



## 高分解能衛星 SAR 画像の変化抽出に基づく津波による橋梁被害把握

井上和樹<sup>1)</sup>, リュウ・ウエン<sup>2)</sup>, 山崎文雄<sup>3)</sup>

1) 非会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻, 大学院生

e-mail: kinoue@iis.u-tokyo.ac.jp

2) 正会員 千葉大学大学院工学研究院, 助教 博(工)

e-mail: wen.liu@chiba-u.jp

2) 正会員 千葉大学大学院工学研究院, 教授 工博

e-mail: fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

### 要 約

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の発生後,津波が繰り返し来襲したことにより多数の橋梁が甚大な被害を受けた.これによって道路網が寸断され,現地調査による早期の被害状況把握が困難となった.このような際,衛星画像は広範囲にわたる被害状況を現地に赴くことなく把握できる点から有用である.とくに合成開口レーダ(SAR)画像は雲や火煙の影響を受けず,昼夜撮影可能であるため緊急対応に適している.本研究では,津波により広範囲が被災した宮城県の沿岸部を対象地域として,発災前後の高分解能SAR画像を用いて,特定の橋梁領域に対して2時期の相関係数に閾値を設定し,被害有無の判別を試みた.その結果を被害報告書における橋梁の被災状況と比較して,本手法の精度と有用性を検討した.

キーワード: TerraSAR-X, 相関係数, 橋梁, 津波, 2011年東北地方太平洋沖地震

### 1. はじめに

地震災害の発生時には,道路網や鉄道網が寸断されることが多い.2011年東北地方太平洋沖地震の際には,岩手県や宮城県の沿岸部において,津波により多数の道路橋や鉄道橋が流出または損壊した<sup>1)3)</sup>.加えて,津波による瓦礫の堆積や湛水による区間閉塞も広範囲に及んだ.災害発生時における応急対応活動において道路の役割は極めて大きく,通行不能となった区間や橋梁の位置を把握し,迅速な啓開や迂回ルートの設定が求められる.一方で,東北地方太平洋沖地震の際には,発生後2日目まで津波警報が継続していたことから,現地状況の把握は容易ではなかった.このような大規模災害の際,最近進歩が目覚ましいリモートセンシング技術は有力な手段の1つと考えられ<sup>4)6)</sup>,現地調査との相互補完を図ることによって,被害把握はより正確で迅速なものとなり得る.

リモートセンシングにおいては,プラットフォームとセンサが重要な2つの要素である.プラットフォームは衛星と航空機が主なものであり,ごく最近,無人航空機(ドローン,UAV)も大きなブームになっている.これらのうち,衛星は広域性,周期性に優れ,多時期画像の変化抽出によって,災害による影響を把握することが可能である.衛星に搭載されるセンサは,光学(可視・近赤外)センサ,熱赤外センサ,合成開口レーダが主なもので,近年,いずれも災害把握への利用が進んでいる.光学セン

サは、Landsatで代表される中解像度衛星では、市街地レベルでの被害把握が限界であった<sup>7)</sup>。しかし、IkonosやQuickBirdなどの高解像度衛星が登場して以来、建物一棟レベルでの被害把握にも利用されている<sup>8)-10)</sup>。また庄司ら<sup>1)</sup>は、2011年東北地方太平洋沖地震の津波作用により流出した橋梁主桁の流出距離、洗掘した橋台背面盛土の流出面積をGoogle Earth上の光学衛星画像から分析し、結果を現地調査書の被害データと比較し評価している。熱赤外センサはASTERやLandsatなどの衛星に搭載され、その画像は津波や洪水による浸水域の把握<sup>11), 12)</sup>などに利用されているが、解像度は60-90mと光学センサと比べると大幅に低く、個別構造物の被害把握への利用は難しい。またこれらのセンサは天候に左右され、災害発生後、雲量が少ない画像が早期に撮影できない場合も多く、火災による煙によっても地表面の撮影が妨げられることもある。

一方、合成開口レーダ (SAR) は衛星からマイクロ波を能動的に照射し、その反射波を観測する機構であるため、全天候型で日照や火煙の影響を受けず、災害発生時の撮影機会に恵まれている。10-30m程度の中解像度のSAR画像に基づいて、松岡ら<sup>13)-15)</sup>は市街地レベルの地震被害把握を行っている。衛星SARに関する最近解像度の向上が目覚ましく、TerraSAR-X (TSX)やCOSMO-SkyMed (CSM)などの地上解像度1-5mの高分解能SAR衛星が登場し、これらからによる強度画像を用いて、地殻変動の抽出<sup>16)</sup>、浸水域の抽出<sup>17)</sup>、建物被害の把握<sup>17)-20)</sup>などが既に行われている。

しかし、SAR画像から橋梁を抽出しその状況を把握しようという研究は、画像の解像度や周辺環境に左右され容易でないことから、未だ数少ない。例えばSoergelら<sup>21), 22)</sup>は、平時の橋梁を対象に、Xバンドの航空機SAR画像を用いて、床版、高欄、側面、底面に反射するマイクロ波と水面の鏡面反射特性の分析から、倒れ込み (layover)、2回反射 (double-bounce)、3回反射 (triple-bounce) に関する後方散乱特性の分析を行っている。また、2008年中国四川地震を対象として、TSXやCSMなどの高分解能衛星SAR画像を用いて橋梁被害を判読しようという試みも見られるが<sup>23)</sup>、事前画像の有無、橋梁に対するマイクロ波の入射角などの撮影条件、橋梁の形状寸法などにより、被害抽出は容易ではない。

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波の前後2時期に撮影された解像度約3mのTSX強度画像を用いて、橋梁の領域における後方散乱係数の変化から、津波による橋梁被害状況の把握を試みる。この結果を地震前後の航空写真や現地被害調査結果と比較することにより、SAR画像の2時期変化による橋梁被害抽出の可能性について検討する。

