■GISによる総合防災マップと地すべりハザードマップ —四国と中米ホンジュラスの例—

Integrated Disaster Prevention Maps and Landslide Hazard Maps using GIS

—Examples of Shikoku and Central America Honduras—

山岸宏光* Hiromitsu YAMAGISHI / 愛媛大学 Ehime University

キーワード：総合防災マップ，四国，地すべりハザードマップ，ホンジュラス

Key words: Integrated disaster prevention map, Shikoku, Landslide hazard map, Honduras

まえがき

最近，災害ハザードマップなど災害関連マップはGIS技術によって作られるようになってきた。とくに，2011年3月11日の東日本巨大災害は全国的に，いわば多重災害ハザードマップの作成を促進させてきた。なぜなら，とくに四国から東海地方にかけての太平洋沿岸地域では，来たるべき南海トラフ巨大地震が，津波（図－1）だけでなく，地すべり，崩壊，土石流などの土砂災害を同時に発生させる危惧があるからである。したがって，本報告では四国地方を例に，沿岸地域の多重災害危険度マップの作成例について紹介する。さらに内陸の災害の典型である，地すべり災害のハザードマップ作成の中間的報告を，中米ホンジュラス国テグシガルパ市の例をあげて紹介する。

1. 四国地方の災害因子

四国地方は我が国のなかで最も山地が最も多く80%を占めており，地すべり地形も3万か所を数えて，我が国全体の10%を占めている（防災科研地すべり地形分布図

図－1 内閣府による南海トラフ巨大地震による津波の想定 (Yahoo Mapによる)

Fig. 1 Tsunami inundation map due to Nankai Trough Big Earthquake by Cabinet Office, Japan. This map is from Yahoo Japan map

データベースURL <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/>）。また，四国南西部は典型的なリアス式海岸であり，来たるべき南海トラフ巨大地震では，最大津波浸水予想高は34 mを超える海岸もあると想定されている。2011年3月11日の東日本大震災では，津波被害の甚大さにくらべて土砂災害は少なかった。このことは，陸からやや遠い海溝型地震であったことや，背後の地質地盤が中生代の古く硬い岩盤であったことが指摘され，地すべり地形はほとんど分布していない地域である。

しかし，四国では，徳島県から愛媛県にかけての地域は三波川帯とよばれる変成岩地帯で，我が国でも有数の地すべり地帯（図－2）である。したがって，南海トラフ巨大地震が発生した場合，四国南西部の海岸では，東日本大震災と同様な津波被害が予想されると共に，2004年10月23日の中越地震のように地すべり災害が多発することも予測される。また，四国地方の特殊性として，香川県，愛媛県を中心に3万箇所以上達するとされる溜池の決壊や土砂流失によるオーバーフローなども危惧される。こうしたことから，愛媛大学防災情報研究センターでは，

図－2 四国の地質図（地質総合センター），活断層（東大出版会を一部簡略化），過去の地震分布，津波想定（内閣府）地すべりを含む総合防災マップ

Fig. 2 Integrated disaster map of Shikoku including geologic map, active faults, past epicenters, tsunami, deep-seated landslides

* 連絡著者 / corresponding author
〒003-0025 札幌市白石区本郷通り 2 丁目北 3 の10の207
Kita 3-10-207, Hongodori 2, Shiroishi-ku, Sapporo 003-0025, Japan
e-mail: hiromitsuyamagishi88@gmail.com

2010年から南海・東南海地震研究部門と防災GIS研究会を立ち上げ、さまざまGIS防災情報の作成や、可視化技術の検討を行ってきた。愛媛県では、東日本大震災以前から防災データが準備され、陸上の震度分布、地表加速度分布、安政地震（1854年）をもとに作られた津波到達時間、津波高などのデータも存在していた（図-3）が多くは未公表であった。その後、2013年6月には初めて土砂災害や津波浸水予想区域についての簡略なデータが愛媛県から公開された（図-4；愛媛県ウェブサイト <http://www.pref.ehime.jp/bosai/higaisoutei/higaisoutei24.html>）。（参照日2013年7月17日）

また、四国地方では、1854年の安政地震のように、南海トラフに起因する海溝型地震のほかに、瀬戸内海や宇和海などの地震をはじめ、我が国では第一級の活断層である中央構造線が走っている（図-2）。これらの内陸型の地震も無視できず、その評価も重要である。

さらに、全国的なことではあるが、地震のみならず豪雨をトリガーとした崩壊も時折発生していて、最近でも、

松山市周辺の地震被害予測図（旧情報）
（4次メッシュ500mX500m）

図-3 安政地震をモデルとした地震被害予想図（愛媛県）
Fig.3 Maps showing seismic intensity, acceleration and liquefaction distribution of Matsuyama area (Ehime Pref.)

