

令和 4 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

ワイヤレス受電機能を有する共振補償方式コアレス超軽量誘導モータの基礎研究

令和 5 年 5 月

株式会社ワイティー

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、株式会社ワイティーが実施した令和4年度「ワイヤレス受電機能を有する共振補償方式コアレス超軽量誘導モータの基礎研究」の成果を取りまとめたものです。

0. 研究背景

CO₂排出量削減等の観点から自動車、船舶、航空機とあらゆる領域で電動化技術の研究が進められている。

航空機領域では省力化・無人化の促進と新サービス創出等社会的ニーズを背景に小型無人航空機(ドローン)がホビー用から産業用へと応用分野を拡大し、都市内の新しい移動手段として人を運ぶことができる乗員型ドローンの開発も活発化してきている。更に、国際民間航空機関 ICAO(International Civil Aviation Organization)のCO₂排出量削減目標(2050年に2005年の半減)に対応するための中型旅客航空機(席数100名~200名)用電動推進技術のニーズが高まっている。航空機用電動推進技術の主要課題として、軽量で高出力可能な高出力密度化及び故障時を含めた高信頼性確保が指摘されている。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

本研究では、高効率での非接触給電を可能にするワイヤレス給電のキー技術である共振補償技術をコアレス誘導モータに導入することで、軽量化と高出力高効率化を両立させ、更には、固定子コイルをワイヤレス給電の受電コイルとしても機能させることで新たなコイル追加なしでワイヤレス充電を可能とする共振補償方式コアレス誘導モータに関する基礎研究を3年間で実施する。

まず共振補償を含む誘導モータの理論解析により、1) 出力、効率等特性の定式化、2) 出力及び効率を最大化するための共振補償条件の定式化、3) 設計や特性解析に活用できるシミュレーションツールの整備を行う。

平行して、構造可変のコアレス誘導モータによるインピーダンス試験及び前述シミュレーションツールによる特性計算からコアレス誘導モータの基本構造を決定する。

これら開発した要素技術を活用して下表を設計目標とする共振補償方式コアレス誘導モータを開発及び評価を実施し、その課題と対策について検討する。

	開発目標	T-motor (農薬散布ドローン用)	シーメンス (電動飛行機用)
モータ形式	コアレス誘導モータ	ブラシレス DC モータ	ブラシレス DC モータ
ギャップ方向	アキシヤル	ラジアル	ラジアル
出力[kW]	0.75	Max 2.8	250
回転数[rpm]	Max 4500	Max 4100	2500
出力密度[kW/kg]	5	3.28	5
最大効率[%]	90	80	—

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1) 理論解析、シミュレーションツールの開発

コアレスモータはコアレス化により固定子及び回転子の漏洩インダクタンス増加し、出力及び効率が大幅低下するという問題がある。本提案はコアレス化による固定子及び回転子の漏洩インダクタンス増加に対し、電磁誘導方式ワイヤレス給電で利用されている共振補償技術を適用することによりコアレスモータを高出力化・高効率化することを目標にしている。

電磁誘導方式ワイヤレス給電では大ギャップによる漏洩インダクタンス増加を補償するための共振コンデンサを送電コイル及び受電コイルに接続し、高効率電力伝送を実現している。動作周波数は送電コイル及び受電コイルは同一で、高周波化することで送受電コイル及び共振コンデンサの小型化を図っている。

しかしながら、誘導モータの回転子周波数は固定子巻線周波数に滑りを乗じた滑り周波数は数 Hz レ

ベルと低周波となり、回転子側共振コンデンサは大容量が必要になり、高速回転する回転子に大容量共振コンデンサを接続装着することは実現性に乏しい。

本提案と同様な共振補償方式を採用したコアレス誘導モータが提案研究されているが、共振補償要素を含む誘導モータを定式化に関する報告はなされていない。

本研究では、提案する共振補償方式誘導モータの特性解明を解析的に実施できるように誘導モータ理論及び電磁誘導方式ワイヤレス理論に基づく共振補償を含む誘導モータ特性の定式化を行う。また、原理モデルを利用しての実験による理論検証、特性改善のための方策検討を効率良く行えるシミュレーションツール開発を実施する。

