

干渉 SAR のコヒーレンス変化から見る
平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴う液状化地域
**Liquefaction Area Associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake,
Inferred from Interferometric SAR Coherence Change**

地理地殻活動研究センター 小林知勝・飛田幹男・小荒井 衛・乙井康成・中埜貴元
**Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tomokazu KOBAYASHI, Mikio TOBITA, Mamoru KOARAI,
Kosei OTOI and Takayuki NAKANO**

要 旨

SAR (Synthetic Aperture Radar. 以下, 「SAR」という.) 干渉解析によって得られる地表の散乱状態の変化を利用して, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (以下, 「東北地方太平洋沖地震」という.) に伴って発生した液状化の発生分布の把握を試みた. 本稿では, 地震発生前のデータペアによるコヒーレンス画像と地震発生前後のデータペアによるコヒーレンス画像との差画像を作成することで, コヒーレンス値の低下域と液状化域との比較を行った. 利根川下流域では, 潮来市日の出, 香取市佐原, 稲敷市西代でコヒーレンス値の低下が顕著に見られ, 特に, 潮来市日の出では住宅地における液状化発生域の分布とコヒーレンス値の低下域との間に, 高い空間的相関があった. 東京湾岸沿いでは, 浦安市から習志野市にかけてコヒーレンス値が低下する領域が帯状に広がり, 液状化発生域とその分布が概ね対応している. 浦安市とその周辺では, 現地調査で確認された液状化/非液状化範囲とコヒーレンス値変化の分布に空間的に良い相関が認められた. コヒーレンス値の変化 (低下) を利用した液状化発生域の判読は, SAR 干渉画像の非干渉域を指標とした判読と異なり, 本来干渉性の悪い領域を判読の対象とすることなく解析できる利点を有する. SAR 干渉解析の結果から液状化範囲を調査する際は, 干渉画像よりもコヒーレンス画像の利用が好ましい.

1. はじめに

SAR 干渉法は, マイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で 2 回以上実施し, 反射波 (散乱波) を干渉させて位相差をとることによって, 地表の変動を捉える技術である. 地表の変動を捉えるには, 地表の散乱特性が 1 回目と 2 回目の観測で大きく変わらない必要がある. もし, 1 回目と 2 回目の観測の間に地表の状態が大きく変化すると, 波が干渉しなくなり計測は不可能になるからである. 干渉性が著しく低下した領域は, ピクセルごとにランダムな数値となり, 隣接するピクセルとの変位の連続性が失われる. SAR 干渉画像では砂目模様となる.

東北地方太平洋沖地震では, 地震に伴う液状化現象が, 千葉県や茨城県など関東地方を中心に数多く報告された. 液状化が起きると, 噴砂・噴礫・噴水などによる地表状態の変化や側方流動などによる地盤形状の変化により, 干渉性は著しく失われると推測される. これまでにも, SAR 干渉画像中の非干渉領域が地震に伴って発生した液状化の領域を示しているとの報告は, 平成 12 年 (2000 年) 鳥取県西部地震 (矢来ほか, 2001; 矢来ほか, 2002) など幾つかの研究でなされてきた. これらの報告では, 干渉画像内にみられる非干渉域を液状化発生域とみなしている. しかし, 干渉画像内の非干渉を指標にした液状化域の推定では, その土地固有の干渉性の悪さと液状化を原因とする干渉性の劣化とを区別することができず, 誤った判読につながる可能性がある. そこで本研究では, 干渉性の度合いを示すコヒーレンス値の変化量を利用して, 干渉性が劣化した領域と現地調査により得られた液状化発生域との空間的対応を調べた. 本稿では, 液状化が広い範囲で発生し被害が大きかった利根川下流域と東京湾岸を調査範囲とした.

2. データ解析の概要

本解析には, (独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の陸域観測技術衛星「だいち」の PALSAR データを使用した. 利根川下流域の解析には path404 のデータを, 東京湾岸沿いの解析には path405 のデータを用いた. 干渉解析には東北地方太平洋沖地震の発生日をはさむ 2011 年 2 月 2 日から 3 月 20 日及び 2011 年 2 月 19 日から 4 月 6 日のデータペアをそれぞれ利用した. また, 地震前 (液状化発生前) の干渉性との比較を行うために, 前述の解析ペアの直近となるペア 2010 年 12 月 28 日から 2011 年 2 月 2 日及び 2011 年 1 月 4 日から 2 月 19 日の干渉解析も行った.

