に関する 5, 12.5, 25, 75, 87.5, 95 パーセンタイル値に対応し、数値はそれぞれのパーセンタイル値である。なお、2 地点間の距離は 8.7km である。

2 地点の降水量の関係は、2 地点間の距離が 30km まで求めた。これは、本研究の目的がメソ スケールを含めた降雨の空間代表性を明らかにすることであり、このためには 30km 程度までの範囲を詳細に分析する必要があると考えたためである。2 地点間の距離が 30km 以下の雨量計の組合せは、関東平野が 1795 組、甲信越の山間部が 1369 組である。図-2 は、関東平野と甲信越の山間部における雨量計の 1km ごとの組合せ数である。これによれば、JR 雨量計と JMA 雨量計の組合せには 2 地点間の距離が近い組合せが多数存在する。このように、メソスケールを含めた降雨の空間代表性の統計解析は、複数の観測網の降水量データを用いることで可能になる。

(4) 分析方法

本研究では、雨量計で観測される降水量の空間代表性を 2 地点の降水量の比を用いて分析した。任意の 2 地点で観測される降水量の差異は一般的に距離の増大とともに拡大すると考えられるが、降雨の空間代表性の評価にはそれを定量的に把握する必要がある。そこで、まず個々の降雨事例に関して同時刻における 2 地点の降水量の差異を、2 地点の降水量の比によって定義する。その上で、多数の降雨事例から得られる降水量の比の集合体について、2 地点の組合せを代表する値を求める。ここでは、2 地点の降水量の比を小さい順に並べた場合に、全データの 75, 87.5, 95% の順位に相当する 75, 87.5, 95 パーセンタイル値を用いた。これらの値は様々な 2 地点間の距離に対して得られるので、本研究ではこれらの値と距離との関係を解析することにより、降雨の空間代表性に関する議論を行った。

図-3 は、アメダスの湯沢(以下、JMA 湯沢とする)と JR 東日本の土樽(以下、JR 土樽とする)の正時における 1 時間降水量の関係を散布図によって示したもので、両地点の 1 時間降水量の比に関する 5, 12.5, 25, 75, 87.5, 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。図-3 において、JR 土樽に対する JMA 湯沢の降水量の比の 5, 12.5, 25 パーセンタイル値は、JMA 湯沢に対する JR 土樽の降水量の比の 95, 87.5, 75 パーセンタイル値に相当す

る。このように、2 地点の降水量の比に関する 75, 87.5, 95 パーセンタイル値は、1 組の組合せから 2 つの値が得られる。ここで、2 地点の降水量の比に関する 25 パーセンタイル値と 75 パーセンタイル値の間には 50% の降雨事例が含まれる。したがって、2 地点の組合せから得られる 75 パーセンタイル値以上の事例を取り上げると、全体の 50% の降雨事例が含まれることになる。同様に、87.5 及び 95 パーセンタイル値以上には、それぞれ降水量の比が大きい上位 25 及び 10% の降雨事例が含まれる。95 パーセンタイル値は降水量の比が大きい上位 10% に相当することから、本研究では 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。これに対して、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。

解析に用いる降水量データは 1mm 単位であるために、降水量が 2 地点とも小さい場合には降水量の比に大きな誤差が含まれる恐れがある。また、全ての降雨事例を用いて解析を行うと、頻度は高いが防災の観点からは重要性が低い弱い雨や小雨の影響を大きく受ける恐れがある。これらの影響を小さくするために、強い雨や大雨の事例を対象に解析を行うことにするが、その基準が高すぎると降雨事例が少なくなり、統計的な解析が難しくなる。そこで、本研究ではこれらを考慮して、1 時間降水量では 2 地点のうち少なくとも 1 地点以上で 10mm 以上の降雨がある場合とし、24 時間降水量では 30mm 以上の降雨がある場合とした。

2 地点の降水量の比は、ある地点で降雨があり、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。したがって、降水量の比を平均する際に無限大を含む可能性があり、その場合には単純な算術平均では値を算出できない。これを避けるために、降水量の比の平均値は、2 地点の降水量を R_a, R_b とした場合、直交座標 (R_a, R_b) から極座標 (r, θ) に変換した上で、極座標の偏角 $(\theta = \arctan(R_b/R_a))$ の平均値 $(\bar{\theta})$ を求めて、最後に直交座標に再変換することによって算出した。

3 降雨の空間代表性

(1) 1 時間降水量の空間代表性

図-4 は、2 地点の正時における 1 時間降水量の関係を散布図によって示したもので、2 地点間の距離が 0, 5, 10km に最も近い 2 地点の組合せを例示した。図-4 に示していない組合せを含めて、2 地点間の距離が大きいほど値のばらつきが大きくなり、1 時間降水量の差異が大きくなる傾向にある。

