

干渉 SAR 解析を用いた令和 6 年能登半島地震による 内灘町及びかほく市の地盤変状範囲の抽出と変状要因の考察

窪田上太郎¹, 太田史朗¹, ハザリカ・ヘマンタ², 風間基樹¹

1 川崎地質株式会社

2 九州大学大学院・工学研究院

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、石川県、富山県、新潟県の広範囲に甚大な液状化被害をもたらした。特に、石川県河北郡内灘町及びかほく市周辺は被害が顕著であり、液状化による地盤の側方流動や、それに伴う水路閉塞等が確認され、被害状況把握や被災メカニズムの解明を目的とした現地調査^{1)~4)}や室内試験⁵⁾が実施されている。地震発生後の災害復旧にあたっては、被害状況の迅速な把握が不可欠であるが、被害が広範囲に及ぶと状況把握が困難となる場合がある。そのため、被害状況を効率的に把握できる方法が必要である。

近年、合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar, 以下 SAR とする）を用いて、衛星画像から地表面状態を観測できる干渉 SAR 解析が実用化されている。干渉 SAR 解析は、SAR で地表の同一地点を 2 時期で観測し、得られた反射波を干渉させて得られる位相差を実際の距離変化に換算することで地表面変位を推定する技術である。ただし、液状化等によって地表面の散乱状態が著しく変化した場合は、地震前後の反射波を干渉させることができず、地表面変位の推定が困難になる。そのため、本論文では、地震前後の地表面の散乱状態の変化を表す指標であるコヒーレンスを用いて、地震による地盤変状範囲を推定する。既往研究では、干渉 SAR 解析を用いた液状化地域の把握や宅地造成地の変動検出等の試みがなされている。小林ら⁶⁾は、干渉 SAR 解析で得られる地震前後の地表面の散乱状態の変化（コヒーレンス変化）を利用して、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴って発生した液状化地域の把握を試みた。その結果、浦安市とその周辺で、現地調査で確認された液状化/非液状化範囲とコヒーレンス変化の分布に空間的に良い相関が認められ、干渉 SAR 解析の結果から液状化範囲を調査する際は、コヒーレンス画像の利用が可能であるとの結果を得ている。ただし、コヒーレンス変化から一意に液状化の発生有無を特定することは原理上不可能であるため、その限界を把握したうえで調査に活用することが重要と結論付けられている。また、宮嶋ら⁷⁾は、干渉 SAR 解析を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した宅地造成地の地盤変状検出を試み、実際に地盤変状が確認された箇所が、干渉画像上において局所的な位相変化領域や非干渉領域として検出されることを示した。これらの結果からも、地震や液状化等に起因する地盤変状範囲の抽出には、干渉 SAR 解析のコヒーレンス変化に着目すべきであることが示唆される。

本論文の目的は、令和 6 年能登半島地震によって甚大な液状化被害を受けた石川県河北郡内灘町及びかほく市を対象に干渉 SAR 解析を実施し、地震発生前後の地表面のコヒーレンス変化から、地震による地盤変状範囲を抽出することである。併せて、抽出した地盤変状範囲と実際の被害状況との整合性を確認するとともに、地形・地質等に着目し、変状要因を考察することを目的とする。

2. 内灘町及びかほく市における液状化被害の概要

石川県河北郡内灘町及びかほく市は、内灘砂丘の内陸側外縁部に位置しており、令和 6 年能登半島地震によって、甚大な液状化被害が発生した。図 1 は、内灘町及びかほく市の位置図を示している。特に、内灘砂丘の河北潟側の外縁部に位置する県道 8 号沿いで顕著な液状化被害がみられ、河北潟干拓地方向への地盤の側方流動や噴砂が確認されている^{1)~3)}。

3. 干渉 SAR 解析による地盤変状範囲の抽出方法

3.1. 干渉 SAR 解析の概要

合成開口レーダー（SAR）は、人工衛星に搭載されるレーダーの一種であり、衛星自ら地表面にマイクロ波を発射し、地表面で様々な方向へ散乱した反射波の中でレーダー方向へ戻る成分（後方散乱波）を観測して画像化する特徴をもつ。干渉 SAR 解析は、SAR を用いて、地表の同一地点を



図 1 内灘町及びかほく市 位置図⁸⁾に加筆

異なる 2 時期で観測し、観測した反射波の位相差を実際の距離変化に換算することで地表面変位を推定する技術である。干渉 SAR 解析に用いる 2 枚の衛星画像は、衛星軌道と観測範囲が同一であることに加えて、観測に用いたマイクロ波の周波数帯が一致している必要がある。図 2 は、干渉 SAR 解析の概念図を示している。観測する位相差は $-\pi \sim \pi$ の値の繰返しで折り畳まれ記録されるため、位相差を実際の変位量に換算する際には、空間的な連続性を考慮して位相差を連続的な値（絶対値）に戻す必要がある。よって、地震や液状化により地表面状態が局所的に激しく変化した場合、位相差の空間的な連続性が損なわれ、バラツキが大きくなるため、位相差を連続的な値に戻すことができず、変位の推定が困難となる。そのため、本論文では 1 回目と 2 回目の地表面の散乱状態の変化を表す指標であるコヒーレンスを用いて、地震による変状範囲を抽出する。

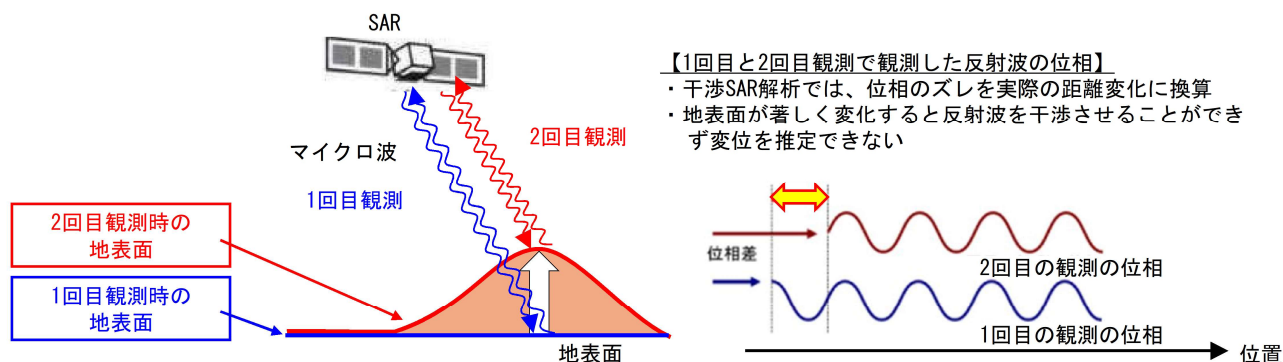


図 2 干渉 SAR 解析の概念図^{9), 10)}に加筆

3.2. コヒーレンス低下量に基づく地盤変状範囲の抽出

コヒーレンスは、1 回目観測と 2 回目観測で観測された後方散乱波の整合性や類似度を示す指標であり、0~1 の値をとる（具体的な算出式は、例えば文献 9)等を参照）。一般的に、コヒーレンスの値は地表面の被覆状態に依存し、建物が多く存在し、安定した後方散乱波が得られる都市部で高く、植物の影響で地表面の被覆状態が変化しやすい森林や田畑等で低い値をとる（表 1 参照）。ただし、安定した後方散乱波が得られる都市部であっても、1 回目観測と 2 回目観測の間で地震等によって構造物や地表面に大規模な変形・変位があった場合は、後方散乱波の類似度が低くなるため、コヒーレンスは低下する。