本研究では, 液状化発生域の判読の指標に, SAR 干渉画像中の非干渉ではなく, コヒーレンス値の変化 (低下) を利用したアプローチを試みる. コヒーレンスは, 干渉性の度合いを示す値で (詳細な式は, 例えば Hanssen (2001) を参照), 0 から 1 に規格化

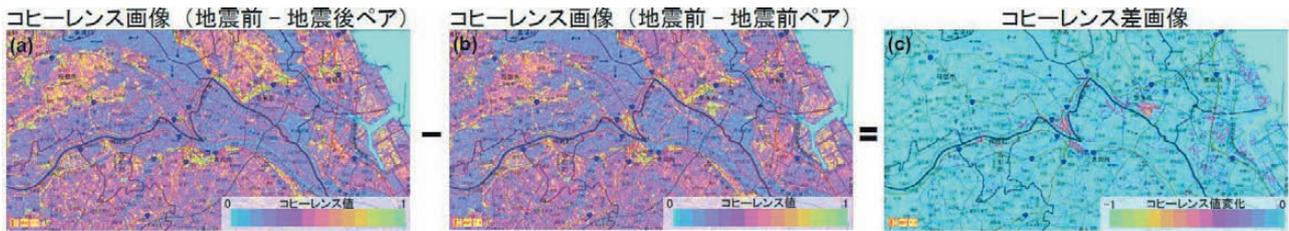


図-1 コヒーレンス差画像の作成. (a)地震前-地震後データペアによる干渉処理から得られたコヒーレンス画像. (b)地震前-地震前データペアによる干渉処理から得られたコヒーレンス画像. (c) コヒーレンス画像(a)のコヒーレンス値からコヒーレンス画像(b)のコヒーレンス値を差し引いて作成したコヒーレンス差画像.

された値をとり、1 に近づくほど干渉性がよいことを示す. コヒーレンス値の分布画像をコヒーレンス画像という (図-1 (a), (b)).

液状化に伴う地表の散乱状態の変化に対応して、液状化発生前と後でコヒーレンスの低下が見られることが期待される. ここでは、地震前-地震前データペアの干渉処理から得たコヒーレンス画像 (図-1 (b)) と地震前-地震後のコヒーレンス画像 (図-1 (a)) を作成し、後者から前者のコヒーレンス値を差し引いて差画像 (図-1 (c)) を作成することで、コヒーレンス値が低下した領域を同定し、現地調査による液状化域との比較を行う. なお、以下の解析で示すコヒーレンスの差画像では、コヒーレンスが低下した領域が視覚的に分かりやすいように、値が減少したピクセルのみ表示し、増加したピクセルにはゼロ値を与えている.

3. コヒーレンス値低下域と液状化分布域の比較

3.1 利根川下流域

図-2 (a)は、利根川下流域で液状化の発生が確認された領域を示したものである. ここで示す発生領域は、国土交通省関東地方整備局・地盤工学会(2011)によるもので、液状化範囲 (赤) 及び非液状化範囲 (青) を電子国土基本図上に図示したものである. 以後、本稿で述べる現地調査とは、特段の説明がない限り、この報告書における結果のことを指す. なお、現地調査は、必ずしも図-2 (a)に示すような面的領域を網羅的に行ったものではなく、道路等に認められた噴砂などの位置を点状、線状に得た結果に加えて、専門家が地形・地質情報等を加味して推定した範囲であることに注意されたい. 詳しくは、国土交通省関東地方整備局・地盤工学会 (2011) を参照されたい.

図-2 (b)は、同領域におけるコヒーレンス差画像である. 2010年12月28日から2011年2月2日(地震前)のペアと2011年2月2日から3月20日(地震前後)のペアから得られたコヒーレンス画像を用いた. 図-2 (b)には、コヒーレンスが低下したことを示す紫~黄色が部分的に見られる. これらの低下域を図-2 (a)と対比してみると、液状化範囲と対応

