

鉄道と気象庁の降水量データを用いた 大雨の標高依存性の解析

ANALYSIS OF DEPENDENCE OF HEAVY RAINFALL ON ELEVATION
USING DATA OBSERVED AT RAILWAY STATIONS AND METEOROLOGICAL STATIONS

鈴木博人¹・中北英一²

Hiroto SUZUKI, Eiichi NAKAKITA

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)

This study statistically analyzed the dependence of heavy rainfall on elevation in mountain areas, using long-term precipitation data observed by raingauges installed densely at railway stations of East Japan Railway Company and meteorological stations of Japan Meteorological Agency. Total rainfall amount of heavy rainfall depends on elevation, and the increasing rate of total rainfall amount is 5-10%/100m. Maximum hourly precipitation of heavy rainfall caused by typhoon and front depends on elevation, and the increasing rate of maximum hourly precipitation is 10-20%/100m. However, maximum hourly precipitation of heavy rainfall caused by thunderstorm dose not depend on elevation. Furthermore, the frequency of heavy rainfall caused by typhoon and front depends on elevation.

Key Words: heavy rainfall, total rainfall amount, hourly precipitation, frequency of heavy rainfall, dependence on elevation

1. はじめに

山岳地域の多い日本では、山間部の降水分布を知ることが重要で、特に大雨の標高依存性を解明することは防災上の重要な課題の一つである。また、気象学的には大雨の特性や機構の解明、水資源の観点からは流域の降水量の把握などにおいて重要である。特に、鉄道では大雨の標高依存性を定量的に解明できれば、線路構造物の防災強度を線路の標高に応じて高めることで、列車の安全と列車運行の安定性の向上に活用できると考えられる。

降水分布の地形・標高依存性に関する既往の研究としては、例えば沖ら¹⁾は降水量に地形効果が顕著に現れるのは個々の気象擾乱に対応する時間スケールよりも若干時間スケールが長い場合、すなわちひと雨降水量から数日間降水量においてであるとしている。中北ら²⁾は、レーダ雨量計の観測値の分析から、さらに長い時間スケールにおいて、気象擾乱ごとの変動を越えた普遍的な降水-地形関係、つまり降水分布の地形依存性における時間スケール階層構造があるとしている。また、山田ら³⁾は山岳地域に設置した地上雨量計による観測データを用いて、熱雷の場合を除けば降水量は標高に対してほぼ線形に増加するとしている。一方、二宮⁴⁾は日本全国の降水量の極値の地理的分布を解析し、1時間降水量の極値の

分布は空間的に一様であるのに対して、日降水量は地形に関連した著しい地域性があるとしている。

このように降水分布の地形・標高依存性に関する既往の研究事例はいくつかあるが、大雨事例のみに着目した事例は見当たらない。これは、大雨の標高依存性を統計的に分析するには、多数の大雨事例の空間的に稠密な降水量データが必要であるが、このような降水量データの入手は容易ではないことによるものと思われる。

東日本旅客鉄道株式会社(以下、JR 東日本とする)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設置して降水量の観測を行っており⁵⁾、降水量データは 1991 年から保存されている。この JR 東日本の降水量データと気象庁の降水量データを組み合わせると、JR 東日本の管内においてデジタル化された長期間かつ稠密な降水量の観測データを得ることができる。そこで、本研究ではこれらの降水量データを用いて、大雨の標高依存性の統計的な分析を下記の考えに基づいて行った。

- (1) 降雨災害は一般的に大きい雨や強い雨によって発生することから、大雨のひと雨降水量と 1 時間降水量を対象とした。
- (2) 大雨に関して防災上重要な情報は降水量と出現頻度の分布であることから、大雨の降水量と出現頻度の標高依存性を分析した。

