

ALOS-2 衛星 SAR 画像を用いた 2018 年北海道 胆振東部地震における液状化被害の検出

劉 ウェン¹・山崎 文雄¹・丸山 喜久¹・松岡 昌志²

¹千葉大学 大学院工学研究院 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)
E-mail: wen.liu@chiba-u.jp; fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp; ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

²東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)
E-mail: matsuoaka.m.ab@m.titech.ac.jp

2018 年 9 月 6 日に発生した Mj6.7 の北海道胆振東部地震により、北海道の 5 市町村に地盤沈下や噴砂などの液状化による被害が生じた。著者らは、2018 年 10 月 2-4 日に現地調査を行い、最も被害が大きかった札幌市清田区と北広島市における被害状況を把握した。また、地震当日に撮影された ALOS-2 PALSAR-2 画像と事前の 2 時期画像を用いて、液状化被害範囲の検出を行った。地震前の 2 時期画像ペアと地震前後の画像ペアにおける相関係数（コヒーレンス）をそれぞれ算出し、地震発生後コヒーレンスの低下した地域を液状化地域として抽出した。現地調査やその他の文献と比較して、抽出に用いるパラメーターの検討と結果の精度評価を行った。

Key Words: *The 2018 Hokkaido-Eastern-Iburi earthquake, soil liquefaction, field survey, SAR, coherence*

1. はじめに

2018 年 9 月 6 日 3 時 7 分に、北海道胆振地方中東部を震源とするマグニチュード(M)_s6.7 の地震が発生した。震源深さは約 37km である。北海道厚真町で最大震度 7 を観測し、広範囲における土砂崩れが発生した¹⁾。この地震により、死者 41 人、負傷者 750 人、住家全壊 452 棟、半壊 1515 棟などの被害を生じた²⁾。苫東厚真火力発電所でのボイラー管破損や発電機の緊急停止により、道北、函館で停電が発生し、最終的に全道ブラックアウトとなった。そのほか、苫小牧市、札幌市、北広島市と江別市、5 市町村に沈下や噴砂などの液状化現象が生じ、道路が隆起・陥没し、周辺の複数家屋が傾く被害があった。

リモートセンシング技術は大規模災害後の被害把握に有効である。合成開口レーダ(SAR)センサは光学センサより、天候の影響を受けず、昼夜に依らず撮影できるため、緊急撮影に適している。近年、センサ技術の発展により高解像度の SAR 画像が得られるようになり、都市域における被害把握も可能となった。

本研究では、地震当日に撮影された ALOS-2 PALSAR-2 (だいいち 2 号) の L バンド SAR 画像と地震前のアーカイブ画像を用いて、札幌市と北広島市における液状化被害

の地域を検出した。また、得られた結果を現地調査の報告と比較して、精度の評価を行った。

2. 対象地域と使用データ

液状化被害が最も多かった札幌市と北広島市を対象地域とした。札幌市では清田区で 3 箇所、北区・東区地下鉄沿線で液状化現象が報じられた。また、北広島市では札幌市との境界にある大曲並木で液状化被害が発生した。札幌市清田区では、過去の 1968 年・2003 年十勝沖地震、1982 年浦河沖地震で複数回の液状化被害を受けた³⁾。

液状化被害の範囲を把握するために、地震前(2018 年 8 月 9 日と 23 日)と地震発生直後(2018 年 9 月 6 日 22 時 38 分)に撮影された ALOS-2 PALSAR-2 画像を用いた。画像の撮影範囲は図-1 に示す。ALOS-2 は、2006 年から 2011 年まで稼働していた ALOS の後継機であり、2014 年 5 月 24 日に打ち上げられた。L バンド合成開口レーダ(PALSAR)を高性能した PALSAR-2 センサを搭載しており、地域観測、災害状況把握、資源探査など幅広い分野で利用されている。本研究に用いる PALSAR-2 画像は 1 帰帰周期(14 日)間隔の 3 時期画像であり、北行軌道(Ascending)



図-1 使用する PALSAR-2 画像の撮影範囲と 2018 年 10 月 2-4 日に行った現地調査のルート

の左観測により撮影された。撮影モードは Stripmap, HH の単偏波観測である。観測角度は 42.9 度、観測方位は北から時計回りの 254 度である。観測方向(slant range)の解像度は 1.43m, 進行方向は 1.77m である。すべての画像は強度と位相を含む Lv. 1.1 の複素数データである。

