

【気候変動脆弱地域における複合地盤災害の
リスク評価に関する研究委員会】
報告書



令和 4 年 3 月

公益社団法人 土木学会 北海道支部

序

近年、北海道では最近の異常気象に起因すると考えられる様々な地盤災害が頻発しています。例えば、北海道では、古くから寒冷地特有の地盤の凍上・凍結融解に起因する土砂災害が発生していますが、地球温暖化に起因すると考えられる近年の融雪期の急速な気温上昇は、急激かつ多量の融雪水の流入・浸透あるいは融雪期の大雨をもたらし、札幌近郊で平成 24、25 年春に連続発生した中山峠斜面災害のような表層崩壊や土砂流動・流出及び陥没などの融雪期の土砂災害リスクを高めています。また、近年の極端気象現象の増加により、台風や集中豪雨等の被害が比較的少なかった北海道においても、平成 28 年 8 月北海道豪雨に代表されるような激甚豪雨災害が度々発生し、発生頻度の増加とともに、災害規模の拡大・深刻化が懸念されています。これは、北海道のような高緯度地域が今後の気候変動の影響を受け易いこと、北海道は温暖地域と比較してこれまで台風や集中豪雨などの影響が少なく雨慣れしていない地盤が多いことから同じ降水量でも多雨地域と比較して大規模な土砂災害が生じ易いなど地盤の災害免疫力が低いこと、温暖地域と異なる積雪寒冷地特有の土砂災害の発生メカニズムが存在すること、などがその要因となっています。加えて、北海道全域には、火山灰質土や風化残積土などの特殊土地盤が広く分布し、これまで様々な地盤災害の要因となってきました。例えば、平成 30 年北海道胆振東部地震では、火山灰質土の自然地盤や盛土で大規模斜面崩壊や宅地液状化被害などの特徴的な地盤災害が発生していますが、地震発生前の降水量が平年より多かったことや地震前日の台風通過により地下水位が通常よりも高い状態にあったことがその要因として報告されています。

このような状況を踏まえると、気候変動による気象条件の極端化、そしてそれに伴う災害外力の増大と複合化に対し、潜在的な災害リスクの評価ならびに地域性を十分に反映した災害レジリエンスの強化が、今後の北海道の持続的な発展のために必要になると考えられます。このため、(公社)土木学会北海道支部では、北海道のような気候変動災害脆弱地域において、近い将来に発生が予想される自然災害に備え、近未来を見据えた合理的な気候変動適応策を現在から検討する意義は大きいと考え、短期的・中長期的視野をもって、気候変動に伴い変質する積雪寒冷地の水・地盤災害の現象・事象の原因の学術的究明と、気候変動下の北海道で今後発災する可能性のある水・地盤災害の防災・減災対策の検討に資するため、「気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する研究委員会」(委員長：石川達也 北海道大学教授)を、(公社)土木学会北海道支部初の研究委員会として、令和元年 5 月 9 日に設立しました。

本委員会は、気象学、水工水文学ならびに地盤工学等の学際的な視点から、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映可能な複合地盤災害リスクの総合的な評価手法を確立すること、及び学問分野を超えた最新の情報収集とそれらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度について学際的な視点から議論することを活動目的としています。このため、本委員会は、下表に示すように(公社)土木学会北海道支部に所属する地盤工学の他、気象学や水工水文学の研究者・専門家 13 名からなっており、(公社)土木学会の組織的特徴を活かした部門横断的な委員構成になっています。また、他地域との連携により研究課題についての議論を深め、効果的に気候変動適応策に関する研究を遂行するために、北海道と同様に気候変動脆弱地域である九州の研究者・専門家と研究連携を図っています。具体的には、本委員会と同時期に設立された(公社)土木学会西部支部「災害脆弱地域における水・地盤災害と複合災害の気候変動によるリスク上昇への適応に関する研究委員会」(委員長：安福規之 九州大学教授)と委員会活動において情報共有など様々な研究連携・相互協力を図っています。

本委員会の活動期間は、令和元年 5 月～令和 4 年 3 月の 3 ヶ年ですが、この間、委員会を 7 回開催するとともに、土木学会北海道支部年次技術研究発表会では令和元年度より特別セッションを毎年度運営し(計 3 回)、気候変動に伴い発災が予想される複合地盤災害リスクの抽出とその情報開示方法について議論を重ねてまいりました。その結果、活動期間最終年度である令和 3 年度には、土木学会北海道支部主催ワークショップ(参加者数：161 名)と土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム(参加者数：244 名)を各 1 回企画し、土木学会会員や社会に対して委員会の活動成果を情報提供しています。特に、本委員会では、北海道で近年発生した水・地盤災害の事例検討を通して、気候変動に伴い発災が予想される新たな形態の複合地盤災害を北海道の地域性を考慮して体系化するとともに、そのリスク評価や防災・減災対策に必要な視点とし

て「自然外力変化の可能性」、「災害形態変容の可能性」、「耐災害性強化の必要性」の3点から今後の学術研究・技術開発の方向性について検討してきました。本報告書は、気象学、水工水文学、地盤工学の観点から捉えた気候変動の影響に関する委員会での各種検討内容を、社会や土木学会会員により広く公開するためにとりまとめたものです。気候変動に伴う複合地盤災害のリスク評価は、不確定要素の多い検討課題であり、それを取り巻く状況も時々刻々と変化しているため、災害の少ないより安心安全な未来をつくるための研究・技術的課題は山積していますが、我々研究者・技術者が、気候変動適応策構築のために今何をすべきなのかについてそれぞれの立場からしっかり向き合う時期にきていることは、昨今の自然災害の発生状況を鑑みても異論のないところかと思えます。高緯度地域は、国内他地域と比較してもより早急な気候変動への対応が望まれますが、近い将来に発災する可能性のある未曾有の複合地盤災害に備えるために、様々な北海道特有の事象を考慮した気候変動適応策の構築に向けた実務的な研究・技術開発を今後検討する際の基礎資料として、本報告書を活用いただければ幸いです。

なお、本報告書の作成にあたりましては、委員各位をはじめ、産官学の多くの方々・機関より様々な御助力を賜りました。ここに深甚な謝意を表します。

表 気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する研究委員会委員名簿（五十音順）

	氏 名	所 属	役 職	専門分野
委員長	石川 達也	北海道大学	教 授	地盤系
幹事兼委員	川村 志麻	室蘭工業大学	教 授	地盤系
委員	川口 貴之	北見工業大学	教 授	地盤系
委員	川尻 峻三	北見工業大学	准教授	地盤系
委員	川端伸一郎	北海道科学大学	教 授	地盤系
委員	今 日出人	ドーコン		水工系
委員	清水 康行	北海道大学	教 授	水工系
委員	所 哲也	北海学園大学	准教授	地盤系
委員	中津川 誠	室蘭工業大学	教 授	水工系
委員	西村 聡	北海道大学	教 授	地盤系
委員	松岡 直基	北海道気象技術センター		気象系
委員	山田 朋人	北海道大学	准教授	気象系 水文系
委員	渡邊 康玄	北見工業大学	教 授	水工系

令和4年3月31日

公益社団法人 土木学会北海道支部
気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する研究委員会
委員長 石川 達也

本報告書では、気象学、水工水文学、地盤工学の観点から捉えた気候変動の影響に関する委員会での各種検討内容を、社会や土木学会会員により広く公開するためにとりまとめたものである。特に、委員会では、最近の土砂災害の事例検討、気候変動の影響による土砂災害のリスク評価やそれに関連する対策法について議論をしている。なお、それらの検討内容は学協会ですでに公表されている。

以下では、第Ⅰ部～第Ⅳ部に分けて、その成果を公表する。

第Ⅰ部 令和元年度～令和３年度 土木学会 北海道支部 委員会 特設セッション

第Ⅱ部 気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関するWS （令和３年５月１２日開催）
土木学会北海道支部

第Ⅲ部 「温暖化が先鋭化する九州と北海道における水・地盤災害の激甚化への適応とは？」
土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム（令和３年３月１１日開催）
（北海道支部関連のみ）

第Ⅳ部 その他

第 I 部

論文一覧（委員会 特別セッション）

■ 令和元年度

1. 気候変動脆弱地域における複合地盤のリスク評価の検討課題
北海道大学大学院 石川達也
2. 融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象とその評価
室蘭工業大学大学院 川村志麻, 山田真嘉, 関東地方整備局 岩間結
3. 大量アンサンブルデータに基づく前期降雨量の分析
北海道大学大学院 星野剛, 山田朋人
4. 気候変動に伴う積雪寒冷地の融雪期における斜面災害危険度の評価
室蘭工業大学大学院 服部有吾, 中津川誠, 坂本莉子
5. ジオセルや排水パイプを用いたのり面保護工に関する野外土槽試験
北見工業大学 古矢達也, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 東京イキ(株)原田道幸, 岡三ビック(株)安達謙二
6. 2019年10月台風19号による千曲川の河川構造物の非災調査
北見工業大学大学院 松田智也, 三浦竜, 川尻峻三, 渡邊康玄, 東京大学大学院 渡邊健治

■ 令和2年度

7. 気候変動脆弱地域における複合地盤のリスク評価の事例検討
北海道大学大学院 石川達也
8. 気候変動を伴う室蘭地域での斜面災害危険度の推定
室蘭工業大学大学院 二階堂樹, 関洵也, 中津川誠
9. 融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象の解析的検討
室蘭工業大学大学院 川村志麻, 山田真嘉, 関東地方整備局 岩間結

■ 令和3年度

10. 北海道における近年の土砂災害の気象的特徴と予測の現状
(株)北海道気象技術センター 松岡直基, 鶴巻亮一
11. 降雨の時空間的局地性と気候変動を考慮したリスクベース評価手法
北海道大学大学院 山田朋人
12. 過去の災害事例を基準とした北海道における線状降水帯の客観的抽出
北海道大学大学院 大家祐太, 山田朋人
13. 気候変動に伴う西胆振地域での斜面災害危険度の評価
室蘭工業大学大学院 吉岡優希, 関洵也, 中津川誠
14. d4PDFによる降雨と融雪過程を考慮した気候変動に伴う斜面災害危険度の評価
室蘭工業大学大学院 片寄陸, 関洵也, 中津川誠
15. 気候変動を考慮した融雪期土砂災害の評価
室蘭工業大学大学院 木戸菜摘, 川村志麻

気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価の検討課題

Issues for risk assessment of complex geodisasters in climate change vulnerable areas

北海道大学大学院工学研究院 ○フェロー 石川達也 (Tatsuya Ishikawa)

1. はじめに

北海道では、積雪寒冷地特有の地盤の凍上・凍結融解が誘因と考えられる地盤災害が多発している。特に、地球温暖化に起因すると考えられる融雪期の急速な気温上昇は、急激かつ多量の融雪水の流入・浸透を引き起こし、土の強度低下をもたらすとともに、内部侵食や表面侵食を促進して地盤の安定性を低下させ、斜面の表層崩壊や土砂流出・陥没などのリスクを高めている。また、近年の異常気象により、台風や集中豪雨等の被害が比較적少なかった北海道においても、北海道豪雨（平成 28 年 8 月）に代表されるような豪雨災害が発生し、その頻度も高くなっている。その一方、北海道全域には、九州地方と同様に、火山灰質土や風化残積土などの特殊土地盤が広く分布している。その結果、平成 30 年 9 月に発生した北海道胆振東部地震では、厚真町一帯に堆積する火山灰質土の多発大規模斜面崩壊が発生し、未曾有の激甚複合地盤災害を経験している。このような状況を踏まえ、災害外力の加速と大規模化に対する潜在的な災害リスク評価並びに地域性を十分に考慮した災害レジリエンスの強化が、今後の北海道の持続的な発展には不可欠である。

本稿では、北海道のような気候変動災害脆弱地域において近年発生した上述の 2 つの激甚災害の調査結果を通して見えてきた、北海道の地域性を考慮した今後の道路・鉄道・河川堤防管理や防災・減災対策とこれに関連する研究や行政に対する提言を整理するとともに、その教訓を踏まえた災害検証と適応策の実現に向けた学術研究の方向性について検討する。

2. 近年の被災事例による教訓

2.1 平成 28 年 8 月北海道豪雨災害

平成 28 年 8 月 17 日から 8 月 23 日の 1 週間に、過去に例を見ないほど複数の台風（7 号、11 号、9 号の 3 個）が続々と北海道に上陸し、北海道東部を中心に降った異常な量の雨により河川の氾濫や土砂災害が発生した。また、8 月 29 日からの前線と台風 10 号の接近による大雨で十勝川水系や石狩川水系・空知川上流で堤防の決壊や河川の氾濫、日高山脈東側での道路や橋梁の流失などが相次ぎ、甚大な災害をもたらした。（公社）地盤工学会災害連絡会議では、当災害の社会的重要性に鑑み、「平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査団」を編成し、短期的・中長期的視野をもって被災地域の現地調査・資料収集・復旧支援等を行い、一連の台風に伴う豪雨による地盤災害の現象・事象の原因の学術的究明と、その後の復旧対策や防災・減災対策に資する調査・検討結果を広く公表している¹⁾。その結果、今後の北海道の地域性を考慮した地盤工学研究や地盤防災行政を考

える上で重要な技術的検討項目として、①雨慣れ・気象慣れしていない地盤の扱い、②従来の想定を超える豪雨対策の検討、③従来と異なる問題土・崩壊形態の顕在化の可能性、④豪雨時に地盤内に浸透しない表面流の扱い、⑤河道の蛇行・流路変動による土構造物の被害、の 5 点を挙げている。また、このような豪雨災害の教訓を踏まえ、その災害検証とともに気候変動適応策の実現に向け、今後検討すべき課題として、①従来の想定を超える豪雨に対する潜在的な地盤災害リスクへの対処、②豪雨時に地盤内に浸透しない表流水の対処法の構築、③河川の蛇行・流路変動を想定した土構造物の防災・減災対策の検討、④災害の地域性（特殊土地盤、雨慣れしていない地盤）を考慮した防災評価指標の提案、を提起している。

2.2 平成 30 年北海道胆振東部地震災害

平成 30 年 9 月 6 日午前 3 時 7 分に北海道胆振地方中東部を震源として発生した、「平成 30 年北海道胆振東部地震」は、道内では過去例を見ないほどの強震動であり、最大震度は、震度階級で最も高い震度 7 を北海道で初めて観測した。この強震動により、火山灰質土を用いて切土・盛土により宅地造成された札幌市清田区の谷埋め盛土の液状化被害や厚真町で観測されたせん断帯での連鎖的な粒子破碎により生じる長距離土砂流動を伴う火山灰質土斜面の広範囲・大規模斜面崩壊など、甚大な被害がもたらされた。（公社）地盤工学会災害連絡会議では、当災害の社会的重要性に鑑み、「平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団」を編成し、短期的・中長期的視野をもって被災地域の現地調査・資料収集・復旧支援等を行い、平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害の現象・事象の原因の学術的究明と、その後の復旧対策や防災・減災対策に資する調査・検討結果を広く公表している²⁾。その結果、今後の北海道の地域性を考慮した地盤工学研究や地盤防災行政を考える上で重要な技術的検討項目として、液状化被害については①地盤の震動特性の影響、②谷埋め盛土の液状化危険度の検討、③宅地造成地の地形要因の影響、④宅地造成・住宅建設方法の検討、⑤複合的要因の影響度の検討の 5 点を、斜面被害については①想定外の地震動への対応方法の検討、②火山灰質土の破碎性・風化劣化の影響、③被害状況のバラツキの要因究明、④異形態斜面崩壊の近接発生の原因究明の 4 点を挙げている。また、このような震災の教訓を踏まえ、その災害検証とともに防災・減災対策の実現に向け、今後検討すべき課題として、①「過去の経験」で対応不能な潜在的な地盤災害リスクへの対処、②火山灰質土の特殊性を考慮した防災・減災対策の構築、③ライフサイクルを考慮した土構造物

の設計・維持管理の提案、④想定外の広域・大規模災害の復旧・復興対策の検討、を提起している。

3. 被災教訓を踏まえた研究事例

本章では上述の課題解決に向けた研究事例を紹介する。

一般に、土砂災害の発生を予測するために、土壌雨量指数・凍結指数等のマクロ指標が広域災害リスクを簡易に判定する拠り所として現在広く用いられているが、異常気象や気候変動により融雪期の豪雨・急激な地温上昇などの外力が過去の観測範囲を超えて増大し、湿潤や融雪など複数の要因がもたらす複合的な地盤災害リスクを広域で予測するには、観測事例が無いことから統計的手法による土砂災害発生危険度基準線（CL：Critical Line）の設定が難しく従来の経験的なリスク評価手法に頼るのみでは十分対応できないことがある。この問題の解決のために、予測される気候変動下での地盤の脆弱化や斜面崩壊等の数値シミュレーションを行い、その結果に基づき、土砂災害発生危険度基準線を設定し、融雪量・降雨量を考慮した積雪寒冷地の土砂災害発生危険度評価手法を構築することが検討されている（図-1）³⁾。

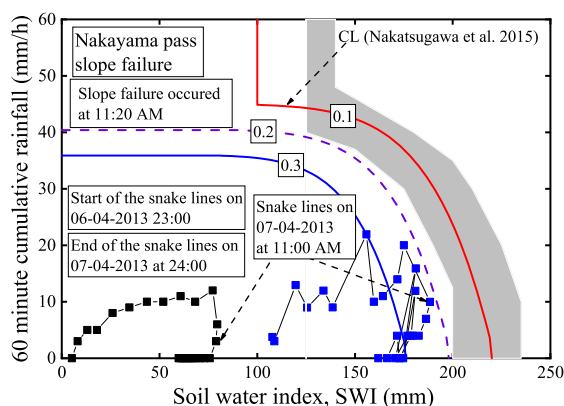


図-1 国道 230 号中山峠斜面崩壊の安定性評価例

この方法によれば、異常気象や気候変動に伴って降雨形態の変化や平均気温の上昇など外力が過去の観測範囲を超えて増大する場合でも、数値解析の観点から被災履歴の少ない潜在的な土砂災害のリスク評価や、降雨指標や凍結指標など広域的な評価指標の地域性を考慮した評価基準の設定が可能となる。今後の気候変動の影響を受け易い北海道のような高緯度地域に対して近未来の地盤防災・減災対策を考える上で有効な手法であるといえる。

また、平成 28 年 8 月北海道豪雨では、直前の 3 つの台風により高い含水状態であった地盤に浸透できなかった大量の表流水が斜面崩壊などの地盤災害を誘発した可能性が指摘されている。一般に表面流出は降雨強度が地盤の浸透能を上回る際に発生するが、発生した地表流の沢部など集水地形への集中が、地表流量を増加させ表面侵食や流路の拡大をもたらし、その結果として土石流や表面侵食型の盛土法面崩壊を引き起こすと考えられる。したがって、地盤の浸透能以上の降雨強度が想定される場合には、「降雨時の浸透流に加え地表流をどのように考慮して地盤・土構造物の広域リスク評価を行うか？」について検討する必要がある。例えば、図-2 は、地理・地形、地質・地盤、道路や鉄道の付帯構造物などの

各種情報を入力し、地表流の流路ネットワークを数値シミュレーションで推定した例である。

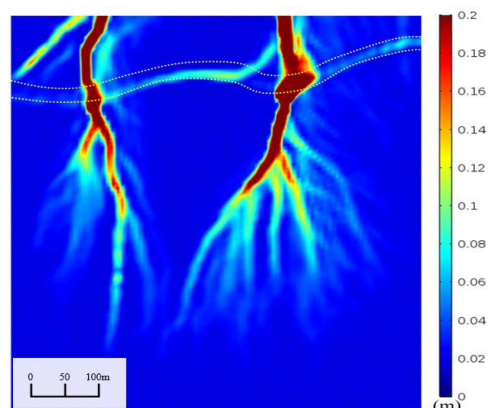


図-2 国道 274 号日勝峠斜面崩壊の安定性評価例

この方法によれば、設計降水量では対応できない確率降雨に伴う表流水の発生に対して、土砂災害危険箇所を抽出するとともに、地表流の流出経路となる交通基盤施設的设计・維持管理方法を再構築することが可能になる。

4. おわりに

（公社）土木学会北海道支部では、北海道のような気候変動災害脆弱地域において、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映できる手法を検討し、災害リスクの総合的な評価手法を確立することを目的として、本年度より新たに「気候変動脆弱地域における複合地盤災害リスク評価に関する研究委員会」（委員長：石川達也北海道大学大学院教授）を立ち上げ、学際領域を超え、気象学、地盤工学ならびに水工水文学に関する最新の情報収集、それらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度について検討している。今後、本委員会の研究活動の一環として、本稿で挙げた研究課題について検討するとともに、発災機構の学術的究明と災害の早期復旧並びに防災・減災技術の向上に向けて、北海道の地域的な問題として社会全体で危機感を共有し、産官学が連携して取り組む体制の構築を進める予定である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査報告書 https://www.jiban.or.jp/?page_id=2569（参照日 2019 年 12 月 6 日）
- 2) 地盤工学会：平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査報告書 https://www.jiban.or.jp/?page_id=11421（参照日 2019 年 12 月 6 日）
- 3) 石川達也, S.S.Subramanian, 所哲也：積雪寒冷地の斜面災害リスク判定法の適用性評価、気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム講演論文集, pp.13-20, 2017.
- 4) Zhu, Y., Ishikawa, T., Shimizu, Y.: Surface flow analysis of Typhoon 10 induced slope failure based on digital elevation modeling, Proceedings of the 9th Symposium on Sediment-Related Disasters, pp.121-126, 2018.

融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象とその評価

Analyses of avalanche and debris flow phenomena in snow-melt season and its evaluation

室蘭工業大学大学院 ○正 員 川村 志麻 (Shima Kawamura)
 室蘭工業大学工学部 山田 真嘉 (Naoyoshi Yamada)
 国土交通省関東地方整備局 岩間 結 (Yui Iwama)

1. はじめに

平成 30 年 3 月 9 日、一般国道 236 号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 (図-1 参照)。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る (図-2 参照)。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ろう。気候変動の影響の顕在化にも指摘されており、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も指摘される。本研究では、土石流解析ソフト iRIC Morpho2DH を用いて、雪崩と土砂流動 (土石流) 現象の再現を試みた。次いで、それらの流動特性に及ぼす諸要因の影響を把握し、融雪期に発生する雪崩・土砂災害に対する解析手法の基礎的検討を行った。

2. 災害概要

被災地の野塚峠は、急峻な日高山脈の西側に位置し、雪崩が発生しやすい地形にある。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が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。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) である²⁾。ここでは、写真からも土砂堆積が確認されるように、雪崩と同時に土砂流動 (土石流) が発生したと仮定して、以下の検討を進める。

3. 解析の概要

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。支配方程式は以下のとおりである。

水及び土砂の混合物の質量保存則は、以下の式によって表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \dots (1)$$

ここに、 t : 時間、 h : 土石流・泥流の流動深、 u, v : x と y 方向における速度成分、 c_* : 静止堆積層の砂礫の堆積濃

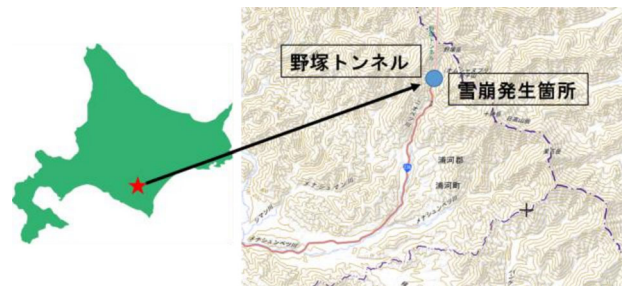


図-1 野塚トンネルと雪崩発生箇所
(国土地理院地図に加筆)



図-2 被災地の様子
(北海道開発局室蘭開発建設部 提供)

度、 E : 河床の侵食速度である。

また、各速度成分と流動方向の河床勾配の関係は、式 (2) と (3) のように表現される。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = C_* \tan(\theta - \theta_e) \dots (2)$$

$$\sin \theta = \frac{u \sin \theta_x + v \sin \theta_y}{\sqrt{u^2 + v^2}} \dots (3)$$

ここで、 θ は流動方向の河床勾配、 θ_x は x 方向の河床勾配、 θ_y は y 方向の河床勾配、 θ_e は水及び土砂の混合物の鉛直平均土砂濃度 $\bar{c}$ に関する流動方向の平衡河床勾配である。

図-3 に示すように、水と土砂の混合物を、河床近傍に層流域、その上に乱流域を有する二層流を考え、 $\bar{c}$ を一定と仮定することで、以下の関係が得られる。

$$\tan\theta_s = \frac{(\sigma/\rho - 1)\bar{c}}{(\sigma/\rho - 1)\bar{c} + 1} \frac{h_s}{h} \tan\phi_s \dots (4)$$

ここで、 ϕ_s は土砂の内部摩擦角（せん断抵抗角）、 h_s/h は層流層厚比である。また、液体中の土砂の質量保存則は以下の式で表される。

$$\frac{\partial \bar{c}h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{c}hU}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}hV}{\partial y} = E \dots (5)$$

結果として、運動量保存則より、以下の関係が得られる。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huU}{\partial x} + \frac{\partial huV}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \dots (6)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hvU}{\partial x} + \frac{\partial hvV}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \dots (7)$$

ここに、 g は重力、 z_b は河床位、 P は圧力である。静水圧近似を用いると、

$$\rho_m = (\sigma - \rho)\bar{c} + \rho \dots (8)$$

ここで、 ρ_m は土砂等の密度、 ρ は水の密度、 σ は土砂の密度である。また、 τ_{bx} 、 τ_{by} は x 、 y 方向における掃流成分であり、以下のようになる。

$$\tau_{bx} = \{\tau_x + \rho f_b(u^2 + v^2)\} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \dots (9)$$

$$\tau_{by} = \{\tau_y + \rho f_b(u^2 + v^2)\} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \dots (10)$$

f_b は抵抗係数であり、乱流域では式(11)、層流域では式(12)によって表わされる。

(乱流域)

$$f_b = \frac{C_{mu}}{8} \alpha^2 \quad \alpha = \kappa/6 \dots (11)$$

(層流域)

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_f \frac{(1 - \bar{c})^{\frac{5}{3}}}{\bar{c}^{\frac{2}{3}}} + k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) \bar{c}^{\frac{1}{3}} \right\} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} \dots (12)$$

ここに、 C_{mu} は泥流の抵抗に関する係数である。なお、解析では $k_f=0.16$ 、 $k_d=0.0828$ を用いた。 e は粒子の反発係数、 d は土砂の平均粒径である。一方、河床位方程式は以下の式で表される。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\frac{E}{C_*} \dots (13)$$

以上の基礎方程式を用いて、本解析では雪崩・土砂流動の流動深、流速、堆積・侵食量を求めた。

4. 実施した解析手順

国土地理院から入手可能な緯度・経度・標高の地形データをインポートし、解析範囲や土砂流動の規模をはじめに規定した。

本解析では、今回発生した雪崩・土砂流動による実際の堆積量（デブリ量=60,000m³、表面積 250m×60m、平均深さ 4m と仮定）になるように、iRIC を用いて逆解析を行い、斜面崩壊体積と侵食深さを算出した。得られた結果を表-1 に示す。

次に、この値を基準に、雪崩を土砂流動（土石流）と同様の現象と仮定し、iRIC Morpho2DH での雪崩解析を行った。雪と土質特性を変化させることによって、流動特性の変化を調査し、解析手法の妥当性を検討した。

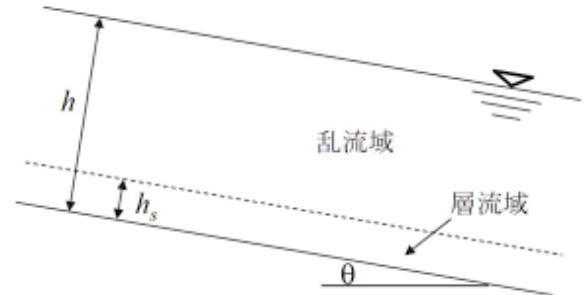


図-3 二相流モデルの概念図

表-1 逆解析による斜面崩壊堆積と侵食深さ

斜面崩壊体積 (m ³)		最大侵食深さ (m)
表面積(m ²)	深さ(m)	
10×10	0.3	0.1

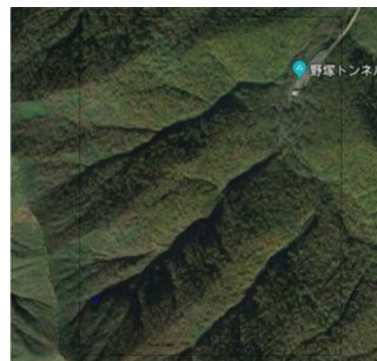


図-4 逆解析に用いた斜面崩壊範囲と土砂の堆積範囲

今回の野塚峠の雪崩は、積雪が湿雪に変化したことで発生した全層雪崩と言われている。ここでは、雪の(a)内部摩擦角（せん断抵抗角）、(b)平均粒径、(c)液体として振る舞う土砂割合の3つのパラメータを変化させて解析を行っている。既往の研究³⁾では、水を多量に含んだ雪内にあるザラメ雪（図-5 参照）の重量含水率(%)と内部摩擦角の関係が報告されており（図-6 参照）、それらのパラメータを参考にした。解析に用いた値を表-2 に示す。なお、雪崩と土砂流動の流動特性を比較するために、土砂流動の内部摩擦角（せん断抵抗角）は図-6 に示すザラメ雪の摩擦角と同値を用いた（表-3 参照）。また、ザラメ雪の平均粒径は 2mm、液体として振る舞う土砂の割合は 0 とし解析を行った。



図-5 ザラメ雪(メッシュ 2mm 間隔)
(上石ら³⁾より引用)

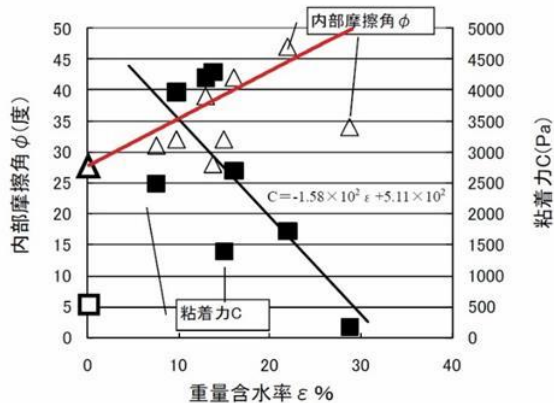


図-6 ザラメ雪の重量含水率と内部摩擦角の関係³⁾

表-2 雪崩解析に用いた重量含水率及び内部摩擦角(せん断抵抗角)

ケース	重量含水率(%)	積雪の内部摩擦角(°)
①	0	28
②	15	39
③	30	50

表-3 土砂流動解析に用いた内部摩擦角(せん断抵抗角)

ケース	内部摩擦角(°)
①	28
②	39
③	50

4. 1 疑似的に再現した雪崩と土砂流動の解析結果

以下では、斜面崩壊発生から 240 秒間の流動特性を比較することにする(表-4 と図-8 と図-9 参照)。

内部摩擦角(せん断抵抗角)の違いによる比較では、内部摩擦角が大きくなるほど、雪崩の流下速度が大きくなっていることがわかる(表-4 参照)。このことを考察してみた。次式は、斜面の雪または土の抵抗力(左辺)と滑動力(右辺)の関係式を示したものである。

$$(W \cos \theta - U) \tan \theta + c \geq W \sin \theta \dots (14)$$

ここで、 W ：雪または土の重量、 θ ：傾斜角、 U ：間隙水圧、 ϕ ：内部摩擦角(せん断抵抗角)、 c ：粘着力である。

上式より、内部摩擦角(せん断抵抗角)が傾斜角より大きい場合(被災地の傾斜角は約 30°)は、安定限界に余裕があるために、その余裕分間隙水圧が高くなっても安定性を維持できることになる。その結果、雪または土が含有できる水量が増えることから、内部摩擦角が大き

くなったとしても雪崩の流下速度は大きくなると考えられる。また、図-7 に示す内部摩擦角と層厚に対する極限水頭高比の関係⁴⁾からもそのことは明らかである。加えて、内部摩擦角が大きくなるほど、下流での雪崩の停滞が顕著になっている(図-8 参照、青色で示された部分が堆積域である)。

次に、雪崩と土砂流の流動特性を比較してみた(図-8、図-9 参照)。その結果、雪崩は土砂流動より被害範囲が狭く、雪崩・土砂流動ともに内部摩擦角が小さいほど長距離流動し、堆積することがわかる。しかし、その傾向は雪崩の方が顕著である。また、解析で得られた結果と実際の堆積範囲⁶⁾の写真による比較では、内部摩擦角(せん断抵抗角)による違いはあるものの、実測値は雪崩と土砂流動の中間的な堆積範囲を示していた(図-10 参照)。このことから、今回発生した災害事例では、雪崩と土砂流動が同時に発生した可能性がある。

表-4 雪崩の内部摩擦角(せん断抵抗角)の違いによる平均流下速度の変化

内部摩擦角(°)	28	39	50
平均流下速度(km/h)	49	52	54

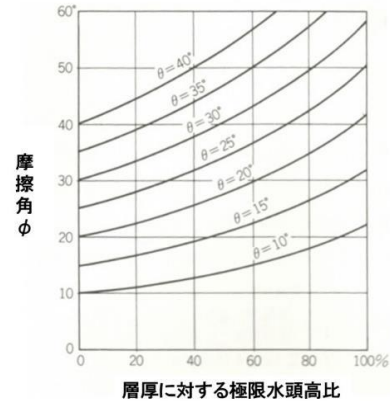


図-7 傾斜角・摩擦角と極限水頭高比の関係⁴⁾

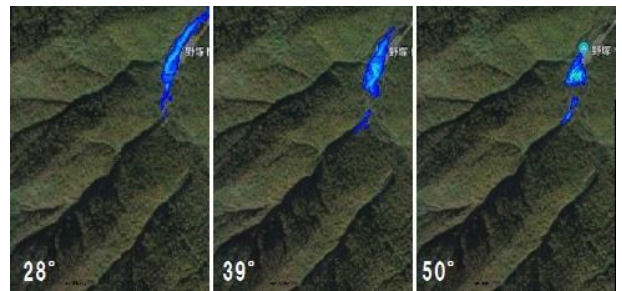


図-8 雪崩発生から 240 秒後の堆積範囲

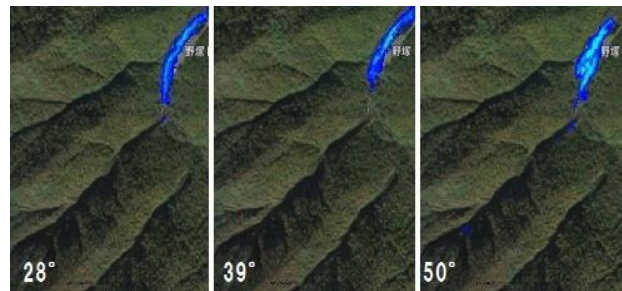


図-9 土砂流発生から 240 秒後の堆積範囲

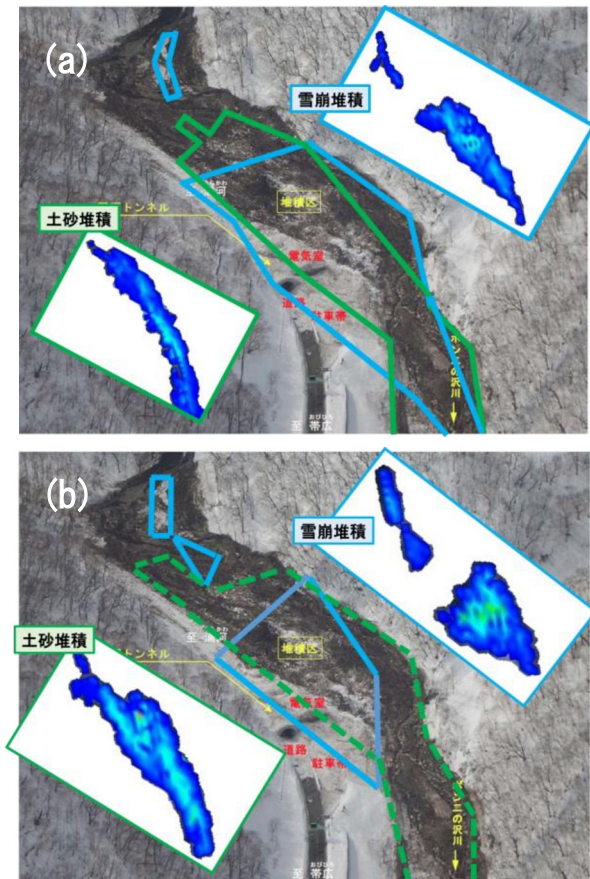


図-10 実際の堆積範囲と解析結果の比較：(a) 内部摩擦角（せん断抵抗角） $\phi=39^\circ$ ，(b) 内部摩擦角（せん断抵抗角） $\phi=50^\circ$

このことについて、さらなる考察を行った。ここでは、既往の報告^{5),7)}にある2つの類似の流下現象（①融雪型火山泥流現象と②雪泥流現象）に着目し、本現象との関係について議論する。

融雪型火山泥流とは、積雪や氷河が存在する活火山で噴火が起きた場合、高温の火山噴出物が斜面上の雪や氷を融解させ、その際に発生した大量の融解水がテフラや雪氷を取り込み、泥流となって火山斜面上を流下する現象のことを言う。沖田ら⁸⁾は融雪型火山泥流現象の基礎的な力学的特性を調べるため、模型斜面を用いた流下実験を行った。その結果、融雪型火山泥流では、テフラ・水・雪から成る凝集体が生成されることを報告している。この凝集体の生成は、融雪型火山泥流の流下特性に強く影響を及ぼし、特に、この凝集体の存在が周りの水を吸収し、含水比を低下させるのに加え、せん断変形に対して抵抗する働きを示すことを実験的に明らかにしている。

一方、雪泥流とは、冬期に土壌が凍結することで不凍水層が形成され、春先に発生する融雪水や雨が地面に浸透せず積雪の中に地下水を形成する。その結果、水を含んだ雪は強度が急に減少して流動化を起し、雪泥流となる。また、雪泥流には不透水層の存在が無い場合においても発生することが確認されている。その場合、斜面下部まで融雪水や降雨は浸透するため、土砂流動（土石流）とともに発生する可能性が指摘されているものの、その発生機構は未解明である。

本現象は、災害発生直前まで降り続いた雨や急激な気

温の上昇があったことから、積雪が雨や融雪水の大量の水を含んで流動する雪と水の混合流体である雪泥流に類似の現象である可能性が高いと考えられる。一方、実測値が雪崩と土砂流動の解析結果の中間的な堆積範囲を示したことから（図-10 参照）、その流下過程で、多量の凝集体が形成し、流下土砂の含水比が低下し、せん断変形に対する抵抗が働いていることも考えられる。

いずれにしても、融雪期に発生する雪崩・土砂流動（土石流）の解析については、入力パラメータの妥当性、凝集体の生成・確認やそれが流動特性にどのような影響を及ぼしているかなど、明確にしなければならない点が多い。今後、詳細な検討が必要である。

5. まとめ

一連の解析結果と考察により、以下の結論を得た。

- (1) 土石流解析を対象とした iRIC Morpho2DH では、擬似的に雪崩の解析も可能である。
- (2) 雪崩現象と土砂流動現象の解析結果の比較では、雪崩現象は、土砂流動現象と比べ、その被害範囲は小さく、その到達距離は短い。また、両現象ともに、内部摩擦角（せん断抵抗角）の大小によって流下範囲は変化する。
- (3) 雪崩-土砂流動の実際の堆積範囲の比較では、その値は雪崩現象と土砂流動現象の解析結果の中間的な範囲を示した。このことから、実際の現象では、その流下過程で、雪・土の凝集体が生成されていた可能性がある。

今後は、凝集体の生成が斜面の流動特性に及ぼす影響について検討を行う予定である。

謝辞：本研究の実施に当たり、室蘭開発建設部から情報の提供を頂いた。また、本研究は JSPS 科研費 JP17H03318 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) 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 HP
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/release/rfqnf000000008wk-att/fns6al000000j130.pdf>
- 3) 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.
- 4) 高野秀夫著，斜面と防災，築地書館出版.
- 5) 沖田竜馬，河島克久，松元高峰，片岡香子，渡部俊：融雪型火山泥流の流動性に与える雪の影響，寒地技術論文・報告集，34, I-007, 2018.
- 6) 岩間結：融雪期に発生する雪崩・土石流現象の解析的検討，室蘭工業大学 平成 30 年度卒業論文
- 7) 上石勲，和泉薫，小林俊一：雪泥流災害と雪泥の力学的性質，自然災害科学，JJSNDS 13-2 205~215, 1994.

大量アンサンブルデータに基づく前期降雨量の分析

Analysis of antecedent rainfall by using large ensemble climate dataset

北海道大学大学院工学研究院 ○正 員 星野剛 (Tsuyoshi Hoshino)
正 員 山田朋人 (Tomohito J. Yamada)

1. はじめに

近年、極端現象の強度と発生頻度を予測するために膨大な気候シミュレーションによる大量アンサンブル気候データベース (d4PDF) ¹⁾ が作成され、過去の気候条件や温暖化進行後の気候条件における数千年分の気候データに基づいて災害につながる低頻度の自然現象の発生頻度を議論することが可能となった。著者らはこれまでにこのデータを 5km 解像度へと力学的ダウンスケーリング (DS) を実施し、DS により実際の降雨の特徴をよく表すことを明らかにした ²⁾ (計画規模の降水量に関しては図 1、1 時間降水強度に関しては図 2 に示す)。また、産業革命前から全球平均温度が 4℃上昇した気候における計画規模の確率雨量は図 3 に示すように 1.3-1.4 倍程度増加すること ²⁾ や図 4 に示すように降雨は時空間的に集中化すること ³⁾ を明らかにした。

これまでは年最大の降雨イベントを対象に分析してきたが、本研究では降雨の流出のしやすさや土砂災害の危険度につながる前期降雨に着目し、その特徴を調べた。北海道地方では 2016 年の 4 つの台風の接近・上陸に伴い甚大な被害を受けたが、4 つの台風のうち台風 10 号の接近時には事前の 3 つの台風により土壌の湿潤度が高く、

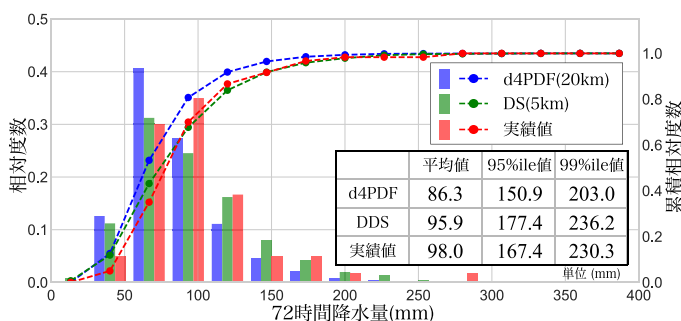


図 1 十勝川帯広基準地点集水域での年最大降水量の頻度分布 (5km 解像度への DS により実績値へ近づく) 山田ら ⁴⁾ より抜粋。

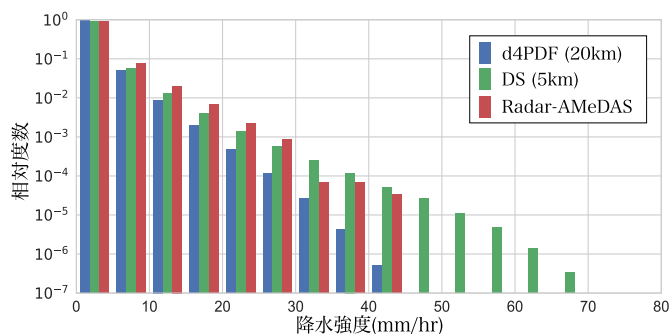


図 2 1 時間降水強度の頻度分布 (DS による強い雨の頻度が観測値に近づく) 山田ら ⁴⁾ より抜粋。

流出率の高い状態であったとされている ⁴⁾。また、事前の降雨量は土砂災害の危険度の診断にも用いられていることから、多角的なリスクの診断および適用策の検討において前期降雨の考慮は極めて重要だと考えられる。

2. 使用したデータ

観測値としてアメダスおよび水文水質データベースに公開されている 1 時間降雨データを使用した。また、異なる気候条件での影響を評価するため d4PDF の過去実験および 4℃上昇実験を 5km 解像度へと DS した降水量データを使用した。過去実験は長期観測データが得られる 1951 年から 2010 年の 60 年を対象に初期擾乱を発生させた 50 メンバの数値計算を実施したものであり (60 年 x 50 メンバ=3000 年)、4℃上昇実験は産業革命前から全球平均温度が 4℃上昇した世界を想定し、CMIP5 メンバの気候海洋気候モデル群による将来予測から得られる 6 種類の全球海面水温パターンと初期擾乱を与えた 15 メンバの数値計算を実施したものである。このうち本研究では 1 年間を通した 5km への力学 DS から後述する年最大降雨イベントの発生 30 日間の降雨データが存在する過去実験 667 年分、4℃上昇実験 1323 年分のデータ (d4PDF-DS5) を使用した。(60 年 x 6 海面

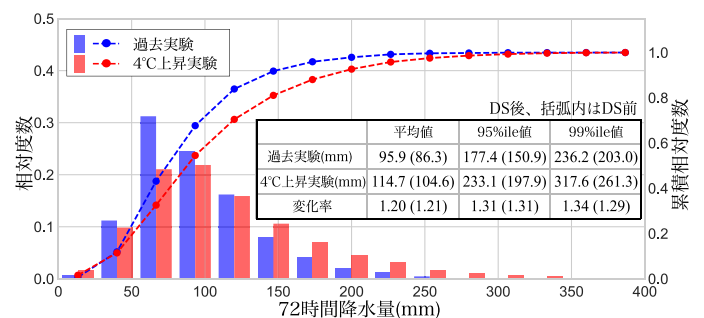


図 3 年最大降水量の頻度分布 (5km への DS 後、99%ile 値は 1.34 倍に増大) 山田ら ⁴⁾ より抜粋。

図 4 計画規模の大雨イベントを対象とした異なる気候条件下での降雨の時空間分布 (4℃上昇実験/過去実験) 対象時間、対象面積が小さいほど降雨の倍率は大きくなる。星野ら ⁵⁾ より抜粋。

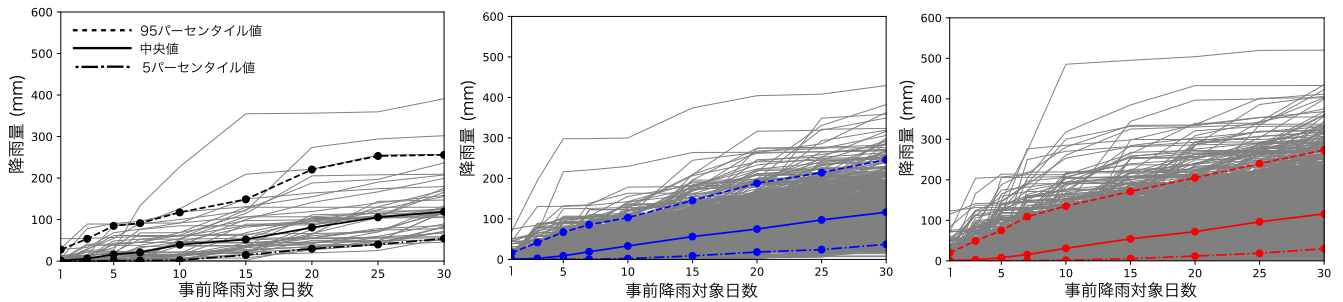


図 5 前期降雨量（左から観測値、過去実験、4℃上昇実験。灰色細線は各年での値、太実線、破線、一点破線はそれぞれ中央地 95 パーセンタイル値、5 パーセンタイル値。）

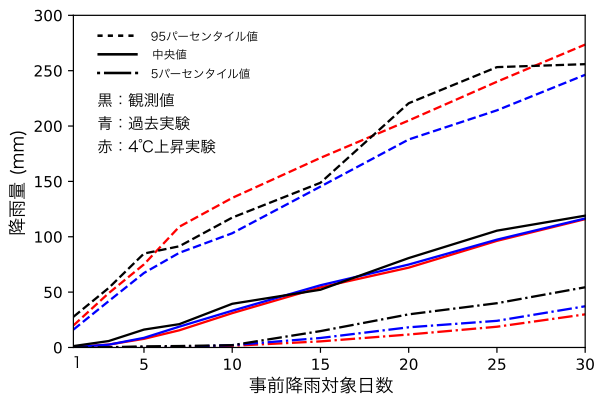


図 6 前期降雨の統計量

水温パターン x 15 メンバ=5400 年)。

3. 前期降雨量

十勝川帯広基準地点集水域を対象に 6 月 1 日から 11 月 30 日までの期間で流域平均の 72 時間降雨量が最大となるイベント（本研究ではこれを年最大降雨イベントとする）を抽出した。観測値としては 1976 から 2018 年までの地上雨量計データを使用し、対象期間で降雨情報が使用可能な雨量計を算術平均することで流域平均降雨量とした。d4PDF-DS5 から同様の基準で年最大降雨イベントを抽出した。この年最大降雨イベントの発生から 1 日前、3 日前、5 日前、7 日前、10 日前、15 日前、20 日前、25 日前、30 日前までの期間での累積流域平均降雨量を算出した。

得られた結果を図 5 に示す。同図より大量のアンサンブルデータからこれまでに観測された事前降雨量を上回るイベントが過去実験、4℃上昇実験に含まれていることがわかる。図 6 に示す中央地は観測値、過去実験、4℃上昇実験のいずれも近い値を有しており、同様の事前降雨量の特徴を有していることがわかる。また、観測値と過去実験の値が近いことから d4PDF-DS5 を用いた前期降雨の分析が妥当であると判断できる。95 パーセンタイル値は 4℃上昇実験において 30 mm 程度大きく、この違いが流出および土砂災害に与える影響を調べる必要がある。図 7 には年最大 72 時間降雨量と事前 30 日間の累積降雨量を示す。この図より、2016 年のような年最大降雨量および事前降雨量が卓越する事例やどちらの降雨量も 2016 年を上回っている事例が d4PDF の過去実験、4℃上昇実験のどちらにも存在することがわかる。また、観測ではカバーされていない降雨パターンの存在

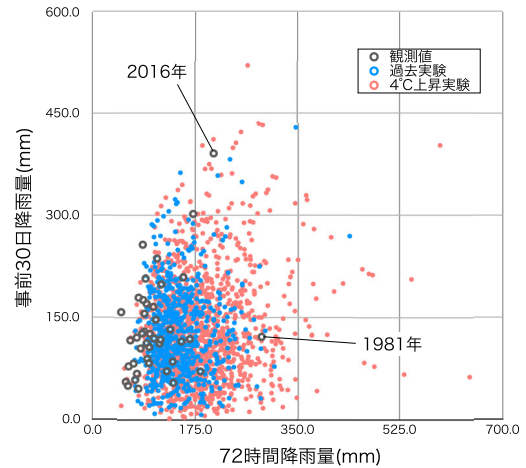


図 7 年最大 72 時間降雨量と事前 30 日降雨量

を示唆する結果であり、大量アンサンブルデータの使用によりこれまでに観測されていないが起こりうる大雨パターンのリスクの把握が可能となると考えられる。

謝辞

本研究は一般財団法人北海道河川財団、文部科学省 SICAT、科研費基盤研究(B) 19H02241、科研費若手研究(B) 17K14728 の支援を受けた。また、本研究では、創生プログラムのもとで作成された、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース(d4PDF)を使用した。DS の実施においては海洋開発研究機構のご支援(平成 29 年度、平成 30 年度地球シミュレータ特別推進課題(成果創出加速))により、地球シミュレータを使用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Mizuta, R., and Coauthors: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp.1383-1393, 2016.
- 2) 山田朋人ら: 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp.391-396, 2018.
- 3) 星野剛ら: 大量アンサンブル気候予測データを用いた大雨の時空間特性とその将来変化の分析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, I_13-I_18, 2018.
- 4) 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団報告書, 土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団

気候変動に伴う積雪寒冷地の融雪期における斜面災害危険度の評価

Research on risk assessment of slope disaster during snowmelt season,s in cold snowy regions due to climate change

室蘭工業大学 ○学生員 服部有吾 (Hattori Yugo)
 室蘭工業大学 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)
 室蘭工業大学 学生員 坂本莉子 (Riko Sakamoto)

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加等の影響により、日本全国で斜面災害の危険度が增大している。一方で、北海道等の積雪地域では融雪期の大雨によって引き起こされる斜面災害の増加が懸念されている。札幌市と道南方面を結ぶ国道230号中山峠では、表-1に示すように、過去の融雪期において斜面災害がたびたび発生している¹⁾。特に、2000年と2012年には写真-1に示すような大規模な斜面災害が発生し、長期間におよぶ交通の障害となるなど大きな影響が出た。また、平成25年から平成26年にかけて公表されたIPCC第5次評価報告書²⁾では「気候システムの温暖化には疑う余地はない」と結論付けられている。気候変動の影響は既に顕在化しつつあり³⁾、今後、降雨量の増加や融雪期の変化により、斜面災害の増加が懸念される。そのため、降雨に加え融雪を勘案した斜面災害発生危険度を表す指標の設定が必要と考えられる。

斜面災害発生の危険度の評価方法に関しては、実効雨量による手法や土壌水分量をタンクモデルによって考慮した土壌雨量指数 (Soil Water Index, 以下 SWI) を用いる手法が提案され、運用されている。SWIは、気象庁と都道府県が共同で発表する「斜面災害警戒情報」⁴⁾として運用されているものの、対象とする斜面災害は大雨によるものであり、融雪を含む災害は含まれない。

本研究では、積雪寒冷地の斜面災害の発生に対する気候変動の影響を定量的に評価することを目的とする。そこで、災害現場付近における融雪を勘案した SWI を推定するとともに、上田ら⁵⁾が作成した地域気候モデルMRI-NHRCM20の1 km メッシュの統計的ダウンスケーリング (Statistical Downscaling, 以下 1 kmDS) データを用いて、将来気候における斜面災害発生危険度の定量的な評価を試みた。

2. 研究方法

2.1 災害事例の概要

本研究で対象とする中山峠付近では、2000年5月と2012年5月に大規模な斜面災害が発生している。それぞれの災害発生箇所と災害状況を図-1、写真-1に示す。

2000年5月の災害は、1969年に開通して以来初めてとなる全面通行止めに至った。この際、延長約550 m、幅50~90 mの範囲で、約200,000 m³の土砂が崩壊した。崩壊により発生した地すべり土塊は下方にある無意根大橋の橋脚や薄別川まで達し、河道閉塞が発生した。

2012年5月の災害は、KP40.6地点 (起点：札幌市)

表-1 中山峠付近の災害履歴

発生日時	災害形態
1998/4/9	崩壊
2000/5/15	地すべり
2006/5/29	落石
2009/5/5	崩壊
2012/5/2	崩壊
2012/5/4	崩壊
2012/5/4	地すべり
2012/5/4	盛土崩壊
2012/5/4	盛土崩壊
2012/5/30	盛土崩壊
2012/6/1	盛土変状
2012/6/1	盛土変状
2013/4/7	盛土崩壊



図-1 災害発生箇所



写真-1 国道230号中山峠の被災状況

(左：2000年5月15日 右：2012年5月4日)

提供：北海道開発局札幌道路事務所及び寒地土木研究所

において、道路幅約10 m、道路延長約86 mの範囲で地すべりが発生し、KP40.8地点においては、盛土法面が幅 (道路延長) 約40 m、横断幅約110 mの範囲で約13,000 m³の土砂が崩壊した。また、同日に地すべりのほか、切土法面崩壊、盛土崩壊など数種類の災害が同時期に発生し、災害発生後、片側交互通行が再開されるまでに連休期間中を含む20日間を要した。

2.2 解析に用いる気象観測・気候変動予測データ

中山峠の現況の斜面災害危険度評価においては時間雨量では気象庁が提供している2000~2012年までの災害現場付近の解析メッシュ雨量データを使用した。

また、中山峠の将来気候における斜面災害危険度評価については、IPCC第5次評価報告書のRCPシナリオ²⁾に基づく気象庁の地域気候モデルMRI-NHRCM20を上田ら⁵⁾によって作成された1 kmDSデータを用いる。

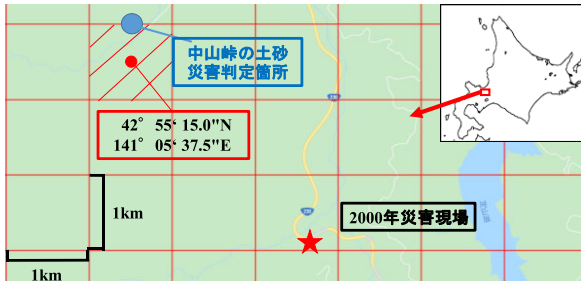


図-2 使用した 1kmDS のメッシュ座標

表-2 解析ケース

解析ケース	計算期間	RCPシナリオ	海面水温
Case-1	現在気候	—	HadISST
Case-2			SST1
Case-3	将来気候	RCP8.5	SST2
Case-4			SST3

注) 海面水温の内、HadISSTは英国ハドレーセンターによる観測値、SST1～3はAR5で用いられた第5期結合モデル相互比較計画データより作成された3種の異なる特徴を有する将来変化の空間パターンを表す。

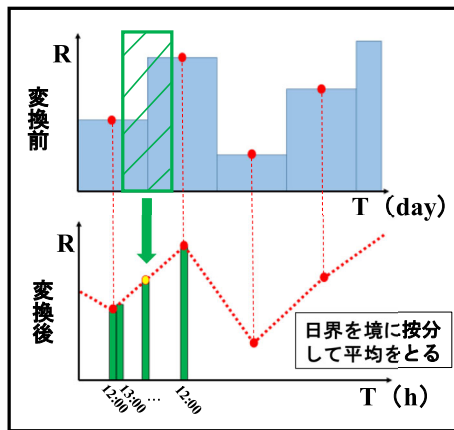


図-3 移動平均の概略図

上田ら⁵⁾は、降水量、降雪水量、気温、気圧、全層雲量、風速、相対湿度を対象にDS-JRA55（気象庁55年解析モデル）などでバイアス補正を行ない、さらには、距離重み法で空間内挿するダウンスケーリングを行っている。本研究では融雪を考慮したSWIの算出を行うため、降水量、降雪水量、気温を用いた。

また本研究で選択した1kmメッシュ座標を図-2に示す。このメッシュの選択方法として、現況の中山峠の土砂災害警戒判定メッシュの座標に近く、2000年での災害現場からも近いことを勘案した。気候変動の解析期間は、現在気候（1984年9月～2004年8月）及び将来気候（2080年9月～2100年8月）の計40年間とした。RCPシナリオについては、積雲対流スキームを同一条件として、海面水温パターンによる比較検証を行うため、公開されているMRI-NHRCM20の解析ケースの中から表-2に示す計4ケースを選定した。

また、本研究で採用した1kmDSのメッシュ値は全て日データであるため、SWI算出に用いるには毎時データに変換する必要がある。そのため、当該時刻の前後12h

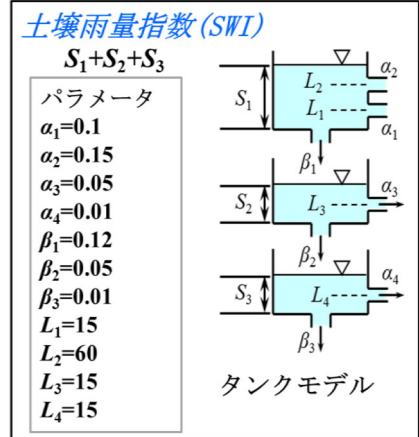


図-4 土壌雨量指数 (SWI) とパラメータ

分の値を、日界を境とした時間重みで按分するような移動平均を行い、日データを時間データに変換した。移動平均の手法の概略図を図-3に示す。なお、時間降水量は所定の時刻の降水量から降雪水量を引いた値を用い、降雪水量が降水量を上回っている場合は降雪量を0mmとした。

2.3 融雪量とSWIの算出方法

融雪期における土壌水分状態の推定に必要な融雪量の算出として、デグリーアワー法を用いて検討した。時間ごとに計測された気温のうち0℃を上回った度数に相当する融雪量を次式から算出する。

$$m_t = k_{dhf} \cdot T_{dnt} \quad (1)$$

ここで、 m_t は所定の時刻 t での融雪量 (mm/h)、 T_{dnt} は所定の時刻 t でのデグリーアワー (deg)、 k_{dhf} はデグリーアワーファクター (mm/deg/h) である。デグリーアワーファクターは実務への適用を考え固定値とし、中津川ら⁶⁾による既往研究において、豊平峡ダムへの計算流入量が実測流入量に合うように調節した結果得られた0.15 mm/deg/hを採用した。なお、積雪がなくなった時点で融雪量は0とした。また、融雪量の計算については、次式から時間値を推定する。

$$AS_t = AS_{t-1} + (s_t - m_t) \Delta t \quad (2)$$

ここで、 AS_t は時刻 t での積雪水量 (mm)、 s_t は所定の時刻 t での降雪水量 (mm/h)、 m_t は融雪量 (mm/h)、 Δt は1hである。

SWIは、デグリーアワー法で算出した時間融雪量と時間雨量を図-4に示す直列3段タンクモデルに入力し推算した。なお、タンクモデルのパラメータは現在気象庁で全国一律に設定されている値⁷⁾を使用した。

2.5 SWIとスネーク曲線による災害発生リスクの評価方法

現在、北海道における土砂災害警報の発表には、危険度判定図（スネーク曲線）が用いられており、北海道の土砂災害発生基準線（Critical Line；以下、CL）及び各気象台の短期降雨指標である60分雨量、長期降雨指標であるSWIの3つの要素によって判断されており⁸⁾、CLは国土交通省と気象庁の連携による土砂災害掲載避難基準雨量の設定方法（案）に基づき各地域に設定され

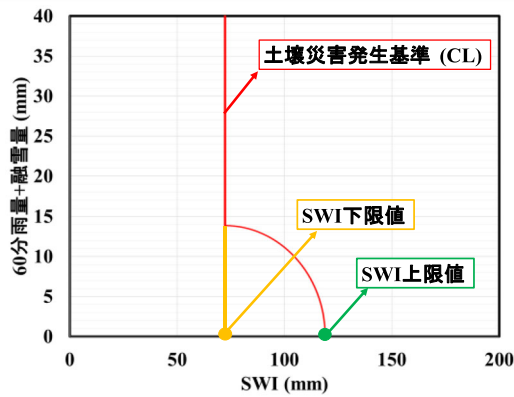


図-5 災害現場付近の観測データによる CL

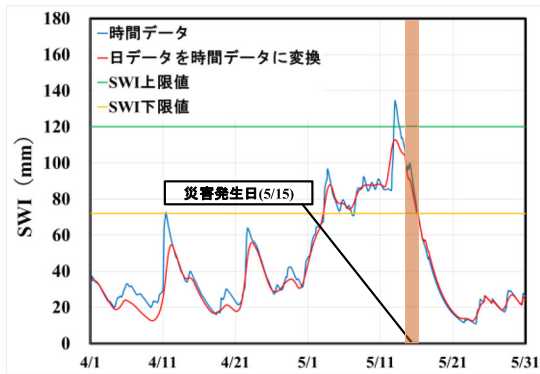


図-6 中山峠における SWI の比較 (2000 年融雪期)

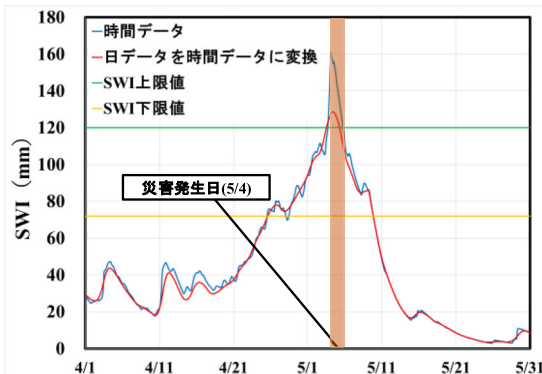


図-7 中山峠における SWI の比較 (2012 年融雪期)

ている⁹⁾。すなわち、図-5 に示すようなダイアグラムにおいて 60 分雨量と SWI のプロット (スネーク曲線) が CL を超えるかどうかの判定が行なわれる。これは基本的に降雨に対する危険度評価の考え方であり、宮崎ら¹⁰⁾は融雪事例にも適用できるように CL の設定を行なった。また、1 kmDS のメッシュ値を日データから毎時データに移動平均して変換すると、降雨量の極値が過少評価されることが予想される。そこで、融雪期の斜面災害は短期間の降雨よりは継続的な融雪で土壌が湿潤する影響が大きいとして、SWI が斜面災害発生の閾値を超えるかどうかで評価することとした。

3. 結果と考察

3.1 観測データを用いた SWI の推定結果と比較検討

図-5 は中山峠の災害現場周辺の観測データ (2000 年 1 月~2013 年 1 月) を対象に融雪量算出法としてデグリ

表-3 観測データと気象シミュレーション (1kmDS) での危険度評価比較

	観測データ (2000/1/1~2012/12/31)	1kmDS 現在気候 (1985/1/1~2003/12/31)
SWI 下限値		
年間超過回数 (回/年)	4.6	4.6
SWI 下限値		
年間超過時間 (h/年)	329	417
SWI 上限値		
年間超過回数 (回/年)	0.5	0.1
SWI 上限値		
年間超過時間 (h/年)	14.1	0.3

表-4 現在気候と将来気候の水収支の比較

	1kmDS 現在気候 (1985/1/1~2003/12/31)	1kmDS 将来気候 (2081/1/1~2099/12/31)			
		SST1	SST2	SST3	平均 (増減)
年平均降水量 (mm)	1,663	1,679	1,598	1,702	1,660 (-3)
年平均降雨量 (mm)	925	1,145	1,154	1,260	1,186 (+261)
年平均降雪量 (mm)	737	534	444	443	474 (-263)
年平均気温 (°C)	4.0	8.4	8.8	9.3	8.8 (+4.8)

ーアワー法を用いて作成された CL であり、緑色で示す SWI 上限値と黄色で示す SWI 下限値を閾値として使用した。また、図-6 及び図-7 は、2000 年及び 2012 年において現場付近での SWI を推定したものである。青線が観測データの毎時データをそのまま入力値とし、赤線が観測データの毎時データを日データに変換して再度毎時データに移動平均した値を入力値としている。またこれらより、ピーク値は過小評価しているが、災害発生日の同日または直前に SWI が最大になっていることがわかる。さらに、ピーク値付近以外の期間では SWI の値がほぼ一致しており、下限値は同様に超過していることから、日データから毎時データに変換した値でも危険度の評価が可能であることがわかる。

3.2 気象シミュレーションデータ (1 kmDS) を入力値とした SWI の推定

表-3 は検証のため、観測データと現在気候 1 kmDS データを用いた SWI 下限値、SWI 上限値の年間超過回数、超過時間を比較したものである。表より、年平均 SWI 下限値超過回数が観測データと現在気候 1 kmDS データで同じ値であることから、SWI 下限値超過回数においてリスク評価が可能であると判断できる。

3.3 現在気候と将来気候の比較

表-4 は現在気候 1 kmDS データと将来気候 1 kmDS データで水文諸量を比較したものである。表より、現在気候に比べ、将来気候では地球温暖化に伴う年平均気温が 4 °C 以上の上昇、年平均降雨量は 200~300 mm の増加が確認できる。対照的に、年平均降雪量は 200~300 mm の減少が確認できた。これらより、気候変動が進行していくに従って、年降水量は大きく変化しないが、雨が増加し、雪が減少することが推察される。

図-8 は現在気候と将来気候で推定した SWI の変動を示している。また、この図において現在気候と将来気候での斜面災害リスクを比較するため、表-5 に SWI 下限値の年平均超過回数及び時間を示す。結果より、現在気

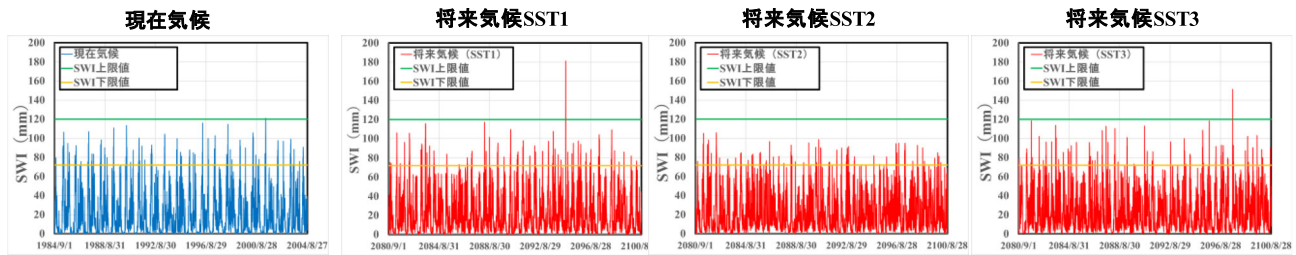


図-8 現在気候及び各将来気候の SWI 算出結果

表-5 年間での現在気候と将来気候の危険度評価

	1kmDS現在気候 (1984/9/1~2004/8/31)		1kmDS将来気候 (2080/9/1~2100/8/31)			
			SST1	SST2	SST3	平均(増減)
SWI下限値						
年間超過回数(回/年)	5		4	4	4	4 (-1)
SWI下限値						
年間超過時間(h/年)	413		271	179	215	222 (-191)

表-6 時期ごとの現在気候と将来気候の危険度評価

	1kmDS現在気候 (1984/9/1~2004/8/31)		1kmDS将来気候 (2080/9/1~2100/8/31)			
			SST1	SST2	SST3	平均(増減)
11~2月	SWI下限値	0.3	1.0	0.9	0.6	0.8 (+0.5)
	年間超過回数(回/年)					
	年間超過時間(h/年)	9	39	25	30	31 (+22)
3~6月	SWI下限値	2.8	1.8	1.5	1.5	1.6 (-1.2)
	年間超過回数(回/年)					
	年間超過時間(h/年)	357	182	111	118	137 (-220)
7~10月	SWI下限値	1	1	1	2	1 (0)
	年間超過回数(回/年)					
	年間超過時間(h/年)	48	51	43	67	54 (+6)

候に比べ将来気候では年間的にみると、超過回数にはさほど変化が見られなかった一方、超過時間は平均で 191 時間減少する結果となった。

次に期別の傾向を評価するため、11~2 月(降雪期)、3~6 月(融雪期)、7~10 月(無積雪期)の 3 つの期間に分けて SWI 下限値の超過回数、時間を比較した。表-6 に期間別の結果を示す。表より 3~6 月の SWI 下限値超過回数が平均で 1.2 回、時間が平均で 220 時間減少している一方、11~2 月では超過回数が平均で 0.5 回、時間が平均で 22 時間増加していることが示された。このことから、将来気候では融雪量の減少により 3~6 月の融雪による斜面災害のリスクが減少する一方、冬期の降雨の増加や、気温上昇に伴い融雪期が早まることで、冬季においても斜面災害のリスクが増加すると推察される。

4. まとめ

本研究において得られた結果を以下に記す。

- 1) MRI-NHRCM20 の 1 kmDS を用いて融雪を考慮した SWI を算出し、斜面災害危険度評価が可能であることを示した。
- 2) 現在気候と将来気候で水文諸量を比較したことで、将来気候では気温の上昇により降雨量は増加し、降雪水量が減少することが示された。
- 3) 現在気候、将来気候で時期ごとの SWI の変動を比較した結果、気温上昇に伴い降雨の増加や融雪期が早まることで、冬期に斜面災害へのリスクが高まることが示された。

本研究の成果は、積雪寒冷地における気候変動に伴な

う斜面災害リスクを勘案した道路管理や地域防災を考えるうえで有用であり、今後は同様の方法を他の地域にも展開していきたいと考える。

謝辞：本研究は文部科学省(MEXT)の事業である気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)の助成を受けたものである。また、(一財)日本気象協会の松岡直基氏、臼谷友秀氏、北海道の宮崎嵩之氏より有益な情報提供を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 伊藤佳彦, 大日向昭彦, 倉橋稔幸, 日下部祐基, 穴戸政仁: 融雪期の道路斜面災害についての考察-国道 230 号を例として-, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会平成 25 年度研究発表会講演予稿集, No33, pp.15~18, 2013.
- 2) 環境省: 日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について(お知らせ)別途資料, 2014.
- 3) 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.
- 4) 気象庁; 土壌雨量指数: <http://www.jma.go.jp/kishou/known/bosai/dojoshisu.h> (閲覧日: 2019/11/27)
- 5) 上田聖也, 中津川誠, 千田侑磨, 小松麻美: 流域水収支が検証された北海道全域の高解像度 Downscaling 情報の作成, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.1051-1056, 2019.
- 6) 中津川誠, 臼谷友秀: 水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006.
- 7) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清: 土壌雨量指数. 天気, 48, pp.349-356. 2000.
- 8) 北海道庁; 北海道土砂災害警戒情報システム: <http://www.njwa.jp/hokkaido-sabou/others/vocabulary.do> (閲覧日: 2019/11/27)
- 9) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 2005.
- 10) 宮崎嵩之, 中津川誠, 西原照雅: 土砂災害発生危険度評価のための実用的融雪量算出法の提案, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.1375-1380, 2017.

ジオセルや排水パイプを用いたのり面保護工に関する屋外土槽試験

Field model tests on slope protection using geocell and drain pipe

北見工業大学工学部	○学生員	古矢達也 (FURUYA, Tatsunari)
北見工業大学工学部	正会員	川口貴之 (KAWAGUCHI, Takayuki)
北見工業大学工学部	正会員	中村 大 (NAKAMURA, Dai)
北見工業大学工学部	正会員	川尻峻三 (KAWAJIRI, Shunzo)
東京インキ株式会社	正会員	原田道幸 (HARATA, Michiyuki)
岡三リビック株式会社	非会員	安達謙二 (ADACHI, Kenji)

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地下では、凍結融解作用を受けたのり面の極表層が春先の融雪水や夏季の大雨によって崩壊する事例が多発する^{1), 2)}。この応急復旧や対策工として、特に北海道では特殊ふとんかご工と呼ばれる、のり面上に敷設した不織布の上に栗石や砕石を充填した金網のケースを設置し、ずれ止めとして1m程度の長尺アンカーバーを打設するのり面保護工が広く普及している^{2), 3)}。しかし、気候変動に伴って北海道の短時間強雨の発生回数は今後も増加するとされており⁴⁾、これまで北海道に適したのり面保護工と考えられてきたものについても、この点を踏まえた再検討が必要な時期に差し掛かっていると思われる。

また、建設業界でも高齢化や人材不足が深刻となっているが、この工法は組み立てや砕石の充填、蓋の取り付け、更には長尺アンカーバーの打設等、不安定なのり面上で行う手作業が多く、決して施工性の良い工法とは言えない。さらに、湧水による不織布背後の侵食や凍上と融解沈下による変形の蓄積によって、変状や崩壊に至るケースも散見されるようになってきた⁵⁾。

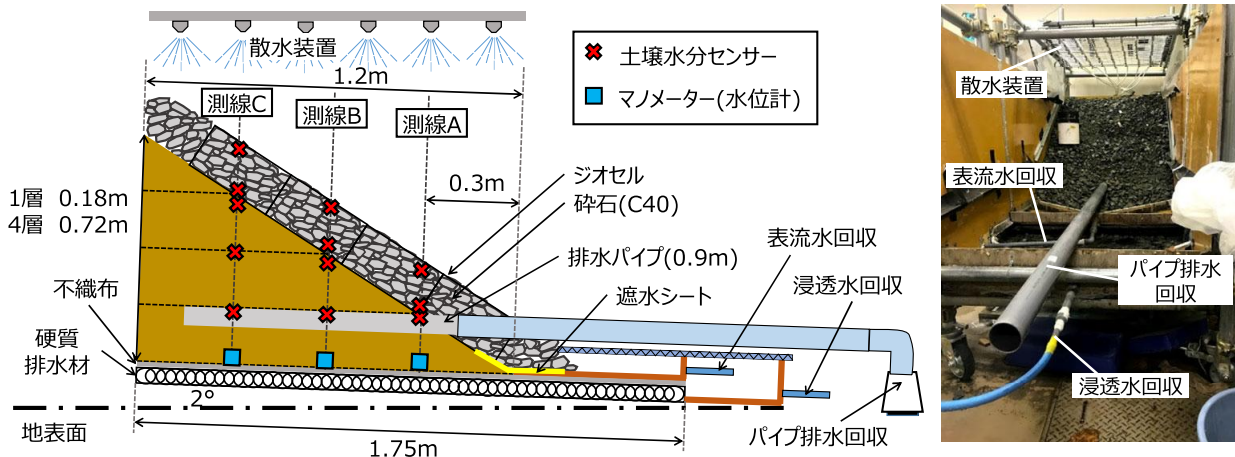
このような背景から、軽量で施工性も良く、工期短縮や切土では逆巻き施工も可能な高密度ポリエチレン製のジオセルと、水位低下による安定性向上が期待できる打設式の鋼製排水パイプを組み合わせたのり面保護工が開発され、実物大実験や室内模型試験による研究が進められている^{5), 6)}。その中で、土中水位よりも高い位置に打

設されたパイプからも排水する場合があることや、砕石C40を充填したジオセル層厚が浸透水量に与える影響、排水パイプの有無による土中水位の違い等に関して、これまでに多くの知見が得られている⁶⁾。しかしながら、中詰め材や背後斜面を構成する土の違いが与える影響など、不明な点は数多く残っている。

そこで本研究では、屋外に6基の土槽を設置し、それぞれに中詰め材や盛土を構成する地盤材料、ジオセル層や排水パイプの有無といった条件を変化させた模型盛土を構築した。本文では、この試験結果を解釈する上で必要な本工法に関するこれまでの知見について概説した上で、同一環境下における降雨時の浸透水量等についての比較・検討から得られた知見について詳述する。

2. 本工法に関して得られたこれまでの知見

図-1は屋内に設置した散水試験用の土槽と、そこに構築した模型盛土に関する概略図である⁶⁾。盛土は砂質土で構成され、斜面上には砕石C40を充填したジオセルを設置し、盛土下部には排水パイプを設置した。なお、この土槽の底部には硬質排水材を設置し、その上に吸出し防止の不織布を敷設している。また、散水試験中はジオセル層表面や層内を流下した水（総じて表流水と呼ぶ）、盛土内を浸透した水（浸透水）、パイプから排出された水（パイプ排水）を独立して計測することが可能である。この模型盛土に対して最大で約90 mm/hの人工散水を実施したところ、幾つかのケースでパイプ排水

図-1 散水試験用の屋内土槽に構築した模型盛土に関する概略図⁶⁾

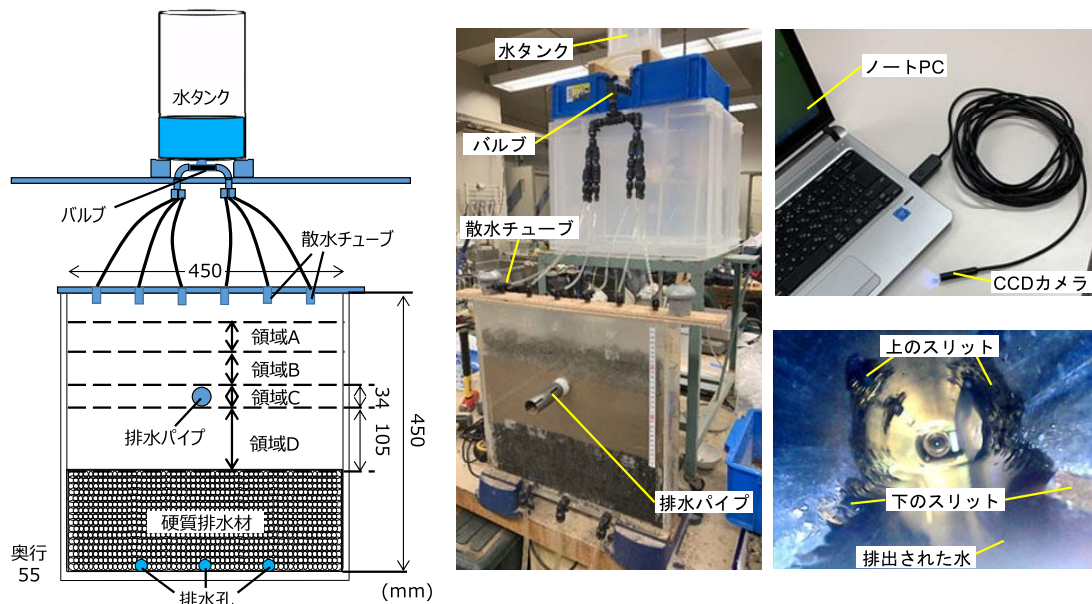

 図-2 パイプ排水機構観察のための散水模型試験に関する概略図⁶⁾


写真-1 完成した模型盛土の様子（ケース3）

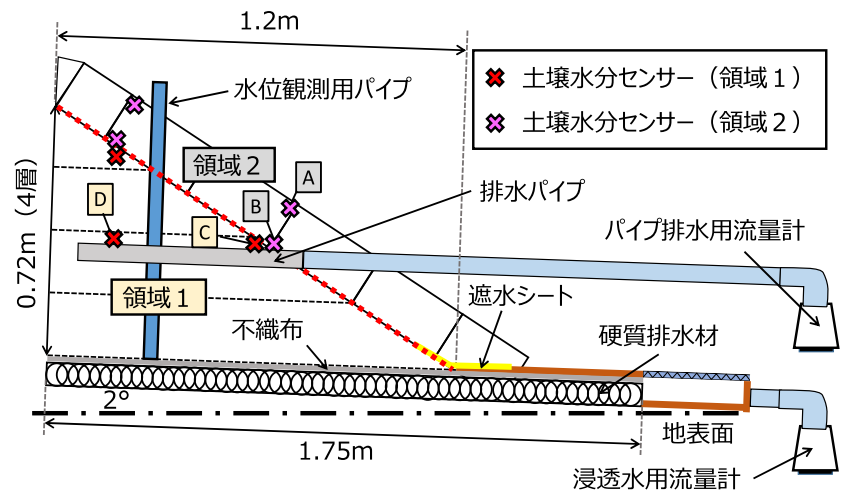


図-3 屋外土槽に構築した模型盛土の断面図

が確認され、その流量はジオセル層厚とともに大きくなることが確認された。また、ジオセル層厚を大きくすると、表流水が増え、浸透水量は減少する傾向にあることが分かった。なお、散水試験中に盛土内の水位は形成されていないことを確認している。

図-2 はパイプの周辺に水位が到達していなくても排水が生じるメカニズムを検討するために実施した散水模型試験に関する概略図である⁶⁾。アクリル製容器にスリット付きの鋼製パイプを貫通させており、水位が上昇しないよう、底部には硬質排水材を設置した上で、容器の底部には穴が開けられており、速やかに外部に排出される構造となっている。実験に使用した土は碎石 C40 と砂質土の 2 種類であり、図中の領域 A～D に充填する組み合わせや締固め度、領域 A と B については高さも変化した様々な組み合わせで散水試験を実施し、その際の浸透・排水挙動を詳細に観察した。その結果、パイプ上部にある土の厚さが小さい場合には、フィンガー流のように浸透した水がパイプのスリットに到達することによって、排水する場合があることを確認した。また、ス

リット周辺で透水係数が急激に低下する境界がある場合（領域 B と C や C と D の境界）、浸透した水がそこで水位を形成することによって排水することも確認した。

3. 本研究で構築した模型盛土斜面

写真-1 は北見工業大学が使用する屋外実験施設であるオホーツク地域創生研究パーク内に設置した 6 基の土槽とその中に構築した模型盛土の一例を示したものである。所定の地盤材料で盛土を構築した後、ケースによってはジオセルを設置して、所定の中詰め材を充填した。また、図-3 は構築した模型盛土の断面図であり、表-1 は図中の領域 1 と 2 に使用した地盤材料の種類や有無、排水パイプ設置の有無といった全 6 ケースの条件についてまとめたものである。図-1 に示した土槽と同様に、底部には不織布を敷設した硬質の排水材を設置し、その上に盛土を構築した。盛土内の水位は不織布を巻いた多孔質パイプによって計測できるようにしているが、計測期間中に水位は確認されなかった。また、近傍に設置した雨量計で降水量を把握しているため、図-1 に示した

表-1 屋外土槽に関する試験条件

ケース名	領域1	領域2	パイプ
1	試料A	砕石C40	あり
2	試料B	試料A	あり
3	試料B	砕石C40	あり
4	試料B	砕石C40	なし
5	試料B	なし	あり
6	試料B	なし	なし

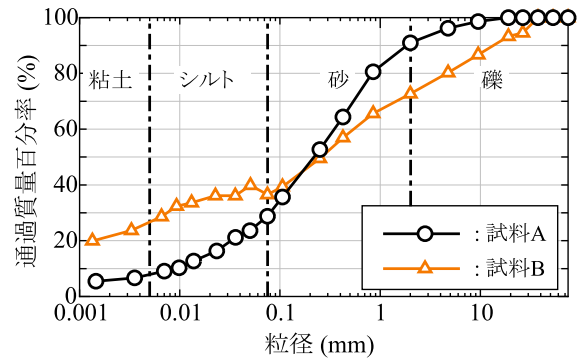


図-4 使用した盛土材料の粒径加積曲線

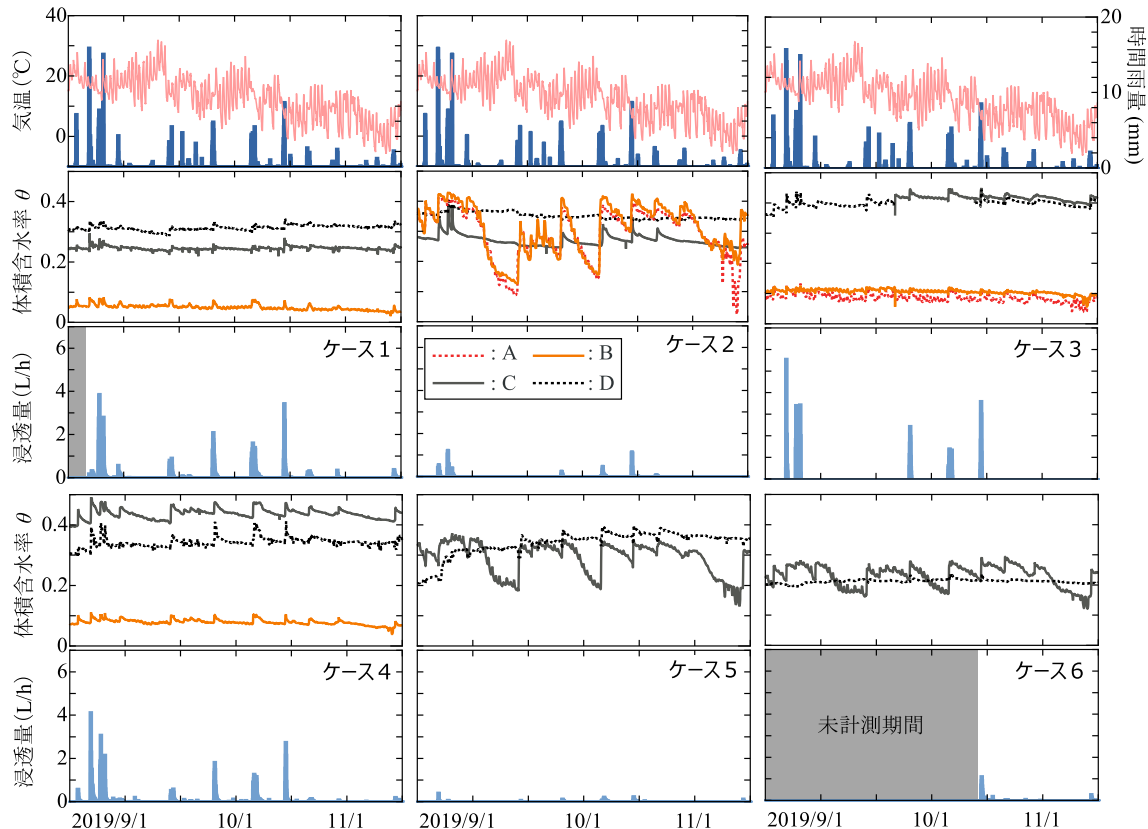


図-5 屋外土槽に構築した模型盛土に関する計測結果

土槽とは異なり、浸透水量とパイプ排水量のみを計測している。盛土は1層 0.18mの4層で構築し、排水パイプを設置したケースでは2層目の上部に設置した。

図-4は盛土や中詰め材として使用した地盤材料の粒径加積曲線である。試料Aは図-1に示した盛土と同様であり、試料Bは土槽の近くにある建設残土からなる盛土から採取した。試料Aは試料Bに比べて細粒分が少い砂質土である。なお、この盛土を用いた本りの面保護工に関する実物大実験も別途実施されている⁵⁾。

4. 計測結果と考察

図-5は盛土を構築して計測を開始した2019年8月中旬から3ヶ月間における計測結果を比較したものである。図中には近傍に設置した雨量計から得られた時間雨量、計測された浸透水量等、ジオセルや盛土内に設置した土壌水分センサーから得られた体積含水率の変化をしている。土壌水分センサーの配置は図-3中に示してお

り、この中の代表的なA～D点についてのみ示している。なお、パイプ排水については、本計測期間中に確認されなかったため、図中には示していない。

まず、今回の計測期間中にパイプ排水が生じなかったことについては、計測期間中に観測された時間雨量がそれほど多くないことが主な要因と考えているが、盛土は比較的均質に構築しているため、スリット周辺で透水係数の差異による水位が形成されにくかったことも影響していると考えている。

次に、降雨時における体積含水率の変化や浸透水量に着目すると、ジオセルを設置していないケース5や6では、盛土表層で計測した体積含水率がジオセルを設置したケース1～4に比べて明らかに小さく、降雨時の浸透水量も明らかに少ないことが分かる。これについては、ある程度の保水力と雨滴衝撃の緩衝効果があるジオセル中詰め材の影響によって盛土表層の含水比（飽和度）が高くなり、それによって表層の透水係数も高くなって浸



写真-2 表面侵食状況の比較 (撮影日 2019 年 12 月 3 日)

透水量が多くなったと考えられる。言い換えれば、ジオセル層のない(裸地状態にある)ケース5と6では、表流水が多くなったために、浸透水量が少なかったと理解できる。このことは、のり面表層を植生や不織布で覆うと浸透水量が増加するとの研究例とも整合する⁷⁾。また、ジオセル中詰め材の影響について考えると、唯一比較的細粒分の少ない試料Aを中詰め材としたケース2では、降雨時におけるジオセル層内の体積含水率の変化が大きいものの、それとは対照的に盛土表層の体積含水率の変化は小さく、浸透水量も圧倒的に少ないことが分かる。これについては、砕石に比べて保水性が高い砂質土内で雨水の捕捉と流下が生じているものと推察される。

写真-2はケース2,4,5における表面の様子を比較したものである(撮影日2019年12月3日)。砕石が中詰めされたケース4では、雨滴侵食は全く見られない。しかし、ケース5は特に細粒分が多く流出しており、ケース2についても、ジオセルによってある程度抑制されているが、表層部分の流出が進んでいることが分かる。これらの結果と将来的な気候変動を踏まえると、今後は耐侵食性と浸透抑制の両機能を兼ね備えたのり面保護工について研究していく必要があると考えられる⁵⁾。

最後に、排水パイプの有無による違いに着目すると、それ以外は同条件のケース3と4、ケース5と6を比較すると、パイプ排水は無かったにも関わらず、いずれも排水パイプが設置されている方の浸透水量が少ないことが分かる。また、各降雨期間を拡大して比較すると、降雨後に上昇した体積含水率が低下するまでの時間についても、パイプが設置されている方が短い傾向にあった。この理由の一つとして、パイプがあることで盛土内の有効応力(サクション)分布が変化し、盛土内の飽和度が比較的低く保たれることで盛土内への浸透水量そのものが抑制されているのではないかと考えているが、不明な点も多く残っているため、屋内での人工散水試験等によって今後も詳細に検討していきたいと考えている。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・特殊ふとんかごやジオセル等によって、のり面表層に砕石層を設置した際、裸地と比べて雨滴等による耐侵食性は明らかに向上するものの、裸地に比べて浸透水量は格段に増加することが明らかとなった。

- ・のり面表層に比較的細粒分が少ない砂質土を充填したジオセル層を設置した際、雨滴等による耐侵食性には問題があるものの、砕石層を設置する場合に比べて土中への浸透水量はかなり抑制されることが分かった。
- ・本計測期間中における排水は確認できなかったものの、排水パイプが設置されたケースの浸透水量は設置されていないケースよりも少ないことが分かった。

謝辞：本研究は公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金の助成によって行われたものである。また、本研究を遂行するに当たり、北見工業大学大学院の衛藤遼氏、平井泰輔氏には多大なる協力を得た。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺裕之：寒冷地における高速道路のり面の緑化について、芝草研究, Vol. 7, No. 1, pp. 5-10, 1978.
- 2) 地盤工学会北海道支部 斜面の凍上被害と対策に関する研究委員会：斜面の凍上被害と対策のガイドライン, 2010.
- 3) 国土交通省北海道開発局：平成 27 年度道路設計要領, 第1集道路, 第4章のり面保護工, 2015.
- 4) 北海道開発局 HP：北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会, 技術検討委員会【最終とりまとめ資料】(詳細), https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html, 確認年月日 2019.12.05.
- 5) 原田道幸, 川口貴之, 中村大, 平井泰輔, 衛藤遼, 川尻峻三, 山下聡：ジオセルを用いたのり面保護工における省力化と緑化に関する検討, ジオシンセティックス論文集, Vol.34, pp.87-92, 2019.
- 6) 平井泰輔, 川口貴之, 川尻峻三, 中村大, 衛藤遼, 原田道幸, 安達謙二：ジオセルと排水パイプを併用した斜面安定工の排水メカニズムに関する模型実験, ジオシンセティックス論文集, Vol.34, pp.107-114, 2019.
- 7) 丸田亮, 細川大吉, 土田孝：不織布フィルターにより表面からの浸透性を高めた模型斜面における降雨浸透と斜面崩壊, 地盤と建設, Vol. 35, No.1, pp.155-162, 2017.

