

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360124

研究課題名(和文) 室温からの連続駆動可能な脱レアアース形高温超伝導誘導同期回転機の研究

研究課題名(英文) Study on High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine Without Utilization of Rare-earth-elements Realizing Continuous Operation from Room Temperature

研究代表者

中村 武恒 (Nakamura, Taketsune)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30303861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導誘導同期回転機について、非超伝導状態においても駆動可能な最適構造・制御方法の実験的かつ解析的検討を実施した。本研究によって、超伝導回転機運転の際の「常に冷却しなければならぬ」という制約が緩和される可能性を示した。

まず、20 kW級試作機について、超伝導状態から非超伝導状態まで連続して運転することに成功した。次に、上記回転機特性を電磁界解析および非線形等価回路によってモデル化し、室温から超伝導状態までの最大効率制御特性を明確化した。さらに、積層電磁鋼板の熱通過率を定量化し、冷凍機駆動周波数可変運転時冷却特性も検討して、温度可変駆動の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)： In this study, we carried out experimental and analytical investigation about optimal structure and control method of High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine (HTS-ISM), which can be operated even at non-superconducting state. Based on this study, we could show the possible mitigation of cooling problems for the HTS-ISM.

First, we succeeded in continuous operation of 20 kW class HTS-ISM from superconducting state to non-superconducting state. Next, the analytical model was developed by means of electromagnetic field analysis and nonlinear electrical equivalent circuit, and then the rotating characteristics for maximum efficiency control were elucidated from the room temperature to the superconducting state. Furthermore, we studied quantitative value of the overall heat transfer coefficient of the laminated silicon steel core, cooling characteristics of the cryocooler for variable drive-frequency, and showed the possibility of variable temperature operation.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高温超伝導 脱レアアース 誘導同期回転機 非超伝導駆動 温度可変駆動 ビスマス系高温超伝導線材 冷凍機冷却

## 1. 研究開始当初の背景

近年の永久磁石回転機の性能向上は著しく、家電製品から車載用まで広く実用されている。特に、我が国で検討されている車載用電気駆動回転機の主流は埋め込み磁石形同期機であり、近い将来の電気自動車の本格的実用化に向けて精力的研究開発が実施されている。しかしながら、永久磁石モータはネオジウムやディスプロシウム他の希土類系磁石材料を使用しており、当該材料の供給不安が高まっていることから、脱永久磁石と低炭素化の両立を達成するブレイクスルーが強く求められている。

上記課題を解決する技術の一つとして、回転機の高温超伝導化が期待されている。即ち、希土類系材料を使用しないピスマス系高温超伝導テープ材は数 km 長について市販されている状況であり、同線材の超低損失通電特性によって、大型機においては冷凍機の運転電力を考慮しても高効率化や大幅な出力密度向上を達成することができる。

研究代表者らは、現在もなお産業界で広く利用されているかご型誘導機に着目し、その簡易な構造や保守の容易性他のメリットを生かし、高温超伝導技術を適用することによって上記ブレイクスルーを達成すべく精力的検討を実施している。本回転機は、簡易な構造を有するかご形誘導機をベースとしながらも、2次巻線を高温超伝導化することによって、すべり回転ならびに同期回転を両立、定常同期回転に伴って、単純なかご形回転子構造であるにもかかわらず非常に高効率、過負荷が印加されても、すべり回転状態に移行して暫時運転可能(乱調や脱調しにくい)既存の誘導機に比較して1桁を大きく上回る高トルク密度化・高出力密度化を実現可能他、既存回転機では達成不可能な高性能化や高機能化が実現可能であることを実験ならびに解析に基づいて明らかにしている。研究代表者らは、本回転機を高温超伝導誘導同期機(High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)と命名し、世界を先導する研究成果を上げている。

