

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04452

研究課題名（和文）電気飛行機を実現する世界最高の出力密度の磁界共振結合モータ・発電機

研究課題名（英文）Machine Based on Magnetic Resonance Coupling with the World's Highest Power Density for Realization of Electrical Aircraft

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：垂直離陸の電気飛行機は人と物の空間移動を可能にし、旅客機の電動化はカーボンニュートラルに貢献する。本研究は電気飛行機の実現のため従来の10倍の出力密度（重量当たりの出力）のモータを創出する。新技術は磁界共振結合と誘導モータの技術を融合したものである。モータは空芯でキャパシタンスを接続した3相巻線を持つ固定子と回転子から構成される。固定子は駆動周波数、回転子はすべり周波数で同時に磁気結合して共振し、無鉄心で高出力が得られる。さらに漏れ磁束抑制リングによって大幅に出力が向上した。試設計した本モータでは、出力513 kW、出力密度29.1 kW/kgが得られ、目標の従来の10倍を超えることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境問題とエネルギー問題のため航空機の電動化が開始され、イノベーションでは人と物の3次元移動を可能にする垂直離陸の電気飛行機が開発されている。実現には電気自動車用モータの5～10倍の出力密度のモータが必須である。本研究のモータは10倍以上の出力密度を持つことが確認されており、本成果は飛行機の電動化や3次元移動体の実用化に大きく貢献できる。学術では省エネルギーが重要になっており、省エネルギーをもたらす可変速モータ技術を進歩させる必要がある。本研究は可変速モータの高出力密度と高効率化の考え方、設計と解析技術を示して有効性を明らかにしており、電気機器とパワーエレクトロニクスの分野の発展に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Research on high power-density motors has been conducted to realize electric aircraft and eVTOL (electric vertical take-off and landing aircraft). We have proposed a magnetic resonance coupling machine (MRCM) based on an induction machine and magnetic resonance coupling. The MRCM is suitable for the realization of electric aircraft because it can produce power without an iron core. The MRCM can potentially yield high power and torque, but its practical performance is limited by flux leakage into the external space. Here, leakage flux is prevented via a magnetic ring installed in the external space of the windings. Our results confirmed that the MRCM can produce a power per weight of 29 kW/kg. It indicates that the MRCM is capable of operating with a high power-density more than ten times that of a conventional motor for electric vehicle.

研究分野：電気機器、パワーエレクトロニクス

キーワード：モータ 発電機 高出力 軽量 磁界共振 コアレス 電気飛行機 電気自動車

1. 研究開始当初の背景

欧米では、電動化技術を柱とした新規開拓として 3 次元空間移動と航空機の電動化の研究が開始され、これは破壊的イノベーションになる。現状の 2 次元平面移動から 3 次元空間移動に変わるので、今までに無い機能や効果が期待できる。ドローンによる運搬だけでなく、物や人の空間配置・移動、空飛ぶロボットや自動車も含まれる。電動化技術はこれらの革新的移動システムを実現するための重要な技術である。地球環境問題の面では航空機の CO₂ 削減も大きな課題である。航空機エンジンから電気とのハイブリッド化や完全電動化は効率を向上し、大幅な燃費向上をもたらし、CO₂ 削減に大きく貢献できるため世界的に研究が加速している。これらを実現するには、モータ重量当たりの出力(出力密度)が現状の電気自動車用モータの 10 倍以上の高出力密度のモータが要求され、従来技術の延長上では不可能な数値である。電気自動車用モータの出力密度の 1.5~2 kW/kg に対して電動 VTOL(垂直離着陸)機やビジネス機のモータの出力密度は 5 kW/kg、中型旅客機では 10 kW/kg、大型旅客機では 20 kW/kg が目標値である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の 10 倍以上の出力密度を可能にする超軽量・高出力のモータ・発電機を創出することである。

