

# ASTERデータを用いた斜面防災支援技術の研究開発

## SHALLOW LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT USING ASTER DATA

森田 格\*・今野正雄\*・品田千尋\*・田代広行\*・高橋 秀\*  
伊東明彦\*\*・片桐英夫\*\*\*・立川哲史\*\*\*\*

Itaru MORITA, Masao KONNO, Chihiro SHINADA, Hiroyuki TASHIRO, Shu TAKAHASHI,  
Akihiko ITO, Hideo KATAGIRI and Tetsushi TACHIKAWA

Roads are a critical element of transportation infrastructure in mountainous countries like Nepal. However, adequate slope investigation and provision of countermeasures against slope failure are often neglected because of financial restrictions. Therefore, slope failures occur in the rainy season causing high levels of road damage. The shallow landslide hazard prediction method was developed to support decision makers who are planning roads or oil pipelines. The method is useful for route planning and designing of countermeasures against slope failures. ASTER data are used to predict the spatial distribution of shallow landslide hazards because they can be applied over a wide area and include altitude data and ground-level reflectivity.

Various kinds of thematic maps of slope failure factors were prepared using ASTER data. The slope stability for each grid cell (15 m×15 m) was then estimated using a physically based numerical model coupled with hydrological theory and slope stability analysis.

**Key Words :** hazard assessment, shallow landslide, rain, SINMAP, ASTER, SSE model

### 1. はじめに

ネパール国のような山岳国において、道路は重要な輸送インフラである。山岳道路建設に際しては、地質調査を行い、必要に応じて十分な斜面対策工を実施することが、安全な道路を維持するために必要である。しかし、途上国においては、一般的に財源的な制約から、十分な調査・対策工が実施されない場合が多く、雨季において斜面災害が発生することにより、人命・財産の喪失、長期の交通障害など国民生活に損害を与えている。このような山岳国では、依然として被災ポテンシャルの高い道路斜面が数多く存在し、道路防災計画の整備が急務となっているのが現状である。

従来、被災ポテンシャルの高い斜面の抽出は、個々の斜面の安定解析や統計的手法により行われている。しかし、これらの方法では、対象が広域にわたる場合、現地調査によるデータ収集や航空写真の判読などに時間と労力を要する。一方、衛星データを利用することで、路線全長にわたる危険斜面の抽出が可能になると考えられる。

そこで、山岳道路や石油資源開発における輸送道路、パイプラインなどの線形構造物における建設計画時のルート選定や、崩壊危険斜面への早急な対策工の実施などを支援する目的で、衛星データの広域モニタリング情報を利用し

た潜在的な崩壊危険斜面の抽出手法を開発した。

本研究では、多バンド、高解像度、安価で、標高データの取得が可能であるTerra衛星ASTERセンサーのデータ（ASTERデータ）を利用し、ASTERデータから抽出した崩壊関連素因（地形、土地利用区分など）と、表層崩壊を対象とした分布型斜面安定解析手法を利用して、斜面崩壊危険箇所を抽出した。このASTERデータと分布型斜面安定解析手法を組み合わせることで、効率的な斜面崩壊危険箇所の抽出が可能となる。なお、本研究には斜面崩壊危険箇所の評価に、分布型斜面安定解析手法と統計的手法を使用した。前者は斜面安定性を物理的手法により評価するもので、以下物理モデルと呼ぶことにする。

本研究で得られた技術を用いて、衛星データを用いた斜面の管理支援システムを構築し、山岳地に建設される線形構造物を有する道路防災事業、電力事業（送電線計画など）、鉄道事業（路線計画など）等の計画・維持管理へ適用することができる。



図一1 ネパール国幹線道路沿いで発生した斜面崩壊

\* 中央研究所 総合技術開発部

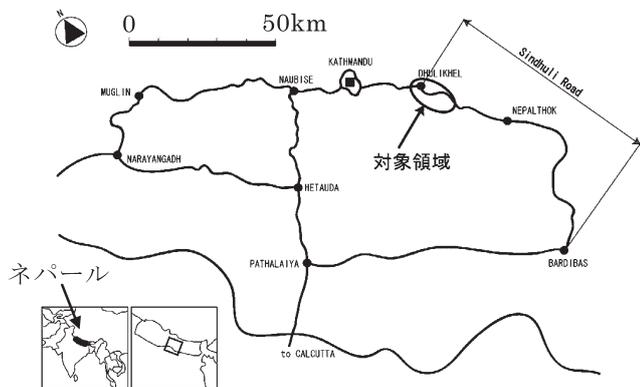
\*\* 宇宙技術開発株式会社

\*\*\* シンズリ道路開発事務所

\*\*\*\* 財団法人 資源・環境観測解析センター

## 2. 対象地域の概要

2002年7月の豪雨により斜面崩壊が発生したネパール国中部Bagmati州Sindhuli道路Kabhrepalanchok地区（Dhulikhel付近）を対象領域とした。対象領域位置を図一2に示す。対象領域の斜面崩壊、地質・地形、気象の特徴について以下に示す。



