

## レーダ雨量に基づく土砂災害の発生評価

—都市域を対象に, 神奈川県の場合—

三 隅 良 平\*・真 木 雅 之\*・岩 波 越\*

### 1. はじめに

降雨は土砂災害を発生させる要因の1つであり, 雨量は土砂災害の発生可能性を評価する指標として広く用いられている. これまで考案された最も簡単な雨量による土砂災害発生指標の1つは実効雨量と呼ばれるもので, 雨量を以下のように重み付き積算するものである (矢野 1990).

$$R_w = \sum_i 0.5^{i/T} R_i \quad (1)$$

ここで  $R_w$  が実効雨量で, 土壌中の水分量を近似的に表現する.  $R_i$  は  $i$  時間前の雨量を表し, 時間が経つほど係数  $0.5^{i/T}$  が小さくなることによって, 流出や蒸発散によって土壌から水が失われる影響を考慮している.  $T$  は半減期と呼ばれる定数で,  $T=1.5$  時間と  $T=72$  時間の実効雨量を組み合わせた危険度評価が広く用いられている (寺田・中谷 2001 など). 一方, より精緻な手法としてタンクモデルを用いた危険度指標があり (鈴木ほか 1979; 牧原・平沢 1993), 土砂災害警戒情報の基準の1つである「土壌雨量指数」の計算にも用いられている (岡田 2002; 立原 2006).

このような雨量による土砂災害の発生評価手法はリアルタイム性が高く, 広域に適用できる利点がある反面, 雨のみを入力情報として用いているため, 実際の土砂災害発生域よりも広い範囲を危険域として判定することになる. なぜならば, 斜面崩壊が起こるかどうかは雨量のみならず, 斜面の勾配や土層の厚さ, 土のせん断強度等にも依存するからである. 地形や土の強

度の効果を取り込むため, 流出解析と斜面安定解析を組み合わせた斜面崩壊予測手法も考案されているが (沖村・市川 1985; 水田・瀬尾 2001; 三隅ほか 2004), 土層の厚さや土のせん断強度に関するパラメータを広域で得るのは難しく, 適用範囲はごく限定的となる.

広域にも適用可能で, かつ雨量以外の条件を組み込んだ土砂災害危険度指標があれば, その実用性は高いと考えられる. 土砂災害の発生と, 降雨や地形・地質に関するパラメータの統計的な関係を利用した土砂災害発生予測モデルがこれまでも作られているが (Gritzner *et al.* 2001; 川越ほか 2008 など), その多くは自然斜面の崩壊を対象としており, 都市域に発生する土砂災害を対象としたものはほとんどない. 都市域では軽微な斜面崩壊でも被害が生じやすく, 災害予測の観点からは被害を受ける人工構造物の存在も考慮する必要がある. 本研究では神奈川県を対象に, 都市域で発生する土砂災害の簡便な評価手法を提案する. 具体的には過去の災害履歴に基づき, レーダのメッシュ (以下, レーダ格子と呼ぶ) の中で土砂災害が発生する確率を, 雨量のみならず, 格子内における人工構造物の存在や, 地形勾配を考慮して評価する手法を提案する. このような気象レーダを用いた広域的な土砂災害の発生確率評価は, 広域に防災活動を行う担当者に役に立つと考えられる. 提案した評価手法を X バンドマルチパラメータレーダによる観測事例に適用し, その効果を検証する.

### 2. 土砂災害発生確率の評価

本研究で発生評価の対象とするのは豪雨をきっかけとした表層崩壊に伴う「土砂災害」である. 斜面崩壊であっても災害を起こさないものや, 長期間の降雨浸透が影響する深層崩壊, 崩壊地点と被災箇所が離れて

\* 防災科学技術研究所.

—2010年11月9日受領—

—2011年5月12日受理—

いる土石流等は対象としない。

1 個のレーダ格子内に土砂災害が起こるかどうかが決める因子として「雨量」「斜面の崩れやすさ」「人工構造物の存在」の3つを考える。すなわち格子内の雨量が一定値を超え、かつ崩れる斜面が存在し、加えて人工構造物が斜面の近くに存在するとき、はじめて土砂災害が発生すると考える（人工構造物が無くても人間が斜面の近くにいれば土砂災害が起こり得るが、ここではそのような場合を除外し、人工構造物が外力を受ける都市域での土砂災害を対象にする）。この考えに基づき、レーダ格子内で土砂災害が発生する確率 ( $P$ ) を以下の式で表す。

$$P = P_{rain} f_{slp} \rho_{bld} \quad (2)$$

ここで  $P_{rain}$  は場所に依存しない雨量のみの関数で、 $f_{slp} = \rho_{bld} = 1$  のときに土砂災害が起こる確率を表す。また  $f_{slp}$  はレーダ格子内において斜面の崩れ易さを表す関数、 $\rho_{bld}$  はレーダ格子内に人工構造物が占める面積の割合である。

