

深層学習による地すべり地形判読技術の向上に関する研究

令和5年 12月19日

古木 宏和

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 地すべりとは	2
1.2.1 地すべりの定義	2
1.2.2 崖崩れ（崩壊）とは	5
1.2.3 地すべりと深層崩壊の違い	6
1.3 社会の中の地すべりの位置づけ	8
1.3.1 国民にとっての土砂災害の認識	8
1.3.2 防災教育と土砂災害危険区域	9
1.3.3 ダム湛水による地すべり	13
1.4 すべり対策の事例	25
1.5 地形計測技術の発展と地すべり発生場予測の研究事例	27
1.5.1 地形測量技術の高度化—航空レーザ測量	27
1.5.2 地すべり地形判読の基礎と発生場予測	31
1.5.3 地すべりのタイプ分類	40
1.5.4 地すべりの判定方法	42
1.5.5 地すべり地形判読の効率化に関する研究	47
1.5.6 地すべりの危険性予測の事例	49
1.6 地すべり地形判読の意義と本論の目的	57
1.7 第1章まとめ	57
第2章 地すべりの破壊のメカニズムと地形との関係性	62
2.1 地すべりの破壊構造の研究における地質工学，土木工学的重要性	62
2.3 地すべりの移動現象と移動体内部の破壊構造の研究	63
2.4 トレンチにおける地すべり内部の破壊構造の観察とサンプリング	65
2.5 地すべり面付近の破砕帯の特徴	66
2.6 せん断破壊を受けた破砕帯に含まれる土粒子の特徴	69
2.7 第2章まとめ	71
第3章 深層学習モデルによる地すべり地形判読手法の検討	73
3.1 地すべり地形判読に深層学習を適用する意義	73
3.2 地すべり危険箇所を判定する深層学習の適用事例	73
3.3 本論の検討手法	75

3.3.1	検討に用いるデータ	76
3.3.2	深層学習の実装環境とアルゴリズム	77
3.4	AI が認識しやすい画像の色調の検討	79
3.4.1	教師データの作成	79
3.4.2	教師データの作成方法と AI が学習する特徴把握のための画像加工	79
3.4.3	調査対象地と教師データとテストデータの区分	81
3.4.4	地形判読技術者の視点による教師データの改善	81
3.4.5	pix2pix のハイパーパラメータ調整	83
3.4.6	生成した画像の評価方法	83
3.4.7	AI が認識しやすい画像の色調の検討における推論結果	84
3.5	地形表現図の違いに着目した深層学習の推論精度の検証	87
3.5.1	検証の対象とする地形表現図	87
3.5.2	学習データの作成と深層学習の実行	88
3.6	第3章まとめ	91
第4章	地すべり地形判読 AI の評価	93
4.1	地すべり地形抽出 AI の性能評価指標	93
4.2	深層学習による地すべり移動体の抽出結果	93
4.2.1	ピクセル単位の一一致率	93
4.2.2	箇所数単位の一一致率	94
4.3	第4章まとめ	105
第5章	地すべり地形判読 AI に関する提言	107
5.1	ピクセル単位と箇所単位による地すべり抽出結果の評価	107
5.2	AI が抽出した地すべり地形の特徴	109
5.3	AI が誤判読および判読漏れした画像の特徴	111
5.4	地域別に作成した教師データによる地形判読 AI の試行	113
5.5	正解と定義するデータの留意点と地形判読 AI 研究の意義	116
5.5.1	正解と定義するデータの留意点	116
5.5.2	地形判読 AI がもたらす土木技術的意義	116
5.5.3	深層学習により向上した地すべり地形判読技術と今後の展望と課題	117
5.6	第5章まとめ	118
第6章	結論	121
	【謝辞】	123

第1章 序論

1.1 はじめに

大規模土砂災害を引き起こす地すべりという斜面移動現象は、古くから「地形判読」という技術で発生場の予測が行われてきた。技術者は、地形図より、地すべりの地形的痕跡を持つ斜面を経験則に基づいて抽出を行ってきた。

地すべりは、日本だけでなく世界各地で多数発生しており、社会インフラや住民生活と密着した地すべりの調査や対策が行われている。中でも日本は、世界から見ても高水準で発見から対策までの土木的知見を有している。地すべりを事前に発見、範囲の特定に当たっては、専門技術者により地すべり箇所の位置を特定する「地形判読」を行う。日本国内では、この判読作業により多くの地すべりが発見され、法律で定められた対策方法に則り、災害発生の未然措置が施されている。判読技術は、専門家の経験的により、位置や境界線を描いているため、属人性が出やすい点に課題がある。また、判読技術の習得には、長い年月を要することから、技術者不足に苛まれる近年においては、技術継承が年々困難になりつつあり、土木工学、地質工学の業界における課題として解決が急務とされている。

本論では、従来技術として確立されている判読技術に対し、2010年代から急速に発展、活用されている深層学習を適用した。深層学習は、画像から特徴を自動認識する能力に優れているため、本論では、深層学習の画像認識力が、技術者が地形図を見て判別している判読作業と同様、ないしは近い画像の生成を行い、「地すべりの位置の推定」が可能であろう、との着想と仮説を持って取り組んだものである。以降に、深層学習によって地すべり地形を抽出する意義を述べると共に、技術的、社会的、深層学習の適用方法、結果の解釈の一連の研究成果を通して判読技術の向上について論述するものである。

本章では、一般論としての地すべりの定義、発生メカニズム、社会的なインパクトなどの背景をとりまとめ、地形判読技術による発生場予測の恩恵と課題、そして深層学習を適用する事への意義と研究目的について述べる。

1.2 地すべりとは

1.2.1 地すべりの定義

地すべりとは、降雨や地震に伴って発生する斜面移動現象の一つである(図 1) [1]。地すべりは、斜面の一部あるいは全部が地下水の影響と重力によってゆっくりと斜面下方に移動する現象のことを言う。一般的に移動土塊量が大い為、甚大な被害をもたらす。また、一旦動き出すとこれを完全に停止させることは非常に困難である。

平成 24 年の紀伊半島水害、平成 26 年の西日本豪雨災害など、土砂災害と呼ばれる豪雨では、地すべりによる災害も多発している [2]。土砂災害は、日本の国土において 70%以上を占める山間部およびその近傍で発生しており、国民の生活と切り離せない現象と言える。土木工学の上でも、土砂災害に対する予知予測、調査、対策工など、古くから国や自治体を中心となり、行ってきた。

土砂災害の種類は、大きく分けて種類ある。崩壊、土石流、地すべりである。このうち本論で対象とする地すべりは、下記のような特徴がある [3]。

- ・動きが緩慢である
- ・繰り返し活動する
- ・降雨や地震に伴って活動する
- ・地域地質により規模や発生条件が異なる

2012 年に紀伊半島で多発した深層崩壊は、巨大な土砂移動現象であり、急速な斜面運動の観点から崩壊と区分されているが、地形的な予兆が存在し、地形地質との関連性が深い点で地すべりの発生機構と同様である。深層崩壊のうち、深層崩壊に関する基本事項に係る検討委員会 報告・提言によれば、緩慢に活動する斜面運動を地すべり、と定義している。地すべりと崩壊についての模式図を図 2 に、実際に発生した地すべりの画像を図 3 に、典型的な地すべりの模式図を図 4 に示す。

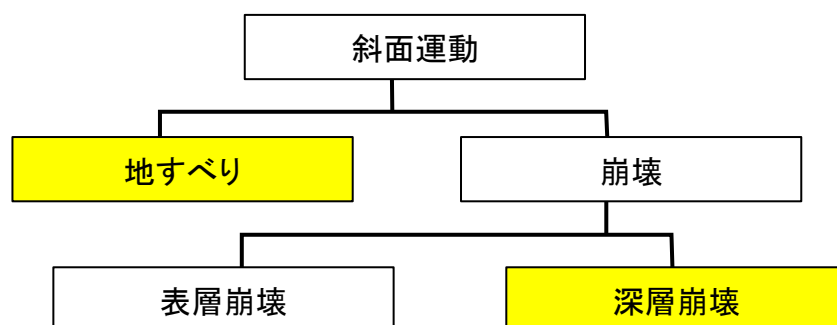
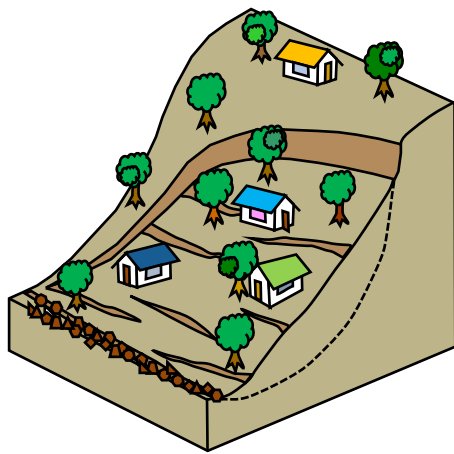
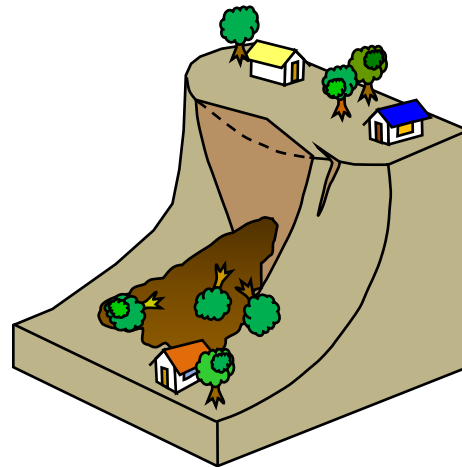


図 1 斜面運動の区分 [2]より引用したものに一部加筆



地すべりの模式図



崩壊の模式図

図 2 地すべりと崩壊の概念図



図 3 2021年7月に発生した小松原地すべり（長野市）



図 4 典型的な地すべりの写真と模式図 [4]より引用

1.2.2 崖崩れ（崩壊）とは

崖崩れ（崩壊）とは、地中にしみ込んだ水分が土や岩盤の抵抗力を弱め、雨や地震などの影響によって急激に斜面が崩れ落ちることを指す[4]。

この崖崩れによって被害を受ける可能性がある箇所は、国土交通省や地方自治体によって急傾斜地崩壊危険区域は「急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律」によって、対策が講じられることが法律で定められている。

崩壊の定義は下記とされている。

- ・斜面（＝がけ）の高さが5m以上であること
- ・斜面の勾配が30度以上であること
- ・原則として、被害想定区域内に5戸以上あること

崩壊のうち、とくに表層崩壊は、いつどこで崩れるかを予測するのは非常に困難だが、崩れた場合その崩土がどこまで到達するかは、統計的に明確になりつつある。

全国の表層崩壊の事例によると、表層崩壊崖際から土砂の先端までの距離は崖の高さと同じ距離の範囲内にほぼ収まっている。したがって、家の建て替えの時には、できるかぎり崖斜面から離して建てて危険を避ける、という対応が必要である。離す距離は安全を見込んで崖の高さの2～3倍以上とするのが望ましいと思われる。土砂・岩石が急速に運動する様式には、「滑る」の他に「落ちる」（落石など）、「流れる」（土石流など）がある。図5に崩壊現象の例を示す。



2022年9月に発生した崩壊
(秩父市)



(国土交通省砂防部 HP より)

図5 典型的な崩壊現象

1.2.3 地すべりと深層崩壊の違い

地すべりと崩壊の特徴の違いを表 1 に示す。地すべりは先に述べた通り、勾配が緩やかな斜面で再発性を持ち、ゆっくりと移動すると定義されている。対して崩壊は、崖崩れに代表されるように急勾配で突発的に発生する。これらは土砂の移動現象としての定義である。

崩壊は、発生メカニズムの観点から、日本国内においては2タイプに区分されている。表層崩壊と深層崩壊である。表層崩壊は、深さ約 2m を目安として地表面の極表層が小規模に崩落する現象を示す。深層崩壊は、文字通り表層よりも深い基岩盤を巻き込んだ崩落現象を示す。

表 2 に地すべり（表層崩壊）と深層崩壊の定義上の違いを、図 6 にそのモデルを、図 7 に区分フローを示す。文献によると、地すべりと崩壊の違いは、地形的に急峻か緩いか、移動土塊の乱れで区分された後の深層崩壊の特徴である地質、兆候、深さ、基盤、規模の点では、地すべりの定義と類似する点が多い。したがって、本論では主題に掲げる判読が斜面運動の予測技術として有効であるという意味から、深層崩壊と地すべりを同様に扱い、以降「地すべり」と表記する。

表 1 地すべりと崩壊の特徴の対比表 [2]より引用したものに一部加筆

	地すべり	崩壊
地形	緩勾配 地すべり地形	急勾配
活動状況	継続的・断続的 再発性	突発的 一過性
移動速度	小さい	大きい
土塊	乱れない 斜面上に留まる	乱れる 大部分が斜面から抜け落ちる

表 2 表層崩壊と深層崩壊の比較表 [2]より引用したものに一部加筆

	表層崩壊	深層崩壊
深さ	浅い	深い
土質	表土層	基盤
規模	小規模	大規模
土砂量	—	約 1 万～数億 m ³

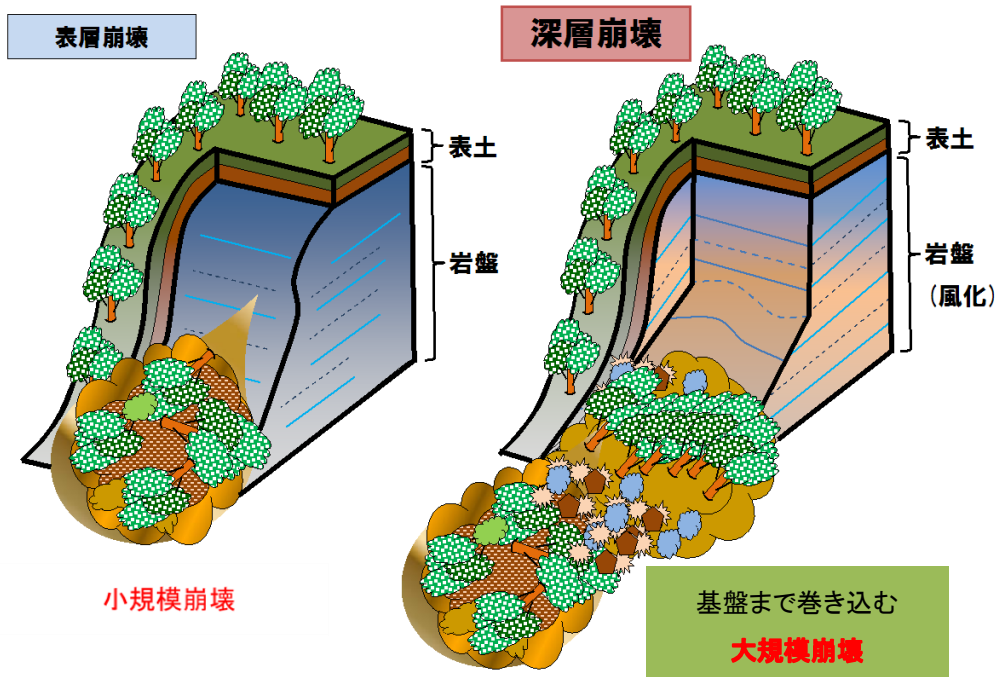


図 6 表層崩壊と深層崩壊の概念図 [2]より引用

斜面運動のうちの崩壊，地すべり

①地形	緩勾配 地すべり地形	急勾配 非火山地域では斜面の変形等の特徴がみられる場合がある
②活動状況	継続的，断続的に動いてる，再発性。	突発性
③移動速度	小さい	大きい
④土塊	乱れない，斜面上に留まる。	乱れる，大部分が斜面から抜け落ち

↓
地すべり

↓
崩壊

①地質	関連が少ない	地質，地質構造（層理，褶曲，断層等）との関連が大きい。
②兆候（地形，地下水）	ほとんどない	有る場合がある。非火山地域では，クリープ，多重山稜，クラック，末端小崩壊，はらみだし，地下水位変動など
③深さ	浅い	深い
④土質	表層土	基盤
⑤植生の影響	有り	無し
⑥規模	小規模（比高小）	大規模（比高大）

↓
表層崩壊

↓
深層崩壊

注）網掛け部は発生前の予測段階で調査が比較的容易な項目

図 7 地すべり・表層崩壊・深層崩壊の区分のフロー

[2]より引用したものに一部加筆

1.3 社会の中の地すべりの位置づけ

1.3.1 国民にとっての土砂災害の認識

地すべりは古くから土砂災害を引き起こす斜面変動（または山体変動）と称され、山崩れ、山流れと呼ばれた、大規模に斜面が崩れ落ちる現象のことである。日本では昭和33年に地すべり防止法が制定されてより、社会インフラや住民生活と密着した地すべりの調査や対策が行われてきた。地すべりは、斜面崩壊と同様に「地すべり」という用語が国民に広く知られ、危険な現象であることが認知されている。日本における地すべりは、地形地質の複雑さ、降雨が多い気候の上から活動条件が揃っていると言える。このため日本では、世界から見ても高水準で発見から対策までの土木的知見を有している。

土砂災害は繰り返し起こると言われている。国民には、土砂災害や洪水災害においては、過去災害履歴から、同じ地域で繰り返し発生するものと認識するよう、伝承され、教育されている。図8は、2012年の紀伊半島水害に用いられた土砂災害の発生場を示した資料である[5]。深層崩壊、地すべりの土砂移動現象は、地形や地質に関連して群発して発生することが科学的に立証されている[6, 7, 8]。

内閣府や国土交通省は、災害を防ぐための国民に対する意識を継続的に高めるために、中心として、住民自身が住まう地域の成り立ちを知り、自然災害に対する知識を継続的に教育する取り組みが行われている。

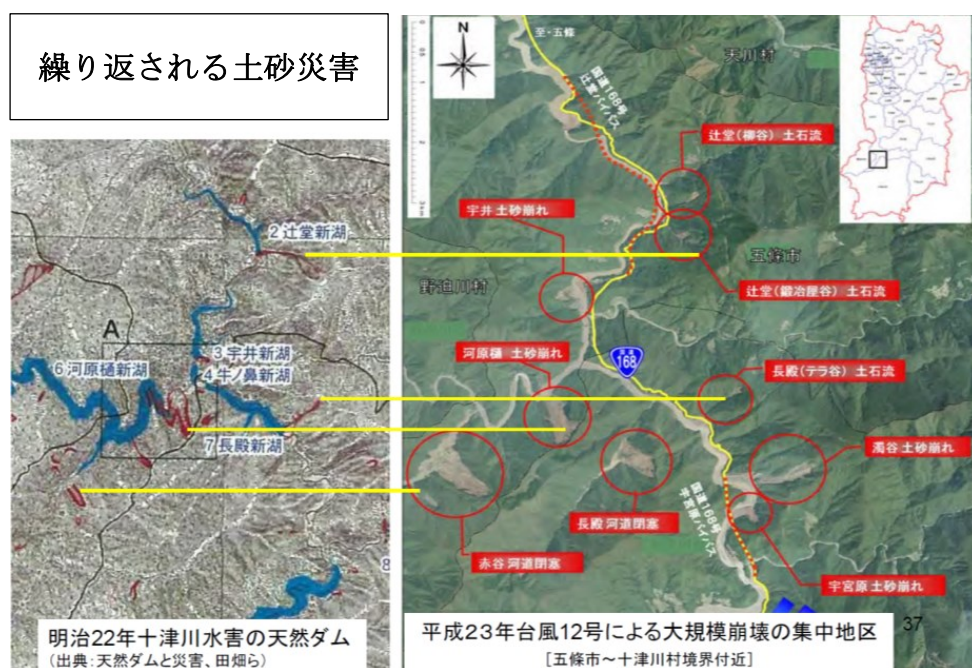


図8 土砂災害の再発性 [5]より引用

1.3.2 防災教育と土砂災害危険区域

防災教育の一つとして、内閣府では、平成26年8月の広島県広島市で発生した記録的な大雨によって大規模な土砂災害が発生したことを受けて、土砂災害に対する国民の意識づけを呼びかけている[9]。土砂災害から身を守るためには、災害を他人事ではなく自分のこととして捉え、備えを進める、すなわち自助と公助を促す発表を行った。近年の土砂災害のインパクトは気候変動による異常気象が継続・増大することが避けられない状況の中、国民の生命を守るための効果的な施策を検討している。図10に土砂災害の例を示す。



図9 被災した家屋の状況 [9]より引用

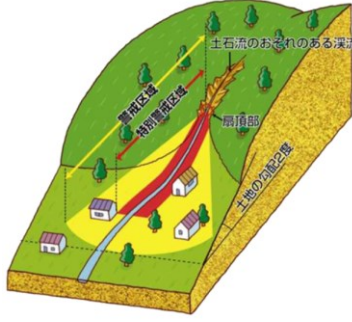


土石流	地すべり	がけ崩れ
<p>山や谷の土・石・砂が川の水と一緒に流れてくるものを土石流という。時速 20km~40km のものが多く岩を動かしてしまふ程の力を持つ事もある。</p>	<p>緩やかな斜面などですべりやすい地層に雨水などがしみこみ、地下水が溜まり、そこから上の地面が動く事を地すべりという。</p>	<p>がけ崩れは、大雨や長雨で地面に水がしみ込んで地盤を弱めて起きるものだが、地震で起きる事もある。</p>
		

図10 土砂災害と砂防事業 [10]より引用を一部加工

こうした土砂災害を法的に防ぐための仕組みとして平成 15 年に土砂災害防止法が制定され [10], 図 11 のように崖崩れ, 地すべり, 土石流の 3 つの土砂移動現象を対象に土砂災害防止区域の設定が行われた。これは各都道府県が指定する区域であり, 統計的に土砂災害の分析が行われ, 指定する範囲はそのデータに基づいている。

全国的には, 図 12 のように土砂災害の発生件数が取りまとめられており, 近年の気候変動から増え続けている異常気象により, 豪雨の頻度や発生パターンは多様化する事は一般常識になっている。この土砂災害から国の施策によりハード対策を施すには莫大な費用と時間を要する。このため, 国民の生命を守るための防災意識の向上を促し, 自助と公助の啓蒙活動を行っている。




がけ崩れ	地すべり	土石流
		
<p>斜面の地表に近い部分が雨水の浸透や地震等でゆるみ, 突然崩れ落ちる現象。崩れ落ちるまでの時間がごく短い為, 人家の近くでは逃げ遅れも発生し, 人命を奪うことが多い。</p>	<p>斜面の一部あるいは全部が地下水の影響と重力によってゆっくり斜面下方に移動する現象。土塊の移動量が大きいため甚大な被害が発生。</p>	<p>山腹や川底の石, 土砂が長雨や集中豪雨などによって一気に下流へと押し流される現象。時速 20-40km という速度で一瞬のうちに人家や畑などを壊滅させてしまうことも。</p>
 	 	 
<p>がけにひび割れができる 小石がパラパラと落ちてくる がけから水が湧き出る 湧き水が止まる・濁る 地鳴りがする</p>	<p>地面がひび割れ・陥没 がけや斜面から水が噴き出す 井戸や沢の水が濁る 地鳴り・山鳴りがする 樹木が傾く 亀裂や段差が発生</p>	<p>地鳴りがする 急に川の水が濁り, 流木が混ざり始める 腐った土の匂いがする 降雨が続くのに川の水位が下がる 立木が裂ける音や石がぶつかり合う音が聞こえる</p>

図 11 土砂災害の模式図と解説 政府広報オンライン HP より引用したものを一部加工

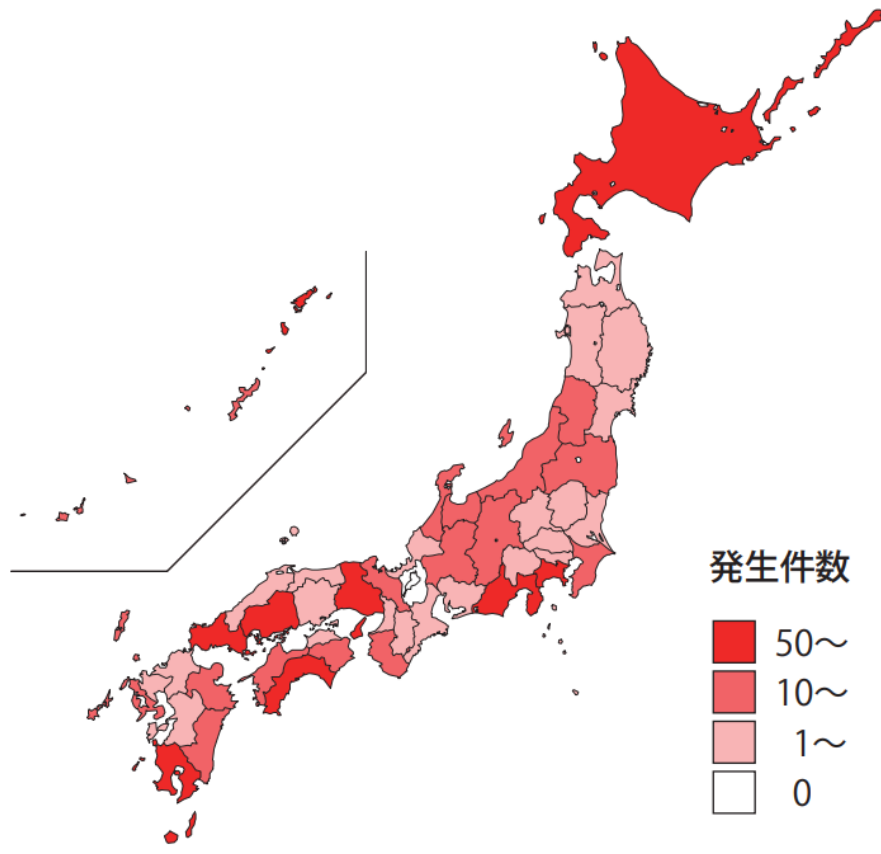


図 12 平成 26 年の各地の土砂災害発生件数（出典：国土交通省） [9]より引用したものを一部加工

土砂災害から人命を守るための一般知識として、国や自治体から国民に対して土砂災害の防災教育を行っている。危険の予兆やいざというときの避難行動の基準など、わかりやすい図解や防災訓練などを通じて自助を働きかけるものである。図 13 はその例。

危険の予兆	注意が必要	いざという時
<p>土石流の危険</p> <ul style="list-style-type: none"> 山全体がうなっているような音がする 川の流が急ににごった 上流から根がついたままの木が流れてきた 雨が降り続けているのに川の水が減った 	<ul style="list-style-type: none"> 上の方がせり出している崖 途中に大きな岩が出ている崖 川が急な角度で曲がっているところ 川幅が急にせまくなっているところ 	<ul style="list-style-type: none"> スピードが速い土石流から逃げる時は直角に 雨量が1時間に20mm、降り始めから100mm以上になったら特に注意 災害はいつ起こるか判らないので、前もって家族で避難する場所を決めておく 
<p>崖崩れの危険</p> <ul style="list-style-type: none"> 崖から小石がパラパラと落ちてきた 崖に割れ目ができた 崖から水が湧き出てきた 		

図 13 土砂災害から身を守るために [10]より引用したものを一部加工

1.3.3 ダム湛水による地すべり

地すべりは、土砂災害以外でも社会的インパクトを及ぼす。その一つはダム貯水池の建設に伴う湛水による地すべりの発生である。現存するダムの建設時には、必ず湛水時を想定した地すべりの調査と対策が行われることになっている。

しかしながら、自然現象であるが故に調査や監視、対策工に伴う失敗事例もある。世界的に有名なダム湛水と地すべりの事故事例は、イタリア国のバイオントダムの地すべり崩落、越流によるものである。バイオントダムでは、貯水池に地すべりがあり、変動していることを捉えていたにも関わらず、事業者がダム開発を止めなかった故の事故が発生した。貯水池に地すべり土砂が崩落したことで断波が発生し、その波がダム堤体を越流し、下流の町に大きな被害をもたらした[11]。

(1) 歴史的なダム貯水池地すべりによる災害事例

バイオントダムは1960年の完成当時、世界一の高さ(264.6m)を誇った発電用のアーチダム(総貯水容量1.7億 m^3)である。ダム完成後3年経った1963年10月9日に、貯水池左岸側で巨大な岩盤地すべり(移動岩塊2.7億 m^3)が発生(図14)、ダム下流に鉄砲水を引き起こして、2000人以上の死者を出した痛ましい事件となった。

同様の地すべりによる災害は1959年にフランスのマルパッセダムでも発生している。イタリア北部で建設が進む世界最大級のバイオントダムについて、当時のメディアでは、マルパッセの地すべり災害を上回る危険が存在していることを新聞で指摘していたが、政府と建設側の地質学者やエンジニアは、一抹の不安を覚えながらもこの記事に取り合わず、工事は着々と進捗する。貯水池左岸のトック山山麓では地すべり変動の兆候が出始めたため、災害を恐れて住み慣れた土地を離れる住民も出たが、大半の住民はダム建設に伴う公共事業を優先させた。

ダム湛水と地すべり活動のメカニズムの把握は非常に困難であり、ダム水位の上昇に伴い、地すべり変動の兆候も大きくなるケースが多い。バイオントダムでは、貯水池左岸のトック山から巨大な岩盤地すべりが突然発生し、大量の移動岩塊が貯水池に流れ込み、5000万 m^3 の越流を起こし、下流の町が被災した。図15は当該ダムの推定断面図である。

被害は、全家屋372戸のうち、全壊家屋は361戸にも達した。町の人口1269名のうち、死者・行方不明者は1190名で、全体の死者は2125名にも達する大災害となった。この巨大な地すべりの形成には、数万年前の氷河時代に山岳氷河が削ってできた地形が大きく関係している。

ダムは、治水、利水、発電等、人間生活を支える重要な役割を土木構造物ではあるものの、建設、竣工に至るまでの過程では、地盤・地質的に大きな不確実性をもつ自然と相対する事になる。ダム湛水は自然へのインパクトが大きく、湛水地すべりもその一つである。日本国内でも、国土交通省をはじめとするダムを建設、運用するに当たり、貯水池斜面地すべりの対応手法がマニュアル化されており、後述の大滝ダムやハッ場ダムではダム湛水に伴う地すべりが社会問題として大きく取り上げられた。



図 14 バイオントダムと巨大な地すべり移動岩塊 [11]より引用

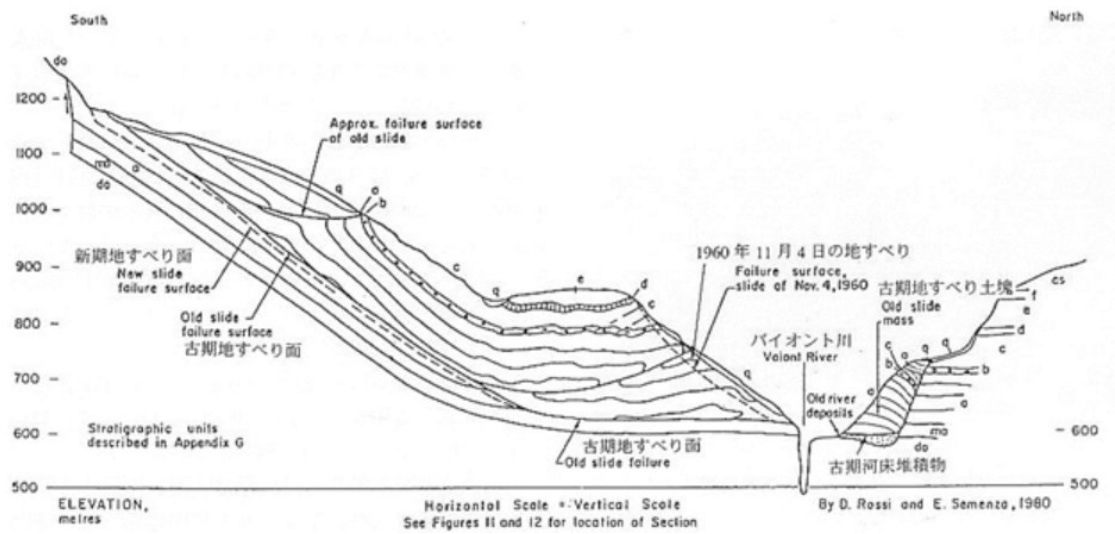


図 15 バイオントダムの地質推定断面図 [11]より引用

(2) 国内のダム貯水池地すべりによる事件の例

日本国内では、奈良県川上村において建設中の大滝ダムでは、試験湛水が中止となった。この原因は湛水に伴う地すべりが発生したためである。詳細を図 16 に示す。国土交通省は、この対策のために 9 年間で約 500 億円の予算を充て、貯水池内の地すべりの再評価および対策工の実施を行っている。大滝ダムは、平成 24 年に再び試験湛水を完了し、現在は多目的ダムとして運用されている。

大滝ダムは、2002 年 8 月にダム本体完成後、地すべり対策に 10 年の歳月を要し、試験湛水開始後貯水池斜面で地すべりが発生した。当時、白屋地区 37 世帯もの住民が移転することとなり、国は調査対策委員会を通じて、新たな土木調査技術が導入された地すべりの再調査が行われた [12]。

ここで重要となる点が、精密な地形地質調査技術の導入である。詳細な地形を読み取り、地すべりの再発を防ぐべく、有識者による地形判読の知見を持って、繰り返し調査が行われた。平成 15 年の試験湛水から 9 年後の平成 24 年に試験湛水を行い、ダム完成へと至った。

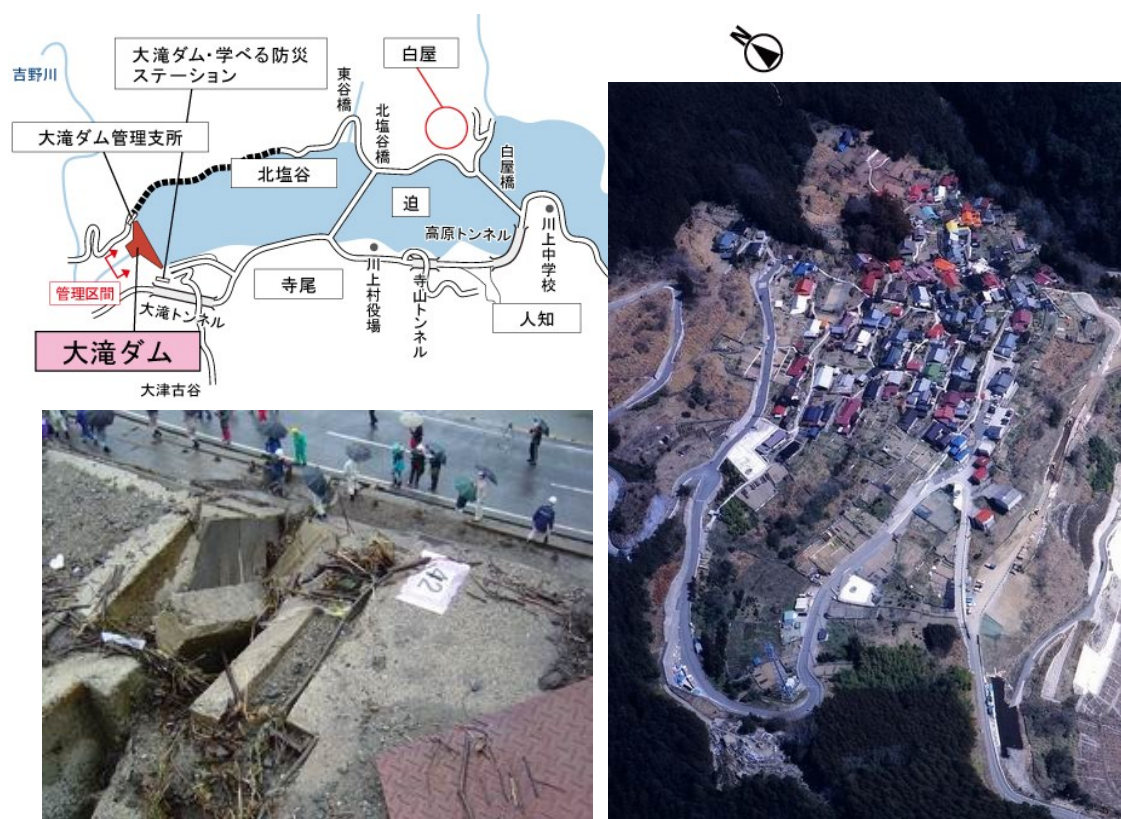


図 16 大滝ダム試験湛水時に発生した白屋地区地すべり [12]より引用したものを一部加筆

国内のダム貯水池地すべりの事例として、土木業界に大きなインパクトをもたらした事例は八ッ場ダムの貯水池地すべり対策事業である。国土交通省は、八ッ場ダム建設時、概算段階において5地区の地すべりの可能性が疑われることを公開し、その調査、対策を行う事で試験湛水に臨むこととした。大滝ダムの白屋地区の地すべり事例を受け、高解像度の地形取得、高品質ボーリング調査等を行い、有識者を踏まえた検討を重ね、多額の費用を要しながらも地すべり対策工を実施し、試験湛水に望むこととした[13]。図 17はその資料である。

2019年10月1日より試験湛水が開始された直後、台風19号の襲来により、ダムの湛水位は一気に満水に達した。この際にも地すべりは安定を損なわず、現在も運用されている。また、八ッ場ダムの効果の実態は明らかとなっていないものの、利根川下流における浸水被害は発生しなかった。

一方では、地すべりの危険性を訴える声も、事業中、運用後の現在でも止んでおらず、ダムが運用され続ける限り、地すべりのモニタリングは続けられるものと考えられる。自然現象である地すべりと人間の生活の在り方を考え、バランスの最適解を考え続けることが土木工学の使命であると言える。

このように様々な目線からの注目を集めるダム建設においては、ダム湛水に伴う地すべり対策事業は、住民の生活にも経済性にも大きなインパクトを与えるものである。

(4) 事業費の主な増要因【7/25】

2. 1 地すべり等安全対策による変更(湛水に伴う地すべり等の対策費の増)・・・(約96億円)

現計画では、平成21年に定められた新たな技術指針※に基づき、当時得られていた情報等をもとに最大限の範囲を想定していたことから、地すべり等の対策費については、事業費の外数として整理していました。(従前から対策を予定していた3箇所は現計画に計上)

今般、専門家の意見を聴きながら地すべり等対策の必要な調査等を進めた結果、従前3箇所を含む6箇所の対策が必要であることが判明したことから、必要な費用を事業費に計上しました。

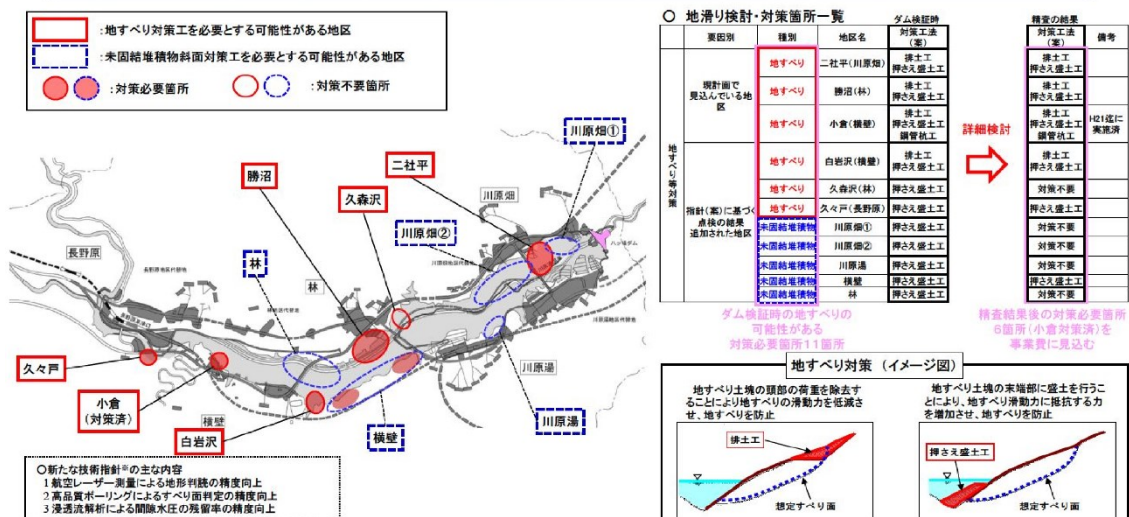


図 17 八ッ場ダムの地すべり対策事業の資料 [13]より引用したものの一部加筆

(3) 地震による地すべりによる災害事例

荒砥沢ダム地すべりは、2008年の岩手・宮城内陸地震により、宮城県栗原市の荒砥沢ダム右岸上流で発生した、長さ約1,300m、幅約900m、滑落崖高さ約150m、崩壊土塊約6,700万 m^3 に及ぶ大規模災害である[14]（図18）。人命の被害は無かったものの、図19の通り、地すべりの周辺及び内部の道路は大きく損壊し、崩落土砂はダム貯水池に流れ込んだ。対策は2020年まで抑制工を中心に行われ、その後は計測器によるモニタリングが継続されている。

荒砥沢ダム地すべりについては、林野庁による対策委員会が発足されている。地すべりの対策方針としては、防災一辺倒の対策を行う事はせずに、現状を可能な限り保存し、地形や景観を活用することも考える、と示した。対策工を行いつつも、地すべりや拡大崩壊など被害の原因となる事象や地すべりの変化を追跡するモニタリングを併用することで対策工を必要最小限の規模に留めることとし、新たな現象を捉えた場合には即応して対策をする旨結論を出した[18]。

荒砥沢地すべりは、防災科学技術研究所が発行する地すべり地形分布図でも判読されており、巨大地すべりの再滑動性の証明となる現象であった。



図18 荒砥沢ダム周辺で発生した大規模な地すべりの状況

[14]より引用したものに一部加筆

道路の被災状況



L 末端隣接ブロック左翼部の道路 (H20.6.22)



M 土塊内部に取り残された道路 (H20.8.9撮影)



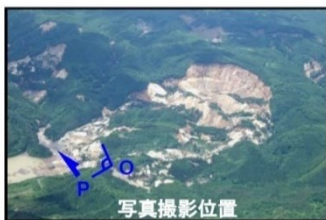
N 頭部滑落崖の寸断された道路 (H20.8.9撮影)

堰止湖の状況



O 末端部の堰止湖 (H20.6.15空撮)

