

久米島海洋深層水を用いた浸水時の 筋・循環動態に及ぼす影響

Effects of Graded Immersion Using Kume Island Deep Ocean Water
on Human Musclicle Circulation

須藤 明治¹・角田 直也¹・高里 久三²・平良 朝幸²・大道 敦³・八木 良訓⁴
Akiharu SUDO, Naoya TSUNODA, Kyuzo TAKASATO, Choko TAIRA, Atsushi OMICHI
and Yoshinori YAGI

Abstract

Kume Island deep ocean water has a higher specific gravity than tap water or surface ocean water and therefore is expected to produce possible effects by higher water pressure. In this study we observed the circulation of the right vastus medialis muscle with a laser tissue blood-oxygen monitor and measured blood pressure when subjects were immersed to the xiphoid process in the Kume Island deep ocean water at 34 °C. Ten males and 5 females served as subjects. Measurements were made with the subjects in each of 5 conditions, that is in a standing, sitting, and lying supine on the ground, in standing position in tap water and in the Kume Island deep ocean water. The specific gravity of tap water and Kume Island deep ocean water were 1.00 g/cm³ and 1.03 g/cm³, respectively when measured using a gravimeter (YAGAMI) when measured.

An equilibration period was allowed for each subject, and measurements were taken only after heart rate stabilized (± 1) for 30 sec. Blood pressure standing in the Kume Island deep ocean water (SBP; 113.54 ± 13.45 /DBP; 65.31 ± 12.65 mmHg) was significantly lower than that sitting on the ground (127.23 ± 12.85 /81.38 ± 10.44 mmHg). The total hemoglobin (HbT) levels in the vastus medialis muscle at right might reflect the variation in venous return with water pressure or posture. Since no significant difference was found between the blood pressure in lying supine on the ground and in standing in the Kume Island deep ocean water, and the musculature circulations were also similar, the water pressure was likely to lie within safety range.

Key Words: Kume Island deep ocean water, immersion, muscle circulation, blood pressure

要 旨

久米島で採取している海洋深層水は、水道水や海洋表層水と比べて比重が大きく、人体に及ぼす水圧の影響が大きいと予想される。そこで、今回はこの深層水と水道水を用い、34 °Cの水温及び剣状突起水位での大腿部の筋循環動態の観察と血圧の測定を行った。

被検者は、男性10名・女性5名(16歳~55歳:平均28.1歳)の計15名で、右側の大腿内側広筋に経皮的レーザー組織血液酸素モニターのセンサーを取り付け、深層水および水道水に浸水した。その結果、血圧値において、陸上座位時の 127.23 ± 12.85 / 81.38 ± 10.44 (mmHg)と比較し

¹ 国士舘大学体育学部 (〒206-8515 東京都多摩市永山7-3-1)

² 久米島町役場海洋深層水係 (〒901-3193 沖縄県島尻郡久米島町字比嘉2870番地)

³ 株式会社ポイントピュール (〒901-3134 沖縄県島尻郡久米島町字具志川660-1-1)

⁴ 株式会社ミクプランニング (〒102-0083 東京都千代田区麴町5-7 TBR4F)

て深層水直立時が $113.54 \pm 13.45 / 65.31 \pm 12.65$ (mmHg) と統計上有意に低下していることが判明した。そして、筋循環動態の観察より、この血圧の低下は、深層水の水圧により静脈の帰環流が増加し、心拍出量が増加したことにより血管の末梢抵抗が低下したことが要因ではないかと推察された。

キーワード：久米島海洋深層水，浸水，筋循環動態，血圧

1. はじめに

近年、水中運動は、浮力による関節への負担軽減などから、高度肥満者や四肢の機能低下が認められる高齢者に対するリハビリテーションやトレーニングとして広く行われている（赤嶺ら，1991）。特に、水圧の影響により、静脈の還流が増大し、1回心拍出量が増加することにより、圧・伸展受容器がこれを感じ、心房性Na利尿ペプチドの分泌が促進、腎の輸入細動脈からはレニン分泌が抑制、中枢神経系からはバゾプレッシンの分泌が抑制され、腎臓では循環血漿量の低下を促すため尿量の増加及び尿中Na排泄の増加をもたらすことも明らかにされている（Larsen *et al*, 1994）（Anderson *et al*, 1986）。特に、レニン分泌の抑制作用は、強力な血管収縮作用を有するアンギオテンシンIIや副腎皮質からのアルドステロンの分泌を抑制することから、血管が拡張傾向にあることを裏付けている。これらのことから、特に30～36℃の温度領域における浸水では安静時心拍数が陸上立位時より減少することがわかっている（Anderson *et al*, 1986；木村ら，2001；須藤ら，2001；加藤ら，2002）。そして、著者らにより剣状突起水位・直立姿勢での大腿部の筋血流動態の観察から、水圧の影響を受け静脈の環流が増大し、一回心拍出量が増加することにより心拍数が減少することが確認されている（須藤ら，2001）。特に、久米島で採取している海洋深層水（久米島海洋深層水）は、水道水や海洋表層水と比べて比重が大きく、この水圧が人体に影響を及ぼすものと予想される。そこで、この久米島海洋深層水と水道水を用い、34℃の水温及び剣状突起水位での大腿部の筋・循環動態の観察と血圧の測定を行い、久米島海洋深層水を用いた水中運動環境の安全性とその特異性について検討した。

2. 対象及び方法

被検者は、男性10名・女性5名（16歳～55歳：平均28.0歳）の計15名であった。各被検者の身長、体重、皮脂厚の計測を実施した（皮下脂肪計；ハーペンデン，OMEGAWAVE）。体脂肪率は、上腕背部と肩胛骨下部の皮脂厚の合計から長嶺らの式を用いて身体密度を算出し、Brozekの式に当てはめ推定した（長嶺，1974）。本研究で用いた海洋深層水は、沖縄県久米島町の沖縄県海洋深層水研究所より分水したものを使用した。そして、水温を34℃一定に保つために温め、常時、温度を観察した（温度計；LT-8A，GramCorporation）。水位は、各被検者の身長差を考慮し、剣状突起レベルの水位に設定した。また、比重の計測は、YAGAMIの標準比重計を用いた。

被検者には、陸上立位、陸上座位、陸上背臥位、水道水での直立（以下、水道水直立）、久米島海洋深層水での直立（以下、深層水直立）の5つの姿勢・環境における安静時の測定を行った。右側大腿の内側広筋に経皮的レーザー組織血液酸素モニター（BOM-L1TR，OMEGAWAVE）のセンサーを取り付け、組織内酸素飽和度（StO₂）、組織ヘモグロビン量（HbT）、組織脱酸素化ヘモグロビン量（HbD）、組織酸素化ヘモグロビン量（HbO₂）を測定した。なお、レーザー組織血液酸素モニターは、送受光間距離30mm一定のセンサーを使用し、内側広筋の筋組織の最も厚い部位の皮膚上に貼付け1秒ごとに測定した。本研究におけるセンサー部位は、外側顆から大転子までの距離を100%とした場合、近位90%の位置であった。そして、パルオキシメーターハンディ100（木村医科機械株式会社）を左第二指に装着し、動脈酸素飽和度（SPO₂）及び心拍数（HR）を測定開始から終了まで測定した。更に、

陸上座位、陸上背臥位、水道水直立、深層水直立の
 血圧値の測定も実施した。特に、血圧の測定位置は、
 陸上座位、水道水直立、深層水直立において心臓の
 位置とし、陸上背臥位では体と平衡の位置とした
 (HEM-609; OMRON)。レーザー組織血液酸素モ
 ニターは、同一姿勢において3分間の安静状態に
 おいて連続的に測定し、各姿勢・環境における安静
 値は、30秒間の心拍数の安定(±1)を目安に30
 秒間の平均値とした。また、パルオキシメーターハ
 ンディ100の測定値及び血圧値は、各姿勢・環境
 における終了直後の最も心拍数が安定した時に測定
 した。尚、各被験者には、十分なインフォームドコ
 ンセントを実施し、実験の意義、内容、危険性を十
 分に説明した上で、実験参加の承諾を得た。結果の
 処理は、得られた各変数の値は特に記載のない場合
 を除き、平均値±標準偏差で示した。各変数の2
 群間の平均値の差の検定には対応のあるt検定を用
 いた。統計処理の結果は危険率5%未満をもって
 有意とした。

3. 結 果

3.1 実験環境と被検者の特徴

実験に用いられた水道水及び海洋深層水の水温の
 平均値は、 34.0 ± 0.5 °Cであり、陸上の温度の平均
 値は、 26.4 ± 0.5 °Cであった(温度計; LT-8A,
 GramCorporation)。また、測定場所と時期は、
 久米島町の株式会社ポイントピュール社の屋根のあ
 る野外にて9月に実施した。水位は、各被検者の
 身長差を考慮し、剣状突起レベルの水位に設定した
 結果、男性の水位の平均値が 115.8 ± 3.3 cm、女性
 の水位の平均値が 114.6 ± 3.4 cmであり、男・女
 の水位の平均値は 115.4 ± 3.4 cmであった。従っ
 て、レーザー組織血液酸素モニターのセンサー貼付
 け位置の水位は、男性が 55.0 ± 5.6 cm、女性が
 51.4 ± 4.0 cmであり、男・女の平均値は、 $53.7 \pm$
 5.2 cmであった。比重は、水道水 1.00 g/cm³、海
 洋深層水 1.03 g/cm³であった。また、各姿勢・環
 境での測定値を計測するにあたり、各姿勢・環境へ
 の適応能力に個人差が認められたため、30秒間の
 心拍数の安定(±1)を目安に各姿勢・環境の時間

Table. 1 Physical characteristics of subjects

	male (n=10)	female (n=5)	total (n=15)
Age (years)	29.8±16.5	24.8±2.9	28.0±13.3
Height (cm)	169.8±7.2	158.4±5.7	165.7±8.6
Weight (kg)	67.7±11.2	53.6±4.3	62.7±11.5
%Fat (%)	15.6±2.4	23.1±2.7	18.3±4.4

(Values are means±S.D.)

を定めた。その結果、測定所要時間の各被検者にお
 ける時間は、陸上立位(測定開始1分30秒~3分
 30秒)、陸上座位(2分50秒~4分10秒)、陸上
 背臥位(4分秒~6分30秒)、水道水直立(6分~
 10分)、深層水直立(12分~14分)の間で行われ
 た。

被検者の身体的特徴においては、男性の身長が
 169.8 ± 7.2 cm、女性が 158.4 ± 5.7 cm、男性の体
 重が 67.7 ± 11.2 kg、女性が 53.6 ± 4.3 kgであつた。
 また、上腕背部と肩胛骨下部の皮脂厚の合計から算
 出した体脂肪率(%Fat)は、男性が 15.6 ± 2.4 %、
 女性が 23.1 ± 2.7 %であつた(Tbale. 1)。

3.2 心拍数の変動

各姿勢・環境における心拍数の変動において、陸
 上立位 84.8 ± 11.3 (拍/分)、陸上座位 77.1 ± 11.3
 (拍/分)、陸上背臥位 71.4 ± 11.9 (拍/分)、水道水
 直立 67.7 ± 9.4 (拍/分)、深層水直立 67.1 ± 9.7
 (拍/分)であつた。陸上で最も低値を示したのは
 陸上背臥位であり、陸上立位及び陸上座位と比較し
 て統計上有意に低値であつた($p < 0.01$)。また、
 深層水直立は、水道水直立及陸上背臥位と比較して
 統計上有意に低値であつた($p < 0.05$) (Fig. 1)。

3.3 筋組織内酸素飽和度の変動

各姿勢・環境における筋組織内酸素飽和度の違い
 を観察するため、心拍数の変動の陸上背臥位が陸上
 時において最も低値を示したことから、この陸上背
 臥位時の値を100とした時の相対値で示した。

組織脱酸素化ヘモグロビン量(HbD)の変動は、
 陸上背臥位の値を100とした場合、陸上立位 143.7
 ± 53.0 、陸上座位 129.8 ± 46.8 、水道水直立 104.5

ISSN 1345-8477

海洋深層水研究

DEEP OCEAN WATER RESEARCH



第4卷 第2号
2003年12月

海洋深層水利用研究会

Japan Association of Deep Ocean Water Applications

海洋深層水研究

第4巻第2号 2003年12月

目次

原著論文

「室戸海洋深層水」中の細菌種の分析……………矢田 修一・大場 雅行・榎本 恵一 47

フィジー海域の海洋温度差発電のための海洋調査及び再生エネルギーの推定

……………中岡 勉・西田 哲也・一瀬 純弥・長友 洪太・水谷壮太郎・巽 重夫

松下 稔・T. Pickering・池上 康之・上原 春男 57

深度 321 m から揚水した富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度の時間変動

……………松永 明信・黒川 弘子・小善 圭一・高柳 信孝・大戸 幹也

豊田 孝義・中島 敏光 67

総説

海洋深層水 (DOW) を用いた海域肥沃化……………高橋 正征・池谷 透 73

CONTENTS

Original Articles

Analysis of Bacterial Species in the Muroto Deep Seawater

.....S. Yada, M. Ohba and K. Enomoto 47

Oceanographic observations and an estimate of the renewable energy for ocean thermal energy conversion in the coast of the Fiji island

.....T. Nakaoka, T. Nishida, J. Ichinose, K. Nagatomo, S. Mizutani, S. Tatsumi,
M. Matushita, T. Pickering, Y. Ikegami and H. Uehara 57

Temporal Changes on Nitrate Concentrations in Deep Seawater Pumped up at 321 m Depth in Toyama Bay, Japan Sea

.....A. Matsunaga, H. Kurokawa, K. Shozen, N. Takayanagi, M. Ohto, T. Toyota
and T. Nakashima 67

Review

Ocean fertilization using deep ocean water (DOW)M. M. Takahashi and T. Ikeya 73

「室戸海洋深層水」中の細菌種の実験

Analysis of Bacterial Species in the Muroto Deep Seawater

矢田 修一¹・大場 雅行²・榎本 恵一¹

Shuichi YADA, Masayuki OHBA and Keiichi ENOMOTO

Abstract

Eighty-five strains of marine bacteria were isolated from the Muroto deep seawater at a depth of 320 m off the coast of Cape Muroto, Kochi Prefecture, Japan. The bacteria were analyzed based on the sequences of the 16S rRNA gene. Seventy-five strains were identified as 12 genera; 29 strains to the genus of *Vibrio*, 16 to *Pseudoalteromonas*, 9 to *Shewanella*, 6 to *Alteromonas*, 4 to *Marinobacter*, 3 to *Erythrobacter*, 2 to *Tenacibaculum*, 2 to *Dietzia* and 1 strain each to the genera of *Bacillus*, *Halomonas*, *Idiomarina* and *Photobacterium*. Some of these strains were closely related to known bacteria including psychrotrophs, barophilic bacteria and bacteria which decompose hydrocarbons. Some other strains produced pigments reported to have physiological activities. On the other hand, the remaining 10 unidentified strains contained novel bacteria whose DNA sequences showed low homology with those of the already identified bacteria. Thus, the Muroto deep seawater has been demonstrated to be an important source for investigations of unknown, yet potentially useful, bacteria.

Key Words: deep seawater, bacterial species, 16S rRNA gene

要 旨

「室戸海洋深層水」中の細菌種を、分離した細菌の 16S rRNA 遺伝子の塩基配列に基づいて分析した。分離した 85 株のうち 75 株は、*Vibrio* 属 29 株、*Pseudoalteromonas* 属 16 株、*Shewanella* 属 9 株、*Alteromonas* 属 6 株、*Marinobacter* 属 4 株、*Erythrobacter* 属 3 株、*Dietzia* 属 2 株、*Tenacibaculum* 属 2 株、*Bacillus* 属 1 株、*Halomonas* 属 1 株、*Idiomarina* 属 1 株、*Photobacterium* 属 1 株、計 12 属に分類された。その中には、既知の低温細菌、深海細菌、石油分解細菌に近縁と考えられる細菌や、生理活性を持つと報告されている色素を産生する細菌が見出された。属を決定できなかった 10 株には、その塩基配列が既知の細菌のものと低い相同性しか示さない、未報告と考えられる細菌が含まれていた。

キーワード: 海洋深層水、細菌種、16S rRNA 遺伝子

1. はじめに

近年、海洋深層水（以下、深層水と略す）は、その特徴である低温性、豊富な無機栄養塩類、清浄性

を利用して、養殖や藻類の培養、食料品、化粧品、食用塩などの原料として広く利用されている。このように深層水は、低温性などの物理的特性やその成分を多様な目的に利用できる再生型資源と認められ

¹高知工科大学（〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185）

²三菱化学生命科学研究所（〒194-8511 東京都町田市南大谷 11 号）

¹Kochi University of Technology

²Mitsubishi Kagaku Institute of Life Sciences

るようになった(中島, 2002). 一方, ある特定の地域や海域に生息する生物群は, それ全体が生物資源または遺伝子資源とみなされ, その中から有用生物や有用遺伝子を探索することが盛んに行われるようになってきた(内藤, 2002). 深層水は数 100 m 以上の水深から取水されるため, 表層の海水とは異なる特徴的な生物資源を含んでいると予想される. それにもかかわらず, その生物相についての研究は未だ十分ではなく, 深層水中の生物資源や遺伝子資源の活用は大きく立ち遅れているのが現状である. したがって深層水中の主要な遺伝子資源である細菌種を解明することは, 有用細菌や有用遺伝子の探索と利用にとって重要な意義を持つと考えられる. そこで我々は, 「室戸海洋深層水」中の細菌種を把握するため, 1999 年から 2002 年にかけて「室戸海洋深層水」中から 85 株の細菌を分離し, 遺伝子解析に基づく細菌の分類を試みたので報告する.

2. 材料と方法

2.1 「室戸海洋深層水」中からの細菌の分離

深層水の採取は, 高知県海洋深層水研究所の取水設備を用い, 1999 年から 2002 年にかけて行った. 室戸岬沖合約 2 km, 水深 320 m の取水口より取水管を経て送られてくる海水を, 研究所のポンプピット内において直接採水した. 深層水の水温は 11.6 ~ 13.6 °C (平均 12.5 °C) であった. 試料海水は, 保冷しながら輸送し, 当日中に細菌分離操作を行った. 細菌の分離は, 深層水を PPES-II 平板寒天培地 (Taga, 1968) に直接塗布するか, 深層水を濾過したメンブレンフィルター (ミリポア, 孔径 0.45 μm) を平板培地に密着させ, 20 °C で培養することによって行った. コロニー数は培養開始後 5 ~ 6 日目で最大に達した. 増殖したコロニーを採取し, 新たな平板培地上で画線培養し, 得られた単一のコロニーを研究に用いた. また, それぞれの細菌株は -80 °C で保存した.

2.2 16S rRNA 遺伝子の塩基配列決定

深層水中から分離した細菌よりゲノム DNA を抽

出・精製し, 16S rRNA 遺伝子両端付近の塩基配列に相補的なプライマーを用いて, 16S rRNA 遺伝子を PCR により増幅した. 用いたプライマーは, *Escherichia coli* 16S rRNA 遺伝子のポジション 8 ~ 27 に相当するフォワードプライマー (5'-agag tttgatcctggctcag-3') とポジション 1542 ~ 1522 に相当するリバースプライマー (5'-aaggaggtgatcagccgca-3') である (平石, 2001). また, 反応には TaKaRa Ex Taq (タカラバイオ) を用いた. 塩基配列決定のための反応は, *E. coli* 16S rRNA 遺伝子のポジション 821 ~ 803 に相当するリバースプライマー r2L (5'-catcgtttacggcgtggac-3') (平石, 2001; Hiraishi, 1992) と, Cy5.5 dye Terminator Kit (Amersham Biosciences) を用いて行った. また, 塩基配列の決定には DNA シーケンサー Gene Rapid (Amersham Biosciences) を用い, 約 300 塩基の配列を決定した.

2.3 相同性検索と属の同定

局所的に高い相同性を持つ塩基配列を検索する BLAST 法 (Altschul *et al.*, 1990) を用いて, 決定した塩基配列とデータベース中の既知の塩基配列との相同性を調べた. 塩基配列データベースとして GenBank を用いた. データベース登録配列と 100 % の相同性を示した株は, 暫定的に登録細菌と同一種とした. また, 結果で述べる通り, 対象とする細菌と 95% 以上の相同性を示す細菌がデータベース中に存在する場合のみ, その細菌と同属とした.

2.4 細菌が産生する色素の抽出と分光測定

色素産生細菌を PPES-II 液体培地に植菌し, 20 °C において 7 ~ 10 日間静置培養した. 遠心分離による集菌後, エタノールを用いて菌体より色素を抽出した. ロータリーエバポレーターを用いて抽出液を減圧乾固し, 再び色素をエタノールに溶解した. 色素の可視スペクトルは Beckman DU-640 分光光度計で測定した. *Pseudoalteromonas luteoviolacea* が産生する青紫色素 violacein, 及び *Pseudoalteromonas denitrificans* が産生する赤色素 prodigiosin を菌体より抽出し, 比較のために用いた. P.

luteoviolacea (IAM 14710 株) と *P. denitrificans* (IAM 14544 株) は、東京大学分子細胞生物学研究所細胞・機能高分子総合センター IAM カルチャーコレクションより分与された。

3. 結 果

1999 年から 2002 年にかけて「室戸海洋深層水」中より 85 株の細菌を分離し、16S rRNA 遺伝子の部分塩基配列に基づいて細菌の分類を行った。

16S rRNA 遺伝子の中央部では末端部に比べて安定したプライマーとの相補的結合を期待できるため、塩基配列の決定には、16S rRNA 遺伝子の中央部付近に相補的なプライマーを用いた。あらかじめ、数種の分離株と 3 種のプライマー (r1L, r2L, f3L) (平石, 2001; Hiraishi, 1992) を用いた予備実験を行い、3 種のプライマーの中で比較的長い配列を解読でき、安定した結果が得られた r2L プライマーを以後使用した。株によって決定できた塩基配列の長さが異なるが、相同性解析の精度を高めるため、解読された配列のうち全株に共通の領域ではなく、各株について得られた最長の塩基配列を BLAST 法 (Altschul *et al.*, 1990) による相同性検索に用いた。

本研究では、細菌の分類と同定のために、16S rRNA 遺伝子の全長 (約 1500 塩基) ではなく、約 300 塩基の部分塩基配列を用いたが、この方法が妥当であるかどうか検討した。分離細菌株の予備的な相同性検索では、*Vibrio* 属が最も多く、ついで *Pseudoalteromonas* 属と *Shewanella* 属が多かった。そこで 16S rRNA 遺伝子全域を用いる相同性の検討を、*Vibrio* 属、*Pseudoalteromonas* 属、*Shewanella* 属について行った。これらの属の細菌の 16S rRNA 遺伝子のほぼ全長にあたる 1366 塩基配列を GenBank のデータベースより抽出し、その相同性を割り出した。用いた 16S rRNA 遺伝子データベースは次の通りである。*Vibrio anguillarum* (X 71821), *V. lentus* (AJ278881), *V. fischeri* (X 74702), *V. logei* (AF323992), *V. splendidus* (AB038030), *V. tapetis* (Y08430), *Pseudoalte-*

romonas denitrificans (X82138), *P. luteoviolacea* (X82144), *P. rubra* (X82147), *Shewanella fidelia* (AF420313), *S. pealeana* (AF011335), *S. woodyi* (AF003549), *S. violacea* (D21225)。

その結果、*Vibrio* 属 6 種の間での相同性は 93 ~ 97 %, *Pseudoalteromonas* 属 3 種の間では 93 ~ 98 %, *Shewanella* 属 4 種の間では 94 ~ 97 % であった。ところが、異なる属の細菌間の相同性は 86 ~ 90 % であり、同属間の相同性とは明らかな差が認められた。

次に部分塩基配列の相同性を求めるため、塩基配列を決定するのに用いたプライマー (r2L) の 3' 末端側から 360 塩基を上記の塩基配列より抽出し、互いに比較した。その結果、*Vibrio* 属間の相同性は 96 ~ 98 %, *Pseudoalteromonas* 属間では 95 ~ 99 %, *Shewanella* 属間では 97 ~ 98 % であり、1366 塩基を用いた相同性よりやや高い値を示した。また、異なる属間の相同性は 86 ~ 94 % であり、同属間より低い値を示した。この結果より、約 300 塩基についての相同性が 95 % 以上を同属の条件と見なすと、16S rRNA 遺伝子全長を用いた分類と同様の結果が得られることが分かった。

上の相同性に基づく基準に従って分離細菌の分類を行ったところ、85 株のうち 75 株は、*Vibrio* 属 29 株、*Pseudoalteromonas* 属 16 株、*Shewanella* 属 9 株、*Alteromonas* 属 6 株、*Marinobacter* 属 4 株、*Erythrobacter* 属 3 株、*Dietzia* 属 2 株、*Tenacibaculum* 属 2 株、*Bacillus* 属 1 株、*Halomonas* 属 1 株、*Idiomarina* 属 1 株、*Photobacterium* 属 1 株の 12 属に分類することができた (Table-1.1, Table-1.2)。残り 10 株については、属を決定するに至らなかった (Table-1.3)。これはデータベース中に近縁種が見出せなかったか、近縁種が存在するがその属が定められていなかったためである。

Table-1.1 (No. 22 ~ 34) の *Pseudoalteromonas* 属 13 株は青紫色の色素を産生した。海洋細菌 *Pseudoalteromonas luteoviolacea* は violacein と呼ばれる青紫色色素を産生することが報告されているため (Laatsch *et al.*, 1984; McCarthy *et al.*, 1985)、これらの分離株及び *P. luteoviolacea* (IAM14710

