

**2. 【研究計画】** ※適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。なお、本項目は1頁に収めてください。様式の変更・追加は不可。

**(1) 研究の位置づけ**

特別研究員として取り組む研究の位置づけについて、当該分野の状況や課題等の背景、並びに本研究計画の着想に至った経緯も含めて記入してください。

**■モータ分野の現況**

近年、環境問題への配慮から様々な製品・機構の電動化が進んでおり、その動力源には電気エネルギーを力学的エネルギーに変換する電動モータが用いられる。現在、このようなモータの中でも特に高出力、高効率、高信頼性といった利点から、回転子に永久磁石が埋め込まれた埋込磁石同期モータ (IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) が自動車駆動用、産業用、家電用として主流となっている (図1)。

**■埋込磁石同期モータ設計が直面する課題**

IPMSM は次の3つの要因により、設計期間の長期化が問題である。

**(a) 長時間の有限要素解析**

IPMSM では図2に示すような有限要素解析が一般に用いられる。有限要素解析では、計算精度の向上を目的として構造を細かな要素に分割して特性計算を実施するため、特性解析に長時間を要する。

**(b) 複数条件での有限要素解析の必要性**

IPMSM は回転子が回転運動を行うため、複数の回転子位置で特性解析を行い、時系列データを入手する必要がある (図3)。また、電気自動車の坂道走行や高速道路走行に代表されるように、IPMSM は幅広い速度-トルク特性が要求され、その解析にはコイルに流す電流条件を変えて解析を行う必要がある (図4)。このように複数の回転子位置、電流条件での有限要素解析が必要とされ、その解析条件数は例えば自動車駆動用 IPMSM では数万程度となり、合計解析時間は数時間から数週間に及ぶ。

**(c) 設計自由度の高さ**

IPMSM は永久磁石を回転子に埋め込んでいるため設計自由度が高く (図5)、要求仕様に適う形状の検討には、様々な形状を有限要素解析する必要がある。

これらの3つの要因から、IPMSM は設計開発期間が長期化するという問題を抱えており、設計期間の短縮が求められている。

**■本研究計画の着想に至った経緯**

以上で説明した IPMSM の設計開発期間の長期化という課題の解決には、解析時間の短縮とモータ形状の自動設計システムが必須である。これらの2つの解決策は、画像解析分野や自然言語処理分野で発展の著しい深層学習モデルの「識別」と「生成」という2つの機能によりそれぞれ解決でき得る。自分野の課題を明確化・細分化することで、他分野で発達した手法との共通点を見出すことができ、次頁以降で説明する本研究計画・内容の着想に至った。

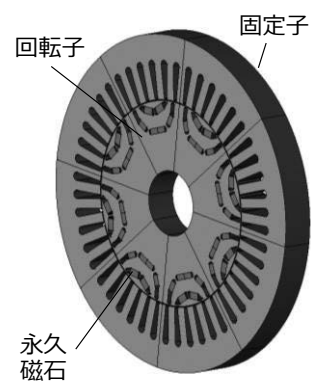


図1 代表的な IPMSM の構造 (周辺部品は省略)

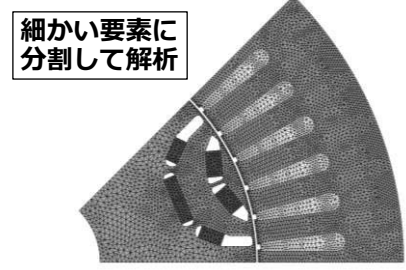


図2 有限要素解析の要素分割の様子 (1/8 モデル)

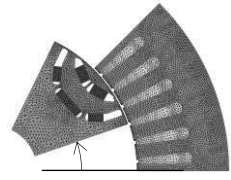


図3 異なる回転子位置での様子

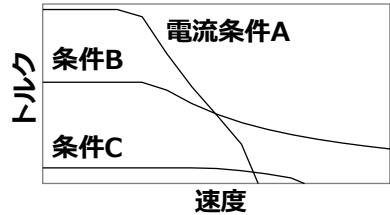


図4 異なる電流条件での特性

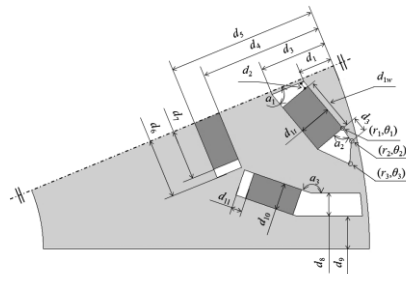


図5 回転子の図面の例 (寸法 : 23 箇所)

