

GISに基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動解析と過誤確率分析法 —2008年岩手・宮城内陸地震での事例研究—

Buffer movement analysis and blunder probability analysis for GIS-based landslide susceptibility mapping—A case study of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, Japan—

濱崎英作^{a)*b)}, 檜垣大助^{c)}, 林 一成^{d)}

Eisaku HAMASAKI, Daisuke HIGAKI and Kazunori HAYASHI

Abstract

During past two decades particularly after the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake, GIS analyses of co-seismic landslides in relation to geological and geomorphological settings have been improved, and studies on mechanical modeling of such landslides have been considerably advanced. However, these analysis using GIS alone was insufficient to complex factor analysis because of the problems in usage procedures of statistical tools and PC memory, even though GIS can support analysis of a lot of statistical layers. In addition, verification of landslide susceptibility mapping by GIS has not been inspected by a validity model up to now.

In this paper, we have developed new analytic techniques based on buffer movement and blunder probability which clarify relevant factors of landslide occurrences by both earthquake and heavy rainfall and facilitate risk assessment supplementing GIS. Buffer movement analysis is the technique that collects GIS statistical data in the circles with radius R moving on the plan map. Blunder probability analysis is one of the objective functions to judge the compatibility of the landslide susceptibility mapping. We describe the methodology of these analysis and the results of AHP landslide susceptibility mapping as a case study of the landslides and slope failures by the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake.

Key words : Landslide, Buffer movement analysis, Blunder probability analysis, Landslide susceptibility mapping, AHP

和文要旨

過去二十年間、特に2004年新潟県中越地震以降、地質や地形情報を基にしたGISでの地震地すべりにおける解析研究が進んできている。またGISを利用した地すべりの要因分析や広域力学的モデルに関する研究もかなり進んできている。しかし、昨今の既存GISプログラムが統計上の分析モデルを多くサポートするとはいえ、広域解析を扱う上ではPCメモリの問題などもあってGIS単独では複雑な因子分析等で十分な機能を有しているとはいえなかった。また、GISを用いた斜面変動予測評価においても、これまではその適合性について目的関数などの客観的手法での検証が十分なされていないと言いがたい。このことから本論文では、GISのこれらの問題を補完する新しい解析手法としてバッファ移動解析と過誤確率分析法を開発提案した。バッファ移動解析は、半径Rの円領域をもって平面地図上を移動してGIS統計データを収集する技術で、地震や降雨時の地すべり発生要因を明確にするためのツールである。過誤確率分析法は、地すべり危険度マッピングのモデル適合性を判断するための、目的関数による客観的な判定機能を有する手法である。本論文は、これらの分析の方法論を解説するとともに、2008年岩手・宮城内陸地震による地すべりや斜面崩壊について、これらの手法を用いたAHP斜面変動予測評価のケーススタディを説明するものである。

キーワード : 地すべり, バッファ移動解析, 過誤確率分析法, 斜面変動予測評価, AHP

1. はじめに

最近20年、特に2004年の新潟県中越地震以来、地理情報システム (GIS:Geographic Information System, 以下GIS) を用いた斜面変動発生場の解析や、それらを駆使しての崩壊、地すべり発生機構モデルの研究が相当に進んできたといえる (たとえば、ハスバートルほか, 2009; 林, 2013; 八木ほか, 2007)。

ただし、GISソフトウェアによる解析では、標高データやそこから求められる各種の地形量がメッシュ単位で表現されることから、結果として斜面変動の危険度評価単位もDEMデータの解像度に依存している場合が多い (例えば、西田ほか, 1997; 内田ほか, 2004; 岩橋ほか, 2008など)。この場合、相対的に規模の小さい崩壊等の

分布は説明できても、地すべりなどの規模の大きな現象には適用が困難であるとの指摘がある (小山内ほか, 2007)。特に、地すべりのような規模の大きな現象は、数mから50mメッシュ単位の地形量よりも、斜面全体の特性を代表するようなより広い範囲の地形的特徴との相関を検討する必要があると考えられる。

今回、それらの問題を補完し、地震や降水・融雪などがトリガーとなる崩壊・地すべりの発生要因を明らかにしてリスクモデル図などの作成を容易にすべく、いくつかの新しい解析手法を開発した。すなわち、①要因抽出とAHP斜面変動予測評価 (AHP Landslide Susceptibility Mapping) のための“バッファ移動解析”と②結果として作成された崩壊・地すべり発生モデルの適合性を確率として判定するための“過誤確率分析法”である。

これらを用いて解析した結果、過去の地震誘因型崩壊・地すべりの現場において実態との良好な適合性を示した。また結果として地震地すべり・崩壊の発生場では、いくつかの共通の要因が崩壊・地すべりの発生に重要な意味を持つことがわかった。さらに、それらの要因を

* 連絡著者 / corresponding author

a) (株)アドバンテックテクノロジー
Advantech Co., LTD.
〒980-0013 仙台市青葉区花京院1-4-8-1202
1-4-8-1202, Kakyoin, Aobaku, Sendai, Japan

b) (株)三協技術
Sankyotek technical engineer Co., LTD.

c) 弘前大学 農学生命科学部地域環境工学科

Faculty of Agriculture and Life Science, Hirosaki University

d) 奥山ボーリング (株)
OKUYAMA BORING Co., LTD.

