

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560346

研究課題名(和文) 大幅な省エネルギーを実現する機器定数の可変が可能な新規永久磁石モータ

研究課題名(英文) Nobel Permanent Magnet Motor Capabe of Changing Machine Constants for Energy Saving

研究代表者

堺 和人 (Sakai, Kazuto)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：40377099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究は消費電力量の大幅な低減を目指し、低速から高速までの広範囲で高効率で運転できる次世代モータを創出し、基本技術を得ることを目的とする。8極と4極に極数変換できる永久磁石モータを創出し、電磁界解析結果から本モータにおいて極数変換によって磁気的な損失である鉄損は約50%低減でき、可変速範囲は従来の2倍以上に拡大できることが明らかになった。

さらに各コイルに各インバータ回路を一对一に接続して直接的に個別に制御できるエレクトロニクスモータを創出し、この原理モデルとして12個の各コイルを持つモータと12個の各インバータ回路を試作して、実験よりモータは駆動中にも極数変換が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We developed a technique in which the number of poles in a permanent magnet (PM) motor is varied to reduce energy consumption. We explain the principle involved and the basic characteristics of the pole-changing motor using a magnetic field analysis, which consists of a PM magnetized by a pulse d-axis current in the armature winding. Our results show that the proposed motor reduces iron loss by about 50 %, has double the speed range, and has high efficiency over a wide speed range. Furthermore, we manufactured a principle model of the electronics motor capable of pole changing in order to verify a function of pole changing. The electronics motor has each armature coil that connects each inverter circuit in order to control the current of the coil. Our results of the experiment confirmed that the motor can change poles during rotation. Therefore, the proposed motor can be utilized in a variable-speed drive system for high performance and efficiency.

研究分野：電気工学

キーワード：電気機器 パワーエレクトロニクス モータ 省エネルギー 高効率 可変速 永久磁石 極数変換

1. 研究開始当初の背景

地球環境とエネルギー問題、現在の電力不足問題の解決において、モータは国内全電力量の50%を消費しており、モータの省エネルギー化は電力不足に大きく貢献できる。さらに再生可能エネルギーを有効利用できる電気自動車ではモータドライブの消費電力量が実用化で重要となる。国内消費電力量の50%を占めるモータの省エネルギー化は電力不足やエネルギー有効利用で効果が大である。現在、省エネのため家電製品や電気自動車では高効率の永久磁石モータが適用されている。しかし、モータは定格点のみ高効率であり、定格点から離れた点で運転すると効率が悪化する。原因は軽負荷時や誘導電圧が高くなる高速域でも永久磁石の強い磁力が一定なためである。大幅な低消費電力量を実現するには、低速回転域では高トルクのため高磁力、高速回転域では電圧抑制のため低磁力に変変できる技術、低速と高速でモータの極数やインダクタンスを可変できる技術が望まれる。この技術は永久磁石の磁力が固定という概念や同期機の極数一定を覆すもので永久磁石が電磁石のように自由に磁力を可変し、極数などの機器定数も可変することになる。また、風力発電では、永久磁石の磁力を可変できれば微風状態や強風の高速回転状態でも運転でき、発電量を増加できる。そこで、永久磁石の鎖交磁束や極数等の可変を可能にする研究が重要な鍵となる。

2. 研究の目的

本研究は消費電力量の大幅な低減を目指し、低速から高速までの広範囲で高効率で運転できる次世代モータを創出し、基本技術を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

研究の方法は下記の3つとなる。

(1) 磁力の可変と極数の変換を可能とするモータの電気・磁気的基本構成を創出する。また、電力変換回路とコイルを一体化することも検討する。ここでは電磁界解析を駆使して仮想モデルでの物理的挙動と磁気的特性検討と駆動回路も含めた検討を行う。