図一2 ロケーションマップ

### (1) 地形・地質

ネパール国は、世界の屋根と言われる山々の南に、南北の幅約190km、東西の長さ約900kmにわたりヒマラヤ山脈に貼りつくように広がる王国である。インドプレートがアジアプレートに突き当たる地殻変動の激しいところに位置するため、南部の海拔100m以下の沖積平野から8,000m級のヒマラヤまで、地形・地質的に変化に富む場所であり、Terai平原、Siwalic丘陵、Lesser Himaraya、High Himarayaの4つの地域に分けられる。Lesser Himarayaは、Mahabharat山地とその北のKathmandu、Pokharaなどの盆地からなり、今回の対象地域が含まれている。地質構成は先カンブリア界の千枚岩、片岩、珪岩、花崗岩、石灰岩が分布しており、千枚岩は著しく風化し、地表では赤色土壌化している。

### (2) 気象

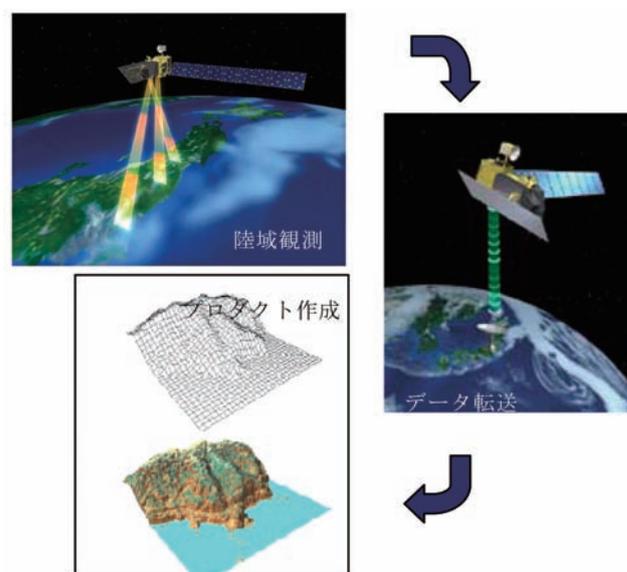
ネパール国は、インド洋からのモンスーンの影響を強く受け、6～9月の雨季には、降水量が非常に多くなっている。とくにLesser Himarayaの南面に多く、年間雨量の約80% (1,100mm) が雨季に集中する。

### (3) 斜面崩壊

2002年7月21日から23日にわたって起きた豪雨により、ネパール国の様々な地域において斜面崩壊や洪水の被害が発生し、今回の対象地域は丘陵地で、斜面崩壊・地すべりが多発した。対象地域の道路沿いにおいて、斜面崩壊は24箇所、地すべり箇所は5箇所を確認した。

## 3. 使用衛星データの概要

衛星データとは、地表面からの放射・反射の輝度を測定したデータである。広範囲にわたる領域を、周期的に観測可能であり、観測範囲は全球にわたる。観測される波長帯の違いから、様々なセンサーによりデータが取得されており、陸域観測においては、可視・近赤外波長帯、短波長帯、熱赤外波長帯、マイクロ波長帯の4つが主に利用されている。



URI : <http://alos.jaxa.jp/index.html>

図一3 衛星観測の概念図

これらの衛星データの一般的利用方法について記す。最も頻繁に利用されている波長帯は、可視・近赤外波長帯である。土地被覆分布や植生分布、地質・鉱物分布、水質汚染箇所や濁度分布などへの利用・研究が進められている。地質や鉱物の特定にあたっては、短波長帯のデータもしばしば利用されている。熱赤外波長帯では、地表面温度分布に利用され、マイクロ波長帯では、地震による地殻変動分布や降水量分布、土壌水分分布などへの利用・研究が進められている。また、衛星の撮影地点をわずかにずらし、同領域を観測した2つの画像から、視差を利用して標高データを作成することも可能である。衛星観測の概念を図一3に示す。

今回利用したASTERデータは、可視・近赤外波長帯を3バンド、短波長帯を6バンド、熱赤外波長帯を5バンド観測し、可視・近赤外波長帯1バンドの直下視と後方視の視差を利用して作成した標高データ（Digital Elevation Model : DEM）を提供している。水平分解能は、可視・近赤外波長帯で15m、短波長帯で30m、熱赤外波長帯で90mとなっており、およそ2ヶ月でほぼ全球を観測可能である。ただし、マイクロ波より短い波長帯では、雲の影響により地表面が観測できない場合がある。

Dhulikhel周辺を対象として処理/解析に利用したASTERデータの諸元を表一に示す。崩壊前の2001年3月30日に観測された画像を入手し、物理モデルを用いた斜面崩壊関連素因(土地被覆分類図・表層地質図・風化指標図)の抽出に利用した。

表一 本研究で使用したASTERデータ諸元

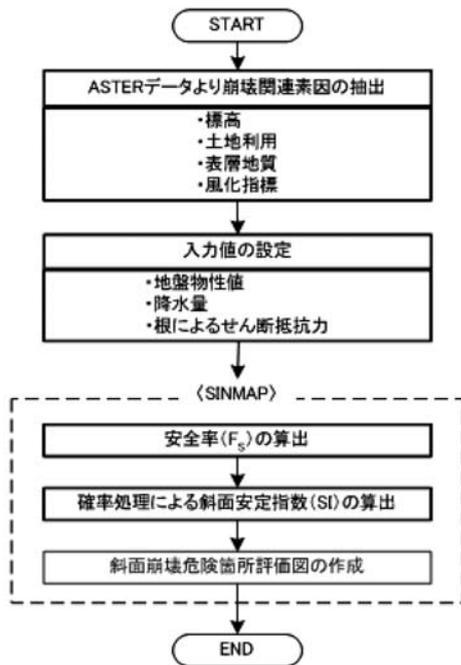
|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| 観測日                | 2001年3月30日                    |
| プロダクトレベル           | 地表面反射率(2B05VS)<br>相対DEM(3A01) |
| 標高誤差 <sup>1)</sup> | 15m以下                         |
| 水平誤差 <sup>1)</sup> | 50m以下                         |