Table-1.1 Bacterial species in the Muroto deep seawater

No.	Strain	Geneus	Closest species (GenBank accession no.)	Matched (bp) /Reference (bp)	Matched (%)	Characteristics
1	315W17	<i>Alteromonas</i>	<i>Alteromonas macleodii</i> (Y18234)	224/224	100	
2	315W18	<i>Alteromonas</i>	<i>Alteromonas macleodii</i> (Y18234)	263/263	100	
3	315W20	<i>Alteromonas</i>	<i>Alteromonas macleodii</i> (Y18234)	309/310	99	
4	315W21	<i>Alteromonas</i>	<i>Alteromonas macleodii</i> (Y18234)	265/265	100	
5	315W23	<i>Alteromonas</i>	<i>Alteromonas macleodii</i> (Y18234)	167/168	99	
6	315W11	<i>Alteromonas</i>	<i>Alteromonas macleodii</i> (Y18234)	310/319	97	
7	402Y1	<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus horikoshii</i> (AB043865) <i>Bacillus</i> sp. KX6 (AB043862)	324/324	100	alkaliphilic bacterium (<i>B. horikoshii</i> , KX6)
8	608R3	<i>Dietzia</i>	<i>Dietzia maris</i> (X81920)	181/182	99	actinomycete, oil degradation (<i>D. maris</i>)
9	911R	<i>Dietzia</i>	<i>Dietzia maris</i> (X81920)	365/367	99	isolated in a salt-making factory (911R)
10	608Y1	<i>Erythrobacter</i>	<i>Erythrobacter citreus</i> (AF118020) <i>Erythrobacter</i> sp. JP 13.1 (AY007680)	404/404	100	
11	608Y3	<i>Erythrobacter</i>	<i>Erythrobacter citreus</i> (AF118020) <i>Erythrobacter</i> sp. JP 13.1 (AY007680)	435/436	99	
12	608Y2	<i>Erythrobacter</i>	<i>Erythrobacter</i> sp. JP 13.1 (AY007680)	459/461	99	activation of eosinophil (608Y2)
13	710W2	<i>Halomonas</i>	<i>Halomonas venusta</i> (AJ306894) <i>Halomonas meridiana</i> (AJ306891) <i>Halomonas aquamarina</i> (AJ306888)	277/277	100	
14	402W3	<i>Idiomarina</i>	<i>Idiomarina abyssalis</i> (AF052740)	279/279	100	deep sea (the Northwestern Pacific Ocean) (<i>I. abyssalis</i>)
15	315W5	<i>Marinobacter</i>	<i>Marinobacter hydrocarbonoclasticus</i> <i>Marinobacter aquaeolei</i> (AJ000726)	354/355	99	degradation of hydrocarbons (<i>M. hydrocarbonoclasticus</i> , <i>M. aquaeolei</i>)
16	315W14	<i>Marinobacter</i>	<i>Marinobacter hydrocarbonoclasticus</i> <i>Marinobacter aquaeolei</i> (AJ000726)	351/351	100	
17	315W16	<i>Marinobacter</i>	<i>Marinobacter hydrocarbonoclasticus</i> <i>Marinobacter aquaeolei</i> (AJ000726)	322/322	100	
18	315W12	<i>Marinobacter</i>	<i>Marinobacter</i> sp. NCE312 (AF295032)	336/336	100	
19	520W1	<i>Photobacterium</i>	Ddeep-1 (AB055793) <i>Photobacterium</i> sp. KT0248	366/371 364/371	98 98	deep sea (Izu-Ogasawara Trench) (Ddeep-1)
20	516W1	<i>Pseudoalteromonas</i>	North Sea bacterium 12-13 (AF069666) <i>Pseudoalteromonas</i> sp. AS-41 (AJ391202)	420/420 419/420	100 99	
21	402W15	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	319/320	99	no pigment produced (402W15)
22	402P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	391/394	99	
23	417P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	382/383	99	
24	520P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	300/301	99	isolated in Norwegian fjords, producing prodigiosin
25	315P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	348/358	97	(<i>P. denitrificans</i>)
26	315P4	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	330/338	97	
27	315P5	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	378/388	97	
28	516P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	431/443	97	producing violacein (402P1, 417P1, 520P1, 315P1, 315P4, 315P5, 516P1, 710P1, 714P1, 315P11, 315P3, 612P1, 710P2)
29	710P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	379/389	97	
30	714P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	311/318	97	
31	315P11	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	393/403	97	
32	315P3	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	362/376	96	
33	612P1	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	402/417	96	
34	710P2	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas denitrificans</i> (X82138)	247/255	96	
35	1020R	<i>Pseudoalteromonas</i>	<i>Pseudoalteromonas rubra</i> (X82147) <i>Pseudoalteromonas piscicida</i> (X82215)	341/343	99	producing prodigiosin (1020R)

株)を液体培養し、その菌体から抽出した色素の可視スペクトルを比較した。その結果、分離株の色素は575 nm付近に吸収極大を示し、そのスペクトルは*P. luteoviolacea*から抽出したviolaceinのものと同じであった。したがって、分離株が産生する青紫

色素は、violaceinまたはそれに極めて近い色素であると考えられる。

しかし、分離株の塩基配列は、*P. luteoviolacea*よりむしろ*P. denitrificans*の塩基配列により高い相同性を示し、特に3株(402P1, 417P1,

Table-1.2 Bacterial species in the Muroto deep seawater

No.	Strain	Genus	Closest species (GenBank accession no.)	Matched (bp) /Reference (bp)	Matched (%)	Characteristics
36	516O1	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella fidelia</i> (AF420313)	309/309	100	
37	516O2	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella fidelia</i> (AF420313)	285/287	99	
38	710O	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella fidelia</i> (AF420313)	367/368	99	
39	315O2	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella pealeana</i> (AF011335)	218/218	100	
40	516O4	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella pealeana</i> (AF011335)	295/295	100	
41	315B1	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella violacea</i> (D21225)	398/405	98	deep sea (Ryukyu Trench) (<i>S. violacea</i>)
42	315O3	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella woodyi</i> (AF003549)	314/314	100	
43	612W1	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella woodyi</i> (AF003549)	311/311	100	
44	612W2	<i>Shewanella</i>	<i>Shewanella woodyi</i> (AF003549)	306/306	100	
45	612G2	<i>Tenacibaculum</i>	<i>Tenacibaculum mesophilum</i> (AB032504)	313/319	98	
46	710Y2	<i>Tenacibaculum</i>	<i>Tenacibaculum mesophilum</i> (AB032502)	402/410	98	
47	315O5	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. PMV19 (AF456340)	412/415	99	
48	608W1X	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. PMV19 (AF456340)	444/447	99	isolated from Norwegian fish (<i>V. anguillarum</i>)
			<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)	442/446	99	
49	315W6	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)	357/358	99	
50	417W1	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)	343/344	99	
51	402W1	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)	354/354	100	
52	402W4	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)	319/319	100	
53	315O6	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio lentus</i> (AJ278881)	415/415	100	
			<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)			
54	402W11	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio lentus</i> (AJ278881)	251/251	100	
			<i>Vibrio anguillarum</i> (X71821)			
55	315W4	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio lentus</i> (AJ278881)	304/304	100	
56	402W9	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio fisheri</i> (X74702)	324/330	98	
57	402W5	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio logei</i> (AF323992)	296/297	99	
58	315O12	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio logei</i> (AF323992)	386/388	99	
59	315O13	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio logei</i> (AF323992)	266/279	95	
60	516W3	<i>Vibrio</i>	unidentified bacterium 4c (AF293974)	383/386	99	
			<i>Vibrio splendidus</i> (AY046955)	382/386	98	
61	315W1	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio splendidus</i> (AB038030)	321/322	99	
62	315W13	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio splendidus</i> (AB038030)	329/329	100	
63	315W2	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio splendidus</i> (AB038030)	360/360	100	
64	315W3	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio splendidus</i> (AB038030)	329/329	100	
65	315O4	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio tapetis</i> (Y08430)	347/347	100	
66	402W14	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio tapetis</i> (Y08430)	330/330	100	
67	315O1	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. EN276 (AB038023)	393/393	100	
68	402W2	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. EN276 (AB038023)	349/349	100	
69	402W7	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. EN276 (AB038023)	430/430	100	
70	315O11	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. EN276 (AB038023)	417/418	99	
71	402W17	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. LMG19840 (AJ316207)	357/359	99	
			<i>Vibrio</i> sp. EN276 (AB038023)			
72	402W13	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. RE35F/12 (AF118021)	223/224	99	
			<i>Vibrio</i> sp. EN276 (AB038023)			
73	315W22	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. 3d 7 (AF388393)	383/385	99	
74	608Y4	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio</i> sp. ANG. HOH (AF022410)	389/391	99	
75	710W1	<i>Vibrio</i>	<i>Vibrio campbellii</i> (X74692)	200/210	95	

520P1) は *P. denitrificans* に 99 % の相同性を示した (Table-1.1). 分離した青紫色素産生株は, その塩基配列の相同性から二つのグループに分けることができた. Fig. 1 は 520P1 株と 710P1 株の塩基配列を *P. luteoviolacea* (GenBank X82144) の配列と比較したものである. 520P1 株と 710P1 株の塩基配列は, 複数の個所で *P. luteoviolacea* の配

列と異なっており, 520P1 株と 710P1 株の間でも配列の違いが認められた. 色素産生細菌のうち, 402P1 株と 417P1 株の塩基配列は 520P1 株の配列と一致し, 残り 9 株 (315P1, 315P4, 315P5, 516P1, 714P1, 315P11, 315P3, 612P1, 710P2) の塩基配列は 710P1 株の配列と一致した. 一方, *Pseudoalteromonas* 属の 1020R 株

Table-1.3 Bacterial species in the Muroto deep seawater

No.	Strain	Genus	Closest species (GenBank accession no.)	Matched (bp) /Reference (bp)	Matched (%)	Characteristics
76	315Y11	unidentified	marine bacterium SCRIPPS 413 (AF359548)	328/329	99	
77	315Y12	unidentified	marine bacterium SCRIPPS 413 (AF359548)	332/333	99	
78	315Y13	unidentified	marine bacterium SCRIPPS 413 (AF359548)	336/337	99	
79	402W6	unidentified	marine eubacterial sp. (L10950)	272/277	98	
			Chukchi sea bacterium AWS-7W3 (AF283852)	270/277	97	the Arctic Ocean (AWS-7W3, AWS-4B2)
			arctic sea ice bacterium AWS-4B2 (AF283849)	270/277	97	
80	402W12	unidentified	unclutured <i>Colwellia</i> sp. MERTS 2CM 93 (AF424079)	242/251	96	the Antarctic Ocean (2CM 93),
			Chukchi sea bacterium AWS-7W3 (AF283852)	242/251	96	the Arctic Ocean (AWS-7W3, AWS-4B2)
			arctic sea ice bacterium AWS-4B2 (AF283849)	241/251	96	
81	402W8	unidentified	<i>Colwellia</i> sp. 34H (AF396670)	355/368	96	Greenland(34H),
			unidentified gamma protobacterium NB1-e (AB013826)			Japan Trench(NB1-e)
82	315Y1	unidentified	<i>Eubostrichus diana</i> e epibacterium (AF154057)	354/372	95	isolated from <i>Eubostrichus diana</i> e (epibacterium)
83	402W10	unidentified	<i>Eubostrichus diana</i> e epibacterium (AF154057)	295/310	95	
84	612R1	unidentified	<i>Cytophaga aprica</i> (D12655)	283/310	91	
85	315W19	unidentified	unidentified gamma protobacterium BD1-7 (AB015519)	308/340	90	Suruga Bay (BD1-7)
			<i>Riftia pachyptila</i> endosymbiont (U77478)	265/283	93	symbiont of <i>Riftia pachyptila</i> (endosymbiont)

(Table-1.1, No. 35) は赤い色素を産生した。 *P. denitrificans* は prodigiosin と呼ばれる赤色素を産生することが知られているため (Enger *et al.*, 1987), 1020R 株と *P. denitrificans* (IAM14544 株) を液体培養し, その菌体から抽出した色素の可視スペクトルを比較した。 1020R 株の色素は 535 nm 付近に吸収極大を持ち, そのスペクトルは *P. denitrificans* から抽出した prodigiosin のものと一致した。 したがって 1020R 株が産生する色素は, prodigiosin またはそれに極めて近い色素であると考えられる。

4. 考 察

4.1 「室戸海洋深層水」中の細菌種の特徴

「室戸海洋深層水」中の細菌種の特徴として, 冷水域の細菌の近縁種が多数認められた。 また深海由来と考えられる細菌の近縁種も数株得られた。 深層水中から分離された代表的な冷水域の細菌の近縁種について以下に述べる。 *Vibrio anguillarum* は,

ノルウェー産の魚類よりの分離が報告されており (Wiik *et al.*, 1989), これと同一種であると考えられる 2 株 (402W1, 402W4), 近縁種 4 株 (315W13, 417W1, 315O6, 402W11) が分離された。 *Pseudoalteromonas denitrificans* は, ノルウェー西岸のフィヨルドより分離された低温細菌であり, 赤色素 prodigiosin を産生することが報告されている (Enger *et al.*, 1987)。 「室戸海洋深層水」中からは *P. denitrificans* と同性を示し, violacein と考えられる青紫色素を産生する細菌が分離された。 これらの色素産生株は, その塩基配列の相同性から, 3 株 (402P1, 417P1, 520P1) と 10 株 (315P1, 315P4, 315P5, 516P1, 710P1, 714P1, 315P11, 315P3, 612P1, 710P2) の二つのグループに分けることができた (Fig. 1)。 violacein は, *P. luteoviolacea* が産生する色素として報告されているが (Laatsch *et al.*, 1984; McCarthy *et al.*, 1985), 分離株は *P. luteoviolacea* とは異なる塩基配列を持っていた (Fig. 1)。 *Shewanella pealeana* は, ヤリイカ (*Loligo pealei*) の卵胞腺より分離さ

<i>P. luteoviolacea</i>	CCTGCTAGCTGTGACGTTACTTACAGAAGAAGCACCGGCTAACTCCGTGCCAGCAGCCGC
520P1	GACTA.....T.....
710P1	GA·TGC.....T.....
<i>P. luteoviolacea</i>	GGTAATACGGAGGTGCGAGCGTTAATCGGAATTACTGGCGTAAAGCGTACGCAGGCGG
520P1AG.....A.....
710P1AG.....A.....
<i>P. luteoviolacea</i>	TTTGTTAAGCGAGATGTGAAAGCCCCGGGCTCAACCTGGGAAGTGCATTTCGAACTGGCA
520P1
710P1
<i>P. luteoviolacea</i>	AACTAGAGTGTGATAGAGGGTGGTAGAATTCAGGTGTAGCGGTGAAATGCGTAGAGATC
520P1	G.....A.....
710P1	G.....A.....
<i>P. luteoviolacea</i>	TGAAGGAATACCGATGGCGAAGGCAGCCACCTGGGTCAACACTGACGCTCATGTACGAAA
520P1T.....
710P1T.....

Fig. 1 Comparison of DNA sequences of 16S rRNA genes of strains 520P1, 710P1 and *Pseudoalteromonas luteoviolacea*. Partial sequences corresponding to the positions 469 to 768 of *E. coli* 16S rRNA gene are shown. Dots indicate identical bases. The sequence of *P. luteoviolacea* gene is according to the data in GenBank (accession number X82144).

れた耐冷細菌であることが報告されており (Leonardo *et al.*, 1999), 同一種と考えられる 2 株 (315O2, 516O4) が分離された。 *S. woodyi* は、地中海西部のアルポラン海のヤリイカの墨汁から分離された。発光することが報告されており、4 °C 及び 25 °C で増殖し、30 °C では増殖できない (Makemson *et al.*, 1997)。同一種と考えられる 3 株 (315O3, 612W1, 612W2) が分離された。710W2 株は、 *Halomonas venusta*, *H. aquamarina*, *H. meridiana* に 100 % の相同性を示す。 *H. venusta*, *H. aquamarina* はハワイの海水より分離され、 *H. meridiana* は南極大陸の塩湖より分離された (Arahal *et al.*, 2002)。710W2 株とこれら 3 種の細菌では、16S rRNA 遺伝子 277 塩基の配列が完全に一致するため、分離株がどの種であるかは同定できなかった。また、属の同定に至らなかった細菌には、marine eubacterial sp. (DeLong *et al.*, 1993) 及び北極海で分離された ASW-7W3, ASW-4B2 と同属であると考えられる 402W6 株、北極海の ASW-7W3, ASW-4B2 及び南極海で分離された 2CM93 と同属であると考えられる 402W12 株、グリーンランド沖で分離された 34H 及び日本海溝で分離された NB1-e (Yanagibayashi *et al.*, 1999) と同属であると考えられる 402W8 株がある。これらも冷水域の細菌の近縁種と考えられる。

深海由来の細菌の近縁種と考えられるものとして

次の株が分離された。 *Shewanella violacea* は、琉球海溝 5110 m の海底堆積物より分離され、紫色色素を産生することが報告されている (Nogi *et al.*, 1998)。この細菌は、好圧菌としても研究が進められている (Kato and Nogi, 2001)。分離した近縁種 315B1 株は、 *S. violacea* に 98 % の相同性を示し、未同定の黒紫色の色素を産生した。402W3 株は、北西太平洋の水深 4000 から 5000 m の海水中から分離された *Idiomarina abyssalis* (Ivanova *et al.*, 2000) と同一種と考えられる。520W1 株は、伊豆・小笠原海溝水深 7242 m の海水から分離された Ddeep-1 株 (Radjasa *et al.*, 2001) に 98 % の相同性を示した。Ddeep-1 株は、 *Hyphomicrobium indicum* (AB016982) の近縁種として分離され (Radjasa *et al.*, 2001)、 *Hyphomicrobium* 属として分類された。しかし、 *H. indicum* は、遺伝子相同性及び細菌の主要性状から *Photobacterium* 属への再分類が示唆されている (Radjasa *et al.*, 2001)。したがって、Ddeep-1 株とその近縁種である 520W1 株も *Photobacterium* 属の細菌と考えられる。

深層水中から分離された細菌中には、最も近縁な種と 95 % 以下の相同性しか示さない、未報告と推定される細菌も見出された。315Y1 株と 402W10 株は、線虫 (*Eubostrichus diana*) の体表より分離された *Eubostrichus diana* epibacterium (Polz *et al.*, 1999) に最も近縁であるが、95 % の相同性

しか示さなかった。315W19 株は、熱水噴出口のハオリムシ (*Riftia pachyptila*) に共生している細菌 (Feldman *et al.*, 1997) に 93 % の相同性を示すに過ぎなかった。612R1 株は、*Cytophaga aprica* に最も近縁であるが、91 % の相同性しか示さなかった。これらの GenBank のデータベースに近縁な属が見当たらない細菌は、全株数の約 4 % を占め、海洋深層水が未知の細菌を含む遺伝子資源として貴重であることを示している。

4.2 「室戸海洋深層水」中より見出された有用と考えられる細菌

「室戸海洋深層水」中より分離した細菌には次のような有用と思われる細菌が見出された。炭化水素分解菌として知られている *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* または *M. aquaeolei* と考えられる株が 2 株 (315W14, 315W16), これと近縁である 315W5 株が分離できた。*M. hydrocarbonoclasticus* は、製油所の近くの地中海の海水から分離された (Gauthier *et al.*, 1992)。*M. aquaeolei* は、ベトナム沖の海底油田を採掘するプラットフォームより分離され、*M. hydrocarbonoclasticus* と 16S rRNA 遺伝子の塩基配列が 99.4 % 一致していることが報告されている (Huu *et al.*, 1999)。他にも *Dietzia maris* に近縁な 2 株 (608R3, 910R) が分離された。*D. maris* は、放線菌であり鉱物油やパラフィンを分解する油分解菌であることが報告されている (Zviagintseva *et al.*, 2001)。なお、*D. maris* 近縁株 2 株のうち 910R 株は、「室戸海洋深層水」を原料とする製塩施設から分離されたものである。

生理活性を持つと報告されている色素を産生する細菌として *Pseudoalteromonas* 属の細菌 14 株が分離された。そのうち 13 株は、抗トリパノソーマ作用、アポトーシス誘導作用、グラム陽性細菌に対する抗生作用など多様な生理作用をもつ青紫色素 violacein (Melo *et al.*, 2000; Margalith, 1992) と考えられる色素を産生した。*P. rubra* または *P. piscicida* に近縁な 1020R 株は、免疫抑制作用、アポトーシス誘導作用をもつ赤色素 prodigiosin

(Kawauchi *et al.*, 1997; Margalith, 1992) と考えられる色素を産生した。

608Y2 株には、アトピー性皮膚炎に関係する好酸球を活性化する作用がある (渡部ら, 2000)。これは、*Erythrobacter citoreus* と *Erythrobacter* sp. JP13.1 に近縁な細菌であった。

好アルカリ性細菌 *Bacillus horikoshii* は、2000 年に海洋科学技術センターより 16S rRNA 遺伝子の配列が登録されている。この *B. horikoshii* (AB043865) または *Bacillus* sp. KX6 (AB043862) と考えられる 402Y1 株が分離された。好アルカリ性細菌が産生するアルカリ性プロテアーゼやアルカリ性セルラーゼは、アルカリ性の溶液の中で酵素活性を持つため、洗濯用洗剤に配合するなど工業的に利用されている (Horikoshi, 1999)。

謝 辞

本研究の推進にあたり、高知県海洋深層水研究所の前所長谷口道子氏はじめ所員の方々には多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。本研究の一部は、文部科学省 (旧科学技術庁) の平成 10 ~ 12 年度科学技術振興調整費による「地域先端研究 (「室戸海洋深層水」の特性把握および機能解明)」及び独立行政法人製品評価技術基盤機構の「平成 13 年度産業上有用な微生物等の収集に関する標準株整備事業」の一環として行われた。なお本研究で分離した細菌のうち 65 株は、独立行政法人製品評価技術基盤機構生物遺伝資源センター (NBRC) において保存されている。

文 献

- Altschul, S. F., W. Gish, W. Miller, E. W. Myers and D. J. Lipman (1990): Basic local alignment search tool. *J. Mol. Biol.*, 215: 403-410.
- Arahal, D. R., W. Ludwig, K. H. Schleifer and A. Ventosa (2002): Phylogeny of the family *Halomonadaceae* based on 23S and 16S rDNA sequence analyses. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 52: 241-249.
- DeLong, E. F., D. G. Franks and A. L. Alldredge (1993): Phylogenetic diversity of aggregate-attached vs. free-living marine bacterial assemblages. *Limnol.*

- Oceanogr., 38: 924-934.
- Enger, ϕ ., H. Nygaard, M. Solberg, G. Schei, J. Nielsen and I. Dundas (1987): Characterization of *Alteromonas denitrificans* sp. nov.. Int. J. Syst. Bacteriol., 37: 416-421.
- Feldman, R. A., M. B. Black, C. S. Cary, R. A. Lutz and R. C. Vrijenhoek (1997): Molecular phylogenetics of bacterial endosymbionts and their vestimentiferan hosts. Mol. Mar. Biol. Biotechnol., 6: 268-277.
- Gauthier, M. J., B. Lafay, R. Christen, L. Fernandez, M. Acquaviva, P. Bonin and J. -C. Bertrand (1992): *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* gen. nov., sp. nov., a new, extremely halotolerant, hydrocarbon-degrading marine bacterium. Int. J. Syst. Bacteriol., 42: 568-576.
- Hiraishi, A. (1992): Direct automated sequencing of 16S rDNA amplified by polymerase chain reaction from bacterial cultures without DNA purification. Lett. Appl. Microbiol., 15: 210-213.
- 平石明 (2001): リボソーム RNA 遺伝子の塩基配列. 48-64 頁. 微生物の分類・同定実験法 (鈴木健一朗, 平石明, 横田明編). シュブリンガー・フェアラーク東京, 東京.
- Horikoshi, K. (1999): Alkaliphiles: some applications of their products for biotechnology. Microbiol. Mol. Biol. Rev., 63: 735-750.
- Huu, N. B., E. B. M. Denner, D. T. C. Ha, G. Wanner and H. Stan-Lotter (1999): *Marinobacter aquaeolei* sp. nov., a halophilic bacterium isolated from a Vietnamese oil producing well. Int. J. Syst. Bacteriol., 49: 367-375.
- Ivanova, E. P., L. A. Romanenko, J. Chun, M. H. Matte, G. R. Matte, V. V. Mikhailov, V. I. Svetashev, A. Huq, T. Maugel and R. R. Colwell (2000): *Idiomarina* gen. nov., comprising novel indigenous deep-sea bacteria from the Pacific Ocean, including descriptions of two species, *Idiomarina abyssalis* sp. nov. and *Idiomarina zobellii* sp. nov. Int. J. Syst. Evol. Microbiol., 50: 901-907.
- Kato, C. and Y. Nogi (2001): Correlation between phylogenetic structure and function: examples from deep-sea *Shewanella*. FEMS. Microbiol. Ecol., 35: 223-230.
- Kawauchi, K., K. Shibutani, H. Yagisawa, H. Kamata, S. Nakatsuji, H. Anzai, Y. Yokoyama, Y. Ikegami, Y. Moriyama and H. Hirata (1997): A possible immunosuppressant, cycloprodigiosin hydrochloride, obtained from *Pseudoalteromonas denitrificans*. Biochem. Biophys. Res. Commun., 237: 543-547.
- Laatsch, H., R. H. Thomson and P. J. Cox (1984): Spectroscopic properties of violacein and related compounds: crystal structure of tetramethyl-violacein. J. Chem. Soc. Perkin Trans., II: 1331-1339.
- Leonardo, M. R., D. P. Moser, E. Barbieri, C. A. Brantner, B. J. MacGregor, B. J. Paster, E. Stackebrandt and K. H. Nealson (1999): *Shewanella pealeana* sp. nov., a member of the microbial community associated with the accessory nidamental gland of the squid *Loligo pealei*. Int. J. Syst. Bacteriol., 49: 1341-1351.
- Makemson, J. C., N. R. Fulayfil, W. Landry, L. M. Van Ert, C. F. Wimpee, E. A. Widder and J. F. Case (1997): *Shewanella woodyi* sp. nov., an exclusively respiratory luminous bacterium isolated from the Alboran Sea. Int. J. Syst. Bacteriol., 47: 1034-1039.
- Margalith, P. Z. (1992): Chapter 8, Other heterocyclic pigments. pp. 111-118. In Pigment Microbiology, Chapman & Hall, London.
- McCarthy, S. A., T. Sakata, D. Kakimoto and R. M. Johnson (1985): Production and isolation of purple pigment by *Alteromonas luteoviolacea*. Bull. Japan. Soc. Sci. Fish., 51: 479-484.
- Melo, P. S., S. S. Maria, B. C. Vidal, M. Haun, N. Duran (2000): Violacein cytotoxicity and induction of apoptosis in V79 cells. In vitro Cell. Dev. Boil. Anim., 36: 539-543.
- 内藤敦 (2002): 海洋生物資源の有効利用. シーエムシー出版, 東京. 260 頁.
- 中島敏光 (2002): -21 世紀の循環型資源-海洋深層水の利用. 緑書房, 東京. 263 頁.
- Nogi, Y., C. Kato and K. Horikoshi (1998): Taxonomic studies of deep-sea barophilic *Shewanella* strains and description of *Shewanella violacea* sp. nov.. Arch. Microbiol., 170: 331-338.
- Polz, M. F., C. Harbison and C. M. Cavanaugh (1999): Diversity and heterogeneity of epibiotic bacterial communities on the marine nematode *Eubostriechus diana*. Appl. Environ. Microbiol., 65: 4271-4275.
- Radjasa, O. K., H. Urakawa, K. Kita-Tukamoto and K. Ohwada (2001): Characterization of psychrotrophic bacteria in the surface and deep-sea waters from the Northwestern Pacific Ocean based on 16S ribosomal DNA analysis. Mar. Biotechnol., 3: 454-462.
- Taga, N. (1968): Some ecological aspects of marine bacteria in the Kuroshio current. Bull. Misaki. Mar. Biol. Inst. Kyoto Univ., 12: 65-76.
- 渡部嘉哉, 富永明, 松本健治, 倉繁隆信 (2000): 炎症

- 細胞に対する作用機構の解明. 147-156 頁. 平成 11 年度科学技術総合研究委託費地域先導研究 研究成果報告書 室戸海洋深層水の特性把握および機能解明. 財団法人高知県産業振興センター, 高知.
- Wiik, R., K. A. Hoff, K. Andersen and F. L. Daae (1989): Relationships between plasmids and phenotypes of presumptive strains of *Vibrio anguillarum* isolated from different fish species. Appl. Environ. Microbiol., 55: 826-831.
- Yanagibayashi, M., Y. Nogi and C. Kato (1999): Changes in the microbial community in Japan Trench sediment from a depth of 6292 m during cultivation without decompression. FEMS. Microbiol. Lett., 170: 271-279.
- Zviagintseva, I. S., M. N. Poglazova, M. T. Gotoeva and S. S. Beliaev (2001): Effect of the media salinity on destruction of petroleum oils by nocardioform bacteria. Mikrobiologiya, 70: 759-764.
- (2003. 6. 9 受付, 2003. 9. 30 受理)

フィジー海域の海洋温度差発電のための 海洋調査及び再生エネルギーの推定

Oceanographic observations and an estimate of the renewable energy
for ocean thermal energy conversion in the coast of the Fiji island

中岡 勉¹・西田 哲也¹・一瀬 純弥¹・長友 洪太¹・水谷壮太郎¹・巽 重夫¹
松下 稔¹・Tim PICKERING²・池上 康之³・上原 春男³

Tsutomu NAKAOKA, Tetsuya NISHIDA, Junya ICHINOSE, Kohta NAGATOMO,
Sohtaro MIZUTANI, Shigeo TATSUMI, Minoru MATUSHITA, Tim PICKERING,
Yasuyuki Ikegami and Haruo Uehara

Abstract

Republic of Fiji and many other countries in the tropical and subtropical areas desire both electric power by the ocean thermal energy conversion (OTEC) and drinking water from desalinated seawater. Then, a hybrid OTEC system combined with a desalination plant by use of deep ocean water is under consideration. For actual construction of the OTEC system, the choice of location is essentially important. In this paper, oceanographic data of seawater temperature, salinity and dissolved oxygen obtained off the coast of Suva of the Viti Levu Island of the Fiji islands in the Pacific Ocean at the beginning of December 1996, 1997, 1998 and 1999 are reported as well as bottom topography. The renewable energy available from the exclusive economic zone in the Fiji islands is estimated based on the oceanographic data obtained. Estimates of renewable energy by the two methods give about 120 and 1959 times as much as the current electric power in the Republic of Fiji, respectively.

