

令和 3 年 4 月 18 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03897

研究課題名(和文) 非定常トポロジー最適設計・乗り心地性能解析による振動抑制型樹脂製ベアリングの開発

研究課題名(英文) Development of oscillation control bearing based on the unsteady topology optimal design analysis

研究代表者

倉橋 貴彦 (Kurahashi, Takahiko)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00467945

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)：本研究では、非定常トポロジー最適化による数値実験および乗り心地の性能分析のための方法構築を行い、振動抑制を目指した樹脂製のベアリングについて検討を実施した。トポロジー最適化解析では、非定常問題に対してひずみエネルギーを評価関数とし解析を実施し、ひずみエネルギーを全時間通して抑制することのできる構造形態を得ることができた。また、自動車の乗り心地の評価では、フェイススケールスコア等の得点化の方法を導入し、脳波波形を用いて定量的評価を行った。フェイススケールスコアが0に近い程安静状態に近いとして検討を実施した結果、軽自動車に比べて普通車の方が乗り心地が良いという結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元定常解析で得られた自動車用シャシー部品のトポロジー最適化形状を対象に3Dプリンティングによる実験モデル作成および加振試験を実施した。トポロジー最適化において設定している評価関数(ひずみエネルギー)と振動特性(固有振動数)の関係を調べたところ、体積比率(質量比率)が小さくなるにつれて固有振動数が大きくなる傾向が得られた。この結果は、数理設計技術と実証実験結果を結び付けたものであり、学術的にも意義深いものである。また、実際の車両部品を対象としていることもあり、将来的な実装という観点からも社会的にも意義のある結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, topology optimization analysis for unsteady oscillation problem in three dimensions was carried out. The performance function was defined by strain energy, and the density method is applied to obtain the optimized shape. The finite element method and the Newmark's beta method were applied to discretize the oscillation equation in space and time, respectively. The optimality criteria method was employed to update the density distribution, and the Lagrange multiplier for the volume constraint was calculated by the bi-section method. Consequently, the appropriate shape was determined based on the above methods. In addition, the numerical evaluation of the comfortable vehicle was performed by introducing the face scale score. In the face scale score, it is regarded that if the value is close to zero, that means resting state. Consequently, it was found that standard-sized automobile is comfortable comparing to the compact car.

研究分野：数理設計工学

キーワード：非定常トポロジー最適化 自動車用シャシー部品 加振試験 3Dプリンティング 乗り心地評価 脳波測定 フェイススケールスコア パワー含有率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

従来、自動車開発において乗り心地の向上に対してエンジンから振動およびタイヤを通して車内に伝搬する振動（ロードノイズ）が問題視されている。近年の電気自動車の普及によりエンジンからの振動は取り去ることができたが、以前としてロードノイズの低減が課題となっている。また、一方で製造コストの低減のため、部品の肉抜きによる軽量化を実施したいが、ロードノイズの低減と両面で考える必要がある。適切な肉抜き箇所を特定するためには、トポロジー最適化にシミュレーションが適した方法であるが、シミュレーションにおいて定義する目的関数の設定から考える必要がある。また、自動車内を伝搬する振動による乗車時の快適性・不快性といった「乗り心地」については、定量的に評価を実施している実例が少なく、将来的に自動車開発が進められていく中で乗り心地の良さの定量的試験法について構築していく必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の背景ももとに、振動する自動車用シャシー部品の振動抑制を目的とし、非定常のトポロジー最適化解析により、最適な形態を創出することを目的とする。また、自動車の乗り心地を定量的に把握するために、フェイススケールスコア等の評点を導入し、自動車の乗り心地について定量的な評価可否の可能性について検討を実施する。

### 3. 研究の方法

研究においては、まず、トポロジー最適化の結果に関する実験的評価との対応を検証する。その後、自動車用シャシー部品の加振試験へ展開する。トポロジー最適化では、ひずみエネルギーを目的関数として設定した場合、変位と随伴変位が自己随伴の関係になり、トポロジー最適化の計算時間を軽減できるという利点を持つ。そのため、振動問題を対象とした場合においても、目的関数としてひずみエネルギーを設定することが理想であるが、このことに対する問題の有無を把握するため、加振試験を実施する。加振試験の結果を受けて、非定常モデルに対するトポロジー最適化の検討を実施し、片持ち梁モデルに対する検証のもと、自動車用シャシー部品に対する最適形態（トポロジー）を創出する。また、自動車の乗り心地の評価の実施にあたり、フェイススケールスコア等の得点化の方法を導入し、普通車と軽自動車や、路面状況の違いに対して計測した脳波波形に対する定量的評価を行い、乗り心地の良さに関する検討を実施する。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 トポロジー最適化のシミュレーション結果と実験結果の関係性に対する考察

