■最近の豪雨崩壊および既往の地すべりにおける地形・地質要因のGIS解析

GIS-based analyses for geomorphological and geological factors of recent heavy rainfall-induced failures and deep-seated landslides

山岸宏光* Hiromitsu YAMAGISHI / (株)シン技術コンサル Shin Engineering Consultant Co., Ltd.

土志田正二 Shoji DOSHIDA / 消防庁消防研究センター National Research Institute of Fire and Disaster

畑本雅彦 Masahiko HATAMOTO / (株)シン技術コンサル Shin Engineering Consultant Co., Ltd.

キーワード：豪雨崩壊，地理情報システム，デジタル標高モデル，地すべり地形，デジタル画像システム

Key words: heavy rainfall-induced failures, GIS, DEM, deep-seated landslides, digital photogrammetry technique

1. まえがき

GIS技術は広く災害分野で使われているIT技術のひとつである。GIS（地理情報システム）とは，位置情報を手がかりに，地理・地形・地質の面的線的情報を解析・分析する技術であり，最近の衛星画像データやGPSの普及とともに災害分野でも広く使われている技術である。いわゆるGISを活用したGIS研究は，Ayalew and Yamagishi (2005)，Yamagishi, *et al.* (2007)，Van Westen, *et al.* (2008) など多数存在し，最近は多くのGIS Landslideに関する論文が国際雑誌に発表されている。それらの多くはハザードマップに関する研究である。そのなかで，Ayalew and Yamagishi (2005) は，GISとLogistic Regressionを組み合わせたもので，さまざまな要素の重み付けを行って斜面災害危険度ゾーンを区分する方法を示したもので，この分野では先駆的な論文で多く引用されている。また，Yamagishi, *et al.* (2007) は，2004年7月の新潟豪雨による崩壊と同年10月の中越地震による斜面崩壊を比較したもので，無数に発生した崩壊の分析と比較にGISが有効であることを示した。Van Westenはとくにホンジュラス テグシガルバ市をターゲットにして，GISで総合的な地すべりハザードマップの作成に長年取り組んでおり，Van Westen, *et al.* (2008) に総括している。自然災害，とくに土砂災害（landslide）をGISで扱うには，その基本情報ともいえるべきITインフラが整備される必要がある。それらのうちで重要なものは，DEMやDTMなど標高を示す地形データ（デジタル標高モデル）をはじめ，地形図，地勢図，地質図や土地利用図などの自然条件の地図など国土地理院の国土基本図，過去・現在の空中写真や国立研究開発法人 産業総合研究所 地質情報総合センターや地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 地質研究所（旧北海道立地下資源調査所）の地質図などの主題図などのデジタル化されたもので，それぞれの機関からWebで配信されている。我が国では2007年に成立・施行された「地理空間情報活用推進基本

法」により，法的にも整備されていて，国土地理院が先頭になって，全国的に「電子国土」が奨励され，このような政府機関や研究所からさまざまなデジタルデータが無料でダウンロードできるようになってきている。たとえば，国土交通省から国土数値情報ダウンロードサービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>) から各種のデジタルデータが無料でダウンロードできる。

とくに，地形・地質的災害にとって必要なデジタル標高モデル（50m_DEM）は地図センター<http://www.jmc.or.jp/>から日本を3区分したDVDを7,714円で購入でき，同標高モデル（10m_DEM, 5m_DEMなど）は無料で地理院のwebsite <http://www.gsi.go.jp/>からダウンロードできるし，実体視可能なアナログカラー空中写真（1975年ころの10000-15000分の1）についても，国土地理院の上記websiteにある地理院地図からダウンロードできるようになった。また，地質図については，国立研究開発法人 産業総合研究所の地質NAVI <https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php>（以下地質NAVIと呼ぶ）から5万分の1ベースのラスター地質図，20万分の1のシームレスベクター地質図がダウンロードできるし，最近では5万分の1地質図のベクターデータ (<https://datastore.gsj.jp/>) も配信され始めた。

斜面災害のデジタルデータについては，国立研究開発法人 防災科学技術研究所（NIED）（以下NIEDと呼ぶ）の地すべり地形分布図データベース<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/>があり，北方領土を除いた日本列島の5万分の1レベルの地すべり地形分布図が完成している（図-1）。また，大きな災害があると，国土地理院などが空中写真など詳細な地形データを配信している。とくに，地理院のwebsiteは，2013年10月に更新され，従来のものから大幅に刷新された。また，2014年3月には「地理院地図3D」も追加配信されて，スケールには限界があるが，どの地域でも地形図や空中写真などが容易に3D化されるのは画期的である。最近の地理院地図は，スマートフォンでも見られるように改善された（「地理院地図」<http://maps.gsi.go.jp/#5/35.362222/138.731389>）。つ ま