## 2. 対象地域と使用データ

本研究では、図1に示す宮城県の仙台・石巻平野を地震発生前後に撮影した2時期のTSX画像を用いた。事前画像は日本時間2010年10月21日の午前5時43分に、事後画像は2011年3月13日 (地震後2日目)の午前5時43分に撮影されている。観測角度は37.30°、パス角度は北から時計周りの190.29° (下降軌道) であり、StripMapモード、HH偏波で観測されたものである。解像度はアジマス方向が約3.5m、レンジ方向が約3.3mである。なお使用した画像は、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。これらのTSX画像は、文献<sup>17), 20)</sup>において津波湛水域と建物被害の抽出に用いたものと同一である。

変化抽出を行う前に、3つの前処理を実行した。まず1番目に、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<sup>24)</sup>。2番目に、スペックルノイズの除去のためEnhanced Leeフィルタ<sup>25)</sup>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3×3ピクセルを採用した。3番目に、地殻変動の影響を考慮した位置補正を行った。3月11日発生のMw9.0の本震と、その後の余震により、東北地方を中心に広範囲で著しい地殻変動が発生した。国土地理院が全国に設置する電子基準点(GEONET)の記録によれば、本震直後に最大で水平方向に約5.3m、上下方向に約1.2mという極めて大きな地殻変動が観測された<sup>26)</sup>。対象地域内に設置されている電子基準点は4箇所であり、3月13日までに観測された水平移動は、矢本基準点では東へ3.24m、南へ1.06m、利府では東へ2.77m、南へ0.73m、名取では東へ2.73m、南へ0.61m、亘理では東へ2.45m、南へ0.42mの移動が確認されている (表1)。そのため本研究では、事前画像全体を均一に右 (東) へ2ピクセル (2.5m)、下 (南) へ1ピクセル (1.25m) 移動し、地殻変動量を概ね打ち消すように簡易的な位置補正を行った<sup>17)</sup>。

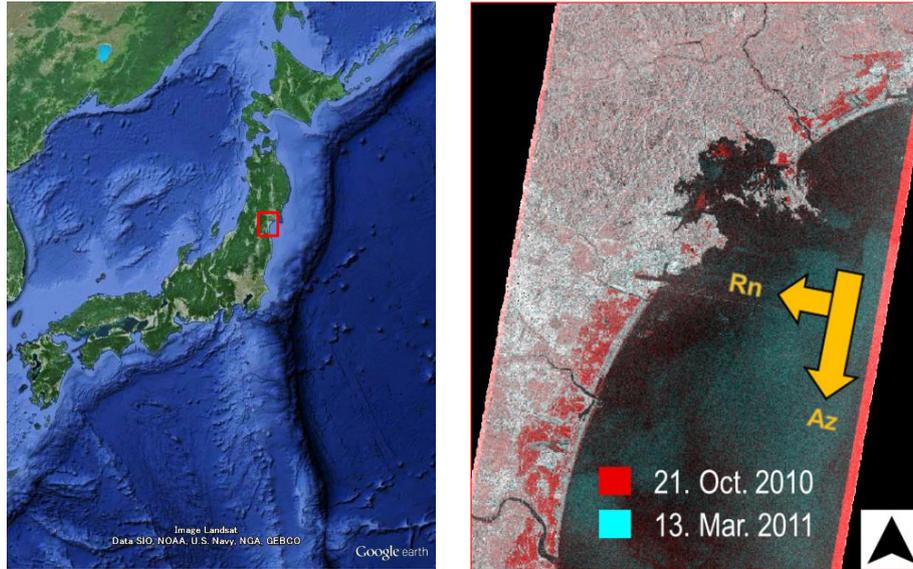


図1 Google Earth上で示した対象地域（赤四角）と使用したTSX画像のカラー合成（赤色：2010年10月21日撮影，シアン色：2011年3月13日撮影）

表1 対象地域内の各電子基準点で検出された地殻変動量

期間	矢本		利府		名取		亘理	
	東	南	東	南	東	南	東	南
2010/10/21 - 2011/3/13	3.24m	1.06m	2.77m	0.73m	2.73m	0.61m	2.45m	0.42m

### 3. 橋梁被害の検出手法

本研究では流出・大被害橋梁として表2に示す9橋梁を対象とする。文献<sup>27)</sup>で流出被害があったとされる橋梁のうちTSX画像の範囲内には6橋梁が存在した。またここでは橋梁が未流出とされているが、国土地理院の航空写真<sup>28)</sup>や宮城県の調査<sup>29)</sup>では背面盛土の流出が認められる1橋梁（橋梁No.160），湛水が認められ通行が不可能であると推定できる1橋梁（橋梁No.162），大規模な津波堆積物が認められ通行が不可能である1橋梁（橋梁No.169）についても大被害橋梁として扱った。本研究では、通行不能となった橋梁の早期把握を目的としているため、落橋や桁流出に加えて、橋台背面の盛土流出も大被害と見なした。また、無・小被害の橋梁としては、航空写真で被害が見受けられない比較的橋長の長い橋梁を対象とし、定川、鳴瀬川、高城川、砂押川、七北田川、名取川、広瀬川、阿武隈川を横過する49橋梁を選択した。以上の全58橋梁について（図2），GISデータに基づいて橋梁領域を設定し、各領域内のSAR強度画像の変化抽出を試みた。

地震前後2時期のTSX画像を用いて、式(1)，(2)で示す後方散乱係数の差分 $d$ と相関係数 $r$ を算出する。

$$d = \bar{I}b_i - \bar{I}a_i \quad (1)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I a_i I b_i - \sum_{i=1}^N I a_i \sum_{i=1}^N I b_i}{\sqrt{\left( N \sum_{i=1}^N I a_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N I a_i \right)^2 \right) \cdot \left( N \sum_{i=1}^N I b_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N I b_i \right)^2 \right)}} \quad (2)$$

ここで、 $i$ はピクセル数、 $I a_i$ と $I b_i$ は事前と事後の画像における後方散乱係数、 $\bar{I}$ は $N$ ピクセルのウィンド

