

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24年5月28日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360429

研究課題名（和文）ヘリカル型海流MHD水素発生法の開発に関する研究

研究課題名（英文）Research and Development on Method for Helical-Type Seawater MHD Hydrogen Generation

研究代表者

武田 実（TAKEDA MINORU）

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：50206992

研究成果の概要（和文）：

始めに、ヘリカル流路モデルを対象として、3次元流速分布計測を行うとともに、流体損失に及ぼす形状効果を実験的に調べ、ヘリカル型海流MHD（magnetohydrodynamics）水素発生器の流体損失モデルを構築した。続いて、この計算モデルを基にして性能予測を行い、水素発生器の最適形状を決定した。製作した水素発生器を用いて、7テスラの磁場下で発電／水素発生実験を行い、予測値に近い結果を得た。さらに、新しい水素ガス採集方法として、超伝導MHD分離法を試み、その可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

First, systematic studies on the effects of the configuration of a helical wall on the flow loss as well as measurements of 3D velocity distribution were made using experimental devices constructed to model the generator. Then, a calculation model of flow loss in a helical-type seawater MHD (magnetohydrodynamics) hydrogen generator was formulated. Second, after performances of the generator were estimated on the basis of the calculation model, the configuration was optimized. Experiments on the electromotive force and generator output were carried out to elucidate the fundamental characteristics of the generator. As a result, experimental values were in agreement with calculated values. In addition, there was a possibility that the MHD separation method was available for separating hydrogen gas from mixed seawater.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

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, 超伝導応用, 水素発生, MHD, 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

化石燃料の消費に伴う大気汚染や酸性雨の問題、更には地球温暖化の問題等が深刻化

している。これらの問題について、2008年7月に開催されたG8北海道洞爺湖サミット／環境・気候変動ワーキングで議論が行われた。

G8は、長期目標として2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量の少なくとも50%削減を求めることで合意した。このような大幅な削減を達成するためには、「環境負荷の少ない代替エネルギー源」の確保が急務である。

化石燃料の代替エネルギー源として、今「水素」が最も注目されている。水素のクリーンな特性を活かすためには、再生可能な資源から水素を生成しなければならない。「海流（または潮流）エネルギー」は、太陽光や風力エネルギーに比べて季節や天候に大きく左右されないため、「水素発生のための再生可能エネルギー」として極めて有効である。わが国は四方を海に囲まれた島国であり、「再生可能な海流／潮流エネルギーを利用したMHD水素発生法」を開発することは、代替エネルギー源確保のための最も重要な基盤技術開発のひとつに位置付けられる。

我々はこれまでにオリジナルなヘリカル型（らせん型）海流MHD発電機／水素発生器（外径10cm、長さ30cm）を試作し、7テスラ（7万ガウス）の超伝導強磁場を用いて基礎特性を明らかにした[1,2]。さらに、その数値シミュレーションにも成功している[3]。これらの研究は国内・国外において例のない全くユニークなものであり、ごく最近では有名な外国雑誌[4]で紹介されるなど世界的に注目を集め始めている。本研究は「新型（ヘリカル型）海流MHD水素発生法」を開発し、再生可能な海流エネルギーの有効利用を提言するものである。

【参考文献】

- [1] M. Takeda, Y. Iwamoto, T. Akazawa, K.A. Bui, X. Liu and T. Kiyoshi: J. Jpn. Inst. Marine Eng., Vol.43, pp.130-134 (2008).
- [2] M. Takeda, Y. Okuji, T. Akazawa, X. Liu and T. Kiyoshi: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.15, No.2, pp.2170-2173 (2005).
- [3] X. Liu, T. Kiyoshi and M. Takeda: Cryogenics, Vol. 46, pp. 362-366 (2006).
- [4] New Scientist, July 5 (2008); Superconductor Week, September 1 (2008).