(2) アキシシャルギャップコアレス誘導モータ本体の開発

アキシシャルギャップコアレス誘導モータ構造とモータ回路定数・モータ特性の関係を明らかにするために、コイル方式(集中巻、分布巻)、磁路構成(バックヨークあり、バックヨークなし)をパラメータとしたモータ構造での誘導モータ等価回路定数に関するデータを取得し、アキシシャルギャップコアレス誘導モータの基本構造を決定する。

(3) 共振補償方式コアレス誘導モータ(モータ本体及び共振補償器)の開発

理論解析、シミュレーションツール及びモータ構造とモータ等価回路定数に関する蓄積データを活用し、目標仕様の共振補償方式コアレス誘導モータの設計、製作及び評価を実施し、課題整理と課題解決方策の検討を行う。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

	開発目標	達成状況	
		実機確認	対策実施時見込み
モータ形式	コアレス誘導モータ	コアレス誘導モータ	コアレス誘導モータ
ギャップ方向	アキシシャル	アキシシャル	アキシシャル
出力[kW]	0.75	3.33	21.6
回転数[rpm]	Max 4500	4800	5400
効率 [%]	90	82.4	90.8
出力密度 [kW/kg]	5	2.5	5.1

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3. 1 共振補償要素を含む誘導モータ特性の定式化(要素課題(1)に対応)

提案する共振補償方式誘導モータの特性解明を解析的に実施できるように、誘導モータ理論及び電磁誘導方式ワイヤレス理論に基づき共振補償を含む誘導モータ特性の定式化及びモータ特性式からモータ出力、効率を最大にする最適条件を明確にする。モータ出力、効率の最大化条件明確化により、要求特性(出力、効率)に適合するモータ設計が効率良く行えるようにする。

【成果】

①高出力密度化の手段として想定しているコアレス化による漏洩インダクタンス増大による特性への影響評価が出来るようにT形等価回路による誘導モータ特性の詳細な定式化を行い、共振補償要素を接続しない場合の出力及びトルクを最大とする条件、最大出力及び最大トルクを定式化した。

②SS共振補償、PS共振補償及びSN共振補償の3方式での巻線抵抗を考慮した誘導モータ効率の定式化に基づき、SN共振補償でSS共振補償と同等の効率を確保するための条件が明らかになったことにより、コアレス誘導モータ本体開発の設計指針が明確になった。

3. 2 シミュレーションツールの開発（要素課題（1）に対応）

共振補償要素を含む誘導モータの出力、効率等特性の定式化に基づき、共振補償方式変更による誘導モータの定常特性、過度特性、損失特性等への影響評価が容易に行えるようにする。下表に示す代表的9種類の共振補償方式に対応した特性解析シミュレーションツールを開発する。

1次	S	P	S	P	P	N	S	N	N
2次	S	S	P	P	N	P	N	S	N

S：直列共振補償、P：並列共振補償、N：共振補償なし

【成果】

共振補償要素未接続時及び9種類の共振補償要素接続時のモータ特性を容易に計算するために、汎用回路シミュレーションソフト(SCAT)及びExcelで構成する誘導モータ特性解析シミュレーションツールを構築した。既知の等価回路定数を使用してのシミュレーション結果は既知特性と一致しており、本研究推進の有効な手段となることが確認できた。

3. 3 アキシアルギャップコアレス誘導モータプロトモデルの製作（要素課題（2）に対応）

モータ構造と誘導モータ等価回路定数との関係を明らかにするために、巻線方式、磁気回路をパラメータに構造が変更可能で、マニュアル回転可能なモータを製作する。

- ①固定子巻線及び回転子巻線方式：集中巻
- ②バックヨーク：2種類（磁性材、非磁性材）

【成果】

コイルエンド部が小さく巻線銅損及び巻線重量の低減が可能なトロイダル巻コイルを固定子巻線、扇型コイルを回転子巻線とするアキシアルギャップコアレス誘導モータを考案した。扇型コイルー扇型コイル構成方式及びトロイダル巻きコイルー扇型コイル構成方式のアキシアルギャップコアレス誘導モータの特長と課題を等価回路定数特性として明らかにすることが出来た。

