

令和元年6月9日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04236

研究課題名(和文) 共鳴振動を利用した金属構造体の弾性特性評価

研究課題名(英文) Elastic properties of metallic materials made by additive manufacturing

研究代表者

垂水 竜一 (Tarumi, Ryuichi)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：30362643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年のAM技術の急速な発展に伴って、高い比強度を持つ金属積層構造体の利用が期待されているが、その力学特性の評価方法は確立されておらず、構造材料としての実用化へ向けた大きな障壁となっている。本研究ではこうした力学特性の一つとして弾性特性に着目し、既存の超音波共鳴法と有限要素解析を組み合わせた新しい弾性特性評価法の開発を行った。また、金属構造体の力学特性を記述するための基礎理論として、構成式に特性長さを含むMicropolar弾性理論とひずみ勾配弾性理論に着目し、これらの理論を用いた共鳴振動現象と静的変形におけるマルチスケール解析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AM技術を用いて作成された金属構造体は、テーラーメイド医療材料や宇宙・航空機材料など、高付加価値を持つ高比強度材料としての応用が期待されているが、その実用化を進めるためには弾性特性の直接評価が不可欠である。本研究で新たに開発した計測システムを用いれば、原理的には任意の外形・内部構造を持つ金属構造体の弾性特性評価に応用できるという特徴を持っている。また、本研究で解析を進めた二つの弾性理論(Micropolar弾性理論とひずみ勾配弾性理論)は、ラティス構造を持つ金属構造体の力学特性解析に適しており、将来的には理論基盤としての応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed a new experimental method which determines the elastic properties of three-dimensional metallic materials made by additive manufacturing (AM) technique. Our method is based on the resonant ultrasound spectroscopy (RUS) and finite element method (FEM). Three-dimensional lattice structures are prepared by selective laser melting for metallic powder. Ultrasound experiment is conducted using tripod-type RUS measurement system and which revealed that the resonance frequencies of the lattice structures can be measured with sufficient accuracy. We also conducted FEM calculation for inverse analysis of the resonance frequencies. Present analysis demonstrates that we can evaluate elastic properties of the lattice structures by combining the RUS experiment and FEM analysis. In addition to the experimental studies, we also conducted theoretical study based on Micropolar elasticity and strain gradient elasticity focusing on the size dependence of resonance frequency.

研究分野：固体力学

キーワード：金属積層構造体 ラティス構造 超音波共鳴法 有限要素法 弾性定数 Micropolar弾性理論 ひずみ勾配弾性理論 サイズ効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、3Dプリンタに代表される AM (Additive Manufacturing) 技術が急速に発展し、これを用いた新しい構造用金属材料の創成が可能となりつつある。従来の構造用金属材料は、その大半が稠密なバルク形状を有していたが、AM 技術を用いれば複雑な内部構造を制御することが可能であり、これによって付加価値の高い高比強度材料（例えばオーダーメイドの医療材料や宇宙・航空機用材料など）への応用が期待されている。こうした新しい金属材料を実用化するためには、その力学特性の評価が必要不可欠である。特に、構造材料の使用範囲は一般に弾性変形領域に限定されることから、その弾性特性を精密に評価することは必須と考えられる。ところが、AM 技術で作成された金属構造体は一般に複雑な外形を持つことが多く、またその内部構造も特異なものが多いことから、従来の機械試験方法による弾性特性の評価は原理的に困難である。そのため、金属構造体に適した新しい弾性特性の評価方法を開発することが、金属構造体の実用化を進める上で必要であるが、そのような計測方法は提案されていないのが現状である。

研究代表者は、これまで超音波共鳴法 (RUS 法) を用いた固体材料の弾性定数計測に従事してきた。この方法は、固体材料の持つ共鳴周波数を実験計測し、得られた結果を逆解析することによって、その固体材料の持つ全ての独立な弾性定数を決定するものである。この方法で用いる共鳴周波数は全ての固体材料が有しているものであり、またその計測時には材料の外部・内部形状は問題とならず、任意の形状を持つ材料の共鳴周波数を決定することができる。そのため、金属構造体にも適用可能と考えられるが、このような立場からの研究はこれまで進められておらず、その研究開発を本研究の主目的とした。

