

---

---

# 次世代輸送システム研究部門

2018 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（2019.3.31 現在）

（部門長）		（部門研究員）
星野 祐 教授	⋮	星野 祐 教授
（副部門長）	⋮	國行浩史 准教授
大島政英 教授	⋮	大島政英 教授
	⋮	佐藤大記 助教
	⋮	北村正司 教授
	⋮	齊藤 茂 客員教授
	⋮	雷 忠 教授

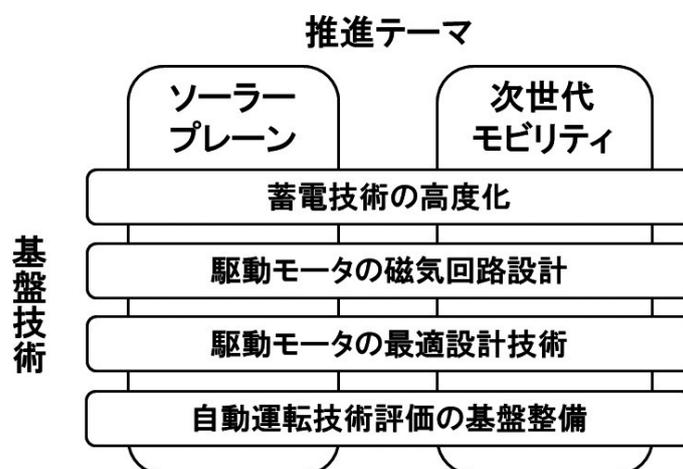
## 次世代輸送システム研究部門 活動サマリー

### 1. 背景・目的

長野県は2016年に「航空機産業振興ビジョン」を策定し、航空産業に参入する活動を推進している。また、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 CO<sub>2</sub> 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、ソーラープレーン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。



### 2. 2018 年度活動サマリー

二つの推進テーマと、基盤技術の両面から研究を進めた。

#### 1) ソーラープレーンの実用化、小型電動航空機の検討（推進テーマ）

地域の企業と協力して新たな機体を開発することを計画していたが、安全管理等の問題から今年度の実施を見送り、大学単独で新たな機体を設計し、製作を進めている。5月に飛行試験を実施する予定である。

一方、本部門の研究が「ジェネラルアビエーション航空機用高出力電氣推進システムの研

究開発」として「JAXA 航空技術イノベーションチャレンジ 2018 powered by DBJ」に採択され、小電動航空機に関する調査と概念設計、電気推進システムの研究開発に関する調査、ベアリングレス Halbach 配列モータ磁気回路の試設計、インバータの初期設計などを実施した。

## 2) 電動航空機モータのフィージビリティスタディ

ハルバッハ配列の永久磁石同期モータの検討とベアリングレスドライブ技術の適用を実施した。モータの重量当たり発生するトルクを増加するため、極ごとに磁束を集中して分布するハルバッハ配列の永久磁石同期モータを検討し、有限要素解析を行った。その結果、今回の解析モデルではハルバッハ配列の方が鉄損の割合が小さいものの、効率はほとんど差がない結果となった。今後、ハルバッハ配列の優位性が表れるモータ形状を再検討していく予定である。

ベアリングレスドライブに関しては、有限要素法モデルを作成しトルクと支持力の解析を行った。トルクと支持力の解析結果から正しくトルクと支持力が発生しており、特に支持力はリップが非常に小さく安定に磁気支持できることが確認できた。今後は航空機推進用モータの仕様を満足するよう詳細設計を進める。

## 3) 数値計画法と磁界解析の組合せによる小型電動航空機用主モータの最適設計

Halbach cylinder 回転子、自動車分野で実績がある埋込磁石型回転子を適用した 2 種類の永久磁石同期モータを対象に、パワーウェイト比の最大化問題を解いて、主モータの構造、パワーウェイト比の上限値などを調査した。その結果、①パワーウェイト比の観点からは Halbach cylinder 回転しが有利であり、巻線方式としては特長を活かせる空隙巻線が好ましく、電流密度  $30 \text{ A/mm}^2$  でパワーウェイト比が  $8 \text{ kW/kg}$  程度であること、②埋込磁石型回転子は、パワーウェイト比に関して若干劣るが、信頼性およびコストの観点から選択肢になり得る、ことがわかった。