3. 研究の方法

モータ・発電機の重量当たりの出力(出力密度)を従来の 10 倍以上に高めるためには革新的技術が必要である。革新的技術は、軽量化のため重い鉄心を無くすこと、同時に前記の無鉄心によって出力が大幅に低下することを解決するためにワイヤレス給電の原理である磁界共振結合を適用し、多相交流の誘導モータとして動作するように考え出したものである。また、無鉄心は軽量化のみでなく、磁氣的損失(鉄損)をゼロにして高効率にする大きな長所がある。図 1 に革新技術を適用した新原理の磁界共振結合モータ・発電機の基本構成を示す。固定子と回転子は(エアギャップワインディング(空芯)の 3 相交流巻線から成り、固定子と回転子の各相には共振状態にするためのキャパシタが直列接続される。固定子は駆動周波数、回転子はすべり周波数の時に固定子と回転子が同時に磁気結合して共振することで、空芯の構成による多量の漏れ磁束が生じて固定子から回転子に電気エネルギーが電送されて出力を発生できる。研究では、磁界解析を駆使して新原理のモータ・発電機の電磁氣的挙動を把握し、電気回路とパワーエレクトロニクスの面からも検討を加えて、静特性と動特性の基本特性を把握する。多発分散推進式電気飛行機の実機レベルの 200 kW 級モータの設計を行い、磁界解析とシミュレーションによって 10 倍の出力密度を実証する。また、10 倍の出力密度を可能にする技術の理論、解析手法、設計技術、試験及び分析・評価手法も確立する。

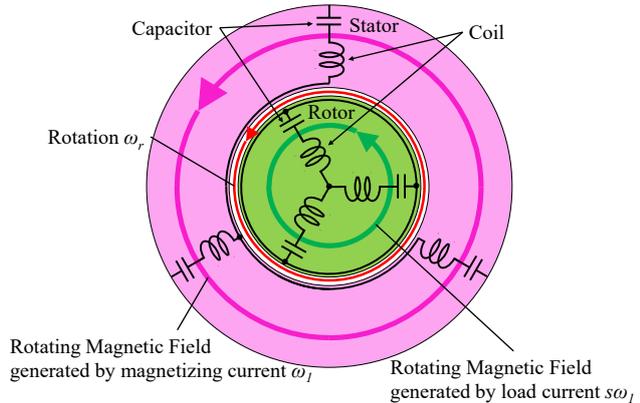


Fig. 1. Conceptual schematic of magnetic resonance coupling motor and generator.

4. 研究成果

(1) 磁界共振結合モータ・発電機の基本設計・特性解析技術の確立

本考案の磁界共振結合モータ・発電機の新技術は従来の 10 倍の高出力密度にするために無鉄心と磁界共振結合、及び誘導モータの技術を融合させている。新技術を確立するためには設計及び特性解析技術を新たに構築することが必須である。そこで、本研究では第 1 ステップとして、磁界共振結合モータ・発電機(MRC machine)の等価回路(図 2)を提案し、等価回路を用いた各

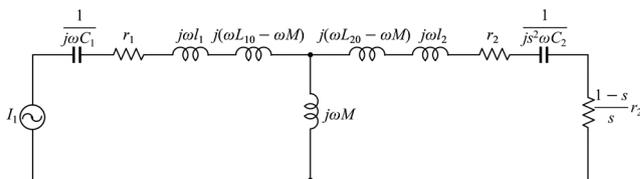


Fig. 2. T-type equivalent circuit of the MRC machine.

$$T = \frac{3 \frac{1-s}{s} r_2 I_2^2}{4\pi f (1-s) p} = \frac{3 \left(\frac{s\omega M I_1}{r_2} \right)^2 \frac{1-s}{s} r_2}{4\pi f (1-s) p}$$

$$= \frac{3 I_1^2 (s\omega)^2 M^2 p}{2 r_2} = 3 r_1 I_1^2 P \frac{(s\omega) (kQ)^2}{\omega^2} \quad \dots (1)$$

T: トルク, s: すべり, r₁ と r₂: 1 次 2 次の巻線抵抗, I₁ と I₂: 1 次と 2 次電流, p: 極数, M: 相互インダクタンス, l₁ と l₂: 1 次と 2 次の漏れインダクタンス, C₁ と C₂: 1 次と 2 次のキャパシタンス, ω: 角速度, k: 結合係数, Q: Q 値

