



整流器を備えたヘリカル型海流MHD発電機の基礎特性

武田, 実
岩本, 裕樹
赤澤, 輝彦
Kiet, Bui Anh
木田, 龍雄

(Citation)

神戸大学海事科学部紀要, 3:107-113

(Issue Date)

2006-07-31

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00517768>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00517768>



整流器を備えたヘリカル型海流 MHD 発電機の基礎特性

Basic characteristics of helical-type seawater MHD power generator with flow rectifiers

武田 実, 岩本 裕樹*, 赤澤 輝彦, Bui Anh Kiet**, 木田 龍雄**
Minoru Takeda, Yuki Iwamoto*, Teruhiko Akazawa, Bui Anh Kiet**, Tatsuo Kida**

(平成 18 年 4 月 7 日 受理)

Abstract

In our work, experimental and computational studies of the helical-type seawater magneto-hydrodynamics (MHD) power generator have been performed as a part of applying superconductivity to maritime sciences. The helical-type generator has a disadvantage of flow loss caused by seawater rotation, so that the flow velocity inside the generator is suppressed. In order to solve this problem, the use of flow rectifiers is expected to be effective. In this study, the helical-type generator is improved with flow rectifiers, and the basic characteristics of the improved generator are investigated. The flow rectifiers 158 mm long consists of a cylindrical tube 10 mm in thickness and six vanes 5 mm in thickness. Results of the experiment using artificial seawater are summarized as follows: (1) The maximum flow velocity increases by 10 % due to a decrease of the flow loss. (2) The maximum electromotive force in the magnetic field of 7 T increases by 10 % due to an increase of the maximum flow velocity. The results are discussed in comparison with the results of the theory.

(Received April 7, 2006)

1. はじめに

化石燃料の消費に伴う大気汚染や酸性雨の問題、さらには地球温暖化の問題等が深刻化している。これらの問題を抑えるために、2005 年より温室効果ガス排出量の削減を目指す京都議定書が発効した。しかし、本質的な問題の解決のためには、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のひとつとして、太陽光・風力・水力・海流エネルギー等の自然エネルギーが期待されている。特に海流エネルギーは、太陽光・風力エネルギーに比べて季節や天候に左右されないため、再生可能なエネルギーとして極めて有効である。海流 MHD (magnetohydrodynamics) 発電は、このような海流の持つ運動エネ

ルギーを電気エネルギーに直接変換するだけでなく、水素ガスも発生するユニークな発電方式である。わが国は四方を海に囲まれた島国であり、再生可能な海流エネルギーを利用したエネルギー変換方式を確立することは、代替エネルギー源確保のひとつの方策として大きな意義がある。

我々は、これまでに 14 T (1 T = 10^4 G) の超伝導強磁場によるヘリカル型 (螺旋型) MHD 推進船の研究を行い、本方式による推進力密度や推進効率が従来型と比較して 1 桁以上向上することを実証した¹⁾。本研究は、MHD 推進船の研究成果に基づいて、逆の原理に従う発電方式すなわち高出力・高効率のヘリカル型海流 MHD 発電方式の着想を得たものである。

海流 MHD 発電では、発電出力や発電効率に対して印加磁場が最も重要なファクターとなる。しかし、これまでの発電装置 (リニア型)²⁾では、超伝導マグネット (ダイポール型) の強磁場化や大型化が問題となっていた。これらの問題を克服する

* 神戸大学大学院前期課程マリンエンジニアリング専攻
現在、スズキ(株)勤務

** 神戸大学大学院前期課程マリンエンジニアリング
専攻

ひとつの方法は、強磁場化や大型化が容易なソレノイド型超伝導マグネットを使用することである。本研究の対象であるヘリカル型海流 MHD 発電方式は、このソレノイド型超伝導マグネットを用いた新しい方式である。既に我々は、小型のヘリカル型海流 MHD 発電機（外径 10 cm、長さ 30 cm）を製作し、7 T の超伝導強磁場を用いて世界で初めて発電実験に成功している^{3),4)}。

