

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04018

研究課題名(和文) 構造音響連成系の過渡応答を利用した有限要素モデルと実物の乖離要因の特定法の開発

研究課題名(英文) Identification of error factors between actual system and finite element model using the transient response of structural acoustic coupled system

研究代表者

古屋 耕平 (FURUYA, Kohei)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：40580056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、設計の効率化の観点から数値計算を援用した設計法が広く利用されている。本研究では、自動車の車体と車内空間のように、構造系と音響系が連成し、かつ多数の部品からなる系の振動騒音特性を予測する有限要素モデルの精度向上を目的に、過渡応答を利用して実物とモデルの乖離の原因(乖離要因)を特定する方法を提案した。本研究は、乖離要因の特定に過渡応答を利用する点、過渡応答に含まれる各部品の寄与を時間領域の相互平均コンプライアンスや簡易パネル寄与解析で評価する点が従来の方法と異なる点である。そして、構造系単体だけでなく、音響系単体、構造系と音響系が接している連成面のそれぞれに乖離がある場合で有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は乖離要因を特定する際に周波数応答を利用することが多かった。周波数応答は励起された時刻歴応答が収束するまでの波形をフーリエ変換して求めるため、系全体の影響が含まれる。よって周波数応答から、乖離要因がどこにあるのかを確実に特定することは困難であった。本研究では過渡応答、特に加振直後の加振点近傍の応答には系の局所的な影響のみが含まれることに着目した点に学術的特徴がある。過渡応答を実験と有限要素解析で比較することで、どこに乖離要因が存在するのかを特定できることを構造系単体、音響系単体、構造音響連成系で示した。また過渡応答に含まれる部品毎の影響を相互平均コンプライアンスで分離する方法を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the novel approach which uses transient response instead of the frequency response to identify error factors between actual system and finite element model has been proposed. A frequency response is calculated from time domain response which includes reflection waves from entire system. Accordingly, it is difficult to identify error factors. On the other hands, the transient response measured immediately after excitation includes reflection waves from local components only. Therefore it is easy to identify error factors than using frequency response. Technical novelties of this research are, using transient response to identify the error factors in structural acoustic coupled system, using time domain mutual mean compliance to determine the contribution of components to the transient response, and using time domain panel contribution analysis. The effectiveness of the proposed approach was shown in the structural acoustic coupled system.

研究分野：機械力学

キーワード：過渡応答 相互平均コンプライアンス 有限要素法 CAE 振動騒音

### 1. 研究開始当初の背景

CAE (Computer Aided Engineering) 技術の発展により、機械構造物の動特性を試作前に予測可能となりつつあり、低周波を対象にした場合、有限要素法が広く利用されている。しかし、自動車の車室内騒音のように振動と音が連成し、かつ、部品が多数存在する場合、動特性の予測精度が低い場合がある。本研究では、自動車開発などで性能評価指標の一つとなっている構造音響連成系の周波数応答関数 (Frequency Response Function, 以下 FRF) の予測精度向上を目的に、実物と有限要素解析で求めた FRF の乖離の原因 (以下、乖離要因) を、過渡応答を利用して特定する方法を提案する。

実物と有限要素解析で求めた FRF が乖離している場合、FRF に対する板厚などの感度と最適化アルゴリズムを利用したモデル更新 (Model updating) を行い、FRF の予測精度を向上させる方法が知られている。このモデル更新で考慮される設計変数は、数値計算上の取り扱いが容易な板厚や弾性率などのパラメトリックな変数である場合が多い。しかし、実際の乖離要因は、形状の違いや結合位置のずれなど、パラメトリックな変数とは限らないため、パラメトリックな設計変数を対象としたモデル更新の適用範囲は限定される。そのため実際の開発現場では、駆動点 FRF を実験と有限要素解析で比較する方法が利用されている。この方法は、乖離要因と疑われるいくつかの部品の駆動点 FRF を、実験と有限要素解析で比較し、駆動点 FRF の乖離が大きい部品を乖離要因と判断する方法である。しかし、駆動点 FRF には加振した部品以外の特性も影響するため、乖離要因を確実に特定することは困難である。