地すべり末端部のシツ
ミックキ沢の全景。



P 末端部の堰止湖 (H20.6.22)

シツミックキ沢は地すべり本体により閉塞され、下流部には堰止湖ができています。

図 19 荒砥沢ダム周辺で発生した大規模な地すべりの状況
[14]より引用したものに一部加筆

(4) 地すべりによる災害の事例①—紀伊半島水害の地すべり（深層崩壊）

地すべり（深層崩壊）は、古くから発生した記録が残されている。和歌山県伊都郡かつらぎ町の有田川沿いでは、同町の水害誌に1953年に発生した地すべりにより河川が閉塞し、その後の天然ダム（土砂ダム）の崩壊により下流に被害が及んだ[16]。同様に宮崎県臼杵郡三郷町の耳川では2005年では、大崩落により河道閉塞が発生した[17]。

1997年7月には、鹿児島県出水市針原川では、上流域で発生した地すべりの土砂が下流に流出し、河川沿いに大きな被害をもたらす土砂災害となった。このように地すべりのような大きな土塊が移動することによる災害の発生形態には、図21のように大きく3つの型があると言われている[18]。

- ① 地すべりが移動し、直接的に人家等に影響を及ぼす場合。
- ② 地すべり土塊が土石流化し、下流の人家等に影響を及ぼす場合。
- ③ 地すべり土塊が移動した結果河道を閉塞し、背後荷湛水した水が越流し、閉塞していた土砂が決壊することで土石流を引き起こす場合。

いずれも大規模な災害を引き起こす原因となる現象である。こうした地すべりの災害は、表3のように全国各地で発生している。奈良県の深層崩壊の調査記録によると、こうした深層崩壊（地すべり）は、付加体と呼ばれる特定の地質[19]で発生することが多く、その発生メカニズムの一つに地形や地質が関連している事を示唆している。

事実として、付加体と呼ばれる地質、西日本の軟部エリアにこうした巨大地すべりの発生箇所が集中しているものの、後述の地すべり地形分布図では全国各地に地すべりの危険性を有した斜面は存在している。図20は地震により発生した深層崩壊の例、図22～図24及び表3に深層崩壊発生事例を示す。

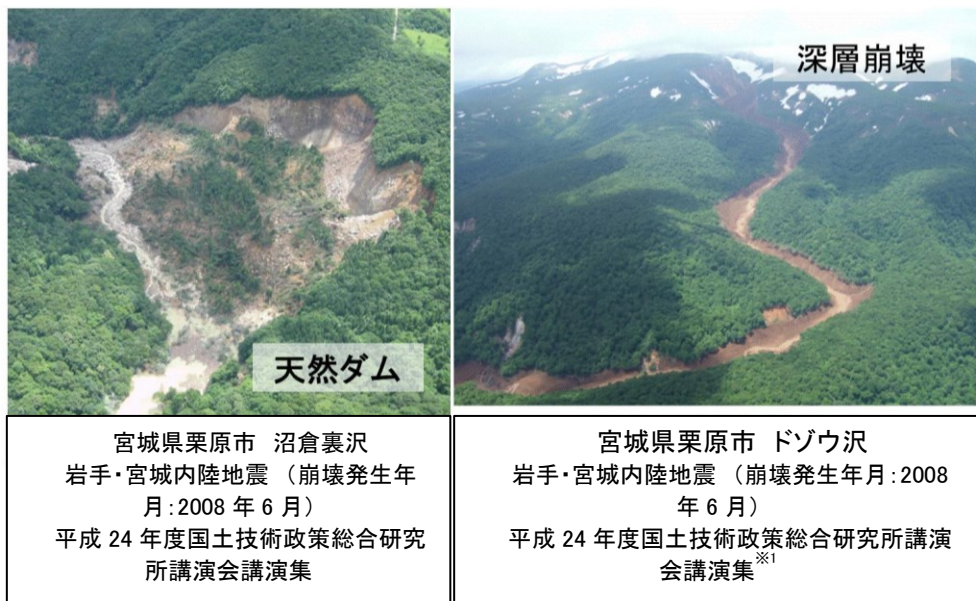


図 20 地震により発生した地すべり（深層崩壊）の例 [18]より引用したものの一部加筆

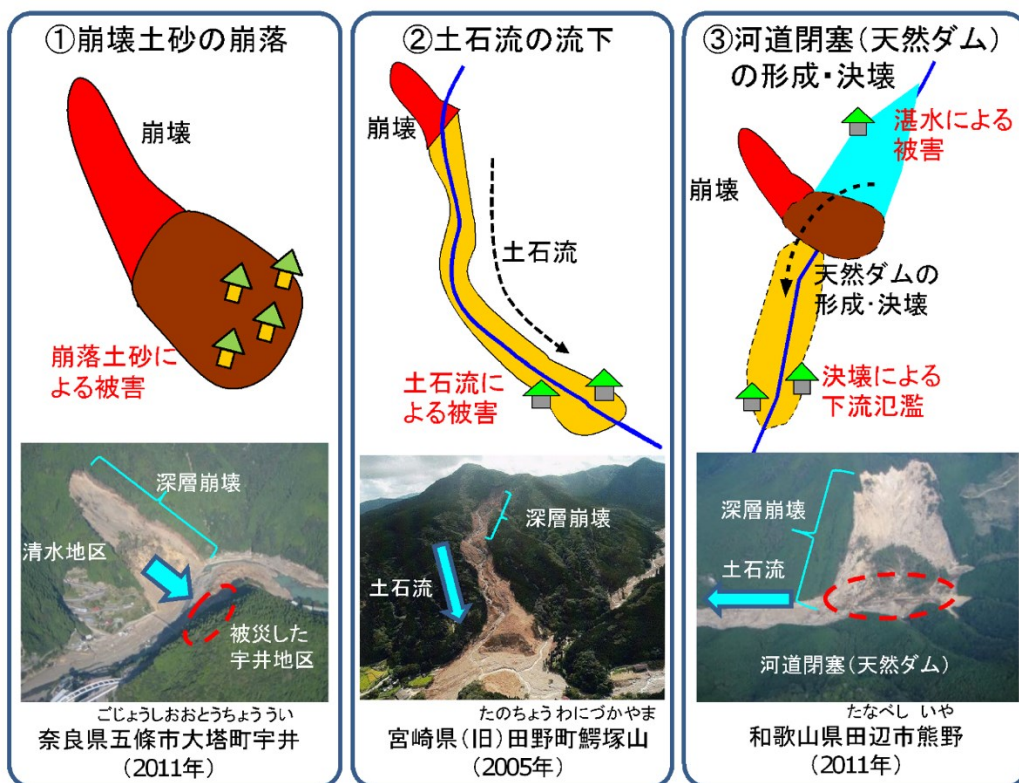


図 21 大規模地すべりにより発生しうる災害形態 [18]より引用



和歌山県伊都郡かつらぎ町
(旧花園村) 有田川
(崩壊発生年月:1953年7月),
水害記録誌^{*1}



鹿児島県出水市 針原川
(崩壊発生年月:1997年7月), 国土交通省 HP



宮崎県東臼杵郡美郷町 (旧西郷村) 耳川
(崩壊発生年月:2005年9月), 国土交通省 HP

図 22 巨大地すべり (深層崩壊) の発生例 [16, 18]より引用したものに一部加筆

表 3 豪雨により発生した深層崩壊の発生履歴の一例 [2]より引用したものに一部修正

発生場所	発生年月	総雨量
宮崎県宮崎市鱈塚山	平成 17(2005)年 9 月	1,013mm
宮崎県東臼杵郡美郷町(旧西郷村)耳川	平成 17(2005)年 9 月	約 1,300mm
三重県多気郡大台町(旧宮川村)	平成 16(2004)年 9 月	753mm
徳島県那賀郡那賀町(旧木沢村)	平成 16(2004)年 7 月	1,583mm
鹿児島県出水市針原川	平成 09(1997)年 7 月	400.5mm
和歌山県伊都郡かつらぎ町(旧花園村)有田川	昭和 28(1983)年 7 月	約 530mm

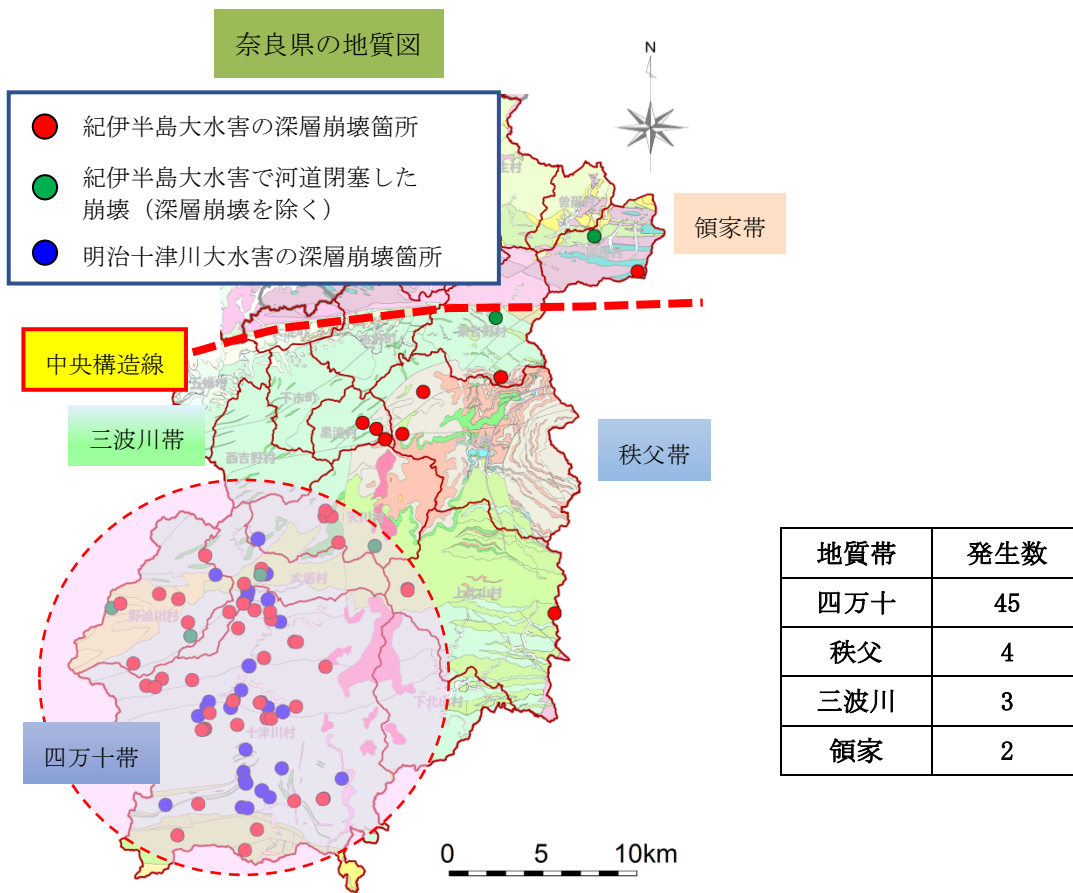


図 23 奈良県の各地質体の深層崩壊発生数一覧表 [2]より引用したものに一部加筆修正

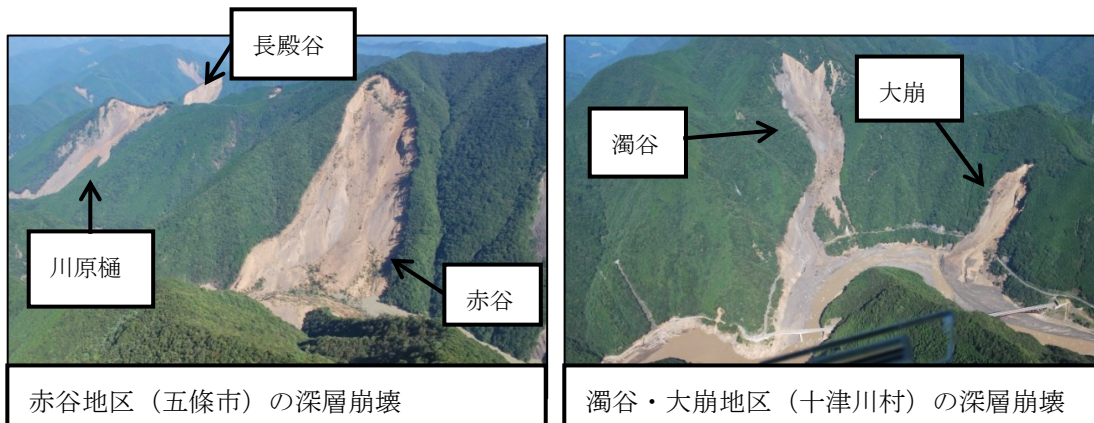


図 24 2012年に発生した紀伊半島水害の深層崩壊の事例 [2]より引用したものに一部加筆

(5) 地すべりによる災害の事例②—地附山地すべり

昭和 60 年（1985 年）7 月 25 日，長野市の地附山において大規模な地すべりが発生した[20]。地すべりは湯や団地や特別養護老人ホームに押し寄せ，26 名の生命が失われ，64 棟の建物を押しつぶした。地すべりは幅 500m，幅 700m，深さ 60m の規模であった。速度は人が歩くほどの速度（約 5km/h）程であったと記録されている。災害詳細の資料を図 25，図 26 に示す。地附山の地質は，前述の深層崩壊とは異なり，繰り返し活動した地すべりの痕跡があり，破碎した岩盤の層の下面に粘土層が分布していた。岩盤は風化が進行しており，雨水が浸透しやすく，地下水が下がりにくい土質であった。地附山地すべり災害発生メカニズムを図 27 に示す。

地附山の地すべりは，第三紀層すべりと呼ばれる火山灰が固結した岩盤が分布するエリアで発生する特徴がある。紀伊半島水害とは対照的に岩塊の固さは柔らかく，地すべり発生地の斜面勾配は全体的に緩い。長野県の北部から，富山県，石川県，新潟県のように日本海側の第三紀層において発生する地すべりに同様の特徴が認められることから，地すべりの発生形態名称として第三紀層地すべりと呼ばれる。対して，紀伊半島水害の付加体で発生する地すべりは，破碎帯地すべりと呼ばれている。

地附山地すべりでは様々な地すべりの調査，計測，対策工が行われており，現在もおおモニタリング事業が継続している。長野県土木部砂防課では，この痛ましい事件を後世に残すために，地附山地すべりの災害史を取りまとめ，HP にて公開している。



図 25 地附山地すべりの災害史資料 [20]

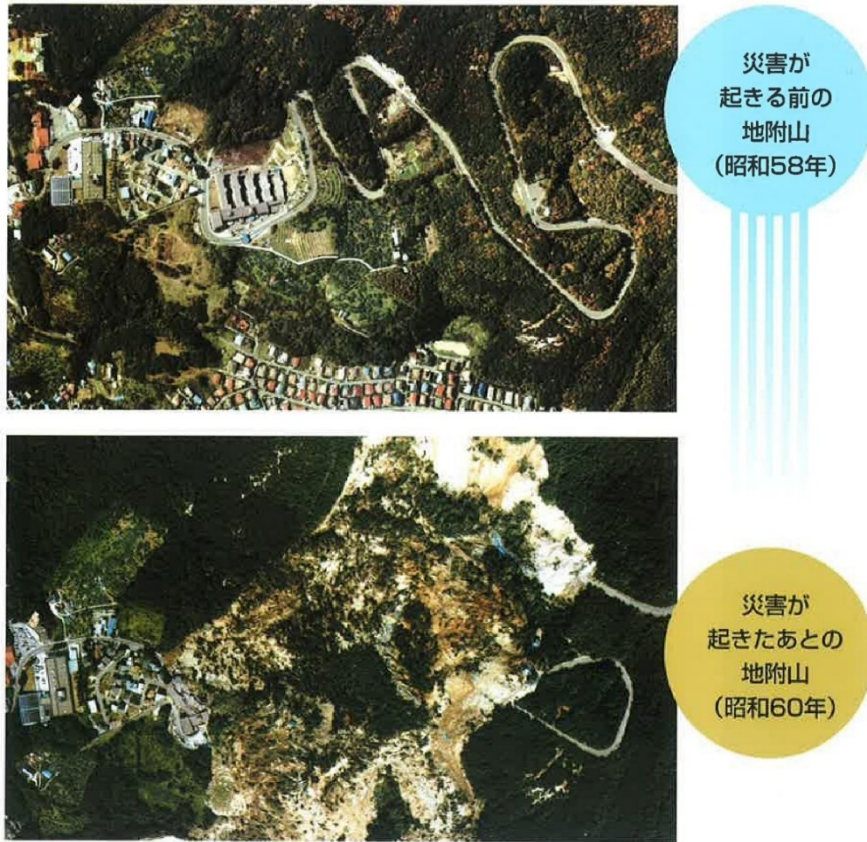


図 26 長野市 地附山地すべり災害の発生前後の写真 (昭和 60 年 7 月発生)
[17]より引用したものに一部加筆

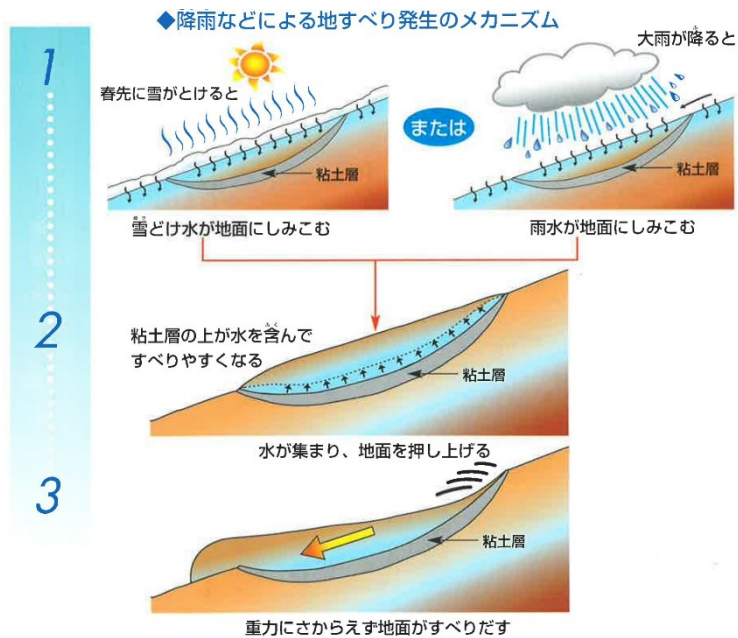


図 27 長野市 地附山地すべり災害の発生メカニズム [20]より引用したものに一部加筆

1.4 すべり対策の事例

地すべりを防止するための対策は，国土交通省，農林水産省が定める指針等に示されている[21]．一般的には，抑制工と抑止工に分けられる．地すべり対策工のうち，抑制工は，地下水排除工，押さえ盛土工，頭部排土工など，土工や地すべりの活動の原因になる地下水を低下させることによる，活動力の低減を試みる対策工である．一方抑止工は，アンカー工，杭工といった，構造物を地すべりに直接設置することにより，計算で求められた地すべり活動力に対して構造物の強度や反力で対応する対策工である．

一般的に抑制工は，費用対効果が得られやすい代わりに，土工が中心であるため，災害発生等の初動から即時的に施すことが可能というメリットがあり，採用されることが多い対策工法である．デメリットとして，地すべりの規模が大きいかほど大きな地形改変を伴うことが多く，景観に及ぼす影響が大きく，市街地や文化財，国立・国定公園などで地すべり対策を検討する場合，配慮が必要である．

抑止工は，対策に必要な土地面積が小さくて済む代わりに費用が高価となることが多い．また，対策に必要な施工機器，ヤード，足場などの仮設設備も土工と比べて大規模となることから，施設設計検討は多岐にわたる．

多くの場合，地すべり対策工は抑制工と抑止工を併用し，最適な経済性，施工性，景観性が考慮された検討がなされて決定される．図 28 に一般的な災害対策工法を示す．

一般的な災害対策工法

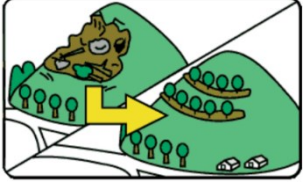
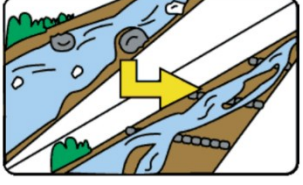


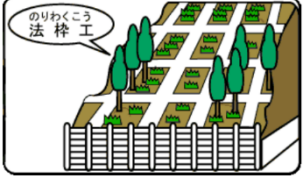
	工法名	工法	役割・目的
土石流対策	山腹工		山の斜面に木を植えて，斜面が崩れるのを防ぐ
	床固工・護岸工・遊砂地 砂防堰堤		緩斜面等で滑りやすい地層に雨水などがしみ込み地下水が溜まってそこから上の地面が動くことを地すべりという 砂防堰堤の役目は，土石流発生時に受け止めて下流に住む人々の命や家屋などの財産を災害から守ること
	杭工・アンカー工		杭を深く打ち込み，地面をすべらないようにする 地表面からアンカーを打ち込み地面を押さえつける
地すべり対策	地下水排水工・排土工		井戸やトンネルを掘り，地面の中にたまった地下水を取り除く 地すべりを起こしている斜面の土を取り除く
	法枠工		コンクリート等の枠で斜面を区分けして植物などを植え，斜面の強度を上げる

図 28 一般的な地すべり対策工法 [10]より引用したものに一部加筆

1.5 地形計測技術の発展と地すべり発生場予測の研究事例

1.5.1 地形測量技術の高度化—航空レーザ測量

(1) 航空レーザ測量の原理

航空レーザ測量とは、航空機に搭載したレーザスキャナから地上にレーザ光を照射し、地上から反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と、GNSS 測量機、IMU(慣性計測装置)から得られる航空機の位置情報より、地上の標高や地形の形状を調べる測量方法である[22]。図 29 の画像のように、航空レーザ測量は「レーザ測距・GNSS・IMU」という3つの技術の合体から実現している。

レーザ測距装置は、レーザ光を発射して地表から反射して戻ってくる時間差を調べて距離を決定する装置である。進行方向に対し横方向にスキャンさせて高さを調べるので、「レーザスキャナ」とも呼ばれる。飛行高度 2000m でスキャン角度が左右の合計 20 度で計測する場合、地上を幅約 700m で一度に測ることができる。また、レーザ光を 1 秒間に 50,000~100,000 回発射が可能になっており、地表で 50~60cm 間隔、またはそれ以下の間隔でも計測が可能になっている。ただし、レーザ計測点の配置はランダムであり、計測点のレーザスポットは点ではなく円形である。この円の大きさは計測高度 1,000m で直径が約 30cm、計測高度 2,000m で約 60cm になる。なお、航空レーザ測距装置にはカメラがついているため地表の画像も同時に取得することが可能になっている。

GNSS 受信機は、航空機の位置(x, y, z)を知るための装置である。一般に地上の電子基準点を利用することにより「連続キネマティック測量」を実現し、地上の測量と同様に高精度な位置測定を可能にしている。

IMU(慣性計測装置)は、いわゆるジャイロを改良したもので、飛行機の姿勢や加速度を測ることができる。この測定値によりレーザ光の発射された方向を正しく補正することが可能になる。

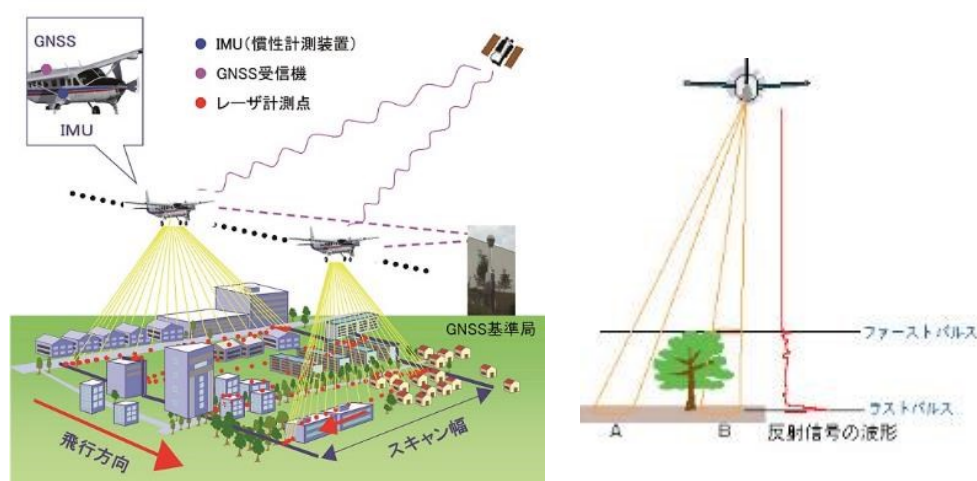


図 29 航空レーザ測量の概念図 [22]より

(2) DSM と DEM

「レーザ測距・GNSS・IMU」の3つの技術で、地表まで達したレーザ光(「レーザ計測点」という)の位置(x, y)と高さ(z)を正確に算出することが可能となる。レーザ計測点の高さは1cm単位で記録されるが、高さの精度は±15cm程度である。なお、水平方向の位置精度は、高さの精度に比べて劣るが、概ね1m程度となる。航空レーザ測量のレーザ光は、上のフット・プリントにも見られるように地面ばかりでなく、建物や樹木の上で反射して戻ってくる。このため、航空レーザ測量で直接得られる高さのデータは、建物や樹木の高さを含んでいる。このような高さのデータよりグリッド化した地表モデルを数値表層モデル、通称 DSM(Digital Surface Model)という。

これに対して、一般の地図のように地表の高さを示したい場合は、これらの建物や樹木の高さを取り除く必要がある。この建物や樹木の高さを取り除く作業を「フィルタリング」と呼ぶ。フィルタリングを行って得た地表面だけの高さのデータからグリッド化した地表モデルを数値標高モデル、通称 DEM(Digital Elevation Model)という。

図 30 のように DSM(画像左)や DEM(画像右)を陰影段彩図として表現すると真上から見た図でも立体的に見ることができる。陰影段彩図は高さのデータに対し、高いところを赤、低いところを青として、その間を橙、黄、黄緑、緑、青緑と連続的に表現し、さらに影をつけたものである。

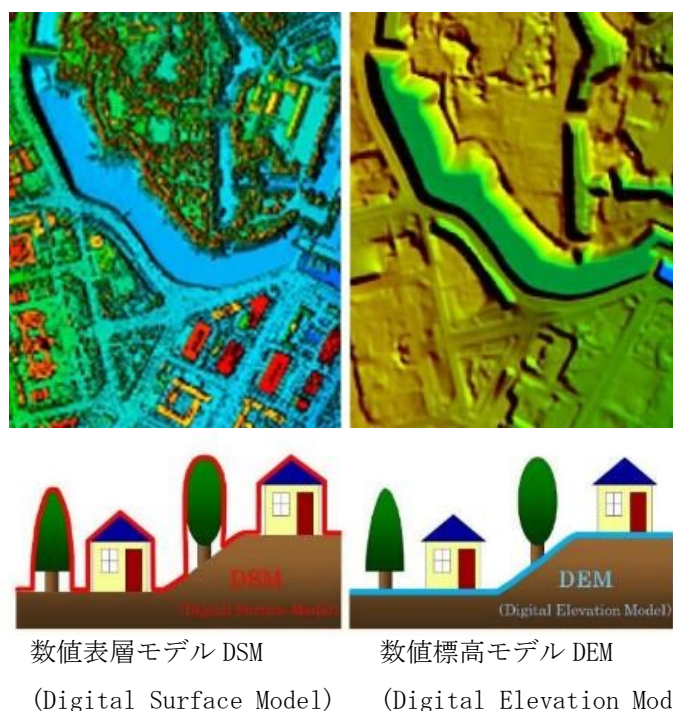
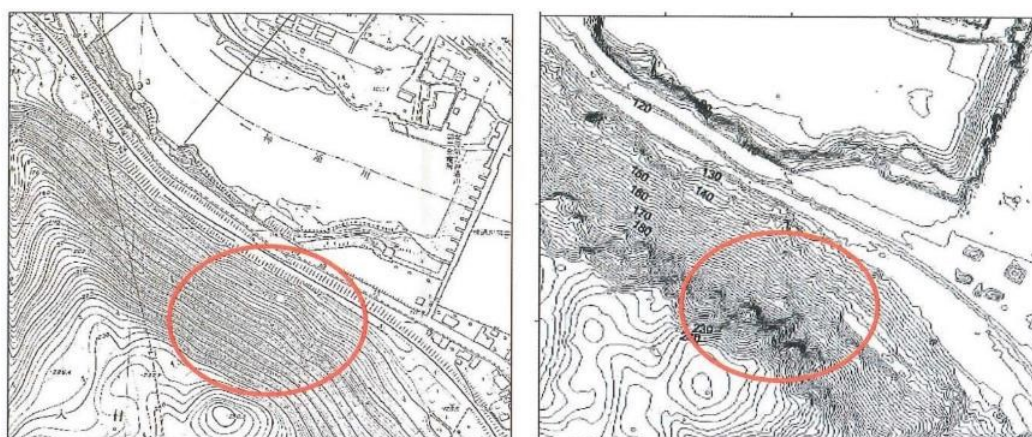


図 30 DSM と DEM の概念図 [22]より引用したものに一部加筆

(3) 空中写真測量図とレーザ測量図の地形解像度の違い

平成 20 年，公共測量規程が更新されて以降，空中写真による航空図に対し，航空機搭載型の LIDAR（航空レーザ測量）による大縮尺の地形図（LP 図）が普及してきた．空中写真から作られた航測図と航空レーザ測量によって作られた地形図の違いを簡単に説明する．

図 31 の左図が従来作成されている空中写真測量による森林基本図，右が航空レーザ測量によって作成された地形図である．航空レーザ測量とは，航空機に搭載したレーザスキャナから地上にレーザ光を照射し，地上から反射するレーザ光との時間差により得られる地上までの距離と，GNSS 測量機，IMU（慣性計測装置）から得られる航空機の位置情報より，地上の標高や形状を調べる測量方法だが，左右差を見ると右の図は等高線が乱れていることが判る．レーザ測量図では，地表面の詳細な形状を把握することが出来るので，現地の露岩も尾根状の等高線で表現されている．



道路防災点検基図（森林基本図）

航空レーザ測量によるコンタ図

図 31 空中写真測量とレーザープロファイラ測量による等高線図の比較

「23」 より引用したものに一部加筆

(4) 地形表現図

地形表現図で代表的なものは等高線図である。そして測量技術の高度化に伴い、詳細な地形情報をより見やすく立体的に可視化する技術が開発されてきた。赤色立体地図は、2002年に航空レーザ計測結果である詳細な地形を見やすく表現した地形表現図の代表例といえる[24]。

令和5年時点で、国土地理院は全国の10m解像度の航空レーザ計測データをオープンデータとしており、膨大な地形情報が閲覧可能な状態になっている。

赤色立体図のような見やすい地形表現図の開発の背景として、従来の等高線図で表す手法では、取得したデータの内、所定の等高線間隔と一致する一部のデータ以外は表現が困難であることが原因としてあった。密な標高データを用いて等高線を生成すると、等高線間隔が狭まり、凹凸の入り混じった地形の表現ができない、もしくは読みにくいという不都合が生じた。そこで、等高線という「線」で表現していた地形を、「赤色の彩度と明度」を使って「面」で表現した。全ての数値地形データを使う方法に変えたことにより、地形の細かな凹凸が見えるようになり、実際の現地の地形状況を見た目に近い凹凸等を直感的に把握できる表現図となった。

また、地形判読を立体的に視認するには、従来は2枚の空中写真を立体視していたが、赤色立体図は1枚の画像で立体的に表現できる画期的な技術であった。

赤色立体地図では、傾斜が急な面が赤く、尾根は明るく谷が暗くなるように表され、微地形まで判読しやすい色調となるよう工夫されている。図32は地形表現図の一例である。

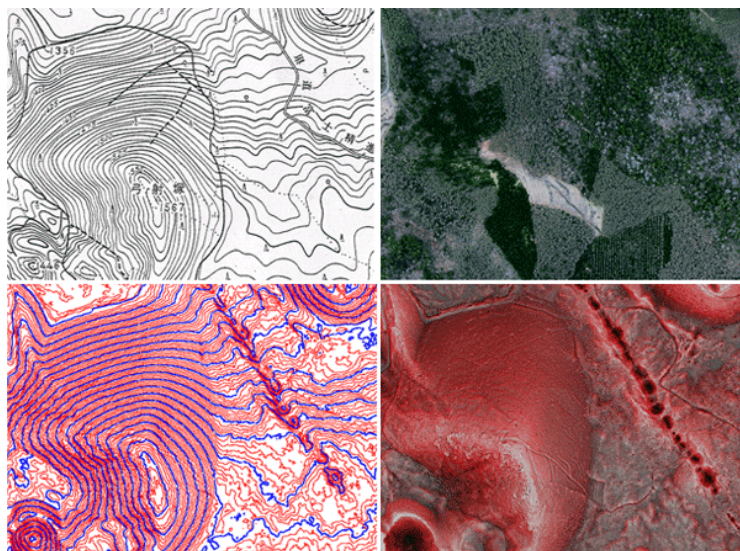


図 32 地形表現図の一例 [24]より引用したものに一部加筆

1.5.2 地すべり地形判読の基礎と発生場予測

地すべりは、古くからその形成、移動メカニズムが研究されており、地形判読は地すべりの場所を特定するための予測手法として用いられてきた[25, 26]。地すべり地形判読を行うための基本的な地形要素や判読の実例を含めた手法を以下に整理する。

(1) 地すべり地形の等高線模式図

前述で述べたように、地すべり地形を判読するに当たり最初に探す特徴は、地すべり地形頭部の遷急線と遷緩線と緩斜面の組み合わせである[27]。地すべり地形判読の留意点を簡潔にまとめると以下の要素からなる。図 33 に地すべりの地形的特徴を示す。

頭部：遷急線と遷緩線に挟まれた馬蹄形状や直線状の急斜面

側部：頭部の遷緩線から発達した沢地形

末端部：凸状に膨らんだ斜面や河川沿いに認められる崩壊、河川の攻撃斜面

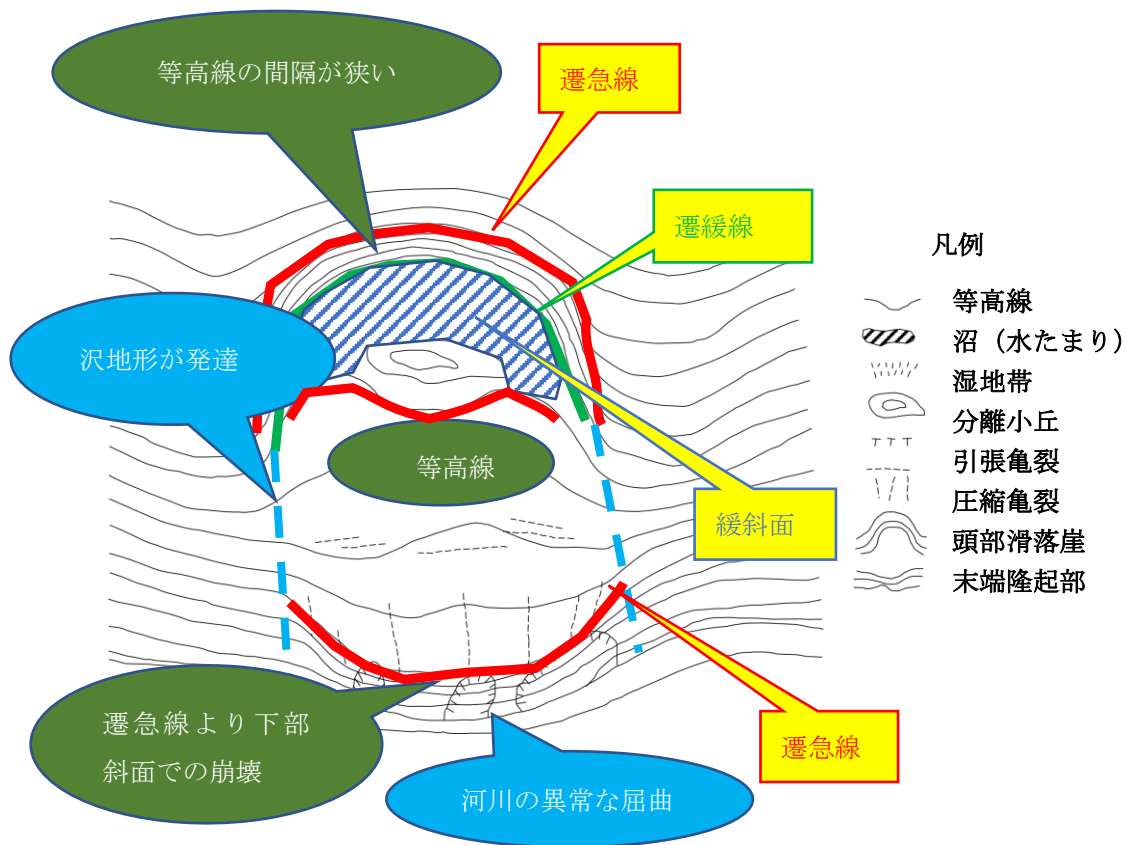


図 33 地すべりの地形的特徴

(2) 地すべり地形に見られる特徴と基礎的な作図例

地すべりおよび深層崩壊地の前兆現象の地形として山頂緩斜面が特徴として上げられる。尾根部に比較的緩くなった斜面の分布である。斜面の浸食や崩壊によって尾根部は普通とがった三角形であることが多いが、崩壊前は図 34 のように緩い斜面であることが多い[28]。尾根の直下には段差地形やこのような二重山稜の微地形が認められ、重力変形が発生していることを窺わせる。こうした斜面を現場で確認したものが下の写真である。落水線方向にガリーなどの浸食地形が形成しているわけでもなく、尾根と並行方向の溝地形が形成している。こうした地形を重力変形地形と呼び、地すべりの前兆地形として判読技術者は地形図から読み解く技術を習熟・修練を重ねる。

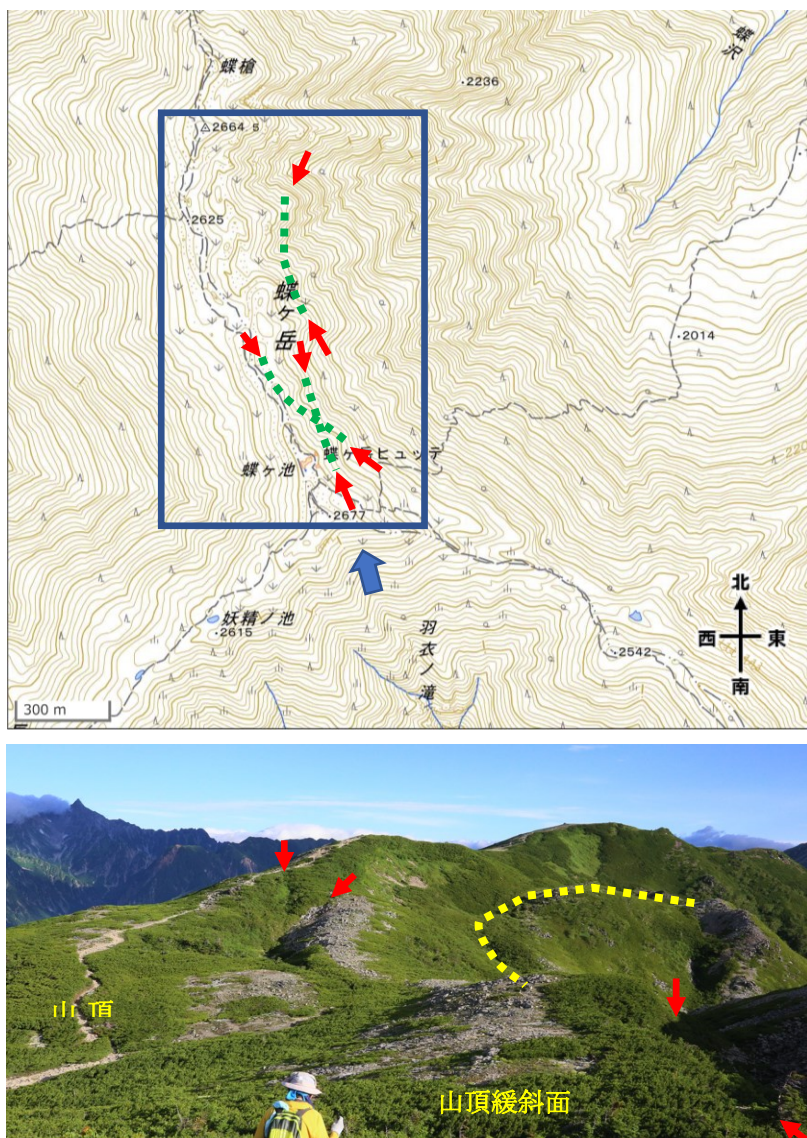


図 34 二重山稜の写真 [28]より引用したものに一部加筆

図 35 は、地すべり地形の判読例である。等高線が尾根・谷・尾根と平行に認められる。尾根部の陥没帯、等高線の狭まり、などを注視している。平面図も尾根部分の等高線間隔が周囲より広がっている。いわゆる山頂緩斜面が広がっている状態である。尾根付近の標高 810m の等高線に特徴が現れている。北西—南東方向に尾根が伸びているが、これと平行となるように 810m の等高線が細い溝状に延びている。この細い溝状地が二重山稜となっていると考えられる。

沢地形とこれらの遷急線・遷緩線との関係より尾根部の二重山稜を頭部とする重力変形が生じているものと推定され、赤点線で囲まれた範囲で地すべり地形の存在が推定される。二重山稜へ向かうように斜面に沢地形が認められる。

斜面の途中の標高 740m の等高線より下方は、上方に比べ等高線の間隔が広がっており斜面勾配が緩くなっている。この標高 740m の等高線付近には遷緩線が分布すると判読可能である。

