

【論文】

高山地域における重力性山体変形の進行の度合いを示す 釣り鐘度とその分布

八木浩司¹・林一成²

¹ 深田地質研究所

² 奥山ボーリング株式会社

Bell-Shaped Slope Index and its distribution indicating the progress of gravitational deformation in high mountain regions

YAGI Hiroshi¹, HAYASHI Kazunori²

¹Fukada Geological Institute

²Okuyama Boring Co.Ltd.

要旨:高起伏山地において山稜上部に緩斜面を残し明瞭な遷急線が形成されている斜面で山体は、全体として釣り鐘型の形状を示す。また、釣り鐘型の山体の遷急線付近には、逆向き小急崖や線状凹地が発達することから、その形状を釣り鐘度 (BSI) と称して DEM データから算出し、重力性山体変形の発生しやすさを推定する指標と考えた。BSI の高い斜面は黒部川などの急速な侵食が起こっている河谷沿いに現れる。今後は、釣り鐘度分布から深層崩壊発生箇所の予測に適用可能と考える。

キーワード: 高起伏山地, 逆向き小急崖, 線状凹地, 重力性山体変形, 釣り鐘度

Abstract: In high-relief mountainous areas, slopes with clear break, leaving only gentle slopes at the top of the ridge, give the mountain an overall bell-shaped slope. Furthermore, since up-hill facing scarplets and linear depressions develop near the breaks of bell-shaped mountain edifices, this shape has been called the bell-shaped slope index (BSI) and calculated from DEM data as an index for estimating the degree of gravitational mountain deformation. Slopes with high BSI appear along river valleys where rapid erosion is occurring, such as the Kurobe River, and in the future, it is believed that the bell-shaped slope index distribution may be applicable to predicting the locations of deep-seated collapses.

Keywords: High relief mountain, Up-hill facing scarplets, linear depression, gravitational deformation, Bell-shaped Slope Index(BSI)

1. はじめに

二重山稜・多重山稜あるいは逆向き小急崖・線状凹地とよばれる高起伏山地の主稜部に分布する微地形 (写真 .1,2,3,4) は、長期間にわたる重力性のクリープ変形の現れと考えられてきた (八

木, 1981 ; 千木良, 1984, Chigira,1992 ほか多数)。それらの微地形は、経験的に地すべりなどの対策に携わる技術者にとって山体崩壊などの予兆のサインとして見なされてきた。しかしそのような高起伏山地稜線付近の微地形は、少なくとも 30ka 以降に発達したものが明らかになり (伏

島, 1988), 氷期以降の para-glacial 現象とも見なされたり, 数 ka 程度の時間スケールで間欠的に発達するようにも考えられてきた (荻谷ほか, 2024). いずれにせよ, 重力性変形の進んでいる斜面では, 強雨による地下水圧の上昇あるいは地震等の外力が働けば, 山体崩壊などの突発災害が発生しやすいことは明らかで, 重力性変形の進んでいる斜面の抽出が必要と考えられた.

筆者らは, 逆向き小急崖・多重山稜などの微地形が多く認められる山体の形態に注目し, それらを既存の数値地形データ (DEM) を用いて抽出する簡便な手法を開発した (八木ほか, 2014 ; Yagi & Hayashi, 2017). 今回, 後述の釣り鐘度 (BSI) を用いて飛驒山脈北部の黒部川流域の山地域において重力性変形の進んでいることが予想される山稜を抽出した.

2. 釣り鐘度とは

逆向き小急崖・線状凹地などの微地形が多く認められる山体は, 高起伏であるにもかかわらず山頂・山稜部に傾斜 15° 以下の緩やかな斜面が残り, 明瞭な遷急線以下に傾斜 40° 以上の急斜面に取り囲まれている (図 1). 逆向き小急崖・線状凹地などの微地形は, 遷急線付近に発達していることから, 遷急線付近で歪みが大きくなりやすいことを示している.

