

研究ノート

海底局位置決定に与える海中水温構造の影響[†]

石川直史*, 藤田雅之*, 松本良浩*

The influence of underwater temperature structure on seafloor positioning

Tadashi ISHIKAWA, Masayuki FUJITA and Yoshihiro MATSUMOTO

Abstract

We have been developing a system for detecting seafloor crustal movement by combining kinematic GPS and acoustic ranging techniques. The influence of underwater temperature structure on precision of seafloor positioning was examined. At sea area off Miyagi Prefecture, underwater temperature fluctuate rapidly with respect to time and space, especially in spring and autumn. This instability deteriorates the precision of measurement results of seafloor positioning. On the other hand, in summer, underwater temperature structure is stable and measurement results have enough precision. The underwater temperature structure in sea area along the Nankai Trough is more stable than that off Miyagi area. These measurement results of the stations situated along the Nankai Trough show higher precision. These results show that a good undersea condition leads to the good precision of a result. However, even when the undersea condition is unstable, an enough number of data lead an enough precision of result.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では、東京大学生産技術研究所との技術協力の下、GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発（浅田・矢吹, 2001; 矢吹, 2002）および海底基準点の展開を行っている。現在まで、主に日本海溝および南海トラフ沿い陸側に十数点の海底基準点を設置し、各点で測量船によるキャンペーン観測を繰り返し実施している（浅田・矢吹, 2000; Mochizuki et al., 2003; Fujita, 2003）。現在、センチメートルレベルの観測精度を目指し、観測を進めていく中で現れる、様々な技術上・運用上の問題点の改善（畝見, 2004; 成田・他, 2005）や、解析手法の開発・改良（藤田・他, 2004; 石川・藤田, 2005; 松本・他, 2006）を日々行っている。

観測システムの概念図を Fig. 1 に示す。このシステムは長基線キネマティック GPS (KGPS) 測位と海中の音響測距を組み合わせて、海底に設置した基準局の位置を、船を介して精密に測定するのである。音響測距によって計測される音波走時を海中の音速度構造を用いて、船上-海底局間の距離に換算し、KGPS 解析および動揺計測によって得られた、船上の音響トランスデューサ位置と合わせて、幾何学的原理に基づき海底局の位置を決定している。この測位技術では、様々な誤差要因が、海底局位置の決定に影響を与えるが、中でも大きいのが長基線 KGPS 測位の不安定性（藤田・矢吹, 2003; 河合・他, 2005; 河合・他, 2006）と海中の音速度構造からくる誤差である（佐藤・藤田, 2004）。長基線 KGPS 測位については、近

[†]Received December 15, 2005 Accepted February 21, 2006

* 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

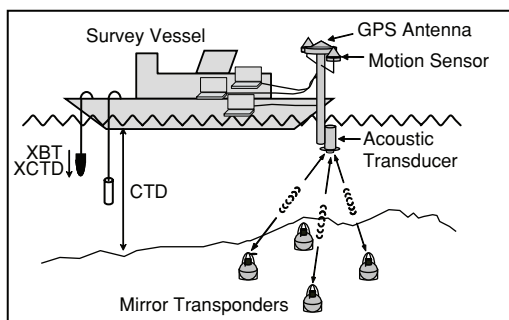


Fig. 1 Schematic figure of the observation system.

年のハード・ソフト両面での進歩により、比較的安定した解が得られるようになってきている。ここでは、もう一つの誤差要因である音速度構造に影響を与える海中の水温構造について注目する。

我々がこれまで各海底基準点で行ってきた観測結果から、南海トラフ沿いに設置した海底基準点にくらべ、宮城県沖に設置した海底基準点の方が、相対的に精度が低い傾向があることが分かってきた (Fujita et al., 2006)。このことは、両海域における海中の音速度構造の違いに起因していると考えられる。

宮城県沖の海域は黒潮系水と親潮系水が混ざり合う混合水域であり、複雑な水温構造を示す。特に水深 100~400 m の層では、水温逆転層が現れるなど、水温の鉛直勾配が激しく変化する。こうした、水温構造の不安定性は、そのまま音速度構造の不安定性でもある。現在の解析では、こうした複雑な時間的・空間的変化を完全にカバーすることができないために、大きな誤差要因となる。

本稿では、宮城県沖および潮岬沖に設置した海底基準点における観測結果をもとに、海中の水温構造と海底基準局の位置決定精度との関連性について考察する。

2 測定および解析の概要

(1) 音速度の測定

海中の音速度は、CTD, XCTD および XBT 観測によって得られた、海水の温度・塩分・圧力 (深度) から、Del Grosso の経験式 (Del Grosso, 1974) を用いて計算している。

機器の精度の面から CTD による観測がもっと

も望ましいが、実際の観測では、CTD を投入する際に使用するギャロsgが、船体後尾に設置してある KGPS アンテナの視界を遮ってしまうために、KGPS 観測と並行して行う音響測距観測を同時にできない。そのため、1日の音響測距観測の前後2回のみ、CTD 観測を行っている。その間の音速度の時間変化を捉えるために、約1時間ごとに XBT もしくは XCTD による観測を行う。

XBT では塩分の計測は行えないため、CTD から得られた塩分を時間的に線形補間したものをを用いて音速度を求める。XCTD は XBT よりも精度が良く、塩分も測定できるので、XCTD 観測を行う方がより望ましいが、XBT にくらべて高価であるため、通常は1日に1回ないしは2回の観測に留まっている。なお海が時化している時や夜間など、ギャロスが使用できず、CTD 観測が行えない場合は、その代用として XCTD 観測を行い、塩分の線形補間も XCTD の観測値を用いて行っている。

CTD は圧力センサを持っており、水圧を変換することで深度を決定しているが、XCTD, XBT は圧力センサを持たず、海中を自由落下する経過時間から、換算式を用いて深度を求めている。そのため、CTD にくらべ深度に対する精度が低い。

近年、この深度換算式の見直しがなされており、XBT に関しては Kizu et al. (2005)、XCTD に関しては社・他 (2005) による新しい深度換算式が提唱されている。現在、我々の解析ではこの新しい深度換算式を使用し、精度の向上を図っている。

音響測距観測は海底基準局の周りを移動して、観測ポイントを変えながら行うため、それと並行して行う XBT/XCTD 観測は、時間のみならず、位置も異なる測定となる。そのため、観測データには時間変化に加え、水平方向の空間変化の分も含まれることになるが、この両者を明確に分離することは難しいため、現在の解析では水平成層を仮定し、水平方向には均質な水温構造をしているものとして計算している。

(2) 局位置解析手法

海底基準局の位置決定には海洋情報部開発のソフトウェア SGOBS Ver. 2.10 を使用した。これは藤田・他 (2004) で紹介されている SGOBS の最新バージョンである。SGOBS での解析に用いるデータは、KGPS 解析から得られた GPS アンテナ位置、音響解析から得られた音波走時、動揺計測パラメータ、および CTD, XCTD, XBT から得られた海中の音速度プロファイルである。