**【研究計画】(続き)** ※適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。なお、各事項の字数制限はありませんが、全体で2頁に収めてください。様式の変更・追加は不可。

**(2) 研究目的・内容等**

- ① 特別研究員として取り組む研究計画における研究目的、研究方法、研究内容について記入してください。
- ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、具体的に記入してください。
- ③ 研究の特色・独創的な点（先行研究等との比較、本研究の完成時に予想されるインパクト、将来の見通し等）にも触れて記入してください。
- ④ 研究計画が所属研究室としての研究活動の一部と位置づけられる場合は申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ⑤ 研究計画の期間中に受入研究機関と異なる研究機関（外国の研究機関等を含む。）において研究に従事することも計画している場合は、具体的に記入してください。

**■研究目的**

本研究は、深層学習を活用した IPMSM の自動設計アルゴリズムを構築し、IPMSM の設計期間を短縮することを目的とする。

**■研究方法、内容**

本研究の根幹を担う技術は、大別すると「識別 AI」と「生成 AI」の2つである。前頁で示したように、設計期間の長期化の要因は(a)-(c)の3つが存在する。このうち(a), (b)を「識別 AI」による有限要素解析の代替、(c)を「生成 AI」による形状の統一的表現と自動設計により解決する。

**1. 識別 AI**

「識別 AI」は、有限要素解析の「モータ形状から運転特性を計算する」という役割をそのまま学習する。すなわち、入力であるモータ形状と出力である運転特性の関係を関数化する（図6）。「識別 AI」を学習するメリットは下記の通りである。

- (1) 内在する関係性を学習するため、最小限のデータからモータ形状の運転特性を高精度に予測できる。
- (2) 有限要素解析に比べて数百～数千分の一の時間で特性計算が完了する。
- (3) 一度学習すれば、何度でも使用可能である。

以上の利点から、最適化設計において多数のモータ形状の特性計算を行っても、短期間で最適形状に到達できる。

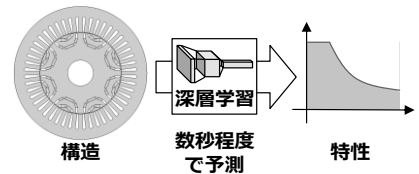


図6 識別 AI の概念図

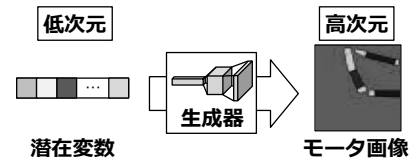


図7 生成 AI の概念図

**2. 生成 AI**

「生成 AI」は設計可能なモータ形状を統一的に表現する。図5に示したように、モータの形状は一般に寸法を用いて表現されるが、表現できる形状が初期形状に依存するという欠点が存在する。例えば磁石の幅や厚さは可変だが、磁石の数は変えられない。そのため、モータの形状を各座標の材料情報を指定し、画像として扱う。この表現方法は寸法表現では同時に扱えなかった様々な形状を統一的に扱うことができ、この画像を「生成 AI」によって生成する（図7）。「生成 AI」が担う役割を以下にまとめる。

- (1) 非常に大きい設計変数空間を次元削減（e.g. 画像：256×256×3 変数のテンソル⇒潜在変数：256 変数のベクトル）し、最適化設計時の探索範囲を限定する。
- (2) 既存の設計可能な形状のみを学習することで、実現不可能な形状を排除する。

以上の2種類の AI を活用して、図8のようにモータの形状最適化設計を行い、従来法より短期間で設計を完了する。

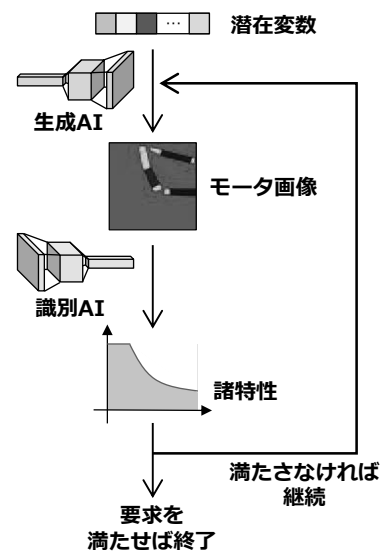


図8 形状最適化の概念図

### ■先行研究と比較した本研究の独創的な点

モータ分野において、深層学習を活用した事例はあまり多くは存在しない。数少ない先行研究では、機械学習や深層学習を用いて設計期間の短縮を目指しているが、モータの運転特性のうちトルク特性やある 1 つの駆動点での特性などしか考慮されず、限定的なモータ構造・特性のみを対象としていた。