式 (2) の  $P_{rain}$  は  $f_{slp} = \rho_{bld} = 1$  を満たすレーダ格子から直接求めることが理想的であるが、そのような格子を実際に検出することは難しい。そこでまず、対象領域すべてのレーダ格子に対する、平均的な土砂災害発生確率  $P'_{rain}$  を考える。 $P_{rain}$  を場所に依存しない雨量のみの関数とすると、 $P'_{rain}$  は以下のように表せる。

$$P'_{rain} = P_{rain} \overline{f_{slp} \rho_{bld}} \quad (3)$$

式 (3) のバーは対象領域を平均した値を示している。 $P'_{rain}$  は半減期72時間実効雨量 ( $R_{72}$ ) と半減期1.5時間実効雨量 ( $R_{1.5}$ ) の1次関数で表されると仮定する。

$$P'_{rain} = \alpha R_{72} + \beta R_{1.5} + \gamma \quad (4)$$

$R_{72}$  と  $R_{1.5}$  を組み合わせた危険度評価は、土砂災害発生危険基準線 (CL ライン; 寺田・中谷 2001 など) で広く用いられており、式 (4) はそれを模したものである。土砂災害の発生履歴から  $P'_{rain}$  が得られれば、係数  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  を統計的に求めることができ、最終的に  $P_{rain}$  が得られる。

式 (2) の  $f_{slp}$  は、レーダ格子内における斜面の崩れやすさを表す関数である。一般にレーダ格子のサイズは数百 m 以上であるのに対し、降雨で崩壊する斜面のサイズは数 m 規模である。従ってレーダ格子内

で斜面が崩れるかどうかは、格子内に存在する斜面の安定性ととも、斜面の数も影響する。 $f_{slp}$  を正確に求めるには、個々の斜面の安定性を調査する必要があるが、広域においてそれを実行することは極めて困難であるため、本研究では数値地図から得られる情報を利用し、レーダ格子を平均した地形の勾配 ( $\theta$ ) を用いて  $f_{slp}$  を以下のようにパラメタライズする。

$$f_{slp} = \delta (\sin \theta)^\epsilon \quad (5)$$

ここで  $\delta$  と  $\epsilon$  は定数である。式 (5) では、レーダ格子を平均した地形勾配が大きければ大きいほど、格子内で斜面崩壊が起こりやすいと仮定されている。なお関数形として  $\sin \theta$  を用いる理由は、土塊が斜面に沿って滑ろうとする力 (土塊に働く重力の斜面に沿う成分) が  $\theta$  の正弦に比例するからである。実際にはレーダ格子を平均した勾配が同じでも、より細かい起伏に富んだ地形もあればそうでない場合もあり、また崩壊しやすい土砂を多く含むこともあればそうでない場合もあるため、 $f_{slp}$  は  $\sin \theta$  に単純には比例しない。その影響を指数  $\epsilon$  で調整する。後述するように、レーダ格子を平均した勾配が小さい時には明らかに土砂災害が起こりにくい傾向があり、式 (5) のような簡単な式でも斜面崩壊の起こりやすさをある程度表現できると考えられる。一方、レーダ格子内に人工構造物が占める割合  $\rho_{bld}$  は、国土数値情報等から直接求めることができる。

以上、式 (2) ~ (5) をまとめて、土砂災害発生確率  $P$  を以下のように表す。

$$P = \xi (\alpha R_{72} + \beta R_{1.5} + \gamma) (\sin \theta)^\epsilon \rho_{bld} \quad (6)$$

ただし  $\xi = \delta / \overline{f_{slp} \rho_{bld}}$  である。

### 3. データ

#### 3.1 解析範囲と格子

本研究の対象領域を神奈川県とする。神奈川県は関東南部に位置しており、毎年何件かの土砂災害が報告されている。神奈川県海老名市本郷 (35°24'N, 139°23'E) には防災科学技術研究所の X バンドマルチパラメータレーダ (EBN レーダ) が設置されており (第1図 a), 2004年以降の暖候期には 500 m メッシュ, 5 分間隔 (2004年は 1 分間隔) でデータが取り続けられている。本研究では EBN レーダを中心とした 500 m 間隔の格子を危険度評価を行う単位とする。

