

電気伝導度変化を伴う冷湧水変動の検出 —相模湾初島南東沖潜航調査(「ドルフィン3K」第546潜航, 「しんかい2000」第1320, 1323潜航)序報—

岩瀬 良一^{*1} 町山 栄章^{*1}

2001年11月から12月にかけて実施された「なつしま」NT01-10航海及びNT01-11航海では、相模湾初島南東沖の冷湧水域において、「ドルフィン3K」第546潜航、「しんかい2000」第1320潜航及び第1323潜航の合計3回の潜航調査を実施した。これらの潜航では、湧水分布の指標となりうる地中温度勾配分布を調査したほか、湧水活動がもっとも活発と思われる地点にメタンセンサ付きCTDセンサを設置し、15日間の連続観測をおこなった。その結果、電気伝導度の値が最大で約5.7%程度スパイク状に時々減少する現象が検出された。スパイクの幅は短いもので数分、長いもので約3時間であり、湧水活動の時間変化を反映したものと考えられる。地中温度勾配分布については、長期観測ステーション北側で21.5K/mの高温度勾配を確認した。

キーワード：相模湾初島沖、冷湧水、電気伝導度変化、地中温度計測、長期観測ステーション、化学合成生物群集

Detection of fluctuation of cold seepage accompanied by conductivity reduction - Preliminary report of dive survey off Hatsushima Island in Sagami Bay ("Dolphin-3K" #546, "Shinkai 2000" #1320, #1323 dives) -

Ryoichi IWASE^{*2} Hideaki MACHIYAMA^{*2}

In November and December, 2001, three dive surveys: ROV "Dolphin-3K" #546 dive, submersible "Shinkai 2000" #1320 dive and #1323 dive were carried out at the cold seepage site off Hatsushima Island in Sagami Bay in NT01-10 and NT01-11 cruise of R/V "Natsushima". In these surveys, sub-bottom temperature gradient distribution that may suggest seepage distribution was investigated and continuous observation was carried out for 15 days by installing CTD sensor with methane sensor at the site where the seepage seemed to be most active. As the result, the phenomena that the water conductivity often had spike-shaped reductions by 5.7% at most were observed. Width of the spike was a few minutes for short ones and more than 3 hours for long ones. This seemed to reflect the time variation of the seepage activity. As for sub-bottom temperature gradient distribution, a gradient as high as 21.5 K/m was detected in the north of the long-term observatory.

Keywords : Off Hatsushima Island in Sagami Bay, cold seepage, conductivity variation, sub-bottom temperature measurement, long term observatory, chemosynthetic biological community

* 1 海洋科学技術センター深海研究部

* 2 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

プレート境界域で発生する諸現象には地下流体が深く関与していることが指摘されている。この海底下における流体の移動を把握するにあたって、海底面を介して出入りする流体の状況を把握することも必要である。海底面を出入りする流体の流量及びそれに含まれるメタンなどの化学成分の時間変動を直接計測する試みの一つとして、浸透圧ポンプを用いた計測装置(Chemical and aqueous transport meter, CAT meter)が開発され、アメリカ西海岸沖の冷湧水域である Cascadia, Hydrate Ridgeでの観測が実施されている(Tryon, et al. (2001))。一方、相模湾初島南東沖の深海底には、冷湧水域の存在が知られており、シロウリガイを中心とした国内で最大規模の化学合成生物群集が存在する。筆者らは本海域において、同様の手法による湧水過程の解明を目指している。その一環として、湧水の指標となりうるシロウリガイやチューブワーム等の化学合成生物群集の分布や地中温度勾配の分布を把握するため、2001年3月14日から3月21日にかけて、「かいよう」KY01-01航海において、無人探査機「ハイパー・ドルフィン」による潜航調査を実施した(岩瀬・久保(2001))。これに引き続き、2001年11月から12月にかけて実施された「なつしま」NT01-10航海及びNT01-11航海において、「ドルフィン

3K」及び「しんかい2000」による合計3回の潜航調査により、さらに詳細な地中温度勾配の分布調査及びメタンセンサ付きCTDセンサによる15日間の連続計測等を実施した。本稿では、この調査結果の概要について報告する。

2. 潜航調査の概要

「なつしま」NT01-10航海は2001年11月2日から11月10日にかけて、またNT01-11航海は同年11月13日から12月6日にかけて実施された。これらの航海において、初島南東沖冷湧水域の調査を目的とする「ドルフィン3K」第546潜航(11月9日)、「しんかい2000」第1320潜航(11月24日)及び第1323潜航(11月28日)が実施された。調査海域図を図1に、航跡図を図2に示す。図2の座標のとりかたは、岩瀬・久保(2001)に合わせてある。

本海域では、1993年以降ケーブル型の多目的観測システム「深海底総合観測ステーション」(以下ステーションと呼ぶ)により深海環境変動のリアルタイム連続観測が行われているが(岩瀬ほか(2001)), 11月9日に実施された「ドルフィン3K」第546潜航では、KY01-01航海で得られた地中温度勾配分布の結果を基に、地中温度勾配が14.9K/mとともっとも高く、湧水活動が活発と推定されるステーションの約60m南の地点(図3★印)に海底設置型のメタンセンサ付きCTDセンサ(Sea

