

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

池上 康之^{*1}, 安永 健^{*1}, 浦田 和也^{*1}, 西村 龍馬^{*1}, 鎌野 忠^{*2}, 西田 哲也^{*2}

Oceanic Observation and Investigation for Compound use of OTEC in Kumejima

Yasuyuki IKEGAMI^{*1}, Takeshi YASUNAGA^{*1}, Kazuya URATA^{*1}, Ryuma NISHIMURA^{*1}, Tadano KAMANO^{*2} and Tetsuya NISHIDA^{*2}

^{*1}Institute of Ocean Energy, Saga University
1 Honjo, Saga-shi, Saga, 840-8502, Japan

^{*2}National Fisheries University
2-7-1 Nagatahon, Shimonoseki, Yamaguchi, 759-6595, Japan

Abstract

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) demonstration plant in Okinawa prefecture deep seawater research center (OPDSRC) in Kumejima, Japan has started the operation for 2 years ago by Okinawa prefecture. Where, the maximum 13,000 t/day of the deep ocean water (DOW) is pumped up from a depth of 612m, which is the largest flow rate in Japan. The utilization of DOW has been expanded as one of the biggest industry and employment generation in Kumejima-island after for 10 years of the operation. For further development, the confirmed seawater data such as temperature, salinity and ions...etc. is required as well as the expansion of the seawater intake facilities. However, there are few available seawater sampling data at the coast of Kumejima-island. Moreover, for OTEC, although the biofouling of heat exchangers especially for the evaporator using surface seawater is the one of the critical issue for the performance of the power plant, the heat exchangers in OPDSRC has a 10 years of long operation without cleaning and/or maintenances. Hence, the paper describes about the analysis results of sampled seawater at the coast of OPDSRC for the design of OTEC and for other multi-purpose utilization of DOW with the cooperation of the training ship of National fisheries university "Koyomaru". Furthermore, the sampled surface and deep seawaters drawn at OPDSRC are analyzed to confirm the composition of the Nutrients and the elements concentration.

Key words : Kumejima, OTEC, Deep Ocean Water, CTD, Nutrient

1. 緒 言

海洋の表層海水と海洋深層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海洋温度差発電 (OTEC) は、持続可能な再生可能エネルギーであるため、エネルギー問題に貢献できる発電方法として期待されている。特に、沖縄県久米島では、沖縄県のプロジェクトとして、世界に先駆けて実海水を用いた OTEC の実証研究が 2013 年 6 月から開始し、国内外から多くの見学者が訪れている。久米島は、島の東側海域の海底地形が急激に落ち込み海洋深層水の取水管設置に有利な形状をしているため、OTEC 商用プラント設置の国内での最有力候補地となっており、平成 26 年に内閣府から海洋温度差発電の実証フィールドとして選定されている。また、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いる。ここで、海洋深層水の複合利用とは、OTEC による発電で利用した海水の熱エネルギーや海洋深層水の特性を有効に利用し、海水の淡水化、水素の製造、漁業、農業やその他の事業への利活用を示し、OTEC で発電に利用する莫大な海水を、他の事業分野の資源として有効に利活用することである。取水した資源である海水を最大限有効利用するためには、海洋環境や海水の成分等の状態を把握する必要があり、そのための様々なデータを取得するための海洋調査が必要不可欠である。特に、今回調査を実施した海域の物理データは公表されているものが少なく、栄養塩類や主要元素等のデータは非常に少ない。

原稿受付 2016 年 07 月 29 日

^{*1} 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)

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

E-mail of corresponding author: ikegami@ioes.saga-u.ac.jp

一方, OTEC では比較的小さい温度差を有効利用し, イニシャルコストを削減するために高性能でコンパクトなプレート式熱交換器を使用する必要がある. しかし, シェル&チューブ型の熱交換器に比べて流路断面積が小さく, バイオフィウリングや大型汚損生物の付着による伝熱性能の低下が顕著に表れる. そのため, 汚れの原因となる海水中の微生物や細菌類が多く, 運転中に熱交換器の性能が著しく低下する地域においては, 表層水を通水する流路や熱交換器では防汚対策が必要となる. しかし, 久米島の海水を使用している沖縄県海洋深層水研究所では, 設立以来 10 数年間メンテナンスフリーでの運転を行っており, 表層海水の清浄性が高く実用機設置が有利であることが示唆される. この海水の成分分析や海水中の細菌数を把握することは, 今後の OTEC の熱交換器のバイオフィウリングの検討のための貴重なデータとなる.

そこで, 本調査では, OTEC 複合利用に必要なデータ取得を目的とした海洋調査を久米島東側海域や OTEC 実証プラントにおいて実施し, 得られた CTD データの解析や取水した海水の成分分析, 細菌検査等の結果について報告する.