(注)( )内はプロダクト番号を示す。

#### 4. ASTERデータと物理モデルによる評価手法

##### (1) 評価手法の概要

土砂災害は、表層崩壊、地すべり、土石流に区分される。本研究ではこれらの災害形態のうち、2002年7月の豪雨時に、発生箇所数が最も多かった表層崩壊を対象として斜面崩壊危険箇所の抽出を行った。評価手順を図一4に示す。



図一4 評価手順

ASTERデータから抽出した崩壊関連素因を基に、地盤物性値などの入力値を設定し、それらの値を表層崩壊を対象とした分布型斜面安定解析ソフトであるSINMAP (Stability INdex MAPping)<sup>2)</sup>に入力して、斜面崩壊危険箇所を抽出した。SINMAPは、対象画素ごとに、標高データなどの地形情報、および土の粘着力などの地盤物性値などから斜面安

定指数 (Stability Index : SI) を算出することで斜面の安定性を評価する統合ソフトである。

斜面安定指数とは、地盤工学的手法より得られる安全率 (Factor of Safety : FS) から算出する。その際、地盤物性値 (土の粘着力や内部摩擦角など) に幅をもたせて安全率を算出するため、安全率の最大値と最小値から確率処理を施して斜面安定指数を算出する。

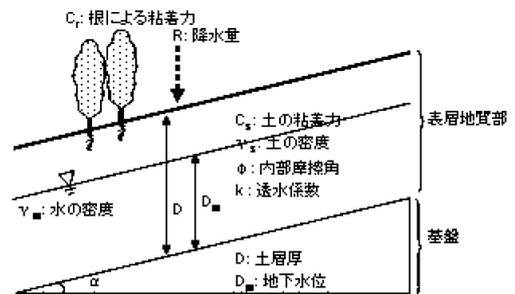
##### 1) 安全率 (Factor of Safety : FS)

安全率 (FS) とは、斜面 (表層) が重力で滑り落ちる力と、滑り落ちることを防ぐ力 (土の粘着力など) との比を取ったものであり、ここでは無限延長斜面を仮定した以下の式で算出する。安全率の算定諸量を図一5に示す。

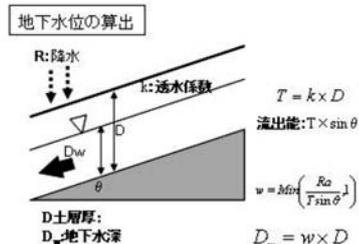
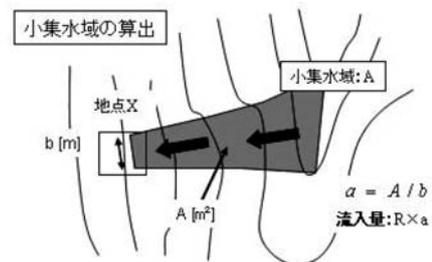
$$FS = \frac{Cs + Cr + \cos^2 \alpha [\gamma_s \cdot (D - D_w) + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot D_w] \tan \phi}{\sin \alpha \cos \alpha (\gamma_s \cdot D)}$$

ここに、CS：土の粘着力、 $\phi$ ：内部摩擦角、 $\alpha$ ：傾斜、DW：地下水位、Cr：根によるせん断抵抗力、D：表層厚、 $\gamma_s$ ：土の密度、 $\gamma_w$ ：水の密度とする。

DWの算定には、DEMより算定した小集水域と降水量 (R)、土の透水係数 (k) を用いる。小集水域と地下水位の算定諸量を図一6に示す。小集水域は任意のピクセル (図一6中の地点X) から上流の小流域を抽出したものであ



図一5 安全率 (FS) 算定諸量の定義図



図一6 小集水域と地下水位算定諸量の定義図

る。この小流域（A）に雨が一様に降ったと仮定して、小集水域の雨による涵養が地点X（幅b）にすべて流入すると仮定すると、単位幅あたりの流入量は $R \times a$  ( $a=A/b$ )で示される。一方、X地点で流出できる量は、透水係数に表層厚を掛けた透水量係数（T）に、 $\sin \theta$ を掛けた値となる。そして流入と流出能の比を取ったものを、ウェットネスインデックス（w）とし、表層厚とウェットネスインデックスを掛けて地下水位を算定する。

2) 斜面安定指数（Stability Index：SI）

地盤物性値に最小値と最大値を設定し、それぞれ物性値の分布が一様であると仮定する。安全率は最小値（F<sub>smin</sub>）と最大値（F<sub>smax</sub>）を持ち、斜面安定指数（SI）は安全率が1以上となる確率として算出する。具体的には、以下のようにして算出する。

- ・ F<sub>smin</sub><1の場合、F<sub>s</sub>の密度関数に対してF<sub>s</sub>>1の面積を求め、これをSIとする。
- ・ F<sub>smin</sub>≥1の場合、SI=F<sub>smin</sub>

