

# 斜面の安定性評価のための斜面—層理面関係図の作り方 ：フリー地理情報システム QGIS を用いて

千木良雅弘・金子 誠

深田地質研究所

Making a Slope-Bedding Relation Map for the slope stability evaluation  
by using a free geographical information system (QGIS)

CHIGIRA Masahiro, KANEKO Makoto

Fukada Geological Institute

要旨：斜面で発生する地すべりや斜面崩壊は、斜面と地質構造特に層理面などの面構造との相対的影響を強く受ける。特に、地震時の地すべりは、流れ盤斜面で、地層が斜面下部で侵食などによって露出している状態のものが発生しやすく、斜面を事前に抽出することは非常に重要である。ここでは、フリーソフトウェアの QGIS と数値地形モデルを用いた斜面と地質構造との関係図を作る方法について、2024 年能登半島地震によって斜面崩壊が発生した地域を題材として紹介する。

キーワード：地すべり、地質構造、地形、地理情報システム

Abstract: Landslides that occur on slopes are strongly influenced by the relationship between slope and geological structure, such as planar features like bedding planes. Particularly, earthquake-induced landslides likely occur on dip slopes that are undercut by erosion or other factors. Therefore, extracting such slopes is very important. In this paper, we introduce the methodology for making a slope-Bedding Relation Map by using the free software QGIS and Digital Elevation Model (DEM), applying it to the area where many landslides were induced by the 2024 Noto Peninsula earthquake.

Keywords: landslides, geological structure, topography, geographic information system

## 1. はじめに

斜面で発生する地すべりや斜面崩壊は、斜面と地質構造、特に層理面などの面構造との相対的影響を強く受ける。そのため、斜面災害危険斜面の抽出にあたって、斜面と面構造との関係を広域にわたって評価することが重要である。この作業は手作業では多大の労力を要するが、地理情報システム (GIS) の普及によって現実的なものとなった。特に、地震時の地すべりは、流れ

盤斜面で、地層が斜面下部で露出している状態のものが発生しやすいことが経験的にわかっており (Chigira and Yagi, 2006)、GIS を使ってこのような斜面を事前に抽出することは非常に重要である。

面構造と斜面との関係を GIS を用いて解析する手法の研究は、Meentemeyer and Moody (2000) に始まり、他に Ilinca et al. (2022)、Mishra et al. (2018)、Santangelo et al. (2015) などの研究がある。我が国でも外国での初期的研究と時を同じく

して根本他 (2000), 根本他 (2001) によって, 斜面と地層の層理面との関係を GIS を用いて解析する手法が考案された. これらは基本的には Meentemeyer and Moody (2000) 他の研究と同じ考え方で, フリーの GIS ソフトウェア GRASS を用いて解析しているが, GIS を用いた処理方法の詳細が紹介されていないことが残念である.

我が国では, 国土の基本情報として縮尺 5 万分の 1 地質図が公刊されており, そこには地層の走向傾斜のデータも多数示されている. しかしながら, そのデータのみでは地層と斜面との関係を解析するのに十分とは言えない場合が多い. Santangelo et al. (2015) は, 地層の走向傾斜のデータが少ない場合, 空中写真から読み取った地層のトレースから走向傾斜を求めて, それを解析に用いることを提案している.

本報告では, 斜面-層理面関係図の作り方の基本的考え方を述べた後, フリー地理情報システム (QGIS) を使った場合の作業手順をまとめた. 適用地域は, 2024 年能登半島地震の時に地すべりが多く発生した輪島市東部である. Meentemeyer and Moody (2000) は, Topographic/Bedding-Plane Intersection Angle (TOBIA) という名称を用いたが, ここでは混同を避けるために, 斜面-層理面関係図 (Slope-Bedding Relation Map, SBRM) という用語を用いる. これは, 層理面だけでなく, 片理面や劈開面といった面構造, さらに, 節理や断層面についても用いることができる.

## 2. 基本的考え方

斜面-層理面関係図の作り方の基本的考え方は, 単純である. まず, 想定ケースを斜面の等高線方向と面構造の走向が大略同じ場合

と, 両者が大きく斜交する場合とに分ける. そして, 前者をさらに斜面と面構造の傾斜方向が同じ場合と反対の場合とに分ける. 結果的に, 斜面は面構造との関係によって, 流れ盤と受け盤, 中立盤とに分けられる (図 1).

