

平成30年6月22日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03944

研究課題名(和文) 3Dマルチマテリアル・ブロックプリンティング技術の開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of 3D multi-material block printing technology

研究代表者

丸尾 昭二 (Maruo, Shoji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00314047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ光造形・鋳型技術を用いて多彩なセラミックスブロック群を作製し、これらを3D形状モデリングとロボット工学を駆使して最適構造に組み立てることで、3次元機能デバイスを作製する「3Dマルチマテリアル・ブロックプリンティング技術」の開発に取り組んだ。マイクロ光造形によって作製したシリコン樹脂鋳型を用いて、微小なバイオセラミックス製ブロックを作製した。微小ブロックを組み立てたブロック群の重心位置を考慮しながら、安定して自動組立を行うためのアルゴリズムを開発した。さらに、作製した微小ブロックをロボットアームと画像処理を組み合わせ、ブロックを自動的に組み立てるシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a 3D block printing technique using multiple ceramic blocks to construct 3D functional devices. Silicone mold made by micro stereolithography was used for making small ceramics blocks. To make the blocks, dense slurry containing ceramic microparticles is inserted into the mold, and then the blocks are released from the mold after drying the slurry. As the first demonstration of the 3D block printing, multiple bio-ceramic blocks were produced using the 3D molding technique. To assemble the blocks, we have developed an algorithm for stably assembling blocks by calculating the center of gravity of the assembled blocks. According to the algorithm, the blocks were automatically assembled by the combination of a multi degree-of-freedom robotic manipulator and image recognition system.

研究分野：3Dプリンティング

キーワード：高速プロトタイピング 光造形 形状モデリング 精密マニピュレーション バイオセラミックス

1. 研究開始当初の背景

近年、複雑な立体構造を自在に作製できる 3D プリンターが大きな注目を集めている。例えば、産業用 3D プリンターとしては、光造形やレーザー焼結法が注目されており、光硬化性樹脂を用いた歯科応用や、金属微粒子を焼結して作製したタービンブレードなどが実用化段階に入っている。一方、我々は、90 年代後半から 20 年近くに渡って、微細な 3 次元形状を作製するマイクロ光造形法の研究を牽引してきた。特に、97 年に我々が発表したフェムト秒パルスレーザーを用いたマイクロ光造形法に関する原著論文 (*Optics Letters* **22** (1997) 132) はマイクロ光造形法の起点となった。さらに、2000 年代にはセラミックス材料に注目し、光造形で作製した樹脂鋳型を用いて立体的なセラミックス構造を自在に作製できる「マイクロ光造形モールドイング技術」を提案・開発した (*Jpn. J. Appl. Phys.* **48** (2009) 06FK01)。そして、バイオセラミックスを用いて再生医療用足場を作製する研究を実施した。

しかし、我々のマイクロ光造形法も含めて、既存の 3D プリンターのほとんどは、単一材料しか用いることができないため、製品の機能が大きく制限されている。また、レーザー描画やノズルを用いた直接描画であるため、生産性が低いという原理的な課題がある。このため、特に医療分野に応用する際には、素材や密度が異なる材料を組み合わせた機能的な足場の作製が不可能であり、多数の臨床実験用サンプルを作製することも困難であった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、マルチマテリアルからなる高機能な足場を高速に作製する革新技術として、3D 微細加工・3D 形状モデリング・ロボット工学という機械系の 3 つの技術を結集し、「3D マルチマテリアル・ブロックプリンター」の開発を目指す。このプリンターでは、多様なバイオセラミックス・ブロック群をあらかじめ作製し、それらを最適形状に自動的に組立て、マルチマテリアルからなる所望の 3D 足場を迅速に形成できる。したがって、従来の 3D プリンターのように足場全体を個別に単品作製する必要がなく、組み立てるだけで所望の 3D 形状の足場を効率的に得られる。よって、緊急を要する医療現場においても迅速に対応できるオーダーメイド医療の実現が期待できる。

3. 研究の方法

多様なセラミックスからなるブロック群は、我々が開発したマイクロ光造形モールドイングによって、シリコン樹脂 (PDMS) による複製技術を用いて精密な結合が可能な微小セラミックス・ブロックを量産する。マイクロ光造形モールドイングでは、まず、マイクロ光造形装置によって光硬化性樹脂