図 2 は, 遷急線点を挟んで上部に斜面に較べ下部斜面の傾斜が大きい場合のせん断歪みの現れかたを示したものである (八木ほか, 2025).

より遷急線付近に歪みが現れやすくなることが示されている. これは, 主稜部に残された比較的大きな荷重が, 遷急線から下部の斜面が谷側への撓みを進めやすいことを示している. 結果的に比高 (斜面長) が大きな斜面では, 歪みの蓄積に

伴い斜面のずれが生じやすくなり, 稜線部の相対的沈下により逆向き小急崖が形成されることを示している.

筆者らは, 写真 1~4 に示したような top-heavy な山体形が釣り鐘に類似していることから, その度合いを釣り鐘度 (Bell-shaped Slope Index : BSI) と呼ぶことにし (八木ほか, 2014 ; Yagi & Hayashi, 2017), それを図 3 に示すとおり求めた.

すなわち, グリッドサイズ 10m あるいは 20m の数値地形モデル (DEM) において, 中心メッシュを設定したのち, 中心メッシュから一定方向に検索距離 L の範囲で断面を描く. 中心メッシュよりも標高が低い点において地下開口角 θ が (横

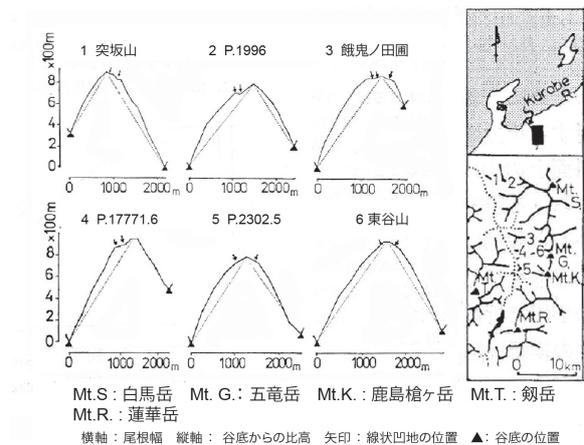


図 1 北アルプス北部に認められる釣り鐘型山体と逆向き小急崖と線状凹地の出現位置 (八木, 1981)

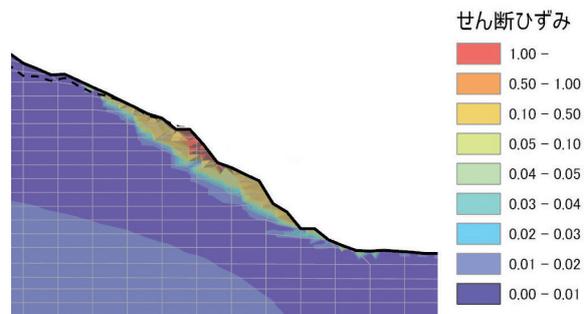


図 2 遷急線を挟んだ斜面のせん断歪み分布 (八木ほか, 2025)



写真1 赤石岳西方の百間平に発達する逆向き小急崖と多重山



写真2 赤石山脈・広河内岳周辺の逆向き小急崖と主稜部の陥没



写真3 身延山地七面山主稜部に残る平坦面と楔状陥没

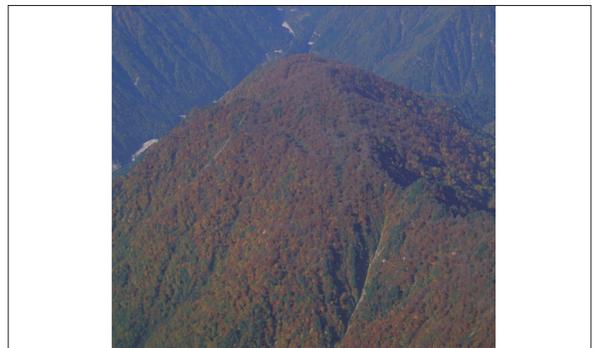


写真4 飛騨山脈北部黒部川右岸の餓鬼の田圃

山ほか、1999) 最小となる接線を求める。次に、接線と地下開口角 θ からなる直角三角形の面積 W_a に、地形断面の面積を W_b とする。仮に W_a に比べ W_b が大きくなるほど山体斜面は谷側に膨らんだ釣り鐘状の形態をとることになる。ここで W_a に対する W_b の面積比を釣り鐘度 (Bell-Shapes Slope Index : BSI : 図3 参照)

