論文　列車運転規制値の設定に資する全国確率実効雨量マップ

篠田　昌弘 [1]

[1]正会員　防衛大学校教授　システム工学群（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）
E-mail:shinoda@nda.ac.jp (Corresponding Author)

土砂災害の増加傾向がある昨今において，盛土や斜面といった土構造物の防災・減災対策を継続的に進める必要がある．本研究では，土構造物の代表的な作用である降雨に着目して，地域気象観測所降水量データを用いた確率実効雨量の算定を実施した．将来における降水量データの蓄積が現在の確率実効雨量に大きな影響を与えないように，確率分布の適合度評価を行い，適合度評価規準を満たした統計データのみを用いて確率実効雨量の算定を実施した．採用した一連の統計学的手法を用いて再現期間の異なる全国確率実効雨量マップと地方ごとの確率実効雨量マップを作成した．作成した全国確率実効雨量マップにより，確率実効雨量の地域特性を定量的に明らかにした．

Key Words: *embankment, slope, precipitation, rainfall, return period, statistical analysis*

1. はじめに

日本は，海と山に囲まれて，水資源が多く，南北に3500 km に渡る地形のため，地域によって四季の彩りに特徴があり，自然豊かな国である．一方，我が国では地震，津波，火山噴火，台風，洪水，土砂災害，雪害などさまざまな種類の自然災害が発生している．令和 2 年度の防災白書の特集では，激甚化・頻発化する豪雨災害をテーマとして取り上げており，豪雨災害状況や豪雨災害に対する政府の検討状況と今後の取り組みが説明されている [1]．豪雨が発生すると，川の氾濫や土石流，がけ崩れ，地すべりが発生しやすくなり，人々の生活や生命が脅かされることから、防災・減災に継続的に取り組む必要がある．

図-1 に，1982 年から 2021 年までの全国における土砂災害（がけ崩れ，地すべり，土石流）の発生状況を示す．図には前後 5 年の隣接平均も併せて示している．統計開始からの土砂災害発生件数の傾向を見ると発生件数が増加していることが分かる．過去 40 年間（1982 年～2021 年）の中で最も土砂災害発生件数が多かったのは，2018 年の 3,459 件であった．**表-1** に，統計開始から令和 2 年までの土砂災害発生件数の上位 5 位を示す．第一位の平成 30 年（2018 年）7 月豪雨では，2,581 件もの土砂災害発生の要因となっており，**図-1** に示す 2018 年の土砂災害発生件数（3,459 件）の約 7 割を占めている．**表-2** に，統計開始から令和 2 年までの土砂災害発生都道府県の上

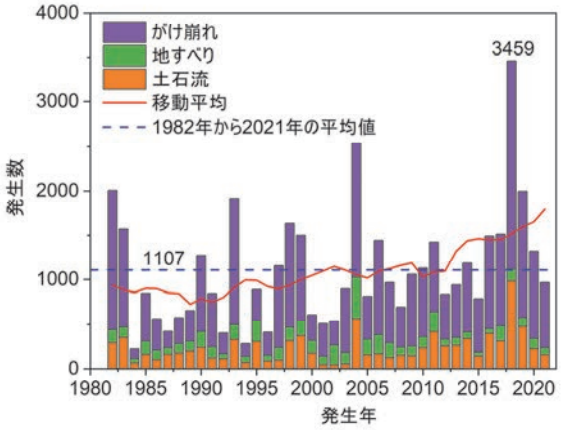


図-1　1982 年から 2021 年の土砂災害発生状況（統計データは，国土交通省砂防部保全課から提供）．なお，2021 年のデータは，2021 年 12 月 22 日時点の速報値である．

表-1　土砂災害発生件数の上位 5 位（文献 2）に加筆）

豪雨災害の名称	土砂災害発生件数
平成 30 年 7 月豪雨	2,581 件
昭和 58 年 7 月豪雨	1,146 件
令和 2 年 7 月豪雨	961 件
令和元年東日本台風	952 件
昭和 57 年 7 月豪雨	941 件

表-2 土砂災害発生都道府県数の上位5位（文献2）に加筆）

豪雨災害の名称	土砂災害発生都道府県数
令和2年7月豪雨	37府県
平成11年6月末豪雨	37道府県
平成18年7月豪雨	36府県
平成2年台風第19号	34府県
平成16年台風第23号	32府県

位5位を示す．いずれの豪雨災害でも30都道府県以上に渡って広域的な土砂災害が発生していることが分かる．小山内ら[3]は，1972年から2007年までに発生したがけ崩れ災害の実態を整理した．がけ崩れの誘因には，降雨，地震，融雪が挙げられるが，降雨によるがけ崩れは全体の93%を占めており，がけ崩れの主誘因は降雨と言える．