KGPS 解析には、長距離基線解析のために開発されたソフトウェア IT (Colombo, 1998) を、音響測距解析には、相関波形処理による手法 (浅田・矢吹, 2001; 富山, 2003) を用いている。

音速度構造は、観測から得られた 1 m ごとのプロファイルを、200 m, 400 m, 800 m, 1600 m, それ以深、という各層ごとに勾配を平均化して計算している。現在の数 cm という海底局の位置決定精度では、1 m 層をそのまま使用する場合と比較して、ほとんど差異が無いことを確認しており、これにより計算時間が大幅に短縮されている。

しかし、観測から得られた音速度構造には精密な海底局位置決定にとって無視しえない誤差が含まれている。そのため SGOBS では、音速度は観測値をそのまま使用するのではなく、音速度も推定パラメータとして解く手法を用いている。具体的には、観測値を初期値として、平均音速度の時間変化パラメータを、局位置解とともに推定することで精度の向上を図っている。

3 局位置解析結果および海中水温プロファイル

海底基準局の測位精度を評価するため、藤田・佐藤 (2004) は、海底基準点「宮城沖 1」における 1 回のキャンペーン観測で取得した全データを 1 日ごとのサブセットに分け、各サブセットから得られた独立の測位解の再現性を吟味した。ここでは同様の方法により、局位置解の精度評価結果を示し、海中水温の観測結果と合わせて、詳しく考察する。

ここで使用したデータは、宮城沖 1 (MYGI),

潮岬沖 1 (SIOE), 潮岬沖 2 (SIOW) の各海底基準点 (Fig. 2) において、2003 年から 2005 年にかけて取得したものである。各キャンペーン観測において取得したデータ数 (音響測距における音波のショット数) は、Table 1 のとおりである。

Fig. 3~Fig. 7 に各キャンペーンにおける局位置解のサブセット比較結果、および水温プロファイルを示す。

各海底基準点は 4 台の海底基準局からなり、各海底局は水深と同一距離の直径を持つ円周上の東西南北に設置してある。局位置解析では 4 局の位置座標を独立に求めている。図のプロットは、それぞれ東西・南北成分について、4 局の平均位置を全日解 (ALL) からの差としてプロットしている。エラーバーは 4 局それぞれの全日解からの差の二乗平均値で、海底局間の相対位置関係のばらつきを示す指標である。また、サブセット解の再現性を評価するために、ばらつきの RMS も合わせて示した。

水温プロファイルは、観測から得られた 1 m ごとの水温値を水深 1000 m までプロットしたものである。各曲線の差が少ないほど、1 日の水温変化が少ないことを示す。水深 1000 m 以深の深海での水温は安定しており、特徴的な変化は無いため省略した。

水温変動の大きい時は、塩分も同様に大きく変動しており、線形補間で導かれた塩分値の誤差が大きくなる恐れがある。1 日の水温変化は、水深 100~500 m の変化の大きい層で、時に 2~3 °C になり、音速度に直すと数 m/s もの変化になる。一方、塩分の変化量は、大きくても 0.2~0.3 PSU 程度であり、音速度への影響は $O(10^{-1})$ m/s に留まる。この程度の大きさであれば、現在の解析における音速度補正手法で十分対応できるため、塩分値の誤差は、大きな問題にはならない。

このように、海中の音速度変化は水温変化の影響が主要であり、塩分の変化による影響は小さいため、以下の議論では水温に的を絞り、塩分の影響に関しては考慮しない。

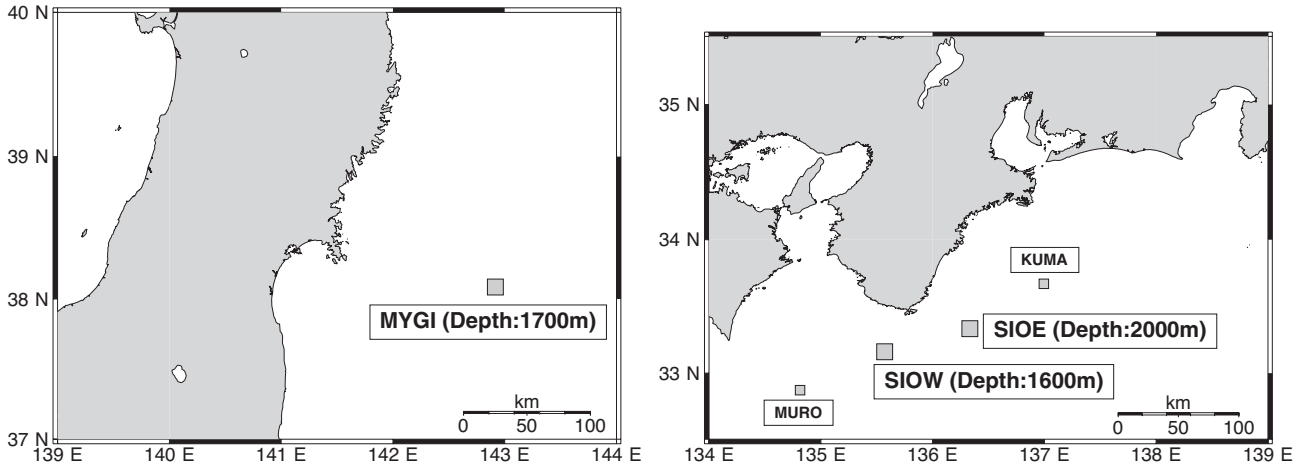


Fig. 2 Locations of the seafloor geodetic reference points used in this study.

Table 1 List of numbers of data for each campaign observation used in this study.

MYGI, APR. 2005	Date	4/22	4/23	4/24	4/25	5/9	5 days	
	Shots	1280	1299	1685	1300	901	6465 shots	
MYGI, AUG. 2005	Date	8/09	8/10	8/11	8/12	8/13	8/14	6 days
	Shots	1312	1300	1296	1300	1300	900	7408 shots
MYGI, SEP. 2005	Date	9/09	9/14	9/15	9/17	9/18	5 days	
	Shots	1061	1300	900	1300	1360	5921 shots	
SIOE, JULY 2004	Date	7/06	7/07	7/11	7/12		4 days	
	Shots	1216	1564	1001	1696		5477 shots	
SIOW, AUG. 2003	Date	8/23	8/24	8/25	8/26	9/14	9/15	6 days
	Shots	1006	1142	810	1021	724	759	5462 shots

