

# 緊急撮影SAR強度画像を用いた 橋梁の被害把握に関する分析と評価

井上 和樹<sup>1</sup>・リュウ ウェン<sup>2</sup>・山崎 文雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>千葉大学工学部 都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: kinoue@chiba-u.jp

<sup>2</sup>千葉大学大学院工学研究科 助教 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: wen.liu@chiba-u.jp

<sup>3</sup>千葉大学大学院工学研究科 教授 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)  
E-mail: fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

2011年に発生したMw9.0の東北地方太平洋沖地震では、多くの橋梁構造物が津波によって甚大な被害を受けた。本研究では、岩手県沿岸部を対象地域として、事前のGISデータを用いて橋梁を自動抽出し、発災直後に緊急観測によって得られた1時期衛星SAR画像による後方散乱係数の特性を利用して、適切な閾値を設定して主桁の被害判別を行った。得られた結果を航空写真や被害報告書と比較することにより、橋梁構造物の被害把握における緊急撮影SAR画像の適用可能性を示した。

**Key Words :** Bridge, Tsunami, Damage Assessment, TerraSAR-X, The 2011 Tohoku Earthquake

## 1. はじめに

発災直後は道路交通がしばしば寸断され、鉄道交通システムも麻痺することが多い。その際、現地調査による構造物の被害把握は困難となる。1994年ノースリッジ地震では、多くの交通施設において甚大な被害が発生した。主要道路および高速道路においても構造的な欠損が生じたり、倒壊したりしたため通行止めが発生した。1995年兵庫県南部地震では、阪神高速道路神戸線、阪急電鉄伊丹線伊丹駅、東海道本線六甲道駅の倒壊に象徴されるように、土木・建築構造物に大規模な被害が発生した。

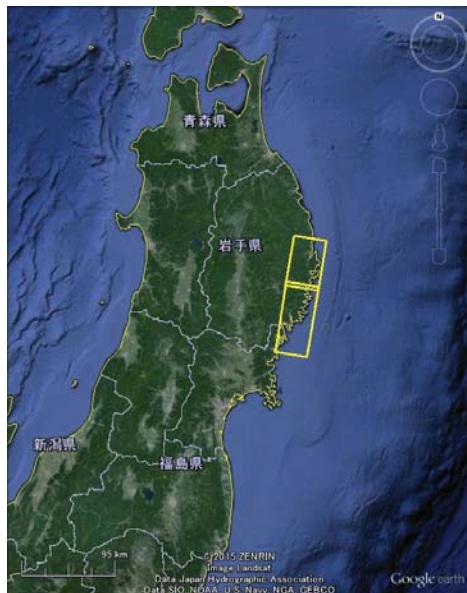
先般の東北地方太平洋沖地震においては、津波の遡上により岩手県・宮城県の沿岸部において多くの道路および鉄道の橋梁構造物が流出・損壊した。同時に、瓦礫堆積や浸水による交通の閉塞も広範囲で発生した。また、超広域災害であったため、緊急対応をおこなう地方公共団体等の機能が失われた。加えて現地調査は危険が伴うことや、広域であることから限界があった。早急に救援活動を行うためにも、広域的な被害情報の早期把握は肝要である。この点において、アクセス不能な被害地域や危険地域の情報を収集できるリモートセンシング技術は有用であり、リモートセンシング技術と現地調査の相互補完を図ることで、被害把握はより正確かつ迅速なものとなる。リモートセンシングのなかでも合成開口レーダ(SAR)は天候、時間帯、火煙の影響を受けない

特徴を持ち、光学センサより発災直後の迅速な緊急対応に適する。

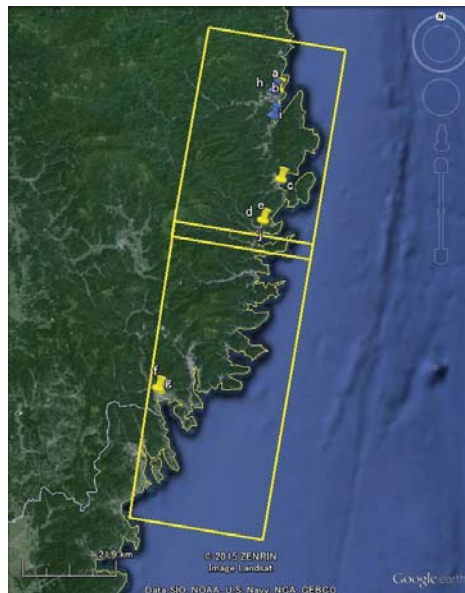
リモートセンシングによる被害把握に関しては幾多の既往の研究が存在する。長谷川ら<sup>1)</sup>は兵庫県南部地震における航空写真を用いた建物被害の抽出をおこない、それらから被害分類をおこない、精度評価をおこなった。また、丸山ら<sup>2)</sup>は新潟県中越地震における道路被害を航空写真によって解析し、被害抽出における画像の空間分解能の影響について分析をおこなった。三浦ら<sup>3)</sup>はジャワ島中部地震における高解像度光学衛星画像を用いた建物被害の把握を実行した。庄司ら<sup>4)</sup>は東北地方太平洋沖地震津波で流出した橋梁の桁や堤防に関してGoogleEarthの光学衛星画像を用いて研究し、結果を現地調査による被害データと比較をしている。リュウら<sup>5)</sup>は東北地方太平洋沖地震での浸水域と建物被害を発生前後の高解像度TerraSAR-X(TSX)画像を用いて抽出している。しかしながらSAR画像による橋梁構造物の地震・津波による被害判読を対象とした分析は乏しい。そこで本研究では、高分解能衛星SAR画像を用いて、東北地方太平洋沖地震で津波により被害を受けた橋梁構造物の分析をおこなう。結果を航空写真や被害報告書と比較することにより精度を評価する。衛星SAR画像を用いた被害判読に関する分析では、衛星軌道やマイクロ波入射角が同一の条件で観測された事前・事後のペア画像を用いた変化抽出を行うことが一般的であり、筆者らの先行研究<sup>6)</sup>でも橋梁構造

物に対する平均差分・相関係数抽出による被害把握の検討を行った。しかし、高分解能のSAR衛星においては撮影範囲が狭いため同一観測条件の事前画像が存在しないケースが多々あるという障壁がある。加えて、2011年東北地方太平洋沖地震、2013年フィリピン台風、2014年広島豪雨土砂災害、2015年ネパール地震、2015年関東・東北豪雨など近年多発する自然災害においては、SAR衛星による緊急観測が実施されている。以上2点の背景から、災害直後に撮

