

あやとりの巻線技術で高性能モータを実現

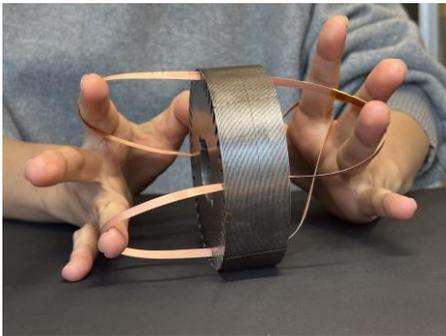
—高温超電導誘導モータの実用化に貢献—

概要

高温超電導体¹は、電気抵抗0の特性によって非常に高密度の電流を極めて小さな損失で流すことができます。モータ²の巻線に高温超電導体を用いれば、非常に高い出力や効率が実現されます。そこで、同モータを利用した液体水素ポンプや、あるいは自動車や航空機などの輸送機器への実用が期待されており、特に航空機応用に関しては国内外で精力的な開発競争が展開されています。

京都大学大学院工学研究科 中村 武恒 特定教授、正木 藍子 同技術職員、Ren Mengyi 同特定研究員（研究当時）、三瓶 峻志 同修士課程学生らの研究グループは、中村研究室が先駆研究を展開している高温超電導誘導同期モータ³を対象として、あやとりの技術を適用した高温超電導巻線構造を提案し、電磁界解析ならびに実験によって優れた回転特性を実証しました。本方法によれば、航空機用途他の大形モータの実用の際に問題となるハンダ接合箇所が格段に低減される簡易な高温超電導巻線が実現され、大きなブレークスルーと考えられます。

本研究成果は、2025年12月4日に国際会議「38th International Symposium on Superconductivity (ISS2025, 長崎市)」にて理論・解析結果を中心に報告され、また2025年12月9日には国内学会「2025年度秋季 第110回 低温工学・超電導学会研究発表会（泉佐野市）」にて上記理論・解析に加えて実験結果が報告される予定です。



左図：高温超電導テープを回転子コアにあやとり巻線した様子

右図：あやとり巻線法で試作した高温超電導回転子の外観写真

1. 背景

モータは、現代社会では私たちの生活に必要な不可欠の電気機器であり、日常生活でその恩恵にあずからない日が無いと言っても過言ではありません。近年では、2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向けて様々な輸送機器のモータによる電動化に関する研究開発も推進されており、従来の自動車や電車だけでなく、航空機についても電気駆動化に関する精力的な研究開発が行われています。輸送機器用モータに求められる重要な性能としては、高効率化と高出力密度化（単位質量あるいは単位容積辺りの出力）が挙げられます。

一方、上記カーボンニュートラル社会を構築するためのエネルギー源として水素が期待されています。そして、水素エネルギーの貯蔵・輸送媒体の一つとして液体水素が検討されています。液体水素は、気体水素に比較して体積が約800分の1になることから、効率的に貯蔵ならびに輸送が可能です。さらに、液体水素の温度（大気圧沸点）がマイナス253℃と非常に低いので、この極低温環境に超電導体を置くと超電導状態となり、即ち電気抵抗が0になります。従って、例えば液体水素タンクを有するシステムに超電導モータを利用すれば、同モータの冷却システムを別途準備せずに高効率・高出力特性を実現できます。

中村特定教授のグループでは、これまで高温超電導誘導同期モータ（図1）³を提案し、基礎研究を推進してきました。本モータでは、世界的に最も汎用されている誘導モータの簡易構造を採用し、そのかご形巻線を市販の高温超電導テープによって構成します。そして高温超電導誘導同期モータの応用としては、複数の共同研究プロジェクトとして、例えば水素エネルギーサプライチェーン向液体水素サブマージポンプ[1]、水素エンジンカローラ向液体水素車載ポンプ[2]、液体水素冷却電動航空機[3]の開発に貢献しています。現時点では、高温超電導モータとして世界で最も実用化に近いと期待されています。