AHP法に基づき階層化し重み付けすることで, AHPの総スコアによる有効なAHP斜面変動予測評価が可能となった。

本論文では, この“バッファ移動解析”と“過誤確率分析法”の手法を紹介する。また, その要因分析手法の適用事例として, 2008年岩手・宮城内陸地震による崩壊・地すべり発生場の分析事例を示すとともに, 検討されたAHP斜面変動予測評価の事例を示す。

2. GISを用いたこれまでの斜面変動予測に関する研究と問題点

GISは位置をもったデータとして電子化し空間情報を統合化することで検索, 集計, 分析が容易で簡単な統計処理などでもできる特徴を有している。GISの防災分野における活用の試みはすでに多くあり, 国または各地方自治体によってハザードマップ作成に活用されている。GISは数値標高モデル (DEM) を活用できるばかりでなく, 土地利用図や地質図, 空中写真, 衛星画像等, 都市計画図, 台帳情報, ハザードマップ等のさまざまなデータをレイヤーとして重ねて表現できるものである (図-1)。したがって, GISは地域住民の避難計画や災害対応計画策定のための情報発信媒体としてもはや重要なツールとなっている。また, 地震や降雨などによって地すべりや崩壊などの発生する可能性が高いエリアを示す斜面変動予測もGISを中心とした研究が2005年ころ (Ayalew and Yamagishi, 2005) から散見されるようになって

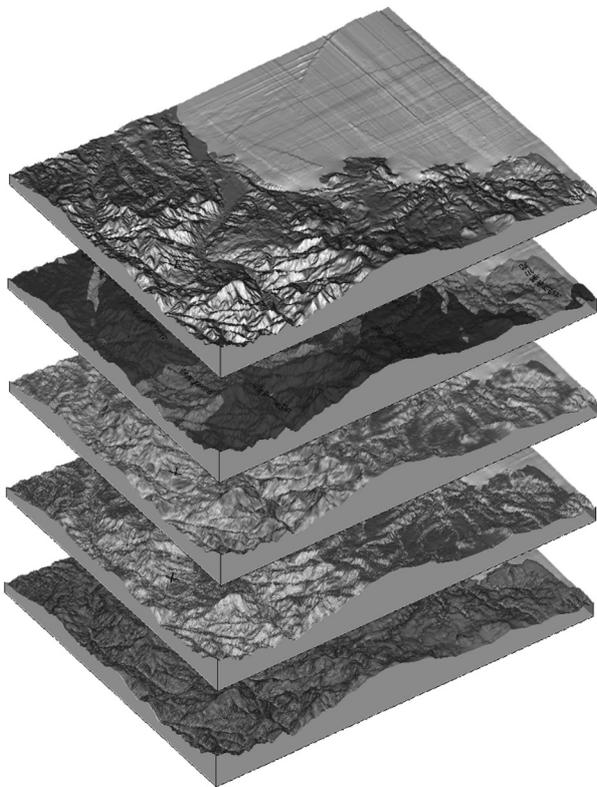


図-1 GIS模式レイヤー図

Fig.1 Example of layered model for GIS overlay operations

ている。かくしてGISは斜面防災での予測研究に欠かせないツールとなってきているといえよう。

他方, 最近のGISを用いた斜面変動予測に関する研究では, 地すべり・崩壊分布データを用いた斜面災害発生モデルを構築するため, さまざまな地形・地質条件を重ね合わせ, さらにAHP法 (Kamp *et al.*, 2008; Yalcin *et al.*, 2011) や最尤度法 (佐藤ほか, 2005), 判別分析法 (岩橋ほか, 2008), ロジスティック統計分析 (Ayalew and Yamagishi, 2005; Mancini *et al.*, 2010), または他の物理モデル (濱崎ほか, 2007) を併用するなどの手法が発表されている。また評価要因分析では傾斜度や, 曲率, 岩相 (地質), 土地利用, 河川からの距離等々を種々のアルゴリズム (たとえばAHPモデルやファジーモデルなど) を利用して計算し, セルまたは地すべりブロックごとに発生危険度を与えるなどが紹介されている (濱崎ほか, 2003; Miyagi *et al.*, 2004)。

ただし, 研究の多くで, 特に日本以外では崩壊と地すべりを分けて扱わない事例 (Yalcin, *et al.*, 2011) なども散見され, また地すべりや崩壊発生域を規模も含めた面情報 (ポリゴン) として扱わず, 点情報 (ポイント) として処理するケース (例えば, Zhu and Huang, 2006) がある。前者の崩壊と地すべりを分けられない場合の問題点のひとつは, 本来要因が異なる可能性のあるものを同時に扱うために共通の因子部分でしか評価されなくなり, 全体のフォーカスが甘くなりがちなことである。たとえば一般に重要因子と判断される斜面勾配で着目したばあい, 地すべりと崩壊の発生しやすい勾配領域が明らかに異なるにもかかわらず, 同時に扱うことで勾配要因の寄与率が低く見積られる恐れがある。一方, 後者の地すべり・崩壊発生域をポイント情報としてしか扱わない場合の問題として, スケールに対する重みづけを別途考慮する必要があり機械的な抽出や分析が難しくなるとともに, 本来大きさが要因の意味が異なる可能性がある場合でも, それがあいまいに扱われてしまいがちなことである。

GISの処理機能に目を向けると, 市販のものは統計処理機能も備わっており, 評価すべきフィールドにおける地形量やさまざまなデータの空間統計量 (たとえば平均値, 最大値, 最小値, 合計値, 最頻値, 標準偏差, 頻度分布など) を収集してデータベース化できる。また, ArcGISなどで用いられているフォーカル統計のように, セル中心に周辺データの統計データを取り込んだ表示をさせることも可能である。しかしながら, 実事例を用いた地すべり等の非発生・発生場の分離のための判別分析や, モデル適合性判定のためのツールに関して, 既存のGISだけでは不十分で他の統計ツールを併用する必要がある。また, GISを用いた研究のいくつかは, 成果としてのリスクモデル図の妥当性評価において, 目視のみの定性的検証しかないものが多いのも実情である。

3. バッファ移動解析と過誤確率分析法

今回、先に述べたいくつかの問題に対応するためGISを用いた斜面解析の補助ツールとして開発したバッファ移動解析と過誤確率分析法の手法について述べるとともに、附帯する各種解析との連携及びその応用方法、AHP斜面変動予測評価までの流れについて述べる。