2. 降雨時の列車運転規制

文献4)によれば，旧国鉄の在来線の構造物のうち，切土や盛土といった土構造物の割合は87%を占めており，豪雨災害に脆弱だと言える．そのため，鉄道各社は豪雨災害に備え，浸食防止工や排水処理工などのハード対策と列車の運転規制等のソフト対策を実施している．降雨時の列車の運転規制の歴史については，文献5)に詳しいが，ここではその一部について紹介する．列車の運転規制の歴史は古く，1909年6月の「保線従事員心得[6]」や1914年2月の「暴風雨雪警戒心得[7]」に遡る．これらには保線従事員の服務規程として，風雨および豪雪の際に取るべき行動が定められていた．その後，1972年には「降雨に対する運転規制基準作成要領[8]」が取りまとめられ，雨量計で計測された時間雨量（短期的雨量指標）と連続雨量（長期的雨量指標）の組み合わせにより運転規制発令の基準値が定められた．1985年7月に，旧国鉄能登線において，運転規制基準に従っていたにも関わらず，降雨による盛土崩壊が原因となって，列車脱線事故が発生した．この事故を契機に，累積雨量を用いた運転規制基準が新たに設けられた．1987年には，国鉄の分割民営化によりJR各社が発足して，雨量指標として，時雨量，連続雨量，累積雨量を用いた列車運転規制基準の基本的な考え方は踏襲されたが，各社で独自の方法が採用されている．本州3社に目を向けると，列車運転規制基準に用いる雨量指標として，JR東日本では実効雨量[9),10),11)]，JR東海では土壌雨量[12),13)]，JR西日本では時雨量と連続雨量が採用されている．なお，JR東海が採用している土壌雨量はJR東海所有の雨量計を使用しているため，土壌雨量指数ではなく土壌雨量と呼んでいる．列車運転規制値を設置する際には，降雨，地盤，構造物の諸元が地域で異なるため，地域の実情に沿って規制値を決定すべきである．

これまでの調査・研究から，降雨と盛土・斜面崩壊発生の対応関係に長期的な雨量指標と短期的な雨量指標を併用することが有益であることが分かっている．両者の指標を一つのパラメータ（半減期）で表す雨量指標に，実効雨量がある．実効雨量は，斜面崩壊発生予測において実績の高い指標であり[14)]，各時刻に降った雨量を現在時刻までの経過時間に応じた一定の率で割り引いて合計した雨量[9)]である．本研究では，ある再現期間における全国の確率実効雨量を算定して，全国確率実効雨量マップで可視化して，確率実効雨量の地域特性の把握を試みる．なお，盛土や斜面の崩壊には，地盤材料の強度特性や透水性が重要となるが，過去に受けた降雨履歴も重要となる．過去に受けた降雨と比較して極めて稀な雨量が作用した場合に，盛土や斜面が崩壊しやすくなるのは周知の事実である．この「極めて稀」の定量的評価に再現期間が適していると考える．なお，既往の研究[15),16)]では，全国における100年確率日降水量マップや100年確率1時間降水量マップは作成されているものの，これまで確率実効雨量マップは作成されていない．

3. 確率実効雨量の算定[15),16),17)]

(1) 概要

本研究では文献15)から17)を参考に，ある再現期間における確率実効雨量を算定した．まず，地域気象観測所から毎時の降水量データを収集した後，実効雨量を算定する．実効雨量は，観測所ごとに年月日時別となっているため，実効雨量の年最大値を求める．その後，確率統計解析により，母数の推定，確率分布の適合度判定を行い，最適な確率分布を決定する．適合度評価基準を用いて，観測所の選定と再現期間の設定を行い，確率実効雨量の算定を行う．以下にそれぞれの項目について具体的に説明する．

(2) データ収集と一次処理

全国の地域観測所における確率実効雨量を算定するために，1976年から2016年に観測された全国のAMeDASデータの毎時降水量データを収集する．1976年から2016年のAMeDASの毎時降水量データは，期間によって収録場所が異なるため注意が必要である．1976年から2005年の観測値はアメダス再統計値から抽出し，2006年から2010年の観測値はアメダス年報から抽出し，2011年から2016年は気象観測月報から抽出した．毎時降水量データを抽出した後，観測所ごとに実効雨量を算定して，観測所ごとに年最大実効雨量を求める．なお，T時における実効雨量$D(T)$は，1時間前の実効雨量を$D(T-1)$，T時

における1時間雨量を$R(T)$，減少係数をαとすると次のように求められる[14].

$$D(T)=D(T-1)\cdot e^{\alpha}+R(T)\cdot e^{\alpha/2} \tag{1}$$

ここで，式(1)の減少係数αは，半減期Mを用いて以下のように求められる．

$$\alpha=\frac{\ln 0.5}{M} \tag{2}$$

上記の式(1)と式(2)を用いて確率統計解析を実施するにあたり，年最大実効雨量のデータ数が極端に少ない場合には適切な確率統計解析が実施できない．そのため，本研究では文献15)を参考に，1つの観測所における統計データが 10 年以上の蓄積のある観測所データを用いた．

(3) 確率統計解析[15]

a) 確率分布

確率実効雨量を算定するために，実効雨量の確率分布を同定する必要がある．文献 18)によれば，水文学で使われている確率分布として，正規分布，対数正規分布，ピアソンⅢ型分布，対数ピアソンⅢ型分布，Gumbel 分布，一般化極値分布などが挙げられている．本検討では以下に示す Gumbel 分布と一般化極値分布を用いた．Gumbel分布の確率分布関数Fと確率密度関数f_Xは次式で表される[18),19)].

$$F(x)=\exp\left[-\exp\left\{-\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}\right] \tag{3}$$

$$f_X(x)=\frac{1}{\sigma}\exp\left[-\frac{x-\mu}{\sigma}-\exp\left\{-\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}\right] \tag{4}$$

ここで，μとσは位置母数と尺度母数である．ξを形状母数として，$\xi\neq 0$ の場合では一般化極値分布の確率分布関数 F と確率密度関数 f_X は次式で表すことができる[18),19)].

$$F(x)=\exp\left[-\left\{1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right\}^{-\frac{1}{\xi}}\right] \tag{5}$$

$$f(x)=\frac{1}{\sigma}\cdot\left\{\frac{\sigma+\xi\cdot(x-\mu)}{\sigma}\right\}^{-\frac{1}{\xi}-1}\cdot\exp\left\{-\left(\frac{\sigma+\xi\cdot(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \tag{6}$$

ξ=0 とすると，前述した Gumbel 分布に一致する．

b) 母数推定

本研究では，確率分布の母数推定法にL積率法[20)]を採用した．L積率法の特徴は下記の通りである．

① 初期値設定なしに母数推定可能.