### 3.2 土砂災害に関するデータ

神奈川県では、県内で発生した土砂災害を「災害報告綴り」として紙媒体にとりまとめている。この資料には、土砂災害の発生日時、場所、崩壊の状況、被害の状況などが記録されている。1988年4月～2003年3月までの資料を神奈川県から借用し、土砂災害発生箇所の緯度経度を地図から読み取ってデータ化した。なお資料に記載されているのは市町村等を通じて神奈川県に通報のあった「土砂災害」であって、県内で発生した「斜面崩壊」がすべて記載されているわけではない。資料に記載されている土砂災害には様々な規模のものがあるが、本研究ではその規模にかかわらず、発生・非発生のみを解析対象とする。

### 3.3 雨量データ

実効雨量 ( $R_{72}$ ,  $R_{1.5}$ ) と土砂災害の発生を統計的に調べるため、雨量データとして気象庁解析雨量を用いる。このデータは1988年～2001年3月の期間は約5 km 格子、それ以降2003年3月までは約2.5 km 格子で1時間間隔である。データをニアレストネイバー法(最も近い座標の値を採用する内挿法)でEBNレーダ格子に変換し、1988年4月～2003年3月の1時間間隔の雨量データを作成した。また5章に示す2004年10月20日の事例については、EBNレーダで観測された雨量データを用いる。EBNレーダは偏波間位相差変化率 ( $K_{DP}$ ) とレーダ反射因子 ( $Z$ ) を組み合わせて降雨強度を計算する (Park *et al.* 2005)。仰角 $2.1^\circ$  (ビームが地形の影響で届かない場所は仰角 $4.5^\circ$ ) のPPIスキャンから計算された1分間隔の降雨強度を、Cressman (1959) の重み関数を用いて加重平均してレーダ格子に内挿した。重み関数に用いる影響半径を1000 m とした。

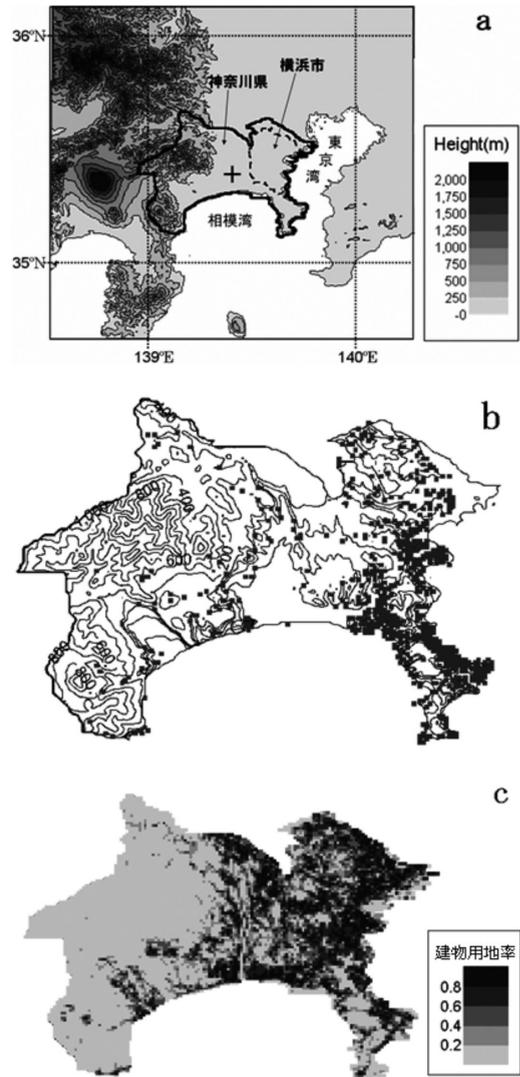
### 3.4 地形、土地利用に関するデータ

レーダ格子に人工構造物が占める割合  $\rho_{bid}$  については、国土数値情報「土地利用細分メッシュデータ」(約100 m メッシュ) に基づき、建物用地が占める割合 (以後、「建物用地率」と呼ぶ) を用いて計算した。また地形の勾配については、「数値地図 50 m メッシュ標高データ」を用いて東西方向および南北方向の勾配を計算し、その大きな方の値をレーダ格子内で平均した。

## 4. 土砂災害発生の特徴

### 4.1 発生頻度の特徴

第1図bは1988年4月～2003年3月に神奈川県で



第1図 (a) 等高線と神奈川県および横浜市の位置、+はEBNレーダの位置を表す。(b) 神奈川県の等高線 (100 m 以下は20 m 間隔, 200 m 以上は200 m 間隔) および1988年4月～2002年3月における土砂災害の発生箇所の分布 (黒い点)。(c) 神奈川県における「建物用地率」の分布。