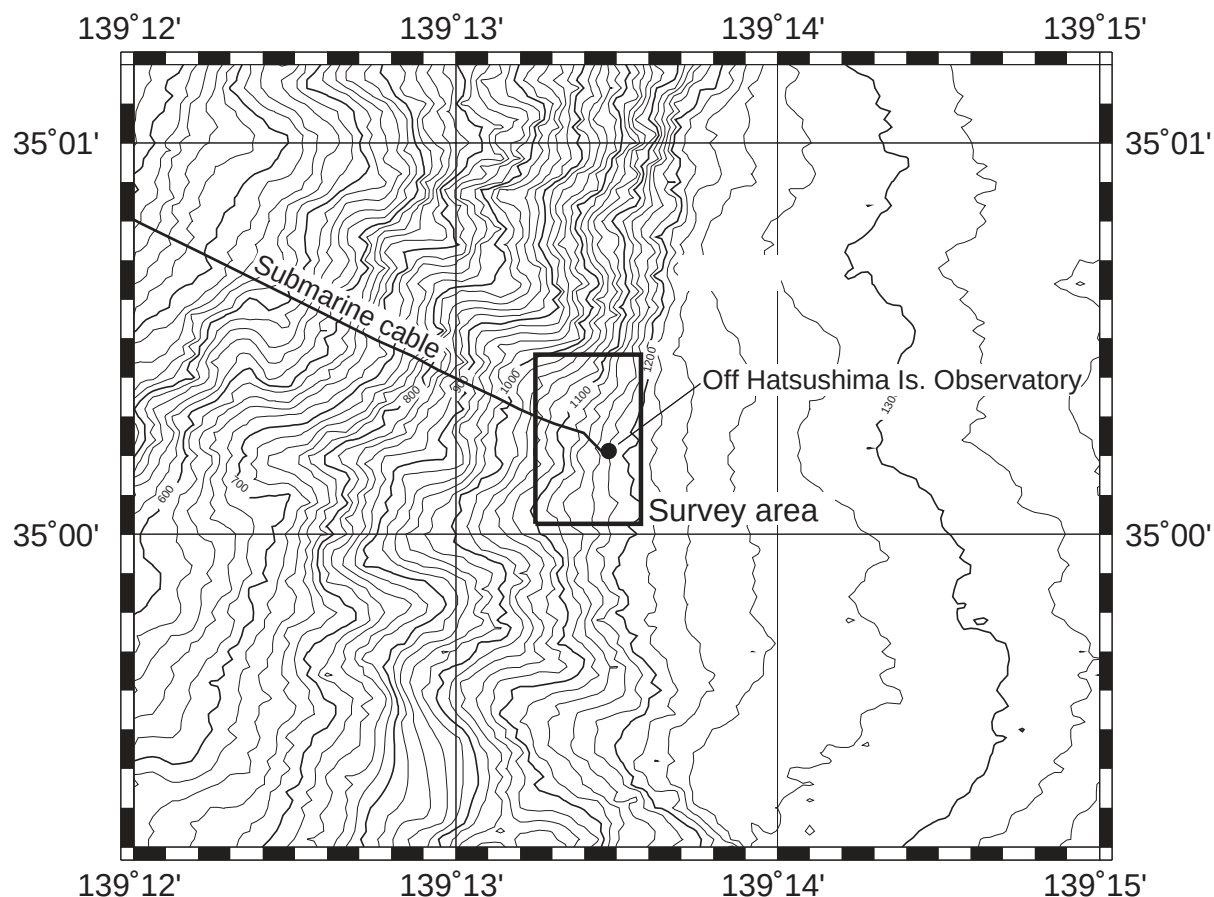


図1 相模湾初島南東沖調査海域

Fig. 1 Survey area southeast off Hatsushima Island

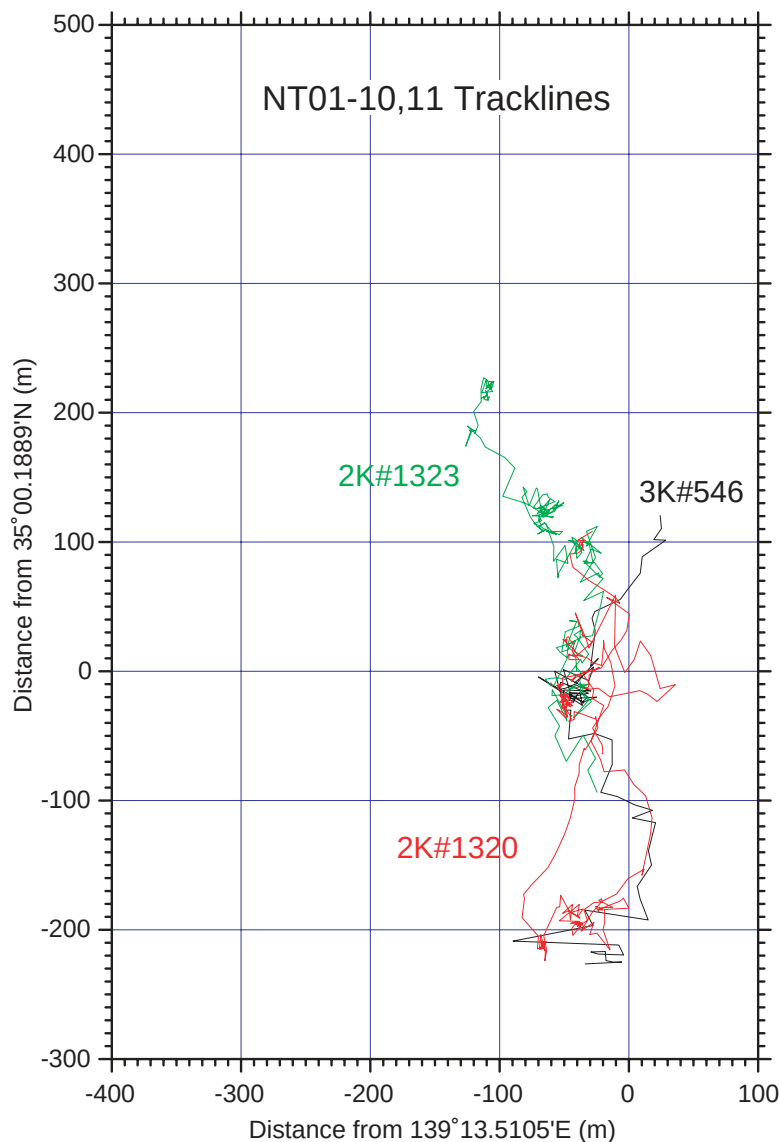


図2 「ドルフィン3K」第546潜航,「しんかい2000」第1320, 1323潜航航跡図
Fig. 2 Tracklines of "Dolphin-3K" #546 dive, "Shinkai 2000" #1320 and #1323 dives

& Sun Technology GmbH製のCTDセンサCTD110Mをベースに、圧力センサをParoscientific社製の8BT2000-I水晶感圧型圧力計に変更し、これにCAPSUM Technologie GmbH製メタンセンサを取り付けたもの。長期計測が可能となるよう外部供給電源としてリチウム電池(13.5V, 90Ah)を接続した。)を設置し、連続計測を開始した。これと同時に、2001年3月16日に「ハイパー・ドルフィン」第44潜航でこの地点から約10m離れた地点(図3☆印)に設置した地中温度計を、このCTDセンサ脇に移設した。設置状況を図4に示す。

11月24日に実施された「しんかい2000」第1320潜航では、これら「ドルフィン3K」で設置したCTDセンサ及び地中温度計を回収したほか、地中温度勾配分布の詳細把握を目的として、ステーションの南側一帯において地中温度計測を行った。この分布調査に用いた地中温度計は、回収した地中温度計と同型で、長さ30cmの槍状のプロープに先端から10cm