からなる 3D 樹脂マスター型を作製する。マイクロ光造形法としては、丸尾らが開発した独自の造形装置を用いる (図 1)。本装置では、青色半導体レーザー (波長 405nm) を対物レンズで集光し、ガルバノミラーを用いて、3D-CAD モデルの断面スライス形状にしたがって x y 面内で走査する。各断面形状を硬化させる度に、z 方向に造形ステージを引き上げることで、3D モデルを造形する。

セラミックスブロック群を量産するために、マイクロ光造形によって作製した 3D 樹脂マスター型を、シリコン樹脂によって型取りし、反転型を作製する (図 2)。そして、このシリコン樹脂型に、セラミックス微粒子を含む高濃度スラリーを注入し、乾燥させた後に、シリコン型から離型する。得られたセラミックス成形体を焼結することで、最終的なブロック形状を得る。本手法では、マイクロ光造形によって作製した 3D 樹脂マスター型は再利用が可能であり、かつシリコン樹脂型も再利用できる。よって、3D プリンティングによって直接セラミックスブロックを造形・量産する方法に比べて、ブロックの生産性が飛躍的に向上できるため、ブロックの量産が可能となる。

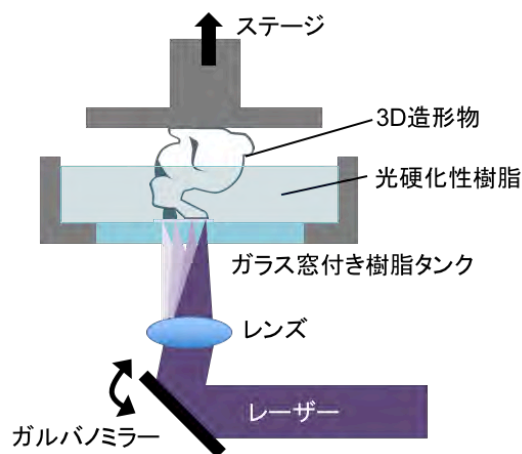


図 1 使用するマイクロ光造形装置の造形法

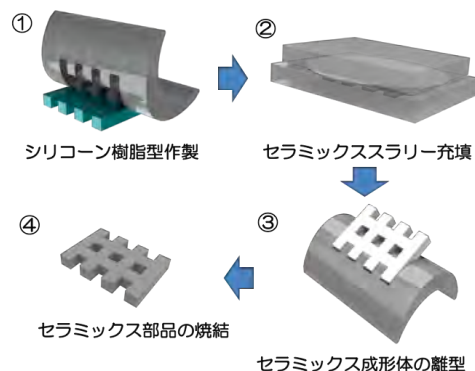


図 2 マイクロ光造形モールドイングによるセラミックス微小部品の複製プロセス

本研究では、上記の手法で量産したセラミックス・ブロックを、患者の CT データに応じた 3D 形状に自動的に組み立てる。そこで、図 3 に示すように、まず、3D モデルデータから、ブロックの 3D 配列を決定する。さらに、決定した 3D 配列に応じて、ロボットを用いてブロックを自動的に組み立てる。

この方法を実現するために、前川らが 3D モデルからブロック配置を自動生成するプログラムを開発する。本手法では、まず、三角メッシュで表現された 3D モデルを、ブロックの 3D 形状に応じたボクセルモデルに変換する。この際、どれだけ細かく分割して、3D モデルを表現するか調整する機能を付与する。さらに、各ブロックの材質や大きさを選択できるようにし、3D モデルを効率的にブロックで再現できるようにする。また、決定したブロック配列に応じて、実際にブロックを積んでいく場合には、積層途中のブロック形状が倒壊することなく、安定に積み上げられる工程を選定する必要がある。よって、形成されるブロックの配置を考慮しながら、必要に応じてサポートするブロックも追加配置していく機能を付与する。

