

## Detection of bridge collapse due to tsunami using high-resolution SAR imagery

○井上和樹<sup>1</sup>・劉ウエン<sup>2</sup>・山崎文雄<sup>2</sup>  
Kazuki Inoue, Wen Liu and Fumio Yamazaki

**Abstract** : This study tries to detect collapsed bridges due to tsunami by analyzing a post-event Synthetic Aperture Radar (SAR) image. TerraSAR-X images covering the Sanriku coast acquired after the 2011 Tohoku earthquake tsunami were employed together with the GIS data of bridges. Extraction of collapsed or washed-away bridges was attempted by setting a proper threshold value of the backscattering coefficient along the bridge's longitudinal axis. In order to verify the effectiveness of the method, the extracted results were compared with aerial optical images and damage investigation reports.

**Keywords** : tsunami, TerraSAR-X, bridge, the 2011 Tohoku earthquake.

### 1. はじめに

地震災害発生時には、道路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。加えて、瓦礫や湛水による道路閉塞も広範囲に及んだ。また、超広域災害であったため、緊急対応を担う自治体等の機能も失われた。道路を利用する緊急対応活動は、発災から24時間以内にピークに達するといわれる<sup>1)</sup>。そのため、通行不能な道路や橋梁の位置を把握し、安全な区間を迅速に啓開することが求められる。一方で、東北地方太平洋沖地震の発生後2日目まで津波警報が継続していたことから、現地調査は危険が伴い、困難であった。

早急に救援活動を行うために、広域的な被害情報の早期把握は肝要である。この点でリモートセンシング技術は有用であり、現地調査と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り得る。とくに、全天候型で日照や火煙の影響を受けない SAR 画像は利用性が高いといえる。

庄司ら<sup>2)</sup>は、Google Earth の光学画像を用いて主桁移動や橋台背面盛土流出の状況を分析している。しかし、地震や津波による橋梁被害を SAR 画像により評価した事例は乏しい。また、衛星 SAR 画像では、同じ観測条件による事前データが存在しない場合も多くある。

このような背景より、本研究では、発災直後に撮影された1時期の TerraSAR-X 強度画像と、GIS データを併用して、橋梁の被害分類を試みる。

### 2. 対象地域と使用データ

2011年東北地方太平洋沖地震で甚大な被害を受けた三陸海岸を Fig. 1 の通り対象地域に設定した。

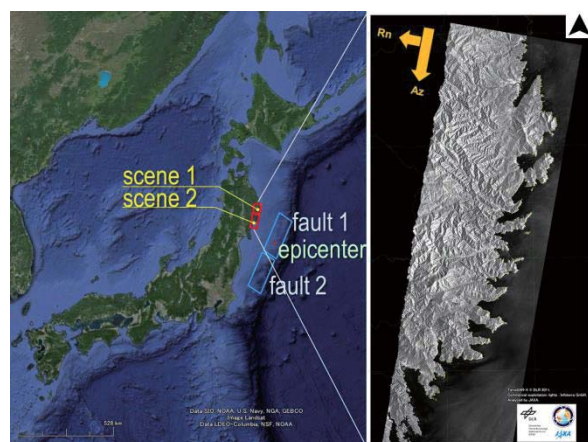


Fig. 1. TerraSAR-X images over the Sanriku Coast used in this study.

使用する TerraSAR-X (TSX) 画像は、2011年3月13日(地震後2日目;午前5時43分ころ)に撮影された1時期の2シーンである。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。観測角度は 33.2°、パス角度は 190.4°である。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、ピクセルサイズ 1.25m にリサンプリングされている。前処理として、放射輝度補正とスペクルノイズ低減処理(Enhanced Lee filter, 5×5 ピクセル)を施した。

橋梁の位置を把握するために、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 1/25000 相当のものを用いた。

得られた橋梁被害の抽出結果の精度を評価するために、参照データとして国総研資料<sup>3)</sup>を用いた。各橋梁について2種類の被害区分(流出・未流出)

<sup>1</sup>学生会員 東京大学生産技術研究所  
(所在地 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)  
(連絡先: kinoue1994@gmail.com)

<sup>2</sup>正会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築都市科学専攻

に分類されており、橋長、幅員、桁高、桁下高、建材の情報が記載されている。

### 3. 被害検出手法

本研究では、主桁が流出、あるいは水没している橋梁を「落橋」と定義する。一方、無被害橋梁、及び軽度の損傷や津波堆積物が発生しており通行可能な橋梁を「残存」と定義する。SAR 画像の範囲内において参照データの記載があり、かつ GIS データで抽出できた、水面を横過する 57 橋梁を対象とする。参照データ内で、歩道橋が分割されて記述されている場合には、本線とともに一橋梁として扱う。