間隔で3個のサーミスタが取り付けられたものであるが、離底前に図3の◆印で示した地点に設置した。

これに引き続き11月28日に実施した第1323潜航では、前潜航で設置した地中温度計を回収し、これを用いて、この地点から北方に向けて、前潜航及びKY01-01での未計測地点を主とする地中温度計測を行った。

この他、海底での潜水船の位置把握のために本海域に設置している音響マーカー(Sonardyne社製ROV-HOMER)が電池の寿命を迎えつつあることから、「しんかい2000」の2潜航ではこれら音響マーカー4本の交換も併せて実施した。

NT01-11航海では、潜航調査のほか、ステーションのADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, 層別音響流向流速計)との比較計測を目的として、3個の流向流速計からなる係留系を支援母船「なつしま」から11月23日に設置、11月27日に回収し、4日間の流向流速計測を行った。

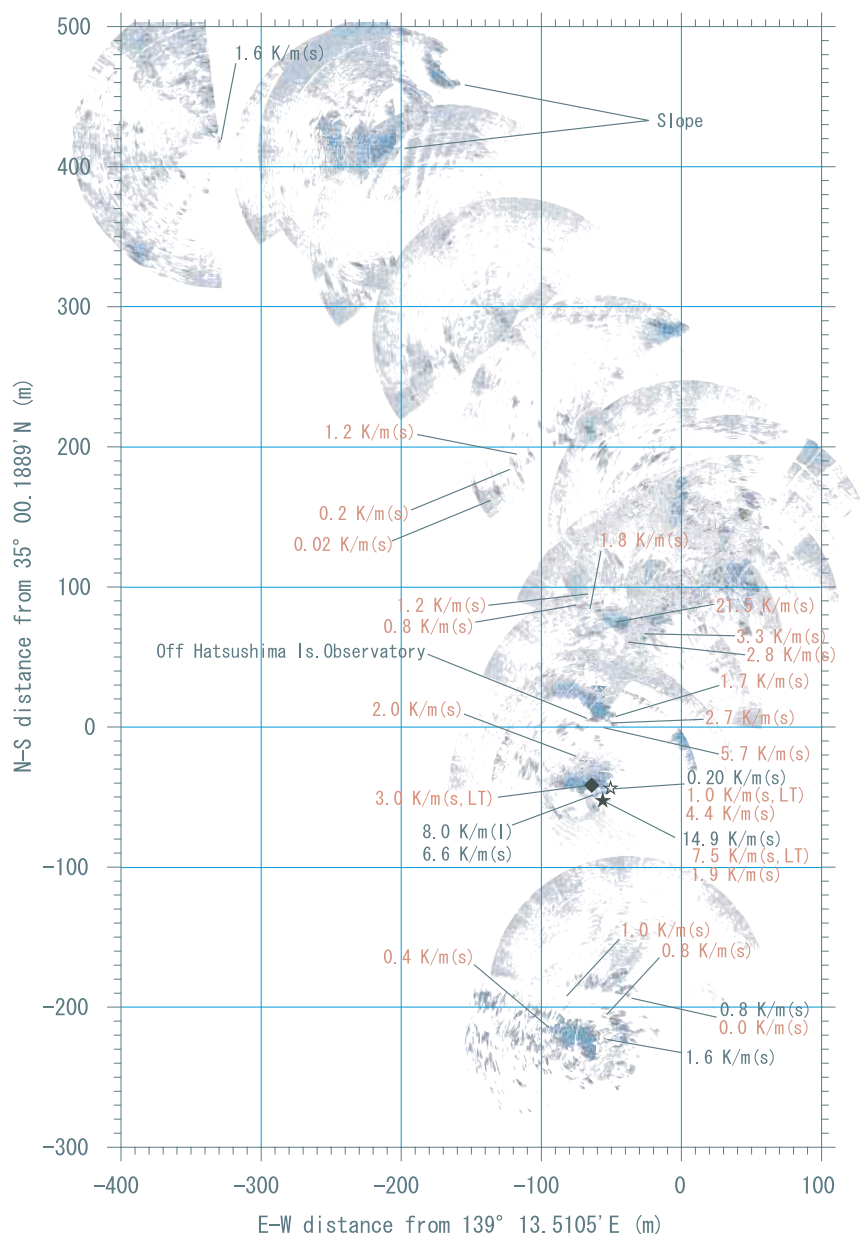


図3 前方探査ソナー画像及び地中温度勾配の分布

岩瀬・久保(2001)図7に加筆。

黒字: KY01-01航海で得られた結果 赤字: NT01-11航海で今回得られた結果

s: プローブ長30cmの地中温度計で計測 l: プローブ長96cmの地中温度計で計測

LT: 長期計測データを平均して算出

☆: 地中温度計設置点(2001年3月16日-11月9日)

★: 地中温度計及びCTDセンサ設置点(2001年11月9日-11月24日)

◆: 地中温度計設置点(2001年11月24日-11月28日)

Fig. 3 CTFM sonar images and distribution of sub-bottom temperature gradients

Modifying Fig. 7 of Iwase and Kubo (2001)

Black value : obtained in KY01-01 cruise Red value : obtained this time in NT01-11 cruise

s : measured by a sub-bottom thermometer whose probe length is 30cm

l : measured by a sub-bottom thermometer whose probe length is 96cm

LT: obtained by averaging long term data

☆: a sub-bottom thermometer deployed site (2001/03/16-2001/11/09)

★: a sub-bottom thermometer and CTD sensor deployed site (2001/11/09-2001/11/24)

◆: a sub-bottom thermometer deployed site (2001/11/24-2001/11/28)



図4 図3の★地点に設置されたメタンセンサ付きCTDセンサ(右)と地中温度計(左)

Fig. 4 CTD sensor with methan sensor (right) and sub-bottom thermometer (left) deployed at site ★ in Fig. 3

係留系の設置位置は、ステーションの南東約800mの地点(34-59.874E, 139-13.782E, リリーサ深度1204m, 測地系WGS-84)で、流速計は海底面からそれぞれ20m, 180m, 340mの高さにある。

3. 調査結果概要

3.1. 地中温度分布

「しんかい2000」第1320潜航並びに第1323潜航では、初島沖ステーション周辺において、プローブが一部しか刺さらなかった地点を含め、併せて20地点の温度分布を計測した。

