

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360125

研究課題名(和文) 磁気波動減速機内蔵メガトルクアクチュエータを搭載した人間型ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of a humanoid robot with mega-torque actuators using magnetic harmonic gears

研究代表者

平田 勝弘(Hirata, Katsuhiko)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00403139

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円、(間接経費) 4,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで研究してきた高性能な磁気波動型ギアをもとに、高トルク・高効率を実現できる新しい磁気ギアの原理モデルを考案した。更に、解析シミュレーションを用いて磁気構造の最適化を実施し、最高性能の磁気波動型ギアを開発した。また、磁気ギアとアクチュエータを一体化した、世界初のメガトルクアクチュエータを開発し、試作評価によってその有効性を示した。また、メガトルクアクチュエータ設計のためにFEMを用いた大規模並列計算シミュレータを開発し、実機による実験結果との比較により解析精度検証を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new magnetic gear was proposed to realize high torque and high efficiency using the concept of our magnetic harmonic gear. The high end magnetic gear was developed through the numerical approach to optimize the magnetic structure parameter of the proposed model. Moreover, a remarkable mega torque actuator was developed by combining a magnetic gear with an actuator. In addition, design tool for mega-torque actuator was developed for large scale parallel computing employing FEM. The computation accuracy of this tool was verified through the comparison with the measurement on a prototype.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気機器

キーワード：磁気ギアードアクチュエータ 磁気ギア ロボット 有限要素法 電磁場解析

### 1. 研究開始当初の背景

近年人間型ロボットの開発が盛んに行なわれるようになり、その性能も日増しに向上してきた。そのような人間型ロボットのアクチュエータには、HONDAのASIMOに見られるように、電動モータと減速機の組み合わせが一般的であり、ロボットの小型化・低消費電力化のために高トルク・高効率、更にはコンプライアンスを実現できる高性能な減速機が不可欠である。現在、大きな減速比を実現できる波動減速機が主流となっているが、金属弾性体の部品であるフレックススプラインと、剛体リング状の部品であるサーキュラスプライン間の機械的な接触に伴う摩擦のため、伝達効率や寿命などの問題を解決する必要がある。それに対して、永久磁石の磁力を用いて非接触で力の伝達を行う磁気減速機構は摩擦や磨耗を起こさずに動力を伝達できるため、高効率・低振動であり、コンプライアンスをもたせることができる。希土類磁石の開発を背景に、様々な減速機構が提案されてきた。鶴本らは、機械式の磁気歯車の歯をそのまま磁極に置き換えた構造、更には高トルク化のために、磁気遊星歯車なども検討されているが、伝達トルクは小さく実用化は難しい。最近では、D. Howeらが磁気高調波を利用した新しい動作原理の減速機構が提案され高い減速比・伝達トルクの実現を原理的に示しているが、複数の永久磁石を必要とする複雑な磁気構造を有するため、製造上・堅牢性など解決すべき課題が多く残されている。

研究代表者らは、これまで、波動減速機の基本原則を永久磁石の磁気力の利用によって実現する理想的な磁気波動形減速機の構造を模索してきた。そして、遂に革新的な磁石内挿形ラジアルギャップ磁気波動減速機を考案し、有限要素法解析にてその動作メカニズムを解明すると共に試作・実験によりその高い性能(減速比 10, 磁気伝達トルク 7.5Nm)を確認した。続いて、薄形の磁石表面形アキシアルギャップ減速機を提案し、更なる高性能(減速比 10, 磁気伝達トルク 10N・m)を実現した。両提案モデルとも、磁極配置の工夫により、振動原因となる高速ロータ側のコギングトルクを激減している。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまで開発してきた2つの磁気減速機原理モデル(特願 2008-129616, 特願 2008-278787)をもとに、人間型ロボットへの搭載へ向けて、新たなモデルを考案すると共に、解析シミュレーションを用いて磁気構造の最適化を実施し、小型で高トルク伝達可能な最高性能の磁気波動減速機を創出する。また、開発した減速機とアクチュエータの磁気回路を共有化・一体化し、世界初のメガトルクアクチュエータを開発する(図1)。

