

内灘町で発生した大規模液状化および流動と地形改変の関係性の検討

長岡技術科学大学大学院 学生会員 ○齊藤竜也

長岡技術科学大学 正会員 池田隆明

長岡技術科学大学 正会員 志賀正崇

1. はじめに（研究背景）

令和 6 年能登半島地震によって震央から南西方向に約 110km に位置する石川県内灘町の海岸砂丘内陸側縁辺部で液状化と流動が発生し、住宅や道路、ライフラインに大きな被害をもたらした。図-1 に内灘町および西荒屋地区の位置関係を示す。砂丘の内陸側斜面は河北潟干拓事業による土砂採取のための掘削が行われており、この大規模な地形改変が行われた場所と液状化と流動が発生した場所には関係性があると考え、そのためには液状化と流動の定量化が必要である。

近年、測量技術や数値解析技術の進歩により三次元の形状把握が可能となっている。地震による地盤災害についても、今後の対策を検討する上で三次元の視点からの解析が重要である。そこで、地震による地盤変状の把握を目的に SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）を用いて取得した三次元点群データから地震後の DSM（Digital Surface Model）を作成した。さらに、地盤変状の定量化のために、地震前に撮影された空中写真から作成した地震前の DSM と地震後の DSM を比較し、地震による地盤変状を明らかにした。



図-1 内灘町および西荒屋地区の位置関係

（文献 1）に加筆）

2. 検討対象地点

山崎²⁾、小林³⁾、清田ら⁴⁾は内灘町において特に西荒屋地区で被害数や被害規模が大きいと報告している。そこで、本報告では西荒屋地区を対象とする。対象道路は図-2 に示すとおり、県道 8 号線（約 1400 m, 赤色線）、西荒屋小学校西側道路（約 410 m, 青色線）、西荒屋小学校北側道路（約 110 m, 緑色線）、西荒屋小学校南側道路①（約 170 m, 黄色線）、西荒屋小学校南側道路②（約 150 m, 桃色線）、西荒屋地区西側道路（約 890 m, 白色線）とした。図-3 は県道 8 号線における被害写真を示している。このように、特に被害が顕著であった県道 8 号線を本報告の対象とする。なお、南側を起点とする。

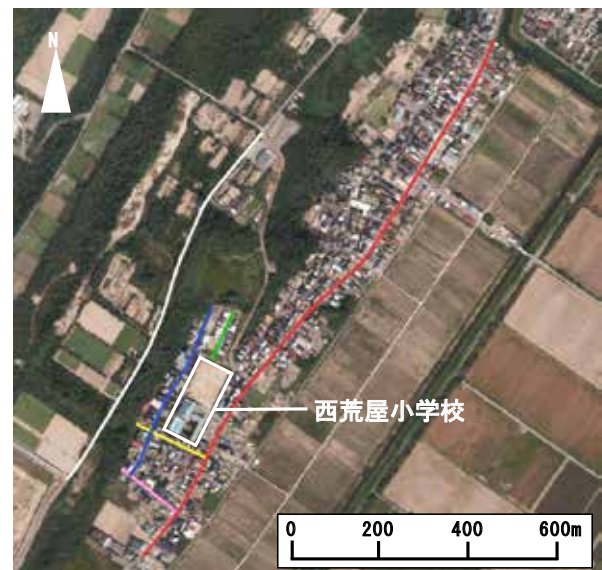


図-2 西荒屋地区の対象道路位置図



図-3 西荒屋地区の被害写真

3. 地震後の地盤形状の定量化

SLAM は移動体が自己位置を推定しながら周囲の三次元地図を同時に構築する技術であり、近年は災害調査への対応が進められている。本報告では地震後の地盤形状を三次元で記録かつ定量化することを目的として、対象道路において SLAM を用いた計測を実施した。計測で取得した三次元点群データから DSM (DSM2024) を作成し、その道路のセンターラインにおける縦断面図を図-4 に示す。

図-4 の 0 m 付近で地盤が不規則な波状をしていることが確認された。また、本結果の妥当性を検証するため地震後の DEM⁵⁾ (Digital Elevation Model, DEM2024) の縦断面図を真値として図-4 に示し、DSM2024 と DEM2024 を比較すると双方はほぼ一致しているため DSM は有効であると考えた。ただし、解析上のエラー (外れ値) が確認されたため、これらは除去した上で利用する。

また DEM2024 が 50 cm メッシュであるのに対し、DSM2024 は 2 cm メッシュで作成されているため、噴砂などより細部の変状を把握できるという利点がある。

