

国際圧入学会 (IPA)
第14回IPA 圧入工学セミナー in 金沢 2024
～能登半島地震からの復興・災害対策～
TKP 金沢新幹線口会議室 6B
2024年10月1日(火)

内灘町における液状化による側方流動 —事例と要因分析—



九州大学

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 教授(専任)

石川県を襲った地震～過去の液状化被害～

石川県内において過去に顕著な被害を及ぼした地震は13回あり、そのうち8回の地震で液状化と思われる現象が確認されている。

発生西暦	発生和歴	地震の地域(名称)	主な被害	液状化履歴	最大震度
1729年 8月 1日	享保 14年	(能登・佐渡)	珠洲郡、鳳至郡で死者5名、家屋全壊・損壊 791棟、輪島村で家屋全壊 28棟、能登半島先端で被害が大きい。	記録なし	不明
1799年 6月 29日	寛政 11年	(加賀)	金沢城下で家屋全壊 26棟、能美・石川・河北郡で家屋全壊 964棟、死者 21名。	履歴あり	6
1833年 12月 7日	天保 4年	(羽前・羽後・越後・佐渡)	死者 47名	記録なし	不明
1891年 10月 28日	明治 24年	濃尾地震	家屋全壊 25棟	履歴あり	5
1892年 12月 9日	明治 25年	(能登半島)	羽咋郡高浜町・火打谷村で家屋損壊あり。堀松村末吉で死者 11名、負傷者 5名、家屋全壊 2棟。	記録なし	不明
1930年 10月 17日	昭和 5年	(大聖寺付近)	小松町等で噴水	履歴あり	6
1933年 11月 21日	昭和 8年	(能登半島)	死者 3名、負傷者 55名、住宅全壊 2棟	履歴あり	5
1944年 12月 7日	昭和 18年	東南海地震	住宅全壊 3棟	記録なし	4
1948年 6月 28日	昭和 23年	福井地震	死者 41名、負傷者 453名、家屋全壊 802棟	履歴あり	6
1952年 3月 7日	昭和 27年	大聖寺沖地震	死者 7名、負傷者 8名	履歴あり	5
1961年 8月 19日	昭和 36年	北濃尾地震	死者 4名、負傷者 7名	記録なし	4
1993年 2月 7日	平成 5年	能登半島沖地震	負傷者 29名、住宅全半壊 21棟	履歴あり	5
2007年 3月 25日	平成 19年	平成 19年能登半島地震	死者 1名、負傷者 338名、家屋全壊 684棟	履歴あり	6強

国土交通省北陸地方整備局・公益社団法人地盤工学会北陸支部：石川県内の液状化しやすさマップ

<https://www.hrr.mlit.go.jp/ekijoka/ishikawa/ishikawa.html>

九州大学を中心とした産・官・学の合同調査団

◆ 学術調査団メンバー

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 田中 剛、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



◆ 現地調査日

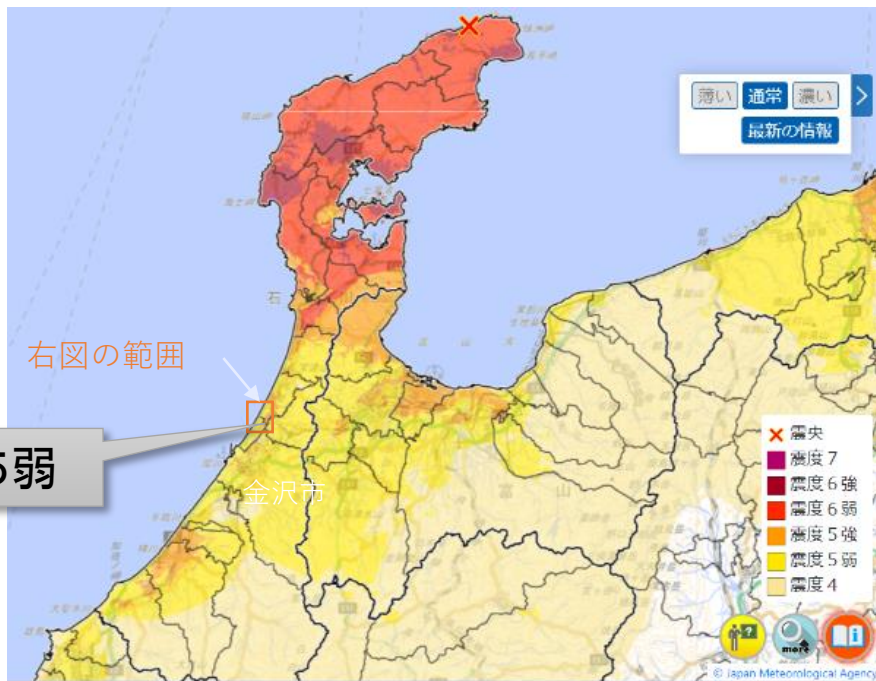
2024年2月3日(土)～4日(日) 2日間

2024年4月23日(火)～27日(土) 5日間



調査の概要

調査日程	主な調査内容
2024年2月3日～4日	踏査, ヒアリング, 【室地区、西荒屋地区】 簡易動的コーン貫入試験(PDCPT), 試料採取, UAV撮影, 3Dレーザー測量
2024年4月23日～27日	簡易動的コーン貫入試験(PDCPT), ピエゾドライブコーン (PDC) , スクリュードライビングサウンディング (SDS) , EM探査

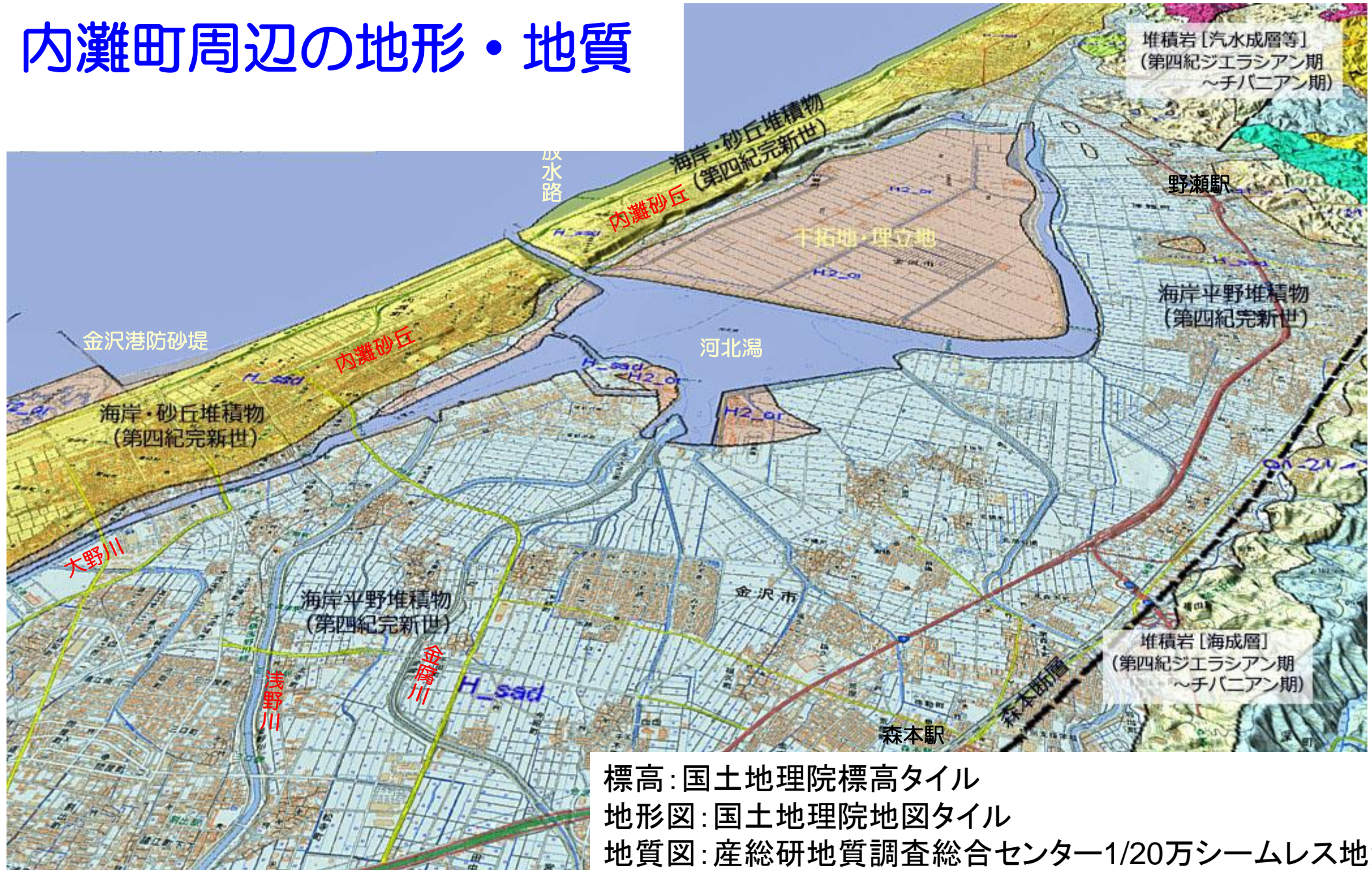


調査位置図 (気象庁HP 推計深度分布より)



調査範囲図 (地理院地図を基に作成)

内灘町周辺の地形・地質



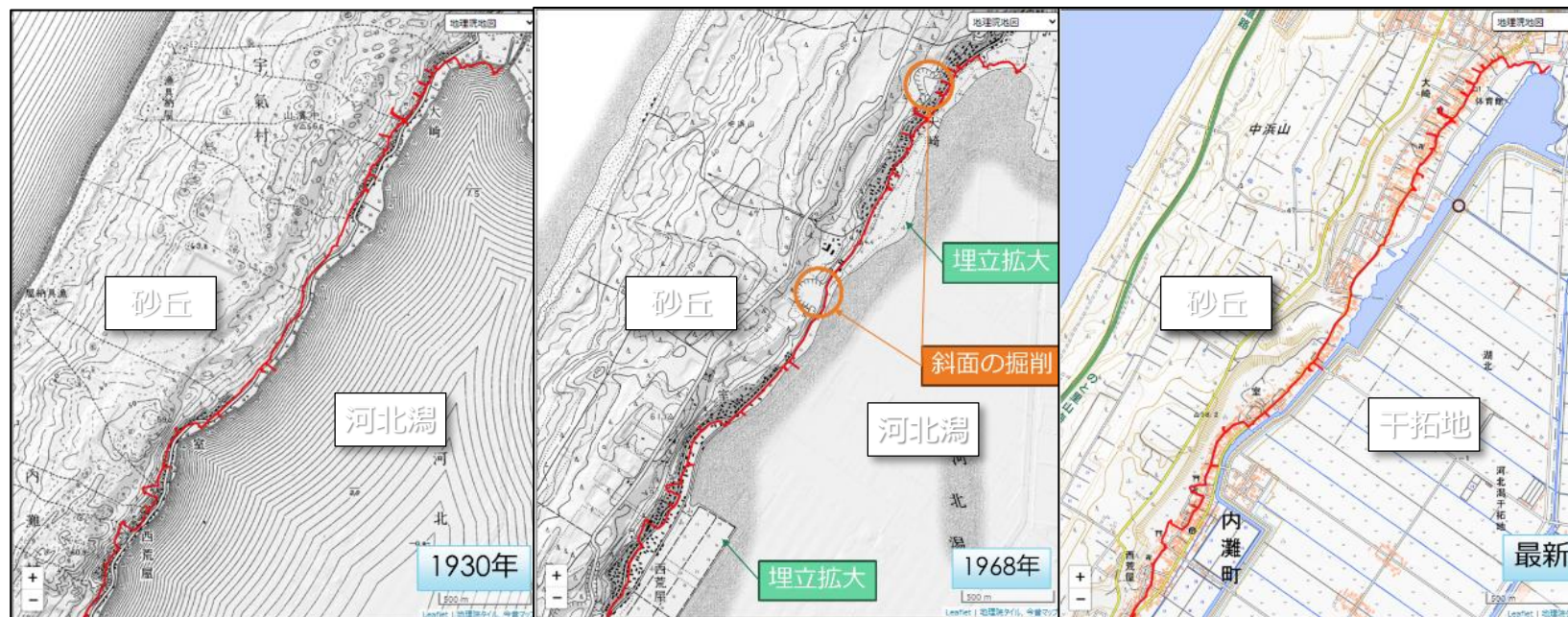
標高: 国土地理院標高タイル

地形図: 国土地理院地図タイル

地質図: 産総研地質調査総合センター1/20万シームレス地質図V2

地形の変遷（1）

- かほく市大崎から内灘町宮坂の地域は、北東－南西方向に直線状に形成された**標高50m程度の砂丘の南東側（干拓地側）**に位置する。
- **干拓地**は、かつては河北潟と呼ばれる汽水湖であったが、**江戸時代のころから小規模に干拓が行われ、昭和38年（1963年）から国営河北潟干拓土地改良事業として干拓工事が大規模に行われ、昭和46年（1971年）に干陸が完了している。**
- 干拓には、砂丘の砂を大規模に掘削しており、過去の地形図によれば、**かつて砂丘の斜面であった場所が埋立により平坦な宅地へと変貌している**ことが確認できる。



