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-

石塚師也*・辻 健**・松岡俊文*

要 旨

液状化は構造物の傾斜, 基礎の抜け上がりや道路の凹凸など, 我々の生活に甚大な被害をもたらす。地震直後に液状化地域を把握することは, 液状化被害後の復興対策立案や今後の液状化発生地域予測のために重要であるが, あまりにも甚大な被害が発生した場合は, 広域かつ複数の地域を同時に被害状況の把握を行うことは非常に困難になる。しかし, 近年, 衛星搭載の合成開口レーダー (SAR) で取得されたデータを用いて, 液状化や建物の倒壊などの災害地域を網羅的に把握する解析手法が提案されている。特に, 地震前後に取得されたデータの相関度の変化を用いた解析は, 都市部における建物の倒壊地域の把握等に有効性を示している。この手法は, 地震前のデータペアの相関度と地震をはさむ前後のデータペアの相関度の変化から, マイクロ波散乱特性の変化を捉える手法であるが, 一般的に都市部以外の地域では恒常的な散乱特性の変化が大きいという問題を残している。これらの問題を解決するため, 我々は地震前に取得された複数のデータペアを用いることで, 恒常的な散乱特性の変化と災害による散乱特性の変化を分離する解析手法を提案し, 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う関東地方の液状化地域の特定に成功した。本論文では, 上記の解析結果に加え, 2011 年クライストチャーチ地震に伴うクライストチャーチ市の液状化地域の把握を行った解析結果を報告する。

キーワード: 地盤液状化・合成開口レーダー(SAR)・相関度解析・地表面変化

1. はじめに

人工衛星搭載の合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar; SAR) は上空約 600~700km からマイクロ波を地表面に放射し, その後方散乱波を受信する能動型リモートセンシングセンサである。受信した後方散乱波の振幅 (後方散乱強度) 及び位相を計測することで, 広域 (数 10~数 100 キロメートル程度) の地表面の情報を高密度 (数メートル~数 10 メートル間隔) に把握することができる。また, SAR は光学リモートセンシングセンサと異なり, 昼夜を問わず, 全天候での観測が可能である。加えて, 衛星が地球を一定の周期をもって周回し

ていることから, 周期的な観測データを得ることができる。これら SAR データの観測情報は液状化等の災害地域の特定に有効であり, 災害後の復興計画の立案や原因究明に役立つ。特に, 大規模な災害が発生した際や, 災害地域に工場や危険地域等の立ち入りの難しい場所が含まれる場合, 衛星データから得られる情報は重要性を増す。これまで, 精度良く災害地域を特定するための, SAR データを用いた多くの解析手法が提案されてきた。例として, 災害前後の散乱強度や位相の相関度の変化を用いた災害地域の特定手法 (Yonezawa and Takeuchi, 2001; Matsuoka and Yamazaki, 2004; Matsuoka and Yamazaki, 2005; Fielding et al., 2005; Gamba et al.,

2012 年 10 月 3 日原稿受付; 2013 年 2 月 6 日受理

* 京都大学大学院工学研究科

〒615-8530 京都市西京区京都大学桂

** 九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所

〒819-0395 福岡西区元岡 744

2007) や衛星搭載光学センサのデータを融合的に用いる手法 (Stramondo et al., 2006), 地震前後の SAR の多偏波モードでの観測データの散乱特性変化を用いた災害地域の特定手法 (Watanabe et al., 2012) 等がある。特に, 相関度の変化を用いた手法は, 実用的な手法として建物の倒壊域の推定に用いられてきた。さらに, 同一観測対象地域を 2 回観測したデータの位相差から, 観測間に発生した地表変動を求める手法である干渉 SAR 解析の結果により, 相関度の低下と液状化地域は一致している可能性が指摘されている (宇根ほか, 2008)。相関度は, ある地点の観測間の後方散乱波の相関性を定量化した値であり, 液状化等の災害による地表面の物理的な変化を捉えることができる。しかしながら, 従来の手法では, 地震災害に起因しない恒常的な地表の変化による相関度の低下と, 地震に起因する液状化等による相関度の低下の影響が精度良く分離できない点が問題であった。この問題を解決する手法として, 同一地域で過去に取得された複数の SAR データから, 恒常的な相関度の低下の度合をピクセルごとに推定することで, 地震による災害地域とそうでない地域を区別する手法が提案されている (Ishitsuka et al., 2012)。本論文では, この解析手法を 2011 年 3 月に発生した 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2011 年 2 月にニュージーランド・クライストチャーチ市で発生した 2011 年クライストチャーチ地震に適用し, 本手法の利点と課題について考察を行う。