その主たる理由が十分なデータ数の確保の難しさである。先に述べたように、モータ設計用 AI の教師データは有限要素解析によって生成するが、その教師データ生成自体に時間が掛かる。例えば、10 万のデータセットを生成するためには、概算で 1 年以上の期間を要する。

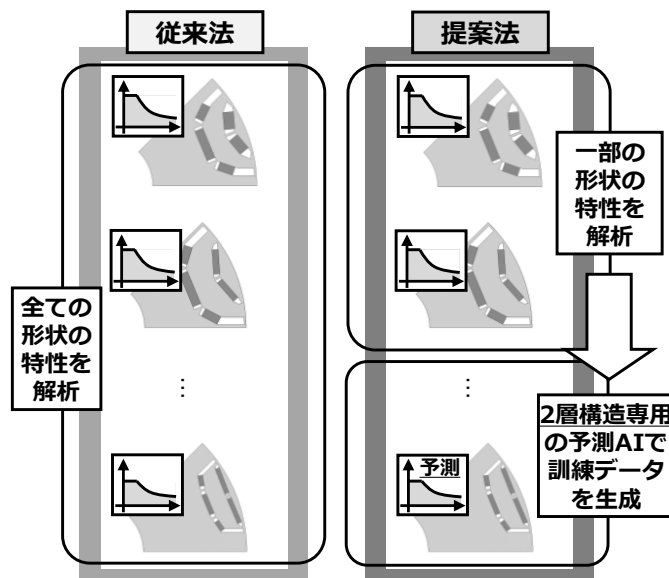


図9 教師データ生成の概念図

このデータ生成の課題を解決するため、本研究では教師データ自体を機械学習によって生成する。図9に例を示す。典型的な回転子構造（ここでは磁石が2層になった構造）を寸法表現により数千程度生成し、それぞれの運転特性を有限要素解析により導出する。この解析結果を用いて2層構造専用の特性予測AIを学習し、この予測モデルを用いて数万程度のデータを生成する。このプロセスを複数の典型的構造に適用することで、十分な量のデータを短期間のうちに確保する。

### ■具体的な研究期間内の研究計画と研究目標

2020 年度終了時点では、ビッグデータ生成のための小規模回帰モデルの学習（速度、トルク特性のみ）まで完了している。2021 年度以降には、生成したビッグデータを用いた回帰 AI および生成 AI の構築と、モータ形状の最適化を実施する。また、未検討のモータ特性（損失特性など）に関するビッグデータ生成も実施する。

以上の進捗状況から、特別研究員期間内での最終目標は次のように設定する。要求運転点（トルク、速度）と各種制約（電流、電圧、体格・重量制約）を与えた時、それらを全て満足しつつ従来構造よりも高効率となる自動車駆動用 IPMSM を短期間で自動設計するアルゴリズムを構築する。

### ■本研究の完成時に予想されるインパクト、将来の見通し

私は過去に自動車メーカーに在籍しており、日本のものづくり業界が海外ベンチャー、特に中国ベンチャーに着実に蝕まれる様を目の当たりにした。一番の理由は開発スピードで、日本のメーカーは製品性能や信頼性を維持しながら従来の半分程度の期間で製品開発を完了しなければならない状況に追い込まれている。そのため本研究は、開発期間の短縮という面でモータを使用する製造業界に絶大なインパクトを与え、自動車業界に限らず幅広い業界におけるイノベーション創出につながる。

今後、実際に企業の設計現場に AI 技術を普及していくためには、性能面に加えて安全性・信頼性といった側面に関しても検討する必要がある。そのため、本研究におけるモータの性能面における成果を踏まえたうえで、企業と密に連携してこれらの課題を解決し、製造業界へ情報科学技術を普及させることで業界全体の更なる発展に貢献したい。