3.1 バッファ移動解析と積層棒グラフによる分析

3.1.1 バッファ移動解析

GISによるデータ収集統計解析および斜面変動予測評価を行う際、これまでの多くが災害教師データをその中心点の位置情報(ポイント)として与え、さらに地すべり・崩壊の種類や規模、傾斜、岩種、地質の構造、断層からの距離などのような整理を行う。そして、この整理に基づき地すべり・崩壊発生の特徴を統計的に分類し、発生主要因を分析する方法が最も一般的なパターンである。このような手法は、現象を微細に検討する上で欠かせないが、発生・非発生の分離を行う際、地図上での発生領域が非発生の領域に比べると通常は圧倒的に少ないため、発生場の要因を統計的・機械的に数値化・定量化しモデル化するには不十分なことが多い。

そこで、GIS上で発生・非発生場がある一定領域をまとめながら周辺データとの関係を概括的・機械的かつ容易に分析することが可能な手法として、バッファ移動解析法を開発した。これは、移動平均(Moving Average)のように時系列データがある区間で平滑化しつつ、視点を変えながら全体の傾向・特徴を概括することに似ている。

バッファ移動解析は、図-2に示すように間隔(dx, dy)でグリッド分割されたセルの集合領域において、バッファ(円領域)半径(R)とスキップ量(Skip)で定義され、移動平均法のように地理上の領域を同じ面積で括りながら扱う。すなわち、バッファ移動解析は等しい間隔でグリッド分割されたGISのセル上においてある一定の範囲を等しくサンプリングしながら、一定距離でスキッ

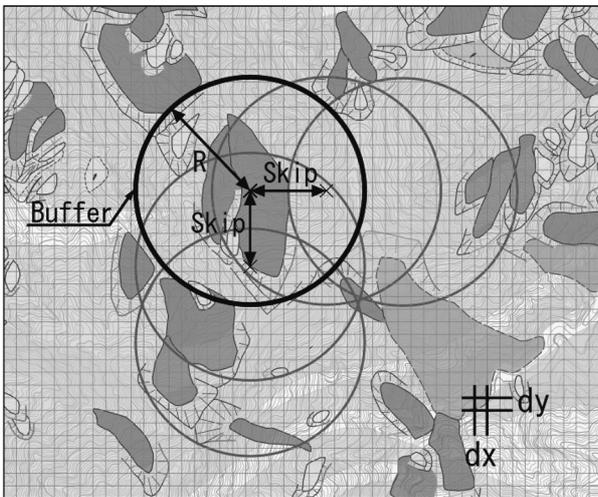


図-2 バッファ移動解析の概念図

Fig. 2 Conception figure of Buffer Movement Analysis

プさせてデータを集積化する手法である。各バッファには目的変数(教師データ)となる発生した地すべり・崩壊のセル数(セル数×dx×dy≒面積)が与えられ、かつ各地形量(勾配、曲率、起伏度、谷次数、地上開度等の平均値や最大値、もしくは最頻値など)や地質、既存地すべり地形の面積などの説明変数を同時に取得できる。結果、従来の統計手法と比較して解析手法がシステム化され、有意な要因が何であるかを分析するのが容易となる。

個々のセルの中にはあらかじめGISでレイヤー処理された各種データや加工された統計情報が格納されており、それぞれのバッファには偏りなく同数のセルに対して公平な情報量が集められている。バッファ半径(R)は地すべりや崩壊などの事象の要因や形状、大きさを勘案し、別々に設定する必要があるが、対象の平均的な大きさが包括される規模で決定される。またSkip量も効率よく、セルの取りこぼしが無いよう(dx, dy) ≤ Skip ≤ Rで決定されている。移動方向は東西、南北方向で、動かし方や順序は任意であるが、Skip量は東西、南北方向に対して均等にスキッピングされるように動かす必要がある。

3.1.2 積層棒グラフ

バッファ毎に集められたデータは、十分な教師データがある場合、ロジスティック回帰分析や重回帰分析など帰納法的に発生要因を解析することも可能であるが、本解析ではデータ数が少ない場合でも解析可能な演繹的手法であるAHP分析を用いている。そのため、AHP分析に渡すために積層棒グラフを作成し要因と発生の関わりを分析した。

すなわち集められた目的変数である崩壊・地すべりのバッファは、発生域が一つも入らない非発生バッファ領域と、発生バッファ領域の2つにわけられる。このとき発生・非発生は単なる有る・なし(1,0)ではなく発生セル数(≒面積)の重みを有するので、バッファ内の発生面積率(Or = 発生セル数/全セル数)が増えるごとにどの要因の割合が増えるか、または減少するかを積層棒グラフで表すことができる。結果として地すべり専門家の経験則に合致する要因においてOrの上昇とともに要因の割合増加の範囲があるとき、その要因はAHPの評価基準

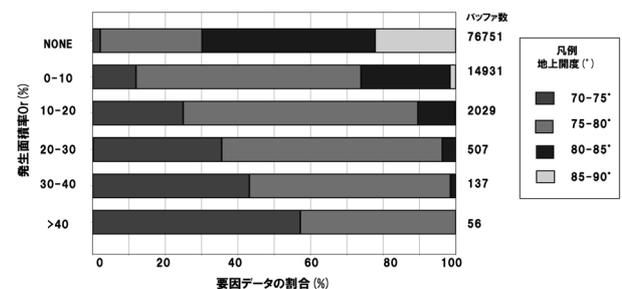


図-3 崩壊発生面積率と地上開度の関係を分析した積層棒グラフの事例

Fig. 3 Example of Stacked Bar Chart for slope failure criteria of overground-openness

として採用可能となる。なお、ここで地すべり・崩壊の発生を個数としてではなく面積率(Or)として表すことは、後述する発生・非発生の正規分布を離散的ではなく連続型の確率変数として扱える利点がある。

