

TerraSAR-X 画像を用いた橋梁把握の基礎的検討

澤 可那子¹・リュウ ウェン²・山崎 文雄²

¹千葉大学工学部 都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

²千葉大学大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

近年、南海トラフ巨大地震やさらなる内陸地震の発生が危惧されている。また短時間豪雨などによる水害も発生している。そういった災害においては、水面に架かる橋梁においても甚大な被害が予想される。災害時における被害の抽出は、災害前後の画像を使用して行う方法がよく用いられている。したがって橋梁が被害を受けたかどうかということも平時の橋梁と被災後の橋梁の状態とを比較することで知ることが可能であると考え。本研究では、東京湾に接続する隅田川とその派川に架かる12の橋梁を対象に、橋梁が衛星SAR画像上で平時においてどのように見えるのか検討を行った。

Key Words : Bridge, Detection, Remote sensing, TerraSAR-X, Urban area

1. はじめに

災害発生時にはしばしば道路や鉄道の寸断により交通網が麻痺する。また、現地調査には危険が伴うため早期に現地へ立ち入ることは困難な場合が多い。加えて被害が広範囲に及ぶと被災状況の収集にはさらなる時間を要する。しかし、迅速に救援、救助活動を行うためにも広域的な被災状況の把握は重要である。そこで有用となるのが現地に行くことなく遠隔的に、かつ広範囲の情報を取得することができる衛星や航空機からのリモートセンシング技術である。その技術の一つである合成開口レーダ (SAR) はマイクロ波を能動的に衛星や航空機から照射し、その反射波を観測することで地表の状況を把握する。マイクロ波を利用するという特性から天候、時間帯の影響を受けにくく、光学センサと比較すると撮影機会に恵まれている。したがって、時間、天候に制約がある光学センサよりも災害時の緊急対応に適する。

SAR 画像を用いた災害時の被災状況把握に関する研究は既に行われている。松岡、山崎¹⁾は災害時における被害地域検出手法の提案を行っている。加藤、山崎²⁾は、水域がほかの土地被覆に比べて後方散乱強度が低いことを利用して地震による水域の変化抽出を行った。また、リュウら³⁾は SAR 画像を用い 3 次元の地殻変動の検出を試みている。こうした広範囲にわたる被災情報の収集に関する研究に加え、近年の SAR の目覚ましい解像度の向上をうけて建物やタンクなど構造物単位での被災状況把握も進ん

でいる。岩崎ら⁴⁾は、SAR の斜め照射特性に着目し、倒れこみ、レーダー影の変化から建物側面の被害を把握することを試みている。

しかし、SAR 画像を用いた災害被害把握に関する研究がこのように進んでいる中で橋梁構造物を対象とした研究は乏しい。2011 年東北地方太平洋沖地震では、津波の遡上により沿岸部において多くの橋梁が流出、損壊した⁵⁾。南海トラフ巨大地震においても最大で 34m の津波の発生が予想されており橋梁への被害は免れない。橋梁は、道路、鉄道を形成する主要な構造物であり、早急な救援、救助活動を行うためには橋梁においても迅速な被災状況の把握は欠かせない。SAR 画像上では、水面を横過する橋梁は、一定の条件を満たすと図-1 のように倒れこみ、2 回反射、3 回反射による特殊な投影が生じることが

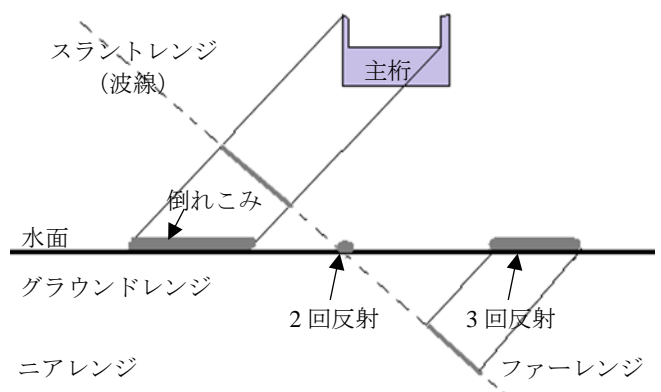


図-1 SAR 画像における水面を横過する橋梁の投影

分かっている⁶⁾。それを踏まえ、本研究では高分解能衛星 SAR 画像を用いて災害発生直後に橋梁の被害把握を行うことを最終目的とし、まずは平時において水面を横過する橋梁がどのように SAR 画像上に投影されるかということの検討を行った。

