

久米島沖における海洋温度差発電と 海洋深層水複合利用のための海洋調査

Oceanic Observation and Investigation for Ocean Thermal Energy Conversion and
Deep Ocean Water Use in Coast of Kemejima Island

浦田和也¹・安永 健¹・池上康之¹・小見聡史²・富賀見清彦²・田中辰彦²・鎌野 忠²・
石田雅照²・大原順一²・西田哲也²・中岡 勉¹

Kazuya URATA, Takeshi YASUNAGA, Yasuyuki IKEGAMI, Satoshi OMI, Kiyohiko FUKAMI,
Tatsuhiko TANAKA, Tadashi KAMANO, Masateru ISHIDA, Junichi OHARA,
Tetsuya NISHIDA and Tsutomu NAKAOKA

Abstract

In 2013, Okinawa prefecture had launched the ocean thermal energy conversion (OTEC) demonstration plant and been operated for about six years in Okinawa prefectural government deep seawater research center (OPDSRC), Japan. The variety of high-develop business utilizing the deep ocean water (DOW) advances in Kumejima island by applying in the aquaculture, agriculture, bath, drinking water and cosmetic products. And, eventually, the DOW industry becomes the biggest community in terms of economical impact in the island. Furthermore, an expected increase of DOW intake capacity for expansion of DOW usage and for introduction of OTEC. In general, the function of DOW is the annual low temperature stability, the clearness, and inorganic nutrient-rich; however, the vertical profile data of the nutrient is limited in the coast of Kumejima. In this paper, therefore, the authors measured the sea water temperature, salinity, and DO by CTD, and sampled in each depth in four locations of the Kumejima east side. The sampled seawater were analyzed the concentration of inorganic nutrients. This research clarifies the vertical profiles of the basic data that is necessary for the application and clarification of the potential of OTEC and DOW multiple utilization.

Key Words: CTD, Deep Ocean Water (DOW), Kumejima, Nutrient, OTEC

要 旨

沖縄県海洋深層水研究所では2013年から、実海水を用いた海洋温度差発電 (OTEC) の実証研究が開始され、6年間の連続運転が行われた。久米島では、エビや海ぶどうの養殖などの水産業、農業、浴用、飲料水や化粧品の製造などに海洋深層水が利用され、島内の大きな産業へとつながっている。今後、海洋深層水の取水量増加による関連産業の拡大やOTECの導入が検討されている。一般的に、海洋深層水は、低温安定性、清浄性、富栄養性などの特性が知られているが、久米島東側海域における海洋の栄養塩や主要元素などの鉛直分布の基礎データは殆どない。そのため、本稿では、久米島東側においてCTD観測を実施し、水温、塩分、溶存酸素量の鉛直分布を計測した。それらのデータを整理し、既往のデータとの比較と共に久米島近海におけるOTECのポテンシャル、海洋深層水複合利用に必要な栄養塩類の基礎データを明らかにした。

キーワード: 栄養塩, 海洋温度差発電, 海洋深層水, 久米島, CTD

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

² 水産大学校 (〒759-6595 山口県下関市永田本町2丁目7-1)

1. 緒 言

沖縄県久米島は、沖縄本島の西方100 kmにあり、島の東側海域の海底地形が急激に落ち込んでいることから、海洋深層水の取水管設置に有利な形状を有している。さらに、陸上養殖施設の設置や農業などに有利な土地が隣接している(ダニエル(2019))。この海底地形を活用し、水深612 mから、最大13,000 m³/hの深層水を取水可能な沖縄県海洋深層水研究所が2000年に開設した。この海洋深層水取水量は現在でも国内最大である(DOWASホームページ)。2013年4月には、実海水を用いた海洋温度差発電(OTEC)実証試験設備が同研究所内に建設され、6年間の長期的運転において、高い稼働率や島嶼国のベース電源と成り得る安定した発電電力などのOTECの基本的特性が検証され、更にはMW級への商業スケールへ適用可能な技術が確認された。