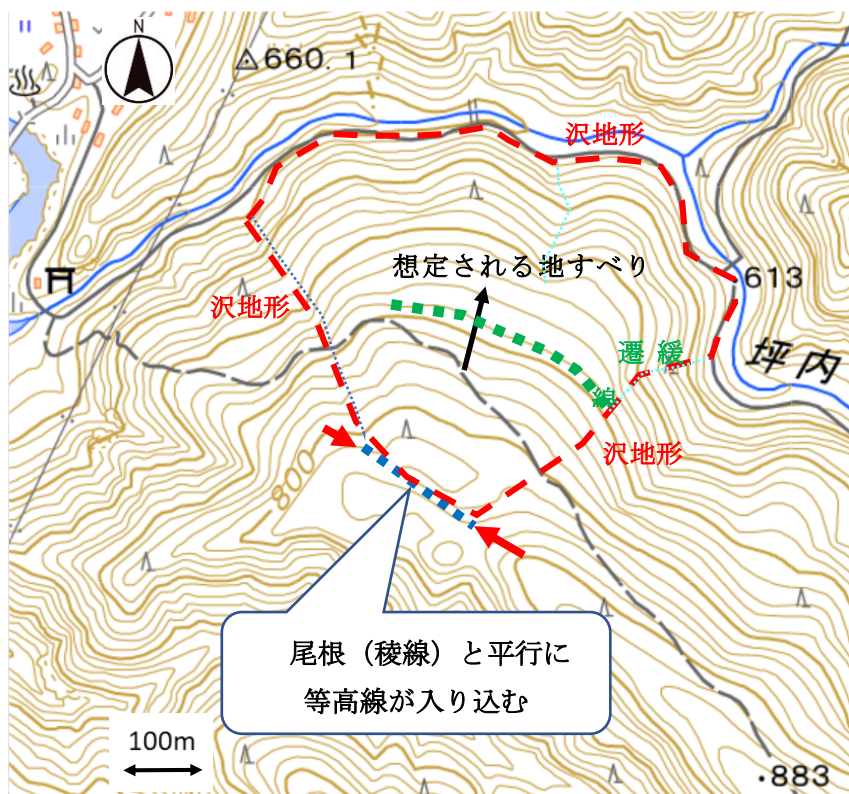


図 35 二重山稜（山頂尾根部の線状凹地）

図 36 は、地すべり地形判読図の一例である。図 37 のように様々な地形要素を判読し、最終的に地すべり移動体を判定する。この移動体の判定は、非常に確度の高い地すべりの箇所を特定することができる。手順は、周辺の尾根、谷、等の地形要素から地すべりが発生しうる位置関係を絞り込んでいくものであるため、最終的に抽出刷る移動体の範囲は、判読者の判断により誤差が生じる。図 38 に地形分類図の例、図 39 に岩盤クリープによる変形を受けた斜面の例を示す。

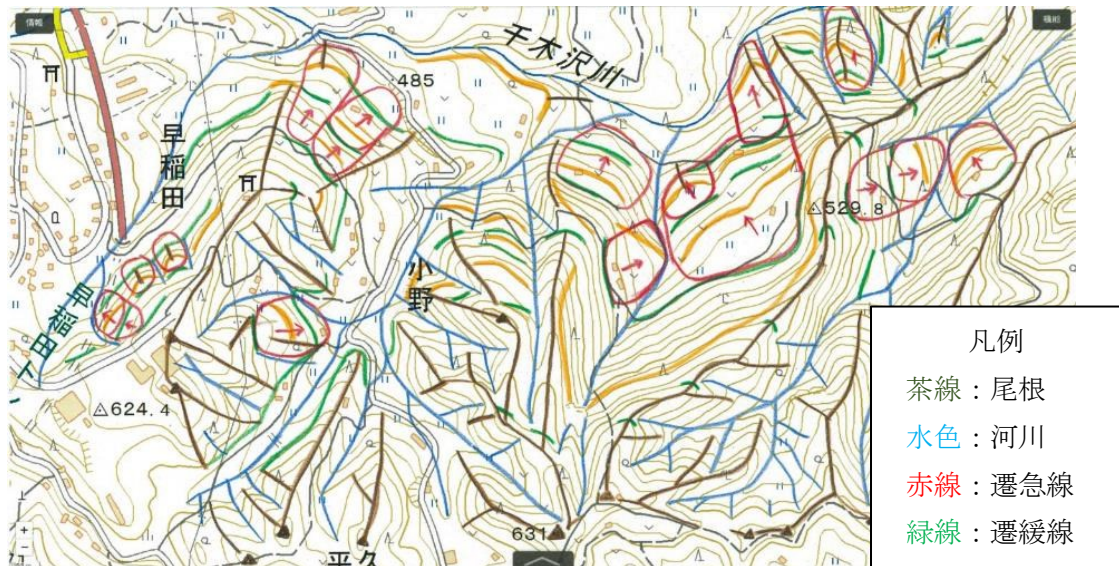


図 36 地すべり地形の判読図の例（地理院地図を基図とした）

< 地形判読凡例 >

名称	記号	名称	記号	名称	記号	名称	記号
稜線（山稜）		凹地		新鮮または開析されていない冠頂をもつ滑落崖		崖錐堆積物 崩積土	
水系（谷底）		凸地 分離小丘		部分的に開析されている冠頂をもつ滑落崖		未固結堆積物 土石流堆積物	
遷急線		線状凹地		冠頂が著しく開析された滑落崖		沖積錐堆積物	
遷急点		段差地形		冠頂が丸味をおびて不明瞭になった滑落崖		扇状地性堆積物	
遷緩線		崩壊地		開析されてなくなつてしまつた冠頂・滑落崖の推定復元位置		扇状地 段丘	
遷緩点		幅の広い 溝上凹地・亀裂		移動体の輪郭が明瞭			
平坦面 緩斜面		幅の狭い 溝状凹地・亀裂		移動体の輪郭が不明瞭（？は輪郭の判定が困難な部分）			
池		雁行亀裂					
		膨隆地の前線					
		貯水線					

【参考文献】大八木則夫（2007）『地すべり地形の判定法』近未来社 p.17
今村遼平ほか（1984）『空中写真による地すべり調査の実際』鹿島出版会 p.99-102

図 37 地形判読図の凡例 [27]より引用したものの一部加筆

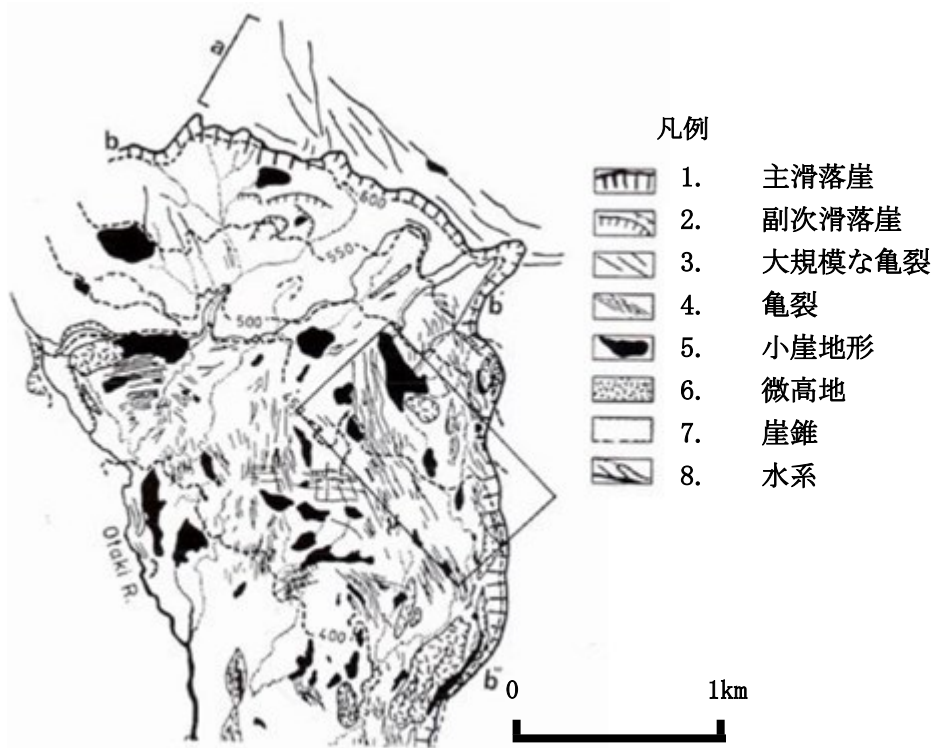


図 38 地すべり地の地形分類図の例 (宮城, 1992) [29]より引用したものに一部加筆修正



図 39 飯豊山地に見られる岩盤クリープによる変形を受けた斜面 (写真中央) [29]より引用

従来の地すべり地形判読は、2枚の空中写真から立体視を行い、地すべり移動体を抽出していた[30]。この判読作業には、地形地質の専門的な知識と判読における修練が必要である。また判読作業には時間を要することから、前述のレーザープロファイラ測量技術のように広域を高解像度で地形情報を取得できる昨今においては、判読作業の効率化が求められている。図 40 に判読事例、図 41 に実体視の様子、図 42 に判読用空中写真の例、図 43 に立体可視図の例を示す。



図 40 地すべり地形の判読事例（徳島県三好市井ノ久保地すべり） [30]より引用



図 41 実体鏡を用いた空中写真の実体視の様子 [30]より引用



図 42 地形判読用の空中写真の例（徳島県三好市井ノ久保地すべり） [30]より引用

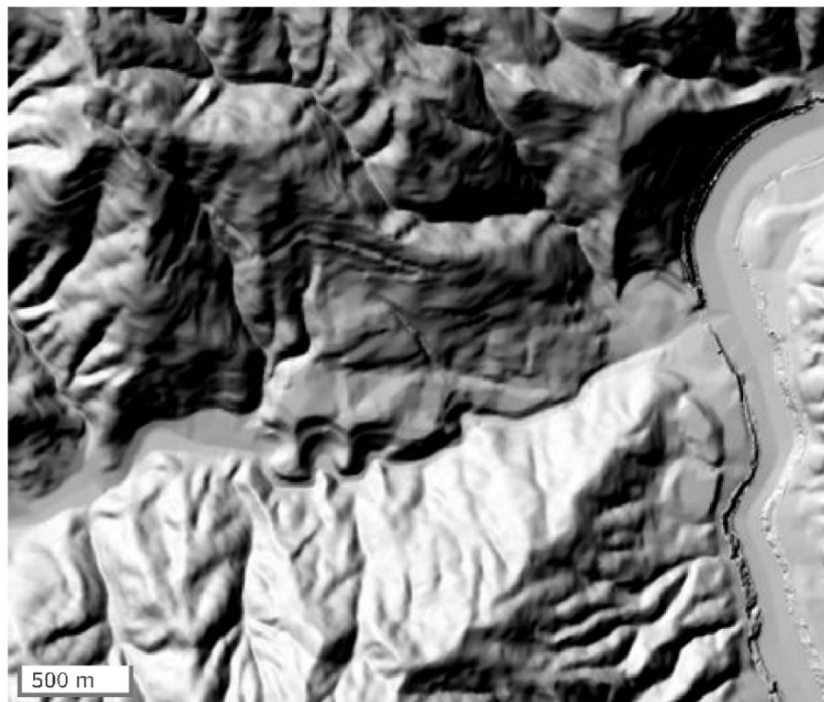


図 43 立体可視化図に示された井ノ久保地すべり [30]より引用

(3) 荒砥沢ダム地すべりの判読事例

図 44 は、荒砥沢地すべりの詳細なレーザ測量の地形図である。その判読を行うと図 45 のようになる。このように地形判読を行うに当たり、レーザ測量技術は有効であり、精度良く地すべり移動体を検出するための有用なツールであることがわかる。専門技術者により国土地理院が発行する 1 : 25000 の地形図を用いて判読が行われた場合、図 46 のようになる。巨視的に地形を見ることにより、発生した荒砥沢地すべりの周辺にも同様の地形が分布している事が分かる [31].



第2回 岩手・宮城内陸地震に係る荒砥沢ダム復旧・復興対策検討会資料 から引用
平成20年8月8日 東北農政局整備部 東北森林管理局森林整備部 宮城県土木部

図 44 荒砥沢ダム周辺で発生した大規模な地すべりの地形 [14]より引用

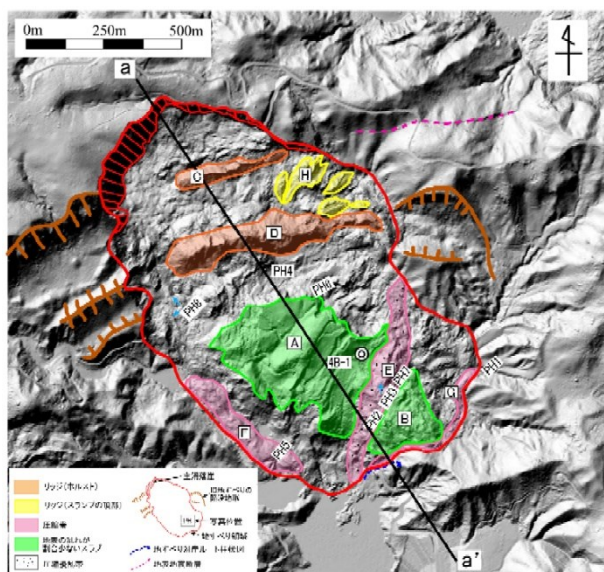
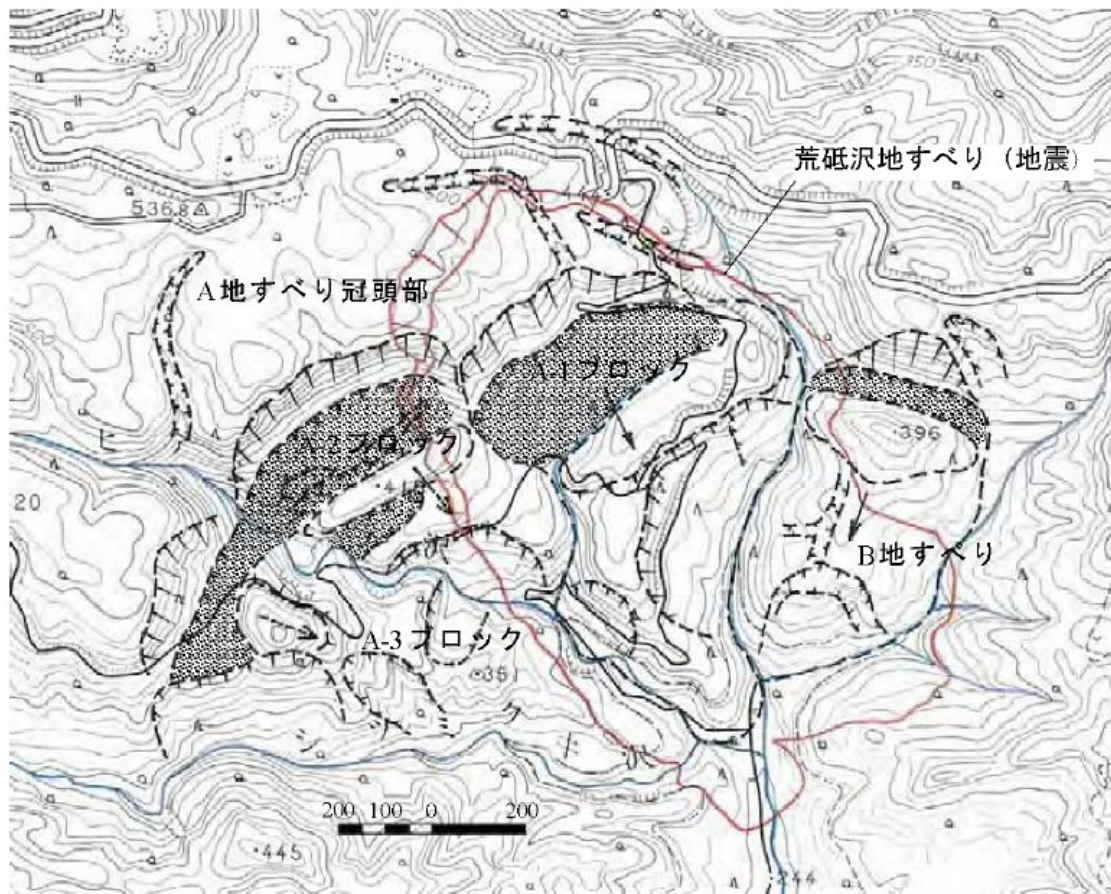


図 45 荒砥沢地すべり 地形区分図 [15]より引用



- 滑落崖
- 陥没帯
- ガリー
- 移動体

- 移動方向
- 荒砥沢地すべり (地震後)
- ブロック (地震後)

図A 地すべり地形判読図 (地震前)

- ・地震前には、移動方向の異なるA地すべりとB地すべりがみられる。
- ・A地すべりは陥没帯やリッジの並びから、3区分される。
- ・地震後地すべりは、A-1ブロックとその冠頭部を主体とし、A-2ブロックとB地すべりの一部を含んで滑動した。
- ・冠頭部の弧大部分の左半分は、開口亀裂と推測される沢地形に沿う。
- ・地震時地すべりは、明らかにB地すべりと移動方向を異にする。

図 46 1:25000 の地形図を用いた荒砥沢地すべり 地すべり地形判読図の例

[31]より引用したものに一部加筆

1.5.3 地すべりのタイプ分類

地すべりは、地域地質により発生場の斜面勾配と岩質によってタイプ分類がされている。小坂 [32]によると、図 47 のように岩盤すべり、風化岩すべり、崩積すべり、粘質土すべりの 4 タイプが主となる。それぞれ移動量と位置エネルギーが異なるとされ、いわば、動きやすさが地域の地形地質によって異なる事を示している。

図 48 は、紀伊半島水害の地すべりと地附山地すべりとの違いが、傾斜と変位率の関係で明確に分かれている。深層崩壊はいわば左上の三波川帯（付加体）、地附山地すべりは右下の上部中新統一鮮新統の区分に属する。

判読作業を行うに当たっては、判読技術者はこうした背景も念頭に読図を行っている。専門的な深い技術であるものの、大原則として地すべり地形の特徴は、図 33 と同じものを見ていることになる。

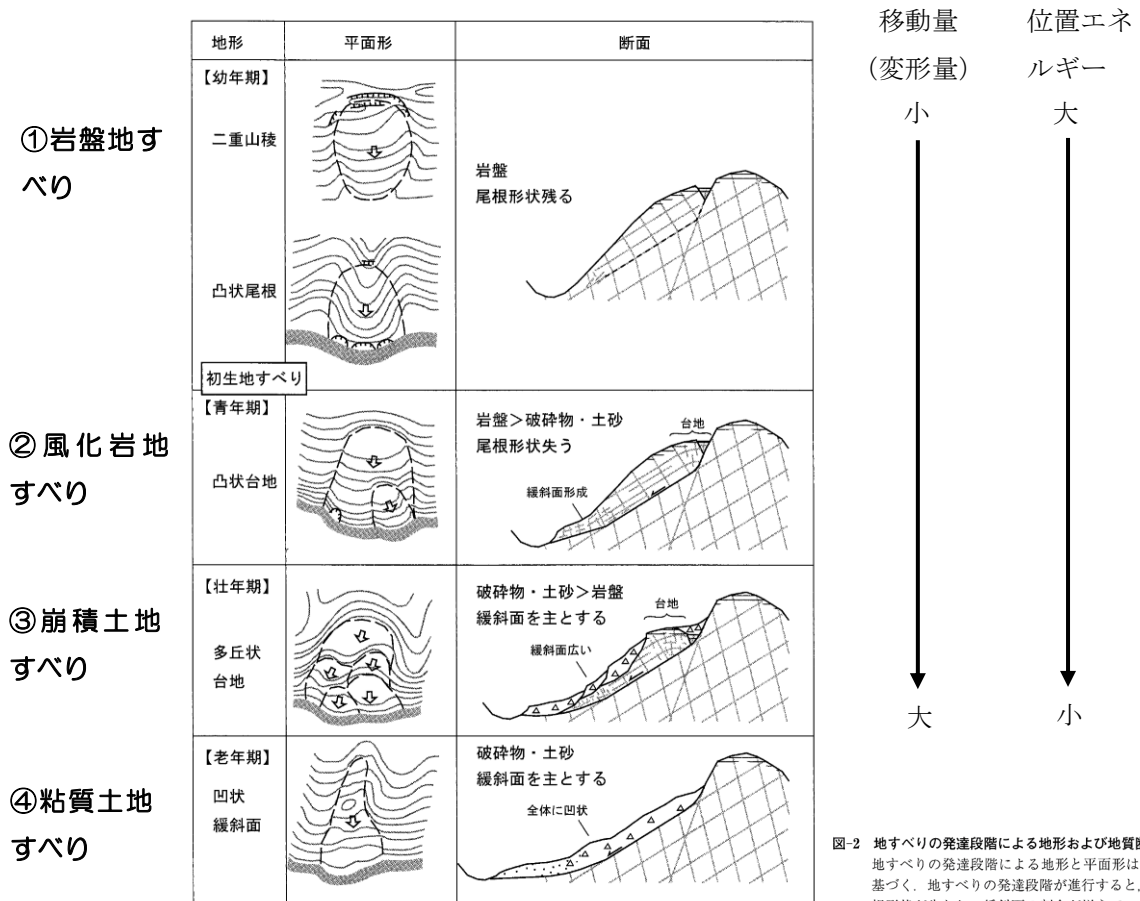


図-2 地すべりの発達段階による地形および地質断面の違い
地すべりの発達段階による地形と平面形は渡 (1992)¹⁰⁾に基づく。地すべりの発達段階が進行すると、岩盤による尾根形状が失われ、緩斜面の割合が増えていく。経験上、凸状台地地形は初生地すべり後、凸状尾根地形は初生地すべり前の段階にあることが多いと考えられる。

図 47 地すべりタイプ分類と移動量，位置エネルギーの違い
[32]より引用したものの一部加筆

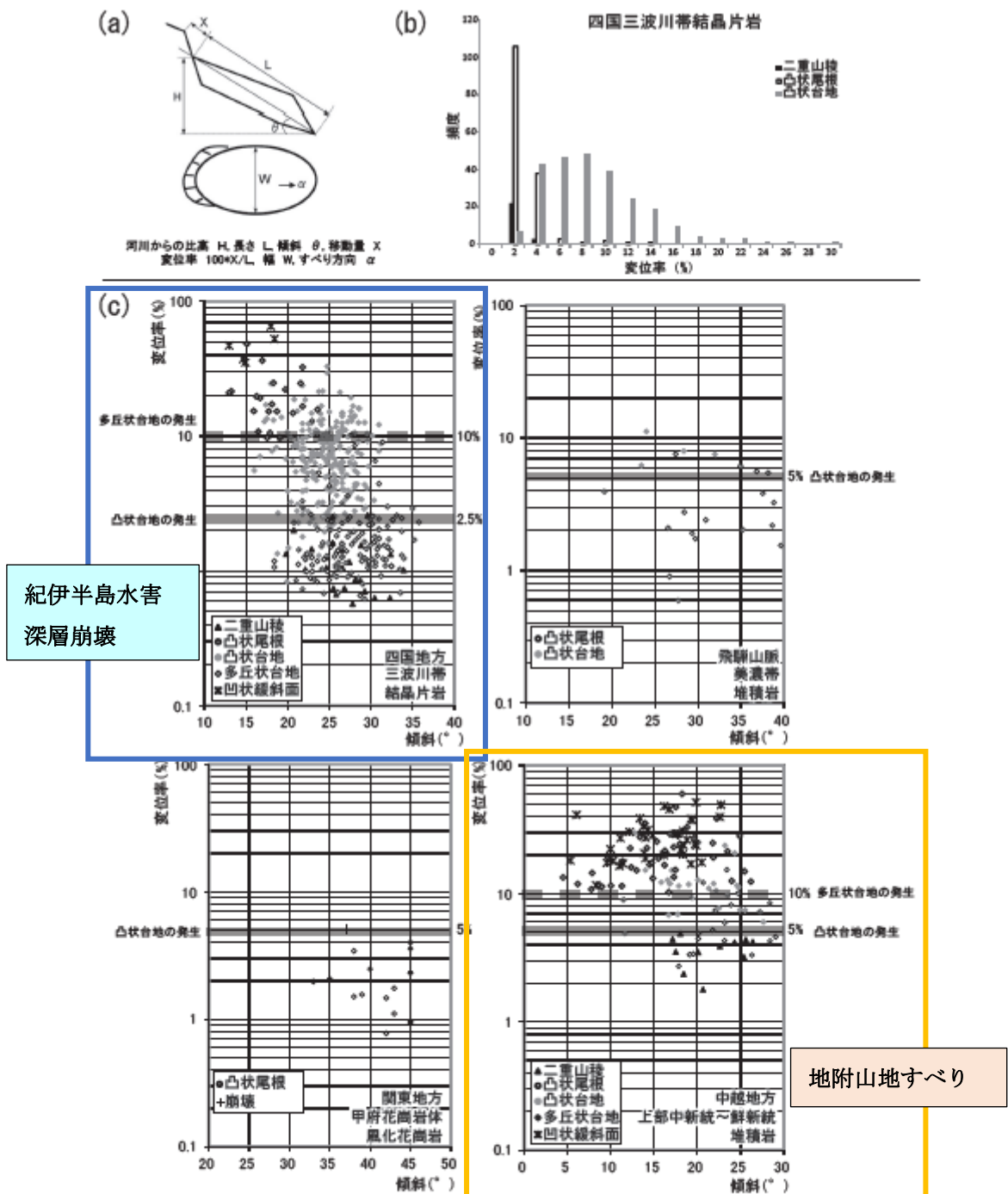


図-7 変位率-斜面傾斜プロット図
 (a) 変位率測定方法 (稲垣ほか, 2007)⁹⁾, (b) 四国地方三波川帯結晶片岩地域における変位率のヒストグラム (稲垣ほか⁹⁾のデータを使用). (c) 変位率-斜面傾斜プロット図. 四国地方は稲垣ほか (2007)⁹⁾, 飛騨山脈は清水ほか (2013)²⁰⁾, 風化花崗岩は橋沢ほか (2012)⁷⁾, 中越地方のグラフは小坂・稲垣 (2007)²⁰⁾のデータに基づく.

図 48 変位と斜面勾配の割合の地域差 [32]より引用したものに一部加筆

1.5.4 地すべりの判定方法

地すべり・深層崩壊が発生するには、重力の作用、岩盤の風化、地殻変動による隆起、河川の浸食作用などによる素因から、長い時間をかけて徐々に地形が変化していくことが知られている。深層崩壊に関連する要因と時間スケールを図 49 に示す。千木良 (1995) [7]、奈良県深層崩壊研究会[2]などによると、この長い年月により変化する地形は、微地形と呼ばれ、地すべりが変動する事により特徴的な地形が見られることが示唆されている。実際、2012 年の紀伊半島水害においては、地すべりの兆候と呼ばれる微地形が認められ、これは前述の航空レーザ測量のような高解像度の地形情報が無いと判読は困難である、としている。

地すべりの素因とは、斜面変動が発生した場所の地質的、地形的な要因（条件）である。これは、地すべりが発生する場所の地形や地質、地質構造、水文地質条件など、地すべりが発生しやすい状態にあることである。斜面の傾斜、遷急線との関係、移動土塊の地質、地層の走向・傾斜、断層・破碎帯、変質、貫入岩との関係、地下水の集まり易さなどを検討する。図 50 に深層崩壊発生場に共通して見られる地形的前兆の模式図、図 51 に地すべり（深層崩壊）の前兆地形変化の有無の事例、図 52 に地すべり（深層崩壊）の前兆である崩壊地の有無の分析事例を示す。

地すべりが発生する場所には地域的な偏りがある。また、同じ地域でも発生する斜面とそうでない斜面がある。地すべりが発生する場所には、地すべりを抑止する何らかの条件があると言われている。

誘因とは地すべりが発生するトリガーとなるもので、自然と人為の二つに分けられる。自然的誘因としては一般に降雨や融雪に伴う地下水圧の上昇を原因とする地すべりが多いが、他にも地すべり末端の土砂が小規模崩壊や河川による洗掘などによって喪失することによるもの、積雪荷重や地震によるものなど様々である。

人為的誘因としては斜面の切土や盛土、トンネル掘削などの土工によるもの、ダム湛水によるものなどである。

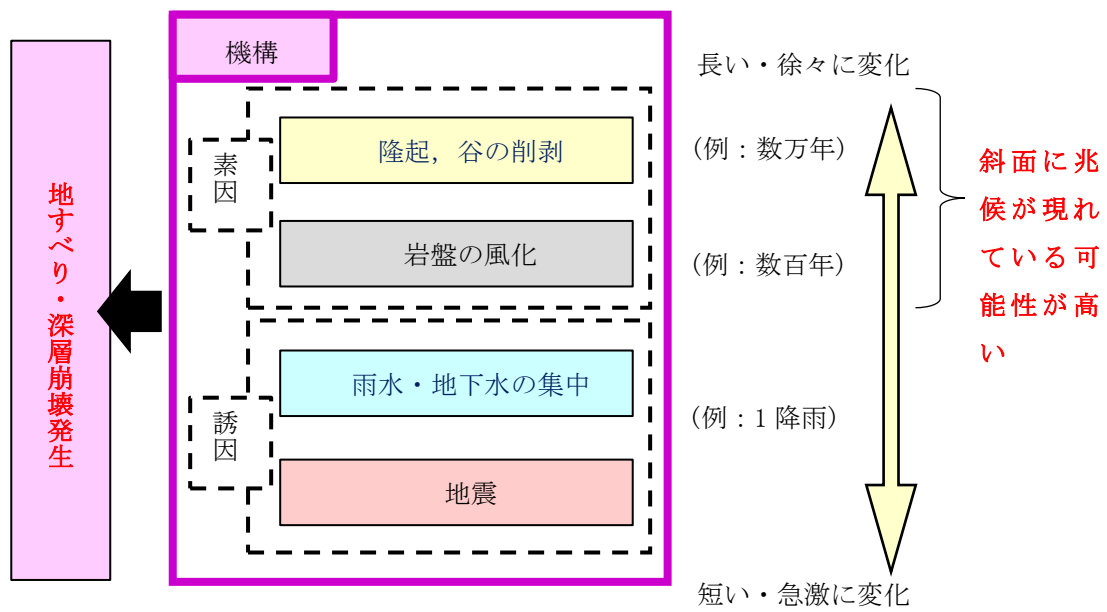
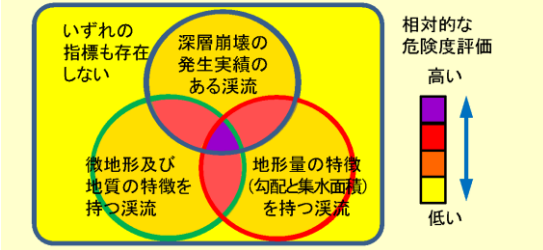


図 49 深層崩壊に関連する要因と時間スケール [2]より引用したものに一部加筆

地質や気候条件が概ね等しいと考えられる地域を対象に、1km²の溪流レベル単位で、深層崩壊発生実績、地質構造・微地形、地形量の3指標で評価

- | |
|-----------|
| ①深層崩壊発生実績 |
| ②地質構造・微地形 |
| ③地形量 |



深層崩壊評価指標 (3指標)

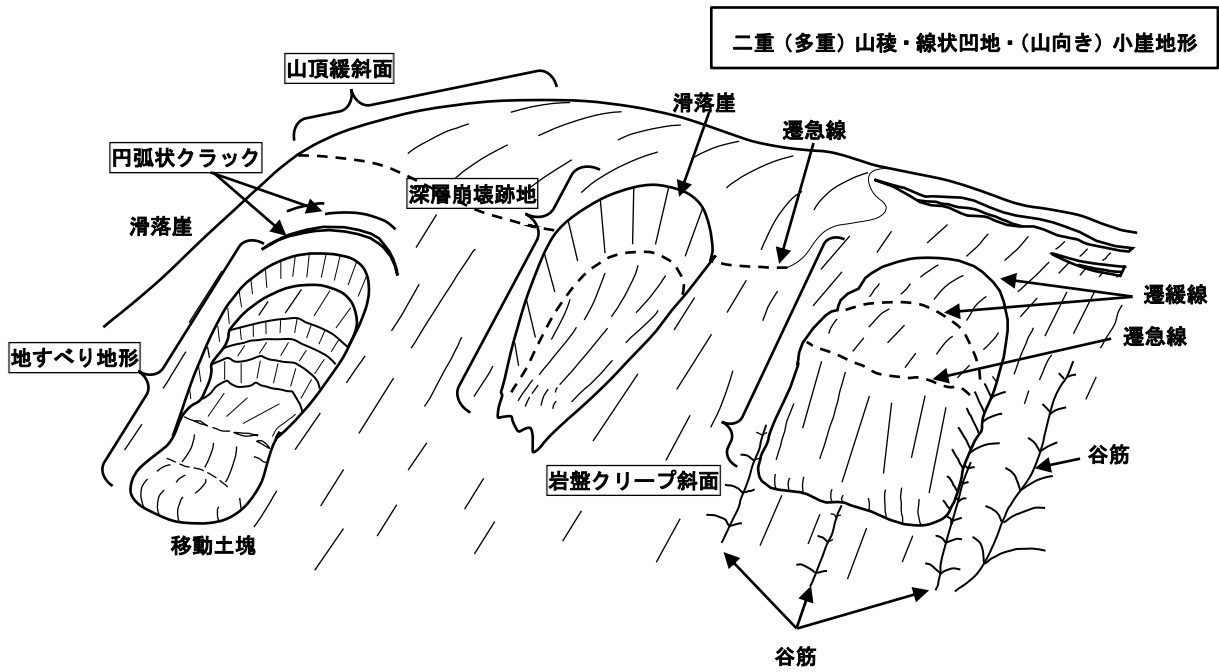
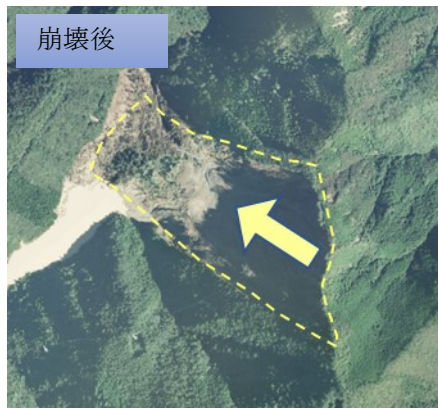


図 50 深層崩壊発生場に共通してみられる地形的前兆の模式図

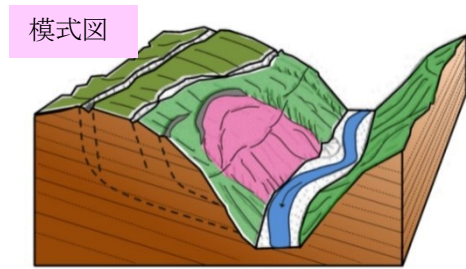
[2, 17]より引用したものに一部加筆



崩壊後



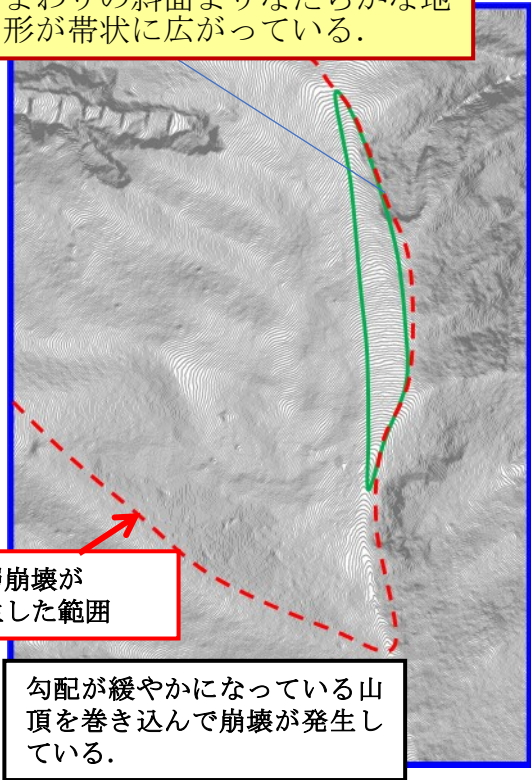
崩壊前



模式図

航空レーザ計測による詳細地形図

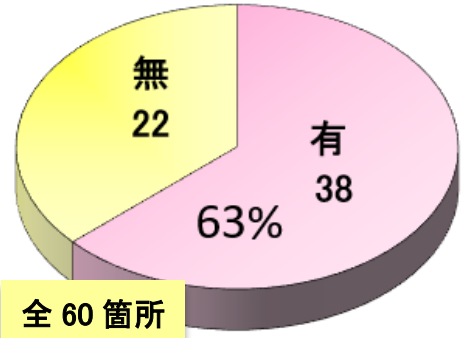
まわりの斜面よりなだらかな地形が帯状に広がっている。



深層崩壊が発生した範囲

勾配が緩やかになっている山頂を巻き込んで崩壊が発生している。

紀伊半島大水害



全 60 箇所

調査数の 63% は山頂に緩斜面が分布

図 51 地すべり（深層崩壊）の前兆地形変化の有無の事例

[2]より引用したものに一部加筆

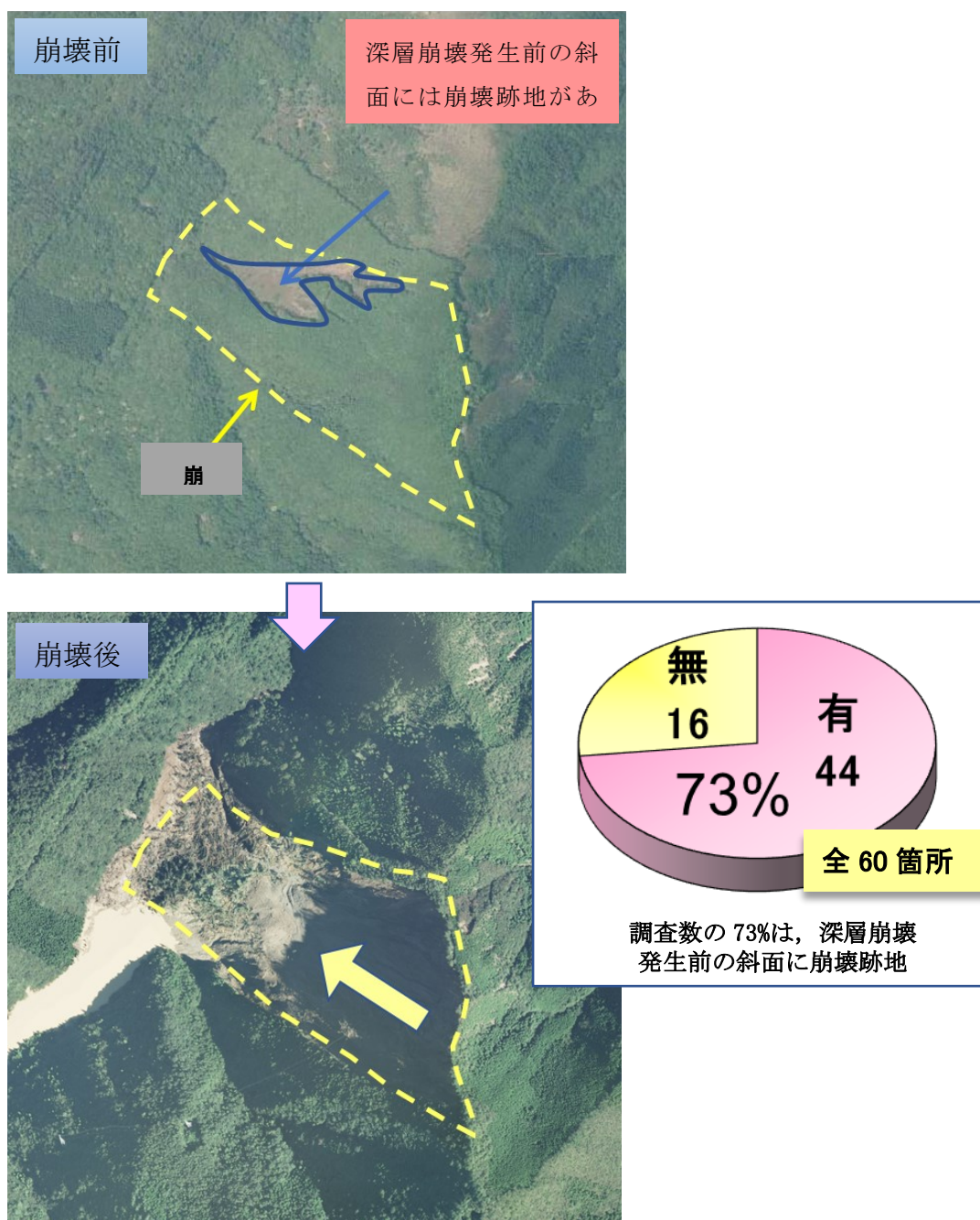


図 52 地すべり（深層崩壊）の前兆である崩壊地の有無の分析事例
[2]より引用したものに一部加筆

1.5.5 地すべり地形判読の効率化に関する研究

(1) 地形量の統計による効率化

地形判読、とくに地すべりのような地形の変形を判読する方法は体系的に教本化されているものの、手法自体を効率化する手法は多くない。土木研究所[33]は、レーザープロファイラー測量技術で高解像度化した地形に対応した地すべり地形の判読手法をとりまとめている。地すべり地形判読では、1次地形判読において尾根や谷地形の抽出を行ったのちに、陥没や押し出しのような地すべり変動特有の地形の特徴の知識化した上で、地域、地質によって異なる様々な地すべり形態に応じた範囲を求める必要がある。例に挙げたような判読技術は数10年の熟練の技術者によるものであり、災害が多発する昨今において判読技術を活用し、防災・減災に役立てていくには技術的思考プロセスを効率的に技術者が学習できるようにした上で、高解像度化されていく地形情報に対する判読し、危険箇所の抽出を客観的に行っていく必要がある。

地すべり地形などの特徴を地形の勾配等を統計的に取得し、類似する地形の箇所を求める研究がある。神谷ら[34]では、日本全国をカバーする精密DEMデータであるデジタルマップ50mグリッド(標高)から、地盤の傾斜をグレースケール画像で表した傾斜勾配図を作成し、傾斜勾配図を用いて、地形・地質の解釈を試みている。斜面勾配図と他の地形図(等高線図、DEM画像、丘陵陰影図)を比較した結果、斜面勾配図が地形・地質の解釈に最も適していることを示している。

