

航空機 Pi-SAR-X2 画像を用いた 橋梁被害の目視判読

平野 晴也¹・山崎 文雄²・劉 ウェン²

¹ 非会員 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)

Email : hiranoharuya@gmail.com

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

Email : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp, wen.liu@chiba-u.jp

2011年東北地方太平洋沖地震による津波によって、多くの橋梁が被害を受けた。近年、発生が危惧されている首都直下型地震や南海トラフ地震の際にも、道路橋や鉄道橋等の交通インフラの被害が懸念される。災害直後、早急に橋梁の被害を把握することは迅速な緊急対応につながる。航空機 SAR は発災直後に、被災地の緊急観測が可能である一方、災害前の同じ観測条件のデータが存在しない可能性が高く、災害前後での比較が難しい。そこで、1 時期の航空機 SAR 画像から橋梁被害を把握することが重要となる。本研究では、全偏波高解像度航空機 SAR (Pi-SAR-X2) 画像を用いて、実際に津波による被害を受けた橋梁を対象に 4 成分散乱電力分解を行い、1 時期の航空機 SAR 画像による橋梁被害の目視判読を試みた。

Key Words: Pi-SAR-X2, bridge, full-polarimetry, airborne SAR, backscattering characteristics

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震による津波によって、多くの道路橋や鉄道橋が流出・損壊するなどの被害を受けた^{1,2)}。橋梁や道路等の被害による交通ネットワークの遮断は、災害対応や復旧の遅れにつながる。したがって、発災直後に橋梁の被害状況を把握することが重要といえる。広範囲に及ぶ被害域の状況を早急に把握するために、人工衛星や航空機等のプラットフォームに搭載したセンサーを用いて、地表面を観測するリモートセンシング技術が利用されている。マイクロ波を用いた合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) は光学センサーと異なり、時間や天候を問わずに地表面を観測することができる。とくに近年の航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR) は 30cm の高解像度かつ 4 偏波での緊急観測が可能であるため、災害状況の把握に適しているといえる。しかし、衛星 SAR と異なり災害前後での同一条件での観測が難しいことや災害前のデータが存在しないことから、災害前後 2 時期画像を比較することが難しい。そこで、1 時期の航空機 SAR 画像から橋梁の被害状況の把握することが重要となる。

リモートセンシング技術を用いた災害状況の把握に関する研究は多く行われている。Yamazaki ら³⁾は高解像度の光学衛星画像を用いて地震による建物被害の検出を行

った。庄司ら⁴⁾は光学衛星画像を用いて、津波によって被害を受けた橋梁構造物の被害把握を行った。近年では、橋梁を対象にした SAR 画像を用いた研究がいくつか行われている。Soergel ら⁵⁾は、SAR 画像上では水域の上を通る橋梁の倒れこみ、2 回反射、3 回反射という現象が生じることを明らかにした。Liu ら⁶⁾は X バンドの高解像度 SAR 画像を用いて、小規模な橋梁では 2 回反射および 3 回反射が倒れこみと重なること、橋梁とマイクロ波の照射方向の角度によって 2 回反射および 3 回反射が投影されることを明らかにした。井上ら⁷⁾は災害前後での橋梁の後方散乱の変化を利用し、2 時期の X バンド高解像度 SAR 画像を用いて、後方散乱係数の差分と相関係数により橋梁被害の把握を行った。

以上の SAR 画像を用いた橋梁に関する研究は単偏波のみの画像を利用したものであった。しかし近年では 4 偏波 (HH・HV・VH・VV) を用いて観測することができる。4 偏波の複素データを用いることで、対象物の散乱メカニズムをより詳細に識別することが可能になる。Freeman ら⁸⁾は 4 偏波から 3 つの散乱成分に分解する散乱モデルを提案した。Yamaguchi ら⁹⁾はさらに新たな散乱成分を加え、4 成分の散乱電力分解を提案した。被害状況の把握に 4 成分散乱電力分解を利用した例として、Chen ら¹⁰⁾は津波で被害を受けた都市域を対象に、被害の前後で特定の散乱成分の割合が変化することを明らか

にした事例がある。橋梁においても同様に津波や地震により被害を受けた場合には、後方散乱は変化すると考えられる。

本研究は、災害後 1 時期の SAR から橋梁の被害を把握することを最終目的としている。そこで本報ではその第一段階として、東北地方太平洋沖地震による津波によって被害を受けた橋梁を対象に、4 偏波高解像度航空機 SAR 画像を用いて 4 成分分散電力分解を行い、橋梁被害の目視判読の検討を行った。