一方で、高温超伝導回転機を運転する際の最も大きな課題の一つは、その冷却法である。即ち、これまでの高温超伝導回転機は常に超伝導状態に冷却しておかなければならず、冷却系が故障して超伝導状態の維持が困難になった場合、システムが焼損する危険がある。従って、一般に高温超伝導回転機システムの冷却状態を常に監視しておかなければならず、実用を検討する上で大きな障害となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、非超伝導状態からの連続駆動が可能な世界初の高温超伝導誘導同期回転機を研究する。具体的には、当該回転機の二

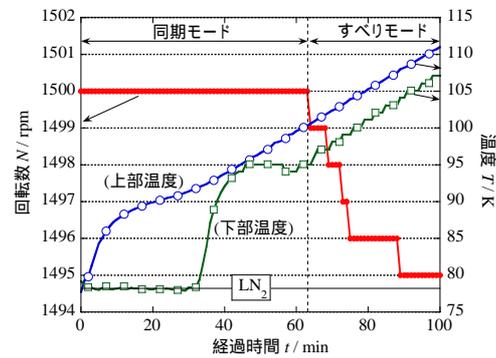


図1 20 kW 級 HTS-ISM における無負荷回転特性の温度変化

次側かご型巻線を高温超伝導/常伝導ハイブリッド2重構造として、超伝導時は高効率同期定常回転とし、また非超伝導時は常伝導かご型巻線の誘導電流によって通常の誘導機として動作することを確認するとともに、最適駆動法を検討する。また、上記運転モードの切り替えを可能にする制御技術の研究や、最適構造設計のための基礎検討(高温超伝導ロータバーにおける非線形抵抗特性、鉄心特性、冷凍機冷却特性の温度依存性他)を実施することによって、高温超伝導機を常に冷却しておかなければならないという制約条件を克服する基盤技術の完成を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、既試作の 20 kW 級高温超伝導誘導同期回転機について、まず超伝導状態と非超伝導状態における連続回転特性を検証する。また、同機について実験結果と非線形等価回路解析結果を比較検討することにより、同解析手法の妥当性を検証する。非線形等価回路パラメータについては、電磁界解析を併用して決定する。

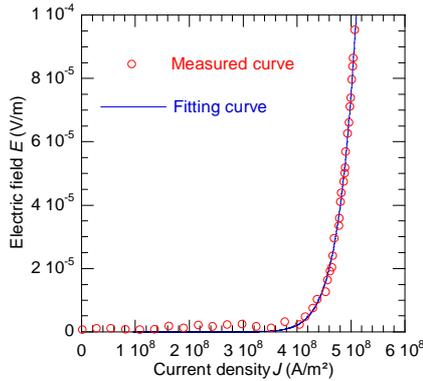
次に、上記試作機における高温超伝導ロータバーについて、その室温からの電気抵抗率を精密に計測し、理論式によって定式化後、温度を可変とした場合の回転機諸特性を検討する。さらに、冷凍機駆動周波数を変化させた場合の冷却特性や、あるいは積層ケイ素鋼板の異方的熱通過率を実験的・解析的に精査する。

## 4. 研究成果

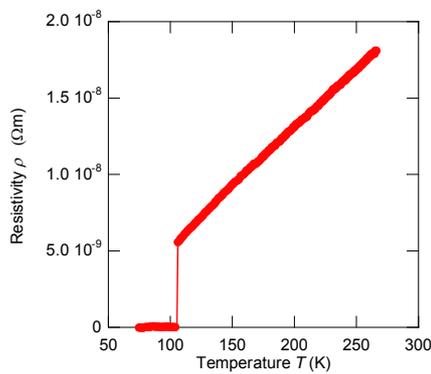
(1) 図1には、既試作の 20 kW 級高温超伝導誘導同期回転機について、超伝導状態ならびに非超伝導状態における無負荷連続回転試験結果を示す。まず、試作機を液体窒素浸漬状態にて無負荷同期回転させ、励磁条件を固定して液体窒素を排出しながら昇温過程の特性を測定した。同図に示すように、回転機上部温度は試験開始後速やかに上昇を開始し、一方で下部温度は 30 分を超えた辺りで上昇開始した。その後、60 分を超えた辺りに