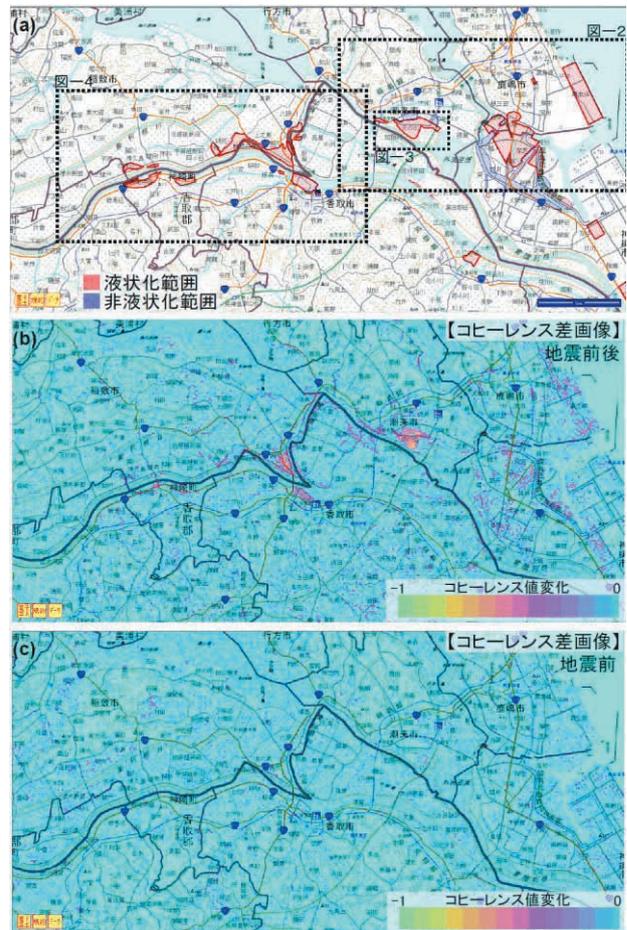


図-2 (a)利根川下流域の液状化発生領域. 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会 (2011) をもとに作成. 赤色及び青色のマスク領域はそれぞれ液状化範囲、非液状化範囲を示す.

(b)2010/12/18-2011/2/2のコヒーレンス画像と2011/2/2-2011/3/20のコヒーレンス画像によるコヒーレンス差画像. コヒーレンスが低下したことを示す紫~黄色が部分的に見られる.

(c)2010/9/17-2010/12/18のコヒーレンス画像と2010/12/18-2011/2/2のコヒーレンス画像によるコヒーレンス差画像.

していることがわかる。地表状態に大きな変化があったこと、すなわち液状化現象が発生したことを反映していると推察される。図-2(c)は2010年9月17日から12月18日と2010年12月28日から2011年2月2日の観測ペアによる液状化発生前のコヒーレンス画像の差画像であるが、図-2(b)に見られるような有意なコヒーレンスの低下は見られない。

潮来市・鹿嶋市及びその周辺の拡大図を図-3に示す。液状化が確認されている鹿島港（領域A）、鹿嶋市鉢形（B）、神栖市深芝（C）、潮来市日の出（D）などで、コヒーレンス値が低下していることがわかる。特に、潮来市日の出でのコヒーレンス低下は顕著であり、その空間分布は現地調査による液状化分布の形状とも類似している。また、領域Bのような数百mの局所的な領域においても、その空間的対応は良い。

潮来市日の出の拡大図を図-4に示す。この地区は液状化の被害が最も大きかった場所の1つである。

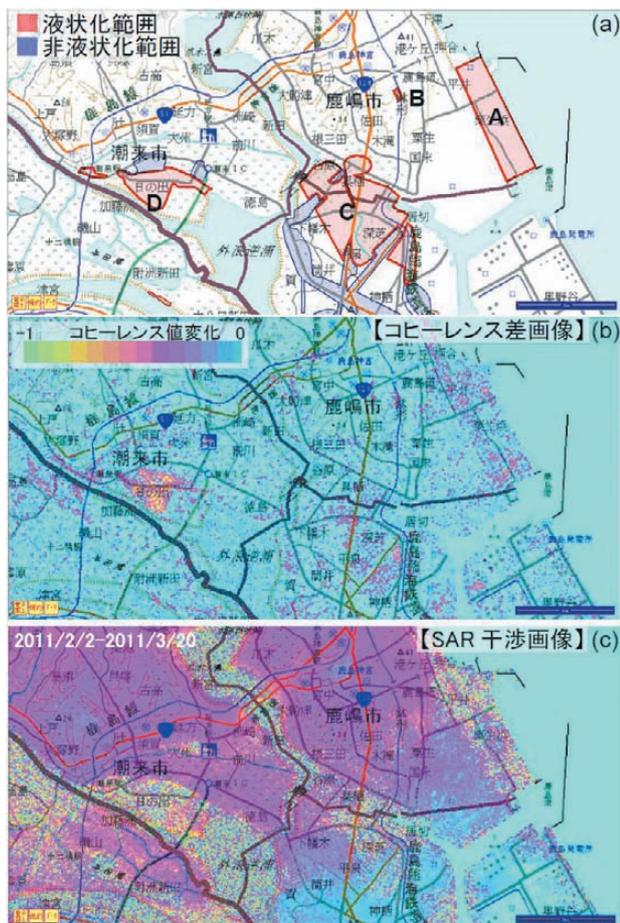


図-3 (a)潮来市・鹿嶋市及びその周辺の液状化発生領域、(b)コヒーレンス差画像、(c)SAR干渉画像。コヒーレンス差画像は図-2(b)と同じである。SAR干渉画像は2011/2/2-2011/3/20のデータペアによる解析結果。