4. 地震前の DSM の作成

SLAM の結果を用いて地震による地盤変状を求めるため、地震前の地形を復元した。この復元には空中写真⁶⁾を用い、SfM/MVS (Structure from Motion Multi-View Stereo) により DSM (DSM2012) を作成した。地震前の最新の空中写真が 2012 年に撮影されたものであったため、本報告では 2012 年の写真を使用し、解析には Agisoft 社の Metashape を使用した。さらに DSM の精度向上のために西荒屋地区周辺地域 (大崎地区、室地区、宮坂地区) まで範囲を広げ、空中写真の中心の緯度経度や撮影高度、目印となる地点の緯度経度と標高も入力した。

DSM2012 の県道 8 号線のセンターラインの縦断面図を図-5 に示す。また、地震前の DEM⁷⁾ (DEM2016) の縦断面図を真値として図-5 に示し、妥当性を検証する。DSM2012 と DEM2016 は概ね一致しているが部分的に差がある。その理由は、空中写真が SfM/MVS を目的として撮影されていないためである。しかし、DEM2016 と DSM2012 の傾向は似ているため DEM2016 を基準として DSM2012 の縦断面図の補正を行う必要があると考える。

また、DEM2016 は 5.0 m メッシュであるのに対し、DSM2012 は 0.2 m メッシュで作成されているため細部の

変状を把握できるという利点がある。

5. DSM2012 の縦断面図の補正方法

5.1 平滑化

補正の手法として DSM2012 と DEM2016 を比較し、外れ値と判断される点を除去する。次に対象が道路であることに着目し、道路の連続性および滑らかさを適切に再現するために平滑化処理を実施した。平滑化には重みつき算術平均を用い、ウィンドウ幅を大きく設定するほど路面は水平に近づくが、過度にウィンドウ幅を大きくすると本来の路面形状が失われてしまう。そこで舗装路面の平坦性⁸⁾および道路勾配の基準⁹⁾を満たす範囲までウィンドウ幅を調整し、重みつき算術平均を適用した。なお、地震前の西荒屋地区の道路はこれら 2 つの基準を満たしていたと考えられることから、地震前の路面形状をより正確に再現するため、基準を満たすまで平滑化を行った。

舗装路面の平坦性は、道路縦断方向における凹凸を評価する指標であり、3 m プロフィールメータによる標準規格値は標準偏差 2.4 mm 以下とされている。しかし、本報告では現地状況を踏まえ、その 10 倍にあたる標準偏差 24 mm 以下を満たすまで平滑化を行った。

一方、道路勾配は縦断方向の傾斜度を評価する指標であり、西荒屋地区において被害が顕著であった県道 8 号線の道路種別 (第 3 種、普通道路、設計速度 40 km/h) に基づく縦断勾配の基準値は 7% 以下とされている。これら 2 つの基準を満たすまでウィンドウ幅を大きくし、補正を実施した。平滑化のみを行った結果を図-6 に示す。

5.2 真値への適合性

平滑化後、一部では双方が一致しているが、2012DSM は 2016DEM に比べ 0 m 付近で約 600 m と約 700 m 付近で約 900 m 区間で平均約 0.2 m 下がっている。SLAM の計測と並行して目視による被害確認を実施した結果、今回の内灘町における隆起や沈下は最大でも約 1 m と考えられるため地盤変状を評価する際に 0.2 m の差は大きいと判断し、当該区間については 2016DEM から 2012DSM を差し引き、その平均値を算出して補正量とし、これを 2012DSM に加えることで 2016DEM に近づけた。この補正を行った結果を図-6 に示す。補正後は 2012DSM が 2016DEM とほぼ一致したため、地盤変状の定量化には 2 種類の方法で補正を行った

後の縦断面図を使用する。

6. 地震による地盤変状の定量化

地震前後の縦断面図を比較し、さらに差分を算出（2024DSM-2012DSM）することで地震による地盤変状を定量的に評価した。その結果を図-7 に示す。図-7 に示したとおり、0 m～約 600 m 区間では全体的に隆起傾向が確認され、特に①～④の 4 箇所では顕著な隆起が生じ、最大隆起量は約 0.8 m であった。一方、約 600 m～約 1400 m 区間では全体的に沈下傾向が見られ、最大沈下量は約 0.5 m であった。地盤変状が確認された箇所を空中写真中に示した結果を図-8 に示す。隆起が確認された場所は西荒屋小学校が位置しており、当該場所はかつて採砂場として深く掘削されたが、現在は埋め立てられているため、地盤が脆弱であった可能性がある。また、採砂場跡地に埋め立てられた大量の土砂が地震動により東側へ流動し、県道 8 号線によってせき止められた結果、顕著な隆起が生じたと推察される。

