

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

FURUKI Hirokazu

氏名 古木 宏和
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 博 乙 第 33 号
学位授与 令和 6 年 3 月 23 日
学位授与条件 学位規程第 3 条第 4 項該当
論文題目 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
論文審査委員 (主査) 教授 中村 吉男¹
(審査委員) 教授 横田 崇¹ 教授 中村 栄治² 准教授 山本 義幸¹
准教授 渡邊 康司²

論文内容の要旨

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

地すべりは古くから土砂災害を引き起こす斜面の土砂移動現象である。大規模に斜面が崩れ落ちることで、甚大な災害を引き起こす自然現象である。地すべりは降雨によって活動することが多く、突発的に発生する崖崩れ、崩壊とは異なり、動きが緩慢なこと、繰り返し活動する特徴がある。この動きの特徴から、地すべりは地形に変動の痕跡を残す。土木技術者は、この地形変動の痕跡を判読し、地すべりによる災害を未然に防ぐ技術を持って、地すべり災害の予防や事後対応を行ってきた歴史がある。例えば、長野県の地附山では、昭和 50 年の降雨で幅 500m、深さ 60m もの地すべりが発生し、24 名の生命が失われた。これらを受けて、長年にわたる地すべり対策事業により、調査、対策工が行われた。近年では異常気象による雨域の拡大台風の強大化、さらに線状降水帯などの豪雨が頻発し、2011 年には紀伊半島で大水害が発生した。紀伊半島では 1889 年にも大規模災害が発生しており、災害の再発性を裏付けるものであった。紀伊半島水害では、規模が大きく突発的に発生する地すべり（深層崩壊）が多発した。この地すべりや深層崩壊は、前兆として地形に特徴的な変形の痕跡を

残すことが知られており、これを専門技術者が判読することにより、地すべり発生場をある程度予測することが可能である。

この地すべり地形の判読は、熟練技術者により行われることで、精度が発揮される。日本では防災科学技術研究所により、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が、近年の高解像度の測量データに合わせた更新が行われていない。また、判読技術自体の習得は長い年月を要することから、個人による属人性やばらつきが生じることが課題である。さらに、技術者不足に苛まれる近年においては、分布図の更新だけでなく技術継承が困難になりつつある。

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、深層学習で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。本論の新規性は、深層学習の土木工学、地形地質学への適用にあり、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具体的に記載する。また、深層学習には一般に多量のデータが必要とされているが、本論では地すべりのような自然現象、災害などデータ

¹ 愛知工業大学 工学部 土木工学科（豊田市）

² 愛知工業大学 情報科学部 情報科学科（豊田市）

数に制約がある場合でも、判読精度を確保できる手法を発見し、その適用と検証を行った結果と、さらなる課題抽出とそれへの対応に関する提言について論述するものである。

本論文は全6章で構成される。各章の内容は次のとおりである。

第1章は、土木技術における地すべり現象のもたらす災害現象や、もたらされる社会的インパクトについて概観する。さらに世界的な異常気象により、今後も増大するであろう地すべり災害の減災に向けた判読技術の観点から解決すべき具体的な検討課題について整理し、本論文における目的を述べる。

第2章は、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。そして岩盤が細粒化することにより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。そのせん断面が降雨等の営力により繰り返し活動し、地すべり地形を形成する。以上から、判読技術は、こうした岩盤の破壊プロセスが内在している斜面災害のリスクを地形から読み取るための重要な技術であることを明らかにした。

第3章は、地すべり地形判読を深層学習によって行う手法について述べる。画像特徴を自動で認識可能な深層学習は、技術者が判読作業で着目する色調情報の認識力と高い親和性があることが判明した。数ある深層学習のアルゴリズムの中から、本論で用いた pix2pix は、画像による入出力が可能である点で、複雑なプログラムの構築と変更が必要なく、技術者が読み取る地すべり地形のような専門的知見をも学習可能とする発見について述べる。また、深層学習に用いる教師データの品質についても言及する。すなわち、判読技術者の観点で地形図の種類を選択し、入力する画像を選別することによって、推論精度が向上することを発見した。

第4章は、第3章で述べた深層学習の結果を整理した上で地形判読 AI としての性能について評価結果を述べる。地形判読 AI の評価は、地形というマクロスケールを考慮し、ピクセルの一致率ではなく、箇所が抽出できたことを正解と設定した。正解率は、2通り求めた。一つ目は、教師

