

# 高分解能 SAR 画像を用いた橋梁の津波被害把握

12T0253W 井上和樹

指導教員：山崎文雄，劉ウェン

## 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では、津波の来襲により、岩手県や宮城県沿岸部において多数の道路橋や鉄道橋が流出し、あるいは損壊した。瓦礫の堆積や津波の湛水による道路の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。この点においてリモートセンシング技術は有用であり、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。全天候型で昼夜撮影可能な合成開口レーダ（SAR）は、発災時の緊急対応に有効である。

本研究では、まず SAR 画像上の橋梁の反射特性について分析した。次に SAR 強度画像と発災前に整備された GIS データを併用して、津波による橋梁の被害を把握する方法を提案した。得られた結果を現地調査データと比較して手法の有用性を明らかにした。

## 2. SAR 画像における橋梁の反射特性

SAR 強度画像上では、水面を横過する橋梁において、倒れ込み(layover)、2 回反射(double-bounce)、3 回反射(triple-bounce)が発生する<sup>1)</sup>。橋軸方向とレンジ方向が直交している場合、主桁は 3 種の平行な縞として投影される。衛星側から数えて一番目の縞（図 1(a)中、黄字 1）は、橋梁の倒れ込みである。二番目の縞は、橋梁、水面（あるいはその逆）による 2 回反射である（図 1(a)中、黄字 2）。最後に三番目の縞は、水面、主桁底面、再び水面による 3 回反射である（図 1(a)中、黄字 3）。

これらの縞は、桁下高が大きいほど間隔が大きくなる。また、上部工の形式による特徴も現れる。例えば、構造形式が吊り橋や斜張橋の場合、主塔やケーブル、ハンガーロープの倒れ込みが確認される（図 1(a)中、黄字 0）。下路式トラス橋の場合、上弦材が確認される。また、下部工のうち水面から上に露出している部分の倒れ込みも起こる。対して、水面の鏡面反射特性から、水面下の部分は SAR 画像上に投影されない。橋軸方向に対してマイクロ波が平行に入射する場合には倒れ込みのみが生ずる（図 1(b)）。

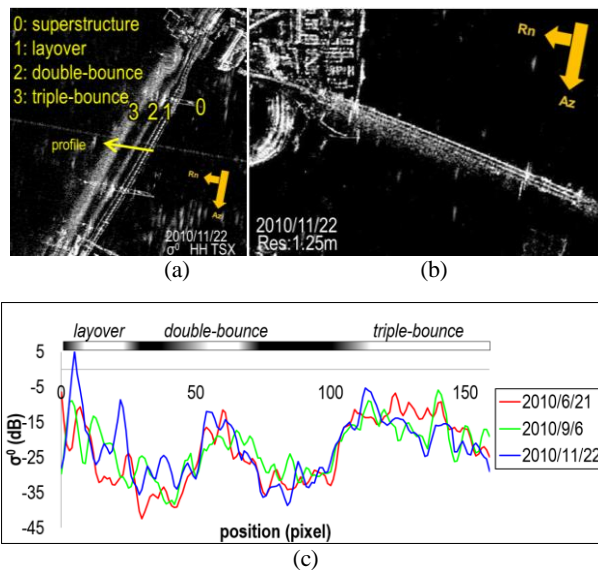


図 1 橋軸方向に対してレンジ方向が直交している場合 (a)と平行な場合 (b)の投影比較; (a)の橋梁を対象としたレンジ方向の水平プロファイル(c)

## 3. 多時期の画像を用いた被害抽出

図 2 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 TerraSAR-X (TSX)画像を用いて橋梁の被害抽出を行った。事前画像は 2010 年 10 月 21 日、事後画像は 2011 年 3 月 13 日に撮影されている。観測角度は  $35.95^\circ$ 、パス角度は  $190.03^\circ$ （左手系北基準；下降軌道）であり、StripMap モードにより HH 偏波で撮影されたものである。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) プロダクトであり、1.25m/ピクセルにリサンプリングされている。

分析の前に、3 つの前処理を行った。第一に、放射輝度補正を行い、デジタルナンバー(DN)から後方散乱係数(Sigma Naught)に変換した。第二に、Enhanced Lee filter (ウィンドウサイズ:  $3 \times 3$  ピクセル)を適用してスペックルノイズを除去した。第三に、co-registration を行った。本震とその余震により、大きな地殻変動が発生した。国土地理院が全国に設置した GPS 電子基準点のうち、画像の撮影範囲内には 4 箇所が設置されている。2011 年 3 月 13 日までに検出された水平方向の変動量の平均値は、東に 2.80m、南に 0.71m である。本研究では、事前画像を東に 2 ピクセル (2.5m)、南に 1 ピクセル (1.25m) 移動して、位置補正を行った。