## 4) 次世代モビリティの実用化（推進テーマ）

これまでの球乗り型の問題点を解決した継手型電動車いす 2 台の機械組立と電装を終えた。その後、組み込み制御系の設計と実装に取り組み、スポーツ競技用電動車いすの基本的な安定化制御に成功した。また、実験結果を踏まえ、機械的剛性を改善した。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。

知財の国内外における確保と、国内外の商社や製造企業との製品化開発に関する協議を進めた。また、長野市、京都市、横須賀市などで展示を行い、市民、製造企業、自治体関係者に紹介し、交流の機会を設けた。その後も出展依頼などを受けている。

今後は自動運転を含む運転支援技術の開発や、外乗りモビリティの実証実験の実施、電動車いすの安全基準審査への適合などに取り組む。

## 5) 次世代モビリティに対応する蓄電技術の高度化

次世代モビリティの蓄電技術について課題を整理するため、既存モビリティおよび次世代モビリティの蓄電技術に関する課題調査を行った。またそれらを踏まえ、劣化抑制技術におけるミニモデルを用いた基礎的検討を行った。課題調査の結果、次世代モビリティの蓄電技術に向けた課題として「エネルギーマネジメント」「急速充電・劣化抑制」「低コスト化」を重点要素として取り上げることとした。

今年度は前述の課題のうち、劣化抑制技術に関する基礎検討を行った。その成果として、電圧アンバランスに起因した劣化を抑制するセル電圧均等化動作の高速化手法、セル電圧均等化回路の簡易的な故障判定手法、および均等化動作に必要なパラメータの簡易設計指針が得られた。

## 6) 自動運転技術評価の基盤整備

日本自動車研究所が2017年に開設した自動運転評価拠点 Jtown の情報を収集した。約2 kmの周回路、V2X市街路、多目的市街路、特異環境試験路から構成されており、さまざまな状況の走行評価が可能である。この多目的市街路は直線距離300 m（最高速度制限60 km/h）を有しており、実車の走行にはこの程度の規模が必要であることがわかった。

南アルプスむら長谷において実施している自動運転バスの実証実験を調査および試乗した。バスはLiderセンサーとGPS情報から、カーブ、狭い路地もスムーズに追従し、運転ルートに設定されているバス停に自動で停車、発進するシステムであった。ただし、停止後は運転者が安全確認して自動運転モードに切り替える仕組みであり、完全自動運転化にはまだ課題があり、引き続き情報収集していく。

簡易的な自動運転技術（測域センサー、カメラ等）を組み込める模型自動車の試作を検討した。測域センサーの表示、カメラを用いた遠隔操作までの試作を完了できた。継続して自動走行化の組み込みを検討する。

## 【研究成果】

### ソーラープレーンの実用化

#### 1. 背景・目的

長野県は2016年に「長野県航空機産業振興ビジョン」を策定して航空産業に参入する活動を推進している。また、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いる。航空機の電動化より、二酸化炭素CO<sub>2</sub>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ある。

そこで、航空機の電動化のための、機体設計、製造、モータ、インバータ、電池などの技術開発を目的とする。

## 2. 研究メンバー

メンバー	主な役割分担
雷 忠	全体統括、機体設計
大島政英	モータの検討、ベアリングレスドライブ
北村正司	数値解析
佐藤大記	蓄電池

## 3. 今年度の研究成果

### (ア) ソーラープレーンの実用化

企業に協力してもらい、学外で作業を行うことは管理問題があり、今年度を実施することが困難であるため、計画を見直した。ソーラープレーンの製作はこれまでと同様に独自に学内で行うことになった。7号機の設計を完了し、現在機体を製作しており、5月中に飛行テストを行う予定である。

### (イ) 小型電動航空機（新規委託研究）

本部門メンバー4名が共同で提案した研究テーマが宇宙航空研究開発機構の公募型研究「JAXA 航空技術イノベーションチャレンジ 2018 powered by DBJ」に採択された。フィジビリティスタディとして次の内容を実施し、研究成果を達成して、JAXA に成果報告書と短期計画・長期計画を提出した。

