

# リモートセンシングの 応用・解析技術

農林水産・環境・防災から建築・土木、高精度マッピングまで

監 修

中山 裕則 杉村 俊郎



NTS



# 1. 高分解能 SAR 画像における橋梁の後方散乱特性

千葉大学 劉 ウェン 国立研究開発法人防災科学技術研究所 山崎 文雄

## 1. はじめに

合成開口レーダ (SAR) センサの発展により、1~5 m 高分解能の衛星 SAR 画像が撮影されるようになった。また、航空機 SAR センサの地上分解能が 30~50 cm に達した。したがって、SAR による観測対象は広域の水田、森林から、個別の人工構造物も含まれるようになった。私たちの生活環境を構成する基盤の一つである建物について、SAR 画像における後方散乱特性は多く研究されてきた<sup>1)-10)</sup>。しかし、交通インフラ要素である橋梁に関する研究は、建物に比べてまだ少ない<sup>11)-14)</sup>。災害発生時、道路や鉄道の寸断により交通網の麻痺はしばしば見受けられる。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。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きわめて大きく、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、天候と昼夜にかかわらず撮影できる SAR 画像は、広域な被害状況を迅速に把握する有力な手段である。

SAR 画像を用いて橋梁被害を検出するためには、まず常時における橋梁の後方散乱特性を理解する必要がある。ここでは、高解像衛星 SAR 画像と全偏波航空機 SAR 画像を用いて橋梁の後方散乱モデルを解説し、2011 年東北地方太平洋沖地震において津波被害を受けた橋梁に関する事例を紹介する。

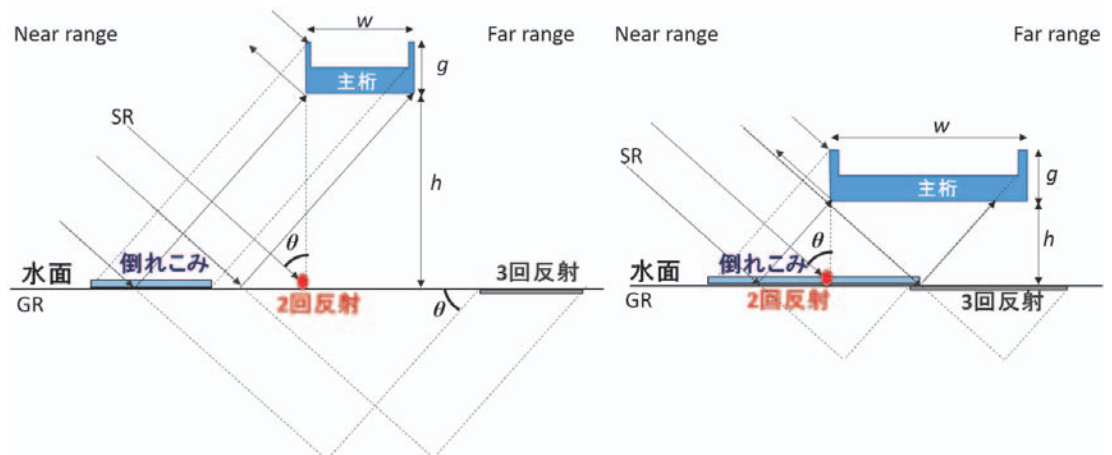
## 2. 橋梁の後方散乱モデル

水域上に位置する橋梁は、水面との相互反射により複雑な反射モデルを示す。Soergel ら<sup>12)13)</sup>の研究によると、水面を横過する大規模な橋梁は、橋軸とマイクロ波の照射方向 (レンジ方向) のなす鋭角である照射角  $\phi$  が  $90^\circ$  のとき、倒れ込み、2 回反射、3 回反射の影響により、3 本以上の縞で投影される。横浜ベイブリッジの SAR 画像と航空写真を図 1 に示す。マイクロ波の照射方向に近い (ニアレンジ) 側から、倒れ込み、2 回反射、3 回反射による投影が順に見られる。倒れ込みは、おもに主桁の上部と側面から直接反射したマイクロ波がグランドレンジ (GR) に投影されたものである。2 回反射は、入射したマイクロ波が橋梁の側面に当たって水面に反射し、水面からセンサ方向へ反射した信号、また

はその逆の順番でセンサ方向へ戻った信号がGRに投影されたものである。3回反射は、水面で反射したマイクロ波が主桁の下部に当たって、同じ経路で水面へ戻り、水面からセンサ方向へ反射した信号が投影されたものである。このような3本の縞状投影は、桁下高の高い大規模な橋梁で見られる。一方、橋梁の桁下高が低いとき、倒れ込みと2回反射や、倒れ込みと3回反射が重なって投影される場合がある。これらの投影モデルを図2に示す。倒れ込みと2回反射が重なる条件を式(1)、3回反射と重なる条件を式(2)に示す。



図1 横浜ベイブリッジ  
高解像度衛星 SAR 画像 (左) と国土地理院の航空写真 (右)



