

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19H02221
研究課題名（和文）車載型高速地中レーダー計測とDSP・AI処理による地表地中空間情報の超規模構築

研究課題名（英文）Large-scale construction of road surface and geospatial information using vehicle-mounted high-speed ground-penetrating radar measurements and DSP/AI processing

研究代表者
水谷 司（Mizutani, Tsukasa）
東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：10636632
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：インフラ分野においてはこれまでは目で直接見えるインフラ表面の状態などの「可視空間情報」に関わる計測・分析技術の開発が研究の主流であったが、次の時代に革新をもたらすのは目で直接見えない地中や構造物内部の「非可視空間情報」の構築、つまり「見えないところの見える化」技術であると考えている。本研究では、近年高速計測可能になった地中レーダーを車載して走行しながら大規模に地中内部を計測し、そのデータを「デジタル信号処理（DSP）」と「AI」を高度に駆使して処理することで道路を構成する地盤内部の埋設管・空洞を自動で検出する技術の基礎を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、道路面下の透視技術として、車載型の高速地中レーダーにより三次元空間データを計測し、そのデータをデジタル信号処理と深層学習モデルにより分析することで、橋埋設管・空洞の三次元位置を推定する技術を開発している。カメラや測距レーザーを活用した目視可能なインフラ表面の状態評価技術に比べて、目視不可能なインフラ内部の状態の推定技術の開発はアルゴリズム構築からその有効性の検証まで各段に難しい。しかし、第三者被害を引き起こす空洞由来の陥没の低減、埋設管位置の詳細な把握による建設工事の効率化などを考えると、道路路面下の異常や構造物の三次元情報を自動で構築する技術の開発は必須である。

研究成果の概要（英文）：In the field of infrastructure, the mainstream of research has been the development of measurement and analysis technology related to "visible space information" such as the state of the infrastructure surface that can be seen directly by the eye. However, we believe that it is the construction technology of "invisible spatial information" such as underground and the inside of structures that is not directly visible that will bring about innovation in the next era. In this research, we measure the inside of the ground on a large scale while driving on-board an underground radar that has become capable of high-speed measurement in recent years, and developed a technology to automatically detect buried pipes and cavities in the ground by processing the data using digital signal processing (DSP) and AI.

研究分野：リアルタイム空間解析工学

キーワード：車載型地中レーダー 埋設管 空洞 三次元位置推定 デジタル信号処理 AI 三次元地中・地表空間構造 模擬フィールド

1. 研究開始当初の背景

次世代の社会モデルである「Society5.0(超スマート社会)」は実空間とサイバー空間の高度な融合による効率的で安全・安心な社会の構築を究極の目標としている。これはインフラ建設・維持管理においても例外ではなく、その実現のためには現実にあるインフラに関する有用な最新の空間情報を大規模に高速でデジタル化しサイバー空間に供給することが必須である。これまでインフラを大規模に計測し分析して得られる空間情報としては、インフラ表面の損傷など目視可能な「可視空間情報」が特に注目され、「ラインセンサカメラ」や「三次元測距レーザー」データのリアルタイム処理により路面やトンネル壁面などの異常箇所の面的マッピング技術の開発を精力的に行ってきた1)。

可視空間情報を構築する技術は成熟してきており、既に研究フェーズから社会実装のフェーズに移行しつつあるといえる。次の時代にインフラ分野にイノベーションをもたらすためにはこの「可視空間情報」に加えて、さらに地中にある構造物や維持管理上ますます重要になってきている道路構造物内部の異常などの直接目では見えない「非可視空間情報」の大規模な構築が求められる。「地中空間情報」の重要性が分かる例として、約4年半前の2016年11月8日に発生したJR博多駅前の空洞を起因とする大規模な道路陥没事故がある。空洞による陥没は前兆なしに突然起こることが多く、陥没を未然に防ぐためには、継続的に地中内部を探索して監視し、空洞が発生したら早急に埋め土をするなどの対応が必要である。

