

雲解像モデルを用いた土砂災害予測の試み  
— 2004 年台風 22 号の通過に伴う横浜市の災害事例 —

三隅良平\*・清水慎吾\*

Forecast Experiment of Landslides Using a Cloud-Resolving Model

— Case Study of Disasters in Yokohama City Caused by Typhoon 0422 —

Ryohei MISUMI and Shingo SHIMIZU

\*Storm, Flood and Landslide Research Unit,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
misumi@bosai.go.jp, shimizus@bosai.go.jp

Abstract

Forecast experiment of landslides caused by Typhoon 0422 in Yokohama city is performed by coupling a cloud-resolving model and an estimation model for occurrence of landslide disasters. Results of 11-hour forecast using initial data before the landing of the typhoon agreed well with the observation as for the typhoon track, but forecast of accumulated rainfall was underestimated by 33 %. This decreased the hit rate of landslide forecast by 0.11 from that estimated by the observed rainfall. However, the false alarm ratios were comparable between them.

**Key words** : Quantitative precipitation forecast (QPF), Shallow landslide, Cloud resolving model, Typhoon

1. はじめに

豪雨による土砂災害は突発的に発生するため、しばしば甚大な被害をもたらす。例えば平成 21 年中国・九州北部豪雨の一連の土砂災害では、21 名の死者・行方不明者が生じた。もし事前に土砂災害の発生が予測され、それに基づいて避難行動をとることができるならば、このような被害を軽減されることが考えられる。

十分な先行時間をもって土砂災害を予測する方法の 1 つは、降雨予測と斜面崩壊の予測を組み合わせることである。このような取組みは、主に短時間降水予測と土砂災害警戒基準雨量との組み合わせによって検討されてきた(井良沢ほか, 1994; 井良沢ほか, 1997; 山越ほか, 2001 など)。これらはいずれも予測時間が 1 時間以内の、いわゆる降水ナウキャストを用いたものである。予測の先行時間がより長い降水予測と土砂災害予測を組み合わせれば、より早い段階からの土砂災害予測が可能になると考えられる。しかしながら、このような取り組みはほとんど行われていない。その理由は、数時間先の降水予測は、土砂災害の発生の有無を判断するほどの定量的な精度を

もっていないと考えられているからである。

局地的な豪雨を、数時間前に定量的に予測することは確かに現段階では難しい。しかしより広域に発生する台風に伴う豪雨の場合は、擾乱のサイズが十分に大きいことや、地形による降雨の増幅過程が比較的簡単にモデル化できることから、定量的な降水予測もある程度可能である。三隅(1998)は気象庁全球スペクトルモデルに地形性降雨モデルを組み合わせ、1993 年台風 7 号通過時の 42 時間にわたる降水予測と、それに伴う土砂災害危険域の予測を試みた。予測された雨量は局地的に 50 % 程度過大評価しているものの、降雨の分布は概ね観測と一致し、予測された危険域の中で多くの土砂災害が発生した。坪木・榊原(2006)は気象庁領域スペクトルモデルと雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) を組み合わせ、2004 年台風 23 号に伴う降雨の 30 時間にわたる予測実験を行った。その結果、予測された降水強度の分布は地上雨量計による観測値と高い空間相関をもち(相関係数 0.85 ~ 0.93)、予測された降水強度の平方根平均二乗誤差は概ね 7 mm/h 以下となった。清水ほか(2010)では同

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 水・土砂防災研究ユニット

様の手法で 2004 年台風 22 号に伴う降水予測実験を行い、積算雨量の誤差が 5.8 - 22.2 % の範囲であったとしている。このように、台風に伴う降雨の量的予測はかなりの精度で可能になってきている。しかしながら、その土砂災害予測への適用は未だ十分に検討されていない。