戸田[35]は、リモートセンシング技術を活用して地形や地質構造などの素因把握を行うことで、長野県内で発生した災害を事例に崩壊発生機構の調査を行った。災害調査事例として、2014年に木曾郡南木曾町梨子沢流域で発生した土石流災害と2017年に飯山市井出川流域で融雪期に発生した山腹崩壊災害について発生機構の検討を行っている。

(2) 熟練技術者による判読時の着眼点の可視化と学びによる効率化

地形判読技術を効率化するための手法として、地形判読の熟練技術者が地形判読の際に着目する地形の位置や特徴を可視化し、他者と共有することで同様の観点、属人的な判定の低減をすすめるための研究がある。佐藤ら[36]は、アイトラッキング技術を用いて、複数の地形判読技術者を被験者として判読に着目する地形の位置や思考時間、言語化される用語について取りまとめている。図53では、判読技術者の視点の位置(円)とその軌跡(円に繋がる赤線)が表示される。視点の位置を追うように熟練判読者Aがペンを用いて赤線を書き入れている(図53)のが判る。

判読者の観点を可視化することで経験が浅い技術者への教育ツールとして用いることで、効率化の効果が期待できるものである。図55に共起ネットワーク図の見方、図55に熟練者及び初心者の視線痕跡図を示す。

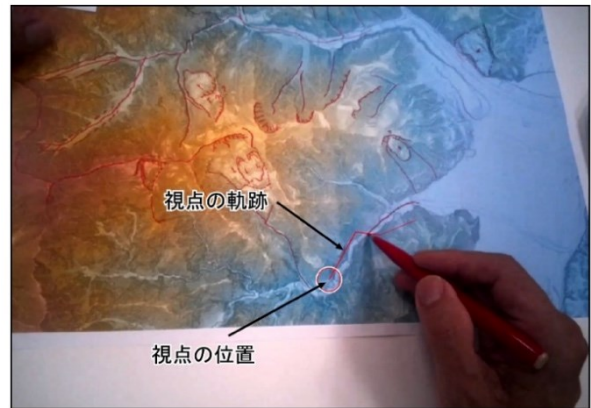


図 53 アイトラッキングを用いた地形判読記録

図 54 熟練判読者 A の視線動画

[36]より引用

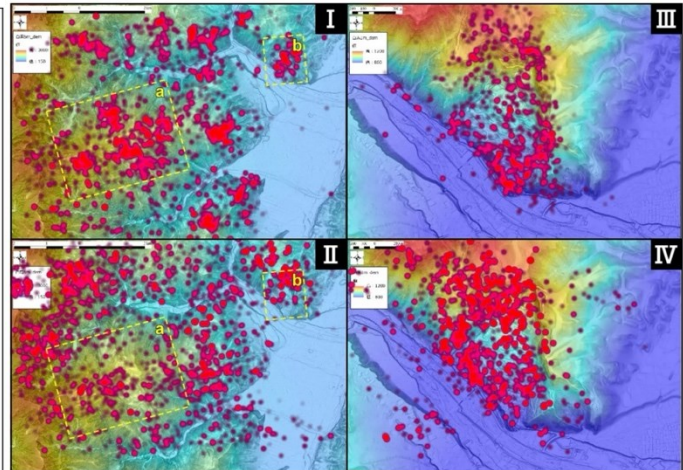
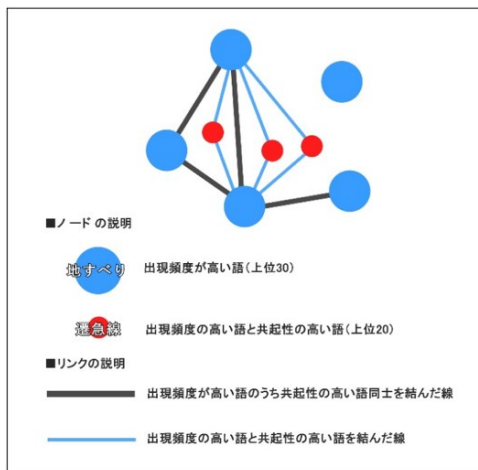


図 55 共起ネットワーク図の見方

図 56 熟練者 (I・III), 初心者 (II・IV)

[36]より引用

1.5.6 地すべりの危険性予測の事例

地すべり地形から地すべりの危険性を予測する手法は、いまだ多くなく、主流は3つである。各手法について概説する。

- ① 地形判読によるもの（地すべり地形分布図、深層崩壊溪流レベル評価マップ）
- ② 地すべり災害が発生した地形の要因に着目し、その指標を主観的に点数付けして危険性の大小を評価したもの（AHP法）
- ③ 誘因である降雨量から予測したもの（土砂災害警戒情報）

(1) 地形判読による地すべり地形の設定—地形分布図

地すべり地形分布図は、撮影縮尺4万分の1のモノクローム空中写真を倍率4倍の簡易実態鏡を用いて判読し、幅150m以上の比較的大規模な地すべり地形のみを抽出されたものである[37]。日本では、防災科学研究所により、全国都道府県における地すべり地形分布図が作成されているなど、地すべりのデータ基盤が確立されていると言える（図57）。

学術的には空中写真判読による地形学的予察図と呼ばれる。ごく一部を除き、判読した地すべり地形について現地調査がされていない。地図上に地すべり地形が表示されていないことが、地すべりや地すべり地形が存在しないことを意味するわけでは無い事が注釈にあり、小規模な初期の変動は判読・抽出することができない、とされている。

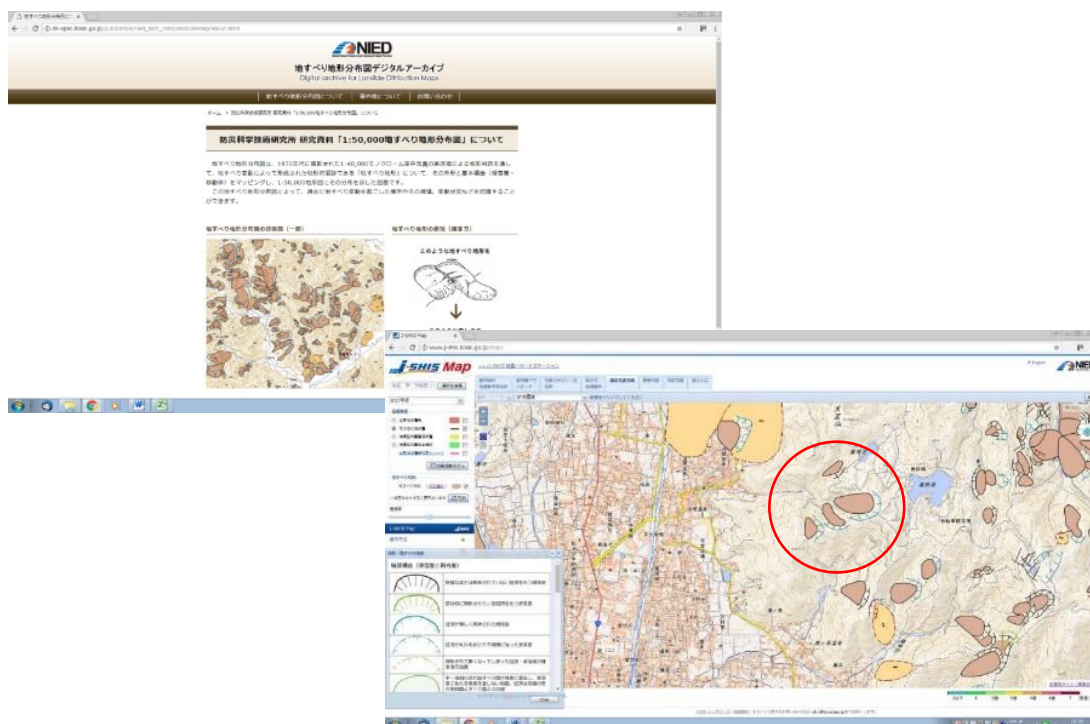


図 57 地すべり地形分布図公開 HP（防災科学研究所発行）

(2) 深層崩壊機溪流レベル評価マップ

深層崩壊溪流レベル評価マップは、国土交通省が土木研究所資料第 4115 号「深層崩壊の発生
の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）」を用いて調査したものである[38]。このマップでは、
評価区域内における深層崩壊の相対的な危険度を確認することができる。作成に当たっては、図
58 に示す深層崩壊の派生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）が用いられており、マニユ
アルに記載されている地形量の統計指標を流域単位で深層崩壊の頻度と地形的前兆が多い溪流ほ
ど危険と設定される。

国土交通省では、平成 22 年 8 月に「深層崩壊推定頻度マップ」（図 59）を公表するなど、深
層崩壊に関する調査が進められている。本論執筆段階においても、深層崩壊の発生要因等は、未
だ全てが解明されているものではなく、マニュアル作成時点の技術レベルで判明している知見
をふまえて検討が行われた。

深層崩壊頻度マップは、空中写真判読等による深層崩壊の溪流（小流域）レベルの判読から行
われている。2010 年の国土交通省から公開されている情報では、深層崩壊溪流レベル評価マッ
プ（地質条件等が同質の一定区域内における深層崩壊の相対的な危険度を示したマップ）の作成
が行われているとされている。公開されている地域は、北海道、東北～関東甲信越、紀伊半島、
四国、九州における深層崩壊の実績がある一部地域である。

深層崩壊頻度マップは、地形判読を地すべり地形分布図を空中写真判読にて行っていること、
判読基図を空中写真から行っている事から、判読技術者の属人性の観点から、ブラックボックス
があり、砂防事業による総合土砂管理の観点から小溪流単位での評価が行われているため、具
体的な発生位置の明示はされていない。深層崩壊頻度マップの精度検証として、紀伊半島水害の深
層崩壊を対象に頻度マップの発生率の検証が行われている（図 60）[39]。

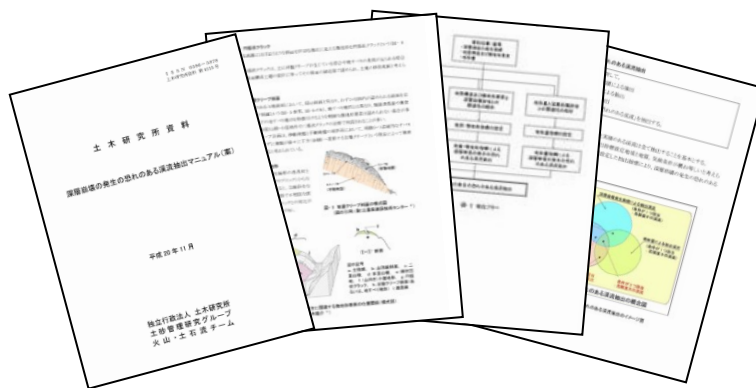


図 58 深層崩壊の発生のある恐れのある溪流抽出マニュアル（案）

[38]より引用したものに一部加筆

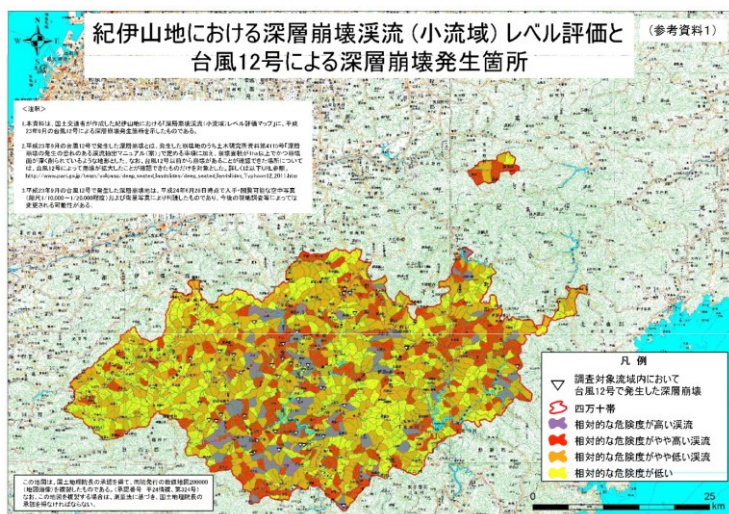
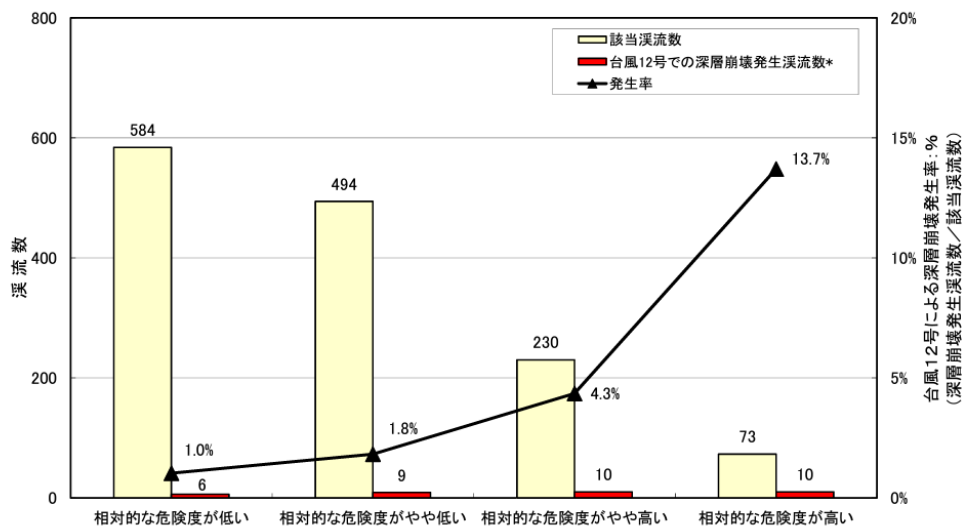


図 59 深層崩壊溪流レベル評価マップ [38]より引用

(参考資料1)

紀伊山地における危険度別溪流数と台風12号による深層崩壊発生状況



*一つの溪流内で複数個の深層崩壊が発生したのも、1溪流として計上している。

図 60 深層崩壊溪流レベル評価マップの検証結果例（紀伊半島水害を対象） [39]より引用

(3) AHP 法による地すべり危険性予測

AHP (Analytic Hierarchy Process) 法[40]は、階層分析法とも呼ばれる意思決定手法である。主観的であいまいな評価を数値化し、判断の整合性を高めることで、最適な評価や選択を図る手法である。

[41]の文献による地すべり地形における AHP 法は、地すべり地形から、その活動度を評価するものである。その評価は、まず空中写真の実体視により地すべり地形の三次元形態を把握し、判定用チェックシート上の地すべり地形についての各要素の項目を選択することにより、対象とする地すべりの活動度を採点することで行う。判定基準については、AHP 法（階層型分析法）という統計手法を用い、熟練技術者が空中写真判読により地すべり地形のどの点に注目して地すべりの活動度を評価しているか解析を行い設定される。AHP 法は、地すべり工学において熟練技術者の地すべり活動度評価における注目点のウェイト（重み付け）を整理し、配点の高さから危険性を決定する。

地すべり地形に対して AHP 法を用いた既往研究[35]では、地すべり地形をなす斜面の抽出と抽出された箇所を構成する地すべりの地形から AHP 法を用いて地すべりの再活動の危険性を評価するシステムを開発している（図 61）。地すべりを空中写真判読し、判読技術者が危険と判定する際に着目する地形的要因を階層構造化（表 4）し、定量化したものである。地すべり地形の危険性の要因と項目は、判読の専門家によるブレインストーミングで決定され、地形の明瞭さや地表面の形状、地すべり末端部の地形からみた不安定さ、などである。

危険度評価の点数は、AHP の各階層を構成する要因の中で選択された項目で決定され、危険度レベルは 4 段階で示されている（表 5）。阿賀野川流域の 312 箇所の地すべり地形をこの手法で評価したところ（図 62）、判読技術者間の総合評価とよく対応するものであり、判読技術の一定の客観性が得られる手法として危険性評価に役立てられるとされている。

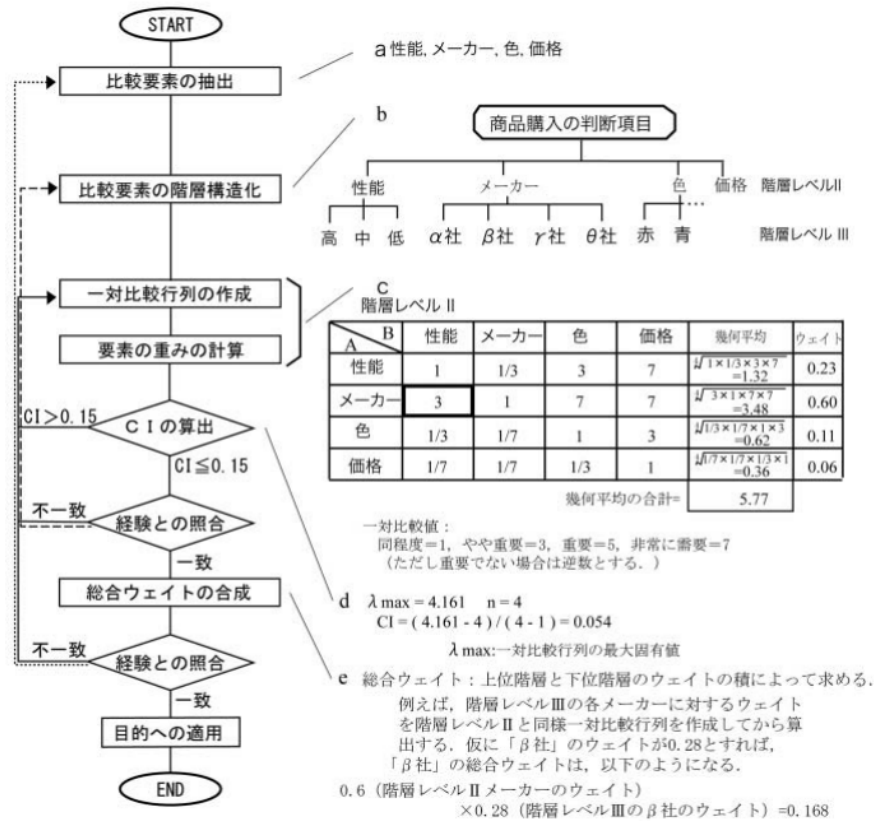


図 61 意思決定プロセスの AHP 法によるモデル化 [41]より引用

表 4 地すべり地形再活動危険度評価のための AHP 階層構造と重み [41]より引用

階層レベルI	階層レベルII		階層レベルIII	階層レベルIV	ウェイト	重み係数	得点
目的	項目	ウェイト	項目	項目			
地すべり発生危険度評価	滑落崖の明瞭度	0.046	明瞭	.....	0.603	0.028	2.8
			やや明瞭	.....	0.228	0.010	1.0
			不明瞭	.....	0.169	0.008	0.8
	移動体の表面形状	0.200	さざなみ型	.....	0.652	0.130	13.0
			凹凸型	.....	0.188	0.038	3.8
			平滑・開析型	.....	0.160	0.032	3.2
	移動体の位置	0.133	末端	.....	0.547	0.073	7.3
			中間	.....	0.220	0.029	2.9
			頭部	.....	0.096	0.013	1.3
			独立	.....	0.137	0.018	1.8
	亀裂の位置	0.251	下部	.....	0.600	0.151	15.1
			中部	.....	0.250	0.063	6.3
			上部	.....	0.150	0.038	3.8
			なし	.....	0.000	0.000	0.0
	移動体末端の状況	0.370	侵食の受けやすさ	強い	0.350	0.130	13.0
やや強い				.....	0.120	0.044	4.4
弱い				.....	0.030	0.011	1.1
なし				.....	0.000	0.000	0.0
末端形状からみた不安定さ			急・比高大	.....	0.350	0.130	13.0
急or比高大	.....	0.150	0.056	5.6			
緩傾斜・比高小	.....	0.000	0.000	0.0			

表 5 AHP 評価採点表例 [41]より引用

地図名	新ID	滑落崖の明瞭度	移動体の表面形状	移動体の位置	亀裂の位置	侵食の受けやすさ	末端形状	得点率	危険度	備考	防止区域	区域番号
HD	24	明瞭	凹凸	中間	なし	やや強い	安定	20	安全	支流	1	R382-0004
HD	24.1	明瞭	凹凸	末端	なし	やや強い	不安定	46	やや危険	支流上	1	R382-0004
HD	25	やや明瞭	凹凸	独立	上部	弱い	やや不安定	28	やや安全	支流上	1	R382-0004
HD	26	やや明瞭	凹凸	頭部	上部	弱い	安定	19	安全		1	R382-0004
HD	27	やや明瞭	開析・平滑	頭部	なし	弱い	やや不安定	24	やや安全	末端の半分が不安定	0	
HD	27.1	やや明瞭	凹凸	末端	なし	弱い	不安定	41	やや危険	位置中下	0	
HD	28	明瞭	さざなみ	独立	なし	弱い	不安定	50	やや危険	支流上	0	
HD	29	やや明瞭	凹凸	独立	なし	弱い	やや不安定	23	安全	谷開析	0	
HD	30	やや明瞭	開析・平滑	独立	なし	弱い	やや不安定	22	安全	谷開析	0	
HD	31	やや明瞭	凹凸	頭部	下部	なし	安定	32	やや安全		0	
HD	31.1	やや明瞭	凹凸	末端	なし	弱い	不安定	41	やや危険	位置中下	0	
HD	32	やや明瞭	凹凸	独立	上部	なし	やや不安定	25	やや安全		0	
HD	33	やや明瞭	凹凸	頭部	なし	強い	やや不安定	37	やや安全	下方地すべり	0	
HD	33.1	明瞭	さざなみ	独立	なし	弱い	不安定	50	やや危険		0	
HD	33.2	明瞭	さざなみ	末端	中部	弱い	不安定	67	危険	末端崩壊可能	0	
HD	34	やや明瞭	さざなみ	頭部	上部	弱い	やや不安定	41	やや危険	支流上	0	
HD	35	明瞭	さざなみ	中間	下部	弱い	やや不安定	63	危険		0	
HD	36	明瞭	さざなみ	独立	なし	弱い	不安定	50	やや危険		0	
HD	37	やや明瞭	さざなみ	独立	なし	弱い	不安定	47	やや危険	支流上	0	
TK	15	明瞭	さざなみ	中間	上部	弱い	やや不安定	46	やや危険		1	R381-0001
TK	15.1	明瞭	さざなみ	末端	上部	弱い	不安定	63	危険		1	R381-0001

備考
 0:防止区域なし
 1:防止区域かかる

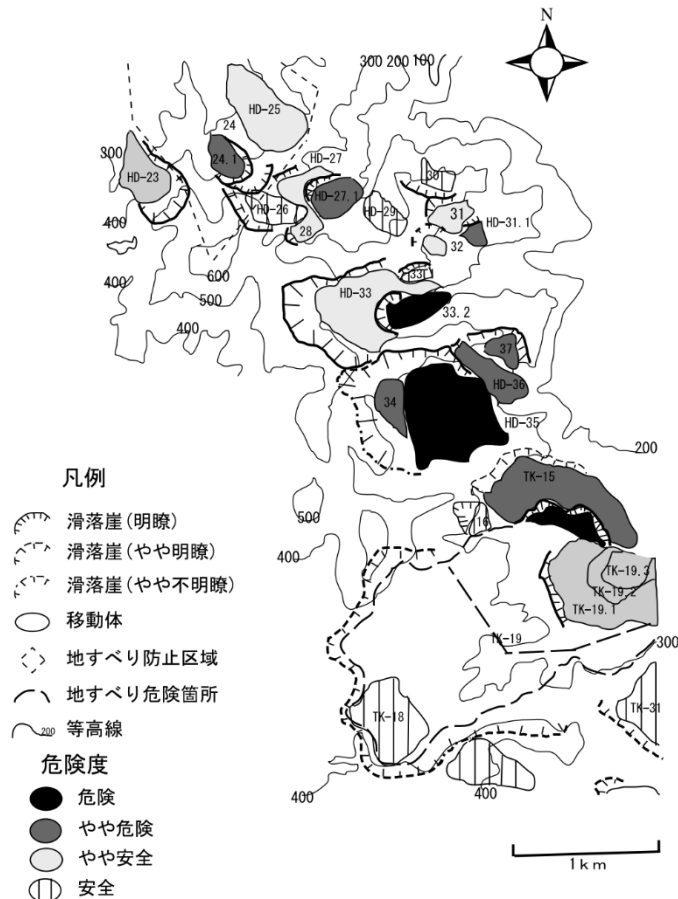


図 62 阿賀野川中流域の地すべり地形再活動危険度分布図 [41]より引用したものの一部加筆

(4) 土砂災害警戒情報

土砂災害という大きな枠組みでは、一般に最も知名度が高い予測手法は、土砂災害警戒情報である[42]。土砂災害警戒情報は、気象庁による大雨警報（土砂災害）の発表後、命に危険を及ぼす土砂災害がいつ発生してもおかしくない状況となったときに、市町村長の避難指示の発令判断や住民の自主避難の判断を支援するよう、対象となる市町村を特定して警戒を呼びかける情報で、都道府県と気象庁が共同で発令するものである。

土砂災害警戒情報は、過去に発生した土砂災害の統計情報から求められた土壌雨量指数という値が一定の基準値を超えると、過去の重大な土砂災害の発生時に匹敵する極めて危険な状況、として避難にかかる時間を考慮して2時間先までに基準に到達すると予測されたときに発令される仕組みである。

土壌雨量指数とは、降った雨による土砂災害危険度の高まりを把握するための指標である。大雨に伴って発生する土砂災害（がけ崩れ・土石流）には、現在降っている雨だけでなく、降雨開始時からの土壌中の水分量を指数として基準化している。土壌水分量は、タンクモデルを用いて数値化されている。この土壌雨量指数は、相対的指標であることが特徴である。指標を検討は、全国各地の気象台が発表する大雨警報（土砂災害）や土砂災害警戒情報等の判断基準に用土壌雨量指数と土砂災害危険度の関連を求めたものであるためである。土壌雨量指数を大雨警報等の判断基準と比較することで土砂災害発生の危険度を判断することが可能であるとされている。土壌雨量指数の計算には、図 63 に示すように降った雨が土壌中を通して流れ出る様子を孔の開いたタンクを用いてモデル化したタンクモデルが用いられている。3段に重ねた各タンクの側面には水がまわりの土壌に流れ出すことを表す流出孔が、底面には水がより深いところに浸み込むことを表す浸透流出孔があり、第1タンクの側面の流出孔からの流出量は表面流出に、第2タンクからのものは表層での浸透流出に、第3タンクからのものは地下水としての流出に対応する。この土壌雨量指数は、各タンクに残っている水分量（貯留量）の合計として算出され、これは、土壌中の水分量に相当する。

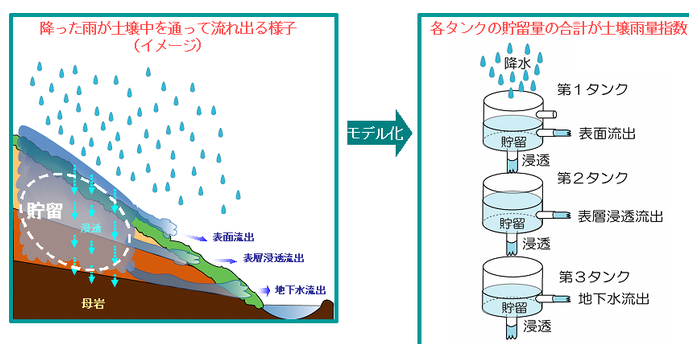


図 63 雨が土壌中に貯まっていく様子とタンクモデルとの対応 [42]より引用

図 64, 図 65 は土砂災害警戒情報発例示の事例である。気象庁がリアルタイムで発令するこの情報は、一意に降水量と先に述べた地域的な土壌雨量指数の統計を持って広域に発令されるものである。住民が住まう土地によりことなる地域地質は考慮されておらず、安全側の判断として注意を呼びかける警戒発令の仕組みとなっている。

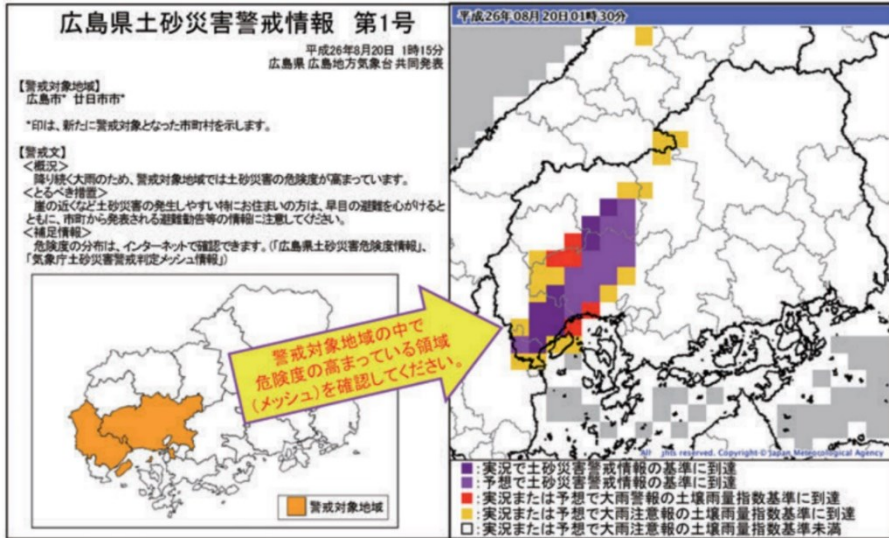


図 64 土砂災害警戒情報（左）・土砂災害警戒判定メッシュ情報（右）の発表例 出典：気象庁 [9]より引用

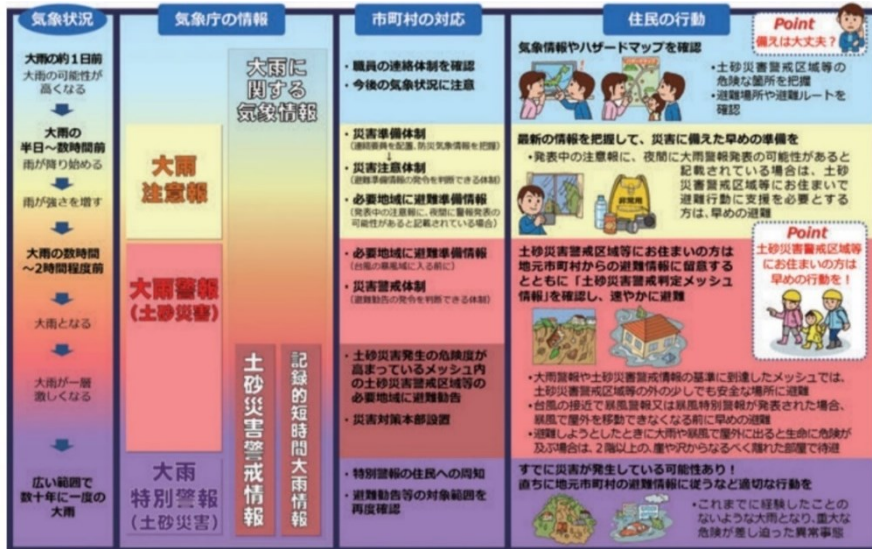


図 65 土砂災害に関する防災気象情報を活用した避難行動 出典：気象庁 [9]より引用

1.6 地すべり地形判読の意義と本論の目的

第1章で述べたとおり，地すべりによる土砂災害の予測は，統計的データから予測する方法と，地形判読による方法の2つに大別される．統計的データは日本の場合，特有の複雑な地形地質，異常気象による降雨の分布や強度の予測が困難なケースがあり，気象学からのアプローチが盛んに行われている．

後者の地形判読は，地形学，土木工学，地質学，自然科学の専門技術者が，長年蓄積し，データベース化してきた知見を活用した技術的アプローチである．土木工学の観点から，判読技術は深層崩壊や地附山地すべり，地すべり地形分布図のように実際の災害が発生した場所を予測できた実績が多数あり，世界的に見ても日本独自とも言える読図技術による予測手法であり，土砂災害を予測する手段として意義があるものである．

課題は，判読技術の属人性，労力とコストを要する点である．また，防災科学技術研究所が作成，発行している地すべり地形分布図においては，1970年代に撮影されたモノクロ写真1:40000をベースとして判読されているため，近年のレーザープロファイラ測量技術など高解像度の地形測量データベースが整いつつある現在においては，よりきめ細やかな判読精度が得られるようになってきた．しかしながら，より高解像度の地形情報が得られるということは，判読の労力も比例して増加してしまう課題は残ったままとなっている．本論で取り扱うディープラーニング，いわゆる深層学習には，画像の色やパターンの特徴を自動抽出，学習できる機能は，判読技術が抱える課題解決策になり得る可能性がある．

そこで本論では，土砂災害予測としての地すべり地形判読の効果と課題を背景として，精度を確保しつつも，属人性，判断のブレを解決するために，深層学習による地形判読技術の学習を行って効率化することを目的とする．第2章以降に土木技術の専門的知見を踏まえた地すべりの解釈と判読技術を向上させる意義について論述する．本論は，深層学習を土木工学，地形地質学への適用という新規性について述べると共に，深層学習に必要な教師データ構築に当たっては専門家の技術的知見が必要不可欠であることを指摘する．また，深層学習には一般に多量のデータが必要と言われているが，本論では地すべりのような自然現象，災害などデータ数に制約がある場合でも，「地すべりの位置を推定」可能な精度を確保できる手法を発見した．その適用と検証を行った結果と，さらなる課題とそれへの対応に関する提言を論述する．

1.7 第1章まとめ

第1章は，地すべりという現象について，定義，現象の特徴，土木工学的な意味について述べた．地すべりは古くから山間部で人間の生活に密着し，被害をもたらしてきた土砂災害である．近年の豪雨災害，例えば紀伊半島水害では，地すべりが高速に移動し崩壊現象を起こす（深層崩壊）ケースがあり，予兆である地形を把握する事の重要性を示唆した．

豪雨災害以外で，世界的にはダム湛水に伴って発生した地すべりによる事故の事例もあり，現象そのものだけでなく，地すべりが移動し河道を閉塞するなどする事により，被害が生じるケースも重なり，日本国内では大きな災害を多数起こしてきた．

今後の異常気象が続く限りは、繰り返し滑動する特徴がある地すべりを効率的に予測、把握し、モニタリングや対策への事業に繋げるための手法はいくつか存在する。自然現象の事例を統計により予測する技術は、土砂災害警戒情報のように広域かつ安全側の警笛を鳴らすものが主流であり、精度や範囲絞り込みの点で課題がある。一方の判読技術では、属人性やコスト面における課題はあるものの、発生場予測としての技術は確立されており、これを効率化する事による土木学的な意義は大きい。土砂災害予測における地すべり地形判読の現状の背景と課題を踏まえ、本論の目的と論述する概要を述べた。

引用文献

- [1] 藤原明敏：地すべりの解析と防止対策，理工図書，1979.
- [2] 奈良県 県土マネジメント部 砂防・災害対策課：平成 23 年紀伊半島大水害 深層崩壊のメカニズムに関する現状報告，奈良県，2013.
- [3] 全国地すべりがけ崩れ対策協議会：がけ崩れ対策の手引き～急傾斜地崩壊対策事業の実務，2004.
- [4] 国土交通省ホームページ：
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/jisuberi_taisaku.html，(最終閲覧日：2023/12/03).
- [5] 荒井正吾：平成 23 年紀伊半島大水害における深層崩壊の解明と復旧・復興対策について，全国治水砂防促進大会，2013.
- [6] 千木良雅弘：群発する崩壊-花崗岩と火砕流-，近未来社，2002.
- [7] 千木良雅弘：崩壊の場所-大規模崩壊の発生場所予測，近未来社，2007.
- [8] 千木良雅弘：深層崩壊：どこが崩れるのか，近未来社，2013.
- [9] 内閣府（防災担当）：特集 2 土砂災害に備える，内閣府 防災情報のページ みんなで減災 平成 27 年度広報誌「ぼうさい」，夏号（第 79 号），10，2015.
- [10] 国土交通省 中部地方整備局 静岡河川事務所：土砂災害とは，土砂災害と砂防事業，<https://www.cbr.mlit.go.jp/shizukawa/sabou/saigai/>，(最終閲覧日：2023/12/03)
- [11] 土木情報サービスいさぼうネット：コラム 5：イタリア・バイオントダム（1963）の被災地を訪ねて，2015.
- [12] 国土交通省近畿地方整備局：大滝ダム白屋地区亀裂現象対策検討委員会資料，2014.
- [13] 国土交通省関東地方整備局：八ッ場ダム建設事業，平成 28 年度第 7 回 関東地方整備局事業評価監視委員会，2016.
- [14] (国研) 土木研究所：大規模地すべり 荒砥沢ダム周辺で発生した大規模な地すべりの状況，平成 20 年岩手・宮城内陸地震調査報告会，2008.
- [15] 東北森林管理局 宮城北部森林管理署：荒砥沢地すべりの今後の対策に関する検討会資料，2022.
- [16] 和歌山県花園村：よみがえった郷土-昭和 28 年大水害をふりかえって-，1994.
- [17] 国土交通省 国土技術政策総合研究所：平成 24 年度国土技術政策総合研究所講演会講演集，国総研資料第 699 号，2012.
- [18] 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 HP：深層崩壊に対する国土交通省の取り組み，平成 24 年 11 月第 5 版，<https://www.mlit.go.jp/common/001019677.pdf>，(最終閲覧日：2023/12/03).
- [19] 財団法人 産業総合研究所：「シームレス地質図」，承認番号：第 60635130-A-20130205-001 号
- [20] 長野県土木部 長野建設事務所：地附山 地すべり災害，長野県，1993.
- [21] (社) 日本河川協会：建設省河川砂防技術基準（案）同解説設計編 9，山海堂，1997.
- [22] 国土地理院：航空レーザ測量の仕組み，

- https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html, (最終閲覧日：2023/12/03).
- [23] 全国地質調査業協会：道路防災点検の手引き，2014.
- [24] 千葉 達朗，鈴木 雄介，荒井 健一，富田 陽子，小泉 市朗，中島 幸信，小川 紀一郎：Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering 63 (1)，2010.
- [25] 渡正亮，小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策，山海堂，1987.
- [26] 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地，古今書院，2000.
- [27] (財)国土技術研究センター：貯水池周辺地すべり調査と対策，古今書院，2010.
- [28] 岐阜ケルン山岳会：<http://www.gifucairn.jp/2020/08/2020-8-15-16> 蝶ヶ岳・大滝山，(最終閲覧日：2023/12/03)
- [29] 檜垣大助：斜面防災技術 地すべり対策技術情報 地すべり地形判読，https://www.jasdim.or.jp/gijutsu/jisuberi_joho/tyosa/tikeihandoku/tikeihandoku.html，(最終閲覧日：2023/12/03).
- [30] 日本応用地質学会 中国四国支部：応用地質 Q&A 中国四国版，<https://www.jseg.or.jp/chushikoku/assets/file/faq/2-03.pdf>，(最終閲覧日：2023/12/03).
- [31] (社)地盤工学会 2008年岩手・宮城内陸地震災害調査委員会：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震 災害調査報告書，2010.
- [32] 小坂 英輝：バランス断面法による岩盤斜面の初生地すべり地形とその変位率，応用地質，56巻，5号，2016.
- [33] 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する手引き(案)，土木研究所資料，2016.
- [34] 神谷泉，黒木貴一，田中耕平：傾斜量図を用いた地形・地質の判読，情報地質 Vol. 11，No. 1，2000.
- [35] 戸田堅一郎：レーザ測量などによる崩壊発生機構調査手法の高度化，長野県林業総合センター研究報告，Vol. 33，2019.
- [36] 佐藤剛・土志田正二：地すべり地形分布図を作成するうえで地形判読の専門家は，地すべり地の何を見ているのか？ アイトラッキング(視線計測)を用いて専門家の“見ている情報”を“見える化”する教材開発一，第18回学術研究助成(地図・地名に関する学術的調査・研究)，2018.
- [37] 清水文健・井口隆・大八木規夫：防災科学技術研究所「1:50,000 地すべり地形分布図」第23集「和歌山・田辺」，防災科学技術研究所研究資料，2005.
- [38] 独立行政法人 土木研究所：深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案)，土木研究所資料，2008.
- [39] 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 砂防計画課：深層崩壊に関する溪流(小流域)レベルの調査について～深層崩壊溪流レベル評価マップの検証結果，https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000552.html(最終閲覧日：2023/12/03)，2012

[40] Saaty, T.L. (1980) : The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw-Hill.

[41] 八木浩司 檜垣大助：日本地すべり学会平成 14 年度第三系分布域の 地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員会，空中写真判読と AHP 法を用いた地すべり地形再活動危険度評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用，地すべり学会誌，Vol. 45 No. 5, 2009.