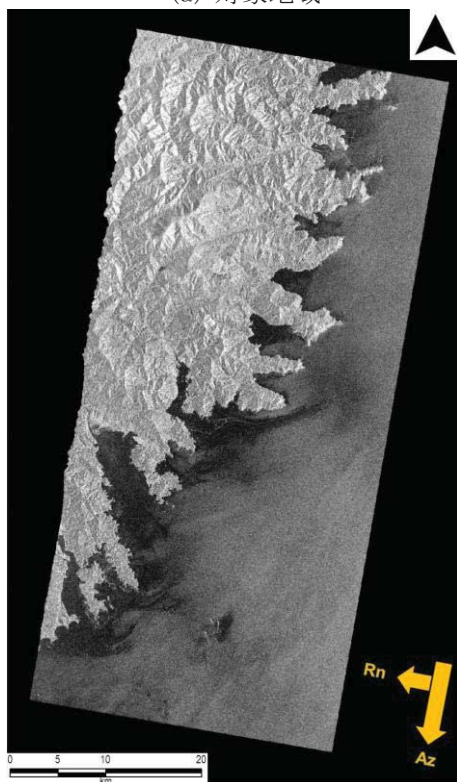
影された1時期のSAR画像から被害を抽出する手法の必要性が高まっており、本研究では岩手県南部および宮城県北部を撮影した緊急撮影時のSAR画像と事前のGISデータを用いて分析を行う。地震、津波・高潮、洪水発生時における橋梁構造物の被害把握の迅速性と正確性の向上、および処理の自動化を目的に据え、発災後早期に橋梁被害スクリーニングを行う方法を提案する。



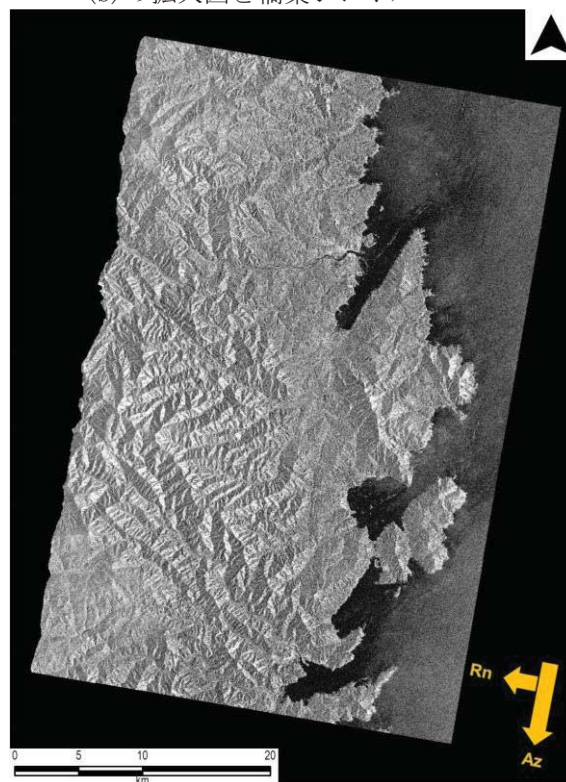
(a) 対象地域



(b) の拡大図と橋梁シンボル



(c) TSX 画像 1 シーン目



(d) TSX 画像 2 シーン目

図-1 対象地域と使用画像

## 2. 使用データと対象地域

橋梁構造物の被害がとくに甚大であった岩手県南部の沿岸部を対象地域に設定している。閉伊川、津軽石川、織笠川、大槌川、気仙川を含む、2011年3月13日（地震後2日目）に撮影された1時期のTSX画像（図-1）の2シーンを用いた。これらは、下降軌道からStripMapモードによりHH偏波で観測されたものである。観測角度は $33.2^\circ$ 、パス角度は $190.4^\circ$ である。なお、幾何補正後に地図投影された簡易オルソ化後のEnhanced Ellipsoid Corrected (EEC) プロダクトで1.25m/ピクセルにリサンプリングされている。

まず、後方散乱強度の校正とスペックルフィルターの適用を行った。後方散乱強度の校正によって、原画像のデジタル値 (DN) から、地形と補正係数を用いて単位面積あたりの後方散乱係数 ( $\sigma^0$ ) に変換した。次に、スペックルノイズの除去のため Enhanced Lee Filter を適用した。ウィンドウサイズは平滑化による橋梁輪郭のぼやけを防止し詳細な情報を保留するために、最小の $3 \times 3$ ピクセルを採用した。

橋梁の位置を把握するためには、国土地理院が公開している基盤地図情報によるGISデータを用いた。縮尺1/2500相当の精度で整備されている地域についてはこれを、それ以外の地域では縮尺レベル25000のものを用いている。基盤地図情報は入手が容易なため、これを用いた分析の提案は望ましいと考えられる。

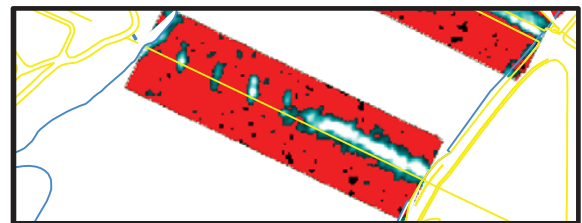
## 3. 橋梁構造物の被害判読方法

基盤地図情報を利用してSAR画像に重ねあわせ、水域上に存在する道路・軌道を橋梁として抽出する。SAR強度画像では、3次元の物体をレーダーの斜め観測で平面に投影するため、倒れ込み(layover)現象が発生する。そのため、水面より高い位置にある主桁は、衛星に近い位置に存在するものとして認識され、GISデータとはずれた位置に示される。同時に、利用した基盤地図情報の精度（縮尺レベル）に依る誤差も存在する。これらの問題点については、GISデータより抽出した桁輪郭から一定の距離の範囲（以下、バッファと呼ぶ）を作成することによって解消する。本研究におけるバッファ幅を橋軸方向の左右に30mとすることに定め、バッファを含むポリゴンに範囲を限定して各々の橋梁に対する解析を行う。

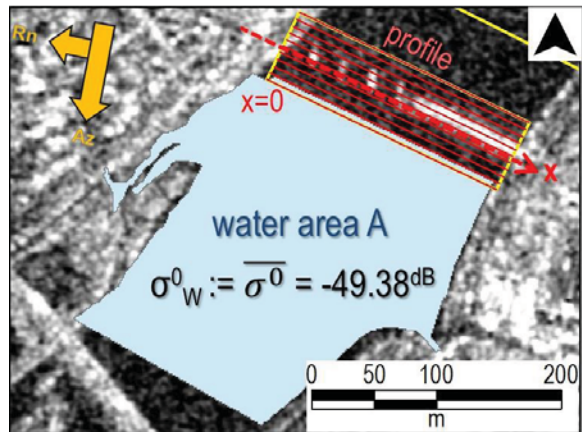
既往の研究から<sup>7)</sup>、水域は表面が平坦であるため、他の土地被覆よりも $\sigma^0$ が極めて小さいという特徴があることが知られている。そのため、SAR強度画像において橋梁の存在は容易に確認できる。この特徴を利用すれば、ある箇所では桁の流失が発生している場合、極めて小さい $\sigma^0$ が橋軸方向に対して垂直に貫いていると仮定できる。

