

インテグレートハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電システムの研究 — 久米島海域, 沖ノ島海域 —

石田 雅照^{*1}, 嶋岡 芳弘^{*2}, 大原 順一^{*1}, 秦 一浩^{*1}
田中 辰彦^{*1}, 西田 哲也^{*1}, 安永 健^{*3}, 池上 康之^{*3}

Ocean Thermal Energy Conversion Plant Using Integrated Hybrid Cycle

— Kumejima, Okinotorishima —

Masateru ISHIDA^{*1}, Yoshihiro SHIMAOKA^{*2}, Junichi OHARA^{*1}, Kazuhiro HATA^{*1}, Tatsuhiko TANAKA^{*1}, Tetsuya NISHIDA^{*1}, Takeshi YASUNAGA^{*3} and Yasuyuki IKEGAMI^{*3}

^{*1} National Fisheries University

2-7-1 Nagata-Honmachi, Shimonoseki-shi, Yamaguchi, 759-6595, Japan

^{*2} National Institute of Technology, Toba College

1-1 Ikegami-cho, Toba-shi, Mie, 517-8501, Japan

^{*3} Institute of Ocean Energy, Saga University

1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

An Integrated Hybrid Ocean Thermal Energy Conversion (I-H OTEC) system is one of the OTEC systems. This system is composed of electric generating plant and desalination plant. The submarine topography of east side of Kumejima region is suitable for arranging pipelines to take in deep ocean water. Therefore, Kumejima region is one of the place that is expected to construct an OTEC plant, and already OTEC experimental plant is under running. Okinotorishima region is also considered suitable for OTEC plant, because of its steep bottom topography and high sea surface temperature. In the present study, the analyses are conducted on the performance of Hybrid OTEC system adopting ammonia as a working fluid, that is using the results of oceanographic investigation carried out by the fisheries training ship. A procedure is developed to maximize a net power of power system consisting of heat exchanger under the condition of designate power system. The maximum net power is given by minimizing the heat exchangers which consume most of a power system. The minimum value of objective function decreases with the increase of the temperature difference between hot seawater and cold sea water.

Key words : Ocean Thermal Energy Conversion, I-H OTEC, Renewable Energy, Kumejima region, Okinotorishima region

1. 緒 言

海洋温度差発電（以下「OTEC」）は、海洋の表層海水と深層海水との温度差による熱エネルギーを電気エネルギーに変換するシステムであり、海洋の表層の温海水と深層の冷海水の温度差が 15℃以上あれば、経済的に成り立つことがわかっている（上原 2007）。OTEC は、化石燃料を使用しない持続可能な再生可能エネルギーを利用した発電方法であり、また、化石燃料を使用したシステムに比べて CO₂の排出量が極めて少ないことから、安定したベースロード型発電システムになりえると考えられている（上原 2004）。インテグレートハイブリッドサイクルは、OTEC システムのひとつで、発電だけでなく、発電の際に使用した温海水を用い、淡水を得ることができる特徴がある（上原, 2007）。

原稿受付 2020 年 11 月 20 日

^{*1} 水産大学校（〒759-6595 下関市永田本町 2 丁目 7-1）

^{*2} 鳥羽商船高等専門学校（〒517-8501 三重県鳥羽市池上町 1 番 1 号）

^{*3} 佐賀大学海洋エネルギー研究センター（〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地）

E-mail of corresponding author: m_ishida@fish-u.ac.jp

沖縄県の離島である久米島では、島内に設置された 8 基のディーゼル発電機により電力が供給され、平成 26 年の総発電出力は約 18,500 kW となっている（沖縄電力 pdf, 参照日 2020 年 11 月 14 日）。離島の発電所は発電用の燃料を輸送しているため輸送コストがかかり、さらに、ディーゼル発電機を運転するため環境負荷が大きくなることが問題となっている。そのために離島では、化石燃料を使用せず、豊富にある海水を利用する OTEC システムが注目されている。また、久米島海域の一部は、海底地形が急激に深く、海洋深層水を取り込む管の設置には有利な形状のため、OTEC プラント設置の国内最有力候補地として、実証フィールドに選定されており、すでに、100kW 級の実験プラントが稼働中である。さらに、久米島内では海洋深層水を利用した事業が発達しているため、海洋深層水の複合利用環境が比較的整っており、関連する産業育成が可能な状況にある（池上他, 2016）。

