

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：32682  
 研究種目：基盤研究（S）  
 研究期間：2008 ～ 2012  
 課題番号：20226006  
 研究課題名（和文） 計算力学と折紙工学融合による新しい軽量コア構造の機能創出と製造法に関する研究  
 研究課題名（英文） Research on Creating Function of New Lightweight Core Structure and Its Forming Method by Fusion of Computational Mechanics and Origami Engineering  
 研究代表者  
 萩原 一郎（ICHIRO HAGIWARA）  
 明治大学・研究・知財戦略機構・特任教授  
 研究者番号：50282843

研究成果の概要（和文）：空間充填幾何学と折紙操作によって開発したトラスコアパネルの成形法を確立し、ハニカムコアパネルに総合的に優ることを示し産業応用を行った。展開収縮コアとして反転螺旋型折紙構造の成形法を開発し、優れたエネルギー吸収材となることを示した。写像変換により、複雑な構造の折畳モデルが効率良く得られることを示し折紙構造の産業応用範囲を広げた。折紙理論を応用し、実物コピーモデルを創出し新しい産業の芽となった。

研究成果の概要（英文）：The forming method of truss core developed by space filling geometry and Origami operation was established, and its application to industry proved that truss core is superior totally to honey comb. The forming method of reverse spiral cylindrical Origami structure as deployable and foldable core was developed, and it was shown that the structure could be excellent energy absorption. Mapping transformation made the range of industry application widen, because it could generate efficiently the complicated folding structures. Finally, Origami theory is applied to generate real copy model which could become the spout of new industry

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	38,900,000	11,670,000	50,570,000
2009 年度	29,900,000	8,970,000	38,870,000
2010 年度	29,900,000	8,970,000	38,870,000
2011 年度	29,100,000	8,730,000	37,830,000
2012 年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
総計	143,800,000	43,140,000	186,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：折紙デザイン、計算折紙塑性加工学、空間充填幾何学、写像変換、曲線折り、オクテット型トラスコアパネル、反転螺旋形折紙構造、実物コピーモデル

## 1. 研究開始当初の背景

軽量で高剛性、高強度を実現できるコア構造は、航空機、宇宙機等の飛翔体にとってなくてはならないものである。加工技術の発展に伴いその用途も広がり、最近では自動車、鉄道車両、建築物等にまで利用が

広がっている。しかし、コア構造の持つ、防音、遮音等の音響特性や遮熱性等様々な機能特性、さらには光と影との織り成す幾何学模様からくる優れたデザイン性などは未だに有効に活用されているとは言いがたい。また現在、市販されているこれらの軽量コ

アのほとんどは、アルミ箔、紙、プラスチックなどを接着剤で角柱状に接着成形して作られており、コア構造の強度が接着剤の特性に大きく依存し、高温にさらされる部品には使用できない等の欠点がある。さらにコアパネルが高価格であることも、建材等への利用を妨げる大きな要因である。またダンボール、波板等のコア材料は加工が簡単である反面、強化できるのは一方向のみの剛性であり、高度な構造的な要請に答えるものではない。コア構造の代名詞とも言えるハニカムコアは、1949年にアメリカの軍用機に始めて搭載され、以来このモデルに関しては新しい素材の使用や接着剤の改良等様々な研究が行われてきた。その一方でハニカム以外の新しいコアモデルの開発はあまり行われておらず、三浦によってその概念が提唱されたダブルコルゲーションコア等があるのみであるが、これを含め強度や剛性、コストの点でハニカムと競合することができ、効率的な加工法のあるコアモデルは未だに開発されていない。省資源の時代にあたり、コア構造は有効な軽量化手段として様々な工業品への利用が期待される。より普及を図るためには、上記の問題点を解決し、さらに低コスト化を図らなくてはならないが、そのためにはより簡便に作製できる新しいコアモデルの開発が必要である。本研究では、コアの形を考える上で基本となる幾何学に立ち返ることで、ハニカムと競合しうる、幾何学的な平面/空間充填形を基にデザインする、新しいコア構造モデルの創出、機能、デザイン性、加工法などの確立を目指すものである。さらに本研究では、コアモデルの構造強化材料以外の利用可能性にも着目し、インフレーター構造にまで応用の範囲を広げ、これまで模様やパズルとしてしか捉えられていなかった幾何学図形を意匠設計や工学に応用することを図る。