図-2に示す通り、ポリゴンの1辺から橋軸方向に線（以下、プロファイル線と呼ぶ）を多数描画して、

ピクセルごとの $\sigma^0$ の値を出力する。橋軸方向に対して開始点から同じピクセル位置において、プロファイル線を描画して抽出した全ての $\sigma^0$ が閾値より小さい場合、その箇所では桁の流失などの被害が発生していると判断する。具体的には、まず河川の水域の $\sigma^0$ の平均値（以下、 $\sigma_w^0$ と呼ぶ）を抽出する。ここで、津波の発災直後は、多くの場合、河川に瓦礫が浮遊している。また、TSX画像は波長の短いXバンドで観測しているため、水面の波も $\sigma^0$ に影響を与える。本研究ではピクセルごとに出力するためこの2点を考慮する必要がある。図-2に示す通り、ポリゴン内である値以下の $\sigma^0$ のピクセルを赤で塗りつぶす。このようにして、光学画像を参照しながら目視で瓦礫や波の影響を無視できる最適な閾値を検討した。様々な値を試行した結果、本研究では $\sigma_w^0 + 10.0\text{dB}$ 以下の範囲を瓦礫と波の影響を無視できる水域として抽出した。図-2 (a) ではこの値以下のピクセルを赤く塗りつぶしているが、瓦礫や波の影響が概ね除外されている。多数のプロファイル線を描画して抽出した $\sigma^0$ が全て $\sigma_w^0 + 10.0\text{dB}$ を下回ったピクセル位置が1箇所以上検出された場合、橋桁に流失被害が発生していると判定する。



(a) 瓦礫・波を考慮した目視による閾値設定



(b) プロファイル線の描画と $\sigma_w^0$ の抽出

図-2 被害検出の手順

表-1 第三十四閉伊川橋梁の水域の $\sigma^0$ の統計

| water area A (34070 pixel) | $\sigma^0$ [dB] |
|----------------------------|-----------------|
| Mean                       | -49.38          |
| Min                        | -66.36          |
| Max                        | -15.59          |
| Standard Deviation         | 5.27            |

#### 4. 被害抽出の結果と評価

表-2の通り、本手法の自動処理によって得られた橋桁流失被害の有無の判定を出力した。それぞれの橋梁について、国土地理院が公開している航空写真<sup>8)</sup>と現地調査報告書<sup>9), 10), 11)</sup>を用いて実際にどのような被害があるのかを確認する。その際、プロファイル線によって抽出された $\sigma^0$ と閾値をグラフに表して、橋軸方向の $\sigma^0$ の連続性を見てどのピクセル位置で流失と判断されたのかを確認する。また、同じピクセル位置に関して航空写真で比較する。以上の流れで、提案した橋梁構造物の被害程度の抽出方法を評価する。

図-3の通り、比較的規模の大きな10橋梁について抽出結果と航空写真・報告書とを比較しながら評価を行った。このうち、(a)から(g)までが主桁流失部あり、(g)から(i)までが主桁残存と判定された。

第三十四閉伊川橋梁(a)では、グラフにおいて多数描画したプロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が $x=64$ ピクセル目以後閾値を下回り、 $\sigma^0$ の大きさが不連続になっている。光学センサ画像では、河川中央付近から左岸までの主桁が流失しており、橋脚が残存している状況が確認できる。現地調査報告書によれば、10基あった桁のうち6基が流失している。グラフでも橋脚部に対応するピクセル位置の $\sigma^0$ が突出して高いことから残存した橋脚が判別可能である。

宮古橋(b)では、 $x=15$ ピクセル目付近で全ての $\sigma^0$ が突出して低い値を示している。光学センサ画像ではこの部分の被害を判読できない。現地調査報告書によれば、桁は残存しているが、左岸付近の欄干が流失し、左岸の堤内地の路面が陥没している。なお、津波襲来時は改修工事中であった。欄干で反射したマイクロ波のために主桁全体の $\sigma^0$ が高い値を示しており、当該箇所だけ欄干の後方散乱が減少したために、突出して低い値となったと考えられる。

織笠橋(c)では、プロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が陸域部分を除いて閾値より低い値を示している。光学センサ画像を見ても、橋脚を残して主桁が流失しており、本手法による被害抽出ができたといえる。

安渡橋(d)でも同様に、プロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が陸域と橋脚を除いて閾値より低

い値を示している。光学センサ画像においても主桁全体の流失が確認できる。グラフ上で $\sigma^0$ の値が高いピクセル位置に対応するように、陸域と橋脚が存在していることが観察できる。

大槌川橋梁(e)では、プロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が閾値を下回る部分が数箇所確認できる。航空写真で確認すると、主桁と堤防が流され、橋脚が残されていることがわかる。SAR強度画像と航空写真を比較すると、水域上の散乱強度が大きい。これは、河川の水面の波や浮遊する瓦礫の影響であると推測できる。

気仙大橋(f)では、全体を通してプロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が閾値より低い、四箇所突出して $\sigma^0$ が高い箇所が存在する。航空写真で確認すると、主桁が流され4基の橋脚が残存している。

姉齒橋(g)でも同様に、3箇所突出して $\sigma^0$ が高い部分があり、それ以外の部分では全プロファイル線が閾値より低い値を示している。航空写真でも3基の橋脚が残存している様子が観察できる。

小山田橋(h)では、全体を通してプロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が閾値を下回るピクセル位置は存在せず、主桁の流失被害がないものとして類別される。航空写真で見ても、この箇所では主桁による大きな被害は観察できない。現地調査報告書においても、小山田橋では主桁の大きな損傷は確認されていない。

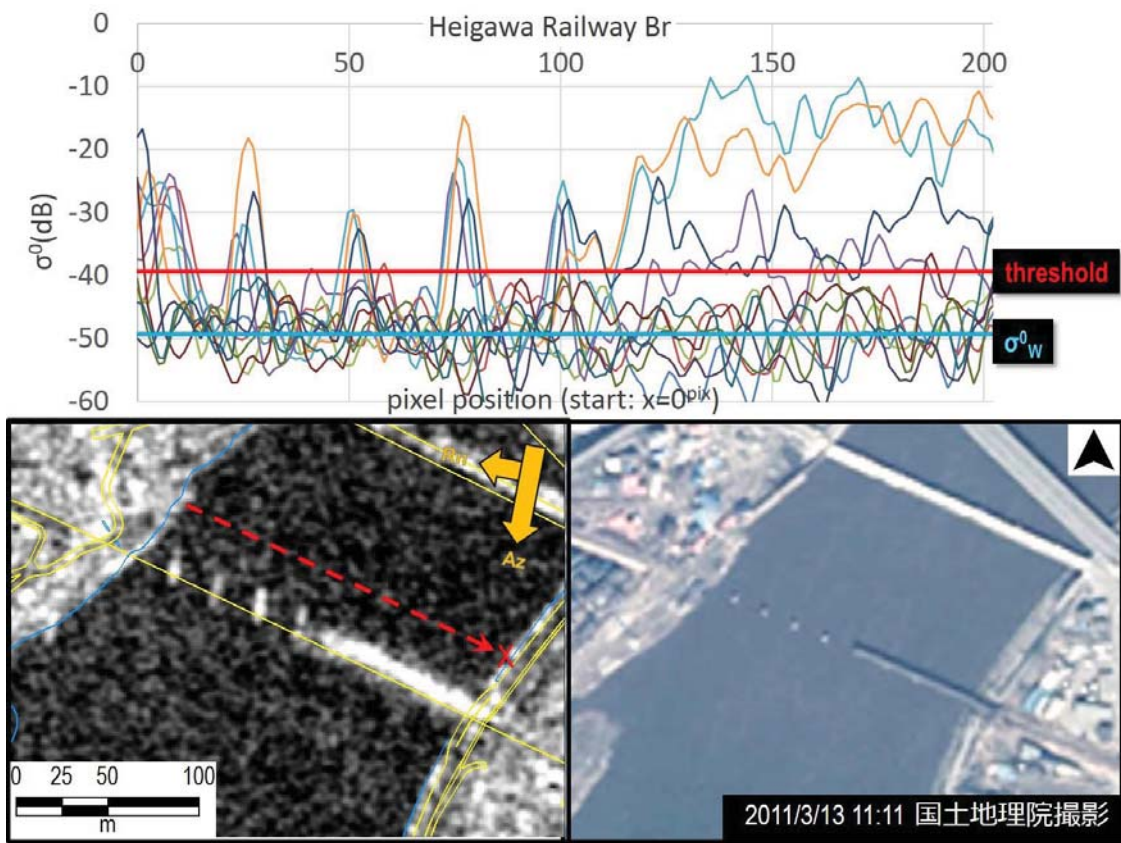
稲荷橋(i)でも同様に、全体を通してプロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が閾値を下回るピクセル位置は存在しない。航空写真では、周辺の陸域は被害を受け瓦礫が堆積している様子が観察できるが、主桁は流失していない。

