



電極分割式ヘリカル型海流MHD発電の基礎研究

武田, 実 ; 広崎, 大樹 ; 瀧本, 佳史 ; 宮川, 拓也 ; 宮沢, 肇 ; 西尾, 茂 ; 木吉, 司

(Citation)

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 10:62-67

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81005254>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81005254>



電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電の基礎研究

Fundamental Study of Electrode Partitioning Helical-Type Seawater MHD Power Generation

武田 実, 広崎 大樹*, 瀧本 佳史**, 宮川 拓也**, 宮沢 肇**, 西尾 茂, 木吉 司***

Minoru TAKEDA, Hiroki HIROSAKI*, Yoshifumi TAKIMOTO**, Takuya MIYAGAWA**,
Hajime MIYAZAWA**, Shigeru NISHIO, Tsukasa KIYOSHI***

(平成 25 年 6 月 14 日受付)

Abstract

As an application of superconducting technology to the field of maritime sciences, we have studied the seawater magnetohydrodynamics (MHD) power generator/hydrogen generator using a high-field superconducting magnet, paying attention to the marine natural energy. The seawater MHD generator is a unique system that not only directly transforms the kinetic energy of an ocean current/tidal current into electric energy but also generates hydrogen gas in accordance with the law of electromagnetic induction, and has the advantages of having no mechanics and being maintenance free.

Recently, a new helical-type seawater MHD generator having a helical insulation wall 97 mm in diameter and 155 mm long with partitioned electrodes and a 7 T solenoid superconducting magnet has been designed, made and examined to elucidate the relationship between characteristics of the generator and a helical flow. It was found that the electromotive force obtained was in agreement with the calculated value in the helical flow region, and independent of the direction of the induced electric field.

(Received June 14, 2013)

1. はじめに

近年, 化石エネルギーへの依存度を減らすため, その代替エネルギーとして環境負荷の少ない再生可能エネルギーが注目されている. 再生可能エネルギーには太陽光, 風力, 地熱等がある. 四方を海に囲まれた我が国では海洋エネルギーの利用も重要であり, 波力, 海洋温度差, 潮流・海流エネルギー等を利用した発電方法の研究がなされている. 海流 MHD (magnetohydrodynamics) 発電¹⁾は海流発電の一つであり, 作動流体として海水を用いて発電が可能のため, 海流中に発電装置を設置すれば恒久的に発電が可能である. また, 海水の運動エネルギーを利用するため, 発電中に温室効果ガスである二酸化炭素を排出せず, さらに機械的駆動部が無い

ため, メンテナンスが容易であるという利点を持つ.

そのため, 当研究室では1970年代より超伝導技術を応用した海洋エネルギーの有効利用に着目し, 海流 MHD 発電の研究を行ってきた. 海流 MHD 発電は, 海水が磁場を横切る際に発生する起電力を直接利用するため, 発電出力を増大させるには, 強い磁場を広い空間に発生することが重要となる. 当初研究が行われていたリニア型海流 MHD 発電機とレーストラック型超伝導マグネットの組み合わせでは, 磁場の強磁場化及び大型化が困難であるとされている²⁾. そこで, 強磁場化, 大型化が可能なソレノイド型超伝導マグネット利用した, ヘリカル型海流 MHD 発電機の研究が始まった^{2),3)}.

これまでに行われたヘリカル型海流 MHD 発電実験では, 起電力と発電出力の実験値が計算値より小さな値であった⁴⁾. この原因の一つとして, 発電機の海水入口付近での流れが乱れ, ヘリカル流路内で想定通りの流れ (ヘリカル流) が起きていないことが挙げられた. これを明らかにするために, 5孔ピトー管を用いてヘリカ