### 2. 研究の目的

従来法の課題を踏まえ、本研究では振動騒音特性を表す有限要素モデルを対象に、過渡応答を利用してモデルと実物の間の乖離要因を特定する方法を提案する。提案法の概要を図 1 の構造系モデルで説明する。図 1 に示すように構造物のある点を加振したとき、励起された振動は加振点から構造全体へ波動として伝播する。その間、部品の結合部など、不連続部で反射、透過を繰り返す。周波数応答関数 (Frequency Response Function, 以下 FRF) は、一般には、加振から振動が収束するまでの時刻歴応答を周波数領域へ変換して求める。このように、FRF は構造物全体へ伝播した波動から算出されるため、構造物全体の影響が含まれる。そのため従来の駆動点 FRF を実験と有限要素モデルで比較する方法では、乖離が存在するか否かを検証したい部品以外の影響が駆動点 FRF に含まれるため、乖離要因を確実に特定することは困難である。

一方、加振直後の駆動点過渡応答に着目すると、その応答には加振した部品やその近傍の部品の影響のみが表れる。よって、駆動点過渡応答を実験と有限要素モデルで比較することで、加振した部品が乖離要因か否かを判断できると考えられる。

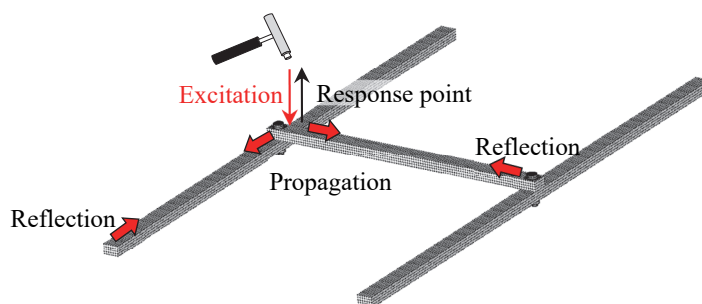


図 1 提案法の概要

### 3. 研究の方法

過渡応答を利用した実物と有限要素モデルの乖離要因の特定法を、構造系に乖離要因がある場合、音響系に乖離要因がある場合、構造系と音響系が接している連成面に乖離要因がある場合のそれぞれの場合で有効性を検証する。乖離要因の特定は以下の流れで行う。

- ① 実物と有限要素モデルの FRF を比較し、乖離要因を特定する周波数を決定する。
- ② 乖離要因を特定する周波数で主要な振動モード、音響モードや実稼働変形から、FRF への影響が大きい部品、位置を複数選ぶ。
- ③ ②で選択した各位置で、対象周波数の振動や音波が励起されるように加振を行い、加振点近傍の駆動点過渡応答を実験計測する。
- ④ 実験で与えた入力を入力を有限要素モデルへ与え、②で選択した各位置で、実験と有限要素解析で求めた駆動点過渡応答を比較し、乖離が小さい部品は乖離要因ではないと考える。その際、駆動点過渡振動に対する構造物の各部品の寄与は時間領域の相互平均コンプライアンスで定量評価する。駆動点過渡音圧に対する音響系の各境界の寄与は時間領域の簡易パネル寄与解析で定量評価する。

#### 4. 研究成果

- ・構造系に乖離要因がある場合での有効性の検証

図2に示す複数のはりからなる構造物で提案法の検証を行った。はじめに、実物を柔らかいスポンジで支持し自由状態を模擬し、有限要素モデルの境界条件も自由状態とした。実験と有限要素解析で求めた対象構造物のFRFの比較結果を図3に示す。入力点と応答点は図2.bに示した位置である。図3に示すように自由状態を模擬した実験と有限要素解析で求めたFRFはよく一致している。この状態から既知の乖離要因として、図4.aに示すように実験装置の左下の境界条件を防振ゴムへ変更した。このときの実験と有限要素解析で求めたFRFの比較結果を図4.bに示す。入力点と応答点は図2.bに示した位置である。図4.bに示すように乖離要因から離れた位置のFRFにも乖離要因の影響が表れており、FRFから実物と有限要素モデルの乖離要因がどこにあるかを判断することが困難であることがわかる。

