

## 2024年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻
職 位 または 役 職	特任准教授
氏 名	梅本 貴弘

### 1. 研究題目

低真空環境条件を考慮したインバータ駆動モータの先進的絶縁設計・診断技術の創成

### 2. 研究目的

本研究では、電気自動車(EV)や電動推進航空機の運用環境としてモータ巻線の絶縁設計に考慮すべき、高高度・低真空環境下におけるインバータサージ下の電気絶縁性能・絶縁異常である部分放電特性を解明し、さらに低真空でのそれら放電基礎メカニズムに立脚した部分放電検出のためのセンサ構造と異常識別アルゴリズムの開発を行う。これにより、高高度環境で使用されるインバータ駆動モータ巻線の絶縁設計指針を獲得し、さらに安全運航のために必須となる異常検知技術を確立することを目的とする。

持続可能な成長とカーボンニュートラルを実現するにあたり、化石燃料を用いた既存の動力源の電動化と、新たな動力源となるモータのエネルギー密度・出力の向上が至上命題である。特に自動車・航空機・ヘリコプターといったモビリティの全電動化は、巨大な市場規模が潜在的に見込まれる一方で、全面的な普及には技術課題も多く残されていることから、モータ設計技術とそれらを駆動するためのパワエレ技術が協調して、“次”の日本の基幹産業として強力に研究開発を推進すべき分野である。

PWM(パルス幅変調)方式などのいわゆるインバータ駆動は、モータの種類や用途、容量を問わず高効率化のため半ば常識になっているが、電気絶縁の観点では、パワーデバイスのスイッチングに伴うスパイク性の高周波過電圧(インバータサージ)がモータ巻線にかかる点が大きな電気的ストレスとなる。また、高速スイッチングが可能なワイドバンドギャップ半導体の社会実装が進むにつれ、そのストレスは増加の一途を辿ると見込まれる。ここで、前述の電動推進航空機や電動ヘリコプターは言うに及ばず、EVにおいても高地運用を前提としてモータ巻線の絶縁設計を行うことが必要であり、15,000 フィート(EV)～40,000 フィート(航空機)という低気圧環境での部分放電現象の理解と絶縁技術の確立が望まれている。

### 3. 研究内容及び成果

本研究では、電動航空機・高地運用 EV のような低気圧環境でのモータ絶縁信頼性を確立することを目的とし、減圧下の部分放電特性の実験的解析、放電開始モデルの数理構築、AI を用いた異常診断技術の確立を行った。また、次年度展開を見据えた冷媒液体絶縁の予備評価も実施した。主な成果は以下のとおりである。

#### (1) 減圧空気下における部分放電特性の系統的取得

大気圧～10 kPa の範囲で制御可能な減圧試験系を構築し、航空機・EV モータのターン間絶縁を模擬したアローペアサンプルを用いて試験を実施した。AC(50 Hz～1 kHz) およびパルス(単極・両極)波形を印加し、部分放電開始電圧(PDIV)および消滅電圧(PDEV)を取得した。

その結果、減圧下では放電の持続時間が伸び、放電電流波形の主成分が 10 MHz から 2 MHz へと低周波化することを明らかにした。また圧力低下に伴い PDEV が単調に低下する一方で、初期電子の供給不足により PDIV が一時的に上昇する「非単調圧力依存性」を実験的に確認した(図 1)。

#### (2) 部分放電発生条件の理論解析とモデル化

実験で得られた PDIV データを基に、Schumann の放電条件式および Volume-Time 理論を援用し、低圧下における放電発生確率の数理モデルを構築した。放電の種となる初期電子供給過程(気体中の電離・絶縁体表面からの電子放出)を Fowler-Nordheim 型電界放出式で記述し、気圧・課電時間・波形条件をパラメータとした放電確率分布関数を導出した。本モデルを用いて、実測された PDIV 値を±10% 以内で再現できることを確認し、低気圧環境における放電電圧の推定手法を確立した(図 2)。