② 通常用いられている積率と異なり，順序統計量の線形和で表される.

③ 線形和に基づく統計量であるため，小標本から計算される変動係数やひずみ係数は偏りが大で変動も大きいという問題を緩和させるために有効.

第1次のL積率λ_1は次式で定義される.

$$\lambda_1=E(X) \tag{7}$$

いま，$X_{(i|N)}$を大きさ N の標本の第 i 番目の順序統計量とするとき，第2次のL積率λ_2は任意に2個取り出したときの最大値と最小値の差の期待値に比例して，次式で定義される.

$$\lambda_2=\frac{1}{2}E\left[X_{(1|2)}-X_{(2|2)}\right] \tag{8}$$

同様に，第3次のL積率λ_3も以下のように定義される.

$$\lambda_3=\frac{1}{3}E\left[X_{(1|3)}-2X_{(2|3)}+X_{(3|3)}\right] \tag{9}$$

式(7)から(9)のL積率解を用いて，確率分布の母数を推定できる．Gumbel 分布の位置母数μと尺度母数σは下記のように推定することができる.

$$\mu=\lambda_1-0.5772\frac{\lambda_2}{\ln 2} \tag{10}$$

$$\sigma=\frac{\lambda_2}{\ln 2} \tag{11}$$

また GEV 分布の位置母数μ，尺度母数σ，形状母数ξは下記のように推定することができる[18)].

$$\mu=\lambda_1+\frac{\lambda_2\left(1+\xi\Gamma(-\xi)\right)}{\left(2^{\xi}-1\right)\Gamma(1-\xi)} \tag{12}$$

$$\sigma=-\frac{\lambda_2}{\left(2^{\xi}-1\right)\Gamma(-\xi)} \tag{13}$$

$$\xi\approx 7.8590d+2.9554d^2 \tag{14}$$

ここで，式(14)は Hosking ら[21)]により提案された近似式であり，式(14)中の d は下記のように算定する.

$$d=\frac{2\lambda_2}{\lambda_3+3\lambda_2}-\frac{\ln 2}{\ln 3} \tag{15}$$

c) 適合度評価

まず，N 個のデータ x_1，x_2，・・・，x_N から求めた確率実効雨量をϕと記す．研究では文献 17)を参考に，確率分布の適合度判定に，下記に示す確率実効雨量 の変動係数の jackknife 推定値を用いた.

$$COV_J=\frac{\sigma_J}{\phi_{ave}} \tag{16}$$

ここに，σ_Jは確率実効雨量ϕの標準偏差の jackknife 推定値であり，次式により求めることができる.

$$\sigma_J = \sqrt{\frac{N-1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\phi_i - \phi_{ave}\right)^2} \tag{17}$$

ここに，Nはデータの個数，ϕ_iはi番目のデータを除く$N-1$個のデータを用いた統計量であり，次式で算定される．

$$\phi_i = \phi\left(x_1, x_2, \cdots, x_{i-1}, x_{i+1}, \cdots, x_N\right) \tag{18}$$

なお，式(16)と式(17)のϕ_{ave}はϕ_iの平均である．確率分布の適合度評価では，式(16)で求められる確率実効雨量の変動係数の jackknife 推定値の小さい方を適した確率分布として選択した．

d) 適合度評価による観測所の選定

地域気象観測所は 1976 年から計測されており，今後継続的に計測されていくことが予想される．降水量データの蓄積に伴い，確率実効雨量マップの更新も必要になってくるが，異常値を多く含む降水量データを用いて確率実効雨量マップを作成した場合には大きなばらつきを有することになる．すなわち，降水量データの蓄積に伴い，確率実効雨量マップを更新する際に，更新する度に異なる確率実効雨量マップになる可能性がある．確率実効雨量が変化する度に，列車の運転規制値を変更するのは非現実的であるため，降水量データが蓄積されても同様な確率実効雨量マップが作成できることが望ましい．そのため，本研究では，以下のような観測所の選定基準を設けた．すなわち，確率分布の候補の中から，適合度評価規準（確率実効雨量の変動係数の jackknife 推定値）を用いて適切な確率分布を決定し，決定された確率分布の適合度が許容値以下であれば，その観測所のデータを採用するが，許容値を超えた場合には，その観測所のデータは不採用とする．上記の手法によれば，一定の規準における確率分布の適合度を満たした降水量データのみを用いて確率実効雨量の算定と確率実効雨量マップの作成が可能である．本研究では，文献 15)を参考に，確率実効雨量の変動係数の jackknife 推定値の許容値を 20%とした．