しかし、この発電方式はヘリカル方向の海水の流れに伴う流体損失が大きく、そのため流速および発生起電力が低下する欠点があった。流体損失を低減してこれらの欠点を克服するためには、発電機の形状を最適化する必要がある。そこで、我々はまず整流器の効果に着目した。本研究は、整流器を備えたヘリカル型海流 MHD 発電機を製作し、その基礎特性を明らかにすることを目的とした。

2. ヘリカル型海流 MHD 発電の原理

Fig.1 にヘリカル型海流 MHD 発電の原理を示す。発電機は、主に同軸 2 重円筒状の電極とヘリカル状の仕切り板で構成されている。図に示すように、同軸方向へ磁場 B を印加した状態で海水が陽極の周りを回転運動すれば、電磁誘導の法則に従って起電力が発生する。起電力 V_e は、次式で示される。

$$V_e = uBD \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 u : 海水流速、 D : 電極間距離、 θ : 磁場と海水流速のなす角度である。上式に示すように、磁場 $B \cdot$ 電極間距離 $D \cdot$ 角度 θ が一定のとき起電

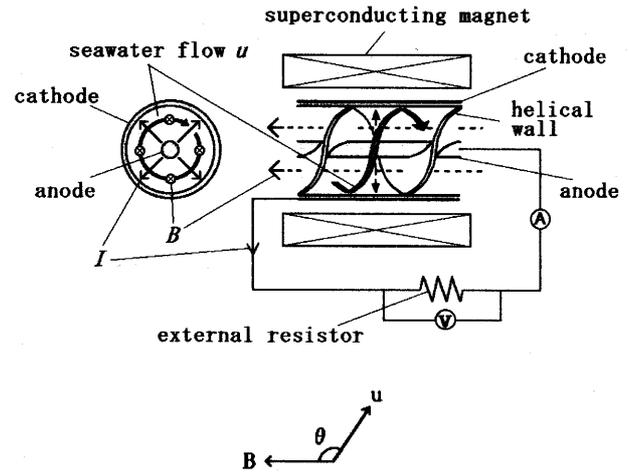


Fig.1. Principle of seawater MHD generation.

力 V_e は海水流速 u に比例する。発生起電力が電気分解電圧 V_d を超えると、電流 I が流れるので発電出力 P を得ることができる。 P は次式より求められる。

$$P = \frac{1}{R_{ex} + R_{in}} K(V_e - V_d)^2 \quad (2)$$

$$K = \frac{R_{ex}}{R_{ex} + R_{in}} \quad (3)$$

ここで、 R_{ex} : 外部負荷、 R_{in} : 内部負荷（海水の電気抵抗）、 K : 負荷率である。 $R_{ex} = R_{in}$ のとき、発電出力 P は最大値を示すことがわかる。

3. 実験装置

3.1 整流器

本研究では流体損失を低減するために、発電機の入口と出口にそれぞれ整流器を設置した。Fig.2 に設置した整流器の写真を示す。整流器は円柱部

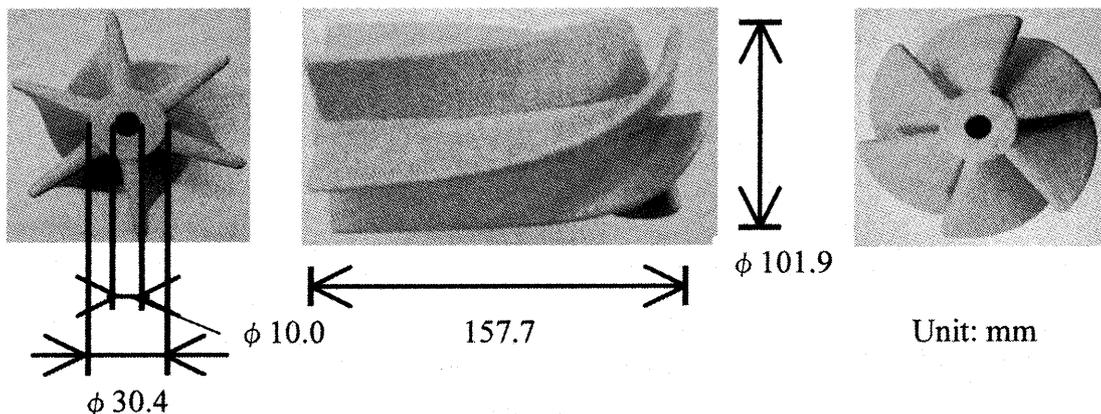


Fig.2. Photograph of a flow rectifier.