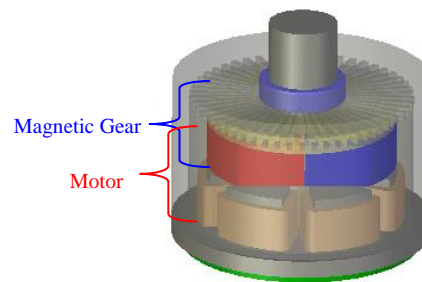


図1 減速機一体型メガトルクアクチュエータの構想

更にこのアクチュエータを搭載した次世代人間型ロボットを開発し、その有効性を検証する。減速機及びメガトルクアクチュエータの目標性能は次の通り。

- (1)新しい磁気波動減速機の目標伝達トルク $\geq 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 減速比 $\geq 20$ , 効率 $\geq 95\%$
- (2)メガトルクアクチュエータの目標出力トルク $\geq 20 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 効率 $\geq 90\%$

### 3. 研究の方法

本研究は、アクチュエータ(研究代表者)、電磁場解析(研究分担者)、ロボット(研究協力者)研究における世界的権威の専門家及び3人の大学院生からなる研究体制で取り組む。

本研究では、今まで開発してきた2つの磁気波動減速機(ラジアルギャップモデル, アキシアルギャップモデル)をもとに、小型・高伝達トルク・低コギングトルク・コンプライアンスを実現する新しい磁気波動減速機の考案とシミュレーションによる磁気回路の最適化、更には実機による実験検証を行う。また、アクチュエータと一体化したメガトルクアクチュエータの原理モデルの考案と設計開発。更に、このメガトルクアクチュエータを搭載した次世代の省エネルギー人間型ロボットを開発する。平行して、メガトルクアクチュエータの最適化設計のための、有限要素法による大規模モデル並列計算シミュレータの開発、及びメガトルクアクチュエータの性能評価装置の開発を行う。

#### ① 平成23年度

23年度では、これまで提案してきたラジアルギャップ形磁気減速機及びアキシアルギャップ形の薄型磁気減速機の両原理モデルを元に、人間型ロボットへの搭載へ向けて、高トルク・高効率・コンプライアンスをめざした新しい磁気波動減速機を考案し、コンピュータ解析による磁気構造・寸法の最適化設計を実施する。また、最適化解析結果より、磁気波動減速機の試作1号機の設計及び実験による性能評価を行う。更に、開発した磁気波動減速機をアクチュエータと一体化したメガトルクアクチュエータを実現するための基本構造を考案し、シミュレーションにより、動作メカニズムの理論的検証を行う。上記開発と並行して、磁気波動減速機及びアクチュエータとの一体化したメガトルクアク

チュエータ設計ツール開発のため、現状の有限要素法を用いた複雑系の動作性能予測シミュレータを元に、更に複数可動部の三次元空間移動を考慮できる並列計算による大規模な動作解析シミュレータへ拡張する。

② 平成 24 年度

24 年度では、23 年度で実施した最適化設計をもとに、作成した磁気波動減速機の試作 1 号機の実験結果より抽出した技術課題の改良設計を行い 2 号機の試作・実験評価を行う。この試作機をもとにアクチュエータと一体化可能な構造を考案し、メガトルクアクチュエータの試作 1 号機を作成・実験検証する。更に、この試作機を用いて大規模な並列計算シミュレータの解析精度を検証する。

③ 平成 25 年度

25 年度では、24 年に開発したメガトルクアクチュエータの試作 2 号機の開発と人間型ロボットへの実装を行い、次世代ロボットとしての実現の可能性を明らかにする。

4. 研究成果

① 本研究では、これまで開発してきた 2 つの磁気減速機原理モデル (特願 2008-129616, 特願 2008-278787) をもとに、新たな磁気減速機モデルを考案すると共に、FEM 解析シミュレーションを用いて磁気構造の最適化を実施し、小型で高トルク伝達可能なツインロータ型磁気波動減速機を考案した。(図 2)

