Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2026-11-04

ヘリカル型海流MHD発電機特性に及ぼす整流器の効果

武田，実
宮沢，肇
山本，周平
竹内，吾翼志
松本，真治

(Citation)
神戸大学大学院海事科学研究科紀要,12:17-22

(Issue Date)
2015

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(JaLCDOI)
https://doi.org/10.24546/81009090

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81009090

KOBE UNIVERSITY

ヘリカル型海流 MHD 発電機特性に及ぼす整流器の効果

Effect of Rectifier on Characteristics of Helical-Type Seawater MHD Power Generator

武田 実，宮沢 肇*，山本 周平**，竹内 吾翼志**，松本 真治***

Minoru TAKEDA, Hajime MIYAZAWA*, Shuhei YAMAMOTO**, Atsushi TAKEUCHI**, Shinji MATSUMOTO***

（平成 27 年 6 月 30 日受付）

Abstract

A seawater magnetohydrodynamics (MHD) power generator/hydrogen generator is a unique system that not only transforms the kinetic energy of ocean and tidal currents directly into electric energy but also generates hydrogen gas as a by-product, which is expected to be used as an ultimate clean energy source. In seawater MHD generation, a new helical-type seawater MHD power generator using a solenoid superconducting magnet is an attractive renewable energy source that can be installed offshore. Recently, a rectifier having five fins with an outer diameter of 97 mm and a length of 150 mm has been designed, fabricated and examined to elucidate the effect of the rectifier on characteristics of the helical-type MHD generator: flow loss, internal road, electromotive force and generator output. Experimental results are discussed in comparison with a pervious data without a rectifier.

(Received June 30, 2015)

１．はじめに

近年, 地球温暖化やエネルギー不足などの問題を解決するために, 自然エネルギーの利用に注目が集まっている．現在利用されている自然エネルギーの例としては太陽光, 風力, 地熱などが挙げられるが, 四方を海に囲まれ, 海洋資源が豊富な我が国では海洋エネルギーの利用も極めて重要である. そこで当研究室では, 超伝導技術を用いた海洋エネルギーの利用方法として海流 MHD (Magneto-Hydro-Dynamics) 発電[(1)]に着目し, 1970年代より基礎研究を行ってきた. MHD 発電は電磁誘導の法則に基づいた発電方法で, 超伝導マグネットなどを用いて強磁場を印加し, プラズマなどの電磁作動流体を磁場に垂直に流すと両者に垂直な方向に電流が流れる仕組みである. 海流MHD発電では作動流体を海水とし, 超伝導マグネットを用いて海流中に強磁場をかけることにより起電力を得る. この発電は海流・潮流のエネルギーを用いて発電するため化石燃料を消費せず, また機械的駆動部がないため海流・潮流中に発電装置を設置すれば恒久的に安定した発電が可能である. また発電中に温室効果ガスであるCO_2を排出しないことも利点である. さらにこの発電方法では, 発電中に海水が電気分解を起こすことによって, 発電中に次世代燃料として注目を集めている水素を発生することも大きな魅力である. そのため，海流MHD発電は発電と水素ガス生成を同時に行う複合的な施設としても大きな可能性を秘めていると言える.

当研究室では当初, リニア型海流MHD発電機を対象としてレーストラック型超伝導マグネットを用いた研究が進められていた. しかし，この型は強磁場化及び大型化が困難であると同時に磁場を有効に利用できないという問題があった. そこで, 現在では発電方式をリニア型からヘリカル(螺旋)型へ, すなわちマグネットをソレノイド型へ替えることにより強磁場化，磁場の有効利用を実現した.