* 海事科学研究科博士課程前期課程
現在, 三菱電機 (株) 勤務

** 海事科学研究科博士課程前期課程

*** 物質・材料研究機構 (平成 25 年 1 月 25 日
逝去)

ル流の流速分布測定が行われ、入口付近での流れが乱れているものの、ヘリカル流路の2～3回転目以降では、想定に近いヘリカル流が起きていることが分かった^{5),6)}。しかし、このヘリカル流と発生起電力等との関係はまだ詳しく調べられていない。

そこで、本研究では電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電機を新たに作製し、ヘリカル流と発生起電力等との関係を明らかにすることを目的とした。また、電極の極性を変えた場合、すなわち誘導電場方向 (印加磁場方向に依存する) を変えた場合の発電特性の違いも詳しく調べることにした。

2. 発電原理

Fig.1 にヘリカル型海流 MHD 発電の原理図を示す。ヘリカル型発電機は、同軸二重円筒状の電極とヘリカル型仕切り板からなる発電空間及び、ソレノイド型超伝導マグネットから構成されている。発電機内部では、超伝導マグネットにより磁場 B が印加されており、海水はヘリカル型仕切り板によって、直進方向の流れから仕切り板の形状に沿って回転する流れ (ヘリカル流れ：流速 U) へと変えられる。すると、海水が磁場を横切る流れに変わるので、電磁誘導の法則により両電極間に起電力が発生する。ここで、起電力 V_e は次式で表される。

$$V_e = \frac{nU_{av}\pi B}{l_{hc}}(r_2^2 - r_1^2) \quad (1)$$

ここで、 n ：ヘリカル状仕切り板の回転の数、 U_{av} ：海水の平均流速 [m/s]、 B ：印加磁場 [T]、 l_{hc} ：ヘリカル流路の長さ [m]、 r_1 ：内側電極外半径 [m]、 r_2 ：外側電極内半径 [m] である。この起電力が海水の電気分解電圧を超えたとき、フレミング右手の法則にしたがって電流 I が流れ、この時に外部負荷をつないでおけば出力を得る

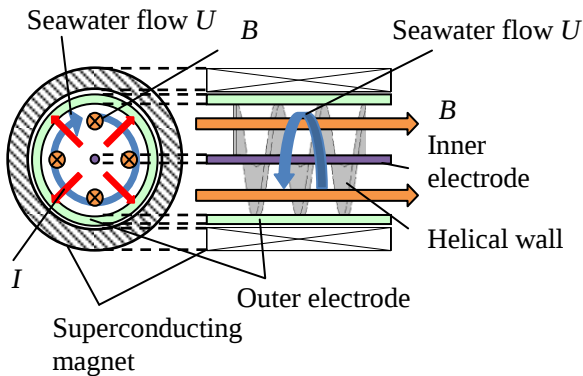


Fig.1 Principal of helical-type seawater MHD power generation.

ことが出来る。ここで、最大発電出力 P_{max} は次式で表される。

$$P_{max} = \frac{1}{4R_{in}}(V_e - V_{re})^2 \quad (2)$$

ここで、 R_{in} ：発電機の内部抵抗 [Ω]、 V_e ：起電力 [V]、 V_{re} ：海水の電気分解電圧 [V] である。

3. 実験装置

3.1 電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電機

Fig.2 に発電機的设计図を、また Fig.3 に外側電極と絶縁リング及びヘリカル状仕切り板の写真を示す。計算により流体損失を考慮した上で最大出力を求めた結果、仕切り板の形状は回転の数 4、ピッチ長 37.5 [mm]、内側電極外直径 20 [mm]、外側電極内直径 100 [mm] が最適であり、その寸法でヘリカル型海流 MHD 発電機を作製した。また、外側電極の間にはスタイキャスト 1266J で作製したリングを挟むことで電極同士を絶縁した。リングと電極はスタイキャスト 2850FTJ で接着し、上からスタイキャスト 1266J で固定した。実際に発電を行う部分は、