(2) 入力値の設定

物理モデルで使用する入力パラメータの設定方法を図-7に示す。土の粘着力・内部摩擦角・透水係数は、土地利用図・表層地質図・風化指標図より地表面特性を分類し、その結果に基づき入力した。根によるせん断抵抗力は、ここでは仮定値を入力した。表層厚・土の密度は現地調査結果から決定し、降水量は崩壊が起きた月の現地観測データを用いた。傾斜・小集水域の算出はDEMを用いて算出した。

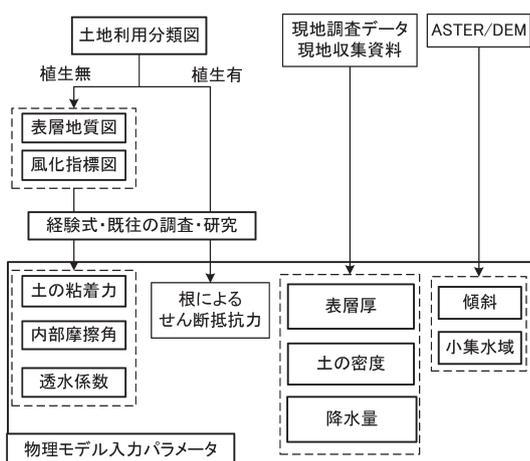


図-7 入力パラメータ設定方法

1) 表層厚・土の密度

評価精度の向上を図る目的で、現地調査にて簡易動的コーン貫入試験および密度試験を実施した。簡易動的コーン貫入試験では、表層厚のデータを取得した。実施した箇所は5箇所、畑地、強風化露岩箇所、森林域、草地（2箇所）

で行った。密度試験も同箇所で行った。表層厚は5箇所の試験結果を平均した値を用い、その値は3.0mであった。また、土の密度は1,460~1,750kg/m<sup>3</sup>であった。表土が主に砂質土であることから、砂質土の一般値である1,730 kg/m<sup>3</sup>を用いた。なお、砂質土の密度の一般値は、日本道路公団（1995）<sup>3)</sup>より引用した。これによると、約1,730~1,930 kg/m<sup>3</sup>となる。

2) 降水量

現地調査で入手した気象観測データを用いて、入力値を設定した。気象観測点はDhulikhelおよびNepalthokである。2地点における2002年7月の月降水量の平均値を算出すると645mm/monthであった。

3) 根によるせん断抵抗力

植生による斜面崩壊防止機能の一般的な評価式はまだ確立されていない。前田他（1997）<sup>4)</sup>では、根を模した風糸を供試体に埋め込み、三軸圧縮試験にてせん断強度定数を測定している。過圧密下ではおよそ32kN/m<sup>2</sup>の補強効果が期待できる。またWilkinson et al.（2002）<sup>5)</sup>では、植生の斜面安定度への効果をみるために、水文モデルを利用した斜面安定解析を行っている。この時対象となったのがラジアタ松で、根によるせん断抵抗力を17kN/m<sup>2</sup>と設定している。ここでは両者の中間値である25kN/m<sup>2</sup>を根によるせん断抵抗力として設定した。

4) 土の粘着力（Cs）・内部摩擦角（φ）・透水係数

これらの物性値の設定は、既往資料に基づき行った。

Humagain et al.（2000）<sup>6)</sup>ではKathmandu~Naubise~Hetaudaの既存道路の南東に位置するKathmandu~Hetauda間の計画路線で斜面の調査・安定解析を実施し、粘着力、内部摩擦角を推定した。Chitlang Valleyにおける中粒~粗粒の軟~中硬の泥岩、頁岩、チャート、砂岩、石灰岩、石灰質千枚岩は、おおむねCs=100~200 kN/m<sup>2</sup>、φ=15~25°。Bhainsedobhan~Hetaudaにおける大理石、含柘榴石片岩、千枚岩、珪岩、粘板岩、泥質苦灰岩、礫岩、砂岩、泥岩は、おおむねCs=100~300kN/m<sup>2</sup>、φ=15~35°である。また、日本道路公団（1995）に記載されている土質定数を表-2に、日本道路協会（1987）<sup>7)</sup>に記載されている透水係数の一般値を表-3に示す。また、Richard（1989）<sup>8)</sup>は、典型的な土や岩についての透水係数を記載しており、細粒~中粒の砂質土は、約2.9×10<sup>-3</sup>~1.4×10<sup>-2</sup>cm/secとしている。

表-2 粘着力・内部摩擦角の一般値

| 土質  | 粘着力 [kN/m <sup>2</sup> ] | 内部摩擦角 [°] |
|-----|--------------------------|-----------|
| 砂・礫 | 0                        | 30~35°    |
| 砂質土 | 0~30                     | 25~30°    |
| 粘性土 | 約 15~50                  | 15~25°    |

表-3 透水係数の一般値

| 土質  | 透水係数 [cm/sec]                                |
|-----|--|
| 砂   | $1.0 \times 10^{-3} \sim 0.1$                |
| 砂質土 | $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ |
| 粘性土 | $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5}$ |

以上より、砂質土、片岩（新鮮・風化）、砂岩（新鮮・風化）の粘着力、内部摩擦角、透水係数を表-4のように設定した。

ここで、風化指標の新鮮・風化の区分については、衛星データより抽出した風化指標図において、0.5未満を新鮮、0.5以上を風化とした。詳細は、(3) 3) を参照のこと。