図-3は、崩壊現象に対し地上開度(横山ほか, 1999)データをバッファ移動解析で5度刻み毎に集積し、積層棒グラフとして示したものである。ここで地上開度はあるグリッド中心点から8方位に対して地上角(90°-仰角)をもとめ、その平均値をもってそのグリッドの値とする地形量である。事例は後述する2008岩手・宮城内陸地震時の崩壊ケースを解析したもので、デジタル標高データとしては北海道地図株式会社製10mDEMのGIS MAP Terrainを用いた。ここではバッファを発生した崩壊地の規模等からR=100m, Skip=50mと設定し、バッファに集められるデータはセルごとに与えられた地上開度の平均値とした。データは、地上開度による分布割合を崩壊非発生(Or=0%)での卓越傾向を積層図で表したほかに、面積率Or(%)を0<Or≤10, 10<Or≤20, 20<Or≤30, 30<Or≤40, 40<Orの計6区分に分けた。このとき抽出されたバッファ数はOr=0%で76,751個, またOr>0%では順に14,931個, 2,029個, 507個, 137個, 56個である。この結果、平均地上開度が70°から75度の範囲では面積率Orの増大とともに割合が増し、Or>40%になると55%以上を70~75°が占めた。また75~80°はOrの増大とともに割合もやや増大傾向にあり、他方80~85°では発生の領域にはあるものの減少傾向があることがわかった。このことから地上開度が崩壊発生場の判断基準として有力な情報であることが予想できた。

3.2 AHPモデルと過誤確率分析法

AHP法を使った分析モデルを作りAHP斜面変動予測

評価を行うために、積層棒グラフなどの要因分析を経て評価基準を作る必要がある。ここでは各評価基準の決められた範囲ごとに地すべり・崩壊発生危険度の高いものほど高いウェイト値を与え、式(1)のようにバッファごとに評価基準ウェイトの合計値をAHPスコア(x)として設定した。

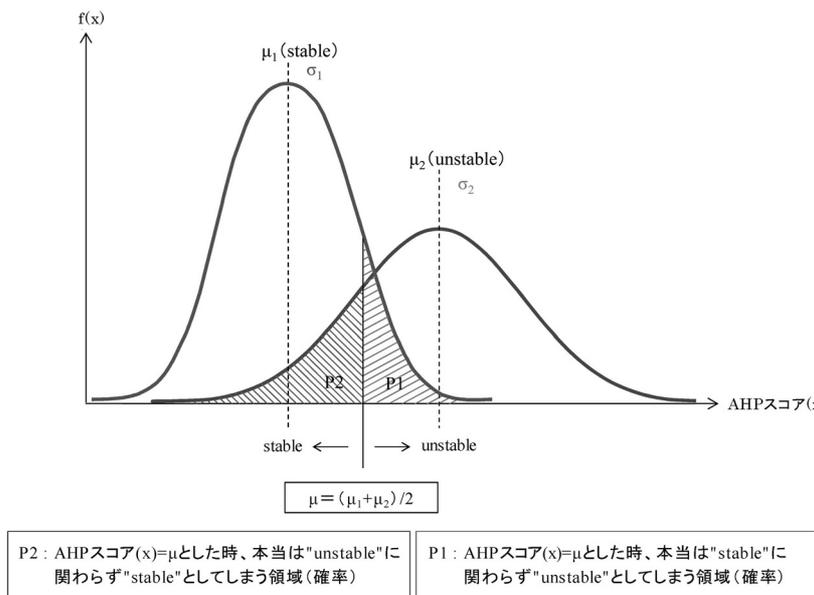
$$X = \sum \alpha_i \cdot W_i \dots\dots\dots(1)$$

ここでWiは各評価基準iごとの最大ウェイトでありαiはその条件の範囲で定めた係数(0 ≤ αi ≤ 1)である。AHPスコアのxはそれらの総和であり各ウェイトが最小のとき0, 他方各ウェイトが最大のとき100となるように設定される。このときx値が小さいほど発生バッファ数が少なくかつ非発生バッファが多く、かつx値が大きいほど発生バッファ数が増え非発生バッファ数が少なくなるモデルは基本的に適正と判断できる。

ただしモデルを最適化する上では、モデルの適正を評価するための目的関数が必要である。ここでは非発生と発生の分布特性に着目し、過誤確率(P)の概念から最適モデルを導く手法を考案した。以下に過誤確率(P)をもとめる過程を述べる。

まず、非発生と発生、およびそれらの合計のAHPスコア(x)の得点分布をヒストグラムで表す。結果として、その分布形状が正規分布に近似できることから、それぞれ平均値(μ)と標準偏差(σ)をもとめることで、正規分布として表わすことができる。

実際は発生と非発生のバッファ数は大きく異なり、ほとんどは非発生のバッファ数が圧倒的に多い。したがって、発生・非発生をたがわず、変数xに対するμとσから正規確率密度関数として表すことで互いを同じ土俵上



過誤確率(P)は(P1+P2)/2で定義される。過誤確率(P)が最小になるモデルが最適モデルである。

図-4 過誤確率(P)の概念図
Fig.4 Conception figure of blunder probability (P)

で比較することが可能となる。

平均値(μ)と標準偏差(σ)による発生・非発生の正規確率密度関数の分布は式(2)で導かれ, その曲線分布は図-4のようになる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(2)$$

図-4に示した確率密度関数の左側の分布は非発生(安定), 右側の分布は発生領域(不安定)である。図-4の μ_1, σ_1 は非発生領域の平均値と標準偏差で, μ_2, σ_2 は発生領域のそれである。ここで $\mu = (\mu_1 + \mu_2) / 2$ としたとき, この μ は安定, 不安定のそれぞれの最良AHPから等しく離れたAHPスコア(x)であり, もっとも判定が困難となる値である。したがって, これをモデルの判定に利用することにする。ここでP1領域は“AHPスコア(x) = μ としたとき, 実際は安定にもかかわらず不安定と過誤する確率”, 一方, P2領域は“AHPスコア(x) = μ としたとき, 実際は不安定なのにもかかわらず安定と過誤する確率”と言える。

ここで $P = (P_1 + P_2) / 2$ を過誤確率(P)と呼ぶこととする。過誤確率(P)は最適化問題の目的関数であり, これを小さくするという事は「誤る」確率が小さくなるということであり, 結果としてモデルの適合度が高いことを示す。概念的には, μ_1 と μ_2 がより離れ, 標準偏差 σ_1, σ_2 がそれぞれ小さくなれば過誤確率(P)は小さくなる。また, この過誤確率は図-4から, その性質上以下のようにも定義される。