[42] 国土交通省 気象庁：土壌雨量指数, 知識・解説＞気象警報・注意報,

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>, (最終閲覧日：2023/12/03)

第2章 地すべりの破壊のメカニズムと地形との関係性

地すべりの移動に伴う破壊のメカニズムと、その結果現れる地形への影響について、土木地質、地質工学的観点から述べ、判読技術へと繋がる表現される地形との関連性について論述する。

2.1 地すべりの破壊構造の研究における地質工学，土木工学的重要性

本章では、地形判読技術の向上に資する研究を進める前段として、すべり面の存在と地すべりの活動、地すべり地形の形成について、研究背景を述べる。第1章で述べたように、地すべり防止法が制定後、航空写真等の利用により、日本国土の地理情報の充実により、地すべり現象に対する国土の整備・保全本が図られるようになった。これにより地すべり地の全体像が見えるようになり、地すべり地には地すべり地形という特有の地形が存在することが指摘され、判読技術の確立に繋がったといえる。地理情報の充実に合わせて日本の経済成長と共に多くの地すべり対策工事が実施され、地すべりの発生メカニズムの解明が進められた。地すべりの範囲を地形から特定されるようになった一方で、地すべりと不動岩盤との境界である「すべり面」の実態把握は大きな課題であった。地すべりの移動現象はすべり面を必ず伴うものであるという物理法則が原則であるものの、すべり面を直接視認できる機会は多くなかった。1990年代になってサンプリング技術の高度化により、調査ボーリングや地すべり対策工事によるすべり面の直接観察する機会は急増し、岩盤のせん断により破碎、細粒化、条線の形成といったすべり面の形成メカニズムの研究が進展した。

すべり面の特定は、地すべり対策工の設計において重要な意義を持つ。設計ではすべり面に伴う破碎帯の下面を境界とし、地すべり活動の誘因となる地下水位、地質構造等の不確実性も配慮し、安全側に設定されることが多い。現在の地すべりの安定性を求めるため安定計算は、基本的二次元断面において解析を行うこととなっている。しかしながら、地すべりは3次元の移動体であり、すべり面もまた三次元的に分布し、一意に求めることは困難である。このため、安全側の設計条件の下で計画されたはずの地すべり対策工が、第1章に述べた大滝ダムの事例のように、十分な効果を発揮できないケースが散見される。このような事例は、いずれも地すべりの規模を見誤っていることに起因するものであり、地すべり規模を特定するための地形判読が重要な因子となることを示している。

本章ではすべり面を特定するための基礎となる、地すべりのすべり面のせん断破碎帯の構造を特徴について実際の観察と分析結果を述べる。ボーリングサンプリングの高品質化により、すべり面の粒度分布や粒子構造の特徴から、すべり面の分布を絞り込むことが可能である。すべり面の構造的研究の事例として取り上げた斜面は、明確な地すべり地形として活発な活動の痕跡として土粒子というミクロの現象だけでなく、地すべり移動による地形変化というマクロのスケールにも痕跡を残すものであり、地形判読技術と地すべりの破壊プロセスの因子を繋ぐ重要な事例である。

2.3 地すべりの移動現象と移動体内部の破壊構造の研究

第1章で述べたように、地すべりは、明確な境界面を持って健全な岩盤の上を滑落する現象と定義されており[1, 2]、すべり面は土木力学的にせん断面、と呼ばれる力学特性で理解できる。このメカニズムを知ることは、斜面の安定性を評価するために本質的に重要であるとともに、その地形への影響は判読技術に繋がる。地すべり内部の破壊構造とすべり面の破砕構造が観察された研究事例はあまりなく、地層境界などの力学的に弱面となりやすい部分がせん断面となることで、重力によって不安定化すると考えられている。またこれが断層運動と関連する場合もある事が報告されている[3, 4]。

多くの場合、地すべりは岩石の重力変形によって作られる[5, 6, 7]。これは地形的にも、第1章で述べた地すべり地形の特徴を持つ場所の調査でも明らかにされており、近年の不攪乱のボーリングサンプル技術により、地すべりの破壊メカニズムが明らかにされつつある[6, 7]。しかし、ボーリングコアはあくまで地表上の1点のデータであり、多点の調査ボーリング情報から立体的な地すべりの内部構造を観察した結果から、土木的な知見から解釈され、地すべり対策工へと繋がるケースが多い。

本章では、ダム貯水池の巨大地すべりにおいて、健全な岩盤とその上部を移動する地すべり土塊の破壊特性と地形への影響について述べるものである。この調査で特徴的な事実は、地すべり側部の、露頭の断面の観察で得られたサンプルと、破壊に伴う粒子構造の特徴である。調査ボーリングからは得られない、連続的な破壊構造の記録は非常に貴重である。この露頭では、地附山地すべりにも匹敵する深さ 60m の地すべりの破壊構造が観察できた。土木的な観点から地すべりの破壊構造を観察し、分析した事例はいくつかある。Henderson ら[8] は、ノルウェーの片麻岩の岩盤すべりの基底せん断帯を発見し、構造的な特徴、特に粒径と形状とせん断強度の関係を調査した。せん断強度は地すべり時のせん断による粒径の減少とともに低下することを述べている。この論文では、破砕構造の特徴の説明が十分になされていなかった。地すべりの場合、数100年、数1000年の時間オーダーでゆっくりと動き、地形的な変化を伴って地すべり内部も徐々に破壊されていく。

この地すべりは、調査当時、年間数 mm の変位を継続しており、明確な地すべり地形を判読できる箇所であった。この地すべりの内部の破壊構造を把握するために、国土交通省により調査された数十のボーリングコアとすべり面のせん断帯を含む地すべり側面のトレンチの観察を行った。

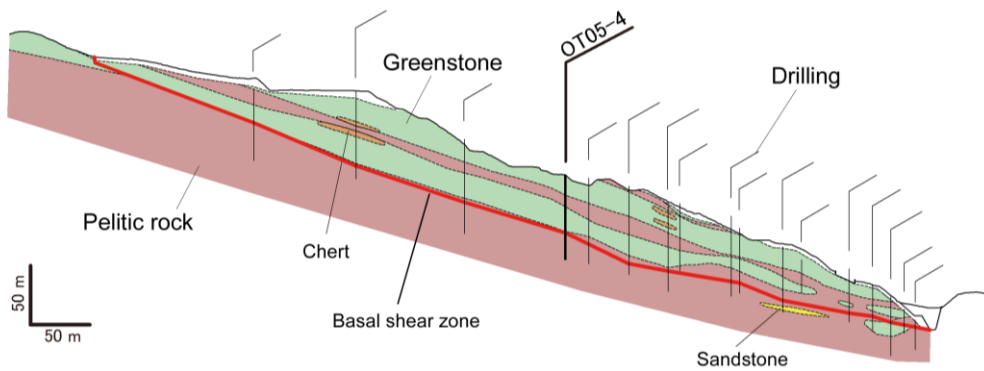
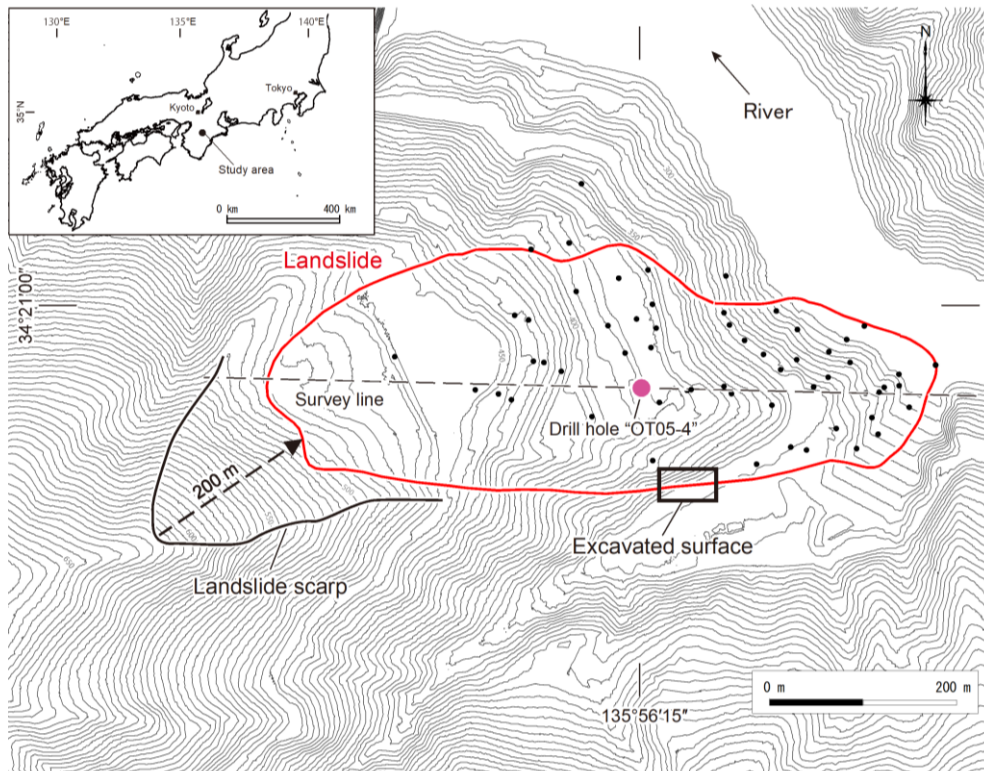


図 66 測線に沿った地形図と断面図. 国土交通省大滝ダム HP からの資料に一部加筆

2.4 トレンチにおける地すべり内部の破壊構造の観察とサンプリング

調査地は、後述の深層学習の対象地域と同様の地域に当たる奈良県南部である。地すべりの概要は、国土交通省近畿地方整備局の大滝ダム貯水池周辺地すべり対策委員会（2006） [9]で報告されたものである。岩質は、中硬岩が厚さ約 60m の地すべり土塊が北向きに移動していた。すべり面と地層の勾配は約 15° 東向きであった。地形的には、地すべり頭部に明確な滑落崖と緩斜面を持っている。地形的には、滑落崖の規模と形状から 200m 以上変位したと推察されている。露頭は地表面から約 60m に相当する地すべり側面に当たる。図 67 の 0m-10m 地点がすべり面の破砕帯に相当する。せん断帯の厚さは最大 6m 程である。スケッチを取得した位置は図 66 に示す。地すべりの移動により岩盤は破壊されて縦方向の亀裂が卓越している。

露頭を観察し、1/100 の縮尺でスケッチを作成し、せん断面の状態が良い場所から 10 個の不攪乱のブロックサンプルを採取した(図 67, 図 68)。サンプリングは、20cm 程度の間隔を確保しながら上部から下部に向けて採取した。ブロックサンプリングした地点では、粒度分析用のサンプリングも実施した。各ブロックサンプルは、乾燥させ、樹脂を含浸させた後、地すべりの移動方向に平行な垂直面に沿って切断した。図の数字の付いた四角は、採取地点を示す。(b)挿入図は、粘土質の材料の鏡肌が観察されるサンプル 4 の拡大写真。写真の位置は、図 67 と 4b に示される。

粒度分析は湿式ふるい分け法と沈降法(JIS1204, 2009 [10])により行った。せん断帯の相対位置による粒の形の変化を調査するために、サンプル 1~5 までの $\phi 2\text{mm}$ 以上の粒子について、真球度と真円度を測定した。測定した粒子は、ランダムに 200 個選定した。球形度は(a, b, c)1/3/aと定義され、a, b, c はそれぞれ岩石片を立体とみなした場合の長軸、中軸、短軸である [11]。円磨度は、断片の形状を Krumbein [12]の標準チャートと比較することにより評価した。球形度は、値が 1 に近いほど丸味を帯びていることを示す。

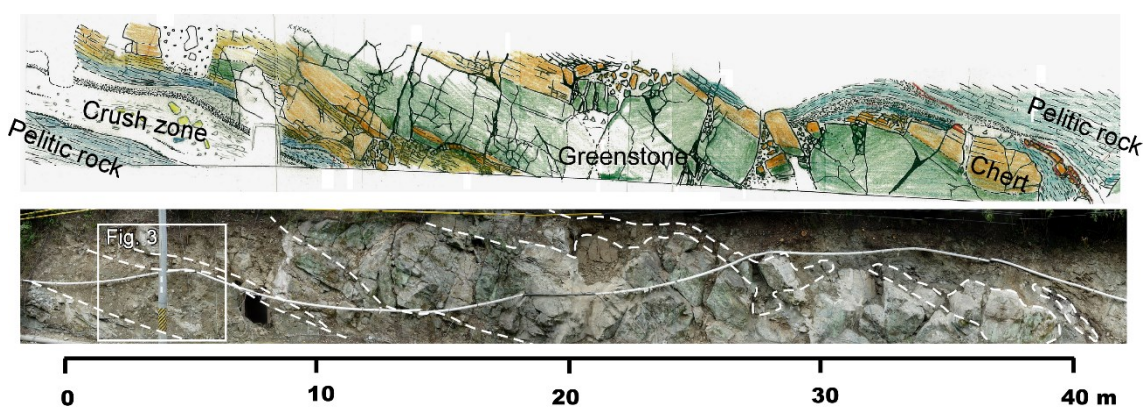


図 67 地すべりと基盤岩付近が露出したトレンチの写真とスケッチ

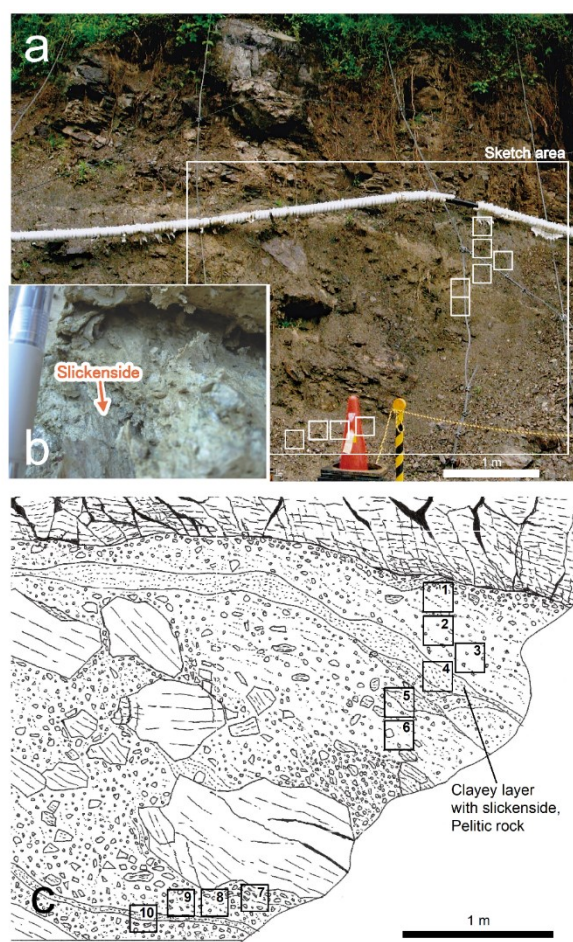


図 68 (a) 写真と (c) 破砕帯のスケッチの採取地点

2.5 地すべり面付近の破砕帯の特徴

破砕帯の観察を行った箇所を図 66 に示す。断面図の内、代表的なボーリング孔 OT05-4 のコア写真は図 69 の通りである。破砕帯は 47.8～48.6m の区間にあることがわかる。47.9m の深さで鏡肌が観察された。OT05-4 のせん断帯の厚さは約 1m で、トレンチの破砕帯より薄くなっており、地質の層序、構造が同じであるため、同じ破砕帯と特定でき、位置違いによる厚さの違いがあることがわかった。

図 69 の(a)は GL-47.8 ～ 48.6 m の基底せん断帯の掘削コア（矢印）、および基底せん断帯の上と下のコアである。この写真の深さ 47.8m から 43m のコアは健全な岩盤であり、RQD 値は 100%だった。写真(b)は、粘土質のコアの亀裂面に確認した鏡肌であり、すべり面のようにせん断面の裏付けとなる。

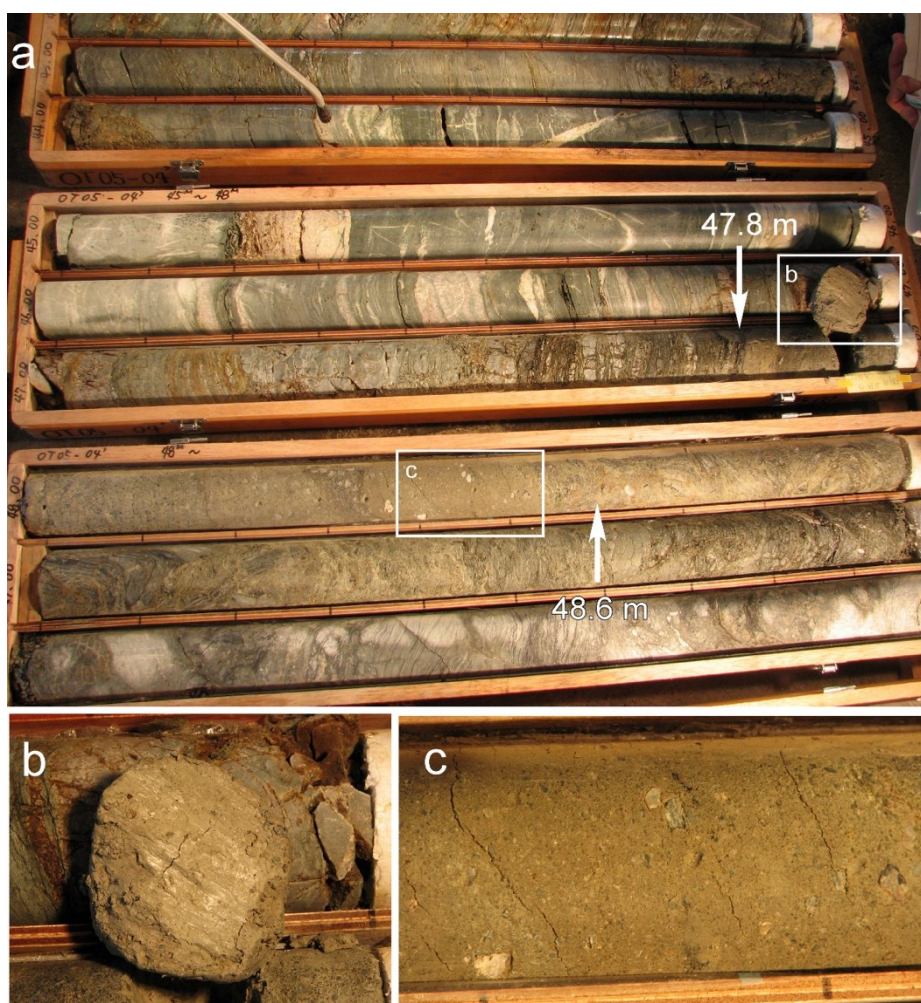


図 69 OT05-4 ボーリングコアと破砕帯部分の拡大写真

図 70 はブロックサンプリングしたサンプルを樹脂固定し、研磨したものがある。大きなせん断帯である破砕帯の一部分を拡大して試しているものであるが、一般的な土質力学で言うせん断運動に伴うせん断面 Y は明確に判別することができる。しかしながら、せん断面 Y に対するリーデルシア R1 や、P フォリエーションといった規則的亀裂や粒子配列を持たないものが多い(図 70a, 図 70 b; Rutter ら [13])。切断面は垂直で、スライド方向 (左上から右下) に平行。図中の(a)は、サンプル 2. 破砕流によって作られた破砕帯が発達し、P フォリエーションの方向に平行に配列する。写真(b)は、サンプル 4. せん断面 Y は発達している。岩石片の長軸は P フォリエーションの方向と平行に並んでいる。破線は、地すべりの移動により乗り上げた構造の部分を示す。この粘土層に含まれる岩片はサンプル 2 に含まれる岩片より丸みを帯びている特徴が見られた。

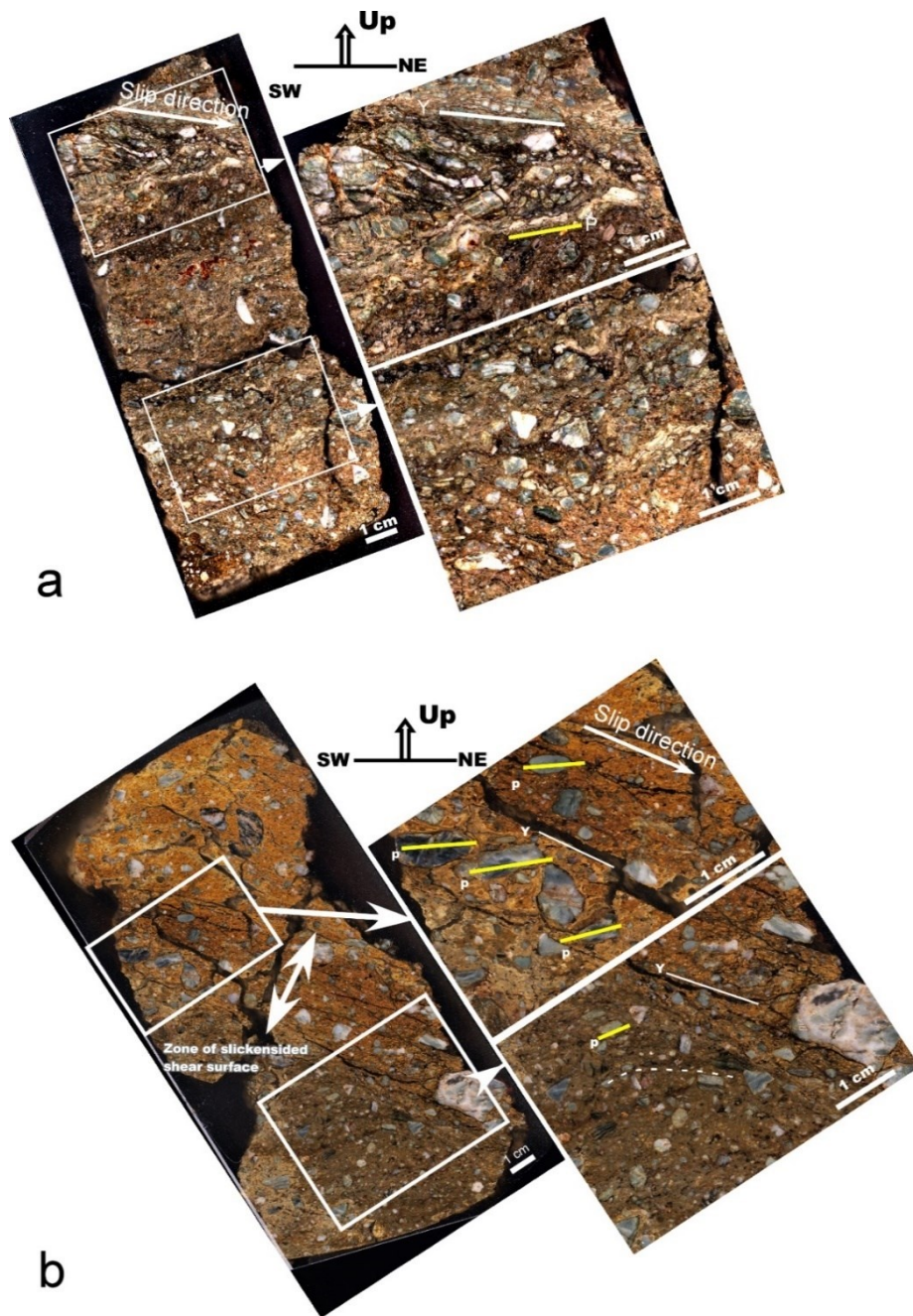


図 70 サンプル 2 と 4 の樹脂固定サンプルの研磨面写真

2.6 せん断破壊を受けた破砕帯に含まれる土粒子の特徴

図 71 はサンプル 1~10 までの破砕帯の粒径加積曲線と粒度分布の比率のグラフである。サンプル 1 から 7 で礫分, 砂分, 粘土分の割合を並べてみると, 対称的なパターンを示す(図 71)。粘土分の量($<74 \mu\text{m}$)はサンプル 4 で最大(35%)であり, サンプル 1, サンプル 7 に向けて減少する傾向にある(図 71b)。砂分の割合も同様のパターンである。礫分($>2 \text{mm}$)は逆のパターンを示し, サンプル 4 で割合が最も少なかったサンプル 6 から下位は乱れが大きくなり, 粘土分, 砂分, 礫分の割合の傾向にバラツキが生じている。粒径加積曲線と合わせて解釈すると, 破砕帯が形成し, 地すべりが移動する過程でせん断応力が不均質に作用したものであると推察する。

図 72 は, サンプル 1~5 の粒子の球形度と円磨度の変化を示したグラフである。(d)は球形度と円磨度の視覚的印象図である[12]。粒子の形の把握のために行なった球形度と円磨度の測定は, 破砕帯の上部から粘土質帯(サンプル 4 およびサンプル 5 で実施した。球形度はサンプル 1~4 (0.90) およびサンプル 5 (0.94) に向けて増加する。円磨度は平均値でサンプル 1~5 に向けて, 0.68 から 0.79 まで上昇する(図 72)。いずれも条線が認められたサンプル 4 に向けて, 丸みを帯びて, 円磨されていると解釈できる。元々の岩片の尖りが長距離の地すべり移動によって摩耗し球に近い状態になったと推察する。

(a)の全体の粒径加積曲線を見て, グラフの傾きが類似することから破砕帯全体が同様の地すべり移動を受けて概ね均質な粒度分布をなしていると考えられる。長時間, 長距離移動による地すべり土塊や基盤岩との境界面であるすべり面の工学的特性を明らかにすることは, 地すべり移動の結果表現される地形への解釈につながり, 判読技術を習得にあたっての深い地形地質の理解に繋がる。

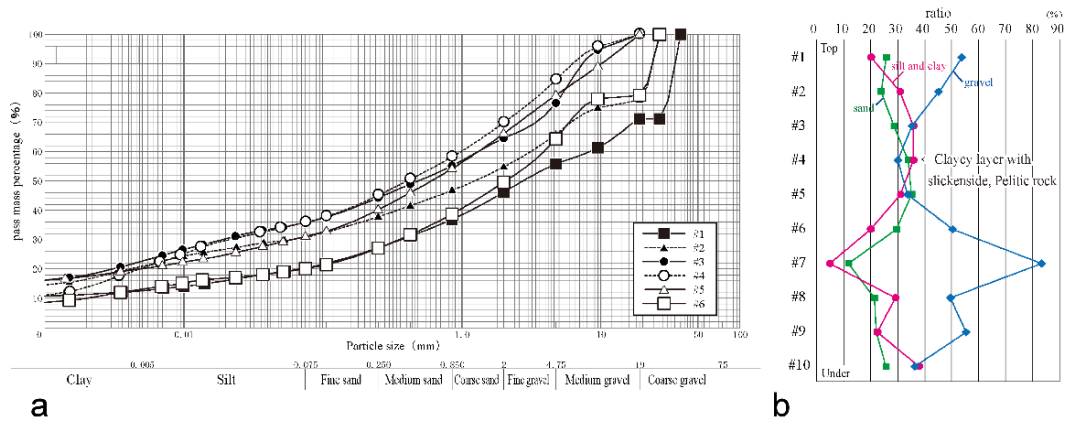


図 71 粒度分布曲線と粒度分率の比率

2.7 第2章まとめ

第2章は、地形判読技術の向上に資する研究を進める前段として、すべり面の存在と地すべりの活動、地すべり地形の形成について、研究背景を述べた。地すべり地形が形成するメカニズムを整理し、地すべり地形の特徴が移動体の岩盤の破壊と密接な関係があることを示した。地すべりは地盤深部の健全な岩盤と移動体との間に形成されるせん断面が連続することにより移動し、移動距離が長いほど、せん断帯とその周辺の粒子は細粒化する。岩盤が重力により破壊され、地すべりとなって移動を繰り返し、健全な岩盤との境界は、岩石、土粒子が細粒化することにより土質的に強度低下を起こすため、地すべりはさらに動きやすくなる。一度すべり面が形成すると、重力の作用と降雨に伴う地下水の上昇等により、繰り返し活動を続け、結果として地すべり地形を形成する。地すべり地形は、こうした岩盤の破壊プロセスの表れであり、この地形を判読することは、斜面変動のリスクを読み取ることと同義である。故に判読技術を向上させることは、斜面災害発生場の事前予測技術高度化に繋がるため、意義と必要性があると言える。

引用文献

- [1] Varnes, D.J. : Slope movement types and processes, in: Schuster, R. J. Krizekeds, (Eds.), Special Report 176 : Landslides: analysis and control. Washington, D.C., TRB, vol. 176, 1978.
- [2] Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. : The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 2014.
- [3] Yamane, M., Yamada, M., Sengoku, A., Wakizaka, Y. & Akamatsu, K. : Composite planar fabrics capable of distinguishing between slip surface clay and fault gouge - An example of landslide of accretionary complex in the Chichibu Belt-. *Journal of Japan Society of Engineering Geology*, 56, 2015.
- [4] Arai, N., Chigira, M. : Rain-induced deep-seated catastrophic rockslides controlled by a thrust fault and river incision in an accretionary complex in the Shimanto Belt, Japan. *Island Arc*, 27, 2018.
- [5] Lettis, W.R., Kelson, H.I., Hanson, K.L. & Angell, M.A. : Is a fault a fault by any other name? Differentiating tectonic from nontectonic faults. In: Hunger, O. & Moore, D. (eds.) 8th International Congress of the IAEG. Taylor & Francis, Vancouver, 1998.
- [6] Chigira, M., Hariyama, T. & Yamasaki, S. : Development of deep-seated gravitational slope deformation on a shale dip-slope: observations from high-quality drillcores. *Tectonophysics*, 605, 2013.
- [7] Wakizaka, Y. : Characteristics of crushed rocks observed in drilled cores in landslide bodies located in accretionary complexes. *Tectonophysics*, 605, 2013.
- [8] Henderson, I.H.C., Ganerod, G.V. & Braathen : A. The relationship between particle characteristics and frictional strength in basal fault breccias: Implications for fault-rock evolution and rockslide susceptibility. *Tectonophysics*, 2010.
- [9] Committee for the landslides around the Otaki dam reservoir (CLOD) : summary of the investigation of unstable slopes around the Otaki dam reservoir.
- [10] JIS 1204 : Test method for particle size distribution of soils. Japanese Industrial Standards. 2009.
- [11] Rittenhouse, G. : A visual method of estimating two-dimensional sphericity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 13, 79-81.
- [12] Krumbein W.C. 1941. : Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11, 64-72.
- [13] Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H. & White, S.H. 1986. : Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *PAGEOPH*, 124, 3-30.

第3章 深層学習モデルによる地すべり地形判読手法の検討

3.1 地すべり地形判読に深層学習を適用する意義

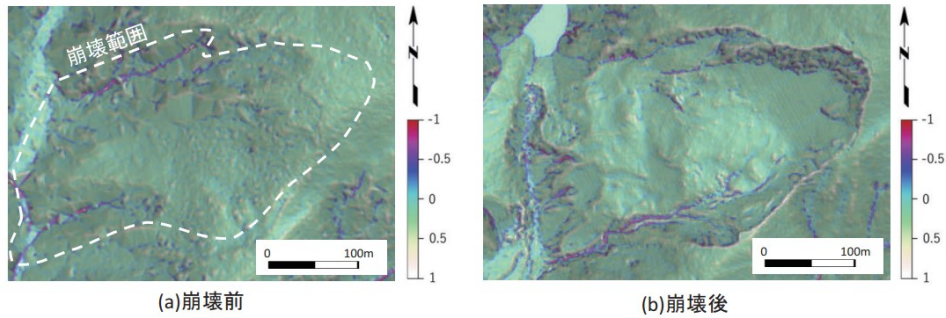
地すべり地形は、従来専門家の経験的則のみで地すべり地形の位置や境界線を描かれ、特定されていた。地形判読技術は、熟練技術者により行われることで、災害発生場を精度良く抽出することが可能な技術である。その一方で、判読により作成される結果に誤差が生じやすいという課題がある。判読技術は、属人性と判読技術を習得に長い年月を要することから、技術者不足に苛まれる近年においては、技術継承が年々困難になりつつある。

ここに、本論は、地すべり地形判読技術に迅速性と客観性を持たせる技術として、深層学習による地形判読技術の学習を行い、迅速化をもたらすとともに、土木技術の専門的知見を踏まえたデータの活用方法について言及する。深層学習を用いる事で、他地域で行う個々の判読に対して、客観的な判定結果としてAIの活用が期待され、地形判読による地すべりの危険箇所を効率的に行う事に繋がる点に意義をもたらすと考える。

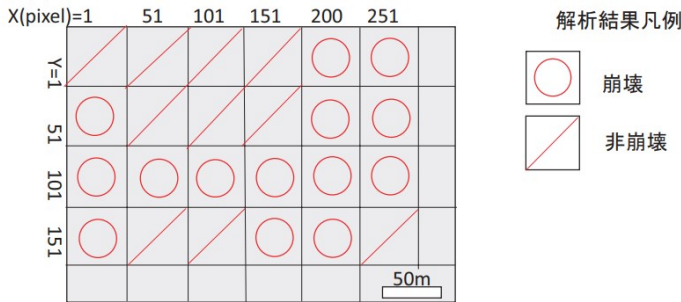
3.2 地すべり危険箇所を判定する深層学習の適用事例

機械学習や深層学習を用いて地すべり地形判読が行われた研究は、世界的にまだ少ない。深層学習により、崩壊地を、崩壊・非崩壊として分類を試みた事例に菊池[1]の研究がある。菊池らは、紀伊半島水害の深層崩壊を対象に、崩壊発生後の地形と被崩壊箇所の地形を深層学習し、グリッドに分割した地形タイル毎に崩壊の発生か非発生の分類を行った。この研究では崩壊発生地を2値分類で90%正解するモデルを構築している(図73)。しかしながら、発生後の崩壊においてのみの検討であり、前兆現象を持つ地すべりへの適用はされていない。

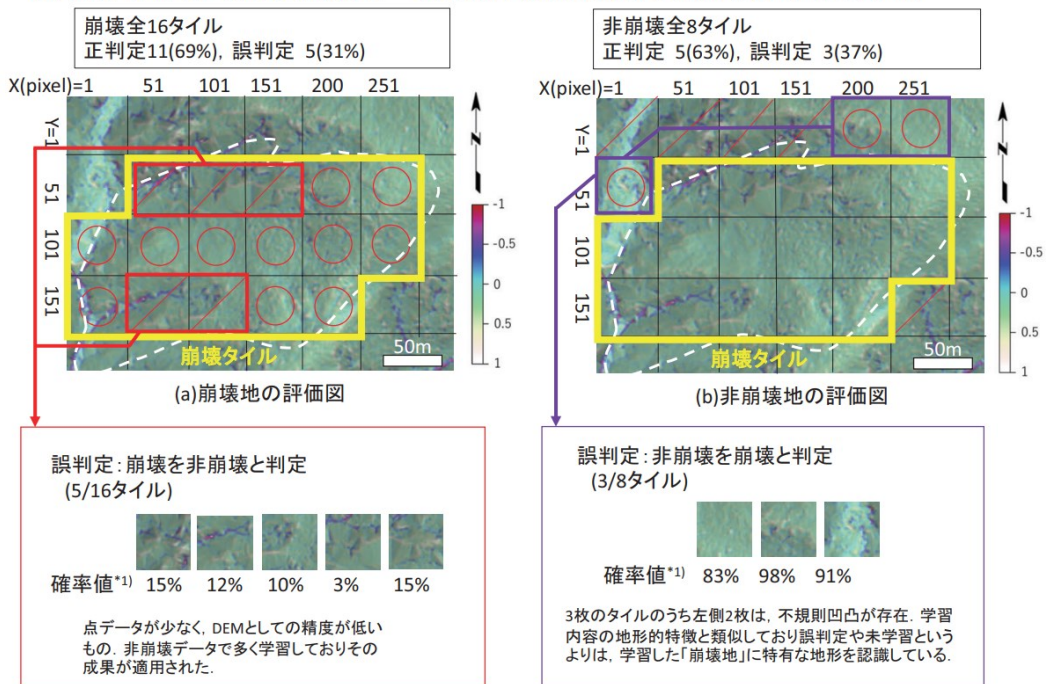
(1) 解析前の微地形強調図



(2) 学習済みモデルによる解析結果



(3) 崩壊・非崩壊に関わる検討結果 (崩壊前の微地形強調図と解析結果の重ね合わせ)



*1) 確率値とは、50%以上で崩壊、50%未満を非崩壊とした各タイルの精度

図 73 崩壊地の正誤判定評価結果 [1]より引用

3.3 本論の検討手法

本論の深層学習による地すべり地形判読の手法について以下に述べる。

深層学習による認識，検知，分析等の技術は，様々な分野での導入が始まっており，斜面防災分野でも土砂災害の発生場予測技術等の研究開発が進められている。

地形判読は，第1章，第2章で述べたとおり，土砂災害発生場を予測する手法として従来行われてきた技術の一つであり，判読技術者の専門的知見が必要とされる．近年，レーザプロファイラ測量技術が開発されて以降，地形から多くの情報が短時間で得られるようになった一方で，課題として判読技術者は，緻密な精度で広大な面積を判読する必要がある等，負担となる側面がある．

深層学習を用いた土砂災害発生場予測の研究例として，野呂他[2]は日本全国の地図タイル（3次メッシュ=1km）を標高，傾斜，曲率，地質を入力情報として教師なし学習を行った．その結果，土砂災害発生場のタイルが，技術者視点で抽出した土砂災害の発生素因毎に分類できることを提示した．また，荒木[3]は，数値地形情報を深層学習することにより，地すべり地が存在する画像を分類する試みを行っている．

本論は，土砂災害発生場の予測手法の開発および判読技術者の負担軽減に資する研究として，地すべりを例に，その具体的な位置や形状の情報を抽出することを目的として，教師有り深層学習による学習を行い，地すべり地形の自動抽出を試みた．図74に深層学習による地すべり地形判読の流れを示す．

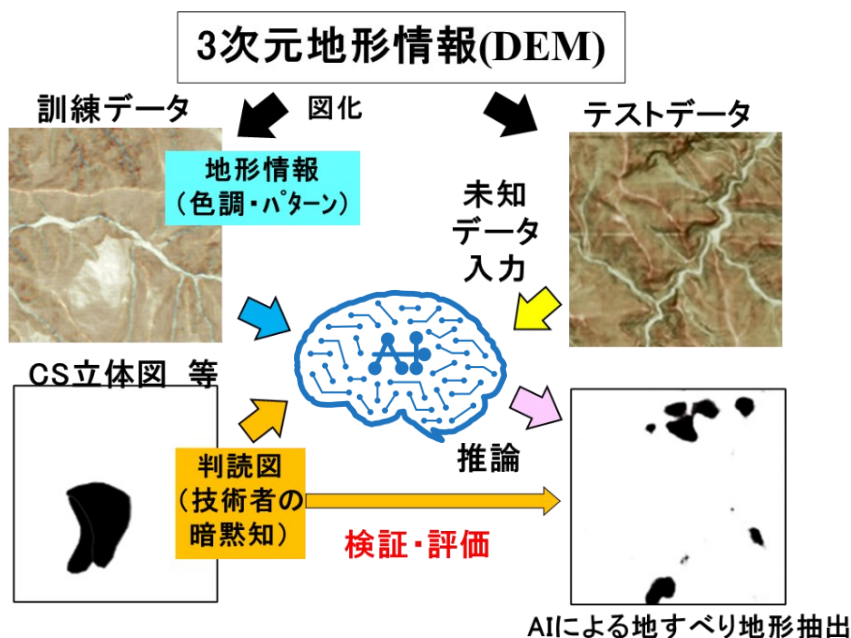


図74 深層学習による地すべり地形判読の流れ

3.3.1 検討に用いるデータ

本論では、オープンデータ化された地形情報や地すべり情報を用いて、深層学習で用いるデータを作成した。地形情報は、国土地理院から提供されている地図タイルを使用し、地すべり情報は防災科学技術研究所が作成・公開している 1:50,000 地すべり地形分布図[4]を使用した。なお、検討対象とした地域は、斜面変動地形が多数分布する地質帯-付加体地域の奈良県南部とした。

本研究では、1:50,000 地すべり地形分布図の地すべり範囲を、画像としてそのまま入力した。技術者は、地形判読する際、地形図や空中写真において、色調 (RGB) の違いを区別し特徴を捉えている。そこで、深層学習では一般に入出力の因果関係がブラックボックスとされる中で、技術者が捉えた特徴を持つ画像をそのまま用いることにより、学習の結果として生成される画像や、学習に用いた教師データの影響を解釈しやすくなると考えた。

地すべり地形の自動抽出の研究事例として、篠原他[5]は、地形の標高、傾斜、傾斜方向の 3 要素を深層学習の入力情報とした地すべり地形の自動抽出を行っている。

本研究では、地形の傾斜量や曲率を色調差で表現し、地形の凹凸を視認しやすく、地形判読を行う上でも有効とされる RGB 画像の CS 立体図[6]を採用した (図 75)。作成した CS 立体図と作成時のレイヤ設定を図 76 に示す。CS 立体図の初期レイヤ構成は、slope レイヤと curvature レイヤが 2 つずつである。本研究では、図 76 右表のようにレイヤとカラーランプ、透過度を設定した。

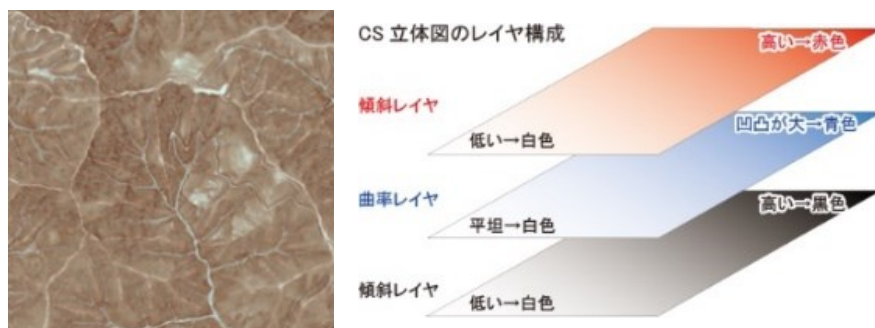
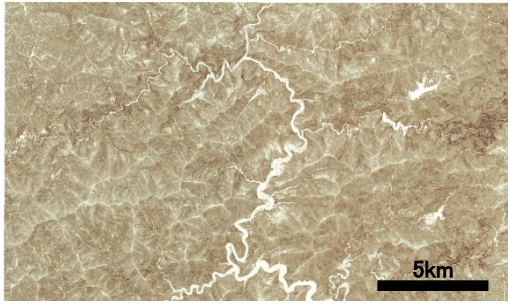


図 75 CS 立体図の作成例(国土地理院 5mDEM より作図 (1 辺 2km))



番号	レイヤ	色調設定		透過度 (%)
		低	高	
1	slope			50
2	curvature			50
3	slope			50

図 76 CS 立体図の作成例 国土地理院基盤地図情報の数値標高モデル(5m メッシュ)より作図

3.3.2 深層学習の実装環境とアルゴリズム

深層学習の実装環境を表 6 に示す. CS 立体図から地すべり地形を抽出するために、「pix2pix」[7]を用いた. pix2pix は GAN (敵対的生成ネットワーク- Generative Adversarial Network) および画像系の DNN (Deep Neural Network) で構成されており, 対となる画像の関連性を学習した上で, 「画像で入力」し, 「画像で出力」する事ができる汎用性が高いネットワークとして知られており [8], 視覚的に認識している特徴を持った画像をそのまま学習させることができる利点がある. 図 77 は pix2pix のイメージ変換例である. 2 つのペアの画像から画像間の関係を学習することで特徴量を捉え, 入力画像に対して学習結果を反映した画像を出力する. 図 78 に pix2pix を用いた地形判読画像生成の考え方を示す.

