

# 複数の機関の雨量計観測値を用いた 大雨の空間スケールに関する解析

鈴木 博人\*・高橋 日出男\*\*・中北 英一\*\*\*

## Study on Spatial Scale of Heavy Rainfall Based on Raingauge Precipitation Data from Multiple Organizations

Hiroto SUZUKI\*, Hideo TAKAHASHI\*\* and Eiichi NAKAKITA\*\*\*

### Abstract

Detection of the spatial scale of heavy rainfall (SSHR) is important for the prevention of disasters. This study analyzed the SSHR based on precipitation data observed by 759 raingauges set up by four organizations in the Kanto Plain and the mountain area of Kanto and Koshin-etsu. The SSHR is evaluated by the relationship of the simultaneous occurrence rate of heavy rainfall and the distance between two points. The results can be summarized as follows: (1) When the time scale of the rainfall index is long, the SSHR becomes large. (2) The SSHR is larger in the plain area than in the mountain area. (3) The SSHR is larger in the case of a typhoon rather than a thunderstorm. The SSHR caused by a stationary front or an extratropical cyclone is between the SSHR caused by a typhoon and by a thunderstorm. (4) When the threshold of precipitation increases, spatial scale of the heavy rainfall becomes small. (5) The relation function of the simultaneous occurrence rate and the distance was proposed.

キーワード：大雨，空間スケール，同時生起率，メソγスケール

Key words : heavy rainfall, spatial scale, simultaneous occurrence probability, meso- $\gamma$ -scale

### 1 はじめに

大雨の空間的な広がり，つまり大雨が同時に発生する範囲を明らかにすることは，さまざまな防災対策を行う上で重要である。大雨の空間スケ-

ールを統計的に把握することで，大雨が同時に発生する恐れのある範囲を明らかにすることができれば，その利用価値は高いと考えられる。本研究では，2地点で同時に大雨になる割合と2地点間の

\* 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  
Disaster Prevention Research Laboratory, Research and Development Center, East Japan Railway Company

\*\* 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科  
Graduate School of Urban Environmental Sciences,  
Tokyo Metropolitan University

\*\*\* 京都大学防災研究所  
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

距離との関係の統計的な解析から大雨の空間スケールを評価し、2地点で同時に大雨になる割合が高い範囲が広いほど大雨の空間スケールが大きいと考えることにする。

鉄道では、降雨に起因した土砂災害などから列車運行の安全を確保するために、災害を発生させる恐れのある大雨を雨量計で検知した場合に、運転中止や速度規制といった列車運転規制を行っている<sup>1)</sup>。2地点で同時に大雨になる割合と2地点間の距離との関係が把握できれば、鉄道では線路沿線の任意の地点で列車運転規制値以上の大雨が生じた時に、そこから離れた雨量計でその降雨量以上の大雨が観測されている割合を知ることができる。これを利用すると、雨量計のより適切な設置間隔や、さらにはレーダー雨量の利用について検討することができる。このような検討結果に基づいて、鉄道にとってより適切な降雨量の観測網を構築することで、降雨時の列車運行の安全性を向上させることができると考えている。また、大雨の空間スケールを把握することは、水資源の観点からは流域の降雨量のより正確な把握、気象学・気候学においては大雨の特性や機構の解明などに重要と考えられる。

列車運転規制に用いられる雨量計は、多くの在来線の鉄道において、積乱雲の水平方向の広がりが10km程度という定性的な理由から、10km間隔を標準<sup>2, 3)</sup>にして設置されている。東日本旅客鉄道株式会社（以下、JR東日本とする）の在来線では、雨量計の設置間隔の平均が9.1km、雨量計から雨量計の受持ち区間の端部までの距離の平均が5.1kmである<sup>4)</sup>。

鉄道では、降雨時の列車運転規制（ソフト対策）を、防災設備による耐降雨性能の向上（ハード対策）と併せて行うことで、降雨に起因した列車脱線事故を大幅に減少させてきた<sup>5)</sup>。降雨時の列車運転規制方法は、大雨時の列車運行の安全性を向上するために、長年に亘って改良が加えられてきた。しかし、その改良の多くは雨量指標についてであり、雨量計の設置間隔や降雨量の観測方法については十分に検討されてきたとはいえない。これは、雨量計の設置間隔が約10kmであることか

ら、10km以下の空間スケール、つまり個々の積乱雲に対応するメソスケールより小さいスケールの大雨の空間分布特性を定量的に評価するのが困難であったためである。

日本では、気象庁を始めとして、国土交通省（以下、国交省とする）、地方自治体、鉄道事業者などのさまざまな機関において雨量計による降雨量の観測が行われている。近年、これらのデータが蓄積されてきたことから、これらの降雨量データを組合せると、デジタル化された長期間かつ稠密な降雨量の観測データを得ることができる。これらの降雨量データを用いることで、10km以下の空間スケールも含めた大雨の空間分布特性について統計的な解析が可能になった。

大雨の空間分布特性に関する研究は、河川の流域災害の防止の観点からの研究が多く、そのため比較的広い範囲を対象とした場合が多い。これは、面積雨量を求めるために必要な地点を合理的に選定することを目的としているためである。一方、鉄道における降雨災害は、主に沿線で発生する土砂災害である。そのため、面積雨量よりも地点雨量が重要である。鉄道の雨量計の設置間隔に相当する10km以下の空間スケールを対象に雨量計の観測値に基づいて降雨の空間分布特性を調べた事例として、仙台管区気象台調査課<sup>6)</sup>は、仙台における観測から、ほぼ同一地点とみなされる一辺15mの正三角形内でひと雨の降雨量に±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た。また、Ciach and Krajewski<sup>7)</sup>は、米国オクラホマシティにおいて3km四方の25地点に雨量計を配置した観測から、2地点の降雨量の相関係数と2地点間の距離の関係について解析した。谷岡ら<sup>8)</sup>は、台風や雷雨に伴う大雨の時空間特性について事例解析を行った。ただし、これらの研究は、短期間の観測データに基づく解析や事例解析である。

葛葉ら<sup>9)</sup>は、2地点で同時に大雨になる割合である降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係について、気象庁の降雨量データを用いて2地点間の距離が概ね10km以上の場合について解析した。鈴木ら<sup>10), 11), 12)</sup>は、複数の機関の雨量計で観

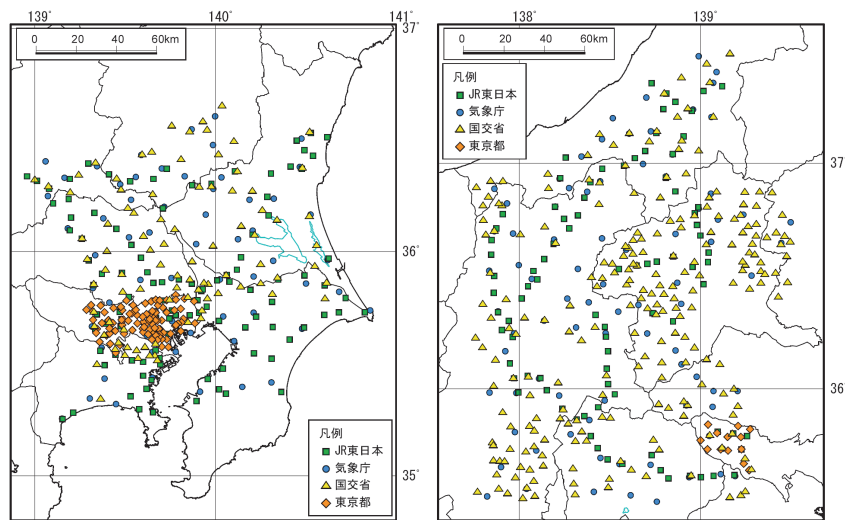


図1 解析に用いた関東平野（左）と関東甲信越の山間部（右）における雨量計の位置。

測された降雨量データを用いて、両者の関係について、2地点間の距離が10km以下の場合も含めて解析を行ってきた。鈴木・高橋<sup>10)</sup>では、関東平野における1時間雨量と24時間雨量を対象に、JR東日本と気象庁の降雨量データを用いて、基準値別、気象じょう乱別に解析を行った。また、鈴木ら<sup>11)</sup>は、JR東日本、気象庁、国交省、および東京都の降雨量データを用いて、関東平野の1時間雨量について、降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係式を提案した。さらに、鈴木ら<sup>12)</sup>は、関東平野と関東甲信越の山間部の1時間雨量と24時間雨量に拡大して、それらの関係式を提案した。