(a) 外観写真

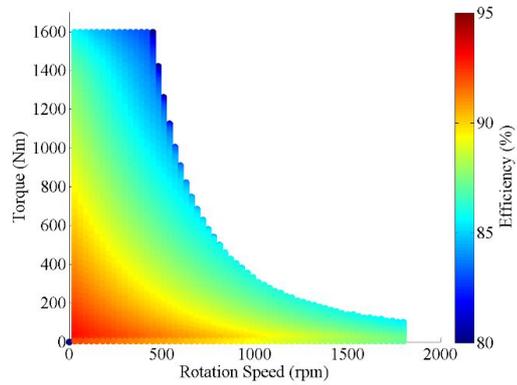


(b) 超伝導状態における電界( $E$ )-電流密度( $J$ )特性の測定例

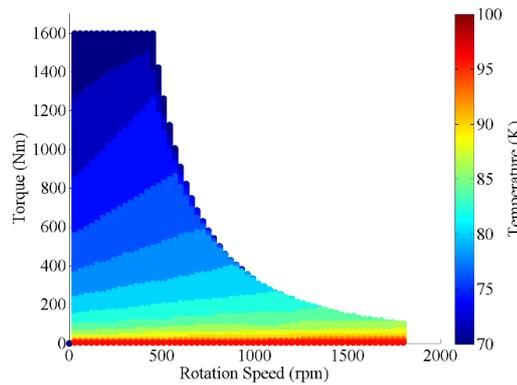


(c) 抵抗率( $\rho$ )-温度( $T$ )特性の測定結果  
図2 高温超伝導ロータバーの外観写真と特性測定例

て上下温度が時間に対してほぼ線形に変化した。さらに、上記時刻以降では回転数が同期値(1500 rpm)から外れ、すべりモード回転に移行した。その後、100分程度まで運転を継続したが、試作機は全く問題無く回転することができた。このことは、超伝導2次巻線が超伝導転移しても、銅バー(および高温超伝導テープ材の銀保護層)に分流することによって回転状態を維持できることを示しており、“超伝導回転機を常に冷却しておかなければならない”というストレスを解消できる可能性を示すことができたと考えられる。(2) 次に、上記結果をもとに、非超伝導状態においても駆動できる構造を検討した。検討に際しては、一般的等価回路を用いることにして、二次巻線抵抗に非線形超伝導特性を導入した。図2(a)には、検討に用いたHTSロータバーの外観写真を示す。ピスマス系高温超伝導テープ材をハンダにて積層後、無酸素銅



(a) 効率



(b) 駆動温度

図3 50 kW級全超伝導HTS-ISMにおける冷凍機冷却効率も考慮した最大効率制御時コンターマップ解析結果

をハンダ接続した。次に、上記ロータバーの超伝導通電特性(図2(b))および超伝導転移前後の抵抗率の測定結果(図2(c))を示す。両図の結果を組み合わせることによって、超伝導状態と常伝導状態の両者に対応可能な等価回路解析コードを構築した。

上記解析コードを用いて、最大効率制御時の効率マップを作成した。図3には、最大効率制御した場合の(a)効率マップと(b)駆動温度について、トルク( $\tau$ )-回転数( $N$ )平面上にプロットしたコンター図を示す。同図に示すように、冷凍機の一般的消費電力を考慮しても広範なトルクと回転数の範囲において85%以上の高効率特性を実現できており、さらに市街地走行モードである比較的低速・軽トルク領域では90%を超えている。また、同高効率特性を実現する運転温度も高くなっており、つまり冷凍機冷却効率も高くなっている。本結果から、HTS-ISMの温度を可変できる技術が確立されれば、非常に高効率な駆動システムが実現可能と期待される。

(3) 最後に、温度可変運転を可能にする構造を検討するために、鉄心コア(等方性積層ケイ素鋼板)の熱通過率を検討した。図4に示すように、円柱状の無方向性ケイ素鋼板(中心に、シャフトを通すための穴が穿孔されている)上部に冷凍機コールドステージを設置