2. 研究の目的

本研究では、ヘリカル型海流MHD（電磁流体力学）発電／水素発生基礎研究成果に基づき、「海流／潮流エネルギーを利用したMHD水素発生法」の開発を目的として、以下の7項目を扱う。

(1)海流MHD水素発生器の流体損失／圧力分布計測：発生起電力の向上には、流体損失を低減して海水流速を増加させることが重要である。そこで、流体損失に及ぼす水素発生器形状の影響を調べるために、詳細に圧力

分布計測を行う。

(2)海流MHD水素発生器内部の流速分布計測：水素発生器内部では平均流速が5 m/sを超えており、すでに可視化装置により複雑な流れや渦等の発生を観測している。さらにPIV計測等の手法を用いて、水素発生器内部の流速分布を詳しく調べる。

(3)水素ガス採集のための超伝導MHD分離実験：発生する水素ガスは海水に伴って移動するため、有効な採集方法等を確立しなければならない。簡易実験用電気分解セルより発生する水素ガスを対象として、我々が考案した超伝導MHD分離法による採集実験を試みる。

(4)海流MHD水素発生器用電極の創製：水素ガス採集の新規な方法として、電極を通じて水素ガスを吸蔵・採集する方法を模索する。そのために、いくつかの多孔質電極の表面上へパラジウム等の薄膜化を試みる。

(5)海流MHD水素発生実験：(1)～(2)の研究成果に基づいて、形状を最適化した水素発生器を製作する。10テスラ級の強磁場および人工海水を用いて、発電特性／水素ガス発生特性を評価する。さらに、(3)超伝導MHD分離法および(4)多孔質電極を用いる新規な方法により、水素ガス採集特性を調べる。

(6)海流MHD水素発生器用高温超伝導マグネットの設計検討：海流MHD水素発生器を実用化するためには、冷却コストを低く抑えられる高温超伝導マグネットの使用が不可欠である。磁場が数テスラ（永久電流状態）、ボア径が1 m級のマグネットの設計検討を行う。

(7)プロトタイプ設計検討：実験結果と数値シミュレーション結果を比較して、計算モデルの妥当性について検討する。これに基づいて、明石海峡の潮流や黒潮の海流を対象としてプロトタイプ水素発生器の設計検討を行う。

3. 研究の方法

本研究の目的は、再生可能な海流／潮流エネルギーを有効利用するヘリカル型海流MHD水素法を開発することである。予備的な研究を含めて、主な研究の方法は以下のとおりである。

(1)海流MHD水素発生器の流体損失／圧力分布計測：流体損失に及ぼす水素発生器形状の影響を調べるために、実験装置と同じ形状の透明な模擬装置を用いて詳細に圧力分布

計測を行った。水素発生器形状のうち流体損失に影響を及ぼす因子は、ヘリカル状仕切り板のピッチ及び回転数、2つの電極の直径比等である。始めにこれらの因子が異なる模擬装置を複数製作した。次に、人工海水の流量を変化させてそれぞれの模擬装置の圧力分布を計測した。

(2)海流 MHD 水素発生器内部の流速分布計測：水素発生器内部の流速分布等を詳しく調べ、異常なヘリカル流れの原因を解明するとともに流体損失の計算モデルに関する知見を得るために、PIV計測に先んじて5孔ピトー管（ヨーメーター）を用いて3次元計測を行うこととした。作製した流速分布装置および循環ポンプを用いて、流速分布を詳しく調べた。また、CADを援用して流速分布の3次元表示を試みた。

(3)水素ガス採集のための超伝導 MHD 分離実験：海流 MHD 水素発生器から発生する水素ガスは、海水の流れに伴って移動するため、有効な採集方法等を確立する必要がある。そこで、海水と被分離物の電気伝導度の違いに伴うローレンツ力の差を利用する、超伝導 MHD 分離法の適用を試みた。作製した実験装置を用いて、10テスラの印加磁場下で水素ガスを模擬した高分子粒子を対象とした、超伝導 MHD 分離実験を行った。

(4)海流 MHD 水素発生器用電極の創製：海流 MHD 水素発生器から生じる水素ガスの新規な採集方法として、電極を通じて水素ガスを吸蔵・採集する方法を考えた。パラジウムは水素吸蔵合金としてよく知られているが、パラジウム銀合金のような水素吸蔵合金をいくつか用意して、水素ガスの透過実験を行った。

(5)海流 MHD 水素発生実験：研究(1)～(2)の成果に基づいて、形状を最適化した海流 MHD 水素発生器を製作した。これを海水フローラインに組み込み、10テスラ級強磁場装置および人工海水を用いて発電特性／水素ガス発生特性を調べた。実験では、まず超伝導強磁場を印加した後、循環ポンプを用いて最大流量約 60 m³/h（約 6 m/s）の人工海水を流した。次に、自動計測装置および水素ガス流量計を用いて、発電出力（電流、電圧）および水素ガス発生量を計測した。実験データを解析して、水素ガス発生量および発生効率に対する磁場および海水流速の依存性を調べた。