### ■申請者が担当する部分

上記の内容は、全て申請者が着想から実装まで担当している研究であり、研究室の研究活動との直接的な関わりはない。

### 3. 人権の保護及び法令等の遵守への対応

※本項目は1頁に収めてください。様式の変更・追加は不可。

本欄には、「2. 研究計画」を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続が必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記入してください。例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続の状況も具体的に記入してください。

なお、該当しない場合には、その旨記入してください。

本研究内容で該当するものはないが、COVID-19 に関する国，府，大学のガイドラインを遵守しながら研究を遂行する予定である。

#### 4. 【研究遂行力の自己分析】 ※各事項の字数制限はありませんが、全体で2頁に収めてください。様式の変更・追加は不可。

本申請書記載の研究計画を含め、当該分野における(1)「研究に関する自身の強み」及び(2)「今後研究者として更なる発展のため必要と考えている要素」のそれぞれについて、これまで携わった研究活動における経験などを踏まえ、具体的に記入してください。

##### (1) 研究に関する自身の強み

###### ■研究における主体性

私は「2. 研究計画」で説明した研究内容のほぼ全てを独力で検討・提案し、積極的に成果発表を行ってきた。具体的な成果は、研究立ち上げから1年という期間で2件の査読付き国際学会（成果⑦-⑧）および4件の国内学会（成果⑨-⑫）で発表を行った。またそのアイデアが評価され、JSTのACT-X事業に採択（成果⑯）され、自身で研究費も獲得している。以上のように、「モータ設計×AI」という分野を切り開いている主体性が私の強みである。

###### ■知識の幅・深さ、技量

私の研究領域は「モータ」と「AI」という二つの研究分野に跨った領域であり、双方の領域に関する深い知見が必要となる。私は、修士時代はモータの電磁界解析に関する研究に従事しており、3つの査読論文（成果①-③）および3件の査読付き国際会議における発表（成果④-⑥）、更に以上の研究成果によって2件の学会賞（成果⑨、⑩）を受賞した。また修士の修了後2年間は自動車メーカーに勤務しており、実務的な経験も有する。AIに関しても、使用した手法の数学的な理論背景を技術解説（成果⑱）したり、Pythonで実装したプログラムを公開（成果⑲）したりと、人に指導できる水準の技量を有している。以上のように、「モータ」と「AI」の双方に関する深い知見・技量を有している点が私の強みである。

###### ■発想力、問題解決力

私の「モータ設計×AI」という分野は未発達分野であり、課題解決のための手がかりとなる先行研究が非常に少ない。そのため私は、近年発展が凄まじいケモインフォマティクス（化学×AIの領域）の論文を参考にしながら研究を進めている。全く畑の違う分野の論文ではあるが、工学的な対象物にAIを適用している点で参考にできる点が多い。このように、多角的な視点から問題を解決できる能力が私の強みであり、それにより研究の立ち上げから一年で2件の査読付き国際学会（成果⑦-⑧）および4件の国内学会（成果⑨-⑫）で発表を行った。

###### ■コミュニケーション力

COVID-19流行下でオンライン開催が多くなった研究会やフォーラムに積極的に参加し、電磁界解析分野やインフォマティクス分野の研究者と積極的にコミュニケーションを取っている。また、学内で新たに設立された熱流体解析とAI技術に関する研究所（計算科学研究所）にも、専門外ではあるが類似する研究分野であることから参加し、積極的に議論を交わしている。

###### ■プレゼンテーション力

私の研究分野は未発達分野であるが、学会発表等の限られた時間の中で聴衆の分野やレベルに合わせたプレゼンテーションを行い、概要や魅力を伝えることができている。その結果、1件の学会賞（成果⑮）を受賞し、さらに招待講演の依頼（成果⑰）を受けるにまで至った。

#### 研究業績リスト

##### (1) 学術雑誌に発表した論文（査読有、全てファーストオーサー）

- ① 清水悠生など：「強磁力磁石適用自動車駆動用IPMSMの特性に及ぼす磁石配置と鉄心材料の影響」、電学論D, Vol. 137, No. 5, pp. 437-444 (2017)
- ② Y. Shimizu *et al.*, “Influence of Permanent Magnet Properties and Arrangement on Performance of IPMSMs for Automotive Applications,” *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, Vol. 6, No. 6, pp. 401-408 (2017)
- ③ 清水悠生など：「自動車駆動用2層IPMSMの運転特性に及ぼすPWMインバータのキャリア高調波の影響