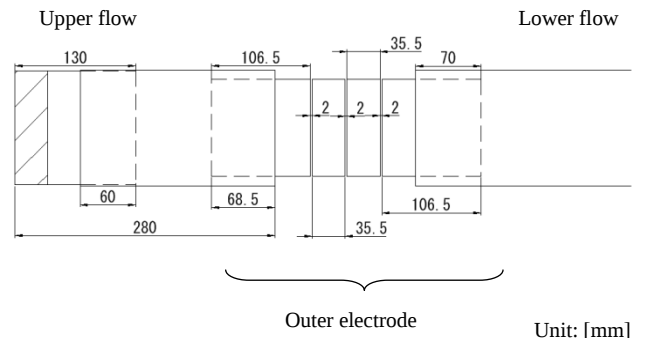


Fig.2 Design for generator.

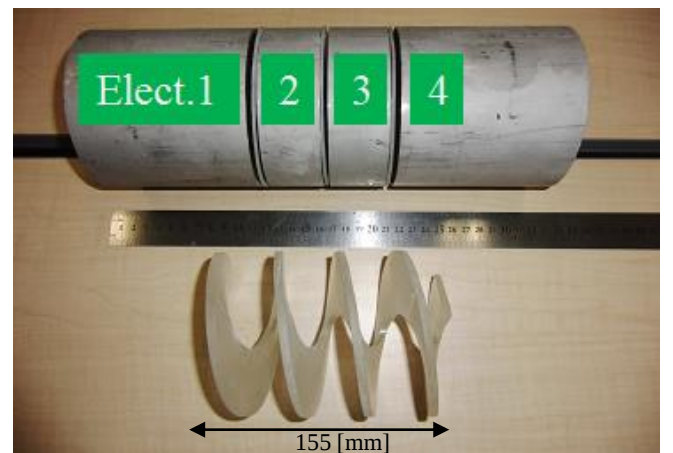


Fig.3 Photo of outer electrodes with insulation ring and helical wall.

ヘリカル状仕切り板を取り付けた長さ 155 [mm]の部分である。なお、ヘリカル状仕切り板を上流側から 1 回転目、2 回転目、3 回転目、4 回転目とし、それぞれに対応する外側電極を電極 1、電極 2、電極 3、電極 4 とした。

3.2 発電実験システム

Fig.4 に発電実験システムの概略図を示す。この実験システムは、発電機、7T 級クライオスタット、海水タンク (1 [m³])、海水循環ポンプ (寺田ポンプ製作所, CMP6-63.7)、渦流量計 (日本フローセル, UZG-VTS2-L)、差圧計 (ジェイテクト, DD101K 100K) などで構成されている。7T 級クライオスタットの実験空間は直径 120 [mm]の円筒状で垂直方向の磁場が印加される。ソレノイド型超伝導マグネット (JMT 社製) の最大中心磁場は 7 [T]で、永久電流モードでの使用が可能である。また、人工海水は導電率を約 50 [mS/cm]とした。

4. 実験結果と考察

4.1 流体損失実験

発電実験ではマグネットの構造上、発電機を縦に設置するほかない。そのため、発電機を縦置きにした場合と横置きにした場合の流体損失を測定し、比較した。

磁場を印加せずに模擬海水を流して、流量 Q [m³/h]と発電部分の出入口の圧力差 ΔP [kPa]を測定し、FE300 を用いて記録した。測定時の流

量は 10, 15, 20, 25, 30 [m³/h]とした。それぞれの流量で 3 回測定した後流量を変えて、3 セット測定した。

Fig.5 に発電機の縦置きと横置きの実験結果を水頭で比較した図を示す。Fig.5 より、発電機の縦置きと横置きでの水頭を比較すると、横置きでの水頭に測定孔間の距離である 20 [cm]分の位置水頭を加えた水頭と縦置きでの水頭がほぼ一致している。このため、発電機を縦に設置しても海水の流れは横置きでの流れと大差ないと考えられる。そのため、発電機を縦に設置して発電実験を行った。

