

### 高解像度 SAR 画像における橋梁の反射特性に関する基礎的検討

千葉大学	正会員	○リュウ・ウエン
元千葉大学	非会員	澤 可那子
千葉大学	正会員	山崎 文雄

#### 1. はじめに

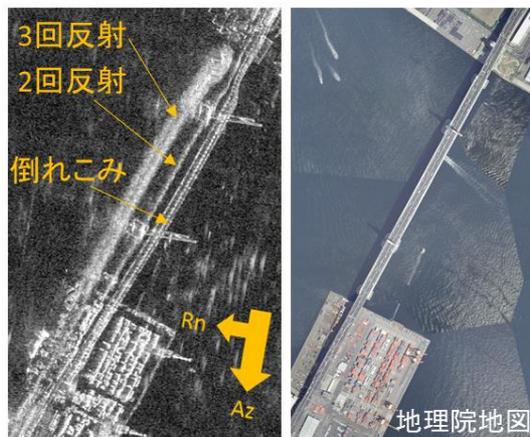
災害発生時、迅速に救助、救援活動を行うためには被災地における素早くかつ広域的な状況把握は欠かせない。現地調査は多大な時間を要し、また危険が伴うことから災害発生直後の情報収集手段としては課題が残る。そこで有用となるのがリモートセンシングであり、遠隔的に広範囲の情報を一度に取得することが可能である。なかでも合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)は、マイクロ波を能動的に照射して観測を行うことから、昼夜、天候の制約を受けず災害時の緊急対応に適する。災害前後の画像を比較する等、SAR 画像を用いた被災状況の把握に関する研究は既に多数行われている。しかし、そのような状況下で橋梁を対象とした研究は乏しい。近年、南海トラフ巨大地震の発生が危惧されており、豪雨による水害も増加している。そうした災害においては、橋梁の被害が予想される。

本研究では、高解像度 SAR 画像を用いた災害発生直後における橋梁被害把握を最終目的とし、平時において水面を横過する橋梁の SAR 画像上における投影特性の検討を行った。

#### 2. 橋梁の投影モデル分析

Soergel らりの研究によると、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  $\theta$  が  $90^\circ$  のとき、倒れこみ、2 回反射と 3 回反射の影響により 3 本の縞状に投影される。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)側から倒れこみ、2 回反射、3 回反射による投影が順に見られる。このような 3 本の縞状投影は、前述の条件下において発生するとされている。角度が  $90^\circ$  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ることにより、投影が異なったものになると考えられる。また橋梁が小規模のとき、倒れこみと 2 回反射や、倒れこみと 3 回反射が重なって投影される場合があることを幾何学的に明らかにした。これらの投影モデルを図-2 に示す。

以上の投影モデルを踏まえ、まずは規模の条件のみ満たす大きな橋梁の投影特性を検討し、つぎに規模と角度  $\theta$  どちらの条件も満たさない小規模な橋梁の投影特性を検討した。



(左) SAR 画像、(右) 航空写真  
図-1 横浜ベイブリッジ

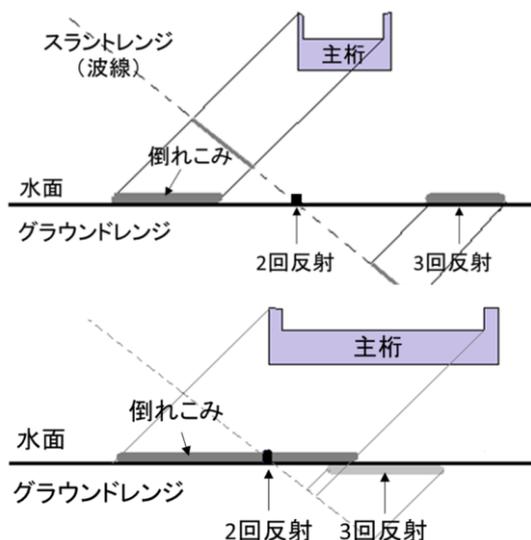


図-2 SAR 画像における橋梁の反射の投影モデル：  
(上) 大規模橋梁、(下) 小規模橋梁

#### 3. 大規模橋梁における投影特性の検討

規模の条件を満たす東京ゲートブリッジ、レインボーブリッジ、鶴見つばさ橋、横浜ベイブリッジの 4 橋梁を対象に SAR 画像における投影を確認した。株式会社パスコより提供を受けた TerraSAR-X(TSX) 画像と情報通信研究機構より提供された Pi-SAR2 画像を用いた。結果を表-1 に示す。表中の 2 回と 3 回はそれぞれ 2 回反射、3 回反射による縞状投影の有無を示している。△は橋梁構造の一部のみ確認できたものにつけている。表から  $\theta$  の角度が  $90^\circ$  でなくても約  $65^\circ$  以上であれば 3 本の縞状投影が確認でき