## 2. 研究の目的

折紙工学と計算力学の研究者共同で、コアの表面形状として、取りうる全てのパターンを体系的に整理し、優れた新しい機能の創出と意匠設計、安価な成型法の開発を目的に次の3課題を取り上げる。

課題1 ダイアコアのテストピースを対象に計算力学を用いて強度・剛性、吸音、遮音、遮熱特性などの機能の創出と成形法の確立

課題2 ダイアコア以外のテストピースコアを対象に計算力学を用いて機能の創出と成形法の確立

課題3 上述のコア構造の産業分野応用のための、建築フロア・壁、道路上の防音壁、都市のヒートアイランド現象緩和の

ための遮熱、高層ビルからの電波反射による電波障害などのニーズに応えるための基盤研究。

## 3. 研究の方法

課題達成のために研究1～研究14を行う。研究1で、コアの表面形状として、取りうる全てのパターンを体系的に整理し折紙コアを作る。これらコア構造の機能を確認し、コア構造の種類、建築構造物など適用対象ごとに最適形状を得る。例えば、ダイアコアでは、三角錐あるいは四角錐コアの扁平率、切隅長さ、板厚などが最適設計の設計パラメータとなる。そしてこれら最適形状コアをプレス成形をベースとする成型手順と方法を計算力学で求める(研究4)。研究2のCADデータは、研究3の3次元プリンター装置による成形、研究4のプレス成形法検討、研究7～研究10のテストピースによる機能検討、研究11～研究14の産業分野への適用のための基盤研究に用いる。研究3は、高価な金型試作の厳選のため、意匠設計のための他、研究7～研究14の機能検討にも利用する。研究5は研究4をもとにプレス成形を実施する。その際、コア構造の強度を維持できるように、プレスによる減肉の少ない金型形状を策定する。研究3及び5で得られる成形品の製造精度の検査は、リバースエンジニアリング技術を利用する研究6で行い計算折紙塑性加工法にフィードバックする。3次元プリンターによる成形品のリバースエンジニアリング技術で得られるCAD(研究6)も研究4及び5に役立てる。研究7で強度・剛性のシミュレーション及び実験による確認を行う。研究8で吸音・遮音のシミュレーション及び実験による確認を行う。研究9で遮熱実験による確認を行う。研究10でデザイン性・音波制御の検討を行う。研究11で車両床・高層ビル床への応用のための基礎検討を行う。研究12でビル壁、道路壁への応用のための基礎検討を行い、例えば、車道に敷き詰めることで道路補強およびタイヤ騒音の低減の可能性を探るビル壁、道路壁とも遮熱、吸音、遮音の低減法を探る。研究13でロケット壁への応用のための基礎検討を行う。現在は、ロケット壁などにハニカムコアが使用されているが、任意の曲率に対応できる本研究のコアの優位性を示す。研究14で運搬・組み立て容易なドーム開発のための基礎検討を行う。

## 4. 研究成果

(1)ダイアコアに関して、軽量にして強度・剛性が高いという折り紙の第1の特色を利用すべく、四面体と八面体の空間充填幾何学から得られるダイヤモンドコアを特にオクテッド型トラス(以降トラス)と称し、トラ

スコアに対し切隅、面離等様々な折紙操作を施し、面離・切隅パラメータと強度・剛性・振動特性との関係を整理した。また、単純プレス加工ができるアスペクト比の関係を得た。

(2) トラスコアのように一様にコアが設けられる構造の場合、安価なプレス成形では中央部は周辺部から板の流入のない張出成形となるが、最外列では端末部から板が流入することになる。この、場所によって成形条件が異なることが板の伸び量を変化させ、深い形状を成形した時の波打ちや反りの原因となった。そこで計算力学の援用により図1に示す最適な多工程成形法を世界に先駆け構築した。このような難しい形状の成形で、一つの金型で数種類の材料の成形を行い、かつ金型の一部の変更のみで様々な四面体形状に対応する成形工法は、これまでに例を見ない革新的な技術開発となり、量産設備構築に貢献した。

(3) トラスコアの衝撃強度は塑性加工硬化によりプラス側に働くことを、試作実験と、加工と機能の一貫解析技術を開発し確認した。この知見を基に新たに加工硬化特性を積極的に利用する設計法を初めて提唱した。非線形問題で最も良く使用されている低減積分シェル要素の利用は時として精度が悪化する事を示すなど折紙塑性学の基盤技術を得た。

