

氏 名	レイ ホン ルオン (ベトナム社会主義共和国)
学位の種類	博士(学術)
学位の番号	甲第82号
学位授与の要件	学位規程第5条第1項該当
学位授与の日付	平成28年3月24日
学位論文題目	空中写真判読とAHPを用いた湿潤熱帯強風化地域における地すべり地形の危険度評価に関する研究—日本とベトナムにおけるフィールド調査をベースとして Large scale landslide risk evaluation by aerial photograph interpretation and integrated AHP approach for humid tropical region based on Japan and Viet Nam field surveys
論文審査委員	(主査) 東北学院大学教授 宮 城 豊 彦 (副査) 東北学院大学教授 松 本 秀 明 (副査) 東北学院大学教授 高 野 岳 彦 (副査) 東北学院大学准教授 岸 浩 介 (副査) 弘前大学教授 檜 垣 大 助

## 論文の内容の要旨

### Abstract

Landslides in mountainous areas and along transport arteries are a serious hazard. They seriously affect living conditions, resulting in loss of human life, substantial property damage and possible disruption of vital transport and communication links. In central provinces of Vietnam, landslides occur frequently. In recent years, due to economic development, there is a big expansion of new settlement and infrastructure such as road, bridge and railroad over hazardous area... Therefore, recognizing existing landslide and assessing landslide risk are very important. The objective of this study will focus on these.

This study is written base on the Japan and Viet Nam field survey and related indoor works. Summary of the studies and the results are mentioned as follows :

1. Field data collection and the landslide mapping : The field investigations were carried in Ja-

pan (Fukayamadake area, at foot slope of Kurikoma volcano, Miyagi Pref.) and Vietnam (Between Prao and Kham Duc along the Ho Chi Minh Route, Central Vietnam). Based on the fields survey, the geological characteristics such as age, weathering characteristics, geological structure and the type of rocks are important factors for realize the landslide activities. Especially the weathering features seem directory affect the strength of rocks and it affect the type of landslide movement. These features play an important role in landslide occurrence in Viet Nam, such as at Mesozoic area, causative factors of landslide are regards to geologic structures with distributions of weak layer such as coal or sericite fine materials ; or at Precambrian, landslide occurrence has poor relation with geological structures ; the main factors are weathering and history of weathering features.

2. Landslide mapping : Large scale landslide topographic areas are identified by aerial photo interpretation. The inventory maps developed between Kham Duc and Prao. Among them, 681 landslide topographic areas were recognized. But the micro topography such as small scarps, cracks were able to not clarified. This is affect to the risk evaluation.

3. Landslide risk evaluation : 36 case studies were tried to apply Japan's inspection sheet for risk evaluation that involves morphological approach such as micro features of landslide body, outline of landslide topography and surroundings of landslide area. Unfortunately, the morphometric approach is not directory applicate to Viet Nam case because of many difficulties of the lacking of source data. On the contrary, there are many important factors of risk evaluation is clarified. That is geological features. The author established the new version of inspection sheet. This is includes the geological factors and reevaluate by AHP approach. Then, the distribution of AHP score are arrangement as the new inspection sheet.

本研究は、斜面災害を引き起こす主要要素である地すべりに注目し、これによる災害軽減を究極の目標としている。学位論文に直結する研究の実施においては、先ず先学によって蓄積された地すべり研究成果の中で、特に地すべり地形の地図化、地すべりの運動様式、地すべり地形の再活動リスクに関する文献調査を行い、研究の概要を把握した。次いで、日本・ベトナム両国をフィールドとして、1) 空中写真判読による地すべり地形の抽出・地図化を行い、抽出した約 650 か所の地すべり諸元をリスト化した。2) それらの一部について現地調査を行い地すべり発生メカニズムを分析し、地質時代、岩質、傾斜、地すべりタイプ、風化特性が地すべりの発生に大きく関係する素因であることを明らかにした。さらに、3) 日本地すべり学会が推進した AHP (一対比較による階層評価法) による地すべり地形の再活動リスク評価手法を検討して、ベトナムのような熱帯の強風化地帯に適用できるように作り直した。

これら一連の調査・研究は、ベトナムなどインドシナ半島で最初の企画である。画像情報解析

とフィールド調査データを組み合わせた取り組みによって、東南アジアのような熱帯強風化地帯に広く分布する大規模地すべり地形の、潜在的な災害発生可能性の評価に一定の進展をもたらすことができた。

