

令和元年6月17日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04319

研究課題名（和文）クローポール型半波整流可変界磁モータの高トルク・高出力・高効率化

研究課題名（英文）Development of Claw Pole Type Half-Wave Rectified Variable Field Flux Motor with Higher Torque, Output Power and Efficiency

研究代表者

阿部 貴志（ABE, Takashi）

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：30222649

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、電気自動車やハイブリッド電気自動車駆動用モータとして、高い効率、高いトルクそして広い出力領域をもつ新しい原理のモータを開発することである。本モータは、半波整流ブラシなし励磁法を用いたクローポール型半波整流可変界磁モータと呼ばれ、堅牢なブラシなし構造だけでなく、固定子電流による界磁磁束の自己励磁と制御が可能である。本研究では、1)試作機の設計と試作、2)制御手法の確立と実機検証、3)シミュレーションによる検証を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本モータの開発により、使用目的に適した速度・トルク領域で高効率モータドライブシステムが実現され、家電製品や産業機器のような可変速ドライブへの応用だけではなく、メンテナンスや温度に問題がある特殊環境下、特にHEVやEVなどへの応用が可能となり、エネルギー問題、地球環境、さらにはレアアース問題にも貢献できる。また、本開発技術は、モータ単体の改良にて成立するものではなく、特殊な固定子三相交流を供給する必要があり、インバータや制御技術も併用した複合技術である。そのため、本モータ開発にて得られる技術は、様々な分野へ応用可能であり、新しいパワーエレクトロニクス利用モータの開発に寄与する。

研究成果の概要（英文）：The Purpose of this research is development of the new concept motor that has higher efficiency, torque and output power for EV and Hybrid EV. This motor is called a Claw Pole Type Half-Wave Rectified Variable Field Flux Motor (CP-HVFM) using half-wave rectified brushless excitation method. Not only it is simple and robust brushless structure, but also it is possible to self-excite and control the rotor field flux by the stator winding current. In this research, 1) to design of the proposed motor and trial manufacture. 2) to establish high torque control and to verify experimentally. 3) to evaluate using co-simulation.

研究分野：パワーエレクトロニクス，電気機器，電動機制御

キーワード：可変界磁モータ 巻線型同期電動機 ダイオード整流 クローポール型回転子 高効率制御 高トルク制御

1. 研究開始当初の背景

CO₂削減などの環境保護に対して自動車の電動化が進み、省エネルギーという観点から工場やビルにて高効率な AC サーボモータドライブシステムが導入されており、その中心となる可変速・高効率モータとして IPMSM が適用されている。その IPMSM は様々な技術開発によって最高効率は 97% を超えているが、この最高効率は限られたトルクや速度での狭い運転領域、もしくは定格点における効率であり、省エネルギーを実現するには、モータドライブシステムの適用領域全体や運転時間の長い高頻度運転領域での平均効率を高める必要がある。また、自動車用モータには、低速度・高トルク領域から高速度・高出力領域までの、高ピークトルクと幅広い可変速領域を持ち、広い領域にて高効率なドライブシステムの導入が必須であるが、例えば、低速度・高トルク領域で優れた特性を示すためには、高トルクと銅損低減のために高磁束設計となり、永久磁石の固定高磁束が発生する逆起電力が、バッテリーなどの電源電圧の制限下では、高速度・定出力領域の運転拡大の妨げとなり、さらに全運転領域での平均効率はモータ単体の効率ほど高くはない。

この解決策として、可変定数や可変界磁モータが大学や企業から提案されており、電気学会の調査専門委員会での活動報告事例を中心に、省・脱レアアースをキーワードにした書籍やシンポジウムなどで研究動向が公表されている。これらの提案モータは優れた特長を持つが、設計時に指定した 2 点程度の領域への対応、可変界磁に機械的機構が必要、可変界磁用に別電源と巻線が必要など、一長一短である。