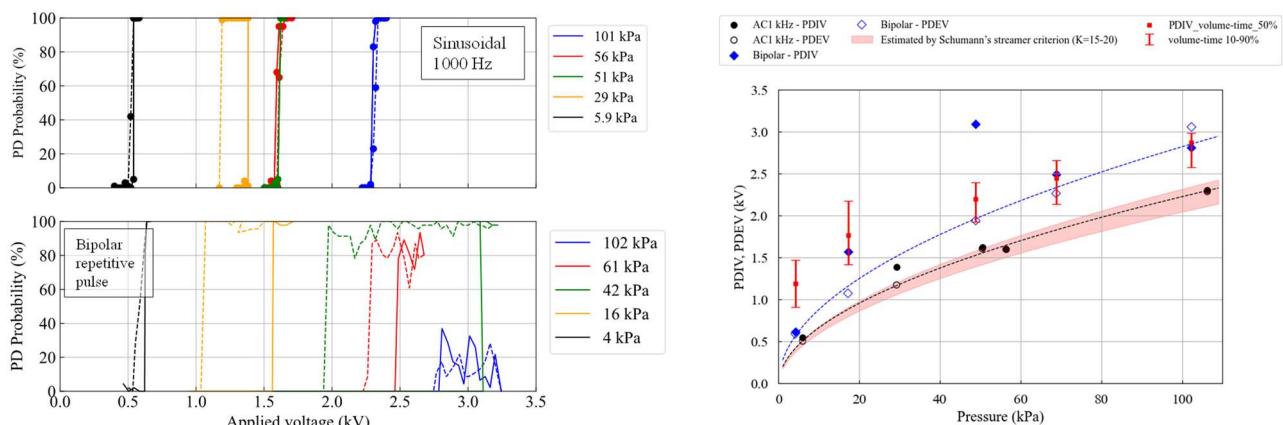


図 1: 印加電圧昇・降圧時の放電発生確率<sup>[1]</sup> 図 2: 部分放電発生電圧の予測モデルの構築<sup>[1]</sup>

#### (3) AI による低気圧部分放電信号の自動識別技術の開発

取得した放電電流波形群(約 2000 イベント)を教師データとして、LightGBM および CNN(畳み込みニューラルネットワーク)を用いた異常診断 AI モデルを構築した。各放電イベントを時間波形・スペクトル分布・包絡線特徴量に基づき分類し、気圧や絶縁欠陥種を跨いだ識別精度 90 % を達成した。

#### (4) 潤滑油環境における絶縁特性の予備評価

航空機で実際に使用される潤滑油を対象とし、球ギャップおよびアローペアサンプルによる減圧下絶縁破壊試験・部分放電試験を実施した。圧力低下により絶縁破壊電界は低下する一方、空気中と比較して PDIV・PDEV が約 10 倍高い絶縁耐力を示すことを確認した。

油の E-d 特性(距離効果)と圧力依存性、放電電圧のバラつきを統計的手法により考慮した PDIV 推定モデルを構築し、実測結果と良好に一致することを示した。

#### 4. 今後の研究の見通し

---

24年度に構築した低気圧環境試験設備およびAI異常診断アルゴリズムを基盤として、25年度以降は空冷モータから液冷モータ(油絶縁)へと研究対象を拡張し、低気圧下における油中放電挙動と絶縁寿命特性の体系的解明を進める。得られた知見を活用して、インバータ駆動モータの絶縁設計指針および余寿命診断技術の確立を目指す。

##### (1) 低気圧環境下での油中部分放電挙動の解明と診断技術の構築

減圧環境試験装置を改良し、液体流動や発生する微小気泡の挙動を同時に観察可能な光学観測系(高速度カメラ・レーザ光源付加)を組み込む。これにより、気圧・電圧・液体特性をパラメータとした油中部分放電の発生・消滅過程を高時間分解能で捉える。アローペアサンプルやツイストペアサンプルを用い、部分放電頻度・放電強度・スペクトル特性を系統的に取得し、気泡発生や液体流動との相関を明らかにする。これらの波形群をもとに、24年度に構築した減圧空気用AI診断アルゴリズムを油中用にチューニングし、媒体の違いによる信号特徴の差を補正した汎用AI異常検知モデルを完成させる。

##### (2) 低気圧・インバータ駆動下での絶縁劣化挙動と寿命特性の解明

モータ巻線の絶縁寿命は、部分放電による絶縁侵食・熱応力・湿度・機械的ストレスが複合的に作用して決定される。これらのうち特に部分放電の寄与を定量化するため、気圧およびインバータ波形をパラメータとした長期寿命試験を実施する。時間経過に伴う部分放電信号の変化を記録し、放電頻度・放電電荷・放電位置分布の統計的解析を通じて、低気圧環境における絶縁劣化律速要因を明らかにする。得られた寿命データは、将来的にAI診断アルゴリズムと連携させることで、絶縁余寿命推定モデルの構築に展開する。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### 【国際会議(査読付)】

- [1] Takahiro Umemoto, Masahiro Sato, Yuichi Tsuboi, Akiko Kumada, "Influence of Applied Voltage Waveforms and Pressure on Partial Discharge Characteristics in a Converter-Fed Motor Winding Model for Electric Propulsion Aircraft", 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2025.DOI: 10.1109/EIC63069.2025.11123397
- [2] Takahiro Umemoto, Yuichi Tsuboi, Yuichi Tanaka, Masahiro Sato, Akiko Kumada, "Breakdown and Partial Discharge Characteristics of Lubrication Oil for Aircraft used as a Coolant in Direct Oil-Cooled Motor under Low Pressure Conditions", 2026 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2026(発表予定)

##### 【国際会議(査読無)】

- [3] Yuichi Tanaka, Yuichi Tsuboi, Takahiro Umemoto, "Design Requirement and Partial Discharge Characteristics in a Converter-Fed Motor Winding Model for Electric Propulsion Aircraft", The 10th International Conference on Materials Engineering for Resources (ICMR2025), A1-6, 2025.

##### 【国内会議】

- [4] 梅本貴弘, 佐藤正寛, 坪井雄一, 熊田亜紀子, “電動推進航空機向けモータ巻線の部分放電特性における印加電圧波形・気圧の影響”, 第55回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, GP(P)-3, 2024.
- [5] 梅本貴弘, 坪井雄一, 田仲雄一, 佐藤正寛, 熊田亜紀子, “航空機用潤滑油を冷媒に用いる直接液冷モータの減圧環境における絶縁破壊・部分放電特性”, 第56回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, O-7, 2025.