表-4 土の粘着力、内部摩擦角、透水係数の入力値

| 表層地質 | 風化指標 | 土の粘着力 [kN/m <sup>2</sup> ] | 内部摩擦角 [°] | 透水係数 [cm/sec]       |
|------|------|----------------------------|-----------|---------------------|
| 砂質土  | —    | 10 - 30                    | 25 - 35   | $10^{-3} - 10^{-2}$ |
| 片岩   | 新鮮   | 1,200                      | 40 - 50   | $10^{-7} - 10^{-4}$ |
|      | 風化   | 100 - 300                  | 15 - 35   | $10^{-4} - 10^{-2}$ |
| 砂岩   | 新鮮   | 800                        | 40 - 50   | $10^{-7} - 10^{-4}$ |
|      | 風化   | 100 - 200                  | 15 - 35   | $10^{-4} - 10^{-2}$ |

(3) ASTERデータより崩壊関連素因の抽出

対象領域において、土地利用図や地質図が整備されていないため、平面分布情報が得られない。そこで、ASTERデータよりこれらの主題図の作成を試みた。

1) 土地被覆分類図

資料収集において整備した地図に記載されている土地利用・土地被覆情報、および様々な土地被覆状態におけるスペクトル情報から、分類項目を決定し、分類処理を実施した。分類手法は、教師付き最尤法を採用した。分類項目は、スペクトルパターンの違いをもとに決定していることから、物理モデルの入力データに適した分類項目として設定されていない。そこで、分類処理した結果から、物理モデルへの入力データに対応するように、分類項目を整理した上で、市街地・道路・樹木・草地・畑地・裸地の出力項目へ統合した。樹木を例にした場合、分類処理の過程では、樹種、生育状況の違いにより、複数の項目に分けることが可能となり、物理モデルに樹種の違いによる樹木の根によるせん断抵抗力を反映できることが望ましいが、樹種の違いによる根によるせん断抵抗力に関わる既存の基礎資料がないのが実状である。そこで、樹木に関しては、1つの分類項目として統合し、土地被覆分類図を作成した。

現地調査を実施した年に最も近い衛星画像（2003年撮影）による土地被覆分類結果と現地調査を比較し、分類精度を

確認したところ、78.6%の精度が得られた。分類図の精度結果から、決して高い精度とは言えないが、7割の精度を超えていることから、最低限の精度は確保できているものと考えられる。また、2001年の衛星画像を用いた土地被覆分類も同様の精度が確保できていると推測される。

2) 表層地質図

対象地域の多くの領域は、樹木などで覆われ、表層の地質が地表上に現れている箇所は、極限られている。ここでは、土地被覆分類図から、植生に覆われていない裸地を対象に、現地調査で得られた情報に基づいて教師を設定し、SAM (Spectral Angle Mapper) の分類処理を施した。SAMは、n次元の未知のスペクトルと基準スペクトルの類似性より、鉱物の識別や樹種判別に使用される手法である。現地調査を通じ、表層地質の分類項目を片岩、砂岩、砂質土に設定し、分類図を作成した。

3) 風化指標図

裸地を対象とした風化指標に関わる素因情報作成に際し、ASTERのバンド比 (band1/band3) を利用した。band1/band3のバンド比は、鉄酸化物の増減に関連すると言われている。岩石組成への依存性もあることから、必ずしもこのバンド比のみで評価できるとは限らないが、風化に関する何らかの情報を含んでいるものと考えられる。

現地調査結果から得られた風化レベルとASTERデータから算出した風化指標の散布図を図-8に示す。破線は線形近似直線を示している。この図から、ASTERデータから作成された風化指標と現地調査の風化の判定に相関があることが認められる。ここで、現地調査の風化判定には、国際地質工学会の判定基準を用いた。風化レベルと風化具合を表-5に示す。

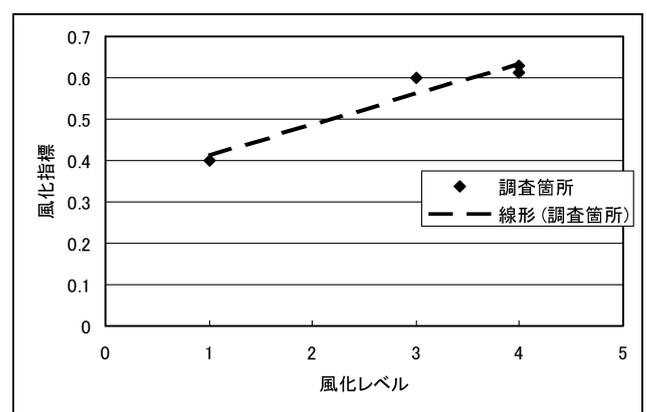


図-8 風化指標と現地調査結果の比較

表-5 風化レベル判定基準

| 風化レベル | 風化具合                                     |
|-------|--|
| 1     | 新鮮な                                      |
| 2     | やや風化した                                   |
| 3     | 中程度に風化した(岩石の35%以下が分解し、および(あるいは)土になっている。) |
| 4     | 非常に風化した(岩石の35%以上が分解し、および(あるいは)土になっている。)  |
| 5     | 極めて風化した                                  |
| 6     | 残留土                                      |