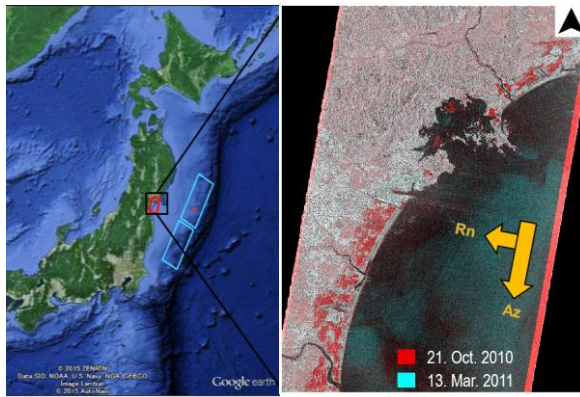


図2 宮城県沿岸部の対象地域とTSXカラー合成画像(事前:赤色,事後:シアン色)

定川, 鳴瀬川, 高城川, 砂押川, 七北田川, 名取川, 阿武隈川を横過する51の未流出橋梁と, 被害報告書<sup>2)</sup>及び航空写真で主桁流出, 橋台背面盛土流出, 高欄流出, 津波堆積物の被害を確認した7橋梁を対象とした. GISデータに基づいて橋梁輪郭を自動抽出し, GISデータ精度及び倒れ込みを考慮した適切なバッファ(10m)を設定し, この範囲内で差分( $d$ )及び相関係数( $r$ )を算出した. 双方とも, ウィンドウサイズとしては,  $9 \times 9$ ピクセルを用いた.

図3(c)の散布図は, 図3(a), (b)のようにバッファを設けた橋梁輪郭内で差分・相関係数の平均値を抽出したものである. 未流出の橋梁を青丸印, 流出・津波堆積物等の被害を受けた橋梁を赤三角形印で示し, それぞれの平均値を黒色の同形印で示した. また, それぞれの標準偏差をエラーバーで示した. 被害を受けた橋梁では, 差分の平均値は広範囲にばらつき, 標準偏差も残存した橋梁より大きい値を示した. これに対して, 相関係数の平均値は, 被害の有無により, 異なる傾向を見せた. 相関係数の平均値に関する累積度数分布を図3(d)に描画して, 閾値として適切な値を検討した結果,  $r=0.3$ を設定したとき被害有無を最適に区分することができた. 表1に対象地域全体の精度, 及び参照データと結果との一致度(カッパ係数)を示す.

表1 エラーマトリックスを用いた精度評価

		Truth data from field survey reports			
		Collapsed	Survived	Total	U.A.
Results from damage detection from TSX images	Collapsed	6	0	6	100.0%
	Survived	1	51	52	98.1%
	Total	7	51	58	-
	P.A.	85.7%	100.0%	-	-
	Overall accuracy				98.3%
Kappa coefficient				0.91	

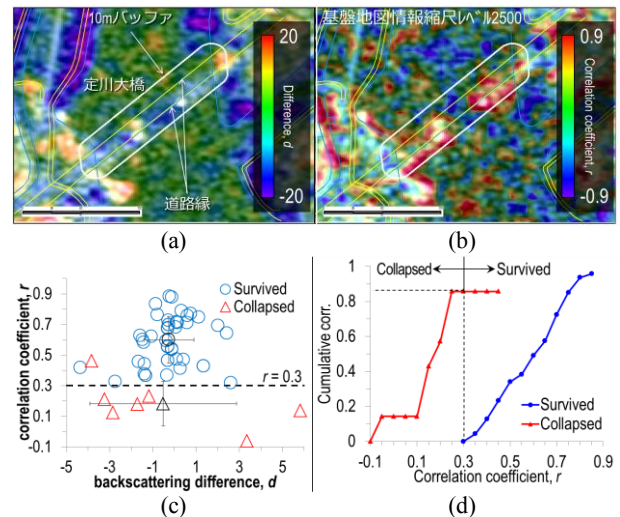


図3 橋梁における差分・相関係数の算出範囲の設定(a), (b); それぞれの平均値の散布図(c); 相関係数値の平均値の累積度数分布(d)

表1で, 誤分類された1橋梁は, 主桁が残存し, 橋台背面盛土の流出が小規模だったため, 相関係数の平均値が高い値を保っていると考えられる. その他57橋梁は適切に分類された. 橋梁では多くの場合, 主桁の輪郭・側面で高い相関を得る. そのため, 被害有無により相関係数の平均値に有意な差が生じるものと考えられる.

#### 4. まとめ

本研究では, SAR強度画像を用いた橋梁の津波被害把握の適用性を示すため, まずSAR画像上で橋梁の投影特性について議論した. つぎに, 宮城県沿岸部を対象地域として, 2011年東北地方太平洋沖地震の津波来襲前後のTerraSAR-X画像を用いて被害抽出を行った. 橋梁輪郭内で算出した2時期画像の差分と相関係数の平均値を用いて, 閾値設定による被害の分類を試みた. しかし, 橋長が長く一部が落橋した場合など平均値が有意に算出されないことも考えられる. 今後は標準偏差, 最大値, 最小値を用いた被害分類について検討を行いたい.

また, 同一観測条件の事前のデータセットが存在しない場合も多いので, 事後画像のみを用いた被害検出手法についても検討したいと考えている.

#### 参考文献

- Soergel, U., Gross, H., Thiele, A., 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.
- 松本高志, 林川俊郎, 何興文, 東北地方太平洋沖地震による橋梁津波被害の調査, 土木学会北海道支部, 論文報告集, 第68号, S-02, 2012.