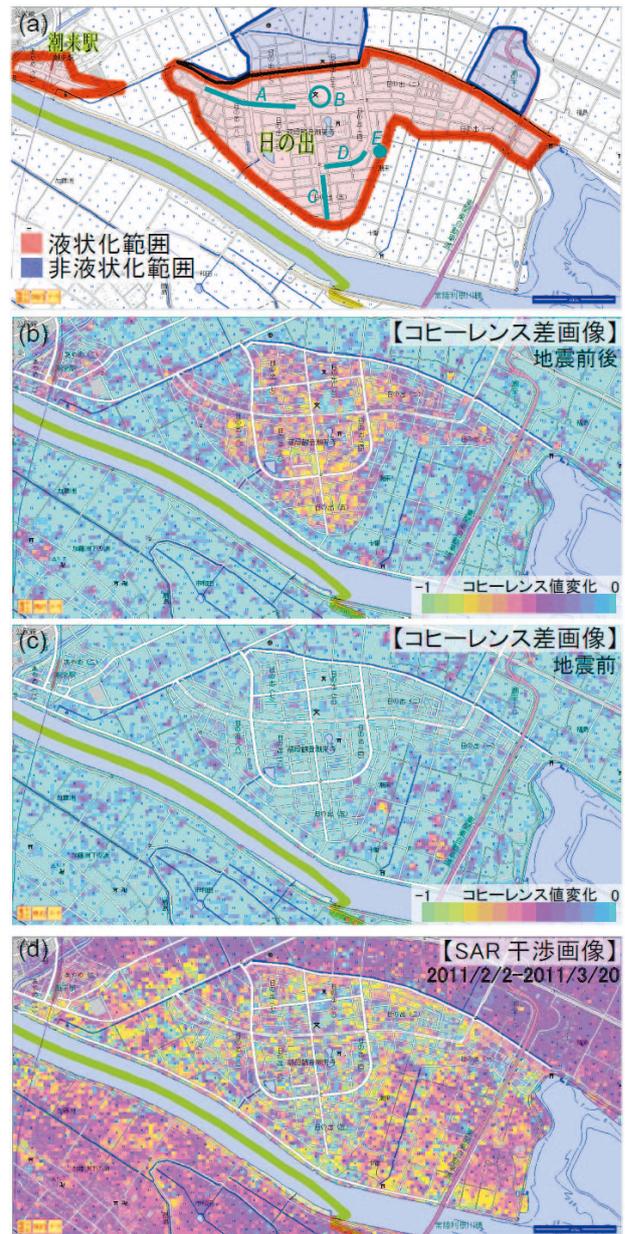


図-4 (a)潮来市日の出地区及びその周辺の液状化発生領域、(b)(c)コヒーレンス差画像、(d)SAR干渉画像。図-4(a)のA～Eは、図-5に示す写真の撮影場所を示す。コヒーレンス差画像(b)及び(c)はそれぞれ図-2(b)及び(c)と同じである。SAR干渉画像は2011/2/2-2011/3/20のデータペアによる解析結果。

図-5に地理情報解析研究室による現地調査の写真を示す（詳しくは、国土地理院地理情報解析研究室（2011）を参照されたい）。図-4(a)に見られるように、液状化は住宅地に集中してみられる一方、周囲の耕地（田）では目立った液状化が報告されていない。図-4(b)と比較すると、液状化発生域とコヒーレンス低下域とは高い空間的相関がある。すなわち、住宅地に集中して大きなコヒーレンスの低



図－5 潮来市日の出地区の液状化の様子（国土地理院地理情報解析研究室，2011）．A～Eの撮影場所は図－4（a）を参照のこと．

下が認められる一方，その他の領域には顕著な変化は見られない．ただし，日の出地区の北部（日の出3，7丁目の一部）は，現地調査では非液状化域（青色）となっており，コヒーレンス差画像との結果と一致しない．図－4（a）に示す現地調査の結果は，液状化発生域判読の客観性を高めるため，噴砂・噴水が認められたものを液状化とみなしており，たとえ地盤の変形が大きくても表面に噴砂等が見られない場合は液状化発生と判断していない（国土交通省関東地方整備局・地盤工学会，2011）．噴砂等は発生していないものの，コヒーレンス画像では地表面の（散乱）状態が大きく変化したことが示唆されており，液状化と強く関係した何らかの地表変化がおきたと推察される．

図－4（b）のコヒーレンス差画像では，日の出地区のほかに，潮来駅周辺にもコヒーレンスの低下する領域が広がっている．現地調査でも同領域に液状化の発生が確認されており，わずかに数百m範囲の規模ではあるが，コヒーレンス差画像により，その液状化域の広がりが見えられていることがわかる．

図－4（c）は，図－2（c）の潮来市日の出の拡大図である．耕地（田）の一部では通常時でも大きくコヒーレンス値が低下しているが，住宅地や潮来駅周辺の広い領域でコヒーレンスが面的に低下する様子は地震発生前には見られないことがわかる．