表 6 本論における深層学習の実装環境

ハードウェア	CPU	Intel core-i7-7700
	メモリ	16GB
	GPU	NVIDIA GeForce GTX 1080 (8GB)
ソフトウェア	OS	Windows10 (64bit)
	プログラム言語	Python 3.6.2 (Anaconda3.5)
	フレームワーク	Tensorflow (google 社)

Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks

Phillip Isola Jun-Yan Zhu Tinghui Zhou Alexei A. Efros

Berkeley AI Research (BAIR) Laboratory, UC Berkeley

{isola, junyanz, tinghuiz, efros}@eecs.berkeley.edu

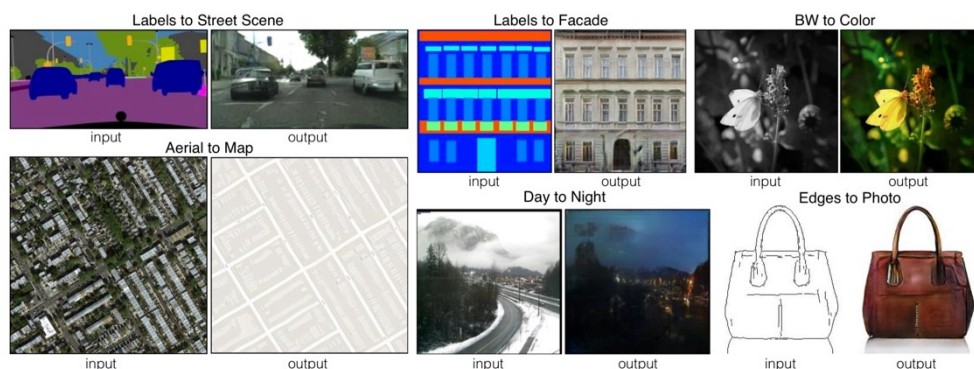


Figure 1: Many problems in image processing, graphics, and vision involve translating an input image into a corresponding output image. These problems are often treated with application-specific algorithms, even though the setting is always the same: map pixels to pixels. Conditional adversarial nets are a general-purpose solution that appears to work well on a wide variety of these problems. Here we show results of the method on several. In each case we use the same architecture and objective, and simply train on different data.

図 77 Pix2pix のイメージ変換例 <https://phillipi.github.io/pix2pix/> より

一般画像での適用例



地すべり地形判読への適用例

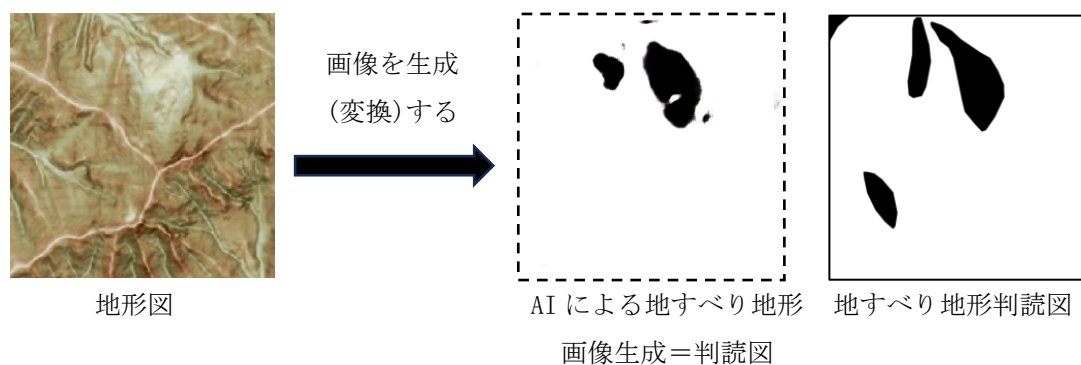


図 78 Pix2pix を用いた地形判読画像生成の考え方

3.4 AI が認識しやすい画像の色調の検討

3.4.1 教師データの作成

pix2pix に入力する教師データと正解データは図 79 のように作成した。画像 A の地形図に対して、1:50,000 地すべり地形分布図の地すべり移動土塊の位置関係を画像 B としてペア画像としたものである。これにより、CS 立体図の色調で表現された地形表現と地すべり形状の関係を学習させることができると考えた。

図郭に適用する地形図のサイズは、1 辺を 1km とした。作図の際は、1km² の図において 1:50,000 地すべり地形分布図に判読されている地すべり移動体を概ね包括できること、また、入力画像を 256pixel に変更した際、地すべりの微地形が不明瞭にならないことを留意した。調査対象エリアの地すべり移動体平均面積は、0.2 km²程度であり、地すべり幅は 150m~200m のものが主であったため、地すべり移動体と滑落崖等周辺地形が 256pixel×256pixel の画像中に収まるサイズとして設定したものである。

AI が認識しやすい画像の色調を検討するための検討として CS 立体図の色調は、CS 立体図作成時のプラグイン実行におけるデフォルトの値のままとした。地すべりデータとして pix2pix に入力する画像の画像 A に対して画像 B は、背景を白色として、地すべり地形分布図の地すべり移動体は赤色とした。



図 79 pix2pix の教師・正解データの作成例

3.4.2 教師データの作成方法と AI が学習する特徴把握のための画像加工

(1) 教師データの拡充と画像の鮮鋭化

地形データと地すべりデータをそれぞれ図 80 のように対象範囲をグリッド状に分割することで作成した。初段階では教師データは 885 枚を教師データとして学習に用いた。なお、テストデータは評価に用いた。

AI が効率的に学習を行うための手法として、ここでは AI の特徴抽出の性能を踏まえた 2 つの観点で教師データ選別を行った。

AI が画像から特徴を捉えるためには、一般に多量なデータが必要とされている。このため、限られたエリアから作成する教師データは、可能な範囲で拡充を行う。

グリッド分割をする場合、AI が学習をするための画像として、ふさわしくない捉える色調の特徴は地形判読技術者が判読に際して着目する地形要素を教師データに含めることの 2 点である。

教師データの設定方法の変更点の 1 つ目として、教師データの拡充を図った。図 80 のようにグリッド状に分割せず、3/4 程度重なるように (1/4 の距離) 縦、横方向に範囲をスライドさせながら分割した(図 81)。これにより深層学習では画像中の色調変化の位置関係、すなわち、地すべり移動体とその周辺地形をくまなくとらえることができると考えた。こうしたデータの増しは深層学習を行う上では有効な加工技術である。一般的には、回転・反転、拡大等も考えられるが、本検討では地すべりが滑動する方位、規模を重視するため、回転・反転、拡大は行わず、スライドのみの処理を行った。

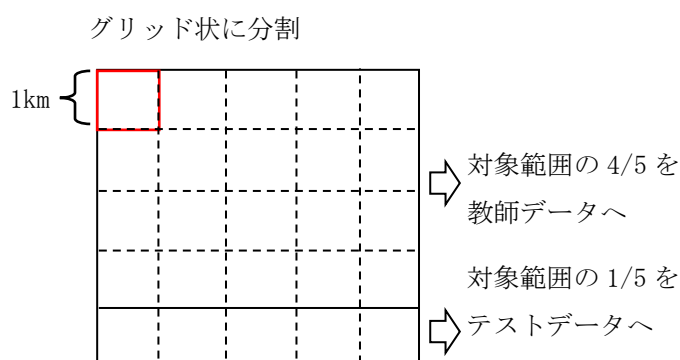


図 80 グリッド分割による教師・テストデータの作成

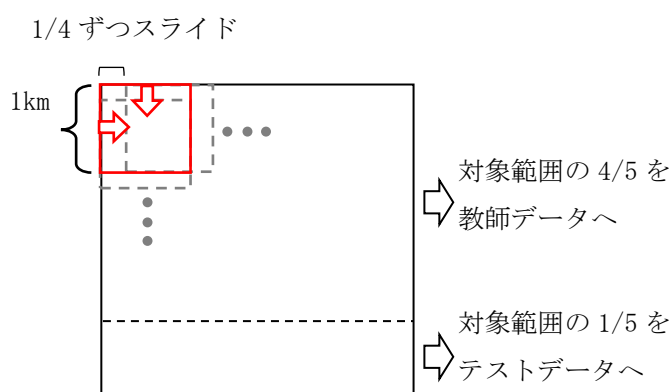


図 81 スライドによる教師・テストデータの作成

3.4.3 調査対象地と教師データとテストデータの区分

教師データとテストデータのエリア設定を図 82 に示す。対象地域は斜面変動地形が多数分布する地質帯-付加体地域の奈良県南部に設定した。3.4.2 のとおり、対象範囲の一部を検証データとし、残り全てを教師データとした。この地域の地すべりには、第 2 章で述べたとおり、地質構造や斜面勾配、地すべり規模、地すべり滑動方向等の共通点がある。

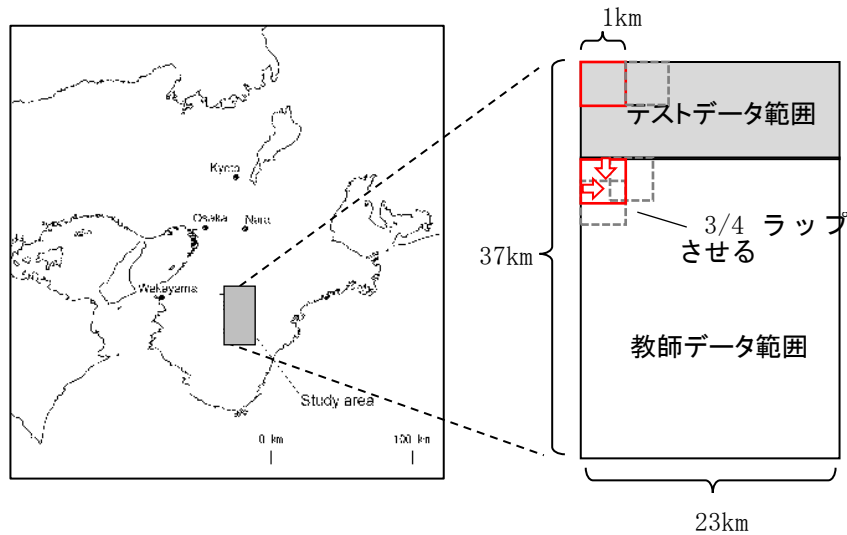


図 82 対象エリアと深層学習用画像データの分割

3.4.4 地形判読技術者の視点による教師データの改善

深層学習による地すべり地形抽出の精度向上のために、明瞭度が高い地すべり地形の選別を選別した。地形判読技術者が地すべり地形を判読する際、着目する地形要素に、図 83 に示す「滑落崖」と凹地や副次滑落崖からなる「頭部緩斜面」がある。防災科学技術研究所の 1:50,000 地すべり地形分布図では、地すべり地形の滑落崖および移動体の輪郭の明瞭度が示されている(図 84)。滑落崖は周辺斜面より急で、馬蹄形の形状を形成しやすいこと、変動量大きい(あるいは新鮮な)地すべりほど、移動体の輪郭が明瞭に区別しやすいことが知られており[10]、判読時に個人差によるばらつきが出にくい地形要素である。

- ① 地すべり移動体がフレームアウトした画像の除去
- ② 地形判読技術者の視点として、教師画像中に地すべり地形を含まない、あるいは大きく欠けているものは、深層学習で地すべり地形を認識させる上で不要と考え、除外した。目安として画像中に地すべり地形頭部を含めて概ね 50%以上含むものは教師データとした。選別後の教師データ数は 1021 となった。

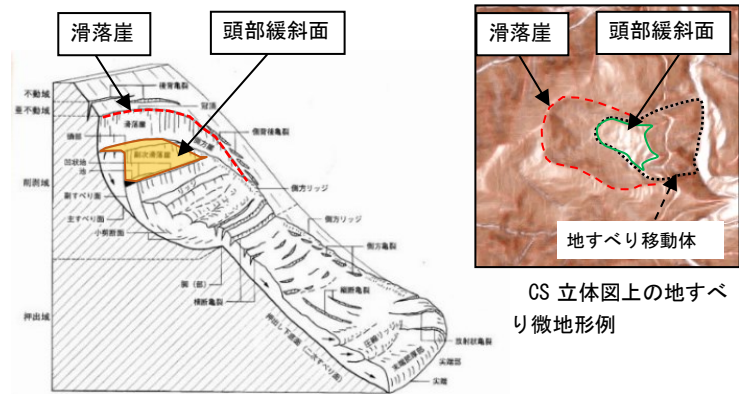
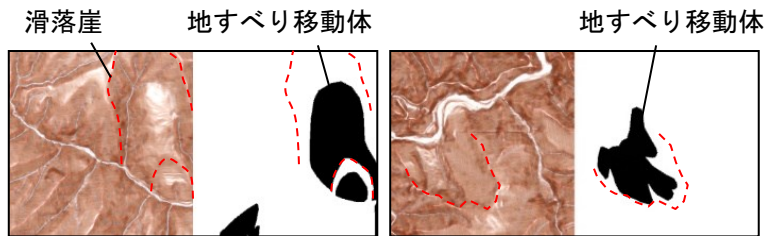


図 83 着目する地すべりの微地形 [10]に一部加筆



移動体の輪郭・境界		防災科学技術研究所 1 : 50000 地すべり地形判読図凡例より
	後方に滑落崖があり、移動体の輪郭が明瞭ないし判定可能	
	後方の滑落崖は明瞭であるが、移動体の輪郭の判定が困難	
	滑落崖はほとんど開析されてしまったが過去の移動体の一部が残存している	

防災科学技術研究所 1 : 50,000 地すべり地形分布図凡例に一部加筆

図 84 地すべり地形の明瞭度の考慮した教師データ例

3.4.5 pix2pix のハイパーパラメータ調整

学習及び画像生成に用いた pix2pix について、変数となるハイパーパラメータの調整を行った。調整は、学習回数 (epoch)、バッチサイズ (batch size) のみとし、他のパラメータは pix2pix 実装段階から変更を加えず、予め設定されている初期値を用いた。なお、変数の変更範囲は epoch を 50~500、batch size を 1~16 とした。深層学習が正常に進んでいる状況は、図 85 のように損失関数 (loss) にて誤差の値が収束に向かっていくことで確認を行った。図は正常に学習が進んでいる状態のものである。一方で図 86 は、過学習の状態を示すグラフである。AI は、特徴はつかみつつも、学習が進みすぎると過学習が起こり、正常な学習結果が得られないため、このような傾向が見られた学習パラメータは不採用とした。

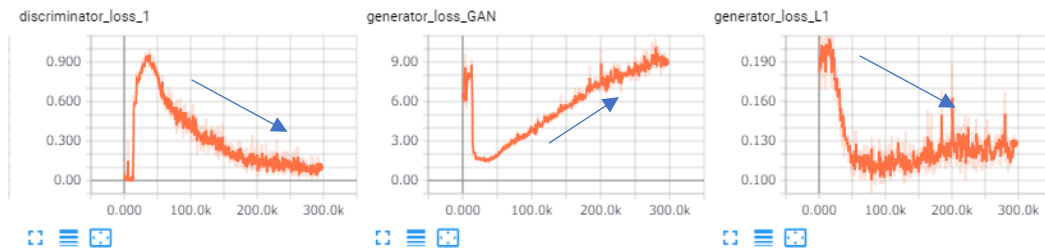


図 85 正常に学習できている損失関数グラフの例

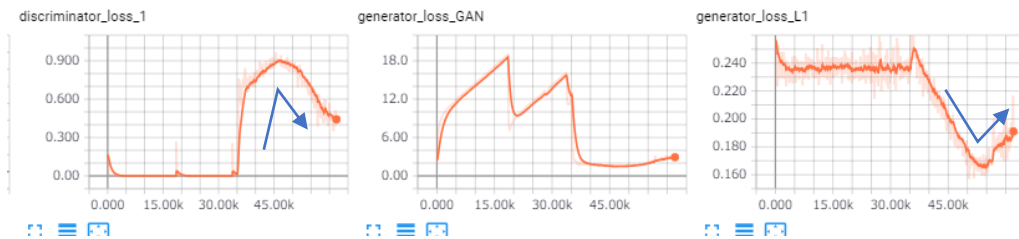


図 86 過学習を示す損失関数グラフの例

3.4.6 生成した画像の評価方法

深層学習で地すべり地形を推論した画像の評価は、一般に機械学習の評価で用いられる再現率、適合率を用いた。これらの算出には、①深層学習で生成された地すべりの推論範囲と、正解と設定した地すべりデータ (1:50,000 地すべり地形分布図の地すべりの移動土塊) と一致する面積 (抽出面積)、②推論結果から抽出面積を引いた面積 (誤判読面積)、③正解データの面積から抽出面積を引いた面積 (判読漏れ面積) を用いた。再現率と適合率は以下の計算式となる。

$$\text{再現率} = \frac{\text{①抽出面積}}{\text{①抽出面積} + \text{③判読漏れ面積}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{適合率} = \frac{\text{①抽出面積}}{\text{①抽出面積} + \text{②誤判読面積}} \dots\dots\dots (2)$$

3.4.7 AI が認識しやすい画像の色調の検討における推論結果

(1) 地形判読技術者の視点による教師データの改善前の推論結果

対象範囲のテストデータにおける画像生成結果のうち、代表的な結果を図 87 に示す。若干ではあるが、地すべり地形を再現している傾向が認められる(図中○)。適切に地すべり移動体は抽出できたケースが一部あるものの、地すべり地形の特徴を捉えている割合は低かった。この再現率と適合率はそれぞれ 0.13 と 0.10 であった。再現率、適合率は低いものの、地すべりの滑落崖や頭部緩斜面に当たる部分を認識している傾向が確認された。

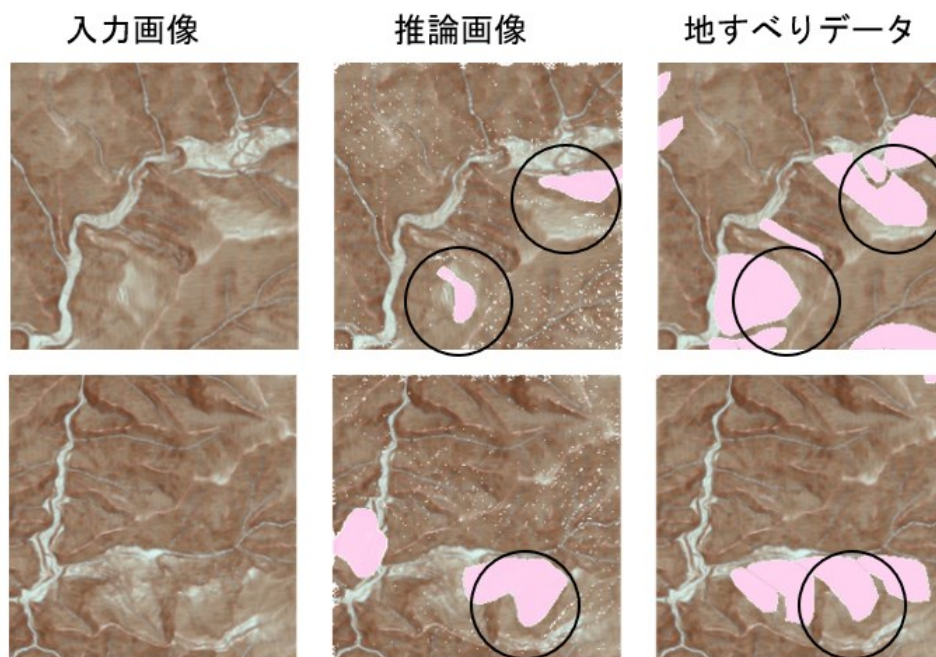


図 87 地形表現図および地すべり移動体の色調変更前の推論結果

(2) 地形判読技術者の視点による教師データの改善後の推論結果

教師データの地形表現図および改善を検討したケースにおいて、再度学習・検証を行った結果、深層学習で生成した地すべり範囲の中には、画像毎に再現率、適合率が異なるものがあった。検証範囲全体平均の再現率、適合率はそれぞれ、0.38、0.50 と教師データの改善前に比べて向上した。

地すべりデータに対して深層学習による推論画像が一部でも重なっているものを抽出できたとした場合、地すべりデータ 190 箇所に対して、推論画像は 101 箇所抽出 (53%) している結果となった。

(3) 地すべりデータと同位置の抽出結果が得られた事例

推論画像の例を図 88 に示す。図中の○のように、正解の地すべりデータに対して比較的近い形状の地すべり移動体の形状が生成された。推論した移動体の周辺地形を見ると、滑落崖や頭部

緩斜面を比較的明瞭に確認できるものが多く、選別した教師データの特徴を捉えられているとみられる。ただし、地すべり地形分布図の形状の再現は困難であった。また、小規模の地すべり地形は抽出できていない傾向が認められた(図中の点線○)。

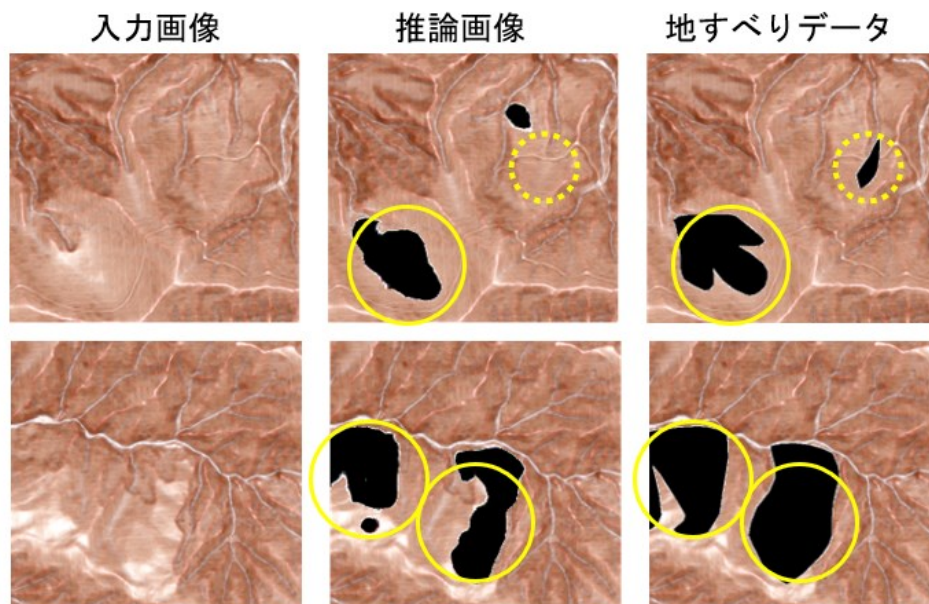


図 88 地形表現図および地すべり移動体の色調変更後の推論結果

地すべりデータに対して誤判読の出力画像の特徴

正解の地すべりデータに対して、深層学習による推論が誤判読あるいは過剰に抽出を行ったために再現率、適合率が相対的に低く算出されている結果も存在した。この解釈として2つのパターンがある。

(4) 明瞭な滑落崖や緩斜面、移動土塊の輪郭を持たない地すべり

図 89 の○の位置は、正解データで地すべりとされているが、深層学習で推論できなかった箇所である。これらの地すべりは明確な滑落崖や緩斜面を持たず、輪郭も不明瞭に見えることから、教師データに無い地すべり地形には対応できていない可能性が高い。また、地すべり地形の大部分が欠けている場合も推論不能となっている。

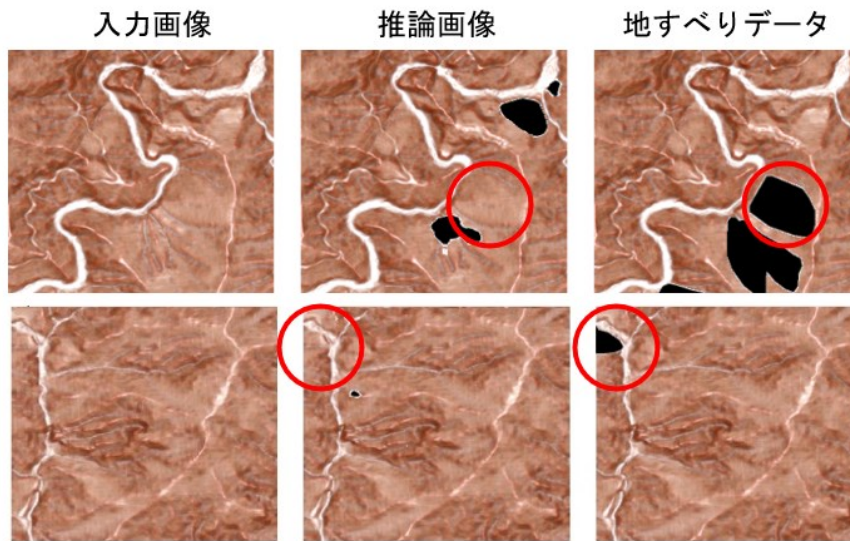


図 89 誤判読の画像例

(5) 深層学習により過剰抽出される地すべり移動体

図 90 は、深層学習による過剰反応した範囲が、地すべり範囲を抽出した例である。図中○部分は、地すべりデータ中に地すべり地形が存在しないが、推論画像には地すべりとして着色がある。この箇所は、地形判読技術者の観点から見ると地すべり地形として判読可能な箇所である。

このように AI の過剰抽出箇所が地すべり地形を呈している事例は一定の割合で出力結果に含まれており、その割合を確認したところ、合計 95 箇所の内、68 箇所（約 72%）であった。

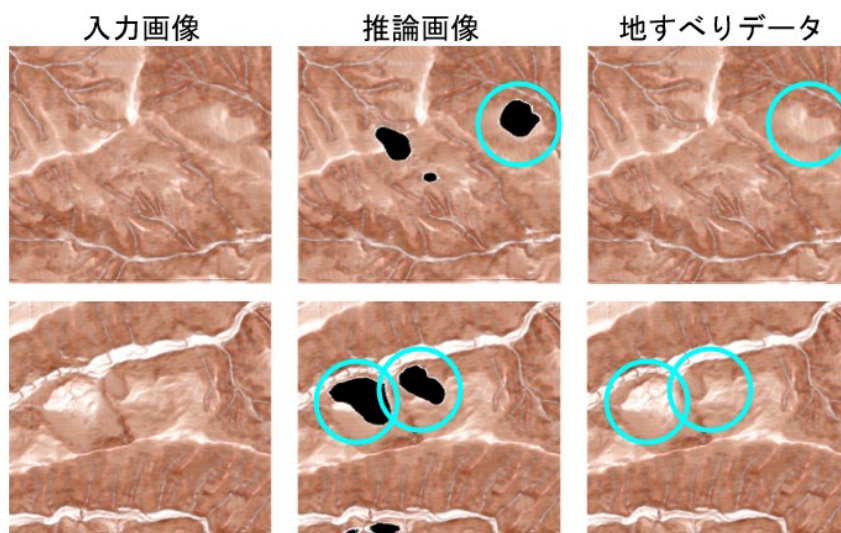


図 90 AI の過剰抽出箇所が地すべり地形と判定できる画像例

3.5 地形表現図の違いに着目した深層学習の推論精度の検証

3.5.1 検証の対象とする地形表現図

図 91 に地形図による地すべり地形の表現図による違いを示す。ここでは、前節および[11]の手法を元に、技術者が判読する際に用いる地形表現図の違いによって AI が学習・推論可能な精度の違いを検証する。前章では、少ないデータでも教師データを専門技術者の知見を含めることによって地すべり危険箇所の抽出が可能である事がわかったため、判読技術者が用いる地形表現が見やすい CS 立体図のような三次元立体表現図と、古くから用いられている等高線図との比較を再現率や適合率等の AI の指標のほか、判読技術者の目線からの検証を行い、判読技術に対する深層学習の有効性を評価する目的である。

等高線図は、従来の地形判読の基図として用いられることが多く、数値標高モデルが活用されるようになってからは、傾斜量図のように地形量を可視化する表現図が用いられるようになった。レーザープロファイラ測量技術が確立して以降は、地形判読には立体的に地形を表現する図法が主体となりつつあり、代表的な表現図として赤色立体地図がある。

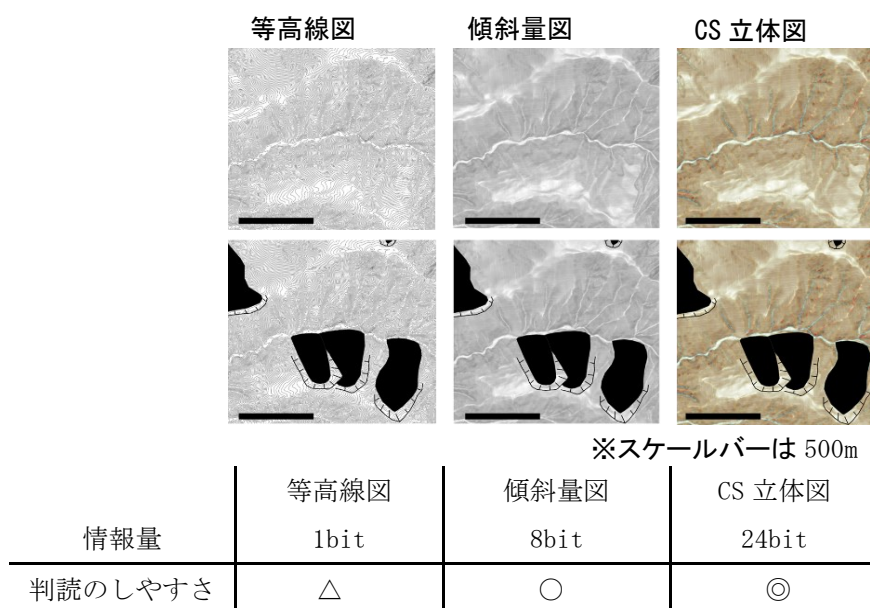


図 91 地形図ごとの情報量と地すべり地形表現の違い（上：地形図，下：地形図に地すべり地形分布図を重ねた画像）

3.5.2 学習データの作成と深層学習の実行

(1) 数値標高モデルからの4種類の地形表現図作成

深層学習に用いた地形表現図は QGIS で作成した。作成した地形表現図は等高線図, 傾斜量図, CS 立体図, 鮮鋭化した CS 立体図の4種類である。地形情報は, 3.3 章と同様に, 国土地理院から提供されている基盤地図情報の数値標高モデル (5m メッシュ) を使用した。等高線図は, GIS のラスタデータ解析ツールから等高線間隔 10m として生成し, 1bit 画像とした。傾斜量図は, 等高線図と同様のラスタデータ解析ツールを利用し, 傾斜の緩急を 8bit のグレースケールのグラデーション表示した画像とした。

CS 立体図は, 3.2.1 節の通り, 傾斜及び曲率レイヤを構築し, 透過度を設定し, 作成した。加えて, ここでは CS 立体図に鮮鋭化処理を加えた図も検証対象とした。技術者が判読時に図面の視認性を向上させる方法として, 画像の鮮鋭化が有効である場合がある。深層学習において, 学習データに微地形の凹凸や勾配変化点等の視認性を向上させることの有効性を定量的に評価する。なお, 鮮鋭化処理とは画像のコントラスト, 彩度を強調する処理を示す。

(2) 学習データの作成

地すべり地形判読の深層学習に用いた学習画像の例を図 92 に示す。深層学習によって地すべり地形の抽出を行うための「正解」とするデータは, 3.3 章と同様に防災科学研究所が発行する地すべり地形分布図を用いた。

学習データは, 画像 A が入力画像, 画像 B が正解画像として, 画像 A の地形図と画像 B の地すべり地形分布図を組み合わせた画像とする。学習データ画像のサイズは, 256 ピクセル×256 ピクセルに対し, 1 辺が 1km となる地形図とそれに対応する地すべり地形分布図を適用した。

(3) 判読技術者による教師データ画像の選別

深層学習により, 効果的に地すべり地形の特徴を学習するために, 教師データの選別を行った。選別方法は, 3.3.3 の手法に準拠した。ただし, ここでは等高線, 傾斜量図, CS 立体図それぞれにおいて地すべり移動体の輪郭・境界が「後方に滑落崖があり, 移動体の輪郭が明瞭ないし判定可能」, 「後方の滑落崖は明瞭であるが, 移動体の輪郭の判定が困難」に該当する地すべり地形が含まれる画像を選別し, 教師データとした。また, 図郭に地すべり移動体が含まれないことを確認下上で選別した。なお, 技術者が地すべり地形を判別できない程フレームアウトしている画像は教師データから除外した。図 93 に教師データ選別時着目した地すべり地形の特徴を示す。

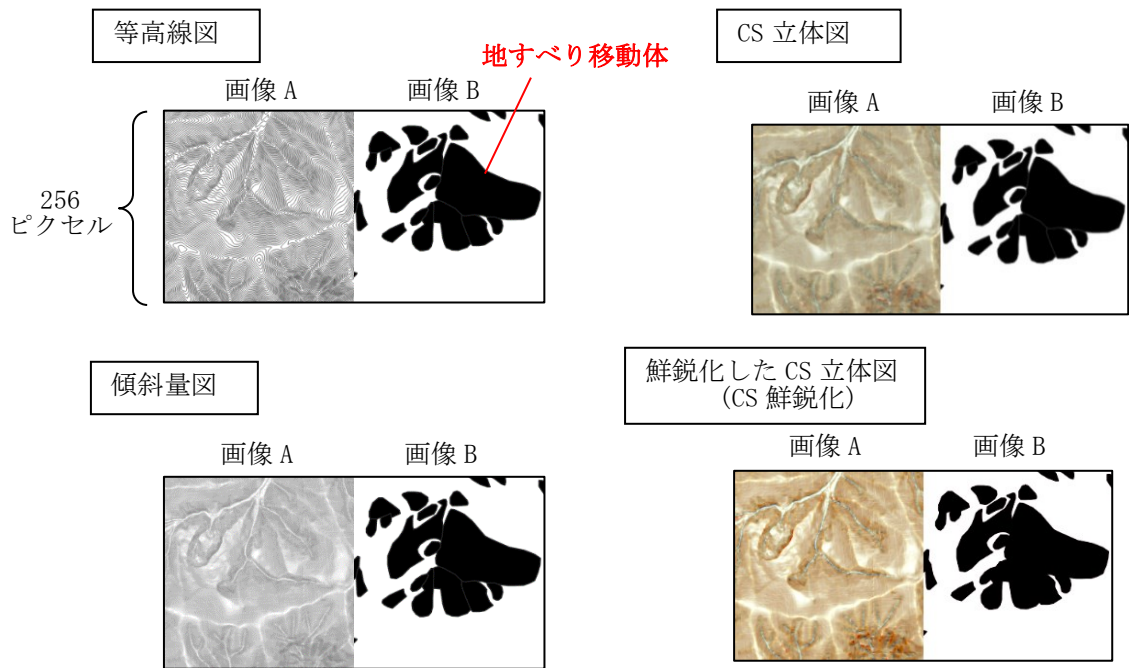


図 92 地形表現図ごとの教師データの例

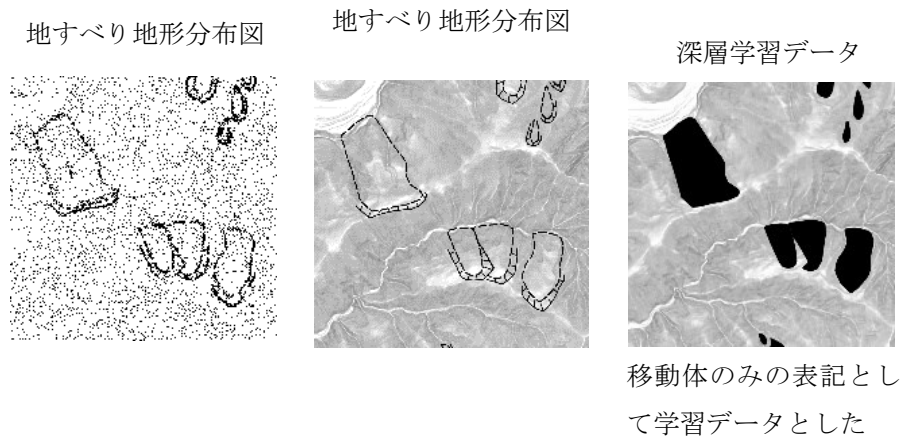


図 93 教師データ選別時の着目した地すべり地形の特徴

(4) 学習データ数

教師データとテストデータ数を表 7 に示す。教師データは、4 つの地形図で範囲、分割方法、図郭面積、解像度、データ拡充方法を全て同様とし、地形図の差が比較できる条件とした。教師データ数は各地形図で約 1000 とした。教師データは範囲内の画像を加工し、データ拡充を行った。本研究では、図 81 に示すとおり、分割範囲を 3/4 ずつスライドさせてデータを拡充した。データの拡充処理方法は、一般的にスライド処理の他、回転・反転、拡大等も考えられるが、本検討の対象エリアは、地質構造に規制されて発生している地すべりが多いため、地すべり変動方位を重視し、回転・反転は行わず、スライドのみの処理を行った。

表 7 教師データと検証データ数

地形図	教師データ				
	元画像数	データ 拡充処理	拡充後 データ数	選別後 データ数	テスト データ
等高線図	600	スライド	2000	1000	80
傾斜量図					
CS 立体図					
CS 鮮鋭化					

(5) 学習と推論時間

表 7 のデータに対して、深層学習に要する時間は、1 回あたり 4~10 時間程度である。時間は学習回数、バッチサイズを変更する事により前後する。たとえば、学習回数 50 回、バッチサイズ 16 の場合は、4 時間程度で学習は終了する。学習回数 200 回、バッチサイズ 2 の場合は、10 時間を必要とする。

テストデータ 80 枚に対する推論時間は、数 10 秒~数分で完了する。分割した個々の画像の推論後、分割前の状態に復元するプログラムを別途構築し、1 枚の画像として後述の照合を実施した。この推論の速さが深層学習の大きなメリットであり、推論精度の高い学習モデルを作る事ができれば、判読対象が広域の面積であるほど効率化が可能とすることになる。

3.6 第3章まとめ

第3章では、深層学習により地すべり地形判読の手法について述べた。基図のCS立体図の作成方法、AIのアルゴリズム (pix2pix) の優位性を述べ、画像での入出力ができる点は、扱い易く、技術者が色調から読み取る判読作業に適している。また pix2pix は、技術者が判断する際に着目する色調パターンを学習していることが判明した。

技術者が判読に用いている地形表現図の違いがAIの学習精度にどのように影響するのかを調べるために技術者が判読の上で用いる地形表現図4種 (等高線, 傾斜量図, CS立体図, 鮮鋭化したCS立体図) のデータを構築し、深層学習を行った。AIの抽出精度を向上させるための手法として、教師データ画像の地すべり移動体の色調を変更し、教師データを判読技術者の観点で選別する事が重要であることを指摘した。

引用文献

- [1] 菊地輝行・崎田晃基・秦野輝儀・吉川慶・西山哲・大西有三：深層学習による崩壊・非崩壊地の自動判読手法の開発，地すべり学会誌，Vol. 56, No. 5, 255-263, 2019.
- [2] 野呂智之・上山嬢子・鈴木大和・戸舘光・中西宏彰・家田泰弘・片嶋啓介・大坪隆三・相澤明宏・塩見礼也：深層学習を用いた画像解析及びクラスタリングによる土砂災害の素因特性の抽出，第 67 回平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集，2018.
- [3] 荒木光一：AI による DEM からの地すべり地形抽出技術，日本地すべり学会シンポジウム，2019.
- [4] 清水文健・井口隆・大八木規夫：防災科学技術研究所「1:50,000 地すべり地形分布図」，防災科学技術研究所研究資料，第 23 集「和歌山・田辺」，2005.
- [5] 篠原崇之・武田大典・下村博之・藤平大・櫻本智美：深層学習 (Dilated U-net) による航空レーザデータを用いた地すべり地形自動抽出手法の検討，第 57 回日本地すべり学会研究発表会講演集，2018.
- [6] 戸田堅一郎：曲率と傾斜による立体図法 (CS 立体図) を用いた地形判読，森林立地，Vol. 56, No. 2, 2014.
- [7] Phillip Isola・Jun-Yan Zhu・Tinghui Zhou・Alexei A. Efros：Image-To-Image Translation With Conditional Adversarial Networks，CVPR，2017.
- [8] 篠崎隆志：GAN-敵対的生成ネットワークの発展，人工知能，Vol. 33, No. 2, 181-188, 2018.
- [9] 古木宏和・稲垣裕・一言正之・藤平大・櫻本智美：ディープラーニングによる地すべり地形の自動抽出-精度と教師データの関係，地盤工学会誌，67 巻，6 号，2019.
- [10] 鈴木隆介：火山・変動地形と応用読図 建設技術者のための地形図読図入門，第 4 巻，2012.
- [11] 古木宏和：3 次元地形情報を用いた深層学習による地すべり移動体抽出-学習データに用いる地形図と抽出精度の関係-，日本地すべり学会誌，58(2)，2021.