かほく市大崎から内灘町宮坂付近の地形の変遷（今昔マップ on the webを基に作成）

地形の変遷（2）



白帆台からの眺望



室地区からの眺望

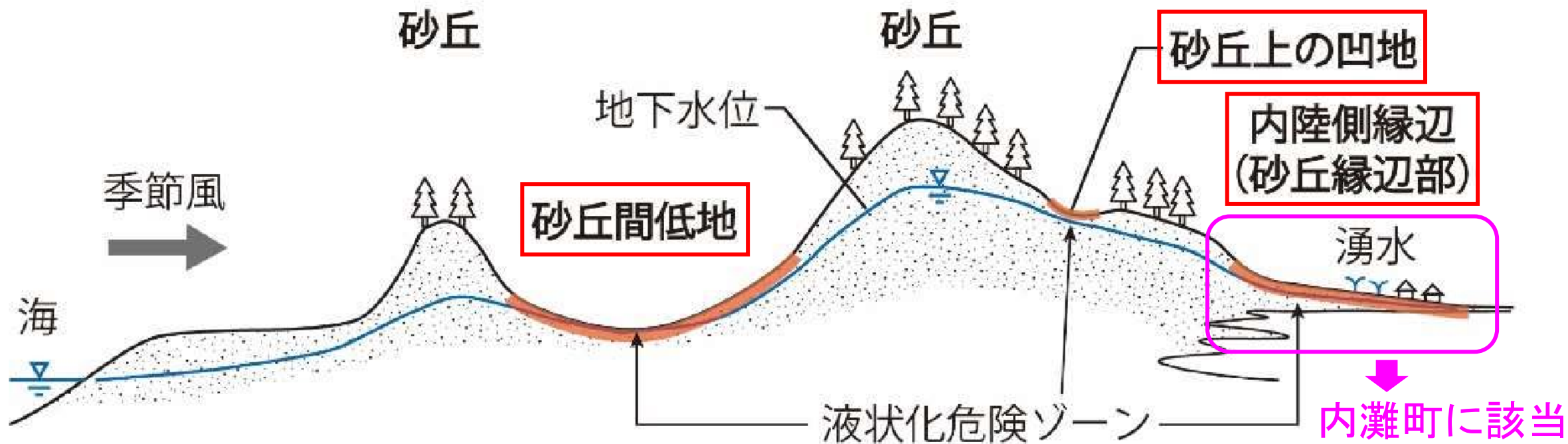
液状化の発生傾向が強くなる地盤条件

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できる。

＜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＞

- 臨海部
 - 大河川沿いの沿岸地
 - 海岸砂丘の裾、砂丘間の低地 ※内灘町に該当
 - 埋立地
 - 低地（湿地）上の盛土造成地
 - 砂利（砂鉄）等採取後の埋戻し地
 - 丘陵地や台地の谷埋め盛土造成地
- } 人工改変地

砂丘地帯の模式断面と液状化発生傾向が強い場所



若松加寿江(2018):そこで液状化が起きる理由. 140p, 東京大学出版会, 東京.

砂丘地帯においては、その頂部付近と内陸側の低地に隣接した箇所（砂丘縁辺部）、砂丘列の間の低地（砂丘間低地）および砂丘上の凹地では、地盤特性と過去の被災事例からみて、液状化の発生傾向が大きく異なる。

内灘町で過去に発生した液状化

金沢市街地の北方の砂丘の背後に、縦3里10町・横1里余の内潟(河北潟)が発達している。河北潟に面する砂丘上に、黒津船大明神(現在の小浜神社)を中心に、粟ヶ崎・大根布・本根布・宮坂・荒屋・室・大崎・内日角・宮腰の諸集落が分布し、地震により著しい被害を受けた。

宮坂・粟ヶ崎では砂丘の砂が崩壊して家屋が埋没した。荒屋・根布でも多くの潰家が生じた。また、根布・荒屋・宮坂・大崎では潟中に砂が噴き出して島が生じた。

特に、大崎では縦170間(約300m)・横50間(約90m)の島が生じた。

※里・町・間は昔の日本の尺度で、1里は約4km、1町は約110m、1間は約1.8m。

寒川旭(1986):寛政11年(1799年)金沢地震による被害と活断層. 地震, 第2輯第39巻, pp.653-663.

寛政の金沢地震における内灘砂丘周辺の加速度は100~150gal

佐々木伸安・宮島昌克・北浦勝(2001):寛政の金沢地震における地盤震動分布の推定, 土木学会, pp.115-116.

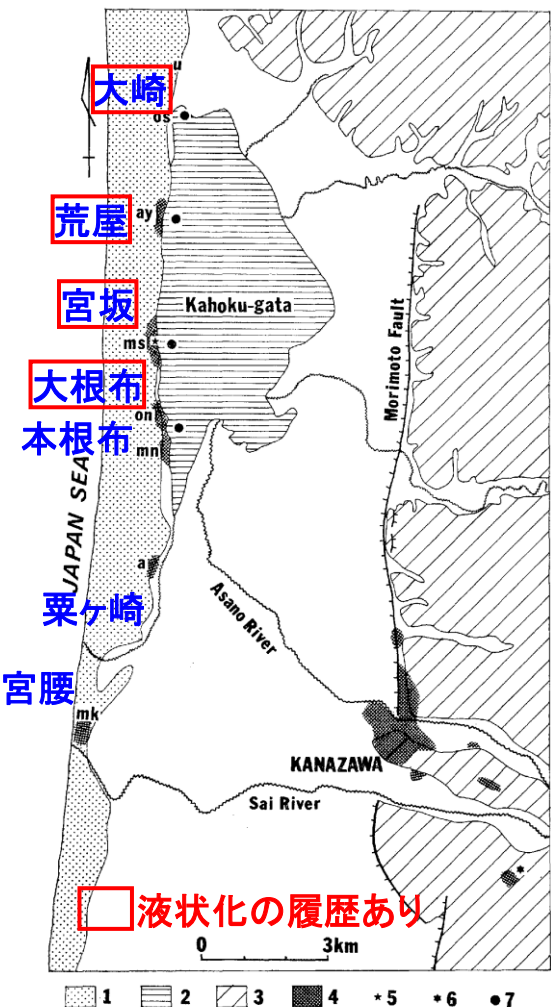
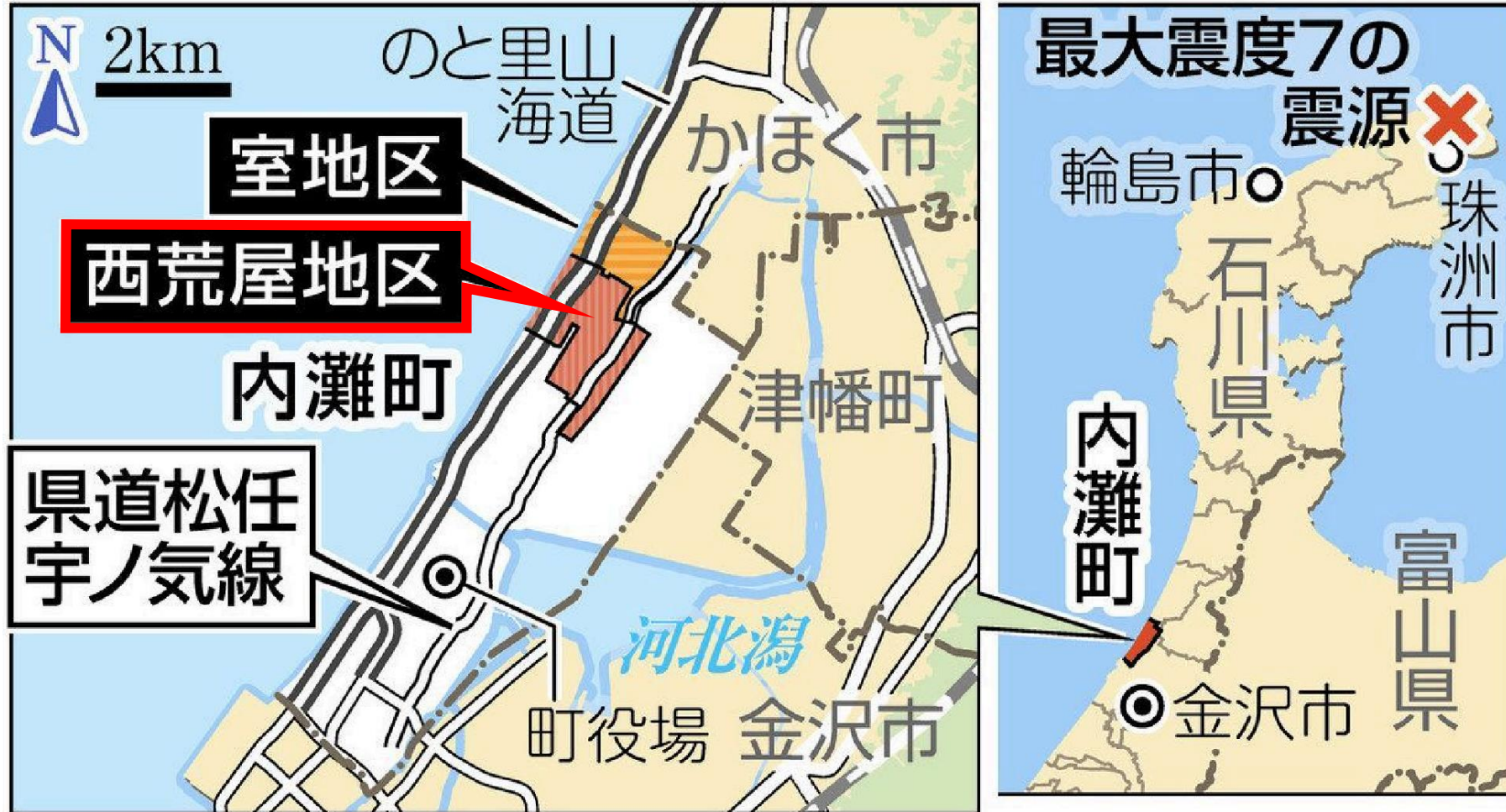


Fig. 5. Map showing the distribution of active faults and the area of severely damaged. 1: Dune. 2: Lagoon. 3: Hills and terraces. 4: Area of severely damaged. 5: Shrine of Kurotsufune. 6: Nodayama Graveyard. 7: Quick sand.

西荒屋地区における被害調査と分析

西荒屋地区における被害調査と分析



今回の地震による液状化被害の状況

- 地盤の液状化による噴砂、段差、隆起等が生じており、家屋等の建築物の転倒、沈下、擁壁の転倒、移動、道路などの舗装面の破壊や隆起、電柱等の傾倒、沈下が顕著である。一部では、水路の閉塞も生じている。
- かほく市大崎から内灘町西荒屋までの地域は、地盤変状が著しく、県道8号線沿い、砂丘斜面の裾部であったところに帯状に連続的に生じている。



水路閉塞：内灘町室



路面の隆起（圧縮変形），電柱傾倒
：県道8号線 かほく市大崎



多段で発生した段差（引張亀裂）
：内灘町西荒屋児童公園

西荒屋地区で発生した側方流動のイメージ



地面のひび割れ

住宅が傾く

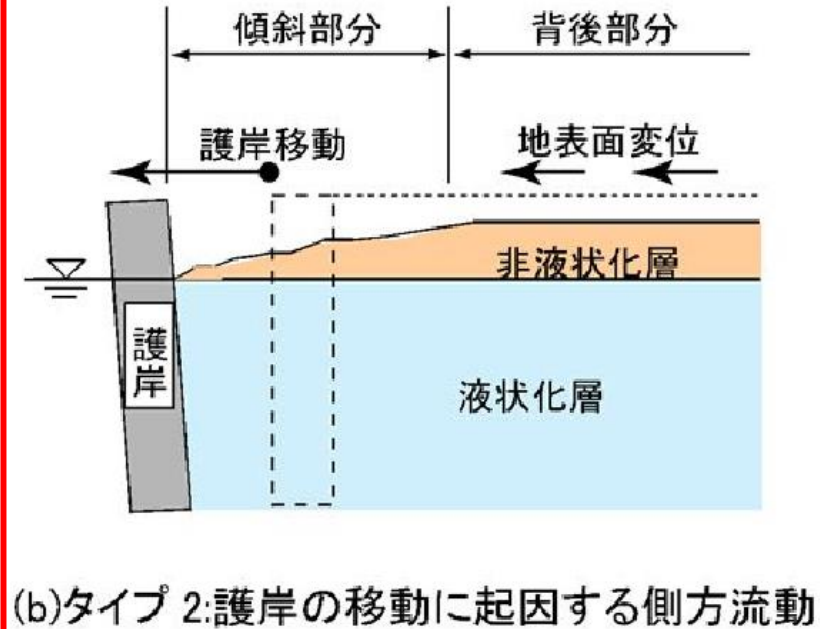
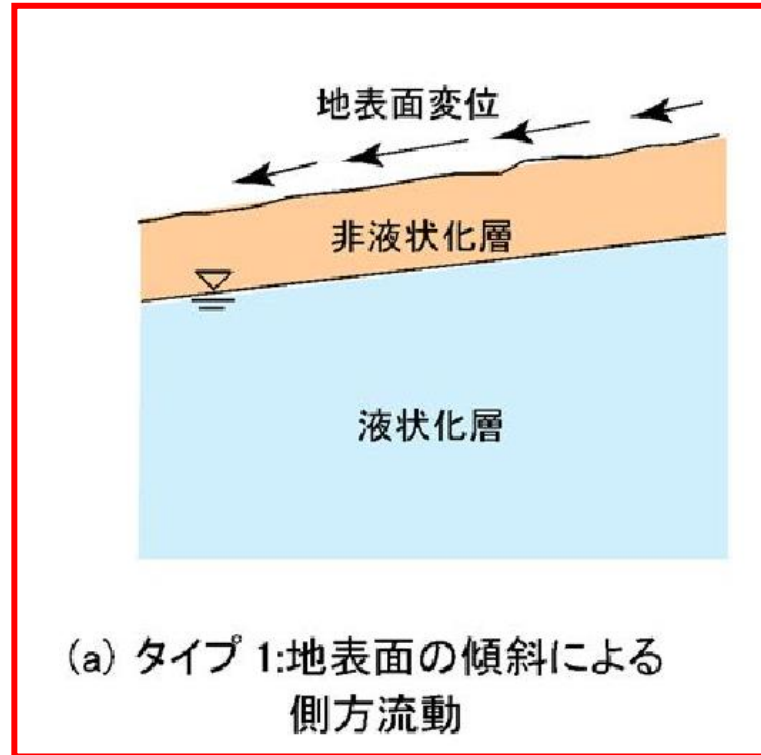
舗装がめくれる

