

# 対馬海域における 海洋温度差発電設計のための海洋調査

Oceanographic investigation for designing  
of an Ocean thermal energy conversion  
in the vicinity of the Tsushima Island

一瀬 純弥<sup>1</sup>・中岡 勉<sup>1</sup>・西田 哲也<sup>1</sup>・植田 貴宏<sup>2</sup>・中島 大輔<sup>2</sup>・秦 一浩<sup>2</sup>  
水谷壮太郎<sup>2</sup>・島崎 渉<sup>2</sup>・和嶋 隆昌<sup>3</sup>・浦田 和也<sup>3</sup>・池上 康之<sup>3</sup>

Junya ICHINOSE, Tsutomu NAKAOKA, Tetsuya NISHIDA, Takahiro UEDA,  
Daisuke NAKASHIMA, Kazuhiro HATA, Sortaro MIZUTANI, Wataru SHIMAZAKI,  
Takaaki WAJIMA, Kazuya URATA and Yasuyuki IKEGAMI

## Abstract

On the Tsushima Island, a practical application of an ocean thermal energy conversion (OTEC) and desalination plant is expected due to the short of electric power and drinking water. In the present study, we made oceanographic observation in the area northwest of Tsushima Island on August, October and November in 2005 and July, August and October in 2006 to obtain physical and chemical data (water temperature, salinity, dissolved oxygen, nutrients and velocity of currents) and topographic data, which is necessary for designing the hybrid OTEC system.

Approximate temperatures in the surface and deep seawaters (SSW and DSW, respectively) at about 170 m in depth were 28°C and 5°C in August 2005, and 21°C and 8°C in November. From the thermal data, OTEC was supposed to be active from August to October. The salinity in SSW and DSW were 31.0–31.8 PSU and below 34.2 PSU, respectively in August 2005; between depths of 30 and 50 m a drastic halocline was detected. The low salinity of SSW in summer suggests the influence of continental river waters. Dissolved oxygen in SSW and DSW in August 2005 were comparatively high (>5.0 ml/l). Water quality showed drastic seasonal changes in SSW shallower than a depth of ca. 150 m, which may be the influence of continental river waters. On the contrary, DSW characterized by high salinity and low temperature was thought to be the cold water endemic to Sea of Japan. On an expected cold water pipe (CWP) (180–200 m in length, 1.7 m in diameter) designed for a sea-based 1,000 kW OTEC plant, the maximum bending moment was estimated to be larger than 3,922 Nm. In the case of employing a land based OTEC plant at Cape Sao on the north of Tsushima Island, length of the CWP should be longer than ca. 9.5 km.

**Key Words:** Ocean Investigation, Tsushima coastal area, OTEC, CTD

**キーワード:** 海洋調査, 対馬海域, 海洋温度差発電, CTD

<sup>1</sup>独立行政法人水産大学校 海洋機械工学科 (〒759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)

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

<sup>3</sup>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

対馬市の電力は、島内に設置された三つのディーゼル発電所（厳原、佐須奈、豊玉）により供給されており、総発電出力は、約 56,500 kW である (<http://www.kyuden.co.jp/index.html>)。これらの発電所は、本土より発電用の燃料を輸送し運転しているため輸送コストがかかり、さらに、ディーゼル発電であるため、環境負荷が大きく問題となっている。また、対馬周辺海域は他国との排他的経済水域の境界線が近く、近年、他国漁船による乱獲のため水産資源が枯渇しており、地域の産業基盤が低下し問題となっている。このようなことから、現在、対馬では、新しい産業の振興が求められている。

一般に、離島対策として、化石燃料を使用せず、離島に豊富な海水をもちいた海洋温度差発電システムや海洋温度差発電と海水淡水化を組み合わせたハイブリッド OTEC システムが注目されている。これらのシステムは、表層海水と深層海水の温度差を利用して発電を行い、さらに淡水を製造するが、同時に汲み上げた海洋深層水を利用した水産物の養殖、漁場の造成、深層水関連商品の製造等、広範囲に及ぶ産業育成が可能であり、離島における新しい産業の振興が期待できる。このように多目的に利用可能なハイブリッド OTEC システムを建設する場合、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、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、設置場所に適した最適設計を行う必要がある。

現在、海洋温度差発電の設置場所の調査や概念設計に関する研究は、日本および世界各国で行われている (Wolff *et al.* (1979), 上原 1982, 乾 1994)。昨今、日本近海および島嶼諸国の設置候補海域（島根沖：上原 1980, フィリピン海域：Uehara, 1988, 沖永良部海域：乾ら 1990, 上原ら 1992, パラオ海域：池上ら 1994）においてハイブリッド OTEC システム設置の可能性の検討が進められている。著者らは、南太平洋のフィジー海域における海水淡水化装置を組み合わせたハイブリッド

OTEC システムの最適化設計のための海洋調査を行い、表層と深層の温度差による熱量と太陽エネルギーの単位面積あたりの熱量を用いた 2 つの方法から、この海域での再生エネルギーについて試算した結果を報告した (中岡ら 2003)。また、この海域に適した海水淡水化システムを設計するための海洋調査も行い、表層水と海洋深層水の海洋熱エネルギーを利用する海水淡水化システム（1日当たりの造水量 1,000 ton）の性能解析結果について報告している (中岡ら, 2006)。

対馬海域については、主に日本海洋データセンターにより海洋調査結果が公表されている (<http://www.jodc.go.jp>)。しかし、水深が深く、低温度が確保できる対馬北西側については、韓国との排他的経済水域の境界線に近いこともあり、年間を通して得られた海洋データは少ない。

著者らは、対馬海域に適したハイブリッド OTEC システムの設計を検討するための海洋データを得るために、2005～2006 年の夏～冬に対馬北西側で海洋調査を行い、設計に必要な検討を行った。本報では、調査結果のうち、栄養塩および希少金属（次報で報告予定）を除く海洋物理データと海底地形について報告する。

## 2. 調査海域と期間

調査は、対馬の北西西水道側の  $34^{\circ}35'N \sim 34^{\circ}48'N$ ,  $129^{\circ}12'E \sim 129^{\circ}18'E$  の範囲で、図 1 に示す St. 1～5 及び CL08 で実施した。2005 年の調査は 8 月 19 日、10 月 9 日および 11 月 26 日、2006 年の調査は年 7 月 26 日、8 月 24 日、10 月 4 日、10 月 21 日および 11 月 10 日に実施した (表 1)。

## 3. 調査項目と方法

調査は、水産大学校練習船の天鷹丸を用いて行った。調査船の主な仕様は、全長 62.6 m, 幅 10.4 m, 国際総トン数 1,020 ton, 航海速度は 12.5 knot である。

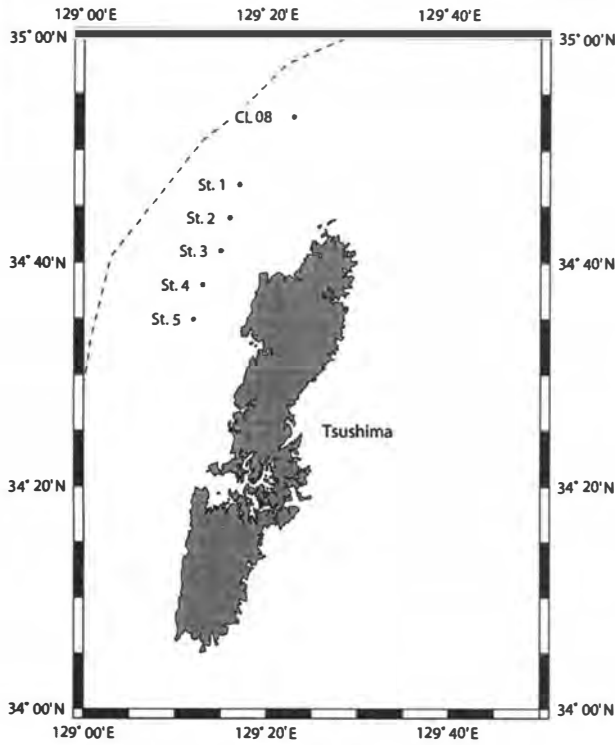


図1 調査海域

調査項目は、水深、水温、塩分、溶存酸素量、潮流の流向、流速、海底地形である。

水深、水温、塩分、溶存酸素量は、電気伝導度水温水深計（Conductivity Temperature Depth）（CTD）（Sea-Bird Electronics, Inc. SBE 9 plus CTD Profiler CTD-O<sub>2</sub>）を各調査点でウインチにより海中に投入し、線速 1.0 m/s で降下させ、水深