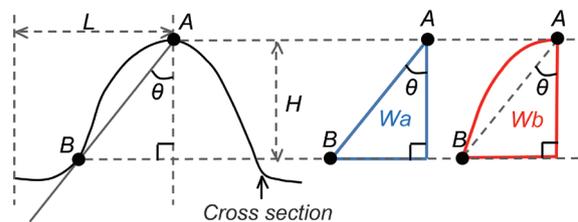
$$BSI = W_b / W_a$$

と定義し、中心メッシュから下る8方位の断面について同様の処理を行い、8方位の平均値

$(bsi1 + bsi2 + \dots + bsi7 + bsi8) / 8$ を各メッシュに与える (図4)。その際、段丘面のように比高 (H) は小さいけれど出っ張り面積が大きくなり結果として BSI が大きくなる場合を省くため、あらかじめ比高の最小値 (H_{min}) を設定し、

$$H > H_{min}$$

の場合のみメッシュ位置に算出された BSI 値が与えられる。なお、 $H < H_{min}$ の場合、当該メッシュは Null 値となる。また、中心メッシュが斜面の中腹にある場合は、登り断面方向には地下開口角を取れないので7断面の平均値 $(bsi1 + bsi2 + \dots + bsi7) / 7$ となり、中心メッシュが凹



θ : subterranean aperture angle
 W_a : subterranean aperture area
 W_b : area of mountain profile
 Bell-shaped Slope Index = W_b / W_a

図3 釣り鐘度の概念図

地にある場合は、下りの断面がないことからこれも Null となり、図上では無着色あるいは青で表現される。以上のプロセスをフローチャートとして示したものが図5である。

3 高起伏山地における BSI 算出に適した重力性山体変形と検索距離と比高

1) 赤石山脈南縁部

山頂緩斜面が残り逆向き小急崖・線状凹地の発達が顕著な赤石山脈南部・山伏峠南方の稜線付近について BSI 分布を明らかにした。ここでは、稜線を挟んで3次谷谷底間の距離が2km程度であることから水平方向の検索距離を1kmとして、比高を50mおよび100mでのBSIをそれぞれ算出して示した(図6)。図には1/4万空中写真判読から確認された逆向き小急崖・線状凹地の位置が赤実線で記してある。いずれも稜線付近にBSIの高い斜面が発達し、その領域で逆向き小急崖・線状凹地が多く発達している。特に比高Hmin100mとした場合に高いBSI領域内で重

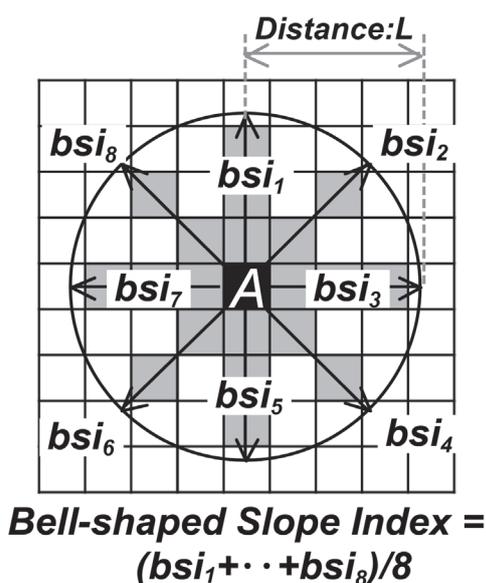


図4 釣り鐘度算出のための検索概念

力性山体変形の分布との対応がよい。

2) 黒部川流域

次に、赤石山脈南部に較べさらに起伏量の大きな黒部川流域について、突坂山のような典型的な釣り鐘型の山体が出現する黒部川流域猫又沢流域を選んで、BSI分布と逆向き小急崖・線状凹地の分布を検討した(図7)。そこでは隣り合った本流に合流する3次谷間の尾根幅は概ね2~3kmで、谷底と稜線との比高は1200~1300mであった。そこで、この地域においても水平方向の検索距離(L)を1kmとして、比高Hminを100m, 200m, 400mに変えた場合、それぞれのBSIの分布の変化を見た。図には1/4万空中写真判読により確認された線状凹地の位置が黒実線で記してある。当然突坂山や不帰岳などの稜線周辺斜面で、