(a) 大規模橋梁

(b) 小規模橋梁

図2 橋軸と垂直方向からマイクロ波が照射した場合における橋梁の反射・投影モデル

$$h < w \tan \theta \quad (1)$$

$$h < w \sin^2 \theta \quad (2)$$

ここで、 $w$  は主桁の幅、 $h$  は桁下高を表す。 $\theta$  はマイクロ波の入射角である。

橋軸とマイクロ波の照射方向のなす鋭角である照射角  $\phi$  が  $90^\circ$  ではない場合、マイクロ波の2回反射や3回反射の経路が変わり、投影は異なったものになる。その場合、桁幅  $w$  が  $w/\sin \phi$  となり、 $\phi$  が0に近づくほど倒れ込みが2回反射や3回反射と重なりやすくなる。高い桁下高を有す大規模橋梁においても、撮影条件により重なった縞が見える場合がある。

### 3. 大規模橋梁の後方散乱モデル

撮影条件の異なる高分解能衛星 SAR 画像と航空機 SAR 画像を用いて、十分な桁下高をもつ大規模橋梁の後方散乱事例を紹介する。対象とする橋梁は、東京湾に位置する東京ゲートブリッジ、レインボーブリッジと鶴見つばさ橋である。使用する衛星 SAR 画像は、ドイツ航空宇宙センター (DLR) の TerraSAR-X (TSX) 衛星<sup>15)</sup> が2010年11月22日に StripMap モードにより HH 偏波で観測したものである。航空機 SAR 画像は、情報通信研究機構の Pi-SAR2 センサ<sup>16)</sup> より撮影した全偏波データである。二つの SAR センサは、ともに X バンドのマイクロ波を使用している。画像の詳細な撮影条件を表1に示す。使用したすべての画像は、輝度補正より後方散乱係数へ変換し、 $3 \times 3$  ピクセルの Lee フィルタ<sup>17)</sup> を用いてスペckルノイズの軽減を行った。Pi-SAR2 画像は、HH 偏波に赤色、HV 偏波に緑色、VV 偏波に青色を与えたカラー合成図で表示する。Google Earth から引用した橋梁の全景と国土地理院が撮影した航空写真<sup>18)</sup> も合わせて表示する。

図3に東京ゲートブリッジの画像を示す。東京ゲートブリッジは、2011年2月に開通した江東区若洲と中央防波堤外側埋め立て地を結ぶ橋梁である。下側に船舶が航行するための桁下高制限、上側に航空機が飛行するための高さ制限があることにより、桁橋とトラス橋を複合させた構造形式をとっており、全長1,618 m、幅員21.1 m、桁下高53.5 mである。図3左下の TSX 画像は、東京ゲートブリッジが完成する前に撮影された画像であり、トラスに挟まれた中心部の桁橋がまだ架かっていない状態である。一方 Pi-SAR2 画像は、完成後に撮影されたものである。TSX 画像では、橋梁の左下部分の照射角  $\phi$  が  $51^\circ$ 、右上部分では  $66^\circ$  である。ニアレンジ側に主桁の倒れ込み、ファーレンジ側に一定

表1 使用する衛星 SAR 画像と航空機 SAR 画像の撮影条件

No.	センサ	日時	入射角 [°] (center)	機首方位角 [°] (左手系北基準)	分解能 [m] (Rn × Az)
1	TerraSAR-X	2010/11/22 5:43	42.8	189.6	$3.0 \times 3.0$
2	Pi-SAR2	2011/03/31 9:47	51.0	18.2	$0.4 \times 0.3$
3	Pi-SAR2	2013/01/10 9:07	31.0	36.1	$0.6 \times 0.3$
4	Pi-SAR2	2013/01/10 9:23	59.5	267.3	$0.3 \times 0.3$