(4) トラスコアとして、図2に示す2枚のパネル片を張り合わせたダブルトラスコアパネル、片側の1枚を平板にした曲面化及び接合が容易なシングルトラスコアパネルの2種類を開発した。シングルトラスコアの基本固有周波数は等重量の平板の5.5倍高く、ダブルトラスコアでは10倍ほど高くなることを示した。シングルトラスコアの太陽電池パネル(図3)は実用化され、新聞に掲載された(図4)。さらに太陽熱発電用ヘリオスタット、OAフロアに続き、ダブルトラスコアの新幹線床構造への利用検討も行い試作に至った。その際、遮音性能と遮熱特性に関し、トラスコアとハニカムコアの比較を行った。以上、ハニカムコアの3割程度の製造費で熱に弱い、曲面化ができないという問題も解決し、ハニカムコアに総合的に勝るコアの開発を得た。

(5) 展開収縮可能という折り紙の第2の特色を利用した、既存の角柱型のコアモデルとは全く異なる、インフレータブル型コア構造体を代表して螺旋形円筒折り紙構造(RSC)を取り上げ、螺旋角の値によって、展開・圧縮の際に反転する場合と反転しない場合の二つのタイプに分かれることを見出した。反転する場合には展開・圧縮に比較的大きな力を必要とし構造体のエネルギー吸収材に利用できる可能性を示した。

(6) 反転しない場合は比較的小さな力で展開・収縮が可能でペットボトルやビール缶への検討を進めた。反転する場合を対象に、段数、辺数、反転角を設計パラメータとする最適化解析を行い現行自動車車体の矩形断面強度部材の1.8倍のエネルギー吸収特性を得た(図5)。また、ハイドロフォーミングによって比較的安価に試作できることを示した。これは新しいアブソーバとして産業界から大いに期待され、雑誌に取り上げられた。

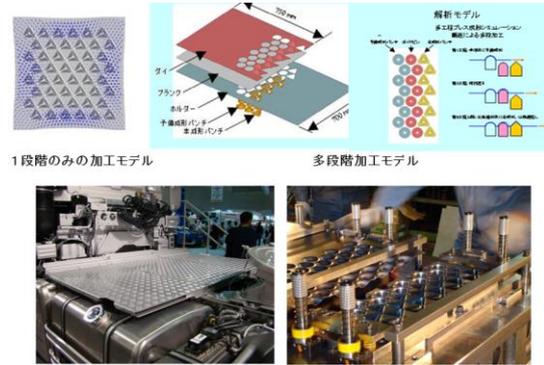


図1 多工程成形とそれに基づくトラスコアパネル量産設備

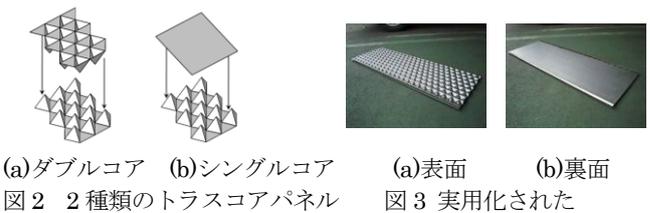


図2 2種類のトラスコアパネル

図3 実用化された太陽電池パネル



図4 トラスコアが実用化された例(日刊工業新聞: 2010.7.10)

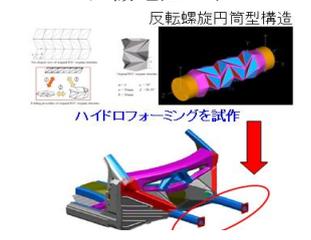


図5 メンバの軽量化に検討中

(7) 現行自動車の半割り型部材では、1枚のハット型折り板と1枚の平板をスポット溶接で結合された構造であるため、RSCほど回転できない。そこで、反転型RSCに倣い、従来の1段の半割り型強度部材に対し、複数段に分け、斜め線を適切に入れることにより反転型RSC的な特性を図った結果、従来以上の性能となり、これは自動車会社からも注目される知見となった。すなわち、従来構造の折紙工学からの見直しの重要性も示した。