しかしながら、高温超電導誘導同期モータのかご形巻線を構成するためには、図2のようにハンダを使用して高温超電導テープ材同士を接合する必要があります。大形のモータになると、非常に大きな電流を流す必要があることから、並列に接続する高温超電導テープ材の数も多くなり、数十枚に達することもあります。その場合、図2の接続を均一に行うために熟練した技術を要することから製造コストの大幅な上昇が危惧されます。また、ハンダ接続箇所において発熱が生じ、その結果効率が低下するリスクがあります。そこで、中村特定教授はハンダ接続箇所を飛躍的に低減する巻線構成としてあやとり巻線法を考案し、研究室メンバーと共に電磁界解析と実験によってその実現可能性の証明を試みました。



図1：高温超電導誘導同期モータの概略図

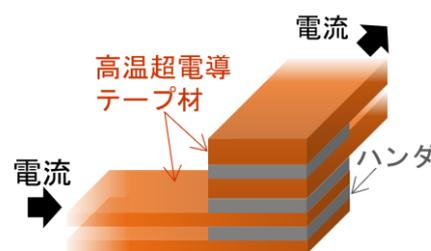
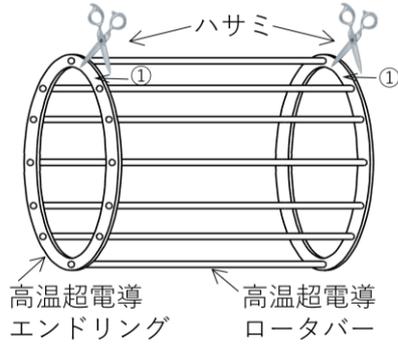


図2：高温超電導テープ同士のハンダ接続部の模式図

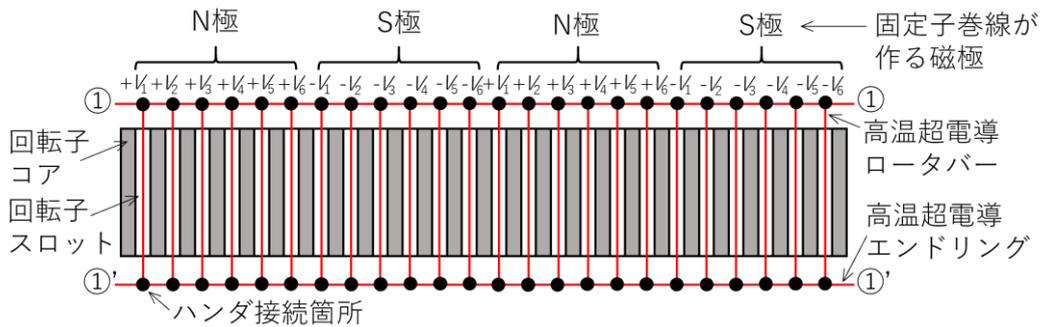
2. 研究手法・成果

図3には、従来の高温超電導かご形巻線の模式図を示します。図3(b)には、同図(a)の①と①'の箇所を切断した展開図を示しています（上部には、固定子巻線が作る磁極（N極とS極）を示しています； $V_1 \sim V_6$ は発生する電圧値を示しており、それら値の前の+や-は極性を表しています）。このとき、●印で示しているハンダ接続箇所は48になります。