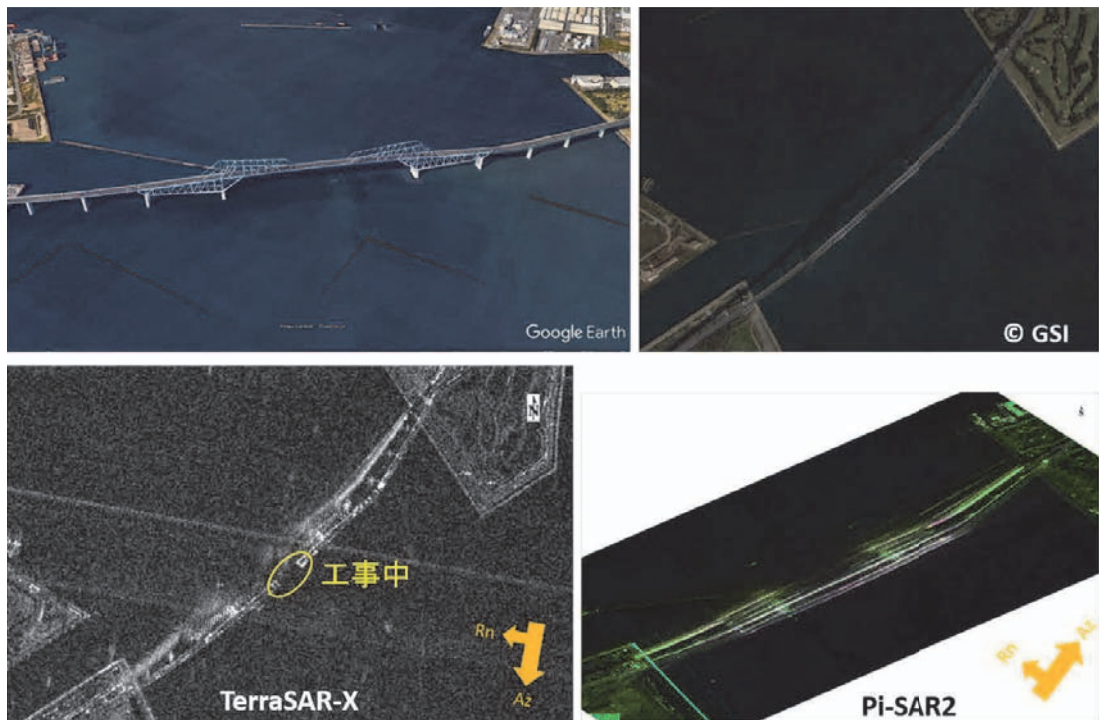


図3 東京ゲートブリッジ

(左上) Google Earth より引用した全景, (右上) 国土地理院の航空写真, (左下) TSX 画像, (右下) Pi-SAR2 画像 (No.3)

の幅がある3回反射の縞が見られる。2本の縞状投影の間に存在する強い後方散乱部分は、橋脚による2回反射である。主桁の側面が薄いため、主桁による2回反射は見られなかった。Pi-SAR2画像では、橋梁左下部分の $\phi$ が $77^\circ$ 、右上部分においては $88^\circ$ である。ニアレンジ側から倒れ込み、2回反射、3回反射の順に3本の縞状投影が確認できる。いずれの画像においても、主桁の3回反射による投影の中心部が消えている。これは、トラスに挟まれた中央部分は、船舶の航行に必要な桁下高を確保するために、箱桁のない平滑な構造を採用したことによって見られた現象である。

図4にレインボーブリッジの画像を示す。レインボーブリッジは、1993年8月に開通した2層構造の吊橋である。上層に首都高速11号台場線が通り、下層は臨港道路の海岸青梅線と新交通ゆりかもめの軌道が通っている。全長798m、幅員29.0m、桁下高53.3mである。TSX画像における $\phi$ が $11^\circ$ と小さいため、マイクロ波の観測方向における見かけの幅員 $w/\sin \phi$ が152mとなり、3本の投影縞が重なっている。Pi-SAR2画像における $\phi$ は $67^\circ$ と比較的大きい値である。しかし、約 $60^\circ$ と大きい入射角 $\theta$ より、式(1)の $w \tan \theta$ が $h$ とほぼ同じ値となり、倒れ込みのファーレンジ側が2回反射の投影縞と重なっている。3本の投影縞になる条件としては、桁下高だけでなく、観測方位とマイクロ波入射角も大きく影響することが分かる。

図5に示す鶴見つばさ橋は、首都高速湾岸線を構成する1994年12月に開通した斜張橋である。全長1,020m、幅員38.0m、桁下高57.4mである。TSX画像における $\phi$ は $38^\circ$ であり、ニアレンジ側に強度の強い主桁の倒れ込みのほか、ファーレンジ側に薄い3回反

射の投影縞が見られる。2回反射は橋脚部のみで見られ、東京ゲートブリッジと同様の薄い主桁構造が原因と考えられる。中央の Pi-SAR2 画像における  $\phi$  は  $46^\circ$  であり、TSX 画