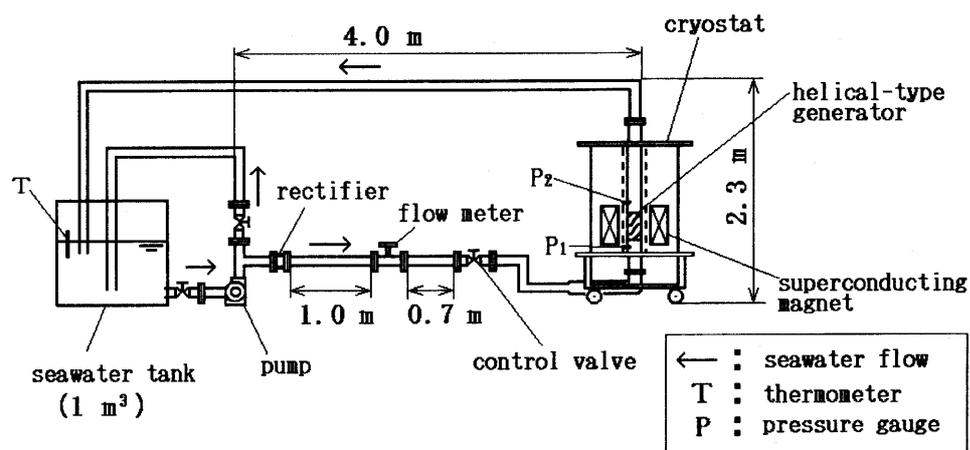


Fig.3. Schematic diagram of the experimental setup.

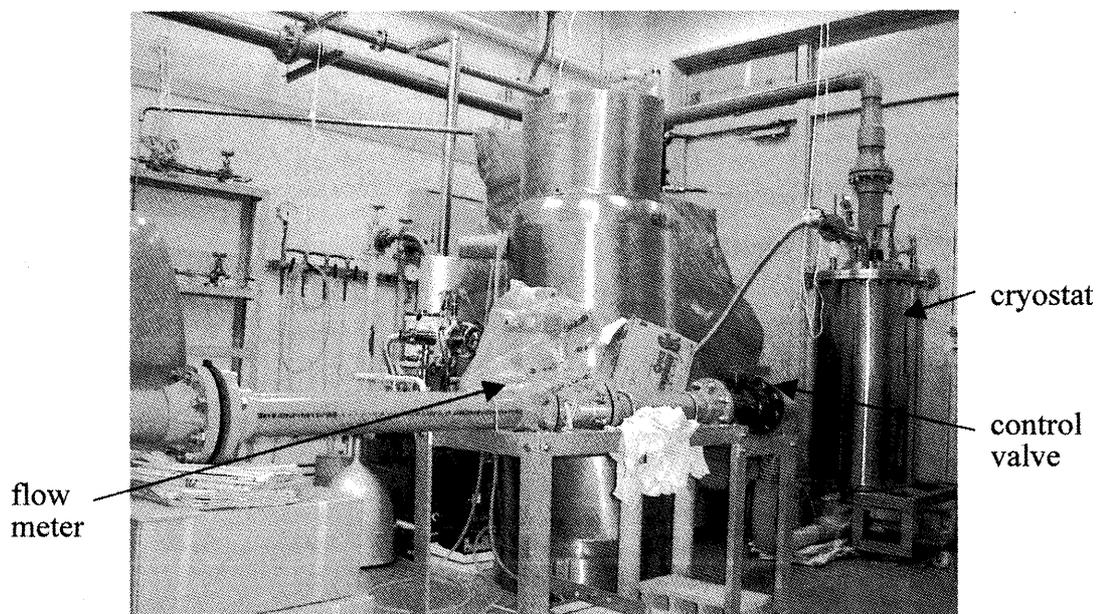


Fig.4. Photograph of the experimental setup.