(2) 実験による検証と基本特性の把握を行うため、創出モータの原理モデルの設計と試作を行う。また、検証試験装置と駆動回路の設計と試作を行う。

(3) 試作した原理モデルを検証試験装置で実験を行う。原理モデルの極数変換の基本動作原理の確認とモータ基本特性を把握する。最後に本研究のまとめと全体総括を行う。

4. 研究成果

成果の概要：低速回転域では多極モータに変換でき、高速回転域では少極モータに変換できる機能を持ったこれまで不可能であつ

た新規の極数変換モータとして数種の方式を創出した。さらに個別の各コイルに個別インバータ回路を一对一に接続して直接的に制御するエレクトロニクスモータを創出した。つぎに極数変換のエレクトロニクスモータの原理モデルとして、モータと12個のインバータ回路を試作して、インバータを制御回路でコントロールして極数変換の実験を行った。実験よりモータの駆動中にも極数変換が可能であることを実証した。下記に主要な成果を述べる。

(1) 極数変換永久磁石モータの創出

主には図1に示す様な8極と4極で極数変換が可能な永久磁石モータの創出に関する研究を行い、さらに3倍の極数比の6極と2極の永久磁石モータ、ハイブリッド式極数変換モータも創出し、電磁界解析を駆使し、いずれのタイプも極数変換が可能であることを明らかにした。同時に極数変換の比率が2倍だけでなく、3倍にできること、ハイブリッド式では1個の磁石だけを磁化して極性反転すれば、極数を12極から4極に変換でき、磁氣的損失は70%も低減し、直流電流による磁化ができるので、磁極位置検出が不要になって容易な制御にも対応できることが得られた。極数変換の主な特性に関しては以下に述べる。図2に示す様に磁氣的な損失である鉄損は無負荷、負荷状態でもいずれも約50%低減できる。図3に示す様に可変速範囲も極数切替えで2倍以上の広範囲に拡大できる。同時に図4に示す様に多極(8極)モードでは高効率の運転範囲は低速域に分布し、少極(4極)モードでは高効率運転範囲は高速域に分布していることが確認された。したがって、極数変換は低速域から高速域までの広範囲に高効率の運転ができることが明らかになった。

また、固定子の巻線切替えは機械式スイッ

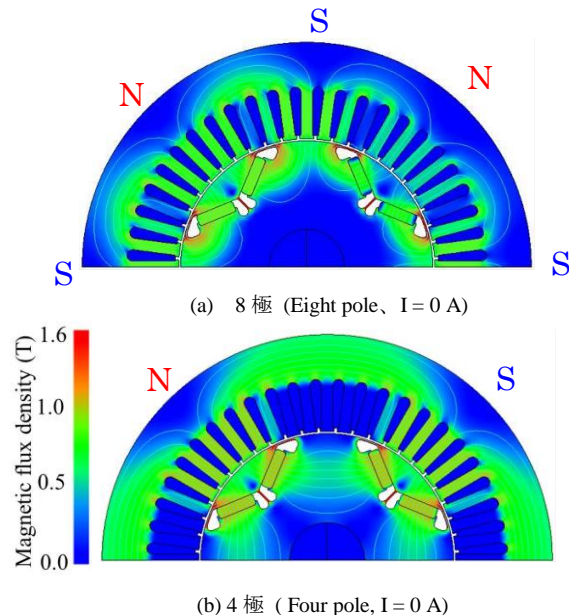


図1 8極/4極に極数変換時の磁束密度分布

子の電磁接触器か、パワー素子のスイッチングによる電気回路で行うことになる。そこで、固定子に複数の回転磁界を発生できる固定子構成の巻線切替え不要の極数変換モータを考案し、このモータ構成にすると、巻線切替え無しに8極と4極に切替えができることを明らかにした。このとき磁気損失は30%~60%低減できた。さらに巻線切替え不要で極数変換が可能になるコイル配置と極数を理論的に明らかにした。