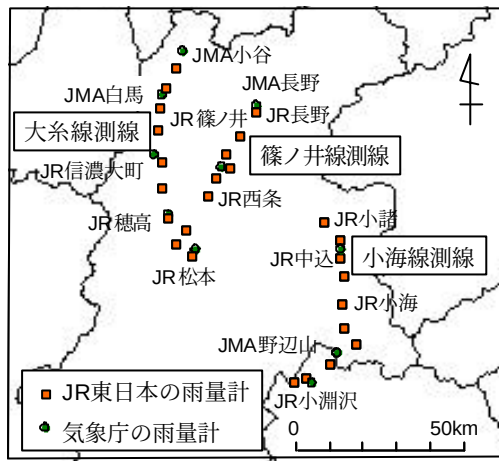


図-1 解析に用いた雨量計の観測箇所と測線

なお、対象地域は長野県と山梨県の鉄道に沿った3測線とし、対象期間は1994年から2005年の暖候期(5月～10月)とした。

2 解析方法

(1) 使用した降水量データ

本研究では、JR 東日本の雨量計で観測された降水量(以下、JR 降水量とする)と気象庁のアメダスの雨量計で観測された降水量(以下、JMA 降水量とする)を用いた。JR 降水量は、転倒ます0.5mmの転倒ます式雨量計で観測されたもので、1991年から5分ごとの降水量データが1mm単位で保存されている。また、JMA 降水量には、1994年からの降水量データを利用することのできるアメダス10分値データを用いた。

(2) 対象地域

解析の対象地域は、図-1に示す小海線(JR小淵沢駅・JR小諸駅)、大糸線(JR松本駅・JMA小谷)、篠ノ井線(JR松本駅・JMA長野)に沿ったほぼ南北方向の3測線とした。図-2は、3測線の雨量計の設置箇所の標高と水平距離の関係で、水平距離は両端の雨量計の設置箇所を結ぶ直線に投影した距離で示した。これらの測線は、いずれも一つの峠を越える測線であるが、標高差や地形勾配などの地形条件は異なっており、地形条件の異なる測線での大雨の標高依存性を調べることで、大雨の標高依存性の普遍性の抽出を試みた。なお、各測線の雨量計の設置箇所数は表-1のとおりである。

(3) 解析方法

大雨の標高依存性の解析は、大雨のひと降水量と最大1時間降水量に対して行った。ひと雨とは降水量0mmが12時間以上継続した場合を区切りとする一連の降水とし、ひと雨降水量はひと雨期間中の降水量の合計、最大1時間降水量は10分ごとに計算した1時間降水量のひと雨期間中の最大値とした。

大雨の基準は、ひと雨降水量は長野県の大部分の地域における24時間降水量の大雨注意報の発表基準である

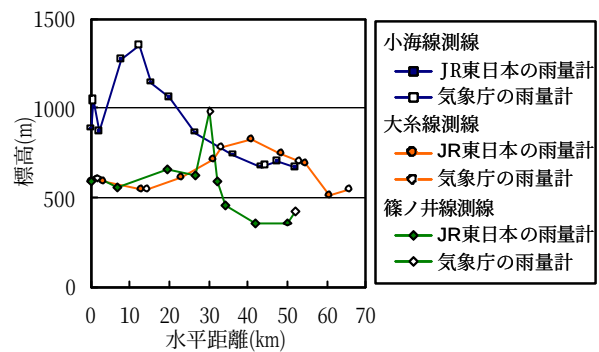


図-2 解析に用いた雨量計の設置箇所の標高。水平距離は両端の雨量計の設置箇所を結ぶ直線に投影した距離。また、南端の雨量計の設置箇所からの水平距離。

表-1 各測線の雨量計の箇所数

測線	JR 東日本	気象庁	合計
小海線	10	3	13
大糸線	9	5	14
篠ノ井線	8	3	11

70mmを準用して用いた。また、1時間降水量は同様に1時間降水量の大雨注意報の発表基準である25mmとした。解析は、1994年から2005年の暖候期において、解析の対象とする測線の全箇所での降水量の欠測がなく、1箇所以上で大雨の基準値以上の降水量が観測された事例を用いて行った。また、大雨の原因は台風、停滞前線、低気圧、熱雷に区分し、大雨の原因は大雨事例ごとに天気図から判断した。

3. 大雨の標高依存性

(1) 大雨の降水量の標高依存性

a) 大雨事例ごとの分析

各測線における大雨事例数は、表-2のとおりである。ひと雨降水量の大雨は、台風と停滞前線といった時間・空間スケールの大きい気象擾乱に起因した事例が大半を占めている。また、1時間降水量の大雨は時間・空間スケールの小さい気象擾乱である熱雷に起因した事例と時間・空間スケールの大きい台風及び停滞前線に起因した事例がほぼ半数ずつである。