国内においては戦前から建設されてきた膨大な上下水管網があり、管路延長がそれぞれ65万km、47万kmで計112万kmもある。特に老齢埋設管については図面が残っていなかったり残っていてもその水平位置・深度の三次元位置情報の精度が低いことが多い。また「残置管」とよばれる使われなくなった埋設管がそのまま地中内部に放置されている場合もあり、その有無や正確な位置情報、材質については記録がないものもある。そのため、土木建築物の建設時、杭打ちする際に想定していない埋設管や残置管が発見され、工事計画を立て直す必要に迫られることがある。問題が発生してから埋設物を除去したり、設計・計画を変更するとなると工期と工費に影響するため、可能な限り多くの埋設管の位置情報を事前に把握することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、近年高速計測可能になった地中レーダーを車載して走行しながら大規模に地中内部を計測し、そのデータを「デジタル信号処理(DSP)」と「AI」を高度に駆使して処理することで道路を構成する地盤内部の埋設管・空洞や橋梁内部の状態などを自動で推定する技術の基礎を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

埋設管および空洞の検知には従来からレーダーの信号を画像化して、目視により判定することが主である。地中内部に点状の局所的な反射体がある場合、その点を局地とする上に凸の双曲線関数状の反応が生じる。図1(a)に示すように埋設管の場合はその双曲線状の反応を探すことで検知する 경우가ほとんどである。空洞の場合、形状は複雑であるため図1(b)に示すようにきれいな双曲線状の反応とはならず、埋設管に比べて格段に検知が難しくなる。近年では埋設管と空洞のいずれについてもレーダー信号を深層学習することで高精度かつ全自動で検知する方法に注目が集まっている。これまで三次元のレーダー信号を鉛直または水平断面で切って画像化し、特定の反応を有する画像を教師データとして学習させたうえで深層学習モデルを作るのが一般的であった。しかし、人間が三次元のレーダー信号から反射体を検知しその属性を推定する場合、たとえば走行方向断面画像を走行直角方向に移動させながら準動的に確認することが多い。この方法により、双曲線関数状の反応が走行直角方向に連続的にみられる場合は埋設管、走行直角方向の特定の区間のみみられる場合には空洞と判断することで、単一の画像を見る場合より検知精度を飛躍的に上げられる。

4. 研究成果

3.の知見を活かして著者らの最新の研究では三次元の畳み込みニューラルネットワーク(3D-CNN)を用いて三次元のレーダー信号を直接教師データとして学習させ、埋設管・空洞の有無及び埋設管の方向を高精度で推定できる深層学習モデルを構築している(図2)。

埋設管については実際に埋設されている数が多い上に前述の通り双曲線関数状の反応を人間が見つかることで良質な教師データを多数生成しやすい。著者らは埋設管を有する一辺2mの立方体領域の三次元教師データを約3,500個用意し、3D-CNNモデルを構築した。

出力クラスは走行直角・走行方向埋設管・非埋設管部の3クラスである。構築したモデルの埋設管の検知精度は最大で約93%で、方向についてはほとんど誤分類なく高精度に判定可能であった。