図-5 は、関東平野と甲信越の山間部について、2 地点の 1 時間降水量の比に関する 75, 87.5, 95 パーセンタイル値と 2 地点間の距離との関係を示したものである。ただし、1 時間降水量の比が 100 倍までの範囲を示してある。図-6 は、2 地点の 1 時間降水量の比と両地点間の距離との平均的な関係を示したもので、2 地点間の距離がある距離 ± 0.5 km の 1km の範囲に含まれる組合せについて、

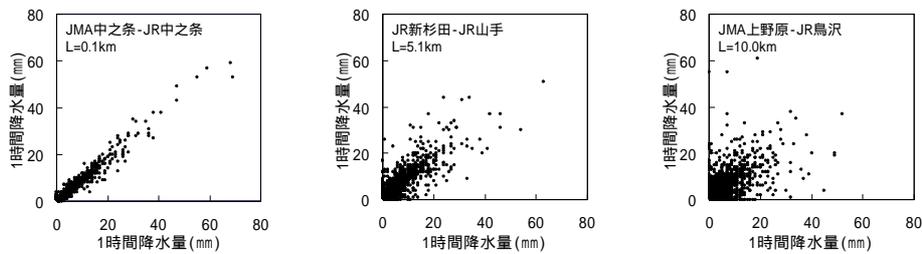


図-4 2地点の正時における1時間降水量の関係．図中の観測地点名は、左側が縦軸の地点、右側が横軸の地点で、JR 東日本の観測地点は地点名(駅名)の前に JR、気象庁は JMA を付けて記してある．なお、図中の L は 2 地点間の距離．

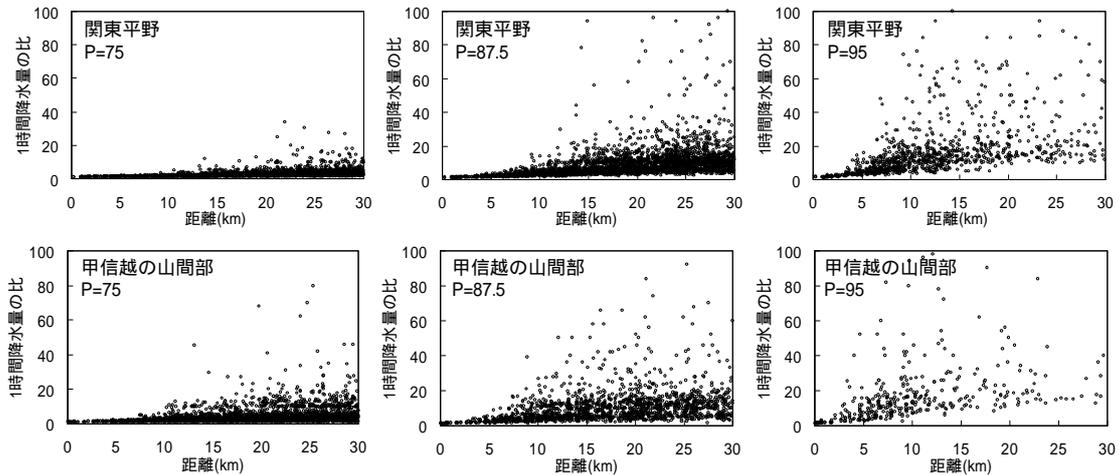


図-5 2地点の正時における1時間降水量の比に関する各パーセンタイル値と2地点間の距離の関係．なお、図中の P はパーセンタイル値．ただし、1時間降水量の比が100倍までの範囲を示してある．

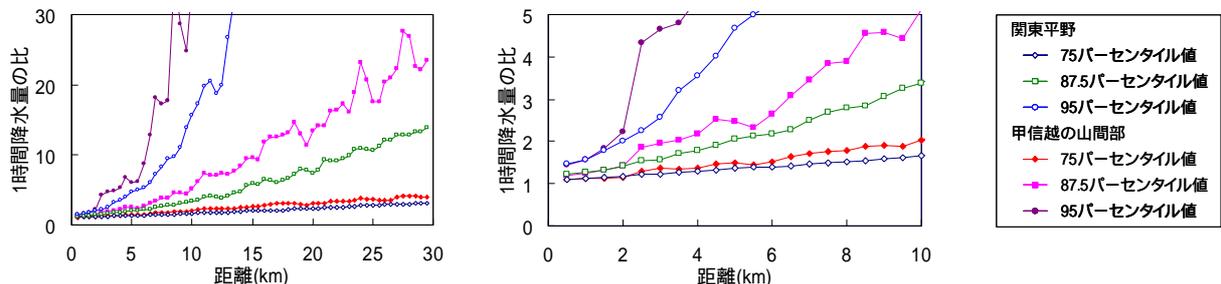


図-6 2地点間の距離がある距離 ± 0.5 kmの1kmの範囲に含まれる組合せについて、1時間降水量の比の平均値を0.5kmごとに示した図．なお、右図は2地点間の距離が10kmまでの拡大図．