Key Words: deep ocean water, oceanographic observation, Fiji, OTEC, renewable energy

要 旨

フィジー共和国をはじめとして熱帯や亜熱帯の多くの国々は、電気と水を確保するために海洋温度差発電 (OTEC) と海水淡水化のプラント建設が期待されている。そのために、海洋深層水を利用する OTEC と海水淡水化のプラントを組み合わせたハイブリッドシステムが考えられている。この OTEC を中心に据えたトータルシステムを考える場合、設置場所の選定が重要となる。この論文は、1996、97、98、99 年の 12 月上旬に太平洋のフィジー群島 Viti Levu 島の Suva 沖で調査した水温・塩分・溶存酸素と海底地形にもとづいて、フィジー経済水域内での OTEC の再生エネルギーを 2 つの方法で試算した。その結果は、それぞれフィジー共和国の現在の発電出力 5.82×10^4 kW の 120 倍と 1959 倍となった。

キーワード: 海洋深層水, 海洋調査, フィジー, 海洋温度差発電, 再生エネルギー

¹独立行政法人水産大学校 (〒759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)

²The University of the South Pacific (P. O. Box 1168, Suva, Republic of Fiji)

³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)

1. 緒 言

フィジー共和国は、南太平洋の中心部（メラネシア海域）に位置し、約 330 の諸島から成り、多くは火山活動や珊瑚礁の隆起によってできている。熱帯性気候で、もっとも暑い 2 月を中心に雨量が多く、首都 Suva の年間降雨量は 3000 mm となっている。面積は四国とほぼ同じ 18333 km²、人口は約 81.1 万人である。経済面では砂糖生産と観光が二大産業となっている。

フィジー共和国の 1 年間の総発電量は 510×10^6 kWh である (<http://www.cia.gov/publications/factbook>, 1999)。フィジー共和国の電力源は、水力が 82.35%，17.65% が化石燃料に頼っている。しかし、化石燃料は価格が高く、電気はすべての島へ行き渡っていないのが現状である。また、化石燃料の使用で二酸化炭素の排出による地球温暖化のために、海面上昇も懸念されている。そのために、フィジー共和国を含めた南太平洋諸国では、海洋深層水を利用する海水淡水化装置を組み合わせた海洋温度差発電 (OTEC) システム (ハイブリッド OTEC システム) を建設するための計画が進んでいる (佐賀大学理工学部附属海洋温度差エネルギー実験施設報告, 2001)。

ハイブリッド OTEC システムを陸上に設置して多目的で使用する場合、建設費は建設場所の気候・地形・設置地域の社会基盤などに大きく影響される。そのために、このプラントを設置する場合には、海象データの十分な調査を実施し、設置場所にあったフィジビリティ・スタディを行う必要がある。

現在、海洋温度差発電の設置場所の調査や概念設計は、日本および世界各国で行われている (Wolff ら, 1979)。上原らは、候補地の 1 つである島根沖で OTEC の発電実験を行っている (Uehara ら, 1980)。また、フィリピン海域での海洋調査を行い、この海域での概念設計を行っている (Uehara ら, 1988)。日本での候補地の 1 つである沖永良部海域では、3 回の海洋調査を行っている (乾ら, 1990)。そして、この調査結果を参照し、発電端出力 10 MW の OTEC プラントと海水淡水化装置を組み合

わせたハイブリッドシステムについて報告している (Uehara ら, 1992)。

現在、フィジー共和国を含む南太平洋諸国では、ハイブリッド OTEC システムの建設計画が進められているが、フィジー共和国沿岸海域での公表海洋データはなく、この海域での海洋深層水利用のためのデータは極めて不足している。そこで、本研究は、南太平洋のフィジー海域に適したハイブリッド OTEC システムを設計するために、調査船を利用して海洋調査を行い、その結果について解析するとともに、この海域の特性について明らかにする。さらに、この海域での海洋温度差発電による再生エネルギーをも試算する。

2. 調 査

2.1 調査場所

フィジー共和国でのハイブリッド OTEC 陸上システムの設置候補地として Viti Levu 島の Suva の南側地域が考えられるので、調査は図 1 に示した Viti Levu 島の南側海域において、1996、97、98、99 年の 12 月上旬に実施した。図 1 の (a)、(b)、(c)、(d)、(e) が取水管設置候補地であるので、想定される取水管設置路に沿って、また、OTEC のための海洋深層水は最低 5 ~ 10 °C 以下の温度が必要であるので、このような観測域と観測点をとった。1996 年 12 月 5 ~ 7 日に実施した (b) 観測域の詳細を図 2 に示した。調査海域の水深は 87 m ~ 1902 m である。

2.2 調査方法

調査は水産大学校の練習船耕洋丸で実施した。同船は全長 81.4 m、幅 13.0 m、総トン数 1990.17 t、主エンジンは 3800 PS、回転数は 230 rpm、航海速度は 14 kt である。

塩分・水温・深さ・溶存酸素は、図 1 に示す各観測点で調査船を漂泊させ、電気伝導度水温水深計 (Neil Brown Instrument Systems, Inc. Mark IIIB CTD Profiler CTD-O₂) (電気伝導度：(範囲：1 ~ 65 mmho, 精度：±0.005 mmho)、温度：(範囲：-32 ~ +32 °C, 精度：±0.005 °C (-3 ~ +32

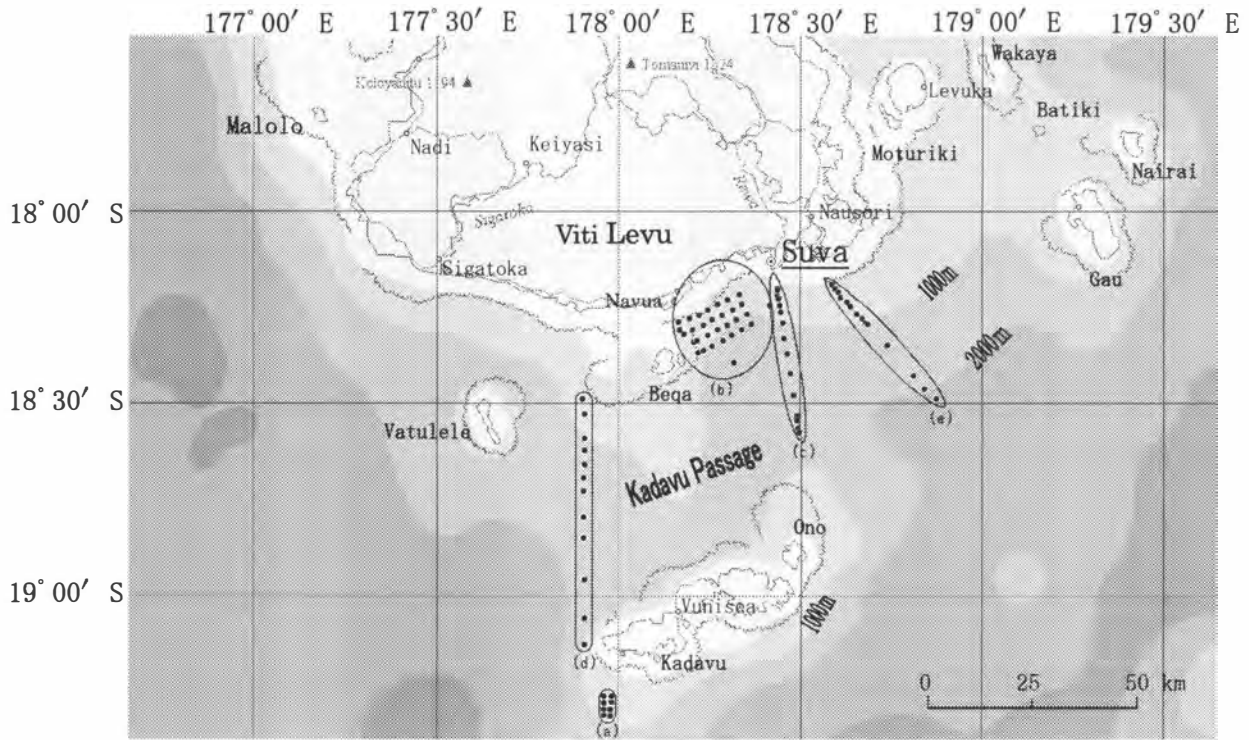


図1 フィジー共和国 Viti Levu 島 Suva 沖で実施した海洋調査の観測域。
 図中の黒点が観測点で、(a)(1996年)、(b)(1996年)、(c)(1997年)、(d)(1998年)、(e)(1999年)

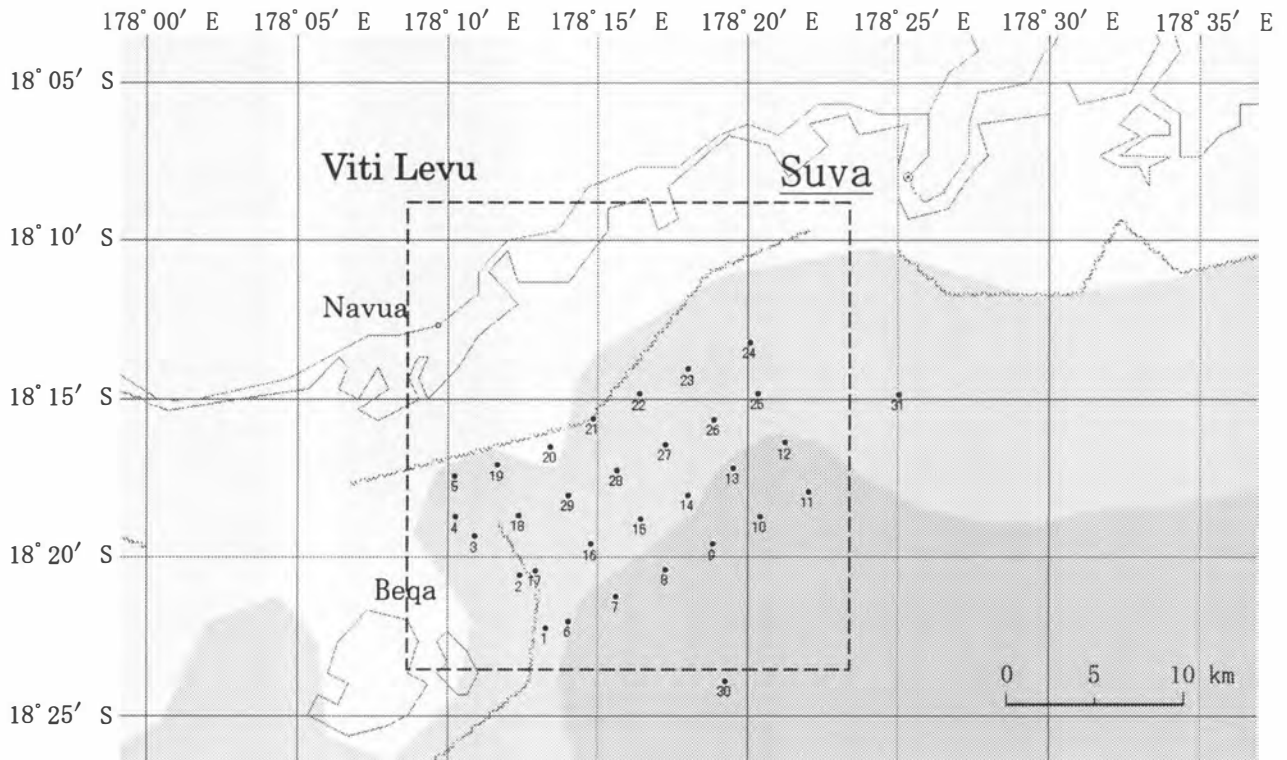


図2 1996年12月7日(b)の観測域と実際の観測点(数字をともなった点)。

°C)), 圧力:(範囲, 精度: 0 ~ 320 db, ±0.5 db, 0 ~ 650 db, ±1.0 db, 0 ~ 1600 db, ±1.6 db, 0 ~ 3200 db, ±3.2 db, 0 ~ 6500 db, ±6.5 db)) を海に投入し深さ 0 m から海底までを 1 m 毎に測

定した。

電気伝導度センサーは電極式, 温度センサーはサーミスター型 (200 Ω, @20.0 °C), 圧力センサーは歪みゲージ型 (350 Ω) である。塩分は, 15.0 °C,

1 気圧における KCl 標準溶液 (1 kg 中に 32.4356 g KCl を含んだ水溶液) の電気伝導度に対する水圧および温度の補正を行った測定時の電気伝導比により求めた。水は圧力を加えると温度が上がるので、温度はポテンシャル水温を用いた。深さは、水圧と深さの関係式より算出した。溶存酸素は、酸素センサーにより測定された電流値を用いて、水圧、水温の補正を行い酸素飽和率を求め、その酸素飽和率に海水中の酸素飽和量を掛け合わせて求めた。また、酸素飽和率を求めるために必要な係数は、ウィングラー法による適定酸素値と比較して決定した。

3. 結果と考察

3.1 水温・塩分・溶存酸素の鉛直分布

図 3 (a)~(e)に示した 1996 年~1999 年の水温の鉛直分布からみると、本観測データ内では、観測年及び観測位置による顕著な違いは確認されなかったが、同一時期の 8~22 測点を詳しくみると、各深さでの測定値には 0.1~1.0℃の温度変化が観察され、その傾向は 800 m 以浅でより大きい傾向が認

められた。水温は表層の 26.4~28.9℃から 600 m 付近の 7.1~7.6℃まで深さと共に急速に低下し、表層混合層ははっきりせず、表層から著しい水温躍層がみられた。600 m 以深は測定した 1400~1902 m の 2.4~3.0℃まで水温は徐々に低下した。

水温は、OTEC の熱源である温度差を決める際に重要で、特に、ハイブリッド OTEC システムでは、表層と深層の温度差が最低約 15.0℃以上必要のために、海水取水管の長さは水温 10.0℃の深さ約 500 m まで必要である。また、水温 5.0℃を使用する場合は深さ約 800 m まで必要となる。

水温が急速に低下する 600 m 以浅では、水温と同様に測点間での塩分変動が 600 m 以深より大きい (図 4)。更に、600 m 以浅では、塩分は表層で 34.0~35.3 PSU と低く、かつ年による変動が大きく、深さとともに 100~200 m の 35.8~36.0 PSU まで増大し、それ以深では低下が認められた。深さ 600 m で 34.4~34.6 PSU となり、600 m 以深では、深さとともに塩分はわずかに上昇した。塩分は、ハイブリッド OTEC システムの構成機器の設計の際に、伝熱に関する輸送物性値を見積もるた

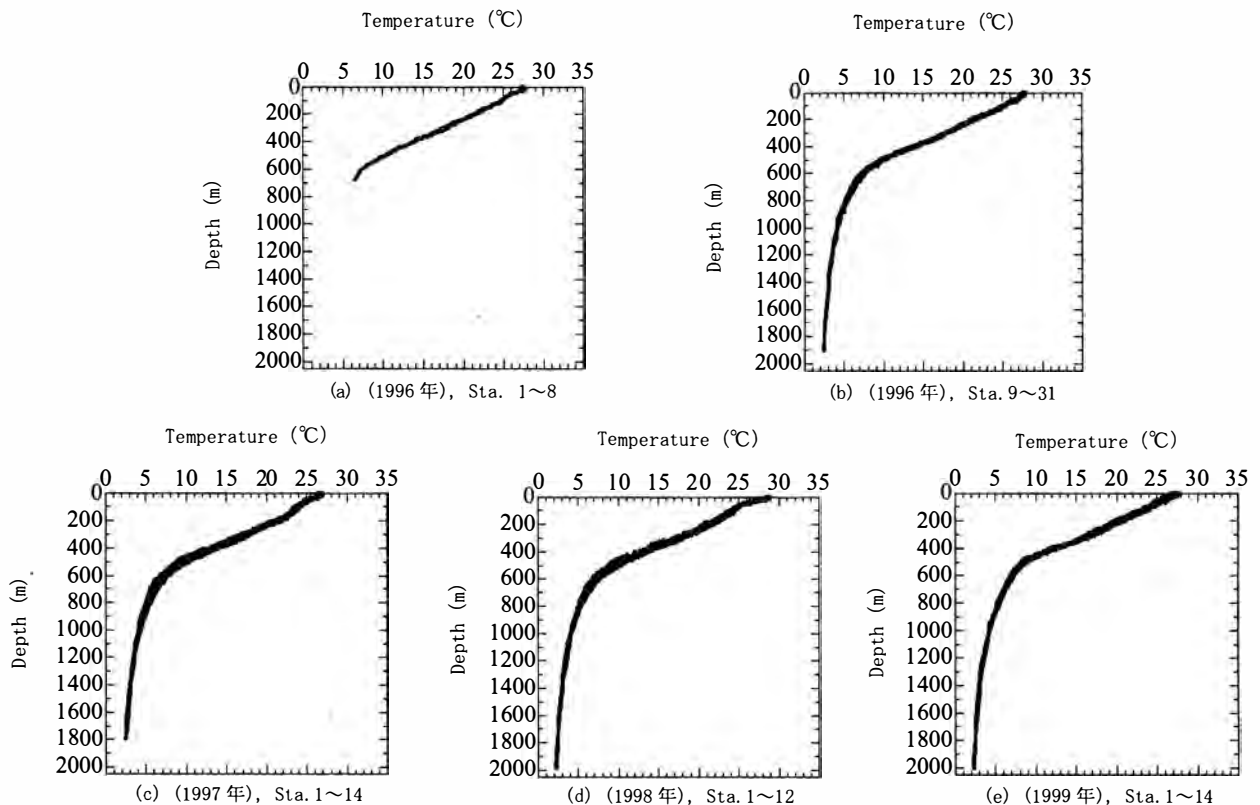


図3 フィジー共和国 Viti Levu 島 Suva 沖で 1996, 97, 98, 99 年 12 月に観測した水温の鉛直分布。

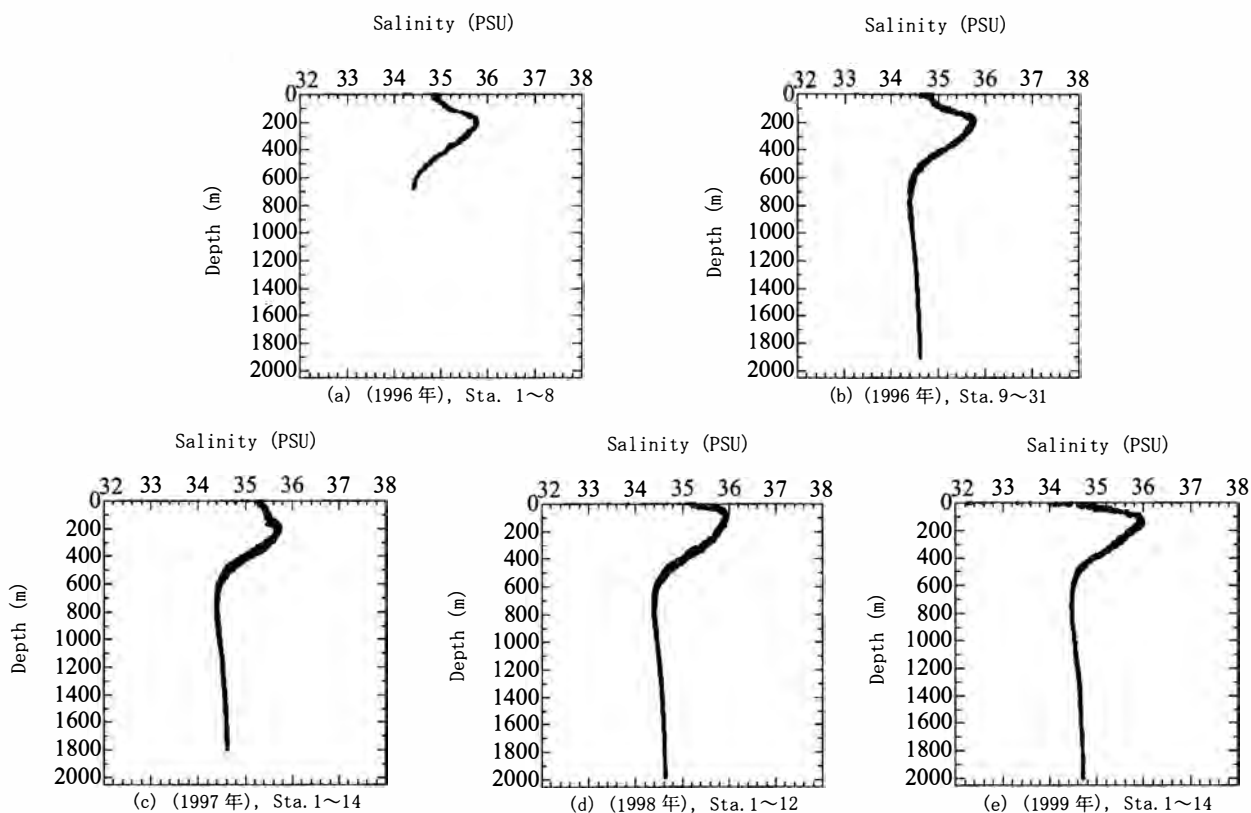


図4 フィジー共和国 Viti Levu 島 Suva 沖で 1996, 97, 98, 99 年 12 月に観測した塩分の鉛直分布.

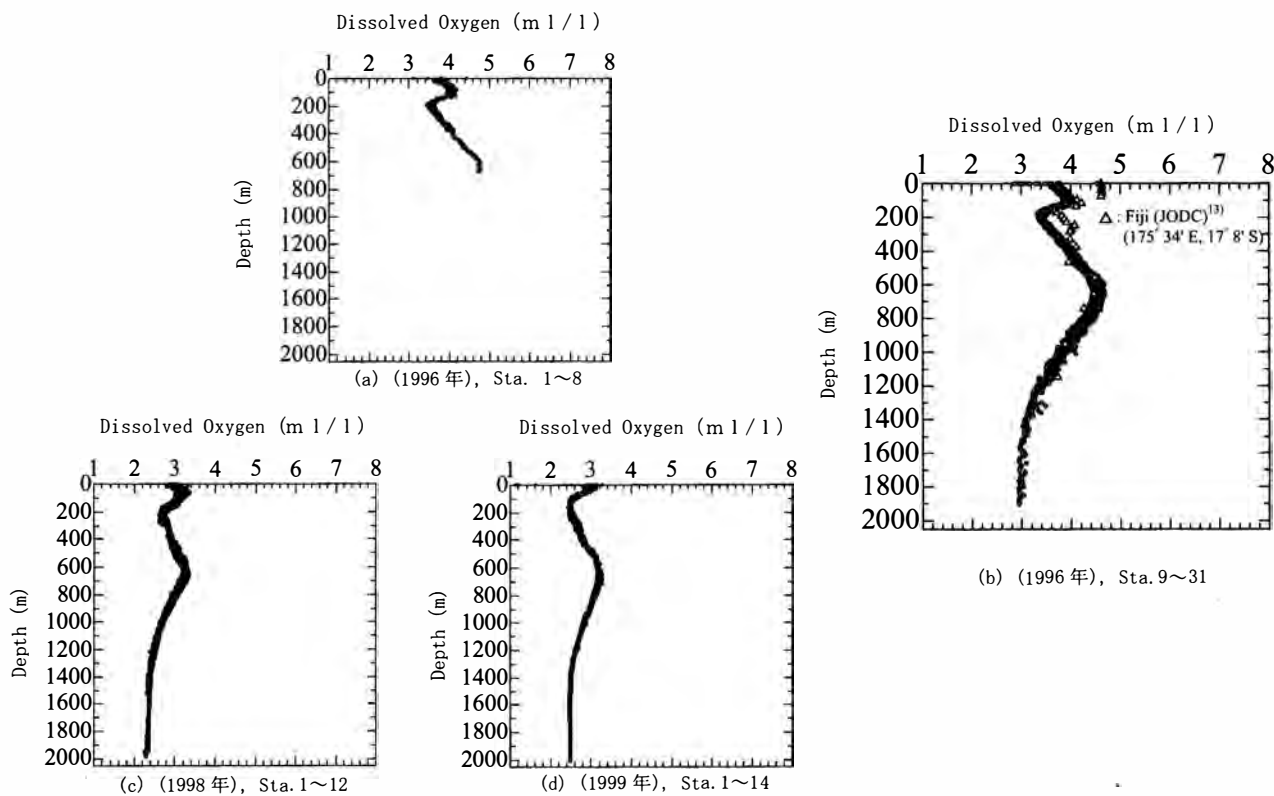


図5 フィジー共和国 Viti Levu 島 Suva 沖で 1996, 98, 99 年 12 月に観測した溶存酸素の鉛直分布.