研究代表者は、ダイオードで短絡された回転子界磁巻線を持つ簡単な構造の半波整流ブラシなし同期電動機の開発と制御法の研究を行ってきた。このモータの半波整流可変界磁法は、回転子巻線に励磁されるほぼ一定の界磁磁束をゼロから最大まで可変可能で、1 つのインバータ電源を用いた電流ベクトル制御にて駆動し、ブラシやスリップリングは不要で、固定子巻線から回転子界磁磁束の励磁を行う手法である。研究代表者は、H25～H27 の基盤研究(C) [25420262]にて、高速領域での堅牢さを高め、低速・高トルク領域での銅損軽減を目的として、回転子巻線を中央に 1 つだけ配置したクローポール型回転子を採用した、図 1 と 2 に示すクローポール型半波整流可変界磁モータを提案し、動作確認のために図 3 に示す試作機を作成、図 4 中の dq 軸電流を流すことで、半波整流可変界磁法の適用確認を終了し、広範囲高効率制御法の検討および特性評価用システムシミュレータの開発を実施した。

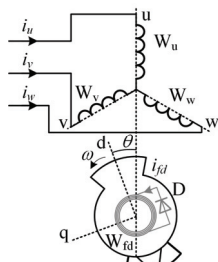


図 1 原理図

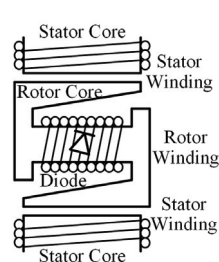


図 2 回転子構造



図 3 試作機の写真

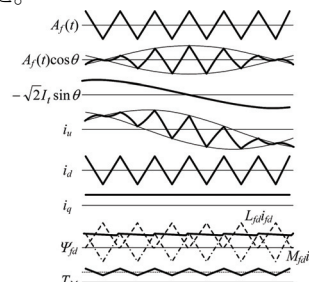


図 4 各種波形

2. 研究の目的

(1) 半波整流可変界磁モータの高トルク化

① 半波整流可変界磁法による最大トルク制御法の確立

半波整流可変界磁法は、固定子巻線に供給する励磁電流により、ダイオードを持つ回転子巻線に励磁されるほぼ一定の界磁磁束をゼロから最大まで連続して可変できる。そこで、特に低・中速度領域における負荷と速度の変化に応じた最大トルク制御法を確立する。

② 付加トルクの併用による高トルク化

集中巻固定子巻線の利用により発生する 2 次空間高調波、もしくは固定子スロット形状による空間高調波にて、ダイオードを持つ回転子巻線に新たな磁束を励磁し、発生する空間高調波トルクの併用を検討する。さらに、回転子と固定子形状を検討して dq 軸インダクタンス比を持たせ、d 軸に供給する励磁電流の三角波にオフセットを持たせることで得られる、リラクタンストルクの併用を検討する。

(2) 半波整流可変界磁モータの高出力化

① 半波整流可変界磁法による高出力制御法の確立

本可変界磁法を用いて、負荷の変化に応じた高速度領域における定出力領域の拡大制御法を検討する。高速度領域では固定子と回転子の回路時定数との影響を考慮したバイアス周波数や変調波形の検討が必要であり、それらを可変できる制御法とドライブシステムを構築する。

② モータ定数の検討による定出力領域の拡大

本モータの極数、スロット数、巻数比など、モータ定数の検討を実施し、特に d 軸インダクタンスを増加させ、定出力範囲 1:4 までの拡大を目指す。また、本検討は、本モータの平均トルクを増加させることにもなるため、(1)-(2)の高トルク化と合わせて試作機を作成する。

(3) 半波整流可変界磁モータの高効率化

① 半波整流可変界磁法による高効率制御法の確立

H25～H27 の基盤研究(C)にて検討した、広範囲の使用領域において損失を最小にする制御ア

ルゴリズムを發展させ、使用用途が要求する高頻度運転領域において最高効率となる制御法を確立する。その高頻度使用領域が多数存在する場合には、平均効率を向上する制御とする。

② 鉄損低減による高効率化

本モータの可変界磁法は回転数の基本周波数より高いバイアス周波数を持つ。そのために、一般のモータに比べ鉄損が増え、また回転子は鉄の塊を利用しており、特に高速度領域においての渦電流損が問題となる。そこで、バイアス周波数や変調波形の再検討を実施する。

