

令和6年能登半島地震による内灘町室地区の液状化被害メカニズム解明に向けた調査報告（その2）

窪田上太郎¹・太田史朗¹・越智義和¹・今井利宗¹・ハザリカヘマンタ²・松本樹典³・田中剛⁴・村井政徳⁵

Investigation Report Aiming to Elucidate the Mechanism of Liquefaction Damage in the Muro District of Uchinada Town Due to the 2024 Noto Peninsula Earthquake (Part 2)

Shotaro KUBOTA¹, Shiro OTA¹, Yoshikazu OCHI¹,
Toshimune IMAI¹, Hemanta HAZARIKA², Tatsunori MATSUMOTO³,
Tsuyoshi TANAKA⁴ and Masanori MURAI⁵

Abstract

In the Muro district of Uchinada Town, which suffered significant liquefaction damage during the 2024 Noto Peninsula Earthquake, PDC (Piezodrill Cone) surveys and EM (Electromagnetic) explorations were conducted as part of a fundamental study aimed at elucidating the mechanism of liquefaction damage. These investigations sought to understand the detailed ground conditions and create geological cross-sections. Surface wave surveys were also performed to assess the looseness of the surface layer based on the conductivity distribution, and these results were compared with the actual liquefaction damage to confirm consistency.

キーワード：地震、液状化、側方流動

Key words: Earthquake, Liquefaction, Lateral flow

1. はじめに

令和6年1月1日16時10分に発生した能登半島

を震源とする地震 (M7.6) は、石川県、富山県、新潟県に甚大な被害をもたらした。特に、石川県

¹ 川崎地質株式会社
Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.

² 九州大学大学院工学研究院
Graduate School of Engineering, Kyushu University

³ 金沢大学名誉教授
Kanazawa University Professor Emeritus

⁴ 東京都市大学建築都市デザイン学部
Department of Urban & Civil Engineering, Tokyo City University

⁵ 清水建設株式会社
Shimizu Corporation

本稿に対する討議は2025年5月末日まで受け付ける。

河北郡内灘町室地区（以下、内灘町室地区）では、液状化や液状化に伴う地盤の側方流動によって、局所的に甚大な被害が発生した。今後の被災地の復旧・復興にあたっては、そうした液状化被害のメカニズムを明らかにすることが不可欠である。そのため、別報告¹⁾では、内灘町室地区で発生した液状化被害のメカニズムの解明に向けた基礎検討として、現地調査で把握した被災状況及び旧地形図等から収集した現地の地盤・地質構成等の情報を収集・整理した結果を報告した。本稿では、今後予定している数値解析等による被災メカニズム検討の基礎資料を得る目的で実施した地質調査および物理探査結果を報告する。

2. 地質調査及び物理探査による地盤状況の把握

2.1 PDC（ピエゾドライブコーン）試験の概要

PDC（ピエゾドライブコーン）試験は地盤内にコーンを打撃貫入して1打撃毎の貫入量から貫入

抵抗Nd値を評価している。このNd値はボーリング調査で実施される標準貫入試験（SPT）結果のN値と等価な貫入抵抗値となる。また、コーン先端位置に設置された圧力センサで地盤内に発生する間隙水圧を測定し、地盤内の間隙水圧の応答（間隙水圧比 (u_R/σ'_v) 、 u_R ：間隙水圧、 σ'_v ：有効上載圧）から細粒分含有率（Fc）を推定することが出来る。

図1は、地質調査を実施した内灘町室地区（室橋付近）の位置図である。本稿では、室地区における地盤構成や地盤の緩み状況を面的に把握するために、PDC試験を実施した。図2赤丸は、PDC試験の実施位置と既往ボーリング調査の実施位置を示している。PDC試験は、内灘砂丘方面から、県道8号を挟んで液状化被害が顕著であった河北潟干拓地方面にかけて、計7か所実施した。表1は各調査地点における変状状況及び調査深度を、写真1はPDC試験の実施状況を示している。



