

2025年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会

干拓地における液状化ハザードマップの 改善に向けた新たな手法

編集：ハザリカ・ヘマンタ, 村井政徳, 太田史朗,
窪田上太郎, 道勇治, 藤白隆司, 石澤友浩, 田中剛,
サハレ・アヌラグ, 犬飼隆義, 廣瀬慧, 福本康秀

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

2025年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会

干拓地における液状化ハザードマップの 改善に向けた新たな手法

編集：ハザリカ・ヘマンタ, 村井政徳, 太田史朗, 窪田上太郎, 道 勇治, 藤白隆司,
石澤友浩, 田中 剛, サハレ・アヌラグ, 犬飼隆義, 廣瀬 慧, 福本康秀

About MI Lecture Note Series

The Math-for-Industry (MI) Lecture Note Series is the successor to the COE Lecture Notes, which were published for the 21st COE Program “Development of Dynamic Mathematics with High Functionality,” sponsored by Japan’s Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) from 2003 to 2007. The MI Lecture Note Series has published the notes of lectures organized under the following two programs: “Training Program for Ph.D. and New Master’s Degree in Mathematics as Required by Industry,” adopted as a Support Program for Improving Graduate School Education by MEXT from 2007 to 2009; and “Education-and-Research Hub for Mathematics-for-Industry,” adopted as a Global COE Program by MEXT from 2008 to 2012.

In accordance with the establishment of the Institute of Mathematics for Industry (IMI) in April 2011 and the authorization of IMI’s Joint Research Center for Advanced and Fundamental Mathematics-for-Industry as a MEXT Joint Usage / Research Center in April 2013, hereafter the MI Lecture Notes Series will publish lecture notes and proceedings by worldwide researchers of MI to contribute to the development of MI.

October 2022

Kenji Kajiwara

Director, Institute of Mathematics for Industry

A Novel Approach for Improving Liquefaction Hazard Maps in Reclaimed Land

MI Lecture Note Vol.106, Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University

ISSN 2188-1200

Date of issue: January 30, 2026

Editor: Hemanta Hazarika, Masanori Murai, Shiro Ohta, Shotaro Kubota, Yuji Michi,

Takashi Fujishiro, Tomohiro Ishizawa, Tsuyoshi Tanaka, Anurag Sahare,

Takayoshi Inukai, Kei Hirose, Yasuhide Fukumoto

Publisher:

Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University

Graduate School of Mathematics, Kyushu University

Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, JAPAN

Tel +81-(0)92-802-4402, Fax +81-(0)92-802-4405

URL <https://www.imi.kyushu-u.ac.jp/>

はじめに

本会議録は 2025 年度 IMI 共同利用研究 一般研究-研究集会（I）「干拓地における液状化ハザードマップの改善に向けた新たな手法」における議論をまとめたものである。

現在、地方自治体が公表している液状化ハザードマップは、限られた地盤情報に基づいて作成されているため、精度に課題がある。多くのボーリング調査を実施すればより正確なマップを作成できるが、莫大な費用を要する。そこで、本研究では、費用を抑えられる現地での簡易な地盤調査（原位置試験）で得られたデータを AI（人工知能）で分析・モデル化することで、現在の液状化ハザードマップを大幅に改善することを目指すものである。具体的には、複数地点で得られた個別の分析結果を統合する新たな手法を提案する。さらに、ニューラルネットワークなどの機械学習手法と比較することで、提案手法の有効性および多様な状況への応用可能性を検証する。また、実際のデータを用いた検証を通じて、具体的な有効性を確認する予定である。

液状化によって地盤が水平方向に大きく移動する「側方流動」による被害の危険性をマップに加えることも極めて重要である。そのため、新たに「側方流動ハザードマップ」の作成も試みるものである。被災した内灘町の復興計画においては、側方流動のリスクを考慮した液状化ハザードマップが不可欠である。本研究は、この地域の地盤リスクを住民に分かりやすく説明し、行政と住民が協力して復興を進めるための基盤作りに尽力することで、災害の予防と被害軽減に貢献することを目指すものである。このような連携を通じて、持続可能な技術革新の土台が築かれ、内灘町をモデルとした本研究の成果が、国内の類似地域にも波及することを期待するものである。本研究の成果は、同規模の地震を想定した場合に、大地震時における社会基盤施設の安定性を高めるための新たな指針を与える点で、大きな意義があるものと考えている。

本研究集会では、液状化を防ぐための新たな戦略として、液状化ハザードマップの精度向上を目指し、これまでの地盤調査結果、数理科学の現場への応用事例、そして地域からの期待について、それぞれの専門家が議論を行った。

本研究集会の成果としては、異なる専門分野や立場を持つ参加者が活発に意見を交わし、今後の研究の方向性について多くの可能性を見出したことが挙げられる。

なお、本研究集会は一般社団法人 GLOSS 研究会と共催された。

ハザリカ・ヘマンタ（九州大学大学院工学研究院・教授）

村井 政徳（清水建設株式会社土木技術本部・主査）

太田 史朗（川崎地質株式会社・代表取締役専務執行役員技術・企画本部長）

窪田 上太郎（川崎地質株式会社技術・企画本部・チーフ）

道 勇治（株式会社吉光組・専務取締役）

藤白 隆司（地盤防災研究所（自営）・代表）

石澤 友浩（国立研究開発法人防災科学技術研究所水・土砂防災研究部門・主任研究員）

田中 剛（東京都市大学建築都市デザイン学部都市工学科・技士）

サハレ・アヌラグ（東京都市大学総合研究所地盤環境工学研究センター・研究講師）

犬飼 隆義（ゼータ設計株式会社・技術統括部長）

廣瀬 慧（九州大学マス・フォア・インダストリ研究所・教授）

福本 康秀（九州大学・名誉教授）

2025年度九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
共同利用・共同研究 一般研究-研究集会(1)
「干拓地における液状化ハザードマップの改善に向けた新たな手法」

令和6年

能登半島地震復興への歩み

液状化被害防止のための新戦略

と き/2025年10月24日(金)~25日(土)

研究集会

現場見学

ところ/九州大学伊都キャンパス
IMIコンファレンスルーム

(ウエスト1号館 口棟414室)

開催方法
対面

タイムスケジュール (10/24~25)

13:00 開会あいさつ 伊藤 大輔(九州大学)

13:05~14:05 一般講演

令和6年能登半島地震による液状化被害発生 の土地条件

村井 直樹(九州大学)

衛星画像から読み解く令和6年能登半島地震による内灘町の液状化被害

田村 上太郎(九州大学)

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage

- Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake -

ザレン アブラム(九州大学)

14:15~15:35 招待講演

令和6年能登半島地震による液状化対策と災害レジリエンス

河内 真文(九州大学)

AIを活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について

大野 隆典(九州大学)

15:38~16:38 特別講演

予測せざる地下水の影響により発生した地すべり

栗原 敏正(九州大学)

2025年ミャンマー(マンダレー)地震に伴う地盤被害の現地調査とその知見

バザリカ ヘマンダ(九州大学)

16:38~17:15 パネルディスカッション

17:15

閉会の挨拶 伊藤 大輔(九州大学)

運営責任者・総務委員

バザリカ ヘマンダ 九州大学大学院工学研究院 社会基盤部門 教授

運営 監 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 教授

村井 直樹 清水建設株式会社

問い合わせ先

九州大学大学院工学研究院 グローバル地盤災害復旧工学グループ

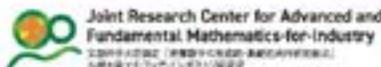
栗原 敏正 Email: global-geo@civil.kyushu-u.ac.jp



<https://event.imi.kyushu-u.ac.jp/event-17974/>

主催 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用・共同研究 一般研究-研究集会(1)

協賛 清水建設株式会社



開催日：2025年10月24日（金）

開催場所：九州大学 伊都キャンパス IMI コンファレンスルーム
（ウエスト1号館D棟414室）

主催：九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

共催：一般社団法人 GLOSS 研究会

種別・種目：一般研究-研究集会（I）

研究計画題目：干拓地における液状化ハザードマップの改善に向けた新たな手法

研究代表者：ハザリカ・ヘマンタ（九州大学大学院工学研究院・教授）

研究実施期間：2025年4月4日（金）

2025年8月1日（金）～2025年8月2日（土）

2025年10月24日（金）～2025年10月25日（土）

公開期間：2025年10月24日（金）研究集会、2025年10月25日（土）現場見学

研究計画詳細：https://joint2.imi.kyushu-u.ac.jp/research_chooses/view/2025a047

研究集会プログラム

タイトル：令和6年能登半島地震復興への歩み ～液状化被害防止のための新戦略～

13:00 開会あいさつ

ハザリカ ヘマンタ（九州大学大学院工学研究院・教授）

13:05 ～ 14:05 一般講演

令和6年能登半島地震による液状化被害発生の土地条件

村井 政徳（清水建設株式会社土木技術本部・主査）

衛星画像から読み解く令和6年能登半島地震による内灘町の液状化被害

窪田 上太郎（川崎地質株式会社技術・企画本部・チーフ）

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced lateral Spreading Damage
- Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake -

サハレ・アヌラグ（東京都市大学地盤環境工学研究センター・研究講師）

14:05 ～ 14:15 休憩

14:15 ～ 15:15 招待講演

令和6年能登半島地震による液状化対策と災害レジリエンス

河内 義文（株式会社ケイズラブ・代表取締役）

AIを活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について

犬飼 隆義（ゼータ設計株式会社・技術統括部長）

15:15 ～ 16:15 特別講演

予期せざる地下水の影響により発生した地すべり

東畑 郁生（東京大学・名誉教授）

2025年ミャンマー（マンダレー）地震に伴う地盤被害の現地調査とその知見

ハザリカ・ヘマンタ（九州大学大学院工学研究院・教授）

16:15 ～ 16:30 休憩

16:30 ～ 17:30 パネルディスカッション

テーマ講演：令和6年度能登半島地震における石川県建設業協会の対応

松本 樹典（金沢大学・名誉教授）

モデレーター：ハザリカ・ヘマンタ

パネリスト：東畑 郁生，松本 樹典，河内 義文

17:30 閉会あいさつ

福本 康秀（九州大学・名誉教授）



集合写真



パネルディスカッション

(左からハザリカ教授，松本教授，河内博士，東畑教授)

目 次

はじめに	i
ポスター	iii
研究集会概要	iv
研究集会プログラム	v
集合写真	vi
1. 開会あいさつ	1
2. 一般講演	1
令和 6 年能登半島地震による液状化被害発生土地条件 (清水建設株式会社土木技術本部・村井政徳)	
衛星画像から読み解く令和 6 年能登半島地震による内灘町の液状化被害 (川崎地質株式会社技術・企画本部・窪田上太郎)	
Understanding and Preventing Liquefaction-Induced lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake - (東京都市大学地盤環境工学研究センター・サハレ・アヌラグ)	
3. 招待講演	8
令和 6 年能登半島地震による液状化対策と災害レジリエンス (株式会社ケイズラブ・河内 義文)	
AI を活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について (ゼータ設計株式会社・犬飼 隆義)	
4. 特別講演	17
予期せざる地下水の影響により発生した地すべり (東京大学名誉教授・東畑 郁生)	
2025 年ミャンマー (マンダレー) 地震に伴う地盤被害の現地調査とその知見 (九州大学大学院工学研究院・ハザリカ・ヘマンタ)	
5. パネルディスカッション	24
6. 閉会あいさつ	30
付録	
講演パワーポイント (179 ページ)	

1. 開会あいさつ

本研究集会の開会にあたり、プロジェクトリーダーである九州大学大学院工学研究院のハザリカ・ヘマンタ教授より挨拶があった。ハザリカ教授は、令和 6 年能登半島地震発生後、約 1 ヶ月という短期間で、九州大学を中心とした産官学の有志が集結し、被災地の大学や民間企業、他地域の研究機関や大学関係者の協力を得て、迅速な初動調査を実施した経緯を説明された。この初動調査は、IMI の短期共同研究「能登半島地震における液状化の発生メカニズムの解明」の一環として実施され、その成果の一部は昨年度のワークショップで報告されている。本年度も IMI 共同研究プロジェクトとして採択され、その研究成果を報告する場として本研究集会被開催される運びとなった。

本研究集会では、これまでの研究成果報告に加え、復興活動における課題や今後の防災対策について、産学の専門家によるパネルディスカッションが実施された。また、プロジェクトメンバーに加え、東京大学名誉教授の東畑郁生教授、株式会社ケイズラブの代表取締役である河内義文氏を特別講演者として招聘し、現地での活動経験に基づく貴重な知見が共有された。ハザリカ教授は、被災地域が依然として複雑な課題に直面している現状を認識し、本日の議論を通じて、より良い復興への道筋を見出すことを期待する旨を述べた。

2. 一般講演

一般講演では、「令和 6 年能登半島地震復興への歩み、液状化被害防止のための新戦略」を実現可能にするため、能登半島地震における液状化被害の実態、その発生メカニズム、広域的な被害把握手法、および今後の復興と防災対策に向けた新しい戦略について考察を行った。特に、地盤工学、地質学、リモートセンシング、そして数理科学が連携する、多様な専門分野が協力するアプローチの重要性が強調された。

清水建設株式会社の村井政徳博士の講演では、内灘町における液状化被害の現地調査結果から、干拓地と埋立地の区別の重要性、および既存ハザードマップが抱える課題が指摘された。川崎地質株式会社の窪田上太郎氏の講演では、合成開口レーダ (SAR) 衛星画像を用いた干渉 SAR 解析によって、液状化被害の範囲を広域的に抽出する手法が示され、その有効性が検証された。東京都市大学のサハレ・アヌラグ博士の講演では、液状化に伴う側方流動のメカニズム解明に向けた詳細な分析が報告された。これらの知見は、能登半島地震からの復興、そして将来の地盤災害に対するレジリエンスを高めるために不可欠であり、数理科学的手法がその基盤を支えることが示された。

2.1 はじめに

2024 年 1 月 1 日に発生した令和 6 年能登半島地震は、能登半島広域に甚大な被害をもたらした。特に、液状化による地盤変状は、家屋の傾斜・沈下、側方流動、インフラ施設の損傷など、社会経済活動に深刻な影響を与えている。九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 (IMI) では、この地震による液状化被害の発生メカニズム解明と、復興に向けた新た

な防災戦略の構築を目指し、産官学連携による共同研究プロジェクト「干拓地における液状化ハザードマップの改善に向けた新たな手法」を推進している。

ここでは、3題の一般講演の内容をまとめた。

講演 1：令和 6 年能登半島地震による液状化被害発生の土地条件

村井 政徳（清水建設株式会社土木技術本部）

講演 2：衛星画像から読み解く令和 6 年能登半島地震による内灘町の液状化被害

窪田 上太郎（川崎地質株式会社企画・技術本部）

講演 3：Understanding and Preventing Liquefaction-Induced lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake -

サハレ・アヌラグ（東京都市大学地盤環境工学研究センター・研究講師）

各講演内容を詳細に報告し、それぞれの知見を統合して、能登半島地震からの復興、そして将来の地盤災害対策における数理科学的アプローチの重要性を考察した。

2.2 一般講演 1：令和 6 年能登半島地震による液状化被害発生の土地条件

村井博士は、令和 6 年能登半島地震における液状化被害の発生メカニズム解明を目的とした IMI 共同研究プロジェクトの概要を説明した。本プロジェクトは、九州大学のハザリカ・ヘマント教授をプロジェクトリーダーとし、金沢大学名誉教授の松本樹典名誉教授、富山県立大学の兵動太一博士、東京都市大学のサハレ・アヌラグ博士といった大学関係者、防災科学技術研究所の石澤友浩博士、建設関連企業の株式会社吉光組の道勇治氏、清水建設株式会社の村井政徳博士、川崎地質株式会社の太田史朗氏・窪田上太郎氏、ゼータ設計株式会社の犬飼隆義氏、地盤防災研究所の藤白隆司氏など、産官学の多様な専門分野を持つメンバーで構成されている。地盤工学だけでなく、地質学など様々な分野が協力するアプローチのもと、詳細な現地調査が実施され、被害の深刻さ、被害が拡大した要因、建造物の損傷状況、大規模な液状化被害のメカニズム解明が進められた。

2.2.1 これまでの研究成果

これまでの研究成果は、地盤工学会の地盤工学研究発表会（2024 年旭川、2025 年下関）で多数発表され、2024 年はサハレ博士、2025 年は窪田氏が優秀発表賞を受賞するなど、高い評価を得ている。また、海外に向けては、米国の GEER レポートに調査結果がまとめられ公開されているほか、自然災害学会誌の特集号や地盤工学会の災害調査論文報告集に、査読付き論文が複数掲載されている。国際会議（インドで開催された Geotech Asia）でもハザリカ教授が発表するなど、国内外で精力的な研究活動が展開されている。

アウトリーチ活動としては、内灘町役場への調査結果報告会、石川県議会議員向けの勉強会での講演（ハザリカ教授）、NHK の取材対応（松本教授による室地区における 12m 側方流動の解説）などが行われ、研究成果の社会還元にも積極的に取り組んでいる。

本年度のプロジェクトでは、「干拓地における液状化ハザードマップの改善に向けた新た

な手法」をテーマに研究が進められている。村井博士は、自治体が公表している液状化ハザードマップの弱点として、限られた地盤情報に基づいて作成されている点を指摘した。この課題に対し、コスト削減可能な現地試験（東京都市大学によるスクリュードライバースOUNDING試験（SDS）、応用地質開発のピエゾドライブコーン（PDC）、古典的な簡易動的コーン貫入試験など）を比較検討し、得られたデータをもとにモデル化することで、ハザードマップの精度向上を目指している。特に、今回の地震でクローズアップされた側方流動の被害危険性をハザードマップに付加することの重要性を強調した。

2.2.3 内灘町における液状化被害の土地条件

内灘町では、主に北西端に位置する西荒屋地区と室地区で液状化被害が精力的に調査された。

西荒屋地区：吉光組の協力による UAV3 次元測量点群データから、広域的な亀裂の発生、水平移動、変動の変状がデジタル技術によって明らかにされた。過去の地形図との比較から、西荒屋地区はかつて砂丘を削った跡地（砂取場）であり、現在の変状箇所がその地形とほぼ重なることが示された。

室地区：大規模な側方流動が発生し、家屋が 12m も移動した事例が確認された。UAV 測量結果もこの移動量を裏付けている。室地区は 1960 年代後半には湿地帯であり、干拓事業に伴う埋め立てが行われ、その上に新たな家屋が建設された地域である。埼玉大学の谷 謙二教授が開発された「今昔マップ」を用いて過去の地形図を重ね合わせると、液状化被害箇所が旧汀線（陸地と水域の境界）や軟弱地盤を示す地図記号と一致することが示された。

干拓地と埋立地の区別：液状化被害の発生状況から、干拓地と埋立地を混同して議論することの危険性を指摘した。干拓は海を締め切って海水を干上がらせて陸地化するのに対し、埋め立ては締め切った場所に土を投入して造成する。内灘町では、広大な河北潟干拓地では液状化被害がほとんど発生していない一方、干拓事業に伴って埋め立てられた箇所や、砂丘を削った跡地を埋めた箇所で大きな被害が出ていることが示された。このことから、ハザードマップ作成においては、単に「緩く堆積した地下水が高いところ」として一括りにするのではなく、土地の成り立ち（干拓地、埋立地、砂丘後背地など）を考慮した詳細な検討が必要であると提言した。

県道 8 号の抑止効果：県道 8 号が側方流動の抑止効果を持っている可能性が指摘された。地盤改良や締め固めが施された道路が、ある種の「レジリエンスベルト」として機能している可能性があり、このような「大丈夫なところ」を抽出することもハザードマップにとって重要な情報となりうると述べた。

2.2.4 質疑応答

東畑教授からは、干拓地での液状化被害が少ないという村井博士の指摘に対し、2011 年

の東日本大震災における霞ヶ浦周辺の元干拓地（千葉県安孫子市日の出地区など）で液状化が発生した事例が挙げられた。これらの地域では、干拓後に農業利用を経て住宅地に転換する際に盛り土が行われ、それが沈下し地下水を含んで液状化した経緯がある。東畑教授は、最終的には「どのような土質か」が液状化の発生を決定づける要因であると指摘し、干拓地か否かという地歴だけでなく、土質そのものの詳細な評価の重要性を強調した。村井博士は、河北潟周辺に限っては干拓地と埋立地で大きな違いがあるように感じているとしつつも、土質の違いを含めた詳細な検討が今後の課題であると応じた。また、八郎潟の堤防での液状化事例も挙げられ、局所的な土質条件の重要性が再確認された。

2.3 一般講演 2：衛星画像から読み解く令和 6 年能登半島地震による内灘町の液状化被害

2.3.1 衛星画像による広域被害把握の重要性

窪田氏は、内灘町のような広域にわたる液状化被害を机上で効率的に把握する手法として、衛星画像の活用について発表した。特に、光学衛星（一般的な衛星画像）と SAR（合成開口レーダ）衛星の違いと、SAR 衛星の利点に焦点を当てた。

SAR 衛星の特性：光学衛星が太陽光の反射を観測するのに対し、SAR 衛星は自ら電波を照射し、その反射波を観測する。このため、雲に遮られず、夜間でも観測が可能であり、天候や昼夜を問わず常に同じ条件で撮影できるという大きな特徴を持つ。これにより、液状化のような地表面の変化を検出しやすい利点がある。

干渉 SAR 解析とコヒーレンス低下：SAR 衛星を用いた代表的な技術として、干渉 SAR（InSAR）解析がある。これは、地表の同じ場所を 2 回観測し、反射波の位相差を比較することで地表面の変位を面的に推定する技術である。しかし、液状化のように地面が著しく攪乱される被害では、反射波が大きく変化するため、変位の推定が困難になる。そこで窪田氏は、InSAR 解析で得られる「コヒーレンス」の低下に着目した。コヒーレンスは、2 回の観測間で地表面の電波反射状態がどれだけ似ているかを示す指標であり、地震の前後でこの値が著しく低下した範囲は、液状化などによる地盤変動が発生した可能性が高いと推測される。

2.3.2 InSAR 解析結果と現地状況との整合性

窪田氏は、Sentinel-1 衛星データを用いて内灘町のコヒーレンス低下解析を実施した。

コヒーレンス低下マップ：解析結果として得られたコヒーレンス低下マップでは、被害の大きかった県道 8 号沿いや、その北側の地域でコヒーレンスが大きく低下しているエリアが抽出された。

現地状況との比較検証：抽出されたコヒーレンス低下エリアを、西荒屋地区、室地区、かほく市野毛地区の現地被害状況（地盤の亀裂、噴砂、電柱の傾斜など）と比較した結果、高い整合性が確認された。これにより、SAR コヒーレンス低下解析が液状化による地盤変動範囲を広域的に抽出する有効な手法であることが示された。

2.3.3 地質・地歴を踏まえた変動要因の考察

内灘町の地質・地歴とコヒーレンス低下エリアの対応関係が考察された。

地質：内灘町は河北潟砂丘とその内陸部に中砂・粗砂が分布する地域である。

地歴：昭和初期から 1970 年代にかけて、干拓と埋立事業が段階的に行われ、旧汀線が大きく変化している。

コヒーレンス低下エリアとの対応：

河北潟に面する旧汀線沿い：コヒーレンス低下が顕著な範囲は、1/50,000 地質図における砂丘後背砂地の分布とほぼ一致した。これらのエリアは標高が約 5m と低く、地下水位も地表から 1~2m 以内と非常に浅いという液状化しやすい地盤条件が重なっていた。

室地区：干拓に伴う埋立地と想定されるエリアと、コヒーレンス低下エリアが重なることが確認された。

西荒屋地区：砂丘と埋立地の境界部、特に小学校周辺で顕著なコヒーレンス低下が見られた。

北側地域：河北潟に面する旧汀線沿いと同様に、砂丘後背砂地の分布、低標高、地下水位が 1m 未満という浅い条件が重なり、コヒーレンス低下が確認された。

これらの結果から、液状化被害は、緩い埋立地、砂丘後背地といった地質条件、および低標高・浅い地下水位という地形・水文条件が複合的に重なった箇所が発生していることが示唆された。

2.3.4 質疑応答

衛星画像からの地盤変動検出に関する質問として、コヒーレンス低下の手法で沈下や隆起、側方流動を区別できるかという問いに対し、窪田氏は「何かしらの地表面の変化（沈下、側方流動、ぐちゃぐちゃになった状態など）があったエリア」を抽出するものであり、個々の変状タイプを区別することはできないと回答した。しかし、地盤の隆起（能登半島地震では広範囲で隆起が発生）のような特徴も捉えられる可能性があり、今後の技術応用への期待が示された。

2.4 一般講演 3: Understanding and Preventing Liquefaction-Induced lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake -

サハレ博士の講演は英語で行われ、液状化に伴う側方流動のメカニズム解明とその教訓に焦点が当てられた。

2.4.1 対象地域の歴史的背景と地盤特性

講演では、対象地域の歴史的背景が 19 世紀初頭にまで遡って検討された。この地域の地

盤は、USCS（統一土質分類法）スキームによれば「非常に高い」液状化感受性を持つ土質であると説明された。また、地盤の沈下傾向が増加していることが観測されており、これは液状化発生の潜在的リスクを示唆している。

2.4.2 側方流動のメカニズムと間隙水圧の挙動

液状化に伴う側方流動のメカニズムを理解するため、詳細な地層の分析が行われた。地層は 3 つの異なるグループに分類され、それぞれのグループが液状化発生時の挙動にどのように影響するかを検討した。特に、地震時の間隙水圧の発生は一樣ではなく、異なる地層が異なる応力を経験することが示された。これは、液状化の発生と側方流動の進展が、地盤の不均一性によって複雑化することを示唆している。

2.4.3 側方流動の「モーメント」と設計への教訓

サハレ博士は、側方流動の発生を「モーメント」という概念を用いてさらに深く分析した。この「モーメント」は、斜面の勾配や地震のメカニズムとどのように関連するかを詳細に示した。この分析は、液状化による側方流動の発生条件を定量的に評価し、その挙動を予測するための重要な知見を提供した。

講演の結論として、これらの研究成果が将来の構造物設計において重要な教訓となることが強調された。液状化による側方流動の複雑なメカニズムを理解し、それを設計に反映させることで、よりレジリエントな社会基盤の構築に貢献できると述べた。

2.5 総合考察と数理科学の役割

本研究集会における 3 つの一般講演は、令和 6 年能登半島地震における液状化被害の多角的側面を浮き彫りにし、そのメカニズム解明と復興に向けた新たな戦略の必要性を示した。これらの知見を統合し、数理科学の視点から考察することで、地盤災害研究の深化と実社会への貢献の可能性が見えてくる。

2.5.1 液状化ハザードマップの高度化と数理科学

村井博士の講演で指摘された既存ハザードマップの課題は、数理科学的アプローチによって解決される。

地盤情報の不確実性評価：限られた地盤情報からハザードマップを作成する際、ボーリングデータや簡易貫入試験データなどの不確実性を定量的に評価するために、確率論や統計学が不可欠である。ベイズ統計やガウス過程回帰などを用いることで、未調査地点の地盤特性を確率的に推定し、ハザードマップの信頼性を向上させることができる。

干拓地と埋立地の区別：土地の成り立ち（干拓、埋立、自然堆積）を考慮したハザードマップの作成には、地理情報システム（GIS）と空間統計学が有効である。過去の地形図や航空写真、地質図などの地理空間データを統合・解析し、各土地条件における液状化

感受性を数理モデルで評価することで、より精緻なゾーニングが可能となる。

側方流動リスクの付加:側方流動の発生メカニズムは複雑であり、そのリスクをハザードマップに付加するためには、地盤の構成則に基づいた数値解析モデル（有限要素法、有限差分法など）が不可欠である。流体-固体連成解析や破壊力学の知見を導入し、地震動と地下水挙動の相互作用を数理的に記述することで、側方流動の発生条件や変位量を予測するモデルを構築できる。

2.5.2 リモートセンシングとデータ科学による被害把握

窪田氏の講演で示された SAR 衛星画像を用いたコヒーレンス低下解析は、広域的な液状化被害を効率的に把握する上で極めて有効な手法である。

画像解析とパターン認識:SAR 画像のコヒーレンス低下は、地表面の変化を捉える指標であるが、これを液状化被害と結びつけるためには、画像処理技術やパターン認識アルゴリズムが重要となる。機械学習や深層学習を用いることで、コヒーレンス低下パターンから液状化の有無や被害の程度を自動的に判別するシステムの開発が期待される。

データ同化とモデル更新:SAR データのようなリモートセンシングデータと、現地調査データ、地盤モデルを統合するデータ同化技術は、地盤の不確実性を低減し、液状化予測モデルの精度を向上させる上で強力なツールとなる。

2.5.3 側方流動メカニズムの数理モデル化

サハレ博士の講演で示された側方流動の「モーメント」解析は、液状化による地盤の不安定化を数理的に捉える試みである。

構成則と数値解析:液状化時の土の挙動を正確に記述する構成則（例：弾塑性モデル、粘塑性モデル）の開発は、側方流動の数値解析の精度を左右する。これらの構成則は、連続体力学の基礎方程式と組み合わせて、有限要素法などの数値解析手法によって地盤の変形挙動をシミュレーションする。

不均一性・不確実性の考慮:地盤の不均一性や地震動の不確実性が側方流動に与える影響を評価するためには、確率論的数値解析やモンテカルロシミュレーションといった数理科学的手法が有効である。

2.5.4 数理科学と地盤工学の連携による復興戦略

能登半島地震からの復興、そして将来の地盤災害に対するレジリエンス向上には、地盤工学と数理科学の緊密な連携が不可欠である。

意思決定支援システム:数理モデルに基づくリスク評価、被害予測、対策効果の定量化は、限られた資源の中で最適な復興・防災戦略を立案するための意思決定支援システムに貢献する。

低コスト調査技術の最適化:SDS や PDC といった低コストな現地試験から得られるデ

ータを最大限に活用するためには、統計的サンプリング計画やデータ解析の最適化が数理科学の課題となる。

アウトリーチ活動の強化：研究成果を地域住民や行政関係者に分かりやすく伝えるためには、可視化技術やインタラクティブなハザードマップの開発が重要であり、これも数理科学の応用領域である。

2.6 結論

本研究集会における3つの一般講演は、令和6年能登半島地震における液状化被害の深刻さと、その複雑なメカニズムを多角的に分析した。村井博士の講演は、内灘町における液状化被害の実態と、干拓地と埋立地の区別、およびハザードマップの改善の必要性を強調した。窪田氏の講演は、SAR衛星画像を用いたコヒーレンス低下解析が広域的な液状化被害を効率的に把握する有効なツールであることを示し、その地質・地歴との関連性を明らかにした。サハレ博士の講演は、液状化に伴う側方流動のメカニズムを詳細に分析し、その設計への教訓を提示した。

これらの研究成果は、能登半島地震からの復興、そして将来の地盤災害に対するレジリエンス向上に不可欠である。そして、その基盤を支えるのが数理科学である。地盤の不確実性評価、複雑な現象の数値シミュレーション、大量データの解析、リスク評価、意思決定支援など、数理科学は地盤工学分野における様々な課題解決に貢献する。九州大学マス・フォア・インダストリ研究所が推進する「マス・フォア・インダストリ」の理念に基づき、今後も地盤工学と数理科学の連携を一層強化し、学際的なアプローチを通じて、地盤災害のメカニズム解明、高精度な予測技術の開発、そして効果的な対策の立案を通じて、社会の安全・安心に貢献していくことが期待される。

3. 招待講演

招待講演では、令和6年能登半島地震における液状化被害の実態、その対策、災害レジリエンスの概念、およびAIを活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について考察された。株式会社ケイズラブの河内義文博士の講演では、能登半島地震で顕在化した空き家リスク、液状化対策の経済的・社会的な課題、地盤流動による土地境界問題、そして「未災学」の重要性が指摘された。ゼータ設計株式会社の犬飼隆義氏の講演では、液状化ハザードマップの現状と課題、地盤情報データベースの活用、液状化弱点領域の抽出手法が示され、データが不足する地域におけるAIを用いたハザードマップ高精度化の可能性が提案された。これらの知見は、能登半島地震からの復興、将来の地盤災害に対するレジリエンス向上、そして数理科学が地盤工学分野に貢献しうる具体的な方向性を示すものである。

3.1 はじめに

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震は、能登半島地域に甚大な被害をもた

らし、液状化による地盤変状、大規模な隆起、インフラ施設の損傷など、多岐にわたる課題を浮き彫りにした。この大規模災害からの復旧・復興は、単なる原状回復に留まらず、将来の災害に備えたより強靱な社会構築を目指す「災害レジリエンス」の視点から多角的に検討される必要がある。

ここでは、本研究集会において行われた 2 題の招待講演の内容をまとめた。具体的には、河内博士による「令和 6 年能登半島地震による液状化対策と災害レジリエンス」と、犬飼氏による「AI を活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について」の各講演内容を詳細に報告し、それぞれの知見を統合して、能登半島地震からの復興、そして将来の地盤災害対策における数理科学的アプローチの重要性を考察した。

3.2 招待講演 1：令和 6 年能登半島地震による液状化対策と災害レジリエンス

3.2.1 社会経済と災害レジリエンス

河内博士は、まず災害レジリエンスの概念を防災科学技術研究所の林 春男前理事長の図を用いて説明した。災害発生により社会機能が低下した後、復旧活動を通じて機能が回復するが、必ずしも 100%回復するとは限らない。レジリエンスとは、この機能低下の総量（三角形の面積）を最小化することであり、初期の機能低下を抑える（強靱化、多重化）ことと、回復力を向上させる（傾きを立たせる＝復旧資源の集中、作業時間短縮）ことの両方が重要である。

能登半島地震の事例として、珠洲市飯田町の交差点の地震 1 ヶ月後と 9 ヶ月後の写真が示された。津波と地震で街道を塞いでいた建物を撤去すると閑散とした風景が広がるが、この間、人口減少は 7.5%に留まった。これは、倒壊した家屋の多くが元々空き家であったことを示唆している。2023 年 12 月 22 日の朝日新聞でも「災害時空き家リスク」が指摘されており、南海トラフ地震や首都直下地震で想定される震度 6 弱以上の地域には 145 万軒の木造放置空き家が存在し、その増加に歯止めがかかっていない現状が強調された。2035 年頃に想定される南海トラフ地震や首都直下地震では、被害想定額が 300 兆円に上り、国民一人当たり 300 万円の負債を背負う計算となる。少子高齢化による生産年齢人口の減少も進む中で、レジリエンスはこのような社会経済状況を踏まえて考える必要があると述べた。

3.2.2 液状化対策はきれいごとじゃない

能登半島地震における液状化被害は、湖を埋め立てた農地（干拓地）で広範囲に発生した。特に、標高が-2.1m という低地であり、能登半島では干満差が約 30cm と小さいため、常時大きな電力を使ったポンプによる排水が必要な土地であったことが指摘された。このような地歴を持つ土地での液状化は避けられない現実である。

著名なガラス作家である鍋本綾二氏は、震災前にこの事態を予測し、アトリエを白保台の高台に移転していた。これはまさに「多重化により B 点に上げた」レジリエンスの好例であり、思い切りの良い行動が功を奏した事例として紹介された。鍋本氏の記録をハザードマ

ップに重ねると、液状化しなかった場所が明確に存在することが示され、液状化しなかった場所のメカニズムを研究することの重要性が強調された。

住民説明会資料から、罹災証明の重要性が説明された。罹災証明は、現金給付、仮設住宅への入居、寄付金・義援金、援護資金貸付、税・保険料・公共料金の減免など、被災者支援の幅広い判断基準となるため、住民にとっては自身の被害度を正確に把握することが最も重要である。

内灘町では、震災後 16 ヶ月経った 2024 年 5 月の段階でも、液状化対策の実証実験が計画されている状況が示された。ボーリング調査、室内試験、中間報告、メカニズムと対策案の検討と進む中で、低地であること、工法が限定されること、広範囲であることから、何をやっても高額になるという課題がある。住民は「次はいつ地震が来るのか、液状化するのか。次の大きな地震は数百年後だと言ってほしい。」と切望するが、地盤工学の専門家としては一度の液状化で地盤が強くなるわけではないことを知っている。現在の地震予測では、能登半島沖セグメントは隆起が続いており、依然として S ランク（危険度が高い）と評価されており、「地震は 2,000 年後」とは言えない現実がある。

液状化対策として、地下水低下工法と地盤改良（サンドコンパクション）が提示されているが、標高・2m の土地で地下水低下を行うには常時大きなランニングコストがかかる。サンドコンパクションの場合、500 億円の費用がかかり、946 件の家屋で割ると 1 件当たり 5000 万円となり、土地を買い取る方が安いという経済的現実が示された。このため、地下水位が高い砂丘上への集団移転も検討されたが、砂丘上の宅地はすでに 1.5 倍に値上がりしており、経済の原則とはいえ、このような状況で住民を守るのが政治の役割ではないかと河内博士は述べた。

公共施設（道路）と一体的な液状化対策が訴えられているが、道路は対策できても宅地は直接対策できないという問題がある。行政は、道路を改良すれば囲まれた宅地も「まあまあだろう」と考えている可能性がある。

最も深刻な問題として、地盤流動による土地境界のずれが挙げられた。国土調査法では、境界のずれが 45cm 以内であれば誤差の範囲として所有者間の合意で登記が可能だが、国は最高裁の判例を根拠に、45cm 以上のずれに対しては土地区画整理事業による境界引き直しを求めており、これには 5 年単位の時間がかかる。

液状化側方流動が最も大きかった内灘町荒屋では、震災後 1 ヶ月で県道が応急復旧されたが、地盤改良は行われていない。しかし、県道が復旧されると、その周りに新しい家が建てられ始めた。個別の家屋再建は止められないが、地盤改良や地下水低下が始まった場合、これらの再建された家屋が再度変形する可能性がある。住民は当初、被災地の買い取りを要望していたが、行政からの明確な回答がないことや、被害の差による避難生活の差から、限界に近い住民が個別の復旧に踏み切った。

友人の家は 3 度傾いていなかったため半壊とされたが、窓や建具が動かない状態であった。公費解体が進み、周囲が更地になる中で、友人の隣家は住宅用鋼管杭を 7m 設置して住

宅を再建した。N 値 0~1 の層を抜けて N 値 4 のシルト質砂に到達する 7m 付近の層を頼りに杭を打ったという。しかし、液状化による中抜けを防止する杭ピッチの研究が不足しており、細い鋼管杭では側方流動で抜けてしまう危険性が指摘された。このような工法が多用される前に、専門家が適切なアドバイスをすべきであると警鐘を鳴らした。

河内博士は、県道敷だけでなく、側方流動しないように改良し、共同溝などを通して、全体を真空排水（SWP 工法）で一旦地下水を締め、液状化強度を上昇させる案を提案した。

3.2.3 「未災学」と二重被災

河内博士は、京都大学の釜井俊孝名誉教授が提唱する「未災学」の概念を紹介した。これは、正常化バイアス（これまで大丈夫だったからこれからも大丈夫だろうと考える心理）によって、専門家と一般住民の間に生じる認識の乖離を埋めるための学問である。

能登半島地震では、地震の 9 ヶ月後に豪雨災害が発生し、二重被災となった事例が報告された。輪島市の野球場付近で発生した大規模な地すべりは、珪藻泥岩の岩盤すべりであり、大きな地震でしか再滑動しないと言われていたが、豪雨によって再滑動し、下流の避難所や水道本管を破壊した。このような二重被災は、専門家が適切なアドバイスできるシステムがないと繰り返される可能性がある。

河川越流で中学生の女子が家ごと流された塚田川の事例では、土石流が直撃した場所に経営住宅が盛土して造られていた。掘り込み河道であるため盛土自体は問題ないと考えられたかもしれないが、増水時にはボトルネックとなり水位が上昇し、土石流が直接当たる地形を行政が作ってしまった形となった。地盤工学の知識があれば、このような場所を避けるアドバイスができたはずであり、輪島には他にも土地があるため、このような盛土は不要であったと指摘した。

南海トラフ地震に備えて、地震の発生確率と災害確率から「地震フラジリティ」を算定した結果、高知県では 0.52 しか回復しないと予測される一方、河内博士の住む山口県では 0.84 と高いが、被害を 0 にすれば助けに行けると考えている。地震発生時に津波を見に行く若者などがいないよう、誰も死なない社会を目指し、助け合いができるレジリエンスを構築すべきであると締めくくった。

3.2.4 質疑応答

杭で支えられた全壊家屋について：杭で支えられて傾きはなかったが、周囲の地盤が中抜けして全壊とされた家屋について質問があった。河内博士は、その家屋は全壊判定であり、地盤がないためであると説明した。しかし、住人は 1 ヶ月後には戻って住んでおり、現在は周囲もコンクリートで補修されているとのこと。問題は、地盤の側方流動による土地境界のずれであり、隣家との境界線問題に直面していることが報告された。

地下水低下工法のメンテナンス費用について：松本教授から、新聞報道では地下水低下工法が地盤改良工法よりも安価であると報じられるが、その後のメンテナンス費用（電気

代など) が一切報じられないことへの疑問が呈された。河内博士は、2011年の東日本大震災後の千葉県我孫子市での事例を挙げ、年間 8,000 円のメンテナンス費用を各家庭が負担することに反対が出て、地盤改良プロジェクトが中止になった経緯を説明した。安全は金で買うものだが、住民がその負担を拒否する現実があり、そのため行政がメンテナンス費用を隠してしまう実態があると述べた。また、内灘町の低地では自然流下での排水は困難であり、大規模なポンプによる排水が必要となるため、ランニングコストは避けられない。水平ボーリングによる排水も深度に限界があるため、深い集水井による排水が試験工事として検討されている状況が示された。