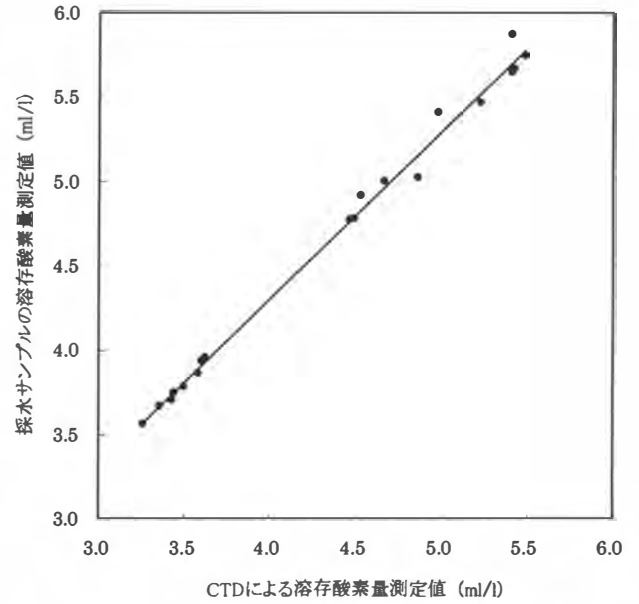


図2 滴定溶存酸素量と測定溶存酸素量の関係

0.0 m から海底付近まで計測した。水深は、鉛直方向の指標に水圧（db）を用い、水圧と水深の関係式より算出した。

2005年11月、12月の調査は、海底付近の水温を調査するために、投下式水温計（Expendable Bathy Temperature (XBT)）とCTDを併用して行った。

水温を用いた密度の計算の際には、ポテンシャル水温を用いている（海洋観測指針 2005）。

塩分は、15℃、1気圧におけるKCl標準溶液

表1 調査期間、調査範囲、調査点、調査項目

回	調査期間	調査範囲	調査点	調査項目	
1	2005/ 8/18~2005/ 8/26	34° 35' N~34° 48' N 129° 12' E~129° 18' E	St. 1 ~ 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>水深、水温、塩分、溶存酸素量</li> <li>海底地形</li> <li>潮流流向、流速</li> <li>採水</li> </ul>	
2	2005/10/ 7~2005/10/11		St. 1 ~ 5	〃	
3	2005/11/25~2005/12/ 2	34° 35' N~34° 53' N 129° 12' E~129° 24' E	St. 1 ~ 5, CL08	〃	
4	2006/ 7/23~2006/ 8/ 1	34° 35' N~34° 53' N 129° 12' E~129° 24' E	St. 1 ~ 5, CL08	<ul style="list-style-type: none"> <li>水深、水温、塩分、溶存酸素量</li> <li>潮流流向、流速</li> <li>採水</li> </ul>	
5	2006/ 8/22~2006/ 8/30			〃	
6	2006/10/ 3~2006/10/ 8			〃	
7	2006/10/20~2006/10/25			St.1 ~ 3, CL08	〃
8	2006/11/ 9~2006/11/12			St.1 ~ 5, CL08	〃

(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及び温度の補正を行い、電気伝導比により求めた。

溶存酸素量は、酸素センサーにより測定された電流値を用いて、水圧、水温の補正を行った酸素飽和率を求め、これに海水中の酸素飽和量を掛け合わせて求めた。各調査で、任意の調査点の採水サンプルについてウインクラー法でも溶存酸素量を求め、酸素センサーの精度を確認した結果、両者の相関係数は 0.993 でよく一致していたので、本報告では溶存酸素センサーを使用して求めた値を示した。

潮流の流向および流速の測定は、2005 年 8 月 18 日 18 時～8 月 19 日 5 時および 2006 年 10 月 9 日 6 時～17 時に調査海域を航走中、超音波潮流流速計 (Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP)) を用いて行った調査水深は 10, 50, 100, 110, 150, 170 m の 6 水深で、設定周波数は、水深 10～100 m は 244 kHz、水深 110～200 m は 130 kHz で、測定精度を上げるため、対地モードで測定を行った。船速が遅い場合や加速中はデータの測定精度が悪いため、船速 6 ノット以上の安定航行中のデータを採用した。なお、気象庁の検潮所 (対馬市美津島町に設置) の潮位 (実測潮位) データ (<http://www.data.kishou.go.jp>) によれば、2005 年調査日の最高潮位時刻は 8 月 18 日 21 時、最低潮位時刻は 8 月 19 日 2 時で、8 月では最も潮位差が大きくなる大潮期に相当していた。同様に、2006 年調査日の最高潮位時刻は、10 月 9 日 12 時、最低潮位時刻は 10 月 9 日 6 時で、10 月としては潮位差が小さい小潮期に相当していた。

海底地形の測定は、計量魚探 (Furuno FQ-80 38 kHz, 120 kHz) を用い、調査海域を航走して行った。

#### 4. 調査結果および考察

##### 4.1 各調査点と水温分布

図 3 には、調査範囲の左端に位置する St.5 から北北東方向に右端の St.1 までの鉛直断面内の水温分布を示した。図中の a は 2005 年 8 月 19 日、b

は 2005 年 10 月 9 日、c は 2005 年 11 月 26 日、d は 2006 年 7 月 26 日、e は 2006 年 8 月 24 日、f は 2006 年 10 月 4 日の調査結果で、a～f の順は以下の項目についても同様である。

2005 年の 8 月には、各調査点とも表層は 28℃以上と高温で、140 m 以深の深層は 5～6℃であった (図 3 a)。10 月には表層は 24～25℃で、8 月に比べると低下していたが、140 m 以深の深層海水は一樣に 5～6℃であった (図 3 b)。11 月には表層は 20～21℃で、8 月、10 月に比べて低下していたが、140 m 以深の深層は 8～9℃で、8 月、10 月に比べると上昇していた。また、北端の調査点に向かうにつれ低下する傾向が見られた (図 3 c)。

2006 年の 7 月には、表層付近が約 22.6℃～24.1℃で、約 160 m 付近で急激に低下し、St.1 の海底近く (水深約 214 m) では 8.4℃、St.3 の海底近く (水深約 192 m) では、9.2℃、St.5 の海底近く (水深約 175 m) では 9.7℃であった (図 3 d)。8 月には、表層の St.1～St.4 が約 28.6℃～28.8℃、St.5 が約 27.9℃であった (図 3 e)。各調査点とも、7 月と同様に水深約 140～160 m で急激に低下し、St.1 の海底近く (水深約 200 m) では約 3.6℃、St.3 の海底近く (水深約 195 m) では約 4.1℃、St.5 の海底近く (水深約 172 m) では約 4.9℃となった。7 月に比べ、表層では約 4～6℃上昇しており、逆に、海底近くでは約 5～6℃低下している。

10 月には、表層は St.1～St.4 が約 23.6℃～23.1℃、各調査点ともに水深約 130～140 m 付近で水温は急激に低下し、St.1 の海底近く (水深約 200 m) では約 4.8℃、St.3 の海底近く (水深約 195 m) では、約 5.3℃、St.5 の海底近く (水深 172 m) では約 5.5℃となった (図 3 f)。8 月に比べ、表層では約 5℃低下し、海底近くの深層では、僅かに約 0.6～1.2℃上昇していた。

以上、6 回の調査 (図 3 a～f) から、水深 140～150 m には、約 4～9℃の間で変動はあるが水温躍層があり、それよりも深層で冷水塊の存在が確認された。図 4 に、St.3 における鉛直方向の水温分布を、調査期間を通して示した。表層の水温は、調査時期による変動が大きく、夏期 (8 月) から冬