本解析では、地震前の 2 時期に撮影された衛星画像及び地震前後の 2 時期に撮影された衛星画像を用いて、2 通りの干渉 SAR 解析を実施し、それぞれのコヒーレンス分布を求める。はじめに、地震前 2 時期に撮影された衛星画像を用いて干渉 SAR 解析を実施し、地震前のコヒーレンス分布を求める。この分布は、その土地が元来保有するコヒーレンス分布であり、人工物が多く後方散乱が強い範囲では高いコヒーレンス、田畑や森林が分布し後方散乱が弱い範囲では低いコヒーレンスが得られる。次に、地震前後 2 時期に撮影された衛星画像を用いて干渉 SAR 解析を実施し、地震後のコヒーレンス分布を求める。地震によって構造物や地表面に大規模な変位が生じ、地表面状態が著しく変化した場所では、地震前後で観測される後方散乱波の類似度が低くなるため、地震前と比較してコヒーレンスは低下する。最後に、2 つのコヒーレンス分布の差分を取ることで、地震前後でコヒーレンスが著しく低下した範囲を抽出する。図 3 は、解析手順の概念図を示している。また、図 4 は推定するコヒーレンス低下量分布の概念図を示している。なお、図 4 中の四角は、地図投影後の各メッシュ（約 14m 四方）と得られたコヒーレンス値を示している。コヒーレンスが著しく低下した範囲は、地震前後で地表面の状態が著しく変化した範囲であるため、地震により何らかの被害を受けている可能性が高い。ただし、田畑や森林等が分布する範囲は、元来保有するコヒーレンスが低いため、コヒーレンス低下量分布から地表面状態の変化を抽出しづらい点に留意する必要がある。

表 1 一般的な地表面の被覆状態とコヒーレンスの関係性

地表面の被覆状態	特徴	コヒーレンス値の傾向
都市部	・人工物（家屋、道路、ビル）が多く後方散乱が強い	高（1 に近い）
森林・田圃・畑等	・植生の影響で安定した後方散乱波が得られない	中～低
水面	・鏡面反射となり、後方散乱波はほとんど生じない	低（0 に近い）

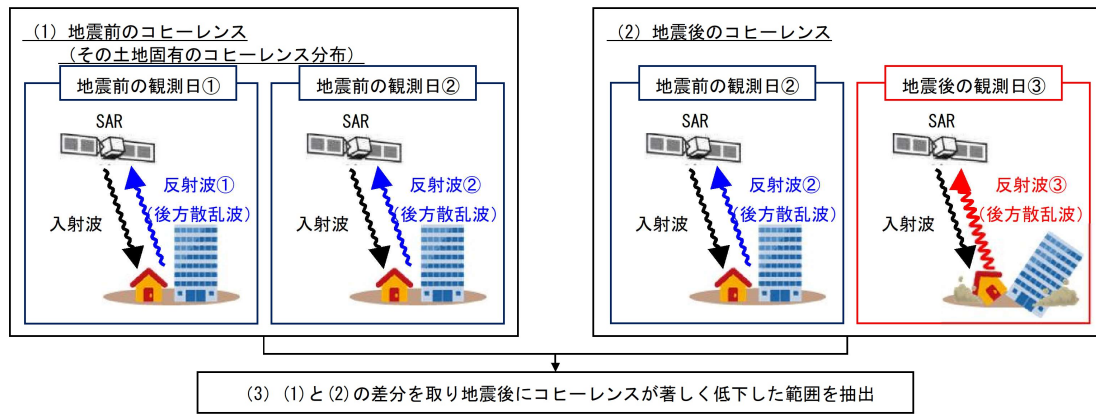


図 3 干渉 SAR 解析のコヒーレンス低下量に基づく変状範囲の抽出 概念図

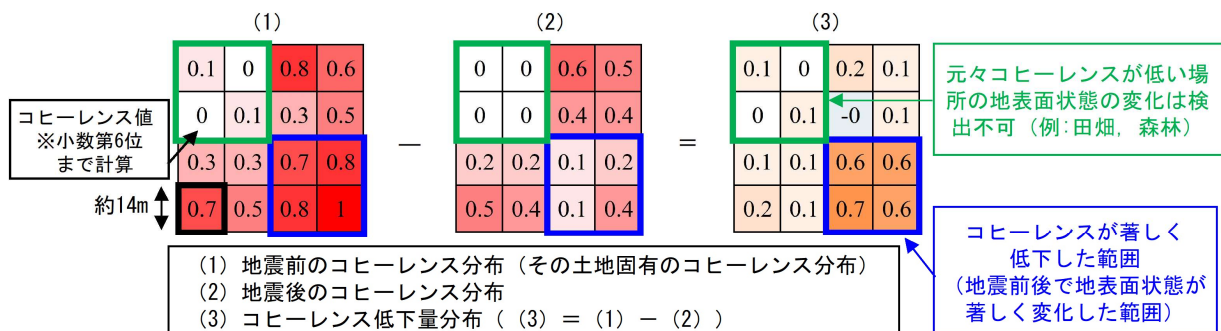


図 4 コヒーレンス低下量分布の概念図

3.3. 解析条件

表 2 は本解析で使用した SAR である Sentinel-1 の諸元を、表 3 は干渉 SAR 解析の検討ケースを示している。はじめに、地震前の 2 時期に撮影された衛星画像を用いて干渉 SAR 解析を実施し、その土地固有のコヒーレンス分布を求める。次に、地震前後の 2 時期に撮影された衛星画像を用いて干渉 SAR 解析を実施し、地震後のコヒーレンス分布を求める。最後に、それらの差分を取ることで、地震前後でコヒーレンスが低下し、地表面状態が著しく変化した範囲を抽出した。本解析で得られるコヒーレンス変化は、地震前後の 2 時期間で発生したすべての地表面変化によるものである。そのため、地震以外の要因を可能な限り取り除くため、地震発生日（2024 年 1 月 1 日）を跨いだ直近 2 観測日（2023 年 12 月 30 日、2024 年 1 月 11 日）の衛星画像を用いて、地震後のコヒーレンス分布を求めた。また、本解析で用いた衛星 Sentinel-1 は、概ね 12 日に 1 度、地表の同一地点を観測する軌道で地球を周回している。そのため、災害直後に衛星画像を用いた解析を実施する場合には、直近及び次回衛星観測日に留意する必要がある（最大で約 12 日後の観測となる場合がある）。なお、本論文で実施した干渉 SAR 解析では、衛星画像のノイズ軽減を目的としてマルチルッキング処理（アジマス方向 4 ルック×レンジ方向 1 ルック）を実施し、約 14m のメッシュサイズで地図投影を行った。

表 2 干渉 SAR 解析に使用した衛星概要

名称	バンド帯（マイクロ波の波長）	水平分解能力（≒識別可能な最小の大きさ）	観測頻度
Sentinel-1	C バンド（約 6cm）	約 5m（衛星進行方向（アジマス方向）） ×約 20m（進行方向と直角方向（レンジ方向））	約 12 日毎に 1 回

表 3 干渉 SAR 解析の検討ケース

No.	項目	衛星画像撮影日（1 回目観測－2 回目観測）
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）	2023/12/18（地震前）－2023/12/30（地震前）
2	・地震後のコヒーレンス分布	2023/12/30（地震前）－2024/1/11（地震後）

4. 干渉 SAR 解析で抽出した地盤変状範囲

図 5 は、干渉 SAR 解析で得られたコヒーレンス分布を示している。順に（1）地震前のコヒーレンス分布、（2）地震後のコヒーレンス分布、（3）地震前後でのコヒーレンス低下量の分布を示している。図 5（3）の赤～橙色で示す範囲が、