- ・小電動航空機に関する調査と概念設計
- ・電気推進システムの研究開発に関する調査
- ・関連企業、JAXA との技術検討
- ・ベアリングレス Halbach 配列モータ磁気回路の試設計
- ・インバータの初期設計



## 4. 今後の計画

引き続き、製作中の7号機を完成し、飛行テストを行う予定である。また、搭載機器や通信技術などを導入し、応用機能の拡張を狙う。企業との連携については、来年度に再検討し、共同で研究開発を進める方法を模索する。

新規の小型電動航空研究に関して、企業、公的機関、地方団体、などと連携し、研究会を設立する。また、外部資金を積極的に獲得し、実用化する研究開発を推進する。

### 電動航空機モータのフィージビリティスタディ

#### 1. 背景・目的

航空機の電動化を踏まえ、以下の2項目について、フィージビリティスタディを行った。

1. ハルバッハ配列の永久磁石同期モータの検討
2. ベアリングレスドライブ技術の適用

#### 2. 研究メンバー

大島政英

#### 3. 今年度の研究成果

##### 1. ハルバッハ配列の永久磁石同期モータの検討

モータの重量当たり発生するトルクを増加するため、極ごとに磁束を集中して分布するハルバッハ配列の永久磁石同期モータを検討した。今年度は最初のステップとして、ラジアル方向に着磁した従来の永久磁石同期モータと比較するため、有限要素法解析ソフト（JMAG Ver 17.1）を用いてモータをモデリングし解析を行った。図1にハルバッハ配列永久磁石同期モータの解析モデルを示す。解析結果より、ハルバッハ配列にすると、トルクリプルの点では優位性はあるが、本来の目的に反してトルクの大きさは従来型より減少してしまった。また、両モデルの効率と損失も解析ソフトを用いて求めた。ハルバッハ配列の方が鉄損の割合が小さいものの、効率はほとんど差がない結果となった。今回の解析モデルは一例なので、モータ各部の寸法を変えて、ハルバッハ配列の優位性が表れるモータ形状を今後、再検討していく予定である。

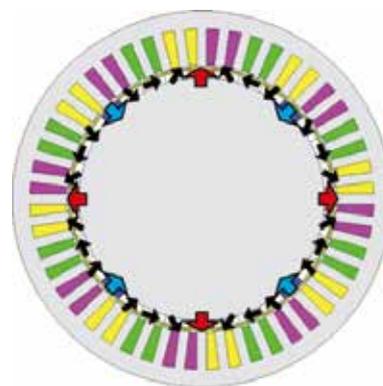


図1 ハルバッハ配列型

##### 2. ベアリングレスドライブ技術の適用

ベアリングレスモータは、磁気力で回転軸を支持する磁気軸受機能とモータの機能を一体化した電磁機械である。特長としては

- (1) 機械的な摩擦がないため、メンテナンスが容易で寿命が長い
- (2) 高速・高出力化が可能

など挙げられる。このため、メンテナンスが困難な環境（宇宙空間、原子炉内など）や潤滑剤による汚損が問題になる環境（真空中、液体中など）のドライブ装置だけでなく、高速ドライブにも適している。現在、基礎研究が終わり実用化の段階に入りつつある。

また、ベアリングレスモータは多軸非接触安定制御を行うため、図2のようにモータをタンデムに配置することから、航空機用推進モータで進められている構造、配置に適していると思われる。

以上の理由により、航空機の電動化にベアリングレスドライブ技術は非常に優位性があると考えます。中でも dq 軸電流制御ベアリングレスモータは以下のような特長があることから適用を検討していきたい。

- (1) 1種類の巻線でトルクと支持力を発生でき巻線構造がシンプルである。
- (2) 制御方法も従来の IPM（埋込磁石構造）モータと同様である。
- (3) トルクと支持力、それぞれ制御範囲が広い。
- (4) 安全性、信頼性を備えている。

dq 軸電流制御ベアリングレスモータは 120 度毎に 3 つのセクションに分け、各セクションには三相巻線 U、V、W が巻いてあり、各セクション独立に制御する。したがって、巻線短絡や開放、インバータ故障など 3 つセクションのうち 1 つのセクションでトラブルが発生しても他の 2 つのセクションでトルク、支持力の制御し持続的に非接触運転が可能である。すなわち、上述の (4) に挙げた安全性、信頼性を備えており、航空機分野において非常に重要と思われる。