従来のアキシヤル型磁気減速機では、高速ロータ 1 つに対して固定磁極片と低速ロータが 1 つずつであったが、ツインロータ型磁気減速機では、高速ロータにのみ永久磁石が装着されている構造は同じだが、その軸方向両側に固定磁極片と低速ロータが 1 対ずつ配置されている。高速ロータに装着された永久磁石の起磁力と固定部のパーミアンスにより固定部の高速ロータとは逆側のアキシヤル方向に高調波磁束が生成される。そして、高速ロータが回転すると、高調波磁束と同期して低速ロータが回転する。

本モデルを有限要素法による性能評価及び図 3 に示す試作実験を実施して、外形  $\phi 100$  にて最大伝達トルク 40Nm, 効率 80% を実現することを確認した。

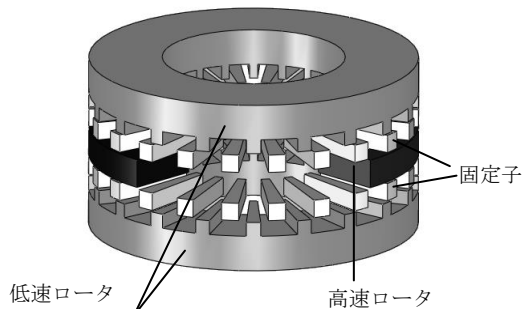


図 2 ツインロータ型減速機

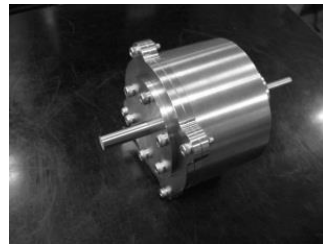


図 3 ツインロータ減速機試作

② 更に大きな伝達トルク・減速比を実現できる軸方向差動高調波磁気減速機を提案した。(図 4) この減速機は、インナーギア、センターギア、アウターギアから構成される。インナーギアとアウターギアは、アキシヤル方向に着磁された永久磁石を磁性体で挟み込み、エアギャップ面に磁極を設けた構造であり、センターギアは、インナーギアとアウターギアの磁極間に等間隔に配置した磁極片である。さらに、フェイス 1 とフェイス 2 には異なる極数の組を設定することにより、各歯車列に対して異なる減速比を与えている。各ギアの磁極間には等間隔のエアギャップをつくり、各フェイスで永久磁石の磁気吸引力により動力伝達を行う。2 つのフェイスの磁気歯車列に対して異なる速度関係式を設定することにより、出力軸を含むフェイスにて異なる速度の 2 つの入力を行う機構を差動機構と称する。この磁気減速機は、入力軸および自由軸の選択により 2 種類の減速比を利用可能である。

各フェイスにて設定する磁極数の組とそれに対応する減速比の例を表 1 に示すが非常に大きな減速比を実現できることが分かる。なお、負の減速比は、回転方向が異なることを意味する。

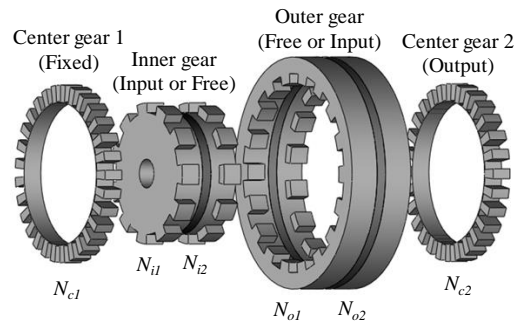


図 4 軸方向差動高調波磁気減速機

表 1 ギア比の一例

Gear Ratio		Face1			Face2		
$G_{r1}$	$G_{r2}$	$N_{il}$	$N_{cl}$	$N_{ol}$	$N_{i2}$	$N_{c2}$	$N_{o2}$
45.8	-28.0	11	29	18	11	28	17
105.4	-74.4	12	29	17	13	31	18
217.0	-201.5	13	27	14	15	31	16
325.0	-350.0	14	27	13	13	25	12
435.0	-464.0	16	31	15	15	29	14
561.0	-363.0	11	28	17	13	33	20