図-2は、小海線測線における大雨のひと雨降水量と標高の関係を例示したもので、ひと雨降水量が標高とともに増加する事例、標高とともに減少する事例、標高によらずほぼ一定の事例、及び降水が一部の箇所のみにもみられる事例を示した。このように降水量と標高との関係は大雨事例ごとに異なると考えられることから、初めに大雨事例ごとの降水量と標高の間の相関係数と標高に対する変化率を調べた。

図-3は、各測線における大雨の降水量と標高の間の相関係数の度数分布である。図中の点線は有意水準5%で相関が有意となる値で、右側の点線より右側は大雨の降

表-2 各測線の解析に用いた大雨の事例数

大雨	測線	台風	停滞前線	低気圧	熱雷	合計
ひと雨 降水量	小海線	10	15	1	3	29
	大糸線	14	28	6	2	50
	篠ノ井線	11	15	2	0	28
1時間 降水量	小海線	9	14	2	27	52
	大糸線	3	12	1	22	38
	篠ノ井線	7	15	0	21	43

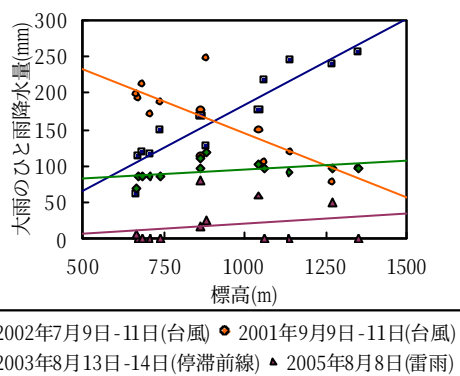


図-2 小海線測線における大雨事例のひと雨降水量と標高の関係 (29 事例の一部)

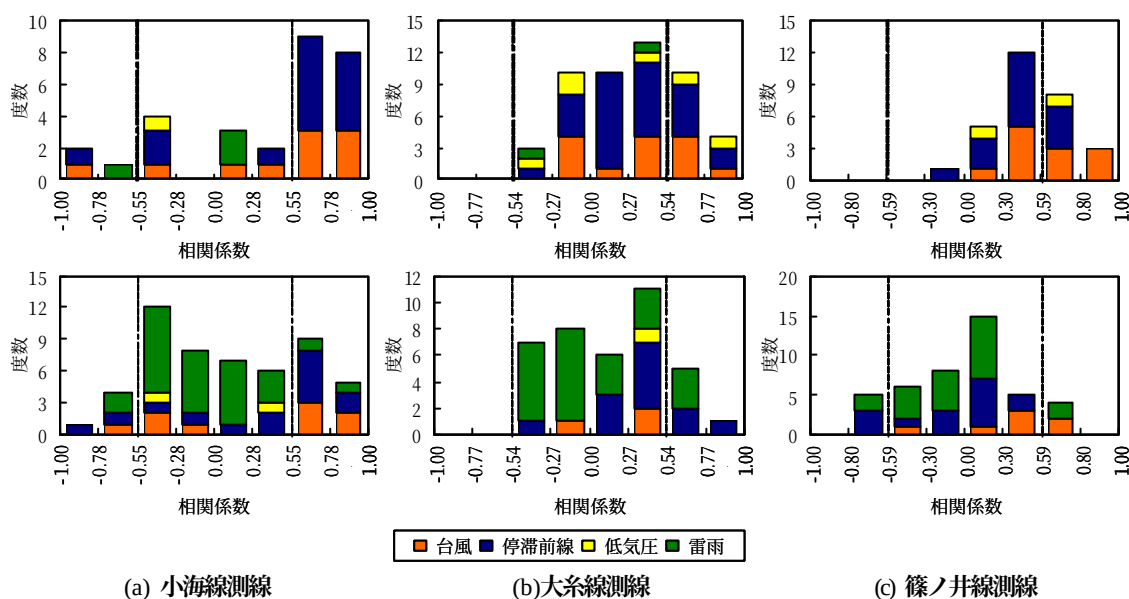


図-3 各測線における大雨の降水量と標高の間の相関係数の度数分布。上段は大雨のひと雨降水量、下段は最大1時間降水量。また、点線は有意水準5%で相関が有意となる値で、右側の点線より右側は大雨の降水量と標高の間の正の相関が有意水準5%で有意、左側の点線より左側は負の相関が有意水準5%で有意。