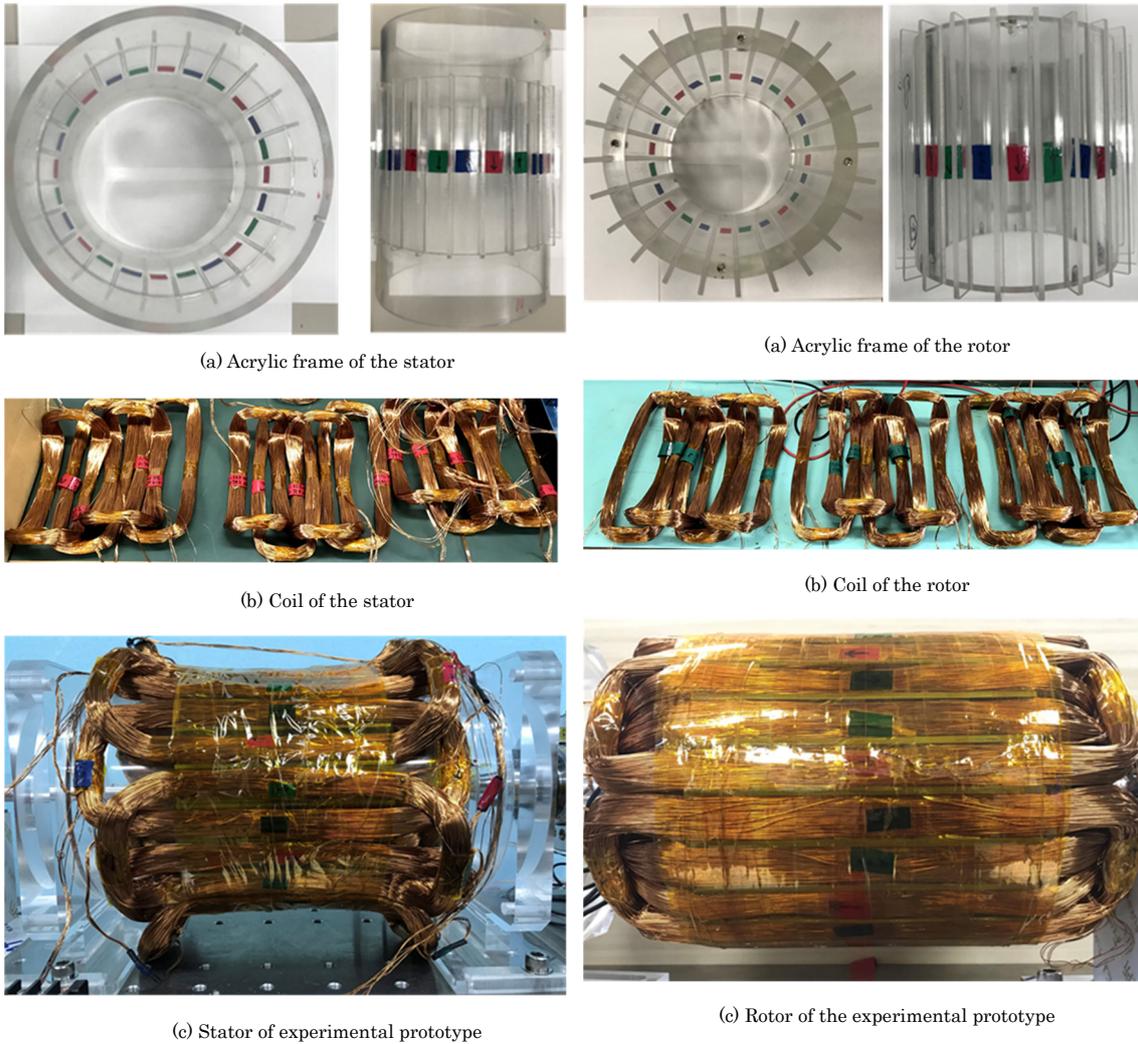


Fig. 3. Stator of experimental model of the MRC machine

Fig. 4. Rotor of the experimental model of the MRC machine.