めに必要となる。

図 5 (a)~(d)は、1996 ~ 1999 年の溶存酸素の鉛直分布を示す。ただし、1997 年の測定データは、

センサーが不良のために除いた。溶存酸素の鉛直分布も水温・塩分と同様に深い方に比べて浅い方で測点間での変動が大きかった。図 5 (a)(b)では、溶存

酸素は表層で 3.5 ~ 3.6 ml/l, 深さとともに増大して 100 m で 4.0 ~ 4.2 ml/l, それ以深は減少して 200 m で 3.3 ~ 3.4 ml/l, それ以深では再び増加して 600 m で 4.6 ~ 4.8 ml/l, それ以深では, 深さとともに 3.0 ml/l まで減少した. 図 5 (b)中には, 日本海洋データセンター (JODC) による Viti Levu 島の西側海域 (175°34'E, 17°8'S) の溶存酸素のデータを示す (△印) (<http://www.jodc.go.jp>, 1997). 図より, 本調査と JODC のデータを比較すると, 表層付近では変動が見られるが, 約 100 m 以深では同様な傾向を示す. 図 5 (c)(d)では, 溶存酸素は表層で 2.8 ~ 3.1 ml/l, 深さとともに減少して 100 ~ 200 m で 2.5 ~ 2.6 ml/l, それ以深は増加して 600 ~ 800 m で 3.2 ~ 3.4 ml/l, さらに, それ以深では深さとともに 2.3 ~ 2.5 ml/l まで溶存酸素は減少した. 溶存酸素濃度は, ハイブリッド OTEC システム内の海水淡水化システムで海水をフラッシュ蒸発させて, 造水用凝縮器で凝縮して淡水を作る過程で真空ポンプが必要であるが, その動

力を見積る際に必要となる. また, この溶存酸素濃度は, 水産物の養殖・蓄養利用の際に重要となる.

3.2 水塊

T-S ダイアグラムをみると, 水温約 5.0 °C 以下では, 34.4 ~ 34.8 PSU, 水温約 5.0 °C 以上 ~ 約 24.0 °C 以下 (深さ約 800 m ~ 約 100 m) では, 34.4 ~ 36.0 PSU の高塩分水が分布し, 水温が約 24.0 °C 以上 ~ 表層までは, T-S ダイアグラムは弧を描くようなパターンを示す (図 6 (a)~(e)). これは, フィジー共和国は年間降水量も多く, 表層に塩分の低い沿岸水の影響を受けた水が分布しているためと考えられる. 各年の平均値を比べると深さ約 250 m 以深ではパターンは一致し, 水塊の性質は同様と考えられる (図 6 (f)). 深さ約 250 m 付近以浅では, 年ごとに T-S ダイアグラムのパターンは変動し, 水塊の性質は異なっている.

南太平洋諸国 (ハワイ, ニューカレドニア) (<http://www.jodc.go.jp>, 1997), パラオ (池上ら, 2002),

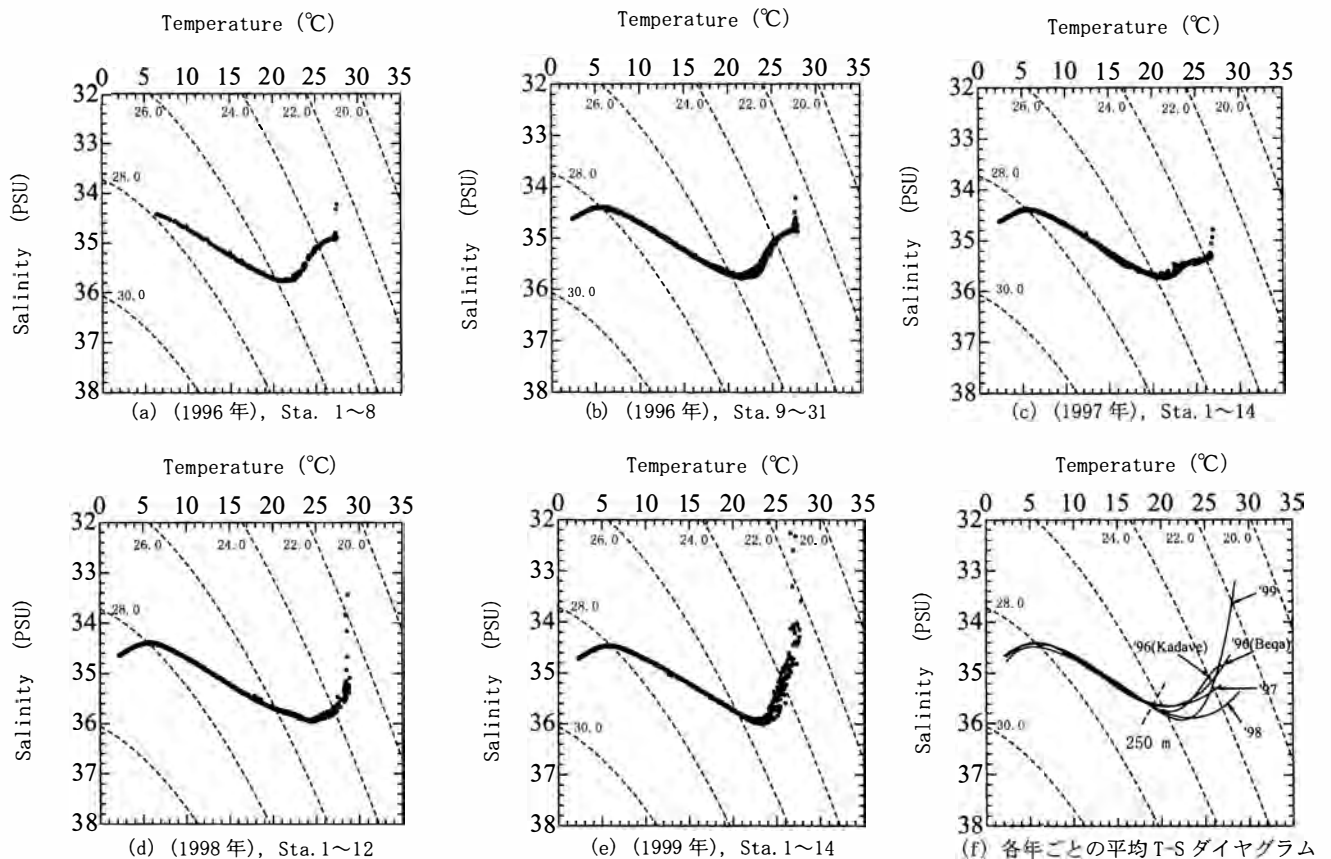


図 6 フィジー共和国 Viti Levu 島 Suva 沖で 1996, 97, 98, 99 年 12 月の各年観測点で得られた水温・塩分ダイアグラム, 破線は密度 (σ_t) (kg/m^3).

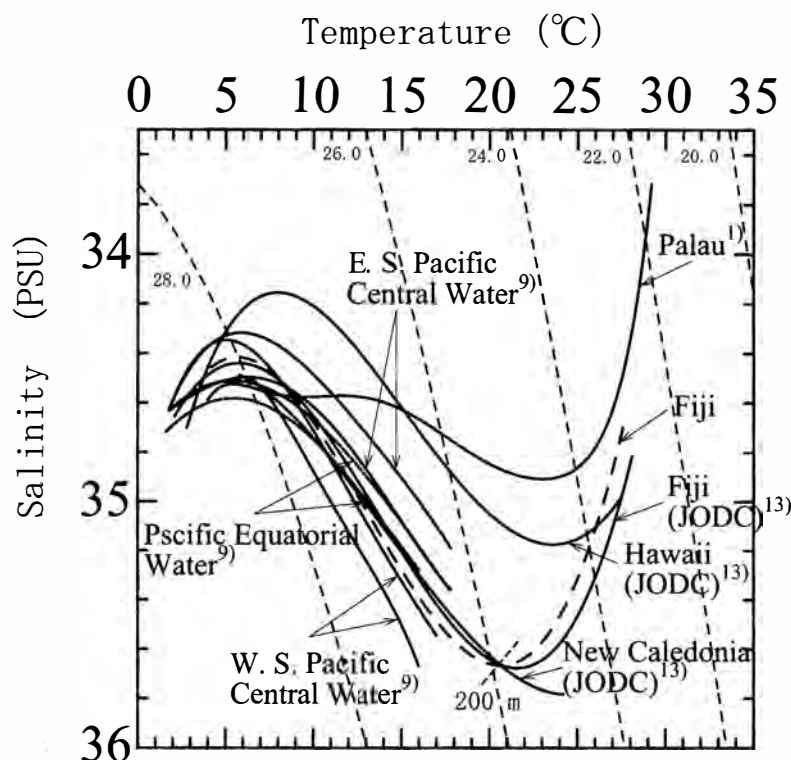


図7 南太平洋諸国（ハワイ，ニューカレドニア，パラオ），東・西南太平洋及び太平洋赤道周辺での T-S ダイアグラム，破線は密度 (σ_t) (kg/m^3)。

東・西南太平洋及び太平洋赤道周辺（Sverdrup ら，1942）の水塊の T-S ダイアグラム（図7）をみると，フィジーの水温-塩分の特性は，深さ 200 m 以深では，フィジー（<http://www.jodc.go.jp>，1997）とほぼ同じ傾向を示し，また，ニューカレドニアとも同じ傾向を示す。深さ約 200 m 以上から表層の範囲では，フィジーの値は弧を描くパターンが大きい。また，水温が約 16 ~ 18 °C 以下では，西南太平洋と太平洋赤道周辺の海域と同じ傾向を示す。パラオの水塊と比較すると，同じ弧を描くようなパターンを示すが塩分濃度分布に差異がみられる。

3.3 海底地形

図2に示した調査対象海域で1996年に測深し，海底地形を調べた（図8（上図））。また，OTEC設置の場所や距離を調べるための観測値に基づく等深線図を示す（図8（下図））。調査海域では，より南東側で深くなる傾向を示した。しかし，環礁に近い Sta. 5, 20, 21, 22, 23 では，深さが浅くなっている。

海底地形に沿って OTEC の海水取水管を設置する場合，詳細な海底地形の起伏状況を調べる必要がある。温度の分布に加えて，以上の海底地形より，

OTEC 用の管路の設置場所は，海底沈設方式を採用した場合には図1の(a)海域で陸から約 12.6 km，(b)で約 9.9 km，(c)で約 9.0 km，(d)で約 5.3 km，(e)で約 12.5 km 以上と考えられる。そのために，陸上に OTEC を設置する場合，最短な(d)海域でも，海水取水管は約 5.3 km 以上の長さが必要となる。

3.4 再生エネルギー

海洋温度差エネルギーの推定値としては確定されたものはないが，1977年に省エネルギーセンターの委員会が行った日本の経済水域内での海洋温度差エネルギーの総量は1年間に 1.0×10^{14} kWh になり，石油に換算すると約 8.6×10^9 t に相当することを示している（日本熱エネルギー技術協会，1977）。一方，表1は，1999年のフィジー共和国の発電・電力消費とエネルギー資源生産・消費量で，1年間の総発電量は， 510×10^6 kWh である（<http://www.cia.gov/publications/factbook>，1999）。その内訳は，化石燃料が 17.65 % と水力が 82.35 % で，水力が大部分を占めている。

OTEC に有効な 5.0 °C の海洋深層水は，本調査海域では 800 m 以深に分布した。フィジー共和国の

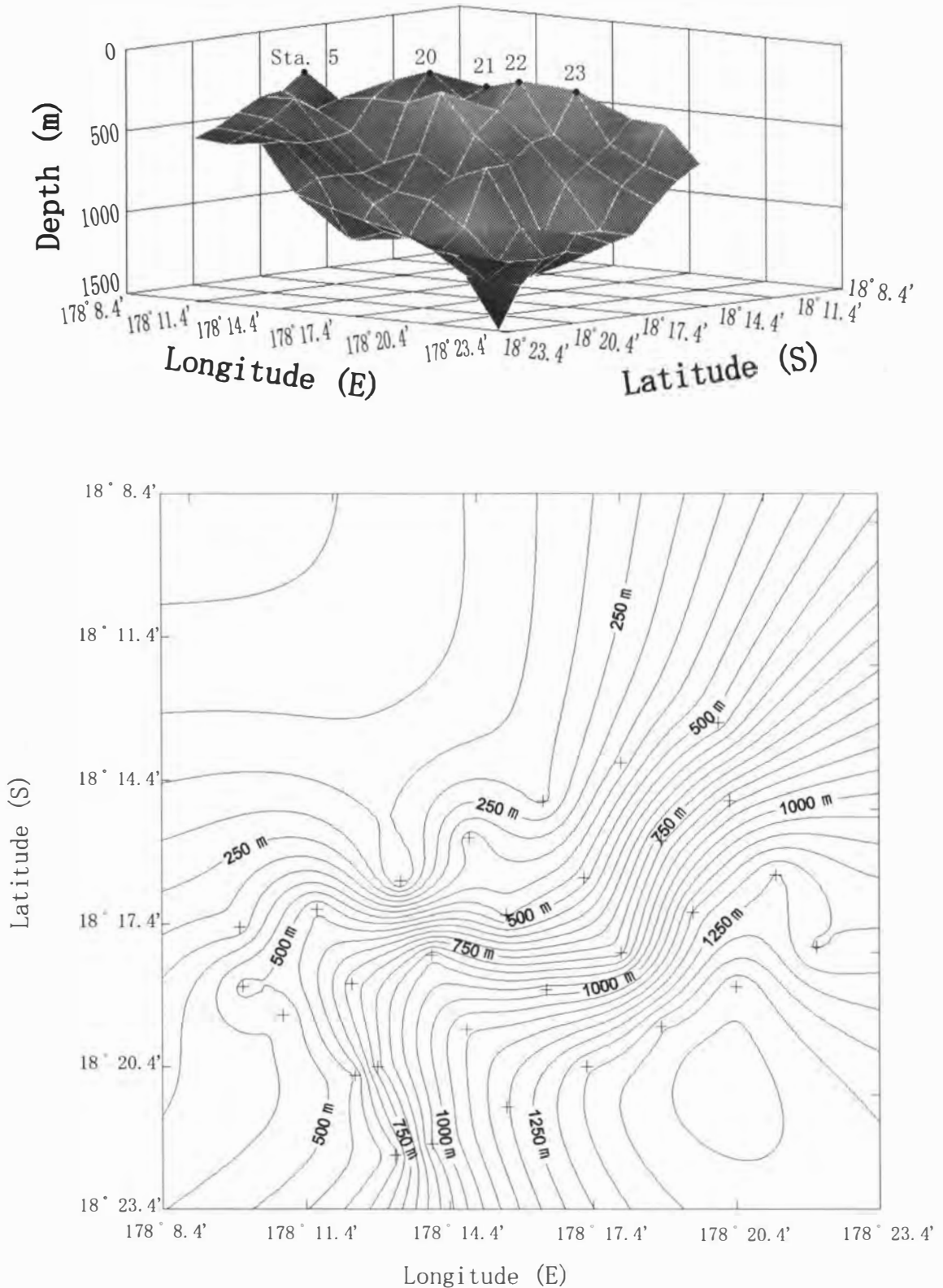


図8 フィジー共和国 Viti Levu 島 Suva 沖の海底地形 (上図) と等深線 (下図)。等深線図中の+印は観測点。

経済水域 (A_{EF}) $1.13 \times 10^{12} \text{ m}^2$ の内で、水深 800 m 以深の面積 (A_F) は $8.9 \times 10^{11} \text{ m}^2$ で全経済水域の約 79% である。また、本調査における表層水温は、 $26.4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 28.9 \text{ }^\circ\text{C}$ であり平均 $27.6 \text{ }^\circ\text{C}$ となる。本調査の 4 年間のデータは、測定期間が 12 月上旬

と限定されているため、JODC の他の 2 月と 5 月のデータを参考にとすると、表層水温は、 $27.4 \text{ }^\circ\text{C}$ と $28.1 \text{ }^\circ\text{C}$ となる。エネルギーの推定における表層平均水温は、本調査及び JODC のデータをもとに $27.0 \text{ }^\circ\text{C}$ を周年平均水温として用いることとする。

表1 1999年のフィジー共和国の発電・電力消費とエネルギー資源生産・消費量 (http://www.cia.gov/publications/factbook, 1999)

Electricity	Electricity production [kWh]	510 million	
	Electricity consumption [kWh]	473.3 million	
	Electricity - production by source	fossil fuel : 17.65 % ; hydro : 82.35 % ; nuclear : 0 % ; other : 0 %	
Energy Resources	Production	Oil	0 (thousand barrels per day)
		Coal	0 (million tons)
		Gas	0 (trillion cube feet)
	Consumption	Oil	6 (thousand barrels per day)
		Coal	0.02 (million tons)
		Gas	0 (billion cubic feet)

そこで、フィジー共和国における OTEC 再生エネルギーの推定では、5.0℃の海洋深層水は 800 m 以深に分布し、表層水温は 27.0℃と仮定し、以下の2つの方法で行った。

高野 (2000) は、海洋温度差のエネルギーを次式(1)で見積っており、これをフィジー海域に適用して再生エネルギー (E_F) を見積ると、

$$E_F = c_p \times m \times \Delta T \quad (1)$$

$$= 4.2 \times 9.17 \times 10^{16} \times 22.0 = 8.47 \times 10^{18} \text{ [kJ]}$$

ここで、

c_p : 海水の定圧比熱 (4.2 kJ/(kg・K))

m : 海水の質量 ($8.9 \times 10^{11} \times 10^2 \times 1.03 \times 10^3 = 9.17 \times 10^{16}$ kg)

ΔT : 温度差 (22.0 K)

ここで、海水の質量 (m) は、フィジー海域の場合は OTEC に利用可能な面積 ($A_F = 8.9 \times 10^{11} \text{ m}^2$) に表層海水平均深さ 100 m と海水の密度 ($1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) を掛けて得られる。温度差 (ΔT) は、表層平均水温の約 27.0℃と深さ 800 m の約 5.0℃との差である。

さらに、このエネルギーの連続的な利用を考える場合には、エネルギーとしては再生可能なエネルギー供給量でなければならない。その値は、この海洋温度差エネルギーを海水の循環に要する時間で除することで求められる。海水の循環期間を 1000 年 (高野, 2002) と仮定すれば、再生エネルギー (E_{FR})

は、次式(2)のようになる。

$$E_{FR} = E_F / \text{海水の循環期間} \quad (2)$$

したがって、フィジー共和国周辺海域では、

$$E_{FR} = 8.47 \times 10^{18} / 3 \times 10^{10} = 2.8 \times 10^8 \text{ [kW]}$$

ここで、海水の循環期間 1000 年は、

$$(1000 \times 365 + 250) \times 24 \times 3600 \approx 3 \times 10^{10} \text{ [s]} \quad (3)$$

この再生エネルギー (E_{FR}) をランキンサイクル熱効率が 2.5% の OTEC により変換すると、OTEC 再生エネルギー (E_{FO}) は 7.0×10^6 kW となり、フィジー共和国の発電出力 5.82×10^4 kW (http://www.cia.gov/publications/factbook, 1999) の約 120 倍となる。

もう一つの推定は、海面から海中への太陽エネルギーの単位面積当たりの熱量 (q) (式(4)) をもとにしたものである (エネルギー変換懇話会編, 1991)。

$$q = \frac{c}{\pi} \left(\frac{h}{k \cdot T'} \right) \left(\frac{\Delta T}{T} \right) \quad (4)$$

ここで、

c : 太陽定数 ($1.35 \times 10^3 \text{ W/m}^2$)

h : 蒸発のモル熱量 (40308.4 J/mol)

k : 気体定数 (8.314 J/(mol・K))

T : 表層平均水温 (27.0℃)

T' : 表面絶対温度 (300.15 K)

ΔT : 温度差 (1.0℃)

再生エネルギー (E_{FR}) は、海面から海中への太陽エネルギーの単位面積当たりの熱量 (q) に、このフィジー海域の利用可能な面積 (A_F) を乗じたものである。太陽エネルギーの大半は海洋表層部で吸収され、蒸発・熱放射・対流を通じて大気との間でのエネルギー交換および海流による輸送に費やされ、海洋深層への熱拡散は極めて小さい。そのために、このエネルギー (E_F) のうち 2% を利用すると仮定する (エネルギー変換懇話会編, 1991) と次式(5)となる。

$$E_{FR} = 0.02 \times q \times A_F \quad (5)$$

$$= 0.02 \times 257.2 \times 8.9 \times 10^{11} = 4.58 \times 10^9 \text{ [kW]}$$

ここで、 A_F はフィジー海域の OTEC に利用可能な面積 ($= 8.9 \times 10^{11} \text{ m}^2$) である。この再生エネルギー (E_{FR}) $4.58 \times 10^9 \text{ kW}$ をランキンサイクル熱効率が 2.5% の OTEC により変換すると、OTEC 再生エネルギー (E_{FO}) は $1.14 \times 10^8 \text{ kW}$ となり、フィジー共和国の発電出力の約 1959 倍となる。

4. 結 論

南太平洋のフィジー海域に適した海洋深層水を利用する海水淡水化装置を組み合わせた OTEC システム (ハイブリッド OTEC システム) の最適設計のための海洋調査を実施し、また、この海域の再生エネルギーについて検討し、以下の結果を得た。

- (1) 1996-99 年の 12 月初旬に Viti levu 島 Suva 沖で実施した 4 回の観測では、水温・塩分の鉛直分布に顕著な違いは確認されなかった。表層水温は、 $26.4 \text{ }^\circ\text{C} \sim 28.9 \text{ }^\circ\text{C}$ で、深さ約 800 m で約 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ の水温が確認された。
- (2) 水温・塩分の鉛直分布では、600 m を境にして以浅は以深に比べてより大きな変動が観察された。
- (3) 溶存酸素の鉛直分布では、水温・塩分と同様に浅い方が、深い方に比べてより大きな変動が観察された。
- (4) T-S ダイアグラムの各年の平均値を比べると深さ約 250 m 以深ではパターンが一致し、水塊の性質は同じで、深さ約 250 m 付近以浅では、年ごとに T-S ダイアグラムのパターンが変動し、水塊の性質が異なっている。調査海域の水温-塩分の特性は、深さ 200 m 以深では、フィジーやニューカレドニアと同じ傾向を示した。深さ約 200 m 以浅では、フィジーの値は弧を描くパターンが大きい。また、水温が約 $16 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下では、西南太平洋と太平洋赤道周辺の海域と同じ傾向を示した。
- (5) 調査海域の海底地形は、南東側で深さが深くなる傾向を示した。しかし、環礁に近い Sta. 5, 20, 21, 22, 23 では水深が浅くなる。陸上に OTEC を設置する場合、(d)の海域では海水取水管の長さは約 5.3 km 以上必要となる。

- (6) フィジー経済水域内での OTEC 用の再生エネルギーは、海洋調査結果を用いて、表層と深層の温度差での熱量と太陽エネルギーの単位面積当たりの熱量の 2 つの方法から試算し、それぞれフィジー共和国の現在の発電出力の 120 倍と 1959 倍となった。

文 献

- エネルギー変換懇話会編 (1991): エネルギー資源工学。オーム社, 178-181 頁。
- <http://www.cia.gov/publications/factbook> (1999).
- <http://www.jodc.go.jp> (1997).
- 池上康之, 浦田和也, 福宮健司, 野田信雄, Gregorio Decherong (2002): パラオ海域における海洋深層水利用のための海洋調査. 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, 27 頁。
- 乾 栄一, 長友洪太, 中岡 勉, 西田哲也, 上原春男, 宮良明男 (1990): 海洋温度差発電設置のための沖永良部海域の海象調査. OTEC, 3, 1-7 頁。
- 日本熱エネルギー技術協会 (1977): 低熱落差発電システムに関する調査研究。
- 佐賀大学理工学部附属海洋温度差エネルギー実験施設報告 (2001): 南太平洋諸国発展のための海洋温度差発電システム. 1-6 頁。
- Sverdrup, U. H., Johnson, W. M. and Fleming, H. R., (1942): The oceans, Prentice-Hall, Inc., 1-1087 pp.
- 高野健三 (2002): 海洋深層水利用研究会ニュース, 海洋深層水のエネルギー量. 6 (1), 8-10 頁。
- Uehara, H., Nakaoka, T., Nagasaki, S. and Yokoyama, H., (1980): Deployment of cold water pipe in the Japan Sea. Proc. 7th Ocean Energy Conf., 14.1-1-14.4-7 pp.
- Uehara, H., Dilao, O. C. and Nakaoka, T., (1988): Conceptual design of ocean thermal energy conversion (OTEC) power plants in the Philippines. Solar Energy, 41 (5), 431-441 pp.
- Uehara, H., Miyara, A., Nakaoka, T. and Nishida, T., (1992): A study of an ocean thermal energy conversion plant using integrated hybrid cycle in the Oki-no-Erabu island. Proc. Second International Offshore and Polar Engineering Conf., 599-606 pp.
- Wolff, A. W., Hubert, E. W. and Wolff, M. P., (1979): OTEC world thermal resource. Proc. Ocean Conf., 13.5.1-13.5.7 pp.