今年度はフィージビリティスタディとして、有限要素法モデルを作成しトルクと支持力の解析を行った。トルクと支持力の解析結果から正しくトルクと支持力が発生しており、特に支持力はリップルが非常に小さく安定に磁気支持できるものと思われる。今後は航空機推進用モータの仕様を満足するよう詳細設計を進める予定である。

## 4. 今後の計画

### 2019 年度

ベアリングレスドライブ技術を適用した航空機推進用モータの詳細な磁気回路設計  
機械構造設計、試作機図面作成

### 2020 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、磁気浮上運転調整（パラメータ同定）

モータ単体で磁気浮上試験

### 2021 年度

モータを試作航空機に搭載、飛行試験

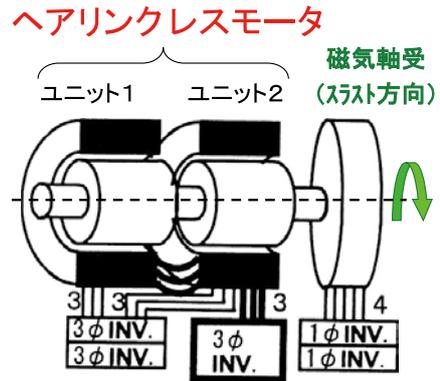


図2 ベアリングレスモータ

## 数理計画法と磁界解析の組合せによる小型電動航空機用主モータの最適設計

### 1. 背景・目的

小型電動航空機用主モータのフィジビリティスタディの一環として、ギャップ磁場の増大が期待できる Halbach cylinder 回転子、自動車分野で実績がある埋込磁石型回転子を適用した2種類の永久磁石同期モータ（前者を HCM、後者を IPM と略記）を対象に、パワーウェイト比（以下、PWR）の最大化問題を解いて、主モータの構造、PWR の上限値などを調査した。

### 2. 研究メンバー

北村正司

### 3. 今年度の研究成果

#### (1) 最適化問題と最適化の方法

図1に HCM と IPM の計算モデル（固定子外径  $\phi 300$ 、平角線を用いた高占積率の波巻コイルを想定）を示す。最適化変数の数はそれぞれ 6、10 である。目的関数は、離陸に必要な最大出力（100 kW、2700 rpm）発生時の PWR であり、これを最大化した。この際、ペナルティ関数法を用いて、ティースとヨーク部における磁束密度の大きさに上限値を設定した。HCM については、固定子鉄心の磁気飽和が予想されるので、スロット巻線と空隙巻線（ティース部を強化プラスチックで置換）の2タイプを対象とした。図2に最適化計算の手順と最適化エンジンに搭載した直接探索法（Rosenbrock 法）のアルゴリズムを示す。

#### (2) 計算結果

図3に一例として12極の HCM に関する最適化計算の結果を示す。これは、3 ケースの導体電流密度に対して前節の PWR 最大化問題（スロット巻線と空隙巻線固定子の2タイプ）を解いた結果をプロットしたものである。空隙巻線タイプの最適形状は、電流密度に依らずほぼ同一である。したがって、PWR は電流密度に比例して増大する。IPM の計算結果を省略するが、表面磁石型に近い最適解が得られる。PWR は若干劣るが、ほぼ同等である。