③ 自動車用途に特化したモータ設計、制御法検討と燃費シミュレーション

自動車用途においては、低速・高トルク域、低～中トルク域、高速・低トルク域での特性改善が必要となる。本研究成果をこの領域に適用して特性の最適化を実施する。また、自動車用途では乗り心地を重視するため、トルク脈動も重要な特性の一つであり、本モータの励磁手法から発生するトルク脈動の低減法を検討する。さらに、本研究で試作するモータは、大学の研究室での実験という制約上 2kW 程度であるが、本研究の成果を自動車搭載用容量へ拡大して、自動車への導入を模擬し、モード走行での燃費シミュレーションによる検討を実施する。

3. 研究の方法

平成 28 年度の計画

(1) クローポール型半波整流可変界磁モータの再試作

H25-H27 の基盤研究(C)の成果である試作機による実験結果を用いて、高トルク、高出力、高効率化への展開を考慮した、固定子鉄心形状や極数、スロット数、巻線比などのモータ定数について新たな検討を加え、有限要素法ソフトを利用した本モータの再設計を行う。

(2) 特性評価連成シミュレーションによる検証

本モータのような特殊な可変界磁法を持つ特性評価は、有限要素法ソフトが持つ回路連成機能を利用した設計と特性解析では不十分である。そこで、H25～H27 の基盤研究(C)において検討した特性評価連成シミュレーションを利用して、本年度に作成する試作機の評価を実施し、最適な設計・試作方針を決定する。

(3) 最大トルク制御法の確立

本モータの d 軸励磁電流には、回転子界磁磁束の励磁効果を高めるために実効値 I_f を持つ三角波が利用されている。この実効値 I_f を速度と負荷トルクに応じて可変させる最大トルク制御法を確立する。

平成 29 年度の計画

(1) 空間高調波トルク併用型モータの試作

前年度の成果を利用して、本年度には半波整流可変界磁法によるトルクだけではなく、固定子巻線やスロット形状による空間高調波を利用した付加トルクである空間高調波トルクの併用を検討する。特にこの空間高調波トルクは高速回転時に顕著に発生するため、解析において、固定子形状や巻線法、スロット形状などを解析し、併用するための最適形状について検討する。

(2) 定出力領域拡大と高効率制御法の確立

本モータの半波整流可変界磁法による磁束制御は、適切な速度と負荷に応じて界磁磁束を変更することで、定出力領域の拡大が可能となる。そこで、三角波の実効値 I_f を速度と負荷に応じて可変させる定出力拡大制御法を確立すると同時に、鉄損低減の対策を検討し、実効値だけでなくバイアス周波数を速度や負荷に応じて変更する制御手法を開発する。

平成 30 年度の計画

(1) リラクタンストルク併用型モータの試作

本年度は半波整流可変界磁トルクに、リラクタンストルクの併用を検討する。リラクタンストルクは dq 軸インダクタンスの差を利用したトルクであり、本モータの固定子スロット形状とクローポール回転子のポールサイズの変更によりインダクタンス比が変更可能となり、突極もしくは逆突極形状に設計可能である。そこで、dq 軸インダクタンス比を解析パラメータとして、併用するために最適な形状を検討する。

(2) 自動車用途に特化したモータ設計と制御法検討

① 自動車用途指向型モータ設計

自動車用途では、低速・高トルク域、低～中トルク域、高速・低トルク域での特性改善が必要となる。そこで、本研究成果をこの領域に適用して特性の最適化を実施する。

② トルク脈動低減制御法

自動車用途で重要な点に乗り心地があり、高トルク特性は重要であるが、本モータの半波整流可変界磁法が発生するトルク脈動が大きき問題となる。そのため、このトルク脈動を打ち消すためにトルク脈動の逆成分をトルク指令電流に重畳する。

③ 燃費シミュレーションによる評価

以上の研究成果を実際の自動車へ適用しての検証試験は大学の研究室という制約上難しく、大容量実験ベンチの導入も予算面で厳しくなる。従って、本研究の知見を自動車搭載用モータ容量での事例へ拡大し、自動車への導入を模擬し、モード走行での燃費システムシミュレーションによる検討を実施する。