OTECは、海洋の表層と深層の温度差を利用し熱エネルギーを電気エネルギーに変換する発電システムである。久米島のOTEC実証設備は、低沸点の作動流体であるHFC134aを表層海水で蒸発させ、その蒸気がタービンを回して発電し、凝縮器で蒸気を液体に戻して循環させる閉ループが採用されている(海洋エネルギー技術研究開発 海洋エネルギー発電システム実証研究「海洋温度差発電」成果報告書(2017))。OTECでは、表層海水と海洋深層水の温度差(約20℃程度)を利用して発電することから、従来の火力・原子力発電が利用する温度差に比して極端に小さい(上原, 2007)。そのため発電電力に対して必要な熱エネルギー量が原理的に大きく、大規模な表層海水および海洋深層水を利用する必要があることから、この海洋深層水を他の産業で利用する複合利用の形態が検討されている。

海洋深層水は、低温安定性、清浄性、富栄養性などの特性が知られており、現在では多くの産業に利用されている(藤田・高橋, 2006)。久米島においては、車エビや海ぶどうの養殖、農業、飲料水、化粧品、浴用などの産業に海洋深層水が利用されており、関連事業の年間売上は約25億、300人以上の雇用に繋がっている。これらの産業の更なる拡大のた

めには、海洋深層水の取水量拡大が必要であり、約100,000 m³/h程度の海洋深層水の取水によって、1 MWのOTECによる再生エネルギーとしての活用した後、海洋深層水を別の産業に利用する複合的な多段利用の形態が久米島モデルとして提唱されている(久米島海洋深層水複合利用基本調査報告書(2011))(離島における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査報告書(2017))。

これらの複合的に用いる資源としての海水を最大限有効活用するためには、海洋環境や海水の成分等のデータが必要となる。海洋の物理データや成分分析データは、これまで様々な海域で海洋調査が実施され解析されている(蒲生(2015))(Amakawa *et al.* (2019))。一方、久米島近海において海洋深層水の栄養塩は、JODC(日本海洋データセンターホームページ)など公開されているデータはほとんどないことから、海洋の沿岸における調査や海水のサンプリングによる海水成分の調査が不可欠である。そこで、本調査では、OTECや海洋深層水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分析等の結果について報告する。また、これらのデータからOTECの発電に必要な海洋深層水の水量および栄養塩による海洋の肥沃化効果を明らかにする。

2. 調査海域及び調査期間

図1に久米島近海における海洋調査を実施した観

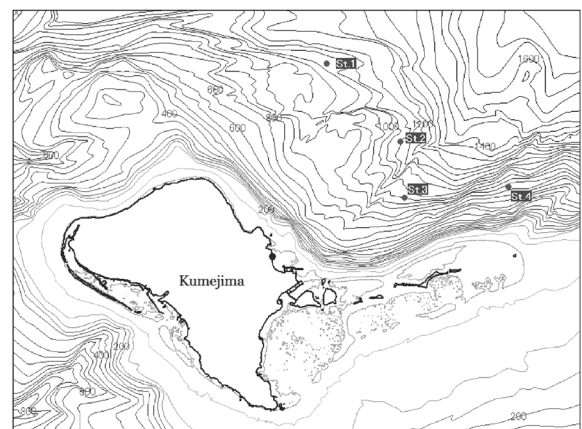


図1 観測サイト

表1 観測点

St.	Latitude	longitude	Depth [m]
1	26°25.89'N	126°50.17'E	929
2	26°23.87'N	126°51.87'E	1,019
3	26°23.00'N	126°51.94'E	908
4	26°23.17'N	126°54.98'E	782

表2 観測項目

No.	Item	Unit
1	Depth	m
2	Temperature	℃
3	Conductivity	S/m
4	Dissolved Oxygen	mL/L

表3 採水点及び深度

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	—	—

測海域を示す。これらの観測点は、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。海洋調査は、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°23.00'～26°25.89'、東経126°50.17'～126°54.98'で行った。

3. 観測方法及び観測項目

海洋調査に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、航海速力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（水産大学校ホームページ）。