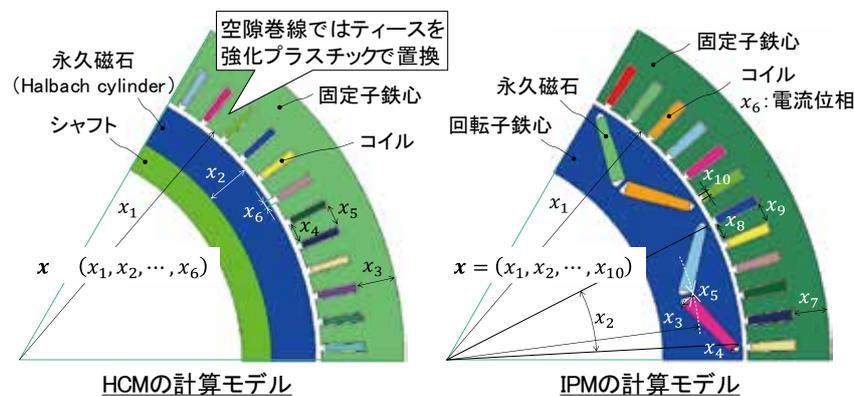


図1 対象モータの計算モデル

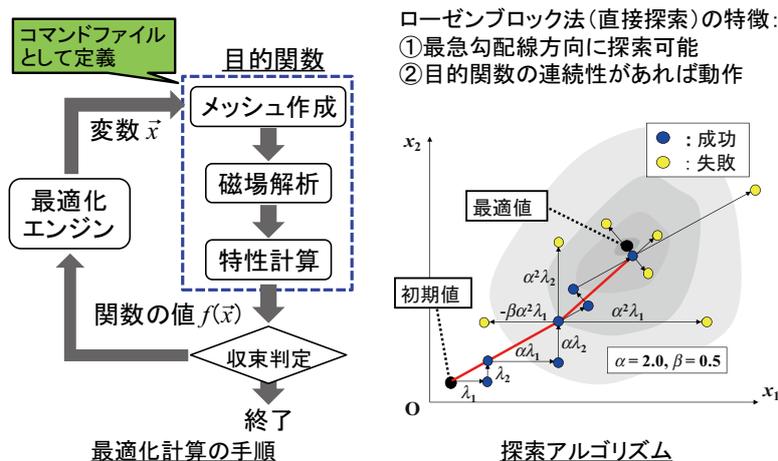


図2 最適化計算の手順と探索アルゴリズム

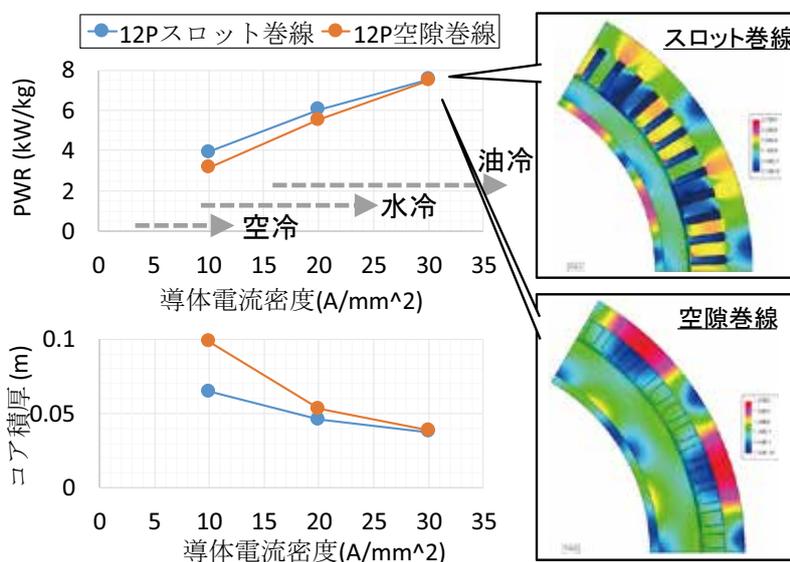


図3 12極のHCMに関する最適化計算の結果 (固定子外径 φ300、出力 100 kW、回転数 2700 rpm)

(3) まとめ

電動航空機用主モータの候補として、2種類のモータ（HCM と IPM）を対象に、PWR に注目した最適設計を実施した結果、① PWR の観点からは HCM が有利である。HCM の巻線方式としては Halbach cylinder の特長を活かせる空隙巻線が好ましい。電流密度 30 A/mm<sup>2</sup> で PWR は 8 kW/kg 程度である。② IPM は、PWR に関して若干劣るが、信頼性およびコストの観点から選択肢になり得る、ことがわかった。

4. 今後の計画

- (1) Halbach array モータの PWR に注目した最適設計
- (2) 空隙巻線の電磁力支持構造、Halbach array 回転子の機械設計
- (3) 機体設計と連携したモータの冷却方式の選定と伝熱設計