4. 全国確率実効雨量マップの作成

全国確率実効雨量マップを作成するためには，実効雨量の半減期と再現期間を事前に設定する必要がある．JR 東日本では，JR 東日本管内の災害データを対象に，複数の半減期を用いて最適な組み合わせを検討した結果，半減期 1.5 時間，6 時間，24 時間の組み合わせとすることで，従来の規制方法と比較して規制時間が短く且つばらつきが小さいことを示した[11]．JR 東日本の列車運転規制では，半減期 1.5 時間，6 時間，24 時間の実効雨量のいずれかの値が列車運転規制基準値を超過した場合に発令，全ての実効雨量値が列車運転規制基準値を下回った後に，異常のないことを確認できた場合に解除される．本研究における実効雨量の半減期は，JR 東日本が公表している列車運転規制値[11]を参考に，1.5 時間，6 時間，24 時間の 3 通りとして設定した．再現期間については，鉄道設計標準（土構造物）の排水工設計[22]を参考に，5 年を基準とした．なお，比較のため，地震ハザード等で採用されている再現期間30年も用いた[23]．したがって，検討ケースの総数は 6 ケースである．

表-2 に，各検討ケースにおける選定された地域気象観測所数を示す．本研究におけるスクリーニング前の地域気象観測所数は 1932 箇所であり，その中から許容値以内の観測所を選定した結果，どの検討ケースにおいても約 1400 箇所以上の観測所が選定された．

図-2 に，一例として，半減期間 1.5 時間，再現期間 5 年の確率実効雨量の算定に用いた観測所の位置を示す．総観測所数は，1446 であった．**図-2** から，選定した観測所は全国に散らばっていることが分かる．

なお，全国確率実効雨量マップの作成には，Generic Mapping Tool（GMT）を用いた．GMT はインターネットから容易にダウンロードできるフリーのソフトウェアであり，容易に日本地図上にコンター図などをプロットすることができる．

表-2 各検討ケースにおける選定された地域気象観測所数

半減期	再現期間	選定された観測所数
1.5 時間	5 年	1446
1.5 時間	30 年	1434
6 時間	5 年	1445
6 時間	30 年	1426
24 時間	5 年	1447
24 時間	30 年	1419