2. 対象地域および使用データ

本研究では、東北地方太平洋沖地震発生後に岩手県大槌町と陸前高田市、宮城県南三陸町と石巻市を観測した 4 枚の Pi-SAR-X2 画像を用いた。対象地域の Pi-SAR-X2 画像を図 1 に、その観測条件を表 1 に示す。使用したものは MGP (Multi look Ground range Product) で、強度と位相を有する複素データであり、地図に 0.25m/pixel の解像度で投影された。なお、SAR 画像上の橋梁を明瞭に認識できるように、スペックルノイズを低減するフィルター処理などは行っていない。

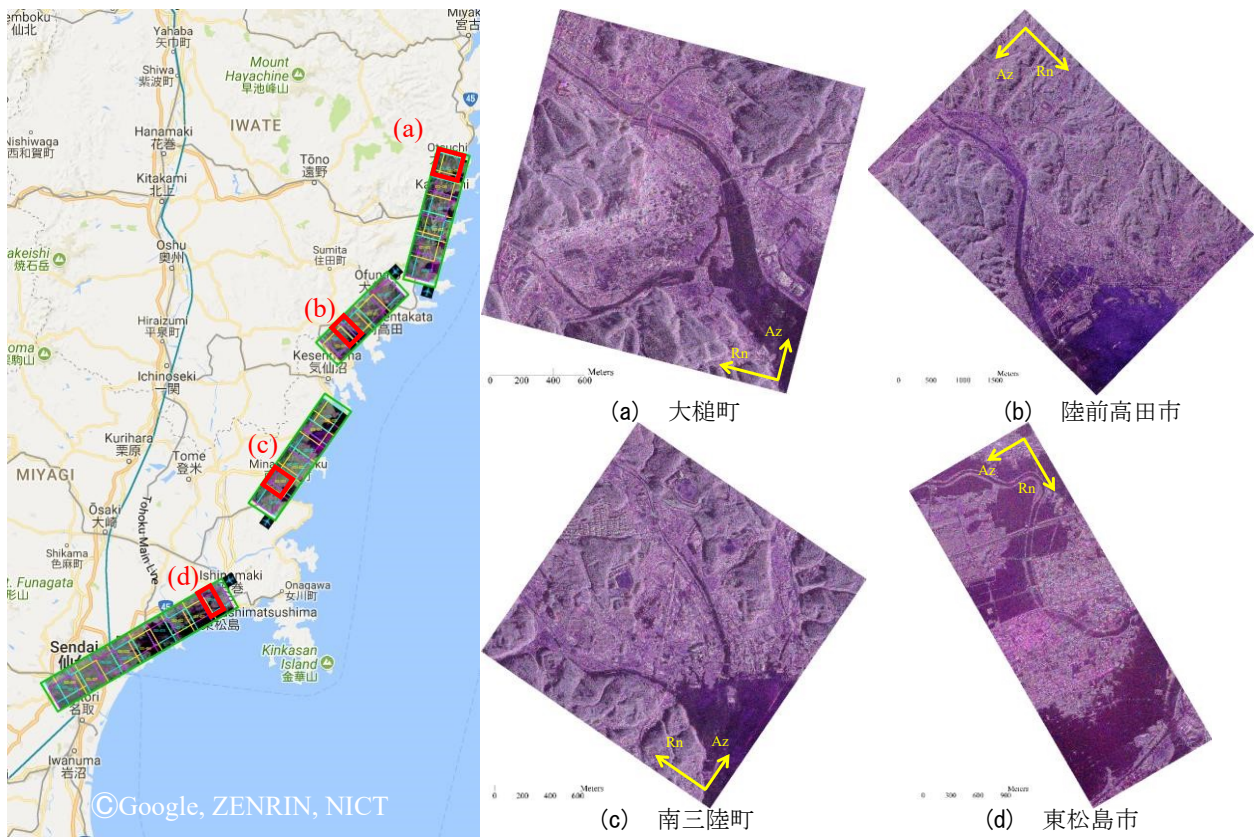


図-1 対象地域の偏波カラー合成画像 (R:HH, G:HV, B:VV)

表-1 使用データの観測条件

場所	大槌町	陸前高田市	南三陸町	東松島市
日付	2011年3月18日	2011年3月18日	2011年3月18日	2011年3月12日
アジマス方向 (°)	15	-135	35	-120
入射角 (°)	44.6	43.1	45.3	36.2