2. 対象地域・対象橋梁と使用データ

今回対象とした地域は、首都直下型地震の発生が危惧される東京である。対象橋梁は、東京湾に接続する隅田川とその派川にかかる 12 橋梁（図-2、表-1）とした。

使用したデータは、東京において平時に撮影された2枚のTerraSAR-X(TSX)画像（図-3）である。二枚の画像ともにほぼ同じエリアでHighSpotモードによりHH偏波で観測されている。(a)が下降軌道(Descending)でマイクロ波入射角は観測幅の中心において 42.19° 、アジマス方向は 189.61° である。一方で(b)は上昇軌道(Ascending)でありマイクロ波入射角が 39.43° 、アジマス方向は 350.15° である



図-2 対象地域と対象橋梁(Google Earth[®]より引用)

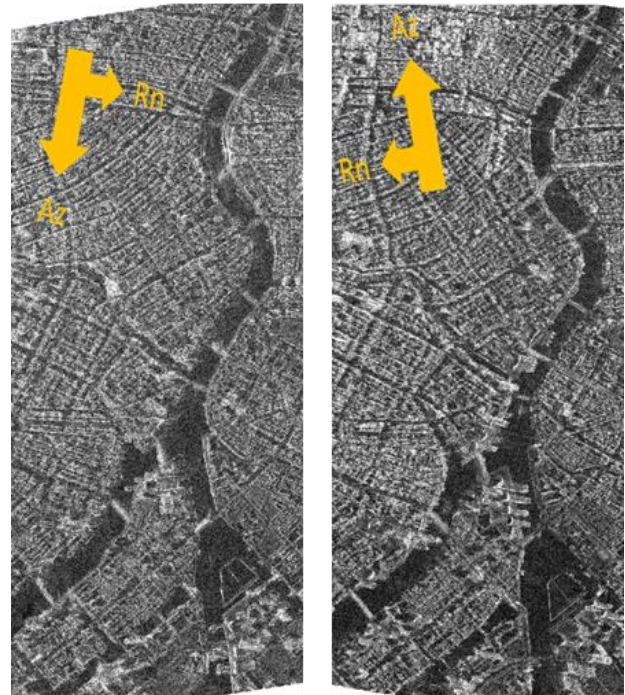
(左手系北基準)。幾何補正後に地図投影された簡易オルソ化後のEnhanced Ellipsoid Corrected (EEC)プロダクトで50cm/pixelにリサンプリングされている。それぞれの画像に対して、デジタル値(DN)から後方散乱強度への変換とスペックルサイズ低減のために拡張Lee Filterを適用した。ウィンドウサイズは橋梁細部における情報を残すために最小の3×3ピクセルを採用した。

3. SAR画像上における対象橋梁の観察

本研究では、橋軸とマイクロ波の照射方向（レンジ方向）のなす鋭角を軸に橋梁の投影特性の検討を行った。

表-1 対象とする 12 橋梁

No.	名称	構造	橋長[m]	幅員[m]
1	中央大橋	斜張橋	210.7	25.0
2	佃大橋	桁橋	220.0	25.0
3	勝鬨橋	アーチ橋	246.0	22.0
4	晴海橋	桁橋	172.8	不明
5	相生橋	トラス橋	149.1	36.8
6	永代橋	アーチ橋	184.7	25.0
7	隅田川大橋	桁橋	210.3	30.0
8	清洲橋	吊橋	186.2	22.0
9	新大橋	斜張橋	170.0	24.5
10	両国大橋	桁橋	329.5	不明
11	両国橋	桁橋	164.5	24.0
12	蔵前橋	アーチ橋	173.4	22.0