2. 調査海域及び期間

図 1 に観測を実施した海域を示す. 主な観測点は, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター久米島サテライトの東方海域 (沖縄県海洋深層水研究所の海洋深層水取水管が設置されている場所) の近辺とした. この海域は, 比較的陸地に近い場所で急激に深くなっており, 将来の取水管設置に有利な海底地形である.

観測点を表 1 に示す. 調査は, 2016 年 1 月 13 日に図 1 に示す St.1~St.4 において実施した. 観測点の水深は, 782~1,019 m, 観測範囲は, 北緯 $26^{\circ} 23.00'$ ~ $26^{\circ} 25.89'$, 東経 $126^{\circ} 50.17'$ ~ $126^{\circ} 54.98'$ で行った.

Table. 1 Observation point

St. No.	Latitude	longitude	Depth [m]	Temp. [°C]	Press. [hPa]
1	$26^{\circ} 25.89'$ N	$126^{\circ} 50.17'$ E	929	15.2	1022.5
2	$26^{\circ} 23.87'$ N	$126^{\circ} 51.87'$ E	1,019	15.8	1023.1
3	$26^{\circ} 23.00'$ N	$126^{\circ} 51.94'$ E	908	15.7	1021.2
4	$26^{\circ} 23.17'$ N	$126^{\circ} 54.98'$ E	782	15.6	1020.5

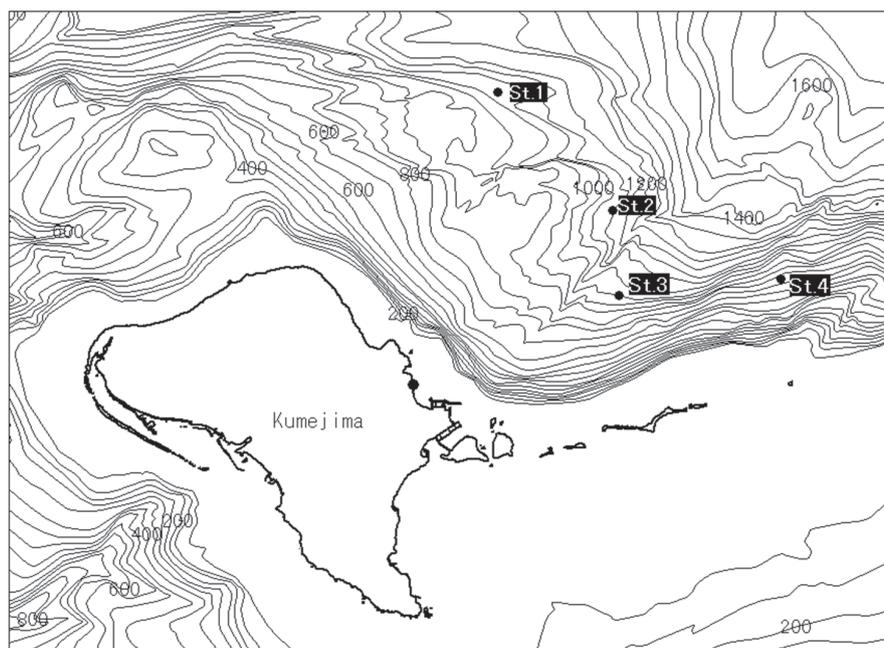


Fig. 1 Observation area

3. 調査項目及び観測方法

調査は水産大学校練習船の耕洋丸を使用した。同船の主な仕様は、87.59 m(長さ)×13.60 m(幅)×8.8 m(深さ)、国際総トン数 2,703 t、航海速度 14.0 knot、定員は合計 109 名（乗組員 42 名、教員 7 名、学生 60 名）である(水産大学ホームページ)。

表 2 に観測項目を示す。観測は、CTD(Sea-Bird Electronics, Inc. SBE 9 Plus)を用いて、水深、水温、塩分、溶存酸素量などをそれぞれの観測点で CTD 用ウインチ (Φ9.53 mm×5,000 m) により海中に投入し、線速 1.0 m/s 以下で投下し、表層から海底に近い位置まで観測し、搭載している多筒採水器 (ニスキンボトル 10 L×12 本) を用いて測定した。表 3 に採水した測定点と測定深度を示す。ここで、測定点は図 1 に示した場所である。

Table 2 Observation item

No.	Item	Unit
1	Pressure (Depth)	db
2	Temperature	°C
3	Conductivity	S/m
4	Dissolved Oxygen	mL/L

Table 3 Sampling depth of observation point

No.	St.1	St.2	St.3	St.4
1	0	0	0	0
2	50	50	50	50
3	100	100	100	100
4	200	200	200	200
5	500	500	500	500
6	800	800	800	752
7	850	850	850	-
8	900	900	868	-
9	-	950	-	-