本論文は6章からなる。

第1章では、研究の背景と意義を概括するとともに、2章以下の論文を支える材料となった自身の公表論文との関係を明示した。なお、申請者は後期課程在学中に11編の報告を行っており、その内2編が国際的に評価される学会誌に掲載された。

第2章では研究の背景を、ベトナムにおける斜面災害の現状と要因、日本の空中写真判読によるマッピング、両国の地すべり地形分布図作成状況、およびリスク評価の手法の4点を記載している。

災害の現状だが、中部から北部の山岳諸地域で集中的に地すべり災害が頻発することを紹介している。その中で、特に中部山岳のラオスとの国境付近ではベトナム戦争時に開発された山岳補給路のホーチミン道路が国道2号線に昇格したが、拡幅拡充を契機に極めて多くの地すべりが発生したことを指摘している。この背景に考えられるのが多数の地すべり地形の存在である。端的には地すべり地形の一部を切って道路を拡幅することで、斜面の潜在的な不安定性が顕在化し、現実の斜面災害を引き起こしている場合が多い。地すべり地形の形成や重地すべり災害の発生には、降雨などの誘因とともに地質・地質構造・風化特性が指摘されていることも紹介している。主指導教員は5~6年前からベトナムの地すべり災害情報の収集を試みていたが、包括的な情報収集が極めて困難であった。ベトナムの地すべり災害の状況を概括したのは、Tien et al. (2016)と並んで画期的である。

地すべり再活動のリスク評価手法に用いているのがAHP (Analytic Hierarchy Process) である。さて、地すべり地形分布図の作成は、日本が長い歴史と経験を持つ。ベトナムでも地すべり災害の発生状況の分布図はあるものの、潜在性を示すマッピングは統計ベースのものに止まっている。本章では、日本とヨーロッパ、ベトナムにおける地すべり情報マッピングの現状を比較することにより、広域地すべりのマッピングの意義を浮かび上がらせることができた。

第3章では、両国調査地の地域特性を記載している。日本は島弧海溝系に位置し、活発な地殻変動下にあり、併せて降水条件も厳しい。従って斜面災害は頻発する。詳細調査を実施した栗駒山麓は火山麓の多雪地で、同時に地震起動型の地すべりが顕著な場所であり、その一部地域の深山嶽地区についての地質特性と地すべり地形の分布特性を紹介している。ベトナムについては、調査地であるベトナム中部山間地の気候条件、地質・地形の概況を紹介している。筆者のベトナム調査地は中部山間地であるが、このエリアで発生している風化状況、斜面勾配を注目、当該地域における斜面災害情報を収集して整理紹介している。なお当該地域に発生する地すべりは後方回転、ブロックグライド、岩屑スベリ、楔型スベリなどに類型化できることを明らかにした。Tien et al. (2015) によって、道路沿いでの斜面災害は上記4類型が普通に発生することが指摘さ

れているが、本調査では大規模地すべり地形というレベルでも同じように理解できることを指摘することができた。

第4章は、大規模地すべり地形分布の空中写真判読による地図化とインベントリー（地すべりリスト）の作成にかかる章である。まず、地すべり地形の定義を紹介し、次いで日本の深山嶽地区における地すべり地形やリニアメントなど関連情報の地図化、フィールド調査で明らかにした地すべりの諸特性を記載している。そして、ベトナムの対象地域で実施した大規模地すべり地形の分布図作成作業の記載を行っている。先ず当該地域で確認できる地すべり地形の実形とその運動型を空中写真の実例とともに紹介している。同時に空中写真判読を実施することの困難性も指摘している。ベトナムでの空中写真確保には多くの困難が伴う。すなわち、多くの地区では写真撮影は1時期しか実施されておらず、軍事的な事情もあって写真の確保自体も容易ではない。空中写真判読は1990年代に撮影された33,000分の1のモノクローム密着空中写真を用いて、大規模地すべり地形を実体視判読、抽出し、2万5千分の1地形図6図幅の範囲で分布図を作成した。対称地域から685箇所の大規模地すべり地形を抽出した。空中写真判読による、地すべりによる変形領域の実形を把握して図示した広域の地すべり分布図作成はベトナム初の業績である。

さらに本章では、これらの地すべり地形と地質状況の関係を吟味し、限られた空中写真からの判読で取得される微地形情報の不確実性についても議論している。日本では多時期多種類の写真を比較検討することで事実判定の確度を高めることができるが、撮影自体に限られるベトナムでの分析は、後の章で議論される危険度評価手法に影響を与えることを指摘した。