2019 年 10 月台風 19 号による千曲川の河川構造物の被災調査

Investigation of river structure damage at Chikuma River due to Typhoon No.19, October 2019

北見工業大学大学院 学生員 ○松田朋也 (Tomoya Matsuda) 非会員 三浦竜 (Ryu Miura)
 北見工業大学 正 員 川尻峻三 (Shunzo Kawajiri) 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
 東京大学大学院 正 員 渡邊健治 (Kenji Watanabe)

1. はじめに

台風 19 号は、2019 年 10 月 12 日に伊豆半島に上陸し、関東甲信地方および東北地方に記録的な大雨をもたらした。この大雨によって、多くの河川が氾濫し、堤防決壊箇所は国管理河川と県管理河川を合わせて、20 水系 71 河川 140 箇所（令和元年 11 月 25 日 7 時時点）であった¹⁾。また、各地で土石流や地すべりなどの土砂災害、橋台背面盛土の流出や橋台崩落などの橋梁被害が発生した。

著者らは、発災約 10 日後の 10 月 23 日、24 日に、信濃川水系千曲川において、現地踏査およびドローンによる空撮を行った。本文では、現地調査から得た河川構造物の被災状況について報告するものである。

2. 洪水の概要

2019 年 10 月 6 日に日本の南東の海上で発生した台風 19 号は、非常に強い勢力を保ったまま日本列島に接近し、12 日 19 時前に伊豆半島に上陸した²⁾。台風 19 号の接近に伴い、12 日 15 時 30 分に静岡県、神奈川県、東京都、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県³⁾、12 日 19 時 50 分に茨城県、栃木県、新潟県、福島県、宮城県³⁾、13 日 0 時 40 分に岩手県にそれぞれ大雨特別警報が発表された⁴⁾。図-1 は、10 月 10 日 0 時から 10 月 13 日 24 時に観測された降水量の合計値を示したものである⁵⁾。神奈川県箱根町では、10 月 12 日の 24 時間降水量が 942.5mm となり²⁾、国内の最高記録を更新した。長野県東部の千曲川地域においては、上流の軽井沢や佐久で 10 月 10 日 0 時から 10 月 13 日 24 時までの降水量が 300mm を超えるなど、各観測地点で日降水量の最高記録を更新する大雨となり、千曲川本川の水位が上昇した。

3. 調査の概要

10 月 23 日に上田市の千曲川 104 キロ付近における堤

防侵食箇所および上田電鉄別所線千曲川橋梁（以下、単に千曲川橋梁と略す）の落橋箇所を、10 月 24 日に東御市の田中橋における橋台背面盛土の流出箇所と海野宿橋における橋台の崩落および取付道路の流出箇所ならびに、長野市の穂保地区における破堤被害について現地調査を実施した。調査手法は、現地踏査による目視観察の他、ドローンによる空撮である。表-1 に、著者らが調査した日時と場所および被災概要をまとめたものを示す。図-2 に調査地点の位置を示す。

4. 被災調査の結果

4.1 千曲川 104 キロ付近における堤防侵食および上田電鉄別所線千曲川橋梁の落橋

千曲川橋梁は、別所線の上田駅と城下駅間に位置する竣工 1924 年、橋長 224.17m、最大支間長 44.88m の 5 連プラットラス橋である⁶⁾。図-3 および図-4 は、今回の調査でドローンによって撮影した千曲川橋梁付近の状況である。千曲川 104 キロ付近の左岸堤防が縦断方向に侵食されており、千曲川橋梁の橋台が崩落し橋桁が落下している。左岸堤防の縦断方向の侵食延長は約 320m であり、住宅地の直前まで堤防の側方侵食が確認できる。千曲川橋梁と千曲川橋梁下流に位置する上田橋間の左岸堤防では、著者らが調査を行った時点で復旧工事としてすでに土が投入されていた。

表-1 調査概要のまとめ

調査日	調査箇所	被災概要
10月23日	別所線千曲川橋梁	堤防侵食、橋台崩落
10月24日	田中橋	橋台背面盛土の流出
	海野宿橋	橋台崩落、取付道路の流出
	穂保地区	破堤

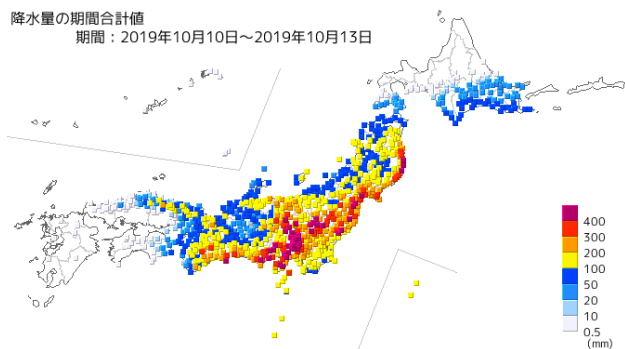


図-1 10 月 10 日 0 時~10 月 13 日 24 時の合計降水量⁵⁾



図-2 調査位置（国土地理院の画像を編集）



図-3 千曲川橋梁の全景(2019.10.23 上流から撮影)



図-4 被災箇所の状況(2019.10.23 上流から撮影)



図-5 2018.3.28 の衛星写真 (Google Earth を編集)

図-5 は、平成 30 年 3 月 28 日の衛星写真を示している。図-3 と図-5 を比較すると、千曲川橋梁付近において、2018 年 3 月 28 日時点では主流路が右岸側にあるものの 2019 年 10 月 23 日時点では流路が左岸側の被災箇所に向かっている。右岸側にも流れが存在しているが、この流れは被災後に施工された瀬替工によるものであり、出水時には主流路が左岸側に向かっていたことが想定される。出水前に右岸側にあった主流路が出水時に左岸側に移動した要因として、低水路内に形成されていた交互砂州が下流に前進したことが考えられる。千曲川橋梁の直下流に位置する砂州に着目すると、図-3 と図-5 の比較により砂州の前縁が移動していることがわかる。このことから、砂州が下流に前進したことにより、千曲川橋梁付近の左岸堤防に流れが集中して堤防が侵食されると共に、千曲川橋梁の橋台が崩落したものと判断される。

4.2 田中橋における橋台背面盛土の流出

東御市に位置する田中橋は、1970 年竣工、橋長 97.6m、幅員 5.5m の、県管理の橋梁である⁸⁾。被災箇所は、図-6 に示される田中橋右岸橋台背面盛土である。右岸橋台の構造形式は、ピアアバットであった。



図-6 被災箇所の状況 (2019.10.24 下流から撮影)



図-7 被災箇所の状況 (2019.10.24 下流から撮影)

図-7 は平成 30 年 3 月 28 日に撮影された衛星写真と今回ドローンによって撮影した航空写真との比較を示したものである。出水前後を比較すると、橋梁上流側の右岸が侵食され植生が流出している。左岸橋台には護岸工がなされており、損傷は見られない。

田中橋は、上流からの流れが右に湾曲した直下流に位置している。一般的には外岸である左岸に氾濫流が勢いよく流れると考えられるが、左岸が崖であることや急流河川の出水時には主流が内岸側になることなどの理由により、外岸側の侵食が抑制されたものとも考えられる。今回の出水時には、内岸である右岸にも激しい流れが生じたものと考えられ、この流れによって橋梁上流側右岸の侵食と、橋台背面盛土の侵食が発生したものと考えられる。また、橋梁右岸側の堤内地および取付道路は、橋梁に向かって下っており、堤内地に降った雨水が取付道路を介して橋梁に向けて集まりやすい状況であった。このような状況から、取付道路を流下してきた雨水が河川に流れ込む際に、橋台背面盛土を流出させたことも考えられる。なお、川尻らはピアアバット形式では側壁を有する逆 T 形式よりも橋台背面盛土の侵食・流出速度が速く、道路陥没の規模が大きくなることを報告しており⁹⁾、今後詳細な分析が必要である。

4.3 海野宿橋における橋台の崩落および取付道路の流出

海野宿橋は、1999 年竣工、橋長 69m の橋梁である¹⁰⁾。図-8 に被災箇所を下流側から撮影した状況を示す。今回の出水で、下流側の橋台が崩落するとともに、取付道路が約 250m にわたって流出した。図-9 は、2018 年 3 月 28 年と 2019 年 11 月 15 日に撮影された衛星写真の比較を示したものである。被災前に橋梁上流側から右岸に施工されていた護岸工が今回の出水で流出し、側方侵食が発生していることが分かる。2019 年 11 月 13 日の衛



図-8 被災箇所状況 (2019.10.24 下流から撮影)



図-9 出水前後の比較 (Google Earth を編集)

星写真では、河道内に応急復旧工事のための仮締切工が行われていることが確認される。被災した箇所は、湾曲部直下流に位置しており、出水時に湾曲部に生じる二次流による外岸側の洗堀が、護岸根入れ部及び護岸天端と橋梁盛土の間で生じたと考えられる。この洗堀により護岸が崩壊するとともに堤防脚部も洗堀を受け、取付道路とともに橋台が崩落したと考えられる。

4.4 穂保地区における破堤

長野市穂保地区の千曲川左岸 57.5 キロ付近では 2019 年 10 月 13 日 6 時 30 分に約 70m にわたって破堤が生じた¹¹⁾。なお、堤防決壊箇所を設置された CCTV カメラにより、10 月 13 日 0 時 55 分頃に越水が始まったことを、国土交通省北陸地方整備局の職員が確認している⁷⁾。

図-10 は、10 月 16 日に国土地理院が撮影した垂直写真である¹²⁾。破堤箇所から堤内に流れ込む氾濫流の痕跡が確認できる。図-11 は、被災箇所周辺の千曲川の河道変遷を示している。2006 年 10 月 1 日、2012 年 8 月 29 日、2018 年 3 月 28 日に撮影された衛星写真を比較す

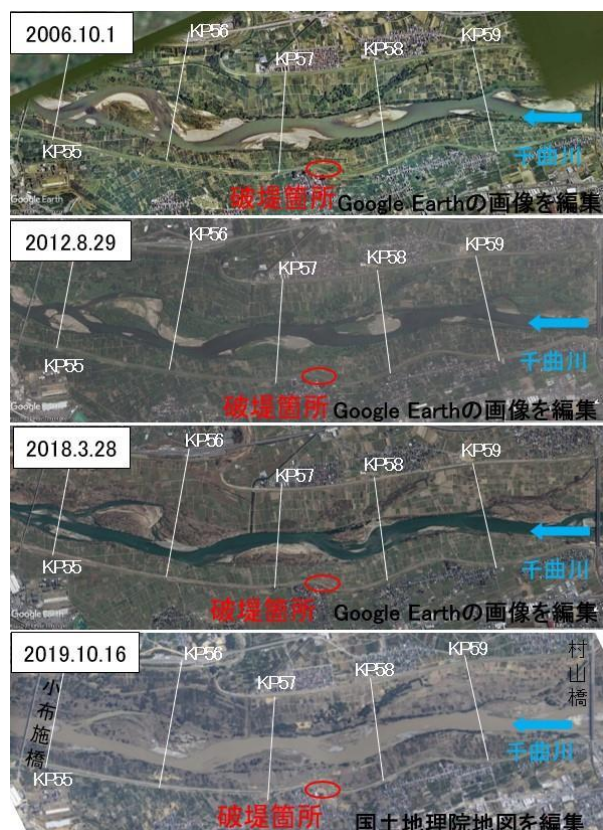
図-10 被災後の垂直写真¹²⁾(国土地理院の画像を編集)

図-11 被災箇所周辺の河道状況の変遷

ると、滞筋の位置に大きな変化はなく、砂州の発達や下流への前進も見られない。また、被災後の 10 月 16 日に撮影された航空写真においても滞筋の位置や砂州の変化はあまり見られない。破堤箇所の前面の高水敷は河川の蛇行部にあたるが、この高水敷の大きな側方侵食は確認できない。すなわち、出水時の河道変化に伴う堤防側方の侵食による破堤ではないことが推察される。

図-12 は、破堤箇所周辺の状況を空撮したものを示している。破堤箇所の上流側における現地踏査において、図-13 に示すように堤内側法面（以下、裏法面とする）の洗堀を複数箇所を確認した。図-12 内に記した番号は、図-13 の番号に対応した撮影箇所を示している。越水による洗堀は、破堤箇所よりも上流の複数箇所の裏法面で確認できた。このことから破堤の主な原因は、越流による裏法面の洗堀と考えられる。図-14 は図-13 の⑥付近で採取した堤体材料の粒度分布を示している。図中には土試料採取箇所付近の堤体断面を併せて記載している。

破堤箇所付近の堤体は、堤体下部の 1.5m 程度が粘性土、堤体上部の 2m 程度が砂質土で構成されていた。堤体下部の粘性土は旧堤体と考えられるが、この旧堤体部については被災後にも法面形状が維持されており、粘性土であるために相対的な侵食抵抗が大きかったと予想される。なお、この粘性土と砂質土の境界部には、吸出し防止材と考えられる不織布が敷設されていた。

5. おわりに

台風 19 号による千曲川の河川構造物の被災は、橋台背面盛土の侵食や、堤防侵食、破堤など様々なケースが確認された。ここでは、現地調査から得られた情報を基に考察を行ったが、今後その結果の検証が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：堤防決壊箇所一覧、<<https://www.mlit.go.jp/common/001313204.pdf>>, (参照 2019.11.29)
- 2) 気象庁：台風第 19 号による大雨、暴風等、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20191012/jyun_sokuji20191010-1013.pdf>, (参照 2019.11.29)
- 3) 気象庁：5 県に大雨特別警報を発表、<<http://www.jma.go.jp/jma/press/1910/12b/kaisetsu201910122050.pdf>>, (参照 2019.11.29)
- 4) 気象庁：岩手県に大雨特別警報を発表、<<http://www.jma.go.jp/jma/press/1910/13a/kaisetsu201910130140.pdf>>, (参照 2019.11.29)
- 5) 気象庁：特定期間の降水の状況（2019 年 10 月 10 日～2019 年 10 月 13 日）、<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/periodstat/20191010a/20191013/24/index_pre.html>, (参照 2019.11.29)
- 6) 羽矢洋，篠田昌弘，村田成二：河床が低下した鉄道河川橋梁下部構造物の健全度診断，土木学会論文集 A, Vol.65 No2, pp.395-409, 2009.5
- 7) 国土交通省北陸地方整備局，第 2 回千曲川堤防調査委員会配布資料，<<http://www.hrr.mlit.go.jp/river/chikumagawateibouchousa/chikuma-02.pdf>>, (閲覧日 2019.11.30)
- 8) 中日本建設コンサルタント：FR20:川を渡る橋・長野県，<<https://www.nakanihon.co.jp/gijyutsu/Shimada/RiverAndBridge/FR20NG.pdf>>, (参照 2019.11.30)
- 9) 川尻峻三，御厩敷公平，川口貴之，倉知禎直，原田道幸：河川増水による橋台背面盛土の侵食に対するジオシンセティックス材料による対策工の提案，ジオシンセティックス論文集，Vol.33, pp. 159-166, 2018.
- 10) 国土交通省：『大規模災害からの復興に関する法律』に基づく道路の直轄権限代行による災害復旧事業に着手，<<http://www.mlit.go.jp/report/press/content/001314403.pdf>>, (参照 2019.11.30)
- 11) 国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所：令和元年 10 月 12 日洪水（台風 19 号）に関する千曲川河川事務所の対応について [第 9 報]，<<http://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/bousai/shussui/20191012k>



図-12 破堤箇所上流の状況(2019.10.24 撮影)



図-13 堤内側法面の洗堀 (2019.10.24 撮影)

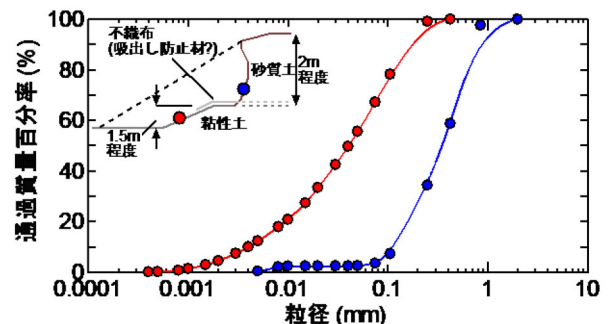


図-14 図-13⑥付近における堤防断面と粒度分布

ouzui/191012%20kisyahapyou09.pdf>, (参照 2019.11.21)

- 12) 国土地理院：令和元年(2019 年)台風 19 号に関する情報，<<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihuu19go.html#6>>, (参照 2019.11.25)

気候変動脆弱地域における複合地盤災害リスクの事例検討

Case study for risk assessment of complex geodisasters in climate change vulnerable areas

北海道大学大学院工学研究院 ○フェロー 石川達也 (Tatsuya Ishikawa)

1. はじめに

近年の気候変動により、毎年のように国内各地で観測記録を更新する豪雨が堤防決壊による河川氾濫や大規模な斜面崩壊・土石流などを引き起こしているが、国内他地域と比較して従来降水量が少なかった北海道においても頻繁に豪雨が観測され、広域激甚土砂災害の危険性が高まっている。例えば、平成28年8月北海道豪雨は、地盤工学や水工水文学に携わる研究者・技術者が想定していない形態の衝撃的な土砂災害であった。また、札幌近郊で平成24、25年の春に連続発生した大規模土砂災害は、地球温暖化に起因する融雪期の急速な気温上昇や大雨が引き起こしたと考えられている。さらに、平成30年北海道胆振東部地震では、大規模斜面崩壊や宅地液状化被害などの特徴的な地盤災害が発生しているが、地震発生前の降水量が平年より多かったことや地震前日の台風通過により地下水位が通常よりも高い状態にあったことがその要因として報告されている¹⁾。

国土交通省が作成した今世紀末の最大雨量の予測では、北海道の多くの地域では1.3倍超の降水量が予想されており、今後北海道のような高緯度地域の方が本州など温暖地域の多くよりも気候変動の影響を受け易い。その一方で、北海道は、これまで台風や集中豪雨などの影響が小さく降雨による土砂災害が国内の温暖地域（多雨地域）と比較して少なかったことから、雨慣れ（降雨に対する土砂災害の慣れ）していない地盤が多い。このため、北海道は、多雨地域と比較して土砂災害の限界雨量が小さく、同程度の豪雨が発生した場合には土砂災害が生じ易い。また、被災規模の拡大・深刻化が懸念される。

本稿では、気候変動災害脆弱地域である北海道において近年発生した上述の3つの甚大な地盤災害の事例検討を通して、気象変動に伴い発災が予想される新たな形態の複合地盤災害を、北海道の地域性を考慮して体系化するとともに、そのリスク評価や防災・減災対策に必要な視点を明らかにして、今後の学術研究・技術開発の方向性について検討する。

2. 平成24、25年融雪期土砂災害

2.1 被災事例の検証と教訓

北海道における近年の融雪期の大規模土砂災害事例として、国道230号中山峠で平成24、25年の融雪期に連続発生した斜面崩壊が挙げられる。国道230号中山峠災害対策検討委員会資料²⁾によると、平成24年5月4日に、道路延長約40mの範囲で盛土法面が崩壊し（崩壊土砂量：約13,000m³）、地すべりによる路面変状も観測されたことから20日間の全面通行止めとなった。翌平成25年4月7日には、前年より札幌側で、道路延長

約50mに渡り盛土法面が崩壊し（崩壊土砂は約11,000m³）、6日間全面通行止めとなった。災害箇所之最寄りの気象データ（無意根TM）をもとに、融雪期（3月～6月）において急激に融雪が起きた日あるいは大雨が降った日の日換算雨量（融雪水量＋日雨量）を算出し、災害発生過去10年間について比較したところ、H24年被災時、H25年被災時がそれぞれ過去10年間で1、2番目であったと報告されている。この結果、大量の融雪水・雨水の地盤浸透が斜面の不安定化をもたらしたと考えられており、融雪期の道路斜面の維持管理、防災・減災対策にあたっては融雪水の影響を考慮する必要性が広く認識されることになった。しかし、北海道土砂災害警戒情報システムの対象区域は、主に「土砂災害が発生した場合に住民の生命または身体に危害が生ずる恐れがあると認められる区域（住居地域）」であり、避難行動の必要のない民家のない山間部・山沿いなど山地は、その対象地域から外れていることが多い。また、対象としている土砂災害は、豪雨に起因する土石流、急傾斜地の崩壊、地すべりであるが、土壌雨量指数（SWI）の算出に用いられるタンクモデルは全国一律であり、積雪寒冷地で発生する融雪期の斜面崩壊など土砂災害の地域性を考慮したものではない。このため、山地を含む北海道全域で当該システムを年間通して活用するには、その適用性を充分検証する必要がある。

2.2 今後の被災リスクの事例研究

一般に、土砂災害の発生を予見するために、土壌雨量指数・凍結指数等のマクロ指標が広域災害リスクを簡易に判定する拠り所として現在広く用いられている。しかし、異常気象や気候変動により融雪期の豪雨・急激な地温上昇などの外力が過去の観測範囲を超えて増大し、湿潤や融雪など複数の要因がもたらす複合的な地盤災害リスクを広域で予測する場合、統計的手法による土砂災害発生危険度基準線（CL：Critical Line）の設定は観測事例が無いことから難しく、従来の経験的なリスク評価手法に頼るのみでは十分対応できない。この問題の解決のために、予測される気候変動下での地盤の脆弱化や斜面崩壊等の数値シミュレーションを行い、その結果に基づき、土砂災害発生危険度基準線を設定し、融雪量・降雨量を考慮した積雪寒冷地の土砂災害発生危険度評価手法を構築することが検討されている³⁾。例えば、図-1は、平成25年の融雪期に中山峠で発生した斜面崩壊事例について、北海道土砂災害警戒情報システムのCLと前述の方法³⁾により求まる新しいCL、および土壌雨量指数（SWI）と60分間積算雨量によるスネークライン（SL）を融雪量考慮の有無それぞれの場合について描

画したものである。地形・地質・降水条件に応じて CL を設定し融雪を考慮して SL を算出した場合、北海道土砂災害警戒情報システムの予測対象外の山地の融雪期斜面崩壊を正確に予測可能となった。この方法によれば、気候変動に伴って降雨形態の変化や平均気温の上昇など外力が過去の観測範囲を超えて増大する場合でも、数値解析的観点から被災履歴の少ない潜在的な土砂災害のリスク評価の実施や、降雨指標や凍結指標など広域的な評価指標の地域性を考慮した設定が可能となる。一例として、力学的ダウンスケーリング手法に基づき札幌近郊の70年後の気象条件を予測し、この土砂災害リスク評価手法を用いて気候変動が積雪寒冷地斜面の安定性に及ぼす影響を定量的に評価した結果を図-2に示す。気候変動の影響を受け札幌近郊の年間の土砂災害リスクは今後増大が予想される結果となったが、同手法は、北海道のような気候変動災害脆弱地域に対して近未来の地盤防災・減災対策を考える上で有効な手法であるといえる。

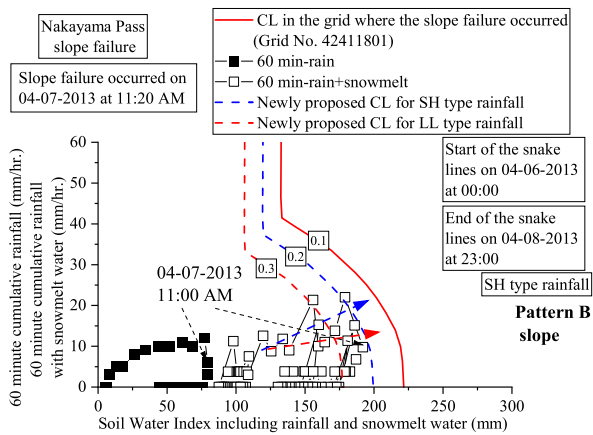


図-1 国道230号中山峠の斜面崩壊安定性評価例

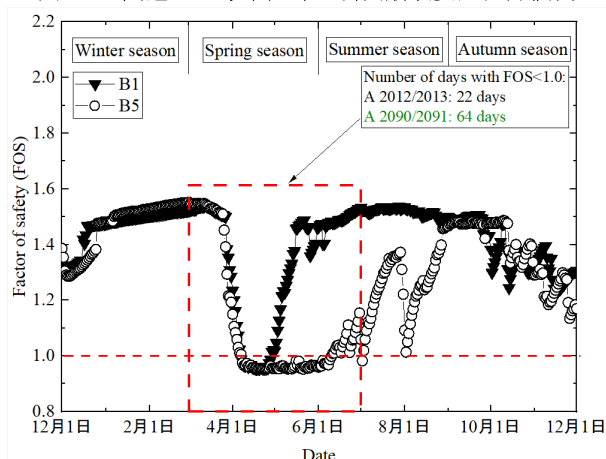


図-2 近未来の中山峠の斜面崩壊安定性評価例

3. 平成28年8月北海道豪雨災害

3.1 被災事例の検証と教訓

平成28年8月17日から8月23日の1週間に、過去に例を見ないほど複数の台風（7号、11号、9号の3個）が続々と北海道に上陸し、北海道東部を中心に降った異常な量の雨により河川の氾濫や土砂災害が発生した。また、8月29日からの前線と台風10号の接近による大

雨で十勝川水系や石狩川水系・空知川上流で堤防の決壊や河川の氾濫、日高山脈東側での道路や橋梁の流失などが相次ぎ、甚大な災害をもたらした。（公社）地盤工学会「平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査団」の最終報告書⁴⁾では、北海道の地域性を考慮した今後の地盤工学研究や地盤防災行政を考える上で重要な技術的検討項目として、①雨慣れ・気象慣れしていない地盤の扱い、②従来の想定を超える豪雨対策の検討、③従来と異なる問題土・崩壊形態の顕在化の可能性、④豪雨時に地盤内に浸透しない表面流の扱い、⑤河道の蛇行・流路変動による土構造物の被害、の5点が挙げられている。また、それを踏まえた防災・減災対策の実現に向け今後検討すべき課題として、①従来の想定を超える豪雨に対する潜在的な地盤災害リスクへの対処、②豪雨時に地盤内に浸透しない表流水の対処法の構築、③河川の蛇行・流路変動を想定した土構造物の防災・減災対策の検討、④災害の地域性（特殊土地盤、雨慣れしていない地盤）を考慮した発災評価指標の提案、を提起している。

3.2 今後の被災リスクの事例研究

平成28年8月北海道豪雨では、直前の3つの台風により高い含水状態であった地盤に浸透できなかった大量の表流水が斜面崩壊などの地盤災害を誘発した可能性が指摘されている。図-3は、平成28年北海道豪雨で多数の斜面崩壊により甚大な被害を受けた国道274号日勝峠について、北海道土砂災害警戒情報システムのCLとSLの関係を示したものである。図中のSLは土砂災害警戒情報の発表基準に相当するCLを大きく超過しており、土砂災害の発生を捉えている。これは、気象庁の早期土砂災害警戒システムは、同時多発的に発生する比較的大規模な斜面崩壊（がけ崩れ、法面崩壊、土砂崩れ）をその対象としているためであろう。しかし、この評価手法では、対象領域（5km四方メッシュ）内のどの位置で斜面崩壊が発生するかを予測することはできない。したがって、道路・鉄道沿線における警戒対象斜面個々の崩壊予測のような局所的な土砂災害リスク評価を精度よく実施するには、評価手法を使い分ける必要がある。

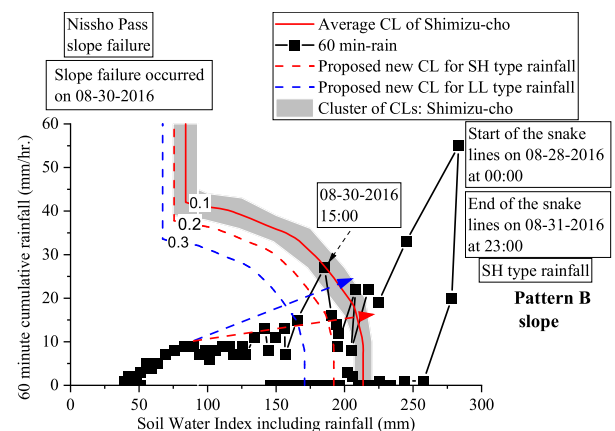


図-3 国道274号日勝峠の斜面崩壊安定性評価例

一般に表面流出は降雨強度が地盤の浸透能を上回る際

に発生するが、発生した地表流の沢部など集水地形への集中が、地表流量を増加させ表面侵食や流路の拡大をもたらし、その結果として土石流や表面侵食型の盛土法面崩壊を引き起こすと考えられる。したがって、地盤の浸透能以上の降雨強度が想定される場合には、降雨時の浸透流に加え地表流を考慮して地盤・土構造物の広域リスク評価を検討する必要がある。例えば、図-4 は、地理・地形、地質・地盤、道路や鉄道の付帯構造物などの各種情報を入力し、降雨の浸透・流出に伴う広域斜面崩壊予測を数値シミュレーションで実施した例⁵⁾である。北海道豪雨で観測された地表流と浸透流を地表面での流出・浸透を考慮して連成したことで、日勝峠で発生した大規模斜面崩壊が再現可能となった。この方法によれば、設計降水量では対応できない確率降雨に伴う表流水の発生に対して、土砂災害危険箇所を抽出するとともに、地表流の流出経路となる交通基盤施設の設計・維持管理方法を再構築することが可能になり、今後北海道で増加が予想される集中豪雨時の広域土砂災害リスク評価に有用な手法であるといえる。

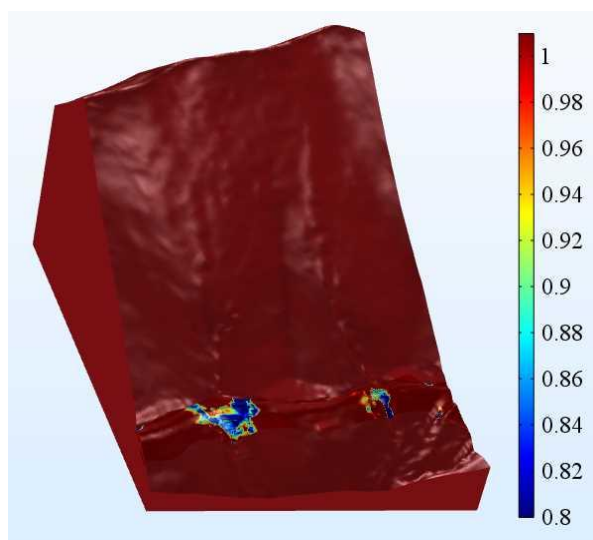


図-4 降雨浸透・流出に因る斜面崩壊ハザードマップ

4. 平成30年北海道胆振東部地震災害

4.1 被災事例の検証と教訓

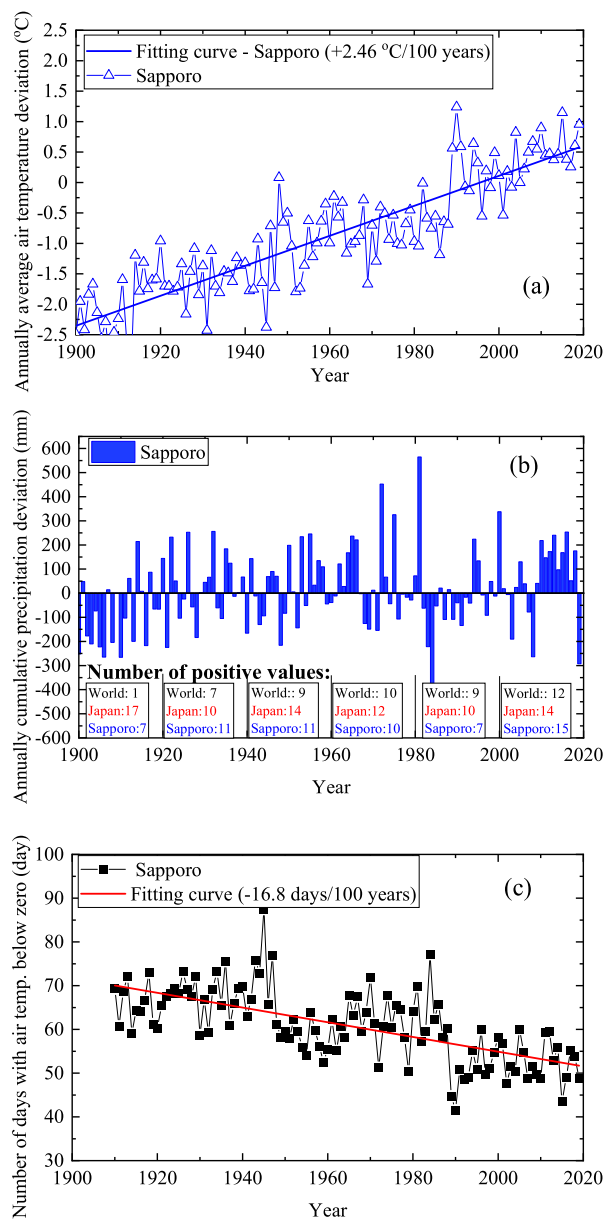
平成30年9月6日午前3時7分に北海道胆振地方中東部を震源として発生した、「平成30年北海道胆振東部地震」は、道内では過去例を見ないほどの強震動であり、最大震度は、震度階級で最も高い震度7を北海道で初めて観測した。この強震動により、火山灰質土を用いて切土・盛土により宅地造成された札幌市清田区の谷埋め盛土の液状化被害や厚真町で観測されたせん断帯での連鎖的な粒子破碎により生じる長距離土砂流動を伴う火山灰質土斜面の広範囲・大規模斜面崩壊など、甚大な被害がもたらされた。(公社)地盤工学会「平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団」の最終報告書¹⁾では、北海道の地域性を考慮した今後の地盤工学研究や地盤防災行政を考える上で重要な技術的検討項目として、液状化被害については①地盤の震動特性の影響、

②谷埋め盛土の液状化危険度の検討、③宅地造成地の地形要因の影響、④宅地造成・住宅建設方法の検討、⑤複合的要因の影響度の検討の5点が、斜面被害については①想定外の地震動への対応方法の検討、②火山灰質土の破碎性・風化劣化の影響、③被害状況のバラツキの要因究明、④異形態斜面崩壊の近接発生の要因究明の4点が挙げられている。また、それを踏まえた防災・減災対策の実現に向け今後検討すべき課題として、①「過去の経験」で対応不能な潜在的な地盤災害リスクへの対処、②火山灰質土の特殊性を考慮した防災・減災対策の構築、③ライフサイクルを考慮した土構造物の設計・維持管理の提案、④想定外の広域・大規模災害の復旧・復興対策の検討、を提起している。

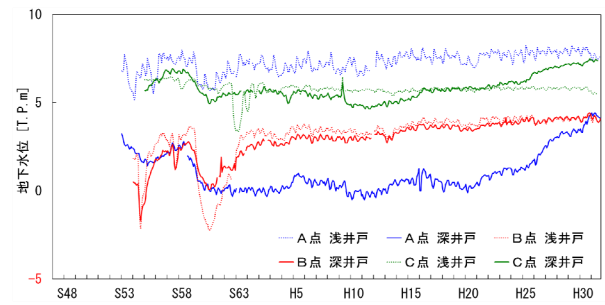
4.2 今後の被災リスクの事例研究

平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害のうち、特に火山灰質土を用いて切土・盛土により宅地造成された谷埋め盛土の液状化問題(札幌市)と、せん断帯での連鎖的な粒子破碎により生じる長距離土砂流動(すべり面液状化)を伴う火山灰質土斜面の崩壊現象(厚真町)については、北海道に広く分布する特殊土の問題であることから、地域性を有する地盤災害として社会全体で危機感を共有し、防災・減災対策への取り組みを促進していくことが望ましい。この二つの特徴的な地盤災害(宅地液状化被害、大規模斜面崩壊)に共通する発生要因として挙げられるのは、構成地盤が火山灰質土であることに加え、地震発生前の地下水位あるいは地盤の含水状態である。例えば、地震前日の台風21号通過により札幌市内で35mm、厚真町で12mmの日雨量が観測されており、地下水位が通常よりも高い状態にあった可能性もある。また、厚真町の地震発生前の降水量は平年の約1.6倍と多く、地盤が例年よりも高含水状態にあったと推定される。さらに、時間経過に伴う排水施設の設計能力以上の雨水の流入あるいは排水管の目詰まり等による排水機能の低下が地下水位の上昇を引き起こすことも考えられる。そこで、ここでは、気候変動が地下水位変化に及ぼす影響について検討する。図-5に、気象庁の観測データをもとに札幌の過去120年間(1900～2020年)の年平均気温偏差(1981～2010年の平均値との偏差)、年降水量偏差、および真冬日の年間日数をそれぞれ示す。札幌の気象条件は、気候変動(地球温暖化)の影響を受け、平均気温が100年間に2.46℃上昇し、年降水量が大雨の回数の増加とともに2010年以降急増し、真冬日が100年間に16.8日減少する傾向にある。即ち、この100年間で札幌は平均気温の上昇により年降水量が増え、冬期が短くなった。その結果として、札幌市内で観測される地下水位は、観測局による傾向の違いはあるものの、図-6に示すように全体的には上昇傾向にあり、特に2010年以降その傾向が強まっているように見受けられる。なお、札幌市内の7点の地下水位観測局の過去10年間(2010～2019年)の最高水位上昇量は平均で0.05m/年と別途報告されている。このような近年の地下水位上昇が、札幌市内の住宅地で液状化による大規模な地盤流動や広範囲に渡る再液状化被害の誘因となった

可能性は否定できない。したがって、今後気候変動に伴って発災が予想される可能性のある北海道特有の新しい複合地盤災害形態の体系化や、被災履歴の少ない潜在的な複合地盤災害の危険性の評価が、近い将来の地盤災害の防災・減災対策に重要な意味をもつことになる。災害外力の加速・大規模化あるいは複合化に対するより適切な気候変動への適応策の構築には、「災害外力が過去の履歴を超えて増大した結果、どのような問題が顕在化するか？」について、災害発生率と地形・地質情報、土質特性、降雨履歴、地震動予測、凍結融解作用などとの関係性を整理し、学術的な観点から新しい複合地盤災害の発災要因・被災形態の顕在化の可能性を加味して考察を深めるとともに、それを踏まえ地域性を十分に考慮した災害レジリエンスの強化を図ることが、今後の北海道の持続的な発展には不可欠であるといえる。



図ー5 札幌の平均気温、降水量、真冬日の日数の推移



図ー6 札幌市内観測局の地下水位計測結果

5. おわりに

(公社)土木学会北海道支部では、北海道のような気候変動災害脆弱地域において、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映できる手法を検討し、災害リスクの総合的な評価手法を確立することを目的として、昨年度より新たに「気候変動脆弱地域における複合地盤災害リスク評価に関する研究委員会」(委員長: 石川達也 北海道大学教授)を立ち上げ、学際領域を超え、気象学、水工水文学ならびに地盤工学に関する最新の情報収集、それらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度や気候変動適応策について検討している。今後、本委員会の研究活動の一環として、本稿で挙げた研究課題について検討するとともに、発災機構の学術的究明と災害の早期復旧並びに防災・減災技術の向上に向けて、北海道の地域的な問題として社会全体で危機感を共有し、産官学が連携して取り組む体制の構築を進める予定である。

謝辞: (公社)地盤工学会地盤災害調査団の調査活動にあたり、調査団員各位をはじめ、産官学の多くの方々・機関より御助力を賜りました。特に、国土交通省北海道開発局・北海道・札幌市・厚真町・(一財)北海道道路管理技術センター・(株)ドーコンには、発災直後より被災地への立入許可や資料共有など、特に重要な御協力を賜りました。ここに記し深甚な謝意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査報告書 https://www.jiban.or.jp/?page_id=11421 (参照日 2020 年 12 月 20 日)
- 2) 北海道開発局札幌開発建設部: 国道 230 号中山峠災害対策検討委員会資料、2013.
- 3) Zhu Y., Ishikawa, T., Subramanian, S. S., Luo, B. : Early warning system for rainfall and snowmelt induced slope failure in seasonally cold regions, Soils and Foundations, 59(1): 2021.
- 4) 地盤工学会: 平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査報告書 https://www.jiban.or.jp/?page_id=2569 (参照日 2020 年 12 月 20 日)
- 5) Zhu Y., Ishikawa, T., Subramanian, S. S., Luo, B. : Simultaneous analysis of slope instabilities on a small catchment-scale using coupled surface and subsurface flows, Engineering Geology, 275: 105750, 2020.

気候変動に伴う室蘭地域での斜面災害危険度の推定

Research on slope disaster risk in Muroran area due to climate change

室蘭工業大学 ○学生員 二階堂樹 (Tatsuki Nikaidou)
室蘭工業大学 学生員 関洵哉 (Junya Seki)
室蘭工業大学 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加等の影響により、日本全国で斜面災害の危険性が增大している。2020年7月の停滞前線による豪雨では、九州、東海地方、及び東北地方で土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が計954件発生した¹⁾。また、2019年10月には台風19号の影響により、東日本と東北地方を中心とした記録的な大雨となり、土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が計952件発生した²⁾。近年、過去に観測されたことのない大雨による斜面災害など、気候変動の影響を実感させる災害事例が相次いでおり、現在、さらには将来起こりうる災害の見通しが望まれる。その一方、災害未経験地域では住民の危機意識の欠如が懸念される。このように、災害未経験地域においては、災害発生リスクと住民の意識に乖離があることが課題である。

気候変動に伴う土砂災害に関連する研究として、服部ら³⁾は、中山峠を対象として、気候変動に伴う融雪期も含めた斜面災害危険度の推定を行い、融雪期が早まることで、冬期の斜面災害発生の可能性を指摘した。また、川越ら⁴⁾は地球温暖化による降雨量増加を考慮した現在気候、将来気候における土砂災害リスクの評価を行い、日本沿岸部や東海地方から四国地方に至る中央構造帯など、日本列島の各地で、気候変動に伴う斜面崩壊の発生確率が著しく上昇することを指摘している。

以上を背景に、傾斜地に住宅が多く、斜面災害が発生すると甚大な被害が予測されるが、歴史的には斜面災害の事例が少ない室蘭地域を対象に斜面災害危険度の推定を行った。まずは、実際に室蘭で斜面災害が発生した1980年の観測データを用いて斜面災害危険度を評価した。次に、気候変動による極端豪雨の増加を考え、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change) の現在気候、将来気候の大量アンサンブル降雨量データから斜面災害の発生頻度を推算した。以上の結果に基づき、災害経験の乏しい地域を対象に、現在、さらには将来起こりうる斜面災害リスクを定量化することを目指す。

2. 研究方法

2.1 対象地域の概要

本研究で対象とした室蘭市は、北海道南西部に位置する太平洋に面した都市である。図-1に室蘭市の位置図を示す。面積は80.88 km²、人口は約81,000人 (2020年11月現在)⁵⁾である。市内には急傾斜地が多いため、斜

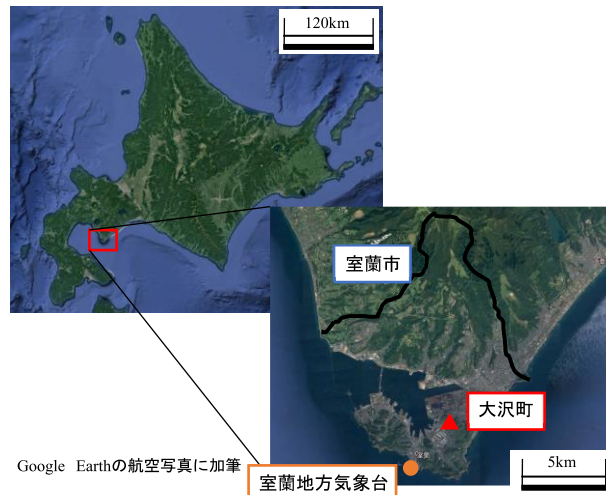


図-1 室蘭市の位置図

面災害に対する脆弱性を有しており、急傾斜地の崩壊の可能性のある土砂災害警戒区域は222箇所、土砂災害特別警戒区域は210箇所存在する。同様に土石流の可能性のある土砂災害警戒区域は56箇所、土砂災害特別警戒区域は17箇所⁶⁾となっており、人家も斜面の付近に集まっているため斜面災害による被害が発生しやすい。実際に1980年には、同市内の大沢町で、土砂崩れにより家屋の被害が1,555件⁷⁾発生した。一方、大雨の頻度が少ないため、災害に対する危機意識が高いとは言えない。なお、隣接する登別市では、1980年や1983年に豪雨に伴う斜面災害が発生しており、室蘭市においても同様の事例が発生する可能性は十分にあると考えられる。

2.2 使用データ

(1) 観測雨量データ

本研究では、1980年の大沢町の斜面災害の再現計算を行うため、気象庁が提供している1980年6月1日から9月30日までの室蘭地方気象台の時間雨量データを使用した。

(2) d4PDF

d4PDFとは、全世界および日本周辺でそれぞれ60 km、20 km メッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度モデル実験出力のことである。実験は全球実験と日本周辺の領域実験に大別され、過去の気候状態と、将来において全球平均気温が4℃上昇した気候状態でモデル実験が行われた。データは過去3,000年分 (過去60年×50ケース、以降現在気候と称する) と4℃上昇時の5,400年分 (将来60年×90ケース、以降将来気候と称する) が存在する。

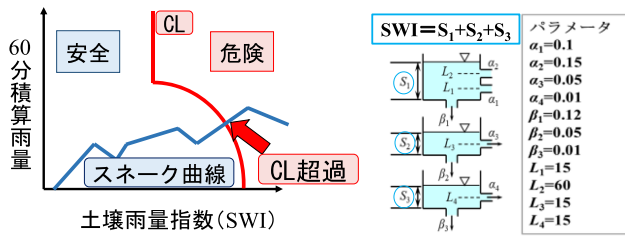

 図-2 土砂災害危険度判定の模式図
～CL とスネーク曲線～

図-3 タンクモデル

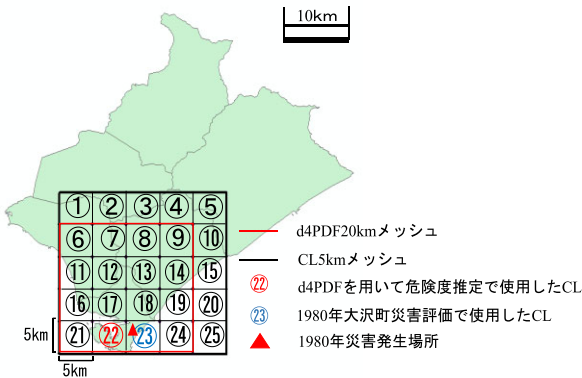


図-4 室蘭地域における CL メッシュ

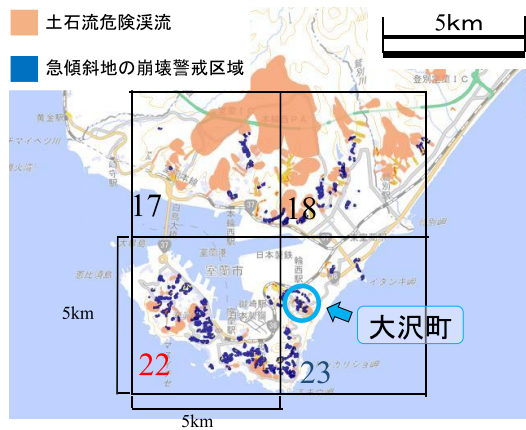


図-5 国土地理院ハザードマップと CL の位置

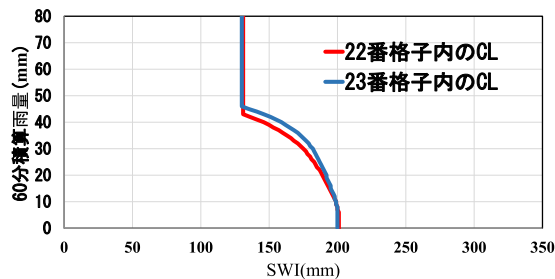


図-6 格子番号 22 番と 23 番の CL

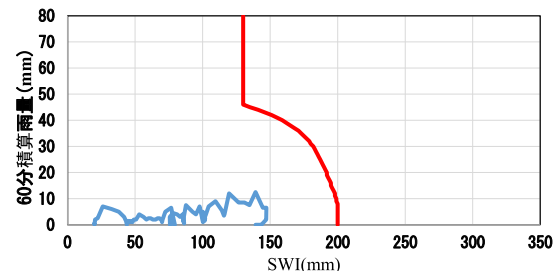


図-7 室蘭市大沢町における CL と 1980 年の災害時におけるスネーク曲線

本研究では長期間の降雨データから斜面災害発生危険度の評価を行うため、通年のデータが公開されている d4PDF20 km メッシュの室蘭地域での降雨データを使用し、現在気候と将来気候の両面から斜面災害危険度の推定を行った。なお、推定対象とした期間は、夏期の大雨に起因する事例に着目し、現在気候（1951～2010 年）、将来気候（2051～2110 年）の 6 月～10 月とした。

(3) SWI 算出方法とスネーク曲線による災害発生危険度の評価方法

現在北海道における土砂災害警報の発表には、危険度判定図（スネーク曲線）が用いられており、北海道の土砂災害発生基準線（Critical Line、以下 CL）、各気象台の短期降雨指標である 60 分雨量、長期降雨指標である土壌雨量指数（SWI）の 3 つの要素から判断⁸⁾されている。具体的には、図-2 のような模式図において、60 分雨量と SWI のプロット（スネーク曲線）が CL を超過するかどうかで土砂災害危険度の判定が行われている。SWI は、図-3 に示す直列 3 段タンクモデル⁹⁾に時間雨量を入力することで算出される。

室蘭地域における CL の 5 km メッシュ（「北海道建設部土木局河川砂防課」提供資料）の格子を図-4 に示す。1980 年に斜面災害が発生した大沢町は図中の 23 番メッシュに属している。しかし、図-5 に示す国土地理院ハザードマップポータルサイト¹⁰⁾においては隣接する 22 番メッシュにおいて、急傾斜地の崩壊警戒区域の指定箇所が多い。そこで、22 番と 23 番メッシュにおける CL の比較を行った。図-6 に両メッシュの CL を示すが、22 番メッシュの CL の方が図の内側（値の小さい側）を通っており、若干安全側の評価となる。従って、本研究の d4PDF を用いた予測では 22 番メッシュの CL を、1980 年の再現計算では対象地が含まれる 23 番メッシュの CL を用いて評価することとした。

3. 結果と考察

3.1 観測データを用いた SWI の結果

1980 年の災害時の室蘭市大沢町におけるスネーク曲線と CL を図-7 に示す。この事例では、247 mm/72 h を観測し、72 時間雨量としては室蘭地方気象台での過去最大となっているものの、スネーク曲線は CL を超過していないことがわかる。とはいえ、脆弱な斜面が多いことになり変わりなく、将来の気候変動により、さらなる大雨の増加も懸念されるため、室蘭市における斜面災害の危険性は低いとは言えない。

3.2 d4PDF20 km メッシュによる現在気候と将来気候の降雨量

図-8 は室蘭市における d4PDF20 km メッシュ（図-4 の赤枠）の現在気候、将来気候での年最大 72 時間降雨量のヒストグラムの比較である。この結果より、d4PDF 現在気候の最大値が観測最大値を超過しているため、現在の室蘭市においても過去に観測されなかったような大雨が発生する可能性が推測される。また、将来気候ではさらに激しい降雨が発生する可能性があることがわかる。

以上より、脆弱な斜面が多い室蘭市において、降雨により斜面災害が発生する危険性は高く、将来的にはそれ

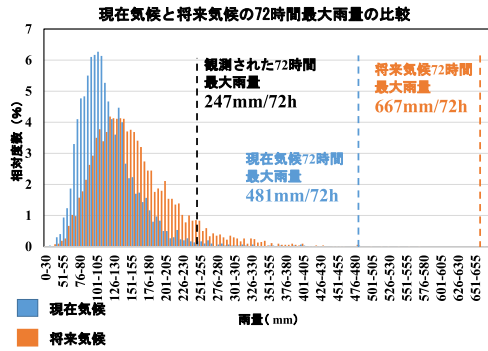


図-8 72時間最大降雨量のヒストグラム

表-1 現在気候と将来気候の超過時間と超過回数及び発生頻度

現在気候				将来気候			
No	年数	月	超過時間(h)	No	年数	月	超過時間(h)
1	HPB_m048_1967	8月	15	1	HFB_MR_m105_2091	8月	22
2	HPB_m082_1961	8月	8	2	HFB_GF_m115_2108	8月	17
3	HPB_m061_1980	8月	6	3	HFB_MP_m101_2053	7月	17
4	HPB_m007_1970	9月	4	4	HFB_HA_m109_2061	8月	14
5	HPB_m004_1958	8月	3	5	HFB_MR_m107_2061	7月	13
6	HPB_m002_1966	8月	2	・	・	・	・
7	HPB_m047_1991	8月	2	200	HFB_MI_m106_2055	10月	1
超過時間合計(h)			40	超過時間合計(h)			610
超過回数合計(回)			7	超過回数合計(回)			200
発生頻度(回/50年)			0.1	発生頻度(回/50年)			1.9

表-2 月別の超過回数の比較

	超過期間					合計
	6月	7月	8月	9月	10月	
現在気候	0	0	6	1	0	7
将来気候	2	39	112	46	1	200

単位: 回

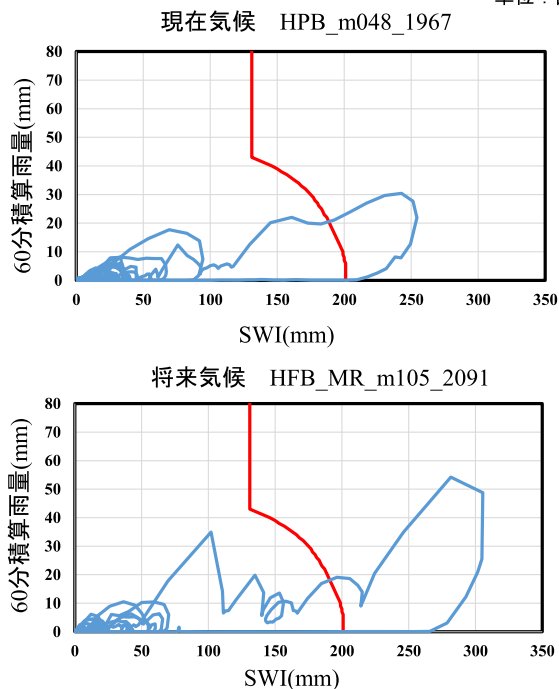


図-9 超過時間が最も長いケースにおける災害危険度評価

表-3 超過時間1位事例の各項目における順位

	現在気候 HPB_m048_1967	将来気候 HFB_MR_m105_2091
72h最大雨量	1位 (481 mm/72 h)	1位 (667 mm/72 h)
1h最大雨量	29位 (30 mm/h)	45位 (54 mm/h)
SWI最大値	1位 (254 mm)	1位 (306 mm)

がさらに高まると考えられる。

3.3 現在気候と将来気候の超過時間と超過回数及び発生頻度の比較

表-1は現在気候3,000年と将来気候5,400年分のSWIを計算し、スネーク曲線がCLを超過したケースの超過時間と超過回数及び発生頻度をまとめたものである。ここで、超過時間とはスネーク曲線がCLを超過した総時間であり、超過回数とはスネーク曲線がCLを超過した回数である。

これを50年間での発生頻度に換算すると、現在気候では50年に0.1回、将来気候では50年に1.9回となる。つまり、室蘭市においては将来的に50年に約2回は斜面災害が発生する事態が推測され、現在気候の0.1(50年に1回)に対し、著しく危険性が高まるといえる。表-2ではCL超過の発生月を示した。結果を見ると、現在気候、将来気候ともに8月に超過回数が集中しており、警戒が必要であることが示唆される。

3.4 現在気候と将来気候の最も超過時間の長い年におけるスネーク曲線

表-1より、現在気候、将来気候の超過時間が最も長いケースでスネーク曲線とCLを用いて災害危険度の評価を行った。結果を図-9に示す。HPB_m048_1967が現在気候、HFB_MR_m105_2091が将来気候で最大の超過時間を記録したケースである。また、表-3ではHPB_m048_1967とHFB_MR_m105_2091での72時間最大雨量、1時間最大雨量、SWI最大値の順位を示した。この結果、現在気候と将来気候のどちらも年最大72時間雨量、SWI最大値は1位であるが、1時間最大雨量の順位が低いことがわかる。ここで、1時間最大雨量が1位のケースで斜面災害危険度判定を行うと、現在気候ではCLを超過せず、将来気候では超過時間2時間であった。これより、降雨が短時間に集中するより、72時間雨量やSWIの大きい、長時間にわたる降雨が斜面災害を引き起こしやすいと推測される。

また、HFB_MR_m105_2091ではCLを超過した後もさらに雨量が増えていることがわかり、CLを超過し、斜面災害が発生してもなお雨量が増え続け、危険な状態を繰り返すことが考えられる。

以上の結果から、過去に観測された降雨量ではスネーク曲線を超過するような大雨は発生していないものの、現実に1980年には斜面災害が発生していることから、現在でも十分に斜面災害が発生する危険性があり、将来的にはさらにその危険性が増すことが推測される。従って、そのような地域では砂防事業や斜面对策といったハード対策に加え、避難体制の強化などのソフト対策の充実が求められる。特に、長期的な降雨予測の精度を向上

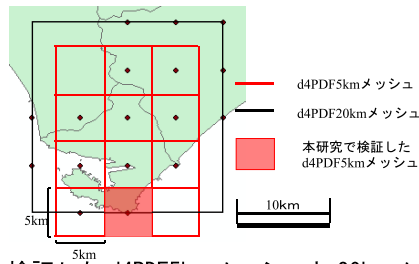


図-10 検証した d4PDF5km メッシュと 20km メッシュ

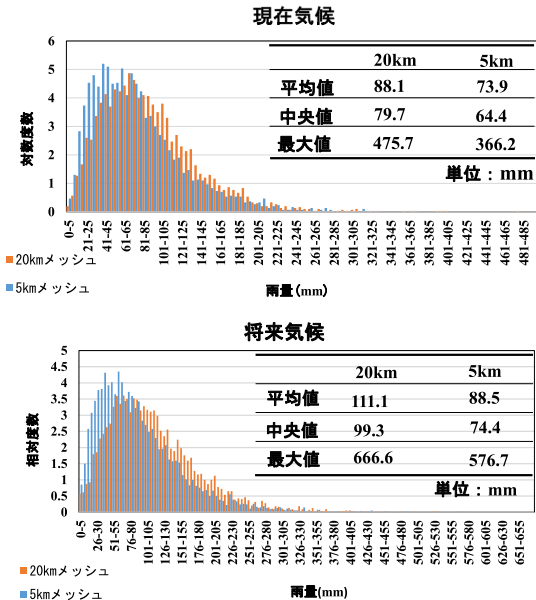


図-11 72 時間最大雨量の 20km メッシュと 5km メッシュの比較

させることで、より早い段階で斜面災害発生危険度を判定し、市民に適切な情報提供を行うなどの方策が重要であるといえる。

3.5 考察

本研究では、d4PDF20 km メッシュの降雨データを使用した。近年の研究では山田ら¹¹⁾により北海道周辺の d4PDF データが 5 km メッシュまで力学的ダウンスケーリング（以下、DS）されている。これにより、より局地的な豪雨の評価が可能となった。しかし、5 km メッシュの DS データは 15 日分のみのデータであり、長期的な土砂災害危険度評価が難しいため、本研究では使用しなかったが、室蘭市における降雨の再現において、5 km メッシュと 20 km メッシュでどの程度違いが表れるのかを検証してみた。

d4PDF5 km メッシュの位置図を図-10 に示す。選択した 5 km メッシュは、室蘭地域南部に斜面災害発生の危険性が高く、1980 年の災害現場から近いことも勘案し、設定した。5 km メッシュでの 72 時間最大降雨量と、それと同時刻の 20 km メッシュの降雨量のヒストグラムを図-11 に示して比較する。結果をみると、5 km メッシュの方が雨量の多い事例もあるが、平均値や中央値をみると、むしろ 20 km メッシュの方が大きいことがわかる。これは、20 km メッシュは室蘭市全体を包括しているのに対し、選択した 5 km メッシュは海岸の 1 メッシュのみで、山側の降雨特性が反映されていないことが理由に考えられる。より細かい地域の局地的な降雨特性を

考慮した評価については今後検討していきたい。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 現在気候と将来気候で降雨量を比較したことで、災害の経験の少ない室蘭市においても降雨量が増加することが示された。
- 2) 現在気候と将来気候で CL の超過時間を比較し、将来気候では降雨量の増加に伴い CL 超過時間が長くなり、斜面災害の危険性が高まることが推定された。
- 3) CL の超過時間が長くなる要因を分析し、短期的な大雨よりも長期的に降り続く雨で斜面災害の危険度が高まることが推定できた。

今後、同様の方法を他の地域に発展し、気候の不確実性に基づく斜面災害リスクの評価に活用していきたい。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（課題番号 20H02404、FY2020～2023）の助成を受けたものである。また、北海道大学の山田朋人氏、星野剛氏、ならびに（一財）日本気象協会の松岡直基氏には、データ提供をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和二年 7 月における土砂災害発生状況，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2_07gouu.html（閲覧日：2020/12/4）
- 2) 国土交通省：令和元年台風 19 号による土砂災害概要，http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r1dosha/r1_typhoon19.html（閲覧日：2020/12/4）
- 3) 服部有吾ら：気候変動に伴う積雪寒冷地の融雪期における斜面災害危険度の評価の研究，土木学会北海道支部，第 76 号，C-09，2019。
- 4) 川越清樹ら：温暖化に対する土砂災害の影響評価，地球環境，Vol.14，No.2，pp.143-152，2009。
- 5) 室蘭市：住民基本台帳人口統計資料，https://www.city.muroran.lg.jp/main/org3600/toukei_mokuji.html（閲覧日：2020/12/11）
- 6) 室蘭市：土砂災害警戒区域の指定，<https://www.city.muroran.lg.jp/main/org7200/dosha6.html>（閲覧日：2020/12/11）
- 7) 室蘭市：市政だより 9 月 15 日号，http://www.city.muroran.lg.jp/main/org1400/1980_shisei.html（閲覧日：2020/12/11）
- 8) 北海道庁：北海道土砂災害警戒情報システム，<http://www.njwa.jp/hokkaido-sabou/others/vocabulary.do>（閲覧日：2020/12/7）
- 9) Ishihara, Y. & Kobotake, S. :Runoff Model for Flood Forecasting, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol.29, No.1, pp.27-43, 1979.
- 10) 国土地理院：ハザードマップポータルサイト，<https://disaportal.gsi.go.jp>（閲覧日：2020/12/9）
- 11) 山田朋人ら：北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化，土木学会河川技術論文集，第 24 巻，pp.391-396，2018。

融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象の解析的検討

Analyses of avalanche and debris flow phenomena in snow-melt season

室蘭工業大学工学部
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

○学生員 横山 遼 (Ryo Yokoyama)
正会員 川村志麻 (Shima Kawamura)
楠田侑平 (Yuhei Kusuda)

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（図-1 参照）。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（写真-1 参照）。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。既往研究^{2,3)}では、土石流解析ソフトiRIC Morpho2DHを用いて、雪崩の再現が可能であること、また、本災害が雪崩と土石流が同時に発生した雪泥流に類似の現象である可能性が高いこと、さらには流動現象に影響を及ぼす雪と土砂の凝集体の生成の可能性について検討・指摘している。本研究では、被災地から採取した実際の土試料の物理力学特性を把握し、より精度の高い被災状況の再現を試みた。それらの結果より、融雪期に発生する雪崩、土石流、雪崩と土石流に対する土砂災害の堆積範囲・土砂量・流動距離の予測が可能かどうかを検討した。

2. 当時の災害概要

被災地の野塚峠は、急峻な日高山脈の西側に位置し、雪崩が発生しやすい地形にある。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。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）である。写真-1と写真-2から、土砂堆積が確認されるように、雪崩と同時に土砂流動（土石流）が発生したことが伺える。

3. 北海道における過去の雪崩災害履歴

はじめに、北海道における、平成25年から令和2年の7年間に国道で発生した雪崩災害についてまとめた。その結果、道内では、約52箇所において雪崩災害が発生している。図-2は、発生した地点をプロットしたものである。なお、この中には複数回発生したものも含まれている。本研究で対象とする野塚峠では、約11箇所雪崩災害が発生していた。このような雪崩の発生箇所は、地形的にも土石流等の土砂災害が発生する可能



図-1 野塚トンネルと雪崩発生箇所
(国土地理院地図に加筆)



写真-1 当時の現地の状況（室蘭開発建設部提供）



写真-2 被災地の様子（野塚トンネル 広尾町側
坑口付近：令和2年11月13日撮影）

性も高い。また、図から明らかなように、近くに河川がある場合が多く、土砂の流入し河道閉塞を起こし、下流に甚大な影響を及ぼす可能性も指摘される。いずれにしても、雪崩災害と土砂災害発生箇所の把握は、今後の災害リスクを評価する上で重要となろう。



図-2 北海道で過去7年間に発生した雪崩災害箇所
(国土地理院地図に加筆)

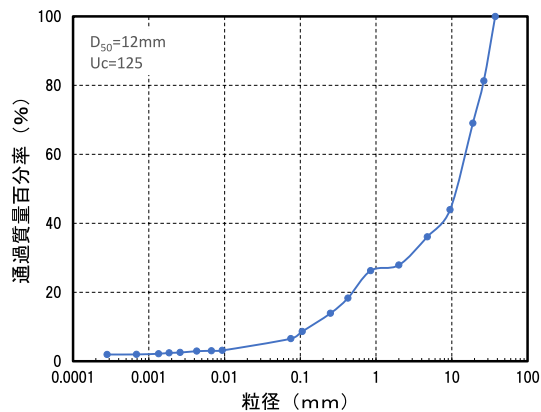


図-3 採取した試料の粒径加積曲線

表-1 採取した試料の物理特性

平均粒径 (mm)	12
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.739
液性限界 (%)	46.7
塑性限界 (%)	NP
最小密度 (g/cm ³)	1.18
最大密度 (g/cm ³)	1.46

4. 試料の物理特性

次に、現地より採取した土試料の物理特性について報告する。試料の採取箇所は写真-1 に示す黄丸の地点である。実施した実験は、土粒子の密度試験、粒度試験、液性・塑性限界試験、最小密度・最大密度試験である。それぞれの実験方法については、地盤工学会基準（土粒子の密度試験方法（JIS A 1202）、土の粒度試験方法（JIS A1204）、液性・塑性限界試験方法（JIS A 1205）、砂の最小密度（JIS A 1224）・最大密度試験方法（JGS 0162））に基づいている。試験結果を図-3 と表-1 に示す。

5. 解析の概要

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

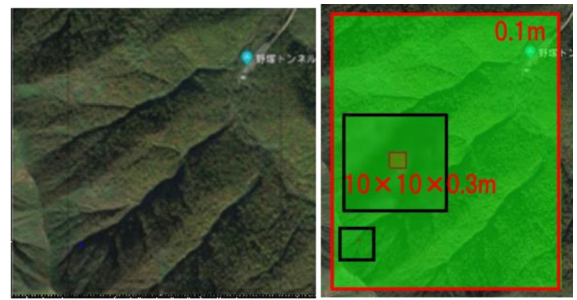


図-4 逆解析に用いた斜面崩壊範囲と土砂の堆積範囲

表-2 逆解析による発生箇所の表面積と浸食深さ

斜面崩壊堆積 (m ³)		最大浸食深さ (m)
表面積 (m ²)	深さ (m)	
10×10	0.3	0.1

表-3 各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)	39	39
液体として振る舞う土砂の割合	0.1	0

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^{2),3)}に詳しい。本解析では、今回発生した雪崩・土砂流動による実際の堆積量（デブリ量 = 60,000m³、表面積 250m×60m、平均深さ 4m と仮定）になるように、iRIC を用いて逆解析を行い、斜面崩壊体積と侵食深さを算出した（図-4 参照）。得られた結果を表-2 に示す。

次に、この値にもとづいて、雪崩・土石流・雪と雪泥流⁹⁾の3パターン解析を行った。解析では「河床材料の種類」、「土粒子の存在率及び平均粒径」、「流体として振る舞う土砂の割合」、「内部摩擦角」を変化させて解析を行っている（表-3 参照）。それぞれのパラメータの設定は以下のとおりである。

(1)「河床材料の種類」

雪泥流解析では、「河床材料」を一様砂から混合砂まで解析可能であることから、本解析では、土砂を野塚峠で採取した土試料とし、雪をザラメ雪として、混合土砂流として評価した。

(2)「土粒子の存在率及び平均粒径」

雪泥流の解析では、流下過程で生成す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。山田⁴⁾は、雪泥流発生時に生成される凝集体が雪と土砂との流下・流動回転時に形成されると仮定し、室内実験により凝集体の生成を確認した（写真-3 参照）。その結果を、

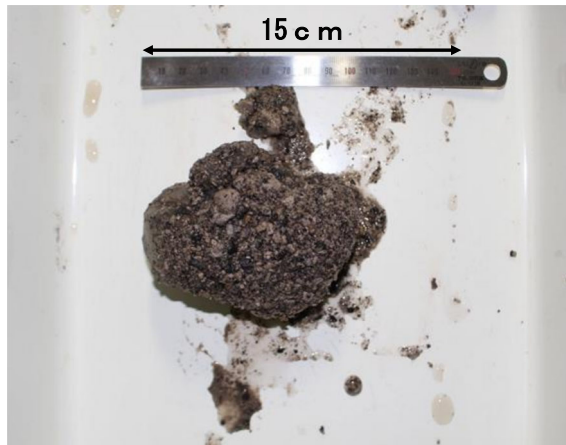
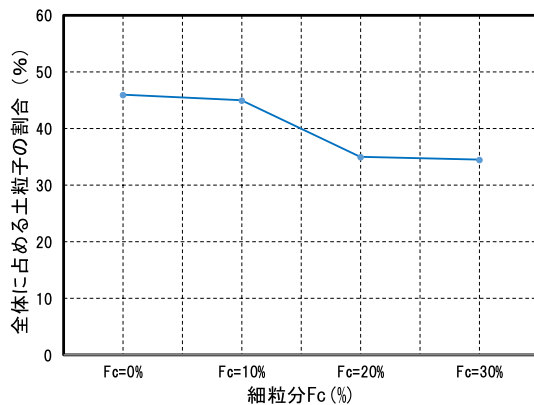
写真-3 細粒分 $F_c=0\%$ の雪と土砂の混合体(凝集体)

図-5 細粒分の違いによる凝集体の全体に占める土粒子の割合の変化

細粒分含有率 F_c (%) と凝集体に占める土粒子の割合として示す(図-5 参照)。図に示すように、 $F_c=0\%$ では、存在率は47%であることから、ここでは、その値を用いて解析している。また、平均粒径は野塚峠の土試料では粒径加積曲線より12mm、ザラメ雪は上石らの研究⁹⁾を参考に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。土石流、雪泥流解析では、前述の粒度試験の結果よりその割合は0.1とし、雪崩解析ではザラメ雪の平均粒径を2mmと仮定したことから、0として解析を行った。

(4)「内部摩擦角(せん断抵抗角)」

ザラメ雪の内部摩擦角は平均粒径と同様に、上石らの研究⁹⁾を参考に決定した。また、野塚峠の土試料については、地盤工学会基準の土の一面せん断試験方法(JGS 0560, 0561)により算定した。せん断抵抗角 ϕ_d は 39° 、粘着力 c_d は0(KN/m²)が得られている。

6. 解析結果と考察

斜面崩壊地から堆積区(沢合流部からトンネル坑口)までの流動特性を比較する(図-6 参照)。図-7 は各事象が発生した後、最も土砂や雪が流動した時の様子であり、図中の黄色線はそれぞれの流動範囲を示す。その結

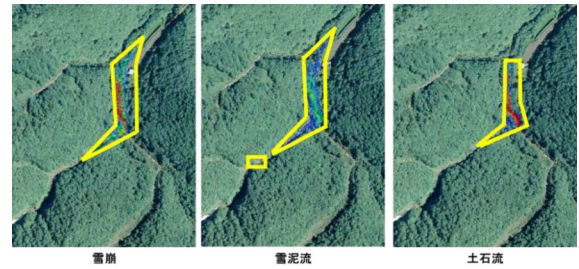
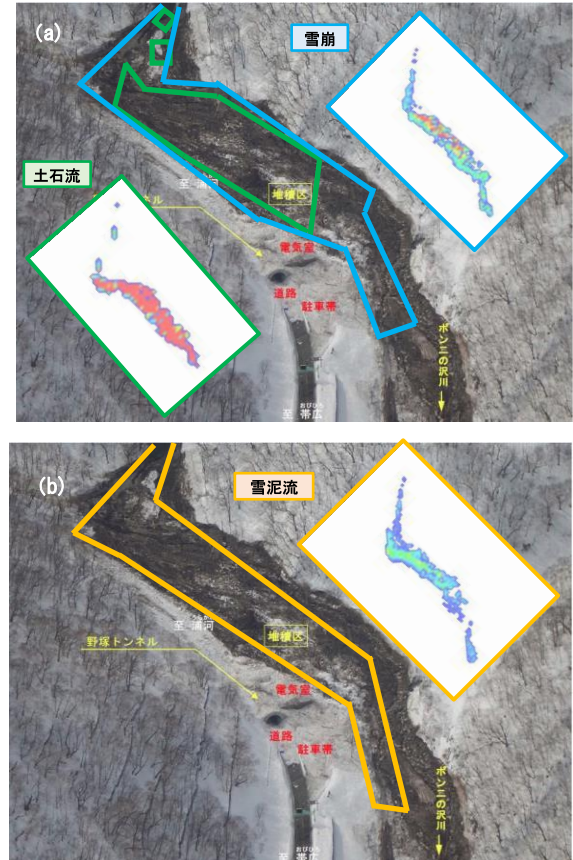
図-6 各解析における流動範囲の比較：
左) 雪崩, 中央) 雪泥流, 右) 土石流

図-7 実際の堆積範囲と解析結果の比較：(a) 雪崩解析・土石流解析 (b) 雪泥流解析

表-4 各解析における概算結果

	雪崩	土石流	雪泥流
堆積範囲 (m ²)	17171	8173	20965
堆積量 (m ³)	21609	1448	60377
流動距離 (m)	1117	1035	1123

果、雪崩は土石流よりも被害範囲が広く、長距離流動し、堆積することがわかる。雪泥流は複数回にわたって流動し、雪崩・土石流よりも長距離流動し、被害範囲は拡大することがわかった。

次に、各解析における末端部の堆積状況と実際の堆積範囲を写真によって比較してみた(図-7 参照)。土砂及び雪の堆積範囲を太線で示す。解析結果は、現地の実態を過小評価しているものの、雪泥流を対象にした解析

結果が、より実態に近い範囲を示した。ここで、解析結果により算出した堆積範囲・堆積量・流動距離を表-4にまとめる。表より、堆積範囲の比較では、土石流、雪崩、雪泥流の順に大きいことがわかる。また、雪泥流の堆積量は約 60,000m³ となり、実際のデブリ量とほぼ一致し、発生箇所からの流動距離においても雪泥流が最も長いことが明らかにされた。

以上より、平成 30 年 3 月 9 日、一般国道 236 号広尾町野塚トンネル付近で発生した融雪期災害では、雪泥流に近い現象だった可能性が高いと指摘される。

一方、本解析においては、災害発生箇所を詳細に特定することができない。このことは、解析結果に影響を及ぼす可能性が高いことから、地盤工学的な解析アプローチにより、はじめに誘因となる気象条件と斜面の詳細な物性値から斜面災害発生箇所を推定し、本解析手法を活用すれば、さらに解析結果の向上化は図れる。さらなる検討は必要であろう。いずれにしても、各災害に対するリスク評価を行うことができれば、この種の災害の対策が可能となる。

7. まとめ

一連の物理力学試験、解析を行った結果、以下のよう
な結論を得た。

- (1) 野塚峠で採取した試料の物理力学特性を把握した。
- (2) 土石流解析を対象とした iRIC Morpho2DH では、擬似的に雪泥流の解析も可能である。
- (3) 雪崩現象、土砂流動現象、雪泥流現象の解析による比較では、土石流、雪崩、雪泥流の順に堆積範囲は大きくなった。また、雪泥流の堆積量は約 60000m³ となり、実際のデブリ量とほぼ一致した。流動距離では雪泥流現象が最も大きな値を示した。これらのことから、本災害は、雪泥流の可能性が高いと考えられる。

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より、試料ならびに、各種災害情報の提供を頂いた。なお、本研究は、令和2年度一般財団法人北海道河川財団研究助成金の補助を受けて行われた。記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国道 236 号野塚峠にて雪崩発生 - 国土交通省 北海道開発局
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/release/rfqnf000000008w-k-att/fns6al000000j130.pdf>
- 2) 山田真嘉, 川村志麻, 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, 第 76 号巻, No. C-07, 2020.1
- 3) 川村志麻, 山田真嘉: 融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象とその工学的評価, 第 55 回地盤工学会研究発表会講演集, No. 22-12-1-06, 2020.7
- 4) 山田真嘉: 雪・土砂の凝集体が融雪期に発生する雪崩・土石流現象に与える影響とその評価, 室蘭工業

大学, 令和元年度卒業論文

- 5) 上石勲, 町田敬, 小田憲健一, 山田悟, 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.
- 6) 沖田竜馬, 河島克久, 松元高峰, 片岡香子, 渡部俊: 融雪型火山泥流の流動性に与える雪の影響, 寒地技術論文・報告集, 34, I-007, 2018.

北海道における近年の土砂災害の気象的特徴と予測の現状

The weather-like feature of the landslide disaster and the current state of the prediction in Hokkaido of recent years

(株)北海道気象技術センター ○正 員 松岡直基 (Naoki Matsuoka)

(株)北海道気象技術センター 非会員 鶴巻亮一 (Ryoichi Tsurumaki)

1. はじめに

異常気象、極端気象現象が世界的に出現し、日本国内でも2014年8月広島県を中心とした豪雨災害をはじめとして、日本各地で毎年のように土砂災害が発生している。1982年から2020年までの土砂災害の発生件数は増加傾向にあり、2018年は過去最大を記録している¹⁾。

土砂災害の発生増加は北海道も例外ではなく、2019年度に土木学会北海道支部内に「気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する研究委員会」が設立された。ここでは発足の契機となった幾つかの土砂災害の気象的な特徴を紹介するとともに、土砂災害予測システムの現状や課題を述べ、あわせて線状降水帯の自動検出や開発中の予測技術も紹介する。

2. 近年の土砂災害の気象的特徴

2.1 地形性降雨による土砂災害

山岳部に暖湿気がぶつかり強制的に上昇すると、断熱膨張で気温が下がり雨雲が発生する。古くから知られた現象で、北海道の大雨地帯も夏季に南からの暖湿気が入りやすいオロフレ山系や日高山脈沿い、大雪山系の南側や阿寒・知床半島に連なる山岳域の南側斜面に広がる。

2016年8月29日から31日にかけて、台風10号の動きに合わせて、日高山脈には長時間にわたり南東の方向から湿った空気が侵入した。このため日高山脈では500mmを超える大雨となり(図-1)、土石流や斜面崩壊が多数発生し、日勝峠を通過する国道が一年近く通行止めとなった²⁾。この台風は気象庁が1951年に統計を開始してから初めて、太平洋側から東北地方に上陸するコースをとった。近年は台風のコースが東寄りになってきていることから³⁾、今後も同様のコースによる日高山脈での地形性降雨による災害が懸念される。

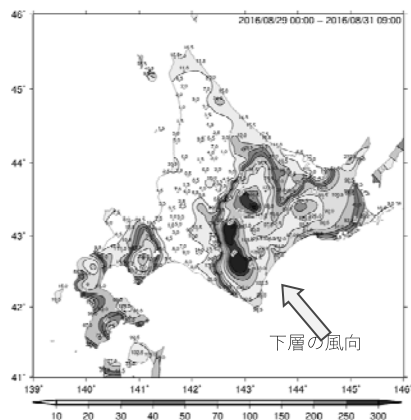


図-1 アメダスと開発局テレメータ降雨量分布図
2016年8月29日1時～31日09時

2.2 融雪期の土砂災害

融雪期の土砂災害も北海道の特徴である。2012年と2013年の春には北海道内で大規模な災害が多発した。図-2は霧立峠近くの地すべり事例である。融雪期は気温の上昇とともに毎日連続的に土中に融雪水が供給され、湿潤状態となっている。ここに大量の降雨が加わると土砂災害の発生危険度が増加することになる。

札幌圏と道南を結ぶ国道230号線の中山峠は2012年から2年連続で、大規模土砂災害により長期間の通行止めが発生した。このため現在は、簡易的な計算融雪量(雪面低下法と degree-hour)に降雨量を加えた値を「換算雨量」と定義し、この値を用いて融雪期の道路管理を行っている。

北海道内の積雪データのある約100箇所のアメダスから計算した、換算雨量60mm以上の年毎の発生比率を図-3に示す。対象としたのは1984年から2019年の36融雪期で、有効観測所総数の比率で表す。比率が最大の2000年は中山峠で大規模地すべりが発生した年である。全道的に融雪時の土砂災害の危険性が増加傾向にあることを示している。



図-2 国道239号霧立峠近くで発生した地すべり
2012年4月26日 北海道開発局提供

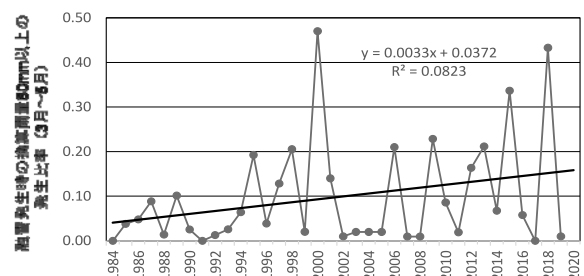


図-3 北海道内のアメダスから計算した換算雨量
60mm以上の年毎の発生比率(3月～5月)

2.3 線状降水帯による土砂災害

線状降水帯とはレーダーで見ると強い雨の降る範囲が線状になり、同じ場所に停滞すると総雨量の分布も線状

になることから命名された。2014 (H26) 年 8 月の広島豪雨災害以降マスコミで使われることが多くなった。

線状降水帯の定義は研究者によっても異なるが気象庁ホームページでは、「次々と発生する発達した雨雲（積乱雲）が列をなした、組織化した積乱雲群によって、数時間にわたってほぼ同じ場所を通過または停滞することで作り出される、線状に伸びる長さ 50～300km 程度、幅 20～50km 程度の強い降水をともしう雨域」としている。2021 年 6 月から気象庁が発表を始めた「顕著な大雨に関する情報」は、線状降水帯により非常に激しい雨が同じ場所で降り続けている状況を通知する。「線状降水帯」というキーワードを使って、土砂災害などの危険性が迫っていることを特別に呼び掛けるものである。

北海道内で線状降水帯によって土石流が発生した例は、2014 年 9 月 11 日に初めて道央圏に大雨特別警報が発表された大雨である（図-4）。この雨で恵庭岳から大規模な土石流が発生し、札幌から支笏湖に向かう国道 453 号では大きな被害が発生した（図-5）。温暖化によって線状降水帯の降雨強度が増すことが懸念される。

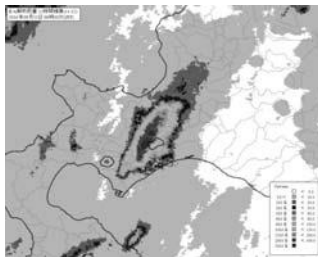


図-4 北海道での線状降水帯(12時間降水量分布)
2014年9月10日19時～11日06時 気象庁作成資料



図-5 国道 453 号を埋めた土石流 北海道開発局提供

3. 土砂災害予測手法の現状

3.1 北海道土砂災害警戒情報システムの現状

北海道では 2008 年 3 月 21 日から、過去の雨量データから発現確率関数を作成する、ニューラルネットワーク学習モデルによる RBFN 手法を適用した予測システムが一般に公開されている。土砂災害警戒情報が発表されたときに災害が発生した発生率は、2008 年から 2011 年の 4 年間の全国平均で約 4%、災害が発生した時に情報が発表されていた捕捉率は約 75%であった⁴⁾。北海道においても近年の検証結果は似通っている。

発生率が低く空振りが多いため、データの蓄積による CL 基準の見直しや、解析対象を 5km メッシュから 1km メッシュに細分化する改善に務めている。しかし発生率の向上は簡単でなく、降雨現象から土砂災害の発生予測を行うことの難しさを示している。

また、避難行動がレベル化され土砂災害警戒情報の発表は、2021 年 5 月から避難指示に該当するレベル 4 の位置づけとなった。避難行動に直結する情報だけに、精度の向上が求められる。

3.2 線状降水帯の自動検出技術と予測技術

気象庁が線状降水帯の発生を住民に知らせるために、防災科学研究所、日本気象協会、気象庁気象研究所のグループによって、自動検出技術の開発が行われた⁵⁾。3 時間積算降水量が 80 mm 以上の分布域の面積が 500km² 以上、長軸の長さが短軸の長さの 2.5 倍以上、雨域内の最大値が 100 mm 以上の三つの条件（図-6）で検出をおこなう。

また、線状降水帯の予測精度向上のために発生条件の詳細な分析を行い、下層水蒸気の流入量、不安定度と上空の湿度、上空と下層の風速差に着目した。具体的には東シナ海での気象観測船による上空の水蒸気量観測、アメダスに湿度の観測を導入し地上の湿りを詳細に把握すること、そして気象レーダーのマルチパラメータ化による降水量と詳細な積乱雲の把握精度向上である。

しかし、線状降水帯を形成する積乱雲一個の水平スケールは 20～40km、維持時間は 30 分～60 分程度と、一般的低気圧に比べて一桁小さな空間・時間現象を扱わなければならない。さらに避難行動などの防災対応のためのリードタイムが 2 時間以上必要であり、線状降水帯の予測は簡単ではない。西日本の複数の自治体では、2019 年から予測の実証実験が行われ、線状降水帯の監視と予測の有効性について検証と改良が行われている。

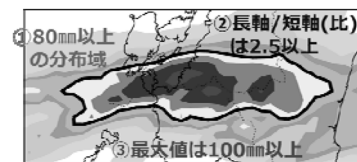


図-6 線状降水帯の自動検出技術の条件設定イメージ

4. おわりに

本州に比べ雨の少ない北海道は土砂災害も少ないと思われる。しかし、線状降水帯に代表されるような極端気象現象の増加は北海道にも及び、いわゆる“雨慣れ”していない地域での対応や、古くて新しい“融雪土砂災害”も注視していかなければならない。地質、地盤、河川工学の複合的な研究の必要性がここにあると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省：報道発表資料、2020.3.29
- 2) 松岡直基：2016 年 8～9 月の北海道における豪雨災害に関する報告 1 気象の概要について、寒地土木研究所月報、第 769 号、pp.42-47, 2017
- 3) 山本太郎：これまでに発生した台風の緯度経度ブロック別中心気圧・移動速度の傾向、土木学会北海道支部論文報告集、第 75 号、2018
- 4) 国土交通省：洪水及び土砂災害の予報のあり方に関する検討会第三回資料 5、pp9、2021
- 5) 防災科学研究所：報道発表資料、2021.6.11

降雨の時空間的局地性と気候変動を考慮したリスクベース評価手法

A Risk-Based Assessment Methodology Considering Spatio-Temporal Locality of Rainfall and Climate Change

北海道大学大学院工学研究院 ○正 員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

大雨に伴う洪水、土砂災害が全国で頻発している。2020年7月には暖湿空気の梅雨前線への流入に伴い九州地方球磨川流域において同月3,4日の総雨量が7月の1ヶ月分に相当する大雨となり甚大な被害がもたらされた。

気候変動がもたらす大雨の頻度や強度への影響に関し、学術論文によって議論が進められている中、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第5次評価報告書(AR5)では、気候システムの温暖化には疑う余地はないと述べられた。我が国では複数の研究機関や関係省庁等により全球・地域気候モデルを用いた将来予測ならびに影響評価が実施されている^{1),2),3)}。国土交通省では平成30年度より「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」を開催し、令和元年10月には提言を発表している。この中でd4PDFを用いた分析結果として、過去気候に対する将来気候下の降水量の変化倍率は2℃上昇相当(2040年代相当)において、北海道全域は1.15倍、その他の地域では1.1倍としている。この2℃上昇は産業革命前からの気温上昇量を意味し、21世紀初頭には既に実測値としておよそ1℃上昇している状況にある。

現在の治水計画は過去数十年程度の観測雨量からこれまでの最大降雨量を考慮しつつ、年最大降雨量を用いた確率雨量を基にしている。一般に30年程度で平年値と言われるが年最大降雨イベントに着目すると、その長さは情報量として限定的である。我々は膨大な自由度を有する気候システムから一種の偶然性を持って生じた過去数十年を経験したこととなる。これはすなわち、時間方向の情報量に起因する不確実性の幅が必ず存在することを意味する。

我が国では文部科学省研究プロジェクトにより、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(以降、d4PDF)」が全球気候モデルと地域気候モデ

化し、数値計算によって擬似的に気候の状態を再現・予測するものである。d4PDFは過去および将来気候を対象として、複数の初期値からなるアンサンブル実験により構成されている(過去気候:50通りの初期擾乱を与えた3000年相当分、将来気候:産業革命前から4℃上昇時に該当するRCP8.5シナリオ(別途、2℃上昇時のシナリオも存在)における計5400年相当)。過去気候については1951年から2010年の海面水温の観測値、将来気候については複数の全球大気海洋結合モデルによって予測された将来の海面水温が底面境界値としてそれぞれ気候モデルに与えられている。このd4PDFは日本を含む東アジア域では20kmの空間解像度でデータを利用でき、データ統合解析システム(DIAS)にて公開されている。

過去・将来気候下を想定した両実験データに対して気象庁気象研究所により開発されている地域気候モデル(NHRCM)を用いた力学的ダウンスケーリングを実施し、5kmの空間解像度の情報とした。以降の洪水リスク評価はこのデータが用いられている。

なお、本稿は著者が記した雑誌「河川」(山田, 2020)およびイギリス気象学会誌(Yamada et al., 2021, ASL.)に記した内容を改めて記したものである。

2. 気候変動の影響を考慮したリスク評価

現行の治水計画において目標とする降雨量は、一般的に、観測年最大降雨量が従う確率分布を推定し、その確率分布において、目標とする安全度相当の年超過確率のクオンタイル値として算出される。年超過確率 p の確率雨量は、1年間に当該の確率雨量以上の降雨が発生する確率が p であるということを意味する。推定確率分布における年超過確率の逆数は、確率年として定義されており、治水計画における重要な指標となっている。我が国の一級河川流域では、100年から200年程度の確率年が

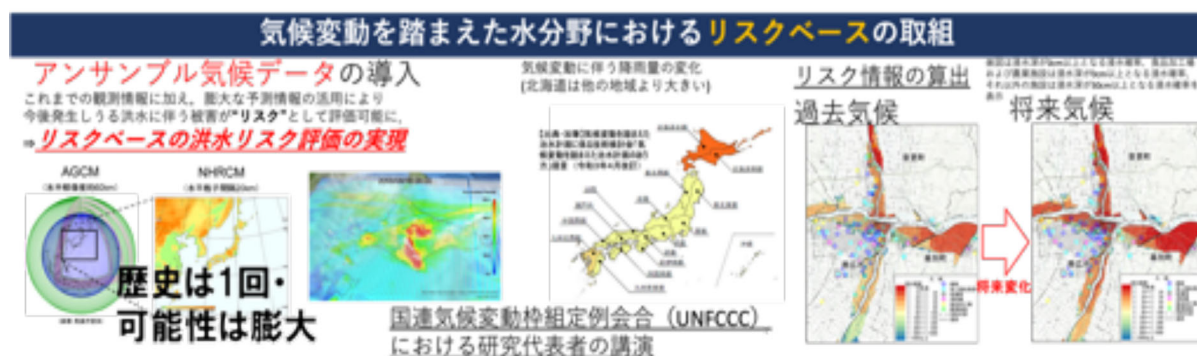


図-1 気候変動を踏まえた水分野におけるリスクベースの取り組みのまとめ。

ルを用いて作成されている。気候モデルとは大気、海洋、陸域の中で発生する様々な現象を物理法則に従って定式

計画確率年として採用されることが多い。従来では、計画確率年相当の降雨量を、過去の観測年最大降雨量に当

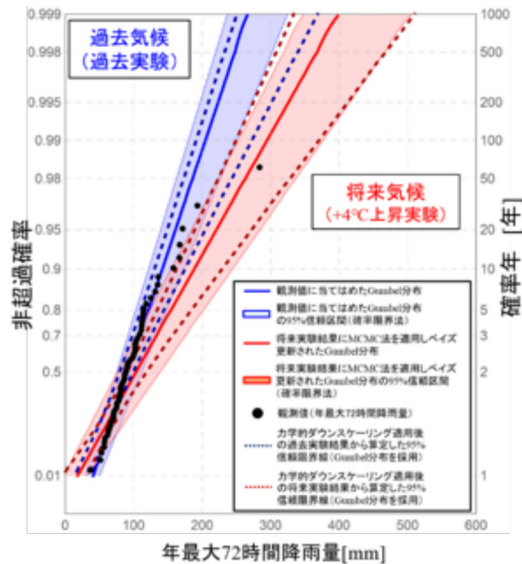


図-2 大量アンサンブル実験と統計理論の双方による確率雨量の信頼区間

てはめた確率分布による外挿によって推定せざるを得ず、現行の計画降雨量は有限な観測情報に起因する推定誤差（不確実性）を有する。このため、観測情報の有限性ならびに今後の気候変動の影響を踏まえた確率雨量の評価手法の構築は急務である。本研究では、その不確実性を幅として定量化可能とする信頼区間をアンサンブル実験により導出し、当該区間に基づく確率雨量の不確実性評価を実施した。その概要を次に示す。アンサンブル実験により、過去発生する可能性のあった降雨ならびに、将来発生する可能性のある年最大降雨量の標本が利用可能となるため、それらの標本別に確率分布の外挿による確率雨量の推定を行うことで、複数の確率雨量の推定値が得られ、これにより、確率雨量の振れ幅や頻度分布が把握可能となる。確率雨量を始めとした、データから求めた統計的推定値の振れ幅は、信頼区間として数学上定義されている。例えば、95%信頼区間は、統計的推定値の頻度分布の95%を含むものである。信頼区間は、治水計画に採用してきた確率分布や計画降雨量の振れ幅を表すため、従来では想定外として扱われるような大規模豪雨をその範囲内の事象として解釈可能とし、その生起リスクを定量化するものである。したがって、信頼区間をどこまで議論するかによって治水計画におけるリスクが検討可能となる。ここで、十勝川流域における確率雨量の信頼区間を考慮した、年最大降雨量の頻度解析結果を図2に示す。同図中において黒点は年最大流域平均72時間降雨量の観測値であり、黒実線はこれらの観測値が従うと仮定したGumbel分布である。一方、青色から紫色の範囲は過去気候、紫色から赤色の範囲は将来気候における確率雨量のアンサンブル実験による信頼区間である。過去・将来気候に関しては、アンサンブル計算結果群から、観測値と同じ期間である60年間分のデータをランダムに選択することによって同一の確率年であっても信頼区間（ここでは95%）としての幅の大きさを定量化し

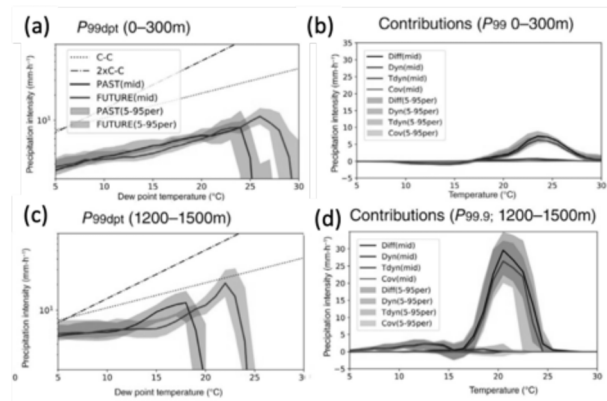


図-3 (a), (c)は降雨強度と露点温度の関係を示す。(b), (d)は降雨量の力学・熱力学の変化を示す。(a), (b)は標高0-300mにおける結果、(c), (d)は標高1200-1500mにおける結果を示す（Yamada et al., 2021, ASLのFigure5を抜粋して引用）。

た。全球平均気温が4℃も異なる両気候において紫色の範囲が存在するという事は、頻度は異なるが同規模の大雨事象は物理的に存在しうることを意味する。さらに、力学的ダウンスケーリングより算定される確率雨量の信頼区間幅は、統計理論である確率限界法に基づくものとも整合しており、その妥当性が理論的観点から担保されている。計画規模相当の降雨量の信頼区間を入力情報の一つとして、浸水・経済被害ならびに死亡リスクの定量化が実現する。

謝辞：本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマC「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」(管理法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所)科研費基盤研究(B)19H02241の支援を受け実施されました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 文部科学省、気象庁、2020：日本の気候変動2020
- 2) SI-CAT ガイドブック編集委員会編、2020：気候変動適応技術の社会実装ガイドブック、技報堂出版
- 3) 国土交通省・国土技術政策総合研究所・気候変動適応研究本部、2017：河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究―「気候変動下での大規模水災害に対する施策群の設定・選択を支援する基盤技術の開発」の成果をコアとして―、国総研プロジェクト研究報告第56号。
- 4) 山田朋人：アンサンブル手法による気候変動予測・リスク評価の考え方、雑誌「河川」、日本河川協会、12月号、pp.77-81、2020。
- 5) T. J. Yamada, T. Hoshino, A. Suzuki, 2021: Using a Massive High-Resolution Ensemble Climate Data Set to Examine Dynamic and Thermodynamic Aspects of Heavy Precipitation Change, Atmospheric Science Letters, 22(8).