4.2 通電実験

ヘリカル型海流 MHD 発電は作動流体として海水を用いているので、発電の際に電極付近で海水の電気分解が起こる。発電により電極間に生じる起電力が低い間は、電極付近に生じるわずかな水素及び塩素等によって電池が形成され、発生した逆起電力の影響が大きくなる。このため電気分解反応が定常的に行われず、電流はほとんど流れない。よって、電気分解を定常的に行うための最低限の電圧、電気分解電圧を測定し、また発電機の内部抵抗も同時に測定した。ここでは、外側電極が高電位となる電位を順方向、内側電極が高電位となる電位を逆方向とした。

流量が 10, 20 [m³/h]の場合において、発電機の電極間に定電圧電源より 0~3 [V]まで 0.1 [V]ずつと 3.5 [V]の直流電圧をかけ、標準抵抗 (10 [Ω]) の両端電圧を FE300 により記録した。

Fig.6 に順方向で流量 10 [m³/h] (流速 2.23

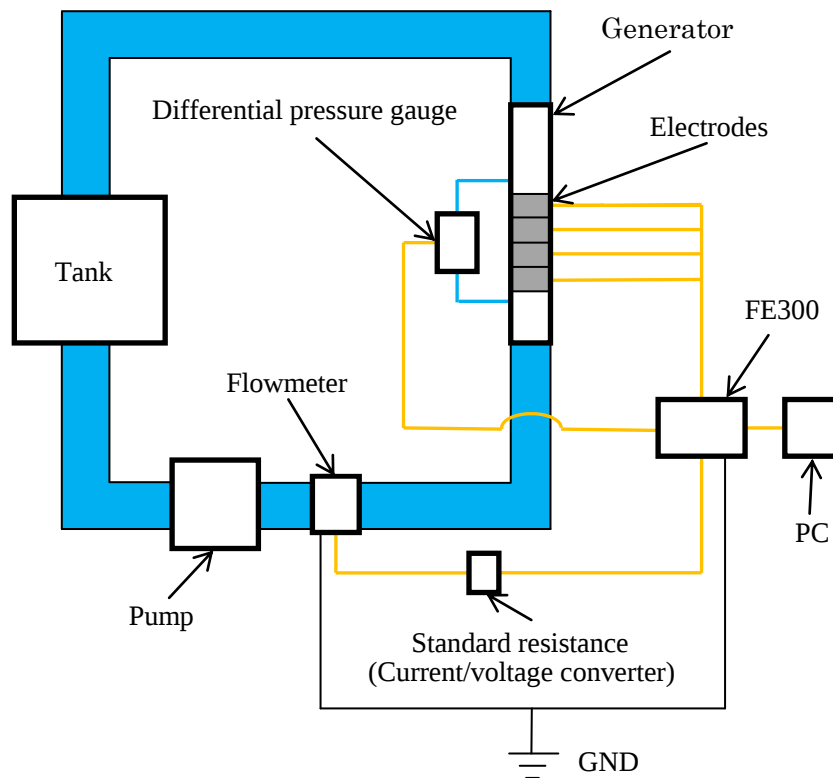


Fig.4 Schematic diagram of experimental setup.

[m/s]) の時の実験結果 (電気分解曲線) を示す。順方向の時の流量 10 [m³/h] での電気分解電圧と内部抵抗は Fig.6 より表 1 の通りとなった。

表 1 電気分解電圧と内部抵抗

	電気分解電圧 [V]	内部抵抗 [Ω]
1 回転目	1.6	4.0
2 回転目	1.7	3.4
3 回転目	1.7	5.4
4 回転目	1.5	3.8

表 1 より電気分解電圧は理論値 (1.36 [V]) よりも大きな値となった。また、発電機の内部抵抗は計算値の約 8 ~ 9 倍程度となった。この原因として、海水の電気分解による電解生成物の発生²⁾による海水の電気伝導度の低下などが考えられるが、未だ明らかになっていない。