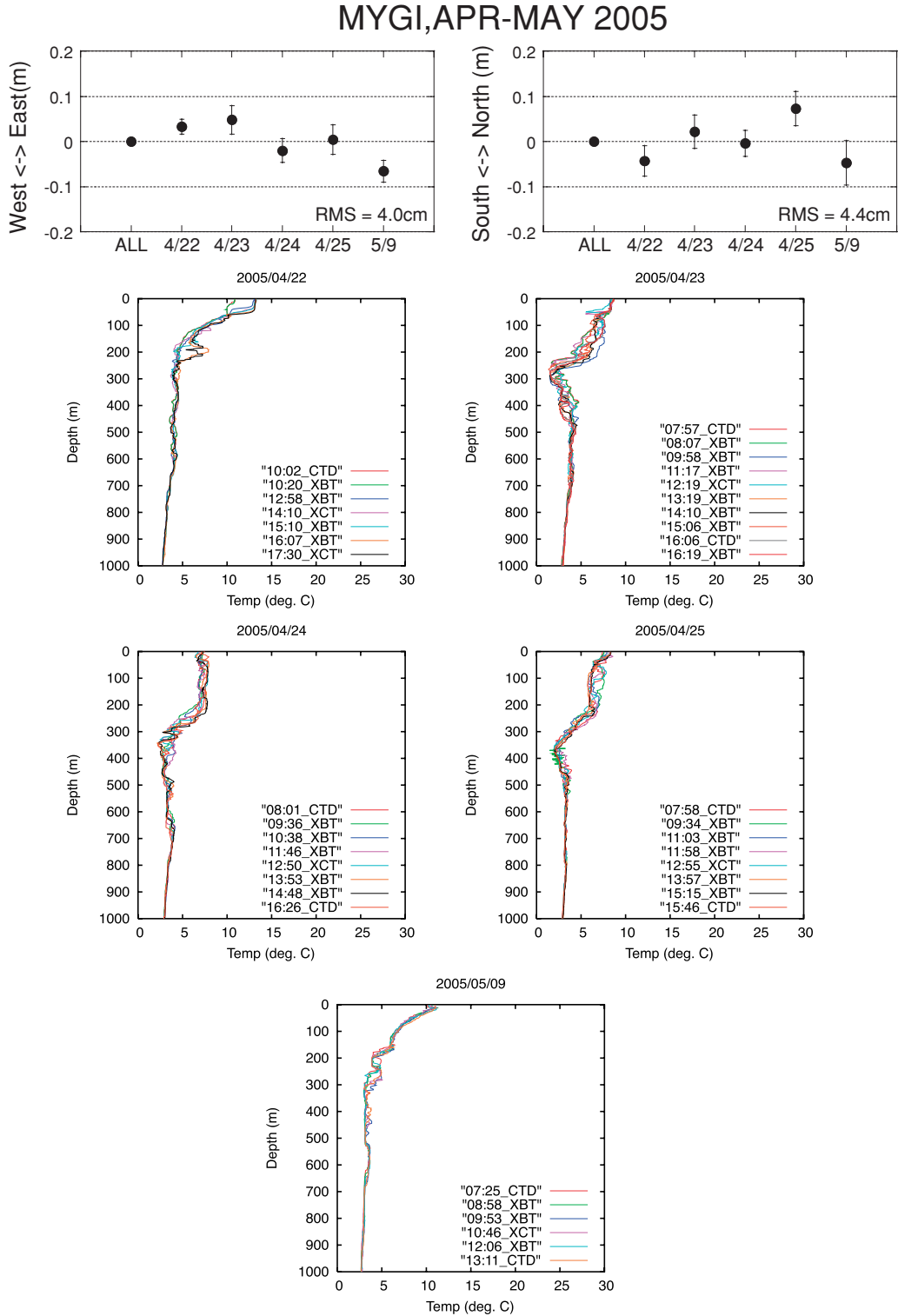


Fig. 3 Results of the campaign observation at MYGI in Apr.-May 2005. The top panels show repeatability of seafloor positioning. The lower panels show vertical profiles of temperature obtained from CTD, XCTD and XBT measurements.

MYGI, AUG 2005

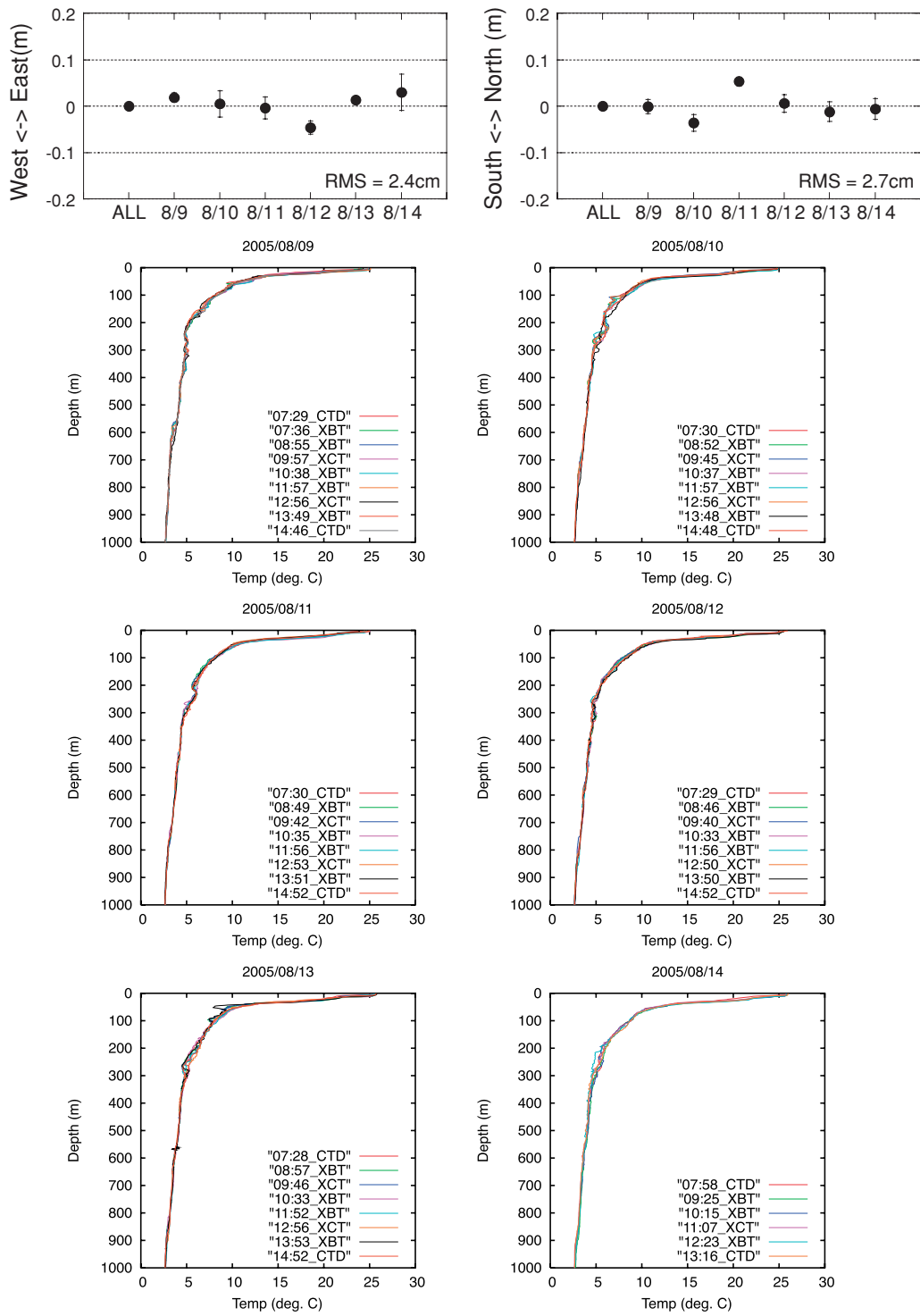


Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the campaign in Aug. 2005.