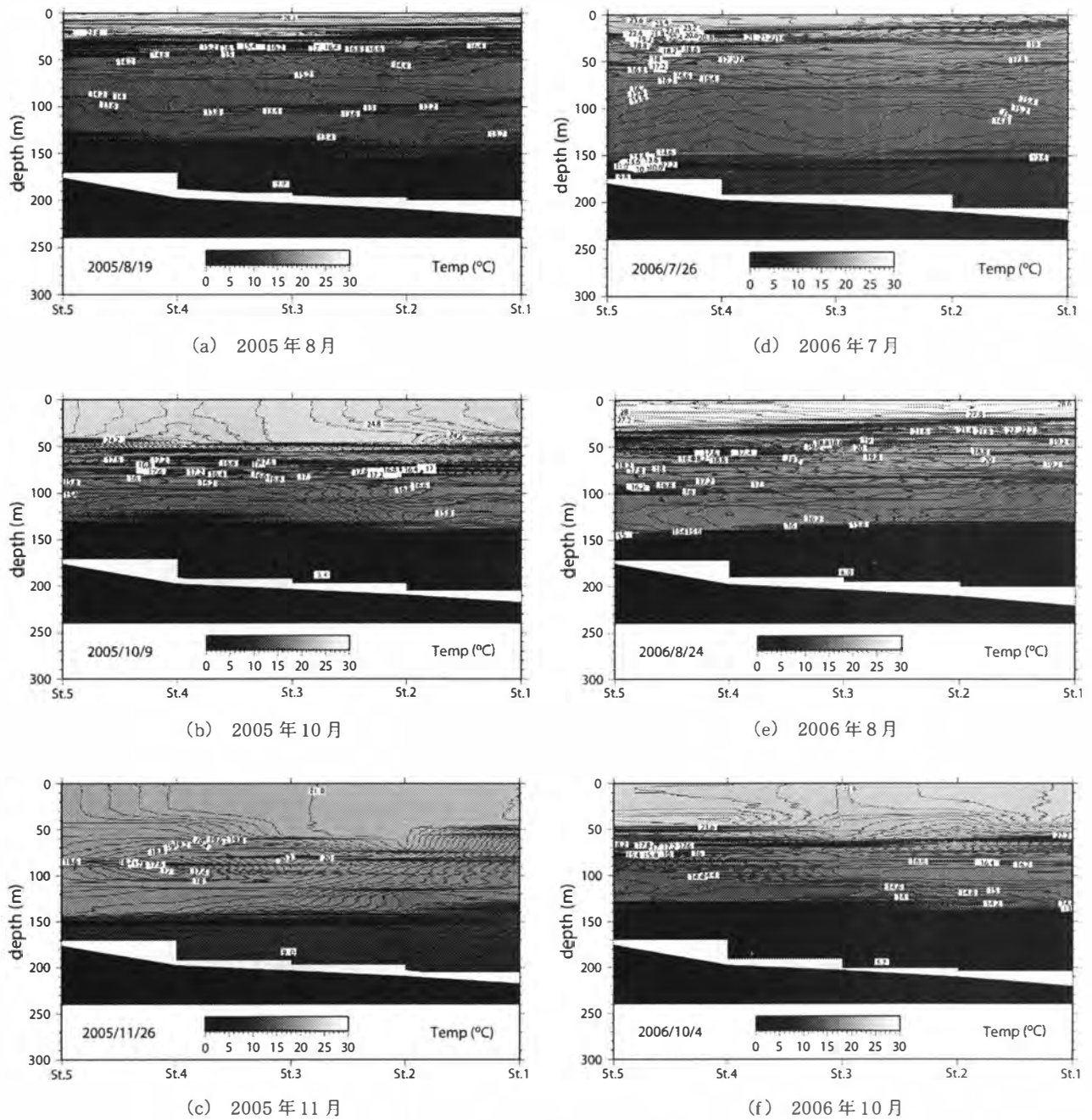


図3 各調査点と水温分布

期（12月）まで低下する。これに対して、海底近くの深層の水温は、多少の変動はあるが、2005年、2006年とも、8～10月には約4～6℃で、表層の水温に比べ変動が少なくほぼ一定である。

海洋温度差発電システムのプラント設置を考える上で、高・低熱源の条件である表層と深層の水温の変化は非常に重要である。これまでの研究では、今回調査した調査点より北方の観測点（34°50.2'N, 129°19.5'E）で韓国水産振興院が調査したデータがある（日本全国沿岸海洋誌 1985）。この研究で

は、表層水温は、1～4月が14℃、5～7月に上昇し、8～9月に26～27℃程度と最高水温となり、その後、10月で22℃、12月で21℃、というように変化することが報告されており、7～11月には、今回の調査でも同じような傾向を示した。また、水深210m付近の水温は、1～2月に10℃程度、3～5月初旬に11℃、6～7月に急激に低下し、8月に7℃、9月に最低水温5℃まで低下し、その後、緩やかに上昇し、11月に7～8℃、12月に11℃となる。この結果は、深層の水塊の最低水温期が8

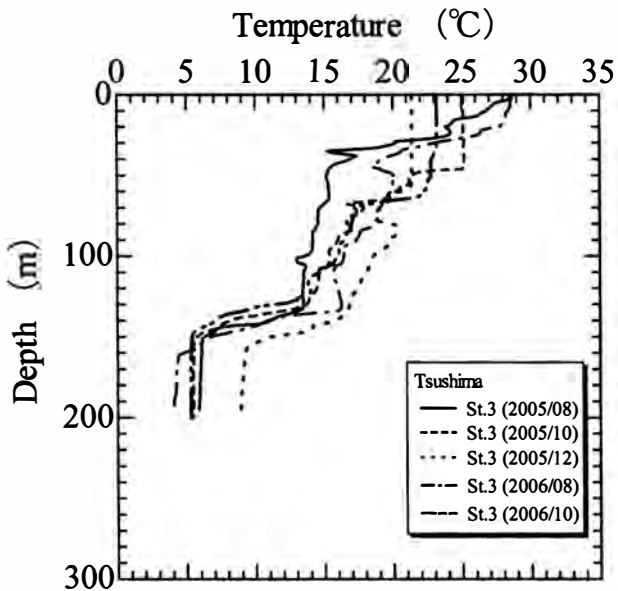


図4 鉛直方向の水温分布 (St.3)

～9月であることを示しており、本調査結果も同じ傾向を示した。

#### 4.2 各調査点と塩分分布

図5a～fに、各調査点における塩分分布を示す。2005年の8月には、表層に31.0～31.8 PSU程度の低塩分層が存在し、水深30～50mの間では急激に塩分が上昇する躍層が存在していた。また、140m以深では34.2 PSUとなっていた(図5a)。10月には塩分から大きく3層の水塊に分かれ、塩分が変化している躍層は、水温や溶存酸素量に変化している躍層と対応している(図5b)。11月には、表層と水深130m付近の高塩分層(34.4 PSU)、St.4とSt.1～CL08の水深80m付近に存在する低塩分層というように複雑な構成になっており、前月まで底層付近に存在していた34.2 PSUの水塊が認められなくなっている(図5c)。

2006年の7月には、表層では32.6～32.7 PSUの低塩分層が存在し、水深30～60mの間で34.3 PSUまで上昇し、それ以深ではほぼ一定であった(図5d)。8月には、表層付近は30.8～31.4 PSUと7月に比べ低く、水深20～50mの間では激しく変化する躍層が存在し、水深70m付近では34.2～34.4 PSU、それ以深では徐々に低下し、海底付近では、約34.1 PSUとなる(図5e)。10月には、

表層は約33.0 PSUと8月(約31.0 PSU)に比べて高くなったが、深層は殆ど変化していない(図5f)。

2005年と2006年の調査結果は、いずれも10～11月に上下層の塩分差が小さくなる傾向を示し、前述の韓国水産振興院が調査したデータでも同じような傾向が見られる(日本全国沿岸海洋誌1985)。また、両年の調査結果ではどちらも夏期において表層が低塩分となっているが、これも日本全国沿岸海洋誌(1985)に述べられているように、対馬暖流が中国大陸の沿岸水による希釈を受けているためと考えられる。2005年と2006年の表層の塩分に差があるのは、大陸からの河川水の量(正確に言えば大陸の降水量)が変化しているためと考えられる。

#### 4.3 各調査点と溶存酸素量分布

図6a～fに、各調査点の溶存酸素量の鉛直分布を示す。

2005年の8月には、表層から深層まで4.4～5.0 ml/lとほぼ一様に分布しており、表層及び深層に比較的溶存酸素量の高い層(5.0 ml/l以上)が確認された(図6a)。10月には、水深50～60m付近に溶存酸素量が低下する躍層と水深140m付近に溶存酸素量が上昇する躍層が確認された。これは水温躍層(図3b)と対応しており、それよりも深層には8月と同様、5.0 ml/l以上の溶存酸素量の高い層が存在していた(図6b)。11月になると、前月には水深50～140m付近に存在した低酸素層が130m以深に移動していた(図6c)。深層に存在していた5.0 ml/l以上の高溶存酸素層がSt.1側の北方に後退し、調査点CL08付近にもその痕跡が見られた。

2006年の7月には、表層及び深層に比較的溶存酸素量の高い層が存在し、水深約50～160mの間に約3.8 ml/lの溶存酸素量の低い領域が存在している(図6d)。8月には、水深50m付近で、溶存酸素量が急激に減少し、水深約80～130mの間では7月に比べ約3.4 ml/lと低下していた。深層の溶存酸素量はほぼ一定であった(図6e)。10月には、St.5の水深60m付近に3.0 ml/l以下の溶存

