

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560177

研究課題名(和文) レーダによる都市域大型構造物の劣化兆候の検出可能性に関する研究

研究課題名(英文) Research on detection possibility of change of large urban structures by satellite-borne SAR

研究代表者

福地 一 (Fukuchi, Hajime)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：90358820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：衛星搭載合成開口レーダ(SAR)観測結果から地上大型構造物の特性変化の抽出可能性を検討するために、国内外の研究状況調査を文献調査及び国際研究集会での調査を通じて実施した。

東京多摩地域の衛星フルポラリメトリックSAR観測データを用いて複数の大型ビル、橋げたなどの地上大型構造物のSAR観測結果を解析した。フルポラリメトリック観測の利点及び観測位相情報を活用して、干渉法より簡便な地上大型構造物の反射特性の経年変化抽出を試みた。その結果、観測シーンごとの詳細な位相変化の解析により、地上大型構造物相互間の相対的な高さの変化などを観測できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the possibility whether satellite-borne Synthetic Aperture Radar(SAR) can detect structural changes of large scale artificial structures such as big bridge or buildings, recent SAR application for urban areas are surveyed from literature and research conferences. We analyzed full-polarimetric SAR measurement data over western part of Tokyo where large bridge and buildings are located. It is well known that the relative height of the persistent or permanent structures can be estimated precisely by interferometric technology. We try to seek more simple method to extract any changes of the structures by fully making use of full-polarimetric measurements. From analysis using phase information in each measurement polarization pairs, it is suggested the possibility to find changes of the structures if many scenes are available and the effect of atmosphere including ionosphere effects are compensated.

研究分野：電波工学

キーワード：合成開口レーダ 都市域リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

2012年12月に起きた、中央自動車道上り線笹子トンネル天井板落下事故、2016年4月におきた、神戸市の新名神高速道路工事中の橋桁落下事故で残念ながら顕在化したのが、多くのトンネル、橋梁、高速道路、線路などの公共インフラが経年劣化していることが広く認識されている。また、公共施設だけでなく、2015年10月に発覚した神奈川県横浜市都筑区の杭打ち不良によるマンション傾斜問題など一般家屋においても設置状況の異常事態が報告されている。しかし、高度成長期の高速道路や線路などの公共大型構造物、大型居住用マンション等は全国に多く存在し、それぞれの経年劣化の程度や補修の緊急性を把握するには、多大な人的・予算的資源が必要となり、十分な対策が講じられていないのが現状であろう。従来から、人工衛星や航空機に搭載されたレーダは地上の非常に広い範囲の様子を短時間で把握可能であることが知られている。東日本大震災の折にも、日本の陸域観測衛星「だいち (ALOS)」、ドイツの陸域観測衛星 TerraSAR-X が地震前後の観測結果を処理して、広域の被害領域情報をいち早く把握している。このように、レーダは地上の大きな変化抽出にその威力を発揮してきた。さらに、近年では衛星搭載レーダの地上観測分解能が飛躍的に向上し、さらに、観測結果のデータ処理技術の高度化に伴って、駅構造物の変位状況、大型建物の季節的なたわみ変動などが長期間にわたる多くの観測データから抽出できる場合がある例が報告されている。そこで、この調査研究では、災害前後の陸上の変化ではなく、そのまま放置しておけば大きな変化をもたらす可能性のある都市域構造物（橋梁、大型建造物など）を周期的に観測した衛星搭載レーダの観測結果からその状態変化を推定する可能性について調査研究する。

2. 研究の目的

前述のように、近年のレーダ観測データの高度処理技術の進展により、地上大型構造物の経年変化の状況把握の可能性がでてきた。そこで、先端的な衛星搭載レーダ観測結果及び信号処理により、これまで観測されてきた都市域観測結果から、大型人工構造物（大型橋梁、大規模建物など）の経年変化の抽出可能性について国内外の調査及び国内観測データを用いた上記可能性の評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 衛星搭載レーダによる経年変化抽出に係る調査

標記経年変化抽出に関連する国内外資料、国際会議発表資料から、変化抽出の可能性に関する調査を行う。ここでは、昼夜・天候、噴煙等によらず地上の状況を把握できるレーダを用いた手法に絞り、光学観測と同等の空間分解能を達成できる合成開口レーダ