4. 研究成果

平成 28 年度の研究成果概要

(1) クローポール型半波整流可変界磁モータの再試作

平均トルクの向上、トルク脈動の軽減を目標として、固定子鉄心形状、極数、スロット数、巻線比率などのモータ定数について FEM により検討した。特に、dq 軸インダクタンス比を順突極とすることで平均トルクを向上し、d 軸インダクタンスの増加と界磁巻線との結合係数を増加させ、トルク脈動の軽減を実現した。さらに、固定子巻線と回転子巻線の巻線数比を検討することで、半波整流可変界磁法にて回転子巻線に誘導される界磁磁束の最大値を拡大し、可変界磁特性の制御範囲を広げた。以上の成果を用いて図のような新型モータを試作した。

(2) 特性評価連成シミュレーションによる検証

FEM によるモータの基本特性だけでなく、本モータの特殊な半波整流可変界磁法を評価するために、H25～H27 の基盤研究(C)において検討した特性評価連成シミュレーションを利用して、上記の設計結果を回路シミュレータに取り込み、インバータモデルと半波整流可変界磁プログラムを利用して、半波整流可変界磁法を考慮した基本特性評価を実施し、上記設計と連携して最適な設計モデルを導いた。

(3) 最大トルク制御法の検証

半波整流可変界磁法に利用されている、d 軸励磁電流成分の三角波の実効値を变化することで、回転子に自励される界磁磁束をゼロから最大値まで可変可能であるが、この実効値を速度と負荷トルクに応じて可変させる最大トルク制御法の検討を実施した。旧モータを利用した検証ではあるが、励磁電流実効値を可変にした特性実験結果より、トルクの向上を確認すると共に、電機子電流を最小にする、もしくは効率を最大にする制御法の検討も実施した。

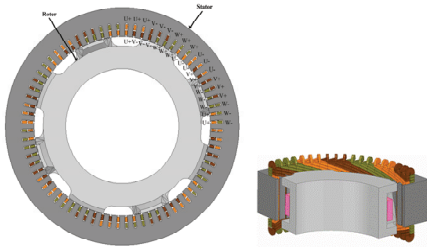


図 5 H28 年度試作モータモデル

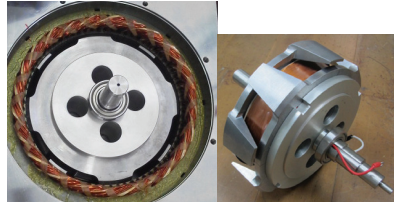


図 6 H28 年度試作モータ写真

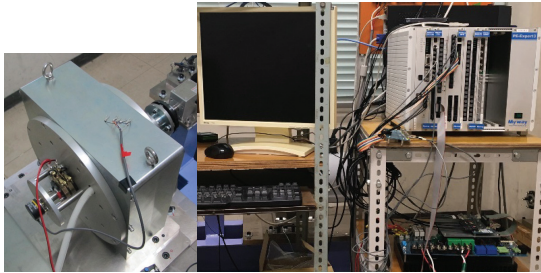


図 7 H28 年度 試作実験モータと駆動システム

平成 29 年度の研究成果概要

(1) 最大トルク制御法の検証

初年次に実施する予定であった本検証を図 5～7 に示す新型モータに対して実施し、励磁電流を変更し回転子に発生する界磁磁束を可変にすることで、特定の速度と負荷において高トルクを得る励磁電流制御手法の指針を得た。

(2) 空間高調波トルク併用型モータの試作

初年次の試作モータの特性試験の結果より、本モータの特長である半波整流可変界磁法によるトルク以外に、固定子の形状による空間高調波によるトルクと思われる現象を実験により確認した。特に、励磁電流を小さくした際に、ダイオードのオン・オフのタイミングに変化が現れ、トルク向上への関与は未確認であるが、界磁磁束を保つために流れる界磁電流の増加を確認している。その成果を用いて、空間高調波トルクを併用するモータの最適設計を実施したが、鉄塊で構成されるクローポール型回転子の電磁界解析では、解析時間が非常に大きくなり、パラメトリックに最適形状を検討することが不可能であった。そこで、空間高調波トルクの併用を確認することを目的として、積層鋼板を用いた突極型の回転子を持つ新たな半波整流可変界磁モータを設計試作した。