水量と標高の間の正の相関が有意水準5%で有意であり、左側の点線より左側は負の相関が有意水準5%で有意である。なお、以下では相関が有意水準5%で有意な場合を「相関がある」、有意水準5%での有意性が認められない場合を「相関がない」とする。

大雨のひと雨降水量と標高の間の相関係数は正の事例が多く、篠ノ井線測線ではほとんどの事例で正である。また、大雨のひと雨降水量は標高と正の相関がある事例も多く、小海線測線では正の相関がある事例が半数以上を占めている。一方で、小海線測線では標高と負の相関がある事例もみられる。3測線に共通していることは、大雨のひと雨降水量は標高に依存する事例も多くみられるが、標高への依存度合は大雨事例ごとに異なっていることである。

大雨の最大1時間降水量と標高の間の相関係数は台風や停滞前線に起因した大雨は正の事例が多くみられる。大雨の最大1時間降水量は標高と正の相関がある事例もみられ、その多くは台風や停滞前線に起因した大雨であ

り、熱雷に起因した大雨は少ない。また、大雨の最大1時間降水量は標高と負の相関がある事例もみられる。3測線に共通していることは、大雨の最大1時間降水量は標高に依存する事例がみられるが、標高への依存度合は大雨事例ごと、さらには大雨の原因となる気象擾乱によって異なっていることである。なお、大雨の最大1時間降水量は大雨のひと雨降水量に比べて標高と正の相関がある事例の割合は小さく、標高と相関がない事例の割合が大きい。

以上のように、大雨の標高依存性は大雨の時間スケールによって異なるとともに、大雨事例ごとに異なっている。これは、時間スケールの大きいひと雨降水量は時間スケールの小さい1時間降水量よりも地形の起伏による増幅効果が現れやすく、また大雨事例ごとに地形の起伏による効果の現れ方が変動するためであると考えられる。