(SAR: Synthetic Aperture Radar) による観測を取り上げる。

(2) 衛星搭載レーダ観測結果を用いた経年変化抽出可能性の評価

本調査研究で入手した衛星搭載 SAR 観測データを含め、ALOS/PALSAR (日本)、TerraSAR-X (ドイツ)、Radarsat2 (カナダ) による東京西部多摩地域の降るポラリメトリック観測データを用いて、同地域内の大型構造物の電波観測結果を解析する。以下の調査結果で示すように、すでに、干渉計 SAR (InSAR: Interferometric SAR) により構造物の相対的な高さについては解析シーン数にもよるが数 cm の高精度での観測が可能であることが知られている。そこで、ここでは、InSAR 手法によらない大型構造物の経年変化抽出の可能性を探るために、上記衛星データの観測結果、特に長期間の同一地域観測データが入手できた ALOS/PALSAR 観測結果について特定構造物からの反射特性の経年変化について解析する。ALOS/PALSAR は L バンド周波数という上記衛星搭載 SAR の中では低い周波数の観測であり、若干構造物内部の情報も反射信号に含まれている可能性がある。また、上記衛星搭載 SAR はいずれもフルポラリメトリック SAR であり、実際の観測は直線偏波 (垂直、水平) であるものの、偏波変換によって、仮想的に直交する 2 つの偏波、例えば円偏波 (右旋、左旋) での反射特性を推定することができ、経年変化抽出に相応しい偏波に関する知見を得ることが期待できる。

4. 研究成果

(1) 衛星搭載レーダによる経年変化抽出に係る調査

従来 SAR は、昼夜天候によらず、災害時の火災や噴火に伴う煙にもよらず地上の状況が把握できるため、大災害時の状況把握に有益とされてきた。

近年、SAR の高度データ解析を通じて、大災害時の大きな地上状況変化だけでなく、橋梁、ビルなどの大型建造物の変位状況など小さな変化についても観測可能であることが報告されるようになってきた (文献④、⑤)。これまでも、距離の離れた 2 つのアンテナの受信信号の相関、あるいは同一地域の 2 回の観測 (repeat path interferometry) 結果の相関をとることにより観測対象の相対高さ、また高さ変化が図られることは干渉 SAR として知られていた。その応用として、地下水のくみ上げに伴う地盤沈下や大地震前後の土地変化の観測が例として挙げられる。文献④、⑤では、この干渉 SAR を特殊な場合として含む Tomographic SAR という手法により、高分解能衛星搭載 SAR である TerraSAR-X (ドイツ)、CosmoSkyMed (イタリア) の数年間にわたる多くの観測シーン解析を行っている。この結果、ベルリン中央駅、ベルリン市街の高速道路橋げた、ラスベガス地域の大型建造物など

の高精度高さはもちろん、屋上部分の高さの季節変化から構造物の柱部分の映像化に成功している。また、ベルリン中央駅の駅建造物の変形、高速道路の橋げたの変形と思われる観測結果も得られている。これらの観測シーンは、TerraSAR-X にしる、CosmoSkyMed にしる、Xバンドという比較的高い周波数の SAR による高分解能観測結果であり、建造物の識別、観測時期の異なる観測結果の正確な位置あわせ (registration) と比較が容易な利点がある。その反面、観測は対象物の表面の情報であり、構造物の高さ情報が観測の基本となっており、決して構造の内部について情報を得ているわけではない。また、Tomographic SAR 手法について十分詳細が理解できていない点もあるが、正確さを得るために多くの同一地域の観測シーン数が必要であると思われる。