埋設管は前節で検知された一辺2mの三次元領域内に存在するものの、実用上はさらに高い

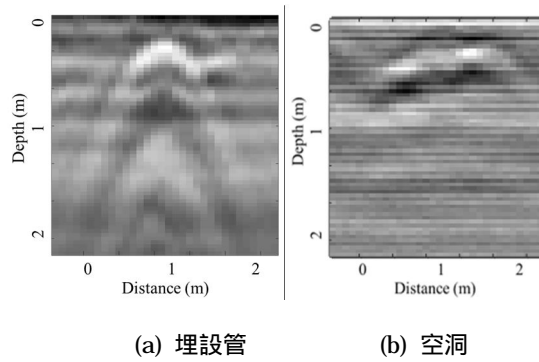


図 1 埋設管・空洞による典型的な反応の例

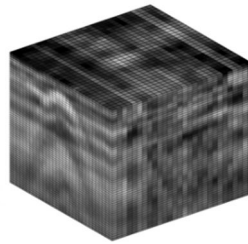


図 2 埋設管の三次元教師データのイメージ

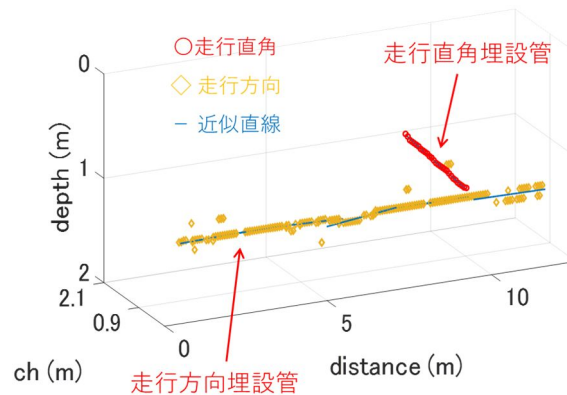


図 3 実埋設管を埋めた検証用フィールドにおける埋設管の三次元位置推定結果

位置精度が要求される．そこで，埋設管を有する領域に逆解析手法であるマイグレーション（合成開口処理）を適用し，反射面にのみ反応を収束させることで高分解能で位置を推定することにした．図 3 は実物大の埋設管のある実験フィールドを計測したデータに本アルゴリズムを適用した結果を示しており，実際の埋設位置と比較した結果，走行直角方向および走行方向の三次元の位置を cm オーダーの高精度に推定できることがわかった．また，深層学習と逆解析を組み合わせることで，500m 区間のデータを 10 分程度の高速で分析できることも実証している．空洞についてはそもそも埋設管に比べて数が少ないのに加え反応が複雑であることから教師データの数は限られる．そこで空洞の反射の三次元反射データについては，実空洞に加えて，電磁界解析手法の一つである時間領域差分（FDTD）法を用いて数値解析的に教師データを増やすことにした．ただし，三次元 FDTD 法は計算コストが高いため，著者らは図 4 に示すように三次元空間中の特定の円筒方向の断面上の電磁界のみを二次元 FDTD 法により計算し，それを円筒方向に補間することにより計算量を 3 オーダー減らしつつ高精度に三次元データを生成する手法を提案している 6)-8)（図 4）．本低コストシミュレーション法により，ランダムに形状パラメータを変更させた計 500 個の空洞の近似三次元教師データを生成し，88 個の実空洞の計測データと合わせて 3D-CNN により学習させた．構築したモデルを実空洞データに適用した結果，約 87%の精度で検出できることがわかった．熟練点検員であってもレーダーの目視判定では 8 割検知できれば高い方と言われていることを考えると，既に高い精度に達していると考えられる．さ

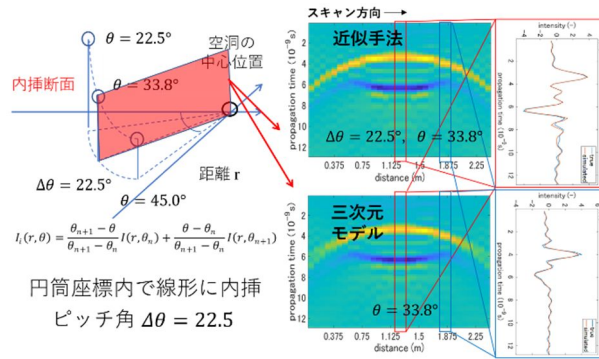


図4 二次元 FDTD 法による空洞の近似的な
三次元教師データの生成

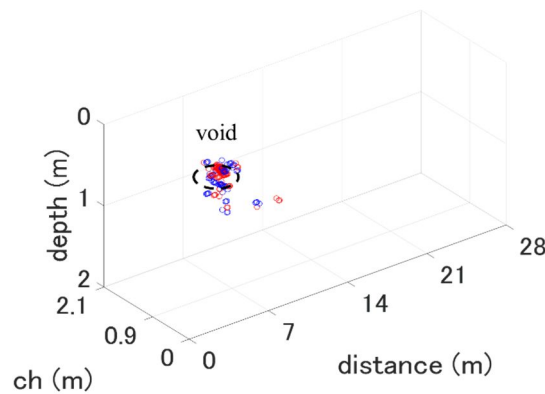


図5 空洞モデルを埋めた検証用フィールドにおける空洞の三次元位置推定結果

らに、三次元位置の推定精度を検証するために、発泡スチロールで作った空洞モデルを埋めた実物大の検証用フィールドデータに適用し、埋設管同様にマイグレーションを適用した結果、図5に示すように空洞モデルの三次元位置の高精度での検出に成功している。