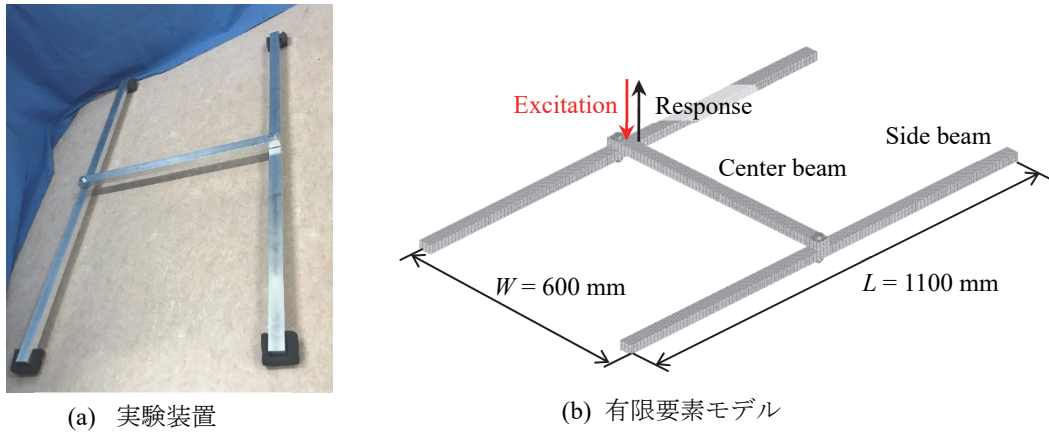


図2 検証で利用した構造物と有限要素モデル

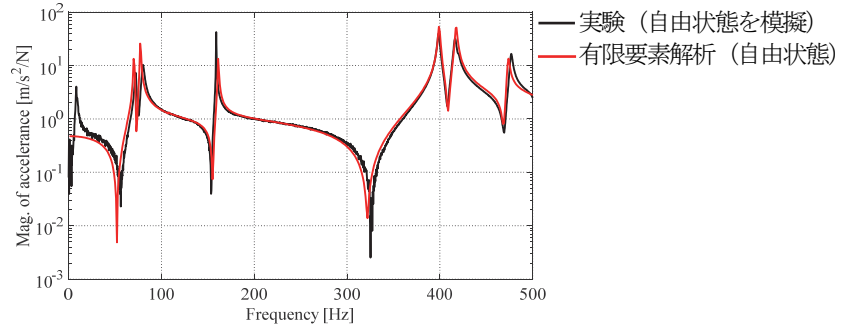


図3 境界自由状態の実験と有限要素解析のFRFの比較結果

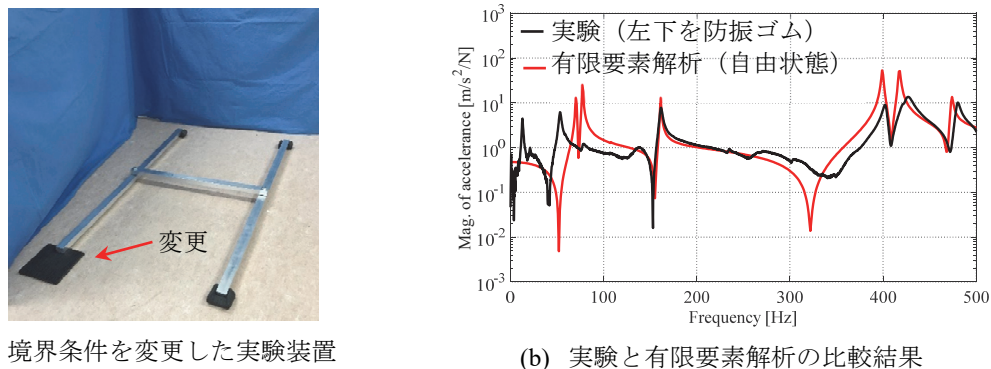


図4 左下の境界条件を変更した実験と有限要素解析（自由状態）のFRFの比較結果

図5には実験と有限要素解析で求めた駆動点過渡応答の比較結果を示す。入力点と応答点は図2.bに示した位置で、実験は左下の境界条件を防振ゴムへ変更した状態、有限要素解析は自由状態の結果を示している。図5に示すように加振後2.1ms間は実験と有限要素解析はよく一致しており、その後、乖離が生じていることがわかる。駆動点過渡応答に対する構造物を構成する各部位の寄与を時間領域の相互平均コンプライアンスで分析した結果を図6に示す。