(研究遂行力の自己分析の続き)

響」, パワーエレクトロニクス学会誌, 43 巻, pp. 130-137 (2017)

## (2) 国際会議における発表

(ポスター・査読有, 全てファーストオーサー)

- ④ Y. Shimizu *et al.*, “Influence of Permanent Magnet Properties and Arrangement on Performance of IPMSMs for Automotive Applications,” IEEE ICEMS 2016-Chiba, DS1G-4-13 (2016)
- ⑤ Y. Shimizu *et al.*, “Efficiency Improvement and Downsizing of Double-Layered IPMSMs Containing a Strong Magnet for Automotive Applications,” EPE’17 ECCE Europe, 9789075815269 and CFP17850-USB (2017)
- ⑥ Y. Shimizu *et al.*, “Reduction of Torque Ripple in Double-Layered IPMSM for Automotive Applications by Rotor Structure Modification,” IEEE PEDS 2017, 72 (2017)

(オーラル・査読有, 全てファーストオーサー)

- ⑦ Y. Shimizu *et al.*, “Reducing Design Time of Permanent Magnet Volume Minimization for IPMSM for Automotive Applications Using Machine Learning,” SAMCON2021, TT2-1 (2021)
- ⑧ Y. Shimizu *et al.*, “Investigation of Irreversible Demagnetization Constraints in Magnet Volume Minimization Design of IPMSM for Automotive Applications Using Machine Learning,” IEMDC 2021, A2L-3 (2021)

## (3) 国内会議における発表 (オーラル・査読なし, 全てファーストオーサー)

- ⑨ 清水悠生など:「機械学習を用いた 2 層 IPMSM の特性予測に関する基礎検討」, 静止器/回転機合同研究会, SA-20-068/RM-20-092 (2020)
- ⑩ 清水悠生など:「機械学習を活用した 2 層 IPMSM の磁石量最小化設計過程における形状推移の要因考察」, 2020 年電気関係学会関西連合大会, G4-16 (2020)
- ⑪ 清水悠生など:「機械学習を用いた 2 層 IPMSM の特性予測精度向上と磁石量最小化設計」, 静止器/回転機合同研究会, SA-21-025/RM-21-025 (2021)
- ⑫ 清水悠生など:「機械学習を用いた自動車駆動用 IPMSM の磁石量最小化設計における耐減磁制約の検討」, 令和 3 年電気学会全国大会, WEB22-C4, 5-086 (2021)

他 6 件

## (4) 受賞歴

- ⑬ 電気学会 優秀論文発表賞を受賞 (2016)
- ⑭ 電気関係学会関西連合大会 奨励賞を受賞 (2016)
- ⑮ 電気関係学会関西連合大会 奨励賞を受賞 (2021)

## (5) 競争的資金

- ⑯ JST・ACT-X「A I 活用で挑む学問の革新と創成」領域,「機械学習を用いた磁石同期モータの構造最適化」研究代表者, 2020-2022 年度

## (6) 講演

- ⑰ 清水悠生,「機械学習を活用した自動車駆動用 IPMSM の最適設計期間短縮」, JMAG ユーザー会 2020

## (7) 技術解説

- ⑱ モータ研究者の技術解説, <https://yuyumoyuyu.com/>

## (8) 公開ソフトウェア

- ⑲ GitHub, <https://github.com/yshimizu12>

## (2) 今後研究者として更なる発展のため必要と考えている要素

私は以下の 2 つの能力が今後の更なる発展のため必要と考えている。

### ■より高度なプログラミング技能など必要技術の習得

今後更なる大規模演算のため, 大阪大学のスパコン Octopus や理化学研究所の計算機システム miniRAIDEN を利用予定である。これらの計算環境を最大限活用するためには, 更に高度な並列プログラミングや GPU を利用したプログラミング技能が必要となる。計算機やデータの大規模化によって必要となる技術は刷新されていくため, 求められる課題に対して適切に道具を選択できるよう技術・知識のアップデートを欠かさないことが必要である。

### ■英語によるコミュニケーション能力

英語によるコミュニケーション能力は, 国際的な研究成果のアピールといった側面で非常に重要な能力である。ネイティブでない研究者として, できるだけ効率的に英語力を向上するために, 他の研究者が書いた英語論文の精読や英語論文の執筆によるリーディング力, ライティング力の向上, 国際学会への出席や英会話アプリ等によるリスニング力, スピーキング力の向上が必要である。