第4章 地すべり地形判読 AI の評価

4.1 地すべり地形抽出 AI の性能評価指標

各地形図の学習データで深層学習を実行した後、地すべり移動体の抽出を行った。本章では、結果のみを示し、解釈と考察は第5章に述べる。表8は、ピクセル単位（面積）でAI抽出結果の性能を計算したものである。一致率とは、地すべり地形分布図の移動体の面積に対してAIが抽出した移動体の面積が一致する割合である。機械学習の評価指標に用いられる再現率、適合率は、式(1)、式(2)で求める。3.4.6章で述べたとおりである。両者ともに値が1.0に近いほどAIの性能が高いとされる。なお、以降、本論の地すべり地形判読図を深層学習したAIモデルを「地すべり地形判読AI」と称す。

$$\text{再現率} = \text{一致面積} / (\text{一致面積} + \text{判読漏れ面積}) \cdots (1)$$

$$\text{適合率} = \text{一致面積} / (\text{一致面積} + \text{誤判読面積}) \cdots (2)$$

4.2 深層学習による地すべり移動体の抽出結果

4.2.1 ピクセル単位の一一致率

ピクセルの一一致率を計算すると、いずれも0.1~0.4と低い結果となった。これは、一致面積が小さいことによるものであり、本研究で用いた教師データ及び深層学習アルゴリズムでは、地すべり地形分布図の移動体の「形状」を再現することが困難であることを示す。

表8 ピクセル単位で計算した一致率、再現率、適合率

地形図	一致率	再現率	適合率
等高線	0.08	0.11	0.24
傾斜量図	0.19	0.26	0.43
CS 立体図	0.15	0.27	0.22
CS 鮮鋭化	0.20	0.33	0.26

4.2.2 箇所数単位の一致率

(1) 検証方法

箇所数に着目した評価結果を示す。表 9 は、地すべり箇所単位の性能を計算したものである。抽出率とは、地すべり移動体を 1 箇所とカウントして、AI が推論した移動体が 1 ピクセル以上重なりを持っているものを「抽出」と判定した。判定に用いた凡例を図 94 に、検出判定図の例を、図 95、図 96 に示す。正解と仮定した地すべり地形分布図と AI の output の位置が一致する箇所は赤色○、地すべり分布図の位置を抽出できていない箇所は黄色○とした。通常、AI の判定はこの 2 つの正誤により再現率、適合率が算出される。

本検討ではこの指標に加えて、AI の output 画像が過剰に抽出した箇所に着目し、output の位置が地すべり地形ないしは、斜面移動の兆候が認められる箇所であるかどうかを技術者により判定を行った。その凡例として output が地すべり等変動地形を示している箇所は青色○とした。また、output が地すべり地形分布図にも該当せず、地すべり等変動斜面の兆候も認められない箇所は、緑色○とした。

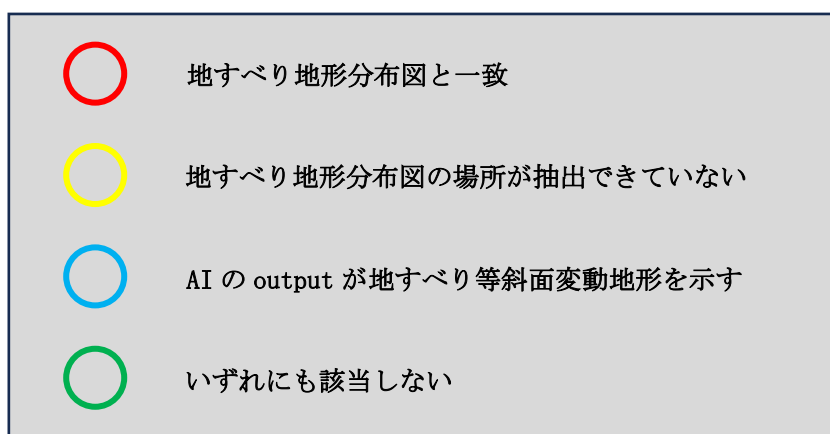
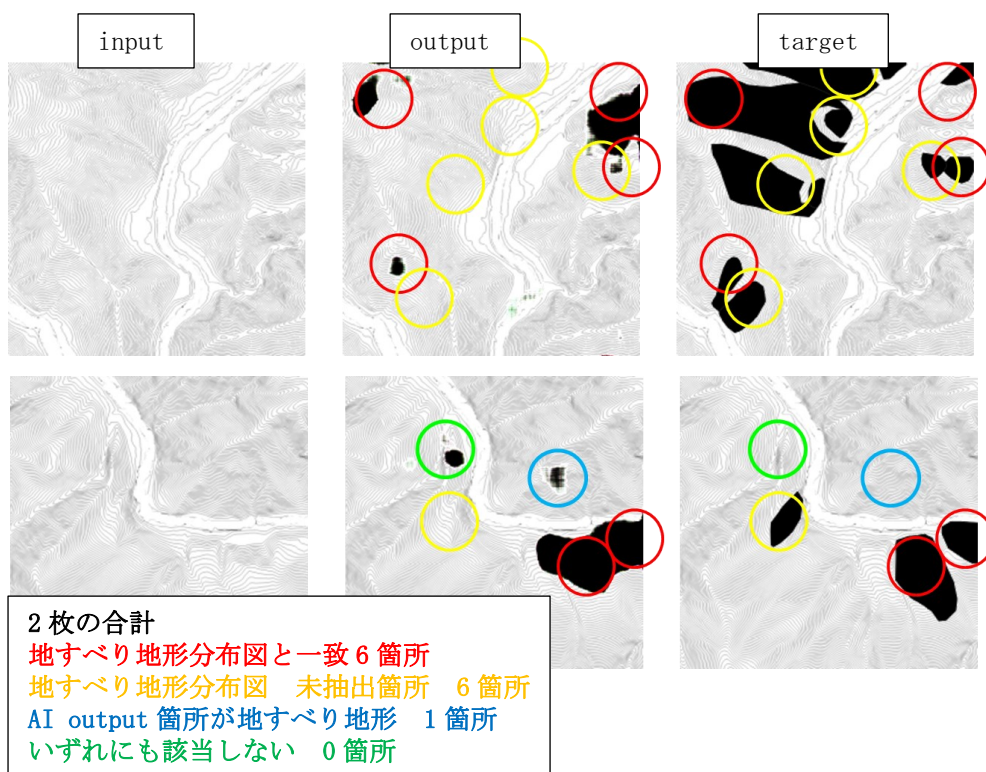


図 94 場所による評価にあたり技術者が判定した判読基準

表 9 箇所単位で計算した AI の抽出率

地形図	正解データに地すべり地形あり		正解データに地すべり地形なし(過剰抽出箇所)		AI 地すべり抽出箇所数 ②+③	AI 抽出箇所総数 ②+③+④	AI抽出箇所が地すべりである確率 (②+③) / (②+③+④)	
	①地すべり移動体の数	②AI抽出個所が①と重なる箇所数	③地すべり地形の特徴を有する	④地すべり地形の特徴がない				
等高線	228	98	43.0%	40	56	138	194	71.1%
傾斜量図	228	94	41.2%	47	34	141	175	80.6%
CS立体図	228	119	52.2%	77	87	196	283	69.3%
CS鮮鋭化	228	125	54.8%	84	51	209	260	80.4%

等高線図



傾斜量図

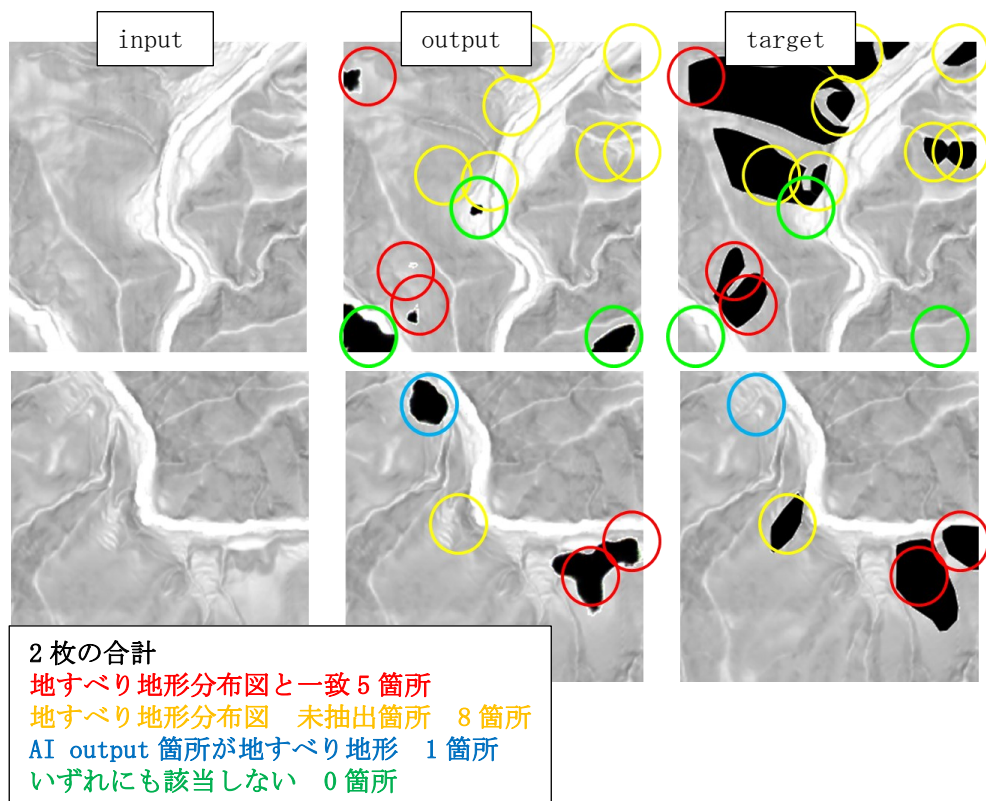


図 95 判定図の例 (1/2)

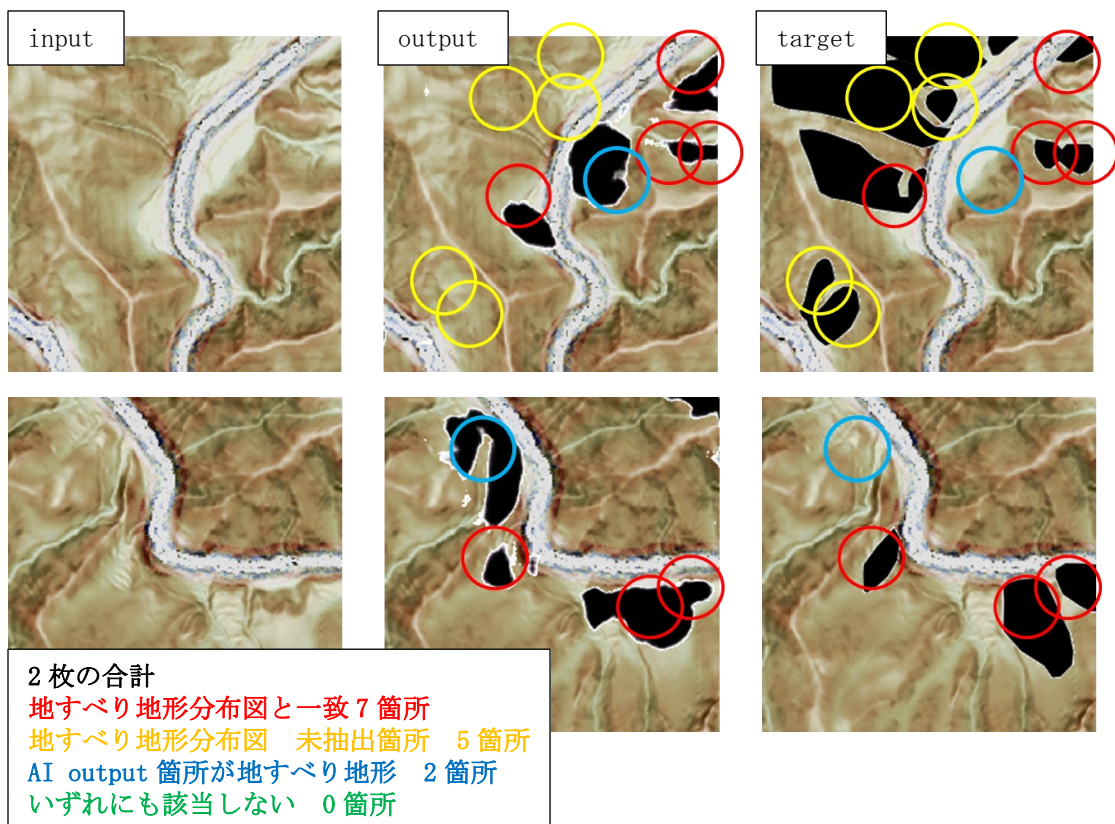
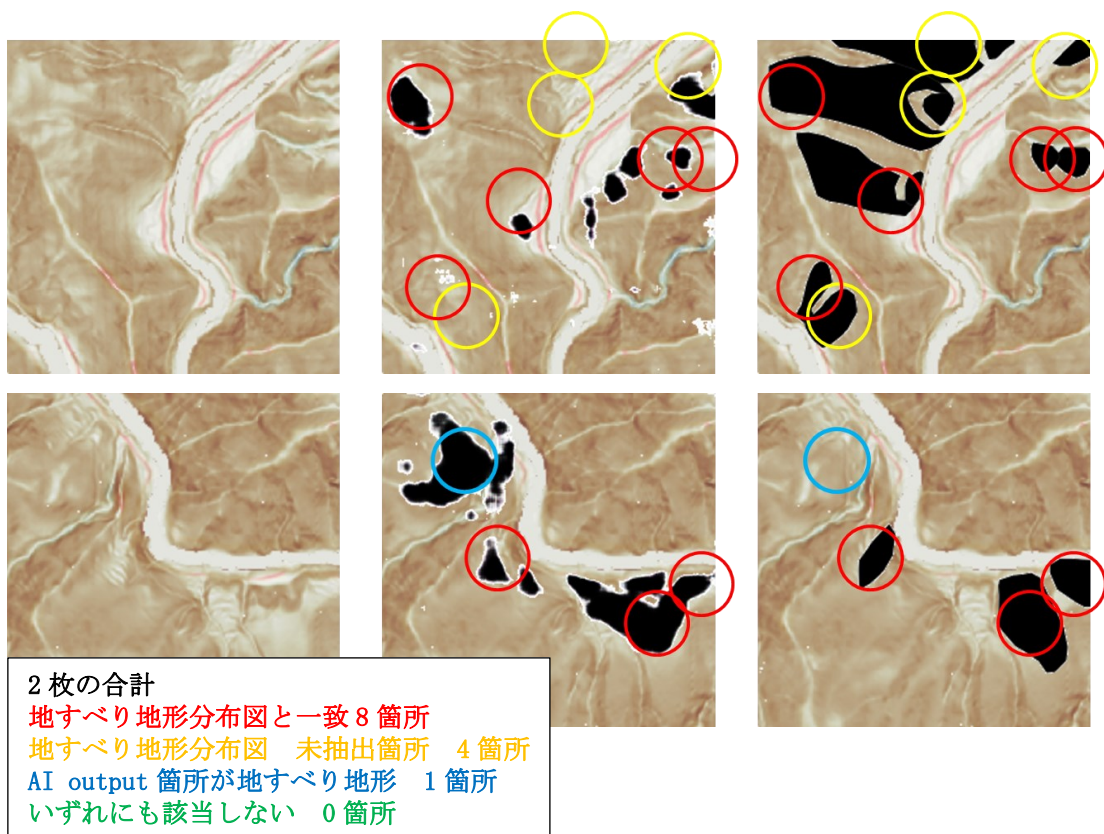


図 96 判定図の例 (2/2)

(2) 地すべり地形の箇所単位の抽出結果

地すべり地形分布図の移動体の箇所数に対して、AI 抽出箇所的一致箇所数の割合（抽出率）は、40～55%であり、鮮鋭化したCS 立体図で最も高かった。また、検証画像には、正解データに地すべり地形が含まれない画像もある。その中で地すべり地形の特徴を有する位置をAI が抽出しているケースが見られた。図▲の移動体の凡例等を元に、AI が抽出した箇所を技術者が判読を行い地すべり地形の特徴を有する箇所数を計上したところ、等高線図では40箇所、鮮鋭化したCS 立体図では84箇所が該当した。

AI により抽出された地すべり移動体の箇所数に着目すると、抽出箇所総数に対して70～80%の確率で地すべり移動体の位置を抽出している結果となった。地形図ごとの抽出箇所数は、等高線と傾斜量図に比べて、CS 立体図の方が多かった。正解データに地すべり移動体がある場合と無い場合を含め、判読漏れや誤判読の割合は、鮮鋭化したCS 立体図で最も高い抽出率が得られた。

(3) AI による地形図ごとの判読画像

テスト範囲全体の入力画像、AI 出力画像、正解とした地すべり分布図画像を図 101～図 103 に示す。この推論画像の生成に要した時間は約5分である。次に、AI による地すべり地形抽出結果画像例を示す。図中左の入力画像に対して、中央の画像が地すべり移動体の抽出結果、左の画像が地すべり地形分布図（正解データ）となる。図 97、図 98 はいずれの地形図においても地すべり地形分布図に対する抽出率が高い画像例である。対し、図 99、図 100 は、抽出率が低い画像例である。図 99 は、地すべり地形分布図に地すべり地形が存在しているが、抽出率が低い画像、図 100 は、地すべり地形分布図に地すべり地形が存在しない画像となる。

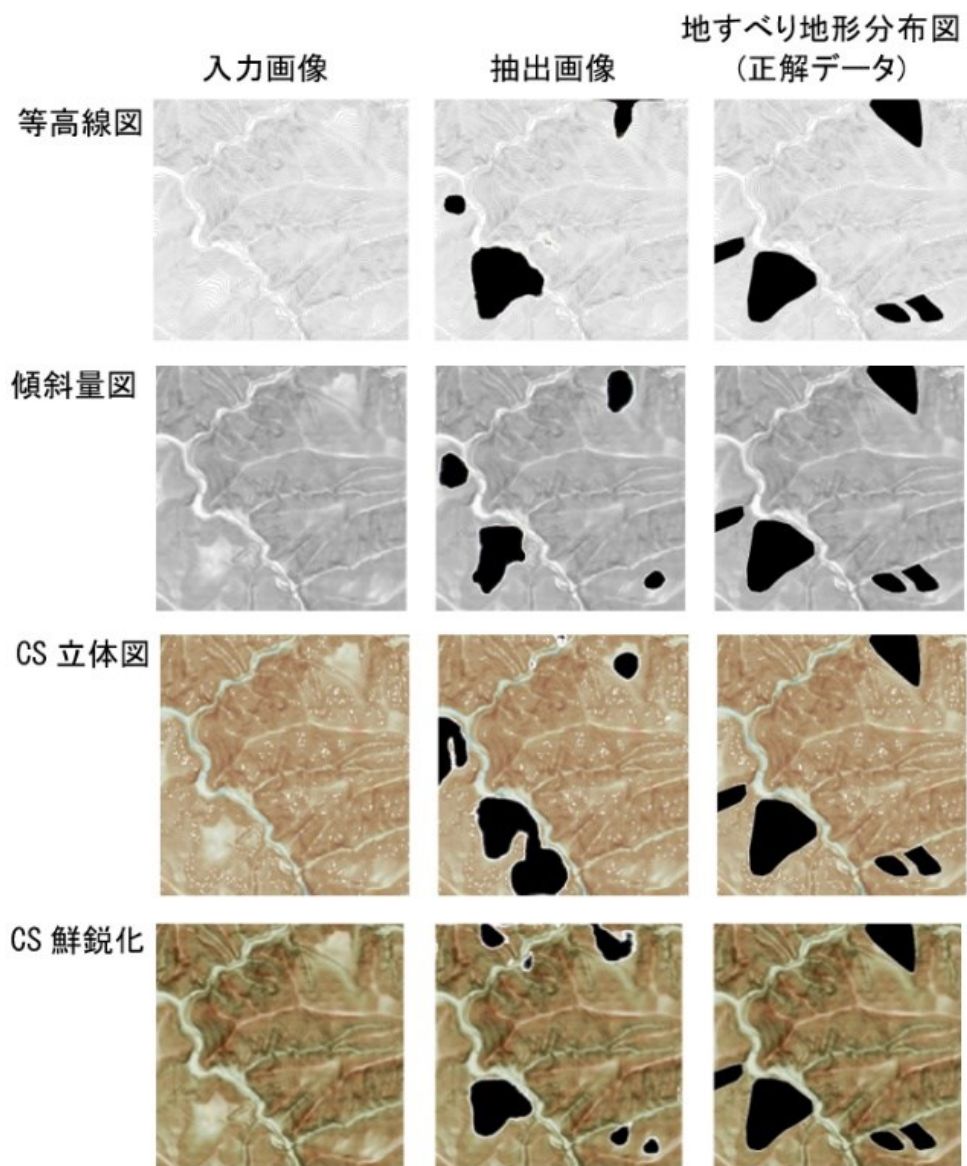


図 97 地すべり移動体の抽出率が高い画像例 (1/2)

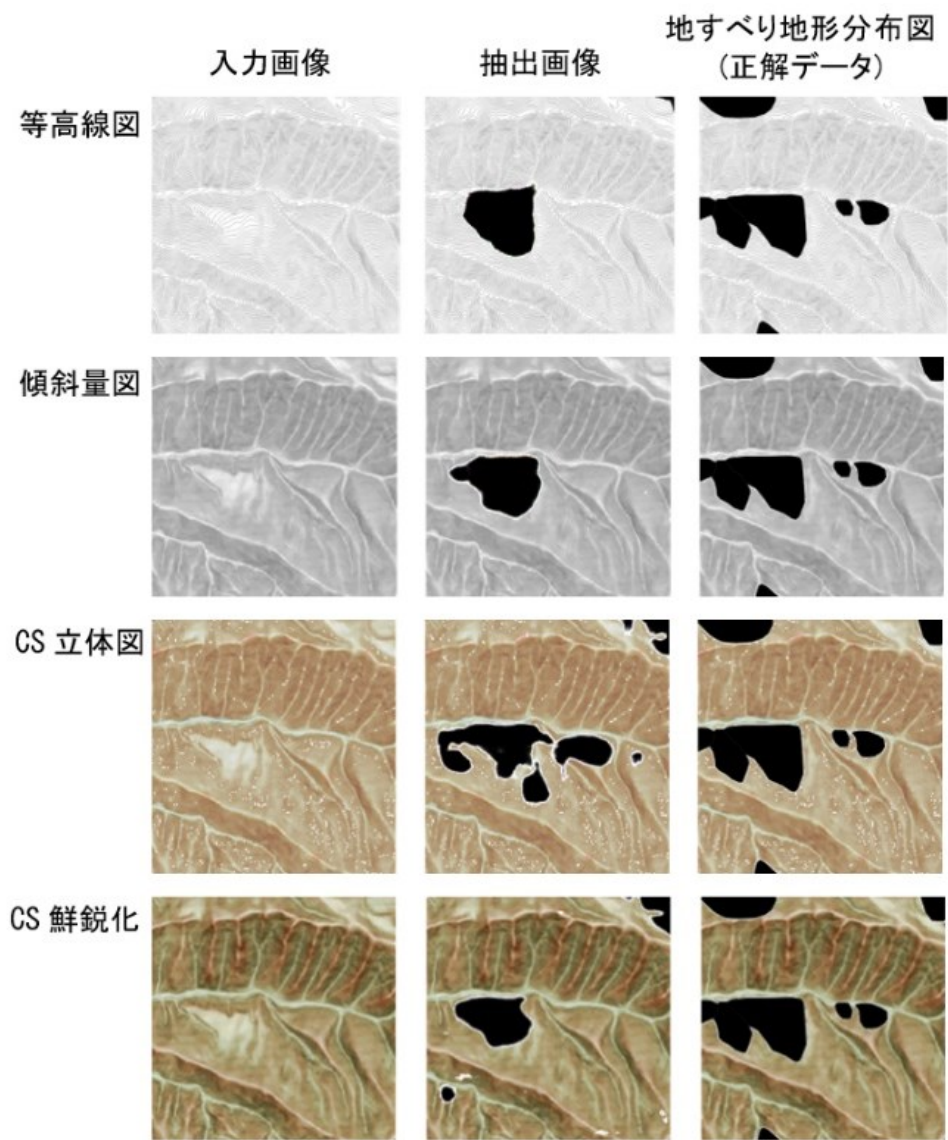


図 98 地すべり移動体の抽出率が高い画像例 (2/2)

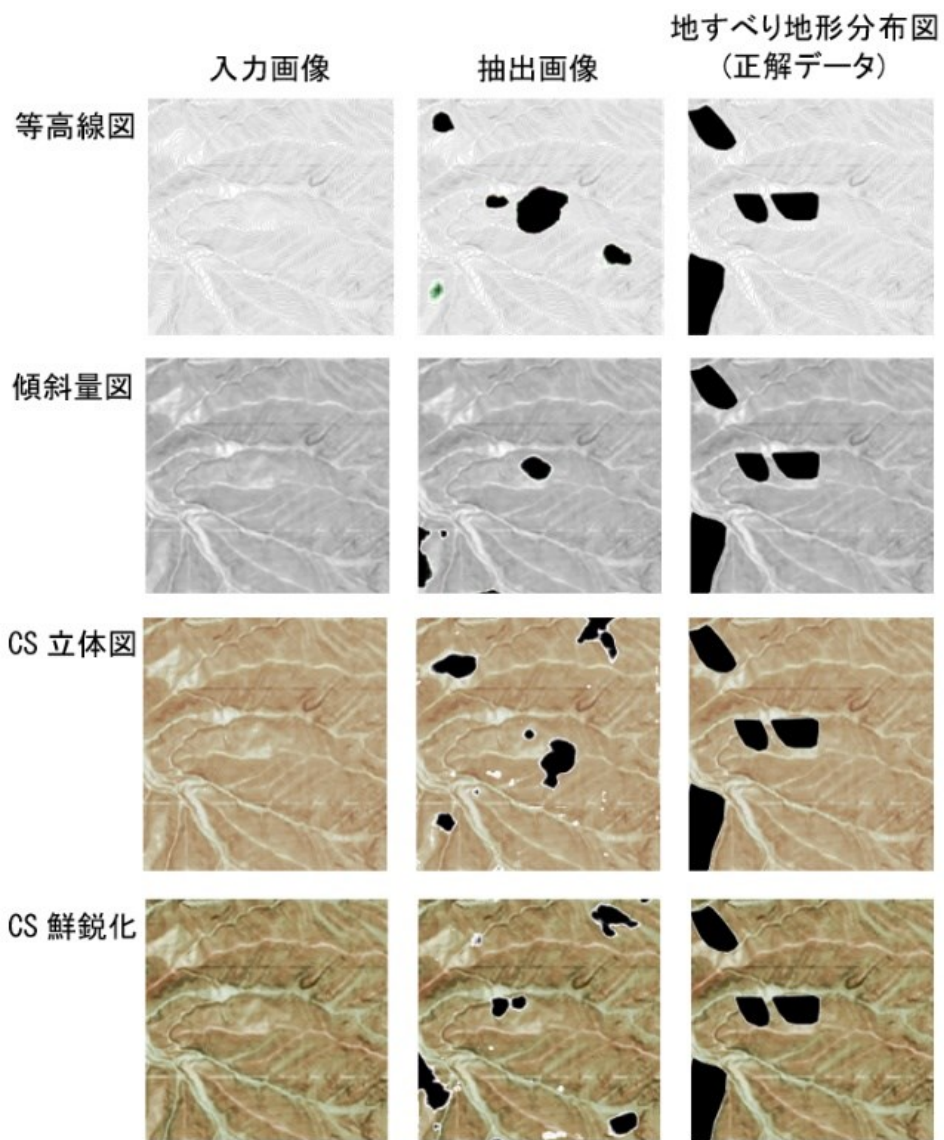


図 99 地すべり地形分布図に対する抽出率が低い画像例

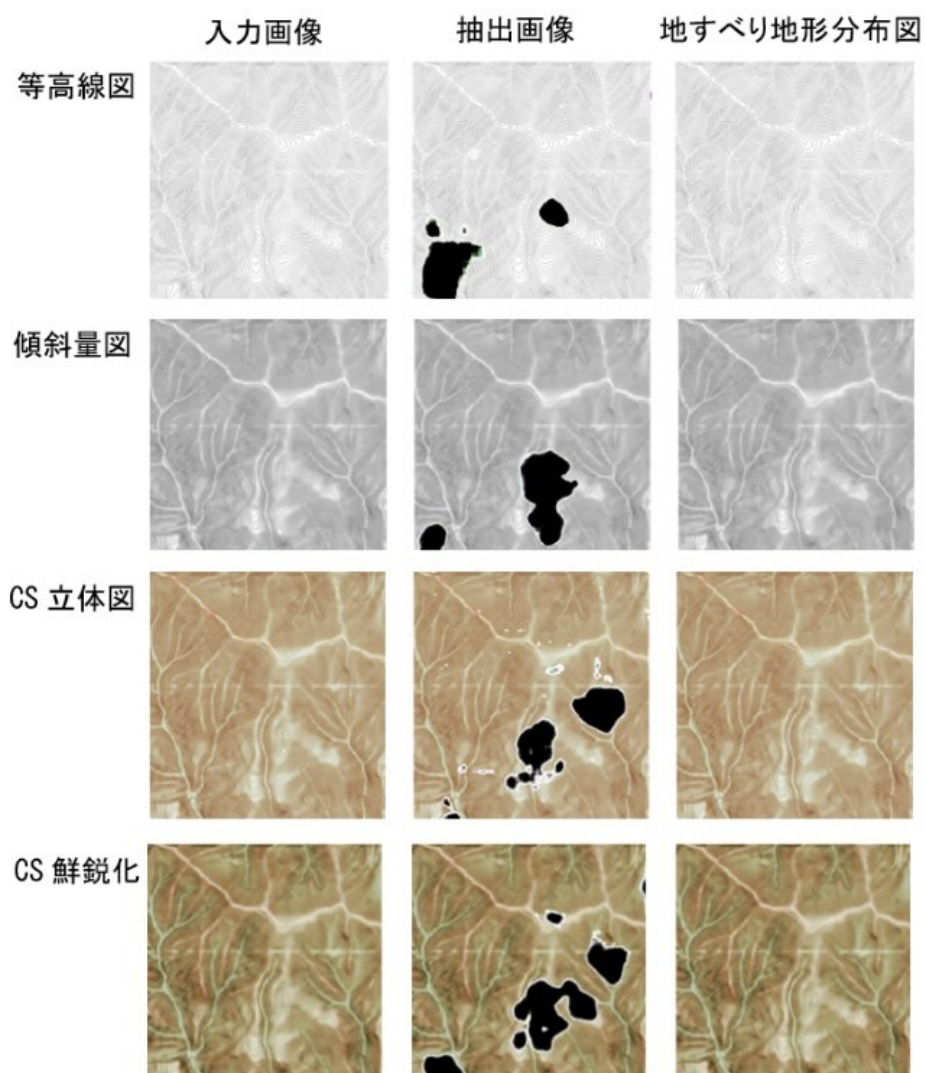


図 100 地すべり地形分布図に無い移動体を AI が抽出した画像例



図 101 地すべり判読AIに入力したCS立体図

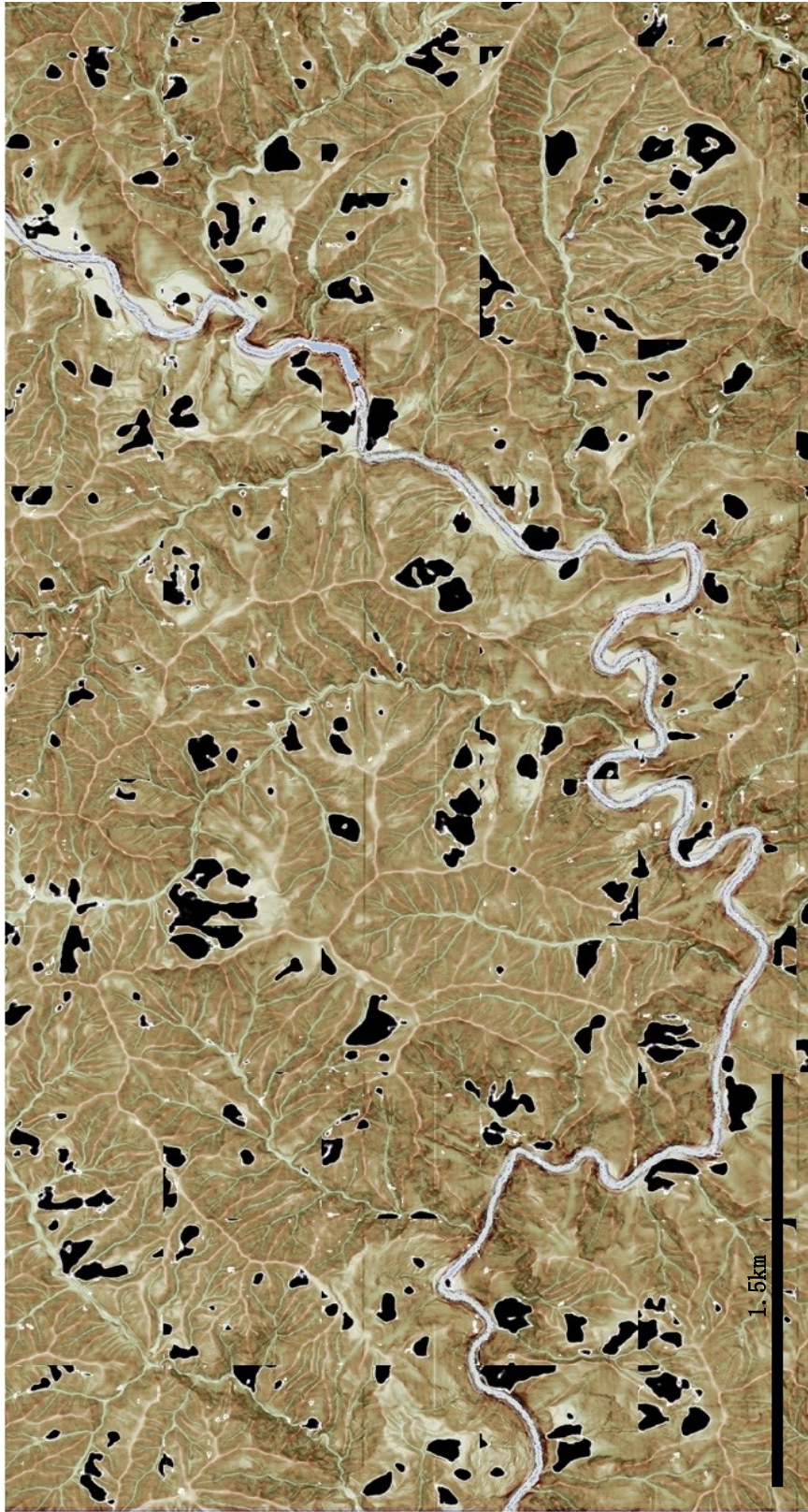


図 102 検証範囲における AI による判読結果

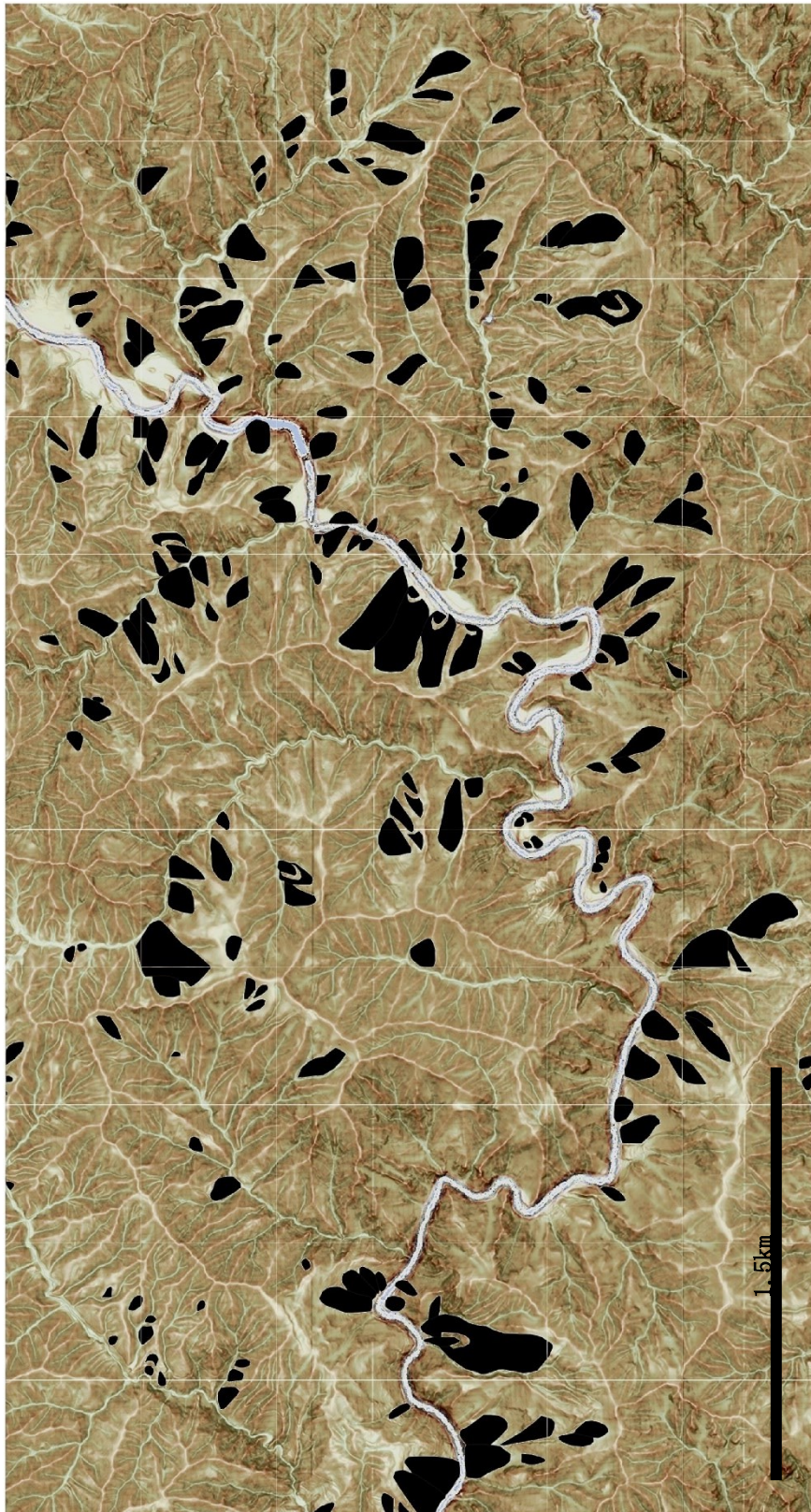


図 103 検証範囲における地すべり地形分布図

4.3 第4章まとめ

第4章では、深層学習による国土地理院が公開している数値標高モデルを用いて等高線、傾斜量図、CS立体図、鮮鋭化したCS立体図の4種類の図を作成し、深層学習による地すべり地形抽出を行った。教師データは、地形図の差が比較できるように同一条件で作成し、正解データは、1:50,000地すべり地形分布図とした。深層学習の結果、本研究で構築したAIは、数分程度の短時間で100m²もの面積を判読することが可能であり、地すべり移動体の位置を約80%の確率で抽出することができることを示した。

抽出精度は、カラー情報が多いCS立体図で高くなり、技術者が判読する際に有効な鮮鋭化処理を加えたCS立体図で最も高かった。こうした事前の画像処理は、AIが特徴を捉えやすくする上でも有効であることを確認した。

引用文献

- [1] 古木宏和・稲垣裕・一言正之・藤平大・櫻本智美：ディープラーニングによる地すべり地形の自動抽出-精度と教師データの関係，地盤工学会誌，67巻，6号，2019.
- [2] 古木宏和：3次元地形情報を用いた深層学習による地すべり移動体抽出-学習データに用いる地形図と抽出精度の関係-，日本地すべり学会誌，58(2)，2021.

第5章 地すべり地形判読 AI に関する提言

5.1 ピクセル単位と箇所単位による地すべり抽出結果の評価

本研究では, [1, 2]の研究を元に, 地すべり地形分布図に対する AI 判読の結果を2つの指標, 面積 (ピクセル) 単位, 箇所数単位で評価した. ピクセル単位の評価結果は, 一致率をはじめ, 再現率, 適合率ともに 0.1~0.2 と低い水準であった. 図 104 は, 地形図種毎の値をグラフ化したものである. 傾斜量図で適合率が高くなっているものの, 正解データとした地すべり地形分布図のように地すべり移動体の位置と形状を再現できているとは言いがたい結果であった.

ピクセル単位と箇所単位の評価結果から, 本研究で作成した教師データおよび使用した深層学習アルゴリズム (pix2pix) では, 技術者が行う地すべり移動体の形状の再現には至っておらず, より高度な深層学習の技術, あるいは品質の高い教師データが必要と考えられる.

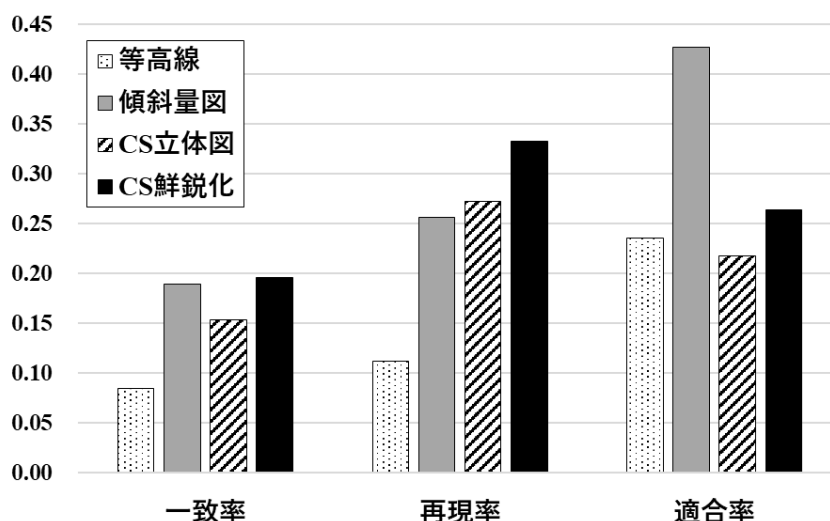


図 104 ピクセル単位で算出した地すべり抽出 AI の評価結果

一方, 地すべり移動体の箇所単位の評価では, 面積単位の結果とは対照的に高い抽出率を示した. 地すべり地形分布図に対する AI の抽出率は, 最大で 55%程度 (図 105) であったほか, 正解データに地すべり移動体がない場合でも, 地すべり移動体と類似した特徴の地形を抽出し, より多くの地すべり移動体を抽出している. この結果, AI 抽出箇所の総数を母数とした地すべり移動体の抽出率は, 70%以上であった (図 106). また, 抽出精度は, 地形図の違いにより差があり, 色情報が多いほど抽出精度が高くなっていた. 抽出率は, 等高線図で 71%, 鮮鋭化した CS 立体図で 80%であった.