- ・非発生分布が左, 発生分布が右にあり, もし完全に分離していれば 過誤確率(P) = 0
すなわち, モデルとしては完璧に成功している。
- ・発生・非発生の分布が完全に重なった分布の場合, 過誤確率(P) = 0.5
すなわち, 判別が不能であり, モデルとしては失敗である。
- ・非発生分布が右, 発生分布が左にあり, 分布が完全に分離していれば過誤確率(P) = 1
すなわち, 常に間違ったモデルといえる。

3.3 基本的な解析の流れ

AHP斜面変動予測評価の基本的な流れを図-5に示す。

すなわち, ①GISを用いて研究領域をdx,dyにグリッド分割し, それぞれのセル上に位置情報の他, 傾斜量や曲率など所定の計算データや統計データ, さらには地質データ, 既存地すべり地形分布データなどの諸説明変数をセットする。また, セットされるデータには目的変数としての地すべり(ここでは移動体に加えて滑落層も含む)や崩壊発生がそのセル上にあるかどうかの判定も含まれる。

次に②として, 要因分析を行うために半径RとSkipを決めてバッファ移動解析を行う。

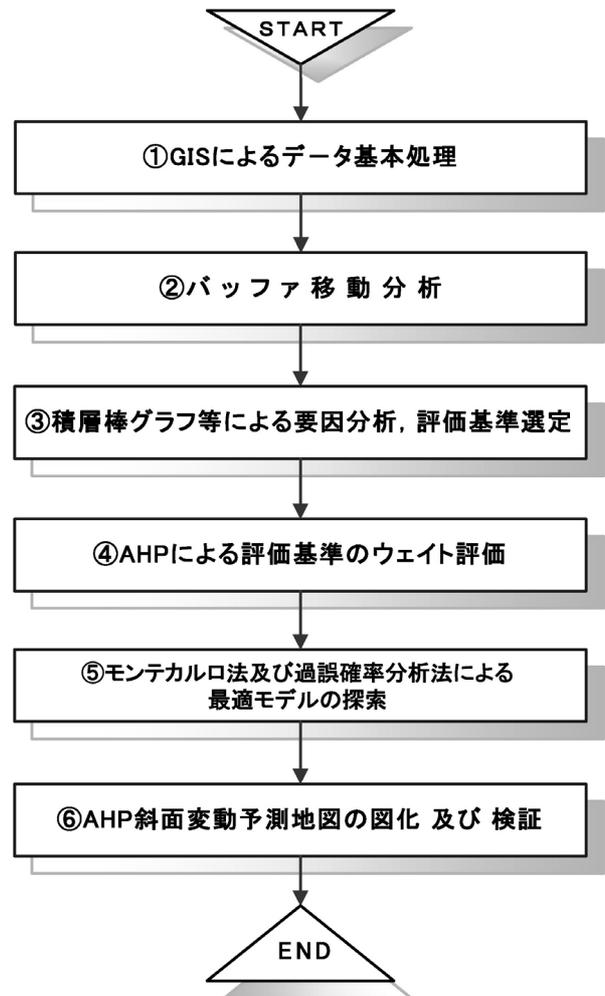


図-5 解析の基本的な流れ

Fig.5 Flowchart of basic analysis for AHP Landslide Susceptibility Mapping by this new method

このとき半径RとSkipは目的変数である地すべりや崩壊の標準的な大きさによって決めることとし, 最適値はいくつか用意された値の中からモデル適合性のもっとも高いものを選択する。さらに③としてバッファ移動解析によって集積されたバッファごとのデータから各要因と目的変数の関係を積層棒グラフで表し, 相関の強い因子を評価基準として選定する。ここでは「地質」「地形」「地下水」に分け, これに評価基準を5つ程度選定すること目標とした。また④として, 地すべり専門家としての経験も含め最大ウェイト(Wi)をAHP法による一対比較をもとに初期設定する。また, 各評価基準で範囲ごとに設定するウェイト(α_i)については積層棒グラフの分布割合から決める。

⑤では, ④の結果を受けてまずはAHPスコア(x)の初期モデルが作成される。ただし, これは最終モデルではなく, 各評価基準の最大ウェイト(Wi)ならびに分布割合の最適化にモンテカルロ法を用いた。モンテカルロ法はコンピュータの乱数機能を用い数値計算や統計モデルの確率計算などに応用される手法で, ここではWiの適

合比率のうち20%について乱数操作で増減させつつ、また全体のWi合計値が100%になるように調整し、AHPスコア(x)のモデル式から最適モデルを探索する。この時、最適化の目的関数に過誤確率分析法を用いるものである。

⑥最後に、この最適モデル式をAHP斜面変動予測値地図として図化して総合的に検証する。

4. 事例解析 (2008年岩手・宮城内陸地震)

分析に当たって2008年岩手・宮城内陸地震での事例を使用した。地すべり(大規模崩壊を含む)と崩壊分布については八木ほか(2008)の判読図を採用した。

4.1 概要

2008年岩手・宮城内陸地震は2008年6月4日の午前8:43に岩手県内陸南部の北緯39度01.7分、東経140度52.8分、深さ約8kmを震源として発生した。最大震度6強、マグニチュードは7.2であった。本震の発生機構は震央から見て西北西-東南東に圧縮軸を持つ西側が隆起する逆断層型で横ずれを伴うものである。地震継続時間は10~15秒。最大加速度4000cm/s²(巖美町祭時)を超える記録のほか1000cm/s²を超える観測点が2か所あった。斜面変動タイプには深層地すべり、崩壊性地すべり、浅層崩壊などがあった。

4.2 結果

これらのGIS分析には災害発生前の10mDEM(北海道地図株式会社製)を使いGISを用いてシームレス地質図((独)産業技術総合研究所地質調査総合センター(編), 2007), 地すべり地形分布図((独)防災科学技術研究所, 2012)などをデータベース化して用いた。当地区で採用したシームレス地質図の地質記号に対し滑動抵抗力を推測してその小さい順に番号で整理したものを表-1に示す。