ウ内における後方散乱係数の平均値である。

SAR画像の解像度，対象橋梁の規模を考慮して，ウィンドウサイズとして9×9ピクセル（126.6m<sup>2</sup>）を設定した．図3に算出された差分値と相関係数を半透明化した事後SAR画像上に示す．

表 2 対象とした大被害橋梁の橋長，全幅員，桁高，桁下高，橋種，竣工年，被害区分<sup>27)</sup>

橋梁 No.	橋梁名	橋長 (m)	全幅員 (m)	桁高 (m)	桁下高 (m)	橋種	竣工年	流出有無
159	定川大橋	126.00	11.75	2.10	4.06	PC-T 桁	1989	流出
160	松ヶ島橋	45.49	6.80	0.90	2.10	PC-T 桁	1964	未流出
162	橋本橋	5.80	7.00	0.68	1.32	RC 床版橋	1959	未流出
163	不明	34.00	6.80	0.47	0.60	鋼 H 桁	不明	流出
164	盆谷地砂山線 1 号橋	10.80	4.30	0.35	0.65	PC 床版橋	1985	流出
165	二郷橋	31.90	6.80	0.73	0.62	鋼 H 桁	1969	流出
166	開運橋	31.00	3.30	1.50	0.50	鋼 I 桁	不明	流出
168	不明	16.90	3.70	0.90	0.50	RC 床版橋	不明	流出
169	マリンレインボーブリッジ	238.00	4.00	0.75	2.25	PC 床版橋	1993	未流出

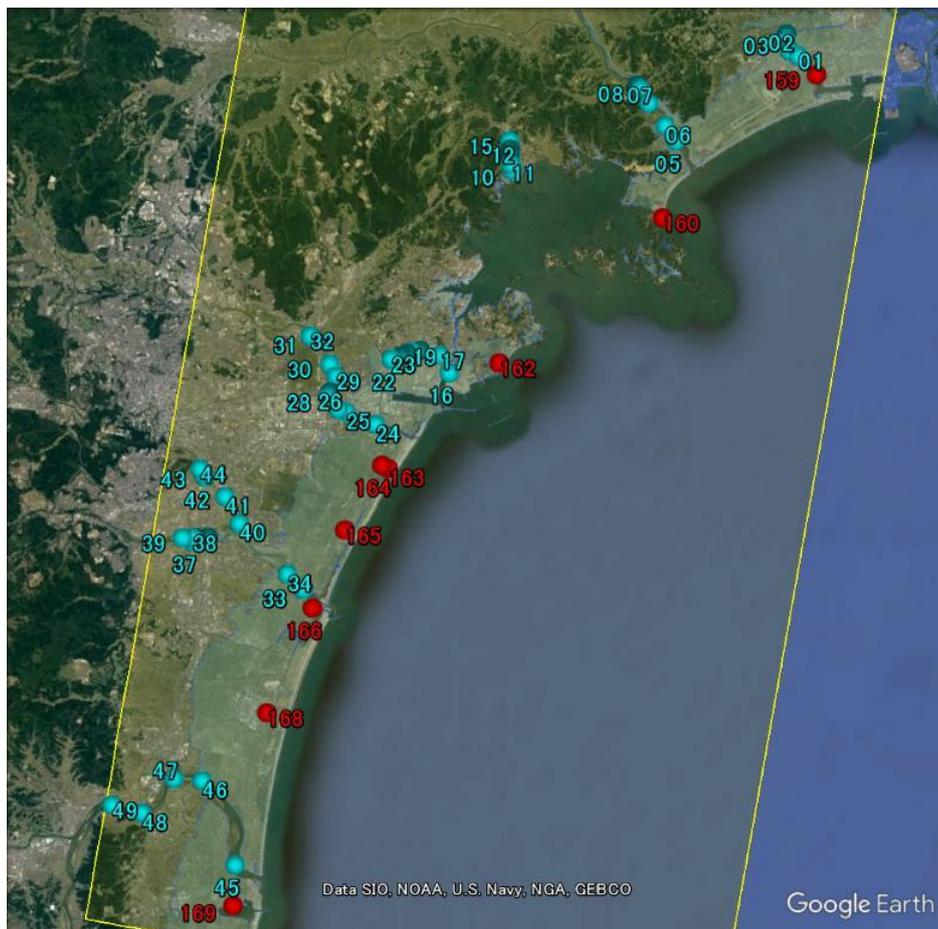


図 2 Google Earth 上に表示した全 58 の対象橋梁．青丸印の無・小被害 49 橋梁は北東から順に番号を振った．赤丸印の大被害橋梁の番号は文献<sup>27)</sup>に従う．

