

気候変動を考慮した融雪期土砂災害の危険度評価手法の確立

室蘭工業大学大学院 工学研究科

北海道大学大学院 工学研究院

北海学園大学 工学部

川 村 志 麻

石 川 達 也

所 哲 也

気候変動を考慮した融雪期土砂災害の危険度評価手法の確立

Risk assessment of geo-disaster in snowmelt season considering climate changes

川村 志麻¹・石川 達也²・所 哲也³

Shima KAWAMURA, Tatsuya ISHIKAWA and Tetsuya TOKORO

¹ 室蘭工業大学 大学院工学研究科 教授

² 北海道大学 大学院工学研究院 教授

³ 北海学園大学 工学部 准教授

要 旨

平成30年3月9日、国道236号野塚峠トンネル付近で雪崩が発生し、道路施設等に影響を与えた。この被災状況を確認すると、雪崩に加え土砂が広範囲に堆積していることが確認されている。それゆえ、雪崩と土石流の発生も視野に入れた検討が必要である。気候変動の影響の顕化も指摘されており、融雪期の雪崩と土石流の土砂災害が多発する可能性がある。本研究では、iRIC を用いて、気候変動を考慮した融雪期の土砂災害危険度評価手法の確立を目指す。本報告では、令和2年度に引き続き、土石流解析ソフトiRIC Morpho2DHを用いて、当該地域の現在気候と将来気候での降雨量と気温の変化を把握し、集水特性を考慮した同解析から、将来気候における雪崩－土石流現象の災害リスクについて検討した。解析では、雪崩と土石流（雪泥流）に対する土砂災害の堆積範囲・土砂量・流動距離を予測した。次いで、雪崩によって河道閉塞が発生した過去の災害事例に基づき、同様の検討を行い、堆積範囲・土砂量・流動距離の予測を行った。さらに、他の地盤解析ツールを開発し、解析手法の高度化に向けた検討を進めた。最後に、今後の課題を整理した。

《キーワード：雪崩；土石流；気候変動；斜面災害リスク》

1. はじめに

平成30年3月9日、一般国道236号北海道広尾町野塚トンネル付近において、雪崩が発生し、道路施設や交通網に影響を与えた。この融雪期災害の被災状況を確認すると、雪崩に加え、土砂が広範囲に堆積していることが確認されている。当時の連続雨量が293mmであることを考えると、同時に土砂流動の発生も視野に入れた検討が必要である。気候変動の影響の顕在化が指摘¹⁾されている中、このような融雪期の雪崩・土砂流動（土石流）被害が多発する可能性が指摘される。

本報告では、令和2年度に引き続き、土石流解析ソフトiRIC Morpho2DHを用いて、当該地域の現在気候と将来気候での降雨量と気温の変化を把握し、集水特性を考慮した同解析から、将来気候における雪崩－土石流現象の災害リスクについて検討した。解析では、雪崩と土石流（雪泥流）に対する土砂災害の堆積範囲・土砂量・流動距離を予測した。次いで、雪崩によって河道閉塞が発生した過去の災害事例に基づき、同様の検討を行い、堆積範囲・土砂量・流動距離の予測を行った。さらに、他の地盤解析ツールを用いた解析手法の高度化に向けた検討を進めた。最後に、今後の課題を整理した。

2. 北海道で発生した過去の土砂災害の特徴と傾向

気候変動による影響を議論するために、はじめに北海道で発生した過去の土砂災害の特徴を把握する。

ここでは、過去およそ100年の主な土砂災害の発生年月日、発生箇所、誘因、地形、表層地質を、地すべり学会北海道支部が発行した「北海道の地すべり'99」と「北海道の地すべり2012」と地盤工学会北海道支部が発行した「北海道の火山灰質土の分布と特徴、実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工、被災事例～」を参考²⁾³⁾⁴⁾とし、土砂災害の特徴を整理した。なお、発生箇所は広範囲にわたらないものに限定している。地形と表層地質は国土地理院（現：国土交通省（国土地理院））と国土庁（現：国土交通省）発行の「土地分類図」を用いて調査している⁵⁾⁶⁾。以下にその特徴と傾向を示す。

図-1は発生誘因の割合を示したものである。図より、最も多い誘因は降雨による事象であり、降雨と融雪、降雨と地震の複合事例を含めると7割以上を占める。また、融雪関連のものは約4分の1を占めている。このことから、融雪期災害に対する注意が必要であることがわかる。

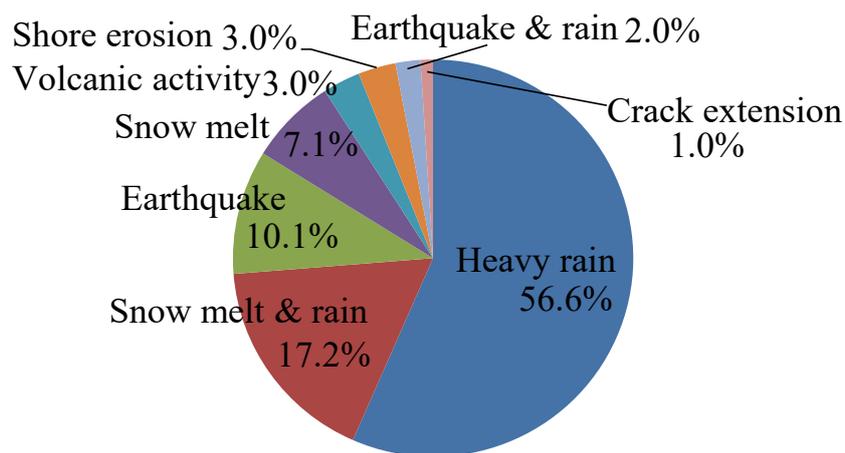


図-1 発生誘因の割合

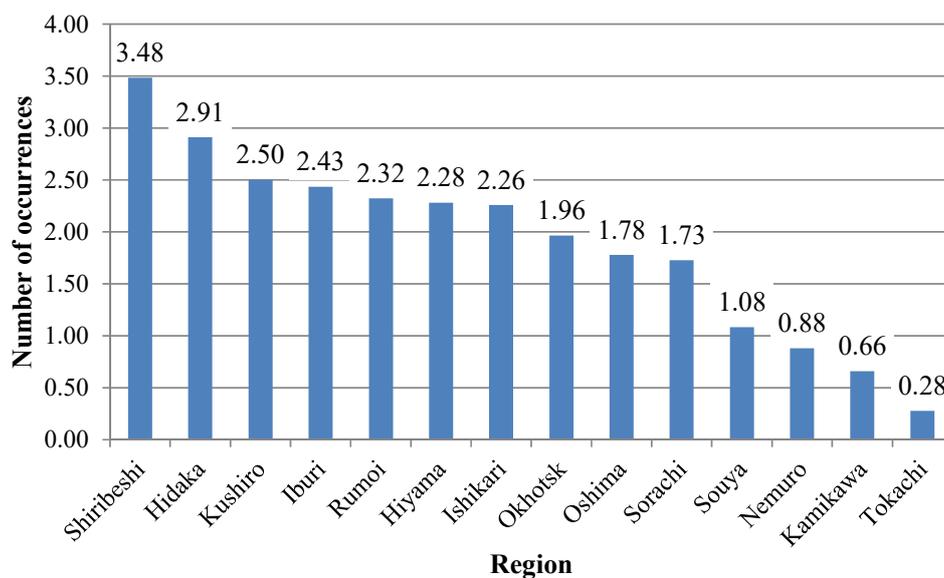


図-2 地域ごとの発生件数(/1000km²)