とフィン部で構成されており、その材質は発砲ウレタンに塩ビ被覆を施したものである。整流器の中心には陽極棒が貫通するように 10 mm の穴を設けた。整流器の外径は 101.9 mm、長さは 157.7 mm であり、一部が陰極に入るように加工してその内径 (100 mm) に合わせた。整流器の一端は直管の流れ方向に、また他端はヘリカル型仕切り板の入口角度に合せ、海水をスムーズに発電機へと導けるようにした。さらに、整流器の先端には円錐形の加工物を設置した。整流器のフィンの枚数は、過去のヘリカル型 MHD 推進船の研究¹⁾で使用された

整流器を参考にして 6 枚とした。整流器の強度を確保するために、それぞれのフィンの厚さは 5 mm とした。

3.2 発電実験システム

Fig.3 に発電実験システムの概略図を、また Fig.4 にその写真を示す。この実験システムは、発電機、強磁場クライオスタット、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)、流量計 (日本フローセル、UZG-VTS2-L)、圧力計 (豊田工機、PMS-5WE-500k)、温度計などで構成されている。

発電機のヘリカル状仕切り板（塩化ビニール製）は、長さ 140 mm、ピッチ数 2.5 の螺旋形をしている。発電機の陽極は、直径 10 mm、長さ 1350 mm の円柱棒である。一方陰極は、内径 100 mm、長さ 260 mm、厚さ 1.5 mm の薄肉パイプである。両電極の材料として、非磁性で耐食性の高い SUS316 を用いた。

強磁場クライオスタット（強磁場発生装置）⁵⁾は、外径 510 mm、長さ 1000 mm である。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。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。

4. 実験結果と考察

4.1 流体損失実験

Fig.3 に示したフローシステムにおいて人工海水（NaCl 濃度 3.4 %、比重 1.03）を流して、ゼロ磁場下で流体損失を調べた。実験では流量 Q 、発電機入口圧力 P_1 および出口圧力 P_2 を測定した。その際、発電機を設置した場合と取り外した場合の両方で測定を行い、次式より流体損失として損失ヘッド h と損失係数 ζ を計算した。

$$h = \frac{\Delta P - \Delta P'}{\rho g} = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (4)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2, \Delta P' = P_1' - P_2' \quad (5)$$

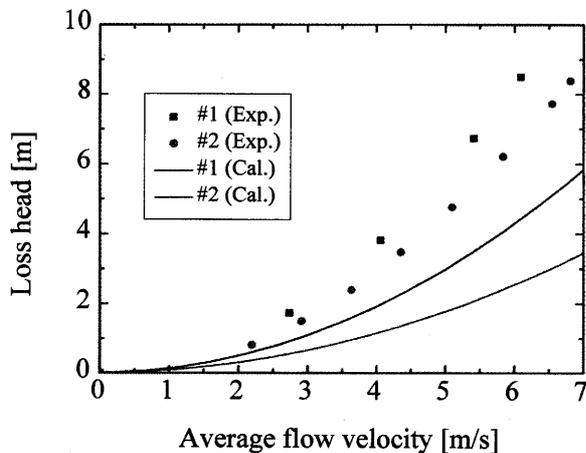


Fig.5. Relationship between loss head and average flow velocity.

ここで、 ρ : 人工海水の密度、 g : 重力加速度、 u : 発電機内の平均流速、 ΔP : 発電機を設置した場合の差圧、 $\Delta P'$: 発電機を取り外した場合の差圧である。なお、発電機内の平均流速 u は海水の流量とヘリカル流路の断面積より計算した。