金属構造体の実用化を妨げるもう一つの要因として、理論研究の遅れが考えられる。金属構造体の中でもラティス構造と呼ばれるものは、周期的な内部構造を持つことから、Micropolar 弾性理論やひずみ勾配弾性理論のように、特性長さを持つ弾性理論を用いることでその力学特性評価が可能と考えられるが、このような研究報告は限定的であり、多くの場合、有限要素法による数値計算に頼らざるを得ないのが現状である。そのため、本研究ではラティス構造への応用を目指した Micropolar 弾性理論とひずみ勾配弾性理論に関する基礎研究を実施する。

2. 研究の目的

上記のような研究背景の下で、本研究では AM 技術によって作成された金属構造体に対する新しい弾性定数計測方法の開発を主目的とする。上記の通り、金属構造体は一般に複雑な外部・内部形状を持つが、RUS 法を応用すれば任意の金属構造体に対して弾性特性の評価が可能と考えられる。これと並行して、Micropolar 弾性理論とひずみ勾配弾性理論を用いたラティス構造の共鳴振動特性に関するマルチスケール力学解析を実施する。

3. 研究の方法

(1) 金属構造体の作製

はじめに、本研究で作成した金属構造体のサンプルを図 1 に示す。これらのサンプルは、独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所の依頼作成システムを利用して製作されたもので、府立産技研の有するドイツ EOS 社製の EOSINT-M280 で作成されている。出発材料はマルエージング鋼粉末であり、これに対するレーザー積層造形によって三次元造形されている。これらのサンプルを用いて RUS 計測を実施する。

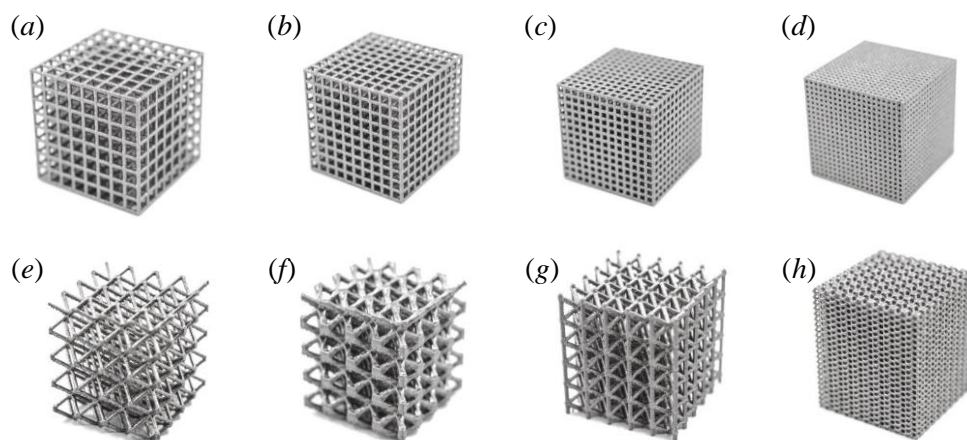


図 1. 本研究で作成した 8 種類の金属積層構造体の外観写真。これらの金属構造体の外形は一辺約 20 mm の立方体形状を有しており、その内部にそれぞれ異なるユニットセルを持つ周期構造を有している。

(2) RUS 法による共鳴周波数計測

本研究では三点支持型の RUS 法を用いて超音波共鳴計測を行った。ここで、三点の支持点は

何れもサンプルの下部から点接触されており、そのため計測中にサンプルに働く力は自重のみであり、理想的な共鳴振動状態を実現することができる。三点の支持点のうち、二点はサンプルを励振および検振するための超音波振動子となっている。RUS法では、これらの超音波振動子を用いてサンプルを超音波振動させるが、ここで励起された超音波の振動周波数がサンプルの持つ固有振動数と一致すると、サンプル内部における弾性波が同位相多重反射状態となって共振が生じ、共鳴振動変位の飛躍的な増大が発生する。一方、それ以外の周波数では弾性波は互いに打ち消しあって微小振動を起こす。そのため、サンプルに対する超音波の入力周波数を掃引し、各周波数に対する振動振幅を計測すれば、サンプルの持つ共鳴周波数を実験的に決定することができる。