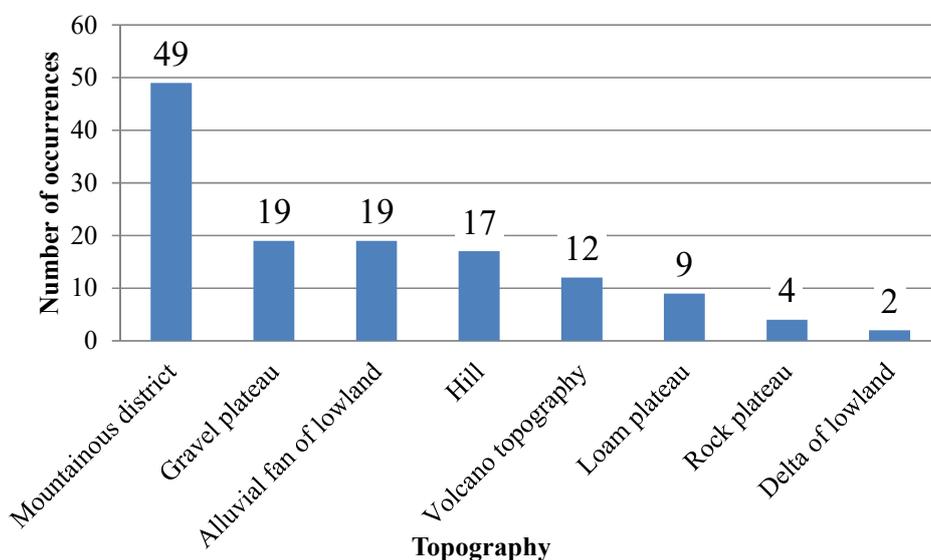


図-3 地形ごとの発生件数

次に、地域別の特徴を整理してみた(図-2)。ここでは、地域によって面積が大きく異なるため、単位面積当たりの発生件数として評価している。土砂災害発生件数が最も多い地域は後志地方で、最も少ない地域は十勝地方である。俯瞰的にみると、地域による違いはそれほど大きくはないが、山地が多い地域ほど件数が多く、台地や平地が多い地域ほど発生件数が少ない傾向にある。また、地形別では、山地が最も多く、次に砂礫台地、扇状地性低地が同数で続き、次いで丘陵地、火山地、ローム台地、岩石台地、三角州性低地となった。結果として、山地が突出して多いほか差はあまり認められない。地形分類図から判断すると、台地や低地での災害のほとんどが河川沿いに集中していた。低地では土石流や地すべりや盛土崩壊といった事例がみられた(図-3)。

同様に、北海道における過去の雪崩災害の履歴⁷⁾(平成18年～令和元年)について整理したものを図-4に示す。図より、各年ばらつきはあるものの、3月～4月に発生する割合が高くなっている(緑線)。これは本研究で対象としている災害事例と同様に、降雨と融雪が急激に進んだ結果、雪崩が発生するケースが増えてきていることを示すものであろう。

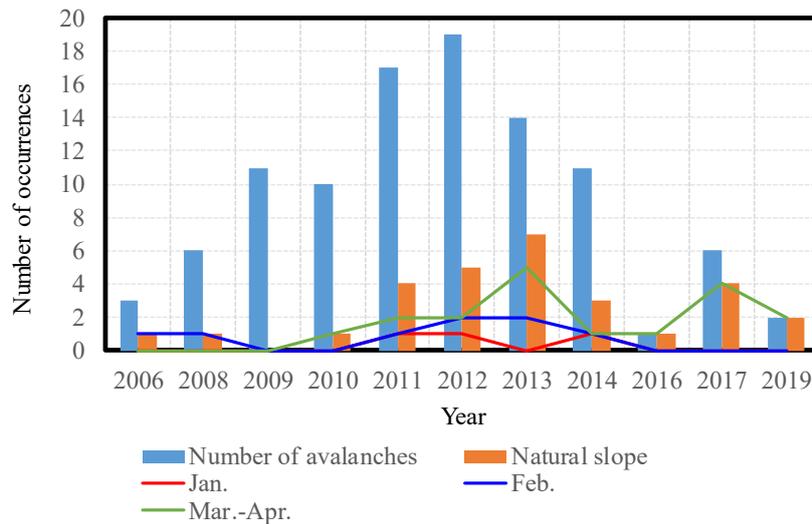


図-4 北海道における過去の雪崩災害の履歴発生誘因の割合

以上のことから、北海道で発生する土砂災害は融雪期に多く発生していること、地域・地形による分類では山地が多い地域で災害発生頻度が高いこと、さらには雪崩災害においても3月～4月に発生する割合が高くなっていることがわかる。よって、気候変動による影響を考慮すれば、今後、融雪期に雪崩-土砂災害の複合的な災害の発生頻度が高まる可能性があることが示唆された。

以下では、はじめに①研究対象地域の現在気候と将来気候の降水量と気温の関係を把握し、次いで②今まで雪崩発生地点の特定が困難であった点を、斜面地形や融雪水の集まり方の観点から考察し、雪崩、雪泥流の発生予測が可能かどうかを検討した。また③平成27年3月2日では、同路線上で雪崩が発生し、それによって近隣にある2級河川が閉塞され、河川を乗り越えた雪崩が道路を塞いだ事例もあることから、この事例に対しても同様の解析を行い、その解の妥当性を検証した。最後に、解析手法の高度化を議論するため、他の地盤解析ツールを開発し、今後の課題について整理した。

3. 当時の災害概要

平成30年3月9日11時20分頃、北海道国道236号野塚トンネル起点側坑口付近において、大規模な雪崩が発生した(図-5)。その後、16時10分に土石流発生情報が提供されているが、発生時間・規模などは不明となっている。当時の状況を図-6に示す。