一方、沖ノ島は東京の南南西約 1,700 km に位置する日本領土として最南端の島であり、無人島ではあるが、島の保全対策や今後の利活用の検討調査・観測が行われている。沖ノ島は日本の排他的経済水域内で唯一熱帯に区分され、日本近海における OTEC システム設置可能な候補地の中で最も適した海域のひとつと考えられている（植田他, 2014）。この海域においても沖ノ島の周囲は、急に深くなっており、水深は 4,000~7,000m に及ぶ（東京都産業労働局, 参照日 2020 年 11 月 14 日）。また、年間を通じて表層海水温度が高いため（中埜他, 2001）OTEC プラントの適地と考えられる。

そこで本研究では、久米島海域と沖ノ島海域について、水産大学校の練習船耕洋丸と天鷹丸を用いて、海洋調査を行った。それぞれの海洋調査で得られたデータを基に、インテグレートハイブリッドサイクルを用いた OTEC システム（以下「I-H OTEC システム」）の性能解析を行い、それぞれの海域において行われた海洋調査の結果を基に、季節ごとの変動と場所での特性について、I-H OTEC システムの評価を行った。その結果について報告する。

2. 調査地点及び調査方法

2・1 調査地点

図 1 に、久米島海域における調査地点を示す。調査は久米島の東側海域で、2017 年 1 月、2018 年 6 月および 2019 年 12 月に行い、調査地点は St.1, St.2, St.3 の 3 点で実施した。また、図 2 に沖ノ島海域における調査海域を示す。

調査は、沖ノ島の南側海域で、2015 年 11 月、2019 年 10 月に行い、調査地点は St.1, St.2, St.3 の 3 点で実施した。

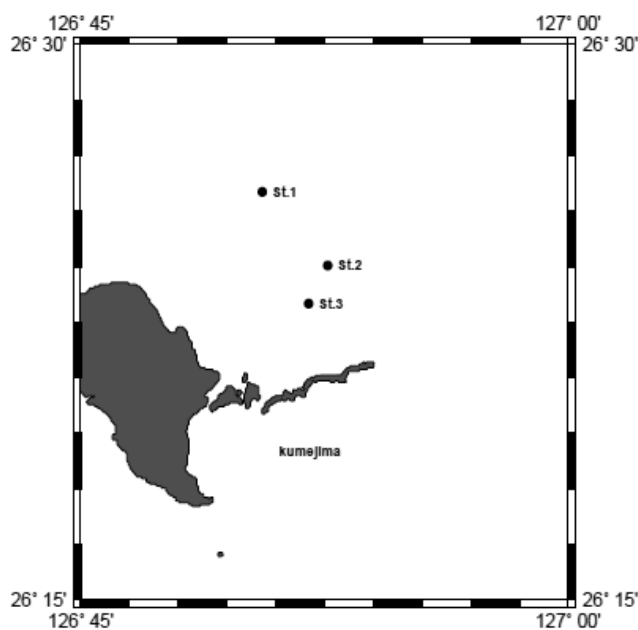


Fig. 1 Kumejima region.

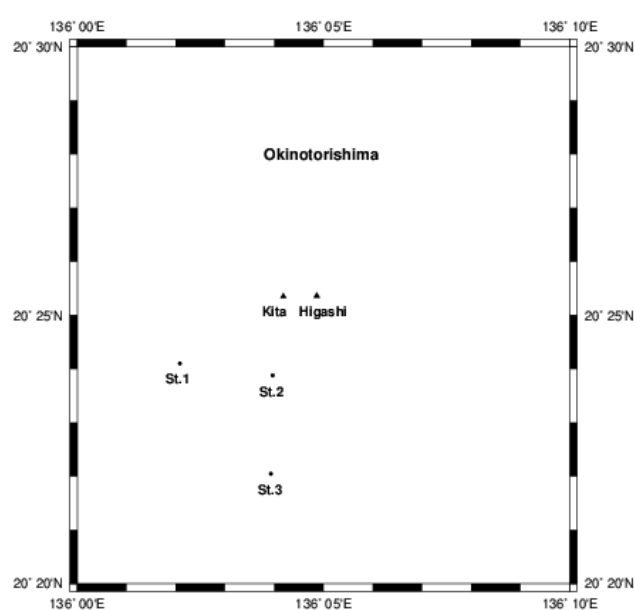


Fig. 2 Okinotorishima region.