当該地区では地すべりと崩壊のバッファ半径(R)とスキップ量(Skip)を、それぞれの現象大きさにあわせR=

250m, Skip=150mとR=100m, Skip=50mとした。なお、八木ほか(2008)によって示された大規模崩壊は、ここではサイズや発生要因が地すべりに近いと判断し地すべりとして扱った。地すべり・崩壊について、それぞれ5つずつ抽出された各評価基準の最大ウェイト(Wi)と条件ごとの係数値(αi)について表-2と表-3にまとめた。また、過誤確率分析法によって適合性ウェイト評価した結果を表-4と表-5にまとめた。表-4,表-5の初期モデルとは、AHP法でまず作成された最大ウェイト(Wi)であり、そのモデルでの過誤確率(P)を表している。他方、最終適合モデルはモンテカルロ法及び過誤確率分析法によって最適化されたWi値であり、同様に過誤確率(P)を示している。わずかだが初期モデルに比べ最終適合モデルの過誤確率(P)が低下しており、モデルが向上している。

図-6,図-7に地すべり・崩壊それぞれの正規分布と過誤確率分析結果を示す。

4.3 考察

地すべり・崩壊それぞれの最適モデルから得られたAHP斜面変動予測値地図を図-8に示す。この図はSkip間隔毎に移動するバッファ中心点のAHPスコア(x)を0~100で示したもので、図ではSkip間隔で区画されるグリッドにAHPスコア(x)が割り当てられる。このグリッドのスコアが高いものほど地すべり・崩壊が発生しやすいことを示す。図-8は最終適合モデルによるAHPスコアを示しているが、事実2008年岩手・宮城内陸地震による地すべり・崩壊発生場とAHPスコア(x)の高得点部との対応がよい。この図から、今回提案のバッファ移動解析と過誤確率分析法を含む一連の手法を使うことによって地すべり・崩壊ともに危険度マップの作成に対して十分な成果が得られることがわかる。

なお、今回の2008年岩手・宮城内陸地震の地すべり発生要因分析では「地質(岩相)」「起伏量」「地上開度」「谷次

表-1 滑動抵抗力を考慮した地質(岩相)データ(20万分の1シームレス地質図;(独)産業技術総合研究所地質調査総合センター(編), 2007)の再分類

Table 1 Reclassification of geological data that takes into account the sliding resistance

番号	記号	地層(20万分の1シームレス地質図の区分)
1	S1	完新世の堆積物および更新世段丘堆積物 盛土など人工改変堆積物新生代降下テフラ・岩屑
2	S2	更新世・鮮新世非海成・海成堆積層(但し石灰岩, 付加コンプレックスを除く) 第四紀火砕流堆積物
3	S3	1, 2を除く新生代堆積岩類 新第三紀火砕流堆積物
4	M	新第三紀・第四紀火山岩類(貫入岩, 火砕流堆積物を除く)
5	H1	新生代・中生代の火山岩類(但し1, 2, 3, 4を除く) 低~中圧型変成岩類
6	H2	付加コンプレックス堆積岩類・火山岩類・深成岩類 異地性玄武岩・石灰岩 高圧型変成岩類
7	H2	深成岩類 チャート

表-2 地すべり評価基準の選定と初期最大ウェイト (Wi) と各設定範囲毎に掛かる係数 (αi)
Table 2 Coefficient (αi) and Maximum weight (Wi) for each evaluation criteria in initial landslide model

地すべり要因	評価基準	バッファ集積法	初期モデルの Wi	範囲の条件 単位	バッファの数値に掛かる係数(αi)と条件範囲				
					1.0	0.6	0.3	0.1	0
地質	地質(岩相)	地質(岩相)の最頻値	27	地質(岩相)番号	3	2	4	5~7	左記以外
地形	起伏量	(最高点-最低点)/2点間の距離	20	数値の範囲	0.35~	0.25 ~ 0.35	0.15~0.25	0~1.15	左記以外
地形	地上開度	地上開度の平均値	20	角度の範囲	75~80	70~75	80~90	90~100	左記以外
地下水	谷次数	谷次数の最大値	20	次数	6~10	4~6	3~4	0~3	左記以外
地質	地すべり土塊	既存地すべり地形(移動体)の面積率	13	%	50~100	20~50	10~20	0~10	左記以外

表-3 崩壊評価基準の選定と初期最大ウェイト (Wi) と設定範囲毎に掛かる係数 (αi)
Table 3 Coefficient (αi) and Maximum weight (Wi) for each evaluation criteria in initial Slope failure model

地すべり要因	評価基準	バッファ集積法	初期モデルの Wi	範囲の条件 単位	バッファの数値に掛かる係数(αi)と条件範囲				
					1.0	0.6	0.3	0.1	0
地形	平均勾配	最大勾配の平均値	25	角度の範囲	35~50	30~35	25~30	5~25	左記以外
地下水	谷次数	谷次数の最大値	10	次数	6~10	4~6	1~4	0~1	左記以外
地質	地質(岩相)	地質(岩相)の最頻値	10	地質(岩相)番号	5~10	3	4	2	左記以外
地形	凸凹10m	凸凹10mの平均値	25	数値の範囲	0.8~2.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0~0.4	左記以外
地形	地上開度	地上開度の平均値	30	角度の範囲	65~75	75~80	80~85	85~100	左記以外

表-4 地すべりを対象とした初期モデルおよび最終適合モデルのAHP最大ウェイト (Wi) と過誤確率 (P)
Table 4 Maximum weight (Wi) and blunder probability (P) in initial and optimized model for Landslide

地すべり要因	評価基準	初期 AHP判断	AHP最大ウェイト(Wi)	
			初期モデル	最終適合モデル
地質	地質(岩相)	◎	27	18
地形	起伏量	○	20	22
地形	地上開度	○	20	15
地下水	谷次数	○	20	17
地質	地すべり土塊	△	13	28
過誤確率(P)			0.3481	0.3457

表-5 崩壊を対象とした初期モデルおよび最終適合モデルのAHP最大ウェイト (Wi) と過誤確率 (P)
Table 5 Maximum weight (Wi) and blunder probability (P) in initial and optimized model for Slope failure