特性計算式(1)を導出した。つぎに高精度な特性値を得るために有限要素法 (FEM) 磁界解析を用いたモータの特性算出方法も得た。手法を検証するために等価回路法と磁界解析を用いて磁界共振結合モータの電圧、電流、トルク、出力を算出し、同等の値が得られて妥当性が確認された。さらに図 3 と 4 に示す磁界共振の原理モデルによる実験で磁界共振によって出力が発生することを確認した。

(2) 完全ヨークレスの磁界共振結合モータで 200 kW 出力と 15kW/kg の出力密度の両立を達成
 本研究の第 2 ステップとして、分散させた多発のモータで駆動する電気飛行機をターゲットにして 200kW 級のモータを試設計した。モータは 100,000 rpm の超高速回転するため過大な遠心力に耐え得る回転子の構造にする必要がある。金属ではこの応力に耐え得ることはできないので、炭素繊維の強化繊維樹脂 (CFRP) で回転子の構造体を構成し、コイルを装着する。図 5 に強度解析で得た回転子の応力分布を示す。最大応力は 3.5 GPa であり、CFRP の耐強度の 7 GPa の 1/2 であり、最高回転数 100,000 rpm において十分な強度を確保している。つぎにモータ特性に関して述べる。等価回路による特性算出を行って最高効率が得られるすべり周波数を導き出し、このすべり周波数における磁界解析を行うことで磁界共振結合モータの最適な駆動特性が得られた。図 6(a), (b) はそれぞれ、出力、効率の回転速度に対する特性を示す。モータの最大出力時の特性は、表 1 に示す様に出力 199 kW、効率 94.5 %、力率 0.994、回転数 100,000 rpm、すべり周波数 223.3 Hz である。コイルの導体内の表皮効果や近接効果を考慮した ($\Phi 0.5$ Litz wire FEA) 場合は、出力 193 kW、効率 91.7 %、力率 0.994、回転速度 100,000 rpm、すべり周波数 223.3 Hz が得られた。本研究で設計した無鉄心の磁界共振結合モータは電気飛行機に必要な 200 kW の出力を発生し、91.7~

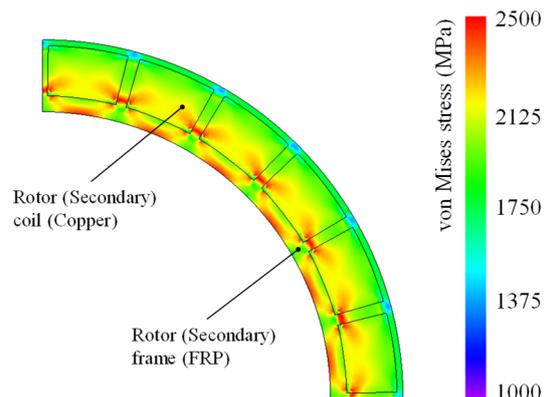
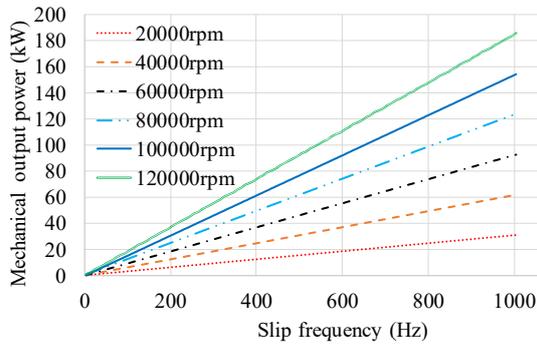
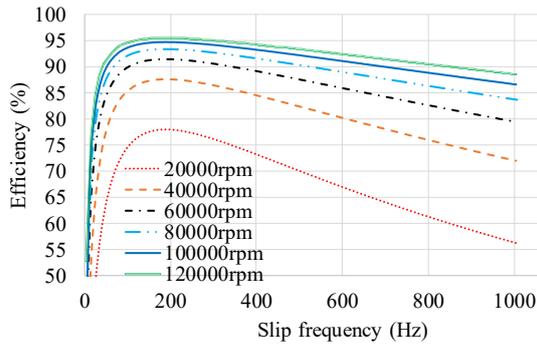


Fig. 5. Mises stress at a rotational speed of 100,000 rpm.



(a) Mechanical output power



(b) Efficiency

Table I Motor characteristics at a rated rotational speed of 100,000 rpm.