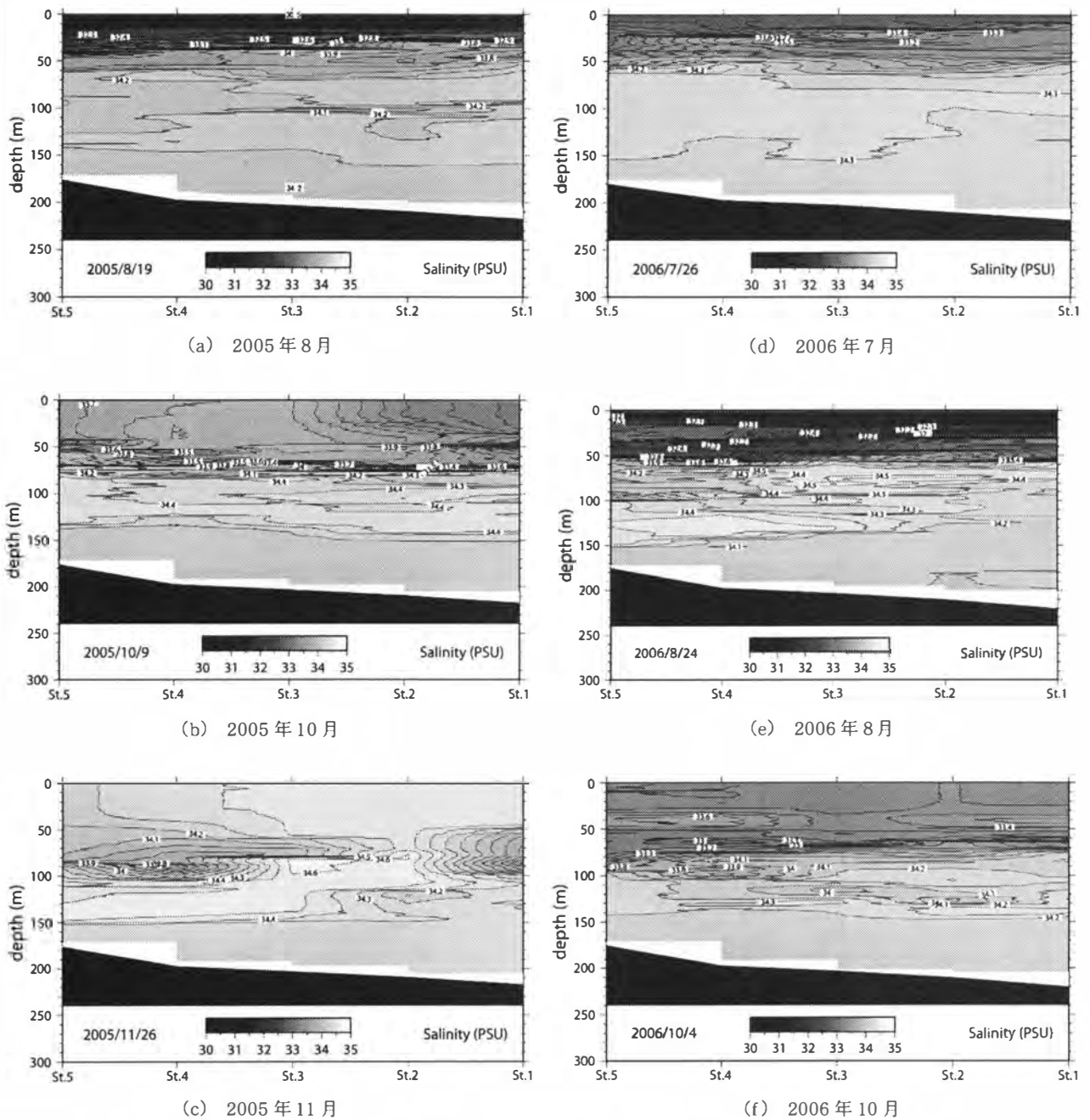


図5 各調査点と塩分分布

酸素量が低い層が見られた (図6 f).

#### 4.4 水塊

図7に、St.2における2005年8月(図中の○印)、10月(△印)、11月(□印)のT-Sダイアグラムを示す。図中の▽印はJODC (<http://www.jodc.go.jp>)による日本海中心部の調査点(132°E, 40°N)のデータであるが、これをみると、2005年8月、2005年10月、2005年11月の調査データはJODCの調査データともほぼ同様で、塩分約

34.2 PSU、水温4~10°Cの範囲で一致している。

千手(1994)は、日本海には、主温度躍層の下、水深500m以深に水温0~1°C程度、塩分34.1 PSU程度の均一な水塊、日本海固有水が存在することを報告している。また、JODCの調査データは、水温8°C以下の塩分については日本海固有水の特性と近似している。これらの既往知見から、調査海域に存在する深層の高塩分・低水温の水塊は、日本海固有水起源と考えられる。磯部(1994)は、この水塊を底部冷水と呼び、日本海下層にある固有水、

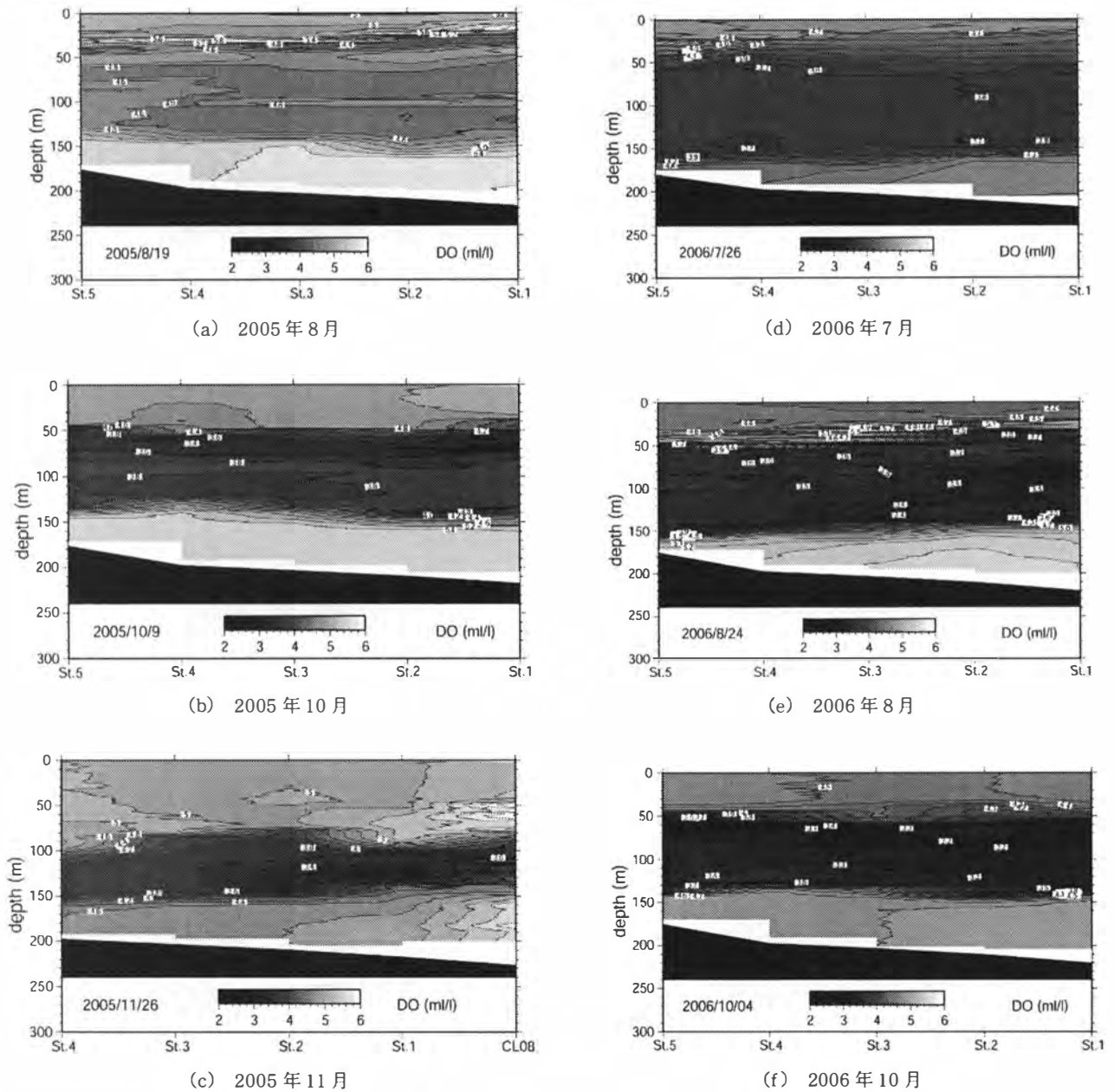


図6 各調査点と溶存酸素量分布

またはその上の水温躍層周辺の水塊が南出することについて、対馬西水道特有の現象としている。なお、2005年8月に表層の塩分が低いのは、前述したように中国大陸からの河川水の影響と考えられる。