図1に示す1/4の引張試験モデルに対して、密度法ベースのトポロジー最適化を実施した。結果として、図2に示す結果が得られ、上下左右の対称性を考慮した試験片を作成し、厚みを変えた試験片に対して引張試験を実施した（図3）。結果として、「初期の肉抜きしていないモデル」と「それと同等の変位になるトポロジー最適化モデル」に対しての重量を比較したところ、トポロジー最適化後の結果が約1割材料削減できることを確認した（表1）。本検討を通じて、トポロジー最適化の工業問題への応用を考える上では重要な知見が得られた。

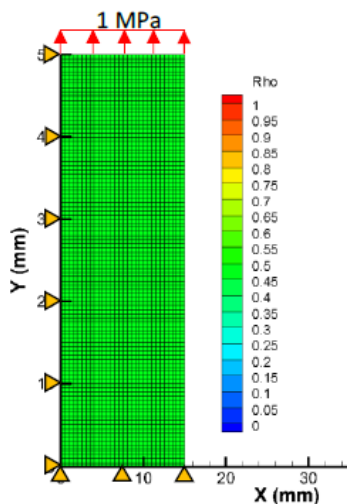


Fig.1 Tensile test model ( Finite element mesh )

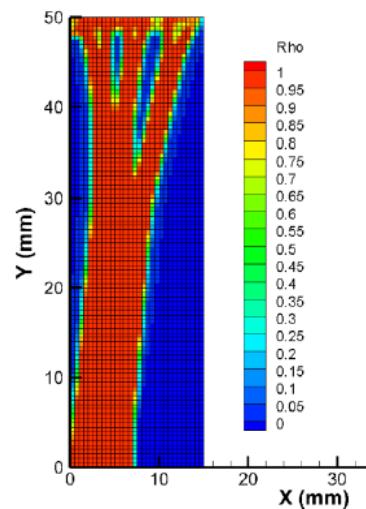


Fig.2 Result of topology optimization

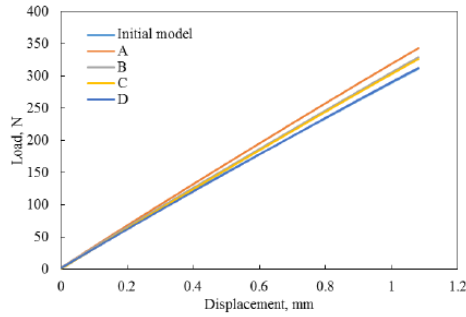


Fig.3 Result of tensile test

Table 1 Comparison of mass for each specimen

試験片	質量, g	変形量, mm
初期構造	3.1	0.68
最適構造A	3.1	0.61
最適構造B	3.0	0.64
最適構造C	2.9	0.65
最適構造D	2.8	0.68

#### 4. 2 ひずみエネルギーと振動特性に関する考察

次に、前節における静的モデルに対する2次元トポロジー最適化を3次元トポロジー最適化に拡張し、自動車用シャシー部品を3Dプリンティングにより作成した(図4)。トポロジー最適化を定常モデルから非定常モデルへ展開するにあたり、本トポロジー最適化において設定している目的関数(ひずみエネルギー)と振動特性(固有振動数)の関係を調べた(図5)。体積比率(質量比率)が小さくなるにつれて固有振動数が大きくなる傾向が得られ(図6)、体積比率に対する固有振動数とひずみエネルギーの変動率を整理したところ同様の傾向を示すことがわかった(図7)。