4.3 起電力実験

電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電方式における起電力測定実験として、流量と磁場方向を変えて実験を行った。本実験では、7T クライオスタットを用いて、永久電流モードで発電

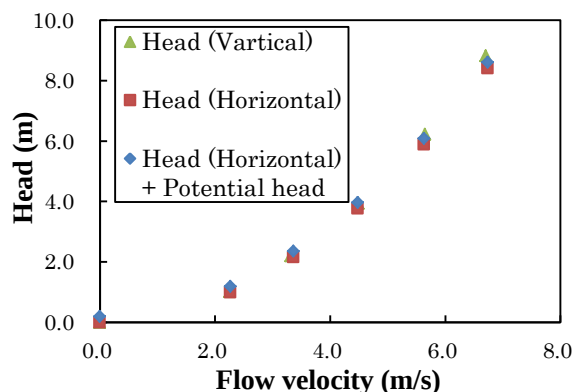


Fig.5 Relationship between head and flow velocity.

機に 7 [T]の磁場を印加した。また、発電機に流入する海水流量を 0~30 [m³/h]で任意に変えられるようにした。発電機の電極間に生じる起電力を FE300 により記録した。測定回路に設置したシャントスイッチにより、測定開始前に両電極間の電位差を 0 とした。また、測定器の零点補正を行った。測定時の海水流量は、0, 10, 15, 20, 25, 30 [m³/h]とした。同時に、発電部分の出入口の流体損失も測定した。また、外側電極が高電位になる磁場 (実験では鉛直上向き) を順方向磁場、内側電極が高電位になる磁場 (実験では鉛直下向き) を逆方向磁場として磁場の向きを変えて実験を行った。実験は各流量で 3 回測定した後に流量を変えて、3 セット測定した。初めに、流量 0 [m³/h]で約 30 秒間両電極を短絡させ、各流量で起電力を測定した。その後、電極と海水が接触することにより生じる電池の影響を取り除くため、流量 0 [m³/h]で 30 秒間両電極を短絡させ、短絡をやめてから 30 秒後に電圧を測定した。また、流量を変えるたび同様に、30 秒間の短絡後、30 秒間待って電圧を測定した。

Fig.7 に毎回の短絡なしの時の起電力実験結果、Fig.8 に毎回の短絡ありの時の起電力実験

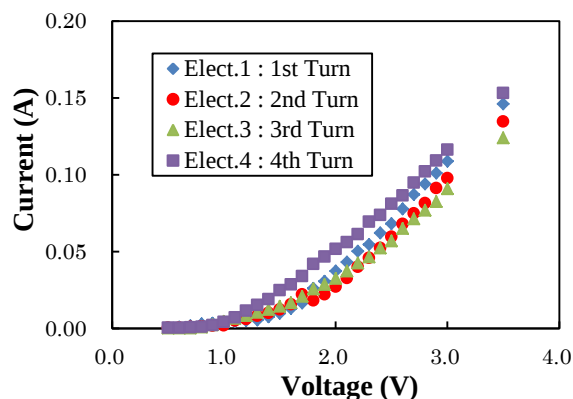


Fig.6 Electrolysis curves.

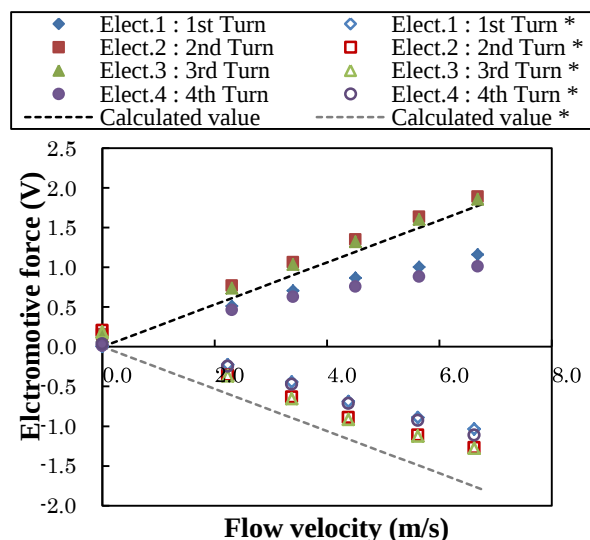


Fig.7 Experimental result of electromotive force with first short-circuiting.
(* shows reverse magnetic field)