図 4 積層ケイ素鋼板の軸方向熱伝達特性測定径の外観写真

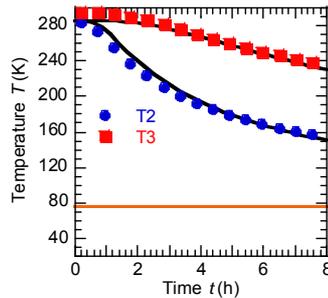


図 5 積層珪素鋼板の軸（積層）方向温度変化（シンボル：実験結果、実線：熱解析結果）

し、軸方向（上下方向）の温度変化を測定することによって、その熱通過率を評価した。図 5 には、実験結果（シンボル）ならびに一次元熱解析結果（実線）を示す。同図に示すように、ケイ素鋼板は 8 h 冷却したにもかかわらず目標温度（77 K）に達せず、解析とのフィッティングから得られる熱通過率は 0.17 W/(mk)であった。即ち、ケイ素鋼板の軸方向熱伝達特性は非常に低く、ほぼ断熱特性として扱うべきことが分かった。本結果をもとにして、系方向冷却特性を改善する検討を実施した。

(4) その他、GM 冷凍機の駆動周波数を積極的に変化させた場合の冷却特性も詳細に測定し、温度可変運転する際の参考データとした。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 4 件)

中村武恒、超電導電気自動車の夢、電気学会誌、査読無（解説）、131 巻 9 号、2011、p. 630

DOI: 10.1541/ieejjournal.131.630

中村武恒、特集：超電導産業機器技術の展開「輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期回転機システムの技術開発の進展、超電導 Web21（電子媒体）、査読無（解説）3月号、2012、pp. 7-9

URL: [http://www.istec.or.jp/web21/pdf/12\\_03/all.pdf](http://www.istec.or.jp/web21/pdf/12_03/all.pdf)

小西武史、中村武恒、雨宮尚之、高温超電導電動機と電力貯蔵装置の適用による電気鉄道の省エネルギー化に関する基礎検討、電気学会論文誌 B、査読有、

132 巻 5 号、2012、pp. 398-406

DOI: 10.1541/ieejpes.132.398

H. Shimura, T. Nakamura, H. Kitano, T. Nishimura, N. Amemiya and Y. Itoh, Calculated Characteristics of HTS Induction/Synchronous Machine Below and Above its Critical Temperature、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、査読有、Vol. 23, No. 3、2013、5201705 (5 pp)  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2244637

〔学会発表〕(計 15 件)

中村武恒、超電導モータの最新技術動向、TECHNO-FRONTIER2011 技術シンポジウム（(社)日本能率協会主催）(招待講演)、2011年7月21日、東京ビッグサイト（江東区）

T. Nakamura、Rotating characteristics of induction/synchronous motor by use of nonlinear property of HTS wires、The 15<sup>th</sup> Japan-US Workshop on Advanced Superconductors（招待講演）、2011年10月28日、住友クラブ（大阪市）

北野紘生、中村武恒、関口大輔、雨宮尚之、伊藤佳孝、高温超電導誘導同期機における自律安定性の実証、2011年度秋季低温工学・超電導学会、2011年11月9日、金沢歌劇座（金沢市）

T. Nakamura、D. Sekiguchi、S. Misawa、H. Kitano、Y. Kawanishi、M. Fukui、T. Matsuo、M. Miyamoto、N. Amemiya、Y. Itoh、M. Yoshikawa、T. Terazawa、Y. Ohashi、N. Okumura、K. Osamura、J. Ogawa、S. Fukui and T. Oka、Current status of high temperature superconducting induction/synchronous machine for automobile application、Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2011 (ACASC2011)（招待講演）、2011年11月17日、ニューデリー（インド）