本研究の目的は、降雨時の列車運転規制にとって、より適切な雨量計の配置間隔や降雨量の観測方法の検討に資することにある。そのためには、JR東日本の列車運転規制に用いられている半減期1.5, 6, 24時間の実効雨量<sup>13)</sup>について、標準的な雨量計の設置間隔が10kmであることから、10km以下の空間スケールを含めた大雨の空間スケールを把握する必要がある。これを踏まえて、本研究では、対象地域と解析に用いた雨量計を所有する機関は鈴木ら<sup>12)</sup>と同様とし、解析の対象期間を1991年から2013年に、対象にする雨量指標を1, 6, 24, 72時間雨量と半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量に拡大した。これらの雨量指標につい

て、雨量指標の時間スケール別、地域別、気象じょう乱別、および基準値別に降雨の同時生起率と2地点の距離との平均的な関係を求めた。その上で、鈴木ら<sup>11), 12)</sup>に比べて、より推定精度の高いこれらの間の関係式を提案する。さらに、降雨の同時生起率について、地域、気象じょう乱、および基準値による差異の有無について検定を行った。

## 2 資料

### 2.1 対象地域と雨量計

解析の対象にする地域は、日本最大の平野である関東平野と平野部を除く関東甲信越地方の地域（以下、関東甲信越の山間部とする）とした。解析に用いる雨量計は、関東平野では標高150m以下の地域に位置する雨量計（図1）とし、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、関東甲信越の山間部では、標高150m以下の平野部と1,500m以上の山間部を除く地域に位置する雨量計（図1）とした。関東甲信越の山間部には盆地などの比較的平坦な場所が含まれるが、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っている。

表 1 機関別の雨量計の地点数。

	JR 東日本	気象庁	国交省	東京都	合計
関東平野	106	62	90	93	351
関東甲信越 の山間部	87	84	224	13	408

## 2.2 降雨量データ

降雨量データは、JR東日本の防災情報システム<sup>14)</sup>、気象庁の地域気象観測システム（アメダス）、国交省の水文水質データベース<sup>15)</sup>、東京都の東京都水防災総合情報システム<sup>16)</sup>の雨量計で観測された正時における1時間雨量を用いた。解析に用いた地点は、関東平野が351地点、関東甲信越の山間部が408地点で、機関別の地点数は表1、機関別の雨量計の分布は図1のとおりである。なお、各機関の雨量計は転倒ます型雨量計で、転倒ますはJR東日本、気象庁、および東京都が0.5mm、国交省が0.5mmまたは1.0mmである。

解析の対象期間は、これらの降雨量データがそろそろ1991年から2013年の23年間の暖候期（5月から10月）とし、この期間で延べ10年以上の降雨量データの蓄積のある地点を対象にした。なお、JR東日本、国交省、および東京都の降雨量データについては、鈴木・高橋<sup>10)</sup>と同様に近隣3地点の気象庁の雨量計で観測された降雨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。

## 2.3 雨量指標

鉄道では、在来線における降雨時の列車運転規制に、JR東日本が半減期1, 6, 24時間の実効雨量<sup>13)</sup>を採用し、他の鉄道事業者では1時間雨量と連続雨量の組合せ、または1時間雨量と24時間雨量の組合せを採用している場合がほとんどである<sup>1)</sup>。新幹線では、全ての線区において1時間雨量と24時間雨量の組合せが採用されている<sup>1)</sup>。道路では、一般道が連続雨量、高速道路が1時間雨量と連続雨量の組合せを採用している<sup>1)</sup>。また、土砂災害警戒情報の発表の判断には、半減期1.5時間と72時間の実効雨量の組合せや、1時間雨量と土壌雨量指数の組合せが用いられている<sup>1)</sup>。

解析の対象とする雨量指標は、鉄道で採用されていることに加えて、他の機関で用いられていることや、大雨の空間スケールと雨量指標の時間スケールの関係を把握することを考慮して、1, 6, 24, 72時間雨量と半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量とした。

1, 6, 24, 72時間雨量は、それぞれ過去1, 6, 24, 72時間の積算雨量である。実効雨量は、時刻 $T$ における実効雨量値を $D(T)$ 、1時間前の実効雨量値を $D(T-1)$ 、1時間雨量を $R(T)$ 、半減期を $M$ 、減少係数を $\alpha$ とすると、

$$D(T) = D(T-1)\exp(\alpha) + R(T)\exp\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1a)$$

$$M = \frac{\ln 0.5}{\alpha} \quad (1b)$$

で推定した<sup>17)</sup>。

また、1, 6, 24, 72時間雨量は、それぞれの積算期間の1時間雨量に欠測がある場合に欠測とした。実効雨量については、寺田・中谷<sup>18)</sup>において、減少係数の累乗が約0.04未満になると実効雨量値へ影響が少ないことが多いとしている。これから、本研究では実効雨量は1時間雨量に欠測がある場合と、それ以降にこのようになる時間までを欠測とした。この時間は、半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量で、それぞれ12, 48, 192, 576時間である。

## 2.4 2地点間の距離

2地点間の距離は、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、10km以下の空間スケールを含めた大雨の空間スケールを知ることにある。そのため、2地点間の距離が10km以下に特に着目することとし、2地点間の距離が大きく離れた場合は対象としない。そこで、このスケールより大きい2地点間の距離が30kmの範囲を解析対象にした。2地点の組合せは、関東平野では10km以下が2,383組、30km以下が14,057組、関東甲信越の山間部では同様に1,050組と7,570組である。図2は距離0.5kmごとの雨量計の組合せ数を示したもので、2地点間の距離が30km以下の範囲では、2地

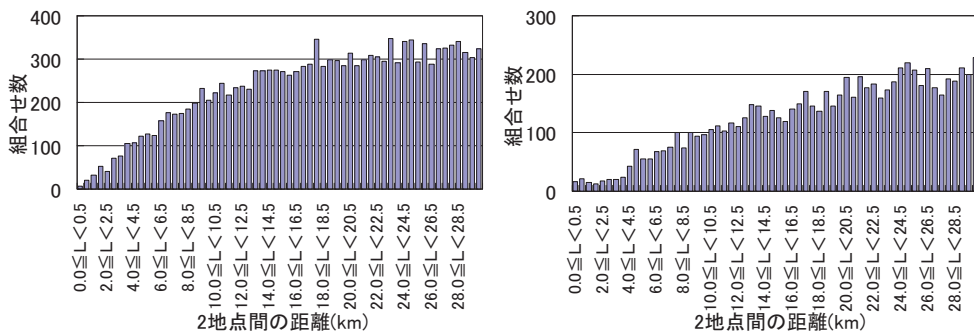


図2 2地点間の距離0.5kmごとの雨量計の組合せ数の頻度分布。

点間の距離が大きいほど2地点の組合せ数が多くなる。

### 2.5 大雨の基準

1時間雨量の大雨の基準は、気象庁において激しい雨の下限値としている30mmとした。他の雨量指標については、1時間雨量30mmと再現期間が同程度になる雨量値を目安にして、大雨の基準を設定した。

他の雨量指標の大雨の基準は、気象庁の地点において1991年から2013年の欠測率が0.1%以下であった関東平野における23地点および関東甲信越の山間部における30地点の降雨量データを用いて設定した。初めに、地点ごとに、一般化極値分布を用いて1時間雨量30mmの再現期間を求めた。次に、地点ごとに、他の雨量指標について、その再現期間になる雨量値を求めた。最後に、関東平野と関東甲信越の山間部について、雨量指標ごとにその雨量値の平均値を求めた。表2には、再現期間が1時間雨量30mmと同等になる雨量値の平均値を示した。これから、大雨の基準は表2に示すように、1, 6, 24, 72時間雨量が30, 70, 115, 140mm, 半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量が35, 60, 100, 130mmとした。