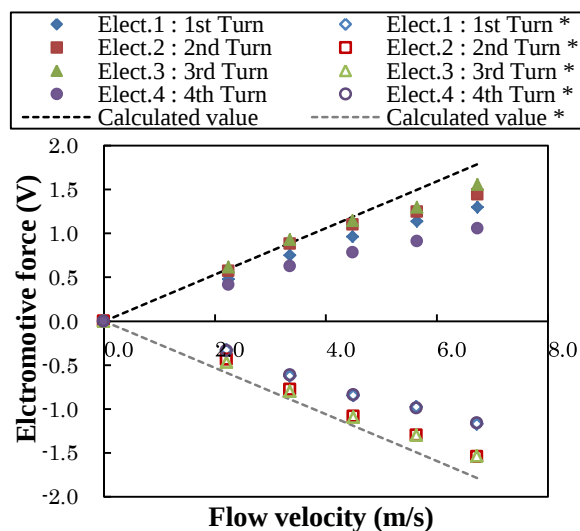


Fig.8 Experimental result of electromotive force with every short-circuiting.
(* shows reverse magnetic field)

結果を示す。Fig.7 よりどちらの磁場方向でも発生した起電力は流速に比例して増加しているが、これは (1) 式の通りである。また、2 回転目と 3 回転目での起電力が 1 回転目と 4 回転目の起電力よりも大きくなっている。これは中心部分ではヘリカル流が安定し、流速の磁場に垂直な成分が大きくなり、一方、入口や出口では流れが安定せず、流速の磁場に垂直な成分が小さくなるためであると考えられる。さらに、印加されている磁場には分布があり²⁾ マグネット中心部で 7 [T]、70 [mm] 離れると 6 [T] まで減少するため、海水が全く同じ様に流れていても (1) 式の通り発生起電力に差ができる。

また、流速 0 [m/s] でも電位差が発生していた。これは電池の影響であると考えられるが、この影響のため Fig.7 に示した通り、同じ流速でも磁場の方向によって起電力の絶対値が異なると考えられる。順方向磁場では 2 回転目と 3 回転目で発生起電力が計算値を上回っているが、これも電池による上昇分が存在するためであると考えられる。

Fig.8 より測定時に両電極間を毎回短絡すると磁場の向きによる発生起電力の絶対値の違いは現れなかった。したがって、磁場の向きにより発生起電力に違いが出たのは電池の影響が大きかったと言える。また、電池の影響による電位差は、外側が高電位になったり内側が高電位になったりして安定しなかった。これは両電極を同じ金属としたためである。よって、両電極の材質を別々の材質にし、電池の影響を安定させるべきだと考えられる。

4.4 発電出力実験

電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電方式における発電出力測定実験として、流量と磁場方向を変えて実験を行った。本実験では、7T 級クライオスタットを用いて、永久電流モードで発電機に 7 [T] の磁場を印加した。また、発電機に流入する海水流量を 0~30 [m³/h] で任意に変

えられるようにした。本測定回路は、発電機の両電極と外部抵抗を導線でつないでおり、外部抵抗の両端電圧を測定することで回路に流れる電流を測定した。測定回路に設置したシャントスイッチにより、測定開始前に両電極間の電位差を 0 とした。また、測定器の零点補正を行った。測定時の海水流量は、0, 10, 15, 20, 25, 30 [m³/h] とした。同時に、発電部分の出入口の流体損失も測定した。また、外側電極が高電位になる磁場 (実験では鉛直上向き) を順方向磁場、内側電極が高電位になる磁場 (実験では鉛直下向き) を逆方向磁場として磁場の向きを変えて実験を行った。実験は各流量で 3 回測定した後流量を変えて、3 セット測定した。