2. 手法の概要

現在運用されている衛星搭載 SAR の多くは, 軌道傾斜角約 90 度で, 地球をほぼ南北方向に周回しながら, マイクロ波を放射し, 地上からの後方散乱波を受信しながらデータの取得を行っている。本論文で用いた日本の衛星「だいち」ALOS (Advanced Land Observing Satellite) に搭載されている PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) の場合, 衛星は南北方向に周回しながら, 中心周波数 1270MHz, チャープ幅 28MHz のチャープ波を約 2100Hz の反復周波数で放射しながら観測を行っている。衛星鉛直直下とマイクロ波照射方向の成す角度はオフナディア角と呼ばれ, 本論文ではオフナディア角が約 34.3 度で観測されたデータを用いた。本論文で用いたオフナディア角を地上での入射角に直すと, 平坦地では約 35~40 度となる。また, 観測ごとの軌道のずれによる入射角の違いは 0~2 度程度である。ただし, 当然ながら, 入射角や入射角の違いは対象とする地表の勾配や衛星と散乱体の位置関係によって異なる。SAR は放射したマイクロ波の後方散乱成分を受信するが, この受信データは, 式(1)に示すように, 地上の散乱体に依存する散乱パターンと SAR のシステムに依存するインパルスレスポンスの畳み込み積分で表す

ことができる。

$$h(x, r) = \iint dx' dr' \varepsilon(x, r) g(x - x', r - r') \quad (1)$$

ここで, $h(x, r)$ は受信された SAR データを表し, $\varepsilon(x, r)$ 及び $g(x, r)$ は, それぞれ散乱パターンとインパルスレスポンスを表す。また, x 及び r はそれぞれアジマス方向 (衛星進行方向に平行な方向) とレンジ方向 (衛星進行方向に垂直な方向) を表す。受信データ $h(x, r)$ から散乱パターン $\varepsilon(x, r)$ を高解像度で推定する処理の説明は, 本論文の趣旨と離れてしまうので割愛する。詳細は以下の文献を参照されたい (Franceschetti and Lanari, 1999; 古屋, 2006)。

受信データから得られた散乱パターン $\varepsilon(x, r)$ は振幅及び位相の情報を有しており, ピクセル毎に振幅及び位相の情報をもつ 2 次元データとなっている。この振幅及び位相はピクセル内の地表散乱体によって後方散乱するマイクロ波の和となっている。ここで, 地表散乱体とは地表面に存在する建物や植物・岩石・水面等の物体を指す。振幅は散乱体からの後方散乱強度を表す値であり, 地表面の粗さ及び比誘電率の関数であることが知られている。例えば, 滑らかな地表面よりも凹凸の多い地表面で大きな値を示す。さらに, 通常, 植生よりも建物の方が大きな値を示す。また, 比誘電率が高いほど散乱成分が多くなるため, 鉛直直下における観測状況下では, 水分含有量の多い地表の土壌の方が少ないものよりも散乱強度が大きい。ただし, 水面のように観測対象が平坦であり, 加えて, 入射角が大きい場合は前方散乱成分が卓越し, 観測される後方散乱強度は小さくなる。一方, 位相は衛星と散乱体の距離に関係する値である。

2.1 相関度

本論文では, 以下の式で定義される位相を補正した相関度 γ (Hagberg et al., 1995) を用い, 液状化に伴う後方散乱特性の変化をマイクロ波の相関性の変化で定量化した。

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{n=1}^N C_1^{(n)} C_2^{(n)*} \exp \left\{ -i(\phi_1^{(n)} - \phi_2^{(n)}) \right\} \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |C_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^N |C_2^{(n)}|^2}} \quad (2)$$