図-4 南海トラフ巨大地震による浸水域想定（愛媛県宇和島付近）をGISで表示した。
Fig.4 Map showing tsunami inundation area by Nankai Trough Earthquake (Uwajima, Ehime Prefecture)

2004年9月の新居浜を襲った豪雨による表層崩壊 (Yamagishi *et al.* 2013) や、2010年9月の高知県奈半利川上流の平鍋ダム付近の深層崩壊がある（笹原ほか，2012）。

2. 愛媛大学防災情報研究センターでのGIS

愛媛県では、2011年3月11日の東日本大震災の前から、1854年の安政地震をモデルとした津波到達海岸での波高や内陸の震度、地表加速度、液状化率など、いづれも500mメッシュの粗いデータではあるが、すでに作成されていた。また、地すべりや崩落危険度マップ、土石流危険度域マップなども同様であった。しかし、津波到達波高データなどはGISで作られたものでなかったため、愛媛大学では、作業機関と協議しつつGIS化してきた（図-3，4および5）。巨大地震の発生は海岸のみならず、低地での液状化災害、丘陵や山地での土砂災害などが同時に発生する。したがって、避難所や避難道路の安全性についても、津波だけでなく土砂災害への対応など総合的に評価する必要がある。また、これらのデータを誰でも見えるようにするには、一般的なプラットフォームが必要である。今回はGoogle earthで表示することにした。このプラットフォームを使うと、ネット環境さえあれば、三次元表示もできるし、自分でデジカメ写真の追加もできる。

東日本大震災が発生した三陸海岸と違い、四国の南西部海岸は三波川帯という地質帯に地すべりが集中する地域に相当している。つまり、破碎帯と呼ばれる割れ目の多いクシャクシャの岩盤が特徴であり（図-2），上記のように南海トラフ巨大地震の発生の際には、津波のみならず崩壊や土石流災害などが同時多発的に発生することは確実であり（図-6），こうした総合防災マップといったものが必要になる。2004年10月24日の中越地震など最近の中山間地を襲った地震では、既存地すべり地での土砂災害発生危険度は他と比べて異常に高かったという研究がある（野呂ほか，2011）。特に中越地震での地すべり発生は、既存地すべり地内が50%に達したと報告

第一波津波到達時間(分)、最大津波到達時間(分)、最大波高(cm)

図-5 安政地震(1854)をモデルとした津波シミュレーションによる到達時間、最大波到達時間、最大波(愛媛県)
Fig.5 Maps showing the Tsunami reaching time and the maximum height along the coast of Ehime Prefecture. based on 1854 Earthquake

されている。

また、四国特有の溜池（筆者の調査では、少なくとも1万5千箇所を数える）の存在も、災害の要因となりうる要素である。つまり、近年の都市化によって溜池近くへの住宅地の進出で、溜池の決壊や土砂流入による越流などによる災害も危惧されている。たとえば、愛媛県東温市の丘陵部にも多数の溜池が存在しているが、それと災害危険要因を重ねてみると、多数の溜池が地すべりや土石流の影響を受けやすいものがあることがわかる（図-7）。

3. GISを活用した地すべりハザードマップの試み—テグシガルパ市の例—

筆者は、2011年から2014年までの期間、JICA Expertとして、中米ホンジュラス国のテグシガルパにおいて、ホンジュラス工科大学（UPI）や自治大学（UNAH）を中心に、地すべり災害ハザードマップ作成指導を行っている。このプロジェクトには山形大学の八木浩司教授、帝京平成大学の佐藤剛准教授がともに参加している。本

図-6 津波浸水想定域、地すべり・崩落・土石流危険域を含む総合防災マップ（Google Earth）の一例（愛媛県八幡浜付近）

Fig. 6 An example of integrated hazard maps including not only tsunami inundation, but also danger zones of landslides and debris flows (Yahatahama, Ehime Pref.)