3. 現地調査

著者らは 2018 年 10 月 2 日から 4 日までの 3 日間、北海道胆振東部地震の被災地を調査した。現地調査のルートを図-1 の青線に示す。10 月 2 日は札幌市の清田区と北広島市における液状化被害の地域、3 日は広域の土砂崩れが発生した厚真町、4 日は道路や鉄道被害があった鶴川町と液状化被害があった苫小牧市を調査した。10 月 2 日に重点的に調査した液状化被害地域の航空写真を図-2(a)に示す。航空写真は国土地理院が 2018 年 9 月 13 日に撮影したものである⁴⁾。正射画像のため、地盤変状と建物の傾きは判読しにくい。また、地震発生後 1 週間を経過したため、道路の復旧作業が進み、道路被害から液状化箇所の推定は難しくなった。一方、ブルーシートと道路上に残った噴砂より、里塚と美しが丘の液状化範囲は概ね判読できる。北広島市大曲並木の被害箇所は、樹木と近隣するため、航空写真の正射画像からほとんど判読できなかった。

現地調査を行った里塚、美しが丘と大曲並木で撮影した写真を図-2(b)に示す。写真 a は里塚中央ぽふら公園を撮ったものである。液状化現象により地盤が 1m 以上沈下し、公園の地面が波打つような状態となっており、複数のブルーシートが被っていた。写真 b は公園付近の住家である。地盤沈下によって左の住家は大きく傾き、右側の住家は杭基礎部分が露出し、道路と段差ができていた。写真 c と d は美しが丘で撮影したものである。液



図-2 (a)図-1 の黒枠内における 2018 年 9 月 13 日に国土地理院が撮影した航空写真正射画像⁴⁾と 10 月 2 日に現地調査のルート；(b)現地調査で撮影した写真。

状化による道路のひび割れは既に修復され、薄く噴砂の痕が残っていた。また、写真 d に住家と道路の間に段差があり、液状化による地盤変状と考えられる。写真 e と f は航空写真から判別できなかった大曲並木で撮影したものである。住家と西側の樹木の間に小さい川があり、住家の背面地盤が川の方向へ崩れて、半壊以上の被害がでた。写真 f から崩れた地面と住家の傾きが見られる。噴砂痕がなかったため、液状化ではなく地震による住宅背面地盤の崩壊だという意見もある⁵⁾。

4. 液状化被害地域の検出

解析ソフト ENVI SARscape を用いて、画像の前処理を行った。進行方向と観測方向において 2 ルックずつマルチルック処理を行い、約 3m 解像度の強度画像を 2.5m の

ピクセルサイズで地図投影した。また、標高による歪みは国土地理院が公開した 10m デジタル標高モデル⁹⁾を用いて補正した。輝度補正後、3 時期の後方散乱係数画像のカラー合成図を図-3(a)に示す。農作業による変化があったため、カラー合成図上に水田などの農地は紫色を示すが、その他の地域はほとんど変化が見られなかった。現地調査を行った札幌市清田区と北広島市大曲並木付近を拡大しても、解像度の関係で液状化被害を判読できなかった。そこで、液状化被害の検出に有効なコヒーレンス(γ)を式(1)より算出した^{7,8)}。本研究では、7×7ピクセルのウィンドウを使用した。

$$\gamma = \frac{|\sum S_1 S_2^*|}{\sqrt{\sum S_1^2 \sum S_2^2}} \quad (1)$$

ここで、 S_1, S_2 は2時期画像における振幅と位相をもつ複素数であり、*は複素数共役を表す。

地震前の8月9日と8月23日の画像から計算されたコヒーレンスはシアン(青と緑)で表示し、8月23日と9月6日の地震前後ペアから得られたコヒーレンスを赤で表示したカラー合成図を図-3(b)に示す。強度画像のカラー合成図に比べて、農地以外の森林域でもコヒーレンスが大きく変化している。本研究では、札幌市と北広島市における液状化被害を検出するため、まず図-3(b)のオレンジ枠における都市域の抽出を行った。

札幌市と北広島市周辺における地震前のペアから求められた事前コヒーレンスを図-4(a)に示す。この地域の主な土地被覆は都市域、農地、森林(山地)と水域である。水域以外の3つの土地被覆から約25,000ピクセルのサンプル地域を選定し、事前コヒーレンスのヒストグラムを図-4(b)に示す。森林(山地)が最も低く、ヒストグラムのピークが0.48前後にある。農地のコヒーレンスは山地よりやや高く、ヒストグラムのピークは0.58前後である。一方、都市域のコヒーレンスが最も高く、ヒストグラムのピークは0.85前後である。農地と都市域のコヒーレンスの累積分布の差が最も大きくなる0.68を閾値とし、0.68以上の地域を都市域として抽出した。