(2) 可変磁力の極数変換永久磁石モータ  
(1) の極数変換と可変磁力の技術を組合

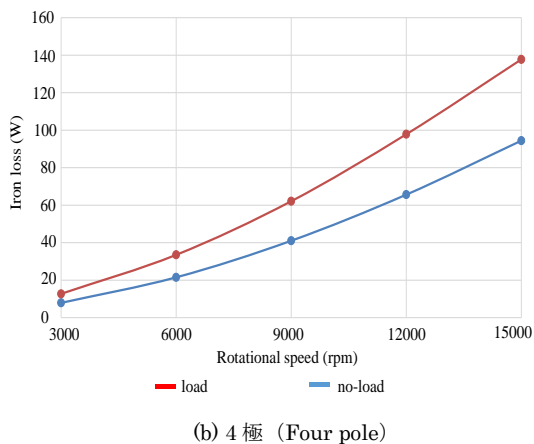
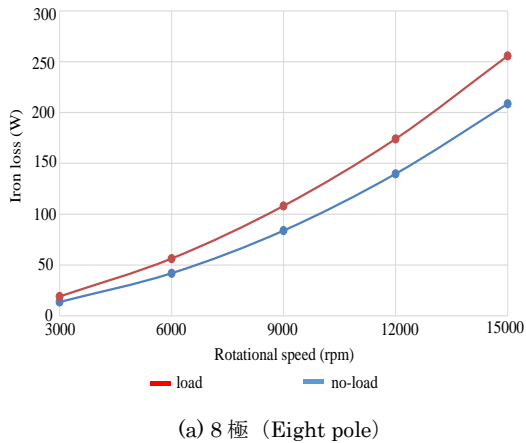


図2 極数変換時の鉄損(磁氣的損失)低減

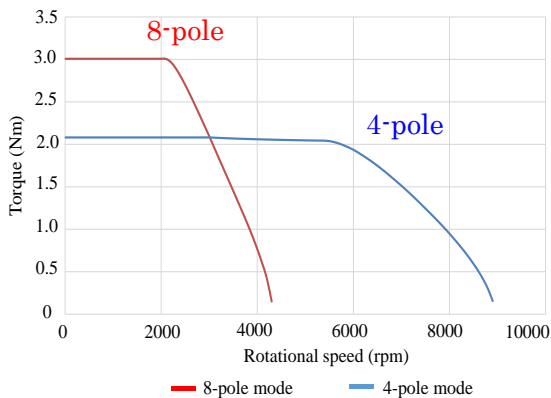
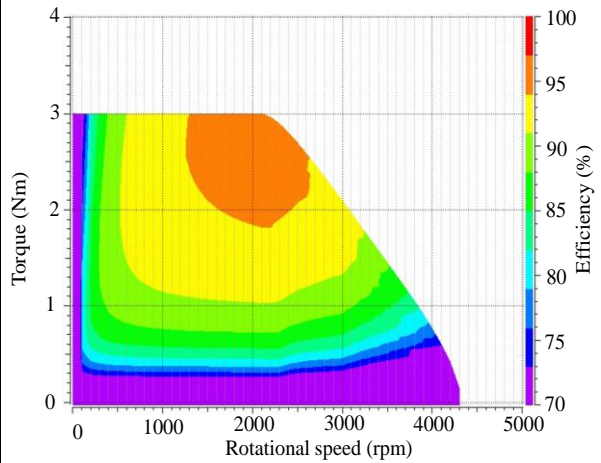
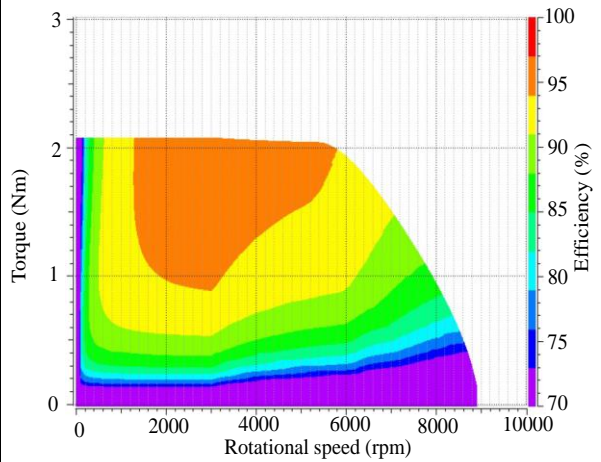


図3 可変速範囲とトルク  
(保磁力 Coercive force : 150kA/m)



(a) 8 極 (Eight-pole)



(b) 4 極 (Four-pole)