表2に観測項目を示す。観測は、CTD (Sea-Bird

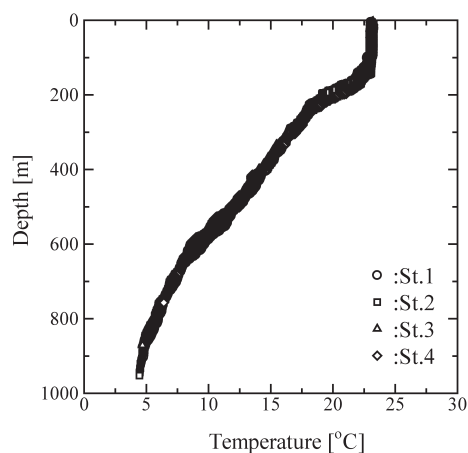


図2 水温の鉛直分布

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計測した。CTD用ウインチ (φ9.53 mm×5,000 m) を用いてCTDを海中に投入し、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）を用いてそれぞれの水深において採水を実施した。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。

4. 観測結果

4.1 各観測点における水温の鉛直分布

図2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℃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St.2においては、水深200 mから800 mまで、100 m毎にそれぞれ19.1℃、16.4℃、14.6℃、12.3℃、9.4℃、6.9℃、5.6℃である。水深100 mから800 mまでは直線的な分布であり、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℃、4.4℃であった。従って、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、800 m、900 mではそれぞれ13.7℃、17.5℃、18.4℃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①2014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(浦田ら, 2014), ②図2のSt.2のデータ, ③JODC(2003年1月17日, 25°1'N-126°50')のデータ(JODC公開データ), ④2001年12月パラオ近海の観測データ, ⑤2006年フィジー海域の観測データ(Ikegami *et al.* (2005))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, 30.4°Cであり, 今回調査を実施した1月と比較すると約7°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, ほぼ同じ値となっており, 海洋深層水の年間を通した低温安定性が示されている。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。また, ④のパラオのデータと比較すると, 水深100 mから800 m付近まで全く異なる鉛直分布を示しており, 水深200 mではおよそ10°C程度異なり, パラオの方が低水温である。一方で⑤フィジーの水温の鉛直分布は, パラオと比較すると久米島の分布に近い値を示している。温度分布は, OTECの熱源として重要である。OTECの場合は, 低温度, 小温度差を利用するので, 詳細な観測データを使用し, 最適なOTECシステムを構築する必要がある。これ

まで, OTECシステムについては, 最適化設計手法を構築し, オフデザインや年間の発電量の試算が行われている(上原・中岡, 1984; 池上・上原, 1989; 實原ら, 1994)。この最適設計では, 正味出力当たりの熱交換器の総伝熱面積を評価関数として用いており, この評価関数は熱源温度の約2～3乗に比例することが示されている。そのため, 一般的に温度差が15°C以下になると, 正味出力当たりの総伝熱面積が過大となり, 高コストである。図3から冬季におけるこの海域の温度差は約15°C以上あるので, OTECの設置場所として好適な海域である。

4.2 各観測点における塩分の鉛直分布

塩分濃度は, 発電プラントや淡水化装置等に用いる熱交換器の設計を行う場合, 輸送物性値(密度, 粘性, 動粘性係数等)に関係する重要なパラメーターである。

図4に各測点(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, 300 m, 400 m, 500 m, 600 mでそれぞれ34.80 PSU, 34.65 PSU, 34.54 PSU, 34.40 PSU, 34.28 PSUであり, 水深約650 mで極小値34.26 PSUであった。650 m付近を境に増加傾向に転じ, 700 m, 800 m, 900 mでそれ