(6)水素貯蔵実験：海流 MHD 水素発生器より発生した水素ガスを採集した後に、これを貯蔵する方法として、極低温技術を利用する

方法が考えられる。そこで、水素貯蔵用断熱真空槽および液体窒素槽を備えた容器を用いて、貯蔵状態を実験的に調べた。

(7)海流 MHD 水素発生器用高温超伝導マグネットおよびプロトタイプ的设计検討：本研究で使用する超伝導マグネットは、低温超伝導線材で作製されているため極低温（約 4 K）への冷却を必要とする。一方、現在開発中の高温超伝導線材でマグネットを作製すれば、液体窒素（沸点 77 K）による冷却が可能となる。これにより冷却コストを低く抑えられるので、海流 MHD 水素発生法の開発に目処が立つ。そこで、磁場が数テスラ（永久電流状態）、ボア径が 1 m 級の高温超伝導マグネットの設計検討を行った。また、明石海峡の潮流や黒潮の海流を対象として、高温超伝導マグネットを内蔵したプロトタイプのヘリカル型海流 MHD 水素発生器の設計検討を行った。

4. 研究成果

海流 MHD 水素発生法は、海流の持つ運動エネルギーを電気エネルギーへ直接変換し、これにより水素ガスを発生するユニークな手法である。本研究では、これまでの基礎研究に基づいて、ヘリカル型海流 MHD 水素発生法の開発を目的とし、以下の成果を得た。

（平成 21 年度）

(1)海流 MHD 水素発生器の流体損失／圧力分布：発生起電力の向上には、流体損失を低減して海水流速を増加させることが重要である。そこで、流体損失に及ぼす水素発生器形状の影響を調べるために、回転数、ピッチ長、電極直径の異なる実験装置を製作し、詳細に圧力分布を計測した。計測結果に基づいて、流体損失の計算モデルを構築するとともに流動特性に対する水素発生器形状の効果を明らかにした。

(2)海流 MHD 水素発生器内部の流速分布計測：水素発生器内部の流速分布等を詳しく調べ、異常なヘリカル流れの原因を解明するとともに流体損失の計算モデルに関する知見を得るために、その計測方法について検討した。その結果、PIV計測に先んじて5孔ピトー管（ヨーメーター）を用いて3次元計測を行うこととし、流速分布計測装置の設計及び作製を行った。

(3)水素ガス採集のための超伝導 MHD 分離実験：水素発生器より発生する水素ガスは、海水に伴って移動するため、有効な採集方法等を確立しなければならない。そこで、水素ガスを模擬した高分子微粒子を対象として、我々が考案した電極分割方式の超伝導 MHD

分離法による採集実験を試みた。採集率の実験値は計算値より小さく、実験装置の改良が必要となった。

(平成 22 年度)

(1)海流 MHD 水素発生器の性能予測：水素発生器形状の流体損失に及ぼす影響を実験的に調べ、流体損失の計算モデルを構築した。この計算モデルを基にし、印加磁場をパラメーターとしてヘリカル型発電機／水素発生器モデルの起電力および最大発電出力の予測に成功した。

(2)海流 MHD 水素発生器内部の流速分布計測：水素発生器内部の異常なヘリカル流れの原因を解明するとともに、性能予測に関する更なる知見を得るために、5 孔ピトー管を用いて、流速分布の 3 次元計測を行った。その結果、流速の半径方向距離依存性および軸方向距離依存性が明らかになった。

(3)水素ガス採集のための超伝導 MHD 分離実験：改良した電極分割方式による超伝導 MHD 分離装置を用い、水素ガスを模擬した高分子粒子を対象として分離実験を行った。その結果、10 テスラの印加磁場下で完全分離に成功した。これにより、水素ガスに対する超伝導 MHD 分離法の有効性が確かめられた。

(4)海流 MHD 水素発生器用電極の創製：新規な水素ガス採集方法として、研究(3)とは異なり電極を通じて水素ガスを採集する方法を考えた。パラジウム銀合金膜を電極として、水素ガスの透過性などを実験的に調べ、これが水素発生器用電極としての可能性を持つことがわかった。

