
次世代輸送システム研究部門

2020 年度活動サマリー・研究成果・業績リスト

次世代輸送システム研究部門

(部門長)

星野 祐 教授

(副部門長)

大島政英 教授

(部門研究員)

北村正司 教授

國行浩史 教授

雷 忠 教授

齊藤 茂 客員教授

佐藤大記 客員研究員

次世代輸送システム研究部門 活動サマリー

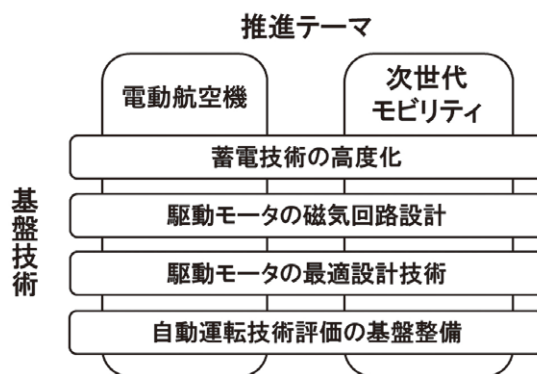
1. 背景・目的

世界的に航空機電動化に関する研究開発が盛んに行われている。本学次世代輸送システム部門は、産業政策研究や製品開発を含めて積極的に産学官連携研究開発の活動に参加している。近年、航空機の環境問題対策として、航空機の電動化が注目されており、二酸化炭素 CO2 の排出削減による環境負荷の低減を始め、燃費の改善、騒音の低下、制御系の電氣化による安全性の向上などの利点が期待できる。その実現には、機体設計、製造、インバーター、モータ、電池、材料の軽量化などの技術開発が求められる。

一方、少子高齢化及び都市圏の人口集中を背景に、今後の社会における新たな移動手段として次世代モビリティの利用が検討され、各地で社会実装が試行されている。少子高齢化は国内外で深刻な問題であるため、優れた次世代モビリティを開発・実用化して生産拠点を形成できれば地域の製造業振興の一助になると考えられる。

そこで本部門ではメンバーが連携し、電動航空機と次世代モビリティの実用化を地域と連携して進めることを目的とする。また、蓄電技術の高度化、駆動モータの磁気回路設計・最適設計技術の開発、及び自動運転技術評価などの基盤技術の整備も進める。

これらの研究開発の一部を学部学生の卒業研究や大学院修士課程の修士論文テーマとし、学生の積極的な研究活動への参加を進めている。



2. 2020 年度活動サマリー

推進テーマと基盤技術の両面から研究を進めた。

1) 電動航空機用主駆動用モータの電磁界解析と出力特性（基盤技術）

昨年度に引き続き、電動航空機用主駆動モータの磁気回路設計を行った。今年度は以前、電氣自動車用に設計したインナーロータ型のモデルを基にして、回転子鉄心に埋め込む永久磁石やフラックスバリアの形状や配置に着目し、パワー密度向上を目指した。

2) 電動航空機向け 100kW 級ハルバックアレイ回転子モータの多目的最適設計（基盤技術）

いわゆる『空飛ぶタクシー』を想定した 100kW 級モータのあるべき姿を調査することが最終目標である。このために、パワーウェイト比の観点で有利なハルバックアレイ回転子を適用した永久磁石式同期モータを対象に、多目的最適化により設計解の大局的な構造を把握することを目的とした。本年度はこのための事前検討を実施した。

3) 電動航空機技術の研究開発（推進テーマ）

太陽光エネルギーを動力源とした無人航空機の研究開発を続けており、7号機の改良設計と流体・構造連携解析を行った。

一方、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の先導研究プログラム「航空機向け高出力・高密度モータの技術開発」において、本部門が再委託先として継続され、委託先の企業と共同で研究開発を進めている。

また、産学官連携研究開発の活動に積極的に参加し、航空機産業拡大のために県内の関連プロジェクトを支援している。

4) 自動運転技術評価の基盤整備（基盤技術）

自動運転技術評価の基盤整備を目的として、3テーマについて継続して検討した。

- (ア) 実車試験評価路の調査
- (イ) 自動運転模型車と試験コースの作成と走行評価
- (ウ) 自動運転化に向けた DS の改良と評価環境の整備

5) 次世代モビリティの実用化（推進テーマ）

球乗り型の問題点を解決した継手型電動車いすの開発を進めており、姿勢の安定化制御に取り組んだ。その結果、下肢不自由者用電動車いすに人を搭乗させることができ、提案した継手型電動車いすの利用可能性を部分的に確認した。また、サスペンションの柔軟性を考慮した、4輪独立懸架式の継手型モビリティの姿勢安定化制御にも取り組んだ。

電動航空機用主駆動用モータの電磁界解析と出力特性

1. 背景・目的

昨年度に引き続き、電動航空機用主駆動モータの磁気回路設計を行った。今年度は以前、電気自動車用に設計したインナーロータ型のモデルを基にして、回転子鉄心に埋め込む永久磁石やフラックスバリアの形状や配置に着目し、パワー密度向上を目指した。