3. 4 誘導モータ等価回路定数測定とモータ特性計算（要素課題（2）に対応）

前記アキシアルギャップコアレス誘導モータプロトモデルを使用して、巻線方式、磁気回路をパラメータに誘導モータインピーダンスの測定及び誘導モータ特性を計算する。

- ①インピーダンス測定法：4端子法
- ②インピーダンス測定周波数：50～10kHz
- ③モータ特性計算：本研究開発シミュレーションツールの活用

【成果】

- ①コイルエンド部が小さく巻線銅損及び巻線重量の低減が可能なトロイダル巻コイルを固定子巻線、扇型コイルを回転子巻線とするアキシアルギャップコアレス誘導モータを考案した。固定子巻線両側面で発生する磁界を有効利用するために扇型コイルで固定子を挟み込む2ロータ構成だけでなく、トロイダル巻コイル内側に発生する磁界を有効利用するためのラジアルギャップ型回転子を追加配置する3ロータ構造等トポロジー展開が考えられる。
- ②プロトモデル開発の予備調査として実施した予備実験により、扇型コイルー扇型コイル構成方式及びトロイダル巻きコイルー扇型コイル構成方式のアキシアルギャップコアレス誘導モータの特長と課題を等価回路定数特性として明らかにすることが出来た。
 - ・扇型コイルー扇型コイル構成方式：結合係数特性に優れている
 - ・トロイダル巻きコイルー扇型コイル構成方式：結合係数を大きくすることが課題
- ③トロイダル巻コイルー扇型コイル方式、扇型コイルー扇型コイル方式と共用可能構造のプロトモデルを製作した。トロイダル巻コイルはコアレスコイルに加えて、予備実験で明らかになった結合係数不足対策として2種類のコア入コイルを製作した。扇型コイルは固定

子巻線、回転子巻線用として巻数の異なる2種類を製作した。

④ トロイダル巻コイル及び扇型コイルに関する磁界解析を実施し、アキシアルギャップ面の磁界分布把握、コイルインダクタンス値を計算した。コイルインダクタンス値に関しては、予備実験で使用したコイル実測値及び簡易計算法による計算値との比較を実施した。磁界解析値は実測値とよく一致すること、簡易計算法も設計段階でのインダクタンス値把握に利用可能な精度があることを確認した。

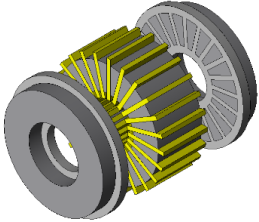
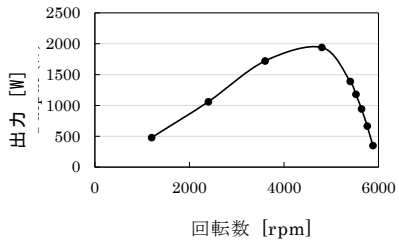
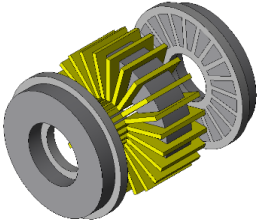
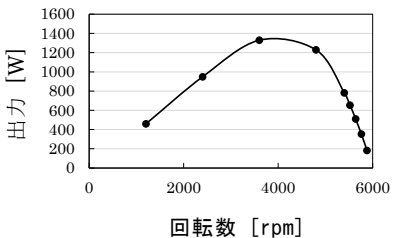
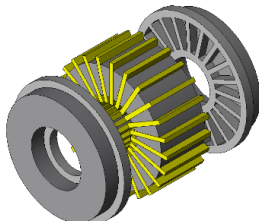
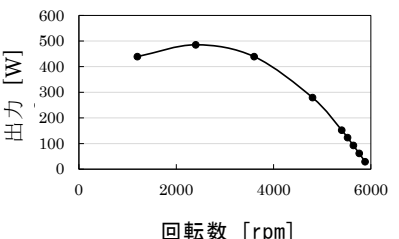
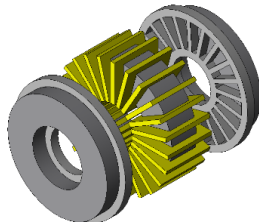
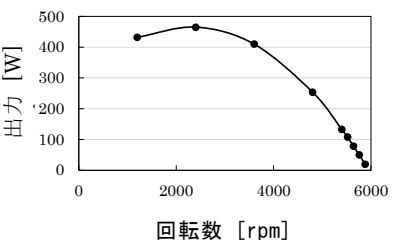
3. 5 アキシアルギャップコアレス誘導モータ本体の設計製作（要素課題（3）に対応）