**5. 【目指す研究者像等】** ※各事項の字数制限はありませんが、全体で1頁に収めてください。様式の変更・追加は不可

日本学術振興会特別研究員制度は、我が国の学術研究の将来を担う創造性に富んだ研究者の養成・確保に資することを目的としています。この目的に鑑み、(1)「目指す研究者像」、(2)「目指す研究者像に向けて特別研究員の採用期間中に行う研究活動の位置づけ」を記入してください。

**(1) 目指す研究者像** ※目指す研究者像に向けて身に付けるべき資質も含め記入してください。

私は、研究対象の探求だけでなく、研究成果を社会課題の解決まで繋げられる研究者を目指している。研究者とは普通、研究対象を調べて整理して理解する、つまり探求することが主な仕事である。しかし、工学分野の研究者は、探求するだけではなくその成果を社会に活かし、現代社会の課題の解決まで見据えた研究を実施する必要がある。

私は過去に自動車メーカーに電気自動車の設計者として在籍していた。そこで感じたことは、日本のものづくり業界が中国などの海外ベンチャーに着実に蝕まれているということだ。一番の理由は開発スピードで、新興の電気自動車ベンチャーは日本のメーカーの半分の開発期間で電気自動車を世に出している。もちろん安全性や信頼性といった側面では日本のメーカーが優位に立っているものの、開発スピードの差がマーケティング戦略に及ぼす影響は甚大で、開発期間の短縮が急務であった。

私はこういった状況を踏まえて、社内の先輩と二人で設計業務の自動化に取り組んだ。具体的には、Excelのマクロ機能と統計的知識を活用して、企画部署の提示する要求仕様から自動で机上設計を実施するツールを構築しようとした。しかし、「設計×自動化」という分野は非常に先端的で難しく、日常の業務の片手間では実現には至らなかった。だからこそ私は、アカデミア研究者としてこの問題に本腰を入れて取り組むことを決断した。以上のように、私は製造業界が直面する課題を解決したいという強いモチベーションから研究者を志した。そのため、研究成果を社会課題の解決まで繋げられるような研究者を目指している。

このような研究者となるために身に付けるべき資質は、周囲を巻き込めるだけの強いリーダーシップである。研究対象の探求から社会課題の解決までには多様な課題が内在しており、それら全てを単独で行うのは不可能である。そのため、①アウトリーチ等の活動によりビジョンを共有できる仲間を増やし、②傾聴力や柔軟な対応力を持って異なる立場の人々が抱える課題を理解し、③その解決のために明確なゴールを掲げ、最後までやり遂げることが重要である。このようにしてリーダーシップを身に付け、周囲の人々と協力しながら社会解決の課題に向けて尽力できるような研究者を目指している。

**(2) 上記の「目指す研究者像」に向けて、特別研究員の採用期間中に行う研究活動の位置づけ**

特別研究員の採用期間中の研究活動を通じて、(1)で述べた周囲を巻き込めるだけの強いリーダーシップを発揮するための3つの要素を習得するべく活動を行う予定である。

まず1つ目の仲間づくりは、学会や講演などの発表の機会や、運営する技術解説でのビジョンの提示、また企業訪問や展示会への参加を行い、積極的に多くの方々に研究成果のアピールを行う。2つ目の傾聴力や対応力は、上述したアピールの機会でのコミュニケーションの中で、研究者や設計現場の方など様々な立場の人々がどのような課題認識を持っているかを聞き出し、その内容を自らの研究計画や方向性に上手く反映させることで習得する。3つ目のゴールに向かって最後までやり遂げる力は、p.5に掲げた研究目標を期間内に全て達成することで身に付ける。

リーダーシップは一朝一夕で身に付けられる資質ではない。まずは小規模のグループや課題に対してリーダーシップを発揮できるよう活動し、少しずつ規模を拡大していくべきである。そのため、特別研究員の採用期間中の研究活動は、「2. 研究計画」の研究内容に関連する方々とのやり取りや研究課題の中で、以上の3つの要素を習得するためのものと位置づける。この規模を徐々に拡大し、将来的には産学連携した大規模な活動において強いリーダーシップを発揮し、社会課題の解決に尽力したい。