溜池と土砂災害危険地区との関連（愛媛県東温市）

図-7 ため池と土砂災害発生予測分布との関連を示す（Google Earth）

Fig. 7 Maps showing the relationship between ponds and landslides and debris flows around Toon City, Ehime Pref. (Google Earth)

文は、彼らとの共同で、写真判読をもとにGISで地すべり地形と道路や河川との関連、地質や地形、種々のインフラとの関連づけを行い、AHPによるハザードマップ作成指導を実施している。本報告はその中間過程の紹介である。

3.1 地すべりハザードマップとは

“Landslide hazard map”という言葉は、あいまいな言葉であり、さまざまな意味をもっていると思われる。

最近では、各自治体で防災マップと同意語で“ハザードマップ”という言葉がよく使われている。しかし、それぞれの災害ターゲットにより、その意味するところは異なるであろう。

“地すべりハザードマップ”とか“土砂災害ハザードマップ”と呼ばれるものも色々あると思われる。“GIS Landslide”の分野においても同様である。筆者の経験では、GISでlandslideを扱う国際雑誌の論文の審査の際に悩まされるのは、その論文で扱う“landslide”は一体何を意味するのかわからないことである。和文で論文を書くときは、崩落(fall)、崩壊(failure)、地すべり(deep-seated landslide)という言葉が使われることが多く、合理的である。また、一般的に使われる“ハザードマップ”の中で、“土砂災害ハザードマップ”は、崩落危険度マップ（急傾斜危険マップ）、地すべりハザードマップ（地すべり危険度帯のゾーニング）などを総合的に扱ったものであろう。本報告で扱う“landslide hazard map”は、日本語でいう“地すべりハザードマップ”でスペイン語では、“deslizamientos mapa de riesgos”に相当する。また、一般的に使われているLandslide Hazardの定義もあいまいであり、国際雑誌に載るようなGIS Landslide Hazard Mapはどれだけ実用化されているであろうか。つまり、GIS解析では、地質、地形、土地利用、降雨量などさまざまなfactorの“重み付け”を行って点数を与えて計算させた結果が“GIS Landslide Hazard Map”とされている。しかし、その後、危険度の高いゾーンには実際にlandslideが多く発生したかどうか実証されたものがあるだろうか。つまり、実用的でないものが多い。

3.2 地すべりハザードマップの種類

アメリカの科学アカデミーのCommittee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy (CRNLHMS, 2004) は“Landslide hazard map”を以下のように4区分している。

1) landslide inventory map, 2) landslide susceptibility map, 3) landslide hazard map, 4) landslide risk map。

GISで作成されるLandslide hazard mapの多くは2)のLandslide susceptibility mapに相当すると思われる。また、写真判読で作成されるのが1)のInventory map（図-8）であり、次の段階で2)のsusceptibility mapということになり、人間的要素（被害）が入って

図－8 空中写真判読によるテグシガルパ市周辺の地すべり地形分布（八木，佐藤による）

Fig. 8 Landslide Inventory map of Tegucigalpa based on airphotograph interpretation by Yagi and Ssato

初めて，3）教義のlandslide hazard mapということになると解釈される。

なお，参考までにCRNLHMS（2004）の定義を原文のまま掲載すると，以下のようである。

1）A landslide inventory map shows the locations and outlines of landslides. A landslide inventory is a data set that may represent a single event or multiple events. Small-scale maps may show only landslide locations, whereas large-scale maps may distinguish landslide sources from deposits, classify different kinds of landslides.

2）A landslide susceptibility map ranks slope stability of an area into categories that range from stable to unstable. Susceptibility maps show where landslides may form.

3）A landslide hazard map indicates the annual probability (likelihood) of landslides occurring throughout an area. An ideal landslide hazard map shows not only the chances that a landslide may form at a particular place, but also the chances that a landslide from farther upslope may strike that place.

4）A landslide risk map shows the expected annual cost of landslide damage throughout an area. Risk maps combine the probability information from a landslide hazard map with an analysis of all possible consequences (property damage, casualties, and loss of service).