2・2 調査方法

調査は, 水産大学の練習船耕洋丸と練習船天鷹丸を用いた。耕洋丸の主な仕様は, 全長 87.59 m, 幅 13.6 m, 国際総トン数 2,703 ton, 航海速力は 14.0 knot である。また, 天鷹丸の主な仕様は, 全長 62.6 m, 幅 10.4m, 国際総トン数 1,020 ton, 航海速力は 12.5 knot である。

調査は, 耕洋丸と天鷹丸に搭載された電気伝導度水温水深計 (CTD: Conductivity Temperature Depth 以下「CTD」) を用いて行った。耕洋丸では, 2017 年 1 月, 2018 年 6 月, 2019 年 12 月に久米島海域, 2019 年 10 月に沖ノ島海域, 3 代目天鷹丸 (現在は 4 代目, 以下「天鷹丸」) では, 2015 年 11 月に沖ノ島海域において海洋調査を行った。各調査地点では, CTD を海中に投入し, 指定深度まで 1.0 m ごとに, 水温, 塩分, 溶存酸素量などを測定した。

3. インテグレートハイブリッド OTEC システム

図 3 に, インテグレートハイブリッド OTEC システムの概要を示す。このシステムは, 通常の OTEC に改良を加え, 蒸気となった作動流体によりタービンを回転させ発電するだけでなく, 蒸発器で熱交換を行った後の温海水をフラッシュ室で減圧蒸発させることで, 真水を製造することができる特徴がある。作動流体は循環ポンプによって蒸発器へ送られる。そこで, 装置の温海水によって加熱され, 蒸発し蒸気となる。蒸気はタービンを通過し, タービンと発電機を回転させて発電する。タービンを出た蒸気は, 凝縮器で深層冷海水によって冷却され再び液体となる。一方, 蒸発器で熱交換を行った温海水は, 真空ポンプによって減圧されたフラッシュ蒸発室に入り, ノズルより噴出され, ここで, スプレーフラッシュ蒸発をする。発生した蒸気は, 造水用凝縮器に導かれ, 凝縮器で熱交換を行ったあとの冷却水により冷却され, 凝縮し淡水となる。(中岡, 2008)

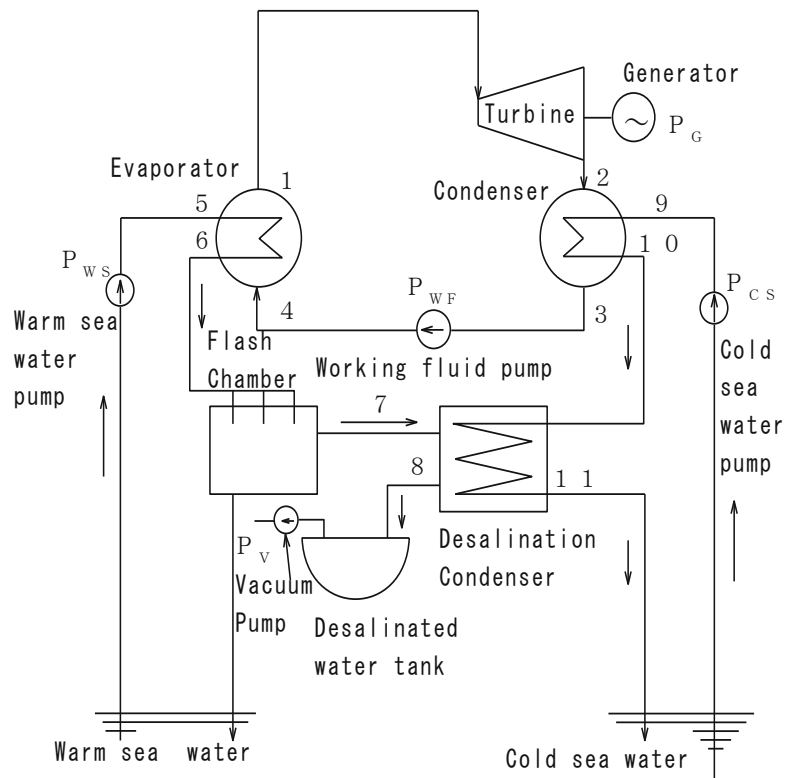


Fig. 3 Arrangement of I-H OTEC system.

Table 1 Calculation condition.