なお、1時間雨量30mmの再現期間の平均値は、関東平野が1.68年、関東甲信越の山間部が3.31年であった。また、一般化極値分布は、田中・宝<sup>19)</sup>が確率分布に採用した指数分布, Gumbel分布, 平方根指数型最大値分布, 一般化極値分布, 対数Pearson III型分布(実数空間法, 対数空間法), 対

表2 1時間雨量30mmと再現確率が同等になる雨量値と大雨の基準。

雨量指標		関東平野	関東甲信越の山間部	基準値
積算雨量	1時間雨量	30.0	30.0	30
	6時間雨量	70.6	70.4	70
	24時間雨量	114.1	118.1	115
	72時間雨量	137.7	147.3	140
実効雨量	半減期1.5時間	33.2	32.8	35
	半減期6時間	62.3	62.2	60
	半減期24時間	97.0	99.6	100
	半減期72時間	127.2	134.4	130

数正規分布(2母数, 3母数)の中で、標準最小二乗規準(Standard Least-Squares Criterion (SLSC), 高棹ら<sup>20)</sup>)が0.04以下になる地点数が最も多いことから採用することにした。

## 3 大雨の空間スケール

### 3.1 降雨の同時生起率

図3は、関東平野における1時間雨量と24時間雨量について、2地点の同時刻(正時)における関係を散布図によって示したもので、2地点間の距離が0.1, 1.0, 5.0, 10.0kmの組合せを例示した。図3に示していない2地点の組合せや雨量指標を含めて、2地点間の距離が大きいほど点の分布が1対1の直線から外れるようになり、降雨量の差異が大きくなる。2地点間の距離が拡大した場合の降雨量の差異の増大は、時間スケールが大きい雨量指標ほど小さい傾向にある。なお、雨量

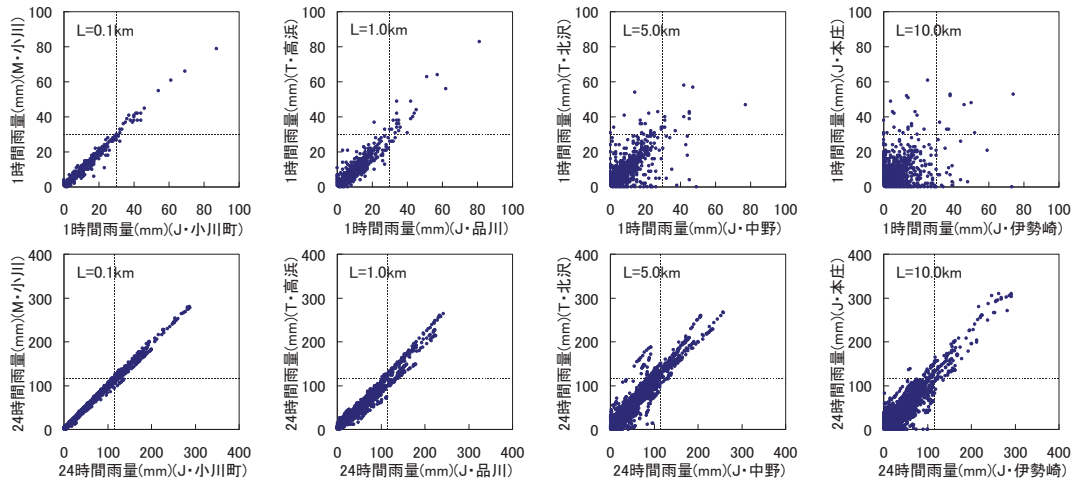


図3 1時間雨量(上段)と24時間雨量(下段)の2地点の降雨量の関係。左端から2地点間の距離が0.1, 1.0, 5.0, 10.0kmの場合。また、点線はそれぞれの雨量指標の大雨の基準を表している。地点名の前のJはJR東日本, Mは国交省, Tは東京都の雨量計を示す。

指標の時間スケールが大きくなるにつれて、2地点間の距離が大きい場合ほど右上りの点の連なりが明瞭に認められるようになる。この点の連なりは、ひと雨期間中における2地点の降雨量の時間推移を表しており、降雨事例ごとに雨の降り方が異なることが分かる。

本研究では、大雨の空間スケールは、前述のように2地点で同時に大雨になる範囲を用いて評価する。2地点で同時に大雨になる範囲は、基準にする地点の降雨量がある基準値以上の場合に、もう一方の地点の降雨量が同時にその基準値以上になった割合である降雨の同時生起率<sup>9)</sup>を用いて解析した。降雨の同時生起率 $P_{i,j}(X)$ は、地点*i*と地点*j*の降雨量を $R_i$ と $R_j$ 、降雨量の基準値を $X$ とし、 $N$ を括弧内の条件を満たす事例の回数としたときに次式(2)で表現される。

$$P_{i,j} = \frac{N(R_i \geq X \cap R_j \geq X)}{N(R_i \geq X)} \quad (2)$$

なお、降雨の同時生起率は、2地点の組合せごとに、地点*i*と地点*j*を入れ換えた2つの異なる値が得られる。

図4および図5には、関東平野および関東甲信越の山間部における1, 6, 24, 72時間雨量と半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、降雨量の基

準値を大雨の基準(表2)にした場合に、2地点の組合せごとに降雨の同時生起率を求めた結果と、2地点間の距離との関係を点で示した。降雨の同時生起率は、式(2)の分母である地点*i*において基準値 $X$ を超過した回数( $N(R_i \geq X)$ )が少ないと、特定の大雨事例の影響を反映してしまう可能性があるとともに、統計値としての信頼性が低くなる。そこで、2地点の組合せごとの降雨の同時生起率は、地点*i*において基準値 $X$ を超過した大雨事例が3回以上かつ式(2)の分母の回数( $N(R_i \geq X)$ )が10回以上の場合にのみ計算することとし、その結果を図4および図5に示した。

図6は、関東平野における1時間雨量と24時間雨量について、降雨量の基準値を大雨の基準(表2)にした場合に、2地点間の距離が $0.5 < L \leq 1.0$ km,  $4.5 < L \leq 5.0$ km,  $9.5 < L \leq 10.0$ km,  $19.5 < L \leq 20.0$ kmの場合における降雨の同時生起率の頻度分布を示したものである。図6では、それぞれの距離区間における降雨の同時生起率の頻度の合計が異なることから、それぞれの距離区間における全頻度で規格化して示した。

次に、降雨の同時生起率と2地点間の距離との平均的な関係を見ることにする。降雨の同時生起率の代表値は、2地点間の距離を0.5kmごとに区分した場合に、各0.5kmの範囲に含まれる全ての2

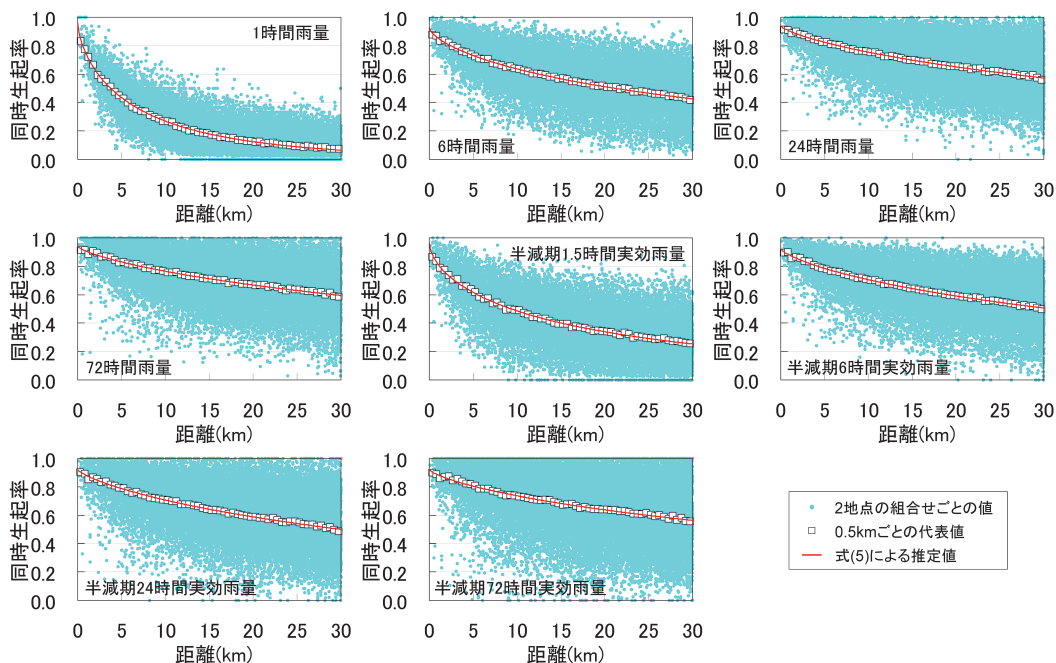


図4 関東平野における1, 6, 24, 72時間雨量および半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量の同時生起率と2地点間の距離との関係。点は2地点の組合せごとの値、□は0.5kmごとの代表値の値、実線は式(5)より推定した値。