大槌大橋(j)では、プロファイル線によって抽出した全ての $\sigma^0$ が閾値を下回るピクセル位置は存在しないが、 $\sigma^0$ の最高値が上下している。これは橋脚に堆積した瓦礫の影響によるものと考えられ、航空写真でもその様子が確認できる。

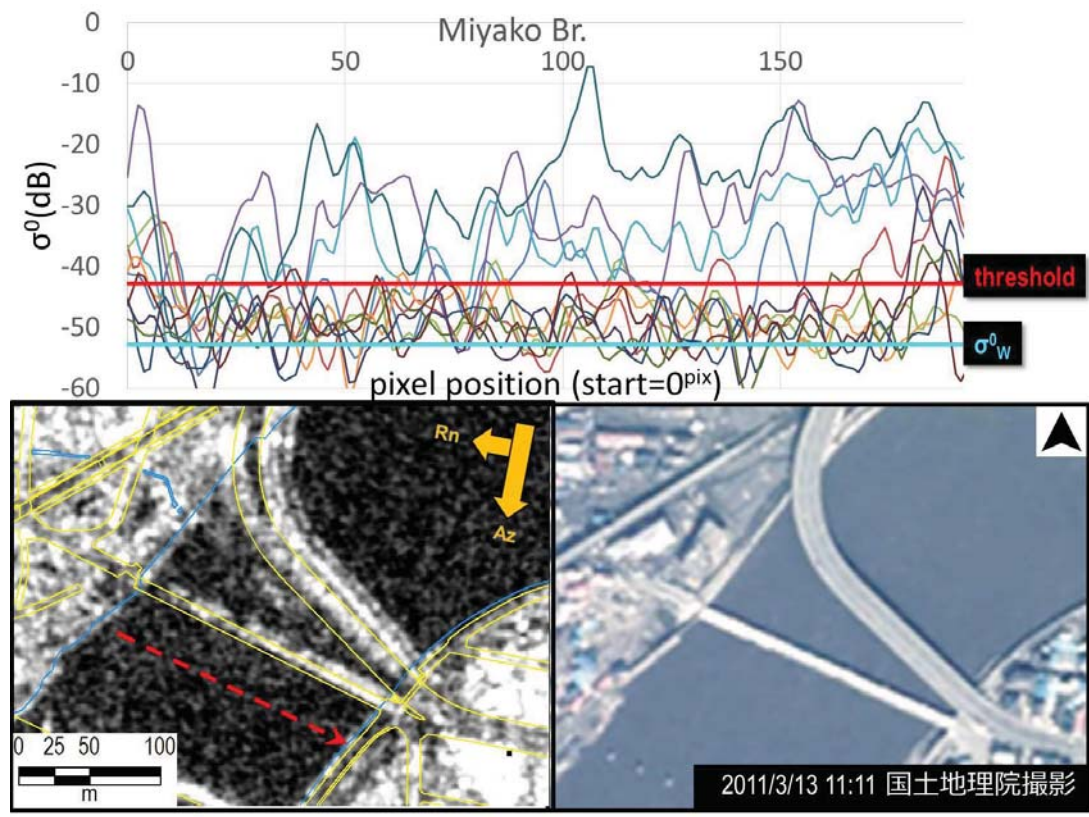
水域と判断する閾値について、 $\sigma^0_w$ に対して10.0dBを加えた値を設定するということが妥当であると考えられる。なお、SAR強度画像の観測条件や河川の状況によって水域内の $\sigma^0$ の値は変化し画像ごとに $\sigma^0_w$ を検討する必要があると考えられる。

表-2 本手法による橋桁流失判定と被害報告書との比較

| 橋梁記号 | 橋梁名       | 経度      | 緯度     | 本手法 | 被害報告書 |
|------|-----------|---------|--------|-----|-------|
| a    | 第三十四閉伊川橋梁 | 141.954 | 39.638 | 流失  | 流失    |
| b    | 宮古橋       | 141.956 | 39.639 | 流失  | 残存    |
| c    | 織笠橋       | 141.959 | 39.448 | 流失  | 流失    |
| d    | 安渡橋       | 141.909 | 39.362 | 流失  | 流失    |
| e    | 大槌川橋梁     | 141.910 | 39.359 | 流失  | 流失    |
| f    | 姉齒橋       | 141.618 | 39.010 | 流失  | 流失    |
| g    | 気仙大橋      | 141.621 | 39.005 | 流失  | 流失    |
| h    | 小山田橋      | 141.945 | 39.635 | 残存  | 残存    |
| i    | 稲荷橋       | 141.941 | 39.583 | 残存  | 残存    |
| j    | 大槌大橋      | 141.909 | 39.360 | 残存  | 残存    |