## 次世代モビリティの実用化

### 1. 背景・目的

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、つくば市モビリティロボット実証実験エリアをはじめとする各地で社会実装が試行されている。次世代モビリティの中でも特に市場拡大が予想されているのが、動力学的安定性を有するパーソナルモビリティである（富士キメラ総研「2015次世代モビリティ関連市場総調査」）。少子高齢化は中国でも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、これまでに進めてきた新たなモビリティの動作原理検討とその裏付けのための試作を踏まえ、実用化に向けた商品化開発に必要な要素技術を検討する。

- ① 駆動部の部品点数削減
- ② バッテリーマネジメント
- ③ 自動運転・運転支援技術
- ④ 車両評価・実証実験

### 2. 研究メンバー

星野 祐

### 3. 今年度の研究成果

- (1) 継手型電動車いす 2 台の機械組立と電装を 8 月中旬に終えた（図 1、図 2）。その後、組み込み制御系の設計と実装に取り組み、スポーツ競技用電動車いすの基本的な安定化制御に成功した。また、実験結果を踏まえ、機械的剛性を改善した。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。
- (2) 関連する知財のうち、球乗型案件は PCT 出願の予備審査を通り、各国移行（JST 支援



図 1 下肢不自由者用  
電動車いす



図 2 スポーツ競技用  
電動車いす



図 3 ネクストモビリティ Expo  
2018（京都 KICK）

による中国・台湾での特許出願)と国内審査請求に進んでいる。継手型案件は JST 支援による PCT 出願予備審査に対し、第 34 条補正で対応した。いずれも東京理科大学 URA センターが対応している。

- (3) 球乗型電動車いすの製品化について、上海の医療機器製造企業及び新宿区商社と推進する方向で合意し、覚書を締結した。2018 年 12 月に上海で上記企業と面談協議し、主に安全基準適合のための技術項目を確認した。
- (4) 京都市 KICK で開催されたネクストモビリティ Expo2018 に試乗展示した(図 3)。台湾高雄市医院及び医学大学の訪日団に、本学でモビリティと車いすを紹介し、試乗して頂いた。2019 年 1 月にヨコスカ×スマートモビリティ・チャレンジで展示した。2019 年 4 月から 5 月にかけて文科省エントランスにて球乗り型モビリティを常設展示している。
- (5) 自動運転に向けたミドルウェアとして ROS を導入し、ROS 上でシミュレータを構築した。

#### 4. 今後の計画

- (1) 継手型の 2 台について、機構的改善や制御系の実装を含め開発を続ける。その後、部門内で進行中の運転支援技術(自動運転を含む)を取り込む。
- (2) 継手型知財の各国移行のため、連携先企業を探す。
- (3) 製品化開発について、今後も上海の企業と協議を続ける。6 月上旬にはよこすか YY のりものフェスタ 2019、6 月中旬には Interop Tokyo 2019 アカデミックイノベーションで試乗展示する。
- (14) 球乗り型モビリティについては実証実験を行うための準備、電動車いすについては安全基準の審査を受けるための準備を進める。

### 次世代モビリティに対応する蓄電技術の高度化

#### 1. 背景・目的

次世代モビリティの蓄電技術について課題を整理するため、既存モビリティおよび次世代モビリティの蓄電技術に関する課題調査を行った。またそれらを踏まえ、劣化抑制技術におけるミニモデルを用いた基礎的検討を行った。