これまでも、短期的には変化しないと思われる都市域の反射体 (PS: Persistent Scatterer) を多数用いて InSAR 手法で都市域の構造物の高さ変化の把握、個別ビルの識別が成されている (文献①、③)。これまでは、衛星搭載 SAR 単体での地上大型構造物の状況把握の報告を述べたが、レーダだけではなく、SAR 観測データと同一地域の高精細の光学観測データとの融合により構造物の地震脆弱性の解析例も報告されている (文献②)。このような PS-InSAR 手法の解析例として、国内で人工的に mm オーダーの高さ変位を施した基準反射体を複数用いた観測結果が報告されている (文献⑥)。この観測では複数の CosmoSkyMed 観測シーンを用いて、mm オーダーの高さ変位の観測が成功しており、この利用として、近年話題になっているマンション屋上部の高さ精密経年変化の把握が提案されている。この応用は、航空機による LIDAR 観測に比して、定期的な SAR 観測アーカイブの利用が可能なることから経費面で航空機観測より有意な状況把握ができると思われる。

国内の公共大型建造物の状況把握例として、ダムの壁面変位の測定実験例がある (文献⑦、⑧、⑨)。この実験では、4 年間にわたり、衛星搭載 SAR による InSAR 観測からのダム壁面変位量を壁面に設置した GPS 測定センサーによる壁面変位量と比較し、5 mm 程度の精度で合うことが報告されている。ただし、ダムにも、アーチダム、重力ダム、ロックフィルダムの種類があり、比較的ダム壁面の傾斜がゆるいロックフィルダムで高い精度が得られるものの、アーチダムのような壁面傾斜が大きい場合には InSAR での測定が難しいことも報告されている。

衛星搭載 SAR では分解能の点で困難と思われるが、地上設置 SAR (GB-SAR : Ground Base SAR) では、高分解能の観測が可能で、例えば、橋梁の固有振動数の経年変化から橋梁の経年変化を予測できる可能性も指摘されている。

(2) 衛星搭載レーダ観測結果を用いた経年変化抽出可能性の評価

衛星搭載フルポラリメトリックレーダによる都市域の観測イメージを図 1 に示す。フルポラリメトリックレーダからは直交する水平偏波 (Eho) と垂直偏波 (Evo) の電波が放射され、都市域で反射されたそれぞれの偏波の電波 (Eh、Ev) が衛星搭載 SAR で受信される。その結果、都市域の電波の反射特性を示すマトリクス (Mhh、Mhv、Mvh、Mvv) が求められる。マトリクスの要素 M は複素数であり、M を求めることによりある観測地点の 8 つの独立した情報が得られる。さらに、直交する 2 つの偏波に係る情報が得られることから、仮に、衛星搭載 SAR から円偏波など直交する任意の 2 つの偏波を送信したときの反射特性 M を計算により求めることができる。このことから、ある観測地点の独立した観測データを飛躍的に増加させることができ、従来よく検討されている 1 つの周波数のみの観測では得られない詳細な都市域情報が得られる可能性がある。

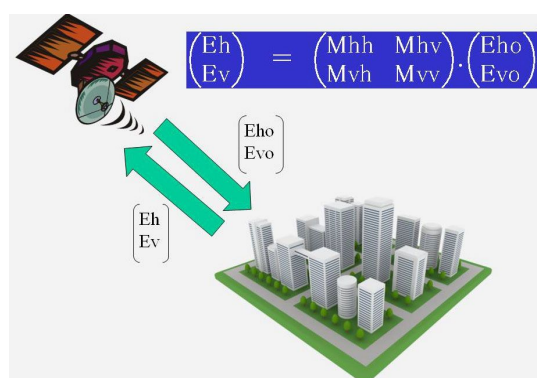


図 1 衛星搭載フルポラリメトリック SAR による都市域観測

以下に述べる衛星搭載 SAR による都市域観測結果はすべて上記のフルポラリメトリック観測結果であり、各送受信偏波ペアに関し、振幅、位相情報が得られる。その結果、フルポラリメトリック観測でしか得られない反射シグナチャや正確な PS ポイント (時間がたっても反射特性が変化しないと思われるポイント) の選択が可能となる。

① 大型建造物 (ビル) の観測

ALOS/PALSAR は 2006 年 1 月に打ち上げられて以降、国内外の研究者に観測データが提供された。そして、すでに設計寿命は過ぎていたが、それが最後の観測義務であるかのように、2011 年 3 月の東日本大震災の被災地域の観測を行い、まもなくしてその寿命を全うした。この間、我々は打ち上げ当初から PALSAR センサーの校正プロジェクトチームの一員として 2006 年 6 月から 10 月にいたるまで集中的に東京西部多摩地域の観測と校正実験を行った。その校正の一環として、PALSAR の