本研究は清水ほか (2010) と同じ事例について、雲解像モデルと土砂災害予測モデルを組み合わせ、横浜市を対象とした土砂災害の発生予測実験を行う。得られた予測結果を実際の土砂災害発生箇所と比較し、土砂災害予測の観点から雲解像モデルに対する要求をとりまとめる。なお本報告において時刻はすべて日本時間である。

## 2. モデルと実験方法

### 2.1 雲解像モデル

雲解像モデル CReSS は名古屋大学で開発された数値モデルで、主に数 km ~ 数百 km の大気現象のシミュレーションに用いられている。非静力学・圧縮系の運動方程式を用いており、予報変数として 3 次元の速度成分、温位偏差、圧力偏差、乱流運動エネルギー、水蒸気・雲水・雨滴・雲氷・雪・霰の混合比を扱っている (Tsuboki and Sakakibara, 2001)。

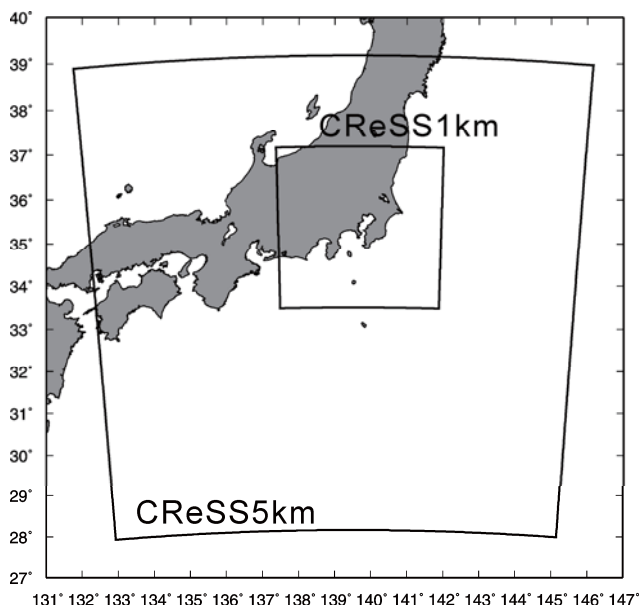


図 1 雲解像モデル CReSS の計算領域 (清水ほか, 2010)

Fig. 1 Numerical domain for CReSS (Shimizu et al., 2010)

雲解像モデルによる降水予測の方法は、清水ほか (2010) の "CReSS\_6h" と同じである。計算領域を図 1 に示す。まず格子解像度 5 km のモデルを広領域で走らせ (図 1 の CReSS 5 km ; 1,000 km × 1,200 km), それを境界値として格子解像度 1 km のモデルを関東地域について走らせる (図 1 の CReSS 1 km ; 440 km × 440 km)。CReSS 5 km の初期値および境界値には、格子解像度 20 km の気象庁領域スペクトルモデルの 3 時間毎の出力値を内挿して用いる。

### 2.2 土砂災害の発生評価

土砂災害の発生評価式として、降雨メッシュ内に土砂災害が発生する確率を求める三隅ほか (2011) の方法を用いる。このモデルでは、降雨メッシュ内に土砂災害が発生する確率を以下のように仮定する。

$$P = P_{rain} \times f_{slp} \times \rho_{bld} \quad (1)$$

ここで P は土砂災害の発生確率、 $P_{rain}$  は土砂災害の発生に及ぼす降雨の影響、 $f_{slp}$  は地形の影響、 $\rho_{bld}$  は被災する構造物の存在割合を表す関数である。 $P_{rain}$  を実効雨量 (矢野, 1990) の 1 次関数、 $f_{slp}$  を降雨メッシュの勾配  $\theta$  を用いてパラメタライズし、P を以下のように表す。

$$P = \delta (\alpha R_{72} + \beta R_{1.5} + \gamma) (\sin \theta)^\epsilon \rho_{bld} \quad (2)$$