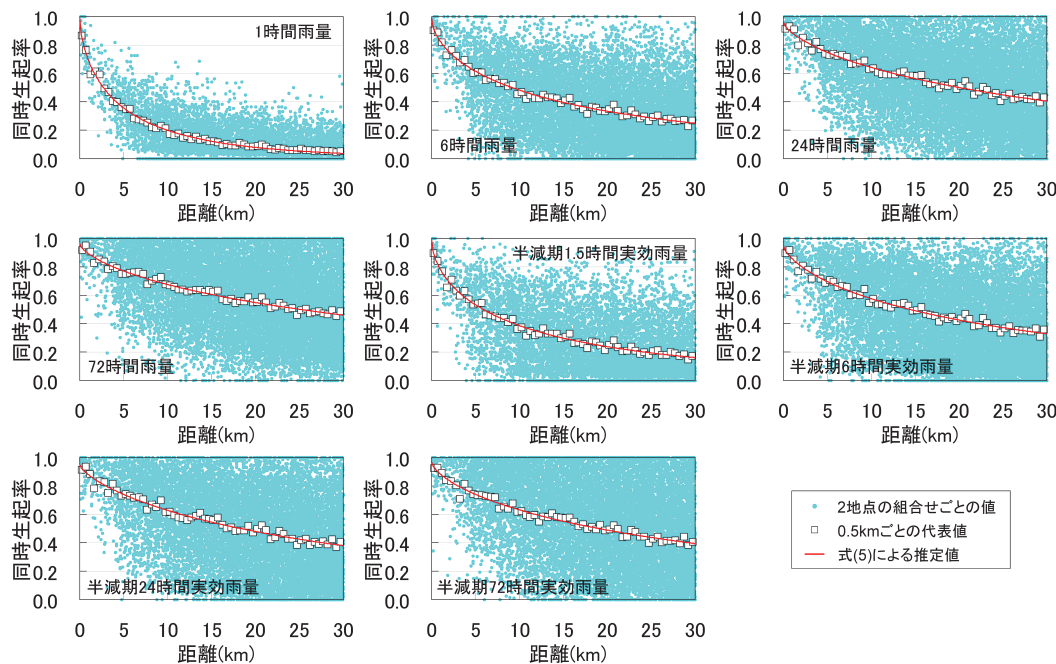


図5 図4と同様。ただし、関東甲信越の山間部の場合。

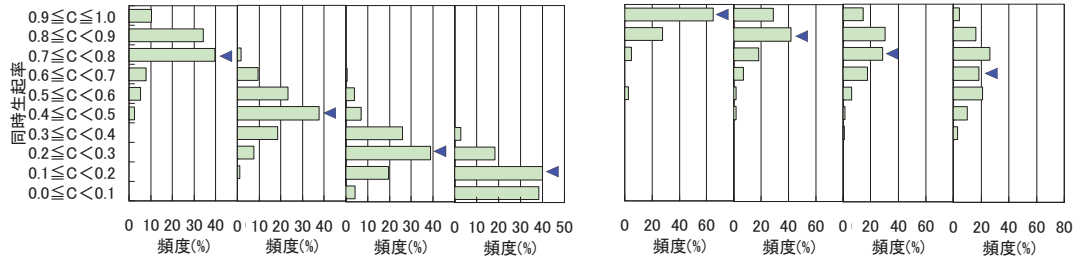


図6 関東平野における1時間雨量(左)と24時間雨量(右)について、2地点間の距離が $0.5 < L \leq 1.0\text{km}$ ,  $1.5 < L \leq 5.0\text{km}$ ,  $5.5 < L \leq 10.0\text{km}$ ,  $10.5 < L \leq 20.0\text{km}$ の場合における降雨の同時生起率の頻度分布。 $\blacktriangle$ は降雨の同時生起率の代表値が属する階級。

地点の組合せの降雨量データから算出した。2地点間の距離の代表値は、同様に各0.5kmの範囲に含まれる2地点の組合せの距離の算術平均値とした。図4および図5には、各0.5kmの範囲における降雨の同時生起率の代表値と2地点間の距離の代表値の関係を□で示した。図6には降雨の同時生起率の代表値が属する階級を▲で示した。

図4および図5に示した降雨の同時生起率の代表値と2地点間の距離の代表値との関係から、降雨の同時生起率は2地点間の距離の拡大とともに単調に減少し、その減少量は2地点間の距離の拡大とともに小さくなる。これから、2地点間の距離の拡大とともに、2地点で同時に大雨になる割合が小さくなる。図6も参照すると、2地点の組合せごとの降雨の同時生起率が分布する範囲は、下限値が0に制限される影響を受ける場合を除いて、2地点間の距離の拡大とともに広がる。この範囲は、関東平野が関東甲信越の山間部に比べて、時間スケールの大きな雨量指標ほど、2地点間の距離が同じ場合に広がる。これは、2地点間の距離が同じでも、2地点で同時に大雨になる割合が高い2地点の組合せと低い組合せがあることを意味している。

鉄道において、降雨の同時生起率と2地点間の距離との平均的な関係を把握できれば、より適切な雨量計の設置間隔の標準や、レーダー雨量の活用必要性についての検討に資することができると考えられる。また、2地点間の距離が同じ場合に降雨の同時生起率がばらつくことは、受持ち区間の大雨の捕捉性能が低い雨量計があることを意味する。この知見は、個々の雨量計の大雨の捕捉

性能の評価に活用できると考えられる。

### 3.2 降雨の同時生起率のモデル化

降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係式のモデル化を行った。降雨の同時生起率の代表値は、図4および図5のように、2地点間の距離の拡大とともに単調に減少し、その減少量は2地点間の拡大とともに小さくなる。また、降雨の同時生起率は、理論的には2地点間の距離が0kmのとき1となり、無限大の時に0に漸近する。しかし、図4および図5の降雨の同時生起率の代表値を2地点間の距離が0km側に外挿すると、2地点間の距離が0kmのとき、降雨の同時生起率が1より小さい値をとるようにみえる。また、仙台管区気象台調査課<sup>6)</sup>は、ほぼ同一地点とみなされる一辺15mの正三角形内の雨量計で観測されるひと雨の降雨量に±6%の差異があるとしている。さらに、鈴木ら<sup>11)</sup>によると、5m間隔で設置した雨量計で観測された1時間雨量の同時生起率を求めると0.94と0.97である。このように、2地点間の距離が僅かに離れただけで、降雨の同時生起率は1よりも小さい値をとる。これらから、2地点間の距離が0kmの場合に、観測誤差などに起因して、1よりも小さい値になると考えられる。

本研究では、このような降雨の同時生起率 $C_{ij}$ ( $X$ )と2地点間の距離 $X$ との関係式の候補に、鈴木ら<sup>11)</sup>が対象にした $a, b$ をパラメータとする分数型の式(3)と指数型の式(4)に、式(4)にパラメータ $c$ を追加した式(5)(以下、改良指数型とする)を加えた上で、最も適合度の高い関係式を選択することにした。