中村武恒、自動車用超電導モータの開発、自動車用モータの小型軽量化と高機能化に向けた材料・構造技術（招待講演）、2011年12月2日、東京ファッションタウン（TFT）ビル（江東区）

T. Nakamura、D. Sekiguchi、S. Misawa、H. Kitano、H. Shimura、T. Nishimura、N. Amemiya、Y. Itoh、M. Yoshikawa、T. Terazawa、Y. Ohashi and N. Okumura、Development of next generation drive system by use of HTS induction/synchronous machine、3<sup>rd</sup> International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2012)（招待講演）、2012年5月3日、イスタンブール（トルコ）

T. Nakamura, H. Shimura, D. Sekiguchi, H. Kitano, S. Misawa, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa and M. Sugano, Novel operational concept of HTS induction/synchronous machine: from non-superconducting to superconducting state, International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012 (ICEC 24-ICMC 2012) (招待講演) 2012年5月16日、福岡国際会議場(福岡市)

H. Shimura, T. Nakamura, H. Kitano, T. Nishimura, N. Amemiya and Y. Itoh, Challenging Operational Break-through for HTS Induction/Synchronous Machine - Below and Above Its Critical Temperature, Applied Superconductivity Conference 2012 (ASC 2012), Portland, Oregon, USA, 2012年10月10日、Portland, Oregon (USA)

志村拓俊、中村武恒、西村立男、北野紘生、雨宮尚之、伊藤佳孝、吉川雅章、超電導 - 常電導転移温度近傍における高温超電導誘導同期回転機の効率特性、2012年秋季低温工学・超電導学会、2012年11月9日、いわて県民情報交流センター[アイーナ](盛岡市)

中村武恒、西村立男、志村拓俊、李全、小笠卓郎、雨宮尚之、伊藤佳孝、吉川雅章、寺澤俊久、奥村暢朗、20 kW 級高温超電導誘導同期回転機の超電導ならびに非超電導状態における回転特性と冷却特性、2013年春季低温工学・超電導学会、2013年5月14日、タワーホール船堀(江戸川区)

中村武恒、車載用高温超電導モータの開発現状、低温工学・超電導学会第4回超電導応用研究会/第2回 HTS 冷却システム検討会シンポジウム(招待講演) 2014年3月7日、住友電気工業(株)大阪製作所(大阪市)

渡邊潤、志村拓俊、中村武恒、小笠卓郎、雨宮尚之、伊藤佳孝、大橋義正、高温超電導誘導同期回転機における冷却構造の検討 - 積層珪素鋼板の熱通過率の異方性、2014年春季低温工学・超電導学会、2014年5月27日、タワーホール船堀(江戸川区)

中村武恒、志村拓俊、西村立男、小笠卓郎、雨宮尚之、伊藤佳孝、大橋義正、冷凍機 COP を考慮した高温超電導誘導同期回転機システムの定常駆動特性解析、2014年春季低温工学・超電導学会、2014年5月27日、タワーホール船堀(江戸川区)

T. Nakamura, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, Y. Ohashi and Q. Li, High

temperature superconducting motor system for low carbon emission transportation equipment, 1<sup>st</sup> International Symposium on Energy Challenges and Mechanics(招待講演) 2014年7月10日(予定) Aberdeen, Scotland (UK)

T. Nakamura, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, T. Nishimura, T. Ogasa, T. Matsuo, N. Amemiya, Y. Ohashi, M. Furuse and S. Fukui, Prominent Performance of 20kW-Class High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine for Next Generation Automobile, The 15<sup>th</sup> IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014) (招待講演) 2014年8月28日(予定) Fukuoka University, Fukuoka (Japan)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 武恒 (NAKAMURA Taketsune)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30303861

### (2) 研究分担者

菅野 未知央 (SUGANO Michinaka)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・助教  
研究者番号：30402960  
(平成25年3月31日に削除)

### (3) 研究協力者

伊藤 佳孝 (ITO H Yoshitaka)  
株式会社イムラ材料開発研究所・研究開発グループ・主任研究員  
研究者番号：20527478