図4 可変速運転における効率分布

せて発展させ、可変速運転において高効率の運転範囲が極数変換のみよりさらに向上することが明らかになった。

(3) 極数変換エレクトロニクスモータの試作と実験

電力変換回路のインバータ回路とモータの各コイルが一体化して各コイル電流を制御することによって極数変換も可能になるエレクトロニクスモータの基本構成を図5に示す。実現の可能性を検証するため12個のコイルと12個のインバータ回路を各個別に直接に接続し、制御回路で12個のインバータの電圧を制御する原理モデルを設計、試作した。図6と図7に試作したインバータ回路と原理モータモデルを示す。原理モデルによって、4極と8極に変換できることを実証した。さらに回転中にも極数の切替えが可能であることを確認できた。極数変換によって磁氣的な損失は約50%も低減できることが検証された。モータと回路を一体化するだけでなく、各コイルの電流を直接的に制御すれば極数変換だけでなく、革新的な機能を持つ新規モータや発電機システムを創出することが期待でき、本研究がこの可能性を実証し、

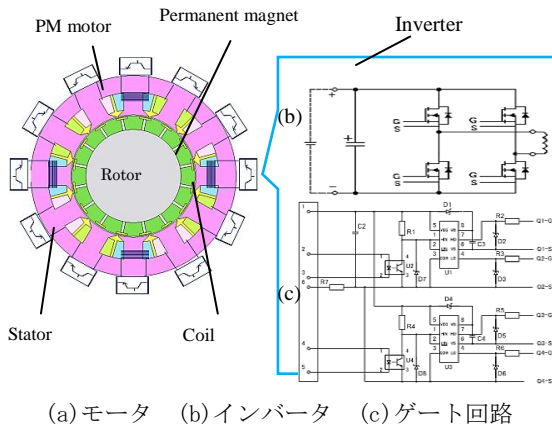


図5 極数変換エレクトロニクスモータ

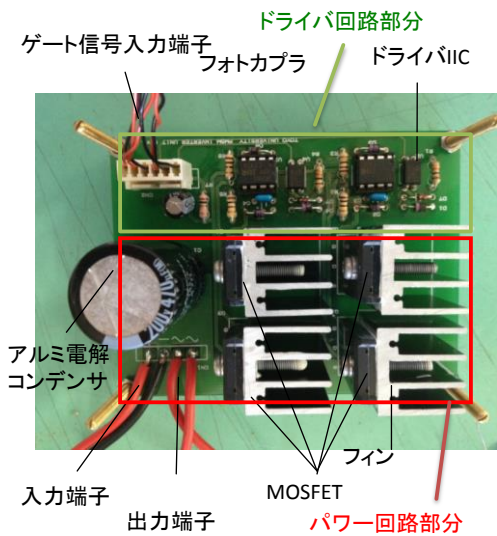


図6 試作インバータ回路

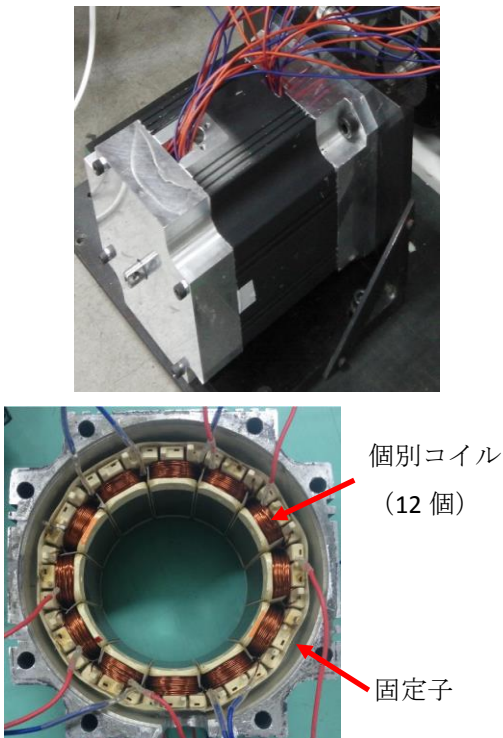


図7 試作原理検証モータ

その研究開発のベースになり得る。

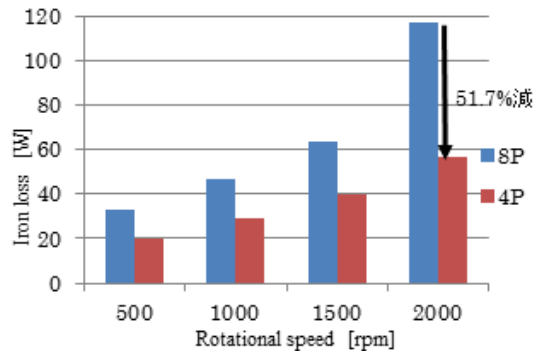


図8 8極と4極における駆動時の鉄損

(4) 順突極・逆突極変換永久磁石モータ  
