

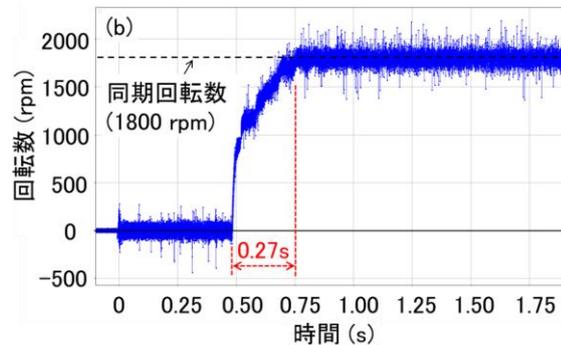
高温超伝導モータで超高速始動に成功

— 自動車や航空機などへの実用に道筋 —

概要

高温超伝導体¹を用いるモータ²は、非常に大きな電流を極めて小さな損失（直流電気抵抗は0）で輸送できる同超伝導体の性質を利用することにより、高効率³かつ高出力密度⁴の回転特性が実現されます。そこで、同モータを利用した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。しかしながら、世界的に行われている従来の研究開発では、そのほぼ全てが一定回転数における特性のみを対象としており、回転数やトルクが時々刻々と変化する加減速状態において高温超伝導モータを安定に運転できるのか、殆ど調べられていませんでした。輸送機器用モータは特有の加減速運転をしなければならず、特に停止状態からの始動時には瞬間的に大きな電流が流れたり回転が不安定になったりします。

京都大学の中村武恒特定教授は、世界で最も汎用されているかご形誘導モータを対象にして、その高温超伝導化を研究してきました（高温超伝導誘導同期モータと呼びます⁵）。この度、イムラ・ジャパン(株)と共に試作した20 kW級モータを対象として超短時間の高速始動特性を精密に測定し、極めて安定に始動できることを実証しました。この成果は、高温超伝導モータの加減速特性が殆ど明らかにされていない現状において、最も過酷な超高速始動に対する回転安定性を世界で初めて示すという観点から大きなブレークスルーと考えられます。



イムラ・ジャパン(株)と共に開発した20 kW級高温超伝導誘導同期モータの外観写真(左図)と液体窒素冷却条件(マイナス196°C)における超急始動特性の試験結果(右図)

1. 背景

輸送機器分野における電動化率の向上は、全世界的なグリーンイノベーションを実現し、クリーンな地球環境を次世代に遺すために極めて重要な研究開発課題の一つです。そして、電動輸送機器の心臓部はモータであり、その性能向上が必要不可欠です。例えば、自動車（航空機）向けモータには、発進時（テイクオフ時）に高い出力が求められ、一方で一定速走行時（水平飛行時）に高い効率が求められます。この性能を実現するために、高温超伝導体を用いた輸送機器用モータの研究開発が国内外で活発に行われています。高温超伝導体は、超低損失で非常に高密度の電流を流せることから、モータの巻線に同导体を用いれば極めて高い効率や出力密度が実現されます。しかしながら、自動車や航空機等の輸送機器の種類に応じて要求される特有の加減速運転に対する回転特性に関しては、これまで世界的に殆ど実験的検証が行われていませんでした。特に、瞬間的に過大な電流が流れ回転が不安定になり易い始動時における高温超伝導モータの動的挙動（ダイナミクス）は明らかになっておらず、焼損等のリスクから実用に際して大きな障害になっていました。

中村特定教授のグループでは、これまで高温超伝導誘導同期モータを提案し、基礎回転理論[1]や設計・制御理論を確立すると共に、応用研究に関しては、国家プロジェクトや企業共同研究を通して99%超の最大効率[2]や高出力密度化[3]などの先駆的成果を上げています。また、高温超伝導／常伝導ハイブリッド巻線を適用した回転子を開発し、冷却系故障時のフェールセーフモードとして室温運転にも成功しており[2,4]、いよいよ実用化の声が聞こえて来てきています[5]。さらに、短時間の起動に対しても安定回転の可能性を実験によって証明し、かつ理論解析によってメカニズムを明らかにしており、この特性を「自律回転安定性」と命名しています[6]。