ここで, C_1, C_2 は 1 回目, 2 回目の観測データであり, 振幅 (A) と位相 (ϕ) をもつ複素数 ($C = A \exp(i\phi)$) である。前述したように, この振幅及び位相はピクセル毎に得られ, 離散化された散乱パターンである。*は複素共役を表し,

i は虚数単位である。 N は相関度を用いる際に使う隣接するピクセル数を表す。本研究では、初めに、2 回の観測で取得されたデータの位置合わせを行った。まず、データの位置合わせでは、レンジ方向とアジマス方向に等間隔に 64 ピクセルずつ選び、それぞれ 128 ピクセル四方の領域内での振幅の相互相関係数が最大となるようなデータ間のピクセルのずれをサブピクセルレベルで計算した。次に、先ほど求めたそれぞれのピクセルのずれから、画像全体の位置合わせの関数の係数群を最小二乗的に推定した。位置合わせの関数には、レンジとアジマスの 1 次（平行移動）及び 1 次の積（歪）を用いた。この位置合わせの手法では、画像間で高い相関度をもつことを前提とするが、1 シーン（約 70km 四方）のデータを用いて位置合わせを行ったため、液状化による相関度の低下は画像の位置合わせに影響は無いと考えられる。その後、スペckルノイズを低減させるため、レンジ方向に 5 ピクセル、アジマス方向に 3 ピクセルずつ値を平均化する処理を行い、解像度をレンジ方向に約 23m、アジマス方向に約 16m とした。続いて、位置合わせされた 2 つのデータの各ピクセルを中心とした隣接する 7 ピクセル四方（ $N=49$ ）を用いて、式(2)に基づき、相関度の計算を行った。上式で定義された相関度は、 $\exp\{-i(\phi_1 - \phi_2)\}$ の項によって位相を補正していることから、振幅の値のみを使って相関度を計算している。SAR データの位相には地表変動や大気の不均質性等の影響が現れるが、本研究で用いた相関度は位相を用いずに相関度を計算することで、これらの影響を取り除いた散乱体のマイクロ波散乱特性の変化による相関度の低下を算出している。相関度は 0 から 1 の値をとり、観測されたマイクロ波の後方散乱特性が異なる時刻での観測で同一の場合、相関度は 1 となる。すなわち、ピクセル内の散乱体の位置や誘電率が変化せず、同一方向から観測する場合は、後方散乱特性は変化せず、相関度は 1 となる。しかし、二回の観測の間に散乱体の位置や誘電率が変化した場合、これらの変化に伴い、後方散乱特性は変化し、相関度の低下が引き起こされる。液状化が発生した場合にも、地表面の構造物の傾斜や地面の噴砂等の地表面の散乱体の変化が起こることが想定される。この散乱体の変化に起因する相関度の低下から災害地域の推定を行うことが、本論文で用いた手法の基本的な概念である。

2.2 恒常的な地表面変化の影響の分離

前述したように、ピクセル内に存在する地表の散乱体の変化が、相関度の低下を引き起こす。このような変化は、災害が発生した際に顕著である。特に地盤液状化に伴う地面の噴砂や凹凸の変化、建物の傾斜は散乱体の変化と成り得る。一方で、災害発生の有無に限らず、恒常的に散乱体の変化は起こっている。例えば、耕作地など

の植生地域では植物の成長に伴い散乱体の後方散乱特性が変化する。また、森林などの植生の多い地域では、多重散乱により、植物の成長の有無に関わらず、後方散乱特性が変化的することが知られている。また、大規模な構造物の建造や取り壊しも散乱体の変化の一例である。以上のような影響は時間的相関度の低下と呼ばれている (Zebker and Villasenor, 1992)。さらに、散乱体の位置は実際には変化していなくとも、観測する衛星の軌道が微妙に変化し入射角が変わることにより、衛星と散乱体の位置関係が変化し、相関度の低下が起こることが知られている。これは、時間的相関度の低下に対して空間的相関度の低下と呼ばれる (Zebker and Villasenor, 1992)。空間的相関度の低下は、ピクセル内で様な散乱体を仮定した場合には解析的に記述できるため、影響を定量的に評価することができる。通常、相関度を用いた解析を行う際は、空間的相関度の低下を十分無視できる値にするために衛星の観測位置がほぼ同一の SAR データを使用する。