(8) 折り紙の展開面と非線形有限要素法を組み合わせ剛体折りに塑性変形まで考慮する構造を新たに開発し画期的な包装機の開発につなげた。

(9) 従来の折り紙が直線折りで平面に展開で

きる平坦折りであったのを曲線折りで立体折りに拡張し図6に示すような斬新な形が得られ新しいファッションやデザインに展開できる可能性を示し、一部、著名なファッションデザイナーに取り入れられた。

(10)野島の円錐殻折り、球面折り、円形膜折りは非常に煩雑な定式によって得られているが、等角写像によって、比較的簡単な円筒殻折りの定式を基に、円錐殻折り、球面折り、円形膜折りの定式が得られ、また、これまで見出されていなかった折畳みの方法も得られることを示した(図7)。更に図8に示すような、残された課題であったトーラス形の折畳モデルも得られた。

(11)ドーム状の折畳モデルもこの等角写像が非常に重要であることを示した。図9はその一例で、同図で左端は展開した場合、右端は折畳んだ場合、同図中央は6枚の布で出来ていることを示す。なお、このドームは6枚の布とその布の間の計6つの境にそれぞれトラス状の補強材が設けられている。

(12)3次元プリンターで様々な試作を行う過程で一つの欠点に気づいた。それは折紙で最も重要な自分の手で造れないことである。そこで、リバースエンジニアリングのセグメンテーション技術と特徴線抽出技術と折紙理論を組合せ図10に示すように、実物コピーモデルと称しCADデータをプリントアウトするだけで、理論上全く同じものが自分の手で造れる手法を開発し特許出願した。これにより、都市のヒートアイランド現象や防音壁など大規模構造に対し、テストピースでの検討に続き、実際の条件下で検討すべく、図11の、グーグルアースの画像から建築物や道路などの実物スケールモデルを造り実験室に設置するという方法を思いついた。この実物コピーモデルは3次元プリンター同様に大きな産業になるよう、特許出願が終了したため論文発表や広報の準備をしている。

(13)折紙工学推進のため、研究会の設置、学会講演会でのオーガナイズセッションの設置、関連の著作など多くのアウトリーチ活動を行った。

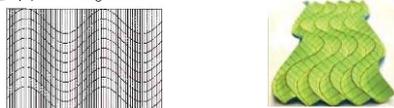


図6 等角写像により円筒折畳モデルが円形膜折畳モデルに変換された例

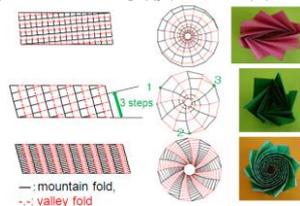


図7 等角写像により円筒折畳モデルが円形膜モデルに変換された例

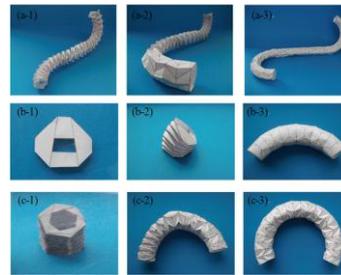


図8 トーラス形の折畳モデル



図9 実験室内に据えることを考えているジャバラ型ドーム

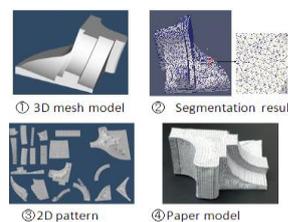


図10 ファンディスク

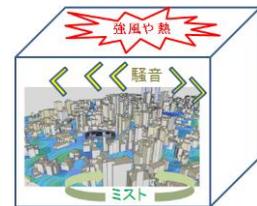


図11 実験室に実物スケールモデルをそっくりそのまま設置している様子

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計83件)

①石田祥子、野島武敏、萩原一郎、等角写像の折紙への応用(巻き取り可能な円形膜作成法)、日本機械学会論文集C編、査読有、79巻801号、2013、pp.1561-1569.

②Eri Nakayama, Sachiko Ishida, Yu-jing Liao、Ichiro Hagiwara、Clothing Skirt Designed on Conical Truss Model、Advances in Manufacturing、査読有、2013.

③石田祥子、野島武敏、亀井岳行、萩原一郎、等角写像とその円錐殻折紙構造物設計への応用、日本応用数学会論文集、査読有、22巻4号、2012年、pp.301-318

④Sunao Tokura and Ichiro Hagiwara、Shape Optimization to Improve Impact Energy Absorption Ability of Truss Core Panel、Journal of Computational Science and Technology、査読有り、Vo.1.5、No.1、2011、pp.1-12.