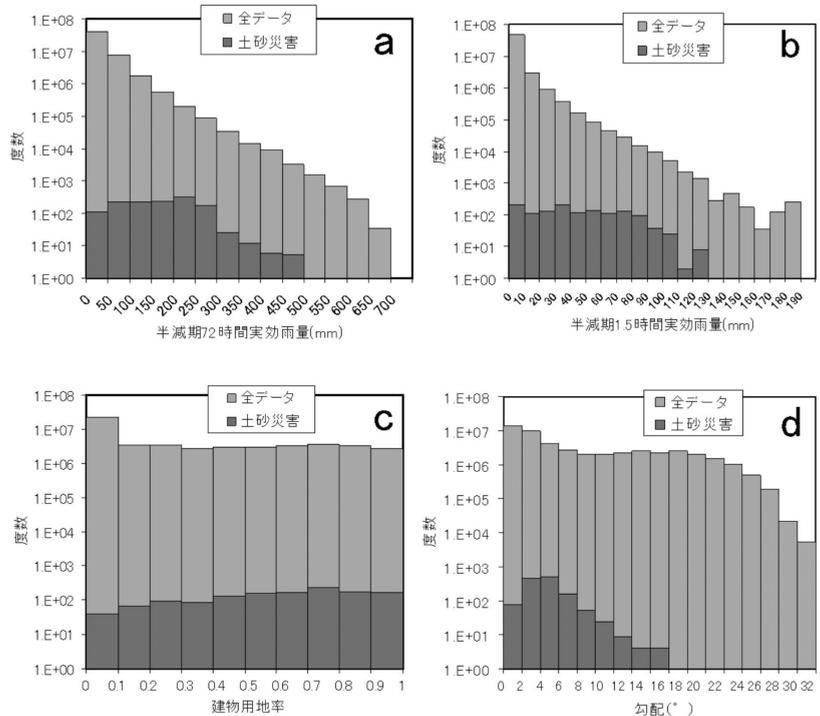
発生した土砂災害の発生箇所を示している。この期間に全部で1,315回の土砂災害が発生した。土砂災害の発生回数には地域的な偏りがあり、都市が集中する東部の丘陵地帯に多い。一方、西部には標高の高い山地が存在するにもかかわらず、土砂災害の発生はあまり

多くない。第1図cに示す建物用地率の分布と比較すると、土砂災害の発生回数が多い神奈川県東部では建物用地率が高く、発生が少ない西部では建物用地率が低いことがわかる。ただし標高の変化の少ない相模湾に沿った平野部では、建物用地率が高くても土砂災害はほとんど発生していない。

次に土砂災害の発生と、実効雨量の関係を検討する。各レーダ格子について式(1)に基づき、気象庁解析雨量から $R_{72}$ および $R_{1.5}$ を計算した。厳密には土砂災害が発生した時刻の実効雨量を用いるべきであるが、「災害報告綴り」には土砂災害の発生時刻が記録されていないデータがあり、ここでは土砂災害発生日の最大値のデータを用い

て検討する。神奈川県のレーダ格子の数(9,393個)と1988年4月1日~2003年3月31日の日数(5,478日)の積51,454,854個が全体のサンプル数となる。第2図a, bに $R_{72}$ および $R_{1.5}$ のヒストグラムを示す。いずれの場合も実効雨量が大きくなるほど、その頻度は減じていく。一方土砂災害の発生回数は、実効雨量の値が大きくなって必ずしも減じない。このことは、実効雨量が大きくなるほど土砂災害の発生率が大きくなっていくことを意味する。ヒストグラムの各階級について、土砂災害の発生回数をデータ数で割った値を第3図a, bに示す。 $R_{72}$ ,  $R_{1.5}$ ともに実効雨量の増加とともに値が増加していく。ただし $R_{72}$ では300mm程度、 $R_{1.5}$ では90mm前後でほぼ値が一定となる。もう1つ注目すべきことは、第3図a, bの縦軸の値が最大でも $10^{-3}$ のオーダーであることである。このことは、大きな実効雨量が観測されても、土砂災害が発生する格子の数は1000個の中の数個に過ぎないことを意味している。