Fig.4 Specimen for oscillation test

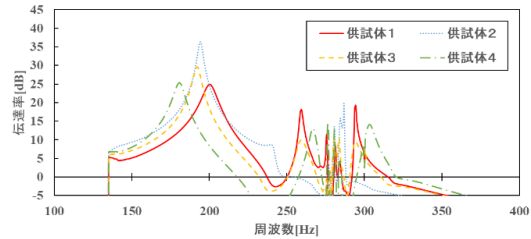


Fig.5 Result of oscillation test

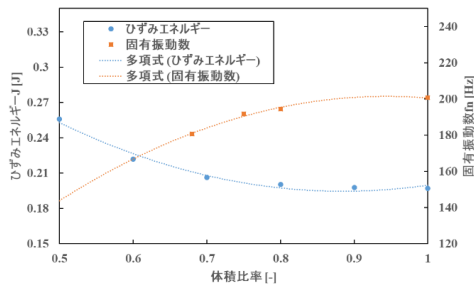


Fig.6 Relationship between strain energy and natural frequency

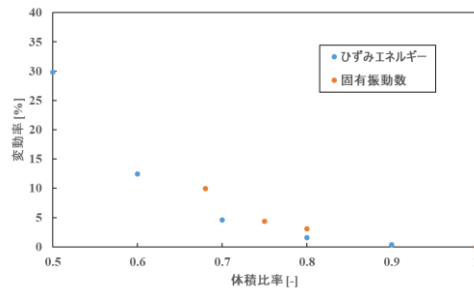


Fig.7 Relationship between rate of variation and volume ratio

#### 4.3 非定常トポロジー最適化に関する検討

前節の結果に基づき、非定常トポロジー最適化のモデルに対して、目的関数をひずみエネルギーとし、数値実験による検討を実施した。結果として、振動モデルではエネルギーが時系列で正負の値の値で変わるため、時間積分すると正負のエネルギーが相殺され、ひずみエネルギーがある場合も過小に評価されてしまう場合がある。そのため、エネルギーの値が負になる場合は、目的関数の計算において絶対値として評価する方法を提案し、シミュレーションによる実験を行った。

まず Case1 として、図8に示す片持ち梁モデルに対して図9に示す衝撃荷重を与え、非定常モデルに対するトポロジー最適化を実施した。結果として、図10に示す評価関数の履歴が得られ、評価関数収束時には図11, 12に示す結果が得られた。最適化後における荷重点での振動変位を調べると、初期モデルに対して変位が抑制できていることを確認できた(図13)。

次に Case2 として、自動車用シャシー部品を想定し、図 14 のモデルに対して、トポロジー最適化を行った。モデルの下面の数点から正弦波（2 周期分）の振動荷重を与えて検討を実施した結果、図 15 に示す結果が得られた。また、荷重点のある 1 点における振動変位を比較したところ、図 16 に示すように、振動変位を制御できていることを確認できた。

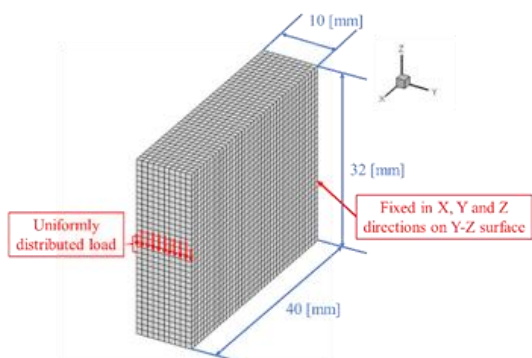


Fig.8 Numerical model and finite element mesh

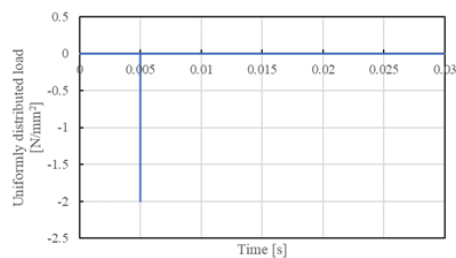


Fig.9 Boundary condition for external force

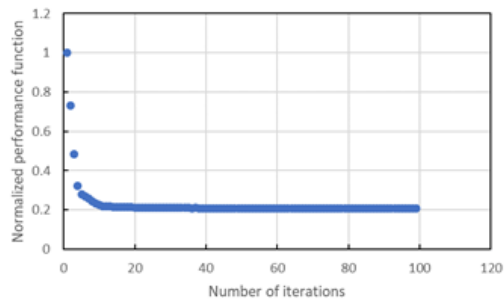


Fig.10 Variation of normalized performance function

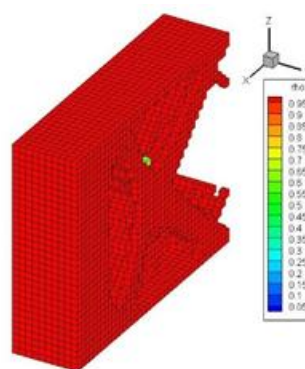


Fig.11 Result of topology optimization

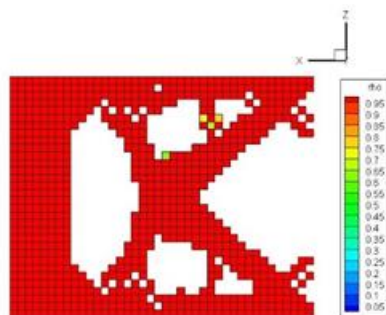


Fig.12 Side view of Fig.11

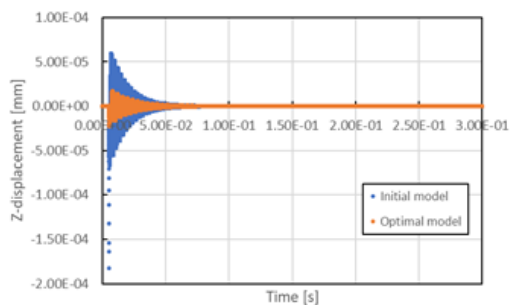


Fig.13 Comparison of time history of displacement between initial and optimized models