まず、橋梁輪郭は GIS データの水涯線・海岸線と道路縁で囲まれるポリゴンを用いて抽出した。マイクロ波の照射によって橋梁は、Fig. 2 に示す倒れ込み、2 回反射、3 回反射の影響を受ける。そのため、各橋梁の倒れ込み範囲を式(1)によって計算し、グラウンドレンジ上で移動する。

$$L = \frac{h}{\tan \theta} \quad (1)$$

ここで、 $L$  は倒れ込み距離、 $h$  は桁下高 (T.P.)、 $\theta$  は観測角度を表す。

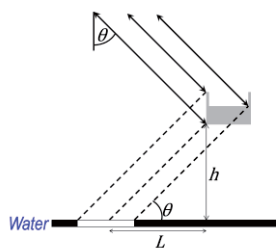


Fig. 2 SAR imaging geometry

被害検出にあたってはプロフィール法を適用した。一般的に、後方散乱係数は高欄や主桁側面で高い値を示す。一方、平滑な路面では鏡面反射により後方散乱係数は低い。西から東に向けて橋軸方向に主桁上 3 本のプロフィール線（両端及び中央）を描画して、ピクセルごとの後方散乱係数を抽出した。落橋している場合、その部分では全てのプロフィール線で、水域の低い  $\sigma^0$  が抽出されると仮定する。Fig. 3(c)には、3 本の内中央に描画したプロフィール線で抽出した、ピクセルごとの後方散乱係数を示す。この橋梁は Fig. 3(a) 光学画像で示す通り主桁が流出し、3 基の橋脚が残存した。グラフでは突出した高い後方散乱係数が 3 箇所を確認される。これに対して、主桁流出部分では極めて低い後方散乱係数が抽出されている。

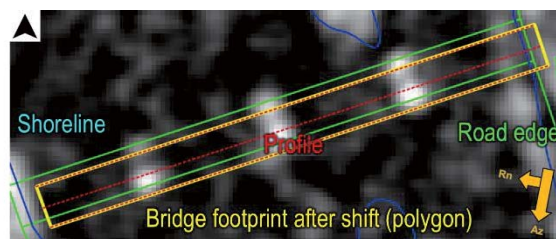
はじめに、3 本のプロフィール線で各ピクセルの  $\sigma^0$  を抽出し、線ごとに最小値を算出した。算出された 3 つの値は、落橋した橋梁では低い値を示すと考えられる。そこで、3 つの最小値のうち、最も高い値が閾値以下である場合「落橋」に分類する。閾値



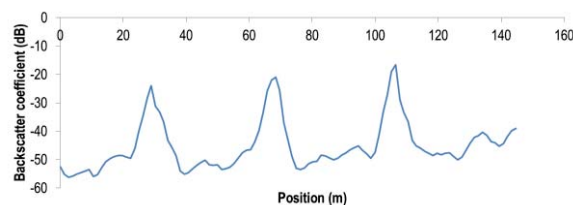
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Pre-event image of No.103 & 104 bridges (a); post-event optical image from Google Earth (b); shifting bridge footprint and drawing 3 profile lines (c); the profile graph along the centreline (d)

Table 1 Statistics for bridges No.103 and 104

103-104	left side	center	right side
Min (dB)	-58.3	-56.3	-56.4
$\sigma$ (dB)	7.0	8.8	4.9
$\mu$ (dB)	-46.4	-45.2	-46.7

よりも大きい場合「残存橋梁」に分類する。例えば、Table 1 に示す橋梁では、3 本のプロフィール線のうち、中央の線で抽出された  $\sigma^0$  の最小値 -56.3 dB が左線及び右線よりも大きいため、この値を被害分類に使用することとし、閾値以下の場合には落橋と見なすことにする。

次に、カップ係数が最大となるように閾値を検討した。カップ係数は、分類結果と参照結果との一致

度を示すもので、完全一致で 1、偶然の一致で 0、偶然より一致度が低いとき負の値となる。0.81 以上の場合「高い一致」、0.41 以上 0.80 以下の場合「中等度の一致」、0.40 以下の場合「低い一致」と分類される<sup>4)</sup>。本研究では、-60.0 dB から 0.0 dB まで、0.1 dB 刻みで 601 の閾値を設定し、それぞれについてカッパ係数を算出した。