決定したブロック配置に応じて、実際にブロックを自動組立するために、前田らがロボット自動組立システムを構築する。構築するシステムでは、組み立てるブロックを観察するための画像取得システムを装備し、得られた画像データを活用して、ブロックを認識し、自動で組み立てるシステムを構築する。

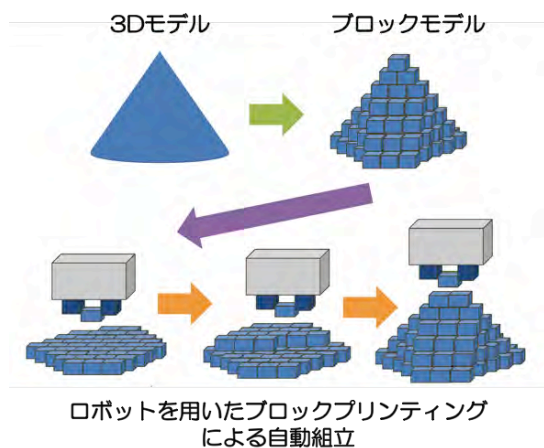


図 3 マルチマテリアル・ブロックプリンティングによる 3D ブロック自動組立 [学会発表 No. 6]

4. 研究成果

マイクロ光造形モールドイングによるセラミックスブロックの転写実験を行った。まず、図 4 のように、2 次元的なブロックモデルの樹脂マスター型を作製し、シリコーン樹脂型を作製した。そして、バイオセラミックスの一種である β リン酸三カルシウムの微粒子からなる高濃度スラリーを調整し、シリコーン樹脂型に注入・固化させた。そして、

シリコーン樹脂型から離型した後に、焼結することで 2 次元的なブロック形状の転写を実証した (図 5)。さらに、より高度なブロックとして、レゴブロックに類似の形状を持つ 3D ブロックの樹脂マスター型 (図 6) を造形し、シリコーン樹脂型からセラミックスブロックを転写した (図 7)。焼結時に生じる形状収縮の誤差を補正することで、転写したブロックの組立が可能な部品の精度を実現した。

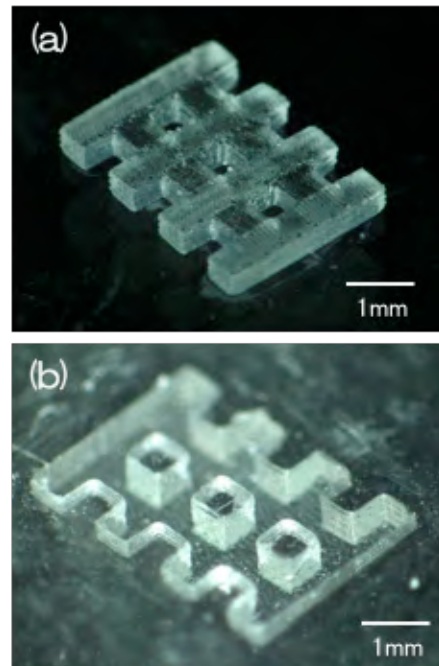


図 4 マイクロ光造形モールドイング用鋳型 (a) 2D ブロックのマスター樹脂型 (b) シリコーン樹脂型

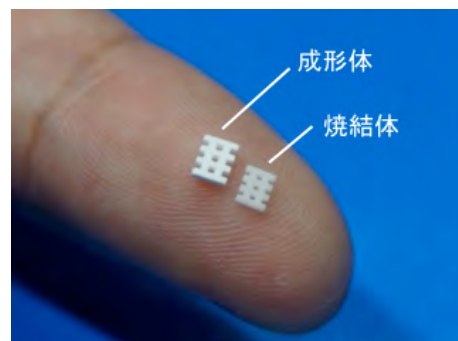


図 5 転写した 2D セラミックスブロック

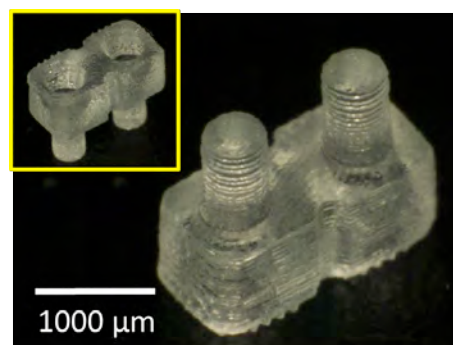


図 6 3D ブロックの樹脂マスター型 [学会発表 No. 1]