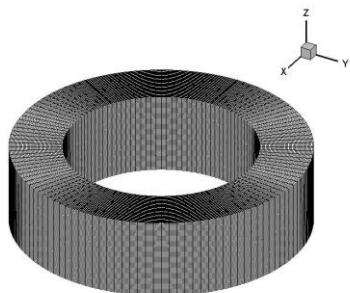


Fig.14 Numerical model and finite element mesh

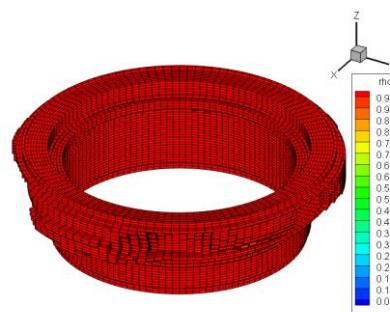


Fig.15 Result of topology optimization

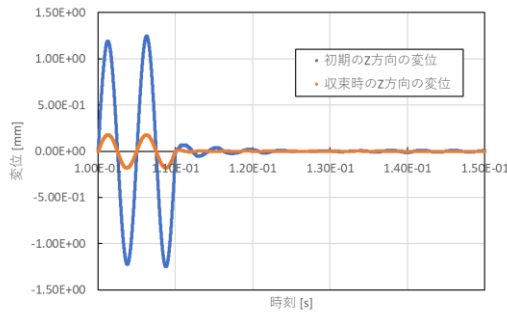


Fig.16 Comparison of time history of displacement between initial and optimized models

#### 4. 4 自動車の乗り心地の評価に関する検討

自動車部品の製品化においては、振動変位の低減のみならず、乗車した人の感覚（乗り心地の良さ）も合わせて評価できる方が好ましいと考えられる。本研究では、自動車の乗り心地の評価を定量的に行うために、脳波の計測を行い、フェイススケールスコアによる評点化を応用することについて検討した。脳波計測は被験者・運転者・計測者の3名にて実施し、自動車1（普通車）と自動車2（軽自動車）にて上記の評点化の結果の比較を行った。試験を行う道路としては、比較的直線的であり、車通りの少ない公道を対象とした。フェイススケールスコアは、安静時を基準とした得点となっている。本検討では、健常者と障害者を想定し、アイマスクの有無と耳栓の有無に対して評点の計算を行った。また、数値が零に近い方が安静状態に近いとし、評点が小さい時、乗り心地が良いと定義した。検討の結果、自動車1（普通車）の方が自動車2（軽自動車）に比べ乗り心地が良いという結果が得られた。

また、上記のフェイススケールスコアでは各脳波のデータ（ $\theta$ 波、 $\alpha$ 波等）をもとに乗り心地の良さを評価していたため、各脳波データに依存しない評価法として「パワー含有率」を用いた方法について追加検討を行った。分析法としては、主成分分析を適用した。また、上記の検討では、普通車と軽自動車に対して、乗り心地の良さを検討したが、結果として普通車の方が乗り心地が良いという結果は得られたものの、計測した脳波データにおいて大きな違いが見られないという問題点もあった。そのため、自動車は「軽自動車」とし、路面状況の違い（公道と農道）に対して乗り心地の良さに関する検討を行った。主成分分析によって得られた主成分得点について、安静時の得点を基準とした際の差（※「他実験結果による得点」と「安静時の得点」の違い（プロットした平面での距離））について比較を行ったところ、公道よりも揺れが大きい農道の方が「乗り心地が悪い」という傾向が得られた。