#### 4.5 潮流

図8a～cは、それぞれ2005年8月の調査海域における水深10m、110m、150mの潮流（流速、流向）の変化を示したもので、横軸に調査時刻、縦軸にそれぞれ流速と流向を示す。水深150mについては、計測機器の問題により、一部データがない

時刻がある。

水深10mの場合、調査海域全体において、最高潮位時刻の前までは、流向は西から西南西方向（以下南西流と記す）であるが、最高潮位時刻の後、流向は北北東方向（以下北東流と記す）に逆転している（図8a）。また、最高流速は、北北東方向の場合約3.4ノットであり、最高潮位時刻の約3時間後に最大となっている。

水深110mの場合、流速は南西流については、水深10mに比べ殆ど変わらず、最大流速は、約2.3ノットである（図8b）。しかし、北東流につい



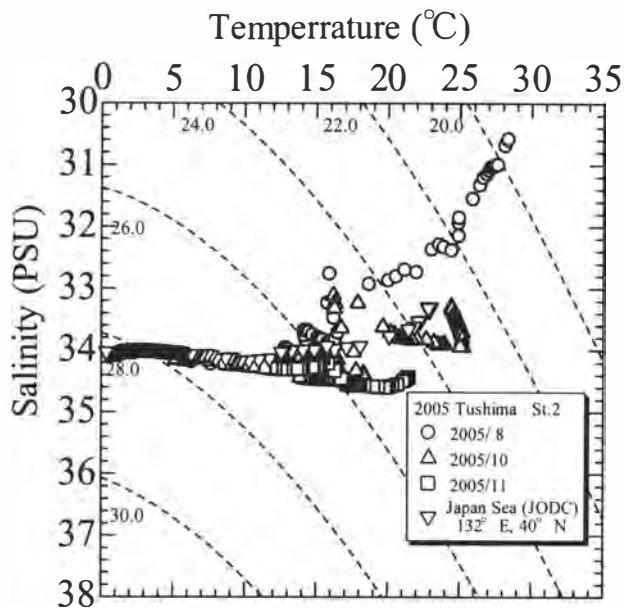


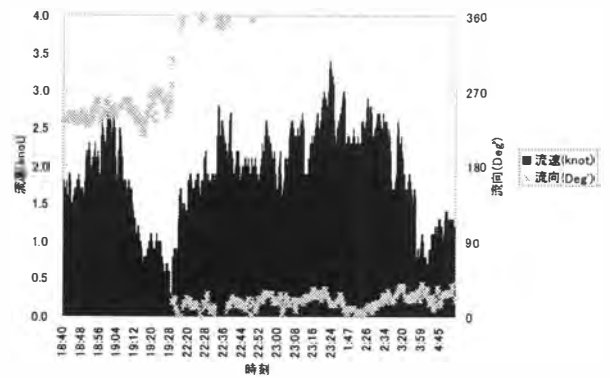
図7 水塊 (T-S ダイアグラム)

では水深 10 m に比べ全体的に小さい。流向については、最高潮位時刻の後には、水深 10 m の場合と同じような傾向を示しているが、最低潮位時刻をすぎると徐々に流向が南方向へ変わる。

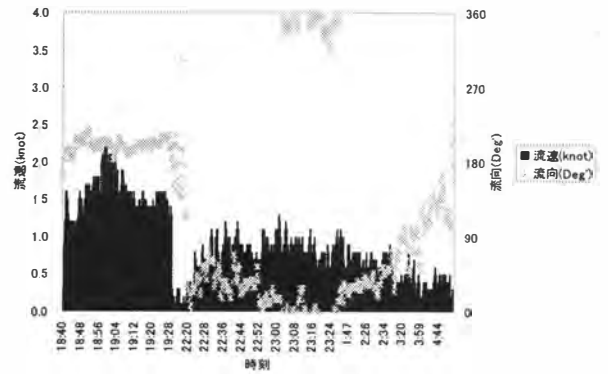
水深 150 m の場合、流速は南西流については、水深 10 m, 110 m に比べ殆ど変わらず、最大流速は、約 2.5 ノットである (図 8 c)。しかし、北東流については全体的に小さい。流向は、最高潮位時刻・最低潮位時刻の後、流速が小さいため安定していない。

これまで対馬海峡の流動特性については、長崎海洋気象台・海上保安庁水路部 (日本全国沿岸海洋誌 1985) が調べている。これによると、済州島南方 (対馬西水道) においては周期が 12.5 時間の半日周潮流が卓越しており、対馬において、高潮後 1~2 時から低潮後 1~2 時までには北東方向へ流れ、その逆の時間帯は南西方向へ流れることを示している。これらの結果は、今回の水深 10 m の場合の調査結果とほぼ同様である。また、最高流速は、北東流で高潮後 3~4 時、南西流で低潮後 3~4 時に現れるとも報告されているが、これは、今回の水深 10 m の場合の調査結果のうち北東流に関して同様な結果が得られた。

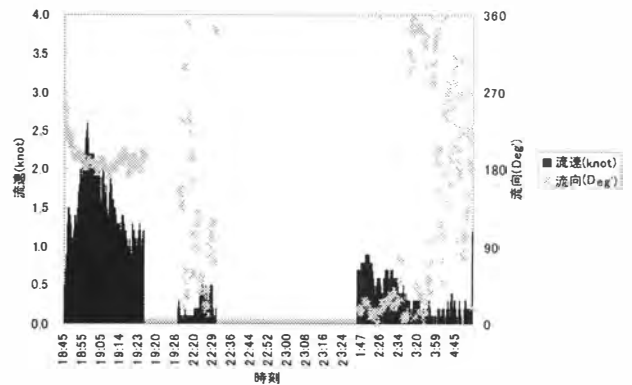
図 9 a~c は、それぞれ、2005 年 10 月の調査海域における水深 10 m, 110 m, 150 m の潮流



(a) 水深 10 m の潮流 (流速, 流向) (2005 年 8 月)



(b) 水深 110 m の潮流 (流速, 流向) (2005 年 8 月)

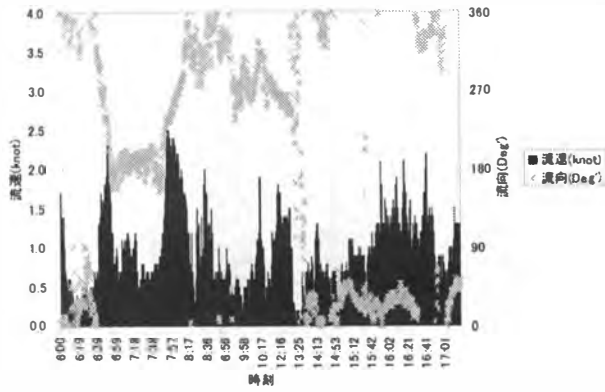


(c) 水深 150 m の潮流 (流速, 流向) (2005 年 8 月)

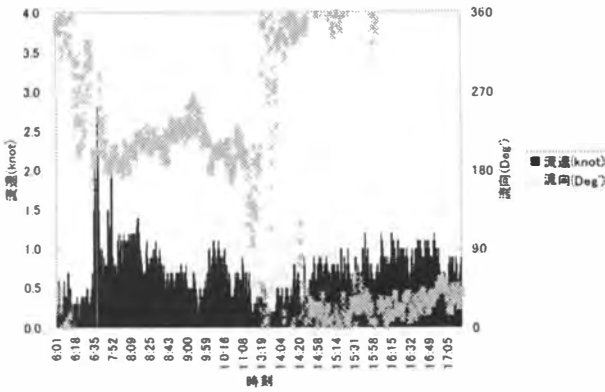
図8 潮流 (流速, 流向) の変化 (2005 年 8 月, 水深 10 m, 110 m, 150 m)

(流速, 流向) の変化を示す。水深 150 m については、計測機器の問題で一部データがない時刻がある。

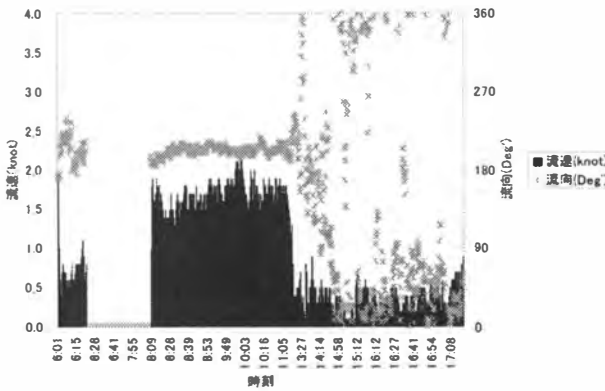
水深 10 m の場合、最高流速は南西流の場合で約 2.4 ノットで、8 月の調査結果に比べ低下している。また、流向や流速の変化が大きく、明瞭な傾向は現れていない (図 9 a)。水深 110 m の場合、流速は南西流については、最大流速は、約 2.4 ノットである (図 9 b)。また、水深 150 m の場合、流速は南西流については、水深 10 m, 110 m に比べ安定し



(a) 水深 10 m の潮流 (流速, 流向) (2005 年 10 月)



(b) 水深 110 m の潮流 (流速, 流向) (2005 年 10 月)



(c) 水深 150 m の潮流 (流速, 流向) (2005 年 10 月)

図 9 潮流 (流速, 流向) の変化 (2005 年 10 月, 水深 10 m, 110 m, 150 m)

た流れとなっており, 最大流速は, 約 2.0 ノット前後である. 北東流については 8 月の結果と同じく全体的に小さい (図 9c). 3 水深のうち, 水深 110 m および 150 m については, 最高潮位時刻・最低潮位時刻の後の流向の変化が 8 月の場合と同じく出ている.