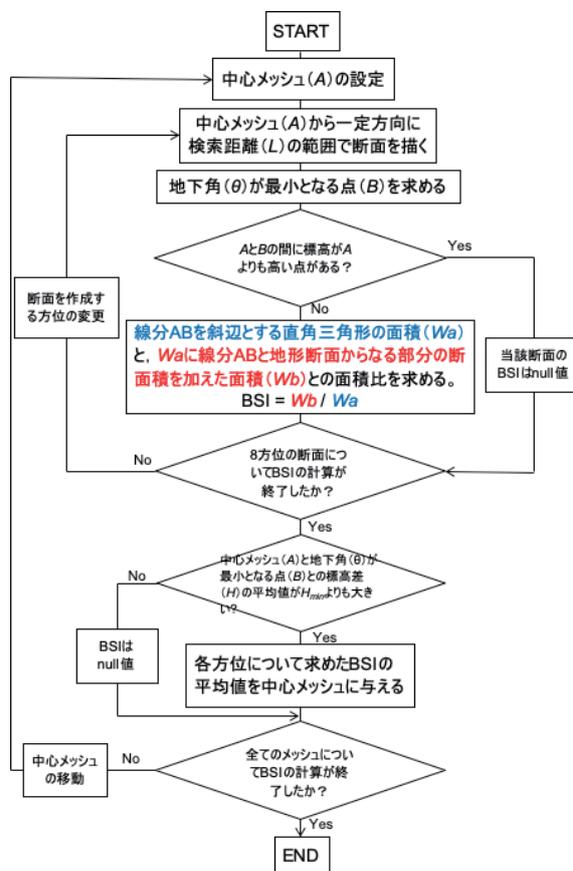


図5 釣り鐘度算出のためのフローチャート

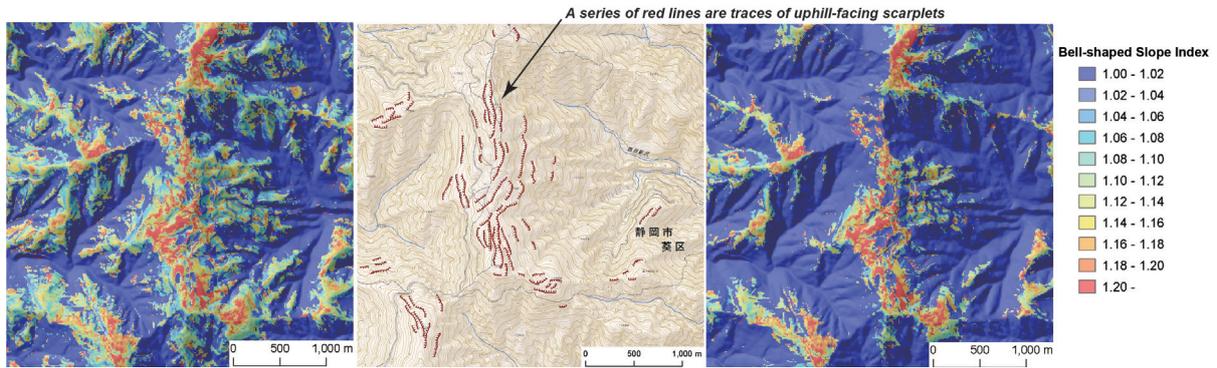


図6 逆向き小急崖・線状凹地の発達が顕著な赤石山脈南部・山伏峠南方の稜線付近について BSI 分布
検索距離を 1km に固定し、比高を 50m (左) と 100m (右) として計算した結果