* 連絡著者 / corresponding author
〒003-0021 札幌市白石区栄通り2丁目8-30
Shiroishi-ku Sakae Dori 2 choume 8-30 003-0021 Sapporo Japan

り、最近頻発する崩壊などの土砂災害や地すべり地形の解析や分析にとっての基本的デジタル情報が整備されてきたことによって、GISソフトを使った解析も容易になってきた。

図ー1 日本の地すべり地形分布図(防災科学技術研究所(NIED)の地すべり地形分布図データベース)

我が国では、1995年1月の阪神大震災以降、2004年10月中越地震、2007年7月中越沖地震、2008年6月岩手・宮城地震、2011年3月東日本大震災と、立て続けに大きな地震が発生した。とくに、発生場所が中山間地の場合には大規模な土砂災害が発生した。また、2004年7月および2011年7月の新潟豪雨、2014年7月の長野県南木曽豪雨、同年8月の広島豪雨災害、同年8月の北海道礼文島災害など、集中豪雨が全国で頻発して、多数の崩壊が発生した。とくに2004年10月の新潟県中越地震からは、従来のアナログ空中写真のみならず、オルソ画像、LPデータ(レーザープロファイラー)画像などGISデータの取得が盛んになり、それにともないGISを活用した研究がおおきく発展してきた。2004年7月新潟豪雨による崩壊についてもいくつかの研究成果が発表されてきた。とくに、岩橋ほか(2007)、山岸ほか(2008)の研究はGISを使った解析で先駆的であり、その後の豪雨災害についてもGISデータの解析研究の蓄積がなされてきた。

一方、北海道に関しては、その再活動が危惧される地すべり地形分布図については、山岸ほか「北海道の地すべり地形デジタルマップ」(2012)を、1993年の紙ベースの「北海道の地すべり地形」(山岸, 1993)のデジタル版として出版した。また、NIEDは従来の紙ベースの5万分の1地すべり地形分布図(紙ベース)も北方領土を

除いて北海道全域を網羅した。同時に、NIEDのWebサイトから「地すべり地形分布図データベース」としてデジタル版も、無料でダウンロードできるようになっている(<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/index.html>)。

本文では、豪雨による崩壊分布と地すべり地形分布の二つの事象についてGISの解析例を紹介する。両者ともにlandslideではあるが、規模や要素(地形・地質)などに相違があり、GIS解析手法にも相違がある。その意味で、GIS landslideの異なった手法を紹介するため二つの事象解析を報告する。まず、崩壊分析については、1983-2009年に発生した我が国の豪雨崩壊について、主に地理院のサイト(<http://www.gsi.go.jp/>)の基盤地図情報の10m_DEMを活用して、地形傾斜との関連をGISで解析した。次に、地すべり地形分布について、山岸ほか(2012)による北海道の地すべり地形分布図、NIEDのそれと、地質NAVI(<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>)のデジタル地質図データとの関連を検討した。さらに、(株)シン技術コンサルの総合地形解析システムを使用して、それらと地形情報との関連を検討した例を紹介する。

2. 豪雨崩壊のGIS解析について

同時多発的に発生する豪雨による崩壊のうち表層崩壊(崩壊深度1m~数m, 幅・長さ数m~10数m, 崩壊量数100m³~数千1000m³)のGIS解析を以下の6地域の崩壊を対象に実施した(図-2)。いずれも写真判読による認定で、1983年島根県浜田地域の場合は災害発生直後の8,000分の1白黒写真を使用し、ほかのすべてはデジタルのカラー空中写真で判読したデータを使った。つまり、1983年の島根県浜田地域、2003年北海道日高地域、2004年の新潟県出雲崎地域、同じく2004年の愛媛県新居浜地域、2009年の山口県防府地域、2010年の広島県庄原地域の主に表層崩壊について10m_DEMの地形データを使っ

図ー2 今回解析した豪雨崩壊地の発生地域

てArcGIS10.2で解析した。

GIS計算手法: いずれの崩壊データも、崩壊源、流送部、堆積部が認識され、それぞれポリゴンデータとして示されるが、解析にあたっては、崩壊源ポリゴンのみを使用し、それをジオメトリ変換して崩壊ポイントとして使用した。崩壊数を得るには、ArcGISのエクステンションSpatial Analystで、まず、計算範囲に切り取ったラスターデータ(10m_DEM)からSpatial Analystのサーフェスで傾斜の分布図を求める。ついで、同じくSpatial Analystで、抽出→マスクで、崩壊ポイントと傾斜区分ラスターを入力する。得られたラスターファイルを5°ごとに再分類すると、5°ごとの崩壊ポイントに対応した個々のラスターレイヤーセルが得られる。その属性テーブルをdbfでエクスポートしてEXCELで計算して崩壊数と傾斜区分との関連をグラフ化した。崩壊面積率を得るには、崩壊源ポリゴンを使って同様に計算して、傾斜区分ごとの崩壊地ポリゴンに対応するセル(10m × 10mのメッシュ)の組み合わせからなる傾斜区分ラスターレイヤーを得る。さらに、傾斜分布ラスターを5°ごとに再分類したラスターを作って、崩壊源ポリゴンから得たラスターレイヤーのセル数を、再分類された傾斜区分ラスターのセル数(いずれも属性テーブルに表示しdbfにエクスポート→EXCEL)で割ってパーセントで表示した。