2. 研究メンバー

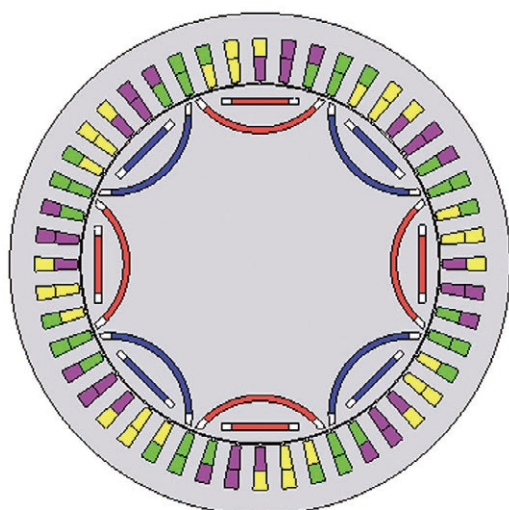
大島 政英

3. 今年度の研究成果

3-1 解析モデルの仕様

図1に以前、電気自動車用に設計したモータのモデルを示す。さらに突極比（ L_q/L_d 、 L_d 、 L_q はそれぞれd軸、q軸インダクタンス）を増加してリラクタンストルクの増加を目指し、さらにコストも考慮して設計を行った。

図2に今年度、提案する回転子構造を示す。図3は回転子磁極1極分の拡大図である。図3(a)は図1に示した以前の形状、図3(b)は今年度新たに提案する形状である。図3(b)は図3(a)に比べ、q軸磁束の磁路が拡大されq軸インダクタンスの増加、さらに突極比の増加が見込まれる。また、永久磁石を曲線ではなく直線形状にして、コスト低減を図った。なお、固定子鉄心の構造や巻線配置は図1に示した以前の電気自動車用モータと同様である。



■ : U相巻線 ■ : V相巻線 ■ : W相巻線

図1 以前の埋込永久磁石型同期モータの横断面

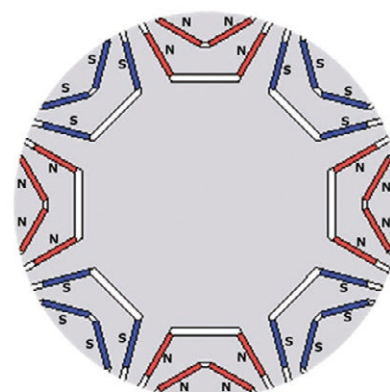


図2 提案する回転子構造

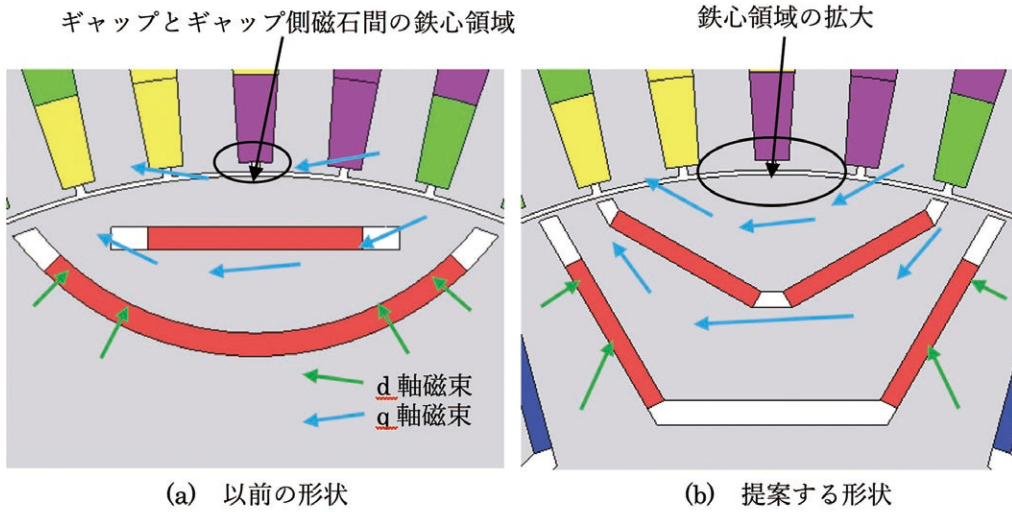


図3 回転子磁極1極分の拡大図

3-2 有限要素解析による検証

今年度提案するモータの有限要素モデルを作成し、トルクを求めパワー密度を算出した。その際、永久磁石やフラックスバリアの配置を変えて、トルクが最大になるそれらの配置を明らかにした。その結果、以前の電気自動車用モータとパワー密度を比較し今年度新たに提案する形状の方が優れていることが示された。

リラクタンストルクが最大になる回転子形状が図2である。ギャップ側磁石の埋込角度は $\theta_a=110\text{deg}$ 、回転子中心側磁石の埋込角度は $\theta_b=60\text{deg}$ 、ギャップ側磁石と回転子中心側磁石間の埋込深さは7.9mmとなっている。なお、永久磁石の使用量については約1.1kgとし、昨年度の回転子構造の約1.4kgに比べて約0.3kg削減した。