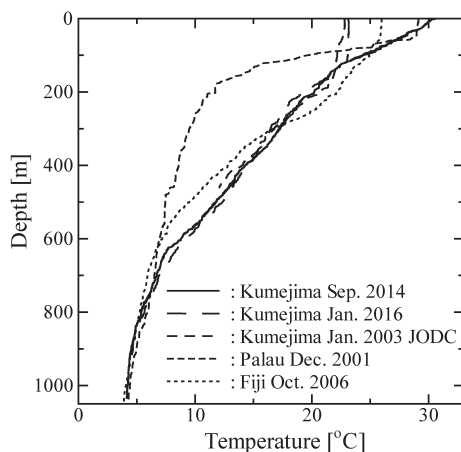


図3 他の地点の水温データとの比較

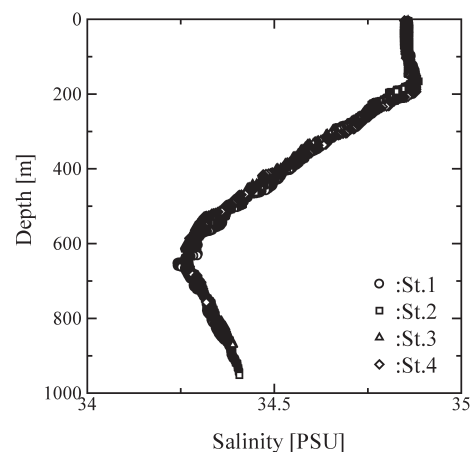


図4 塩分の鉛直分布

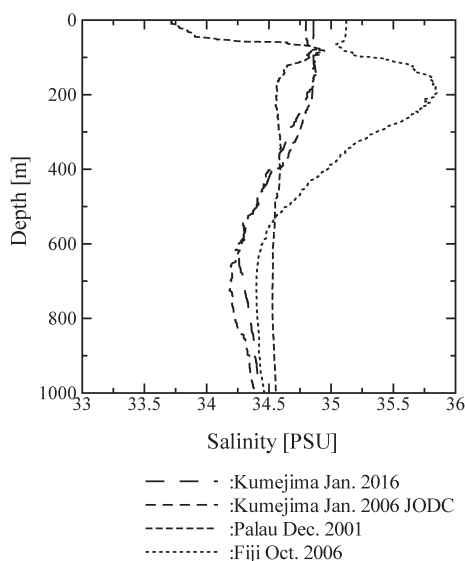


図5 他の地点の塩分データとの比較

ぞれ34.30 PSU, 34.34 PSU, 34.39 PSUとなり、St.2では950 mで34.41 PSUであった。図4から、4つの観測点において塩分の鉛直分布はほぼ同じであった。

図5に①図4のSt.2のデータ、②JODC (2006年1月20日, 26°27'N-126°38')のデータ (JODC公開データ)、③2001年12月パラオ近海の観測データ、④、2006年フィジー海域の観測データ (Ikegami *et al.* (2005))を比較した塩分の鉛直分布を示す。今回観測を行った久米島周辺海域の1月のデータとJODCの2006年1月のデータを比較すると表層から水深600 mまではほぼ一致しており、水深600 m以深においても0.1~0.15 PSUの違いがあるが、同様の傾向で分布している。③のパラオのデータは表層で約33.7 PSUであるが、久米島の表層で約34.9 PSUと異なり、水深400 mまでにおいて久米島とは異なる鉛直分布が確認できる。④のフィジーのデータと比較すると、水深100 m付近までは約0.2 PSUの違いはあるがほぼ同じ傾向を示し、水深100 mから500 m付近まではフィジーの方が高い塩分濃度で分布している。500 m以深においては、①から④のデータは約0.2 PSUの範囲で同様の鉛直分布を示している。

4.3 各観測点における溶存酸素の鉛直分布

溶存酸素は、オープンサイクルOTEC、ハイブリッドサイクルOTECなどのフラッシュ室内での蒸発の際、不凝縮ガスとしてシステム内に滞留するガス量

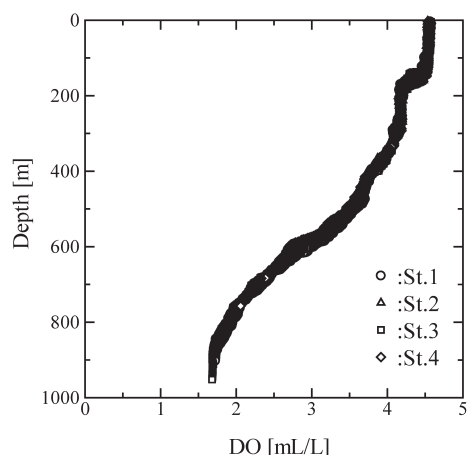


図6 溶存酸素の鉛直分布

の指標であり、真空圧に大きく影響する。

図6に各測点 (St.1~St.4) における溶存酸素 (Dissolved Oxygen; DO) の鉛直分布を示す。図6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とほぼ同じ濃度で直線的な鉛直分布を示している。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。