3. 目視判読方法

本研究では国土技術政策総合研究所の資料^{1),2)}をもとに、津波による被害を受けた15橋梁を選定した。対象とした橋梁の橋梁名、橋種、流出の有無について表2に示す。上部構造または下部構造の流出した橋梁が8橋梁、瓦礫の堆積や高欄の変形など流出以外の被害を受けた橋梁が7橋梁である。

橋梁の後方散乱は、橋梁の構造形式だけでなく橋梁の軸方向とマイクロ波の照射方向の角度によって変化することがわかっている⁹⁾。そこで、図-2に示すように橋軸方向とマイクロ波の照射方向の間の角度を ϕ と定義する。

4成分散乱電力分解を用いて4種類の散乱成分に分解した。4成分散乱電力分解とは、HH・HV・VH・VV偏波の実測データを、散乱モデル行列を用いて対象物での散乱現象を表面散乱 (Surface scattering : Ps)、体積散乱 (Volume scattering : Pv)、2回反射散乱 (Double-bounce scattering : Pd)、ヘリックス散乱 (Helix scattering : Pc) の4成分の散乱電力に分解することで、単偏波よりも詳細に散乱メカニズムを識別できる方法である。表面散乱は地面、海面などの表面で引き起こされる1回(奇数回)反射の散乱過程、体積散乱は絡み合った枝などランダムに向いた線状物体の集合から引き起こされる散乱過程、2回反射散乱は地面と幹、道路と建物の壁などの直角構造で引き起こされる2回(偶数回)反射の散乱過程、ヘリックス散乱は直線偏波を円偏波に変える散乱過程で人工建造物の表面から発生する散乱過程を示している¹¹⁾。

資料^{1),2)}および光学画像をもとに、偏波カラー合成画像および4成分散乱電力のカラー合成画像から橋梁被害を目視で判読できるかどうかの検討を行う。

表-2 対象橋梁の橋梁名、橋種、流出の有無⁹⁾

橋梁 No.	橋梁名	橋種	流出
59	大槌大橋	PC-T桁	無
60	安渡跨道橋	PC床版橋	無
61	安渡橋	鋼I桁	有
66	小槌橋	PC床版橋	無
67	古廟橋	鋼H桁	無
90	沼田跨線橋	PC-T桁	有
94	最上堂橋	鋼H桁	無
96	松原大橋	PC床版橋	無
101	気仙大橋	鋼I桁	有
103	姉齒橋	鋼トラス	有
124	不明	RC-T桁	無
126	中橋	RC床版橋	有
127	八幡橋	PC床版橋	無
128	水尻橋(上)	鋼H桁	有
159	定川大橋	PC-T桁	有

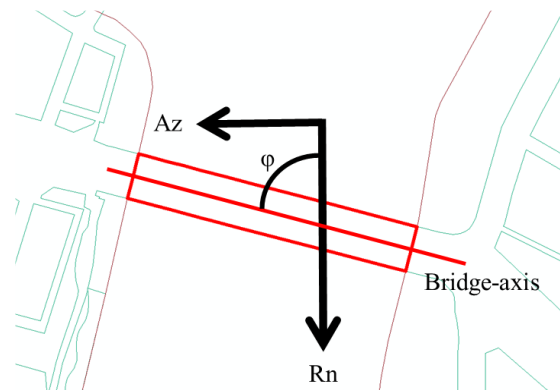


図-2 橋軸方向とマイクロ波照射方向の角度 ϕ

4. 結果

(1) 被害区分が分かっている橋梁

上部構造の流出した橋梁を図-3に、流出以外の被害を受けた橋梁を図-4、目視判読結果を表-3に示す。図-3、4は偏波カラー合成画像および、4成分散乱電力分解をした散乱成分のカラー合成画像、津波による被害の前後での光学画像を示す。表-3は明確に判読できれば○、判読できなければ×、どちらともいえない場合は△を示す。橋梁の被害区分は、参考文献^{1),2)}を参考にした。

No. 61は上下部構造が流出した。上下部構造が流出した場合には、マイクロ波の後方散乱がなく、水面と同じ散乱現象(鏡面反射)となるため、SAR画像では橋梁の存在を確認できない。あらかじめ橋梁の存在がわからない場合、流失として判定できない。

