

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02094

研究課題名（和文）革新的な樹脂含浸法による先端複合材料の作製と振動最適化

研究課題名（英文）Innovative manufacturing of advanced composites using electrodeposition resin molding and vibration optimization

研究代表者

本田 真也（HONDA, Shinya）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90548190

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では以下の3つの項目に取り組んだ。1. 革新的な先端複合材（炭素繊維強化複合材料，CFRP）の作製手法である電着樹脂含浸法の実験パラメータの調査による作製条件最適化とセルロースナノファイバー層の挿入による高機能化。2. 刺しゅう技術による自由な繊維配向を持つ複合材の局所的な異方性と板厚を考慮した計算モデルの構築と最適設計。3. 設計空間を学習しながら応答曲面を更新することで、目的関数の評価回数を抑えた効率的な最適化手法の開発。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに自由繊維形状を有する複合材の振動特性を最適化している研究は行われていたが、均一の板厚を想定し、また、実験による検証は行われていなかった。振動特性の正確な推定には板厚分布は重要であり、本研究のように繊維曲率に起因する板厚変化を考慮した最適設計を行なっている点に学術的な意義がある。また、電着樹脂含浸法は、他の手法よりもエネルギー消費量が少なく、また自動車塗装のように流れ作業による大量生産に向いているため、その有用性が証明され実用化されれば、近年、需要が拡大している複合材作製の効率化・省エネルギー化が図れるため創造的であり、社会に広く貢献する技術である。

研究成果の概要（英文）：In this study, the following three topics were investigated: 1. Optimization of the fabrication conditions of the electrodeposition resin impregnation method, an innovative fabrication method for advanced composites (carbon fiber-reinforced composites, CFRP), by investigating experimental parameters, and the insertion of cellulose nanofiber layers for higher functionality; 2. Development of a computational model that takes into account the local anisotropy and plate thickness of the composite material with free fiber orientation by embroidery technology, and its optimal design; 3. Development of an efficient optimization method that reduces the number of evaluations of the objective function by updating the response surface while learning the design space.

研究分野：機械力学

キーワード：複合材料 振動 最適設計 電着樹脂含浸 逐次近似最適化 曲線状繊維

1. 研究開始当初の背景

日本経済新聞社によると炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の世界市場は、航空機に加え自動車量産モデルにも適用されるため、2030年には4.3兆円を超え、2018年度の3倍以上になると報じられている。この需要を満たすためには、CFRPの製造技術の向上・効率化が必須である。

先進製造技術の代表例として、ロボットアームで自動積層する装置や3Dプリンターがある。ロボット積層は樹脂をあらかじめ含んだプリプレグテープを用いるため、オートクレーブ内の高温・高圧下で硬化する必要があり、成形には膨大なエネルギーを要し、成形時間の長さから大量生産には向いていない。一方、3Dプリンターは熱可塑性の樹脂を用いるため硬化時間は必要としないが、熱硬化樹脂と比較して複合材強度が劣る。そのため我々はこれまでファイバー縫付機を用いた先進複合材の作製に着目してきた。

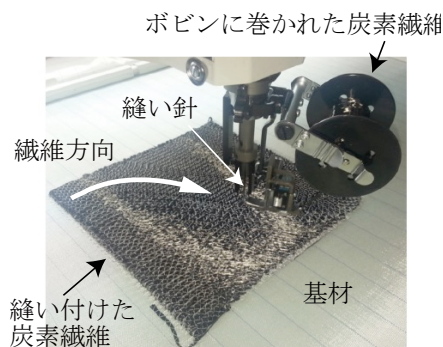


図1 ファイバー縫付機による曲線繊維配向

本装置は炭素繊維を針と糸で任意形状に基材に縫い付ける刺しゅう技術を応用した装置 (図1) であるため、服飾産業と同様に大量生産が可能であり、今後到来するCFRPの需要拡大に十分対応可能である。

ファイバー縫付機を用いた場合、樹脂を後から繊維間へ含浸させる必要がある。樹脂の含浸法に関しては、ファイバー縫付機に限らず、オートクレーブ法の代替として着目されており、その効率化に関する研究が多く行われている。しかしながら、物理的な圧力によって粘度の高い樹脂を直径10マイクロの炭素繊維間に均質に含浸することは容易ではなく、成形後のボイドの発生を完全に抑えることは困難であり、その抑制・予測手法に関する研究も盛んに行われている。