コアレス誘導モータ本体の電気設計は、モータ構造とモータ等価回路定数に関する蓄積データ活用による巻線、磁気回路の設計（1次設計）⇒磁界解析によるモータ等価回路定数算出⇒最適共振補償条件との整合性確認及びシミュレーションツールによるモータ特性計算⇒2次設計の手順で実施し、機械設計実施後にモータ製作を行う。

【成果】

① 固定子スロットティースのコアレス、回転子スロットティースのコアレス、固定子及び回転子スロットティースのコアレスによるモータ出力特性への影響について磁気回路網解析した結果、固定子スロットティースコアレスが有望なコアレス構造であることが判明した。

コア構造とモータ特性 (RNA 解析結果)

非コアレス			最大出力 ≈2000W 最大出力速度 ≈5000rpm
固定子スロットティースコアレス			最大出力 ≈1400W 最大出力速度 ≈4000rpm
回転子スロットティースコアレス			最大出力 ≈500W 最大出力速度 ≈2500rpm
固定子及び回転子スロットティースコアレス			最大出力 ≈470W 最大出力速度 ≈2500rpm

②下記最終設計仕様に基づき固定子及び回転子を設計試作した。

最終設計仕様

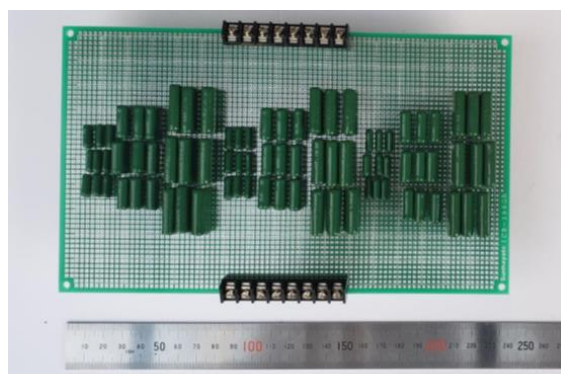
	巻線方式	トロイダル巻	
固定子	導体	平角銅線	固定子ティースコアレスによる結合係数低下を抑制するために、平角銅線で固定子コイル高さ低減による磁氣的ギャップの最小化
	コア形状	スロットティースコアレス	
	コア材	SMC	数百 Hz 帯での鉄損増加防止
	方式	かご形	スロットティースコア重量削減及び高速回転時の機械強度確保が容易
回転子	コア形状	非コアレス	
	コア材	SMC	
	導体	銅	

3. 6 共振補償器の設計製作（要素課題（3）に対応）

上記実施項目（3-1）の結果に基づき共振補償器の設計、製作を行う。共振補償器は周波数変更による回転数制御への対応として、共振条件調整可能な制御型共振補償器についても検討を行う。

【成果】

- ①容量固定式共振補償器の設計手順を示し、積層セラミックスコンデンサ及びフィルムコンデンサ使用時の共振コンデンサ回路を設計した。
- ②小型化可能な積層セラミックスコンデンサの入手性問題からフィルムコンデンサに変更し、3相分フィルムコンデンサを実装した共振コンデンサ回路を製作した。



共振コンデンサ実装基板(3相分)