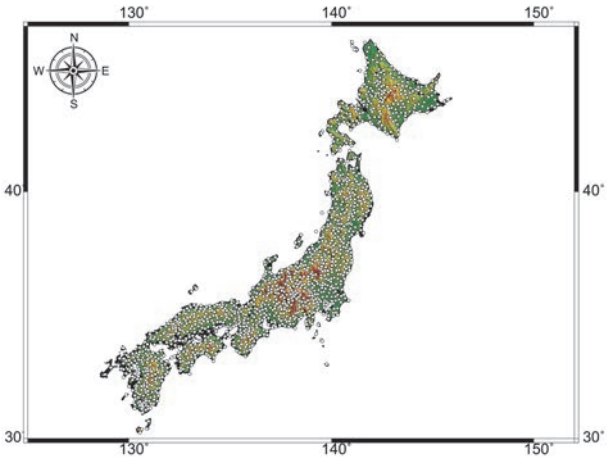


図-2 選定された地域気象観測所の例（半減期間 1.5 時間，再現期間 5 年）

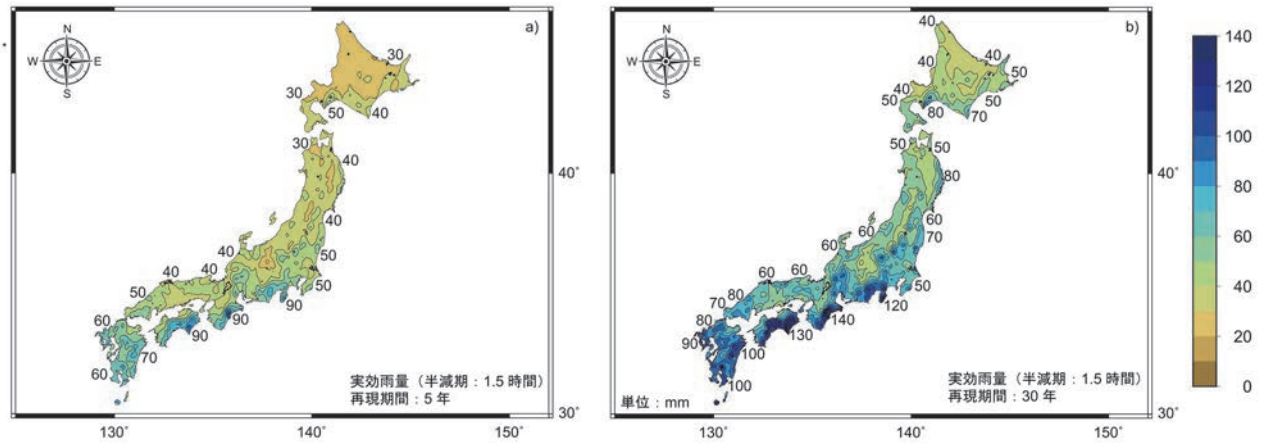


図-3　半減期を1.5時間とした場合の全国確率実効雨量マップ：a) 再現期間：5年，b) 再現期間：30年

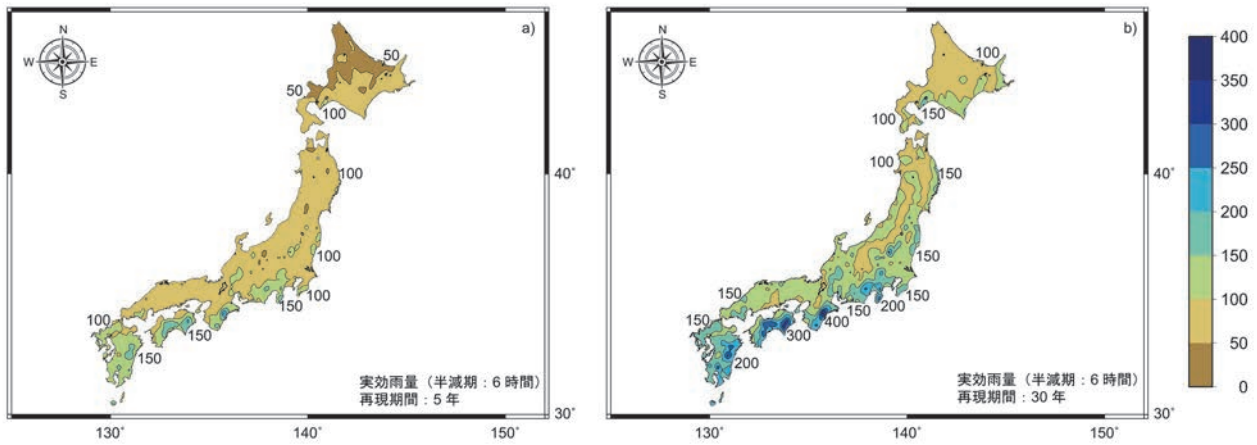


図-4　半減期を6時間とした場合の全国確率実効雨量マップ：a) 再現期間：5年，b) 再現期間：30年

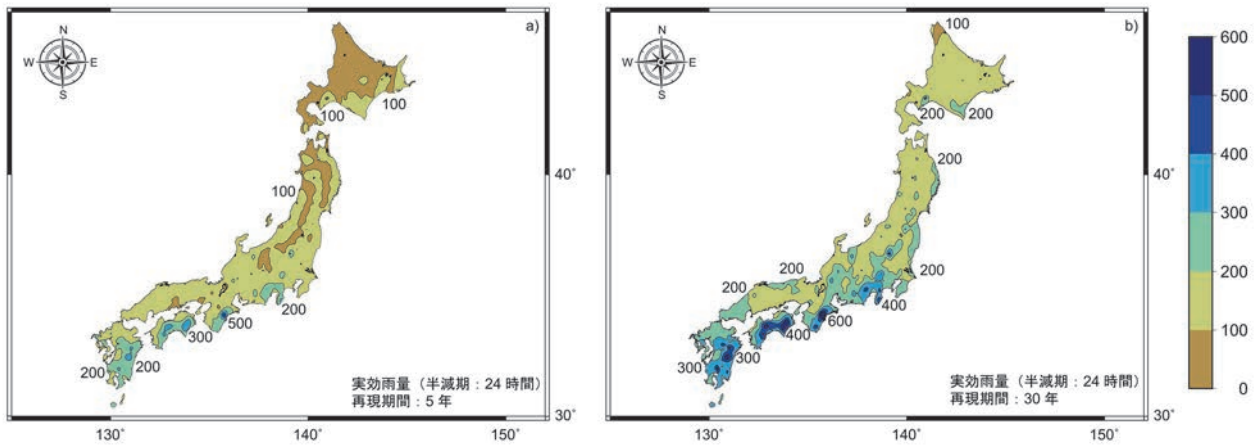


図-5　半減期を24時間とした場合の全国確率実効雨量マップ：a) 再現期間：5年，b) 再現期間：30年

図-3から**図-5**に，半減期を1.5時間，6時間，24時間，再現期間を 5 年と 30 年とした場合の全国確率実効雨量マップを示す．さらに，**図-6**から**図-12**に，半減期を 1.5 時間，再現期間を 5 年とした場合の，北海道地方，東北地方，関東・東海地方，北陸地方，近畿地方，中国・四国地方，九州地方の確率実効雨量マップを示す．なお，**図-6**から**図-12**は，**図-3a)**の拡大図であり，同図には，国土交通省国土数値情報に基づいた鉄道路線をプロットした．**図-3**から**図-5**に示すように，再現期間が 5 年と 30 年の場合では，確率実効雨量の絶対値は異なるが，傾向はほぼ等しい．全体的な傾向としては，北海道と東北地方は確率実効雨量が相対的に少なく，関東・東海地方は相対的に多いことが分かる．中国地方は相対的に少ない．また，紀伊半島の東側が特に大きく，四国・九州地方の太平洋側も相対的に大きいことが分かる．また，**図-3**から**図-5**を縦に見ると，確率年を固定して，半減期を変化