相関度を用いて災害地域の特定を行う際には、災害による地表面散乱特性の変化と恒常的な地表面散乱特性の変化を区別する必要がある。一般的に用いられる解析手法の 1 つとして、災害をまたぐデータペアの相関度から、災害をまたがないデータペアの相関度を差し引くことにより、災害による相関度の低下のみを推定する方法がある (Fielding et al., 2005)。この手法は、3 もしくは 4 つの SAR データで解析が可能のため、解析可能な SAR データが少ない場合でも解析できることが利点である。しかし、この手法の前提として、解析に用いたデータペア間で災害以外の散乱体の変化がほぼ同一であるという仮定があるが、この前提が成り立たない場合がある。例えば、耕作地での作物の収穫や植え付け等により、災害以外による散乱体の変化がデータペア間で一定ではない場合である。また、複数の散乱体や植生がピクセル内にある場合は観測ごとに散乱特性が変化する可能性がある。そのため、本研究では、既往解析の手法に加え、災害前の SAR データからピクセル毎に災害以外の散乱体の変化による相関度の低下の割合を推定し、既往解析で相関度の低下が表れたピクセルのうち、恒常的な散乱体の変化による相関度の低下の可能性のあるものを取り除く処理を行った。具体的には、まず、災害をまたぐデータペアと同じ観測期間の災害をまたがないデータペアを選び出し、それぞれのデータペアで相関度を計算した。次に、これらのデータペアの全ての組み合わせで、相関度の差を計算し、ピクセル毎に、相関度の差の平均値 (μ) と標準偏差 (σ) を求めた。そして、最終的に、恒常的な散乱体の変化の影響として、閾値 $\gamma_{thre} = \mu - k\sigma$ を推定し、この災害をまたがないデータペアから推定された閾値よ

Table 1. Co-seismic and pre-seismic data pairs to estimate correlation change due to the 2011 Tohoku earthquake.

Co-seismic data pair	Bperp [m]	Time span [days]	Pre-seismic data pair	Bperp [m]	Time span [days]	Orbit direction	Covered area
20110219 – 20110406	394	46	20110104 – 20110219	709	46	Ascending	Tokyo bay
20101120 – 20110407	914	138	20101005 – 20101120	593	46	Descending	Tone river

Table 2. Pre-seismic data pairs to estimate correlation change due to ordinal surface change in the waterfront along Tokyo bay and Tone River.

Pre-seismic data pair	Bperp [m]	Time span [days]	Orbit direction	Covered area
20060808 – 20060923	576	46	Ascending	Tokyo bay
20071227 – 20080211	945	46	Ascending	Tokyo bay
20080211 – 20080328	96	46	Ascending	Tokyo bay
20081113 – 20081229	22	46	Ascending	Tokyo bay
20081229 – 20090213	740	46	Ascending	Tokyo bay
20100216 – 20100403	144	46	Ascending	Tokyo bay
20110104 – 20110219	709	46	Ascending	Tokyo bay
20080329 – 20080514	146	46	Descending	Tone river
20080629 – 20080814	1507	46	Descending	Tone river
20090817 – 20091002	236	46	Descending	Tone river
20091002 – 20091117	237	46	Descending	Tone river
20100520 – 20100705	139	46	Descending	Tone river
20100705 – 20100820	173	46	Descending	Tone river
20101005 – 20101120	593	46	Descending	Tone river
20071228 – 20080514	616	138	Descending	Tone river
20090517 – 20091002	654	138	Descending	Tone river
20091002 – 20100102	587	138	Descending	Tone river

りも相関度が低下しているピクセルを災害による有意な散乱体の変化が起こったピクセルとした。ここで、 k は考慮する標準偏差の重みを表し、以下の解析では、恒常的な散乱体の変化がガウス分布に従うと仮定し、 $k=2$ (95.4%信頼区間) を用いた。

3. 解析結果

3.1 2011 年東北地方太平洋沖地震

2011 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖の日本海溝を震源とした $M_w9.0$ の海溝型地震が発生した (USGS, 2011b)。この地震に伴い、関東地方では気象庁震度 5~6 弱程度の揺れが観測された (Hoshiba et al., 2011) (Fig. 1b)。また、関東地方では主要動が 40~130 秒程度続いたことも影響し、東京湾臨海域や利根川流域等では大規模な液状化現象が発生した。液状化に伴う噴砂や建物の傾き、マンホールの抜け上がり等のインフラストラクチャーへの被害も多く報告され (国土交通省関東地方整備局ほか, 2011), 液状化に伴い広範囲で地盤沈下が発生したことが推定されている (石塚ほか, 2012)。本論文では、まず、東京湾臨海域及び利根川中流域 (Fig. 1a) を

Fig.1. Topography at Kanto region (a) and JMA seismic intensity due to the 2011 Tohoku earthquake (b) (after Hoshiba et al., 2011). Dashed lines are two analyzed area (waterfront along Tokyo bay and Tone river).