従来の経験によれば, 中立盤の斜面は重力によって変形しにくく, 規模の大きな地すべりはほとんど生じないことが知られている. そのため, 中立盤斜面のこれ以上の細分は今のところ必要ない. 中立盤は, 層理面の傾斜方向と斜面の傾斜方向が  $45^\circ$  から  $135^\circ$  の角度をなす場合とし, これが  $45^\circ$  以下の場合流れ盤とし,  $135^\circ$  以上の場合を受け盤とする. 流れ盤斜面は地すべりや深層崩壊を起こしやすく, また, 受け盤斜面は面構造の傾斜が急な場合には曲げトップリングを起こすが, それ以外は, 表層の緩んだ部分の表層崩壊が地震や降雨によって発生する場合が多い. 地震時の地すべりは, 流れ盤斜面の中でも, 面構造が斜面下部で露出する Overdip cataclinal slope (斜面の方が層理面よりも急な斜面, 柎目盤斜面) で発生することが多いことが 2004 年新潟県中越地震で明らかになった (Chigira and Yagi,

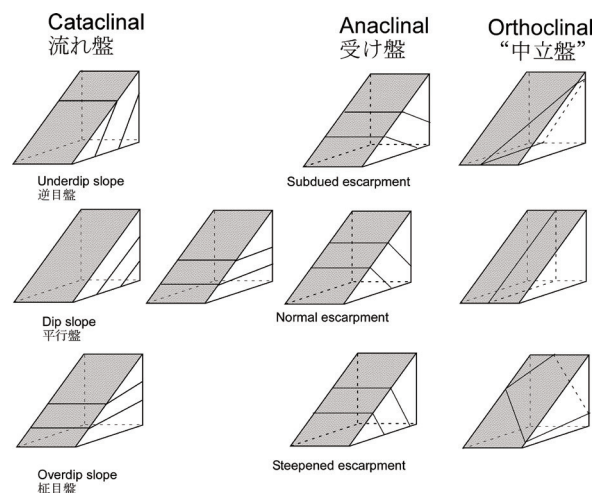


図 1 斜面と層理面との関係模式図. 灰色の面が斜面.

2006). そのため、単に流れ盤斜面を抽出するのではなく、柁目盤斜面と逆目盤斜面とを区別することも必要となる.

### 3. 具体的方法

ここでは、フリーの地理情報システム QGIS 3.22Białowieża を用いて、例示的な解析を行った。使用した DEM は 2024 年地震前の能登半島の 1m メッシュの DEM、用いた地質図は吉川他 (2002) による縮尺 5 万分の 1 地質図幅「珠洲岬、能登飯田及び宝立山地域」である。以下、実際の作業を手順を追って記述する。

#### 3.1 地質図の QGIS へのロード

QGIS に地質図をロードして、そこに表示されている地層の走向傾斜を数値として新たなレイヤーに入力する。

我が国の広い範囲をカバーしている縮尺 5 万分の 1 の地質図は、産業総合研究所の地質情報研究部門 (旧地質調査所) が作成してきたもので、ウェブ上で公開しており、それをダウンロードして使用することができる。これらの地質図は位置情報を含んだ GeoTIFF として提供されているので、そのまま QGIS にロードすることができる。

古い地質図や論文に掲載されている地質図はたいてい位置情報を持っていないので、いったん QGIS にロードした後、Georeference して、既存の地図に合わせる。この作業には、コマンドバーのプラグインに Freehand raster georeferencer をインストールして使用した。

次に、走向傾斜のレイヤーを作成して、走向傾斜の地点をプロットして、走向傾斜を入力する。この場合の走向傾斜は通常良く使われる N20E/40E のような表現ではなく、地層の傾斜方

向を北から右回りに測定した値を傾斜方向 (Dip direction) とし、それと傾斜角との 2 つの数値で示す方が後に処理がしやすい。プロジェクトの座標系は直交座標系にしておいた方が便利である。

#### 3.1.1 データの入力

まず、走向傾斜のレイヤーを作る。QGIS 上のコマンドバーから、「レイヤー→レイヤーを作成→新規シェープファイル→ジオメトリタイプはポイント→新規フィールドに Dip direction, Dip を追加する (両方とも、データ型は小数点付き数値, 精度 1) →OK」と選択する。

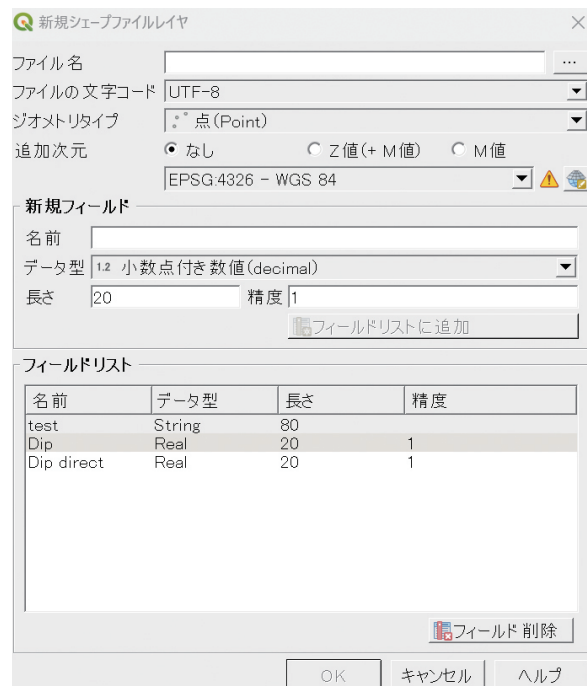


図 2

走向傾斜のレイヤーを編集モードにして、地質図上の走向傾斜地点をプロットし、逐一 Dip, Dip direction を入力する (あるいは、場所だけ最初にプロットして、その後属性テーブルを編集してから入力しても良い)。その後保存し、編集終了となる。