(3) 定出力領域の拡大と高効率制御法の確立

初年次の試作モータを用いて、様々な速度と負荷状態において、励磁電流の三角波の実効値を变化させて、効率を低下させることなく定出力領域を拡大する制御法を検討した。その結果、広い速度範囲で高効率点を維持可能な励磁電流実効値とトルク電流実効値の組み合わせがあることを実証した。

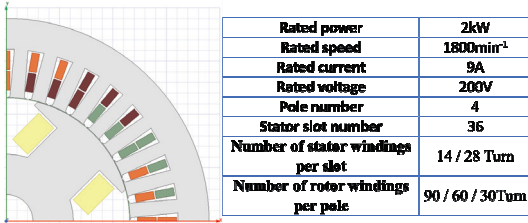


図 8 H29 年度 突極型回転子の解析モデル



図 9 H29 年度 突極型試作モータの写真

平成 30 年度の研究成果概要

(1) 積層鉄心突極型回転子モータの特性試験

昨年度に試作した突極型回転子モータに対して、半波整流界磁トルクだけでなく、空間高調波によるトルクやリラクタンストルクを付加した、トルク向上の検討を実施した。この研究では、半波整流可変界磁トルクにリラクタンストルクを加えたトルク式を用いて、後継トルクを最大にする励磁電流実効値を、速度 PI の出力であるトルク電流指令値により定める制御アルゴリズムを確立し、実機による検証を実施した。その結果、トルクの向上だけではなく、出力範囲の高速領域への拡大、更には効率の向上も確認した。

(2) リラクタンストルク併用型モータの試作

上記 1 の結果を利用して、付加トルクとしてリラクタンストルクを大きく併用可能とするモータ設計を実施した。dq 軸インダクタンス比を設計パラメータとして、合計トルクを向上、脈動トルクを減少させる最適な形状を検討し、新たなモータを設計・試作した。この設計により回転子突極形状について、固定子ピッチと回転子磁極幅の関連性やトルク向上につながる設計指針を得た。

(3) 自動車用途に特化したモータ設計と制御法検討

上記 1 にて確立した制御アルゴリズムは、トルク向上だけでなく、出力範囲の高速領域への拡大、さらには効率の向上も確認されたが、その分析が十分ではなく、自動車用途で必要となる各種運転領域における最大トルク、定出力領域拡大、高効率化などを実現するためには、特性評価連成シミュレーションによる検討が必要であり、今後の課題としたい。