⑤Xilu Zhao、Yabo Hu and Ichiro Hagiwara、Study on Crach Characteristics of Half Cut Type Vehicle Side Member Structure of Energy Absorption Ability by Using Origami Engineering、Journal of Computational Science and Technology、査読有、Vo.5、No.1、2011、pp.13-25.

⑥Xilu ZHAO, Yabo HU and Ichiro HAGIWARA, Shape Optimization to Improve Energy Absorption Ability of Cylindrical Thin-Walled Origami Structure, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 5, No. 3, 2011, pp. 148-162

⑦ Zhi Zhen Xia, Xilu Zhao and Ichiro Hagiwara, A Simulation Approach to Improve Forming Limitation of Truss Core Panel, Applied Mechanics and Materials, Vols. 121-126, 2011, pp. 2471-2475.

⑧ Ahmed Desoki, Hiroaki Morimura and Ichiro Hagiwara, General Design of the Forming Collar of the Vertical Form, Fill and Seal Packaging Machine Using the Finite Element Method, PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE Packag. Technol. Sci., 査読有, 2010, pp. 1-17.

⑨田中 聡、斎藤 一哉、森村浩明、萩原 一郎、トラスコアパネルの振動特性に関する研究、日本機械学会論文集 C 編、査読有、76 巻 765 号 2010、pp. 1050-1055.

⑩戸倉 直、萩原一郎、トラスコアパネルの衝撃エネルギー吸収性能向上のための形状最適化、日本機械学会論文集 A 編、査読有、76 巻 765 号、2010、pp. 564-572.

⑪S. Tokura, I. Hagiwara, A Study for the Influence of Work Hardening on Bending Stiffness of Truss Core Panel, J. Appl. Mech., 査読有、Vol. 77, Issue 2.

⑫ Sunao TOKURA and Ichiro HAGIWARA, Forming Process Simulation of Truss Core Panel, Journal of Computational Science and Technology, 査読有、Vol. 4, No. 1, 2010, pp. 25-35

⑬趙希録、胡亜波、萩原一郎、折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計、日本機械学会論文集 A 編、査読有、76 巻 761 号、2010、pp. 10-17.

⑭戸倉直、萩原一郎、成形シミュレーションで得られる加工硬化を考慮したトラスコアパネルの曲げ剛性の検討、日本機械学会論文集 A 編、査読有、75 巻 753 号 A 編、2009、pp. 588-594.

⑮斎藤一哉、武田晃太、戸倉直、萩原一郎、新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンと成形性の関係、日本機械学会論文集 A 編、査読有、75 巻 751 号 2009、pp. 381-387.

⑯斎藤一哉、野島武敏、森村浩明、萩原一郎、新しく開発した軽量コアパネルの曲げ剛性の評価、日本機械学会論文集 A 編、査読有、75 巻 750 号、2009、pp. 259-265.

⑰Arzu Gonenc Sorguc, Ichiro Hagiwara, and Semra Arslan Selcuk, Origamics In Architecture: A Medium Of Inquiry For Design In Architecture, Middle East

Technical University, Journal Of The Faculty Of Architecture, Vol. 26, No. 2, pp. 235-247, (2009-12)

⑱戸倉直、萩原一郎、トラスコアパネルの製造シミュレーション、日本機械学会論文集 A 編、74 巻 746 号 2008、pp. 1379-1385.

⑲斎藤一哉、野島武敏、萩原一郎、新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンと機械的特性の関係、日本機械学会論文集 A 編、74 巻 748 号 2008、pp. 1580-1586.

〔学会発表〕(計 8 2 件)

①萩原一郎、自動車の事後衝突研究から折紙工学研究へー力学への思い、第 62 回理論応用力学講演会、招待講演、2013 年 3 月

〔図書〕(計 5 件)

①野島武敏、萩原一郎編、折紙の数理とその応用、共立出版社(2012.9).

②萩原一郎、シミュレーション辞典、機械分野主査、機械部門主査、コロナ社(2012.1).

③萩原一郎、宮崎興二、野島武敏 監訳：デザインサイエンス百科事典—かたちの秘密をさぐる—、朝倉書店(2011.4).

④田端正久、萩原一郎監訳：計算力学理論ハンドブック、朝倉書店(2010.6).