 モータや発電機は順突極、逆突極性、非突極性のいずれかになり、各固有の特徴を有する。しかし、逆に突極性は機器の性能を制限することになる。本研究は効率や可変速特性を突極性が大きく影響することに着目して、両方の突極性を変換できれば、従来特性を超える優れた特性が期待できる。そこで、順突極・逆突極に変換できる永久磁石モータを創出し、可変速範囲の拡大、高効率の運転範囲の拡大が得られることが解析によって確認された。モータの原理は、電流が作る磁界によって一部の磁石の極性を反転させることによってモータの突極性を順突極と逆突極に変換できる構成とする。

(5) 銅損低減及び風力発電用発電機  
 巻線抵抗による銅損を低減するためコイルエンドのない Transverse-Flux-Machine (TFM) を検討した。TFM はさらに3個のみで単純形状の円環状コイルなので高品質・信頼性が向上し、また、多極化が容易なので風力発電用発電機に適用できるメリットがある。TFM に可変磁力技術を適用するが、まずは出力向上と出力脈動の低減を図った。3次元的な磁気の流れ(磁束)の新構成によって、出力向上は従来機の約1.6倍、コアの位相ずらし配置方法によってトルク脈動率は90%も低減でき、性能向上が図れた。尚、一部の永久磁石の極を反転させれば可変磁力が可能になる。

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 2件)
- ① Junya. Tanaka, Kazuto Sakai, "Enhanced Transverse-Flux Motor with Torus coils", IEEJ Journal of Industry Applications (電気学会英文論文誌), 査読有, Vol. 4, No. 4, DOI10.1541/ieejjia.4.1, 2015年7月(掲載決定)
  - ② K. Sakai and N. Yuzawa, "Permanent Magnet Motors Capable of Pole Changing