表-1 大規模橋梁の投影特性のまとめ

$\theta$ [°]	橋梁	画像	縞	2 回	3 回
11	レインボー	TSX	1	×	×
38	鶴見つばさ	TSX	1	×	△
46	鶴見つばさ	Pi-SAR2	2	×	○
51~66	東京ゲート	TSX	2	△	△
64	鶴見つばさ	Pi-SAR2	5	○	○
67	レインボー	Pi-SAR2	3	○	○
71	横浜ベイ	TSX	3	○	○
77~88	東京ゲート	Pi-SAR2	3	○	△
79	横浜ベイ	Pi-SAR2	3	○	○
83	横浜ベイ	Pi-SAR2	4	○	○

表-2 小規模橋梁の投影特性のまとめ

$\theta$ [°]	橋梁	画像	$\sigma^0$ [dB]	反射	輪郭
1	両国橋	Des	-13.56	○	○
4	晴海橋	Asc	-12.67	○	○
5	永代橋	Des	-12.45	○	○
15	蔵前橋	Des	-8.88	×	○
16	晴海橋	Des	-12.67	○	○
17	隅田川大橋	Des	0.68	×	×
21	新大橋	Asc	-6.40	×	○
21	両国橋	Asc	-9.47	×	○
23	清洲橋	Des	-5.69	×	○
25	永代橋	Asc	-9.09	×	○
33	相生橋	Asc	-0.76	×	×
35	蔵前橋	Asc	-7.71	×	○
37	隅田川大橋	Asc	-2.14	×	×
38	佃大橋	Des	-2.51	×	○
41	新大橋	Des	-2.76	×	○
43	清洲橋	Asc	-5.41	×	○
44	勝鬨橋	Des	-1.67	×	○
53	相生橋	Des	-4.78	×	○
58	佃大橋	Asc	-7.55	×	×
64	勝鬨橋	Asc	-6.53	×	○
50-68	中央大橋	Des	0.94	×	×
70-88	中央大橋	Asc	-3.39	×	○
48-90	両国大橋	Des	-1.46	×	×
33-90	両国大橋	Asc	-2.99	×	×

ることがわかった。また、東京ゲートブリッジは TSX と Pi-SAR2 のどちらの画像においても橋梁中央部で 3 回反射が消失し、確認できなかった。これは橋梁中央部のみ床版と桁が一体となる構造であり、橋梁底部が滑らかになっているためであると考えられる。鶴見つばさ橋と横浜ベイブリッジにおいては、縞が 3 本を超えて確認された画像があった。撮影条件によって SAR 画像において投影が残像として別の部分にも映り込むアンビギュイティという現象がある<sup>2)</sup>。このことから 4 本目、5 本目の投影はアンビギュイティまたは水面、橋梁間での更なる多重反射の影響ではないかと考える。

4. 小規模橋梁における投影特性の検討

隅田川とその派川を横過する規模の条件が満たさない 12 橋梁を対象に、TSX 画像を用いた投影条件の確認を行った。衛星の飛行方向（アジマス方向）が下降軌道(Des)と上昇軌道(Asc)の計 2 枚の画像を用いた。結果を表-2 に示す。床版上における煩雑な投影が多く確認されたため、鏡面反射の有無と橋梁輪郭の捕捉の可否をまとめた。鏡面反射は床版上の後方散乱係数( $\sigma^0$ )を水面と比較することで判断した。この結果から、 $\theta$  が約 15°以上で鏡面反射が確認できなくなっていることがわかった。これは一般的に床版上の構造物が橋軸に沿って設置されており、 $\theta$  が大きくなるにつれ構造物におけるコーナー反射、2 回反射や 3 回反射が生じやすくなるためである。橋梁の輪郭を捉えられなかった要因は、2 回反射や 3 回反射が重なったことに加え、複雑な路線構成をしていることやトラス等の上部工も影響している。そのため、角度  $\theta$  との有義な関係は確認できなかった。

5. まとめと今後の課題

災害発生直後の橋梁被害把握を最終目的に、まずはその足がかりとして高分解能 SAR 画像を用いて平時における橋梁の投影特性を検討した。一般的に、大規模橋梁においては  $\theta$  が約 65°以上であれば 3 本の縞状に投影されることがわかった。しかし、橋梁構造によっては 65°以上を満たしていても 3 本の縞

状投影にならない場合がある。このことから、縞状の投影が途中で消失していたとしても、必ずしも橋梁に被害があると言えない。

小規模橋梁においては 3 本の縞状投影は確認できなかった。また、 $\theta$  が約 15°以上になると床版上に煩雑な投影が生じることがわかった。津波などにより床版上に堆積物が積みあがった場合、橋梁が落橋して真下に構造物が堆積した場合等においても複雑な後方散乱が発生し、煩雑な投影となることがわっている。したがって、今後の課題としては平時における煩雑な投影か、被災したことによる煩雑な投影かを判別できる方法が必要と考える。

謝辞

本研究に使用した TerraSAR-X データの所有権はドイツ航空宇宙センター(DLR)が有するものであり、株式会社パスコより提供して頂きます。Pi-SAR2 画像は国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)に有し、提供して頂きます。

参考文献

- 1) U. Soergel, H. Gross, A. Thiele, 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(3), 185-190, 2006.
- 2) R.O. Harger, Synthetic Aperture Radar Systems: Theory and Design, in Academic Press, New York:, 1970.