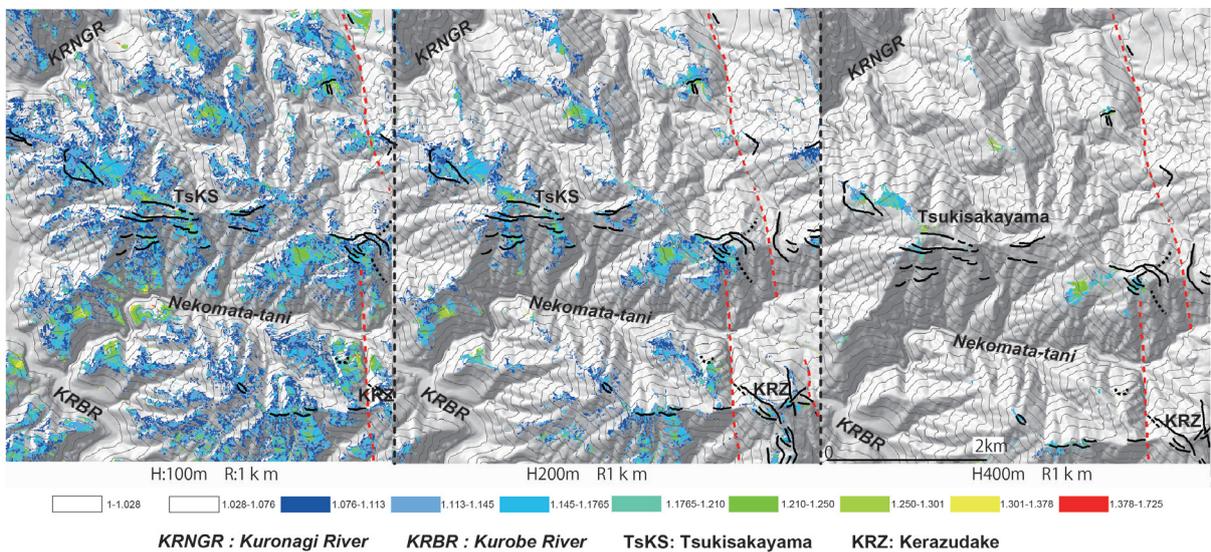


図7 検索距離を 1km に固定して比高を 100m, 200m, 400m とした場合の BSI 分布

逆向き小急崖・線状凹地の分布密度が高い。この場合、猫又沢右岸には BSI が 1.113 ~ 1.301 と相対的にその値の高い斜面が広く分布し、そのうち逆向き小急崖の分布との対応が比較的簡単に読み取れるのは、検索距離 1 km で比高を 200m にした場合のものである。以上から、山地地域であれば検索距離を 1km とし調査地域の起伏量によって比高を調整して検討する必要がある。

4 飛騨山脈北部黒部川流域における BSI 分布と重力性山体変形

本報告では飛騨山脈北部の雪倉岳、朝日岳を含む黒部川流域、猫又谷流域、祖母谷最上流域を含む黒部川流域について、検索距離 1km、比高 200m で得られる BSI 分布と重力性山体変形を検討した(図 8)。図より、黒部川左岸沿いに高起伏の山域が広がり、高い BSI の分布領域も分布する。これは、黒部川本流域に接した左岸域での浸食が激しいことを示唆している。上述の突坂山