図1 内灘町室地区 位置図

表1 PDC試験の実施箇所一覧表

| 地点No. | 調査箇所の変状状況 | 調査深度(m) |
|-------|---|---------|
| 1 | ・変状無し | 11.9 |
| 2 | ・約12m側方流動した家屋付近 ・付近一帯での噴砂を確認 | 10.0 |
| 3 | ・側方流動による地表部の開口クラック | 20.0 |
| 4 | ・側方流動による開口部であり、付近一帯での噴砂を確認 ・地表まで滞水し極めて緩い | 10.0 |
| 5 | ・側方流動による水路の閉塞箇所 ・付近一帯での噴砂を確認 | 10.8 |
| 6 | ・変状無し | 10.0 |
| 7 | ・変状無し | 9.0 |



写真1 PDC試験の実施状況

2.2 物理探査の概要

室地区における地質断面図作成の基礎資料とすることを目的にEM（電磁）探査を実施した。EM探査では、地盤内の導電率の分布から高導電率の粘性土と低導電率の砂質土を判別することが出来る。また、砂質土内の導電率の差異から、地下水位の有無や飽和度の違いを推察することが出来る。図2青線は、実施したEM探査の測線位置を示している。EM探査には、GEONICS社製のEM-31（可探深度5m）及びEM-34（可探深度10~20m）を用いた。

2.3 地質調査・物理探査結果に基づく室地区の地盤状況

図3は、各調査地点で得られたPDC試験の結果を示している。また、図4上図はEM探査結果を、図4下図はPDC試験およびEM探査結果から得られた地質断面図を示している。併せて、図5は、県道8号~河道付近の地質断面図の拡大図を示している。PDC試験では、表層部に砂層の分布が確認されたが、特に、液状化による変状が著しいNo.2~No.5地点では、深度2m程度ま

で自沈し極めて緩い状態であることが明らかとなった。別報告¹⁾では、過去の航空写真や地歴、地質調査結果から、液状化被害が顕著であった県道8号から干拓地側の範囲に深度1.5~2.5mまで埋立層が分布することが明らかとなっており、PDC試験による自沈層の深度と埋立層の深度が概ね一致している。

なお、地震前に実施された地質調査結果(22-I-1)では、表層から深度約3m付近までN値10以下の緩い砂質土層が確認されている。そのため、当該範囲の表層部には、地震前から埋立層と想定される緩い砂質土層が分布し、地震による液状化によって同層が側方流動したと考えられる。

また、県道8号より干拓地側の調査地点(No.2~No.5)では、深度7~8m付近から細粒分含有率Fcが50%以上を示し粘性土層と想定される。一方で、県道8号より内灘砂丘側の調査地点(No.1, No.6, No.7)では粘性土層は確認されず、N値10以下の砂質土の下位に、N値30以上の締まった砂質土が分布している。これは、新旧の砂丘層の境界を示していると考えられる。