2.1 1983年島根県浜田地域の豪雨崩壊の解析

島根県浜田地域(図-3)では、1983年7月20日から23日に豪雨があり、多数の崩壊と洪水を発生させた。総降水量は742mmで、最大日雨量は372mmに達した。この地域は標高400mまでの丘陵からなり、岩盤の地質は、古生代と中生代の変成岩や花崗岩、さらには古第三紀の火山岩からなる。多くの崩壊は表層崩壊で、崖錐地形や風化土層から発生している。とくに、地質的には花崗岩地帯で最も頻度の高い傾向がある。

これらの崩壊を空中写真で判読し(Pimiento and Yokota, 2006)、その分布を地理院の10m_DEMを使ったGIS解析により、地形傾斜と標高との関係を検討した。標高との関連で見ると、全地域での崩壊面積率は100m

図-3 1983年7月の島根県浜田崩壊分布と解析範囲(PimientoとYokota, 2006による判読)

–350mより高い標高で高くなる。崩壊数で見ると、標高150–200mでの459箇所へと増加し、それより高度を増すと崩壊数は減少する。一方、傾斜との関係で見ると、全域での崩壊数は傾斜区分(Slope Classes)25–35°にピークがあり(図-4)、崩壊面積率では30–35°にピークのある、ややきれいな正規分布をしめし、最大値は3.5%近くに達した(図-5)。

図-4 1983年島根県浜田崩壊の崩壊数と傾斜区分との関係

図-5 1983年島根県浜田崩壊と崩壊(面積)率と傾斜区分との関係

2.2 2003年北海道日高地域の豪雨崩壊の解析

2003年8月9–10日、北海道日高地方で台風10号が日高山脈に近づいた。この台風は2日間で合計400mmの降雨をもたらした。そして最大時間降雨で50mmが記録され、合計20,000箇所の崩壊が沙流川流域や厚別川流域で記録された(寒地土木研究所資料)。本文では厚別川流域での崩壊(図-6)について基盤地図情報の10m_DEMによる地形標高データを使って、傾斜との関連を解析した。結果は崩壊数は20–25°にピークがある(図-7)が、崩壊(面積)率は全体にバラつきが大きい傾向があった(図-8)。

図一 6 2003年8月の北海道日高崩壊の分布と解析範囲（寒地土木研による判読）

図一 7 2003年北海道日高崩壊の崩壊数と傾斜区分の関係

図一 8 2003年北海道日高崩壊崩壊面積率と傾斜区分との関係

2.3 2004年新潟県出雲崎地域の豪雨崩壊の解析

2004年7月13日, 新潟県中越地域で梅雨末期にともなう豪雨が降った。降雨量は24時間で400mmに達し, 主に刈谷田川や五十嵐川の信濃川の支流の破堤による氾濫災害で14名が犠牲となった。同時に丘陵地域では崩壊が発生し, これにより2名が犠牲となった。崩壊は合計3,000箇所以上が空中写真で判読された(アジア航測(株)による)。写真判読と現地調査では, 2種類の崩壊(表層崩壊と深層崩壊タイプ)があったが(山岸ほか, 2004), 解析には区別せず, すべてを使用した, ほとんどは表層崩壊であった。

これらの崩壊は出雲崎から栃尾にかけて発生したが, 出雲崎地域では1961年にも同様な崩壊が多数発生したこ

とが1962年の空中写真でわかっている。さらには1976年から1978年にかけても発生したことが知られている(山岸ほか, 2008)。

本文では, 出雲崎—栃尾地域での2004年の崩壊のうち出雲崎付近のもの(972個; 図-9)について, GISにより崩壊と地形傾斜の関係を解析した結果について述べる。地形標高データは北海道地図(株)のGISMAP(10m DEM)を使って行った。この場合, 傾斜区分(Slope

図一 9 2004年7月の新潟県出雲崎付近の表層崩壊の分布と解析範囲（アジア航測(株)の判読による）

図一 10 2004年新潟県出雲崎崩壊の崩壊数と傾斜区分との関係

図一 11 2004年新潟県出雲崎の崩壊(面積)率と傾斜区分との関係

Classes) をおよそ 5° ごとに再分類して, それぞれの崩壊数と崩壊面積率を計算した。その結果, 崩壊数は $25-30^{\circ}$ にピークがある (図-10) が, 崩壊面積率では 50° くらいまでは徐々に増加するが, それより上は急激に増加する (図-11)。