MYGI, SEP2005

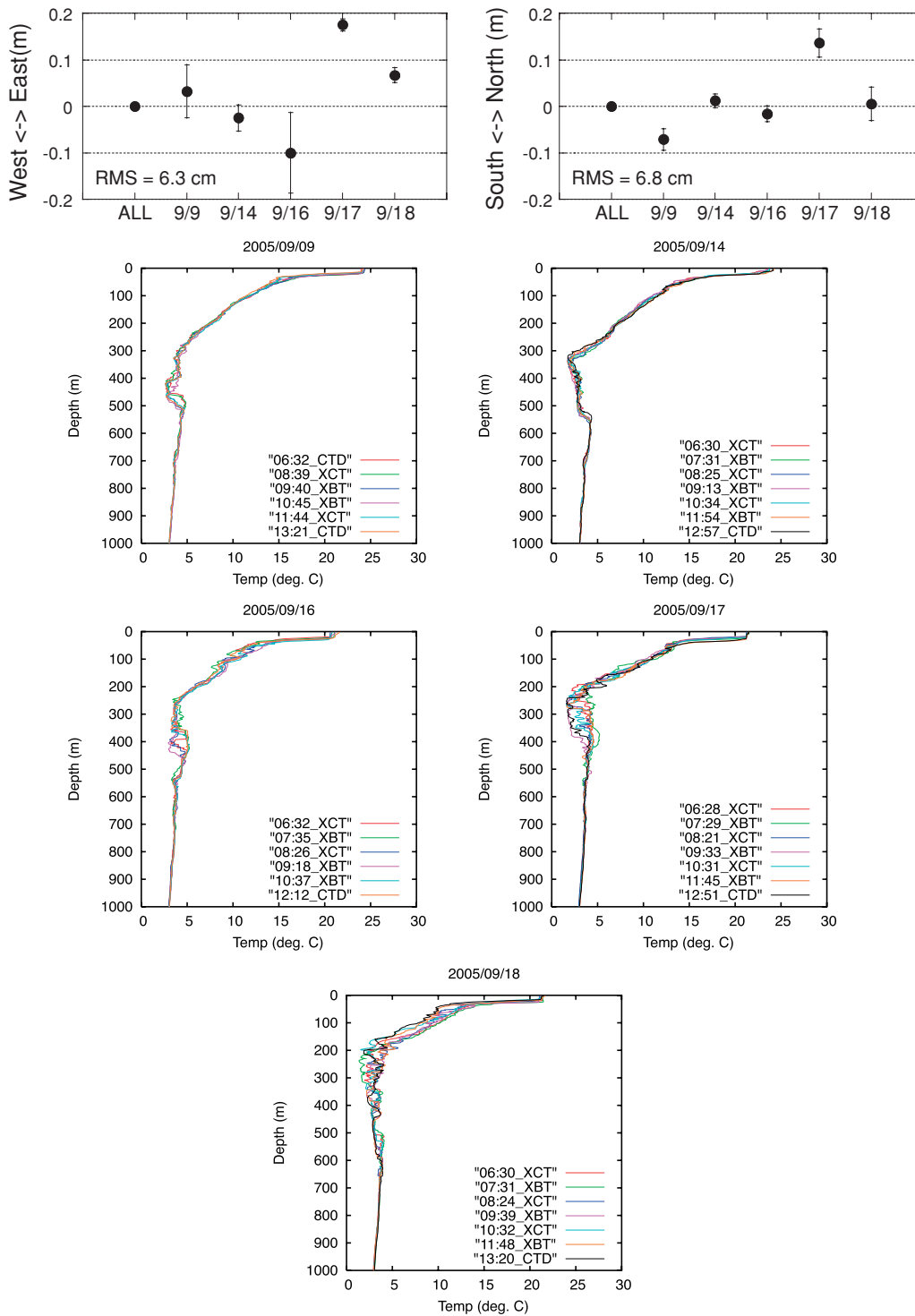


Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the campaign in Sep. 2005.