(平成 23 年度)

(1)海流 MHD 水素発生器内部の 3 次元流速分布計測：海水のヘリカル流れを解明するとともに性能予測に関する知見を得るために、水素発生器を模擬したヘリカル流路モデルを対象として 5 孔ピトー管を用いて流速分布計測を行い、CAD を援用して 3 次元流速分布を表示することに成功した。理想に近いヘリカル流れは 3 回転目以降であれば実現しており、ヘリカル流路の外壁面の影響を受けて流速が低下していることがわかった。

(2)海流 MHD 発電／水素発生実験：発電特性／水素発生特性を明らかにするために、製作した実験装置を用いて 7 テスラの磁場下で実験を行った。起電力は予測値に近い値を示したが、磁場方向（順方向、逆方向）に依存することが明らかとなった。また、海水の平均流速が約 5 m/s を超えると発電することは

確認したが、水素発生は未だ確認できていない。

(3)水素貯蔵実験：海流 MHD 水素発生器より発生した水素ガスを採集した後に、これを貯蔵する方法として極低温技術を利用した液化方法が有効である。そこで、断熱真空槽・液体窒素槽を備えた容器を用いて液体水素の貯蔵状態を実験的に調べ、液化方法の有効性を明らかにした。

(4)海流 MHD 水素発生器用高温超伝導マグネットの設計検討：水素発生器を実用化するためには、冷却コストを低く抑えられる高温超伝導マグネットの使用が不可欠である。そこで、テープ形状をした超伝導材料を対象として、フープ応力および遮蔽磁場の影響について検討し、これらを考慮したマグネットコイルの設計手法を確立した。

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 10 件)

(1) M. Takeda, Y. Tanase, T. Kubozono, A. Abe, S. Nishio, B. Wan: Separation Characteristics Obtained from Electrode Partitioning MHD Method for Separating Oil from Contaminated Seawater Using High-Field Superconducting Magnet, IEEE Transactions on Applied Superconductivity (2012), in press 査読有.

(2) A. Otsuka, Y. Yanagisawa, T. Kiyoshi, H. Maeda, H. Nakagome, M. Takeda: Evaluation of the Screening Current in a 1.3 GHz NMR Magnet Using ReBCO, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, pp. 2076-2079 (2012) 査読有.

(3) M. Takeda, T. Yanaka, S. Nishio, H. Hirotsuki, A. K. Bui, T. Kiyoshi: Measurements of Velocity Distribution inside Helical-Type Sea-water MHD Power Generator Using Five-Hole Pitot Tube, Proceedings of 9th International Symposium on Marine Engineering Kobe 2011, B5-1 Paper (2011) 査読有.

(4) M. Takeda: Seawater Magnetohydrodynamics Power Generator / Hydrogen Generator: Advances in Science and Technology, Vol. 75, pp. 208-214 (2010) 査読有.

(5) A. K. Bui, M. Takeda, T. Kiyoshi: Measurements of Flow Loss in Helical-Type Seawater MHD Power Generator, TEION KOGAKU (Journal of the Cryogenic Society of

Japan), Vol. 45, pp. 506-513 (2010) 査読有.

(6) A. Otsuka, T. Kiyoshi, M. Takeda: A 1.3 GHz NMR Magnet Design under High Hoop Stress Condition, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, pp. 596-599 (2010) 査読有.

(7) 武田実: 超伝導MHD分離法による海洋流出油の分離回収技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 45, pp. 113-117 (2010) 査読無

(8) M. Takeda, S. Yagi, Y. Matsuno, I. Kodama, S. Fujikawa, H. Kumakura, T. Kuroda: Liquid Hydrogen Experiment Facility with System Enabling Observation under Horizontal Vibration, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 55, pp. 311-318 (2010) 査読有.

(9) M. Takeda, Y. Tanase, T. Kubozono, A. Abe, S. Nishio, B. Wan: Studies of Electrode Partitioning MHD Method for Separating Oil from Contaminated Seawater Using High-Field Superconducting Magnet, Proceedings of 8th International Symposium on Marine Engineering Busan 2009, Paper No. 30 (2009) 査読有.