試作実験を実施し、外形  $\phi 100$  にて最大トルク 60Nm、効率 90% まで改善できることを確認した。

③ 次に減速機とアクチュエータの磁気回路を共有化・一体化し、世界初のメガトルクアクチュエータを開発した。最初に原理モデル(図 5)を考案して動作原理を明らかにした。基本構成としては、高速ロータにのみ永久磁石が設置されている。高速ロータには、8 極のセグメント磁石 ( $B_r = 1.3T$ ) が貼り付けられている。一方、低速ロータは、電磁鋼板を積層することで形成された 20 個の磁極片から構成され、それらは内径部の薄肉部で互いに連結されている。12 スロットのステータには、集中巻きされた 3 相巻線が組み込まれているが、各ティースにはコイルが、4Y 結線になるように接続されている。動作原理は次の通り。ステータには、巻線極対数が 4 になるようにコイルが巻かれているため、3 相交流電流により 4 極対の起磁力が発生する。この起磁力は、低速ロータの内周に 4 極対の基本波磁束を生成するだけでなく、低速ロータのパーミアンスにより高調波磁束も生成する。ここで、コイルに 3 相交流電流が流れることで、ステータ内周の基本波磁束がコイルの回転磁界と同じ速度で回転する。つまり、永久磁石式 8 極 12 スロットモータと同じ原理で高速ロータが回転する。高速ロータの極対数を  $N_h$ 、低速ロータのスロット数を  $N_l$ 、ステータのスロット数を  $N_s$  とすると、 $N_h$  と  $N_s$  は、永久磁石式同期モータとして回転する組み合わせでなければならない。低速ロータを回転させるために、高調波磁束を利用した磁気減速機の原理を用いる。このとき、下記の式が成立しなければならず、 $m = n = p = 1$  とすることで、原理モデルの磁気ギアードモータの仕様である  $N_h = 4$ 、 $N_l = 20$ 、 $N_s = 12$  が得られる。

$$(2p-1)N_s = (2n-1)N_l \pm 2(2m-1)N_h$$

また、上式を満足する仕様の磁気減速機の減速比  $G_r$  は、次式で表され、本稿の磁気ギアードモータでは  $G_r = 2.5$  となる。

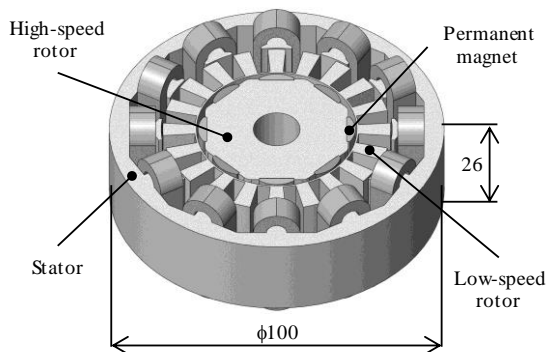


図 5 メガトルクアクチュエータ基本構成

$$G_r = \mp \frac{(2l-1)N_l}{2(2m-1)N_h}$$

本原理モデルを検証するため試作機を制作して性能評価を行った。図 6 に試作機を、図 7 に実験装置を示す。実験評価の結果、原理モデルは理論通り磁気ギア効果をもつ高トルクを実現できるアクチュエータであることが判明した。

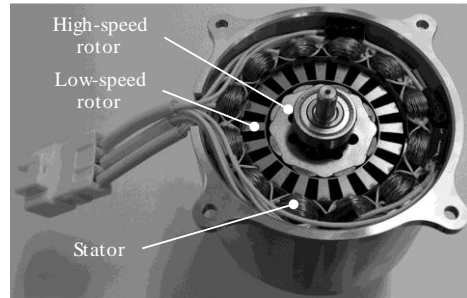


図 6 メガトルクアクチュエータ試作機

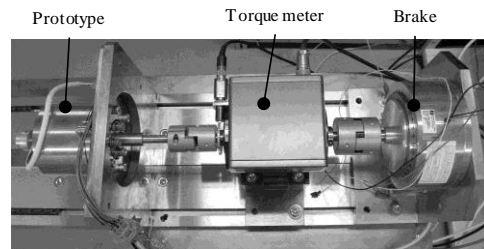


図 7 実験装置

④ 更にこの原理モデルをもとに大きなトルクを得るモデルを開発した。ハーフ PM 型磁気ギアードモータを図 8 に示す。原理モデルと同体格 ( $\phi 100 \times 35$ ) としている。高速ロータには、エアギャップ面が N 極の永久磁石 5 枚が等間隔に貼り付けられており、極間は磁性体(電磁鋼板)であるが、5 極対を形成する。一方、低速ロータは 17 極の磁極片(電磁鋼板)を内径部で接続した 1 つの部品で形成されている。