Power generation end output	P_M			1,000	(kW)
Working fluid				NH ₃	(-)
				St.1 St.2 St.3	
Warm seawater inlet temperature	T_{WSI}	Kumejima	Jan.2017	23.8 24.1 24.0	(°C)
			Jun.2018	26.2 25.7 25.8	(°C)
			Dec.2019	23.5 23.5 23.4	(°C)
			Nov.2015	28.4 28.4 28.5	(°C)
			Oct.2019	28.7 28.3 28.4	(°C)
		Okinotorishima			
Cold seawater inlet temperature	T_{CSI}	Kumejima	Jan.2017	5.3 5.4 5.3	(°C)
			Jun.2018	5.3 5.4 5.4	(°C)
			Dec.2019	4.9 5.1 5.0	(°C)
			Nov.2015	4.8 4.5 4.5	(°C)
			Oct.2019	4.7 4.8 4.7	(°C)
		Okinotorishima			
Plate length	ΔX			2.0	(m)
Plate width	ΔL			1.0	(m)
Plate thickness	δ			1.0	(mm)
Warm seawater side spacing	ΔY_{WS}			5.0	(mm)
Cold seawater side spacing	ΔY_{CS}			5.0	(mm)
Working fluid side spacing	ΔY_{WF}			5.0	(mm)
Thermal conductivity	λ			17.2	(W/(m ·K))
Pump efficiency	η_{PL}			80.0	(%)
Turbine efficiency	η_T			85.0	(%)
Generator efficiency	η_G			96.0	(%)
Working fluid pump efficiency	η_{WF}			75.0	(%)

4. 計算方法

計算は、発電端出力 P_M を 1,000 kW と仮定し、作動流体にはアンモニアを使用する。表 1 に、計算条件を示す。表より、温海水入口温度はそれぞれの調査地点の表層海水温度である。冷海水入口温度は、水深 850 m における水温である。また、ポンプ類、蒸気タービン、発電機、作動流体ポンプの効率、既存システムで使用される一般的な効率である。

特に、インテグレートハイブリッド OTEC システムの性能を決めるうえで、表層と深層の水温は熱源条件として重要である。熱交換器の熱通過係数は表層・深層の温度によって変わるため、熱交換器の総伝熱面積に大きく関係し、熱交換器の大きさが変わると、表層海水流量、深層海水流量および作動流体ポンプの動力も変化する。従って、設計条件の設定は、インテグレートハイブリッド OTEC システムで熱源条件が変化した場合のオフデザインを行う際にも、海域の熱源の温度条件を知る必要があり、熱源の調査は重要となる（一瀬他，2007）。

4・1 最小評価関数

インテグレートハイブリッド OTEC システムの評価は、システムの正味発電出力 1 kW に対する、熱交換器の総伝熱面積 m^2 を、式 (1) で示す評価関数 γ を用いた（上原，2007）。

$$\gamma = A_T / P_N \quad (1)$$

ここで、 A_T は熱交換器の総伝熱面積、 P_N は正味発電出力である。評価関数は、正味発電出力の大きさに対する熱交換器の総伝熱面積の大きさで表され、この評価関数が小さいほうがシステムを小型化できる。すなわち、評価関数 γ が最小となる点がシステムにとって最適な設計点となる。このとき評価関数 γ が最小となる点を、最急勾配法を用いて最小評価関数 γ_{min} を算出した。

使用される熱交換器については、多種多様なものがある。これらの中から最適なものを選択するには、熱効率、熱通過率、圧力損失、耐久性、耐食性、製造コスト、設置面積、メンテナンス方法など多方面にわたって総合的に検討を行う必要があるが、ここでは、プレート式熱交換器を使用した。

また、評価関数は、最終的には発電原価で算出を行う必要があるが、設置場所の条件、作動流体、伝熱面材料等の条件を設定することにより算出することが必要となる。

4・2 正味発電出力

正味発電出力 P_N は、次の式 (2) により算出した。

$$P_N = P_M - (L_H + L_C + L_F + L_V) \quad (2)$$

ここで、 P_M は発電端出力、 L_H は温海水ポンプ動力、 L_C は冷海水ポンプ動力、 L_F は作動流体ポンプ、 L_V は真空ポンプ動力である。

4・3 総伝熱面積

総伝熱面積 A_T は、次の式 (3) により算出した。

$$A_T = A_E + A_C + A_{fc} \quad (3)$$

ここで、 A_E は蒸発器の伝熱面積、 A_C は凝縮器の伝熱面積、 A_{fc} は造水用凝縮器の伝熱面積である。

5. 結果と考察

5・1 水温分布

水温は、OTEC の熱源である温度差を決める際に特に重要で、表層と深層の温度差が最低約 15 °C 以上必要である (上原, 2007)。

図 4 に、久米島海域における St.1 の 2017 年 1 月、2018 年 6 月および 2019 年 12 月の水深と水温の変化を示す。図より、水深 600 m 付近までは、ほぼ一定の割合で約 8 °C まで水温が低下するが、その後は、温度の下がり方がゆるやかになり、水深 900 m 付近では 水温約 5 °C となっている。また、深層海水温度は 2017 年 1 月、2018 年 6 月および 2019 年 12 月、ともに約 5 °C だが、表層海水は、6 月のほうが高くなっている。このため、表 1 より、2017 年 1 月と 2019 年 12 月の表層海水と深層海水の温度差は約 18.6 °C となり、2018 年 6 月は約 20.9 °C となっている。