ここで  $R_{72}$  および  $R_{1.5}$  はそれぞれ半減期 72 時間および 1.5 時間実効雨量で、本研究では CReSS 1 km の出力値から直接求めることができる。 $\theta$  は降雨メッシュを平均した地形勾配で、「数値地図 50 m メッシュ標高データ」から計算される。また  $\rho_{bld}$  として「国土数値情報土地利用細分メッシュデータ」に基づく降雨メッシュに占める建物用地の割合を用いた。 $\alpha \sim \epsilon$  は経験的に決められる定数で、三隅ほか (2011) は過去 15 年分の神奈川県における土砂災害発生履歴から、500 m メッシュの降雨データに対して係数を表 1 のように求めた。本研究では CReSS 1 km の出力値を 500 m メッシュに内挿し、式 (2) に基づいて土砂災害発生確率を計算した。

表 1 式 (2) の係数の値  
Table 1 Values of coefficients in equation (2).

$\alpha$	$1.3 \times 10^{-5}$
$\beta$	$1.2 \times 10^{-4}$
$\gamma$	$-4.4 \times 10^{-5}$
$\delta$	25.0
$\epsilon$	0.88

### 2.3 対象事例

予測の対象としたのは、2004 年台風 22 号 (T0422) の通過に伴う横浜市の土砂災害である。図 2 に 10 月 9 日 9 時の地上天気図を示す。T0422 は 10 月 4 日にフィリピンの東に発生し、9 日 16 時に伊豆半島に上陸、北西方向に移動して鹿島灘に抜けた。この台風の通過に伴い、横浜地方気象台では 9 日に 191.5 mm の日雨量が記録され、市内で床上浸水 296 件、床下浸水 332 件、がけ崩れ 74 件、土砂流出 192 件が記録された (横浜市, 2005)。

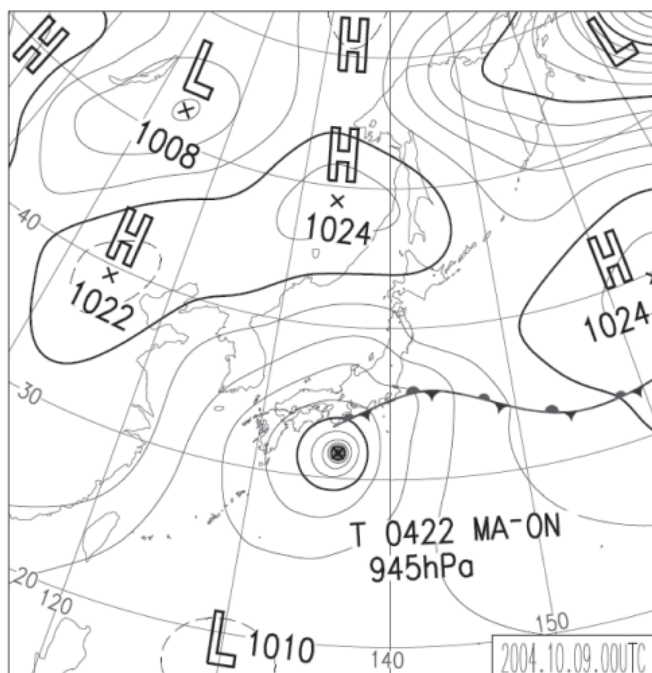


図2 2004年10月9日9時の地上天気図(気象庁, 2004)  
Fig. 2 Weather chart at 9 JST on 9 October 2004 (JMA, 2004).