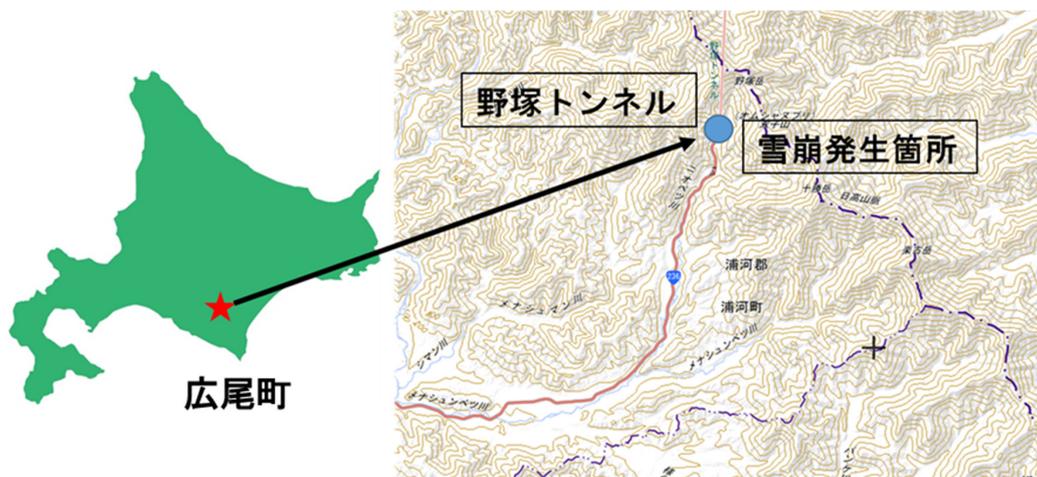


図-5 災害発生地点(国土地理院地図に加筆)



図-6 当時の被災状況（北海道開発局室蘭開発建設部 提供）

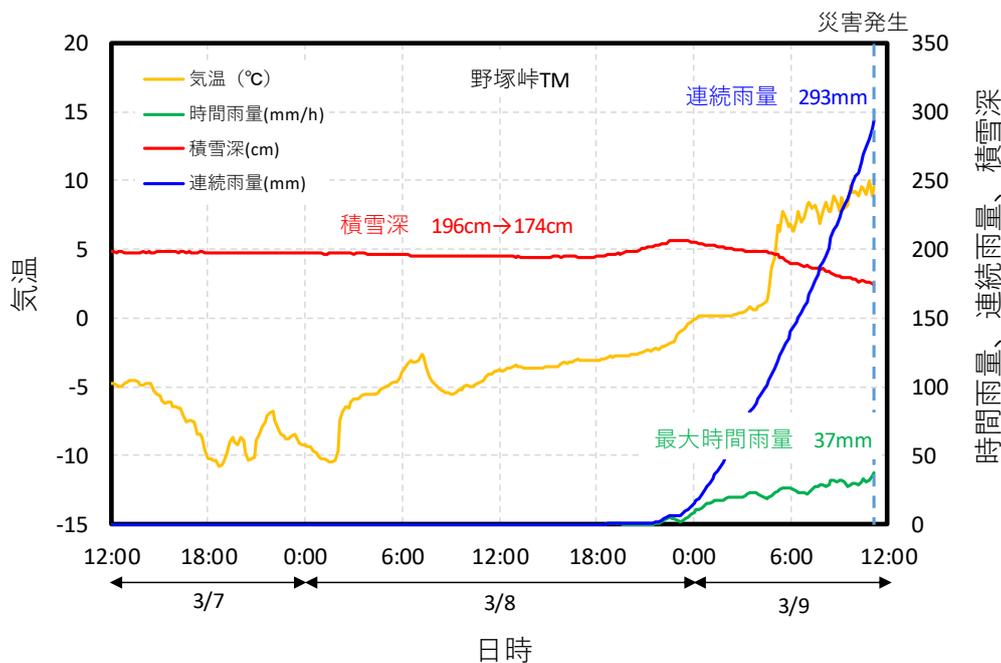


図-7 災害発生当時の気象情報（野塚峠TM，北海道開発局室蘭開発建設部 提供）

災害発生時は，平成30年3月9日に接近した前線と低気圧の影響により暖かく湿った空気とその周辺に流れ込み，気温が上昇し，災害直前までの連続雨量が293mm，最大時間雨量が37mmを記録した（図-7）。また，積雪深が22cm減少したことも確認されている。これにより，大雨と融雪が急激に進んだ結果，雪崩が発生したとされている。雪崩の規模は総量：約60,000m³，うち道路上：約7,000m³（高さ2m，幅60m，延長60m）であった⁸⁾。図-6の雪崩堆積状況から確認されるように，雪崩と同時に土砂流動（土石流）が発生した可能性が高いことが伺える。本災害の発生 の 要 因 を 災 害 資 料⁸⁾ に つ い て 整 理 すると，次の地形的・現象論的な特徴が考えられる。

・地形的要因

野塚峠は急峻な日高山脈の西側に位置し，雪崩が発生しやすい谷地形が多い。雪崩や土石流が発生しやすいことから，雪・土砂の走路では樹木などが過去の土砂災害で流され，走路の障害物が少ないため流下速度が大きくなる可能性がある。

・積雪状況による要因

気温上昇による大雨・融雪によって現地の積雪は，水を多く含んだ湿雪に変化していたと考えられる。湿雪内にあるザラメ雪は雪粒同士の結合が弱く，このザラメ雪が生成されたことで全層雪崩が発生した可能性が高い。

令和2年度の研究では，土石流解析ソフトiRIC Morpho2DHを用いた解析を行い，疑似的に雪崩と雪泥流現象の再現が可能であることを示している。

4. 使用した気候変動予測モデル

解析の対象地域を図-8に示す。本研究では，気象庁のMRI-NHRCM20（気候変動予測モデル）⁹⁾の20km格子気象データを，千田ら¹⁰⁾が北海道全域を対象に1km格子毎に統計的ダウンスケーリングした高解像度のデータセット（以下，1km格子NHRCM20と称す）を使用した。このデータセットはDSJRA-55（領域ダウンスケーリングモデル）¹¹⁾および気象庁平年値¹²⁾を用いてバイアス補正し，ダウンスケーリングしたものである。また，予測シナリオは地球温暖化への対策を一切行わなかった場合の最悪のシナリオであるRCP8.5シナリオについて，海面水温SST1～SST3の中で最も海面水温の高くなるSST3を採用

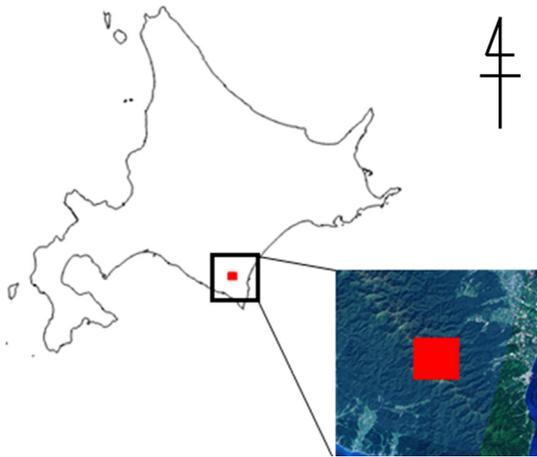


図-8 対象とした解析範囲

表-1 NHRCM20 の概要

MRI-NHRCM20→1km格子NHRCM20		
	現在気候	将来気候
空間解像度	20km→1km	20km→1km
対象期間	1984年9月～2004年8月 (日データ)	2080年9月～2100年8月 (日データ)
将来予測シナリオ	—	RCP8.5
海面水温パターン	HadISST	SST3
気象項目	降水量・気温	