4. 観測及び分析結果

4・1 各観測点における水温の鉛直分布

図 2(a)~(d)に各測点 (St.1~St.4) における海水温度の鉛直分布を示す。図 2 から、表層で 23.1 °C で、水深 100 m 付近までは各測定点の水温は表層とほぼ同じ値を示しているが、100 m 以深になると急激な低下がみられる。最も水深が深いデータが取得されている図 2(b)では、水深 200 m では 19.1 °C、300 m で 16.4 °C、400 m で 14.6 °C、500 m で 12.3 °C、600 m で 9.4 °C、700 m で 6.9 °C、800 m では約 5.6 °C であり、水深 100 m から 800 m までは直線的な分布である。800 m 以深では温度の低下が緩やかになり、900 m、950 m でそれぞれ 4.7 °C、4.4 °C であった。よって、この測定点での冬の時期 (1 月期) における温度差は、表層と水深 600 m では 13.7°C、800 m で 17.5°C、900 m で 18.4°C であり、冬季の温度差エネルギーの大きさが確認された。また、各 4 つの観測点での水温の鉛直分布は、水深 150 m 付近および 600 m 付近で約 1°C の違いがみられるが、ほぼ同じ傾向であることが分かる。

図 3 に①JODC (2003 年 1 月 17 日, 25° 1'N-126° 50') のデータ (JODC 公開データ)、②2014 年 9 月 2 日~3 日に実施した久米島近海の海洋調査で得られた水温のデータ (浦田他, 2014) ③図 2(a)のデータを比較した水温の分布を示す。久米島周辺海域の夏季 (9 月) の表層の海水温度は、約 29.6 °C であり、今回調査を実施した 1 月と比較すると 6.5 °C の違いがあり、水深 150 m 付近までは異なる傾向がある。150 m 以深の鉛直分布は、水深 200 m~300 m 付近と 600 m~700 m 付近で若干の違い (0.2~1.3 °C) がみられるが、ほぼ同じ値を示しており、海洋

深層水の低温安定性が示されている。また, JODC のデータと比較すると観測時期がほぼ同じであるが, 2003 年と 2016 年のデータでは, 最大約 1.7°C の違い (水深 200 m 付近) があり若干異なる傾向を示している。

