

平成22年 6月 4日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560287

研究課題名（和文） 小型・軽量ネオジム系永久磁石モータの省重希土構造設計法の研究

研究課題名（英文） Studies on Design Approach for Downsized and Weight-Reduced Permanent Magnet Motors utilizing Less Heavy Rare-Earth Elements

研究代表者

小坂 卓 (KOSAKA TAKASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10324477

研究成果の概要（和文）：高損失密度の小型・軽量永久磁石モータで使用される磁石は、減磁防止のため、高耐熱性を付与する重希土類添加剤を必要とする。この添加剤量を低減するためには磁石の温度分布を考慮した高速解析を含む構造設計法が重要となる。有限要素磁場解析で得られた損失値を用いて磁石部の熱分布評価を行う熱回路網に基づく熱解析法を考究し、3次元有限要素法による熱伝導解析に比べ、解析精度は同等で、解析時間を百分の一に低減できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：The rare-earth magnet used in downsized and weight-reduced permanent magnet motors with high power density requires heavy rare-earth elements as additives providing with higher heat-resisting property to protect its demagnetization. For reducing the additives, a design approach for motor structure is important, in which a fast computation considering thermal distribution on permanent magnet is involved. We studied on and developed the thermal analysis approach for computing thermal distribution on permanent magnet, which was based on thermal circuit network and used losses obtained from finite element magnetic field analysis. Compared with heat conduction analysis by finite element method, the developed analysis approach made it possible to reduce its computation time by one-hundredth while keeping its computation accuracy same.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：希土類系永久磁石形同期モータ、省重希土類構造設計、簡易熱伝導解析、

1. 研究開始当初の背景

民生・産業・運輸の全ての分野で不可欠な動力源であるモータの近年の小型軽量化・高効率化を実質的にもたらしたのは、アルニコ／フェライト磁石の最大エネルギー積の10倍超、30MGOe超の高エネルギー密度を持つ希土類系磁石 (Nd-Fe-B) である。この希土類系磁石の技術発展無くして、永久磁石同期モータ (以下、PMSMと略記) を搭載し、現在、自動車グローバル市場で牽引的な役割を果たす国内メーカーによるハイブリッド自動車 (以下、HEVと略記) は存在しないといっても過言ではない。PMSMは年々普及拡大を遂げ、それに伴って希土類系磁石の国内生産高も増加の一途を辿っている。希土類系磁石の“希土類”とは実質、軽希土のネオジウム (Nd) を意味するが、掘削費 (人件費) など採算が合わないため、結果的に現在は中国一極集中状態で、その生産シェアは全世界比で9割以上に達している。日本のものづくりの優位性の根幹となる原料だけにその安定供給は必須の課題であるが、ネオジウム (Nd) の埋蔵は米、豪、CIS、インドなど世界各地に分布しており、中国一極支配の状況を回避できる可能性は十分ある。これに対し、真に深刻な問題は、希土類系磁石の高保磁力化、すなわち高耐熱性を与える添加剤である重希土のジスプロシウム (Dy) やテルビウム (Tb) の安定供給である。これらは現在、中国南部 (江西省竜南鉱) のイオン吸着鉱が唯一の供給源であり、将来的に供給不安・価格高騰のリスクを抱えている。

これに対し、技術立国である我が国の磁石メーカーは、二合金法や粒界拡散法など重希土添加剤を効果的に利用して高耐熱性を実現する手法の開発を進めている。この動きは、希土類系磁石ユーザからの訴求項目に対応するもので、訴求項目を明示する点ではユーザ側＝アプリケーション側も努力していると見なせるが、ユーザ側には、小型軽量・高効率など必要性能を維持したままで希土類磁石使用量を出来る限り少なく、あるいは高耐熱性を必要としないPMSMの省重希土構造設計法が重要となる。

省重希土構造設計法で重要な要素は、熱発生源となる損失解析評価技術と発生熱による熱伝導解析評価技術で、原則的にはこれを連成させて磁石の温度上昇を特定することとなる。損失解析評価技術については、有限要素解析 (FEA) を用い、PMSM を題材にインバータ駆動下でPWM高調波を考慮した希土類系磁石の渦電流損解析、鉄心コアでの鉄損解析について、国内外で研究が進んでいる。一方、熱伝導解析については、発生熱を固定値とし