崩壊要因	評価基準	初期 AHP判断	AHP最大ウェイト(Wi)	
			初期モデル	最終適合モデル
地形	平均勾配	◎	25	24
地下水	谷次数	△	10	21
地質	地質(岩相)	△	10	9
地形	凸凹10m	◎	25	21
地形	地上開度	◎	30	25
過誤確率(P)			0.3070	0.3044

数]「地すべり土塊 (=既往地すべり地形の移動体の面積率)」の5アイテムが選定され、それぞれ最大ウェイト (Wi) が18%, 22%, 15%, 17%, 28%のモデルがもっとも良好な結果を示した。他方、崩壊については「平均勾配」「谷次数」「地質(岩相)」「凸凹度10m」「地上開度」が選定されたが、過誤確率(P)で見るとそれぞれ最大ウェイト (Wi) が24%, 21%, 9%, 21%, 15%のモデルがもっとも適合するモデルとなった。このことから、従来から多くの地すべり専門家が述べてきたように、地震による崩壊では地形要因のウェイトが高いといえる。一方、地すべり

発生には地質要因も少なからず影響しており、やはりもともと地すべり地形が多く脆弱なところで多発し、かつ第三紀堆積岩類や火砕流堆積物分布範囲において多く発生していることがわかった。

5. まとめ

(1) ここでは、斜面変動予測値地図を構築する上で、GISをサポートする手法としてバッファ移動解析法を開発した。これはグリッド間隔dx, dyのラスタ上で分割されたGIS平面上で半径Rのバッファ領域を

評価基準	地質(岩相)	起伏量	地上開度	谷次数	地すべり土塊
Wi	18	22	15	17	28
	非発生		発生		過誤確率
μ 1	σ 1	P1	μ 2	σ 2	P2
39.5	14.2	0.327	52.3	18.4	0.365
					P
					0.3457

μ : 平均値 σ : 偏差値

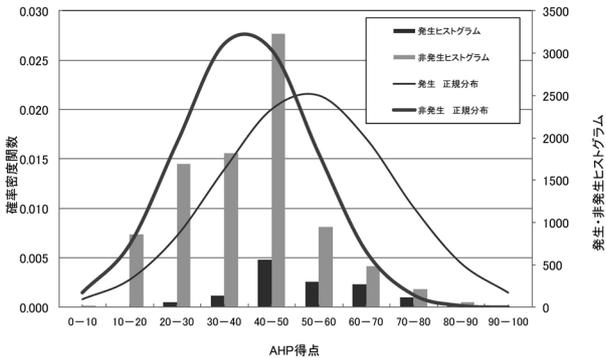


図-6 地すべりの最終最適正規分布モデルと過誤確率(P)
Fig.6 Final result for Landslide with Normal distribution density function and blunder probability (P)

評価基準	平均勾配	谷次数	地質(岩相)	凸凹10m	地上開度
Wi	24	21	9	21	25
	非発生		発生		過誤確率
μ 1	σ 1	P1	μ 2	σ 2	P2
31.6	13.6	0.255	49.5	23.8	0.354
					P
					0.3044

μ : 平均値 σ : 偏差値

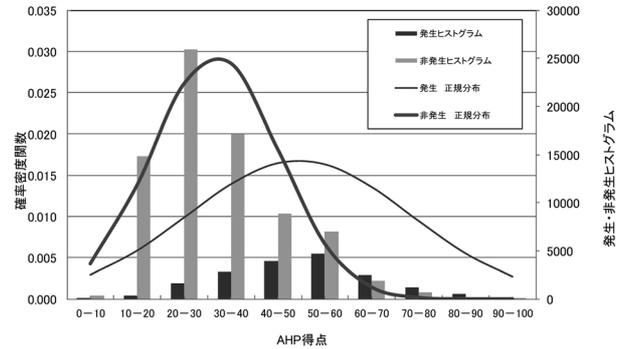


図-7 崩壊の最終最適正規分布モデルと過誤確率(P)
Fig.7 Final result for slope failure with Normal distribution density function and blunder probability (P)

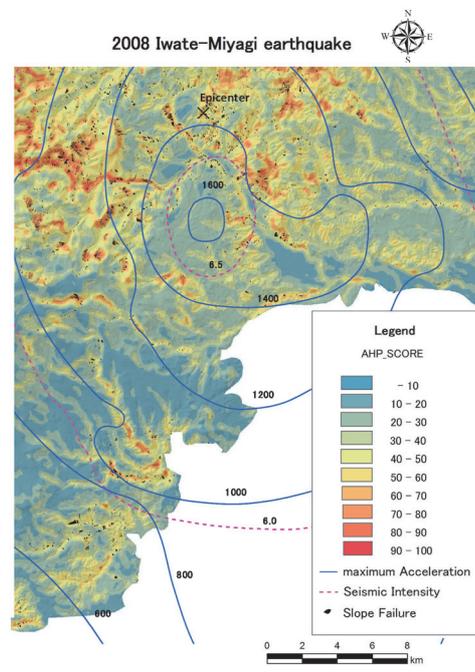
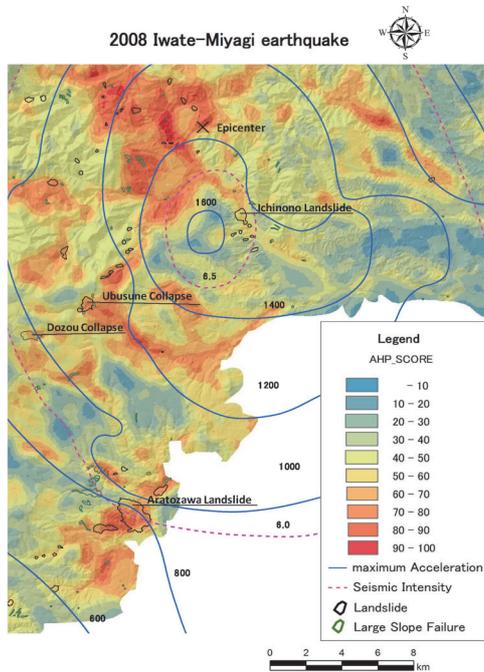