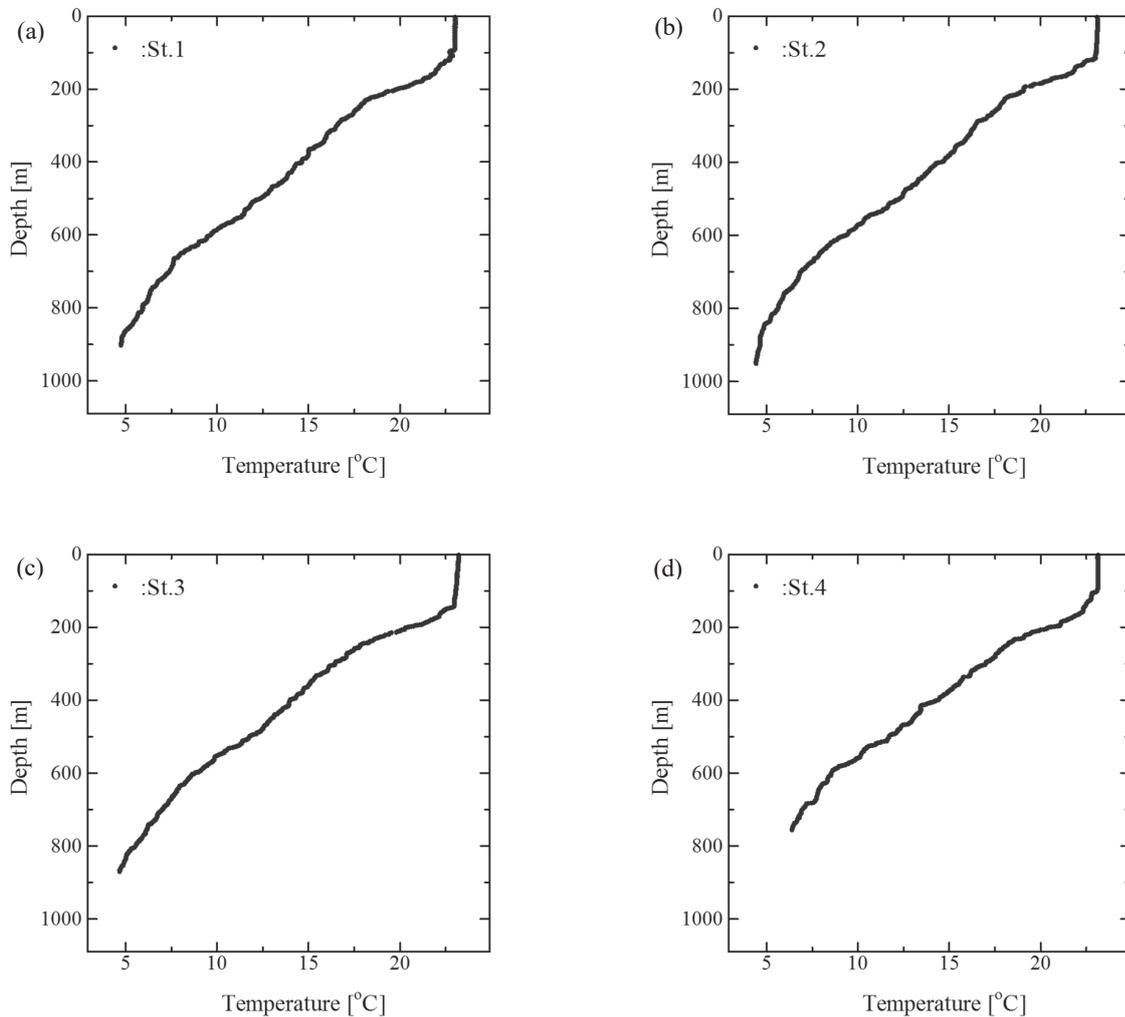


Fig. 2 Vertical seawater temperature profile

4・2 各観測点における塩分の鉛直分布

図 4 に各観測点(St.1~St.4)における塩分の鉛直分布を示す。表層で 34.85 PSU で, 水深 120 m 付近まではほぼ同じ塩分で直線的な鉛直分布を示しているが, 120 m 以深になると若干の増加がみられ水深 160 m 付近で極大値 34.88 PSU という値を示している。水深 160 m から水深 650 m 付近までは低下傾向があり, 200 m で 34.80 PSU, 300 m で 34.65 PSU, 400 m で 34.54 PSU, 500 m で 34.40 PSU, 600 m で 34.28 PSU, 水深約 650 m には 34.26 PSU で極小値を示す。650 m 付近を境に増加傾向に転じ, 700 m で 34.30 PSU, 800 m では 34.34 PSU であり, 900 m では 34.39 PSU (St.1 および St.2), 950 m で 34.41 PSU (St.2) であった。St.1~St.4 までのそれぞれの観測点において塩分の鉛直分布はほぼ同じであることが確認できる。