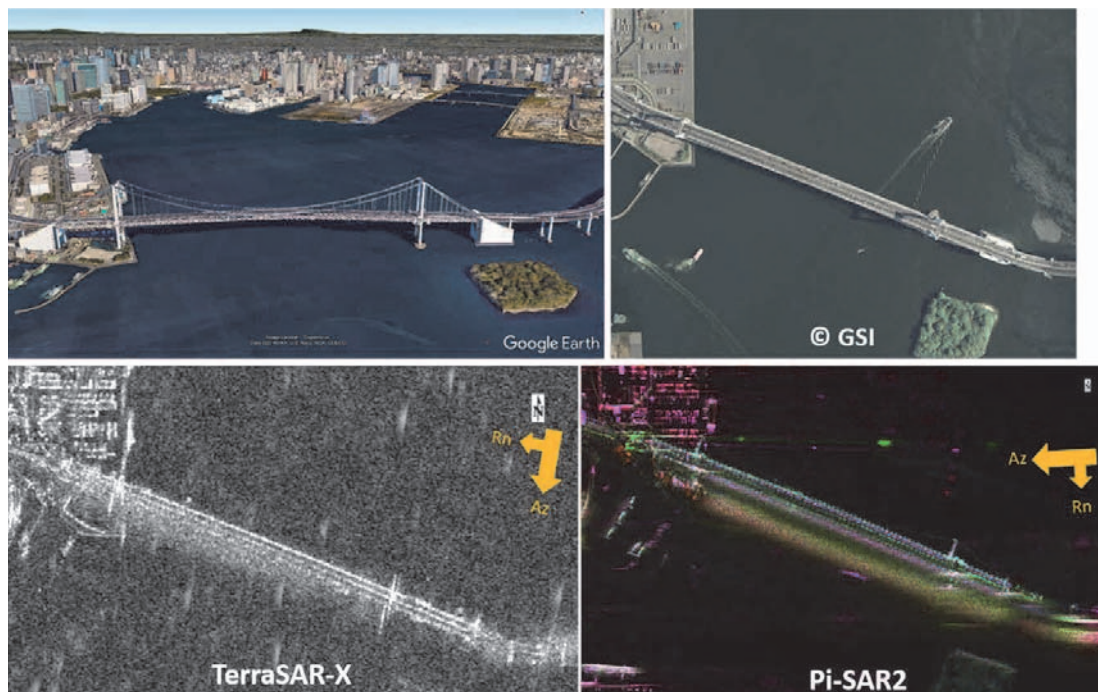


図4 レインボーブリッジ

(左上) Google Earth より引用した全景, (右上) 国土地理院の航空写真, (左下) TSX 画像, (右下) Pi-SAR2 画像 (No.4)

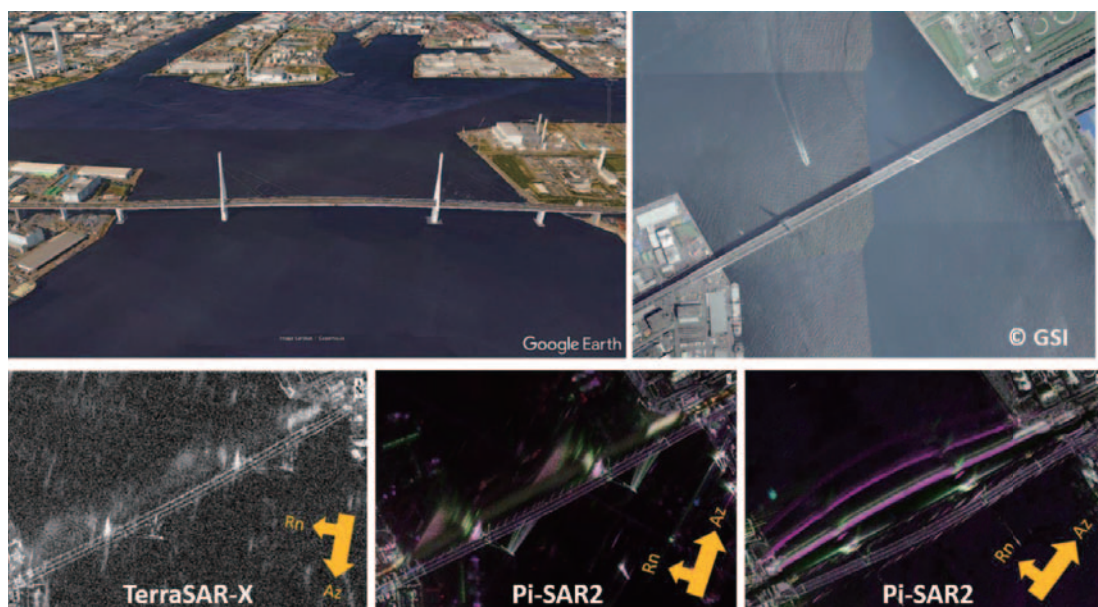


図5 鶴見つばさ橋

(左上) Google Earth より引用した全景, (右上) 国土地理院の航空写真, (左下) TSX 画像, (下中央) Pi-SAR2 画像 (No.2), (右下) Pi-SAR2 画像 (No.3)



像と同様に主桁の倒れ込みと強度の弱い3回反射の投影縞のみ見られる。一方、 $\phi$ が $64^\circ$ である右側のPi-SAR2画像では、5本の反射縞が確認できる。ニアレンジ側から、主桁の倒れ込み、2回反射、3回反射、3回以上の多重反射の順に並んでいる。TSX画像や中央のPi-SAR2画像と異なって、主桁の2回反射が投影された理由は、小さめの入射角によると考えられ、同様の理由で3回反射も他の画像より強い強度を示している。最も強度の小さい5本目の投影縞は、多重反射のほか、ambiguity<sup>19)</sup>である可能性も考えられる。

以上の事例をまとめると、橋軸とレンジ方向のなす照射角 $\phi$ が大きいほど、3本の反射縞が重ならない可能性が大きい。一方、マイクロ波の入射角 $\theta$ が小さいほど、2回反射、3回反射の強度が強くなり、3本の投影縞の重なる可能性が小さくなる。また、主桁の構造も投影した反射縞に大きく影響する。