対象として、地震による液状化地域の特定について、相関度を用いた解析結果 (Ishitsuka et al., 2012) を報告する。

東京湾臨海域をカバーする地震前後のデータペアは 2011 年 2 月 19 日と 2011 年 4 月 6 日を用い、利根川中流域をカバーするデータペアは 2010 年 11 月 20 日と 2011 年 4 月 7 日を解析に用いた (Table 1)。これらは

Fig. 2. Correlation difference map between co-seismic and pre-seismic data pair at the waterfront along Tokyo bay without using a coherence change threshold (a) and using a coherence change threshold (c), and along the middle part of Tone river without using a coherence change threshold (b) and using a coherence change threshold (d).

Fig. 3. The threshold of correlation difference estimated from pre-seismic pairs at the waterfront around Tokyo bay (a), Tone river (b).

地震をまたぐデータペアのうち最短の期間をもつペアである。また、地震前のデータは 2006 年から 2011 年の地震前までの入手可能な全てのデータを用いた (Table 2)。

まず、東京湾臨海域及び利根川中流域での地震前後のデータペアから推定された相関度と、地震前のペアから推定された相関度の差を各ピクセルで計算した (Table 1, Fig. 2a, 2b)。Fig. 2a, 2b で、灰色の箇所は地震前のデータペアよりも地震前後のデータペアにおいて相関度が低下している地域、すなわち地震前後のデータペアで何らかの地表面のマイクロ波散乱特性に変化が現れた地域である。しかし、2.2 で述べたように、地震以外を原因とする恒常的な散乱体のマイクロ波散乱特性の変化は起こっているため、恒常的な変化を推定し、取り除く必要がある。地震前の複数のデータペア (Table 2) を用いて恒常的な相関度の変化を推定し、相関度の変化の閾値

を決定した (Fig. 3)。Fig. 3 より、ピクセルごとに相関度の変化の閾値は異なることが分かる。この閾値を用いて推定した被害域が Fig. 2c, 2d である。Fig. 2c, 2d の灰色の地域は、地震の被害により相関度が低下した地域と言える。Fig. 2c に示すように、東京湾臨海域では広範囲の沿岸部で地震に起因する相関度の低下が確認された。しかし、一様に被害を受けているとはいえず、被害域の分布にばらつきがあることが分かる。一方、Fig. 2d より、利根川中流域でも川に沿って地震に起因する相関度の低下が確認された。

ここで、相関度の閾値を用いた解析を行った場合の結果 (Fig. 2a, 2c) と行わなかった場合の結果 (Fig. 2b, 2d) を比較すると、東京湾臨海域では結果に大きな差は見られないのに対し、利根川中流域では相関度の閾値を用いることで結果が大きく変わっていることが分かる。これは、東京湾臨海域と利根川中流域の地表面被覆の違いが影響

Table 3. Co-seismic and pre-seismic data pairs to estimate correlation change due to the 2011 Christchurch earthquake.

Co-seismic data pair	Bperp [m]	Time span [days]	Pre-seismic data pair	Bperp [m]	Time span [days]	Orbit direction
20100911 – 20110314	1198	184	20090908 – 20100311	1530	184	Ascending

Table 4. Pre-seismic data pairs to estimate correlation change due to ordinal surface change in Christchurch city.

Pre-seismic data pair	Bperp [m]	Time span [days]	Orbit direction
20070303 – 20070903	773	184	Ascending
20070719 – 20080119	1821	184	Ascending
20070903 – 20080305	2086	184	Ascending
20071204 – 20080605	1484	184	Ascending
20090724 – 20100124	1420	184	Ascending
20090908 – 20100311	1530	184	Ascending

Fig. 7. Correlation difference map between co-seismic and pre-seismic data pair at Christchurch city without using a correlation change threshold (a) and using a correlation change threshold (b).

