

液状化地域における SAR 画像コヒーレンス低下の考察

東京工業大学 環境・社会理工学院 松岡 昌志

元東京工業大学大学院修士課程 賀川 健人

理化学研究所 革新知能統合研究センター カリムザデ・サドラ

Examination on Phase Coherence Reduction in SAR Images Observed in Liquefaction Area

Masashi Matsuoka, Kento Kagawa, Tokyo Institute of Technology
Sadra Karimzadeh, RIKEN AIP

Abstract

Some low phase coherence areas were recognized from the result of analysis by using PALSAR-2 images which observed damage areas of the 2016 Kumamoto earthquakes. Especially, there are straight belt-shaped low phase coherence area in southern Kumamoto city. Even though the damages of liquefaction were reported, the appearance of boiled sand effects for phase coherence is less and damaged buildings are not many in this region. Therefore, one of the reasons decreasing phase coherence is considered as land subsidence by liquefaction effect. In order to clarify this phenomenon, this study tried to examine the relationship between land subsidence and phase coherence by a simple simulation. We also performed phase coherence analysis for PALSAR-2 images captured the affected areas due to the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake and a weighted overlay (WO) analysis based on phase coherence result, LiquickMap (from seismic intensities and geomorphologic classification), and topographic slope to distinguish damaged building associated with geotechnical damage including liquefaction.

1. はじめに

2016 年 4 月 14 日から、熊本県を中心に M6 以上の地震が連続して発生し、14 日 21 時 26 分 (M6.5) の地震および 15 日 0 時 3 分 (M6.4) に発生した地震 (前震)、16 日 1 時 25 分には M7.3 の本震が発生した。国土院の調査では、布田川断層帯に沿った地盤の変動や、南阿蘇河陽地区における大規模な土砂崩壊が報告されている¹⁾。このような災害発生時において、早期に被害を把握することは効果的な災害対応を考える上で重要であり、人工衛星リモートセンシングでは広域かつ迅速に被害の把握が可能である。1995 年兵庫県南部地震以降、人工衛星に搭載したセンサによって取得される人工衛星リモートセンシングを利用した手法が被害の早期把握に積極的に利用され、洪水による浸水や建物被害のモニタリング等において成果をあげている。

本報では、ALOS-2 衛星の合成開口レーダ (SAR) センサである PALSAR-2 画像を用い、熊本地震の液状化発生地域における地震前後の SAR 画像のコヒーレンスが変化することをシミュレーションによって明らかにし、2018 年北海道胆振東部地震の液状化発生地域でも同様の傾向がみられることを示す。

2. 熊本地震の PALSAR-2 画像とコヒーレンスの変化

地震前 (2015/11/30 および 2016/3/7) と、前震後 (2016/4/18) に被災地を撮影された PALSAR-2 画像を用いた (表 1)。地震前の 2016/3/7 を Master 画像、他の 2 シーンを Slave 画像として位置合わせを行い、地震前のペア 2015/11/30(Slave)-2016/3/7(Master)、地震前後のペア 2016/3/7 (Master)

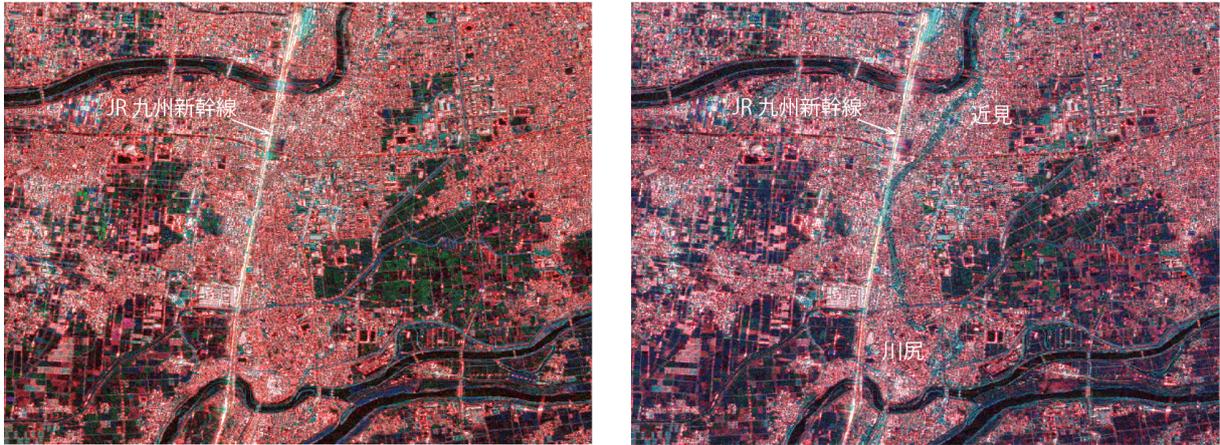


図1 カラーコンジット画像 (熊本市南区近見・刈草・川尻)
左：地震前のペア (2015/11/30-2016/3/7)、右：地震前後のペア (2016/3/7-2016/4/18)