今回，八木浩司・佐藤剛両氏による白黒空中写真判読で作成されたTegucigalpa市のlandslide inventory map（図－8）をGISでポリゴン化し，ASTER_GDMによる30mDEMの地形データを使って地すべりの発地点（滑

落崖ラインの中心点）の標高を調べると，標高1100－1200 mの地点が最も多いことが分かった（図－9 aおよび9 b）。さらに，地すべり地形（移動体）と地質との関連を見ると，地すべり地形の数でも，面積率でも，溶結凝灰岩の部分に多いことがわかる（図－10aおよび10b）。つまり，Tegucigalpa北部の地すべり集中域は，上面が平坦な溶結凝灰岩がキャップロック構造をなしている。

また，テグシガルパのハザードマップ作成の過程では，まず，川までの距離が250m以内（日本の土砂災害防止法施行令 第二条には，土砂災害警戒区域の範囲として，地滑りが動いた場合，その先端から最大が250m）の地すべりを検索した（図－11a）。一方，同じく250m以内の道路と地すべりの分布も属性選択で調べた（図－11b）。とくに，Tegucigalpa市の真ん中を北へ流れるCholtega Riverは，北部の狭窄部を横切るが，その川の両側は活動的な地すべりが多数存在していて，それらが再活動すると，その河川が閉塞してしまい，Tegucigalpa市の中心部が水没する危険が高まる恐れがある。また，ほかの方

図－9 a 地すべり発生点と標高との関係

Fig. 9a Map showing the relationship between landslide and elevation

図－9 b テグシガルパ市周辺の地すべり数と標高との関係（1100－1200mに集中している）

Fig. 9b Bar graph showing the elevation of generating of the landslides in Tegucigalpa. Notice that 1100 to 1200m zones have highest zone of landslide generation

図-10a 地すべり分布と地質岩相との関係
Fig. 10a Landslide distribution and geologic map

図-10b 地すべり数と地質岩相との関係を示すグラフ（溶結凝灰岩に多いことがわかる）
Fig. 10b Bar graph showing that the most of the landslides generated from the welded tuffs which make up the cap rock structure

法で作成されたハザードマップとの組合わせでも、地すべり地形内だけでなく、判読されない部分も評価できる。その意味で、今回、ホンジュラスのUNDP（国連開発計画）から提供されたテグシガルバ市の地すべりハザードマップも有用である。

つまり、Tegucigalpa市のUNDP（国連開発計画）でも、“地すべりハザードマップ”（AMENZA MAPA）を作成していて、最近のバージョンアップしたのを見ると、判読地すべり地形の集中域（北西部）は危険度最大のAlta zoneに一致する（DEMによる傾斜度の高い地域らしい：図-12）。しかし、この急傾斜帯の多くは、地すべり地形の滑落崖にあたる。最近の災害はむしろ地すべり地内緩傾斜に多く発生している。

以上の結果は、途中経過であり中間的なものである。今後は、これらの写真判読も最近撮影されたカラー写真を使って、再度判読を行い、それにもとづいてinventory mapを作成し、それぞれの地すべり地の活動度や別のプロジェクトで実施されているボーリング孔の計測データを属性データに追加する。同時に、5人程度の地すべり判読者により、地形的特徴を含めた種々の要素からAHP法で危険度判定を（Miyagi *et al.*, 2004など）行うことになる。その場合は、2003年に地すべり学会が新潟県阿

図-11a 河川から250m以内にある地すべりを示す（GISで計算）
Fig. 11a The landslides within 250m from the rivers, found by attribute selection of GIS

図-11b 主要道路から250m以内にある地すべり分布
Fig. 11b The landslides within 250m from the main roads, found by attribute selection of GIS

図-12 国連開発計画（UNDP）による地すべり危険度マップ（斜面区分）と八木・佐藤による地すべりマップをオーバーレイしたマップ
Fig. 12 Landslide Hazard Map (UNDP_Map) overlain by Inventoried landslides by Yagi and Sato)

賀野川で国土交通省の委託をうけて実施した例（八木ほか，2009；図-13）が参考になる。

4. まとめ

今回は総合防災学ともいえる資料について、愛媛県を中心に作成した報告と、中米ホンジュラスの首都テグシガルパ市の地すべり危険度マップの作成の一端を紹介した。いずれも、最近の新しい技術ともいえるGISを活用した。とくに、ホンジュラスのテグシガルパの地すべりについては、1998年ハリケーンミッチの大災害以来、Harp *et al.* (2002) がGISを活用したLandslideの研究の報告で、各地質相に土質係数を与えてラフなハザードマップを試みている。その後も最近ではVan Westen *et al.* (2008) が、テグシガルパのデジタルデータを紹介した論文も発表している。