EM探査では、深度約20m付近で高い導電率

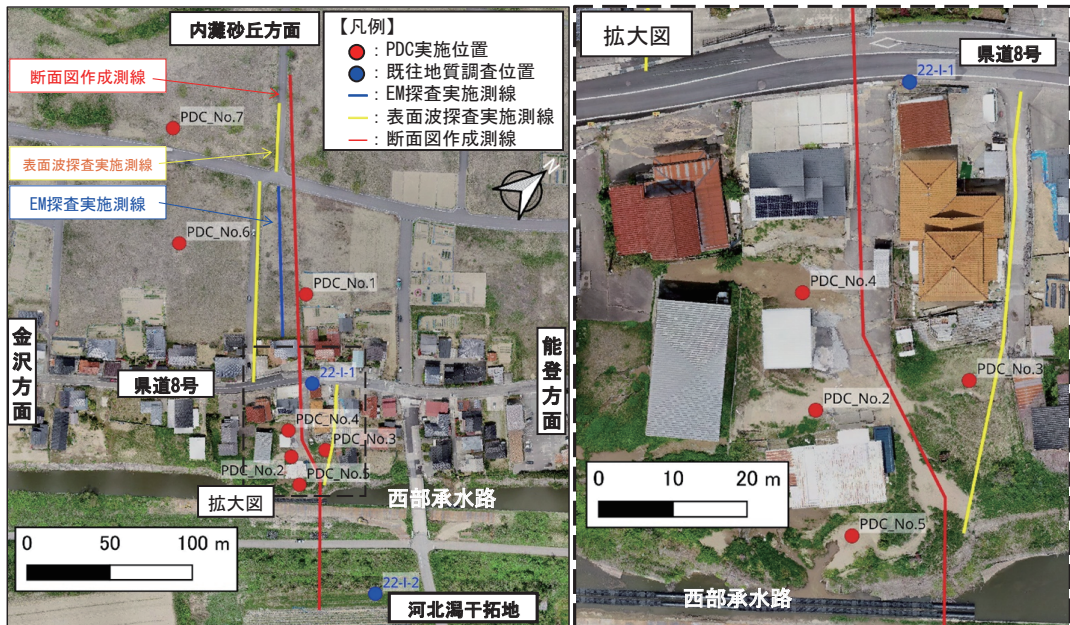


図2 地質調査・物理探査 実施位置平面図

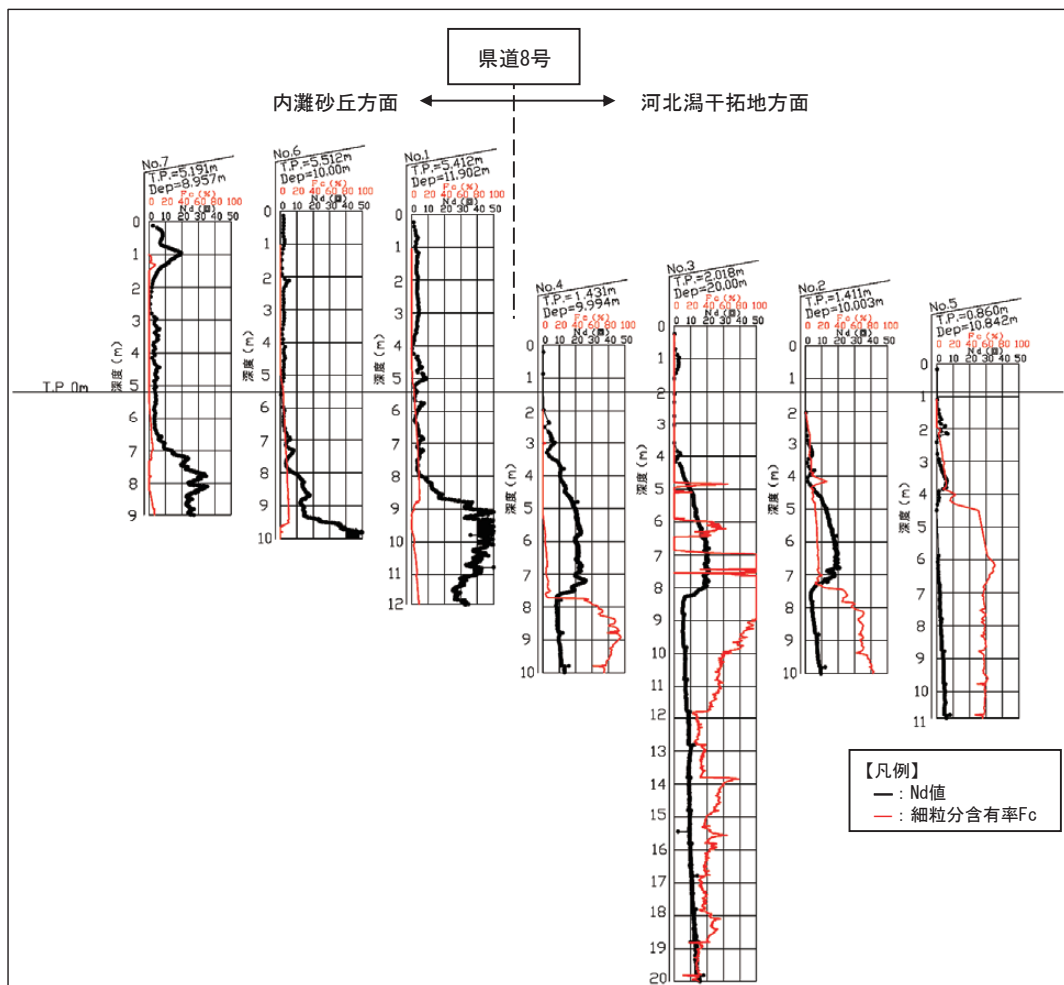


図3 PDC試験で得られたNd値と細粒分含有率の深度分布

が観測されており、粘性土層Acが堆積する領域と考えられる。室地区の表層部には、国道8号より内灘砂丘側には砂丘土層が、干拓地側には干拓に伴う埋立層Fs及び砂丘土層が堆積している。

3. 表面波探査による液状化範囲の推定

室地区の表層部における液状化範囲を推定するために、表面波探査を実施し、地盤の緩みが生じた範囲を推定した。表面波探査には、株式会社ジオファイブ製のGeoSEIS-24を用いた。

図6は、表面波探査の結果を示している。また、図7は、国道8号～河道付近の拡大図を示してい

る。S波速度の分布を概観すると、山側の砂丘層が分布する範囲はS波速度が100～180 m/sであるの対して、国道8号から水路側の領域は、S波速度が100 m/s以下と小さく、その範囲は埋立層Fsの範囲と概ね一致する。砂丘砂で埋め立てられた埋立層FsのS波速度が相対的に低い要因は、昭和初期の埋め立てであり、適切に締め固めがなされていないことが考えられる。

次に、埋立層Fs内のS波速度の差異に着目すると、特に水路近傍でS波速度が低い領域が局在している。水路近傍では、現地で液状化に伴う噴砂や水路閉塞を伴う流動が認められている。水