No. 90は全上部構造が流出し、橋台背面土が流出した。橋梁の床版表面では水面と同じように鏡面反射が起こるため暗くみえる。しかし、全上部構造が流出してしまったため、橋脚部分だけが残り2回反射散乱がおきていることがわかる。橋脚が確認できることから、主桁が流出したと判読できる。しかし、橋台背面土が流出したかは不明確である。何本もの2回反射散乱が見えるのは、橋軸直角方向への過度な変位を抑えるために設けられたサイドブロックの影響によるものだと考えられる¹²⁾。また偏波画像と散乱電力画像を比較すると、植生と人工物による2回反射散乱を明確に識別できるため、散乱電力画像のほうが被害を識別しやすいと考えられる。

No. 94は上部構造が一部流出した。SAR画像から橋梁の輪郭が確認できる。高欄部分および橋梁の側面で強い後方散乱が生じている。散乱成分では高欄部分では2回反射散乱、側面部分では体積散乱が生じている。橋梁の両端部分では鏡面反射が生じているため、橋梁の一部が流出したことが判読できる。橋梁がマイクロ波の照射方向側に傾斜しているため、後方散乱が比較的強くなって

いると考えられる。

No. 101 は全上部構造および橋台背面土が流出した。上部構造が流出したため、橋脚部分での2回反射散乱および体積散乱が確認できる。2回反射散乱は橋脚の側面によるもので、体積散乱は瓦礫によるものだと考える。

No. 103 は全上部構造が流出し、橋脚が損傷した。この橋梁に関しても、全上部構造が流出したため、橋脚による2回反射散乱が確認できることから、主桁が流出したと判読できる。橋梁の形状と照射角 ϕ の影響により、2本の強い2回反射散乱が生じていることがわかるが、橋脚の損傷までは識別することは難しい。また、橋脚部分で2点の表面散乱が確認できるが、これは鋼製支承によるものだと考えられる¹²⁾。

No. 126 は上下部構造が流出した。下部構造も流出したため、橋梁の存在を確認できず、画像だけでは被害判読できない。

No. 128 は上部構造の一部および橋台背面土が流出した。橋梁の輪郭が途中で途切れていることがわかるため、一部被害があることが判読できる。また、床版からは体積散乱が確認できる。これは橋梁が被害を受けて傾いたため、後方散乱が起きていることが考えられる。

No. 159 は中央径間および橋台背面土が流出した。輪郭を明確に認識でき、中央部分で途切れていることがわかるため、橋梁の一部が流出したことが判読できる。橋梁側面による2回反射散乱を確認できる。

No. 59 は高欄が変形した。SAR画像では橋梁の輪郭を確認することができる。高欄の部分では一定の間隔で強い体積散乱が生じている。他方の高欄の同一線上では表面散乱が起きている箇所と体積散乱が起きている箇所が存在する。これが高欄の変形を示していると考えられるため、被害があると判読できる。床版上に2回反射散乱

が確認できるが、瓦礫が堆積していた可能性がある。

No. 96 は損傷が確認されていない。高欄部分で2回反射散乱が起きている。床版上に瓦礫が堆積していることが明確にわかるため、被害判読は容易である。

(2) 被害区分が不明な橋梁

以下の橋梁は被害を受けた橋梁であるが、参考文献¹⁾²⁾では被害区分の記載がされていない。

No. 60 は陸橋であり、橋梁の輪郭を明確に認識することが難しいため、SAR画像のみでは被害判読できない。光学画像では瓦礫が堆積していることがわかる。

No. 66 は水門が橋梁に隣接しており、橋梁の輪郭を認識することが難しい。床版があると推定されるところでは、様々な散乱が起きている、瓦礫が堆積していると考えられるため、どちらともいえない。また、水門にある塔により、マイクロ波が到達しないため黒く見えるレーダシャドウが確認できる。また水面に大量の瓦礫が浮いていることも確認することができる。

No. 67 は水面の範囲が小さいため、SAR画像で橋梁の輪郭を確認することが難しいため、どちらともいえない。しかし、橋梁がある位置では体積散乱が生じていることは確認でき、床版上になにもない場合には鏡面反射により暗くなるため、瓦礫が堆積していた可能性がある。

No. 124 は高欄部分で体積散乱や2回反射散乱が起きていることがわかる。同一線上で後方散乱が一定でないため、高欄の変形などの被害を受けていると推測できる。また、床版上では様々な散乱が起きているため、瓦礫が堆積していることがわかる。