(2003. 5. 6 受付, 2003. 10. 17 受理)

深度 321 m から揚水した富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度の時間変動

Temporal Changes on Nitrate Concentrations in Deep Seawater Pumped up at 321 m Depth in Toyama Bay, Japan Sea

松永 明信¹・黒川 弘子¹・小善 圭一²・高柳 信孝¹
大戸 幹也¹・豊田 孝義³・中島 敏光³

Akinobu MATSUNAGA, Hiroko KUROKAWA, Keiichi SHOZEN, Nobutaka TAKAYANAGI,
Mikiya OHTO, Takayoshi TOYOTA and Toshimitsu NAKASHIMA

Abstract

Concentrations of nitrate in deep seawater pumped up from 321 m in Toyama Bay were determined at an hour interval between September 2001 and March 2003 with a newly designed continuous fully-automated ion chromatography. Nitrate concentrations were usually around 24 μM , but sometimes suddenly changed to 10.1 to 24.8 μM for periods of several hours to several days. The decrease of nitrate concentration was found to be closely associated with temperature rise. It was thought that seawater masses having low nitrate concentration and high temperature might occasionally reach the inlet of the deep seawater intake pipe due to possible vertical and horizontal movements of seawater masses. Stormy weather in winter and typhoon in summer could be responsible for such seawater mass movements.

Key Words: deep seawater, Toyama Bay, nitrate, ion-chromatography, temperature

要 旨

イオンクロマトグラフを用いて、硝酸塩を1時間毎に連続的に自動分析する装置を開発して、2001年9月から2003年3月まで、富山県滑川市の県水産試験場に揚水されている海洋深層水中の硝酸塩濃度を測定した。上記深層水中に含まれる硝酸塩濃度は通常は24 μM 程度であるが、時々10.1~24.8 μM の濃度変動が観察された。濃度変動は時間単位で見られ、数時間から数日間に及んだ。硝酸塩濃度と水温に高い相関が認められ、濃度の減少と水温の上昇が対応した。硝酸塩濃度が低く、水温の高い水塊が深層水の取水口付近へ、水平的又は鉛直的に時々移動してくることが示唆され、原因として冬型の天候や台風等の可能性が考えられた。

キーワード: 海洋深層水, 富山湾, 硝酸塩, イオンクロマトグラフィー, 水温

1. はじめに

海洋深層水は表層水に比較して、①水温が低いこと(低温性)、②硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩等の

栄養塩類の含有量が多いこと(富栄養性)、③有機物や細菌類が少なく、化学的及び微生物学的に清浄であること(清浄性)、④水質の季節的変動が小さく安定していること等の特性を有すると言われてい

¹富山県衛生研究所 (〒939-0363 富山県射水郡小杉町中太閤山 17-1)

²富山県水産試験場 (〒939-8536 富山県滑川市高塚 364)

³海洋科学技術センター (〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15)

る(中島・豊田 1994)。しかしながら、特定深度の深層水中の栄養塩類濃度等が予想外に変動することが示唆されている(豊田ら 1998; 深見ら 2000; 稲葉ら 2001; 木下ら 2002)。

1994年から富山県水産試験場では、滑川市沖の水深 321 m から深層水の揚水を開始し、水産分野をはじめとして、海洋療法、食品加工及び医薬・化粧品等での利用・研究が行われている。Watanabe *et al.* (2000) は 1996 年 8 月から 1 年間にわたって、揚水された海水を毎日採取して栄養塩類濃度等を測定した。その結果、栄養塩類濃度は大きく変動し、硝酸及び亜硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩濃度の変動範囲はそれぞれ 4.5~22.4 μM 、0.86~1.98 μM 、9.9~47.7 μM であった。栄養塩類濃度の変化には季節的あるいは規則的な周期性は見られず、水温及び塩分にも相関は認められなかったと報告している。

こうした海洋深層水の栄養塩類濃度の時間変動の詳細を把握し、その変動要因を解明するためには、1 日 1 回の測定頻度ではなく、より頻繁な栄養塩類の濃度測定の必要性が考えられる。そこで、富山県水産試験場に揚水されている深層水について、硝酸塩濃度を 1 時間毎に連続自動分析する装置として、高速液体クロマトグラフの構成装置を組み合わせ、一部は改造した専用イオンクロマトグラフ(IC)を開発した(松永ら 2001, 小善ら 2001)。開発した連続自動分析装置を用いて汲み上げられた深層水の濃度分析を実施したところ、技術的な問題点が発生した。そこで、長期間にわたって正確な値を得るために検討を行った。ここでは、開発した装置の運用管理状況及び 2001 年 9 月から 2003 年 3 月までの硝酸塩濃度の時間変動と水温の関係を報告する。

2. 実験方法

2.1 揚水施設等の概要及び測定対象深層水

水産試験場の沖合い 2.63 km の水深 321 m から、口径 250 mm の鎧装硬質ポリエチレン管を経由してポンプで海水を揚水し、陸上部は地中の距離が 430 m、口径 200 mm の塩化ビニール管を経て、

20 m³ の受水槽へ 3,000 m³/日で送水されている。受水槽中の深層水を水温測定対象とした。配水施設で一部は熱交換され、水温の異なる深層水が各種魚介類の飼育施設へ配水されている。熱交換することなく低温飼育棟へ送られたものの一部(分岐した専用配管; 流速は 10 L/分)を用いて、硝酸塩を 1 時間毎に測定した。

2.2 海水ろ過装置

深層水には粒子状物質や細菌が混在しており、分析カラムの劣化を速める等、硝酸塩分析装置の維持管理を困難にする。水産試験場では低温飼育棟へ深層水が加圧送水されており、その一部を硝酸塩測定用として更に分岐配管し、開閉栓で圧力を調整してろ過装置に送り、粒子状物質等を除去した。ろ過装置は、アドバンテック東洋(株)のろ過器ハウジング(1 PP-1-FS 型)を 2 個直列連結し、それぞれ 1 μm (公称孔径)及び 0.2 μm (粒子補足性能 99%) のカートリッジフィルター(外径; 70 mm, 高さ; 250 mm)を装着して、0.3~0.5 L/分の流速で深層水をろ過した。フィルターは 2~4 週間毎に交換した。

2.3 イオンクロマトグラフ(IC)装置

高速液体クロマトグラフ用の各種装置を組み合わせ、IC 方式で硝酸塩の連続自動分析装置を工夫し組み立てた。装置の構成及び IC の分析条件は既に報告したもの(松永ら 2001, 小善ら 2001)に準じ、その概要等を図 1 に示した。連続自動分析装置の分析部にろ過深層水を送るペリスタポンプ駆動送液部分のチューブにシリコンチューブ(ST)を用いた。ST 及びその両端の配管は 1 ヶ月毎に交換した。

2.4 水温計

水産試験場の受水槽中にアレック電子(株)製の CO MPACT-CT (水温分解能 0.01 °C) センサーを設置した。10 分毎に計測し、メモリに蓄積されたデータを定期的にパーソナルコンピュータ(PC)に取り込んだ。また、水産試験場では深層水監視用の水

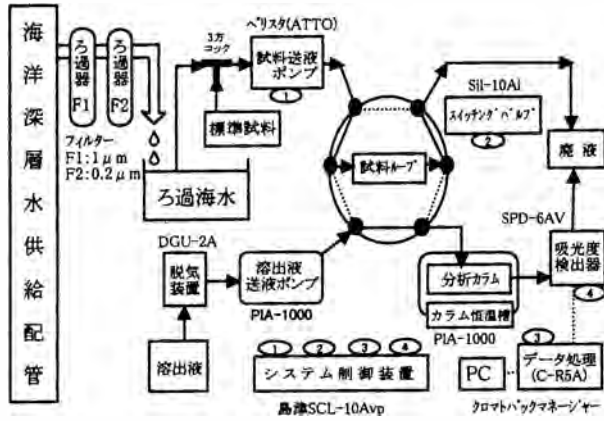


図1 硝酸塩の連続自動分析装置のシステム構成
 システム制御装置から次の構成装置に制御信号を出力する。①試料（ろ過海水）送液ポンプのオン、オフ。②スイッチングバルブの切り替え（試料ループを海水で置換する接続モードと分析ラインに接続モードの切り替え）。③データ処理装置の始動（終了時間は装置が内臓）。④吸光度検出器のゼロ点調整。海水分析は1時間サイクル、標準試料は30分サイクルで各装置を制御した（松永ら2001）。

温計が配水施設の送水ポンプの直後に組み込まれ、1時間毎の測定値（水温分解能 0.1℃）が記録紙に出力され、1日平均値がPCに記録されている。これらの値も解析に利用した。

3. 結果と考察

3.1 連続自動分析装置の維持管理

2001年2月から開発した装置を用いて深層水をろ過せずに連続的に測定したところ、5月になって測定値が24μM程度から16μM程度に、1週間で単調に直線的に減少することに遭遇した。別のIC装置で深層水を直接手動で測定したところ、その値は24μM程度であり、開発した装置による連続分析では濃度が減少していることが分かった。そこで、ペリスタポンプ駆動送液部分のチューブ及び配管を蒸留水で洗浄したところ、分析値は一時的に通常値に回復したが、1週間も経過しない内に再度濃度減少現象が発生した。その原因として、駆動部のチューブ内に細菌等を含む汚染物が沈着して、硝酸塩が消費されることが想定された。また、粒子状物質や藻類が沈着するためか、6月には分析カラムが1ヶ月以内に圧力上昇し、分離性能が劣化した。そこで、深層水中の微生物等を除去するため

に、実験方法に記載したろ過装置を用いて、深層水をろ過して分析することに変更した。またペリスタポンプ駆動送液部のチューブも、タイゴン、ファーマイド及びシリコンと材質の異なるものを比較し、性能を検討した。ろ過した深層水を用いた場合、タイゴンやファーマイドでは徐々に濃度が減少したが、シリコンでは少なくとも1ヶ月間は問題が認められなかった。チューブ材質としてシリコンが優れている理由については不明であるが、ペリスタポンプのチューブは、従来のタイゴンからシリコンに変更した。ろ過装置のフィルターやペリスタポンプの配管等については、実験方法で述べたように定期的に交換することにより、深層水中の硝酸塩濃度の時間変動を正確に把握することが可能になった。なお、本装置を用いた場合の硝酸塩分析カラムの寿命は5～8ヶ月間であった。

3.2 富山湾滑川海洋深層水の硝酸塩濃度の時間変動

2001年9月20日から2003年3月末までの硝酸塩濃度の測定値を図2に示した。硝酸塩濃度の変動範囲は10.1～24.8μMであり、大部分は24μM程度であるが、しばしば濃度の増減が起きていた。2001年10月～12月は硝酸塩濃度変化が少なく、1割程度の減少が数回観察されただけで、ほぼ一定（24μM）していた。一方、2002年1月～3月には2～3日間継続する3割程度の濃度減少がしばしば観察された。5～6月には濃度は比較的安定していたが、4月中旬、7月上旬、9月上旬、10月下旬～11月中旬、2003年1月上旬～2月下旬に大きな減少がみられた。2001年秋冬期と2002年の同期を比較すると、濃度減少が起きる時期については2002年の方が1～2ヶ月早まっていた。2001年秋には台風が日本列島へ接近することもなく、天候は穏やかな日々が続いた。一方、2002年は11月から寒い日々が続いて冬の訪れが早く、2003年2～3月は比較的暖かい日々が続いた。この冬型天候の発生時期の差異が、硝酸塩濃度変動を引き起こす時期の異なる誘因となった可能性が考えられる。2002年7月上旬には季節はずれの台風6及び7号が日本に上陸し、9月上旬に台風

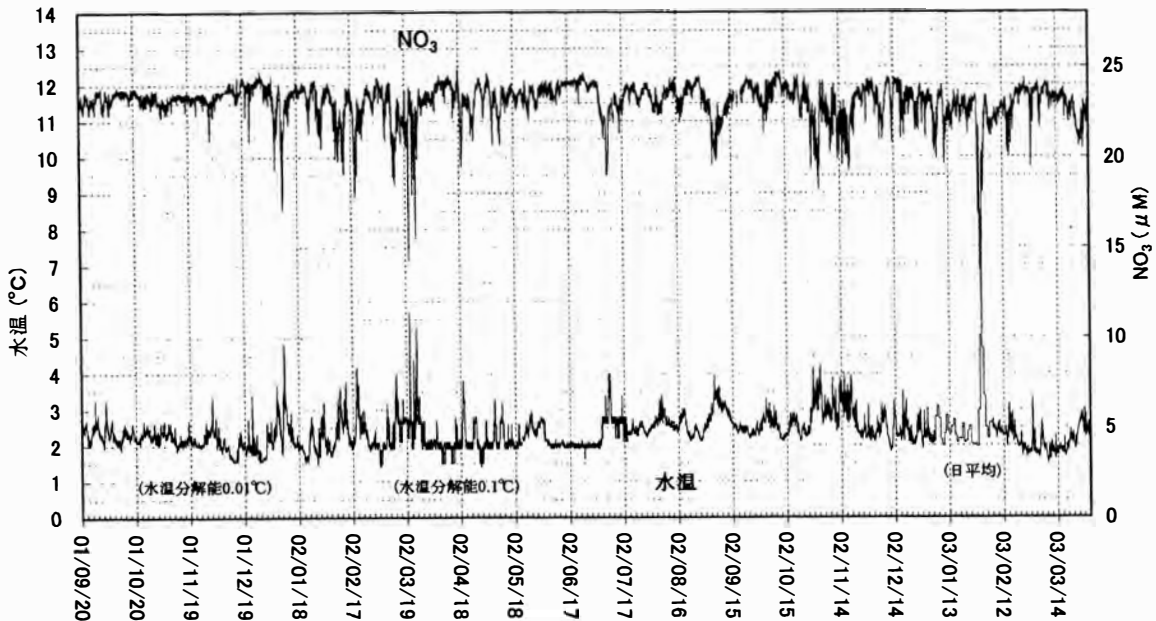


図2 富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度と水温の時間変動

2001年9月20日から2003年3月31日まで、富山県水産試験場に深度321mから揚水された海洋深層水について、低温飼育棟の配管中のものの硝酸塩を1時間毎、受水槽中の水温を10分毎に測定した。水温分解能は0.01°C、ただし、2002年3月1日～5月22日、7月5日～21日は0.1°C、2003年1月5日～2月5日は日平均。

15号が朝鮮半島を直撃しており、こうした海洋気象の影響も考えられる。

3.3 硝酸塩濃度と水温との関係

水産試験場の揚水量は年間を通して一定（約3,000 m³/日）であり、水深321mの深層水取水口から約3km離れた受水槽に深層水が到達するまでの時間は約1時間と算出される。受水槽の水温は取水口付近の水温を正確に示すものではないが、取水口付近の水温を反映するものと考えられる。深層水水温の上昇と硝酸塩濃度の減少との対応が顕著であることが、図2より明らかである。図2の2001年12月20日から1ヶ月間を拡大して図3に示した。水産試験場の深層水の硝酸塩濃度は少なくとも時間単位で変動していることが判明した。また、1日に1回測定すると仮定して、正午付近の測定値だけを併記した。1日に1回の測定では数時間の濃度変動を把握することは困難である。1時間毎の自動分析装置の開発によって、数時間見られる突然の硝酸塩の濃度変動の把握が可能になった。Watanabe *et al.* (2000) の調査では硝酸塩濃度と水温の変化との間に相関が認められなかった。その理由は、1日に1回の硝酸塩測定では時間間隔が

長く、しかも深層水の採取時刻と水温測定時刻がかならずしも一致しないこと等に起因すると推定される。

図2に示した2002年の測定結果を2月1日～2月28日（冬季）と8月15日～9月14日（夏季）に分けて、硝酸塩濃度と硝酸塩測定開始時刻に最も近い時刻の水温との相関を検討した（図4）。いずれの時季も硝酸塩濃度と水温が高い相関を示した。Watanabe *et al.* (2000) は深層水取水口付近の水温に比較して、揚水された深層水の水温は1～2°C高いと報告している。図4から明らかなように、冬季の相関曲線に比較して、夏季のそれは高温側へ0.5°C移動している。これは揚水中に深層水が影響を受ける環境温度の違いによるものと推定される。取水口付近では硝酸塩濃度と水温との関係は、年間を通して変わらないことが示唆される。

計測中の2003年1月下旬に、硝酸塩濃度は10.1 μMまで最も大きく減少した。受水槽の水温計及び深層水監視装置のプリンターの故障のため、詳細な水温は測定できなかったが、1時間毎の測定値の1日平均値は保存されており、最大値は5°Cを超えて大きく上昇した。過去にこの程度の大きな水温変動が見られたのは1996年6月20日である。

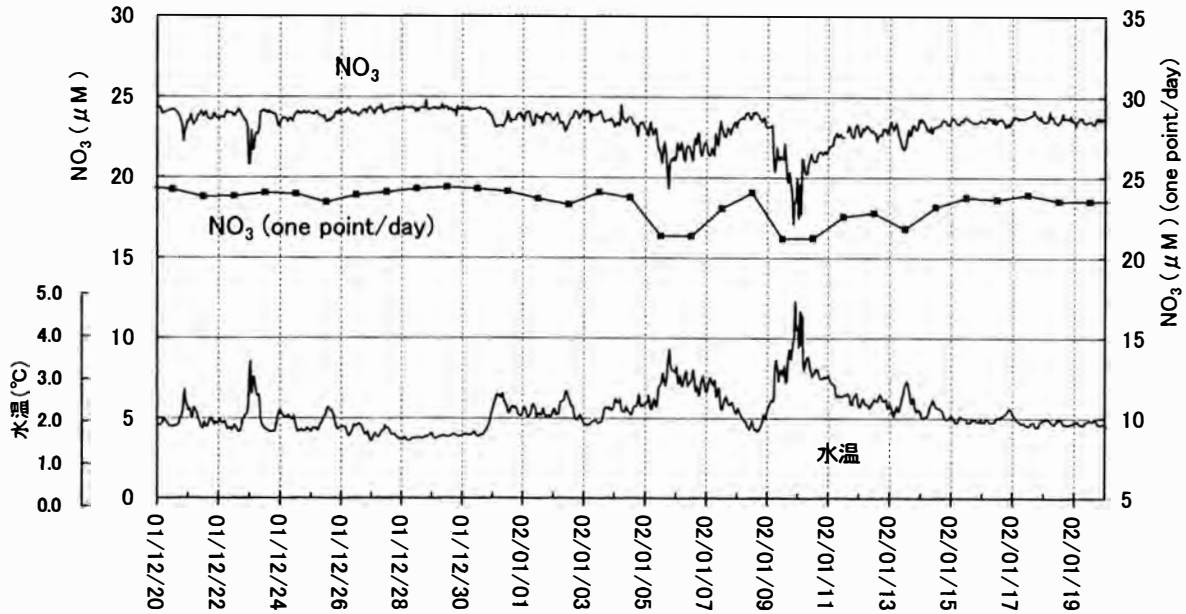


図3 富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度と水温の時間変動
 図2に示した2001年12月20日から2002年1月19日の拡大図。NO₃⁻、1時間毎の硝酸塩濃度；NO₃⁻ (one point/day)、1日に1回、正午に近い時刻の硝酸塩濃度；水温、10分毎の水温。

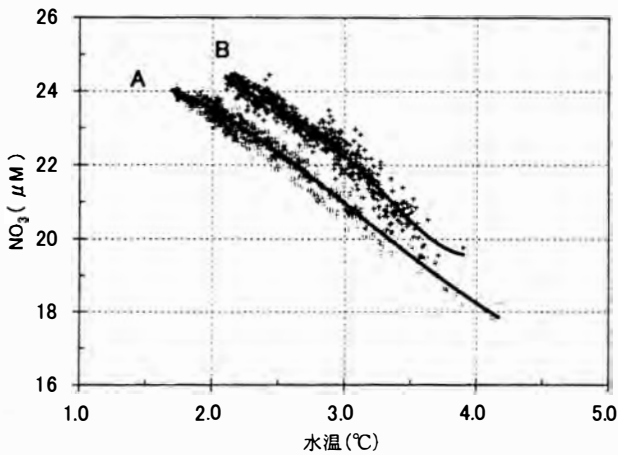


図4 富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度と水温の関係

図2の2期間について、硝酸塩濃度とその測定開始時刻に最も近い時刻の水温との関係を解析した。□；2002年2月1日から2月28日，n=672（30分間隔の測定を含む），実線Aは近似曲線； $Y = -0.0117X^4 + 0.3595X^3 - 2.6813X^2 + 4.8062X + 21.917$ ， $R^2 = 0.9677$ 。+；2002年8月15日から9月14日，n=710（測定の欠落あり），実線Bは近似曲線； $Y = 1.1463X^4 - 13.0911X^3 + 54.674X^2 - 101.6X + 95.583$ ， $R^2 = 0.9411$ 。

したがって、富山湾滑川海洋深層水の取水口付近では、数年に1回程度の頻度で、5℃以上の日平均水温変動を伴う短期間の水質変動が起こっていることが考えられる。

4. まとめ及び今後の展望

本研究で次のことが明らかになった。①開発した1時間毎の自動分析装置は、揚水されている海洋深層水中の硝酸塩濃度の時間変動を1年間の長期間にわたって計測するために、十分に実用的な装置である。②富山県水産試験場の深層水中の硝酸塩濃度は通常は24μM程度であるが、時々2～3割程度減少し、稀には半減することもあり、冬季には減少の割合及びその頻度が高い。③硝酸塩濃度の減少は水温の上昇と対応する。

水産試験場の深層水取水口付近では、性質の異なる水塊が時々移動しているものと推定された。変動の大部分で硝酸塩濃度の低下、高水温を示すことから、何らかの原因で浅い深度の水塊が降下して取水口に達している可能性が考えられる。可能性としては内部波による水塊の上下振動、あるいは移流による異なった水塊の到達等が考えられる。富山県滑川深層水の取水口は、水温躍層の下限近くに位置するために、浅い方の水塊が降下してくると水温と栄養塩類は大きく変動する。一方、深い方の水塊が上昇してきても、同程度の深度では、水温と栄養塩類の変動は小さい。したがって、揚水される深層水の水質の変動を小さくするためには、取水口を水温躍層

の下限から十分に深いところに設置する必要がある。

富山県では水産試験場及び 20 km 離れた入善町で海洋深層水が揚水されている。両施設で硝酸塩濃度の計測調査を実施し、両施設の取水口付近での水温及び流向・流速等の観測を行うことにより、硝酸塩濃度等を指標として、富山湾内での深層水の詳細な動態及びその要因の解明が期待されるものと考えられる。

文 献

- 深見公雄・松本純・門田司・中野雄也・西島敏隆 (2000) : 海洋深層水の水質変動と微細藻類に対する増殖ポテンシャルの関係, 海深研, 1, 27-31.
- 稲葉栄生・勝間田高明・安田訓啓 (2001) : 駿河湾 300 m 層の流動と水温の変動, 海深研, 2, 1-8.
- 木下淳司・近磯晴・宮原司 (2002) : 小田原沖海洋深層

水の栄養塩類特性について, 海深研, 3, 7-13.

- 松永明信・小善圭一・黒川弘子・山本敦・大浦徹 (2001) : イオンクロマトグラフィーによる海洋深層水中の硝酸塩の連続自動分析, 富山衛研年報, 24, 132-137.
- 中島利光・豊田孝義 (1994) : 海洋深層水の資源的価値とその利用, 月刊海洋, 26, 133-138.
- 小善圭一・松永明信・黒川弘子・大浦徹・山本敦 (2001) : 海洋深層水中の硝酸塩の連続自動分析, 海洋深層水利用研究会小田原大会講演要旨集, 33-34 頁.
- 豊田孝義・中島利光・黒山順二 (1998) : KAUL の汲み上げ深層水中の栄養塩類, 海洋深層水利用研究会高知大会講演要旨集, 24-25 頁.
- Watanabe, M., J. Ohtsu and A. Otsuki (2000): Daily variations in nutrient concentrations of seawater at 321 m depth in Toyama Bay, Japan Sea, J. Oceanogr., 56, 553-558.
- (2003. 6. 26 受付, 2003. 11. 21 受理)

Ocean fertilization using deep ocean water (DOW)

Masayuki Mac TAKAHASHI¹ and Tohru IKEYA²

Abstract

Food production in the world is likely to become an urgent subject needing to be solved in the near future due to the steady increase of the world human population and the deterioration of farm lands for agriculture in the most productive areas. A large stock of nutrients in deep ocean water (DOW), below the euphotic zone of the world ocean, has great potential for enhancing existing marine production which could subsidize the production of animal protein on land. Three trials of ocean fertilization currently being carried out in Japan to increase fish and other marine products are summarized as follows: mixing more nutrient-rich bottom water with nutrient-poor shallow water by means of an artificial seamount and prevailing current actions on the continental shelf; adding more nutrient-rich deep ocean water (DOW) to nutrient-poor surface water after it has been heated from passing it through electric power plants as a coolant; and directly discharging more nutrient-rich DOW to nutrient-poor shallow euphotic water as density current after mixing it with warm surface water.

Key Words: *deep ocean water, DOW, ocean fertilization, seamount, primary production, phytoplankton, fish production, continental shelf, open ocean, nutrients, density current*

1. Introduction

Food security has always been one of the most important subjects for human society. The "Green Revolution", which greatly contributed to enhancing agricultural production in the world over the last 50 years, is now facing deteriorating farm lands due to over-use of fertilizers and agricultural chemicals. No new useful crop strains have been developed over the last few decades. These factors make it difficult for any further increases in food production, or to even maintain the existing level of food production. Fisheries catches, which support the human food supply mainly as animal protein, are also decreasing because of over-fishing and environmental deterioration of fish habitats through various human activities (Takahashi, 2000).

Among the biological communities in this biosphere, the coral reef community is known to have the highest level of primary production, and average production of a coral reef is as high as 4000 g dry-weight.m⁻².year⁻¹ of organic matter (Whittaker and Likens, 1975). However average production in other marine communities is about 1/10 of the coral community, or even lower such as: 500 g dry-weight.m⁻².year⁻¹ for upwelling regions; 360 g dry-weight.m⁻².year⁻¹ for continental shelf waters; and 125 g dry-weight.m⁻².year⁻¹ for pelagic oceans. These low levels of production in marine environments are mainly a result of limited nutrient availability in the euphotic zone, where primary producers such as phytoplankton carry out photosynthetic production.