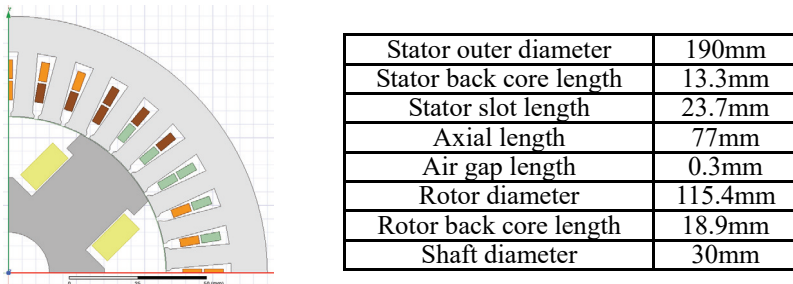


図 10 H30 年度解析モデルと設計パラメータ

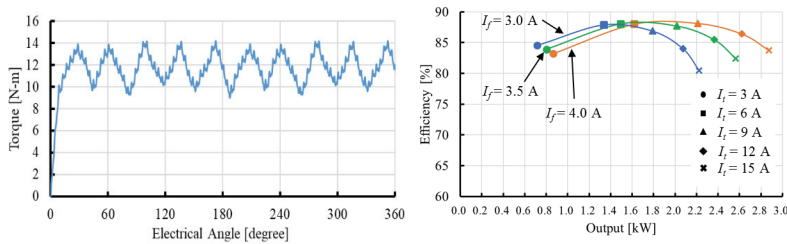


図 11 トルク解析結果

図 12 効率解析特性

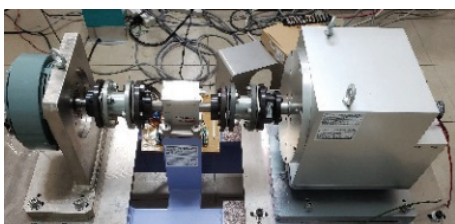


図 13 H30 年度試作モータ

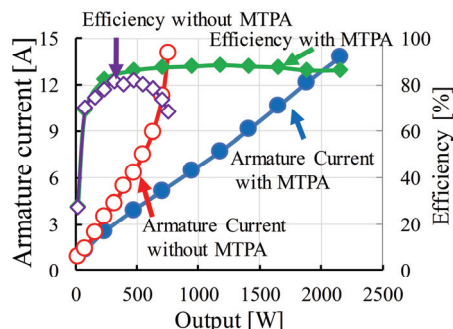


図 14 最大トルク制御実験結果

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 12 件)

- 1) Koki Hirata, Takashi Abe, Tsuyoshi Higuchi, Evaluation of Turns Ratio of Stator and Rotor Windings for Half-Wave Rectified Variable Field Flux Motor, Proc. of The 21th International Conference on Electrical Machines and Systems, (2018)
- 2) Hideaki Fukumoto, Takashi Abe, Tsuyoshi Higuchi, Influence of Excitation Current on Characteristics in a Claw Pole Type Half-wave Rectified Variable Field Flux Motor with Iron Powder Core, Proc. of The 21th International Conference on Electrical Machines and Systems, (2018)
- 3) 平田晃基, 阿部貴志, 樋口剛, 圧粉磁心を用いたクローポール型半波整流可変界磁モータの電磁界解析による効率特性評価, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, (2018)
- 4) 鳥越圭介, 阿部貴志, 樋口剛, 半波整流可変界磁モータの固定子と回転子巻線比による自己励磁特性への影響について, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, (2018)
- 5) Yuya Eguchi, Yuta Nakashima, Takashi Abe, Tsuyoshi Higuchi : A Design Method with Iron Powder Core for a Claw Pole Type Half-wave Rectified Variable Field Flux Motor, Proc. of The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, (2017)
- 6) Yuta Nakashima, Yuya Eguchi, Takashi Abe, Tsuyoshi Higuchi : Fundamental Output Characteristics a Claw Pole Type Half-wave Rectified Variable Field Flux Motor, Proc. of The 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, (2017)
- 7) 江口裕也, 阿部貴志, 樋口剛, 古賀誉大, 金川欣次, 五十嵐和則, 圧粉磁心を用いたクローポール型半波整流可変界磁モータの解析手法について, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, (2017)
- 8) 福本秀晃, 阿部貴志, 樋口剛, 圧粉磁心を用いたクローポール型半波整流可変界磁モータのモータ定数評価, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, (2017)
- 9) Yuichi Okada, Takashi Abe, Tsuyoshi Higuchi : The evaluation of the positioning accuracy in the position control method using Measured Torque Curves for Switched Reluctance Motor, Proc. of The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, (2016)
- 10) Yuta Nakashima, Takashi Abe, Tsuyoshi Higuchi : Experimental Investigations on Variable Field Flux Control of a Claw Pole Type Half-wave Rectified Variable Field Flux Motor, Proc. of The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, (2016)
- 11) 江口裕也, 中島祐太, 阿部貴志, 樋口剛, クローポール型半波整流可変界磁モータの励磁変調波周波数が特性に与える影響, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, (2016.8)
- 12) 中島祐太, 江口裕也, 阿部貴志, 樋口剛, クローポール型半波整流可変界磁モータの駆動システムについて, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, (2016.8)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 樋口 剛

ローマ字氏名 : HIGUTCHI, Tsuyoshi

所属研究機関名 : 長崎大学

部局名 : 工学研究科

職名 : 教授

研究者番号 (8 桁) : 50156577

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 犬塚 勝利

ローマ字氏名 : INUZUKA, Katsutoshi

研究協力者氏名 : 重松 浩一

ローマ字氏名 : SHIGEMATSU, Koichi

※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。