1 時間降水量の比に関する各パーセンタイル値の平均値を 0.5km ごとに求めたものである．

図-6 によれば、2 地点の 1 時間降水量の比に関する 75 パーセンタイル値の平均値は 2 地点間の距離が 30km の範囲で距離の増大に伴って漸増し、87.5 パーセンタイル値の平均値は 10km 程度を超えると増加の割合が急増する．95 パーセンタイル値の平均値は、関東平野では 2 地点間の距離が 2.5km 程度、甲信越の山間部では 2km 程度を超えると急増する．また、2 地点の 1 時間降水量の比の 75 パーセンタイル値に関する平均値は、2 地点間の距離が 6km 程度を超えると 1.5 倍以上になる．一方、95 パーセンタイル値の平均値は、関東平野では 2.5km 程度、甲信越の山間部では 2km 程度を超えると 2.5 倍以上になる．また、95 パーセンタイル値の平均値は 1km の場合でも 1.5 倍程度であり、1 時間降水量は 1km と狭い範囲でも 2 地点の降水量の比が大きい局地性の高い降雨事例

がある．

図-5 によると、2 地点の 1 時間降水量の比に関する 75 及び 87.5 パーセンタイル値は、2 地点間の距離が 30km の範囲において多くの組合せで距離ごとに同程度の値を示す．しかし、95 パーセンタイル値では、距離ごとに同程度の値を示すのは関東平野で 15km 程度、甲信越の山間部で 10km 程度までである．また、75、87.5、95 パーセンタイル値は、関東平野では 2 地点間の距離がそれぞれ 20、10、2.5km 程度、甲信越の山間部ではそれぞれ 10、5、2km 程度を超えると他と比べてかなり大きな値を示す組合せが現れ始める．

以上のように、2 地点の 1 時間降水量の比に関する 75 パーセンタイル値は、2 地点間の距離が 5km 程度以下であると平均値が 1.5 倍以下であるとともに 2 地点の組合せによる値のばらつきが小さい．2 地点の組合せにおける 75 パーセンタイル値を一般的な降雨とすると、一般的

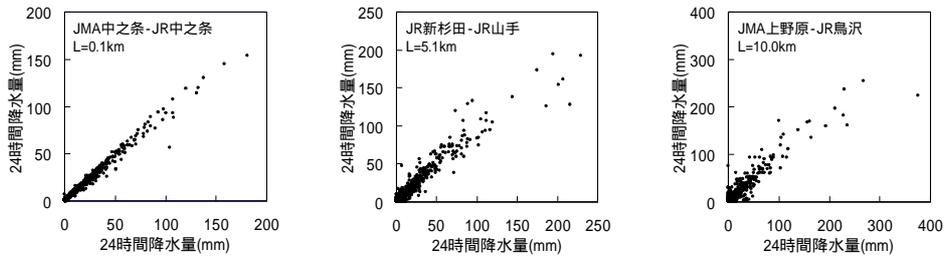


図-7 2地点の24時における24時間降水量の関係．図中の観測地点名は、左側が縦軸の地点、右側が横軸の地点で、JR 東日本の観測地点は地点名(駅名)の前にJR、気象庁はJMAを付けて記してある．なお、図中のLは2地点間の距離．