- and Three-Torque-Production Mode using Magnetization”, IEEJ Journal of Industry Applications (電気学会英語論文誌), 査読有, Vol. 2. No. 6, pp. 269-275, DOI10.1541/ieejia.4.1, 2013年6月 [学会発表] (計 42件)
- ① Kazuto Sakai, Kouki Matsuda and Nariaki Yuzawa, “Permanent Magnet Motor Capable of Pole-Changing without Changing the Connection of the Armature Windings for High Efficiency”, in Proc. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC2015), 2015年5月11日, Coeur d’Alene (アメリカ)
  - ② 田中淳也, 堺和人:「Transverse Flux Motor の低コギングトルク化」平成27年電気学会全国大会, 5-002, 2015年3月24日, 東京都市大学 (東京都・世田谷区)
  - ③ 北野真弘, 堺和人:「分布多層不等巻数巻線による永久磁石機の電圧とトルクリプルの低減」平成27年電気学会全国大会, 5-017, 2015年3月24日, 東京都市大学 (東京都・世田谷区)
  - ④ 松田康暉, 堺和人:「順突極と逆突極に変換可能な永久磁石モータ」平成27年電気学会全国大会, 5-018, 2015年3月24日, 東京都市大学 (東京都・世田谷区)
  - ⑤ 岡安正憲, 小川哲史, 堺和人:「エレクトロニクスモータドライブシステムの試作と実験」平成27年電気学会全国大会, 4-048, 2015年3月24日, 東京都市大学 (東京都・世田谷区)
  - ⑥ 小川哲史, 堺和人:「可変相数・可変極数のコイル直接制御モータに関する基礎研究」第18回電気学会東京支部埼玉支所研究発表会, 0-1809, 2015年3月5日, 東京都市大学 (埼玉県・さいたま市)
  - ⑦ K. Sakai and N. Yuzawa, “Permanent Magnet Motor with Pole Changing and Variable Magnetic Force for Variable Speed”, in Proc. 21th International Conference on Electrical Machines (ICEM), GD-003832, 2014年9月2日, ベルリン (ドイツ)
  - ⑧ K. Sakai and N. Yuzawa, “Effects of Coercive Force and Characteristics of a Pole-Changing Permanent Magnet Motor for Variable-Speed Drive”, in Proc. 2014 16th European Conf. on Power Electronics and Applications, paper 0060, 2014年8月26日, ラッペンランタ (フィンランド)
  - ⑨ 小川哲史, 堺和人:「可変相数・可変極数のコイル直接制御モータに関する基礎研究」平成26年電気学会産業応用部門大会 Y-89, 2014年8月26日, 東京電機大学 (東京都・足立区)
  - ⑩ 北野真弘, 堺和人:「巻線切替不要の極数変換電機子巻線の基礎研究」平成26年電気学会産業応用部門大会 3-6, 2014年8月26日, 東京電機大学 (東京都・足立区)
  - ⑪ 松田康暉, 堺和人:「逆突極と正突極可変磁力モータの特性検討」平成26年電気学会産業応用部門大会 3-7, 2014年8月26日, 東京電機大学 (東京都・足立区)
  - ⑫ 田中淳也, 堺和人:「Transverse flux machine の低トルク脈動化」平成26年電気学会産業応用部門大会 3-8, 2014年8月26日, 東京電機大学 (東京都・足立区)
  - ⑬ 堺和人:「Transverse flux motor の基本と高性能化」モータ技術シンポジウム, pp. B6-3-1 - B6-3-24, 2014年7月25日, 東京ビッグサイト (東京都・江東区)
  - ⑭ J. Tanaka and K. Sakai, “Enhanced Transverse-Flux Motor with Torus Coils” The 2014 International Power Electronics Conference - ECCE Asia-, pp. 240-245, 2014年5月19日, 広島国際会議場 (広島県・広島市)
  - ⑮ K. Sakai, Y. Okamura, “Characteristics of a Permanent Magnet Motor Capable of Changing Pole by a Factor Three,” in Proc. International Conference on Power Electronics, Machines and Drives: PEMD2014, Paper 0474, 2014年4月8日, マンチェスター (イギリス)
  - ⑯ 堺和人, 西田隆太郎:「最大トルク位相シフトを可能にするPMモータ」平成26年電気学会全国大会, 5-026, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ⑰ 田中淳也, 堺和人:「Transverse Flux Motor の高トルク化」平成26年電気学会全国大会, 5-025, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ⑱ 北野真弘, 堺和人:「巻線切替不要の極数変換電機子巻線の検討」平成26年電気学会全国大会, 5-024, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ⑲ 松田康暉, 堺和人:「逆突極・順突極PMモータの特性検討」平成26年電気学会全国大会, 5-009, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ⑳ 岡村佑二, 堺和人:「3倍比極数変換永久磁石モータの変換・可変速特性」平成26年電気学会全国大会, 5-022, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ㉑ 湯澤成彰, 堺和人:「巻線切替なし極数変換モータの基本特性」平成26年電気学会全国大会, 5-006, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ㉒ 小川哲史, 堺和人:「相数・極数可変のエレクトロニクスモータドライブシステムの基礎研究」平成26年電気学会全国大会, 4-117, 2014年3月18日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
  - ㉓ N. Yuzawa and K. Sakai, “A Permanent Magnet Motor Capable of Pole Changing for Variable Speed Drive,” in Proc. International Conference on Electric