図 10 a ~ d は, 2005 年 8 月の調査海域における各層 (水深 10 m, 50 m, 110 m, 150 m) の潮

流 (流速, 流向) をベクトルで示す. St.3 付近を比較すると, 表層流向が南西流の場合, 水深 10 m は流向 244°で流速 2.7 ノット, 水深 110 m では 195°で 1.9 ノット, 水深 150 m では 187°で 2.0 ノットである. 表層流向が北東流の場合, 水深 10 m は 15°で 2.5 ノット, 水深 110 m では 28°で 0.7 ノット, 水深 150 m では 35°で 0.6 ノットとなる. 南西流の場合より, 北東流の場合の方が表層から深層までの流速の差が大きい.

#### 4.6 海底地形

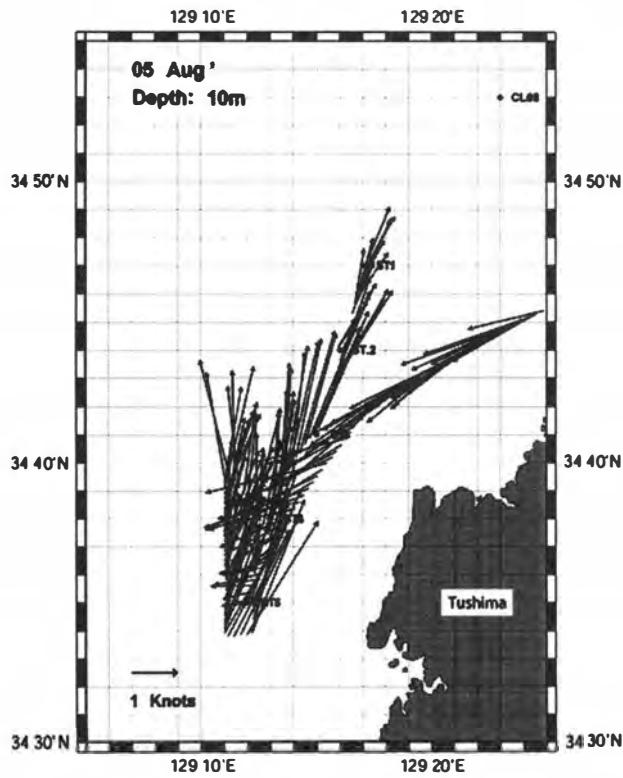
図 11 a ~ b に計量魚探により測深した海底地形を示す. 図 11 a は 2 次元 (緯度, 経度) での等深線を示し, 図 11 b は, 緯度, 経度, 水深の関係を投影法で表したものである. 図 11 b において, 茶色の部分は, 対馬北端の陸岸である. なお, 陸岸付近の水深は調査船で測深することが不可能であるため, 沿岸海の基本図 ((財)日本水路協会海洋情報センター) を使用した.

図 11 a ~ b より, 調査海域の海底は, 海岸から調査地点にむけて水深約 150 m まで急激に深くなり, 調査地点付近で対馬舟状海盆と称する深さ約 200 m 程度のくぼみ (日本全国沿岸海洋誌 1985) が存在していることが確かめられた.

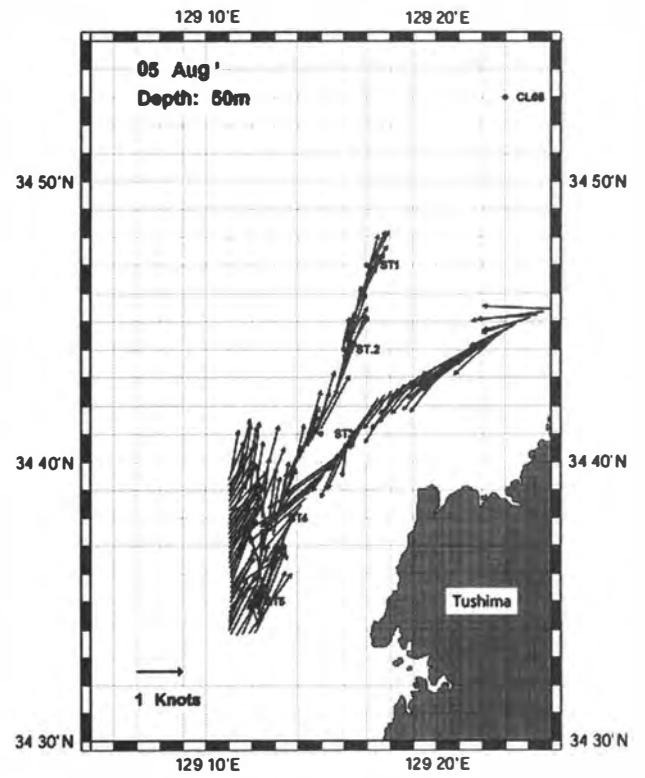
### 5. ハイブリッド OTEC システム設計のための考察

#### 5.1 熱源の検討

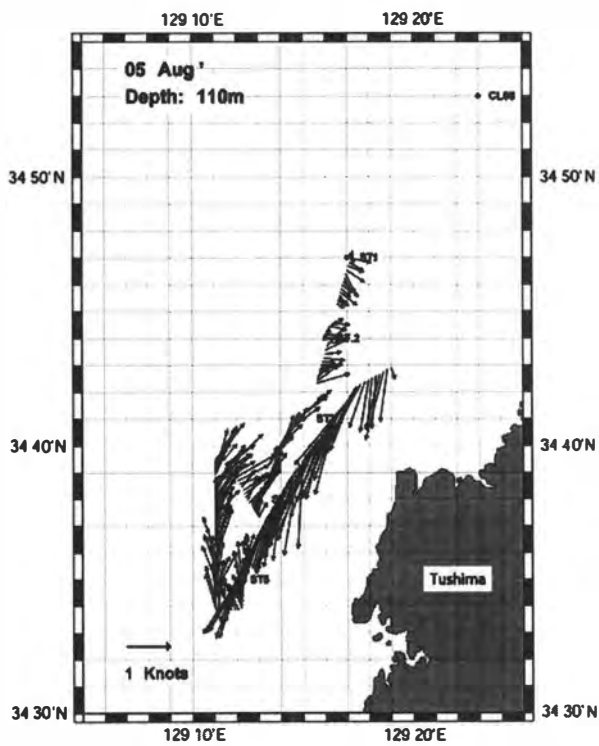
OTEC システムを, 正味出力当たりの建設コストを抑えて建設するためには, 表層と深層の温度差が最低約 15.0°C 以上が必要 (上原ら 1982) と考えられていることから, 表層と深層の水温は, 熱源条件としてハイブリッド OTEC システムの性能を決める上で重要である. 特に, 熱交換器の熱通過係数の性能は表層・深層の温度や温度差によって変わるため, 熱交換器の総伝熱面積に大きく関係し, 熱交換器の大きさが変わると, 表層海水, 冷海水流量, ひいては作動流体ポンプの動力も変化する. 従って, 設計条件の設定, あるいは, 設計されたハイブリッド OTEC システムにおいて熱源条件が変化した場