(a)2008/02/15

(b)2008/02/16

図-3 TSX 画像

Descending (Des)の場合

$$\theta = 270 - (\alpha - \beta) \quad (0 \leq \beta \leq 9.61)$$

$$\theta = |(\alpha - \beta) - 90| \quad (9.61 \leq \beta \leq 180)$$

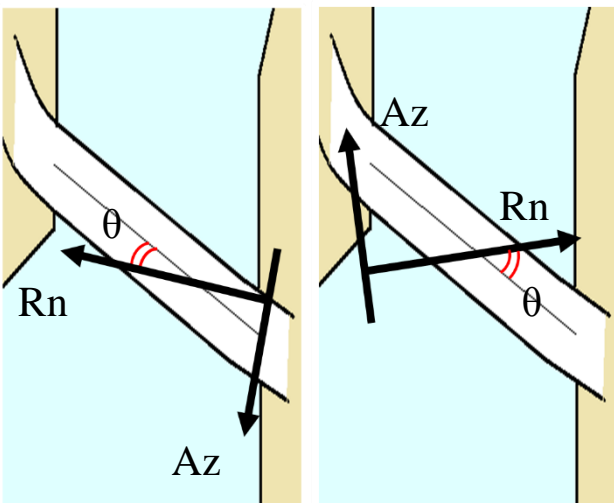
Ascending (Asc)の場合

$$\theta = |270 - (\alpha - \beta)| \quad (0 \leq \beta \leq 170.15)$$

$$\theta = (\alpha - \beta) - 90 \quad (170.15 \leq \beta \leq 180)$$

と定義する。ここで θ は橋軸方向とレンジ方向がなす鋭角(図-4)、 α はアジマス方位角、 β は橋軸の方位角($0 \sim 180^\circ$)である。

まず中央大橋(図-5)である。この橋は2径間連続鋼斜張橋という構造形式をしている。曲線橋のため2箇所で橋軸をとった。 θ はDesにおいては北側 53° から南側 71° と変化しAscにおいては同様に 67° から 85° へ変化する。通常、床版は凹凸が少なく滑らかな面であるため鏡面反射が起こり暗く投影される³⁾。しかし、中央大橋の画像では、Des、Ascの画像ともに床版においても複雑な後方散乱が発生し主桁の輪郭を確認できない。Desの画像においては主塔の存在が確認でき、Ascの画像においては主塔がマイクロ波照射方向に倒れこむ様子が明瞭に確認できる。



(c)Descending (d)Ascending
図-4 レンジ方向と橋軸方向がなす鋭角 θ

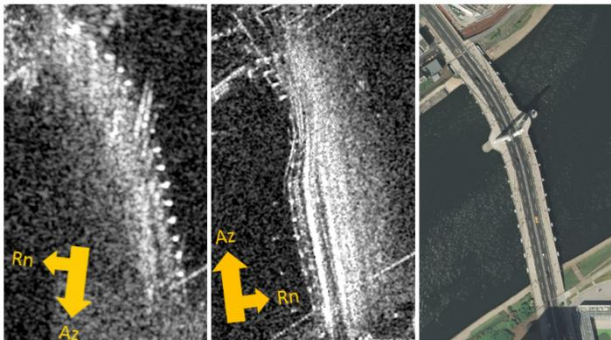


図-5 中央大橋：(左) 2008/02/15；(中心) 2008/02/16；
(右) 地理院地図より引用

どちらの画像においても主桁とケーブルの接続部は確認できるがケーブル本体は確認できない。

佃大橋(図-6)は3径間連続鋼床版箱桁橋である。 θ はDesで 41° 、Ascで 55° である。どちらの画像ともに床版上で複雑な後方散乱が確認できる。Desの画像ではそのような状況下でも主桁の輪郭を確認できる一方、Ascの画像はとくにファーレンジ側で強い後方散乱が発生し主桁の輪郭も確認できない。

勝鬨橋(図-7)は3径間で両端が下路式アーチ、中央部が上方に開く可動橋という構造である。 θ はDesで 47° 、Ascで 61° である。どちらの画像においても床版で複雑な後方散乱が発生しているが主桁の輪郭は確認できる。床版上の複雑な後方散乱は上部工が一つの要因と考えられる。Desの画像では上部工のアーチリブの倒れこみが一部確認できるが曖昧である。一方、Ascの画像では上部工のアーチリブ、そして吊材が倒れこむ様子まで鮮明に確認できる。またAscの画像では、とくにファーレンジ側に後方散乱が強い範囲が広がっている。