大雨の降水量の標高に対する変化率は、大雨の降水量と標高の関係が線形であるとする、大雨の降水量と標高の一次回帰直線の傾きと考えることができる。なお、

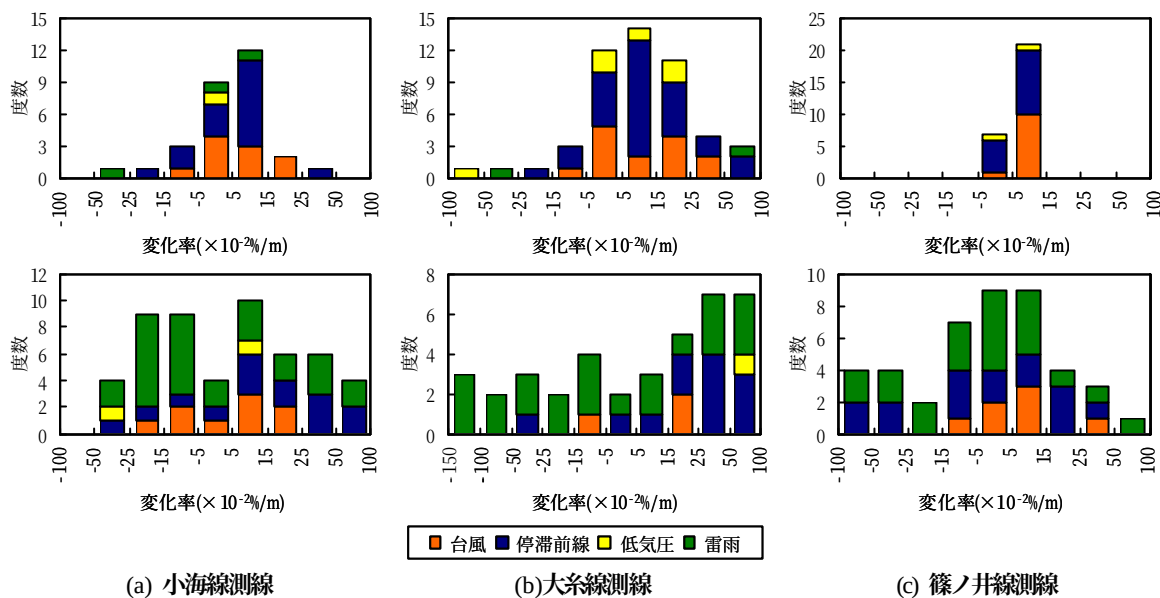


図-4 各測線における大雨の降水量の標高に対する変化率の度数分布. 上段は大雨のひと雨降水量, 下段は最大1時間降水量

降水量の標高に対する変化率は、大雨の降水量は大雨事例ごとに異なることから全箇所の降水量の平均値で規格化した。

図-4は、各測線における大雨事例の降水量の標高に対する変化率の度数分布である。大雨のひと雨降水量の標高に対する変化率は、大雨事例ごとに異なるが正の事例が多く、5-15%/100m程度の場合が多くみられる。つまり、大雨のひと雨降水量は標高が100m高くなると5-15%程度増加する事例が多い。一方で、大雨の最大1時間降水量の標高に対する変化率には、大雨のひと雨降水量の場合のような傾向はみられない。これは、大雨の1時間降水量は局地性が強いために、降水分布によって標高に対する変化率が大きく変動するためであると考えられる。

b) 大雨の降水量を平均化した分析

降水量の標高依存性の普遍性を抽出するには、中北ら²⁾は複数の気象擾乱にわたるような長い時間スケールでの解析が有効であるとしている。本研究では、この考え方を大雨の降水量の標高依存性の分析に応用して、大雨の原因になった気象擾乱別に大雨の降水量を積算・平均することで、大雨の降水量と標高の関係の普遍性の抽出を試みた。図-5は、大雨の降水量の平均値と標高の関係である。なお、大雨の降水量の平均値は大雨の原因別の箇所ごとの平均値である。大雨の原因別の分析は、大雨のひと雨降水量は大雨事例数の多い台風と停滞前線、大雨の最大1時間降水量は台風、停滞前線、及び熱雷について行った。表-3には大雨の降水量の平均値と標高の間の相関係数、及び標高に対する変化率をまとめて示した。

大雨のひと雨降水量の平均値と標高は、大糸線測線の停滞前線に起因した大雨を除いて正の相関がある。よって、3測線の共通性から大雨のひと雨降水量は標高に依存しており、標高の高い場所ほど大きくなると考えられ

る。つまり、大雨のひと雨降水量には普遍的な降水量—標高関係があるものと考えられる。

大雨の最大1時間降水量の平均値と標高は、台風に起因した大雨の小糸線測線と篠ノ井線測線、停滞前線に起因した大雨の小海線測線と大糸線測線は正の相関があるが、熱雷に起因した大雨は全測線で相関がない。また、台風と停滞前線に起因した大雨の小海線測線と大糸線測線は正の相関があるが、全大雨事例の場合は全測線で相関がない。よって、3測線の共通性から台風や停滞前線に起因した大雨の最大1時間降水量は、標高に依存する傾向がみられ、標高の高い場所ほど大きくなると考えられる。つまり、台風や停滞前線に起因した大雨の最大1時間降水量にも普遍的な降水量—標高関係があるものと考えられる。ただし、大雨のひと雨降水量に比べて標高との相関は低く、標高への依存性は低い。一方で、熱雷に起因した大雨の最大1時間降水量には降水量—標高関係はみられない。

以上から、時間スケールの大きいひと雨降水量は時間スケールの小さい1時間降水量よりも地形の起伏による増幅効果が現れやすいと考えられる。また、1時間降水量は台風や停滞前線といった空間スケールの大きい気象擾乱に起因した大雨は地形の起伏による増幅効果が現れやすいが、空間スケールの小さい熱雷による大雨は積乱雲の動的な振る舞いが反映されて地形の起伏による増幅効果が現れにくいものと考えられる。