側方流動 → 地盤が横方向に動く

地面が盛り上がる

液状化に伴う側方流動とは？

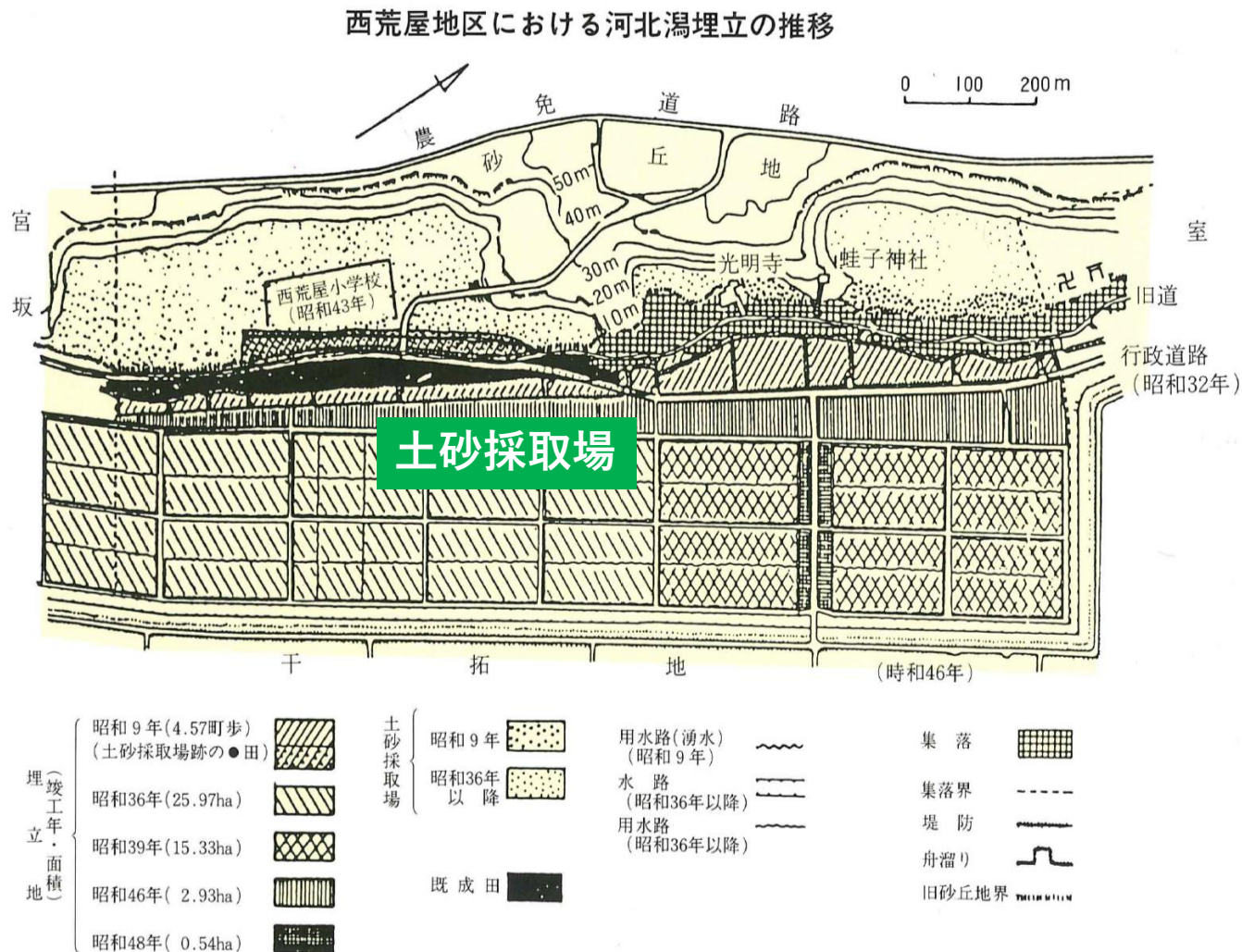
今回の地震
で発生した
側方流動



側方流動は**2つのタイプ**に分類される。

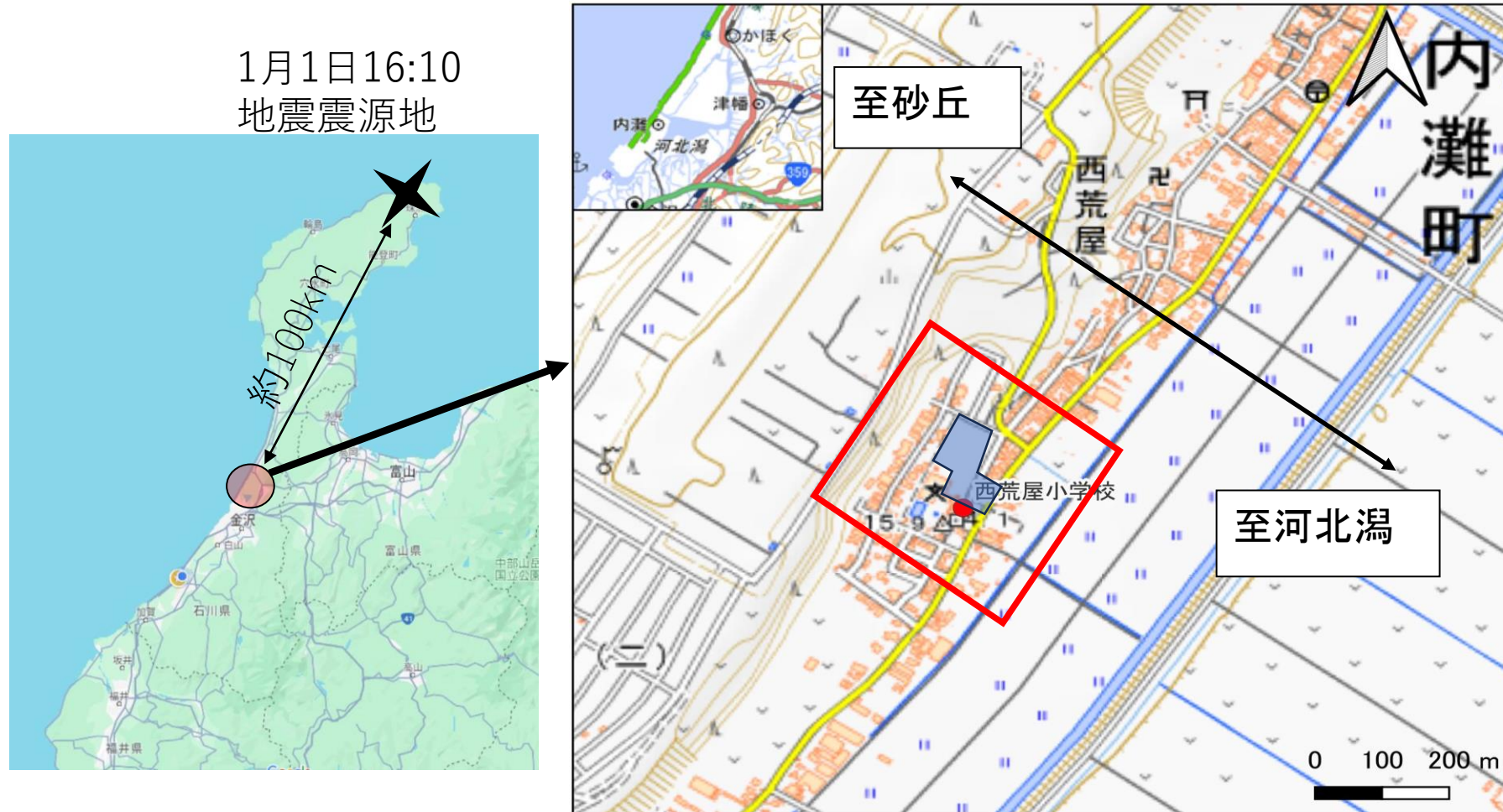
- (a) **タイプ 1 (図a)** 地表面が傾斜している場合に液状化地盤が重力によって斜面下方に移動するもの。
- (b) **タイプ 2 (図b)** 護岸が地震による慣性力や基礎地盤の液状化によって水辺方向に移動し、これに伴って護岸背後の液状化地盤が水平移動するもの。

西荒屋地区における河北潟埋立の推移



- 荒屋小学校周辺は土砂採取場であったことが分かる。
- 土砂採取は、現状土地より深い位置までポンプを用いて掘削していたことが確認されている。
- その後、干拓事業時に、土砂採取場は現在の形に人工的に埋め戻されている。

調査位置 (河北郡内灘町西荒屋地区)



荒屋小学校を中心に約300m角の赤四角で示した位置でドローンによる3次元写真測量を実施した。

西荒屋地区のドローン写真測量＋3次元点群データ



➤ クラック位置付近の荒屋小学校横では側方移動により道路の変形も確認できる

ドローン測量3次元点群データと背面砂丘上部との比高差



- 土砂採取場の掘削跡地の地形も確認することができた。

水平（側方）移動部 拡大図



- 赤ラインが荒屋小学校グラウンドから続くクラックラインである。
- 青が想定される元の道路、赤の部分が側方移動が確認できた部分が明確に表現されている。
- ドローン測量データからこの道路も大きな横移動が確認できている。

西荒屋小学校付近 拡大図



クラックの確認できているグランド部の詳細断面と
大変形を確認できている県道部の詳細断面を
詳細測量として実施した3Dレーザー測量データからポリゴンデータ
として抽出することとした。

西荒屋小学校付近 写真



県道部の変形（隆起）の様子



県道沿の砂丘側側道の変形（隆起）の様子

3次元レーザー測量結果と国土地理院データの比較①



西荒屋小学校グラウンド

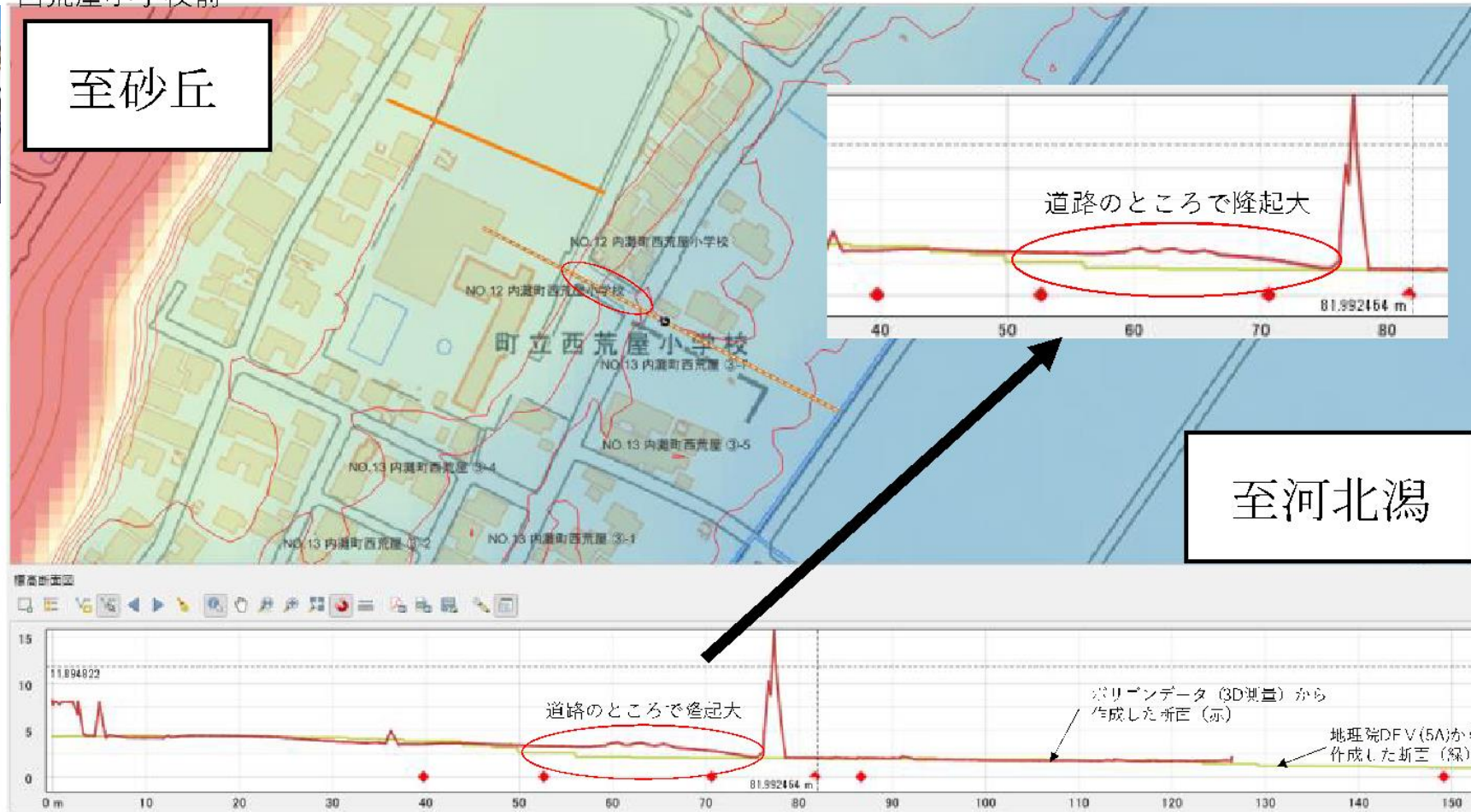


- 測量データ（赤線）と地理院データ（緑線）を比較することで、**グラウンドクラック部分には、段差が確認**できる。**クラックが発生していない部分は、元のグラウンド高さ**と3D測量時のグラウンド高さはほぼ一致し、**標高変化がほぼなかった**。
- クラックラインを頂点として、**グラウンドが横方向に移動したことが推測**できる。