これらの結果をKY01-01航海で既に得られている結果及び前方探査ソナーの画像(岩瀬・久保(2001))と併せて図3に示す。赤で示された数値が本航海で新たに得られたデータであり、KY01-01航海のデータは黒字で示してある。数値の後のs,lの記号は岩瀬・久保(2001)と同様に、それぞれプローブ長30cm, 96cmの地中温度計での計測を示している。本航海ではプローブ長30cmのものしか使用していない。また、LTの記号は長期計測が実施されたものであり、☆地点では「ハイパー・ドルフィン」第44潜航(3月16日)による設置から「ドルフィン3K」第546潜航(11月9日)による移設までの238日間、★地点では移設後「しんかい2000」第1320潜航による回収(11月24日)までの15日間、そして◆地点では第1320潜航での設置から第1324潜航(11月28日)までの4日間の連続計測が実施され、温度勾配はこれら設置期間を通してのサーミスタ間の平均温度差から算出した。これ以外の計測点については、5分から10分間の計測により、ほぼ温度平衡に達したと思われる時点での温度差より温度勾配を算出した。サンプリング間隔は、☆及び★地点での長期計測については5分間隔、それ以外は10秒間隔である。

得られた地温勾配の値は大小さまざまだが、特に顕著なのは、ステーションの約70m北のコロニー内の赤褐色の変色域内で計測したもので、21.5K/mと極めて高い値が得られた。これ以外は、最大でも5K/m程度以下である。但し、プローブは必ずしも垂直に刺さったわけではなく、斜めに刺さった場合は実際の温度勾配はさらに大きくなるが、これらの値については補正を施していない。

図5は◆点での設置期間中(11月24日から11月28日まで)の記録を示したものである。これによると設置後しばらくして、真中のサーミスタ温度(T_b , 海底面下約20cm)が急に減少し、

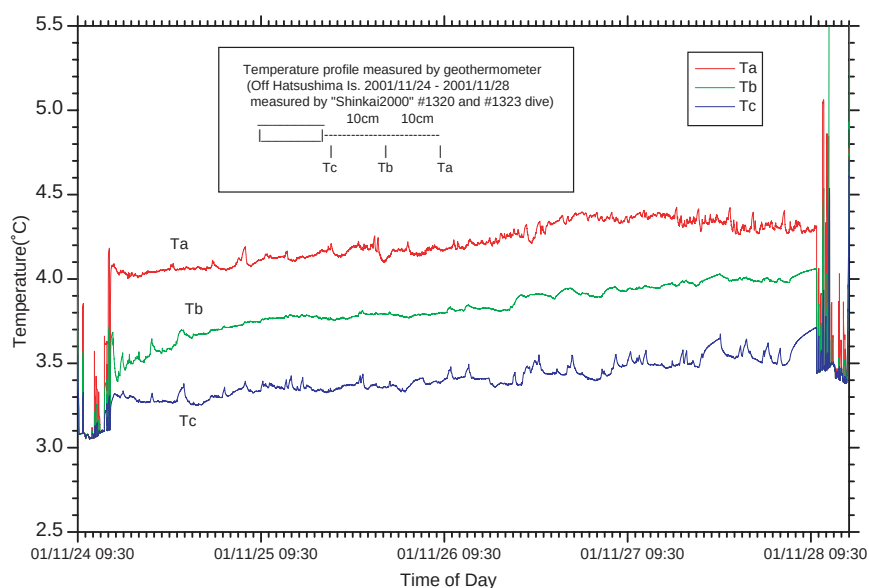


図5 地中温度計記録(2001年11月24日-11月28日) 図3の地点◆に設置

Ta: 海底下約30cm Tb: 海底下約20cm Tc: 海底下約10cm

Fig. 5 sub-bottom thermometer profile (2001/11/24-2001/11/28) Deployed at site ◆ in Fig. 3

Ta: about 30cm below seafloor Tb: about 20cm below seafloor Tc: about 10cm below seafloor

徐々に他のサーミスタと同様の変化になっている。これは、潜水船の着底・離底による擾乱が、間隙水の移動などの形で海底面に及んだものと推定される。また、一番深いサーミスタ(Ta, 海底面下約30cm)の短周期の変動がTbに比べて大きく、また必ずしも水温変動に追従していないが、これも間隙水の移動を示唆している可能性がある。

図6は「ハイパー・ドルフィン」第44潜航で図3の☆地点に

設置し、「ドルフィン3K」第546潜航で同★地点に移設し、「しんかい2000」第1320潜航で回収した地中温度の全記録である。サンプリング間隔は5分である。全体的には水温変動の影響が卓越しているが、☆地点設置期間中、5月以降11月の移設までの間、温度勾配が漸増しており、これは湧水活動の長期的な変化を反映している可能性がある。移設前の地温勾配は平均して1.0K/m程度であり、移設後の地温勾配は

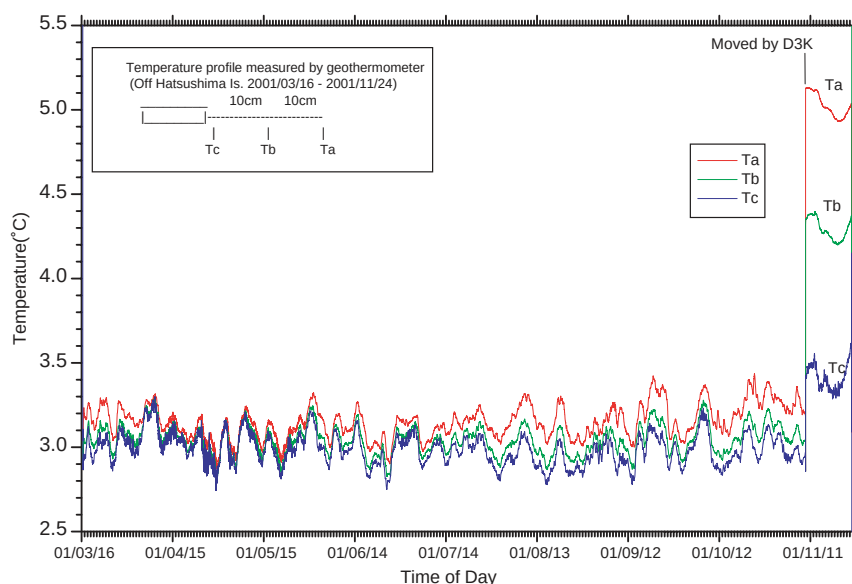


図6 地中温度計記録(2001年3月16日-11月24日)図3の☆地点に設置後、11月9日に★地点に移動

Fig. 6 Sub-bottom thermometer profile (2001/03/16-2001/11/24)