第5章では、ベトナムの調査地を湿潤熱帯の典型と仮定して、地すべり地形の危険度評価に関する議論と試論を展開している。一般に地すべり現象は、不安定要因を含む斜面の一部が安定するために移動する現象である。しかし、地すべりによって移動・変形した土地は依然として斜面上に止まる。この移動し停止した土地を移動体と称するが、その形態・物性・水循環は変動前の状態からは大きく変化している。この変化の仕方は、自律的破壊過程として理解することができ、この過程のステージ毎に再活動の発生可能性を考えることができる。学位申請者の主指導教員らは、この理論とAHPを組み合わせて地すべり地形の再活動リスクの評価法を構築した。学位申請者は、この評価法を熱帯強風化地域に適用しようと試みた。しかしそれは、2つの点で不適切であるとの結論に到達した。第1に、地質・風化特性の大きな相違である。地質の時代幅が先カンブリア紀（6億年以前）から第四紀（200万年以後）まで、極めて長く、その地質構造・岩質・風化に圧倒的に違いがあり、地質時代で類型化することで、地すべり発生の特性を大まかに把握出来そうなこと。第2に画像情報の限界である。ベトナムでは、空中写真や地形図、その他のセンシング情報の整備が乏しく、空中写真の判読情報を検証する術が限られている。また、熱帯林という厚い森林に遮られて地表の微地形を観察しにくいことも重大である。これらを踏まえて、ベトナムでのリスク評価は、地質・地質構造・風化という地質特性をAHPの評価要素に加える

こととした。これに伴って、AHP 評価のシートも改良することとなった。申請者の評価シートにある評価項目とその配点が、実際の地すべりリスクをどれ程適切に反映できているのかは、現地での変動状況の調査事例である 30 か所の AHP スコアで検証することとした。その結果、地質・風化特性を含めて評価シートは、実際の被害状況を反映しているものと判断された。風化特性も含めた地質要因を評価軸に含めるのは妥当と考えられる。

第 6 章は本学位申請論文の総括である。第 1 に、地すべり地形のマッピングによるベトナムの地すべり地形と災害発生特性の総括である。日本で開発した手法により地すべり地形の外形自体は把握でき、2 万 5 千分の 1 地形図 6 図幅分の地すべり地形分布図を作成することができた。ベトナムの調査地一帯に分布する第四紀から先カンブリア紀までの広い時期での地質・地質構造と風化特性と地すべり地形形成の対応を把握した。地質に関係する特性と地すべり地形の分布とに相応の関係を指摘できた。第 2 に、これを踏まえて、AHP では地質分野の要件を危険度評価の評価項目に含めるで、ベトナムのような熱帯強風化地域に適用可能な地すべり再活動評価シートを構築した。最後に、筆者の調査研究の体験を踏まえて、ベトナムにおける今後の調査研究のあり方を提案した。

## 審査結果の要旨

学位申請者の博士後期課程における標記研究の実施状況、一連の研究業績をまとめ上げることで作成した学位請求論文、および研究発表について一連の評価を行った。最終審査会は、平成 28 年 2 月 10 日 15 時 15 分から 16 時 15 分に公開発表と質疑、引き続き 16 時 30 分から 17 時 30 分には最終の口頭試問を実施した。質疑応答は英語と日本語で実施され、適宜日本語から英語への翻訳も行った。以下に審査の要約を記す。

**全体的な評価：**本研究は、斜面災害を引き起こす主要な要素である地すべりに注目し、これによる災害軽減を究極の目標としている。学位論文に直結する研究の実施においては、先ず先学によって蓄積された地すべり研究成果の中で、特に地すべり地形の地図化、地すべりの運動様式、地すべり地形の再活動リスクに関する文献調査を行い、研究の概要を把握した。次いで、日本・ベトナム両国をフィールドとして、1) 空中写真判読による地すべり地形の抽出・地図化を行い、抽出した約 650 か所の地すべり諸元をリスト化した。2) それらの一部について現地調査を行い地すべり発生メカニズムを分析し、地質時代、岩質、傾斜、地すべりタイプ、風化特性が地すべりの発生に大きく関係する素因であることを明らかにした。さらに、3) 日本地すべり学会が推進した AHP (一対比較による階層評価法) による地すべり地形の再活動リスク評価手法を検討して、ベトナムのような熱帯の強風化地帯に適用できるように作り直した。