3.3 招待講演 2 : AI を活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について

3.3.1 背景と課題

犬飼氏は、令和 6 年能登半島地震で発生した液状化による側方流動やマンホールの浮き上がりなどの被害を背景に、液状化ハザードマップの高精度化の必要性を強調した。液状化の危険度は、通常、液状化抵抗係数 (FL 値) や液状化指数 (PL 値) を用いて評価されるが、本来は 3 次元的な空間として評価されるべきである。防災計画やハザードマップ作成においては、地震想定に基づいた PL 値が必要となる。ハザードマップは、自然災害から家屋を守るための地域の危険を教えてくれる「災害リスクの見える化」ツールであると定義した。

3.3.2 ハザードマップの現状と名古屋市の事例

名古屋市が公開している液状化危険度マップが事例として紹介された。名古屋港周辺の沖積層が卓越する地域では、ほぼ全域が液状化危険度の高いエリアとして示されている。このマップは、500m メッシュ区分ごとに計算されており、名古屋市全域にわたって整備されている。

3.3.3 広域地盤を対象とした液状化判定手法

液状化判定手法には、詳細な動的 FEM 解析などがあるが、ハザードマップ作成には不向きであるため、簡易的な手法が用いられる。犬飼氏は、表層地形の微地形による方法と、土質・地下水データを用いた FL 法や PL 法による判定方法を紹介し、後者の手法に焦点を当てた。この手法には、ボーリングデータ、N 値、単位体積重量、細粒分含有率 (Fc)、50% 粒径 (D_{50}) などの地盤情報が必要となる。

3.3.4 地盤情報データベースの活用

名古屋市内には、地盤工学会中部支部がまとめた「最新名古屋地盤図」という地盤情報データベースが存在する。このデータベースには、柱状図や土質図が整理されており、昭和期に作成されたデータと平成 24 年に追加されたデータが統合されている。地図上でクリック

すると、各地点の柱状図や地質断面図が閲覧でき、地層構成や傾斜などの詳細な地質情報が得られる。犬飼氏は、これらの基礎資料を用いて液状化判定を行うことを提案した。

しかし、名古屋市全域を見ても、ボーリング柱状図の分布には密度の偏りがあり、特に北西部などではデータが密ではない箇所も存在する。そのため、大都市地域であっても全ての地点にボーリングデータがあるわけではなく、500m メッシュのような広域ハザードマップを作成しようとする、どうしても空白地域が生じてしまうという現状が指摘された。

3.5 液状化判定の対象土層と感度分析

道路橋示方書に基づく液状化判定の対象土層の条件が説明された。

地下水位が地表面から 10m 以内、かつ深度 20m 以内に存在する土層。

細粒分含有率が 35%以下の土層、または 35%を超えても塑性指数 (I_p) が 15 以下の土層で、50%粒径が 10mm 以下、かつ 10%粒径が 1mm 以下である土層。

細粒分含有率 (F_c) は、粘土とシルトの含有率を示すが、古い地質データやボーリング柱状図には記載がない場合が多い。広域ハザードマップを作成する際には、これらの古いデータも活用せざるを得ないため、 F_c を正確に推定する必要がある。

液状化抵抗係数 FL は、動的せん断強度 R と地震時せん断応力比 L の比で算定される。 R の算定には N 値、 F_c 、 D_{50} が必要であり、感度分析の結果、 F_c の感度が非常に高いことが示された。このため、 F_c を正確に評価することの重要性が改めて強調された。

液状化指数 PL は、深度 0m から 20m までの FL 値を積分して算定され、液状化の危険度を平面的な指標として評価するために用いられる。 PL 値が 5 以下、5~20、20 以上で危険度が分類される。

3.3.6 地盤特性を考慮した液状化弱点領域の抽出

愛知県稲沢市での事例が紹介された。1944 年の東南海地震時の噴砂・噴水に関するアンケート調査結果から、液状化履歴のある場所とない場所が明確に残っている。稲沢市は、最終氷期における急激な海面上昇により、約 6,000 年前には現在の海岸線が稲沢市付近にあり、その南北で海成層と非海成層が分布している。ボーリング柱状図の貝殻記載から、南側の海成層では海河変堆積物が確認され、北側の非海成層では確認されないことが示された。

アンケート調査結果と地質断面図を重ね合わせると、液状化が発生した箇所と地質特性（特に上部砂層の海成層）との相関が見られた。 FL 値が 0.4 以下となる液状化しやすい層が地表面近くに存在する場合、液状化が顕在化しやすい。このように、細粒分含有率などの地盤特性を正確に把握しながら液状化を判定することの重要性が示された。

また、濃尾平野の南北における地質断面の比較から、同じような地層が連続していても、堆積環境の違いにより土層状態が異なることが示された。特に、細粒分含有率の深度分布は、河川堆積物の影響を受ける北側と、海成層の影響を受ける南側で異なる傾向を示し、このような地域的な特性も AI を用いて評価し、ハザードマップ作成に生かす必要があると述べた。

3.3.7 AI を活用した液状化ハザードマップの高精度化

犬飼氏は、AI を「人間の知能、知的行動を模倣する技術であり、学習・推論・判断を行う能力を持つコンピュータプログラム」と定義した。AI による推論には学習データが必要となるが、能登半島のような被災地ではボーリングデータが不足している現状がある。

そこで、犬飼氏は、データが豊富に揃っている名古屋地盤図のデータを用いて AI を学習させ、そのモデルを能登半島のようなデータ不足地域に適用することで、ハザードマップの高精度化を目指す研究計画を提案した。

具体的な研究計画は以下の通りである。

名古屋市内の「最新名古屋地盤図」の柱状図データ (N 値, 単位体積重量, F_c , D_{60} など) を整理し、欠落情報がある場合や意図的に欠落させたデータを用いて AI を学習させる。

AI 技術を用いて F_L 値を算定し、それに基づいて P_L 値を計算する。

この AI モデルを、広域地盤情報が整備されていない能登半島の被災地（特に内灘町室地区など）に適用し、高精度なハザードマップを作成する。

さらに、側方流動を反映したハザードマップの作成も目指す。

3.3.8 質疑応答

ハザードマップと住民の行動：国土交通省 OB の瀬戸口氏から、名古屋市で公開されているハザードマップに対し、住民がより安全な地域への移転や引っ越しといった行動を起こしているかという質問があった。犬飼氏は「全くない」と回答し、住民は住み慣れた場所に住み続けたいと考える傾向があることを指摘した。ハザリカ教授は、ハザードマップが「オオカミ少年」のようなファクターになっていないかという懸念を示し、犬飼氏は「100 年以内に間違いなく起こる」というような、より確実性の高いハザードマップを示すべきだと述べた。しかし、東畑教授は、地震学がそこまで予測できる段階にないため、「100 年以内に液状化が起こる」と断言することは難しいと指摘し、この現実を前に、いかに住民に理解を求め、対策を講じるかが難しい問題であると述べた。

AI と地盤調査の必要性：東畑教授は、AI が流行している現状を認識しつつも、「AI ができるから地盤調査は不要になる」という誤解が広まることへの懸念を示した。これは業界の首を締めることになりかねないため、地盤調査の重要性を引き続き強調し、AI は調査のスピードアップやポイント増加 (PDC などの活用) を補完するツールとして位置づけるべきだと提言した。犬飼氏は、東畑教授の意見に同意し、AI は地質調査技術者の専門的な知見を可視化し、不足する情報を補完するツールとして活用すべきであり、全ての調査を AI に置き換える発想ではないと説明した。地盤の急変を AI がどこまで把握できるかという課題も認識しつつ、AI はあくまで補完的な役割を果たすべきであると述べた。

3.4 総合考察と数理科学の役割

両講演は、能登半島地震における液状化被害の深刻さと、その対策、そして将来の災害に備えるための課題を多角的に提示した。これらの課題解決には、地盤工学の知見に加え、数理科学の積極的な関与が不可欠である。

3.4.1 災害レジリエンスと数理科学

河内博士が提示した災害レジリエンスの概念は、数理科学的な最適化問題として捉えることができる。

機能低下の最小化：災害による機能低下の総量（三角形の面積）を最小化するためには、強靭化（初期機能低下の抑制）と回復力向上（復旧速度の加速）の両面で最適な資源配分を決定する必要がある。これは、多目的最適化問題として定式化され、線形計画法や非線形計画法、動的計画法などの数理最適化手法が適用可能である。

空き家リスクの評価：空き家が災害リスクを高めるという指摘は、空間統計学やネットワーク分析を用いて、空き家の分布と災害被害の相関を分析し、リスクの高い地域を特定することに繋がる。

経済的影響の予測：南海トラフ地震や首都直下地震による経済的被害額の予測は、経済モデルと確率論的リスク評価を組み合わせた数理モデルによって行われる。

「未災学」と行動変容：正常化バイアスを克服し、住民の行動変容を促すためには、行動経済学やゲーム理論の知見を取り入れた数理モデルが有効である。リスク認知のモデル化や、情報伝達の最適化を通じて、防災意識の向上を図ることができる。

3.4.2 液状化対策の意思決定と数理科学

液状化対策の選択（地下水低下、地盤改良、集団移転など）は、費用対効果、リスク低減効果、社会受容性などを考慮した複雑な意思決定問題である。

費用対効果分析：各対策工法の初期費用、ランニングコスト、維持管理費用、そして期待される被害低減効果を定量的に評価するために、経済学的な費用対効果分析や多基準意思決定分析が用いられる。

不確実性下の意思決定：地盤特性の不確実性、地震発生の不確実性、対策効果の不確実性などを考慮した意思決定には、確率論的最適化やロバスト最適化といった数理手法が有効である。

土地境界問題：地盤流動による土地境界のずれは、幾何学的な問題であり、測量データと空間解析技術を用いて、ずれの量を正確に把握し、最適な境界再設定案を導き出すことができる。法的な制約と住民の合意形成を考慮した多目的最適化も考えられる。

杭の設計最適化：側方流動による杭の中抜け防止に関する研究は、地盤と杭の相互作用を記述する数値解析モデル（有限要素法など）と、確率論的設計法を組み合わせることで、最適な杭径や杭ピッチを決定する数理的なアプローチが可能である。

3.4.3 AI を活用したハザードマップの高精度化と数理科学

犬飼氏が提案した AI を活用したハザードマップの高精度化は、データ科学と機械学習の応用例である。

データ補完と予測：ボーリングデータが不足する地域において、データが豊富な地域（名古屋など）の地盤情報を用いて AI を学習させ、欠落している地盤特性（FC、D50 など）を推定することは、機械学習（例：回帰分析、ガウス過程回帰、ニューラルネットワーク）の得意分野である。

液状化判定モデルの構築：FL 値や PL 値の算定は、地盤特性と地震動パラメータを入力とする複雑な非線形関数である。AI（例：サポートベクターマシン、ランダムフォレスト、深層学習）を用いて、これらの関係性を学習し、液状化危険度を予測するモデルを構築することで、より高精度な判定が可能となる。

空間的推論と可視化：AI が学習した地盤特性や液状化危険度を、GIS と連携させて空間的に推論し、ハザードマップとして可視化することは、数理的な空間補間技術やデータ可視化手法の応用である。

側方流動の反映：側方流動の発生メカニズムは複雑であり、これをハザードマップに反映させるためには、AI が地盤特性、地形勾配、地震動特性、地下水条件などの多岐にわたる情報を統合的に学習し、側方流動の発生確率や変位量を予測するモデルを構築する必要がある。これは、教師あり学習や強化学習の応用が考えられる。

AI と地盤調査の協働：AI は地盤調査を代替するものではなく、補完するツールとして位置づけられるべきである。AI が予測した液状化弱点領域やデータ不足箇所を特定し、そこに重点的に地盤調査（PDC や CPT など）を行うことで、限られたリソースの中で最も効率的かつ効果的な調査計画を立案することが可能となる。これは、数理最適化と AI の協働による調査計画の最適化問題である。

3.5 結論

本研究集会における 2 つの招待講演は、令和 6 年能登半島地震が突きつけた液状化対策、災害レジリエンス、そしてハザードマップの課題に対し、地盤工学と数理科学が連携して取り組むべき方向性を示した。

河内博士の講演は、空き家リスク、低地における液状化対策の経済的・社会的な困難さ、地盤流動による土地境界問題、そして「未災学」の重要性など、災害復興における多岐にわたる現実的な課題を浮き彫りにした。これらの課題解決には、単なる技術的な解決策だけでなく、社会システムや住民の意識変革を促すための数理科学的アプローチ（最適化、行動経済学、リスク評価など）が不可欠である。

犬飼氏の講演は、液状化ハザードマップの現状と、データ不足地域における高精度化の課題を提示し、AI を活用したデータ補完、液状化判定モデルの構築、そして側方流動を反映したハザードマップ作成の可能性を示した。これは、機械学習、空間統計学、データ可視化

といった数理科学の技術が、地盤工学分野における情報不足の克服と予測精度の向上に大きく貢献しうることを明確に示した。

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所が推進する「マス・フォア・インダストリ」の理念に基づき、今後も地盤工学と数理科学の連携を一層強化し、学際的なアプローチを通じて、地盤災害のメカニズム解明、高精度な予測技術の開発、そして効果的な対策の立案を通じて、社会の安全・安心に貢献していくことが期待される。特に、AI は地盤調査を代替するものではなく、その効率化と精度向上を支援するツールとして、地盤工学の専門家と協働することで、その真価を発揮すると考えられる。

4. 特別講演

特別講演として「予期せざる地下水の影響により発生した地すべり」（東京大学 東畑郁生 名誉教授）および「2025年ミャンマー・マンダレー地震に伴う地盤被害の現地調査とその知見」（九州大学大学院工学研究院 ハザリカ・ヘマンタ教授）の2題の発表があり、地下水が関与する地盤災害のメカニズム、事例、対策、そして今後の課題について考察された。地盤災害の複雑な現象を理解し、予測・対策を講じる上で、数理科学的アプローチが不可欠であることも示された。東畑先生の講演では、従来の土質力学の枠を超えた地下水の挙動が引き起こす地すべりや誘発地震の多様な事例が紹介され、人間活動が地盤の安定性に与える影響が強調された。一方、ハザリカ先生の講演では、2025年ミャンマー・マンダレー地震における広範な液状化被害と、その現地調査から得られた知見が詳細に報告され、地震観測網の整備や低コストな地盤調査技術の導入の重要性が提言された。両講演は、地盤災害の複雑性と、その予測・対策における学際的アプローチ、特に数理科学との連携の必要性を示唆している。

4.1 はじめに

地盤災害は、地震、降雨、火山活動など様々な自然現象によって引き起こされるが、その根底には地下水の挙動が深く関与している。特に、人間活動による地形改変や構造物建設が地下水流動系に与える影響は大きく、予期せざる地盤災害を誘発する可能性がある。これらの複雑な現象の解明と、より精度の高い予測・対策の実現には、従来の経験的手法に加え、数理科学的なアプローチが不可欠である。物理モデルの構築、数値解析、データ科学、確率論といった数理科学の知見は、地盤工学分野における新たなブレークスルーをもたらし、社会課題解決に大きく貢献する可能性を秘めている。本稿では、地盤工学の第一線で活躍する2名の研究者による特別講演の内容を詳細に記述し、地下水が関与する地盤災害のメカニズム、国内外の事例、そして今後の研究および実務における課題と展望について、数理科学との連携の視点も交えながら考察する。

4.2 特別講演1：予期せざる地下水の影響により発生した地すべり

4.2.1 従来の地すべりメカニズムと地下水の役割

地すべりのメカニズムは、一般的に有効応力原理に基づいて説明される。すなわち、地下水が地中に浸透し、間隙水圧が上昇することで土粒子の間に働く有効応力が低下し、せん断抵抗力が減少することで斜面が不安定化するというものである。有効応力原理に基づく地すべりメカニズムは、物理法則に基づいた数理モデルとして表現され、地下水流動は流体力学の基礎方程式（例：ダルシーの法則、連続の式）によって記述される。これらの数理モデルは、有限要素法や有限差分法といった数値解析手法を用いて、地すべりの発生条件や挙動をシミュレーションする基盤となる。雨水が地表から浸透し、地下水水位が上昇するという考え方が教科書的に広く受け入れられているが、東畑教授は、これらの従来の理解だけでは説明できない地すべり現象が数多く存在し、実際の地下水挙動はより複雑であることを指摘した。特に、基盤層の透水性や地下水流動経路に関する認識が実態と乖離している場合があるという。

4.2.2 能登半島地震における地すべり事例

2024年に発生した能登半島地震では、地下水の影響が顕著な地すべり事例が多数確認された。

穴水町の地すべり：平年よりやや多い程度の降雨量にもかかわらず、大規模な地すべりが発生した。これは、輪島高校のグラウンド周辺で発生した地すべりと類似しており、山の上に造成された野球場の脇で崩壊が発生した。現地調査では、地震発生から6ヶ月以上経過しても液状化の痕跡や亀裂が残存していた。地質調査からは、地質層がライト方向へ傾斜していることが確認され、浸透した水がライトスタンド裏に集積し、もともと不安定だった地盤で地震動が引き金となって地すべりが発生した可能性が示唆された。従来の土質力学の想定を超える量の地下水が集積したことが、この地すべりの要因として考えられる。

金沢北陵高校の地すべり：元々小さな谷を埋め立てて造成された学校で、地震により杭が露出するほどの被害が生じた。学校のグラウンドはスポーツ利用のため、芝生ではなく土がむき出しであり、水はけを良くする目的で水が浸透しやすい構造になっている。この特性が、地下水が集まりやすい谷地形と相まって斜面を不安定化させ、地震動が最後の一撃となって崩壊に至ったと推察される。

津幡町緑が丘の地すべり：震災後1ヶ月が経過しても、パイプから大量の地下水が流出し続けている状況が確認された。この地域では、近くに調整池が存在し、そこからの水が宅地へ浸透している可能性が指摘された。さらに、地震前には路面にコの字型の亀裂が多数発生していたことがGoogle Earthなどの画像から確認された。このような特定のパターンを持つ亀裂の認識は、画像解析や機械学習を用いた危険度評価の可能性を示唆する。これは斜面が変動している兆候であり、危険度評価における重要な指標として認識すべきであると強調された。

4.2.3 その他の地すべり・斜面崩壊事例

国内外の様々な地すべり・斜面崩壊事例が、地下水の予期せざる挙動との関連で紹介された。

伊豆大島 (2013年) : 大雨による大規模な斜面崩壊では、多数のパイプ状の穴から水が噴き出した痕跡が確認された。これは、地中深部で間隙水圧が異常に上昇し、有効応力が低下した結果と考えられている。しかし、このような現象は従来の土質力学では十分に考慮されておらず、伊豆大島の間隙水圧の定量的な予測困難性は、地下水流動モデルの不確実性や、観測データの不足といった数理モデル構築上の課題を浮き彫りにする。

松代群発地震 (1960年代) : この地震は揺れの規模は大きくなかったものの、地域に大量の地下水が噴出し、地すべりが発生したことが報告されている。火山学の中村先生は、地球深部から水が上昇して噴出したとする「水火山説」を提唱しており、地下水の深部起源の可能性を示唆している。

釧路沖地震 (1993年) : 谷埋め盛土区間で発生した地すべりでは、地下水の流入による盛土重量の増加と、軟弱な泥炭層上の盛土が地震動によって崩壊した。復旧後も同じ弱点が残存し、1年半後の北海道東方沖地震で再び被災したことから、単なる「復旧」ではなく、より強固な構造を目指す「強化復旧」の概念が阪神・淡路大震災以降に生まれた経緯が説明された。

東名高速道路 : 盛土区間で、周辺の丘陵地からの水が盛土に浸透し、盛土材料である泥岩が徐々に劣化していき、最終的に地震動によって崩壊した事例が紹介された。

アゼルバイジャン (バクー) : カスピ海沿岸の都市バクーの裏手では、多数の地すべりが現在も進行中である。この地域では、植物園での散水や貯水池からの水が地下水として供給され、斜面を不安定化させている可能性が指摘された。地すべりの記録は19世紀にまで遡り、歴史的な問題であることが示された。

中国の農業地域 : 食糧増産を目的とした乾燥地帯での過剰な灌漑（「大水満開」と呼ばれる、年に数回大量の水を撒く方法）が、普段は安定している黄土斜面を不安定化させ、大規模な崩壊を引き起こしている事例が紹介された。これは、水資源の無駄遣いであると同時に、地盤災害を誘発する自滅行為であると警鐘を鳴らした。

パイオントダム災害 (1963年) : 世界最悪クラスのダム事故として知られるパイオントダム災害が取り上げられた。この事故では、ダム本体は崩壊しなかったものの、貯水池への大規模な地すべり（約2億立方メートル）が発生し、これにより生じた巨大な津波がダムを越えて下流のロンガローネ村を壊滅させた。事故の原因は、深さ200m以上という深部に存在した弱層が、湛水によって間隙水圧が上昇し、有効応力が低下したこととされている。深部の弱層における間隙水圧上昇と有効応力低下のメカニズムは、流体-固体連成解析や破壊力学の観点から数理モデル化され、地すべり発生の条件を定量的に評価する試みがなされている。当時の主任技術者は、工事中に異変を察知し、地すべ

りの危険性を感じていたが、深部の地盤状況を技術的に立証することが困難であり、大規模プロジェクトを停止させるに至らなかったという悲劇が語られた。この事例は、未解明な地盤挙動に対する技術者の直感の重要性と、それを立証する技術的困難さ、そして社会的な意思決定の難しさを示唆している。

4.2.4 対策と課題

地すべり対策における課題と提言がなされた。

斜面観測と早期警報：高額な擁壁工事が困難な自然斜面においては、斜面変位を継続的に観測し、早期警報を発するシステムが重要であると強調された。斜面観測データに基づく早期警報システムは、時系列データ解析や統計的予測モデルの応用領域である。過去には手動で計測する斜面傾斜センサーも存在したが、自動計測の困難さから廃れた経緯がある。

亀裂パターンの認識：路面や地表面に現れる亀裂は、単なる舗装の劣化や乾燥収縮だけでなく、斜面変動の兆候である場合がある。特に「コの字型」など特定のパターンを持つ亀裂は、斜面が動いている危険な兆候であり、このようなパターンが確認された場合は「レッドゾーン」として扱うべきであると述べられた。亀裂パターンの認識は、画像処理技術やパターン認識アルゴリズムの活用により、客観的かつ効率的な危険度評価に貢献しうる。

4.2.5 人間活動による誘発地震

地すべりだけでなく、人間活動が地震を誘発する事例も多数紹介された。

ダム建設による誘発地震：戦後、世界各地でダム建設後に誘発地震が発生した事例が報告されている。アルジェリア（1960年代）、インドのコイナダム（約100人死亡）、タジキスタンのヌレクダム（高さ300mのロックフィルダム）、フーバーダム、エジプトのアスワンハイダムなどが挙げられた。これらの事例では、ダム貯水による水圧が断層に浸透し、間隙水圧を上昇させることで断層のせん断破壊を誘発したと考えられている。ダム貯水による誘発地震のメカニズムは、応力解析、流体-固体連成解析、破壊力学といった数理モデルを用いて詳細に検討される。特に、断層への水圧浸透と間隙水圧上昇による有効応力低下は、ポロ弾性理論などを用いて数理的に記述される。

紫坪鋪（しへいほ）ダムと四川大地震（2008年）：2007年に竣工した紫坪鋪ダムの直後に四川大地震（死者約8.7万人）が発生し、ダムサイトと震源が非常に近かったことから、ダムが地震を誘発した可能性が議論された。この問題については、中国国内の論文ではダムとの関連を否定する一方、海外の論文では関連を指摘するなど、見解が二分されている現状が示された。

因果関係と責任：ダムが地震を誘発するケースには、もともと安全だった断層がダムによって破壊された場合と、本来起こるべき地震がダムによって早められた場合がある。東

畑先生は、どちらもダムが原因であることに変わりはないが、「ダムが悪い」という責任の次元は異なるという考察を提示した。誘発地震の因果関係や責任の議論は、確率論的アプローチやリスク評価モデルの構築を通じて、不確実性を定量化し、意思決定を支援する数理学の役割を強調する。

提言:ダム建設による誘発地震のリスクを低減するためには、プロジェクト全体費用に比べればわずかな費用で済む地震観測を早期に開始し、ダム建設前後の地殻安定性の変化を継続的に計測することが重要であると強調された。このようなデータが不足していることが、誘発地震に関する議論が延々と続く原因となっている。

その他の誘発地震:ダム建設以外にも、地中への廃棄物封入や天然ガス採掘などが誘発地震の原因となることが指摘された。オランダでは、天然ガス採掘による誘発地震問題が深刻化し、天然ガスプロジェクトが中止された事例が挙げられた。

4.2.6 質疑応答

能登半島地震のメカニズムと松代群発地震との類似性について。能登半島地震のメカニズムが、地下水の流動や間隙水圧の上昇による有効応力低下という点で、松代群発地震と類似している可能性について質問があった。東畑教授は、自身の研究スケールは小さいものの、流体の動きが関与しているという点で類似していると回答し、地下水の挙動が地震発生メカニズムに深く関与している可能性を示唆した。

4.3 2025年ミャンマー・マンダレー地震に伴う地盤被害の現地調査とその知見

4.3.1 調査の背景と経緯

ハザリカ教授は、2025年3月12日に発生したミャンマー地震（モーメントマグニチュード $M_w7.7$ ）に伴う地盤被害の現地調査結果を報告した。この調査は、国際地盤工学会のアジア地域技術委員会（ATC3）からの提案を受け、当初は土木学会、地震工学会、地盤工学会の3学会合同調査団として計画された。しかし、ミャンマーの政治情勢が不安定であったため、最終的には地盤工学会（JGS）のみがハザリカ教授と東畑教授の2名を派遣することになった。調査の実施には、ミャンマー地質学会（MGS）の Sone Han 会長、ミャンマー工学会連盟の Khin Maung Htaey 会長、および現地出身のコンサルタント技術者である Myat Myat Phyo Phyo 博士（ハザリカ研究室の卒業生）の多大な協力が不可欠であった。

4.3.2 地震の基礎情報

地震概要:本地震は、 $M_w7.7$ 、震源の深さ10kmというごく浅い地震であった。サガイン断層の右横ずれ断層運動がメカニズムとされている。特に注目すべきは、破壊が音速を上回る速度で進行する「スーパーシア破壊」の可能性が指摘されており、これが広範な被害拡大の一因となったと考えられている。スーパーシア破壊のような高速破壊現象は、波動伝播理論や破壊力学に基づいた高度な数値シミュレーションによってそのメ

カニズムが解明される。

サガイン断層：サガイン断層はミャンマーを南北に走る全長約 1400km の巨大な断層であり、過去に多くの地震を発生させてきた。今回の地震は、1839 年の $M_w7.8$ 地震以来の「地震空白域」(約 400km) で発生したものであり、その発生が懸念されていた地域であった。

地震計データ：現地の地震観測網には課題が多く、マンダレーに設置された地震計のデータは信頼性が低いと評価された。最大地盤加速度 (PGA) は 0.179G と報告されているが、これは過小評価である可能性が高い。一方、首都ネピドーの地震計データは比較的良好であり、上下動で 1G 以上の加速度が確認された。地震計データ解析は、信号処理、フーリエ解析、スペクトル解析といった数理科学的手法が不可欠である。特に、加速度スペクトル分析は、地震動の卓越周期を特定し、構造物への影響を評価する上で重要な情報を提供する。加速度スペクトル分析では、ネピドーでは短周期地震動が卓越する傾向が見られたが、ヤンゴンでは比較的長周期地震動が卓越しており、遠く離れたタイのバンコクで発生したマンション崩壊被害との関連も示唆された。これは、長周期地震動が遠方まで伝播し、高層建築物に大きな影響を与える可能性を示している。

4.3.3 地盤被害の現地調査結果

現地調査では、広範囲にわたる多様な地盤被害が確認された。

交通インフラ：ヤンゴン・マンダレー間の高速道路 (AH1) では、液状化による段差や側方流動が広範囲で発生し、道路構造物や周辺のアパートにも被害が及んだ。道路の近くの両側で液状化が発生している状況が確認された。

液状化被害：農地や道路沿いで広範囲に液状化 (噴砂) の痕跡が確認された。特にアマラプラ地域で顕著であり、マンダレー市を囲むエイワディ川とミンゲイ川という二つの大きな川の流れが、液状化の一因である可能性が指摘された。液状化現象や側方流動、沈下といった地盤被害の予測には、地盤材料の構成則に基づいた数値解析モデルが用いられる。有限要素法や有限差分法を用いた地盤応答解析は、これらの現象の発生メカニズムを理解し、被害を定量的に評価する上で重要なツールとなる。

ショッピングモール建設予定地：地下水低下工法が実施されていたにもかかわらず、流動性液状化が発生した。側方流動により道路の縁石が本来の位置から 2.5m も移動し、空洞化、クラック、斜面崩壊も確認された。これは、従来の液状化対策が十分でなかったか、あるいは想定を超える地震動や地下水挙動が発生したことを示唆している。

小学校の建物被害：ネピドー市周辺のニューンピン住居村の小学校では、液状化によるクラックや雨どいのずれが発生した。簡易貫入試験 (PTSPT) を実施した結果、地盤は非常に軟弱 (N 値 ≥ 5) であり、液状化しやすい条件であることが判明した。

河川堤防の被害：マンダレー市に近い AH1 の橋脚が、河岸の地すべりによって押し下げられた。ミンゲイ川沿いでは側方流動により 10m 以上の移動が確認され、25 棟の家屋

が流される人的被害も発生した。また、別の場所では大規模な噴砂により 30 棟の家屋が失われた。

橋脚の損傷：調査最終日には、道路が 1m 沈下している橋脚が発見された。これは、橋脚基礎の支持力不足や液状化による沈下、あるいは側方流動の影響が考えられる。

4.3.4 提言と今後の課題

ミャンマー地震の現地調査から、今後の災害対策における重要な課題と提言がなされた。

信頼性の高い地震計の整備：地震動の正確な把握のためには、信頼性の高い地震計を設置することが極めて重要である。現状では、日本、アメリカ、トルコ/イタリアなど一部の国に限定されており、多くの国で地震計の設置が困難な状況にある。国際的な協力による観測網の整備が求められる。

低コストな地震動評価手法の活用：地震計が不足している場合でも、微動計測など安価な方法を用いて卓越周期などの地震動特性を把握する必要がある。低コストな地震動評価手法としての微動計測は、信号処理やスペクトル解析を通じて地盤の固有周期を推定する。これにより、地域ごとの地震動特性を推定し、被害予測に役立てることが可能となる。

ハザードマップの作成：液状化ハザードマップを含むマイクロゾーニングマップの作成は、災害対策上極めて重要である。ハザードマップの作成は、地理情報システム (GIS) と空間統計学を組み合わせることで、液状化や地すべりの発生確率を空間的に評価する確率論的ハザード評価へと発展しうる。これにより、危険区域を特定し、適切な土地利用計画や建築規制を導入することができる。

地盤情報の整備：ボーリング調査は高価であるため、PTSPT (簡易動的コーン貫入試験) のような低コストの技術を活用して地盤情報を整備することが大きな課題である。PTSPT のような低コストな地盤調査技術から得られる大量のデータは、統計解析やデータ同化の手法を用いて、地盤特性の不確実性を低減し、より信頼性の高い地盤モデルを構築するために活用される。

4.4 結論

本稿で紹介された両講演は、地盤災害の複雑な現象を理解し、予測・対策を講じる上で、数理科学的アプローチが不可欠であることを明確に示している。東畑教授の講演は、従来の土質力学の枠を超えた地下水の複雑な挙動が、地すべりや誘発地震といった大規模な地盤災害を引き起こす可能性を、能登半島地震やバイオントダム災害など国内外の豊富な事例を通じて示した。特に、人間活動による地形変化や構造物建設が地下水流動系に与える影響の大きさと、その予測・対策の困難さが浮き彫りになった。物理モデルの構築、高度な数値解析、大量の観測データや調査データの統計的・機械学習的解析、そして不確実性を考慮した確率論的リスク評価は、地盤工学分野における数理科学の主要な貢献領域である。

一方、ハザリカ教授の講演は、2025年ミャンマー・マンダレー地震における広範な液状化被害の現地調査結果を詳細に報告し、地震空白域での大規模地震発生の現実と、その地盤被害の実態を明らかにした。この調査は、地震観測網の未整備、地盤情報の不足といった開発途上国が抱える共通の課題を浮き彫りにし、信頼性の高い地震計の設置、低コストな地震動評価手法の活用、ハザードマップの作成、そしてPDCPTのような低コストな地盤調査技術の導入が喫緊の課題であることを提言した。これらの課題解決においても、信号処理、空間統計、データ同化といった数理学の知見が不可欠である。

両講演を通じて、地盤災害のメカニズム解明には、地下水流動、地質構造、地震動特性、人間活動の影響といった多岐にわたる要素を統合的に考慮する学際的アプローチが不可欠であることが再確認された。九州大学マス・フォア・インダストリ研究所が推進する「マス・フォア・インダストリ」の理念に基づき、今後も数理学と地盤工学の連携を一層強化することで、複雑な現象のモデル化、不確実性の定量化、大量データの解析を通じて、地盤災害のメカニズム解明、高精度な予測技術の開発、そして効果的な対策の立案を通じて、社会の安全・安心に貢献していくことが期待される。

5. パネルディスカッション

本パネルディスカッションは、「令和6年能登半島地震復興への歩み、液状化被害防止のための新戦略」と題して、能登半島地震からの復旧・復興活動における課題、地盤災害対策の現状と将来展望、そして数理学が果たすべき役割について議論された。モデレーターは九州大学大学院工学研究院のハザリカ・ヘマンタ教授、パネリストは東京大学名誉教授の東畑郁生教授、金沢大学名誉教授の松本樹典教授、株式会社ケイズラブの河内義文博士の3名が務めた。松本教授からは、石川県建設業協会の災害対応事例と市民による復興支援活動に関する話題提供があった。議論では、地盤流動による境界問題、液状化ハザードマップの信頼性向上、地盤調査の重要性、そして地震による隆起と漁業復興の課題など、多岐にわたるテーマが取り上げられた。これらの議論を通じて、地盤工学分野における数理科学的アプローチの必要性と、産官学連携による学際的協働の重要性が再確認された。

5.1 はじめに

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震は、能登半島地域に甚大な被害をもたらした。現在も復旧・復興に向けた取り組みが続けられている。特に、液状化による地盤変状、大規模な隆起、インフラ施設の損傷などは、地域の社会経済活動に深刻な影響を与えている。このような大規模災害からの復興は、単なる原状回復に留まらず、将来の災害に備えたよりレジリエントな社会構築を目指す「強化復旧」の視点が不可欠である。

本パネルディスカッションでは、地盤工学の第一線で活躍する専門家が、能登半島地震からの復旧・復興活動における具体的な課題と、それに対する解決策、そして今後の防災戦略について議論した。特に、地盤の側方流動による土地境界問題、液状化ハザードマップの信

頼性向上，地盤調査のあり方，地震による隆起がもたらす漁業への影響など，多岐にわたるテーマが取り上げられ，数理科学がこれらの課題解決にどのように貢献できるかについても言及された。

5.2 パネルディスカッションの概要

5.2.1 モデレーターおよびパネリスト

モデレーター：ハザリカ ヘマンタ（九州大学大学院工学研究院 教授）

パネリスト：東畑 郁生（東京大学 名誉教授）

松本 樹典（金沢大学 名誉教授）

河内 義文（株式会社ケイズラブ 代表取締役）

5.2.2 松本樹典教授による話題提供

パネルディスカッションに先立ち，金沢大学の松本樹典名誉教授より，能登半島地震からの復旧・復興活動に関する話題提供があった。松本教授は，本研究集会が一般参加型の発表会も想定しているとの認識から，専門的な地震データや液状化の言葉を避け，震災からの復旧・復興というテーマに焦点を当てた。

(1) 石川県建設業協会の災害復興に対する対応

松本教授は，石川県建設業協会と石川県との間で締結されている災害時における応急対策工事に関する基本協定（平成 9 年 3 月）および細目協定（平成 25 年）に基づき，建設業協会が迅速な災害対応を行った事例を紹介した。

(2) 金沢建設業協会の対応

初動：地震発生直後（1月1日 16時10分）の15分後には，安否確認システムによる各社防災担当者へのメール自動送信が行われた。翌日には出勤可否と緊急資材・機材の確認，1月3日には災害支援本部が設置され，重機・運搬車両の手配，災害派遣業者の班割り（2泊3日体制，車中泊が基本），備品（軽油，燃料，水，測量機器など）の確認が行われた。

応急復旧作業：1月4日より応急復旧作業が開始され，日本海建設は国交省からの依頼により緊急支援物資の輸送を担当した。1月5日には珠洲道路の大田原付近で発生した斜面崩壊の土砂撤去作業に着手。道路のひび割れや段差が生じる中，1月6日には重機による土砂撤去が進められた。しかし，横転した車両の撤去は，法律的問題から困難であった。

継続的な活動：1月7日には能登町のパトロールで道路のひび割れや河川堤防の破壊を確認し，雪の中での作業が続いた。2月3日には輪島市の門前総合運動公園付近で道路の緊急補修作業が行われ，能登里山空港にはトイレカーが移送された。2月5日には碎石

による溝埋め作業が実施され、作業終了後の重機や軽油などの引き継ぎ状況も詳細に管理された。3月には笛志川の河川警戒作業（地震ダム対策）や土嚢製作（1日72袋）など、2ヶ月以上にわたる復旧活動が報告された。積雪10cm以上では除雪作業に重機が取られるため、土木作業が中止されるなど、能登地域の厳しい気象条件も活動に影響を与えた。

(3) 小松能美建設業協会の対応

小松能美建設業協会は1月5日から作業を開始し、4月19日まで100日間にわたり警戒作業を行った。参加企業は約30社、延べ1726名が従事した。株式会社吉光組専務取締役の道勇治氏がまとめた資料を基に、吉光組によるドローン・レーザ測量など、若い世代の技術者も復旧活動に貢献したことが紹介された。

作業内容：珠洲地区に警戒箇所が多く集まり、道路啓開のための碎石投入が第一の作業であった。碎石は当初不足したが、石川県、県建設業協会、福井県からの協力で確保された。富山県は液状化被害が甚大であったため、自県での碎石確保も困難であった。斜面崩壊箇所の警戒作業や土嚢の活用、大型土嚢の製作・備蓄・運搬（特に河川堤防のかさ上げに利用）も行われた。

ゴミ集積場の整備：珠洲市への協力として、8ヘクタールのゴミ集積場の表層改良（セメント系固化剤使用）と碎石路盤（2700立方メートル）の造成が行われ、ゴミ集積が可能となった。

自己完結型支援：作業は職長、オペレーター、手元の3人1組で行われ、金沢や小松から現地へ向かい、3泊4日の車中泊、その後簡易宿泊施設泊、風呂なしという自己完結型の支援体制であった。燃料や食料も全て持参し、前の班との引き継ぎを徹底した。班編成は4班で構成され、多くの建設関連企業が復旧活動に携わった。石川県建設業界からは、能登の被災者へ向けたメッセージも送られた。

(4) 市民による復興支援の一例

専門家だけでなく、一般市民による復興支援活動の一例として、自身が住む金沢市小里野町内会協和会の活動を紹介された。

能登復興支援バス旅行：10月5日に能登復興支援バス旅行が実施され、被災地を見学しながら復興を支援する活動が行われた。

能登ワイン工場（穴水町）：液状化被害があった穴水町に位置するが、幸いにも工場は無事であった。土日にはオーケストラアンサンブル金沢のメンバーがボランティアで演奏活動を行い、多くの人が訪れた。94歳の今井さん（珠洲の自宅が津波で流され、金沢市に避難中）も参加し、元気な姿を見せた。能登ワイン工場の入口には、穴水市出身の画家・大森信義氏の作品が飾られており、大森氏も復興活動に協力している。

能登里山空港：昼食をとり、被災状況の説明を受けた。空港ロビーには能登高校書道部の

作品「面白いことがあふれる愛は私を強くする」が飾られ、能登復興のシンボルとなっている。

神社：被災した神社の宮司から被災状況を聞いた。

震災語り部観光列車：穴水から七尾へ向かう「のと鉄道」の観光列車に乗車。のと鉄道も線路やトンネルに被害を受けたが、復旧が進められている。列車内では、のと鉄道の職員が語り部として、自身の被災体験や、地震発生時に乗客を安全な場所に誘導した経験などを語った。

参加者の声：参加者からは、「被災された語り部の方の話は重く心に染みた」「被災者の苦しみや困りごとを伝える勇気が必要」「七尾や穴水などどこもまだまだ復旧途中であり、ブルーシートが屋根に残る景色に胸が痛んだ」「被災者の話を聞くことは貴重な経験となった。自分事として防災に備えていきたい」「水が大事、トイレが大事、電気が大事と考えさせられた。自分の命を守ること、みんなで助け合うことが大事」といった感想が寄せられた。

町内会の防災活動：松本教授の町内会では、津波や斜面に対しては安全な場所であるものの、各防災備品の準備を進めている。簡易トイレ、懐中電灯、カセットコンロなどの準備を推奨し、電気や水道が数日間止まる可能性に備えるよう呼びかけている。現在、町内会には2名の防災士が誕生している。