観測に影響を及ぼすレーダの送受信アンテナの不完全性、ファラデーローテーション量の推定のそれぞれを補償して正確な地上反射特性を得る方法を提案した(文献⑩)。加えて、フルポラリメトリック反射特性が既知の大型建造物を用いて、電離層に起因するファラデーローテーションを算出する試みも実施した。

図2, 4は、それぞれ、横田基地内の建造物、旭硝子工場の建造物の SAR 観測擬似カラー画像である。また、図3, 5は、それぞれの GoogleEarth 画像を示している。



図2 横田基地内の建造物観測結果(青丸)



図3 横田基地内の建造物(GoogleEarth)

これらの観測結果をもとに、2006年10月21日の観測地点上空の電離層総電子量(TEC)に伴うファラデーローテーションを求めると以下の量になる。

- ・電離層観測による結果：6.2度
- ・基準反射器2基による結果：5.7-5.8度
- ・人工構造物による結果：5.6度 (図2)
6.1度 (図4)

この結果から大型建造物のフルポラリメトリック SAR 観測結果からファラデーローテ

ーション量を推定できることが示された。ここでは、ファラデーローテーションの影響の少ない時の各建造物のフルポラリメトリック反射特性がわかっており、その特性は変わっていないという前提でファラデーローテーションを求めている。この結果を解釈すると、もし、ファラデーローテーションなど電離層を含む大気の影響が十分な精度で補償できるとし、観測対象建造物のフルポラリメトリック反射特性が変化する結果が得られたとすると、反射特性に影響を及ぼす建造物の電気特性の変化が検出できる可能性がある。この場合は、決して建造物の高さの情報のみでなく、形状変化、含水率等の変化等にも対応する経年変化も推定できる可能性がある。ALOS/PALSARの周波数は1GHz周辺であり、乾いた構造物であれば表面だけでなく内部の電気的性質も計測できる利点があるが、それより高い周波数のSARに比べてファラデーローテーションなど伝搬媒質の影響を受けやすいという欠点がある。このような低い周波数のSARでの観測対象経年変化を計測するには伝搬媒質の影響補償が重要な技術となる。

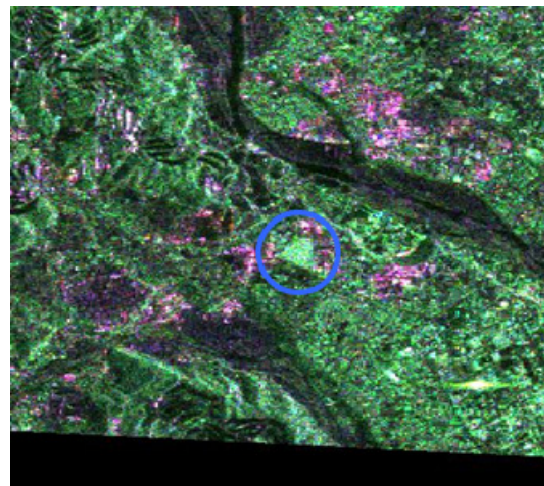


図4 旭硝子工場内の建造物観測結果(青丸)



図5 旭硝子工場内建造物(GoogleEarth)

② 市街地における PS(Persistent Scatterer)の選定

第4節(1)項で述べたように、大型建造物の経年変化の抽出には、多くの高精度 SAR 観測シーンがあることが望ましい。さらに、都市域など、時間が経過してもその反射特性が大きく変化しない PS(Persistent Scatterer)がシーン内に多く存在することが望ましい。観測対象とする大型建造物もその PS であるが、多くの PS のなかで一部の PS が特性変化することによって建造物の熱変位などの抽出が可能となっている。そこで、所有する衛星搭載 SAR 観測データのうち数mの高分解能を有する TerraSAR-X による多摩地域観測結果から PS 点の抽出に関する解析を実施した。この PS ポイントを多く抽出し、その PS 点を含む多くの観測シーンを用いて正確なレジストレーションを行うことによって、関心対象である PS 点の経年変化が抽出できる可能性がある。