過去の災害事例を基準とした北海道における線状降水帯の客観的抽出

Extraction of Line-shaped Rainbands that have occurred in Hokkaido over the past 33 years

北海道大学大学院工学院 ○学生員 大屋祐太 (Yuta Ohya)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

線状降水帯は、気象学的なメカニズムとして複数の積乱雲で構成されるメソ対流系が線上に並ぶことで強い雨域を停滞させる。北海道においても線状降水帯による大雨が発生し、1990 年台から 2000 年台にかけて増加傾向であることが確認されている¹⁾。線状降水帯を伴う豪雨災害は日本全国で頻繁に発生し、河川の氾濫を招くため、2021 年 6 月より気象庁は「顕著な大雨に関する情報」として線状降水帯の発生を警戒レベル 4 相当以上の防災情報として提供し、全国統一の危機管理を行っている。しかしながら同警戒の発令条件の一つは「解析雨量 (5km メッシュ) において前 3 時間積算降水量が 100mm 以上の分布域の面積が 500km² 以上」であり、年間降水量が 3000mm に達する九州北西部を含む西日本を想定されているため、非常に厳しい閾値を有する。一方で同地域の最大都市である札幌市における内水氾濫の計画雨量でさえ非超過確率年 10 年の 35mm/h²⁾であることから、同エリア全域をカバーする線状降水帯の指標として不十分である。本研究では、過去 33 年間のレーダ観測による降雨データからある閾値で降雨形状が線状に分布するものを線状降水帯と呼び、2010 年 8 月に忠別川が氾濫した事例と 2014 年 9 月に石狩・胆振地方に大雨特別警戒をもたらした事例 (以下、2014 年豪雨) を含み、災害をもたらす規模の北海道で発生した線状降水帯の客観的指標による抽出を行い、特定した雨域の特徴を述べることで北海道における線状降水帯の存在及び定義を提案するものである。第 2 章に定義を決める上で重要な線状降水帯の一般的な特徴をまとめ、第 3 章に本研究で使ったデータセットと解析手法を示した。第 4 章に抽出結果、第 5 章をまとめとした。

2. 線状降水帯の特徴

線状降水帯、あるいは広義にメソ対流系^(例えば 3), 4), 5)は、レーダ・衛星の観測網が整備され、非静力学モデルが発達した 1980 年以降より特にメカニズムや事例研究が進んだ気象現象である。寒冷・停滞前線や低気圧 (温暖前線も含む) 付近で発生することが示されている。しかしながら、台風や熱雷、地形性に直接関係せずに発生する集中豪雨であるため発生を予測することは難しく、停滞時間も長い特徴を有する。同現象は、個々の積乱雲が、発生から維持・発達を経て減衰・消滅する過程が線状の降雨域内で行われており、その構造によりバックビルディング型やスコールライン型のようなパターン³⁾に分かれる。2014 年豪雨は、典型的なバックビルディング型の線状降水帯であり、著者ら⁶⁾は個々のセルが風上側の

収束点で発生する様子と三次元風速場の関係をまとめたものである。このように道内における事例解析は存在するものの、定量的な指標で抽出する必要がある。

3. データセット・解析手法

降雨データとして、レーダ観測雨量に地上観測による補正を行なったレーダアメダス解析雨量 (以下、解析雨量) を用いた。解析雨量は、1988 年の導入以降、空間解像度・時間解像度は向上した。本研究では、過去の情報をなるべく多く含めた解析を行うため、全てのデータセットを共通の解像度に変換して解析を行なった。空間解像度は 5km メッシュとし、解像度の細かい最近のデータ (2.5km, 1km メッシュ) は双線形内挿により統一した解像度とした。時間解像度は 1 時間 3 時間雨量としており、30 分間隔・1 時間間隔のそれぞれのデータの前の 3 時間分に該当するデータの平均を求め、3 時間雨量としている。これらの解像度は、線状降水帯の個々のセルの動きや構造を無視し、単に降水システムによる総雨量として雨域形状を評価するための設定としている。こうして作成した 5km メッシュ、1 時間間隔の 3 時間雨量データを以降、降雨グリッドデータとして扱う。

線状降水帯の抽出方法は、Hirockawa ら^{7), 8)}の方法を踏襲し、降雨量が相対的に少ない北海道エリアに対応するため一部を変更し、下記のように行ない、本研究における基準の閾値とした。

- ① 降雨グリッドデータから、ある閾値以上のグリッドの 8 連結により結合されたグリッド数が 20 (面積 500km² に相当) 以上を検出し、豪雨オブジェクトとした。閾値の基準値は 40 mm/3h を与えた。
- ② 抽出したオブジェクトを 1 時間前に抽出したオブジェクトと重ね合わせた時、被覆率がある閾値以上の場合、同一の豪雨イベントとし、同一豪雨イベントに含まれる雨量から停滞時間を求めた。閾値には 50% を与えた。
- ③ 抽出した豪雨イベントの対象時間における雨域は東西方向・南北方向で端に該当するグリッドから南北・東西比を算出し、さらに雨域を 180 度回転させながら同様に南北・東西比を求めたうち、最も大きいものをそのイベントのアスペクト比・雨域の傾きとした。
- ④ ①～③までの画像解析を経て、継続時間・アスペクト比がある閾値を満たす豪雨イベントを線状降水帯と定義した。閾値には 5 時間の停滞時間、アスペクト比 2.5 を与えた。

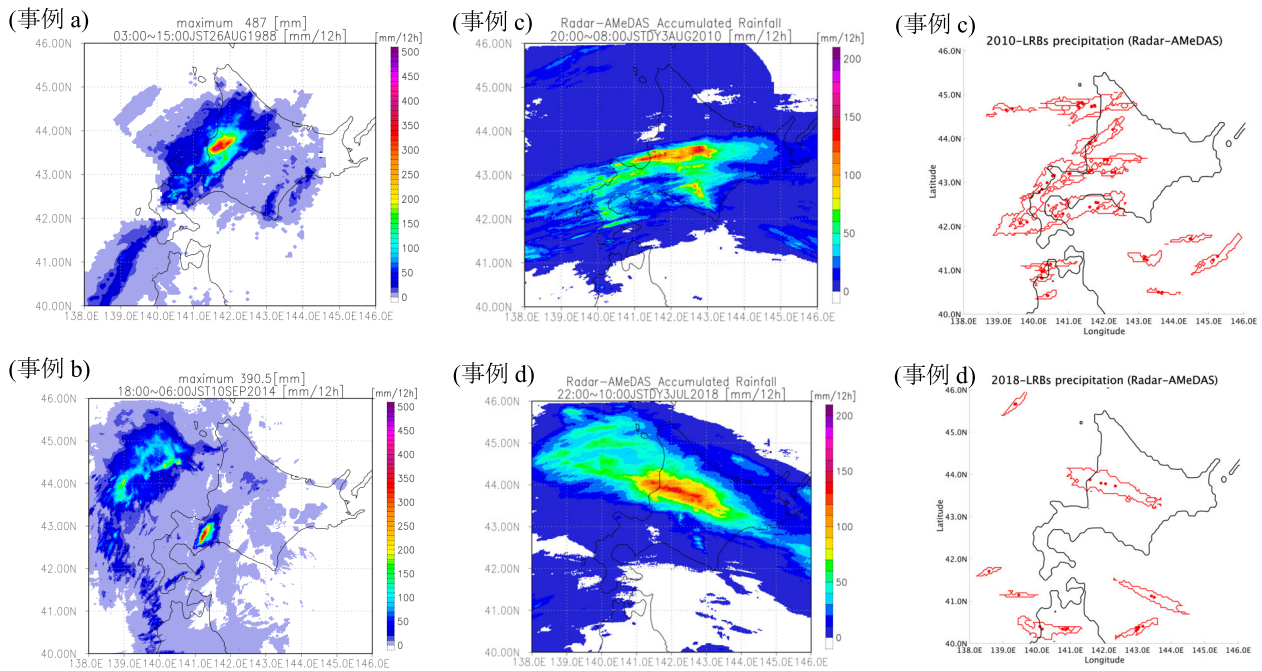


図-1 対象期間に災害をもたらした線状降水帯の降雨分布

図-2 抽出された線状降水帯の位置

4. 解析結果

本研究の定義上、重要となる線状降水帯による豪雨イベントを図-1に示す。線状降水帯の定義に用いた閾値は降雨量、被覆率、停滞時間、アスペクト比の4つのパラメータの組み合わせであり、それぞれの事例がどの組み合わせによる定義上で線状降水帯と判定されるかを調べた。左上は1988年8月に留萌川が氾濫した事例(a)、左下は2014年9月に発生した石狩・胆振豪雨による事例(b)、右上は2010年8月に発生した忠別川豪雨の事例(c)、右下は2018年7月にペーパン川が氾濫した事例(d)である。どの事例も災害をもたらした事例であるが、その規模は様々である。図-2は今回の解析上で線状降水帯と判定された結果である。事例(c)は基準となる閾値に対し停滞時間を4時間に減らすと特定されたことを示し、事例(d)は、基準となる閾値で特定された。一方で事例(a)(b)は、同定義上で停滞時間が10時間にも及ぶ一方で、雨域が広範囲に広がるためアスペクト比が徐々に小さくなるため既存の条件では定義上、抽出されない結果となる。本研究では、継続時間を3から5時間としたある範囲内とした場合、線状降水帯として特定可能となった。

5. まとめ

本研究は、北海道で発生した線状降水帯を客観的な指標による抽出を試みた。気象庁の方法を踏襲しながら降雨量を含むパラメータを調整することで線状降水帯の事例を調査した。今後、線状降水帯による危険度をさらに高精度で分析・予測するために、解像度の細かい観測(XRAINなど)を用いる事による線状降水帯の構造を含めた抽出方法や、地形性による雨域の除去が課題である。また本論文で紹介しきれなかった大量アンサンブルデータに適用した結果との比較によって今後、発生する現象の予測も可能となる。

謝辞：本研究は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマC「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561および、科研費「19H00815」の支援を受け実施されました。記して感謝の意を表します。

参考文献

1. Yamada, T. J.; Sasaki, J.; Matsuoka, N.: Climatology of line - shaped rainbands over northern Japan in boreal summer between 1990 and 2010. *Atmospheric Science Letters*, 13(2), 133-138, 2012.
2. 柳川尚吾, 事例報告 気候変動を踏まえた上下水道事業 札幌市下水道事業の取り組み, 水坤 2020 vol.60 夏号, p.11-p.13, 2020.
3. 瀬古弘. 中緯度のメソ β スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究, 気象庁研究時報 62.1, 1-74, 2010.
4. Houze Jr, R. A., 100 years of research on mesoscale convective systems. *Meteorological Monographs*, 59, 17-1, 2018.
5. Schumacher, R. S.; Rasmussen, K. L. , The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(6), 300-314, 2020.
6. 大屋祐太; 山田朋人. 2014年9月に北海道で発生した線状降水帯における鉛直渦構造と降水強度の関係. 土木学会論文集 B1 (水工学), 76.2: I_193-I_198, 2020.
7. Hirockawa, Y.; and Coauthors : Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2020.
8. 津口裕茂; 加藤輝之: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析, 天気 61.6, p.455-p.469, 2014.

気候変動に伴う西胆振地域での斜面災害危険度の推定

Research on slope disaster risk in the west Iburi area due to climate change

室蘭工業大学 ○学生員 吉岡優希 (Yuki Yoshioka)
室蘭工業大学 学生員 関洵哉 (Junya Seki)
室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加等の影響により、日本全国で斜面災害の危険性が增大している。2021年7月に発生した豪雨では、中部地方、関東地方で土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が計263件発生した¹⁾。2020年7月の停滞前線による豪雨では、九州、東海地方、及び東北地方で土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が計954件発生した²⁾。近年、過去に観測されたことのないような大雨による斜面災害が多発しており、現在、さらには将来起こりうる災害の見通しが望まれる。

北海道を対象とした気候変動に伴う土砂災害の研究として、二階堂ら³⁾は、室蘭地域を対象として、災害の経験の少ない地域でも気候変動によって斜面災害危険度が増大する可能性を指摘した。

本研究では、斜面災害の発生頻度が比較的高く、気候変動による降雨の増加が懸念される西胆振地域を対象に斜面災害危険度の判定を行った。まずは、実際に1983年に斜面災害が発生した登別の事例を検証した。次に、先行研究の室蘭市に加え、登別市、伊達市大滝区（以降、室蘭、登別、大滝）を対象に、気候予測データベース（d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change）の現在気候、将来気候の大量アンサンブル降雨量データを使用することで、現在、さらには将来起こりうる斜面災害リスクの定量的な評価を試みた。

2. 研究方法

2.1 対象地域の概要

本研究で対象とした室蘭、登別、大滝の位置を図-1に示す。各地域の人口は、室蘭は約80,000人⁴⁾、登別は約46,000人⁴⁾、伊達市は約33,000人⁴⁾である。室蘭、登別、大滝は斜面が多く、土砂災害警戒区域はそれぞれ395箇所、131箇所、132箇所、土砂災害特別警戒区域はそれぞれ332箇所、96箇所、105箇所である⁵⁾。その上、登別、大滝は多雨地域であり、潜在的に斜面災害の危険度が高い。また、住居が斜面に隣接し、日本有数の観光地である登別温泉が立地するなどの条件も相まって、斜面災害による人的、経済的被害も懸念される。実際に1980年には室蘭市大沢町、登別市富浦町、1983年には、登別温泉町で土砂災害による家屋の被害が873件発生している⁶⁾。

2.2 使用データ

(1) 観測雨量データ

本研究では、過去の降雨データとして、気象庁が提供するAMeDASの時間雨量を使用した。降雨データは、観測が行われた期間である、室蘭の1940年～2020年（81

年）、登別、大滝の1976年～2020年（45年）を対象とし、6月1日から10月31日までの時間雨量を使用した。

(2) d4PDF

d4PDFとは、全世界および日本周辺でそれぞれ60km、20kmメッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度モデル実験出力である。実験は全球実験と日本周辺の領域実験に大別され、過去の気候状態と、将来において全球平均気温が4℃上昇した状態でモデル実験が行われた。データは過去3,000年分（過去60年×50ケース、以降、現在気候）と4℃上昇時の5,400年分（将来60年×90ケース、以降、将来気候）が存在する。

本研究では長期間の降雨データから斜面災害発生危険度の評価を行うため、通年のデータが公開されているd4PDF20kmメッシュの室蘭、登別、大滝での降雨データを使用し、現在気候と将来気候の両面から斜面災害危険度の推定を行った。なお、対象期間は、夏期の大雨に起因する事例に着目し、現在気候（1951～2010年）、将来気候（2051～2110年）の6月～10月とした。

2.3 スネーク曲線による災害発生危険度の評価方法

現在、北海道における土砂災害警報の発表には、危険度判定図（スネーク曲線）が用いられており、北海道の土砂災害発生基準線（Critical Line, 以下CL）、各気象台の短期降雨指標である60分雨量、長期降雨指標である土壌雨量指数（SWI）の3つの要素から判断⁷⁾される。ここで、CLは、国土交通省と気象庁の連携による土砂災害掲載避難基準雨量の設定方法（案）に基づき各地域に5kmメッシュで設定されている。具体的には、図-2のような模式図において、60分雨量とSWIのプロット（スネーク曲線）がCLを超過するか否かで土砂災害危険度の判定が行われる。SWIは、図-3に示す直列3段タンクモデル⁸⁾に時間雨量を入力することで算出される。

ここで、本研究で用いた室蘭、登別、大滝におけるCLの5kmメッシュ（「北海道建設部土木局河川砂防課」提供資料）の格子とd4PDF20kmメッシュを図-4に示す。

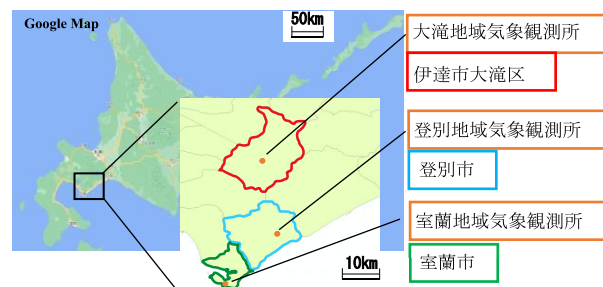


図-1 室蘭市、登別市、伊達市大滝区の位置図

2.4 d4PDF 降雨量の補正

登別における実測雨量と d4PDF 現在気候雨量の年最大 1 時間雨量のヒストグラムの比較を図-5 に示す。これより、d4PDF 雨量が実測より過小評価していることがわかる。従って、本研究では d4PDF 雨量のバイアス補正を行うこととした。補正にはクオンタイルマッピング法（以降、QM 法）⁹⁾とピアニの手法（以降、ピアニ法）¹⁰⁾を用いて行い、各手法の精度を比較した。なお、補正にあたっては、実測データと d4PDF データにおいて、年最大 1 時間雨量を用いて補正を行った。図-6 に QM 法とピアニ法の模式図を表す。

ここで、QM 法とは、実測とモデルそれぞれの雨量の累積分布関数を作成し、雨量の累積確率の値を算出し、同じ累積確率の時の実測雨量を読み取り、その倍率に応じてモデル雨量を補正する手法である。例えば、図-6 に

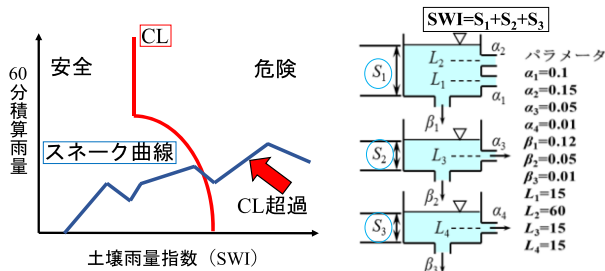


図-2 土砂災害危険度判定の模式図

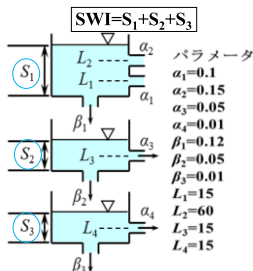


図-3 タンクモデル

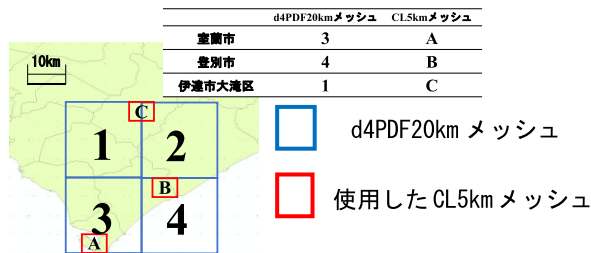


図-4 d4PDF20km メッシュと使用した CL5km メッシュ

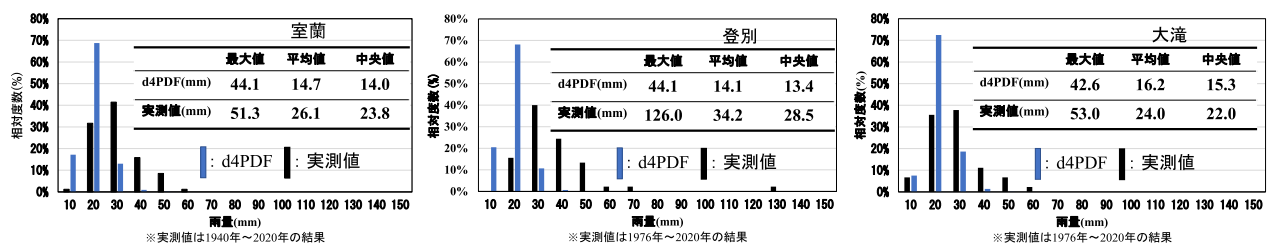


図-5 d4PDF20km メッシュでの年最大 1 時間雨量のヒストグラム

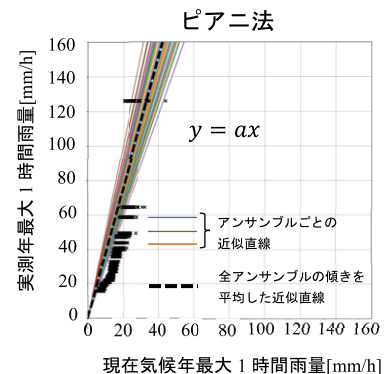
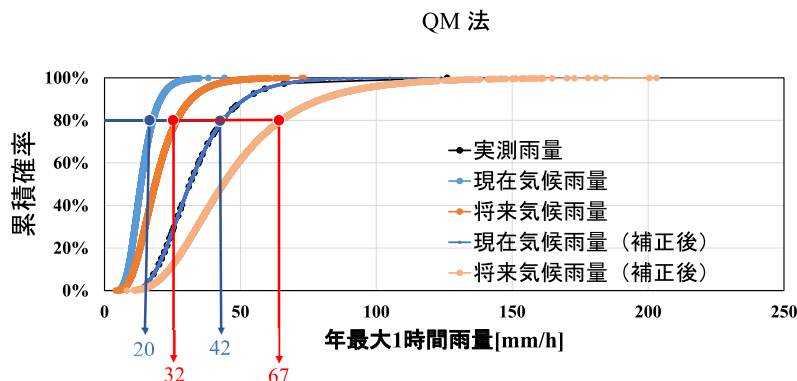


図-6 QM 法とピアニ法によるバイアス補正の模式図

ある累積確率 80%に対応する雨量は、実測は 42mm、現在気候は 20mm、将来気候は 32mm となる。ここから、現在気候の雨量は実測に合わせ 42mm に補正する。また、将来気候の雨量は、現在気候と実測雨量の倍率（ここでは $42/20=2.1$ 倍）を d4PDF 将来気候の雨量に乘以、 $32 * 2.1=67\text{mm}$ に補正する。これをすべての累積確率に対して行い、d4PDF の雨量を補正する。

また、ピアニ法とは、実測雨量と計算雨量を昇順にソートし、横軸に d4PDF 現在気候、縦軸に実測の雨量をとり、対応する順位の雨量をプロットする。その後、最小二乗法により近似直線を求めることで対象地域の雨量の補正を行う手法である。上記の手順を室蘭、登別、大滝のそれぞれで現在気候のアンサンブル 60 パターンすべてで行い、地域ごとの全アンサンブルの近似直線の傾きを求める。最後に、近似直線の傾きを平均したものを対象地域の代表的な補正倍率（図-6 の a）とし、将来気候の雨量にも補正倍率を乗じることで補正した。

3. 結果と考察

3.1 観測データを用いた SWI の計算結果

1983 年の登別市登別温泉町のスネーク曲線と CL を図-7 に示す。なお、登別の超過判定を行うにあたり、土砂災害警戒区域が多く、1983 年の事例で大きな被害が起きた登別温泉町地区（図-4 の CL5km メッシュ B）を採用する。これより、スネーク曲線が CL を超過しており、斜面災害の危険度が高いことがわかる。超過時間は 8 時間となった。また、本事例では、1 時間当たり最大 126mm、1 日当たり 417mm という登別地域において観測史上過去最大の雨量が記録された。以上より、スネーク曲線と CL を用いた過去の斜面災害危険度判定の妥当性が確認できたため、同様の手法で d4PDF を用いた計算を行う。

3.2 雨量データの補正結果

室蘭、登別、大滝における、QM 法とピアニ法を用いた d4PDF 雨量のバイアス補正結果を表-1 に示す。表-

1より、ピアニ法を用いた補正よりも、QM法を用いた補正のほうが、年最大1時間雨量の平均値、中央値、最大値いずれも実測の再現性が高い。また、総雨量の観点からも精度を比較するため、実測とd4PDF現在気候の6～10月間の総雨量を比較した。表-2に結果を記す。QM法においては、登別、大滝ではd4PDF現在気候データの平均値、中央値が実測と近い値を示す結果となったが、室蘭ではやや過大評価となった。一方、ピアニ法においてはいずれも過大評価となった。以上より、現実的な雨量を得るため、QM法による雨量のバイアス補正を行うことが適切と判断した。

3.3 現在気候、将来気候の超過回数と発生頻度及び超過時間の比較

過去の実測雨量を用いて、既往事例でのCLの超過判定を行った。結果を表-3に示す。ここで、超過時間とはスネーク曲線がCLを超過した総時間であり、超過回数とはスネーク曲線がCLを超過した回数である。結果として、室蘭、大滝ではCLを超過することはなかったが、登別では45年に5回の割合でCLを超過することが分かった。次に、QM法により補正したd4PDF雨量を用い、現在気候3,000年と将来気候5,400年分すべてのケ

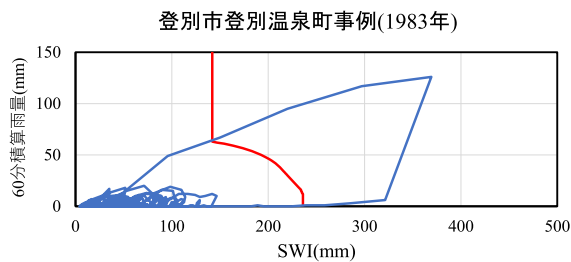


図-7 登別市登別温泉町におけるCLと1983年の災害時におけるスネーク曲線

表-1 室蘭、登別、大滝における実測とd4PDF現在気候の年最大1時間雨量の比較

	実測雨量 [mm]	d4PDF現在気候 (補正前)[mm]	d4PDF現在気候 (QM法補正後)[mm]	d4PDF現在気候 (ピアニの手法補正後)[mm]
室蘭				
最大値	51.3	44.1	84.3	74.6
平均値	26.1	14.7	26.1	24.9
中央値	23.8	14.0	24.5	23.7
登別				
最大値	126.0	44.1	123.8	165.9
平均値	32.7	14.1	33.8	53.2
中央値	27.0	13.4	32.7	50.3
大滝				
最大値	53.0	42.6	89.4	77.8
平均値	24.0	16.2	24.0	29.5
中央値	22.0	15.3	21.8	28.0

表-2 室蘭、登別、大滝における実測とd4PDF現在気候の6～10月の総雨量比較

	実測雨量 [mm]	d4PDF現在気候 (補正前)[mm]	d4PDF現在気候 (QM法補正後)[mm]	d4PDF現在気候 (ピアニの手法補正後)[mm]
室蘭				
最大値	1,130	1,449	2,312	2,452
平均値	709	710	1,096	1,202
中央値	688	698	1,076	1,180
登別				
最大値	2,085	1,276	2,493	4,800
平均値	1,199	618	1,130	2,324
中央値	1,156	606	1,102	2,282
大滝				
最大値	1,209	1,854	1,795	3,384
平均値	712	890	716	1,624
中央値	693	874	698	1,596

ースでSWIを計算し、スネーク曲線のCL超過判定を行った。室蘭、登別、大滝における結果を表-4に示す。また、各地域での超過回数、超過頻度を表-5にまとめる。

結果より、現在気候では、室蘭で12年に1回、大滝で73年に1回の頻度で斜面災害が発生することが推測される結果となったが、登別では6年に1回と他地域に比べ高頻度で斜面災害が発生しうることが示された。これは、表-3に示す実測雨量を用いた9年に1回の頻度に近い値となっている。

また、将来気候では室蘭で3年に1回、大滝で10年に1回、登別で2年に1回と、現在に比べ高頻度で斜面災害が発生する可能性が示された。これは、将来の気候変動により降雨量が増加したことで、SWIが増加しスネーク曲線の超過度合が大きくなったことが要因と考えられる。以上より、d4PDFを用いることにより、室蘭、登別、大滝いずれも現在でも斜面災害が発生する可能性があり、将来気候においてはさらに頻度が増加する可能性が示された。特に登別地域においては、高い頻度で斜面災害が発生する可能性が示唆された。

3.4 現在気候と将来気候の最も超過時間の長い年におけるスネーク曲線

表-4より、室蘭、登別、大滝における、現在気候、将

表-3 室蘭、登別、大滝の実測雨量での斜面災害発生頻度

	室蘭	登別	大滝
超過回数(回)/(年)	0/71	5/45	0/45
発生頻度(回)/(年)	0/71	1/9	0/45
超過時間合計(h)	0	14	0

表-4 各地域での現在気候、将来気候でのCL超過回数および超過時間（上：室蘭、中：登別、下：大滝）

室蘭現在気候			室蘭将来気候		
順位 (位)	年数	超過時間 (h)	順位 (位)	年数	超過時間 (h)
1	HPB_m023_1952	49	1	HFB_GF_m110_2066	108
2	HPB_m004_1958	37	2	HFB_MI_m102_2066	83
3	HPB_m046_1980	33	3	HFB_MI_m110_2080	76
・	・	・	・	・	・
257	HPB_m090_1983	1	1806	HFB_MR_m115_2095	1
登別現在気候			登別将来気候		
順位 (位)	年数	超過時間 (h)	順位 (位)	年数	超過時間 (h)
1	HPB_m063_1968	38	1	HFB_MI_m110_2080	72
2	HPB_m048_1967	28	2	HFB_MI_m102_2066	56
3	HPB_m021_1990	25	3	HFB_GF_m110_2066	55
・	・	・	・	・	・
473	HPB_m090_2010	1	2288	HFB_MR_m115_2109	1
大滝現在気候			大滝将来気候		
順位 (位)	年数	超過時間 (h)	順位 (位)	年数	超過時間 (h)
1	HPB_m082_1961	17	1	HFB_MR_m105_2091	19
2	HPB_m048_1967	12	2	HFB_MR_m109_2051	18
3	HPB_m043_2006	5	3	HFB_MP_m101_2053	14
・	・	・	・	・	・
41	HPB_m089_2008	1	558	HFB_MR_m115_2101	1

表-5 d4PDFによる室蘭、登別、大滝での斜面災害発生頻度

	室蘭		登別		大滝	
	現在気候	将来気候	現在気候	将来気候	現在気候	将来気候
超過回数(回)/(年)	257/3,000	1,806/5,400	473/3,000	2,288/5,400	41/3,000	558/3,000
発生頻度(回)/(年)	1/12	1/3	1/6	1/2	1/73	1/10
超過時間合計(h)	1,081	10,071	1,285	10,350	95	1,187

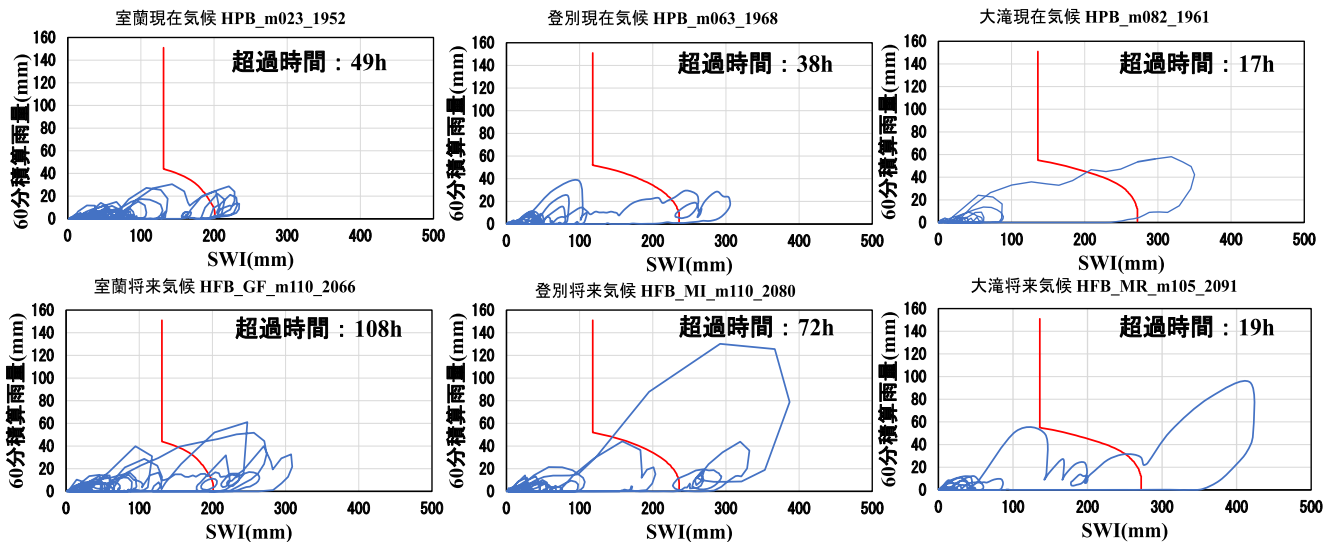


図-8 CL 超過時間が最も長いケースでの災害危険度評価 (左：室蘭，中：登別，右：大滝)

表-6 バイアス補正の有無による斜面災害危険度評価の比較

	室蘭(バイアス補正なし)		室蘭(バイアス補正あり)	
	現在気候	将来気候	現在気候	将来気候
超過回数 (回)/(年)	7/3,000	200/5,400	257/3,000	1,806/5,400
発生頻度 (回)/(年)	1/429	1/27	1/12	1/3
超過時間 合計(h)	40	610	1,081	10,071

来気候の CL 超過時間が最も長いケースでのスネーク曲線と CL を図-8 に示す。これを見ると、将来気候では、特に登別や大滝のような多雨地域において、長時間にわたる降雨によって CL を超えた後も短時間に集中する大雨が推定されている。

3.5 バイアス補正の有無による斜面災害危険度の比較

二階堂ら³⁾は、d4PDF を用いて室蘭市における斜面災害危険度の評価を行ったが、降雨のバイアス補正は行っていない。バイアス補正の有無による斜面災害危険度の比較を表-6 に示す。例えば現在気候では、バイアス補正を行わない場合の CL の超過頻度は429年に1回だが、行った場合は12年に1回と、高頻度で超過している。このことから、d4PDF 雨量を用いて災害危険度を評価する際には、実測値との関係に留意しながら適切なバイアス補正を検討する必要がある。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) d4PDF データが雨量を過小評価する可能性があり、QM 法のような適切なバイアス補正を行う必要があることがわかった。
- 2) 現在気候と将来気候で CL の超過回数と超過時間を比較し、将来気候では降雨量の増大に伴い、CL 超過回数の増加、CL 超過時間の長期化で、斜面災害の危険性が高まることが示された。
- 3) 将来的には SWI の増加をもたらす長期的な雨量と短期的な集中豪雨が影響し、斜面災害危険度を増大させる可能性があることが示された。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費(課題番号 20H02404, FY2020

～2023) の助成を受けたものである。また、北海道大学の山田朋人氏、星野剛氏(現寒地土木研究所)、ならびに(一財)日本気象協会の松岡直基からは情報提供をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和3年8月11日からの大雨による土砂災害発生状況，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3_0811ooame.html(閲覧日：2021/12/2)。
- 2) 国土交通省：令和2年7月における土砂災害発生状況，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2_07gouu.html (閲覧日：2021/12/2)。
- 3) 二階堂樹ら：気候変動に伴う室蘭地域での斜面災害危険度の推定，土木学会北海道支部，77，C-04，2020。
- 4) 総務省統計局：令和2年国勢調査，<https://www.stat.go.jp/index.html> (閲覧日：2021/12/9)。
- 5) 北海道：土砂災害警戒区域等の指定状況，<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/kn/kss/72840.html> (閲覧日：2021/12/2)。
- 6) 1983年9月の登別地方の豪雨災害，http://www.hro.or.jp/list/environmental/research/gsh/publication/report/report0202/gshr55_083_090.pdf(閲覧日：2021/12/2)。
- 7) 北海道庁：北海道土砂災害警戒情報システム，<http://www.njwa.jp/hokkaido-sabou/others/vocabulary.do>(閲覧日：2021/12/2)。
- 8) Ishihara *et al.*: Runoff Model for Flood Forecasting, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 29, 1, pp.27-43, 1979.
- 9) Matthias, J. T. *et al.*: Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, vol.112, pp.449-468, 2012.
- 10) Piani, C. *et al.*: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theoretical & Applied Climatology*, vol.99, pp.187-192, 2010.

d4PDF による降雨と融雪過程を考慮した気候変動に伴う 斜面災害危険度の評価

Research on risk assessment of slope disaster induced by rainfall as well as snowmelt due to climate change using d4PDF

室蘭工業大学 ○学生員 片寄陸 (Riku Katayose)
室蘭工業大学 学生員 関洵哉 (Junya Seki)
室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加等の影響により、日本全国で斜面災害の危険度が增大している。一方で、北海道等の積雪地域では融雪期の大雨によって引き起こされる斜面災害の増加が懸念されている。今後、気候変動により気温が上昇すると、このような傾向はさらに深刻化すると考えられる。そのため、降雨に加え融雪を勘案した斜面災害発生危険度の評価が必要と考えられる。

斜面災害発生危険度の評価方法に関しては、土壌水分量をタンクモデルによって考慮した土壌雨量指数 (Soil Water Index, 以下 SWI) を用いる手法が提案、運用されている。SWI は、気象庁と都道府県が共同で発表する「斜面災害警戒情報」¹⁾として運用されているものの、対象とする斜面災害は降雨によるものであり、融雪を含む災害は含まれない。先行研究で宮崎ら²⁾と服部ら³⁾は、融雪を考慮した斜面災害リスクの評価を行った。宮崎ら²⁾の研究では、土砂災害発生危険度評価のために融雪量を考慮した SWI を推定し、土砂災害発生基準線 (Critical Line; 以下, CL) を用いて評価した。宮崎ら²⁾は、倉本ら⁴⁾が提案した RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network (RBFN)) を用いた非線形 CL の設定手法に基づき、推定した SWI より融雪を考慮した CL を設定した。服部ら³⁾の研究では、上田ら⁵⁾の作成したの地域気候モデル MRI-NHRCM20 の 1kmSDS データを用いることで、気候変動下での SWI を推定し、宮崎ら²⁾が設定した CL の SWI 下限値の超過回数、時間を季節別に推算することで危険度の評価を行った。

そこで上記先行研究を発展させ、気候の不確実性を考慮するため、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF, database for Future climate change) の現在気候、将来気候の大量アンサンブルデータの気温、降水量データを利用した。それに基づき、宮崎ら²⁾による融雪を考慮した北海道の土砂災害発生基準線 (Critical Line; 以下, CL) を用いて融雪過程を含めた中山峠での斜面災害危険度の評価を行う。

2. 研究方法

2.1 災害事例の概要と研究対象

本研究で対象とする中山峠付近では、2000 年 5 月と 2012 年 5 月に大規模な斜面災害が発生している。それぞれの災害発生箇所と災害状況を写真-1 に示す。2000 年 5 月の災害は、延長約 550 m、幅 50~90 m の範囲で、約



写真-1 国道 230 号中山峠の被災状況

(左：2000 年 5 月 15 日 右：2012 年 5 月 4 日)

提供：北海道開発局札幌道路事務所及び寒地土木研究所

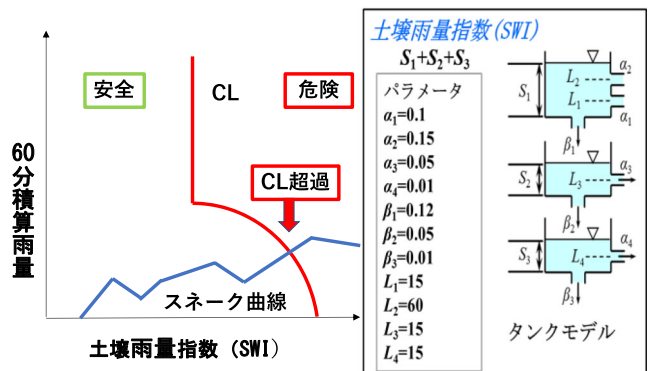


図-1 土砂災害危険度判定の模式図と

土壌雨量指数 (SWI) のパラメータ

200,000 m³ の土砂が崩壊した。崩壊により発生した地すべり土塊は下方にある無意根大橋の橋脚や薄別川まで達し、河道閉塞が発生した。2012 年 5 月の災害は、KP40.6 地点 (起点：札幌市) において、道路幅約 10 m、道路延長約 86 m の範囲で地すべりが発生し、KP40.8 地点においては、盛土法面が幅 (道路延長) 約 40 m、横断幅約 110 m の範囲で約 13,000 m³ の土砂が崩壊した。

2.2 CL による災害発生リスクの評価方法

現在、北海道における土砂災害警戒の発表は、危険度判定図 (スネーク曲線) を用い、CL 及び各気象台の短期降雨指標である 60 分雨量、長期降雨指標である SWI の 3 つの要素によって判定されている⁶⁾。すなわち、図-1 に示すようなダイアグラムにおいて 60 分雨量と SWI のプロット (スネーク曲線) が CL を超えるかどうかの判定が行われる。SWI の計算では、図-1 に示す直列 3

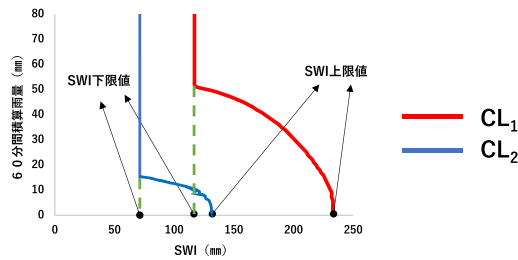
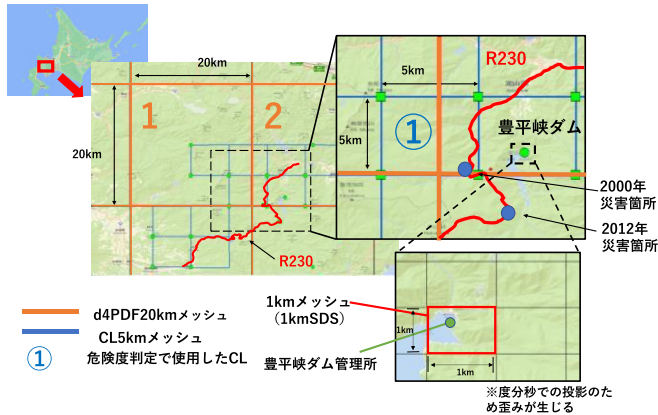
図-2 CL₁とCL₂の比較

図-3 中山峠の位置とd4PDF, CL5kmメッシュ, ダム管理所, 1kmSDSメッシュの位置

段タンクモデルを利用する。なお、タンクモデルのパラメータは現在気象庁で全国一律に設定されている値⁷⁾を使用した。

CLは国土交通省と気象庁の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法(案)⁸⁾に基づき各地域に設定されている(以降、CL₁と称する)。加えて、本研究では降雨のほかに融雪を考慮するため、積雪・融雪期(本研究では1月～5月, 11月～12月)には宮崎ら⁹⁾の研究で得られたCL(以降CL₂と称する)を使用した。CL₁とCL₂を図-2に示す。特に融雪期は土壌水分が絶えず多い状態からCL₂はCL₁に比べSWIの下限値と上限値が共に低く設定される結果となっている。なお、本研究では2000年に災害が発生した地点を含むCLを対象とし、土砂災害危険度の推定を行った。

2.3 d4PDFの降水量, 気温データ

d4PDFは、全世界および日本周辺についてそれぞれ60km, 20kmメッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度モデル実験出力である。実験は全球実験と日本周辺の領域実験に大別され、過去の気候状態と、将来において全球平均気温が4℃上昇した気候状態でモデル実験が行われた。データは過去3,000年分(過去60年×50メンバー, 以下、現在気候)と4℃上昇時の5,400年分(将来60年×90メンバー, 以下、将来気候)がある。本研究では、気候変動による気温の上昇や降雨の増加に伴う中山峠での斜面災害の危険度を評価するため、現在気候, 将来気候の20kmメッシュ降水量データ(以下、d4PDF降水量データ)と20kmメッシュ気温データ(以下、d4PDF気温データ)を使用した。図-3に中山峠, d4PDF20kmメッシュ, CL5kmメッシュの位置を示す。なお、図-3より、降水量データおよび気温データは、

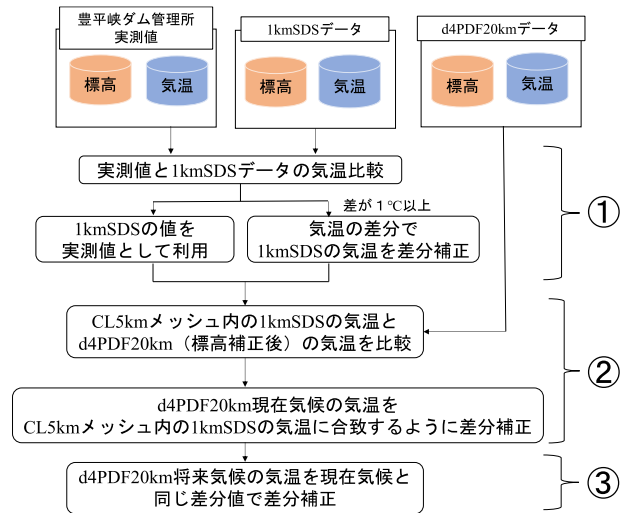


図-4 d4PDF 気温データの補正フロー図

表-1 1km SDS データと豊平峡ダム実測値の気温の比較

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
実測値	-7.97	-7.34	-3.07	2.78	9.64	14.70	18.63	19.29	14.59	7.95	1.38	-5.03
1kmSDS 補正後	-7.45	-6.95	-3.35	3.24	9.34	14.14	17.84	19.16	14.24	8.04	1.14	-4.65
差	-0.52	-0.39	0.27	-0.46	0.29	0.55	0.78	0.13	0.35	-0.10	0.24	-0.38

対象としたCLの5kmメッシュ①と重なるd4PDFメッシュ1, 2のものをを使用した。

2.4 d4PDF 気温データの補正

抽出したd4PDF20kmメッシュの平均標高は、評価対象としたCLメッシュ内の平均標高と異なるため、気温の補正が必要である。そこで、本研究では西島ら⁹⁾の手法を参考に補正を行った。具体的には、上田ら⁵⁾が北海道領域においてMRI-NHRCM20(気象研究所領域気候予測モデル)を1kmスケールに統計的ダウンスケーリングしたデータ(以下、1kmSDS)¹⁰⁾を用いて補正を行う。1kmSDSのデータは実測値を用いて補正しているため、実測の近似値として扱える。使用データは、豊平峡ダム管理所の実測値22年分(2000年～2021年, 以下、実測値), 1kmSDSの現在気候20年分と将来気候60年分, d4PDFの現在気候3,000年分と将来気候5,400年分を用いる。図-3に豊平峡ダム管理所と対応する1kmメッシュの位置を示し、図-4に気温補正のフローを示す。以下にそれに従って手順を説明する。

- ① 図-3に示す豊平峡ダム管理所に対応する1kmSDS(平均標高538.5m)の気温データを気温減率0.65/100mによってダム管理所の標高(485m)に補正し、月平均で比較する。ここで両者を比較すると表-1の通りになる。通年で月平均気温の差が1℃以下となるので1kmSDSを実測値に代替できると判断した。
- ② d4PDF20kmメッシュの標高(図-3のメッシュ1: 444.4m, メッシュ2: 390.7m)の現在気候のd4PDF気温データをCL5kmメッシュ①の1kmSDSの平均標高(740.9m)に標高補正する。両者を月平均値で比較すると、その差分値が1℃以上であったのでd4PDF気温データをその差分値で月ごとに補正する。
- ③ 将来気候の気温も現在気候と同じ差分値で補正する。

表-2 標高補正後 d4PDF と CL5km 内 1 km SDS
の気温データの比較

現在気候	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1kmSDS	-9.30	-8.85	-5.18	1.42	7.48	12.55	16.54	17.67	12.52	5.98	-0.59	-6.53
d4PDF(補正前)	-6.77	-6.45	-2.84	3.92	9.67	15.39	18.89	19.65	15.76	8.32	1.76	-4.14
d4PDF(標高補正後)	-8.88	-8.55	-4.94	1.82	7.57	13.29	16.79	17.55	13.65	6.22	-0.34	-6.25
標高補正後の気温差	0.42	0.29	0.24	0.40	0.09	0.74	0.25	-0.12	1.13	0.23	0.25	0.28

将来気候	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1kmSDS	-4.02	-4.08	-0.35	5.74	12.18	16.71	21.06	22.80	17.49	11.13	5.04	-1.99
d4PDF(補正前)	-1.53	-1.70	1.98	8.24	14.29	19.97	23.71	24.93	20.89	13.60	7.36	0.39
d4PDF(標高補正後)	-3.63	-3.80	-0.12	6.14	12.19	17.87	21.61	22.83	18.79	11.50	5.26	-1.71
標高補正後の気温差	0.39	0.29	0.23	0.40	0.01	1.16	0.55	0.02	1.30	0.37	0.22	0.28

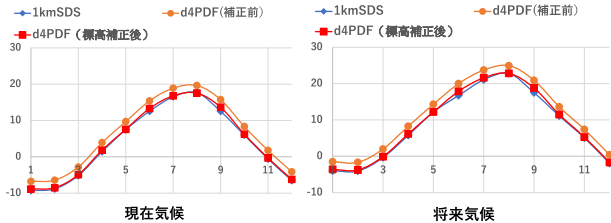


図-5 d4PDF の標高補正後の月平均気温比較

表-3 年間降水量の比較

	d4PDF(mm)	実測値(mm)
年降水量	1,584	1,107

以上の手順によって図-3 のメッシュ 1, 2 の d4PDF 気温データを CL5km メッシュ内の標高に合わせて補正した結果を表-2 と図-5 に示す。その結果、標高補正を行うことで、朱字のように d4PDF 気温データを 1kmSDS の気温に近似させることができた。

2. 5 d4PDF 降水量データの信頼性

d4PDF20km 降水量と豊平峡ダム管理所の実測値の降水量実測値を年間の総量で比較することで、d4PDF 降水量の信頼性を検証する。結果を表-3 に示す。これより、年降水量は、d4PDF が実測値よりも大きい値を示していることから、d4PDF 降水量データを用いることで安全側の評価ができると考えられる。よって d4PDF 降水量データは補正せずに利用する。

2. 6 積雪水量の推定

d4PDF 降水量データから、気温により降雨量と降雪量を判別する。近藤¹¹⁾は相対湿度を用いた以下の式を提案している。

$$T_c = 7.7 - 6.6rh \quad (1)$$

ここで、 T_c は臨界温度(°C)、 rh は相対湿度である。降水時の条件から $rh = 1$ 、すなわち $T_c = 1.1$ °C として $T_c = 0$ °C の結果と比較したところほぼ同様であった。本論文では気温が 0 °C を超えたものを降雨量、0 °C 以下を降雪量と判別し、降雪量は積雪水量として積算していく。

2. 7 融雪量と蒸発散量を考慮した SWI の算出方法

SWI の算出には降雨量を用いるが、通年の計算では降雨量のほかに融雪量の考慮が必要である。本研究ではデグリーアワー法を用いて融雪量を推算した。融雪量は、d4PDF 降水量データを気温で 0 °C を上回った度数に相当する値としてを次式から算出する。

$$m_t = k_{dhf} \cdot T_{dht} \quad (2)$$

表-4 現在気候、将来気候の夏期、積雪・融雪期の CL 超過回数と発生頻度

	CL超過回数(回)		発生頻度(回/50)	
	夏季	積雪・融雪期	夏季	積雪・融雪期
現在気候	0	49	0	0.8
将来気候	4	159	0.04	1.5

表-5 積雪・融雪期における現在気候、将来気候の超過時間

順位	現在気候	超過時間(h)	順位	将来気候	超過時間(h)
1位	HPB_m050_1990	15	1位	HFB_4K_GF_m107_2055	24
1位	HPB_m060_1974	15	1位	HFB_4K_MP_m106_2051	24
3位	HPB_m062_2009	12	3位	HFB_4K_HA_m109_2081	21
	*			*	
49位	HPB_m086_2009	1	159位	HFB_4K_MR_m115_2073	1

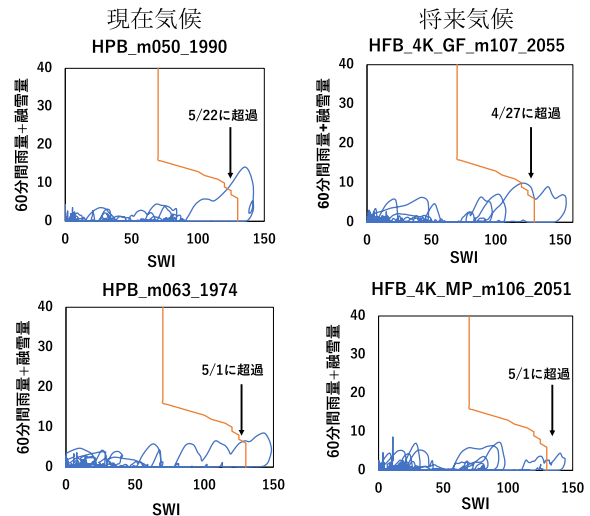


図-6 積雪・融雪期の現在気候、将来気候の CL とスネーク曲線(表-5 の同値で 1 位の 2 ケース、左: 現在気候、右: 将来気候)

ここで、 m_t は融雪量 (mm/h)、 T_{dht} は 0°C を上回った度数 (デグリーアワー) (deg)、 k_{dhf} はデグリーアワーファクター (mm/deg/h) である。デグリーアワーファクターは実務への適用を考え固定値とし、中津川¹²⁾による 0.15 mm/deg/h を採用した。また、積雪がなくなった時点で融雪量は 0 とする。さらに、本研究では、SWI の算出に蒸発散量を考慮する。対象範囲の蒸発散量は、ソーンスウェイト法¹³⁾で推算した。月蒸発散量を対象月の日数×24 時間で除し、1 時間毎の蒸発散量を算出する。SWI は、デグリーアワー法で算出した融雪量と降雨量から、蒸発散量を引いた値を入力し推算した。

3. 結果と考察

3. 1 CL とスネーク曲線による危険度の評価結果

d4PDF 降水量データを用いて現在気候と将来気候でスネーク曲線を作成し、CL の超過判定を行った。なお、夏期は CL₁、積雪・融雪期は CL₂ を用いて超過判定を行った。結果を表-4 に示す。これより、現在気候の夏の CL 超過回数は 0 回であったが、積雪・融雪期では 49 回となっている。これは、融雪により土壌中の水分量が多いうえに降雨が相まって斜面災害の危険度が高まったためと推察される。また、将来気候では、夏期、積

表-6 1kmSDS と d4PDF の SWI 下限値年間超過回数比較

		現在気候		将来気候	
		1kmSDS*	d4PDF	1kmSDS*	d4PDF
積雪期 11~2月	SWI下限値 年間超過時間(回/年)	0.3	0.1	0.8	0.3
融雪期 3~6月	SWI下限値 年間超過時間(回/年)	2.8	4.4	1.6	2.8
夏期 7~10月	SWI下限値 年間超過時間(回/年)	1.0	0.1	1.0	0.1

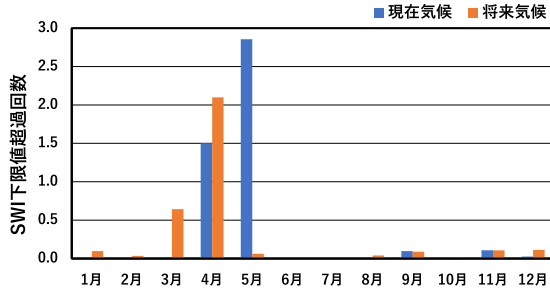
※1kmSDSの結果は服部ら³⁾による

図-7 d4PDFを用いた月別超過回数

雪・融雪期ともに現在気候に比べ超過回数が顕著に増加している。そのため、将来は年間を通して土砂災害の発生に注意が必要と考えられる。ここで、積雪・融雪期のCL超過時間を表-5にまとめた。なお、夏期の4ケースでは超過時間が最長でも1時間であったため、特に危険度が高いと考えられる積雪・融雪期を重点的に評価した。また、表-5において現在気候、将来気候で超過時間がともに1位である2ケースのスネーク曲線を図-6に示す。これらは現在気候、将来気候ともに、融雪期の4月～5月にCLを超過している事例であった。さらに、表-5と図-6より、現在気候、将来気候ともSWIの増加によってCLを超える傾向が共通しており、長期的な降雨や融雪による土壌水分量の増加による斜面災害に注意が必要であることが示唆される。

3. 2 CL 下限値の超過時間の判定

服部ら³⁾の見解に基づき、スネーク曲線がCLのSWI下限値を超過した場合、いつ斜面災害が発生してもおかしくない状況であるとし、その回数を推算することで斜面災害危険度の評価を行う。服部ら³⁾による1kmSDSを用いた結果と本研究のd4PDFを用いた結果を表-6に示す。図-7にd4PDFの月別の超過回数の変化を示す。服部ら³⁾による結果では、将来気候でのSWI下限値超過回数は、11～2月の積雪期で増加しており、3～6月の融雪期で減少、夏期では変化がなかった。アンサンブルデータ数の多い本研究の結果でも、将来気候の超過回数が現在気候に対して積雪期で増加し、融雪期で減少、積雪期で増加、夏期は変化がなかった。また、月ごとのSWI下限値超過回数は、現在気候は4月、5月に増加するのに対し、将来気候では3月、4月に増加している。将来気候では融雪期が早まることで早い時期からの斜面災害発生に注意が必要であることが示唆される。

4. まとめ

本研究において得られた結果を以下に記す。

- 1) 夏期(6月～10月)と積雪・融雪期(1月～5月、11月、12月)それぞれでCLの超過判定を行い、斜面災害の危険度が夏期に比べ積雪・融雪期が高

いことが示された。

- 2) 現在気候、将来気候のCLの超過回数と超過時間を比較し、将来気候が現在気候より超過時間、超過回数ともに多いことから、将来にわたって斜面災害の危険性が高まることが推察された。
- 3) SWIの下限値の超過回数を現在気候、将来気候で比較した結果、将来気候では1か月程度超過回数が増える月が前倒しとなるため、斜面災害に対する早めの警戒が必要と考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費(課題番号 20H02404, FY2020～2023)の助成を受けたものである。また、北海道大学の山田朋人氏、星野剛氏(現寒地土木研究所)、ならびに(一財)日本気象協会の松岡直基氏からは有益な情報提供をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：土壌雨量指数, <http://www.jma.go.jp/kishou/known/bosai/dojoshisu.h> (アクセス日: 2021/10/27)。
- 2) 宮崎嵩之ら：土砂災害発生危険度評価のための実用的融雪量算出法の提案, 土木学会論文集 B1 (水工学), 73, 4, pp.1375-1380, 2017。
- 3) 服部有吾ら：気候変動に伴う積雪寒冷地の融雪期における斜面災害危険度の評価の研究, 土木学会北海道支部, 76, C-09, 2019。
- 4) 倉本和正ら：RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50; 117-132, 2001。
- 5) 上田聖也ら：流域水収支が検証された北海道全域の高解像度 Downscaling 情報の作成, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75, 2, pp.1051-1056, 2019。
- 6) 北海道庁：北海道土砂災害警戒情報システム, <http://www.njwa.jp/hokkaido-sabou/others/vocabulary.do> (アクセス日: 2021/12/14)。
- 7) 岡田憲治ら：土壌雨量指数, 天気, 48, pp.349-356, 2000。
- 8) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 2005。
- 9) 西島星蓮ら：気候変動に伴う積雪地域の多目的ダムにおける以上洪水時防災操作の発生頻度に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 77, 2, I_43-I_48, 2021。
- 10) DIAS, 北海道 1km メッシュ統計的ダウンスケーリングデータ <https://data.diasjp.net/dl/storages/filelist/dataset:566> (アクセス日: 2021/10/27)。
- 11) 近藤純正：水環境の気象学, 朝倉書店, 1994。
- 12) 中津川誠ら：水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006。
- 13) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geographical review*, 38, 1, pp.54-94, 1948。

気候変動を考慮した融雪期土砂災害の評価

Evaluation on avalanche and debris flow phenomena in snow-melt season considering global warming

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院○学生会員 木戸菜摘 (Natsumi Kido)
正 会 員 川村志麻 (Shima Kawamura)

1. はじめに

北海道は、他地域に比べ、厳しい積雪寒冷気候下にある。そのような地域では、水資源を積雪に依存していることから、気候変動の影響¹⁾が大きいと言われている。将来気候の気温上昇や降水量の増加に伴い、融雪期における雪崩・土石流リスクの増加が懸念されている。既往の研究²⁾では、平成30年3月9日に、一般国道236号北海道広尾町野塚トンネル付近で発生した雪崩災害³⁾について、土石流解析ソフト iRIC Morpho2DH を用いた解析を行い、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。今回対象にしている野塚トンネル付近は急峻な日高山脈の西側に位置し、雪崩が発生しやすい地形のため、本災害以外にも過去に複数回雪崩が発生している。例えば、平成27年3月2日に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⁴⁾。また、野塚峠では雪崩発生地点が複数箇所同時発生した災害も報告されている。本研究では、過去の研究と同様に、iRIC Morpho2DH を用いて、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災害発生リスクを考察し、雪崩、雪泥流の発生予測が可能かどうかを検討した。その後、気候変動の影響を考慮し、将来気候における雪崩・土石流発生の災害評価を行った。

2. 使用データ

対象地域を図-1に示す。本研究では、気象庁のMRI-NHRCM20（気候変動予測モデル）⁵⁾の20km格子気象データを、千田ら⁶⁾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）⁷⁾および気象庁平年値⁸⁾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⁹⁾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。

3. 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-2に示す。融雪期である3-

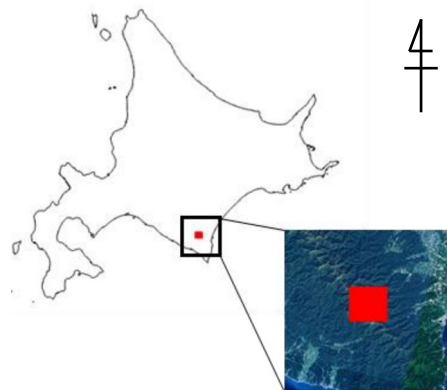


図-1 今回対象とした解析範囲

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	

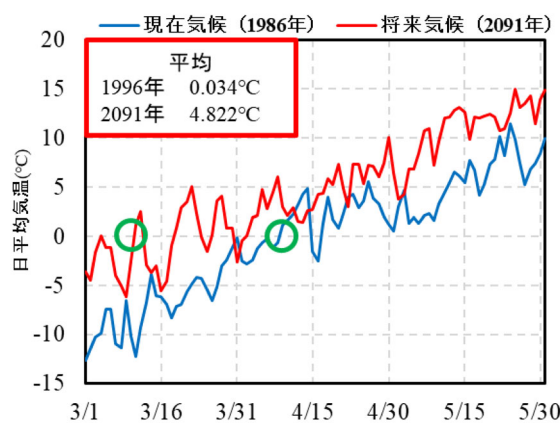


図-2 融雪期の日気温変動

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-3

に示す．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とこちらも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，この領域において，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⁹⁾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．

4. 解析概要

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^{10), 11)}に詳しい．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．本解析では，はじめに雪崩・土石流の発生リスクが高い地点を，流体の流れやすさと集水地形の観点から調べた．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⁴⁾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，雪泥流が最も甚大な被害がでることを明らかにしている（表-2 参照）．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集水箇所から，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¹¹⁾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とザラメ雪の混合土砂流として評価した．

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とザラメ雪の平均粒径と存在率を表に示す．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¹²⁾より，凝集体の全体

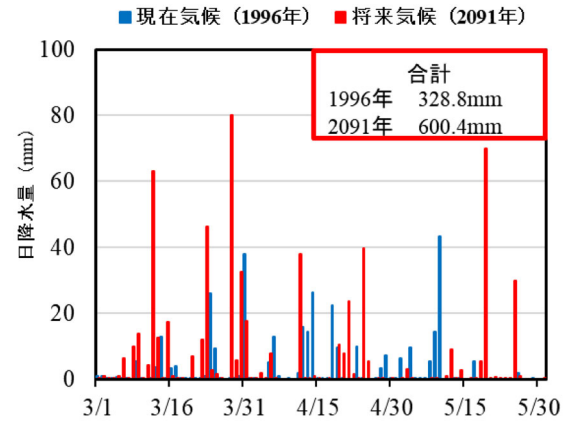


図-3 融雪期の日降水量

表-2 既往の研究の解析結果

	雪崩	土石流	雪泥流
堆積範囲 (㎡)	17,171	8,173	20,965
堆積量 (㎡)	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	

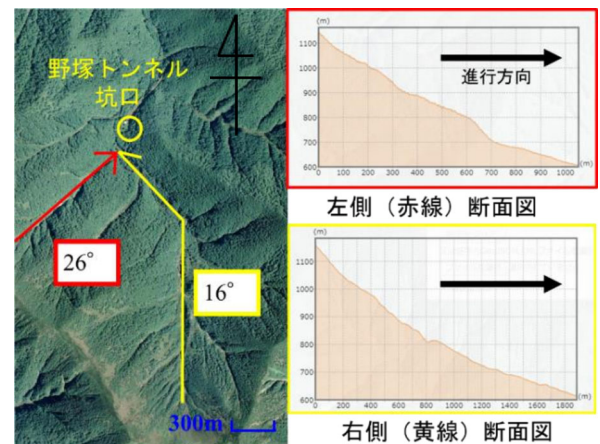


図-4 野塚トンネル周辺斜面の断面図と傾斜角

に占める土粒子の割合は $F_c=0\%$ 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．野塚峠の土試料とザラメ雪の平均粒径と存在率を表-3に示す．

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．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 $\phi=42^\circ$ を解析に用いた．

5. 解析結果と考察

ここでは，この領域に，ある一定量の降雨があり，流水が発生した場合を想定し，どの箇所に流体が集水するのかを，はじめに調べてみた．図-4に野塚トンネル周辺斜面の断面図と傾斜角を示す（国土地理院地図に加筆）．左側の赤線部の斜面は傾斜約 26° ，右側の黄線部斜面は約 16° と中～急斜面であった．図-5は，図-4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．

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-6に示す．左図が図-4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-4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 $67,000 \text{ m}^3$ ，黄線の経路は約 $24,000 \text{ m}^3$ ，合計は $91,000 \text{ m}^3$ となり，既往の研究²⁾で得られた雪泥流の堆積量 $66,000 \text{ m}^3$ と比較すると堆積量が約 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．

さらに，野塚峠トンネル近隣において，同様の災害リスクのある地点の解析を行った．最初の解析範囲（野塚峠）と類似地形による解析範囲を図-7に示す．はじめに，斜面の断面図と傾斜角を図-8に，流体の流れやすさと集水地点の解析結果を図-9に示す．この地点も上側が 25° ，下側が 21° の中～急斜面であり，先ほどの解析と同様，分岐している部分から流水が始まり，合流後にその流量が増加している．雪泥流解析の結果を図-10に示す．左図が解析開始から 20 秒後，右図が 110 秒後の様子である．その結果，堆積量は約 $5,100 \text{ m}^3$ となった．また，今回の類似地形の解析では，雪泥流は道路まで到達しなかったが，雪泥流等の流体の流れやすさによっては，被害が拡大する可能性もある．

以上より，野塚峠のような急峻な地形において，合流

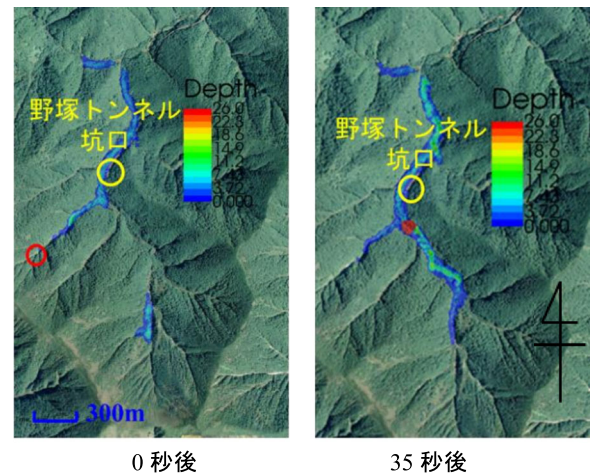


図-5 野塚トンネル周辺 流動発生地点の推定解

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)	0.3
10×10	0.3	

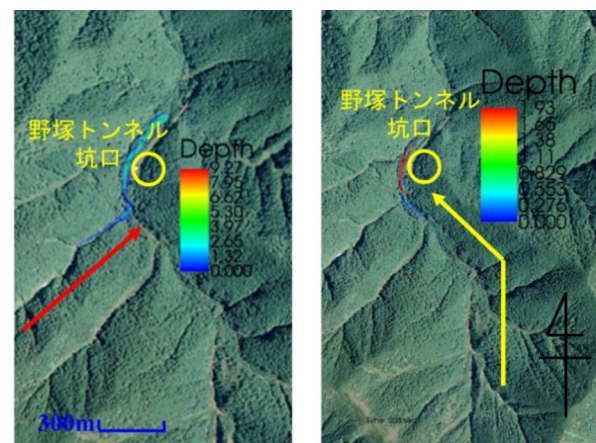


図-6 野塚トンネル周辺 雪泥流解析結果

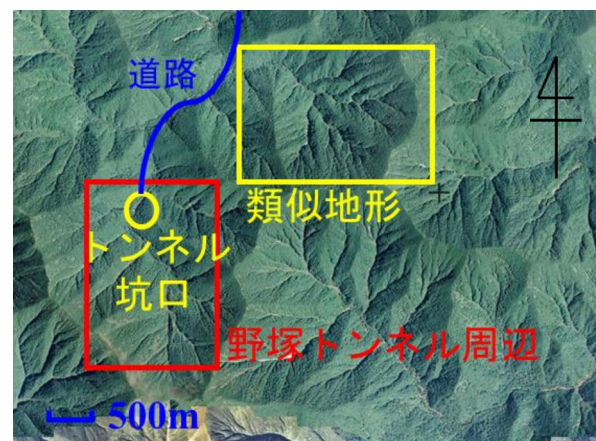


図-7 解析範囲の位置関係

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。なお、用いたパラメータの設定については、妥当性も含め、今後さらなる検討が必要である。

6. まとめ

一連の解析を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 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る。融雪期災害の増加が危惧される。
- (2) 土石流解析を対象とした iRIC Morpho2DH では、用いるパラメータを設定することによって、疑似的に雪泥流、雪崩現象を再現することが可能である。
- (3) 急峻な地形かつ合流部のある斜面では、同時多発的に雪崩・雪泥流災害が発生する可能性がある。

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より、試料ならびに、各種災害情報の提供を頂いた。なお、本研究は、令和3年度一般財団法人北海道河川財団研究助成金の補助を受けて行われた。また、利用したデータセットは、文部科学省委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム (DIAS) と気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) の下で、収集・提供されたものである。記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書第1作業部会報告書 (自然科学的根拠) の公表について, pp.10, 2013.9,
- 2) 横山遼, 川村志麻, 楠田侑平, 土木学会北海道支部年次研究論文発表会, 土木学会, 令和2年度土木学会北海道支部年次研究論文集, 第77号, C-05, 2021.1
- 3) 国土交通省 北海道開発局：国道236号野塚峠にて雪崩発生
- 4) 加我直孝, 佐藤敏宏, 林弘幸：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 北海道開発技術研究発表会発表論文, 2015
- 5) 環境省：環境省 地域気候変動予測データ (協力：気象庁), 2018.12
- 6) 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
- 7) 気象庁：JRA-55 領域ダウンスケーリング (DSJRA-55), 2017.3
- 8) 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/>)
- 9) 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.
- 10) 山田真嘉, 川村志麻, 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

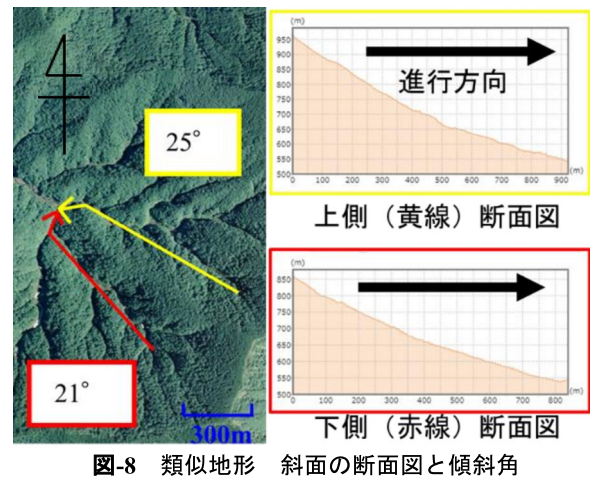
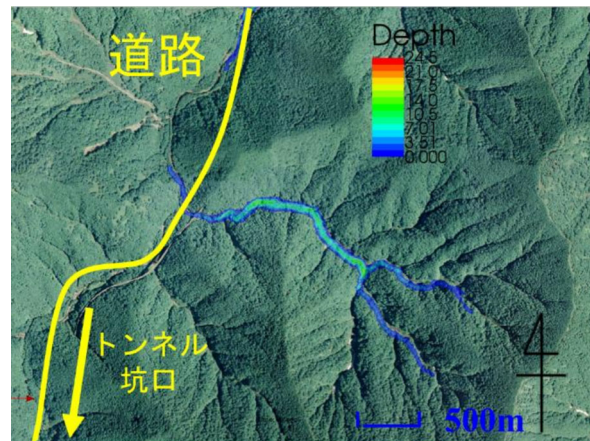
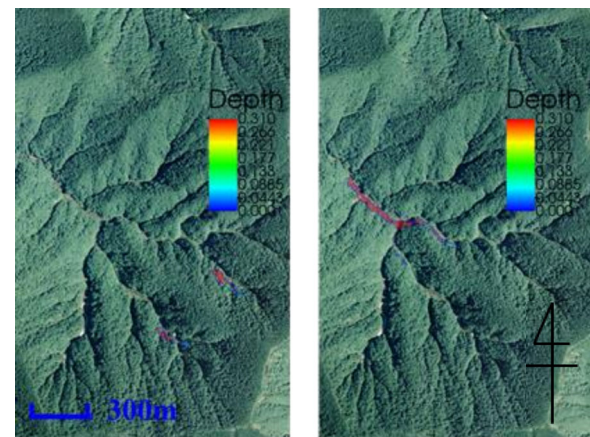


図-8 類似地形 斜面の断面図と傾斜角



50 秒後

図-9 類似地形 水の流れの解析結果



20 秒後

110 秒後

図-10 類似地形 雪泥流解析結果

研究発表論文集, 第76号, No. C-07, 2020.1

- 11) 上石勲, 町田敬, 小田憲健一, 山田悟, 佐藤篤司：雪粒同士が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.
- 12) 川村志麻, 山田真嘉：融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象とその工学的評価, 第55回地盤工学会研究発表会講演集, No. 22-12-1-06, 2020.7

第 II 部

資料一覧（気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する WS）

1. プログラム
2. 委員会概要 石川 達也（北海道大学）
3. アンサンブル手法による気候変動予測と洪水リスク評価 山田 朋人（北海道大学）
4. 斜面災害の低頻度発生地域を対象とした気候変動にともなう危険度の評価 中津川 誠（室蘭工業大学）
5. 2016 年 8 月北海道豪雨災害時における十勝川水系中小河川の土砂災害事例について 清水 康行（北海道大学）
6. 融雪期に発生した雪崩-土石流現象とその評価 川村志麻（室蘭工業大学）
7. 釧路川堤防での法面崩壊メカニズムと気候変動を考慮した設計降雨量の考え方
8. 川尻峻三（北見工業大学）
9. 気候変動を考慮した寒冷地の道路のり面対策工 川口貴之（北見工業大学）
10. 令和 2 年 7 月九州を襲った豪雨による国管理の河川堤防の被害事例とその教訓プログラム 安福規之（九州大学）

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では、北海道のような気候変動災害脆弱地域において、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映できる手法を検討し、災害リスクの総合的な評価手法を確立することを目的に、平成 31 年度に「気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する研究委員会」を設立しました。

本ワークショップでは、学際領域を超え、気象学、地盤工学ならびに水工水文学に関する最新の情報収集、それらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度について議論します。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

記

- 主 催 : 土木学会北海道支部
(担当: 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研究委員会)
- 期 日 : 2021 年 5 月 12 日 (水) 13:00~16:00
- 会 場 : Zoom ウェビナーによるオンライン開催 (開催方法は別途 HP にてお知らせします)
- ワークショップの内容
 - ① 話題提供 (講演時間: 15 分程度 + 質疑応答時間: 5 分程度)
 - ② パネルディスカッション (30 分程度)
- 参加希望の方は、下記よりお申し込みください。
<https://committees.jsce.or.jp/hokkaido/node/19>
- 申込期日: 2021 年 5 月 10 日 (月) 17:00
手続き完了後、受付完了メールを送信します。メールには、Zoom ウェビナー URL、パスコードを記載します。なお、メールが届かない場合はアドレス入力に誤りがないかご確認のうえ、土木学会支部事務局へお問い合わせください。
問い合わせ先: 公益社団法人土木学会北海道支部 事務局
TEL: 011-261-7742
E-mail: hjsce@olive.ocn.ne.jp
- CPD : 2.9 ポイント
CPD 受講証明書は参加申込いただいた方のうち CPD 受講証明発行用アンケートに回答していただくことで発行させていただきます。下記ページより発行申請をお願い申し上げます。

<https://forms.gle/HWkQCZw3f34Wr57U8> 申請締切: 2021 年 5 月 23 日 (日)

- ・建設系 CPD 協議会加盟団体 CPD システム利用者は、各団体のルールに沿って、CPD 単位の申請をお願い致します。
- ・他団体へ CPD 単位を登録する場合は、その団体の登録のルールに則って行われます。単位が認定されるかどうかは、直接その団体にお問い合わせください。

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 プログラム

1. 委員長 挨拶 (13 : 00～13 : 05)

2. 話題提供 (13:05～15:30)

13:05～13:25 「アンサンブル手法による気候変動予測と洪水リスク評価」

北海道大学 山田 朋人

13:25～13:45 「斜面災害の低頻度発生地域を対象とした気候変動にともなう危険度の評価」

室蘭工業大学 中津川 誠

13:45～14:05 「2016 年 8 月北海道豪雨災害時における十勝川水系中小河川の土砂災害事例について」

北海道大学 清水 康行

14:05～14:25 「融雪期に発生した雪崩-土石流現象とその評価」

室蘭工業大学 川村 志麻

14:25～14:45 「釧路川堤防での法面崩壊メカニズムと気候変動を考慮した設計降雨量の考え方」

北見工業大学 川尻 峻三

14:45～15:05 「気候変動を考慮した寒冷地の道路のり面対策工」

北見工業大学 川口 貴之

15:05～15:15 休 憩

15:15～15:30 「令和 2 年 7 月九州を襲った豪雨による国管理の河川堤防の被害事例とその教訓」

九州大学 安福 規之

3. パネルディスカッション (15:30～16:00)

コーディネーター 北海道大学 石川 達也

* タイトルにつきましては、変更になることもあります。



気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関するWS

主催：公益社団法人 土木学会

プログラム

13:00～13:05 開会挨拶

委員長 石川達也（北海道大学）

13:05～15:30 話題提供・質疑（各20分）

1. アンサンブル手法による気候変動予測と洪水リスク評価 山田朋人（北海道大学）
2. 斜面災害の低頻度発生地域を対象とした気候変動にともなう危険度の評価 中津川誠（室蘭工業大学）
3. 2016年8月北海道豪雨災害時における十勝川水系中小河川の土砂災害事例について 清水康行（北海道大学）
4. 融雪期に発生した雪崩-土石流現象とその評価 川村志麻（室蘭工業大学）
5. 釧路川堤防での法面崩壊メカニズムと気候変動を考慮した設計降雨量の考え方 川尻峻三（北見工業大学）
川口貴之（北見工業大学）
6. 気候変動を考慮した寒冷地の道路のり面対策工 休憩（15:05～15:15）
7. 令和2年7月九州を襲った豪雨による国管理の河川堤防の被害事例とその教訓 安福規之（九州大学）

15:30～16:00 パネルディスカッション

コーディネーター 石川達也（北海道大学）

16:00 閉会

司会進行： 所 哲也（北海学園大学）

設立経緯

経緯

北海道では、寒冷地特有の地盤の凍上・凍結融解が誘因と考えられる地盤災害が多発している。特に、地球温暖化に起因すると考えられる融雪期の急速な気温上昇は、急激かつ多量の融雪水の流入・浸透を引き起こし、土の強度低下をもたらすとともに、内部侵食や表面侵食を促進して地盤の安定性を低下させ、斜面の表層崩壊や土砂流出、及び陥没などのリスクを高めている。また、近年の異常気象により、台風や集中豪雨等の被害が比較的少なかった北海道においても、北海道豪雨(2016)に代表されるような豪雨災害が発生し、その頻度も高くなっている。加えて、北海道全域には、九州地方と同様に、火山灰質土や風化残積土などの特殊土地盤が広く分布し、H30年9月に発生した北海道胆振東部地震(2018)では未曾有の激甚複合地盤災害を経験している。このような状況を踏まえ、災害外力の加速と大規模化に対する潜在的な災害リスク評価ならびに地域性を十分に反映した災害レジリエンスの強化が、今後の北海道の持続可能な発展のために必要である。



土木学会として、防災減災対策が後手にならないように近未来を見据えた合理的な気候変動適応策を現在から検討する意義

委員会概要

- 委員会名称：

気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する
研究委員会

- 活動目的：

本委員会では、北海道のような気候変動脆弱地域において、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映できる手法を検討し、災害リスクの総合的な評価手法を確立すること、及び学際領域を超え、気象学、地盤工学ならびに水工水文学に関する最新の情報収集、それらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度について議論することを目的とする。

- 活動期間： 令和元年4月～令和4年3月（3ヶ年）

- 成果公開：

最終年度に、シンポジウムまたは講習会などを企画し、土木学会の会員や社会に対して最新の情報提供を行う予定

3

委員名簿

職 名	氏 名	所 属
委員長	石川 達也	北海道大学
幹事兼委員	川村 志麻	室蘭工業大学
委員	川口 貴之	北見工業大学
委員	川尻 峻三	北見工業大学
委員	川端 伸一郎	北海道科学大学
委員	今 日出人	北海道大学(現 ドーコン)
委員	清水 康行	北海道大学
委員	所 哲也	北海学園大学
委員	中津川 誠	室蘭工業大学
委員	西村 聡	北海道大学
委員	松岡 直基	北海道気象技術センター
委員	山田 朋人	北海道大学
委員	渡邊 康玄	北見工業大学



土木学会の
組織的特徴
を活かした部
門横断的な
委員構成、北
海道支部初
の研究委員
会として設立

計 13名

※ 委員会活動にご興味がありましたら委員会幹事までお問い合わせください。

4

九州と北海道の防災減災研究連携

気候変動脆弱地域における複合地盤災害の リスク評価に関する研究委員会

土木学会両支部で令和元
年度から3年間活動予定

目的

本委員会では、気候変動災害脆弱地域において、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映できる手法を検討し、災害リスクの総合的な評価手法を確立することを目的とする。学際領域を超え、気象学、地盤工学ならびに水工水文学に関する最新の情報収集、それらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度について検討する。

平成30年8月の土木全国大会(札幌)開催時に九州、北海道両地区の地盤工学の研究者チームで情報交換会を開催し、土木学会の両支部で「地域気候変動適応に関する研究委員会」を立ち上げ、研究課題について議論を深め、効果的に研究を遂行するための環境を整えた。

土木学会北海道支部研究委員会
委員長：
石川達也(北海道大学教授)

研究連携



土木学会西部支部研究委員会
委員長：
安福規之(九州大学教授)

5

公益社団法人
土木学会北海道支部

気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関する研究委員会
2021年5月12日(水) 13:00~16:00 Webinar(オンライン開催)



気候変動脆弱地域における複合地盤災害のリスク評価に関するWS

主催：公益社団法人 土木学会

プログラム

13:00~13:05 開会挨拶

委員長 石川達也(北海道大学)

13:05~15:30 話題提供・質疑(各20分)

1. アンサンブル手法による気候変動予測と洪水リスク評価 山田朋人(北海道大学)
 2. 斜面災害の低頻度発生地域を対象とした気候変動にともなう危険度の評価 中津川誠(室蘭工業大学)
 3. 2016年8月北海道豪雨災害時における十勝川水系中小河川の土砂災害事例について 清水康行(北海道大学)
 4. 融雪期に発生した雪崩-土石流現象とその評価 川村志麻(室蘭工業大学)
 5. 釧路川堤防での法面崩壊メカニズムと気候変動を考慮した設計降雨量の考え方 川尻峻三(北見工業大学)
 6. 気候変動を考慮した寒冷地の道路のり面対策工 川口貴之(北見工業大学)
- 休憩(15:05~15:15)
7. 令和2年7月九州を襲った豪雨による国管理の河川堤防の被害事例とその教訓 安福規之(九州大学)

15:30~16:00 パネルディスカッション

コーディネーター 石川達也(北海道大学)

16:00 閉会

司会進行： 所 哲也(北海学園大学)

アンサンブル手法による 気候変動予測と洪水リスク評価

北海道大学 山田 朋人

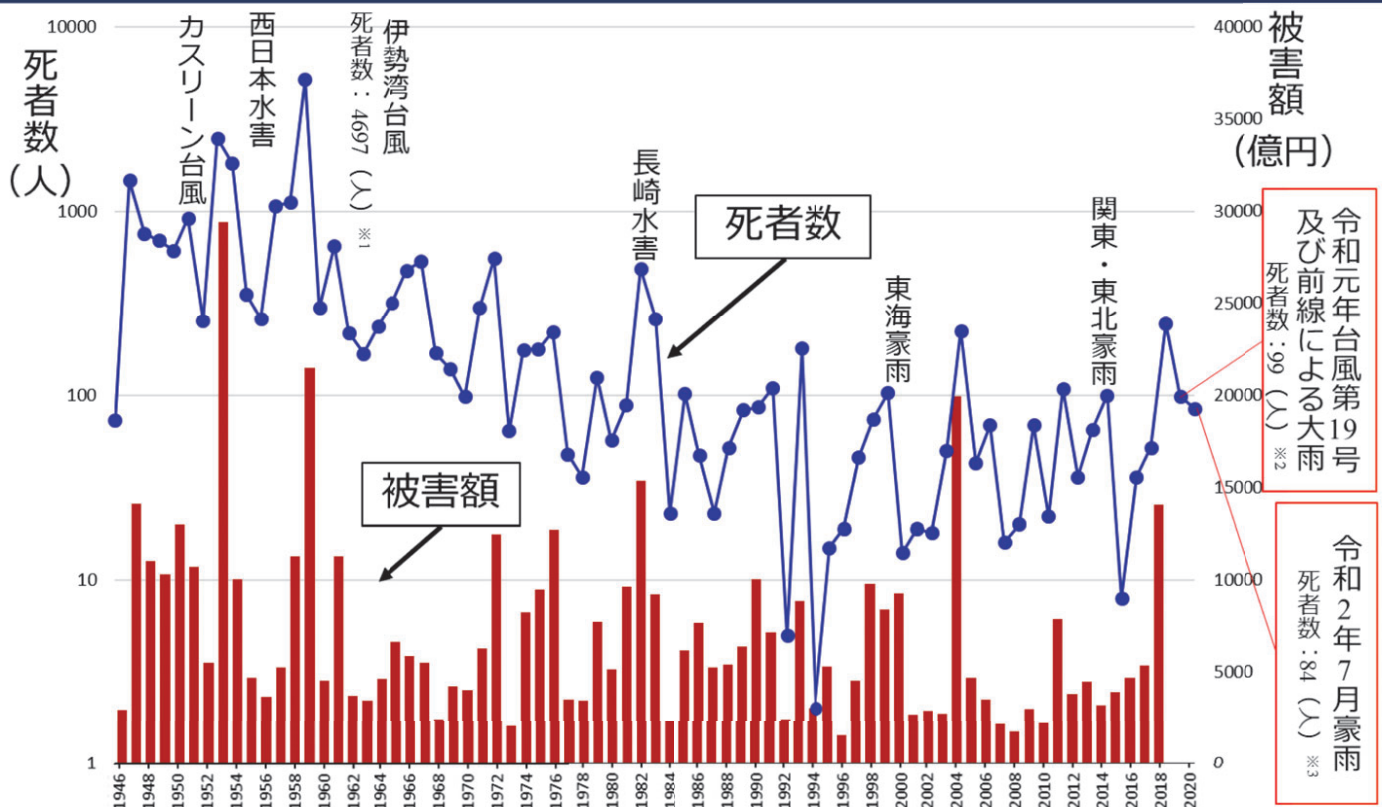
tomohito@eng.hokudai.ac.jp

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

2021年5月12日

1

水害による死者数と水害被害額の関係



注) 死者数は、水害・土砂災害による合計値であり、各年の水害被害額は、2005年価格に実質化したものである。また、2019年度と2020年度の項目にはそれぞれ、「令和元年台風第19号及び前線による大雨」および「令和2年7月豪雨」に伴う死者数のみを記入した。

※1消防白書より

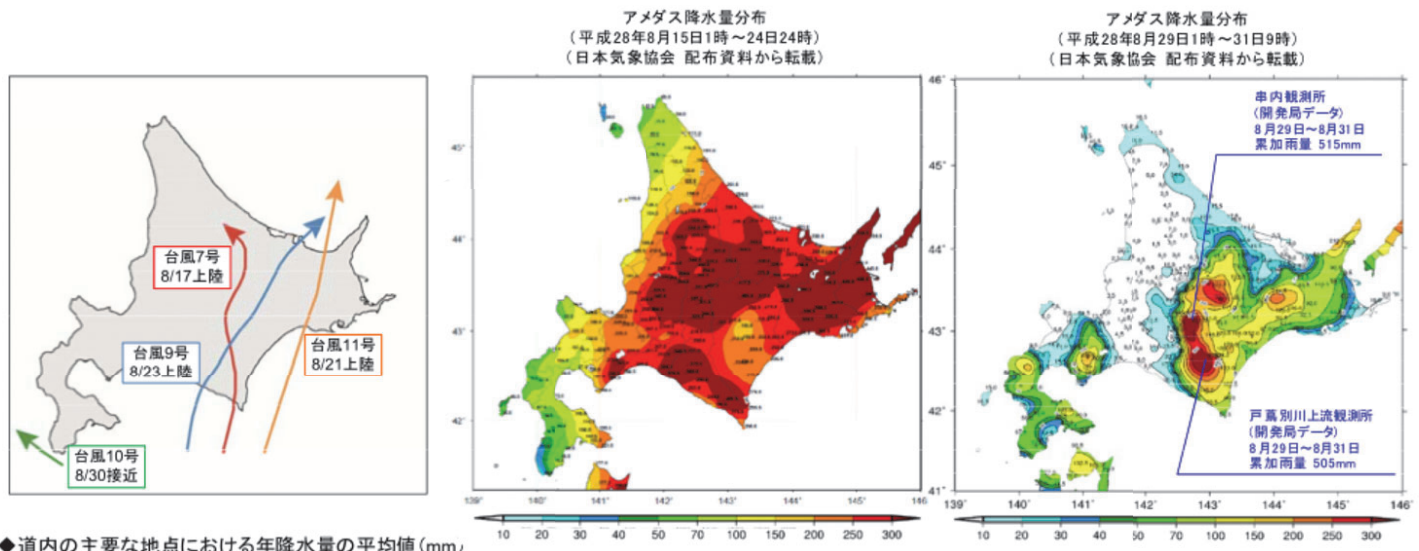
※2消防庁災害対策本部：令和元年台風第19号及び前線による大雨による被害及び消防機関等の対応状況（第63報）

※3内閣府 防災情報のページ：令和2年7月豪雨による被害状況等について（11月2日14:00現在）

※1946年から2018年までの水害による死者数および水害被害額は、国土交通省「水害統計調査」に掲載されているものを用いた。

平成28年8月北海道大雨激甚災害

- ・観測史上初めて1週間に3個の台風が北海道に上陸
- ・道東の広い地域で月降水量の記録を更新
- ・本州でも災害をもたらす程の降雨量



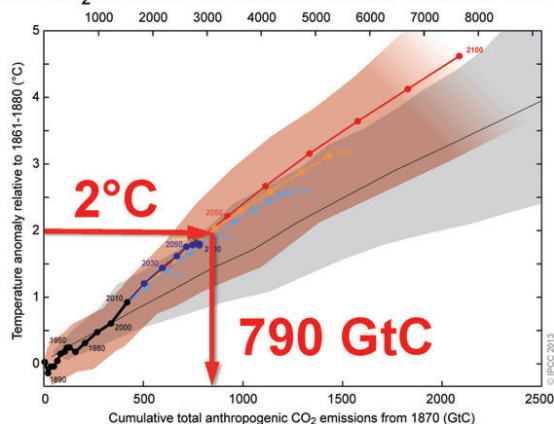
地点名	年降水量の平均値(mm)	統計期間	地点名	年降水量の平均値(mm)	統計期間
札幌	1106.5	1981～2010	釧路	1042.9	1981～2010
函館	1151.7	1981～2010	帯広	887.8	1981～2010
小樽	1232.0	1981～2010	網走	787.6	1981～2010
旭川	1042.0	1981～2010	北見	763.6	1981～2010
室蘭	1184.8	1981～2010	留萌	1127.0	1981～2010

8/16～8/31の雨量観測について
 ・串内観測所(空知郡南富良野町) 総雨量 888mm
 ・戸蔭別川上流観測所(北海道帯広市) 総雨量 895mm

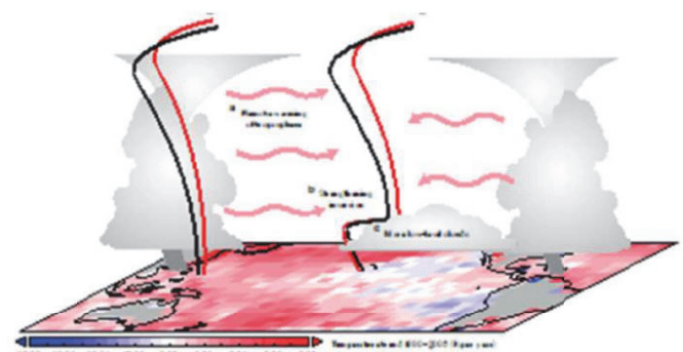
CO₂排出量について

■2℃上昇の状況は、既に差し迫った近未来であり、適応策の速やかな社会実装が求められる。

To limit **anthropogenic warming** to *likely* < 2°C, cumulative CO₂ emissions must be limited to about 790 GtC.