地震前後でコヒーレンスが著しく低下した範囲である。当該範囲は、地震前後で地表面状態が大きく変化し、地震による何らかの変状が発生したと考えられる。ただし、河北潟干拓地内の一部区域のように地震前のコヒーレンスが概ね 0.4 以下と低い範囲では、地震によって地盤変状が発生していた場合でも、コヒーレンス変化（低下）を抽出できない場合がある。そのため、田畑や森林等、その土地固有のコヒーレンスが低い範囲を評価する場合は留意が必要である。

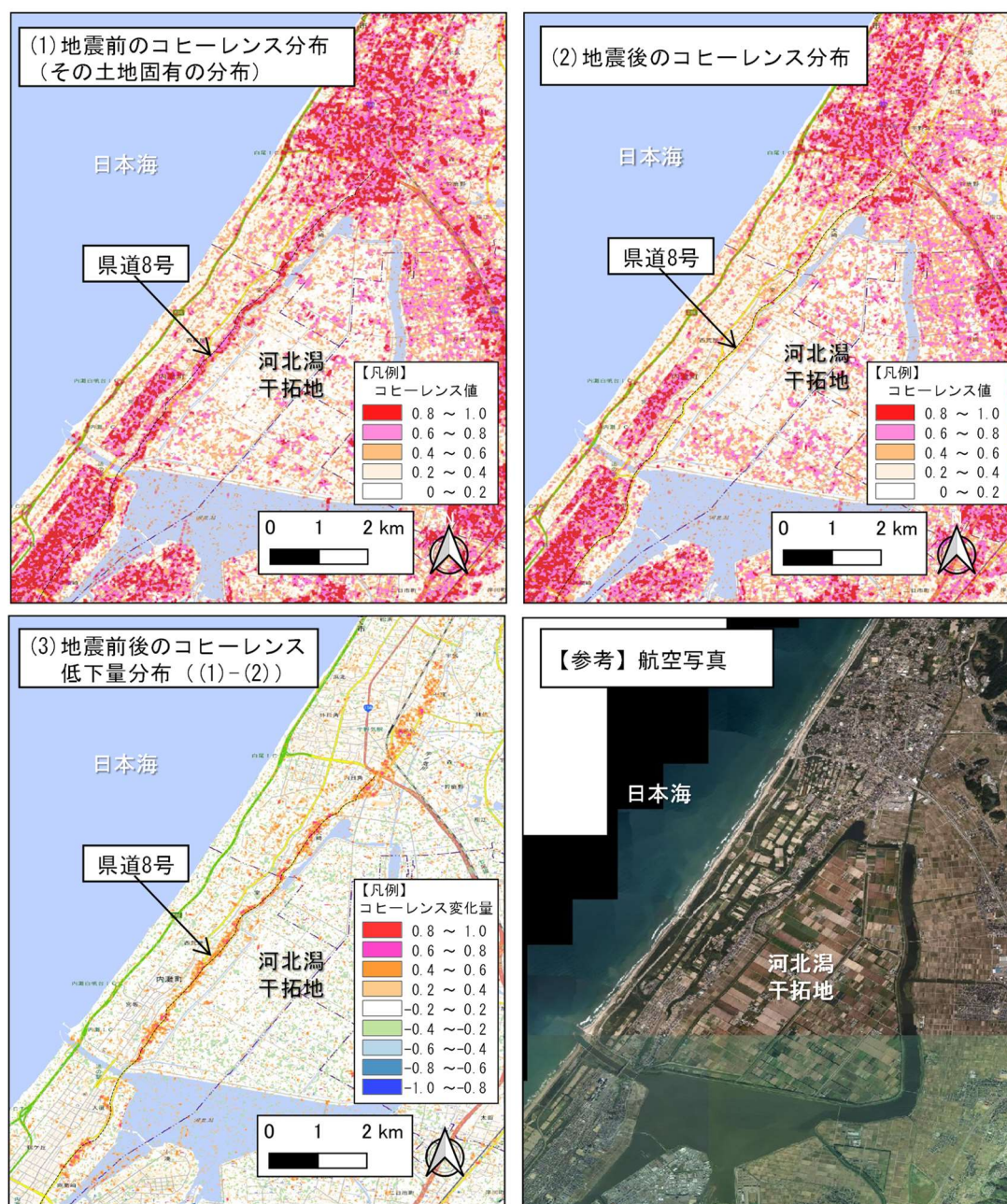


図 5 干渉 SAR 解析で推定したコヒーレンス分布と地震前後のコヒーレンス低下量⁸⁾に加筆

5. 現地被害状況と干渉 SAR 解析結果の比較

干渉 SAR 解析で推定した地盤変状範囲と現地の被害状況を比較し、整合性を確認した。解析結果と現地被害状況の比較は、内灘町西荒屋（にしあらや）地区、内灘町室（むろ）地区及びびかほく市宇野気（うのけ）地区の 3 地区で実施した。図 6 は被害状況を比較した 3 地区の位置関係を示している。

5.1. 内灘町西荒屋地区

図 7 は、内灘町西荒屋地区の被害状況を示している。写真①は、県道 8 号の被害状況を示しており、路面の起伏に加えて河北潟干拓地方向への電柱の傾きが確認された。また、写真②は、県道 8 号より内灘砂丘側に位置する小学校グラウンドであり、河北潟干拓地側への側方流動に伴い発生したテンションクラックの状況を示している。写真①及び写真②で示

したエリアは、地震によって大規模な地表面変位が生じ、地震前後の後方散乱波の類似度が低くなったため、コヒーレンスが低下したと考えられる。また、写真③は、小学校近傍の路面で確認された噴砂であり、付近一帯で同様の変状が確認されている。噴砂が確認された場所では、路面や構造物のクラックや傾きも確認することができ、液状化によって地表面変位が生じたことによってコヒーレンスが低下したと考えられる。以上の比較から、顕著なコヒーレンス低下がみられた県道 8 号沿いや小学校付近で液状化に伴う地盤変状を確認でき、西荒屋地区において解析結果と実際の被害状況との対応を確認できた。



図 6 現地状況と解析結果の比較場所

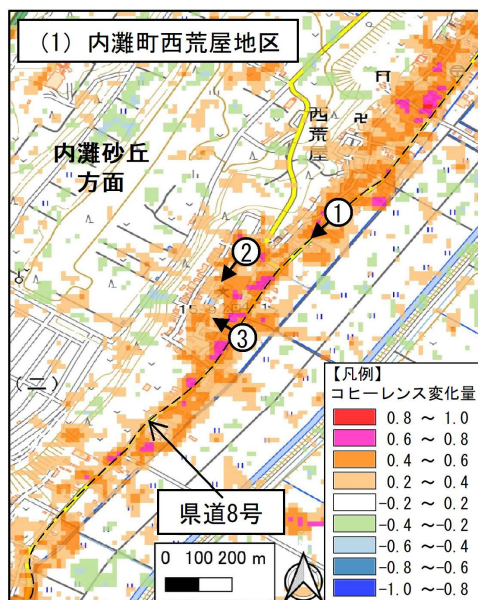


図 7 内灘町西荒屋地区における解析結果と被害状況の比較⁸⁾に加筆



5.2. 内灘町室地区

図 8 は、内灘町室地区の解析結果と被害状況の比較を示している。写真④、⑤は、室橋付近で発生した側方流動の様子を示している。室橋付近では、県道 8 号よりも河北潟干拓地側の宅地が水路方向へ側方流動しており、水路閉塞等が発生している。また、写真⑥、⑦は県道 8 号における被害状況を示しており、河北潟干拓地方向への地盤の変状や電柱の傾き等が確認されている。内灘町西荒屋地区と同様に、被害が大きな場所で著しいコヒーレンス低下がみられ、解析結果と実際の被害状況との対応を確認できた。