て与えてFEAで解析評価する手法が知られているが、回転部分を含むモータの場合、各部の熱対流が複雑で、熱伝達係数の設定法については未だ明確にされていない。損失解析と熱伝導解析の連成解析となると、電気時定数 (msec) と熱時定数 (sec) が大きく異なることから、電気時定数に対して十分な時間刻み幅で行う損失解析にそのまま熱伝導解析を連成させた場合、解析時間が長大するという問題点を抱えている。加えて、FEAでも三次元解析となれば、損失解析自身の時間そのものが長く、現在のモータ設計開発サイクルに根ざしたリーズナブルな設計リードタイムという観点から、解析精度を維持したまま、解析時間を劇的に短縮する省重希土構造設計法の開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、エンジンに隣接配置されるため磁石の耐熱設計に特に厳しい条件が課せられるHEV主機用途を想定し、現行のプリウス、ハリアーなどに搭載される埋込磁石形同期モータ (IPMSM) を省重希土構造設計対象とする。電機子巻線については、省スペース・使用銅線材の低減 (=低コスト) の観点から、現行の分布巻線ではなく、集中巻線とする。分布巻線に比べて集中巻線は、居所的な巻線起磁力分布集中が激しく、より過酷な条件の下での省重希土構造設計問題を扱うこととなる。前述のように、回転部分を含むモータの場合、各部の熱伝達係数の設定法が難しい。そこで、1年目前半は、希土類系磁石の温度上昇評価装置を用い、提案する非線形簡易磁気解析法と熱伝導解析手法を連成させた磁石部温度上昇解析評価法の有用性を検証する。1年目後半では、標準的なIPMSMの熱伝達係数の理論的な設定法について考究を行う。2年目は、希土類系磁石を含む各部の温度測定モニタリングが可能な試作機を設計試作し、実モータに対する磁石部温度上昇解析評価法の評価をもって有用性を評価し、目標性能を満足するための最小磁石使用量を実現、あるいは高耐熱性を要しない省重希土構造設計指針を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 希土類系磁石の温度上昇評価装置を用いた非線形簡易磁気解析法と熱伝導解析手法の提案連成熱解析法による磁石部温度上昇解析評価法の基礎的な有用性検証

図1の評価装置は、モータの巻線に相当する図中コイルに可変周波数、可変振幅の電圧を与えて、鉄心を介して導電率の高い希土類系磁石 (NEOMAX社、NOEMAX-35VH相当) へ交

番磁界を印加し、発生する渦電流損、ならびに鉄損を測定評価し、同時に時間に対する磁石の温度上昇を測定する装置である。磁石はIPMSMで一般に用いられる平板形状で、その大きさは現行のHEVで使用されている大きさと等しい。その外周に巻かれたサーチコイルにより磁石が曝される交番磁界の磁束密度振幅をモニタし、実モータの回転子内部へ埋め込まれた磁石が曝される交番磁界（周波数：数十～数千Hz、磁束密度振幅0.01～0.15T）条件に合わせた測定を行う。

磁場・損失解析には、既に考案済みのIPMSMの非線形簡易磁気解析法を応用する。その妥当性については、損失測定データとの比較を行い、必要に応じて、FEAによる磁界解析により、物理的な挙動を把握しつつ、適宜磁気回路の補正を行う。一方、熱伝導解析には、図2に示す熱伝導回路網による手法を採用する。ここでの熱伝達係数設定の取扱いは簡単と考えている。前述の簡易非線形磁気解析による損失解析データを発熱源とし、熱伝導回路網による熱伝導解析法と連成させて磁石部温度上昇解析を行い、測定温度データとの対比による有用性の検証を行う。