ヘリカル型海流MHD発電を実用化するためには, 発電機の高出力・高効率化という問題を解決する必要がある. 海流MHD発電では海水の流速と発生起電力が比例するため, 発電出力・発電効率を向上させるためには発電機内部の流速を上げるのが有効な手段である. しかし, この型の発電機では, ヘリカル流路の入口・出口での急激な断面積変化及び直線流からヘリカル（螺旋）流への変化などに伴うエネルギー損失

*　海事科学研究科博士課程前期課程
　　現在，三菱重工業(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

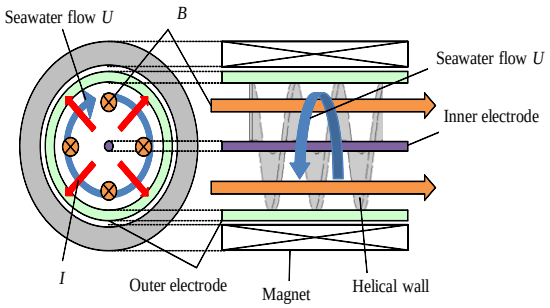


Fig.1 Principle of helical-type seawater MHD power generation.

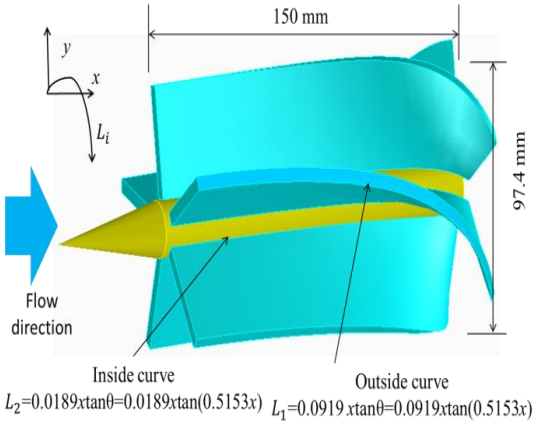


Fig.2 Schematic diagram of rectifier.

が大きく, 流速が低下するとともに不安定になるという問題[2],[3]がある.

そこで本研究では, 発電機前方に設置することによって流れの乱れを改善する効果が実証されている整流器[4]を用いて, 発電機を改良するとともに, 過去の研究[1]と比較することによって, 整流器設置による発電機特性への影響を調べることを目的とする. 発電機特性の比較項目として, 流体損失, 内部抵抗, 起電力, 発電出力の4つを取り上げる.

2. 発電理論

Fig.1 にヘリカル型海流 MHD 発電の原理図[1]を示す. この発電機は, ヘリカル型仕切り板と二重円筒状の電極からなる流路及びソレノイド型超伝導マグネットで構成されている.

Fig.1 のように発電機には軸方向に磁場 B が印加され, その中を仕切り板によってヘリカル流へと変えられた海流が通過することによりファラデーの電磁誘導の法則に基づいて起電力が発生する. 起電力 V_e は次式で表される.

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

ここで, n : 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} : ヘリカル流路中心長さ [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ると電流 I が流れる. このとき発電機を外部負荷につないでおけば出力を得ることができる. 最大発電出力 P_{max} は次式で表される.

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

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

Fig.2 に今回作製した整流器の概略図を, Fig.3 に今回作製した発電機の設計図を示す. 整流器は外径 20 mm の円柱軸と 5 枚の羽から成るフィン部で構成され, 長さ 150 mm, 外径 97.4 mm

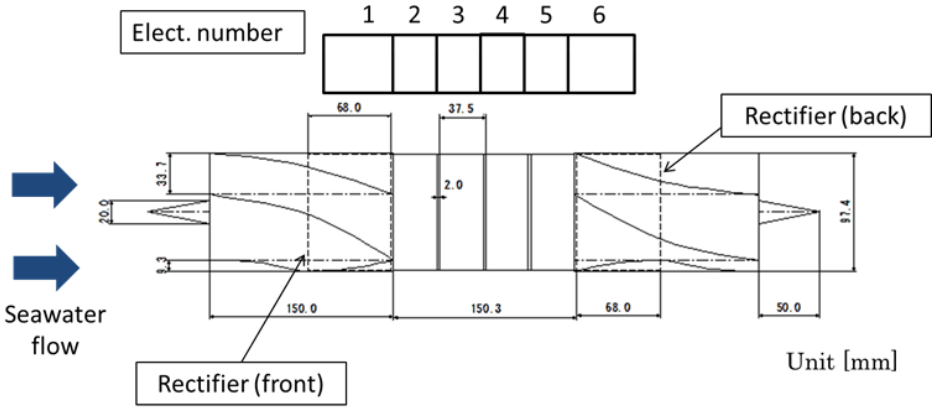


Fig.3 Draft of helical-type seawater MHD power generator with rectifiers.