本研究では、道路路面下の透視技術として、車載型のマルチチャンネルの高速地中レーダーにより三次元空間データを計測し、そのデータをデジタル信号処理と深層学習モデルにより分析することで、橋埋設管・空洞の三次元位置を推定した結果の成果について述べた。カメラや測距レーザーを活用した目視可能なインフラ表面の状態評価技術に比べて、目視不可能なインフラ内部の状態の推定技術の開発はアルゴリズム構築からその有効性の検証まで各段に難しい。しかし、第三者被害を引き起こす空洞由来の陥没の低減、埋設管位置の詳細な把握による建設工事の効率化などを考えると、道路路面下の異常や構造物の三次元情報を自動で構築する技術の開発は必須である。現時点で既に実運用できる精度に達してきているものの、さらにアルゴリズムの最適化を行い計測と同時に逐次処理するアルゴリズムを実装することにより、道路路面下の「リアルタイム」透視が実現しインフラ分野の時間・空間革新につながると期待している。

参考文献

- 1) 水谷 司，道路路面下の透視技術の最前線，計測と制御，Vol.60, No.11, pp.760-764，2021。(DOI：10.11499/sicejl.60.760)
- 2) 国立研究開発法人 土木研究所：福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会 報告書 (2018)
- 3) T. Yamaguchi, T. Mizutani, M. Tarumi, and D. Su: Sensitive Damage Detection of Reinforced Concrete Bridge Slab by “Time-Variant Deconvolution” of SHF Band Radar Signal, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.57, No.3, pp. 1478-1488 (2019)
- 4) T. Mizutani: Bridge Slab Damage Detection by Signal Processing of UHF-Band Ground Penetrating Radar Data, Journal of Disaster Research, Vol.12 No.3, pp. 415-421 (2017)
- 5) Y. Fujino, and T. Mizutani: Research and Implementations of Structural Monitoring for Bridges and Buildings in Japan, Engineering, Vol. 5, No.6, pp.1093-1119 (2019)
- 6) Takahiro Yamaguchi*, Tsukasa Mizutani, Tomonori Nagayama Mapping Subsurface Utility Pipes by 3D Convolutional Neural Network and Kirchhoff Migration using GPR Images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Accepted, 2020 (Accepted),
- 7) 山口貴浩, 水谷 司：三次元畳込みニューラルネットワークとキルヒッフマイグレーションによる地中埋設管の検知，生産研究, No. 72, Vol. 4, pp. 81 - 85 (2020)
- 8) T. Yamaguchi, T. Mizutani: Detection and Localization of Manhole and Joint Covers in Radar Images by Support Vector Machine and Hough Transform, Automation in Construction, No.126 (2021) (Accepted).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Takahiro Yamaguchi, Tsukasa Mizutani | 4. 巻 No.126 |
| 2. 論文標題 Detection and Localization of Manhole and Joint Covers in Radar Images by Support Vector Machine and Hough Transform, Automation in Construction | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Automation in Construction | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.autcon.2021.103651 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Takahiro Yamaguchi, Tsukasa Mizutani and Tomonori Nagayama | 4. 巻 未定 |
| 2. 論文標題 Mapping Subsurface Utility Pipes by 3D Convolutional Neural Network and Kirchhoff Migration using GPR Images | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2020.3030079 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 飯田 芳久, 長山 智則, 薛 凱, 蘇 迪, 水谷 司 | 4. 巻 66A |
| 2. 論文標題 鉄道橋交通振動を対象としたアクティブ制振の数値的検討 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 構造工学論文集 | 6. 最初と最後の頁 376-387 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/structcivil.66A.376 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Tomonori Nagayama, Yoshiki Ikeda, and Tsukasa Mizutani | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 Research and Implementations of Structural Monitoring for Bridges and Buildings in Japan | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Engineering | 6. 最初と最後の頁 1093-1119 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.eng.2019.09.006 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Tomoaki Takeda, Tsukasa Mizutani, Tomonori Nagayama, and Yozo Fujino | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Reproduction of Cable-stayed Bridge Seismic Responses Involving Tower-girder Pounding and Damage Process Estimation for Large Earthquakes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering | 6. 最初と最後の頁 1-16 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001336 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 水谷司 | 4. 巻 79 |