一方、我々は炭素繊維に樹脂を含浸する革新的な手法を提案している。自動車の塗装技術にも使用されている電着技術を用いた樹脂含浸法であり、エポキシ樹脂を含む電着液に炭素繊維を沈ませて (図2)、繊維に通電することで繊維の周りに樹脂を電気化学的に析出させる (図3)。物理的な圧力による含浸ではないため、ボイドが発生する可能性が極めて低く、流れ作業による大量生産にも向いており、ファイバー縫付機との相性が良い。これまでの研究により、本手法で成形したCFRP供試体は繊維方向に120 GPa程度のヤング率を示しており、オートクレーブにより作製したCFRPと同等であることがわかっている。

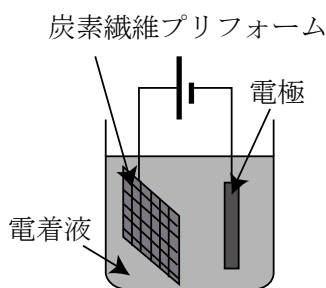


図2 電着含浸法概念図

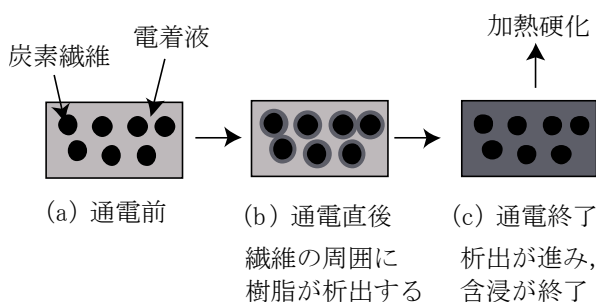


図3 樹脂が繊維の表面に析出する概念図

2. 研究の目的

冒頭にあげた全ての先進的な複合材作製方法に共通する特徴として、これまでの直線や織物状などの繊維形状に限らず、自由な繊維形状で配向できる点である。例えばファイバー縫付機により、円孔周りに「らせん状」に繊維を配向した試験片は孔がない試験片と同程度まで強度が回復することがわかっており、自由繊維形状は複合材の効率的な機能強化に有用である。これまで電着による製造方法・静的強度に関して研究を行ってきたが、複合材構造はシェル構造として構造物の外板など動的条件下で利用される例が多く、その振動特性は重要である。そのため、本研究では正確なモデル化による振動特性の評価と自由繊維形状の最適設計技術を開発することを目的として以下を実施する。

- (1) 革新的な先端複合材 (炭素繊維強化複合材料, CFRP) の作製手法である電着樹脂含浸法の実験パラメータの調査による作製条件最適化とセルロースナノファイバー層の挿入による高機能化。

- (2) 刺しゅう技術による自由な繊維配向を持つ複合材の局所的な異方性と板厚を考慮した計算モデルの構築と最適設計.
- (3) 設計空間を学習しながら応答曲面を更新することで、目的関数の評価回数を抑えた効率的な最適化手法の開発.

3. 研究の方法

上述の3点に対して以下の方法で行う.

- (1) 電着樹脂含浸の体系化, 製造複合材の更なる高性能化を目的とした試作と評価実験を行う. 本技術は実験パラメータが多数存在し, これまで経験則などあいまいに決めていた各種パラメータの体系化が必要である. パラメータとしては, 電着時の電圧, 抵抗, 通電時間, 温度, 硬化時間などがあり, 作製した試験片の断面観察, 引張・曲げ試験および実験モード解析により強度や減衰性能を評価する.
- (2) 繊維を曲線状に配置した場合, 繊維束(トウ)間に重なり(ラップ)や隙間(ギャップ)が存在し, 部分的に板厚が変化する. この局所的な板厚変化は振動特性に顕著に影響を与えるため, 板厚分布を考慮した振動数の推定技術や設計手法が重要である. 板厚が分布する原因は主に曲線状に配置された繊維トウ間のラップによるものである. 平面上の強化繊維である曲線群はある三次元曲面の等高線とみなすことができる. 等高線を表現する数式が既知であれば隣り合う曲線間隔から任意点の「ラップ率」が算出でき, 板厚が推定できる. この板厚分布と局所的な異方性を有限要素法の各要素に反映するプログラムを開発し, 振動数を算出する. また, 複合材は損失係数にも異方性があり, 繊維を自由形状にすることでより繊細な減衰設計が可能となるため, 減衰最適化も可能にする.
- (3) 近年広く利用されている遺伝的アルゴリズムや粒子群最適化法などのメタヒューリスティクスは, 汎用性が高いが膨大な繰り返し計算が必要であり, 有限要素法により目的関数を評価する場合, 最適解を得るまでに長時間を要する. そのため, 本研究では脱メタヒューリスティクスを目的に, 逐次近似最適化法を開発する. この手法は, はじめに設計変数空間に粗い応答曲面を張り, 応答曲面上の最適点やサンプル点が疎な部分に新たなサンプル点を追加していき, 徐々に設計変数空間を学習し, 応答曲面の精度を上げつつ最適化していく手法である. 応答曲面内の探索には計算時間を要さないため, メタヒューリスティクスよりも最適化に要する時間が大幅に軽減できる.