## 4. 小規模橋梁の後方散乱モデル

続いて、式(2)を満たす桁下高の低い橋梁の後方散乱モデルを検討する。東京の隅田川に架かる8橋の橋梁を対象とした。使用するSAR画像は、2009年12月22日と2013年1月10日に撮影されたPi-SAR2画像である。2009年の画像は東から西へマイクロ波が照射されているのに対して、2013年の画像は北から南へ照射されている。どちらの入射角 $\theta$ も $43^\circ$ 前後である。対象橋梁の詳細を表2に示す。幅員 $w$ に比べて、桁下高 $h$ が小さいため、すべての対象橋梁において倒れ込みと3回反射が重なる。

小規模橋梁における後方散乱特性を定量的に評価するため、橋梁輪郭内における散乱電力成分の割合を算出した。橋梁輪郭は、国土地理院が提供する基盤地図情報<sup>20)</sup>の水涯線と道路縁を用いて作成した。倒れ込みと3回反射の投影縞を含むために、橋梁輪郭の外側に5mのバッファを設定して対象範囲を拡大した。散乱電力成分は、全偏波の情報より4成分散乱電力分解<sup>21)</sup>を用いて得られたものである。桁橋と吊橋の例を図6に示す。電力分解後は、2回反射散乱を赤色、体積散乱を緑色、表面散乱を青色で表示するカラー合成図を使用する。

両国橋(No.3)は主桁と床版のみで構成される桁橋構造を有する。照射角 $\phi$ が $8^\circ$ の時には、橋梁の側面と欄干における反射が確認できるが、床版上に鏡面反射が生じ強度は低く、表面散乱の割合が4成分の中で最も高い。照射角 $\phi$ が $80^\circ$ の時には、強い2回反射散乱が確認できるが、これは照射角 $\phi$ が $90^\circ$ に近いほど、水面と橋梁側面による2回反射が

表2 対象とした小規模橋梁の構造と撮影角度

橋梁 No.	橋梁の名称	構造形式	橋長 [m]	幅員 [m]	桁下高 [m]	$\phi$ 1 [°] (2009年)	$\phi$ 2 [°] (2013年)
1	麩橋	下路アーチ	151	22.0	不明	25	63
2	蔵前橋	上路アーチ	173	22.0	7.0	22	66
3	両国橋	桁橋	165	24.0	6.3	8	80
4	新大橋	斜張橋	170	24.5	6.5	28	60
5	清州橋	吊橋	186	22.0	6.0	30	58
6	隅田川大橋	箱桁橋	210	30.0	6.7	26	62
7	万年橋	下路アーチ	56	17.7	不明	82	6
8	永代橋	下路アーチ	185	25.0	5.5	12	76



橋梁 No. (構造)	照射角 $\phi$ [°]	偏波のカラー合成	散乱電力成分の カラー合成図	光学画像 (Google Earth / 国土地理院 <sup>18)</sup> )
3 (桁橋)	8			
	80			
5 (吊橋)	30			
	58			

図6 桁橋と吊橋が撮影条件の異なる Pi-SAR2 画像における偏波と散乱電力成分のカラー合成図  
白枠は橋梁輪郭と 5 m バッファである

強くなるためである。橋梁輪郭内で複雑な投影縞が見られるが、倒れ込みや2回反射、3回反射が重なるためだと考えられる。

清洲橋 (No.5) は、主塔の間に張り渡したケーブルにからハンガーロープを下ろして主構造を吊り、ケーブルを両端に定着する構造を有する。照射角  $\phi$  が  $30^\circ$  の時には、橋梁の側面・欄干による表面散乱と2回反射散乱が確認できる。また、主塔やケーブルからは体積散乱が生じている。照射角  $\phi$  が  $58^\circ$  の時にも同様の後方散乱の傾向がみられる。主塔やケーブルによる体積散乱が強く、輪郭が明確に認識できる。

散乱電力成分の割合は、4成分の電力合計に対する各散乱成分の比である。道路上に部材がない橋梁とある橋梁における照射角による散乱電力割合の変化を図7に示す。道路上に部材がない橋梁では、照射角  $\phi$  が  $0^\circ$  に近づくほど表面散乱の割合が高くなり、照射角  $\phi$  が  $90^\circ$  に近づくほど2回反射散乱の割合が高くなる傾向がみられた。この傾向は、主桁と床版以外の部材をもたない桁橋に顕著である。また、照射角  $\phi$  が  $45^\circ$  に近づくほど、体積散乱が強くなるのが分かる。一方、道路上に部材がある橋梁の多くは、照射角  $\phi$  が  $0^\circ$  に近づくほど2回反射散乱の割合が高くなり、照射角が  $90^\circ$  に近づくほど表面散乱の割

