

令和6年能登半島地震における内灘町西荒屋地区の地盤変状の定量化

長岡技術科学大学 齊藤竜也

池田隆明

志賀正崇

1. はじめに

令和6年能登半島地震は令和6年（2024年）1月1日16時10分に発生したM_j7.6の地震である。石川県志賀町と石川県輪島市で震度7が観測されたほか、石川県内の多くの観測点で震度6弱以上の揺れが観測された。また、県外においても、新潟県、富山県、福井県、長野県、岐阜県で震度5弱が観測されるなど、本地震は広範囲にわたり強い揺れをもたらした。震源から南東方向に約110 km離れた石川県河北郡内灘町では、震度5弱を観測し、海岸砂丘の内陸側の麓に沿って広範囲に液状化現象およびそれに伴う地盤流動が発生し、住宅の不同沈下や道路の隆起などの被害が多数確認された。図-1に推計震度分布および内灘町の位置を示す。

内灘町は石川県中央部の日本海沿岸に位置し、西側は日本海、東側は河北潟に挟まれた細長い砂丘地帯を主体とする地域である。河北潟周辺では過去に農地造成を目的とした干拓事業が実施された。この干拓事業で、河北潟内に陸地を造成するための掘削が内灘町で行われ、掘削された土砂は河北潟の埋め立てに利用された。図-2に内灘町の地質分布を示す。以上のように、内灘町は海岸砂丘、掘削地、埋立地といった異なる地盤特性を有する地域が隣接して分布する特徴を持つ。本稿では、内灘町の掘削や埋め立てなどの人為的な地形変化を地形改変と総称する。

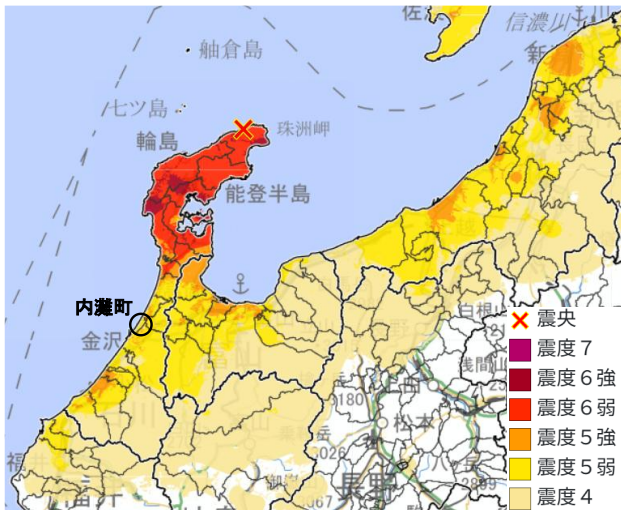


図-1 推計震度分布および内灘町の位置
(参考文献1)に加筆)



図-2 内灘町の地質分布
(参考文献2)に加筆)

2. 内灘町の地盤被害と地形改変の関係性

地震発生から時間が経過した令和6年10月6日に内灘町の中でも被害が大きかったとされている西荒屋地区を対象範囲として目視確認により被害発生箇所および被害程度を記録した。目視確認のため被害発生箇所および被害程度の判定は自身の主観が含まれているが、この記録に基づき、被害分布図を作成した。西荒屋地区の被害分布図を図-3に示す。被害分布図より、県道8号線に沿っての被害が多いが、場所によって被害の大きさが異なることが確認された。しかし、目視による被害発生箇所および被害程度の判定は調査者の主観が含まれることや、被害の見落としが生じる可能性があり、目視調査には客観性および網羅性の確保が困難であるという課題がある。

前述したように、内灘町では過去に地形改変が行われている。どの程度地形改変が行われているのかを確認するために図-4に示す、地形改変前後の旧版地図の標高20mの等高線の位置から把握する。標高20mの等高線は地形改変前後で最大約200m西側に移動していることから、この範囲で地形改変が行われたと考える。

図-3の西荒屋地区の被害分布図と図-4の地形改変場所を比較すると、被害分布と地形改変場所は概ね一致していることが確認できる。このことから、液状化・流動化が広範囲に発生した要因の一つとして、過去の地形改変の影響が示唆される。