図7に①図6のSt.2のデータ、②JODC (2006年1月20日, 26°27'N-126°38')のデータ (JODC公開データ)、③2001年12月パラオ近海の観測データ、④、2006年フィジー海域の観測データ (Ikegami *et al.* (2005))を比較した塩分の鉛直分布を示す。今回観測を行った久米島周辺海域のデータとJODCの2006年1月のデータを比較すると水深約200 mから600 mまでは0.5 mL/L程度の違いがある地点があるが、ほぼ同様の鉛直分布を示している。③のパラオ

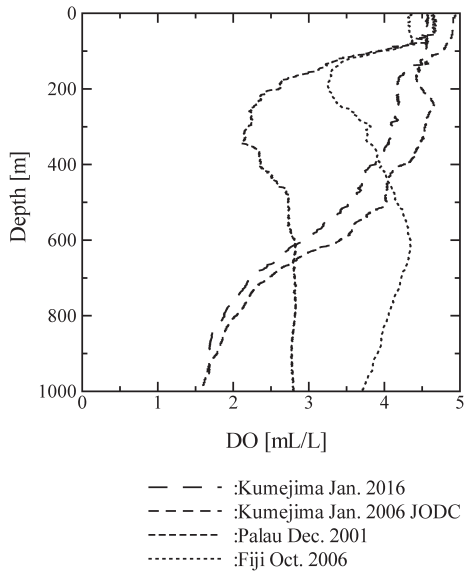


図7 他の地点のDOデータとの比較

のデータと比較すると表層から深層まで異なる傾向を示し、水深300 m付近ではパラオが2.2 mL/Lであるが、久米島が4.4 mL/Lと高い値を示している。しかし、水深約600 m以深では久米島の方が低い値で分布している。④のフィジーのデータと比較すると、水深約400 m付近までは久米島の方が高い値を示しているが、水深400 m以深においてはフィジーの方が高い濃度で分布している。水深800 mでは約2.2 mL/Lの違いが確認できる。

4.4 水塊

図8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(池上ら, 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8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℃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℃~20℃、塩分が約34.6~34.8 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。

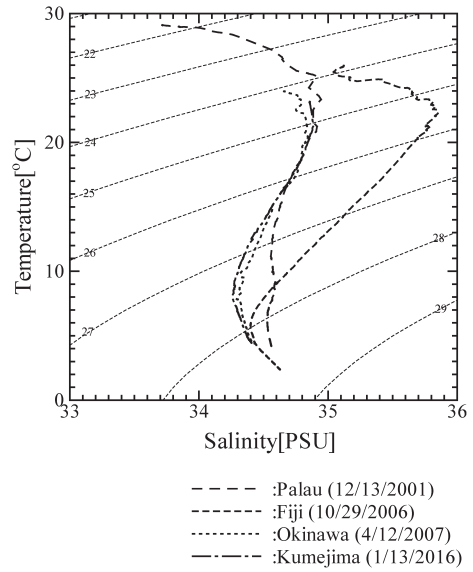


図8 水塊

5. OTECに必要な海洋深層水流量

CTD観測データから久米島沿岸のOTECに必要な深層水流量を推算する。安永ら(安永ら(2018))(Yasunaga *et al.* (2020, 2021))によると、OTECでのエクセルギー Ex [kW] は表層海水と低温の海水の温度 T_w [K], T_c [K] および温海水と冷海水の質量流量 [kg/s] と定圧比熱 [kJ/(kg·K)] の積である熱容量 [kW/K] から算出できる。両海水の熱容量が等しいと仮定し、その熱容量流量を C [kW/K] とすると、海水流量当たりの Ex は次式となる。

$$Ex = C(\sqrt{T_w} - \sqrt{T_c})^2 \quad (1)$$

OTECの発電量 W [kW] を、 Ex の30%と仮定すると、 W に対する必要な1時間当たりの冷海水の海水量 $M_{c,req}$ [t/h] は、式(1)から次式が得られる。

$$M_{c,req} = \frac{3W}{(\sqrt{T_w} - \sqrt{T_c})^2} \quad (2)$$

ここで、冷海水の比熱を簡易的に4.0 [kJ/(kg·K)] と仮定した。

図9は、図2のSt.2の温度分布より表層から20 mの表層温度を基準として、式(2)から各水深での正味出力に必要な流量を算出した結果を示す。図9から、水深800 m以深においては、深層水の鉛直分布