晴海橋(図-8)は高さの異なる道路が三つ水平方

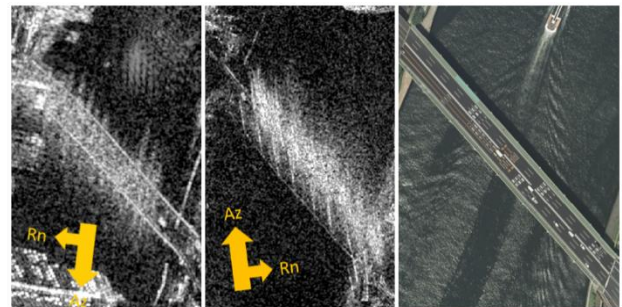


図-6 佃大橋

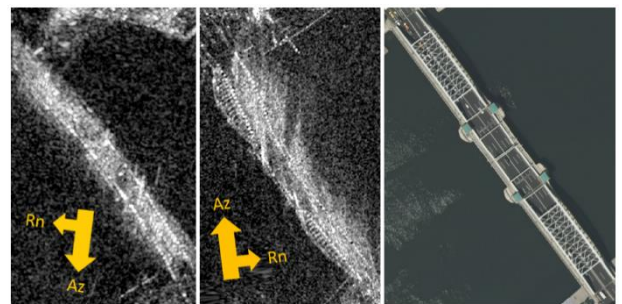


図-7 勝鬨橋

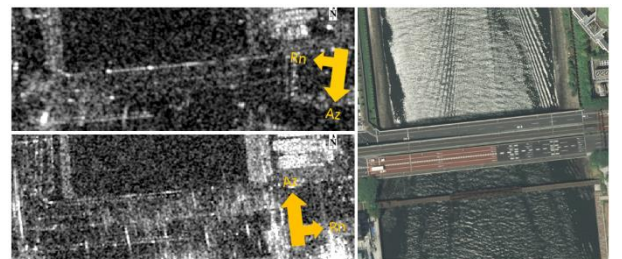


図-8 晴海橋

向に並び一つの橋を形成する構造の桁橋である。 θ はDesで 13° 、Ascで 1° である。床版は暗く投影されており鏡面反射が起こっていることがわかる。後方散乱は他の橋梁と比較して総じて弱い。主桁の輪郭はほぼ確認できる。しかし、主桁の一部において隣接する建物のレーダーシャドウによって一部判読不可能となっている。高さの異なる道路が並んでいるがそれによる影響は確認できない。

相生橋(図-9)は3径間鋼トラス桁橋である。 θ はDesで 50° 、Ascで 36° である。床版において、上部工のある部分では強い後方散乱が発生し、Desでは主桁の輪郭がかなり確認できるがAscでは確認できない。一方で上部工のない部分では鏡面反射が起き床版は暗く投影されている。したがって、この床版上に投影されている強い後方散乱は上部工の影響によるものであり、後方散乱の縞状の向きから上横構において反射したものであると言える。どちらの画像においても上部工の倒れこみは確認できない。

永代橋(図-10)は3径間で、中央部が下路式アーチ、両端部が鋼桁橋という構造である。 θ はDesで 8° 、Ascで 22° である。左右の側径間の床版においては暗く投影されており鏡面反射が確認できる。しかし中央径間では強い縞状の後方散乱が発生している。このことから、相生橋同様、上横構で反射したものであると考えられる。どちらの画像においても主桁の輪郭はおおむね確認できるが、Ascの画像の一部において上横構での反射の影響により不鮮明な部分も存在する。

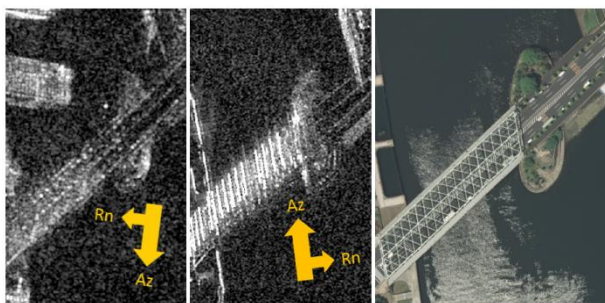


図-9 相生橋

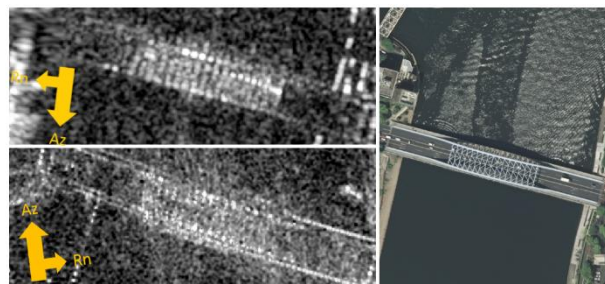


図-10 永代橋：(左上) 2008/02/15；(左下) 2008/02/16；(右) 地理院地図⁹⁾より引用

隅田川大橋(図-11)は3径間連続鋼床版箱桁橋である。この橋は高さの異なる道路が上下に平行に並び橋を形成する2層橋である。 θ はDesで 20° 、Ascで 34° である。どちらの画像においても床版上で複雑な後方散乱が発生しており主桁の輪郭は確認できない。とくにAscの画像ではファーレンジ側に強い後方散乱の範囲が広がっている。