Fig.9 に順方向磁場の時の発電出力実験結果、Fig.10 に逆方向磁場の時の発電出力実験結果を示す。Fig.9 と Fig.10 より、どの条件でも流速 4.5 [m/s] 以下では出力が 0 [W] となっているが、これは流速 4.5 [m/s] 以下の時には発生起電力が海水の電気分解電圧以下となっているためである。しかし、電気分解電圧付近の電圧では、電気分解電圧を下回っていても電流は流れている。実際に、発電実験により得られた起電力が「4.2 通電実験」で得られた電気分解電圧に達していない場合でも Fig.9 と Fig.10 の通り、ごく小さな出力が測定された。Fig.9 と Fig.10 を比較すると、4 回転目の出力が順方向磁場と逆方向磁場では、順方向磁場の実験値の方が約 2 倍大きくなっている。ここで、(2) 式の通り発電出力は起電力と内部抵抗に依存する。よって、Fig.7 と Fig.8 より磁場方向を変えても 4 回転目の起電力には大きな差がないため、外部抵抗の影響によるものと考えられる。また、1 回転目と 2 回転目の出力も磁場方向によって差ができています。これは、海水の電気分解電圧以下の電圧では電圧と電流が比例しないことが原因の一つだと考えられる。よって、発生起電力を海水

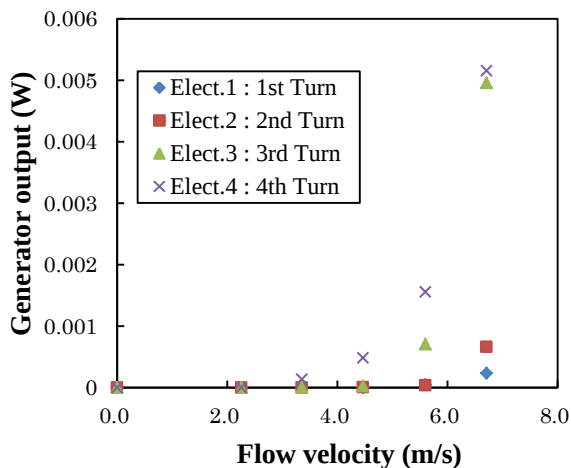


Fig.9 Experimental result of generator output in forward magnetic field.

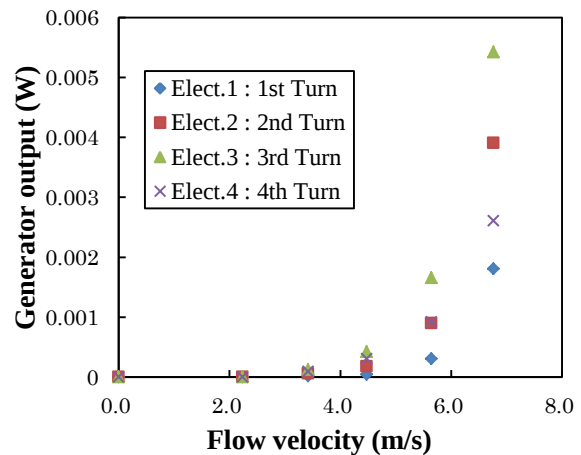


Fig.10 Experimental result of generator output in reverse magnetic field.