目を解析に用いた (Table 3)。一方、相関度変化の閾値を推定するために用いた 6 つのデータペアを Table 4 に示す。

まず、2011 年東北地方太平洋沖地震による液状化地域を対象とした解析と同様に、相関度の閾値を用いずに、地震前のデータペアと地震前後のデータペアの相関度の差をとった (Table 3, Fig. 7a)。Fig. 7a で相関度の低下が見られる地域は、災害による相関度の低下に加えて、恒常的な散乱体の散乱特性の変化による相関度の低下も含まれており、地震前後のペアで相関度が低下していても、災害による変化と断定することはできない。そこで、3.1 と同様に、地震前の複数のデータペアを用いて恒常的な散乱特性の変化に伴う相関度の変化の閾値を推定し、マッピングした (Fig. 8)。Fig. 8 より、解析範囲の中央

部に位置するクライストチャーチ市は、ほとんどが市街地であるため、地震前の相関度の変化はほぼ一定であるものの、一部のピクセルでは恒常的に相関度の変化が起こっていることが分かる。これらの閾値を用いて解析を行った結果、Avon 川と Heathcote 川の流域では、広範囲において相関度の低下が確認された (Fig. 7b)。

次に、地震直後に行われた液状化の噴砂分布の調査結果 (地盤工学会, 2011) を本研究の相関度の変化のマップと重ねて比較を行った (Fig. 9)。噴砂分布の調査は、現地における踏査を行い、地表面に噴砂が確認されたか否かによって液状化の発生の有無を判定している。比較の結果、現地調査の結果と本研究の解析結果は整合的であり、解析により判別された地域は液状化地域を表していると言える。

Fig.8. The threshold of correlation difference estimated from pre-seismic pairs at the waterfront around Christchurch city.

Fig. 7b より, Heathcote 川流域の液状化域は, Avon 川流域の液状化域と比べると, 範囲が狭いことが分かる。これは修正メルカリ震度分布に示されているように, Avon 川流域での揺れが Heathcote 川の流域よりも大きかったためと考えられる。また, Avon 川下流域と Heathcote 川下流域は震源に近く, 広範囲に液状化しているものの, Avon 川と Heathcote 川の間には液状化が発生していない空白域が存在している。それぞれの河川流域を見ると, Avon 川流域では噴砂が見られた地域と本研究で推定した被害域との間に比較的良好な一致が見られたが, Heathcote 川流域では噴砂が確認されているのにも関わらず, 相関度の低下が見られなかった地域も存在する。この不一致の原因としては, Heathcote 川流域では液状化の程度が比較的軽微であったため (安田ほか, 2011), 有意な散乱体の変化を捉えることができなかった可能性がある。しかしながら, 噴砂が確認されなかった地域の分布は本研究の解析結果とよく一致していることから, 相関度の低下が見られた地域では, 液状化等の地震に伴う被害を捉えることができていると言える。

4. 解析手法の注意点及び課題

前章までで, 2011 年東北地方太平洋沖地震と 2011 年クライストチャーチ地震を例に挙げ, 本手法の有効性を示した。以下に, 本解析手法を適用する際の注意点と課題を述べる。

4.1 ウィンドウサイズと解像度

Fig.9. Comparison between our result and existing field survey (after 地盤工学会, 2011).

式 2 より, 相関度を計算する際には, 対象とするピクセルを中心とした正方形の領域を仮定して, 隣接するピクセル間の和をとることが分かる。推定される液状化地域の空間解像度はこの正方形の大きさに規定される。この和をとるピクセル数 (ウィンドウサイズ) が小さ過ぎる場合は, 相関度の信頼性が低くなるといった問題が生じる (Matsuoka and Yamazaki, 2004)。一方, あまりにもウィンドウサイズが大きい場合は解像度が下がり, 液状化地域が過度に推定してしまう傾向があるため, 注意が必要である。

4.2 散乱特性が不安定な地域での液状化の特定

液状化による有意な相関度の低下を捉えることが困難な場合がある。特に, 耕作地では散乱体の変化が著しい場合が多く, 観測毎に相関度の変化が大きいと考えられる。具体的には, 液状化による相関度の変化の値より, 推定された相関度の閾値の値が小さい場合は液状化地域を特定することはできない。また, 災害前のデータペアによる相関度が相関度の閾値の大きさよりも小さい場合は, その差をとっても有意な相関度の差は現れない。

4.3 液状化以外の被害の分離

液状化以外にも, 地震に伴い発生する津波や建物の倒壊によって, 地震前後のペアのみで相関度を下げる要因が存在する。津波の被害の場合, 一般的に, 津波による浸水は地上の散乱体の状態を著しく変化させるため, SAR データの振幅画像を比較することで, 被害地域を判定することができる (Hashimoto et al., 2011)。しかし, 液状化被害も建物の倒壊同様に, 構造物への被害を引き起こすため, 建造物の被害については, 液状化地域と非