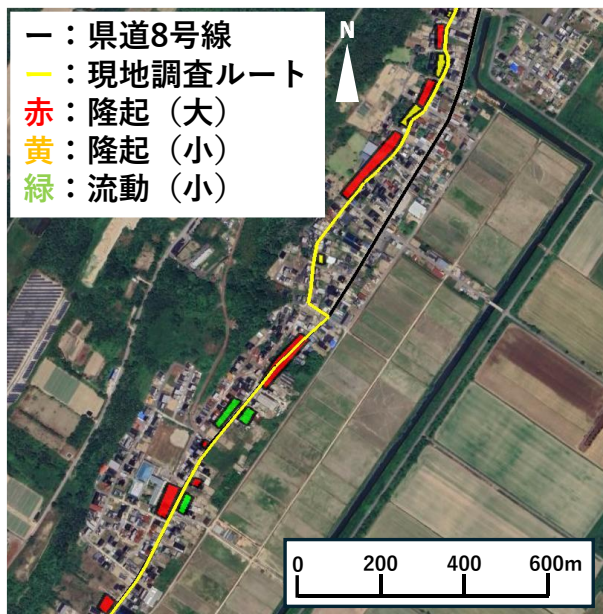


図-3 西荒屋地区の被害分布図

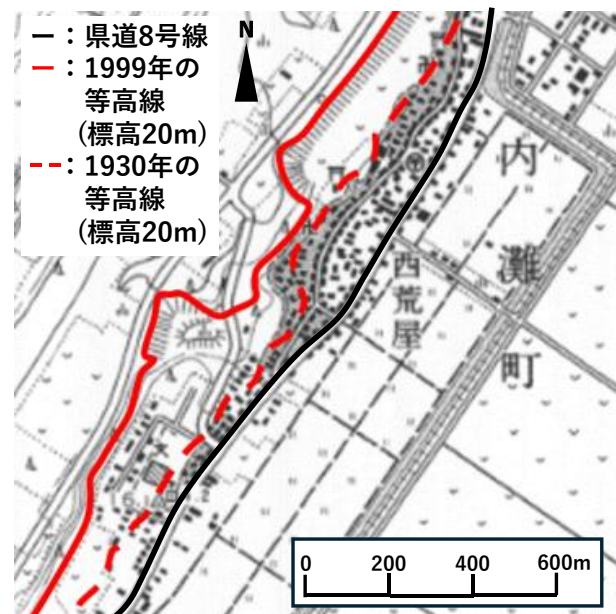


図-4 西荒屋地区の地形改変場所

3. 研究目的

内灘町で発生した液状化・流動化と地形改変の関係性を明らかにするために地盤変状を三次元的に定量化する必要がある。本研究では、近年急速に発達してきた空間情報技術を用い、内灘町で生じた詳細な地盤変状を三次元的に定量化する。具体的には、地震後の液状化・流動化による被害状況および地盤変状を LiDAR SLAM (Light Detection and Ranging Simultaneous Localization and Mapping) を用いて三次元データとして記録する。また、地震前に撮影された空中写真を用いて SfM-MVS (Structure From Motion-Multi-View Stereo) から地震前の三次元データを再現し、SLAM による地震後のデータと比較し、地震による地盤変状を算出する。

4. 研究手法

研究手法は図-5 に示す研究フローに従って行う。また、詳細については次節から述べる。そして、本研究では数値表層モデル (DSM : Digital Surface Model) や数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) の標高値の比較により地盤変状の定量化を行う。DSM は建物や植生を含んだ標高値のモデルであるのに対し、DEM は建物や植生を取り除いた標高値のモデルである。本研究では DSM を作成したが、精度検証のために DEM を用いた。道路部は建物や植生の影響が非常に小さいため、DEM と DSM における道路部の標高値は概ね一致すると考えられる。また、地震後は LiDAR SLAM 計測を行った。本来であれば、被害が顕著であった住宅地においても詳細な計測を行うことが望ましい。しかし、多くの家屋では傾斜が顕著であり、調査時における安全性の確保が困難である。さらに、私有地の撮影・計測には土地所有者の許可が必要となる。これらの制約を踏まえ、DSM と DEM の標高値が同一であると考えられ、安全性が確保でき、かつ公共空間である道路を主な計測対象とし、本研究では特に被害が顕著であった西荒屋地区の県道 8 号線を研究対象とする。