これら一連の調査・研究は、ベトナムなどインドシナ半島で最初の企画である。画像情報解析とフィールド調査データを組み合わせた取り組みによって、東南アジアのような熱帯強風化地帯に広く分布する大規模地すべり地形の、潜在的な災害発生可能性の評価に一定の進展をもたらしたものとして高く評価できる。よって、博士(学術)の称号を授与するに叶うとすることができる。

**評価の詳細：**学位論文の各章を精査する。本論文は6章からなる。

第1章では、研究の背景と意義を概括するとともに、2章以下の論文を支える材料となった自身の公表論文との関係を明示した。なお、申請者は後期課程在学中に11編の報告を行っており、その内2編が国際的に評価される学会誌に掲載されている。

第2章では研究の背景を、ベトナムにおける斜面災害の現状と要因、日本の空中写真判読によるマッピング、両国の地すべり地形分布図作成状況、およびリスク評価の手法の4点を記載している。

災害の現状だが、中部から北部の山岳諸地域で集中的に地すべり災害が頻発することを紹介している。その中で、特に中部山岳のラオスとの国境付近ではベトナム戦争時に開発された山岳補給路のホーチミン道路が国道2号線に昇格したが、拡幅拡充を契機に極めて多くの地すべりが発生したことを指摘している。この背景に考えられるのが多数の地すべり地形の存在である。端的には地すべり地形の一部を切って道路を拡幅することで、斜面の潜在的な不安定性が顕在化し、現実の斜面災害を引き起こしている場合が多い。地すべり地形の形成や重地すべり災害の発生には、降雨などの誘因とともに地質・地質構造・風化特性が指摘されていることも紹介している。主指導教員は5~6年前からベトナムの地すべり災害情報の収集を試みていたが、包括的な情報収集が極めて困難であった。ベトナムの地すべり災害の状況を概括したのは、Tien et al. (2016)と並んで画期的である。

地すべり再活動のリスク評価手法に用いているのがAHP (Analytic Hierarchy Process) である。さて、地すべり地形分布図の作成は、日本が長い歴史と経験を持つ。ベトナムでも地すべり災害の発生状況の分布図はあるものの、潜在性を示すマッピングは統計ベースのものに止まっている。本章では、日本とヨーロッパ、ベトナムにおける地すべり情報マッピングの現状を比較することにより、筆者による広域地すべりのマッピングの意義を浮かび上がらせている。

第3章では、両国調査地の地域特性を記載している。日本は島弧海溝系に位置し、活発な地殻変動下であり、併せて降水条件も厳しい。従って斜面災害は頻発する。詳細調査を実施した栗駒山麓は火山麓の多雪地で、同時に地震起動型の地すべりが顕著な場所であり、その一部地域の深山嶽地区についての地質特性と地すべり地形の分布特性を紹介している。ベトナムについては、調査地であるベトナム中部山間地の気候条件、地質・地形の概況を紹介している。筆者のベトナム調査地は中部山間地であるが、このエリアで発生している風化状況、斜面勾配を注目、当該地

域における斜面災害情報を収集して整理紹介している。なお当該地域に発生する地すべりは後方回転、ブロックグライド、岩屑スベリ、楔型スベリなどに類型化できることを明らかにした。Tien et al. (2015) によって、道路沿いでの斜面災害は上記 4 類型が普通に発生することが指摘されているが、本調査では大規模地すべり地形というレベルでも同じように理解できることを指摘した点で有意義である。

第 4 章は、大規模地すべり地形分布の空中写真判読による地図化とインベントリー（地すべりリスト）の作成にかかる章である。まず、地すべり地形の定義を紹介し、次いで日本の深山嶽地区における地すべり地形やリニアメントなど関連情報の地図化、フィールド調査で明らかにした地すべりの諸特性を記載している。そして、ベトナムの対象地域で実施した大規模地すべり地形の分布図作成作業の記載を行っている。まず当該地域で確認できる地すべり地形の実形とその運動型を空中写真の実例とともに紹介している。同時に空中写真判読を実施することの困難性も指摘している。ベトナムでの空中写真確保には多くの困難が伴う。すなわち、多くの地区では写真撮影は 1 時期しか実施されておらず、軍事的な事情もあって写真の確保自体も容易ではない。空中写真判読は 1990 年代に撮影された 33,000 分の 1 のモノクローム密着空中写真を用いて、大規模地すべり地形を実体視判読、抽出し、2 万 5 千分の 1 地形図 6 図幅の範囲で分布図を作成した。対称地域から 685 箇所の大規模地すべり地形を抽出した。空中写真判読による、地すべりによる変形領域の実形を把握して図示した広域の地すべり分布図作成はベトナム初の業績である。