予測の初期値を台風上陸前の2004年10月9日9時とし、11時間の降水予測を行った。ただしCReSSのスピナップを考慮し、CReSS 1 kmの出力値は11時以降の値を用いた。CReSS 1 kmの予測値を500 mメッシュに内挿し、式(2)に基づき土砂災害の発生確率を評価する。対象とする土砂災害はがけ崩れ(急傾斜地の崩壊)である。結果を検証するために、横浜市役所市民情報センターで閲覧可能な「平成16年横浜市の災害」(横浜市, 2005)に記載されているがけ崩れ発生箇所の情報から、がけ崩れ発生箇所を特定した。

### 3. 予測結果

#### 3.1 降雨予測

本事例における台風の予測結果は、清水ほか(2010)が詳しく報告している。予測された台風の経路は、気象庁によるベストトラックと概ね一致していた。ただし実際よりも予測された台風は移動速度が遅く、上陸時刻は約1時間遅れた。図3は10月9日11時~20時の総雨量の分布を、レーダ・アメダス解析雨量とCReSS 1 kmの予測との間で比較したものである。なお当時のレーダ・アメダス解析雨量は30分間隔、2.5 kmメッシュで作成されていた。伊豆半島から神奈川県にわたる強い雨域をCReSS 1 kmはうまく予報している。しかし予報された雨域はレーダアメダス解析雨量よりも、全体に北西方向にずれている。例えばレーダアメダス解析雨量では相模湾や東京湾にも強い雨が解析されているが、CReSS 1 kmの予測では強い雨域が陸上に分布している。

雨量分布の詳細を確認するため、図3のうち35°~

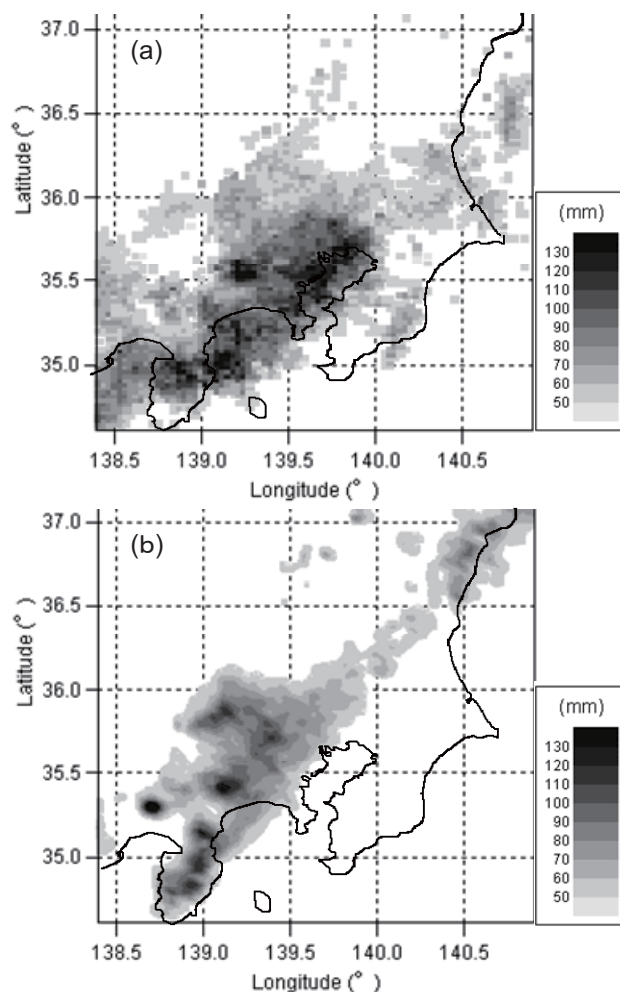


図3 2004年10月9日11時~20時の総雨量。(a)レーダアメダス解析雨量、(b)CReSS 1 km

Fig. 3 Total rainfall from 11 JST to 20 JST derived from (a) JMA Radar-AMeDAS precipitation analysis and (b) forecast by CReSS with 1-km grids.