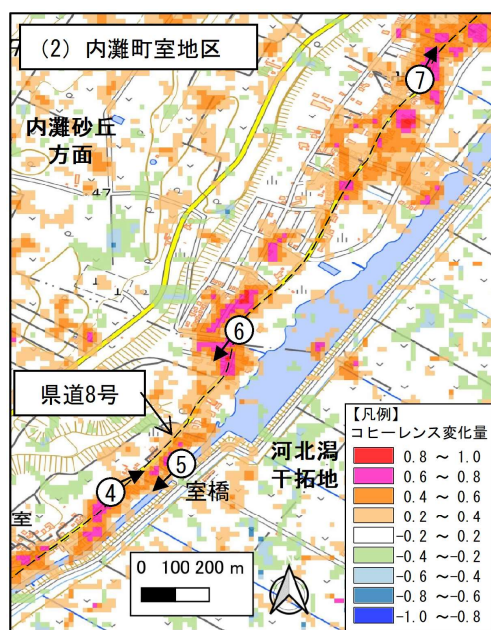


図 8 内灘町室地区における解析結果と被害状況の比較⁸⁾に加筆

5.3. かほく市宇野気地区

図 9 は、かほく市宇野気地区における解析結果と被災状況の比較を示している。かほく市宇野気地区は、河北潟干拓地から北東方向に約 1km 離れた場所に位置しており、内灘町の西荒屋地区、室地区と比較すると液状化被害の程度は軽微であるが、コヒーレンスの低下が確認された。写真⑧、⑪は、現地調査の結果確認された噴砂の発生状況を示している。また、液状化に伴う変状と考えられる地盤の沈下（写真⑨）や電柱の傾き（写真⑩）等が確認された。コヒーレンス低下量に着目することで、内灘町西荒屋地区、室地区と比較して変状が軽微であったかほく市宇野気地区の地盤変状範囲を抽出することができた。一方で、コヒーレンス変化量の絶対値に着目すると、大規模な変状がみられた西荒屋地区及び室地区では概ね 0.4～0.6 が分布し、一部 0.6～0.8 の範囲が確認されている。宇野気地区は、2 地区と比較して変状が軽微であったものの、コヒーレンス変化量の絶対値に明確な差異はなかった。そのため、今回の事例では、コヒーレンス変化量の絶対値から変状程度を推定することは困難と考えられる。

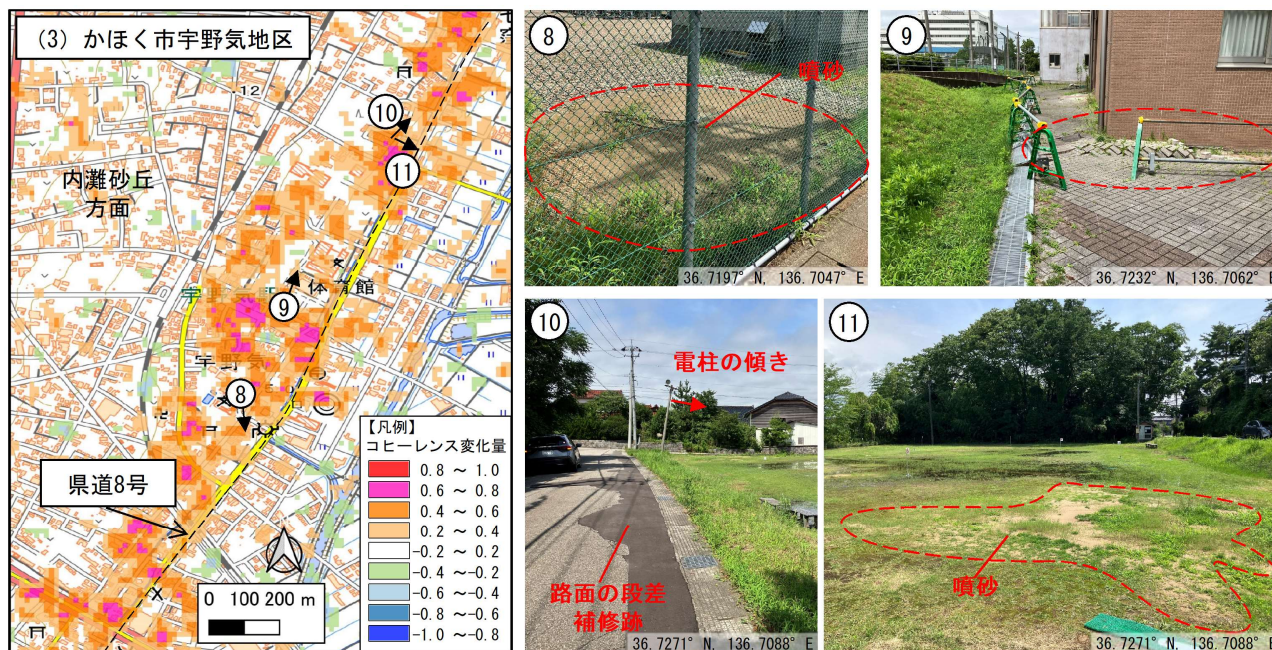


図 9 かほく市宇野気地区における解析結果と被災状況の比較⁸⁾に加筆

6. 変状要因に関する考察

6.1. 内灘町周辺の地質と地歴

内灘町では、昭和初期から 1970 年代にかけて実施された干拓及び埋め立て事業によって、河北潟が陸地化されている。図 10 は、干拓・埋立事業以前の内灘町の旧地形図と、5 万分の 1 地質図の比較を示している。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、砂丘後背砂地であり中粒砂及び細粒砂が堆積している。

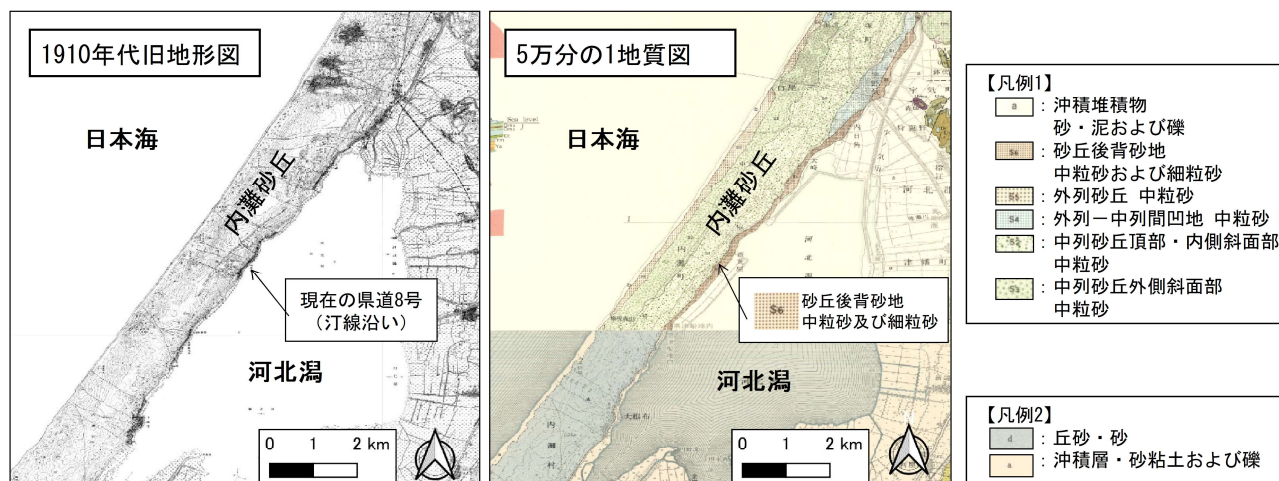


図 10 内灘町の旧地形図と地質区分¹¹⁾

図 11 は、河北潟における干拓・埋め立て事業及びその前後の地形図を示している。河北潟では、昭和初期から埋め立て事業が実施され、1960 年代までに図 11 中央図の赤枠範囲が埋め立てられている。また、1970 年代には国営干拓事業が実施され、図 11 右図のように、河北潟が陸地化されている。