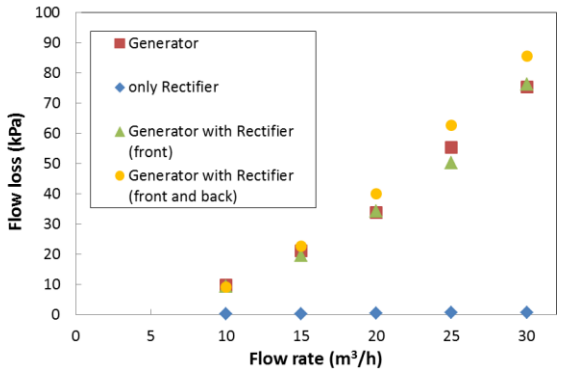


Fig.4 Relationship between flow loss and flow rate on condition of ①-④.

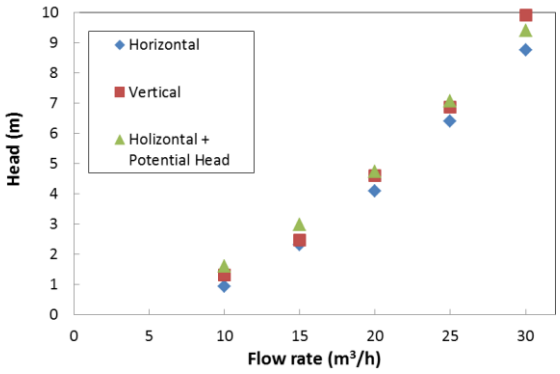


Fig.5 Relationship between head and flow rate on condition of ④ and ⑤.

である. 流体をフィン部にスムーズに導くための長さ 50 mm の突起物を円柱軸先端に取り付けている. 材質は STYCAST1266 である. 発電機はピッチ長 37.5 mm, 内側電極外直径 20 mm, 外側電極内直径 97.4 mm, 回転の数 4 である. 発電機前後には整流器を取り付け, 流れの安定化を図った. 電極材質は SUS316 であり, 各 turn の出力を得るために絶縁リングを用いて外側電極を Elect.1~6 に分割した.

４. 発電機特性実験

4. 1 流体損失

この計測では発電機をフローラインに固定し, ①流路に発電機のみを設置した場合, ②流路に整流器のみを設置した場合, ③発電機前部に整流器を設置した場合, ④発電機前部及び後部に整流器を設置した場合（横置き）, ⑤発電機前部及び後部に整流器を設置した場合（縦置き）の 5 つの条件で流体損失の測定を行った. 測定流量は 10, 15, 20, 25, 30 [m^3/h]とし, それぞれの測定において 4 回計測を行い, 平均を取った. ①～④の条件での流体損失の測定結果を Fig.4 に, ④⑤の条件での測定結果を Fig.5 に示す.

①では入口, 出口部分での流れの変化の際に生じる渦などの影響により計算値との差が大きい結果となった. ②の損失は①の損失に比べて無視できるほど小さく, ③ではほとんど損失の増減がなかった. しかし, ④では損失の増加が見られた. これは出口部分で, ヘリカル流から直線流に遷移する際の距離を結果的に短くしたことが原因と考えられる. 一方, 重力の影響を排すると, ④と⑤の流体損失の差はほぼなくなった.

4. 2 内部抵抗

この計測では人口海水を 10 [m^3/h] , 20 [m^3/h] で流し, 発電機両端に 0~3.5 [V]の電圧を印加した. そして 20 秒の短絡の後 20 秒間待機し, 外部に接続した 10 [Ω]の抵抗の両端電圧をデータロガーで 10 秒間計測することで, 発電機の電気分解電圧及び内部抵抗を求めた. 10 [m^3/h]での順電場（外側高電位）及び逆電場方向（内側高電位）の測定結果をそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示す.