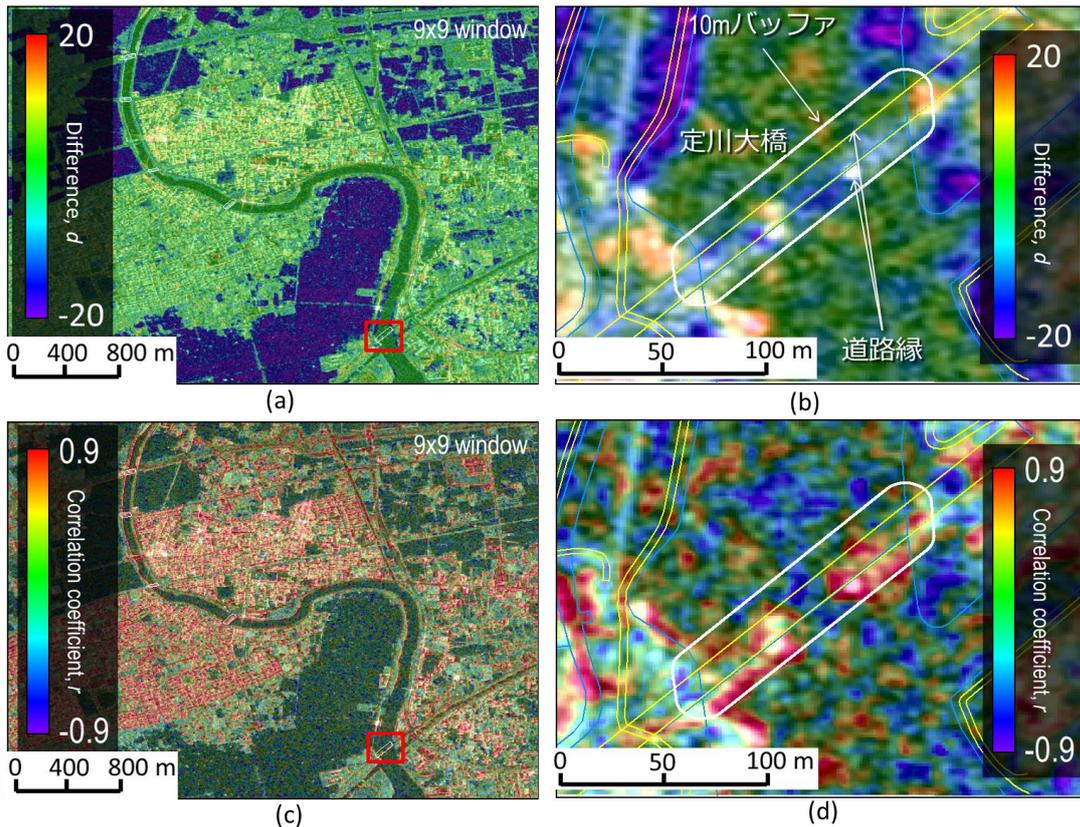


図3 定川大橋付近の後方散乱係数の差分(a, b)と相関係数(c, d). 拡大図(b, d)では抽出された道路縁輪郭に10mの外周バッファを設けた橋梁領域を描画した

図3に示す定川大橋 (No.159) の差分値画像と相関係数画像を例に挙げて橋梁被害の分類方法を示す. GISデータとして国土地理院にて公開されている基盤地図情報<sup>30)</sup>を利用した. 道路橋については, 水涯線・海岸線と道路縁のデータセットを利用して橋梁輪郭 (ポリゴン) を抽出した. 鉄道橋については水涯線・海岸線と軌道の中心線のデータセットを利用して橋梁中心線 (ライン) を抽出した. SAR画像上の橋梁では, SARの斜め観測の特性により橋軸方向と観測角度の関係によって, 上部工の倒れ込みや二回反射, 三回反射が発生する<sup>31)</sup>. 本研究ではこれらの現象を考慮し, 橋梁輪郭, 及び橋梁中心線の外側に10mのバッファを設定し, 図3では白枠で示すような橋梁領域を作成した. なおこの10mの橋梁輪郭の外周バッファは, 橋桁の倒れ込み領域とレーダ影の範囲を概ね含むように設定した. 具体的には, 大被害橋梁のうち幅員と桁下高が最大の定川大橋の場合, 桁上端から河川水面までの距離は, 表2の桁高と桁下高<sup>32)</sup>の和の6.16mとなる. したがってレーダ入射角を考慮すると<sup>33)</sup>, 桁の水面への倒れ込み長は8.09m, レーダ影長は4.69mとなり, とともに設定バッファ長10mに充分含まれる. 無被害橋梁の場合は, 河川の上流にあるため桁下余裕高<sup>32)</sup>はこれよりさらに小さいと考えられるため, このバッファは今回の検討地域においては十分な大きさといえよう. この橋梁領域内で, 事前画像から事後画像にかけての後方散乱係数の差分, 相関係数の平均を算出する. この際, 橋梁領域内には, 橋台背面盛土の一部を含むことになる点に注意されたい.

#### 4. 結果と考察

9本の大被害橋梁について, 津波来襲前後の強度画像と航空写真<sup>28)</sup>, 及び詳細な状況写真<sup>29), 34)</sup>を図4に示す. また, 表3に示した橋梁領域ごとに得られた差分値と相関係数の平均値について, 図5に散布図を示す. なおこの図中では, 無・小被害橋梁を青丸印, 大被害橋梁を赤三角形印で示す. また, 無・小被害橋梁の平均値を黒丸印, 大被害橋梁の平均値を黒三角形印で示し, 各標準偏差をエラーバーで示す.

大被害 橋梁No.	TerraSAR-X画像		航空写真(国土地理院)		現地写真 <sup>a)</sup> , GSI斜め 写真 <sup>b)</sup> と写真保存プ ロジェクト <sup>c)</sup>
	2010/10/21	2011/3/13	2006/10/31	2011/3/13	
159					
160					
162					
163					
164					
165					
166					
168					
169					

図4 9本の大被害橋梁における津波襲来前後のTSX画像, 航空写真<sup>28)</sup>, 参照写真<sup>29), 34)</sup>  
(TSX画像上の黄色線は橋梁領域を示す)

表3 対象橋梁の領域内で算出された差分値と相関係数

大被害橋梁			無・小被害橋梁			橋梁 No.			橋梁 No.					
橋梁 No.	d[dB]	r	橋梁 No.	d[dB]	r	d[dB]	r	橋梁 No.	d[dB]	r	橋梁 No.	d[dB]	r	
159	-3.58	0.41	1	0.59	0.68	18	0.60	0.76	35	1.35	0.43	36	-0.31	0.67
160	1.63	0.22	2	-1.16	0.78	19	2.61	0.32	37	-0.27	0.70	38	-1.32	0.37
162	3.35	-0.06	3	-0.75	0.79	20	-1.06	0.62	39	-0.31	0.46	40	-2.74	0.33
163	-1.16	0.57	4	-0.28	0.63	21	0.14	0.71	41	-0.12	0.54	42	0.27	0.41
164	-3.47	0.38	5	-0.31	0.55	22	2.43	0.64	43	-1.42	0.58	44	-0.79	0.76
165	-11.55	-0.09	6	0.11	0.71	23	-1.58	0.63	45	-1.66	0.46	46	-0.13	0.88
166	-11.96	-0.16	7	1.35	0.43	24	-0.28	0.73	47	0.10	0.47	48	-1.39	0.44
168	-5.10	-0.11	8	-0.31	0.67	25	-0.12	0.54	49	-1.38	0.37	平均	-0.24	0.61
169	1.43	0.47	9	-0.27	0.70	26	0.59	0.71	標準偏差	1.18	0.15			
平均	-3.38	0.18	10	0.07	0.68	27	-0.86	0.83						
標準偏差	5.18	0.27	11	1.13	0.75	28	-0.34	0.37						
			12	0.33	0.79	29	2.01	0.69						
			13	-0.31	0.56	30	-0.30	0.68						
			14	-1.48	0.60	31	-0.23	0.88						
			15	-4.34	0.42	32	0.75	0.77						
			16	0.42	0.47	33	-0.31	0.55						
			17	-0.38	0.59	34	0.11	0.71						