図6 日野市程久保の団地(GoogleEarth)

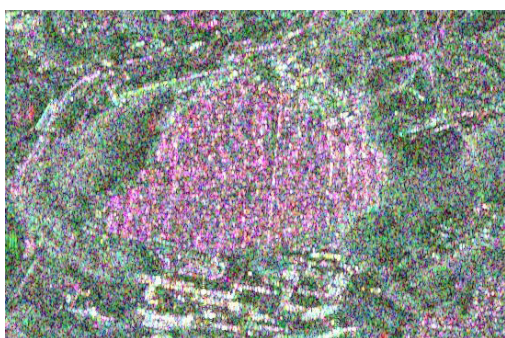


図7 日野市程久保の団地の擬似カラー図

図6, 7はそれぞれ解析対象とした日野市程久保の団地の光学写真、擬似カラー画像である。以下には、この家屋群の中の PS ポイントの選択について検討する。PS は2期間で反射特性が変化しない点であるので、2つの観測時間として、

- ・A時点：2011年9月17日
- ・B時点：2011年10月9日

をとりあげ、双方で計測されているフルポラリメトリック観測のHH成分(図1のMhh)の比較を行う。

当然団地内には植生など PS 点とはいえないピクセルが存在するため、まず PS 候補として、大まかに、 $|HHA/HHB|$ が1に近い点を抽出した。その抽出された各ピクセルの HHA/HHB を極座標として表示したものが、図8である。

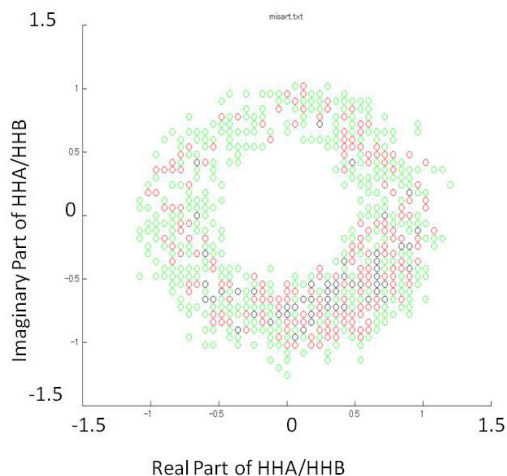


図8 HHA/HHB の軌跡(色は個数の違い)

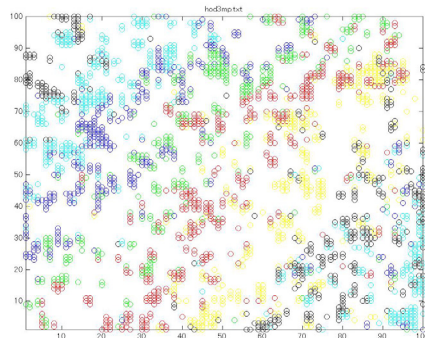


図9 荒い PS 候補についてその位相情報を色で表現したマップ

図8の各点の色は個数の違いを表している。あらかじめ振幅が1に近い点を選んだので大まかに円形のトレースになるのは当然であるが、2時期の TerraSAR-X の軌道の違いにより、位相情報は0から360度までの値をとっている。この各点を観測マップの上にプロットしたものが図9で、この図では色が位相情報を表現している。この結果から、あきらかに、斜め状に等位相の場所があることが見て取れる。通常、観測範囲は住居が多いエリアであるので、多くの部分はこの1ヶ月弱の時間経過で反射特性に変化がないと考えられるので、すべてのピクセルが同じ高さの PS であれば、きれいな等位相の縞模様として各点がプロットされるはずである。図8, 9はレジストレーションとして荒いレジストレーションをしていることもあり、明確な振幅1の円、きれいな縞模様になっていないと考えられる。この縞模様は、InSAR と同一