まとめ：松本教授は、発災直後の地元の関連業者の素早い判断と行動の重要性、そして長い期間にわたる復旧・復興支援活動の継続が大切であると締めくくった。

5.3 パネルディスカッション：主要テーマと数理学の役割

松本教授の話題提供後、ハザリカ教授をモデレーターとしてパネルディスカッションが開始された。

5.3.1 地盤の側方流動による土地境界問題と復興

ハザリカ教授は、河内博士の発表で言及された「境界の問題」を提起し、地盤の側方流動によって土地の境界が不明確になる問題について、パネリスト3名に意見を求めた。

東畑教授の意見：東畑教授は、日本の法務省が全国各地の境界を厳密に定める取り組みを進めている現状に触れつつ、地盤の側方流動が発生した被災地においては、厳密な境界確定よりも「早く元の生活に戻る」ことを優先すべきだと主張した。平方メートル単位の土地の増減にこだわるよりも、早期の家屋修復やインフラ復旧を優先し、住民が元の生活を取り戻せるよう、国が柔軟な対応をすべきであると提言した。境界争いは長期化し、復興の妨げとなるため、住民が「自分の土地が減ってもよい」と割り切る意識と、それを後押しする行政の姿勢が重要であると強調した。

河内博士の意見：河内博士は、輪島市のように数メートルも地盤がずれ、自分の家が隣の敷地に入り込むような極端な事例を挙げ、基準点を変更しても、将来的に地盤が戻る可

能性（東日本大震災での沈下後の隆起事例）も考慮すると、単純な解決は難しいと述べた。しかし、会計検査院の指摘など、行政の拘子定規な対応が復興を阻害する可能性を懸念し、側方流動のような前例のない事態に対しては、隣接地同士の話し合いで解決できるよう、時限的な条例などで柔軟に対応すべきであると提案した。

松本教授の意見：松本教授も東畑教授の意見に基本的に賛同し、敷地境界だけでなく、道路、電柱、側溝といった公共インフラの境界が元に戻っていない現状を指摘した。国が厳密な原状回復を求めるのであれば、そのための予算を投じてインフラを元の位置に戻すべきであり、それができないのであれば、現状のずれを許容する柔軟な対応が必要であると主張した。住民同士の理解と、公共インフラ管理者との連携がスムーズな復興には不可欠であると述べた。

追加議論：ハザリカ教授は、パネリストの意見から「フレキシブルな対応」の重要性を再確認し、行政が住民よりも固く考えすぎている可能性を指摘した。また、能登半島地域では、宝達志水町のように十数軒の民家が砂丘上に移転した事例もあるが、内灘町のように店舗兼住宅や工場兼住宅は住専地域という法律上の制約から移転が困難な場合もあることが示された。このような多様な状況に対応するためには、移転可能な住民は移転を促し、困難な住民には現地での復旧を支援するなど、きめ細やかな対応が必要であるとの意見が出た。

5.3.2 液状化ハザードマップの信頼性向上と数理科学

ハザリカ教授は、液状化ハザードマップの信頼性向上について議論を提起した。特に、ボーリングデータなどの地盤情報が少ない地域でのハザードマップ作成の課題と、ピエゾ・ドライブ・コーン（PDC）などの新しい調査技術やAIの活用について意見を求めた。

東畑教授の意見：東畑教授は、地盤調査の重要性を長年訴えており、かつて国際地盤工学会の委員会で「工事費の2%程度を調査に回すべき」という結論を出したことを紹介した。現状の調査費が0.3～0.5%程度であることに触れ、「調査もしないで結果に文句を言うのは間違いであり、安全は金で買うものだ」と強調した。調査会社側も、その責任を自覚し、ISO基準のような認証制度を導入し、優秀な技術者が正当な評価を得られるような体制を構築すべきであると提言した。また、PDCだけでなく、他にも多くの調査技術があることを指摘し、積極的に活用すべきだと述べた。

河内博士の意見：河内博士は、地質調査業協会が「地質リスク」の概念を推進し、事前調査を増やすことで、後でかかる費用を削減できると主張していることに触れ、東畑教授の提言する2%という数字は、内灘町の復興費用500億円に換算すると10億円に相当し、それだけの費用を調査に投じる価値はあると述べた。

松本教授の意見：松本教授は、調査数を増やすことの重要性を強調し、特に簡易動的コーン貫入試験（PDCPT）よりも静的貫入試験であるコーン貫入試験（CPT）の活用を推奨した。CPTは、土質、透水係数、変形係数などを推定でき、液状化が発生するよう

な浅い深度の地盤評価に有効であると述べた。地盤工学会が CPT の利点を広く認識させ、普及に努めるべきであると提言した。また、ハザードマップの課題として、能登半島が地震の震度から見ると「安全な真っ白な地域」として扱われてきた現状を指摘した。過去の設計震度が低く抑えられていたため、現在の基準で見ると耐震性が不足している構造物も存在し、ハザードマップは外力と抵抗力の両方の性能向上を考慮したものでなければ信頼できないと述べた。

追加議論：ハザリカ教授は、世界標準ではプロジェクト全体の 2~3%が調査費に充てられていると認識しているが、日本ではそれよりも低い現状に驚きを示した。東畑教授は、自身の認識では基礎工事費の 2~3%であり、プロジェクト全体費の 2~3%は「オーバーエスティメーション」ではないかと述べ、認識のずれがあった。河内博士は、プロジェクト全体の調査設計費として 2~3%は妥当な数字であると補足した。また、能登のグラウンドが液状化しやすい理由として、砂丘の砂が豊富にあるため、液状化しにくい真砂土ではなく、砂丘の砂でグラウンドが作られていた可能性が指摘された。復旧工事で碎石が大量に投入されている現状を踏まえれば、最初から液状化しにくい材料を使用すべきであったとの意見も出た。

5.3.3 地震による隆起と漁業復興の課題

東畑教授は、能登半島地震で広範囲に発生した隆起が、漁業に与える深刻な影響について言及した。

隆起の不可逆性：東畑教授は、地震による隆起が元に戻る事例は、日本の四国（南海地震）や東日本（三陸）など一部に限られ、能登半島のような日本海側では隆起したらそのまま戻らないことが多いと説明した。このため、隆起を前提とした漁業復興策を検討する必要がある、とした。

漁港復旧の課題：隆起によって漁港が浅くなり、漁船の出入りが困難になっている現状に対し、すべての漁港を掘り下げるとは、過疎化と高齢化が進む漁業地域において、多額の費用（何十億円）を要するため、財務省などから賛同を得にくいという厳しい現実を指摘した。

復興戦略の提案：東畑教授は、能登の魚の品質はブランドものであり、漁業を復興させるべきだと主張した。そのための戦略として、すべての漁港を復旧させるのではなく、輪島などの重点漁港を整備し、他の漁港の漁業者には整備された漁港に集まってもらうという案を提示した。しかし、これは「自分の港を奪われる」という感情的な反発を招く可能性があるため、農業のように漁業も法人化し、会社組織として運営することで、漁業者全体で利益を共有し、協力体制を築くことを提案した。これは、災害を「復旧」ではなく「良くなるチャンス」と捉え、構造改革を進める機会とすべきであるという考えである。

河内博士の意見：河内博士は、能登半島地震で陸地がヘクタール単位で増加したことに触

れ、その陸地は国の所有物であるため、そこを有効活用し、沖に新たな港を建設するなどの発想転換が必要であると述べた。数百万年前の地殻変動で陸地が形成された歴史を踏まえれば、今回の隆起も新たな国土形成の機会と捉えることができると期待を示した。

5.3.4 液状化メカニズムと排水条件

液状化のメカニズムに関する質問として、地震中の水の流れやパーシャルドレイン（部分排水）の可能性について議論された。

東畑教授は、砂層の透水係数が $k=0.1\text{cm/s}$ 程度の場合、厚さ 10 m の砂層から十分に排水されるには 30 分から 1 時間程度かかるのに対し、地震動の継続時間は 10 秒程度と、タイムスケールが全く異なることを指摘した。このため、設計段階でパーシャルドレインを考慮できるのは、地表から 50 cm 程度の非常に浅い部分に限られると述べた。深い部分では、サンドドレインやグラベルドレインといった排水対策が必要となる。

6. 閉会あいさつ

研究集会の閉会にあたり、九州大学名誉教授の福本康秀教授より挨拶があった。福本教授は、半日間にわたる研究集会を通じて、能登半島地震からの復興という重要なテーマについて活発な議論が行われたことに感謝を述べた。昨年度から今年度にかけて、復興へのフェーズが進んでいることを力強く感じたという。

福本教授は、地盤工学を専門としない異分野の視点から、液状化のメカニズムについて、村井博士の講演で示された干拓地と埋立地の違い、砂丘の砂の特性、そして能登半島地震で歴史的にも世界的に珍しい隆起と広範囲な液状化が同時に発生したことなど、多くの学びがあったと述べた。また、犬飼氏が講演されたハザードマップの信頼性向上は、住民が活用できるものにするために不可欠であると強調した。

数理科学の専門家として、福本教授は、地盤工学分野における数理科学の貢献可能性について言及した。

ドローン点群データの処理：ドローンで取得した点群データの可視化やデータ処理、機械学習を用いた迅速かつ正確な解析は、数理科学の得意分野である。

作業計画の最適化：松本教授が紹介されたような、多数の業者や作業員が関わる復旧作業の計画立案には、数学の最適化手法が利用できる。

データ不足への対応：パネルディスカッションで議論されたデータ不足の問題に対しては、統計学のデータ同化などの手法が有効である。これらの汎用的なソフトやアルゴリズムは、IMI の主要な研究テーマでもあり、地盤工学分野とのコラボレーションを強く推進したいと述べた。

流体力学の応用：福本教授の専門である流体力学は、地下水の流れや液状化予防のための排水対策、杭打ちなどのコスト最適化に貢献できる。

福本教授は、今回の研究集会で得られたテーマを数学の業界にも広め、実り豊かなコラボ

レーションにしていきたいと意欲を示した。最後に、長時間の議論に参加したすべての関係者、特に若い研究者が多数参加していることに期待を寄せ、来年以降も IMI を活用したコラボレーションの拡大を呼びかけ、閉会の挨拶を締めくくった。

令和6年度能登半島地震による 液状化被害発生土地条件 Geotechnical Conditions Contributing to Liquefaction- Induced Damage during the 2024 Noto Peninsula Earthquake



村井 政徳(清水建設株式会社)
Masanori Murai (Shimizu Corporation)

1

IMI共同研究のこれまでの経緯

History of IMI Collaborative Research

短期共同研究2024a036

令和6年能登半島地震における液状化の発生メカニズムの解明

- ・分野横断的なアプローチのもとで詳細な現地調査を実施。
- ・本調査を通じて、被害の深刻さが明らかとなるとともに、被害拡大の要因、構造物の損傷状況、さらに大規模な液状化被害のメカニズムについて学術的な解明が進められた。



九州大学 ハザリカ ヘマンタ+学生2名
金沢大学名誉教授 松本 樹典
富山県立大学 兵動 太一+学生1名
東京都市大学 サハレ アヌラグ
防災科学技術研究所 石澤 友浩
株式会社吉光組 道 勇治・谷口 真平
大山 智也・高橋 壘
清水建設株式会社 村井 政徳
川崎地質株式会社 太田 史朗・窪田 上太郎
地盤防災研究所 藤白 隆司
※産・官・学の合同調査団

2

研究成果 Research Achievements

- 地盤工学会研究発表会での発表

【優秀発表賞】2024年：サハレ・アヌラグ(東京都市大学), 2025年：窪田上太郎(川崎地質)

- GEER Report 084

- 査読付き論文の公表

自然災害学会誌特集号, 地盤工学会災害調査論文報告集

- 国際会議での講演・発表

Geotech Asia(Goa, India)ほか



内灘町教育委員会での現地調査結果報告会(2024.4.17)



3

IMI共同研究のこれまでの経緯

History of IMI Collaborative Research

研究集会2025a047

干拓地における液状化ハザードマップの改善に向けた新たな手法

- ・地方自治体が公表している液状化ハザードマップは、限られた地盤情報に基づいて作成されている点が弱点。
- ・コスト削減可能な原位置試験から得られたデータをモデル化することによって、現行の液状化ハザードマップの大幅な改善を目指したい。
- ・マップに側方流動による被害の危険性を付加することも極めて重要であり、新たに「側方流動ハザードマップ」作成を試みる。
- ・被災した内灘町における復興計画では、側方流動のリスクを加えた液状化ハザードマップが欠かせない。当該地の地盤リスクを住民に説明し、官民の合意形成を促進する基盤作りに尽力し、防災・減災に寄与したい。これらの連携により、持続可能なイノベーションの基盤が築かれ、内灘町モデルとした本研究の成果が国内の類似地域へ広がる道も開かれる。

4

調査対象地域 Study Area



5

西荒屋地区 Nishi Araya Area



6

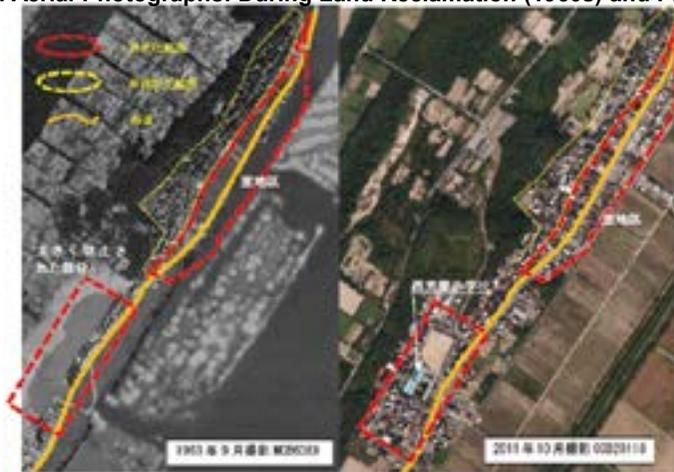
西荒屋地区のUAV写真測量+3D点群データ



7

干拓中(1960年代)と現在(2011年)の空中写真による比較

Comparison of Aerial Photographs: During Land Reclamation (1960s) and Present (2011)



(河内ほか, 2024)

8

西荒屋地区で発生した側方流動のイメージ



9

室地区 Muro Area



10

側方流動した土塊によって河道閉塞される



地震前の堤防法肩ライン(推定)

11

家屋は南東方向に約12m移動した！



12

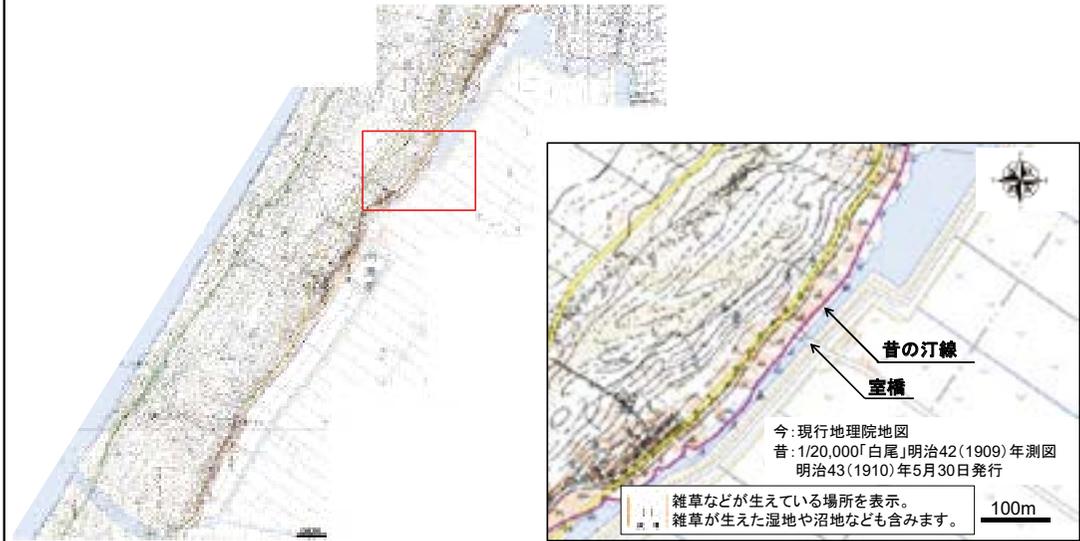
室地区の地形改変の変遷



13

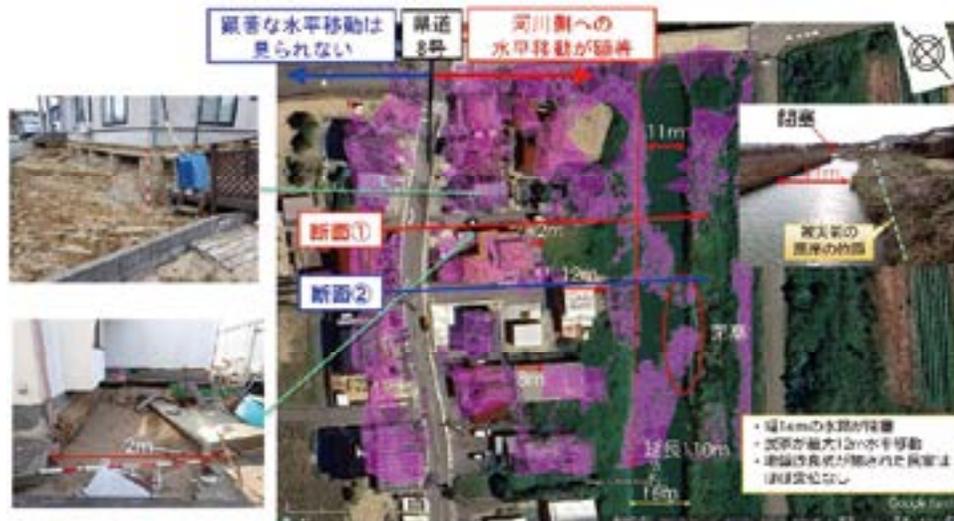
今昔マップon the Webの重ね合わせ

※今昔マップon the Web (<https://ktgis.net/kjmapw/>)は
埼玉大学 谷 謙二教授(2022年8月逝去)による運営サイトです



14

家屋は南東方向に約12m移動した！



15

実は干拓地はそれほど液状化していない

Contrary to Popular Belief: Reclaimed Lands Are Not So Vulnerable to Liquefaction



京都大学防災研究所 上田恭平准教授, 毎日放送2024年1月18日出演
 Dr. Kyohei Ueda (Associate Professor, Kyoto University DPRI), featured on MBS, Jan. 18, 2024.

16



17

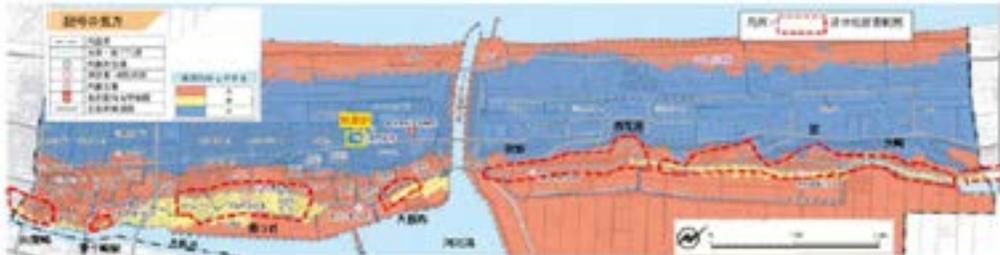


18

内灘町危険区域マップ

Uchinada Town Hazard Map

Liquefaction damage occurred in the area enclosed by the red dotted line.



(河内ほか, 2024)

19

液状化の発生傾向が強くなる地盤条件

Ground Conditions Prone to Liquefaction

液状化は、砂質土がゆるく堆積し地下水位が高い地盤が、地震で強く揺れた時に発生する現象。

液状化の発生傾向が強くなる地盤条件は、土地の成り立ちを反映しており、現在の地形や人工改変地の分布からその傾向を推定することが可能。

Liquefaction is a phenomenon that occurs when **loosely deposited sandy soil with a high groundwater level is strongly shaken by an earthquake**. The ground conditions that increase the tendency for liquefaction to occur reflect the land's formation, and this tendency can be estimated from the current topography and the distribution of artificially altered areas.

20

液状化の発生傾向が強くなる地盤条件

Ground Conditions Prone to Liquefaction

<過去の地震で液状化による被害が多く発生している場所の代表例>

Representative examples of locations where liquefaction damage has frequently occurred in past earthquakes.

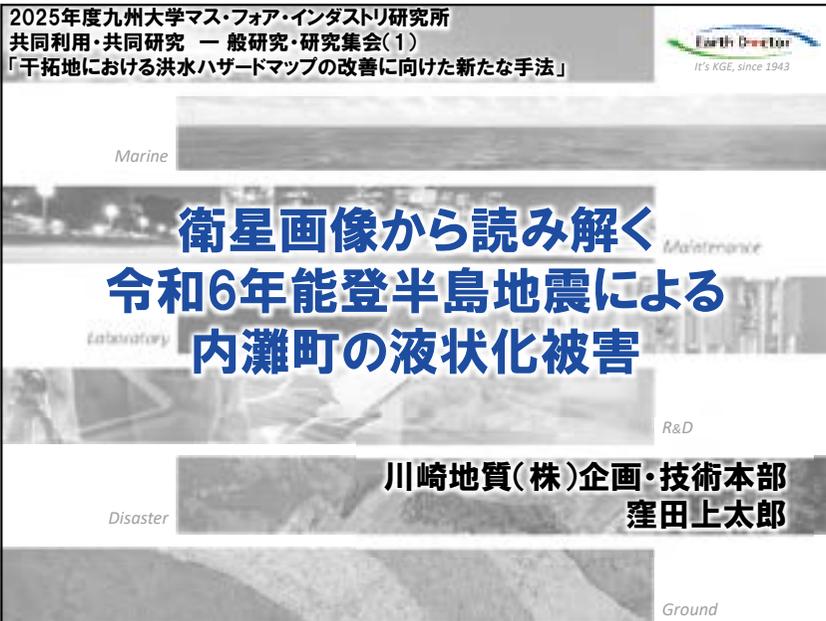
- 臨海部 Waterfront area
- 大河川沿いの沿岸地 Coastal areas along large rivers
- 海岸砂丘の裾、砂丘間の低地 Base of coastal dunes, lowlands between dunes
- 埋立地 Landfill
- 低地(湿地)上の盛土造成地 Embankment development on wetlands
- 砂利(砂鉄)等採取後の埋戻し地 Backfilled land after gravel extraction, etc.
- 丘陵地や台地の谷埋め盛土造成地
Valley-fill embankment development in hilly areas and plateaus

21

まとめに変えて Summary

- 内灘町で発生した液状化、それに伴う側方流動のほとんどは、埋立て地で発生している。当該地域ではかほく潟干拓事業によって開発された干拓地が広く分布しているが、ほとんど液状化は発生していない。
- ハザードマップ作成にあたっては、埋立地、干拓地はどちらも人工地盤であるが、明確に区別すべき。地歴情報を加味したハザードマップ作成が重要と考える。
- 側方流動は、県道が流動抑止の効果を持っているようである。地盤流動の発生深度は数m以内の浅層と推測される。
- 強靱なレジリエンスベルトになりうる可能性あり(河内ほか, 2024)。このような情報もハザードマップに盛り込めると地域住民にとって有益な情報となり得ると考える。

22



1

本日の内容 

1. はじめに

- ① 令和6年能登半島地震による液状化被害
- ② 被害状況把握への人工衛星 (SAR衛星) の活用

2. 衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出

- ① 内灘町の地盤変状範囲の抽出結果
- ② 現地状況との整合性確認
- ③ 合成開口レーダー (SAR) の概要と解析手法

3. 地質・地歴を踏まえた変状要因の考察

- ① 内灘町の地質・地歴の概要
- ② 地形・地歴を踏まえた変状要因の考察

4. まとめ

2

はじめに

◆ **令和6年能登半島地震による液状化被害**

- 令和6年1月1日に発生した令和6年能登半島地震で、石川県河北郡内灘町では甚大な液状化被害が発生
- 液状化被害は、県道8号沿いを中心に広範囲にわたって確認

⇒ 広範囲の被害状況を効率的に把握する手法として、衛星画像を活用

① 干拓地・水鏡方向へ被害激甚

3

はじめに

◆ **被害状況把握への衛星画像の活用**

- 主な衛星画像には「光学衛星画像」と「SAR衛星画像」
- 光学衛星画像：太陽からの反射光を観測し、悪天候時や夜間は撮影不可
- SAR衛星画像：衛星自ら発信したマイクロ波の後方散乱波を受信。天候や昼夜を問わず撮影可 ⇒ **常に同じ条件で撮影できるため、対象物の変化を検出しやすい**

	光学衛星	SAR衛星
観測原理		
観測結果		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 自然の放射光や太陽からの反射光を観測し画像化 ◆ 雲に遮られ、夜間は観測不可 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 衛星自ら発信したマイクロ波の後方散乱波を受信し、その強度と位相情報を画像化 ◆ 雨や雲等を透過するため、天候や昼夜を問わず観測可能

こちらを活用

出典：SIGMA SAR HP

出典：JAXA HP

4

はじめに

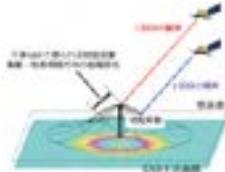


◆ SAR衛星画像を用いた代表的な技術：干渉SAR解析

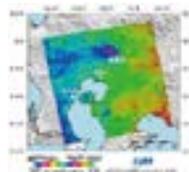
- SAR衛星が撮影した衛星画像を用いて、地表面の状態や変位を面的に推定する技術
- 地表の同一地点を2度観測し、得られた反射波を比較することで地表面変位を推定



代表的なSAR衛星（ALOS-2）¹⁾



干渉SAR解析の概念図²⁾



干渉SAR解析結果の例³⁾

目的・実施内容

- 石川県河北郡内灘町の液状化被害範囲の抽出を目的に、干渉SAR解析を実施

- ① 干渉SAR解析結果から地盤変状範囲を抽出、現地状況との整合性確認
- ② 地形・地質等に着目し、変状要因を考察

5

本日の内容



1. はじめに

- ①令和6年能登半島地震による液状化被害
- ②被害状況把握への人工衛星（SAR衛星）の活用

2. 衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出

- ①内灘町の地盤変状範囲の抽出結果
- ②現地状況との整合性確認
- ③合成開口レーダー（SAR）の概要と解析手法

3. 地質・地歴を踏まえた変状要因の考察

- ①内灘町の地質・地歴の概要
- ②地形・地歴を踏まえた変状要因の考察

4. まとめ

6

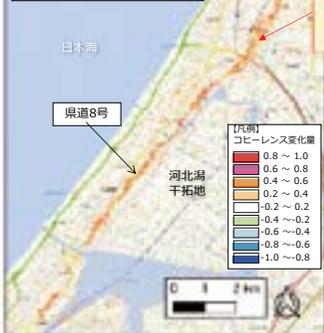
衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出



◆ 内灘町の地盤変状範囲の抽出結果

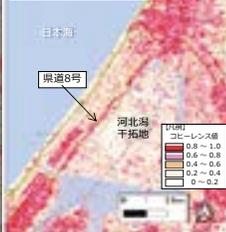
- 干渉SAR解析の「コヒーレンス値の低下」に着目して、地表面状態の変化を確認
- 「コヒーレンス」は、1回目観測と2回目観測の間で、地表面の電波の反射状態がどれだけ似ているか？を示す指標
- 地震前後でコヒーレンスが著しく低下した範囲
⇒ 地震前後で地表面状態が変化し、液状化等による地盤変状が発生した可能性が高い

◆地震前後のコヒーレンス低下量分布 ((1)-(2))

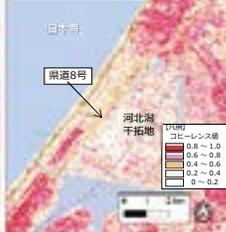


✓ 赤～橙の範囲：
⇒地震前後でコヒーレンスが大きく低下し、液状化による地盤変状が生じたと推測される範囲

(1)地震前のコヒーレンス分布 (その土地固有の分布)



(2)地震後のコヒーレンス分布



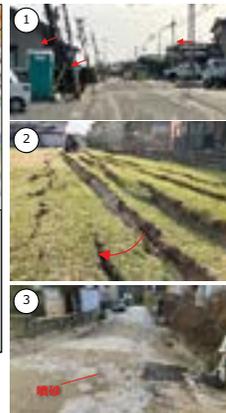
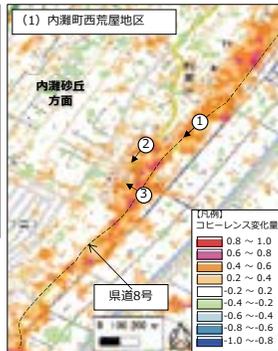
7

衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出



◆ 現地状況との整合性確認

- 現地での被害状況と干渉SAR解析での抽出範囲を比較
- (1) 内灘町西荒屋地区
- (2) 内灘町室地区
- (3) かほく市宇ノ気地区



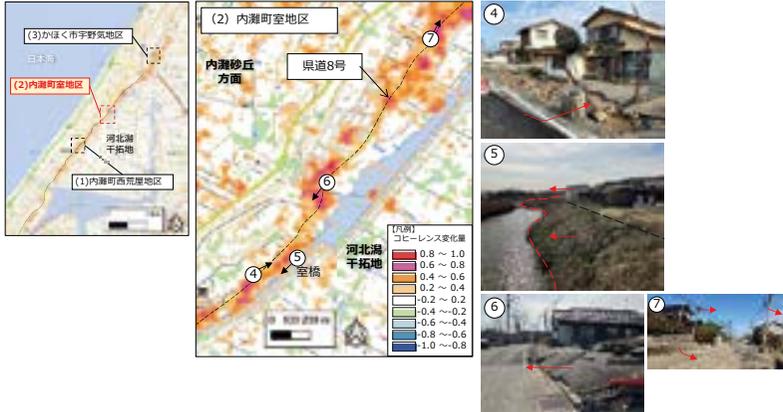
8

衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出



◆ 現地状況との整合性確認

- 現地での被害状況と干渉SAR解析での抽出範囲を比較
 - (1) 内灘町西荒屋地区
 - (2) 内灘町室地区
 - (3) かほく市宇ノ気地区



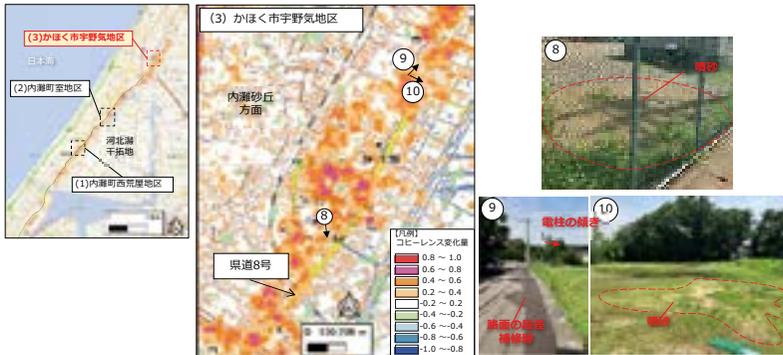
9

衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出



◆ 現地状況との整合性確認

- 現地での被害状況と干渉SAR解析での抽出範囲を比較
 - (1) 内灘町西荒屋地区
 - (2) 内灘町室地区
 - (3) かほく市宇ノ気地区



✓ 現地の被害状況と解析結果との対応を確認

10

干渉SAR解析の概要 ①合成開口レーダー (SAR) の概要



◆ 合成開口レーダー (SAR) 衛星

- ▶ 高度数百kmで地球を周回し、2週間~1カ月程度で同一地点に戻る人工衛星



- ▶ 衛星自ら斜め下方向へマイクロ波を照射し、地表面で散乱したマイクロ波の中で衛星方向へ戻る成分 (後方散乱波) を観測



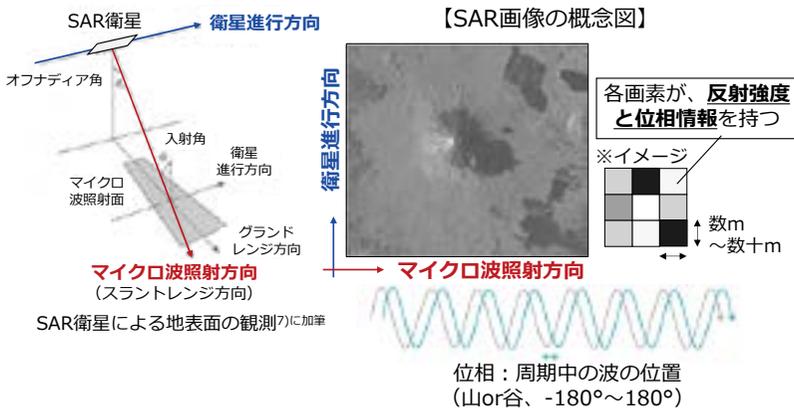
11

干渉SAR解析の概要 ②SAR衛星の観測結果



◆ SAR衛星の観測結果

- ▶ 観測結果は、2次元のレーダー画像 (SAR画像) として記録
- ▶ 各画素が、後方散乱波の強度 (反射強度) と位相情報 (周期-180°~180°中の波の位置) を保有

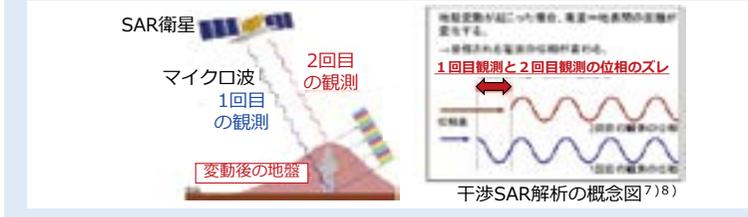


12

干渉SAR解析の概要 ③ 2時期間の地表面変位量の推定 (差分干渉解析) ③

◆ 干渉SAR解析

- 干渉SAR解析は、地表の同一地点を2時期で観測し、得られた反射波を干渉させる（位相の差をとる）ことで地表面変位を推定
- ただし、位相差から変位を推定するという特性上、液状化被害のような、**2時期の間で地表面の状態が著しく変化した場合（ex.液状化による倒壊）、変位の推定が困難**



◆ コヒーレンス低下量に着目した液状化による変状範囲の抽出

- コヒーレンスは、**2枚の衛星画像の観測対象箇所の散乱状態の変化を測る指標で、**地表面の被覆状態に依存
- 基本的には、後方散乱が大きな都市部で高く、田圃・森林等では低い
- 2時期の間で、地表面状態が大きく変化した場合 ⇒ コヒーレンスは著しく低下**

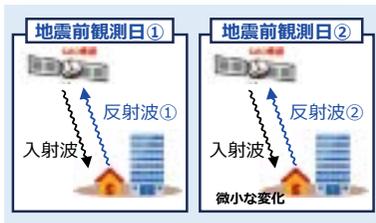
13

干渉SAR解析の概要 ③ 2時期間の地表面変位量の推定 (差分干渉解析) ③

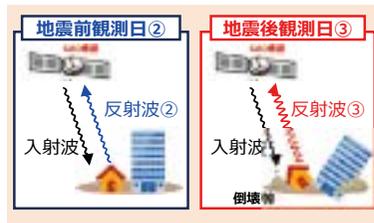
◆ 液状化被害範囲の抽出方法・解析概要

- 地震前後でコヒーレンスが著しく低下した範囲（地表面状態が大きく変化した範囲）**
 ⇒ **液状化による変状が発生した可能性がある範囲** として抽出

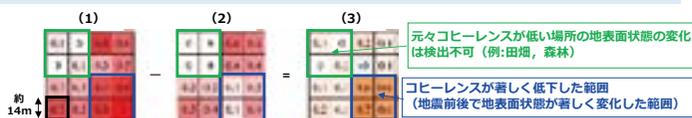
(1)地震前のコヒーレンス分布
(その土地固有のコヒーレンス分布)



(2)地震後のコヒーレンス分布



(3) (1)と(2)の差分を取り地震後にコヒーレンスが著しく低下した範囲を抽出



14

干渉SAR解析の概要 ③2時期間の地表面変位量の推定（差分干渉解析）

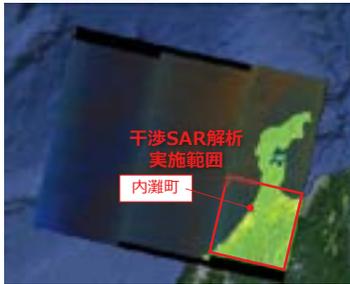
◆ 解析概要

- 使用したSAR衛星：Sentinel-1
- 解析ソフト：SNAP



名称	Sentinel-1
バンド帯 (マイクロ波の波長) ※鉛直方向の観測精度に影響	Cバンド (約6cm)
水平分解能力 ※画素の大きさに相当	約5m×約20m ・ マイ加波照射方向約5m、 衛星進行方向約20m
観測頻度	12日に1度 同一地点を観測

◆ 解析実施範囲



◆ 解析に用いた衛星画像撮影日

N o.	内容	衛星画像の撮影日 (1枚目 - 2枚目)
1	地震前のコヒーレンス (その場所固有のコヒーレンス)	2023/12/18(地震前) - 2023/12/30(地震前)
2	地震後のコヒーレンス	2023/12/30(地震前) - 2024/1/11(地震後)

15

本日の内容

1. はじめに

- ①令和6年能登半島地震による液状化被害
- ②被害状況把握への人工衛星（SAR衛星）の活用

2. 衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出

- ①内灘町の地盤変状範囲の抽出結果
- ②現地状況との整合性確認
- ③合成開口レーダー（SAR）の概要と解析手法

3. 地質・地歴を踏まえた変状要因の考察

- ①内灘町の地質・地歴の概要
- ②地形・地歴を踏まえた変状要因の考察

4. まとめ

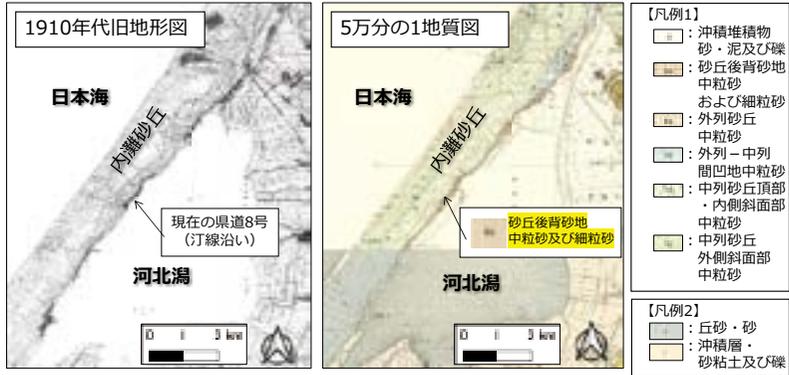
16

内灘町周辺の地質・地歴の概要



◆ 内灘町周辺の地質

- 内灘町は、昭和初期から1970年代に実施された干拓及び埋め立て事業により、河北潟が陸地化
- 現在の県道8号付近である内灘砂丘の河北潟側外縁部は、砂丘後背地であり砂が堆積



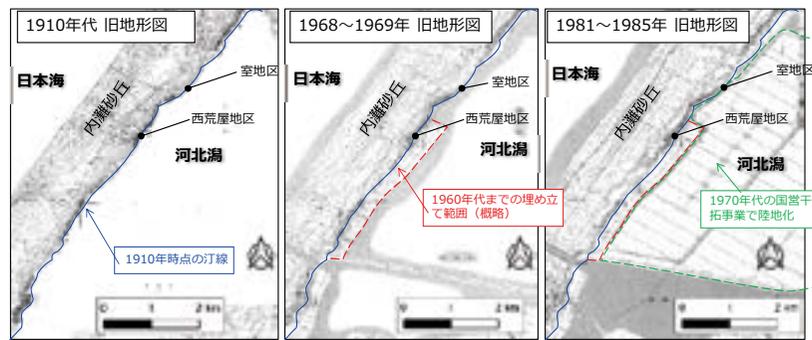
17

内灘町周辺の地質・地歴の概要



◆ 内灘町周辺の干拓・埋め立て事業

- 内灘町は、昭和初期から1970年代に実施された干拓及び埋め立て事業により、河北潟が陸地化
- 現在の県道8号付近である内灘砂丘の河北潟側外縁部は、砂丘後背地であり砂が堆積



18



19

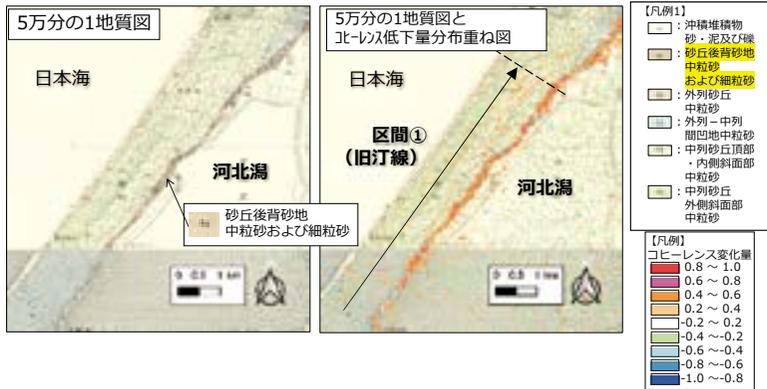


20

◆ 【区間①】河北潟干拓地の汀線で原地盤（砂丘）と埋め土層の境界部

✓ 地質区分との対応

- 区間①の5万分の1地質図とコヒーレンス低下量分布を比較
- 顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、砂丘後背砂地（中粒砂および細粒砂）の分布範囲と概ね対応