2.4 2004年愛媛県新居浜地域の豪雨崩壊の解析

2004年には9月から10月にかけて合計10個の台風が日本列島に上陸した。とくに9月27日に台風21号の進路が

図-12 2004年10月の愛媛県新居浜市周辺の表層崩壊の分布と解析範囲 (朝日航洋(株)の判読による)

図-13 2004年愛媛県新居浜崩壊の崩壊数と傾斜区分との関係

図-14 2004年愛媛県新居浜崩壊の崩壊(面積)率と傾斜区分との関係

南西日本を通過し, 9月29-30日に四国を通過した際, 400mmを超える降雨が記録された。それにより, 愛媛県新居浜市周辺は多数の崩壊が発生し, 1,700箇所以上に達したことが朝日航洋(株)により明らかになった (図-12)。

GISを活用した同様の解析では, 地理院の基盤地図情報の10m_DEMを使って傾斜と崩壊数と面積率を計算すると, 崩壊数では傾斜区分 $10-20^{\circ}$ にピークがあり (図-13), 崩壊(面積)率では, 傾斜とともに増加し, 一度減少するが $40-45^{\circ}$ にピークがある (図-14)。

2.5 2009年山口県防府地域の豪雨崩壊の解析

2009年7月20-21日にかけて, 山口県防府地域を豪雨が襲った。とくに, 21日には日雨量が275mmに達し, 最大時間雨量は72.5mmに達した。この豪雨は崩壊とそれにとまう土石流を発生させて老人ホームを中心に14名が犠牲となり多くの家屋が破壊された。崩壊の著しかった剣川流域 (図-15) で, 地理院基盤地図情報10m_DEMを使って, 同様に崩壊と傾斜の関係を調べると, $25-30^{\circ}$ に崩壊数のピークがあり (図-16), $15-35^{\circ}$ に崩壊面積率が緩く上昇するが 35° から急激に下がる傾向がある (図-17)。

この地域では, 災害直後にLPデータ (レーザープロファイラー) 画像 (1 m_DEM) が国土交通省により取得された。災害発生前の2005年にも同じ精度で撮影され

図-15 2009年7月の山口県防府地域の豪雨崩壊の分布と解析範囲 (パスコ(株)による判読)

図-16 2009年山口県防府崩壊の崩壊数と傾斜区分との関係

図一17 2009年山口県防府崩壊の崩壊（面積）率と傾斜区分との関係

図一18 2009年の崩壊後に撮影されたLPデータ（1 m DEM）と崩壊以前（2005）年のLPデータの差分を計算して作成したマップ

図一19 図一18の枠の部分(A)に崩壊の分布図を重ねたもの

ていたもので、詳細な比較が可能となった。図一18はLPデータの2005年と2009年との差分をとったものである。図一18の黒っぽい部分はマイナスで浸食（崩壊を含む）を意味し、白っぽい部分はプラスで堆積（土石流）を示す。図一19は図一18のA地域の浸食部分に前述の崩壊ポリゴンを重ねたもので、浸食谷の頭部が崩壊しているのがわかる。地質的には、これらの崩壊は中生代の花崗岩地域に集中していて、その風化帯である、“マサ”の崩壊といえる。

2.6 2010年広島県庄原地域の豪雨崩壊の解析

2010年7月16日に広島県庄原市で豪雨による多数の崩壊や土石流が発生した。その日の日雨量は59mmに達し、7月の合計雨量は416mmに達した。この豪雨により発生した多数の崩壊については、パスコ(株)と国際航業(株)との共同運航による空中写真の判読（パスコ(株)）により崩壊分布（図一20）が確認された。ほかの地域と同様に、崩壊数（700箇所）について、GISで地理院基

図一20 2010年7月の広島県庄原市の豪雨崩壊の分布と解析範囲（パスコ(株)の判読による）

図一21 2010年広島県庄原崩壊の崩壊数と傾斜区分の関係

図-22 2010年広島県庄原崩壊の崩壊(面積)率と傾斜区分との関係

盤地図情報10m_DEMを使って解析した。

その結果, 最大崩壊数の傾斜区分は25-30°にあり(図-21), 崩壊面積率は40-45°にピークがあるが, 例外的に30-35°で高く, 50-55°で急激に高くなっている(図-22)。地質的には, いずれの崩壊も中生代の流紋岩と玄武岩地域(地質NAVIによる)で発生しており, 両者の相違はない。