36°N, 139°~140°Eの範囲を拡大し、80 mm以上について等値線を描いた(図4)。レーダアメダス解析雨量では強い雨域が地形にあまり依存せず、台風の進行方向に沿って南西~北東に分布しているのに対し、CReSS 1 kmでは強い雨が山岳斜面に集中している。台風22号の中心は三浦半島付近を通過し、眼の周囲の壁雲などにより実際は強い雨がもたらされたが、CReSS 1 kmの予測では、むしろ地形による降雨増幅が強く働き、それによって局地的な大雨が降ったことが示唆される。

次に横浜地方気象台(位置は図4に示されている)の1時間雨量を比較する。図5は横浜地方気象台における前1時間雨量と、CReSS 1 kmによる予測値を比較したものである。この9時間の総雨量は横浜地方気象台による観測で112.0 mmに対し、CReSSの予測では75.3 mmとなっており、予測値は33%の過少評価になっている。ただしCReSS 1 kmの予測値は17時に観測より強い42.1 mmに達しており、現実よりも集中度の高い雨となっている。

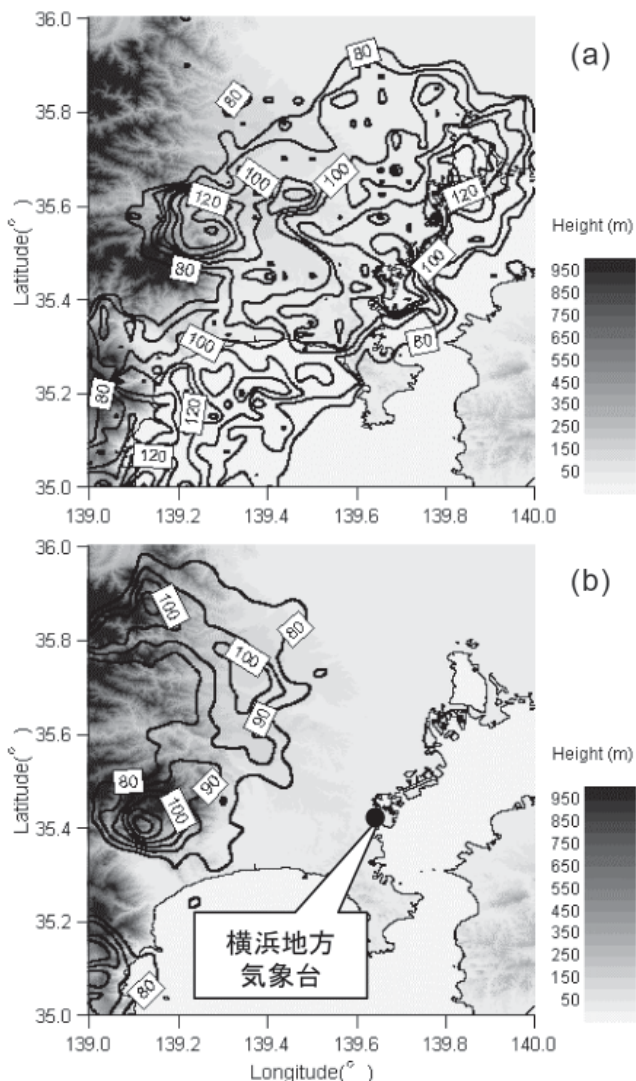


図 4 2004 年 10 月 9 日 11 時～20 時の総雨量と地形。(a) レーダアメダス解析雨量, (b) CReSS 1 km. 雨量の等値線は 80 mm 以上について描かれている。

Fig. 4 Total rainfall from 11 JST to 20 JST derived from (a) JMA Radar-AMeDAS precipitation analysis and (b) forecast by CReSS with 1-km grids, imposed over the topography. Contours are drawn where the rainfall is greater than 80 mm.

図 6 は式 (2) の入力値の 1 つである, 半減期 72 時間実効雨量の分布を比較したものである. なお実効雨量の初期値として, 横浜地方気象台の雨量観測データから計算された 2004 年 10 月 9 日 11 時の値 204.3 mm を用いた. 観測, 予測ともに実効雨量の値は 250 mm ~ 300 mm の範囲にあるが, その分布は大きく異なる. レーダアメダス解析雨量では実効雨量の大きな値が横浜市東部に見られるのに対し, CReSS 1 km の予測ではむしろ横浜市西部の丘陵地帯に大きな値が見られる. これは図 4 に示したとおり, CReSS 1 km の予測はより地形依存が強いことを反映している.