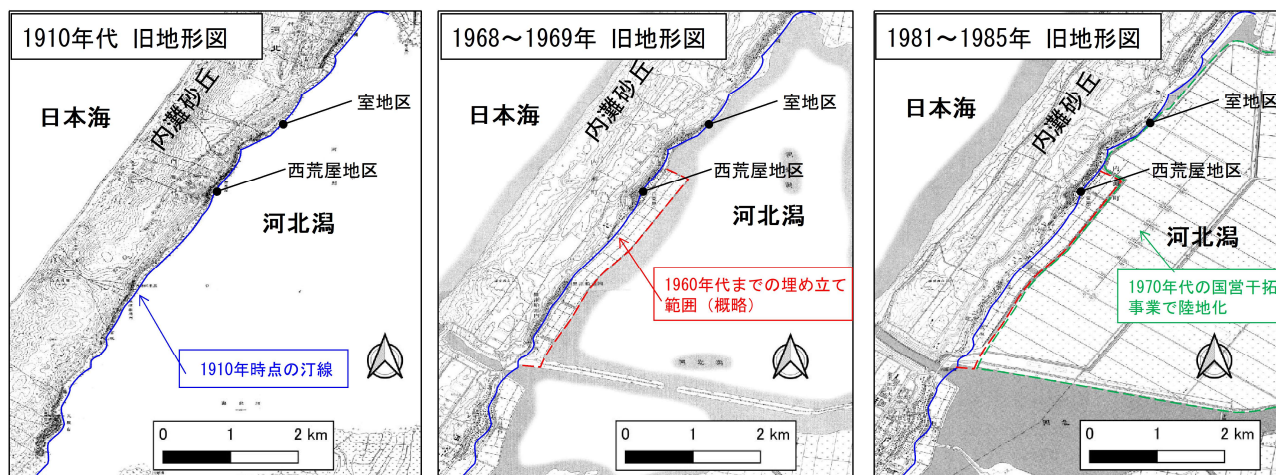


図 11 内灘町及び河北潟干拓地の埋め立て範囲

図 12、図 13 はそれぞれ内灘町西荒屋地区、室地区の地形の変遷を示している。両図ともに、左から干拓・埋め立て事業前の旧地形図（1910 年代）、1960 年代の航空写真、現在の航空写真を示し、赤線は旧地形図及び航空写真から想定される原地盤（砂丘層）と埋め土層の境界線を示している。内灘町西荒屋地区は、土砂採取場として掘削された場所が埋め立てられ、現在の西荒屋小学校となっている。また、内灘町室地区は、干拓事業に伴う埋め立てにより県道 8 号より河北潟側の低地が宅地化されている。

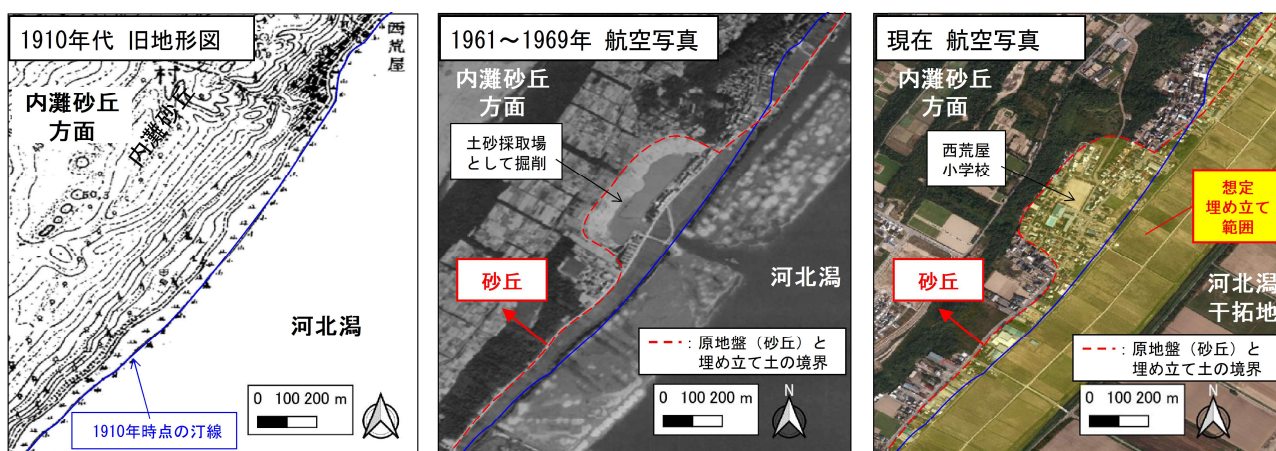


図 12 内灘町西荒屋地区における旧地形図と干拓・埋め立て前後の航空写真の比較^{※8)}に加筆

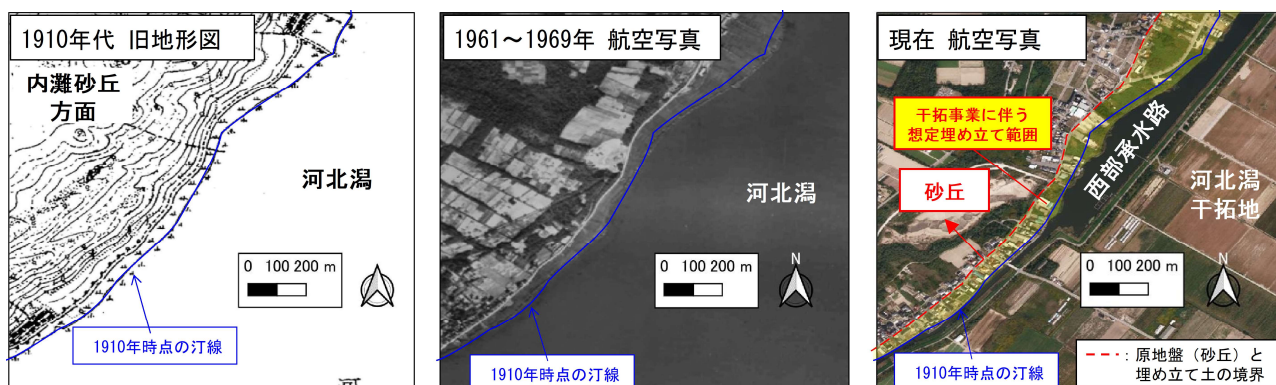


図 13 内灘町室地区における旧地形図と干拓・埋め立て前後の航空写真の比較^{※8)}に加筆

6.2. 内灘町の地質・地歴を踏まえた変状要因の考察

本解析で抽出したコヒーレンス低下範囲は、図 14 右図の通り、河北潟干拓地の汀線で原地盤（砂丘）と埋め土層の境界部に相当する区間 1 と、河北潟干拓地の北側に位置する区間 2 に大別される。各区間の特徴を以下に示す。