次に札幌市と北広島市内における地震前後のコヒーレンスと事前コヒーレンスの差を式(2)より求めた。事前コヒーレンスを用いて抽出された都市域におけるコヒーレンス差($\Delta\gamma$)を図-5(a)に示す。

$$\Delta\gamma = \gamma_{co-event} - \gamma_{pre-event} \quad (2)$$

現地調査を行った清田区以外に、2つのコヒーレンス低下地域が見られる。航空写真で確認したところ、どちらも農地であった。地震前後ペアの8月23日と9月6日

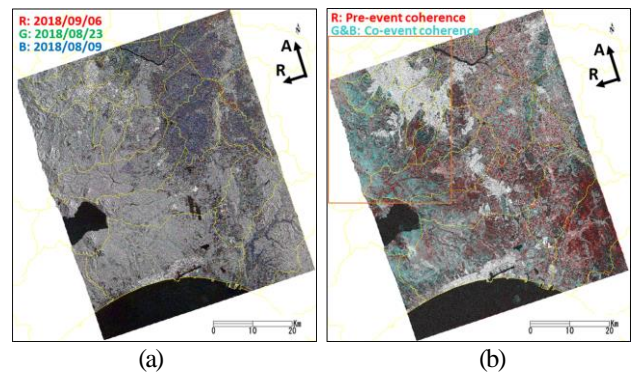


図-3 (a)3時期強度画像のカラー合成図；(b)地震前ペアと地震前後ペア画像から得られたコヒーレンスのカラー合成図。

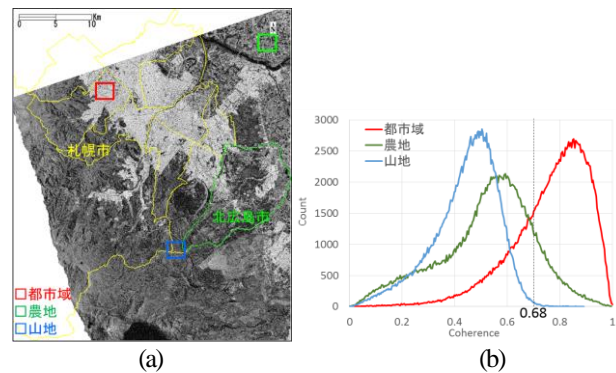
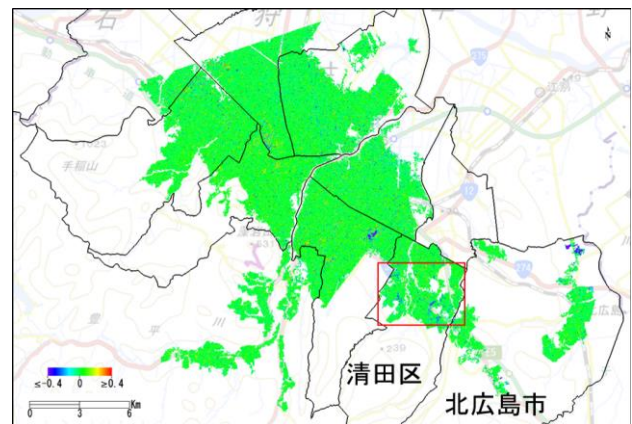


図-4 (a)図-3(b)のオレンジ枠における地震前ペアのコヒーレンスの拡大図と土地被覆の異なる3つのサンプル地域；(b)土地被覆ごとの事前コヒーレンスのヒストグラム。



(a)



(b)

図-5 (a)札幌市と北広島市の都市域におけるコヒーレンスの差；(b)赤枠内の清田区を拡大したものの。

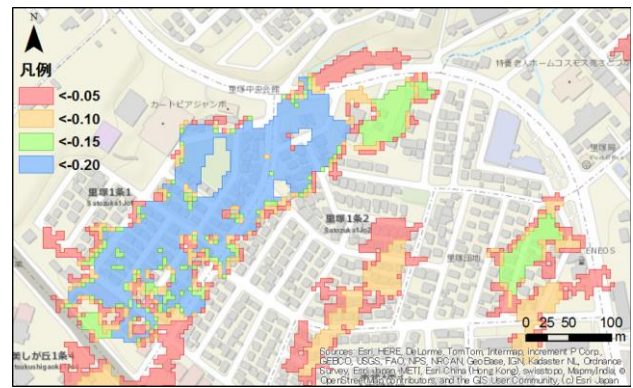
の間に、収穫作業によりコヒーレンスが著しく低下したと推測した。清田区周辺を拡大した図を図-5(b)に示す。調査を行った里塚, 美しが丘と大曲並木に明らかなコヒーレンス低下が確認でき、コヒーレンス差による液状化地域の検出は有効と考えられる。調査した3箇所以外に、清田区清田で2箇所のコヒーレンス低下域が見られた。清田区の境目にある箇所は清田2条・北野1条付近、その西にある低下地域は清田5-7条付近である。著者らは現地調査を行わなかったが、西村・渡部⁵⁾の調査によると、この2箇所で液状化被害が見られた。