液状化地域の建物の被害を区別することは現時点では難しい。

5. まとめ

衛星搭載 SAR データの相関度の閾値を用いた解析手法を提案し、液状化地域の推定を行った。この解析は、単に災害をまたぐデータペアと災害前のデータペアの相関度の変化を捉えるだけでなく、災害前の複数のデータペアを用いて、ピクセル毎に恒常的な散乱体の変化から相関度の閾値を決定し、液状化等の災害のみによる相関度の変化をより精度良く推定する手法である。

まず、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う関東地方の液状化地域への適用結果を紹介し、次に、2011 年クライストチャーチ地震に伴う液状化地域の推定結果を示した。解析結果は共に既存の噴砂分布の調査結果と整合的であった。2011 年東北地方太平洋沖地震の解析結果では、東京湾臨海域と利根川中流域での液状化地域を比較し、耕作地のような恒常的に散乱体の変化が大きい地域において閾値の設定の重要性を示した。また、2011 年クライストチャーチ地震を対象とした解析結果では、クライストチャーチ市の 2 つの河川流域での液状化と液状化の空白域の分布を特定し、Avon 川流域でより液状化による地表面の被害が大きい可能性を示した。

現状では液状化現象が特定しづらい地域が存在すること、被害状況を詳細には把握できていないこと等の課題点もあるが、上記の結果から、本研究で用いた解析手法は液状化の特定に有効であると言える。また、本研究で用いた解析手法は多数のデータを必要とするが、今後の衛星搭載 SAR データ観測の高頻度化等に伴い、解析手法の有用性は高まっていくと考えられる。

謝 辞

本論文で使用した PALSAR の原データの所有権は経済産業省及び宇宙航空研究開発機構にある。レベル 1.0 データは宇宙システム開発利用推進機構第三技術本部(旧 ERSDAC)より提供して頂いた。関東地方の液状化調査データは国土交通省関東地方整備局及び地盤工学会より提供して頂いた。本論文は地球規模対応国際科学技術協力事業(SATREPS)の助成を受けて行ったものである。また、2 名の査読者の方からは有益な指摘を頂いた。以上のデータ提供、調査結果の使用、経済的支援や助言に対して、深謝する。

参 考 文 献

Atzori, S., C. Tolomei, A. Antonioli, J. P. Merryman Boncori, S. Bannister, E. Trasatti, P. Pasquali, and S. Salvi (2011):

The 2010-2011 Canterbury, New Zealand, seismic sequence: multiple source analysis from InSAR data and modeling, *J. Geophys. Res.*, **117**, B08305.

Fielding E. J., M. Talebian, P. A. Rosen, H. Nazari, J. A. Jackson, M. Ghorashi, and R. Walker (2005): Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran, earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation, *J. Geophys. Res.*, **110**, B03302.

Franceschetti, G., and R. Lanari (1999): Synthetic aperture radar processing, *CRS Press*, Boca Raton.

古屋正人 (2006): 地殻変動観測の新潮流 InSAR, 測地学会誌, **52**, 225-243.

Gamba, P., F. Dell'Acqua, and G. Trianni (2007): Rapid damage detection in the Bam area using multitemporal SAR and exploiting ancillary data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **45**, 1582-1589.

Hagberg, J. O., L. M. H. Ulander, and J. Askne (1995): Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **33**, 331-340.

Hashimoto, M., Y. Fukushima, Y. Takada, T. Ozawa, S. Okuyama, T. Abe, M. Furuya, M. Tobita, and M. Shimada (2011): Images from ALOS of March 2011 Tohoku earthquake, *Space Research Today*, **181**, 17-19.

Hoshiba, M., K. Iwasaki, N. Hayashimoto, T. Shimoyama, K. Hirano, Y. Yamada, Y. Ishigaki, and H. Kikura (2011): Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0) -earthquake early warning and observed seismic intensity-, *Earth Planets Space*, **63**, 547-551.

石塚師也・辻 健・松岡俊文・水野敏実 (2012): 干渉 SAR 解析を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した東京湾臨海域の液状化に伴う広域地表変動量の推定, 土木学会論文集 C, **68**, 175-182.