大気中CO₂濃度が倍になるとシステムに $\approx 4 \text{ W/m}^2$ の余剰エネルギーが生じる。これ自身は地球表面気温を ≈ 1 度上昇させるが、実際の温度上昇は気候フィードバックに大きく依存する



Mauritsen (2016 Ngeo)

Budget for the 2°C target: 790 Bill. t C
 CO₂ emitted until 2011: -515 Bill. t C
Remaining emissions: 275 Bill. t C
 CO₂ emissions 2012: 9.7 Bill. t C/yr

気候変動を踏まえた治水対策の検討

日本での動き

平成28年度 北海道開発局・北海道

平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会

平成29年度 北海道開発局・北海道

北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会

平成30～31年度 国土交通省

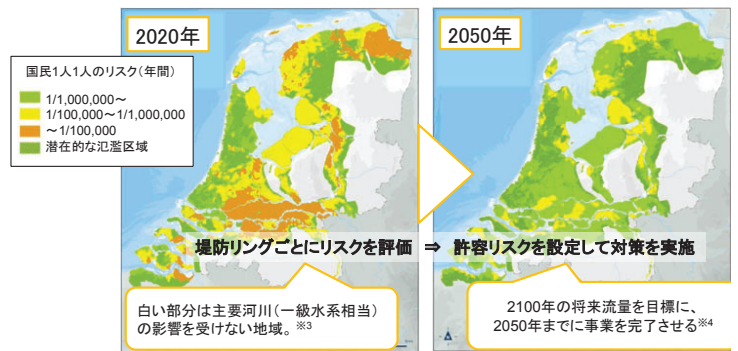
気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会

令和元年度 北海道開発局・北海道

北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会

諸外国の動き

- オランダでは気候変動を踏まえた目標設定をし、2050年までに事業を完了させることが決定されている。
- この他にアメリカ、イギリス、ドイツ、スイスなどでも検討がなされている。



地域ごとの個人リスク(左:現状のままの2020年、右:氾濫防御基準を満たした2050年)※2

出典: ※1 The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs, Delta Programme 2015: Working on the delta, 2013.9, <https://english.deltacommissaris.nl/documents/publications/2013/09/17/delta-programme-2014>

※2 J. Van Alphen, The Delta Programme and updated flood risk management policies in the Netherlands, 2016.7, pp9, <http://online.library.wiley.com/doi/10.1111/1111.12183/abstract>

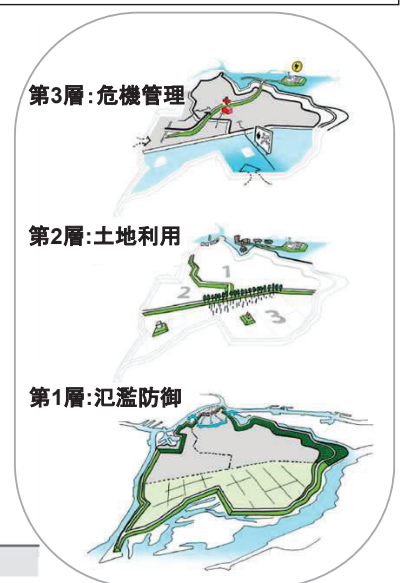
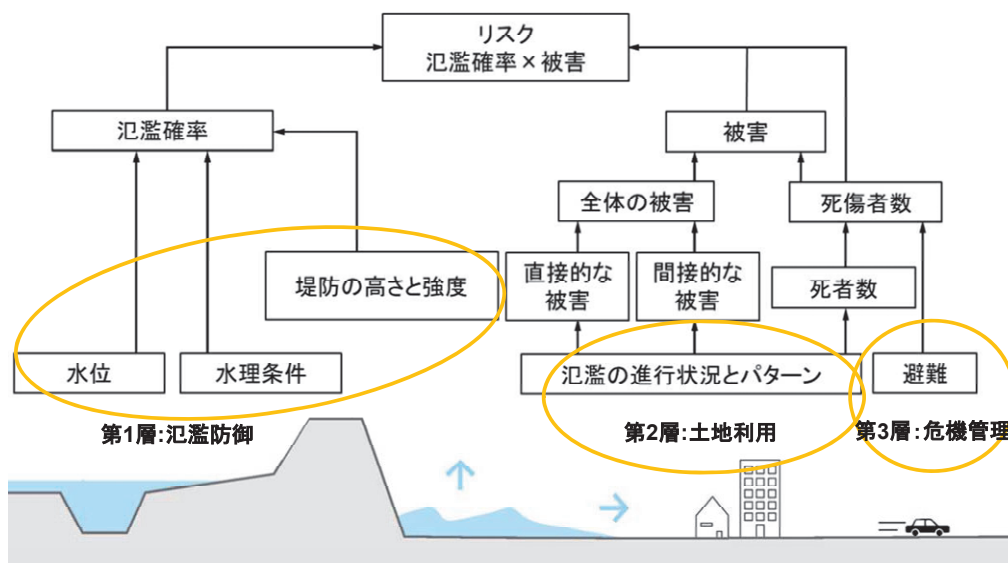
※3 2019/2/22 オランダ公共事業局Rijkswaterstaatからメール回答、2019/2/25 HKV CONSULTANTSからメール回答

※4 2018/1/11 HKV CONSULTANTSへの聞きとり

5

リスクベースアプローチの先進事例(オランダ・デルタプログラム)

- デルタプログラムでは、リスクベース・アプローチ(Risk based approach)の適用によって、氾濫による年間死亡率を1/100,000以下にすることを目標としている。リスクベースの「リスク」とは、特定事象の発生の可能性(氾濫確率)とそれが起きた時に引き起こされる影響(被害)のかけあわせである。
- 重層的氾濫リスク管理(Multi-layer flood risk management)により対策を講じ、リスクベース・アプローチの手法により対策を講じることとしている。※1



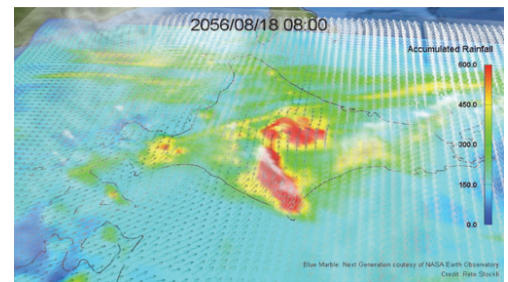
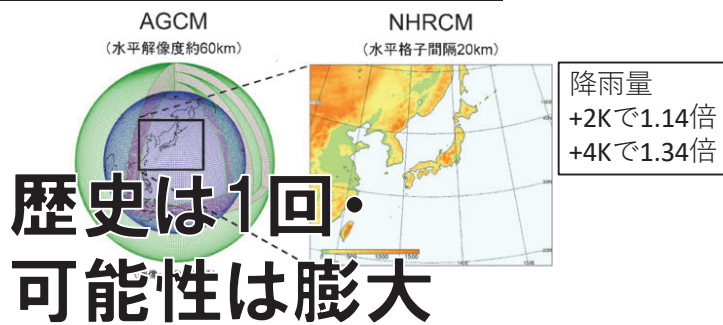
重層的氾濫リスク管理概略図 ※3

出典: ※1 2018/1/12 デルタ委員会事務局Delta Commissionへの聞きとり

※2,3 The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs, Delta Programme 2014: Work on the delta, 2013.9, pp36(※2), pp83(※3), <https://english.deltacommissaris.nl/delta-programme/documents/publications/2013/09/17/delta-programme-2014>

気候変動を踏まえた水分野における リスクベースの取組

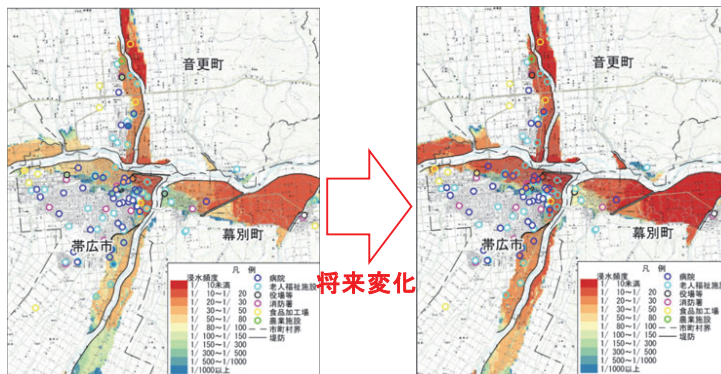
アンサンブル気候データの活用



リスク情報の算出

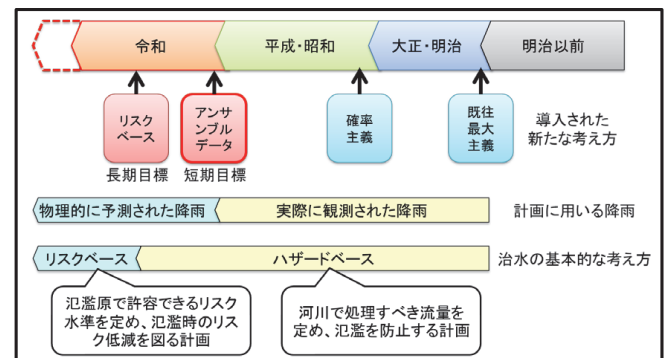
過去気候

将来気候



※図は浸水深が0cm以上となる浸水確率、食品加工場および農業施設は浸水深が0cm以上となる浸水確率、それ以外の施設は浸水深が30cm以上となる浸水確率を表示

治水計画の考え方の流れ



7

外力に揺らぎがある確率微分方程式系

ヨーロピアン・オプションのプレミアム（価格）を求める公式であり、F. ブラックとM. ショールズの1973年の論文

Volatility: 変動成分の大きさ

これが大きいと予測が困難である一方、これを怖がると利益は遠ざかる。

$$dS_t = \sigma S_t W_t + \mu S_t dt$$

W_t : ウィナー過程

σ : ボラティリティ

μ : ドリフト

経済の時間発展も降雨の
時間発展も似たような話

降雨流出過程の不確実性

発表者らの式

$$dq = aq^b(\bar{r}(t) - q)dt + \sigma\sqrt{T_L}dw$$

降雨流出過程(事前降雨の影響あり)の不確実性

$$dq = aq^b(\bar{r}(t) - q)dt + \sigma_1\sqrt{T_{L_1}}dw + \sigma_2\sqrt{T_{L_2}}dw$$

ヨーロピアン・オプション：権利行使日(満期日)にのみ権利を行使できるオプション取引のこと。

あらかじめ決めた“行使価格で商品を買う権利”のことをコールオプションという。将来、ある商品を買いたい価格が上昇してしま

気候変動による洪水の激甚化

気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言 改訂版【概要】

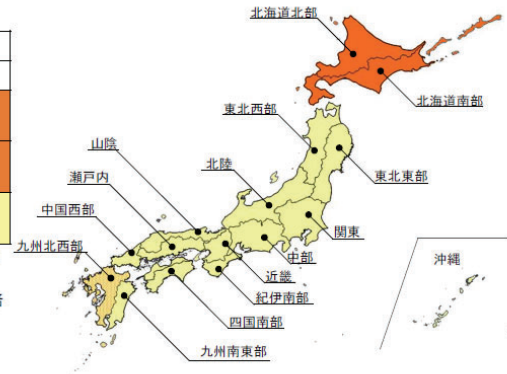
<気候変動に伴う降雨量や洪水発生頻度の変化>

- 降雨特性が類似している地域区分ごとに将来の降雨量変化倍率を計算し、将来の海面水温分布毎の幅や平均値等の評価を行った上で、降雨量変化倍率を設定。
- 2℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道で1.15倍、その他(沖縄含む)地域で1.1倍、4℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道・九州北西部で1.4倍、その他(沖縄含む)地域で1.2倍とする。
- 4℃上昇時には小流域・短時間降雨で影響が大きいので、別途降雨量変化倍率を設定する。

<地域区分毎の降雨量変化倍率>

地域区分	2℃上昇	4℃上昇	
			短時間
北海道北部、北海道南部	1.15	1.4	1.5
九州北西部	1.1	1.4	1.5
その他(沖縄含む)地域	1.1	1.2	1.3

- ※ 4℃上昇の降雨量変化倍率のうち、短時間とは、降雨継続時間が3時間以上12時間未満のこと
- ※ 3時間未満の降雨に対しては適用できない
- ※ 流域面積100km²以上について適用する。ただし、100km²未満の場合についても降雨量変化倍率が今回設定した値より大きくなる可能性があることに留意しつつ適用可能とする。
- ※ 年超過確率1/200以上の規模(より高頻度)の計画に適用する。



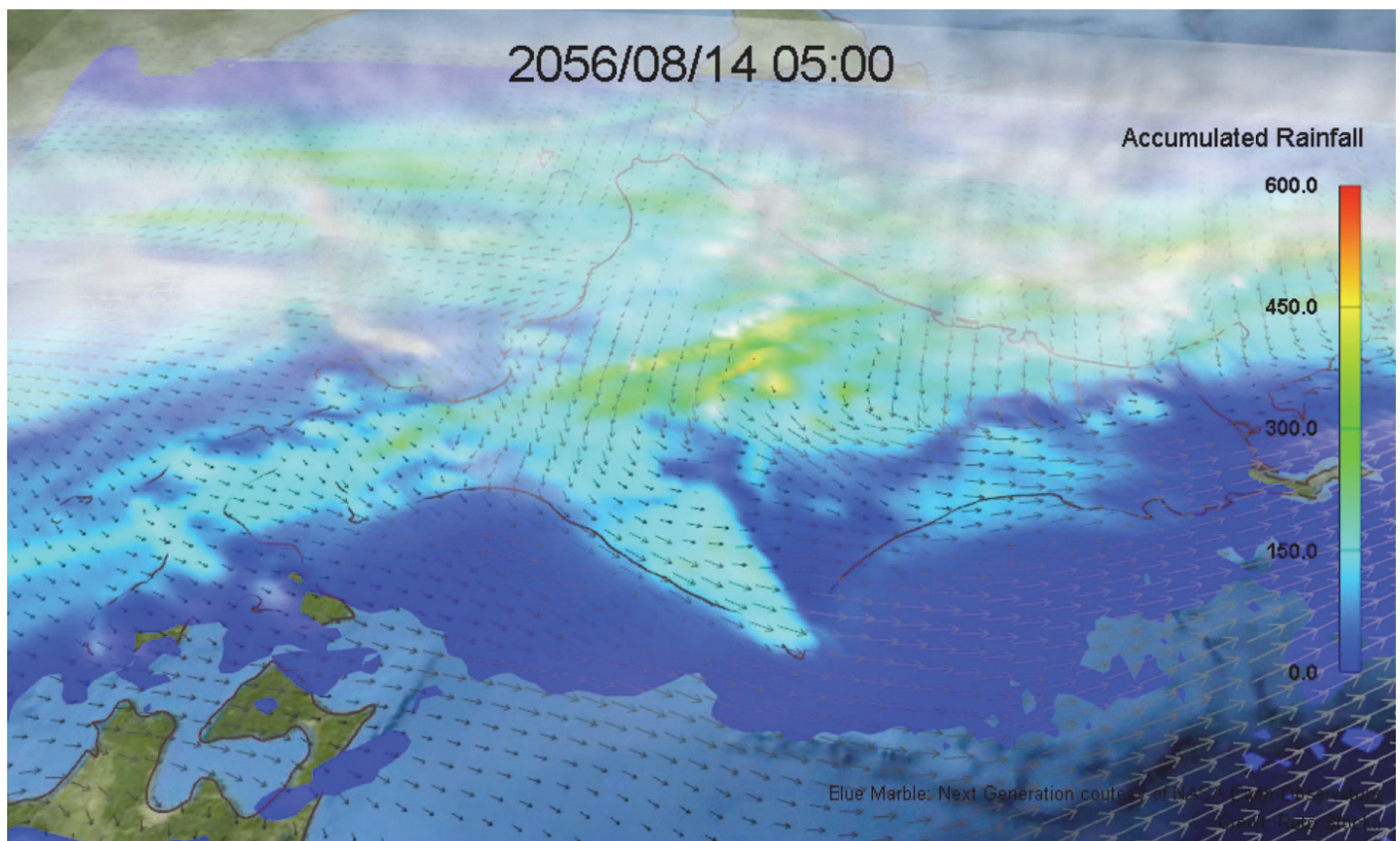
<参考>降雨量変化倍率をもとに算出した、流量変化倍率と洪水発生頻度の変化の一級水系における全国平均値

気候変動シナリオ	降雨量	流量	洪水発生頻度
2℃上昇時	約1.1倍	約1.2倍	約2倍
4℃上昇時	約1.3倍	約1.4倍	約4倍

- ※ 2℃、4℃上昇時の降雨量変化倍率は、産業革命以前に比べて全球平均温度がそれぞれ2℃、4℃上昇した世界をシミュレーションしたモデルから試算
- ※ 流量変化倍率は、降雨量変化倍率を乗じた降雨より算出した、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の流量の変化倍率の平均値
- ※ 洪水発生頻度の変化倍率は、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の降雨の、現在と将来の発生頻度の変化倍率の平均値(例えば、ある降雨量の発生頻度が現在は1/100として、将来ではその発生頻度が1/50となる場合は、洪水発生頻度の変化倍率は2倍となる)

気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言 (令和3年4月改訂)

力学的ダウンスケーリング結果の一例



2016年洪水に似た降雨パターン (台風による大雨)

d4PDFの実験デザイン

大量アンサンブル気候予測データベース

気象研究所非静力学地域気候モデルNHRCMによる複数の気候条件下でのシミュレーション

過去実験：19509月から2011年月までの観測された海面水温などが境界条件

2℃上昇実験：産業革命以前から全球平均気温が2℃上昇した条件

4℃上昇実験：産業革命以前から全球平均気温が4℃上昇した条件

※2℃上昇実験、4℃上昇実験はトレンド成分を除いており、温暖化の程度は時間変化しない（温室効果ガス濃度は2℃上昇実験、4℃上昇実験でそれぞれRCP8.5シナリオの2040年、2090年の値を設定）

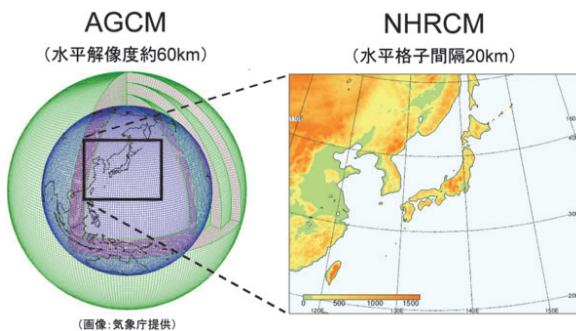
アンサンブル数

膨大なアンサンブルデータに基づく検討が可能

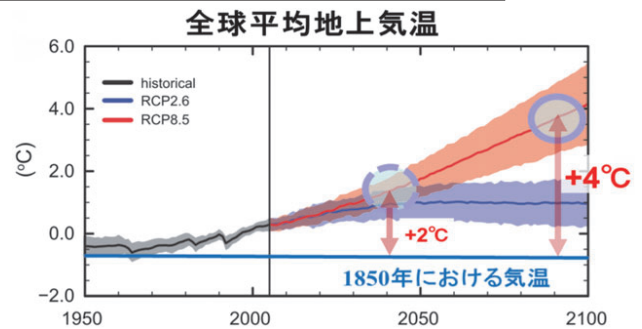
過去実験：60(年)x50(アンサンブル)=3000(年)

2℃上昇実験：60(年)x6(SST)x9(アンサンブル)=3240(年)

4℃上昇実験：60(年)x6(SST)x15(アンサンブル)=5400(年)



d4PDFの実験デザイン (<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/design.html>)



気象計算と統計理論による極値分布の幅 (力学的的手法と統計的手法の両輪で前進する内容)

■ d4PDF(5km,Yamada)の過去実験の95%信頼区間は、実際の観測値(極値統計理論により95%信頼区間を設定)と概ね一致している。

■ 年最大降雨量は、DS前後で概ね一致しており、DSする際の境界条件の影響は無いことを確認している。

■ 「国連気候変動枠組条約(UNFCCC)第50回補助機関会合(SB50)」(2019年6月20日 ドイツ・ボン)

『数学的理論と物理計算が一致していることは高い信頼性を有している。』

・d4PDF(5km, Yamada)と極値統計理論による95%信頼区間の比較
(十勝川帯広基準地点) (常呂川北見基準地点)

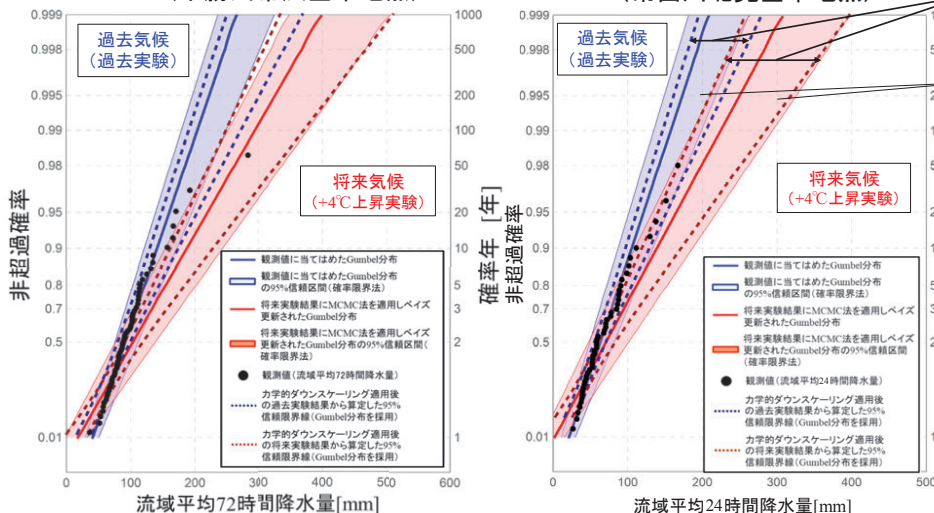


図 十勝川及び常呂川流域における流域平均24時間降水量の観測値(黒点、以降では、解析用データとも表記)、これらの観測値に当てはめたGumbel分布(青実線)および確率限界法検定に基づく当該Gumbel分布の95%信頼区間(青色で表示された範囲)とMCMC法に基づき観測値に当てはめたGumbel分布に力学的ダウンスケーリング適用後の将来実験結果を取り入れベイズ更新されたGumbel分布(解析用データに当てはめたGumbel分布の予測分布、赤実線)、確率限界法検定に基づくベイズ更新された当該Gumbel分布の95%信頼区間(赤色で表示された範囲)、力学的ダウンスケーリング適用後の過去実験結果による95%信頼区間(青破線から成る幅)、力学的ダウンスケーリング適用後の将来実験結果による95%信頼区間(赤破線から成る幅)。

物理モデル(d4PDFの5kmダウンスケーリング結果)に基づく95%信頼区間

※青破線の幅:過去気候での物理モデルに基づく95%信頼区間

※赤破線の幅:将来気候での物理モデルに基づく95%信頼区間

数理統計理論(確率限界法検定)に基づく95%信頼区間

※青色で着色された範囲:過去気候での統計理論に基づく95%信頼区間

※赤色で着色された範囲:将来気候での統計理論に基づく95%信頼区間

d4PDFが有するアンサンブル情報から明らかとなる確率雨量の振れ幅(信頼区間)は、数理統計理論に基づく確率雨量の振れ幅(信頼区間)とほとんど一致する。

・d4PDF(5km, Yamada)計算領域(北海道)



「国連気候変動枠組条約(UNFCCC)第50回補助機関会合(SB50)」(2019年6月20日 ドイツ・ボン)



幅：観測・準観測データの取りうる範囲

想定するハイエトグラフはより先鋭化

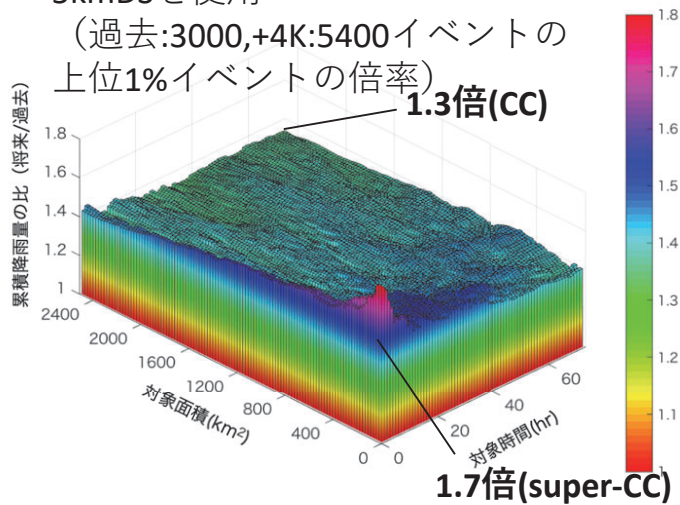
常呂、石狩、筑後でも同様の傾向

年最大降雨の時空間的な将来変化

帯広基準点流域

5kmDSを使用

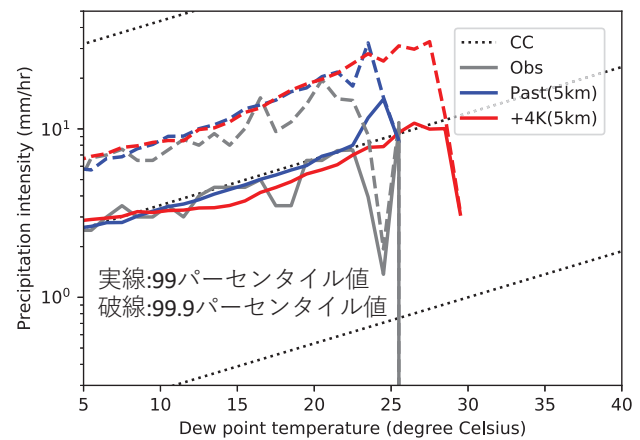
(過去:3000,+4K:5400イベントの
上位1%イベントの倍率)



露点温度と降水強度の関係

アメダス帯広地点

Yamada et al. (under review)



湿度の影響を除くため露点温度を使用

なぜ集中化? CCの観点から考える

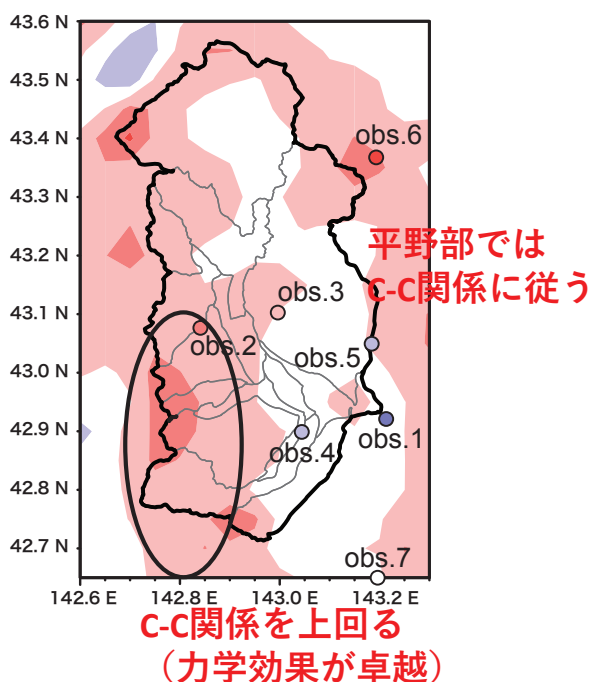
- 流域平均72時間降雨はCCスケールの変化
- 時空間的に小さいスケールの降雨の変化
- 観測とd4PDF過去実験はいずれもCCに平行
- +4KはCCに平行に高温側に移動
- 率はsuper-CC

極端降雨の時空間的な集中化の要因分析

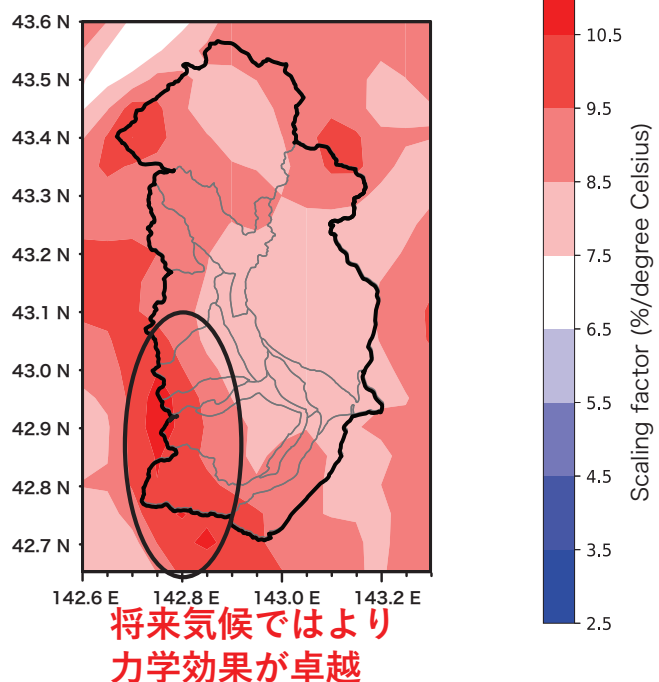
気温と極端降水量との関係

Yamada et.al (under review)

過去気候

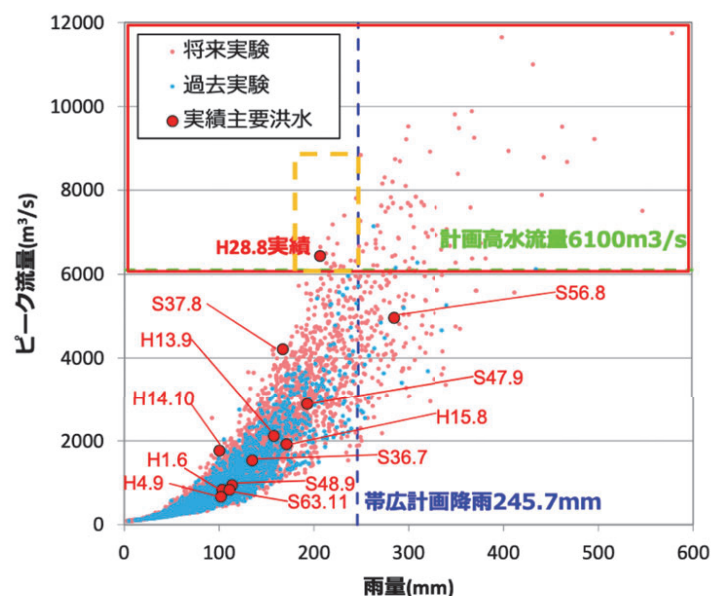


将来気候 (4°C上昇)

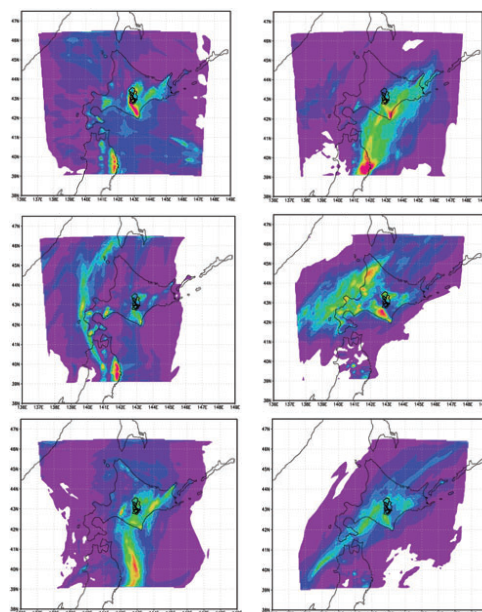


気温と飽和水蒸気圧の関係 (Clausius-Clapeyron関係 ;
7%/°C) より、力学効果の卓越箇所が明らかに

流域平均降雨量に対するピーク流量（十勝川流域）



高解像度大雨データ



十勝川 帯広地点

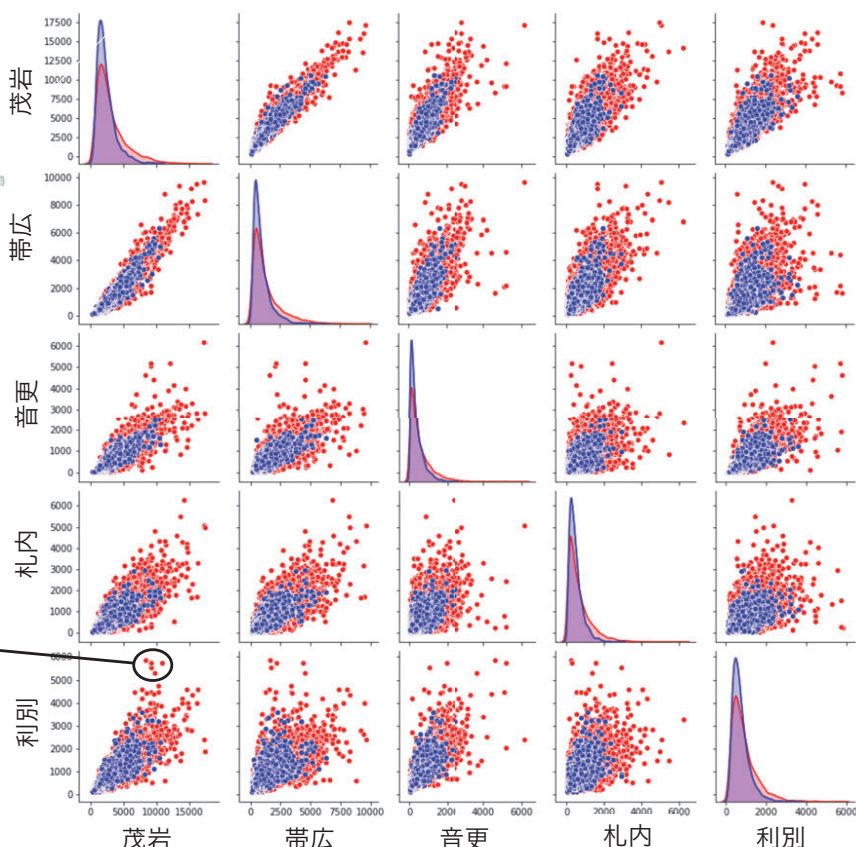
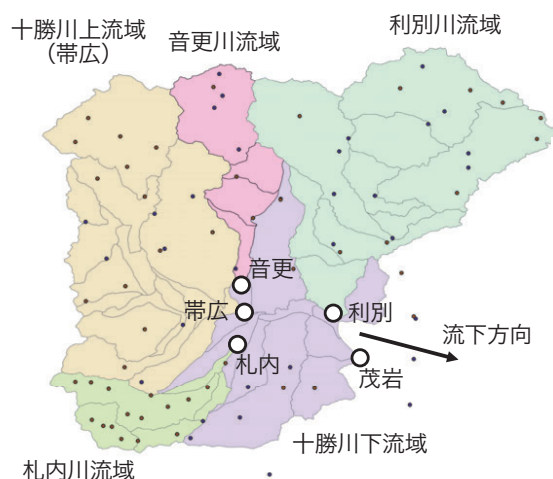
- 流域平均降雨量に対してピーク流量は大きなばらつきを有することが大量アンサンブルデータを用いることで明らかに
- 降雨量だけでなく降雨の特徴（時間的・空間的）の影響を含んだリスク評価が可能に

15

ピーク流量の地点間のばらつき

ピーク流量の散布図行列

過去実験：3000イベント
4℃上昇実験：5400イベント



茂岩（本川下流）では危険性は小さいが利別川では大きい

流域内の危険度の空間分布はイベントごとに異なる。

様々な被害シナリオが存在

リスク評価手法

【氾濫リスクの分布や確率的な評価が可能に】

- ・大量アンサンブル気候予測データが持つ降雨の時空間分布により、流域内の氾濫リスクの分布が詳細に分析できるようになった。
- ・豊富なアンサンブル数を持つことから確率的な評価が可能となり、氾濫リスクを期待値として定量的に把握可能となった。

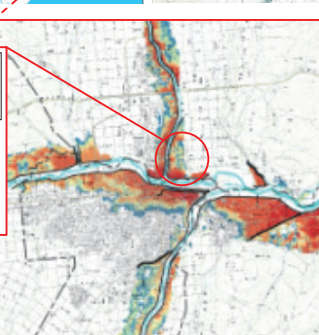
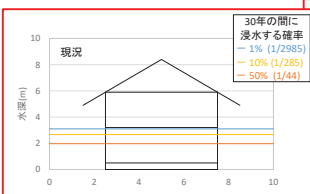
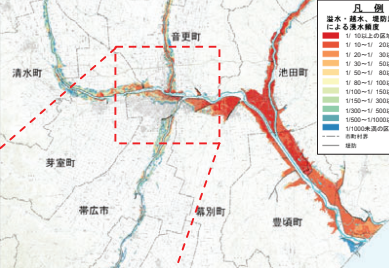
浸水想定区域図(想定最大規模)では1つの降雨・流量パターンに対する想定であるのに対し、d4PDFを用いることで豊富な降雨の時空間分布を基に、浸水確率の分布を示すことができる。

浸水想定区域図(想定最大規模)



1階が水没する程度となる浸水深となる確率 (d4PDF 4°C上昇実験、浸水深1m)

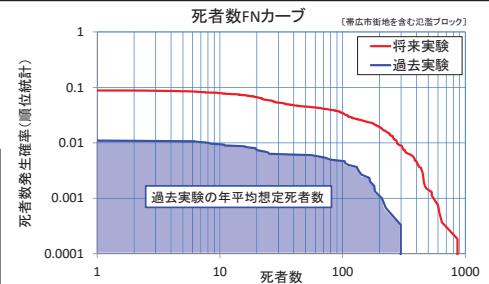
(RCP8.5シナリオで想定される2090年時点)



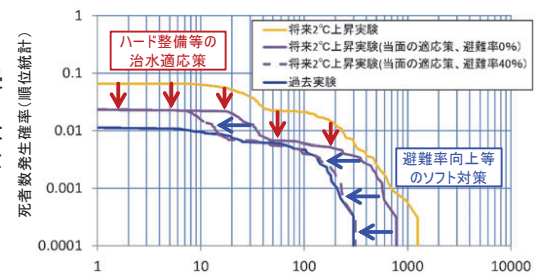
メッシュ毎・浸水深毎に浸水確率を算出するなど、豊富なアンサンブル数により確率的な評価が可能となった。



避難方法やまちづくり、住まい方の検討へ活用することも考えられる。

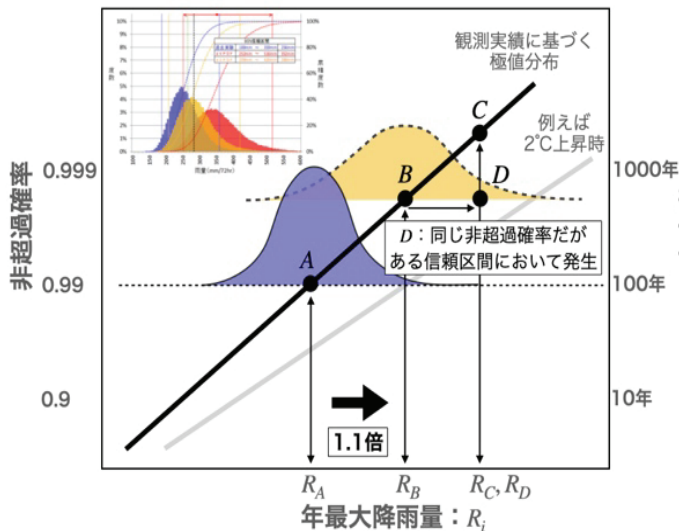


従来は、死者数等のリスク情報は最大値のみ検討されてきたが、大量アンサンブルデータを用いることで、その確率的な分布や期待値が把握できる。

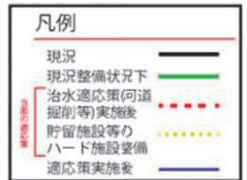
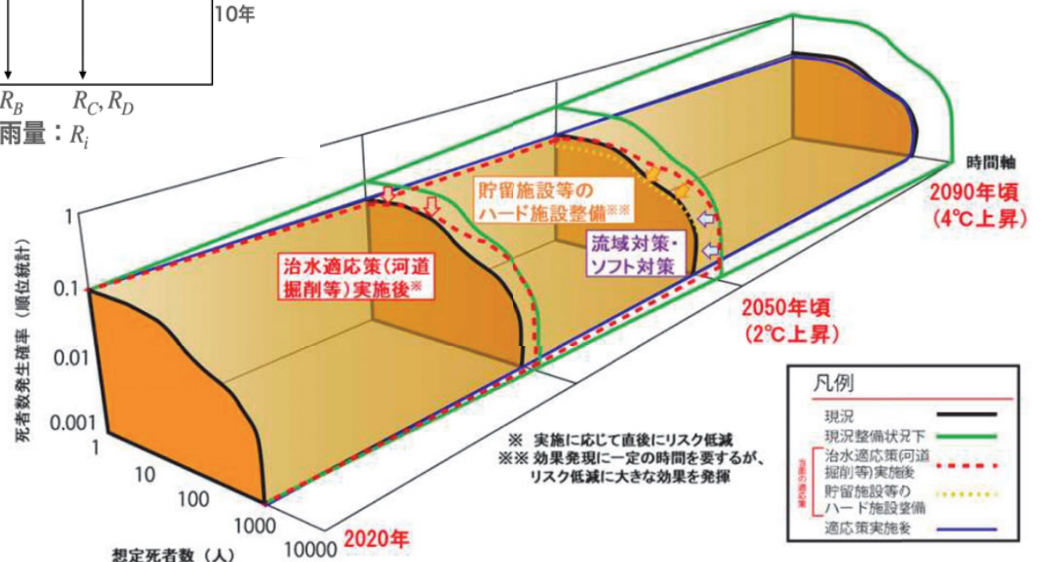


対策の種類によってその効果は異なる特徴を持つ。FNカーブを用いることで地域のリスクの状況に応じた効果的な対策検討が可能となる。

時間軸上でのリスクの定量化が不可欠



山田(2020; 雑誌河川)

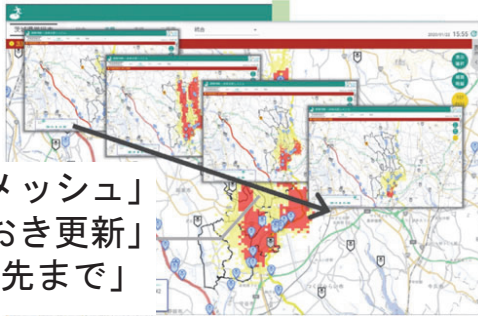


内閣府SIP: リスクベースの避難判断支援への適用に向けて研究開発中



動的なリスク情報

時々刻々の予測情報



「250mメッシュ」
「10分おき更新」
「6時間先まで」

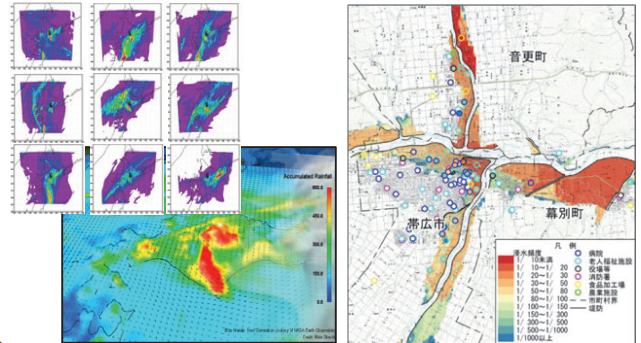
静的なリスク情報

過去の災害経験(数事例)

+

数千年分の情報をもつ
気候データベース

- 災害経験の不足を補う



- ・ リスクの精査（見落とし回避）
- ・ 様々な事態の事前想定
- ・ 動的・静的リスク情報の融合による避難判断の高度化

まとめ

洪水リスクを分析し、適応策の具体的な検討へ

- ・ 大量アンサンブル気候データの5km力学DSにより、流域スケールでの大雨の将来変化を分析
- ・ 計画規模の降雨量の不確実性を評価可能になった
- ・ 温暖化進行後には計画規模の降雨量
（計画降雨継続時間・流域全体）は1.2-1.4倍に（中央値として）
- ・ 温暖化進行後の降雨は短時間化、局所化の傾向に（計画降雨継続時間・流域全体での降雨量の増加率を上回る）
- ・ 複合的なリスクの変化を定量的に評価可能
- ・ 複合的なリスク評価に基づいた、効果的な治水対策の検討が可能になった

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

「斜面災害の低頻度発生地域を対象とした 気候変動にともなう危険度の評価」

2021年5月12日(水)

室蘭工業大学大学院・工学研究科

中津川 誠(なかつがわ まこと)

1

研究背景・目的

- 気候変動により災害経験の少ない地域でもハザードの増大により、斜面災害危険度が高まる可能性がある
- 暴露、脆弱性の観点からも評価する必要がある



2

暴露・脆弱性 土砂災害の潜在的脅威

室蘭市～2019年7月現在

土砂災害警戒区域

279箇所（未指定118箇所） 指定率 70%

土砂災害特別警戒区域

228箇所（未指定105箇所） 指定率 68%

北海道土砂災害警戒情報システムより



脆弱性



©北海道室蘭建設管理部



©Google earth

方法 不確実性を考慮したハザードの評価

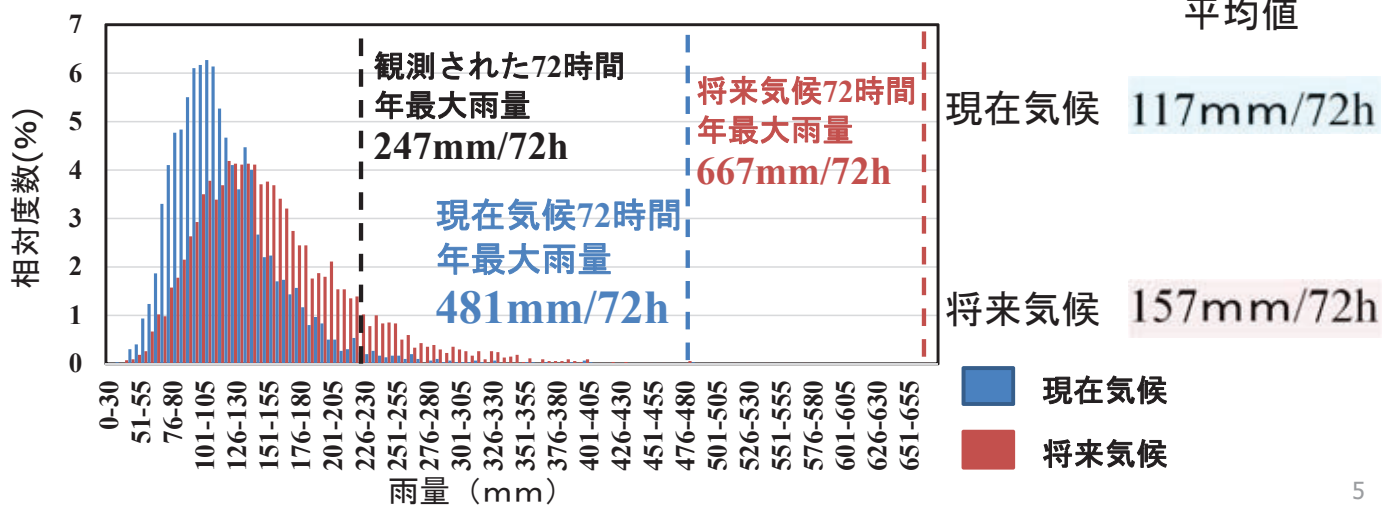
大量アンサンブルデータd4PDFを用いた雨量の設定

現在気候: 60年 × 50パターン = 3,000年分

将来気候: 60年 × 90パターン = 5,400年分

夏期の大雨に起因する事例に着目し, 6月～10月を対象期間

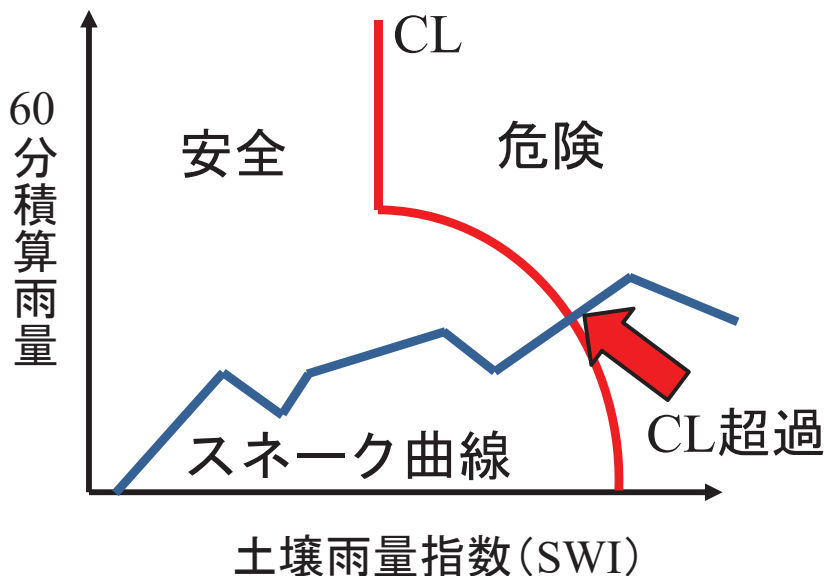
d4PDFから現在気候と将来気候の72時間年最大雨量の比較



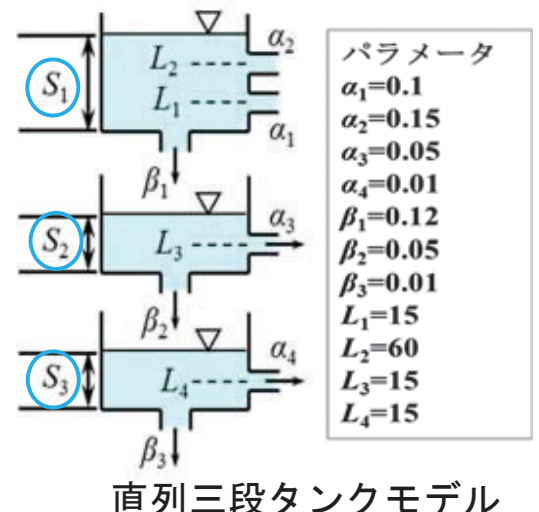
5

方法 斜面災害危険度判定

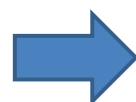
斜面災害危険度判定模式図
～CLとスネーク曲線～



$$SWI = S_1 + S_2 + S_3$$

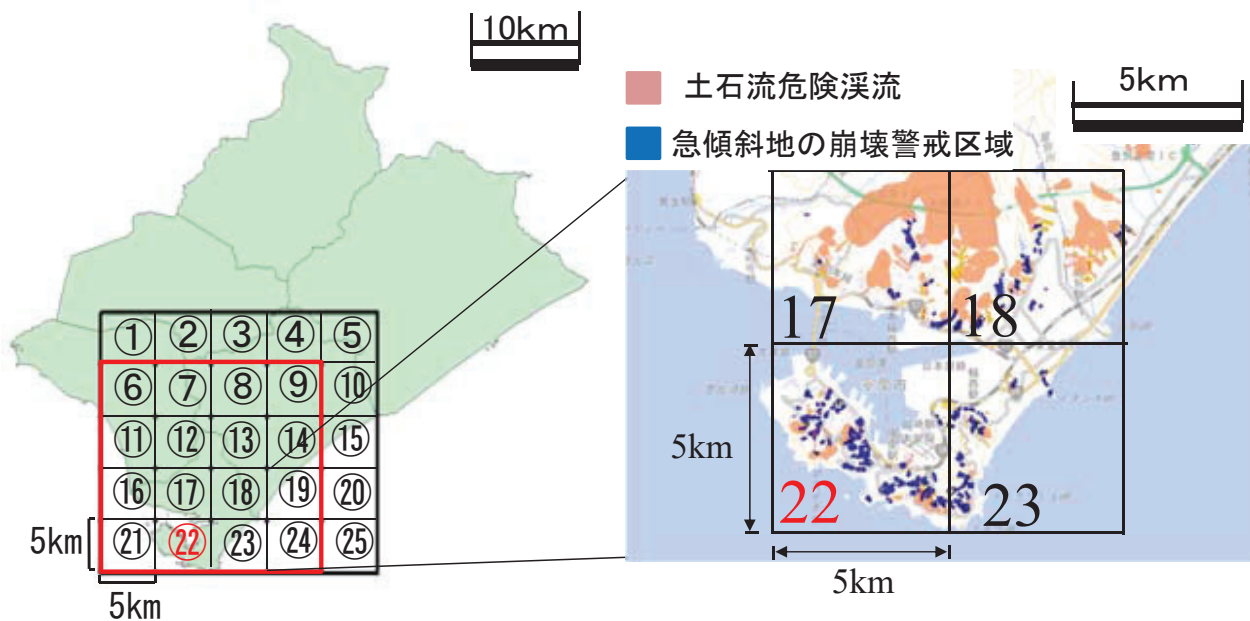


スネーク曲線がCL超過



斜面災害危険度 大

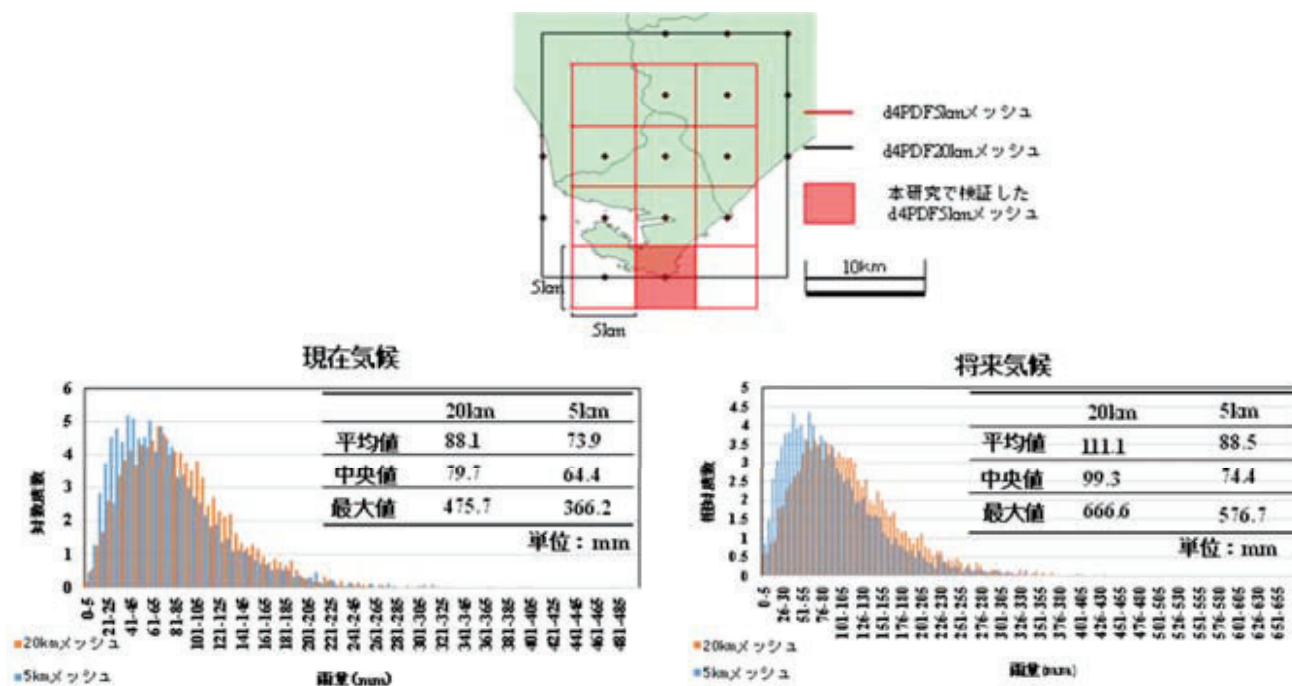
方法 対象地域



提供: 国土地理院ハザードマップポータルサイト

- d4PDF20kmメッシュ
- CL5kmメッシュ
- ②② d4PDFを用いて危険度推定で使用したCL

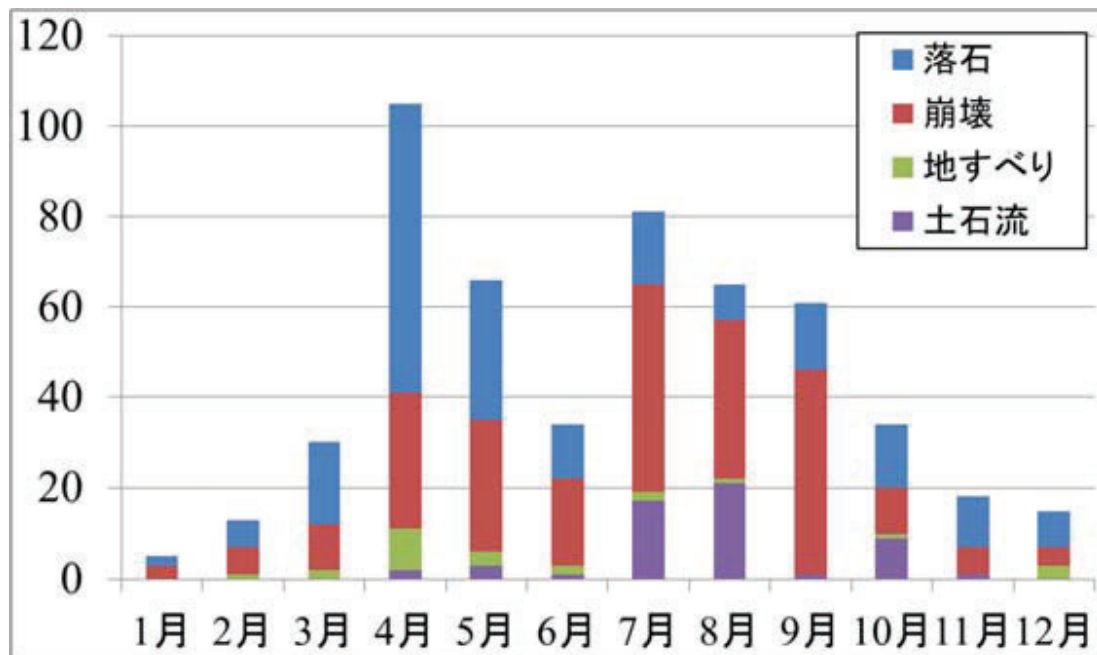
方法 DS情報の比較



この事例では20km情報の方がやや大きい値(安全側)
 →(将来の融雪の評価も念頭に)通年にわたって揃っている20km
 情報を用いる

今後に向けて 融雪+大雨の危険度評価

雪解けの時期に斜面災害の発生が最も多い

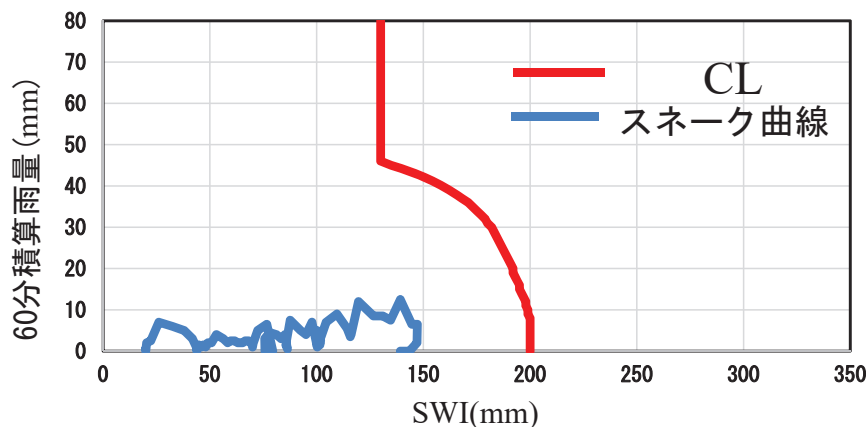


▲ 北海道の月別道路斜面災害発生件数(1981～2011年)¹⁾

1) 大日向「北海道の国道斜面災害の履歴分析結果について」(2012)

結果 過去事例の評価

1980年8月室蘭市（過去最大72時間降雨量）のスネーク曲線



CLは超過していないが災害発生
→危険側の評価に見える

- ・当時のCLと変わっている？
- ・当時の施工の問題？

1980年8月31日の被害状況写真 提供：室蘭市



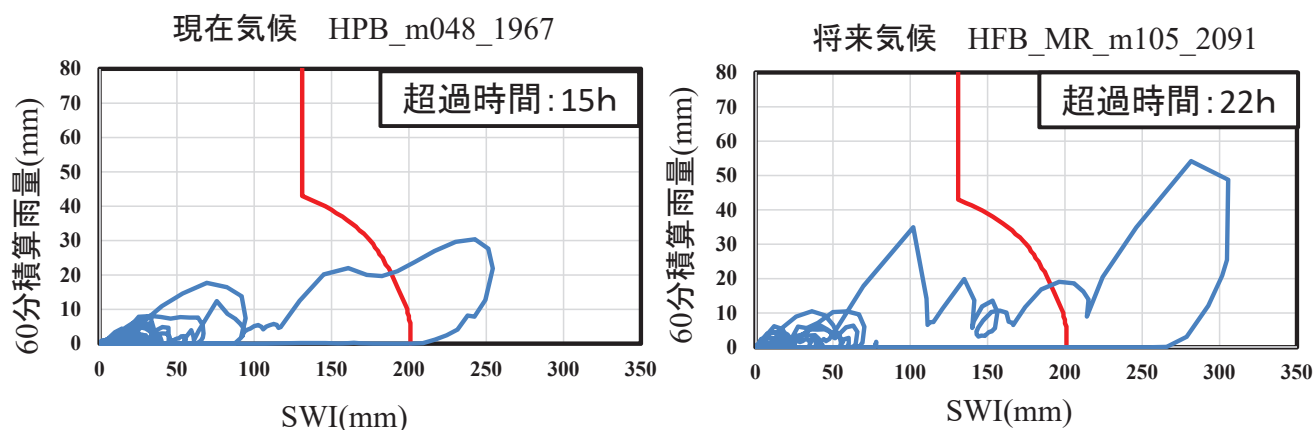
結果 CL超過判定

現在気候				将来気候			
No	年数	月	超過時間(h)	No	年数	月	超過時間(h)
1	HPB_m048_1967	8月	15	1	HFB_MR_m105_2091	8月	22
2	HPB_m082_1961	8月	8	2	HFB_GF_m115_2108	8月	17
3	HPB_m061_1980	8月	6	3	HFB_MP_m101_2053	7月	17
.	.	.	.	.	.	.	.
7	HPB_m047_1991	8月	2	200	HFB_MI_m106_2055	10月	1
超過時間合計(h)			40	超過時間合計(h)			610
超過回数合計(回/3000)			7	超過回数合計(回/5400)			200
発生頻度(回/50年)			0.1	発生頻度(回/50年)			1.9

超過期間						
	6月	7月	8月	9月	10月	合計
現在気候	0	0	6	1	0	7
将来気候	2	39	112	46	1	200



結果 極端事例のスネーク曲線



	現在気候 HPB_m048_1967	将来気候 HFB_MR_m105_2091
72 h雨量最大値	1位 (481 mm/72 h)	1位 (667 mm/72 h)
1 h雨量最大値	29位 (30 mm/h)	45位 (54 mm/h)
SWI最大値	1位 (254 mm)	1位 (306 mm)

まとめ

- 降雨の増加によって、将来的に斜面災害の経験が少ない地域でも災害が発生する可能性があることが示された
- CLの超過時間は短時間の降雨より、長時間の降雨によって超過時間が長くなることが示された



斜面災害の未経験地域で**危機意識**を高める必要性

融雪＋降雨による斜面災害の危険度推定へ

2016年8月北海道豪雨災害時における 十勝川水系中小河川の 土砂災害事例について

2021年5月12日

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

北海道大学 清水康行

IPCC第5次評価報告書(平成25年11月気候変動に関する政府間パネル)の概要

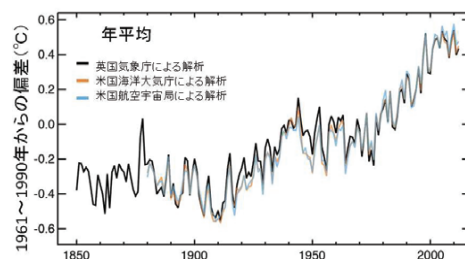
【観測事実と温暖化の要因】

- ◆ 気候システムの温暖化については疑う余地がない。
- ◆ 人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高く、温暖化に最も大きく効いているのは二酸化炭素濃度の増加。
- ◆ 最近15年間、気温の上昇率はそれまでと比べ小さいが、海洋内部(700m以深)への熱の取り込みは続いており、地球温暖化は継続している。

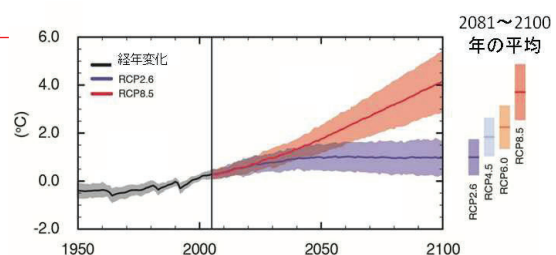
【予測結果】

- ◆ 21世紀末までに、世界平均気温が0.3~4.8℃上昇、世界平均海面水位は0.26~0.82m上昇する可能性が高い(4種類のRCPシナリオによる予測)。
- ◆ 21世紀末までに、ほとんどの地域で極端な高温が増加することがほぼ確実。
また、中緯度の陸域のほとんどで極端な降水がより強く、より頻繁となる可能性が非常に高い。
- ◆ 排出された二酸化炭素の一部は海洋に吸収され、海洋酸性化が進行。

世界の地上気温の経年変化

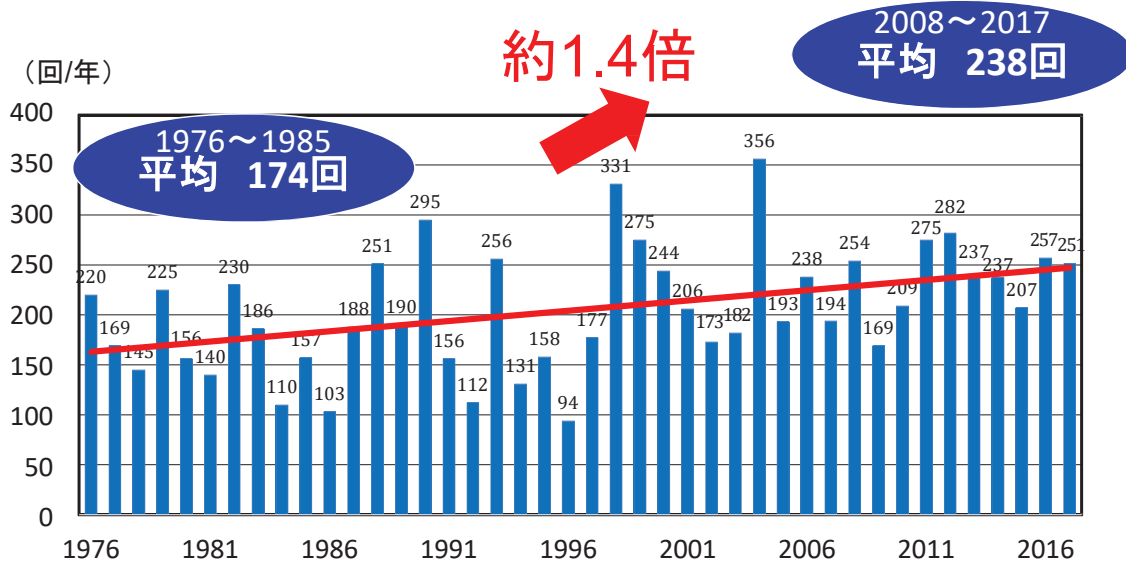


1950~2100年の世界平均地上気温の
経年変化(1986~2005年の平均との比較)



短時間強雨発生回数の長期変化

○ 時間雨量50mmを超える短時間強雨の発生件数が約30年前の約1.4倍に増加



1時間降水量50mm以上の年間発生回数(アメダス1,000地点あたり)

※ 毎年1月に前年分のデータを追加
 ※ アメダスの地点数は、1976年当初は約800地点だが、その後増加し、2016年では約1,300地点
 ※ 年による地点数の違いの影響を除くために、1,000地点あたりの発生回数に換算し比較
 ※ 山岳地域に展開されていた無線ロケット雨量観測所のうち、廃止された観測所は除外

国土交通省Webより

※気象庁資料より作成

4

(参考)平成27年9月 関東・東北豪雨(鬼怒川等)

- 宮城県、栃木県を中心に観測史上1位の降水量を記録。鬼怒川では流下能力を上回る洪水となり、関東地方の国管理河川では29年ぶりに堤防が決壊(常総市三坂町地先)。
- 約40km²が浸水し、死者2名、家屋被害約8,800戸などの被害が発生するとともに、多数の孤立者が発生し、約4,300人が救助された。

被害状況等	
死亡2名、重症3名、中等症11名、軽症17名	
常総市	(全壊53、大規模半壊1,578、半壊3,476、床上浸水148、床下浸水3,072)
結城市	(大規模半壊6、半壊44、床上浸水1、床下浸水155)
筑西市	(大規模半壊68、半壊3、床下浸水18)
下妻市	(全壊1、半壊39、床上浸水16、床下浸水110)
つくばみらい市	(半壊13、床上浸水1、床下浸水21)
八千代町	(床上浸水2、床下浸水9)
ヘリによる救助者数	1,343人
地上部隊による救助者数	2,959人

被災した家屋



茨城県常総市の浸水状況



国土交通省
Webより

8

(参考)平成28年8月北海道・東北地方を襲った一連の台風(空知川、札内川、芽室川等)

- 8月に相次いで発生した台風第7号、第9号、第11号は、それぞれ北海道に上陸。台風第10号は、に暴風域を伴ったまま岩手県に上陸。北海道への3つの台風の上陸、東北地方太平洋側への上陸は、気象庁の統計開始以来初めて。平成28年9月6日気象庁公表資料を抜粋、一部改変 ※統計開始:1951年
- 一連の台風により、死者24名、全半壊約940棟、家屋浸水約3,000棟の甚大な被害が発生。



(参考)平成29年7月九州北部豪雨(赤谷川等)

- 平成29年7月5日、6日の大雨「平成29年7月九州北部豪雨」では、朝倉雨量観測所等で観測史上1位の雨量を記録するなど、記録的な大雨により、出水や山腹崩壊が発生。
- 河川のはん濫、大量の土砂や流木の流出等により、死者42名、家屋の全半壊等約1,520棟、家屋浸水 約2,230戸の甚大な被害が発生。

項目	狀況等
人的被害※ ¹	死者42名、行方不明者2名、負傷者34名
住家被害※ ¹	全壊325棟、半壊1,109棟、一部破損88棟、家屋浸水2,231棟
救助者数	警察庁 445人※ ⁷ 消防庁 283人※ ⁵ 海上保安庁 40人※ ⁶ 防衛省 658人※ ⁷

※1 内閣府「8月30日からの梅雨前線に伴う大雨及び平成29年台風第3号による被害状況等について」
(平成30年1月17日12:00現在)

※2 各時点の消防庁災害対策本部報告のうち、最大であった数値を記載
①(第2報 7:6 4:00現在発令中、②(第1報 7:7 18:00現在発令中)

※3 消防庁「平成29年8月30日からの梅雨前線に伴う大雨及び平成29年台風第3号の被害状況及び消防機関等について」(8月2日18:30時点)

※4 内閣府「平成29年8月30日からの梅雨前線に伴う大雨及び平成29年台風第3号による被害状況等について」(8月2日12:00現在)

※5 内閣府「平成30年1月17日12:00現在」



気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言(R3年4月) [国土交通省]

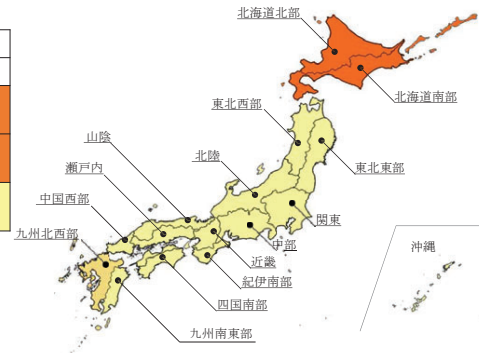
＜気候変動に伴う降雨量や洪水発生頻度の変化＞

- 降雨特性が類似している地域区分ごとに将来の降雨量変化倍率を計算し、将来の海面水温分布毎の幅や平均値等の評価を行った上で、降雨量変化倍率を設定。
- 2℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道で1.15倍、その他(沖縄含む)地域で1.1倍、4℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道・九州北西部で1.4倍、その他(沖縄含む)地域で1.2倍とする。
- 4℃上昇時には小流域・短時間降雨で影響が大きいため、別途降雨量変化倍率を設定する。

＜地域区分毎の降雨量変化倍率＞

地域区分	2℃上昇	4℃上昇	
			短時間
北海道北部、北海道南部	1.15	1.4	1.5
九州北西部	1.1	1.4	1.5
その他(沖縄含む)地域	1.1	1.2	1.3

- ※ 4℃上昇の降雨量変化倍率のうち、短時間とは、降雨継続時間が3時間以上12時間未満のこと3時間未満の降雨に対しては適用できない
- ※ 雨域面積100km²以上について適用する。ただし、100km²未満の場合についても降雨量変化倍率が今回設定した値より大きくなる可能性があることに留意しつつ適用可能とする。
- ※ 年超過確率1/200以上の規模(より高頻度)の計画に適用する。



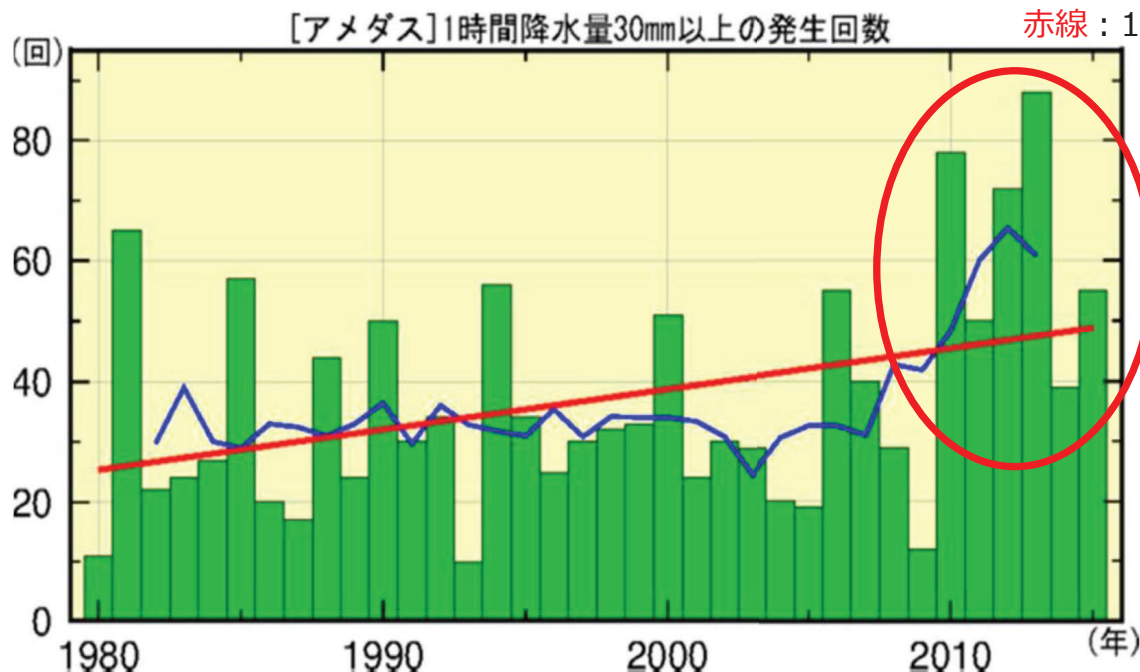
＜参考＞降雨量変化倍率をもとに算出した、流量変化倍率と洪水発生頻度の変化の一級水系における全国平均値

気候変動シナリオ	降雨量	流量	洪水発生頻度
2℃上昇時	約1.1倍	約1.2倍	約2倍
4℃上昇時	約1.3倍	約1.4倍	約4倍

- ※ 2℃、4℃上昇時の降雨量変化倍率は、産業革命以前に比べて全球平均温度がそれぞれ2℃、4℃上昇した世界をシミュレーションしたモデルから試算
- ※ 流量変化倍率は、降雨量変化倍率を乗じた降雨より算出した、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の流量の変化倍率の平均値
- ※ 洪水発生頻度の変化倍率は、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の降雨の、現在と将来の発生頻度の変化倍率の平均値(例えば、ある降雨量の発生頻度が現在は1/100として、将来ではその発生頻度が1/50となる場合は、洪水発生頻度の変化倍率は2倍となる)

国土交通省
Webより

青線：5年間の移動平均
赤線：1次相関式



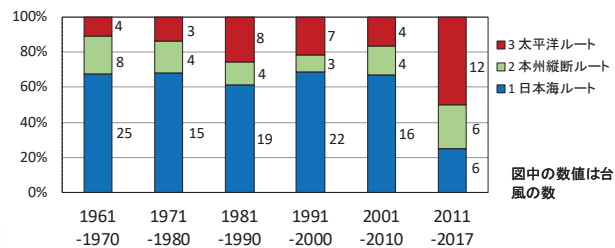
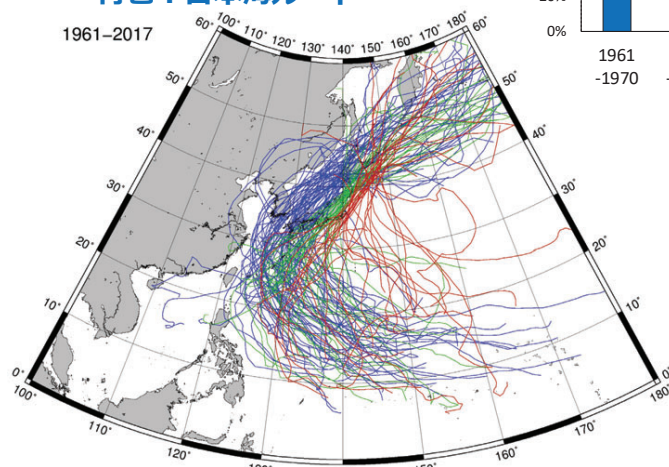
特に2010年以降の集中豪雨の発生回数が急増している

1980年～2017年の北海道アメダスデータによれば、1時間30mm以上の雨の年間発生件数は明らかな増加がみられる

山田朋人(2018)

これまでに北海道に上陸・最接近した台風 (1961～2017)

赤色：太平洋ルート
緑色：本州縦断ルート
青色：日本海ルート



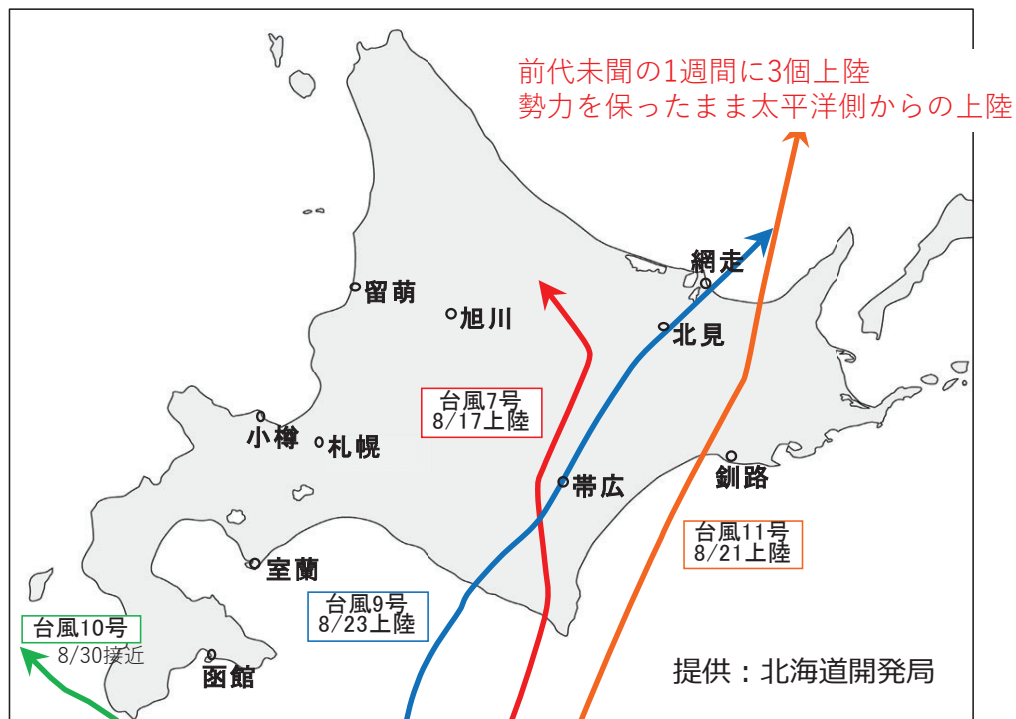
北緯30度を中心気圧が980hPa以下で通過した北海道に接近した台風の、北緯40度を通過した時刻での中心気圧(hPa)と数(N)