2.7 豪雨崩壊のGIS解析のまとめ

本文での豪雨崩壊のGIS解析は, 1983年7月島根県浜田, 2003年8月北海道日高, 2004年7月新潟県出雲崎, 2004年10月愛媛県新居浜, 2009年7月山口県防府, 2010年7月広島県庄原の崩壊源ポリゴンデータと, デジタル標高モデル(10m_DEM)の地形データの傾斜との関係の計算を行った。

その結果として, 崩壊数の最大値の傾斜区分はいずれもやや正規分布に近いパターンをしめし, そのピークは20-30°でやや類似していて, 崩壊面積率は, 浜田が35°の正規分布に近いが, 日高が55°, 出雲崎が60°, 新居浜

では45°に, 防府では35°, 庄原では45°くらいにピークがあり, それぞれバラバラなパターンをしめし一定していない(表-1, 図-23)。

表-1に示すように, それぞれの地域の岩盤地質は異なっている。つまり, 日高地域, 新居浜地域, 出雲崎地域はいずれも砂岩や泥岩の堆積岩であり, 防府地域, 庄原地域は中生代の岩石である。しかし, 日高の表層部は第四紀の火山灰や軽石層が1m以上被っており, また, 防府の表層部は花崗岩の風化した“マサ”と呼ばれるザクザクの粗い砂である。表層崩壊は地すべりと違って岩盤の地質に左右されるのではなく, こうした表層の風化物の特性に起因しているといえる。つまり, 地質との関連を検討する場合, 表層崩壊は岩盤の風化の仕方や岩盤を覆う火山灰などに関係しているといえるが, 今回は10m_DEMの標高モデルから主に地形傾斜との関連を解析したものである。この場合, 崩壊数については, いずれの崩壊地も傾斜区分20-30°くらいにピークがあり一定であるが, 崩壊面積率についてはバラツキがある。このことは, データは十分ではないが, 表層部の地質や植生など, ほかの要素との関連を示しているのかも知れない。

図-23 本文中扱った豪雨崩壊のまとめ

表-1 わが国の豪雨による表層崩壊のまとめ

崩壊災害名	1983 浜田崩壊	2003 日高崩壊	2004 出雲崎崩壊	2004 新居浜崩壊	2009 防府崩壊	2010 庄原崩壊
最大の崩壊数を示す傾斜区分(°)	25-30	20-25	25-30	10-20	25-30	25-30
最大の崩壊(面積)率を示す傾斜区分(°)	30-35	40-55	55-60	40-45	30-35	40-45 (例外的に30-35)
合計崩壊数	2404	3404	3095	1745	1460	700
全崩壊地の最大面積(m ²)	27794.1	21474.1	40458.8	24358	6132	4122.1
全崩壊地の最小面積(m ²)	25.8	22.4	57.5	139.4	1.3	35.1
全崩壊地の平均面積(m ²)	1427.1	682.9	702.8	1392.4	196	440.8
岩盤地質	白亜紀花崗岩、変成岩	新第三紀砂岩・泥岩	新第三紀砂岩・泥岩	白亜紀砂岩・泥岩	白亜紀花崗岩	中生代流紋岩・玄武岩
表層地質	マサ土	第四紀火山灰・軽石層	風化砂岩・泥岩	風化砂岩・泥岩	マサ土	風化火山岩

3. 北海道の地すべり地形分布図のGISマップの空間情報としての活用

我が国では、深度の大きいlandslideつまり、地すべり地形は5万分の1のスケールで、紙ベースあるいはGISデータとして配信されている。とくに、GISデータについては、北海道については、のべたように、「北海道地すべり地形デジタルマップ」(山岸ほか, 2012; 図-24)と、NIEDの地すべり地形分布図データベース (<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/index.html>; 図-1))が使用できる。本文では、前者(以下山岸マップとよぶ)と、後者(以下NIEDマップとよぶ)の北海道の部分などを使ったGIS解析を紹介する。

図-24 北海道の地すべり地形分布図(山岸ほか, 2011)

3.1 北海道における地すべり地形の分布図の活用

山岸ほか(1996)の「北海道の地すべり地形データベース」には合計12,800箇所の地すべり地形と、それぞれの属性をEXCELのデータとして格納している。それは5万分の1地すべり地形ごとに番号が付されており、それぞれの地すべり地形の最高標高、幅、長さ、面積(楕円で計算)、移動方向、森林所有区分などが示されている。最近では、GISが普及してきたので、山岸マップでは、ArcGISのshpファイル形式で提供している(山岸ほか, 2012)。また、NIEDマップでは、shpファイルの属性テーブルとしては個々の地すべりの滑落崖の分類などが格納されている。これらの地すべり地形GISデータと、デジタル標高モデルを基本とした地形数値地図と産業総合研究所地質NAVIによる地質図との関連をそれぞれ検討した。つまり、10m_DEMなどの標高データを画像システムを使って、地すべり地形がどの程度表現されるか、また、ラスターやベクターの地質図から、地すべり分布図と地層傾斜、傾斜方向との関連性などを検討した。