電気分解電圧は 1.2～2.0 [V], 内部抵抗は 1.1~6.2 [Ω]であった. 過去の実験[(1)]で見られた計算値との差は大幅に減少した. なお, 後に説明する発電実験ではこの誤差が大きく影響している. 電気分解電圧は逆電場方向（内側高電位）の場

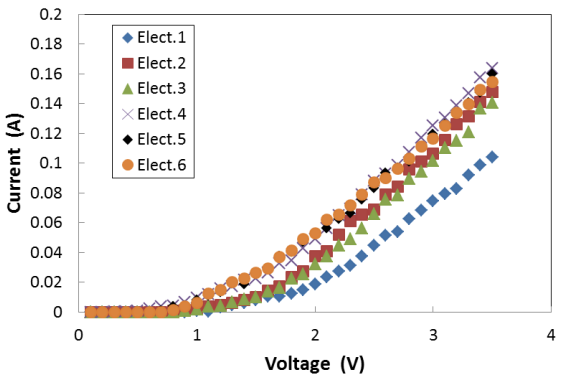


Fig.6 Voltage-current characteristics in forward electric field.

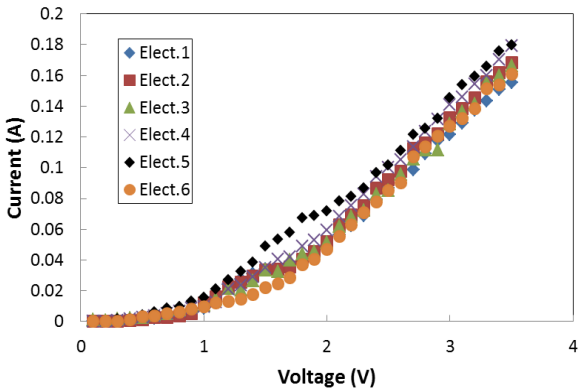


Fig.7 Voltage-current characteristics in reverse electric field.

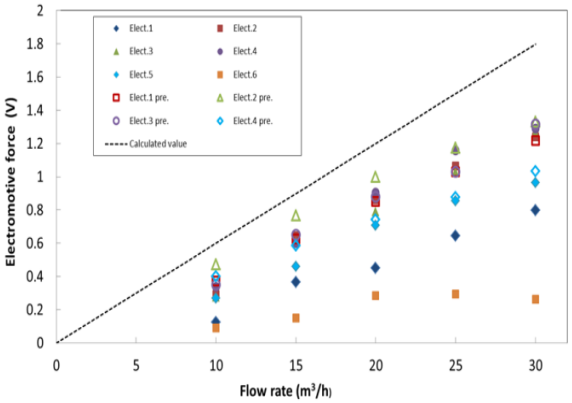


Fig.8 Experimental result for electromotive force in forward magnetic field.

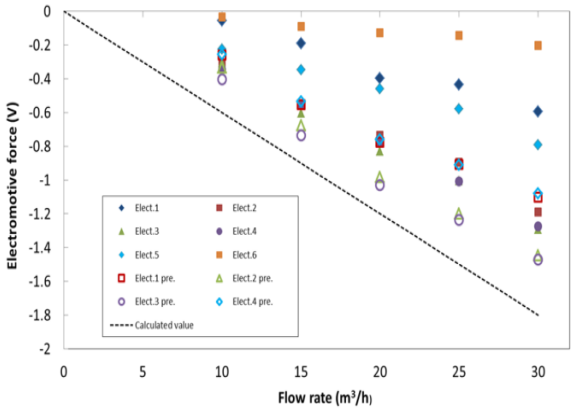


Fig.9 Experimental result for electromotive force in reverse magnetic field.

合が順電場方向（外側高電位）に比べて小さくなった. また, 流量を増加させると電流が流れにくくなる傾向がみられた.