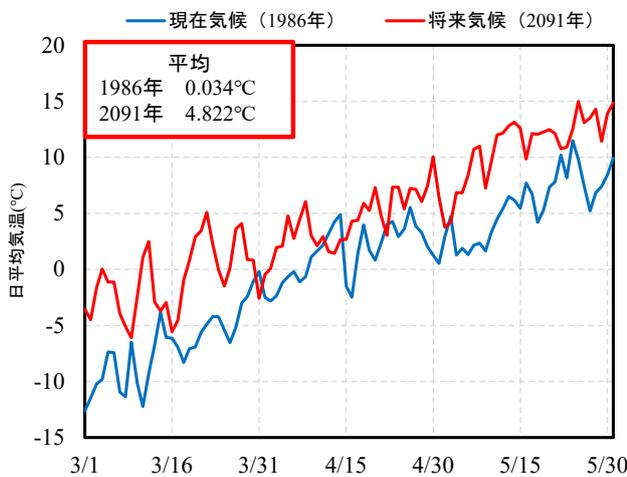


図-9 融雪期の日気温変動

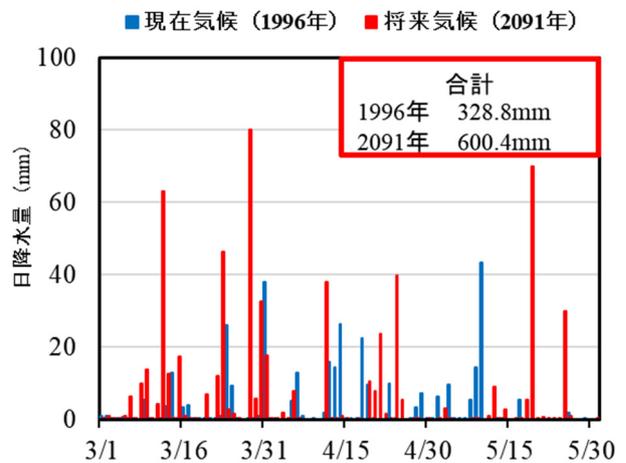


図-10 融雪期の日降水量

し、現在気候との最も大きい変化量を評価する。対象期間は現在気候（1984年9月～2004年8月）、将来気候（2080年9月～2100年8月）とする。表-1にNHRCM20および1km格子NHRCM20の概要を示す。

4. 1. 気候変動による気温と降水量の変動

現在および将来気候の各20年間で3～5月の気温が最も平均に近い年の気温変化を図-9に示す。融雪期である3～5月においても気温が上昇していることがわかる。また、気温がプラスになる最初の日に着目すると、将来気候では現在気候より1か月近く早まっていることから、冬の終わりが早まっていることがわかる。

次に、同期間の3か月間の合計降水量と日降水量を図-10に示す。図より、現在気候の1996年では3か月の合計降水量が328mmなのに対して将来気候の2091年では600mmと大きく増加していることがわかる。また、最大日降水量に着目すると、現在気候が43mmなのに対して将来気候は80mmとなり倍近く増加している。さらに、40mm以上の降水量となる日数も増えていることから、将来気候では、この対象地域において、融雪期の日降水量が増加することが指摘される。実際、北海道では、融雪期の雪崩・土砂災害は増加傾向¹³⁾にあることから、今後は多方面から災害リスクを議論することが重要となろう。

表-2 既往の研究の解析結果

	雪崩	土石流	雪泥流
堆積範囲 (m ²)	17,171	8,173	20,965
堆積量 (m ³)	21,609	1,448	60,377
流動距離 (m)	1,117	1,035	1,123

表-3 解析に用いたパラメータ

	野塚峠土試料	ザラメ雪
平均粒径(m)	0.012	0.002
流動前の存在率(%)	47	15
流動後の存在率(%)	47	15
内部摩擦角 (degree)	42	
液体として振る舞う土砂の割合	0.1	

5. 解析の概要

5.1. 解析方法

本研究で使用したiRICは水工学に関わる数値シミュレーションツールである。ここでは、その中の一つである土石流・泥流モデルを主体とした解析ソルバMorpho2DHを用いた解析を行った。解析モデルでは、掃流力・抵抗係数・河床位が求められるようになっている。なお、詳細は既報^{14),15)}が詳しい。iRIC Morpho2DHでは「流れのみ」、「掃流砂・浮遊砂」、「土石流・泥流」の3種類の解析が可能である。

本解析¹⁶⁾では、はじめに雪崩・土石流の発生リスクが高い地点を、水の流れやすさと集水地点の観点から調べた。その後、雪泥流条件での疑似解析を行った。ここで、実際のデブリ量に対する逆解析を行った。既往の研究¹⁵⁾では、雪崩・土石流・雪泥流（土石流と雪崩が同時発生したもの）の3種類の堆積範囲・堆積量・流動距離を比較した際、雪泥流が最も大きな被害が出ることを明らかにしている（表-2）。ここでは、災害の影響が大きい雪泥流現象に着目し、評価を行うことにした。用いた解析のパラメータの設定は以下のとおりである。

(1) 流体の流動特性の評価と集水箇所の推定

ここでは、はじめに流体の流れやすさと地形的要素から、最も雪崩・土砂災害が発生しやすいと考えられる箇所の推定を行う。

① 「境界条件」

本解析では「流量」と「下流端水位」を設定し、ある流域に所定の流量を与えた。流量は開始時から終了時まで一定としている。下流端水位は開始時のみ0mに設定した。

② 「河床材料の種類」

「河床材料」は一様砂から混合砂まで解析可能であり、ここでは河床材料をザラメ雪の一様材料として評価した。また、ザラメ雪の平均粒径は上石らの研究¹⁸⁾を参考に2mmとした。