3.2 デジタル画像システムによる地すべり地形の検討

デジタル画像システムとは、数値データを使って画像を表現・解析するシステムで、さまざまなものが普及している。例えば、アジア航測(株)による赤色立体地図(千葉, 2006など)、国際航業(株)によるエルザマップ(EL-SAMAP)、朝日航洋(株)の陰陽図などがあり、LPデー

タ(レーザープロファイラー)の普及とともに広く活用され急速に進展している。とくに昨今の土砂災害の写真測量にはLPデータが必須になってきている。今回は、(株)シン技術コンサルが開発した総合地形解析システム俗称「きつね」(田中, 2008)を使用して、地すべり地形がどれだけ表現されているかなどを検討した。

本文では、このシステム(以下「きつね」とよぶ)を使用して、デジタル標高モデル(10m_DEM)と山岸マップやNIEDマップを重ねることにより、地すべり地形判読にどれだけ利用できるかを検討した。「きつね」は、DEMを使って、標高データ(1点)とその周辺の近傍データ(4近傍, 8近傍など)を使って、種々の地形特性を3次元的に表現するものである(田中, 2008)。この画像システムでは以下の地形量を表現できる。陰影図、標高段彩図、傾斜区分図(図-25)、比標高図(近傍点のうち、標高の最高点である接峰面=浸食原面)、最低点である接谷面(浸食下限=当該地点標高の3要素から浸食度合いを示すもの)、地貌図※(図-26)などである。

まず、札幌市西方の定山溪地域の10m_DEMを使った「きつね」の傾斜区分図(図-25a)に地すべり分布図

図-25 定山溪地域の10m_DEMから作成した地形解析システム「きつね」による傾斜区分図(a)。b 山岸マップを重ねたもの、c: NIEDマップを重ねたもの、d: それぞれの地すべり地形の滑落崖と移動体が該当する範囲(楕円で示した部分)

図-26 定山溪地域の10m_DEMから作成した地形解析システム「きつね」による地貌図(a)。b 山岸マップを重ねたもの、c: NIEDマップを重ねたもの、d: それぞれの地すべり地形の滑落崖と移動体が該当する範囲(楕円で示した部分)

※ 本稿完成後に、デジタル画像システム「きつね」の青地景図(北海道のみ: 10m_DEMによる)が(株)シン技術コンサルのホームページ(<http://shin-enginfo/chibouzu/index.html>; 参照日2015年11月20日)に公開された。

(NIEDマップ)を重ねる(図-25b,c,d)と,地すべりの滑落崖部分は $D=20-40^{\circ}$ くらい(図-25dの下の方の楕円で囲んだ範囲),地すべり土塊部分は $D=2-10^{\circ}$ くらい(図-25dの上の方の楕円で囲んだ範囲)と読み取れる(図-25b,c,d)。

このソフトの特徴である地貌図は地形を表すいくつかの指標を組み合わせることによって誇張した“疑似地形”として表現するもので,その場合の組み合わせの要素は“地貌指数”の値として算出され,地貌指数($GTI = \log$ 【箇所標高 $\times \tan$ (箇所傾斜) $\times$ 比標高】)で表わす。なお,地貌指数 GTI は常用対数であり,単位は無名数である。

この地貌図で,同じく定山溪地域のもの(図-26a)に地すべり地形分布図(NIEDマップ)を重ねると(図-26b,c,d),地貌指数(GTI)では地すべり滑落崖は $GTI=2.4-3.0$ (図-26dの下の方の楕円で囲んだ範囲),地すべり土塊部分は $GTI=2.0$ 以下で,内部の起伏によって数値が多少変化する(図-26dの上の方の楕円で囲んだ範囲)。この地貌図を使って,地すべり地形を判読した例では,渡邊・田中(2008)は,地すべり規模が 0.3km^2 から 0.5km^2 では,点数で表した明瞭度の高い地すべり地形(山岸マップ)の抽出率は約13%, 0.5km^2 から 1km^2 の規模では約32%, 1km^2 以上のものでは約62%という結果を得たことから, 1km^2 以上の規模を有する比較的明瞭な地すべり地形であれば,50mメッシュを使った地貌図によって地すべり地形は識別可能であるとのべている。