Deployed at site ☆ on March 16th in Fig.3 and moved to site ★ on November 9th

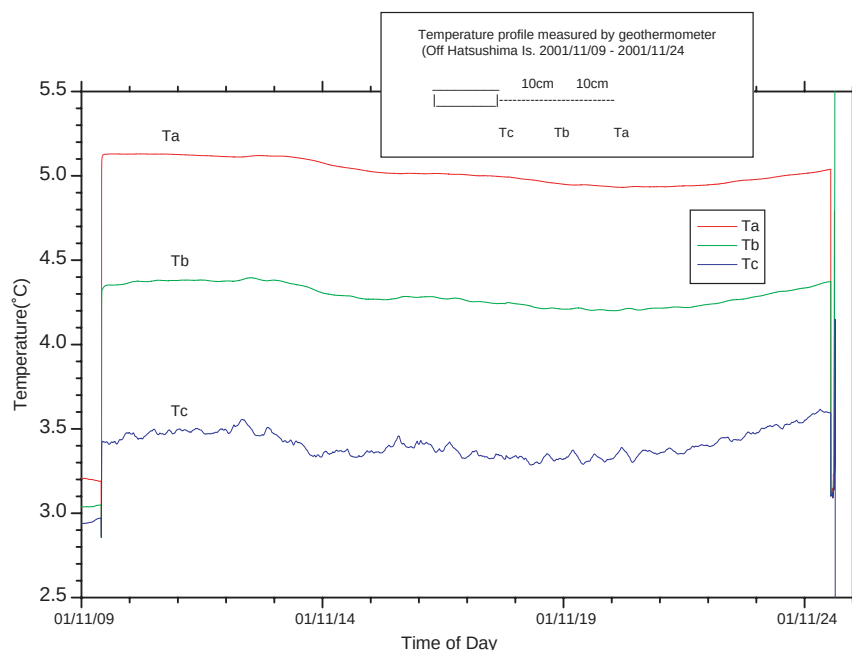


図7 地中温度計記録(2001年11月9日-11月24日) 図3の地点★に設置

Fig. 7 sub-bottom thermometer profile (2001/11/9-2001/11/24) Deployed at site ★ in Fig.3

7.5K/m程度である。移設後の★地点はバクテリアマットと思われる赤褐色の変色域が認められ、湧水活動が移設前の場所に比べてやはり活発と推測される。しかしながら得られた温度勾配は、KY01-01航海で計測された値14.9K/mの約半分である。これはプローブの傾きなどによる計測上の問題に起因する可能性もあり、今後吟味する必要がある。

図7は、図6のうちから移設後の記録を抜き出したものである。変動はほぼ水温変動に追従していると考えられる。

3.2. メタンセンサ付きCTDセンサによる計測

図3の★地点において、11月9日から11月24日までの期間メタンセンサ付きCTDセンサで計測した水圧、水温、海水の電気伝導度、メタン濃度の記録を、同期間のステーションのCTDデータと共に図8に示す。

水圧及び水温変化は、オフセットの違いを除いてステーションのデータと同様の変化を示しているが、電気伝導度については、11月12日以降スパイク的に小さくなる擾乱が見ら

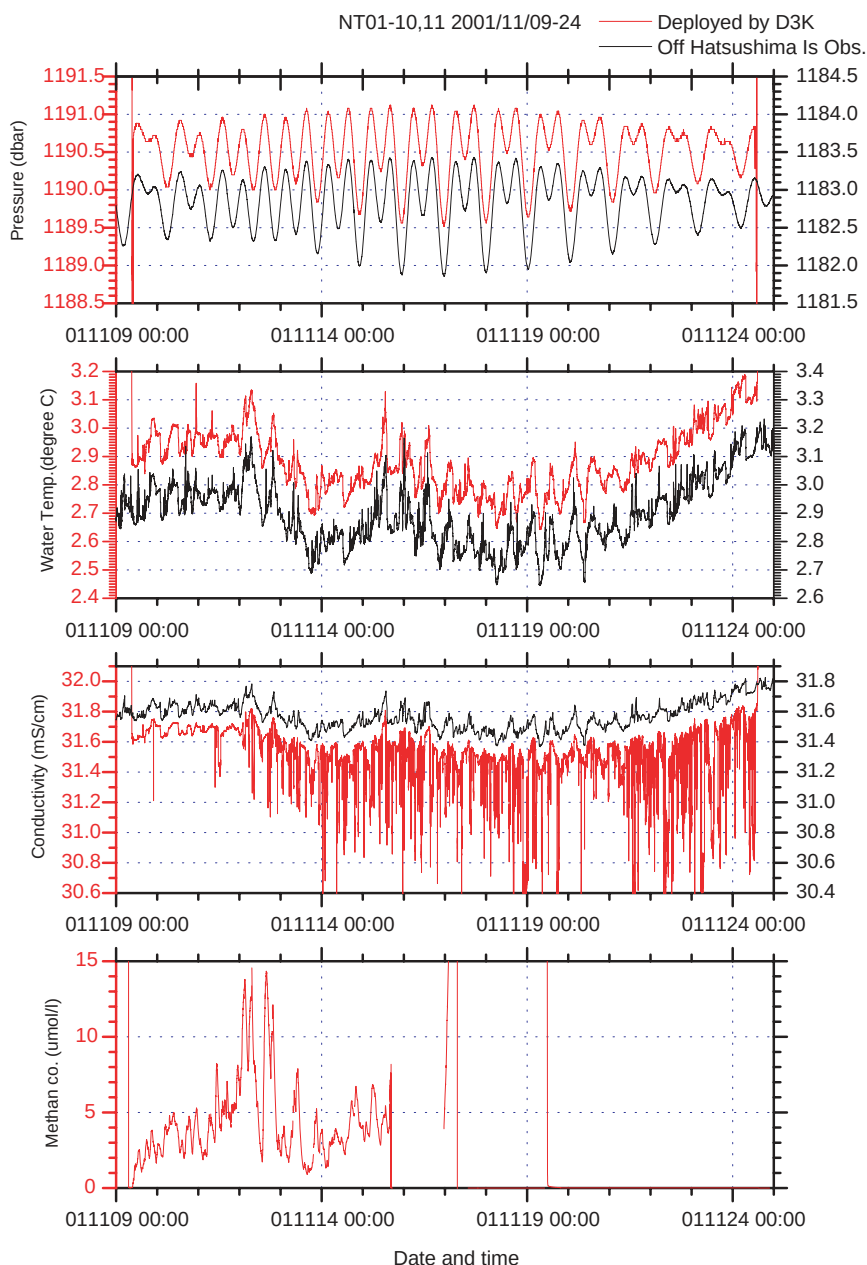


図8 CTDとメタン濃度の記録

赤線：「ドルフィン3K」で図3の地点★に設置 黒線：初島沖ステーションのデータ

Fig. 8 CTD and methane concentration profile

Red : Deployed at site ★ in Fig.3 by "Dolphin-3K"