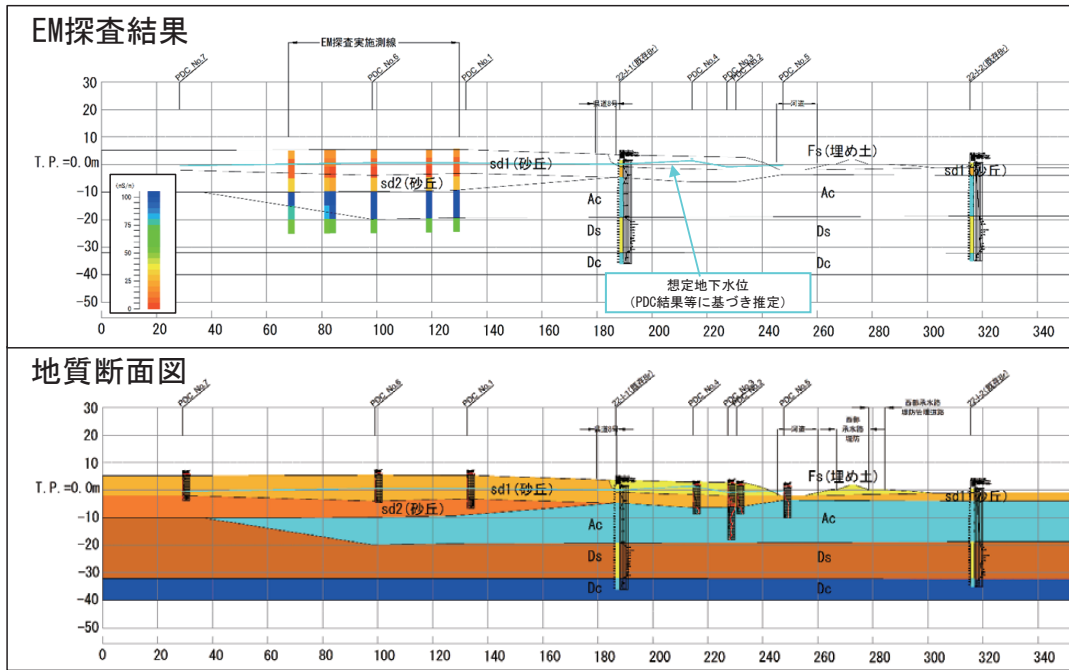


図4 EM探査の結果及びEM探査・PDC試験の結果に基づき作成した地質断面図

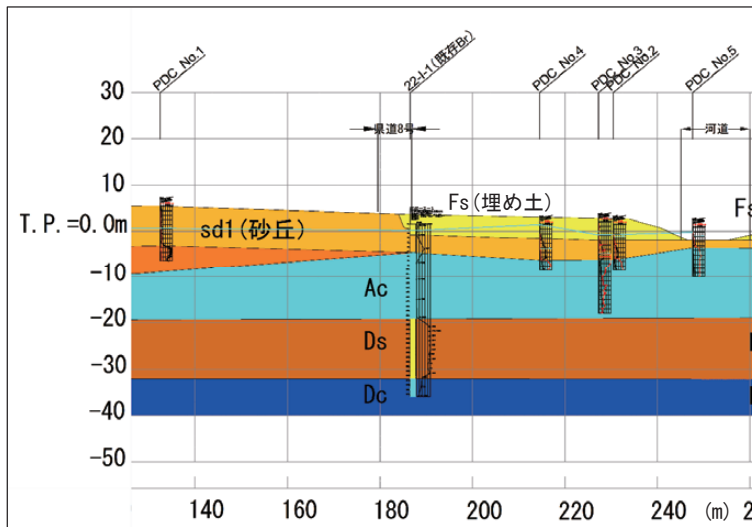


図5 県道8号～河道付近の拡大図

路近傍では、PDC試験でも深度約2mまで自沈層が確認されており、当該領域では、液状化に伴う側方流動により、せん断剛性の低下やゆるみが発生したと想定される。埋土層と砂丘(地山)の

境界は、県道8号付近にあると想定されるが、S波速度の分布をみると、埋立層の端部から約40mの範囲まで、S波速度が100~120m/sとなる領域が認められる。現地では、引張亀裂や階段