第2図c, dおよび第3図c, dはレーダ格子の建

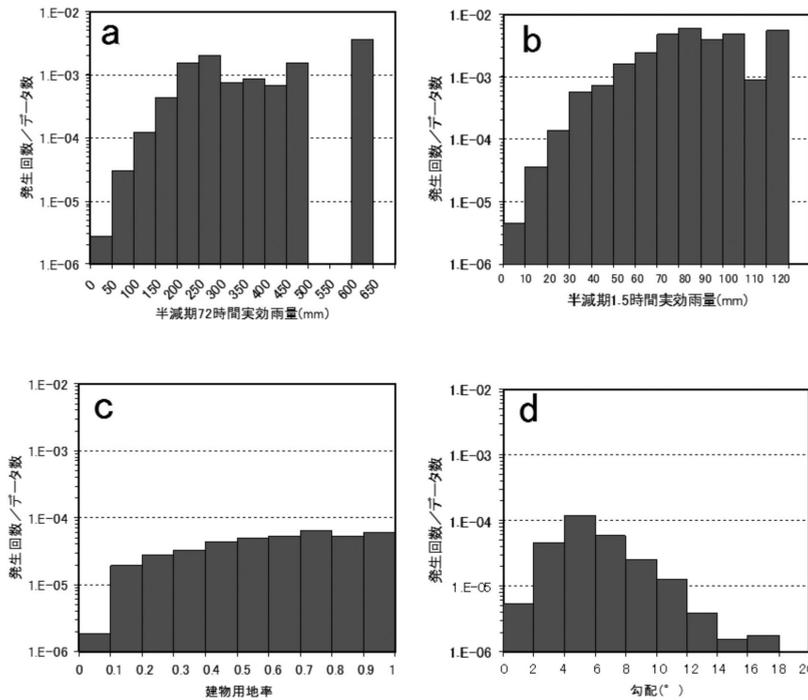


第2図 1988年4月1日~2003年3月31日における (a) 半減期72時間実効雨量(日最大値), (b) 半減期1.5時間実効雨量(日最大値), (c) 建物用地率, (d) 土地の勾配のヒストグラム。度数は格子数×日数であり、そのうち土砂災害が発生した場合を濃い色で示している。

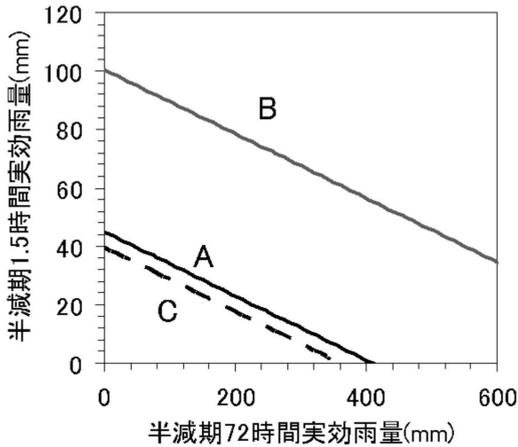
物用地率および勾配について同様のヒストグラムを示す。建物用地率は、値が0.1以下のとき土砂災害の発生率が小さく、それより大きな値では階級値の増加とともに発生率が緩やかに増加する傾向がある。レーダ格子の勾配は、 $4^{\circ} \sim 6^{\circ}$ の範囲で最も土砂災害の発生頻度が大きく、勾配がそれより小さくても大きすぎても発生頻度が小さくなる。ただしレーダの格子は500mメッシュであるのに対し、実際に崩壊する斜面の空間スケールは数m程度であり、ここで示す勾配は実際に崩壊する斜面の勾配ではないことに注意を要する。勾配が小さい格子はそもそも土砂災害を起こす斜面が少なく、また勾配が急な斜面は一般に土層が薄いことや(飯田・田中1997)、崩壊が起こったとしても被害を受ける人工構造物が少ないことが要因と考えられる。

#### 4.2 土砂災害の発生確率

次に神奈川県土砂災害について式(6)の係数 $\alpha \sim \xi$ を求める。最初に $R_{72}$ を50mm間隔、 $R_{1.5}$ を10mm間隔の階級に分け、それぞれの中央値を階級値と



第3図 第2図において土砂災害発生時の度数を全データの度数で割ったもの。



第4図 特定の土砂災害発生確率における  $R_{72}$  と  $R_{1.5}$  の関係。Aは式(4)で  $P'_{rain} = 1 \times 10^{-3}$  のとき、BとCはそれぞれ式(6)で  $P = 1 \times 10^{-3}$ 、 $\theta = 2^\circ$ 、 $\rho_{bid} = 0.1$  のときおよび  $P = 1 \times 10^{-3}$ 、 $\theta = 5^\circ$ 、 $\rho_{bid} = 1.0$  のときを表す。

した。次に1988年4月～2003年3月における土砂災害の発生履歴から、「ある  $R_{72}$ 、 $R_{1.5}$  の階級値の組み合わせに対して土砂災害の起こった格子数」を「同一条件

にあった全格子数」で割ることにより、土砂災害発生確率  $P'_{rain}$  を計算した。その結果から重回帰分析により式(4)の係数を求めたところ、 $\alpha = 1.3 \times 10^{-5}$ 、 $\beta = 1.2 \times 10^{-4}$ 、 $\gamma = -4.4 \times 10^{-3}$  が得られ、重相関係数0.57、各係数は信頼度95%の水準で有意であった。