2011～2017は太平洋ルートの台風が多い。同ルートは勢力が衰えず北海道に上陸・最接近しやすいという特徴を有する。

* 最接近：北海道から300kmの範囲 山本太郎, 山田朋人作成(2018)

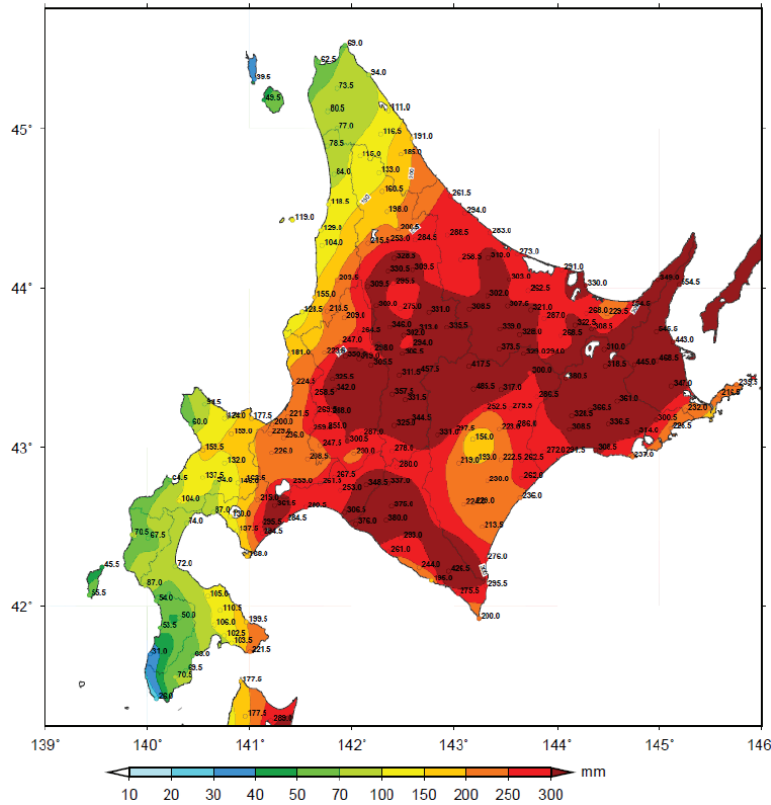
9

2016年北海道豪雨災害をもたらした4つの台風



10

2016年8月15日1:00～24日24:00 最初の3台風による降雨量

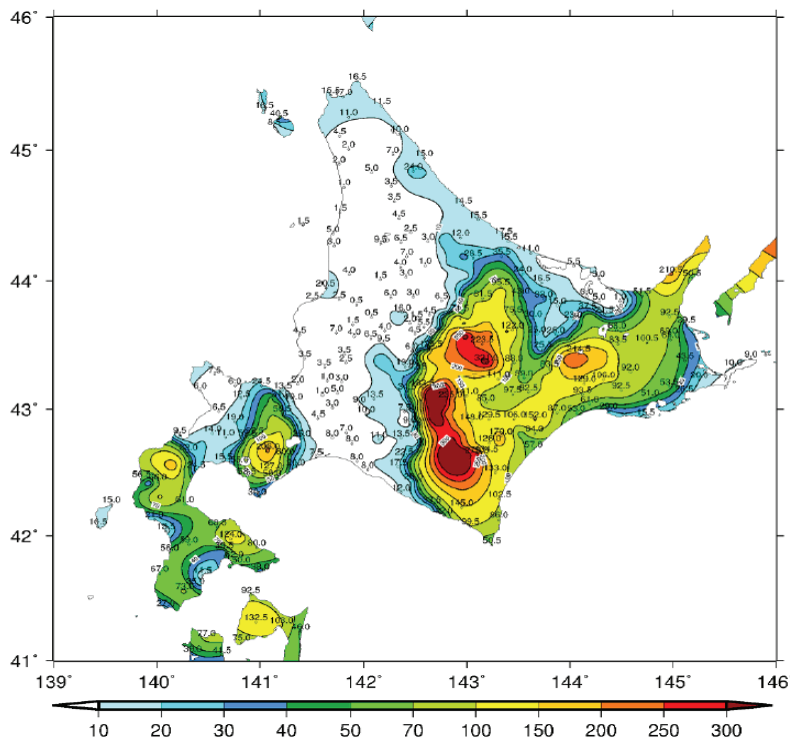


アメダス降雨
日本気象協会
配布資料より

国土交通省・北海道開発局・
河川管理課
「平成28年8月20日からの
大雨及び台風第10号による
出水の概要」2016.9.10より

11

8月29日1:00～31日9:00の総降雨量(台風10号による大雨)



日高山脈の標高の高い
地域では**500mm**
を超えるまさに記録
的な大雨となった。

雨量観測所	総雨量
狩勝(河川)	512
目勝(河川)	367
ぬかびら源泉郷(ア)	351
札内川ダム(河川)	507
戸蔭別(河川)	530
野塚(道路)	713

13

○ 石狩川水系辺別川及び常呂川水東亜川で堤防が決壊する等、17水系43河川において浸水被害が発生。

台風第10号による大雨
石狩川水系空知川(南富良野町)
・堤防決壊 2箇所
・浸水面積 約130ha 浸水家屋107戸



斜里川水系幾品川で堤防が決壊する等、7水系18河川において浸水被害が発生。

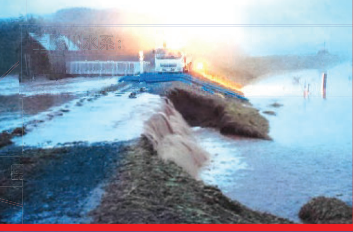
湧別川水系:2河川
【浸水面積20ha】

斜里川水系:2河川
【浸水面積66ha】

湧別川水系:1河
【浸水面積21.8ha】

奥美別川水系:1河
【浸水面積36ha】

8月20日から続く大雨
常呂川水系常呂川(北見市)
・堤防決壊 1箇所 越水4箇所
・浸水面積 約215ha



台風第9号による大雨
石狩川水系石狩川(深川市、旭川市)
・溢水
・浸水面積 約120ha 浸水家屋 6戸



台風第10号による大雨
十勝川水系札内川(帯広市)
・堤防決壊 2箇所
(浸水被害のない中札内村含む)
・浸水面積 約50ha 浸水家屋2戸他



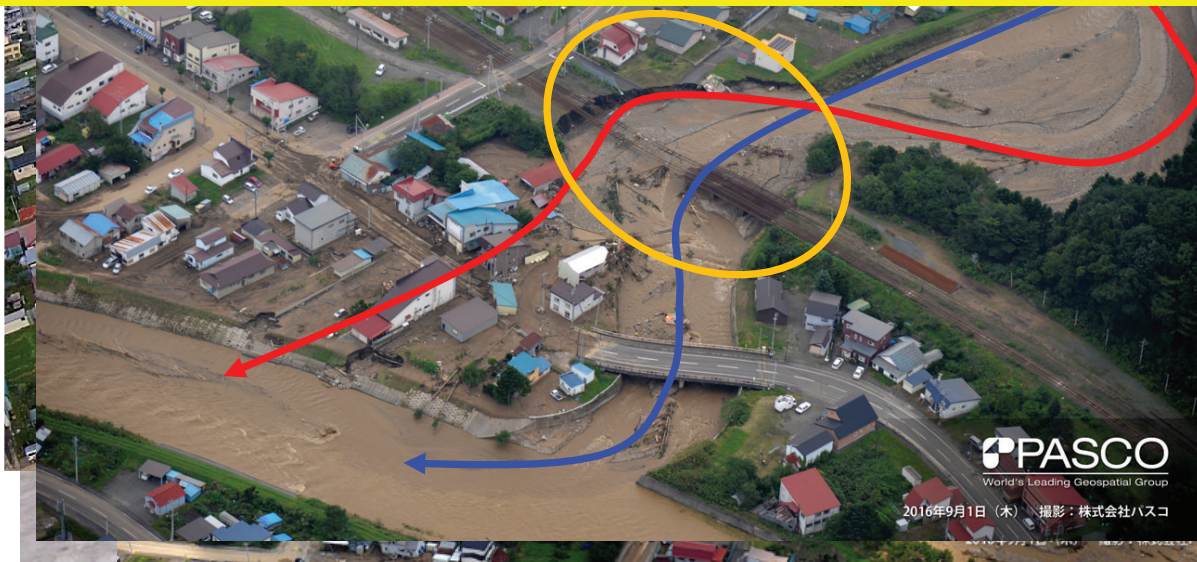
十勝川水系ペケレベツ川(帯広市)
状況H28.9.1撮影

新得川(被害状況)H28.9.1撮影

2016年8月 十勝川水系パンケ新得川



水が溢れるというよりは土砂が溢れる



PASCO
World's Leading Geospatial Group

2016年9月1日(木) 撮影:株式会社パスコ

2013年10月
伊豆大島土砂災害(台風)
24時間雨量:824mm
死者行方不明:39名



写真：毎日新聞社Websiteより

16

2014年8月
広島土砂災害(前線・台風)
1時間雨量: 12mm
死者: 74名



写真: Twitter-STH
(セイブ・サ・ヒロシマ)
@STH_20140826



写真：朝日新聞デジタル

17

2017年7月

九州北部豪雨(梅雨前線)

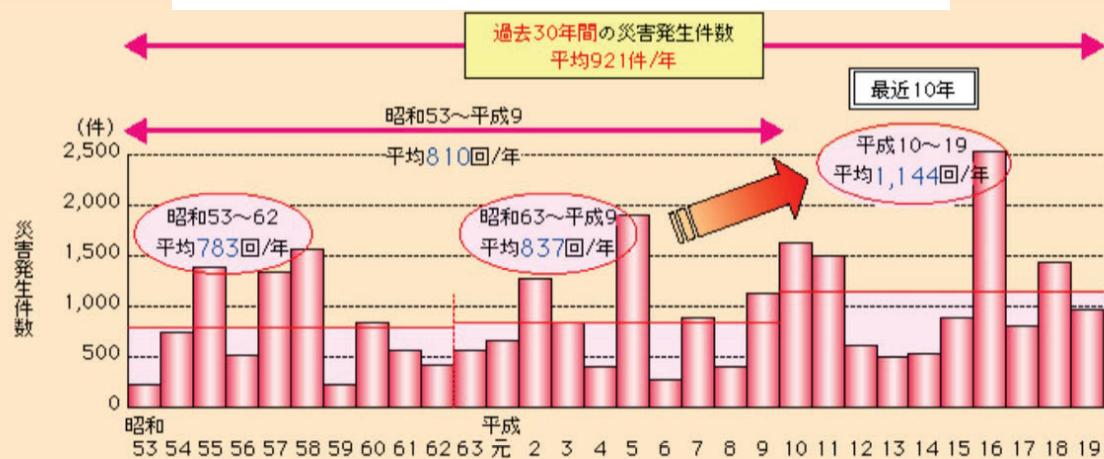
6時間雨量: 299mm(日田)

死者不明: 42名

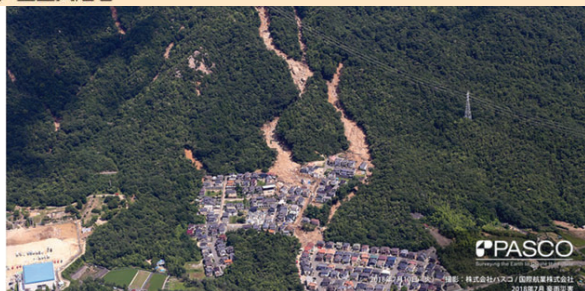
※土砂・河川氾濫複合災害



我が国の土砂災害発生件数の推移 (国土交通省)



(注) 平成4～7年の雲仙普賢岳による火砕流を除く。昭和53～57年の土石流、地すべりの件数は推計値
資料) 国土交通省



十勝川水系ペケレベツ川の被災状況



多くの十勝川支川で河岸浸食, 落橋, 道路崩落等の被災



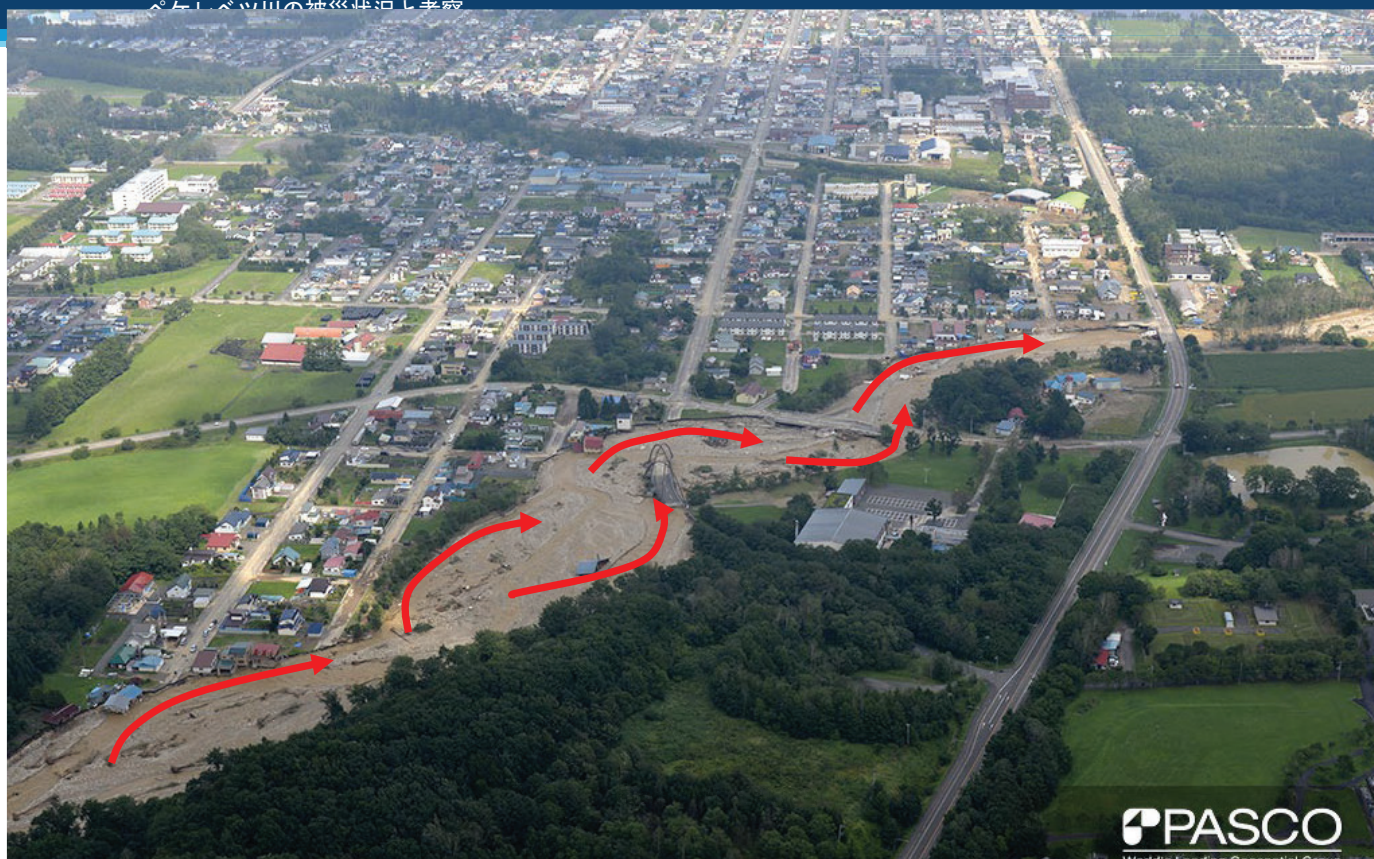
- 計画高水位超過
- 堤防決壊発生箇所



- ✓ いずれも大量の土砂が移動し, 低水路に堆積し, 流
- ✓ 大流量, 植生, 基岩露出, 還流....



- ✓ 急勾配
- ✓ 流路工区間の下流側から主に流路変動
- ✓ 上流と下流の被災区間において異なる流路変動特性





砂防学会速報より引用 (2016/9/6) →

低水路に多量の土砂の堆積



流路の直線化
河床低下と軟岩露出

芽室川→一晩にしてV字谷が形成



渋山川（十勝川水系）



30

渋山川2019年6月3日撮影



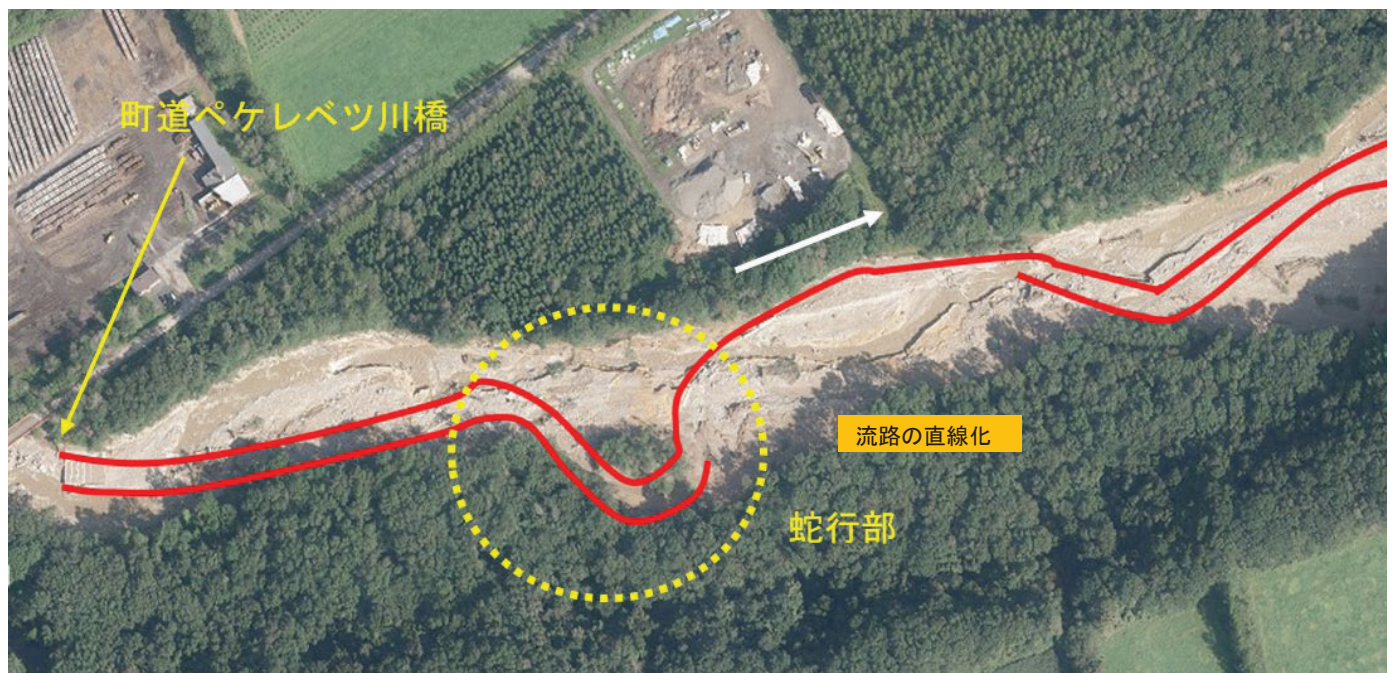
31

北海道の軟岩河川の浸食問題



ペケレベツ川の被災状況と考察

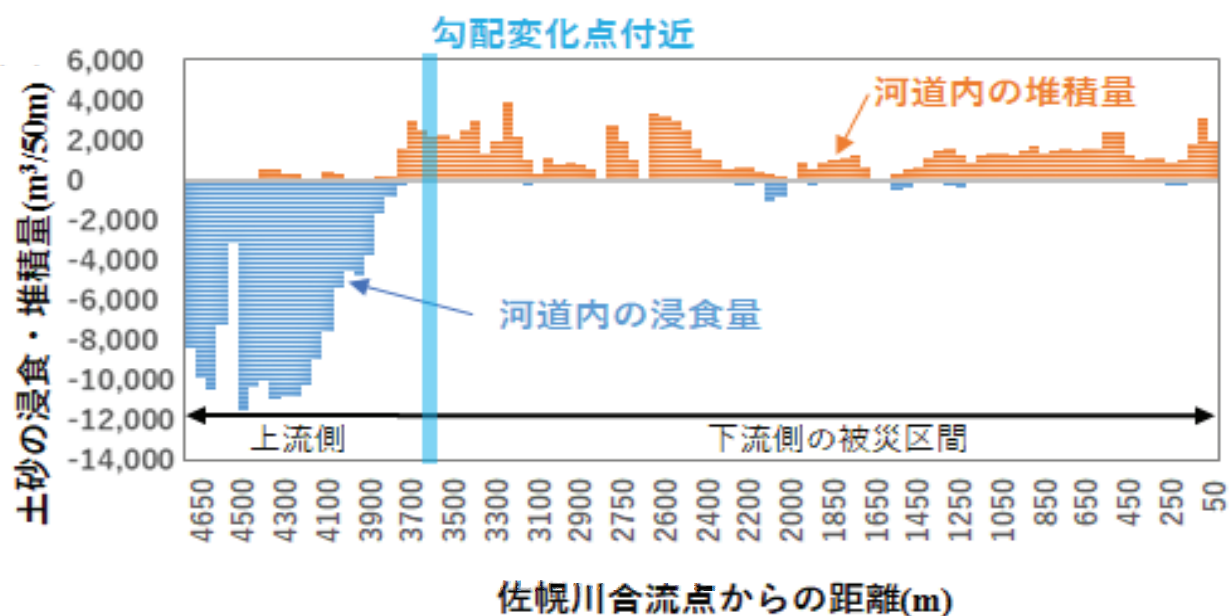
33



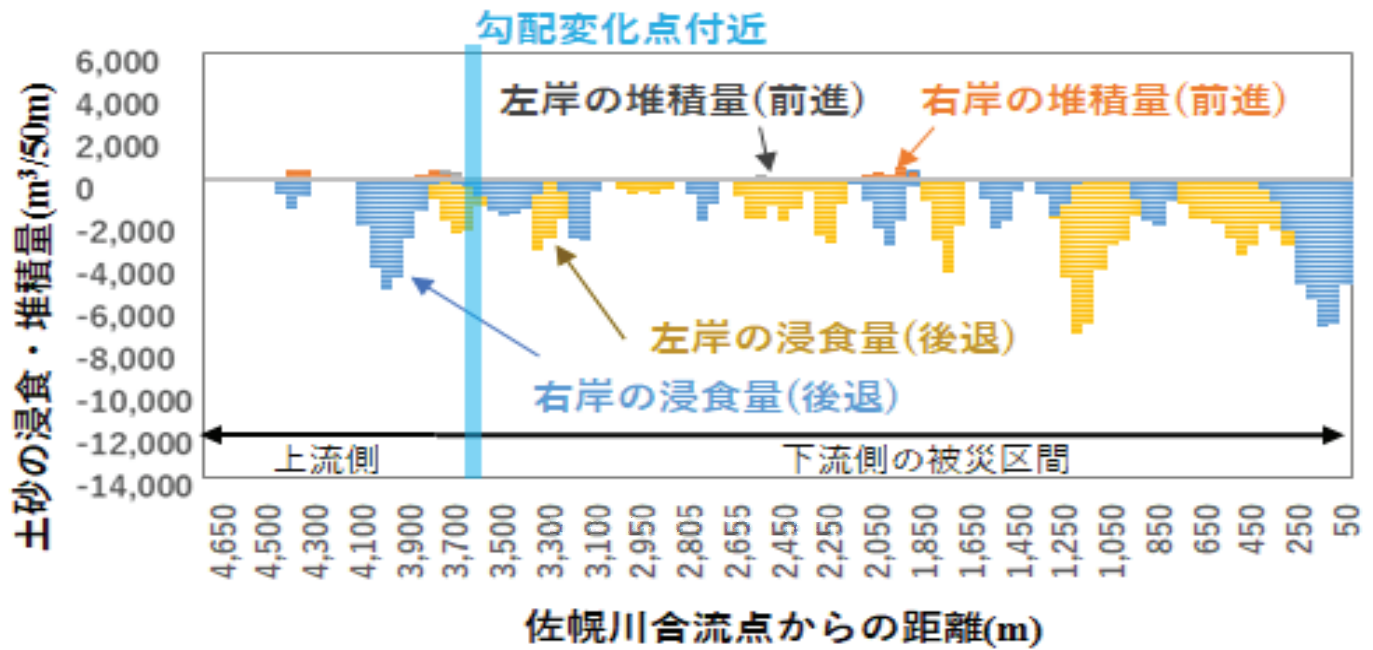
上流域（砂防区間より下流）の写真(2/3)



上流域（砂防区間より下流）の写真(3/3)



※ 1990年代の河川整備時の計画河床高と出水後の横断測量（2016年9月）の差分

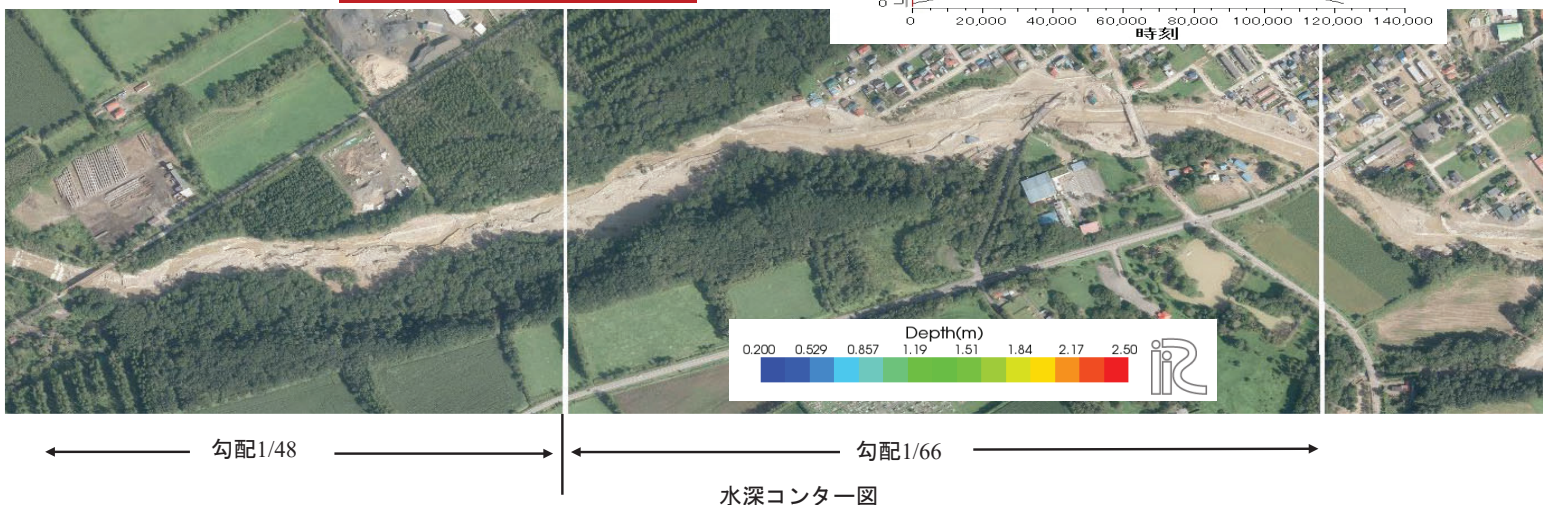
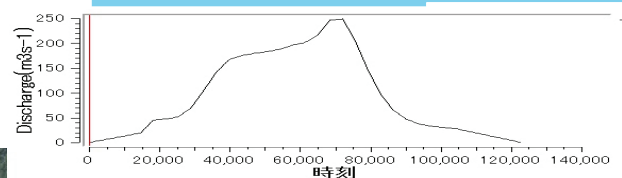


※ 1990年代の河川整備時の計画河床高と出水後の横断測量（2016年9月）の差分

iRIC Nays2DHを用いた流路変動特性の検討

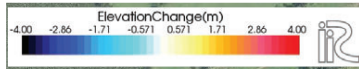
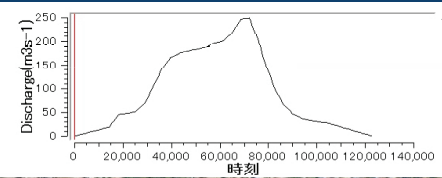
[Case1:水だけの計算]

水だけの計算だと
氾濫しない



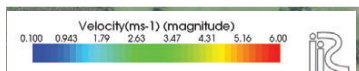
- ✓ 上流区間での氾濫：150 m^3/sec を超えたあたり。
- ✓ ただし、市街地付近に浸水被害はほぼなく、流れの計算のみでは被害規模を評価できない

[Case2:再現計算（河床変動，埋没基岩を考慮）]



河床変動量コンター図

同じ流量でも土砂移動を考慮して初めて氾濫被害を説明できる



流速コンター図

(a) $Q \approx 100 \text{ m}^3/\text{sec}$

増水期

(b) $Q \approx 180 \text{ m}^3/\text{sec}$

増水期



流路は切り替わり直進

(c) $Q \approx 200 \text{ m}^3/\text{sec}$

増水期

流路の蛇行化が顕著に、
低水路への土砂堆積(d) $Q \approx 250 \text{ m}^3/\text{sec}$
(ピーク時)

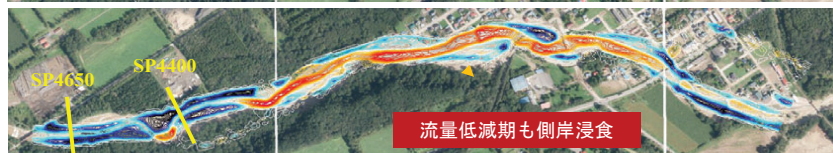
ピーク



流路の蛇行化と側岸浸食

(e) $Q \approx 50 \text{ m}^3/\text{sec}$
(出水後半)

減水期



流量低減期も側岸浸食



まとめ

- 地球温暖化の影響を考慮して計画降雨量，計画流量をアップさせ治水安全度の強化を目指す．→大河川・低平地はそれでOK
- ただし，扇状地河川，山間地河川では流量（水だけ）では実際の被害に繋がる土砂・洪水氾濫を予測・評価出来ていない可能性があり，実際に多発する土砂災害に対応できない．
- 気候変動脆弱地域，複合地盤災害を考える場合重要な観点のひとつ．

融雪期に発生した雪崩・土石流現象とその評価

室蘭工業大学大学院・工学研究科

川村 志麻

skawamur@mmm.muroran-it.ac.jp

災害の概要

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。**

気候変動の影響の顕在化？



融雪期の雪崩と土石流の土砂災害が同時に発生する可能性もあり、被害の拡大が懸念される。

過去の気象データ^{1),2)}から言えること

1. 降水量について

日降水量は、100mm以上の日数が増加する一方で、1mm以下の日数が減少し、大雨の頻度が増える半面、弱い降水も含めた降水日数は減少する特徴を有している。

2. 気温（地盤凍結）について

地球規模での温暖化が多くの資料で指摘されているが、北海道でも長期データが確保できる7地点の平均で100年あたり年平均気温が1.59℃上昇したことが報告されている。

3. 積雪について

最大積雪深の年変化は、やや減少傾向がみられる地点はあるものの、総じて微減または横ばいである。

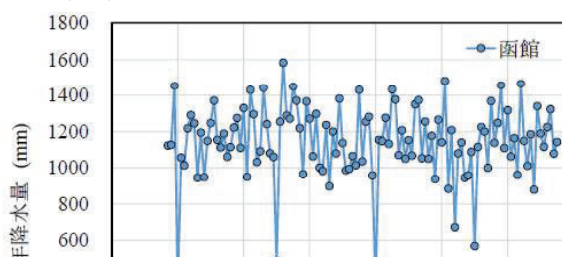
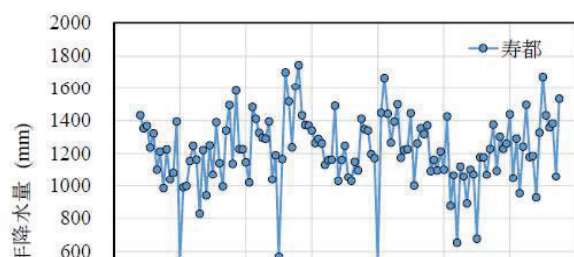
1) 札幌管区気象台：北海道の気候変化【第2版】，pp.9-11，2017.
2) 気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム

3

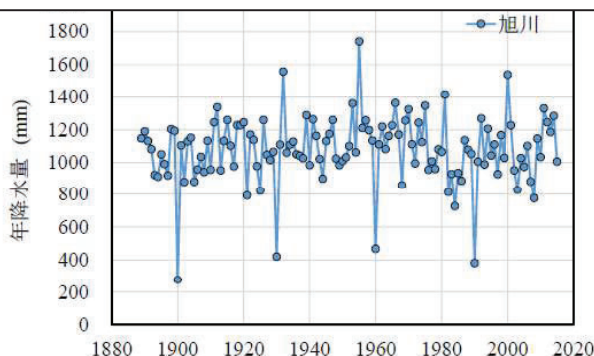
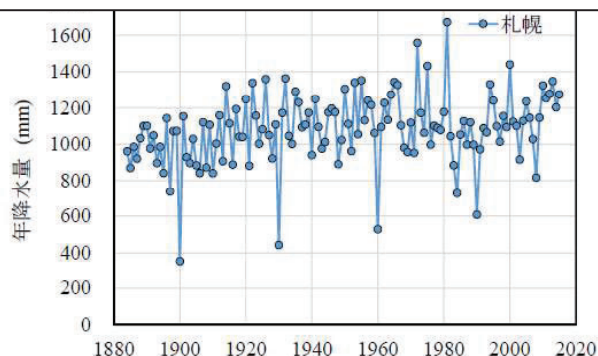
100年規模での降水量の変動

代表4地点の年降水量の平均値を順位で並べたもの

気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム資料より



札幌を除くと、年降水量の長期的な変動は少ない。札幌のみ増加傾向を示しているが、この理由は明らかにはされていない¹⁾。

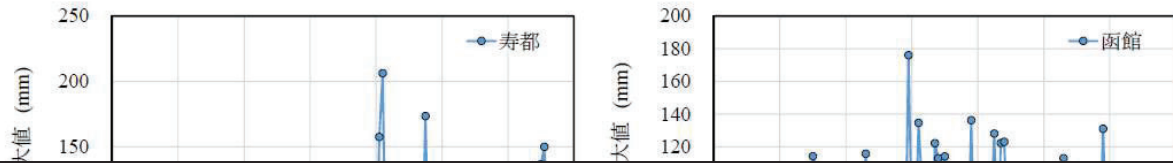


4

100年規模での降水量の変動

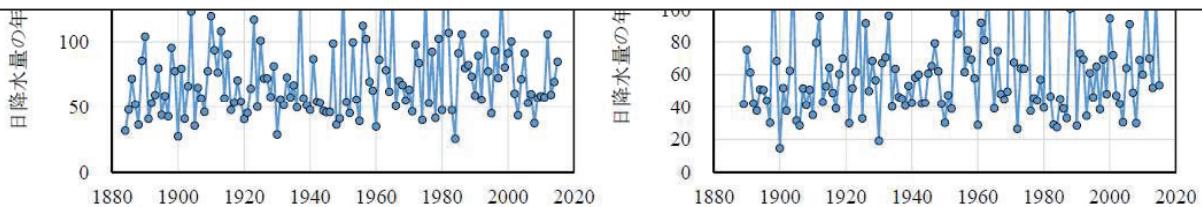
代表4地点の年最大日降水量を順位で並べたもの

気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム資料より



日降水量の年最大値の変化では、明らかな傾向を見ることは難しいが、日降水量が70mmを超える日数が年々増加傾向にあるとされている¹⁾。

全国規模で時間雨量50mm以上の発生回数が明瞭に増加しているとされ、北海道においても時間雨量30mm以上の発生回数で増加傾向が確認されている¹⁾。

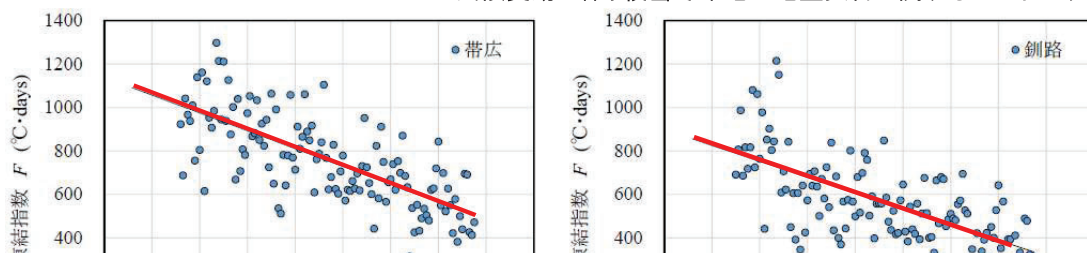


5

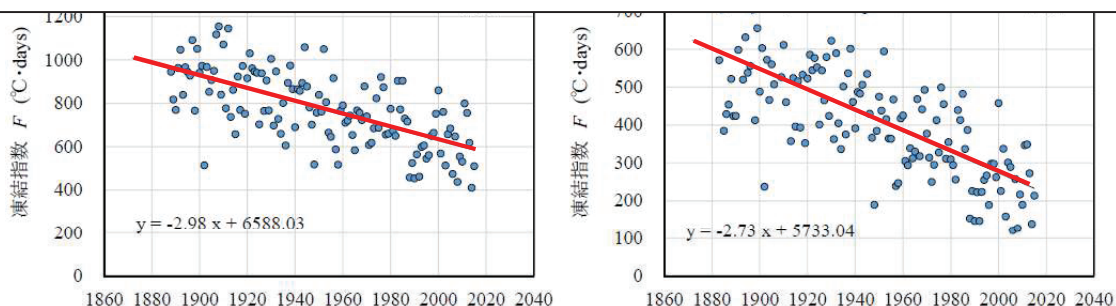
100年規模での気温・凍結指数の変動

代表4地点の凍結指数の減少率を順位で並べたもの

気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム資料より



全地点ともに凍結指数が減少している。最も温暖化しているのは帯広であり、 $4.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}/\text{年}$ で凍結指数が減少している。

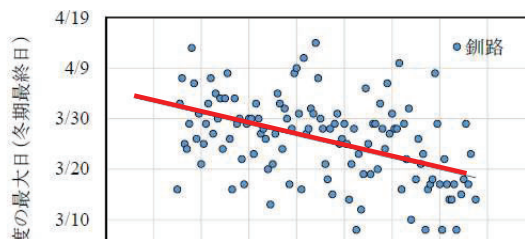
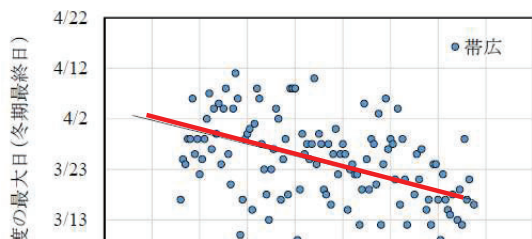


6

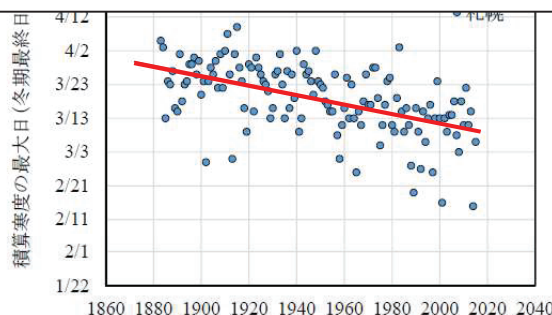
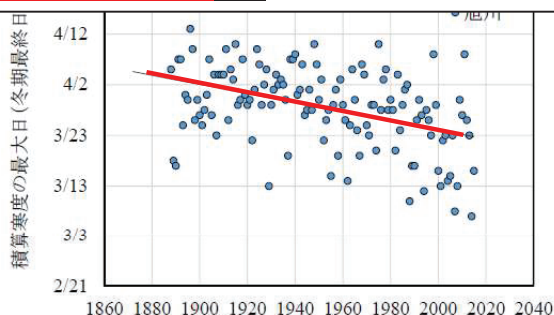
100年規模での気温・凍結指数の変動

代表4地点の冬期最終日の年変化

気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム資料より



積算寒度が最大となる日すなわち日平均気温がプラスに転じる冬期最終日は早まっている（冬期の終わりが早まっている）。

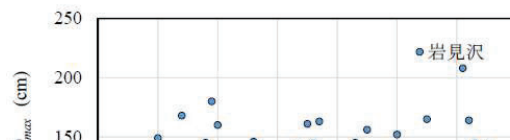
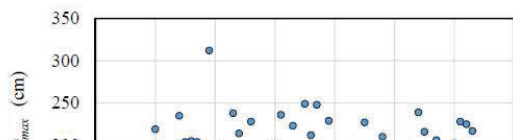


7

100年規模での積雪深の変化

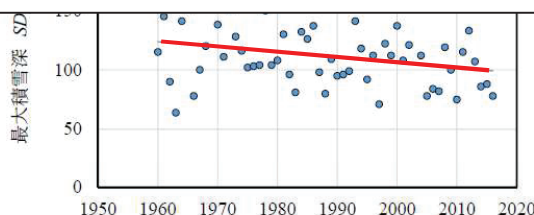
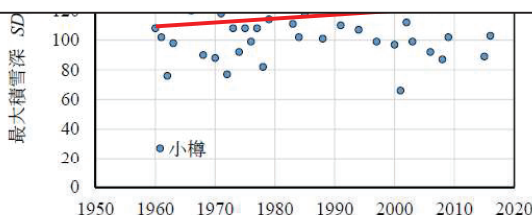
代表4地点の平均積雪深の年変化

気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム資料より



最大積雪深の年変化は、やや減少傾向がみられる地点はあるものの、総じて微減または横ばいである。

冬期の最終日が年々早まっていることを勘案すると、積雪量に変化が少なく冬期間が短縮されることから、時間当たりの融雪量が増大する傾向にあると考えられる。



8

北海道における土砂災害の特徴として

融雪期に発生する土砂災害が多いことが特徴である。

例えば、2012年4月の国道239号の地すべり（霧立峠）や2012年5月と2013年4月に発生した国道230号（中山峠）での盛土崩壊は、融雪と降雨が複合的に影響したタイプの寒冷地型災害であったと言われている。

9

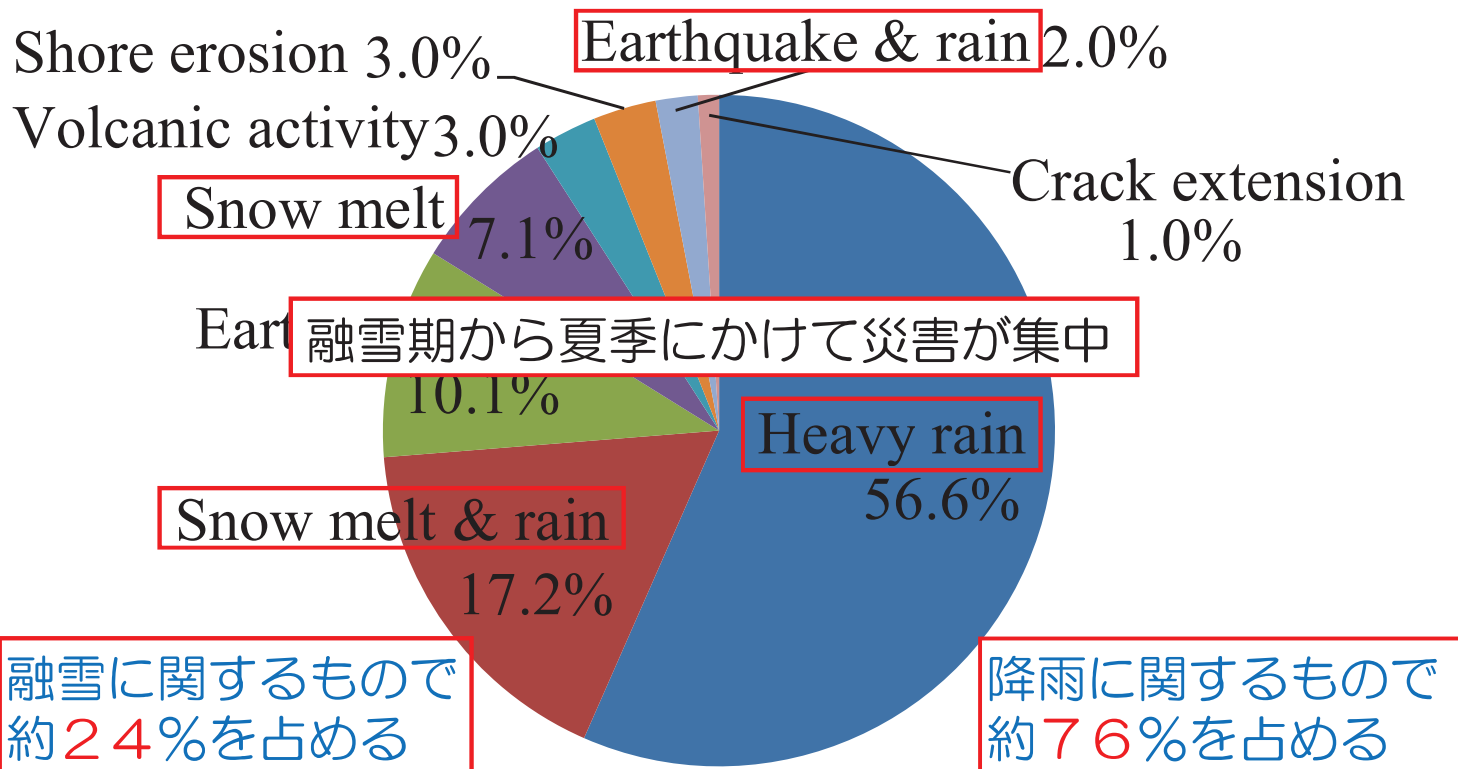
過去の斜面災害¹⁾について調査²⁾（北海道）

- 過去およそ100年
- 斜面崩壊，岩盤崩落，土石流，地すべり
- 広範囲にわたらないもの
- 全131件

1) 「北海道の地すべり '99」、「北海道の地すべり2012」

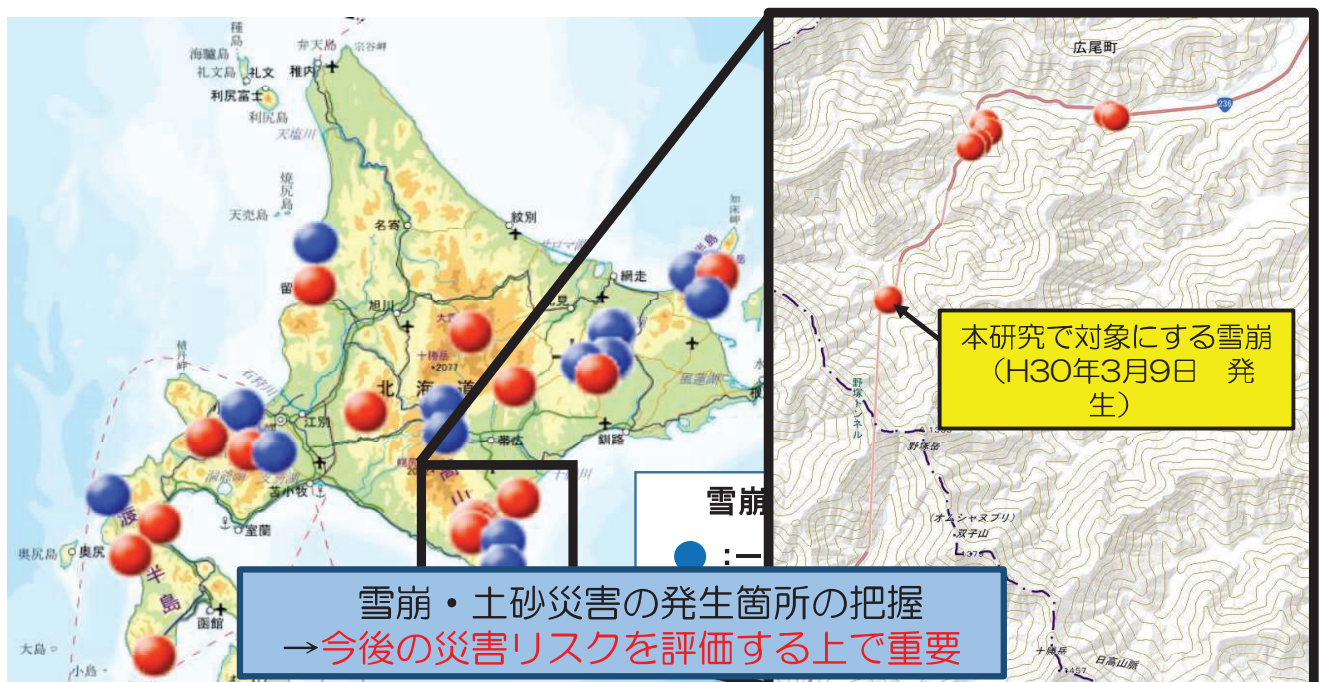
2) 藤原拓也 北海道で発生した降雨による斜面災害の地盤工学的特徴
平成26年度 室蘭工業大学卒業論文 より

発生誘因の割合



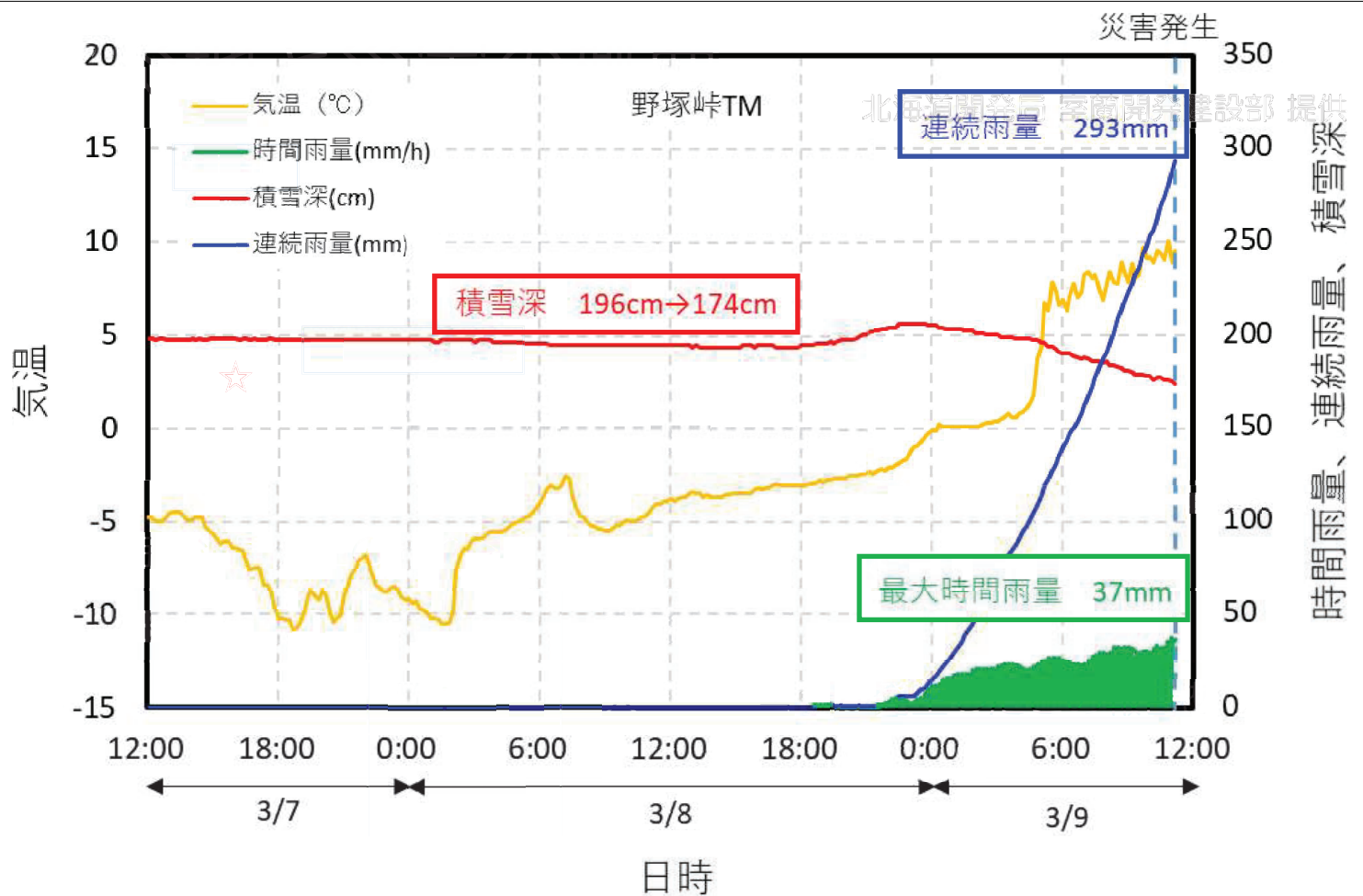
13

北海道における過去の雪崩災害の履歴



平成25年から令和2年に発生した雪崩災害箇所（国土地理院地図に加筆）

16



・被災直前の3月9日11:10まで
連続雨量293mm, 最大時間雨量37mm, 積雪深22cm減少

大雨・融雪
が原因か？

現地の雪崩・土石流の堆積

当時の積雪状況

気温の上昇による融雪・大雨

積雪が湿雪に変化

湿雪内の雪粒同士の結合が弱いザラメ雪によって全層雪崩が発生

※湿雪…水を多く含んだ雪。 全層雪崩…気温の上昇や雨により発生する雪崩。
ザラメ雪…粒径1～3mmの氷、融解・凍結を繰り返してできた粗い雪。

iRIC Morpho2DHとは

<支配方程式>iRIC Morpho2DHソルバーマニュアルより

・水及び土砂の混合物の質量保存則

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = \frac{E}{c_*}$$

・運動量保存則

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial hu v}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m}$$

・静水圧近似

$$\rho_m = (\sigma - \rho) \bar{c} + \rho$$

t: 時間
h: 土石流・泥流の流動深
u・v: 速度成分
c: 静止堆積層の砂礫の堆積濃度
E: 河床の浸食速度
g: 重力
P: 圧力
ρ: 水の密度
σ: 土砂の密度
c: 水及び土砂の混合物中の鉛直平均土砂濃度

これらの式より、**掃流力 τ** ・**抵抗係数 f** ・**河床位 z** が求められる。

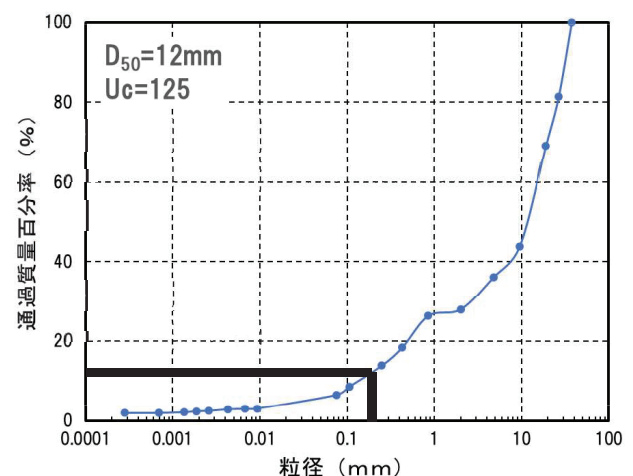
20

解析方法

各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	39
夜体として振る舞う土砂の割合	0.1	0

野塚峠土試料の粒径加積曲線



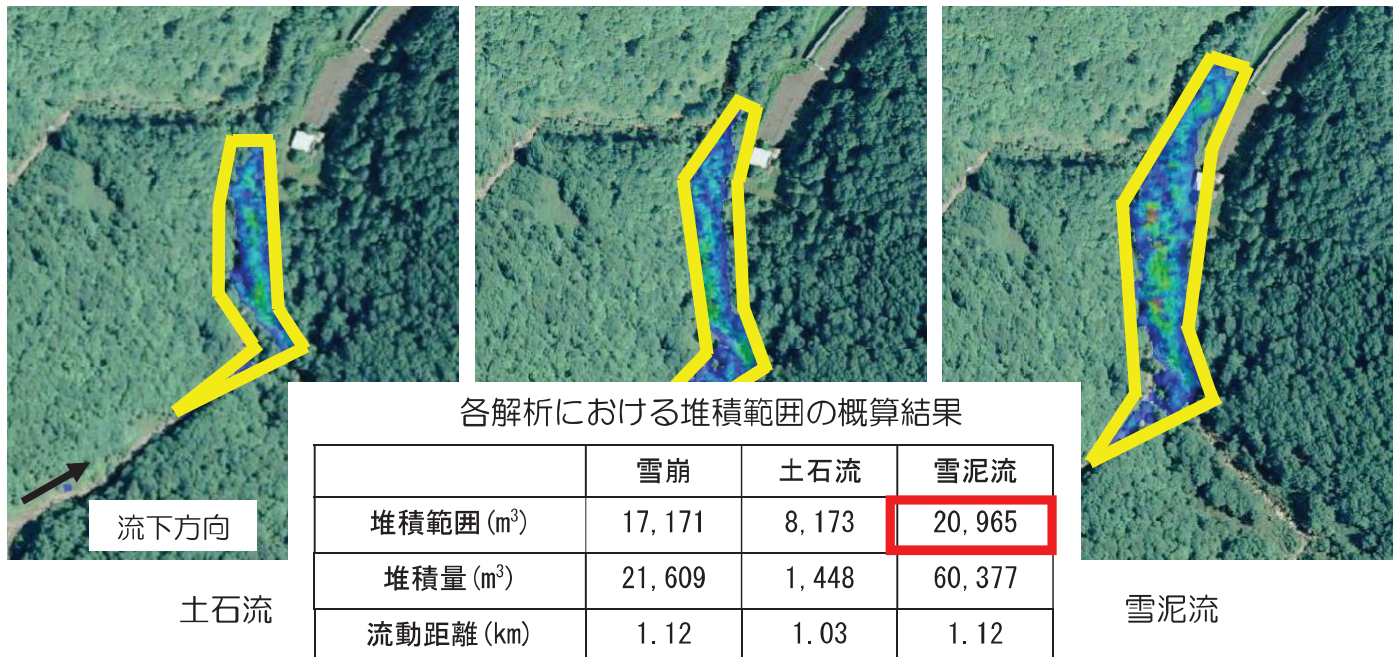
・野塚峠土試料→粒度試験の結果より算定

・ザラメ雪→ザラメ雪の平均粒径が2mmなので0とする

川村志麻、山田真嘉
「融雪期に発生した雪崩 - 土砂流動現象とその工学的評価」、第55回地盤工学研究発表会(2020)を参考

各解析における流動特性の比較

◎堆積範囲の比較

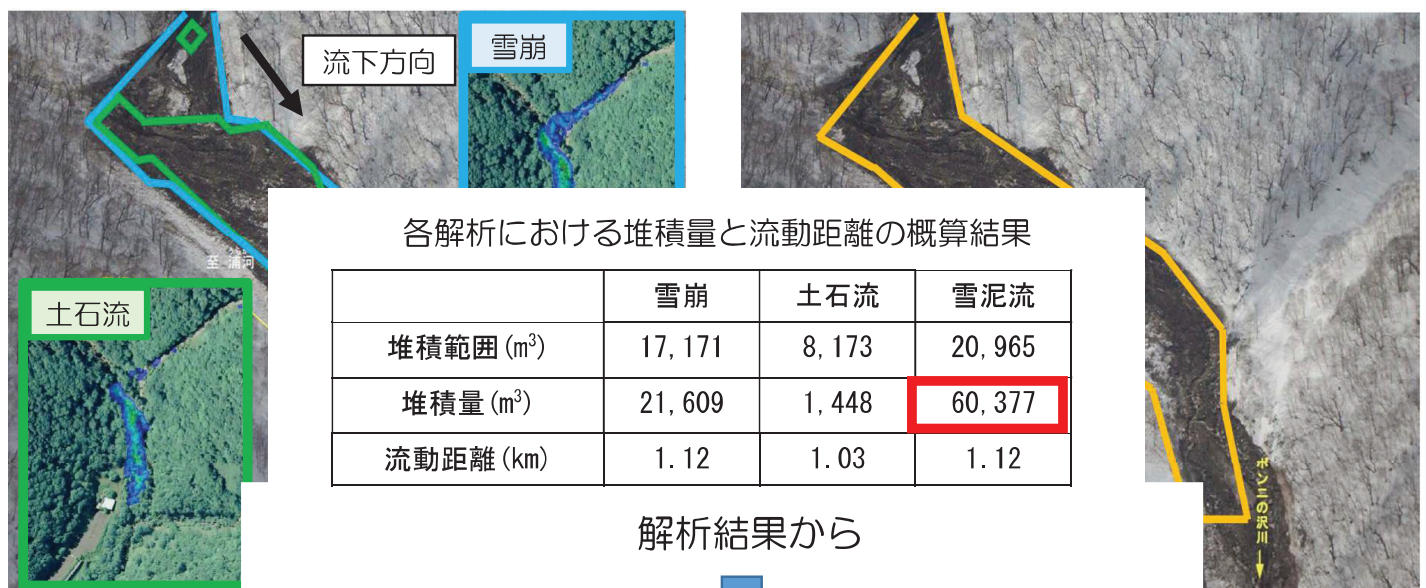


雪泥流が最も堆積範囲が大きい

29

実際の堆積状況との比較

◎堆積量と流動距離の比較



解析結果から

雪泥流に類似の現象が発生、
被害範囲が拡大したと考えられる

30

まとめ

(1)過去の気象データに基づいて、その特徴を把握した。また、北海道では融雪期から夏季にかけて土砂災害が発生する可能性が高い。

(2)雪崩災害に関しては、3月～4月にかけて発生頻度が高くなっている。

(3)融雪期に発生する雪崩・土砂流動は、堆積範囲が広く、長距離流動（被害規模が増大）する可能性がある。

31

謝辞：取りまとめを行う上で、北海道開発局
室蘭開発建設部、北海道道路管理技術センター
から情報提供頂いた。記して、感謝の意を表します。

ご清聴ありがとうございました。

32



釧路川堤防での法面崩壊メカニズムと 気候変動を考慮した設計降雨量の考え方

本取り組みは、
国土交通省北海道開発局釧路開発建設部
(株) ドーコンと協力して進めてきました。

北見工業大学 地域と歩む防災研究センター
川尻峻三(センター長・准教授)

北見工業大学
地域と歩む防災研究センター

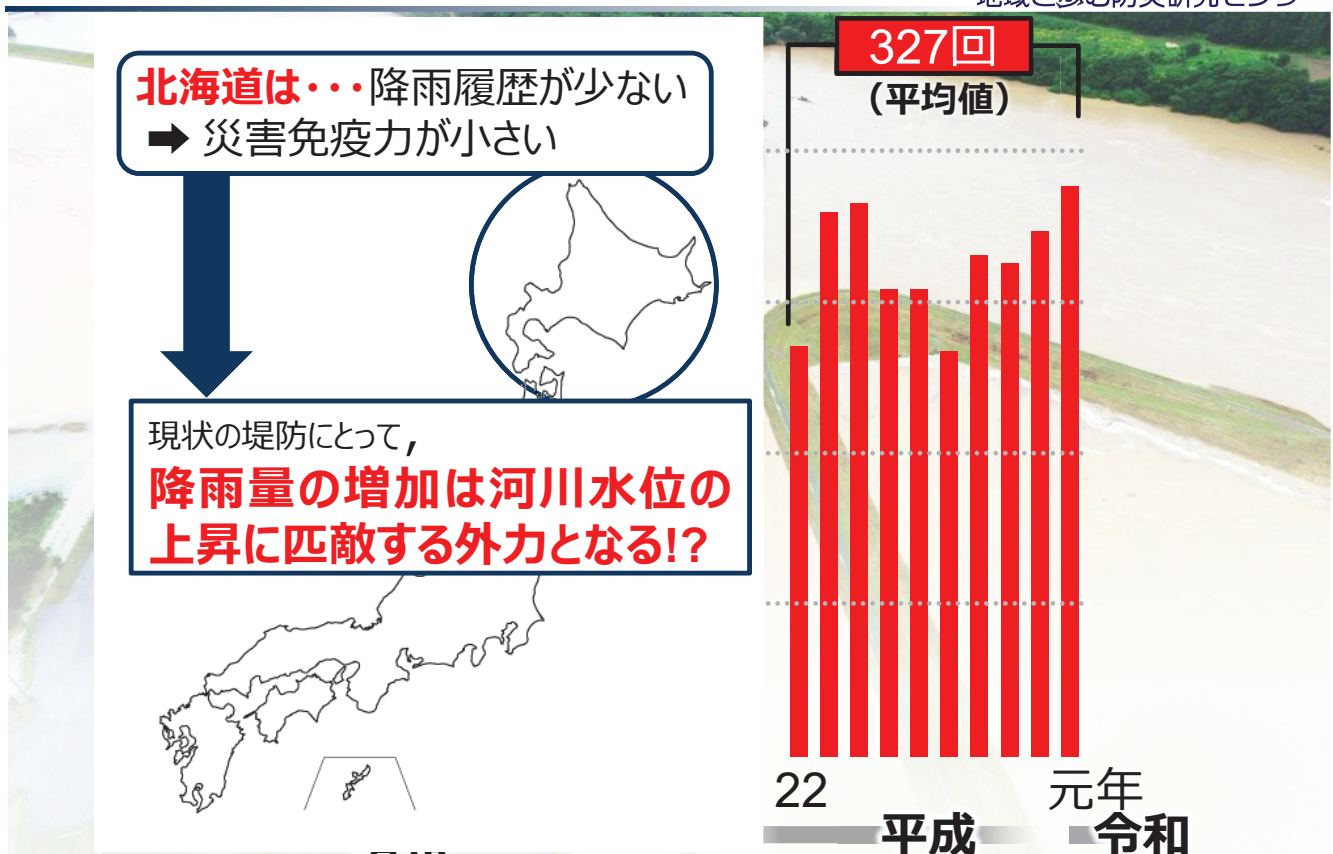


1

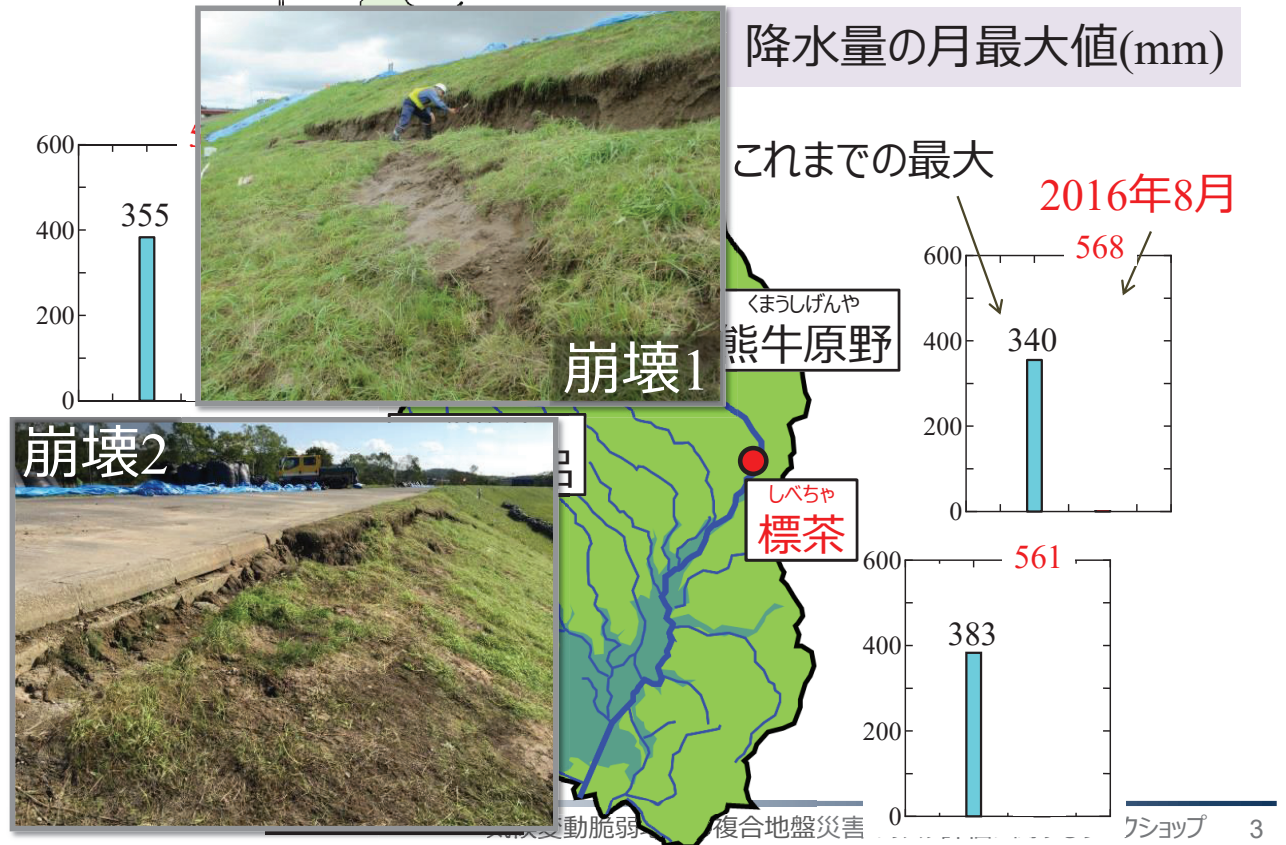
時間雨量50mm以上の年間発生回数

(気象庁AMeDASデータから作成)

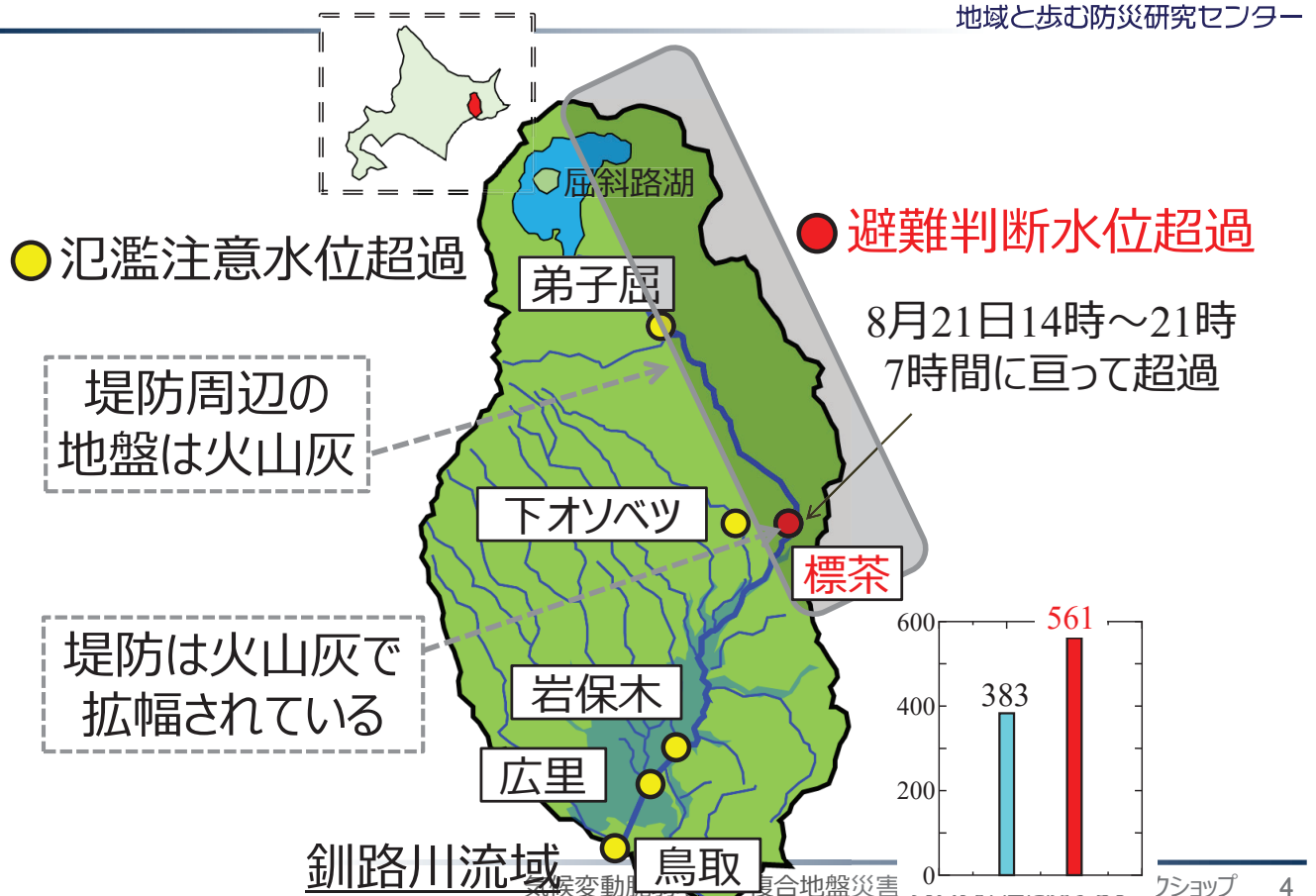
北見工業大学
地域と歩む防災研究センター



2016年北海道豪雨での釧路川堤防の被災



2016年北海道豪雨での釧路川堤防の被災



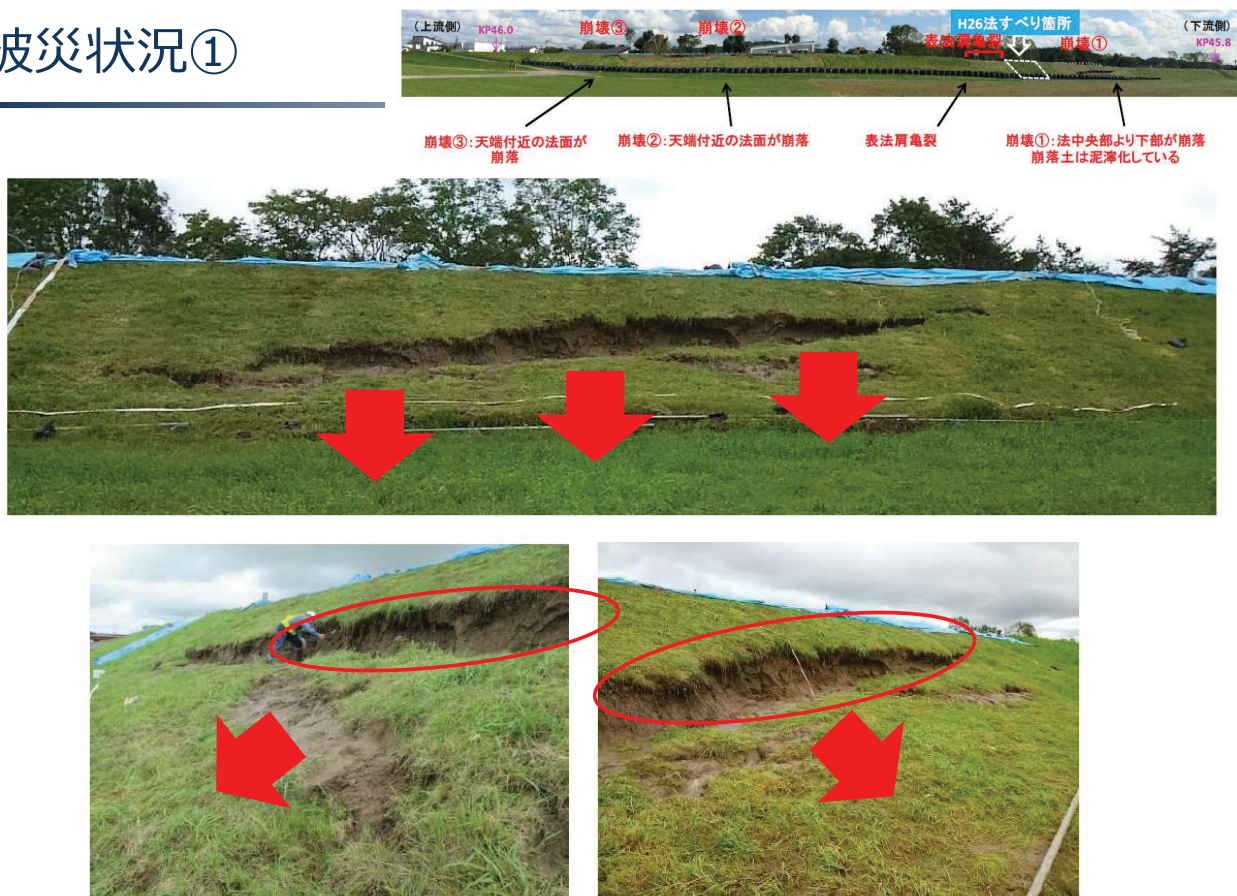
標茶町市街地 開運橋(左岸KP46.2)～富士樋門(KP45.7)



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

5

被災状況①



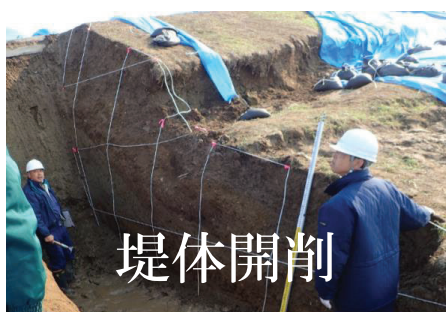
気候変動脆弱地域の複合地盤災害のリスク評価に関するワークショップ

6

被災状況②



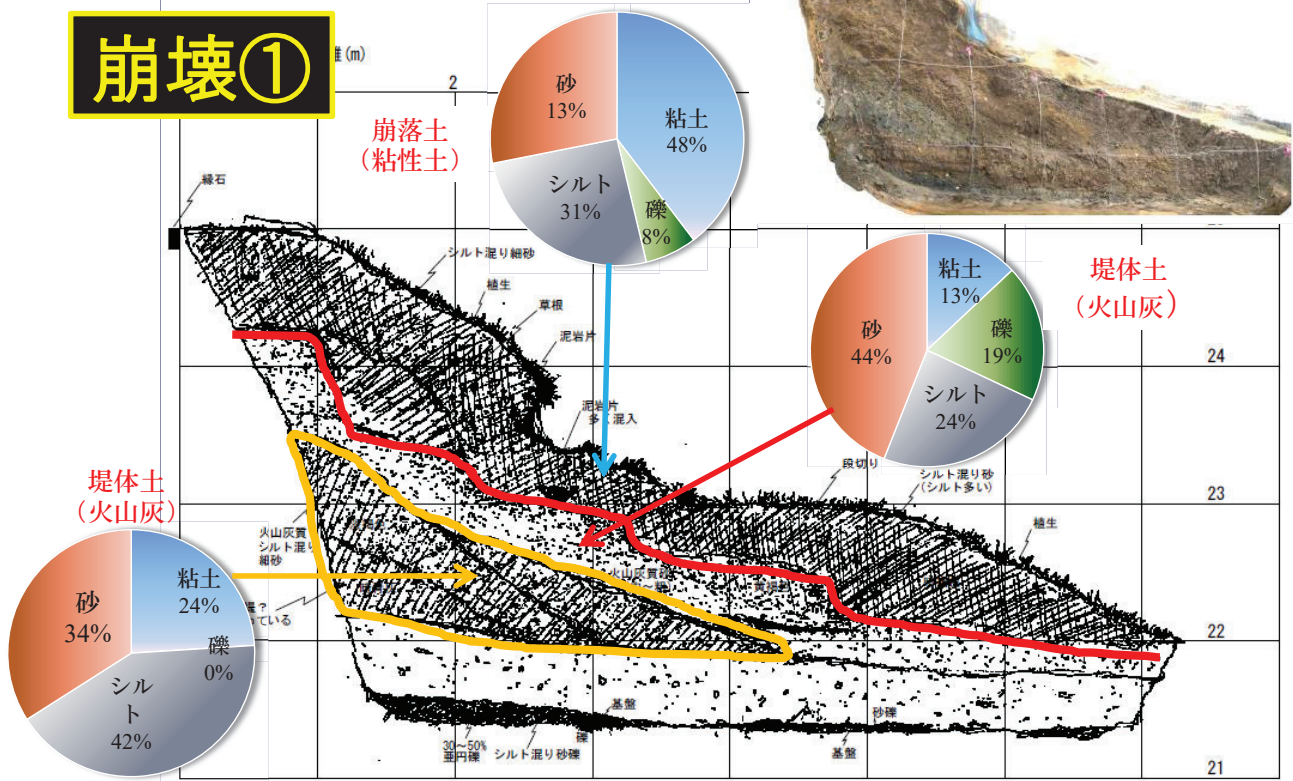
地盤調査の概要



開削の結果



崩壊①

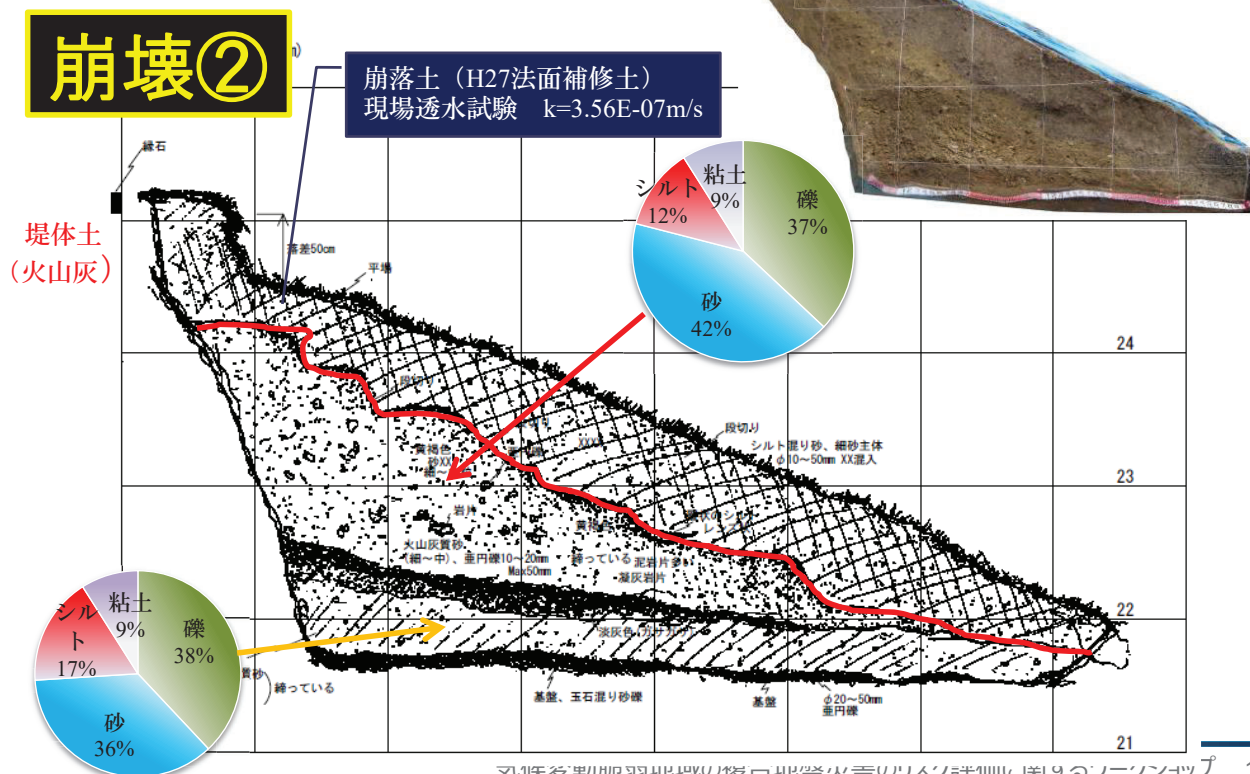


9

開削の結果



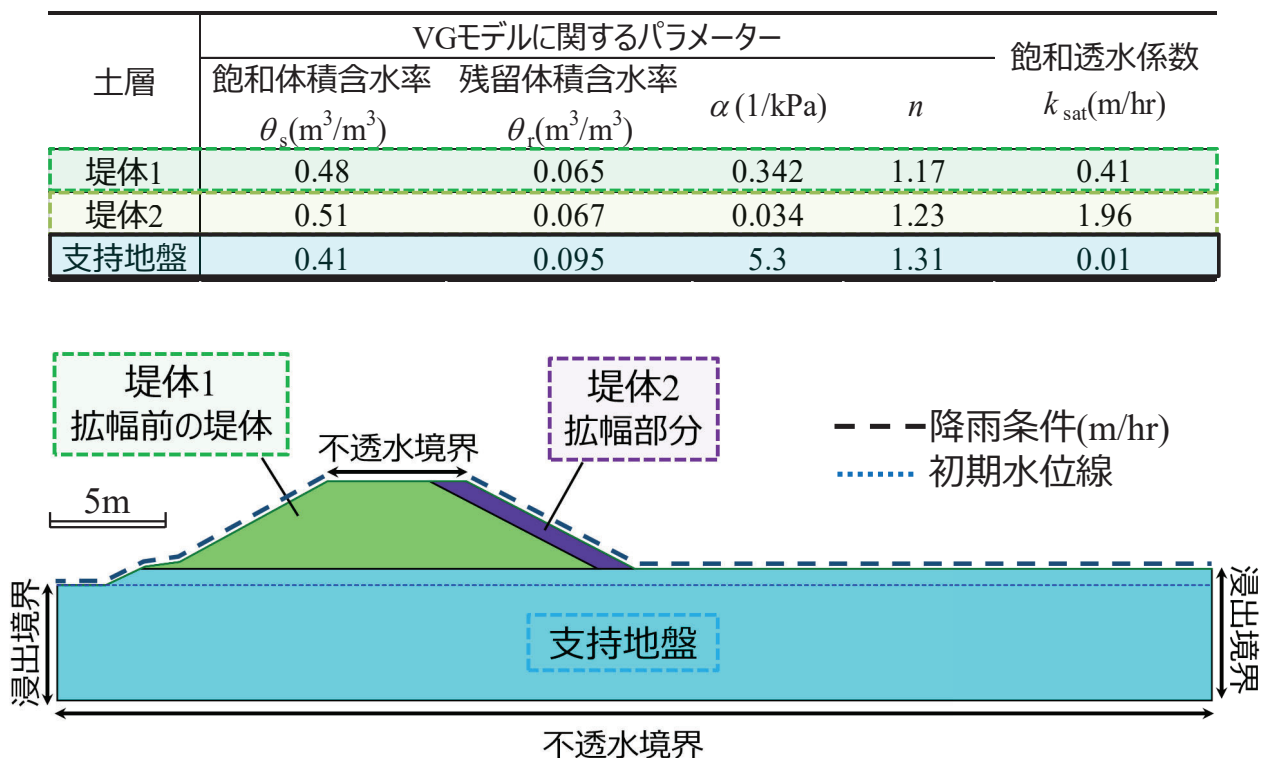
崩壊②



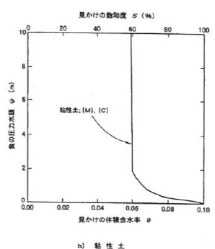
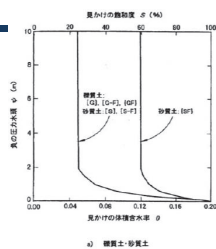
原位置透水試験



浸透に関する解析モデル

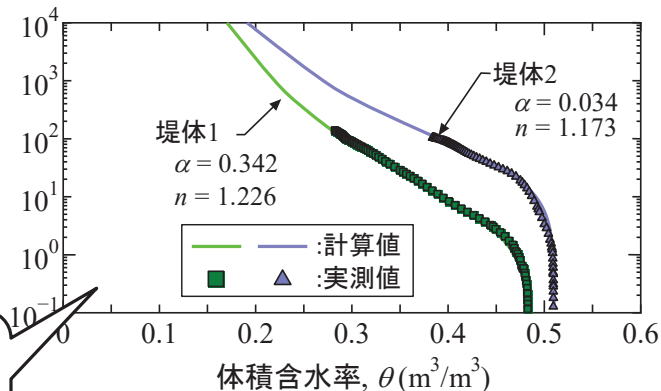


浸透に関する解析モデル



より
精緻に！

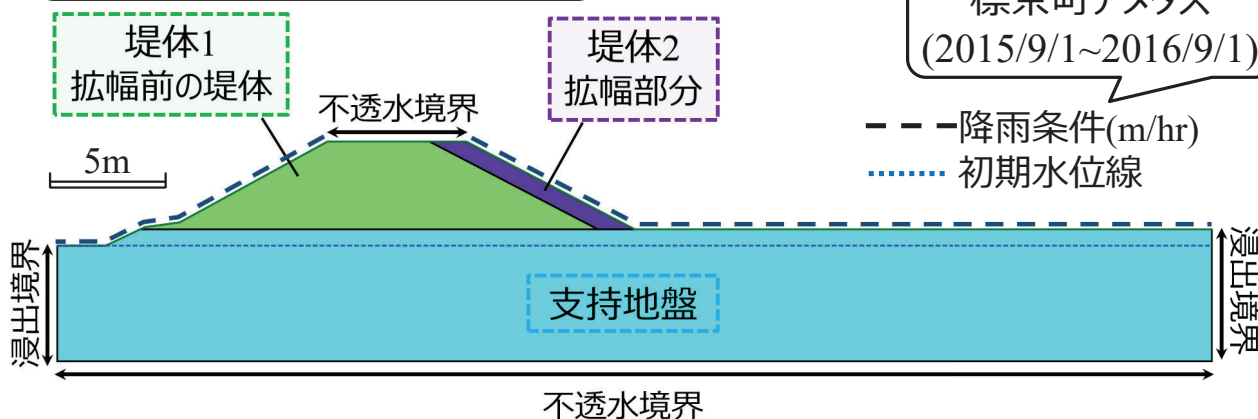
サクション, s (kPa)



保水性試験（連続加圧方式）
結果にVGモデルを適用
→水分特性曲線として利用

標茶町アメダス
(2015/9/1~2016/9/1)

--- 降雨条件(m/hr)
..... 初期水位線



浸透に関する解析モデル

細粒分^少

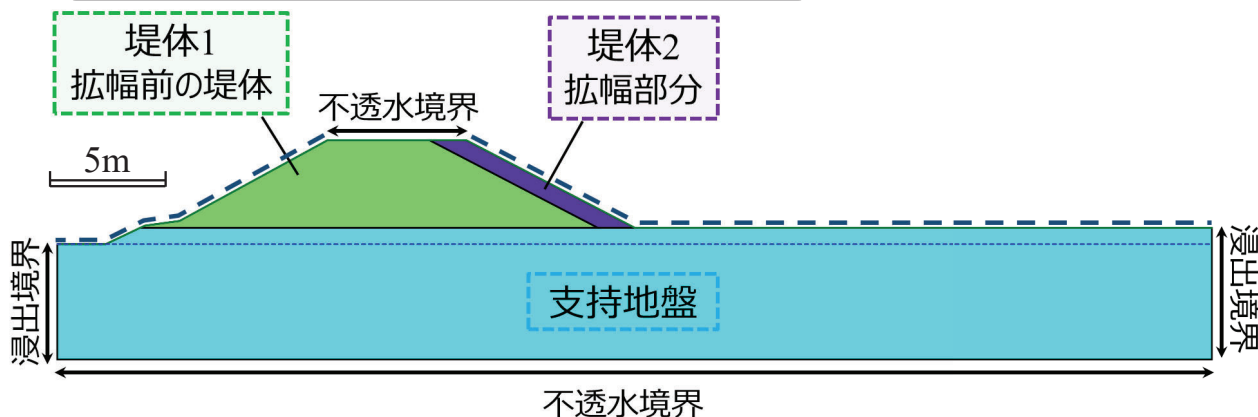
→過剰間隙水圧による影響は少ない

サンプリング試

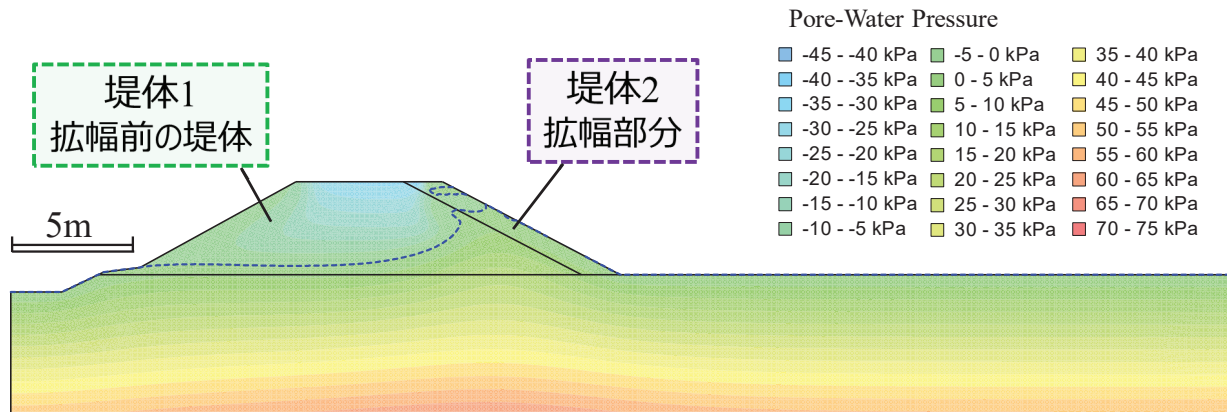
土層	c_{cu}	ϕ_{cu}	c'	ϕ
堤体1	0.0	20.5	0.0	36.9
堤体2 (崩壊箇所)	0.0	20.4	0.8	38.0
			8.3	37.0

細粒分^多

→せん断中の過剰間隙水圧上昇を考慮

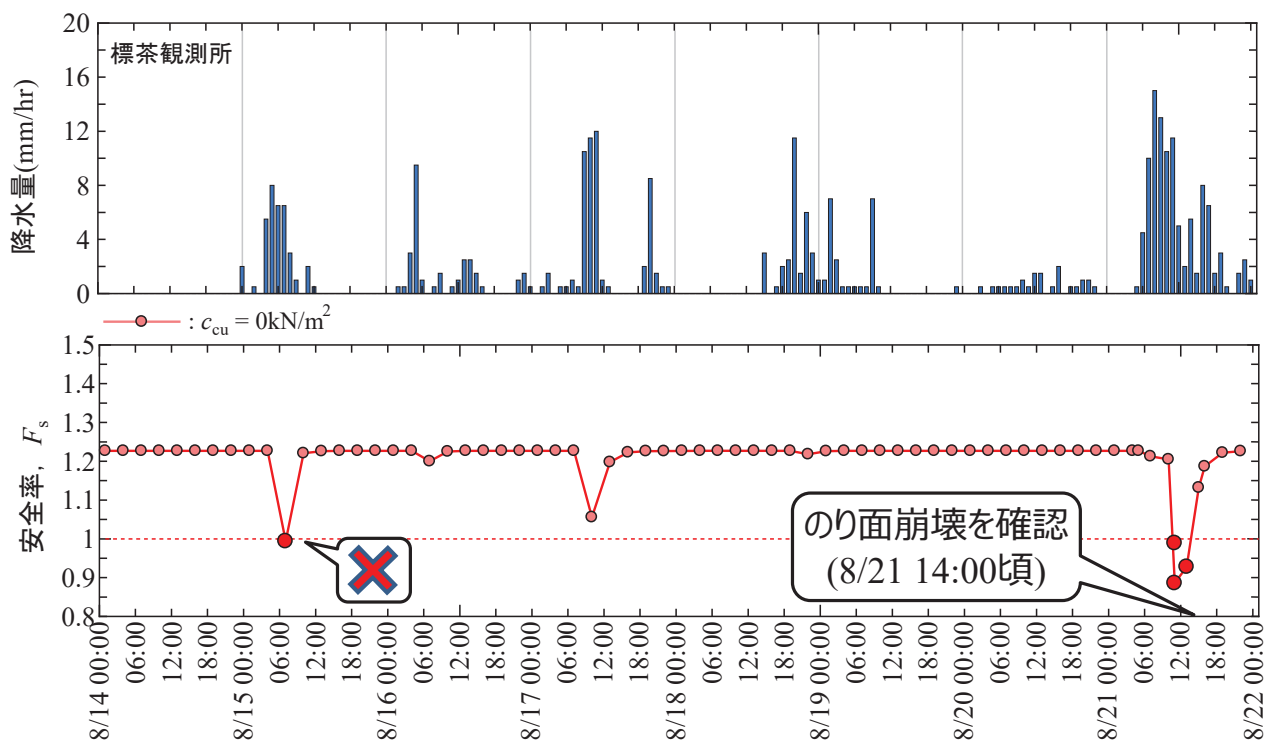


最も F_s が低下した時間(2016年8月21日10:00) における間隙水圧分布・水位線

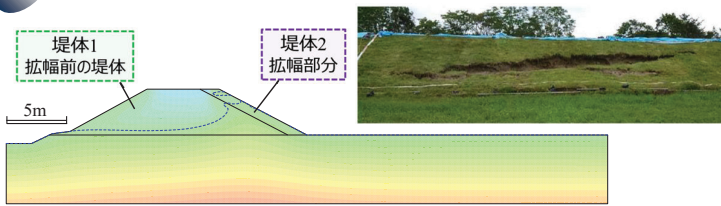


- 👍 堤体1では水位の上昇は見られない
- 👍 堤体2の大部分で水位が発生

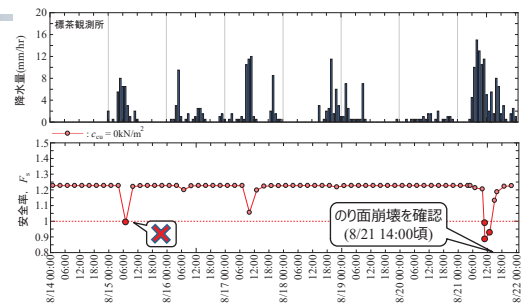
解析結果：法面の安全率



被災した実堤防の再現計算



→ 堤体土質に応じた室内実験と、
その結果を反映した解析では実現象をそこそこ再現できる



被災した実堤防を再現した試験堤防による被災の再現実験と適切な法面勾配の検討

実大試験堤防への散水実験(2018)



- 試験堤防で法面変状が発生した際 (湛水開始) の安全率は0.9程度

2割堤 (試験堤防)

降雨浸透に伴う法面崩壊を概ね再現

3割堤

- 3割堤, 4割堤では安全率を満足

4割堤

裏法面の飽和領域が増加・・・

- 実大試験堤防に対して実績降雨を与えると法面崩壊
→ 崩壊メカニズムはほぼ解明できた
- 数値解析では3割堤で十分安定性を確保できる
→ 気候変動の影響を受けた降雨ではどうなる・・・

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 17

現行設計の降雨量設定は気候変動に対応している?????