以上のように,「きつね」の最大の特徴は単なるViewerでなく,地形を数値として表現できることである。

3.3 GISによる地すべり地形分布と地質構造との関連

堆積岩地域の例として,函館市西方の木古内図幅(秦光男・垣見俊弘,1979)地域を例にあげる(図-27,28)。木古内図幅地域には,主に新第三紀の泥岩や砂岩などの堆積岩が広く分布していて,その地域に地すべり地形が多数存在する(図-27)。地層の傾斜度とすべり地形分布(NIEDマップ)をみると(図-28),見た目では地層の緩傾斜地域(図-28の東西両側の黒っぽい部分)に地すべりが多いように見える。定量的にするため,表層崩壊で実施したと同様の方法で 10° ごとの地層の傾斜区分図と地すべり数との相関を示すと $20-30^{\circ}$ の地層傾斜の範囲に地すべりが多いことがわかる(図-29)。この図は地層傾斜度のポイントデータからArcGIS10.2のSpatial Analystの内挿→クリギング(Kriging)で等傾斜度マップができるので,それと地すべりの数をGISでラスタ解析したものである。

つぎに,図-30では,地層の走向傾斜(傾斜は短い直線)と地すべり(山岸マップ)の滑動方向(地すべり地内の滑落崖に直交する長い直線)を示す。これによると,地層傾斜の方向と地すべりの方向は直感的にはほぼ一致しているが,定量的にみるためにGISで計算すると,地層の傾斜方向と地すべりの滑動方向は,ほぼ整合的である(図-31)。つまり,この地域の地すべりの多くは流

図-27 木古内地質図と地すべり分布図(NIEDマップ)

図-28 木古内地質図の地層傾斜分布図に地すべり分布図(NIED)を重ねたもの。背景は地層の傾斜区分図で,黒っぽいほど傾斜は緩くなる

図-29 GISで 10° ごとの地層傾斜区分と地すべり個数の関連を計算したもの

図-30 木古内地質図の地層の走向傾斜分布と地すべり(山岸マップ)の滑動方向

図-31 木古内地質図の地層の傾斜方向（時計回りの360°読み）と地すべり（山岸マップ）の滑動方向の相関

れ盤的であることを示唆している。

4. まとめ

本報告は, 1) 豪雨崩壊のGIS解析と, 2) 地すべり地形分布図のデジタルデータと地形や地質との関連について検討したものである。わが国では, 時間雨量100mmを超える豪雨が局所的に発生しやすくなり, 台風とともに豪雨による崩壊が頻発し, とくに同時多発的に発生することが多い。このように膨大な数のデータを解析する手法としてGISが有効である。もちろん, この技術では個々の崩壊地を捉えるには限界がある。しかし, 現に著者の一人山岸の経験では, 2004年の出雲崎地域の崩壊で現地調査ができたのは, 10%にも満たなかった。

本報告では, 1) については, 豪雨による同時多発型の崩壊の数や面積率を10m_DEM (デジタル地形データ) との関連で解析した。この解析では豪雨による多くの表層崩壊では, 地形を大きく変形させることがないので, 地形との関係が重要と考えて, とくに地形傾斜と崩壊数や密度を検討した。結果としては, 崩壊数はやや正規分布にちかく, 25-30°くらいにピークがあることは共通しているが, 崩壊密度 (面積率) は地域によりバラつきがあった。このことは, 傾斜だけでなく, 斜面の表層地質や植生が反映されているのかも知れない。2) については, NIEDや山岸ほか (2012) の地すべり地形分布図のデジタルデータを, 10m_DEMを使った地形解析システムによる図 (傾斜区分図, 地貌図) に重ねて, どの程度地すべり地形が表現できるかを検討した。また, ラスター地質図から地層の傾斜方向と地層傾斜を読み取ってデジタル化したものと地すべり地形分布デジタルデータから, 地質構造との関連付けを試みた。総合地形解析システム「きつね」による傾斜区分図や地貌図でみると, 地すべり地形の範囲は数字で表現できるが, データがまだすくなく今後の検討にまたれる。

以上のように, 1) 豪雨崩壊のGIS解析では10m_DEMによる地形傾斜との関連を, 2) 地すべり地形分布図の

GIS解析では地質図と地形数値情報との関連を扱った。いずれも大量のデータを, 地形や地質との関連で定量的に処理できることがGISの優位性であるが, これらをハザードマップまで高めるには, 豪雨崩壊であれば, 地形だけでなく, 表層地質, 植生分布, 気象条件など多くの要素がからんでいるので, その重みづけが難しいのが実情である。

また, 地すべり地形分布については, その再滑動が問題であり, 今回の例のように, 地質構造でも堆積岩の地層傾斜などとの関連はある程度把握できるが, 地すべりが多く存在する断層破碎帯や火山岩地帯の岩相境界などは, 詳細な地質図を独自に作成する必要がある。地質NAVIから配信されているベクター地質図は20万分の1レベルであり, 5万分の1レベルの地すべりマップで相関がいいのはその岩相のみである。より詳細に地質構造との関連を見るには5万分の1地質図デジタルマップが必要になるが, 地質NAVIからの無料ダウンロード (<https://datastore.gsj.jp/>) できるのは, まだ, 2015年2月現在60図幅程度であり, 今後に期待したい。