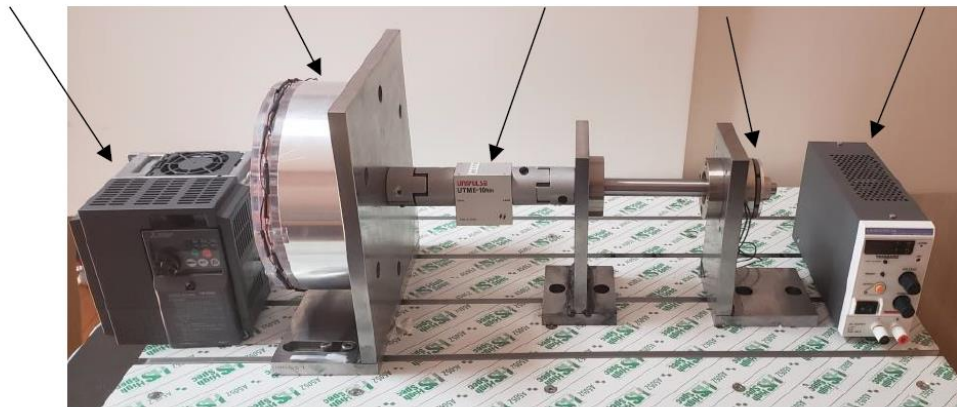
3. 7 共振補償方式アキシャルギャップコアレス誘導モータの試験評価（要素課題（3）に対応）
理論解析、シミュレーションツール、最適共振補償条件の検証、共振補償の有効性を確認することを目的に試験評価を行う。

- ①等価回路定数測定
- ②特性試験

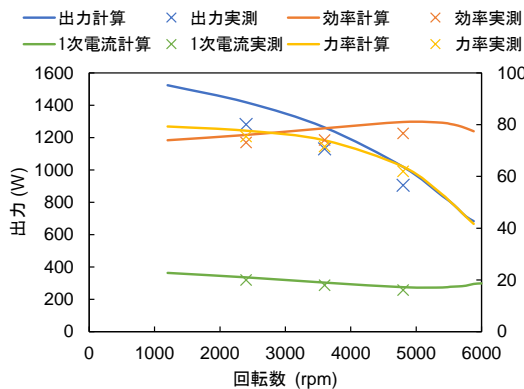
【成果】

- ①試作機に共振補償コンデンサを接続した共振補償方式トロイダル巻アキシャルギャップコアレス誘導モータとして出力 1400W、回転数 4800rpm までの実負荷動作を確認した。
- ②実機負荷試験結果は RNA 解析結果と良く一致しており RNA 解析法の有効性を確認した。
- ③共振コンデンサ容量変化時のモータ特性 (図 6) は回路等価定数算出共振コンデンサ容量の 160 μ F での効率は約 83%、出力密度は約 2.6 であった。

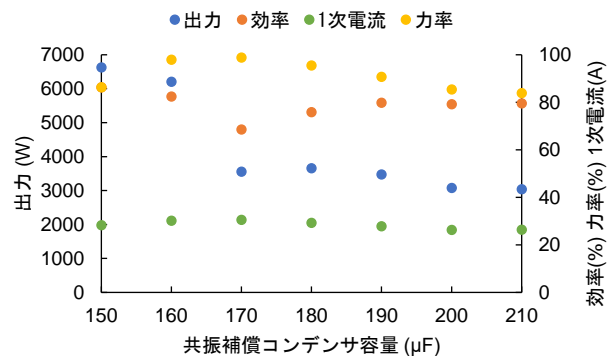
インバータ 供試機(1回転子構成) トルクメータ 負荷装置 負荷装置用電源



実機試験システム



実機試験結果 (相電圧 38.2V)



共振容量依存特性 (相電圧 57.5V)

3. 8 固定子巻線利用によるワイヤレス給電検証（要素課題（3）に対応）

固定子巻線との間でワイヤレス給電可能とする送電コイルを設計製作し、下記項目実施により、固定子巻線利用によるワイヤレス給電の技術的可能性の検証を行う。

- ①4端子法による送電コイル固定子巻線間インピーダンスの測定
- ②等価回路シミュレーションによる給電特性解析

【成果】

- ①固定子巻線を受電コイルとして構成するワイヤレス給電用送電コイルは送受電コイル間磁気的ギャップを最小化するためにコアを溝付とする以外は固定子巻線と同一仕様で試作した。
- ②固定子巻線に送電コイルを対向配置した状態で測定したコイル間インピーダンスより等価回路定数を算出し計算した結果、モータ電源周波数と同一の400Hzにて効率約40%、伝送電力約4000Wのワイヤレス給電可能であることが明らかになった。

