

## 海底地殻変動観測における海中音速度処理手法

石川直史：航法測地室

松本良浩：海洋研究室

### Handling of sound speed in seafloor geodetic observation

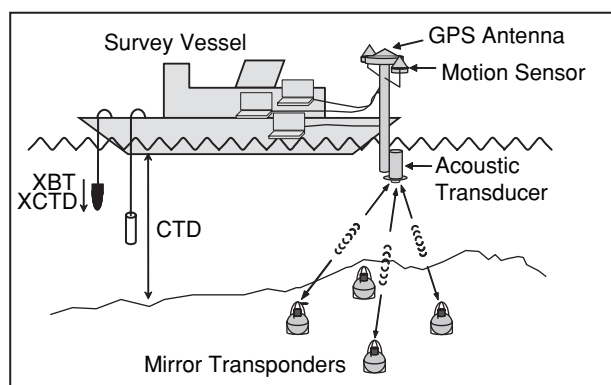
Tadashi ISHIKAWA: Geodesy and Geophysics Office

Yoshihiro MATSUMOTO: Ocean Research Laboratory

#### 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により、GPS音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発および海底基準点の展開を行っている (Fujita et al, 2006 and the references therein).

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、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ものである。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。



第1図 海底地殻変動観測システム

Fig. 1 Schematic figure of the observation system

音響測距による音波の伝播時間から、船上局と海底局間の距離を求めるためには、海中の音速度が必要不可欠であり、海底局の精密な位置決定のためには、高精度に音速度構造を把握する必要がある。そのため、観測時にはCTD, XCTDおよびXBT観測を行い海中音速度構造の把握に努めている。

本稿では、現在の解析における、CTD, XCTDおよびXBTの観測データの取り扱いについてまとめた。

#### 2 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る、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。

CTD, XCTD, XBTの測定精度 (カタログ値) をTable 1に示す。CTDはSea-Bird社製のSBE-19を、XCTD, XBTは鶴見精機製のXCTD-2, T-5を使用している。

##### 2.1 CTD

機器の精度の面からCTDによる観測がもっとも

第1表 機器の測定精度

Table 1 Measurement accuracy of equipments

	CTD SBE-19	TSK XCTD-2	TSK XBT T-5
Temperature	0.01 °C	0.02 °C	0.2 °C
Conductivity	0.001 S/m	0.03 S/m	-

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スが、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 (Fig.2)。現在の解析手法では、KGPSによって船上GPSアンテナの位置を高精度に求めるためには、4～5時間以上の連続したデータが必要であるため (河合, 2006) KGPS観測、およびそれとを並行して行う音響測距観測中には、ギャロスを使用することができず、CTD観測が行えない。そのため現在は、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。

通常、1日の最初、朝に行うCTDは海底付近まで観測を行うが、1日の最後、夕方に行うCTD観測は、観測時間の制約から (本観測は基本的に日中のみ行う)、水深1000m以上ある海域であっても、1000mまでの観測にとどめている。水深1000m以上の深海の音速度構造は安定しており、急激な変化はほとんど無いことから、このような運用としている。

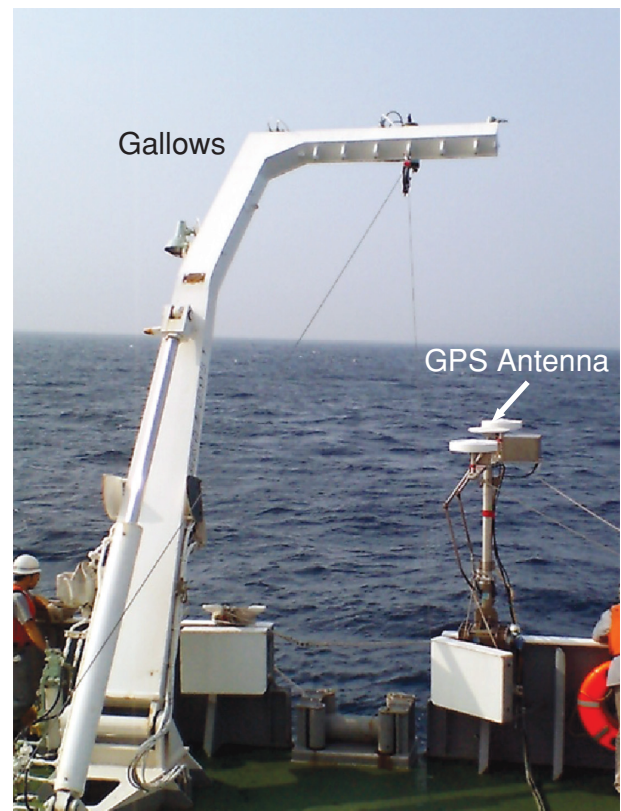
実際に、CTD観測で測定される量は、温度、電気伝導度および圧力であり、塩分は、これらの量から計算式によって求められる。音速度の計算も含めた一連の計算には、Sea-Bird社製のSEASOFT (DOS版) を用いている。また、本解析では、CTDを海底へ降ろす時のデータのみを用いている。