まず差分値については、大被害があった9橋梁の平均値は-3.38dB、標準偏差は5.18dBとなった(表3)。一方、無・小被害の49橋梁の平均値は-0.24dB、標準偏差は1.18dBであった。散布図からも見受けられるように、大被害の9橋梁は、無・小被害の49橋梁に比べ、差分値のばらつきが大きい。橋梁構造物が津波被害を受けた場合、その被害種別によって後方散乱は2種類の傾向が想定される。第一に、主桁や橋脚、橋台背面盛土、欄干が津波作用によって流出した場合、橋梁領域内の後方散乱係数は小さくなると考えられる。これは、水域の強度が橋梁より極めて低いためである。第二に、主桁、床版が残存して路面に津波堆積物が滞留した場合には、後方散乱係数が大きくなると考えられる。今回の抽出結果においても、大被害橋梁における差分値がばらついて、標準偏差が無・小被害橋梁と比べて大きい値を示した。以上から、差分値を扱うことは、大被害橋梁の被害形態の把握や、目視による被害箇所の判読において有用であるといえよう。

次に、相関係数に関しては、大被害橋梁の平均値は0.18、標準偏差は0.27であった。一方、無・小被害橋梁の平均値は0.61、標準偏差は0.15であった。相関係数は、津波被害を受け主桁、橋台背面盛土、欄干が流された場合や、津波堆積物が滞留した場合、事前画像と事後画像の相関が小さくなり、低い値を示している。

図4に示すように、橋梁No.159, 165, 166, 168では、事前画像において主桁による高い後方散乱が見られ、事後画像では流出した部分の散乱強度が低くなった。差分値は-11.96dB~-3.58dBと負の値を示し、相関係数は-0.16~0.41と比較的小さい値を示した。橋梁No.160では、背面盛土の流出状況が事後画像で明瞭に判読でき、流出箇所の一部が橋梁領域内に含まれる。一方で、主桁上には瓦礫が滞留している。差分値は1.63dBと高い値を示し、相関係数は0.22と低い値を示した。橋梁No.162は橋長が小さいことと、事後画像が撮影された時点で橋梁全体が浸水していることから、SAR画像上での判読が困難である。差分値は3.35dBと高い正値が示され、相関係数は-0.06と低い値が示された。これは湛水により瓦礫が滞留しているためであると推察される。橋梁No.163と164では、事後画像の主桁流出箇所に瓦礫が滞留していることから、SAR画像上でも変化を見ることが難しかった。差分値はそれぞれ-1.16dB, -3.47dBと低い値を示し、相関係数はそれぞれ0.57と0.38であった。橋梁No.169では、橋梁上に自動車や建物が残留している。差分値は1.43dBであり、瓦礫の影響により事後画像における後方散乱の増加が認められる。相関係数は0.47となり、無・小被害橋梁の相関係数の平均と比べると低い値となった。他方、図5から読み取れるように、無・小被害橋梁については、事前から事後にかけての後方散乱係数の変化は比較的小さく、相関係数も0.4程度以下には下がっていない。

これまで2時期のSAR強度画像に基づく建物被害抽出に関しては、差分と相関係数の2つの指標を組合せた方法が行われてきた<sup>13)-15),17)</sup>。しかし、相関係数単独の方が被害/無被害をよく区分するケー