図-5(a)に示す都市域におけるコヒーレンス差の平均値は0.01、標準偏差は0.08であり、ほとんどゼロに近い数値であった。本研究ではコヒーレンス差の閾値を-0.05, -0.10, -0.15, -0.20と設定し、液状化範囲の抽出を試みた。車の移動によるコヒーレンスの低下を除去するために、抽出された地域が2,500m²以下の場合ノイズとして除くことにした。現地調査で行った里塚と美しが丘付近で閾値の検討を行った。図-6(a)と(b)に4つの閾値から検出された被害地域を示す。閾値を小さくするほど検出された地域が小さくなる。図-6(c)と(d)に西村・渡部⁵⁾の調査結果を示す。西村・渡部の調査チームは地震当日の9月6日に現地調査を行ったため、約1ヶ月後に調査を行った著者より正確なデータが得られたと考えられる。

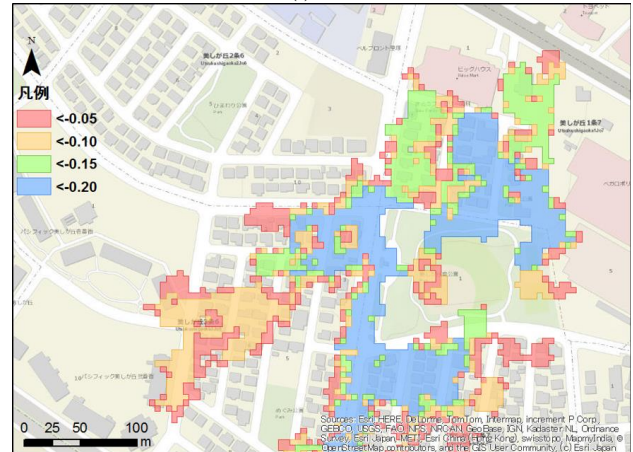
里塚では、西村・渡部の調査によると、南西側の土砂が沈下し、東北方向へ流れた。沈下した部分はすべての閾値から検出できたが、閾値を-0.20と設定したとき、里塚1条2丁目にある噴砂域を検出できなかった。現地調査写真aとbを撮影した場所はすべての閾値から検出できた。一方、閾値が-0.05と-0.10と設定したとき、被害が見られなかった中央部も液状化として誤検出された。

美しが丘では、現地調査の報告より広い範囲がコヒーレンス差から抽出された。美しが丘南公園の南側にある住宅ブロックはすべての閾値から液状化地域として検出されたが、現地調査では被害が報告されなかった。一方、被害が報告された6丁目の東側はすべての閾値から検出されたが、西側は閾値が0.05と-0.10と設定したときのみ検出された。また、閾値が-0.15は閾値が-0.20のときより多くの被害建物を含められた。

以上の比較より、液状化検出の閾値を-0.15と設定した。清田区周辺に抽出された液状化被害地域を図-7に示す。清田区から4箇所、北広島市大曲並木から1箇所の液状化被害地域が検出できた。抽出された地域の面積は約0.2km²であった。また、抽出されたエリアは、西村・渡部の現地調査結果で報告された被害箇所(赤丸)と比較して概ね一致している。