図－6は香取市・稲敷市及びその周辺の拡大図である．香取市佐原（領域E）や稲敷市西代（F）でコヒーレンスの低下が顕著である（図－6（b））．それに対応する領域では現地調査でも液状化が確認さ

れており，その空間的分布も両者の対応が良い（図－6（a））．そのほか，現地調査で液状化が確認された稲敷市結佐，香取市石納（G），神崎町今（H），稲敷市橋向・余津谷，神崎町向野（I）でもコヒーレンスの低下が認められる．

3. 2 東京湾岸

図－7（a）は，東京湾岸沿いで液状化の発生が確認された領域を示す．図－2（a）と同様，国土交通省関東地方整備局・地盤工学会（2011）によってまとめられた液状化範囲（赤）及び非液状化範囲（青）を電子国土基本図上に図示したものである．

図－7（a）に示されるように，液状化は主に，千葉県浦安市から千葉市の沿岸にかけて帯状に分布している．図－7（b）は2011年1月4日から2月19日の地震前データペアによるコヒーレンス画像と2011年2月19日から4月6日の地震前後のデータペアによるコヒーレンス画像の差画像である．周囲と比べてコヒーレンスが低下する領域が，浦安市から習志野市の湾岸沿いに帯状に集中して分布しており，図－7（a）で示される液状化の範囲と調和的であることがわかる．

図－8は浦安市及びその周辺の拡大図である．図－7（b）のコヒーレンス差画像でコヒーレンス値の低下が顕著な領域の1つである．首都高速湾岸線付近より海側で顕著なコヒーレンス値低下が見られる．その分布形状は現地調査の結果（図－8（a））と概ね調和的である．以下，現地調査とコヒーレンス差画像をさらに詳細に比較する．現地調査では，舞浜2

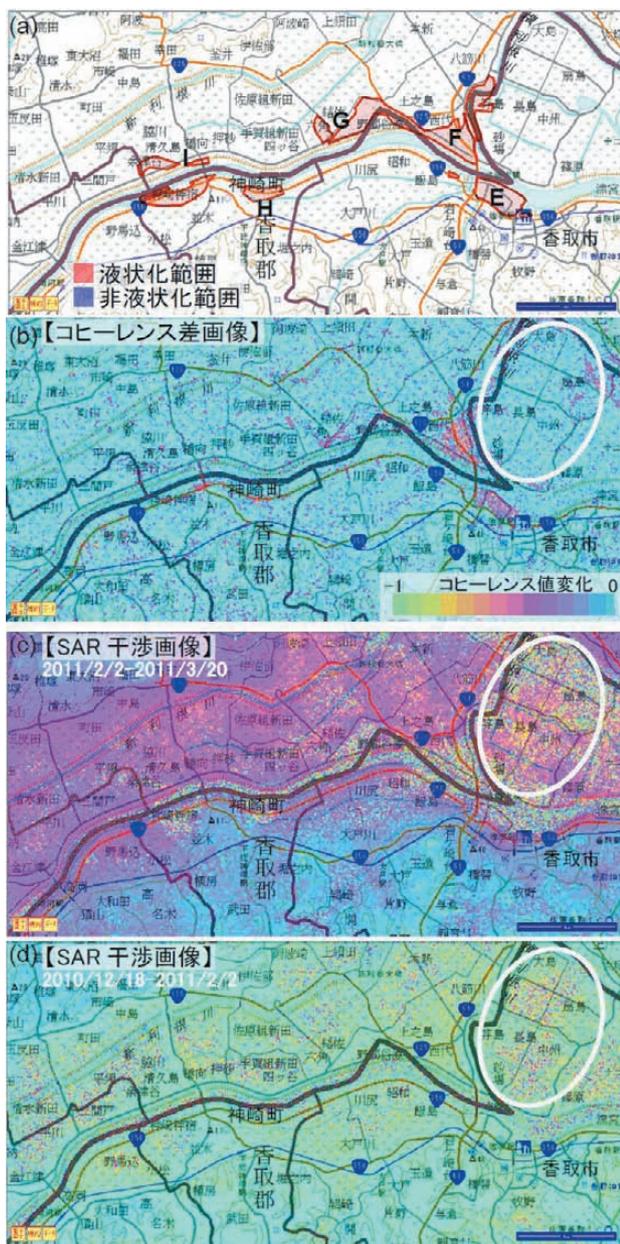


図-6 (a)香取市・稲敷市及びその周辺の液状化発生領域、(b)コヒーレンス差画像、(c) (d) SAR干渉画像。コヒーレンス差画像は図-2 (b)と同じである。SAR干渉画像(c)及び(d)はそれぞれ2011/2/2-2011/3/20及び2010/12/18-2011/2/2のデータペアによる解析結果。