表 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	id	xcoord	ycoord	Dip direct	Dip	Strike	Pole direction	Pole dip	Pole direction (radian)	Pole dip (radian)		nx	ny	nz
2		130	37	95	40	5	275	50	4.7997	0.8727		-0.640341609	0.056022632	-0.76604
3	0	137.0965	37.44076	190	12	100	10	78	0.1745	1.3614		0.036103486	0.204753045	-0.97815
4	0	137.0859	37.44163	145	25	55	325	65	5.6723	1.1345		-0.242403877	0.346188613	-0.90631

### 3.1.2 走向傾斜地点に座標を与える

走向傾斜のレイヤーを選択。コマンドバーの「プロセッシング→Vector geometry→Add geometry attributes→ベクタージオメトリ→ジオメトリ属性を追加→実行」。

これで、走向傾斜のレイヤーに座標のフィールドができて、それぞれの値が入力される。

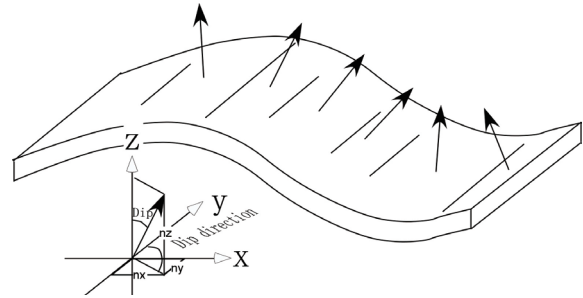


図 3 層理面を示す単位ベクトル。

### 3.2 走向傾斜データの内挿

走向傾斜データのない部分の走向傾斜を内挿する。この時、走向と傾斜を独立してそれぞれ内挿する場合と、走向傾斜を単位ベクトルで表し、その3成分をそれぞれ内挿する場合とがあり、Ilinca et al. (2022), Meentemeyer and Moody(2000), Mishra et al. (2018) は前者, Santangelo et al. (2015) は後者の方法をとっている。地層の層理面には上下があるので、単に走向と傾斜を独立で内挿するよりも、層理面の単位ベクトルの3成分を内挿の方が厳密である。ここでは、走向傾斜の単位ベクトルをそれぞれ内挿し、その結果を用いて傾斜分布図と傾斜方向分布図を作成する。

このフィールドに必要項目を追加して、それぞれの値を計算していく。

表 1 の Dip direction, Dip までは入力されているので、その右側に Strike, Pole direction, Pole dip を追加し、エクセル上で計算を進める。Pole は、層理面の極である。

Pole direction (G2) は、 $=IF((D2<180), D2+180, D2-180)$ 。これは、D2 (Dip direction) が  $180^\circ$  よりも小さければ、 $D2+180$ 、 $180^\circ$  よりも大きければ  $D2-180$  とするということである。これをラジアンに直して、 $=G2/180*PI()$ 。

Pole dip は、 $=90-E2$ 。これをラジアンに直して、 $=H2/180*PI()$ 。

nx, ny, nz の欄には次の式を入力する (四川大学趙思遠氏作成)。

#### 3.2.1 層理面の法線の単位ベクトルを求める

走向傾斜は面の方向のデータであり、その方向は面の法線で決定づけられ、この法線は単位ベクトルで表される (図 3)。まず、走向傾斜のレイヤーの属性テーブルを開き、それをコピーしてエクセルシートに張り付ける。このエクセルシー

$$nx=IF((G2<=90),TAN(I2)/SQRT((TAN(I2)^2+1))*(TAN(J2)^2+1),IF((G2<=180),-TAN(I2)/SQRT((TAN(I2)^2+1))*(TAN(J2)^2+1),IF((G2<=270),-TAN(I2)/SQRT((TAN(I2)^2+1)*(TAN(J2)^2+1)),TAN(I2)/SQRT((TAN(I2)^2+1)*(TAN(J2)^2+1))))))$$

斜面の安定性評価のための斜面一層理面関係図の作り方  
: フリー地理情報システム QGIS を用いて

$$ny=IF((G2<=90),1/SQRT((TAN(I2)^2+1)*(TAN(J2)^2+1)),IF((G2<=180),-1/SQRT((TAN(I2)^2+1)*(TAN(J2)^2+1)),IF((G2<=270),-1/SQRT((TAN(I2)^2+1)*(TAN(J2)^2+1)),1/SQRT((TAN(I2)^2+1)*(TAN(J2)^2+1))))))$$
$$nz=-TAN(J2)/SQRT(TAN(J2)^2+1)$$