清洲橋(図-12)は自碇式鋼鉄製吊り橋構造をしている。 θ はDesで 26° 、Ascで 40° である。床版においてやや強い後方散乱が発生しているが主桁の輪郭は鮮明である。Desの画像の一部においてメインケーブルの倒れこみが確認できる。また、Ascの画像ではニアレンジ側、ファーレンジ側ともにメインケーブルの倒れこみが確認できる。それと同時にどちらの画像においても塔部水平材が一部確認できる。

新大橋(図-13)は2径間連続斜張橋である。 θ はDesで 38° 、Ascで 24° である。どちらの画像においても床版上で複雑な後方散乱が発生しているが、主桁の輪郭は確認できる。また、主塔の倒れこみは見られない。

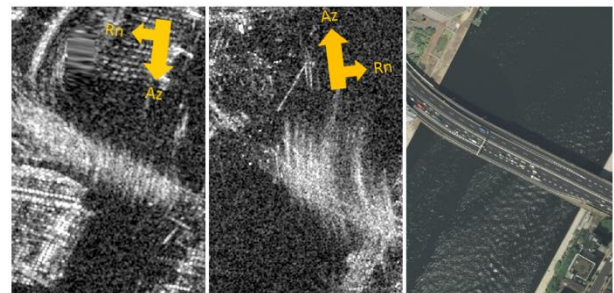


図-11 隅田川大橋

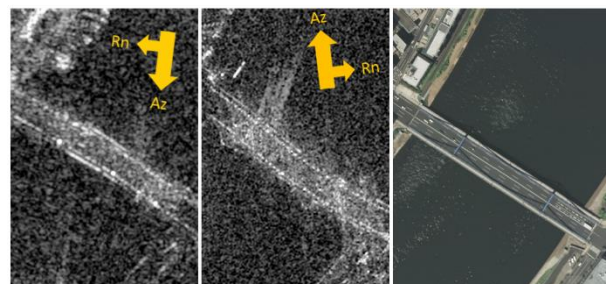


図-12 清洲橋

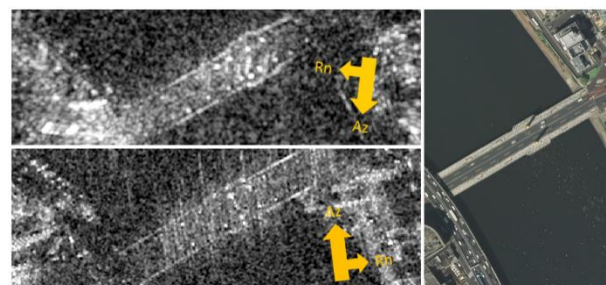


図-13 新大橋

両国大橋（図-14）は3径間連続鋼床版桁橋であり、首都高速道路のジャンクションを含むこともあり一部層構造で、また高さの異なる道路が水平に並び複雑な路線構成となっている。曲線橋であるため3箇所において橋軸をとると、 θ はDesにおいて橋梁西側 51° から 90° に達し、中央部では 50° 、また 90° に達し東側で 78° と変化する。Ascでは同様に 65° 、 90° 、 36° 、 90° 、 88° と変化する。床版上で複雑な後方散乱が発生し主桁の輪郭はもちろん、橋がどの位置に存在するかを特定することも一部において困難である。

両国橋（図-15）は3径間ゲルバー式鋼桁橋である。 θ はDesで 4° 、Ascで 18° である。床版は鏡面反射が起こったことにより暗く投影されている。Desの画像は他の橋梁と比較して総じて後方散乱が弱いが主桁の輪郭はおおむね確認できる。Ascの画像においては主桁の輪郭は鮮明に確認できる。