(2) 雪泥流解析

① 「河床材料の種類」

雪泥流解析では、野塚峠で採取した土試料¹⁵⁾とザラメ雪の混合土砂流として評価した。

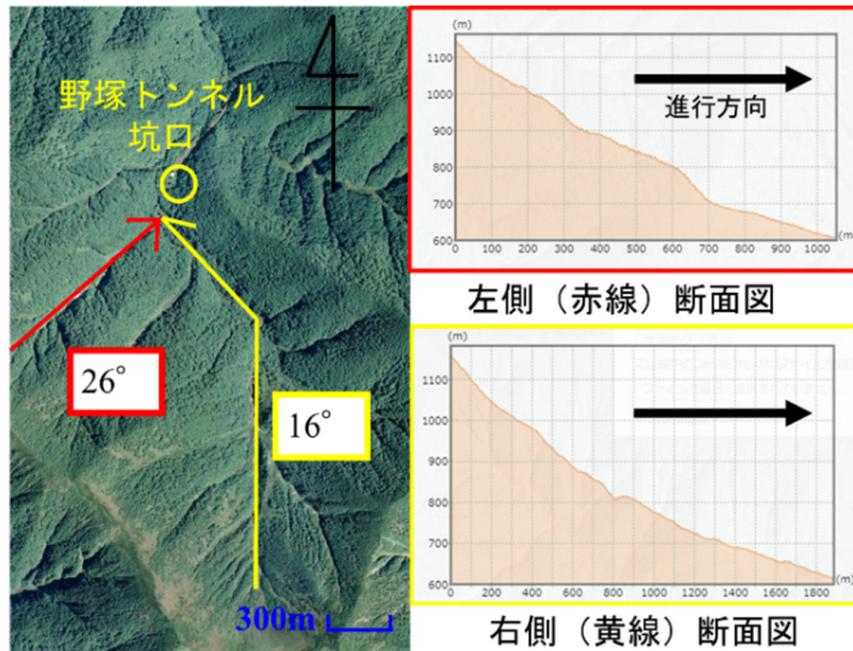


図-11 野塚トンネル周辺斜面の断面図と傾斜角

② 「土粒子の存在率および平均粒径」

野塚峠で採取した土試料（図-6 黄色○地点）とザラメ雪の平均粒径と存在率を表-3に示す。雪泥流の解析では、流下過程で生成される可能性の高い凝集体（雪・流動土砂の混合体）から、流動前の土粒子の存在率および流動開始後の存在率を算定した。既往の研究¹⁵⁾より、凝集体の全体に占める土粒子の割合は細粒分含有率 $F_c=0\%$ では47%であることが明らかにされている。その値を代表値として解析に用いた。また、平均粒径は、野塚峠の土試料では12mm、ザラメ雪の粒径は(1)の解析と同様、2mmとした。

③ 「流体として振る舞う土砂の割合」

iRICでは、0.2mm程度以下の土砂の割合によって流体として振る舞う割合が規定されている¹⁷⁾。本解析では既往の研究の粒度試験より、その割合を0.1として解析を行った。

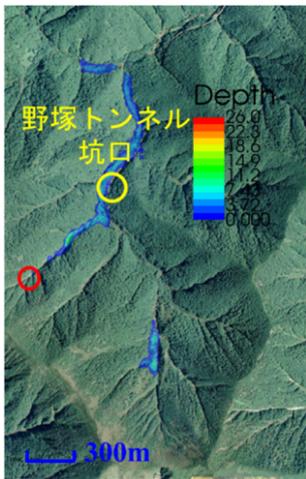
④ 「内部摩擦角（せん断抵抗角）」

地盤工学会基準の土の一面せん断試験方法（JGS 0561）に基づき、野塚峠土試料に対し一面せん断試験を行い、得られたせん断抵抗角 $\phi_d=42^\circ$ を解析に用いた¹⁵⁾。

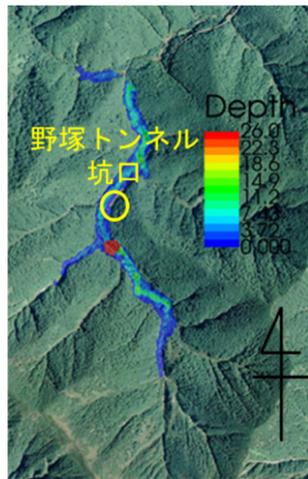
6. 解析結果と考察

6.1. 平成30年3月9日に発生した災害事例における解析

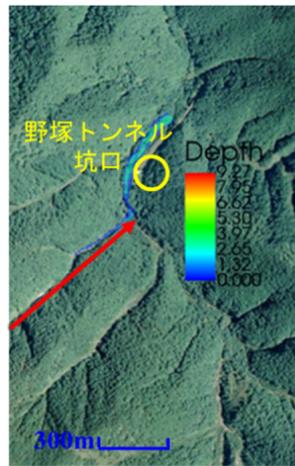
ここでは、対象領域に、ある一定量の降雨があり、流水が発生した場合を想定し、どの箇所に降雨が集水するのかを、はじめに調べてみた。図-11に野塚トンネル周辺斜面の断面図と主な谷部での傾斜角を示す（国土地理院地図に加筆）。地形的な特徴として、この領域では傾斜約 26° （左側の赤線部）と約 16° と中～急斜面（右側の黄線部）が流下の主ルートになる可能性が高く、ここではこれらルートに着目した。図-12は、図-11について、流体の流れやすさと集水地形の観点から災害発生地点を特定した結果を示す。図の左側は解析開始から0秒後、右側が35秒後に、流れが発生する様子を示している。解析結果より2方向から流体が流れ込み、合流時にはその流量が増加することがわかる。前述のように、既往の研究¹⁵⁾では、実際の雪崩のデブリ量から逆解析によって雪崩発生箇所を推定しているが、その地点は図の左側の赤丸の地点であり、今回の流れやすさと集水地形を考慮した解析結果の左側のルートと一致する。仮に2ルート（左右図）で同時多発的に雪泥流が発生するケースでは、被害が拡大する可能性が指摘される。



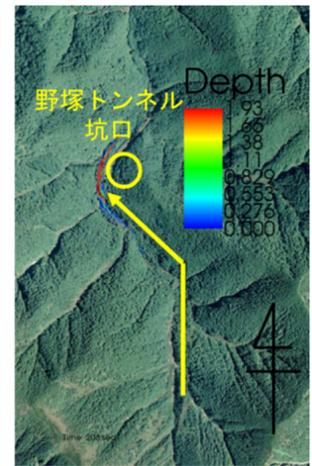
0 秒後



35 秒後



106 秒後の堆積状況



238 秒後の堆積状況

図-12 流動発生地点の推定

図-13 野塚トンネル周辺 雪泥流解析結果

表-4 斜面崩壊面積と浸食深さ

斜面崩壊体積(m ³)		最大浸食深さ(m)
表面積(m ²)	深さ(m)	
10×10	0.3	0.3

ここでは、前述の2つの主ルートから崩壊が発生したと仮定し、雪泥流条件で雪崩・土砂の堆積量の推定を行った。その結果を図-13に示す。左図が図-11に示した赤色の経路での結果であり、解析開始から106秒後の堆積状況を示す。また、右図が図-11において黄色で示した経路であり、解析開始から238秒後の堆積状況である。ここで用いた斜面崩壊の面積と深さ、最大浸食深さは表-4に示すとおりである。

解析結果より、赤線の経路は合流直前の堆積量は約67,000 m³、黄線の経路は約24,000 m³、合計は91,000 m³となり、既往の研究¹⁵⁾で得られた雪泥流の堆積量66,000 m³と比較すると、赤線で示されたルートでは堆積量はほぼ一致しているが、2ルートで発生した場合では堆積量が約1.4倍増加することがわかる。このことから、中～急斜面で合流地点のある斜面では、複数方向からの雪泥流が合流し、被害が拡大する可能性がある。

以上より、将来気候では融雪期において気温が上昇し、雨量の多い日が増え、融雪期災害の増加が危惧される。また、野塚峠のような急峻な地形では、合流部のある斜面は雪崩・土砂流動の発生時に、被害が拡大する可能性が高いことが示された。

6.2. 平成27年3月2日に発生した災害事例における解析

ここでは、平成27年3月2日午前2時頃、一般国道236号線広尾町野塚峠（KP=91.5付近）において、豊似川を挟む対岸斜面から流下した雪崩について検討する。この災害では、雪崩が河川・国道へ押し寄せ、複数の道路付帯施設等に影響を与えた（図-14）。融雪期災害の被災状況を確認すると、発生した雪崩が河川へ流下したことにより、仮にその規模が大きければ、被害が拡大した可能性が指摘される。