次に  $\epsilon$  と  $\zeta$  の値を求めるため、式(6)を以下のように変形する。

$$\frac{P}{P'_{rain} \rho_{bid}} = \zeta (\sin \theta)^\epsilon \tag{7}$$

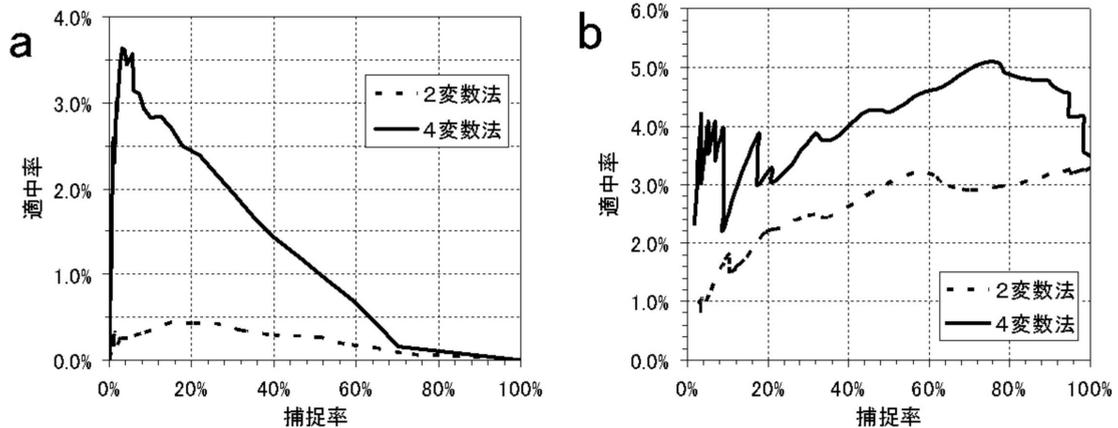
まず  $\sin \theta$  を0.005間隔で階級に区分し、各階級値における土砂災害発生確率  $P$  を、その階級における  $P'_{rain}$  および  $\rho_{bid}$  の平均値

で割ることにより、式(7)の左辺の値を計算した。次に  $\sin \theta$  の階級値と左辺との関係をプロットし、最小2乗法により係数  $\zeta$  と指数  $\epsilon$  の値を求めた。得られた値は  $\zeta = 25.0$ 、 $\epsilon = 0.88$  となった。

以下の解析では、雨量のみによる土砂災害発生評価式(4)と、本研究で提案された評価式(6)を比較しながら議論を進める。ここで式(4)と式(6)の違いは次のように解釈される。例えば  $P'_{rain} = 1 \times 10^{-3}$  としたとき、式(4)は以下のように変形される。

$$R_{1.5} = -0.11R_{72} + 45 \tag{8}$$

式(8)は第4図のAのような直線として描かれ、 $R_{1.5}$  がこの直線より上にあるとき  $P'_{rain} > 1 \times 10^{-3}$  となる。つまり式(8)は一種の土砂災害発生危険基準線(CLライン)と見なすことができる。一方式(6)は  $f_{slp}$ 、 $\rho_{bid}$  の値によって縦軸の切片が可変となる。例えば斜面勾配が小さく、建物用地がほとんど無い状況を想定し、 $P = 1 \times 10^{-3}$ 、 $\theta = 2^\circ$ 、 $\rho_{bid} = 0.1$  と置いたとき、式(6)は第4図の直線Bのようになり、大きな  $R_{72}$  や  $R_{1.5}$  に対しても  $P < 1 \times 10^{-3}$  である。一方  $P = 1 \times 10^{-3}$ 、 $\theta = 5^\circ$ 、 $\rho_{bid} = 1.0$  とおくと式(6)は直線Cのようになり、比較的小さな  $R_{72}$  や  $R_{1.5}$  に対し



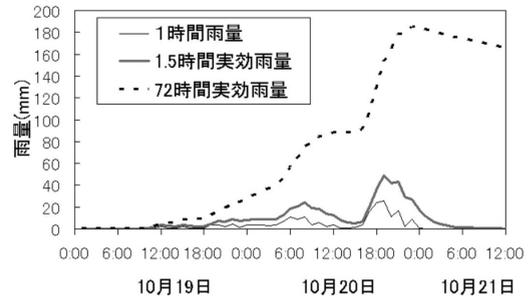
第5図 2変数法と4変数法による、土砂災害発生格子の捕捉率に対する適中率の変化。(a) 1988年4月～2003年3月の神奈川県に適用した場合、(b) 2004年10月20日の横浜市の事例に適用した場合。

て  $P > 1 \times 10^{-3}$  となる。すなわち式 (6) はレーダ格子の勾配および建物用地率に応じて、別々の CL ラインを設定することを意味する。