蔵前橋（図-16）は3径間の連続上路式アーチ構造となっている。 θ はDesで 18° 、Ascで 32° である。床版は比較的暗く投影されており鏡面反射が起きると考えられるが、橋脚の倒れこみにより一部やや強い後方散乱が確認できる。主桁の輪郭はどちらの画像においても確認できる。

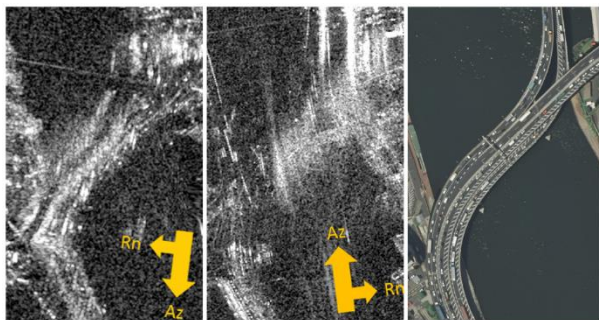


図-14 両国大橋

4. 照射角度による橋梁の投影特性の検討

以上の結果をまとめたものが以下の表-2である。輪郭は主桁輪郭を意味し、ニアレンジ側、ファーレンジ側どちらも確認できて○、どちらかのみの場合、曖昧な場合は△、不鮮明で確認できない場合は×としている。腹部は上部工、下部工の腹部を意味し、それらの倒れこみが確認できれば○、倒れこみは確認できないが存在を確認できる場合、倒れこみが曖昧な場合は△、不鮮明で確認できない場合は×とする。上部は上部工の上部を意味し、それらが一方のみでも確認できれば○とし、曖昧な場合は△、確認できない場合は×としている。上部工、下部工が存在せず、側部、上部に当てはまるものがない場合は—としている。

中央大橋のDes、Asc、佃大橋のAsc、隅田川大橋のAscの画像では主桁の輪郭を鮮明に把握することが

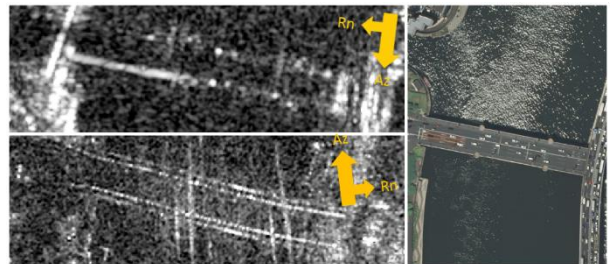


図-15 両国橋

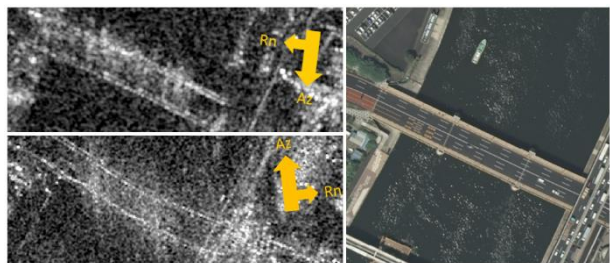


図-16 蔵前橋

表-2 対象12橋梁のSAR画像上での見え方のまとめ

No.	名称	構造	Des			Asc				
			$\theta [^\circ]$	輪郭	腹部	上部	$\theta [^\circ]$	輪郭	腹部	上部
1	中央大橋	斜張橋	53→71	×	△	—	67→85	△	○	—
2	佃大橋	桁橋	41	○	—	—	55	×	—	—
3	勝鬨橋	アーチ橋	47	○	△	×	61	○	○	×
4	晴海橋	桁橋	13	○	—	—	1	○	—	—
5	相生橋	トラス橋	50	○	×	△	36	×	×	○
6	永代橋	アーチ橋	8	○	×	○	22	○	×	△
7	隅田川大橋	桁橋	20	×	—	—	34	×	—	—
8	清洲橋	吊橋	26	○	△	△	40	○	○	△
9	新大橋	斜張橋	38	○	×	—	24	○	×	—
10	両国大橋	桁橋	51→90→50 →90→78	×	—	—	65→90→36 →90→88	×	—	—
11	両国橋	桁橋	4	○	—	—	18	○	—	—
12	蔵前橋	アーチ橋	18	○	△	—	32	○	△	—