また、大雨のひと雨降水量の平均値の標高に対する変化率は、小海線測線及び篠ノ井線測線と大糸線測線では異なるが、大雨のひと雨降水量は標高が100m高くなると平均的には5-10%程度増加すると推定される。大雨の最大1時間降水量の平均値の標高に対する変化率は、測線によって異なるが台風や停滞前線に起因した大雨では標高が100m高くなると平均的には10-20%程度増加する

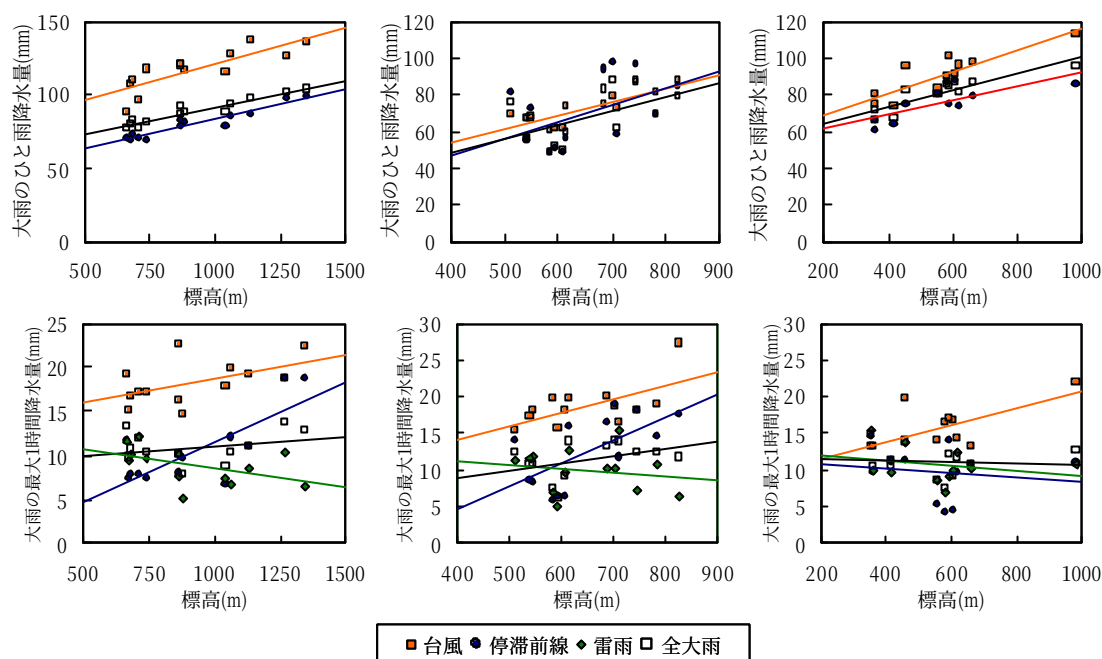


図-5 大雨の原因別の大雨の降水量の平均値と標高の関係。上段は大雨のひと雨降水量，下段は最大1時間降水量。

表-3 各測線における大雨の降水量の平均値と標高の間の相関係数，及び標高に対する変化率。表中の*は相関が有意水準 5%で有意な場合。

	測線	相関係数					変化率($\times 10^{-2}\%/m$)				
		台風	前線	雷雨	台風・前線	全大雨	台風	前線	雷雨	台風・前線	全大雨
ひと雨降水量 の大雨	小海線	0.82*	0.95*	—	0.94*	0.96*	4.25*	5.04*	—	4.65*	4.06*
	大糸線	0.82*	0.49	—	0.57*	0.54*	10.14*	13.21	—	12.2*	11.28*
	篠ノ井線	0.86*	0.73*	—	0.87*	0.88*	6.44*	5.03*	—	5.69*	5.65*
1時間降水量 の大雨	小海線	0.52	0.77*	-0.49	0.78*	0.29	2.99	13.09*	-4.96	7.73*	1.98
	大糸線	0.62*	0.63*	-0.17	0.68*	0.39	9.82*	24.96*	-5.05	20.84*	8.72
	篠ノ井線	0.64*	-0.16	-0.26	0.10	-0.07	7.33*	-3.21	-0.26	1.31	-0.85