Primary production in most of the ocean is ex-

¹Department of General Systems Studies

²Department of Life Sciences, Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

pected to be enhanced if nutrient availability for primary producers can be improved. There is no question that primary production can be stimulated by adding limiting nutrients to a given euphotic water body, whether they are enclosed in experimental culture flasks, or are mesocosm containers having a volume such as 1 to over 1000 tons (Bienfang, 1970; Ishizaka *et al.*, 1983; Takahashi *et al.*, 1982). There have also been several trials to improve actual nutrient environments for natural algal communities by bringing up subsurface water containing more nutrients into nutrient-poor euphotic zones (Roels *et al.*, 1971; Roels, 1980; North, 1977, 1987). Gundersen and Bienfang (1970) suggested using cold deep ocean water (DOW) for cooling electric power plants followed by the use of the heated nutrient-rich DOW for ocean fertilization. The Fisheries Agency of Japan enacted the "Organic Law of Fisheries" in 2001, to strongly stimulate efforts to maintain existing stocks of fish and other fishing targets; and to increase future stocks around the exclusive economic zone (EEZ) of the Japanese islands. Ocean fertilization is one of the possibilities to meet those goals.

Direct ocean fertilization using DOW was tested experimentally in Toyama Bay in the summer of 1989 and 1990. Twenty-six thousand tons of DOW was pumped up from 220 m and spread across the surface after being mixed with two parts of surface water. Various baseline data were obtained from the experiment (Nakata *et al.*, 1991; Iseki *et al.*, 1994). Fertilization effects of DOW were recognized by the recovery of a seaweed community along the flow of DOW that was discharged from the Kochi Deep Seawater Research Laboratory (Watanabe *et al.*, 2000; Hayashi *et al.*, 2003). Due to low concentrations of nutrients even in the

DOW, a huge amount of DOW was required as well as a large amount of energy for pumping. Thus, natural energy, such as ocean thermal energy conversion (OTEC), was suggested as a way to meet pumping and other energy requirements in the open ocean (Otsuka, 1997). A relatively large-scale ocean fertilization project, in a warm offshore ocean, has been proposed to create a large new fishing area (Takahashi *et al.*, 1993; Matsuda *et al.*, 1999; Matsuda *et al.*, 2002).

Three research programs testing ocean fertilization using the nutrients contained in DOW have been carried out in Japan. The first is an experimental evaluation of primary production stimulated by nutrients brought up by an artificial seamount designed to enhance turbulent mixing. The second is an evaluation of primary production stimulated in coastal waters using nutrients in heated DOW after it passed through a power generation plant. The third is an experimental evaluation of stimulating surface primary production by directly spreading DOW pumped up into the euphotic zone in the open ocean. Construction of artificial seamounts is restricted to continental shelves shallower than 200 m because of increased economic and engineering difficulties at greater depths. The use of DOW as power plant effluent is also restricted to near shore areas, as well as being restricted to obtain DOW. The direct use of DOW of the third type has no major limitations by depth and distance from shore but there are other additional requirements such as a strong structure that can stand in open ocean conditions, a structure large enough to have a positive effect, securing a suitable energy supply and so on. Each experiment mentioned above involves several new technological developments. These include efficient pumping of near bottom water to the euphotic zone using a combination of artificial

seamounts and current actions, pumping up DOW from a depth of a few 100 m and keeping it within the euphotic zone by controlling its temperature by passing it through cooling thermal plants, or diluting it with warm surface water to minimize diffusion for at least a few days.

2. Background concept for ocean fertilization

Marine production, including that of fish and sea mammals, depends entirely on primary production by photosynthetic organisms (Ryther, 1969). It is therefore essential to increase primary production in order to enhance marine production. Primary production in the ocean is mainly controlled by available solar radiation or nutrient supply. As solar radiation is unamenable to control by human efforts, nutrient supply is the target to increase marine primary production (Takahashi, 2000).

In the ocean, all nutrients acting as bio-elements generally increase in concentration with depth, tend to reach a maximum concentration around 1000 m, and remain at high concentrations almost down to the bottom (Sverdrup *et al.*, 1942). This nutrient accumulation in the subsurface water is due to decomposition of organic matter by heterotrophic organisms. Thus, oceanic primary production will be enhanced if nutrients in DOW can be supplied to the euphotic zone, where photosynthesis is carried out. Energy required to raise DOW to the sea surface using a mechanical method, such as pumping, is equivalent to 1/1000 of energy for heating DOW so that the specific gravity of DOW equates with that of surface water (Isaacs and Schmitt, 1969).

Among about 30 bio-elements required by phytoplankton, the macro-elements nitrogen,

phosphorus and silica and the microelement iron are apt to be in insufficient supply in the euphotic zone of the ocean. An unbalanced supply of nutrients, such as one low for silica but high in other elements, discourages the growth of diatoms, so a phytoplankton community poor in diatoms develops. Similar species changes also occur due to changes in nutrient concentrations even with a balanced composition: lower concentrations encourage small phytoplankton whereas larger cells are stimulated at higher nutrient fluxes. Dominance of large diatom species supports a classical straight food chain contributing to fisheries organisms. However, dominance of small phytoplankton species does not give much enhancement effect to fisheries organisms but it enhances others.

Furthermore, it takes at least one or more days to promote phytoplankton growth by changing nutrient environments using quick dilution, then certain levels of nutrient concentrations have to be maintained for a certain time period to initiate phytoplankton growth. Due to its high density, DOW pumped into the euphotic zone will tend to sink below the euphotic zone before the nutrients in it are taken up by primary producers. To achieve effective ocean fertilization, it is necessary to prevent sinking and rapid dilution of DOW in the euphotic zone. Thus, adjustment of DOW buoyancy by heating it with the waste heat of a power generation plant, mixing of DOW with surface water, or physical confinement of discharged water or some other means is required.

Nitrate is one of the essential nitrogenous nutrients that are in limited supply in the ocean. The total amount of nitrate in DOW would be as much as 600×10^9 tons N, which is more than 6000 years worth of nitrogenous nutrients currently used in agricultural activities around the

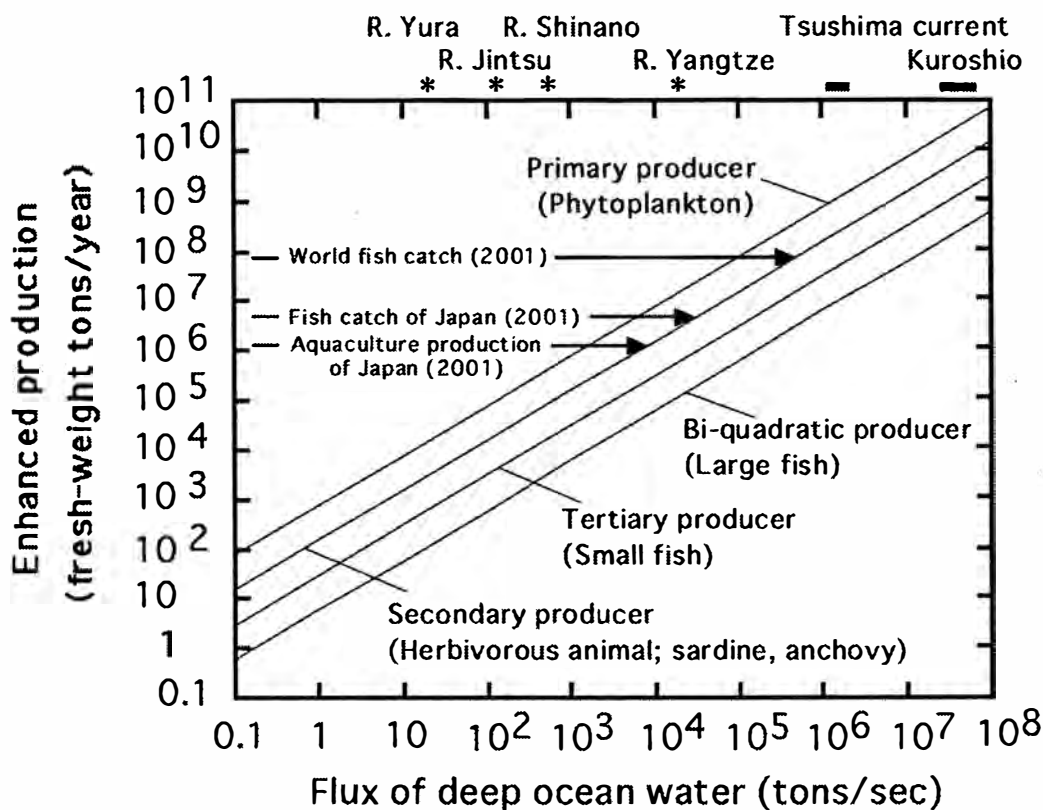


Figure 1. An estimation of enhancement of primary, secondary, tertiary, and bi-quadratic production using deep ocean water (Iseki, 2000). (The original figure was redrawn for the English version based upon the assumptions mentioned in this text).

world: This is based on the assumption of $30 \mu\text{M}$ as the average nitrate concentration of DOW below 200 m in the entire world ocean and 95 % for DOW percentage in the total seawater. The amount of phosphorus nutrients in DOW is in even greater amounts for agricultural use than nitrogen.

Under natural conditions, subsurface nutrient rich water comes up to the surface very slowly in most sea areas but at rather rapidly in a few limited cases such as upwelling and during seasonal vertical water mixing. In the former case, frequent nutrient supplies stimulate primary production, which result in greater fish production, and support robust fisheries (Ryther 1969).

Iseki (2000) predicted possible fertilization effects using DOW under the following assumptions: (1) DOW contains $30 \mu\text{M}$ of nitrate and other bioelements in balanced concentrations; (2) the nitrogen to carbon atomic ratio of phyto-

plankton using nitrate is 16:106; (3) the conversion factor for organically combined carbon to organic matter production by phytoplankton is two and that for dry-weight to fresh-weight is five; and (4) the ecological efficiency for material and energy transfer between each trophic level throughout the food chain is 20 %.

As shown in Figure 1, the upwelling rate of DOW at $0.1 - 1 \text{ ton}\cdot\text{s}^{-1}$ (about 10^4 to 10^5 tons per day) could produce several 100 to 1000 fresh-weight tons per year of primary production which could support several 10 to 100 fresh-weight tons per year of secondary production by planktivores such as sardines, anchovies and so on. To increase secondary production to be as large as the yearly fish catch of Japan (5×10^6 fresh-weight tons in 2001), about $10^5 \text{ ton}\cdot\text{s}^{-1}$ (10^{10} tons per day) of DOW is required. To reach the level of the world fish catch in 2001, the amount of DOW required is in the order of about 10^6

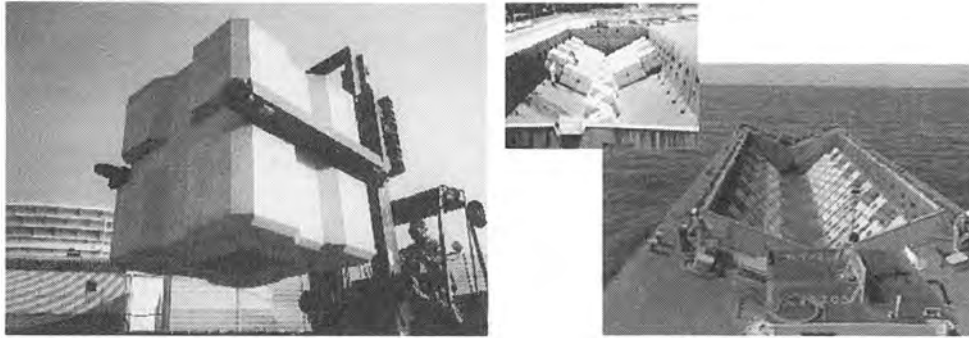


Figure 2. “Ashcrete” blocks (made from flyash cement) used to construct underwater seamount: a (left). an Ashcrete block; b (right). delivery of Ashcrete blocks from a bottom-opening barge at sea (Suzuki, 2000).

$\text{ton}\cdot\text{s}^{-1}$ (10^{11} tons per day) for planktivores.

Ocean fertilization using subsurface nutrient-rich water could be achieved anywhere in the ocean. However, areas cannot be expected to achieve effective fertilization where subsurface water has low levels of nutrients and are subject to extensive and frequent vertical water mixing (due to low water column stability).

3. Experimental approaches to ocean fertilization

3.1. Artificial seamount

On continental shelves shallower than about 200 m, bottom water contains more nutrients than the shallower water. Surface primary production could therefore be enhanced if bottom water is mixed with nutrient-poor shallow water by tidal or other currents. To increase fish and fisheries organisms on the continental shelf, some enhancement to primary productivity can be made possible by supplying nutrients from the bottom water to the euphotic zone. An underwater, dual-cone seamount has been proposed as an effective way to achieve water mixing between the bottom and the shallow layers (Suzuki, 1995). According to flume experiments, the most effective form of the conical seamount was a peak height of 30 m and the width of 400 ~ 600 m for 100 m water depth.

In the area of 100 m water depth, the total volume of each seamount was $330 \times 10^3 \text{ m}^3$. Concrete blocks approximately 1.6 m each side (4.1 m^3 in volume, about 7 – 8 tons in weight) was proposed as a basic unit to construct a twin-cone type seamount (Figure 2a). Concrete blocks were delivered to the sea floor by free falling from a bottom-opening barge (Figure 2b). Since the location of each block on the sea floor varies according to the prevailing direction and speed of the current during its free fall, the delivery point of the blocks from the barge is controlled under consideration of the current conditions. In flume experiments of 1/100 in scale, the loss rate of blocks due to dispersion and burial was less than 30 % during the random free fall operation. Since there is some free space around blocks (total free space is about 50 % of the seamount), total volume of blocks required to construct one twin-cone seamount with a cone height of 30 m and radius of 120 m is about $210 \times 10^3 \text{ m}^3$. The transverse direction of the ridge between the dual cone seamount was set at the sea floor to cut across the prevailing current in the area to achieve the most effective mixing of bottom water with shallow water.

Because of the large amount of material required to make concrete blocks to construct an artificial seamount, it is essential to obtain suit-

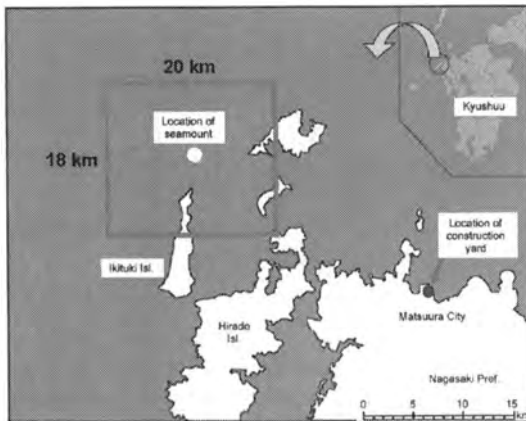


Figure 3. Map of the construction site for the underwater seamount off Ikituki Island, Nagasaki Prefecture (Suzuki, 2000).

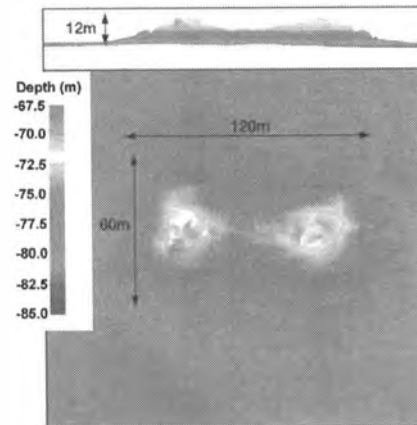


Figure 4. Shape of the underwater seamount constructed off Ikituki Island, Nagasaki Prefecture. Seamount structure was determined using the underwater depth sounding (Suzuki, 2000).

able materials that are cheap, bulky, plentiful, do not cause environmental destruction by damaging hills or beaches, and cause no major environmental deterioration of seawater by leaking heavy metals and other hazardous chemicals. Flyash produced from electric power plants using coal was therefore chosen as the material for making the concrete blocks (Suzuki, 1999). Despite increases in flyash production, no demand for practical usage has developed, and as matters stand, almost all extra flyash tends to be dumped into shallow coastal waters in reclamation projects.

Flyash concrete blocks having a unidirectional pressure strength of more than $1.96 \times 10^5 \text{ Nm m}^{-3}$ was advanced under the following production conditions (by weight): 65 % flyash, 11 % cement, 23 % water, and 1 % mixing agent (Suzuki, 2000). Sonication treatment was used to mix the contents, which saved the quantity of both water and cement used in the normal procedure; and resulted in a shorter incubation period, no adhesion of the concrete mixture to the mold, and no cracking. Concrete blocks made of flyash are called "Ashcrete" blocks. The specific gravity of Ashcrete blocks varied from 1.7 to 1.9 depending upon the quality of flyash used,

which is lighter than an ordinary concrete block of 2.3. Since the light-weight Ashcrete blocks do not sink easily into muddy bottoms, they are suitable for constructing underwater seamount on muddy or sandy sea floors. Furthermore, a steady increase in strength of Ashcrete blocks in seawater with time is another advantage. Safety for various marine organisms due to possible leaching of chemicals from Ashcrete blocks and the succession of living colonies on the blocks have been assessed (Marino Forum 21, 1989; Collins *et al.*, 1992).

A seamount was experimentally constructed at a depth of 84 m on the continental shelf off Nagasaki Prefecture as shown in Figure 3. This was a research and development project (1995-2000) of the Marino Forum 21, which was supported by the Fisheries Agency of Japan (Suzuki and Takahashi, 1997; Suzuki, 2000). About 5000 Ashcrete blocks were set over 3 years (1997-1999), until a twin-cone seamount with a peak height of about 12 m, width of 120 m and a side width of 60 m was constructed (Figure 4). A simulation model predicted that strong upwelling would result from a reciprocal tidal current across the seamount (Suzuki 1995, Honda, 2000). During the course of construc-

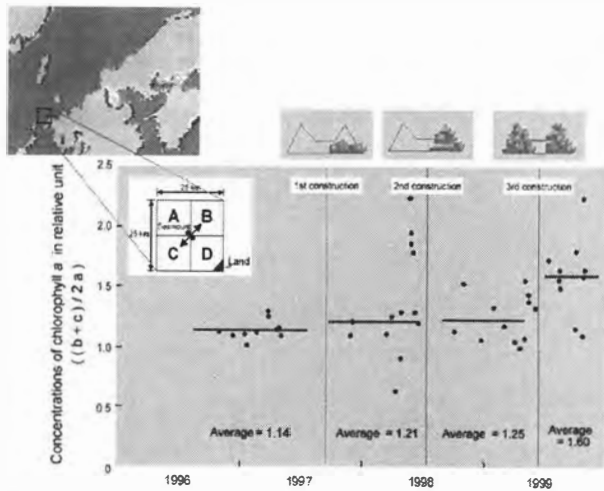


Figure 5. Changes in chlorophyll concentrations detected by satellites around the seamount during construction. The areal mean of the chlorophyll concentration (b+c) for section B and C was normalized using data for the offshore reference Section A(a). The arrows crossing the seamount indicate the direction of the tidal current around the seamount. The relative average chlorophyll concentration $((b+c)/2a)$ shown by horizontal bars increased by about 1.4 times when 75 % of the seamount had been completed (compared to the condition without seamount) (Kumagai *et al.*, 2000).

tion, chlorophyll concentrations in the surrounding area of the seamount, detected by satellites, showed a steady increase by about 1.4 times the average when 75 % of the seamount was completed (Figure 5) (Kumagai *et al.*, 2000). Fishing operations also showed an obvious increase of fish catch in the area (Figure 6) (Tomoda and Nishimura, 2000). Fresh-weight fish catch in the area of 18 km × 20 km around the seamount (under construction) increased from 250 tons (mostly saurel) in 1996/97 to 1500 tons (mostly anchovy) in 1998/99. A large number of fish schools were actually recognized by direct observations of a Remotely Operated Vehicle (ROV) elsewhere around the seamount. They were composed various species of juveniles and adult fishes including many commercially valuable fishes.

ROV observations also showed various species of organisms attaching to the surface of Ashcrete blocks, which created a rich rock eco-

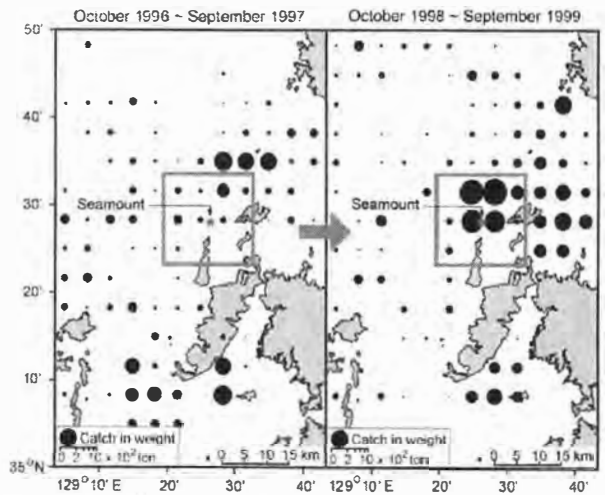


Figure 6. Changes in fish catches caught with purse-seine nets before and after constructing the seamount. Fish-catch records were compared before and after the construction within the area of 18 × 20 km around the seamount (Tomoda and Nishimura, 2000).

system within a year after setting the blocks. The surrounding seafloor of the seamount is entirely covered by soft mud, but a different rock ecosystem was obviously formed from the placement of the blocks. Since the top of seamount was still way below the euphotic zone, no photosynthetic organisms could live autotrophically on the seamount.

There are three possible effects from constructing underwater seamounts to enhance ocean fertilization and increase fisheries organisms of as follows. The first is the stimulation of primary production by nutrients being brought up from the bottom water and mixed with the euphotic zone water. The second is the formation of a rock ecosystem by placing Ashcrete blocks on the seafloor, as these blocks supply a substrate for various species of sessile organisms that live mostly on particles sinking from the water above. The third is the seamount creates an attractive environment for fishes and other organisms.

Once a seamount is constructed, it will last almost forever with little maintenance effort. Such seamounts will be suitable for areas shal-

lower than 100 m or so, and most effective if there is a strong prevailing current, particularly in warm seasons. Even though nutrient concentrations near the bottom in the area suitable for seamounts may not be high, useful ocean fertilization effects can be expected. Generally, deeper depths give greater fertilization effects. However, as depth increases, the size of a seamount will become huge; and there will be a great increase in the total materials required for construction in deeper sea areas. This will result in a greater engineering and economic difficulties. Based upon the success of the ocean fertilization project mentioned above, the Fisheries Agency of Japan has designated seamount construction as one of the promising ocean fertilization programs, and provides constant financial support for their construction.

3.2. Direct use of heated DOW passed through electric power plants

Since DOW tends to sink below the euphotic zone because of its low temperature when it is discharged directly into the ocean surface layer, except in extremely shallow water of 10 m or so, preheating of DOW by passing it through an electric power plant for cooling has been proposed (Isaacs and Schmitt, 1969; Bienfang, 1970; Gundersen and Bienfang, 1970). The use of DOW for cooling power plants can have several advantages, such as: an increase in cooling efficiency by the low temperature of DOW; no bio-fouling within the entire cooling system without special measures; and almost no entrainment of organisms causing system damage. Additional construction costs to extend the intake water pipe to depths deep enough to collect cooling water is required, which would be the only major disadvantage, but one easily offset by the benefits mentioned above. Furthermore, since

heated DOW does not sink to great depths, it can fertilize the ocean if it is kept within the euphotic zone by controlling its temperature. Considering that the total amount of seawater currently used for cooling power plants in Japan is as large as approximately 10^4 ton.s⁻¹, if DOW is used as coolant it could support slightly less than the current level of annual aquaculture production in Japan (see Figure 1).

A research and development project for the use of DOW as cooling water for power plants has been carried out as one of the national research programs on "Research and development on the effective use of energy and resources of deep ocean water (1999–2003)" by the Japan Ocean Industries Association (JOIA) under the supervision of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) with financial support from the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). In the project, 1×10^6 ton.day⁻¹ (ca. 10 ton.s⁻¹) of DOW was assumed to be pumped up for cooling a 600 MWe thermal fossil-fuel plant (Kadoyu *et al.*, 2003), and the heated DOW effluent was used in a trial of coastal water fertilization.

The practicality and possibility of using DOW as a thermal plant coolant was evaluated in the project and the necessary technologies needing to be developed was assessed. An existing power plant, designed to use surface seawater as a coolant, showed an increased efficiency of 3.5 % in northern and central Japan in summer by using DOW. Furthermore, the heat transfer area requirement of a steam condenser can be considerably reduced with the use of DOW for optimally designed power plants, together with some improvements in plant efficiency (Kadoyu *et al.*, 2003). This benefit can be applied to power plants constructed in the future. There was only a small amount of entrainment of

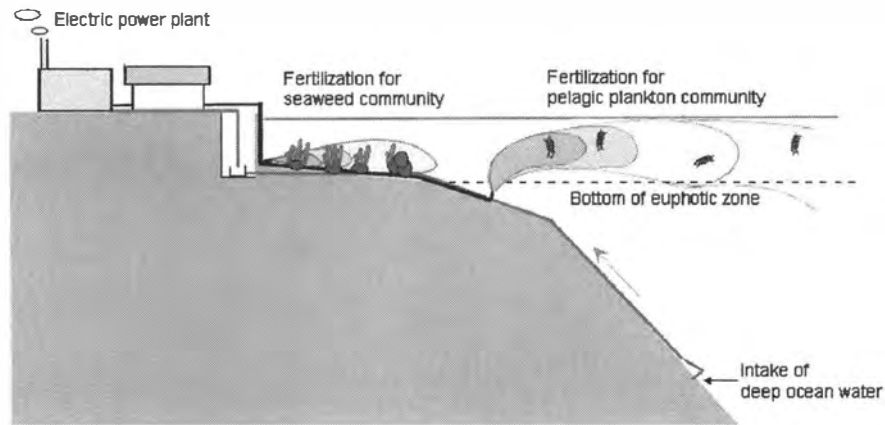


Figure 7. Schematic diagram showing the potential for ocean fertilization of near-shore seaweed community and pelagic plankton community using DOW heated by passing it through an electric thermal plant (Hayashi *et al.*, 2003).