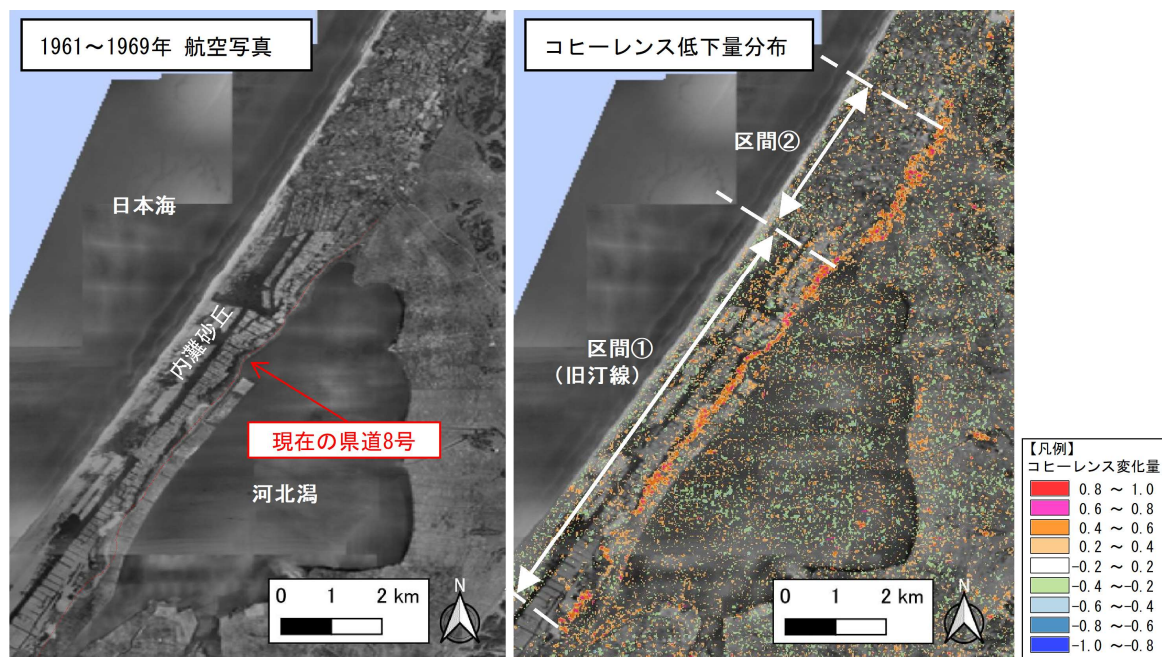


図 14 干拓・埋め立て以前の航空写真とコヒーレンス低下量分布の比較⁸⁾に加筆

(1) 内灘砂丘内陸側外縁部の旧汀線（区間 1）

図 15 は、内灘町西荒屋地区及び室地区で想定される埋め立て範囲と、抽出したコヒーレンス低下量分布の比較を示している。顕著なコヒーレンス低下が見られた範囲は、砂丘層と埋め土層の境界と概ね対応している。そのため、原地盤（砂丘層）と比較して相対的に緩い埋め土層で顕著な液状化被害が発生した可能性が示唆される。

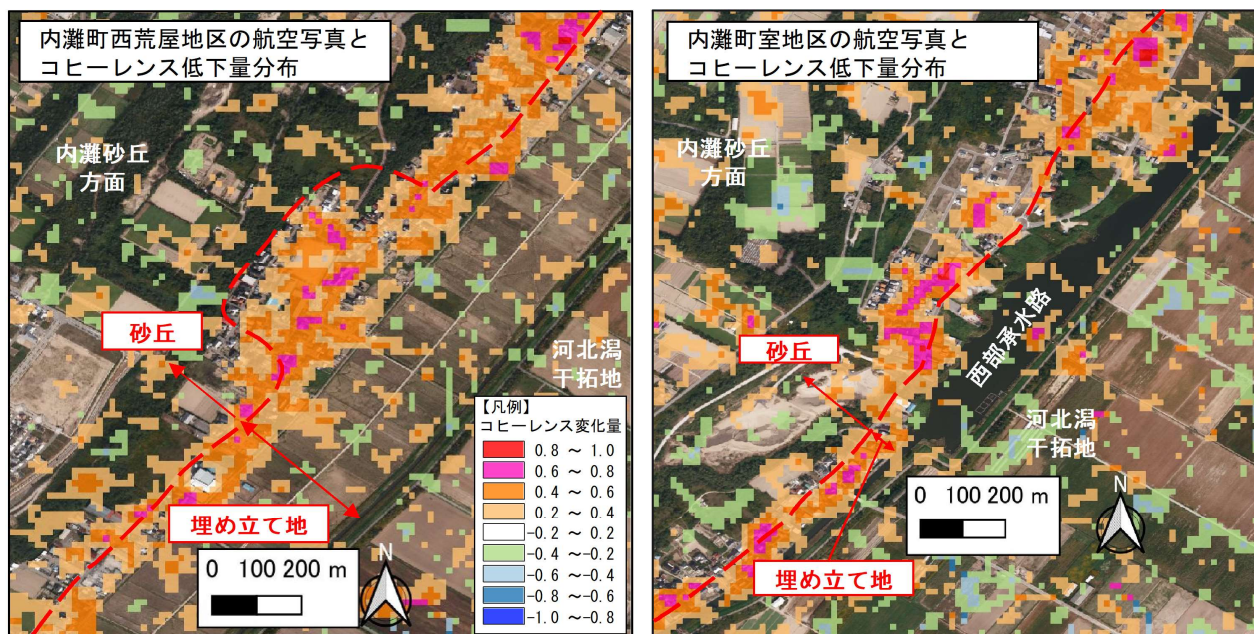


図 15 内灘町西荒屋地区（左）及び室地区（右）における原地盤・埋め土の境界とコヒーレンス低下量分布の比較⁸⁾に加筆

図 16 は、区間 1 における 5 万分の 1 地質図¹¹⁾に加筆とコヒーレンス低下量分布の比較を示している。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しており、液状化による変状範囲

と地質区分との相関性が認められる。また、図 17 は、5m 間隔で作成した等高線、周辺地質調査¹²⁾で確認された地下水位深度及びコヒーレンス低下量分布の比較を示している。図中の黒線は 5m 間隔の等高線を示しており、赤線は標高 5m の等高線を示している。顕著なコヒーレンス低下がみられた範囲は、標高 5m の等高線を上端として分布している。また、当該範囲周辺で実施された地質調査でも、深度 0～2m 程度の浅い地下水位が観測されている。以上、区間 1 では以下の要因によって液状化による地盤変状が発生したと考えられる。

- ・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が発生した可能性がある。
- ・砂丘後背砂地が分布する範囲であり、他地区と比較してゆるい細粒砂が堆積していたと考えられる。
- ・標高が 5m 以下と低く、周辺地下水位が約 0～2m と浅いため、液状化が発生しやすい地盤条件であったと推察される。