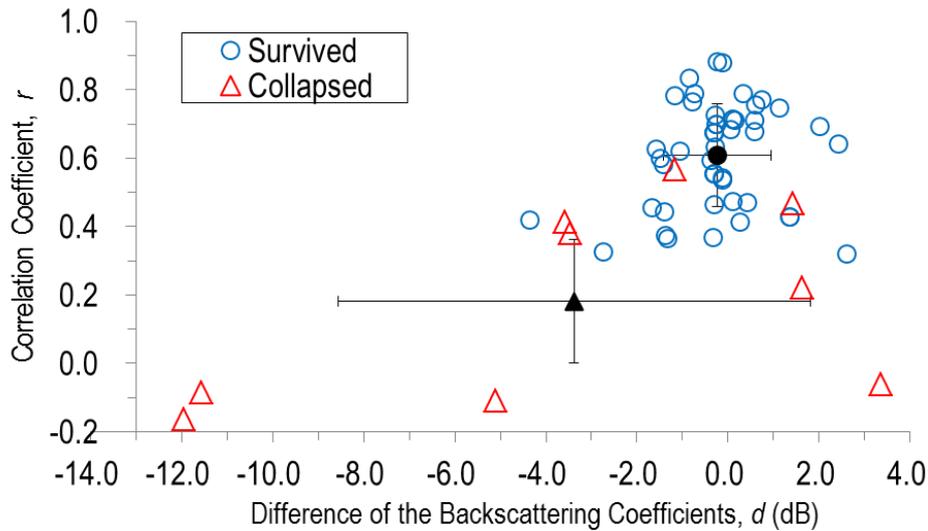


図5 大被害橋梁と無・小被害橋梁の後方散乱係数の差分と相関係数の散布図

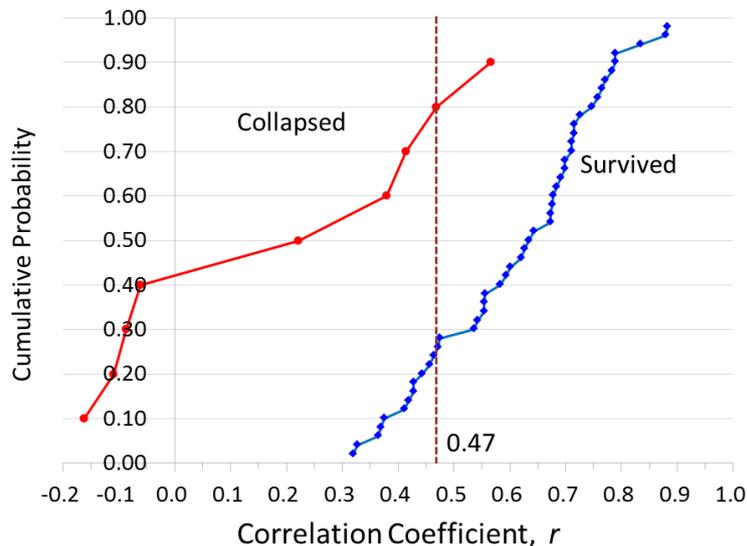


図6 大被害橋梁と無・小被害橋梁の相関係数の累積確率

スもあった<sup>35)</sup>。今回の橋梁被害抽出においては、橋梁の構造形式や形状、周辺環境、被害形態などによって、被災橋梁の差分値に大きなばらつきがあった。したがってここでは、相関係数に閾値を設定し、被害の有無を推定することにした。被害橋梁と無被害橋梁に関して、個々の橋梁領域の相関係数の平均値の累積分布を図6に示す。ここで $i$ 番目のプロットング点の累積確率は、サンプル数を $n$ として、 $i/(n+1)$ とした<sup>36)</sup>。この分布より、被害の有無を分ける最も適切な相関係数の閾値の決定を試みる。

相関係数の閾値を-0.2から1.0まで連続的に動かしたとき、大被害橋梁および無・小被害橋梁の各抽出率(Producer's Accuracy)の変化と、2つの抽出率の和を図7に示す。これより相関係数の閾値を0.47とした場合、抽出率の和が最大となることが分かった。したがってここでは、この値を橋梁範囲の被害検出のための相関係数の閾値とすることにした。図6にもこの閾値をプロットしたが、被害橋梁の見逃しを1橋と少なくしたうえで、無被害(残存)橋梁を被害橋梁と見なす空振りを49本中12本と少なくするバランスの取れた閾値であることが読み取れる。

この相関係数の閾値を用いて、対象橋梁全体を区分した場合のエラーマトリックスを表4に示す。抽出率の和を最大とする方針を採ったため、9本の大被害橋梁のうち8本が適切に抽出され(88.9%)、49

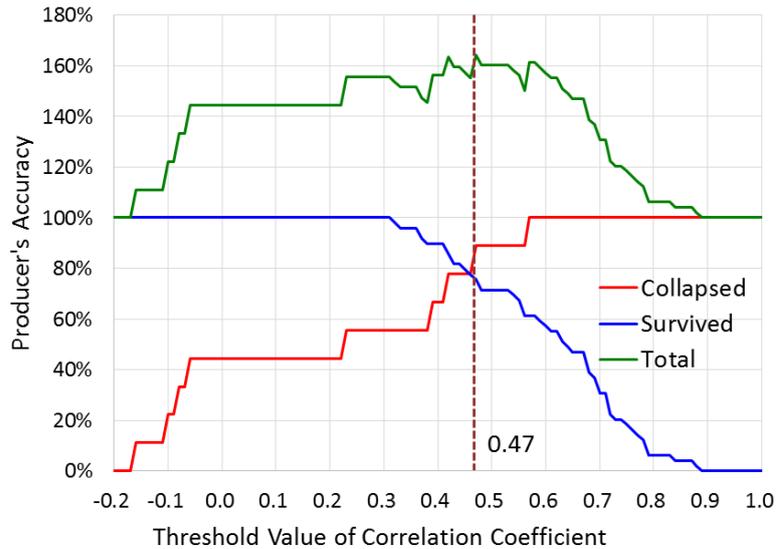


図7 相関係数の閾値を-0.2から1.0まで動かしたときの大被害および無・小被害橋梁に対する抽出率の変化とその和. 閾値を0.47に設定した時, 抽出率の和が最大となる.

表4 相関係数の閾値(r=0.47)による分類のエラーマトリックス

		Reference Data			User's Accuracy
		Collapsed	Survived	Total	
SAR Image Interpretation	Collapsed	8	12	20	0.400
	Survived	1	37	38	0.974
	Total	9	49	58	
Producer's Accuracy	Collapsed	0.889	0.755		
	Overall Accuracy			0.776	
	Kappa Coefficient			0.430	

本の無・小被害橋梁のうち37本が抽出された(75.5%)。一方,抽出した結果の正答率(User's Accuracy)に関しては,無・小被害橋梁の数が大被害橋梁の数より5倍以上多いため,この橋梁データセットで大被害と判定されたものの正答率は40.0%と低い値となり,無・小被害と判定されたものの正答率は97.4%と高い値となった。以上の結果より,58橋梁に対してSAR画像を用いて大被害と無・小被害の2つに分類する総合精度(見かけ上の一致率)は77.6%という値になった。しかし,分類の数が2つと少ないため,総合精度は「偶然による一致率」をかなり含んでいると考えられる。そこでこれを除去したカッパ係数<sup>37)</sup>(Kappa coefficient)を計算したところ0.430となった。この値は通常,中程度の一致(moderate agreement)<sup>38)</sup>と判断されるレベルのものであり,今回使用した橋梁データの選択と2時期のSAR画像に基づく被害抽出法に,さらなる改善の余地があることを示しているといえよう。