本研究で使用した超音波計測システムの外観写真を図2に示す。この計測では、まずセンセサイザーから同一周波数で位相のそろった正弦波信号と余弦波信号をピーク間電圧8Vで出力する。次に、正弦波信号を二本に分岐させて、このうち一方をバイポーラアンプで増幅させた後、サンプルを励振するための超音波センサーへ入力する。一方、もう一つの正弦波信号はデジタルオシロスコープへ直接入力し、ここでAD変換を行う。同様に、余弦波信号も直接デジタルオシロスコープへ入力してAD変換を行う。この状態でセンセサイザーの出力周波数を掃引すると、サンプルはそれに応じた振動を生じるが、これを検出用の超音波振動子を用いて電圧信号へと変換し、これをバンドパスフィルターへ通してノイズの除去を行った後、デジタルオシロスコープへ入力してAD変換を行った。なお、本研究で使用したデジタルオシロスコープはテラデザイン・レクレイ社のHDO6034である。このオシロスコープは最大入力チャンネル数が4チャンネルとなっており、信号分解能14bit、サンプリング周波数は最大2.5 GP/sでメモリ長は50 MSである。



図2. 本研究で使用したRUS計測システムの外観写真。

(3) FEM法による共鳴周波数の数値解析

本研究では、RUS法によって得られた金属構造体の共鳴周波数を逆解析するために、FEM法による数値計算を利用した。AM技術を用いて金属構造体を作成する際には、CADデータを用いて構造設計を行うが、このデータを用いることで金属構造体のFEMモデルを作成し、その共鳴周波数を計算する。この計算において、金属構造体の出発材料はマルエージング鋼粉末であることから、金属構造体の構成部材の持つ弾性特性はマルエージング鋼のそれと十分に近いと仮定し、ヤング率とポアソン比の初期推定値をそれぞれ $E = 193 \text{ GPa}$ 、および $\nu = 0.3$ と設定し、密度は $\rho = 7,930 \text{ kg/m}^3$ で固定した。FEM計算にはCOMSOL Multiphysics ver. 4.4を用いている。この計算ではメッシュ間隔を約0.2 mmとした。この結果、計算に用いた全自由度は約120,000である。

(4) Micropolar 弾性理論

Micropolar 弾性理論に関する基礎研究では、ラティス構造を想定したはりモデルを構築するとともに、このモデルに基づく静的変形特性解析、および共鳴振動解析を実施する。図3に本研究で導入した二次元ラティス構造のはりモデルを模式的に示す。このモデルは弾性はりの周期配置によって構造体を作成しているが、構造体が持つ特性長さ（図3では l_1 と l_2 ）によって力学特性にサイズ効果が現れる。本研究では、この点に着目した解析を行う

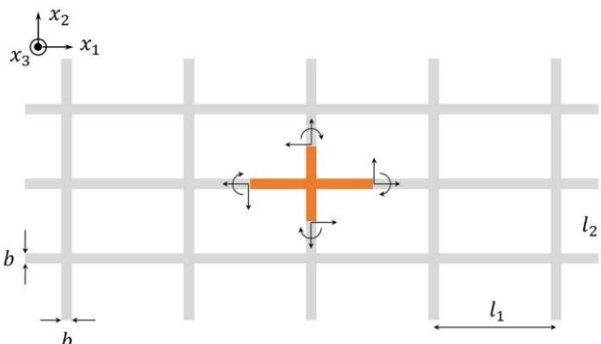


図3. 二次元ラティス構造のはりモデル

(5) ひずみ勾配弾性理論

ひずみ勾配弾性理論は、Micropolar 弾性理論と同様に周期的な内部構造を持つ固体の弾性特性解析に適した理論的枠組みであるが、これまで構成則（フックの法則）に含まれる多数の弾性定数の決定方法が存在しないことから、理論の応用が限定的となっていた。そこで本研究では、フロベニウス代数と Schur-Weyl の双対律およびヤング対称子を用いることで、ひずみ勾配弾性定数を代数的に既約分解し、理論の本質的な単純化を図る。並行して、この理論に基づく共鳴振動現象のマルチスケール力学解析を行い、共鳴振動に現れるサイズ効果の影響について検討する。