本研究で使用した pix2pix は, 学習時に地すべり移動体とその周辺の地形図の色調情報 (配色, 濃淡, パターン等) を学習している. これに検証画像を入力した際, 学習した特徴と類似する地形図の色調情報を持つ位置を着色 (出力) していると考えられる. 本検討では, 地形図の表

現方法が深層学習に与える影響を評価するために、地形図の種類以外の要素を同一条件として教師データを作成した。したがって、AIの抽出精度に影響する要素は、1bitの等高線図と、24bitの鮮鋭化したCS立体図とで異なる階調差、色調差であり、この情報量が多いほど、判読技術者と同様に地形的特徴の認識精度が向上すると考えられる。

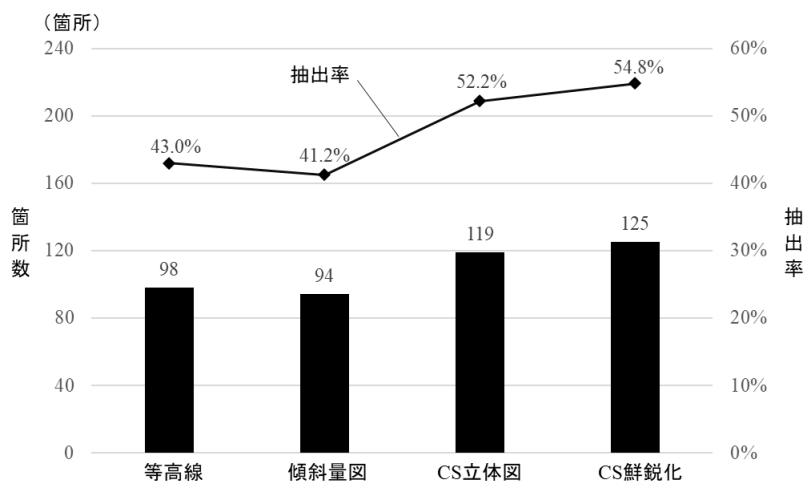


図 105 地すべり地形分布図に対する AI 抽出箇所数と抽出率

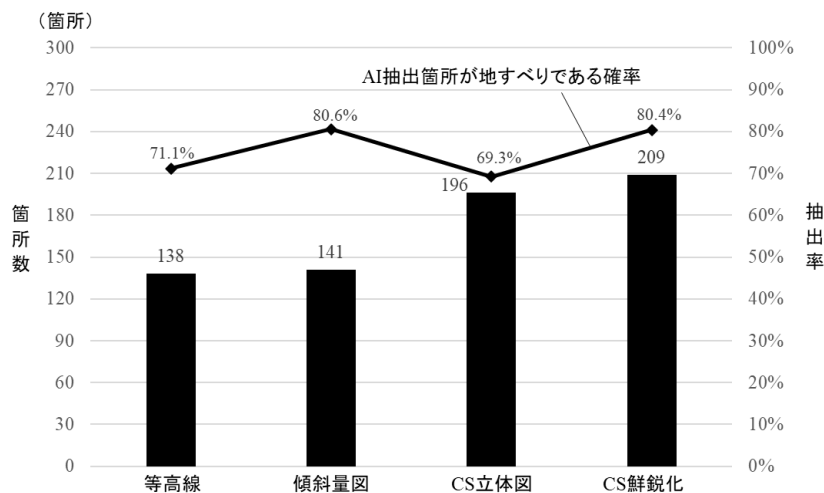


図 106 AI が抽出した地すべり地形箇所数と抽出確率

5.2 AI が抽出した地すべり地形の特徴

図 107 は、図 97 の 4 種の地形図の AI 抽出結果画像例である。AI が抽出した地すべり移動体の範囲は、頭部緩斜面から末端部を着色している（○で図示）。抽出箇所共通する地形的特徴は、地すべり地形特有の滑落崖、頭部緩斜面、遷急線、遷緩線、押し出し地形等が明瞭に識別できる点である。また AI は、正解データに地すべり移動体がない箇所に地すべりを抽出しており、抽出箇所が地すべり地形の特徴を有する（□で図示）ケースがある。地すべり地形分布図にない箇所の抽出は、いわば技術者にとって AI が気づきを与え、見落としを防止するだけでなく新たな発見をもたらす可能性があることを示している[3]。

図 108 は図 99 の AI 抽出画像となる。AI が抽出した地すべり移動体は、正解データの移動体に対する面積割合が低いが、その位置は正解データと一致している。また、図 97 と同様に AI は、正解データに地すべり移動体がない位置に地すべり地形の特徴を抽出している。

図 109 は、図 100 の AI 抽出画像である。正解データに地すべり移動体が存在しないため、この画像では一致率は 0 となる。AI は、この画像の中でも地すべり移動体の箇所を抽出しており、その中には、地すべり地形の特徴を有するもの、特徴をもたないもの（△で図示）の両方が存在する。先に述べたように、こうした複数の可能性が考えられる場所は、現地調査を行い、実際の現象を確認する必要がある。

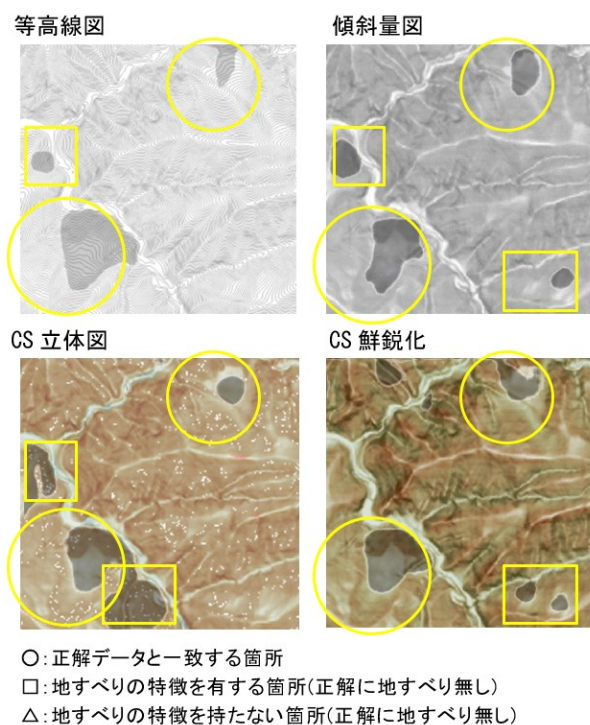


図 107 地形表現図ごとの AI 地形判読結果の比較（図 97 の拡大）（地すべり移動体を透過して表示）

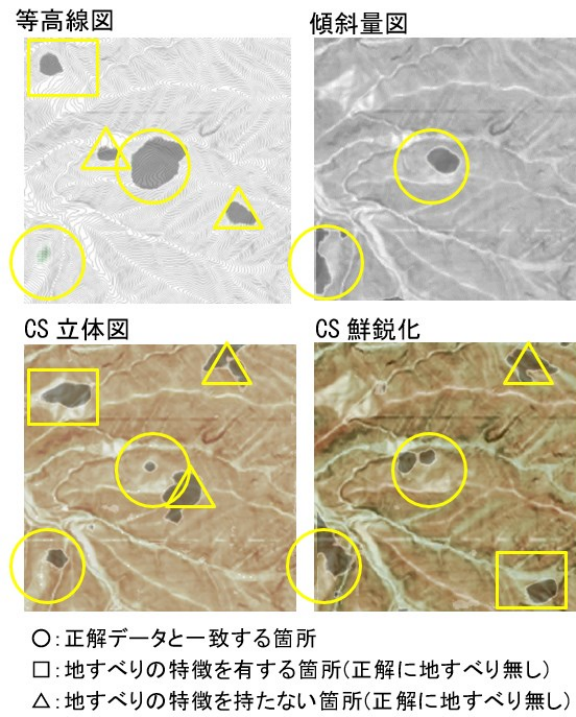


図 108 地形表現図ごとの AI 地形判読結果の比較 (図 99 の拡大) (地すべり移動体を透過して表示)

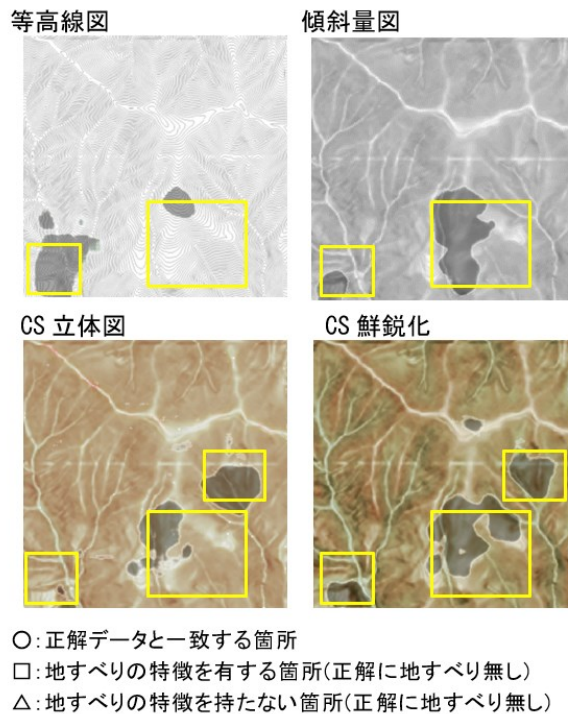


図 109 地形表現図ごとの AI 地形判読結果の比較 (図 100 の拡大) (地すべり移動体を透過して表示)

5.3 AI が誤判読および判読漏れした画像の特徴

AIにより地すべり移動体が抽出できなかったケースについて考察する。図 110 は誤判読と判読漏れの画像例である。地形図の違いによらず、判読できなかった地すべり移動体を図中に示す(図中▲★)。誤判読, 判読漏れ箇所の地形図を再度判読し, 抽出できなかった要因を推察した。その結果下記のような特徴があることがわかった。

【★誤判読箇所】

・沖積扇状地の扇頂部や蛇行河川と段丘面のように地すべり地形の滑落崖-緩斜面の位置関係, 色調が類似している箇所

【▲判読漏れ箇所】

- ・教師データ選別時に除外した図 93 の不明瞭な地すべり地形とされるもの
- ・滑落崖は明瞭であるが, 緩斜面, 遷急線, 遷緩線が明瞭でないもの
- ・滑落崖が明瞭でないもの, またはやせ尾根状で崖地形の面積が小さく, 頭部の緩斜面をもたないもの
- ・小規模で 5m メッシュの地形図に地すべり地形の特徴が表現されていないもの

これらの誤判読を低減するための解決策は, 3つ考えられる。

(1) バリエーションに富んだ判読データを拡充する

判読する地形のパターンは, 地域や地質によって形態的な特徴が類似する傾向がある。土木技術として判読を生業としている技術者の知識を蓄積・学習できれば, 精度が向上し, 誤判読を低減させられる可能性がある。

(2) 誤判読した地形の特徴を AI に学習させる

本検討では, 地すべり地形のみを学習データとして推論を実施した。このため, AI は, 地すべり地形の特徴のみを考慮し, 類似した地形を抽出している。誤判読箇所を減らすことを目的とした場合, AI の汎用性の観点から考えれば, 誤判読した地形を学習させ, 地すべり地形ではないことを認識させることで誤判読の割合を低減させられる可能性がある。例えば, 本論では教師データ作成の際に地すべり移動体を黒色と定義して学習を行った。これに沖積扇状地や段丘面を別の色調として定義し, 学習させる, 等が考えられる。ただし, 自然現象故の真の正解が判断しにくい地域や地形要素に適用するには, さらなる検証が必要であると考えられる。

(3) 詳細な地形情報を用いる

より詳細な地形情報を用いて, 判断を明確化した上で教師データとしての品質を向上させる方法が考えられる。国土地理院の基盤地図情報では, 5m メッシュを最大解像度として公開されているが, 例えば, 1m メッシュ等の詳細な地形情報があれば, より小規模の地形的特徴を深層学習し, 幅広いスケールの地すべり地形抽出に対応できる可能性がある。また, 画像による深層学習であれば, 技術者が着目する特徴(色調)を強調する等の処理を加えることも有効であると考えられる。

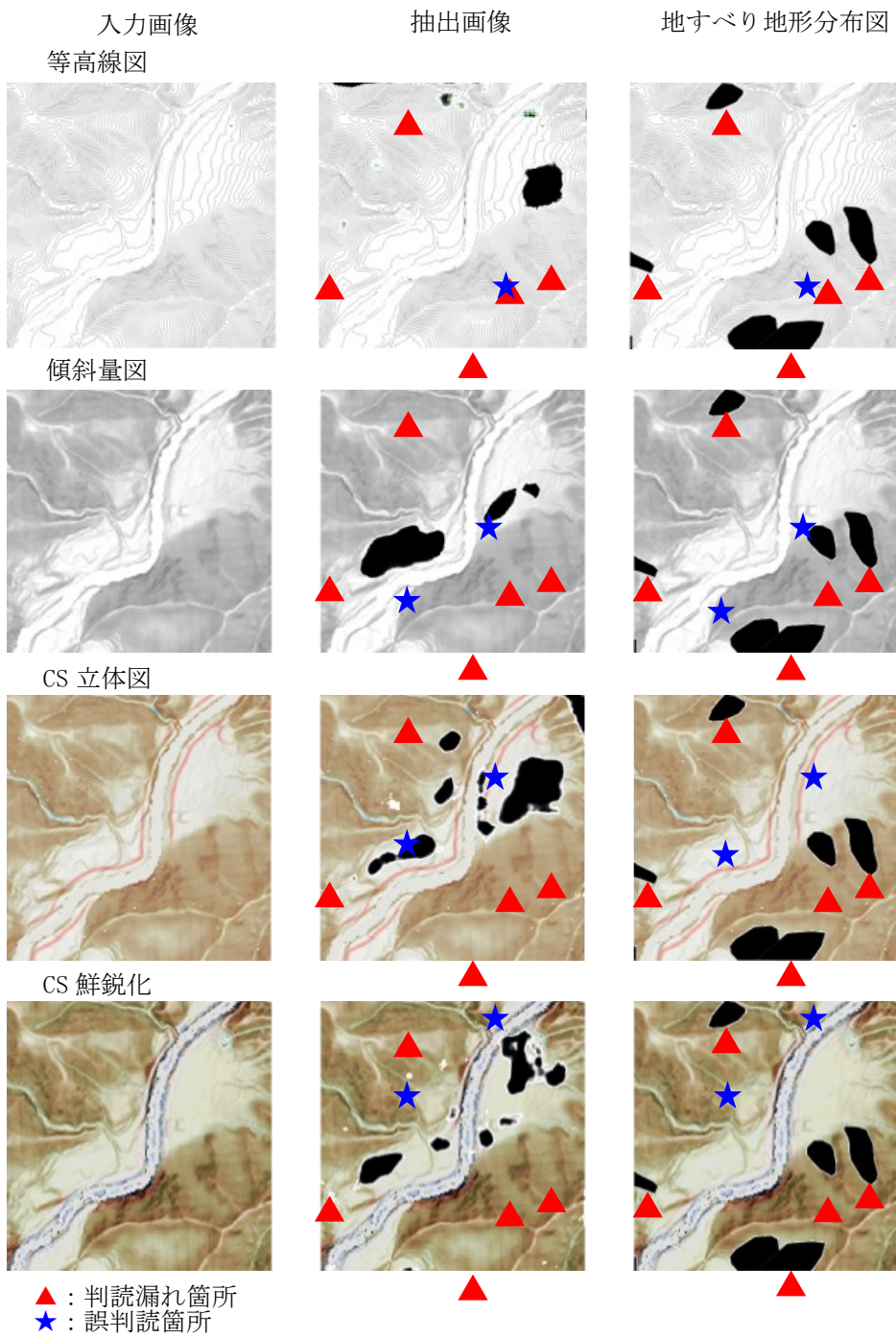


図 110 誤判読・判読漏れ箇所の画像例

5.4 地域別に作成した教師データによる地形判読 AI の試行

深層学習による地形判読 AI の汎化性能を検証する試行として、[4]の文献を参考に日本各地の地すべり地形データをピックアップし、同等程度の教師データ数を確保した上で判読精度の検証を行った。対象は、表 10 に示す 4 県である。地域毎に地形地質、地すべりの発生誘因が異なる地域である。この 4 県の教師データを用いて、次の検証を行った。

- ・ 4 県の教師データを集約して学習
- ・ 対象地域毎に学習

地質の異なるデータを用いる事により、他地域への汎化性能の検討を付けると共に、抽出精度に影響する要因、例えば地域差であるのか、データ数なのか、影響を考察する。

なお、CS 立体図の作成方法や深層学習アルゴリズム (pix2pix) は同様とした。Pix2pix のハイパーパラメータは、学習回数 (epoch)、バッチサイズ (batch size) のみ調整した。

図 111 に学習率が高い画像例を、表 11 に地域とケース別の再現率、適合率等を示す。再現率と適合率には若干バラツキがあるものの、正解率は 0.6~0.7(60~70%)であった。つまり、各地域の検証データについて地すべり範囲を生成させた結果、教師データ集約を行った場合と、地域毎に学習を行った場合とでは、正解率に大きな差は生じない結果である事がわかる。なお、この試行検討の奈良県でのデータは、本論の教師データを用いている。

図 111 の AI 判読結果を見ると、判読技術者の視点からは、明らかな誤り、判読の誤差はそれほど無いように見える。付加体地域においては、集約した教師データを用いた抽出画像の方が地すべり地形を再現できている。正解率も 60~80%程度である事から、類似する地質の地域であれば、教師データは一定の共通した地形的特徴があることは既知の事実であることから、地形判読 AI にもある程度の汎化性能があると考えられる。また、地形判読 AI は、北海道や熊本県の出力画像では、地すべり地形分布図で判読されていない箇所に地すべりを抽出している。この位置も地形的に地すべり地形であり、地すべり地形判読 AI の有効性を示すものである。

一方で、第三紀の堆積岩地域では、数値上、地域毎の教師データを用いた方がやや精度良く判読できている。これは付加体地域には少ない、第三紀の地質体特有の緩勾配斜面ややせ尾根地形等が考慮されたためと解釈できるが、教師データ集約の判読による正解率も低くはないため、地域特性が考慮されているかは、断言できない。より教師データと出力結果を吟味し、解釈する必要がある。

表 10 対象地域と地質体毎の教師データ，検証データ

対象地域	地質体	教師データ [※]	検証データ
北海道	新第三～白亜紀付加体	764	120
新潟県	新第三紀堆積岩	1461	120
奈良県	白亜紀付加体	1021	100
熊本県	中～古生代付加体	1311	120

表 11 地域別に作成した学習データと抽出精度の違い 再現率/適合率/正解率[※]

対象地域	教師データ集約	地域毎
付加体(北海道)	0.5/0.2/0.7	0.5/0.3/0.7
堆積岩(新潟県)	0.4/0.5/0.6	0.5/0.4/0.7
付加体(奈良県)	0.5/0.3/0.7	0.5/0.5/0.7
付加体(熊本県)	0.6/0.4/0.8	0.4/0.4/0.6

※抽出範囲が地すべりデータの範囲と重なるっている個所数の割合

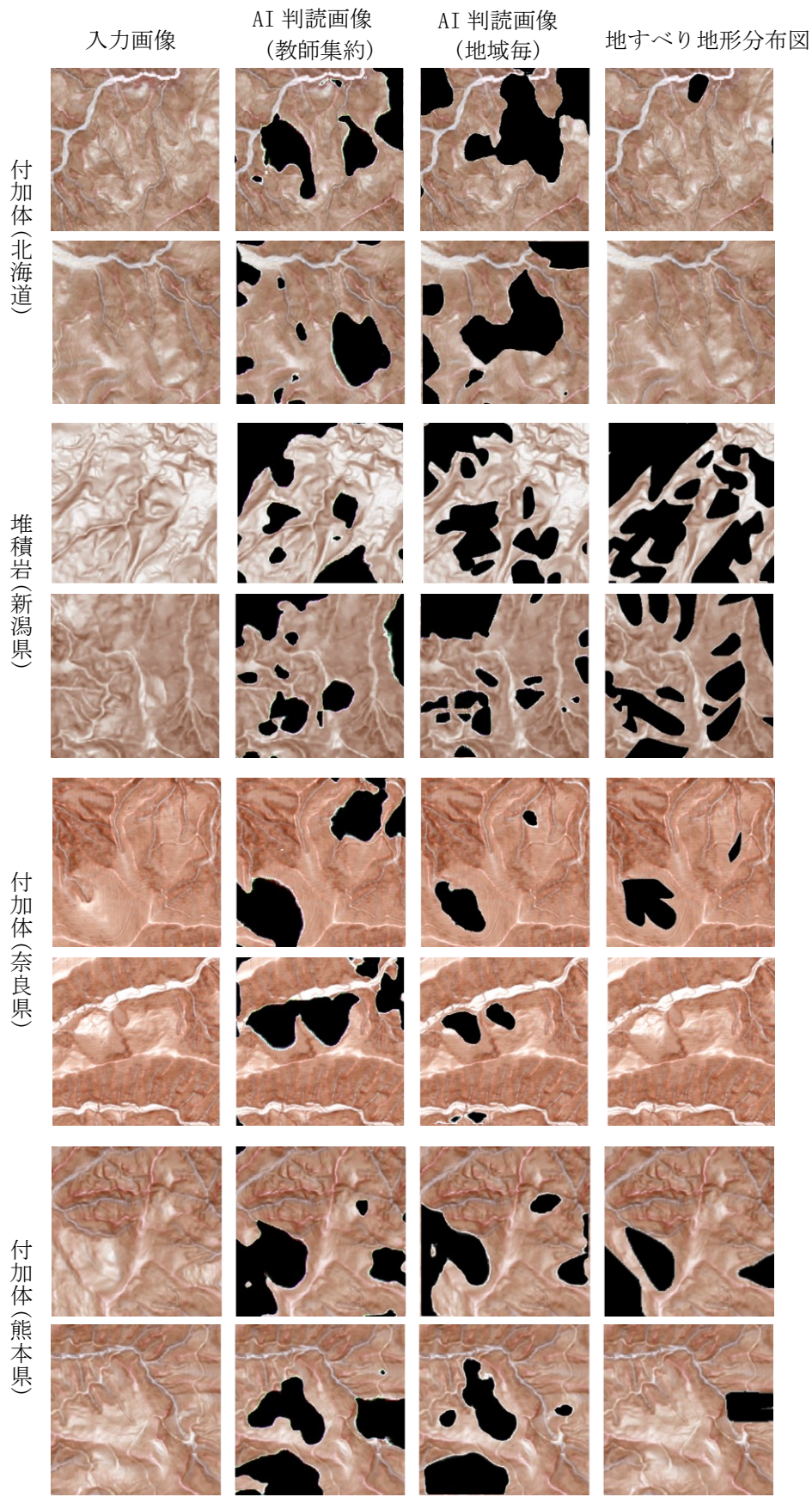


図 111 教師データをケース別(地域別・集約)に学習した地すべり地形抽出画像

5.5 正解と定義するデータの留意点と地形判読 AI 研究の意義

5.5.1 正解と定義するデータの留意点

第5章冒頭で述べたように、地すべり地形のように自然現象を対象として、判読という属人的な技術に深層学習を適用する場合、AI が出す答えには複数の意味が含まれることになる。このため、教師データに込められた意図を適切に解釈し、その上でAI が出した答えを技術的観点から評価する必要がある。

自然現象を対象とする場合、留意すべき事項は、正解データは土砂災害を引き起こす地すべりのような自然現象を対象とするため、100%の解は得られない点である。このため、AI の教師データおよび正解データには、不確実性が含まれることに留意する必要がある。例えば、地すべり地形判読の場合、判読技術者の属人性と、教師データとする判読図（地すべり地形分布図）の判読精度を留意しておくことである。地すべり地形分布図は、判読基図を1:40000の空中写真より複数の判読技術者により行われている。ここには判読技術者の個人差が生じている可能性を鑑みる必要がある。また、地すべり地形分布図の注釈の通り、地すべり地形の幅または長さが150m以下のものは含まれていない。本論で用いた数値地形情報は5mメッシュの解像度をもつことから、1:40000の空中写真で読み取れる地形よりも詳細な地形情報である。

また、不確実性はAI の観点からも存在する[5, 6]。深層学習、とくにpix2pixは、敵対性生成ネットワーク（GAN）というアルゴリズムを搭載しており、画像の特徴を学習する際にランダムにピックアップし、共通する特徴を正として精度を向上させていく。このランダム性は、いわば教師データが少なく、不均質であればあるほど誤差を生じやすい。このため、教師データ数が本論のように数1000あるいは、数100程度の場合、安定した学習を複数回実施し、検証用データを設けて交差検証を行うなど、AI の観点からの深層学習を用いるための知見が必要である。また出力においても同様である。参照するモデルが複数ある場合、出力される結果もその数だけ存在するため、1回の学習から求められるAI モデルの精度だけで正否を判断することはリスクを有する。[3][4]の研究は、複数のモデル構築と出力される結果の不均質性を考慮した上で、少ないデータから行われた深層学習による出力画像から、より確実性の高い地すべり箇所を求めるための方法を検討しており、本研究においても有効な検証手法であると考えられる。

5.5.2 地形判読 AI がもたらす土木技術的意義

深層学習を適用することにより、同じ範囲の地すべり地形分布図を教師データに用いたとしても、推論したい地形図の解像度が詳細なものであれば、より小規模の地すべり地形の抽出が可能になる。つまり、地すべり地形の基本形状が同じであれば、スケールが異なる地形図を与えても一定の推論結果を得ることが可能である。

深層学習は、このような高い汎化性能を有する。本論の地すべり地形判読であれば、国内海外問わず、地形データが存在する地域へ適用可能である。近年の地形情報の解像度が飛躍的に向上したことで、判読に適した基礎データは整ったと言える。ただし、地域が異なれば、第2章で述べたように、地形地質が異なり、地すべりの破壊プロセスや降雨や地震などの誘因も異なる。こ

のため、一様の教師データでは抽出精度は頭打ちになり、その地域に応じたローカルカスタマイズが必要になる。日本のように地すべり地形分布図のような参考となるデータが存在しない海外などにおいては、地すべり地形判読 AI が出力した判読結果が、技術者目線で妥当なものであるか、判読漏れがないか、などを判断する必要がある。

その場合でも、ゼロから地形判読を行う必要はない点は、大きなメリットといえる。例えば、土木地質学的観点で日本のある地域と類似する地形地質の地域に適用する場合、参照する判読データがなくとも、ある程度の精度で迅速に判読を行うことができる可能性がある。その地域に応じた地すべり地形判読 AI を、データを蓄積しつつ、ブラッシュアップしていくことでさまざまな地域の土砂災害のリスクを有する斜面の抽出ができる可能性がある。

こうした地すべり地形という大原則が変わらず、地域差があるものに適用、追加学習することを転移学習という。転移学習は、例えば、判読技術者が、他の地域でも同様に地形判読ができるように、対象に含まれるローカルの特性を暗黙的に読み取り、判読していることと同義である。熟練した判読技術者に直ちに及ぶ地形判読 AI はできずとも、データ＝知見の蓄積は可能である。長年積み重ねられた土木工学の知見を教師データとすることで、被属人的で客観的な判定を支援するツールとして活用可能である。

5.5.3 深層学習により向上した地すべり地形判読技術と今後の展望と課題

地形判読 AI による従来の判読技術からの向上を表現した図を図 112 に示す。地すべり地形判読 AI は、従来は判読技術者が数ヶ月を要して判読図を作成してきた過程を短縮化、効率化が可能である。優れた従来技術である地形判読技術を、新しい技術である深層学習により、専門知を学習し、高速化する事で効率化を可能とした。判読技術者の知見を教師データに反映させることでデータの品質を良質化し、検出精度も向上させられることが判明した。さらに、この良質な教師データは、土木業界が抱える技術継承の課題に対しても、専門知をデータ化、見える化、していることから、優れた判読技術の教材として活用可能である。具体的に地形判読技術が向上した点を列記する。

- ・迅速化
- ・属人性、人的ミス等リスク軽減
- ・高解像度地形データへ対応
- ・地形・教師データ更新の柔軟性
- ・他地域への汎用性
- ・暗黙知の可視化による説明性、技術継承ツールとしての活用

また、既知の地すべり地形以外の地すべりを抽出できることから、判読技術者の見落としを防止できる効果も期待できる。地形情報の取得方法が多様化し、レーザや衛星等による高解像度、高頻度の地形情報が更新されても、事前に学習した地形判読 AI を用いれば、短時間で図化する事が可能である。判読技術の本質は、地すべり斜面の危険箇所を見極める事である。リスクが潜在する地形を可能な限り早く、客観的指標で抽出し、その場所を現地で事実を確認する事である。

とくに、2023年より国土地理院で公開が開始された衛星 SAR の時系列解析[7]等で変動を捉えられる技術とは親和性が高いと考えられ、地すべり地形判読 AI により抽出した地すべりのリスクを有する斜面を衛星情報と組み合わせて、豪雨後に素早く照合する、継続的にモニタリングする、教師データや地形情報を更新するなど、今後も発展性が期待できる。

昨今、土木、建設業界では、DX 化が求められている。DX 化の柱である AI (深層学習) の利活用、技術継承の手法として、本論ではその先駆的事例を実証的に明示した研究である。ただし、課題として、現時点における地すべり地形判読 AI の抽出精度、誤検知箇所、データ数の点で今後も検証を行う必要がある。とくに、地すべりの移動、災害派、多大な社会的インパクトを伴い、現象発生数が限られるため、実際の現象との対応が困難であることが想定される。既存の計測データや、昨今計測が行われている衛星 SAR による変動情報を駆使し、リスクの高いエリアの正当性を検証していく必要がある。

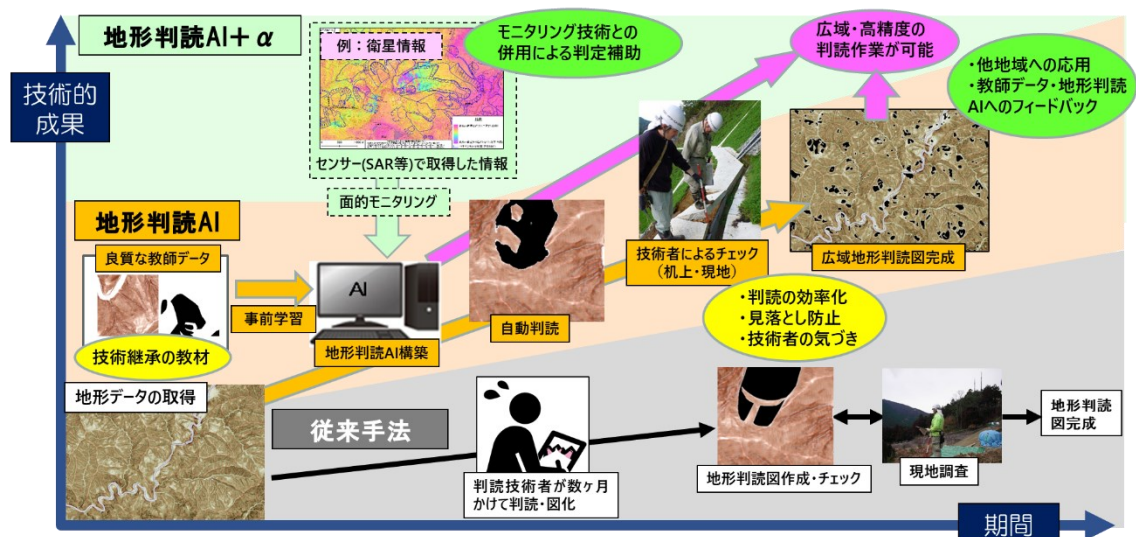


図 112 地形判読 AI を用いる事による技術的向上を示すイメージ図

5.6 第 5 章 まとめ

第 5 章では、地すべり地形判読 AI を用いた地形表現図ごとの精度比較を行った。人工知能の評価では、ピクセル単位で再現率、適合率、IOU などの指標が用いられることが多い。本研究で考案した新たな評価指標は、ピクセルの一致ではなく、地すべりの疑いのある「場所」に着目する点である。4 種類の地形表現それぞれで同じエリアとデータ数の条件で深層学習及び推論を実施した。等高線図、傾斜量図、CS 立体図、鮮鋭化した CS 立体図のうち、鮮鋭化した CS 立体図において 80% の抽出率であった。

この AI の精度は、技術者による教師データを作成することが重要である。地すべりのように自然現象は、予測が難しく 100% の正解が集めにくく、AI に入力する正解データに不確実性が生じるため、正解とするデータには注意が必要である。自然現象のように不確実性を持ったデータ

を取り扱う場合は、専門技術者が選別し、学習させる AI はツールであることを理解し、出力した結果は AI に与えたデータを踏まえて技術者が解釈を行うべきであることを留意点として述べた。

本論の地すべり地形判読 AI がもたらす土木工学、地質工学的意義として、他地域に適用可能な汎化性能を有することを取り上げた。さらに、地すべり地形判読 AI の教師データは、判読技術者が作り込んだ良質なデータであるため、技術継承の教材として技術継承の材料となり得るものであることを述べた。最後に、建設 DX の時代において、本論は AI (深層学習) を用いて土木工学の専門知、暗黙知を学習させることが可能であることを実証した先駆的事例であることを明示し、衛星 SAR 解析技術等と併用する事により、地すべり等の斜面災害リスクを持つエリアを迅速かつ効率的に絞り込むことが可能な研究成果であることを提示した。

引用文献

- [1] 古木宏和, 稲垣裕, 一言正之, 藤平大, 櫻本智美: ディープラーニングによる地すべり地形の自動抽出-精度と教師データの関係, 地盤工学会誌, 67 巻, 6 号, 2019.
- [2] 古木宏和: 3 次元地形情報を用いた深層学習による地すべり移動体抽出-学習データに用いる地形図と抽出精度の関係-, 日本地すべり学会誌, 58(2) , 2021.
- [3] 古木宏和, 荒木光一, 野村卓矢: 深層学習における少数の事象を対象としたアノテーション方法の検討, 土木学会, AI・データサイエンス論文集, 2 巻 J2 号, 2021.
- [4] 古木宏和, 一言正之, 稲垣裕: 深層学習による地形判読-地質体毎の入力教師データと推論精度の関係-, 日本地すべり学会第 58 回研究発表会, 2019.
- [5] 竹内 祐太郎, 山本 義幸, 古木 宏和, 宇津木 慎司, 吉田 一也, 中村 吉男: 空間的不均一性・連続性に関する正規化処理による地すべり移動体の深層生成, 写真測量とリモートセンシング, 61 巻 1 号, 2022.
- [6] 竹内 祐太郎, 山本 義幸, 古木 宏和, 宇津木 慎司, 吉田 一也, 中村 吉男: 深層学習モデルによる地すべり移動体の画像生成における不確実性評価と性能向上手法の提案, 写真測量とリモートセンシング, 61 巻 6 号, 2022.
- [7] 国土地理院: 地理院地図, 干渉 SAR 時系列解析結果, 2023. https://maps.gsi.go.jp/#5/35.889050/139.746094/&base=std&base_grayscale=1&ls=std%7Curgent_sbas_japan_merge_dr_u16&blend=0&disp=11&lcd=urgent_sbas_japan_merge_dr_u16&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m, (最終閲覧日: 2023/12/16)

第6章 結論

ここでは、本論の結論として、第1章から第5章までの結論を取りまとめる。

第1章は、地すべりという現象について、定義、現象の特徴、土木工学的な意味について述べた。地すべりは古くから山間部で人間の生活に密着し、被害をもたらしてきた土砂災害である。近年の豪雨災害、例えば紀伊半島水害では、地すべりが高速に移動し崩壊現象を起こす（深層崩壊）ケースがあり、予兆である地形を把握する事の重要性を示唆した。

豪雨災害以外で、世界的にはダム湛水に伴って発生した地すべりによる事故の事例もあり、現象そのものだけではなく、地すべりが移動し河道を閉塞するなどする事により、被害が生じるケースも重なり、日本国内では大きな災害を多数起こしてきた。

今後の異常気象が続く限りは、繰り返し滑動する特徴がある地すべりを効率的に予測、把握し、モニタリングや対策への事業に繋げるための手法はいくつか存在する。自然現象の事例を統計により予測する技術は、土砂災害警戒情報のように広域かつ安全側の警笛を鳴らすものが主流であり、精度や範囲絞り込みの点で課題がある。一方の判読技術では、属人性やコスト面における課題はあるものの、発生場予測としての技術は確立されており、これを効率化する事による土木工学的な意義は大きい。土砂災害予測における地すべり地形判読の現状の背景と課題を踏まえ、本論の目的と論述する概要を述べた。

第2章は、地形判読技術の向上に資する研究を進める前段として、すべり面の存在と地すべりの活動、地すべり地形の形成について、研究背景を述べた。地すべり地形が形成するメカニズムを整理し、地すべり地形の特徴が移動体の岩盤の破壊と密接な関係があることを示した。地すべりは地盤深部の健全な岩盤と移動体との間に形成されるせん断面が連続することにより移動し、移動距離が長いほど、せん断帯とその周辺の粒子は細粒化する。岩盤が重力により破壊され、地すべりとなって移動を繰り返し、健全な岩盤との境界は、岩石、土粒子が細粒化することにより土質的に強度低下を起こすため、地すべりはさらに動きやすくなる。一度すべり面が形成すると、重力の作用と降雨に伴う地下水の上昇等により、繰り返し活動を続け、結果として地すべり地形を形成する。地すべり地形は、こうした岩盤の破壊プロセスの表れであり、この地形を判読することは、斜面変動のリスクを読み取ることと同義である。故に判読技術を向上させることは、斜面災害発生場の事前予測技術高度化に繋がるため、意義と必要性があると言える。

第3章では、深層学習により地すべり地形判読の手法について述べた。基図のCS立体図の作成方法、AIのアルゴリズム（pix2pix）の優位性を述べ、画像での入出力ができる点は、扱いやすく、技術者が色調から読み取る判読作業に適している。また pix2pix は、技術者が判断する際に着目する色調パターンを学習していることが判明した。

技術者が判読に用いている地形表現図の違いがAIの学習精度にどのように影響するのかを調べるために技術者が判読の上で用いる地形表現図4種（等高線、傾斜量図、CS立体図、鮮鋭化したCS立体図）のデータを構築し、深層学習を行った。AIの抽出精度を向上させるための手法として、教師データ画像の地すべり移動体の色調を変更し、教師データを判読技術者の観点で選

別する事が重要であることを指摘した。

第4章では、深層学習による国土地理院が公開している数値標高モデルを用いて等高線、傾斜量図、CS立体図、鮮鋭化したCS立体図の4種類の図を作成し、深層学習による地すべり地形抽出を行った。教師データは、地形図の差が比較できるよう同一条件で作成し、正解データは、1:50,000地すべり地形分布図とした。深層学習の結果、本研究で構築したAIは、数分程度の短時間で100m²もの面積を判読することが可能であり、地すべり移動体の位置を約80%の確率で抽出することができることを示した。

抽出精度は、カラー情報が多いCS立体図で高くなり、技術者が判読する際に有効な鮮鋭化処理を加えたCS立体図で最も高かった。こうした事前の画像処理は、AIが特徴を捉えやすくする上でも有効であることを確認した。

第5章では、地すべり地形判読AIを用いた地形表現図ごとの精度比較を行った。人工知能の評価では、ピクセル単位で再現率、適合率、IOUなどの指標が用いられることが多い。本研究で考案した新たな評価指標は、ピクセルの一致ではなく、地すべりの疑いのある「場所」に着目する点である。4種類の地形表現それぞれで同じエリアとデータ数の条件で深層学習及び推論を実施した。等高線図、傾斜量図、CS立体図、鮮鋭化したCS立体図のうち、鮮鋭化したCS立体図において80%の抽出率であった。

このAIの精度は、技術者による教師データを作成することが重要である。地すべりのように自然現象は、予測が難しく100%の正解が集めにくく、AIに入力する正解データに不確実性が生じるため、正解とするデータには注意が必要である。自然現象のように不確実性を持ったデータを取り扱う場合は、専門技術者が選別し、学習させるAIはツールであることを理解し、出力した結果はAIに与えたデータを踏まえて技術者が解釈を行うべきであることを留意点として述べた。

本論の地すべり地形判読AIがもたらす土木工学、地質工学的意義として、他地域に適用可能な汎化性能を有することを取り上げた。さらに、地すべり地形判読AIの教師データは、判読技術者が作り込んだ良質なデータであるため、技術継承の教材として技術継承の材料となり得るものであることを述べた。最後に、建設DXの時代において、本論はAI(深層学習)を用いて土木工学の専門知、暗黙知を学習させることが可能であることを実証した先駆的事例であることを明示し、衛星SAR解析技術等と併用する事により、地すべり等の斜面災害リスクを持つエリアを迅速かつ効率的に絞り込むことが可能な研究成果であることを提示した。

【謝辞】

本博士論文の執筆にあたり、多くの方々のご支援と助言に感謝の意を表します。

最初に、指導教員である愛知工業大学工学部土木研究科中村吉男教授には、土木工学における専門的知見とご自身の経験から、具体的かつ適切なご指導を賜りました。同研究科山本義幸准教授には、博士論文執筆前より、土砂災害リスク対応への深層学習適用のテーマについて、多々議論、ご指導をいただいただけでなく、愛知工業大学における博士論文提出に際した手続き、ご校閲・校正等、細部にわたり懇切丁寧なご指導を頂きました。同研究室修了の竹内祐太郎氏には、本論のテーマ、手法を学術的に深める形で研究を遂行し、感染症による情勢不安定の最中にありながら、2本の査読付き論文の執筆を成し遂げるなど、私の研究の継続だけでなく後押しをして下さいました。深層学習という新しい手法を用いたアプローチは、土木分野での先駆的研究であっただけに、土木工学的意義を見出し、共感いただき、さらに深めていただいた御三方とのご縁がなければ、本博士論文の完成はありませんでした。改めて、ここに厚くお礼を申し上げます。

愛知工業大学工学部土木研究科の横田崇教授、渡邊康司准教授には、学位審査委員会において副査にて本論の審査を頂きました。本論において、土木工学における深層学習の活用の観点を論述するにあたり、情報科学部 情報科学科の中村英治教授には、学位審査委員会の副査の立場から深層学習の専門性と工学的観点から様々なご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

また、UGS社の宇津木真司氏には博士論文執筆のきっかけを頂き、本論文と手法の応用や地質工学的観点からの解釈、将来の展望性等について活発な議論を頂き、アイデア創出にご協力を頂きました。深く感謝の意をお伝えするとともに、今後も協業し、地質学、土木工学の観点から業界に貢献できることを共に探求できれば幸いです。

さらに京都大学名誉教授の千木良雅弘先生には、本論文の第2章の研究論文執筆にあたり、多大なご助力をいただきました。何より、先生から教わった土砂災害を理学と工学からアプローチする災害地質の考え方は、本論を執筆した社会人21年を経ても、私自身の根幹である思想と技術を紡いでくれています。この場をお借りして、改めて感謝申し上げます。

最後に、本研究に取り組む期間中、多忙な毎日を全力で支え、温かく応援してくれた妻明香に、心からの感謝を述べたいと思います。ありがとうございました。