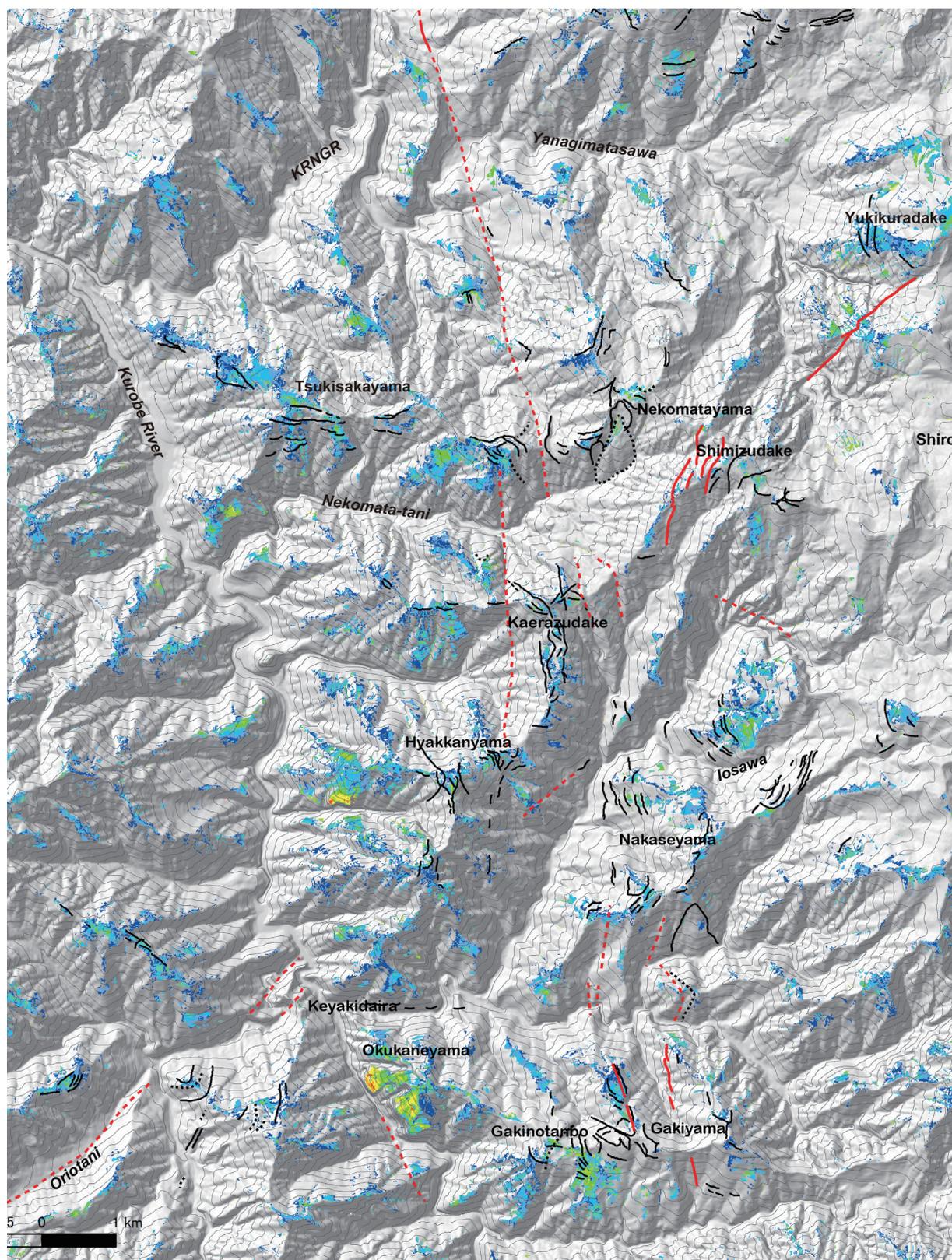


図8 飛騨山脈北部・黒部川右岸地域のBSI分布

以外にも餓鬼の田圃，百貫山，中瀬山，不帰山，硫黄沢右岸上部斜面，猫又山，雪倉岳西面に逆向き小急崖・線状凹地の発達が顕著で BSI の値も高い斜面が広がる。それらの地形は，斜面の最大傾斜方向に直交するように等高線に沿って発達することから，斜面の重力に起因した変形であることは明らかである。

一方，本地域では中央部に猫又断層（産総研 HP）と呼ばれる地質断層（赤点線）が走る。また，本図右端部に位置する雪倉岳南斜面から南西に連続する直線的な凹地や逆向き小崖などの変位地形が認められ，雪倉断層（赤実線）と呼ばれてきた（上本，1978; 中野ほか，2002）。