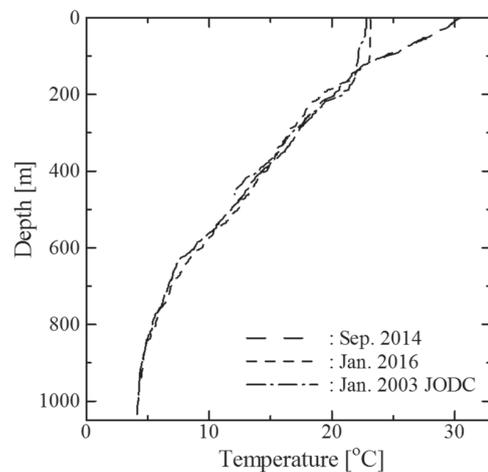


Fig. 3 Vertical seawater temperature profile

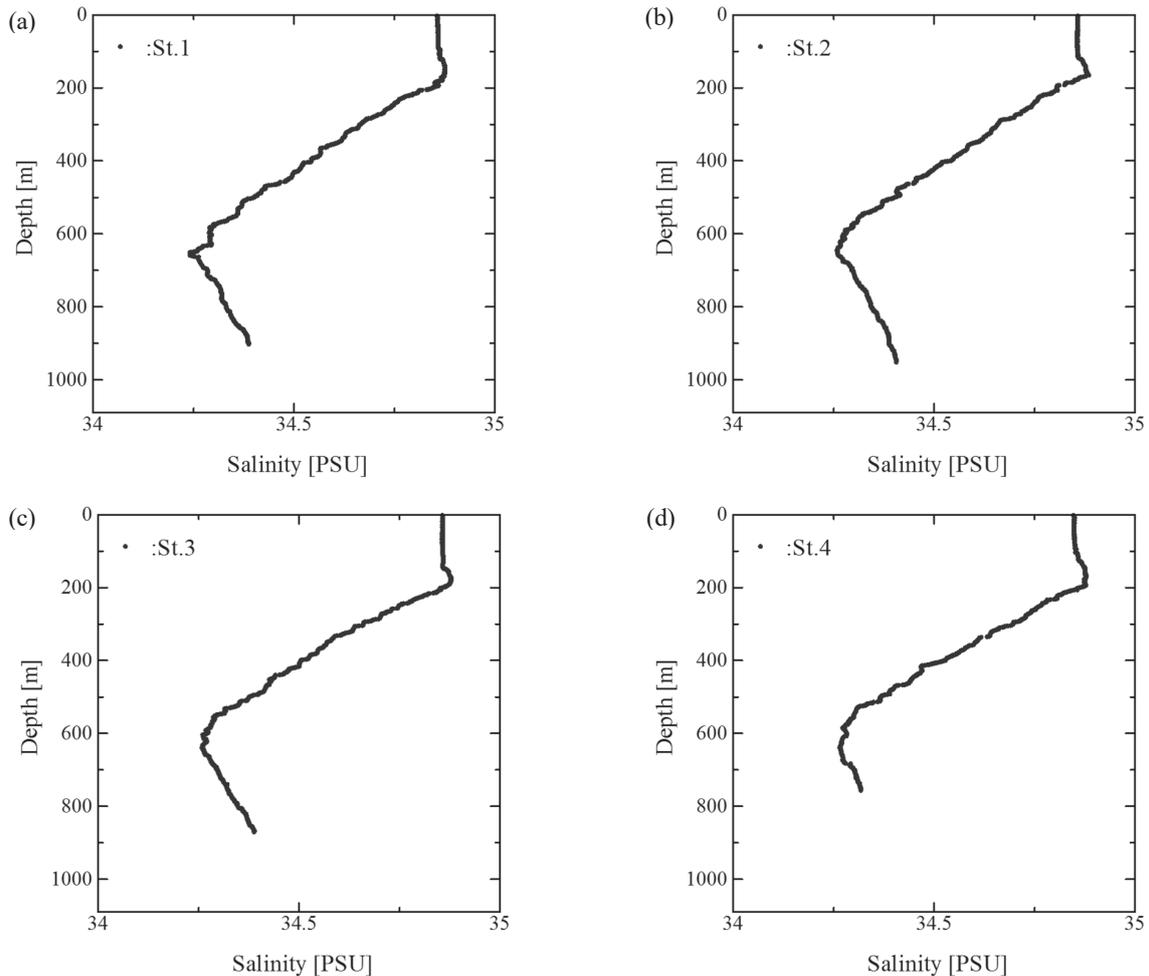


Fig. 4 Vertical seawater salinity profiles (St.1~St.4)

4・3 各観測点における溶存酸素量の鉛直分布

図 5(a)~(d)に各測点(St.1~St.4)における溶存酸素量(Dissolved Oxygen; DO)の鉛直分布を示す。図 5 から、全測定点で、表層から水深 120 m 付近までは 4.5~4.46 mL/L とほぼ同じ DO で直線的な鉛直分布を示している。図 5(b) から、St.2 では、120 m から 180 m までは比較的急激な低下があり 120 m で約 4.5、180 m では約 4.2 mL/L である。180 m から 400 m 付近までは緩やかに低下し、200 m で約 4.2 mL/L、300 m で 4.1 mL/L、400 m で約 3.9 mL/L である。400 m 以深から 800 m では減少率が大きくなり、500 m で 3.5 mL/L、600 m で約 3.0 mL/L、700 m で 2.2 mL/L、800 m では約 1.9 mL/L であり、850 m 以深では若干の低下がみられるが、約 1.7 mL/L と同様な値を示している。また、St.1~St.4 までのそれぞれの観測点において DO の鉛直分布はほぼ同じ傾向であることが確認できる。これらの結果と水温の鉛直分布を比較すると減少の傾向が似通っているため、DO の鉛直分布は水温の影響が大きいことが分かる。