の電気分解電圧よりも大きくすることができれば出力は安定すると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究をまとめると以下のようになる。

(1) 電極分割式ヘリカル型海流 MHD 発電機を初めて作製した。その仕様は次の通りである。回転の数 4, ピッチ長 37.5 [mm], SUS316 製外側電極の内直径 97.4 [mm], SUS316 製内側電極の外直径 20 [mm], 外側電極長さが 1 回転目と 4 回転目で 106.5 [mm], 2 回転目と 3 回転目で 35.5 [mm], 印加磁場 7 [T]である。

(2) 発電機を縦に設置して測定した流体損失と横に設置して測定した流体損失を比較すると、位置水頭分以外に大きな違いはなかった。よって、発電機を縦に設置しても流れに大きな違いが無いことが分かった。

(3) 発電機と直流電源を用いて通電実験を行った。電気分解電圧は 1.2 ~1.8 [V], 内部抵抗は 2.4 ~7.4 [Ω]であった。この内部抵抗の値は計算値よりも最大で 10 倍程度大きな値である。また、内部抵抗は、外側電極の大きな 1 回転目と 4 回転目で比較的小さくなる傾向が見られた。さらに、順方向と逆方向では実験結果に違いが見られた。電極 1 ~電極 4 までの測定値の差に注目すると、印加した電圧に対して流れた電流において、順方向の値が逆方向より小さかった。これは電池の影響が残っているためであると考えられる。

(4) 7 [T]の磁場を印加し、起電力実験を行った。発電機の電極を分割した結果、流れの安定している 2 回転目と 3 回転目での起電力は計算値と近くなった。電極を分割しない場合、起電力は発電機の入口部分の影響を受けるため計算値よりも小さくなる。そのため、想定される起電力が海水の電気分解電圧に近い場合は電極を分割し、少しでも電気分解電圧と起電力の差を広げることで発電出力を大きくできると考えられる。また、流速を変化させるたびに両電極を短絡させた場合は、同流速での実験値の絶対値に近い値となった。従って、発生起電力に対する誘導電場方向依存性はないと言える。

(5) 7[T]の磁場を印加し、発電出力実験を行った。発電出力は順方向磁場の場合に測定毎に測定値にばらつきができた。磁場方向によってばらつきが異なる原因は明らかではない。しかし、起電力の測定値はばらつきが小さかったため、

発電出力のばらつきは内部抵抗のばらつきによるものであると考えられる。

今後の課題は以下の通りである。

(1) 発電機入口での流れを整えるため、ヘリカル状仕切り板の上流に整流器を設置し、安定した流れの範囲を拡大する。

(2) 外側電極と同様に、内側電極を 1 回転毎に分割し発電実験を行う。分割電極により得られる起電力を直列に接続し、出力電圧の増加を確認する。

(3) 内側と外側の電極の材質をそれぞれ別の材質として、電池の影響を考慮に入れた発電機を作製する。

(4) 発電機大型化 (外側電極内直径 1 [m]以上) の前段階として外側電極内直径 0.5 [m]程度の模擬発電機を作製し、想定通りのヘリカル流が流れるかを確認する。

謝辞

本研究の一部に対して、科研費基盤研究 A (24246143)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩田 章・佐治 吉郎 共著：超伝導による電磁推進の科学，朝倉書店 (1991)
- 2) 奥地 泰明：ヘリカル型海流 MHD 発電の基礎研究，神戸商船大学大学院商船学研究科修士論文 (2004)
- 3) Anh Kiet BUI *et al.* : Measurements of Flow Loss in Helical-Type Seawater MHD Power Generator, TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.) Vol.45, No.12, pp.506-513 (2010)
- 4) 広崎 大樹：ヘリカル型海流 MHD 発電機の性能予測とその評価，神戸大学海事科学部卒業論文 (2011)
- 5) M.TAKEDA *et al.* : MEASUREMENTS OF VELOCITY DISTRIBUTION INSIDE HERICAL-TYPE SEAWATER MHD POWER GENERATOR USING FIVE-HOLE PITOT TUBE, Proc. ISME KOBE 2011, B5-1 PAPER (2011)
- 6) Y. TAKIMOTO *et al.* : Measurements of 3D Velocity Distribution Inside Helical-Type Seawater MHD Power Generator Using Five-Hole Point Tube, 2nd East Asia International Student Symposium on Maritime Sciences, pp.27-28 (2012)