—2016/4/18 (Slave) の2ペアを用いて被災地のコヒーレンスの変化を調べた。1ペアの干渉処理により1枚のコヒーレンス画像が得られる。干渉処理とは、Master 画像と Slave 画像のマイクロ波の位相成分の差分を計算することによって地殻変動を検出する技術であり、一般的に地表面に変化がなければコヒーレンスは高くなる。また、それぞれの Master 画像と Slave 画像からは、マイクロ波の後方散乱強度を表す画像が得られる。

そこで、干渉処理によって得られたコヒーレンス画像と Master と Slave の後方散乱強度の画像を RGB に着色合成 (R: コヒーレンス画像、G: Master の後方散乱強度画像、B: Slave の後方散乱強度画像) することによって RGB コンジット画像を作成した。なお、各画像のピクセル分解能は 5 m × 5 m として、それぞれのペアについて作成した。図1に熊本市南区近見・刈草・川尻付近の地震前のペア、地震前後のペアの RGB コンジット画像を示す。水域や植生がある地域は後方散乱強度が低いので暗い色になり、建物群についてはマイクロ波の多重反射により後方散乱強度が高くなるため明るくなる。そして、コヒーレンスが高い地域は赤色になるが、コヒーレンスが低い地域は赤色の成分が少ないのでシアン色になる。それぞれのペアを比較すると、地震前後のペアでは旧鹿兒島街道に沿いに帯状にコヒーレンスが低下している地域がみられ、噴砂が確認された地域 (図2参照)²⁾ との対応は良い。この地域を液状化の帯と呼ぶ。図3には液状化の帯によるコヒーレンス値の断面を示す。液状化の帯ではコヒーレンスが 0.1 程度にまで低下して

表1 熊本地震の解析に使用した PALSAR-2 画像のデータセット

観測日	軌道	照射方向	オフナディア角
2015/11/30	下降	右 (西) 向き	32.8°
2016/3/7	下降	右 (西) 向き	32.8°
2016/4/18	下降	右 (西) 向き	32.8°

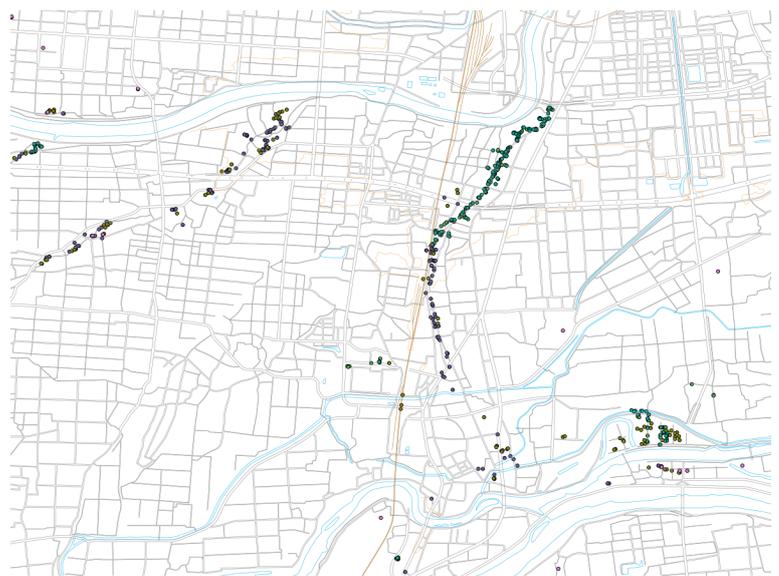


図2 液状化による噴砂が確認された地点 (熊本市南区近見・刈草・川尻)