現行設計法に対する検討項目

- ①計画降雨量 (総降雨量) を用いる
→ 気候変動による雨量増加を見込む必要がある
- ②降雨強度は10mm/hr程度
→ 時間雨量が増加傾向にあり, 考慮する必要がある
- ③長方形の降雨波形を設定
→ 降雨波形によって浸潤面の上昇過程が異なる

3) 洪水外力の設定 河川堤防の構造検討の手引き, JICE

(1) 降雨量とその波形の設定

堤防への降雨の浸透は、河川水位と同様に堤体内の浸潤面を上昇させる要因となる。実際には河川水位の上昇がなくとも、降雨浸透のみで堤防ののり面が崩壊した事例もあり、また堤防の浸透実験や現地の堤体内水位観測においても降雨による浸潤面の上昇が観測されている。

降雨量は河川水位 (外水位) 波形とともに非常浸透流計算の入力条件として必要なもので、設定にあたっては次のような手順で設定する。

- ①原則として当該河川の計画降雨量 (総降雨量) を用いる
- ②降雨強度は10 mm/hr 程度を目安とする
- ③①で設定した総降雨量と②で設定した降雨強度をもとに長方形の降雨波形を設定する

ここで長方形の降雨波形を設定したのは、図 4.3.9a) の試算の結果に示すように、総降雨量が同じであれば、降雨波形の形状によらず降雨による堤体内の浸潤面の上昇量がほぼ同一となるためである。また、降雨強度の目安を10 mm/hr 程度としたのは、図 4.3.9b) に示すように、総降雨量が同じであれば、降雨強度にかかわらず浸潤面の上昇量はほぼ同一となること、また一般的な堤体の透水性 (図 2.1.3 参照) はその程度の降雨強度に対応することによるものである。したがって、透水性の低い堤体の場合に、安全側を考慮して浸透量を増す方がよいと考えられる場合には、堤体を構成する土の透水性に見合った小さな降雨強度を設定する必要がある。

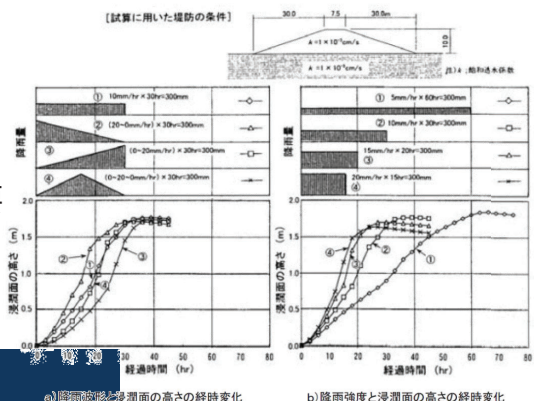
そもそも・・・

堤体土質の違いによる浸潤線の上昇過程や移動速度の基本的な挙動について不明な点が多い

堤体土質の違いによる

- ・降雨浸透機構の解明
- ・堤体土質に応じた危険な降雨波形

の検討が必要



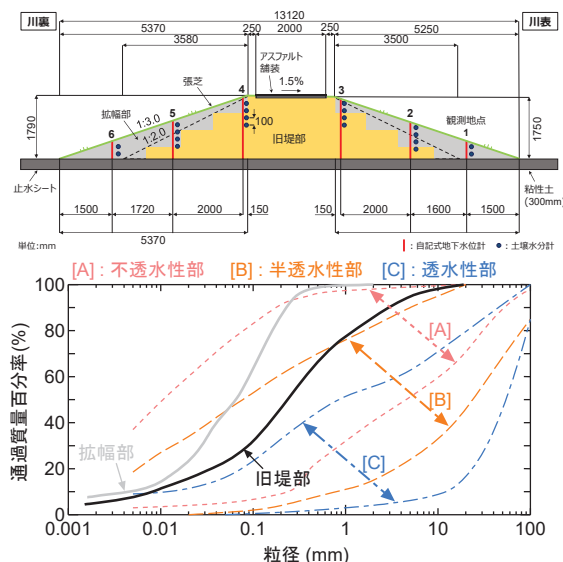
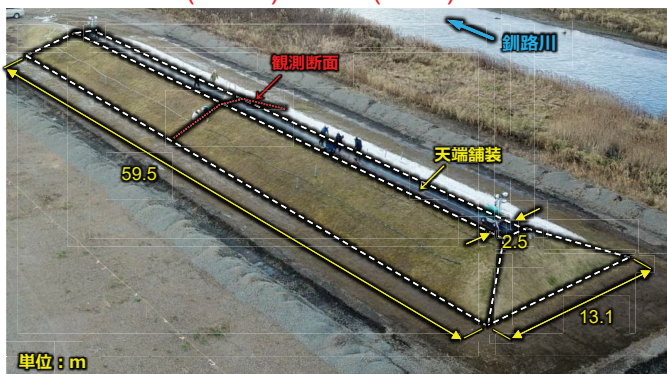
堤防の設計・耐力評価に用いる将来の
気候変動を考慮した降雨量の考え方が必要

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 18

3割堤の試験堤防に対する解析的検討

またしても実大試験堤防を構築・・・

実大試験堤防(3割堤)の構築 (2020)



検討の手順

- ① 試験堤防の降雨時浸透挙動を再現可能な解析モデルを構築
- ② この解析モデルにd2PDFから抽出した複数の降雨波形を外力として入力
- ③ 各降雨波形に対する浸透流・安定解析から、降雨履歴と安全率変化の関係を把握

d2PDFから抽出した降雨波形

抽出した降雨波形

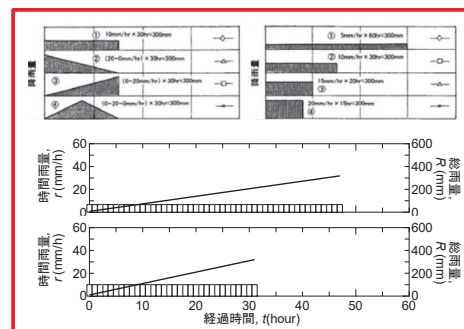
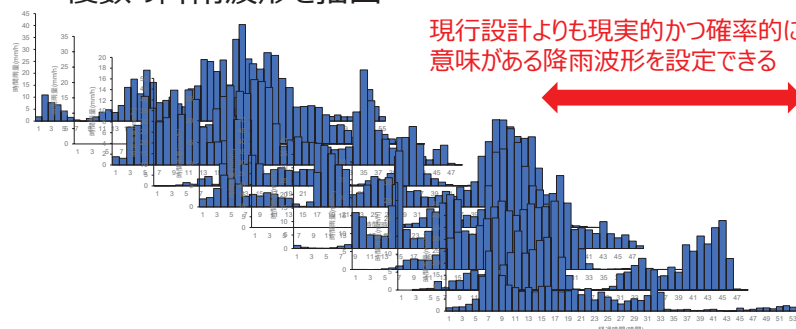
① d2PDF :

世界平均の地上気温が産業革命当時と比較し、
2°C上昇した世界を模した大規模アンサンブル気候予測データセット

「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」での成果
過去実験 (最大3000ケース) 将来実験(2°C上昇最大3240ケース, 4°C上昇最大5400ケース)

② 釧路川流域標茶町付近を力学的ダウンスケーリングした結果から・・・

1/100確率雨量の中央値である総雨量R = 315mmに対して±10%の範囲となる
複数の降雨波形を抽出



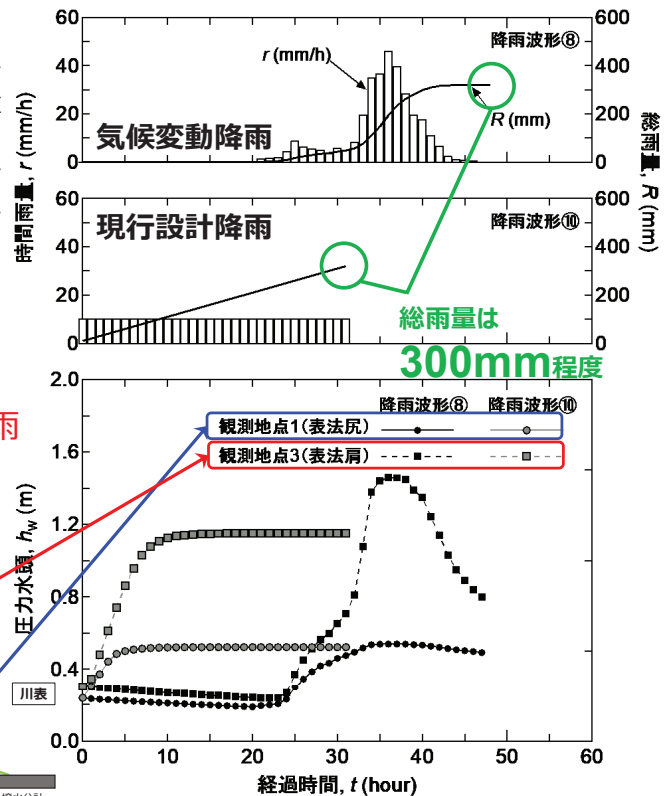
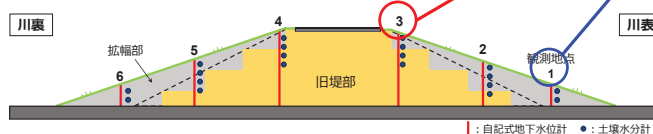
事前降雨の考え方

- ① AMeDAS 標茶の年平均雨量 1015.8mm と年平均降雨日数 113.5 days から年平均日雨量 8.9mm/day を算出
- ② 年平均日雨量 8.9mm/day に北海道における降雨変化倍率 1.06 を乗じて気候変動を考慮した年平均日雨量 9.5mm/day を設定した。
- ③ この日雨量を 3 日毎に事前降雨として与える

解析結果から・・・

h_w の最大値：現行設計降雨 < 気候変動降雨

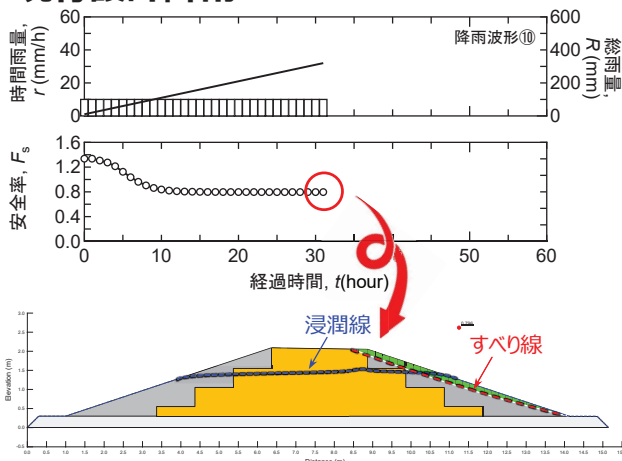
現行設計の降雨量設定では、浸潤線を低く算出することで、危険側の評価となる可能性があることを示唆



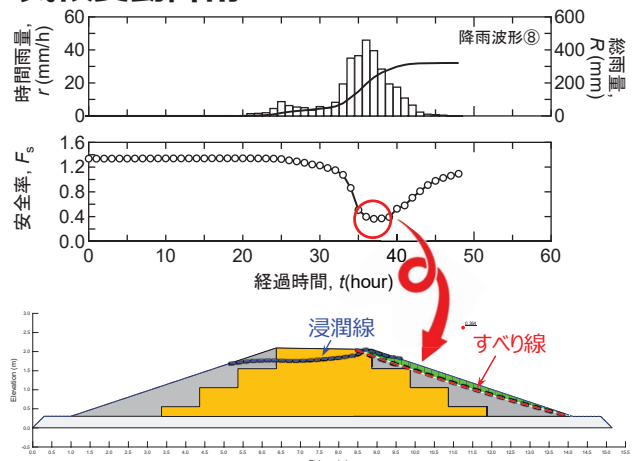
気候変動脆弱地域の複合地盤災害のリスク評価に関するワークショップ 21

安全率の時間変化の例

現行設計降雨



気候変動降雨



- ① 総降雨量が 300mm 程度と同等ではあるものの、降雨波形の違いによって安全率の増減や最小値が異なる
- ② 多くの解析ケースで気候変動を考慮した降雨波形のほうが、現行マニュアルよりも安全率が小さい
- ③ 今回の検討の範囲では、降雨浸透に伴う法面の安定性の低下や回復は、総降雨量よりも雨の降り方の影響が大きい

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 22

$r_{\max}$ の増加に伴い、 $(\Delta F_s)_{\max}$ は減少

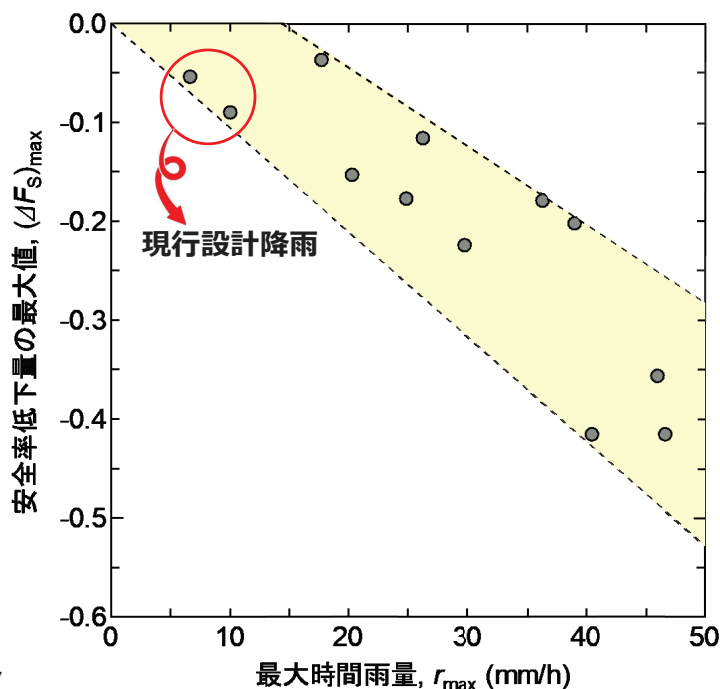
ランダムな降雨波形であっても、 $r_{\max}$ が安全率低下の支配要因

現行設計降雨

1つの降雨波形に対して1つの安全率
→ 決定論的な議論となるので、
想定雨が降らないときには...

気候変動降雨

降雨波形の数に対応した安全率
→ 確率論的な議論が可能となるので、
計画総降雨量に対して幅を持った対応ができる



今後の展開・予定：全道への波及を目指し

国交省河川・砂防技術開発研究公募の枠組みを利用

川尻峻三（北見工大、研究代表者）

- ・研究全体の企画と遂行
- ・観測機器の選定と設置
- ・浸透流解析パラメータの取得
- ・浸透流解析のとりまとめ

渡邊康玄（北見工大、共同研究者）

- ・河川工学観点からの観測箇所選定
- ・降雨波形の選定・分析

左近利秋（ドーコン、共同研究者）

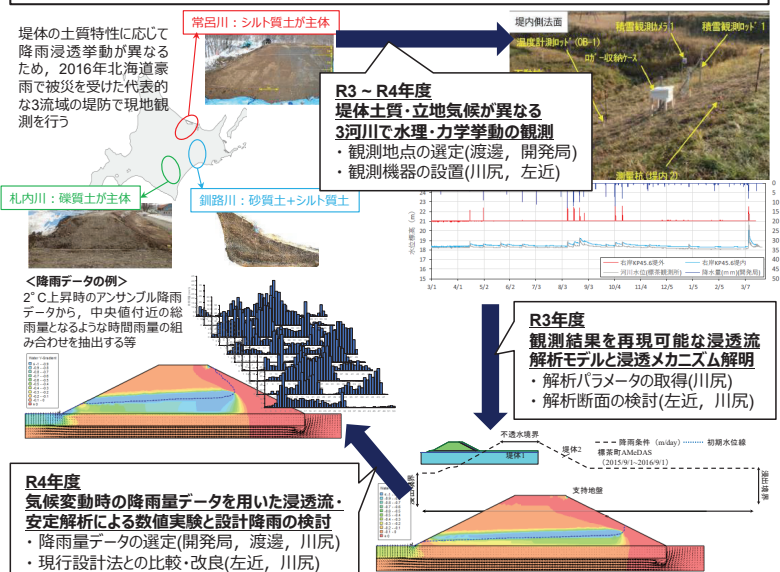
- ・観測機器の設置
- ・浸透流解析の実施
- ・実務的な観点からの設計波形の提案

北海道開発局（網走・帯広・釧路開建）

- ・観測箇所の工事履歴や河道変遷の提供
- ・治水計画を考慮した降雨量データの検討

本研究の目指すゴール

堤防の設計・耐力評価に用いる将来の気候変動を考慮した降雨量の考え方の提案



北海道開発局と研究代表者は2016年北海道豪雨の堤防被災を契機として強固に連携している。この度の取り組みは、この連携を遺憾なく発揮して気候変動の問題にチャレンジ

現行の設計法で対応可能な堤体土質を明示し、危険側の評価となる堤体土質の洗い出しと最適な降雨波形について取りまとめ

気候変動下における
・堤防要注意箇所選定
・堤防断面検討 など

気候変動を考慮した 寒冷地の道路のり面対策工

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°
～2021/5/12～

北見工業大学 工学部 川口 貴之

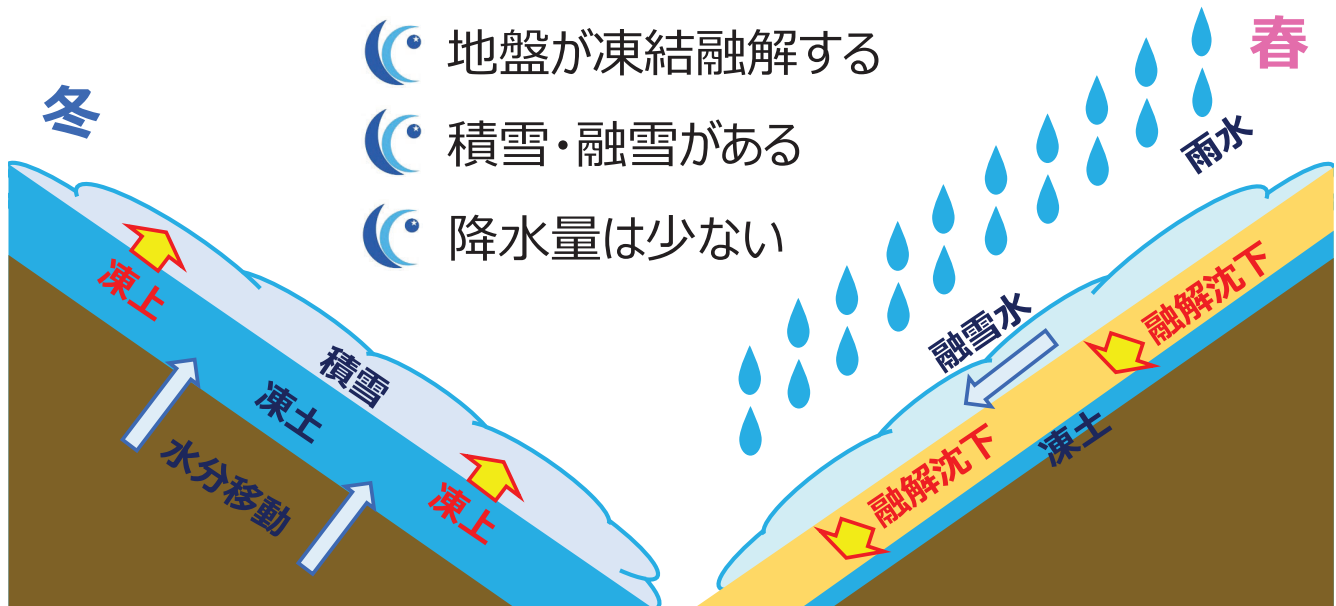
- のり面保護工に限定
- 対策工は一般に選定フローで決定
- 植生工が優先
- 問題がある場合のみ構造物工



長い年月の中でその地域に適した
対策工が普及して（生き残って）いる

❶ 対策工にはそれまでの気候特性が反映

対策工に関連してる!? 北海道の気候特性



❷ 反映している!? のり面保護工の例

- ❶ モルタル・コンクリート吹付工が少ない
- ❶ 金属製の軽量枠が少ない
- ❶ **特殊ふとんかご工が多い**



ライト工業HPより



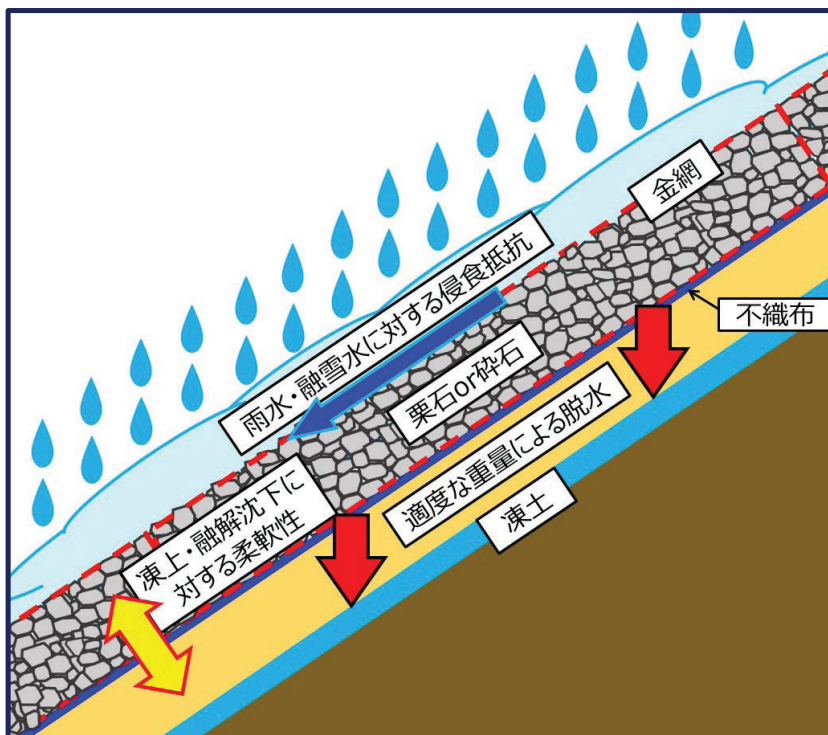
斜面の凍上被害と対策のガイドラインより



普及している対策工から学ぶ

特殊ふとんかご工

- 侵食抵抗
- 適度な重量
- 柔軟性



予想される気候変動

- 短時間強雨回数，年間降水量の増加
- 凍結指数の低下
- 積雪・融雪量の変動幅の増大
- 融雪後期の強雨が増加

(気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム発表論文集，2017)
(西原・渡邊，土木学会論文集G，2015)



従来の対策 **+** 強雨・降水量
(特に融雪後期)

植生工に与える影響

どの程度の強雨まで対応可能？

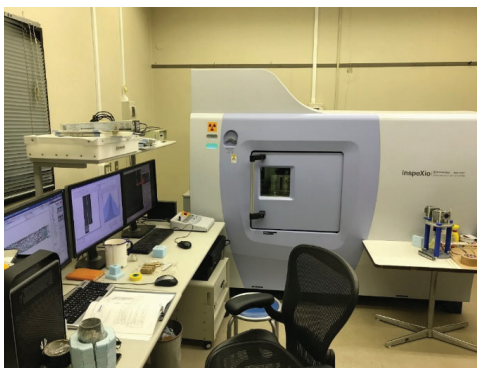
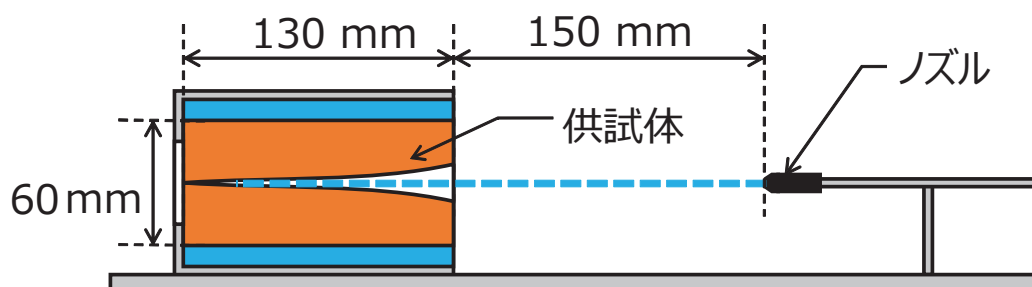
融雪後期の侵食抵抗は？
(凍結融解ダメージは？)



不明な点が多い

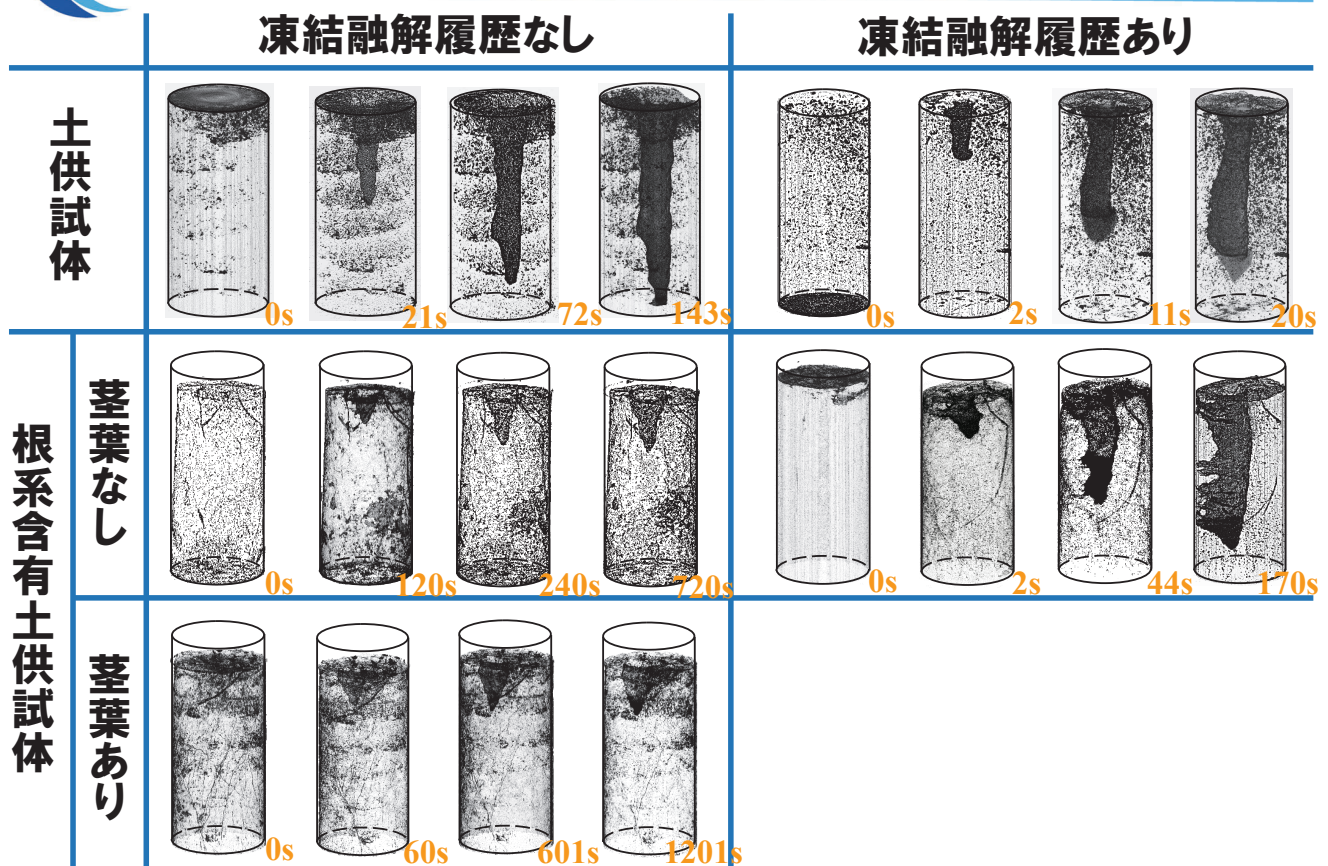


植生工の侵食抵抗に関する研究紹介



X線CTスキャンで
侵食深や根系の
発達状況を確認





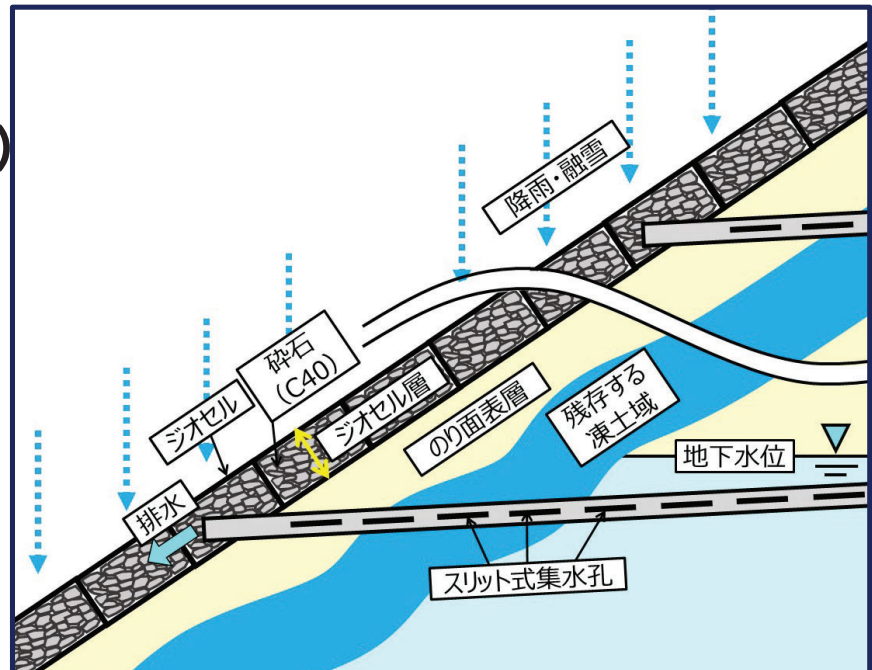
- ❧ 根系・茎葉には侵食抑制効果
(定量化が課題)
- ❧ 凍結融解によって効果は減少
(植物学的なアプローチも必要)
- ❧ 植生シート・マットも有効？



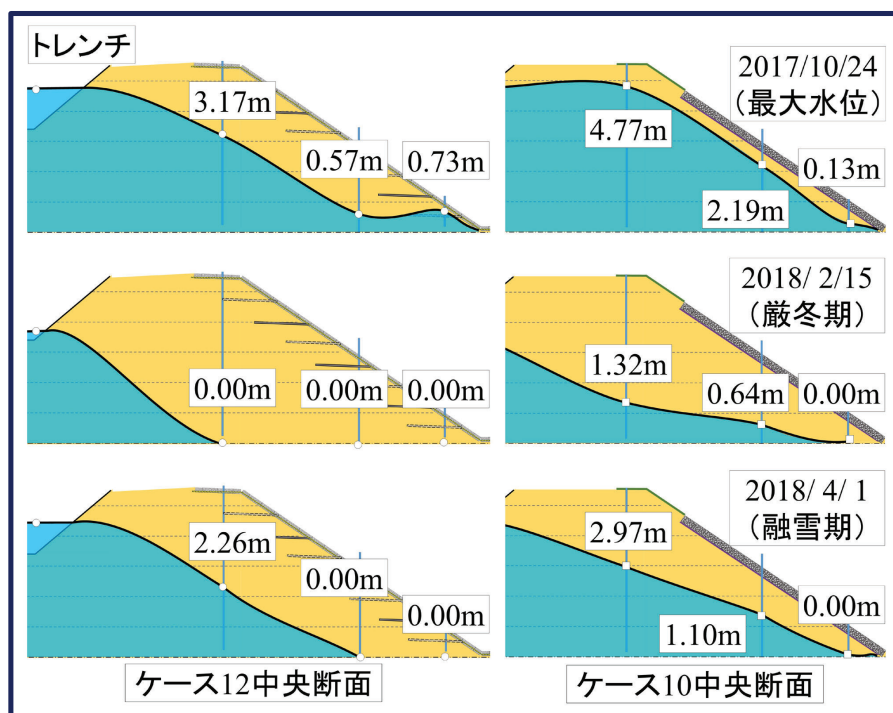
普及している対策工の**高機能化 1**

ジオセル
(軽量・柔軟)

排水パイプ
(水位低下)



水位低下性能を確認



屋外 模型試験



砂質土
侵食：大
浸透：中

碎石
侵食：小
浸透：大

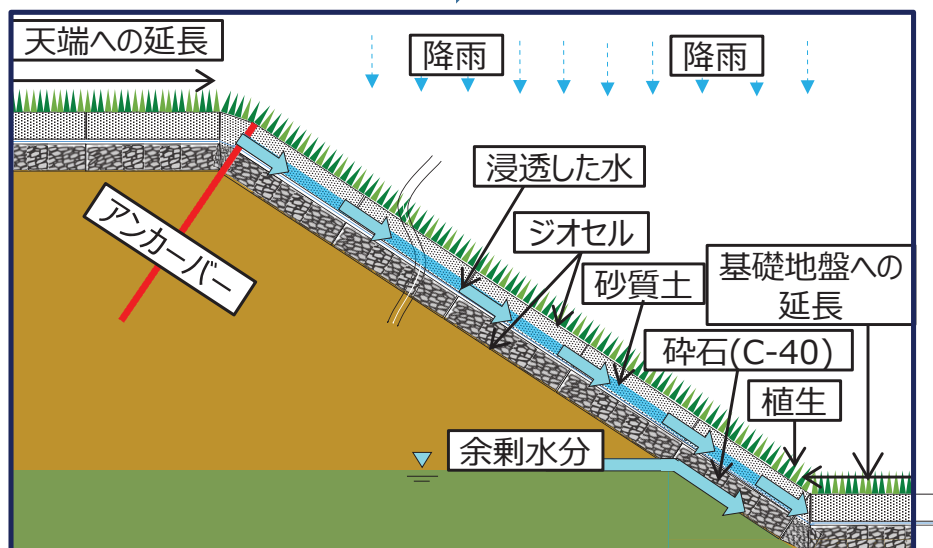
なし
(Fc=40%)
侵食：大
浸透：小



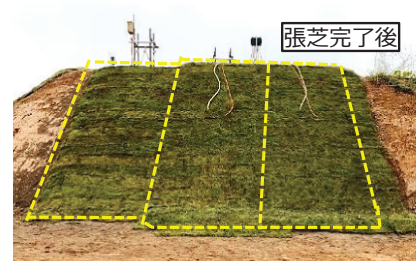
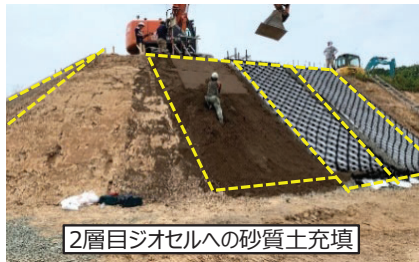
普及している対策工の**高機能化 2**

砕石＋不織布＋砂質土＋緑化

➡ **侵食・浸透抑制の両立**



実物大実験



農地脇斜面の 対策工として実施工



まとめ

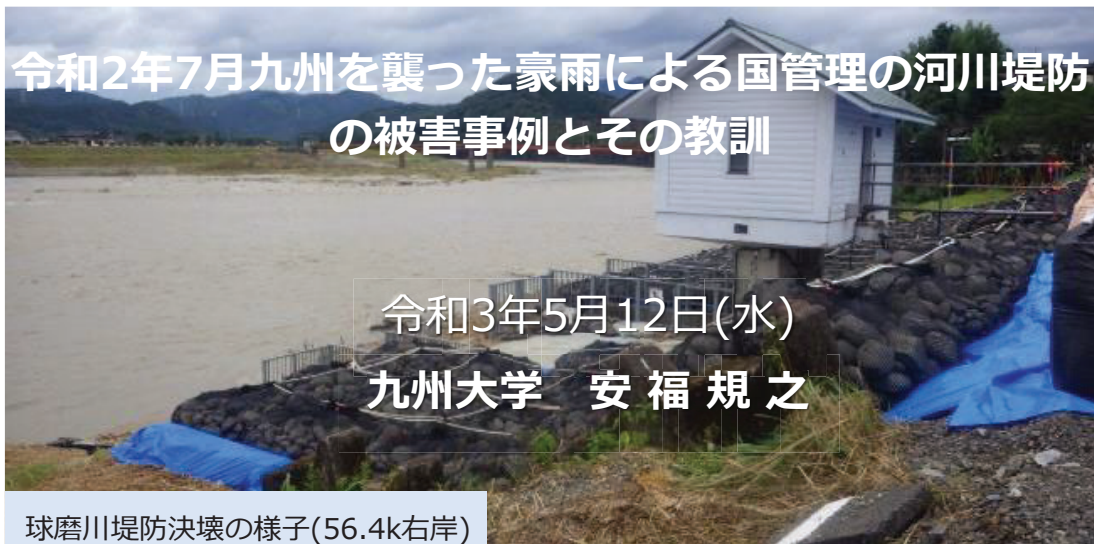
これまで北海道に適した対策工



これからも適した対策工



将来を見据え、
新たな対策工にも積極的にTRY

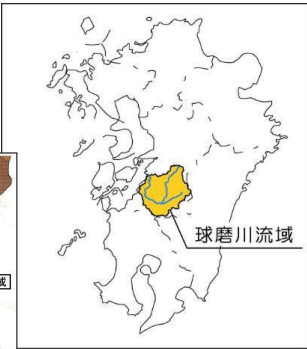
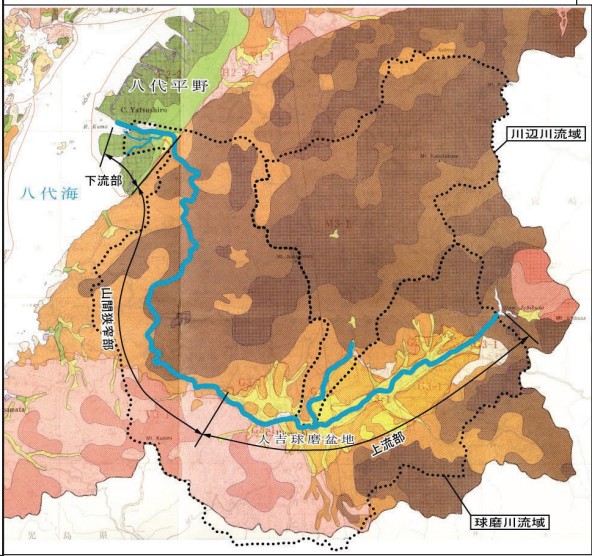


- / 「球磨川堤防調査委員会」報告書
- / 「筑後川堤防調査委員会」報告書
- / 「令和2年7月九州豪雨災害の総合調査・研究」報告書
(令和2年度 特別研究推進費 (研究代表者: 大本照憲 (熊本大学))

話題提供の流れ (内容)

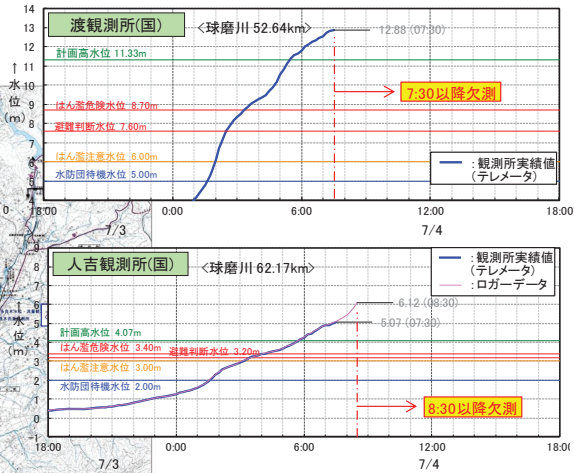
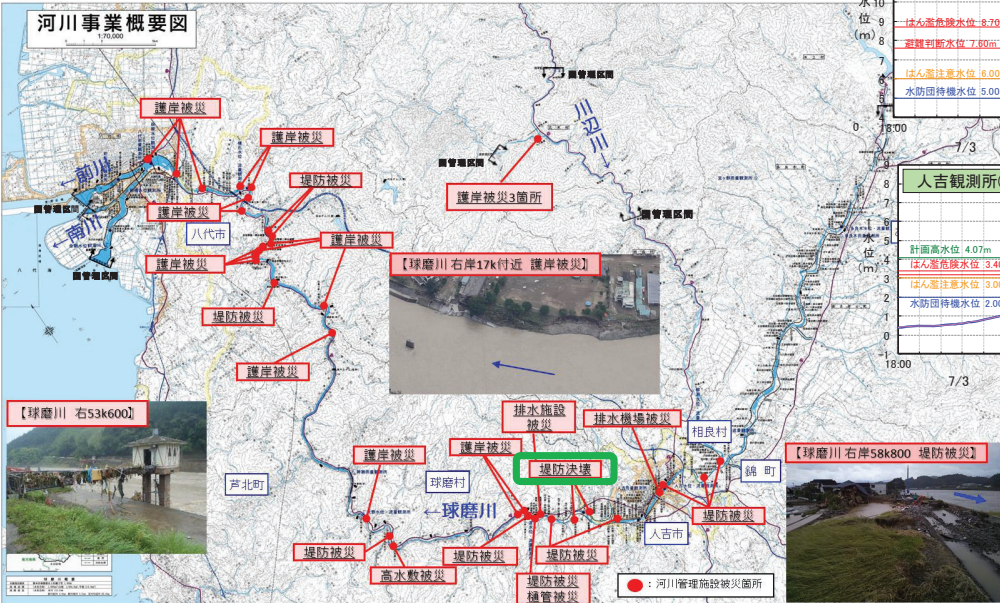
1. 球磨川河川堤防の決壊状況とその要因分析 (国としての見解)
2. 浸透流解析に基づく
球磨川河川堤防の破堤要因に関する影響分析 (個人としての見解含む)
 - ・ 国の考え方と数値解析に基づく個人的な見解
- (3. 筑後川河川堤防の変状の概要、その要因分析と対策工)
4. まとめと今後の課題

球磨川流域の地形分類



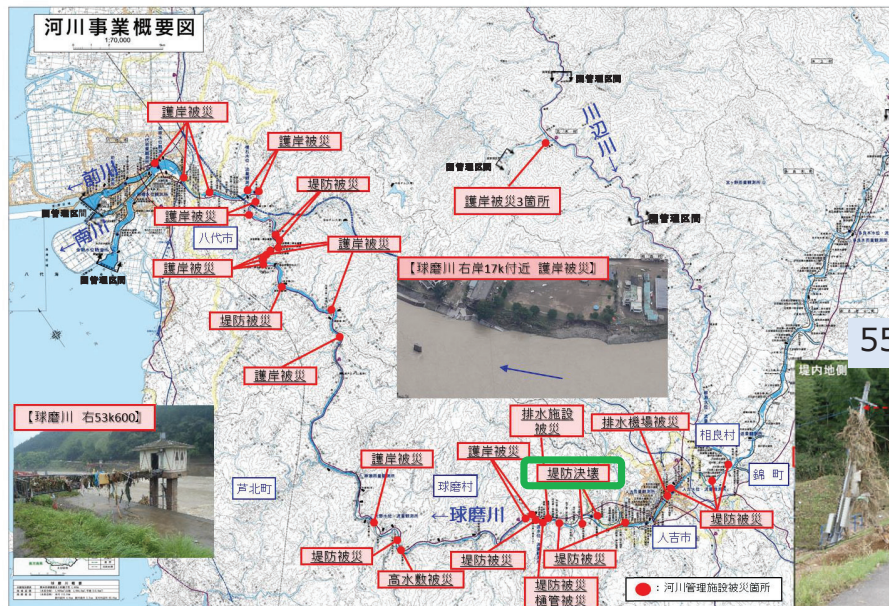
/「球磨川堤防調査委員会」報告書

球磨川の国管理区間の河川管理施設被災状況



/「球磨川堤防調査委員会」報告書

球磨川の国管理区間の河川管理施設被災状況



56.4k右岸の堤防決壊の状況



55.0k左岸の堤防決壊の状況



/「球磨川堤防調査委員会」報告書

球磨川右岸56.4k付近(八久保排水樋管)の被災状況



- 決壊箇所の状況調査
- 洪水痕跡調査（聞き取り＋流向痕跡＋痕跡水位）
- 内外水位波形の再現解析

/「球磨川堤防調査委員会」報告書

決壊箇所の状況調査による結果



- 堤防天端のアスファルトや堤体材料と思われる土砂が川表側に飛散



- 出水時点の水位は、堤防天端から2m以上の水位であった
- 堤内側の植生は上向きや決壊箇所に向けて倒伏し、堤外側の植生は下向きに倒伏

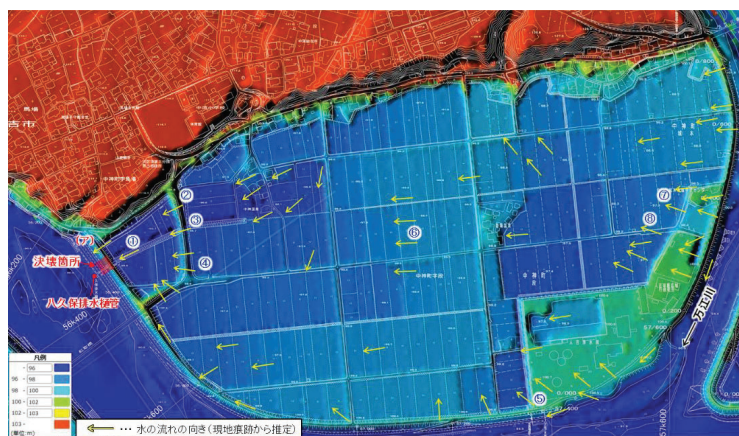
/「球磨川堤防調査委員会」報告書

洪水痕跡調査-聞き取り調査と流向痕跡-

- 7月4日(土)
時間不明：万江川より越水始まる
7時30分：八久保樋管で堤防越水
8時30分-9時30分：1-2時間で水位は家屋敷高より2m程度高くなった。
- 越水した時点では、堤防は決壊していない。
- 決壊の状況は、避難していたため、確認していない。

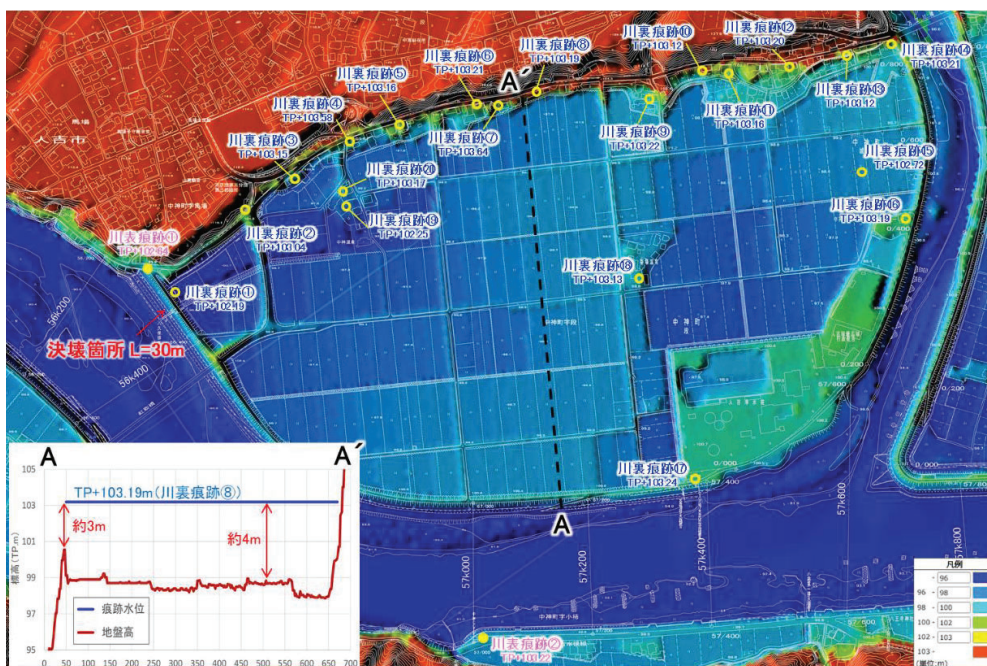


- 洪水時の流向の整理結果



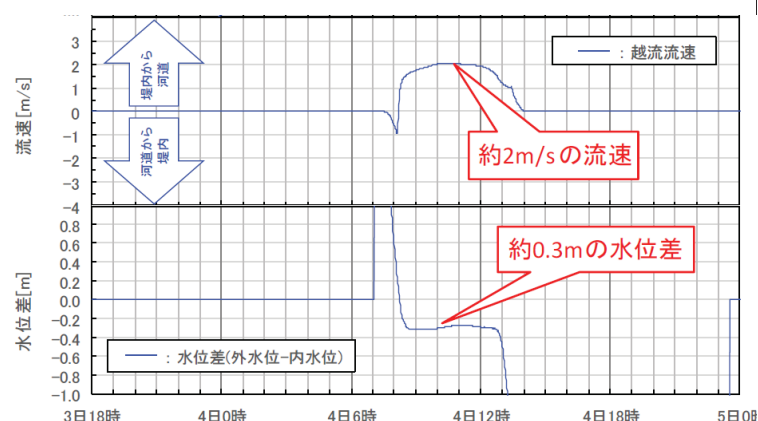
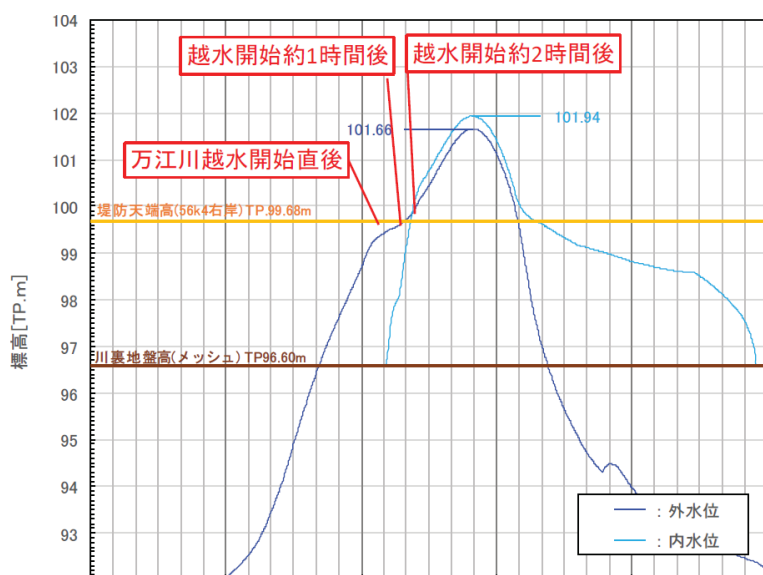
/「球磨川堤防調査委員会」報告書

痕跡水位の整理結果



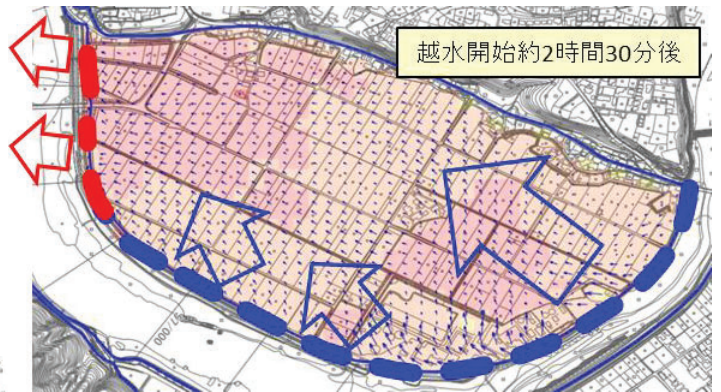
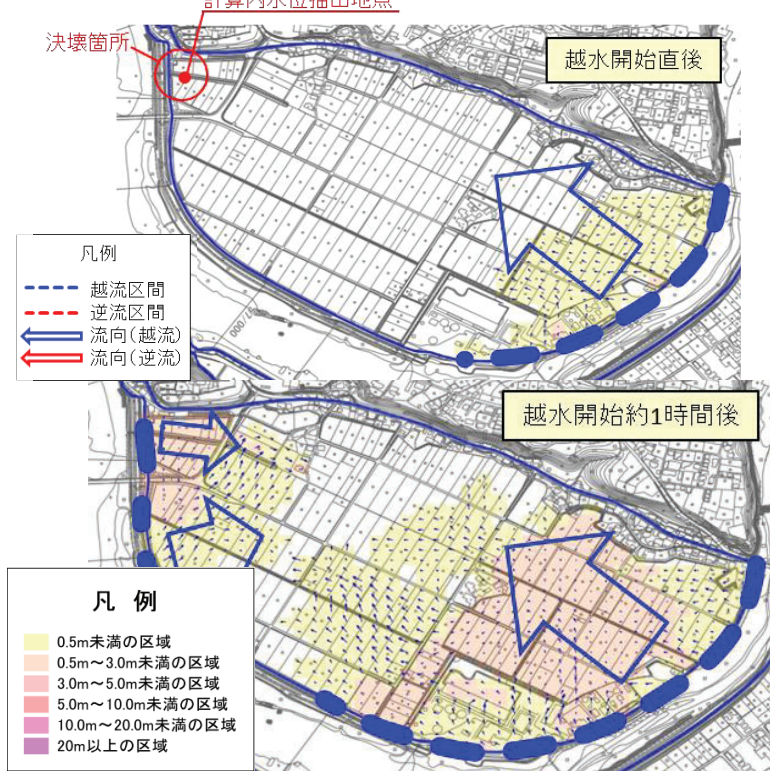
/「球磨川堤防調査委員会」報告書

再現解析により内外水位波形(八久保排水樋管地点)



/「球磨川堤防調査委員会」報告書

氾濫解析結果に基づく氾濫状況の分析(八久保排水樋管地点)



- 支川万江川より越水始まる。
- 越水開始1時間後に56.4k付近から越水が生じ、氾濫が氾濫ブロックの広範囲に及んだ。
- 越水開始約2時間30分後には、56.4k付近の堤内地水位が堤外地水位よりも高くなり、堤内地側から堤外地側への逆越流が生じている。

/「球磨川堤防調査委員会」報告書

決壊原因と想定される決壊メカニズム

● 検討の考え方と委員会の見解:

- ✓ 現地調査(被災状況調査、洪水痕跡調査、耐侵食性調査など)、
- ✓ 洪水氾濫流の再現解析、堤防の浸透流解析などの実施

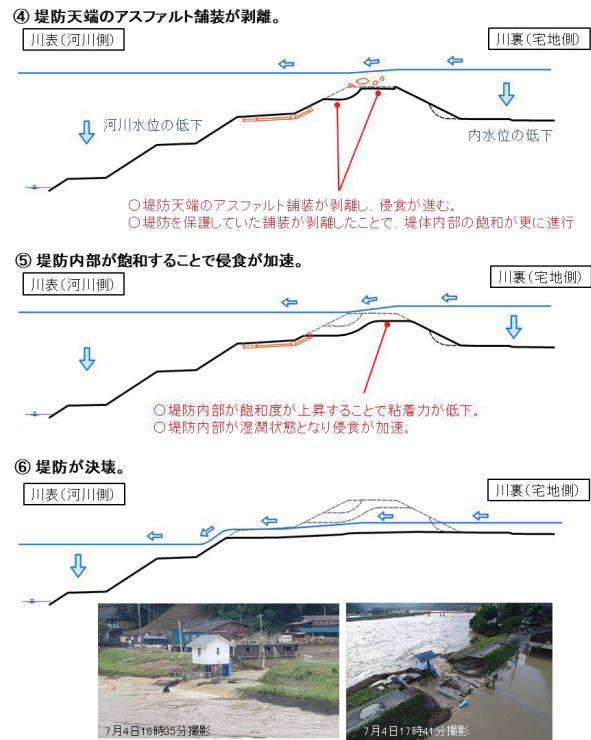
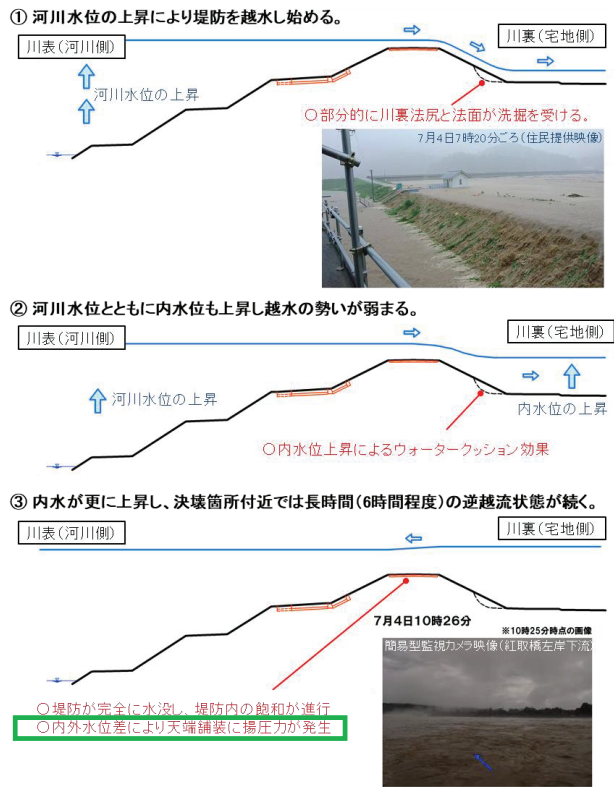
検討の考え方:「今回のように長時間(約6時間)にわたって水没した状態に置かれた堤体に関する侵食・洗堀や浸透に関する知見はほとんど存在しておらず、またそれを解析する技術も確立していないと考えられることから、「決壊メカニズム」を特定するには至らなかった」

- 越水による決壊の可能性の検討結果は具体的に示し、推察される「堤防決壊のプロセス」には言及した
- 検討した項目には、「舗装の流失」、「舗装の浮き上がり」、「地形による流れの集中による影響」、「堤防表面の侵食」、「水没した堤防の土質変化」、これらの分析結果を踏まえ、「堤防決壊のプロセス」を推察した

/「球磨川堤防調査委員会」報告書

推定された堤防決壊のプロセス

/「球磨川堤防調査委員会」報告書



決壊プロセス中の今後の対策を考える上での二つの視点（個人的な取り組み）

- 舗装の剥離、損失の影響と堤体内の弱部の洞察
- 置き換え土の影響分析

不飽和・飽和浸透流・安定解析の実施
(Hydrus2D + Slope Cube Model)

解析断面位置(56.4k右岸) 八久保排水樋管付近

/「球磨川堤防調査委員会」報告書

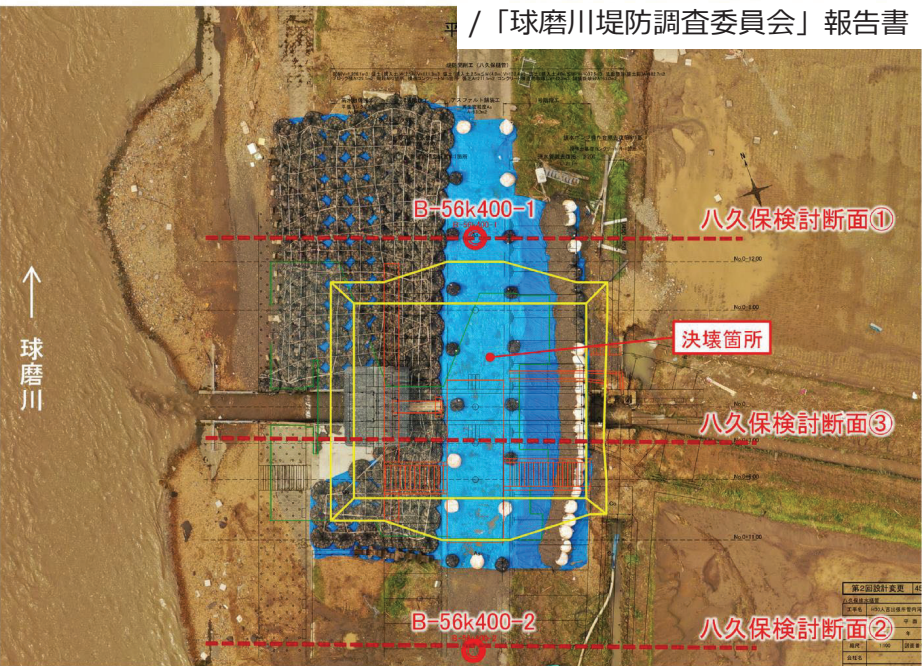


図5.4 a): 球磨川八久保地区の河川堤防横断図,

決壊箇所 の 堤防構造

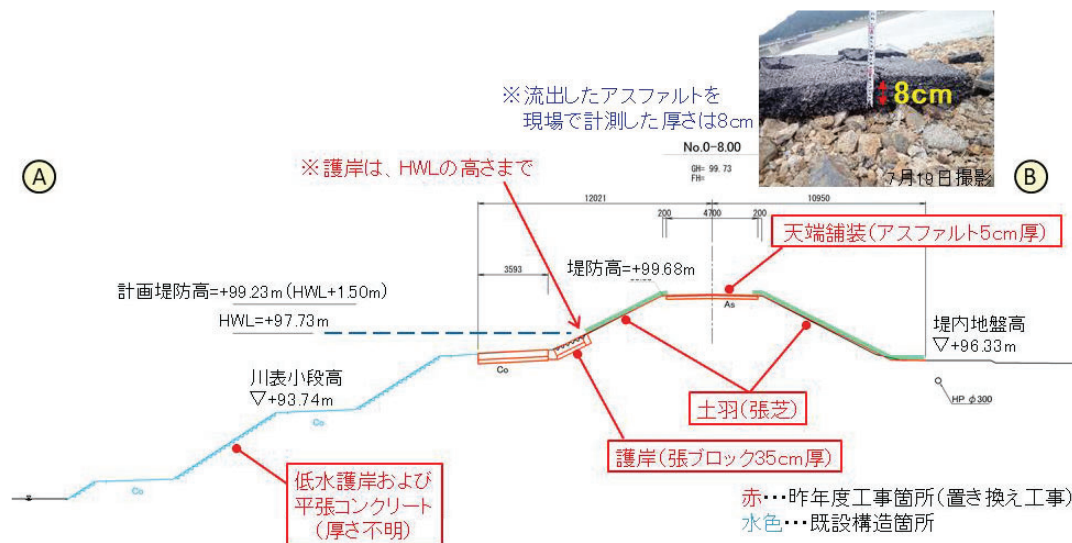


図5.3 決壊箇所での堤防構造

/「球磨川堤防調査委員会」報告書

球磨川左岸55k で採取された旧堤体土と置き換え土



写真5.3

b): 球磨川左岸55k で採取された旧堤体土と置き換え土

球磨川56.4k(八久保地区)の旧堤体と置き換え土の土質分類と物理特性

表5.2 球磨川56.4k(八久保地区)の旧堤体と置き換え土の土質分類と物理特性

No.	対象	地層区分		分類		
		地層名	記号	名称	γ_t (kN/m^3)	
①	"八久保下流 B-56k400-1"	[旧堤体土]	旧堤体土	bn	細粒分質砂質礫	21.5
			洪積砂質土層	Ds	細粒分質礫質砂	20.6
			洪積砂質粘性土層	Dcs	-	15
			洪積砂質土層	Ds	-	16
			洪積砂礫層	Dg	細粒分混じり砂質礫 細粒分質砂	18
③	"八久保決壊部 No.0+3.00"	[置き換え土]	置き換え土	Nbn	細粒分砂混じり礫 細粒分混じり砂質礫	21.3

/ 「球磨川堤防調査委員会」 報告書
に基づき加筆

球磨川堤防被災地点近傍で採取された旧堤体土と置き換え土の粒度特性

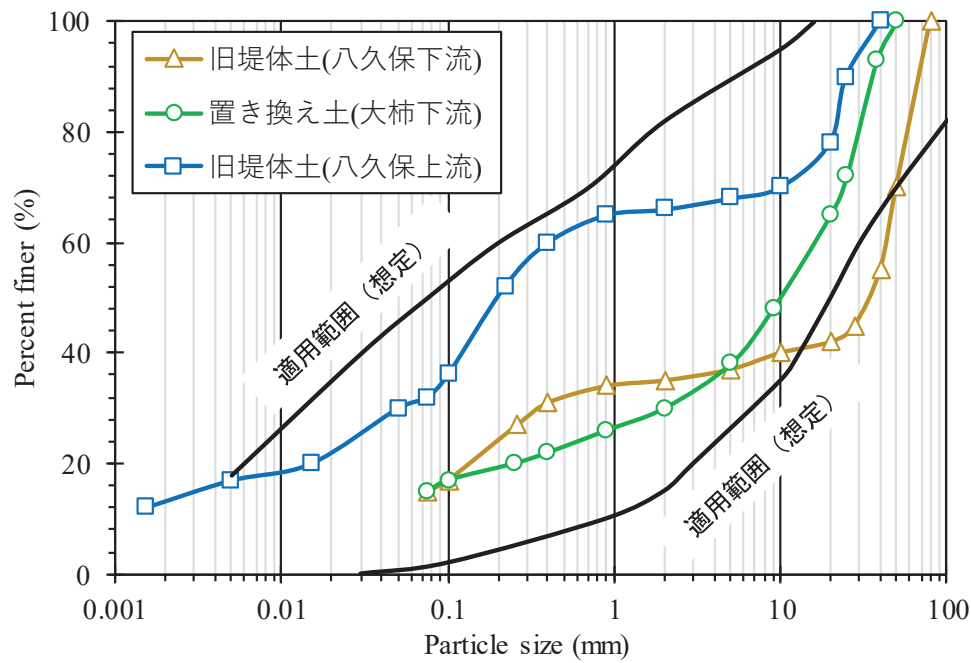


図5.6 球磨川堤防被災地点近傍で採取された旧堤体土と置き換え土の粒度特性

/ 「球磨川堤防調査委員会」 報告書
に基づき加筆

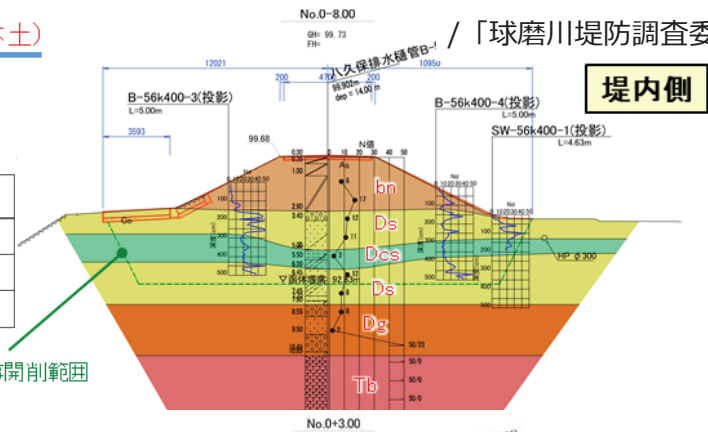
①[下流側]B-56k400-1(旧堤体土)

b) 河川側

[土質区分]

記号	地層名
Dcs	洪積砂質粘性土層
Dg	洪積砂礫層
Tb	凝灰角礫岩

緑...置き換え工事開削範囲



③[決壊部]No.0+3.00(置き換え土)

c) 河川側

[土質区分]

記号	地層名
bn	堤体盛土(旧堤体土)
Nbn	新規堤体盛土(置き換え土)
Ds	洪積砂質土層

緑...置き換え工事開削範囲

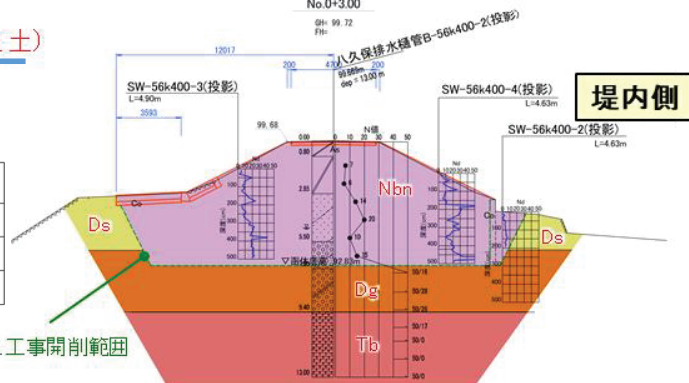
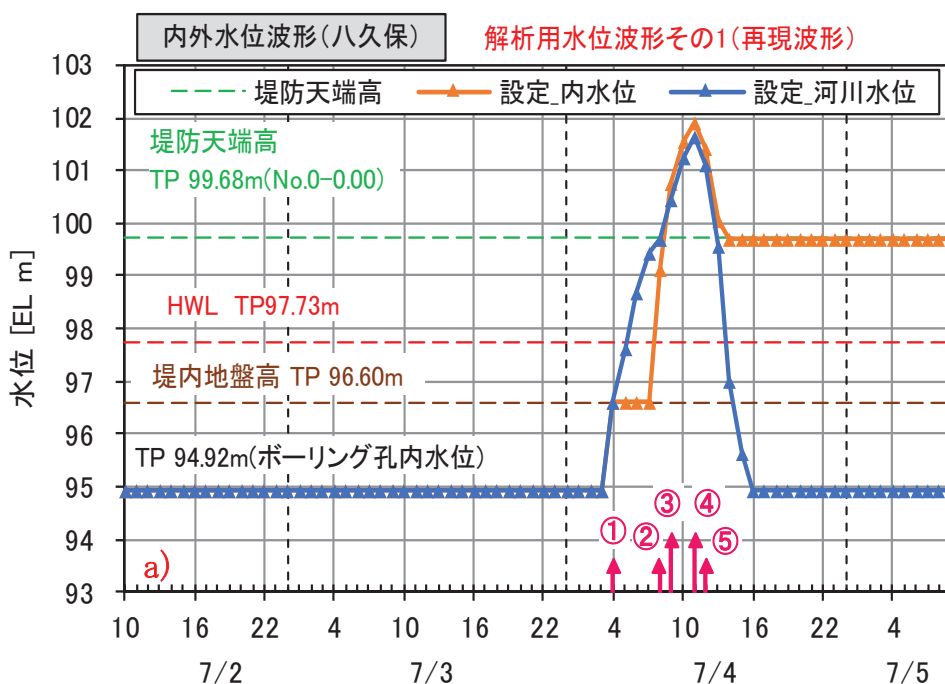


図5. 4b):旧堤体土で築堤された土層想定断面, (c):置き換え土で築堤された土層断面

解析に用いたハイドログラフ



河川水位の変化を圧力ヘッドの時刻歴変化に置き換え、解析

①: 42時間後

②: 46時間後

③: 47時間後

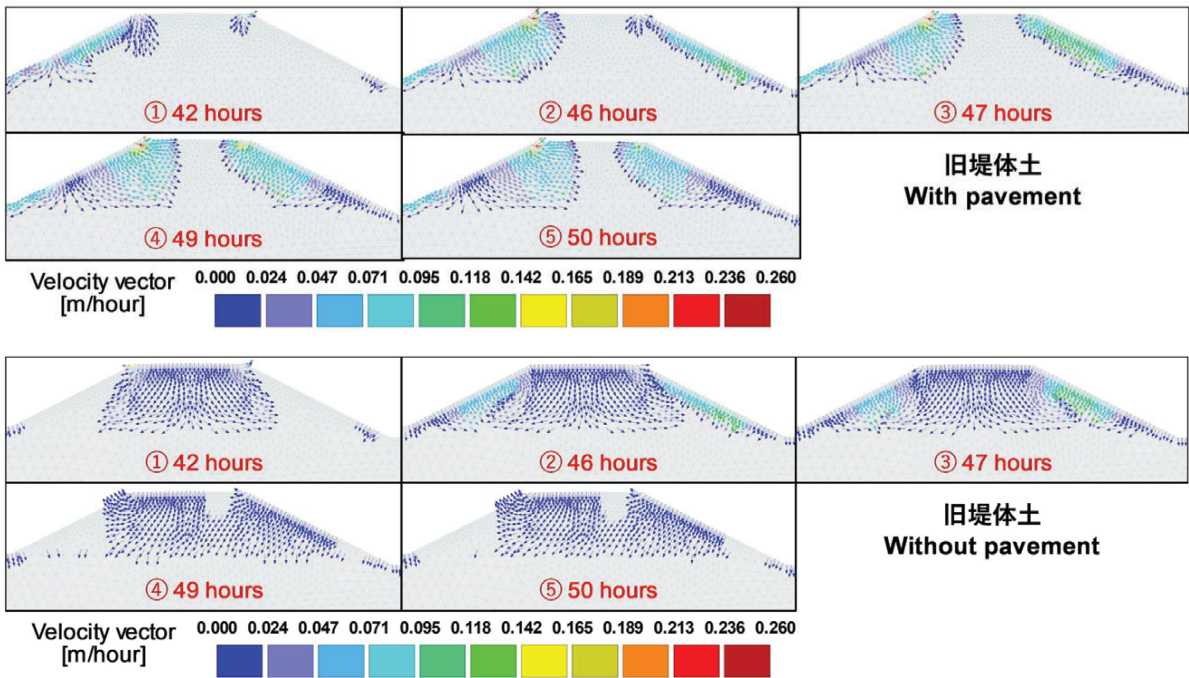
④: 49時間後

⑤: 解析ができなくなった時点



解析結果の相対的な比較

旧堤体土の堤体内の土中水の流れの方向と速さのベクトル図 (天端がアスファルト舗装されている場合としない場合を想定した比較)



局所安全率からみた堤体内の健全性分析

LFS= $\frac{\text{状態変化後の逐次せん断応力}}{\text{状態変化前のせん断強さ}}$

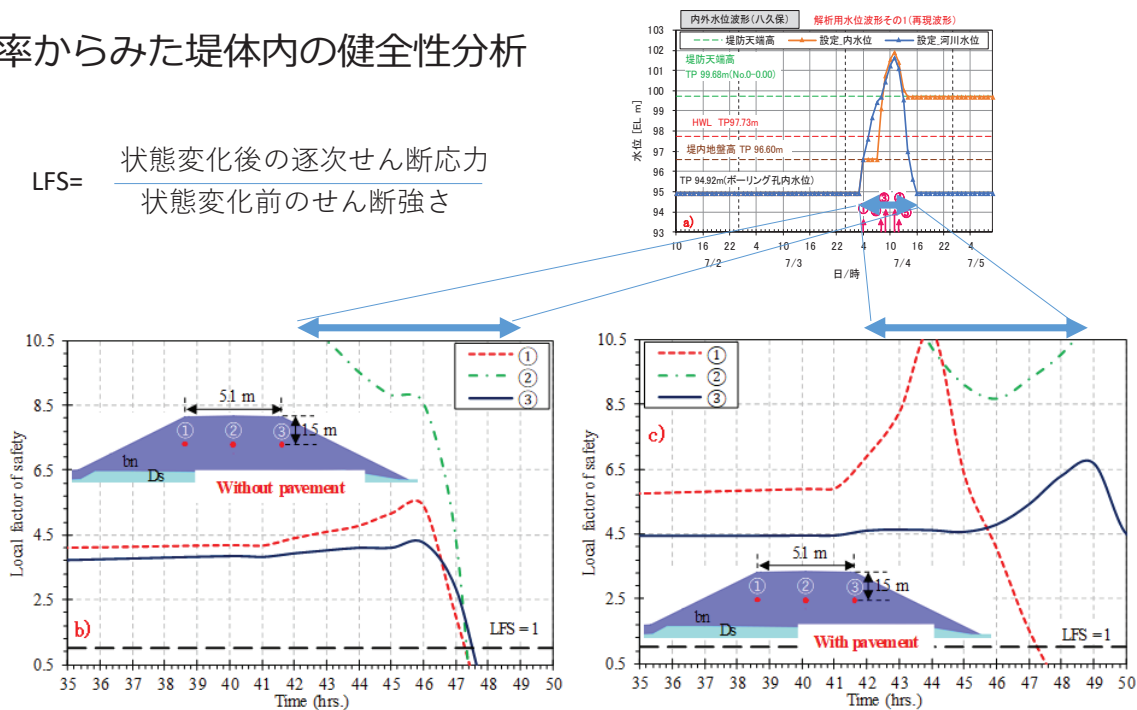
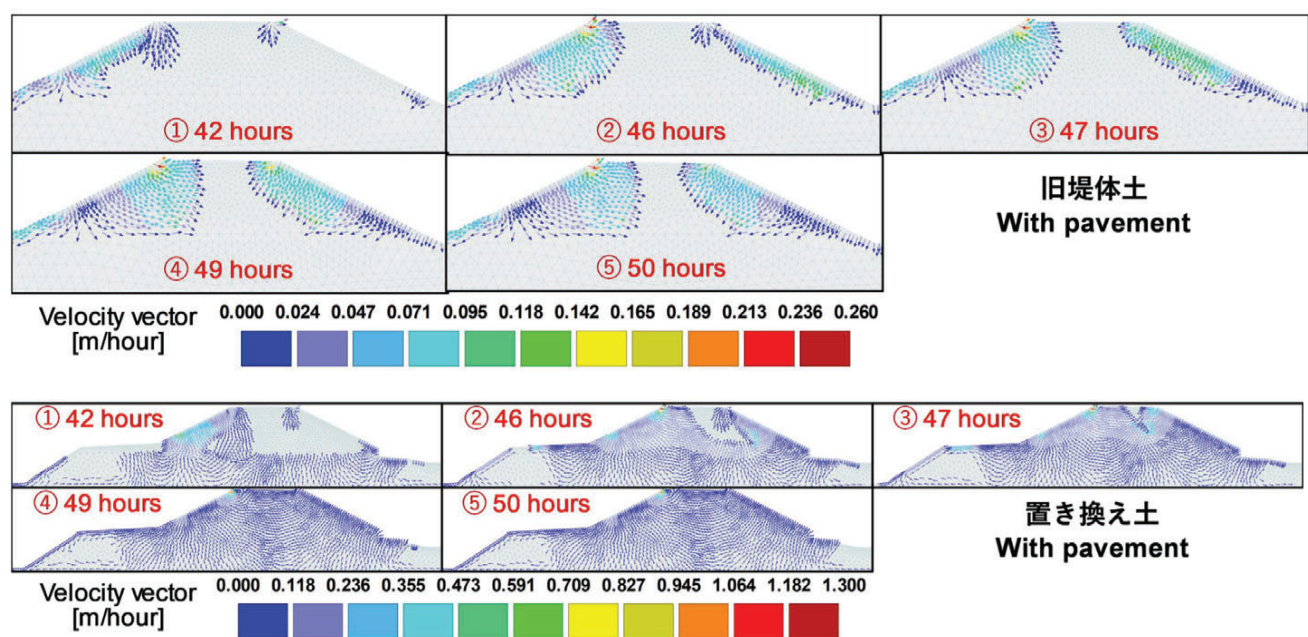


図5. 16

- b):天端からの浸水を許容した旧堤体土からなる堤体の局所安全率の推移,
c):天端からの浸水を許容しない旧堤体土からなる堤体の局所安全率の推移,

置き換え土と旧堤体土の違いが堤体内の土中水の流れの方向と速さに与える影響
(天端がアスファルト舗装されている場合)



堤体土の違いが局所安全率に与える影響の分析

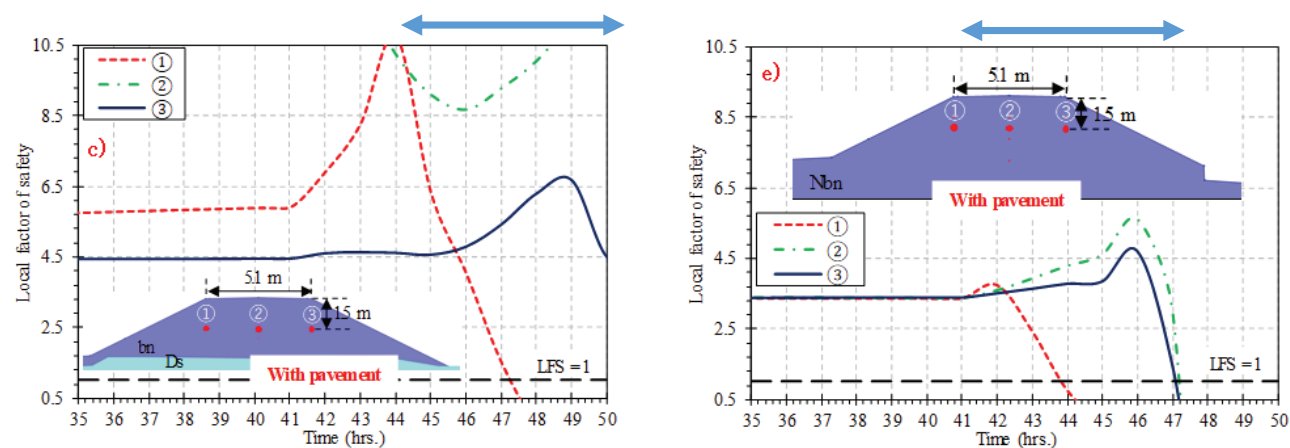


図5.16
c):天端からの浸水を許さない場合の旧堤体土からなる堤体の局所安全率の推移
e):天端からの浸水を許さない場合の置き換え土からなる堤体の局所安全率の推移

今後の課題とまとめ

- 地盤情報の重要性について
—基準データの整備—
- 解析手法の革新的な高度化と深化の必要性
—異分野連携の重要性の認識—
- 解析結果に分析からの知見
 - 1) 天端を適切に保護することの重要性を改めて認識すること、
 - 2) 土中水の堤体内での局所的な安全率の変化の特性からこういったところが弱部になりやすいのかを理解できれば、
それは、効果的な補強のあり様を考えるヒントを与えること

第 III 部

資料一覧（土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム）

「温暖化が先鋭化する九州と北海道における水・地盤災害の激甚化への適応とは？」

＊北海道支部関連部分

1. プログラム
2. 基調講演 「北海道における気候変動下の水・地盤災害の潜在リスクとその評価」
石川達也（北海道大学）
3. 気候変動に伴う降雨変化の特徴と洪水災害リスクの考え方
山田朋人（北海道大学）
4. 気候変動による降雨量増加を想定した実大試験堤防への散水実験と浸透流解析
川尻峻三（北見工業大学）
中津川誠（室蘭工業大学）
5. 気候変動による急流河川の侵食危険度の評価