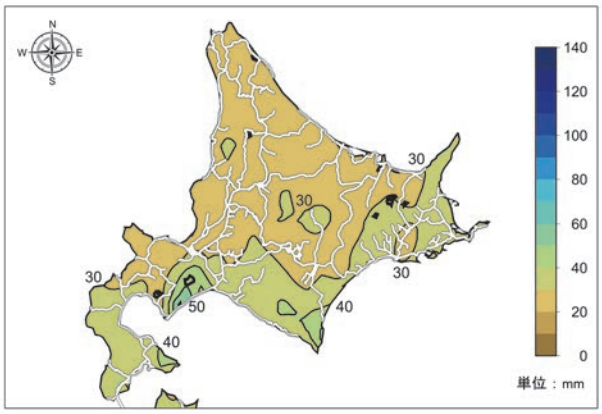


図-6 半減期を1.5時間とした場合の5年確率確率実効雨量マップ（北海道地方）．

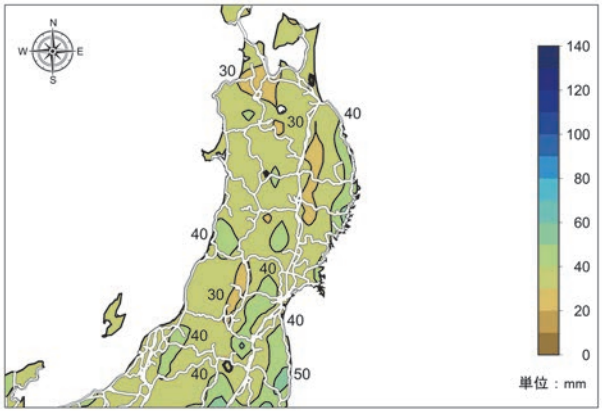


図-7 半減期を1.5時間とした場合の5年確率確率実効雨量マップ（東北地方）．

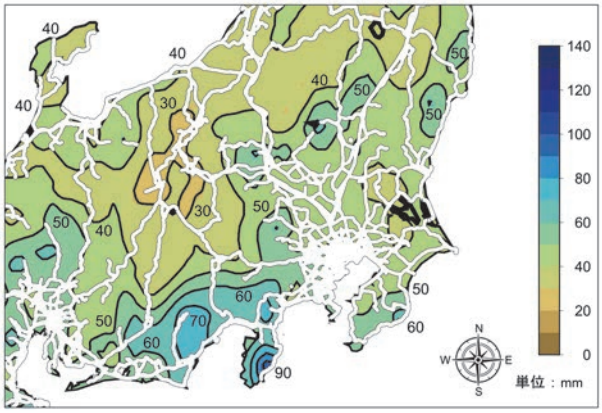


図-8 半減期を1.5時間とした場合の5年確率確率実効雨量マップ（関東・東海地方）．

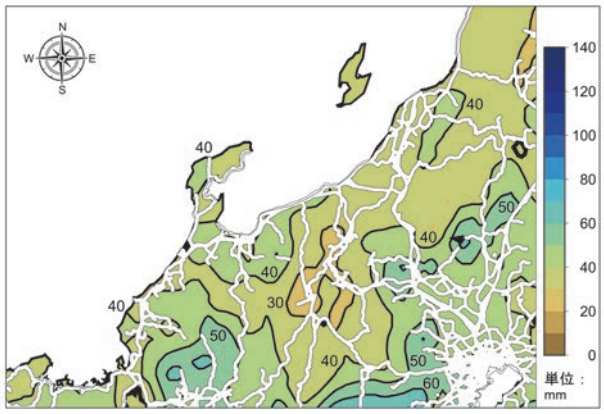


図-9 半減期を1.5時間とした場合の5年確率確率実効雨量マップ（北陸地方）．

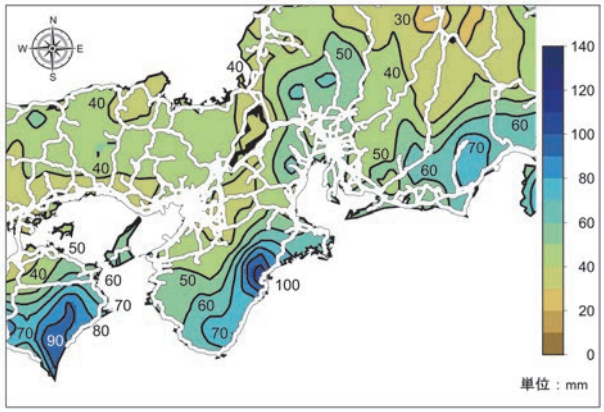


図-10 半減期を1.5時間とした場合の5年確率確率実効雨量マップ（近畿地方）．

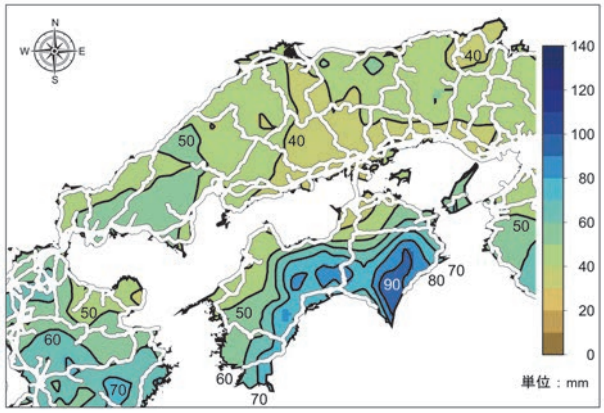


図-11 半減期を1.5時間とした場合の5年確率確率実効雨量マップ（中国・四国地方）．

させた場合の確率実効雨量を確認できる．当然のことであるが，半減期の値を大きくすると，確率実効雨量の値が大きくなることが確認できる．

次に，**図-3a)**の拡大図（**図-6** から**図-12**）について説明する．北海道地方は南側の確率実効雨量が相対的に多く，特に苫小牧市西側から室蘭市東側が多い結果となった（**図-6**）．東北地方は岩手県太平洋側，福島県太平洋側，山形盆地の確率実効雨量が相対的に多い結果となった（**図-7**）．他の地方と比較すると，東北地方は最大確率実効雨量と最小確率実効雨量の差が小さい結果となった．関東・東海地方は，伊豆半島南部太平洋側の確率実効雨量が最も多く，次いで千葉県南部太平洋側と駿河湾周辺が相対的に多い結果となった（**図-8**）．北陸地方は，福井平野，金沢平野，射水平野，砺波平野，富山平野，新川平野で確率実効雨量が相対的に多い結果となったが，他の地方と比較すると，最大確率実効雨量と最小確率実効雨量の差が小さい結果となった（**図-9**）．近畿地方は三重県太平洋側の確率実効雨量が相対的に多く，特に