本研究では, GISデータの精度と橋梁の倒れ込み範囲を考慮して, GISデータから抽出された橋梁輪郭と橋梁中心線に10mのバッファを一律に設定し, 橋梁領域を作成し平均値を算出した。使用した2時期のSAR画像は約5ヶ月間離れており, 秋から冬への季節変化とともに地表面の植生が大きく変化したことが推測できる。そのため, バッファを設定する本手法では, 橋梁構造物以外に, 地表面の植生の変化を抽出した可能性も否定できない。これらの誤差要因の少ない2時期画像を用いることができれば, 被害橋梁の抽出精度はさらに向上するであろう。また, 同じ条件で撮影された事前SAR画像が存在しない場合も多く, 事後SAR画像と事前GISデータからの被害抽出<sup>39)</sup>も今後の課題といえよう。

## 5. まとめと今後の展望

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に津波の来襲により被害を受けた橋梁に関し、橋梁領域内における TerraSAR-X 強度画像の後方散乱係数の変化による判別を試みた。GISデータの道路縁および水涯線のデータを用いて橋梁輪郭を抽出し、それに10mのバッファを設定することで橋梁領域を作成した。橋梁領域内で后方散乱係数の差分と相関係数の値を計算し、被害の有無による傾向の違いにより分類を試みた。使用した SAR 画像の範囲内に存在する橋長の長い9本の大被害橋梁と49本の無・小被害橋梁を対象として、差分と相関係数の分布を考慮して相関係数に閾値を与えることで、大被害橋梁を抽出した。その結果、相関係数の閾値を0.47とした場合、大被害橋梁と無・小被害橋梁のそれぞれの抽出率の和を最大化することができ、総合精度は0.776、カッパ係数は0.430となった。

しかし、大被害橋梁を抽出する相関係数の閾値は、橋梁の形式や形状寸法、被害の形態と程度、瓦礫の散乱状況や橋桁と水面との位置関係などの環境条件、マイクロ波の撮影条件、波長、偏波、空間分解能、橋軸方向とマイクロ波レンジ方向との相対角度など、多数の条件に依存するものと考えられる。今回の閾値は、個別橋梁の早期被害推定法としては、分解能3m程度のXバンド SAR 画像における大被害に対する目安を与えるものといえようが、今後、様々な被災橋梁に対する同様の検討事例をさらに蓄積する必要がある。

本研究では、相関係数に関し閾値を設定して分類を試みたが、差分値に関しても被害状況により利用することも考えられる。また、橋長が長い橋梁で被害箇所が小規模な場合、本手法では橋梁領域内の平均値を扱うため有意な分類が行われない可能性が認められた。今後はテクスチャ分析など他の解析手法を合わせることで、被害検出の精度向上を目指したいと考える。また本手法では、水涯線・海岸線データを利用して橋梁の輪郭・中心線を抽出したが、平時、水量が少なく堤防間に比して水域が狭い河川では橋梁全体の輪郭・中心線を抽出できない。今回の対象地域は沿岸部であり水域の幅が比較的広がったが、沿岸部以外においても適用できるように手法を改善していきたい。GISデータなどを用い橋梁の領域が作成されれば、本手法による被害検出は幅広いケースに適用可能である。今後は精度と汎用性の向上を目指して、さまざまな災害事例を対象にして、検証を重ねる予定である。

## 謝辞

本研究で使用した TerraSAR-X 画像は、ドイツ宇宙航空センター (DLR) の所有であり、GEO's Geohazard Supersites (<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>) を通じて提供を受けた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 国土技術政策総合研究所: 平成24年度道路調査費等年度報告, 国総研資料第766号, 2013.
- 3) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会: 東日本大震災合同調査報告, 共通編 2 津波の特性と被害, 土木学会, 2014.
- 4) Rathje, E., and Adams, B.J.: The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering, Opportunities and Challenges, Earthquake Spectra, 24(2), pp. 471-492, 2008.
- 5) Eguchi, R.T., Huyck, C., Ghosh, S., and Adams, B.J.: The Application of Remote Sensing Technologies for Disaster Management, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 2008.
- 6) 山崎文雄: リモートセンシングの防災利用の最新動向, 土木技術, Vol. 68, No.12, pp. 9-14, 2013.
- 7) 松岡昌志, 山崎文雄, 翠川三郎: 1995年兵庫県南部地震での被害地域における人工衛星光学センサ画像の特徴, 土木学会論文集, No. 648/I-54, pp. 177-185, 2001.
- 8) Saito, K., Spence, R.J.S., Going, C., and Markus, M.: Using High-Resolution Satellite Images for Post-Earthquake Building Damage Assessment: A Study Following the 26 January 2001 Gujarat Earthquake. Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 1, pp. 145-169, 2004.
- 9) Meslem, A., Yamazaki, F., and Maruyama, Y.: Accurate evaluation of building damage in the 2003