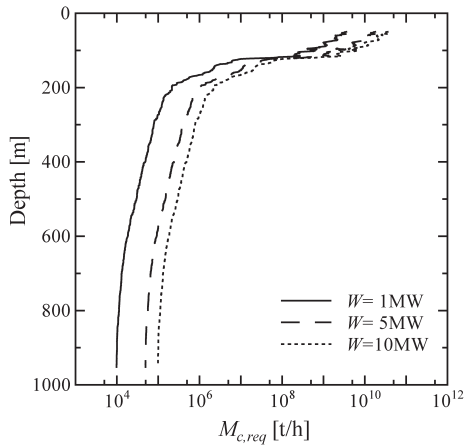


図9 発電量に必要な深層水流量

はあまり変化がないので、 $M_{c,req}$ はほぼ一定である。1 MWの正味出力の場合、水深約900 mで $M_{c,req}$ は、約 2.4×10^5 [t/day]となる。

6. 栄養塩類の分析結果

久米島における海洋深層水複合利用として、海洋肥沃化などに必要となる栄養塩（ケイ酸塩、リン酸塩、硝酸塩）について調べた。

採水した海水を、ケイ酸塩は、モリブデンイエロー法、リン酸塩はモリブデンプルー法、硝酸塩は、銅-カドミウム還元・ナフチルエチレンジアミン吸光法により分析を行った。

図10にケイ酸塩の鉛直分布を示す。表層から水深200 mまではほぼ0に近い値を示しており、表層(0~1.95 μM)、水深50 m (0~1.82 μM)、水深100 m (0~1.46 μM)、水深200 m (0.93~2.39 μM)である。200~500 mまでは比較的緩やかに増加し、水深500 mでは平均26.8 μM で水深200 mの平均値の約16倍を示している。500 mから800 mまでは急激な増加傾向があり、水深750 mで84.8 μM 、800 mでは平均93.9 μM と大きな値を示している。800 m以深になると緩やかに増加し、水深850 mで平均113.2 μM 、水深900 m付近では約116.5 μM 、950 mで約120 μM で水深200 mの約100倍の濃度である。図中には、北大西洋(27°N, 53.5°W)と北太平洋(30°N, 170°W)の代表的な地点における栄養塩の鉛直分布(堀部, 1994)を示す。これらのデータを比較すると水深