3次元レーザー測量結果と国土地理院データの比較②

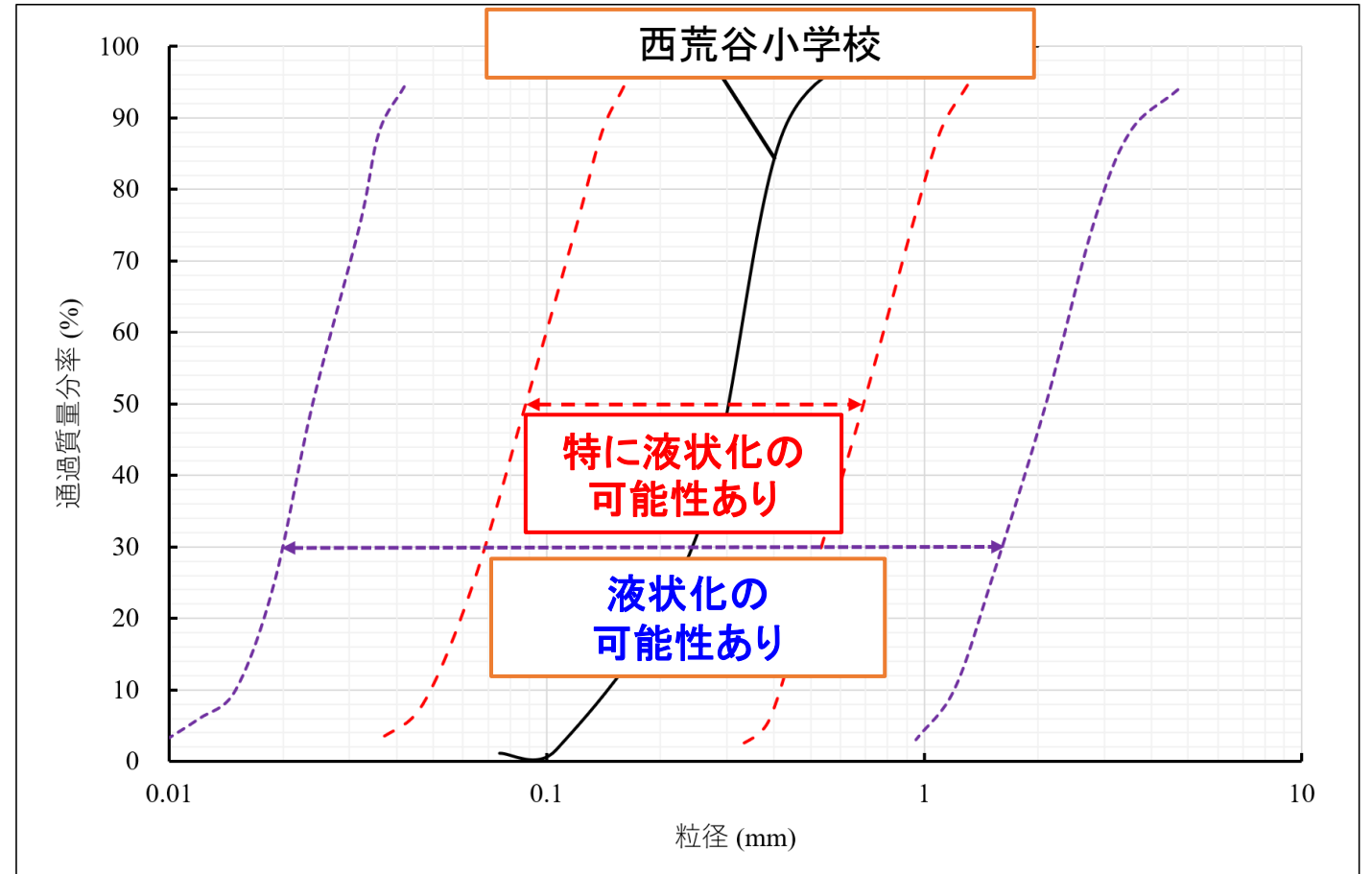
西荒屋小学校前

至砂丘



- 県道部の3Dレーザー測量データと地理院DEMデータとの比較を確認すると、明らかに県道が隆起していることが確認できる。
- 荒屋小学校前の県道部はこの測量データから隆起が発生していたと確認できた。

西荒屋地区の地質①

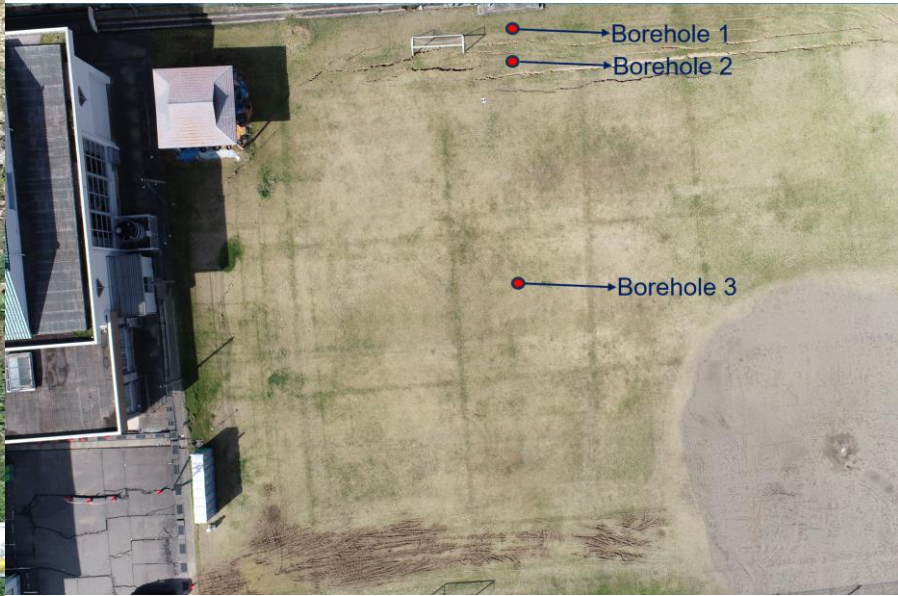


土の流動分布曲線

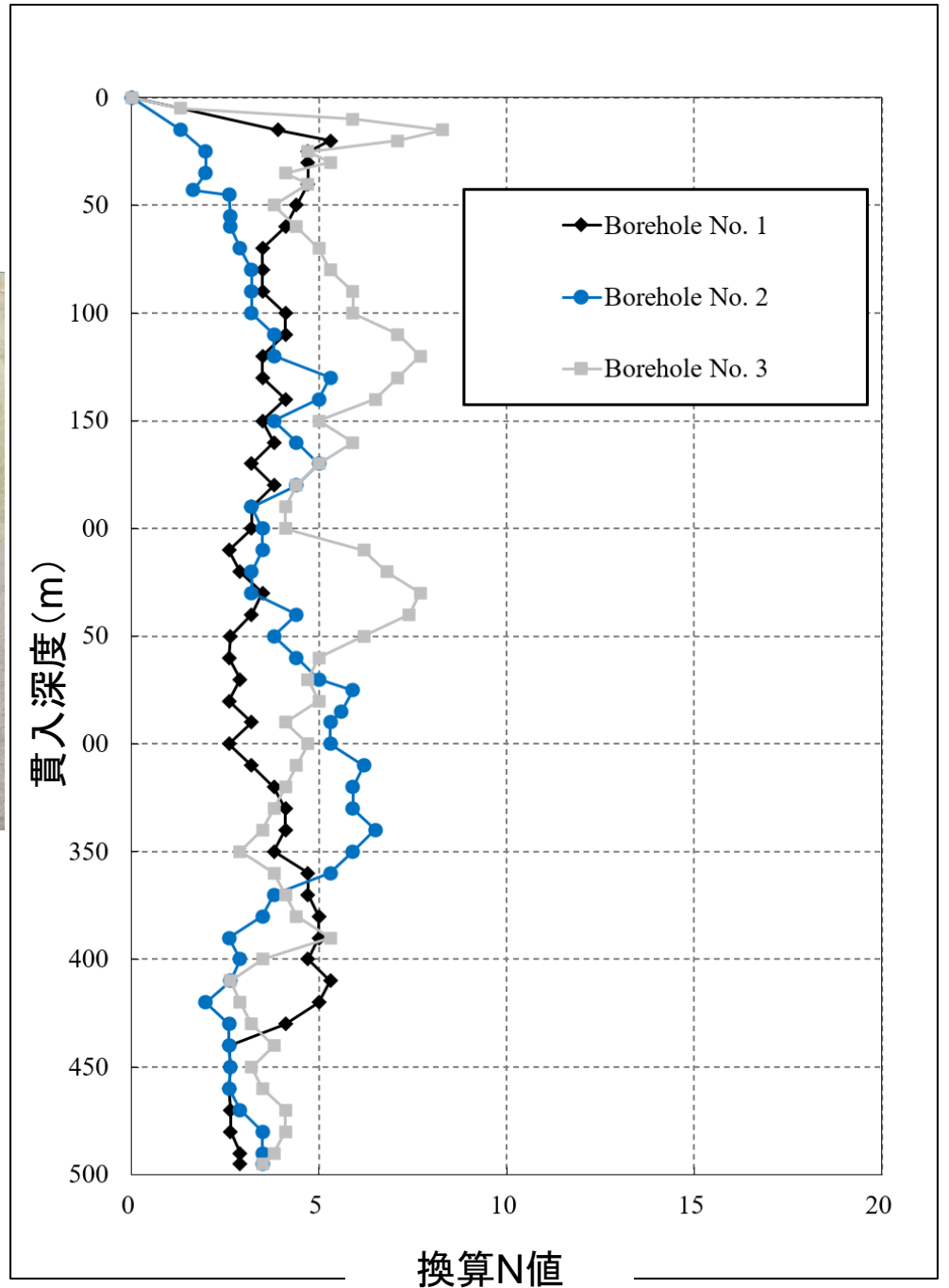


砂質土から粘質土まで分布しているか、
どこかの粒径に偏りがあるのかを判断できる。

西荒屋地区の地質② (PDCPT結果)



➤ N値が5以下で液状化しやすい地盤である。



*PDCPT (簡易動的コーン貫入試験)