データに用いた地すべり地形分布図との対比により、一致する箇所の確率を算出した。二つ目は AI が出力した箇所が、判読技術者の判定として妥当性がある箇所を技術者目線で計上し、確率を求めた。評価の結果、地すべり地形分布図に対する正解率は約 55%であった。一方、AI が判読した箇所が地すべり地形である確率は約 80%となり、技術者が見やすい地形表現図ほど、深層学習による地形抽出精度も向上するという関係性が見られた。いずれも推論出力に要する時間は数分である。

第5章は、地すべり地形判読 AI の出力結果について考察し、深層学習を地すべりのように自然現象に用いる際の着眼点や留意点の提言を示した。考察では、地形表現図の違いによらず AI と技術者が判読できた地すべり地形の特徴を明らかにし、判読技術への AI の適用性を述べる。本論では、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図を教師データに用いているものの、地形解像度の高い地形表現図に適用することで、地すべり地形分布図の判読対象外とされている斜面変動の前兆地形を検出できていることは、斜面の危険性を評価する技術として意義があるものと考えられる。また、AI が誤判定、あるいは抽出できない地形の特徴を技術者の視点から分析し、実際の判読適用を想定した場合の許容される誤判定であるのかを考察するとともに、抽出精度を改善するための課題抽出と解決策について述べる。本論では、地形判読 AI により誤判読と判定された画像は技術者でも判定が困難あるいは判断に迷うものが多く、自然科学、ひいては土木技術において 100%の正解が設定できない対象への深層学習の適用、評価、解釈の1提案となると考える。

第6章は、前章までに議論した事項を項目ごとに要約し、現時点で明らかになった課題と今後の発展性について言及した。

論文審査の結果の要旨

我が国では、梅雨時や台風シーズンになると地すべりや山崩れが全国各地で毎年のように発生し、家屋や道路、農地、林地が被害を受け尊い人命が失われることも少なからず生じている。また、地すべりは社会インフラや住民生活と密着した現象であり、地方自治体では対処できないほど大規模な災害となることから、第二次世界大戦後、頻発す

る地すべり災害については、法令化され（地すべり等防止法：昭和三十三年法律第三十号制定）、国により復旧・防災工事が行われることとなった。一方、時を同じくして、国土の利用、整備及び保全の観点から地理情報の充実が図られ、空中写真が一般に使用できるようになった。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な地形が存在することが指摘され、防災上重要な課題となる地すべりの発生箇所の予知・予測を、地形判読により確立する研究が積極的に取り組まれた。その成果は防災科学技術研究所により全国の地すべり地形分布図として整理された。しかしこの分布図の活用には、①1970年代に撮影されたモノクロ写真（縮尺 1:40,000）をベースに作成されたものであり、近年の高解像度の測量データに合わせた照査・更新が行われていない。②照査・更新には経験豊富な熟練技術者による地形判読が必要である。③熟練技術者の判読技術は理論と実践に基づくものであるが、それを明確な文書や図として公表せず暗黙知の形で個人のノウハウとして蓄えられていることが多く、判読結果には属人性や偏りが生じるなどの課題が挙げられている。更に、技術者不足にさいなまれ、形式知に依存する近年においては分布図の更新だけではなく地形判読の技術継承も困難な状況にある。等の問題点を含んでいる。

本論文は、土砂災害の予測を行う上で不可欠な地すべり地形判読の効果と課題を背景とし、深層学習による地形判読技術の向上を目指すものであり、これらを土砂災害の防止・保全に係る調査・計画・設計上の検討事項として議論し、考察したものである。

本論文は全 6 章で構成され、各章の内容は次のとおりである。

第 1 章「序論」では、地すべりを含めた地形判読技術の現状を整理し上述した問題点と解決すべき事項を整理し本研究の目的を明らかにした。

第 2 章「地すべりの破壊メカニズムと地形との関係性」では、研究を進める前段として本論文の課題である地すべり地形の判読と評価の重要性について、地すべりのメカニズムの観点から理論的、実験的に考察し論じた。

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」では、三次元地形情報を用いた深層学習の画像特徴抽出機能による生成 AI 技術を用いて、地すべり移動体の