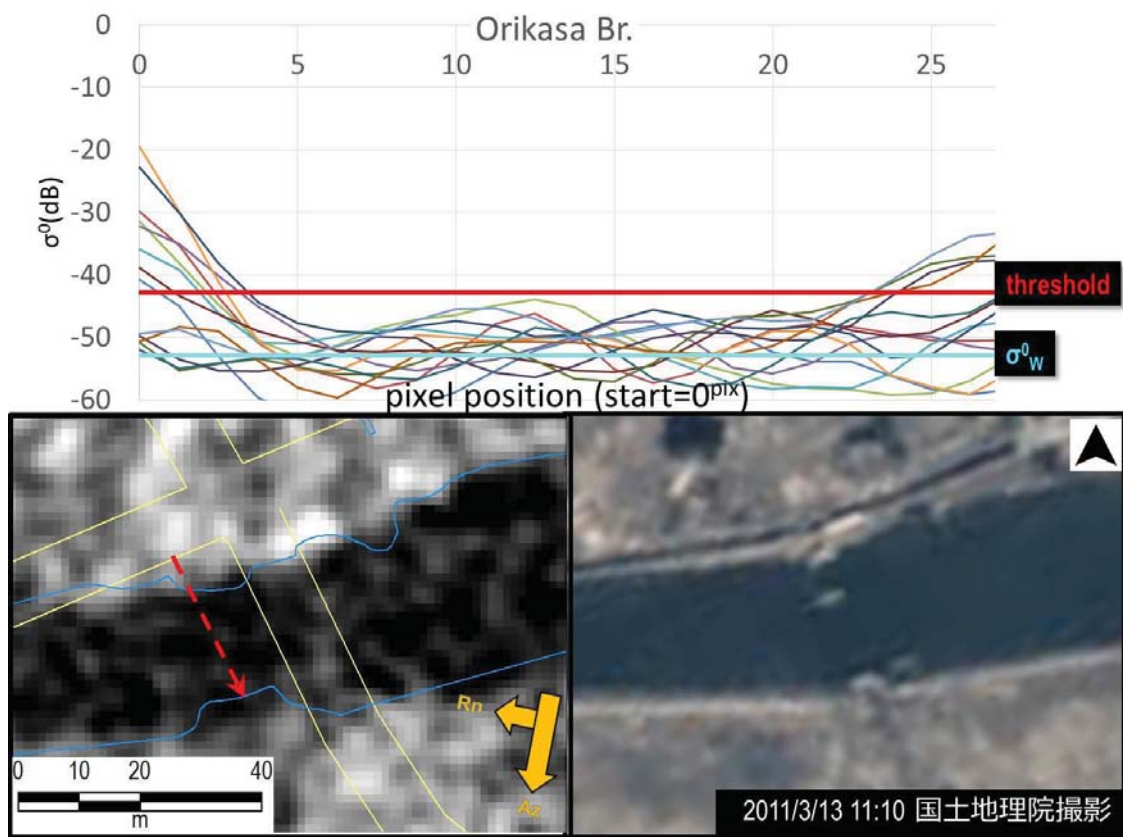


(a) 第三十四閉伊川橋梁

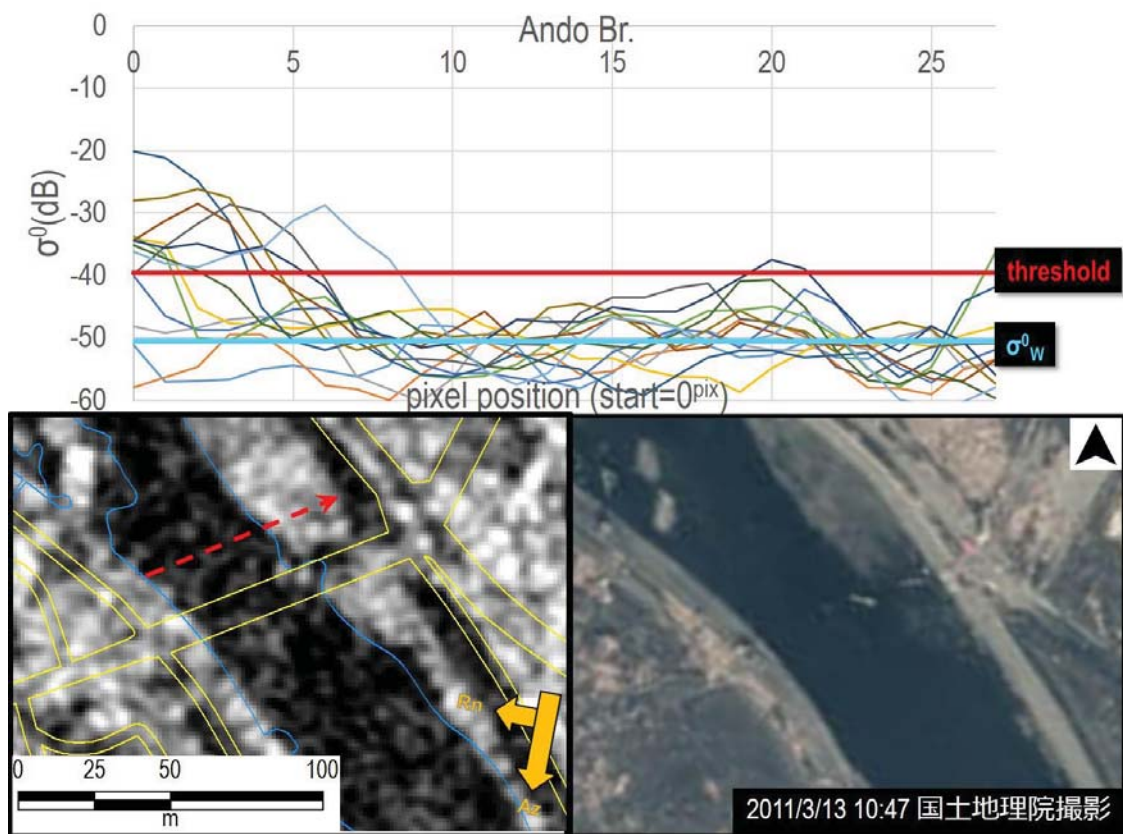


(b) 宮古橋

図-3 プロファイル線で抽出し  $\sigma^0$  のグラフ, TSX 原画像, 国土地理院撮影の航空写真 (1)