| 2. 論文標題 道路インフラ情報の大規模構築技術の最前線 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 運輸と経済 | 6. 最初と最後の頁 163-170 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 水谷司 | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 画像, レーザー, レーダーデータの数理的処理による地表地中空間情報の自動・超規模構築 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 生産研究 | 6. 最初と最後の頁 859-863 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.71.859 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 水谷司 | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 道路路面下の透視技術の最前線 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 計測と制御 | 6. 最初と最後の頁 760-764 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.60.760 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hinari Kawamura, Yoshifumi Nagata, Tomoaki Tokuno, Tetsuya Ishida, Tsukasa Mizutani |
| 2. 発表標題 Pavement evaluation method using MMS |
| 3. 学会等名 RILEM International Symposium on Bituminous Materials (ISBM) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Harada, A., K. Yoshimura, T. Mizutani |
| 2. 発表標題 Quantification and Application of "Climate-Risk" based on the tree-ring proxy data |
| 3. 学会等名 JpGU2020 (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 川島学, 水谷司, 内堀裕之, ホアン チョン クエン, 楠浩一 |
| 2. 発表標題 無線ネットワークを用いた異常検知システムの性能確認とオフライン解析結果に基づく一考察 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山口貴浩, 水谷司 |
| 2. 発表標題 地中レーダ信号の深層学習と解析学的信号処理による埋設管の三次元位置情報の推定 |
| 3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 水谷司 |
| 2. 発表標題 「リアルタイム空間解析」が実現する地上地下空間情報の超規模構築 |
| 3. 学会等名 第10回IDESメンバーシップ公開セミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 川村 日成, 永田 佳文, 水谷 司 |
| 2. 発表標題 MMSを用いた舗装の評価手法(その1) |
| 3. 学会等名 土木学会年次学術講演会講演概要集 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tsukasa MIZUTANI |
| 2. 発表標題 Big Data Construction of Infrastructural Quantitative Information by Real Time Spatial Analysis |
| 3. 学会等名 8th Joint Semnar on Civil Infrastructures (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takahiro Yamaguchi, Tsukasa Mizutani, and Minoru Tarumi |
| 2. 発表標題 Subsurface pipes detection by 3D convolutional neural network and Kirchhoff Migration using GPR images |
| 3. 学会等名 8th Joint Semnar on Civil Infrastructures (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. MIZUTANI, T. ISHIDA, K. SUZUKI, Y. TAKAHASHI, Y. NAGATA, H. KAWAMURA |
| 2. 発表標題 2-DIMENSIONAL PAVEMENT CONDITION EVALUATION BY SPATIAL FREQUENCY ANALYSIS OF POINT CLOUD DATA |
| 3. 学会等名 17th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Aisa (USMCA) (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akiara Harada, Kei Yoshimura, and Tsukasa Mizutani |
| 2. 発表標題 Study on Global Quantitative Analysis of Spatial Representation Proxy Data by Applying Signal Processing Techniques |
| 3. 学会等名 American Geophysical Union(AGU) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takahiro Yamaguchi, Tsukasa Mizutani, and Minoru Tarumi |
| 2. 発表標題 Automatic and High-Speed Damage Detection of Reinforced Concrete Bridge Slab by Ground Penetrating Radar |
| 3. 学会等名 17th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Aisa (USMCA) (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

| | | |
|---------------------------|--------------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称 状態監視装置 | 発明者 武輪知明, 辻田亘, 澤良次, 水谷司, | 権利者 同左 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、6611991 | 取得年 2020年 | 国内・外国の別 国内 |

〔その他〕

-

| | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|