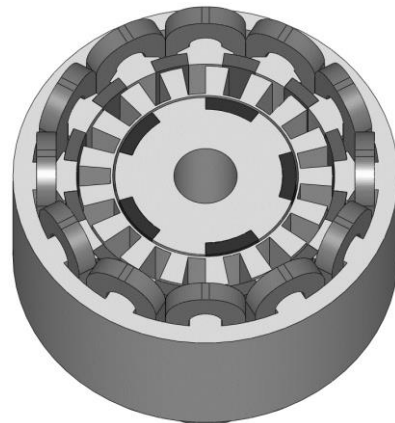


図 8 ハーフ PM 型モデル

ステータは 12 個のティースを有し、それらには 5 極対のロータを回転できるように 3 相巻線が施されている。また、ステータのロット開口部にはエアギャップ面に対して同一極性を有する永久磁石が設置され、ステータ内周は 12 極対の磁束密度分布を有する。ハーフ PM 型磁気ギアードモータは、12 スロットのステータに巻かれたコイルに 3 相交流を印加することで、5 極対の高速ロータを回転させる。これは、一般的な 10 極 12 スロット永久磁石モータを回転させる原理と同じである。この仕様をもとに、試作を作成して性能評価を実施した。(図 9) その結果、外形  $\phi 100$  にて最大トルク 80Nm, 効率 85% と高性能なメガトルクアクチュエータの開発に成功した。

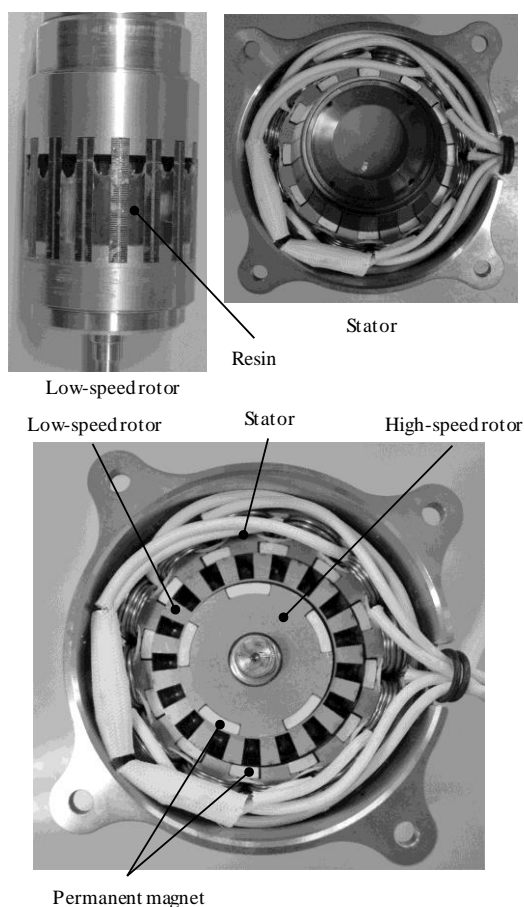


図 8 ハーフ PM 型メガトルクアクチュエータの試作機

⑤ 磁気波動減速機及びアクチュエータとの一体化したメガトルクアクチュエータ設計ツール開発を実施した。有限要素法を用いた複雑系の動作性能予測シミュレータを元に、複数可動部の三次元空間移動を考慮できる並列計算による大規模な動作解析シミュレータへ拡張した。試作機による実験実証を行い、解析の有効性を確認した。

⑥ 図 10 に示すように、開発したメガトルクアクチュエータを搭載した次世代人間型ロボットの開発については、アクチュエータの開発に時間・費用を要したために構想に留まった。本課題については、引き続き推進チームにて研究を進めていく予定。