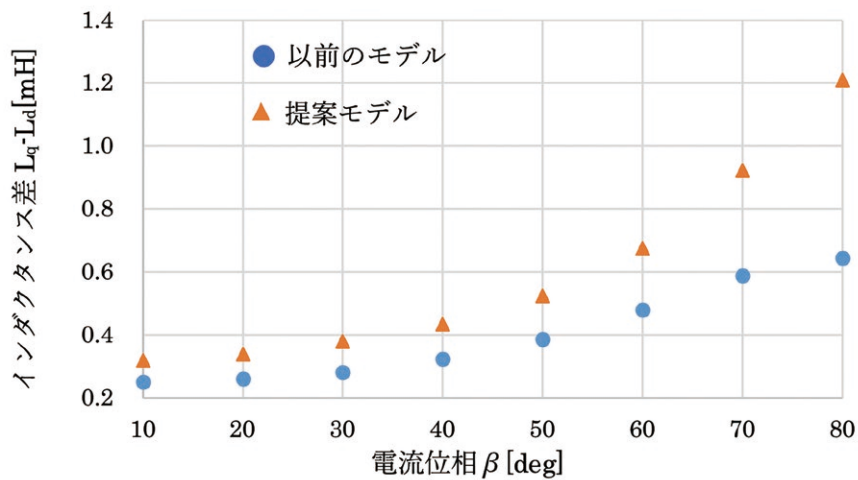


図4 インダクタンスの差

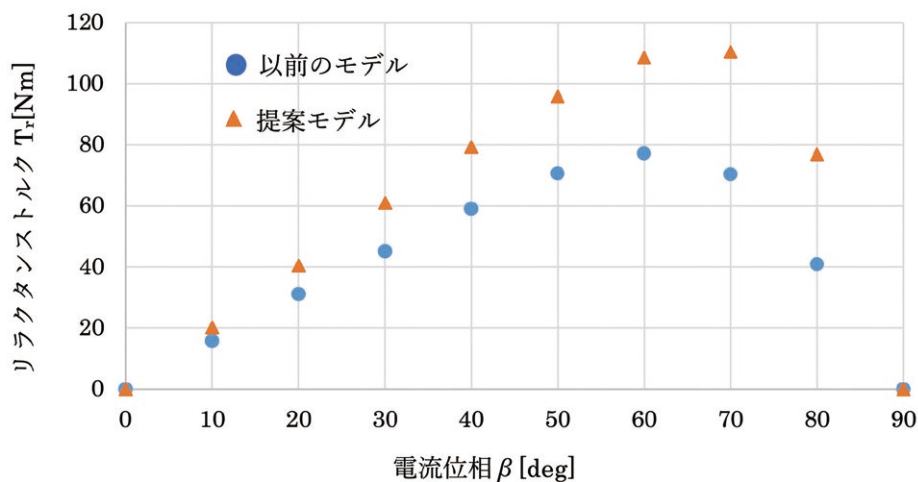


図5 リラクタンストルク

以下、以前の電気自動車用モータモデルとの比較検討を行う。図4に電流位相角に対するq軸、d軸インダクタンスの差を示す。従来モデルに比べ今年度提案モデルはインダクタンスの差が増加しており、電流位相角 80° のとき最大で約1.9倍に増加した。これは図3(b)に示したようにq軸インダクタンスの磁路を十分確保した効果が大きいと思われる。次に図5に電流位相角に対するリラクタンストルクを示す。電流位相角が 0° 、 90° では差がないものの、それ以外の領域では従来型よりリラクタンストルクが増加しており、今回提案するモデルは最大で110Nmほどに達している。図6に電流位相角に対するマグネットトルクも含めた全トルクを示す。ここでは示さないが、マグネットトルクについては電流位相角に関わらず提案モデルは以前のモデルとほとんど差がなかった。したがって、図3に示したリラクタンストルク増加の効果で全トルクが図6のように増加した。

最後に表1にトルクやモータ重量、パワー密度の比較を示す。今年度新たに提案した形状は全ての点で以前の形状より優れており、永久磁石やフラックスバリアの形状や配置に工夫を施した効果が見られた。その結果、パワー密度は1.39kW/kgから1.6kW/kgに増加した。

