

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 21 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360425

研究課題名（和文） 海水流発電用小型高効率回転機に関する研究

研究課題名（英文） Studies on small-sized efficient rotating machine for tidal power generation

研究代表者

和泉 充（Izumi Mitsuru）

東京海洋大学 海洋科学技術研究科 教授

研究者番号：50159802

研究成果の概要（和文）：

自然エネルギーは密度が低いがどこにもある。海水は大気と比較して 800 倍以上も密度が高く、低い流速でも風力発電に比較すればかなりの程度小さなプロペラで有効なエネルギー供給を可能にする。この研究では、海洋、船舶（港湾）、鉄道（橋梁）、電気・機械、エネルギー材料等に関わる研究者が知見と設備を結集し、海潮流による発電に焦点を絞り、わが国を中心とする海洋沿岸・島嶼・内海域への設置環境に適したエネルギー回収システムの実証的研究を行うこととし、立地性、システム、タービンプロペラ等設計から要求される低設置コストの新しい海潮流発電用小型高効率回転機本体のバイタル部分の設計・試作と評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

Tidal and ocean current power generation effectively enable us to supply a kind of renewable energy with relatively small turbine diameter in compared to wind turbine thanks to sea water density which is more than 800 times of that for atmosphere. In the present study, one focuses on tidal and ocean power system together with the viewpoints on ocean, ship/port, railway/bridge, electronics and machinery, and energy materials. Then, operation tests are designed for coastal, islands and inland sea to obtain a suitable energy recovery system. A small-sized demonstrator, which is composed of a vital part of novel, compact and efficient rotating machine concepts, was designed and assembled together.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2011 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋工学、海潮流発電、高温超電導、超電導発電機、タービンプロペラ、磁束ピン止め、バルク磁石、界磁－電機子構造

1. 研究開始当初の背景

平成 19 年に海洋基本法が制定され、海洋環境の保全と海洋の利活用の推進が要請されている。また、全地球規模での低炭素・省エネルギー社会の確立も急務とされる。これらの要請に応えるために、海洋エネルギーの利活用として潮流や海流を利用した発電（以下海水流発電と略称）と電力供給の確かな取り組みが求められている。国際的な関心も高まっている。海潮流発電は、風力発電の大气に比較して、密度の高い海水の流れから電力を得るものであり、北欧、カナダ、米国等で研究されている。わが国では国内島嶼沿岸域における防災・安心・安全対策としての新エネルギーの確立、海峡橋梁の多機能化、海底資源探査の電力、海中トンネル、海中・水中構造物、沿岸警備、地域・地場漁業等の支援エネルギーとして広汎に資する。これまでの国内外の研究では、水車（プロペラ）の形状学的研究が活発に行われていた経緯がある。海潮流を水車で受けて回転子を回すことから、水車の設計そのものは勿論重要である。しかしながら、同時に、狭水道や橋梁、海峡などの狭隘な設置海域に立地し、高効率に発電が可能な新たな設計による発電機本体、すなわち海潮流発電用小型高効率回転機本体の研究が必要である。本研究では超電導技術を適用して、この本体の研究を行うことを提案した。

2. 研究の目的

(1) わが国で想定される狭水道、橋脚、海峡域等への立地性を検討して海潮流発電用小型回転機本体の体格、エネルギー回収システムとしての設置条件、タービンの性能評価技術等を決定する。
(2) 液体窒素による冷却で電気抵抗ゼロを実現する高温超電導体の結晶の塊（バルク磁石）を超電導界磁に利用して、小型で増速機の不要な 1 MW 級までの海潮流発電用小型回転機本体を低速多極機として試設計を行う。
(3) バルク磁石 (M. Tomita and M. Murakami, Nature., 421, 517-520, 2003) により最大発電効率を得るための、最適な磁石の寸法と発生最大磁束を決定して海潮流発電用小型回転機本体への適合性と適用限界を明らかにし回転機本体の試設計を完成する。
(4) 回転機本体発電構造の試作を行う。必要なバルク超電導磁石の改良・改質を行い本体に実装して在来機を凌ぐ性能と超電導発電機の適用限界を実証する。
(5) 試作機の立地性の検討から発電性能試験までを行ってわが国で想定される海峡域等でのエネルギー回収システムの立地性やタービン評価技術等を評価する。