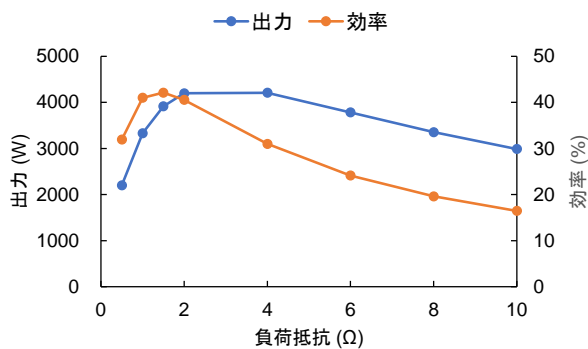
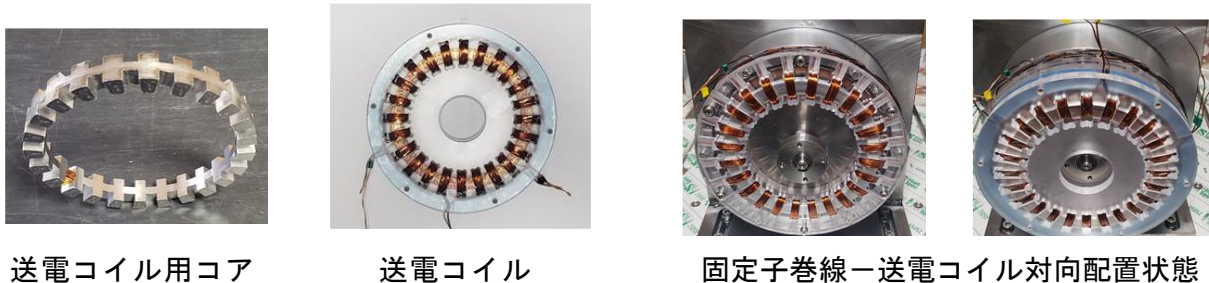


図 10. 給電特性 (相電圧 92V 一定)

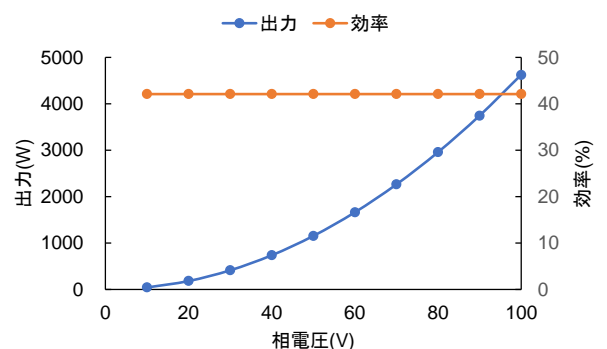


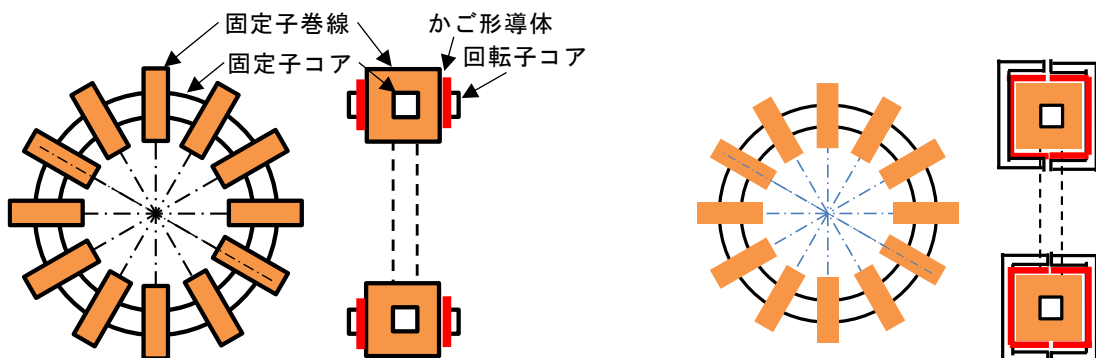
図 11. 給電特性 (負荷抵抗 1.5Ω 一定)

3. 9 課題整理及び解決策の検討 (要素課題 (3) に対応)