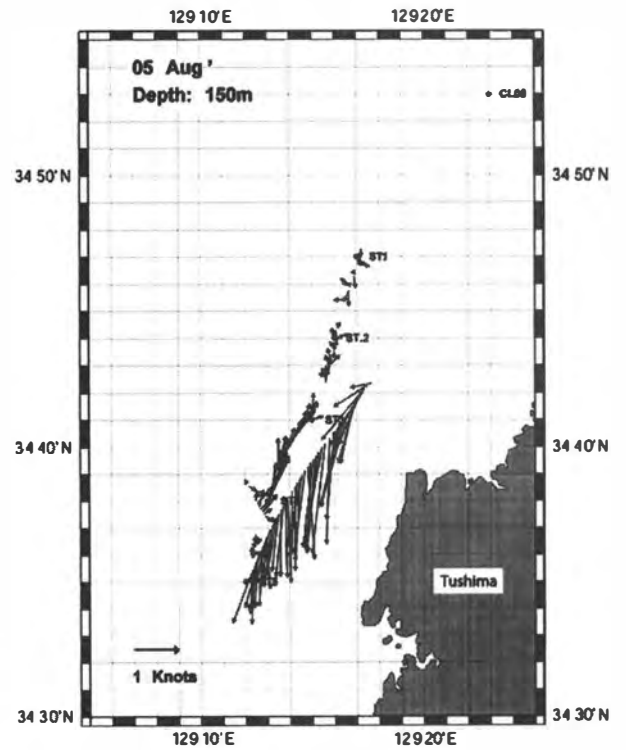
(a) 2005年8月 水深10m



(b) 2005年8月 水深50m

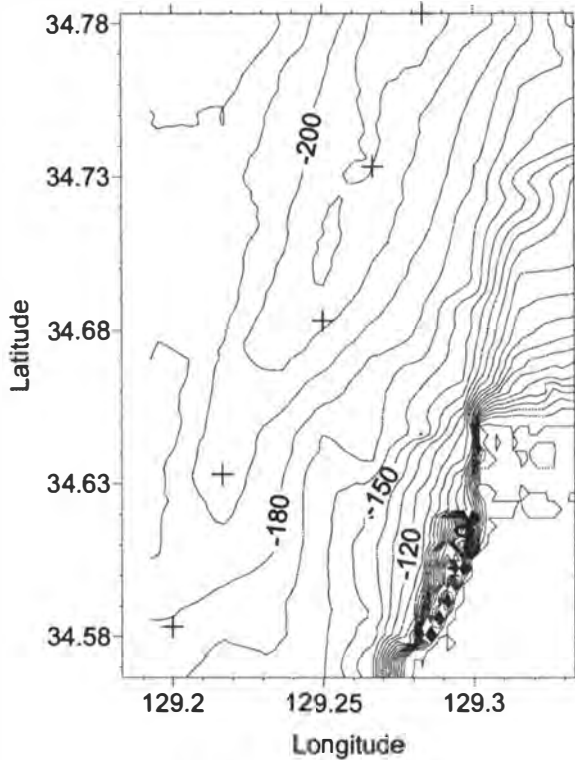


(c) 2005年8月 水深110m

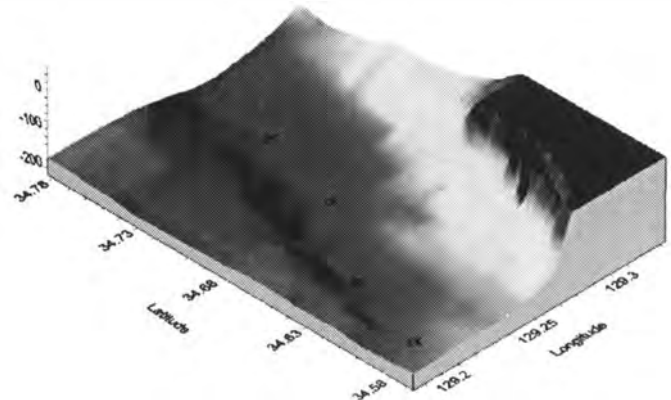


(d) 2005年8月 水深150m

図10 各層における潮流のベクトル



(a) 海底地形 (2次元)



(b) 海底地形 (3次元)

図 11 海底地形

合のオフデザインを行う際にも海域の熱源の温度条件を知る必要があり、熱源の調査は重要となる。

本調査海域の場合、2005年8月には表層で約28℃、深層で約5℃、温度差は約23℃となるが、同年11月には表層で約21℃、深層で約8℃、温度差は約13℃となり、OTECシステムを稼働する上で厳しい条件である。従って、この海域での海洋温度差発電プラントの設置を考える場合、本調査海域の発電可能期間は8～10月と考えられる。また、2005年12月には深層の水温が約9℃に上昇し、表層の水温も低下して温度差が十分ではないため、この時期には他の発電システムとの組み合わせなどの対策が必要と考えられる。

著者らは、すでに対馬の調査海域においてハイブリッドOTECシステムを設置する場合について、熱源条件、冷海水取水管長さについて性能解析を行っている(中岡ら2007)。これより、発電端出力1,000kWのプラントで、2005年8月の場合(温度差約23℃)、正味発電主力は490kWが得られている。後述する塩分や溶存酸素量の影響について

は、今後検討を行う必要がある。

## 5.2 構成機器(熱交換器、冷海水取水管)の設計に対する検討

### 5.2.1 塩分の影響について

熱交換器(蒸発器、凝縮器)を設計する際には、輸送性質の熱物性に海水の塩分が大きく影響し、具体的には粘性係数や熱伝導率が変化する。これは、熱交換器内の流れや伝熱現象に関係し、熱交換器の伝熱面積を算出するのに塩分変化の把握が重要である。また、OTECを運転する際、発電端出力に対して運転に必要な各ポンプのポンプ動力の占める割合は非常に大きく、10万kWのシステムの場合でも約23%に達し(海洋温度差発電読本1982)、プラントを設計する際には、各ポンプのポンプ動力の正確な見積もりが不可欠である。深層水を取水するための冷海水取水ポンプのポンプ動力を見積もる際、冷海水取水管の圧力損失が必要で、この圧力損失が大きくなると、ポンプ動力は大きくなる。冷海水取水管内の圧力損失には、密度差によるものと管摩擦

によるものがある。管摩擦による損失は、冷海水取水管が長くなると大きくなる。また、密度差による損失は、表層と深層と海水の密度差が大きくなると大きくなる。これは、海水の密度に大きく関係し、海水中の塩分と関係するため重要となる。塩分及び密度差がポンプ動力に及ぼす影響については、今後、得られたデータを使用した性能解析を行う必要がある。

また、OTEC で使用した海洋深層水を利用して漁場造成を行う際、放流した深層水を植物プランクトンの光合成が行われる有光層に対流させることが必要になる。例えば、相模湾で実験中の深層水取水装置「拓海」においても、海水の密度差による沈降を防ぐために、表層水と混合（深層水：表層水＝1：2）を行って、水深 20 m 付近に放流している（海洋深層水の多目的利用 2006）。

図 12 に、St.2 における 2006 年 8 月（図中の○印）、10 月（△印）、11 月（□印）のポテンシャル密度 ( $\sigma_\theta$ ) を示す。ポテンシャル密度は、ポテンシャル水温と塩分、基準圧力により算出した（海洋観測指針 2005）。図 12 より、特に夏期においては、水深 10～40 m に塩分の場合と同じく密度躍層が存在している。また、表層～水深 50 m の間での密度分布変化は、20～24  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  となっている。これは、「拓海」が設置された相模湾の夏期の密度分布とほぼ同様である。従って、対馬海域で海洋深層水を利用して漁場造成を行う場合も、「拓海」の実験運転で得られた放流水の挙動に関するデータ及び放流手法が応用可能と考えられる。

### 5.2.2 溶存酸素量の影響について

海水中の溶存酸素量は、OTEC と海水淡水化装置を組み合わせたハイブリッド OTEC システムの海水淡水化装置を設計する際に重要である。海水淡水化装置のフラッシュ蒸発室を設計する際、真空ポンプの動力は、断熱圧縮仕事とポンプ効率によって求められる。断熱圧縮仕事は放出溶存空気容量から計算されるが、放出溶存空気容量は、フラッシュ蒸発室内で放出され、OTEC の蒸発器を通った海水から発生する蒸気の飽和温度とこの飽和温度に対応