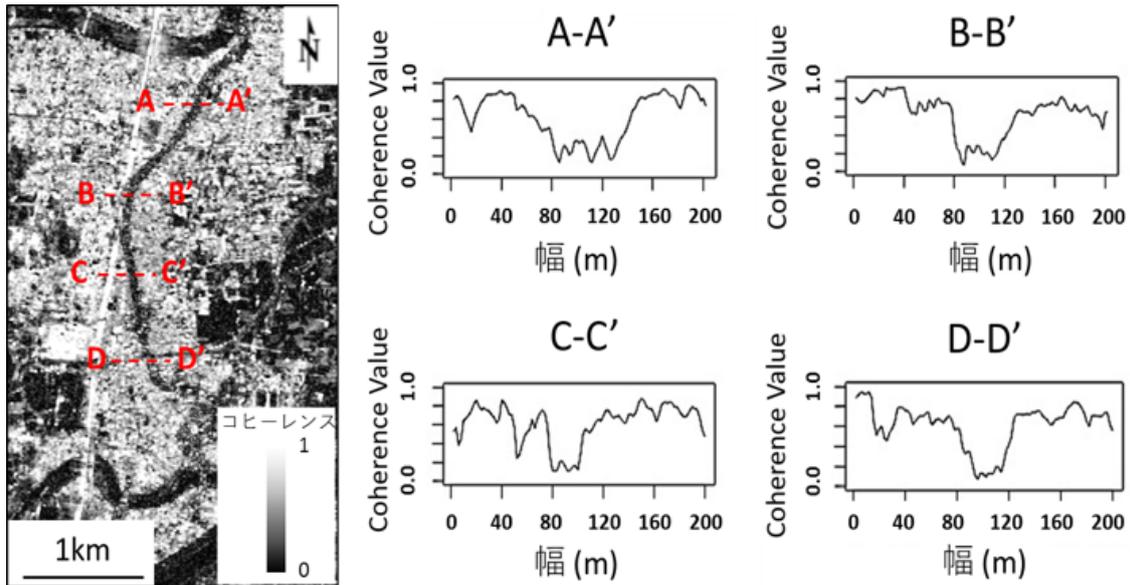


図3 液状化の帯によるコヒーレンスの値の断面

いる。なお、この地域では、筆者らが行った現地調査でも噴砂の跡を確認しており、鉛直方向に局所的には最大で約1m～1.5m地盤沈下していた。また、コヒーレンスは建物倒壊など大きな変状があった場合にも低下するが、現地での外観調査や航空写真からの目視からはそのような大きな建物変状は確認できなかった。本震の6ヶ月後に観測したPALSAR-2画像による干渉処理でもコヒーレンス低下がみられるため、地表面が噴砂で覆われたことが原因ではないと考えられる。以降では、コヒーレンス低下の原因をシミュレーションによって明らかにする。

3. コヒーレンスのシミュレーション

3.1 位相および振幅の変化がコヒーレンスに与える影響

ここでは、振幅と位相の変化がコヒーレンスにどのような影響を与えるのかを検討する。2つの3×3ピクセルの配列を1回目の観測と2回目の観測で得られたSAR画像と考え、それぞれをMaster画像、

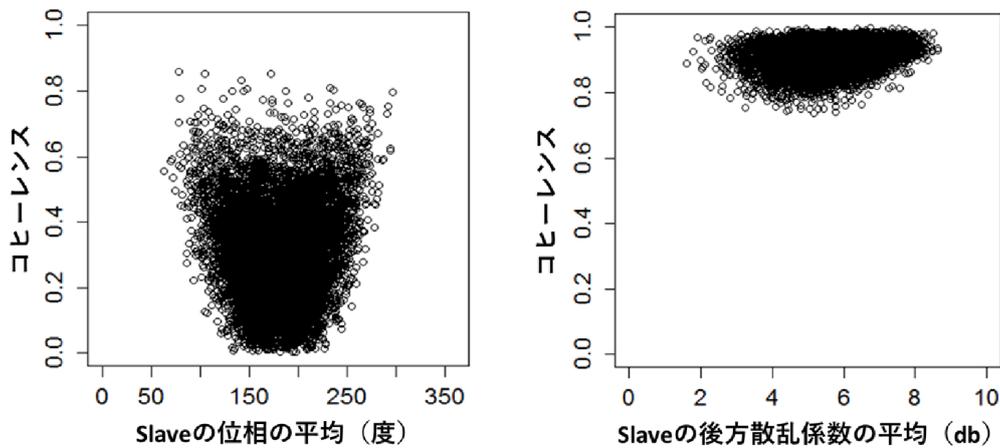


図4 Master画像を固定し、Slave画像の位相と後方散乱係数を変化させた時のコヒーレンス
左：位相とコヒーレンスの関係、右：後方散乱係数とコヒーレンスの関係