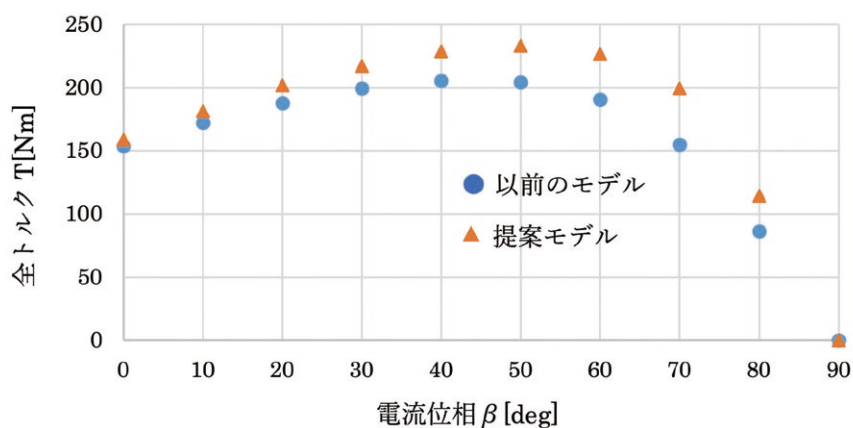


図6 全トルク

表1 パワー密度等の比較

	以前の回転子形状	提案する回転子形状
永久磁石の使用量 [kg]	1.4	1.1
最大リラクタンストルク [Nm]	77.2	110.4
最大全トルク [Nm]	205.6	233.1
モータの最大出力 [kW]	43.1	48.8
モータの全重量 [kg]	30.9	30.6
最大パワー密度 [kW/kg]	1.39	1.6

4. 今後の計画

2021 年度

パワー密度を増加することができたものの、まだまだ、実用レベルには程遠いので、引き続き、ロータポロジータについて検討を行っていく。磁気回路設計を行った後、概念設計から詳細設計へ。

2022 年度

試作機部品製作（業者に依頼）、インバータ、制御システム構築、制御プログラム作成組立、調整、速度制御試験

電動航空機向け 100kW 級ハルバックアレイ回転子モータの多目的最適設計

1. 背景・目的

いわゆる『空飛ぶタクシー』を想定した 100kW 級モータのあるべき姿を調査することが最終目標である。このために、パワーウェイト比（以下、PWR）の観点で有利なハルバックアレイ回転子を適用した永久磁石式同期モータを対象に、多目的最適化により設計解の大局的な構造を把握することを目的とした。本年度はこのための事前検討を実施した。

2. 研究メンバー

北村 正司

3. 今年度の研究成果

(1) パレート最適解の簡易探索法の構築

2つの目的関数 f_1 と f_2 を最小化する多目的最適化問題を考える。多目的最適化では、パレート最適解を探索する。図1 (a) にパレート最適解の定義を示す。自分自身に優越する設計解が存在しない解をパレート最適解という。図1 (b) に今回考案した単目的最適化に

よるパレート最適解の探索方法を示す。この方法は、 f_1 f_2 平面上においてパレート最適解を通り、設計解の集合と接する直線を考え、原点 O からこの直線までの距離を最小化することによって、当該パレート最適解を見つけ出すものである。