SIOE, JULY 2004

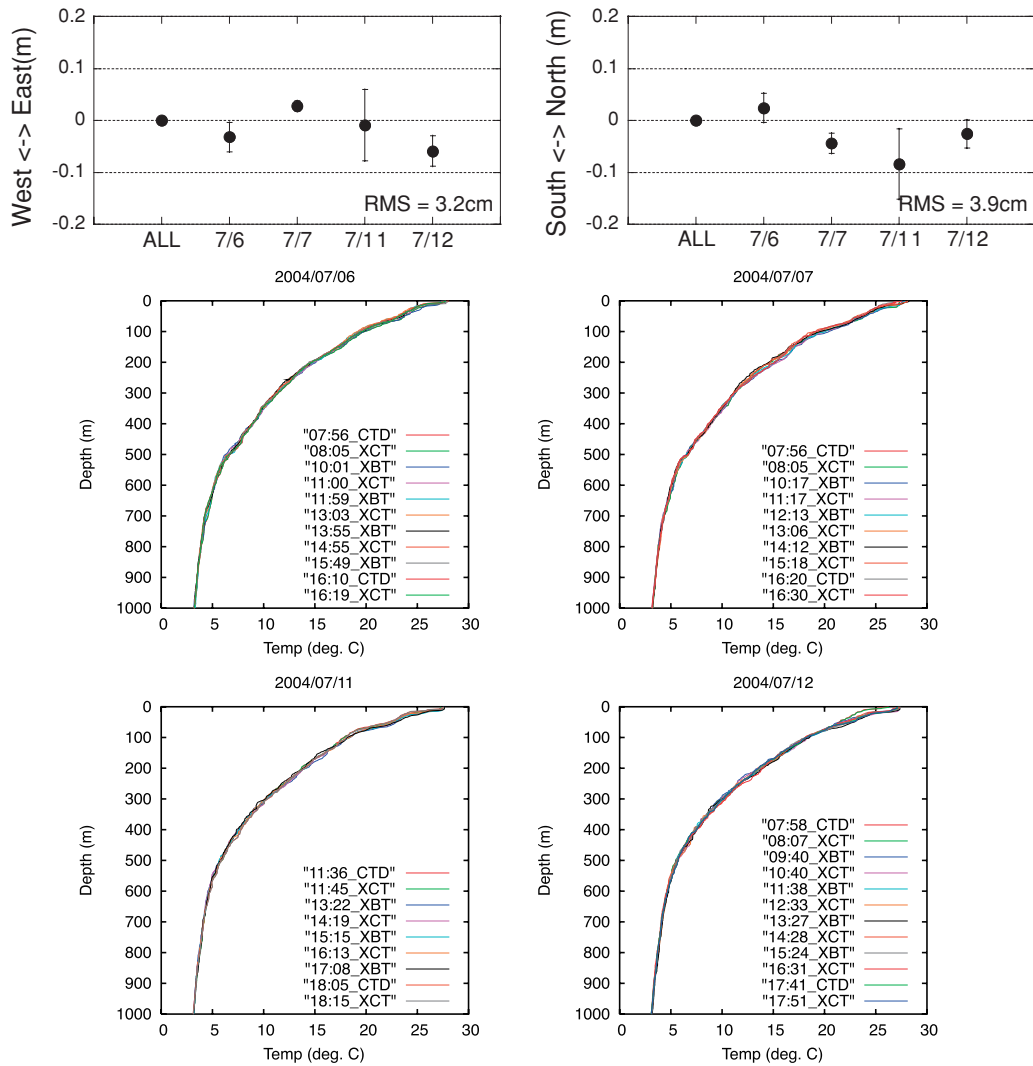


Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the campaign at SIOE in July 2004.

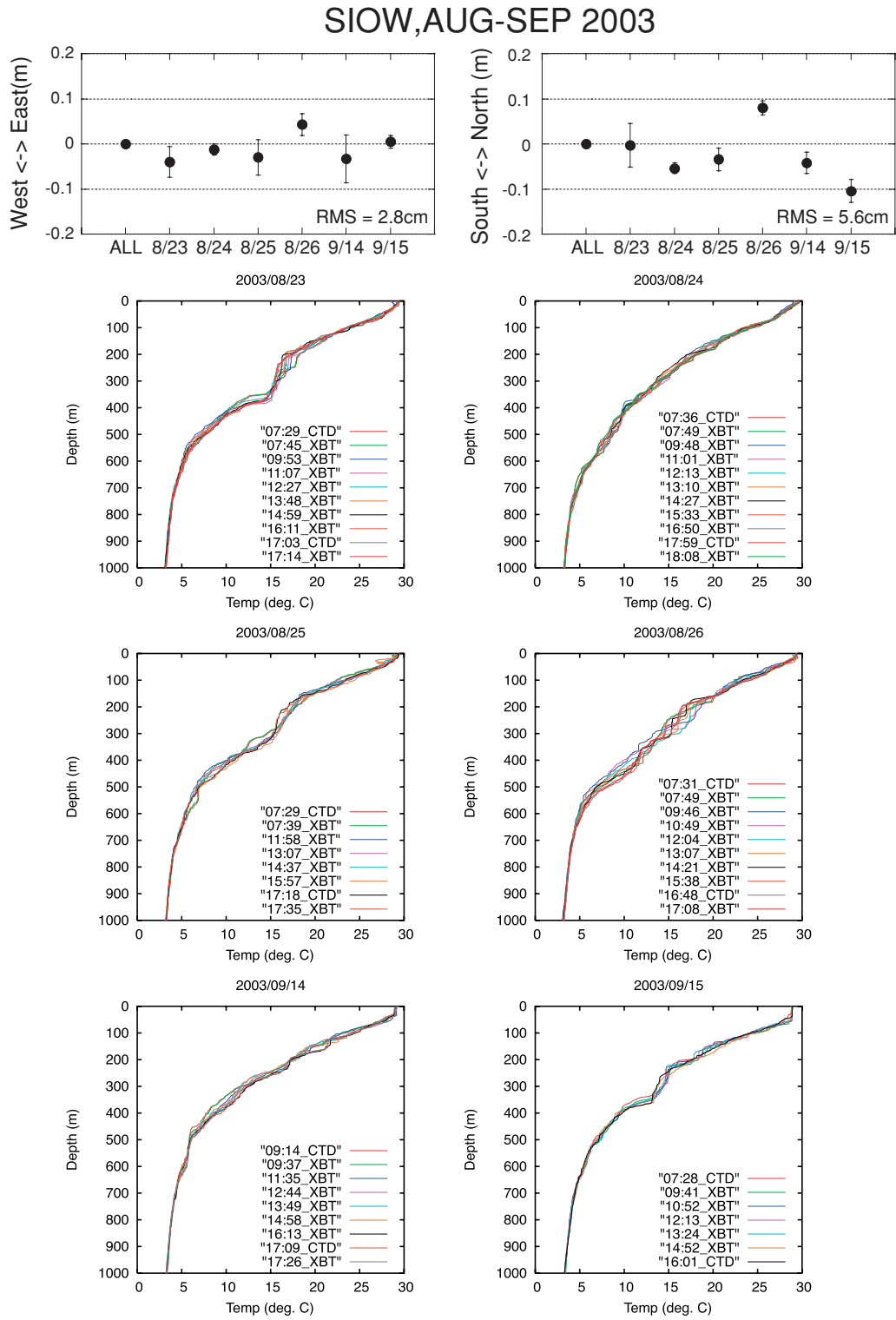


Fig. 7 Same as Fig. 3, but for the campaign at SIOW in Aug.-Sep. 2003.

局位置解析では、海底局の3次元の座標値を求めているが、このうち高さ成分は音速度誤差の影響を受けやすく、決定精度が相対的に低くなる。石川・藤田(2005)では、高さを既知の値に固定し、推定パラメータを減らすことで、局位置の水平成分の決定精度が向上することを示した。ここでは、MYGIの結果については、その手法を用い高さを固定することで、精度の向上を図っている。固定する高さは過去の観測結果からもっとも妥当と思われる値を用いた。

SIOE,SLOWについては観測回数が少なく、固定する高さの値を決定するための十分な結果が得られてないため、この手法は用いていない。

4 海中水温構造の影響の評価

(1) MYGIの結果

MYGIの結果では、4月(Fig.3)や、9月(Fig.5)の結果と比較すると、8月(Fig.4)はサブセット解のばらつきが非常に小さく、安定した測位結果が得られていることが分かる。水温プロファイルに注目すると、変化が少なく安定している8月に比べ、4月、9月は水深200~600mの層で、水温の鉛直構造が複雑に変化しており、1時間ごとの各観測値の差も大きくなっている。こうした、水温プロファイルの変化の激しさは、時間変動のみならず、水平方向の変動も無視できない大きさであることを暗示している。水平成層を仮定する現在の解析手法では、こうした水温の水平方向の変動には原理的に対応できていないため、精度を低下させる大きな原因となり、解のばらつきが相対的に大きくなってしまったと考えられる。