しかし、これらのデータや成果が現地ホンジュラスの技術者などに生かされた形跡がない。それは、現地に受け皿となるべき機関や人材がいなかったためであり、演者らが実施しているJSPS-JICAの専門家派遣事業の実施する理由ともなっている。つまり、これらの論文が実用的に生かされるには、現地の研究者や技術者による計測や現地踏査などのデータとを組み合わせる必要がある。その意味でも、2013年3月16-22日に開催された第1回中米-カリブ海地すべり会議は、この地域での地すべり対策や教育にとってのネットワークづくりへの、大きな第一歩であった。今後の活動に期待したい。

以下のサイトに本会議の講演要旨とプレゼンすべてが公開されている (<http://congresosdedeslizamiento.com/>)。 (参照日2013年5月10日)

あとがき

本報告は2013年5月24日に開催された日本地すべり学会シンポジウム「地すべり災害の対応—技術の変遷と課題—」で発表したものである。二つの異なったテーマで、第1は来るべき南海トラフ巨大地震のために用意すべき巨大地震にともなう多様な災害を扱う「総合防災マップ」のGIS可視化について紹介したものであり、第2は中米ホンジュラスで実施中の「地すべりハザードマップ」の作成例を示したものであるが、ongoingのテーマである。これをより実用的にするには、まずは、写真判読に始まってGIS化と扱いの習得した技術者の教育が必要で、そのうえでマッピング・GIS解析と現地データの収集・解析とをお互いにフィードバックしながら進めていく必要がある。

謝 辞

第1のテーマについては、データを提供いただいた愛媛県危機対策課、データ作成に協力いただいた愛媛大学GIS研究会和田壮平氏に謝意を表す。また第2のテーマについては、JICAホンジュラス事務所の方々、写真

図-13 新潟県阿賀野川流域の地すべり危険度評価マップ（八木ほか，2009）

Fig. 13 Map showing a landslide susceptibility classification along the Agano-gawa, Niigata Prefecture (Yagi *et al.*, 2009)

判読をしていただいたJICA-JSPSの科学技術派遣専門家として協力いただいた八木浩司・佐藤剛両博士に感謝する。

参考文献

- 1) Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy (CRNLHMS, 2004) : Partnership for reducing landslide risk. The National Academic Press, Washington DC, 123p.
- 2) 笹原克夫・桜井亘・加藤仁志・島田徹・小野尚哉 (2012) : Li-Darによる深層崩壊発生斜面の地形学的検討—平成23年台風により高知県東部に群発した深層崩壊の事例解析—, 京都大学防災研究所 特定研究集会, 23C-03, 深層崩壊の実態, 予測, 対応 (研究代表者 千木良雅弘), p.1-10.
- 3) Harp, E. D., Held, M. D. and McKenna, J. P. (2002) : Digital inventory of landslides and related deposits in Honduras Triggered by Hurricane Mitch, USGS. Open file Report p. 2-61.
- 4) Miyagi, T., Prasad, G. B., Tanavud, C., Potichan, A. and Hamasaki, E. (2004) : Landslide risk evaluation and mapping - Manual of aerial photo interpretation -, Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, No. 66, p. 75-137.
- 5) 野呂智之・松山清輝・ハスバートル・中村明 (2011) : 既存地すべり地形における地震時地すべり発生危険度評価手法に関する研究, 土木研究所資料, 第4202, 60p.
- 6) Van Westen, C. J., Castellano, E. and Kuriakose, S. L. (2008) : Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assesmen: An overview. Engineering Geology, Vol. 102, p. 112-131.
- 7) 八木浩司・桧垣大助 (2009) : (社)日本地すべり学会平成14年度第三系分布域の地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員会 (2009) : 空中写真判読とAHP法を用いた地すべり地形再活動, 危険度評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, p. 358-366.
- 8) 山岸宏光 (2012) : 南海トラフ巨大地震のためのGISデータの可視化, 南海トラフ巨大地震に備える. 愛媛大学防災情報研究センター, p. 168-180.
- 9) Yamagishi, H., Doshida, S. and Pimiento Edgar (2013) : GIS analysis of heavy-rainfall induced shallow landslides in Japan. In Margottini, C. Canuti, P. and Sassa, K. (2013) : Landslide Science and Practice, Vol. 1 Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning, p. 601-607, Springer Verlag. (原稿受付2013年7月24日, 原稿受理2013年8月23日)