計算結果は、エクセルファイルとして保存するとともに、QGIS が読み込めるように、CSV ファイルとしても保存する。

### 3.3 単位ベクトルの情報の入った走向傾斜データを QGIS に戻す

データソースマネージャをクリックして、保存した CSV ファイルを読み込む。

すると、マップ上の走向傾斜データと同じ点に再度点がプロットされる。新しい方のレイヤーには追加データが付加されている。このファイルを QGIS 上で編集できる形 (Shapefile) にするために、レイヤー名を右クリックして、「エクスポート→新規ファイルに地物を保存→ファイル名を Bedding などとして OK」をクリックする。この時点で、走向傾斜 CSV ファイルは不要になるので、そのレイヤーを削除する。走向傾斜のシンボルは通常の地質図で使うシンボルとして SVG マーカーを使って表示した方が見やすい (千木良, 2021)。

### 3.4 走向傾斜のデータのない部分の内挿

データのない部分の内挿方法には、Kriging, Spline, 累乗逆距離加重法 (IDW 内挿) がある。次は Kriging を用いた方法であり、Gustavo William Pereira et al. (2023) 作成の Smart-Map のプラグインを用いた。動画 <https://www.youtube.com/watch?v=bFObnORruIY> を参考にした。

まず、QGIS のプラグインで Smart-Map を

インストールして、これからのデータを入れるフォルダーを QGIS の Noto フォルダーの中に作成しておく。この場合、フォルダー名は SmartMapRetry とした。

まず Smart-Map に最初の走向傾斜データを取り込む。Smart-Map を起動すると、図 4 のパネルが開く。データの保存先となる Output Directory のフォルダーは、SmartMapRetry を選択。Data タブの中央部にある Layer QGIS から、Input layer に BeddingCentral, z に nx (または, ny, nz) を選択して import. ny, nz も同様に行い、計 3 回行う。図 4 は、nx のデータをインポートした結果。

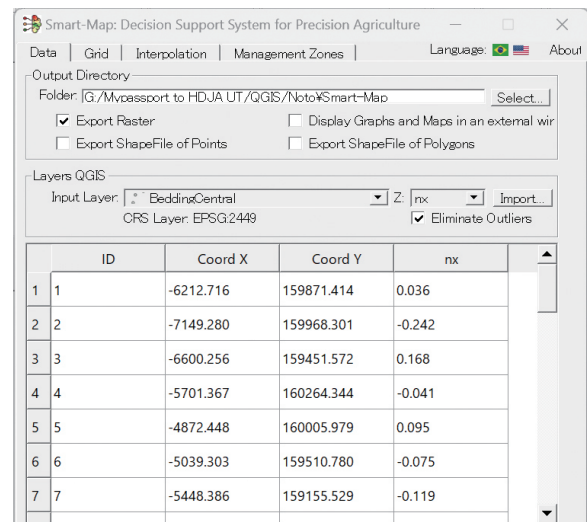


図 4 Smart-Map を起動して現れるパネル。

次に同じパネルの Grid タブから、Pixel size, Outline Polygon を選択して、Define ボタンを押す。Pixel size が 10 m だと比較的早く計算が終了した。Outline Polygon はデータを作る領域で、この場合は自分で作っておいたポリゴン (Area) を選択。

Interpolation タブから、calculation ボタンを押す。これでデフォルトの計算結果が決まるようである。Maximum Distance と Lag (ポイントの距離) を適当に変える (図 5)。多分 Semivariance と Distance が線形になるような設定を選択する

らしい (図5)。ModeはLinear。

データの数が少ない場合にNeighborの数が多  
いと、遠いデータの影響が強くなってしま  
う。この場合6くらいがよさそうである。Range  
をチェック。