Slave 画像として両者の各ピクセルに任意の振幅と位相を与える。

まず、位相の変化とコヒーレンスの関係について検討を行う。これは、人工衛星と対象物との距離が変化したことを模擬している。振幅が変化せずに位相のみが変化した場合を想定し、まず Master と Slave のすべてのピクセルの振幅（後方散乱係数）を 10 dB に統一する。また、Master の各ピクセルの位相を 0° とし、Slave の各ピクセルの位相を $0^\circ \sim 360^\circ$ の間になるようにランダムに変化させ、コヒーレンス計算を 10,000 回実施した。Slave の 3×3 ピクセルの平均位相の値とコヒーレンスの関係を図 4 左に示す。平均位相が 180° 付近のときコヒーレンスが 0 近くまで低下する。また、位相のバラツキ（標準偏差）とコヒーレンスの関係についても計算したところ、 100° 付近においてもっともコヒーレンスが低下することがわかった。

次に、振幅の変化とコヒーレンスの関係について検討を行う。これは地表面の被覆が異なるものに変化したことを模擬している。位相が変化せずに振幅のみが変化した場合を想定し、まず Master と Slave の位相をすべてのピクセルにおいて 0° に統一する。Master のすべてのピクセルの振幅（後方散乱係数）を 10 dB になるように固定し、Slave の各ピクセルの振幅（後方散乱係数）を $0 \sim 10$ dB の間になるようにランダムに変化させた。コヒーレンス計算は上述の位相のシミュレーションと同様に 10,000 回である。Slave の 3×3 ピクセルの平均振幅の値とコヒーレンスの関係を図 4 右に示す。Slave の平均振幅が 5 dB 付近でコヒーレンスが低下するものの 0.8 程度である。振幅のバラツキ（標準偏差）とコヒーレンスの関係についても計算したところ、標準偏差が大きくなるにつれてコヒーレンスが低下するが、その値は 0.8 程度と上述の位相のシミュレーションに比べると低下の程度は小さい。