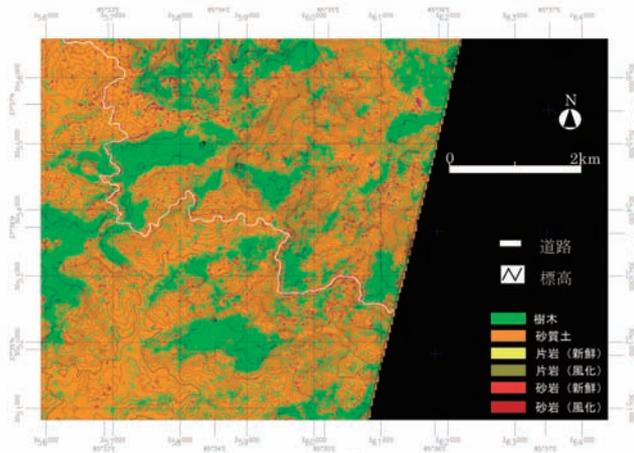


図-9 地表面特性分類図

4) 地表面特性分類図

1) から3) の分類図に基づいて、地表面特性を分類した結果を図-9に示す。分類にあたっては、土地利用図より樹木・裸地・それ以外(草地・畑地・市街地・道路)に分類した。それ以外に分類された箇所については砂質土に分類し、裸地に分類された箇所については、表層地質図より片岩・砂岩、砂質土に分類した。片岩・砂岩に分類された箇所は、更に風化指標図にて新鮮・風化を分類した。「新鮮」は風化指標で0.5未満の値を、「風化」は0.5以上の値で与えた。

このようにして分類した地表面特性を用いて、表-4で設定した砂質土、片岩(新鮮・風化)、砂岩(新鮮・風化)それぞれの土の粘着力、内部摩擦角、透水係数を与えた。樹木の箇所には砂質土の粘着力、内部摩擦角、透水係数を与え、さらに根によるせん断抵抗力も与えた。

(4) 評価結果

(2)、(3)において設定した入力値より評価した結果を図-10に示す。白線がシンズリ道路を示し、ASTER/DEMの標高(10mごと)を黒の実線図で描いている。赤~ピンク色が危険性の高い箇所を示しており、黄色・青・緑の箇所が危険性の低い箇所を示す。全領域に占めるSIの割合は、0.5以下が1.0%、0.5~1.0が15.6%、1.0~1.25が12.1%、1.25~1.5が9.2%、1.5以上が62.0%であった。

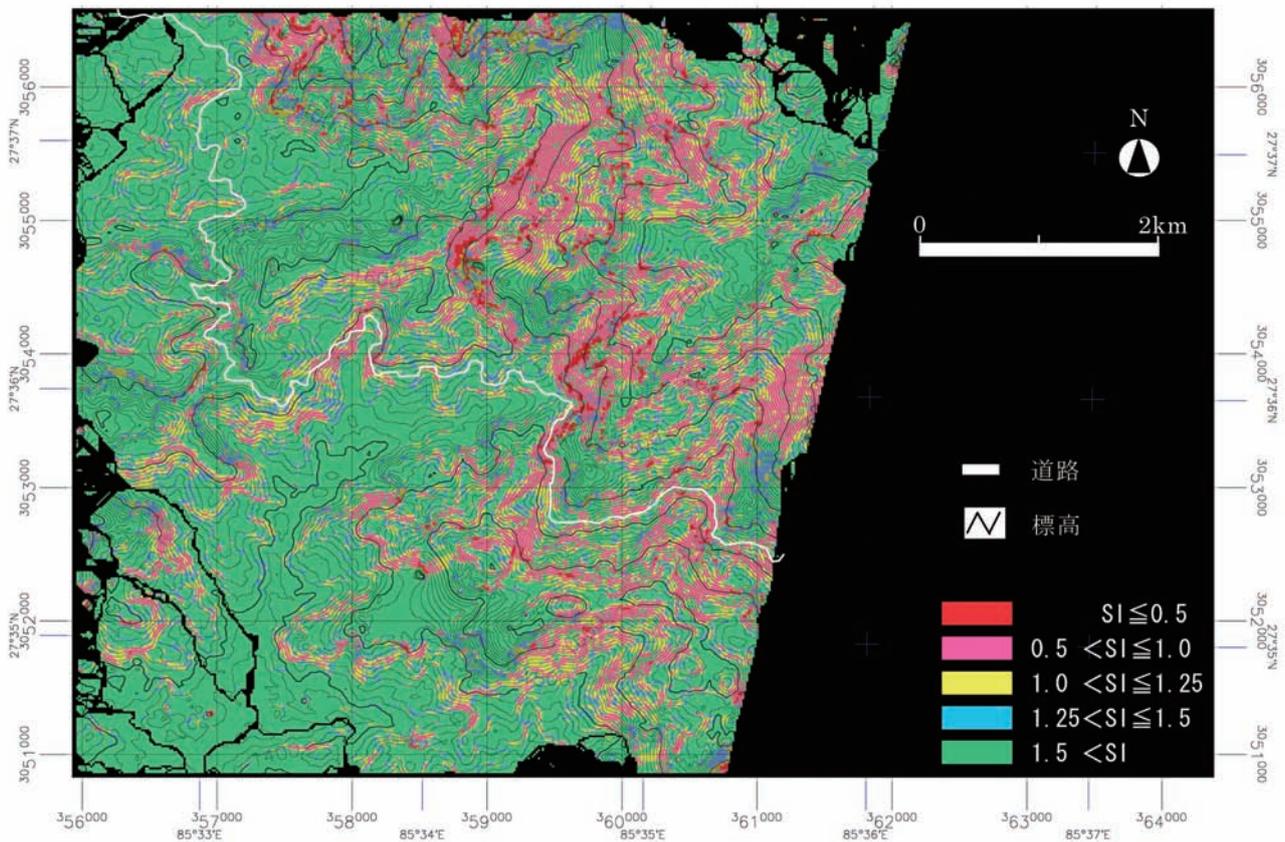


図-10 斜面崩壊危険箇所評価(物理モデル)