No. 127 は高欄の同一線上で散乱成分が変化しているため、高欄が変形していると推測できる。床版上でも後方散乱があるため、瓦礫が堆積していた可能性がある。

表-3 橋梁被害の目視判読の結果

橋梁No.	橋梁名	ϕ (°)	輪郭	橋脚	被害区分	被害の目視判読
59	大槌大橋	41	○	×	高欄の変形	○
60	安渡跨道橋	38	×	×	記載なし	×
61	安渡橋	35	×	×	上下部構造の流出	×
66	小槌橋	68	△	×	記載なし	△
67	古廟橋	49	△	×	記載なし	△
90	沼田跨線橋	61	×	○	全上部構造の流出、橋台背面土の流出	○
94	最上堂橋	51	○	×	上部構造の一部流出	○
96	松原大橋	9	○	×	損傷確認されず	○
101	気仙大橋	83	×	○	全上部構造の流出、橋台背面土の流出	○
103	姉齒橋	63	×	○	全上部構造の流出、橋脚の損傷	○
124	不明	29	○	×	記載なし	○
126	中橋	60	×	×	上下部構造の流出	×
127	八幡橋	60	○	×	記載なし	○
128	水尻橋 (上)	63	○	×	上部構造の一部流出、橋台背面土の流出	○
159	定川大橋	75	○	×	中央径間の流出、橋台背面土の流出	○

No.	ϕ ($^{\circ}$)	R:HH G:HV B:VV (Sigma naught)	R:Pd G:Pv B:Ps (Sigma naught)	Google Earth Before	GSI map Soon after
61	35				
90	61				
94	51				
101	83				
103	63				
126	60				
128	63				
159	75				

図-3 上部構造の流出した橋梁

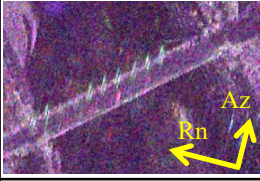
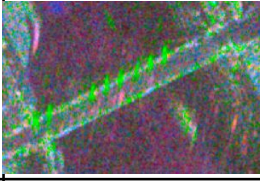


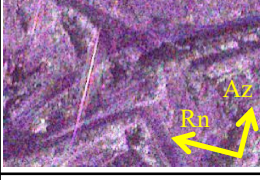
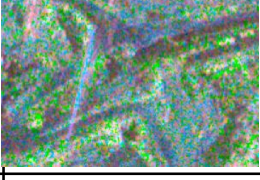

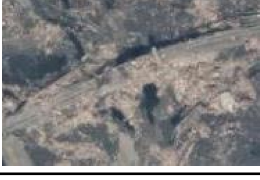

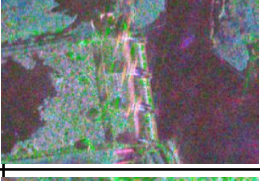
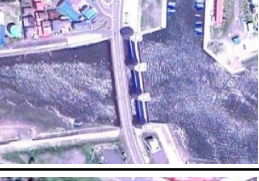
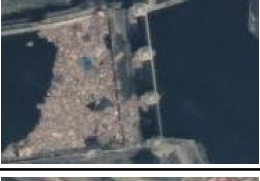

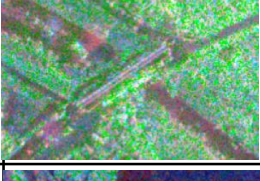

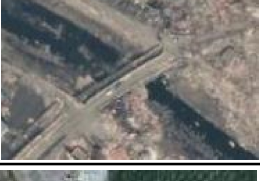
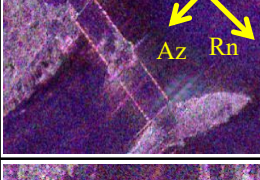
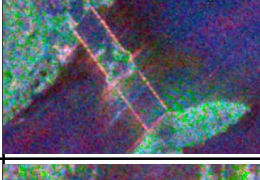


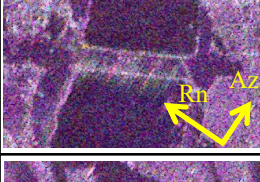
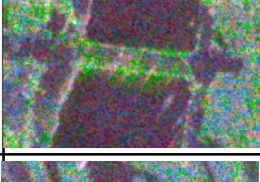


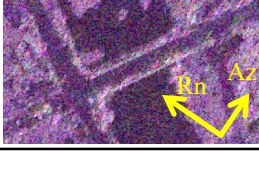
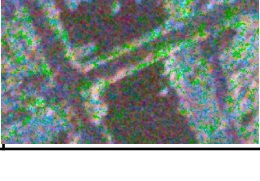


No.	ϕ ($^{\circ}$)	R:HH G:HV B:VV (Sigma naught)	R:Pd G:Pv B:Ps (Sigma naught)	Google Earth Before	GSI map Soon after
59	41				
60	38				
66	68				
67	49				
96	9				
124	29				
127	60				