- Boumerdes, Algeria earthquake from QuickBird satellite images, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 5, No. 1, pp.1-18, 2011.
- 10) 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.
  - 11) 外岡秀行：ASTER夜間熱赤外面像に見る東日本大震災，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 31, No. 3, pp. 334-337, 2011.
  - 12) 花田大輝，山崎文雄：ASTER熱赤外面像を用いた2011年東日本大震災における津波被害把握，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 6(特集号), pp. 63-72, 2012.
  - 13) 松岡昌志，山崎文雄：1995年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星SAR強度画像の特徴，日本建築学会構造系論文集，No. 546, pp. 55-61, 2001, 2001.
  - 14) 松岡昌志，能島暢呂：人工衛星LバンドSARに基づく建物の地震被害推定モデルの構築とALOS/PALSAR画像への適用，日本地震工学会論文集，Vol. 10, No. 3, pp.73-86, 2010.
  - 15) 松岡昌志，Miguel Estrada：2007年ペルー地震の被災地を観測したALOS/PALSAR画像による建物被害推定モデルの構築，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 6(特集号), pp.36-49, 2012.
  - 16) リュウ・ウエン，山崎文雄：2011年東北地方太平洋沖地震前後のTerraSAR-X強度画像を用いた地殻変動の検出，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 4(特集号), pp. 3-13, 2012.
  - 17) リュウ・ウエン，山崎文雄，郷右近英臣，越村俊一：高解像度SAR 画像を用いた東北地方太平洋沖地震における津波湛水域と建物被害の抽出，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 6(特集号), pp. 73-85, 2012.
  - 18) Brunner, D., Lemoine, G., and Bruzzone, L.: Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 5, pp. 2403-2420, 2010.
  - 19) Miura, H., Midorikawa, S., and Matsuoka, M.: Building Damage Assessment Using High-Resolution Satellite SAR Images of the 2010 Haiti Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 32, No. 1, pp. 591-610, 2016.
  - 20) Wieland, M., Liu, W., and Yamazaki, F.: Learning change from Synthetic Aperture Radar images: Performance evaluation of a Support Vector Machine to detect earthquake and tsunami-induced changes, *Remote Sensing, MPDI*, 8(10), 792, doi:10.3390/rs8100792, 2016.
  - 21) Soergel, U., Cadario, E., Thiele, A., and Thoennessen, U., Extraction of bridges over water in multi-aspect high-resolution InSAR data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 3, pp. 185-190, 2006.
  - 22) Soergel, U., Gross, H., Thiele, A., and Thoennessen, U., Feature extraction and visualization of bridges over water from high-resolution InSAR data and one orthophoto, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(2), pp. 147-153, 2008.
  - 23) Balz, T., Perissin, D., Soergel, U., and Liao, M.S.: Post-seismic infrastructure damage assessment using high-resolution SAR satellite data, *Proceedings of 2nd International Conference on Earth Observation for Global Change*, Chengdu, China, May 25-29, 2009.
  - 24) Airbus Defence and Space: Radiometric Calibration of TerraSAR-X Data, [http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r465\\_9\\_tsx-x-itd-tn-0049-radiometric\\_calculations\\_i3.00.pdf](http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r465_9_tsx-x-itd-tn-0049-radiometric_calculations_i3.00.pdf) (参照 2017-6-1)
  - 25) Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq P., and Oosterlinck, A.: Speckle filtering of synthetic aperture radar images, A review, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 8, No. 4, pp.313-340, 1994.
  - 26) 国土地理院：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震に関する対応（GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動），<http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html> (参照 2017-6-1)
  - 27) 玉越隆史，横井芳輝，川見周平：2011年東北地方太平洋沖地震による津波と道路橋の被害との関係に関する分析，国総研資料第843号，pp. 3-110, 2015.
  - 28) 国土地理院：地理院地図，<http://maps.gsi.go.jp/> (参照 2017-6-1)
  - 29) 宮城県：平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震宮城県内道路被災状況写真，<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/road/hisaijoukyoushasinn.html> (参照 2017-6-1)

- 30) 国土地理院：基盤地図情報，<http://www.gsi.go.jp/kiban/> (参照 2017-6-1)
- 31) Liu, W., Sawa, K., and Yamazaki, F.: Backscattering characteristics of bridges from high-resolution X-band SAR imagery, Proc. of the International Symposium on Remote Sensing 2017, Nagoya, Japan, pp. 324-327, 2017.
- 32) 国土技術研究センター：河川を横過する橋梁に関する計画の手引き(案)，2009.
- 33) 岩崎洋志，山崎文雄，リュウ・ウエン，野中崇志，笹川正：高解像度衛星SAR 画像を用いた建物側面の被害把握，日本地震工学会論文集，Vol. 13, No. 5, pp. 18-32, 2013.
- 34) Yahoo!JAPAN東日本大震災写真保存プロジェクト，<http://archive.shinsai.yahoo.co.jp/> (参照 2017-6-1)
- 35) Yamazaki, F., Bahri, R., Liu, W., and Sasagawa, T.: Damage extraction of buildings in the 2015 Gorkha, Nepal earthquake from high-resolution SAR data, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2016, Delhi, India, Proc. of SPIE Vol. 9877, 98772K-1-11, doi: 10.1117/12.2223306, 2016.
- 36) Ang, A. H. S., and Tang, W. H. (伊藤学，亀田弘行 訳)：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善(株)，1997.
- 37) Cohen, J.: A coefficient of agreement for nominal scales, Educational and Psychological Measurement, 20 (1), pp. 37-46, doi:10.1177/001316446002000104, 1960.
- 38) McHugh, M.L., Interrater reliability: the kappa statistic, Biochemia Medica, 22( 3), pp. 276-282, 2012.
- 39) Yamazaki, F., Inoue, K., and Liu, W.: Damage assessment of bridges using spatial characteristics of high-resolution satellite SAR intensity images, Stochastic Mechanics SM&MS 2016, Vol. VI, No. 1, pp. 163-170, ISSN: 2035-679X, 2016.

(受理：2017年 6月29日)  
(掲載決定：2017年 9月 8日)

## **Detection of Bridge Damages due to Tsunami Using Multi-temporal High-resolution SAR Images**

INOUE Kazuki<sup>1)</sup>, LIU Wen<sup>2)</sup> and YAMAZAKI Fumio<sup>3)</sup>

1) Non-member, Graduate Student, School of Engineering, The University of Tokyo, M. Eng.

2) Member, Assistant Professor, Department of Urban Environmental Systems, Chiba University, Ph.D

3) Member, Professor, Department of Urban Environmental Systems, Chiba University, Dr. Eng.

### **ABSTRACT**

This study tried to detect collapsed bridges due to tsunami by analyzing changes of backscattering intensity in Synthetic Aperture Radar (SAR) images. TerraSAR-X images covering the Sendai and Ishinomaki planes acquired before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake were employed together with the GIS data of bridges. The bridge region was created according the GIS data with a 10-m buffer. Then the difference and correlation coefficient of the sigma naught values within the bridge region were obtained. The proper threshold value of the correlation coefficient was investigated to extract collapsed bridges. In order to verify the effectiveness of the method, the extracted results were compared with the reference data from damage investigation reports and aerial photographs. The threshold vale of the correlation coefficient, 0.47, gave the highest value for the summation of the producer accuracies for collapsed and survived bridges, with the overall accuracy 0.776 and the kappa coefficient 0.430.

*Key Words: TerraSAR-X, Correlation coefficient, bridge, tsunami, the 2011 Tohoku-Oki Earthquake*