一方, 内部抵抗は発電部分でない Elect.1 と Elect.6 で大きい値となった. しかし Elect.6 の逆電場方向（内側高電位）のみ, 内部抵抗は発電部分の電極と同等になった. これは中心軸が発電機後方に伸びているため, 内側電極の表面積が大きくなっていることが原因とみられる. なお, 実験中に人工海水の水温が上昇したため, 電気伝導度が変化している影響も考慮する必要があると考えられる.

4. 3 起電力

この計測では発電機に 7 [T]の磁場を印加し, 順磁場（外側高電位）と逆磁場方向（内側高電位）で流量を 10, 15, 20, 25, 30 [m^3/h] にそれぞれ変化させて発生起電力を計測した. 計測前は両電極間をそれぞれ 20 秒短絡した. そして, 20 秒待機した後, データロガーを用いて 10 秒間電圧を計測した. なお計測は各流量で 4 回行い, 平均を取った. 各磁場方向における起電力の測定結果を Fig.8, 9 に, 各流量における電極毎の起電力を Fig.10 に示す.

Fig.8, 9 をみると, まず各電極とも計算値より低い値となっている. これは摩擦損失や流れの乱れの影響, 磁場分布の影響などが原因だと考えられる. そして, 整流器部分の Elect.1 と 6 はどちらの場合でも他の電極より低いことがわかる. これは内部抵抗の高さと流れが磁場に直交していないことが原因と考えられる. また, 同じ構造の Elect.2~4 と比較して Elect.5 がやや低い結果となっている。さらに, 整流器を取り付けたにも関わらず, 過去の実験[(1)]（図中 pre.）に比べ全体的に同等かやや低下という結果になった. この原因について以下に考察する.

電極分割式発電機の発電部分は軸方向に対して対称な構造になっており, 起電力の計測結果は理論上, Elect.1 = Elect.6, Elect.2 = Elect.5, Elect.3 = Elect.4 となる. しかし, Fig.10 を見ると, 起電力は Elect.1 > Elect.6, Elect.2 > Elect.5 という結果になっている. 電気分解電圧の各電極間の差を考えても, 明らかに発電機後方で起電力が下がっていることがわかる. これらから, 起電力が過去の結果と比べて上昇しなかった原因は, 主に後方に設置した整流器が原因ではないかと考えられる. 現在の実験方法では発電機後方に直管流路が長めに設けてあり, 流れがヘリカル流から直線流へ変化する際は長い距離を要していた. しかし, 後方に整流器を設置したことによって, 結果的に出口付近の流れの変化が急激になってしまったと推測される. そして, 発電機前方での損失軽減と発電機後方での損失増大が影響を与え, このような結果になったと考察できる.

4. 4 発電出力

この測定では, 発電機に 7 [T]の磁場を印加し, 順磁場と逆磁場方向で流量を 10, 15, 20, 25, 30 [m^3/h]にそれぞれ変化させて, 直列接続した可変

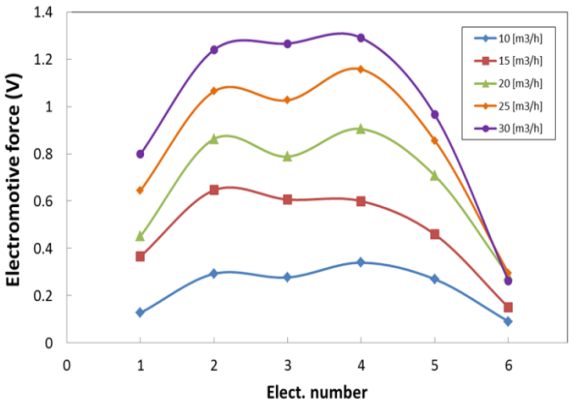


Fig.10 Experimental result for electromotive force on each electrode.