さらに本章では、これらの地すべり地形と地質状況の関係を吟味し、限られた空中写真からの判読で取得される微地形情報の不確実性についても議論している。日本では多時期多種類の写真を比較検討することで事実判定の確度を高めることができるが、撮影自体に限られるベトナムでの分析は、後の章で議論される危険度評価手法に影響を与えることを指摘している。

第 5 章では、ベトナムの調査地を湿潤熱帯の典型と仮定して、地すべり地形の危険度評価に関する議論と試論を展開している。一般に地すべり現象は、不安定要因を含む斜面の一部が安定するために移動する現象である。しかし、地すべりによって移動・変形した土地は依然として斜面上に止まる。この移動し停止した土地を移動体と称するが、その形態・物性・水循環は変動前の状態からは大きく変化している。この変化の仕方は、自律的破壊過程として理解することができ、この過程のステージ毎に再活動の発生可能性を考えることができる。学位申請者の主指導教員らは、この理論と AHP を組み合わせて地すべり地形の再活動リスクの評価法を構築した。学位申請者は、この評価法を熱帯強風化地域に適用しようと試みた。しかしそれは、2 つの点で不適切であるとの結論に到達した。第 1 に、地質・風化特性の大きな相違である。地質の時代幅が先カンブリア紀（6 億年以前）から第四紀（200 万年以後）まで、極めて長く、その地質構造・岩質・風化に圧倒的に違いがあり、地質時代で類型化することで、地すべり発生の特性を大まかに把握出来そうなこと。第 2 に画像情報の限界である。ベトナムでは、空中写真や地形図、その他のセ

ンシング情報の整備が乏しく、空中写真の判読情報を検証する術が限られている。また、熱帯林という厚い森林に遮られて地表の微地形を観察しにくいことも重大である。これらを踏まえて、ベトナムでのリスク評価は、地質・地質構造・風化という地質特性を AHP の評価要素に加えることとした。これに伴って、AHP 評価のシートも改良することとなった。申請者の評価シートにある評価項目とその配点が、実際の地すべりリスクをどれ程適切に反映できているのかは、現地での変動状況の調査事例である 30 か所の AHP スコアで検証することとした。その結果、地質・風化特性を含めて評価シートは、実際の被害状況を反映しているものと判断された。風化特性も含めた地質要因を評価軸に含めるのは妥当と考えられる。

第 6 章は本学位申請論文の総括である。第 1 に、地すべり地形のマッピングによるベトナムの地すべり地形と災害発生特性の総括である。日本で開発した手法により地すべり地形の外形自体は把握でき、2 万 5 千分の 1 地形図 6 図幅分の地すべり地形分布図を作成することができた。ベトナムの調査地一帯に分布する第四紀から先カンブリア紀までの広い時期での地質・地質構造と風化特性と地すべり地形形成の対応を把握した。地質に関係する特性と地すべり地形の分布とに相応の関係を指摘できた。第 2 に、これを踏まえて、AHP では地質分野の要件を危険度評価の評価項目に含めるで、ベトナムのような熱帯強風化地域に適用可能な地すべり再活動評価シートを構築した。最後に、筆者の調査研究の体験を踏まえて、ベトナムにおける今後の調査研究のあり方を提案している。

以上、各章ごとに総括したように、本研究はそれぞれの章において新規性のある成果を得ることに成功し、地すべり地形の分布状況把握においても、再活動リスクの評価シートの作成においても一定の進歩が得られたと判断できる。

## 最終試験結果の要旨

最終試験は 2 月 10 日午後 4 時 30 分から 5 時 30 分まで、教養学部 4 号館 3 階 (GIS 実習室) において実施した。発表者による簡単な概要説明の後、質疑応答が行われた。

主な質問項目は、

大規模地すべり地形とはどのようなものを指すのか。

既存の地すべりの危険度評価研究にはどのような特徴があるのか。

本研究における危険度評価の着眼点はどのようなものか。

本研究の手法が日本でのそれよりも優れている点はあるか。等であった。

回答は何れも肝要を得ており、特段の問題は認められなかった。試験担当者の一致した意見として、合格と判定する。