Black : Obtained by Off Hatsushima Island Observatory

れる。残念ながらメタン濃度については11月15日 16:29に故障が発生し、それ以降のデータは使用できないが、それ以前については1~15 $\mu\text{mol/l}$ 程度の値をとり、水温と同様な半日周変化が見られる。必ずしも全ての期間で明瞭というわけではないが、全体として水圧が減少しつつある時に極大となる傾向がある。但し、今回KY01-01航海と同様にメタンセンサ付きCTDセンサ(ドイツASD Sensortechnik GmbH製)を「ドルフィン3K」及び「しんかい2000」に固定して航走中に計測していたが、その結果は岩瀬・久保(2001)と同様にほぼ2nmol/lであり、これと比較すると前者の値は千倍以上大きい。現在原因を調査中であるが、前者が計測途中で故障していることから、前者のデータに異常がある可能性が高い。

電気伝導度は水温変動の影響を受けるので、その影響を調べるため、ステーションのデータ及び設置したCTDセンサのデータについて、電気伝導度と水温間の相関をプロットしたのが図9である。設置したCTDセンサについては、スパイク的な擾乱がない11月10日のデータを用いた。どちらのデータにも同様な線型の相関が見られ、この相関関係を用いて電気伝導度の変化から水温による変動成分を取り除くことができる。設置したCTDセンサの電気伝導度の観測値と同センサの水温から図9の相関をもとに得られる計算値との差分を水圧データと共に示したのが図10である。水温及びもとの電気伝導度データも同時に示す。電気伝導度の差分の

最大値は1.8mS/cm程度、もとの電気伝導度データとの比にして約5.7%、スパイクの幅は短いもので1, 2分, 長いもので3時間である。なお、電気伝導度センサは海底面から約10cm上にある。潮汐との相関はあまり明瞭でない。この変動は塩分濃度の低い湧水が間欠的に湧き出している様子を示していると考えられる。設置直後にスパイク的な変化が見られないのは、設置作業に伴う海底面の擾乱により湧き出し口が乱されたためと推測される。

塩分濃度の低い湧水という点で、この現象がTsunogai et al.(1996)で指摘されている陸水起源という点には矛盾しない。メタン濃度と電気伝導度の変化は、湧水の時間変化を反映しているものと思われ、今後さらに定量的な解析を進めることとする。

3.3. 係留系による流速計測

初島沖長期観測ステーションのADCPデータでは海底面近傍の流れと上層(高度150m程度以上)の流れでは、同一時刻の流向が異なるなどの傾向が見られる(岩瀬ほか, 2001)。またADCPの送受波面にカニが登るなどの影響によりデータに擾乱が発生することが推定されている。これらの検証を目的として、3台の流速計からなる係留系をステーションの近くに一定期間設置し、ステーションのADCPと比較計測を行った。

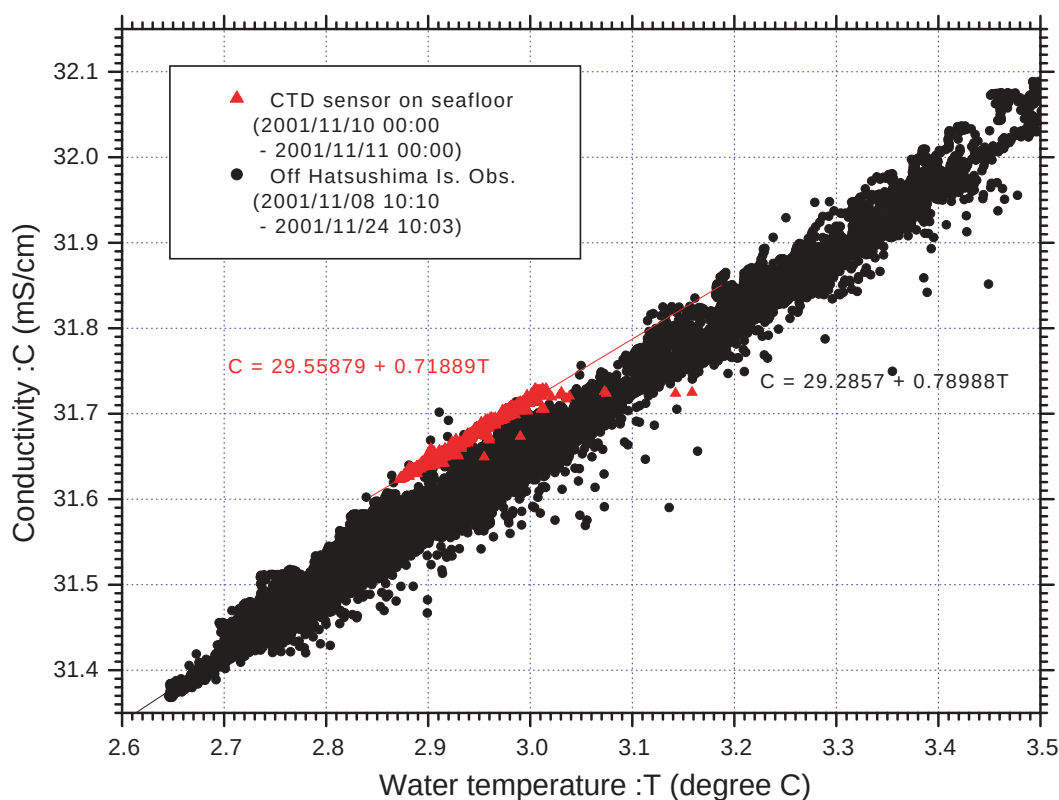


図9 水温と電気伝導度の相関

赤線:「ドルフィン3K」で図3の地点★に設置 黒線:初島沖ステーションのデータ

Fig. 9 Relation between water temperature and conductivity

Red : Deployed at site ★ in Fig.3 by "Dolphin-3K" Black : Obtained by Off Hatsushima Island Observatory