図 5, 図 6 に、久米島海域における St.2 と St.3 の 2017 年 1 月、2018 年 6 月および 2019 年 12 月の水深と水温の変化を示す。St.2 と St.3 においても水深と水温の変化の傾向は St.1 と同様であり、水深 900 m 付近の深層海水温度は 2017 年 1 月、2018 年 6 月および 2019 年 12 月、ともに約 5 °C だが、表層海水温度は、6 月のほうが高くなっている。このため、表 1 より、St.2 の 2017 年 1 月と 2019 年 12 月の表層海水と深層海水の温度差は約 18.7 °C、2018 年 6 月は約 20.3 °C となっている。また、St.3 の 2017 年 1 月と 2019 年 12 月の表層海水と深層海水の温度差は約 18.7 °C、2018 年 6 月は約 20.4 °C となっている。

図 7 に、沖ノ島海域における 2015 年 11 月および 2019 年 10 月の、St.1 の水深と水温の変化を示す。図より、水深 100 m 付近までは、温度の下がり方は急であるが、それ以降は水深 600 m 付近までは、ほぼ一定の割合で約 7 °C まで水温が低下するが、その後は、温度の下がり方がゆるやかになり、水深 800 m 付近では 水温約 5 °C となっており、これ以降も水温が下がり続けている。また表 1 より、2015 年 11 月および 2019 年 10 月の表層海水と水深 850 m の深層海水の温度差は約 23.5~24.0 °C となっている。

図 8, 図 9 に、沖ノ島海域における 2015 年 11 月および 2019 年 10 月の、St.2 と St.3 の水深と水温の変化を示す。図より、St.2 と St.3 においても水深と水温の変化の傾向は St.1 と同様であり、水深 800 m 付近の水温は約 5 °C となっている。

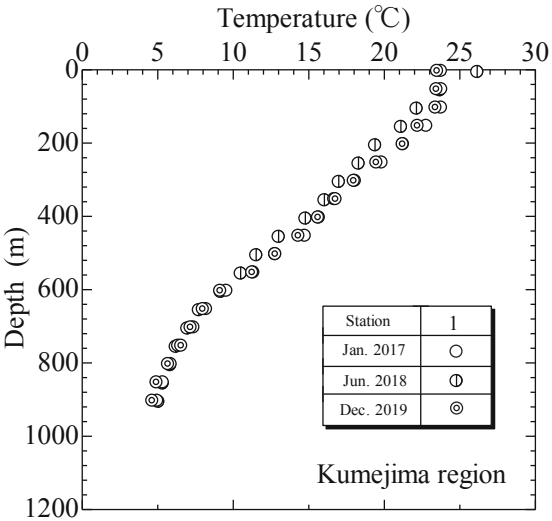


Fig. 4 Vertical profile of seawater temperature Kumejima region (St.1).

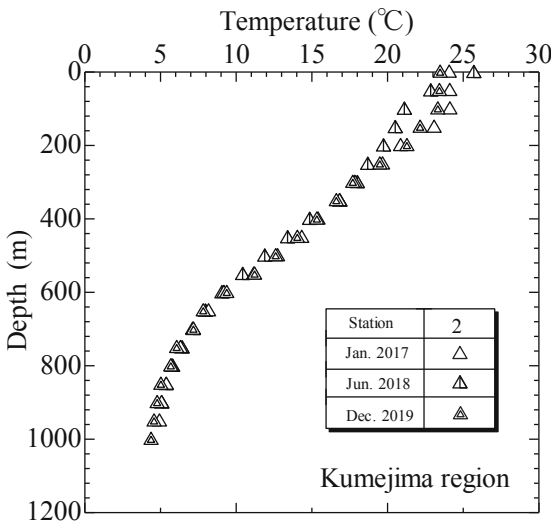


Fig. 5 Vertical profile of seawater temperature Kumejima region (St.2).