できていない。これらはファーレンジ側で後方散乱が強い範囲が広がっているためである。以上の画像の他にも主桁の輪郭は確認できるが、同様にファーレンジ側に強い後方散乱の範囲が広がっている画像が存在する。それが佃大橋のDes画像、勝鬨橋のAsc画像、清洲橋のAsc画像である。これらの橋梁SAR画像に共通することは、橋軸とレンジ方向のなす鋭角 θ がほぼ 40° 以上であることだ。 θ が 40° 以上になることで橋梁、水面間での二回反射、三回反射が観測されやすくなり、その結果としてファーレンジ側での強い後方散乱が発生すると考える。

唯一、隅田川大橋は θ が 34° でもファーレンジ側での強い後方散乱が確認できるが、これは他の条件が影響している可能性が考えられる。それは橋梁が層構造になっていることだ。対象橋梁のうち層構造、または高さの異なる道路が水平に並んでいる橋梁は晴海橋、隅田川大橋、両国大橋が存在する。このうち晴海橋はDes、Ascともに主桁輪郭が明確であるが、隅田川大橋、両国大橋はそれぞれの画像ともに輪郭を把握できていない。把握できない要因として床版上において複雑な後方散乱が発生していることが挙げられる。 θ が 20° の隅田川大橋Des画像でも複雑な後方散乱が確認できることから、層構造など複雑な路線構造を持つ橋梁では各々の主桁部分で倒れこみや二回反射、三回反射が発生し、それが床版部分で重なり合うため複雑な後方散乱が発生しやすいと考える。したがって、橋軸とレンジ方向が平行にちかくない限り他の橋梁よりも θ が小さな値で複雑な後方散乱が発生すると考える。

腹部の投影特性についても一定の傾向が見られる。上部工の倒れこみが確認できる○のものは観測した橋梁のうち θ が 40° 以上であった。しかし、相生橋のように θ が大きくても上部の上横構での反射により腹材の倒れこみが確認できないもの、勝鬨橋のDes画像のように倒れこみは確認できるが不明瞭なものも存在し、 θ がある一定角度以上であれば必ず上部工の倒れこみが確認できるという訳ではないことが分かった。上部の投影が見られた画像の照射角度には一定の法則は確認できなかった。

5. まとめと今後の課題

東京都心部を撮影した2枚のTSX画像を用いて、橋軸とレンジ方向がなす鋭角 θ を軸にSAR画像上における平時の橋梁の投影特性を検討した。上部工の腹部の倒れこみを確認したい場合には、 θ を一定程度

以上、本研究では 40° 以上、大きくする必要があると言える。しかし、一方で θ を大きくするにつれてファーレンジ側で強い後方散乱の範囲が広がり主桁輪郭を判読しにくくなってしまふ恐れがある。また、層構造や高さの異なる道路が水平に並んだ構造の橋梁では、複雑な後方散乱が発生しやすく観測が困難であることが分かった。

本研究から、橋軸とレンジ方向がなす鋭角 θ が橋梁の投影特性に大きくかわりを持っていることが明らかになった。しかし、橋軸とレンジ方向がなす角度のみでは橋梁の投影特性を把握するためには不十分であり、構造形式、桁下高等、ほかの要素も交えて検討することが欠かせない。また、衛星SAR画像は軌道が決まっており、 θ の値をそれぞれの橋梁に対して自由に設定することは不可能である。したがって複雑な後方散乱の発生メカニズムを突き止め、そのような後方散乱が発生している中でも橋梁の観測が可能となるよう検討を進めていく必要がある。

謝辞

本研究で使用したTSX画像は、株式会社パスコと千葉大学の共同研究の一環として株式会社パスコより提供を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星SAR強度画像を用いた被害地域検出手法の最近の地震への適用とその妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, (558), 139-147, 2002.
- 2) 加藤圭太, 山崎文雄: ALOS/PALSAR 画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震による水域の変化抽出, 日本地震工学会論文集, 10(3), 1-11, 2010.
- 3) リュウ・ウエン, 山崎文雄, 松岡昌志, 野中崇志, 笹川正: TerraSAR-X強度画像を用いた2011年東北地方太平洋沖地震における3次元地殻変動の検出, 日本リモートセンシング学会誌, 34(3), 166-176, 2014.
- 4) 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.
- 5) 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, 68, S-02, 2012.
- 6) Soergel, U., Gross, H., Thiele, A., Thoennesen, U., 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
- 7) Google Earth: <https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>
- 8) 国土地理院: <http://maps.gsi.go.jp/>