なお、図-7 および図-8 に示した、①と②の間および③と④の間は顕著な隆起や沈下は認められなかった。これは、①と②の間は住宅地の中を通る路地（図-8 青線、県道 8 号線中の 220 m 付近で交差）、③と④の間は砂丘上部方向に向かう道路（図-8 青線、県道 8 号線中の 460 m 付近で交差）があり、それぞれの道路に沿った流動が比較的小さかったためであると考えられる。図-7 中に路地と県道 8 号線との交点を a、道路と県道 8 号線との交点を b として示す。また、②と③の間でも大きな変状は確認されず、これは西荒屋小学校校舎の杭基礎によって流動が抑制された結果と考えられる。

一方、⑤の区間で顕著な沈下が確認された。これは①～④と同様に県道 8 号線西側を起点とする東方向への流動が生じたものの、県道 8 号線で流動がせき止まらず、道路自体が流動し沈下に至ったものと推定される。

7. 終わりに

本研究では令和 6 年能登半島地震によって液状化と流動が発生した内灘町西荒屋地区の地盤変状の定量化を DEM や DSM を用いて行った。

小規模な道路被害にも着目するため、内灘町西荒屋地区における地震前後の DSM を作成した。SLAM で取得した三次元点群データから作成した地震後の DSM は高い精度を有しており、外れ値を除去するのみで十分であることが確認された。一方、空中写真から作成した地震前の DSM も比較的良好な精度が得られたが、より精度を向上させるためには、外れ値を除去したうえで重みつき平均や部分的に平均値による補正を行うなど、適切な処理が必要であることが分かった。

西荒屋地区における県道 8 号線の南側では隆起傾向が確認され、特に大きい箇所では約 0.8 m の隆起が確認された。一方、住宅地を通る路地付近や西荒屋小学校校舎付近、砂丘上側に向かう道路付近の県道 8 号線では、顕著な隆起や沈下は確認されなかった。さらに、県道 8 号線の北側では全体的に沈下傾向があり、特に大きい箇所では約 0.5 m の沈下が確認された。

今後検討範囲を拡大するとともに横方向の変形についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 産総研地質調査総合センター：20 万分の 1 日本シームレス地質図、<https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html>, 2025 年 7 月 15 日閲覧
- 2) 山崎新太郎：石川県内灘町周辺の液状化現象と地すべりについて、<https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/contents/wp-content/uploads/2024/01/40aa1f3a9e42e222409093ed1ccb5e15.pdf>, 2025 年 7 月 17 日閲覧
- 3) 小林俊一：地盤被害調査について、https://www.kanazawa-u.ac.jp/wp/wp-content/uploads/2024/02/07_zibanhigai_kobayashi.pdf, 2025 年 7 月 17 日閲覧
- 4) 清田隆・栗間淳・池田隆明・志賀正崇：令和 6 年能登半島地震石川県内の地震被害調査、https://committees.jsce.or.jp/eec205/system/files/DamageReport_IshikawaPref_Tokyo_Nagaoka_Ver.1.pdf, 2025 年 7 月 15 日閲覧
- 5) 林野庁：数値標高モデル DEM0.5 m（能登地域 2024）、<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/rinya-dem-noto2024> , 2025 年 7 月 17 日閲覧
- 6) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス、<https://service.gsi.go.jp/map-photos/app/map?search=history> , 2025 年 1 月 20 日閲覧
- 7) 国土地理院：基盤地図情報サイト、<https://www.gsi.go.jp/kiban/>, 2025 年 1 月 20 日参照
- 8) 国土交通省：＜別添＞舗装の構造に関する技術基準、<https://www.mlit.go.jp/road/sign/pavement3.html>, 2025 年 7 月 4 日閲覧
- 9) 社団法人日本道路協会：道路構造令の解説と運用