6.2.1. 当時の気象状況と災害概要¹⁹⁾

雪崩箇所近傍の野塚峠TMによると、3月2日午前2時の気象観測では、積雪深202cm、気温マイナス2.5℃であった。同TMの新たな積雪深は、3月1日午後1時から2日午前2時までの13時間に48cmであった。

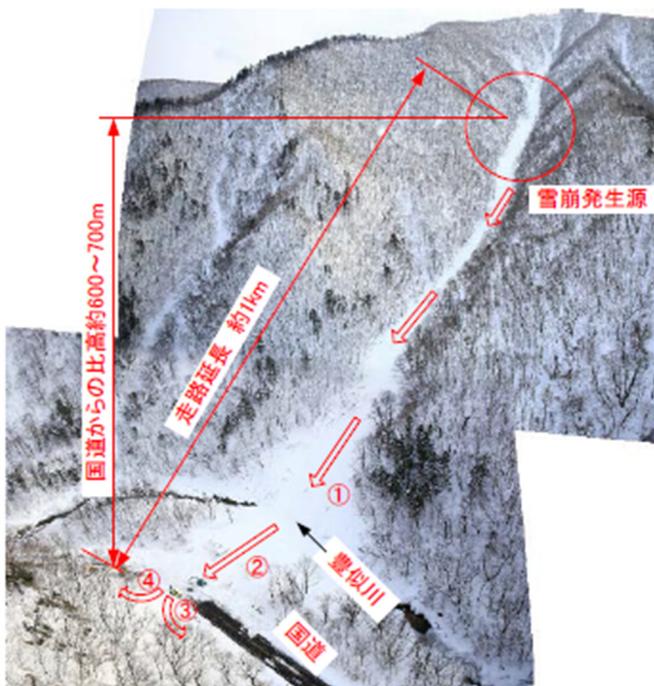


図-14 当時の被災状況¹⁹⁾

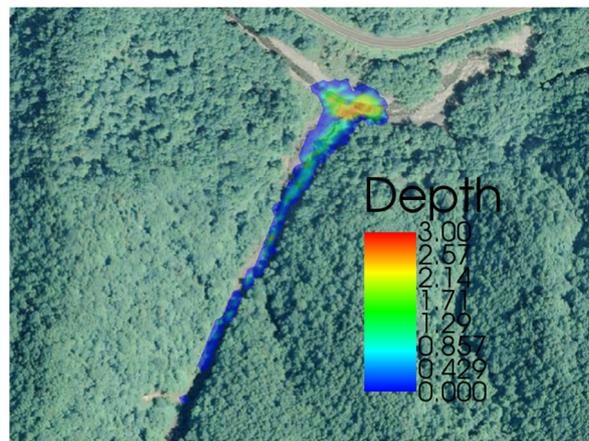


図-15 雪泥流解析結果

表-5 解析における概算値

堆積範囲 (m ²)	4,061
堆積量 (m ³)	6,560
流動距離 (m)	930

なお、この積雪深202cmは、過去は5年間の最大積雪深の平均183.6cmと比べて約20cm多く、後に観測史上最大となる305cmを記録している。雪崩発生前日に気温がプラスまで上昇し表面が融雪した。その後、気温が急激に低下して積雪表面が凍結し、すべり面が形成されていた。その上に短時間（13時間）で48cmの降雪（約4cm/h）があったため、大規模な雪崩が発生したと考えられる。

雪崩全体デブリ量は約3,120m³とされており、走路延長約1kmを雪崩が流下した。沢を沿って、デブリが流れていることや、豊似川を乗り越えていることがわかる。

6. 2. 2. 解析結果

ここでは、5.1と同様に雪泥流解析を実施した²⁰⁾。なお、雪崩時に形成される凝集体の形成状況により、堆積量が変わることから、最も多い堆積量の条件で今回は解析を行った²⁰⁾。その結果、堆積範囲は4,061 m²、流動距離は約930 m、堆積量は約6,560 m³となった（表-5）。堆積量が実際の約2倍として表現されているが、これは雪崩解析ではなく、雪泥流解析で行ったことに起因している。既往の研究¹⁵⁾では、雪泥流と雪崩解析では流動距離に変化はないものの、堆積量は大凡1/3程度になることから、今回の解析結果は概略その傾向を表現していると考えられる。

以上のことから、iRICでは適切に入力パラメータを設定することができれば、擬似的に雪崩、雪泥流の解析が実施可能であることが示された。一方、iRICを用いた解析では、融雪期土砂災害（雪崩災害も含む）の発生地点の予測はできないが、集水の仕方ならびに地形的効果を考慮すれば、簡易的に災害発生地点の予測は可能かもしれない。いずれにしても、更なる検証は必要である。ここでは、さらに地盤解析ツールを用いて、解析手法の高度化ならびにリスク評価手法の提案を目指した検討を行った。

7. 降雨浸透・流出解析による融雪期の雪崩—土砂災害の発生要因分析とリスク評価手法の提案

この章では、雪崩—土砂流動災害発生の判断基準となり得る雨水・融雪水の積雪・地盤内浸透に着目し、雪崩—土砂流動現象の発生時期とその初動崩壊規模を降雨強度、融雪速度、地盤の含水・凍結状態、積雪状況、土質などから体系的に予測するため、降雨浸透・流出解析を用いた融雪期の雪崩—土砂流動