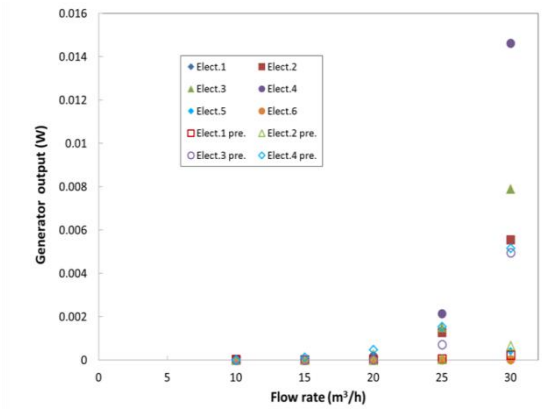


Fig.11 Experimental result for generator output in forward magnetic field.

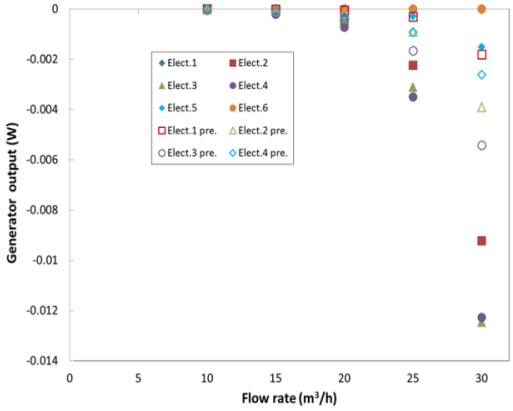


Fig.12 Experimental result for generator output in reverse magnetic field.

抵抗の両端電圧を測定して, 発電出力を求めた. 各流量で 4 回の計測を行い, 平均を取った. 計測前は両電極間をそれぞれ 20 秒短絡した. そして 20 秒待機した後, データロガーを用いて 10 秒間計測を行った. それぞれの磁場方向における発電出力の測定結果を Fig.11,12 に示す.

Fig.11,12 をみると, Elect.1 と 6 はどの流量でもほぼ 0 [W]である. これは起電力実験の結果からもわかるように, 流れが磁場と直交しておらず, 発生起電力が海水の電気分解電圧を超えていないことが原因である. 続いて Elect.2~5 に着目すると, 起電力実験と変わらず Elect.5 は出力が低いことがわかる. 一方, Elect.2~4 は各電極で差はあるものの, 過去の値[(1)]を上回る結果となっている. さらに, Elect.3 では磁場の方向によって大きな差が出ている. Elect.3 以外の各電極間の出力差の主な原因は発生起電力の差ではなく, 内部抵抗の差であると考えている.

Elect.3 は磁場方向で内部抵抗に大きな差はなく, 考察が難しい部分ではあるが, 流量 30 [m^3/h] の電気分解電圧と起電力計測結果を比べると, 順磁場よりも逆磁場方向の方が電気分解電圧と起電力の差が小さかった (順磁場では電気分解電圧が 1.77 [V], 起電力が 1.26 [V], 逆磁場では電気分解電圧が 1.44 [V], 起電力が 1.29 [V]). 電気分解電圧付近は導電性が変化している部分であるため, 電流－電圧特性が不安定になることが原因ではないかと考えられる.

５. まとめ

本研究をまとめると以下のようになる.

(1) 流れを整える効果を持つ整流器を作製した. 整流器は円柱軸と 5 枚の羽から成るフィン部で構成されている. 円柱軸は外径 20 [mm], 長さ 150 [mm]の棒の先端にフィン部へ流体をスムーズに導くための円錐型の長さ 5 [mm]の突起物を取り付けている. 一方フィン部は長さ 150 [mm], ねじり角 72°の羽 5 枚から成っている.

(2) 過去に行われた実験で問題となった発電機入口及び出口部分の流れの乱れを解消するため, 発電機前後に整流器を設置した改良型の発電機を作製した. なお, より正確なデータを得るため電極を 6 分割した.

(3) 発電機をフローラインに固定し, ①流路に発電機のみを設置した場合, ②流路に整流器のみを設置した場合, ③発電機前部に整流器を設置した場合, ④発電機前部及び後部に整流器を設置した場合（横置き）, ⑤発電機前部及び後部に整流器を設置した場合（縦置き）の 5 つの条件で流体損失の測定を行った. 測定流量は 10, 15, 20, 25, 30 [m^3/h] とした.