ものと推定される。

(2) 大雨の出現頻度の標高依存性

図-6 は，大雨の降水量が大雨の基準値を超過した頻度と標高の関係である。なお，大雨の出現頻度はそれぞれの測線における全大雨事例数に対する割合で示した。また，表-4 は大雨の出現頻度と標高の間の相関係数である。

ひと雨降水量の大雨の出現頻度と標高は，全大雨事例の場合は全測線，台風起因した大雨は小海線測線と大糸線測線，停滞前線起因した大雨は大海線測線と篠ノ井線測線で相関がある。よって，3 測線の共通性からひと雨降水量の大雨の出現頻度は標高に依存しており，標高の高い場所ほどひと雨降水量の大雨の出現頻度が高く，ひと雨降水量の大雨に曝される確率が高いことが分かる。つまり，ひと雨降水量の大雨の出現頻度と標高の間には，普遍的な出現頻度－標高関係があると考えられる。

1 時間降水量の大雨の出現頻度と標高は，台風起因した大雨の全測線，停滞前線起因した大雨の小海線測線と大糸線測線で相関があるが，熱雷起因した大雨は全測線で相関がない。また，台風と停滞前線起因した大雨は小海線測線と大糸線測線で相関があるが，全大雨事例の場合には全測線で相関がない。よって，3 測線の

共通性から台風や停滞前線に起因した 1 時間降水量の大雨の出現頻度は標高に依存しており，標高の高い場所ほど 1 時間降水量の大雨の出現頻度が高く，1 時間降水量の大雨に曝される確率が高いことが分かる。つまり，台風や停滞前線といった空間スケールの大きい気象擾乱に起因した 1 時間降水量の大雨の出現頻度と標高の間にも出現頻度－標高関係があると考えられる。ただし，大雨のひと雨降水量に比べて標高との相関は低く，標高への依存性は低い。一方で，熱雷に起因した 1 時間降水量の大雨には出現頻度－標高関係はみられない。

以上から，大雨の出現頻度の標高への依存度合には，降水量の地形の起伏による増幅効果の現れやすさが反映されていると考えられる。つまり，大雨の降水量の標高依存性が高い場合ほど，大雨の出現頻度の標高依存性が高いと考えられる。

また，全大雨事例の場合の箇所ごとの大雨の出現頻度の割合は，ひと雨降水量の大雨は 30-80%程度であるのに対して，1 時間降水量の大雨は 10-25%程度と低い。これから，ひと雨降水量の大雨は一つの峠を越える程度の範囲では同時に生起している場合が多いのに対して，1 時間降水量の大雨は同時に生起する場合が少なく，1