〔産業財産権〕

○出願状況(計 3 件)

名称：三次元構造物の製造方法、三次元構造物の製造装置、及び、プログラム

発明者：萩原 一郎, Savchenko Maria, Yu Bo, 篠田淳一

権利者：学校法人明治大学

種類：特許権

番号：2013-080862

出願年月日：2013 年 4 月 8 日

国内外の別：国内

名称：エネルギー吸収構造体

発明者：萩原一郎、趙希録、胡亜波

権利者：国立大学法人東京工業大学

種類：特許権

番号：特願 2009-209858

出願年月日：2009 年 9 月 10 日

国内外の別：国内

名称：管状体拡張成形方法及び管状体拡張成形用金型

発明者：萩原一郎、南山秀夫

権利者：国立大学法人東京工業大学

種類：特許権

番号：特願 2009-261414

出願年月日：2009 年 11 月 17 日

国内外の別：国内

○取得状況(計 3 件)

名称：準統計モデルによるメッシュ修正方法  
発明者：萩原一郎、オルガエゴロワ、マリア  
サブチェンコ、ウラヂミールサブチェンコ  
権利者：国立大学法人東京工業大学

種類：特許権

番号：272205

取得年月日：2010年4月28日

国内外の別：国内

名称：最大角度法を用いた三角形メッシュ生成方法及びプログラム

発明者：萩原一郎、程文杰、篠田淳一

権利者：国立大学法人東京工業大学

種類：特許権

番号：3928016

取得年月日：2007年3月16日

国内外の別：国内

[その他] ホームページ等

(イ) Science Links Japan

(<http://sciencelinks.jp/>) J-LEX コーナー

(ロ) 08年度から設置の科学技術振興機構

(JST) の日本の科学技術の紹介コーナーサ

イト

<http://sciencelinks.jp/content/view/656>

[/260/](http://sciencelinks.jp/content/view/656) (英語)、他に仏語、中国語サイトあり。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

萩原 一郎 (ICHIRO HAGIWARA)

明治大学研究・知財戦略機構・特任教授

研究者番号：50282843

### (2) 研究分担者

杉山 文子 (FUMIKLO SUGIYAMA)

京都大学・大学院工学系研究科航空宇宙工  
学専攻・助教

研究者番号：80152907

小机 わかえ (WAKAE KOZUKUE)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：30288211

趙 希祿 (Xilu Zhao)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：30670307

(平成23年度～)

野島 武敏 (TAKETOSHI NOJIMA)

東京工業大学・イノベーション研究推進  
体・特任教授

研究者番号：30670307

(平成20年度, 21年度のみ)

安井 位夫 (TAKEO YASUI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70143691

北岡 哲子 (TETSUKO KITAOKA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30447536

(平成20年度, 22年度, 23年度)

大島 修造 (SHUZO OSHIMA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教  
授

研究者番号：20143670

大熊 政明 (MASAAKI OOKUMA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60160454

福島直人 (NAOTO FUKUSHIMA)

東京工業大学・イノベーション研究推進  
体・特任教授

研究者番号：90420299

(平成20年度, 22年度, 23年度)

篠田 淳一 (JUNICHI SHINODA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・東工  
大特別研究員

研究者番号：60266880

(平成20年度, 21年度, 23年度)

オルガ エゴロワ (OLGA EFOROVA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・東工  
大特別研究員

研究者番号：

(平成20年度のみ)

毛利 泰裕 (YASUHIRO MOURI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・東工  
大特別研究員

研究者番号：30010870

(平成20年度, 21年度, 22年度のみ)

森村 浩明 (HIROAKI MORIMURA)

東京工業大学・イノベーション研究推進  
体・特任教授

研究者番号：20447535

(平成20年度のみ)

梶原 逸朗 (ITSURO KAZIWARA)

神奈川工科大学・工学部機械工学科・教授  
(平成20年度, 21年度のみ)

研究者番号：60224416

### (3) 連携研究者

戸倉 直 (SUNAO TOKURA)

(株) JSOL・研究員

研究者番号：

北岡 裕子 (HIROKO KITAOKA)

(株) JSOL・研究員

研究者番号：

小林秀敏

大阪大学基礎工学研究科 機能創成専攻・  
教授

研究者番号：10205479

斎藤一哉 (KAZUYA SAITO)

(独) 宇宙開発研究機構・研究員

研究者番号：40628723