Fig.8に、二管区海洋速報から抜粋した表面水温分布を示す。本稿での議論は、およそ3km四方の観測海域における1日の時間変化に着目しているため、海洋速報とは時間的・空間的スケールが異なる。また、表面水温分布だけでは、海中の様子を正確には把握できないために、我々の観測結果との直接的な比較はできないものの、周辺海

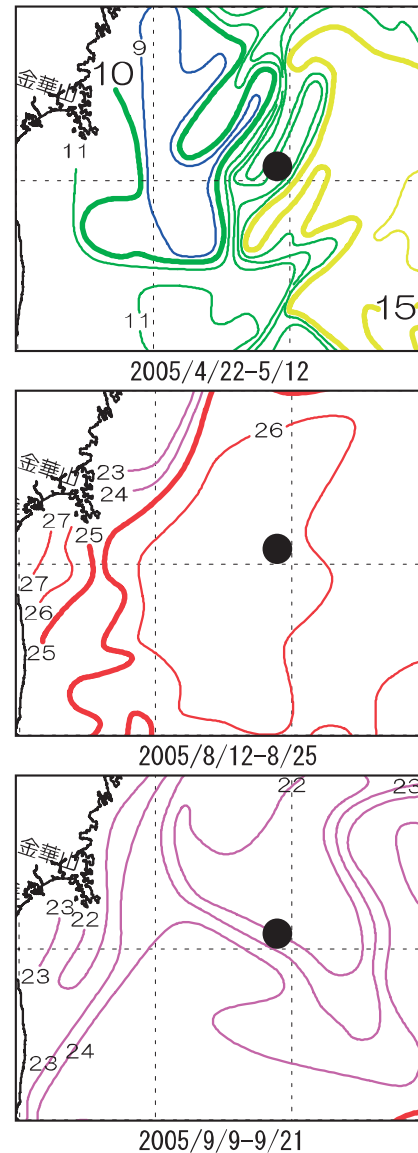


Fig.8 Distribution of sea surface temperature in the neighboring area of MYGI (solid circle). Extract from Quick Bulletin of Ocean Conditions of 2nd Regional Coast Guard Headquarters.

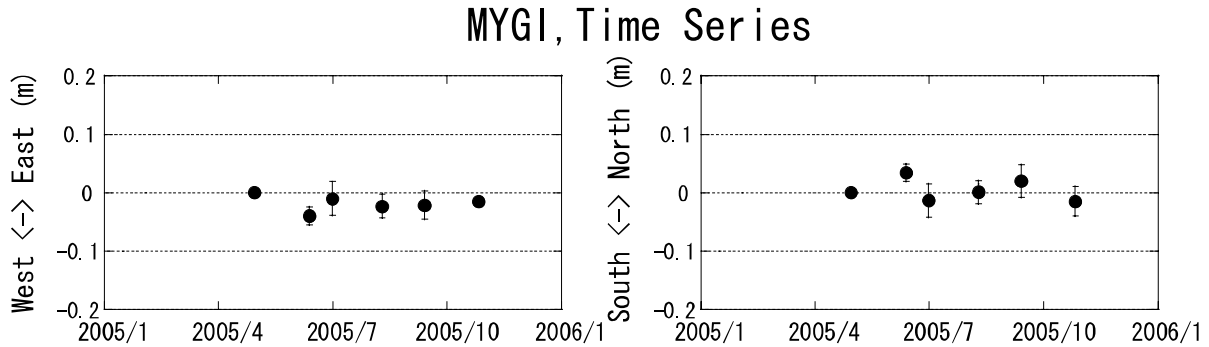


Fig. 9 Time series obtained at MYGI from six campaign epoch during 2005.

域のおおまかな状況を把握するための参考となる。

これらの図から4月、9月は海底基準点周辺で等温線が混み入っており、表面水温の空間的不均質が大きい様子が分かる。特に春は、親潮後退期にあたり、親潮系冷水が残存するなど、海況変動が激しく、音速度が安定せず観測には不向きな環境であると言える。

このような、ばらつきの大きい4月、9月の結果は、その解の信頼性が低くなってしまうことが懸念される。Fig. 9にMYGIにおける2005年に行った6回の観測の全日解をプロットした時系列を示す。この図を見ると、4月、9月の結果も他のキャンペーンと比較して、特に大きなずれは見せていない。Table 1に示したように、4月、9月はそれぞれ5日間の観測で約6000ショットのデータを得ており、このデータ数の多さから、統計的に誤差が相殺されていると考えられる。

このことから、海中の水温構造が不安定で、1日ごとのサブセット解では、ばらつきが大きくなってしまう場合であっても、十分な数の観測データが得られていれば、全観測日を合わせた全日解は、十分な精度を持った妥当な解となりうる事が分かる。

(2) SIOEの結果

Fig. 6の2004年7月のSIOEの結果では、宮城沖で見られたような水温逆転層もなく、水温プロファイルが極めて安定している。局位置解析結果も良好で、サブセット解のばらつきも少なく、水

温の安定性を反映した結果になっている。また、この時期は黒潮が南に蛇行しており、観測海域における流れが弱かったことも良好な結果が得られた一因となっている。黒潮の流れが解析結果に与える影響は、次のSLOWの結果の項で考察する。

こうした水温構造の安定性は、南海トラフ沿いの海域において一般的に見られ、観測に適した海域であると言える。例として、南海トラフ沿いの他の海底基準点(KUMA,SLOW,MURO)の結果をFig. 10に示す。春から秋にかけて、安定した水温プロファイルとなっていることが分かる。

現在、SIOEをはじめとする南海トラフ沿いの海底基準点では、MYGIで用いた高さを固定する手法を使用していないが、今後観測を重ね、固定する高さについて十分な情報が得られれば、さらに精度が向上すると期待される。

(3) SLOWの結果

Fig. 7に示した、2003年8月のSLOWの結果では、RMS=2.8 cmと安定している東西成分にくらべ、南北成分はRMS=5.6 cmとばらつきが大きくなっている。