解析技術 (理論解析手法、シミュレーションツール)、アキシアルギャップコアレスモータ構造及び振補償方式コアレス誘導モータとしての課題を整理し、各課題に対する対応策を検討する。

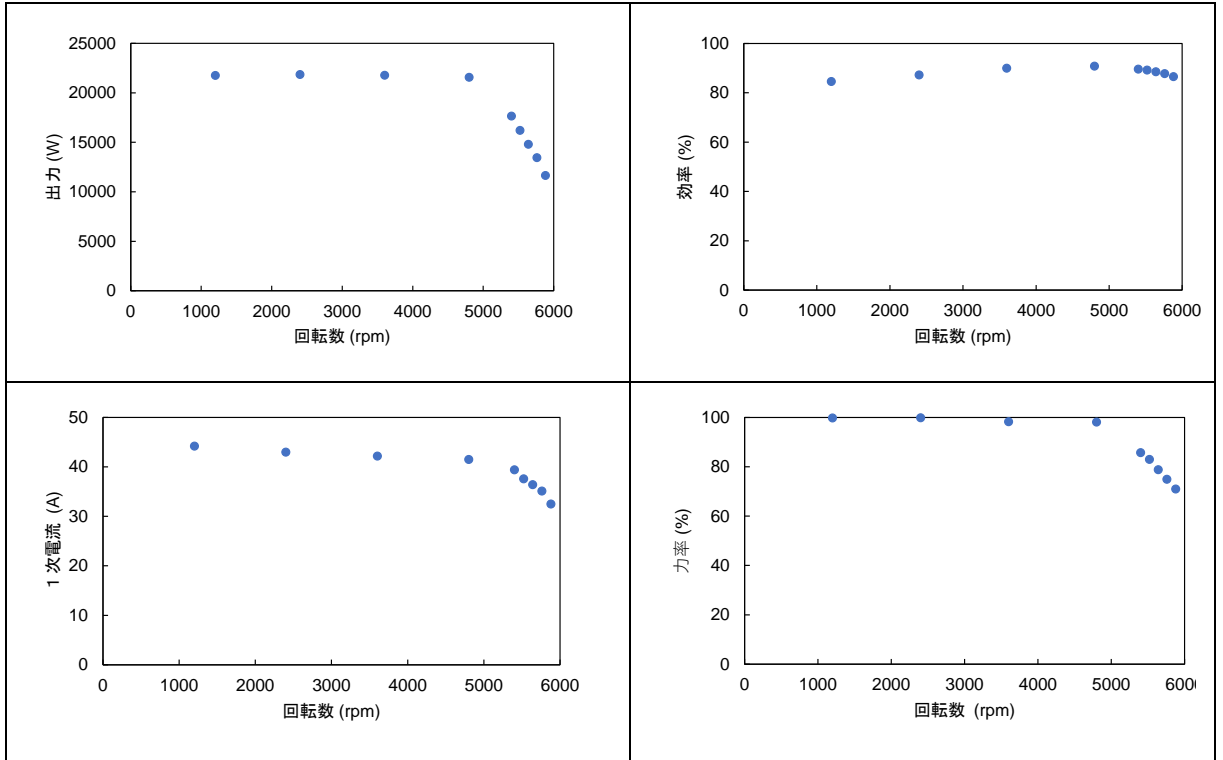
【成果】

- ①トロイダル巻固定子巻線が生成する全磁束をトルク発生に寄与するように回転子のかご形導体形状を変更した新構造回転子を考案した。
- ②トロイダル巻アキシアルギャップコアレス誘導モータの新構造回転子への変更及び固定子巻線のアルミ線への変更により開発目標の出力密度及び効率が達成できる見通しが確認できた。