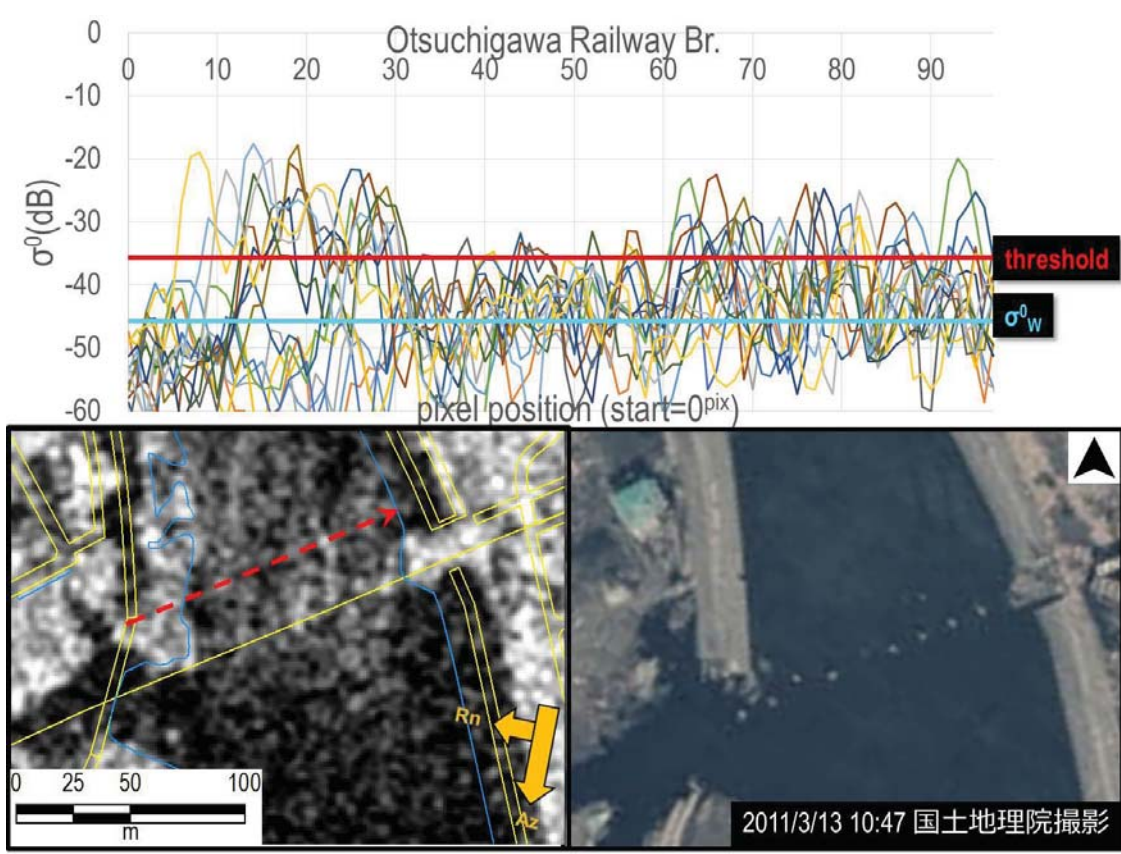


(c) 織笠橋

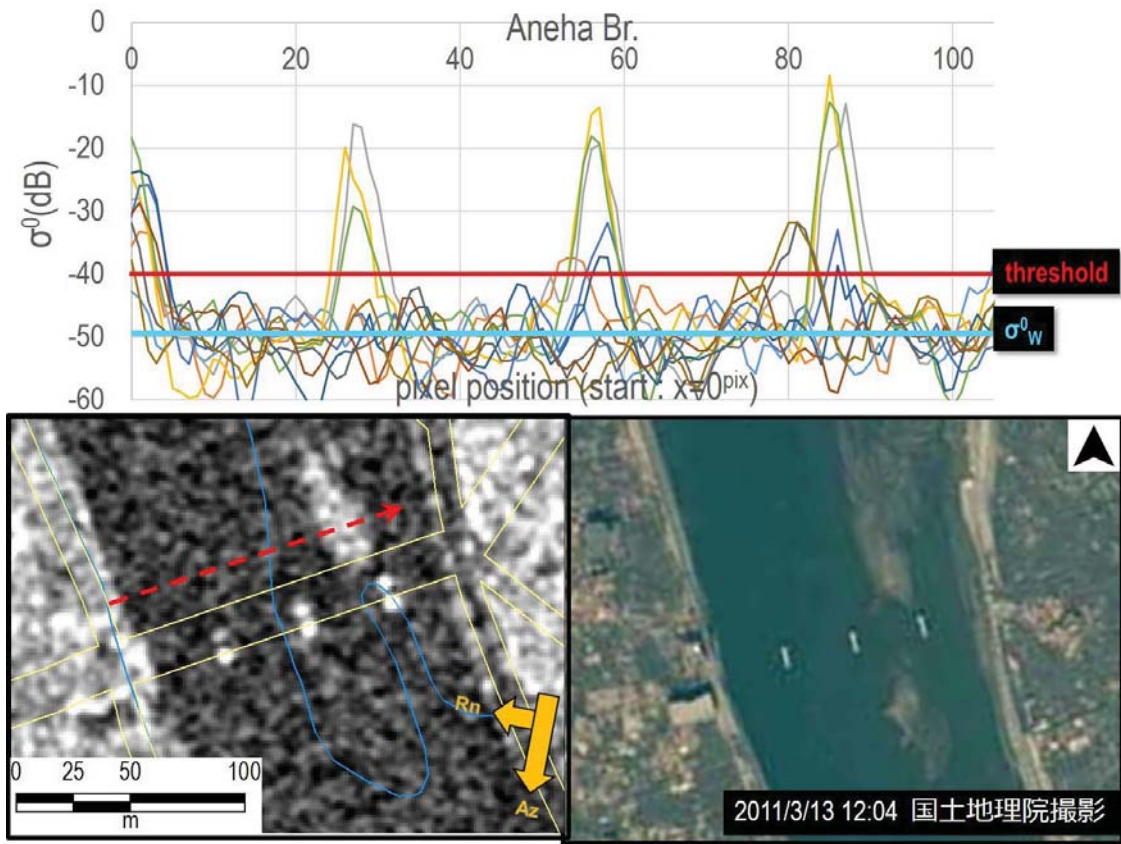


(d) 安渡橋

図-3 プロファイル線で抽出し  $\sigma^0$  のグラフ, TSX 原画像, 国土地理院撮影の航空写真 (2)