表3 式 (3), (4), (5) から推定される降雨の同時生起率とその代表値との標準偏差。標準偏差は、表中の値 × 10<sup>-2</sup>。

雨量指標		関東平野			関東甲信越の山間部		
		分数型	指数型	改良指数型	分数型	指数型	改良指数型
積算雨量	1 時間雨量	2.28	2.82	0.70	2.79	3.50	1.62
	6 時間雨量	0.88	1.81	0.61	2.18	3.78	2.06
	24 時間雨量	0.68	1.11	0.56	2.29	2.83	2.23
	72 時間雨量	0.87	1.22	0.72	2.21	2.67	2.08
実効雨量	半減期 1.5 時間	0.79	2.87	0.84	2.29	4.15	2.24
	半減期 6 時間	0.72	1.26	0.59	2.37	3.07	2.32
	半減期 24 時間	0.72	1.21	0.65	2.57	3.00	2.53
	半減期 72 時間	0.94	1.32	0.79	2.49	3.04	2.39

表4 最小二乗法により推定された式 (5) のパラメータ a, b, c。

雨量指標		大雨の基準	関東平野			関東甲信越の山間部		
			a	b	c	a	b	c
積算雨量	1 時間雨量	30	0.041	0.142	0.683	0.010	0.206	0.651
	6 時間雨量	70	0.073	0.023	0.661	0.009	0.057	0.593
	24 時間雨量	115	0.061	0.013	0.742	0.041	0.027	0.694
	72 時間雨量	140	0.058	0.011	0.722	0.038	0.021	0.669
実効雨量	半減期 1.5 時間	35	0.035	0.054	0.609	0.009	0.090	0.598
	半減期 6 時間	60	0.077	0.017	0.736	0.051	0.036	0.686
	半減期 24 時間	100	0.079	0.017	0.760	0.050	0.030	0.725
	半減期 72 時間	130	0.076	0.012	0.710	0.032	0.028	0.675

$$C_{ij}(X) = \frac{1-a}{1+bX} \tag{3}$$

$$C_{ij}(X) = (1-a)\exp(-bX) \tag{4}$$

$$C_{ij}(X) = (1-a)\exp(-bX^c) \tag{5}$$

なお、式 (3), (4), (5) の a は、降雨の同時生起率が、2 地点間の距離が 0km の場合における 1 からの誤差を表すパラメータである。

式 (3), (4), (5) のパラメータ a, b, c は、2 地点間の距離が 30km 以下における降雨の同時生起率の代表値から最小二乗法を用いて推定した。表 3 には、式 (3), (4), (5) から推定された降雨の同時生起率とその代表値との標準偏差を示した。表 3 によると、式 (5) の改良指数型の標準偏差が最も小さく、降雨の同時生起率の代表値との適合度が最も高い。これから、降雨の同時生起率と 2 地点間の距離との関係は式 (5) の改良指数型の

関係式を用いて推定することにした。

図 4 および図 5 には、対象にした全ての雨量指標について、降雨の同時生起率と 2 地点間の距離との関係を式 (5) で推定した結果を実線で示した。また、表 4 には最小二乗法により推定した式 (5) のパラメータ a, b, c を示した。パラメータ a は 0.05 前後、c は 0.7 前後で、これらは雨量指標や地域による違いが小さい。一方で、パラメータ b は、1 時間雨量と 72 時間雨量で 1 桁程度異なっている。パラメータ b は、2 地点間の距離が大きくなるのに伴う降雨の同時生起率の減少率に寄与するパラメータである。

### 3.3 雨量指標の時間スケール別の解析

大雨の空間スケールと雨量指標の時間スケールとの関係を調べた。図 7 には、関東平野と関東甲信越の山間部に分けて、降雨量の基準値を大雨の基準 (表 2) にした場合に、1, 6, 24, 72 時間雨量

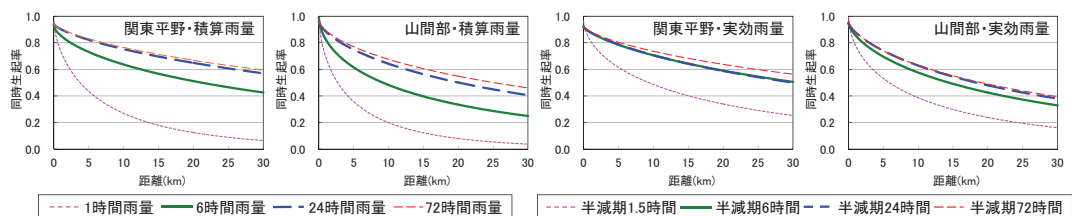


図7 関東平野および関東甲信越の山間部における1, 6, 24, 72時間雨量および半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、地域別および積算雨量と実効雨量別に式(5)より推定した降雨の同時生起率と2地点間との距離の関係。

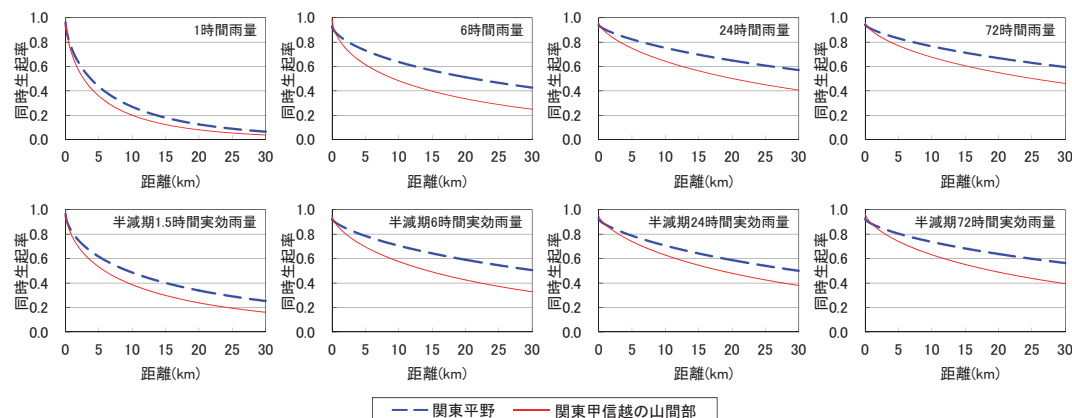


図8 関東平野および関東甲信越の山間部における1, 6, 24, 72時間雨量および半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、雨量指標別に式(5)より推定した降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係。

および半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係を式(5)で推定して示した。2地点間の距離が増大すると、1時間雨量の同時生起率は急激に低下し、雨量指標の時間スケールが大きくなるのにしたがって緩やかに低下するようになる。つまり、降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、時間スケールが大きい雨量指標ほど広い。これから、降雨量の基準値を1時間雨量30mmと再現確率が同程度の大雨とした場合に、時間スケールが大きい雨量指標ほど同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、大雨の空間スケールが大きいと考えられる。

### 3.4 平野部と山間部の解析

大雨の空間スケールの地域性を調べた。図8には、降雨量の基準値を大雨の基準(表2)にした場合に、1, 6, 24, 72時間雨量および半減期1.5, 6,

24, 72時間の実効雨量について、関東平野と関東甲信越の山間部における降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係を式(5)で推定して示した。同一の雨量指標の場合に、降雨の同時生起率が同じ値になる2地点間の距離は、対象にした全ての雨量指標で、関東平野が関東甲信越の山間部に比べて大きい。つまり、降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、関東平野が関東甲信越の山間部に比べて広い。これから、同一の雨量指標の場合に、関東平野は関東甲信越の山間部に比べて同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、関東平野は関東甲信越の山間部に比べて大雨の空間スケールが大きいと考えられる。

次に、同一の雨量指標について、降雨量の基準値を大雨の基準(表2)にした場合に、各0.5kmの範囲に含まれる2地点の組合せの降雨の同時生起率を母集団として、関東平野と関東甲信越の山間部における降雨の同時生起率の平均値の差につ