3. 研究の方法

(1) 単なる潮流発電機本体の開発ではなく、実用のフィールドの条件とプロペラの構造や形状、CFD 技術を用いたギアレスによる可変速に対応した最適タービン形状設計、流体特性のこれまでの海上安全技術研究所の研究成果を発展的に応用し、地域性等も考慮する。
(2) バルク磁石を世界に先駆けて船舶推進用超電導モータの設計と試作に応用した経験を生かして、前項が与える条件のもとで、増速機不要でプロペラ直結の低速多極機としての超電導発電機構造を実現する
(3) 磁石の改質改良を行った成果を、前項で設計した低速多極発電機に応用する。バルク磁石は 30 mm の磁石形状寸法で 2 T（テスラ）を超える磁束を保持できる。バルク磁石が、銅線はもとより超電導の電線を巻き線したコイルや永久磁石に比べて、はるかに小さな寸法形状で、同寸法の永久磁石の 10 倍以上の磁束を保持できる特性をそのまま海潮流発電用小型回転機に適用させる。
(4) 回転機本体発電構造の試作機の適用限界の実証であり、可能な限りバルク磁石の冷却や断熱に必要な空間と素材を最小とする冷却構造と励磁技術を確立して、試作回転機内部での最大磁束保持を実証しようとするにもうひとつの独創的なポイントと特色がある。
(5) 試作機の発電性能試験を行ってわが国で想定される海峡域等でのエネルギー回収システムとしての適合性等の見通しを得る。各研究者は、海洋・船舶機器：洋上風力や潮流発電のシステムの構想、ポッド推進装置、電気推進船、スーパーエコシップ（SES）の研究開発、30 mm 程度の狭い空間に 10 T に至る強磁束を与える超電導磁石材料の開発、1 メガワット級までのギアレス船舶推進用超電導モータの設計と試作、鉄心を使わないコアレス超電導磁石を機器に実装された状態で有効に冷却して強磁束を発生させる超電導機器要素技術に関する成果をあげてきており、その学際的知見の集約から新たな発電機本体の設計思想を醸成する。

4. 研究成果

(1) 想定される狭水道、橋脚、海峡域等への立地性を検討して高効率エネルギー回収システムとして海水流発電用小型回転機本体の体格、タービン直径、設置条件等を検討し、本研究における設計仕様を 1 MW とした。
また、実際の海域に設置した場合には、時間的な流速変化以外に波浪、動揺の影響によ

っても流速変動を生じる。模型を用いた波浪中の拘束状態での曳航試験から、波浪中での出力係数とその平水中の結果では、時間平均すると波浪中と平水中は同等であり、波浪の影響がほとんどない。一方、平均化すると分からない振幅の大きな変動成分が存在することから、これにいかに対応するかが課題である。実際は、発電機の慣性や負荷トルクによって変動成分は小さくなると考えられるがロータに生じるトルク変動はかなり大きくなることに注意する必要がある。

(2) 1 MW の海水流発電用小型回転機本体の界磁-電機子構造を試設計するとともに回転数とトルクの特性を解析検討した。また、界磁冷却システムの試設計を行う過程で、極低温冷媒をロータに効率よく閉サイクルで供給するとともに、周囲からの熱侵入を極小化して回転機効率の向上に寄与する低温用小型ロータリージョイントのシーズをもっていたが、実際に純ネオン冷媒を用いてその有効性を実証して海潮流発電機の有効な技術要素とした。

(3) 高温超電導体の結晶の塊であるバルク磁石を 30 mm x 30 mm の寸法を磁石素片単位として界磁極とし、10 kVA 級の海水流発電用小型回転機本体の界磁-電機子構造を設計・検討した。発生最大磁束をバルク表面で最大 5 テスラまでを想定して回転機本体の試設計を行なった。

また、発生磁束の収束あるいは磁束密度分布制御の目的でバルク磁石と磁性体を組み合わせるなどの工夫を行っている。以降の試作機では、Gd-Ba-Cu-O バルク磁石材料を選択、結晶材料を多層にスライスして結晶成長境界が層間で重ならないように交互積層し、界磁磁束を交流同期機として望ましい形状とした。

(4) 10 kVA 級の回転子本体と発電構造の試作改良を繰り返し行った。必要なバルク超電導磁石の改良・改質も行い回転子本体に実装し在来機を凌ぐ電機子領域での磁束保持性能と適用限界を見極めようとした。

バルク磁石の改質では、バルク磁石を界磁として最大発電効率を得るための、最適な磁石の寸法と発生最大磁束をパルス着磁法と磁化測定によって実証的に考究した。その過程で、界磁とする Gd 系バルク超電導磁石にピン止め材料として軟磁性材を添加することによって、磁場中における臨界電流密度を 30 % 以上向上させることに成功し、関係発表論文のうち 1 編は 2009 年の当該国際論文誌におけるハイライトに選定された。さらに本体発電機構造等を検討する過程で内外の回転機構造を総説した論文も当該掲載国際