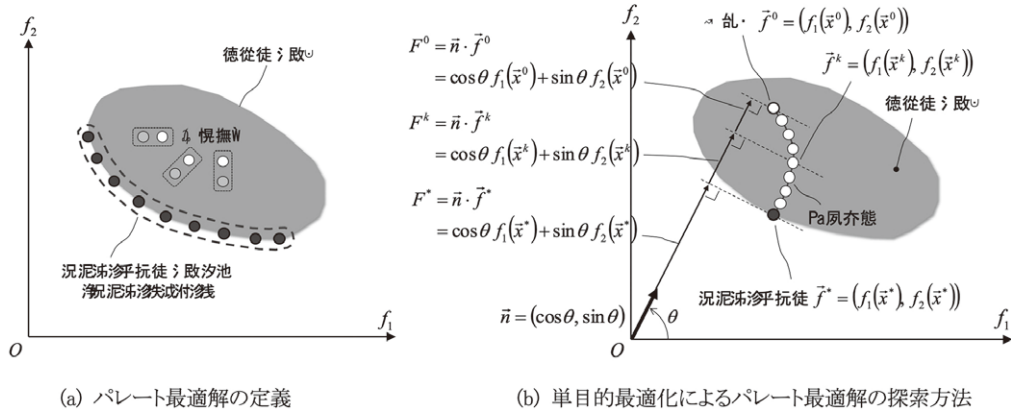


図1 2目的最適化問題におけるパレート最適解の簡易探索方法

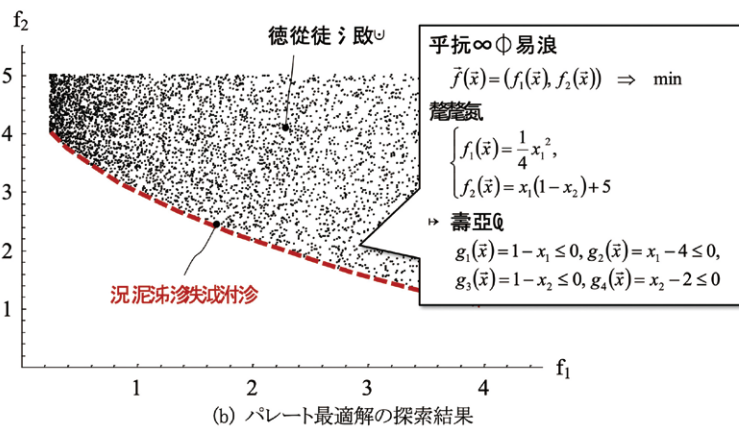
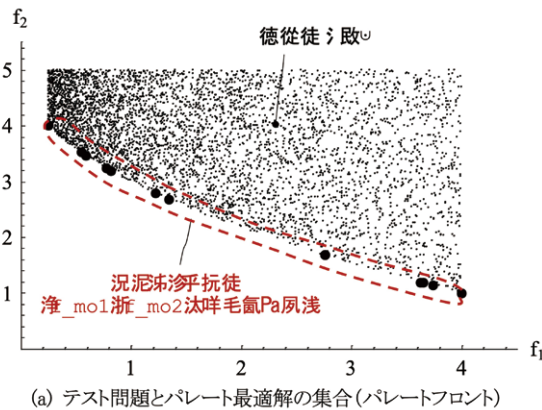


図2 テスト問題による簡易探索法の検証

図2 テスト問題による簡易探索法の検証

図 2 (a) に上記の方法の有効性を確認するためのテスト問題を示す。図 2 (b) はパレート最適解の探索結果である。意図通りにパレート解が求められることが確認できた。

(2) ハルバックアレイ回転子モータに関するテスト計算の結果

ハルバックアレイ回転子モータの出力は 100kW、回転数は 1,900rpm とした。第 1 の目的関数を PWR の逆数、第 2 の目的関数をモータの損失として、これらの最小化問題を上述の簡易探索法を用いてテスト計算した。図 3 に最適化の計算モデル (10 極-12 スロットの場合) を示す。テスト計算では、図 3 の計算モデルを 2 回および 3 回繰り返した 20 極-24 スロットモータと 30 極-36 スロットモータを対象とした。導体の電流密度 (実効値) は 10 A/mm^2 とした。ハルバックアレイの 1 極当たりのセグメント磁石 (図中の \rightarrow は磁化ベクトルを示す) の数は 5 である。最適化の変数は図中の x_1 から x_7 である。ティースとヨークにおける磁束密度の大きさに制約条件を課して、各部の磁束密度を許容値以下に収めるようにした。

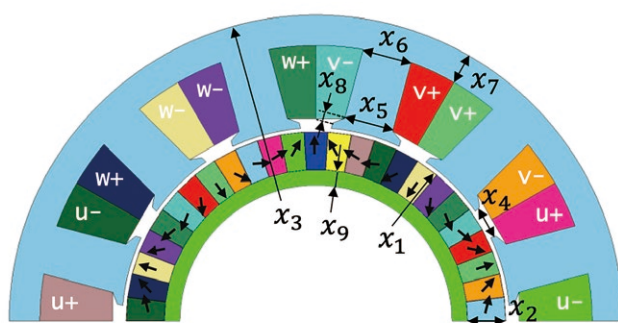
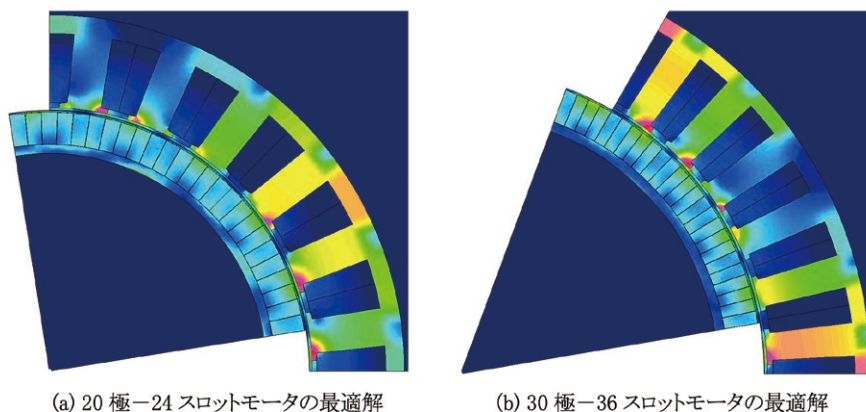


図 3 最適化計算のモデル (10 極-12 スロットの場合)

図 4 は、テスト計算により得られたパレート最適解に関する磁束密度のシミュレーション結果である。図 5 は、20 極-24 スロットの場合におけるパレート最適解を示したものである。今回のテスト計算ではパレートフロントの両端の最適解を求めた。PWR は 3 から 4 kW/kg 程度である。モータの損失と PWR の間に明確なトレードオフが存在することが見て取れる。パレート最適解の間で約 1kW の損失の差があることがわかった。