2. 研究手法・成果

本研究では、中村特定教授が提唱している高温超伝導誘導同期モータの「自律回転安定性」を究極化する実験に取り組みました。対象とするモータは、科学技術振興機構(JST)の先端的低炭素化技術開発(ALCA)の助成を受けて(株)イムラ・ジャパン（旧、(株)イムラ材料開発研究所）と共に試作した20 kW級モータです（図1）。同モータは、銅線を用いた固定子巻線とビスマス系高温超伝導テープを用いたかご形回転子巻線（図2）を組み合わせたものです。液体窒素（マイナス196℃）を用いた冷却によって超伝導状態とし、周波数60 Hz・電圧141 V（実効値）の電気入力を極めて短い加速時間で与え、急始動試験を実施しました。その際、一切のフィードバック制御を適用せず（オープンループ制御と呼びます）、即ちモータの応



図1：20 kW級高温超伝導誘導同期モータの外観写真 [6]

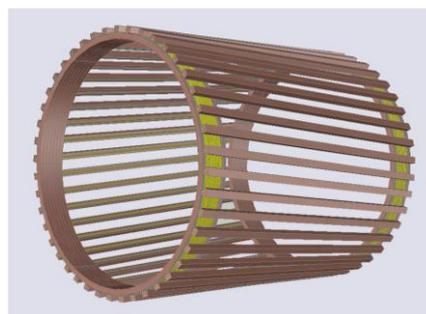


図2：高温超伝導かご形回転子巻線の概略図 [6]

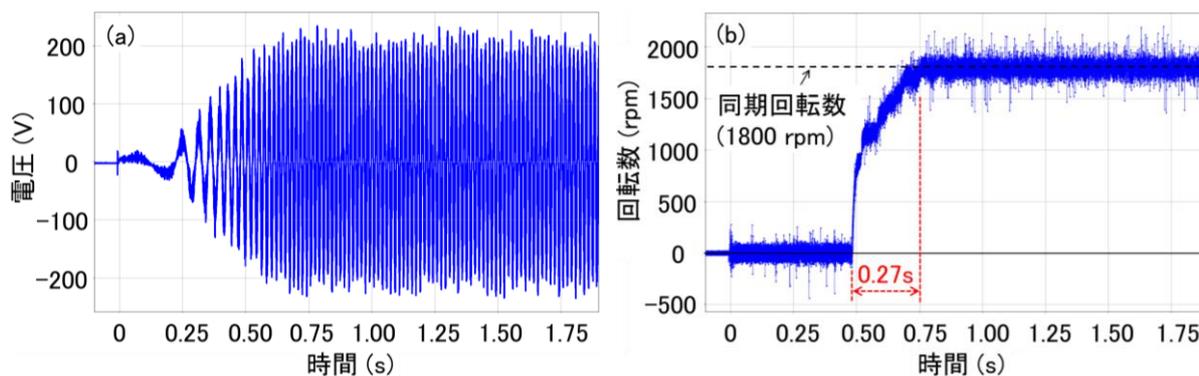


図 3：20 kW 級高温超伝導誘導同期モータの液体窒素浸漬条件（マイナス 196℃）における急始動試験結果（駆動周波数: 60 Hz、(a)電圧波形、(b)回転数）

答特性を評価しました。計測に際しては、サンプリング周波数 1 GHz の超高速計測器を用い、0.4 マイクロ秒毎（1 マイクロ秒は 100 万分の 1 秒）の瞬時データを取得することで、急始動時における極めて精密な回転特性の評価を実現しました。

液体窒素中（マイナス 196℃）において、図 3(a)の電圧を入力したところ、図 3(b)の始動特性（回転数の変化）が実現されました。即ち、20 kW 級モータは時刻 0.48 s 付近での始動後瞬時に回転数 800 rpm(1 分間に 800 回転)まで到達し、さらに 0.27 s 後（時刻

0.75 s）には回転数 1800 rpm に収束して定常回転状態に移行しています。その際、オープンループ制御にもかかわらず全く振動的振る舞いが生じず、ほぼ理想的な加速特性が得られています。この特性は、高温超伝導かご形巻線のインテリジェントな特性によって実現されます[6,7]。図 4 には、高温超伝導かご形巻線の電気抵抗の電流に対する変化を模式的に示しています。同図において、臨界電流はゼロ抵抗を維持する電流の最大値です。高温超伝導かご形巻線に流れる電流は、臨界電流未満のゼロ抵抗状態では損失が無く高効率なのですが、非常に振動しやすくなってしまいます。一方で、上記電流が臨界電流値以上になれば振動しにくくなって安定なのですが、有限の電気抵抗に伴って損失が大きくなります。中村特定教授の高温超伝導誘導同期モータでは、高温超伝導かご形巻線が回転状態に応じて自律的に流れる電流を臨界電流未満にしたり以上にしたりすることで、高効率と安定回転を両立する急始動を実現します[7]。つまり、高温超伝導体のインテリジェントな特性（非線形抵抗特性）を効果的に利用することで、安定な超急始動特性が実現されます。