(10) A. K. Bui, M. Takeda, T. Kiyoshi: Hydraulic Characteristics of Helical-Type Seawater MHD Power Generator, Proceedings of 8th International Symposium on Marine Engineering Busan 2009, Paper No. 98 (2009) 査読有.

[学会発表] (計 12 件)

(1) 武田実, 前川一真, 奈良洋行, 松野優, 藤川静一, 熊倉浩明, 黒田恒生: 液体水素のスロッシングに関する基礎研究, 第85回2011年度秋季低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座; 1D-a02, 2011年11月9日.

(2) 前川一真, 奈良洋行, 武田実, 松野優, 藤川静一, 熊倉浩明, 黒田恒生: 液体水素用 MgB₂ 液面センサーの外部ヒーターに対する熱応答性および液面検知特性, 第85回2011年度秋季低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座; 1D-a01, 2011年11月9日.

(3) M. Takeda, T. Yanaka, S. Nishio, H. Hirotsaki, A. K. Bui, T. Kiyoshi: Measurements of Velocity Distribution inside Helical-Type Seawater MHD Power Generator Using Five-Hole Pitot Tube, 9th International Symposium on Marine Engineering Kobe 2011, 神戸国際会議場; B5-1, 2011年10月19日.

(4) M. Takeda, Y. Tanase, T. Kubozono, A. Abe,

S. Nishio, B. Wan: Separation Characteristics Obtained from Electrode Partitioning MHD Method for Separating Oil from Contaminated Seawater Using High-Field Superconducting Magnet, 22nd International Conference on Magnet Technology, Marseille, France; 4FO-2, 2011年9月15日.

(5) 谷中拓哉, 武田実, 西尾茂, 広崎大樹, A. K. Bui, 木吉司: 5孔ピトー管を用いたヘリカル型海流MHD発電機内部の流速分布計測, 第58回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学; 26a-KN-9, 2011年3月26日.

(6) 久保蘭隆祥, 武田実, 棚瀬康之, 蔵岡孝治, 阿部晃久, 西尾茂, 万碧玉: 超伝導MHD分離用電極の開発に関する基礎研究, 第58回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学; 26a-KN-8, 2011年3月26日.

(7) A. K. Bui, 武田実, 木吉司: ヘリカル型海流MHD発電機の流動特性および性能予測, 第83回2010年度秋季低温工学・超電導学会, 鹿児島県民交流センター; 1B-a12, 2010年12月1日.

(8) 棚瀬康之, 武田実, 久保蘭隆祥, 阿部晃久, 西尾茂, 万碧玉: 海洋流出油の分離・回収のための電極分割方式による超伝導MHD分離法の研究 (2), 日本船舶海洋工学会 平成22年関西支部秋季講演会, 神戸市産業振興センター; 2010K-OS-6, 2010年11月15日.

(9) M. Takeda: Seawater Magnetohydrodynamics Power Generator / Hydrogen Generator, 5th Forum on New Materials / CIMTEC 2010 (招待講演), Montecatini Terme, Italy; FK-7:IL08, 2010年6月18日.

(10) A. K. Bui, 武田実, 木吉司: ヘリカル型海流MHD発電機の流動特性 (3), 第82回2010年度春季低温工学・超電導学会, 川崎市産業振興会館; 2D-a02, 2010年5月13日.

(11) A. K. Bui, 武田実, 木吉司: ヘリカル型海流MHD発電機の流動特性 (2), 第81回2009年度秋季低温工学・超電導学会, 岡山大学; 2C-a05, 2009年11月19日.

(12) 武田実, 棚瀬康之, 久保蘭隆祥, 阿部晃久, 西尾茂, 万碧玉: 海洋流出油の分離・回収のための電極分割方式による超伝導MHD分離法の研究, 日本船舶海洋工学会 平成21年関西支部秋季講演会, 大阪大学; 2009K-OS1-12, 2009年11月6日.

[その他]

ホームページ等

<http://www.maritime.kobe-u.ac.jp/graduate/composition/professors/takeda.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 実 (TAKEDA MINORU)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：50206992

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

木吉 司 (KIYOSHI TSUKASA)

物質・材料研究機構・超伝導材料センター・グループリーダー

研究者番号：00354316

西尾 茂 (NISHIO SHIGERU)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：30208136

蔵岡 孝治 (KURAOKA KOJI)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号：80356930