(2) 標準的なIPMSMの各部熱伝達係数の理論的な設定法の考究

標準的なIPMSMのモデルとして、電気学会のベンチマークモデルである図3のIPMSMを対象とする。このモデルで、モータ各部、特に平板永久磁石周辺に焦点を充てて、熱伝達係数の理論的な設定法ならびに熱伝導回路網の構成について考究する。この際、市販の熱伝導解析ソフトであるMotor-CAD (MotorDesign社)を導入し、任意の発生熱源を与えた際の時間に対する磁石部温度上昇データを評価基準に、熱伝導回路網の妥当性を検証する。熱伝達係数についての考究の難航が予想されるが、必要に応じて本学の熱

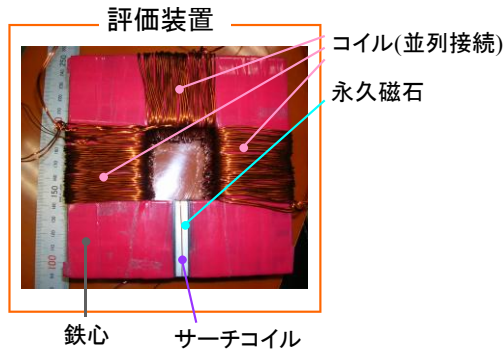


図1 希土類系磁石の温度上昇評価装置
流体力学の教員に研究協力援助を依頼し、計

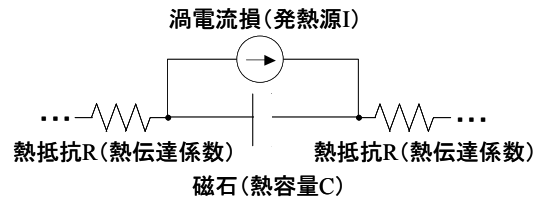
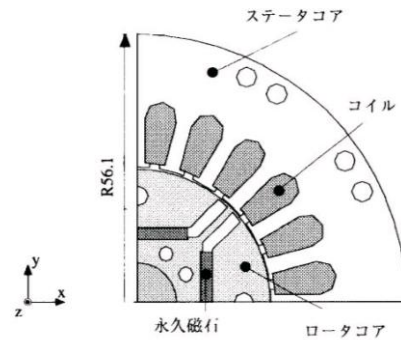
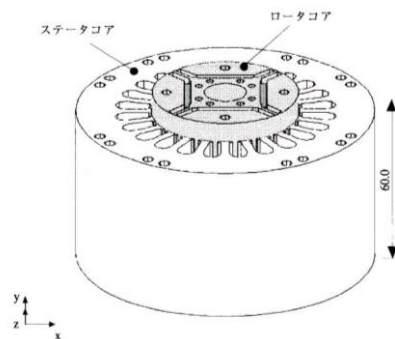


図2 熱伝導回路網モデル



(a) 平面図 (1/4 領域)



(b) 全体図

図3 電気学会標準 IPMSM モデル

画通りの研究遂行を目指す。

(3) 希土類系磁石を含む各部の温度測定モニタリングが可能な試験機設計試作と実モータにおける磁石部温度上昇解析評価法の有用性評価

1年目で確立した磁場・損失解析と熱伝導解析の連成による磁石部温度上昇評価法の有用性を検証すべく、希土類系磁石を含む各部の温度測定を可能とするIPMSM試験機の設計試作を行う。困難な点は回転側に設置する温度測定用熱電対であるが、スリップリングの導入で対応する予定である。試作にあたっては、現在も共同研究で試作機製作を依頼しており、試作実績のあるモータ試作メーカーの岩間電機製作所を利用する。これまでの実績経験から、設計期間3ヶ月、試作期間3ヶ月で、十分な議論を経た試作が可能である。