#### 2. 研究メンバー

佐藤大記

#### 3. 今年度の研究成果

課題調査の結果、次世代モビリティの蓄電技術に向けた課題として「エネルギーマネジメント」「急速充電・劣化抑制」「低コスト化」を重点要素として取り上げることとした。

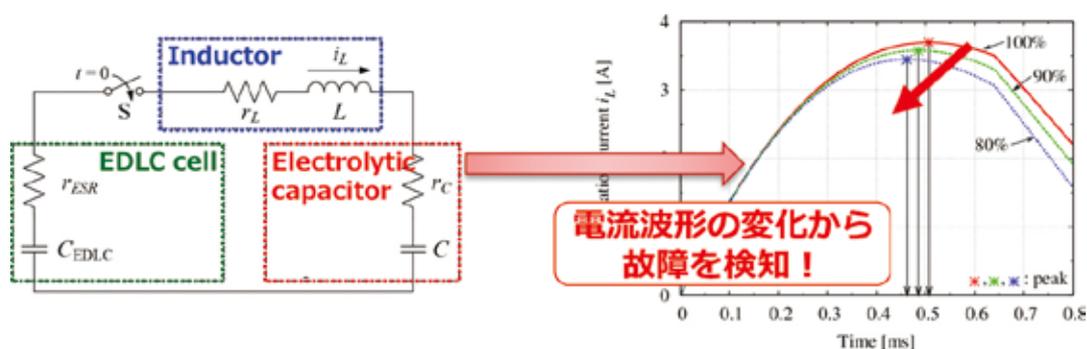


図1 セル電圧均等化動作の高速化手法を適用した実験結果

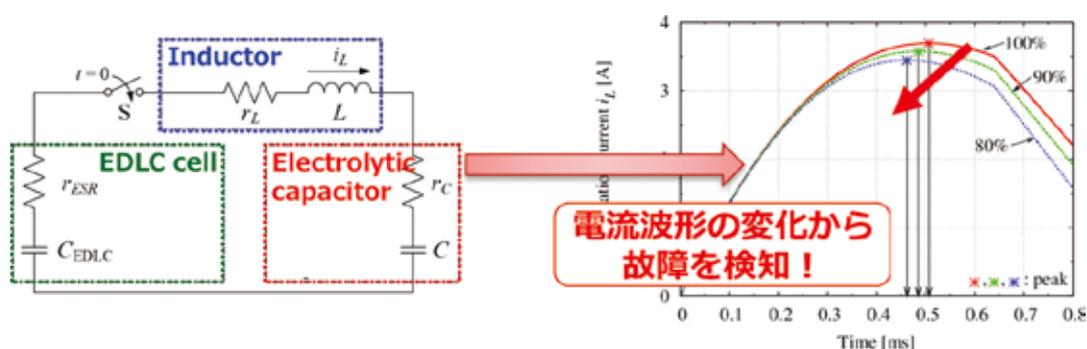


図2 電流情報のみを用いたセル電圧均等化回路の簡易故障検出手法

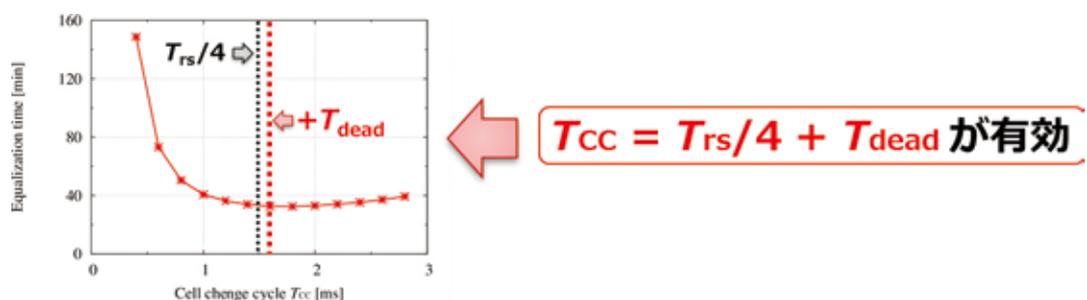


図3 セル切替周期 Tcc の簡易設計手法

2018年度は前述の課題のうち、劣化抑制技術に関する基礎検討を行った。その成果として、電圧アンバランスに起因した劣化を抑制するセル電圧均等化動作の高速化手法（図1）、セル電圧均等化回路の簡易的な故障判定手法（図2）、および均等化動作に必要なパラメータの簡易設計指針（図3）が得られた。

#### 4. 今後の計画

2019年度は今年度の成果を踏まえ、引き続き劣化抑制技術の検証を進める。加えて、急速充電時の動作解析を行い、蓄電モジュールの定常状態だけでなく充放電状態を含めた劣化抑制技術の構築に取り組む。