4. 研究成果

各項目に対する研究成果概要を以下に示す.

- (1) 図4は電圧・電流に着目して電着条件を変更させた場合の4点曲げ試験の結果を示す. 試験片は平織材を8層積層して作製した. 効果時間は230度で8時間である. 図より曲げ強度は電圧の違いによる影響は少なく, 電流の違いによる影響が大きいことがわかった. また, 1.5Aで200Vの時, 最大曲げ強度が達成できた.

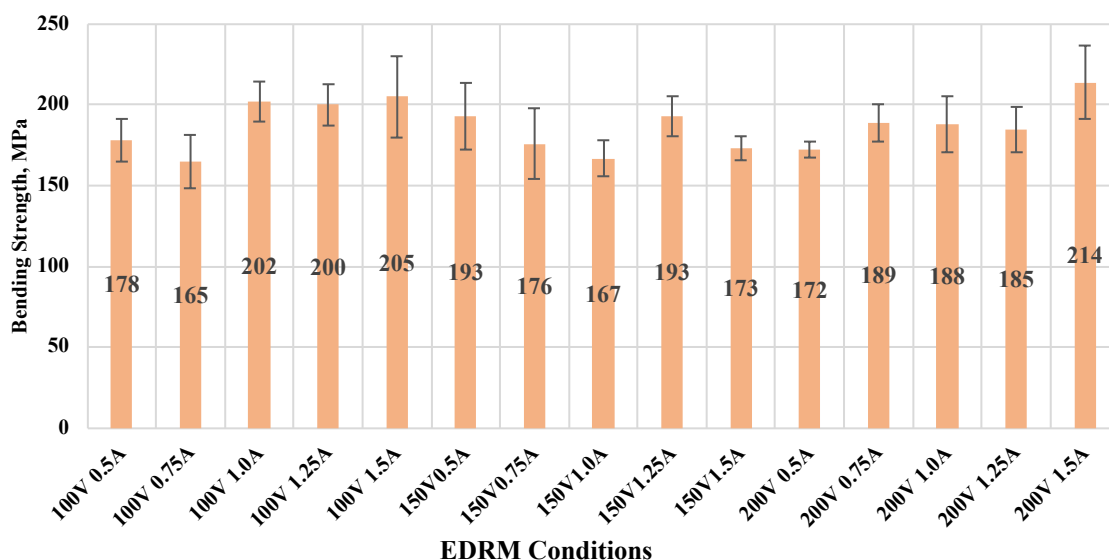


図4 各種電着条件による曲げ強度

- (2) 電着樹脂含浸法により作製される CFRP の減衰推定及び減衰向上を目的とした繊維形状の最適化を行った。減衰を固有減衰容量 (SDC) によってモデル化し、減衰の数値計算に必要なとなる材料の減衰パラメータについては、実験モード解析と有限要素解析を併用して逆解析的に同定した。最適化では、第 1 次モード SDC を最大化する曲線状の繊維形状を探索した。2 変数ガウス関数の線形結合で定義される曲面の等高線により繊維形状を表現した。また、曲線状の繊維形状で生じる板厚分布を推定し、有限要素解析に適用した。さらに数値解析及び最適化結果を評価するために CFRP を作製し、実験モード解析を行った。最適化で得られた繊維形状 (図 5A) を適用した場合、いくつかの直線配向と比べて第 1 次固有振動数及びモード SDC が向上した。最適繊維形状とよく似ている -45° の直線配向と比べても、 $+28\%$ ほど第 1 次モード SDC が高かった。また、数値計算により推定した板厚分布 (図 5B) とファイバー縫付機と電着樹脂含浸法により作製した試験片の板厚分布を比較すると、ある程度精度良く予測できていることがわかる。そのため、本研究で開発した曲線状の繊維配向最適化技術は有用であることがわかった。