(a)里塚



(b)美しが丘



(c)里塚



(d)美しが丘

図-6 (a-b)里塚と美しが丘における4つの閾値を用いた抽出結果の比較；(c-d)西村・渡部⁵⁾の調査による液状化被害箇所。

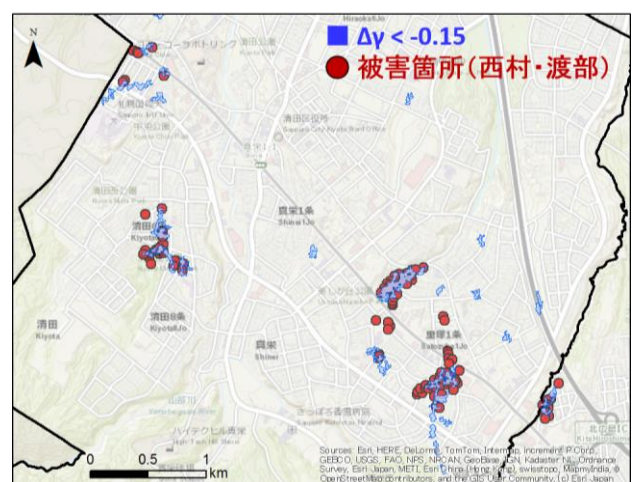


図-7 3 時期の PALSAR-2 画像から検出された札幌市清田区周辺における液状化地域の範囲と西村・渡部⁵⁾が報告した被害箇所の比較。

6. まとめ

2018年北海道胆振東部地震による札幌市と北広島市の液状化被害地域の検出を行った。著者らは約1ヶ月後の10月2日に現地調査を行い、液状化被害の状況を把握した。復旧作業よりが判別できない被害箇所もあった。さらに、14日周期ごとの地震前2時期画像と地震当日のALOS-2/PALSAR-2画像を用いて画像処理による液状化被害地域の抽出を行った。

地震前ペアと地震前後ペアから位相を補正した相関係数コヒーレンスを求めて、地震後コヒーレンスが低下した地域を液状化被害として抽出した。植生による季節変化を軽減するために、事前コヒーレンスを用いて都市域を抽出し、液状化被害の検出は都市域に限った。現地調査をもとにコヒーレンス差の閾値を検討し、札幌市清田区と北広島市大曲並木から0.2km²の液状化被害地域を抽出した。その結果、9月6日に現地調査行った西村・渡部⁹が報告した被害箇所はほぼ検出できた。

謝辞：本研究で使用したPALSAR-2データはJAXAに所有権があり、ALOS-2研究公募(RA-6)に基づく研究(PI No.3243)を通じて貸与されたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省気象庁：平成30年北海道胆振東部地震の評価，2018.
- 2) 北海道庁：平成30年北海道胆振東部地震による被害状況等（第113報），2018.
- 3) 若松加寿江，尾上篤生：平成30年北海道胆振東部地震による札幌市清田区美しが丘・清田における地盤災害，http://www.koa-kaihatsu.co.jp/wp-content/uploads/2018/09/utsukushigaoka_kiyota_report%E8%88%88%E4%BA%99.pdf, 2018.
- 4) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html#1>, 2018.
- 5) 西村聡，渡部要一：平成30年北海道胆振東部地震による液状化被害，平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団速報会，地盤工学会，https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2018/10/nishimura_watabe_20181002.pdf, 2018.
- 6) 国土地理院基盤地図情報：<http://www.gsi.go.jp/kiban/>, 2018.
- 7) Ishitsuka, K., Tsuji, T., Matsuoka, T.: Detection and mapping of soil liquefaction in the 2011 Tohoku earthquake using SAR interferometry, *Earth Planets Space*, Vol. 64, pp.1267–1276, 2012.
- 8) 石塚 師也，辻 健，松岡 俊文：SARデータの相関度を用いた液状化地域の特定手法の開発—2011年東北地方太平洋沖地震及び2011年クライストチャーチ地震への適用，物理探査，66巻，1号，pp.25-35, 2013.

(2018. 12. 10 受付)

DETECTION OF SOIL LIQUEFACTION DUE TO THE 2018 HOKKAIDO-EASTERN-IBURI EARTHQUAKE USING ALOS-2 SATELLITE SAR IMAGERY

Wen LIU, Fumio YAMAZAKI, Yoshihisa MARUYAMA and Masashi MATSUOKA

A JMA magnitude 6.7 earthquake hit the eastern Iburi, Hokkaido, Japan, on September 6, 2018. Due to the strong shaking, soil liquefactions occurred in five cities and villages. The authors conducted a field survey on October 2, 2018 to grasp the damage conditions in Sapporo and Kita-hiroshima Cities. In addition, two pre-event and one post-event PALSAR-2 images taken 19 hours after the earthquake were used to detect the affected areas due to liquefactions. The coherences between the pre-event pair and the co-event pair were calculated, respectively. The urban areas with the decrease of the coherence after the earthquake were detected as damaged areas. The threshold value of the coherence difference was discussed by comparing with the field survey reports. As a result, most of the reported damaged areas could be detected successfully using the proposed method.