図6に示した時間領域の相互平均コンプライアンスを確認すると $t=4$ msまでは左締結部、中央のはりの寄与が大きく、この時刻は実験と有限要素解析の過渡応答が一致していることから左締結部、中央のはりは乖離要因ではないと判断できる。乖離が生じ始める $t=5$ msでは左下コーナー、左上コーナーなどの寄与が大きくなってきており、乖離の原因と疑うことができ、次にそれら左下コーナー、左上コーナーの駆動点過渡応答を実験と有限要素解析で比較した結果を図7.a, 7.bにそれぞれ示す。図7.aは左下コーナー、図7.bは左上コーナーの比較結果を示す。図7より、左下コーナーの乖離が早い時刻から生じており、左下コーナーに乖離要因があると判断することができる。

以上のように構造系に乖離要因がある場合での提案法の有効性を示した。

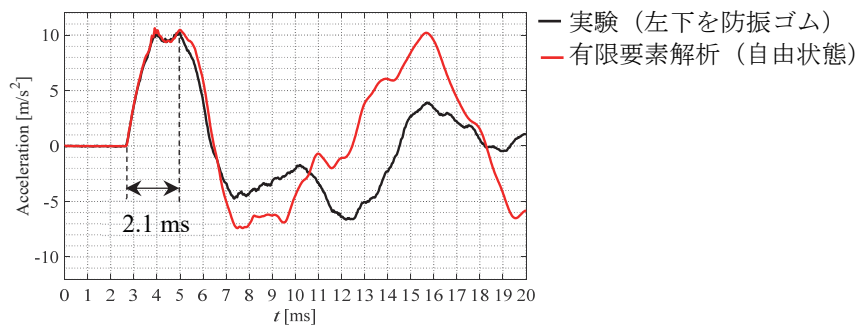


図5 駆動点過渡応答の比較結果

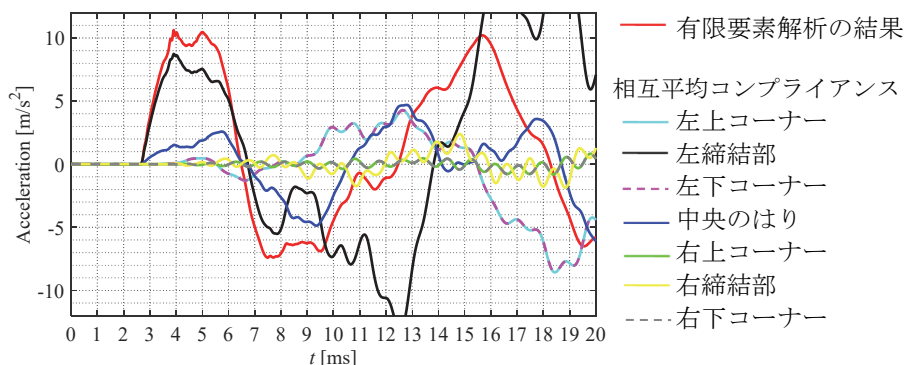
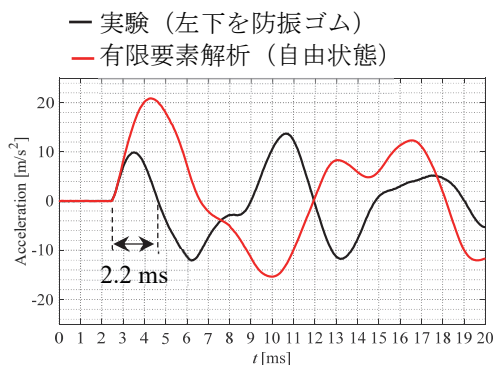
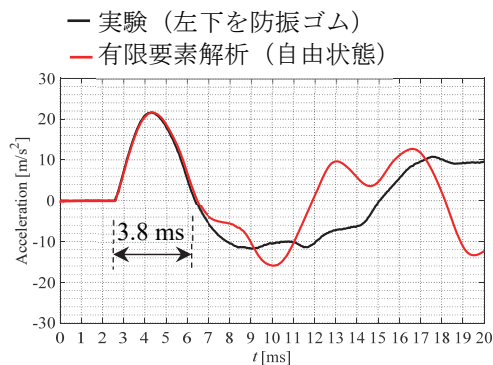