## 2.2 XCTD, XBT

CTD観測が行えない測距観測中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による観測を行っている。

XCTDは、XBTよりも精度が良く、電気伝導度も測定できるので、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。また、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、その代用としてXCTD観測を行っている。

XBTは、電気伝導度の計測は行えないため、1日の観測前後に行うCTD観測から得られた電気伝導度を、時間的に線形補間したものを用いて、音速度を計算している。XCTD, XBTのデータもCTDと同



第2図 船尾の観測機器の状況  
Fig. 2 The situation of the equipment of the stern

様に、Sea-Bird社製のSEASOFT (DOS版) を用いて、計算処理を行っている。

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に関しては社ほか (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。

実際の観測データの例をFig.3に示す。この図は宮城沖1海底基準点 (MYGI) において、2005年4月24日に得られたデータから得られた、水温・電気伝導度、およびそれらから計算された塩分・音速度のプロファイルである。XBTデータの音速度は上述のように、電気伝導度の線形補間値を用いて計算している。

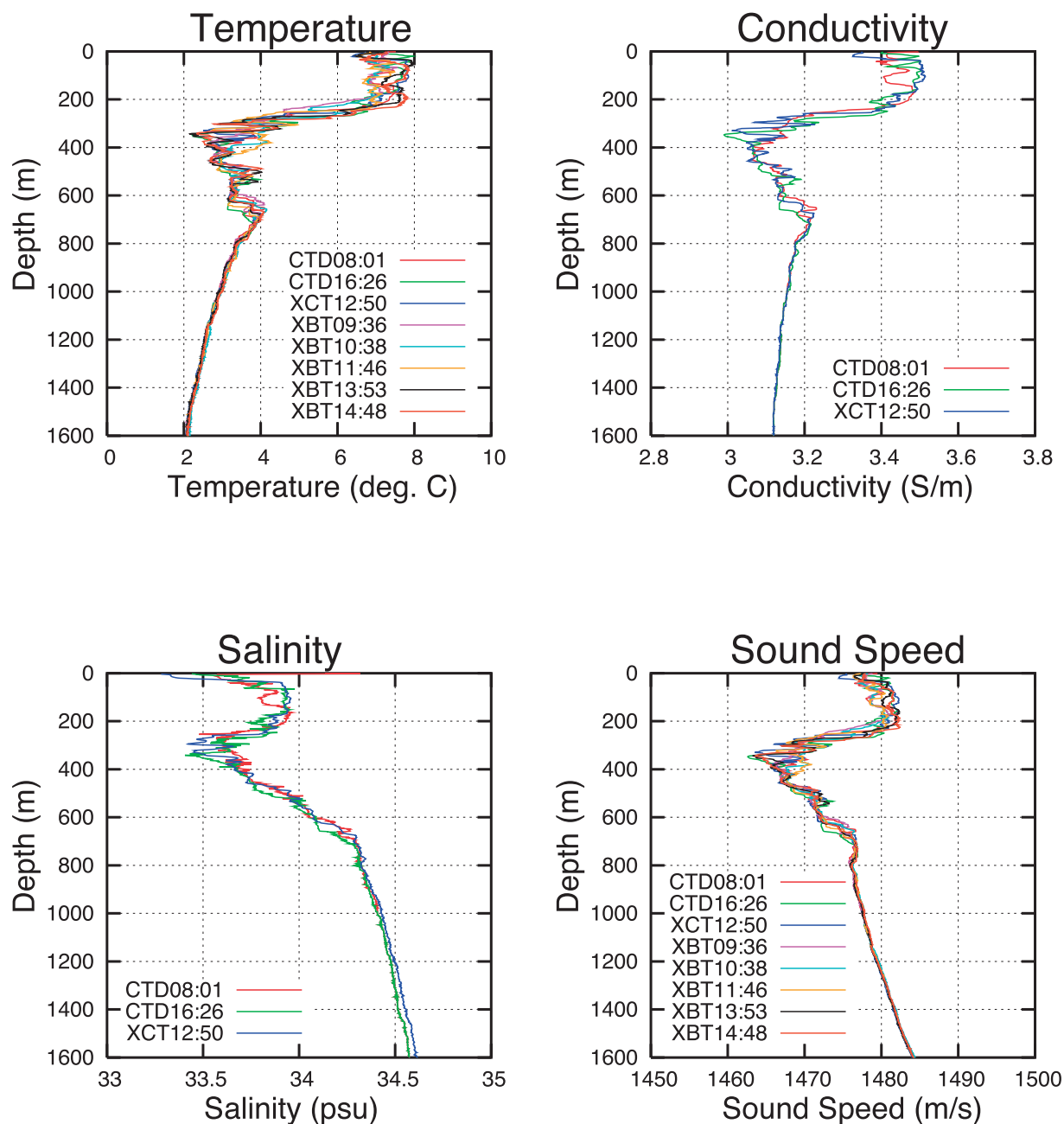
3 局位置推定ソフトにおける音速度の取り扱い

現在、我々は海底基準局の位置を求める局位置解析のためのソフトウェア「SGOBS (Seafloor Geodetic OBServation)」の開発を行っている (藤田, 2004)。