#### 4. 5 研究により得られた知見の整理

本研究により得られた知見を以下に整理する。引張試験片のモデルに対して静的なトポロジー最適化を実施し、初期モデルと最適化後の結果との比較により、1割程度の重量低減効果があることを確認した（4.1節）。この内容をもとに、自動車シャシー部品のモデルを作成し、体積比率に対する固有振動数とひずみエネルギーの変動率を整理したところ同様の傾向を示すことがわかった（4.2節）。そのため、目的関数をひずみエネルギーとして、非定常モデルに対するトポロジー最適化を実施した（4.3節）。解析においては、ひずみエネルギーは時系列において正と負の値を示すことから、実際にはひずみエネルギーを有していても、時間積分すると相殺され適切にひずみエネルギーを評価できないという問題が生じた。そこで、負の値を示すエネルギーに対して絶対値を取ることで、非定常のトポロジー最適化を実施し、自動車用シャシー部品に対しても最適な形態を求めることができた。また、上記の関連で、「自動車の乗り心地評価」を定量的に行う方法について検討を実施した（4.4節）。脳波を評点化したフェイススケールスコアを導入し、健常者・障害者を想定し、乗り心地について検討したところ、普通車と軽自動車では普通車の方が「乗り心地は良い」という結果が得られた。また、脳波の各波形に依存しない乗り心地の良さの評価法として、パワー含有率を用いた検討を実施した。主成分分析を用いて、道路状況の違い（公道と農道）に対する乗り心地の良さについて検討をしたところ、揺れが大きい農道の方が、「乗り心地が悪い」という結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 岸田 真幸, 倉橋 貴彦, 井山 徹郎, 小林 正成, 加藤 遼	4. 巻 55
2. 論文標題 3Dプリンティング技術に基づく自動車のシャシー用部品のトポロジー最適化構造の作製および加振試験による実験的評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 長岡工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 21-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24806/rrnitnc.55.0_11	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 芝崎 智貴, 吉原 健太, 鋤柄 あかね, 倉橋 貴彦, 池田 富士雄	4. 巻 55
2. 論文標題 脳波の計測結果を用いた自動車乗り心地の評価方法に対する提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 長岡工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 11-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24806/rrnitnc.55.0_21	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 K.Yoshihara, T.Kurahashi and M.Kobayashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Numerical and practical experiments for maximally stiff structure based on the topology optimization theory and the FEM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JSIAM Letters	6. 最初と最後の頁 73-76
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 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 M. Kishida and T. Kurahashi	4. 巻 8
2. 論文標題 3D topology optimization analysis for minimization of strain energy in oscillation problems ~ Application of topology optimized density distribution in steady problems to initial density distribution in unsteady problems~	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transaction on GIGAKU	6. 最初と最後の頁 1-8
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 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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岸田 真幸, 嶋田 雅也, 高橋 陽也, 吉原 健太, 倉橋 貴彦, 加藤 遼, 小林 正成
2. 発表標題 自動車のシャシー用部品を対象としたひずみエネルギー最小化問題に対するトポロジー最適化解析
3. 学会等名 日本応用数理学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiko Kurahashi, Kenta Yoshihara and Masanari Kobayashi
2. 発表標題 Numerical and practical experiments for maximally stiff structure under tensile loading based on the topology optimization theory and the FEM
3. 学会等名 Form and Force (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉原 健太, 倉橋 貴彦, 小林 正成
2. 発表標題 トポロジー最適化理論に基づく剛性最大化構造に対する数値的・実験的検証
3. 学会等名 日本応用数理学会年会2018
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 高橋 陽也, 吉原 健太, 倉橋 貴彦
2. 発表標題 剛性最大化問題を対象とした三次元トポロジー最適化解析における数値実験
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第56期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 M. Kishida and Kurahashi
2. 発表標題 3D topology optimization analysis for minimization of strain energy in oscillation problems ~ Application of topology optimized density distribution in steady problems to initial density distribution in unsteady problems~
3. 学会等名 5th STI-Gigaku 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸田 真幸, 倉橋 貴彦
2. 発表標題 3次元非定常振動問題におけるひずみエネルギー最小化を目的としたトポロジー最適化解析
3. 学会等名 日本機械学会計算力学部門CMD2020 計力スクウェア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Kishida and T. Kurahashi
2. 発表標題 Considerations on Relationship between Each Sensitivity Term and Results of Topology Optimization in Unsteady Oscillation Problem for 3D Cantilever Beam
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸田 真幸, 倉橋 貴彦, J. Baiges
2. 発表標題 密度法に基づくトポロジー最適化解析に対する重み付き感度の適用(Application of weighted sensitivity for topology optimization analysis based on the density method)
3. 学会等名 第17回日本応用数理学会研究部会連合発表会
4. 発表年 2021年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

数理設計研究室（長岡技術科学大学 機械創造工学専攻 倉橋研究室）  
<https://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~kurahashi/index.php>

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
連携研究者	井山 徹郎  (TETSURO IYAMA)  (00452087)	長岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授    (53101)	

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
---------	---------