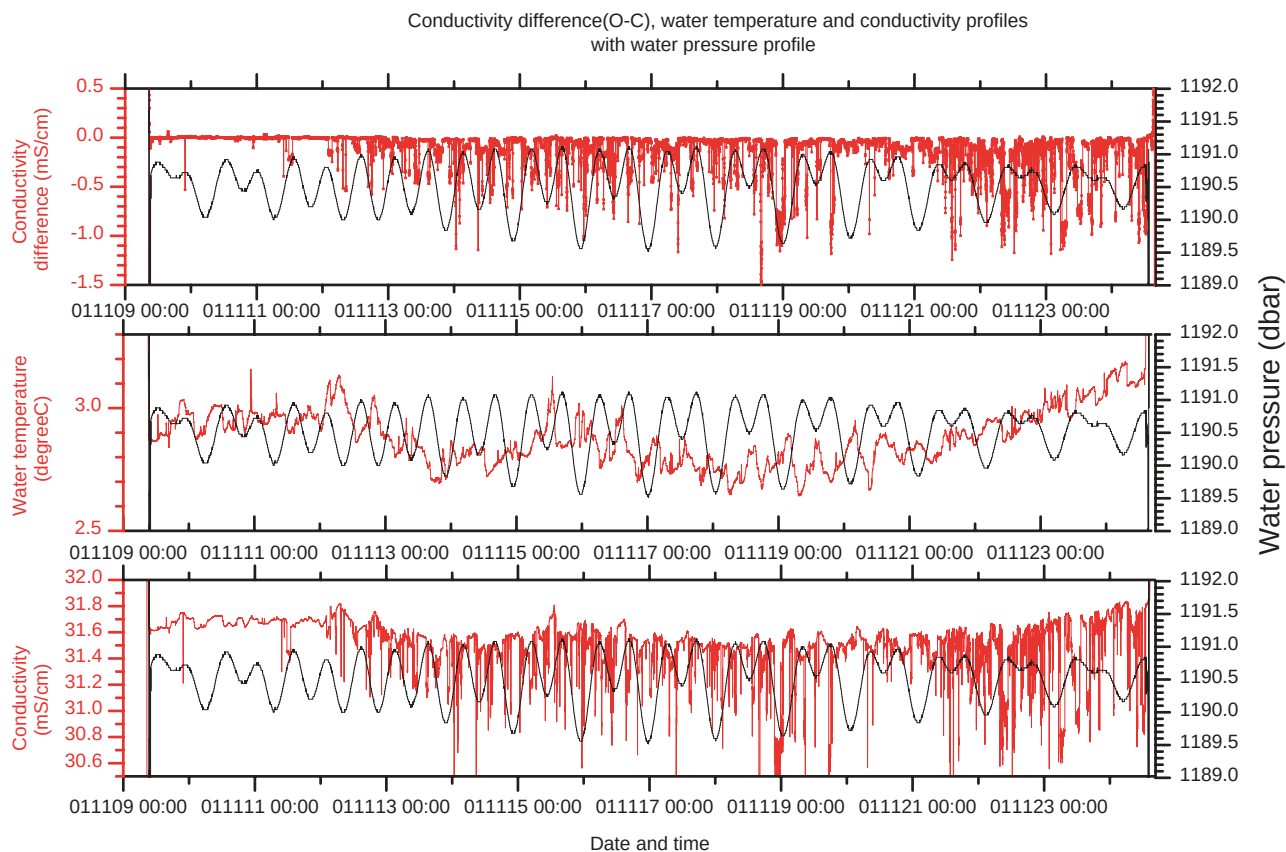


図10 電気伝導度差分データ, 水温, 電気伝導度生データ(赤)と水圧データ(黒)

Fig. 10 Profiles of conductivity difference, water temperature and raw conductivity data (red) with water pressure data (black)

今回用いた係留系は、3個の流向流速計からなるもので、11月23日から11月27日までの4日間、ステーションの南東約800mの地点(34-59.874E, 139-13.782E, リリーサ深度1204m, 測地系WGS-84)に設置して計測を行った。流速計は海底面からそれぞれ20m, 180m, 340mの高さにあり、一番下の流速計は、Aanderaa社のRCM-11, 上の2台の流速計は同社のRCM-8を使用した。

計測結果をステーションのADCPデータのうち同じ高度のデータと共に図11に示す。

係留系による高度180mと340mのデータは南向きの流れが卓越している。一方、高度20mのデータも南向きの流れが卓越しているが、前二者に比べて、北向きの流れも生じている。

これらは海底面近くの流れが、その上層と比較して、ステーションのすぐ西側に急斜面があるなどの地形的な影響を受けやすいものと推定される。

また、おおよその傾向はステーションのデータと同じだが、相違点も見られる。ステーションのADCPの送受波面にカニが登る影響などが考えられるが、今後詳細なデータ比較により、その影響を評価する予定である。

4. 考察

冷湧水域全体としての海底面を介した湧水状況の解明を最終的な目標とし、その一環として、NT01-10, 12航海により、湧水分布の指標となりうる初島南東沖湧水域における地中温度勾配分布を詳細に調べ、また温度勾配がもっとも高く、湧水活動がもっとも活発と思われるステーション南方の地点にメタンセンサ付きCTDセンサを設置し、15日間の連続観測により電気伝導度のスパイク的な変化の形で、塩分濃度の低い湧水の湧き出しを示すと思われる湧水活動の時間変化を検出した。

またこのCTDセンサ脇に同じ期間設置した地中温度計は、水温変動に追従すると思われる変化がほとんどで、湧水や間隙水の移動を示す兆候は見受けられない(図7)。ところが、その十数m西の地点では、地中温度については、観測期間が異なるものの、間隙水の移動が示唆される変動が見られた(図5)。さらにこれまでの調査ではステーションの南側にのみ高温度勾配領域があり、ここが湧水活動の中心と考えていたが、ステーションの北側にも高温度勾配地点が1箇所発見された。これら湧水活動の水平方向不均質性を示すと思われる現象を解明するには、面的な同時観測が必要と考えられる。

Current data by mooring system in NT01-11 Leg-2 cruise
and ADCP data of Off Hatsushima Is. Observatory