以下、式 (4) を「2変数法」、式 (6) を「4変数法」と呼び、それぞれの式によりどの程度土砂災害発生の評価ができるかを検討する。ここで検証には、予測の空振りの少なさを指標である適中率 (= 適中格子数 ÷ 予測格子数)、および見逃しの少なさを指標である捕捉率 (= 適中格子数 ÷ 全発生格子数) の2つを用いる。具体的には、2変数法、4変数法において、それぞれに土砂災害発生確率を変えて、同じ数の土砂災害を捕捉できるよう危険水準を設定した場合の適中率 (空振りの少なさを比較する。捕捉率は土砂災害発生確率により変化するため、様々な捕捉率について適中率を比較して精度を検証する。第5図aは係数を求めるのに用いたデータ (1988年4月～2003年3月) で検証した結果である。捕捉率をどのように設定しても、4変数法の方が2変数法よりも適中率が高い。例えば捕捉率60%のとき、2変数法、4変数法の適中率はそれぞれ0.18%、0.69%である。

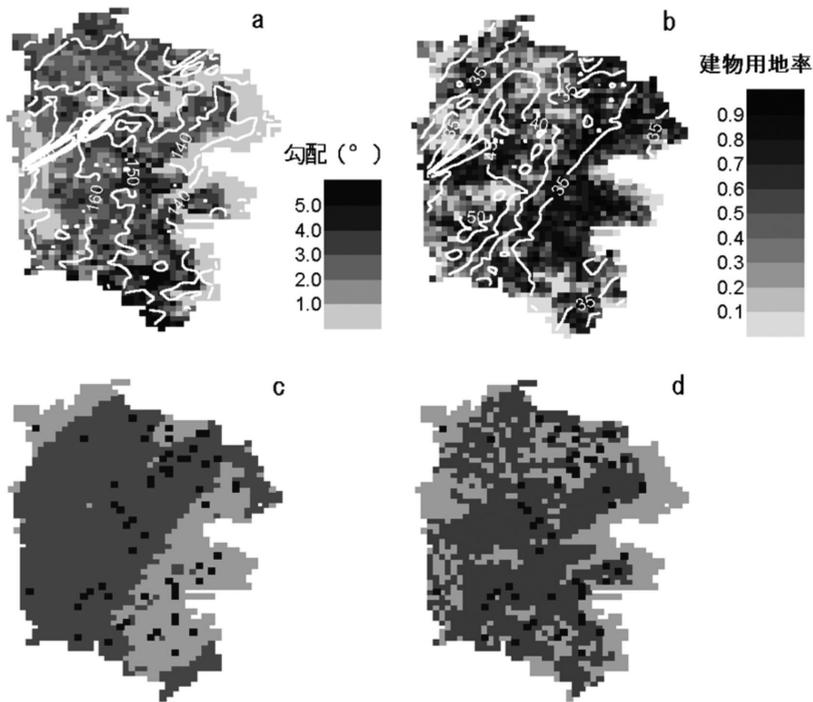
##### 5. マルチパラメータレーダを用いた発生評価

次に2変数法、4変数法による土砂災害発生確率を、EBNレーダによる雨量を用いて検証する。2004年10月19日から20日にかけて台風23号が関東地方を通過し、神奈川県に大量の雨をもたらした。第6図は横浜地方気象台で観測された1時間雨量および実効雨量の変動を示している。降雨は10月19日10:00に始ま



第6図 横浜地方気象台における2004年10月19日00:00～21日12:00の1時間雨量、半減期1.5時間および72時間実効雨量の変化。

り、20日19:00には1時間雨量が26mmに達した。同じ時刻に  $R_{1.5}$  の最大値49.1mmが記録されている。一方  $R_{72}$  は20日23:00に最大値185mmに達した。この台風の通過によって神奈川県内に多くの土砂災害が発生したが、県内すべての発生箇所を同定するのは困難であったため、検証エリアを横浜市内に限定し、「横浜市の災害」(横浜市2005)から土砂災害発生箇所を同定した。この雨で発生した横浜市内の土砂災害発生件数は72件であり、レーダ格子での個数は69個である。なお横浜市はレーダサイトから約20km離れているが、Xバンドマルチパラメータレーダを用いた雨量推定は、レーダサイトからの距離が30km以内であれば現業で用いられているCバンドレーダよりも精度が高いことが知られており(高堀ほか2009)、充分に利用可能である。



第7図 2004年10月20日の横浜市における (a) レーダ格子の勾配 (陰影) と半減期72時間実効雨量の最大値 (等値線), (b) 建物用地率 (陰影) と半減期1.5時間実効雨量の最大値 (等値線), (c) 2変数法に基づく土砂災害発生確率 ( $1 \times 10^{-3}$ 以上を濃い陰影で示す) と実際に発生した格子 (黒塗り), (d) 4変数法に基づく土砂災害発生確率と実際に発生した格子 (陰影, 黒塗りは (c) と同様)。