海底局位置を精密に求めるには、要求精度内で正確な音速度構造を与える必要があるが、現状の観測

機器の精度では、数cmレベルの測位には十分であるとは言えない。また、音速度構造は時間・空間で複雑に変化するため、その変化全てを観測でカバーするのは不可能であると言ってよい。従って、観測値に基づく音速度構造のみから高精度測位を行うことは極めて困難である。そこでSGOBSでは、音速度構造自体も推定パラメータとして解くことで、音

Profiles of Sea Water (MYGI : 2005 04/24)



第3図 MYGI, 2005年4月24日の観測における各種プロファイル

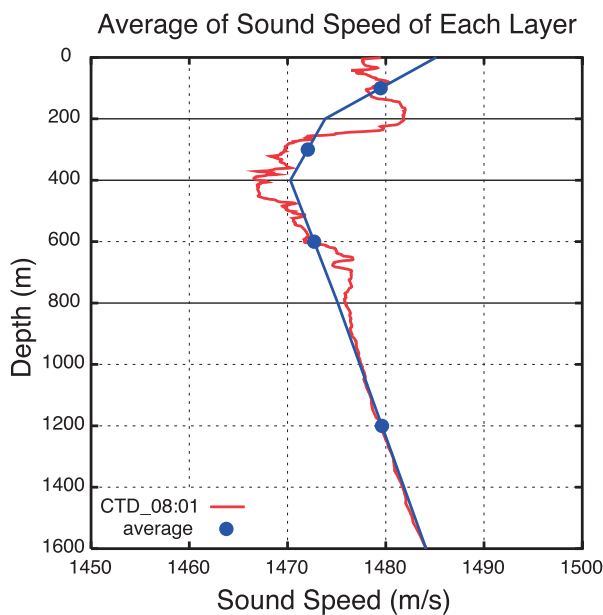
Fig. 3 Vertical profiles of sea water obtained from the measurement in Apr. 24, 2005 at MYGI

速度誤差の影響を軽減している。

SGOBSにおける、音速度構造の取り扱いについてまとめると、以下ようになる。

- ・ 水平方向の音速度分布が均質な水平成層構造を仮定
- ・ 観測値の1m層データをそのまま使うのではなく、0m, 200m, 400m, 800m, 1600m, それ以深、の各層ごとに勾配を平均化したプロファイルを用いる (Fig.4)
- ・ このプロファイルの形状は時間的に一定で変化しない
- ・ 観測から得られた平均音速度の1日の時間変化を2次多項式で回帰したものを初期値とする
- ・ 平均音速度の時間変化係数を推定パラメータとして解く
  - － 1回目：1日の時間変化を2次関数として解く
  - － 2回目：測線ごと (通常約20分) の時間変化を2次関数として解く
- ・ 音速度誤差の影響は伝播距離が長くなるほど大きくなるため、局位置推定の際には、伝播距離によるデータの重み付けを行う