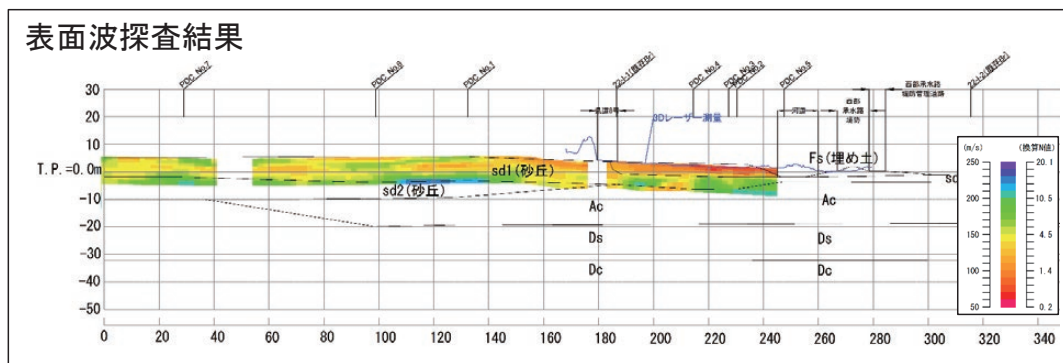


図6 表面波探査結果

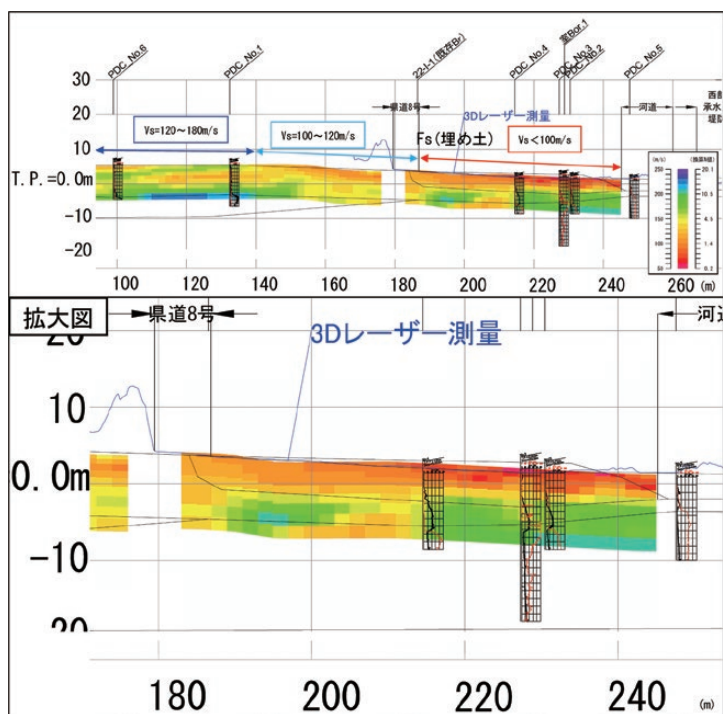


図7 表面波探査結果（拡大図）

状の段差地形を有する斜面の滑落崖様を呈していることから、この領域は、埋立層Fsが側方流動したことにより、二次的に斜面変動を生じた領域の可能性が示唆される。

4. 干渉 SAR 解析により推定した液状化に伴う変状範囲との対比

Kubota・他²⁾は、合成開口レーダー（Synthetic

Aperture Radar, 以下 SAR) を用いて、衛星画像から地表面状態を推定できる干渉 SAR 解析を用いて、内灘町室地区における液状化被害範囲を抽出した。具体的には、地震前後に撮影された衛星画像を用いて干渉 SAR 解析を実施し、地震で地表面の散乱状態が変化し、干渉性（コヒーレンス）が低下した範囲を抽出することで、液状化に伴う変状範囲を推定した。

干渉 SAR 解析には、C バンド SAR 衛星 Sentinel-1 が撮影した衛星画像を用い、以下 2 ケースの干渉 SAR 解析を実施した。ケース 1 は、地震前の 2 時期で撮影された 2 枚の衛星画像を用い、ケース 2 は、地震前後に撮影された 2 枚の衛星画像を用いて干渉 SAR 解析を実施した。図 8 は、使用した衛星画像と解析範囲、表 2 は、各検討ケースの画像撮影日を示している。

図 9 は、Kubota・他²⁾によって抽出された液状化に伴う変状範囲(コヒーレンス低下範囲)を、図10は室地区周辺の拡大図と旧地形図との比較を示している。図 9 右図および図10右図で、赤～橙色で示された範囲が、地震前後でコヒーレンスが低下し、液状化に伴い変状が発生した可能性が高い範囲を示している。

また、図10の旧地形図との比較から、干渉 SAR 解析によって推定された液状化に伴う変状範囲と、

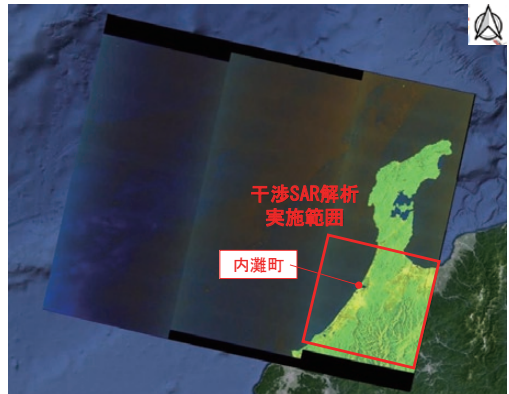


図 8 干渉 SAR 解析実施範囲

表 2 干渉 SAR 解析検討ケースと衛星画像撮影日

| 検討 No. | 衛星画像撮影日 |
|--------|-------------------------------------|
| 1 | 2023/12/18 (地震前) - 2023/12/30 (地震前) |
| 2 | 2023/12/30 (地震前) - 2024/1/11 (地震後) |