第7図 a, b は EBN レーダで観測された実効雨量の最大値の分布を示している。  $R_{72}$ ,  $R_{1.5}$ とも横浜市西部で大きな値を示している。第7図 c, d はそれぞれ2変数法, 4変数法を用いたときの土砂災害発生確率の最大値の分布を示している。2変数法では実効雨量の値が大きい横浜市西部で土砂災害発生確率が大きくなっている。ところが土砂災害は必ずしも実効雨量の値が大きい場所に起こっておらず、むしろ横浜市東部に多く発生している。4変数法では、発生確率の大きな場所が、建物用地率の大きな横浜市東部にも広がり、土砂災害発生箇所をうまく捕捉している。第5図 b に示すように、どのように捕捉率を設定しても4変数法の方が2変数法よりも適中率が大きくなる。

雨量に基づく土砂災害危険度指標には様々なものがあり、第7図 c に示したものは異なる結果が得られることもあり得るが、雨量のみを指標として用いている限りにおいては、仮にどのような手法を用いても、

大きな雨量の観測された場所より危険度が大きくとらざるを得ないと考えられる。本事例のように実効雨量の大きな場所以外に土砂災害が発生するような事例では、4変数法の方が適中率は高いと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では都市域における土砂災害の発生確率をリアルタイムで評価する簡便な式を提案した。提案された式にはパラメータとして半減期72時間実効雨量, 半減期1.5時間実効雨量, 人工構造物の存在, およびレーダ格子の勾配が考慮されている。神奈川県内の15年間の土砂災害発生履歴に基づいて係数を決め、2004年台風23号の事例で検証を行ったところ、実効雨量のみに基づく方法よりも適中率が上昇する結果が得られた。このような統計的な土

砂災害発生評価は、物理的な危険度評価が困難な都市域において特に有効であるとともに、広域の防災活動を行う担当者がリアルタイムで土砂災害危険域の分布を知る上で有益であると考えられる。

## 謝辞

神奈川県土整備部の方々には、災害報告綴りを閲覧、コピーさせていただいた。また日本気象協会の石井琢哉氏には、神奈川県の土砂災害データの整理に協力していただいた。匿名の査読者からは適切なコメントをいただき、論文の内容を向上させることができた。以上記して感謝いたします。

## 参考文献

- Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.  
Gritzner, M. L., W. A. Marcus, R. Aspinall and S. G.

- Custer, 2001 : Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attribute, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, 37, 149-165.
- 飯田智之, 田中耕平, 1997 : 簡易貫入試験からみた土層深と地形の関係. *地形*, 18, 61-78.
- 川越清樹, 風間 聡, 沢本正樹, 2008 : 数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築. *自然災害科学*, 27, 69-83.
- 牧原康隆, 平沢正信, 1993 : 斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度. *研究時報*, 45, 35-70.
- 三隅良平, 小口 高, 真木雅之, 岩波 越, 2004 : 分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険域のリアルタイム予測. *自然災害科学*, 23, 415-432.
- 水田敏彦, 瀬尾和夫, 2001 : 数値標高モデルに基づく豪雨による斜面崩壊危険度予測—長崎市を事例対象として—. *自然災害科学*, 19, 477-491.
- 岡田憲治, 2002 : 土壌雨量指数. *測候時報*, 69, 67-100.
- 沖村 孝, 市川龍平, 1985 : 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法. *土木学会論文集*, (358), 69-75.
- Park, S. G., M. Maki, K. Iwanami, V. N. Bringi and V. Chandrasekar, 2005 : Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II : Evaluation and application. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 22, 1633-1655.
- 鈴木雅一, 福嶋義宏, 武居有恒, 小橋澄治, 1979 : 土砂災害発生の危険雨量. *新砂防*, 31(3), 1-7.
- 立原秀一, 2006 : 土砂災害警戒情報の発表開始について. *天気*, 53, 43-45.
- 高堀 章, 前坂 剛, 三隅良平, 2009 : Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定—複数仰角PPIデータを用いた改善効果について—. *防災科学技術研究所研究報告*, (73), 41-47.
- 寺田秀樹, 中谷洋明, 2001 : 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*, (5), 1-58.
- 矢野勝太郎, 1990 : 前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究. *新砂防*, 43(4), 3-13.
- 横浜市総務局危機管理対策室, 2005 : 平成16年横浜市の災害, 107pp.

---

Evaluation of Landslide-Disaster Occurrence in Urban Areas  
Based on Radar-Derived Rainfall  
—Case Study in Kanagawa Prefecture—

Ryohei MISUMI\*, Masayuki MAKI\*\* and Koyuru IWANAMI\*\*

\* (Corresponding author) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba 305-0006, Japan.

\*\* National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

(Received 9 November 2010 ; Accepted 12 May 2011)

---