中村特定教授は、従来のかご形巻線と電磁気学的に等価な巻線構成として、図4を考案しました。例えば、



(a) 高温超電導かご形巻線と切断箇所



(b) 展開図

図 3：従来の高温超電導かご形巻線

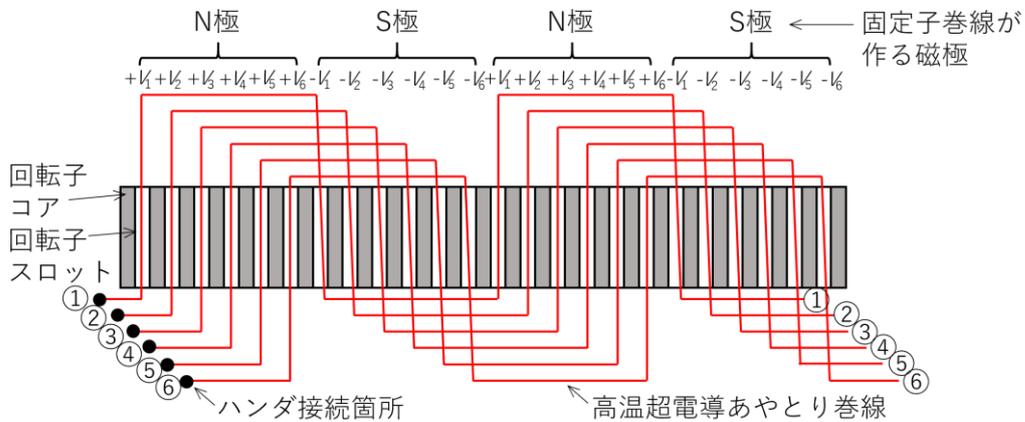


図 4：図 3(b)と等価なあやとり巻線図 (①～⑥の同じ番号同士をハンダで接続)

図 3(b)における N 極の一番左の電圧 $+V_1$ と S 極の一番左の電圧 $-V_1$ は、大きさが同一で極性が逆になります。そこで、それら巻線を相互に接続しても、同巻線を通る電流は図 3(b)と同一になります。従って、他の場所にある巻線 ($+V_2$ と $-V_2$, ..., $+V_6$ と $-V_6$) も同様に接続していくと、図 4 になります。このとき、ハンダ接続箇所が 6 となり、図 3(b)よりも格段に少なくなっています。図 4 の巻線は、初めに 1 か所だけハンダ接続した高温超電導ループを作っておいて、図 5 の例のようにあやとりのように配置すれば簡単に完成します。

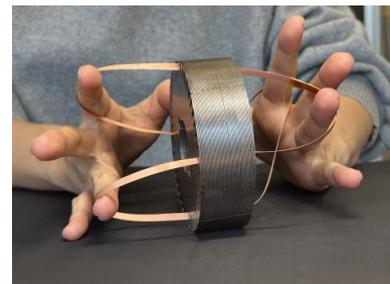


図 5：高温超電導テープを回転子コアにあやとり巻線した様子

中村特定教授と研究室メンバーは、まず電磁界解析によって図 4 のあやとり巻線の妥当性を検証しました。その後、図 6 のプロトタイプ機を試作し、液体窒素中における回転試験を実施しました。図 7 には負荷回転特性の実験結果の一例を示します。同図に示すように、プロトタイプ機は回転数 1200 rpm において 2.8 kW 程度の出力を実現しています。本プロトタイプ機は未だ最適化設計を行っておらず、定格出力 1.5 kW の誘導モータの回転子巻線のみを高温超電導あやとり巻線に改造しただけですが、既に高い出力を実現できています。



図 6:あやとり巻線法で試作した高温超電導回転子の外観写真

3. 波及効果、今後の予定

本成果によって、高温超電導誘導同期モータの実用化を促進するための強力な候補となる巻線法が確立しました。本研究のあやとり巻線法によれば、ハンダの施工が格段に簡易化され、製造コストの大幅な低減が期待されます。今後は、あやとり巻線の最適化設計を実施し、まずは効率 99%超の実証を目指します。さらに、企業共同研究として具体的応用先を定め、出力密度の究極化にも挑戦していく予定です。なお、図 4 のあやとり巻線法ならば、予め 1 か所のみを超電導接続として高温超電導ループを作製し、その後うまくコアに配置することができれば、究極のゼロ抵抗巻線が実現可能と期待されます。本技術についても、今後検討を進めていく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(A)、次世代輸送機器用高トルク密度高温超伝導誘導同期モータとシステム化に関する研究、25H00739）の助成を受けました。高温超電導誘導同期モータの回転試験準備に際して、中村武恒研究室の松浦潤 研究員ならびに祖父江浩 技術補佐員に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