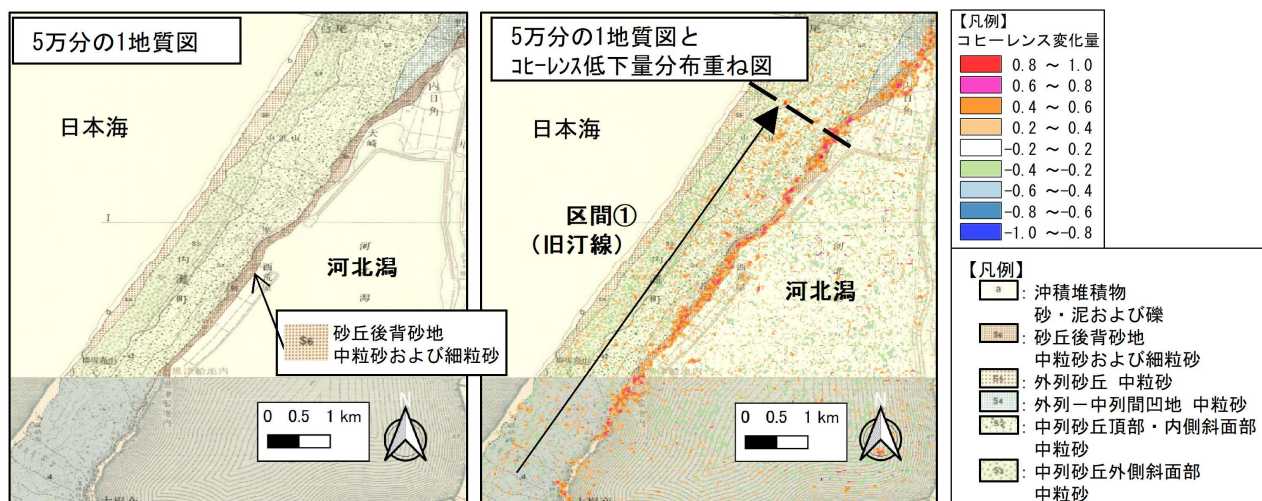


図 16 5万分の1地質図とコヒーレンス低下量分布（河北潟周辺）の比較¹¹⁾に加筆

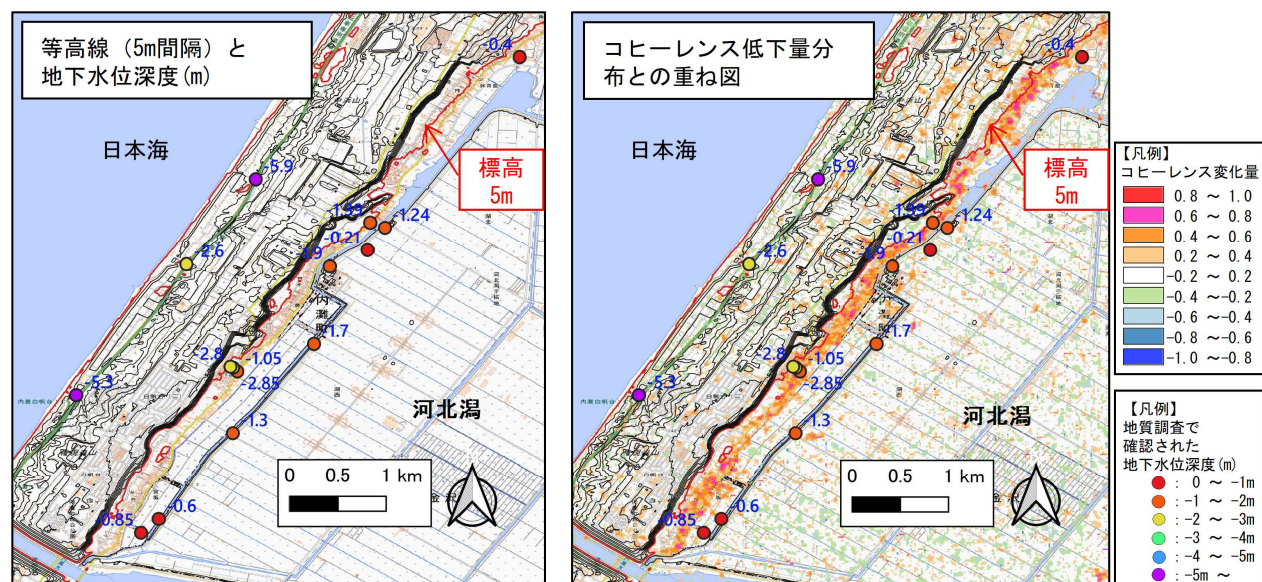


図 17 等高線及び地下水位とコヒーレンス低下量分布の比較（河北潟周辺）⁸⁾に加筆

(2) 河北潟北部（区間 2）

区間 2 は、干拓・埋め立て工事の対象範囲外であり、河北潟北東部の内灘砂丘内陸側外縁部に位置する。図 18 は、5 万分の 1 地質図¹¹⁾に加筆とコヒーレンス低下量分布の比較を示している。著しくコヒーレンス低下した範囲は、砂丘後背砂地が分布する範囲と概ね対応しており、液状化による変状範囲と地質・地形区分の相関性が認められる。また、図 19 は、5m 間隔で作成した等高線、周辺の地質調査結果¹²⁾で確認された地下水位及びコヒーレンス低下量分布の比較を示している。区間 1 と同様に、コヒーレンス低下がみられた範囲は標高 5m の等高線を上端として分布しており、地下水位深度も 0～1m 程度と浅い。以上から、区間 2 は、干拓・埋め立て工事の対象範囲外であるものの、以下の要因により液状化によ

る地盤変状が発生したと考えられる。

- ・砂丘後背砂地が分布する範囲であり、他地区と比較してゆるい細粒砂が堆積していたと考えられる。
- ・標高が 5m 以下と低く、周辺地下水位が約 0～2m と浅いため、液状化が発生しやすい地盤条件であったと推察される。