## 5. 評価手法の検証

評価結果の精度を把握するために、崩壊箇所の現地調査結果との比較、および統計的手法による評価との比較を実施した。統計的手法については、広域にわたる崩壊危険度評価にしばしば利用されている数量化Ⅱ類を使用した<sup>9)</sup>。

### (1) 崩壊箇所調査資料による検証

#### 1) 検証方法

斜面崩壊危険箇所評価結果と崩壊調査報告書による崩壊箇所を比較した。崩壊箇所は全部で29箇所である。崩壊、未崩壊を区分するために、評価結果のピクセルに対して崩壊地と未崩壊地を図-11のように設定した。崩壊地ピクセルでは、崩壊地を厳密に特定することは困難であるため、実際の崩壊地を覆うように3×3ピクセルと設定し、この9ピクセルを1つの崩壊箇所と定義した。また未崩壊地ピクセルは、道路を中心として、両側3ピクセルずつの領域を設定し、崩壊地ピクセルを除いたピクセルと定義した。

次に、崩壊地と未崩壊地の正答率は、以下のように定義した。崩壊地の正答率は、危険性有の箇所数を全崩壊箇所数で割った値で算出した。危険性有の箇所は図-10の赤・ピンクで表示されたピクセルを含む崩壊箇所とした。未崩壊地の正答率は、危険性無しのピクセル数を全未崩壊地ピクセル数で割った値で算出した。危険性無のピクセルは図-10の緑・青・黄で表示されたピクセルとした。



図-11 崩壊地・未崩壊地ピクセルの設定方法

#### 2) 検証結果

崩壊地の正答率は75.9% (29箇所のうち22箇所中)、未崩壊地は81.7%であった。崩壊危険箇所として抽出できなかった7箇所は、崩壊土量が5m<sup>3</sup>の箇所が6箇所、10m<sup>3</sup>の箇所が1箇所となっており、崩壊土量が少ない崩壊、つまり小規模な崩壊での予測正答率が低下した。

### (2) 統計的手法との比較

#### 1) 統計的手法を用いた評価方法の概要

統計的手法を用いた斜面崩壊危険箇所の抽出の流れを図-12に示す。統計的手法による斜面安定性評価モデルは複数あるが、本研究ではSSEモデル (Slope Stability Evaluation model using satellite data and geographical information)<sup>9)</sup>に基づき、評価を行った。評価は、多種の素

因データを相関係数と偏相関係数によって多重共線関係にある素因を排除し、数量化Ⅲ類を用いてデータ構造を分析する方法である。そして、実際の崩壊履歴をトレーニングデータとして数量化Ⅱ類を行い、各画素について危険性の「有・無」をミニマックス2群判別により分類した。

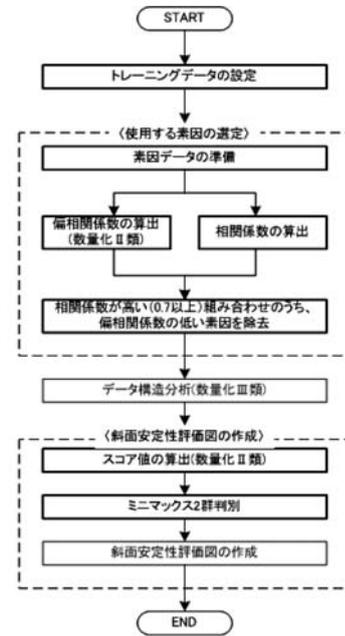


図-12 SSEモデルによる評価フロー

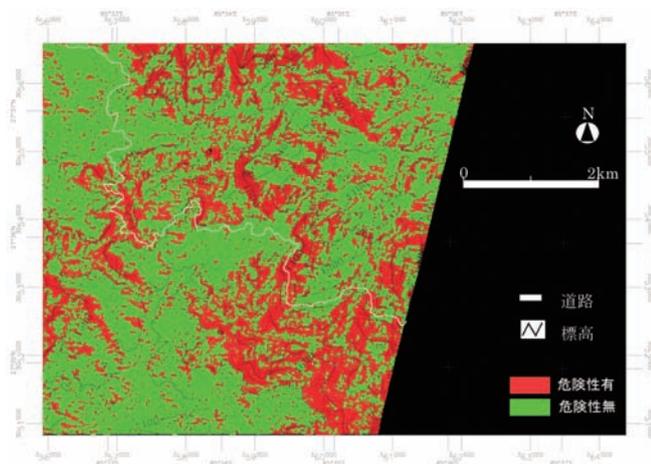
#### 2) 素因の設定

今回素因として「土地被覆分類、植生活性指標区分、谷密度、傾斜区分、斜面方位区分、標高区分、縦断地形区分、横断地形区分、起伏量区分、土壌水分指標区分、表層地質区分、風化指標区分、地表面温度区分」の13要因を選定した。素因間の相関の高い組 (相関係数>0.7) は、表層地質区分と土壌水分指標区分、傾斜区分と起伏量区分の2組であった。これらの内、数量化Ⅱ類により得られる危険性の有無に対する偏相関係数の低い、土壌水分指標区分および起伏量区分を削除対象とした。偏相関係数の高い素因は、斜面方位区分、標高区分、横断地形区分、傾斜区分、起伏量区分であった。