抽出手法について吟味・検討を行った。開発手法は、地形図の空間情報と地すべり移動体の輪郭・境界の明瞭性に着目した地すべり地形表現図の双方を学習させることとし、これが可能なアルゴリズムを選定した。前者の地形図空間情報は地すべりによる地形変化の痕跡は地形情報に内在されるものであり、後者は、同時にその地形情報には土木技術者が理論と実践により培った暗黙知により判定した地すべりの移動体を明示している。また、地すべり地形表現図の作成においては、暗黙知の拠り所となる色調情報の認識力の観点から①等高線図、②傾斜量図、③CS 立体図、④CS 鮮鋭化図の 4 種類の地形表現図を用いて学習及び教師データの品質を吟味し推論精度の向上・効率化について総括的な考察を行い地形判読生成 AI 技術の適用性を議論した。

第 4 章「地すべり地形判読 AI の評価」では、第 3 章で示した深層学習により行った解析の結果を整理する上で、地形判読生成 AI 技術の評価は、地形というマクロスケールであることに着目し、ピクセルの一致率ではなく地すべり箇所が抽出できたことを正解であると設定する 2 通りの正解率を定義し議論を進めた。この結果、技術者が見やすい地形表現図を用いた深層学習ほど地形抽出精度も向上するという関係性が確認された。更に、CS 鮮鋭化図を用いた学習においては、地すべり移動箇所数（228 箇所）に対し 260 の抽出箇所数を出力したが、過剰抽出箇所には地すべり地形分布図には表示されていない明瞭な地すべり地形が含まれていることが判明した。また、いずれの地形表現図を用いた解析においても推論出力に要する時間は数分であり、判読の迅速化が図られていることが確認された。

第 5 章「地すべり地形判読 AI に関する提言」では、深層学習を地すべりのように自然現象に用いる際の着眼点や留意点について提言した。前章で指摘した過剰抽出箇所を、複数の技術者により近年の高解像度の測量データを用いて地形判読を行い地すべり地形の特徴を吟味することにより、既存の地すべり地形分布図では判読対象外とされている斜面変動の前兆地形を検出していることを確認した。すなわち、地形解像度の高い地形表現図に適用した AI による地形判読は、斜面の危険性を評価する判読能力を具備しているものと考えられ、意義ある技術向上が図られていることが判明した。一方、AI が誤判定、あるいは

抽出できない地形の特徴を技術者の視点から分析すると、例えば、段丘地形と地すべり地形の相違など、熟練技術者でも地形図のみからでは判定が困難あるいは判断に迷うものが少なからず含まれていることが判明した。このことから、地すべり地形生成 AI 技術は、地すべり判読の有効な支援ツールとして機能するばかりでなく、判読技術を継承するツールとしても活用できることが示唆された。本論文で示した一連の評価手法は、100%の正解が設定できない自然を対象とする土木技術における深層学習の適用、評価、解釈に一石を投じた。

第 6 章は、本論の結論として、前章までに議論した事項を項目ごとに要約し、現時点で明らかになった課題と今後の発展性について言及し、結論とした。

全国の地すべり地形分布図の作成が着手されて、約 50 年経過し、地すべり大国である我が国においては地形図から地すべり地形の痕跡を読み取る技術の重要性は社会インフラの計画・調査・設計において欠かさない役割を担っている。加えて、本文で話題とした地すべり地形の判読技術は、暗黙知を礎とした技術論によるところが大きく、技術の伝承を含めた客観的な手法による迅速な判読技術が求められると共に、近年の高解像度の測量データを用いた地形判読技術の向上が新たな課題として提起されている。この意味で、独自の観点から生成 AI を用いた地すべり地形の判読評価の適用は、先駆的な研究であり、地すべり地形に限らず土砂災害発生地形判読など広く議論の進展が期待される。また、本論文で提示した地形判読 AI に関する幾つかの提言は、地形判読のみならず、100%の正解が設定できない自然を対象とする土木技術における深層学習の適用、評価、解釈の合理化・高度化に寄与するものと考えられる。

以上、本論文は、学術的にも、工学的にも高い価値を有し、地形・地盤・情報工学の各分野における技術、特に実務に直結する調査・計画・設計の発展に寄与すること多大であり、博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認められる。