(4) 目標性能を満足するための最小磁石使用量を実現、あるいは高耐熱性を要しない省重希土構造設計指針の明確化 磁場・損失解析と熱伝導解析の連成による

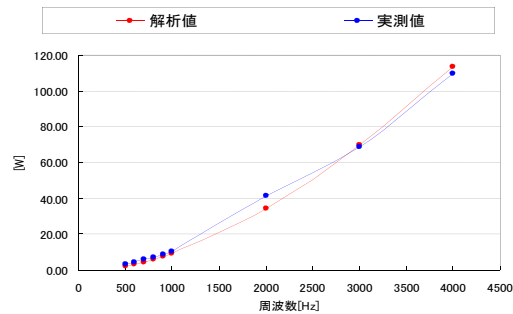
磁石部温度上昇評価法の妥当性が検証されたことを前提に、連成解析により多数の設計ケーススタディーデータを採取し、その傾向から、HEV主機用途を想定したIPMSMを対象に、目標性能を満足するための最小磁石使用量の実現、あるいは高耐熱性を要しない省重希土構造設計指針の理論的考察を行い、設計指針をまとめる。先述の前提条件とした妥当性の検証が不十分であることが予想されるが、その場合は、磁場・損失解析と熱伝導解析の連成の問題点を明らかにし、磁石部温度上昇評価法の確立にこの研究期間を充当し、その後半年内に、省重希土構造設計指針の理論的考察を行い、設計指針をまとめる。

4. 研究成果

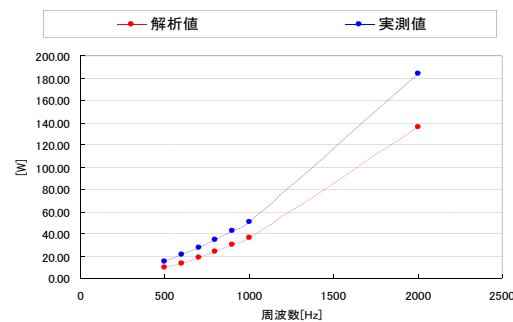
- (1) 希土類系磁石の温度上昇評価装置を用いた非線形簡易磁気解析法と熱伝導解析手法の提案連成熱解析法による磁石部温度上昇解析評価法の基礎的な有用性検証

PMSMの省重希土構造設計法の確立へ向け、第一の課題は、発生熱量、すなわち各部損失の高精度な評価である。解析精度の検証には正確な実験値が必要であり、温度上昇評価装置によって各部損失測定実験を実施した。磁石の直接発熱を生じさせる磁石部渦電流損の測定値を正確に特定するためには、鉄損との正確な分離が必要である。当初、磁石挿入部分に設置したサーチコイルで検出される磁束密度振幅を同一に揃えた条件下であれば、鉄心各部の磁束密度は等しくり、結果、磁石非挿入時と挿入時の鉄損が等しくなるとして非挿入時の鉄損を用いて分離を行ったが、非挿入時と挿入時で鉄心各部での磁束密度が異なることを明らかにし、非挿入時の鉄損を用いた分離は、正確ではないことを明らかにした。一方、FEAを用いた場合の非挿入時と挿入時の鉄心各部の磁束密度は実測値と一致することを確認し、この磁束密度を用いて損失分離し、磁石部の渦電流損を測定した結果をFEAによる同解析値と比較した結果を図4に示す。永久磁石に印加される交流磁場の磁束密度を0.033~0.109[T]、周波数を500Hz~数kHzまで変化させた結果で、磁束密度が低い場合は、測定値と解析値の両者は良く一致するものの、磁束密度の上昇に伴い、誤差が大きくなることがわかる。これは、永久磁石が生じる鉄心中の直流磁場オフセットにより、鉄損係数が非挿入時、すなわち直流磁場ゼロの場合と異なるためであると考えられる。この結果により、FEAによる永久磁石の渦電流損解析値は、鉄心中磁束密度が等しいことから、解析値の精度は高いと推測できるが、鉄心の損失解析が困難であるため、鉄損による鉄心からの熱伝達の解析精度

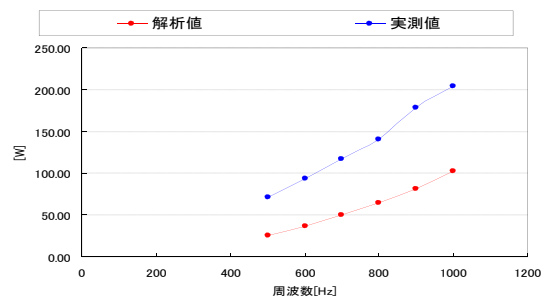
が劣化することが予想されるため、モータ熱回路網解析でも磁石による直流磁場と鉄心のヒステリシスマイナーループを考慮した解析が重要となる知見を得た。一方、非線形簡易磁気解析では、FEAによる渦電流損解析に対し、磁石部の渦電流損の解析精度に大きな誤差を生じることが明らかとなった。これは、磁石表面における磁束密度の時間変化の解析精度が劣化するためである。以後、磁石部渦電流損解析値は、FEAによる値を用いて、熱回路網解析手法の検討を行った。