- Machines and Systems: ICEMS2013 , PMDC-1851, pp.1-6 , 2013年10月27日, 釜山 (韓国)
- 24 Y. Okamura and K. Sakai, "Permanent Magnet Motor Capable of Changing the Number of Poles by a Factor of Three," in Proc. International Conference on Electric Machines and Systems: ICEMS2013 , PMDC-1799, pp.1-5, 2013年10月27日, 釜山 (韓国)
- 25 K. Sakai and N. Yuzawa, "Permanent Magnet Motor Capable of Pole Changing for High Efficiency", in Proc. 2013 IEEE ECCE, pp. 5064-5071, 2013年9月17日, デンバー (アメリカ)
- 26 K. Sakai and N. Yuzawa, "Effects of Pole-Changing in a Permanent Magnet Motor", in Proc. 2013 15th European Conf. on Power Electronics and Applications, paper 0036, 2013年9月3日, リール (フランス)
- 27 小川哲史, 堺和人:「エレクトロニクスモータドライブシステムに関する研究」平成25年電気学会産業応用部門大会 Y-80, 2013年8月28日、山口大学 (山口県・山口市)
- 28 田中淳也, 堺和人:「コイルエンドレスの省レアアーストランスバースフラックスモータ」平成25年電気学会産業応用部門大会 3-3, 2013年8月28日、山口大学 (山口県・山口市)
- 29 岡村佑二, 堺和人:「省エネの3倍比極数変換モータの基本特性」平成25年電気学会産業応用部門大会 3-30, 2013年8月28日、山口大学 (山口県・山口市)
- 30 湯澤成彰, 堺和人:「極数変換の永久磁石リラクタン্সモータの基本特性」平成25年電気学会産業応用部門大会 3-31, 2013年8月28日、山口大学 (山口県・山口市)
- 31 堺和人:「可変磁石モータ」モータ技術シンポジウム, pp.B4-2-1 - B4-2-21, 2013年7月18日、東京ビッグサイト (東京都・江東区)
- 32 K. Sakai, N. Yuzawa, "Realization High Efficiency using Pole-Changing Hybrid Permanent Magnet Motors" in Proc. IEEE, International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC2013), TS11.5, pp. 489-494, 2013年5月13日, シカゴ (アメリカ)
- 33 湯澤成彰, 堺和人:「ハイブリッド式可変機器定数 PM モータの原理と基本特性」平成25年電気学会全国大会 , 5-006, pp.10-11 , 2013年3月20日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- 34 新妻孝則, 堺和人, 大山俊行:「機器定数変換エレクトロニクスモータドライブ」平成25年電気学会全国大会 , 5-007, pp.12-13 , 2013年3月20日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- 35 堺和人, 湯澤成彰:「巻線切り替え無し極数変換永久磁石モータの基本特性」平成25年電気学会全国大会 , 5-008, pp.14-15 , 2013年3月20日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- 36 中里圭佑, 堺和人, 湯澤成彰:「極数変換永久磁石リラクタン্সモータの基本特性」平成25年電気学会全国大会 , 5-009, pp.16-17 , 2013年3月20日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- 37 岡村佑二, 堺和人:「省エネの3倍比極数変換永久磁石モータの原理と基本特性」平成25年電気学会全国大会 , 5-010, pp.18-19 , 2013年3月20日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- 38 T. Niizuma and K. Sakai, " Electronic Motors Capable of Pole-Changing and Variable Machine Constants " in Proc. International Conference on Electric Machines and Systems (ICEMS2012), DS3G1-7, pp.1-4, 2012年10月22日, 北海道立道民活動センター (北海道・札幌市)
- 39 H. Yokose and K. Sakai, " Spiral Flux Motor with Torus Coils " in Proc. International Conference on Electric Machines and Systems (ICEMS2012), DS3G1-8, pp.1-4, 2012年10月22日, 北海道立道民活動センター (北海道・札幌市)
- 40 K. Sakai and H. Hashimoto, "Permanent Magnet Motors to Change Poles and Machine Constants " in Proc. 20th International Conference on Electric Machines (ICEM2012) , FF-002178, pp.433-438 , 2012年9月3日, マルセイユ (フランス)
- 41 湯澤成彰, 堺和人:「ハイブリッド式可変機器定数モータの基礎研究」平成24年電気学会産業応用部門大会 Y-85, pp.Y-85 , 2012年8月20日、千葉工業大学 (千葉県・習志野市)
- 42 岡村佑二, 堺和人:「省エネの3倍比極数変換モータに関する基礎研究」平成24年電気学会産業応用部門大会 Y-86, pp.Y-86 , 2012年8月20日、千葉工業大学 (千葉県・習志野市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堺和人 (SAKAI, Kazuto)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号: 40377099