<用語解説>

- 1 高温超電導体：マイナス 248°C程度以上の温度において、電気抵抗がゼロになる他の超電導現象を発現する物質です。
- 2 モータ：ここでは、電気エネルギーを回転エネルギーに変換する機器をモータと呼んでいます。本研究では、三相交流巻線によって回転磁界を発生する固定子と、かご形巻線を有して回転する回転子を組み合わせる三相交流誘導モータを対象にしています。
- 3 高温超電導誘導同期モータ：京都大学・中村武恒特定教授の独自技術として研究開発が行われている高温超

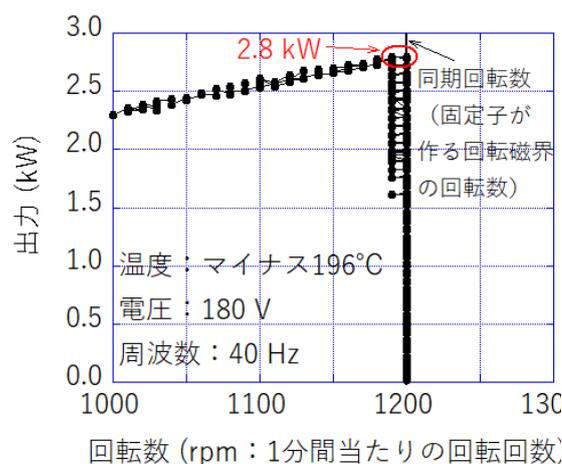


図 7:あやとり巻線法で試作した高温超電導誘導同期モータの負荷回転特性の実験結果（温度：マイナス 196°C（液体窒素浸漬冷却）、電圧：180 V、周波数：40 Hz、同期回転数：1200 rpm）

電導モータです。かご形誘導モータと同様の簡易構造ながら、高効率、高出力密度、急激な加減速に対する回転安定性（自律回転安定性）、過負荷条件における出力可能性（短時間定格）、非超電導駆動の可能性（フェールセーフ機能）等の高性能性や高機能性を有しています。

<研究者のコメント>

私たちが2005年から研究開発を推進している高温超電導誘導同期モータは、様々な努力を重ねてようやく実用化の目途が立ちそうな状況です。本研究では、上記実用化を加速する高温超電導巻線としてあやとり巻線を考案し、その性能を実証することに成功しました。本巻線法は、高温超電導かご形巻線の電磁気学的等価性に着目し、あやとりという古くからある素朴な遊びにヒントを得てハンダ接続箇所を大幅に低減する方法であり、これからの実用の際にその実力が発揮されると期待されます。本成果をベースに、今後自動車や航空機他の輸送機器、あるいは液体水素ポンプへの実用を目指して研究開発を加速していく予定です。(中村 武恒)

<論文タイトルと著者、公表されている URL>

- [1] 京都大学 大学院工学研究科 最近の研究成果, “世界初！大流量の液化水素ポンプ運転試験に成功！～超電導モータをはじめて産業機械に搭載し、高効率を達成～” (2024年3月) <https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20240318> (2025年11月30日閲覧)
- [2] トヨタタイムズニュース, “【超電導×水素エンジン】レースの現場で挑む未知の技術” (2025年11月) <https://www.youtube.com/watch?v=hi5snrZEdvU> (2025年11月30日閲覧)
- [3] Masayoshi Yamamoto and Taketsune Nakamura, “Electromagnetic design and performance analysis of a 20 MW-class high temperature superconducting induction/synchronous motor for electric aircraft applications using a self-assembling design method (自己組織化設計法を用いた電動航空機用 20 MW 級高温超電導誘導/同期モータの電磁気設計と性能解析)”, Physica C, vol. 628 (May., 2025) 1354690 (10pp) (DOI: 10.1016/j.physc.2025.1354690)