～3丁目、千鳥地区において大規模な液状化が発生している一方、東京ディズニーランドではその外周部と駐車場以外では顕著な被害がないことが報告されている。コヒーレンス差画像においても両地域におけるコヒーレンス変化に明瞭な違いが見られ、舞浜2～3丁目及び千鳥地区において大きなコヒーレンス低下、すなわち液状化と思われる現象が発生したことが推察される一方で、ディズニーランド敷地内においては目立ったコヒーレンス低下は見られな

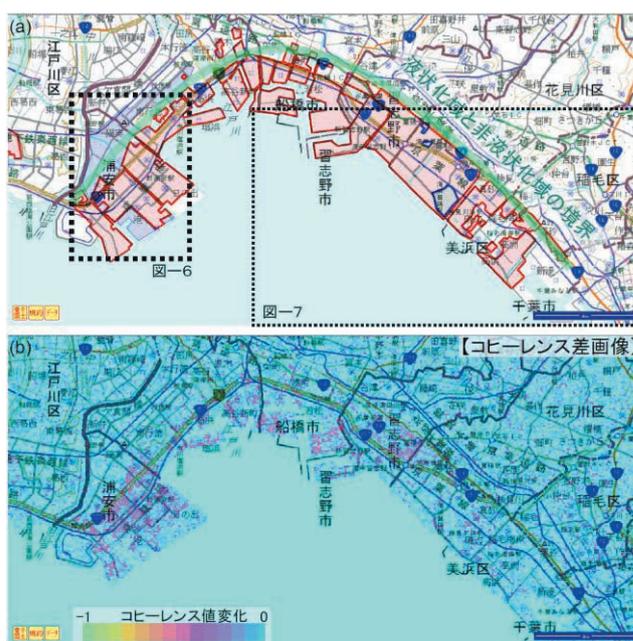


図-7 (a)東京湾岸沿いの液状化発生領域。国土交通省関東地方整備局・地盤工学会(2011)をもとに作成。赤色及び青色の部分はそれぞれ液状化範囲、非液状化範囲を示す。(b)2011/1/4-2011/2/19のコヒーレンス画像と2011/2/19-2011/4/6のコヒーレンス画像の差画像。コヒーレンスが低下したことを示す紫～黄色が部分的に見られる。

い。その北東側(弁天、鉄鋼通り、富岡、今川、高洲、海楽、美浜、入船、明海、日の出地区)でも液状化現象の発生が広く認められ、対応する領域でコヒーレンスの低下が見られる。図-9は図-8(a)に示すA～D点で撮影した現地調査の写真であるが、B～D点が上記液状化域の様子である。一方、港地区、高洲・明海・日の出地区の南東部のように、液状化がほとんど見られない領域もある。コヒーレンス差画像でも、部分的にコヒーレンスの低下は見られるものの、相対的にコヒーレンス変化は小さく、液状化が顕著に発生しなかったことが示唆される。首都高速湾岸線付近より北西側の富士見、堀江、東野(北東側)、猫実、北栄地区では液状化がほとんど見られていないが(図-9 A点)、コヒーレンス差画像においてもこれら領域では目立ったコヒーレンス値低下は見られず両結果は調和的である。液状化域と非液状化域の境界位置についても比較的両者の対応は良く、例えば猫実と海楽の間の境界はコヒーレンス差画像においても明瞭である。