土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム

「温暖化が先鋭化する九州と北海道における水・地盤災害の激甚化 への適応とは？」

- 主催：土木学会西部支部 災害脆弱地域における水・地盤災害と複合災害の気候変動によるリスク上昇への適応に関する研究委員会

共催：土木学会北海道支部 気候変動脆弱地域における複合地盤災害リスク評価に関する研究委員会

- 開催日時：令和4年3月11日(金) 午後2時から午後5時まで
開催場所：ZOOM+ウェビナー オンライン開催
参加費：無料

- プログラム： 総合司会（九大・矢野真一郎）

1. 開会あいさつ（西部支部適応委員会：安福規之委員長）

2. 基調講演 14:05～15:05

石川達也（北海道支部委員会委員長，北大教授）

「北海道における気候変動下の水・地盤災害の潜在リスクとその評価」

矢野真一郎（西部支部適応委員会副委員長：九大教授）

「九州における近年の水害事例から見た流域治水のあり方について（仮）」

~~~~ 休憩 10min ~~~~

3. パネルディスカッション 15:15～

・趣旨説明 コーディネーター：安福委員長

・西部支部・北海道支部委員会委員による話題提供：

1) 山田朋人（北大准教授）

「気候変動に伴う降雨変化の特徴と洪水災害リスクの考え方」

2) 丸谷靖幸（九大助教）

「気候変動が九州地方における河川流況に与える影響評価（仮）」

3) 川尻峻三（北見工大准教授）

「気候変動による降雨量増加を想定した実大試験堤防への散水実験と浸透流解析」



4) 笠間清伸（九大教授）

「機械学習と力学モデルを併用した広域斜面危険度評価（仮）」

5) 中津川誠（室蘭工大教授）

「気候変動による急流河川の侵食危険度の評価」

6) 重枝未玲（九工大准教授）

「九州地方における近年の水災害と激甚化への適応策に求められる解析技術」

・総合討論：

・総括：コーディネーター

4. 閉会あいさつ（北海道支部委員会幹事：川村志麻（室蘭工大教授））

■ 申し込み方法：

下記申し込みサイトより申し込みください。（締め切り：R4.3月4日（金）17時まで）

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdXqv0ASwrl7ULgjZiOfia4B4ieIYv4-VONAp4a7QvIjivO2g/viewform?usp=sf\\_link](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdXqv0ASwrl7ULgjZiOfia4B4ieIYv4-VONAp4a7QvIjivO2g/viewform?usp=sf_link)

なお、参加方法は討論参加型（ZOOM：先着 100 名）と聴講型（ウェビナー：最大 500 名まで）がありますので、選択下さい。

また CPD（現在申請中）が必要かについても回答下さい。

アクセス先については、当日午前中までにメールにて配信しますので、メールアドレスの入力を間違えないようにお願いいたします。

■ CPD について：

本シンポジウムは土木学会 CPD 認定プログラムです（申請中）。なお、CPD 取得には、申込後にご案内するアンケート（Google Form を予定）への回答が必須となります。また、土木学会以外の団体に提出する場合の方法等は提出先団体に事前にご確認ください。他団体が運営する CPD 制度に関する内容については回答いたし兼ねます。

■ 問い合わせ先：

シンポジウムの内容に関して：九大 矢野：[yano@civil.kyushu-u.ac.jp](mailto:yano@civil.kyushu-u.ac.jp)

申請方法に関して：九大 丸谷：[maruya@civil.kyushu-u.ac.jp](mailto:maruya@civil.kyushu-u.ac.jp)



## 北海道における気候変動下の水・ 地盤災害の潜在リスクとその評価

土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム

「温暖化が先鋭化する九州と北海道における水・地盤災害の激甚化への適応とは？」

2022年3月11日(金) 14:05～14:35

北海道大学 大学院工学研究院 土木工学部門  
自然災害適応分野 地盤環境解析学研究室

教授 石川 達也

1

### 講演内容

1. 北海道の気象条件と斜面災害
2. 平成28年8月北海道豪雨による斜面災害
3. 平成24, 25年融雪期斜面災害
4. 気候変動に伴う積雪寒冷地の斜面災害リスクに向けて



# 1. 北海道の気象条件と 斜面災害



## 豪雨による斜面災害 — H28年8月北海道豪雨 — 一般国道274号 日勝峠（7合目付近）の被災状況





# 融雪による斜面災害 — H24, 25年融雪期 —

## 一般国道230号 中山峠の被災状況



2013年4月8日撮影

## 北海道の気候と斜面災害

支部合同シンポジウム

### 降雨特性

- 北海道で降水量の多い地域(1600～2000 mm)
  - ・ 後志山岳地帯南東部
  - ・ 日高山脈南東部
  - ・ 天塩山地(冬季の降雪)
  - ・ 山岳地帯を除くと, 600～1300 mm がほとんど
- 西日本の太平洋側2000～3000 mm
- 北海道はその1/3～1/2程度
- 日降水量200 mm以上はほとんど出現しない

### 災害の特徴

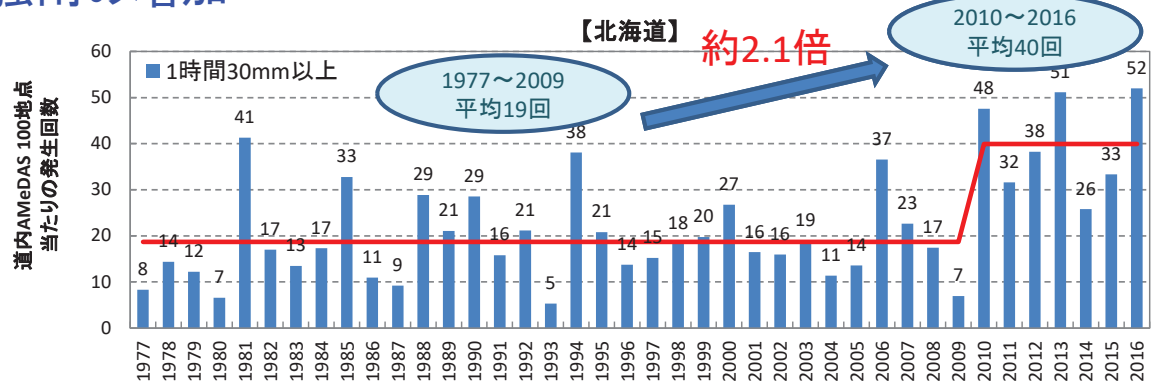
- ① 春の融雪出水期
  - ・ 融雪期に豪雨が重なり流量が著しく増大
  - ・ 道北・道央の豪雪地域で斜面崩壊, 地すべり
- ② 夏の台風・低気圧による豪雨期
  - ・ 全道で見られるが, 渡島半島, 東胆振, 日高, 道東太平洋側で多発
  - ・ 発生域: 火山, 扇状地, 海岸山地
  - ・ 主な土砂災害の発生形態:
    - 1640年(寛永17)～1999年4月
    - 斜面崩壊 23件
    - 地すべり 38件
    - 泥流(土石流) 7件

### 豪雨履歴が少ない → 崩壊履歴の少ない斜面

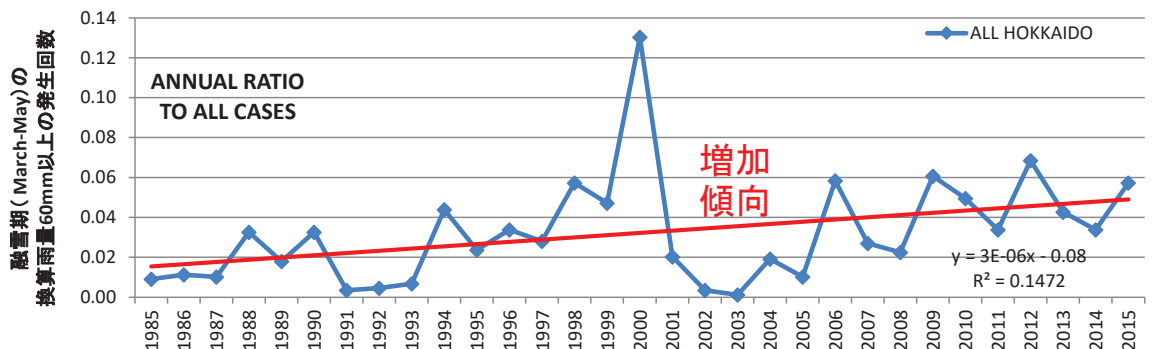
不安定な土層が斜面上を厚く覆っているので, 降雨強度の弱い雨でも崩壊が発生しやすい。

一般に, 日降水量200mm以上で崩壊の発生頻度が多いとされているが, 北海道では, **日降水量40mm以上で発生頻度が急増**する。

## ① 短時間強雨の増加 注) 気象協会 松岡氏講演(2017.6.2)資料を一部修正



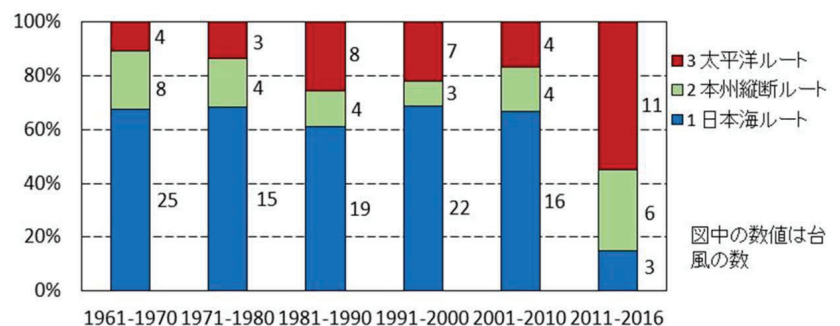
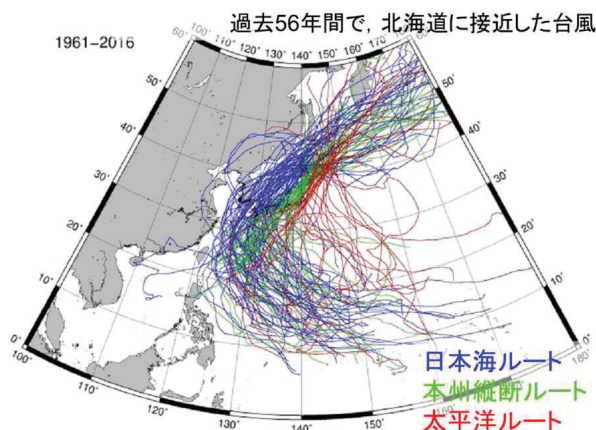
## ② 融雪期の換算雨量の増加 注) 換算雨量 = 連続雨量が存在する時間の融雪量 + 連続雨量



道内の雨の降り方が変わってきたのでは？ → 経験則が適用し辛い  
新たな気象ステージに入ったことを自覚し、調査研究に当たる必要性

## 北海道周辺を通過する台風の特徴

近年太平洋ルートが多い。北海道の周辺を通過する台風は、太平洋を経由するものの方が、低い中心気圧を維持したまま接近する。



\* 接近の定義: 北海道から300km以内の距離に達した台風

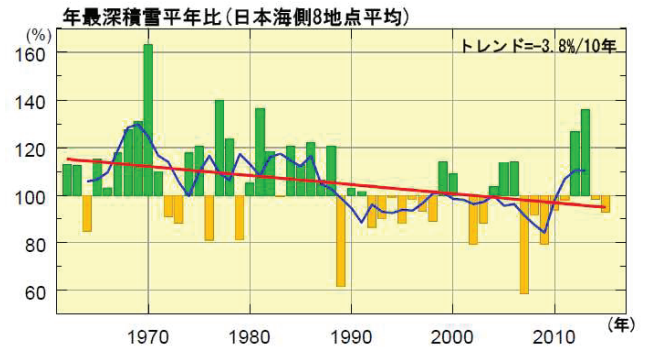
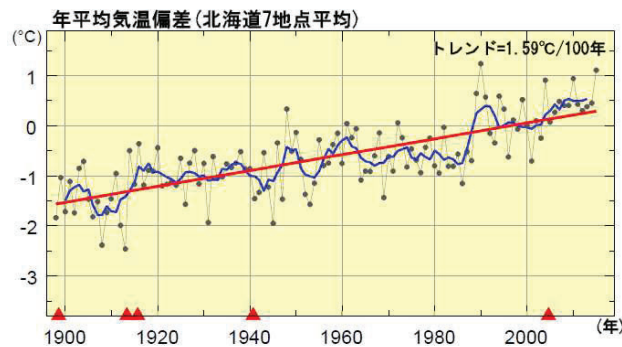
北緯30度から北緯40度を通過するまでの中心気圧の気圧変化度(hPa/° N)と数(N).  
(北緯30度を中心気圧が980hPa以下で通過した台風を対象)

| 平均期間      | 年数 | 全ルート  |     | 1 日本海ルート |    | 2 本州縦断ルート |    | 3 太平洋ルート |    |
|-----------|----|-------|-----|----------|----|-----------|----|----------|----|
|           |    | 気圧変化度 | N   | 気圧変化度    | N  | 気圧変化度     | N  | 気圧変化度    | N  |
| 1961-2016 | 56 | 2.62  | 116 | 2.90     | 67 | 2.68      | 24 | 1.82     | 25 |

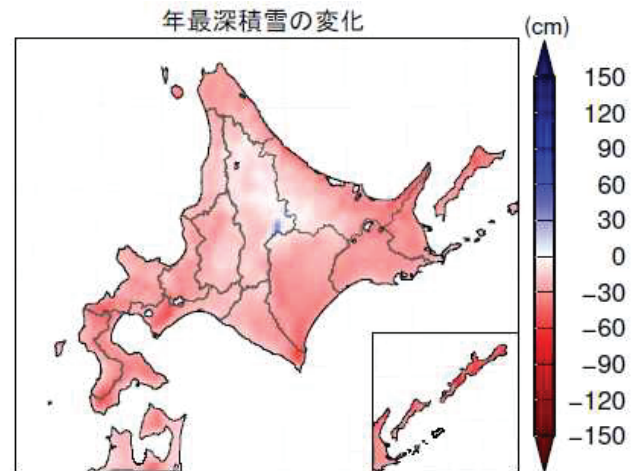
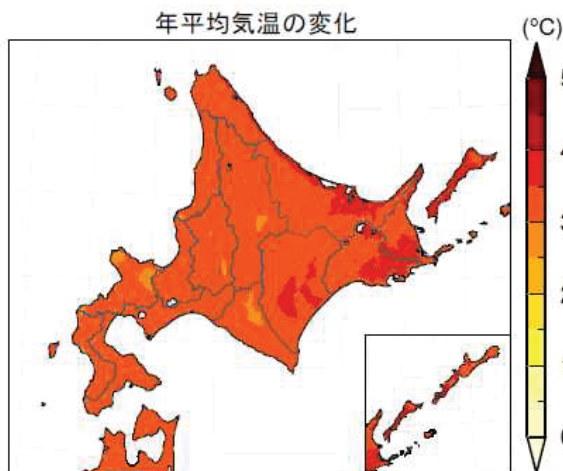
太平洋ルート: 北海道に接近する際に、他のルートと比較して弱体化しづらい。



# 今後の道内の気象条件変化 1



北海道の各地点を平均した長期変化傾向

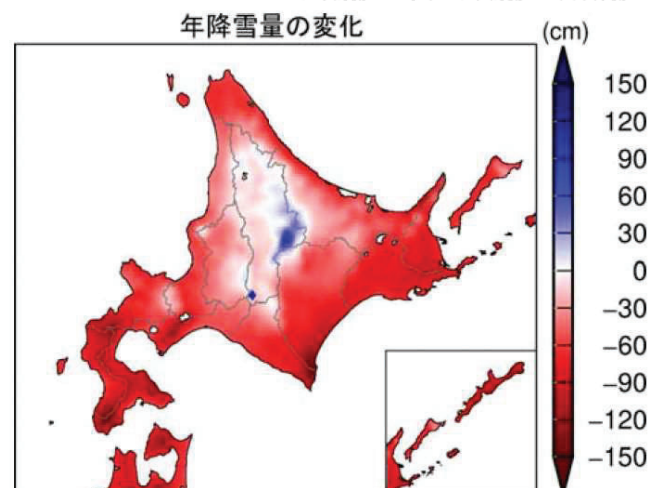
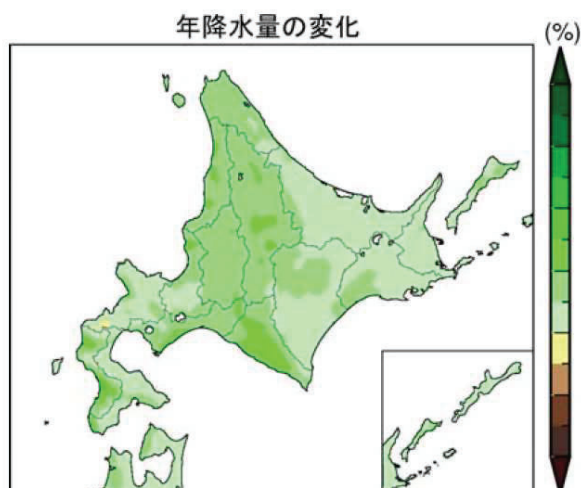
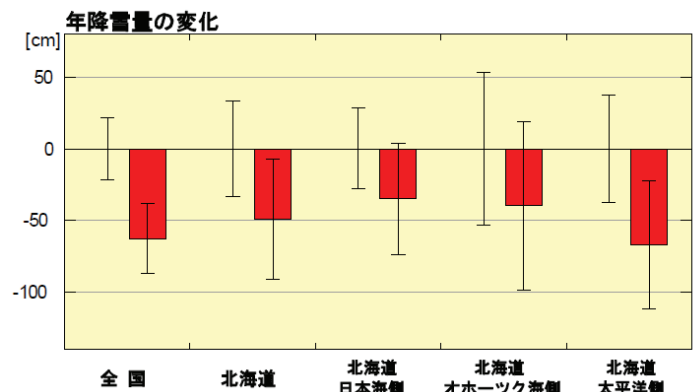
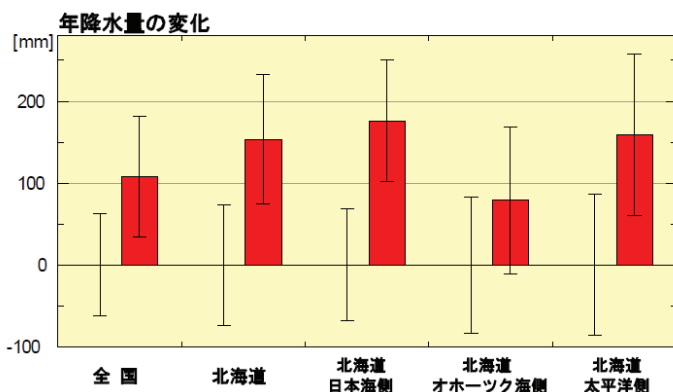


気象庁： 20世紀末（1980～1999 年）に対する21世紀末（2076～2095 年）の変化量予測  
（SRES A1B シナリオ（IPCC, 2000））

札幌管区気象台、北海道の気候変化【第2版】、2017年3月

9

# 今後の道内の気象条件変化 2



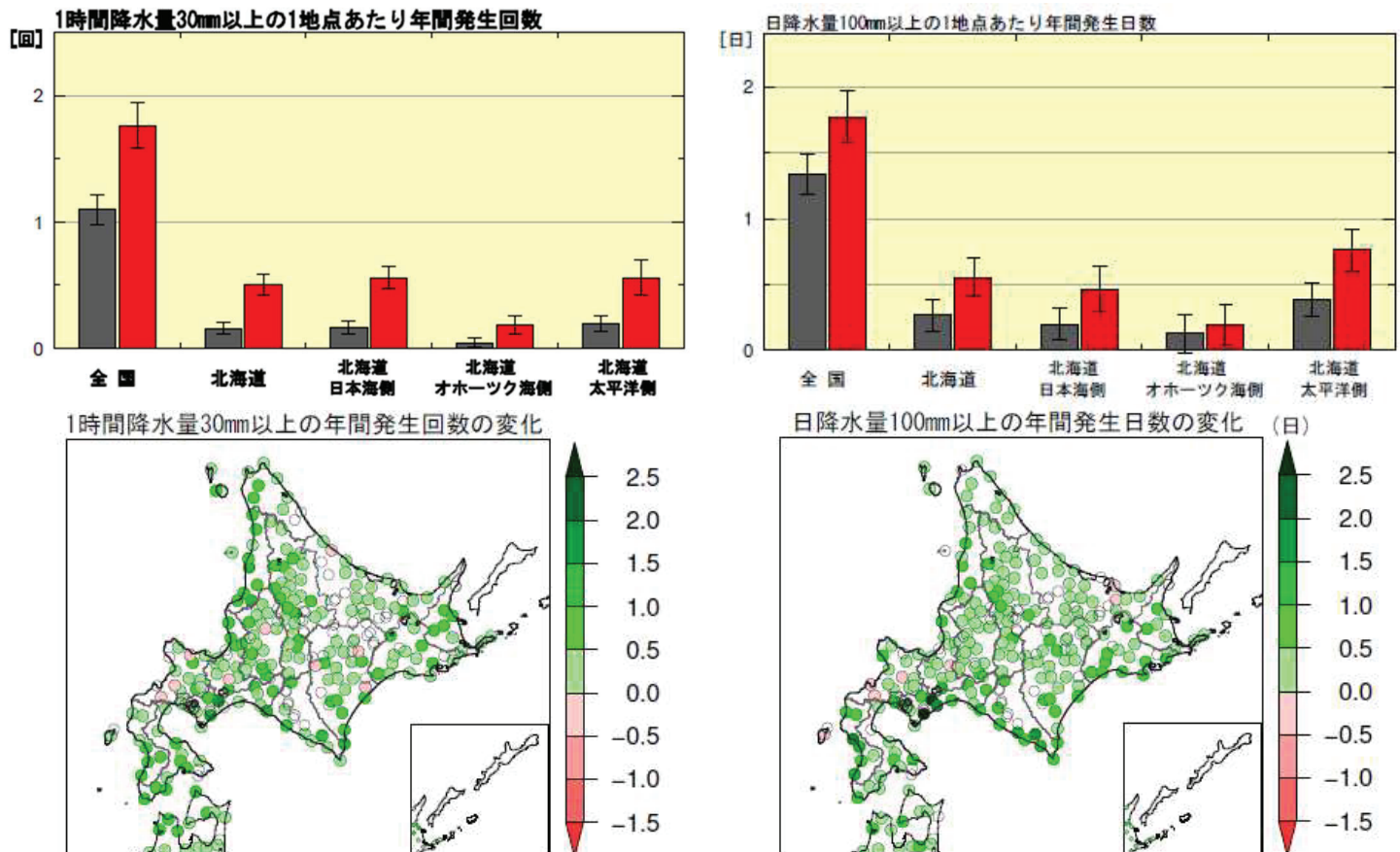
気象庁： 20世紀末（1980～1999 年）に対する21世紀末（2076～2095 年）の変化量予測  
（SRES A1B シナリオ（IPCC, 2000））

札幌管区気象台、北海道の気候変化【第2版】、2017年3月

10



# 今後の道内の気象条件変化 3



気象庁： 20世紀末（1980～1999 年）に対する21世紀末（2076～2095 年）の変化量予測  
 （SRES A1B シナリオ（IPCC, 2000））

札幌管区気象台、北海道の気候変化【第2版】、2017年3月 11

## 今後の北海道の気象条件と斜面災害

### ●自然外力変化の可能性●

#### ①気候変動(温暖化に伴う気象条件変化)は今後北海道でどのように進むのか？

- ・ 土砂災害の誘因となる降雨量はどの予測モデルでも増加する
- ・ 短期指標である短時間雨量の出現増加は観測値でも有意
- ・ 気候変動により春の訪れが早まり融雪の早期化が進む
- ・ 融雪期の土砂災害の危険性は換算雨量（降雨量＋融雪量）からも増加傾向が有意
- ・ 高標高や日本海側の一部を除いて降雪量は減少するも、融雪土砂災害の危険性は減少しない

#### ②今後の地盤災害対策において気候変動予測情報をどのように活用すべきか？

- ・ 年間降水量が10%増加、日降水量100mm以上が0.5回増えたら土砂災害のポテンシャルは何%増加するのか
- ・ d4PDFのようなアンサンブル予測情報を用いて振れ幅の議論ができ、すでに出現している記録的な気象外力をこの幅の中で評価可能
- ・ 世界的に見て優れているd4PDFからダウンスケーリングした5kmメッシュから、地域・地形を考慮した災害予測ができる
- ・ 予測モデルの特性から短期指標（時間雨量など）の予測精度は高いことを考慮して使用すべき

## 2. 平成28年8月北海道 豪雨による斜面災害



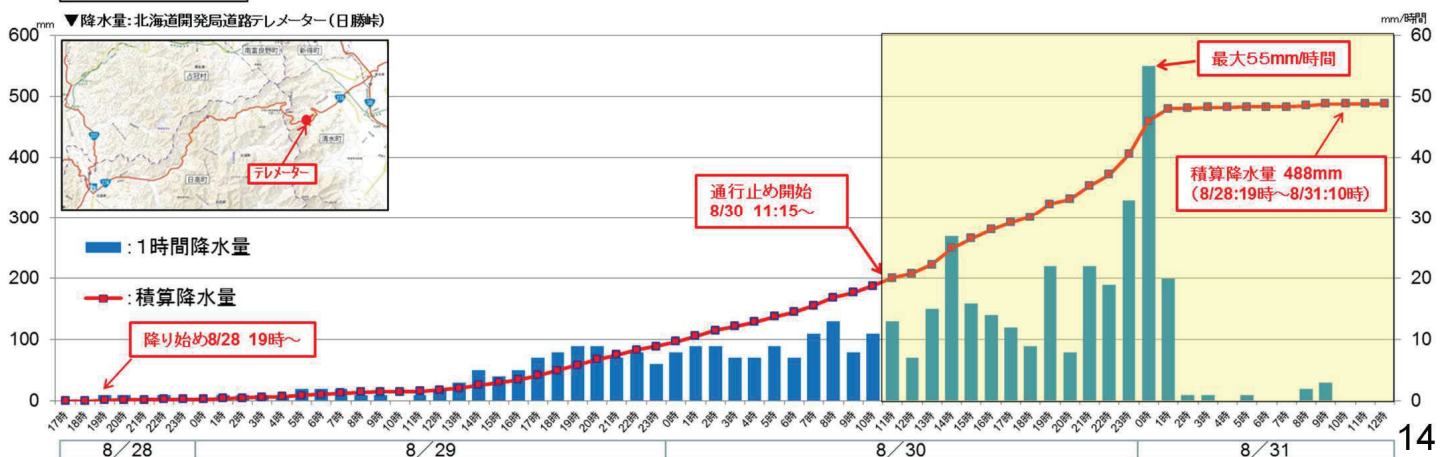
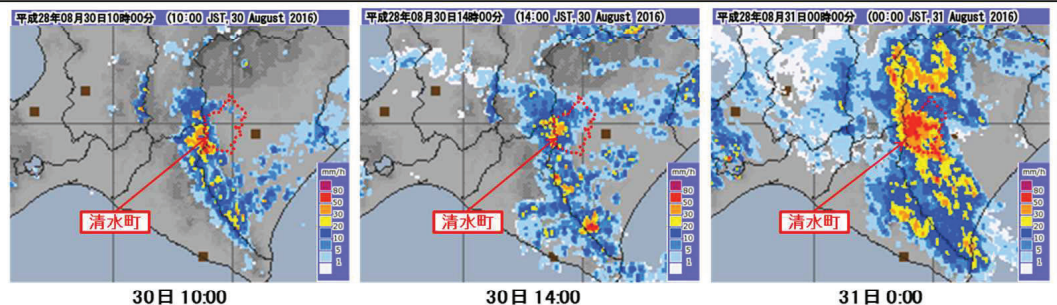
## 平成28年8月北海道豪雨

### 台風10号の概要

帯広開発建設部提供資料

8月17日～23日の1週間に3個の台風が北海道に上陸。また、8月29日から前線に伴う降雨があり、その後、台風第10号が北海道に接近した30日から31日の深夜にかけて、日勝峠周辺等にて局地的に猛烈な雨(観測史上1位)が降り、降り始めからの雨量は488mmを記録。

■国道274号  
日勝峠テレメータ(日高町)  
・1時間雨量: 55mm  
(8月30日23:00～0:00)  
・積算降水量: 488mm (観測史上1位)  
(8月28日19:00～)





# 国道274号日勝峠の被災概要

## 日高町千栄～清水町清水間（42.9 km）の被災箇所



| 区間   | 千路露橋～鹿鳴橋                                                                                                   | 鹿鳴橋～日勝峠                                                                                                                                                                 | 日勝峠～清水町 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 地質   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・日高変成帯に属する変成岩・深成岩</li> <li>・日高帯および空知-エゾ帯に属する非変成の砂岩・泥岩が分布</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・日高帯の堆積岩類を貫く花崗岩類が分布</li> <li>・浅部はマサ化が進行</li> <li>・風化花崗岩類の上位には、凍結破碎、凍結融解、ソリフラクションにより形成された周氷河斜面堆積物</li> <li>・角礫混じり土砂が分布</li> </ul> |         |
| 降雨   | 少ない                                                                                                        | 多い                                                                                                                                                                      |         |
| 被災特徴 | 河川増水による水衝部の侵食、洗掘                                                                                           | 土石流の発生や大量の路面表流水による排水施設の閉塞・破損・溢水に伴う盛土・切土斜面の侵食・浸透崩壊                                                                                                                       |         |

北海道開発局提供資料に加筆・修正 15

## 国道274号日勝峠の被災状況 1

### 清水町側（7合目付近）の被災状況



道路損壊（L=100m）



## 清水町側（8合目付近）の被災状況



## 土石流による盛土崩壊

17

# 国道274号日勝峠の被災状況3

## 日高町側（8合目付近）の被災状況



## 溢水による切土崩壊

18



# 国道274号の地盤災害の発生要因

## ● 7合目以上の高地 → 豪雨発生

- 風化花崗岩が細粒化したまさ土や周氷河性斜面堆積物で構成される地盤
  - 大量の雨水が浸入し脆弱になり易い
  - 不均質な地質で水みちがしやすい地質条件
  - 沢部で土石流が発生
- 道路路面を多量の表流水が流下
  - 道路線形の変化地点に集中 → 盛土の路肩部を侵食・洗掘
- 小段排水や法頭の排水溝に想定外の多量の水が流入
  - 溢水した表流水が法面を流下し侵食・洗掘 → 崩壊 に至る
- 道路下の横断管や縦断管に多量の土砂や流木が侵入し閉塞
  - 排水機能が低下 → 管周囲が水みちとなり盛土内に大量の雨水が浸透
  - 管周辺が侵食 → 盛土崩壊 に至る
  - 越流した路面表流水により侵食・洗掘 → 盛土崩壊 に至る

## ● 標高が低い地域 → 急激な河川増水

- 河川近接部の道路や橋梁の橋脚基礎、水衝部の橋台背面
  - 侵食・洗掘 → 崩壊 に至る

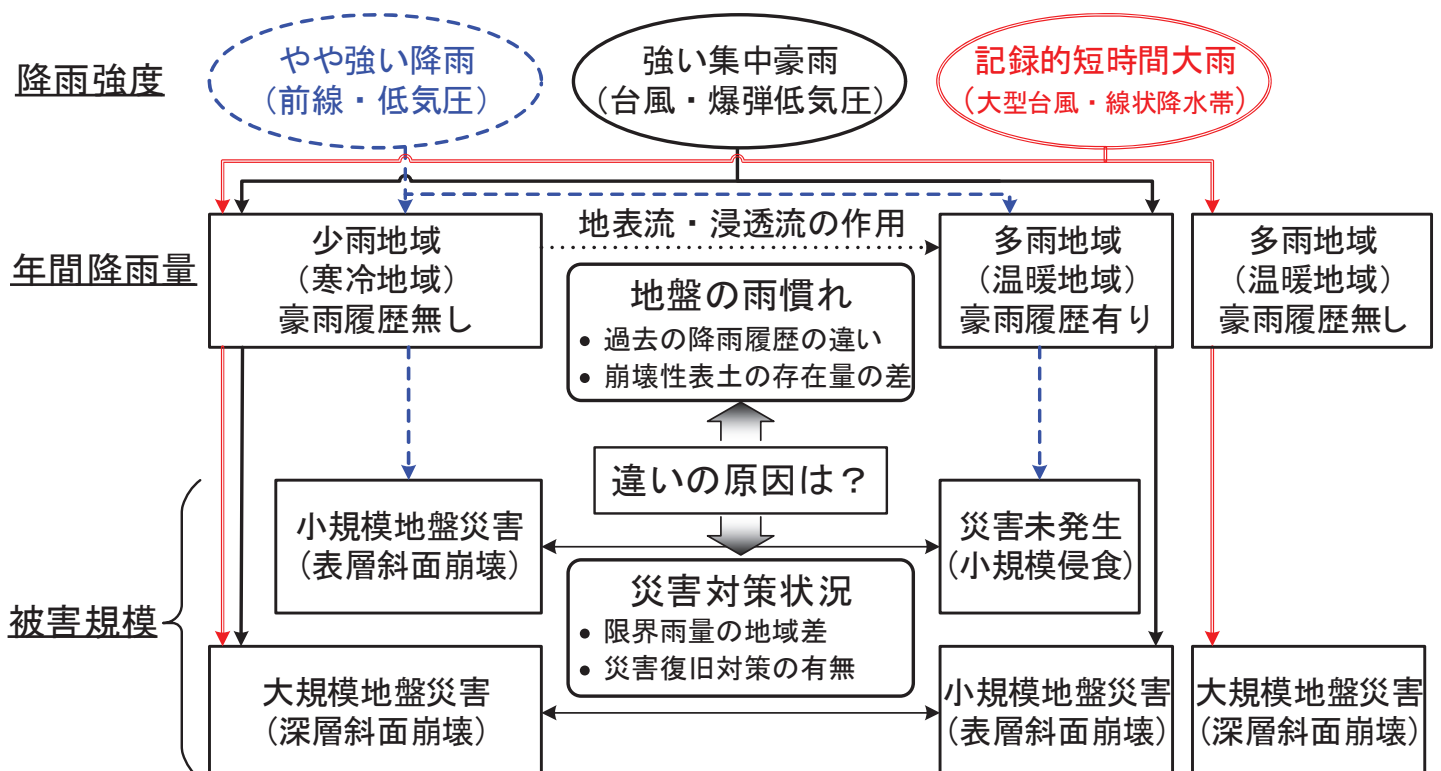
19

# 雨慣れ・気象慣れ — 台風10号の例 —

過去の降雨履歴・被災履歴  
に応じて変質する土砂災害  
の素因・誘因を考慮の必要性



教訓1:  
地盤の雨慣れ・気象慣れの災害  
への影響をどう評価すべきか？





# 想定を超える豪雨 - 台風10号の例 -



日勝峠の排水溝・横断管の被災状況

- 土構造物等の排水能力を上回るような想定外の降雨流出により被災した箇所が散見された。
- 豪雨に伴う地盤内に浸透できない表流水の存在とその流下経路が地盤災害を誘発した箇所が数多く見られた。

## 教訓2:

設計降水量では対応できない確率降雨をどう対処すべきか？

21

# 表流水の扱い - 台風10号の例 -

一般国道274号 日勝峠（8合目付近）の被災状況



一般国道274号 日勝峠（7合目付近）の被災状況



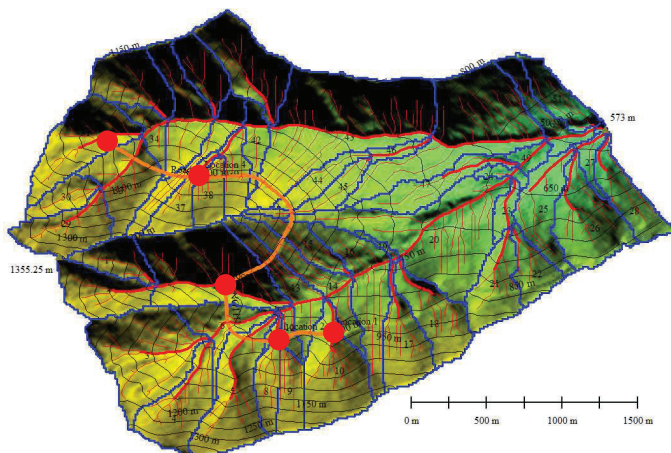
上り車線側（日高町行き）には土砂・石・樹木が堆積

- 確率降水量を上回る未経験の豪雨で生じた地盤に浸透できなかった雨水が表流水として大量に舗装面を流下
- 斜面崩壊地点は流路ネットワーク上に存在しており、地表流・浸透流の集積地形
- 地表流の発生とその集積が侵食や流路の拡大をもたらし、その結果土石流や表面侵食型の盛土斜面崩壊を誘発

## 教訓3:

豪雨時の地表流や浸透流をどう考慮し、広域リスク評価を行うか？

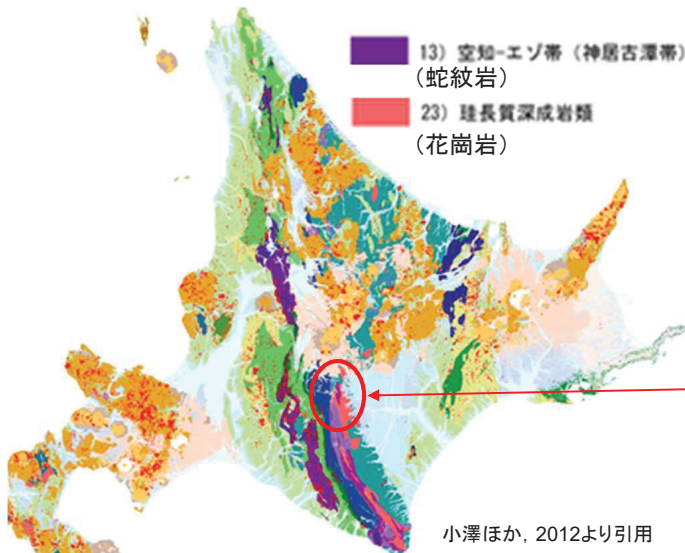
22



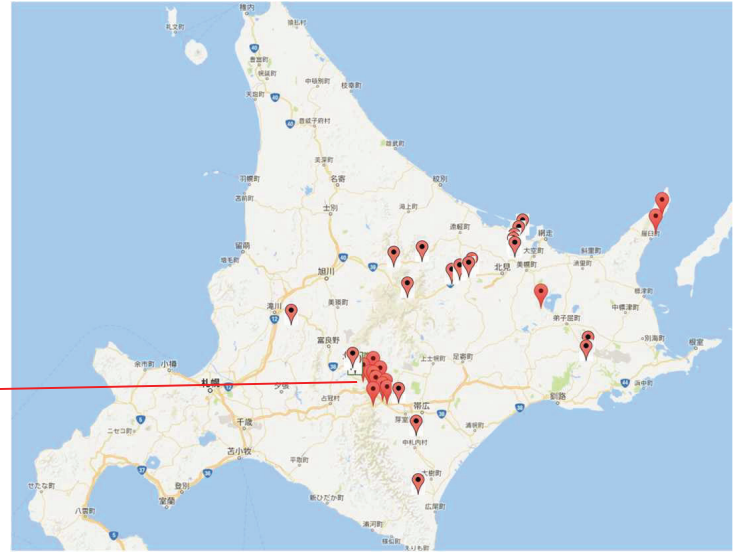
日勝峠の地形解析・水系解析結果



# 従来と異なる問題土 ― 台風10号の例 ―



北海道豪雨災害の調査箇所



北海道豪雨災害の調査箇所

- 日高変成帯の深成岩類は地すべり地形の分布密度小。
- 斜面崩壊箇所周辺は風化花崗岩(まさ土)や周氷河性斜面堆積物が広く分布。



一般国道274号(清水町側)7合目周辺の状況

## 教訓4:

外力が過去の履歴を超えて増大し、新たな問題土が顕在化した？

23

## 平成28年8月北海道豪雨災害の教訓

### KEY POINT

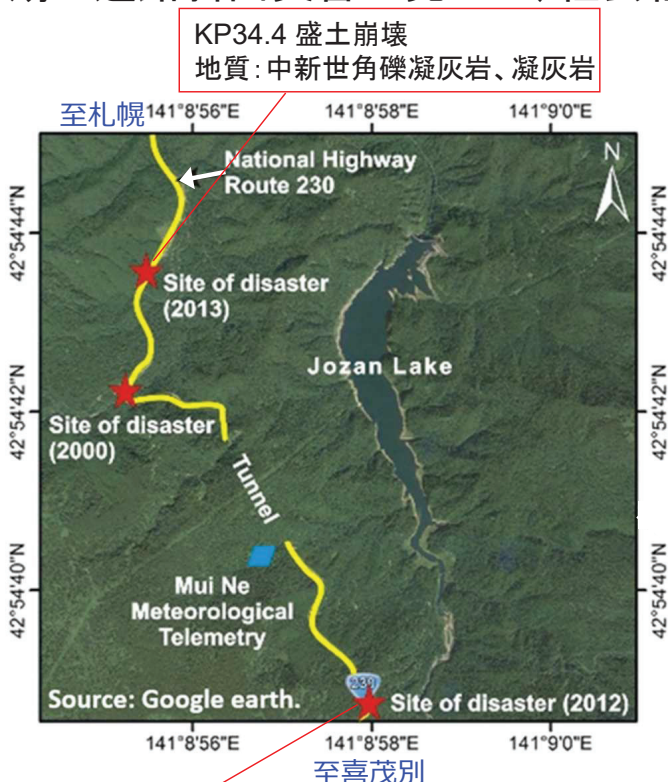
- 雨慣れ・気象慣れしていない地盤の扱い
- 従来の想定を超える豪雨対策の検討
- 地盤内に浸透しない表流水の扱い
- 従来と異なる問題土の顕在化の可能性

### 3. 平成24, 25年融雪期 斜面災害



## 国道230号中山峠の被災概要

札幌市と道南を結ぶ一般国道230号で平成24年、25年の2年連続で融雪期に道路斜面災害が発生し、社会経済活動に大きな影響を与えた。



#### ① 平成24年融雪期土砂災害

- 盛土法面崩壊規模:  
延長約40m、長さ約110m、深さ約5mの範囲で崩壊(崩壊土砂量: 約13,000m<sup>3</sup>)
- 災害発生要因:  
急激な融雪+大雨(日換算雨量128mm)による飽和度の上昇により発生
- 5月4~23日: 全面通行止(20日間)
- 5月23~26日: 片側交互通行

#### ② 平成25年融雪期土砂災害

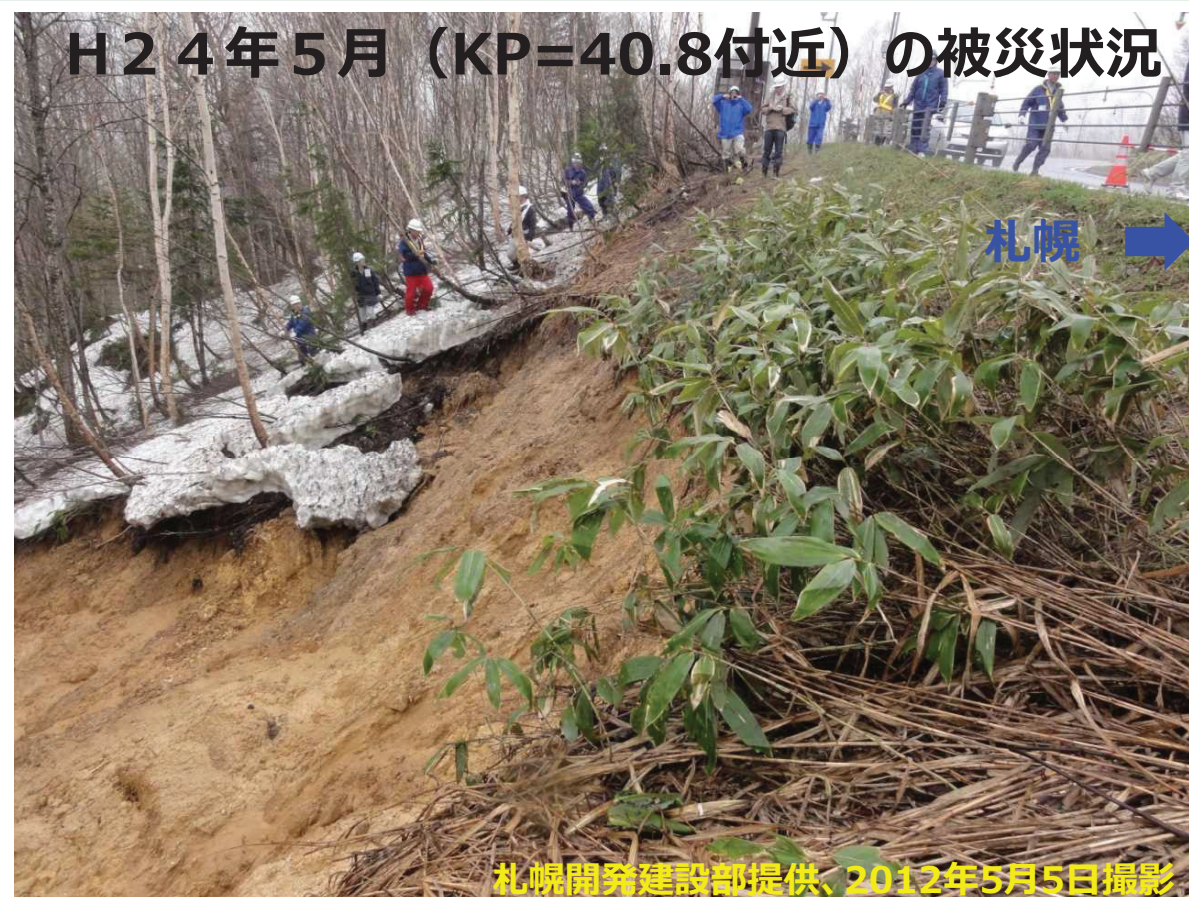
- 盛土法面崩壊規模:  
延長約50m、長さ約50m、深さ約5mの範囲で崩壊(崩壊土砂量: 約11,000m<sup>3</sup>)
- 災害発生要因:  
急激な融雪と大雨(日換算雨量118mm)による飽和度の上昇により発生
- 4月7~12日: 全面通行止(6日間)
- 4月12~25日: 片側交互通行(夜間通行止)





**盛土崩壊**

27



**盛土崩壊**

28



## H25年4月（KP=34.4付近）の被災状況



### 盛土崩壊

29

## H25年4月（KP=34.4付近）の被災状況



### 盛土崩壊

30



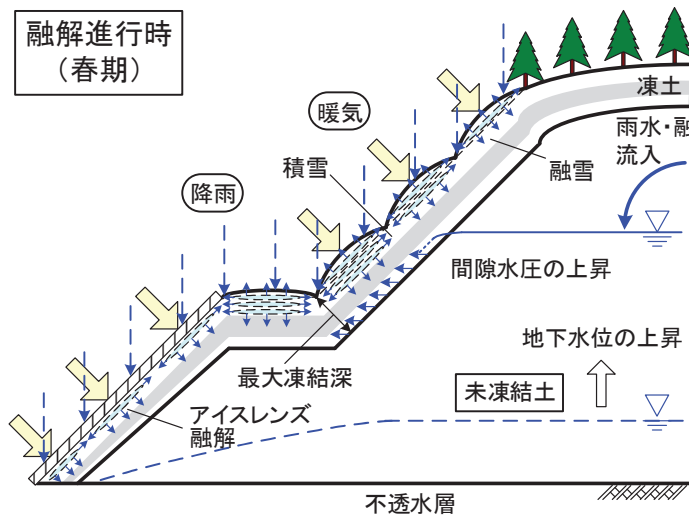
# 国道230号中山峠斜面崩壊要因

## 崩壊メカニズム

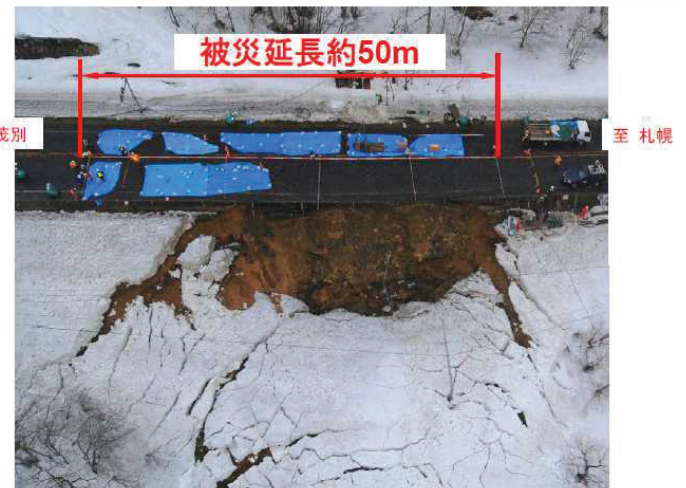
- ① 急激な降雨／融雪により地山(山側)から大量の雨水・融雪水が盛土内へ浸透し、盛土内の飽和度あるいは地下水位が上昇
- ② 盛土法面の積雪が法尻部からの地下水の浸出を抑制
- ③ 盛土法尻部の地下水位の上昇により当該箇所の間隙水圧が上昇
- ④ まず、盛土内の間隙水圧上昇によるせん断抵抗力の低下により地盤が不安定化し、法尻部の法面崩壊が発生
- ⑤ その後、法肩部からの法面崩壊が連動発生

斜面の安定性に対する融雪水の影響を考慮する必要性

融解進行時  
(春期)



融解期の凍結融解斜面の崩壊形態例



H25年4月被災状況 (KP34.4)

国土交通省・北海道開発局「国道230号中山峠災害対策検討委員会資料」より

31

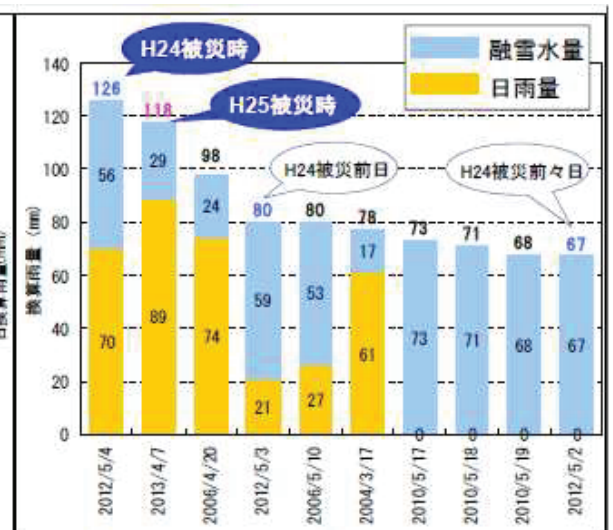
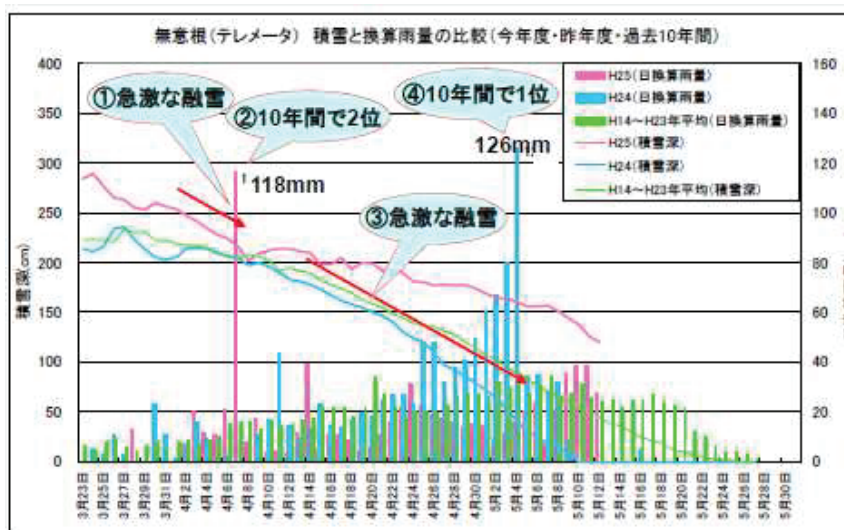
## 斜面崩壊箇所の気象条件

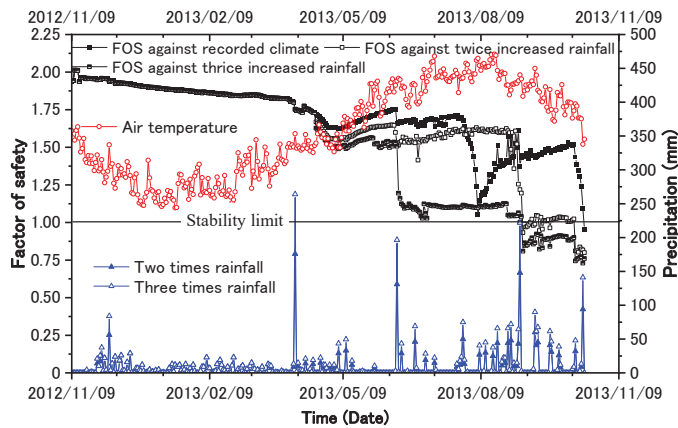
### ● 日換算雨量※の過去10年間の比較

※平均気温から融雪量を推定し水量に換算した値と、降雨量を足しあわせた値

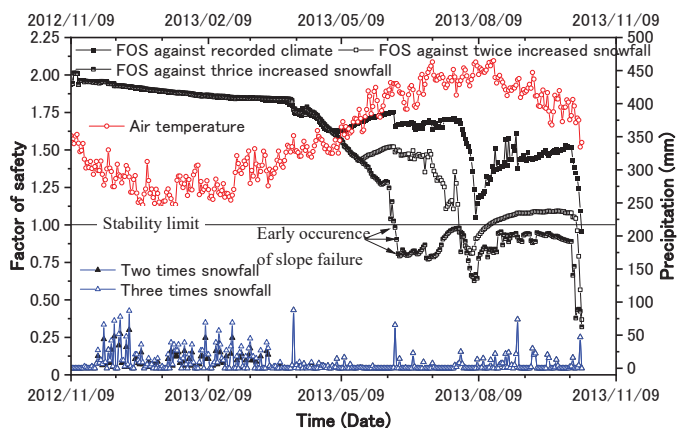
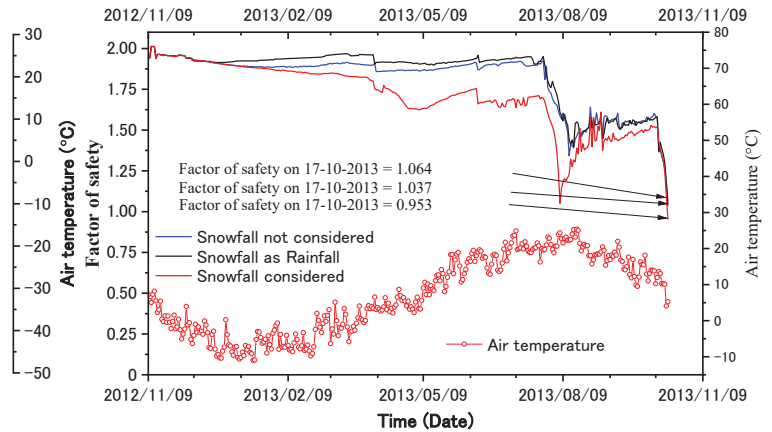
- ・ 平成25年被災時は、3月30日以降積雪深が急激に減少し始め、融雪量が増加 ……①
- ・ 被災発生当日(平成25年4月7日)の日換算雨量は118mm ……②
- ・ 平成24年被災時は、4月9日以降急激に積雪深が減少し始め、融雪量が増加 ……③
- ・ 被災発生当日(平成24年5月4日)の日換算雨量は126mm ……④

- 日換算雨量(融雪水量＋日雨量)はH24年被災時、H25年被災時にそれぞれ過去10年間の融雪期で1, 2番目の値を記録





2次元FEM解析モデル



2次元FEM解析モデル

- 降雨量が増加すると、非凍結期の斜面安定性(安全率)は大幅に低下
- 降雪量が増加すると、融雪に要する時間も長くなり、大量の融雪水浸透によりさらに安全率は低下
- 融雪により地盤の飽和度は長期に亘り高い状態に維持されることから、融雪水は、融解期以降の安全率の推移にも大きな影響を及ぼす



斜面の安定性に対する降雪・融雪の影響を考慮する必要性

## 4. 気候変動に伴う積雪寒冷地の斜面災害リスクに向けて



# 北海道土砂災害警戒情報システム



対象区域： 住居地域  
対象災害： 豪雨に起因する土石流，急傾斜地の崩壊，地すべり

## QUESTION：

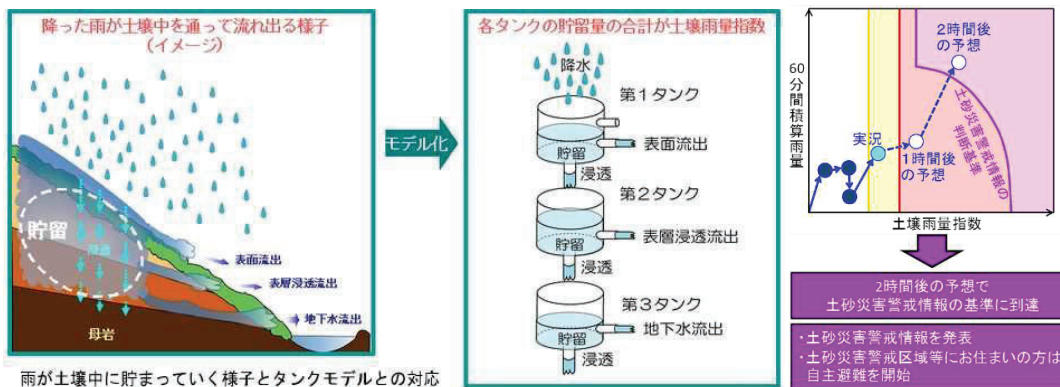
- 山間部の土砂災害発生予測に適用可能か？
- 融雪期の土砂災害発生予測に適用可能か？

北海道土砂災害警戒情報システム 北海道庁HPより

## 土壌雨量指数の留意点

- ① 全国一律のパラメータを用いており，個々の傾斜地における植生，地質，風化等は未考慮。
- ② 比較的表層の地中をモデル化。従って，深層崩壊や大規模な地すべりといった地下深くまで及ぶような現象は対象外。

35



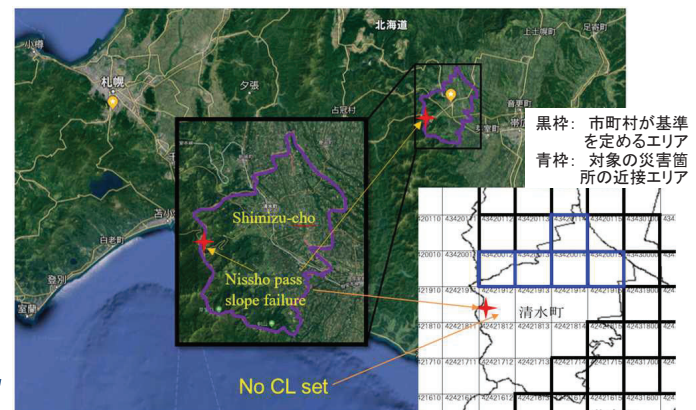
土砂災害警戒情報・土砂災害警戒判定(気象庁) 気象庁HPより

# 土砂災害警戒情報システムの適用性 1

土砂災害警戒情報システムの対象は主に住宅地域であり，民家のない山地は対象から外れていることが多い。

豪雨時の山間部の土砂災害発生予測に適用可能か？

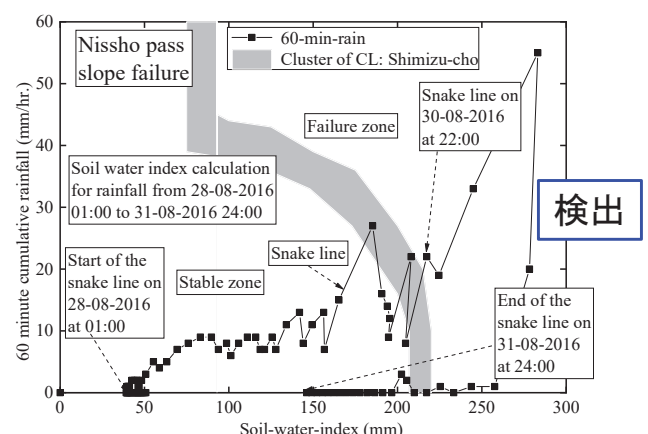
災害発生は予測できるが，正確な位置や規模は予測不可



土砂災害警戒判定基準設定区域(清水町近傍)



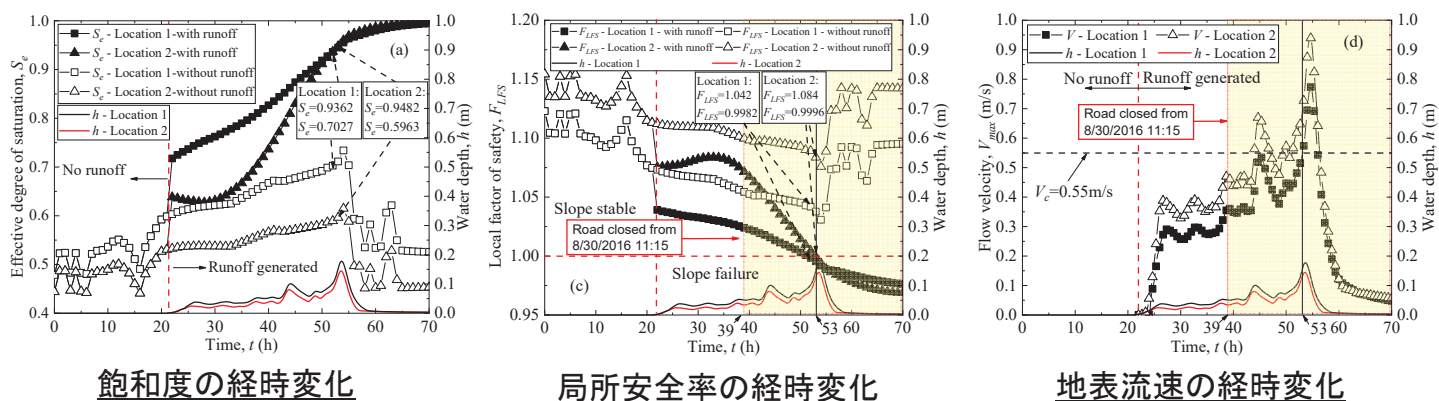
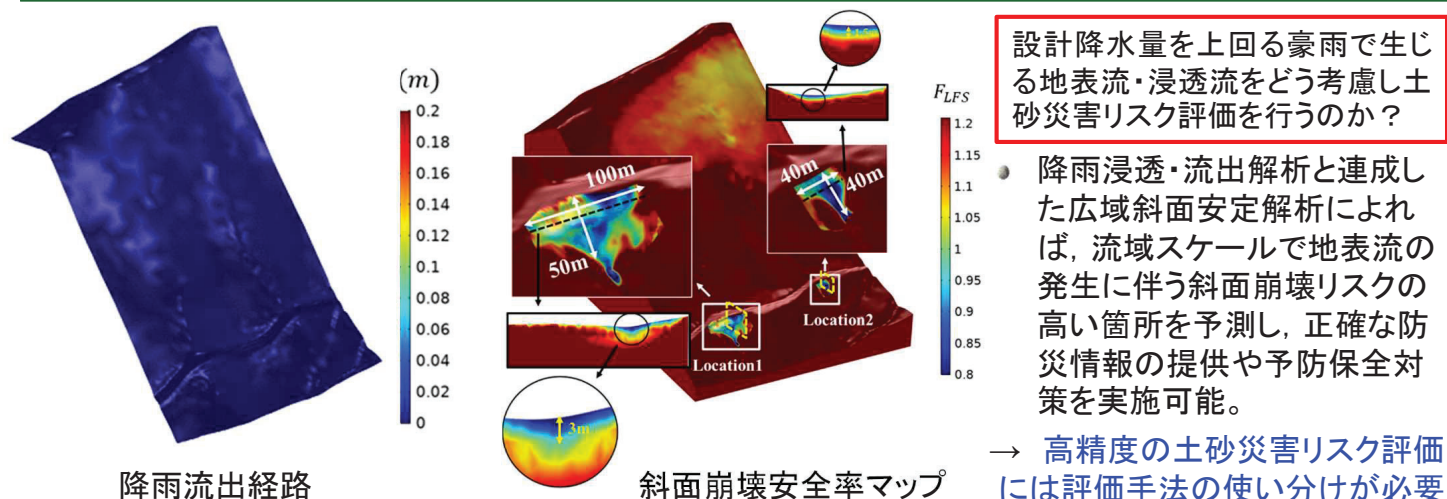
国道274号日勝峠斜面崩壊(2016.8.30)



国道274号日勝峠斜面崩壊(2016.8.30) 36



# 降雨浸透・流出を考慮した土砂災害リスク評価



豪雨時の地表流を考慮し道路沿いの複数斜面のハザードマップを作成可

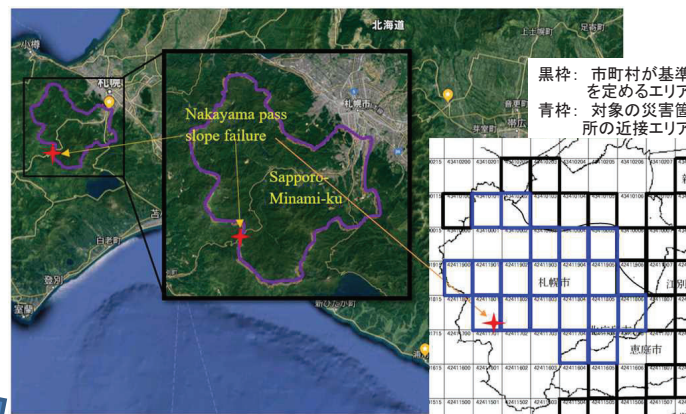
## 土砂災害警戒情報システムの適用性 2

支部合同シンポジウム

タンクモデルは全国一律のパラメータを用いており、積雪寒冷地など土砂災害の地域性を考慮したものではない。

融雪期の土砂災害発生予測に適用可能か？

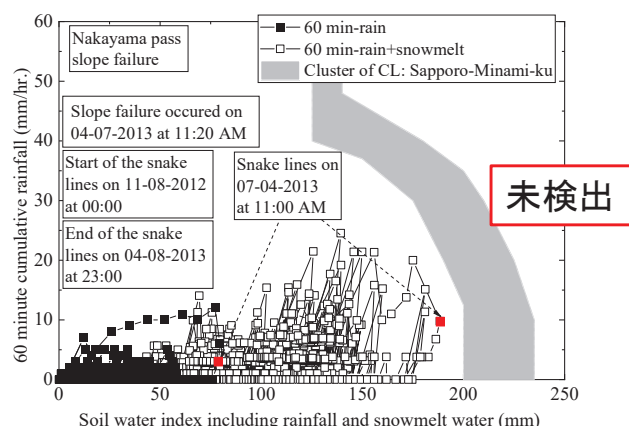
融雪水の考慮では災害発生は予測できない。精確な予測には崩壊機構の考慮が必要



土砂災害警戒判定基準設定区域(札幌市近傍)



国道230号中山峠斜面崩壊(2013.4.7)

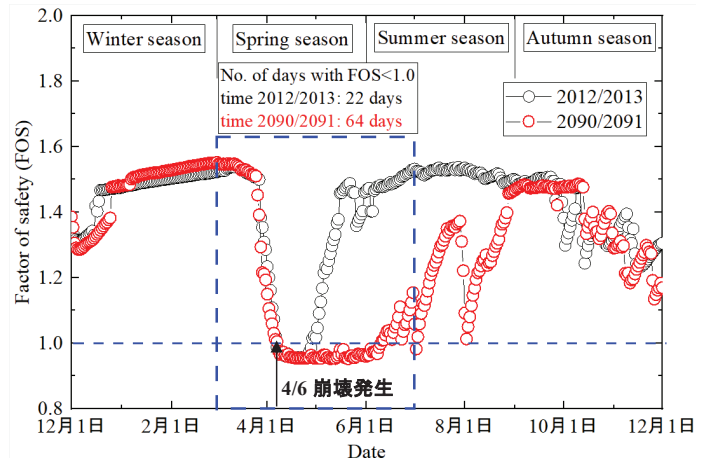
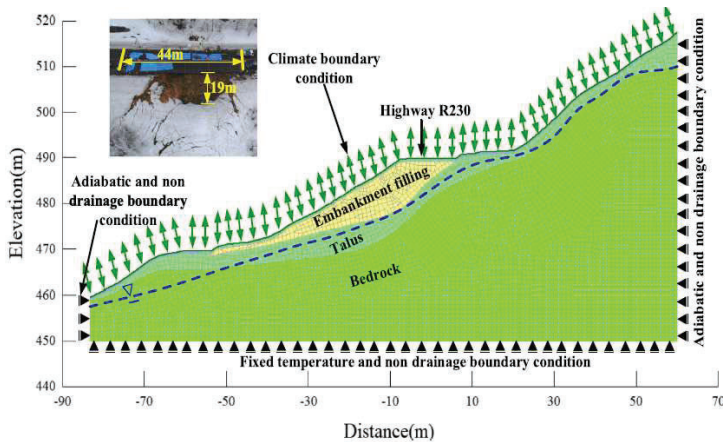


国道230号中山峠斜面崩壊(2013.4.7) 38

# 寒冷地斜面崩壊危険度の将来予測

気候変動に伴う将来の気象条件変化（気温上昇や降水量の増加）により北海道の土砂災害はどのようになるか？

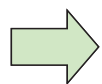
力学的DS手法により札幌の70年後の気象条件を予測し、熱伝導/浸透連成FEMによる斜面安定解析を用いて気候変動が積雪寒冷地斜面の安定性に及ぼす影響を評価



熱伝導/浸透連成FEM解析モデル(中山峠)

近未来の中山峠の斜面安定性評価例

- 気候変動の影響を受け札幌近郊の年間の土砂災害リスクは今後増大
- 同手法は、北海道のような気候変動災害脆弱地域に対して近未来の地盤防災・減災対策を考える上で有効

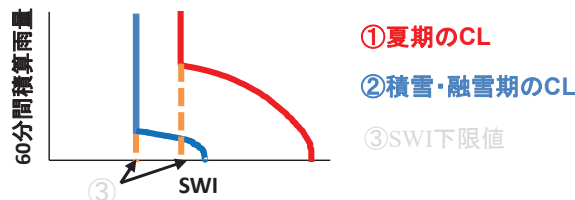


気象条件変化に呼応して道内で発生してきた既往の土砂災害が今後どのように変容する可能性があるかを検討する必要性

39

# 気候変動に伴う斜面災害危険度の評価

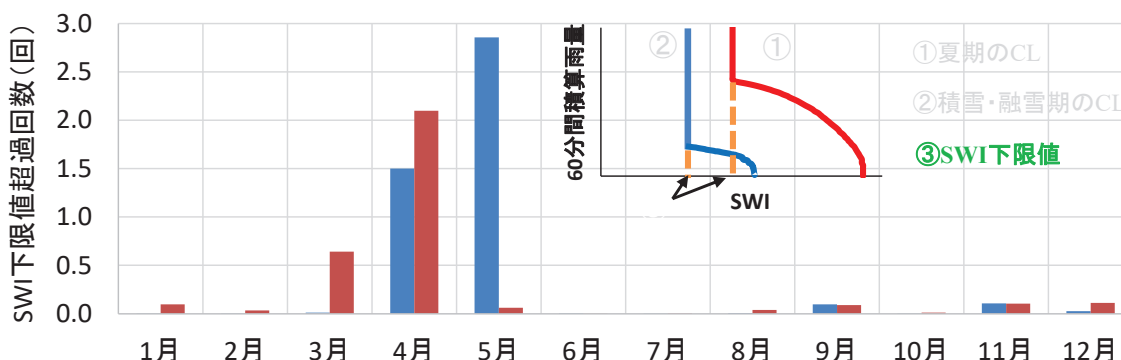
片寄陸, 中津川誠, 関洵哉: d4PDFによる降雨と融雪過程を考慮した気候変動に伴う斜面災害危険度の評価, 令和3年度土木学会北海道支部論文報告集, 第78号, C-07, 2022.1.



|      | CL超過回数 |        | 発生頻度 (回/50年) |        |
|------|--------|--------|--------------|--------|
|      | 夏期     | 積雪・融雪期 | 夏期           | 積雪・融雪期 |
| 現在気候 | 0      | 49     | 0            | 0.8    |
| 将来気候 | 4      | 159    | 0.04         | 1.5    |

将来, 気候変動により夏期に比べ積雪・融雪期での斜面災害の危険度が高まる

d4PDFを用いたCL超過判定結果の比較



将来, 気候変動により融雪期での斜面災害の発生が早まると考えられるため早めの警戒が必要

d4PDFを用いたSWI下限値の超過回数の比較

40



# 今後の気候変動脆弱地域災害リスク評価

## ● 自然外力変化の可能性

- ・ 気候変動(地球温暖化に伴う気象条件変化)は今後北海道でどのように進む可能性があるのか？
- ・ 将来の地盤災害対策において気候変動予測のどういう情報をどのように活用すべきか？



**北海道で今後増加が予想される現行の確率降水量では対応が難しい未経験の異常気象時の土砂災害リスク評価の重要性増**

## ● 災害形態変容の可能性

- ・ 気候変動に呼応して道内で発生してきた土砂災害は今後どのように変化するのか？
- ・ 気候変動に伴って今後道内未経験の複合地盤災害が発災するとしたらそれをどのように予想すればよいのか？



**将来気候で発災が予想される積雪寒冷地特有の事象を踏まえた新たな形態の複合地盤災害の予測とその体系化の必要性**

## ● 耐災害性強化の必要性

- ・ 既存の設計・維持管理法では予測・評価が難しい潜在的な災害リスクに対してどのような備え(対策)が考えられるのか？
- ・ 将来の災害外力の加速・大規模化あるいは複合化に対するより適切な気候変動適応策の構築に我々は今何をなすべきか？



**北海道の気象特性と地域特性を考慮した総合的な土砂災害リスク評価と災害適応策の在り方について継続・学際的議論要**

## 謝 辞

調査・研究に多大なるご協力を賜りました関係各位に  
御礼申し上げます。

国土交通省北海道開発局，北海道，札幌市，  
日本気象協会北海道支社，東日本高速道路(株)北海道支社，  
北海道道路管理技術センター，地盤工学会地盤災害調査団各位

### 【参考文献】

- Subramanian, S. S., Ishikawa, T., Tokoro, T. : Stability assessment approach for soil slopes in seasonal cold regions, Engineering Geology, 221: 154-169, 2017.4. (10.1016/j.enggeo.2017.03.008)
- Subramanian, S. S., Ishikawa, T., Tokoro, T. : An early warning criteria for the prediction of snowmelt induced soil slope failures in seasonal cold regions, Soils and Foundations, 58(3): 582-601, 2018.6. (10.1016/j.sandf.2018.02.021)
- Zhu Y., Ishikawa, T., Subramanian, S. S., Luo, B. : Simultaneous analysis of slope instabilities on a small catchment-scale using coupled surface and subsurface flows, Engineering Geology, 275: 105750, 2020.7. (10.1016/j.enggeo.2020.105750)
- Zhu Y., Ishikawa, T., Subramanian, S. S., Luo, B. : Early warning system for rainfall and snowmelt induced slope failure in seasonally cold regions, Soils and Foundations, 61(1): 198-217, 2021.1. (10.1016/j.sandf.2020.11.009)
- Zhu Y., Ishikawa, T., Yamada, T., Subramanian, S. S. : Probability Assessment of Slope Instability in Seasonally Cold Regions under Climate Change, Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2: 20, 2021.7. (10.1186/s43065-021-00034-1)
- 片寄陸, 中津川誠, 関洵哉: d4PDFによる降雨と融雪過程を考慮した気候変動に伴う斜面災害危険度の評価, 令和3年度土木学会北海道支部論文報告集, 第78号, C-07, 2022.1.

**ご静聴ありがとうございました。**

# 気候変動に伴う降雨変化の特徴 と洪水災害リスクの考え方

北海道大学 大学院工学研究院

山田 朋人

tomohito@eng.hokudai.ac.jp

2022年3月11日(金)

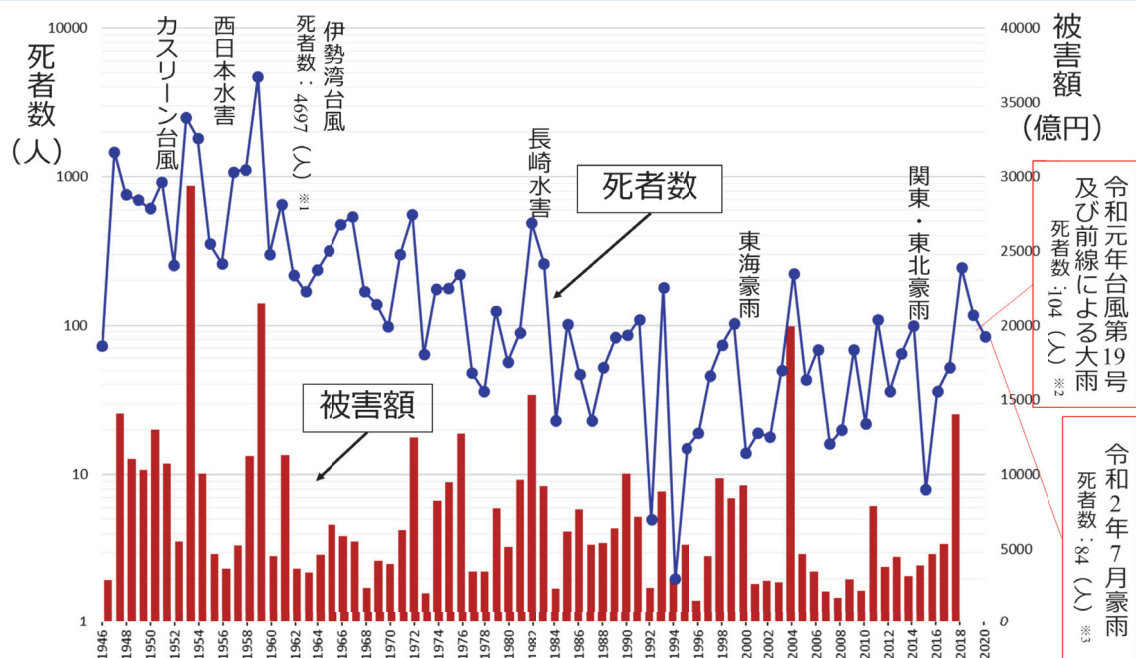
土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム  
「温暖化が先鋭化する九州と北海道における水・地盤  
災害の激甚化への適応とは？」

## 我が国における水害による死者数と被害額の関係 2

治水整備により、戦後からの1990年代後半に亘り、水害は減少した一方、  
**2008年以降、水害は増加傾向にある。**

我が国の直轄河川における堤防の整備状況（河川整備基本方針）は**67.7%※（2018年時点）**。

※出典：国土交通省：直轄河川堤防整備状況等，2018.



注) 死者数は、水害・土砂災害による合計値であり、各年の水害被害額は、2005年価格に実質化したものである。また、2019年度と2020年度の項目にはそれぞれ、「令和元年台風第19号及び前線による大雨」および「令和2年7月豪雨」に伴う死者数のみを記入した。

※1消防白書より

※2消防庁災害対策本部：令和元年台風第19号及び前線による大雨による被害及び消防機関等の対応状況（第6報）

※3内閣府 防災情報のページ：令和2年7月豪雨による被害状況等について（11月2日14:00現在）

※1946年から2018年までの水害による死者数および水害被害額は、国土交通省「水害統計調査」に掲載されているものを用いた。

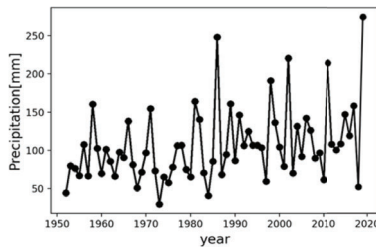


Mann-Kendall検定に基づき年最大日降水量の時系列のトレンドを定量化。

2020年時点で、北海道、東北および九州地方を始めとした諸地域で、年最大日降水量時系列の非定常性が検出された。

1976年から2020年までの45年間分の日雨量のデータに(約16000日以上)全く欠損、欠測がないAMeDAS(674地点)データを解析

### 年最大降雨量の時系列

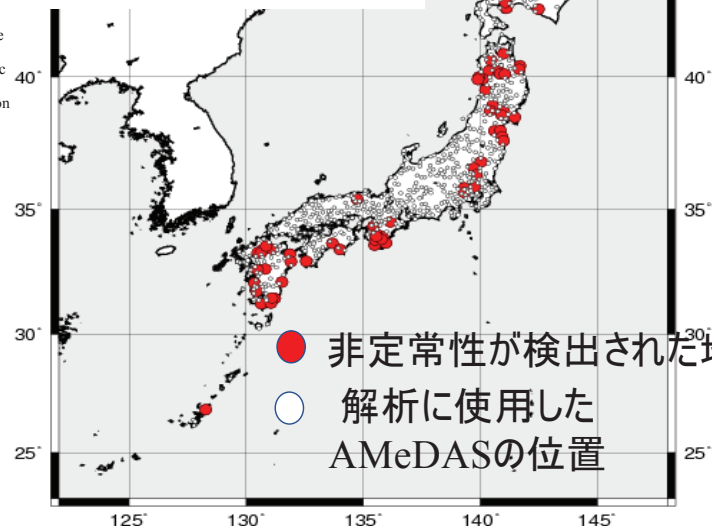


【左図】阿武隈川岩沼基準地点上流域における年最大流域平均雨量

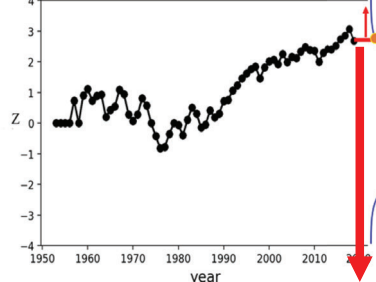
【左下図】阿武隈川岩沼基準地点での統計量Zの時系列

M.G.Kendall(1938), A New Measure of Rank Correlation  
Henry.B.Mann(1945), Nonparametric Tests against Trend  
M.G.Kendall(1975), Rank Correlation Methods  
Hirsch et al.(1982), Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data

有意水準5%で非定常性が検出された70地点(2020年時点)



### 検定統計量の時系列



非定常性が検出された時点

25/861地点(1986年) → 36/847地点(1996年)  
→ 68/777地点(2006年) → 36/847地点(2010年)

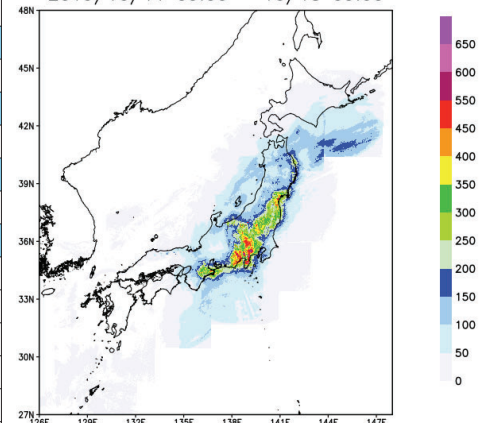
## 令和元年東日本台風時に計画降雨量を超過する雨量を記録した河川

近年、記録的豪雨が毎年のように発生し、計画降雨量(基本方針)を超過する雨量が記録されている。

| 河川名 |      | 基準点     | 想定確率年      | 計画降雨         | 10月11-12日の<br>2日間雨量 | 計画降雨<br>に対する比率 | 最大24時間<br>雨量 |
|-----|------|---------|------------|--------------|---------------------|----------------|--------------|
| 関東  | 久慈川  | 山方      | 1/100確率    | 235 mm /2日   | 256.0 mm            | 109%           | 247.4 mm     |
|     | 那珂川  | 野口      | 1/100確率    | 300 mm /2日   | 306.2 mm            | 102%           | 295.3 mm     |
|     | 利根川  | 八斗島     | 1/200確率    | 336 mm /3日   | 298.7 mm            | 89%            | 282.4 mm     |
|     | 渡良瀬川 | 高津戸     | 1/100確率    | 419 mm /3日   | 370.2 mm            | 88%            | 354.1 mm     |
|     | 鬼怒川  | 石井      | 1/100確率    | 362 mm /3日   | 365.3 mm            | 101%           | 348.6 mm     |
|     | 荒川   | 岩淵      | 1/200確率    | 516 mm /3日   | 417.6 mm            | 76%            | 401.2 mm     |
|     | 多摩川  | 石原      | 1/200確率    | 457 mm /2日   | 473.0 mm            | 104%           | 453.0 mm     |
|     | 鶴見川  | 末吉橋     | 1/150確率    | 405 mm /2日   | 306.1 mm            | 76%            | 293.2 mm     |
| 相模川 | 厚木   | 1/150確率 | 460 mm /2日 | 467.8 mm     | 102%                | 443.8 mm       |              |
| 北陸  | 阿賀野川 | 馬下      | 1/150確率    | 223 mm /2日   | 171.6 mm            | 77%            | 164.5 mm     |
|     | 千曲川  | 立ヶ花     | 1/100確率    | 186 mm /2日   | 193.7 mm            | 104%           | 186.8 mm     |
| 東北  | 北上川  | 狐禅寺     | 1/150確率    | 200 mm /2日   | 145.5 mm            | 73%            | 132.9 mm     |
|     | 旧北上川 | 和渕      | 1/150確率    | 267 mm /2日   | 257.7 mm            | 97%            | 249.0 mm     |
|     | 鳴瀬川  | 三本木橋    | 1/100確率    | 312 mm /2日   | 303.3 mm            | 94%            | 292.7 mm     |
|     | 吉田川  | 落合      | 1/100確率    | 335 mm /2日   | 268.1 mm            | 80%            | 260.9 mm     |
|     | 名取川  | 名取橋     | 1/150確率    | 362.8 mm /2日 | 335.9 mm            | 93%            | 330.4 mm     |
|     | 広瀬川  | 広瀬橋     | 1/150確率    | 388.4 mm /2日 | 312.8 mm            | 81%            | 307.4 mm     |
|     | 阿武隈川 | 福島      | 1/150確率    | 256.5 mm /2日 | 269.8 mm            | 105%           | 267.5 mm     |

気象庁Cバンドレーダによる観測72時間雨量

2019/10/11 09:00 ~ 10/13 09:00 [mm]



- ・欧米諸国では、**気候変動を考慮した河川整備を実施**
- ・我が国の直轄河川における堤防の整備状況（河川整備基本方針）は、**67.7%※<sup>1</sup>（2018年時点）** ※<sup>1</sup> 出典：国土交通省：直轄河川堤防整備状況等、2018。

- **米国**：ハドソン川下流域(NYC)において、気候変動を踏まえた浸水リスクを算出した。
- **英国・独国**：温暖化シナリオを用いて、**気候変動分を堤防の余裕高に上乗せ**している。（UK、Environment Agency、2016、KLIWA、2009）
- **蘭国**：ハザードベース(~2016年)→**100%完了**、**リスクベース**(2017年~)→25%完了

## ・特に米国・NZでは、自治体を中心に治水対策を実施

- **NZ**は、全国17地域ごとの評議会（**Regional Council**※<sup>2</sup>）にリスク軽減計画の作成と実施に権限と責任を持たせる。 ※<sup>2</sup> 環境・国土問題に関する専門の意思決定の議会、全国に11分かれる
- **米国**は、連邦堤防の基準(1/100年超過確率)より**地方自治体の判断が優先**される。
- **仏国**は、堤防の氾濫防御基準は**各地区のステークホルダーが設定**する。



（土木学会「河川の体力診断※」の中で著者ら実施の内容(現在、17国23河川)」）  
 ※ 諸外国との比較から道路・河川・港湾の整備水準を判定する

# 流域治水への転換

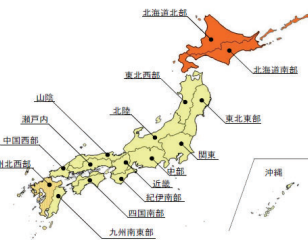
## 気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言 改訂版【概要】 ＜気候変動に伴う降雨量や洪水発生頻度の変化＞

- 降雨特性が類似している地域区分ごとに将来の降雨量変化倍率を計算し、将来の海面水温分布毎の幅や平均値等の評価を行った上で、降雨量変化倍率を設定。
- 2℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道で1.15倍、その他(沖縄含む)地域で1.1倍、4℃上昇した場合の降雨量変化倍率は、北海道・九州北西部で1.4倍、その他(沖縄含む)地域で1.2倍とする。
- 4℃上昇時には小流域・短時間降雨で影響が大きいため、別途降雨量変化倍率を設定する。

### ＜地域区分毎の降雨量変化倍率＞

| 地域区分        | 2℃上昇 | 4℃上昇 |     |
|-------------|------|------|-----|
|             |      | 短時間  | 長時間 |
| 北海道北部、北海道南部 | 1.15 | 1.4  | 1.5 |
| 九州北西部       | 1.1  | 1.4  | 1.5 |
| その他(沖縄含む)地域 | 1.1  | 1.2  | 1.3 |

- ※ 4℃上昇時の降雨量変化倍率は、産業革命以前に比べて全球平均気温がそれぞれ2℃、4℃上昇した世界をシミュレーションしたモデルから試算