図-4 流出以外の被害を受けた橋梁

5. まとめと今後の展望

本研究では、災害後 1 時期の SAR 画像から橋梁被害を把握するための第一段階として、x バンドの航空機 SAR (Pi-SAR-X2) 画像を用いて、東北地方太平洋沖地震による津波によって被害を受けた橋梁を対象に、4 成分散乱電力分解を行い、橋梁被害の目視判読を試みた。

その結果、津波により橋梁の上部構造のみが流出すると、主に橋脚部分での 2 回反射散乱が確認できることがわかった。また、橋脚の形状や構造によって、表面散乱や体積散乱、複数本の 2 回反射散乱が生じることがある。上下部構造が流出すると、橋梁の存在が確認できない。橋梁の一部が流出した場合には、橋梁の輪郭が途切れることを確認した。しかし、現時点では橋脚の損壊や橋台背面土の流出を識別することは難しいといえる。以上のことから 1 時期の Pi-SAR-X2 画像を用いた橋梁被害の目視判読は、上部構造の一部または全上部構造のみの流出については容易に識別できることがわかった。しかし、上下部構造が流出した場合には、水面と同様にみえるため、1 時期の SAR 画像のみからの判読は難しい。また、橋脚の損傷や橋台背面土の流出を判読することは難しい。一方で、高欄の変形や瓦礫の堆積については、橋梁輪郭が明確に確認できる場合のみ可能である。

橋梁が被害を受け、マイクロ波の照射方向側に傾いた場合には、後方散乱が比較的強くなる可能性があることや、津波による橋梁被害を判読する場合には、流木などの瓦礫と人工構造物を区別するために、4 偏波よりも 4 成分散乱電力のほうが適していると考えられること、SAR 画像上で陸橋の輪郭を確認することは難しいため、SAR 画像における橋梁の被害検出は、水面上の橋梁に限定するべきことがわかった。

目視判読は個人によって評価が異なるため、被害を受けた橋梁のパラメータの定量化が今後の課題となる。SAR 画像のみで橋梁被害を視覚的に確認できないことがあるためである。プロフィールラインを設定し、橋脚と水面での後方散乱の強弱をみることで、上部構造の流出を検出する方法や、GIS データから作成した橋梁輪郭と SAR 画像を重ね合わせることで、上下部構造の流出を検出できると考えている。その他にも、散乱成分の割合やエントロピーなどの検討も今後行う予定である。

謝辞

本研究で使用した Pi-SAR-X2 画像は、国立研究開発法人情報通信研究機構と千葉大学との共同研究の一環として情報通信研究機構から提供を受けた。ここに記して感謝を表す。

参考文献

- 1) 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, 2015.
- 2) 国土技術政策総合研究所: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告, 国総研資料 第 814 号, 2014.
- 3) Yamazaki, F., Kouchi, K., Koshiyama, M., Matsuoka, M.: Earthquake damage detection using high-resolution satellite images, Proceedings of the IEEE 2004 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, CD-ROM, 4p, 2004.
- 4) 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 号, 第 6 巻 (特集号), pp. 104-119, 2012.
- 5) 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, XXXVI (3), pp. 185-190, 2006.
- 6) Liu, W., Sawa, K., Yamazaki, F.: Backscattering characteristics of bridges from high-resolution X-band SAR imagery, International Symposium on Remote Sensing, pp. 324-327, 2017.
- 7) 井上和樹, リュウ・ウエン, 山崎文雄: 高分解能衛星 SAR 画像の変化抽出に基づく津波による橋梁被害把握, 日本地震工学会論文集, 第 17 号, 第 5 号, pp. 48-59, 2017.
- 8) Freeman, A., Durden, S. L.: A three-component scattering model for polarimetric SAR data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 3, pp. 963-973, 1998.
- 9) Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., Yamada, H.: Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 8, pp. 1699-1706, 2005.
- 10) Chen, S., Sato, M.: Tsunami damage investigation of build-up areas using multitemporal spaceborne full polarimetric SAR images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 51, No. 4, pp. 1985-1997, 2013.
- 11) 山口芳雄: レーダポーラリメトリの基礎と応用—偏波を用いたレーダリモートセンシング—, pp. 125-139, コロナ社, 2007.
- 12) 日経コンストラクション: 東日本大震災の教訓 土木編 インフラ被害の全貌, pp. 50-54, 日経 BP 社, 2011.