## 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テーマについて検討をスタートする。

- ① 車試験評価路の調査・仕様検討
- ② 南アルプスむら長谷（道の駅）を拠点とした自動運転サービスの実証実験の参画
- ③ 自動運転模型車の調査・試作

### 2. 研究メンバー

國行浩志

### 3. 今年度の研究成果

- ① 日本自動車研究所が2017年に開設した自動運転評価拠点 Jtown の情報を収集した。約2 km の周回路、V2X 市街路、多目的市街路、特異環境試験路から構成されており、さまざまな状況の走行評価が可能である。この多目的市街路は直線距離300 m（最高速度制限60 km/h）を有しており、実車の走行にはこの程度の規模が必要であることがわかった。
- ② 南アルプスむら長谷において実施している自動運転バスの実証実験を調査および試乗した。バスは Lidar センサーと GPS 情報から、カーブ、狭い路地もスムーズに追従し、運転ルートに設定されているバス停に自動で停車、発進するシステムであった。ただし、停止後は運転者が安全確認して自動運転モードに切り替える仕組みであり、完全自動運転化にはまだ課題があり、引き続き情報収集していく。（図1）
- ③ 簡易的な自動運転技術（測域センサー、カメラ等）を組み込める模型自動車の試作を検討した。測域センサーの表示、カメラを用いた遠隔操作までの試作を完了できた。継続して自動走行化の組み込みを検討する。（図2）



図1 自動運転実証実験バス

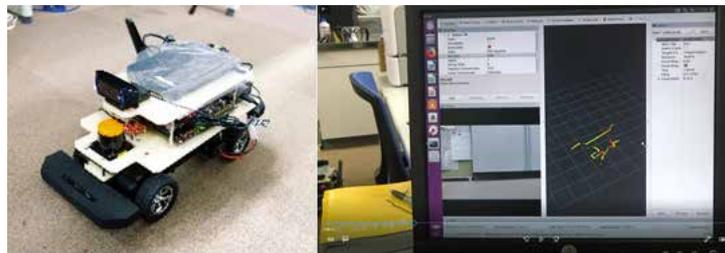


図2 自動運転模型車とモニター構成

### 4. 次年度以降の計画

次年度は引き続き、以下の項目に着目して調査、模型の試作検討、評価を進める。

- ① 実車試験評価路の調査（特に、大学等の研究機関など）
- ② 自動運転実証実験の情報収集と参画（継続）
- ③ 自動運転模型車の改良（自動運転化、高速処理化など）および試験コースの作成と評価

## 次世代輸送システム研究部門 研究業績リスト

### 学術論文

- [1] 佐藤大記, 星伸一, 内田晃介:「LC 直列回路方式セル電圧均等化回路における蓄電セル電圧の大小関係推定を利用した均等化時間低減法」, 電気学会論文誌 D, Vol.139, No.6, pp.1-10, (2019) (in press).

### 口頭発表

- [2] 羽賀拓磨, 雷忠:4 席小型電動航空機の概念設計, 日本航空宇宙学会 第 55 回中部・関西支部合同秋期大会, 名古屋, 平成 30 年 11 月 24 日.
- [3] 佐藤大記, 星伸一:「回生型ゲート駆動回路を適用した LC 直列回路方式セル電圧均等化回路のバッテリーモジュール充電時における動作特性」, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, Vol.IV, pp.115-118, (2018).
- [4] 佐藤大記, 星伸一:「均等化電流を利用した LC 直列回路方式セル電圧均等化回路の回路素子の劣化判定」, 電気学会 自動車/交通・電気鉄道合同研究会, VT-18-028/TER-18-073, pp.7-12, (2018).
- [5] 佐藤大記, 星伸一:「LC 直列回路方式セル電圧均等化回路におけるセル切替周期と均等化時間の関係性に関する一考察」, 平成 31 年電気学会全国大会, 4-272, pp.450-451, (2019).

### 特許

- [6] 星野 祐, 全方向移動装置及びその姿勢制御方法, 特願 JP2017/023822, 特開 WO2018/003886, 2018-525231, CN201780040317X, TW106121601
- [7] 星野 祐, 全方向移動装置及びその姿勢制御方法, 特願 JP2018/018611, 特開 WO2018/216530

### 展示

- [8] NAGANO EXPO 2018, 2018/9/23-24, 若里公園
- [9] ネクストモビリティ Expo2018 (京都スマートシティ Expo 2018), 2018/10/4-5, KICK
- [10] ヨコスカ×スマートモビリティ・チャレンジ 2019, 2019/1/24-26, YRP センター 1 番館