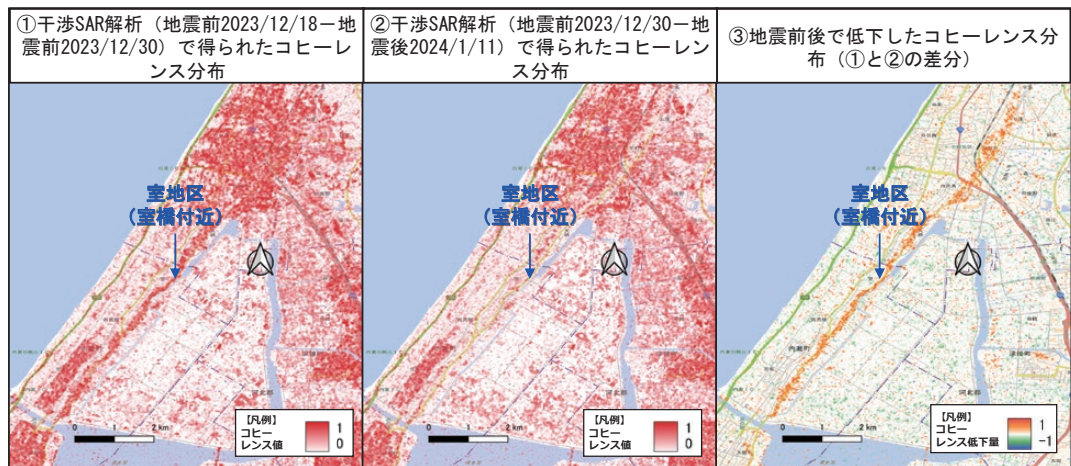


図 9 干渉 SAR 解析で得られたコヒーレンス分布と地震前後でのコヒーレンス低下量



図10 旧地形図とコヒーレンス低下範囲の比較

液状化によってゆるみが生じたと考えられる埋立層の範囲が概ね一致していることを確認できた。

5. 結論

本稿では、令和6年能登半島地震において顕著な液状化被害を受けた内灘町室地区において地質調査（PDC試験）及び物理探査（EM探査）を実施し地盤状況を把握した。そして、別報告¹⁾における既存資料等の整理結果及び本調査結果を踏まえて、内灘町室地区の地質断面図を作成した。また、表面波探査を実施し、液状化に伴う表層地盤のゆるみとその範囲を確認した。現地調査で確認された顕著な変状が認められる範囲と、旧地形と現地形図の対比で抽出した埋立層の範囲が一致し、実際の液状化被害状況との整合性が取れていることが確認できた。

謝辞

本研究は九州大学マス・フォア・インダストリ

研究所 共同利用・共同研究拠点の支援を受けた（2024年度短期共同研究「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」（2024a 036））。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 窪田上太郎・太田史朗・ハザリカヘマンタ・松本樹典・田中剛・村井政徳・藤白隆司・道勇治：令和6年能登半島地震による内灘町室地区の液状化被害メカニズム解明に向けた調査報告（その1），日本自然災害学会，Vol.43，No.3（本号），2024.
- 2) Kubota, S., S. Ohta, J. Takeda and H. Hazarika: Identification of Liquefaction Damage Area in the 2024 Noto Peninsula Earthquake by Focusing on Coherence Changes in InSAR Analysis, 9th Japan-Taiwan Workshop.

（投稿受理：2024年6月30日

訂正稿受理：2024年9月13日）

要 旨

令和6年能登半島地震において顕著な液状化被害を受けた内灘町室地区を対象に、液状化被害メカニズムの解明に向けた基礎検討として、PDC（ピエゾドライブコーン）試験及びEM探査を実施し、詳細な地盤状況を把握し、地質断面図を作成した。また、表面波探査を実施し、表層地盤の導電率分布から表層部の緩み度合を確認し、実際の液状化被害状況との整合性を確認した。