Model	Equivalent circuit	FEA without consideration of AC loss	FEA of $\phi 0.5$ litz wire
Slip	0.0324	0.0324	0.0324
Slip frequency (Hz)	223.33	223.33	223.33
Primary current(A)	116	116	116
Primary current density (A/mm ²)	24.6	24.6	24.6
Primary voltage (V)	1054	1054	1054
Secondary current (A)	18.58	18.58	18.29
Secondary current density (A/mm ²)	23.7	23.7	23.3
Torque (Nm)	19.1	19.0	18.4
Mechanical output power (kW)	200	199	193
Primary copper loss (W)	4803	4803	10929
Secondary copper loss (W)	6699	6698	6498
Efficiency (%)	94.6	94.5	91.7
Power factor	1.00	0.994	0.994

Fig. 6. Characteristics at different slip frequencies at each rotational speed.

94.5 % の高効率であることが確認された。

(3) さらなる出力密度の向上を達成 ～漏れ磁束抑制磁性リング方式とその技術を獲得～
 現状の従来機の最高出力密度は電気自動車 (EV) 用モータの 1~2 kW/kg である。したがって、従来の 10 倍の出力密度は、10~20 kW/kg となる。そこで、上限の 20 kW/kg まで出力密度をさらに高めるため固定子巻線と回転子巻線の外部に漏れる磁束を抑制する技術を考案した。コイルの磁気回路に鉄心などの磁性体を組み込むと磁束密度が高くなり、出力は増加するが、一方の磁界共振においては、モータの出力が変化すると磁性体の磁気抵抗が変化してインダクタンスが変動し、共振状態からはずれて出力が大幅に低下する問題がある。そこで、モータの出力が変化しても共振状態を維持するためにインダクタンスがほぼ一定になるように磁性リングの磁気抵抗の変動をある範囲に収めることでインダクタンスはほぼ一定になり、出力が変化しても磁界共振を維持できることがわかった。漏れ磁束抑制磁性リングを適用して出力向上を図った磁界共振結合モータを試設計した。固定子のみ磁性リングがあるモータ (図 7)、固定子と回転子の両方に磁性リングがあるモータ (図 8) の 2 種類を検討した。図 9、10 はそれぞれ固定子のみと固定子と回転子両側磁性リングのモータの最高速回転時の応力分布を示す。固定子のみは 100,000 rpm、固定子と回転子の両方では、回転子の磁性リングの強度の限界のため 40,000 rpm では強度上問題が無く回転できることがわかる。つぎにモータ特性について述べる。図 11、12 はそれぞれ回転速度に対する出力と効率を示す。また、表 2 は各特性値を示す。固定子のみ磁性リングのモータの特性値は、出力 513 kW、効率 96.9 %、回転速度 100,613 rpm、トルク密度 2.76 Nm/kg、出力密度 29.1 kW/kg であり、固定子と回転子の両方の磁性リングのモータの特性値は、出力 491.9 kW、効率 96.7 %、回転速度 39,889 rpm、トルク密度 3.90 Nm/kg、出力密度 16.3 kW/kg である。これらの結果から、固定子のみ磁性リングのモータは目標の上限の出力密

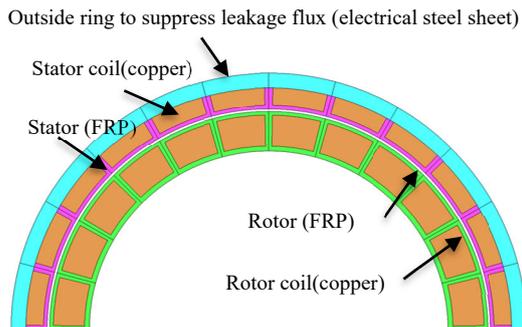


Fig. 7. Configuration of the MRC motor with a single magnetic ring on the outside of the stator.

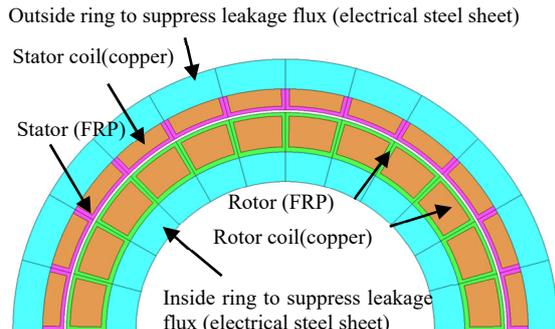


Fig. 8. Configuration of the MRC motor with magnetic rings on both the out and inside of the stator and the rotor.