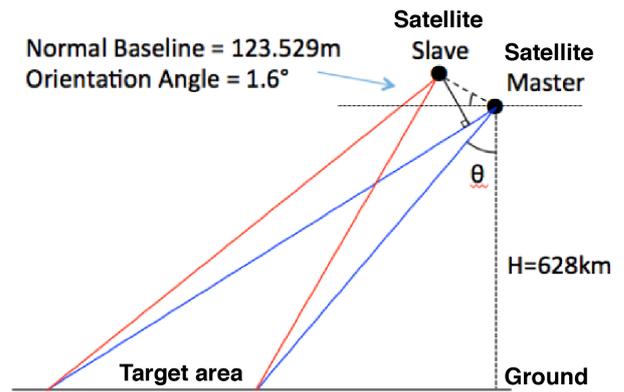


図 5 シミュレーション条件

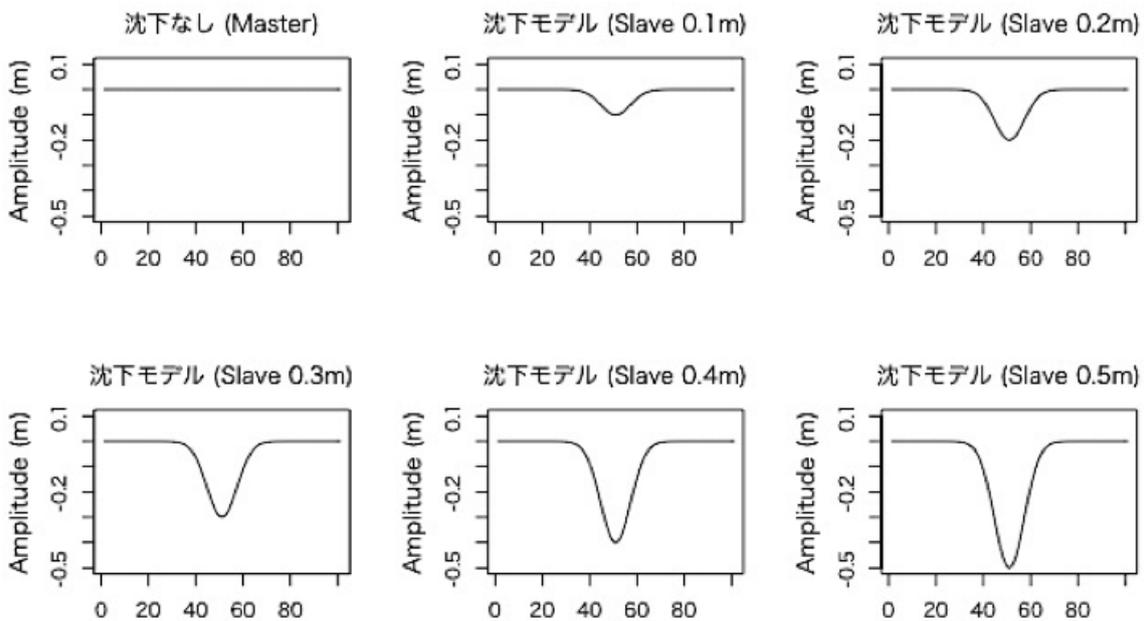


図 6 地盤沈下のモデル（滑らかな地表面）

3.2 液状化地域におけるコヒーレンスシミュレーション

前節によりコヒーレンスの低下は位相が変化することによって起こり、それは人工衛星と対象物との距離が変化したと考えることができる。図1に示すように 熊本県熊本市南近見・刈草・川尻付近は液状化による噴砂が確認され、国土地理院はこの地域における地震による平均的な地盤変動は鉛直方向に約0.15～0.2m沈下と報告³⁾している。そこで、コヒーレンスの低下は地盤沈下が原因であると仮定し、コヒーレンスのシミュレーションを行った。

シミュレーション条件は、図5のように PALSAR-2 画像の観測条件に準じて設定した。地盤の沈下は、沈下のないフラットな平面を Master (地震前) として、Slave (地震後) が Master に対して相対的に 0.1m、0.2m、0.3m、0.4m、0.5m 沈下し、その沈下の幅は約 100m とした。地盤は滑らかに沈下したと仮定した。図6に想定した地盤モデルを示す。シミュレーションは Master と各 Slave とのコヒーレン

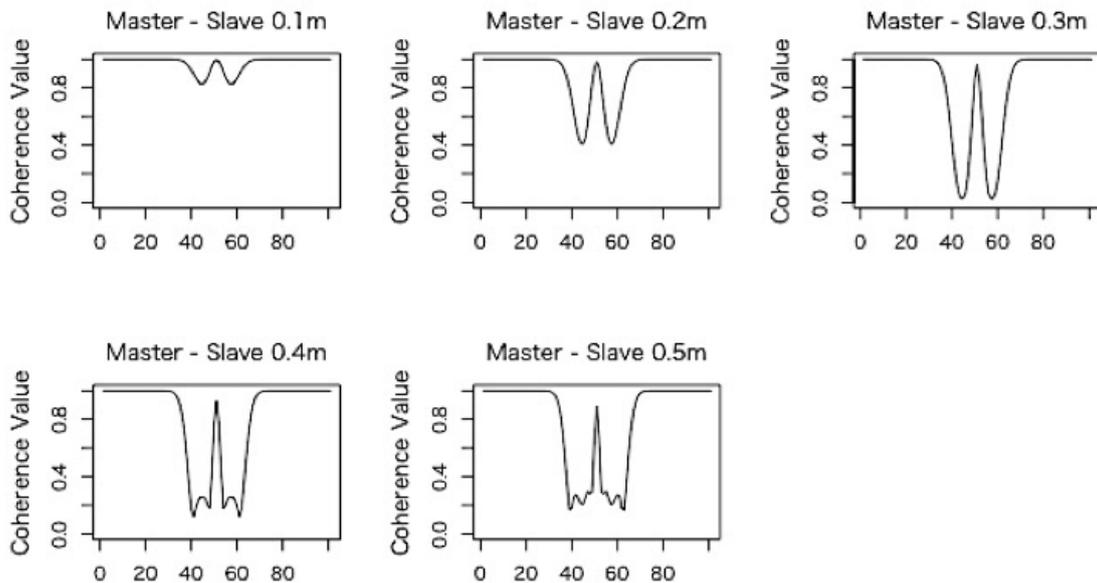


図7 コヒーレンス (滑らかな地表面)