4. 研究成果

(1) RUS 法による金属構造体の弾性特性評価

図3に RUS 法により得られた金属構造体の共鳴スペクトルの計測例を図4に示す。ここで、図4の(a)および(b)は、それぞれ図1の(a)および(b)のサンプルより得られた共鳴スペクトルを表している。これらの結果を見ると、バックグラウンドノイズは周波数の増加とともに減衰しながら振動する特徴的な振る舞いを示すことが確認できる。この特徴的なバックグラウンドノイズは、金属構造体の持つ力学的な性質とは無関係の、計測システムに起因した人工的な現象と考えられる。現時点ではその発生理由を特定するには至っていないが、本研究で計測を行った金属構造体の共鳴周波数帯域（ ~ 10 kHz）は、同様のサイズを持つバルク状金属材料の共鳴周波数帯域（ ~ 100 kHz）よりも1桁程度低いことから、計測に用いたセンサーの振動特性の問題、すなわちセンサーが低い周波数帯域に対応できていない等の理由が考えられる。しかしながら、このバックグラウンドノイズの間では金属構造体の共鳴周波数帯域に対応したシャープなピークが現れており、これは金属構造体の共鳴周波数と考えられる。その他の特徴としては、共鳴振動によるピーク強度が必ずしも大きくないこと、また複数の共鳴振動ピークが隣接した周波数帯域に存在すること、などが挙げられる。この原因としては、作成した金属構造体の造形精度が十分でなく、本来は縮退すべき共鳴ピークが分裂していることや、入力した超音波の振動エネルギーの一部が大気中に散逸していることなどが考えられる。しかしながら、RUS 法による弾性特性評価で必要となるのは共鳴周波数であり、共鳴ピーク周辺のバックグラウンドノイズは本質的な影響を与えない。そのため、図4で得られた実験結果に対して FEM 解析を行った。

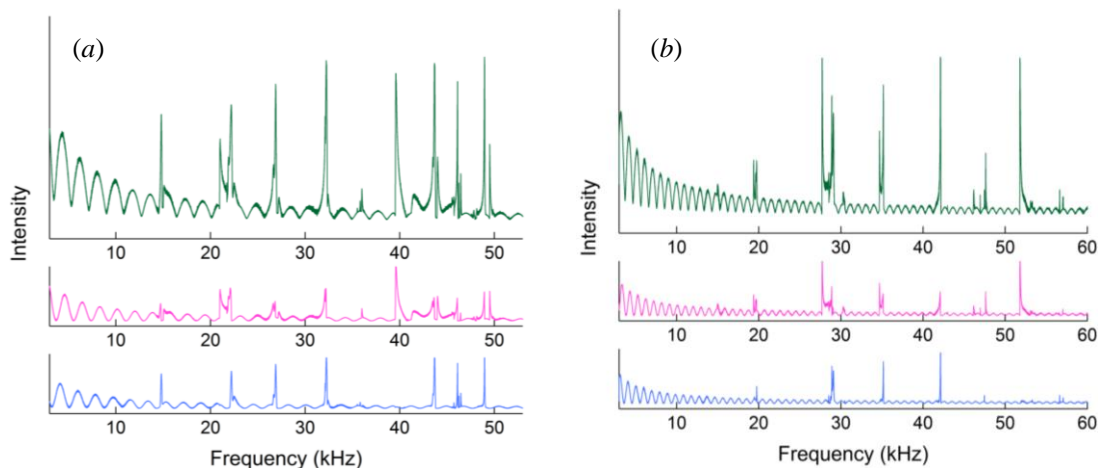


図4. 金属積層構造体より得られた共鳴スペクトルの計測結果。(a)および(b)はそれぞれ図1の(a)および(b)に示す構造体より得られたスペクトルに対応している。図において、上段は共鳴振動振幅の周波数依存性を表しており、中段と下段はそれぞれ共鳴振動振幅の正弦波成分と余弦波成分となっている。