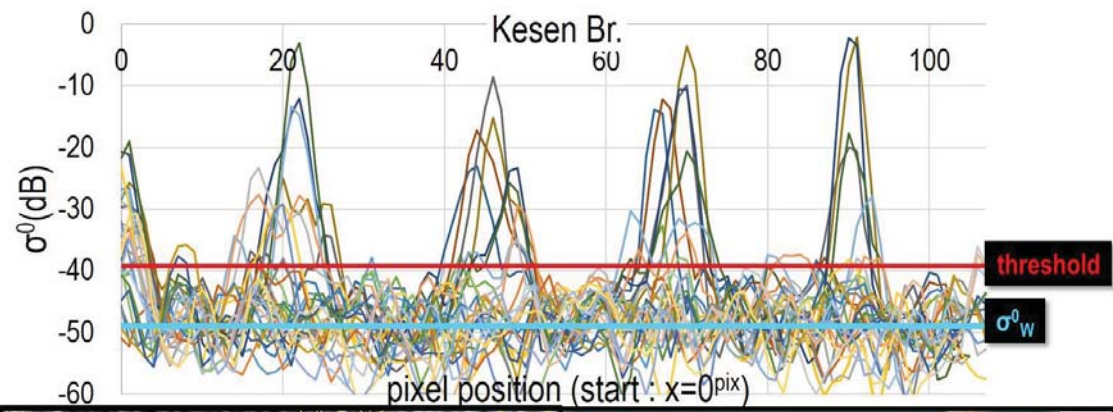


(e) 大槌川橋梁

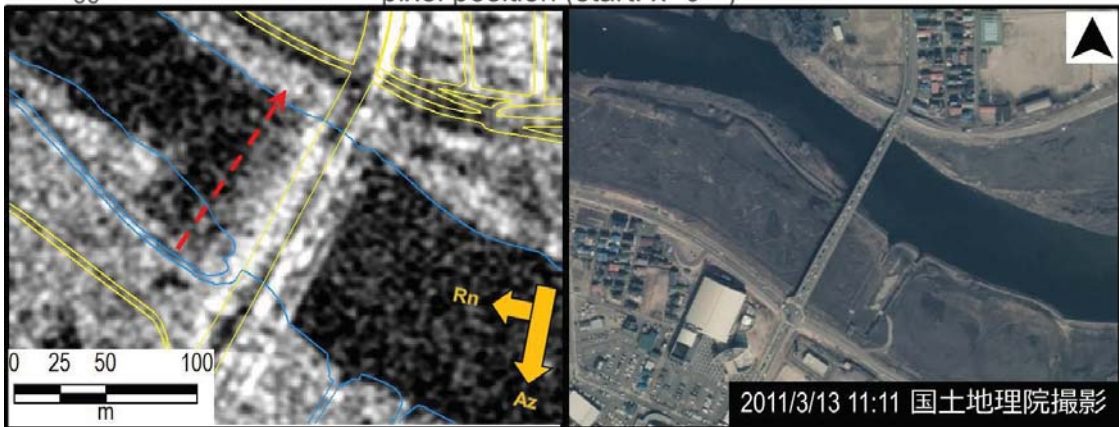
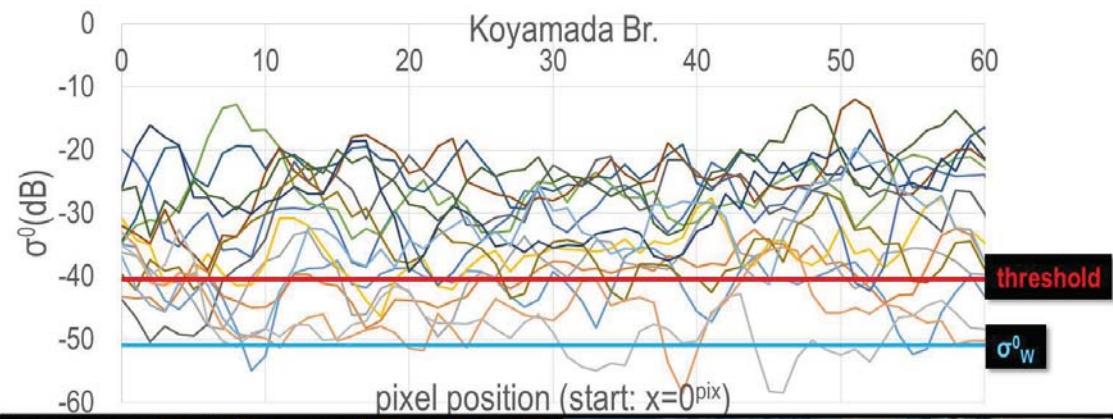


(f) 姉齒橋

図-3 プロファイル線で抽出し  $\sigma^0$  のグラフ, TSX 原画像, 国土地理院撮影の航空写真 (3)