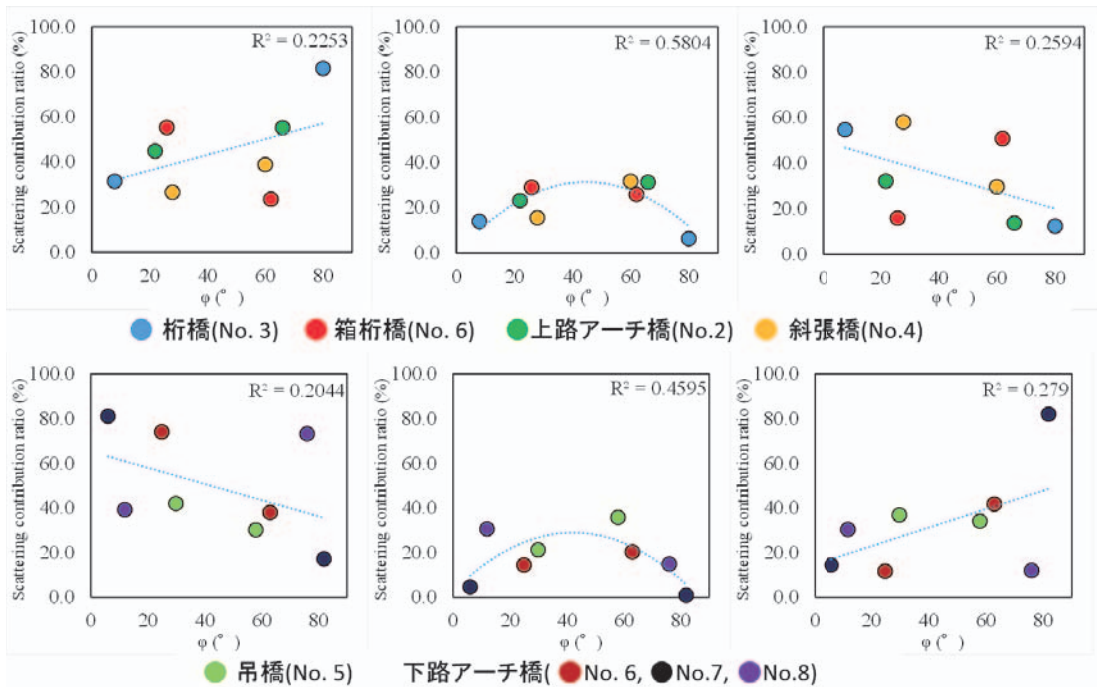


図7 照射角  $\phi$  による散乱電力の割合の傾向  
 (上) 道路上に部材がない橋梁, (下) 道路上に部材がある橋梁

合が高くなること分かる。この傾向は、道路上に部材をもたない橋梁の後方散乱傾向と異なる。この理由として、照射角が  $0^\circ$  に近い場合、橋梁側面による表面散乱の割合よりも、道路上部材の補剛材による2回反射散乱の割合が高くなるためだと考えられる。また、照射角が  $90^\circ$  に近い場合には、道路上部材の影響により、橋梁側面の面積が大きくなるため、側面による2回反射散乱よりも、部材側面による表面散乱の割合が高くなるものと考えられる。

小規模橋梁における後方散乱の検討結果からは、大規模橋梁と同様に構造形式や照射角  $\phi$  による後方散乱特性の変化がみられた。照射角が大きいほど、2回反射散乱が生じやすく、輪郭内の後方散乱が比較的強くなる。また、道路の上に構造部材をもつ橋梁では、これらの部材からの反射により、体積散乱が比較的強く生じる傾向がみられる。

## 5. 2011年東北地方太平洋沖地震の被害橋梁

これまで検討した橋梁の後方散乱特性を踏まえて、2011年東北地方太平洋沖地震の津波に襲われた橋梁の事例を紹介する。対象となる橋梁は、岩手県陸前高田市の津波浸水範囲に位置する3橋梁である。国土交通省国土技術政策総合研究所(NILIM)が災害直後から現地調査を行い、道路橋の被害状況や構造条件を整理した<sup>22)</sup>。NILIMの資料による対象橋梁の詳細を表3に示す。対象橋梁は、すべて道路上に構造物のない単純な形式である。また、桁下高は幅員に比べて小さいため、SAR画像における倒れ込み、2回反射、3回反射が重なる条件を満たす。そのうち、2橋では主桁が流失し、1橋については現地調

査で損傷が確認されなかった。

被害橋梁を観測するために、災害直後に撮影された TSX 衛星画像と Pi-SAR2 航空機画像を用いた。TSX 画像は、2011 年 3 月 13 日 05:43 に StripMap モードにより HH 偏波で観測されたものである。センサの照射方位は北から時計回りに 280.4°，入射角は 33.2°である。Pi-SAR2 画像は、2011 年 3 月 18 日に 4 偏波で観測されたものである。照射方位は北から時計回りに 145.0°，入射角は 47.8°である。対象橋梁周辺の SAR 画像と災害前後の光学画像を図 8 に示す。前節と同様の前処理を行い、4 偏波の Pi-SAR2 画像を 4 成分の散乱電力に分解した。