図 10 メガトルクモータ搭載ロボット構想

#### 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 17 件)

(1) Noboru Niguchi and Katsuhiro Hirata, "Torque-Speed Characteristics Analysis of a Magnetic-Geared Motor Using Finite Element Method Coupled With Vector Control", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.49, NO.5, pp.2401-2404, 2013.05

(2) 新口昇, 平田勝弘, 森元瑛樹, "スリップ現象を有する磁気ギアードモータの N-T 特性", 電気学会論文誌, Vol.133, No.12, pp.1179-1185, 2013.12

(3) Noboru Niguchi, and Katsuhiro Hirata, "Cogging Torque Analysis of Magnetic Gear", IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL.59, No.5, pp.2189-2197, 2012.05

(4) Ariff Zaini, Noboru Niguchi and Katsuhiro Hirata, "Continuously Variable Speed Vernier Magnetic Gear", IEEE Transactions on Magnetics, VOL.48, No.11, pp.3104-3107, 2012.11

(5) 長井信吾, 平田勝弘, 新口昇, "ツイン低速ロータを有するアキシアル型磁気減速機", 日本 AEM 学会誌 Vol.20, No.1, pp.78-83, 2012.03

[学会発表] (計 26 件)

(1) Noboru Niguchi, Katsuhiro Hirata and

Masahiko Sakai, "High Performance Hybrid-Type Magnetic Planetary Gear", Proceedings of IEEE ICMA2013 (International Conference on Mechatronics and Automation), Takamatsu, Japan, pp.662-669, 2013. 08

(2) Eiki Morimoto, Katsuhiro Hirata, Noboru Niguchi, "A NOVEL HYBRID-TYPE MAGNETIC PARADOX PLANETARY GEAR", Proceedings of ISEF2013(XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering), Ohrid, Macedonia, PS5-177, 2013.09

(3) Noboru Niguchi, Katsuhiro Hirata, Ariff Zaini, Shingo Nagai, "Proposal of an Axial-Type Magnetic-Geared Motor", Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM2012), France, pp.736-741, 2012.09

(4) Noboru Niguchi, and Katsuhiro Hirata, "Torque-Speed Characteristics Analysis of a Magnetic-Geared Motor Using Finite Element Method Coupled with Vector Control", Proceedings of 15<sup>th</sup> Biennial IEEE CEFC (Conference on Electromagnetic Field Computation), Oita, Japan, TA3-1, p.303, 2012.11

(5) Noboru Niguchi, and Katsuhiro Hirata, "Electromagnetic Vibration Analysis of a Magnetic Gear Employing the 3-D Finite Element Method", Proceedings of IEEE COMPUMAG 2011, Sydney, Australia, PA4.3, pp.52-53, 2011.07

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 4 件)

名称：電動機

発明者：平田勝弘，新口昇，宮川敦士，堺谷洋，小柴敦誉，千葉貞一郎，吉田剛

権利者：大阪大学，コマツ

種類：特許

番号：特許出願 2013-226079

出願年月日：2013.10.30

国内外の別：国内

名称：電動機

発明者：平田勝弘，新口昇，宮川敦士，堺谷洋，千葉貞一郎，小柴敦誉

権利者：大阪大学，コマツ

種類：特許

番号：特許出願 2013-226080

出願年月日：2013.10.30

国内外の別：国内

名称：磁気波動歯車装置

発明者：平田勝弘，新口昇，アリフザイニ，鴛海翼，森元瑛樹

権利者：大阪大学，IHI

種類：特許

番号：特許出願 2013-033695

出願年月日：2013.02.22

国内外の別：国内

名称：磁気変速装置

発明者：平田勝弘，宮崎進

権利者：HONDA 技術研究所

種類：特許

番号：特許出願 2011-110742

出願年月日：2011.05.17

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 勝弘 (HIRATA KATSUHIRO)

研究者番号：00403139

(2) 研究分担者

河瀬 順洋 (KAWASE YOSHIHIRO)

研究者番号：20144735