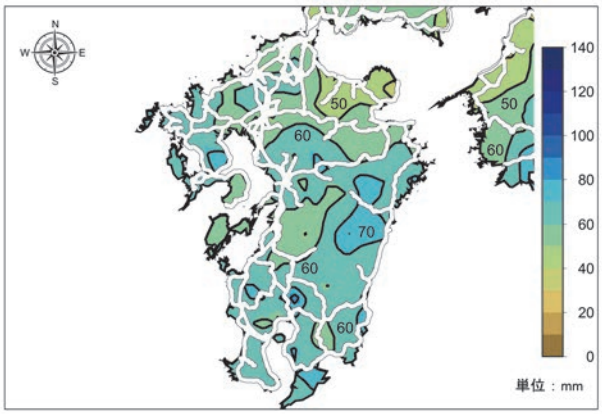


図-12　半減期を 1.5 時間とした場合の 5 年確率確率実効雨量マップ（九州地方）.

「尾鷲の雨」で有名な三重県尾鷲市が日本全国の中でも極めて多い結果となった. 中国･四国地方では, 四国の太平洋側の確率実効雨量が相対的に多く, 特に高知県室戸市が三重県尾鷲市に次いで確率実効雨量が多い結果となった. 九州地方は他の地方と比較して全体的に確率実効雨量が多く, 特に九州南部から九州山地東側が相対的に多い結果となった. 九州山地東側の日向市は九州地方の中でも最も確率実効雨量が多い結果となった.

図-3 から**図-5** に示す確率実効雨量は，地域によって大きく異なっていることが分かる．実効雨量を用いた列車規制値を設定する際には，地形や地質を考慮して過去の被災事例に基づいて経験的に決定することが必須であるが，加えて，各地点で同程度の再現期間の雨量に耐えられるように防災対策の優先順位を決定すること，設定した列車運転規制値（実効雨量）の再現期間を確認することも有効であろう.

5. まとめ

本研究では，篠田(2007)，篠田・宮田(2018)の算定方法に従って，ある再現期間における確率実効雨量を算定した．1976 年～2016 年に観測された地域気象観測所（AMeDAS）の毎時降水量から実効雨量を求めた後，観測年ごとの極値を抽出して，全国の確率実効雨量の算定を実施した．初期設定の必要のない L 積率法を用いて確率分布の母数の推定を行った後，確率実効雨量の変動係数の jackknife 推定値が最小の確率分布を，最適な確率分布とした．確率実効雨量の変動係数の jackknife 推定値が 20%未満の統計データを有する観測所のみを抽出し，再現期間 5 年と 30 年における全国と地方の確率実効雨量マップを作成した.

過去に受けた降雨と比較して極めて稀な雨量が作用した場合に，盛土や斜面が崩壊しやすくなる．この「極めて稀」な状態を定量的に評価するために，再現期間を考慮した確率実効雨量が盛土や斜面崩壊の良い指標となる.

算定された確率実効雨量マップから，確率実効雨量には大きな地域特性があることを明らかにした．特に，東海地方，近畿地方，四国地方，九州地方は全国的に実効雨量の多い地域が存在するため，「極めて稀」な実効雨量が他の地域と比較して大きくなる．列車運転規制値を設定する際には，地形や地質を考慮して過去の被災事例に基づいて経験的に列車運転規制値を決定することが重要であるが，加えて，設定した列車運転規制値（実効雨量）の再現期間を確認することも有効であろう.

謝辞：本研究を進めるにあたり，国土交通省砂防部保全課の土砂災害統計データ，気象庁の AMeDAS データ，国土交通省国土数値情報の鉄道路線データを使用しました．また，（公財）鉄道総合技術研究所　防災技術研究部　地盤防災研究室　渡邉諭室長に貴重なご意見をいただきました．なお，本研究は JSPS 科研費 JP20K05057 の助成を受けたものです．ここに記して謝意を表します.

REFERENCES

1) 内閣府：令和 2 年度防災白書，2020．[Cabinet Office, White Paper on Disaster Management 2020, 2020.]
2) 国土交通省砂防部：令和二年の土砂災害，2020，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2dosha-saitop.html．[Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Sabo (Erosion and Sediment Control) Department: Landslide disasters in 2020, 2020]
3) 小山内信智，冨田陽子，秋山一弥，松下智祥：がけ崩れの実態，国土技術政策総合研究所資料，No. 530, 2009．[Osanai, N., Tomita, Y., Akiyama, K. and Matsushida, T.: Reality of cliff failure disaster, *Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management*, No. 530, 2009.]
4) 池田俊雄，亀田弘行，岡田勝也，片寄紀雄，浜田達幸：降雨に対する地盤と土木構造物の防災診断，山海堂，1995．[Ikeda, T., Kameda, H., Okada, K., Katayose, N. and Hamada, T.: Disaster prevention diagnosis of ground and civil engineering structures against rainfall, Sankaido, 1995.]
5) 渡邉諭：降雨時運転規制の変遷，RRR，Vol.78，No.6，2021．[Watanabe, S.: Restriction of train operation under rainfall, RRR, Vol. 78, No. 6, 2021.]
6) 鉄道院：保線従事員心得（通達 478 号），1909．[Railway Bureau: Instruction to maintenance engineer, No. 478, 1909.]
7) 鉄道院：暴風雨雪警戒心得（通達 140 号），1914．[Railway Bureau: Vigilance against storm, rainfall and snow, No. 140, 1914.]
8) 日本国有鉄道施設局・運転局：降雨に対する運転規制基準作成要領，1972．[Facilities Administration and Operation Bureau of Japanese National Railways: Guideline for preparing operating regulation criteria for rainfall,