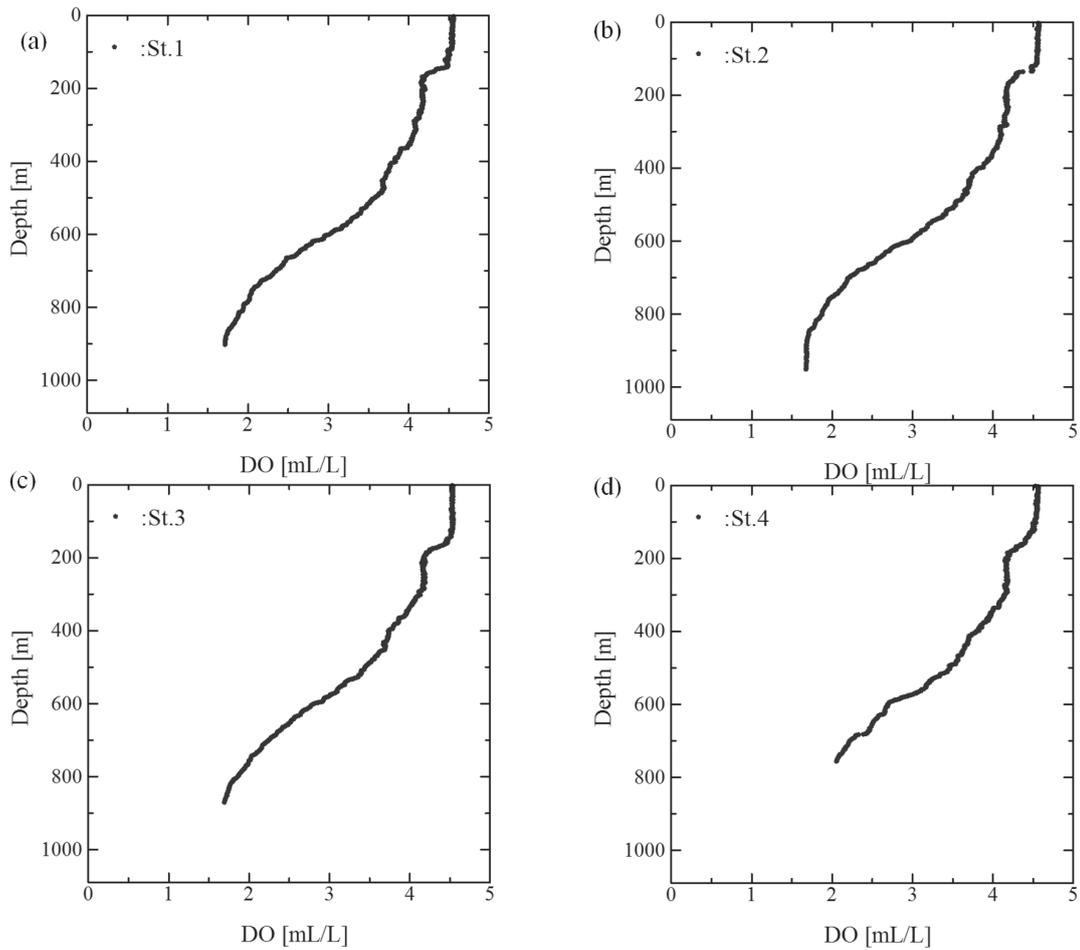


Fig. 5 Vertical DO profiles

4・4 水塊

図6に今回観測を行った久米島の $T-S$ ダイアグラムを示す。図中には、比較のため、これまで観測を行ったパラオ（池上他, 2002）、フィジー（Ikegami et al, 2005）、沖縄北西部（Nakaoka et al, 2010）のデータを併せて示す。

図6から、久米島の水塊は、沖縄北西部の海水と類似した構造を示している。特に水温が $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下では、両者はほぼ一致しており、同じ水塊であることが示唆される（東海大学出版会, 1994）。図6から、久米島の水塊は、南半球のフィジーとは全く異なる水塊の性質であることが確認されるが、北半球のパラオのデータと比較すると水温が約 $16\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、塩分が約 $34.6\sim 34.8\text{ PSU}$ の範囲で一致しており、傾向が似ていることがわかった。

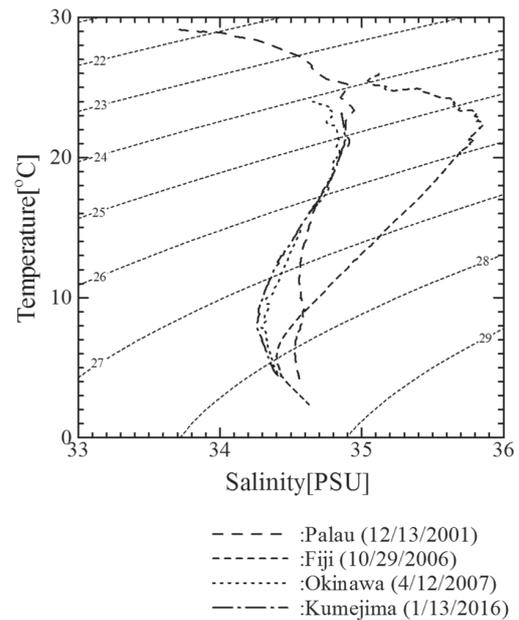


Fig. 6 Comparison of water mass

5. 久米島表層水及び海洋深層水の成分分析

5・1 分析検体及び方法

佐賀大学海洋エネルギー研究センター久米島サテライトでは、隣接する沖縄県海洋温度差発電実証プラントより分水した海水を使用して小型のスプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化装置及び水素製造装置の連続運転やプレート式熱交換器の汚れ試験等を行っている。この表層海水と深層海水を定期的に採水し、栄養塩類や主要元素、従属栄養細菌について分析及び検査を実施した。それぞれの海水の取水深度は、表層水が15 m、深層水が612 mである。

5・2 栄養塩類の分析結果

表4に2015年4月～2016年3月までの表層海水（SOW）と海洋深層水（DOW）の栄養塩類の分析結果を示す。なお、実験装置や取水配管等の補修及びメンテナンスにより実験装置が稼働していない時期は採水を実施していない。

ケイ酸塩（ SiO_4^{4-} ）の分析結果は、SOWでは0～7.2 μM の範囲で推移し、本データの平均は2.5 μM であった。DOWでは、10月と11月に60 μM 以上の比較的高い値を示しており、43～63 μM の範囲で推移し、平均約50 μM で、SOWの約20倍の濃度であった。

リン酸塩（ PO_4^{3-} ）の分析結果より、SOWは、11月は最大値0.8 μM を示しているが、その他の月は0～0.5 μM の範囲で推移し、本データの平均は0.2 μM となり、ほぼ0に近い値であった。一方、DOWでは、1.7～2.1 μM の範囲で推移し、平均1.9 μM とSOWの約10倍の濃度であった。