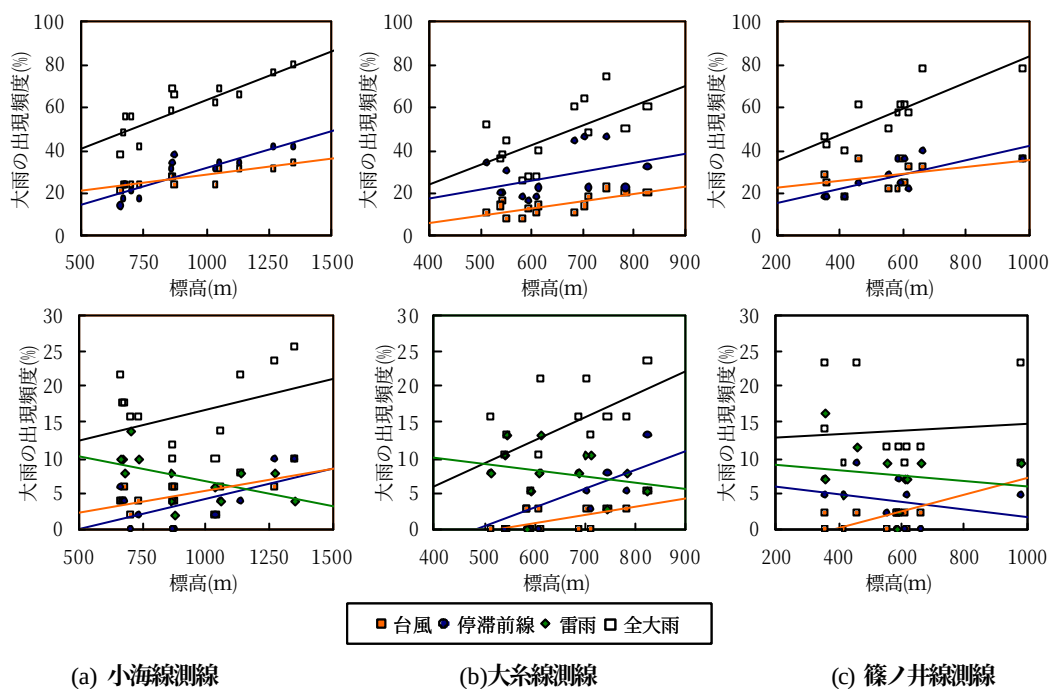


図-6 各測線における大雨の出現頻度と標高の関係。上段は大雨のひと雨降水量，下段は最大1時間降水量

表-4 各測線における大雨の出現頻度と標高の間の相関係数。
表中の*は相関が有意水準5%で有意な場合。

	測線	台風	前線	雷雨	台風・前線	全大雨
ひと雨降水量 の大雨	小海線	0.88*	0.86*	—	0.91*	0.86*
	大糸線	0.72*	0.39	—	0.60*	0.63*
	篠ノ井線	0.44	0.72*	—	0.78*	0.83*
1時間 降水量 の大雨	小海線	0.64*	0.59*	-0.51	0.67*	0.35
	大糸線	0.69*	0.60*	-0.26	0.72*	0.53
	篠ノ井線	0.78*	-0.30	-0.15	0.28	0.07

時間降水量の大雨はひと雨降水量の大雨に比べて局地性が高いことが分かる。

4 まとめ

本研究では、JR 東日本と気象庁の長期間かつ稠密な降水量データを用いて、一つの峠を越える3測線において、大雨の降水量と出現頻度の標高依存性について統計的な分析を行った。その結果、3測線の共通性から下記のことが分かった。

(1) 大雨のひと雨降水量は標高に依存しており、大雨のひと雨降水量と標高との間には普遍的な降水量—標高関係があることが示された。また、大雨のひと雨降水量は標高が100m高くなると平均的には5-10%程度増加すると推定された。

(2) 大雨の最大1時間降水量は、台風や停滞前線といった空間スケールの大きい気象擾乱に起因した大雨の場合には標高に依存しており、普遍的な降水量—標高関係があることが示された。また、これらによる大雨の最大1時間降水量は標高が100m高くなると平均的には10-20%程度増加するものと推定された。一方で、空間スケールの小さい熱雷に起因した大雨の最大1時間降水量

には降水量—標高関係がないことが示された。

(3) ひと雨降水量の大雨及び台風や停滞前線といった空間スケールの大きい気象擾乱に起因した大雨の最大1時間降水量の出現頻度には、普遍的な出現頻度—標高関係があることが示された。

今後は、大雨の降水量と出現頻度の標高依存性の分析の対象箇所を拡大することで、より普遍的な大雨の降水量及び出現頻度と標高の関係を明らかにしていきたいと考えている。また、この解析結果は鉄道では、大雨の降水量や出現頻度に応じて、つまり標高に応じて線路構造物の防災強度を高めることで、降雨に対する列車の安全と列車運行の安定性をより一層高めることに活用できるものと考えている。

参考文献

- 1) 沖大幹，虫明功臣，小池俊夫：地形と風向による豪雨時の降水分布の推定，土木学会論文集，Vol417II-13，pp.199-207，1990。
- 2) 中北英一，鈴木善晴，池淵周一：降雨場の地形依存性に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，Vol43B-2，pp.117-136，2000。
- 3) 山田正，日比野忠史，荒木隆，中津川誠：山地流域での降雨特性に関する統計的關係，土木学会論文集，Vol527II-33，pp.1-13，1995。
- 4) 二宮洗三：豪雨の時間スケールからみた降水強度極値の地理的分布，天気，Vol24，pp.63-70，1977。
- 5) 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。

(2006.9.30 受付)