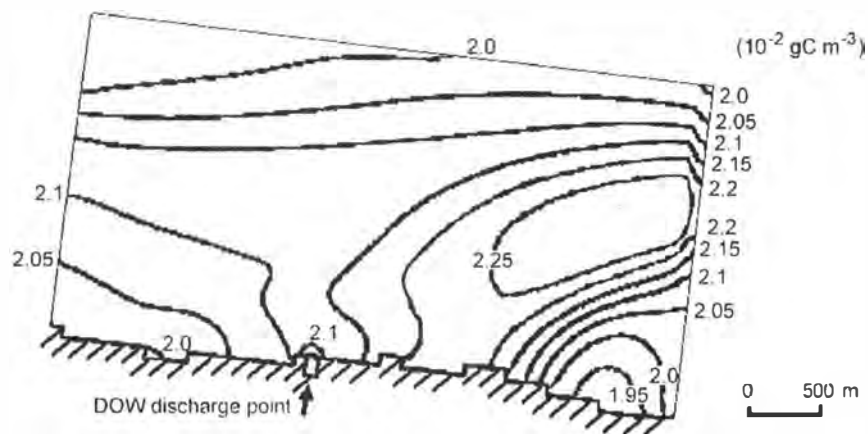


Figure 8. A model estimate of ocean fertilization increasing phytoplankton production as shown by an increase in phytoplankton biomass in g C m^{-3} due to heated DOW of $10^6 \text{ ton} \cdot \text{day}^{-1}$ discharged into coastal water (Hayashi *et al.*, unpublished data).

organisms living around the intake mouth of DOW in Namerikawa, Toyama, where the intake inlet was a few meters above the bottom at 310 m (Hayashi *et al.*, 2003). No observable bio-fouling has been noticed in the Kochi Deep Seawater Research Laboratory where DOW has been pumped up continuously since 1989 from 310 m using 12.5 cm reinforced polyethylene pipe. Similar results with no major bio-fouling have also reported from the Natural Energy Laboratory of Hawaii over a much longer time period. They have been pumping DOW from below 600 m for nearly 20 years.

Considering that most power plants are located close to coastal waters, heated DOW can be delivered from land to almost any location in

coastal waters. As shown schematically in Figure 7, a seaweed community will be fertilized if DOW is discharged into a rocky shore area within the euphotic zone, whereas a pelagic plankton community will be fertilized if heated DOW is discharged further offshore. A possible enhancement to primary production was estimated using a numerical simulation model in the project mentioned above. The simulation showed an obvious increase in primary production in the offshore water (Figure 8).

Although the use of heated DOW for ocean fertilization is still being evaluated, it is worth considering it for both cooling and ocean fertilization in the future. Because heating is essential to reduce the specific gravity of DOW, it is

quite important to adjust the buoyancy of DOW by heating it by passing through cooling systems. Cooling is not only for electric power plants but also for several other possibilities such as air conditioning.

3.3. Direct ocean fertilization using DOW

The Marino Forum 21 awarded research and development funds for five years from the Fisheries Agency of Japan for the direct use of DOW for ocean fertilization (2000–2004).

For ocean fertilization using DOW, at least two important challenges have to be solved: one is how to pump up a large quantity of DOW, and the other is how to keep the DOW in position within the euphotic zone with minimum diffusion, at least for a few days after discharge. Achieving ocean fertilization at an oceanic scale may require DOW containing $30 \mu\text{M}$ nitrate in the order of 1×10^6 tons per day or more in open water. Natural energy such as OTEC, solar and wind would be ideal for pumping DOW up in the sea. In the course of the Marino Forum project, OTEC was suggested as the most promising energy source for pumping DOW up in comparison with wind, photo-voltatic, waves, shore-based electric power and diesel fuel (Ouchi *et al.*, 2002; Watanabe *et al.*, 2003).

There was a pioneer experiment for ocean fertilization carried out in Toyama Bay in 1989 and 1990, which was supported by the Special Coordination Fund for Promoting Science and Technology of the Science and Technology Agency of Japan. In that project, DOW was sprayed onto the sea surface from a floating barge named “Hoyo”, which pumped DOW up from 220 m. Although the buoyancy of DOW was adjusted by mixing it with two parts surface water, the floating of DOW within the euphotic zone was not confirmed, possibly due

to limited amounts of DOW being discharged and it behaving unexpectedly. In the Marino Forum project, a density current generator was applied to discharge and plunge DOW horizontally into a certain layer of the euphotic zone in a stratified water column. The aim was to minimize sinking and diffusion of DOW after discharge into the euphotic zone (Ouchi *et al.*, 1998). To avert DOW from sinking below the euphotic zone, it was mixed with two parts of warm surface water and discharged as a density current.

The Marino Forum project decided on Sagami Bay, near Tokyo, as the experimental field site because a large counterclockwise eddy often develops and circulates at the surface there, possibly due to effects of the Kuroshio current (Figure 9). If the DOW discharged from the discharger became trapped within an eddy, the diffusion of nutrients in DOW was expected to slow down. In the final design, 1×10^5 tons of DOW from a 200 m depth was pumped up per day by the revolving power of an impeller with a 2.35 m diameter (lower impeller) through a steel riser pipe with an internal diameter of 100 cm and a wall thickness of 31 mm. One part of the DOW was mixed with two parts of warm water collected from a depth of five meters to reduce the specific gravity of DOW (Figure 10) (Ouchi *et al.*, 2003). The water from the five-meter depth was taken in using the same revolving impeller action (upper impeller). The mixture of DOW with five-meter water was then discharged slowly at 20 m as a density current. The DOW discharger, named “Takumi”, was operated continuously with the use of energy generated by a diesel engine (to evaluate the potential for fertilizing Sagami Bay). “Takumi” was set at the site at the end of May 2003, and discharged DOW since the end of July 2003.

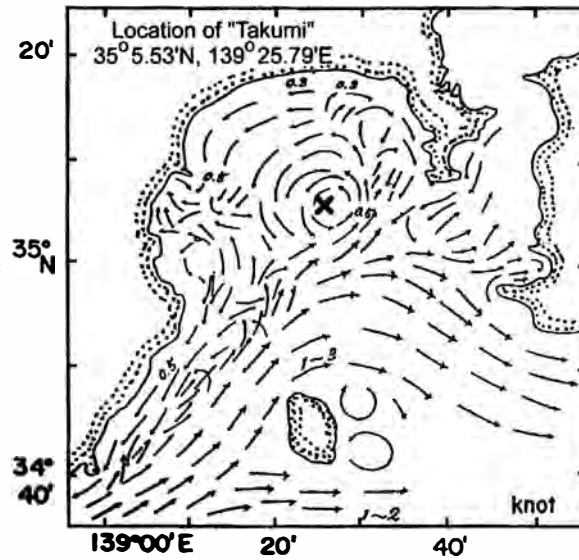


Figure 9. Counterclockwise surface eddy frequently observed in Sagami Bay. DOW discharger “Takumi” (location shown by the “X” symbol) was set near the center of the eddy (Iwata and Matsuyama, 1989).

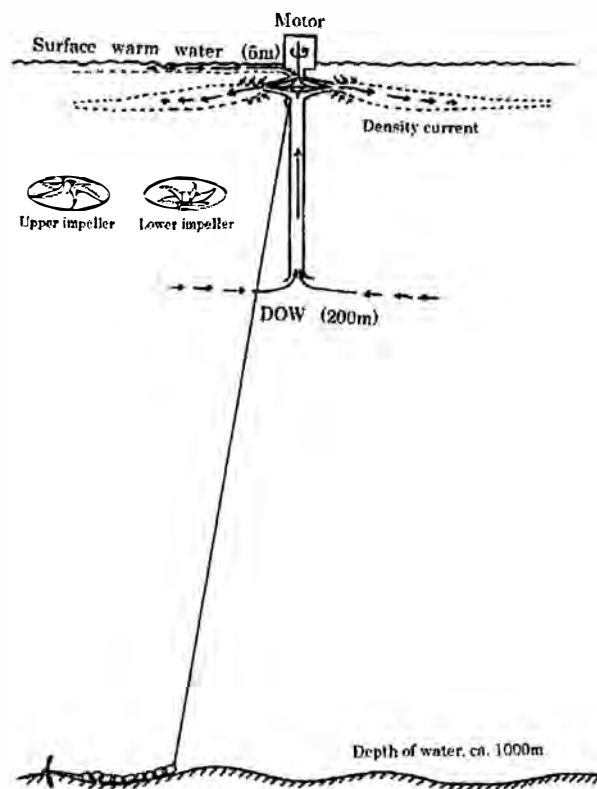


Figure 10. Conceptual design of the offshore-based DOW discharger “Takumi” (after Ouchi *et al.*, 2003).

DOW containing about $20 \mu\text{M}$ of nitrate at 10°C was pumped up, mixed with the five-meter water containing less than $1 \mu\text{M}$ nitrate at about 25°C in summer, and discharged as a density current. New technology developments include: (1) the entire design of the DOW discharger

“Takumi”, which stands for year-round operation in the open sea; (2) practical and economical installation of a riser-pipe and floating offshore structure; and (3) technology for detecting ocean fertilization.

4. Future perspectives

Utilization of DOW containing rich nutrients from nearly 100 m or more in depth to fertilize a large volume of the ocean has now been tested. Several essential engineering technologies have been developed as a necessity. Three experiments undertaken in Japan have been reviewed in this paper. Improvements in the technologies are still need for efficient and practical application, although most of the technologies required for constructing underwater seamounts have reached the level of practical application. Some technologies associated with the two other approaches have to be improved before practical operation can be achieved.

Within the three, ocean fertilization experiments reviewed here, each has at least site-specific advantages. Seamounts will be suitable for fertilizing shallow waters of continental shelf areas such as those less than 100 m with low or moderate concentrations of nutrients at the sea bottom. DOW effluent from power plants containing rich nutrients and heated up will be an ideal source for ocean fertilization but is restricted to near shore waters with a steep coastal slope where it is not suitable to construct a seamount. DOW can be pumped up at any location where it is relatively easy to pump DOW from below approximately 200 m. This generally requires a huge and strong structure to overcome rapid diffusion of nutrients by supplying great amounts of DOW and to be able to stand in the rough environment of the open ocean. Therefore, direct pumping of DOW for fertilization will cover most deep-water areas that are not suitable for the other two approaches.

To utilize DOW for ocean fertilization, there must be many ways to do it, including those

introduced in this paper. Those methods will depend upon specifics of the local planning site, and the actual combination of other uses for deep water (in addition to fertilization). Combining the use of DOW for ocean fertilization and as a coolant will be ideal for the efficient utilization of the cold energy and nutrients of DOW, where it is possible. Direct pumping of DOW in the open ocean can be combined with several other purposes such as electric power generation, extracting metals in DOW, and so on.

CO₂ uptake during photosynthetic production using nutrients contained in DOW also requires attention. Since the CO₂ concentration in DOW is already higher than the surface water, we have to consider the balance of how much CO₂ is fixed compared to CO₂ released into the air. Considering that the average age of DOW is around 100 years at 300 m around Japan, the equilibrium of CO₂ between the air and the surface seawater was much smaller compared to the present age because of low CO₂ concentrations in the air at that time. Therefore, more CO₂ could be absorbed up to reaching the new equilibrium point when DOW is used for ocean fertilization.

Since the utilization of DOW is an imposition of new human activity on the ocean, we must be careful not to significantly disturb the ocean system. One of the important issues is to find out what level of DOW usage will not to disturb the ocean system. Otsuka (2002) estimated a level based upon the magnitude of temporal variation in ocean currents and suggested using a given limit of DOW resources that is within natural fluctuation levels, because nature can already cope with such fluctuations.

The rich silicate in DOW could specifically enhance diatom growth, but stimulation of other

species such as those causing red tides has to be checked carefully. To avoid such a problem, DOW operations for ocean fertilization should be at, or facing, the open ocean rather than being in enclosed sea areas where red tides are apt to occur.

Acknowledgements

This paper was orally presented as a key-note lecture at the 5th Ocean Mining Symposium of the International Society of Offshore and Polar Engineering (ISOPE - OMS 2003 symposium) held on 15–19 September 2003, in Tsukuba, Japan. The research was financially supported by the research funds of the grant-in-aid of special research (#14540576) by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan, by the Marino Forum 21, and the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). Drs. Kazuo Iseki, Tatsuo Suzuki, Masatoshi Hayashi and Kazuyuki Ouchi kindly permitted the use of their figures. Ms. Linda Worland kindly edited English.

References

- Bienfang, P. K. 1970. On the potential of deep ocean water to increase primary production under surface light and temperature conditions. BS Thesis, Faculty of Biology, University of Hawaii, 93 pp.
- Collins, K. J., A. C. Jensen and A. P. M. Lockwood. 1992. Stability of a coal waste artificial reef. *Chem. Ecol.*, 6: 79–93.
- Gundersen, K. and P. K. Bienfang. 1970. Thermal pollution: Use of deep, cold, nutrient-rich sea water for power plant cooling and subsequent aquaculture in Hawaii. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 27: 513–516.
- Hayashi, M., T. Ikeda, K. Otsuka and M. M. Takahashi. 2003. Assessment on environmental effects of deep ocean water discharged into coastal sea. *In* Recent Advances in Marine Science and Technology (ed. M. K. Saxena), PACON International, Honolulu, Hawaii, 535–546 pp.
- Honda, Y. 2000. Numerical simulation of upwelling induced by underwater seamount. *Gekkan Kaiyo* 32: 480–484 (*In* Japanese).
- Isaacs, J. D. and W. R. Schmitt. 1969. Stimulation of marine productivity with waste heat and mechanical power. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* 33: 20–29.
- Iseki, K., H. Nagata, K. Furuya and A. Kawamura. 1994. Effect of artificial upwelling on primary production in Toyama Bay, Japan. Proc. The 1994 Mie Internat. Forum and Symp. on Global Environment and Friendly Energy Technology, Mie Academic Press, 458–462 pp.
- Iseki, K. 2000. Ocean fertilization by deep ocean water – A proposal for a sustainable ocean farm, *Gekkan Kaiyo*, Special volume 22: 170–178 (*In* Japanese).
- Ishizaka, J., M. Takahashi and S. Ichimura. 1983. Evaluation of coastal upwelling effects on phytoplankton growth by simulated culture experiments. *Mar. Biol.*, 76: 271–278.
- Iwata, S. and M. Matsuyama. 1989. Surface circulation in Sagami Bay – The response to variations of the Kuroshio axis. *J. oceanogr. Soc. Japan* 45: 310–320.
- Kadoyu, M., Y. Eguchi and F. Takeda. 2003. A parametric study of power plant performance using deep-sea water for steam condensation. *In* Recent Advances in Marine Science and Technology (ed. M. K. Saxena), PACON International, Honolulu, Hawaii, 547–556 pp.
- Kumagai, Y., A. Naitoh and M. M. Takahashi. 2000. Enhancement effects of phytoplankton biomass by means of underwater seamount. *Gekkan Kaiyo* 32: 469–473 (*In* Japanese).
- Marino Forum 21, 1989. Design and production manual for flyash concrete blocks. Engineering data report 6 (*In* Japanese).
- Matsuda, F., J. Szyper, P. K. Takahashi and J. R. Vadus. 1999. The ultimate ocean ranch. *SEA Technol.* August issue: 17–26 pp.
- Matsuda, F., T. Sakou, M. Takahashi, J. Szyper, J. Vadus and P. Takahashi. 2002. U.S.-Japan advances in development of open-ocean ranching. UJNR Marine Facilities Panel, <http://www.dt.navy.mil/ip/mfp/paper5.html>
- Nakata, K., Y. Fujiwara and T. Kajikawa. 1991. Prognostic tool for designing an offshore, open ocean mariculture OTEC system. Proc. of the

- Workshop on Engineering Research Needs for Off-shore Mariculture Systems, 26-28 September, 1991, Honolulu, Hawaii. 473-521 pp.
- North, W. J. 1977. Possibilities of biomass from the ocean, the marine farm project. Proc. of Symp. on Biological Conversion of Solar Energy (*eds.* Mitsui, A., S. Miyachi, A. San Pietro and S. Tamura), Univ. Miami, Academic Press.
- North, W. J. 1987. Oceanic farming of *Macrocystis*, the problems and non-problems. Chapter 2 in Seaweed Cultivation for Renewable Resources (*eds.* Bird, K. T. and P. H. Benson).
- Otsuka, K. 1997. Economic analysis for an integrated OTEC/biomass system. J. Kansai Soc. N. A., Japan, No. 227: 89-101.
- Otsuka, K. 2002. Deep ocean water as a regenerated natural resource. Report on the total quantity of resources of deep ocean water. Japan Resources Association. 28-31 pp (*In Japanese*).
- Ouchi, K., T. Yamatogi, K. Kobayashi and M. Nakamura. 1998. Density current generator - A new concept machine for agitating and upwelling a stratified water area. Proc. of Ocean Community Conference '98, The Marine Technology Society, Baltimore, USA, 129-136 pp.
- Ouchi, K., S. Ogiwara, E. Kobayashi, K. Fukumiya, M. Yonezawa and K. Kato. 2002. Ocean nutrient enhancer - Creation of fishing ground using deep ocean water. Proc. OMAE: 21st International Conference, June 23-28, Oslo, Norway. 2002-28355.
- Ouchi, K. 2003. Ocean nutrient enhancer "Takumi" for the experiment of fishing ground creation. Proc. 5th (2003) ISOPE-OMS, September 15-19, Tsukuba, Japan.
- Roels, O. A. 1980. From the deep sea: food, energy, and fresh water. Mech. Engineer. 102: 37-43 pp.
- Roels, O. A., R. D. Gerard and A. W. H. Be. 1971. Fertilizing the sea by pumping nutrient-rich deep water to the surface. *In* Fertility of the sea (*ed.* by J. D. Costlow). Vol. 2. 401-415 pp. Gordon and Breach Science Publ., New York.
- Ryther, J. H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. Science 166, 72-76.
- Suzuki, T. 1995. On the study of upwelling created by artificial seamount for the purpose of enhancing biological productivity. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo, 207 pp.
- Suzuki, T. 1999. Development of high-volume fly ash concrete and application to marine structure. Fisheries Engineering 36: 61-69.
- Suzuki, T. 2000. Boosting seafood production with recycled industrial by-products. Civil Engineering, JSCE 38: 26-31.
- Suzuki, T. and M. Takahashi. 1997. Enhancement of coastal upwelling by man-made sea-mounts constructed by flyash concrete blocks for the increase of marine productivity. Proc. Oceanol. Internat. 97, Pacific Rim. 1: 89-107.
- Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming. 1942. The oceans, their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1087 pp.
- Takahashi, M. M. 2000. DOW: Deep ocean water as our next natural resource. Terra Scientific Publishing Co., Tokyo. 99 pp.
- Takahashi, M., I. Koike, K. Iseki, P. K. Bienfang and A. Hattori. 1982. Phytoplankton species responses to nutrient changes in experimental enclosures and coastal waters. *In* Marine Mesocosms (*eds.* G. D. Grice and M. R. Reeve) Springer-Verlag, New York, 333-340 pp.
- Takahashi, P. K., K. R. McKinley, V. D. Phillips. L. Magaard and P. Koske. 1993. Marine macrobiotechnology systems. J. Mar. Biotech. 1: 9-15.
- Tomoda, K. and K. Nishimura. 2000. Creation of fishing ground by underwater seamount. Gekkan Kaiyo, 32: 474-479 (*In Japanese*).
- Watanabe, M., M. Taniguchi, T. Ikeda, M. Komatsu, K. Takatsuki and S. Kanamaki. 2000. Fertilization of coastal areas by deep ocean water. Gekkan-Kaiyo Special Volume 20: 160-169 (*In Japanese*).
- Watanabe, T., K. Ouchi, T. Yamatogi and S. Jitsuvara. 2003. The advantage of OTEC as the energy source for the ocean nutrient enhancer. *In* Recent Advances in Marine Science and Technology (*ed.* M. K. Saxena), PACON International, Honolulu, Hawaii, 557-564 pp.
- Whittaker, R. H. and G. E. Likens. 1975. The biosphere and man. *In* Primary Productivity of the Biosphere (*eds.* Lieth, H. and R. W. Whittaker) Springer-Verlag, New York, 305-328 pp.

Received: 20 September 2003

Accepted: 21 November 2003

海洋深層水（DOW）を用いた海域肥沃化

高橋 正征・池谷 透

要 旨

このところ確実に継続している世界の人口増加や食糧生産基地の農地の劣化を考えると、近い将来、世界の食糧生産は最重要課題の一つになりそうである。一方、水深数 10 m の真光層以深に存在する巨大な栄養塩類のストックは、現状の海洋の生産を高める一大可能性を秘めており、それが実現すれば、陸上での動物タンパク質生産を補うことが可能である。そこで魚や他の水産生物の増産を目指して、現在、日本で進められている海域生産性向上への 3 つのチャレンジを紹介する。第 1 は、大陸棚の底近くにある栄養塩類を多く含んだ海水を人工海底マウンドと流れの作用によって貧栄養の表層水と混合して肥沃化を図る。第 2 は、富栄養の海洋深層水を陸上に汲み上げ、それによって発電所を冷却し、温まった海洋深層水を浅海域に放水して藻場やプランクトン群集の生産を高める。第 3 は、大陸棚以遠の深い海域で海洋深層水を揚水し、暖かい貧栄養の表層水と混合して密度調整し、真光層中に留まるように放水することにより海域を肥沃化する。

キーワード：海洋深層水、海域肥沃化、海底マウンド、一次生産、植物プランクトン、魚類生産、大陸棚、外洋域、栄養塩類、密度流

「海洋深層水研究」(Deep Ocean Water Research) 投稿規程

1. 「海洋深層水研究」は海洋深層水利用研究会の論文誌として、海洋深層水とその資源利用の研究および技術開発の成果を発表する学術雑誌である。
 2. 「海洋深層水研究」は、年1回以上発行し、原著論文、短報、総説、その他からなる。本誌掲載論文の著作権は海洋深層水利用研究会に帰属する。論文は1篇が10印刷頁以内とし、超過した場合はページチャージを支払う。
 3. 投稿は原則として海洋深層水利用研究会会員に限る。
 4. すべての論文は2人以上の査読者の審査を経て担当編集委員が採否を判断し、編集委員会が決定する。投稿に際しては、原稿および図表のコピー4部を編集委員長に送付する。
- 論文の投稿先：
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1
東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系
高橋 正征（「海洋深層水研究」編集委員長）
（封筒の表に「海洋深層水研究」原稿在中と明記する。）
電話：03-5454-6627
FAX：03-5454-4321
E-mail：ctkmac@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp
5. 執筆要領（「投稿の手引き」参照）
 - 1) 原稿は和文もしくは英文とし、ワープロソフトを使用してA4判の白紙に40字×25行になるように打ち出す。やむをえず手書きとする場合は、400字詰原稿用紙に横書きとする。
 - 2) 原稿のはじめには、題名、著者名、所属機関名を記す。また、それぞれの英訳をつける。図・表の説明は和文もしくは英文とする。
 - 3) すべての論文に、英文の要旨とキーワード、和文の要旨とキーワードをつける。
 - 4) 図・表・写真は原則として、A4判の台紙を使用し、そのままの版下となるように黒インクで明瞭に描く。図・表の横幅は10cmまたは21cmとして投稿することが望ましい。はっきりしたものであれば、白黒コピーでもよい。図・表・写真には番号をつけ、原稿の末尾につける。受理決定の後、印刷用の原図を提出する。
 - 5) 数式は上下に1行ずつあけて明瞭に書く。
 - 6) 脚注は用いない。
 - 7) 文献は、本文中では深海（1996）、（深海1995；深海・浅海1971）のように引用する。著者が3人以上の文献は、深海ら（1970）のようにする。
文献は、最初の著者の姓のアルファベット順に並べ、次の例にしたがって、別紙にまとめて記載する。
 - a) 論文：中川光司・横山嘉人・中島宏・池上良成（2000）：海洋深層水のミネラル供給源としての利用。海深研。1. 1-11.
Cox, R. A., M. J. McCartney and F. Culkin (1970): The specific gravity/salinity/temperature relationship in natural sea water. Deep-Sea. Res. 17. 679-689.
 - b) 単行本：吉田秀樹（2000）：よくわかる海洋深層水。コスモトゥーワン、東京。223頁。
Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Flemming (1942): The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1087pp.
 - c) 単行本の章：杉ノ原伸夫（1991）：世界の海の水の循環。62-76頁。海と地球環境。日本海洋学会編。東大出版会、東京。
Richards, F. A. (1965): Chapter 6, Dissolved gases other than carbon dioxide. p. 197-225. *In* Chemical Oceanography, Vol. 1. ed. by J. P. Riley and G. Skirrow. Academic Press, London and New York.
 6. 投稿論文が受理された時は、下記の3点を編集委員長に提出する。
 - 1) 最終原稿2部。
 - 2) 原図（写真を含む）・原表とそれらの説明
 - 3) 最終原稿を入力したフロッピーディスク text file
 7. 各論文の別刷り30部は無料提供し、それ以上は有料とする。要求部数を校正刷返却時に印刷会社に申し込む。
 8. カラーの写真や図の印刷は著者の実費負担とする。A4判1頁で約10万円。

(2000年11月)

「海洋深層水研究」(Deep Ocean Water Research) 投稿の手引き

1. 投稿論文(原著論文, 短報, 総説, その他)

1. 1. 投稿論文の構成(和文もしくは英文)

1. 1. 1. 投稿論文の第1頁(複数頁にわたっても構わない)

以下の事項をすべて和文もしくは英文で記載する。

1. 表題と短縮表題 (running title)
2. 著者名
3. 研究の行われた機関, 現在の所属機関とそれらの所在地
4. 要旨: 和文と英文. 和文は約 400字(英文は約 300語)以内. 5語以内の和文と英文のキーワードをつける。
5. 図・表の枚数
6. 査読審査・編集時の連絡先(電話, FAX, E-mail address)

1. 1. 2. 投稿論文の第2頁以下

以下の事項を記述する。

1. 本文(和文もしくは英文): 最後の結論を記載するパラグラフの表題は「結論」が望ましい。
2. 謝辞(和文もしくは英文): 文部省科学研究費補助金, その他の研究助成を受けたときは, そのことを明記する。
3. 文献: 投稿規定を参照. 英文論文に和文の文献がある場合には原点は和文であることを断った上で, 英文訳で表示する。