松原大橋では現地調査において損傷は確認されなかった。TSX 画像における照射角は 44°，Pi-SAR2 画像では 22°である。照射角が比較的に小さいため、2 回反射と 3 回反射ともに強度が低く、いずれの画像からも明確には確認できなかった。一方、鏡面反射する床版上では強い反射がみられた。道路上には構造部材が存在しないため、津波で運ばれた瓦礫によるものと推測できる。また、散乱電力成分のカラー合成図では、橋梁本体からの表面散乱と 2 回反射と異なり、床版中央において強い体積散乱を示す。高い地上分解能より、堆積した瓦礫の個数と場所もおおよそ把握できる。

気仙大橋と姉齒橋は、主桁が流出した被害橋梁である。気仙大橋については、TSX 画像での照射角は 49°，Pi-SAR2 画像では 67°である。姉齒橋については、TSX 画像での照射角は 30°，Pi-SAR2 画像では 84°である。床版が流出したため、橋脚部分の 2 回反射の

表 3 対象とした岩手県陸前高田の浸水域に位置する 3 橋梁

橋梁名	構造形式	橋長 [m]	幅員 [m]	桁下高 [m]	被害区分
松原大橋	PC 床版橋	56.00	12.80	1.95	損傷が確認されず
気仙大橋	鋼 I 桁	108.74	13.30	6.33	全上部構造物が流失
姉齒橋	鋼トラス	147.20	8.20	3.57	全上部構造物が流失

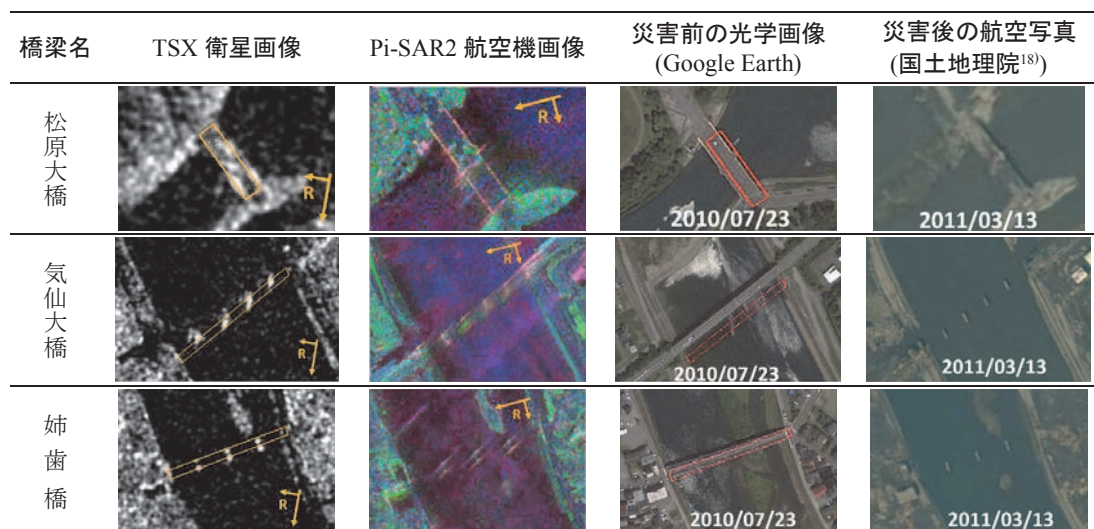


図 8 対象となる 3 橋梁の災害後 SAR 画像と災害前後の光学画像

Pi-SAR2 画像は、2 回反射散乱を赤色、体積散乱を緑色、表面散乱を青色で表示するカラー合成図である。



み投影された。気仙大橋の Pi-SAR2 画像からは、2 回反射に加えて体積散乱も観測されたが、これは橋脚間に発生した多重反射と考えられる。主桁が全部流出した場合は、地上分解能の低い単偏波の衛星 SAR 画像だけからも十分に被害状況を把握できる様子が示された。

## 6. まとめ

本稿では、水域の上に位置する橋梁に対する SAR 画像における後方散乱特性とその投影モデルを解説し、桁下高の高い大規模橋梁と低い小規模橋梁の事例を紹介した。また、平時の橋梁の後方散乱モデルを踏まえて、2011 年東北地方太平洋地震において津波被害を受けた橋梁の事例を解説した。水面との相互反射により、橋梁の SAR 画像上への投影は、橋梁の構造形式や SAR 画像の撮影条件（照射角と入射角）に大きく影響されることを明らかにした。橋梁の後方散乱特性を理解することは、災害直後の 1 時期の SAR 画像を用いた迅速な橋梁被害の判断に繋がる。ここでは、通常橋梁 11 橋と津波襲来後の橋梁 2 橋について紹介したが、橋梁の後方散乱特性を解明するためには、今後もより多くの事例を収集・分析する必要がある。

### 謝 辞

本稿に掲載した TerraSAR-X (TSX) データはドイツ航空宇宙センター (DLR) に所有権があり、(株) パスコより千葉大学との共同研究の一環として提供された。航空機 SAR (Pi-SAR2) データは、国立研究開発法人情報通信研究機構に所有権があり、千葉大学との共同研究より提供されたものである。