Fig.5 および Fig.6 に流体損失の測定結果を示す。図中のプロット点の#1 は整流器なしの発電機を、また#2 は整流器を備えた発電機を示す。一方図中の実線は、ヘリカル流路の断面積と同じ断面積の螺旋円管を仮定し、発電機の出入口における流路方向の変化および流路断面積の変化に伴う損失を考慮して計算で求めたものである。Fig.5 よりわかるように、同じ平均流速で損失ヘッドを比較すると#1 に比べて#2 の方が低減している。また、最大平均流速に着目すると、#1 の 6.1 m/s から#2 の 6.8 m/s へ約 10 % 増加している。Fig.6 においても、損失係数を比較すると約 4.5 から約 3.5 へ改善されている。以上より、流体損失の低減および平均流速の増加に対して整流器設置の効果が見られた。しかし、実験値と計算値の間には大きな差が見られており、この原因として螺旋円管を仮定したことや整流器自身の流路断面積の変化に伴う損失を考慮しなかったことなどが考えられる。

4.2 通電実験

海流 MHD 発電では、電極付近で海水の電気分解が起こる。電気分解電圧を調べることは発電出力実験を行う上で重要なので、ゼロ磁場下において

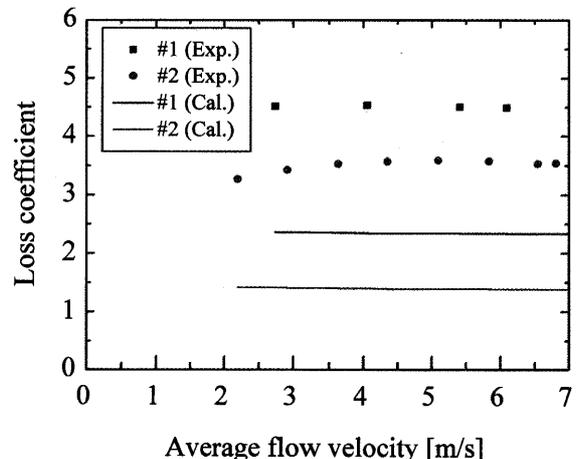


Fig.6. Relationship between loss coefficient and average flow velocity.

それを調べた。実験では、平均流速 u が 0 m/s、4.1 m/s、6.8 m/s (max) の場合において、電極間の印加電圧と発生電流を測定した。その際、印加電圧を設定した後に電流値の上昇率が微小になったとき (準定常状態) の値を記録した。

Fig.7 は電気分解曲線の一例である。この曲線より電気分解電圧 V_d を見積もると、平均流速 u が 0 m/s、4.1 m/s、6.8 m/s (max) の場合において、それぞれ 1.4 V、1.3 V、1.2 V であった。これらの値はばらついているが、理論値 (1.36 V) ⁶⁾ に近い値であった。一方、電気分解曲線の傾きに基づいて内部抵抗 R_m を求めると、それぞれ 4.8 Ω 、3.5 Ω 、12.6 Ω であった。これらの値は計算値 (0.57 Ω) に比べてかなり大きかった。この原因として、電解生成物の発生による電気伝導率の低下や海水温度の上昇による電気伝導率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

流体損失実験において、最大平均流速に約 10 % の向上が見られた。従って、起電力に対しても同程度の向上が予想される。そこで、整流器を備えた発電機に対する起電力実験を行った。実験では、7 T までの強磁場下で発電機に流入する海水流量を変化させて起電力を発生した。

Fig.8 に得られた発生起電力の流速依存性を示す。ここで、平均流速は海水流量とヘリカル流路の断面積より計算した。また、図中の実線は(1)式

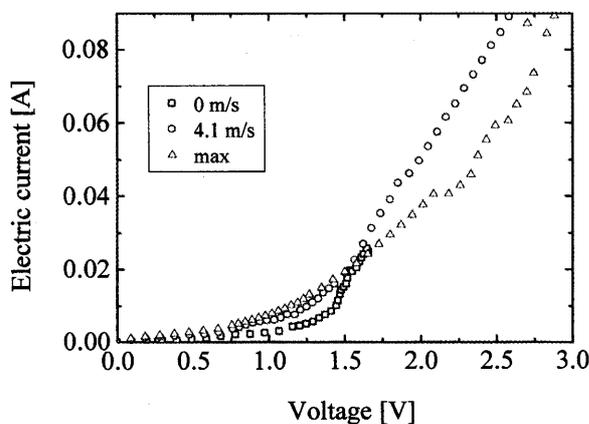


Fig.7. Electrolysis curves as a parameter of average flow velocity.