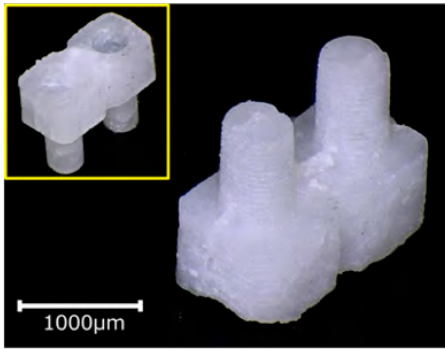


図7 3Dセラミックスブロックの試作例
[雑誌論文 No. 2, 学会発表 No. 1]

次に、3Dモデルからブロック配列を自動的に生成するプログラムを開発した。図8は、シマウマモデルを例にしたブロック配列の決定例である。実際のシマウマモデルをブロックで表現する際に、ブロックの大きさを変えることで、より詳細なモデルを表現できていることがわかる。また、シマウマの白と黒を区別してブロックを配置できていることから、本プログラムが複数種のブロックを用いたマルチマテリアル・ブロックプリンティングにも適用可能であることがわかる。したがって、このプログラムによって、ブロックのサイズや形状、材質の異なるブロック群を用いてマルチマテリアルなブロックモデルを構築できることが示された。

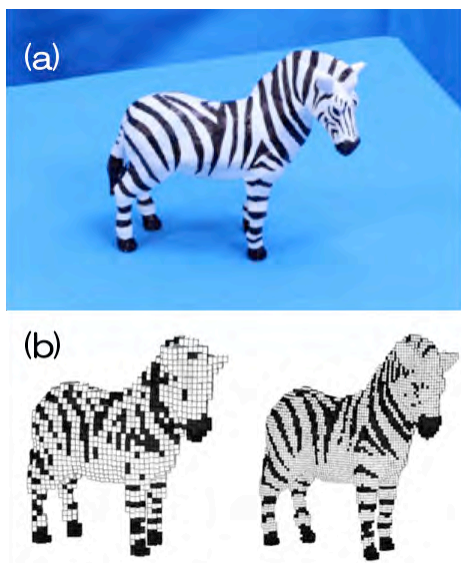


図8 3Dモデルから生成したブロック配置
(a) 3Dモデル (b) サイズの異なるブロックでの3Dモデルの再現例[雑誌論文 No. 1]

さらに、開発したブロック配列生成プログラムを用いて、実際に3Dモデルをブロック配列化し、ロボットによって組み立てる実験を行った。実験では、3D-CADで設計したブリッジモデルを、2種類の異なる形状を持つブロックを組み合わせてブロックモデルに変換した(図9)。そして、実際にロボットアームを用いて組み立てた(図10、11)。

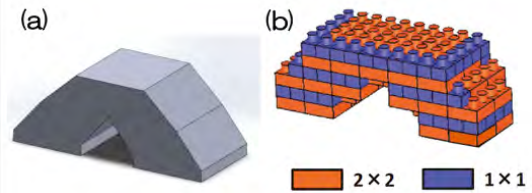


図9 ブリッジモデルのブロック配列
(a) 3D-CADモデル (b) ブロックモデル
[学会発表 No. 6]



図10 ロボットによるブロックの組立実験
[学会発表 No. 6]

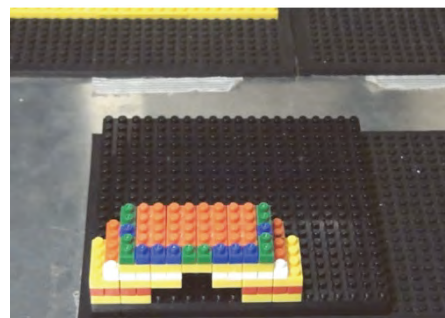


図11 ブリッジモデルの組立例
[学会発表 No. 6]