水温プロファイルを見ると、この海域の特徴でもある水温逆転層の無い安定した構造を示しているものの、Fig. 6のSIOEと比較すると、変化が大きくなっている。

水温変動をより詳細に見るために、8月23日を例にとって、XBT観測で得られた平均水温をプロットしたものをFig. 11に示した。ここで

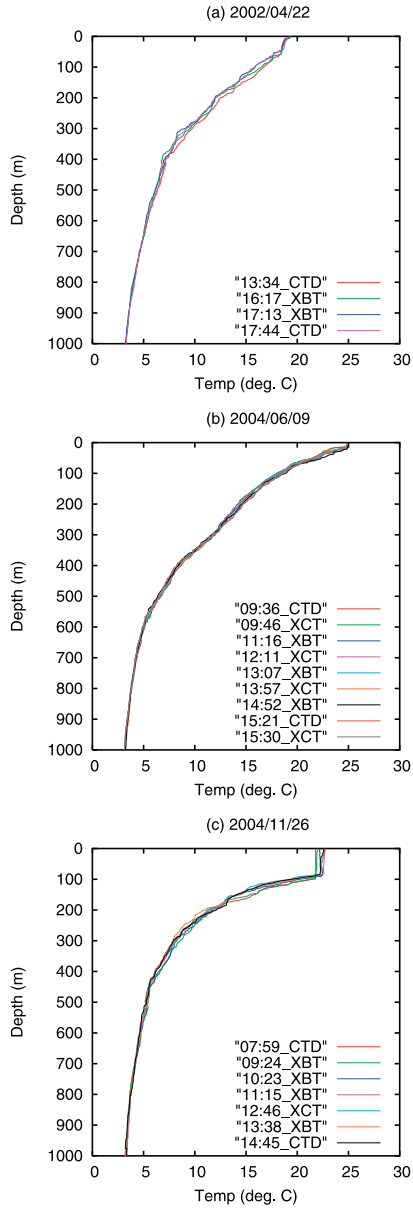


Fig. 10 Vertical profiles of temperature obtained from CTD, XCTD and XBT measurements ; (a) at KUMA on 22 Apr., 2002, (b) at SIOW on 9 June, 2004 and (c) at MURO on 26 Nov., 2004.

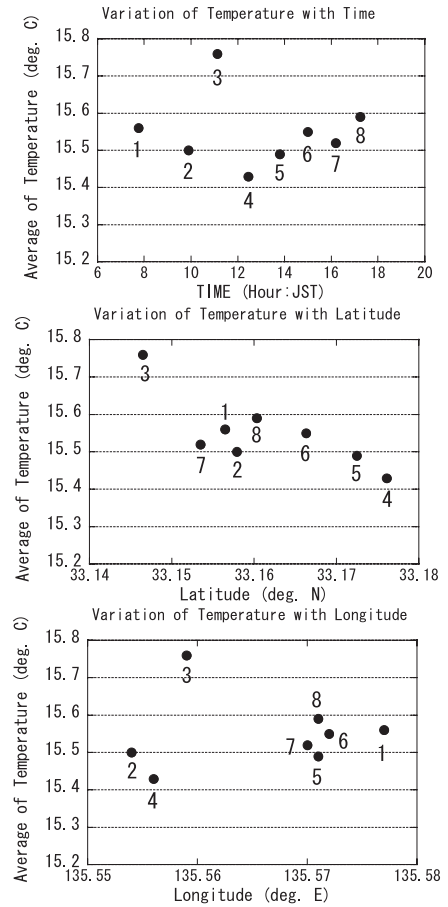


Fig. 11 Variation of average temperature down to 600 m with respect to time, latitude and longitude, obtained from XBT measurements at SIOW on 23 Aug., 2003.

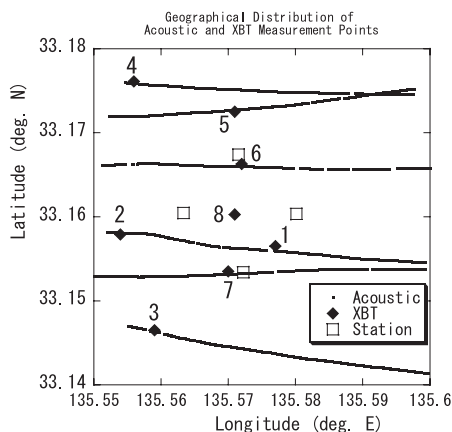


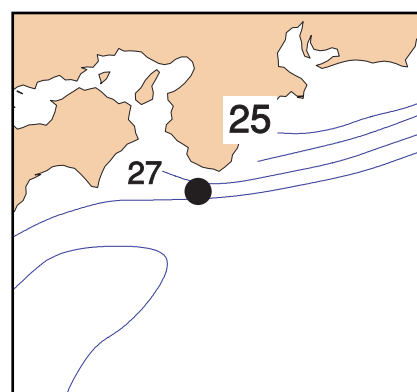
Fig. 12 Geographical distribution of acoustic measurement points (wavy lines) and XBT measurement points (solid diamonds) around four seafloor stations (white squares) at SLOW on 23 Aug., 2003.

は、各観測ごとの差が大きく出る水深 600 m までの平均水温を、時間、緯度、経度に対してプロットしている。各プロットの番号は、XBT を投入した順番である。

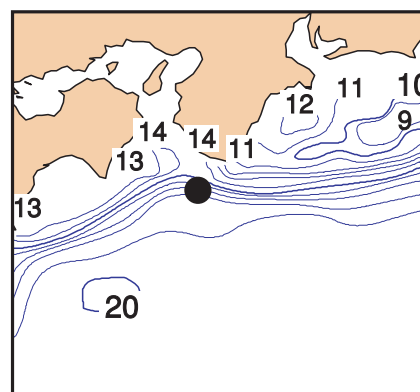
これらの図から、この日の水温変動は緯度に対する変化が有意であると推測される。平均水温の差が大きい 3 番、4 番に注目すると、時間・経度ともに近い値であるが、緯度に大きな差を持っており、平均水温の差はこの緯度の差によるものであると思われる。また、1 番と 2 番では、経度に大きな差があるが、平均水温に大きな差は見られない。これは 1 番と 2 番が近い緯度での観測であったためと考えられる。これらのことから、この海域では南北方向に水温の勾配が大きくなっており、そのことが、局位置解の南北方向のばらつきを大きくさせた要因となったと考えられる。

この観測時の海底基準点は、黒潮の中にあり、東西方向に強い流れがある中での観測であった。Fig. 11 に 8 月 23 日の測線配置を示す。強い海流のため東西に大きく流されての観測であることが分かる。海流に平行な東西方向は水温が均質になりやすいが、流れに垂直な南北方向には水温分布に勾配が生まれる可能性がある。

Fig. 12 は、海洋速報 (2003 年 24 号: 観測期間 2003 年 8 月 19 日~26 日) から抜粋した表面



2003/8/19-8/26(surface)



2003/8/16-9/15(200m)

Fig. 13 Distribution of temperature on the neighboring area of SLOW (solid point). Upper panel shows sea surface temperature and lower panel shows undersea temperature at depth of 200 m. Extract from Quick Bulletin of Ocean Conditions of JHOD.