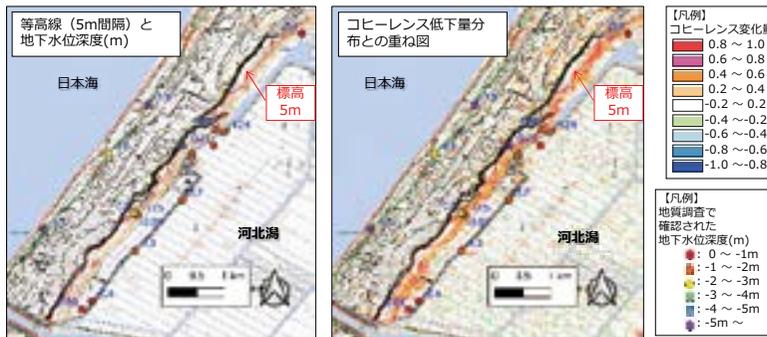


21

◆ 【区間①】河北潟干拓地の汀線で原地盤（砂丘）と埋め土層の境界部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間①のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0~2m程度の浅い地下水位が観測



22

◆ 【区間①】河北潟干拓地の汀線で原地盤（砂丘）と埋め土層の境界部

✓ 埋立範囲との対応 【室地区】

- 室地区は、干拓事業に伴う埋立によって、県道8号より河北潟側の低地が宅地化
- 顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、砂丘層と埋め土層の境界と概ね対応



23

◆ 【区間①】河北潟干拓地の汀線で原地盤（砂丘）と埋め土層の境界部

✓ 埋立範囲との対応 【西荒屋地区】

- 西荒屋地区は、土砂採取場として掘削された場所が埋め立て（現在の西荒屋小学校付近）
- 室地区と同様に、顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、砂丘層と埋め土層の境界と概ね対応



以上、区間①の変状要因をまとめると、

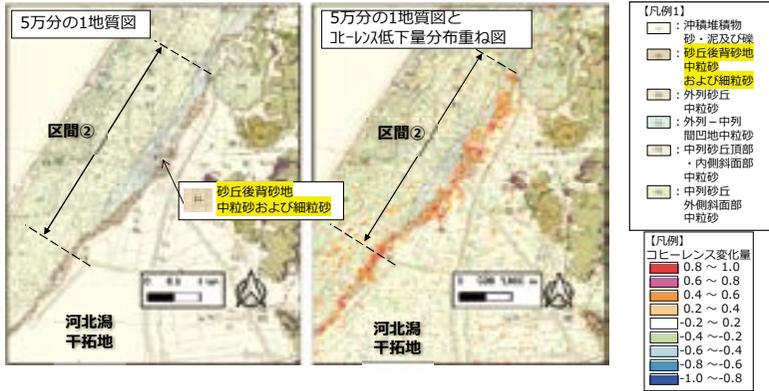
- 原地盤（砂丘層）と埋め土層の境界部であり、原地盤と比較して相対的に緩い埋め土層で顕著な液状化被害
- 砂丘後背砂地が分布する範囲で、他の場所と比較してゆるい細粒砂が堆積
- 標高が5m以下と低く、地下水位も浅い（深度約0-2m）ため、液状化しやすい地盤条件

24

◆ 【区間②】 河北潟干拓地北部

✓ 地質区分との対応

- 区間②の5万分の1地質図とコヒーレンス低下量分布を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、砂丘後背砂地（中粒砂および細粒砂）の分布範囲と概ね対応**

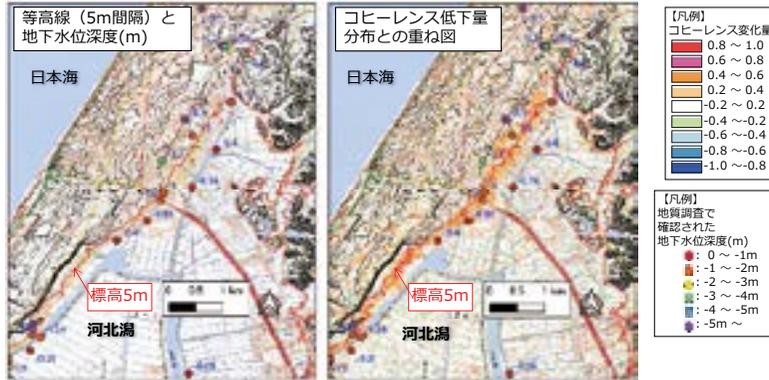


25

◆ 【区間②】 河北潟干拓地北部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間②のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0~2m程度の浅い地下水位が観測**



26

◆ 【区間②】河北潟干拓地北部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間②のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0～2m程度の浅い地下水位が観測**



以上、区間②の変状要因をまとめると、

- 干拓・埋め立て工事の対象範囲外であるものの、以下の要因で液状化被害が発生
- **砂丘後背砂地**が分布する範囲で、他の場所と比較してゆるい細粒砂が堆積
- **標高が5m以下と低く、地下水位も浅い(深度約0-2m)**ため、液状化が発生しやすい地盤条件

1. はじめに

- ①令和6年能登半島地震による液状化被害
- ②被害状況把握への人工衛星 (SAR衛星) の活用

2. 衛星画像を活用した地盤変状範囲の抽出

- ①内灘町の地盤変状範囲の抽出結果
- ②現地状況との整合性確認
- ③合成開口レーダー (SAR) の概要と解析手法

3. 地質・地歴を踏まえた変状要因の考察

- ①内灘町の地質・地歴の概要
- ②地形・地歴を踏まえた変状要因の考察

4. まとめ

まとめ



◆ 衛星画像を活用した内灘町の地盤変状範囲の抽出

目的・実施内容

▶ 石川県河北郡内灘町の液状化被害範囲の抽出を目的に、干渉SAR解析を実施

- ① 干渉SAR解析結果から地盤変状範囲を抽出、現地状況との整合性確認
- ② 地形・地質等に着目し、変状要因を考察



得られた結果

- ▶ 干渉SAR解析のコヒーレンス変化に着目することで、液状化による地盤変状範囲を抽出でき、現地状況との整合性を確認できた。
- ▶ 抽出した変状範囲は、①内灘砂丘内陸側外縁部の旧汀線と、②河北潟北部に大別される。
- ▶ ①と②に共通する変状要因としては、「砂丘後背砂地で、ゆるい細粒砂が堆積」、「標高が低く(5m以下)、地下水位が浅い(深度約0-2m)」
- ▶ さらに区間①は、原地盤(砂丘)と埋土層の境界部であり、原地盤と比較して相対的にゆるい埋土層で被害

ご清聴ありがとうございました。

- ✓ 本解析は、期間内に地表面状態が変化した範囲を抽出しているため、人工的な地形変化がある場合や、国境のコヒーレンスが低い場所の評価には留意が必要

29

参考文献・引用等



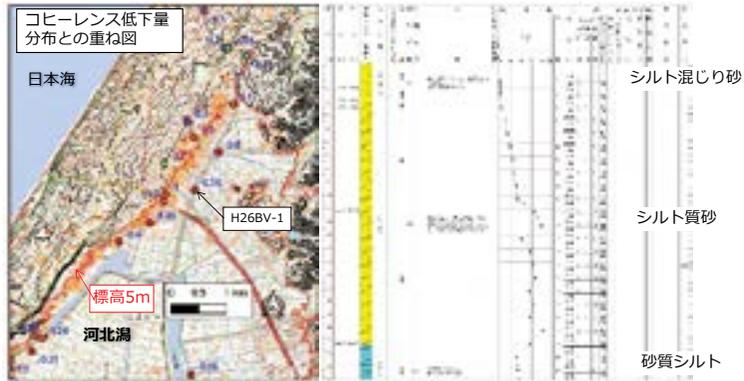
1. (一財)リモート・センシング技術センターHP: Sentinel-1A/1B/1C/1C, <https://www.restec.or.jp/satellite/sentinel-1-a-1-b.html>
2. 国土地理院HP: 干渉SARの基本, 2023/5/30閲覧, https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html
3. JAXAHP: 干渉SAR画像の見かたについて, https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jpal2_howto_insar.htm
4. JAXA・国土交通省: 災害時の人工衛星活用ガイドブック水害編・衛星基礎編, H30.3.
5. SAR(合成開口レーダ)のキホン〜事例、分かること、センサ、衛星、波長〜, <https://sorabatake.jp/3364/>
6. 国土技術政策総合研究所資料: 単偏波の高分解能SAR画像による河道閉塞箇所判読調査手法(案), H25.11
7. 日本リモートセンシング学会: 基礎からわかるリモートセンシング, H23.6.
8. 国土地理院: 干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究.

30

◆ 【区間②】 河北潟干拓地北部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間②のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0~2m程度の浅い地下水位が観測**

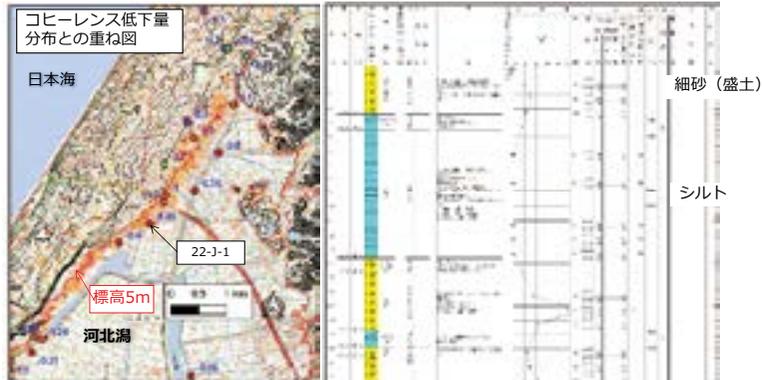


31

◆ 【区間②】 河北潟干拓地北部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間②のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0~2m程度の浅い地下水位が観測**

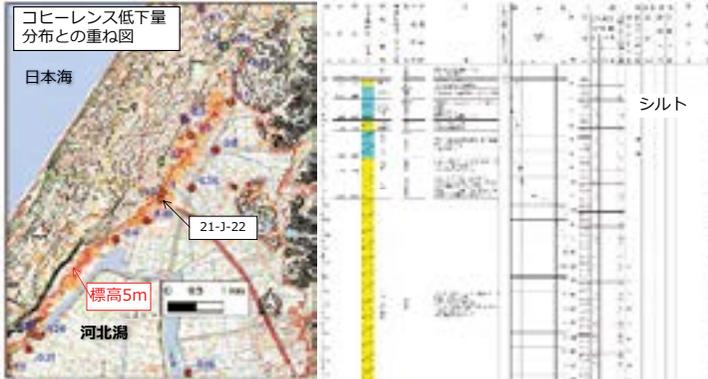


32

◆ 【区間②】 河北潟干拓地北部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間②のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0~2m程度の浅い地下水位が観測**

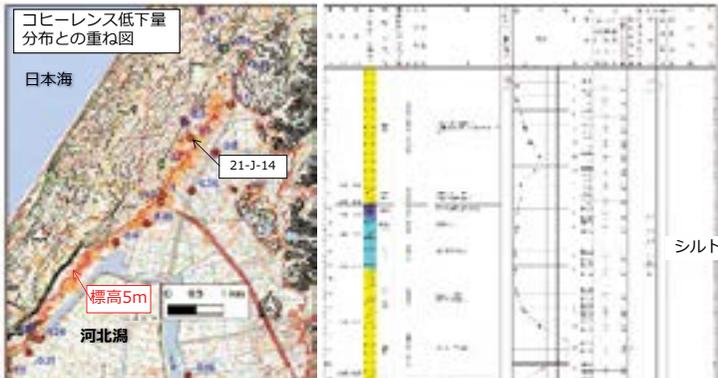


33

◆ 【区間②】 河北潟干拓地北部

✓ 等高線・地下水位との対応

- 区間②のコヒーレンス低下量分布と5m間隔の等高線とボーリング調査で確認された地下水位深度を比較
- 区間①と同様に、**顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高5mを上端として分布し、深度0~2m程度の浅い地下水位が観測**

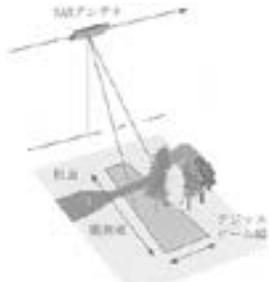


34

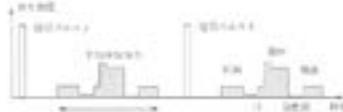
【参考】 SAR衛星の画像生成



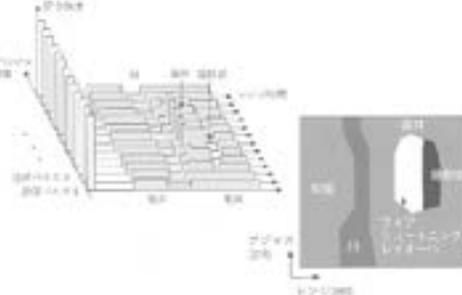
◆ 実開口・合成開口レーダーの画像生成²⁾



① 送信波と受信波



① 送信波毎の並べ替えとレーダー画像



- ◆ 粗面は一定の後方散乱強度
- ◆ 川（水面）は後方散乱が無い
- ◆ 樹木は後方散乱強度が高いが、後方が影となり強度低い

35

【参考】 干渉SAR解析の分解能



◆ SAR衛星の水平分解能

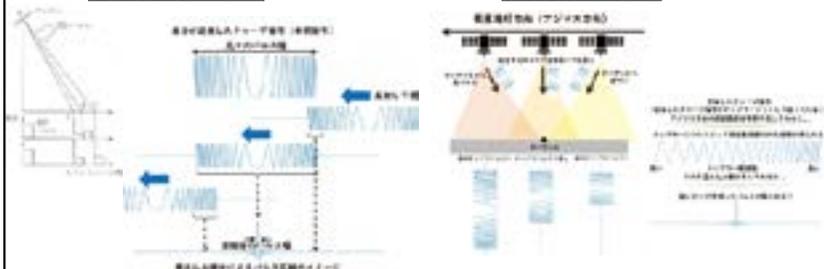
- ・ 方向別に以下の技術を用いて水平分解能を向上させている

① マイクロ波照射方向（レンジ方向）

- ・ 矩形パルスの場合、マイクロ波照射方向の分解能はパルス幅を短くするほど向上。
- ・ 高分解能を得るには、高圧のパルスを連続して放射する必要があり、小型のSAR衛星では限界がある。
- ・ 周波数変調をかけたチャープパルスを使った「パルス圧縮」技術で、実質的にパルス幅の短い波を送信することで、**マイクロ波照射方向の分解能を向上**させている。

② 衛星進行方向（アジマス方向）

- ・ 衛星進行方向の分解能は、照射面のビーム幅が狭いほど向上
- ・ 分解能を向上させるためには、衛星のアンテナ長を大きくする必要があり、小型衛星には限界がある。
- ・ **ドップラー効果を利用して衛星進行方向に仮想の長いアンテナを合成し、高分解能を実現する、合成開口技術を用いて、衛星進行方向の分解能を向上**させている。



36

【参考】PSI法について



◆ PSI法の解析手順

(1) 干渉ペアの選択
 ・同一地点で複数回観測されたSAR画像のうち、ある1つの画像をMaster画像として、その画像を基準にペアを選定。

(2) PS候補点の選定
 ・計算負荷低減を目的に、SAR画像の中からPS点の候補となる画素を選定。
 ・PS候補点は、反射強度の時間的安定性（振幅の時間平均値とその標準偏差の比）を指標として選定。

(3) 差分干渉処理（干渉画像の作成）
 ・(2)で選定したPS候補点に対して、反射波の位相差を算定し、各ペアでSAR干渉画像を作成。

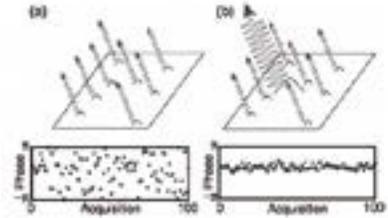
(4) 誤差低減処理
 ・①衛星軌道のズレによる誤差、②地形（標高）による誤差、③大気・水蒸気分布による誤差の影響を、衛星軌道・DEMデータ等で推定し、除去。

(5) PS点の選定
 ・PS候補点の画素に対して、干渉性の強さを表す指標である干渉度（※）を計算し、閾値を超える候補点（変位を高精度に補足できた点）を、PS点として選定。
 （※）干渉位相に含まれるノイズ量を定量化した指標で、干渉性の低下に伴う確率的な観測誤差を表す。

(6) 地表変位位置の推定
 ・PS点における干渉位相を距離に変換し、時系列の変位量を算定。

◆ PS点について

(a) PS点が得られない画素 (b) PS点が得られる画素



- ◆ 同じ散乱強度を持つ散乱体がランダムに1画素内にランダムに分布すると、位相が安定しない
- ◆ 1画素内に強い散乱が一つだけあると、他の散乱体の影響が無視でき、位相が安定 → PS点になりえる

液状化に起因する側方流動被害の解明と防止対策— 2024年能登半島地震からの教訓

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Anurag Sahare (サハレ アヌラグ)

Research Assistant Professor (研究講師)

Tokyo City University (東京都市大学)

令和6年 能登半島地震復興への歩み ~液状化被害防止のための新戦略~ (2025年10月24日)

1

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Outline (発表内容)

1. Background & Objectives (背景・目的)
2. Field Observations from the 2024 Noto Earthquake 被害状況の現地観察 (能登2024)
3. Ground Testing & Mechanism Synthesis (地盤調査／試験と変形機構の整理)
4. Centrifuge Modeling: Spatial Kinematic Demands (遠心模型実験: キネマティック外力の空間発現)
5. Implications for Design & Mitigation (設計・対策への示唆)

2

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

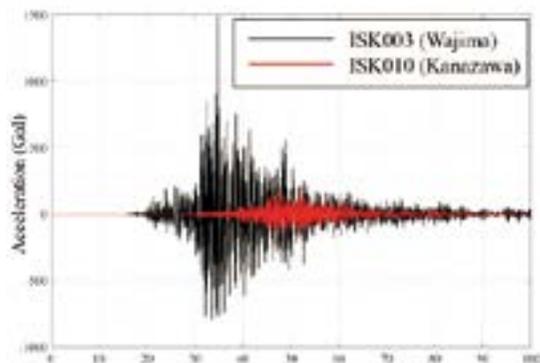
Background & Objectives (背景・目的)



3

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Background of the earthquake

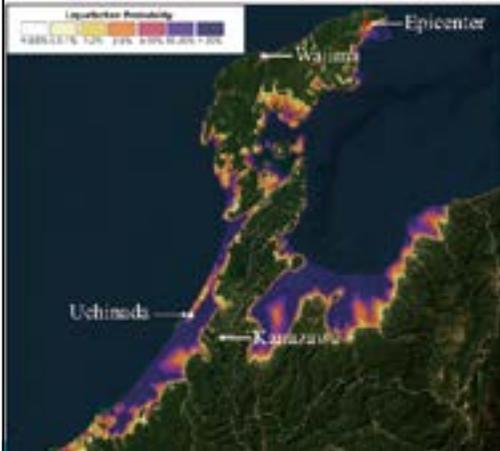


Despite the comparatively smaller PGA (~200 – 220 gals) near Uchinada, the earthquake caused tremendous damage including significant liquefaction-induced lateral spreading.

4

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Background of the earthquake



Why was the damage so substantial?

5

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Historical Perspective (背景および歴史的観点)



6

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Historical Perspective (背景および歴史的観点)



7

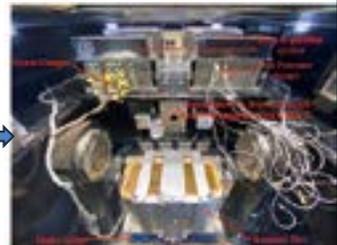
Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Research Objectives (目的)

Document the deformation pattern of damage in the Uchinada strip

Explain the mechanism using in-situ field testing

Test/quantify the deformation mechanism via centrifuge modeling



8

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Research Objectives (目的)

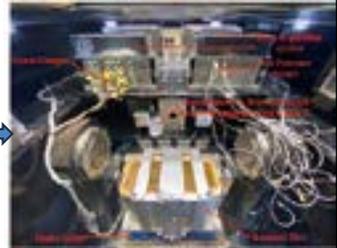
Document the deformation pattern of damage in the Uchinada strip



Explain the mechanism using in-situ field testing



Test/quantify the deformation mechanism via centrifuge modeling



9

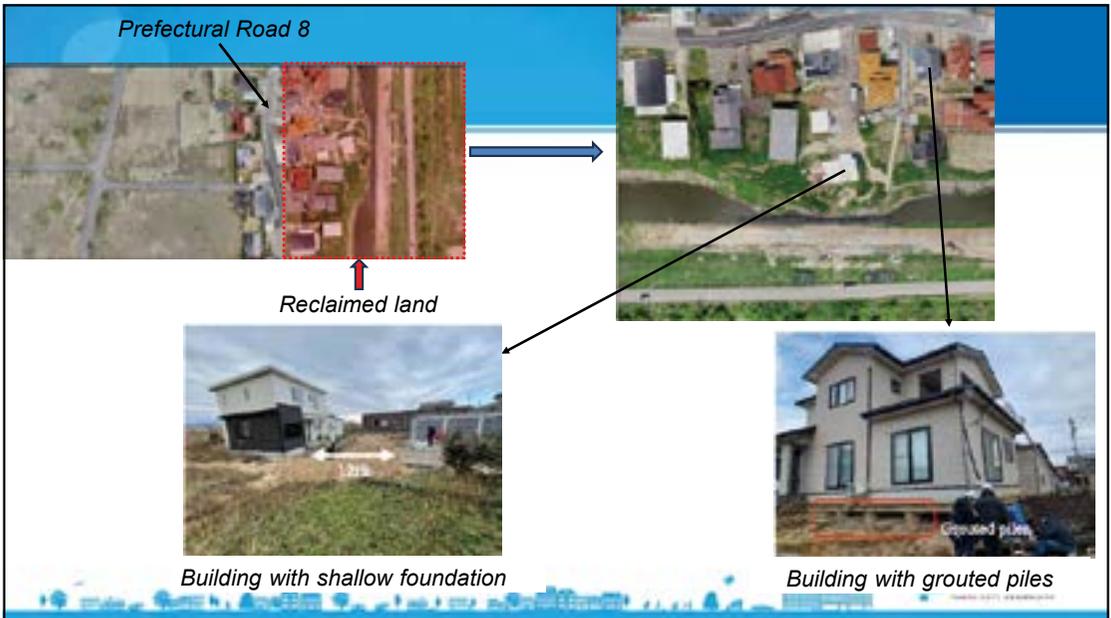
Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Field Observations from the 2024 Noto Earthquake 被害状況の現地観察 (能登2024)

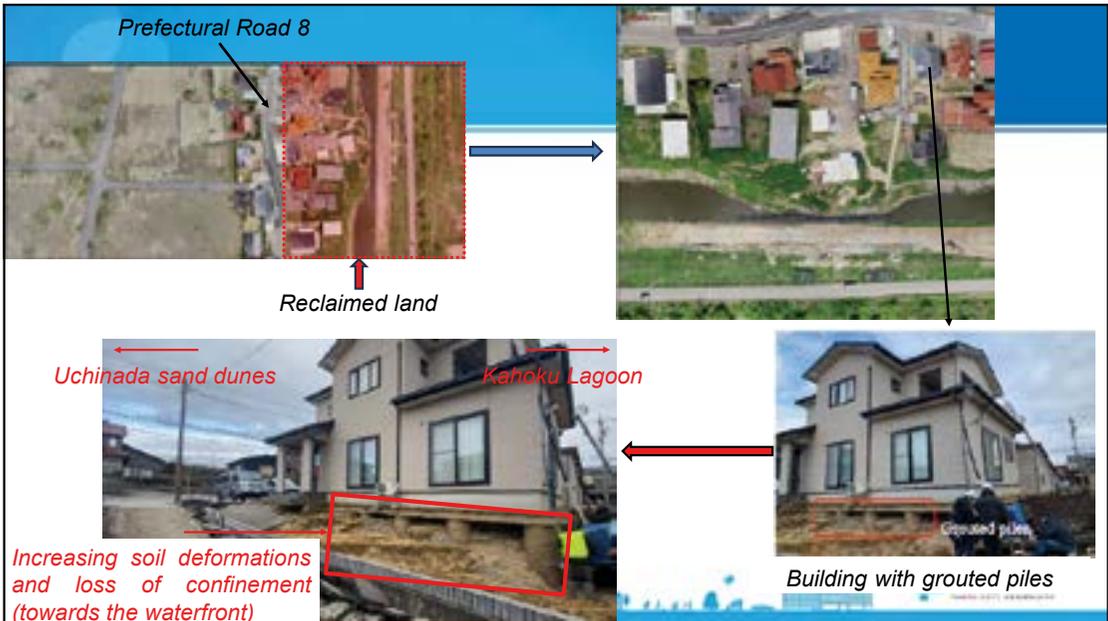
10



11



12



13

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Research Objectives (目的)

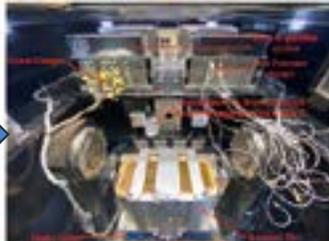
Document the deformation pattern of damage in the Uchinada strip



Explain the mechanism using in-situ field testing



Test/quantify the deformation mechanism via centrifuge modeling



東京都市大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

14

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Ground Testing & Mechanism Synthesis (地盤調査／試験と変形機構の整理)

15

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Ground Testing & Mechanism Synthesis (地盤調査／試験と変形機構の整理)

1. Particle size distribution of sand ———→ *Liquefaction potential of soil*
2. SPT Boring Survey ———→ *To Understand ground layering*
3. Portable dynamic cone penetration testing (PDCPT) ———→ *To Understand deformation mechanism*
4. 3D Laser scanning survey ———→ *To Understand deformation mechanism*

16

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

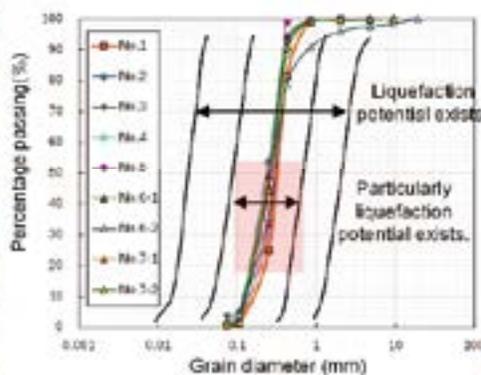
Ground Testing & Interpretation of Deformation Mechanism (地盤試験および変形機構の解釈)

1. Particle size distribution of sand \longrightarrow *Liquefaction potential of soil*

17

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Particle size distribution of sand



According to the USCS classification, soil can be classified as a poorly graded clean sand with a very high liquefaction potential ($C_u = 1.5-1.6$)

18

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

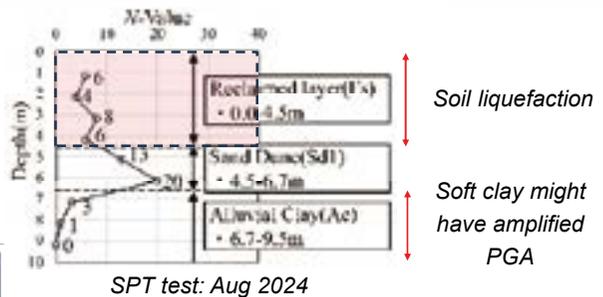
Ground Testing & Interpretation of Deformation Mechanism (地盤試験および変形機構の解釈)

2. SPT Boring Survey → *To Understand ground layering*

19

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

SPT Boring Survey



20

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Ground Testing & Interpretation of Deformation Mechanism (地盤試験および変形機構の解釈)

- 3. Portable dynamic cone penetration testing (PDCPT) —→ *To Understand deformation mechanism*



21

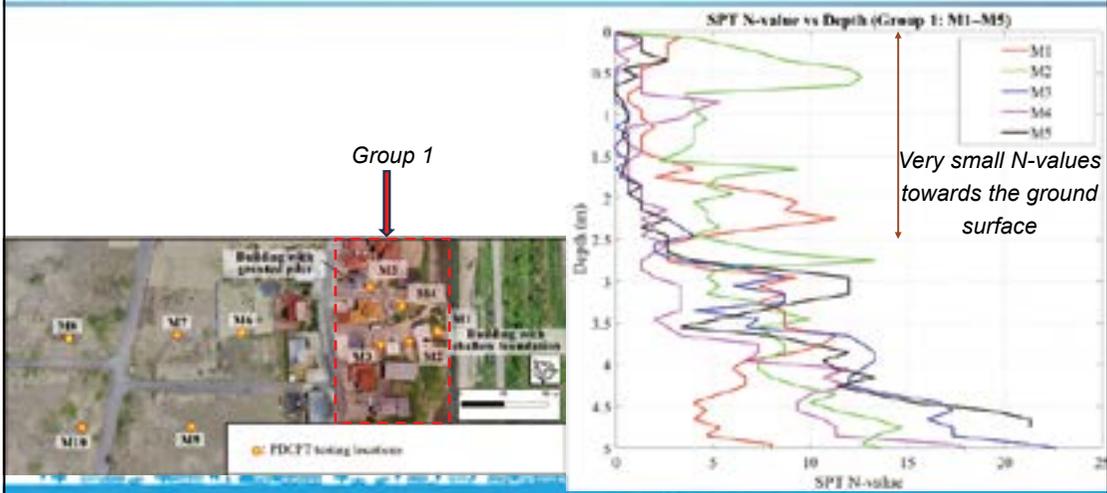
Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Portable dynamic cone penetration testing (PDCPT)

These PDCPT tests were conducted in Feb 2024

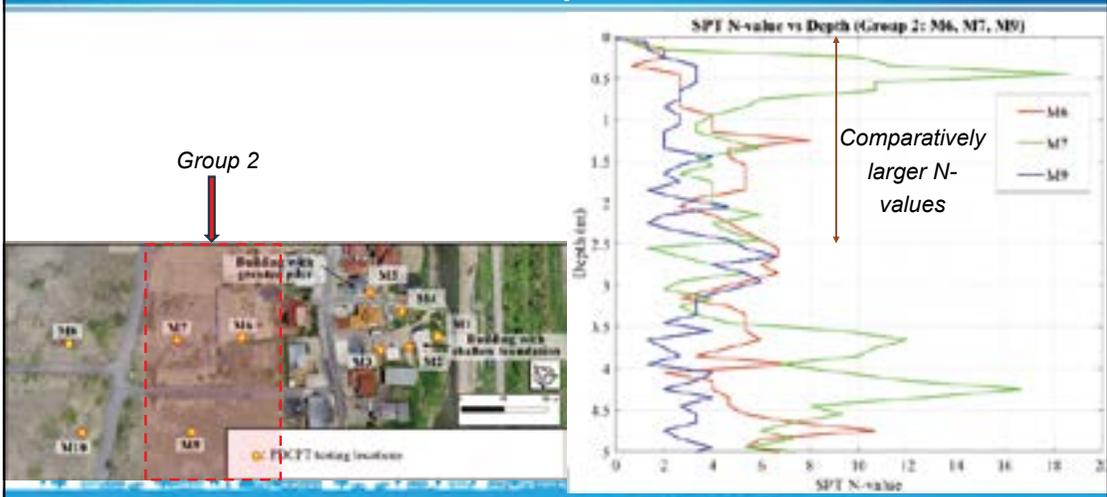
22

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



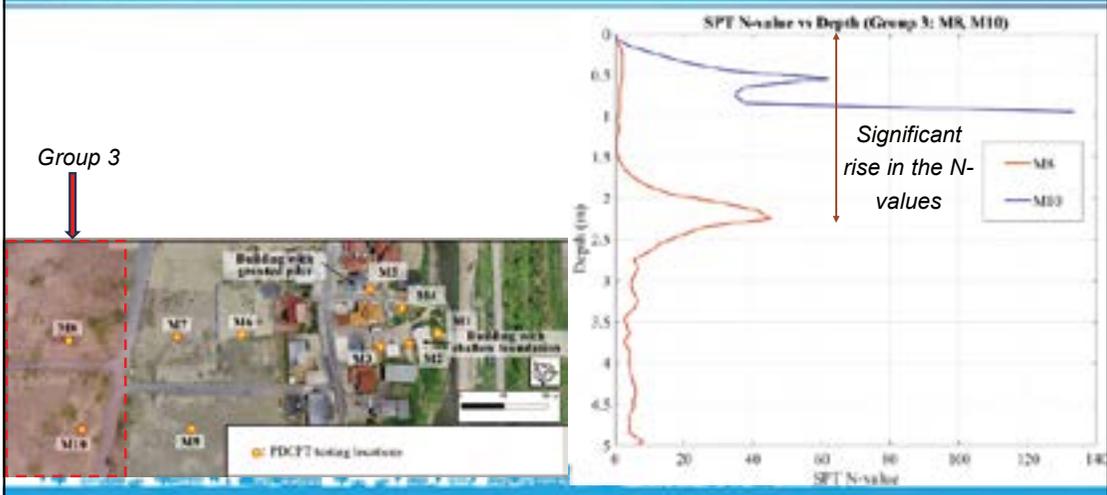
23

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



24

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



25

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

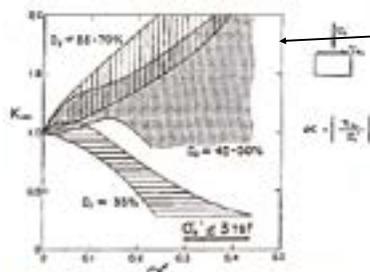
Simplified liquefaction potential evaluation (Idriss & Boulanger, 2014)

$$Liquefaction\ potential(FL) = \frac{CRR}{CSR}$$

Cyclic stress ratio (CSR)

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_v} \right)^{r_s}$$

Stress reduction factor
 $r_s = 1 - 0.00765 \times depth(z)$



Cyclic resistance ratio (CRR)

$$CRR = CRR_{7.5} (MSF) K_{\sigma} K_r$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{lqCS}} + \frac{(N_1)_{lqCS}}{135} + \frac{50}{[10 \times (N_1)_{lqCS} + 45]^2} \frac{1}{200}$$

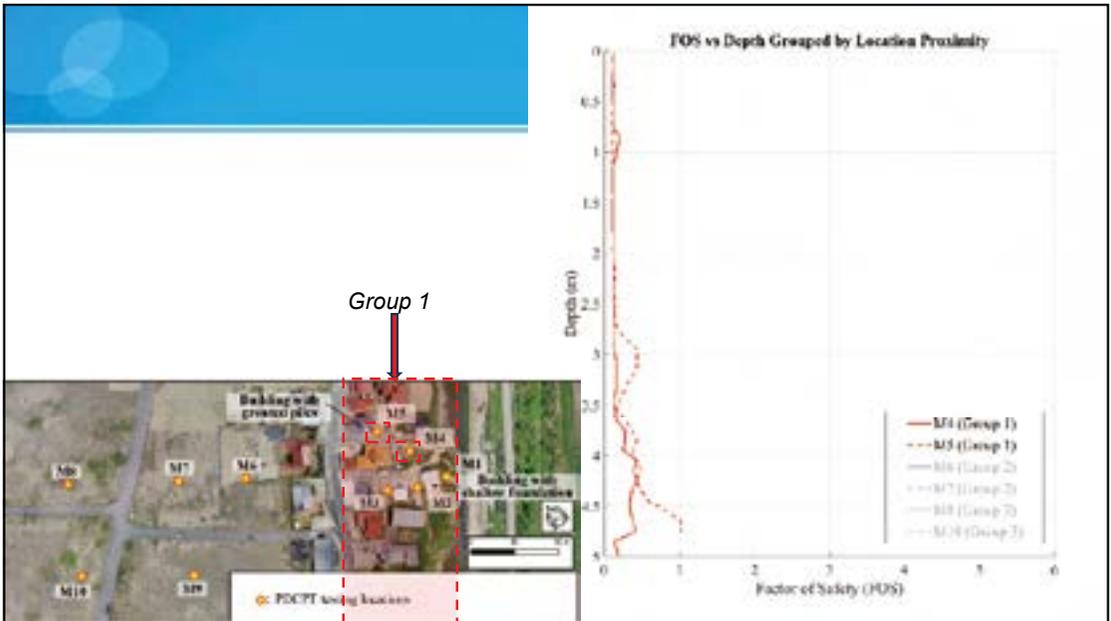
$$(N_1)_{lqCS} = N \times C_{\sigma} \times C_r$$

Overburden correction factor

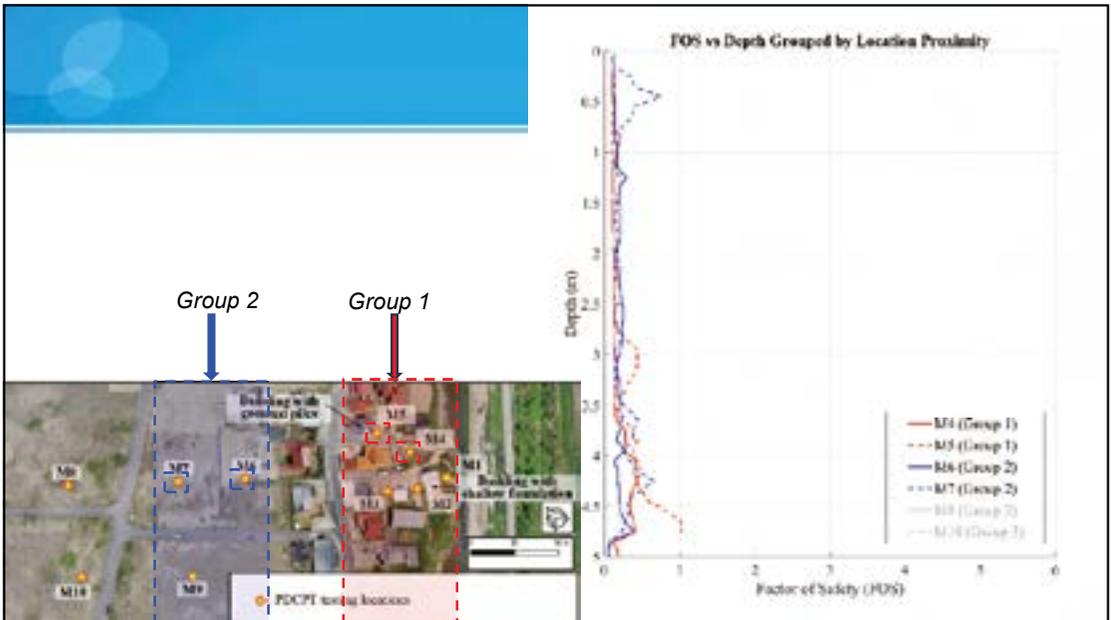
$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.1 \quad C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{lqCS}}} \leq 0.3$$

Seed and Harder, 1990

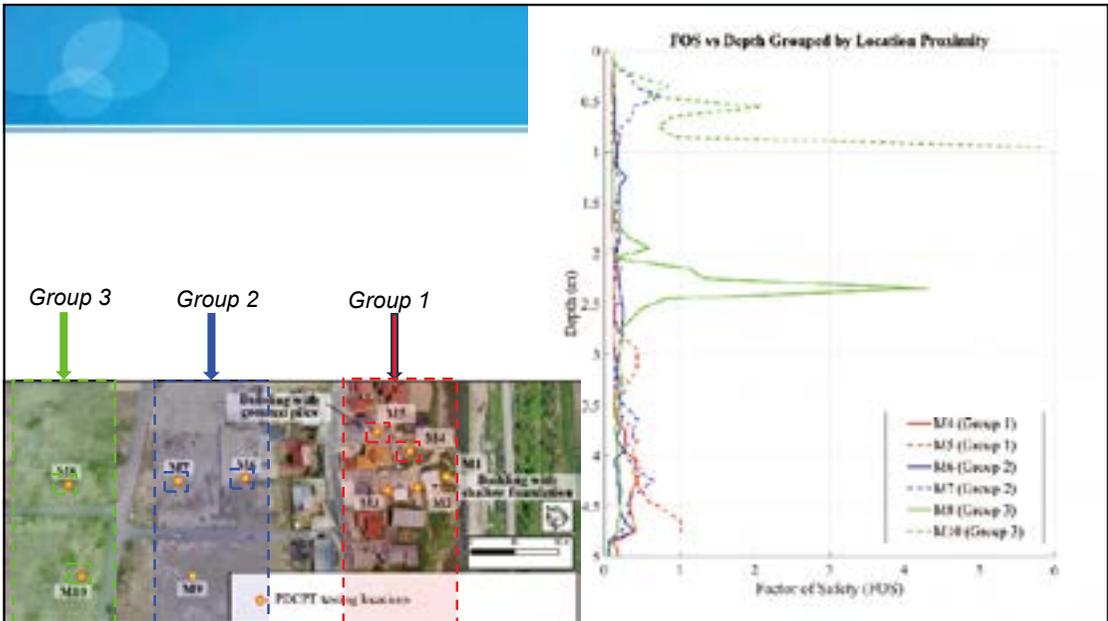
26



27



28



29

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

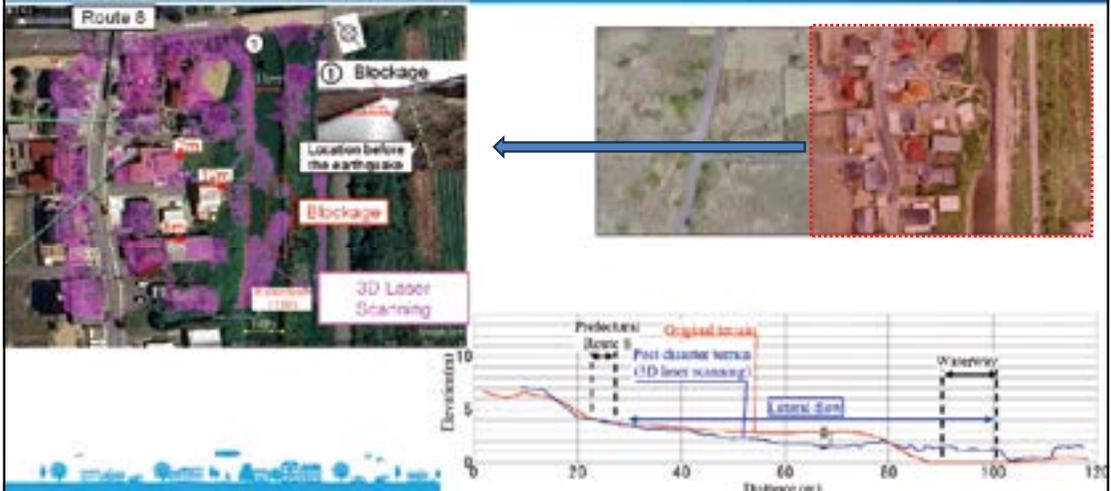
Ground Testing & Interpretation of Deformation Mechanism (地盤試験および変形機構の解釈)