猫又断層は，直線的な谷や連続するサドル地形の存在からリニアメントとして認識されているが，逆向き小崖などの山地斜面に直接的な変位を与えているのは餓鬼山北側稜線と同北西側斜面の逆向き小急崖のみである。それらは直線的に発達するものの，変位の範囲が限定的であることから，広域的な造溝応力に起因する断層運動に起因するものとは考えにくい。餓鬼山北西側斜面の逆向き小急崖については，周辺斜面の BSI が低いにもかかわらず変位が起こっていることから，並行する地質断層にもたらされた構造に沿った重力性変位に伴うものと考えられる。

雪倉断層に沿った逆向き小崖・線状凹地は，清水岳西方まで尾根を跨いで両側に直線的に発達する形態的特徴から，山地斜面の広がりに対応した単なる重力性変形とは言いがたい。上本(1978)は，雪倉断層が跡津川断層や弥陀ヶ原断層の延長に位置することから活断層の疑いがあることを述べた。しかし折尾谷を経て黒部川から不帰岳にかけての山塊では，雪倉断層の延長で北東-南西走向の変位地形は見いだせない。現時点では重力性断層とも広域応力場で活動した断層とも評価でき

ず，その解明は今後の課題である。

まとめ

高起伏山地において山稜上部に緩斜面を残し明瞭な遷急線が形成されている斜面で山体は，全体として釣り鐘型の形状を示す。また，釣り鐘型の山体の遷急線付近には，逆向き小崖や線状凹地が発達することから，その形状を「釣り鐘度（BSI）」と称して DEM データから算出し，重力性山体変形の発生しやすさを推定する指標と考えた。今後は，釣り鐘度分布から深層崩壊発生箇所の予測に適用可能と考える。

文献

- 千木良雅弘 (1984) : 結晶片岩の岩盤クリープ (その 1) 関東山地三波川帯の地質構造と地すべり地形との関連. 応用地質, 第 25 巻, pp.182-194.
- Chigira, M., 1992. Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep. *Engineering Geology*, **32**, 157-184.
- 伏島祐一郎 (1988) : 北アルプス蝶ヶ岳の多重山稜. 日本地理学会予稿集, **33**, 112-113.
- 荻谷愛彦・高岡貞夫・清水勇介 (2024) 北アルプス蝶ヶ岳・妖精ノ池における閉塞凹地埋積物の層序と年代. 専修自然科学紀要, **55**, pp.25-30.
- 中野 俊・竹内 誠・吉川敏之・長森英明・荻谷愛彦・奥村晃史・田口雄作 (2002) 白馬岳地域の地質. 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, 105 p.

産業技術総合研究所(産総研) HP 活断層データベース <https://gbank.gsj.jp/activefault/search>

上本進二 (1978) 白馬岳北方鉢岳西斜面の新时期断層地形. 第四紀研究, vol.17, p.171-175.

八木浩司 (1981): 山地にみられる小崖地形の分布とその成因. 地理学評論, **54**, 272-280.

八木浩司・林一成・今泉文寿・佐藤剛・檜垣大助 (2014) 重力性山体変形の限界領域を示す地形量としての起伏度, 山体釣り鐘形状度, 山体歪み度. 2014年日本地球惑星科学連合大会 03010 (HDS29-P05)

Yagi, H. & Hayashi, K. (2017) Bell-shape index indicating top-heavy profile of high relief mountain and gravitational deformation. Proceedings / Abstracts of the 4th Slope Tectonics Conference (Kyoto,2017)

八木浩司・林一成・佐藤昌人・山田隆二・本山功・井村 匠・渡辺 修・柴崎達也・新井場公德・土志田正二 (2025) 2025年12月31日未明に鶴岡市西目地区で発生した地すべり災害の概要と地形・地質的背景. 日本地すべり学会誌, 62-5,11-16.

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, 38-4. 26-34