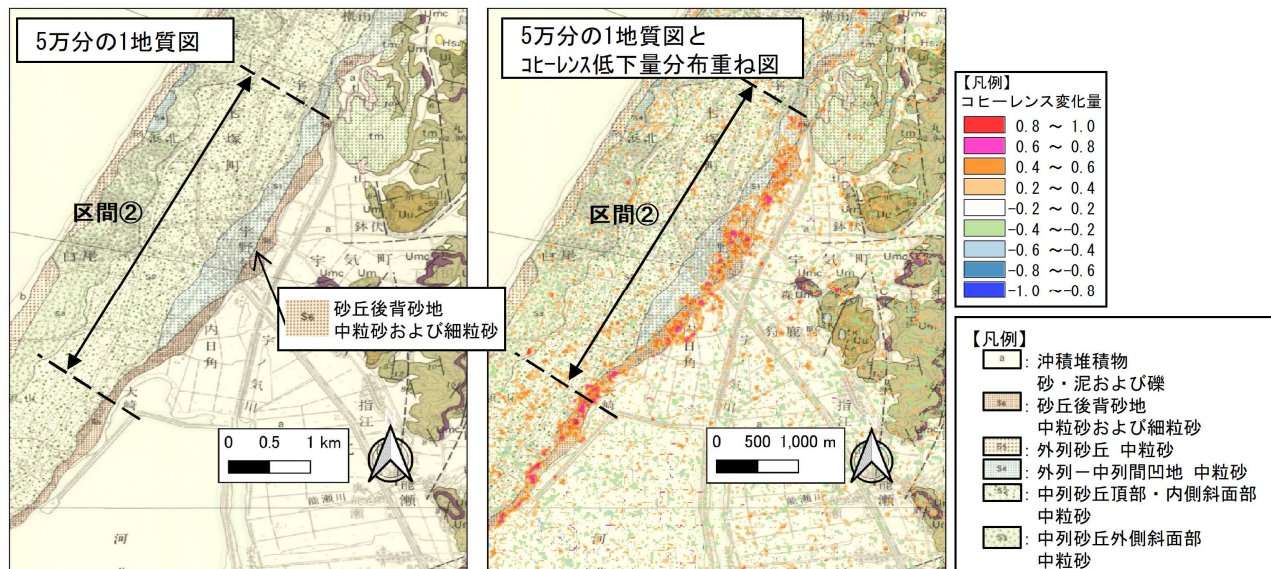


図 18 5万分の1地質図とコヒーレンス低下量分布の比較¹⁾に加筆

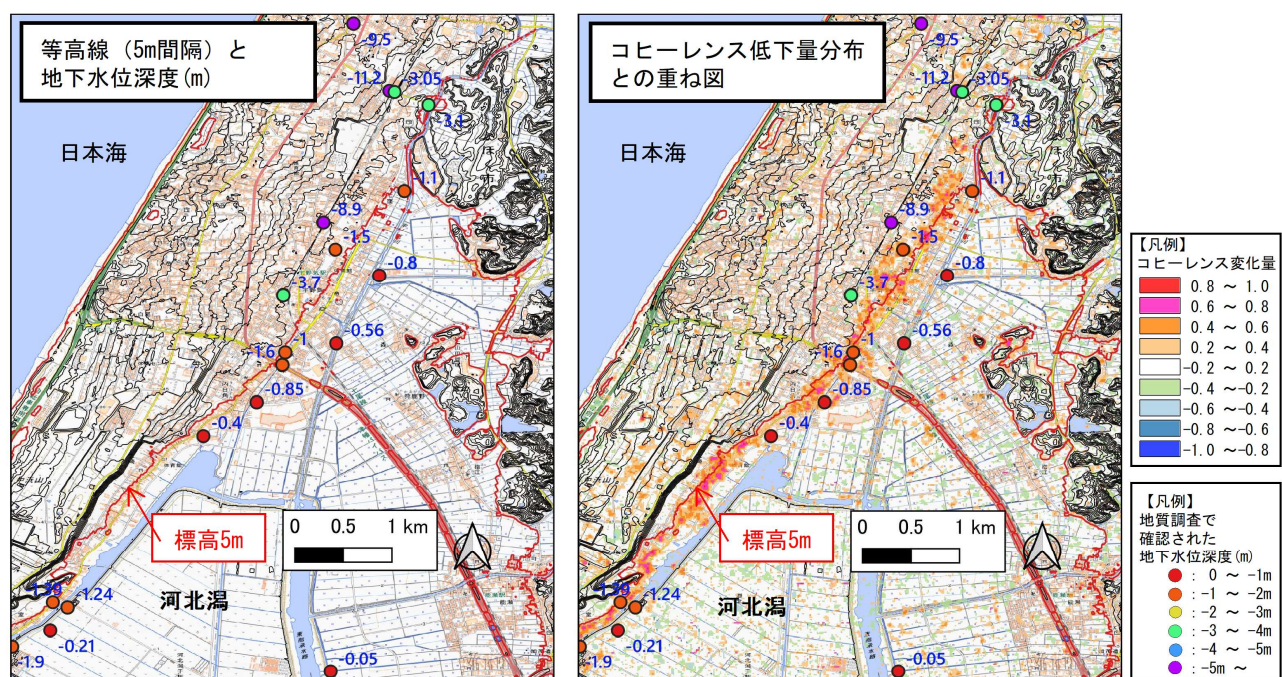


図 19 等高線及び地下水位深度とコヒーレンス低下量分布の比較（河北潟北部）⁸⁾に加筆

7. 結論

本論文では、令和 6 年能登半島地震によって甚大な液状化被害を受けた内灘町及びかほく市を対象に干渉 SAR 解析を実施し、地震発生前後の地表面の散乱状態の変化から、地震による地盤変状範囲を抽出した。併せて、解析結果と実際の被害状況を比較するとともに、地形・地質等に着目し、変状要因を考察した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 干渉 SAR 解析で得られる地震前後のコヒーレンス低下量から、内灘町及びかほく市で発生した地震による地盤変状範囲を推定できた。併せて、実際の被害状況との比較から、解析結果と液状化による変状範囲との対応を確認できた。
- (2) また、抽出した変状範囲は、旧地形図、航空写真等との比較結果から、内灘砂丘内陸側外縁部の旧汀線と河北潟

北部に大別されることが明らかになった。

- (3) 内灘砂丘内陸側外縁部の旧汀線は、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が発生したと考えられる。さらに、砂丘後背砂地であり、他地区と比較してゆるい細粒砂が堆積していたと考えられる。また、標高が 5m 以下と低く、周辺地下水位が約 0～2m と浅いことも変状発生の一因であったと考えられる。
- (4) 一方で、河北潟北部は、干拓・埋め立て工事の対象範囲外であるが、砂丘後背砂地であり、他地区と比較してゆるい細粒砂が堆積していたと考えられる。また、標高が 5m 以下と低く、周辺地下水位が約 0～2m と浅いことも変状発生の一因であったと考えられる。
- (5) なお、本解析手法は解析を実施した 2 時期内でコヒーレンス変化に着目して地表面状態が変化した範囲を抽出する手法である。そのため、解析期間内に人工的な土地改変等が実施されている場合や、固有のコヒーレンスが低い場所の評価には留意が必要である。

8. 謝辞

本論文は、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所共同利用・共同研究拠点及び九州大学総長特別研究費の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

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), 自然災害科学 JJSNDS, Vol.43, No.3, pp. 631-639, 2024.
- 2) 窪田上太郎, 太田史朗, 越智義和, 今井利宗, ハザリカヘマンタ, 松本樹典, 田中剛, 村井政徳: 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), 自然災害科学 JJSNDS, Vol.43, No.3, pp. 641-648, 2024.
- 3) Hazarika, H., Ohta, S., Kubota, S., Michi, Y., Sahare, A., Tanaka, T., Ishizawa, T., Murai, M., Fujishiro, T., Matsumoto, T., and Hyodo, T.: Lateral Flow in Reclaimed Land due to Liquefaction during the 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan~ Insights from Remote Sensing and Field Survey ~, 8th ICRA GEE 2024, Springer Singapore, Hardcover ISBN 978-981-96-1351-9, 2025 (印刷中) .
- 4) 窪田上太郎, 太田史朗, ハザリカ・ヘマンタ, 田中剛, サハレ・アスラグ, 村井政徳, 道勇治, 藤白隆司, 松本樹典: 令和 6 年能登半島地震による側方流動に伴う内灘町の被害と変状要因分析, 地盤工学会災害調査論文報告集 (投稿中) .
- 5) 太田史朗, 佐々木朋子, 窪田上太郎, 風間基樹: 令和 6 年能登半島地震で地盤変状が発生した石川県内灘町室地区における X 線 CT 及び室内土質試験に基づく変状メカニズムの考察, 地盤工学会災害調査論文報告集 (投稿中) .
- 6) 小林知勝, 飛田幹男, 小荒井衛, 乙井康成, 中埜貴元: 干渉 SAR のコヒーレンス変化から見る平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う液状化地域, 国土地理院時報, Vol.122, pp.143-151, 2011.
- 7) 宮嶋愛菜, 福島洋, 中埜貴元, 藤原智: InSAR を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震時における宅地造成地での変動検出とその発生背景の考察, 自然災害科学 JJSNDS, Vol.41, No.9, pp. 19-35, 2022.
- 8) 国土地理院: 地理院タイル, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, 2024 年 12 月 10 日閲覧.
- 9) 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, 理工図書, 2011.
- 10) 国土地理院: 干渉 SAR の基本, https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html, 2024 年 12 月 10 日閲覧.
- 11) 産総研地質調査総合センター: 5 万分の 1 地質図幅「金沢」「津幡」, <https://www.gsj.jp/Map/JP/geology4-10.html#10020>, 2024 年 12 月 10 日閲覧.
- 12) 一般社団法人国土地盤情報センター地盤情報緊急公開サイト: <https://publicweb.ngic.or.jp/emergency-1/>, 2024 年 12 月 10 日閲覧.

(2025.4.1 受付)