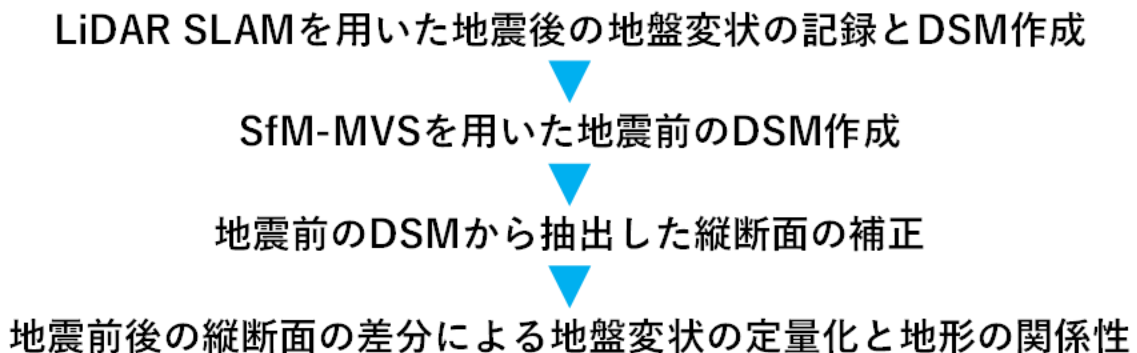


図-5 研究フロー

5. LiDAR SLAM を用いた地震後の地盤変状の記録と DSM 作成

林野庁は 0.5 m 解像度の DEM を公表している（以下、林野庁 DEM）³⁾。大規模な地すべり等の地盤災害の把握を目的とするのであればこの解像度で十分であるが、内灘町で発生した液状化・流動化による地盤変状を詳細に記録するためにはより高解像度の三次元データが必要である。そこで、レーザーで対象物までの距離や対象物の形などを計測すると同時に地図作成や自己位置を推定する技術である LiDAR SLAM を用いて地盤変状の計測を行い、計測データから DSM を作成した（以下、SLAMDSM）。SLAMDSM の解像度は 0.02 m であり林野庁 DEM よりも高解像度であるため、噴砂や亀裂などの小さな地盤被害を見ることができる利点がある一方で、計測条件によっては自己位置推定の精度が低下し、結果として精度の低い DSM が作成される恐れがある。そこで、SLAMDSM の精度検証のために林野庁 DEM と比較する。DEM の場合は問題ないが、DSM の場合、道路の両側に建物や植生が存在すると道路端部は建物や植生を含んだものになってしまう。そこで建物や植生の影響をなるべく小さくするため、そして視覚的に分かりやすく比較するために県道 8 号線のセンターラインの縦断面での比較を行う。比較した結果を図-6 に示す。双方の結果はほぼ一致しているため地盤変状を定量化するのに必要な程度の精度があると考えられる。しかし、SLAMDSM の 660 m 付近と 1060 m 付近は車両や一時的な障害物が含まれたデータであるためこの区間は林野庁 DEM の結果で置き換え補正した。図-7 に補正後の SLAMDSM を示し、これを地震後の縦断面とする。