雑誌の 2012 年のハイライトに選定された。

(5) 本研究成果(2)-(4)によって試作した 10 kVA 級発電機の回転発電性能試験を行った(図 1 参照)。

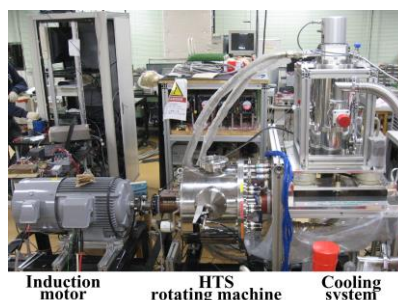


図 1 10 kVA 級発電用超電導回転機と試験装置

ここでは、高磁束を収束生成できる高温超電導バルク磁石を回転界磁極に応用するための機器要素としての適合性を明らかにしようとしたものである。超電導体を同期回転機内部のような交流磁場にさらすと磁束が超電導体内外で出入りし、運動することから発熱を生じる。またその周波数が高い場合には材料そのものの局所的な温度上昇から磁石性能の低下を生む。ここでは、直結タービンの回転数域を超える回転数で発電試験を行い、純ネオンガス熱サイフォンにより 40 K に安定的に冷却された界磁磁束の変動を精密に測定した。なお、バルク磁石はすべての界磁を 1 テスラに着磁して行なった。その結果、回転数 60 rpm、発電電流 4 Hz, 10 A, 0.235 kW の出力において、電機子からの交流磁場 (32 mT) と熱輻射による界磁の損失が観測されなかったことは高温超電導バルク磁石を低速の発電機界磁に利用できる見通しを得たものと結論できる。また、120 rpm, 0.668 kW においても損失は大きくなく、240 rpm、発電電流 16 Hz で 1.4 kW 出力、交流磁場 72 mT の時に交流損失および熱輻射に起因する損失を観測した。風力発電や潮流発電でタービンの回転数の 3 倍以上となる 60 rpm においても超電導バルク体の捕捉磁束は電機子からの交流磁場に影響されないことが明らかとなった。従って、低速高出力を要する発電に、超電導バルク界磁を用いた発電機が十分適合可能であるばかりか、最大 5 テスラまでの十分な着磁を行うことによってさらなる小型化と効率化が期待できることが明らかになった。

また、本研究の成果(2)で行なった 1 MW 級発電機的设计データから得た負荷トルクをもとに、発電機の負荷トルクとタービンが発生するトルクが釣り合う平衡状態を求めてタービン性能曲線を作成した。MW 級の発電システムであるから、想定海域の流速分布に合

わけて適切なタービン仕様を選定する必要がある。

発電機の負荷トルクに関するデータをもとに、タービン直径をパラメータにケーススタディを実施した。定格（設計）流速は、1.5 m/s-2.5 m/s の範囲を想定した。これに基づいて、ケーススタディのパラメータを表1に示す。タービン直径毎に、発生トルクと発電機負荷トルクの関係を得た。図2にタービン直径が30 mのときの結果を示す。

表1 ケーススタディパラメータ

	パラメータ		
タービン直径	20m	30m	45m
流速	0.5m/s	~	2.5m/s

流速毎にタービントルクと発電機負荷トルクの平衡状態になる回転数を求め、回転数に対応した出力を発電機的设计データから内挿して求めた。この方法を用いてタービン直系をパラメータにして求めた発電性能曲線を図3に示す。

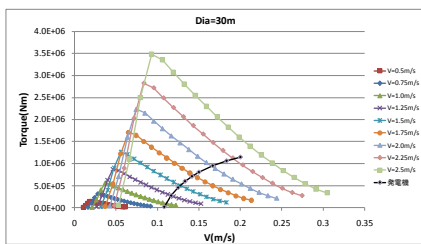


図2 発電機負荷トルクとタービントルクの関係

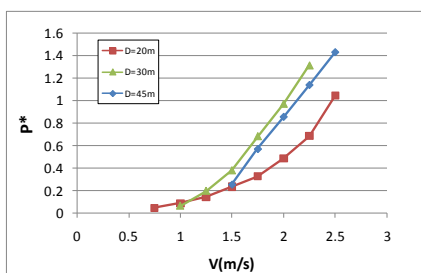


図3 タービン直径毎の発電性能曲線

図3の結果から、タービン直径は30mが適切であると考えられる。タービン直径が20mだとタービン特性から最高出力点の回転数が速くなるために当該発電機とのマッチングが悪い。また、直径45mのケースでは、30mのケースとほぼ同等であるが、カット・イン流速が高くなるために、年間総発電量で比べて減少することになる。