**N値が約20以下であれば液状化の可能性があります、N値が10以下であれば液状化の危険性が高い。

室地区における被害調査と分析

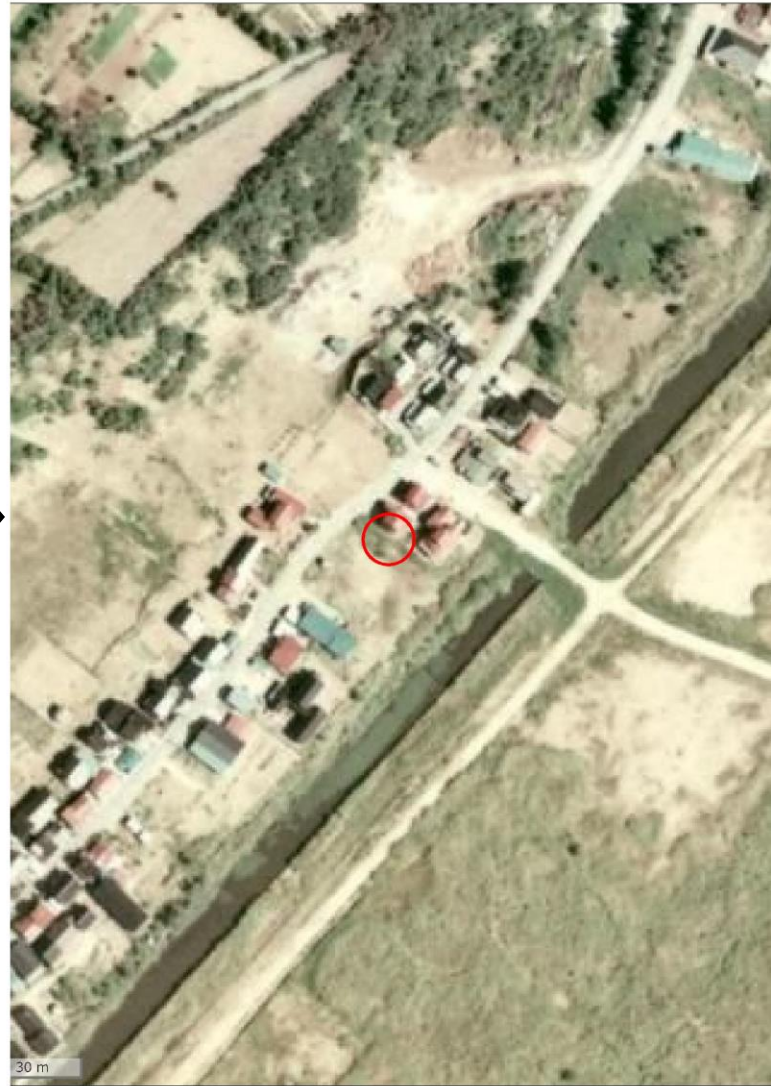
室地区における被害調査と分析



室地区の地形改変の変遷



1968/06/06 MCB684X-C6-3



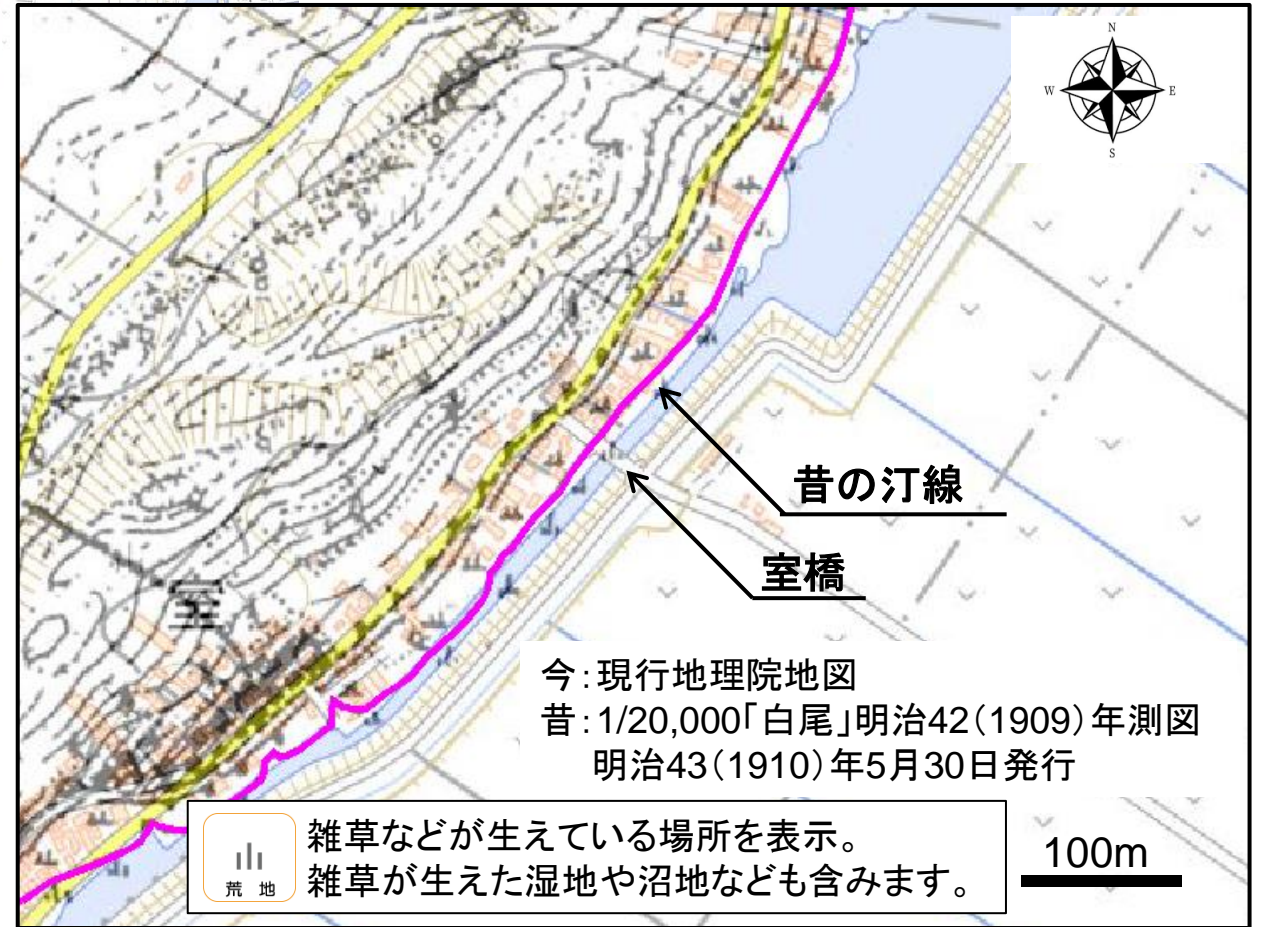
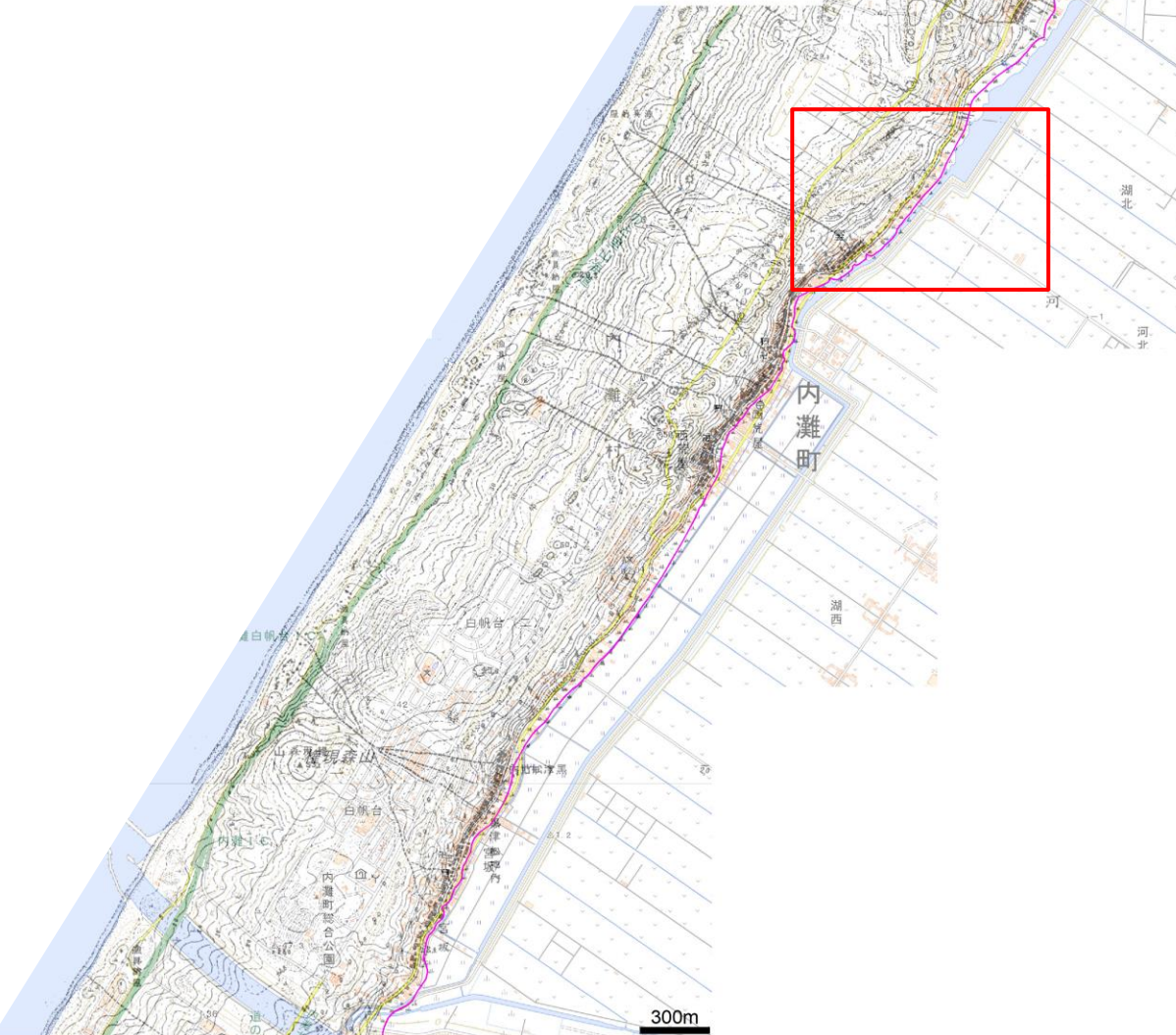
1975/09/06 CCB7519-C28-4




2011/10/12 CCB20118-C1-8

M. K.様宅

今昔マップon the Webの重ね合わせ



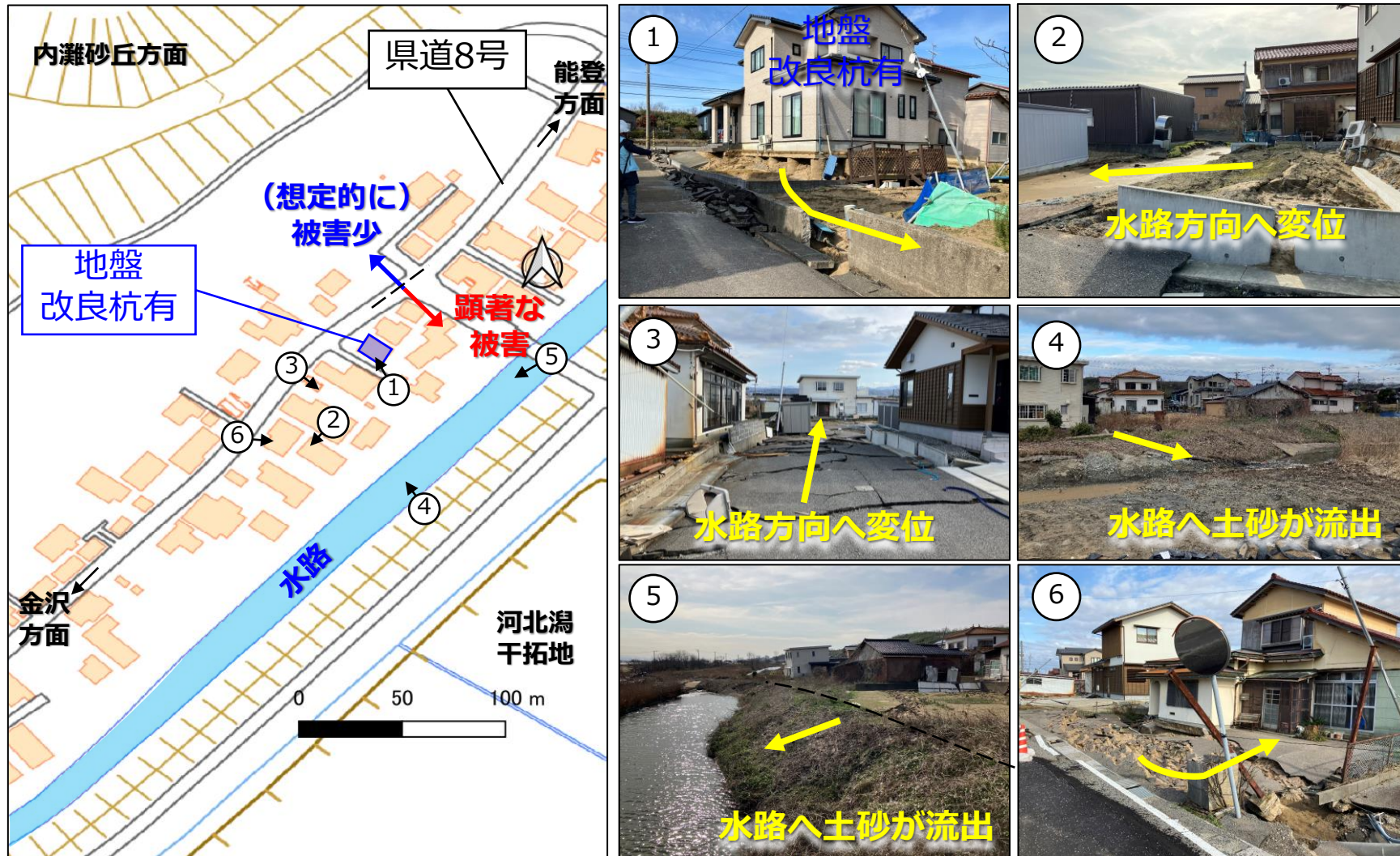
今: 現行地理院地図
昔: 1/20,000「白尾」明治42(1909)年測図
明治43(1910)年5月30日発行

 雑草などが生えている場所を表示。
雑草が生えた湿地や沼地なども含みます。

100m

※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

室地区（室橋付近）の被害状況



- 県道8号より水路側の複数の家屋が水路方向へ側方移動。
- 地盤改良杭が施工された家屋（①の写真）では、隣接する家屋と比較して変位が見られない。

地元住民への聞き取り調査



松本 樹典
(金沢大名誉教授)