1. 1. 3. 図・表の説明

和文原稿は和文もしくは英文で, 英文原稿は英文でまとめて別紙に記述する。

1. 1. 4. 図・表のコピー

原図・原表は, 後述の「1. 3. 原図・原表(印刷原稿)の作成」によって作成する。投稿の時は, それらのコピーを送り, 原図・原表は著者が保管する。

1. 1. 5. 英文(もしくは和文)頁

1. 1. 1. の1~4を英文(和文原稿)もしくは和文(英文原稿)で独立した用紙に記述する。

共著者

共著者が用いている英文表示を利用するよう, 共著者に確認する

英文要旨

和文論文の英文要旨は必ずしも, 和文要旨の英訳である必要はない。論文の内容が外国人に理解できるように配慮する。ごく短くても構わない。

1. 2. 本文

1. 2. 1. 原稿のスタイル

1. A4縦置きで, 余白は上下 30 mm, 左右 30 mm として, 1行 35~40字(全角), 25行に印字して, 投稿原稿とする。
2. 図・表の挿入希望位置を右余白に明示する。ただし, 本文に比べて図表の多い(印刷1頁あたり図1枚以上)時は, 希望に添えるとは限らない。
3. ページ番号を必ず付ける。

1. 2. 2. 用語・単位

1. 漢字は常用漢字を使用する。学術用語の使用には, 文部省「学術用語集」のほか, 理化学辞典, 専門分野の事典(例: 海洋大事典)・便覧などを参考にする。
2. 単位は原則として SI 単位。複合単位は以下の例

のように表示する。例: $J K^{-1} mol^{-1}$ 。

3. 数字と単位の間は, 半角あける。

1. 3. 原図・原表(印刷原稿)の作成

図・表はバランスがとれ, 明瞭で, 文字の読みやすいものを工夫する。以下により図表作成のためのキーポイントを上げる。

1. 原図・原表はそのまま写真製版用の原稿となるよう, A4(縦横いずれでもよい)の上質用紙に作成する(投稿規定参照)。
2. 図(写真を含む)・表の横幅(縦軸のタイトル, 数字, 単位を含む)は 10 cm, または 21 cm とする(投稿規定参照)。印刷時には80%に縮小されるので, 図・表中の文字の大きさは 10ポイント以上, すなわち英子文字(a, c, e, m, o, sなど)の高さの最小値を 1.5 mm 以上にする。
3. 上付き・下付きのある文字では, 添え字が 60~70%の大きさになるので, 最小でも 12ポイントを使用する。
4. X-軸, Y-軸の太さは, 0.2 mm 程度, 図中の主な線(データを結ぶ)の太さは, 0.3~0.5 mm 程度が適当で, 0.1 mm 以下の太さの線は, 印刷したときに見えなくなることがある。
5. データポイントが重要なときは, 中空の(○◇□△▽×+)よりは, 中黒(●◆■▲▼)の方が見えやすい。また, 大きさ(高さ)は 2 mm 程度(10 cm 幅のとき)が適当で, 面積を同じにすると, 同じ大きさに見える。

1. 4. 投稿

投稿論文4部を海洋深層水利用研究会の論文誌「海洋深層水研究」編集委員長に送る(宛先は投稿規定参照)。

2. 最終原稿(原稿が受理されたとき)

2. 1. 最終原稿

下記の3点を「海洋深層水研究」編集委員長に送る(宛先は投稿規定参照)。

1. 担当編集委員との打ち合わせで修正された最終原稿を, 2部提出する。書式は投稿原稿と同じ, 著者構成の段階での文章の大幅な修正は, 特別の場合以外はできない。
2. 原図・原表(写真は図として扱う)とそれらの説明。受理の段階で, 修正を依頼することがある。
3. 最終原稿はフロッピーディスクにテキストファイルで入力したものを送る。

2. 2. 最終原稿(テキストファイル)の送り方

次のいずれかの方法で「海洋深層水研究」編集委員長へ送る(宛先は投稿規定参照)。

1. DOS/V (IBM PC/AT 互換)方式でフォーマットされた 3.5 インチのフロッピーディスク (MF-2 HD) に記載された本文のテキストファイルを, 最終原稿, 原図・原表と一緒に「海洋深層水研究」編集委員長に送付する。Mac あるいは, NEC PC 方式などでフォーマットされた 3.5 インチのフロッピーディスクは受け付けない。
2. DOS/V 方式で送れない場合は, E-mail で送る。最終原稿本文のテキストファイルを, E-mail 本文としてメールする。件名は「最終原稿送付」とする。

E-mail address: ctkmac@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

(高橋正征)

(2000年11月制定)

海洋深層水研究

第4巻(2003) 総目次

Deep Ocean Water Research Vol. 4 Contents

目次

原著論文

- 海洋深層水をかけ流した磯焼け地帯転石の植生回復Ⅱ……………藤田 大介 1- 9(1)
- 久米島海洋深層水を用いた浸水時の筋・循環動態に及ぼす影響
……………須藤 明治・角田 直也・高里 久三・平良 朝幸・大道 敦・八木 良訓 11-18(1)
- 海洋深層水大規模取水—分配システムのフィージビリティスタディ(第2報)
—CO₂排出量を指標としたLCA—……………大塚 耕司・松本 吉倫 19-27(1)
- 亜熱帯表層植物プランクトン群集に対する海洋深層水の肥沃化効果
……………池谷 透・川延 京子・高橋 正征 29-37(1)
- 新形式継手を用いた新しい深層水取水工法(TUJ取水工法)の開発
……………西川 正夫・栗原 明夫・五明美智男・加藤 謙・佐見 誠 39-45(1)
- 室戸海洋深層水中の細菌種の分析……………矢田 修一・大場 雅行・榎本 恵一 47-56(2)
- フィジー海域の海洋温度差発電のための海洋調査及び再生エネルギーの推定
……………中岡 勉・西田 哲也・一瀬 純弥・長友 洪太・水谷壮太郎・
異 重夫・松下 稔・Tim Pickering・池上 康之・上原 春男 57-66(2)
- 深度321 mから揚水した富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度の時間変動
……………松永 明信・黒川 弘子・小善 圭一・高柳 信孝・
大戸 幹也・豊田 孝義・中島 敏光 67-72(2)

総説

- 海洋深層水(DOW)を用いた海域肥沃化……………高橋 正征・池谷 透 73-87(2)
- 「海洋深層水研究」(Deep Ocean Water Research) 投稿規定……………88(2)
- 「海洋深層水研究」(Deep Ocean Water Research) 投稿の手引き……………89(2)

Deep Ocean Water Research Vol. 4 (2003) Contents

CONTENTS

Original Articles

- Algal recovery on coralline-covered cobbles collected from an urchin-dominated barren ground in flowing deep-sea water II Fujita, D. 1- 9(1)
- Effects of graded immersion using Kume Island deep ocean water on human muscle circulation Sudo, A., N. Tsunoda, K. Takasato, C. Taira, A. Omichi and Y. Yagi 11-18(1)
- Feasibility study of large-scale deep ocean water distribution system (2nd report) – Life cycle assessment based on CO₂ emission – Otsuka, K. and Y. Matsumoto 19-27(1)
- Fertilization effects of deep ocean water on phytoplankton community in subtropical surface water Ikeya, T., K. Kawanobe and M. M. Takahashi 29-37(1)
- Development of new method for laying water intake pipes linked by universal joints Nishikawa, M., A. Kurihara, M. Gomyo, K. Kato and M. Sami 39-45(1)
- Analysis of bacterial species in Muroto deep seawater Yada, S., M. Ohba and K. Enomoto 47-56(2)
- Oceanographic observations and an estimate of the renewable energy for ocean thermal energy conversion in the coast of the Fiji Island Nakaoka, T., T. Nishida, J. Ichinose, K. Nagatomo, S. Mizutani, S. Tatsumi, M. Matsushita, T. Pickering, Y. Ikegami and H. Uehara 57-66(2)
- Temporal changes on nitrate concentrations in deep seawater pumped up at 321 m depth in Toyama Bay, Japan Sea Matsunaga, A., H. Kurokawa, K. Shozen, N. Takayanagi, M. Ohto, T. Toyota and T. Nakashima 67-72(2)

Review

- Ocean fertilization using deep ocean water (DOW) Takahashi, M. M. and T. Ikeya 73-87(2)

Rule for contributing articles to the journal "Deep Ocean Water Research" 88(2)

Guideline for preparing articles to the journal "Deep Ocean Water Research" 89(2)

海洋深層水利用研究会

会 長	酒 匂 敏 次	東海大学海洋学部
副 会 長	松 里 壽 彦	水産総合研究センター養殖研究所
	川 崎 一 男	沖縄県海洋深層水研究所
	嵯 峨 直 恆	北海道大学大学院水産科学研究科
	鈴 木 満 平	富山県水産試験場
	高 橋 正 征	東京大学大学院総合文化研究科
	辰 巳 勲	清水建設株式会社
	田 村 光 政	高知県海洋深層水研究所
	豊 田 孝 義	海洋科学技術センター
	中 島 敏 光	海洋科学技術センター
	野 上 欣 也	社団法人日本栽培漁業協会
	深 見 公 雄	高知大学農学部
	藤 田 大 介	東京水産大学応用藻類学研究室
会計監査	下 村 嘉平衛	株式会社間組

論文誌編集委員会

論文誌編集委員会 委員長	高 橋 正 征	東京大学大学院総合文化研究科
副委員長	辰 巳 勲	清水建設株式会社
	井 関 和 夫	水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所
	内 村 真 之	海洋科学技術センター
	後 藤 和 博	パシフィックコンサルタンツ株式会社
	嵯 峨 直 恆	北海道大学大学院水産科学研究科
	中 村 弘 二	水産総合研究センター中央研究所
	藤 田 大 介	東京水産大学応用藻類学研究室
	森 野 仁 夫	清水建設株式会社技術研究所
編集幹事	清 水 勝 公	清水建設株式会社

海洋深層水研究 Vol. 4 No. 2

印 刷 2003年12月25日 印刷所 有限会社 英和出版印刷社
発 行 2003年12月30日 〒113-0022 東京都文京区千駄木4-20-6
Tel. 03-5685-0621
Fax. 03-5685-0701

発行所 海洋深層水利用研究会

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15
海洋科学技術センター内
Tel. 046-867-9569
Fax. 046-867-9575

本誌略称は「海深研」、英文略は「Deep Ocean Wat. Res.」

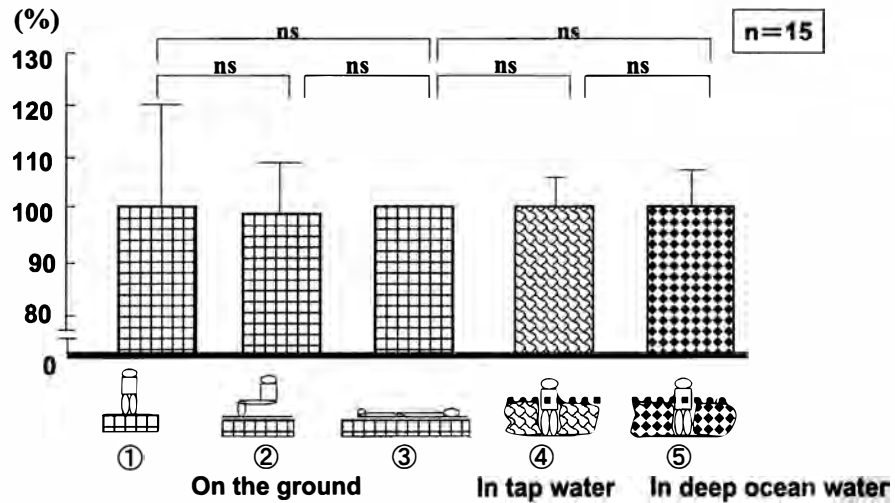


Fig. 3. Comparison of oxygenated hemoglobin (HbO₂) levels in various positions
 ① Standing position on the ground ② Sitting position on the ground
 ③ Lying supine position on the ground ④ Standing position in tap water
 ⑤ Standing position in deep ocean water
 Values are means±S.D. ns: not significant

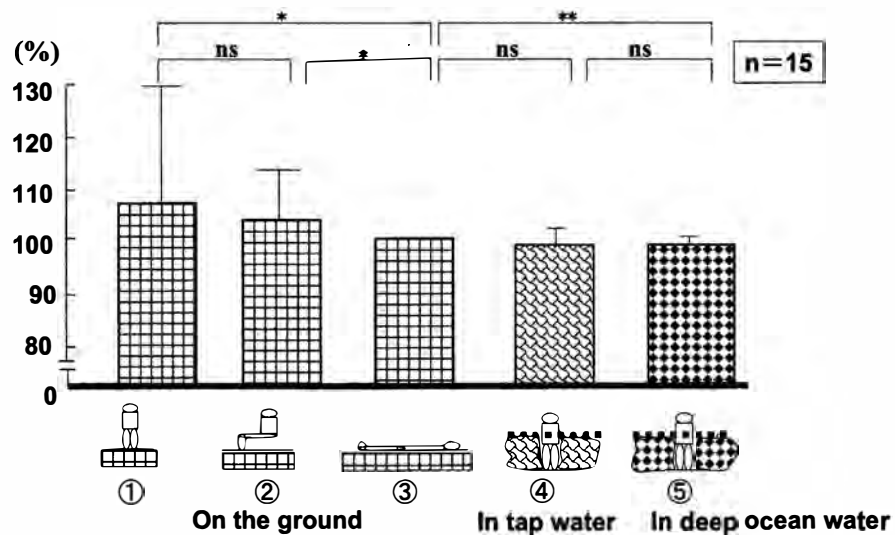


Fig. 4. Comparison of total hemoglobin (HbT) levels in various positions
 ① Standing position on the ground ② Sitting position on the ground
 ③ Lying supine position on the ground ④ Standing position in tap water
 ⑤ Standing position in deep ocean water
 Values are means±S.D. *: p<0.05, **: p<0.01, ns: not significant

したのは陸上背臥位であり、陸上立位及び陸上座位と比較して統計上有意に低値であった (p<0.05)。また、深層水直立は、水道水直立とは有意な差は認められなかったものの、陸上背臥位と比較して統計上有意に低値であった (p<0.01) (Fig. 4)。

組織酸素飽和度 (StO₂) の変動は、陸上背臥位の値を 100 とした場合、陸上立位 90.8±8.6、陸上座位 93.7±6.3、水道水直立 100.9±7.7、深層水直

立 102.3±6.4 であった。陸上で最も低値を示したのは陸上立位であり、陸上座位及陸上背臥位と比較して統計上有意に低値であった (p<0.05) (p<0.01)。また、深層水直立は、水道水直立と比較して統計上有意に高値であったが、陸上背臥位とは有意な差は認められなかった (Fig. 4)。

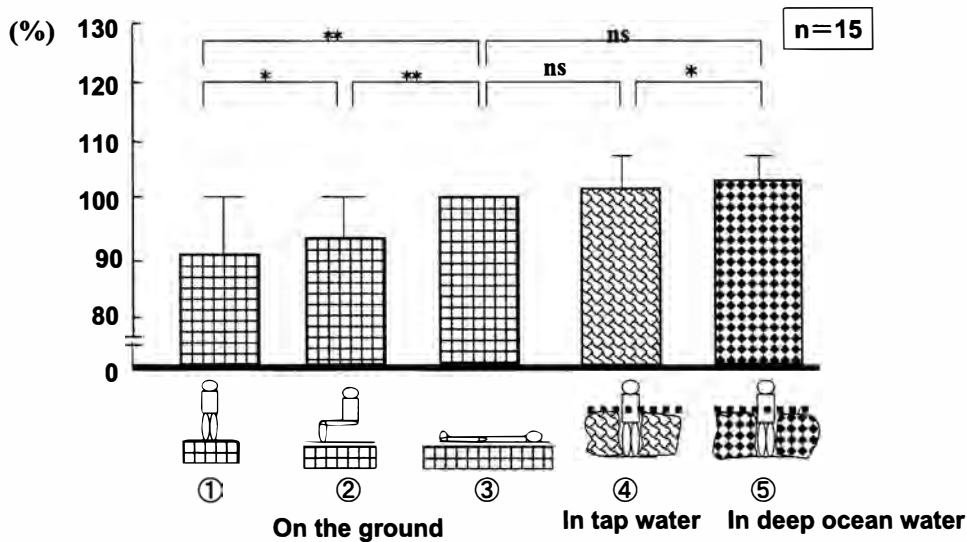


Fig. 5. Comparison of tissue oxygen saturation (StO_2) levels in various positions
 ① Standing position on the ground ② Sitting position on the ground
 ③ Lying supine position on the ground ④ Standing position in tap water
 ⑤ Standing position in deep ocean water
 Values are means \pm S.D. *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ns: not significant

3.4 血圧の変動

血圧の変動は、陸上座位の収縮期血圧の平均値は 128.4 ± 13.1 (mmHg), 拡張期血圧は 82.4 ± 10.7 (mmHg), 陸上背臥位の収縮期血圧の平均値は 113.4 ± 10.4 (mmHg), 拡張期血圧は 64.5 ± 10.1 (mmHg), 水道水直立の収縮期血圧の平均値は 119.4 ± 12.4 (mmHg), 拡張期血圧は 68.9 ± 12.3 (mmHg), 深層水直立の収縮期血圧の平均値は 114.9 ± 13.9 (mmHg), 拡張期血圧は 66.9 ± 13.6 (mmHg) であった。陸上背臥位の収縮期及び拡張期血圧の平均値は、陸上座位より両者とも統計上有意に低値を示した ($p < 0.01$)。また、深層水直立の収縮期及び拡張期血圧の平均値は、水道水直立より両者とも統計上有意に低値を示した ($p < 0.05$)。そして、深層水直立と陸上背臥位における収縮期及び拡張期血圧の平均値においては統計上有意な差は認められなかった (Fig. 5)。

4. 考 察

最近の近赤外線分析技術の発達により、血流量および動静脈酸素較差の連続的な測定が可能となり、特に、ヘモグロビンの酸素-脱酸素化状態の変化に関する非侵襲的な測定技術が確立され、いくつかの実験の結果から安定した数値が得られるようになって

てきた (本間ら, 1992; 本間ら, 1998)。特に、本研究におけるレーザー組織血液酸素モニターから得られた HbD の値は、筋組織の静脈血流量を、HbO₂ の値は、筋の組織の酸素消費量を表す指標とされている。そして、HbD と HbO₂ をたしたものが HbT として表され、センサー部位の筋の血流量を表す指標とされている。StO₂ は、HbO₂/HbT で算出され、筋の組織の酸素飽和の状態を表す指数とされている。しかし、一般的には、レーザー組織血液酸素モニターからデータを比較する場合、近赤外線生体組織での散乱状況などに不明な点が多いことから、各被検者で比較するのは難しいとされている (本間ら, 1998)。そこで、本研究においては、陸上での条件の中で最も心拍数が低値を示した陸上背臥位の値を基準に各測定値を比較した。

また、これまで、ヒトを浸水させた場合、各被検者の身長を考慮せずに水位を一定にしたり、各被検者の浸水に及ぼす個々の生理反応時間の違いを考慮せず、測定時間を一定にする傾向が見られ、心拍数や血圧値の変動について統一した結果が少なかった。そこで、本研究では、各姿勢・環境における安静値のデータの読み取りを 30 秒間の心拍数の安定 (± 1) を目安に行った。

その結果、心拍数は、陸上立位時より陸上座位時、

Table. 2 Changes in blood pressure

n=15	SBP / DBP (mmHg)
Sitting position on the ground	128.4±13.1 / 82.4±10.7
Lying supine position on the ground	113.4±10.4 / 64.5±10.1
Standing position in tap water	119.4±12.4 / 68.9±12.3
Standing position in deep ocean water	114.9±13.9 / 66.9±13.6

(SBP: systolic blood pressure, DBP: diastolic blood pressure)
(Values are means±S.D. *: p<0.05, **: p<0.01)

陸上座位時より陸上背臥位時の方が低下していることが確認され、更に、深層水直立は、水道水直立及陸上背臥位より有意に低値であることが確認された。また、この心拍変動は、筋組織の静脈血流量を反映している HbD の変動と類似している傾向にあることがわかった。特に、陸上での反応は、姿勢の変化により下肢の HbD が減少した分だけ、胸郭への静脈の帰還流が増大し、それが心拍出量を増加させた結果、心拍数が減少したのではないかと考えられた。これらの結果は、従来の著者らの報告と一致するものであった (須藤ら, 2001; Sudo, *et al.*, 2001)。更に、比重が 0.03 g/cm³ 大きい深層水での心拍数の減少は、水道水より有意な HbD の減少がおきたために、水道水と比べてより多くの静脈の帰還流が増加したのではないかと考えられた。

次に、HbO₂ の変動は、各姿勢・環境において有意な差は存在しなかった。この結果より、本研究における浸水時間程度では、これらの環境の違いによる筋組織の酸素消費には影響がなかったことがわかった。また、HbT の変動は、HbO₂ の有意な変動がなかったため、HbD の変動を反映している結果となっていた。そして、StO₂ の変動は、HbO₂ に有意な変化がなく、HbT が陸上立位、陸上座位、陸上背臥位の順に減少したために、相対的に StO₂ が増加し、更に、深層水直立が、陸上背臥位と有意な差がなかったことから、深層水直立の筋組織循環動態は陸上背臥位と類似している状態であると考えられた。この結果は、血圧値においても、深層水直立が、陸上背臥位と有意な差がなかったことから推察することができた。特に、深層水直立の血圧は、陸上座位や水道水直立よりも低値を示したことから、その水圧の程度が下肢の血管にかかる壁内外圧差の

負担を軽減し、陸上背臥位と同程度の静脈の帰還流の増加をもたらした結果、腎周辺の血流量が増加し、レニン分泌の抑制及び強力な血管収縮作用を有するアンギオテンシン II や副腎皮質からのアルドステロンの分泌を抑制したことにより、血管が拡張傾向に至り、その作用によって血管の末梢抵抗が減少した結果、血圧が低値を示したのではないかと推察された。また、深層水が及ぼす比重の影響により水道水より浮力が増すことが考えられ、筋の緊張を少なくしているのではないかと考えられることから、今後、浮力との因果関係も研究したい。

以上の心拍変動・筋組織の循環動態及び血圧値の結果から、久米島海洋深層水への浸水は、副交感神経系が亢進されている環境であり、特に血圧値の有意な減少が認められたことからリラクゼーションのためのストレッチングや軽い負荷での水中運動には適した環境ではないかと思われた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、被検者の確保及び実験準備に御協力していただいた仲里町役場の平田光一様、山城義徳様に感謝いたします。また、実験の準備、被検者としてもご協力していただいた久米島バーデプロジェクト委員会の仲間俊郎委員長にも感謝いたします。そして、実験を補助していただいた(株)アプライドオフィスの赤崎房生様に感謝いたします。最後に、本研究に対し助成していただいた久米島町役場に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Anderson, J. V., N. D. Millar, J. P. O'hare, J. C. Mackenzie, R. J. M. Corral and S. R. Bloom. 1986: Atrial natriuretic peptide: physiological release associated with natriuresis during water immersion in man. *Clin. Sci.*, 71, 319-322.
- 赤嶺卓哉・田口信教・須藤明治・酒匂 崇・松永俊二. 1991:「腰痛者水泳教室」における最近の知見と成績. *臨床スポーツ医学*. 8, 437-441.
- 樋口 満・田畑 泉・吉武 裕・西牟田 守・太田壽城. 2001:水泳運動が閉経後女性の有酸素性能力と中性脂質・リポ蛋白プロファイルに及ぼす影響. *体力科学*. 50, 175-184.

- 本間幸子・福岡義之・藤井宣晴・江田英雄・池上晴夫.
1992: 近赤外分光法を用いた筋活動の循環動態の評価—自転車運動時の大腿活動筋について—. 体力科学, 41, 586-594.
- 本間俊行・本間幸子・加賀谷淳子. 1998: 膝伸展運動時にみられる協働筋間での酸素供給・消費バランスの相違. 体力科学, 47, 525-534.
- 木村真規・鈴木政登・矢澤 誠・岡村 功. 2001: 腕クランキング運動時の心拍応答に及ぼす浸水の影響. 日本運動生理学会誌, 8, 41-48.
- 加藤 尊・福沢昌平・菅島康浩・北川 薫. 2002: 流水装置を用いた水中歩行の特徴—スイミングプールでの水中歩行と陸上トレッドミル歩行との比較から—. 体力科学, 51, 119-128.
- Larsen, A. S., L. B. Johansen, C. Stadeager, J. Warberg, N. J. Christensen and P. Norsk. 1994: Volume-homeostatic mechanisms in humans during graded water immersion. *Amer. Physiol. Soc.*, 77, 2832-2839.
- 長嶺晋吉. 1974: 皮下脂肪からの肥満判定. 日本医学会雑誌, 68, 919-924.
- 松井 健・宮地元彦・星島葉子・高橋康輝・山元健太・吉岡 哲・小野寺 昇. 2002: 陸上定常負荷運動後の水中浸漬が全身循環の回復過程に及ぼす影響. 体力科学, 51, 265-274.
- 松永俊二・酒匂 崇・赤嶺卓哉・田口信教・須藤明治.
1992: 腰痛患者に対する水泳運動療法の有効性について. リハビリテーション医学, 29, 115-121.
- 小野寺昇. 2000: 水中運動と健康増進. 体育の科学, 50, 510-516.
- 須藤明治・赤嶺卓哉・田口信教・酒匂 崇. 1992: 腰痛に対し水中運動療法の及ぼす効果—一般腰痛者とスポーツ選手腰痛者における調査より—. 体力科学, 41, 386-392.
- 須藤明治・赤嶺卓哉・田口信教. 1992: 腰痛者のための水泳教室テキスト. 環境工学社, 東京, 201頁.
- 須藤明治. 1999: 水中運動処方 I. 文化書房博文社, 東京, 135頁.
- 須藤明治・角田直也・八木良訓. 2000: 高齢の腰痛患者に対する水中運動の効果. 柔道整復・接骨医学, 9, 13-18.
- 須藤明治・角田直也・田口信教. 2001: 水中環境下での脚筋力トレーニングは筋血流制限下のトレーニングと言えるのか. デサントスポーツ科学, 22, 193-203.
- 須藤明治・角田直也・井尻成幸・八木良訓. 2002: 高齢・低筋力者における水中運動の効果. 国士舘大学体育研究所, 21, 65-73.
- Sudo, A. and N. Tsunoda. 2001: Effect of muscle blood flow in water immersion. 6th European College of Sport Science. 925p.

(2003. 2. 27 受付, 2003. 6. 11 受理)