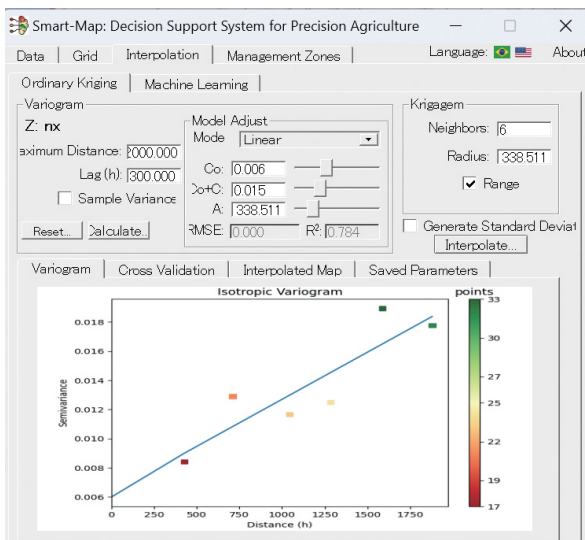


図5 データの内挿のための設定画面。

Interpolateをクリック。計算が終わると、  
Kriging Interpolated Mapが表示される (図6)。

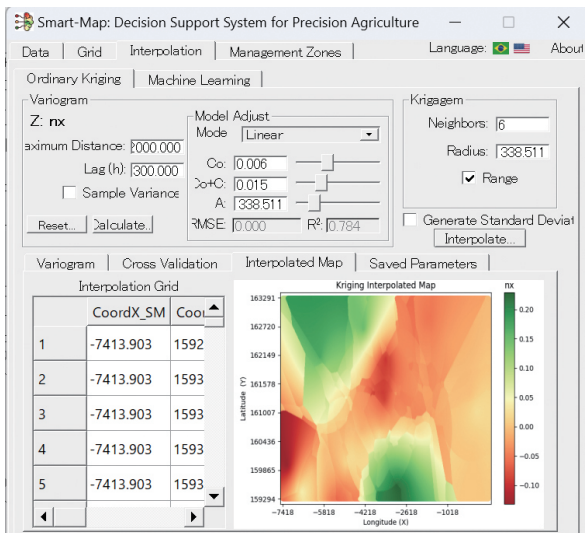


図6 データの内挿画面。

計算結果は、自動的にSmartMapRetryに保存  
される。

ny, nzについても同様に計算する。

#### 4. 傾斜分布図の作成

内挿した単位ベクトルのデータを使って地層  
の傾斜分布図を作成する。ここでは、ラスタ計  
算機を使用する。コマンドバーの「ラスタ  
ラスタ計算機」を選択。すると、図7のパネル  
が現れる。

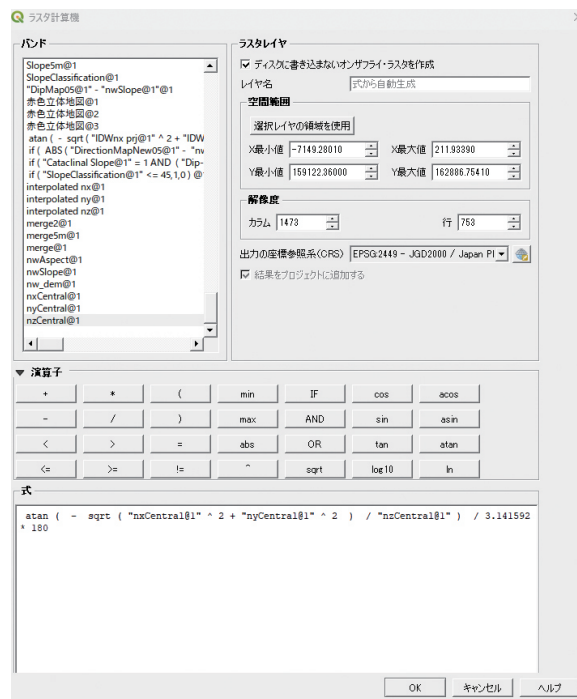


図7 ラスタ計算機画面。

図7の左にあるバンドには、今まで使ったレ  
イヤーが多数表示されるので紛らわしいが、こ  
れらから計算したい領域と同じ領域を持つレ  
イヤーを選択し、「選択レイヤーの領域を使用」  
をタップ。解像度はデフォルト、出力座標系は  
直交座標系。

式の枠内に、次の式を入力する。

$$\text{atan}(-\sqrt{("nx\_Central" ^2 + "ny\_Central" ^2) / "nz\_Central" ^2}) / 3.14159265 * 180$$

ディスクに書き込まないオンザフライ・ラ

スタ作成にはチェックを入れる。このチェックがないと OK ボタンを押せない。他はデフォルトとして、OK ボタンを押すと、図 8 の傾斜分布図がプロットされる。ここでも、単位ベクトルの座標が直交座標系になっていないと、変なところにプロットされるので要確認。

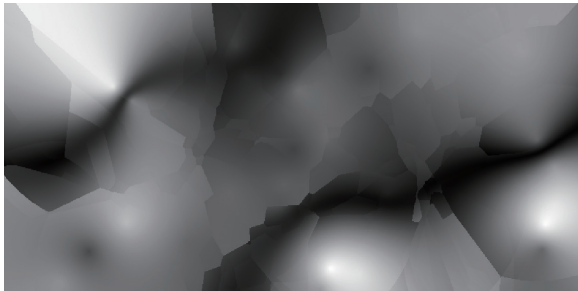


図 8 傾斜分布図.