筆者らの今回の報告は, GISでも初歩的方法であり最先端とは言えるものではないが, とくに豪雨崩壊については, データがまだまだ少ない現状である。しかし, DEMデータやLPデータが容易に入手できるようになり, ドローンも普及してきた今日, GISを利用した崩壊・地すべりの調査・研究の条件は大いに整ってきたと言える。

謝 辞

今回の報告にあたり, データを提供していただいたエドガー ピミエント氏, および豪雨崩壊を判読してshpファイルを提供いただいた朝日航洋(株), アジア航測(株), パスコ(株)の各社, およびLPデータを提供いただいた国土交通省山口河川事務所に謝意を表す。また, 渡邊 司氏には, デジタル画像システム「きつね」の解析について, ご協力いただいた。

参考文献

- 1) Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005): The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology*, Vol. 65, pp. 15-31.
- 2) 国土地理院 (2015): 地理院地図, <http://maps.gsi.go.jp/#5/35.362222/138.731389> (参照日2015年5月10日)
- 3) 千葉達朗 (編) (2006): 活火山 活断層 赤色立体地図で見る日本の凸凹, 技術評論社(株), 135p.
- 4) 秦 光男・垣見俊弘 (1979): 木古内地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 56p.
- 5) 一般財団法人 地図センター: <http://www.jmc.or.jp/> (参照日2015年5月10日)
- 6) 岩橋純子・山岸宏光・神谷 泉・佐藤 浩 (2007): 2004年7月新潟豪雨と10月新潟県中越地震による斜面崩壊の判別分析, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, pp. 1-12.
- 7) 国立研究開発法人 産業総合研究所 (AIST) 地質調査総合センター: 地質NAVI <https://gbank.gsj.jp/geonavi/> (参照日2015年5月10日)
- 8) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所: 地すべり地形デー

- データベース, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/index.html> (参照日 2015年5月10日)
- 9) 国土地理院: 地理院地図, <http://www.gsi.go.jp/> (参照日 2015年5月10日)
 - 10) 国土交通省国土政策局国土情報課: 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (参照日 2015年5月10日)
 - 11) Pimiento, E. and Yokota, S. (2006): Distribution of slope failures following the 1983 San' in Heavy rainfall disaster in Misumi-Kituska area, western Shimane, Southwest Japan, Geoscience Rept. Shimane Univ., pp. 25–30.
 - 12) 田中富男 (2008): 数値地図で見る北海道の地形—目で見る地形の新たな展開, シン技術コンサル (株), 54p.
 - 13) Van Westen, C. J., Castellanos, E. Kuriakose, S. L. (2008): Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. Eng., Geology, Vol. 102, pp. 112–131.
 - 14) 渡邊 司・田中富男 (2008): 地貌図の活用法—地すべり地形の把握を例として—, 2008年株式会社シン技術コンサルタン技術研修発表会 概要集, pp. 11–18.
 - 15) 山岸宏光 (1993): 北海道の地すべり地形, 北海道大学図書刊行会, 392p.
 - 16) 山岸宏光・アヤレウルルセグド・大谷政敬・加藤晃司 (2004): 2004年7.13新潟県中越地域豪雨による同時多発斜面災害, 平成16年度 一般財団法人 日本建設情報総合センター (JACIC) 研究助成事業活動・報告, <http://www.jacic.or.jp/josei/itiran.html> (参照日 2015年5月30日)
 - 17) Yamagishi, H., Doshida, S. and Pimiento Edgar (2013): GIS analysis of heavy-rainfall induced shallow landslides in Japan, Landslide Science and Practice. Vol. 1. Landslide inventory and susceptibility and hazard zoning, Springer Verlag, pp. 601–607.
 - 18) 山岸宏光・川村信人・伊藤陽司・堀俊和・福岡浩編 (1996): 北海道の地すべり地形データベース (+CD-ROM), 北海道大学図書刊行会, 344p.
 - 19) Yamagishi, H. and Iwahashi, J. (2007): Comparison between the two triggered landslides in Mid-Niigata, Japan-by July 13 heavy rainfall and October 23 intensive earthquakes in 2004, Landslides, Vol. 4, pp. 389–397.
 - 20) 山岸宏光・斉藤正弥・岩橋純子 (2008): 新潟県出雲崎地域における豪雨による斜面崩壊の特徴—GISによる2004年7月豪雨崩壊と過去の崩壊の比較—, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, pp. 57–63.
 - 21) 山岸宏光ほか (2012): 北海道の地すべり地形デジタルマップ (+DVD), 北大出版会, 77p
(原稿受付2015年3月9日, 原稿受理2015年7月6日)