### 文 献

- 1) G. Franceschetti, A. Iodice and D. Riccio : "A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**(8), 1787-1801 (2002).
- 2) E. Simonetto, H. Oriot and R. Garello : "Rectangular building extraction from stereoscopic airborne radar images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**(10), 2386-2395 (2005).
- 3) P. Gamba, B. Houshmand and M. Saccani : "Detection and extraction of buildings from interferometric SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**(1), 611-618 (2000).
- 4) D. Brunner, G. Lemoine and L. Bruzzone : "Earthquake damage assessment of buildings using VHR optical and SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **48**(5), 2403-2420 (2010).
- 5) 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*, **13**(5), 18-32 (2013).
- 6) Y. Cao, C. Su and G. Yang : "Detecting the number of buildings in a single high-resolution SAR image," *European Journal of Remote Sensing*, **47**(1), 513-535 (2014).
- 7) 三浦弘之, 翠川三郎, 松岡昌志 : 撮影方向の異なる高分解能 SAR 画像を用いた建物被害の検出精度の向上に関する研究, *日本地震工学会論文集*, **15**(7), 390-403 (2015).
- 8) H. Li, Q. Li, G. Wu, J. Chen and S. Liang : "The impacts of building orientation on polarimetric orientation angle estimation and model-based decomposition for multilook polarimetric SAR data in urban areas," *c* **54**(9), 5520-5532 (2016).
- 9) W. Liu and F. Yamazaki : "Extraction of collapsed buildings due to the 2016 Kumamoto earthquake based on multi-temporal PALSAR-2 data," *Journal of Disaster Research*, **12**(2), 241-250 (2017).



## 第2編 応用事例

- 10) リュウ・ウェン, 山崎文雄: 高解像度 SAR 画像の強度と位相情報を用いた高層建物の高さ推定, 日本リモートセンシング学会誌, **38**(2), 149-162 (2018).
- 11) Y. Wang and Q. Wang: "Recognition of roads and bridges in SAR images," *Pattern Recognition*, **31**(7), 953-962 (1998).
- 12) U. Soergel, E. Cadario, A. Thiele and U. Thoennessen: "Extraction of bridges over water in multi-aspect high-resolution InSAR data," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXVI** part 3 (2006).
- 13) U. Soergel, H. Gross, A. Thiele and U. Thoennessen: "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), 147-153 (2008).
- 14) E. Cadario, K. Schulz, H. Gross, H. Hammer, A. Thiele, U. Thoennessen, D.J. Weydahl and U. Soergel: "Feature extraction and change detection for bridges over water in airborne and spaceborne SAR image data," In: *Proceedings of the EARSeL Symposium: Remote Sensing-New Challenges of High Resolution* (2008).
- 15) AIRBUS: "TerraSAR-X image product guide -Basic and enhance radar satellite imagery" (2019).  
[https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459\\_9\\_20171004\\_tsxx-airbusds-ma-0009\\_ts\\_x-productguide\\_i2.01.pdf](https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_ts_x-productguide_i2.01.pdf)
- 16) 情報通信研究機構: 航空機搭載型合成開口レーダ (Pi-SAR2) (2019).  
<https://www.nict.go.jp/out-promotion/other/case-studies/itenweb/4otfsk00000oxk9o-att/Pi-sar2.pdf>
- 17) J.-S. Lee: "Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-2**(2), 165-168 (1980).
- 18) 国土地理院: 地理院地図 (2019).  
<https://maps.gsi.go.jp/>
- 19) 大内和夫: リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎, 東京電機大学出版局, 第2版, 125-127 (2009).
- 20) 国土地理院: 基盤地図情報 (2019).  
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>
- 21) G. Singh, Y. Yamaguchi and S.-E. Park: "General four-component scattering power decomposition with unitary transformation of coherency matrix," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **51**(5), 3014-3022(2013).
- 22) 国土技術政策総合研究所 (NILIM): 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, 国土技術政策総合研究所資料, (843)(2015).  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0843pdf/ks084301.pdf>

# リモートセンシングの応用・解析技術

## 農林水産・環境・防災から建築・土木、高精度マッピングまで

---

発行日 2019年8月8日 初版第1刷発行  
監修者 中山 裕則, 杉村 俊郎  
発行者 吉田 隆  
発行所 株式会社エヌ・ティー・エス  
東京都千代田区北の丸公園 2-1 科学技術館 2階  
TEL 03(5224)5430 <http://www.nts-book.co.jp/>  
制作・印刷 日本ハイコム株式会社

---

© 2019 中山裕則, 杉村俊郎 他.

ISBN 978-4-86043-612-4

乱丁・落丁はお取り替えいたします。無断複写・転載を禁じます。

定価はケースに表示してあります。

本書の内容に関し追加・訂正情報が生じた場合は、当社ホームページにて掲載いたします。

※ホームページを閲覧する環境のない方は当社営業部（03-5224-5430）へお問い合わせ下さい。