M. K.様

県道から見たM. K.様宅



M. K.様宅は柱状地盤改良によって側方流動を免れた！



柱状改良体はL=6m×50本施工
目視では損傷は確認されず

家屋周辺の地盤



基礎周辺の地盤が液状化で側方流動し、流されている。

3次元レーザー測量実施範囲

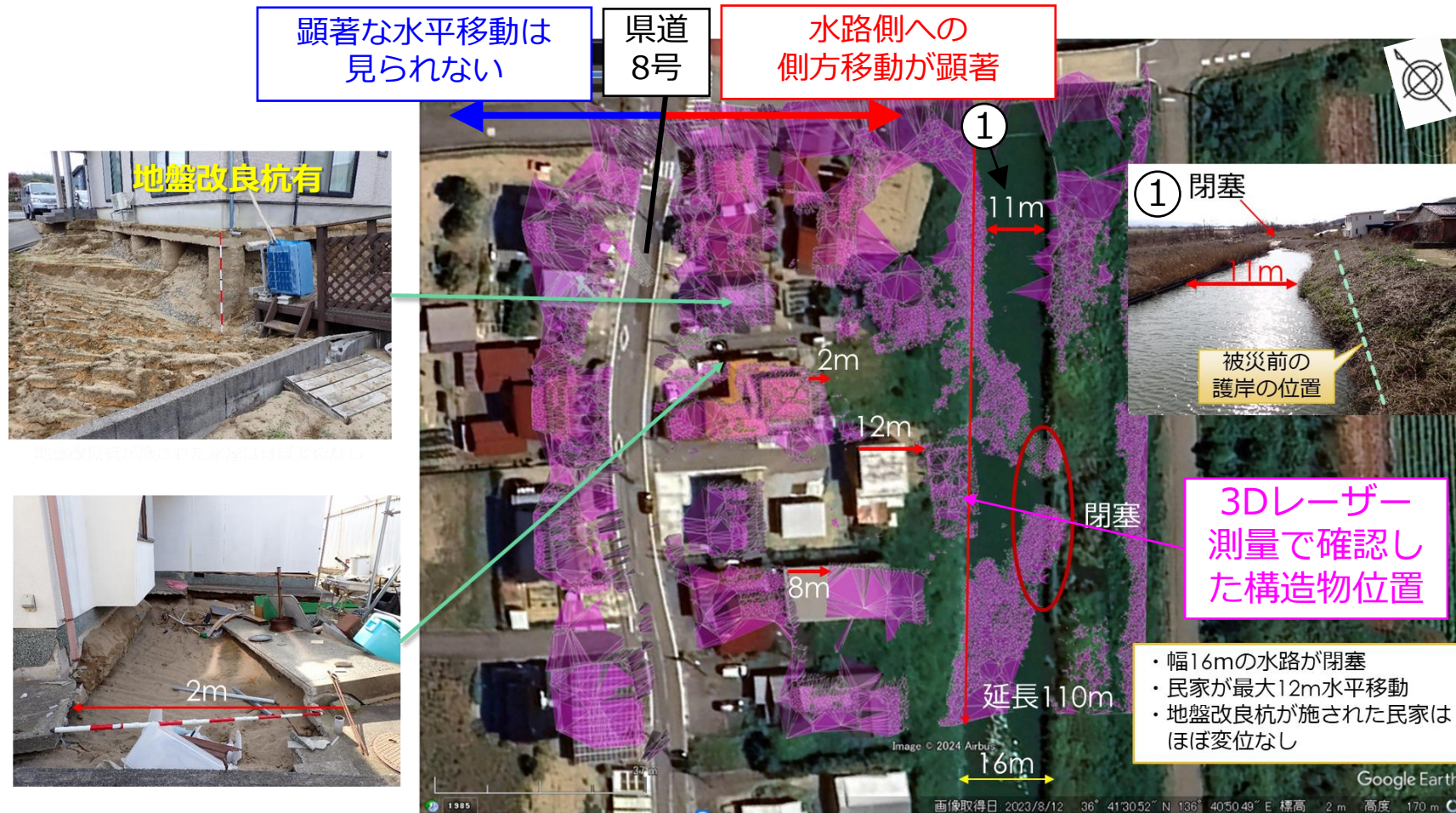


◆ 使用機器一覧

種別	使用機器・ソフトウェア	メーカー
3D レーザー測量	GLS-200 (1.0mm(σ), 40m 時)	TOPCON
3D 点群生成	MAGNET Collage (2.1.0.15780J)	TOPCON
3D 点群解析	SiTE-Scope2023	KENTEN
検証点 測量	RTF500 (2周波RTK-GNSS)	アカサカテック

- 液状化被害が顕著であった内灘町室地区の3Dレーザー測量を実施
⇒ 地震前航空写真・地形データ (5mDEM) と比較し、被害状況を把握

建造物の水平移動状況



- 3Dレーザー測量と航空写真との比較から、地盤改良杭が施工された家屋を除き、水路方向へ約2~12mの水平移動を確認。
- 水路付近では、護岸の変形を伴う河道閉塞を確認。
- 一方、県道8号より西側（内灘砂丘側）では顕著な水平移動無し。

マスコミの注目



液状化で住宅が12mほどずれ動く“広域的な対策を”石川 内灘町

2024年2月21日 15時03分

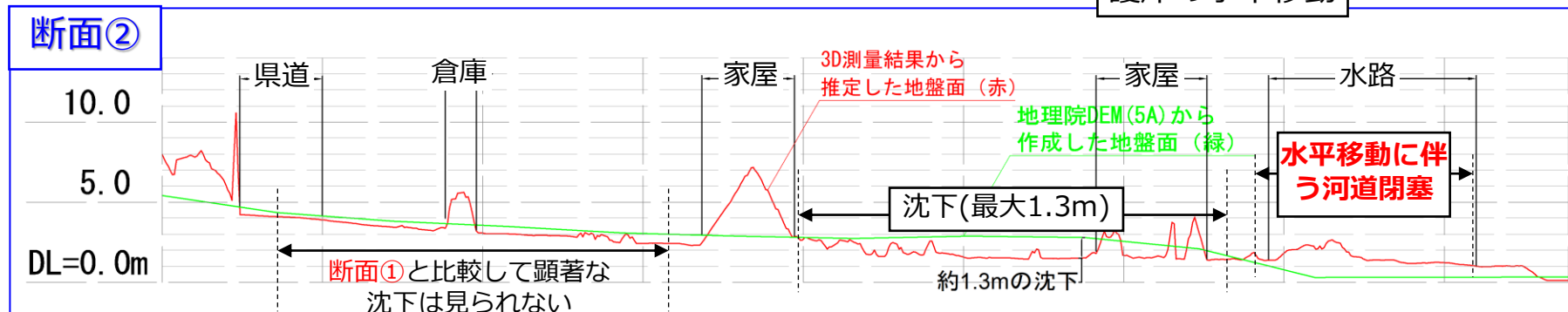
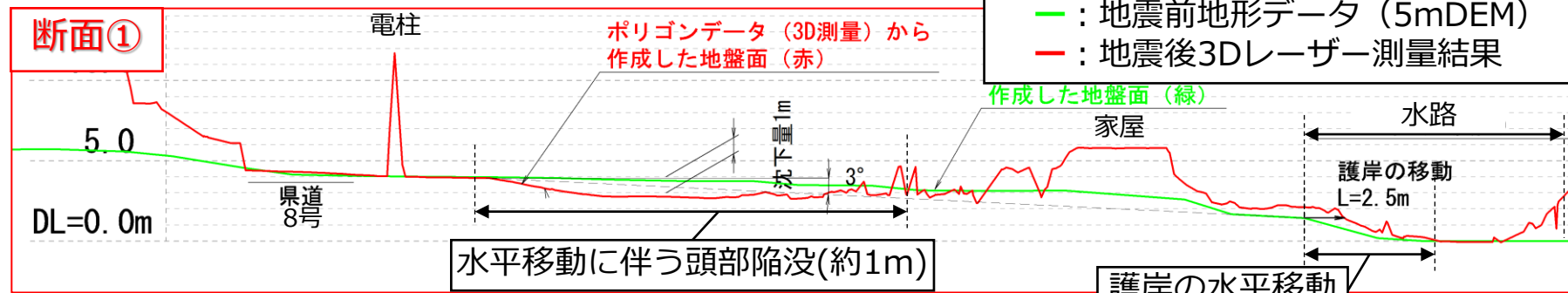
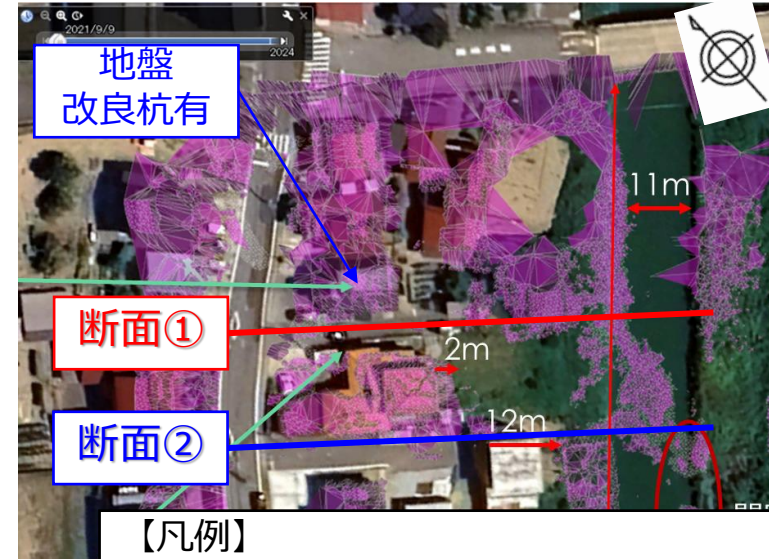
地震前後の変位状況

➤ 【断面①】 地盤改良杭施工家屋近傍

- 県道脇から約40mの範囲で最大約1mの沈下（水平移動に伴う頭部陥没と推定）
- 護岸の水平移動

➤ 【断面②】 約12m水平移動家屋近傍

- 水路付近での水平移動に伴う最大約1.3mの沈下とそれに伴う河道閉塞



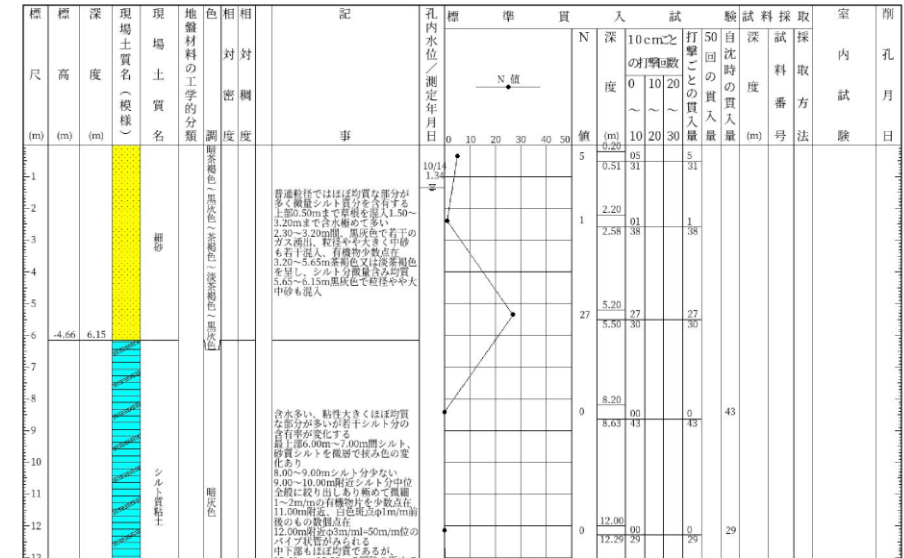
【凡例】
 緑線：地震前地形データ（5mDEM）作成した地盤面（緑）
 赤線：地震後3Dレーザー測量結果作成した地盤面（赤）

室地区の地質① 既往ボーリング

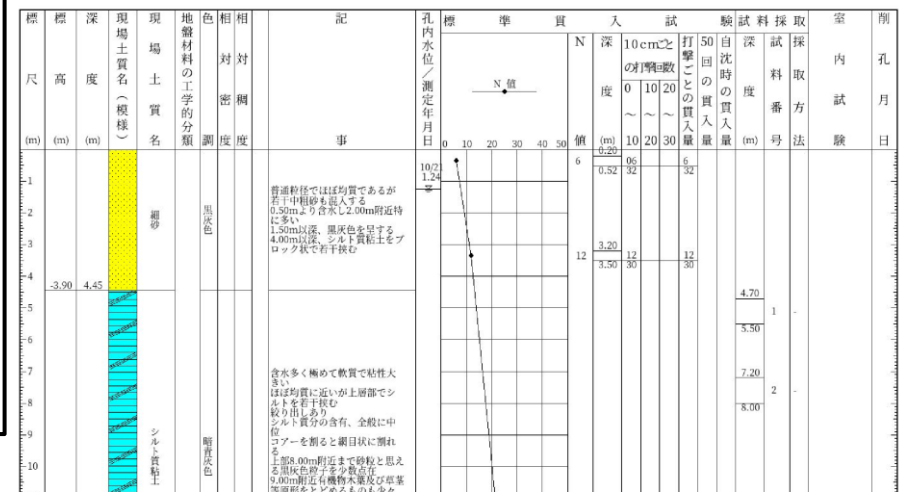


- 地表から4.45～6.15mの層厚で細砂が分布している。
- 干拓によって埋め立てられた地層である。
- 埋土の下位には粘土～シルト質粘土が層厚15m程度厚く堆積している。
- ボーリング掘削時に確認された地下水位は、地表面下1.24～1.34mと高い位置に存在している。