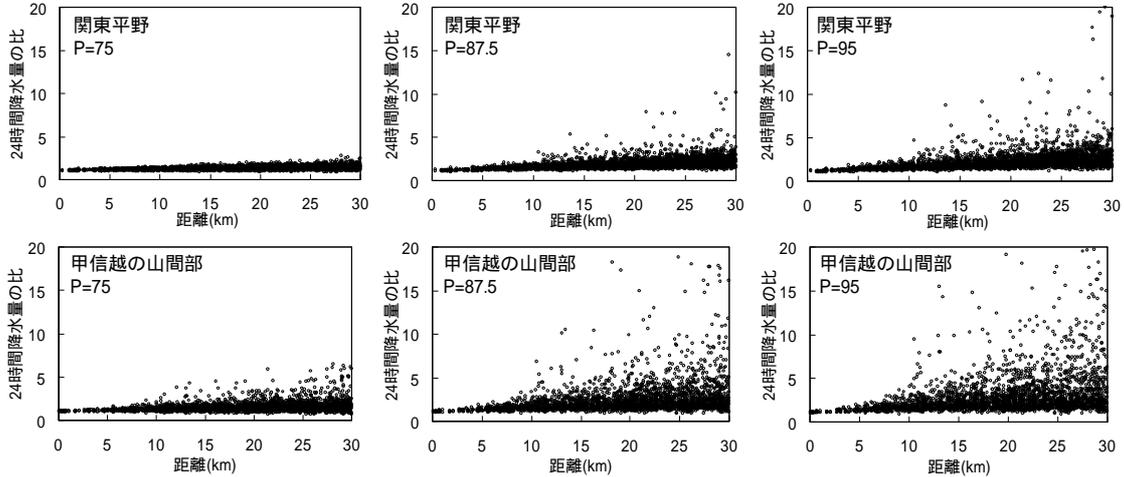


図-8 2地点の24時における24時間降水量の比に関する各パーセンタイル値と2地点間の距離との関係．なお、図中のPはパーセンタイル値．ただし、24時間降水量の比が20倍までの範囲を示してある．

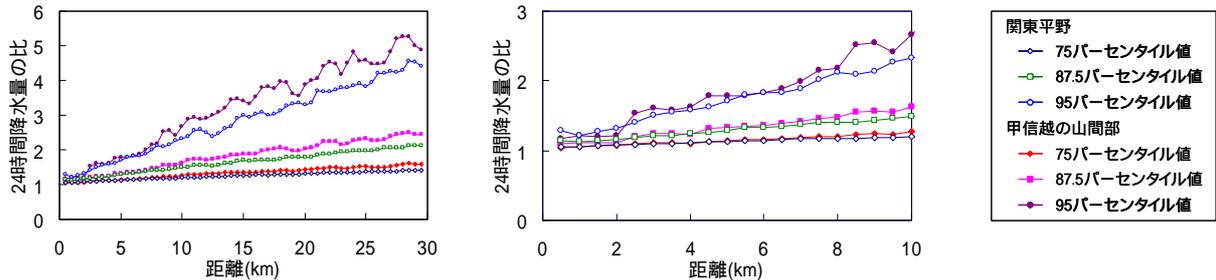


図-9 2地点間の距離がある距離 ± 0.5 kmの1kmの範囲に含まれる組合せについて、24時間降水量の比の平均値を0.5kmごとに示した図．なお、右図は2地点間の距離が10kmまでの拡大図．

な降雨の1時間降水量の空間代表性が高い範囲は5km程度と考えられる．一方、2地点の1時間降水量の比に関する95パーセンタイル値は、2地点間の距離が1kmの場合でも平均値が1.5倍程度である．また、関東平野では2地点間の距離が2.5km程度まで、甲信越の山間部では2km程度までは漸増かつ2地点の組合せによる値のばらつきが小さいが、2地点間の距離がこれらを超えると増加の割合とばらつきが急増する．2地点の組合せにおける95パーセンタイル値を局地性の高い降雨とすると、その場合に1時間降水量の空間代表性が高い範囲は、関東平野が2.5km程度、甲信越の山間部が2km程度と考えられる．

また、2地点の1時間降水量の比に関する75、87.5、95パーセンタイル値の平均値は、2地点間の距離が2km程度以下では関東平野と甲信越の山間部で同程度であるが、2km程度以上では関東平野に比べて甲信越の山間部が大

きな値を示すようになる．したがって、2地点間の距離が2km程度を超えると、1時間降水量に地形の起伏等による影響が現れるようになって考えられる．

(2) 24時間降水量の空間代表性

図-7は、図-4と同じ2地点について24時における24時間降水量(日降水量)の関係を例示したものである．図-7に示していない組合せを含めて、2地点間の距離が大きいほど値のばらつきが大きくなり、24時間降水量の差異が大きくなる傾向にあるが、その傾向は1時間降水量と比べると小さい．

図-8は、図-5と同様に2地点の24時間降水量の比に関する75、87.5、95パーセンタイル値と2地点間の距離との関係を示したものである．ただし、24時間降水量の比が20倍までの範囲を示してある．また、図-9は、図-6と同様に1kmの範囲に含まれる組合せについて、24時