#### 4. 解析結果

601 通りの閾値を設定した際に、参照データで落橋とされており、適切に分類された橋梁（赤グラフ）と、参照データで残存橋梁とされており、適切に分類された橋梁（青グラフ）、それらの合計数（黒グラフ）を Fig. 4 (a) に示す。-48.8dB から -47.9dB まで、及び -47.3dB から -46.9dB までの範囲に閾値を設定した場合、合計が最大（57 橋梁中 43 橋梁）となった。

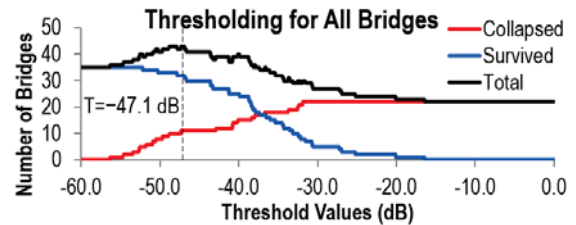
同様に、Fig. 4 (b) には橋長が 50m 以上の橋梁に限定した場合のグラフを示すが、-48.8dB から -46.9dB までの範囲に設定した場合、合計が最大（22 橋梁中 19 橋梁）となった。また Fig. 4 (b) に示す 100m 以上の場合は、-49.6dB から -38.7dB までの範囲に設定した場合、合計が最大（9 橋梁中 8 橋梁）となった。

Fig. 5 には総合精度とカッパ係数をそれぞれ示す。総合精度は、上述の 43 橋梁が適切に分類された範囲に閾値を設定した場合に 75.4% と最大であった（青線）。これに対して、カッパ係数は、-47.3dB から -46.9dB までの間に閾値を設定した場合に最大となった（青線：0.44、中等度の一致度）。

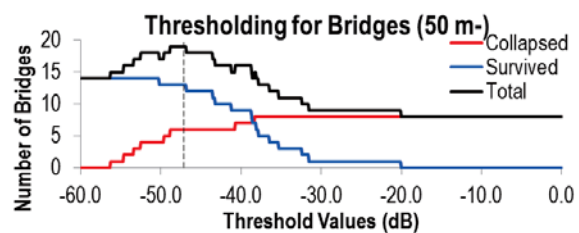
以上の結果に基づき、本論文では閾値として -47.1dB を設定することとし、Table 2 にはこの際のエラーマトリックスを示す。22 橋梁中、10 の落橋が適切に分類され、35 橋梁中、33 の残存橋梁が適切に分類された。赤線で示した 50m 以上の橋梁は、-48.8dB から -46.9dB の範囲に閾値を設定した場合に、カッパ係数が最大の 0.69 となった。緑線で示した 100m 以上の橋梁は、-49.6dB から -38.7dB の範囲に閾値を設定した場合に、カッパ係数が最大の 0.77 となった。これより、橋長が長いほど高精度な分類が行われたといえる。

仮定によれば、落橋部分では水域の低い後方散乱係数が検出されるため、これと適切な閾値はほぼ等価となる。設定した閾値と水域の後方散乱係数を比較するために、Fig. 6 に示すように河川の水涯線に囲まれる範囲に ROI を設定し、 $\sigma^0$  を抽出した。Table 3 に示すように、抽出された後方散乱係数の平均値 ( $\mu_w$ ) は -49.4dB、標準偏差 ( $\sigma_w$ ) は 3.8dB であった。SAR 画像では、水面で発生する波、津波襲来による瓦礫の漂流が、後方散乱強度に影響するため、水面上の後方散乱係数は均一ではない。そのため、閾値設定に際しては、標準偏差を許容値として設け、 $\mu_w \pm \sigma_w$  の範囲で決定することが適すると考えられる。

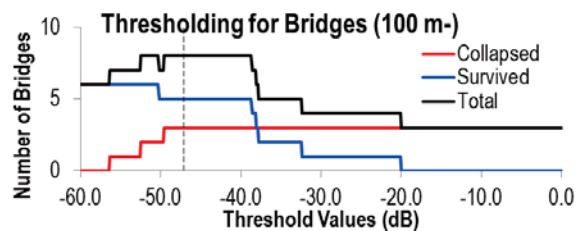
これに従えば、本研究で設定した 47.1dB という閾値は  $49.4 \pm 3.8$ dB の範囲にあることから、適切であるといえよう。