図-8 2008岩手・宮城内陸地震から導かれたAHP斜面変動予測値地図

Fig.8 AHP Landslides Susceptibility Map from 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake (Left: Landslide & Right: Slope failure)

一定間隔でスキップ(Skip)させながら移動しセル毎にまとめられた各統計量を集積させる方法で、目的変数としての斜面変動ばかりでなく各地形量、地質、既存地すべり地形などもデータとして集積できる。これは時間データの移動平均法と概念的には類似しており、データを平滑化し全体的な傾向を俯瞰して見ることが可能な手法な手法である。

- (2) 集積されたデータを積層棒グラフなどに表した後、AHP法により地すべり・崩壊発生の評価モデルを作成した。その適合性判定には過誤確率分析法を用いた。
- (3) 過誤確率分析法とは、正規分布確率密度関数を用い

崩壊や地すべりの発生・非発生条件の独立・分離を明確に評価するために使用したもので、モデルの合理性を過誤確率(P)の最小化を目的関数として評価したものである。最適モデルの絞込みにはモンテカルロ法を用いた。

- (4) 事例として2008年岩手・宮城内陸地震の際に発生した地すべり・崩壊をモデル化し検討した結果、良好な適合性が得られ、結果として崩壊・地すべりの斜面変動予測評価モデルとしても十分な成果が得られた。
- (5) なお、本手法とAHP法などを駆使して得られた地域ごとの要因解析結果およびAHP斜面変動予測値

地図の詳細については順次報告していく予定である。

- (6) 今後は、積層棒グラフからAHP及び各評価基準の最大ウェイト(Wi)及び条件ごとの係数(α_i)の最適値を自動的に算定する方法についての研究を進めて行きたい。

6. 終わりに

本論文では、国土交通省河川砂防技術研究開発制度での研究課題「類型化に基づく地震による斜面変動発生危険個所評価手法の開発」(H23-25年度)の成果を一部活用させて頂いた。

謝 辞

本解析を行うに当たり研究課題メンバーの一人である山形大学の八木浩司教授が作成された判読図を活用させていただくとともにAHPの要因評価に繋がる貴重なご意見を賜った。ここに感謝する次第です。

参考文献

- Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2005): The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology*, Vol. 65, pp. 15-31.
- (独)防災科学技術研究所 (2012): 地すべり地形分布図データベース, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/> (参照日2012年6月6日)
- 濱崎英作・戸来竹佐・宮城豊彦 (2003): AHPを用いた空中写真判読結果からの地すべり危険度評価手法, 第42回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 227-230.
- 濱崎英作・宮城豊彦・竹内則雄・大西有三 (2007): 簡易RBSM三次元試行球面すべり面法を用いた造成地盛土斜面の地震被害評価法, *日本地すべり学会誌*, Vol. 43, No. 5, pp. 251-258.
- ハスパートル・村中亮太・丸山清輝・花岡正明 (2009): 新潟県中越地震による地すべりの発生条件の検討, *日本地すべり学会誌*, Vol. 45, No. 6, pp. 428-434.
- 林一成 (2013): 地震地すべりとそれに伴う地すべりダムの発生危険度評価手法の開発, 群馬大学工学部博士論文, pp. 1-99.
- 岩橋純子・山岸宏光・神谷泉・佐藤浩 (2008): 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, No. 1, pp. 1-12.
- Kamp, U., G., Benjamin, J. K. and Ghazanfar, O. L. (2008): GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir

- earthquake region, *Geomorphology*, Vol. 101, pp. 631-642.
- 小山内信智・内田太郎・野呂智之・山本悟・小野田敏・高山陶子・戸村健太郎 (2007): 既往崩壊事例から作成した地震時斜面崩壊発生危険度評価手法の新潟県中越地震への適用, *砂防学会誌*, Vol. 59, No. 6, pp. 60-65.
- Mancini, F., Cappi, C. and Ritrovato, G. (2010): GIS and statistical analysis for landslide susceptibility mapping in the Daunia area, Italy, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 1851-1864.
- Miyagi, T., Prasad, G. B., Tanavud, C., Potichan, P. and Hamaski, E. (2004): *Landslide Risk Evaluation and Mapping-Manual of Aerial Photo Interpretation for Landslide Topography and Risk Management*, Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, No. 66, September, pp. 75-137.
- 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1997): 数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析, *砂防学会誌*, Vol. 49, No. 6, pp. 9-16.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編) (2007): 20万分の1日本シームレス地質図データベース, 産業技術総合研究所研究情報公開データベースDB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 佐藤浩・関口辰夫・神谷泉・本間信一 (2005): 斜面崩壊の危険度評価におけるニューラルネットワークと最尤度分類の比較, *日本地すべり学会誌*, Vol. 42, No. 4, pp. 293-302.
- 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信男・小山内信智 (2004): 地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No. 204, pp. 1-91.
- 八木浩司・山崎孝成・渥美賢拓 (2007): 2004年新潟県中越地震にともなう地すべり・崩壊発生場の地形・地質的特徴のGIS解析と土質特性の検討, *日本地すべり学会誌*, Vol. 43, No. 5, pp. 44-56.
- 八木浩司・山崎孝成・宮城豊彦 (2008): 岩手・宮城県内陸地震で発生した東栗駒山東面の崩壊と土石流, *日本地すべり学会誌*, Vol. 45, No. 2, pp. 63-64.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C. and Yamralioglu, T. (2011): A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey, *Catena*, Vol. 85, pp. 274-287.
- 横山隆三・白沢道生・菊池祐 (1999): 開度による地形特徴の表示, *写真測量とリモートセンシング*, Vol. 38, No. 4, pp. 26-34.
- Zhu, L. and Huang, J. F. (2006): GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, December 2006, Volume 7, Issue 12, pp. 2007-2017.

(原稿受付2014年7月25日, 原稿受理2014年12月5日)