(a) 20 極-24 スロットモータの最適解

(b) 30 極-36 スロットモータの最適解

図 4 最適化計算の結果

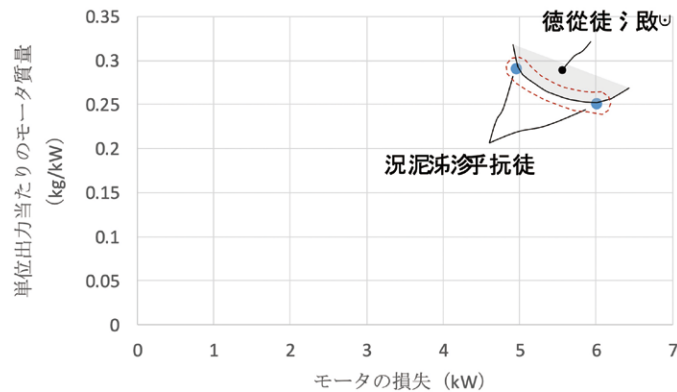


図5 パレート最適解の探索結果（20極-24スロットの場合）

4. 今後の計画

- (1) モータの熱解析の高度化
- (2) 熱-磁場連成解析を用いたモータの最適設計

電動航空機技術の研究開発

1. 背景・目的

近年、世界中に電動航空機に関する研究開発が急激に活発となり、2021年現在、約300社が関連プロジェクトを発表し、技術競合が激しくなっている。モータ、インバータ、バッテリー、軽量化材料、など電動化に関する要素技術が飛躍的に向上しており、2020年代半ば、小型電動航空機（1～5人）の実現が予測される。一方、航空機のCO₂排出削減が重要な環境課題として取り上げられており、電動化による環境負荷の低減が注目を集めている。航空機電動化の利点としては、二酸化炭素CO₂の排出削減による環境負荷の低減を始め、燃費の改善、騒音の低下、制御系の電氣化による安全性の向上などが挙げられる。

次世代輸送システム部門においては産業界と連携して、電動航空機に関する研究を行っており、研究開発計画、機体設計、推進モータシステム、ソーラープレーン無人航空機などの研究開発を進めている。

2. 研究メンバー

メンバー	主な役割分担
雷 忠	電動航空機概念設計、研究企画作成
大島政英	電氣モータの磁気回路設計、機械構造設計
北村正司	電氣モータのマルチフィジックスと多目的最適化
佐藤大記	インバータ開発、電源システム設計

3. 今年度の研究成果

(ア) ソーラープレーンの実用化

太陽光エネルギーを動力源とした無人航空機の研究開発を続けており、飛行性能を向上するため、機体設計の改良を行った。改良設計についてコンピュータシミュレーションを行い、飛行性能を確認した。

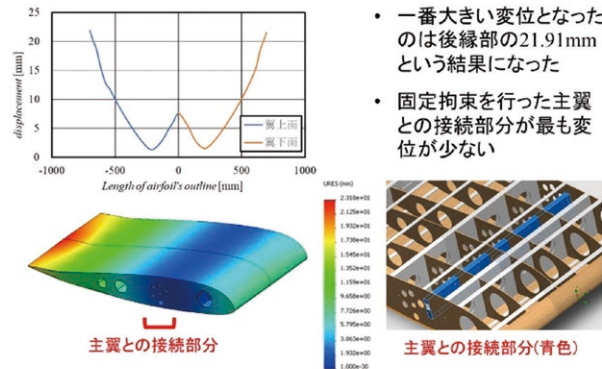


図1 改良したソーラープレーン7号機体の流体・構造連成解析

(イ) 電動航空機推進モータの研究開発（継続委託研究）

2019年7月に多摩川精機株式会社が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の先導研究プログラム「航空機向け高出力・高密度モータの技術開発」に採択された。本部門が再委託先として本研究に参画し、これまで蓄積してきた航空機設計技術と電気推進技術を活かし、推進モータおよびコントローラに関する設計、実験を行っている。

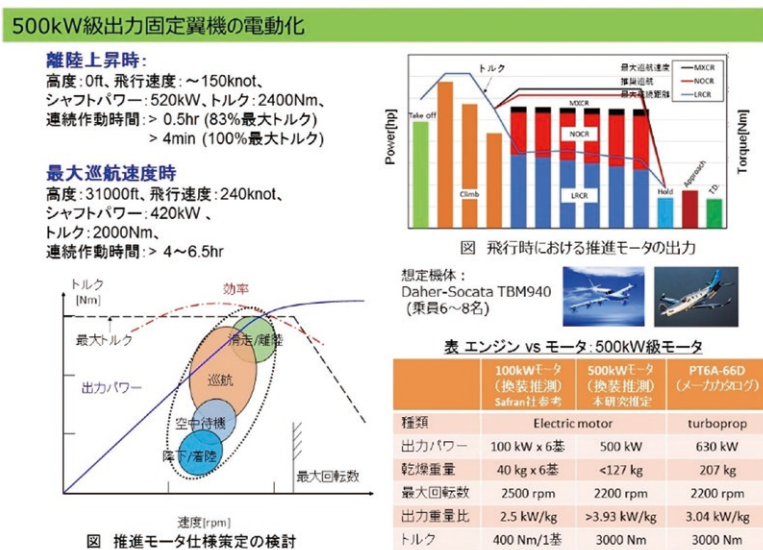


図2 電動推進機体の検討対象

(ウ) 産学官連携活動

新型コロナウイルス感染症の影響による航空機需要急減や、国産ジェット旅客機事業の事実上の凍結などにより、「長野県航空機産業振興ビジョン」を策定した2016年（平成28年）5月時点から大きく変化している。2020年に長野航空機産業振興ビジョンの改訂（以下、改訂ビジョン）を行った。本学は改訂準備会議、調査、打合せなどに参加し、当面の対応方針に関して提言した。