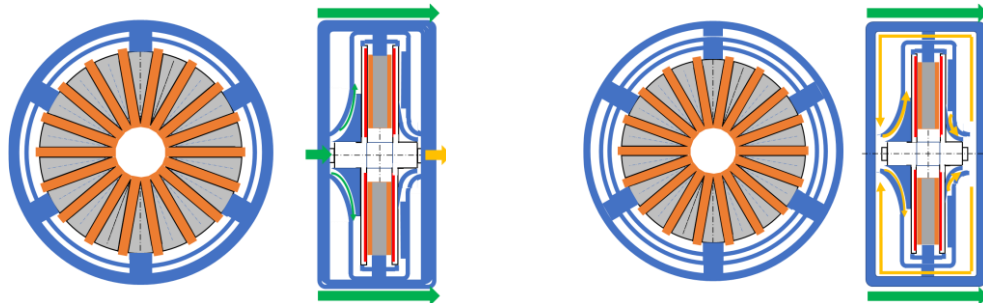


トロイダル巻アキシアルギャップコアレス誘導モータ (左: 従来構造、右: 新構造)

新型構造回転子方式アキシアルギャップコアレス誘導モータ特性見遠し

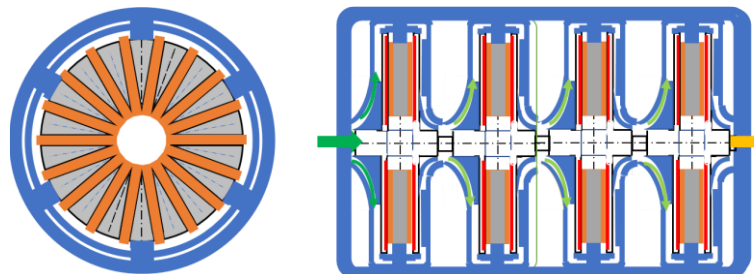


③電動旅客機用モータへの展開を想定した大容量化に伴う発熱へ対応するためにトロイダル巻アキシアルギャップ誘導モータが遠心圧縮機構造に類似していることに着目し、冷却性能が低下する高度巡行環境でも冷却可能なモータ空冷方式を検討した。



外部空気直接流動方式

内部空気循環方式



多重化構成外部空気直接流動方式

3. 10 プロジェクトの総合的推進

各要素課題に関する研究の進捗確認、計画の合理化検討等を行う打合せを定期的（原則1回/月）に実施し、計画通りにプロジェクトを推進する。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究のさらなる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知する。

【成果】

①進捗確認会議を21回開催し、計画通りにプロジェクトを推進できた。

②研究成果を電気学会全国大会で3件、マグネティックス研究会で1件の発表を行った。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

①新構造回転子によるコイルエンドレスモータの実現

出力密度改善対策の過程で固定子巻線生成磁束の利用率に着目することで、磁束利用率100%を可能とする新型のトロイダル回転子構造を考案した。コイルエンドがないことにより多重化構造に起因する効率低下発生がないことからラジアルギャップモータで問題になる多重化による効率低下及び重量増もなく、多重化構造による大出力化が有効であることが明らかに。

②磁気回路網解析法(RNA解析)による誘導モータ特性計算の時間短縮

RNA解析は磁気抵抗回路に置換し計算する磁界分布解析と等価回路解析を連成して行う解析法でモータ特性時間は約30分であり、一般的に実施されているFEM解析の約20時間に比較して大幅な時間短縮が可能となり有効な解析法である。等価回路定数変更時の概略特性を把握後に磁気モデルを変更してRNA解析することにより、最適な設計結果を得られるまでの時間の短縮が可能となる。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

新構造回転子によるコイルエンドレストロイダル巻アキシシャルギャップ誘導モータはレアアースフリーモータとして産業用途への展開可能性について、大学・民間企業等との連携を含めて検討する予定である。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

電気学会マグネティックス研究会で招待講演として令和4年2月に発表講演した。今後は電気学会での発表に加えて、日本航空宇宙学会航空原動機宇宙推進講演会、自動車技術会学術講演会等での成果発表を積極的に実施する。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

進捗確認会議開催による日程管理及びオンライン会議による時間の有効利用により効率的に業務を推進した。

5. 2 経費の効率的執行

相見積もりによる試作費低減及び外部機関保有設備利用により経費節減に努めた。

6. まとめ、今後の予定

新考案回転子を採用した共振補償方式トロイダル巻コイルアキシアルギャップコアレス誘導モータの実機評価等による技術開発を継続実施すべく令和5年度安全保障技術研究推進制度に提案中。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	4件
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

「該当なし」

(3) その他特記事項

「該当なし」