この図はまだ仮の出力なので、このレイヤーを右クリックしてエクスポートして DipMap として保存する。

## 5. 傾斜方向分布図の作成

同じくラスタ計算機を用いて、地層の傾斜方向分布図を作成する。ラスタ計算機に、次の式を入力する。この時も、選択レイヤーの領域を使用というのがあるので、あらかじめ nx を選択してから入力 (式の入力後でも OK)。

```
if(( "nx_vector" >=0)AND( "ny_vector" >=0),180+atan( "nx_vector" /" ny_vector" )*180/3.14159265,
if(( "nx_vector" >=0)AND( "ny_vector" <0),360+atan( "nx_vector" /" ny_vector" )*180/3.14159265,
if(( "nx_vector" <0)AND( "ny_vector" <=0),atan( "nx_vector" /" ny_vector" )*180/3.14159265,
180+atan( "nx_vector" /" ny_
```

vector" )\*180/3.14159265)))

OK を押すと、図 9 の画像が得られる。

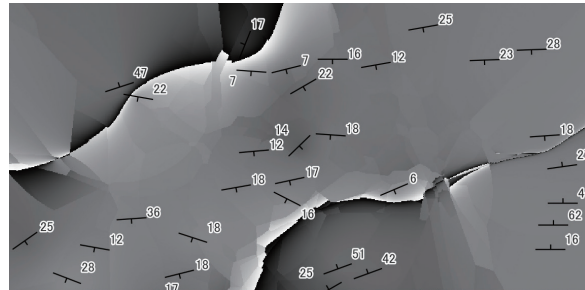


図 9 傾斜方向図.

ここで傾斜方向が不連続になっているラインが 2 つあるが、これらはほぼ褶曲軸部に一致している。しかしながら、走向傾斜のデータが不十分なこともあり、地質図上の軸部とは正確には一致していない。

## 6. 斜面一層理面関係分類図の作成

まず、地層の傾斜方向と斜面の傾斜方向との関係図を作成する。そのためには、図 10 に示すように、斜面の傾斜方向 (Slope direction) と地層の傾斜方向 (Dip direction) との差を用いる。

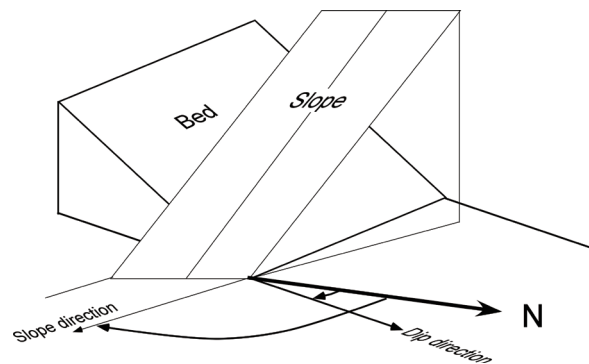


図 10 斜面の傾斜方向と地層の傾斜方向との関係.

ラスタ計算機で次の式を入力する。

```
if(abs( "stru_direct" -" aspect" )<180,abs( "stru_direct" -" aspect" ),if(abs( "stru_direct" -" aspect" )<=360,360-abs( "stru_direct" -
```

” aspect” ),0))

これでOKを押すと、範囲が真っ白になって、凡例が180度から360度になっていたが、これは次のようにすると修正できた。

レイヤーをダブルクリックして、レイヤープロパティからシンボロジを選び、単バンド疑似カラー、補完方法を離散、モード等間隔分類、分類数3としてから、値のところに上から順番に45、135と入れると、3区分にできる(図11)。区分は適当に変えられるけれども、45度以下が流れ盤(Cataclinal)、45-135が中間(Orthogonal)、135以上が受盤(Anaclinal)のような表示が良い。

OKを押すと、図12の斜面分類図が表示される。

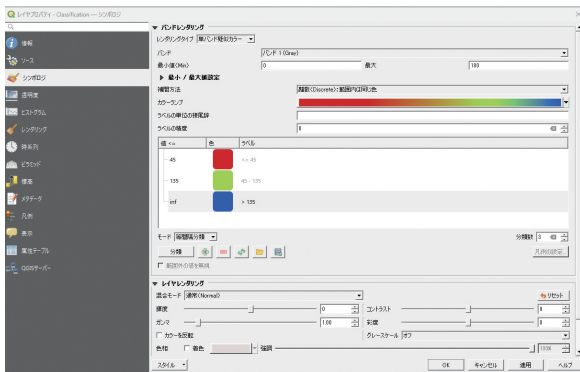


図11 傾斜分布図のシンボロジ設定。

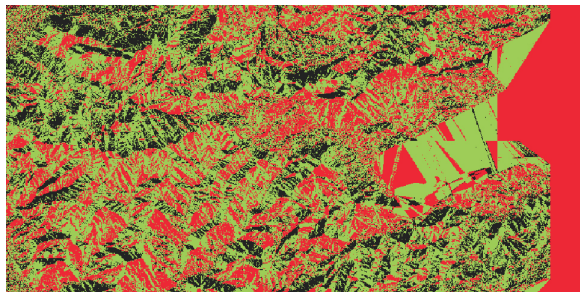


図12 斜面の流れ盤、中立盤、受盤分布図。

## 7. 特定の斜面一層理面関係の領域の抽出

### 7.1 流れ盤斜面(Cataclinal slope)の抽出.

ラスタ計算機で、if (“SlopeClassification@1” <= 45,1,0).