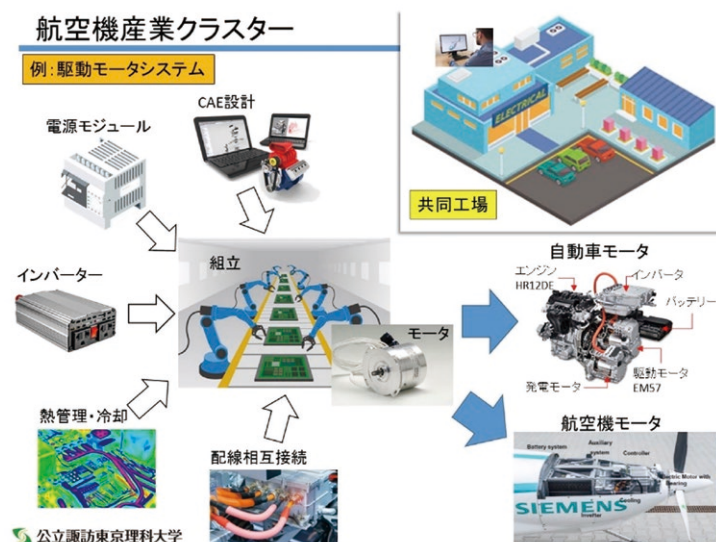


図3 産学官連携活動の提言

4. 今後の計画

NEDO プロジェクトにおいて、多摩川精機（株）に協力し、開発目標を達成するように研究を進めていく。さらに、次期の国家プロジェクトに向けて要素技術や研究環境などを準備する。また、電動航空機の研究に関して、企業、公的機関、地方団体、などと協力し、地域プロジェクトを支援しながら、実用化技術の研究開発を推進する。

自動運転技術評価の基盤整備

1. 背景・目的

自動運転技術評価の基盤整備を目的として、3テーマについて継続して検討した。

- ① 実車試験評価路の調査
- ② 自動運転模型車と試験コースの作成と走行評価
- ③ 自動運転化に向けたDSの改良と評価環境の整備

2. 研究メンバー

國行 浩史

3. 今年度の研究成果

- ① 東京大学生産技術研究所附属千葉実験場（柏キャンパス）にて所有する実験フィールドを調査した。走行試験路として片側1車線の直線路を約300m確保している。また、中央に信号機付きの交差点を設定し、ITS技術や自動運転車の走行・評価が可能である。



図1 東京大学生産技術研究所附属 千葉実験場
(出典：<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/about/facilities/chiba/>)

- ② 小型のPC(NVIDIA製 JetsonNano)を組み込んだ市販自動運転の模型車 JetBot(GClue製：図2)を用いて、前方カメラによる障害物、道路検知(白線内の識別)を機械学習させ評価実験を行った。約3m×2mの片側1車線の周回路評価コースを設定し(図3)、車線内の走行や相手車両の障害物回避が可能であることがわかった。さらに、通常走行を機械学習した模型車を追突や正面衝突となる事故リスクシーンを設定し、車両挙動の評価を行った。その結果、想定しにくい追突や正面衝突となる衝突事故が見られ(図4)、今後、自動運転時の事故リスク評価の一助として活用できることがわかった。



図2 JetBot

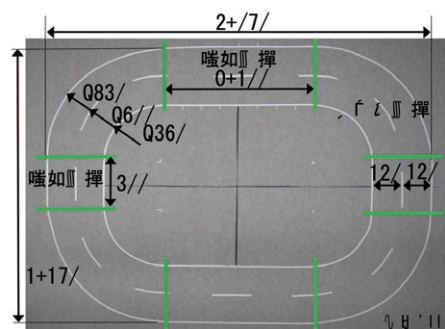


図3 模型実験の周回路評価コース

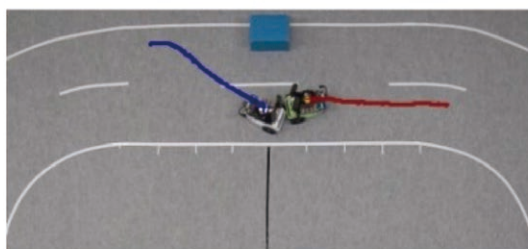


図4 想定しにくい事故シーンの例(対面走行時の逆行動)

- ③ 自動運転時の運転行動等を分析、評価するためのベースとなる実車に近いドライビングシミュレータ（以下、DS）の構築がほぼ完了できた。DSの視野角を拡大するために、曲面有機ELモニターを用いて約180度の視野角を持つモニター装置を組み込んだ（図5）。また、実車に近いステアリング操舵特性およびブレーキ反力特性を設定するために、DSのソフトウェアと連動した反力モーターを組み込み、チューニングを行った。