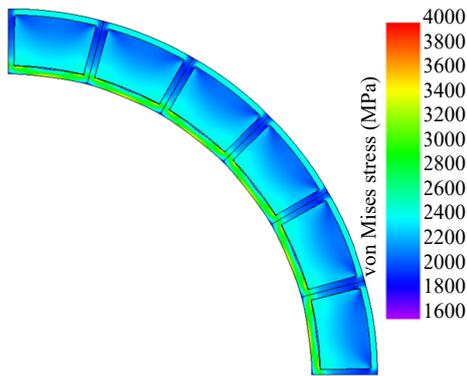


Fig. 9. Distribution of von Mises stress at a rotational speed of 100,000 rpm in the rotor without the magnetic ring.

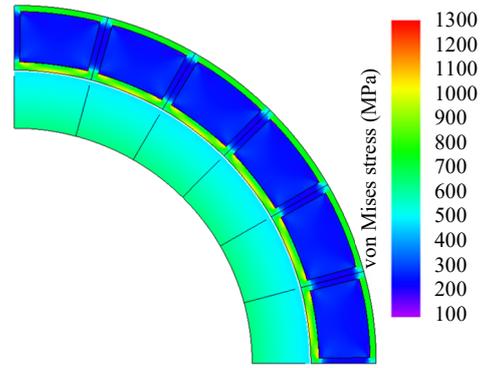


Fig. 10. Distribution of von Mises stress at a rotational speed of 40,000 rpm in the rotor with the magnetic ring.

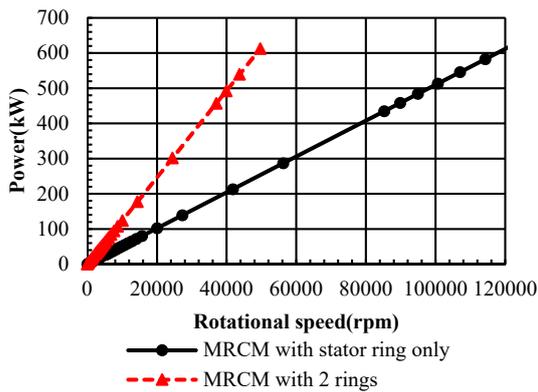


Fig. 11. Output power characteristics of the MRC motors.

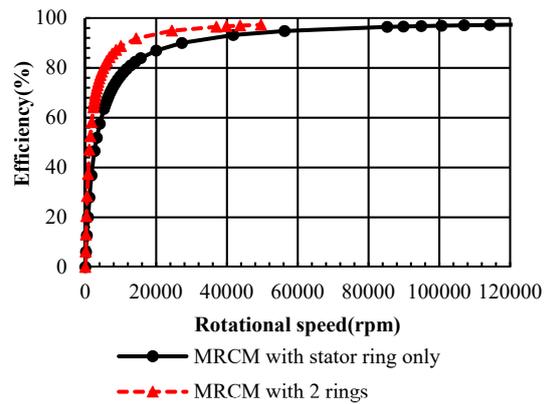


Fig. 12. Efficiency characteristics of the MRC motors.

度 20 kW/Kg を大きく超える 1.45 倍を達成できた。一方、固定子と回転子の両方の磁性リングのモータでは、出力密度 16.3 kW/kg は目標の中央値であるが、トルク密度は固定子のみ磁性リングのモータよりも大きな値である。このことから、出力、トルクのどちらかを重視するかで磁性リングの方式を選択すればよいことがわかる。

(4) 成果の国内外の位置づけとインパクト

磁界共振結合モータ・発電機は、最近では英国のマンチェスター大学、日本のアイシン、横浜国立大学も研究を開始しているが、本研究の成果であるモータ・発電機の等価回路と特性計算や解析手法、モータ特性等は先行して学会発表し、実際の電気飛行機駆動用モータとして試設計や特性解析の結果は学術や産業の進歩につながっている。さらには、本研究のモータの出力密度は欧米の研究機関の研究プロジェクトで示された電気飛行機用モータの目標値をクリアしており、その技術は世界的にもインパクトがある。