4. SAR 干渉画像の非干渉領域と液状化について
～干渉性を指標とした液状化判読の注意点～
液状化によるコヒーレンス値(干渉性)の顕著な低下は、SAR 干渉処理の最終プロダクトである干渉

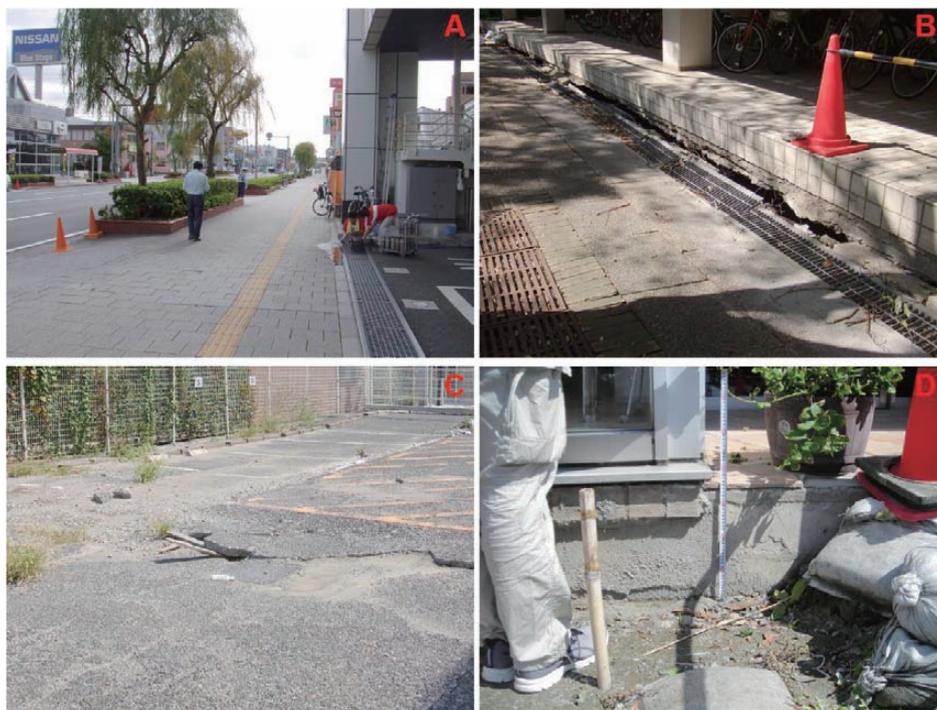


図-8 (a)浦安市とその周辺の液状化発生領域, (b)コヒーレンス差画像. コヒーレンス差画像は図-7 (b)と同じ. 図-8 (a)のA~Dは, 図-9に示す写真の撮影場所を示す.

画像にも非干渉 (砂目模様) として現れる. 干渉処理の中間プロダクトであるコヒーレンス画像よりも広く公開されている現状もあり (例えば, 国土地理院は SAR 干渉画像の一部をホームページ上で公開している: <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/result.html>), SAR データ解析者以外のユーザーとしては干渉画像を利用した液状化域の判読が簡便であろう. 図-3 (c), 図-4 (d), 図-6 (c) は地震発生前後のデータペアによる干渉画像である. 液状化発生域に対応する領域では非干渉 (砂目模様) となり, その空間的対応には良い相関があることがわかる. 地盤変動や噴砂等による地表の散乱状態の変化に伴い干渉性が劣化して, 干渉画像上では砂目模様となったと考えられる. ただし, ここで注意が必要なのは, 非干渉領域が必ずしも液状化を反映していない場合もあることである. 非干渉域には, もともと干渉性が著しく低い領域も多く含まれているからである. このことは干渉性の低い耕地 (田) が広がる領域に着目するとわかりやすい. 例えば, 図-6 (d)の地震発生前のデータペアによる干渉画像には非干渉領域 (砂目模様) が広く分布しているが, これら非干渉領域は耕地 (田) に対応している (図-6 (a)). たゞ地震前後の干渉画像に非干渉域が広がっていたとしても, 元々干渉性が悪い領域においては, その干渉性の劣化が液状化を原因とするものなのかはわからない. 干渉画像の干渉性のみを指標とした液状化域の判読は誤った解釈の恐れがある.

一方, コヒーレンス差画像では, 干渉性の変化から液状化の発生を議論できない場所をあらかじめ排除できる. 例えば, 図-6 で丸囲みした領域は, 元々地震前も干渉性の悪い土地であり (図-6 (d)), 地震前後のペアでも非干渉域が広がる (図-6 (c)). このような本来コヒーレンス値が低い場所では, その差をとっても大きなコヒーレンス低下にはならず, 差画像には目立った変化が現れない (図-6 (b)). コヒーレンス値の変化量を利用することにより, 本来干渉性からは液状化を判読できない領域を排除できる. このことは, 液状化発生域を推定する際に, 干渉画像の干渉性を指標にする判読と比して大きな長所となる. ただし, コヒーレンスの差画像を利用しても, その低下をもって液状化の発生域を一意に判読することは不可能であることは留意されたい. コヒーレンス値低下の原因は液状化だけとは限らないからである.

元々干渉性が低い土地では, たゞ液状化が発生していてもコヒーレンス値の変化からはその抽出が困難である. 図-10 は, 習志野市から千葉市にかけて海岸沿いの拡大図である. 液状化範囲 (図-10 (a)) とコヒーレンス差画像 (図-10 (b)) との比較からわかるように, この領域では液状化が広い範囲で認め



図－9 浦安市の液状化の様子。A～Dの撮影場所は図－8 (a)を参照のこと。

られているが、コヒーレンス値に明瞭な低下は見られない。図－10(c)及び(d)は、それぞれ地震前後のデータペア（2011/2/19-2011/4/6）及び地震前データペア（2011/1/4-2011/2/19）による干渉画像である。地震前後の干渉画像には、湾岸沿いに帯状に非干渉領域が広がっており液状化の発生域との対応も良い。しかし、地震前の干渉画像を見ると、通常時においても干渉性が低いことが認められる。このような場所においては、干渉性の変化から液状化発生域を判読することはそもそも困難である。