さらに、実際の道路の走行評価を効率的にできるように道路モデルをテンプレート化したDS評価モデル作成手法を考案し（図6）、第8回学生プログラミングワールドカップ（フォーラムエイト主催）にて審査員特別賞を受賞した。この手法を用いて、国道152号（大門街道）などの近隣の中山間道路モデルを作成できた（図7）。



図5 DSモニター装置および評価エリア

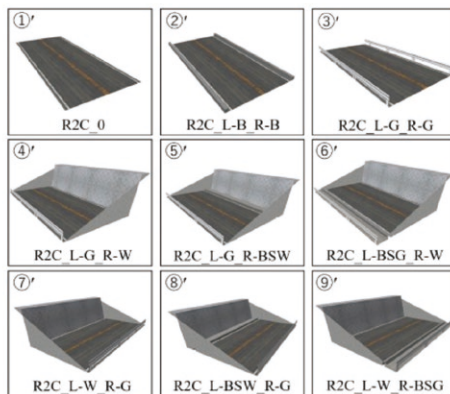


図6 評価モデル作成テンプレート



図7 DS評価エリア（国道152号：大門街道）

4. 次年度以降の計画

次年度は、引き続き模型実験車を用いた自動運転時の事故リスクシーンを拡大し、評価・検討を進める。また、今年度構築したDSのさらなる改良、特に自動運転時を想定した装置の改良等を行い、例えば自動運転時から人へ権限を委譲されるシーンなどの危険な状況を想定した評価をできるようにする。

次世代輸送システム研究部門 研究業績リスト

査読付き論文

- [1] 雷忠, 太陽光エネルギーを利用したソーラープレーンの技術課題、Technical Journal of Advanced Mobility ～次世代移動体技術誌～ 1(1) 62 - 71 2020年4月
- [2] 國行浩史, 行田拓人, 窪田雄聡, 3次元道路線形計測による中山間地域の交通事故要因の研究, 自動車技術会論文集, Vol.51, No.5, pp.938 - 943, 2020 (2020年5月発表)

口頭発表

- [1] 星野 祐, 田中 魁, 動力的安定性を有する継手型全方向モビリティの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2A1 - O08 (2020年6月発表)
- [2] 丹羽翔志, 下川貞仁, 雷忠: 小型プロペラ飛行機の飛行性能に関する推算, 日本航空宇宙学会第58回飛行機シンポジウム, 2020年11月
- [3] 中釜亮, 雷忠: 超微細気泡水による洗浄に関する研究, 第11回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2020年10月26日 - 2020年10月28日
- [4] 國行浩史, 山崎一真, 佐々木勇輔, 東海太, 左右カーブの認知差と事故リスクに関する分析, 日本交通科学学会講演会講演集, 2020 Vol.20, p.91, 2020 (2020年11月発表)

講演

- [1] 雷忠, “電動化”の取り組みから, “駆動モータシステム開発”に求められるコア技術, ニーズ・概仕様, 航空機システム研究会「操縦・飛行システム分科会」, NPO 諏訪圏ものづくり推進機構主催, 2020年10月7日
- [2] 雷忠, 航空機の電動化技術及びこれからの展開, AREC 第228回リレー講演会 (航空・宇宙), 一般財団法人浅間リサーチエクステンションセンタ主催, 2020年11月19日

受賞

- [10] 受賞者: 東海太, 佐々木勇輔, 山崎一真 (國行研究室)
 受賞名: 第8回学生プログラミングワールドカップ 審査員特別賞
 受賞題目: Creation of Hilly and Mountainous Road Simulator Model Using a Card System
 受賞内容: 株式会社フォーラムエイトが主催した第8回学生プログラミングワールドカップにおいて、機械電気工学科國行研究室から参加した学生チーム (チーム名: A.S.Y.) が審査員特別賞を受賞した。テンプレート化した道路モデルを考案し、その組み合わせで中山間地域のDS評価モデルを作成する画期的な手法を開発したことが評価された。
 受賞日: 2020年11月19日

企業連携

- [1] 雷忠, 企業共同研究「ファインバブルの生成と効果, 及びその産業用途への適用についての検討」, 2020年1月~2021年1月

外部資金獲得

- [1] 佐藤大記, 雷忠, 航空機電動化を指向した電池管理システムの高度化, 宇宙航空研究開発機構 JAXA 航空イノベーションチャレンジ 2020 powered by DBJ, 2020年9月 - 2021年3月
- [2] 雷忠, 北村政英, 北村正司, 佐藤大記, 「NEDO 先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/航空機向け高出力・高密度モータの技術開発」に係る委託業務変更実施計画書 (2020年7月~2021年7月) (継続)
- [3] 雷忠, 消毒液に関する新しい製造法の開発及び消毒除菌効果の確認実験, 2021年2月~2021年7月