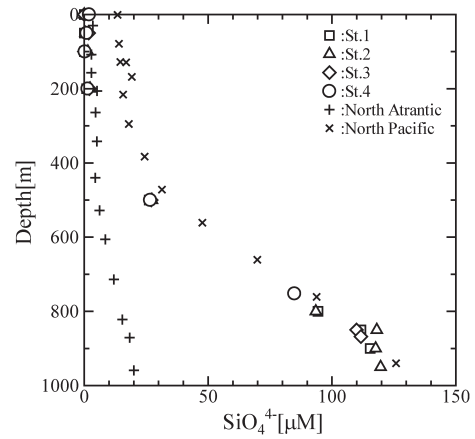


図10 ケイ酸塩の鉛直分布

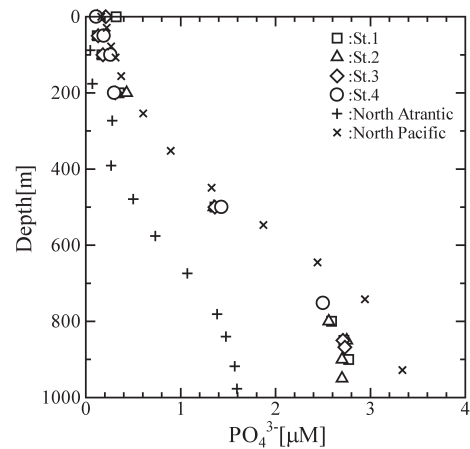


図11 リン酸塩の鉛直分布

200 m地点までは、北大西洋に近い値を示しているが、水深500 m以深においては北太平洋とほぼ同じ値を示しており、ケイ酸塩の濃度が比較的高いことが分かる。

図11にリン酸塩の鉛直分布を示す。表層(0.11~0.3 μM)、水深50 m (0.12~0.19 μM)、水深100 m (0.17~0.26 μM)で比較的低い値を示しているが、水深200 m (0.30~0.43 μM)から増加している。水深200~800 mまで直線的に増加し、水深500 mでは平均1.38 μM で表層の約7倍の値を示している。800 mで平均2.58 μM 、850 mで2.73 μM 、水深900 mでは平均2.94、水深950 m (St.2) で2.70 μM であり、900 m付近が最大であることが示唆される。北大西洋と北太平洋の値と比較すると、表層から水深500 mまでは北太平洋とほぼ同じ値で分布しているが、それ以深になると若干低い値で推移し、約750 m付近では、北太平洋より15%程度低くなる。しかし、500 m以深にお

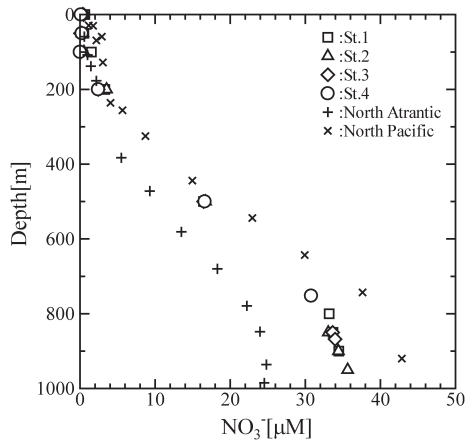


図12 硝酸塩の鉛直分布

いては、北大西洋のおよそ2倍の濃度で分布している。

図12に硝酸塩の鉛直分布を示す。ケイ酸塩の鉛直分布と同様に表層から水深100 m付近まではほぼ0に近い値を示しており、表層(0.13~0.65 μM)、水深50 m(0.07~0.52 μM)、水深100 m(0.11~1.52 μM)である。水深200 mでは、2.42~3.54 μM で増加傾向がある。水深200 m~800 mまでは直線的に増加し、水深500 mでは平均15.56 μM 、800 mで平均28.98 μM 、850 mで33.46 μM である。水深800 m以深になると緩やかに増加し、900 mでは平均34.28 μM 、950 mで35.64 μM であるため、この付近に最大値があると考えられる。また、濃度分布は表層から水深200 mまでは、北大西洋と北太平洋の値とほぼ同じ値で分布しており、200 m以深においては中間の濃度で推移している。

7. 海洋の肥沃化効果について

井関は、海洋深層水取水量と海洋の肥沃化効果(生物生産量の推定値)との関係を以下の式で示している(井関和夫, 2000)。これは、二次生産量について、生産量 P [生産量トン/年]と深層水汲み上げ量 m [トン/秒]との関係を示している。(硝酸塩濃度は、30 μM と仮定している。)

$$P = 2.8 \times 10^2 \cdot m^{1.0} \quad (3)$$

ここでは、今回調査を実施した久米島海域(水深800 m, 硝酸塩濃度約30 μM)で海洋肥沃化の効果について試算する。5章より、久米島にOTECを設置し、正味出力1 MWの場合、海洋深層水の取水量は約 2.4×10^5 [t/day] (2.78 [トン/秒])となる。この取水量より、久米島海域の二次生産量(イワシ類)を見積ると、約778 [生産量トン/年]となる。この量は、久米島町2018年の年間総漁獲量602トン(e-statホームページ)を上回る規模である。このことより、久米島においてOTECの多目的利用として海洋の肥沃化を行った場合の有効性が示唆される。

8. 結 言

久米島における海洋深層水複合利用のための海洋調査を行った結果、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800 mでは17.5°C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°Cの違いがあるが、水深200 m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ダイヤグラムより、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) 海洋深層水の必要流量を試算した結果、正味出力1 MWの場合、水深約900 mの海水では、 2.4×10^5 [t/day]であった。
- (4) 栄養塩類の分析結果より、ケイ酸塩は表層から水深200 mまではほぼ0であるが、水深950 mでは120 μM で水深200 mの約100倍の濃度である。リン酸塩は水深900 m付近が最大となり、200 mの約8倍である。硝酸塩は表層から100 mまではほぼ0であるが、水深200 mから急激に増加傾向があり、950 mでは35 μM で水深100 mの30倍以上の濃度を示している。
- (5) 井関の式より、久米島海域におけるOTEC複