(a) All the 57 bridges



(b) The 22 bridges longer than 50 m



(c) The 9 bridges longer than 100 m

Fig. 4 Number of bridges classified properly (The dashed line is the threshold value determined in this study)

Table 2 Error matrix when setting the threshold value as -47.1 dB

		Reference data			
		Collapsed	Survived	Total	U.A.
Results from damage detection from TSX images	Collapsed	10	2	12	83.3%
	Survived	12	33	45	73.3%
	Total	22	35	57	-
	P.A.	45.5%	94.3%	-	75.4%
Kappa coefficient					0.44

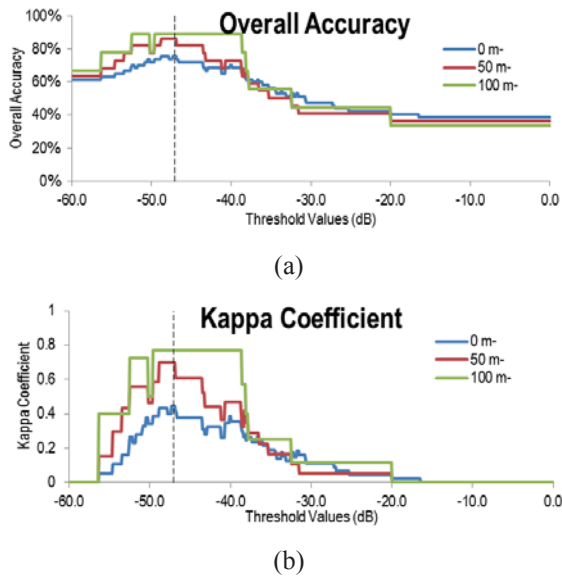


Fig. 5 Overall accuracy and kappa coefficient with respect to the threshold value

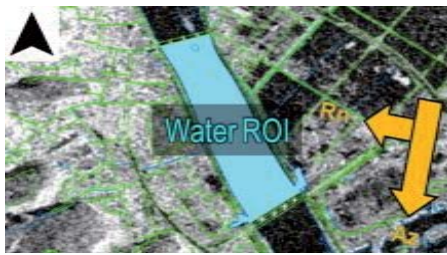


Fig. 6 Extraction of sigma naught value in water area

Table 3 Backscatter coefficient in water area

Pixel count	61027 pixels
Mean	-49.4 dB
Standard deviation	3.8 dB
Max.	-16.8 dB
Min.	-62.1 dB

## 5. 考察と結論

本研究では、災害発生後 1 時期の高分解能 SAR 画像と GIS データを併用して、プロファイル法を用いた河川を跨ぐ橋梁の落橋の検出を試みた。橋軸方向に後方散乱係数を抽出し、落橋と残存橋梁との差異を利用して、定量的な分類を行った。分類に際し適切な閾値を設定するため、カッパ係数を最大化し得るものを検討した。目視判読と異なり、定量的かつ半自動的に分類できる点で優位性を示した。

対象とした橋梁では、 $-47.1\text{dB}$  に閾値を設定したとき、最適に分類され、22 橋梁中 10 の落橋と、35 橋梁中 33 の残存橋梁を区分した。このうち、橋長 50m 以上のものに限れば、8 橋梁中 6 の落橋と 14 橋梁中 13 の残存橋梁を適切に分類できた。この時

の総合精度は 86.4%、カッパ係数は 0.70 であった。同様に、橋長 100m 以上のものに限れば、3 橋梁中全ての落橋と 6 橋梁中 5 の残存橋梁を適切に分類できた。この時の総合精度は 88.9%、カッパ係数は 0.77 であった。このように橋長が長いほど、落橋の抽出率（プロデューサ精度）は向上した。小規模橋梁では、解像度のために水域の低い後方散乱係数を抽出できないため、落橋と残存橋梁との区分が困難であったと考えられる。

本手法では、橋梁の河川敷上部分や陸橋の分類を対象としていない。今後は、プロファイルの標準偏差を利用した分類や、路面のテクスチャを利用した分類により、これらを対象に含めた被害検出を試みたいと考えている。

## 【参考文献】

- 金子正洋, 松岡一成: 道路の啓開・復旧に関する調査, 平成 24 年度道路調査費等年度報告, 国総研資料第 766 号, pp. 104-105, 2013.
- 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.
- 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.
- Congalton, R. G.: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, Remote Sensing of Environment 37, pp.35-46, 1991.