水温、および水深 200 m の水温の分布（観測期間 2003 年 8 月 16 日～9 月 15 日）である。この図からもこの時期に、南北方向に水温勾配があったことが分かる。

また、この測位手法では、データ配置の幾何学的バランスも局位置決定に影響を与えるため（佐藤・藤田, 2004）、流れによってデータ配置のバランスが崩れた（東西には密だが南北には疎）ことも、南北成分の精度を低下させた一因となっていると考えられる。

5 まとめ

宮城県沖（MYGI）、潮岬沖（SIOE, SIOW）の各海底基準点における、海底地殻変動観測の結果から、海底局位置の決定精度と海中の水温構造の関係について検討した。今回、定量的な議論はできなかったものの、水温構造の安定性が局位置解の決定精度に大きく影響を与えることが分かった。

宮城県沖の海域は、南海トラフ沿いの海域にくらべ、水温逆転層が現れるなど、水温変化が激しく、サブセット解のばらつきが大きくなる傾向にある。特に、春期や秋期においては、親潮系の冷水と黒潮系の暖水が入り交じり、水温の時間・空間的变化が大きくなり、観測にあまり向いていない時期であると言える。一方で夏期は、水温構造が比較的安定しており、サブセット解のばらつきの RMS も 3 cm 以内に収まるなど、良好な結果が得られている。

また、各キャンペーン観測の時系列結果から、水温構造が不安定な時期であっても、十分な観測日数および、データ数を確保することによって、全日解は十分な精度を持つ結果になりうることが分かった。

南海トラフ沿いに設置した海底基準点では、これまでに十分な観測回数が確保されておらず、MYGI で用いた高さを固定して精度を向上させる手法が使えないものの、この海域における水温構造の安定性から、MYGI の夏場に匹敵する良好な結果が得られている。ただし、観測海域が黒潮の

流れの中に入ってしまう場合、流れの鉛直方向に水温の不均質が生まれ、その方向の局位置決定精度が低下してしまう傾向が見られる。

現在の解析手法では、水温の水平分布の不均質に対応することができず、このことが精度低下の大きな要因となっている。この問題についての対策は将来的な課題であるが、解析における計算の困難さに加え、水平方向の変化を確実に捉えるためには、同時刻における 2 箇所以上での観測が必要になるなど、極めて難しい問題である。しかしながら、水平分布の不均質の存在など、条件の悪い時であっても、十分な数のデータを取得することで、所定の精度を確保することが可能であるため、1 回のキャンペーン観測では十分な観測日数を確保することが必要である。

謝 辞

本研究は、海上保安庁の海底地殻変動観測プロジェクトに関わっている航法測地室衛星測地担当職員、および矢吹哲一朗、富山新一、佐藤まりこの各氏、測量船「海洋」「明洋」乗組員、東京大学生産技術研究所の浅田昭、望月将志、吉田善吾の各氏、KGPS 解析のソフトウェア IT を提供して下さった、NASA/GSFC の Colombo 氏ら、多くの方々の協力の下に行われた。記して感謝する。

要 旨

海底地殻変動観測における海底局位置の測位結果と、観測海域の水温構造との関係について検討した。その結果、水温構造の時間的・空間的変動の安定性が測位結果に大きく影響を与えることが分かった。

宮城県沖の海域では、特に春期や秋期において、水温変動が解析で補正しきれない大きさになり、測位結果のばらつきも大きくなる傾向にある。夏期は水温変動も比較的小さく安定しており、測位結果のばらつきも小さい。

南海トラフ沿いの海域は、宮城県沖にくらべ水温構造が安定しており、その安定性を反映して良

好な測位結果が得られている。しかしながら、この海域は時期によっては黒潮の影響を受けるため、海流の流れに鉛直な方向の測位精度が低下する場合もある。

また、水温構造が不安定で、一日ごとの測位結果のばらつきが大きい場合でも、十分な観測データが得られていれば、所定の精度を有する結果になりうるということが分かった。

参考文献

浅田昭, 矢吹哲一郎 (2000) : 海底音響基準局 ネット, *生産研究*, 52, 293-296.

浅田昭, 矢吹哲一郎 (2001) : 熊野トラフにおける長期地殻変動観測技術の高度化, *地学雑誌*, 110 (4), 529-543.

Colombo, O.L. (1998) : Long-Distance Kinematic GPS, in "GPS for Geodesy 2 nd edition", 537-568, Springer.

Del Grosso, V.A. (1974) : New Equation for Speed of Sound in Natural Water (with comparison to other equations), *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56, No. 4, 1084-1091.

Fujita, M. (2003) : Seafloor geodetic observation - GPS/acoustic combination technique -, *HydroInternational*, 7, 41-43.

Fujita, M., T. Ishiakwa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada and O.L. Colombo (2006) : GPS/Acoustic seafloor geodetic observation : method of data analysis and its application, *Earth Planets Space* 58, 1-11.

藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎 (2004) : 海底地殻変動観測における局位置解析ソフトウェアの開発, *海洋情報部技報*, 22, 42-49.

藤田雅之, 佐藤まりこ (2004) : 海底地殻変動観測における局位置決定再現性の評価, *海洋情報部研究報告*, 40, 85-92.

藤田雅之, 矢吹哲一郎 (2003) : 海底地殻変動観測における K-GPS 解析結果の評価手法につ

いて, *海洋情報部技報*, 21, 62-66.

石川直史, 藤田雅之 (2005) : 海底地殻変動観測における局位置解析手法と精度の向上について, *海洋情報部研究報告*, 41, 27-34.

河合晃司, 成田誉孝, 藤田雅之, 石川直史, 淵之上紘和, 長岡継 (2005) : 長基線 KGPS 測位精度の機種 (アンテナ) 依存性について, *海洋情報部技報*, 23, 66-72.

河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志 (2006) : 長基線 KGPS の精度評価について, *海洋情報部技報*, 24, 80-88.

Kizu S., H. Yoritaka and H. Hanawa (2005) : A New Fall-Rate Equation for Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK. *J. Oceanogr.*, 61 No. 1, 115-121, 591-600.

社泰裕, 石井春雄, 藤田雅之, 加藤弘紀 (2005) : XCTD-2 F の深度換算式較正の試み, *海洋情報部技報*, 23, 93-98.

松本良浩, 藤田雅之, 河合晃司, 石川直史, 矢吹哲一郎, 望月将志, 浅田昭 (2006) : 海底地殻変動観測における GPS マスト局アンテナの利用, *海洋情報部技報*, 24, 94-98.

Mochizuki, M., M. Sato, M. Katayama, T. Yabuki, Z. Yoshida and A. Asada (2003) : Construction of Seafloor Geodetic Observation Network Around Japan, *Recent Advances in Marine Science and Technology*, 2002, 591-600.

成田誉孝, 畝見潤一郎, 望月将志 (2005) : 海底地殻変動観測における機器の現状とその運用について, *海洋情報部技報*, 23, 53-60.

佐藤まりこ, 藤田雅之 (2004) : 海底地殻変動観測における海中音速度誤差の局位置への影響について, *海洋情報部技報*, 22, 42-49.

富山新一 (2003) : 海底地殻変動観測における音響解析, *海洋情報部技報*, 21, 67-72.

畝見潤一郎 (2004) : 海底地殻変動観測の現状と諸問題について, *海洋情報部技報*, 22, 33-41.

矢吹哲一郎 (2002) : 海底地殻変動観測を旨とした音響技術開発, *水路部研究報告*, 38, 47-58.