4. 3D Laser scanning survey —→ *To Understand deformation mechanism*



30

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



31

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Research Objectives (目的)

Document the deformation pattern of damage in the Uchinada strip



Explain the mechanism using in-situ field testing

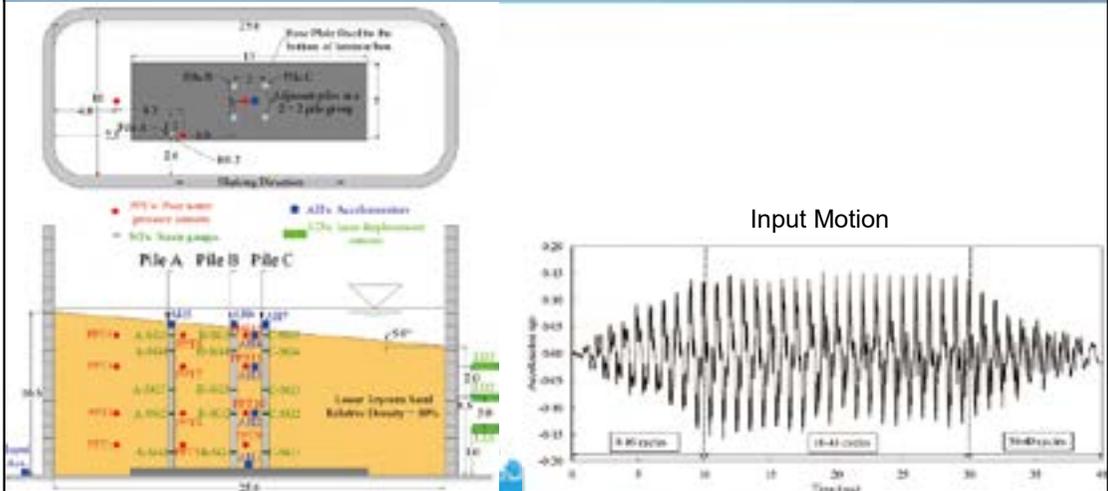


Test/quantify the deformation mechanism via centrifuge modeling



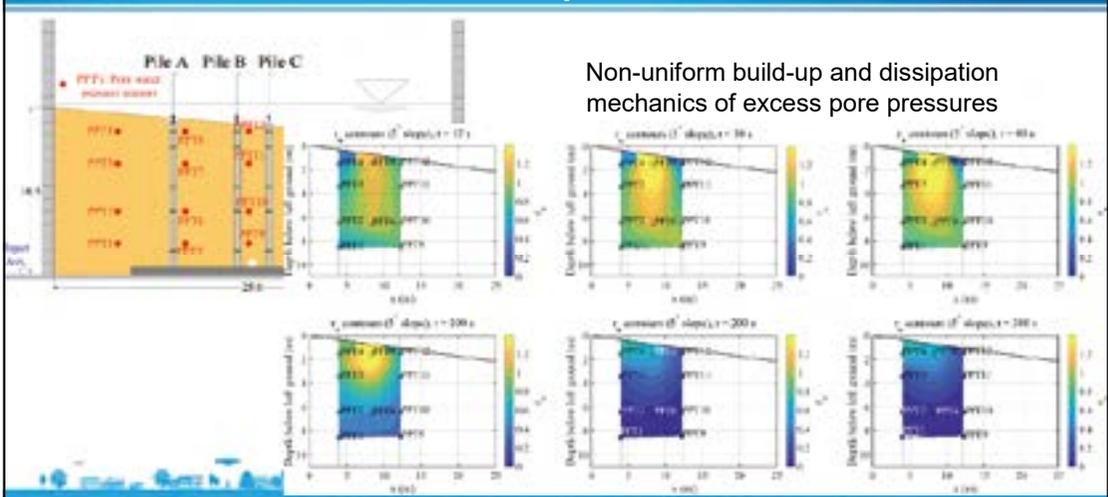
32

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



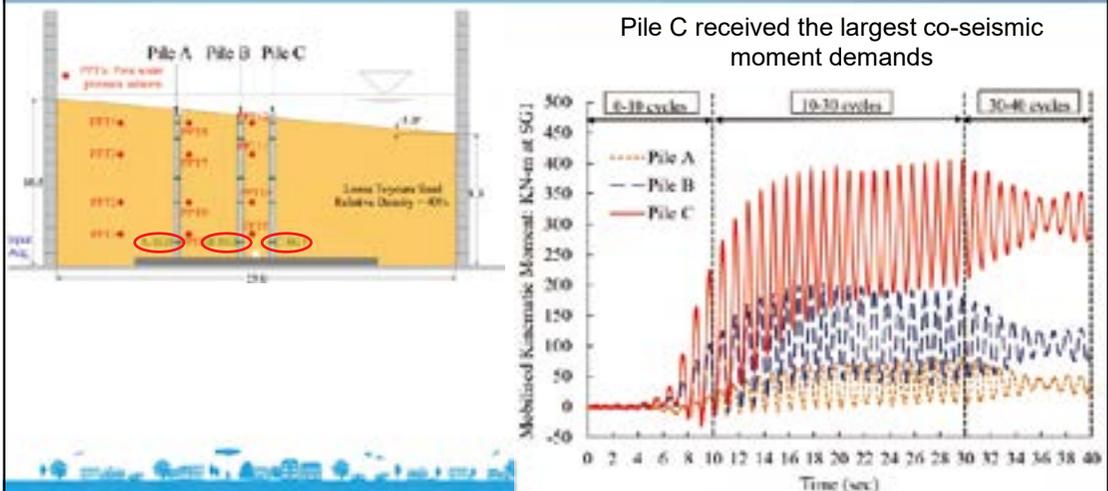
33

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



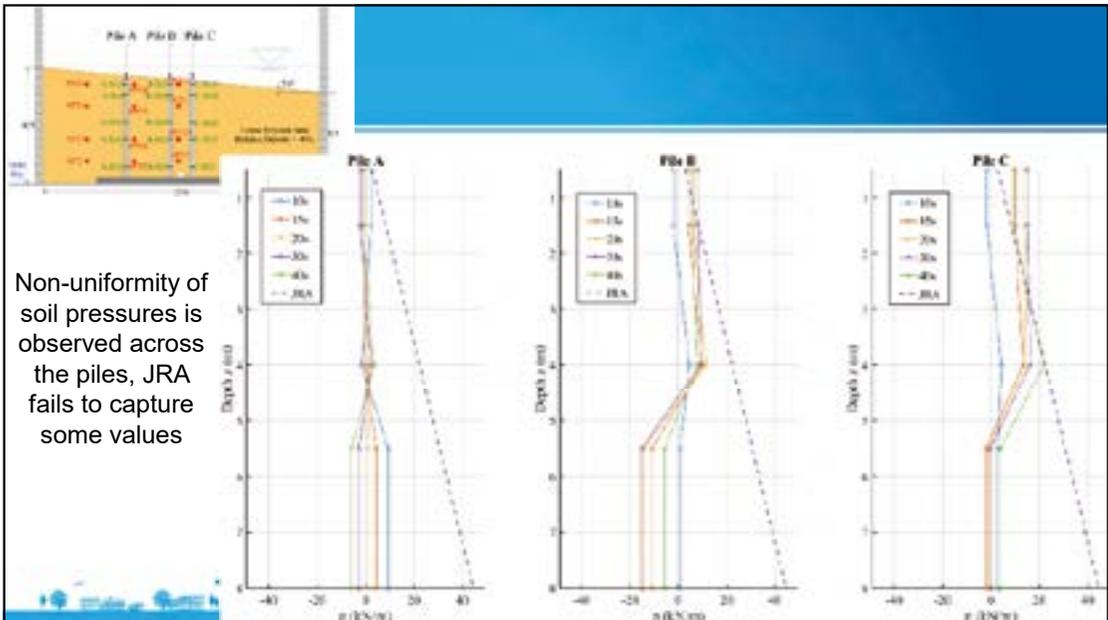
34

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake



Pile C received the largest co-seismic moment demands

35



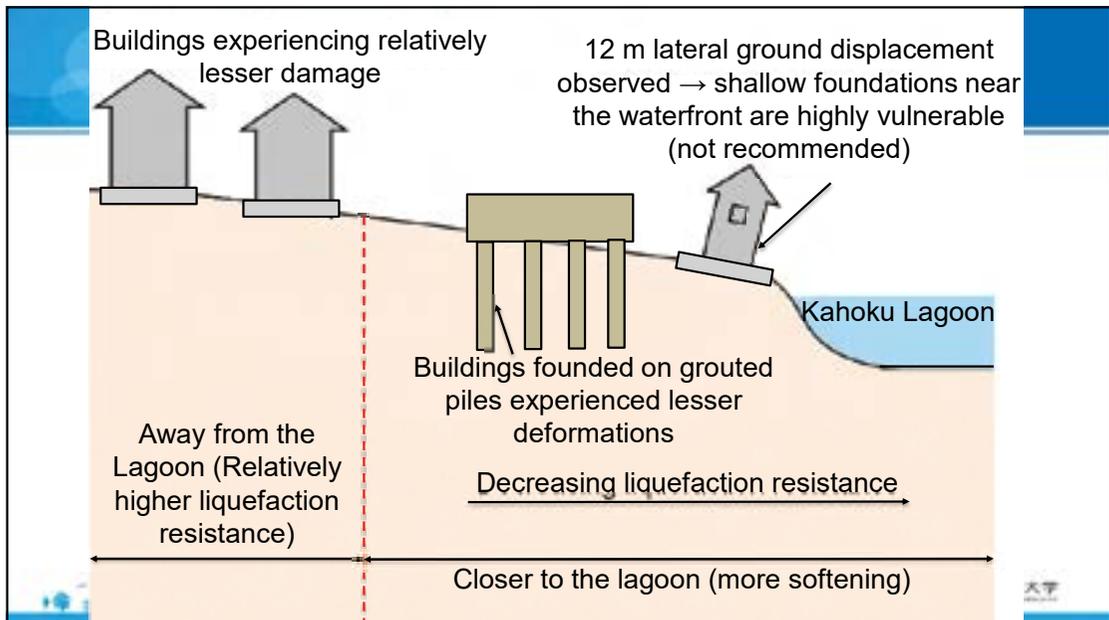
Non-uniformity of soil pressures is observed across the piles, JRA fails to capture some values

36

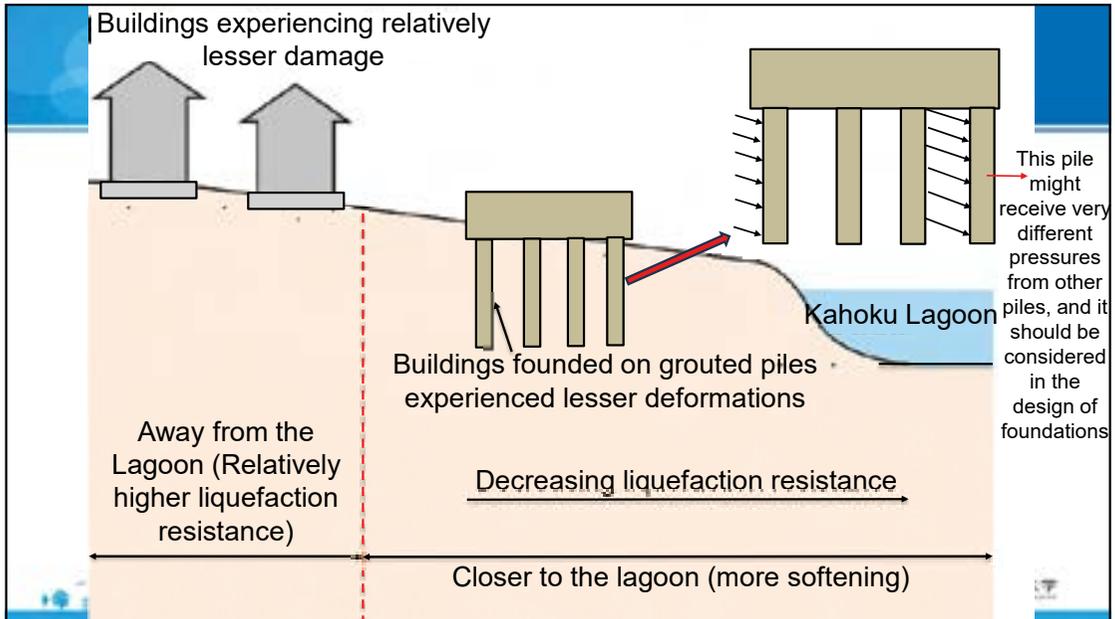
Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Implications for Design & Mitigation (設計・対策への示唆)

37



38



39

Understanding and Preventing Liquefaction-Induced Lateral Spreading Damage - Lessons from the 2024 Noto Peninsula Earthquake

Conclusions derived from this study (まとめ)

- **Damage driver:** Liquefaction-induced lateral spreading localized in the reclaimed strip near Kahoku Lagoon; large ground offsets (12 m) occurred despite moderate PGA.
- **Stratigraphy (from SPT & logs):** Loose reclaimed clean sand (0–4.5 m) over sand-dune deposits (4.5–6.7 m) over soft alluvial clay (6.7–9.5 m), a profile conducive to liquefaction in the upper layers.
- **Waterfront gradient:** Liquefaction resistance decreases toward the waterfront (lowest FOS near the lagoon) and increases inland toward the Uchinada sand dunes; consistent across PDCPT/FOS and 3D-laser deformation.
- **Kinematic demand is non-uniform:** Centrifuge tests show spatially varying excess-pore-pressure fields that produce higher moments on downslope piles; standard JRA pressure distributions do not capture this asymmetry.
- **Design & mitigation:** Avoid shallow foundations near the waterfront; for pile groups, explicitly check differential kinematic loads and consider targeted ground improvement along the waterfront band.

ご清聴ありがとうございました

40



1

自己紹介

【地盤工学会】

- ・ 令和6年能登半島地震調査団 「災害レジリエンス・斜面災害」班
- ・ 極端降雨・巨大地震に対応した斜面防災対策研究委員会

- ▶ 氏名：河内 義文（こうち よしふみ）
- ▶ 年齢：68歳（7月5日生）
- ▶ 株式会社ケイズラブ（環境地盤工学研究所・コンサルタント）代表取締役
- ▶ 資格：博士（工学），技術士（建設・応用理学）
- ▶ 日本技術士会中国本部副本部長・山口県支部長
- ▶ 1625年から同じところに住んでいる



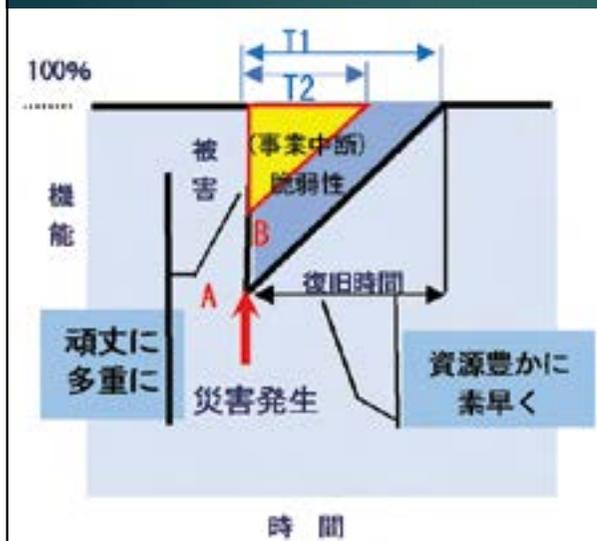
2

令和6年能登半島地震による液状化対策と災害レジリエンス

- ▶ 1. 社会経済と災害レジリエンス
- ▶ 2. 液状化対策は困難だ
- ▶ 3. 未災の場をどうする

3

1.社会経済と災害レジリエンス



- ▶ 回復過程において、機能中断によって生じる三角形の面積を小さくすることがレジリエンスの向上と定義
- ▶ 方策①：予防力の向上 被害で出ないように個々の要素の強靱化、システムを多重化で、機能損失を防ぐ
- ▶ 方策②：回復力の向上 速やかな機能回復のために、復旧資源を沢山集め、個々の仕事に要する時間を短縮

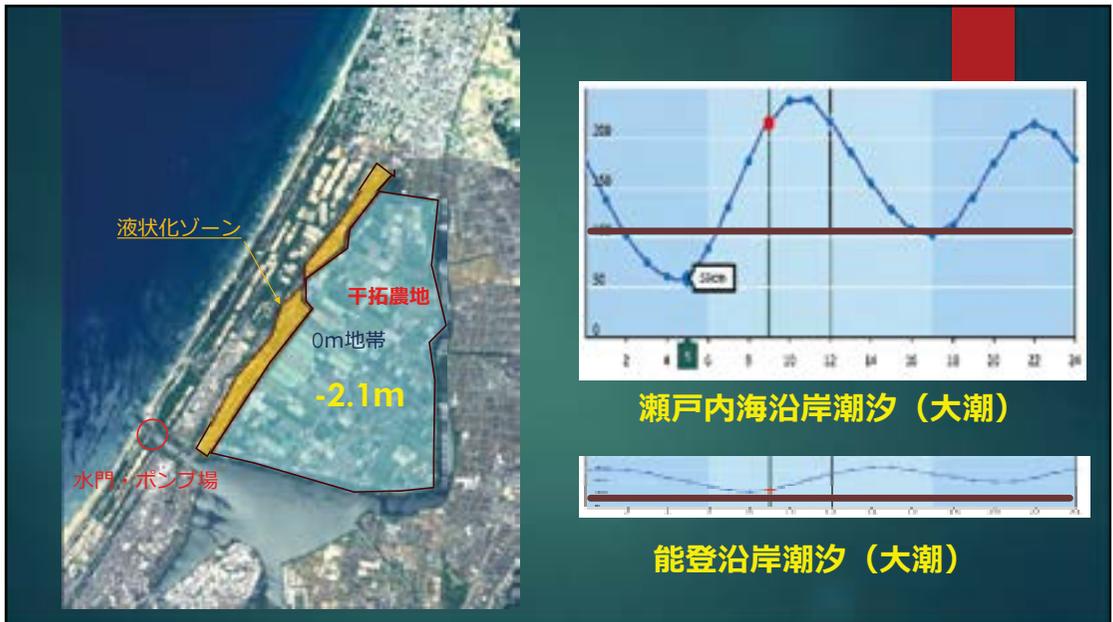
4



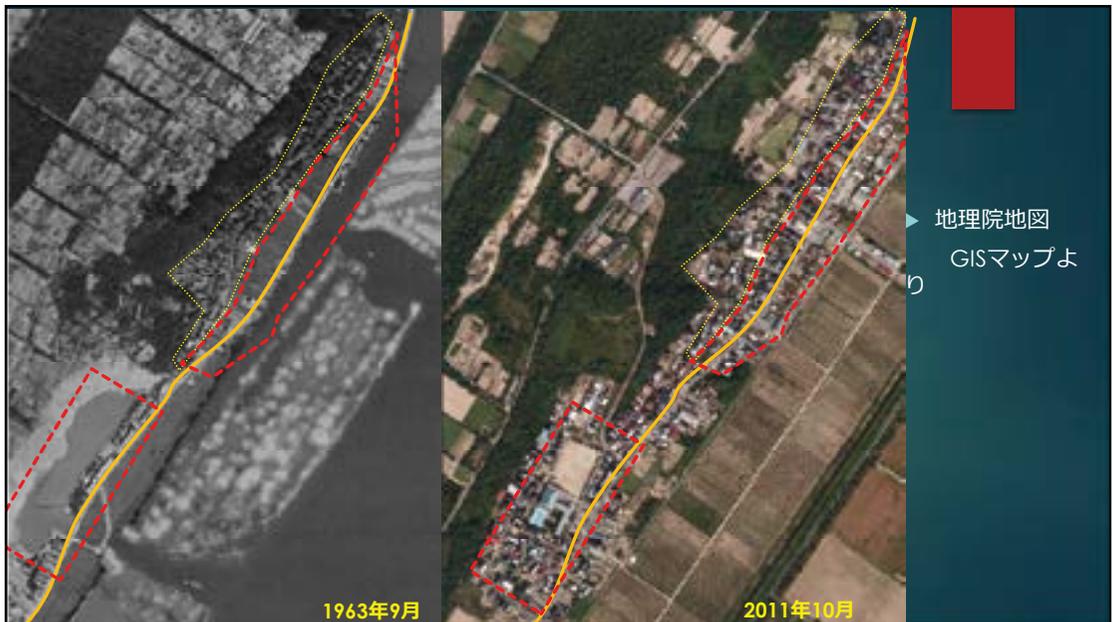
7



8

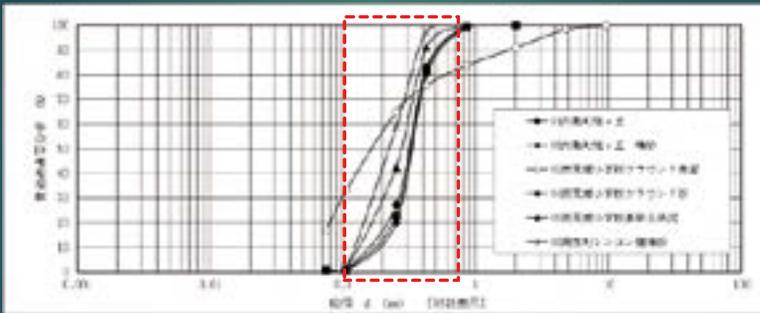


9

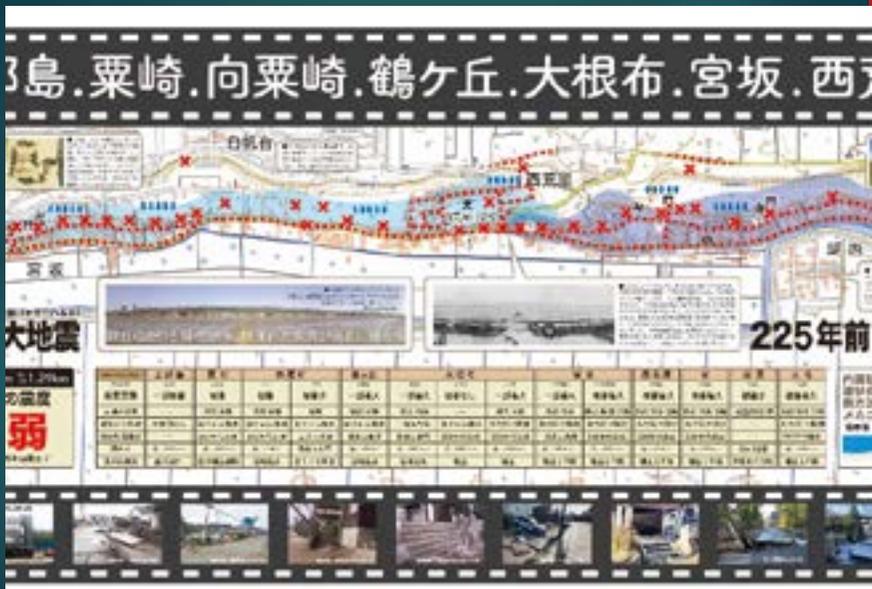


10

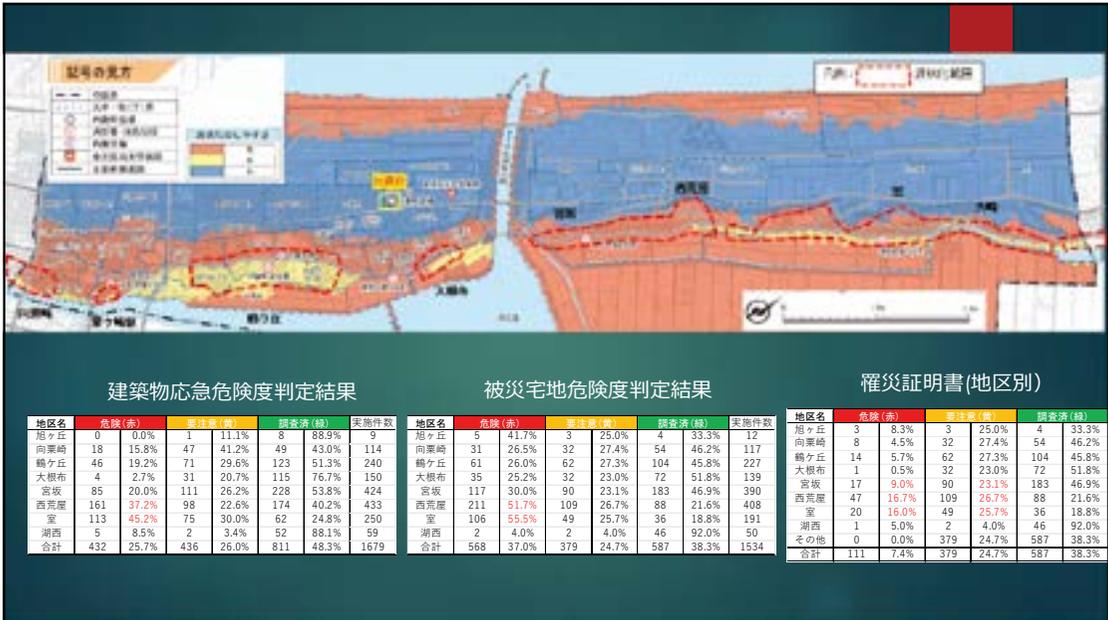
内灘町 液状化区域の粒度特性



11



12



13

内灘町における住民説明会の実施日と内容

日時	項目	内容
2024年3月	能登半島地震 各種生活支援制度	内灘町内被害状況 ライフライン復旧状況 都市防災推進事業
2024年8月	液状化調査の現状と予定 被災宅地復旧支援 アンケート調査協力	被害状況・公費解体状況 液状化調査経過・復旧工法概要 被災宅地等復旧支援制度 再建意向など
2024年11月	液状化対策 公共施設復旧 災害公営住宅 土地境界・応急仮設・災害復興計画	メカニズムと対策エリア・工法・スケジュール・補助制度 公共施設復旧・復興スケジュール 災害公営住宅建設と入居に関する 基本計画2025年3月策定
2025年5月	公共施設復旧 液状化対策実証実験 土地境界確定	公共施設復旧・復興スケジュール 実証実験計画(場所) 3つの対応案提示

14

液状化対策とレジリエンスという概念

- ▶ 液状化が発生した盛土に関しても、液状化による地盤の緊密化はある程度は行えたとしても、今回の地震においても振動時間が20秒程度であったので、地盤が不均一化しているものの、締め固まったとは言い難い状況であるものと推定される。



したがって、今回液状化が発生した盛土に関しては、再度比較的大きな振動を伴う地震が発生した場合は、液状化リスクは大きいまま

2024年1月1日	震度5弱 (M7.6)	20秒継続で液状化
2024年6月3日	震度4 (M6.0)	液状化なし
〇〇年〇月〇日	震度5弱	再液状化？

15

地震の発生確率、再来確率と地震フラジリティ

- ▶ 地震の発生確率を $P(H)$ として、レジリエンス指標の期待値 $E[R]$ を以下のように表現できる。

$$\mathbf{▶ E[R] = \int R(H) \times P(H) dH}$$

- ▶ $R(H)$: 地震ハザード H に対するレジリエンス値 (例えば震度や地動速度に応じた回復力)
- ▶ $P(H)$: 地震ハザードの確率分布 (例: 南海トラフ地震の30年以内発生確率70~80%, 活断層地震の50年以内発生確率0.37%)
- ▶ 複数の地震シナリオ (震度6弱~震度7など) に対して、それぞれの回復力と発生確率を掛け合わせて、全体の期待レジリエンスを算出する。

16

地震の再来確率と地震フラジリティ

平成・令和活動期に地震が発生した活断層(現時点の危険度)

種別	番号	断層名	地震名	マグニチュード (Mw)	最新活動時期 (西暦年)	活動間隔 (年)	J-Shisによる 30年発生確率 (%)	危険度
平成・令和活動期	①	六甲淡路島断層帯	1995年阪神淡路	7.3	1995			A
	②	伏在断層	2000年鳥取県西部	7.3	2000	-		Z
	③	信濃川断層帯北部	2004年中越地震	6.8	2004	40~77	2.87	Z
	④	日奈久・布田川断層	2016年熊本	7.3	2016	100~160	0~16	Z
	⑤	能登半島沖セグメント	2024年能登半島	7.6	2024	17~163	16~18	S

危険度	色	説明
危険度 A	赤	16年以内の過去最大規模の地震
危険度 B	黄	16年以内の過去最大規模の地震
危険度 C	黒	16年以内の過去最大規模の地震
危険度 D	白	16年以内の過去最大規模の地震

17

1. 液状化対策について

【適用可能な液状化対策工法の選定】

○ 公共施設と宅地の一体的な液状化対策工法の中から、当該地域の特性を踏まえ、「地下水位低下工法」と「地盤改良工法」を選定しました。

	地下水位低下工法	砂子状地中掘削工法	地盤改良工法
工法概要			
概要	宅地や道路の地下水位の高さを積極的に低下し、地盤下に液状化層の発生を抑制し、その下の液状化層の厚さや液状化の程度を軽減する。	原状土とセメントなどの改良材を液状化層に混合挿入して、砂子状地中掘削工法を適用し、この砂子状地中掘削工法によって、液状化を抑制する。	改良材を注入・振動により液状化層を固め、液状化層の厚さを増大させて、地盤強度（液状化）を高めることで、液状化を抑制する。
適用可否	○	×	○

○ 道路直下に集水層を設け、宅地の地下水位を低下する工法
 ○ 排水には自然排水方式、ポンプ排水方式がある

○ 砂等を注入する等して地盤の強度を上げる工法
 ○ 砂子状地中掘削工法は、地盤改良工法と同様に適用可能

■ 住民説明会資料
2024年11月

18

1. 液状化対策について

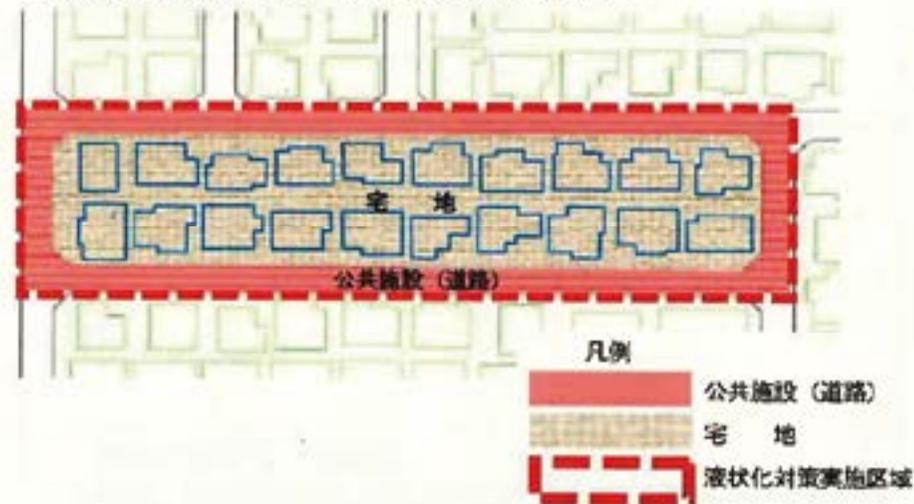
【再液状化防止のための対策工率率の検討】

- (1) 液状化対策方針書
今次災害を考慮した地震動に対して、適切な耐震性能の可成り低減を図るによる対策目標を設定
- (2) 液状化対策検討あり
今回の地震で液状化被害が発生したとみられる地帯は対策すべき範囲を設定（内閣府：約12Gne）
- (3) 液状化対策工率率

対策工種	地下水位低下工法	地盤改良工法
概要	表層地盤の下層部を個別的に改良し、地表層下の液状化被害を抑制し、その下層地盤の厚みや液状化の発生を抑制する。	対象地帯入-締結部により液状化を抑制し、液状化被害の発生を抑制する。圧入法（圧入機）も用いられ、液状化を抑制する。
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ○ 既設倉庫は部分的に適用 ○ 50コンクリートが発生 ○ 地帯内の工事本数は少ない ※ 倉庫、道路の下層部を改良して減らすことにより、液状化の発生を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 既設倉庫は部分的に適用 ○ 50コンクリートが発生 ○ 地帯内での工事の本数は多い ※ 倉庫、道路の下層部を改良することにより、液状化の発生を抑制する。
概算工率率	（圧入法）約140～220億円 （圧入法下方式-一部圧入改良）約310～440億円 （圧入法下方式-全部圧入改良）約440～550億円	約400～600億円
ラックコスト（1年あたり50）	（圧入法）約4,800～7,000万円 ※ 建設費を削減する （圧入法下方式）約500～900万円、※ 減額あり	なし
事業期間	約5～10年	約5～10年
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ○ 地下水の管理費の増加 ○ 地盤改良（地下水下）の費用がかかる ○ 既存の建築物の損傷 ○ 周辺環境への影響 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 液状化被害の発生を抑制する ○ 工事費の削減、建設費の削減 ○ 周辺環境への影響

災害時液状化防止事業（国の補助事業）を活用し、町が事業を実施する予定

<公共施設の復旧と一体的な液状化対策>



深刻な地籍境界問題



21

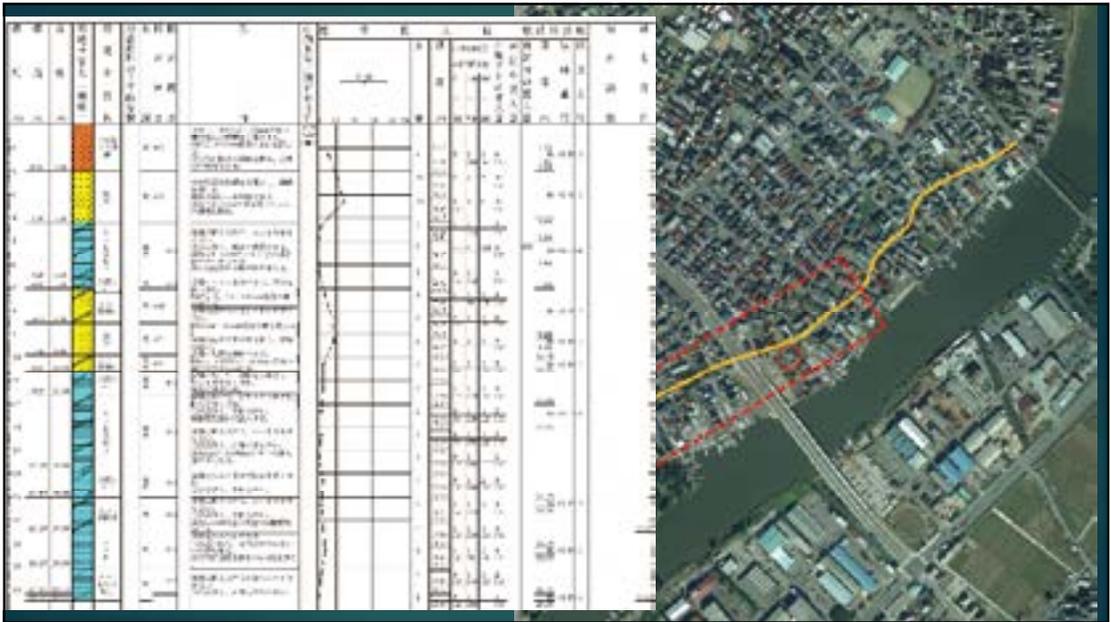


▶ 内灘町西荒屋 (2024年1月撮影)



▶ 内灘町西荒屋 (2025年5月撮影)

22

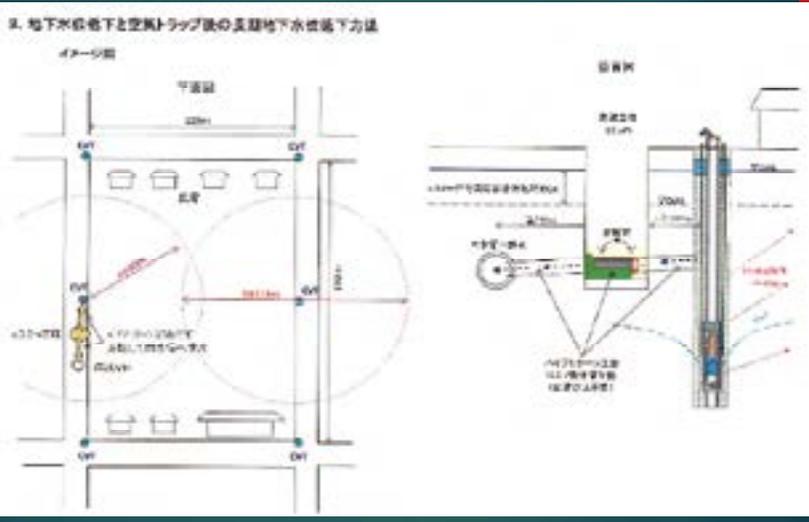


25



▶ 内灘町室(2024年1月撮影)

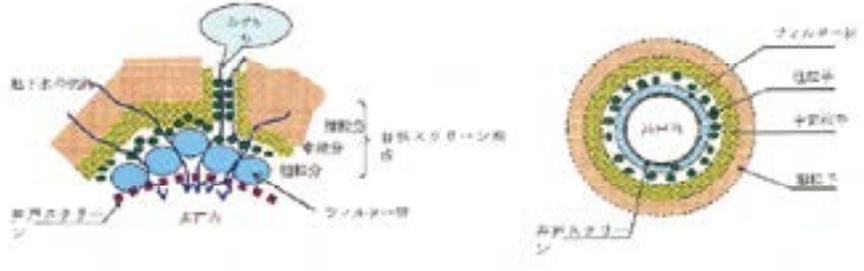
26



29

5. グリル現象について

【1】-W人：脱着の時のグリル現象により、井戸に古い方が此層の地下水の濃度が大きくなるが、H-Wを洗浄する圧力・圧力・吸水・吸気圧降下、行方率で地層中の汚染層に、井戸に古い時に花い粒子が集まり、中時に中程度の粒子、速くに細粒子がアーチ空に絡み集えられリング状に形成されます。これ各種たはグリル現象と呼びますが、このグリル現象が引くと腐蝕層の発生しない自然のスクリーンが出来ます。



30

3.未災の場

釜井俊孝（京都大学名誉教授）



31

- ▶ 不思議と国民の大半は、明日は我が身とっていない
- ▶ 南関東、大阪、名古屋等の巨大都市圏で、住民多数を巻き込む大規模な宅地崩壊が起きていないからかもしれない
- ▶ この地域に未だ大地震が来ていないからにすぎないことは、専門家の間では自明
- ▶ これを「未災」という
- ▶ 未災の意識を専門家が国民と共有できない所に、問題の根幹がある



※ 確実に危険とまでは言えないが、安全であると太鼓判を押すこともできない地域を「未災の場（土地）」と呼ぶ

32

未災学とは？

- 未災学は、日本人が本来持っていた
- ▶ 「自分の身は自分で守る」
 - ▶ 「自然を良く観察する」
 - ▶ 「（将来のために）欲望を抑制する」

離見の見

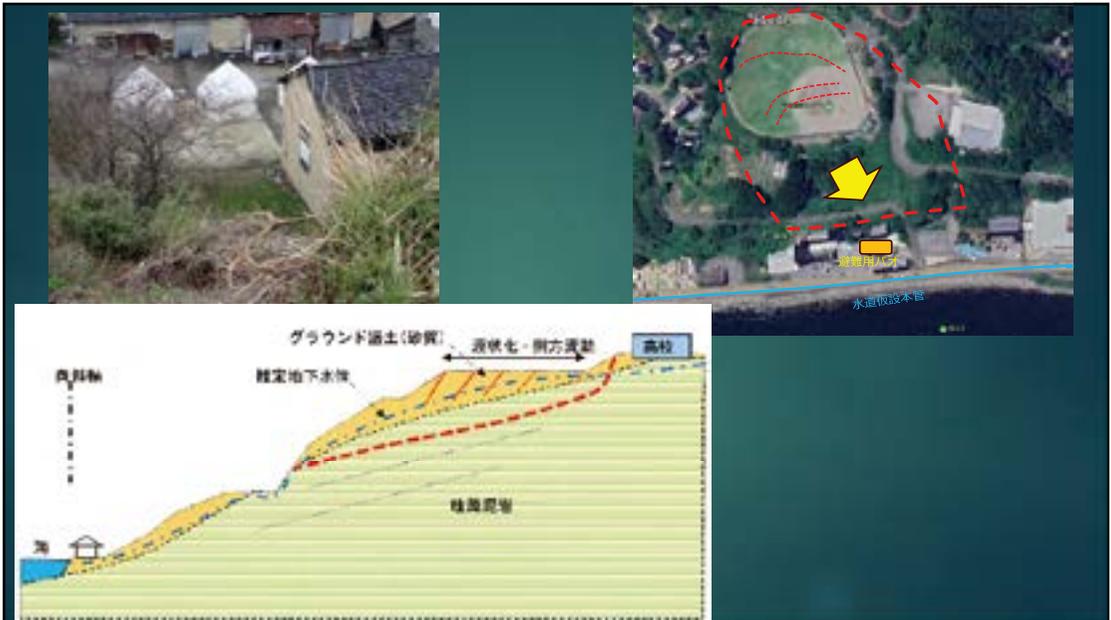
- ◆ 災害（自然）との共生を目指す学問
- ◆ 地学を基礎として、失われた日本人の「野生」を取り戻す試みである。