合利用による海洋の肥沃化効果の有効性が示唆された。

参考文献

- Amakawa, H., Y. Tsai-Luen, H. Tazoe, H. Obata, T. Gamo, Y. Sano, S. Chuan-Chou, and K. Suzuki (2019) Neodymium Concentration and Isotopic Composition Distributions in the Southwestern Indian Ocean and the Indian Sector of the Southern Ocean, *Chemical Geology*, 511, pp. 190–203.
- e-stat (政府統計の総合窓口) ホームページ ; e-stat.go.jp
- 藤田大介・高橋正征 (2006) 海洋深層水利用学, 成山堂書店, 209 pp.
- 蒲生俊敬 (2015) 海洋地球科学, 講談社, 262 pp.
- 堀部純男 (1994) 海水の科学と工業, 東海大学出版会, pp. 92–138.
- 池上康之・浦田和也・福宮健司・野田信雄・Gregorio Decherong (2002) パラオ近海における海洋深層水利用のための海洋調査, 海洋深層水2002久米島大会講演要旨集, p. 27.
- 池上康之・上原春男 (1989) 海洋温度差発電システムのオフデザイン条件での性能解析, 日本機械学会論文集, 第511号B編, pp. 920–927.
- Ikegami Y., K. Urata, A. Bando, T. Wajima, K. Ohto, T. Nakaoka, K. Tabuchi and T. Kamano (2005), Oceanic Observation and Investigation for Utilization of Ocean Energy in the Fiji, Proc. 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., pp. 557–562
- 井関和夫 (2000) 海洋深層水による洋上肥沃化, 月刊海洋, 号外No. 22, pp. 174–175.
- 實原定幸・池上康之・上原春男 (1994) 海洋温度差発電システムの設計条件の最適化, 日本機械学会論文集, 60(570B), pp. 291–298.
- 海洋深層水利用学会 (DOWAS) ホームページ ; <http://www.dowas.net>
- 緑の分権改革推進事業 (2011) 久米島海洋深層水複合利用基本調査報告書, 190 pp.
- 内閣府沖縄総合事務局経済産業部 (2017) 平成29年度離島地域における海洋深層水を利用した地域活性化可能性調査, 64 pp.
- 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
- Nakaoka T., K. Urata and Y. Ikegami (2010), Oceanic Observation and Utilization of Ocean Energy in Okinawa, Proc. of RENEWABLE ENERGY, O-Oc-4-4.
- 中島敏光 (2002) 海洋深層水の利用, 緑書房, p. 34.
- NEDO (2017) 海洋エネルギー技術研究開発海洋エネルギー発電システム実証研究「海洋温度差発電」成果報告書, 291 pp.
- 水産大学校 (NFU) ホームページ ; http://www.fish-u.ac.jp/b_rensyusen/kouyoumaru/top.html
- トーマス・H・ダニエル (2019) Deep Ocean Research, 19(3), pp. 205–216.
- 上原春男, 海洋温度差発電読本 (復刻版) (2007), 株式会社GEC, pp. 7–17
- 上原春男・中岡勉 (1984), プレート式熱交換器を用いた海洋温度差発電システムの研究, 日本機械学会論文集, 第456号B編, pp. 1955–1962.
- 浦田和也・永江壽光・廣智恵・池上康之 (2014), 久米島における海洋深層水複合利用に関する調査, 海洋深層水利用学会講演論文集, 15(12), p. 95.
- 安永健・森崎敬史・池上康之 (2018), OTECの有効熱エネルギーに関する研究, 日本機械学会論文集, 84(859), p. 398.
- Yasunaga, T. and Y. Ikegami, (2020) Finite-Time Thermodynamic Model for Evaluating Heat Engines in Ocean Thermal Energy Conversion, *Entropy*, 22 (2), 211.
- Yasunaga, T., K. Fontaine and Y. Ikegami, (2021) Performance evaluation concept in ocean thermal energy conversion towards standardization and intelligent design, *Energies*, 14 (8), 2336.
- (2021年6月22日受付 ; 2021年8月22日受理)