(a) B=0.033[T]



(b) B=0.066[T]

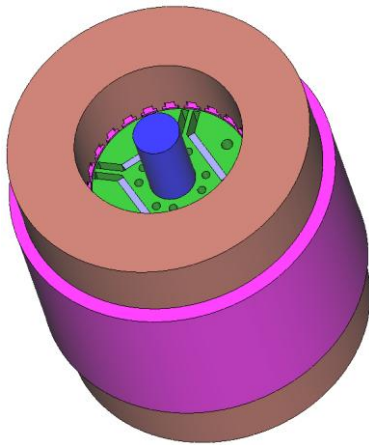


(c) B=0.109[T]

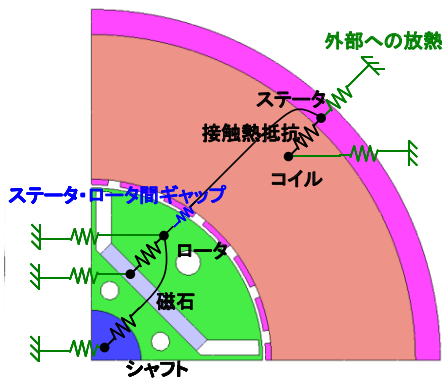
図4 磁石部渦電流損の解析／実測値比較
(2) 標準的なIPMSMの各部熱伝達係数の理論的な設定法の考究

市販の熱伝導解析ソフトウェアであるMotor-CADは、対象としたIPMSMなど永久磁

石をロータ鉄心内部へ埋込んだ複雑形状への対応が困難である。このことから、IPMSMへの熱伝導回路網への応用が困難な課題であることがわかる。図5は、図3のモータを対象に構築した熱伝導回路網の構成である。各部位間の熱伝達係数については、Motor-CADでの設定方法を踏まえ、理論的な設計方法を考案した。図6は、FEA(JMAG-studio)による熱伝導解析ならびに提案の熱伝導回路網(図中 EXCEL)による温度上昇解析値の比較を見たものである。モータの運転条件は、急速暖房運転時の出力に近い4,000r/min-2.5Nmである。ロータコア温度、ステータコア温度、コイル温度、コイル温度で、FEAによる熱伝導解析値と良好な一致を見ており、提案熱伝導回路網による温度上昇解析結果が有用であることが確認できる。