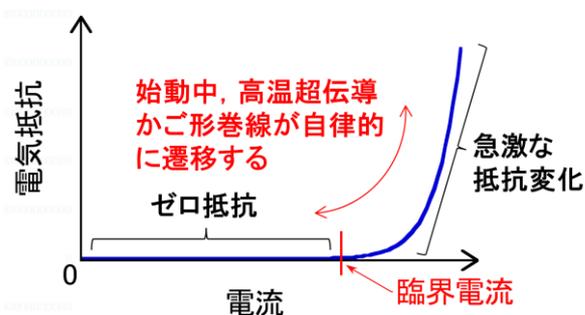


図 4：高温超伝導かご形巻線の電気抵抗－電流特性の模式図[6,7]

3. 波及効果、今後の予定

本成果によって、高温超伝導誘導同期モータの超高速始動に対する回転安定性が実証されました。この結果から、抵抗 0 の高温超伝導体を利用する同モータは加減速を伴う輸送機器に適用可能であることが明らかになりました。今後は、上記特性をベースに自動車や航空機などの具体的システムを想定した実用的な運転制御法の確立につなげていきます。

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(22H01471)の支援を受けました。20 kW 級プロトタイプ機の開発には、JST のプロジェクト“戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) ”「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」の支援を受けました。実験データ取得に際して、京都大学大学院工学研究科電気工学専攻・祖父江浩技術補佐員ならびに修士課程学生の中田雅大氏にご協力頂きました。また実験準備に際して、同・松浦潤研究員の協力を得ました。関係各位に感謝申し上げます。

<参考文献>

- [1] T. Nakamura and Y. Ogama, "Relationship between the Induced Voltage of a Rotor Bar and the Rotation Characteristics of a High-Temperature Superconducting Induction Motor", *Journal of Applied Physics*, vol. 136 (2024) 093903 (12pp) (DOI: 10.1063/5.0219918)
- [2] T. Nakamura, et al., "Development of 50-kW-Class High-Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor with Continuous Drive Characteristics from Room Temperature", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 5 (2023) 5200205 (5pp) (DOI: 10.1109/TASC.2023.3238293)
- [3] M. Yamamoto and T. 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", *Physica C*, in press
- [4] 「高温超伝導モータの室温運転に成功－輸送機器など実用化に道筋－」、*京都大学プレスリリース*、2023年3月7日、<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230307>
- [5] 例えば、“世界初！ 大流量の液化水素ポンプ運転試験に成功！～超伝導モータをはじめて産業機械に搭載し、高効率を達成～”、*(株)西島製作所ホームページ*、2024年3月14日、<https://www.torishima.co.jp/2024/03/14/post-9334/>
- [6] 中村 武恒、「輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期モータの研究開発—ALCA プロジェクトの総括と今後の展望—」、*低温工学*、vol. 57、no. 2 (2022) pp. 101-108
- [7] 中村 武恒、「モータに超電導を組み合わせる」、*トランジスタ技術 SPECIAL (モータ大図鑑 メカニズムの研究)*、CQ 出版社、no.165 (2023) pp. 163-169

<用語解説>

- 1 高温超伝導体：マイナス 248℃程度以上の温度において、電気抵抗がゼロになる他の超伝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 効率：ここでの効率とは、(有効) 電気入力に対する機械 (回転) 出力の比です。効率が高いほど、電気入力が効果的に出力に使われることになり、かつ発熱が低減します。
- 4 出力密度：出力密度とは、単位容積若しくは単位質量当たりの出力です。出力密度が高いほど、小さな容積若しくは軽い質量で必要な出力を実現することができます。
- 5 高温超伝導誘導同期モータ：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伝導モ

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）、非超伝導駆動の可能性（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年から研究開発している高温超伝導誘導同期モータは、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、高温超伝導モータの特長として高出力密度や高効率だけでなく、急始動時の究極の回転安定性をも実証することに成功しました。この特性は、高温超伝導体の非線形抵抗特性という「賢さ (Intelligence)」を利用することではじめて達成されます。全てのモータは、運転に際して必ず始動の過程を経なければならず、スムーズな始動法を実現することは極めて重要で必要不可欠です。本成果をベースに、今後自動車や航空機他の輸送機器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）