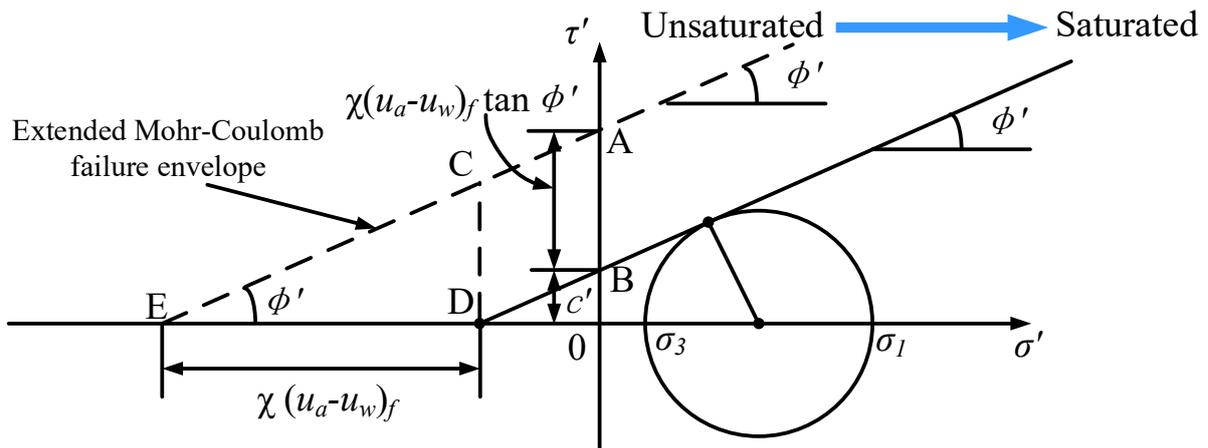


図-16 不飽和土要素の飽和度変化に伴う局所せん断強さの変化

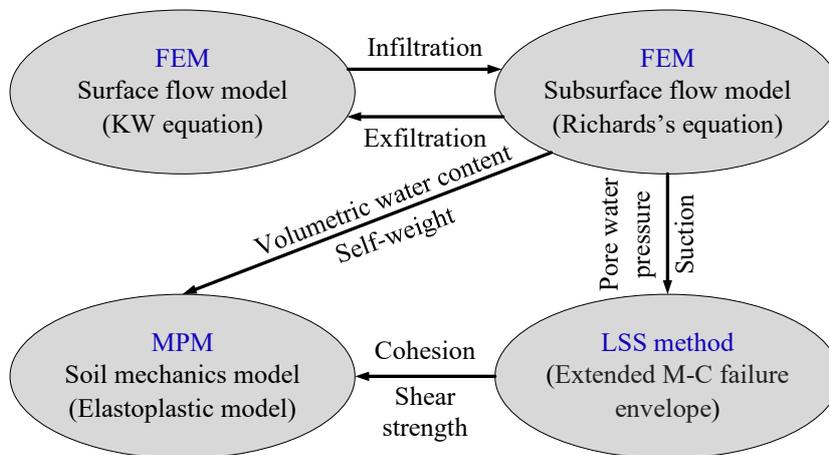


図-17 FEM-MPMカップリングモデル

現象の発生要因分析と災害リスク評価手法を開発して、積雪寒冷地における法面の雪崩—土砂災害危険箇所の抽出法を提案する。このため、気候変動に伴う融雪期の集中豪雨や急激な融雪を想定した雪崩—土砂災害の事例分析・パラメトリックスタディにより、道内の主要交通幹線（主に国道）の広域災害リスク評価を検討する。具体的には、積雪内の雨水・融雪水浸透を考慮してLPデータを利用した集水域規模の降雨浸透・流出解析を種々の解析条件下で行うとともに、それに基づく積雪・地盤内の含水比分布を考慮した斜面安定解析を実施する。これにより、融雪期の雪崩—土砂流動現象の発生メカニズムを分析するとともに、その発生時期と初動崩壊規模を降雨強度、融雪速度、地盤の含水・凍結状態、積雪状況、土質などから体系的に予測する融雪期の雪崩—土砂災害発生リスク評価手法を提案する。

令和3年度は、昨年度の今後の検討課題として挙げた「積雪層・地盤表層の2層構造の安全率低下領域と初動崩壊範囲の関係性の確立」を検討するため、昨年度開発した流域の複数斜面に対して実施可能な降雨浸透・流出解析の結果を用いて、降雨時の単一斜面の崩壊現象について大変形解析を実施可能な大変形地盤解析システム（FEM-MPMカップリングモデル）を開発した²¹⁾。この手法では、不飽和斜面内の各土要素の飽和度変化に伴う局所せん断強さ（LSS : Local shear strength）の変化を計算するために局所安全率（LFS : Local factor of safety）法を提案し（図-16）、さらに、LFS法を用いて有限要素法（FEM : Finite Element Method）と物質粒子法（MPM : Material Point Method）を結合した大変形地盤解析（FEM-MPM準（片方向）連成解析）を実施する（図-17）。続いて、開発したLFS法に基づくFEM-MPMカップ