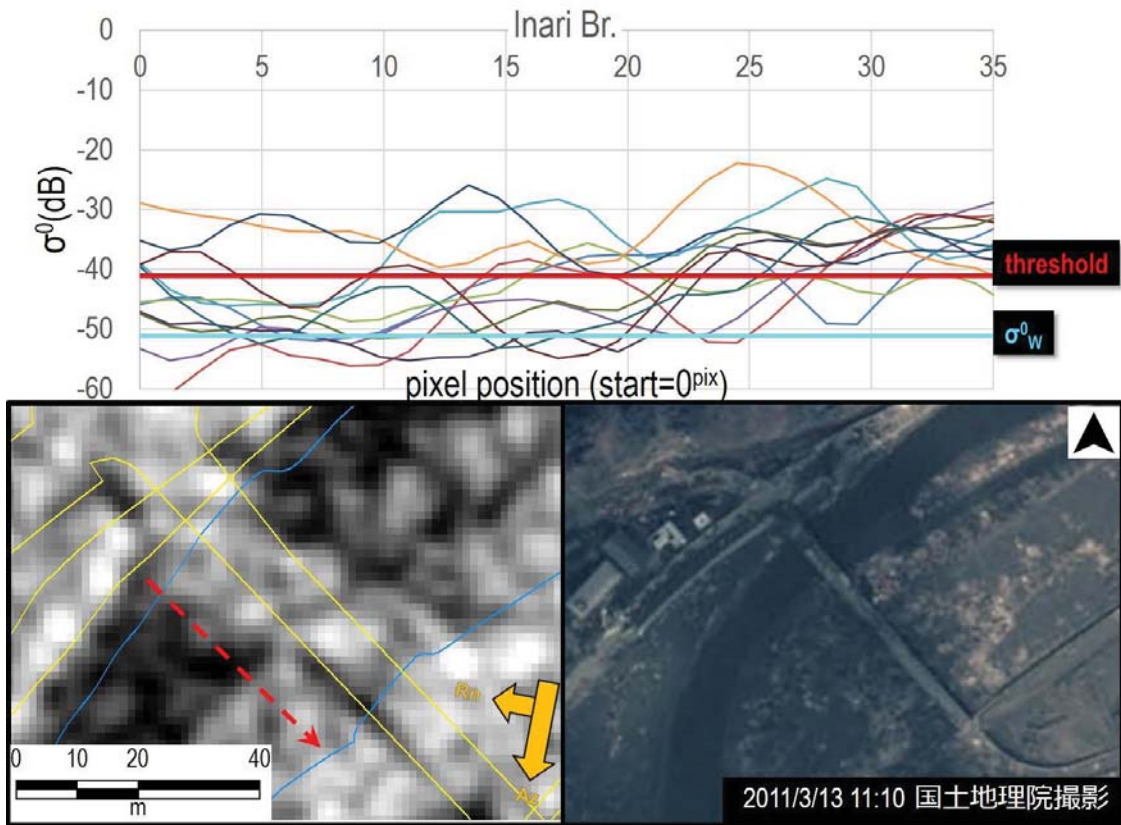
(g) 気仙大橋



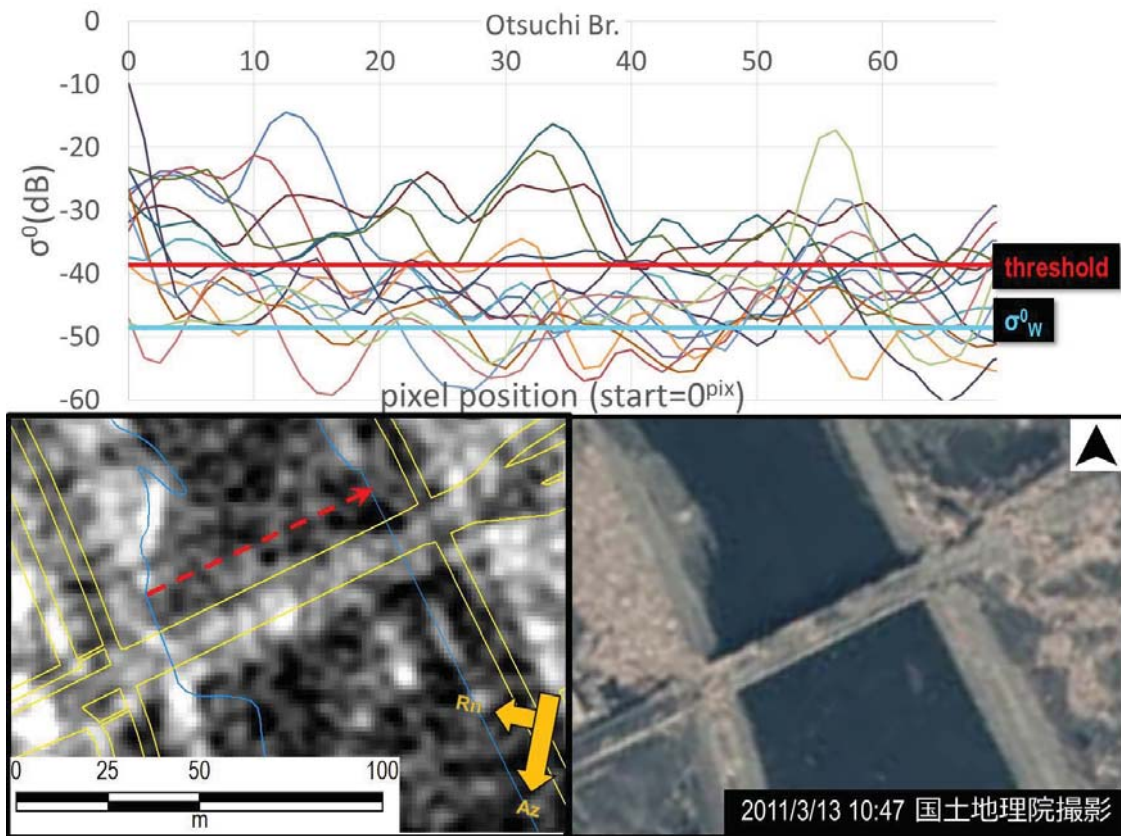
(h) 小山田橋

図-3 プロファイル線で抽出し  $\sigma^0$  のグラフ, TSX 原画像, 国土地理院撮影の航空写真 (4)





(i) 稲荷橋



(j) 大槌大橋

図-3 プロファイル線で抽出し  $\sigma^0$  のグラフ, TSX 原画像, 国土地理院撮影の航空写真 (5)

## 5. まとめと今後の課題

岩手県南部の沿岸部を対象地域として、東北地方太平洋沖地震の発生後2日目に緊急観測によって得られた一時期のSAR強度画像と発災前のGISデータを併用して、橋梁構造物の被害把握に向けた方法を提案した。橋軸方向にピクセルごとの後方散乱係数値の大きさを抽出し、水域の後方散乱の特徴を利用して、適切な閾値を設定することで橋桁の流失被害の抽出を試みた。得られた結果を光学センサ画像や被害報告書と比較することにより、その精度について評価した。閾値に関して、光学画像を参照し被害箇所を確認しながら、浮遊する瓦礫と水面の波が後方散乱に及ぼす影響を無視できるような水域内の $\sigma^0$ の範囲を目視で検討した。

本研究で得られた橋桁の流失被害の判定結果を、航空写真や被害報告書と比較したところ、計10橋梁のうち、9橋梁で橋桁の流失被害の有無を適切に判定できた。このことから、流失被害に限れば、本手法で橋梁の被害判別ができるといえる。一方で、橋桁は流失していないものの欄干が流失したことによる誤判別が1橋梁で発生した。この場合、橋梁被害が発生しているため、判定の定義を見直したい。また、プロファイル線で抽出した $\sigma^0$ をグラフ化すると、橋桁の流失箇所や残存した橋脚の位置を有意に確認できた。

提案した手法の課題は4点考えられる。1点目は、SAR強度画像における水域の散乱特性を利用して被害把握をしているために、橋桁の高水敷上部分を対象にしていない点である。また、高速道路の高架橋など陸橋である場合にも提案した手法を適用できない点である。堤防間（堤外地）の幅が大きい河川でも常時は低水路の幅が小さく高水敷の幅が大きい河川が多々存在する。したがって、今後はこうした場合の被害抽出方法についても検討を重ねていく。

2点目に、今回対象とした10橋梁の構造形式はすべて桁橋であったが、吊橋、斜張橋などの場合、今回提案した方法に大きく影響すると考えられる。今後は常時に超高解像度モードで撮影されたSAR強度画像を用いて、長さ、構造形式・材料、橋脚高さ・スパン、マイクロ波照射方向・波長と橋軸方向との関係、水面との位置関係を仔細に分析すると同時に、マイクロ波の空間変動特性について研究していく予定である。

3点目に、本手法では小規模な路面損壊、桁段差、盛土洗掘、瓦礫堆積といった被害については抽出できない。こうした被害の把握方法は多時期のSAR画像を用いた変化抽出や干渉SARを用いた3次元変化抽出が考えられるが、1時期のSAR強度画像を用いて検出する方法についても今後検討していく。

4点目に、橋梁の桁長が短い場合にはSAR強度画像の解像度のために正確な判別ができない点である。今後、超高解像度モードで撮影されたSAR強度画像を用いて適用範囲を広げる。

## 参考文献

- 1) Hasegawa, H., Yamazaki, F., Matsuoka, M., Sekimoto, I., Determination of building damage due to earthquakes using aerial television images, 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 8p, 2000.
- 2) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Yogai, H., Tsuchida, Y., Damage detection of expressways in the 2004 Niigata-Ken Chuetsu earthquake using aerial photographs, Proceedings of the 2nd Asia Conference on Earthquake Engineering, Manila, Philippines, CD-ROM, Paper No.IVC2, 11p, 2006.
- 3) Miura, H., Midorikawa, S. and Kerle, N., Detection of building damage areas of the 2006 Central Java, Indonesia earthquake through digital analysis of optical satellite images, Earthquake Spectra, 29(2), pp.453-473, 2013.
- 4) 庄司学, 高橋和慎, 中村友治: 2011年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた橋梁構造物の被害把握, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第6号(特集号), pp. 104-119, 2012.
- 5) Liu, W., Yamazaki, F., Gokon, H., Koshimura, S., Extraction of tsunami-flooded areas and damaged buildings in the 2011Tohoku-Oki Earthquake from TerraSAR-X intensity images. Earthquake Spectra, 29(S1), pp.183-200, 2013.
- 6) Inoue, K., Liu, W., Wieland, M., Sasagawa, T., Yamazaki, F., Analysis and evaluation of bridge damages using high-resolution SAR imagery, Proceedings 36th Asian Conference on Remote Sensing, CD-ROM, p19, 2015.
- 7) 加藤圭太, 山崎文雄: ALOS/PALSAR 画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震による水域の変化抽出, 日本地震工学会論文集, Vol. 10, No. 3, pp. 1-11, 2010.
- 8) 国土地理院, 地理院地図, 2015年12月1日閲覧, <http://maps.gsi.go.jp/>.
- 9) 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所: 東北地方太平洋沖地震による橋梁の被災調査概要報告, 2011.
- 10) 水工学委員会, 東日本大震災調査団報告書, 2015年12月1日閲覧, <http://rde.nhdr.niigata-u.ac.jp/jsce/>.
- 11) 岩手県沿岸広域振興局土木部, 町道新町末広町線安渡橋災害復旧工事, 2015年12月1日閲覧, <http://www.town.otsuchi.iwate.jp/docs/2014092300014/files/andobashi140917.pdf>.
- 12) 岩手県, 平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波災害に関する被害状況及び技術的な考察, 2015年12月1日閲覧, [https://www.pref.iwate.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/006/761/shiryuu\\_no5\\_1.pdf](https://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/006/761/shiryuu_no5_1.pdf).