調査位置		河北潟干拓地内		北緯		36°41'31.9"	
建設事務所		不明		調査期間		昭和50年10月14日～昭和50年10月18日	
電話(不明)		主任技師 不明		現場代理人		不明	
総掘孔長		37.50 m		試験機		ロータリー式	
方位		北 0° 東 90° 南 180° 西 270°		ポンプ		不明	



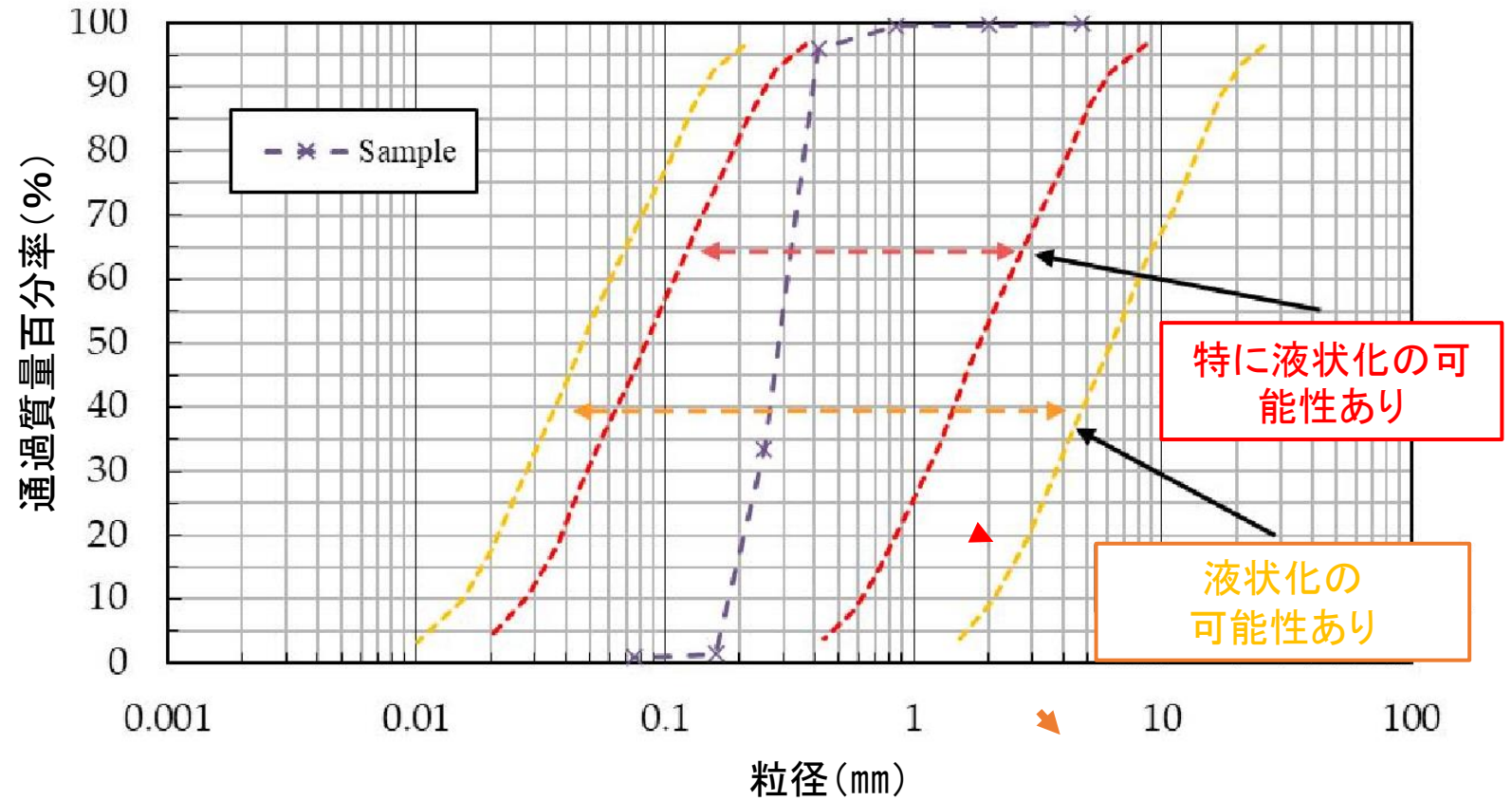
調査位置		河北潟干拓地内		北緯		36°41'30.2"	
建設事務所		不明		調査期間		昭和50年10月21日～昭和50年10月25日	
電話(不明)		主任技師 不明		現場代理人		不明	
総掘孔長		35.50 m		試験機		ロータリー式	
方位		北 0° 東 90° 南 180° 西 270°		ポンプ		不明	



室地区の地質②

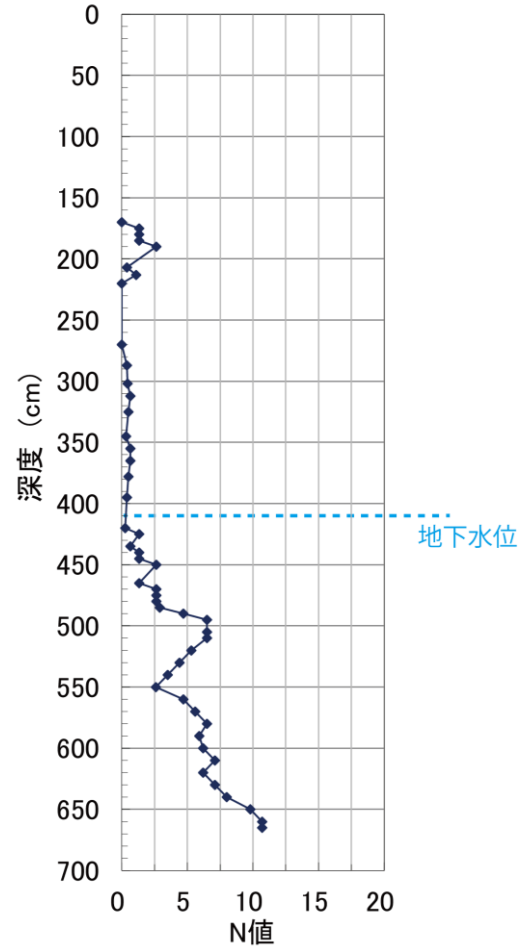
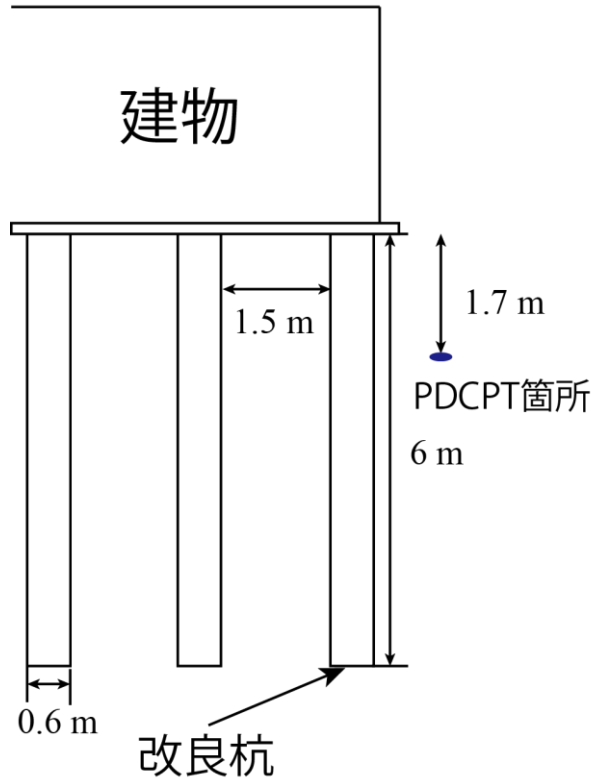


試料採取箇所



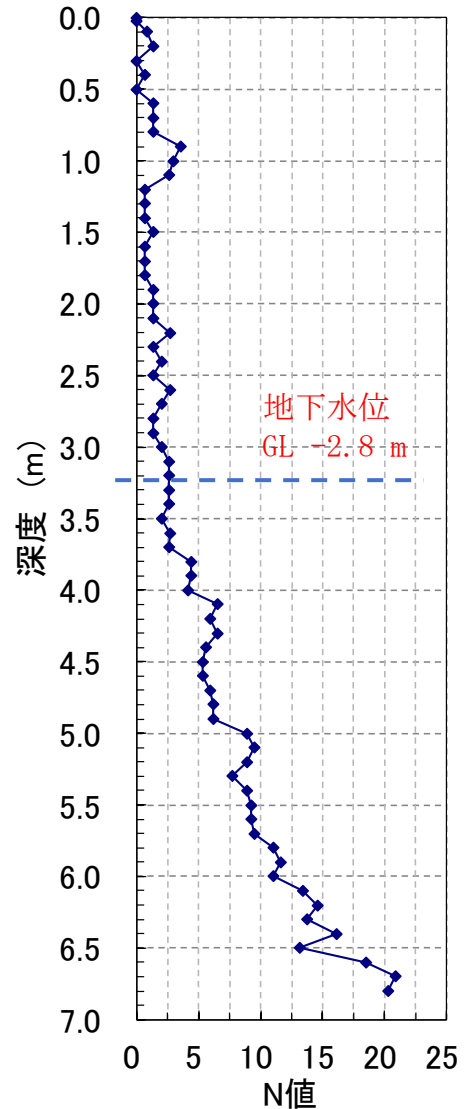
土の流動分布曲線

室地区の地質③(PDCPT結果)



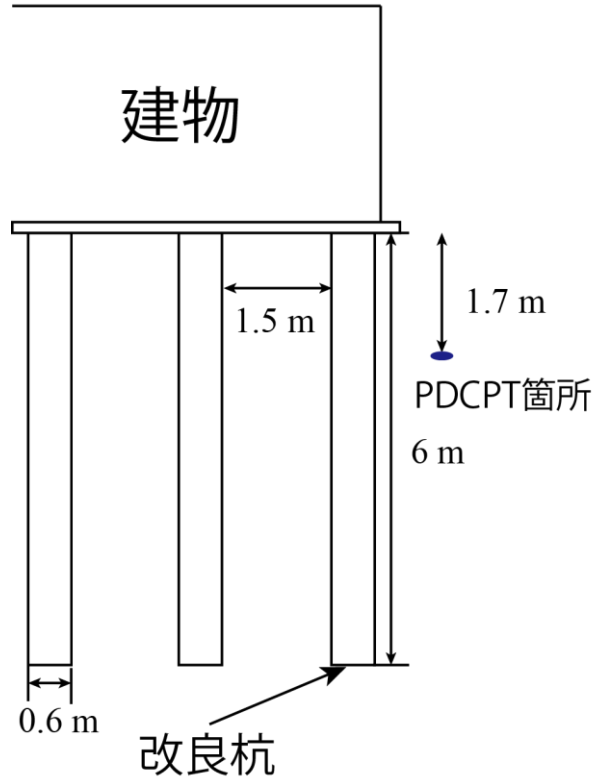
- 改良杭で支えられた住宅の基礎付近で行ったPDCPTの結果から、**約4mの深さに地下水が存在**していることが明らかになった。

室地区の地質④(PDCPT結果)