1972.]
9) 島村誠：列車運転規制のための合理的な雨量指標について，砂防学会誌，Vol. 49，No. 1，pp.9-11，1996. [Shimamura, M.: Reasonable rainfall indicator for train operating restriction, *Academic Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp.9-11, 1996.]
10) 東日本旅客鉄道：降雨災害との関連性がよい雨量指標「実効雨量」の導入について，https://www.jreast.co.jp/press/2008/20080601.pdf（2022年4月4日アクセス），2008．[East Japan Railway Company: Introduction of "effective rainfall," a rainfall indicator that is better related to rainfall disasters, https://www.jreast.co.jp/press/2008/20080601.pdf (accessed on April 4, 2022), 2008.]
11) 鈴木修，山村啓一，島村誠：実効雨量指標を用いた降雨時運転規制に関する研究，*JR EAST Technical Review*，No. 21，pp.42-49，2007．[Suzuki, O., Yamamura, K. and Shimamura, M.: Research on operating regulations during rainfall using effective rainfall index, *JR EAST Technical Review*, No. 21, pp.42-49, 2007.]
12) 東海旅客鉄道：在来線の新しい降雨運転規制の導入について，https://jr-central.co.jp/news/release/nws002925.html（2022 年 4 月 4 日アクセス），2020．[Central Japan Railway Company: Introduction of new rainfall operation regulations for conventional lines, https://jr-central.co.jp/news/release/nws 002925.html (accessed on April 4, 2022), 2020.]
13) 林宏樹，浅野嘉文，大木基裕，舟橋秀麿：降雨時の新たな運転規制，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.1，No.1，pp.402-407，2022．[Hayashi, H., Asano, Y., Ohki, M. and Funahashi, H.: New train operation controls on heavy rain, *Journal of Infrastructure Maintenance Research and Development*, Vol.1, No.1, pp.402-407, 2022.]
14) 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.16-26，1981．[Suzuki, M. and Kobashi, S.: The critical rainfall for the disasters caused by slope failures, *Academic Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 121, pp.16-26, 1981.]
15) 篠田昌弘：AMeDAS データを用いた確率降雨量マップ，土木学会論文集 B，Vol. 63，No. 3，pp.195-205，2007．[Shinoda, M.: Probabilistic precipitation map based on AMeDAS data, *Journal of Japan Society of Civl Engineers B*, Vol. 63, No. 3, pp.195-205, 2007.]
16) 篠田昌弘，宮田喜壽：確率的方法と経験的方法による観測データの蓄積に伴う確率降水量の変化，土木学会論文集 B1，Vol. 74，No. 5，pp.I_211-I_216，2018．[Shinoda, M and Miyata, Y.: Probabilistic precipitation difference with accumulated observation data by probabilistic and experimental methods, *Journal of Japan Society of Civl Engineers B1*, Vol. 74, No. 5, pp.I_211-I_216, 2018.]
17) 宝馨，高棹琢馬：水文頻度解析における確率分布モデルの評価基準，土木学会論文集，No.393/II-9，pp.151-160，1988．[Takara, K. and Takasao, T.: Criteria for evaluating probability distribution models in hydrologic frequency analysis, *Journal of Japan Society of Civl Engineers* , Vol. 393/II-9, pp.151-160, 1988.]
18) 水文・水資源学会：水文・水資源ハンドブック，1997．[Japan Society of Hydrology Water Resources: *Handbook of Hydrology Water Resources*, 1997.]
19) Coles, S.: An Introduction to Sttistical Modeling of Extreme Values, London, Springer, 2004.
20) Hosking, J. R. M.: L-Moments; analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. Journal of Royal Statistics Society, B, 52, 2, pp.105-124, 1990.
21) Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. and Wood, E. F.: Estimation of the generalized extreme value distribution by the method of probability weighted moments. Technometrics, Vol. 27, No. 3, pp.251-261, 1985.
22) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説:土構造物，丸善，2007．[Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary (Earth structures), Maruzen, 2007.]
23) 地震調査研究推進本部，全国地震動予測地図2020年版，地震動予測地図の手引編・解説編，2021．[The Headquarters for Earthquake Research Promotion: Manual and commentary of national seismic hazard maps for Japan (2020), 2021]

(Received March 31, 2023)
(Accepted June 9, 2023)

PROBABLISTIC EFFECTIVE RAINFALL MAP USEFUL FOR SETTING TRAIN OPERATION CONTROL

Masahiro SHINODA

This study focused on rainfall, which is a typical action of soil structures, and calculated the probabilistic effective rainfall using precipitation data from a regional meteorological observatory. In order to ensure that the accumulation of precipitation data in the future does not significantly affect the current probabilistic effective rainfall, a goodness-of-fit evaluation of the probability distribution was conducted, and only statistical data that satisfied the goodness-of-fit evaluation criteria were used to calculate the probabilistic effective rainfall. A national and regional probabilistic effective rainfall map was created using the statistical methodologies employed. The probabilistic effective rainfall map clarified that the regional characteristics should be considered when the effective rainfall is used as the train operation regulation value.