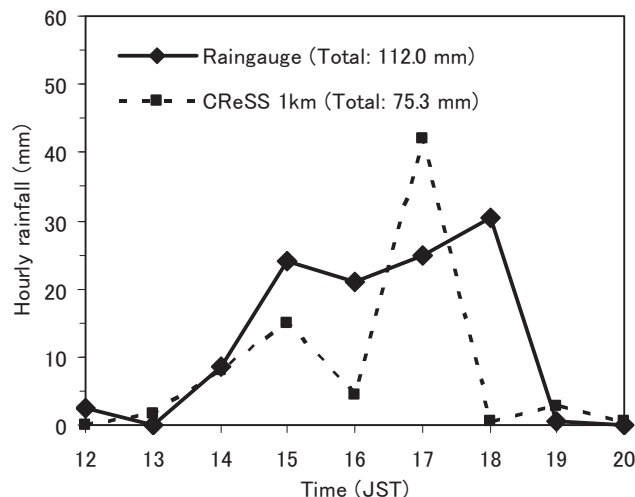


図 5 2004 年 10 月 9 日 12 時～20 時における, 横浜地方気象台の前 1 時間雨量. 実線は雨量計による観測, 破線は CReSS による予測を表す.

Fig. 5 Time variation of hourly rainfall at Yokohama Local Meteorological Observatory. Solid and broken lines indicate raingauge observation and forecast by CReSS, respectively.

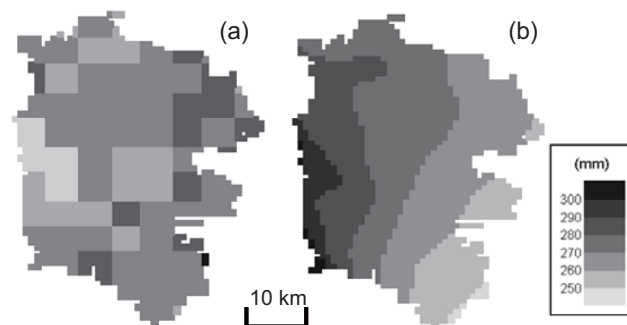


図 6 2004 年 10 月 9 日 17 時における, 横浜市の半減期 72 時間実効雨量の分布. (a) レーダアメダス解析雨量, (b) CReSS 1 km による予測値

Fig. 6 Distribution of "effective rain" with half-life period of 72 hours at 17 JST on 9 October 2004 in Yokohama City, derived from (a) Radar-AMeDAS analysis and (b) forecast of CReSS 1 km.

### 3.2 土砂災害発生域の予測

前節で示したように, 雲解像モデル CReSS による予測は, 台風の経路に沿った大雨を概ね表現したが, 雨の集中域が現実とは山岳側にずれていた. この節では, CReSS の降雨予測の誤差が土砂災害発生域の評価にどの程度影響するかを検討する.

図 7 は式 (2) に基づく土砂災害発生確率について, 2004 年 10 月 9 日 11 時～20 時の最大値をレーダアメダス解析雨量と CReSS 1 km の予測雨量で比較したものである. 横浜市内の降雨分布のパターンが大きく異なるにもかかわらず, 発生確率の分布は両方で良く似ており, 実際に確率の高い場所の近くで土砂災害が発生している. これは