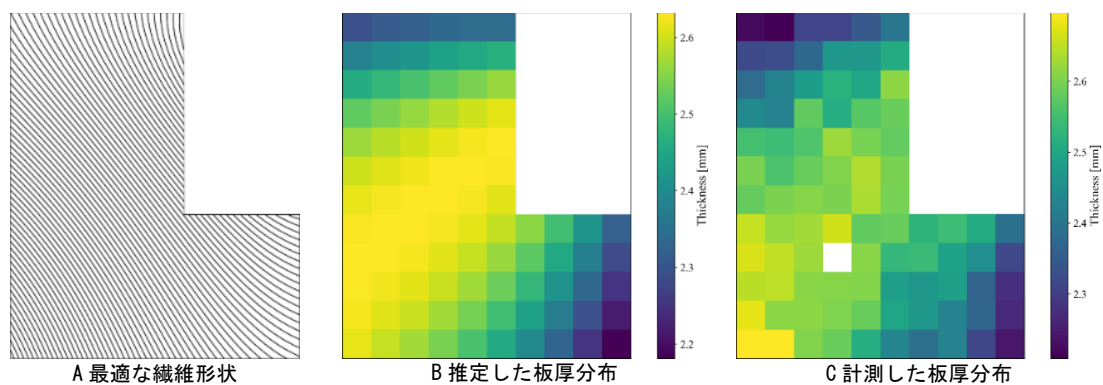
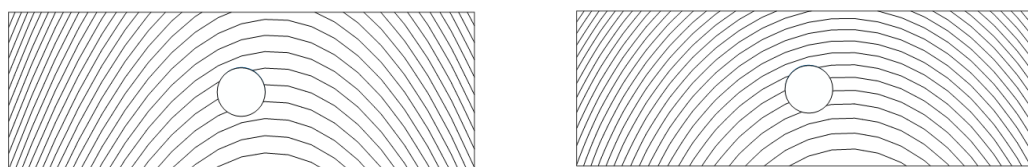


図 5 最適化結果と実験との比較

- (3) 図 6 に一般的なメタヒューリスティックである粒子群最適化 (PSO; Particle Swarm Optimization) と本研究で開発した逐次近似最適化 (SAO; Sequential Approximated Optimization) で得られた最適繊維形状を示す。長手方向に単軸引張状態を仮定し、応力やひずみが集中する円孔まわりの主ひずみを最小化する目的で、二つの手法で最適化を行った。また、図 6 に示される層を $+\theta$ 層、有限要素法の要素ごとに符号を反転させた $-\theta$ 層を交互に積層した $[(+\theta/-\theta)]_2$ の対称 8 層 CFRP 積層板とした。図より両者ともに同様の繊維形状を示していることがわかる。PSO では最大主ひずみは 2.01×10^{-4} となり SAO よりも優れた解が得られたが、目的関数の評価 (有限要素法の実行回数) に 25,000 回を必要とし、最適化を複数回実行するのは困難である。一方 SAO では最大主ひずみは 2.87×10^{-4} と若干 PSO より大きな値を示したが、PSO と同様の最適繊維形状が得られており、目的関数の評価回数が 700 回に抑えられた。このことから、本手法が少ない目的関数評価回数で優れた設計を探索できる実用的な最適化手法であることがわかる。