33

未災の場の分類

番号	素因・誘因	斜面条件	条件	斜面勾配	備考
①	トップヘビー (加速度)	盛土1	適切に施工されていない盛土	30° (1 : 1.5)	粒度・締固め度・排水条件
②		盛土2	法肩付近	30° (1 : 1.5)	地震応答が大きい(3倍?)
③		切土・自然斜面	風化・緩みが生じている斜面	45° 以上	地震応答が大きい
④	液状化	液状化砂地盤	地下水位が浅く緩い	1° ~ 6°	造成後に被震履歴がない
⑤		地すべりブロック	脆弱化後に被震履歴がない	5° ~ 20°	液状化が関係している?
⑥		扇状地	下層に粘土層が連続する	1° ~ 5°	ウォーターフィルム

34



35



36

【未災の場】
輪島市塚田川の氾濫



37

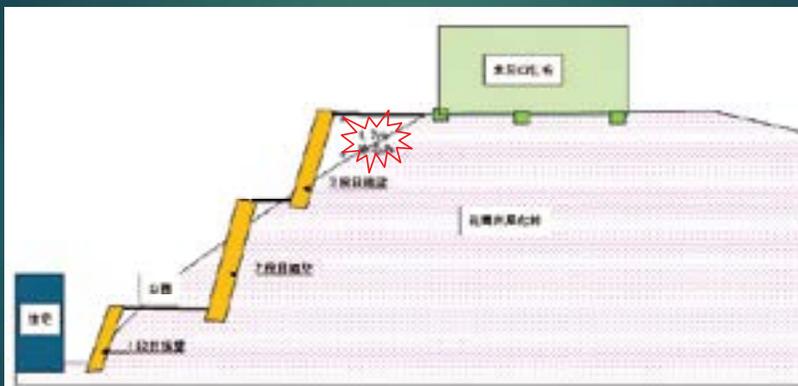


38



39

岡山県早島町の団地



40



41



42

地震で崩壊する盛土(未災の場合)



2011年東北震災（仙台市青葉区西花苑）



2024年能登半島地震（金沢市田上新町）

43

地震の発生確率，再来確率と地震フラジリティ

- ▶ $E[R] = \int R(H) \times P(H) dH$
- ▶ $R(H)$ ：地震ハザード H に対するレジリエンス値（例えば震度や地動速度に応じた回復力）
- ▶ $P(H)$ ：地震ハザードの確率分布（例：南海トラフ地震の30年以内発生確率70～80%，

地域	R0(地震発生時)	R0(非発生時)	計算式	E (R) レジリエンス期待値
高知県	0.4	1	$0.4 \times 0.8 + 1.0 \times 0.2$	0.52
岡山県	0.7	1	$0.7 \times 0.8 + 1.0 \times 0.2$	0.76
山口県	0.8	1	$0.8 \times 0.8 + 1.0 \times 0.2$	0.84

44



45

AIを活用した液状化ハザードマップの高精度化とその適用可能性について

ゼータ設計株式会社
犬飼 隆義

1

- 研究の背景
- ハザードマップ
- 広域地盤を対象とした液状化判定
- 広域地盤情報の活用例
「最新名古屋地盤図（追補版）」
- 道路橋示方書による液状化判定手法
- 地盤特性としての液状化弱点領域の抽出
- 濃尾平野地盤の工学的特性例
- 内瀬町室地区における側方流動
- AI技術
- AIを活用したハザードマップ作成イメージ

2

研究の背景

- 都市化の進んだ地域の地盤には構造物基礎やライフラインなどが乱立し、液状化に誘発される地盤の側方移動（永久変位）が構造物やライフラインに多大な影響を及ぼしている。
- 令和6年能登半島地震では、液状化被害により、側方流動やマンホールの浮き上がりによる建物の損壊が発生している。このような被害を低減するために、地盤の平面的な広がりや深度方向を考慮した液状化危険度を3次元空間的に評価しておく必要がある。
- 地域地震防災計画やハザードマップ作成の基礎資料として各所で行われている液状化予測は、地盤の液状化に対する危険度を表す液状化指数（PL値）による液状化危険度を表す一枚の平面分布図の形で整理されることが多い。しかしながら、このような整理方法は、液状化危険度の高い地区を把握する上で有用であるが、以下の問題点が指摘できる。
 - (1)危険度評価は、ある想定地震に対して行われており、評価結果はその想定地震に対して有効。
 - (2)想定地震の発生に先立ち、他の強い地震が発生した時、予測と異なった箇所での液状化の可能性を否定できない。
 - (3)地域地盤の液状化危険度を一枚の平面分布図だけで表すのは、地盤構造や地盤の工学的特性を無視したものであり、地中構造物の地震防災の視点立った工学情報として不十分。

3

ハザードマップとは

ハザードマップ：

- 自然災害から命を守るための「地域の危険を教えてくれる地図」。

ハザードマップの目的：

- 災害リスクの見える化。
- 自然災害が発生した際に、想定される危険な場所を地図上に示し、地域の災害リスクを事前に把握。
- 地域地震防災計画の基礎資料として使用。

4

液状化ハザードマップ事例【名古屋市】

- ・ 愛知県名古屋市港区を事例とした液状化危険度マップ

・ 震度分布



・ 液状化危険度分布



5

広域地盤を対象とした液状化判定

- ・ 広域地盤を対象とした液状化判定は、既存の地盤情報をもとに行われるのが一般的。
- ・ 新規に地盤調査が行われることはまずない。
- ・ このような制約条件から、広域地盤を対象とした液状化予測では、詳細法（動的FEM解析）の適用は不可。

(1) 微地形による方法：過去の液状化事例と地表面微地形との関連から液状化危険度を面的に評価。

(2) 土質と地下水による簡易液状化判定法：ボーリング資料に基づき、ボーリング地点における液状化危険度の定量的評価。結果の面的拡大が困難。

上記の液状化判定手法を用いて、液状化危険度を評価しても、以下の問題点が考えられる。

- ・ 対象地域の地盤特性を考慮した液状化弱点領域が、地質断面図的あるいは三次元空間的に抽出出来ない。

6

広域地盤情報の活用例

名 称	「最新 名古屋地盤図(追補版)」データベース
組 織	公益社団法人 地盤工学会 中部支部 「最新名古屋地盤図」改訂委員会編
構築年開始	2007年4月
対象地域	愛知県 名古屋市
入力本数	約4,200本(既存資料)+427本(新規追加)
システム	WEBブラウザ上で、起動(HTML)
データ書式	柱状図：PDF形式、解説文：HTML形式
入力内容	調査内容(場所・緯度経度・標高・層間) 柱状図(土質・N値・色調・記事) 土質試験(物理試験・一軸圧縮試験・三軸圧縮試験・圧密試験) 孔内水平荷重試験・現場透水試験
利用方法	CD-ROMで提供して、販売
活用例	地域地盤研究(防災) 建設一般(調査・計画・建設施工) 地震動・液状化予測他

7

「最新名古屋地盤図(追補版)」

「最新名古屋地盤図(追補版)」
公益社団法人 地盤工学会 中部支部
「最新名古屋地盤図」改訂委員会 編
平成24年11月

▲初期メニュー

柱状図番号	柱状図 土質(N値)	孔内水平荷重透水 新設区画 (Q50)	備考
E73110	O		追補版
E73110	O		追補版
E73110	O		追補版

▲検索結果画面

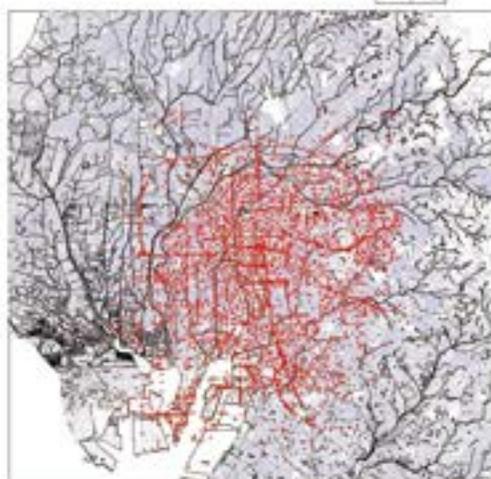
柱状図表示 (PDF)

▲解説欄

柱状図検索平面図 (水色: 新規F-9箇所)

8

「最新名古屋地盤図（追補版）」データベース



9

道路橋示方書における液状化判定手法 【液状化判定対象土層】

- 沖積層の土層で、以下の1)から3)の条件を全てに該当する場合には、地震時に液状化が生じる可能性がある。

- 1) 地下水位が地表面から10m以内にあり、かつ、地表面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- 2) 細粒分含有率FCが35%以下の土層またはFCが35%を超えても塑性指数Ipが15以下の土層
- 3) 50%粒径D50が10mm以下で、かつ、10%粒径D10が1mm以下である土層

参考文献：道路橋示方書・同解説、Ⅴ 耐震設計編、平成29年11月、
公益社団法人 日本道路協会、pp161-162

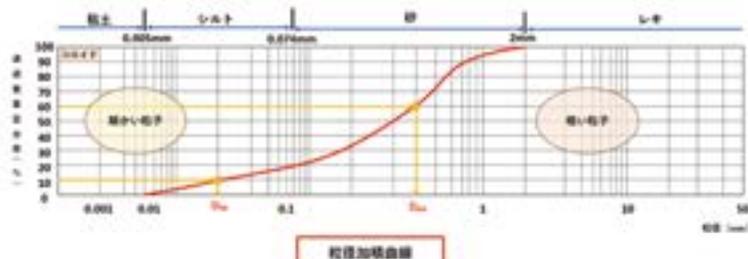
10

道路橋示方書における液状化判定手法 【液状化判定対象土層】

■ 細粒分含有率：

0.0075		0.075		0.25		0.85		2.00		4.75		19		75	
粘土		シルト		細砂		中砂		粗砂		細礫		中礫		粗礫	
細粒分								粗粒分							

■ 50%粒径、10%粒径：



11

道路橋示方書における液状化判定手法 【液状化に対する抵抗率FL】(1)

(3) 液状化に対する抵抗率 F_L をレベル1地震動及びレベル2地震動のそれぞれに対して式 1 により算出し、この値が1.0以下の土層については橋に影響を与える液状化が生じると判定する。

$$F_L = R/L \quad \dots\dots\dots 1$$

ここに、

- F_L ：液状化に対する抵抗率
- R ：動的せん断強度比
- L ：地震時せん断応力比

参考文献：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、平成29年11月、公益社団法人 日本道路協会、pp162-163

12

道路橋示方書における液状化判定手法 【液状化に対する抵抗率FL】(2)

④) 動的せん断強度比 r_d は、レベル1地震動及びレベル2地震動のそれぞれに対して式 2 によることを標準とする。

$$r_d = r_{d1} R_L \quad \text{----- 2}$$

(レベル1地震動及びレベル2地震動(タイプ1)の場合)
 $r_{d1} = 1.0$
 (レベル2地震動(タイプ2)の場合)

$$r_{d1} = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases} \quad \text{----- 3}$$

$$R_L = \begin{cases} 0.9982 \sqrt{0.85N_s} - 2.1 / 1.7 & (N_s < 14) \\ 0.9982 \sqrt{N_s / 1.7} + 1.6 \times 10^{-4} (N_s - 14)^{1.1} (14 \leq N_s) \end{cases} \quad \text{----- 4}$$

$$N_s = \begin{cases} r_{sc}(N_1 - 2.47) - 2.47 & (D_{50} < 2\text{mm}) \\ \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 & (D_{50} \geq 2\text{mm}) \end{cases} \quad \text{----- 5}$$

$$N_1 = 170N_s (s_{pc} + 70) \quad \text{----- 6}$$

$$r_{sc} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 30\%) \\ FC + 20 / 30 & (30\% \leq FC < 40\%) \\ FC - 10 / 12 & (40\% \leq FC) \end{cases} \quad \text{----- 7}$$

ここに、

r_{d1} : 地震動特性による修正係数

R_L : 繰返し三軸強度比

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効土載圧 100kN/m^2 相当に換算した N 値

N_s : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

s_{pc} : 標準貫入試験を行ったときの地表面からの深さにおける有効土載圧 (kN/m^2)

r_{sc} : 細粒分含有率による N 値の修正係数

FC : 細粒分含有率 (%) (粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 50% 粒径 (mm)

参考文献: 道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、平成29年11月、公益社団法人 日本道路協会、pp162-163

13

道路橋示方書における液状化判定手法 【液状化に対する抵抗率FL】(3)

⑤) 地表面せん断応力比 r_s は、レベル1地震動及びレベル2地震動のそれぞれに対して式 8 によることを標準とする。

$$r_s = r_s k_{sd} r_{sc} \quad \text{----- 8}$$

$$r_s = 1.0 - 0.015e \quad \text{----- 9}$$

$$k_{sd} = r_{sd} k_{sd0} \quad \text{----- 10}$$

ここに、

r_s : 地表面せん断応力比の深さ方向の修正係数

k_{sd} : 液状化の判定に用いる地表面の設計水平震度 (西谷五人により小震点以下2倍とする)

r_{sc} : 地域別修正係数で、レベル1地震動に対しては3.4に規定するレベル1地震動の地域別修正係数 r_{1c} とする。レベル2地震動(タイプ1)に対しては3.4に規定する r_{2c} 。また、レベル2地震動(タイプ2)に対しては3.4に規定する r_{2c} とする。

k_{sd0} : 液状化の判定に用いる地表面の設計水平震度の標準値

e : 地表面からの深さ e における全土載圧 (kN/m^2)

s_{pc} : 地表面からの深さ e における有効土載圧 (kN/m^2)

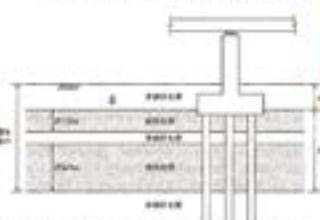
e : 地表面からの深さ (cm)

参考文献: 道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、平成29年11月、公益社団法人 日本道路協会、pp162-163

14

道路橋示方書における液状化判定手法 【地盤の流動力】

- 流動力を評価するにあたって、液状化指数（PL）で評価している。
- 液状化指数は、地震時に地盤が液状化する可能性を示す数値であり、地盤の特性や外部からの力（地震動）に基づいて計算する。
- この指数が高いほど、液状化のリスクが高い。
- 液状化指数は、液状化に対する抵抗力（FL値）を基に算出され、地層毎の特性を考慮して評価。



$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) (10 - 0.5x) dx$$

FL：液状化に対する抵抗力
x：地表面からの深さ

表 4.4.2 非液状化層中の流動力の修正係数 c_{L2}

液状化指数 P_L (m^2)	修正係数 c_{L2}
$P_L \leq 5$	0
$5 < P_L \leq 20$	$(0.2P_L - 1)/3$
$20 < P_L$	1

図 4.4.2 液状化層と非液状化層中の流動力の修正係数 c_{L2} の算出方法を示す。なお、 c_{L2} は、 P_L の値に応じて変化する。

参考文献：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、平成29年11月、公益社団法人 日本道路協会、pp110-113

15

地盤特性としての液状化弱点領域抽出

対象地域の地盤概況

- 地盤資料が収集され、稲沢市の協力により実施した1944年の東南海地震当時における噴砂・噴水事例に関するアンケート調査により、当時の液状化履歴がかなり明確になっている稲沢市域の地盤を対象。
- 最終氷期最盛期後の急激な海面上昇にともない、現在より6,000年前頃の最高海水準期の海岸線は稲沢市域を横切り、大垣付近まで到達。
- 地質概要は、洪積世末期の礫層（第一礫層）上に、沖積層が堆積。



図 1 稲沢市域における地盤の概況
（稲沢市提供）に基き

16

地盤特性としての液状化弱点領域抽出

対象地域の液状化履歴

- ・東南海地震の際に、噴砂・噴水現象あり
- ・アンケート調査により、確認。
- ・アンケートは、地震当時、年齢が10才以上で、稲沢市に在住する者に対して、地震当時に居住した敷地およびこれに隣接する田畑等を対象として実施。



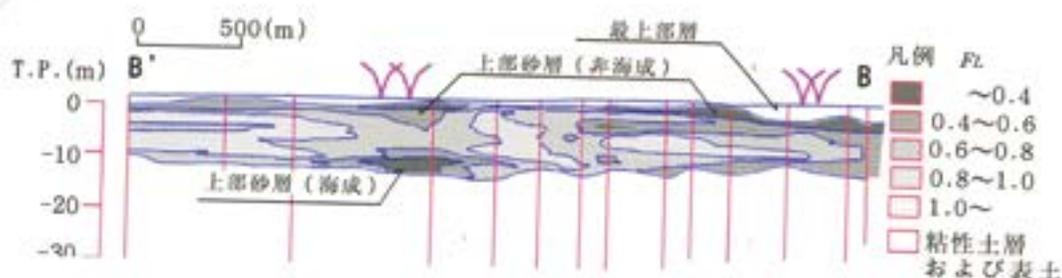
図 4 稲沢市域における東南海地震時の液状化および調査地点位置

液状化判定対象断面位置

17

地盤特性としての液状化弱点領域抽出

一律地表面最大加速度による液状化危険箇所の抽出例



(a) 「道路橋」(上部砂層の $D_{50}=0.450\text{mm}$)

図 11 断面 B-B' における等 F_2 値線

18

濃尾平野地盤の工学的特性例



位置図

臨海部
(東西断面)

地層名	地層年代	地層構成		地層名	地層年代	地層構成	
		種類	記号			種類	記号
河川相	沖積	砂質土	Amcm	河川相	沖積	砂質土	Amc
	沖積	砂質土	Amcc		沖積	砂質土	Amcc
	沖積	砂質土	Amc		沖積	砂質土	Amc
	沖積	砂質土	Amcm		沖積	砂質土	Amcc
	沖積	砂質土	Am		沖積	砂質土	Amc
扇状地相	沖積	砂質土	Sc	扇状地相	沖積	砂質土	Amcc
	沖積	砂質土	Sc		沖積	砂質土	Amcc
第一層相	沖積	砂質土	St	第一層相	沖積	砂質土	St
	沖積	砂質土	St		沖積	砂質土	St
湖沼相	上流	沖積	砂質土	湖沼相	上流	沖積	砂質土
	中流	沖積	砂質土		中流	沖積	砂質土
	下流	沖積	砂質土	湖沼相	下流	沖積	砂質土
	沖積	砂質土	DmLa		沖積	砂質土	DmLa
湖沼物産相	沖積	砂質土	Dm	湖沼物産相	沖積	砂質土	Dm
	沖積	砂質土	Dm		沖積	砂質土	Dm
	沖積	砂質土	Dm		沖積	砂質土	Dm
湖沼相	沖積	砂質土	T				

中央部
(南北断面)

地層層序表

19

細粒分含有率

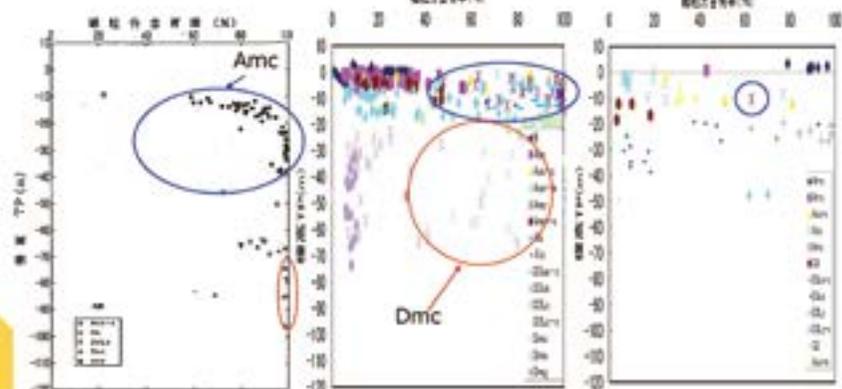
Amc : 鍋田 (60~100%)、大江 (50~100%)、清洲 (60%付近)

Dmc : 鍋田 (100%付近)、大江 (40~80%)、清洲 (分布無)

鍋田地域

大江地域

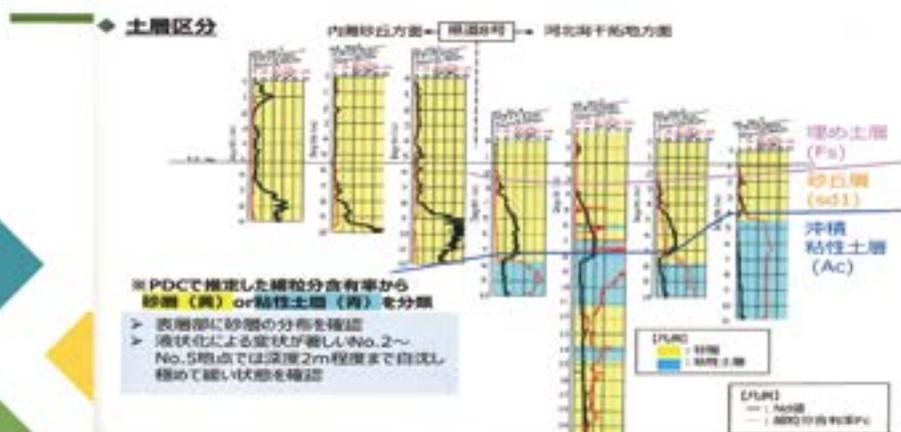
清洲地域



20

内灘町室地区における側方流動

地質調査結果および土層区分



21

AIとは

- AI（人工知能）は、人間の知的行動を模倣する技術であり、学習、推論、判断を行う能力を持つコンピュータープログラムを指します。
- **AIの定義**
- AI（Artificial Intelligence）は、人工的に作られた知能を意味し、コンピュータが人間のように認識、判断、推論を行う技術です。AIは、データを学習し、経験を積むことで自己学習能力を持ち、様々なタスクを実行できるようになります。
- **AIの歴史**
- AIの概念は1950年代から存在しており、特に1956年にダートマス大学で行われた研究会で「AI」という言葉が初めて使用されました。その後、AIは数回のブームと冬の時代を経て、現在のようにながら私たちの生活に浸透しています。最近のAIブームは、コンピュータの処理能力の向上とインターネットの普及によって引き起こされました。

参照：Copilot Serch

22

AIを活用したハザードマップ作成イメージ

- 液状化判定：柱状図、N値、単位体積重量、粒度組成というような土質情報が必要。
- 名古屋市は、「最新名古屋地盤図」が発刊。柱状図の位置情報、柱状図が整理済。欠落情報がある場合でのAI技術による液状化判定。
- 広域地盤情報が整備されていない地域や能登半島地震での被災地に対して、ハザードマップの高精度化。
- 側方流動を反映したハザードマップ作成。



- 「最新名古屋地盤図（追補版）」の地盤情報を用いた液状化判定（FL法、PL法）
- 細粒分含有率FC、50%粒径D50等を欠落させ、AI技術を用いた液状化判定
- 地盤特性を反映した液状化ハザードマップ
- 内灘町室地区の地質調査結果を使用。AI技術を活用したハザードマップの高精度化



大宰天満宮奉納当代博多図

松寿庵竹森道悦奉上

熊本義里人道圓濟作

元禄十一戊寅年(1698) 九月頃カ
118.3x101.8cm 紙本著色

1

予期せざる地下水の影響により発生した地すべり
Landslides triggered by unexpected effects of ground water

20251024

東畑郁生

Ikuo Towhata
at IML, Kyushu University



2

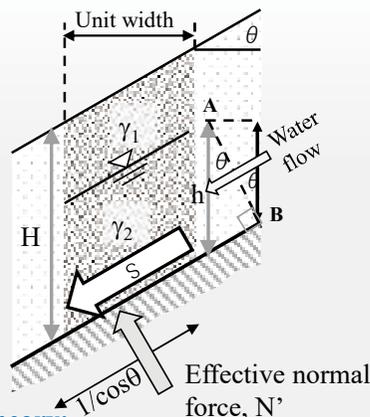
Contents

1. Conventional soil-mechanic view
2. Coseismic landslides 地震地すべり
3. Rainfall-induced landslides
4. Landslides under gravity effects
5. Counter measures / mitigation
6. Reservoir-induced seismicity

3

Soil mechanics approach: Evaluation of slope instability with ground water effects

Depth of water = h



Weight of soil $W = \gamma_1(H-h) + \gamma_2h$
 Normal force $N = W \cos \theta$
 Shear force $S = W \sin \theta$

Normal stress $\sigma = N / (1/\cos \theta) = W \cos^2 \theta$
 Pore water pressure $u = \gamma_w h \cos^2 \theta$
 Effective stress $= (W - \gamma_w h) \cos^2 \theta$
 Shear strength $= (W - \gamma_w h) \cos^2 \theta \tan \phi + c$
 Shear stress $\tau = W \sin \theta \cos \theta$

Factor of safety $= [(W - \gamma_w h) \cos^2 \theta \tan \phi + c] / (W \sin \theta \cos \theta)$

This is a scientific theory;
Water is provided from the slope surface (rain water),
Water flow is two-dimensional, and
Bottom of surface layer is impervious.

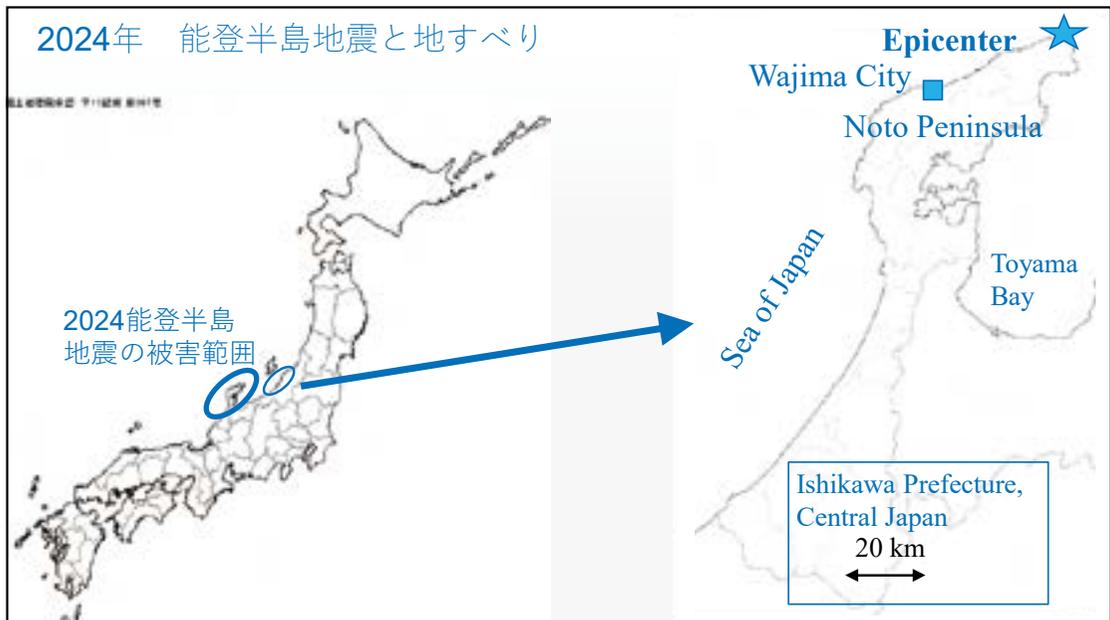
Reality may be substantially different.

4

Contents

1. Conventional soil-mechanic view
2. Coseismic landslides 地震地すべり
3. Rainfall-induced landslides
4. Landslides under gravity effects
5. Counter measures / mitigation
6. Reservoir-induced seismicity

5



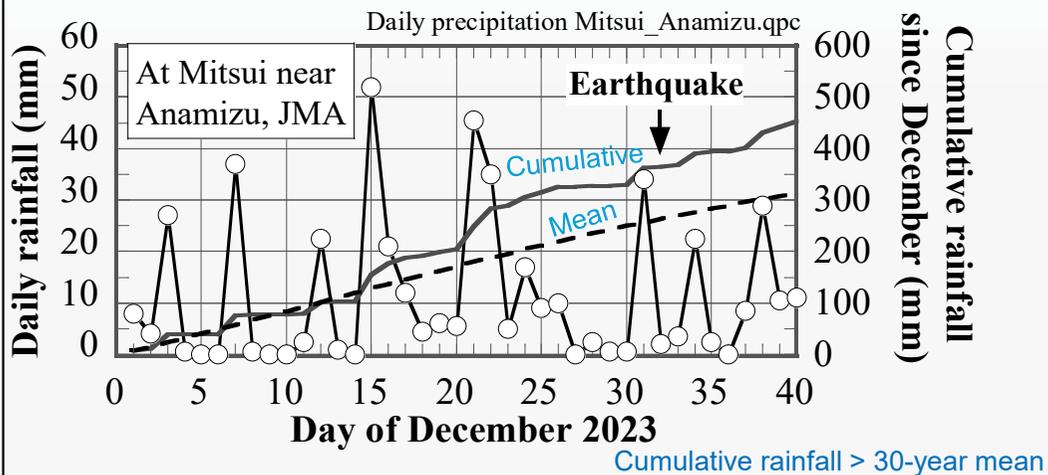
6

Slope failure in Anamizu Town



7

Rainfall record at JMA Station near Anamizu



8



9

Google earth view
Baseball field: original mountain was excavated and soil is exposed

Problem of sports facility at hill top:

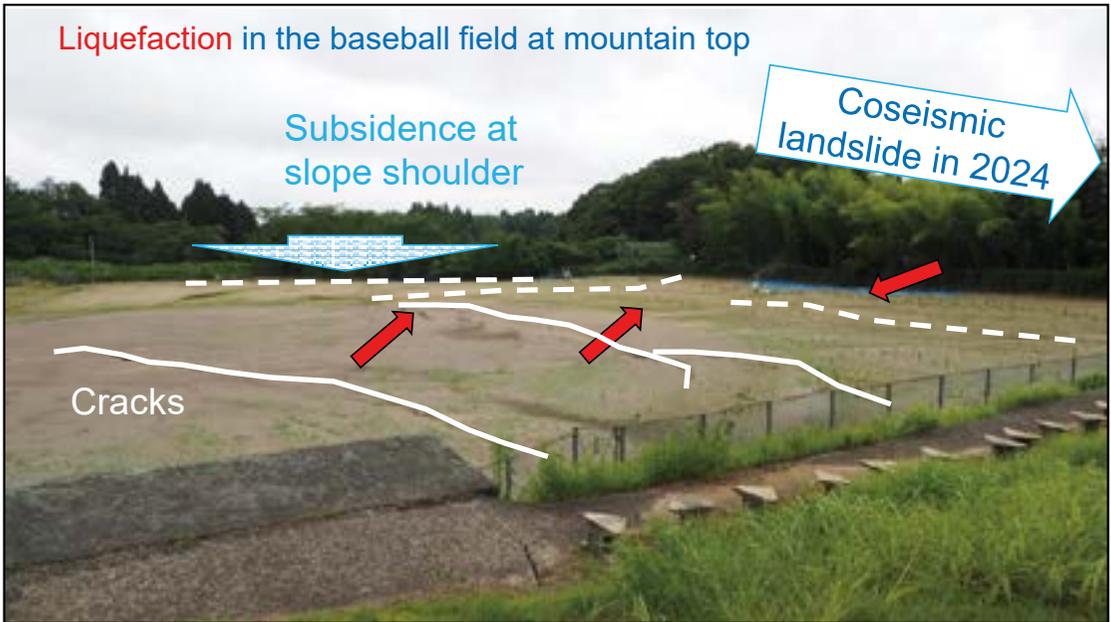
- Rain water is not absorbed by vegetation.
- Increased infiltration into top of the slope.
- Sports facilities are designed and constructed for rain water to promptly infiltrate into soil.
- Slope instability

Baseball field

Landslide

Google Map

10



11

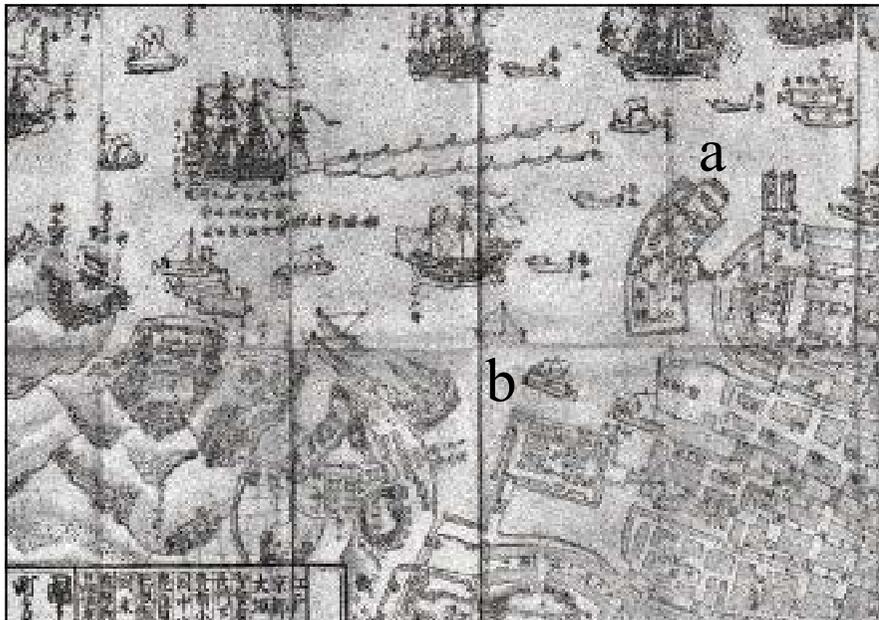


12

Geological strata inclined towards the failed slope



13



長崎 1778年らしい
a 出島
b 唐人町
いずれも人工島

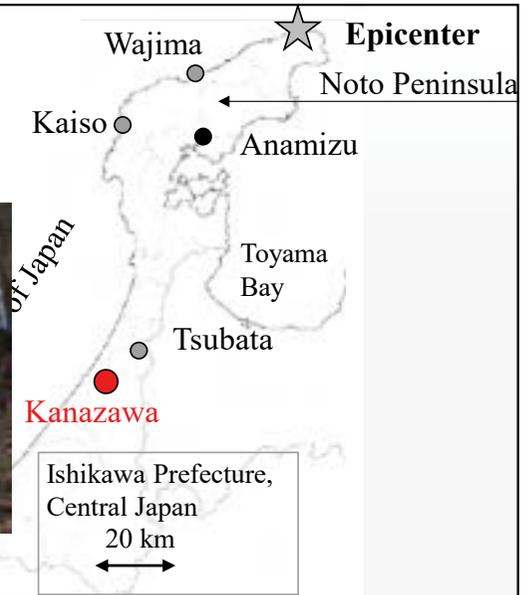
14

Kanazawa City 谷埋め盛土

Filling of a small valley
at Hokuryo High School 北陵高校



A small valley had been filled with soil.

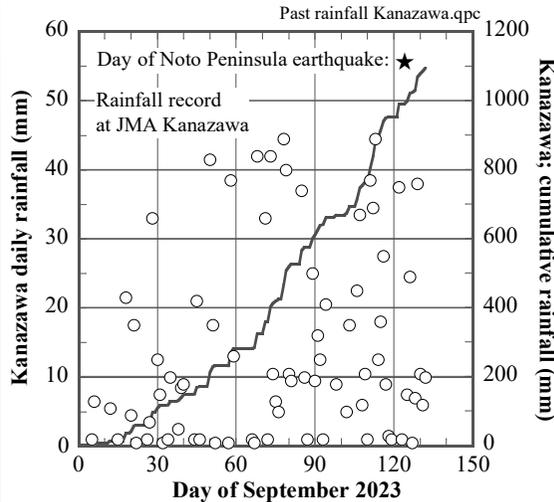


15



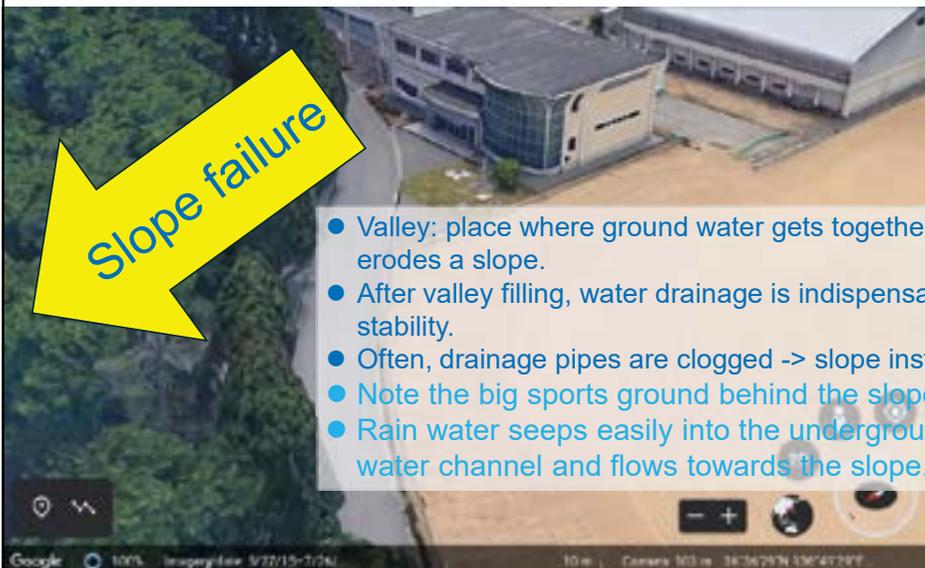
16

Rainfall record at JMA Kanazawa



17

View of the site in July 2015 谷とは地下水が集まる場所



18



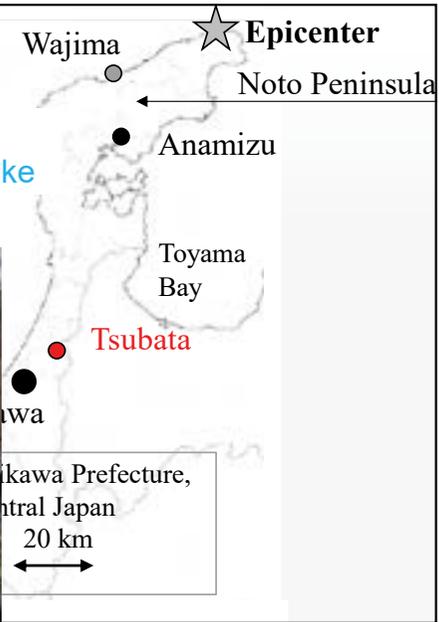
19



20

Residential development in
Tsubata Town 津幡町

Continued water drainage from the site one month and even six months after the earthquake

Wajima
 Epicenter
 Noto Peninsula
 Anamizu
 Toyama Bay
 Tsubata
 Toyama Prefecture,
 Central Japan
 20 km

21

Water reservoir next to the failed fill: one of the sources of water?



North

Both residential fill and this reservoir were constructed by stages in late 20th Century as shown in the next slide

22

GSI maps of the Tsubata site in 1980 and 2000

1980



Future residential development
No reservoir yet

2000



元の小さな谷に盛土されている

貯水池から側方の宅地盛土へも水が浸透していた可能性は？
谷埋め盛土宅地の排水不十分か？
災害が予見できたか？できた！後述。

23

Contents

1. Conventional soil-mechanic view
2. Coseismic landslides 地震地すべり
3. Rainfall-induced landslides
4. Landslides under gravity effects
5. Counter measures / mitigation
6. Reservoir-induced seismicity

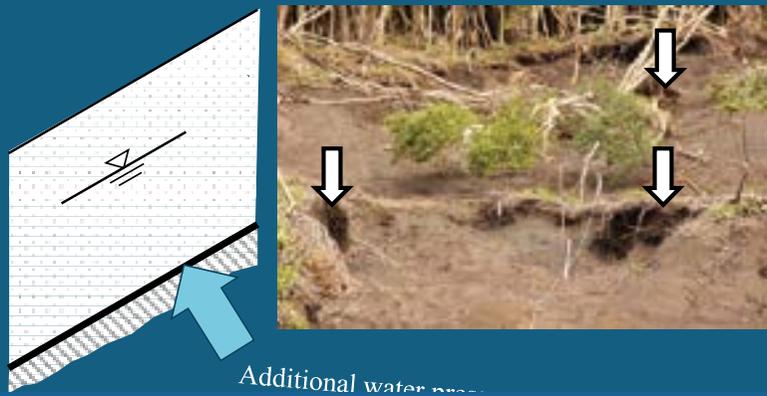
24

2013年伊豆大島豪雨時の斜面崩壊



25

Complicated reality: パイピング孔 豪雨時の地下水噴出 piping holes detected after slope failure



下面からの高い水圧供給は、従来の地盤工学では考慮されていない。
また、具体的な水圧値は予測不可能。

26

さらにパイピング孔の例 2023年太宰府



27

パイピング孔の例 2020年熊本県葦北



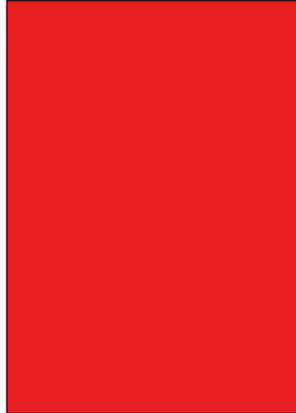
28

Ejection of tectonic water through faults

1960年代の松代群発地震：大量の地下水噴出があった：地すべり

Example: Makiuchi牧内 landslide during Matsushiro earthquake swarm in Japan
Ejected water triggered 3 landslides.