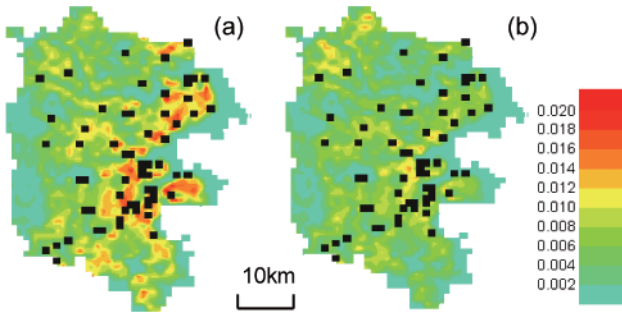


図7 2004年10月9日11時～20時における、式(2)で評価した土砂災害発生確率および実際の発生箇所(黒い点)。降雨の入力値として(a)レーダアメダス解析雨量を用いた場合、(b)CReSS 1 kmの予測値を用いた場合

Fig. 7 Maximum probability of landslide occurrence evaluated by equation (2) from 11 JST to 20 JST on 9 October 2004, calculated with (a) JMA Radar-AMeDAS precipitation analysis and (b) forecast rainfall by CReSS with 1-km grid. Black spots indicate landslides.

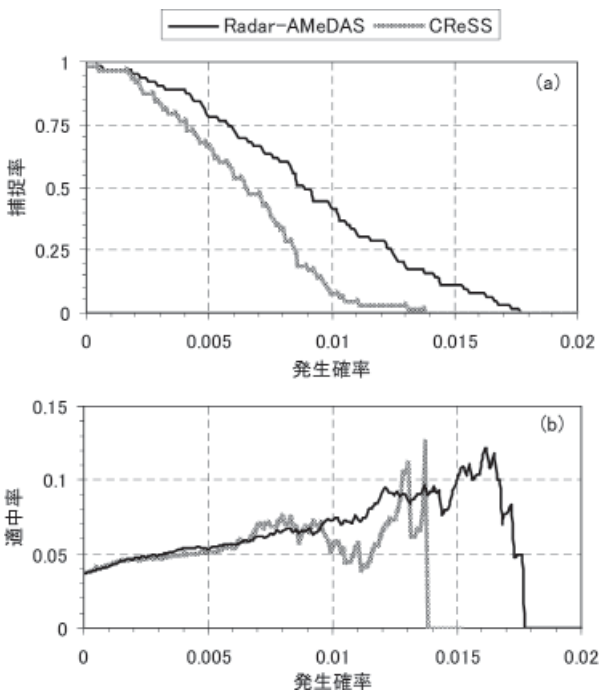


図8 土砂災害発生確率と(a)捕捉率、(b)適中率との関係  
Fig. 8 Relationship between the probability of landslides and (a) probability of detection and (b) success ratio.

式(2)で $\theta$ や $\rho_{blid}$ の影響が効いているためである。ただし総雨量の多いレーダアメダス解析雨量の方が、局所的に高い土砂災害発生確率を示している。

両者の結果を見逃しの少なさの指標である「捕捉率」(=適中格子数÷全発生格子数)と、空振りの少なさの指標である「適中率」(=適中格子数÷予測格子数)で評価した(図8)。同じ土砂災害発生確率に対して、レーダアメダス解析雨量を用いた場合の方が捕捉率が高い。これは

CReSS 1 kmでは雨量を過少評価しているために、特定の土砂災害発生確率が占める面積が狭いことに対応している。一方、同じ発生確率に対する適中率は両者でほとんど変わらず、概ね0.05～0.1の範囲にある。例えば土砂災害に対する警報の水準として発生確率0.05を用いたとき、レーダアメダス解析雨量と比較して捕捉率は0.78が0.67に減じるが、適中率は両者とも0.053である。このことは雲解像モデルを用いた土砂災害予測は見逃しが多いが、空振りは実際に観測された雨量を用いた場合と変わらないことを意味している。

#### 4. まとめ

雲解像モデルCReSSと土砂災害の発生確率評価を組み合わせて、横浜市を対象として2004年台風22号に伴う土砂災害の予測実験を行ったところ、以下の結果が得られた。