Ishitsuka, K., T. Tsuji, and T. Matsuoka (2012): Detection and mapping of soil liquefaction in the 2011 Tohoku earthquake using SAR interferometry, *Earth Planets Space*, **64**, 1267-1276.

地盤工学会 (2011): 2011 年ニュージーランド Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団報告書, <http://www.jiban.or.jp/> (2013 年 1 月 14 日アクセス).

国土交通省関東地方整備局・地盤工学会 (2011): 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書, <http://www.ktr.mlit.go.jp/> or <http://www.jiban.or.jp/> (2013 年 1 月 14 日アクセス).

Matsuoka, M., and F. Yamazaki (2004): Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes, *Earthq. Spectra*, **20**, 975-994.

- Matsuoka, M., and F. Yamazaki (2005): Building damage mapping of the 2003 Bam, Iran, earthquake using Envisat/ASAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes, *Earthq. Spectra*, **21**, 8275-8284.
- Stramondo, S., C. Bignami, M. Chini, N. Pierdicca, and A. Tertulliani (2006): Satellite radar and optical remote sensing for earthquake damage detection: results from different case studies, *Int. J. Remote Sens.*, **27**, 4433-4447.
- 宇根 寛・佐藤 浩・矢来博司・飛田幹男 (2008): SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析, 日本地すべり学会, **45**, 125-131.
- USGS (2011a): "Magnitude 6.1 –South island of New Zealand", <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usb0001igm/> (2013 年 1 月 31 日アクセス).
- USGS (2011b): "Magnitude 9.0 –Near the east coast of Honshu, Japan", <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/> (2013 年 1 月 31 日アクセス).
- Watanabe, M., T. Motohka, Y. Miyagi, C. Yonezawa, and M. Shimada (2012): Analysis of urban areas affected by the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake and tsunami with L-band SAR full-polarimetric mode, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **9**, 472-476.
- 安田 進・時松孝次・渦岡良介・細野康代・M. Cubrinovski・R. Orense・清田 隆・山田 卓(2011): 2011 年ニュージーランド 2011 Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査報告, 地盤工学会誌, **59**, 48-49.
- Yonezawa, C., and S. Takeuchi (2001): Decorrelation of SAR data by urban damages caused by the 1995 Hyougoken-Nambu earthquake, *Int. J. Remote Sens.*, **22**, 1585-1600.
- Zebker, H. A., and J. Villasenor (1992): Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **30**, 950-959.

Improved correlation analysis to detect liquefied area using multi-temporal SAR images -Application to the 2011 Tohoku Earthquake and the 2011 Christchurch Earthquake-

Kazuya Ishitsuka *, Takeshi Tsuji** and Toshifumi Matsuoka*

ABSTRACT

Soil liquefaction induces severe damage to infrastructure, buildings and residential houses. It is important to detect liquefaction area for planning of recovery scheme or future liquefaction prediction. However, wide range of the occurrence of soil liquefaction or liquefaction at restricted area sometimes prevents us to map all of a damaged area due to earthquake. Recently, as new analyzed techniques to detect damaged areas, the use of synthetic aperture radar (SAR) images has been proposed. Interferometric correlation analysis is one of the most effective methods especially to detect damaged area due to earthquake. This technique makes use of the difference of correlations calculated from SAR datasets acquired at co-seismic and pre-seismic period. Although the effectiveness of this technique has been shown previously, there is a disadvantage of its application to areas where scattering characteristics is rather variable (e.g., sub-urban and rural area). To discriminate liquefaction area by using correlation change, we have proposed an improved correlation analysis to use multi-temporal SAR images acquired before an earthquake and successfully detected liquefaction area at Kanto district due to the 2011 Tohoku earthquake. In this paper, we show the application results of newly-developed technique to the 2011 Tohoku earthquake as well as the 2011 Christchurch earthquake.

Keywords: soil liquefaction, synthetic aperture radar, interferometric correlation analysis, surface change

Manuscript received October 3, 2012; Accepted February 6, 2013.

* Graduate School of Engineering, Kyoto University
Kyoto daigakukatsura, Nishikyo-ku, Kyoto, Japan, 615-8530

** International Institute for Carbon-Neutral Energy Research
(WPI-I2CNER), Kyushu University
Ito Campus, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku,
Fukuoka, Japan, 819-0395