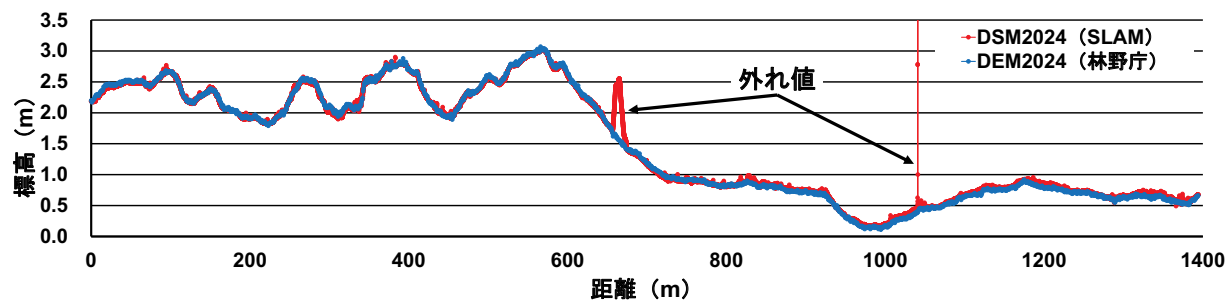


図-4 DSM2024 と DEM2024 の比較

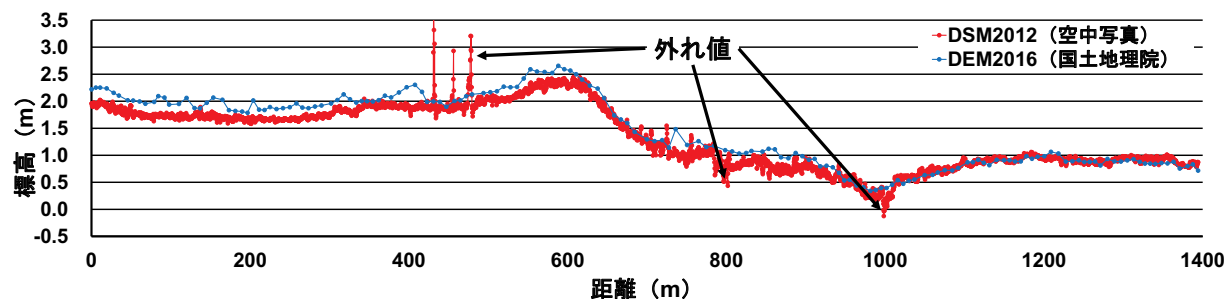


図-5 DSM2012 と DEM2016 の比較

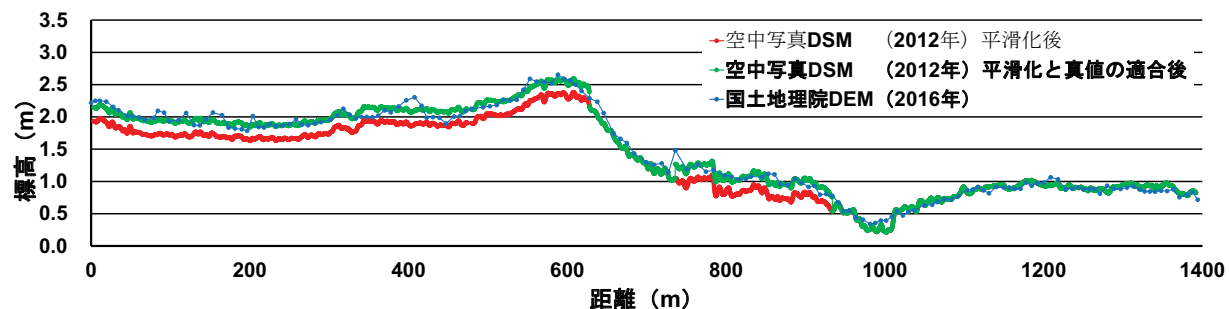


図-6 DSM2012 を 2 種類の方法で補正した縦断面図

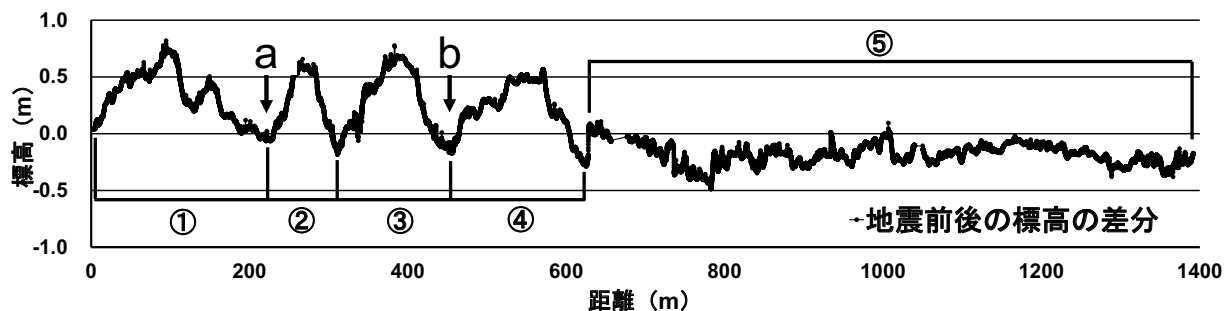


図-7 地震前後の標高の差分



図-8 対象場所の地盤変状箇所