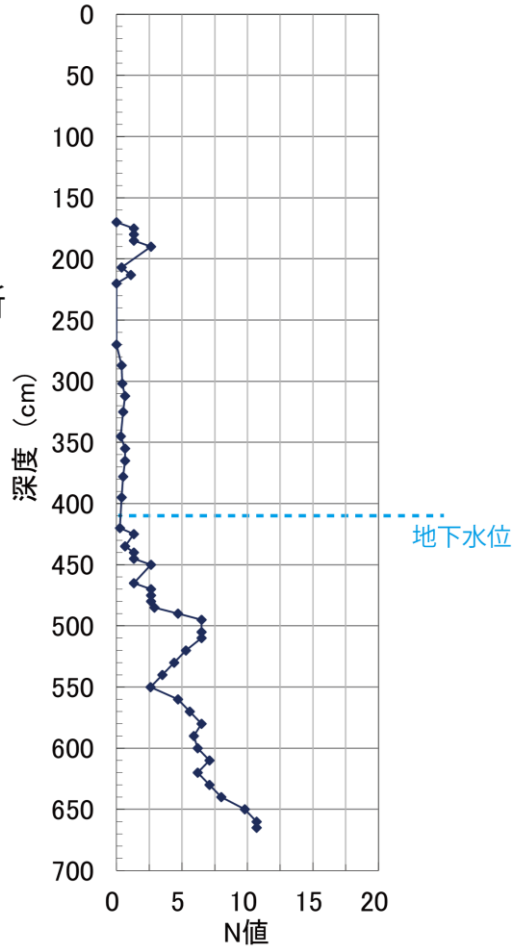


- 側方流動で12mほど移動した家屋の付近では、**深度4mまでN値5以下**。
- **比較的浅いところで (2.8m) 地下水位が確認された。**

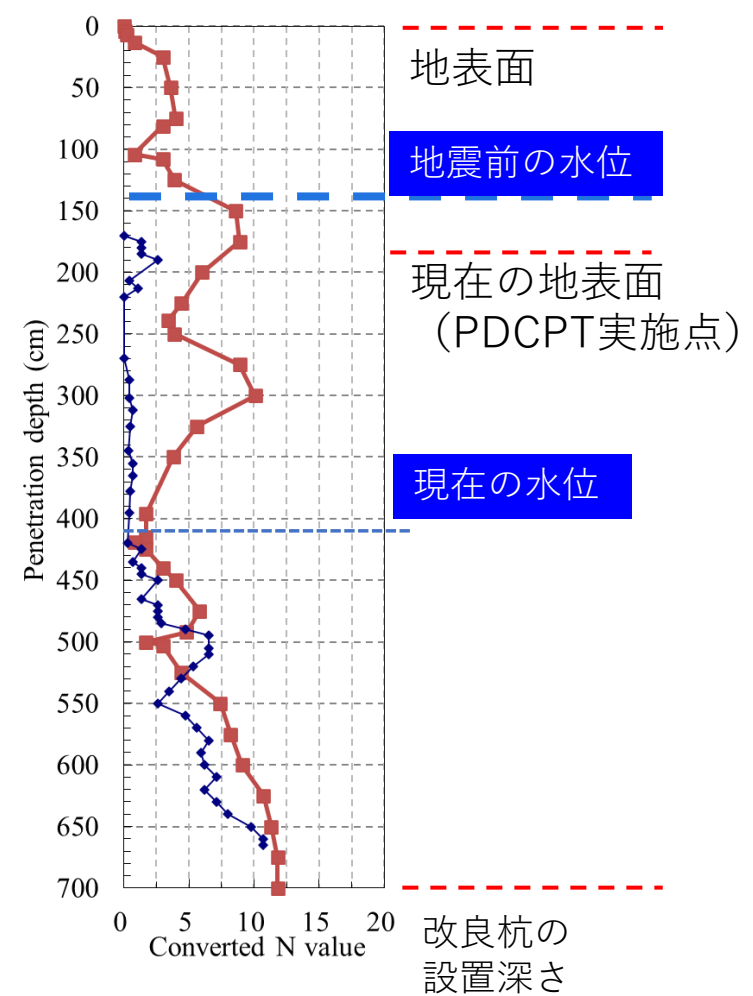
室地区の地質⑤(PDCPT結果)



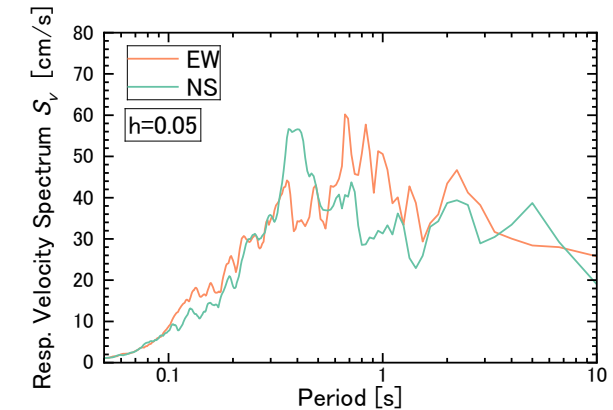
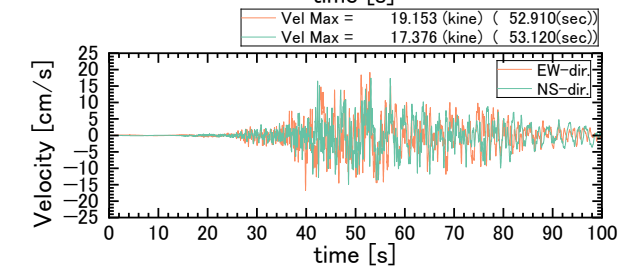
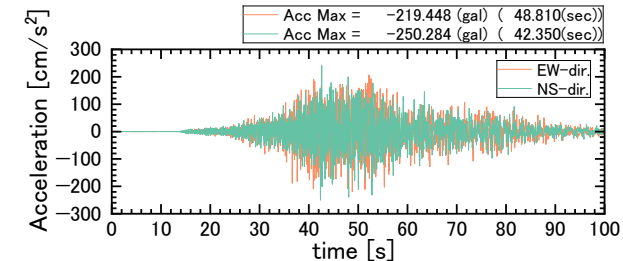
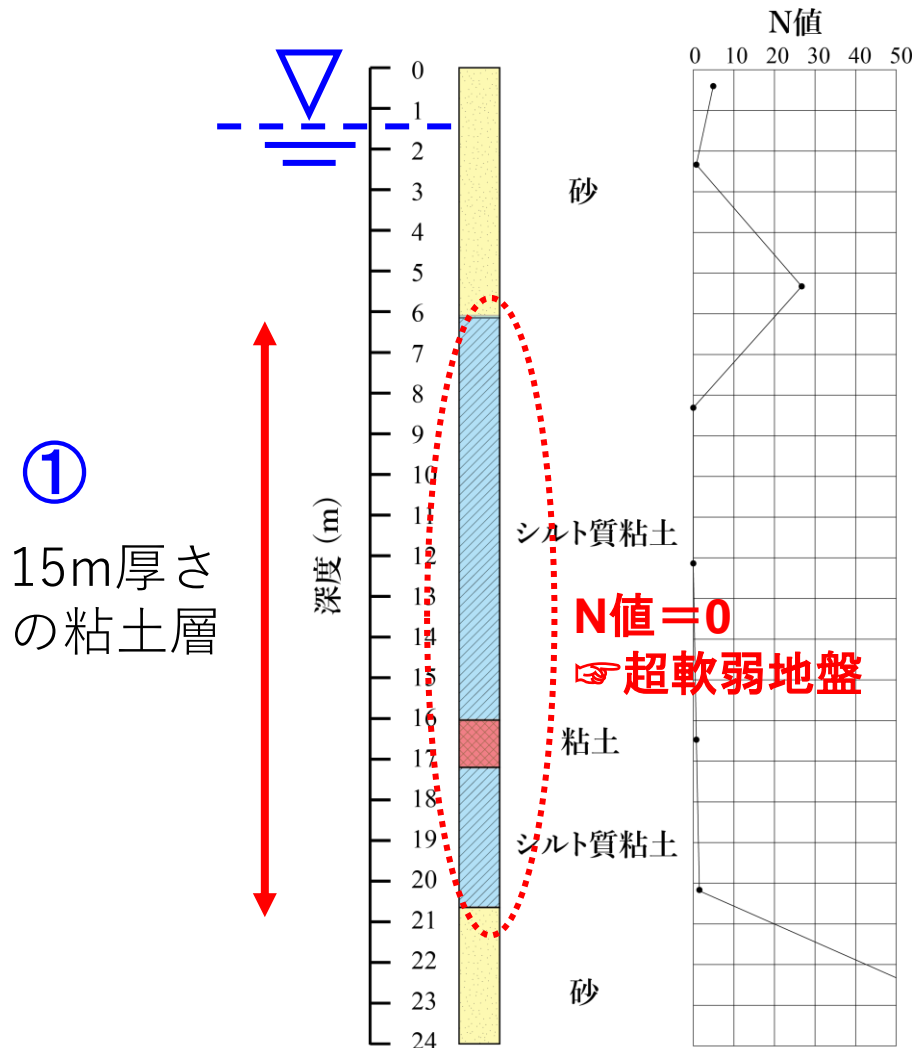
PDCPTデータ



建設前のボーリングデータとの比較



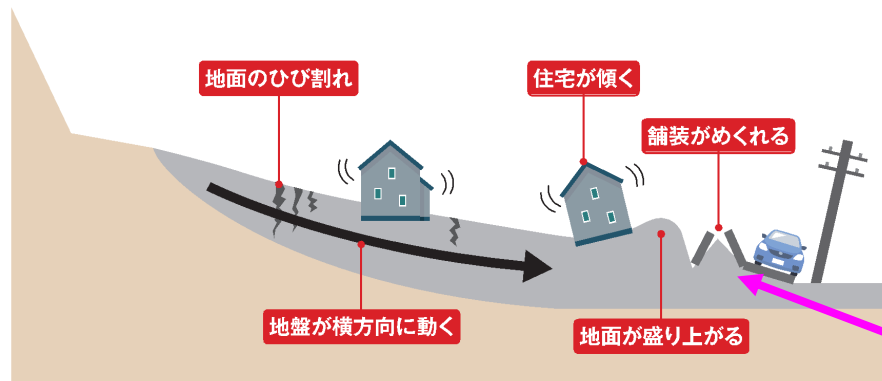
局所的な液状化被害の要因分析(1)



- ① 室地区では15mの厚さの超軟弱地盤層が地震動を増幅させ、甚大な液状化被害を引き起こしたと考えられる。
- ② 速度スペクトルが短周期に卓越し、速度が大きい(60 cm/s)ことも一因。

局所的な液状化被害の要因分析(2)

- ③ 内灘町は干拓事業によって埋め立てられた干拓地であり、**地下水位が浅い**。
- ④ 道路が圧縮され隆起している原因として、長年にわたる**交通振動による繰り返し荷重の影響**で表面が締固められたと推測される。
その結果、道路が支えとなり、**大きな側方流動が抑制された**と考えられる。



④

交通振動による繰り返し
荷重の影響で表面が締固められた



局所的な液状化被害の要因分析(3)



珠洲市



西荒谷近傍の県道

⑤

- ⑤ 浅い箇所での液状化により、被害が拡大。
内灘町で、マンホールの浮上は顕著ではない。

調査結果のまとめ

- (1) 地盤の段差と隆起は、液状化による側方流動によって引き起こされたすべり破壊の結果であると推測する。
- (2) 既往ボーリング掘削時に観察された地下水位は、比較的高い位置にあることから、液状化が発生しやすい環境にあると考えられる。
- (3) 液状化および側方流動により、複数の家屋が2～12m移動したが、改良杭が施工された家屋では変位がみられなかった。
- (4) 水平変位が観察された家屋の周辺では、約1mの沈下や河道部の隆起（河道閉塞）が確認された。
- (5) 地盤調査の結果から、室地区では地下水がかなり浅い位置に存在することが確認された。
- (6) 浅い箇所での液状化により、内灘町ではマンホールの浮上は顕著ではないと考えられる。
- (7) 流動破壊によって流れてきた地盤のほとんどが道路側で停止し、道路が圧縮されて隆起していることがわかった。

今後の課題

- ① 地下水位の徹底的な調査
- ② 多くのボーリングデータに基づく液状化ハザードマップを改善
- ③ 側方流動の危険性も記載する新たな液状化ハザードマップの作成
- ④ 地盤調査に基づく地下水位の低下工法
- ⑤ 危険性のある場所に安価な地盤改良工法を実施

産・官・学 学術調査団による内灘町での報告会

内灘町役場 令和6年4月17日



謝 辞

このたびの能登半島地震により被災された皆様に、また、ご家族・関係者の皆様に心よりお見舞い申し上げますとともに、皆様の安心と安全が1日でも早く確保されますよう、心よりお祈り申し上げます。

現地調査に際し、内灘町役場はじめ関係各位には、現地調査にご理解いただき、ご協力いただきました。また、被災された地元の皆様から被災当時の貴重な証言をいただき、大変参考になりました。

地震動に関しては、防災科学技術研究所(NIED)のデータを利用しました。

末筆ながら関係各位に感謝申し上げます。

また、本調査の実施にあたり、以下の2つの研究支援を受けた。

- 1) 九州大学総長裁量経費 2024年能登半島地震の復旧・復興支援に向けた異分野連携の調査
- 2) 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 共同利用・研究拠点(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」)

ご清聴いただき、ありがとうございました。

2024年能登半島地震に関するワークショップ

2024年10月11日（金）13:00～17:00 福岡

13:00	開会あいさつ	調査団代表	九州大学大学院工学研究院 教授	ハザリカ ヘマンタ
一般講演				
13:05~13:20	防災科学技術研究所	石澤 友浩		断層近傍の強震観測記録に基づく地震動特性
13:20~13:35	富山県立大学	兵動 太一		奥能登および富山県における液状化被害の概要
13:35~13:50	地盤防災研究所	藤白 隆司		かほく市および内灘町における液状化被害の概要
13:50~14:05	株式会社吉光組	道 勇治		ドローンおよび3Dレーザー測量を用いた内灘町西荒屋地区の被害分析
14:05~14:15 休憩				
14:15~14:30	清水建設株式会社	村井 政徳		内灘町室地区の地形・地質・地歴について
14:30~14:45	川崎地質株式会社	太田 史朗		内灘町室地区で発生した地盤の側方流動について
14:45~14:55	九州大学	ハザリカ ヘマンタ		局所的な液状化被害の要因分析
14:55~15:10	質疑応答			
15:10~15:20 休憩				
特別講演				
15:20~15:40	九州大学	菅 浩伸		能登半島北岸の浅海底地における地形調査
一般講演				
15:40~15:55	中央大学名誉教授	國生 剛治		地震記録によるSS-Newmark 法での降伏変位を考慮した斜面の滑り破壊について
15:55~16:10	九州大学	梶田 幸秀		Lidarによる路面段差精度の検討
16:10~16:25	九州大学	小宮 哲平		災害破棄物の処理現状と課題
16:25~16:35	金沢大学名誉教授	松本 樹典		2007年能登半島地震を振り返って
16:35~16:50	質疑応答			
16:50	閉会あいさつ		九州大学マス・フォア・インダストリ研究所 教授	福本 康秀