より求めた理論値であり、平均流速および平均磁場 (中心磁場の 90 %) の値を用いた。この図より、起電力は平均流速に対してほぼ比例関係にあり、その係数が磁場により異なることがわかる。7 T において最大起電力は 1.35 V であり、予想どおり整流器なしの場合より約 10 % 向上した。また Fig.8 より、実験値が理論値より約 30 % 小さいことがわかる。この原因について、以下に考察を行った。

始めに電気化学的および電磁気学的な観点から考察を進めたが、原因を説明できなかった。次に、流体力学的な観点から考察を行った。すなわち、ヘリカル状の仕切り板に沿う海水の流れが実質的には 2.5 回転 (ピッチ数 2.5) より減少しているのではないかと考えた。そこで、電極中心 (磁場中心) 付近において海水の回転数が 1.5 に減少していると仮定し、電極全体にかかる起電力を求めてみた。その結果を Fig.9 に示す。理論値は実験値よりも小さくなっているが、両者の差は 7 T では約 10 %、6 T では約 20 %、2 T では約 6 % であり、比較的小さくなっている。従って、実質的な回転数の減少が一つの要因ではないかと考えられる。これを明らかにするために、発電機内部の海水の流れを可視化する実験を計画している。

4.4 発電出力実験

発電出力の実験では、外部負荷 (0 Ω ~ 10 Ω 可変) を用いて 7 T の強磁場下で発電機に流入する海水流量を変化させて発電した。Fig.10 に平均流速をパ

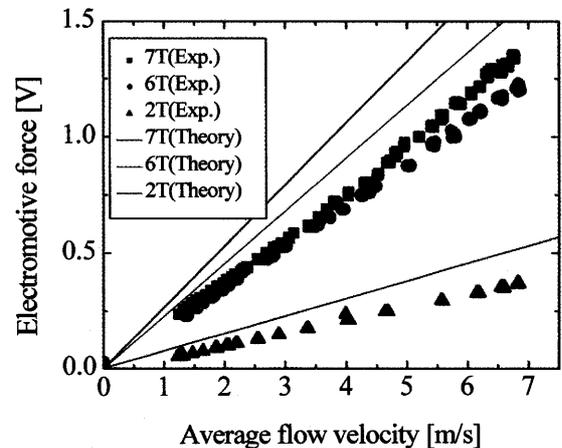


Fig.8. Relationship between electromotive force and average flow velocity.

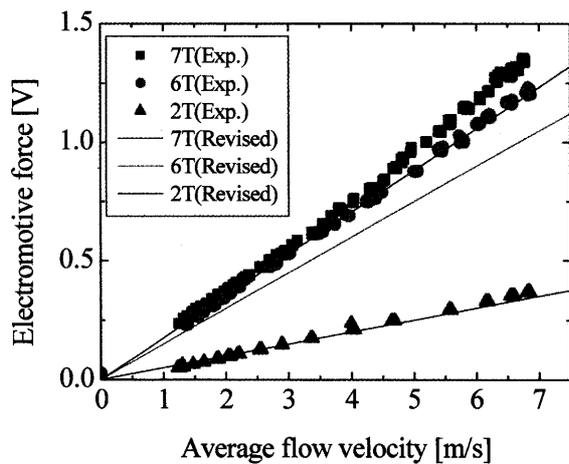


Fig.9. Relationship between electromotive force and average flow velocity.