FEM 法を用いた弾性定数の決定手順は次の通りである。まず、図1のサンプル(a)ではマルエージング鋼バルク材料のヤング率を基準として $E = 181, 184, 187, 190, 193$ GPa の5つのヤング率を考え、同様にポアソン比についても $\nu = 0.26, 0.28, 0.3, 0.32, 0.34$ の5つの組み合わせを考えた。この結果、合計25通りヤング率とポアソン比の組み合わせが得られるため、その全てについて有限要素法による共鳴周波数解析を行い、これを図4(a)より得られた共鳴周波数と比較して両者の誤差が最小となる組み合わせを求めたところ、 $E = 184$ GPa, $\nu = 0.32$ となった。同様の解析を図4のサンプル(b)に対しても行ったところ、 $E = 190$ GPa, $\nu = 0.28$ となった。これらの結果は、マルエージング鋼のバルク材料の弾性特性である $E = 193$ GPa, $\nu = 0.3$ と比較して十分に妥当な値と考えられる。

以上の研究結果は、(i)レーザー積層造形法によって多様な周期構造を持つ金属構造体の作成が可能であること、(ii)既存の RUS 法を用いることで金属構造体の共鳴周波数を計測可能であること、(iii)FEM 法による共鳴周波数の逆解析から、金属構造体の構成部材の弾性特性を評価可能であることを、を実証している。構成部材の弾性特性が評価できれば、実測値に基づいて金属構造体の示す任意の弾性特性を FEM 法により計算することができる。そのため、当初の研究目的はほぼ達成することができたと考えられる。今後の研究課題としては、金属構造体の造形精度の向上

や、低周波数帯域に適した超音波計測システムの再構築等が挙げられる。

(2) Micropolar 弾性理論に基づく共鳴振動理論の構築

図5に本研究で構築した理論に基づいて行った Micropolar 弾性体の共鳴振動解析結果を示す。図5(a)は共鳴振動の半周期における共鳴振動変位を表している。一方、(b)および(c)は(a)に含まれる変位ベクトルの回転成分と、Micropolar 回転を表している。図より明らかなように(b)と(c)には大きな相違が現れており、Micropolar 理論特有の共鳴振動現象が確認できる。

このようにして得られた共鳴振動に対して、共鳴周波数のサイズ依存性解析を行った。その結果、モデルに含まれる特性長さを基準としてその約10倍以上のサイズ領域ではスケーリング則に従った共鳴周波数変化が現れるのに対して、約10倍以下の領域では共鳴周波数とサイズの関係がスケーリング則から離れ、サイズ効果が発現することが明らかとなった。この理論解析結果は、図1に示したラティス構造体共鳴周波数は、その大半がサイズ効果を示すことを意味している。

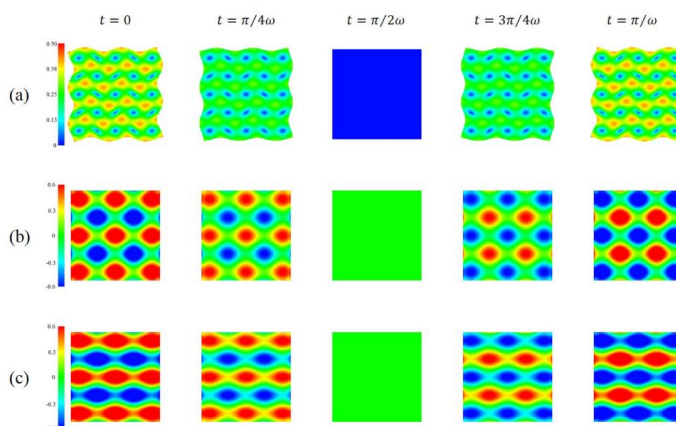


図5. Micropolar 弾性体の共鳴振動モード

(3) ひずみ勾配弾性理論に基づく共鳴振動理論の構築

本研究では、代数学的手法を用いることによって、一次のひずみ勾配弾性理論に現れる二種類のひずみ勾配弾性定数テンソル（5階テンソルと6階テンソル）を既約分解することに成功した。これによって、ラティス構造体の力学特性を解析する際に、ひずみ勾配弾性理論を用いた解析が一つの選択肢となった。この研究成果は、現在論文執筆中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 固体の共鳴振動理論の深化と展開
垂水竜一
学術の動向, Vol. 22, No. 3, pp. 26-31 (2017).
- ② 古典弾性理論における二つの近似とその弊害 ～固体の共鳴振動解析を通して～
垂水竜一
計算数理工学レビュー, 2017年1号, pp. 1-9 (2017).