- ※ 流域面積100km<sup>2</sup>以上については適用する。ただし、100km<sup>2</sup>未満の場合についても降雨量変化倍率が今回設定した値より大きくなる可能性があることに留意しつつ適用可能とする。
- ※ 年超過確率1/200以上の規模(より高頻度)の計画に適用する。



＜参考＞降雨量変化倍率をもとに算出した、流量変化倍率と洪水発生頻度の変化の一級水系における全国平均値

| 気候変動シナリオ | 降雨量   | 流量    | 洪水発生頻度 |
|----------|-------|-------|--------|
| 2℃上昇時    | 約1.1倍 | 約1.2倍 | 約2倍    |
| 4℃上昇時    | 約1.3倍 | 約1.4倍 | 約4倍    |

- ※ 2℃、4℃上昇時の降雨量変化倍率は、産業革命以前に比べて全球平均気温がそれぞれ2℃、4℃上昇した世界をシミュレーションしたモデルから試算
- ※ 流量変化倍率は、降雨量変化倍率を乗じた降雨より算出した。一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の洪水の発生頻度の平均値
- ※ 洪水発生頻度の変化倍率は、一級水系の治水計画の目標とする規模(1/100～1/200)の降雨の、現在と将来の発生頻度の変化倍率の平均値
- ※ 例として、ある流域の洪水発生頻度が現在1/100として、将来ではその発生頻度が1/50となる場合は、洪水発生頻度の変化倍率は2倍となる

『**流域治水とは、気候変動の影響による水災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域（雨水が河川に流入する地域）から氾濫域（河川等の氾濫により浸水が想定される地域）にわたる流域に関わるあらゆる関係者が協働して水災害対策を行う考え方**』

【引用】国土交通省：「流域治水」の基本的な考え方

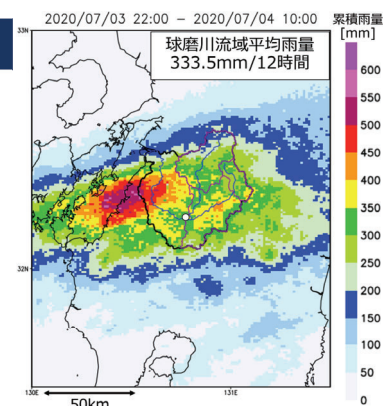
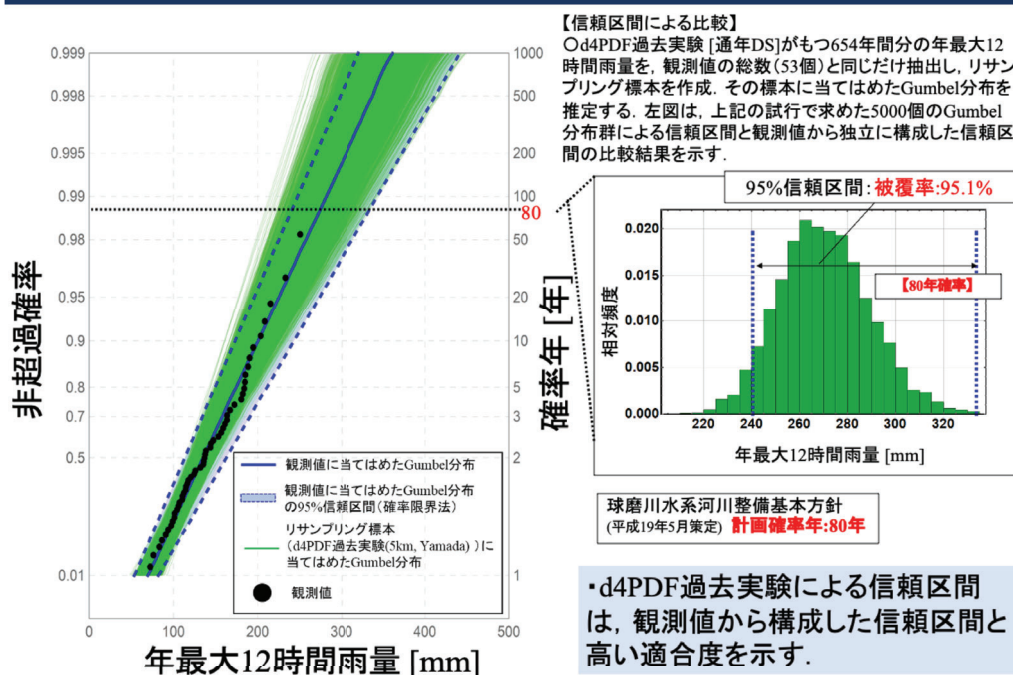




現況の河川整備で設定されている降雨量は確率論でいう期待値(平均値)であり、**想定以上の雨が降る確率は常に存在する。**

⇒分布の幅を想定されるリスクとして治水対策に組み込みつつ、**気候モデルによる将来予測結果を導入することで、気候変動に伴う洪水リスクが評価可能に。**

## 信頼区間によるd4PDF過去実験(5km,Yamada)の統計的再現性評価

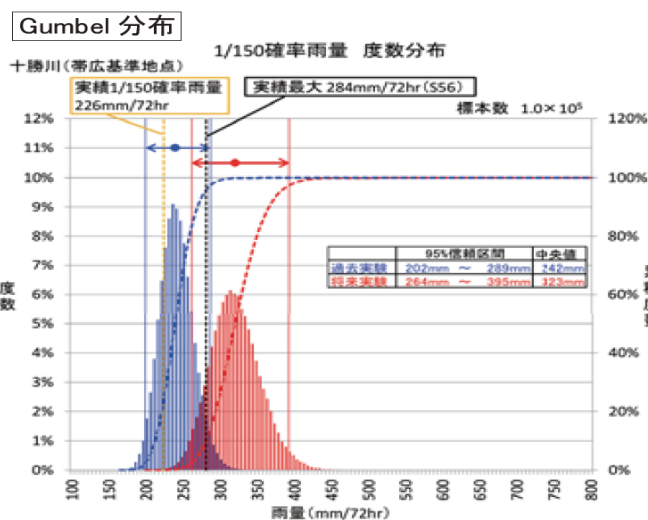
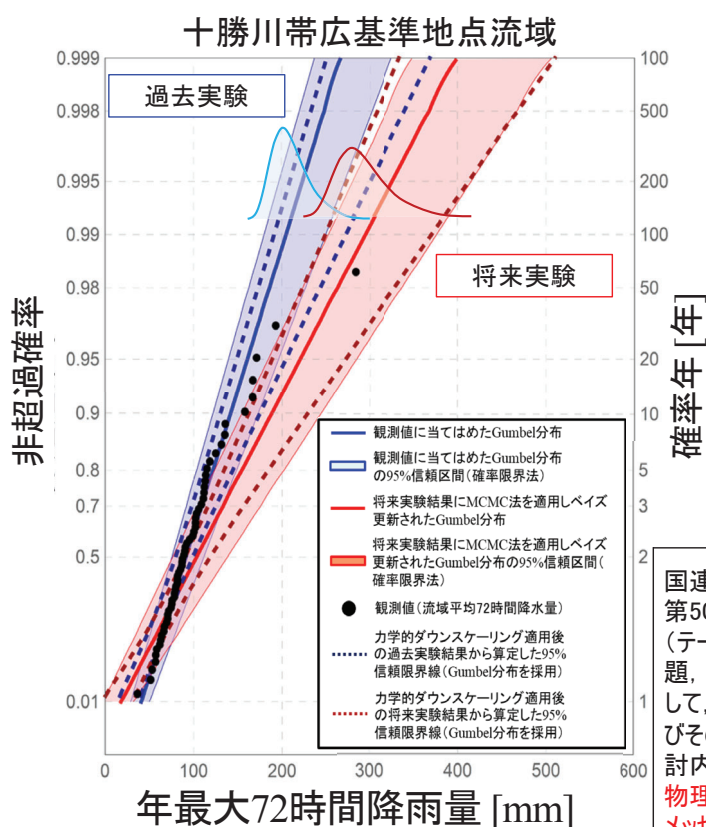


計画確率年(80年確率)で発生しうる雨量の幅は統計理論により予測可能。

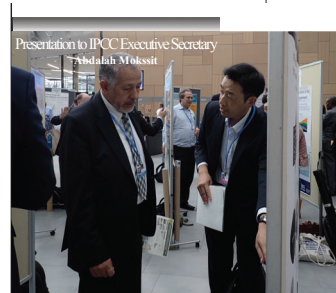
従来では“想定外”として扱われる豪雨の規模やその生起リスクが推定可能となる。

## 物理学と統計学の両輪での統合的予測 8

力学的予測結果は、理論により導かれる統計的閾値と整合する。本検討の数理的妥当性が理論の観点から示された。



国連気候変動枠組条約  
 第50回補助機関会合(SB50)  
 (テーマ:防災, 世界経済, 少数民族問題, 飢餓問題)にて、代表的防災研究として、著者らの気候変動予測研究およびその成果を踏まえた治水計画に係る検討内容を紹介した。  
 物理・統計的結果の両輪が不可欠とのメッセージが広く支持を集めた。



## 過去実験、4℃上昇実験の降雨量の比較

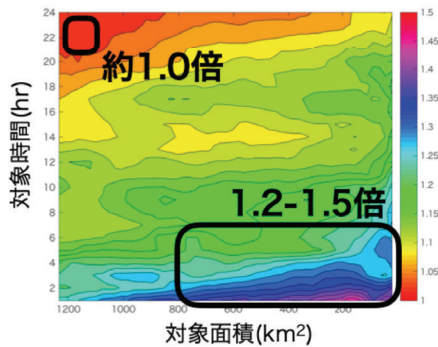
・計画降雨継続時間における流域平均降雨量（99%ile値）

|           | 過去実験  | 4℃上昇実験 | 倍率   |
|-----------|-------|--------|------|
| 十勝川(72時間) | 235.8 | 317.1  | 1.34 |
| 常呂川(24時間) | 156.3 | 217.6  | 1.39 |
| 石狩川(72時間) | 196.1 | 228.4  | 1.16 |
| 筑後川(48時間) | 379.0 | 511.9  | 1.35 |

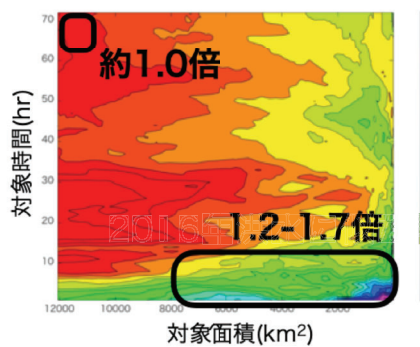
(mm) (mm)

## 降雨の時空間特性の比較（過去実験、4℃上昇実験間での倍率）

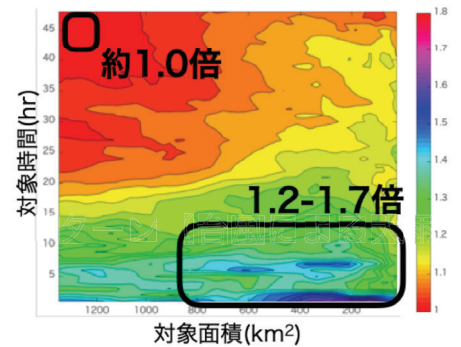
常呂川(150-200mmの降雨)



石狩川(200-250mmの降雨)



筑後川(350-400mmの降雨)

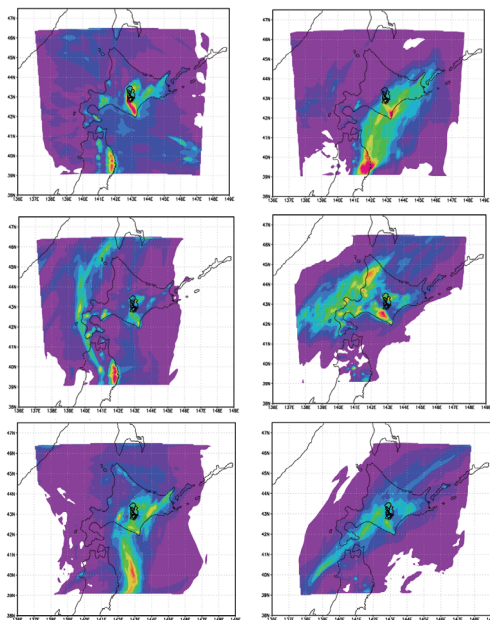


いずれの流域においても将来気候の大雨は短時間・局所化の傾向

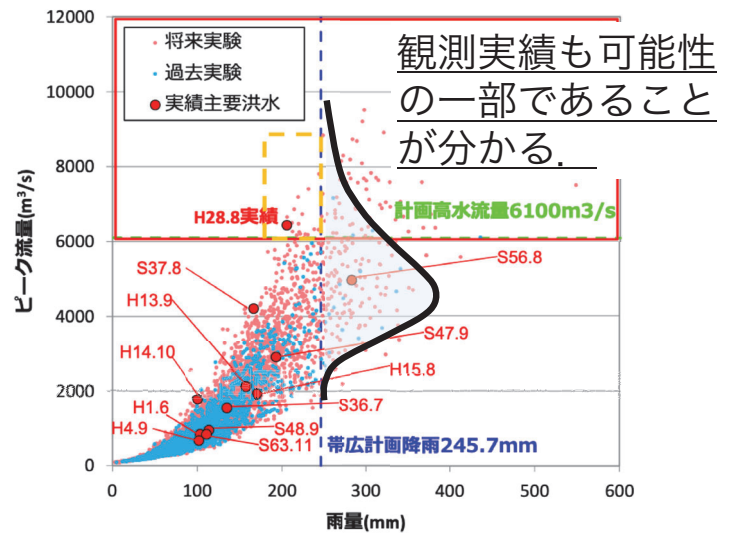
## 流域平均降雨量に対するピーク流量の幅

将来予測される豪雨パターンを起因する洪水流量が把握可能に⇒過去経験のない洪水をリスク情報として扱えるようになる。

### 高解像度大雨データ群



降雨の時空間の分布によっては、総雨量は同じでも、運が悪ければ、より大きな洪水被害が生じる可能性も。



十勝川 帯広地点

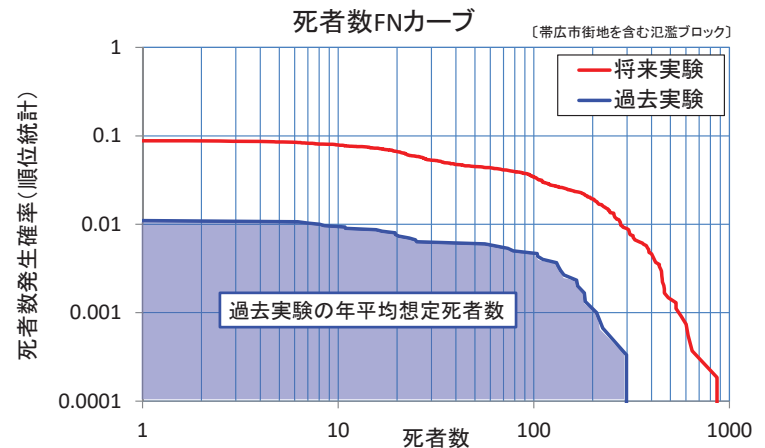
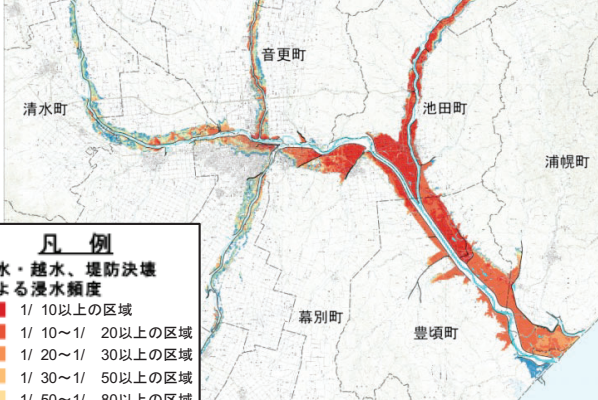


どの程度まで安全な流域を作るか？⇒最新の科学に基づく**洪水リスクの普遍化**を経て、流域関係者が共同で取り組むべき課題

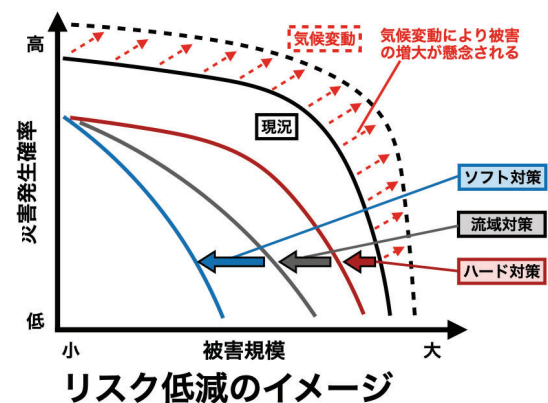
気温が4℃上昇したとき、1m以上の浸水が発生するリスク

1階が水没する程度となる浸水深となる確率  
(d4PDF 4℃上昇実験、浸水深1m)

(RCP8.5シナリオで想定される2090年時点)



リスク低減  
の概念図



11

内閣府SIPレジリエンス防災  
最新科学による避難判断支援  
(九州大学グループとの協働)

IDR4Mによる判断支援  
(市町村災害対応統合システム)

最新科学に基づく予測

・AI技術を含めた避難指示等の発令判断のための  
情報支援システム

10分毎更新の  
予測情報を6時  
間先まで提供

自治体の事前防災・避難判断支援

避難訓練

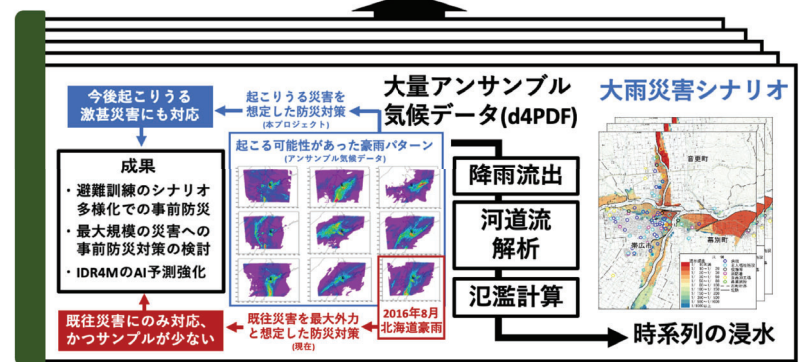
防災演習

事前防災

**第1回 演習 (2021/7/27)**  
2016年8月豪雨を想定した大雨災害シナリオを用いたデモ  
・主な議論の内容  
✓現在の避難情報の発令の方法について  
✓自治体間の広域避難・連携について  
✓避難所所の運営について  
✓2016年台風10号時の対応について

**第2回 演習 (2021/9/17)**  
IDR4Mを活用した緊急時対応のデモとディスカッション  
・主な議論の内容  
✓システムから入手できる情報について  
✓気候予測モデルによるリスク情報について  
✓自治体の避難判断に必要な情報について

**第3回 演習 (2021/11/15)**  
2016年8月豪雨時の緊急時対応の確認とIDR4Mの操作演習  
・主な議論の内容  
✓緊急時の情報整理や警戒のプロセスについて  
✓河川管理者と自治体担当者協働での意思決定について  
✓2016年台風10号時の時系列での対応について



大雨災害シナリオデータベース (様々な大雨パターン)

未経験だが起こりうる災害に対して訓練・準備ができる



## 気候再現・予測情報のダム管理への導入：過去経験のない大規模豪雨の生起リスクを踏まえたダム運用が検討されている。



写真-1-1 堤防一部流出箇所全景  
(上流側から撮影。H23. 9. 7 PM1:49撮影。○が流出箇所)



桑村ら

対象流域：  
糠平ダム  
流域(北海道)



(松本, 池田, 河田, 山田, 中北, 中津川, 河川技術論文集, 2021)

アンサンブル情報より、洪水対策上、考慮すべき豪雨の生起確率・ハイトグラフが想定可能となる。

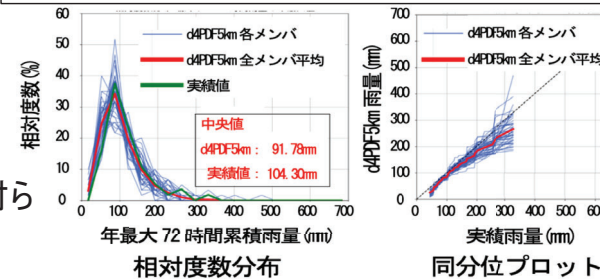


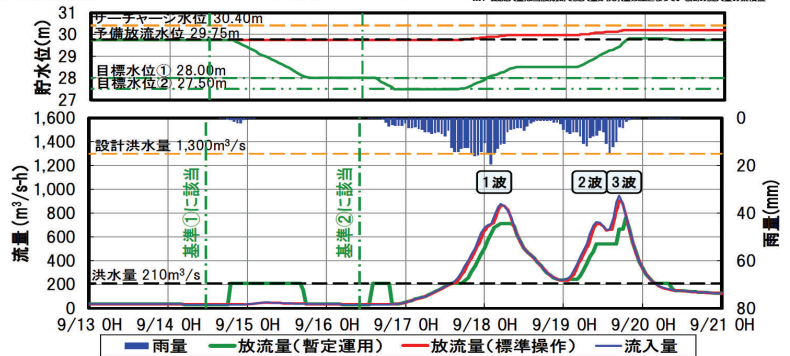
表-2 ダム放流シミュレーション条件

| 操作条件 | 目標下水位                        | 満ち始め時間 | 水位低下率  | 上流水位            |
|------|------------------------------|--------|--------|-----------------|
| 標準操作 | 29.75m                       | 40分    | 210m/s | 304m (サ・チヤーン水位) |
| 暫定運用 | 第1段階: 29.75m<br>第2段階: 27.50m | 3時間    | -      | -               |

表-3 ダム放流シミュレーション結果

| 事例       | 総流入量 <sup>※1</sup>    | 最大流入量                   | 操作条件 | 最大放流量                 | 最高水位   |
|----------|-----------------------|-------------------------|------|-----------------------|--------|
| 1        | 117 百万 m <sup>3</sup> | 944 m <sup>3</sup> /s   | 標準操作 | 930 m <sup>3</sup> /s | 302.0m |
| 2        | 58 百万 m <sup>3</sup>  | 999 m <sup>3</sup> /s   | 暫定運用 | 700 m <sup>3</sup> /s | 29.83m |
| 3        | 40 百万 m <sup>3</sup>  | 501 m <sup>3</sup> /s   | 暫定運用 | 618 m <sup>3</sup> /s | 29.80m |
| 2016年1台風 | 72 百万 m <sup>3</sup>  | 1,158 m <sup>3</sup> /s | 暫定運用 | 476 m <sup>3</sup> /s | 29.89m |
| 2016年1台風 | -                     | -                       | 暫定運用 | 77 m <sup>3</sup> /s  | 30.31m |
| 2016年1台風 | -                     | -                       | 暫定運用 | 65 m <sup>3</sup> /s  | 29.22m |

※1 総流入量は当該期間で流入量が洪水水量以上となっている時の流入量の累積値



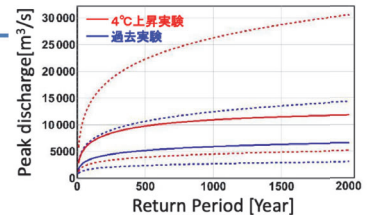
## 気候変動・洪水リスクに関する国際的な取組み(両国の産官学連携)



## 各Work Packageの主な研究結果

### Work Package 1 「気候変動」降雨量および流量の推定

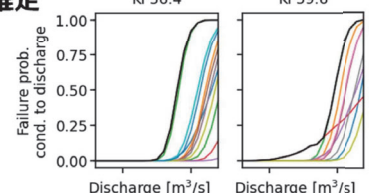
- ・ 既往出水と気候予測アンサンブルデータに基づいて、日蘭の流出モデルで流出計算を実施。
- ・ 雨量・流量・モデルの不確実性を考慮し、**流量確率を算定**



流量生起確率(帯広基準地点)

### Work Package 2 「破堤メカニズム・破堤確率」洪水確率の推定

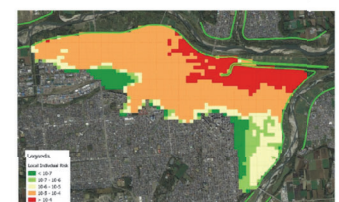
- ・ 越水破堤について、各横断測線の堤防フラジリティカーブ(破堤確率)を算出
- ・ WP1で算出した流量確率から各測線の水位確率に変換
- ・ 水位確率に破堤確率を乗じて、**氾濫発生確率を算出**
- ・ H-Q関係・堤防高・芝の状態に関する不確実性を考慮



各セクションにおける破堤確率(抜粋)

### Work Package 3 「リスク評価」洪水リスクと死者数の推定

- ・ 類似の氾濫域となる一連区間(セクション)と、セクションを代表する破堤確率最大となる測線(セグメント)を設定
- ・ 破堤点ごとの氾濫に対し、人的・経済的被害を算出
- ・ 氾濫発生確率と被害を乗じて、**人的・経済的リスク(被害の期待値)を算出**
- ・ 避難率の不確実性を考慮し、オランダモデルと日本の災害実績を基に避難率を算定



人的リスク分布(4°C昇温実験) 7

18 January 2022  
9:00-11:00 (CET)  
2022年1月18日(火)  
17:00-19:00 (日本時間)

Japan-Netherlands Joint Research  
"Climate Change and Flood Risk in Hokkaido"  
日蘭共同研究「北海道における氾濫リスクと気候変動」ウェビナー

SPEAKERS 登壇者

Language: 英語・English and Japanese with consecutive interpretation  
英語・日本語 (通訳者提供)

PROGRAMME プログラム

1. Welcome (5 min)  
2. Introduction (5 min)  
3. Presentation of project (10 min)  
4. Presentation of project (10 min)  
5. Presentation of project (10 min)  
6. Presentation of project (10 min)  
7. Presentation of project (10 min)  
8. Presentation of project (10 min)  
9. Presentation of project (10 min)  
10. Presentation of project (10 min)  
11. Presentation of project (10 min)  
12. Presentation of project (10 min)  
13. Presentation of project (10 min)  
14. Presentation of project (10 min)  
15. Presentation of project (10 min)  
16. Presentation of project (10 min)  
17. Presentation of project (10 min)  
18. Presentation of project (10 min)  
19. Presentation of project (10 min)  
20. Presentation of project (10 min)  
21. Presentation of project (10 min)  
22. Presentation of project (10 min)  
23. Presentation of project (10 min)  
24. Presentation of project (10 min)  
25. Presentation of project (10 min)  
26. Presentation of project (10 min)  
27. Presentation of project (10 min)  
28. Presentation of project (10 min)  
29. Presentation of project (10 min)  
30. Presentation of project (10 min)  
31. Presentation of project (10 min)  
32. Presentation of project (10 min)  
33. Presentation of project (10 min)  
34. Presentation of project (10 min)  
35. Presentation of project (10 min)  
36. Presentation of project (10 min)  
37. Presentation of project (10 min)  
38. Presentation of project (10 min)  
39. Presentation of project (10 min)  
40. Presentation of project (10 min)  
41. Presentation of project (10 min)  
42. Presentation of project (10 min)  
43. Presentation of project (10 min)  
44. Presentation of project (10 min)  
45. Presentation of project (10 min)  
46. Presentation of project (10 min)  
47. Presentation of project (10 min)  
48. Presentation of project (10 min)  
49. Presentation of project (10 min)  
50. Presentation of project (10 min)  
51. Presentation of project (10 min)  
52. Presentation of project (10 min)  
53. Presentation of project (10 min)  
54. Presentation of project (10 min)  
55. Presentation of project (10 min)  
56. Presentation of project (10 min)  
57. Presentation of project (10 min)  
58. Presentation of project (10 min)  
59. Presentation of project (10 min)  
60. Presentation of project (10 min)  
61. Presentation of project (10 min)  
62. Presentation of project (10 min)  
63. Presentation of project (10 min)  
64. Presentation of project (10 min)  
65. Presentation of project (10 min)  
66. Presentation of project (10 min)  
67. Presentation of project (10 min)  
68. Presentation of project (10 min)  
69. Presentation of project (10 min)  
70. Presentation of project (10 min)  
71. Presentation of project (10 min)  
72. Presentation of project (10 min)  
73. Presentation of project (10 min)  
74. Presentation of project (10 min)  
75. Presentation of project (10 min)  
76. Presentation of project (10 min)  
77. Presentation of project (10 min)  
78. Presentation of project (10 min)  
79. Presentation of project (10 min)  
80. Presentation of project (10 min)  
81. Presentation of project (10 min)  
82. Presentation of project (10 min)  
83. Presentation of project (10 min)  
84. Presentation of project (10 min)  
85. Presentation of project (10 min)  
86. Presentation of project (10 min)  
87. Presentation of project (10 min)  
88. Presentation of project (10 min)  
89. Presentation of project (10 min)  
90. Presentation of project (10 min)  
91. Presentation of project (10 min)  
92. Presentation of project (10 min)  
93. Presentation of project (10 min)  
94. Presentation of project (10 min)  
95. Presentation of project (10 min)  
96. Presentation of project (10 min)  
97. Presentation of project (10 min)  
98. Presentation of project (10 min)  
99. Presentation of project (10 min)  
100. Presentation of project (10 min)



- ・ **計画を超える降雨**が近年多発している.
- ・ 現在の気候であっても計画を超える降雨は起こりうる.  
(物理学・統計学手法によって説明済み)

適応策の策定のためには、これまでの降雨観測を経て蓄積されてきた知見と合わせ、最新の科学技術に基づく低頻度かつ極端な豪雨現象の予測を積極的に実行する必要がある.

- ・ 最新の科学により（現在・今後の）治水・利水さらには複合的な災害の**リスク評価**が可能になった. その成果は、我が国の気候変動を踏まえた技術検討に活用されている.
- ・ 個別最適から全体最適へ. リスクベースによる全体としてベネフィットの獲得を. それには価値観の提案が必要.
- ・ **物理的に発生し得る洪水リスク情報を被害予測に導入**した新しい避難支援の枠組みの構築が十勝地方で先行的に実施されており今後、全国的に展開.

**科学的な成果に立脚したリスク情報をどのように活用するかは国、自治体、企業、住民の主体的な連携により決め、流域一丸での治水が期待される. 地域ごとのコーディネータが必要.**



## 【話題提供】

# 気候変動による降雨量増加を想定した 実大試験堤防への散水実験と浸透流解析

北見工業大学 地域と歩む防災研究センター

北海道開発局 釧路開発建設部

北海道開発局 釧路開発建設部

(株)開発工営社

(株)開発工営社

川尻 峻三

濱中 昭文

稲垣 乃吾

不動 充

鈴木 智之

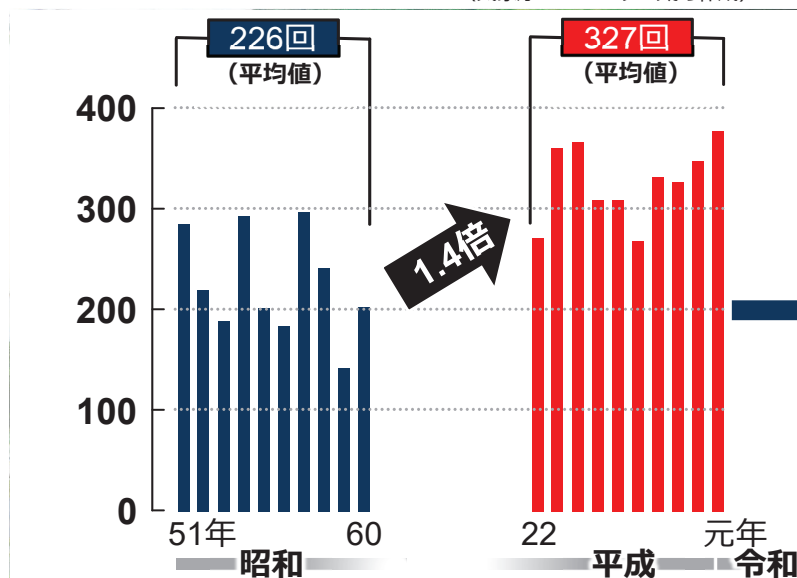
北見工業大学  
地域と歩む防災研究センター



## 研究の背景

### 時間雨量50mm/h以上の年間発生回数の比較

(気象庁AMeDASデータから作成)



北海道は・・・降雨履歴が少ない

→ 災害免疫力が小さい



現状の堤防にとって、  
**降雨量の増加は河川水位の上昇に匹敵する外力となる!?**



### 2016年北海道豪雨災害での被災事例：釧路川堤防



崩壊③: 天端付近の法面が崩落

崩壊②: 天端付近の法面が崩落

表土亀裂

崩壊①: 法中央部より下部が崩落  
崩落土は泥濘化している

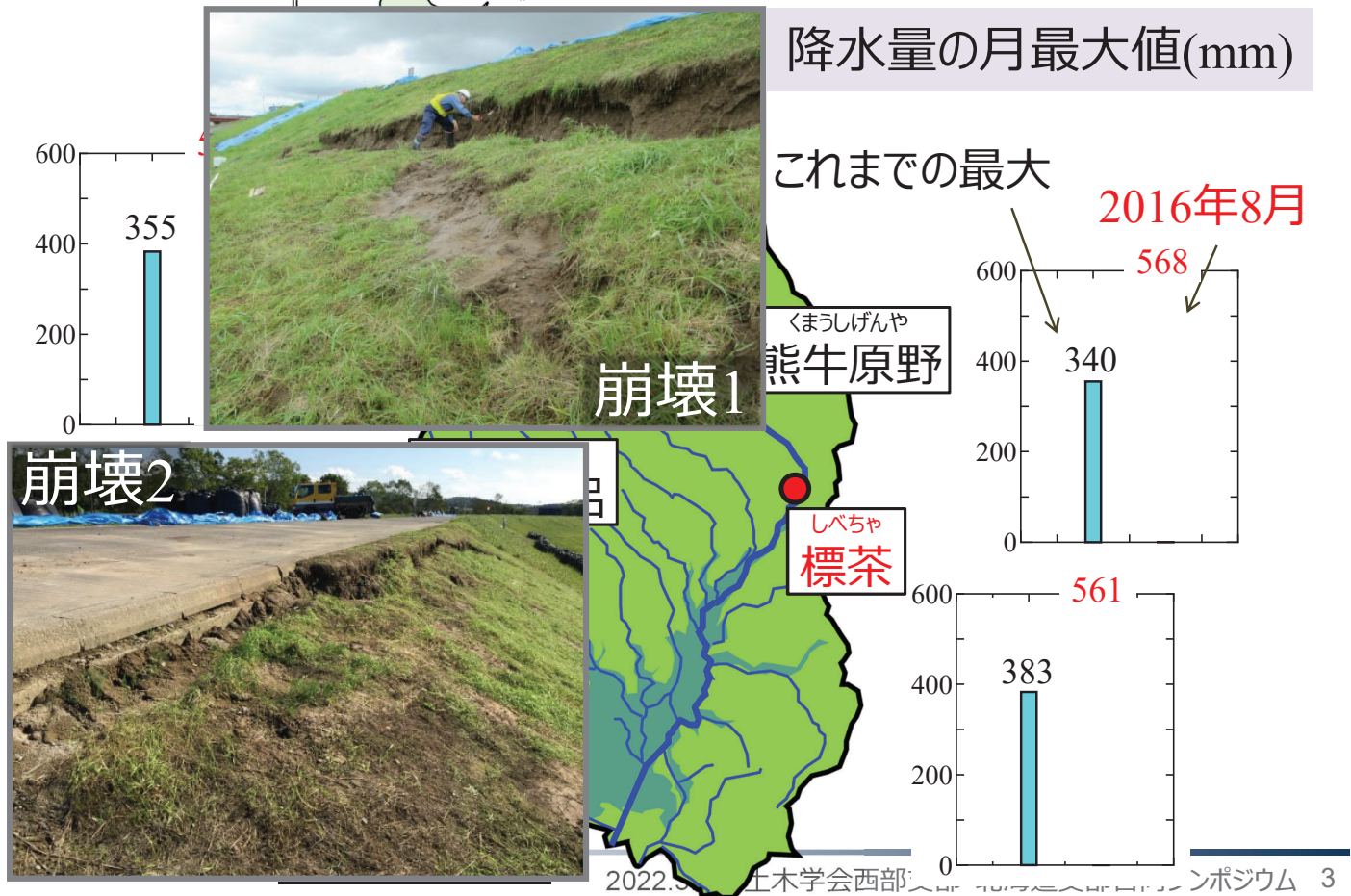
出水前の降雨で  
法面の滑り破壊





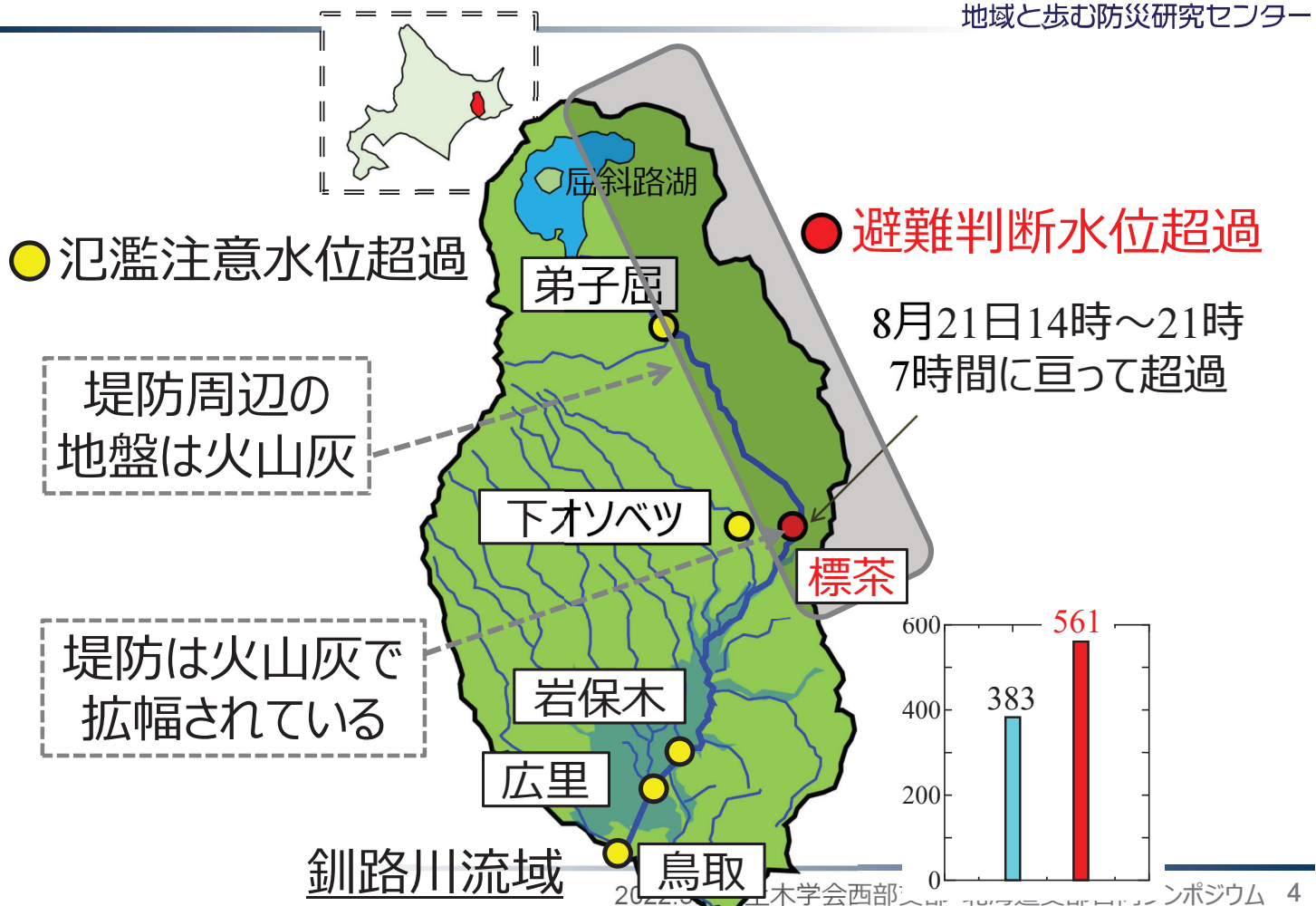
# 2016年北海道豪雨での釧路川堤防の被災

北見工業大学  
地域と歩む防災研究センター



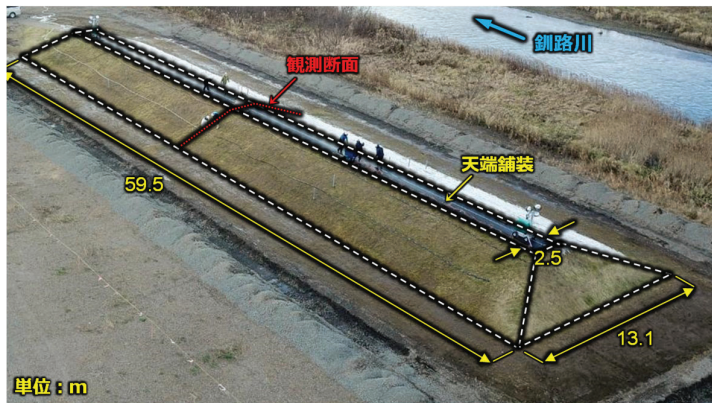
# 2016年北海道豪雨での釧路川堤防の被災

北見工業大学  
地域と歩む防災研究センター

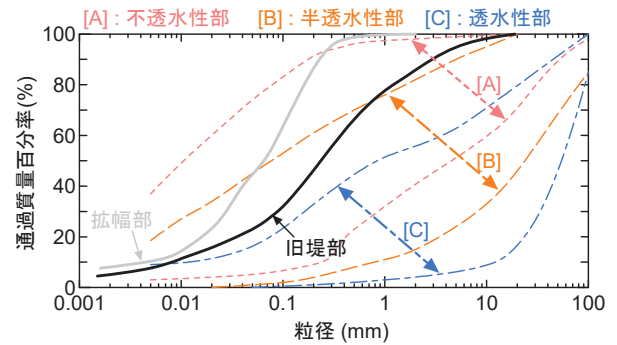
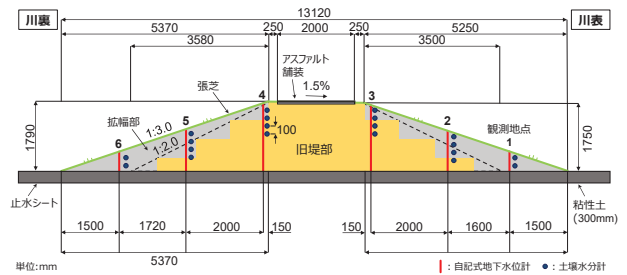


# 堤防強化として3割堤(緩勾配化)を検討

## 実大試験堤防を構築して動態観測



高水敷掘削の有効利用を念頭として、  
表・裏法面に火山灰シルト質土で覆土



### 【本日の話題提供の内容】

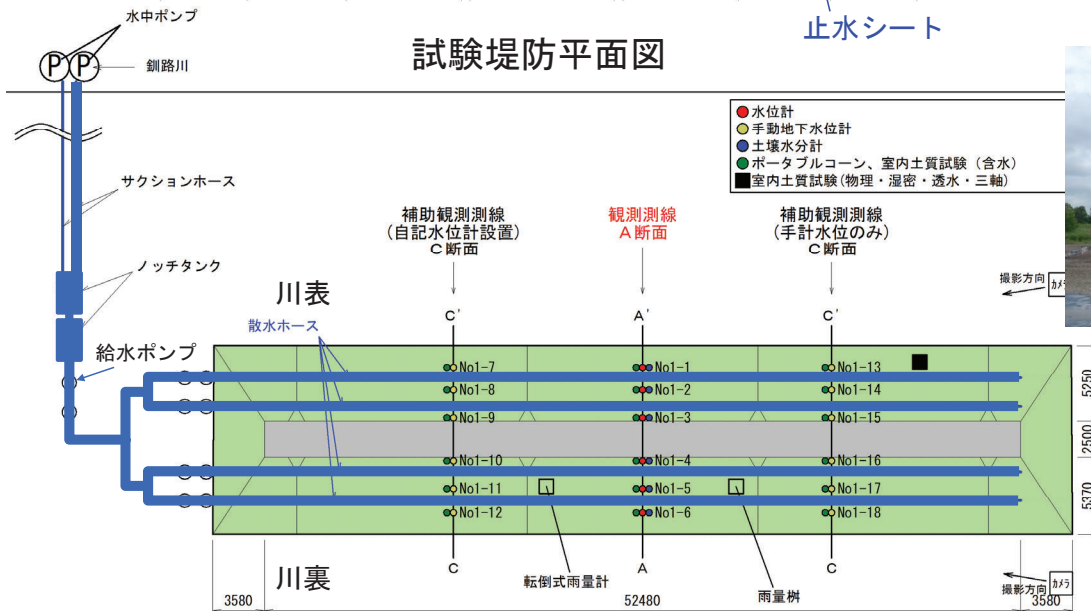
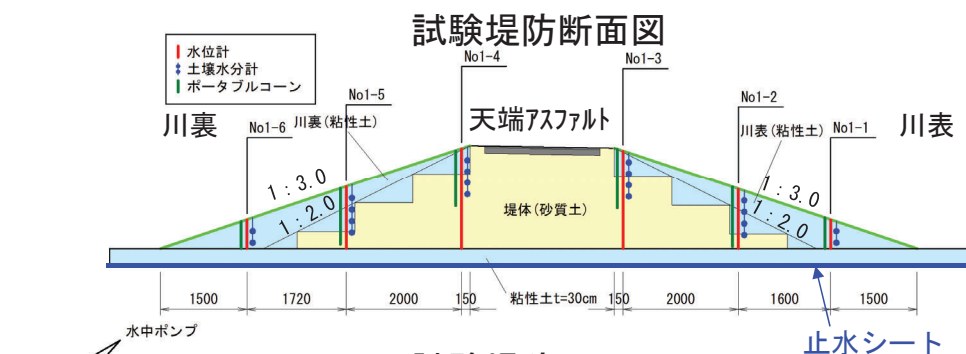
### 検討内容

現行マニュアルや地盤工学的手法で実験をどこまで再現可能か!?

- シルト質土が被覆された3割堤防への散水実験と水理挙動の観測
- 観測結果に対する再現解析を行い、対策工実施区間の地盤パラメータを決定

2022.3.11 土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム 5

## 散水実験の概要



2割堤完成後の段切り状況  
(令和2年6月16日撮影)

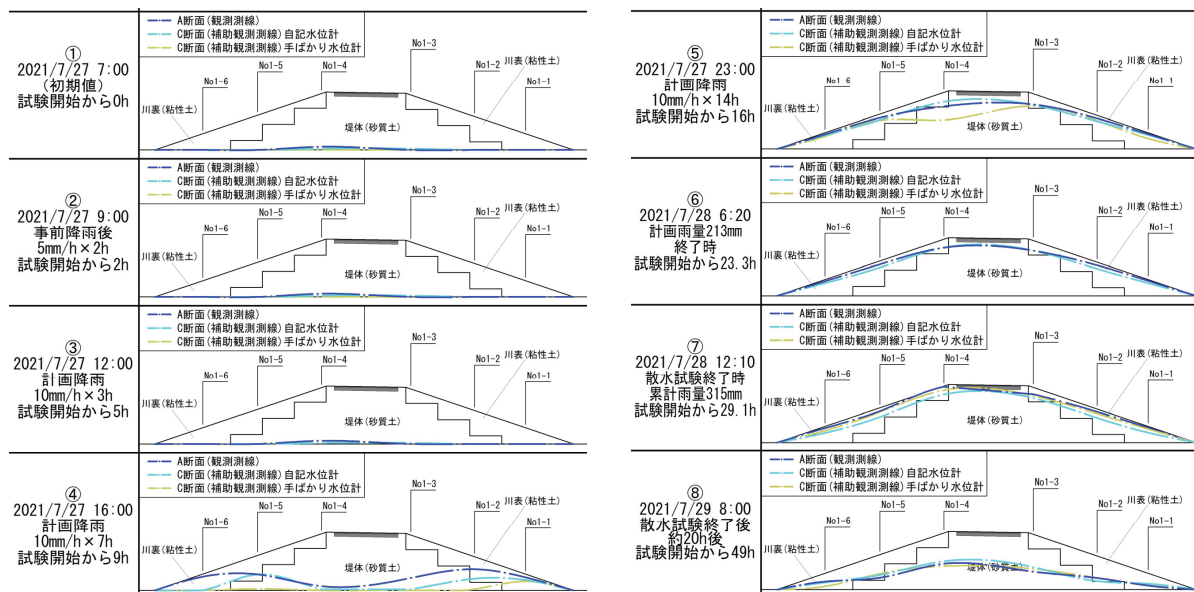
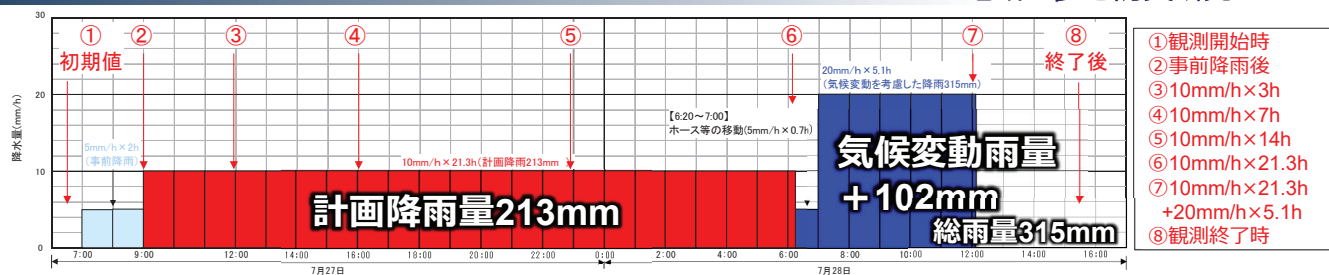


3割堤施工状況  
(令和2年6月23日撮影)

2022.3.11 土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム 6



# 散水時の浸潤面の変化



⑥計画降雨終了時点で堤体内の水位はほぼ最大の状況となることが確認された

# 散水時の浸潤面の変化

## 実験終了後の法面の状態は・・・

法面はかなり高飽和度な状態（ぐじゅぐじゅな状態）

➡ しかし、法面変状は確認できなかった

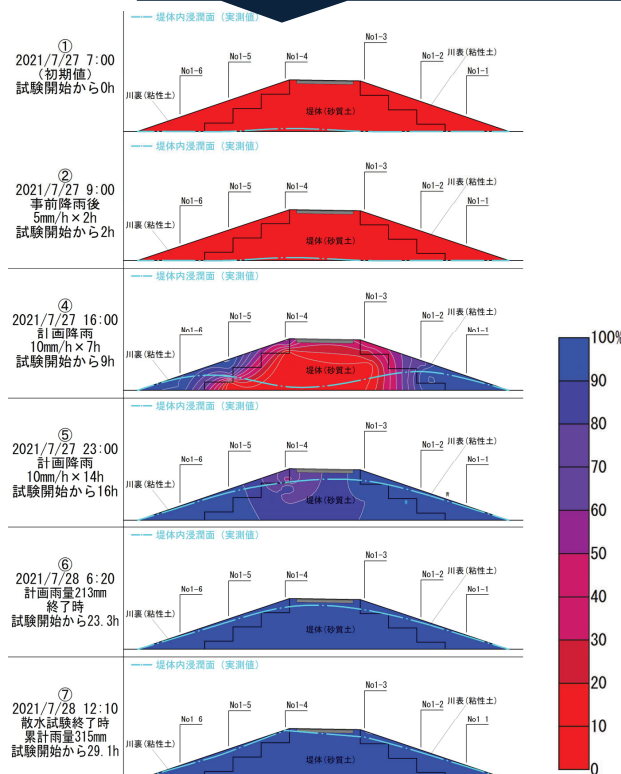
A断面川裏側



A断面川表側

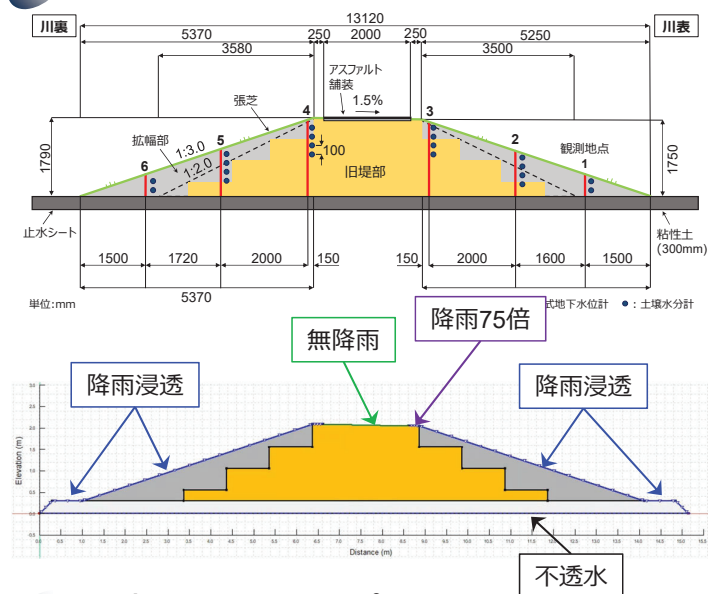


## 体積含水率（土中水分量） 変化率



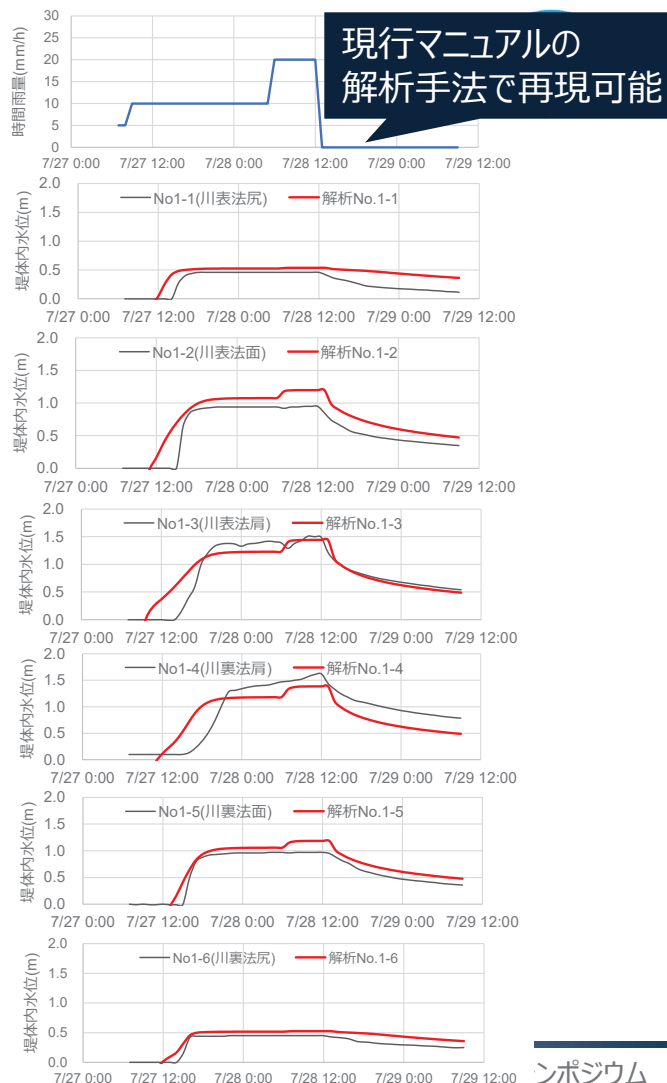
# 浸潤面変化の解析結果

## 浸透流解析の境界条件



## 浸透流解析の入力パラメータ

| 区分           | 飽和透水係数<br>$k_{sat}$ (m/s) | VGパラメータ (水分特性曲線) |       |            |            |
|--------------|---------------------------|------------------|-------|------------|------------|
|              |                           | $\alpha$ (1/kPa) | $n$   | $\theta_s$ | $\theta_r$ |
| 旧堤部<br>(砂)   | $7.24 \times 10^{-5}$     | 0.157            | 1.47  | 0.462      | 0.205      |
| 拡幅部<br>(シルト) | $1.27 \times 10^{-5}$     | 3.378            | 1.691 | 0.566      | 0.287      |



2022.

ンボジウム 9

# 安全率変化の解析結果

## ベーンコーンせん断試験による土の強度パラメータ( $c$ , $\phi$ )の取得

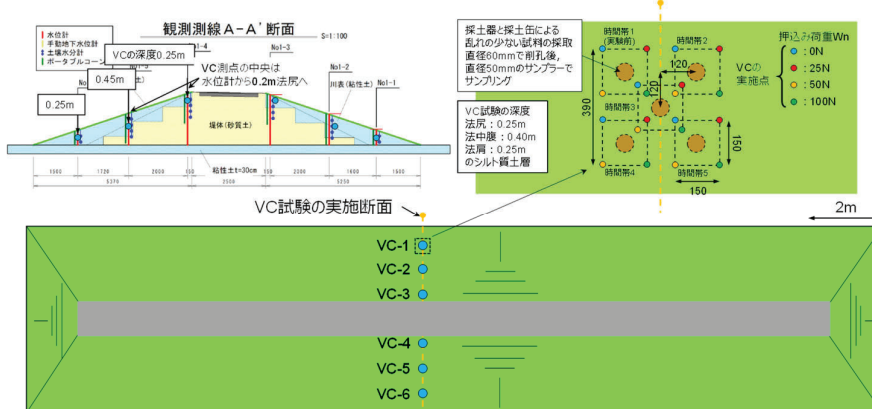
現行マニュアルでは・・・三軸圧縮試験や一面せん断試験を推奨



**実務も研究も過去の実績はかなり豊富だが・・・**

- 乱れの少ない土供試体の準備が必要
- 堤体の表層など拘束圧が小さい実験は苦手
- 不飽和状態（自然状態）の実験は手間

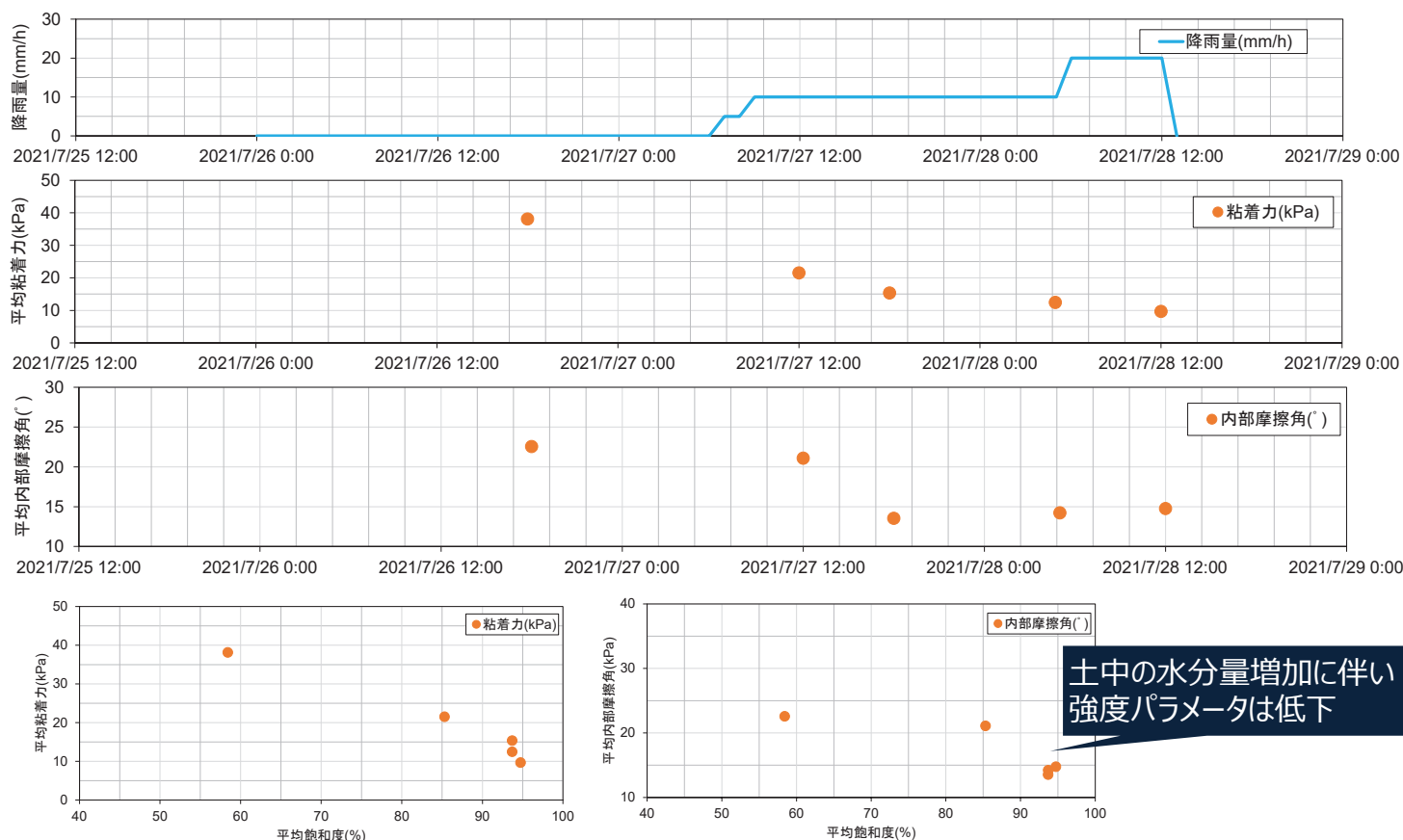
## 散水実験中に原位置せん断試験（ベーンコーンせん断試験）を実施



2022.3.11 土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム 10

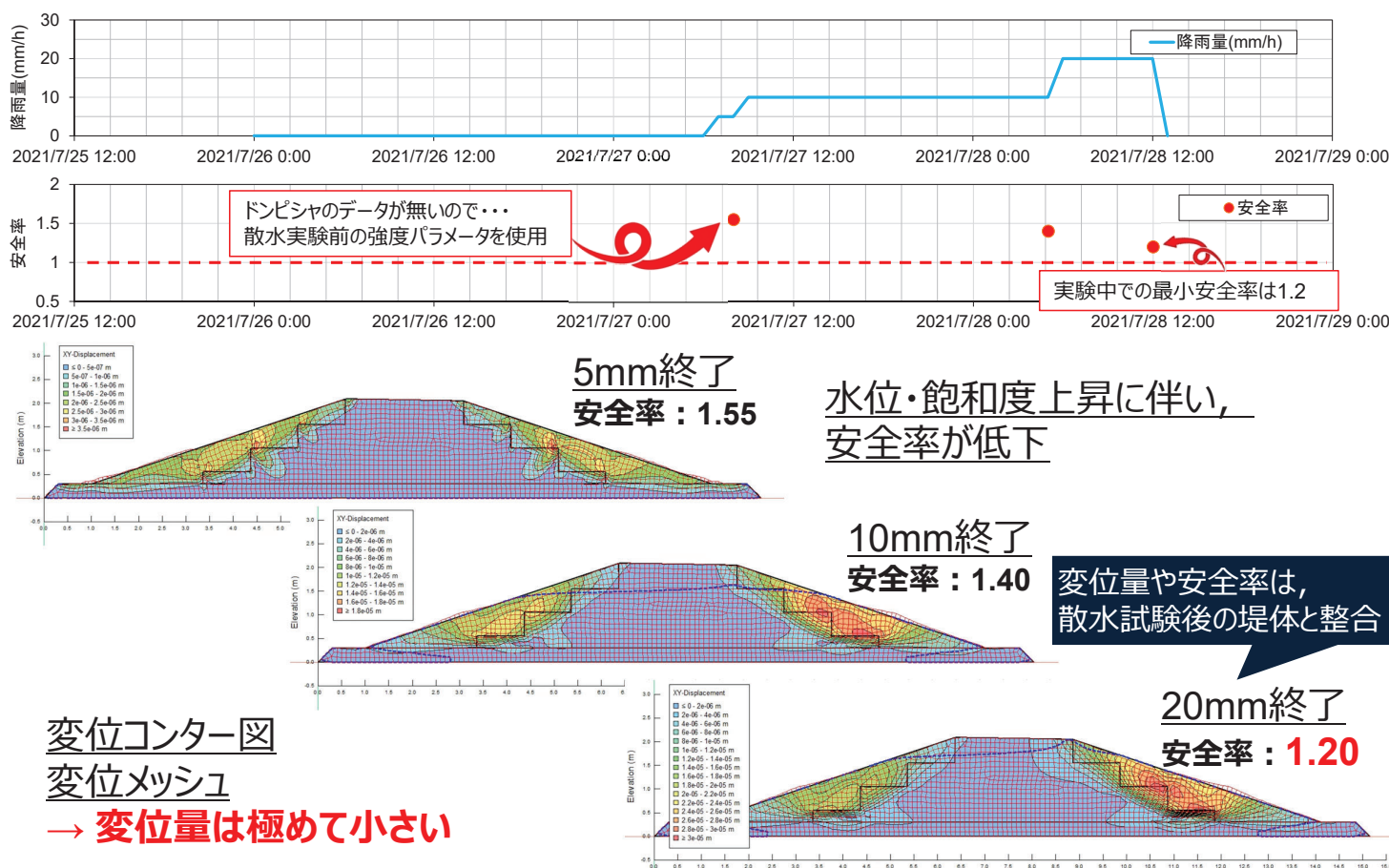


# 散水実験中の強度パラメータの変化



2022.3.11 土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム 11

## せん断強度低減法(変位量を計算可能な安定計算手法)による安定解析の結果



## 浸潤線の変化について

基本的には現行のマニュアル（河川堤防の構造検討の手引き）の手法で再現可能

- ただし…
- 透水係数については室内試験の値よりも大きいとすることがある
  - 室内試験供試体と実構造物のスケール効果の影響を考慮

## 力学挙動について

現行のマニュアルの三軸試験では低拘束条件での力学パラメータの取得が困難

- そこで…
- 原位置で力学パラメータを取得できるベーンコーンせん断試験を適用
  - 飽和度の上昇に伴い土の力学パラメータの低下する傾向を把握できた
  - 安全率は1.0を超え、実際の法面の状況を再現できた

**浸潤面上昇過程 = 浸透**に関する変状・崩壊予測は、現在のマニュアルや地盤工学的な手法・技術でそこそこの精度で可能！！

しかし、  
破堤は起こる…

これまでに地盤工学的な観点からのデータが少ない  
**侵食に着目した実験データの蓄積や  
解析手法の検討が必要**

2022.3.11 土木学会西部支部・北海道支部合同シンポジウム 13



ご清聴，ありがとうございました。



# 「気候変動による 急流河川の侵食危険度の評価」

2022年3月11日(金)

室蘭工業大学大学院・工学研究科

中津川 誠(なかつがわ まこと)

## 豊平川の洪水 急流＋暴露人口

戦後最大流量となった1981年



南19条橋付近



南大橋上流左岸



幌平橋付近

1981年(S56年)8月洪水



昭和56年8月の洪水状況  
高速流による三角波  
北海道開発局札幌開発建設部

2011年(H23年)8月洪水



中津川撮影

## 研究目的

### 都市急流河川の豊平川を対象として

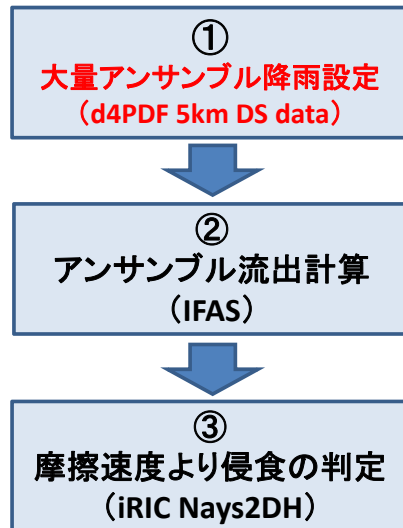
- 現在気候と将来気候の不確実性を考慮した水文量の推定
- 現在気候と将来気候の**侵食危険度**を評価
- 気候変動を考慮した治水計画
- 大都市部の危機管理



# 研究方法

## ① d4PDF 大量アンサンブル降雨予測データ (5kmメッシュ\*)

\*北海道大学・山田らによるDSデータ



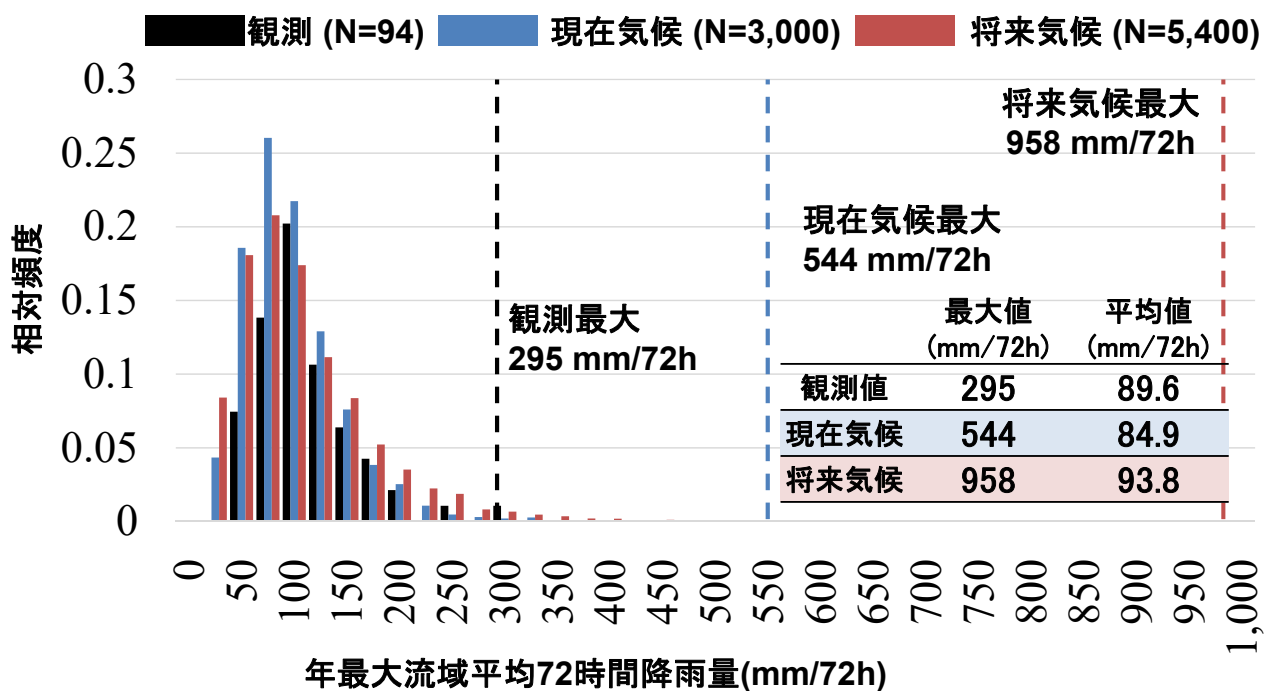
5

# データ

## ① d4PDF 大量アンサンブル降雨予測データ (5kmメッシュ\*)

\*北海道大学・山田らによるDSデータ

豊平川流域ヒストグラム

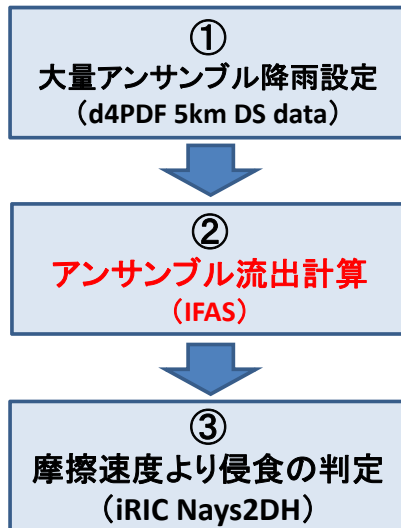


6

# 研究方法

## ② IFASによる 流出計算

土木研究所ICHARM<sup>2)</sup> 開発



Google Earth

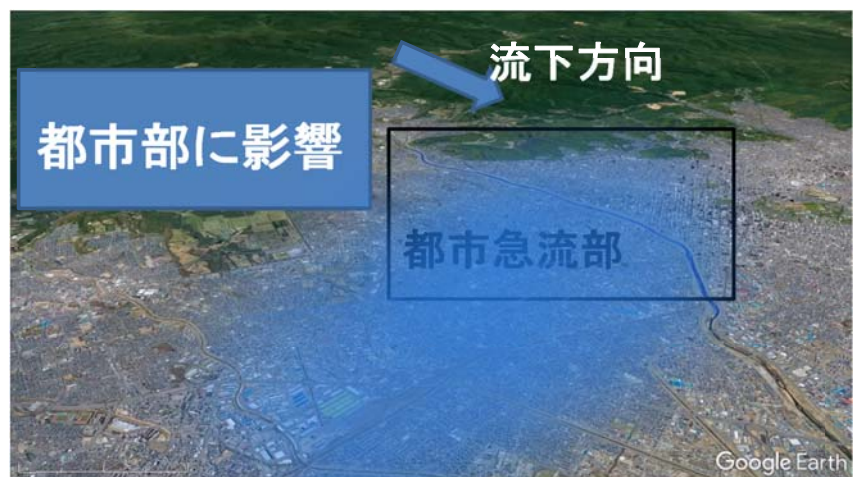
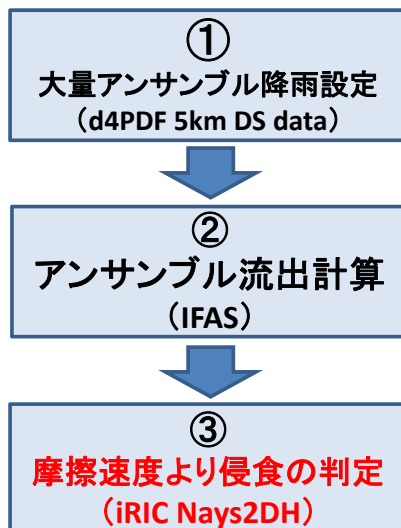
2) ICHARM : 国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター

7

# 研究方法

## ③ iRIC Nays2DH

北海道大学・清水らが開発



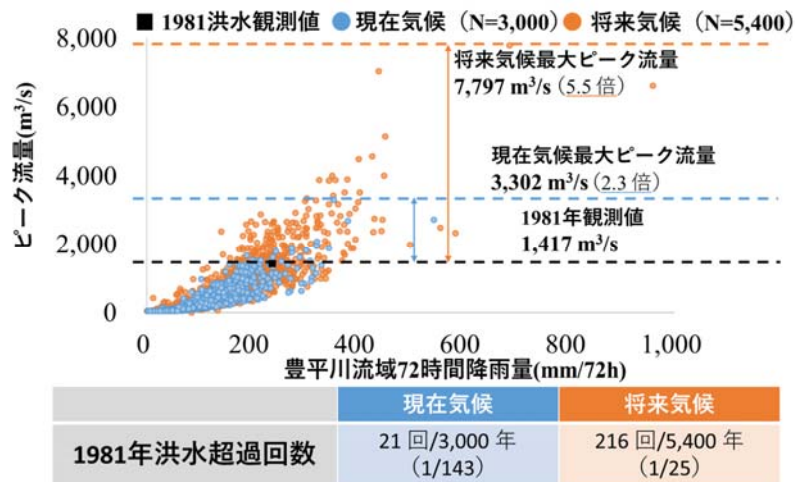
Google Earth

8



## 結果 現在気候と将来気候の豊平川の流量

- 降雨量を**d4PDF** 5kmメッシュデータ(by山田ら)で現在気候3,000年分, 将来気候5,400年分用意
- その降雨データを用い, **IFAS**で流量を計算. モデルパラメータは1981洪水の再現で設定



### d4PDF降雨量に対するピーク流量の計算結果と1981洪水の超過回数

参考: 豊平川の計画雨量310mm/72h, 計画高水流量2,000m³/s, S56(1981)年洪水時ピーク流量1,417m³/s

- ピーク流量では1981洪水を上回る頻度は現在気候1/143に対し将来気候1/25と増加が顕著

参考;

川井翼ら, 大量アンサンブルデータを用いた急流河川の侵食危険度の評価, 2021土木学会論文集B1(水工学), 稲垣慶吾ら, d4PDFを用いた気候変動に伴う豊平川の侵食危険度の推定, 2021土木学会北海道支部論文報告集

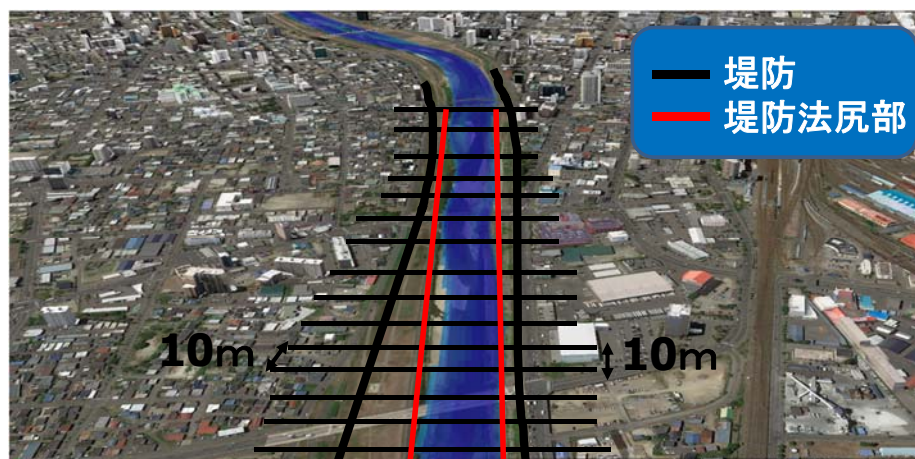
## 結果 豊平川侵食危険度の評価

先行研究<sup>3)</sup>より,

**摩擦速度( $u_*$ )0.3m/sを指標として堤防法尻部侵食の評価**

現況河道で現在気候**346**ケース

整備計画河道で将来気候**1,174**ケース(流量**400m³/s**以上)



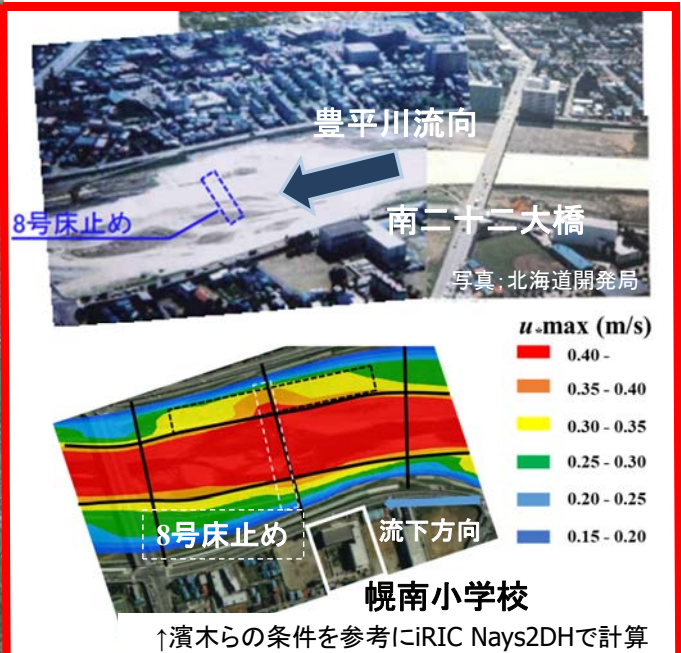
Google Earthに加筆



## 結果 侵食発生時の摩擦速度の根拠



1981年の洪水時  
高水敷の侵食が発生した箇所  
(南二十条大橋付近KP17.0-KP17.8)



11

## 結果 豊平川侵食危険度の評価(コンター図)

■ 摩擦速度 $>0.3\text{m/s}$ 以上の出現頻度

侵食の危険度  
低い 0.00 0.035 0.07 高い

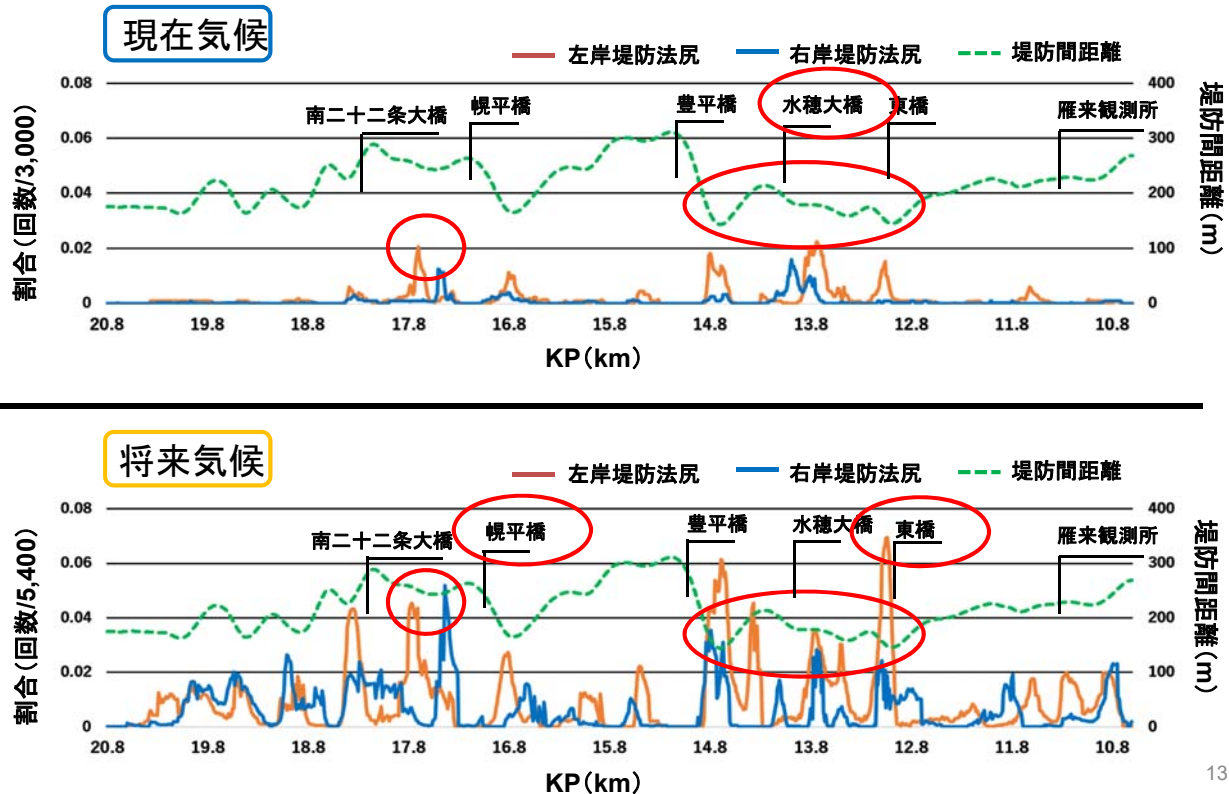


|                        | 現在気候                   | 将来気候                    |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 最も侵食頻度の危険性<br>が高い場所の頻度 | 68 回/3,000 年<br>(1/44) | 375 回/5,400 年<br>(1/14) |



## 結果 豊平川侵食危険度の評価(縦断図)

・左右岸堤防法尻部の摩擦速度 $>0.3\text{m/s}$ 以上の出現割合



13

## 気候変動下の豊平川～まとめ

■ 1981年の洪水を超える流量となる頻度

**現在気候**

21回/3,000年 ➡ 約1/143

**将来気候**

216回/5,400年 ➡ 約1/25

■ 現在気候・将来気候で最も侵食危険度が高い場所の頻度

**現在気候**

水穂大橋付近 68回/3,000年 ➡ 約1/44

**将来気候**

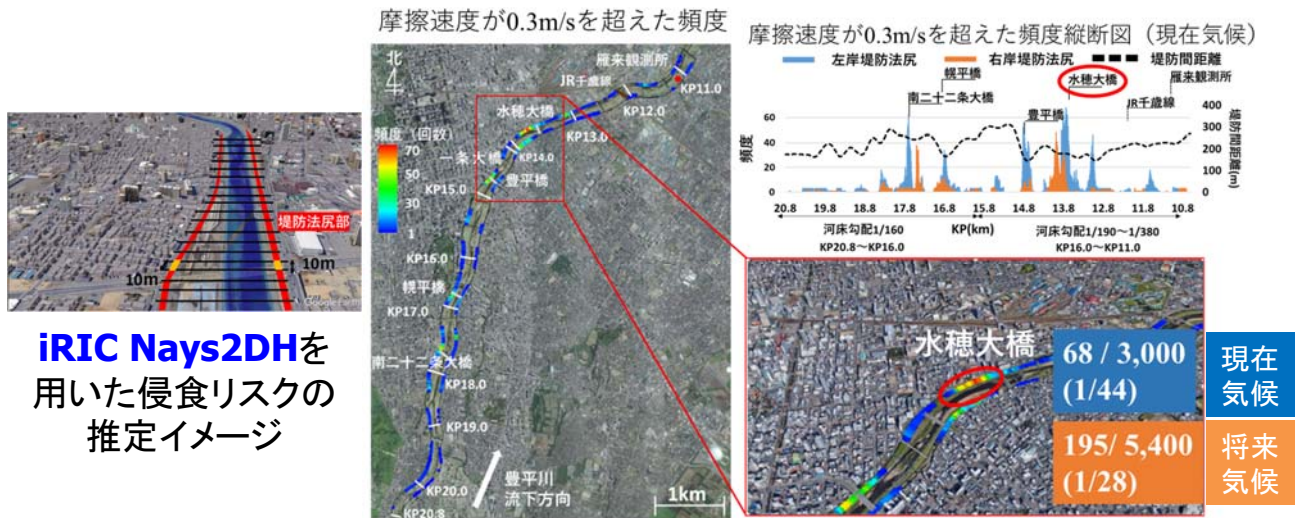
東橋付近 375回/5,400年 ➡ 約1/14

今回の研究では、ピーク流量でエネルギーが1番大きい状態で評価した  
→これらに河床変動計算を取り入れ、実態に近い現象の評価が必要

14

# 気候変動下の豊平川～まとめ

- ・ 現在気候, 将来気候のピーク流量を与え, **iRIC Nays2DH**で河道水理計算実施
- ・ 流量 $Q > 400 \text{ m}^3/\text{s}$  (低水路満杯) のケースで摩擦速度 $u_* > 0.3 \text{ m/s}$ を堤防法尻侵食の評価基準



- ・ 狭窄部で侵食危険度が高く, 最も高い個所での出現頻度は現在気候1/44, 将来気候1/14
- ・ 被害軽減(気候変動適応策)のためのハード対策, ソフト対策(危機管理など)の必要性
- ・ ピーク流量でのポテンシャル評価から, 流量変化に伴う河床変動や堤防の決壊侵食メカニズムを考慮した実態評価が今後の課題

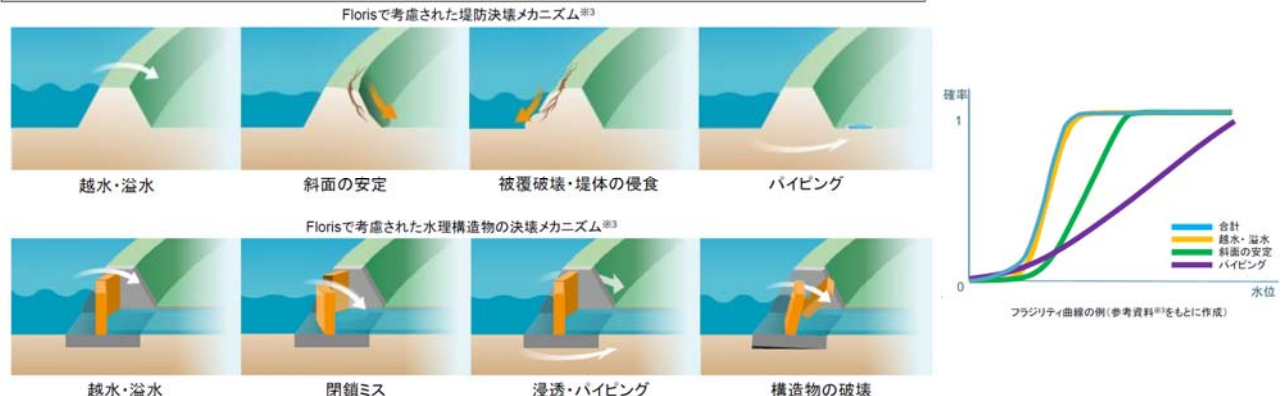
15

## (参考)オランダでは

堤防(+構造物)決壊確率が設定され, 氾濫リスクの推算に使われている。

### 【氾濫確率の算定】堤防の決壊メカニズム

- Florisプロジェクトでは堤防の決壊メカニズムは, 越水・越流, 斜面の安定, 被覆破壊・堤体の侵食, バイピングの4つの決壊メカニズムが考慮されている。
- 水理構造物の決壊メカニズムは, 越水・溢水, 閉鎖ミス, 浸透・バイピング, 構造物の破壊などの決壊メカニズムが考慮されている。砂丘の決壊メカニズムは, 砂丘の侵食が考慮されている。※1※2



出典: ※1 Elisabet de Boer, Comparison of Reliability Methods for Flood Defence Systems, 2007.8.  
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:3A18e44a40-5de1-42d0-bb03-e96a5a903250>  
 ※2 Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Flood Risks and Safety in the Netherlands (Floris) – Full report, 2005.11,  
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:60751ba9-2271-404a-8f0d-518cd7a07157?collection=research>  
 ※3 Rijkswaterstaat VNK Project Office, The National Flood Risk Analysis for the Netherlands: FINAL REPORT, 2016.4, pp100-101,  
[https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Eindrapport%20V%20eiligheid%20Nederland%20m%20Kaart\\_tcm21-63921.pdf](https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Eindrapport%20V%20eiligheid%20Nederland%20m%20Kaart_tcm21-63921.pdf)



## 第 IV 部

## 論文一覧（その他）

1. 北海道十勝地域におけるアンサンブル気候予測情報を活用した 緊急時対応に向けた取り組み  
鈴木章弘，山田朋人（北海道大学）山本太郎（北海道河川財団），植村郁彦（北海道大学）  
令和 3 年度土木学会北海道支部支部論文報告集，B-34，2022
2. 気候変動下における大雨の将来リスクに関する新しい解釈と提案，総合土木技術誌土木施工  
山田朋人（北海道大学）  
土木施工 2021 年 2 月号，2021
3. 九州地方を対象とした梅雨期における前線および周辺環境場の年々特性  
宮本 真希，山田 朋人（北海道大学）  
土木学会論文集 B1（水工学）Vol.77.No.2,I\_463-I-468,2021
4. Using a massive high-resolution ensemble climate data set to examine dynamic and thermodynamic aspects of heavy precipitation change  
Tomohito J. Yamada, Tsuyoshi Hoshino, Akihiro Suzuki (Hokkaido University)  
Atmospheric Science Letters,22,8. 2021
5. 気候変動を踏まえた豪雨・洪水氾濫リスクの考え方  
山田朋人，清水康行（北海道大学）  
ながれ，40 巻，19-24，2021.
6. 融雪期に発生した雪崩-土砂流動現象とその工学的評価  
川村志麻，山田真嘉（室蘭工業大学）  
第 55 回 地盤工学研究発表会，22-12-1-06，2021
7. 気候変動と斜面の物性変化を考慮した火山灰斜面のリスク評価  
千田侑磨，川村志麻，木戸菜摘，佐藤将弥（室蘭工業大学）  
地盤工学会北海道支部技術報告集，第 61 号，2021
8. 融雪期に発生した雪崩-土石流現象とその評価  
川村志麻，横山遼（室蘭工業大学），石川達也（北海道大学），所哲也（北海学園大学）  
令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，III-240，2021
9. 厚真川小流域における崩壊斜面からの流出土砂量の観測  
宮崎 功太郎 星野 剛 山田 朋人（北海道大学）  
橋場 雅弘（(株)福田水文センター）  
令和 2 年度土木学会北海道支部支部論文報告集，B-01，2021
10. 気象要素を用いる客観手法による梅雨前線の季節進行と年々変動  
宮本 真希，山田 朋人（北海道大学）  
令和 2 年度土木学会北海道支部支部論文報告集，B-26，2021



11. 将来気候における北海道周辺域の台風接近数の海面水温依存性  
大屋祐太, 星野剛, 山田朋人 (北海道大学)  
水文・水資源学会／日本水文科学会 2021 年度研究発表会要旨集, PP-A-04, 2021
12. アンサンブル気候データに適した降雨の時空間パターン分類手法の提案  
星野剛, 山田朋人 (北海道大学)  
水文・水資源学会／日本水文科学会 2021 年度研究発表会要旨集, PP-A-05, 2021
13. 梅雨期の九州地方における前線の停滞と降雨特性  
水文・水資源学会／日本水文科学会 2021 年度研究発表会要旨集, PP-A-07, 2021  
宮本 真希, 山田 朋人 (北海道大学)
14. 2018 年北海道胆振東部地震に伴い発生した大規模崩壊斜面における土砂侵食率の定量的評価  
宮崎 功太郎 星野 剛 山田 朋人 (北海道大学)  
水文・水資源学会／日本水文科学会 2021 年度研究発表会要旨集, PP-B-04, 2021
15. アンサンブル気候データを活用した事前防災と避難判断支援への取り組み  
鈴木章弘, 星野剛, 山田朋人, (北海道大学) 山本太郎 (北海道河川財団)  
水文・水資源学会／日本水文科学会 2021 年度研究発表会要旨集, PP-B-28, 2021
16. アンサンブル手法による気候変動予測・リスク評価の考え方  
山田朋人 (北海道大学)  
河川 2020 年 12 月号, 77-81, 2020
17. 複数の気象要素と画像解析を用いた前線の抽出方法,  
宮本真希, 山田朋人 (北海道大学)  
令和元年度土木学会北海道支部論文報告集, B-10, 2020
18. 台風経路に着目した令和元年台風 19 号の大雨特性の評価,  
星野剛, 岡地寛季, 竹原由, 山田朋人 (北海道大学)  
土木学会論文集 B1(水工学), 特集 (令和元年風水害報告特別企画), 76, 414-423., 2020
19. 札幌圏における複数のドップラーレーダを組み合わせた線状降水帯の風速場,  
大屋祐太, 山田朋人 (北海道大学)  
令和元年度土木学会北海道支部論文報告集, 76, B-08, 2020
20. 気候変動の影響を考慮した火山灰斜面の地盤災害リスク評価  
千田侑磨, 川村志麻, 鈴木大貴 (室蘭工業大学)  
令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, III-184, 2020