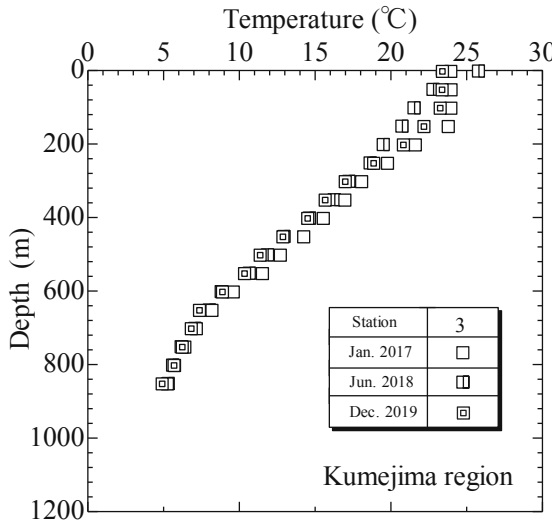


Fig. 6 Vertical profile of seawater temperature Kumejima region (St.3).

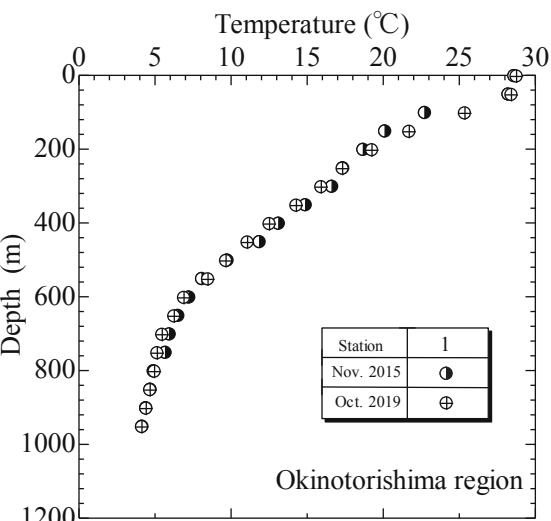


Fig. 7 Vertical profile of seawater temperature Okinotorishima region (St.1).

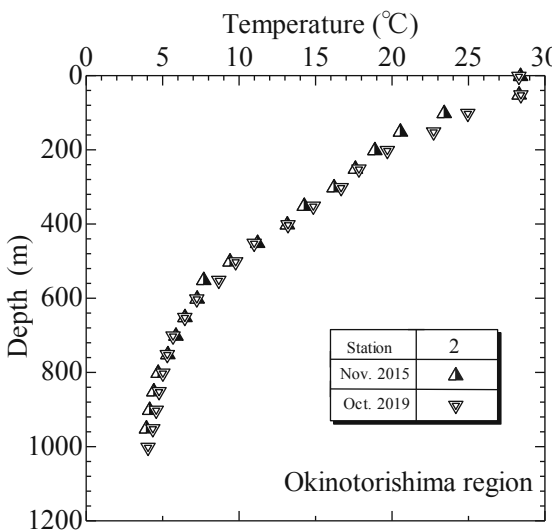


Fig. 8 Vertical profile of seawater temperature Okinotorishima region (St.2).

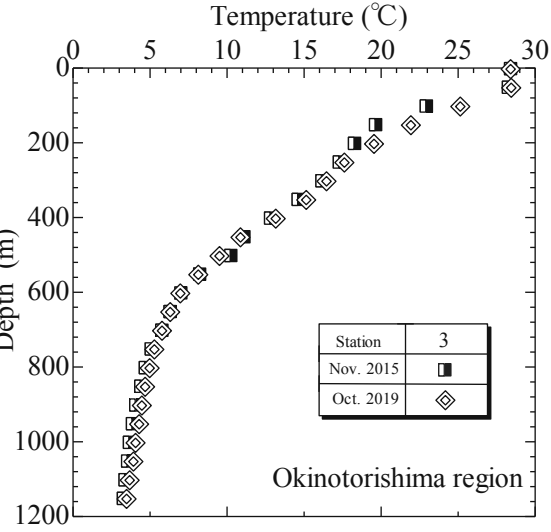


Fig. 9 Vertical profile of seawater temperature Okinotorishima region (St.3).

5・2 最小評価関数

図 10 に, 最小評価関数 γ_{min} と温冷海水入口温度差 ($T_{WSI} - T_{CSI}$) の関係を示す. 図より, 最小評価関数は, 久米島海域の場合, 2018 年 6 月が $19.6 \sim 22.2 \text{ m}^2/\text{kW}$, 2019 年 12 月が $37.6 \sim 40.3 \text{ m}^2/\text{kW}$ となっている. また, 沖ノ島海域では, 2019 年 10 月は $10.4 \sim 11.4 \text{ m}^2/\text{kW}$ となっている. 一方で, 表 1 より, 温冷海水入口温度差は, 久米島海域では 2018 年 6 月が $20.3 \sim 20.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 2019 年 12 月が $18.4 \sim 18.6 \text{ }^\circ\text{C}$ となっている. また, 沖ノ島海域では, 2019 年 10 月は $23.5 \sim 24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ となっている. また, 図より, 最小評価関数 γ_{min} は, 温冷海水入口温度差 ($T_{WSI} - T_{CSI}$) が大きくなるほど小さくなる.