(5) 今後の展望

本研究で得られた磁界共振結合モータ・発電機は固定子と回転子にそれぞれ 3 相巻線を持っているので、固定子と回転子にそれぞれインバータ接続して周波数と位相を制御して電力を供給すれば、固定子と回転子の両側から電気エネルギーの入力または出力を行うことができる。磁界共振結合モータ・発電機に両側給電を適用すれば、同一周波数で 2 倍の回転数になり、同じ銅損で 2 倍の出力が得られて効率も向上することが予想される。今後は、本研究で得られた成果とデータを基にして、磁界共振結合モータ・発電機に両側給電を適用して世界最高の出力密度と効率を有する電気飛行機や電気自動車駆動用モータを研究開発し、カーボンニュートラルに貢献できる新技術を生み出して持続可能な社会と電気エネルギーと省エネルギーの分野の学術発展を促進する。

TABLE II
PERFORMANCE OF MRC MOTORS

Model	MRC with both stator and rotor magnetic rings	MRC with stator magnetic ring
Power supply frequency (Hz)	1355	3412
Rotational speed (rpm)	39889	100613
Slip	0.0186	0.017
Slip frequency (Hz)	25.2	58
Primary current (A)	117.8	117.8
Primary voltage (V)	1445	1514
Secondary current (A)	19.87	19.46
Torque (Nm)	117.75	48.69
Output power (kW)	491.9	513.0
Torque per weight (Nm/kg)	3.90	2.76
Power per weight (kW/kg)	16.3	29.1
Iron loss (W)	1156.1	1152.7
Efficiency (%)	96.7	96.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takishima Kenta, Sakai Kazuto	4. 巻 11
2. 論文標題 Design Method for Ultralightweight Motor Using Magnetic Resonance Coupling and its Characteristics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 76～87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21003160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takishima Kenta, Sakai Kazuto	4. 巻 140
2. 論文標題 Characteristics of Ultra-Lightweight Motor Based on Magnetic Resonance Coupling for Operation at Variable Speeds Considering Influence of Capacitance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 303～313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.140.303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takaaki Toda, Kazuto Sakai
2. 発表標題 Operation Characteristics of a Magnetic Resonance Coupling Motor with a Magnetic Ring for 8 and 4 Poles
3. 学会等名 IEEE ECCE(Energy Conversion Conference and Exposition) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takaaki Toda, Kazuto Sakai
2. 発表標題 Magnetic Resonance Coupling Motors with Magnetic Rings for Enhanced Power Generation
3. 学会等名 24rd The International Conference on Electrical Machines(ICEM) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田 荘明, 堺 和人
2. 発表標題 磁界共振結合への展開に向けた両側給電回転電機の二次周波数一定運転
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清浦 暁生, 堺 和人
2. 発表標題 アキシアルギャップ型磁界共振結合モータの出力密度向上
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 八木原 駿一, 堺 和人
2. 発表標題 高出力化のための両側給電モータにおける1次と2次のアンペアターン比と特性
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸田 荘明, 堺 和人
2. 発表標題 両側給電モータの基本作用と磁界共振結合への展開
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八木原駿一，堺 和人
2. 発表標題 1次コンデンサなし磁性リング付き磁界共振結合モータの極数に対するモータ特性
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清浦臯生，堺 和人
2. 発表標題 漏れ磁束抑制磁性リング付きアキシアルギャップ型磁界共振結合モータにおける外径/長さの特性影響
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田荘明，堺和人
2. 発表標題 漏れ磁束抑制磁性リング付き磁界共振結合モータのリング厚さの検討
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八木原駿一，堺和人
2. 発表標題 電気飛行機用磁界共振結合モータの極数に対するモータ特性
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清浦 臯生, 堺和人
2. 発表標題 電動飛行機用漏れ磁束抑制磁性リング付きアキシアル型磁界共振結合モータ
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田 荘明, 堺和人
2. 発表標題 電気飛行機用磁界共振結合モータの外部漏れ磁束抑制リングによる出力向上
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八木原 駿一, 堺和人
2. 発表標題 電気飛行機用磁界共振結合モータの3次巻線による特性
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuto Sakai, Takanobu Akiyama
2. 発表標題 Basic Characteristics of an Axial-gap Type Magnetic Resonant Coupling Machine with Different Numbers of Poles
3. 学会等名 IEEE ECCE (Energy Conversion Conference and Exposition) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 聖也、堺 和人
2. 発表標題 ハイブリッド磁界共振結合モータのハルバツハ配列によるトルク特性
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関