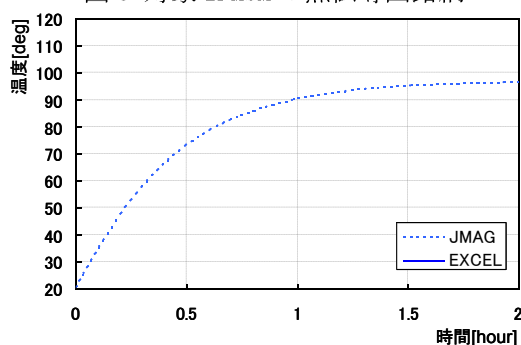


(a) モータ外観図

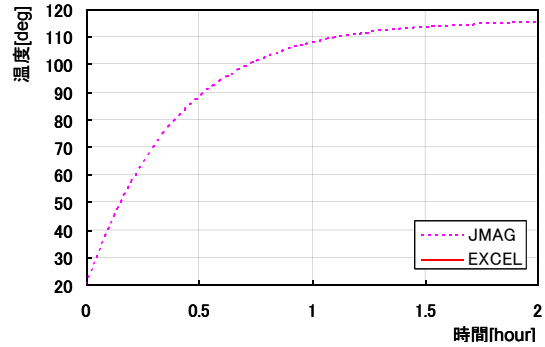


(b) 熱伝導回路網

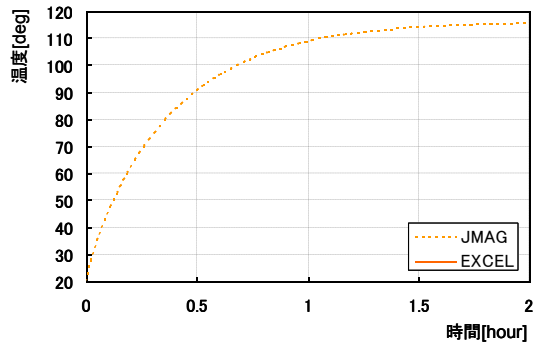
図5 対象 IPMSM の熱伝導回路網



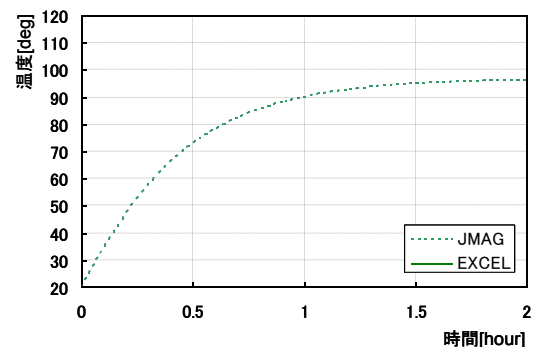
(a) ロータコア温度上昇



(b) ステータコア温度上昇



(c) コイル温度上昇



(d) コイル温度上昇

図6 熱伝導解析結果の比較

- (3) 希土類系磁石を含む各部の温度測定モニタリングが可能な試験機設計試作と実モータにおける磁石部温度上昇解析評価法の有用性評価

図7に温度測定モニタリング用に試作したモータの外観図を示す。磁石などモータ各部に設置した熱電対の出力をスリップリング

を介して引き出しており（図7中向かって左側）、これにて温度計測を行った。しかしながら、モータ内部磁場の影響などで計測値にバラつきが多いため、現在、原因究明中である。しかしながら、ある条件下では解析値と類似した傾向の温度計測ができていることから、熱導電回路網の有用性が確認される。

(4) 目標性能を満足するための最小磁石使用量を実現、あるいは高耐熱性を要しない省重希土構造設計指針の明確化

提案解析手法にて種々の条件下で、温度分布解析を実施した結果、埋込深さを深くすることで、省重希土構造設計の可能性が高いことが分かるが、磁石量が多くなるなどトレードオフもある。今後、引き続き詳細な検討を進めたい。

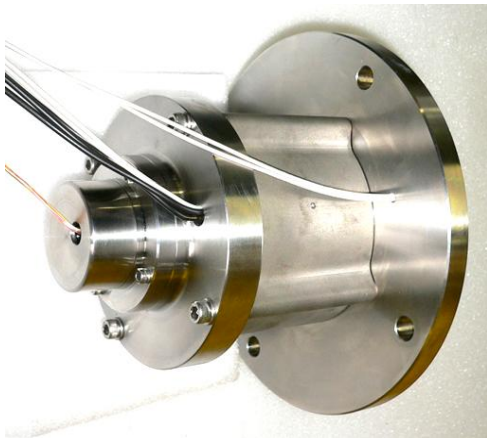


図7 試作機の外観

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1件)

神谷 宗宏, 栗田 秀哉, 三浦 徹也, 柳生 泰秀, 小坂 卓, 松井 信行:「キャリア高調波を考慮したハイブリッド車用埋込磁石形同期発電機の磁石温度解析」, 電気学会論文誌, 査読有, Vol.127-D, No.12, pp.1238-1244 (2007年)

[学会発表] (計2件)

① 河瀬順洋, 山口 忠, 汐田英知, 水野雅斗, 神谷宗宏, 小坂 卓, 松井信行:「キャリア高調波の影響を考慮したIPMモータの温度分布解析」, 平成20年度電気学会全国大会, 2008年3月20日, 福岡工業大学

② Munehiro Kamiya, Yoshihiro Kawase, Takashi Kosaka and Nobuyuki Matsui, “Temperature Distribution Analysis of Permanent Magnet in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering PWM Carrier Harmonics”, International Conference on Electric Machines and Systems, Oct. 9th 2007, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小坂 卓 (KOSAKA TAKASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 10324477