間降水量の比に関する各パーセント値の平均値を0.5kmごとに求めたものである。

図-9によれば、2地点の24時間降水量の比に関する75, 87.5, 95パーセント値の平均値は、2地点間の距離が30kmの範囲で距離の増大に伴って漸増する。また、2地点の24時間降水量の比に関する75パーセント値の平均値は、2地点間の距離が10km程度のとき1.2倍であり、95パーセント値の平均値も5km程度において1.8倍と1時間降水量に比べると小さい。また、95パーセント値の平均値は2地点間の距離が1kmの場合に1.2倍から1.3倍程度である。

図-8によると、2地点の24時間降水量の比に関する75, 87.5, 95パーセント値は、2地点間の距離が30kmの範囲で距離ごとに同程度の値を示す。2地点の24時間降水量の比に関する75パーセント値は、関東平野では他と比べて大きな値を示す組合せはみられないが、甲信越の山間部では2地点間の距離が10km程度を超えると他と比べて大きな値を示す組合せが現れ始める。また、87.5及び95パーセント値は、関東平野と甲信越の山間部ともに10km程度を超えると他と比べてかなり大きな値を示す組合せが現れ始める。

以上のように2地点の24時間降水量の比に関する75パーセント値は、2地点間の距離が10km程度のとき平均値が1.2倍と小さいとともに2地点の組合せによる値のばらつきも小さい。このことから、一般的な降雨について24時間降水量の空間代表性が高い範囲は10km程度と考えられる。また、2地点の24時間降水量の比に関する95パーセント値は、2地点間の距離が5km程度以下であると平均値が1.8倍以下であり2地点の組合せによる値のばらつきも小さい。したがって、局地性が高い降雨の場合に、24時間降水量の空間代表性が高い範囲は5km程度と考えられる。

2地点の24時間降水量の比に関する75, 87.5, 95パーセント値の平均値は、2km程度以上になると関東平野に比べて甲信越の山間部で大きな値を示すようになる。また、8km程度以上になるとそれがより顕著になる。したがって、2地点間の距離が2km程度を超えると、24時間降水量に地形の起伏等による影響が現れ始め、8km程度を超えるとそれが顕著になると考えられる。

4 まとめ

本研究では、JR 東日本と気象庁の1時間降水量及び24時間降水量を用いて、関東平野と甲信越の山間部を対象に2地点の降水量の比を解析することによって、メソスケールを含めた降雨の空間代表性を分析した。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時間降水量の比に関する95パーセント値は、2地点間の距離が1kmの場合でも1.5倍程度である。したがって、1時間降水量は1kmと狭い範囲でも2地点の降水量の比が大きい局地性が高い降雨事例が存

在する。また、24時間降水量の比に関する95パーセント値は、2地点間の距離が1kmの場合には1.2倍から1.3倍程度である。

(2) 2地点の組合せにおいて50%の降雨事例が含まれる2地点の降水量の比に関する75パーセント値を一般的な降雨とすると、その場合の1時間降水量及び24時間降水量の空間代表性が高い範囲はそれぞれ5km程度及び10km程度と考えられる。

(3) 2地点の降水量の比に関する95パーセント値を局地性の高い降雨とすると、1時間降水量の空間代表性が高い範囲は関東平野が2.5km程度、甲信越の山間部が2km程度と考えられる。また、24時間降水量の空間代表性が高い範囲は5km程度と考えられる。

(4) 2地点の降水量の比の75, 87.5, 95パーセント値の平均値は、2地点間の距離が2km程度以上では関東平野に比べて甲信越の山間部で大きな値を示すようになる。このことから、2地点間の距離が2km程度を超えると、降水量には地形の起伏等による影響が現れるようになると考えられる。

今後は、2地点の降水量の比を距離の関数として地域ごとにモデル化し、そのモデルを用いた雨量計の配置間隔と強い雨や大雨の捕捉率との関係性を評価すること、及び降雨をもたらした気象擾乱別の解析などを通して、より適切な雨量計の配置方法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 島村 誠：降雨・河川増水に対する運転規制方法等の改正，日本鉄道施設協会誌，pp.437-440，1989。
- 2) 道路ハンドブック編集委員会編：道路ハンドブック，建設産業調査会，1992。
- 3) 宝 馨，今本博健，林 泰一，中北英一，市川 温，橋野典平，中村幸雄：1998年那珂川流域における豪雨・洪水災害について，京都大学防災研究所年報，No.42，B-2，pp.235-253，1999。
- 4) 井良沢道也，田口陸男：降雨特性を考慮したテレメータ配置計画の検討，砂防学会誌，Vol.49，pp.22-27，1996。
- 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，Vol.46，pp.127-132，2002。
- 6) 谷岡 康，福岡捷二，伊藤繁之，小山幸也，傳 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/ -41，pp.29-45，1997。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 国土地理院。測量計算，<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html>，2007年9月30日。

(2007.9.30 受付)