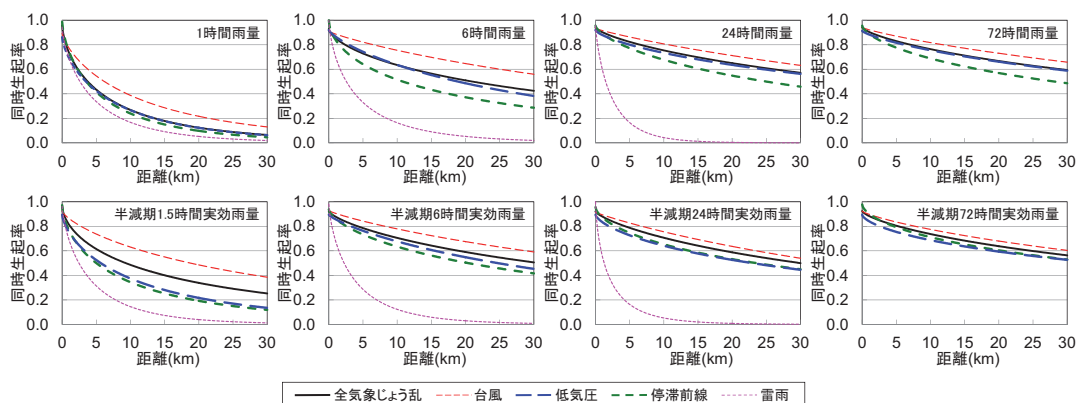


図9 関東平野における1, 6, 24, 72時間雨量および半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、気象じょう乱別式(5)より推定した降雨の同時生起率と2地点間の距離との関係。なお、低気圧と停滞前線は全気象じょう乱とほぼ同値の場合がある。

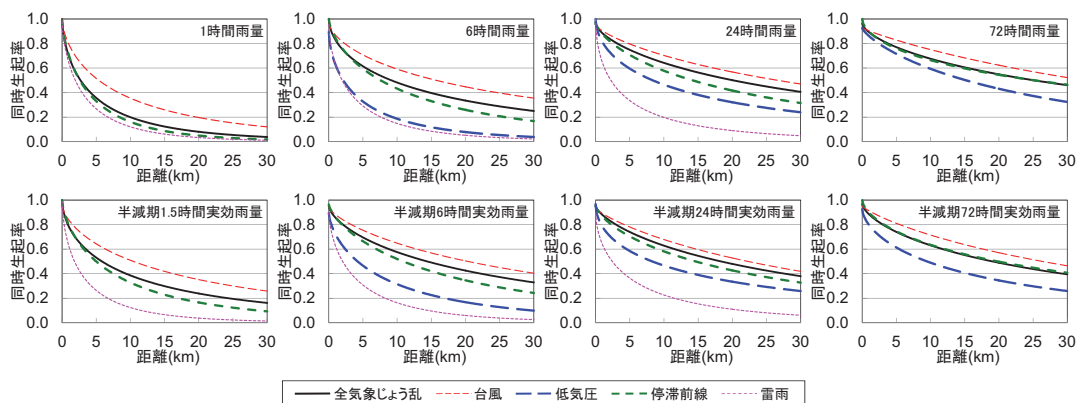


図10 図9と同様。ただし、関東甲信越の山間部の場合。

いて、Welchの検定を用いて検定を行った。検定には、基準にする地点*i*において基準値*X*を超過した大雨事例が3回以上かつ式(2)の分母の回数( $N(R_i \geq X)$ )が10回以上の2地点の組合せの降雨の同時生起率のみを用いた。その結果、降雨の同時生起率の平均値の差は、対象にした全ての雨量指標で、2地点間の距離が5km以下から有意水準5%で有意であり、2地点間の距離が大きくなるほど有意性が高くなる傾向にあった。これから、降雨の同時生起率は、2地点間の距離が同じ場合に、関東平野が関東甲信越の山間部に比べて有意に大きいと考えられる。

降雨の同時生起率が同じ値を示す範囲が関東甲信越の山間部が関東平野に比べて小さいのは、山

間部では降雨量に標高依存性がみられることや、山脈の風上側と風下側で降雨量が異なることなどが関係していると考えられる。つまり、山間部では降雨量の分布に地形の影響が加わることで、降雨量の分布が複雑になり、平野部に比べて大雨が同時に生起する範囲が狭くなると考えられる。

### 3.5 気象じょう乱別の解析

大雨の空間スケールと大雨をもたらした気象じょう乱との関係を調べた。これらの関係を分析するにあたり、天気図と衛星写真から、大雨をもたらした気象じょう乱を台風(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、梅雨季や秋雨季などには、停滞前線上を

表5 気象じょう乱別の降雨の同時生起率の平均値の差について、◎は2地点間の距離が5km以下から有意水準5%で有意な場合、○は5kmから10km以下で有意な場合、△は10kmから30km以下で有意な場合、×は30km以下で有意な場合がない場合。また、-は検定ができなかった場合。網掛けなしは「気象じょう乱の組合せ」の上段の気象じょう乱が下段に比べて降雨の同時生起率が大きい場合、網掛けは上段が下段に比べて小さい場合。

地域		関東平野						関東甲信越の山間部							
気象じょう乱の組合せ		台風			低気圧			停滞前線	台風			低気圧			停滞前線
		低気圧	停滞前線	雷雨	停滞前線	雷雨	雷雨		低気圧	停滞前線	雷雨	停滞前線	雷雨	雷雨	
積算雨量	1時間雨量	-	◎	◎	-	-	◎	-	◎	◎	-	-	◎		
	6時間雨量	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	×	◎		
	24時間雨量	◎	◎	-	◎	-	-	○	○	◎	○	◎	◎		
	72時間雨量	◎	◎	-	◎	-	-	○	×	-	○	-	-		
実効雨量	半減期1.5時間	○	◎	◎	-	-	◎	-	○	◎	-	-	◎		
	半減期6時間	◎	◎	◎	○	◎	◎	○	△	◎	△	○	◎		
	半減期24時間	◎	◎	-	×	-	-	△	×	◎	△	◎	◎		
	半減期72時間	◎	◎	-	×	-	-	○	×	-	△	-	-		

メソ低気圧が東進する場合や、停滞前線と台風が日本近傍に存在する場合に大雨がもたらされることがある。梅雨前線上のメソ低気圧は、傾圧不安定性によって発達する温帯低気圧とは構造が異なっており、活発な梅雨前線はむしろメソ低気圧の連なりとして認識できる<sup>21)</sup>。そのため、停滞前線上にメソ低気圧を伴う場合の大雨は停滞前線に区分した。停滞前線と台風が存在する場合には、台風本体のスパイラル状の雲群と停滞前線の雲群を衛星画像から目視で判別し、前者による大雨を台風、後者の場合を停滞前線に区分した。

実効雨量は、式(1)の定義式のとおり先行雨量の影響を受けている。また、時間スケールが大きい積算雨量も先行雨量の影響を受けている場合がある。このように、大雨の基準を超過した場合の降雨量は、それ以前に出現した気象じょう乱による降雨の影響を受けている場合があるが、本研究では大雨の基準を超過したときに出現している気象じょう乱を、その大雨をもたらした気象じょう乱とした。

図9および図10には、降雨量の基準値を大雨の基準(表2)にした場合に、関東平野および関東甲信越の山間部における1, 6, 24, 72時間雨量と半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、気

象じょう乱別に降雨の同時生起率と2地点間の距離の関係を式(5)で推定して示した。ただし、低気圧の1時間雨量と半減期1.5時間の実効雨量については、関東甲信越の山間部において、2地点間の距離が5km以下の場合に、0.5kmの範囲における式(2)の分母の回数( $N(R_i \geq X)$ )が10回以下の場合がある。そのため、これらについては降雨の同時生起率の推定を行わなかった。また、雷雨については継続時間が短いことから、72時間雨量および半減期72時間の実効雨量の降雨の同時生起率の推定を行わなかった。

降雨の同時生起率は、2地点間の距離が増大すると、雷雨による大雨が急激に低下するのに対して、台風による大雨が比較的緩やかに低下する。低気圧や停滞前線による大雨については、降雨の同時生起率が同じ値を示す範囲として台風と雷雨による大雨の中間に位置付けられる。また、低気圧と停滞前線の降雨の同時生起率が同じ値を示す範囲は、関東平野では低気圧が広く、関東甲信越の山間部では停滞前線が広い傾向にある。このように、降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、対象にした全ての雨量指標で、台風の場合に広く、雷雨の場合に狭い。また、低気圧と停滞前線はこれらの中間に位置する。これから、同一の雨量指