ラメータとした発電出力の抵抗依存性を示す。この図より、平均流速 u が 2.2 m/s および 4.3 m/s の場合には、ほとんど出力が得られていないことがわかる。これは発生起電力が電気分解電圧より小さく、電流がほとんど流れていないからである。一方、 u が 6.8 m/s (max) の場合には、 $4\ \Omega \sim 10\ \Omega$ の間で最大出力 (0.035 W) が得られている。この結果は、(2)式において $R_{ex} = R_{in}$ のとき、発電出力 P が最大値を示すことを支持している。同じ条件で実験を繰り返したところ、最大出力の最高値は 0.07 W であった。実験結果に対して再現性の問題が見られたが、この原因として海水の変質や海水温度の変化などが考えられる。これらの影響をなくすために海水を循環式ではなく掛け流し式に変更して、再度実験をする予定である。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ヘリカル型海流 MHD 発電機の流体損失を低減するために、整流器を製作し発電機の入口と出口に設置した。整流器は円柱部とフィン部で構成されており、円柱部は肉厚を 10 mm、フィン部は肉厚を 5 mm とした。また、フィンの枚数は 6 枚とした。
- (2) 流体損失実験の結果、損失係数が約 4.5 から約 3.5 に改善され、発電機内の最大平均流速は 6.1 m/s

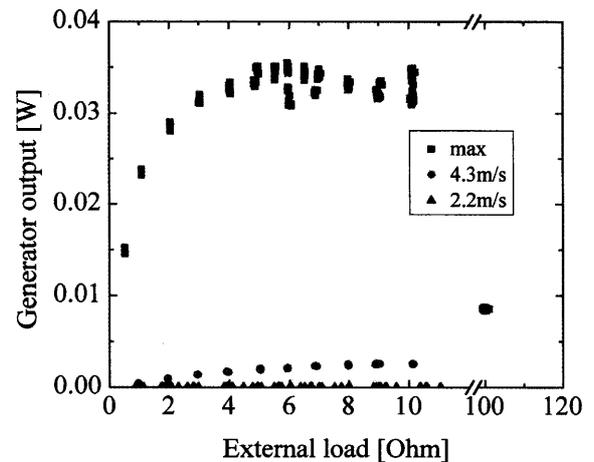


Fig.10. External load dependence of generator output with $B = 7\ T$.

から 6.8 m/s へ約 10% 増加した。すなわち、流体損失の低減および平均流速の増加に対して整流器設置の効果が見られた。

(3) 通電実験より、電気分解電圧および発電機の内部抵抗を見積った。電気分解電圧は 1.0 V ~ 1.5 V であり、理論値に近い値であった。一方内部抵抗は、測定方法や海水流速に強く依存して大きな値を示した。

(4) 起電力実験の結果、7 T において最大起電力は 1.35 V であり、予想どおり整流器なしの場合より約 10 % 向上した。実験値が理論値より小さかった原因のひとつとして、発電機内部を流れる海水の実質的な回転数の減少が考えられる。

(5) 発電出力の抵抗依存性を調べた結果、平均流速が 6.8 m/s (max) の場合に $4\ \Omega \sim 10\ \Omega$ の間で最大出力が得られた。この結果は、理論式において $R_{ex} = R_{in}$ のとき、発電出力が最大値を示すことを支持している。

謝辞

本研究の一部に対して、平成 16 年度 ~ 17 年度神戸大学海事科学部学内プロジェクト研究経費および平成 16 年度ひょうご科学技術協会一般学術研究助成金の援助を受けました。ここに謝意を表します。また、有益な議論をして頂きましたプロジェクトメンバーおよび物質・材料研究機構の木吉

司博士に感謝します。

参考文献

- 1) K. Nishigaki, C. Sha, M. Takeda, Y. Peng, K. Zhou, A. Yang, D. Suyama, Q.J. Qing, L. Yan, T. Kiyoshi and H. Wada: *Cryogenics*, Vol.40, No.6, pp.353-359 (2000).
- 2) 岩田章, 佐治吉郎 : *低温工学* Vol.15, No.6, pp.317-328 (1980).

- 3) M. Takeda, Y. Okuji, T. Akazawa, X. Liu and T. Kiyoshi: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.15, No.2, pp.2170-2173 (2005).
- 4) X. Liu, T. Kiyoshi and M. Takeda: *Cryogenics*, in print.
- 5) 武田実, 奥地泰明, 赤澤輝彦 : *神戸大学海事科学部紀要* 第1号, pp.125-130 (2004).
- 6) 米山宏 : *電気化学*, 大日本図書 (1986).