の情報を有していると考えられ、解析処理が煩雑な InSAR 処理に比べて簡便な各 PS ピクセルの反射位相特性が得られる可能性がある。PS の設定は、図 9 の縞模様を最小二乗法等によりモデル化し、そのモデルに近い点から必要個数まで、あるいは、観測対象が含まれるまで選択することになる。もし、選択された PS 点の特性がある時点から変化するようであれば、そのピクセルの PS 点に位相変化をもたらすようななんらかの経年変化があったと判断できる。ここでは、HH 成分のみの解析結果を紹介したが、他の散乱マトリクス成分についても同様な PS 選択をすることによって信頼度を向上させることができよう。ただし、観測範囲内に高さの異なる PS 点が散在する場合に等位相縞模様をどうモデル化するかは検討を要する。

(3) まとめ

人工衛星搭載の合成開口レーダ (SAR) 観測結果から地上大型構造物の特性変化の抽出可能性を検討するために、国内外の研究状況調査を文献調査及び国際研究集会での調査を通じて実施した。その結果、これまでドイツの観測衛星 TerraSAR-X によるベルリン市内の長期観測で駅庁舎や高速道路橋げたの年間位置変動状況が検出できることがわかった。また、国内では、大型構造物としてダムを対象にした衛星搭載 SAR 繰り返し観測とダム壁面に配置した GPS 測定器による壁面変位測定の比較から衛星搭載 SAR による壁面変位の観測可能性が示されていることがわかった。これらの測定では時間を隔てた複数の観測シーンから干渉 SAR 手法により高さ変動を抽出する手法が使われている。この変動を正確に抽出するためには、多くの観測シーンが必要なこと、また観測周波数により大気等の種々の誤差要因があり、この要因の補償法が重要であることがわかった。

本研究等で入手した東京多摩地域の衛星搭載 SAR 観測データを用いて複数の大型ビルなどの地上大型構造物の衛星搭載 SAR 観測結果を解析した。これらの観測では、複数の偏波情報を観測できるフルポラリメトリック観測データであり、対象物に関するレーダ反射特性を多く入手することが可能である。そこで、この研究では、フルポラリメトリック観測の利点及び観測位相情報を活用して、干渉法より簡便な地上大型構造物の反射特性の経年変化抽出を試みた。その結果、電離層を含む大気の影響を正確に補償できれば、Tomographic SAR 手法も含め、観測シーンごとの詳細な位相変化の解析により、大型構造物の変化などを観測できる可能性を示すことができた。

<引用文献>

- ① U. Soergel (Ed.), "Radar Remote Sensing of Urban Areas", Springer, 2010.
- ② X. Yang (Ed.), "Urban Remote Sensing",

Wiley-Blackwell, 2011.

- ③ Q. Weng (Ed.), "Urban Remote Sensing", CRC Press, 2006.
- ④ G. Fornaro, et al., "SAR tomography: An advanced tool for 4D spaceborne RADAR scanning with application to imaging and monitoring of cities and single buildings", IEEE Geoscience and Remote Sensing Soc. Newsletter, pp.10-18, Dec. 2012.
- ⑤ C. Chee, "Tomographic SAR reconstruction of a 4D city using TerraSAR-X data", Bachelor Thesis, Technische Universitaet Munchen, 2012.
- ⑥ H. Hirata, et al., "PS-InSAR analysis and accuracy evaluation of a known target with height change", Proc. 36th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2015), Manila, Oct. 2015.
- ⑦ 富井 直弥: "将来の社会実装を目指した SAR 衛星によるインフラ変位モニタリング", 2016SIP 防災・インフラ維持管理合同シンポジウム予稿、東京、2016年3月。
- ⑧ 佐々木隆、外、"衛星 SAR によるダムの維持管理における変位モニタリング", 2016SIP 防災・インフラ維持管理合同シンポジウム予稿、東京、2016年3月。
- ⑨ 本田謙一、"ダム等インフラのモニタリングに対する合成開口レーダの利用可能性", IDL&ENVI ユーザカンファレンス、東京、2014年10月。
- ⑩ A. Takeshiro, et al., "Verification of polarimetric calibration method using Faraday rotation compensation using PALSAR data", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 12, pp. 3960-3968, Dec. 2009.

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 0 件)
- [学会発表] (計 0 件)
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
福地 一 (FUKUCHI, Hajime)
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
研究者番号: 90358820
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし
- (4) 研究協力者
土田 祥大 (TSUCHIDA, Shota)