一方、MW級の発電システムを実施するためには、流速に応じてシステムの定格出力、構成が大きく変化する。設置する海域によって、システムの定格出力、構成を検討する必要がある。今後の課題として、タービン側では、翼型、翼数を変えることで最大出力時の設計回転数をずらすことが可能である。回転数等をずらすことによる効果を調査する必要がある。

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 7件)

- ① M. Watasaki, M. Miki, B. Felder, K. Tsuzuki, R. Sato, S. Kase, M. Izumi, T. Ida, Trapped magnetic flux of bulk HTS magnets in the external AC magnetic field at low temperatures, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23, (2013) 8201604. DOI:10.1109/TASC.2012.2236874、査読有
- ② D. Zhou, S. Hara, B. Li, K. Xu, J. Noudem and M. Izumi, Significant improvement of trapped flux in bulk Gd-Ba-Cu-O grains fabricated by a modified top-seeded melt growth process, Supercond. Sci. Technol., 26, (2013) 015003.、査読有
- ③ B. Felder, M. Miki, K. Tsuzuki, R. Sato, H. Hayakawa, M. Izumi, Cryogenic rotary joints applied to the cooling of superconducting rotating machinery, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23, (2013) 5201204. DOI:10.1109/TASC.2013.2241382、査読有
- ④ D. Zhou, M. Izumi, M. Miki, T. Ida, M. Kitano, An overview of rotating machine systems with high-temperature bulk superconductors, Supercond. Sci. Technol., 25 (2012) 103001 (12pp). DOI:10.1088/0953-2048/25/10/103001、査読有
- ⑤ 南 佳成、潮流・海流発電システムの高効率化に向けた研究開発、混層流学会誌「混層流」、第25巻、査読無、2012、第4号
- ⑥ M. Miki, B. Felder, K. Tsuzuki, Z. Deng, N. Shinohara, M. Izumi, T. Ida, H. Hayakawa, Influence of AC magnetic field on a rotating machine with Gd-bulk HTS field-pole magnets, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21 (2011) pp. 1185-1189, DOI:10.1109/TASC.2010.2084985、査読有
- ⑦ Y. Xu, M. Izumi, K. Tsuzuki, Y. Zhang,

C-X. Xu, M. Murakami, N. Sakai, I. Hiranbayashi, Supercond. Sci. Technol., 22 (2009) 095009 (6pp). DOI:10.1088/0953-2048/22/9/095009、
査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Mitsuru Izumi, Masahiro Watasaki, K. Tsuzuki, T. Ida 他 6 名, Trapped flux engineering and application of bulk HTS, 8th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials, Tainan, Taiwan, 2012 年 12 月 7 日 (招待講演).
- ② Mitsuru Izumi, Yusuke Fukumoto, Masaru Tomita, Noki Maki, Yoshimasa Minami 他 6 名, Potential Application of HTS to Tidal Turbine Generators, 第 25 回国際超電導シンポジウム (ISS2012), 東京, 2012 年 12 月 4 日 (招待講演).
- ③ 牧 直樹・篠原信行・和泉 充, 潮流発電用 HTS 発電機の基本電気設計検討, 平成 25 年電気学会全国大会産業応用部門 5-107, 2012 年 3 月 21 日、名古屋大学
- ④ Yoshimasa Minami, Development of tidal and ocean current generator system suitable for the sea around Japan, Proceedings of International Research Meeting of Kyushu University Research, CD-ROM, 2011

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 低温用ロータリージョイント

発明者: 和泉 充、三木 基寛、北野雅裕

権利者: 国立大学法人 東京海洋大学、株式会社 北野精機

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/059365

出願年月日: 2010年6月2日

国内外の別: 国外

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和泉 充 (IZUMI MITSURU)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号: 50159802

(2) 研究分担者

南 佳成 (MINAMI YOSHIMASA)

海上技術安全研究所・洋上再生エネルギー

開発系・主任研究員

研究者番号: 60399516

富田 優 (TOMITA MASARU)

鉄道総合技術研究所材料技術研究部超伝

導応用研究室長

研究者番号: 50358404

(3) 連携研究者

村上雅人 (MURAKAMI MASATO)

芝浦工業大学・工学部・材料工学科・教授

研究者番号: 00365545

井田徹哉 (IDA TETSUYA)

広島商船高等専門学校・電子制御工学科・
准教授

研究者番号: 80344026