信濃毎日新聞記事→
水火山説



On August 13th, 2019



29

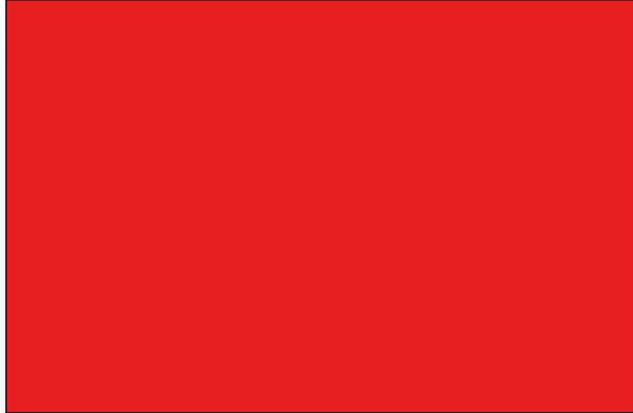
Contents

1. Conventional soil-mechanic view
2. Coseismic landslides 地震地すべり
3. Rainfall-induced landslides
4. Landslides under gravity effects
5. Counter measures / mitigation
6. Reservoir-induced seismicity

30

2009 earthquake of Mw=6.3 hit Shizuoka, Japan.
Highway embankment collapsed because ...

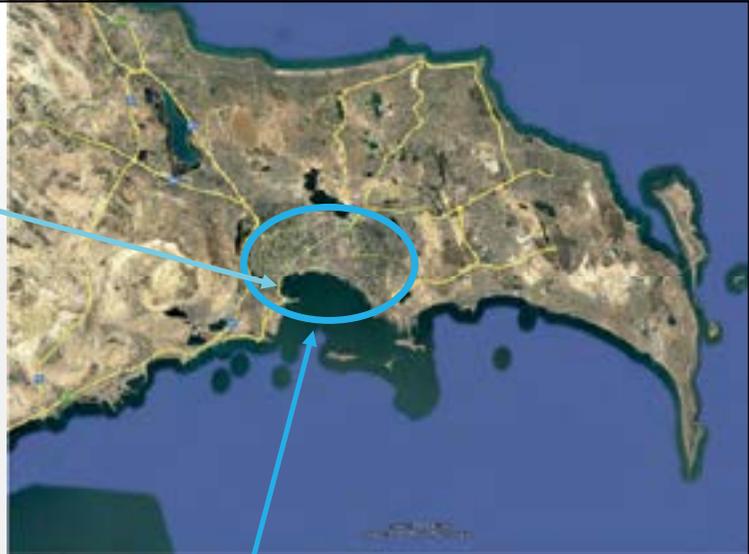
東名高速の盛土に前後の給
料から地下水浸透
→盛土材料の泥岩が劣化
→静岡地震で崩壊



NEXCO Central の写真

31

**Bayil Landslide,
Badamdar, Baku,
Azerbaijan**



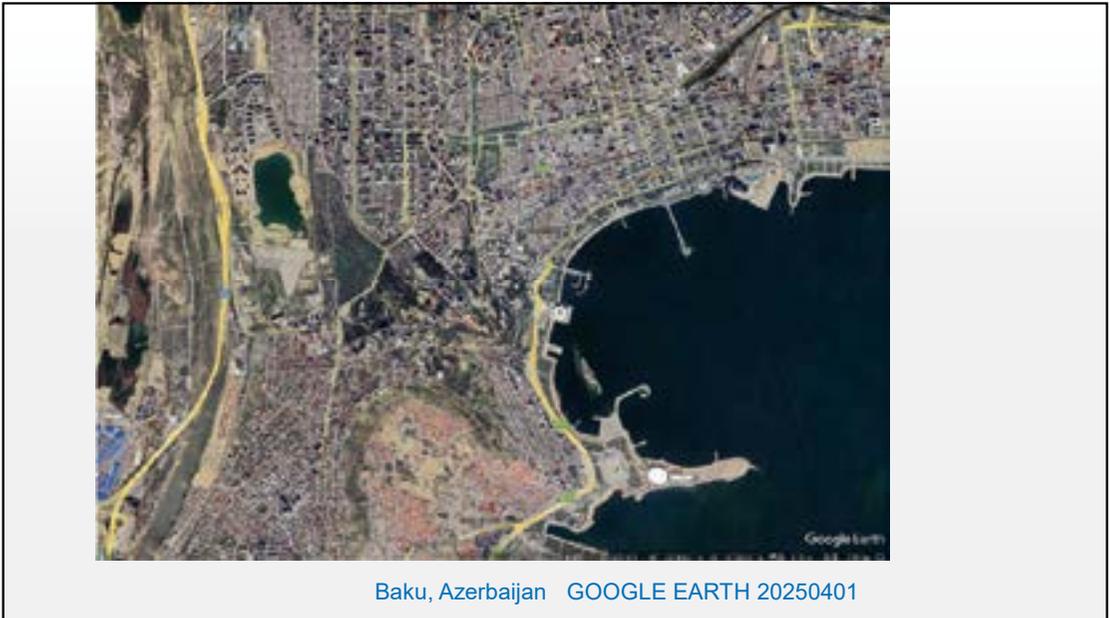
アゼルバイジャンのバクー

Baku, Azerbaijan GOOGLE EARTH 20250401

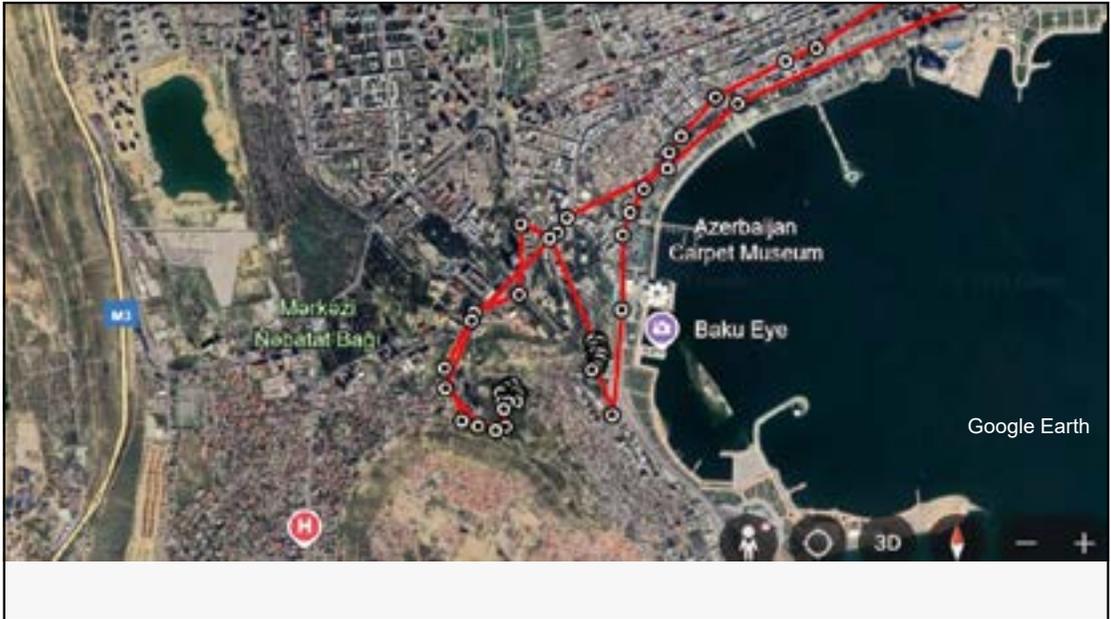
32



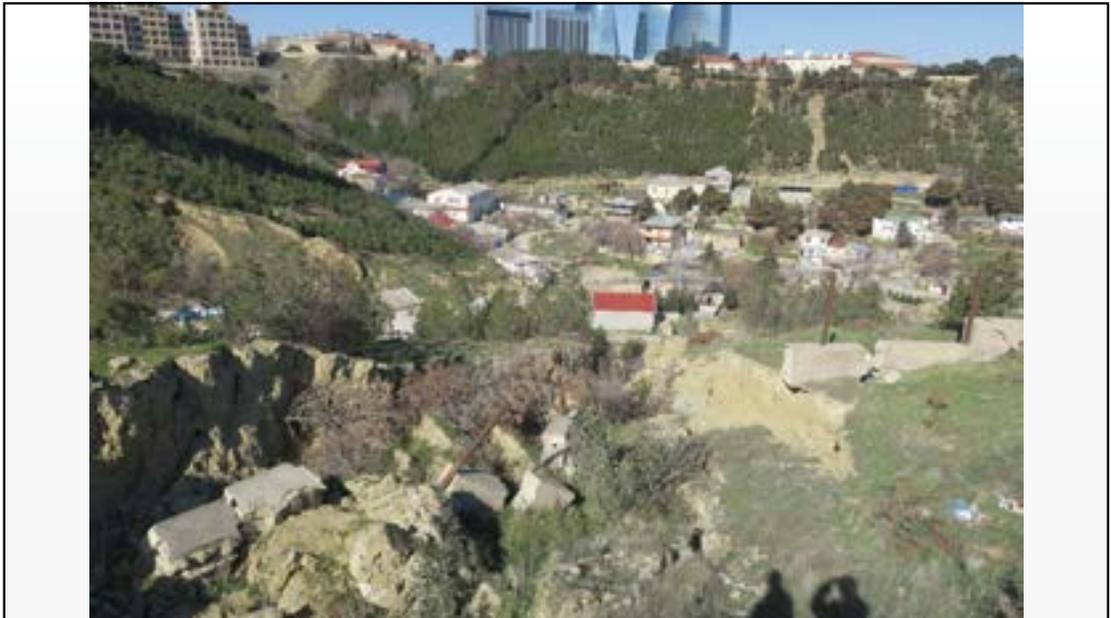
33



34



35



36



37

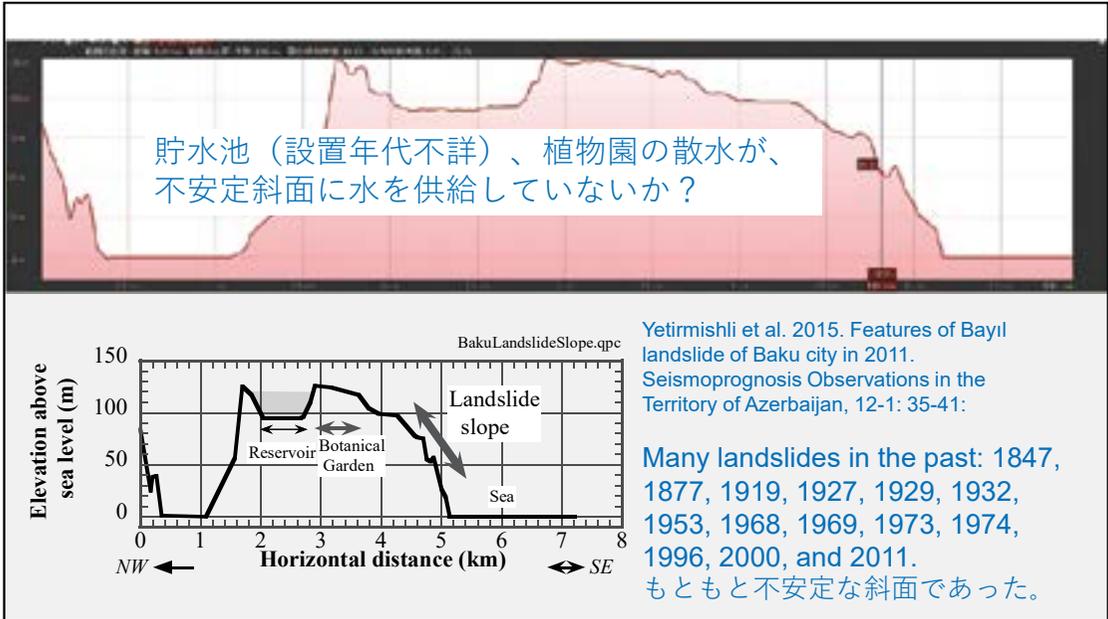


Qanlı Göl: Bloody Lake

Qurd Qapısı Qəbiristanlığı: Wolf Gate Cemetery

Mərkəzi Nəbatat Bağı: Central Botanical Garden established in 1936: <https://azerbaijan.travel/central-botanical-garden-as-of-2025101>

38



39



40



西吉
1920 海原
地震

黄土斜面の
地震地すべり
河道閉塞の跡

41

黄土高原 灌溉水過剰と地すべり誘起の事例 黒方台

Peng, D., et al. (2019) Hydrological response of loess slopes with reference to widespread landslide events in the Heifangtai terrace, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences* 171: 259-276 (Paper 8684).

王志荣, 吴玮江, 周自强 (2004) 甘肃黄土台塬区农业过量灌溉引起的滑坡灾害. *中国地质灾害与防治学报* 15(3): 43-46 (Paper 8741).

大水漫灌 (時期を定めて年3回くらい大量に灌溉する) 水無駄⇔点滴灌溉.

42



43

Vajont Dam in Italy, 1963

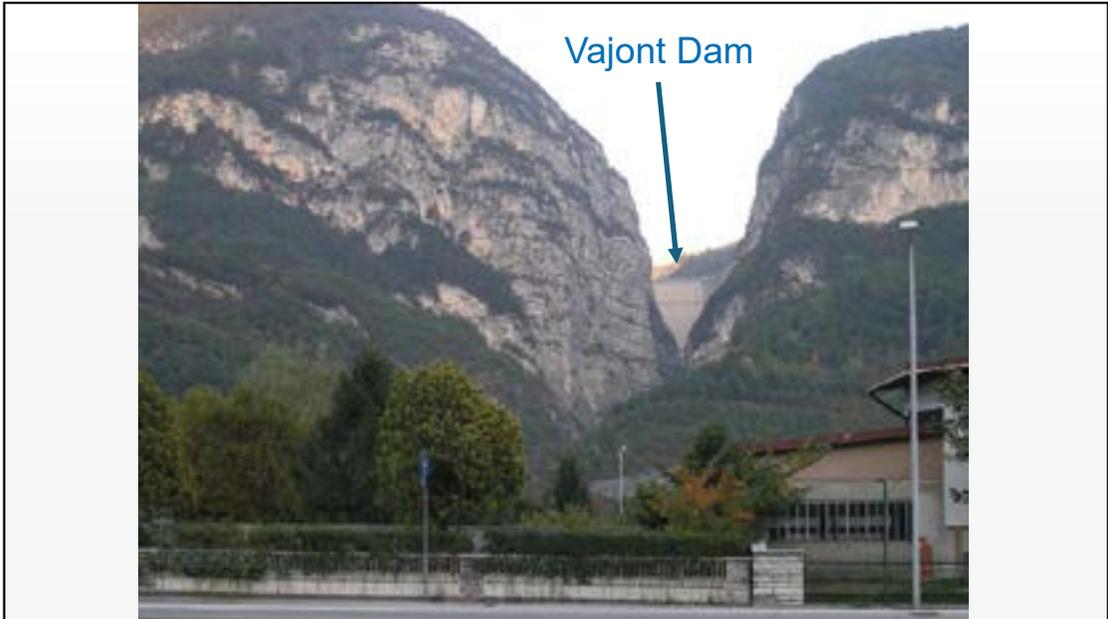
Landslide-induced tsunami killed 1919 residents.



Longarone after the disaster

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%B3%E3%83%88%E3%83%80%E3%83%A0#/media/File:Vajont1963usarmy.jpg>

44



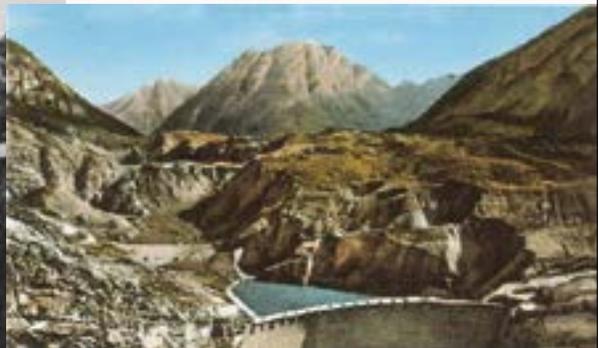
45

Vajont Dam before failure

<http://www.bottaonline.net/FotoVajont/invaso1.jpg>



Consequence in a picture post card



46

Geological cross section

(for reference, refer to Towhata's lecture note)

Weak layer at hundreds of meters below surface
Reservoir water pressure came into the weak layer and reduced effective stress → instability

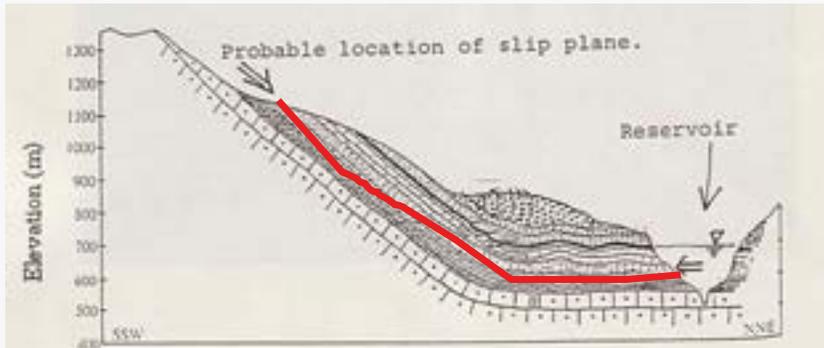


Fig.1-1 Rock sliding at Vajont Dam in Italy.

47

Longarone in 2010



48

Contents

1. Conventional soil-mechanic view
2. Coseismic landslides 地震地すべり
3. Rainfall-induced landslides
4. Landslides under gravity effects
5. Counter measures / mitigation
6. Reservoir-induced seismicity

49

対策

- 排水
- **斜面観測と早期警報**
- 補強
- さらに擁壁など…



昭和30年代の斜面傾斜センサー：伸縮計の無い時代の斜面観測

50

Aerial view of Tsubata 津幡 site in June 2022 (1.5 years before the earthquake)



Pre-seismic views at five sites with and without slope failure



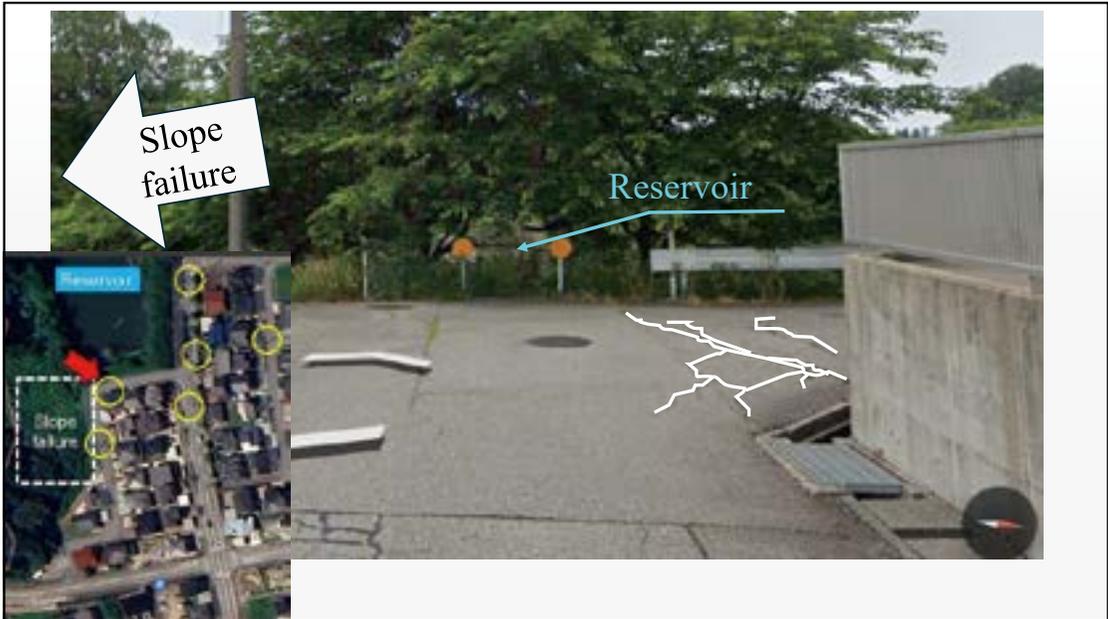
51

Google Street View in June 2022: 1.5 years before the earthquake



Cracks in the pavement suggested block movement of soil towards the slope 1.5 years before the earthquake. Typical shape of the cracks is

52



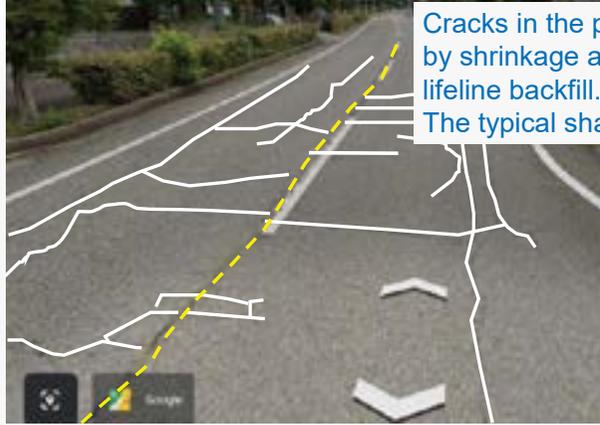
53



54

Pavement far from slopes;
Photo in August 2023

Google Earth
Street View



Cracks in the pavement made
by shrinkage and subsidence in
lifeline backfill.
The typical shape is rectangular



55

One more photo of cracks in August 2023;
Concentrated cracks possibly due to
subsidence of pipeline backfill?



56

Cracks in road pavement
→ Useful signal of potential slope failure:



57

Contents

1. Conventional soil-mechanic view
2. Coseismic landslides 地震地すべり
3. Rainfall-induced landslides
4. Landslides under gravity effects
5. Counter measures / mitigation
6. Reservoir-induced seismicity

58

Oued Fodda dam, Algeria; 89m high; one of the earliest reservoir-induced earthquakes



LE BARRAGE DE L'OUED FODDA
Le barrage en ciment. Le lac. Le réservoir qui s'élève



Gourinard, Y., Thévenin, J. (1952) La Géologie et les problèmes de l'eau en Algérie. Le barrage de l'Oued Fodda, Congr. GdL Intern., Compt. Rend 19c. Alger, 155-181.

Completion and impounding in 1932;
Seismic tremors in 1933

59

**Reservoir-induced seismicity
Fault rupture triggered by diffusion of reservoir water pressure**



Koyna Dam, India

60

Reservoir-induced seismicity

Fault rupture triggered by permeation of reservoir water pressure



Nurek Dam, Tajikistan; 300-m high



61

Reservoir-induced seismicity

Fault rupture triggered by permeation of reservoir water pressure



Hoover Dam, USA

62

Reservoir-induced seismicity

Fault rupture triggered by permeation of reservoir water pressure



Aswan High Dam, Egypt

and many more

63

紫坪鋪 Zipingpu Dam, China, 2008

コンクリート表面遮水式ロックフィルダム



64

2008年四川省大地震 犠牲者8.7万人



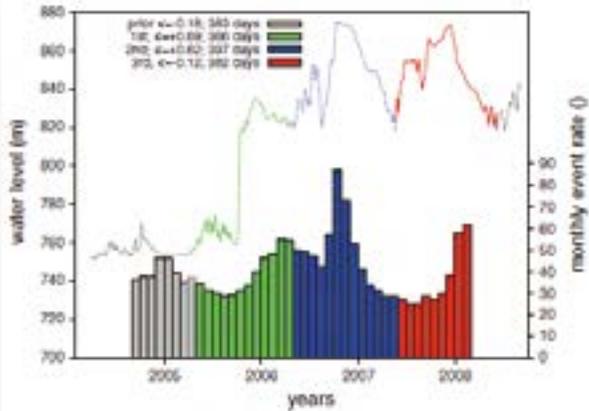
65

2008年四川省大地震龍門山断層と 紫坪埔ダムZipingpu Damとの位置関係 ダムは震央に近い



66

Zipingpu Dam: correlation between water level and number of earthquakes



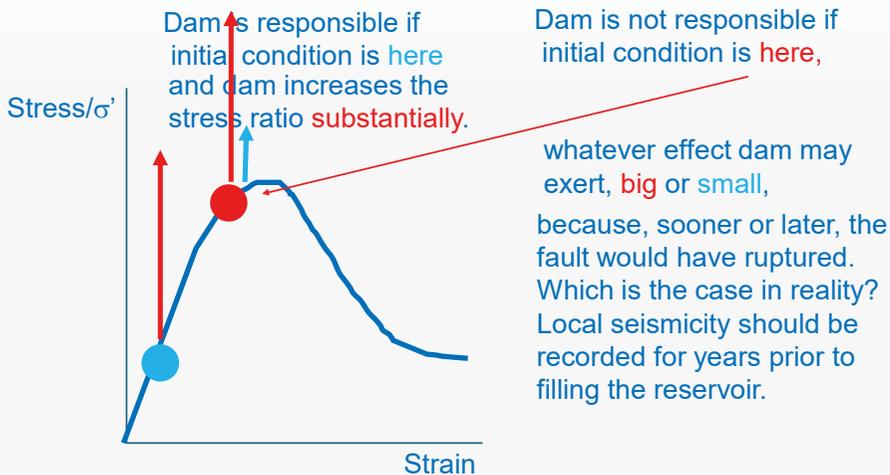
紫坪鋪ダムとWenchuan地震との関係は、結論が出ていない。
しかし、もう一つの論点がある。

Klose, C.D. (2012) Evidence for anthropogenic surface loading as trigger mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake, *Environmental Earth Sciences* 66(5): 1439–1447.

67

Forensic idea on reservoir-induced earthquakes

How significant is the responsibility of dam construction?
Study stress (ratio) -strain state in a fault:



68

まとめ

自然には、技術的に無視されてきた謎が未だに多い。
水圧と地震誘起の問題は、最近の、廃棄物の近くへの封入、天然ガス採取などで、重視されている。



ご清聴ありがとうございました

2025年ミャンマー（マンダレー）地震に伴う 地盤被害の現地調査とその知見

九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授
九州大学 共創学部(専任教員)
一般社団法人 GLOSS研究会 理事長
インド工科大学 マドラス校 非常勤教授

ハザリカ ヘマンタ



1

本日の報告内容

- ◆ 学会調査団の構成
- ◆ 調査ルートと日程
- ◆ 地震に関する基礎情報
- ◆ 調査項目・調査結果
 - 1. 交通インフラ ◆ 特に地盤被害（液状化および流動性破壊に伴う被害）
 - 2. 建物
 - 3. 断層
 - 4. 文化遺産

2

学会調査団の構成

地盤工学会

九州大学

ハザリカ ヘマンタ

東京大学名誉教授/東畑建築事務所 取締役

東畑 郁生

川崎地質株式会社

窪田 上太郎 (幹事長)

国際地盤工学会「Geotechnology for Natural Hazards」に関するアジア地域技術委員会ATC3(委員長：早稲田大学岡村未対教授)のメンバー

ミャンマー地質学会 (Myanmar Geosciences Society: MGS)

Prof. Sandy Chit Ko

Professor, Department of Geology, Maubin University, Ayeyarwady Region

Dr. Kaung Si Thu

Lecturer, Department of Geology, Dagon University, Yangon Region

Dr. Tun Tun Min

Lecturer, Department of Geology, West Yangon University, Yangon Region

基礎地盤コンサルタンツ シンガポール支社

Dr. Myat Myat Phyo Phyo

Assistant Lab manager, Kiso Jiban Consultants Co., Ltd., Singapore Branch

3

調査ルートと日程

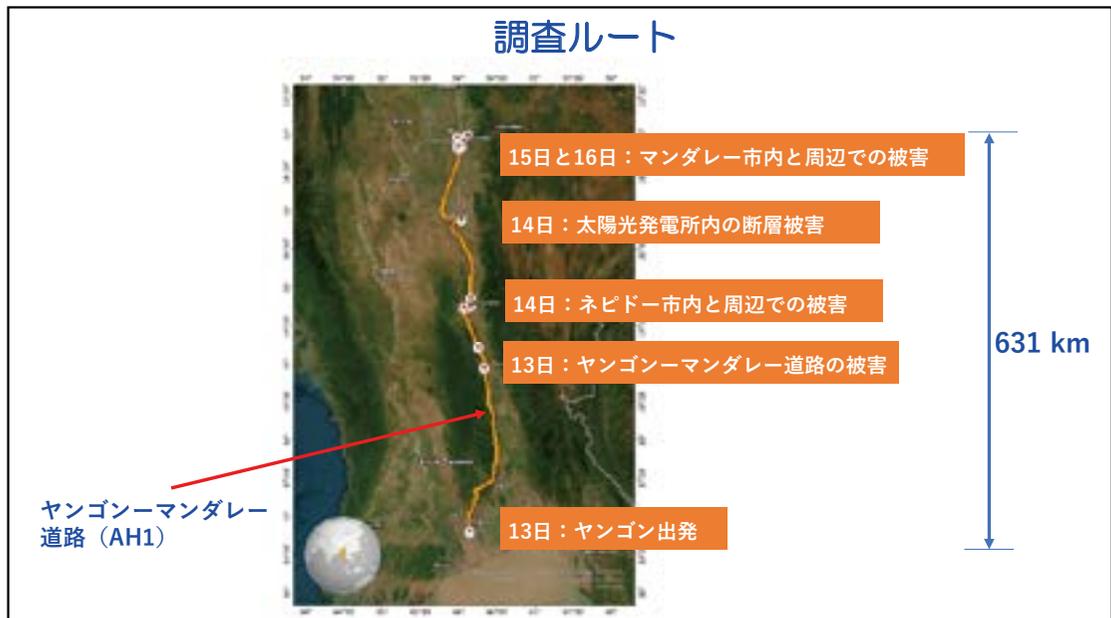
4

地震の震源地



5

調査ルート



6

調査日程と調査活動

➤ Day 1 (6月13日) @ヤンゴン

- ◆ MGSでキックオフミーティング
- ◆ 車でネピドーまで移動 (ヤンゴンーマンダレー道路)
- ◆ 途中で道路被害の調査

➤ Day 2 (6月14日) @ネピドー

- ◆ 建物被害(鉄道局集合住宅)
- ◆ 液状化に伴う被害(小学校)
- ◆ 断層に伴う被害 (こども病院)
- ◆ マンダレーへ移動
- ◆ 途中で断層に伴う被害 (太陽光発電所内のオフセット)

➤ Day 3 (6月15日) @マンダレー

- ◆ 断層と道路橋 (鉄道橋) の被害 (サガイン地域)
- ◆ 液状化に伴う河川堤防の被害
- ◆ 道路橋の被害
- ◆ 液状化に伴う道路被害 (アムラプラ地域)
- ◆ 建物被害 (スカイ・ヴィラ・コンドミニウム)

➤ Day 4 (6月16日)

@マンダレー

- ◆ 看護学校の被害
- ◆ 建物被害
- ◆ 道路橋の被害
- ◆ ヤンゴンへ移動

➤ Day 5 (6月17日)

@ヤンゴン

- ◆ MGSで報告会

7

MGSでキックオフ ミーティング (6月13日)



MGSの会長
Dr. Sone Han



MGSの幹事長
Prof. Day Wa Aung



ミャンマー工学会連盟の会長
Engr. Khin Maung Htaey

8

地震に関する基礎情報

9

2025年ミャンマー（マンダレー）地震の概要

基本情報

発生日時: 2025年3月28日 12:50:52 MMT (06:20:52 UTC)

マグニチュード: Mw 7.7

震源の深さ: 約10 km (ごく浅い)

震源位置: 北緯22.001° , 東経95.925° (マンダレー市ー北西)

断層と破壊様式

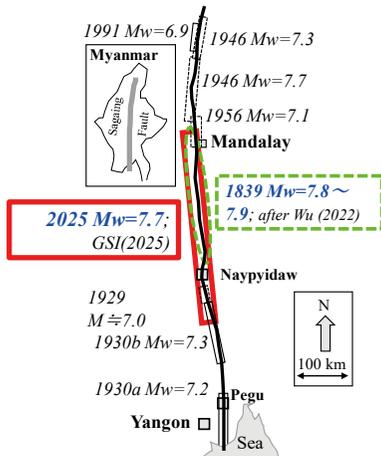
原因断層: サガイン 断層 (右横ずれ型ストライクスリップ断層)

破壊長: 約400–460 kmにわたる広域破壊

スーパーシア破壊:破壊が音速を上回る速度で進行した可能性があると指摘されている

10

サガイン断層



➤ サガイン断層はミャンマーを南北方向に走る、全長約1,400kmに及ぶ右横ずれ（デクストラル）型の横ずれ断層である。

➤ 地震空白域（Seismic Gap）

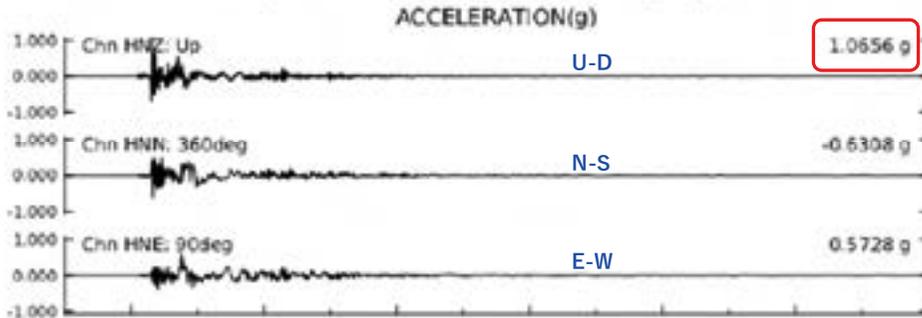
サガイン断層中部および南部の地図 (Wangら (2014) をもとに作成)

- 1) Wang, Yu; Sieh, Kerry; Tun, Soe Thura; Lai, Kuang-Yin; Myint, Than (2014). "Active tectonics and earthquake potential of the Myanmar region". Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 119 (4): 3767–3822
- 2) 国土地理院 (GSI) https://www.gsi.go.jp/cais/topic20250328_Myanmar.html
- 3) Wu, S.H.(2022): Re-estimating the magnitude of 1839 Ava earth-quake through geomorphic mapping and macroseismic records, central Myanmar, Master thesis, Department of Geo-sciences, National Taiwan University, Taiwan

11

地震計データ（ネピドー）

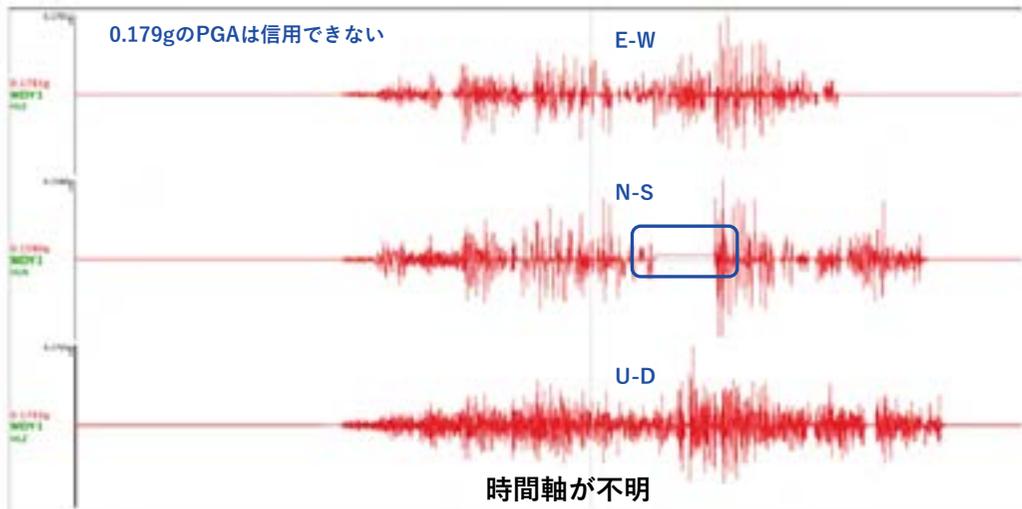
GE.NPW.HNx --: UNK DMH/GEOFON Station Naypyitaw, Myanmar
 Rcrd start 2025/03/28 06:21:00.316 UTC
 Frequency Band Processed: 0.02 Hz to 40.0 Hz (sample rate 100.0/s)
 us7000pr9c: M 7.7 - 2025 Mandalay, Burma (Myanmar) Earthquake



時間：40-100s

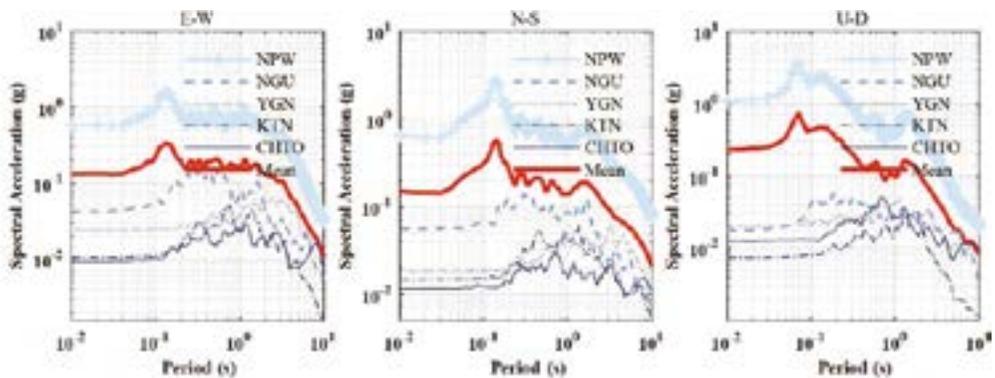
12

地震計データ (マンダレー)



13

加速度スペクトル



➤ ネピドーでは短周期、ヤンゴンでは長周期で卓越

(Courtesy: Wangら, Earthquake Engineering and Eng. Vib., 2025)

14

調査結果

- 1.交通インフラ
- 2.建物

特に地盤被害（液状化および流動性破壊に伴う被害）

15

液状化に伴う道路被害①
(ヤンゴンーマンダレー道路：AH1)



16

液状化に伴うヤンゴン-マンダレー道路の被害



➤ 液状化による沈下が発生

➤ 側方移動でアバットの被害

17

液状化に伴うヤンゴン-マンダレー道路の被害



調査時（6月13日）

➤ 側方移動による被害

18

液状化に伴うヤンゴン-マンダレー道路の被害



- 隣接農地（道路東側）内において、電柱が転倒している



- 道路に水平変位が発生し、線形が乱れた

19

地震直後の液状化の痕跡



農地内

アバット周辺

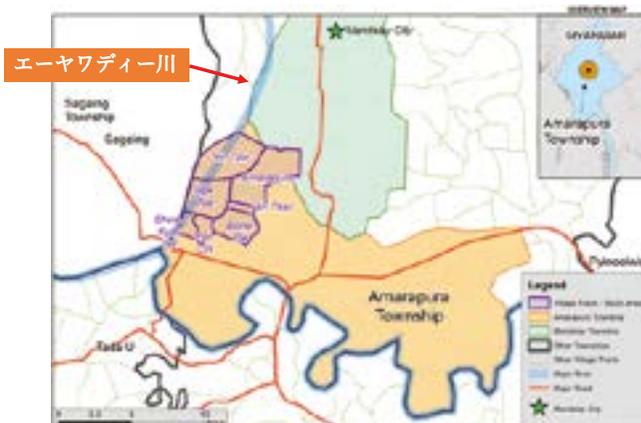
20

液状化に伴う道路被害② (マンダレー市内のアムラプラ地域)



21

マンダレー市とアムラプラ地域



マンダレー市は2つの大きな河川に囲まれており、西にエーヤワディー川、南にミンゲ川が流れている。

22

ショッピングモール建設予定地（アムラプラ地域）



地下水低下工法を用いた液状化対策が行われたと報告されているが.....