実際の例として、MYGIにおける2005年4月24日



第4図 音速度の鉛直プロファイルと各層ごとの平均値

Fig. 4 Vertical profile of sound speed and its mean values of each layer

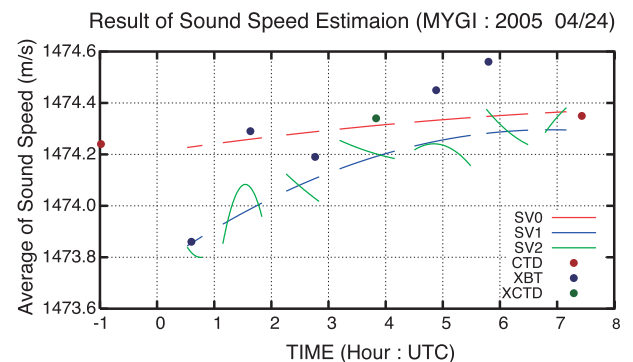
の推定された音速度の時間的な変化曲線を Fig.5 に示す。図中の曲線は、海面から水深800mまでの平均音速度の時間変化を表している。SV0 は観測値から求められた2次回帰曲線, SV1, SV2 はそれぞれ1回目, 2回目の推定結果, 丸点は観測で求められた音速度の平均値である。

音速度の時間変化は2次関数でなく、さらに高次の関数で推定することも可能であるが、これまでの解析結果からほとんどの場合において、2次関数で十分な結果が得られることが確かめられている。次数を上げることは、より複雑な変化にも対応できるというメリットがあるものの、推定パラメータを増加させることにもなるため、物理的に妥当な理由が無い限り、むやみに次数を上げるべきでは無いと考えている。

Fig.6 に、音波往復走時の残差を示す。図のプロットは、4台の海底局の推定位置に対する、往復走時のばらつきを表す。各グラフは音速度として、上段からそれぞれ、SV0, SV1, SV2 を用いた結果であり、音速度推定を行うことによって、残差が小さくなっているのが分かる。

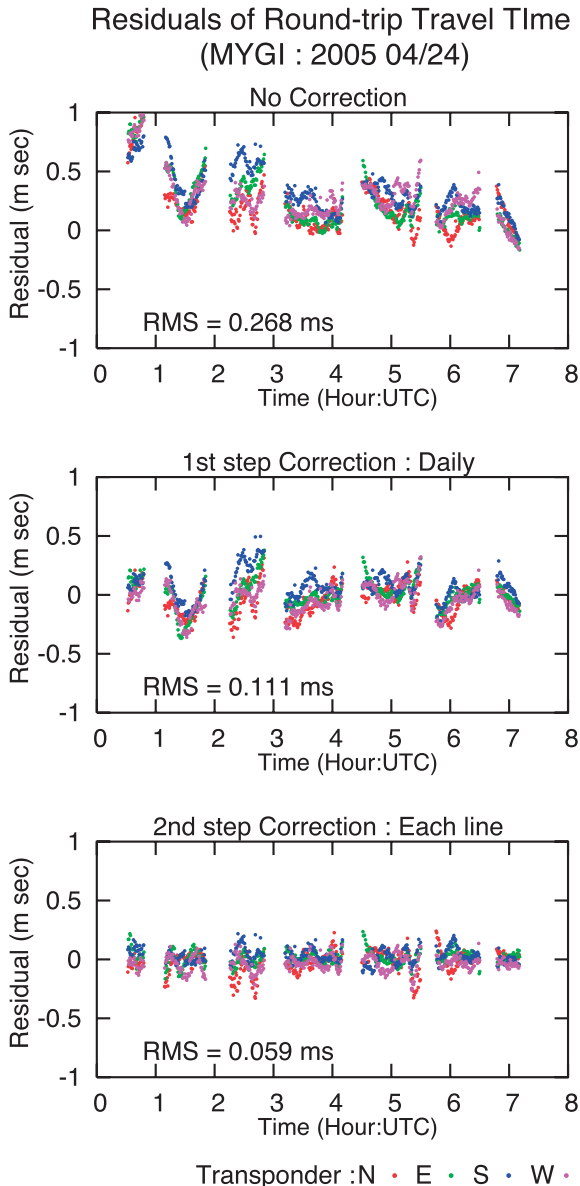
#### 4 電気伝導度の局位置解析への影響

既に述べたように、XBTは電気伝導度のデータを持たないため、1日の観測の前後に行っているCTD観測から得られた電気伝導値を線形補間することによって、音速度を計算している。しかし、実際の電気伝導度は必ずしも線形の変化をしている訳ではないため、このことが音速度の誤差要因となる。