図6 駆動点過渡応答に対する各部位の寄与 (時間領域の相互平均コンプライアンス)



(a) 左下コーナーの駆動点過渡応答の比較結果



(b) 左上コーナーの駆動点過渡応答の比較結果

図7 左下コーナー、左上コーナー位置での駆動点過渡応答の比較結果

・音響系に乖離要因がある場合での有効性の検証

同様の流れで図 8 に示す音響箱と有限要素モデルを用いて、音響系に乖離要因がある場合での有効性を検証した。実験装置の左端の穴を開口、有限要素モデルの境界条件を閉口とし、実験と有限要素モデルの乖離要因が左端にあることを、過渡応答を利用して特定可能か検証した。図 9.a に左端位置での駆動点過渡応答の比較結果、図 9.b に右端位置での比較結果を示す。図 9.a に示すように左端で実験と有限要素解析の乖離が早い時刻から生じていることから左端に乖離要因が存在すると判断できることを示した。

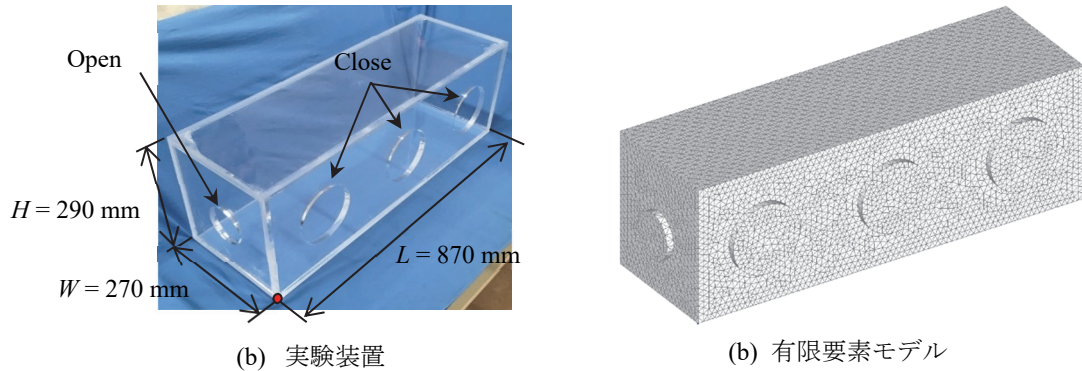


図 8 検証で利用した音響箱と有限要素

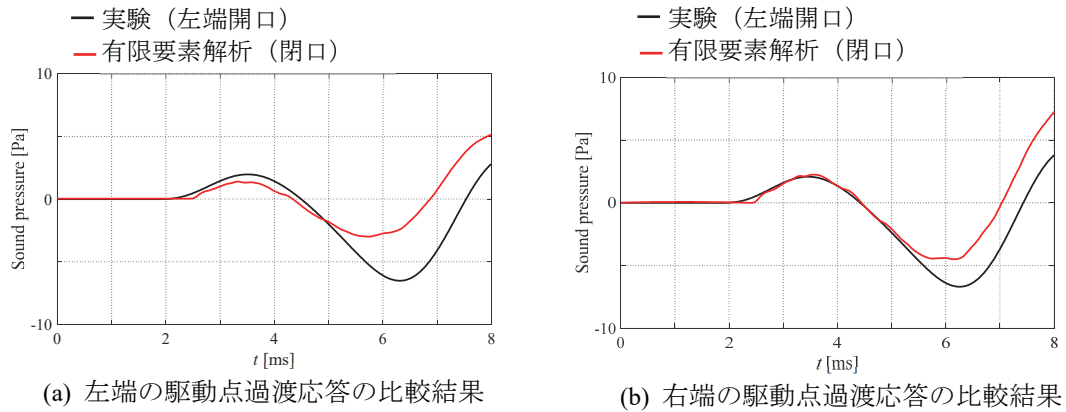


図 9 左端、右端位置での駆動点過渡応答の比較結果

・連成面に乖離要因がある場合での有効性の検証

同様の流れで図 10.a に示す実験装置を用いて、構造系と音響系が接する連成面に乖離要因がある場合での有効性を検証した。乖離要因として実験装置の面の半分に、厚さ 25mm の吸音材を設けた。吸音材の質量は実験装置（音響箱）に対して小さいため構造振動への影響は小さく、厚さも 25mm であることから低周波の音響モードに対する影響も小さいが、振動から音へ変換される際の影響が大きい。図 10.a に示した位置 A、B それぞれを打撃加振したときの位置 A、B の音圧の実験と有限要素解析の比較結果を図 10.b、10.c に示す。図 10.b、c の比較から位置 A に乖離要因が存在すると判断できることを示した。

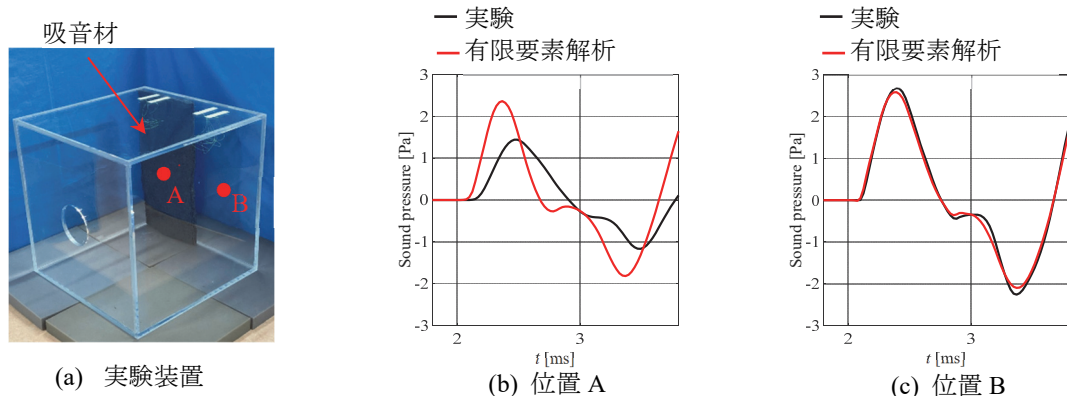


図 10 検証で利用した実験装置と駆動点過渡応答の比較結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 古屋 耕平, 新谷 拓己, 吉村 卓也, 松村 雄一	4. 巻 86
2. 論文標題 過渡応答を利用した実構造物と有限要素モデルの乖離要因の特定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00369	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古屋 耕平, 木村 勇貴, 吉村 卓也, 松村 雄一
2. 発表標題 過渡応答を利用した実音場と有限要素モデルの乖離要因の特定法の数値検証
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新谷 拓己, 古屋 耕平, 吉村 卓也, 松村 雄一, 新井 勝彦, 和田 靖彦
2. 発表標題 過渡応答を利用した実構造物と有限要素モデルの乖離要因の特定法
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018 講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古屋 耕平, 木村 勇貴, 吉村 卓也, 松村 雄一, 新井 勝彦, 和田 靖彦
2. 発表標題 過渡応答を利用した実音場と有限要素モデルの乖離要因の特定法
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018 講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉村 和哉, 古屋 耕平
2. 発表標題 過渡応答を利用した構造音響連成系の有限要素モデルと実物の乖離要因の特定
3. 学会等名 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2021
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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