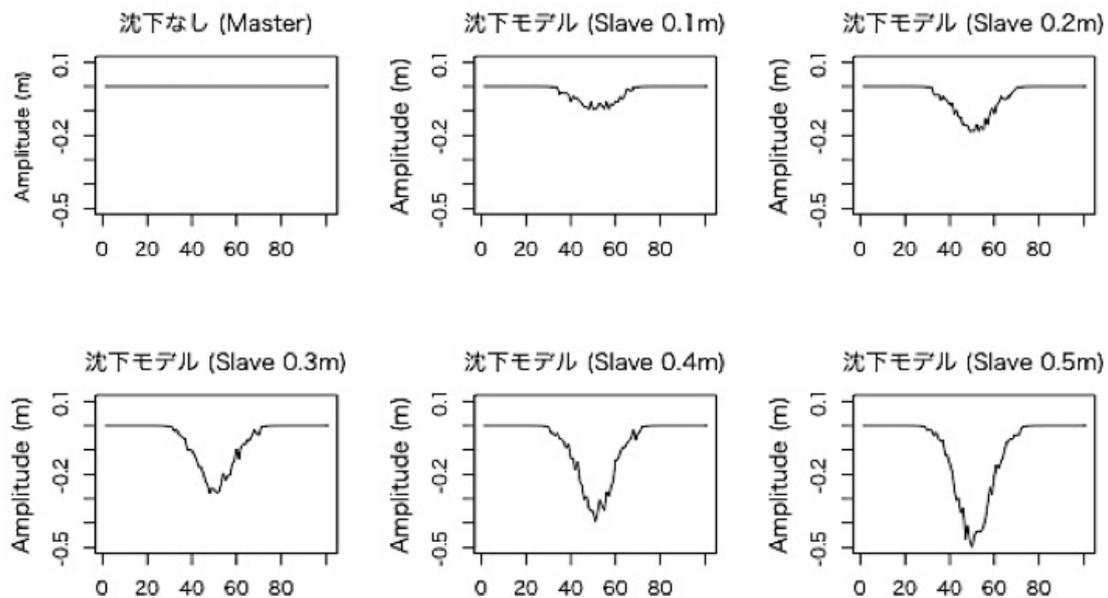


図8 地盤沈下のモデル (凹凸の地表面)

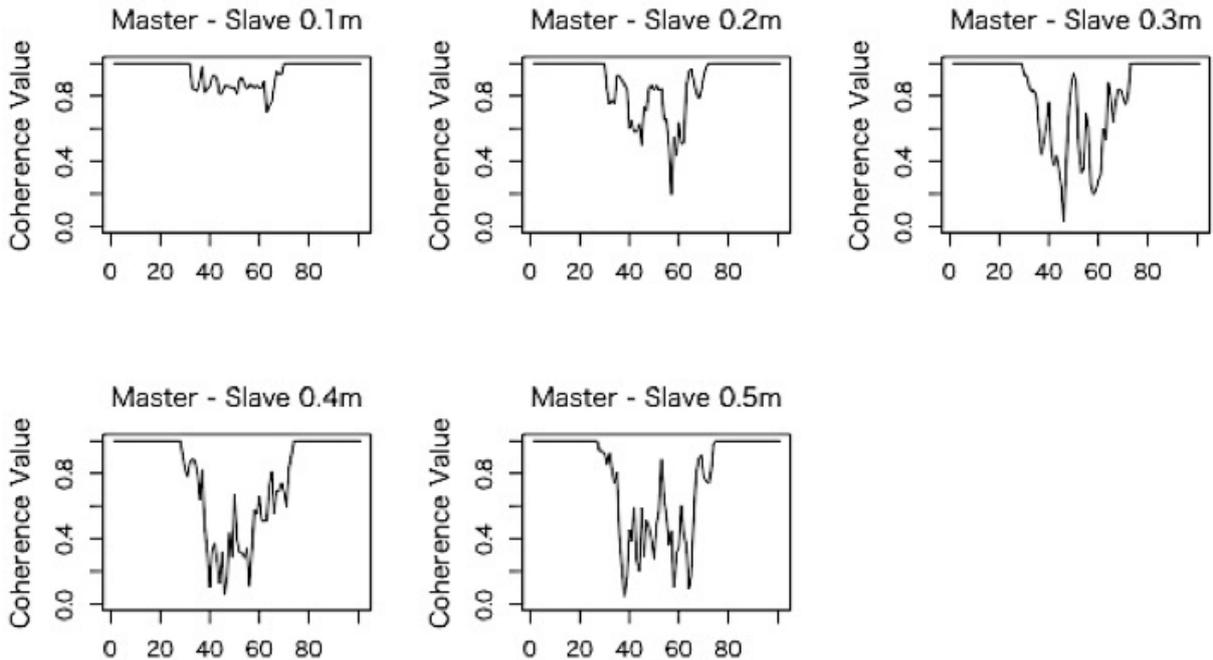


図9 コヒーレンス (凹凸の地表面)