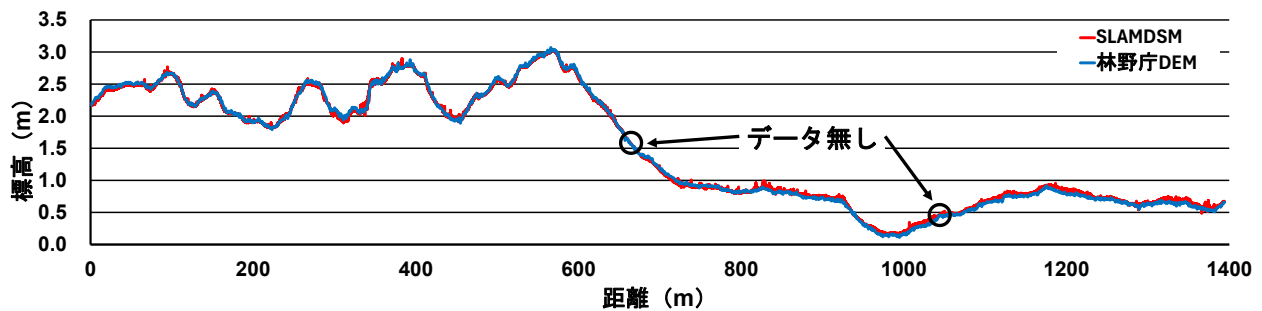


図-6 SLAMDSM と林野庁 DEM の比較

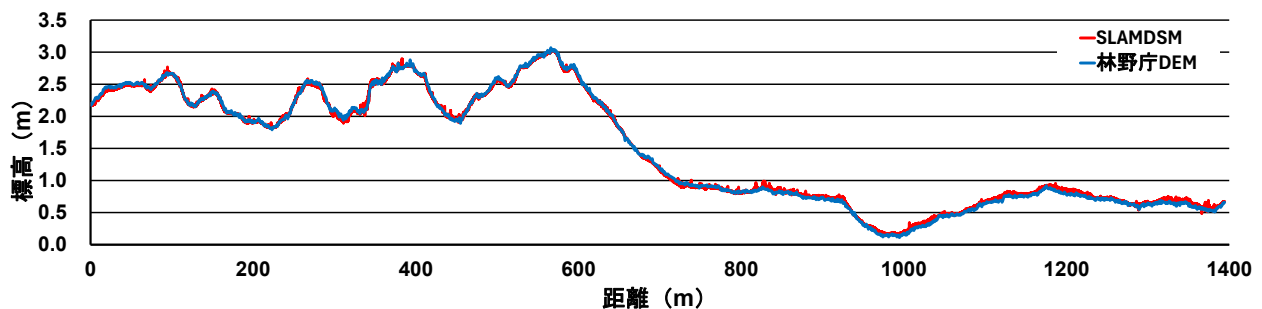


図-7 補正後の SLAMDSM と林野庁 DEM の比較

6. SfM-MVS を用いた地震前の DSM 作成

地震前の三次元データと前述した SLAMDSM との標高差分から、地盤変状の定量化を行う。地震前の三次元データとして、国土地理院が 5 m 解像度の DEM（以下、地理院 DEM）を公表している⁴⁾。しかし、地理院 DEM は 0.02 m 解像度の SLAMDSM と比較して解像度が低く、5 m 以下の地盤変状を把握することは困難である。

そこで、地震前に内灘町周辺で撮影された空中写真⁵⁾を用い、複数枚の画像から三次元データを生成する手法である SfM-MVS により DSM を作成した（以下、空中写真 DSM）。使用した空中写真は、地震前に撮影された最新のデータである 2012 年のものである。しかし、空中写真は SfM-MVS を目的として撮影されたものではないため、生成される DSM には誤差やノイズが含まれる可能性がある。そのため、空中写真 DSM の精度を検証するために地理院 DEM との比較を行った。比較は、視覚的に理解しやすく、また後述する細かな凹凸の除去処理を行いやすいことから、県道 8 号線のセンターラインに沿った縦断面において実施した。比較結果を図-8 に示す。比較の結果、400 m～500 m の区間において連続性がないデータが確認された。道路は一般に連続した縦断面形状を有するため、これらの値は外れ値と判断し補正を行った。外れ値補正は以下の手順で実施した。まず、外れ値を除いたデータを有効データと定義し、400 m～500 m 区間の有効データに対して三次関数による近似を行った。三次関数は道路縦断面形状のような緩やかな曲線形状を表現することが可能であるため、本研究では三次関数による近似を用いた。次に、有効データと近似関数との差の最大値（絶対値）を算出した。その後、外れ値区間における外れ値と近似関数との差を求め、有効データにおける最大差と一致するように外れ値の補正を行った。