次に, 時期に着目すると, 久米島海域の 2018 年 6 月と 2019 年 12 月を比べた場合, 2018 年 6 月の方が, 最小評価関数が小さくなっていることがわかる. これは 2018 年 6 月の方が, 表層海水温度が $2.2 \sim 2.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 高く, 温冷海水入口温度差が大きくなるためである. また, 表 1 より, 冷海水入口温度は 2018 年 6 月, 2019 年 12 月では, 同一水深においてほぼ同じ温度になっている, 温冷海水入口温度差に影響を与えるのは表層海水温度である.

一方で, 沖ノ島海域の場合, 最小評価関数は久米島のいずれの結果よりも小さくなる. これは, 沖ノ島海域は久米島海域と比べて, 表層海水温度が高いためである.

5・3 正味発電出力

図 11 に, 正味発電出力 P_N と温冷海水入口温度差 ($T_{WSI} - T_{CSI}$) との関係を示す. 図より, 正味発電出力は, 久米島海域の場合, 2018 年 6 月が $442.6 \sim 458.1 \text{ kW}$, 2019 年 12 月が $371.6 \sim 379.6 \text{ kW}$ となっている. また, 沖ノ島海域では, 2019 年 10 月は $524.1 \sim 535.7 \text{ kW}$ となっている.

これらの結果から, 温冷海水入口温度差が大きいほど正味発電出力が大きくなる. これは, 温冷海水入口温度差が大きくなると, 温海水ポンプ, 冷海水ポンプ, 作動流体ポンプ, 真空ポンプの各ポンプ動力が小さくなるためと考えられる. (中岡, 2008)

5・4 総伝熱面積

図 12 に, 総伝熱面積 A_T と温冷海水入口温度差 ($T_{WSI} - T_{CSI}$) との関係を示す. 図より, ハイブリッド OTEC システムに必要な総伝熱面積は, 久米島海域の場合, 2018 年 6 月が $9.0 \times 10^3 \sim 9.8 \times 10^3 \text{ m}^2$, 2019 年 12 月が $14.3 \times 10^3 \sim 15.0 \times 10^3 \text{ m}^2$ となっている. また, 沖ノ島海域では, 2019 年 10 月は $5.6 \times 10^3 \sim 6.0 \times 10^3 \text{ m}^2$ となっている.

これらの結果から, 温冷海水入口温度差が大きいほど, 総伝熱面積は小さくなる.

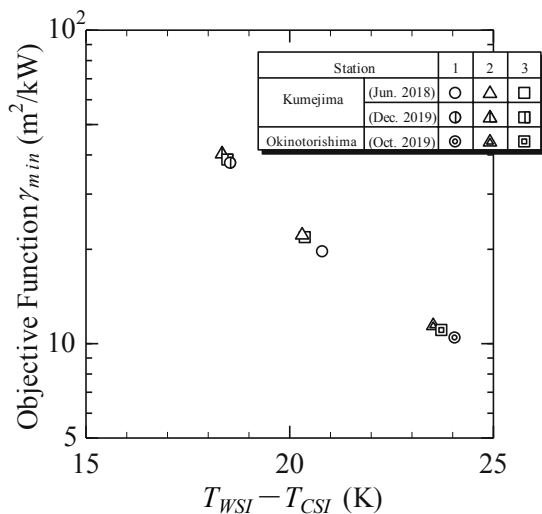


Fig. 10 Objective function.

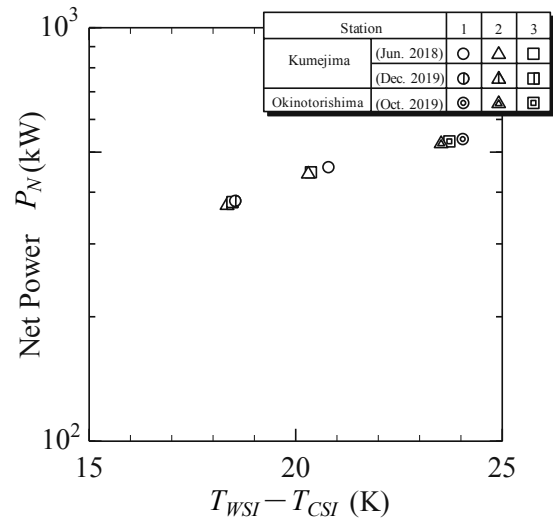


Fig. 11 Net power.