23

ショッピングモールの反対側で道路における液状化 および斜面崩壊



24

側方流動の影響



- この盛土は、おそらく入手しやすい浚渫川砂を用いて築造されたものである。
- 現在は、隣接する新たに盛土された区域から地下水が浸入している可能性がある。

25

液状化による空洞化・クラック



路面下の空洞化

クラック発生

26

道路の反対側でも側方流動および肩部での陥没



27

液状化に伴う小学校の被害
(ネピドー市周辺の
Nyaung Pin Gyi Su :
ニャウン・ピン・ジー・スー村)



28

ニャウン・ピン・ジー・ス村・小学校



➤ 噴砂の後



➤ 地震直後の噴砂



➤ 噴砂

- 向かいの小学校で、液状化により不同沈下が発生した
- ニャウン・ピン・ジー・ス村内では、液状化による噴砂現象も確認された。

29

ニャウン・ピン・ジー・ス小学校の被害状況



- 雨樋のズレ
- 校舎の壁面にひび割れ
- 側方移動・不同沈下

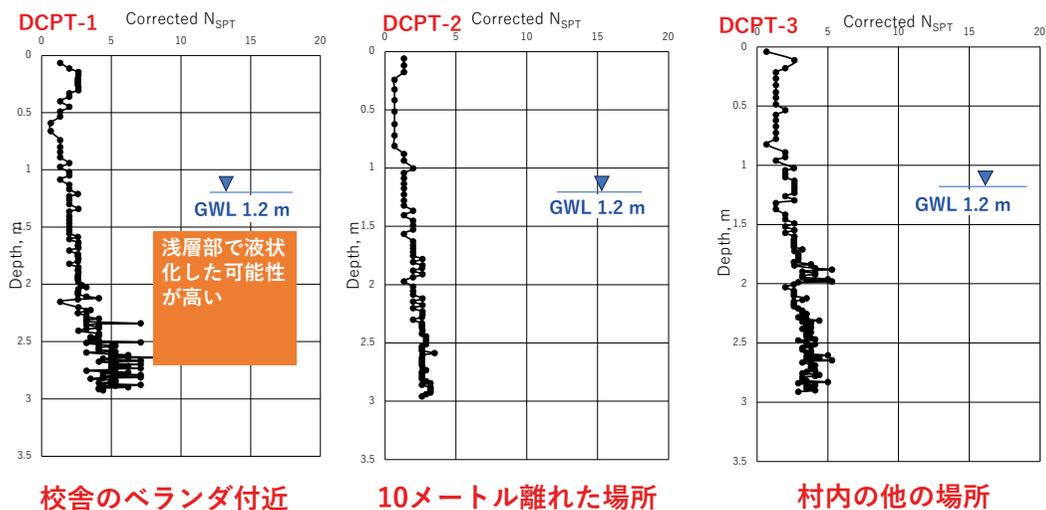
30

簡易動的コーン貫入試験 (Dynamic Cone Penetration Test: DCPT)



31

簡易動的コーン貫入試験の結果



32

河川堤防の被害 (マンダレー市内)



33

ヤンゴンーマンダレー道路で橋脚の倒壊 (南側からの眺め)



➤ 第1橋脚が河岸の地すべりにより押し下げられた

34

北側橋脚の倒壊



➤ 同様に、北側の第1橋脚も押し下げられた

35

ミッティンジ川北岸における堤防の地すべり



36

ミッティンジ川南岸における堤防の地すべり



➤ 10 m以上の流動が確認（25戸の家屋が流された）

37

道路の被害



➤ 両側で斜面崩壊が発生している

38

ミング川堤防の別箇所でも崩壊が発生（流動性地すべり）



- 広範囲で大規模な河岸の地すべりにより30戸の家屋が押し流され、多くの人命が失われた。

39

橋脚の損傷 (マンダレー市内)



40

橋脚とアバットメント



橋脚部における1.5 mの沈下：根入れ不足の影響か？



アバットメント周辺

41



MGsで報告会
(6月17日)

42

まとめ

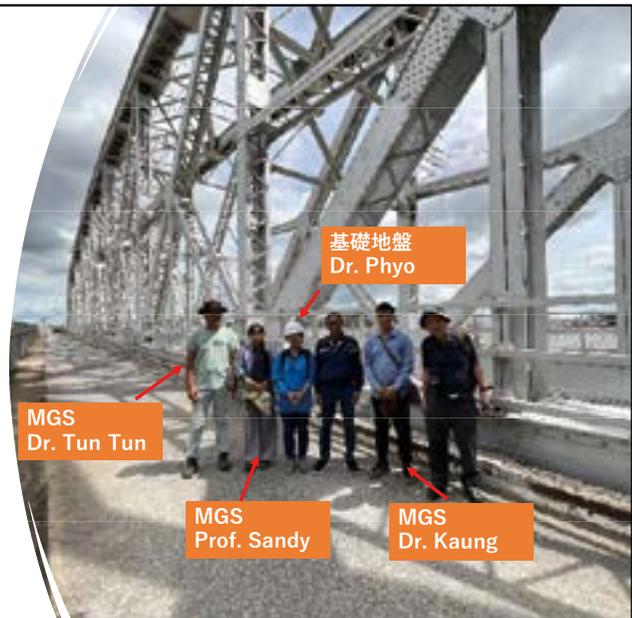
今後の課題

- ◆ 正確に地震動を観測できる信頼性の高い地震計を設置
- ◆ 微動観測による卓越周期およびH/Vスペクトルの確認
- ◆ 都心部のマイクロゾーンネーションおよび液状化ハザードマップの作成
- ◆ 詳細な地盤情報に基づくボーリングデータベースの整備

43

謝辞

調査協力メンバー



44

ご清聴をいただき
ありがとう
ございました

謝辞

- 地盤工学会
- 東京大学名誉教授 東畑郁生
- ミャンマー地質学会
会長 Dr. Sone Han
幹事長 Prof. Day Wa Aung
- ミャンマー工学会連盟
会長 Mr. Khin Maung Htaey
- 基礎地盤コンサルタンツ シンガポール支社
Dr. Myat Myat Phyo Phyo
- 川崎地質株式会社
窪田 上太郎（調査団幹事長）

令和6年度能登半島地震における 石川県建設業協会の対応

松本 樹典
金沢大学名誉教授

1. 令和6年度能登半島地震における金沢建設業協会の対応
2. 小松能美建設業協会による災害復旧支援
3. 市民による復興支援の一例

1

1

令和6年度能登半島地震における 金沢建設業協会の対応

日本海建設株式会社 丸山 雅之
金沢大学土木工学科 平成2年卒業

2

2

1. 令和6年度能登半島地震発生の概要

- 1) 発生日時 令和6年1月1日 午後16時10分
- 2) 地震種別 能登半島地下16km「**内陸地殻内地震**」
- 3) 震央場所 鳳至郡穴水町の北東42km珠洲市内
- 4) 地震規模 気象庁マグニチュード
(M:) **7.6**
- 5) 最大震度 **震度7**
(輪島市門前町走出・羽咋郡志賀町香能)

3

3

2. 協会の災害時の活動についての基本協定

平成9年3月31日付

「災害時等における応急対策工事に関する基本協定」
が石川県知事と石川県建設業協会との間で締結された。

平成25年4月1日付

「災害時等における応急対策工事に関する細目協定」

県央土木総合事務所 等: 甲

金沢建設業協会: 乙

4

4

内 容(抜粋)

(目的)

第1条

この協定は、広域応急対策工事の実施に関する細目を定めることにより、災害時に対する公共土木施設の迅速かつ適切な機能の維持及び回復を図ることを目的とする。

5

5

(広域災害等応急対策協力者等)

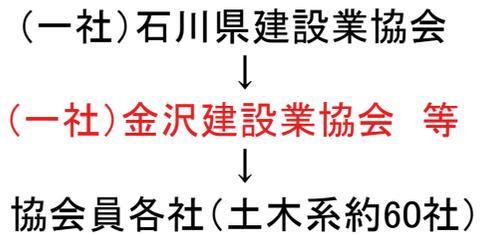
第2条 この協定に賛同し、広域応急対策工事を実施できる乙の協会員を災害等応急対策協力者という。

2. 乙は甲にこの協定の締結後速やかに協力者名簿及び応急対策工事実施体制表を提出する。
3. 乙は協力者名簿及び応急対策工事実施体制表に変更が生じた場合又は甲から特に報告を求められたときは速やかに甲に対し当該事項について報告する。

6

6

災害対応の組織

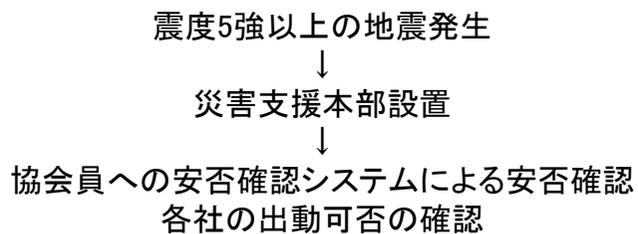


7

7

災害への対応

金沢建設業協会でのBCP(事業継続計画)の規定



8

8

能登半島地震に関する活動内容

令和6年1月1日 16:25分(16:10に地震発生)
安否確認システムより各社防災担当者宛てに
メールが自動送信される。

1月2日

金沢建設業協会から協会員各社へ指示



出勤可否及び緊急資機材の保有状況を確認

9

9

1月3日 災害支援本部設置

災害対策委員17名が集まり緊急支援会議
及び安否確認作業を実施



10

10

- 重機を手配
- 運搬車両の手配
- 災害派遣の業者の班割
- 被災状況などから各班2泊3日体制
(車中泊が基本・能登空港内にも休憩個所)
- 災害派遣時の備品などの確認
(重機用軽油、各車両燃料、水、食料など)

11

11

1月4日より応急復旧作業を開始

日本海建設(株)は国交省からの依頼により
緊急支援物資の輸送を担当。1月16日終了



12

12

1月5日(珠洲道路:大田原付近)



13

13



14

14



15

15



16

16



17

17

1月7日(能登町付近をパトロール)



18

18



19

19



20

20

2月3日(輪島市門前総合運動公園付近)



21

21



22

22

2月3日

能登里山空港にトイレカーを金沢より移送



23

23

2月4日(輪島市門前総合運動公園付近)



24

24

2月5日(輪島市門前総合運動公園付近)



25

25

2月5日(作業終了後の引き継ぎ状況)



26

26

3月1日(鳳至川河川啓開作業)



27

27



28

28

3月2日(鳳至川河川啓開作業)



29

29



30

30

3月3日(鳳至川河川啓開作業・降雪中止)



31

31

3月28日(輪島市河川啓開大型土嚢作成)



約70袋/日作成

32

32

3月29日(輪島市河川啓開大型土嚢作成)



33

33

3月30日(輪島市河川啓開大型土嚢作成)



34

34

最後に

我が故郷 能登の一日も早い復興・復旧
を心よりお祈りいたしております。

35

35

36



R6 能登半島地震 小松能美建設業協会による 災害復旧支援について

～小松能美建設業協会の一員として～

(株) 吉光組 専務取締役 道 勇治

金沢大学土木工学科平成元年卒



37



能登半島地震の啓開作業期間

能登半島地震発生 1月1日(月)16時10分頃

小松能美建設業協会 啓開作業期間

作業開始日 1月5日(金)

最終作業日 4月19日(金)

作業期間102日(大雪で4日休み)

参加企業&人数 29社 延べ人数1726人

吉光組 8回出動 31日(延べ人数 140人)



38

小松能美建設業協会の啓開個所



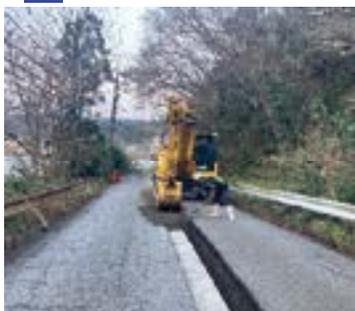
39

啓開個所 珠洲地区



40

道路啓開作業(砕石投入)



41

砕石の確保



災害当初 砕石確保が困難であったが、県、県建設
業協会の対応により何とか確保できる様になった



42

道路啓開(斜面崩壊)



43

斜面崩壊(迂回路設置)



44

斜面崩壊(迂回路設置)



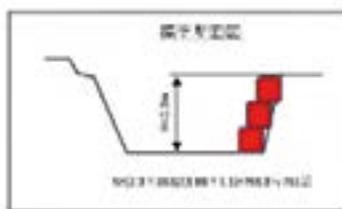
45

大型土のう製作 備蓄 運搬



46

河川護岸復旧作業



YOSHIMITSU

47

珠洲市への協力(ごみ集積場対応)



ごみ集積場約8haの表層改良
全体3,323tセメント系固化材
道路部2,700m³の碎石路盤

YOSHIMITSU

48

ごみ集積場 6月28日の様子



49

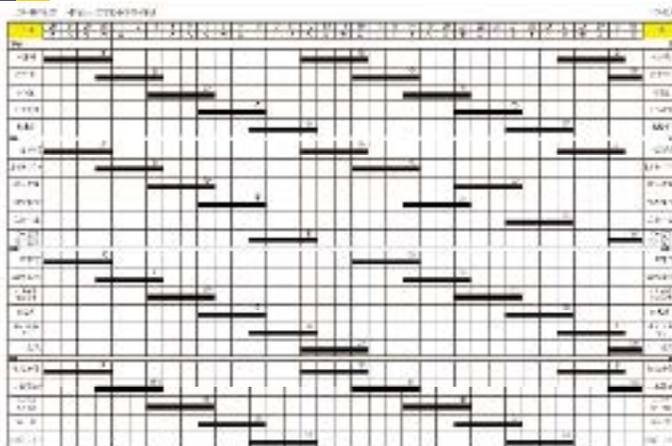
啓開作業の基本ルール

- 人員は職長、オペ、手元の3名1組
ごみ集積場の1班はオペ2、手元3の5名1組
- 1日目 7時発~12時現地着
引継ぎ後作業開始・・・
引継ぎ場所 珠洲商工会議所
- ※2日目・3日目は全日作業
4日目 午前中作業→午後引継ぎ~帰還
- 自己完結型支援(燃料、食料、車中泊、風呂無し)



50

班編成 4班 3泊4日



51

情報共有(クラウドの活用)



共有アドレスを知っている人は、誰でもアクセス可能とした



52

LINEによる情報共有



53

地元の優しさ 宿泊施設 シャワーの提供



※珠洲商工会議所1階シャワー(2基)
利用可能(1/29より)
16時~19時(予約制) シャンプー/ボ
ディソープ備え付け有。土日利用不可
珠洲建設業協会及び小松能美建設業
協会のみ利用可能



54

最後に

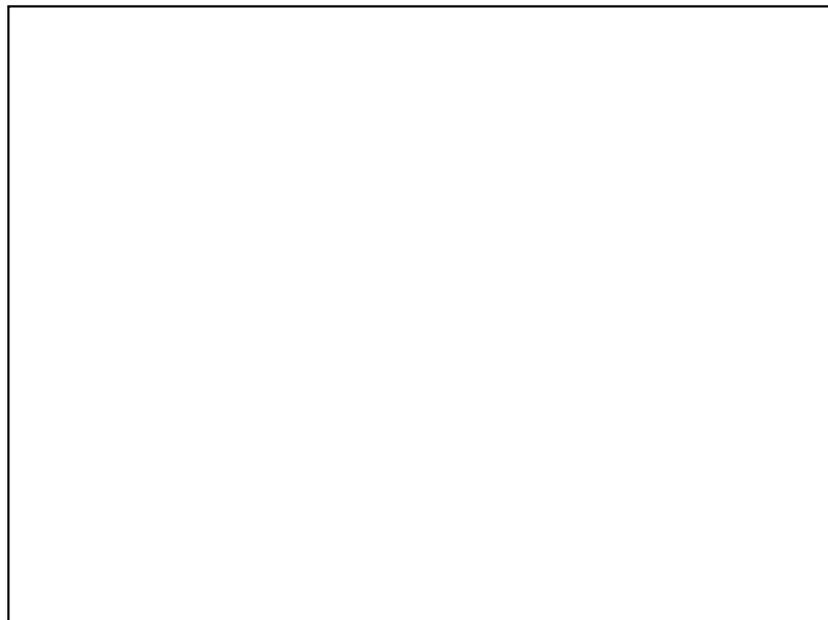
能登半島地震によって、被害に遭われた
皆様へ心よりお見舞い申し上げます

一日でも早い復旧、復興をお祈りします

建設業を生業とする我々は、与えられた
役目を確実に対応し、少しでも皆様のお
役に立てる様努力していきます



57



58

市民による復興支援の一例

金沢市小立野(こだつの)町会『共和会』の活動

『能登復興支援バス旅行』
2025年10月5日（日）

行 程

能登ワイン工場 ⇒ のと里山空港 ⇒ 逸見比咩神社(穴水大宮)
⇒ 語り部観光列車 ⇒ のと山里海ミュージアム

59

59



能登ワイン工場のぶどう畑

60

60



能登ワイン工場

OEK(オーケストラアンサンブル金沢)の演奏

今井さん(94歳)

珠洲の自宅が津波で流され、
現在金沢市小立野に在住

61

61



能登ワイン工場入口

ぶどうの絵は、
画家 大森慶宣氏の作品

穴水市出身
金沢大学教育学部卒
金沢市小立野在住

62

62



63

63



のと里山空港あんのん食堂

のと里山空港

若山氏による被災状況の説明

溢れる愛は私を強くする

能登高校書道部

64

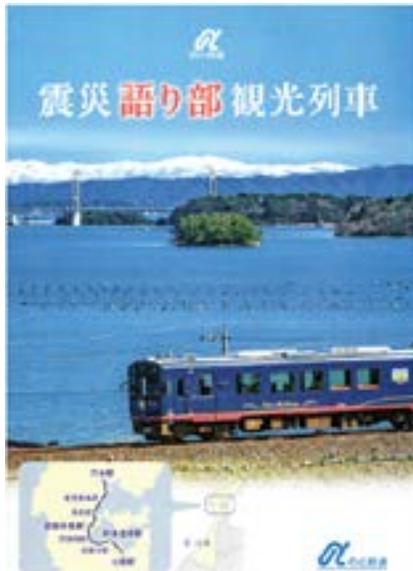
64



逸見比咩神社(穴水大宮)

65

65



66

66



67



今井さん(94歳)
 珠洲の自宅が津波で流され、
 現在金沢市小立野に在住

68



のと里山里海ミュージアム



69

69

参加者の声・感想

- 実際に被災された語り部の語りは重く、心に沁みた。
- 被災者の苦しさや困りことを伝える勇気が必要。
- 七尾・穴水など、どこもまだまだ復旧途上。
- ブルーシートが屋根に残る景色に胸が痛んだ。
- 被災者の話を聞くことは貴重な経験となった。自分事として防災に備えていきたい。
- 水が大事！ トイレが大事！ 電気が大事！と考えさせられた。
- 自分の命を守ること、みんなで助け合うことが大事。

70

70



町内会での防災備品準備の薦め

町内会に、現在二人の防災士

71

71

発災直後は、地元の関連業者の
素早い判断・行動が重要。

長い間の復旧・復興支援活動継続が大切。

72

72

MI レクチャーノートシリーズ刊行にあたり

本レクチャーノートシリーズは、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「機能数学の構築と展開」(H15-19 年度)において作成した COE Lecture Notes の続刊であり、文部科学省大学院教育改革支援プログラム「産業界が求める数学博士と新修士養成」(H19-21 年度) および、同グローバル COE プログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」(H20-24 年度)において行われた講義の講義録として出版されてきた。平成 23 年 4 月のマス・フォア・インダストリ研究所 (IMI) 設立と平成 25 年 4 月の IMI の文部科学省共同利用・共同研究拠点として「産業数学の先進的・基礎的共同研究拠点」の認定を受け、今後、レクチャーノートは、マス・フォア・インダストリに関わる国内外の研究者による講義の講義録、会議録等として出版し、マス・フォア・インダストリの本格的な展開に資するものとする。

2022 年 10 月

マス・フォア・インダストリ研究所
所長 梶原 健司

International Project Research-Workshop (I)

A Novel Approach for Improving Liquefaction Hazard Maps in Reclaimed Land

発行 2026年1月30日
編集 Hemanta Hazarika, Masanori Murai, Shiro Ohta, Shotaro Kubota, Yuji Michi, Takashi Fujishiro, Tomohiro Ishizawa, Tsuyoshi Tanaka, Anurag Sahare, Takayoshi Inukai, Kei Hirose, Yasuhide Fukumoto

発行 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
九州大学大学院数理学府
〒819-0395 福岡市西区元岡744
九州大学数理・IMI 事務室
TEL 092-802-4402 FAX 092-802-4405
URL <https://www.imi.kyushu-u.ac.jp/>

印刷 城島印刷株式会社
〒810-0012 福岡市中央区白金2丁目9番6号
TEL 092-531-7102 FAX 092-524-4411

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
COE Lecture Note	Mitsuhiro T. NAKAO Kazuhiro YOKOYAMA	Computer Assisted Proofs - Numeric and Symbolic Approaches - 199pages	August 22, 2006
COE Lecture Note	M.J.Shai HARAN	Arithmetical Investigations - Representation theory, Orthogonal polynomials and Quantum interpolations- 174pages	August 22, 2006
COE Lecture Note Vol.3	Michal BENES Masato KIMURA Tatsuyuki NAKAKI	Proceedings of Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2005 155pages	October 13, 2006
COE Lecture Note Vol.4	宮田 健治	辺要素有限要素法による磁界解析 - 機能数理学特別講義 21pages	May 15, 2007
COE Lecture Note Vol.5	Francois APERY	Univariate Elimination Subresultants - Bezout formula, Laurent series and vanishing conditions - 89pages	September 25, 2007
COE Lecture Note Vol.6	Michal BENES Masato KIMURA Tatsuyuki NAKAKI	Proceedings of Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2006 209pages	October 12, 2007
COE Lecture Note Vol.7	若山 正人 中尾 充宏	九州大学産業技術数理研究センター キックオフミーティング 138pages	October 15, 2007
COE Lecture Note Vol.8	Alberto PARMEGGIANI	Introduction to the Spectral Theory of Non-Commutative Harmonic Oscillators 233pages	January 31, 2008
COE Lecture Note Vol.9	Michael I.TRIBELSKY	Introduction to Mathematical modeling 23pages	February 15, 2008
COE Lecture Note Vol.10	Jacques FARAUT	Infinite Dimensional Spherical Analysis 74pages	March 14, 2008
COE Lecture Note Vol.11	Gerrit van DIJK	Gelfand Pairs And Beyond 60pages	August 25, 2008
COE Lecture Note Vol.12	Faculty of Mathematics, Kyushu University	Consortium "MATH for INDUSTRY" First Forum 87pages	September 16, 2008
COE Lecture Note Vol.13	九州大学大学院 数理学研究院	プロシーディング「損保数理に現れる確率モデル」 — 日新火災・九州大学 共同研究2008年11月 研究会 — 82pages	February 6, 2009

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
COE Lecture Note Vol.14	Michal Beneš, Tohru Tsujikawa Shigetoshi Yazaki	Proceedings of Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2008 77pages	February 12, 2009
COE Lecture Note Vol.15	Faculty of Mathematics, Kyushu University	International Workshop on Verified Computations and Related Topics 129pages	February 23, 2009
COE Lecture Note Vol.16	Alexander Samokhin	Volume Integral Equation Method in Problems of Mathematical Physics 50pages	February 24, 2009
COE Lecture Note Vol.17	矢嶋 徹 及川 正行 梶原 健司 辻 英一 福本 康秀	非線形波動の数理と物理 66pages	February 27, 2009
COE Lecture Note Vol.18	Tim Hoffmann	Discrete Differential Geometry of Curves and Surfaces 75pages	April 21, 2009
COE Lecture Note Vol.19	Ichiro Suzuki	The Pattern Formation Problem for Autonomous Mobile Robots —Special Lecture in Functional Mathematics— 23pages	April 30, 2009
COE Lecture Note Vol.20	Yasuhide Fukumoto Yasunori Maekawa	Math-for-Industry Tutorial: Spectral theories of non-Hermitian operators and their application 184pages	June 19, 2009
COE Lecture Note Vol.21	Faculty of Mathematics, Kyushu University	Forum "Math-for-Industry" Casimir Force, Casimir Operators and the Riemann Hypothesis 95pages	November 9, 2009
COE Lecture Note Vol.22	Masakazu Suzuki Hoon Hong Hirokazu Anai Chee Yap Yousuke Sato Hiroshi Yoshida	The Joint Conference of ASCM 2009 and MACIS 2009: Asian Symposium on Computer Mathematics Mathematical Aspects of Computer and Information Sciences 436pages	December 14, 2009
COE Lecture Note Vol.23	荒川 恒男 金子 昌信	多重ゼータ値入門 111pages	February 15, 2010
COE Lecture Note Vol.24	Fulton B.Gonzalez	Notes on Integral Geometry and Harmonic Analysis 125pages	March 12, 2010
COE Lecture Note Vol.25	Wayne Rossman	Discrete Constant Mean Curvature Surfaces via Conserved Quantities 130pages	May 31, 2010
COE Lecture Note Vol.26	Mihai Ciucu	Perfect Matchings and Applications 66pages	July 2, 2010

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
COE Lecture Note Vol.27	九州大学大学院 数理学研究院	Forum “Math-for-Industry” and Study Group Workshop Information security, visualization, and inverse problems, on the basis of optimization techniques 100pages	October 21, 2010
COE Lecture Note Vol.28	ANDREAS LANGER	MODULAR FORMS, ELLIPTIC AND MODULAR CURVES LECTURES AT KYUSHU UNIVERSITY 2010 62pages	November 26, 2010
COE Lecture Note Vol.29	木田 雅成 原田 昌晃 横山 俊一	Magma で広がる数学の世界 157pages	December 27, 2010
COE Lecture Note Vol.30	原 隆 松井 卓 廣島 文生	Mathematical Quantum Field Theory and Renormalization Theory 201pages	January 31, 2011
COE Lecture Note Vol.31	若山 正人 福本 康秀 高木 剛 山本 昌宏	Study Group Workshop 2010 Lecture & Report 128pages	February 8, 2011
COE Lecture Note Vol.32	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Forum “Math-for-Industry” 2011 “TSUNAMI-Mathematical Modelling” Using Mathematics for Natural Disaster Prediction, Recovery and Provision for the Future 90pages	September 30, 2011
COE Lecture Note Vol.33	若山 正人 福本 康秀 高木 剛 山本 昌宏	Study Group Workshop 2011 Lecture & Report 140pages	October 27, 2011
COE Lecture Note Vol.34	Adrian Muntean Vladimír Chalupecký	Homogenization Method and Multiscale Modeling 72pages	October 28, 2011
COE Lecture Note Vol.35	横山 俊一 夫 紀恵 林 卓也	計算機代数システムの進展 210pages	November 30, 2011
COE Lecture Note Vol.36	Michal Beneš Masato Kimura Shigetoshi Yazaki	Proceedings of Czech-Japanese Seminar in Applied Mathematics 2010 107pages	January 27, 2012
COE Lecture Note Vol.37	若山 正人 高木 剛 Kirill Morozov 平岡 裕章 木村 正人 白井 朋之 西井 龍映 柴 伸一郎 穴井 宏和 福本 康秀	平成23年度 数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究ワーク ショップ 拡がっていく数学 ～期待される“見えない力”～ 154pages	February 20, 2012

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
COE Lecture Note Vol.38	Fumio Hiroshima Itaru Sasaki Herbert Spohn Akito Suzuki	Enhanced Binding in Quantum Field Theory 204pages	March 12, 2012
COE Lecture Note Vol.39	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Multiscale Mathematics: Hierarchy of collective phenomena and interrelations between hierarchical structures 180pages	March 13, 2012
COE Lecture Note Vol.40	井ノ口順一 太田 泰広 寛 三郎 梶原 健司 松浦 望	離散可積分系・離散微分幾何チュートリアル2012 152pages	March 15, 2012
COE Lecture Note Vol.41	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Forum “Math-for-Industry” 2012 “Information Recovery and Discovery” 91pages	October 22, 2012
COE Lecture Note Vol.42	佐伯 修 若山 正人 山本 昌宏	Study Group Workshop 2012 Abstract, Lecture & Report 178pages	November 19, 2012
COE Lecture Note Vol.43	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Combinatorics and Numerical Analysis Joint Workshop 103pages	December 27, 2012
COE Lecture Note Vol.44	萩原 学	モダン符号理論からポストモダン符号理論への展望 107pages	January 30, 2013
COE Lecture Note Vol.45	金山 寛	Joint Research Workshop of Institute of Mathematics for Industry (IMI), Kyushu University “Propagation of Ultra-large-scale Computation by the Domain-decomposition-method for Industrial Problems (PUCDIP 2012)” 121pages	February 19, 2013
COE Lecture Note Vol.46	西井 龍映 栄 伸一郎 岡田 勘三 落合 啓之 小磯 深幸 斎藤 新悟 白井 朋之	科学・技術の研究課題への数学アプローチ —数学モデリングの基礎と展開— 325pages	February 28, 2013
COE Lecture Note Vol.47	SOO TECK LEE	BRANCHING RULES AND BRANCHING ALGEBRAS FOR THE COMPLEX CLASSICAL GROUPS 40pages	March 8, 2013
COE Lecture Note Vol.48	溝口 佳寛 脇 隼人 平坂 貢 谷口 哲至 鳥袋 修	博多ワークショップ「組み合わせとその応用」 124pages	March 28, 2013

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
COE Lecture Note Vol.49	照井 章 小原 功任 濱田 龍義 横山 俊一 穴井 宏和 横田 博史	マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 II 数式処理研究と産学連携の新たな発展 137pages	August 9, 2013
MI Lecture Note Vol.50	Ken Anjyo Hiroyuki Ochiai Yoshinori Dobashi Yoshihiro Mizoguchi Shizuo Kaji	Symposium MEIS2013: Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis 154pages	October 21, 2013
MI Lecture Note Vol.51	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Forum “Math-for-Industry” 2013 “The Impact of Applications on Mathematics” 97pages	October 30, 2013
MI Lecture Note Vol.52	佐伯 修 岡田 勘三 高木 剛 若山 正人 山本 昌宏	Study Group Workshop 2013 Abstract, Lecture & Report 142pages	November 15, 2013
MI Lecture Note Vol.53	四方 義啓 櫻井 幸一 安田 貴徳 Xavier Dahan	平成25年度 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 安全・安心社会基盤構築のための代数構造 ～サイバー社会の信頼性確保のための数理学～ 158pages	December 26, 2013
MI Lecture Note Vol.54	Takashi Takiguchi Hiroshi Fujiwara	Inverse problems for practice, the present and the future 93pages	January 30, 2014
MI Lecture Note Vol.55	栄 伸一郎 溝口 佳寛 脇 隼人 洪田 敬史	Study Group Workshop 2013 数学協働プログラム Lecture & Report 98pages	February 10, 2014
MI Lecture Note Vol.56	Yoshihiro Mizoguchi Hayato Waki Takafumi Shibuta Tetsuji Taniguchi Osamu Shimabukuro Makoto Tagami Hirotake Kurihara Shuya Chiba	Hakata Workshop 2014 ~ Discrete Mathematics and its Applications ~ 141pages	March 28, 2014
MI Lecture Note Vol.57	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Forum “Math-for-Industry” 2014: “Applications + Practical Conceptualization + Mathematics = fruitful Innovation” 93pages	October 23, 2014
MI Lecture Note Vol.58	安生健一 落合啓之	Symposium MEIS2014: Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis 135pages	November 12, 2014

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
MI Lecture Note Vol.59	西井 龍映 岡田 勘三 梶原 健司 高木 剛 若山 正人 脇 隼人 山本 昌宏	Study Group Workshop 2014 数学協働プログラム Abstract, Lecture & Report 196pages	November 14, 2014
MI Lecture Note Vol.60	西浦 博	平成26年度九州大学 IMI 共同利用研究・研究集会 (I) 感染症数理モデルの実用化と産業及び政策での活用のための新たな展開 120pages	November 28, 2014
MI Lecture Note Vol.61	溝口 佳寛 Jacques Garrigue 萩原 学 Reynald Affeldt	研究集会 高信頼な理論と実装のための定理証明および定理証明器 Theorem proving and provers for reliable theory and implementations (TPP2014) 138pages	February 26, 2015
MI Lecture Note Vol.62	白井 朋之	Workshop on “ β -transformation and related topics” 59pages	March 10, 2015
MI Lecture Note Vol.63	白井 朋之	Workshop on “Probabilistic models with determinantal structure” 107pages	August 20, 2015
MI Lecture Note Vol.64	落合 啓之 土橋 宜典	Symposium MEIS2015: Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis 124pages	September 18, 2015
MI Lecture Note Vol.65	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Forum “Math-for-Industry” 2015 “The Role and Importance of Mathematics in Innovation” 74pages	October 23, 2015
MI Lecture Note Vol.66	岡田 勘三 藤澤 克己 白井 朋之 若山 正人 脇 隼人 Philip Broadbridge 山本 昌宏	Study Group Workshop 2015 Abstract, Lecture & Report 156pages	November 5, 2015
MI Lecture Note Vol.67	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	IMI-La Trobe Joint Conference “Mathematics for Materials Science and Processing” 66pages	February 5, 2016
MI Lecture Note Vol.68	古庄 英和 小谷 久寿 新甫 洋史	結び目と Grothendieck-Teichmüller 群 116pages	February 22, 2016
MI Lecture Note Vol.69	土橋 宜典 鍛冶 静雄	Symposium MEIS2016: Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis 82pages	October 24, 2016
MI Lecture Note Vol.70	Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	Forum “Math-for-Industry” 2016 “Agriculture as a metaphor for creativity in all human endeavors” 98pages	November 2, 2016
MI Lecture Note Vol.71	小磯 深幸 二宮 嘉行 山本 昌宏	Study Group Workshop 2016 Abstract, Lecture & Report 143pages	November 21, 2016

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
MI Lecture Note Vol.72	新井 朝雄 小嶋 泉 廣島 文生	Mathematical quantum field theory and related topics 133pages	January 27, 2017
MI Lecture Note Vol.73	穴田 啓晃 Kirill Morozov 須賀 祐治 奥村 伸也 櫻井 幸一	Secret Sharing for Dependability, Usability and Security of Network Storage and Its Mathematical Modeling 211pages	March 15, 2017
MI Lecture Note Vol.74	QUISPEL, G. Reinout W. BADER, Philipp MCLAREN, David I. TAGAMI, Daisuke	IMI-La Trobe Joint Conference Geometric Numerical Integration and its Applications 71pages	March 31, 2017
MI Lecture Note Vol.75	手塚 集 田上 大助 山本 昌宏	Study Group Workshop 2017 Abstract, Lecture & Report 118pages	October 20, 2017
MI Lecture Note Vol.76	宇田川誠一	Tzitzéica 方程式の有限間隙解に付随した極小曲面の構成理論 —Tzitzéica 方程式の楕円関数解を出発点として— 68pages	August 4, 2017
MI Lecture Note Vol.77	松谷 茂樹 佐伯 修 中川 淳一 田上 大助 上坂 正晃 Pierluigi Cesana 濱田 裕康	平成29年度 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究会 (I) 結晶の界面, 転位, 構造の数理 148pages	December 20, 2017
MI Lecture Note Vol.78	瀧澤 重志 小林 和博 佐藤憲一郎 斎藤 努 清水 正明 間瀬 正啓 藤澤 克樹 神山 直之	平成29年度 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 プロジェクト研究 研究会 (I) 防災・避難計画の数理モデルの高度化と社会実装へ向けて 136pages	February 26, 2018
MI Lecture Note Vol.79	神山 直之 畔上 秀幸	平成29年度 AIMaP チュートリアル 最適化理論の基礎と応用 96pages	February 28, 2018
MI Lecture Note Vol.80	Kirill Morozov Hiroaki Anada Yuji Suga	IMI Workshop of the Joint Research Projects Cryptographic Technologies for Securing Network Storage and Their Mathematical Modeling 116pages	March 30, 2018
MI Lecture Note Vol.81	Tsuyoshi Takagi Masato Wakayama Keisuke Tanaka Noboru Kunihiro Kazufumi Kimoto Yasuhiko Ikematsu	IMI Workshop of the Joint Research Projects International Symposium on Mathematics, Quantum Theory, and Cryptography 246pages	September 25, 2019
MI Lecture Note Vol.82	池森 俊文	令和2年度 AIMaP チュートリアル 新型コロナウイルス感染症にかかわる諸問題の数理 145pages	March 22, 2021

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
MI Lecture Note Vol.83	早川健太郎 軸丸 芳揮 横須賀洋平 可香谷 隆 林 和希 堺 雄亮	シェル理論・膜理論への微分幾何学からのアプローチと その建築曲面設計への応用 49pages	July 28, 2021
MI Lecture Note Vol.84	Taketoshi Kawabe Yoshihiro Mizoguchi Junichi Kako Masakazu Mukai Yuji Yasui	SICE-JSAE-AIMaP Tutorial Advanced Automotive Control and Mathematics 110pages	December 27, 2021
MI Lecture Note Vol.85	Hiroaki Anada Yasuhiko Ikematsu Koji Nuida Satsuya Ohata Yuntao Wang	IMI Workshop of the Joint Usage Research Projects Exploring Mathematical and Practical Principles of Secure Computation and Secret Sharing 114pages	February 9, 2022
MI Lecture Note Vol.86	濱田 直希 穴井 宏和 梅田 裕平 千葉 一永 佐藤 寛之 能島 裕介 加藤田雄太朗 一木 俊助 早野 健太 佐伯 修	2020年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 進化計算の数理 135pages	February 22, 2022
MI Lecture Note Vol.87	Osamu Saeki, Ho Tu Bao, Shizuo Kaji, Kenji Kajiwara, Nguyen Ha Nam, Ta Hai Tung, Melanie Roberts, Masato Wakayama, Le Minh Ha, Philip Broadbridge	Proceedings of Forum “Math-for-Industry” 2021 -Mathematics for Digital Economy- 122pages	March 28, 2022
MI Lecture Note Vol.88	Daniel PACKWOOD Pierluigi CESANA, Shigenori FUJIKAWA, Yasuhide FUKUMOTO, Petros SOFRONIS, Alex STAYKOV	Perspectives on Artificial Intelligence and Machine Learning in Materials Science, February 4-6, 2022 74pages	November 8, 2022

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
MI Lecture Note Vol.89	松谷 茂樹 落合 啓之 井上 和俊 小磯 深幸 佐伯 修 白井 朋之 垂水 竜一 内藤 久資 中川 淳一 濱田 裕康 松江 要 加葉田雄太郎	2022年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 材料科学における幾何と代数 III 356pages	December 7, 2022
MI Lecture Note Vol.90	中山 尚子 谷川 拓司 品野 勇治 近藤 正章 石原 亨 鍛冶 静雄 藤澤 克樹	2022年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 データ格付けサービス実現のための数理基盤の構築 58pages	December 12, 2022
MI Lecture Note Vol.91	Katsuki Fujisawa Shizuo Kaji Toru Ishihara Masaaki Kondo Yuji Shinano Takuji Tanigawa Naoko Nakayama	IMI Workshop of the Joint Usage Research Projects Construction of Mathematical Basis for Realizing Data Rating Service 610pages	December 27, 2022
MI Lecture Note Vol.92	丹田 聡 三宮 俊 廣島 文生	2022年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 時間・量子測定・準古典近似の理論と実験 ～古典論と量子論の境界～ 150pages	January 6, 2023
MI Lecture Note Vol.93	Philip Broadbridge Luke Bennetts Melanie Roberts Kenji Kajiwara	Proceedings of Forum “Math-for-Industry” 2022 -Mathematics of Public Health and Sustainability- 170pages	June 19, 2023
MI Lecture Note Vol.94	國廣 昇 池松 泰彦 伊豆 哲也 穴田 啓晃 縫田 光司	2023年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 現代暗号に対する安全性解析・攻撃の数理 260pages	January 11, 2024
MI Lecture Note Vol.96	澤田 茉伊	2023年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 デジタル化時代に求められる斜面防災の思考法 70pages	March 18, 2024

シリーズ既刊

Issue	Author/Editor	Title	Published
MI Lecture Note Vol.97	Shariffah Suhaila Syed Jamaludin Zaiton Mat Isa Nur Arina Bazilah Aziz Taufiq Khairi Ahmad Khairuddin Shaymaa M.H.Darwish Ahmad Razin Zainal Abidin Norhaiza Ahmad Zainal Abdul Aziz Hang See Pheng Mohd Ali Khameini Ahmad	International Project Research-Workshop (I) Proceedings of 4 th Malaysia Mathematics in Industry Study Group (MMISG2023) 172pages	March 28, 2024
MI Lecture Note Vol.98	中澤 嵩	2024 年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 自動車性能の飛躍的向上を目指す Data-Driven 設計 92pages	January 30, 2025
MI Lecture Note Vol.99	Jacques Garrigue	2024 年度採択分 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用研究集会 コンピュータによる定理証明支援とその応用 308pages	March 17, 2025
MI Lecture Note Vol.100	Yutaka Jitsumatsu Masayoshi Ohashi Akio Hasegawa Katsutoshi Shinohara Shintaro Mori	IMI Workshop of the Joint Usage Research Projects Mathematics for Innovation in Information and Communication Technology 274pages	March 19, 2025
MI Lecture Note Vol.101	Makoto Ohsaki Yoshiki Jikumaru	IMI Workshop of the Joint Usage Research Projects Evolving Design and Discrete Differential Geometry:towards Mathematics Aided Geometric Design 528pages	October 1st, 2025
MI Lecture Note Vol.102	Keunso Kim	Young Researchers and Students-Workshop (I) Topological Data Analysis and Industrial Mathematics 198 pages	December 22, 2025
MI Lecture Note Vol.103	Kulbir Ghuman Pierluigi Cesana, Kenji Kajiwara, Yu Kaneko Linh Thi Hoai Nguyen Daniel Packwood, Yasser Salah Eddine Bouchareb	International Project Research-Workshop (I) Advancing Materials Data, Design and Discovery 102 pages	December 26, 2025
MI Lecture Note Vol.104	Soon-Sun Kwon Minjung Gim Jae-Hun Jung	International Project Research-Workshop (I) orum “Math for Industry” 2025 - Challenge of Mathematics for Industry in the AI era – 444pages	January 5, 2026

MI Lecture Note Vol.105

Zaiton Mat Isa
Arifah Bahar
Shariffah Suhaila Syed
Jamaludin
Zaitul Marlizawati
Zainuddin
Sharidan Shafie
Ahmad Fadillah Embong
Shaymaa Mustafa
Nur Arina Bazilah Aziz
Nik Zetti Amani Nik Faudzi
Mohamad Shahiir Saidin
Mohd Rashid Admon

International Project Research-Workshop (I)
Malaysia – Japan Symposium on Mathematical and
Statistical Modelling
122pages

Junualy 8, 2025



Institute of Mathematics for Industry
Kyushu University

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
九州大学大学院 数理学府

〒819-0395 福岡市西区元岡744 TEL 092-802-4402 FAX 092-802-4405
URL <https://www.imi.kyushu-u.ac.jp/>