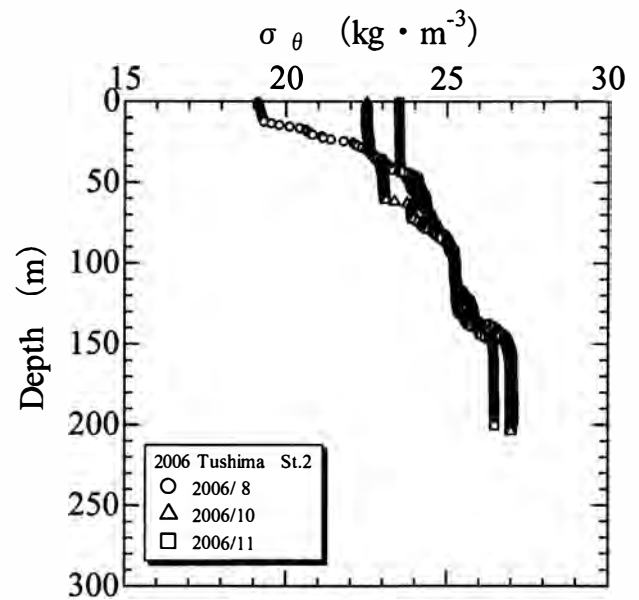


図 12 ポテンシャル密度

する蒸気圧力より算出される。また、海水淡水化装置の造水用凝縮器の凝縮熱伝達を考える場合、水蒸気中に空気が混入すると凝縮熱伝達は大きく低下する。Jakob (1949) によると、水蒸気内の空気含有率 2.0% において、平均熱伝達係数が約 1/3 に低下することが示されている。以上、溶存酸素量は、熱交換器の伝熱性能に大きく関わるので、この海域の溶存酸素量を把握することは重要である。溶存酸素量が、真空ポンプの所要動力、及び熱交換器の伝熱性能に与える影響については、今後、得られたデータを使用した性能解析を行う必要がある。また、OTEC を使用した海洋深層水を利用する海洋生物の増養殖を行う場合、この海域の深層の溶存酸素量は年間を通して約 5.0 ml/l (約 7.1 mg/l) 以上ある。この値は、実際に海洋深層水を利用した海洋生物の増養殖が行われている高知県における海洋深層水の値より大きい（海洋深層水利用学 2006）。従って、この溶存酸素量は、増養殖を行うにあたり問題が無いと考えられる。

### 5.2.3 潮流の流向・流速の影響について

潮流の流向・流速の影響は、洋上設置型プラントの場合、プラントの構造、係留方法及び冷海水取水管の設計に関係する。洋上設置型の冷海水取水管は、潮流の流向・流速の違いによって相当な曲げモーメ

ントが発生する。この海域においては、2005年8月のSt.3付近で、表層流向が北東流の場合、表層10mは15°で2.5ノット、110mでは28°で0.7ノット、150mでは35°で0.6ノットとなり、表層から深層までの流速の差が大きい。

このため、この海域では潮流の流向・流速の変化により、冷海水取水管に相当な曲げモーメントが働くと考えられるので、これに耐え得る強度と構造を考えて設計する必要がある。

上原らは、日本海島根沖でOTEC洋上実験を行い、直径267mm、長さ192mの冷海水取水管に対し、曲げモーメントが水深30mで3,520Nm、102mで1,294Nmと計測しているが、潮流は水深100mで約1.0ノット、約150mで約0.4ノットであった(Ueharaら1980)。

以上のことから、この海域で、1,000kWの洋上設置型OTECプラントを設置する場合、冷海水取水管は、長さ180~200m、直径1.7m程度が考えられるが、その場合、最大で約3,922Nm以上の曲げモーメントが掛かることが予想される。この値は、OTECプラントの取水管直径、潮流の流速が島根沖の洋上実験の値より大きいため、洋上実験の最大値(Ueharaら1980)よりも大きくなると仮定した。

#### 5.2.4 海底地形について

調査海域では、海岸から調査地点に向けて水深約150mまで急激に深くなり、調査点付近には深さ約200m程度のくぼみが存在している。陸上設置型のOTECを設置する場合、図10中のSt.3付近より冷海水を取水すべく、対馬北端の棹崎付近まで取水管を敷設すると、管長が約9.5km以上になることは必定である。これに対して、洋上設置型プラントの場合の取水管長は約180~200mとなる。

### 5.3 水塊の検討

4.2節で述べたように、夏期の表層の低塩分水は、中国大陸からの河川水の影響と考えられ、4.4節で述べたように、深層に存在する高塩分・低水温の水塊は日本海起源の日本海固有水の水塊であり、調査

海域において、OTECシステムを設置する場合、システムの稼働時間は日本海固有水の水塊の挙動に大きく左右されると考えられる。今後、OTECシステムの稼働時間を把握する上でも、継続的な海底設置型の潮流・水温計を活用した調査が必要である。

## 6. 要 約

本報は、対馬海域に適したハイブリッドOTECシステム設計のための、海洋データ、海域の特徴を調べるために海洋調査を行い、以下の結果を得た。

- 1) 水温は、2005年8月には表層で約28°C、深層で約5°C(温度差は約23°C)、2005年11月には表層で約21°C、深層で約8°C(温度差は約13°C)となり、この結果を元に海洋温度差発電のプラントの設置を考える場合、8~10月に発電が可能と考えられた。
- 2) 塩分は、2005年8月には表層で31.0~31.8PSU程度で低塩分となり、水深30~50mの間では激しく変化する躍層が存在し、140m以深では34.2PSU以下となる。夏期に表層の塩分が低いのは、中国大陸からの河川水の影響と考えられる。
- 3) 溶存酸素量は、2005年8月には表層から深層まで極端な変化は見られないが、表層及び深層に比較的溶存酸素量の高い層(5.0ml/l以上)が存在する。
- 4) 海面より水深約150mまでの表層は、季節により大きく変化し、大陸からの河川水の影響を受けていると考えられた。それよりも深い層に存在する高塩分・低水温の水塊が日本海起源の日本海固有水の水塊と考えられた。
- 5) この海域で、1,000kWの洋上設置型OTECプラントを設置する場合、冷海水取水管は、長さ180~200m、直径1.7mが考えるが、その場合、曲げモーメントは最大で、約3,922Nm以上かかることが予想される。
- 6) 陸上設置型のOTECを設置する場合、対馬北端の棹崎付近から同様の冷海水を取水すると、約9.5km以上の海水取水管の敷設が必要となる。

## 文 献

- 藤田大介・高橋正征 (2006): 海洋深層水利用学, 成山堂書店, 東京, 46-84.  
<http://www.data.kishou.go.jp>  
<http://www.kyuden.co.jp/index.html> (2006)  
<http://www.jodc.go.jp>
- Hubert, W. E., Wolff, P. M. (1979): OTEC World Thermal Resource, Proc. Ocean Conf., 13.5.1-13.5.7.
- 池上康之・浦田和也・板東晃功・中岡 勉・田淵清春・鎌野 忠・Pickering T (2004): フィジー海域における海洋エネルギー利用のための海洋調査, 第3回海洋エネルギーに関する合同研究セミナー.
- 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.
- 乾 栄一・長友洪太・西田哲也・池上康之・中岡 勉・上原春男 (1994): 海洋温度差発電設置のための世界海域のエネルギー源調査, OTEC, 5, 1-19.
- 磯部篤彦 (1994): 対馬海峡における対馬暖流について, 月刊海洋, 26, 802-809.
- 伊藤慶明・高橋正征・深見公雄 (2006): 海洋深層水の多面的利用, 恒星社厚生閣, 東京, 73-78.
- 気象庁 (2005): 海洋観測指針 (第1部), 財団法人気象業務支援センター, 東京, 1-171.
- 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・Pickering T・池上康之・上原春男 (2003): 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, 海洋深層水研究, 4(2), 57-66.
- 中岡 勉・西田哲也・一瀬純弥・田淵清春・鎌野 忠・池上康之 (2006): 海水熱エネルギーの有効利用のための海水淡水化システムの研究—南太平洋海域(フィジー海域)の場合—, 日本海水学会誌, 60, 47-54.
- 中岡 勉・西田哲也・一瀬純弥・中島大輔・植田貴宏 (2007): 海洋エネルギーを利用したハイブリッド海洋温度差発電システムの研究—対馬海域—, 日本海水学会第58年会研究技術発表会講演要旨集, 2-3.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (1985): 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, 東京, pp.901-931.
- 千手智春 (1994): 等密度面解析から推測される日本海上部固有水の形成と循環, 月刊海洋, 26, 794-801.
- Uehara, H., Nakaoka, T., Nagasaki, S. and Yokoyama, H. (1980): Deployment of Cold Water Pipe in the Japan Sea, Proc. of 7th Ocean Energy Conf., 14.1-1-14.4-7.
- 上原春男 (1982): 海洋温度差発電読本, オーム社, 東京, 202 pp.
- Uehara, H., Dilao, C. O. and Nakaoka, T (1988): Conceptual Design of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Power Plants in the Philippines, Solar Energy, 41-5, 431-441.
- 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. of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, 599-606.
- Jakob, M. (1949): Heat Transfer, Wiley, 1, 692.
- (財)日本水路協会 海洋情報センター, 棹崎・伊奈.  
 (2007. 3. 28 受付, 2007. 9. 7 受理)