また、空中写真 DSM には全体的に細かな凹凸が確認された。一般に舗装道路は安全な走行を確保するために維持管理されており、地震前の道路縦断面にこのような微小な凹凸が多数存在する可能性は低い。さらに、本研究の目的は地震による地盤変状を定量化することであるため、地震前の道路縦断面形状は可能な限り滑らかな形状として推定する必要がある。

そこで、空中写真 DSM に含まれる凹凸を除去し、より現実的で連続性を有する道路縦断面を得るため、外れ値補正後の縦断面に対して三角移動平均による平滑化処理を行った。三角移動平均は中心点付近のデータに大きな重みを与えるため、単純移動平均と比較して地形の傾向を保持しながら局所的な凹凸を除去することができる。また、三角移動平均では平均範囲を広くするほど凹凸を除去することができるが、過度に広げると実際の地形形状とかけ離れた人工的な縦断面となる可能性がある。そのため、平均範囲の設定には舗装路面の平坦性⁶⁾および道路の縦断勾配⁷⁾に関する基準を用い、これら二つの基準を満たす範囲で設定した。平均範囲は場所ごとに試行錯誤により決定する必要があるため、本研究では県道 8 号線において前後 3 m を平均範囲とした。

外れ値補正および平滑化処理後の県道 8 号線の縦断面を図-9 に示す。平滑化により細かな凹凸は除去されたものの、0 m～600 m および 700 m～950 m の区間において、地理院 DEM と比較すると空中写真 DSM が平均的に約 0.2 m 低い値を示していた。この誤差は地盤変状の定量化結果に影響を与える可能性があるため、追加の補正を行った。具体的には、地理院 DEM と平滑化後の空中写真 DSM との差の平均値を算出し、その平均値を空中写真 DSM に加算することで補正を行った。