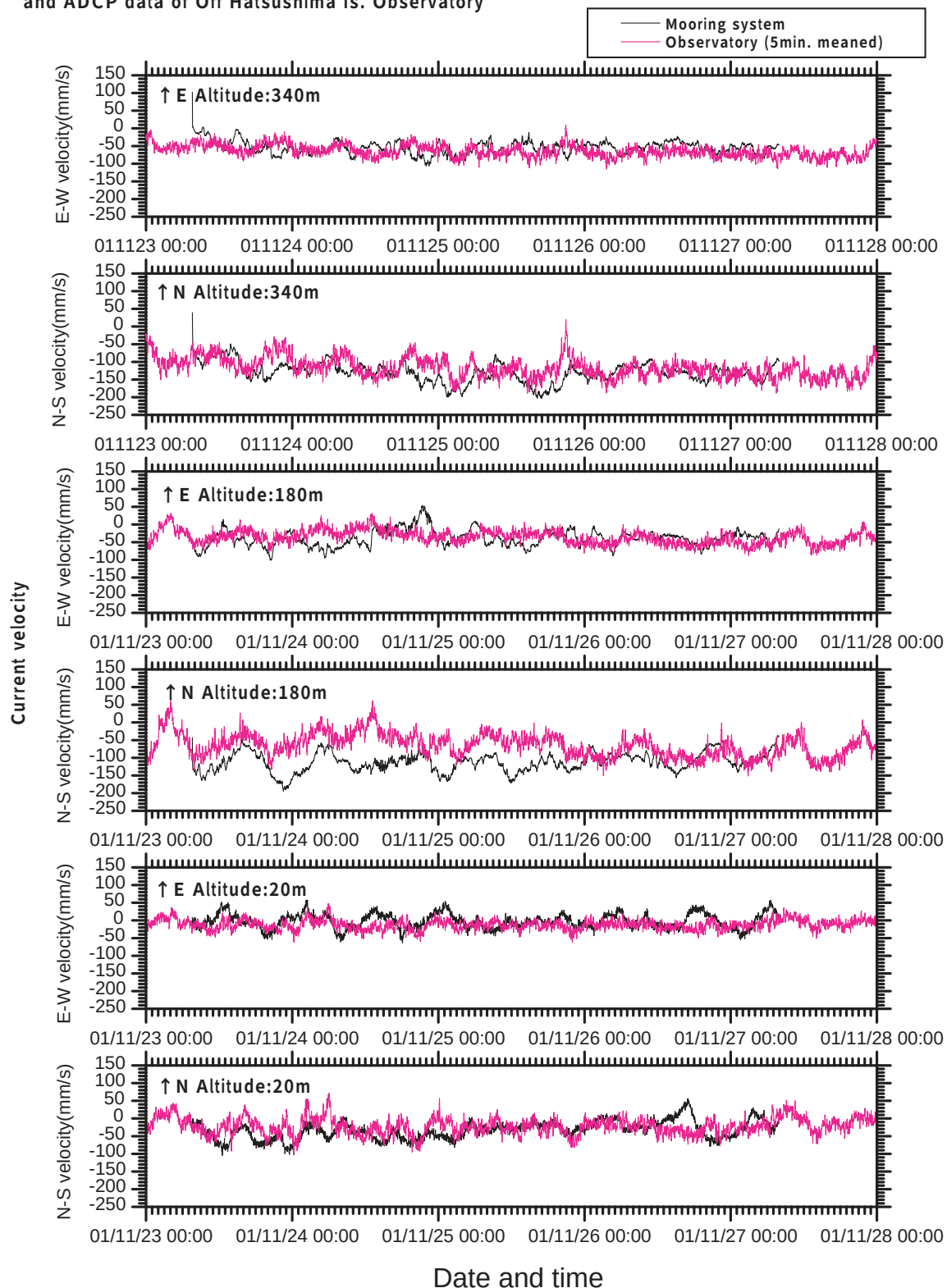


図11 係留系による流向流速データ(黒)とステーションのADCPデータ(ピンク)
上から、東向き成分、高度340m 北向き成分、高度340m 東向き成分、高度180m
北向き成分、高度180m 東向き成分、高度20m 北向き成分、高度20m

Fig.11 Water current profile by mooring system (black) and by observatory (pink)
From top; Eastward element, altitude 340m Northward element, altitude 340m Eastward element, altitude 180m
Northward element, altitude 180m Eastward element, altitude 20m Northward element, altitude 20m

その一方で設置直後はCTDセンサの電気伝導度に変化が見られないこと(図10)や、図5に見られる地中温度の変動など、潜水船によるセンサの設置などの海底作業により、観測対象である海底の擾乱を引き起こす可能性があることもわかった。

今後はこれまで得たデータを詳細に解析した上で、CAT meterなどを用いた湧水量やそれに含まれる化学成分の変動の直接計測を含め、観測手段の同時展開などを通じて、海底面を介した湧水活動の定量的な解明を進めたい。

謝辞

本航海では、依田司令はじめ「ドルフィン3K」、「しんかい2000」運航チーム並びに長谷川船長はじめ「なつしま」乗組員の方々に大変お世話になった。また、本航海の首席研究員である極限環境生物フロンティア研究システムの三輪グループサブリーダーには、航海計画の立案から航海の実施までお骨折りいただいた。また、日本海洋事業(株)の前澤優子氏並びに小寺透氏には機器の準備、資料整理などを手助けしてい

ただいた。またこの他の乗船研究者の方々にも機器の準備に手助けをいただいた。ここに記して御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 岩瀬良一, 満澤巨彦, 平田賢治, 海宝由佳, 川口勝義, 藤江剛, 三ヶ田均, 相模湾初島沖深海底総合観測ステーションの更新 一次世代リアルタイム観測の確立に向けて, JAMSTEC深海研究, 18, 185-192(2001)
- 2) 岩瀬良一, 久保雄介, 相模湾初島沖・神津島東方沖「ハイパー・ドルフィン」潜航調査(KY01-01航海), JAMSTEC深海研究, 19, 37-44(2001)
- 3) U.Tsunogai, et al., Fresh water seepage and pore water recycling on the seafloor: Sagami Trough subduction zone, Japan, Earth and Planetary Science Letters, 138, 157-168 (1996)
- 4) M.D.Tryon and K.M.Brown, Complex flow patterns through Hydrate Ridge and their impact on seep biota, Geophysical Research Letters, 28, 2863-2866, (2001)

(原稿受理：平成14年2月14日)