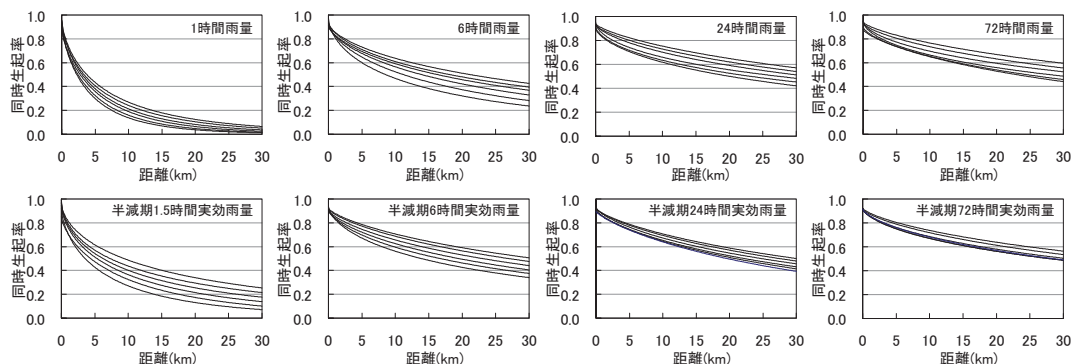


図 11 降雨量の基準値を大雨の基準にした場合および大雨の基準から 1, 2, 3, 4, 5 割高くした場合の関東平野における 1, 6, 24, 72 時間雨量および半減期 1.5, 6, 24, 72 時間の実効雨量について、式 (5) より推定した降雨の同時生起率と 2 地点間の距離との関係。2 地点間の距離が同じ場合に降雨の同時生起率が大きい実線から、降雨量の基準値を大雨の基準にした場合、大雨の基準から 1, 2, 3, 4, 5 割高くした場合。

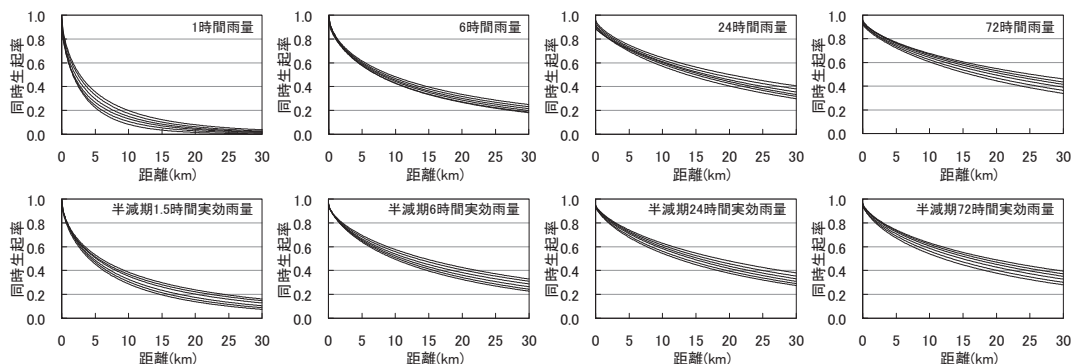


図 12 図 11 と同様。ただし、関東甲信越の山間部の場合。

標の場合に、台風の場合は同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、雷雨の場合に狭く、低気圧と停滞前線はこれらの中間である。したがって、台風の場合は雷雨の場合に比べて大雨の空間スケールが大きく、低気圧と停滞前線の場合にこれらの中間の空間スケールになると考えられる。

次に、同一の雨量指標について、降雨量の基準値を大雨の基準 (表 2) にした場合に、各 0.5km の範囲に含まれる 2 地点の組合せの降雨の同時生起率を母集団として、異なる気象じょう乱の降雨の同時生起率の平均値の差について Welch の検定を用いて検定を行った。検定には、基準にする地点  $i$  において基準値  $X$  を超過した大雨事例が 3 回以上かつ式 (2) の分母の回数 ( $N(R_i \geq X)$ ) が

10 回以上の 2 地点の組合せの降雨の同時生起率のみ用いた。その結果、異なる気象じょう乱の降雨の同時生起率の平均値の差は、対象にした全ての雨量指標で、2 地点間の距離が大きくなるほど有意性が高くなる傾向にあった。表 5 には、異なる気象じょう乱における降雨の同時生起率の平均値の差が、2 地点間の距離が 5km 以下から有意水準 5% で有意な場合を◎、5km から 10km 以下で有意な場合を○、10km から 30km 以下で有意な場合を△、30km 以下で有意な場合がない場合を×で示した。また、Welch の検定は、検定に用いることが可能な 2 地点の組合せ数が 1 以下の場合には検定ができない。このために検定ができなかった場合は-で示した。低気圧と雷雨にはこのような場合がみられるが、表 5 によると、時間スケールが

大きい雨量指標の場合などで、降雨の同時生起率の平均値の差に有意水準5%での有意性がみられない場合があるが、多くの場合に有意水準5%で有意である。これから、時間スケールが大きい雨量指標の場合などの一部の場合を除いて、気象じょう乱による降雨の同時生起率に差があると考えられる。

降雨の同時生起率が同じ値を示す範囲が気象じょう乱によって異なるのは、大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る。つまり、台風による大雨は広域に組織化された積乱雲群によってもたらされる場合が多いため、大雨が同時に生起する範囲が広いと考えられる。一方、雷雨による大雨は少数の積乱雲によってもたらされる場合が多いことから大雨が同時に発生する範囲が狭く、低気圧や停滞前線による大雨は両者の中間に該当すると考えられる。

### 3.6 降雨量の基準値を変えた解析

降雨量の基準値を変えることで、大雨の空間スケールと降雨量の基準値の関係を調べた。図11および図12には、関東平野および関東甲信越の山間部における1, 6, 24, 72時間雨量と半減期1.5, 6, 24, 72時間の実効雨量について、降雨量の基準値を大雨の基準(表2)から1, 2, 3, 4, 5割高くした場合の降雨の同時生起率と2地点間の距離の関係を式(5)で推定して示した。なお、降雨量の基準値を高くした場合でも、0.5kmの範囲における式(2)の分母の回数( $N(R_i \geq X)$ )は10回以上であった。

同一の雨量指標の場合に、降雨の同時生起率が同じ値になる2地点間の距離は、対象にした全ての雨量指標で、降雨量の基準値が低いほど大きい。つまり、降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、降雨量の基準値が低いほど広い。これから、降雨量の基準値が低いほど、同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、降雨量の基準値が高いほど、同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が狭い。したがって、降雨量の基準値が低いほど大雨の空間スケールが大きく、降雨量の基準値が高いほど大雨の空間スケールが

表6 表5と同様。ただし、降雨の基準値を大雨の基準にした場合と大雨の基準から1, 2, 3割高くした場合。

雨量指標	大雨の基準	関東平野			関東甲信越の山間部			
		1割	2割	3割	1割	2割	3割	
積算雨量	1時間雨量	30	○	◎	◎	×	○	◎
	6時間雨量	70	◎	◎	◎	×	×	△
	24時間雨量	115	○	◎	◎	×	○	◎
	72時間雨量	140	○	◎	◎	×	△	△
実効雨量	半減期1.5時間	35	◎	◎	◎	×	×	×
	半減期6時間	60	△	◎	◎	×	×	△
	半減期24時間	100	△	○	◎	×	△	△
	半減期72時間	130	△	◎	◎	×	△	△

小さいと考えられる。

次に、同一の雨量指標の場合に、各0.5kmの範囲に含まれる2地点の組合せの降雨の同時生起率を母集団として、降雨量の基準値が大雨の基準(表2)の場合とその基準から1, 2, 3割高くした場合の降雨の同時生起率の平均値の差についてWelchの検定を用いて検定を行った。検定は、3.5 気象じょう乱別別解析と同様の方法で行い、検定結果を表6に表5と同様の記号で示した。表6によると、関東平野では、降雨の同時生起率の平均値の差は、対象にした全ての雨量指標で、降雨量の基準値を高くした場合に、2地点間の距離が30km以下で有意水準5%で有意である。降雨量の基準値を大雨の基準(表2)から3割高くすると、5km以下から有意である。関東甲信越の山間部では、関東平野に比べて、降雨の同時生起率の差が有意水準5%で有意なる2地点間の距離が大きくなり、30km以下では有意水準5%での有意性がみられない場合もある。