さらに、ブロックを自動的に供給しながら、連続的に自動組立を行うシステムも開発した[学会発表 No. 9]。

以上の基礎的検討から、市販ブロックによる組立に成功したので、マイクロ光造形モールドイングによって作製された微小ブロックの組立を自動的に行うシステムを開発した。組立に用いたロボットシステムは、微小ブロックの把持に適した超音波モータによって駆動される小型ロボットシステムである(図12)。この小型ロボットを用いて、マイクロ光造形モールドイングによって量産した微小ブロック(光硬化性樹脂製)を用いたブロック組立実験を行った。実験では、微小ブロックを画像処理によって自動認識させた(図13)。そして、実際にブロックを把持して組み立てることに成功した(図14)。

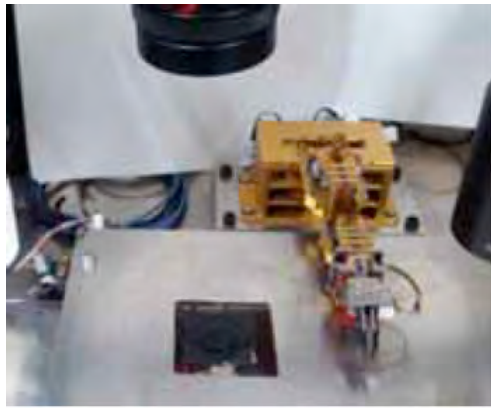


図 12 小型ロボットアームと画像処理システムを組み合わせた微小ブロック組立装置 [学会発表 No. 11]

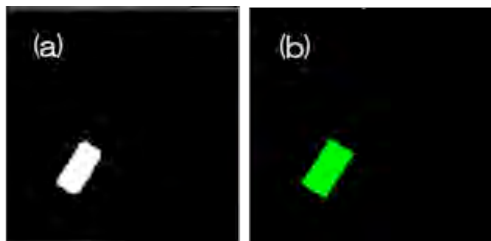


図 13 微小ブロックの画像認識の例
(a) 二値化したブロック抽出画像
(b) 輪郭抽出によるブロック形状認識 [学会発表 No. 11]

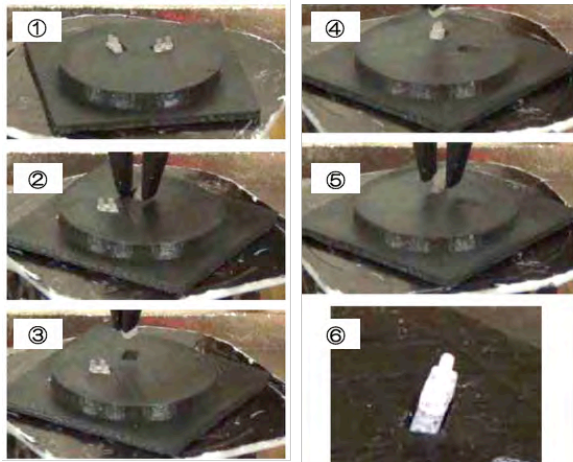


図 14 小型ロボットによる微小ブロックの自動組立 [学会発表 No. 11]

以上の結果から、マイクロ光造形モルディングによって作製した微小ブロックを、画像認識によって自動的に組み立てることを実証できた。また、図 7 に示した β リン酸三カルシウム・スラリーを用いて作製したバイオセラミックスの生体適合性に関しても、廣田らの動物実験によって確認している。よって、今後、開発した微小ブロック自動組立システムに、量産したバイオセラミックス製ブロックを適用することで、患者の CT データから 3D 足場を形成するブロック配置を決定し、自動的に組立を行うトータルシステムを実現させることができる。

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 3 件)

1. T. Kozaki, H. Tadenuma, and T. Maekawa, “Automatic generation of LEGO building instructions from multiple photographic images of real objects,” *Computer-Aided Design*, Vol. 70, 13-22 (2016). (査読あり)
2. 丸尾昭二, “マイクロ光造形モルディングによる 3 次元セラミックス構造の作製と応用,” *Form Tech Review* Vol. 25, No. 1, 95-98 (2016). (査読なし)
3. 丸尾昭二, “レーザー光を用いた超高分解能 3D プリンティング技術,” *機械技術*, 第 65 巻, 第 12 号, 38-43 (2017). (査読なし)