- (1) 雲解像モデルCReSSは台風の移動を概ね予測したが、降雨分布は実際よりも山岳斜面に集中しており、横浜市では11時間雨量で33%の過少評価であった。
- (2) 予測された横浜市における土砂災害は、観測されたレーダアメダス解析雨量を用いた場合よりも、捕捉率が低下し見逃しが増えるが、適中率はほとんど変わらず空振りは同程度であった。

雲解像モデルで予測された降雨が、実際よりも山岳地域に集中した原因がCReSS自体にあるのか、あるいは初期値として用いたデータに問題があるかはこの実験のみでは分らない。同一の初期値を用いて、異なる雲解像モデルで予測実験を行い、モデルの特性調査を行う必要がある。また予測された横浜市の雨量が33%も過少評価されていたにもかかわらず、雨量を用いた危険域評価の適中率は観測された雨量を用いた場合とほとんど変わらなかった。このことは、台風上陸前に予測雨量に基づいて警報を出した場合、空振りによって情報の受け手を混乱させる度合いは現状と変わらないことを示唆する。したがって捕捉率の低下を考慮しても、台風上陸前に土砂災害の警報を出すことはそれほど現場を混乱させるものではないと考えられる。ただしこれは1事例の結果なので、今後事例研究を積み重ねていくことが必要である。

本研究では台風上陸前の初期値を用いて、台風通過に伴う土砂災害の危険域予測を試みた。このような取り組みは防災の観点から見た気象予測精度や改善すべき方向の確認にもなるので、今後も定期的に取り組んでいきたい。

#### 参考文献

- 1) 井良沢道也・北川 明・杉浦幸彦・竹森史郎(1994):レーダによる降雨予測の土砂災害への適用. 砂防学会誌, 46(6), 10-17.
- 2) 井良沢道也・竹森史郎・よう朝夫・遠藤治郎(1997):短時間降雨確率予測値の土砂災害への適用. 砂防学会誌, 50(3), 4-11.

- 3) 三隅良平(1998) : 降雨モデルを用いた土砂災害予測の試み. 自然災害科学, **17**(2), 177-188.
  - 4) 三隅良平・真木雅之・岩波 越(2011) : 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—. 天気, **58**, 697-704.
  - 5) 清水慎吾・加藤 敦・前坂 剛・木枝香織・岩波 越(2010) : 雲解像モデルによる降雨量予測実験—2004年10月9日台風22号の事例解析—. 防災科学技術研究所研究報告, **78**, 1-13.
  - 6) Tsuboki, K. and A. Sakakibara (2001): CReSS User's Guide, 2nd Edition, 253pp.
  - 7) 坪木和久・榊原篤志(2006) : 雲解像モデルを用いた台風に伴う局地豪雨の量的予測実験—2004年10月20日の台風0423号に伴う近畿地方北部の豪雨を例として—. 自然災害科学, **25**(3), 351-373.
  - 8) 山越隆雄・仲野公章・渡正 昭・山田 孝(2001) : 10分間更新短時間降雨予測の土砂災害警戒避難への適用. 月刊土木技術資料, **43**(11), 26-31.
  - 9) 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. 砂防学会誌, **43**(4), 3-13.
  - 10) 横浜市(2005) : 平成16年横浜市の災害, 総務局危機管理対策室, 107pp.
- (2011年10月6日原稿受付,  
2011年11月8日改稿受付,  
2011年11月14日原稿受理)

## 要 旨

雲解像モデルと土砂災害の発生確率評価を組み合わせ、横浜市を対象として2004年台風22号に伴う土砂災害の予測実験を行った。台風上陸前のデータを初期値とした11時間の予測結果は、台風の移動を概ね予測したが、降雨分布は実際よりも山岳斜面に集中しており、横浜市では11時間雨量で33%の過少予測であった。このことが土砂災害の予測結果の捕捉率を減じさせたが、予測の適中率は、実際に観測された雨量を用いて評価した場合とほとんど変わらなかった。

**キーワード** : 量的降水予測, 表層崩壊, 雲解像モデル, 台風