降雨の同時生起率が同じ値を示す範囲が降雨量の基準値が高くなると狭くなる理由として、降雨量の基準値が高くなると、降雨量がその基準値を超過した量が小さいことが多くなるために、降雨量が基準値を超過する範囲が狭くなると考えられる。言い換えれば、降雨量の基準値が高いほど、その基準値以上の範囲が狭くなる。

## 6 おわりに

本研究では、JR 東日本、気象庁、国交省、および東京都の雨量計で観測された降雨量データを用いて、関東平野と関東甲信越の山間部を対象に、大雨の空間スケールに関する解析を行った。ここでは、大雨の空間スケールは、2 地点で同時に大雨になる割合である降雨の同時生起率で評価した。1, 6, 24, 72 時間雨量と半減期 1.5, 6, 24, 72 時間の実効雨量について、雨量指標の時間スケール別、地域別、気象じょう乱別、および基準値別に、降雨の同時生起率と 2 地点の距離との平均的な関係を求めた上で、両者の間の関係式を提案した。さらに、降雨の同時生起率について、地域、気象じょう乱、および基準値による差異の有無について検定を行った。

- ① 降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、降雨量の基準値を 1 時間雨量 30mm と再現確率が同程度の大雨とした場合に、時間スケールが大きい雨量指標ほど広い。これから、時間スケールが大きい雨量指標ほど、同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、大雨の空間スケールが大きいと考えられる。
- ② 大雨時に降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、同一の雨量指標の場合に、関東平野が関東甲信越の山間部に比べて広い。また、関東平野と関東甲信越の山間部における降雨の同時生起率の平均値の差は、2 地点間の距離が 5km 以上から有意水準 5% で有意である。これから、関東平野は関東甲信越の山間部に比べて同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、関東平野は関東甲信越の山間部に比べて大雨の空間スケールが大きいと考えられる。
- ③ 大雨時に降雨の同時生起率が同じ値になる範囲は、同一の雨量指標の場合に、台風の場合に広く、雷雨の場合に狭い。また、低気圧と停滞前線はこれらの中間に位置する。降雨の同時生起率の平均値の差は、時間スケールが大きい雨量指標の場合などで有意水準 5% での有意性がみられない場合があるが、多くの場合で有意水準 5% で有意である。これから、台風の場合は

同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が広く、雷雨の場合に狭く、低気圧と停滞前線はこれらの中間に位置する。台風の場合は雷雨の場合に比べて大雨の空間スケールが大きく、低気圧と停滞前線の場合にこれらの中間の空間スケールとなる。

- ④ 降雨量の基準値を 1 時間雨量 30mm と再現確率が同程度の大雨から高くすると、基準値が高くなるのにしたがって降雨の同時生起率が同じ値になる範囲が狭くなる。また、関東平野では、降雨量の基準値を 1 時間雨量 30mm と再現確率が同程度の大雨とした場合とその基準値から 1, 2, 3 割高くした場合の降雨の同時生起率の平均値の差は、2 地点間の距離が 30km 以下で有意水準 5% で有意である。また、降雨量の基準値を 3 割高くすると、5km 以下から有意である。関東甲信越の山間部では、関東平野に比べて、降雨の同時生起率の差が有意水準 5% で有意なる 2 地点間の距離が大きくなり、30km 以下では有意水準 5% での有意性がみられない場合もある。これから、降雨量の基準値が高いほど、同等以上の大雨が同時に観測される割合の高い範囲が狭く、大雨の空間スケールが小さいと考えられる。

本研究では、JR 東日本の降雨時の列車運転規制に用いられている雨量指標を含めて、降雨の同時生起率と 2 地点間の距離との平均的な関係の関係式を提案した。鈴木ら<sup>22)</sup>では、1 時間雨量を取り上げて、鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値の設定方法の考え方を提案した。今後は、鈴木ら<sup>22)</sup>の考え方と本研究の成果を活用して、鉄道における雨量計のより適切な設置間隔や、さらにはレーダー雨量の利用について検討して行きたいと考えている。

また、図 4 および図 5 によると、2 地点間の距離が同程度であっても同時に大雨になる割合が高い 2 地点の組合せと低い組合せがある。同時に大雨になる割合が低い 2 地点の組合せを鉄道の雨量計に当てはめて考えると、雨量計で雨量計の受持ち区間の大雨を捉えられる割合が低い場合に相当

する。このような大雨の捕捉性能の低い雨量計を抽出して、雨量計の受持ち区間の見直しや雨量計を増設する方法については鈴木ら<sup>23)</sup>で提案されている。

### 【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および危険度予測，地盤工学 実務シリーズ 23，丸善，184p，2006。
- 2) 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，Vol.35，pp.437-440，1989。
- 3) 岩井美津雄：在来線防災情報収集システムの開発・導入，日本鉄道施設協会誌，Vol.42，pp.136-138，1996。
- 4) 鈴木博人・大島竜二：雨量計で観測される降雨量と災害の発生地点の降雨量の差異に関する考察，自然災害科学，Vol.33，pp.101-113，2014。
- 5) 鈴木博人：降雨時の列車運行の安全性向上に向けた考察－降雨に起因した列車脱線事故の分析－，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.18，pp.141-147，2014。
- 6) 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。
- 7) Ciach, G., W. Krajewski : Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma, *Advanced in Water Resources*, Vol.29, pp.1450-1463, 2006.
- 8) 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，pp.29-45，1997。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 鈴木博人・中北英一・高橋日出男：鉄道における雨量計の配置間隔に関する考察，水工学論文集，Vol.55，pp.271-276，2011。
- 12) 鈴木博人・中北英一・高橋日出男：離散的に配置された雨量計の大雨の捕捉性能に関する解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.57，pp.I\_295-I\_300，2013。
- 13) 鈴木修・島村誠：実効雨量による降雨時列車運転規制基準の開発と導入，鉄道力学論文集，Vol.13，pp.200-203，2009。
- 14) 加藤 光：防災情報システムの導入，*Japan Railway Engineers' Association*, Vol.32, No11, pp.18853-18856, 1989。
- 15) 安部友則・金子達之輔・米内弘明：水文水質データベースの開発，河川情報研究，Vol.6，pp.81-88，1998。
- 16) 東京都：平成 27 年度 東京都水防計画，[http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/kasen/suiboukeikaku/PDF/H27\\_suiboukeikaku.pdf](http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/kasen/suiboukeikaku/PDF/H27_suiboukeikaku.pdf)，2015 年 4 月 10 日
- 17) 鈴木雅一・小橋澄治：がけ崩れ発生と降雨の関係について，新砂防，Vol.121，pp.16-25，1981。
- 18) 寺田秀樹・中谷洋明：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法，国土技術政策総合研究所資料，Vol.5，58p.，2001。
- 19) 田中茂信，宝 馨：河川流量の頻度解析における適合度と安定性の評価，水工学論文集，Vol.43，pp.127-132，1999。
- 20) 高棹琢馬，宝 馨，清水 章：琵琶湖流域水文データの基礎的分析，京都大学防災研究所年報，Vol.29 (B-2)，pp.157-171，1986。
- 21) 二宮洸三：雨とメソシステム，東京堂出版，242p.，1981。
- 22) 鈴木博人・中北英一・高橋日出男：鉄道における雨量計の設置間隔と列車運転規制基準値の設定方法に関する考察，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.56，pp.985-990，2012。
- 23) 鈴木博人・大島竜二・中北英一・高橋日出男：雨量計による大雨の捕捉性能の評価と雨量計の受持ち区間の見直し方法に関する研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.59，pp.I\_1303-I\_1308，2015。

(投稿受理：平成 27 年 4 月 10 日)