これは、分類角が45度以下ならば1、それ以外は0という指示。これで流れ盤斜面が抽出される。最初は画面が真っ白に表示されるが、これをエクスポートしてCataclinal Slopeとして保存。シンボロジで表示範囲を0と1とすると、図13の画像が得られる。

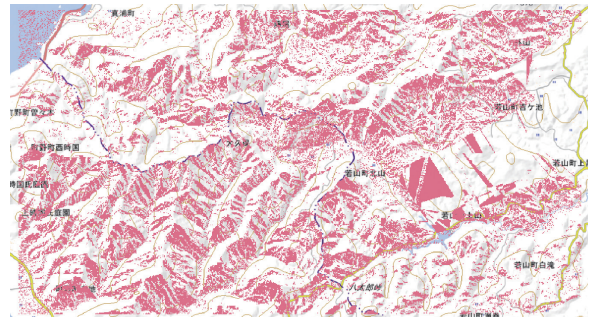


図13 流れ盤斜面の分布。

### 7.2 傾斜斜面(Dip slope)の抽出

Cataclinal slope, かつ、地層の傾斜-斜面傾斜の絶対値が10度未満の斜面を抽出する。地層の傾斜-斜面傾斜が-10度から10度までは、Dip slopeとみなすことにした。

if (“Cataclinal Slope@1” = 1 AND (abs (“Dip” - “Slope”) <= 10),1,0)

計算結果は図14である。

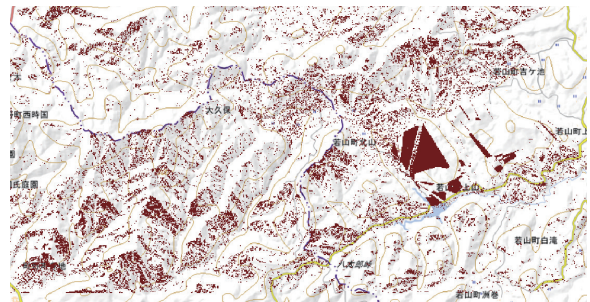


図14 傾斜斜面(Dip slope)の分布。



### 7.3 Cataclinal over dip slope (柎目盤斜面)の抽出

Cataclinal slope で、地層の傾斜よりも斜面の傾斜の方が大きな斜面の抽出.

```
if ( "CataclinalSlopeRetry@1" = 1 AND ( ( "NWSlope5m@1" - "DipMapRetrial@1" ) >= 10 ) , 1, 0 )
```

計算結果は、図 15 である.

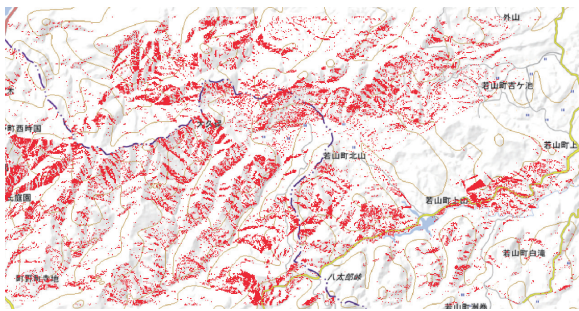


図 15 柎目盤斜面の分布.

これで一応求める図が作成できた.

柎目盤斜面の分布と地理院の崩壊分布図, 発生前の傾斜図と重ねると、図 16 のようになる.

また、流れ盤斜面の分布と地すべりの分布とを重ね合わせると、図 17 のようになった.