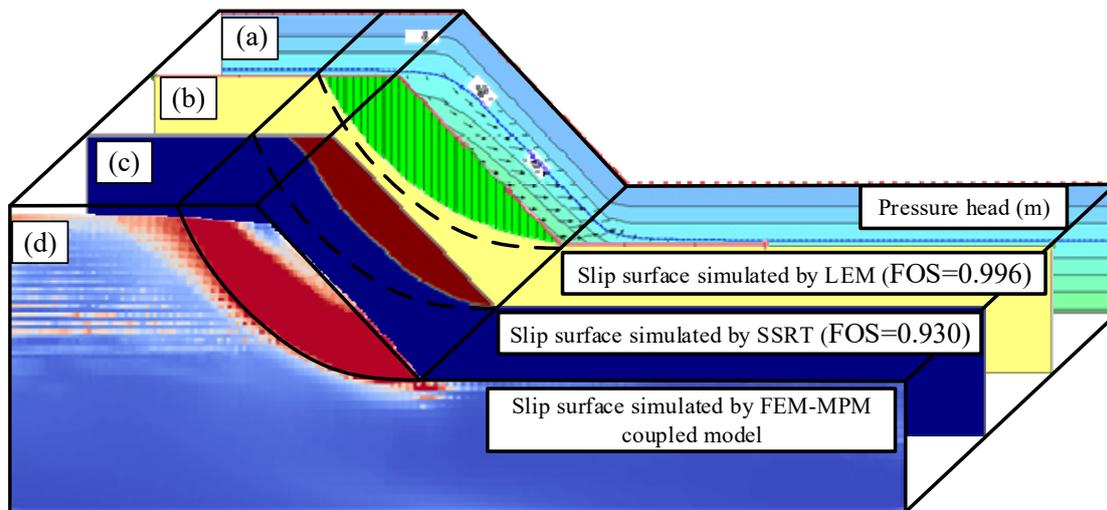


図-18 異なる解析手法による解析結果の比較

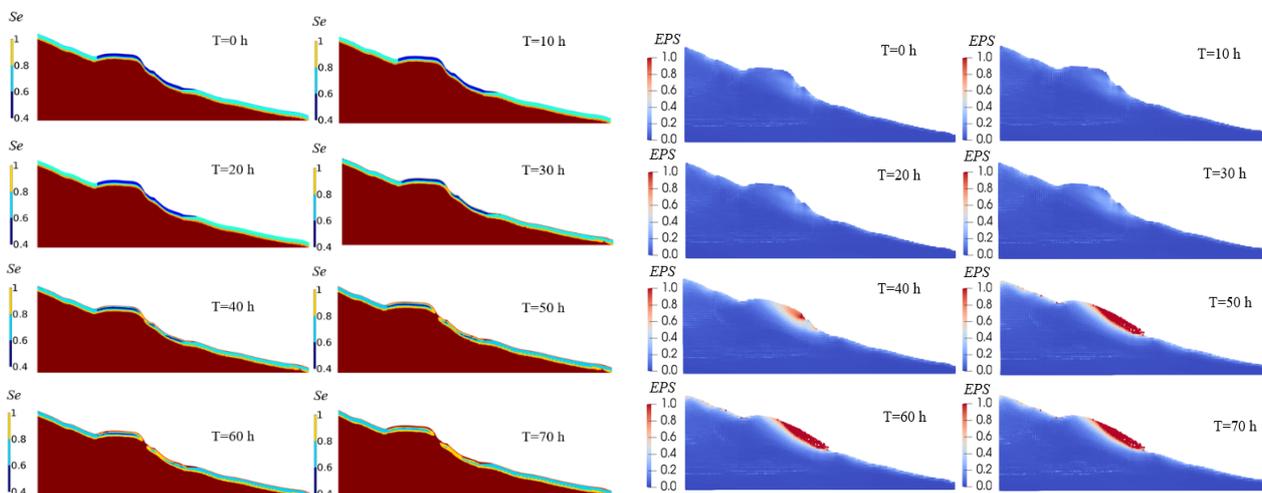


図-19 FEM-MPM準連成解析結果（左図：FEMによる飽和度分布，右図：MPMによる有効塑性ひずみ分布）

リングモデルの有効性を検証するために、極限平衡法（LEM：Limit-Equilibrium Method）およびせん断強度低下法（SSRT：Shear Strength Reduction Technique）から得られた単純な斜面条件の解析結果と比較検討を行い、斜面崩壊発生条件やすべり面の形状がほぼ一致することを確認した（図-18）。さらに、北海道開発局から提供のあった1mメッシュLPデータを用いて、2016年8月の北海道豪雨で土砂災害が観測された日勝峠の集水域規模の降雨浸透・流出解析および地表流と地下水流の両方を考慮した大規模斜面崩壊の再現解析を行い、当該解析手法の適用性と実用性を検証した（図-19）。しかし、本年度の研究では、昨年度実施されたiRICによる実際の雪崩—土砂流動現象の再現解析から推定される斜面崩壊範囲と解析結果（初動崩壊規模）と比較可能な解析結果をFEM-MPMカップリングモデルで得るまでには検討が進捗しなかった。この点については、今後、昨年度挙げた他の2つの研究課題である、(1) 積雪層の雨水・融雪水浸透の推定方法の確立、及び(2) 雨水・融雪水の浸透に伴う積雪層の強度特性評価法の確立、に関する検討を継続して行い、提案手法の適用性と信頼性の向上について検討する予定である。また、その結果をiRICの再現解析結果と比較して、雪崩—土砂流動現象に対するiRIC数値シミュレーションの妥当性と適用性について地盤工学の観点から検証する予定である。

8. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 過去の災害事例調査では、北海道における融雪期土砂災害は全体の25%を占めている。さらに、雪崩災害においても3月～4月に発生する割合が高くなっている。気候変動による影響を考慮すれば、今後、融雪期に雪崩-土砂災害の複合的な災害の発生頻度が高まる可能性がある。
- 2) 研究対象地域では、将来気候において融雪期に気温が上昇し、また降雨量の多い日が増える。このことから融雪期災害の増加が危惧される。
- 3) 土石流解析を対象としたiRIC Morpho2DHでは、擬似的に雪泥流に対する解析も実施可能である。また、予測が難しい発生地点の推定については、集水の仕方ならびに地形的効果を考慮することによって、簡易的ではあるが、その可能性が示された。
- 4) 他の雪崩災害事例の再現解析を行った結果、本解析手法は大凡その挙動（流動距離、面積）は表現する。
- 5) 別の地盤解析ツールを用いて、解析手法の高度化ならびにリスク評価手法の提案を目指した検討を行った。その結果、高度化に向けた問題点が整理された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道開発局 室蘭開発建設部、(一財)道路管理技術センターから情報の提供を頂いた。各種試験と解析の実施では室蘭工業大学 木戸菜摘、丹野祐生、各君の協力を得た。なお、本研究は令和3年度(一財)北海道河川財団の助成で行われた。記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 工藤啓介, 長谷川裕史, 中津川誠: 気候変動が積雪寒冷地の汽水湖水質に及ぼす影響の評価, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.205-210, 2017.
- 2) 地すべり学会北海道支部: 北海道の斜面災害史, 北海道の地すべり '99, pp.4-9, 1999.
- 3) 日本地すべり学会北海道支部 北海道地すべり学会: 北海道での最近の地すべり災害-被災事例と教訓-, 北海道の地すべり2012, pp.15-34, 2012.
- 4) 地盤工学会北海道支部: 北海道の火山灰質土の分布と特徴, 実務家のための火山灰質土~特徴と設計・施工, 被災事例~, pp.9-20, 2011.
- 5) 国土地理院, 20万分の1土地分類基本調査, https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_20-1.html#prefecture01
- 6) 国土庁土地局, 土地分類図(地形分類図)北海道 I からVII, 1977
- 7) (一財)北海道道路管理技術センター 雪崩DB
- 8) 国道236号野塚峠にて雪崩発生 - 国土交通省 北海道開発局帯広開発建設部
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/release/rfqnf000000008wk-att/fns6al000000j130.pdf>
- 9) 環境省: 環境省 地域気候変動予測データ (協力: 気象庁), 2018.12
- 10) 千田侑磨: 北海道全域の気候変動の影響を推定するための高解像度Downscaling情報の作成, 平成30年度室蘭工業大学卒業論文, 2019.3
- 11) 気象庁: JRA-55領域ダウンスケーリング (DSJRA-55), 2017.3
- 12) 気象庁ホームページ: 過去の気象データ (平年値), (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>)
- 13) 川村志麻: 気候変動脆弱地域の複合地盤災害のリスク評価に関するワークショップ, 土木学会北海道支部, 2021.5.12.

- 14) 川村志麻, 山田真嘉, 岩間 結: 融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象とその評価, 土木学会北海道支部研究発表論文集, 令和元年度土木学会北海道支部論文報告集, 第76号, C-07, 2020.
- 15) 川村志麻, 横山遼, 石川達也, 所哲也: 融雪期に発生した雪崩-土石流現象とその評価, 第76回土木学会年次学術講演会講演集, C部門, 2021.
- 16) 木戸菜摘, 川村志麻: 気候変動を考慮した融雪期土砂災害の評価, 土木学会北海道支部研究発表論文集, 令和3年度土木学会北海道支部論文報告集, 第77号, C-08, 2022.
- 17) iRIC,Morpho2DHチュートリアル (土石流・泥流),p.18. (<https://i-ric.org/download/morpho2dh-tutorial/> 2022.9.参照)
- 18) 上石勲, 町田敬, 小田憲一, 山口悟, 佐藤篤司: 雪粒同士の結合が弱い湿雪の粘着力と内部摩擦角の測定, 雪氷研究大会, 2009.
- 19) 加我直孝: 一般国道236号(天馬街道)野塚峠における雪崩事前通行規制について, 第59回(2015年度)北海道開発技術研究発表会発表論文集, No.5, 2015.
- 20) 丹野祐生: 融雪期に発生する雪崩・土砂流動解析とその評価, 室蘭工業大学 令和3年度卒業論文, 2022.3.
- 21) Yulong Zhu, Tatsuya Ishikawa, Yafen Zhang, Binh T. Nguyen, Srikrishnan Siva Subramanian: A FEM MPM hybrid coupled framework based on local shear strength method for simulating rainfall/runoff induced landslide runout, Landslides, 2022, DOI 10.1007/s10346-022-01849-z