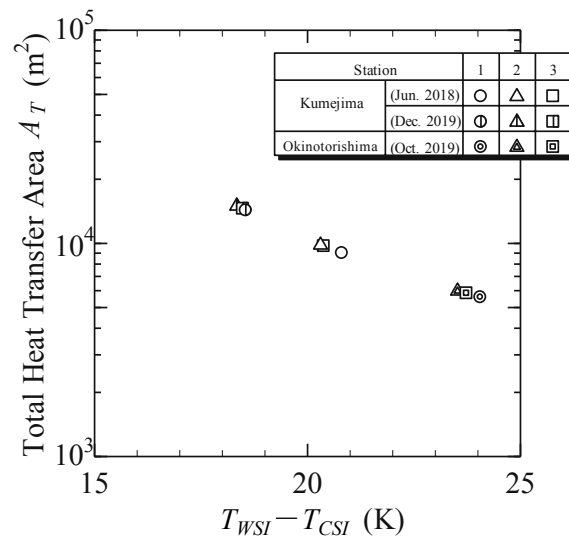


Fig. 12 Total heat transfer area.

6. 結 言

本研究は、水産大学校の練習船耕洋丸・天鷹丸を用いて、久米島海域と沖ノ鳥島海域の海洋調査を行い、その結果を用いてインテグレートハイブリッド OTEC システムの性能解析を行ったものである。以下に結果を示す。

- (1) OTEC に必要な温冷海水入口温度差は 15 °C あれば可能とされており、久米島海域においては、1 月、6 月 12 月、いずれの月も OTEC に必要な温度差がある。また、沖ノ鳥島海域においても、10 月、11 月は OTEC に必要な温度差がある。
- (2) 最小評価関数 γ_{min} は、温冷海水入口温度差 ($T_{WSI} - T_{CSI}$) が大きくなると減少する。
- (3) 久米島海域においては、6 月の温冷海水入口温度差は、12 月に比べて大きい。また、表層海水温の高い 6 月の方が温度差エネルギーのポテンシャルは高い。
- (4) 温冷海水入口温度差が大きいほど、正味発電出力は大きくなる。また、総伝熱面積は小さくなる。
- (5) 熱交換器の総伝熱面積は季節により変動する。特に久米島海域における 2018 年 6 月と 2019 年 12 月を比べると、その大きさは 12 月のほうが 6 月より約 1.5 倍大きくなる。
- (6) OTEC を連続的に稼働するためには、季節ごとの熱源の調査は重要である。特に、温冷海水入口温度差が 15°C 以下の場合においては、他の発電システムとの組み合わせなどの対策が必要となる。

文 献

- 上原春男, 海洋温度差発電読本(復刻版), (株)GEC, p.42, pp.100-101, p.135.
- 上原春男, 海洋温度差発電を用いた新産業創出と国土保全, 海洋温度差エネルギー利用研究会(AOTEC), 1-4(2004).
- 沖縄電力, 久米島における再生可能エネルギー発電設備の連携に関する説明会, www.okiden.co.jp/shared/pdf/whats_new/2014/140529_03.pdf.
- 池上康之・安永健・浦田和也・西村龍馬・鎌野忠・西田哲也, 久米島における海洋温度差発電複合利用のための海洋調査, OTEC, No.21(2016), p.25.
- 植田貴宏・西田哲也・大原順一・田中辰彦・浦啓助・浦田和也・池上康之, 沖ノ鳥島海域における水産資源開発と海洋エネルギー利用のための海洋調査, 水産大学校研究報告, No62(2)(2014) pp.75-83.
- 東京都産業労働局ホームページ, 沖ノ鳥島の概要, <https://www.sangyo-rodo.metro.tokyo.jp/nourin/suisan/>.
- 中笠岩男・藤森英俊・木邑純一, 沖ノ鳥島における気象・海象観測, 海洋科学技術センター試験研究報告(2001), p.149.
- 中岡 勉, 対馬海域の海洋熱エネルギーの有効利用, 日本海水学会, Vol.62, No.6(2008), p.261, p.263.
- 一瀬純弥・中岡勉・西田哲也・植田貴宏・中島大輔・秦一浩・水谷壮太郎・島崎渉・和嶋隆昌・浦田和也・池上康之, 対馬海域における海洋温度差発電設計のための海洋調査, 海洋深層水研究(2007), pp.16-18.