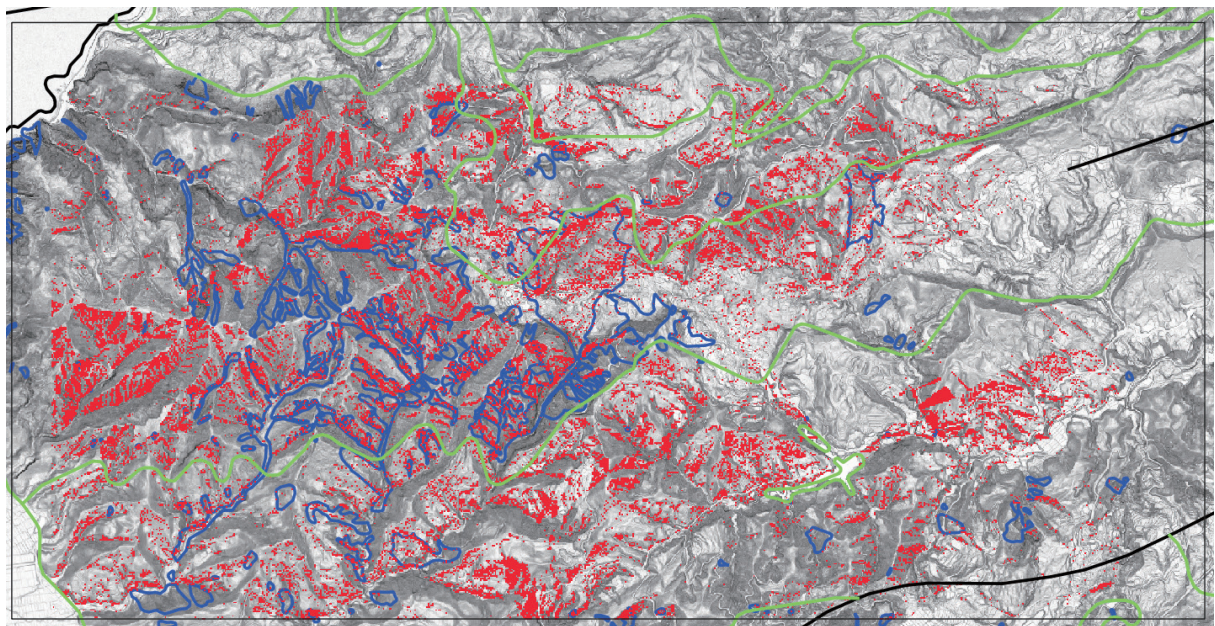


図 16 柎目盤斜面, 能登半島地震による崩壊地, 地震発生前の地質図の重ね合わせ.

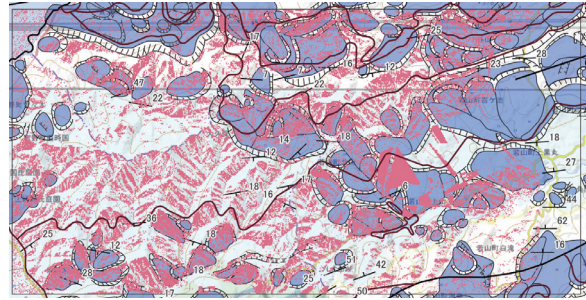


図 17 流れ盤斜面の分布と地すべりの分布.

東部では、流紋岩質火砕岩の分布域に大規模な地すべりが並んでいるが、これらはこの層の下の珪質シルト岩との境界付近にすべり面を持つものかもしれない.

これらの図から言えそうなことは、流紋岩質火砕岩の部分では、層理面と斜面との関係に係わらず多くの崩壊が発生していたことである. また、流れ盤斜面でも地すべりは非常に少ない. 東部の流紋岩質火砕岩分布域に地すべりは、火砕岩の下の珪質泥岩にすべり面があるのかもしれない.

珪質泥岩の流れ盤斜面には地すべりが多い.

残念ながら、柎目盤斜面で新たな地すべりや崩壊が多いという結果にはならなかった.

## 8. おわりに

地すべりの発生に大きく影響する層理面と斜面との相対的な関係を示す図を QGIS を用いて作成することができた。流紋岩質火砕岩の地域では、地層と斜面との関係に係わらず、崩壊が多数発生していたことがわかった。

## 謝辞

G 空間情報センター提供の 1mDEM（地震前）を使用した。四川大学の趙思遠氏には計算式をかわせていただいた。

## 文献

Chigira, M. and Yagi, H. (2006): Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan. *Engineering Geology*, **82**, 202–221.

G 空間情報センター (2024), 令和 6 年能登半島地震, <https://www.geospatial.jp/ckan/organization/aigid-dsaster-20240101>, (2024 年 8 月 10 日参照).

Ilinca, V., Şandric, I., Jurchescu, M. and Chiţu, Z. (2022): Identifying the role of structural and lithological control of landslides using TOBIA and Weight of Evidence: case studies from Romania. *Landslides*, **19**(9), 2117–2134.

Meentemeyer, R. K. and Moody, A. (2000): Automated mapping of conformity between topographic and geological surfaces. *Computers & Geosciences*, **26**(7), 815–829.

Mishra, B. K., Bhattacharjee, D., Chattopadhyay, A.

and Prusty, G. (2018): Tectonic and lithologic control over landslide activity within the Larji-Kullu Tectonic Window in the Higher Himalayas of India. *Natural Hazards*, **92**(2), 673–697.

根本達也・藤田 崇・升本眞二・ベンカテッシュ  
ラガワン・塩野清治 (2000) : 地層面と地形面の関係の表現方法. *情報地質*, **11**(2), 98–99.

根本達也・藤田 崇・升本眞二・ベンカテッシュ  
ラガワン・塩野清治 (2001) : 地形面と地層面の関係の数値表現—数量化理論第 II 類を用いた地すべり地判別への適用—. *情報地質*, **12**(2), 102–103.

Santangelo, M., Marchesini, I., Cardinali, M., Fiorucci, F., Rossi, M., Bucci, F. and Guzzetti, F. (2015): A method for the assessment of the influence of bedding on landslide abundance and types. *Landslides*, **12**(2), 295–309.

吉川敏之・鹿野和彦・柳沢幸夫・駒澤正夫・上嶋正人・木川栄一 (2002) : 珠洲岬, 能登飯田及び宝立山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 76p.