整流器を設置しない場合は入口, 出口部分での流れの変化の際に生じる渦などの影響により計算値との誤差が大きい結果となった. 整流器自体の損失は発電機自体の損失に比べて無視できるほど小さく, 発電機前方に整流器を設置した際はほとんど損失の増減がなかった. 整流器を後方に設置した際には損失の増加が見られた. これはヘリカル流から直線流に遷移する際の距離を結果的に短くしたことが原因と考えられる. 重力の影響を排すると縦置きと横置きの流体損失の差は, ほぼなくなった.

(4) 発電機と直流電源を用いて通電実験を行った. 人口海水を 10 , 20 [m^3/h]で流し, 発電機両端に 0~3.5 [V]の電圧を印加して内部抵抗を求めた.

電気分解電圧は 1.2 ～2.0 [V], 内部抵抗は 1.1~6.2 [Ω]であった. 過去の実験で見られた計算値との誤差は大幅に減少した. 電気分解電圧は逆電場方向の場合が順電場方向に比べて小さくなった. 流量を増加させると電流が流れにくくなる傾向がみられた. 内部抵抗は発電部分でない Elect.1 と Elect.6 で大きい値となった. しか

し Elect.6 の逆電場のみ, 内部抵抗は発電部分の電極と同等になった. これは発電機の構造が原因と考えられる.

(5) 発電機に 7 [T]の磁場を印加し, 順磁場と逆磁場方向で流量を 10, 15, 20, 25, 30 [m^3/h] に変化させて発生起電力を計測した. 発電部分の電極では, 順磁場, 逆磁場方向ともに起電力の上昇はほぼ見られなかった. 原因については, Elect.1 > Elect.6, Elect.2 > Elect.5 の起電力結果より, 主に後方に設置した整流器の影響ではないかと考えられる. また Elect.1 と Elect.6 は発電部分ではないため, 起電力は小さい値となっていた.

(6) 発電機に 7 [T]の磁場を印加し, 順磁場と逆磁場方向で流量を 10, 15, 20, 25, 30 [m^3/h] に変化させて直列接続した可変抵抗の両端電圧を測定し, 発電出力を求めた. Elect.2~5 に着目すると, 各電極で差はあるものの, 過去の値を上回る結果となった. 各電極間の出力差の主な原因は発生起電力の差ではなく, 内部抵抗の差であると考えている.

今後の課題は以下の通りである.

(1) 流路断面積の変化も軽減できるような構造を考案して, 整流器の改良を行う. また, 後方整流器の設置による影響を詳しく調べる.

(2) 電気分解電圧を超えて安定した状態で実験を行うため, 大型化した発電機を作製する.

謝辞

本研究の一部に対して, 科学研究費基盤研究 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) Takeda Minoru, Hirosaki Hiroki, Kiyoshi Tsukasa, Nishio Shigeru : Fundamental Study of Helical-Type Seawater MHD Power Generation with Partitioned Electrodes, *Journal of the JIME*, Vol. 49, No. 3, pp. 113-117 (2014)

(2) Minoru TAKEDA, Takuya YANAKA, Shigeru NISHIO, Hiroki HIROSAKI, Anh Kiet BUI and Tsukasa KIYOSHI : MEASUREMENTS OF VELOCITY DISTRIBUTION INSIDE HELICAL-TYPE SEAWATER MHD POWER GENERATOR USING FIVE-HOLE PITOT TUBE, *Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME) 2011, Kobe*, B5-1 PAPER (2011)

(3) 武田 実, 瀧本佳史, 広崎大樹, 西尾 茂, 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 3D 流速分布計測, 日本船舶海洋工学会平成 24 年春季講演会論文集, pp. 113-116 (2012)

(4) 武田 実, 宮沢 肇, 広崎大樹, 瀧本佳史, 宮川拓也, 西尾 茂, 木吉 司 : ヘリカル型海流 MHD 発電機内部の流速分布に及ぼす整流器の効果, 第 83 回（平成 25 年）マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp. 183-184 (2013)