[学会発表] (計15件)

- ① Ryuichi Tarumi, Shunsuke Kobayashi and Yoji Shibutani
Group-theoretical construction for constitutive equation of the first strain gradient elasticity
The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling
(MMM2018, November 1st, 2018, Osaka International Convention Center, Japan)
- ② Yuto Horikawa, Ryuichi Tarumi and Yoji Shibutani
Nonlinear elasticity on Riemannian manifold and its application to general surface development
The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling
(MMM2018, October 31th, 2018, Osaka International Convention Center, Japan)
- ③ 垂水竜一, 小林舜典
超音波共鳴法による格子状金属積層構造体の弾性率の推定
日本鉄鋼協会 第176回秋季講演大会 (2018年9月20日 東北大学 川内キャンパス)
- ④ ひずみ勾配弾性理論を用いた共鳴振動現象のサイズ依存性解析
木村 雄大, 垂水 竜一, 渋谷 陽二
関西支部第93期定時総会講演会(2018.3.12-13, 摂南大学寝屋川キャンパス)
- ⑤ 二次元テトラカイラル系構造体の曲げ変形特性に現れるサイズ効果
矢田聖, 垂水竜一, 渋谷陽二
関西学生会 2017年度学生員卒業研究発表講演会(2018.3.10, 摂南大学寝屋川キャンパス)

- ⑥ ひずみ勾配弾性体のフォノン振動モードとサイズ効果
木村雄大, 垂水竜一, 渋谷陽二
日本物理学会春季大会 (2017-03.17-20, 大阪大学豊中キャンパス)
- ⑦ ひずみ勾配弾性理論に現れる弾性定数テンソルの一般線形群の下での既約分解
小林舜典, 垂水竜一, 渋谷陽二
日本物理学会春季大会 ポスターセッション(2017-03.17-20, 大阪大学豊中キャンパス)
- ⑧ ひずみ勾配弾性理論の数理的特徴とその応用
垂水竜一, 渋谷陽二
第2回マルチスケール材料力学シンポジウム (2017-05.26, 名城大学 天白キャンパス)
- ⑨ 二次元カイラル系構造体の連続体近似とそのマルチスケール解析
垂水竜一, 野瀬勇斗, 渋谷陽二
第22回計算工学講演会 (2017-05.31-06.02, ソニックシティー)
- ⑩ 群論を用いたひずみ勾配弾性体の構成式の再構成
垂水竜一, 小林舜典, 渋谷陽二
2017年計算力学講演会 (2017-09.16-18, 近畿大学)
- ⑪ 有限要素法による二次元カイラル構造体の共鳴振動解析
金 政敏, 垂水竜一, 渋谷 陽二
関西支部第92期定時総会講演会(2017.3.13-14, 大阪大学吹田キャンパス)
- ⑫ 二次元周期構造体の基準振動モードとサイズ効果
木村雄大, 垂水竜一, 渋谷陽二
2017年日本物理学会秋季大会 (2017-09.22-25, 岩手大学)
- ⑬ ひずみ勾配弾性体に現れる力学特性のサイズ効果
加藤優汰郎, 垂水竜一, 渋谷 陽二
関西学生会平成27年度学生員卒業研究発表講演会(2017.3.11, 大阪大学吹田キャンパス)
- ⑭ マイクロポーラー弾性理論による二次元カイラル構造体の弾性特性解析
野瀬勇斗, 垂水竜一, 渋谷陽二
関西学生会平成27年度学生員卒業研究発表講演会(2017.3.11, 大阪大学吹田キャンパス)
- ⑮ 二次元カイラル金属構造体の共鳴振動特性解析
垂水竜一, 金政敏, 渋谷陽二
日本金属学会秋期大会 (大阪大学, 2016年9/21~23)

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-ndc.me.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織
大阪大学

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

該当なし

※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、研究者個人に帰属されます。