硝酸塩（ $\text{NO}^3 + \text{NO}^2$ ）の分析結果は、SOWは、8月は4.5 μM と他の月と比較して高い値を示しているが、8月以外では0～0.3 μM の範囲で推移し、8月以外の平均値はほぼ0であった。一方、DOWでは21.6～49.3 μM の範囲で推移し、平均26.6 μM で表層水と比較すると高い濃度であることが確認できる。

以上の結果と4・5節の久米島近海の1月の海洋調査のデータと比較すると、ケイ酸塩が約50 μM 、リン酸塩約1.9 μM でほぼ一致している。硝酸塩は海洋調査のデータ約23 μM より若干高い値であるが、5月の49.3 μM を除外すればほぼ同じ値を示している。また、久米島において取水している表層水及び深層水の栄養塩類の濃度は安定していることが確認できた。

Table 4 Analysis of Nutrients

Date	DOW [μM]			SOW [μM]		
	SiO_4^{4-}	PO_4^{3-}	$\text{NO}^3 + \text{NO}^2$	SiO_4^{4-}	PO_4^{3-}	$\text{NO}^3 + \text{NO}^2$
2015/4/8	43.3	1.7	22.2	1.1	0.0	0.0
2015/4/23	49.1	2.1	21.6	0.0	0.2	0.1
2015/5/26	46.6	1.8	49.3	1.5	0.1	0.2
2015/8/3	48.9	2.1	27.2	3.2	0.3	4.5
2015/9/24	44.8	1.9	25.1	3.2	0.1	0.3
2015/10/19	60.9	2.0	24.2	2.6	0.5	0.0
2015/11/27	62.7	1.9	25.0	7.2	0.8	0.0
2015/12/14	50.4	1.9	24.3	2.1	0.1	0.0
2016/2/18	48.9	1.8	24.4	2.2	0.1	0.0
2016/3/8	50.1	1.9	25.2	2.4	0.2	0.0
2016/3/29	49.6	1.9	24.1	2.1	0.1	0.1

5・3 主要元素類の分析結果

表5に2015年4月～2016年3月までの分析結果を示す。表6から、ナトリウム(Na)は、9,485～12,944 mg/Lで平均10,765 mg/L、カリウム(K)は、352～475 mg/Lで平均389 mg/L、マグネシウム(Mg)は、1,111～1,534 mg/Lで平均1,233 mg/L、カルシウム(Ca)は、392～496 mg/Lで平均455 mg/L、塩素(Cl)は、17,223～21,085 mg/Lで平均19,370 mg/L、臭素(Br)は、38～99 mg/Lで平均70 mg/L、硫黄(SO₄)は、2,316～2,843 mg/Lで平均2,594 mg/Lであり、「海水中に含まれる主な元素とその平均濃度(野崎義行, 1996)」とほぼ一致している。即ち、主要元素は安定した化学系で存在し、保存性が高いため、水平的及び鉛直的にほぼ均一な濃度であるので、栄養塩類とは異なり、水深によって違いは見られない。また、表6から、これらの分析結果により主要元素類は年間を通じて濃度が安定していることが確認された。

Table 5 Analysis of Elements

Date	DOW						
	Elements Concentration [mg/L]						
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Br	SO ₄ ²⁻
2015/4/8	11015.7	391.9	1242.6	476.9	19989.6	67.5	2641.4
2015/4/23	11031.8	390.0	1239.0	476.6	20083.1	68.4	2679.0
2015/5/26	10635.1	376.9	1191.7	458.1	19440.3	68.0	2586.1
2015/8/3	10504.0	378.0	1171.0	475.0	18810.0	62.0	2516.0
2015/9/24	10014.0	360.0	1113.0	471.0	18067.0	65.0	2420.0
2015/10/19	10898.1	388.3	1229.9	496.6	18621.3	62.9	2507.2
2015/11/27	10711.5	400.9	1260.2	452.4	19592.9	99.8	2638.0
2015/12/14	10811.6	398.3	1271.7	448.6	19859.4	66.9	2711.2
2016/2/18	10879.8	397.4	1274.7	418.2	19963.1	77.8	2687.3
2016/3/8	10777.1	394.2	1264.1	410.8	19764.9	71.8	2666.6
2016/3/29	10421.1	379.1	1222.4	392.5	18773.9	74.3	2505.6