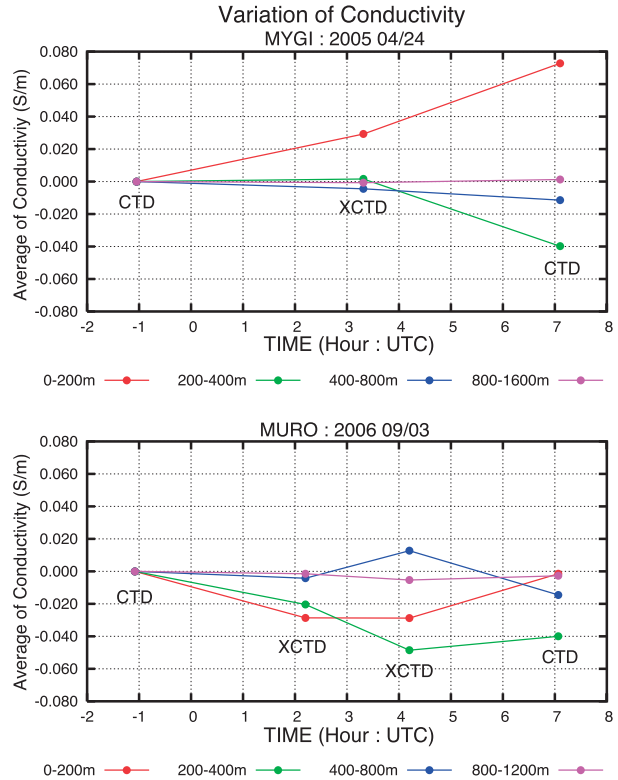
第5図 音速度推定結果

Fig. 5 Result of sound speed estimation



第6図 音波往復走時残差  
Fig. 6 Residuals of acoustic round-trip travel time

Fig.7に実際の観測から得られた、各層ごとの平均電気伝導度の変化の例を示す。図の変化量から、線形補間値の誤差は浅海の変化の大きいところで、0.02~0.03S/m程度であると見積られる。これは、音速度にすると数10cm/sの誤差となり、SGOBSにおける、音速度初期値の値 (Fig.5のSV0の曲線) に影響を与える。ただし、2次回帰曲線は海底までの平均音速度を用いて計算されるため、変化の少ない深海部分の影響によって、この誤差は通常0.1m/s以下に押さえられる。この程度の初期値の違いであれば、音速度推定結果にほとんど影響を



第7図 各層ごとの平均電気伝導度の変化  
Fig. 7 Variation of mean conductivity of each layer

与えることはないため、電気伝導度を線形補間によって、おおまかに求めることは、現状の解析において、妥当な手法であると考えられる。

実際に、電気伝導度の補間手法による違いを見るため、別の補間手法による結果との比較を行った。ここでは、1日分のCTD、XCTDの観測結果の平均値を求め、各XBTデータに対して、一律にその平均値を当てはめる手法を試みた。

Table 2に、MYGIと室戸岬沖海底基準点 (MURO) における比較結果を示す。ここで、電気伝導度を線形補間した場合と平均値を用いた場合の推定局位置の差について、音速度推定を行った場合と行わなかった場合のそれぞれについて示した。なお、MYGIに対しては石川・藤田 (2005) による、高さ固定の手法を用いたため、高さ方向の差は示していない。

各下段に示す、音速度推定を行う通常の解析における比較では、1~2mmの違いしかなく、現状精度では、全く問題にならない。

第2表 電気伝導度を線形補間した場合と平均値を用いた場合の推定局位置の差  
table 2 Difference of estimated station position between linear interpolation method and averaging method

Site, Epoch	Sound Speed Correction	Difference		
		Eastward	Northward	Upward
MYGI, APR. 2005	No	-1.6 cm	0.8 cm	-
	Yes	0.0 cm	0.2 cm	-
MURO, SEP. 2006	No	0.7 cm	-0.2 cm	1.9 cm
	Yes	0.0 cm	-0.1 cm	-0.4 cm