スを求め、コヒーレンス計算時の平均化ウィンドウは 25m とした。なお、2 回の観測で後方散乱係数に変化がなかったと仮定した。シミュレーションで得られたコヒーレンスを図 7 に示す。シミュレーションから地盤沈下によってコヒーレンスが低下し、沈下量が大きくなるとコヒーレンスの低下も大きくなるという結果を得た。今回のモデルでは沈下量が 0.3m を超えるとコヒーレンスの値の低下に乱れが生じた。しかし、いずれの結果も Slave の沈下の勾配が大きいところではコヒーレンスが低くなっているのに対し、沈下の勾配が小さいところではコヒーレンスの低下が緩やかになっている。なお、実際の地盤沈下は滑らかなには起こらず、局所的に不同沈下になっていると考えられる。そこで、沈下後の地表に凹凸がある場合のシミュレーションも行った。その地表の凹凸は、平均 0.02m、標準偏差 0.02m の乱数を発生させて表現した。図 8 に Slave の地盤モデルを示す。コヒーレンスのシミュレーション結果を図 9 に示す。地表面に凹凸がある場合は、滑らかな面でのコヒーレンスにさらにバラツキ (乱れ) を与えたような結果になった。

4. 2018 年北海道胆振東部地震での液状化地域

3 章のシミュレーションにより、液状化等の地盤沈下地域をコヒーレンスの低下から抽出できる可能性を示した。本章では 2018 年 9 月 6 日の北海道胆振東部地震の液状化被害 (札幌市清田区里塚付近・北広島市大曲並木) を観測した PALSAR-2

表 2 北海道胆振東部地震の解析に使用した PALSAR-2 画像のデータセット

観測日	軌道	照射方向	オフナディア角
2018/8/9	上昇	左 (西) 向き	42.9°
2018/8/23	上昇	左 (西) 向き	42.9°
2018/9/6	上昇	左 (西) 向き	42.9°

画像による検証を行った。表 2 に地震前 (2018/8/9 および 2018/8/23) と、前震後 (2018/9/6) に被災地を撮影された PALSAR-2 画像を示す。地震前の 2018/8/23 を Master 画像、他の 2 シーンを Slave 画像として位置合わせを行い、地震前のペア 2018/8/9 (Slave) —2018/8/23 (Master)、地震前後のペア

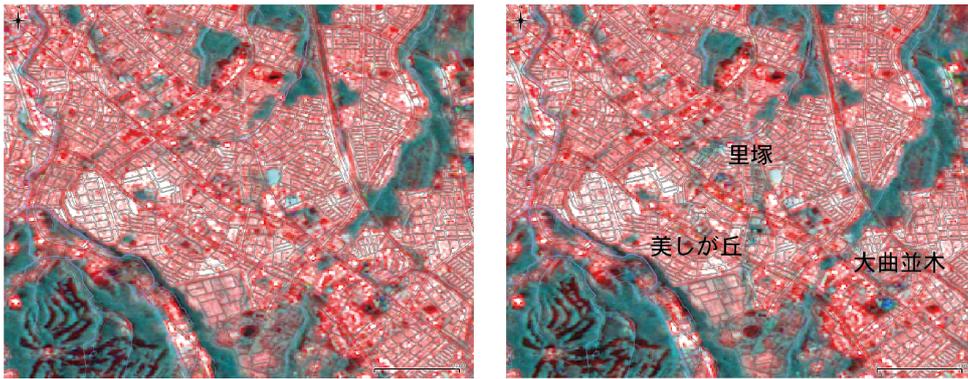


図 10 カラーコンジット画像（札幌市清田区里塚付近・北広島大曲並木）
 左：地震前のペア（2018/8/9-2018/8/23） 右：地震前後のペア（2018/8/23-2018/9/6）