前述のように、コヒーレンス差画像を用いても干渉画像を用いても、干渉性やその変化をもって一意に液状化の発生域を特定することは不可能である。干渉性を利用した液状化判読には原理上の限界がある。しかしながら、一意に特定できないことをもって、SAR干渉データを用いた液状化域判読に有用性を認めないのは拙速であろう。SARデータを用いた判読作業の最大の長所は、面的に数十km四方の地表情報を一度に獲得できる点にある。発生可能性のある領域を網羅的に抽出できれば、現地調査などにとっては有用な情報となろう。先の議論の通り、コヒーレンスの差画像を利用する利点は、本来干渉性が悪いためその変化から液状化の発生可能性を議論できない場所を排除できることにある。場所によっては、液状化発生前にもかなり広い範囲で非干渉域が存在することを考慮すると、干渉画像の非干渉域を指標として液状化の発生域を抽出する作業は効率的とは言えない。SAR干渉解析の結果から液状化範

囲を調査する際は、干渉画像よりもコヒーレンス画像の利用が好ましいだろう。

5. まとめ

SAR干渉解析から得られる干渉性の変化を利用することにより、東北地方太平洋沖地震に伴って発生した液状化域の空間分布の把握を試みた。本研究では、地震前のデータペアによるコヒーレンス画像と地震前後のデータペアによるコヒーレンス画像との差画像を作成し、差画像中のコヒーレンス値の低下域と液状化域との比較を行った。本稿では、液状化が広い範囲で発生した利根川下流域と東京湾岸を調査対象とした。その結果、利根川下流域及び東京湾岸とも、液状化発生が確認されている場所では、対応する領域でコヒーレンス値が低下しており、その範囲も現地調査による液状化範囲と概ね調和的であった。利根川下流域では、潮来市日の出、香取市佐原、稲敷市西代の広い領域でコヒーレンス値の低下が見られ、これら分布は現地調査における液状化範囲と良い一致が見られた。特に、潮来市日の出では、住宅地における液状化発生域の分布とコヒーレンス値の低下域とに、高い空間的相関が見られた。東京湾岸沿いでは、浦安市から習志野市にかけてコヒーレンス値が低下する領域が帯状に広がっており、液状化発生域とその分布が概ね対応している。浦安市とその周辺では、コヒーレンス値の低下が広い領域で見られ、現地調査で確認された液状化/非液状化範囲とコヒーレンス値低下域には空間的に良い相関が



図-10 習志野市～千葉市の湾岸沿いの液状化発生領域 (a), コヒーレンス差画像 (b), SAR 干渉画像 (c) (d). コヒーレンス差画像は図-7 (b) と同じ. SAR 干渉画像はそれぞれ 2011/2/19-2011/4/6 及び 2011/1/4-2011/2/19 のデータペアによる解析結果.

あった. 一方, 千葉市の湾岸沿いの液状化発生域は地震発生前から干渉性が悪く, コヒーレンス値の変化から液状化域を判読することは困難であった. コヒーレンス値の低下域を利用した液状化発生域の判読は, SAR 干渉画像の非干渉を指標とした場合と異なり, 本来干渉性の悪い領域を判読の対象とすることなく解析できる利点を有する. SAR 干渉解析の結果から液状化範囲を調査する際は, 干渉画像よりもコヒーレンス画像の利用が好ましい. ただし, 干渉性やその変化をもって一意に液状化の発生域を特定することは原理上不可能であり, その限界を把握しながら液状化発生域の調査に利用することが重要である.

謝 辞

本研究で使用した「だいち」のPALSARデータの所有権は, (独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 及び経済産業省にあります. また, 本研究で用いたPALSARデータは, 衛星データを用いた地震・地盤変動データ流通及び解析ワーキンググループ (地震WG) を通じて提供を受けたもの, 及びJAXAとの共同研究協定に基づいて国土地理院がJAXAから購入したものを使用しています. この場を借りて, 御礼申し上げます.

参 考 文 献

- Hanssen, R. F, 2001: Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers, 511 Dordrecht.
- 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, <http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html> (accessed 22 Nov. 2011).
- 国土地理院地理情報解析研究室, 2011: 東北地方太平洋沖地震による液状化について, <http://www.gsi.go.jp/common/000062384.pdf> (accessed 22 Nov. 2011).

矢来博司, 村上亮, 飛田幹男, 中川弘之, 藤原智, 2001 : RADARSATの干渉SARでとらえた平成12年（2000年）鳥取県西部地震に伴う地殻変動, 国土地理院時報, 95, 139-145.

矢来博司, 中川弘之, 飛田幹男, 村上亮, 藤原智, 2002 : RADARSAT/SARデータ干渉処理による地殻変動検出の試み, 地震, 54, 535-546.