補正後の縦断面を図-10 に示す。この補正後の縦断面を地震前の縦断面とする。

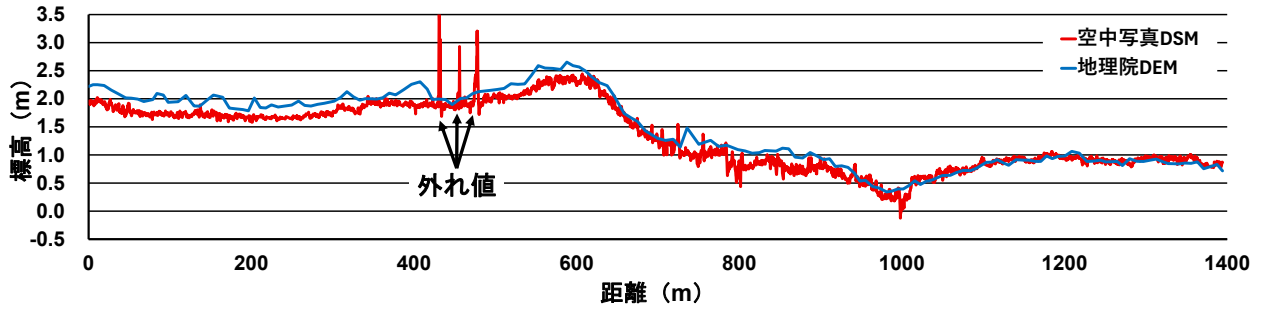


図-8 空中写真 DSM と地理院 DEM の比較

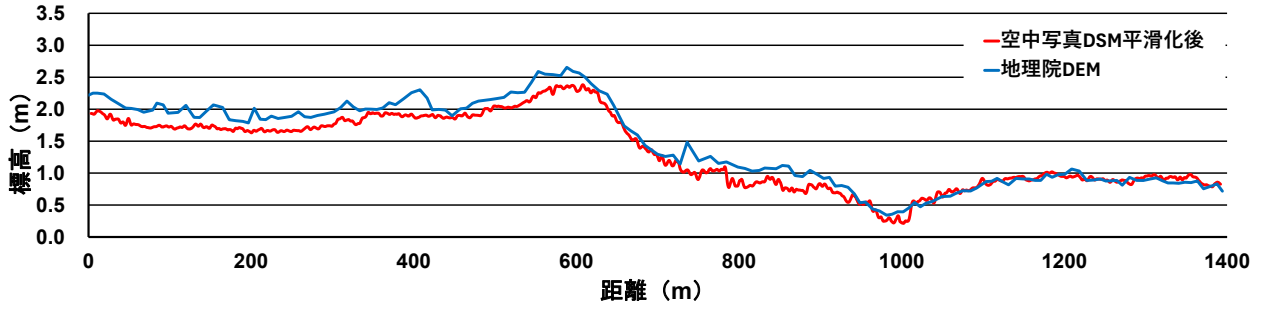


図-9 平滑化後の空中写真 DSM と地理院 DEM の比較

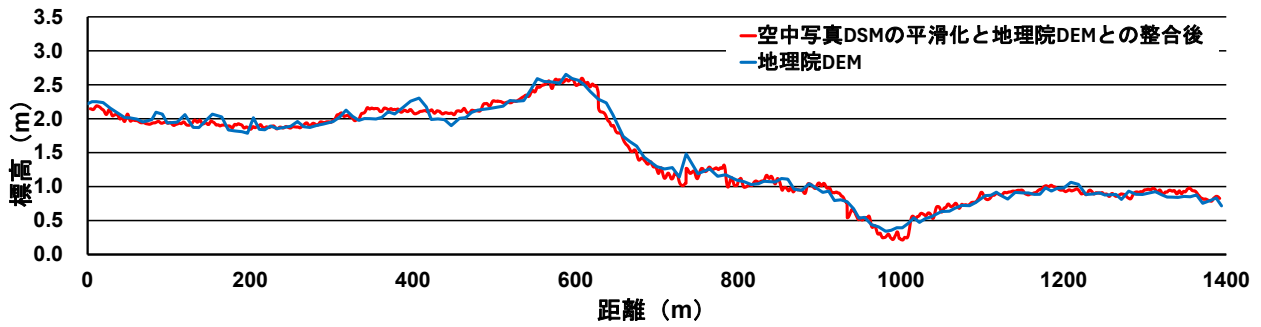


図-10 空中写真 DSM の平滑化と地理院 DEM との整合後と地理院 DEM の比較

7. 地震前後の縦断面の差分による地盤変状の定量化

地震前後の縦断面の差分により地盤変状の定量化を行った。県道8号線の空中写真を図-11に示し、地震前後の縦断面差分の結果を図-12に示す。なお、差分が正の値の場合は隆起、負の値の場合は沈下を示す。図-12より、①～④の範囲では全体的に隆起が確認され、最大で約+0.8 mの地盤変状が確認された。この隆起は、西側から東側へ地盤の流動が発生し、その流動が県道8号線によってせき止められたことにより生じた可能性がある。一方、①と②の間、②と③の間、③と④の間では周囲と比較して変状量が小さい区間が確認された。①と②の間付近には図-11中の黄色線で示す路地が存在しており、この路地部分では地盤が締め固められていたことにより流動が抑制され、結果として隆起量も小さくなった可能性がある。②と③の間には西荒屋小学校の校舎が位置しており、建物基礎の存在により地盤の流動が抑制されたことで隆起量が小さくなったと考えられる。また、③と④の間には県道162号線へ接続する道路が存在しており、この道路部分でも地盤が締め固められていたことで流動が抑制され、隆起量が小さくなった可能性がある。このように、周辺の構造物や道路によって流動が部分的に抑制されたことにより、隆起量の大きい区間と小さい区間が混在し、結果として県道8号線の縦断形状は波状の変化を示したと考えられる。一方、⑤の範囲では全体的に沈下が確認され、最大で約-0.5 mの地盤変状が確認された。①～④の区間と比較すると⑤の区間では地盤変状が小さい傾向が見られる。これは、県道8号線の西側に位置する旧道が流動を抑制したことが一因である可能性がある。また、県道8号線自体も流動に伴って移動したことで、結果として沈下として観測されたと考えられる。