A PSO による繊維形状

B SAO による繊維形状

図 6 繊維形状の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Honda Shinya, Takisawa Hiraku, Takeda Ryo, Sasaki Katsuhiko, Katagiri Kazuaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Estimation of damping characteristics and optimization of curvilinear fiber shapes for composites fabricated by electrodeposition resin molding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanics of Advanced Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 4407 ~ 4418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15376494.2022.2095063	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 Yasuyuki Joko, Shinya Honda	4. 巻 26
2. 論文標題 Dehydration Dynamics Model with a Random Algorithm for a Front-loading Washer/dryer,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanics of Advanced Materials and Structures,	6. 最初と最後の頁 4934-4941
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15376494.2021.1943079	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 Islam Md Tansirul, Honda Shinya, Katagiri Kazuaki, Sasaki Katsuhiko, Takeda Ryo	4. 巻 1
2. 論文標題 Investigation of manufacture variables on the mechanical properties of CFRP prepared by electrodeposition resin molding method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Mechanics of Advanced Materials and Structures	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) 10.1080/15376494.2024.2303731	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16件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Isamu Saiwaki, Shinya Honda, Kazuaki Katagiri, Katsuhiko Sasaki and Ryo Takeda
2. 発表標題 Vibration optimization of laminated composites with curvilinear reinforcing fibers for shell structures
3. 学会等名 The 7th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Genki KITAZAWA, Shinya HONDA, Katsuhiko SASAKI, and Ryo TAKEDA
2. 発表標題 Evaluation of optimal design of laminated composite structures using Bayesian optimization
3. 学会等名 The 7th Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md Tansirul Islam, Shinya Honda, Kazuaki Katagiri, Katsuhiko Sasaki, Ryo Takeda, Isamu Saiwaki, Yuto Shimizu
2. 発表標題 Vibration characteristics of curvilinear CFRP prepared by electrodeposition resin molding manufacturing method
3. 学会等名 2023 IUTAM Symposium on Nonlinear dynamics for design of mechanical systems across different length/time scales (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinya Honda, Isamu Saiwaki, Kazuaki Katagiri, Katsuhiko Sasaki, and Ryo Takeda
2. 発表標題 Vibration Design of Composites with Nonlinear Fiber Shapes Fabricated by Tailored Fiber Placement Machine and Electrodeposition Resin Molding Method
3. 学会等名 2023 IUTAM Symposium on Nonlinear dynamics for design of mechanical systems across different length/time scales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md Tansirul Islam, Shinya Honda, Kazuaki Katagiri, Katsuhiko Sasaki, Ryo Takeda
2. 発表標題 Effect of heat curing temperature for CFRP fabricated by electrodeposition resin molding method
3. 学会等名 The American Society for Composites (ASC) 38th Annual Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水 佑音, 本田 真也, 佐々木 克彦, 武田 量, 片桐 一彰
2. 発表標題 電着樹脂含浸法により作製したCFRPの電気的特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Md Tansirul Isram, Hiraku Takisawa, Shinya Honda, Kazuaki Katagiri, Katsuhiko Sasaki, Ryo Takeda
2. 発表標題 Damping properties of composite plates fabricated by electrodeposition resin molding
3. 学会等名 第13回 日本複合材料会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田 真也, 瀧澤 拓, 片桐 一彰, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 曲線状強化繊維を有する複合材の減衰特性同定と最適化
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 才脇 武, 本田 真也, 片桐 一彰, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 シェル構造に向けた曲線状強化繊維複合材の振動最適化手法
3. 学会等名 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2022 (D&D2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田 真也, 瀧澤 拓, 片桐 一彰, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 電着樹脂含浸法による CFRP 板の曲線状強化繊維形状の最適設計
3. 学会等名 日本機械学会, 第14回最適化シンポジウム (OPTIS2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北澤 元気, 花谷 孔明, 本田 真也, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 ベイズ最適化による積層複合材構造の最適設計の効率化
3. 学会等名 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2022 (D&D2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧澤 拓, 本田 真也, 片桐 一彰, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 電着樹脂含浸法により作製した複合材の減衰推定と曲線状繊維配向最適化
3. 学会等名 日本航空宇宙学会, 第63回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiraku TAKISAWA, Naoki HASHIMOTO, Shinya HONDA, Kazuaki KATAGIRI, Katsuhiko SASAKI, Ryo TAKEDA
2. 発表標題 Vibration characteristics of carbon fiber reinforced composites fabricated by electrodeposition molding method
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧澤 拓, 本田 真也, 片桐 一彰, 佐々木 克彦, 武田 量
2. 発表標題 電着樹脂含浸法により作製した複合材の振動減衰性能の推定と最適化
3. 学会等名 日本機学会, Dynamics and Design Conference 2020 (D&D2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中谷翔太, 本田真也, 佐々木克彦, 武田 量
2. 発表標題 逐次近似応答曲面による炭素繊維強化複合材の多目的最適化
3. 学会等名 日本複合材料学会, 第45回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本直暉, 本田真也, 片桐一彰, 佐々木克彦, 武田 量
2. 発表標題 電着樹脂含浸法による炭素繊維複合材料の作製と力学特性評価
3. 学会等名 日本複合材料学会, 第45回複合材料シンポジウム
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
研究 分担者	片桐 一彰 (KATAGIRI Kazuaki) (70521277)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授 (15401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	佐々木 克彦 (SASAKI Katsuhiko)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

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