#### 3) 評価結果

評価結果を図-13に示す。赤が危険性有の箇所を、緑が危険性無の箇所を示す。評価対象範囲において、危険箇所の占める割合は、35.6%であった。

現地調査結果と比較したところ、崩壊地の正答率は89.7% (29箇所のうち26箇所中)、未崩壊地は71.8%であった。崩壊地における誤判別箇所を見ると、崩壊土量が5m<sup>3</sup>の箇所が2箇所、10m<sup>3</sup>の箇所が1箇所となっている。物理モデルと同様に、統計的手法を用いた場合でも、小規模な崩壊での予測正答率が低下した。



図一三 斜面崩壊危険箇所評価（統計的手法）

#### 4) 物理モデルと統計的手法の精度比較

- ・両手法とも道路近傍において同等な正答率を得ることができた。
- ・物理モデルでは道路近傍以外の領域においても地質工学的評価と整合的である。一方、統計的手法では、緩斜面においても危険性有と評価した箇所があった。これは、統計的手法では、トレーニングデータを必要とし、用いた素因データ（特に斜面方位）に依存して崩壊危険箇所を評価したためと考えられる。

#### 5) 統計的手法との比較のまとめ

- ・道路近傍においては同等な正答率となった。道路近傍以外の領域における崩壊危険度評価については、地質工学的評価との整合性から、物理モデルが妥当である。
- ・斜面崩壊の誘因である降雨について、物理モデルでは降雨量の変化による危険度の変化を考慮することができる。統計的手法では、崩壊時の雨量データが必要となるため、考慮することは非常に難しいと考えられる。
- ・崩壊履歴、主題図の数について、今回の解析では、物理モデルは4つの主題図を使用し、統計的手法は13の主題図を使用して評価を行った。統計的手法の評価精度は履歴数に依存するため、崩壊関連データの整備が十分でない地域では、物理モデルの評価が有効である。

### 6. まとめと今後の課題

ASTERデータと分布型斜面安定解析手法を組み合わせたモデルを構築し、斜面崩壊危険箇所評価をネパールに適用した。物理モデルの評価精度について、現地調査結果と比較したところ、崩壊地の正答率が75.9%となり、適用性は高いと考えられる。道路近傍以外の領域における崩壊危険度評価については、地質工学的評価との整合性から、統計的手法より物理モデルが妥当であった。また、物理モデルはトレーニングデータや主題図を多く必要とせずに評価が

可能であることから、新設道路計画もしくは新設間もない道路の維持・管理において、データが少ない場合には物理モデルが有効であると考えられる。

今後の課題として、物理モデルの精度をさらに向上させるには、以下の点が挙げられる。これまでの研究では、根によるせん断抵抗力の評価式は確立されていない。しかし、これが樹種などから推定可能となると、衛星データを用いることによる斜面崩壊危険度の評価精度の改善が期待される。

また、現在の物理モデルでは、表層厚は一様に与えている。傾斜のきつい箇所については、表層厚を大きく設定している可能性があるため、過大評価となっている可能性がある。傾斜などを考慮して、表層厚の平面分布を合理的に与えることにより、評価精度が向上すると考えられる。

謝辞：本研究は（財）資源・環境観測解析センターの委託研究として実施しました。ここに厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) ASTER SCIENCE PROJECT ユーザーズガイド [http://www.science.aster.ersdac.or.jp/jp/documnts/users\\_guide/index3D.html](http://www.science.aster.ersdac.or.jp/jp/documnts/users_guide/index3D.html)
- 2) Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N: The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping, 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, p. 21-25, 1998
- 3) 日本道路公団：設計要領第1集 1998
- 4) 前田浩之助、杉山太宏、外崎 明、赤石 勝：人工樹木根系を含む関東ロームの非排水せん断強度特性、東海大学紀要工学部, vol.37, No.1, pp.155-160, 1997
- 5) Wilkinson, P.L., Anderson, M.G. and Lloyd, D.M: An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction, Earth Surf. Process. Landforms, No.27, p1285-1297, 2002
- 6) Humagain, I.R., Schetelig, k., Sharma, M.P., Upreti, B.N. and Langer, M.: Slope stability analysis along the proposed Kathmandu - Hetauda Road with tunnel sections, Journal of Nepal Geological Society, Vol.22, pp.187-200, 2000
- 7) 日本道路協会：道路土工－排水工指針, 1987
- 8) Richard H. Cuenca: IRRIGATION SYSTEM DESIGN An Engineering Approach, PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1989
- 9) 大林成行、小島尚人、亀井慎一郎：リモートセンシング研究所報告 No.28 複数の斜面安定性評価モデルを対象とした特徴比較, 東京理科大学リモートセンシング研究所, 2000