Date	SOW						
	Elements Concentration [mg/L]						
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Br	SO ₄ ²⁻
2015/4/8	10484.7	372.7	1183.6	452.1	18875.8	63.6	2518.6
2015/4/23	11203.9	397.1	1255.8	478.9	20422.8	69.6	2706.0
2015/5/26	10717.3	379.1	1201.0	459.3	19812.8	71.2	2636.3
2015/8/3	10607.0	382.0	1185.0	474.0	18980.0	52.0	2522.0
2015/9/24	10249.0	366.0	1143.0	467.0	18468.0	74.0	2469.0
2015/10/19	10085.2	359.5	1130.5	449.8	17278.3	38.1	2329.1
2015/11/27	11075.6	414.7	1305.4	464.3	20172.4	82.4	2694.1
2015/12/14	9485.2	352.8	1111.7	405.8	17223.5	51.3	2316.1
2016/2/18	11418.0	417.9	1343.4	433.0	21085.8	84.5	2823.9
2016/3/8	10813.0	398.8	1266.7	472.4	19948.8	76.3	2667.8
2016/3/29	12994.6	475.5	1534.9	491.4	20919.9	83.0	2843.4

5・4 従属栄養細菌の分析結果

表6に2015年4月～2016年3月までの細菌検査結果を示す。表7から、DOWは、 $3.90 \times 10^1 \sim 7.15 \times 10^3$ CFU/mLまでの範囲で推移しており、平均値は 9.40×10^2 CFU/mLである。SOWは、 $4.80 \times 10^1 \sim 8.48 \times 10^2$ CFU/mLまでの範囲で推移しており、平均値は 2.01×10^2 CFU/mLである。DOWは、清浄性が高く細菌数等が少ないことが知られているが、今回の検査結果ではSOWの細菌数が若干低い値を示している。これは、今後継続して検査を実施し原因を究明する必要がある。しかし、久米島のSOW及びDOWは、伊万里湾等の海水(通常 $10^3 \sim 10^4$ CFU/mL、池上他、2008)と比較すると清浄性が高いことが確認された。

Table 6 SS and Heterotrophic Bacteria

Date	DOW [μ M]		SOW [μ M]	
	Suspended Solid [g/L]	Heterotrophic Bacteria [CFU/mL]	Suspended Solid [g/L]	Heterotrophic Bacteria [CFU/mL]
2015/4/8	0.021	2.84×10^2	0.017	9.56×10^1
2015/4/23	0.025	4.60×10^2	0.037	1.43×10^2
2015/5/26	0.016	7.66×10^2	0.016	1.43×10^2
2015/8/3	0.008	6.18×10^2	0.009	2.84×10^2
2015/9/24	0.009	3.90×10^1	0.008	6.73×10^1
2015/10/19	0.004	4.57×10^1	0.004	2.21×10^2
2015/11/27	0.046	2.70×10^2	0.003	7.35×10^1
2015/12/14	0.002	2.12×10^2	0.008	2.10×10^2
2016/2/18	0.006	7.15×10^3	0.004	8.48×10^2
2016/3/8	0.017	3.60×10^2	0.010	4.80×10^1

6. 結 言

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及び久米島において使用されている表層水と海洋深層水の分析を継続して行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 水温の鉛直分布より、今回観測を実施した冬季(1月)における温度差は、表層と水深800mでは17.5℃であるため、久米島近海の温度差エネルギーのポテンシャルが高いことが確認された。
また、これまでの観測結果と比較すると夏季(9月)では表層水で約6.5℃の違いがあるが、水深200m以深においてはほぼ同じ傾向を示しており、海洋深層水の低温安定性が示された。
- (2) T-Sダイアグラムより、久米島の水塊は沖縄北西部とほぼ同じ構造であり、南半球のフィジーとは異なることがわかる。
- (3) 栄養塩類の分析結果より、ケイ酸塩は表層から水深200mまではほぼ0であるが、水深950mでは120 μ Mで水深200mの約100倍の濃度である。リン酸塩は水深900m付近が最大となり、200mの約8倍である。硝酸塩は表層から100mまではほぼ0であるが、水深200mから急激に増加傾向があり、950mでは35 μ Mで水深100mの30倍以上の濃度を示している。
- (4) 久米島サテライトで使用している表層水と深層水を定期的に採集し細菌検査を実施した結果、両者ともに細菌数が少ないため清浄性が高く、発電プラントなどの連続運転の際に問題となる汚れ防止対策が簡素化できる可能性が示された。

文 献

水産大学ホームページ ; http://www.fish-u.ac.jp/b_rensyusen/kouyoumaru/top.html

日本海洋データセンター(JODC)ホームページ ; http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html

池上康之 他, 第6回海洋深層水利用研究会全国大会, 海洋深層水 2002 久米島大会講演要旨集, p. 27

Yasuyuki Ikegami, et al, Oceanic Observation and Investigation for Utilization of Ocean Energy in the Fiji, Proc. 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., (2005), pp.557-562

Tsutomu Nakaoka, et al, Oceanic Observation and Utilization of Ocean Energy in Okinawa, Proc. of RENEWABLE ENERGY, (2010)

浦田和也 他, 海洋深層水利用学会講演論文集(2014), 第15巻12号, p.95

池上康之 他, 第78回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集(2008), Vol. 78th, p. 97-100

東海大学出版会, 海水の化学と工業(1994), pp.96-97

中島敏光, 海洋深層水の利用(2002), p.34.