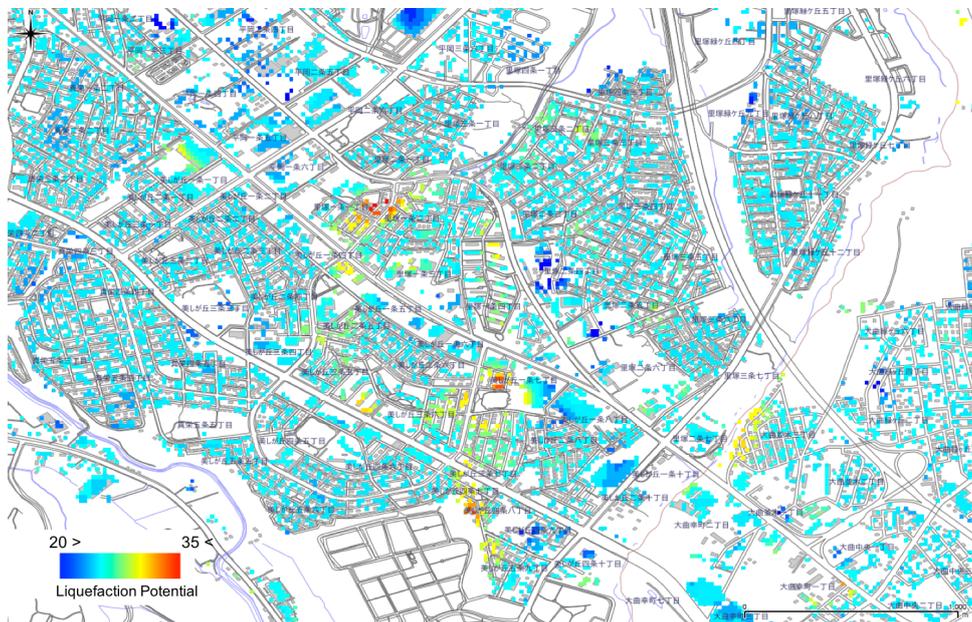


図 11 液状化や地盤変動に起因した被害の推定

2018/8/23 (Master) —2018/9/6 (Slave) の 2 ペアを用いて被災地のコヒーレンス画像を計算し、後方散乱係数の画像と組み合わせて RGB コンジット画像を作成した。結果を図 10 に示す。図 1 と同様に地震前後ペアではコヒーレンスの値が低下しシアン色に変化している地域がみられ、これらの地域は液状化被害が報告⁴⁾されている地域や著者らの現地調査とも対応している。液状化に起因した地盤被害地域を視覚的・定量的に抽出するため、コヒーレンス画像を主体として、さらに、強震観測記録および微地形分類図に基づき推定した液状化危険度と地盤の傾斜度を補足的に重畳して求めた液状化ポテンシャル画像を図 11 に示す⁵⁾。図 1 や図 10 で明らかなように植生地域でもコヒーレンスが低下するため、この解析では国土地理院の建物ポリゴンデータを参考にして建物以外にマスクをしている。液状化ポテンシャルが高い地域は液状化被害とよく対応し、旧地形における谷筋および旧河道の位置⁶⁾とも対応する。

6. まとめ

本報は 2016 年熊本地震の被災地を観測した ALOS2 衛星の PALSAR-2 画像から地震前後にコヒーレンスが低下する地域は液状化発生地域（熊本市南区の液状化の帯）とよく対応することを示し、コヒー

レンス低下が地盤沈下に起因することをシミュレーションにより明らかにした。地盤の沈下量が大きいほど、そして、沈下の勾配が大きいほどコヒーレンスは低下し、さらに、不同沈下であればコヒーレンスの値が乱れる傾向があることがわかった。2018年北海道胆振東部地震を観測した PALSAR-2 画像でも同様に札幌市清田区里塚や美しが丘等においてコヒーレンスが低下する地域がみられ、現地調査による液状化や地盤災害と対応することを確認した。

謝辞

ALOS-2 衛星の PALSAR-2 画像は JAXA のワーキングを通じて入手した。記して謝意を表します。

参考文献

1. 国土地理院：平成 28 年熊本地震に関する情報、<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>（アクセス日：2019 年 2 月 4 日）
2. 若松加寿江、先名重樹、小澤京子：平成 28 年（2016 年）熊本地震による液状化発生の特性，日本地震工学会論文集、第 17 巻、第 4 号、pp.81-100、2017.
3. 国土地理院：熊本地震で変動した基準点の新しい成果を公表、<http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60019.html>（アクセス日：2019 年 2 月 4 日）
4. 石川達也、清田隆、池田隆明（地盤工学会・土木学会調査団）：北海道胆振東部地震の液状化被害、018 年 9 月 6 日に発生した北海道胆振東部地震の被害調査速報会、http://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files//\%E5%A0%B1%E5%91%8A%E4%BC%9A20180921%E7%9F%B3%E5%B7%9D%E4%BF%AE%E6%AD%A3%E7%89%88_0.pdf アクセス日：2019 年 2 月 5 日）
5. Karimzadeh, S., Matsuoka, M.: A weighted overlay method for liquefaction-related urban damage detection: A case study of the 6 September 2018 Hokkaido eastern Iburi earthquake, Japan, Geosciences, MDPI, Vol.8, No.12, 487, 14p., 2018.
6. 若松加寿江：平成 30 年北海道胆振東部地震における札幌市清田区における液状化発生地域の旧地形と液状化履歴 [urlhttp://home.kanto-gakuin.ac.jp/~wakamatu/wakamatsu/reports/kiyota_liquefaction.pdf](http://home.kanto-gakuin.ac.jp/~wakamatu/wakamatsu/reports/kiyota_liquefaction.pdf)（アクセス日：2019 年 2 月 5 日）