[学会発表] (計 11 件)

1. 大庭 敏裕, 前川 卓, 前田 雄介, 丸尾 昭二, “3D ブロック・プリンティングの研究 (第一報: バイオセラミックスブロックの作製), ” 第 7 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 平成 27 年 10 月
2. 狐崎 拓哉, 竹澤 正仁, 佐々木 雄飛, 前川 卓, “自立性と安定性を考慮したレゴモデル組み立て図の自動生成”, 情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 第 161 回研究発表会, 平成 27 年 11 月
3. 中野 櫻二郎, 狐崎 拓哉, 丸尾 昭二, 前川 卓, 前田 雄介, “ロボットによる 3D CAD モデルからのブロック玩具自動組立のための組立手順生成” 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2016, 平成 28 年 3 月
4. 中野 櫻二郎, 狐崎 拓哉, 丸尾 昭二, 前川 卓, 前田 雄介, “3D ブロックプリンティングシステムとしての 3D CAD モデルからのブロック玩具自動組立” 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 平成 28 年 9 月
5. T. Oba and S. Maruo, “Mass production of three-dimensional ceramic micro components using a soft molding technique,” *Proceedings of International Symposium on Micro-Nano Science and Technology* 2016, 平成 28 年 10 月
6. Yusuke Maeda, Ojiro Nakano, Takashi Maekawa, and Shoji Maruo, “From CAD Models to Toy Brick Sculptures: A 3D Block Printer,” *IEEE/RSJ International*

Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2016, 平成28年10月

7. 野田洋平, 大庭敏裕, 景山達斗, 福田淳二, 丸尾昭二, “青色半導体レーザーを用いたマイクロ光造形法によるセラミックス部品の作製,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 平成29年3月
8. 杉本 千遥, 前田 雄介, 丸尾 昭二, 前川 卓, “多様な3Dモデルに対応可能なブロック玩具自動組立,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 (ROBOMECH 2017), 平成29年5月
9. 廣野 翔大, 前田 雄介, 丸尾 昭二, 前川 卓, “超音波モータ駆動ロボットを用いた微細ブロック組立,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 (ROBOMECH 2017), 平成29年5月
10. Chiharu Sugimoto, Yusuke Maeda, Takashi Maekawa and Shoji Maruo, “A 3D Block Printer Using Toy Bricks for Various Models,” 13th IEEE Conf. on Automation Science and Engineering (CASE 2017), 2017. 平成29年8月
11. 古川太一, 野田洋平, 大庭敏裕, 永瀬史憲, 谷口周平, 丸尾昭二, “マルチスケール・マイクロ光造形装置の開発と応用,” 日本機械学会第3回イノベーション講演会 (iJSEM2017), 平成29年10月

〔図書〕 (計 1 件)

1. 丸尾昭二 (分担執筆), 「Application 66 – Fabrication of Functional Ceramic Devices Produced by Three-Dimensional Molding Using Microstereolithography」, Nanoparticle Technology Handbook Third Edition, Makio Naito, Toyokazu Yokoyama, Kouhei Hosokawa, Kiyoshi Nogi, pp. 759-763, 総ページ 904, Elsevier (2018.3.23 発行). ISBN-13 : 9780444641106

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称：セラミックス成形体の製造方法
発明者：丸尾昭二、城谷伸寛、大庭敏裕
権利者：横浜国立大学
種類：特許権
番号：2017-057527
出願年月日：2017年3月23日
国内外の別：国内

名称：セラミックス成形体の製造方法
発明者：丸尾昭二、城谷伸寛
権利者：横浜国立大学

種類：特許権

番号：2017-057800

出願年月日：2017年3月23日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mnt.ynu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸尾 昭二 (MARUO, Shoji)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00314047

(2) 研究分担者

前川 卓 (MAEKAWA, Takashi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70361863

前田 雄介 (MAEDA, Yusuke)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50313036

廣田 誠 (HIROTA, Makoto)

横浜国立大学・大学院医学研究科・准教授

研究者番号：20347305