図-11 県道8号線空中写真

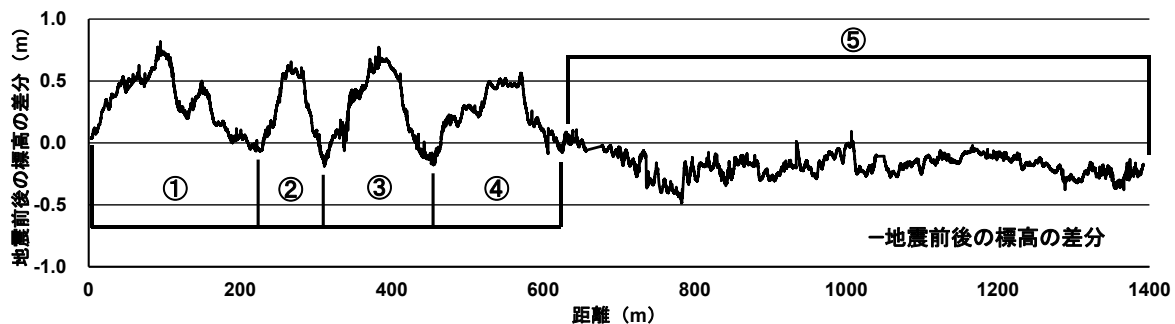


図-12 県道8号線の地震前後の標高差分

8. 地盤変状と過去の地形との関係性

液状化の発生要因を検討するためには、現在の地盤条件だけでなく、地盤の形成過程や人為的改変を含む過去の地盤履歴を把握することが重要である。そこで、本研究では過去の地形と現在の地形を比較し、地形改変と液状化被害との関係について検討を行った。

図-13 に 1962 年の西荒屋小学校周辺の空中写真、図-14 に現在の西荒屋小学校周辺の空中写真を示す。図-13 に着目すると、図中の黄色線で示すように西荒屋地区には池が存在していたことが確認できる。この池が存在していた位置は、現在では西荒屋小学校が建設されている区域に相当しており、当該地点は過去に池を埋め立てることで造成された地盤であることが分かる。

県道 8 号線の縦断解析の結果、小学校周辺において特に大きな隆起が確認された。この結果は、過去の地形改変に伴って形成された地盤条件が、地震時の液状化および地盤流動の発生に影響を与えた可能性を示唆している。特に、池の埋め立てによって形成された地盤は、周囲の自然地盤と比較して締固めの程度や地盤構造が異なる場合があり、そのことが液状化の発生や流動の挙動に影響した可能性が考えられる。

しかし、本研究で実施した地形履歴との比較のみから、液状化および流動化の発生要因を詳細に特定することは困難である。そのため、今後はボーリングデータなどを用いた地盤内部構造の把握や、液状化解析を実施することで、液状化の発生および地盤流動のメカニズムをより詳細に解明する必要がある。



図-13 1962年の西荒屋小学校周辺の空中写真



図-14 現在の西荒屋小学校周辺の空中写真

参考文献

- 1) 気象庁：推計震度分布図, https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#7/36.781/137.42/&contents=estimated_intensity_map&id=202401011610, (2025年12月23日閲覧)
- 2) 産業技術総合研究所 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/>, (2025年12月23日参照)
- 3) G空間情報センター：林野庁・数値標高モデルDEM0.5m（能登地域2024）, <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/rinya-dem-noto2024>, (2026年1月14日閲覧)
- 4) 国土地理院：基盤地図情報サイト, <https://www.gsi.go.jp/kiban/>, (2026年1月14日閲覧)
- 5) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス, <https://service.gsi.go.jp/map-photos/>, (2026年1月15日閲覧)
- 6) 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>, (2026年1月12日閲覧)
- 7) 国土交通省：道路構造令, https://laws.e-gov.go.jp/law/345CO0000000320/#Mp-At_20, (2026年1月12日閲覧)