各上段の音速度推定を行わず、観測値の2次回帰曲線をそのまま解析に用いた結果を比較しても、1 cm程度の差しか生じていない。これは、上で述べたように、2次回帰曲線は平均音速度から求められるため、電気伝導度の値の違いによる、2次曲線の差が僅かであることを示している。

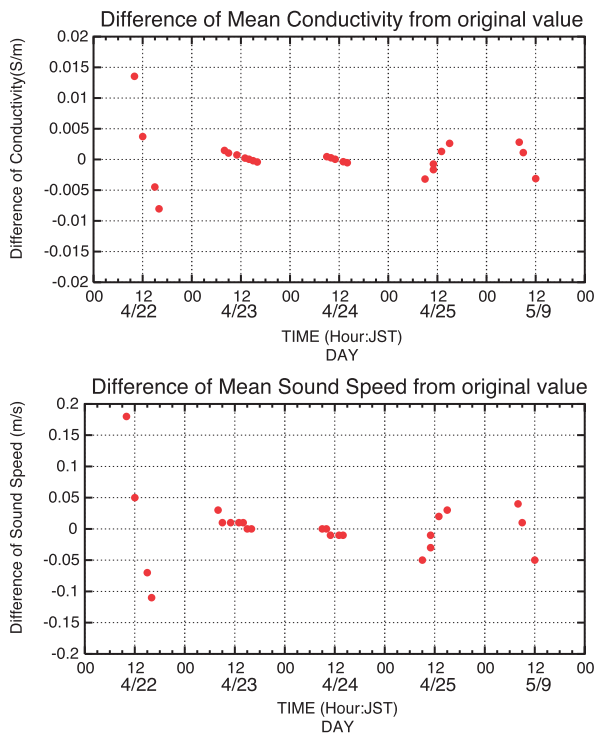
Fig.8 に、水深1600mまでの平均電気伝導度と平均音速度について、通常の線形補間による手法との差を示す。4月22日を除くと、音速度の差は0.05m/s以内に収まっている。4月22日は0.1m/s以上のず

れを見せているものもあるが、この日1日分のデータによる解析結果の差は1 cm以内であり、この程度の音速度の違いは、解析結果に影響を与えないと言える。

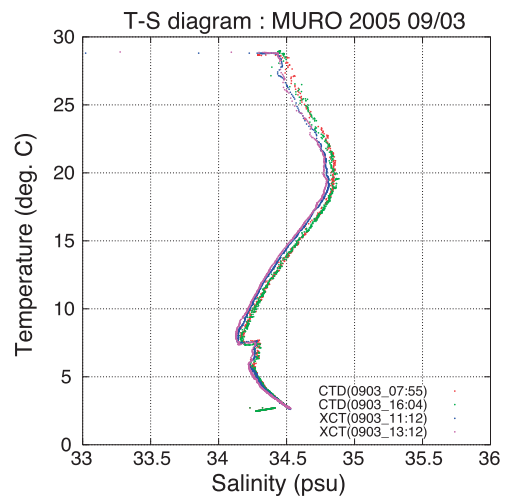
5 まとめ

この結果から、現在の解析手法では、電気伝導度の値に関しては、それほどシビアではなく、CTD観測を行えない測距観測中の音速度については、XBTによる水温観測のみであっても、十分な精度の結果が得られていると考えられる。これは、音速度推定を行うことで、観測値に含まれている誤差の影響を、軽減することができるからである。

さらに、より正確な値を求めたい場合は、TSダイアグラムから塩分値を読み取る方法も考えられる。Fig.9 に2006年9月3日のTSダイアグラムを示す。この図のように水温と塩分の関係が安定してい



第8図 平均電気伝導度と平均音速度の通常の線形補間による手法との差  
Fig. 8 Difference of conductivity and sound speed between linear interpolation method and new averaging method



第9図 MURO, 2006年9月3日のTSダイアグラム  
Fig. 9 TS diagram at MURO in Sep. 3, 2006

ば, XBT観測で求められた水温値から, 塩分を正確に推定することが可能になる. 現状精度では, ここまでの正確さは要求されないものの, 将来のさらなる高精度測位のためには, こうした手法も有効になってくるであろう.

#### 参 考 文 献

- Del Grosso, V.A.: 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, (1974)
- 藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一郎: 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, (2004)
- Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, K. Kawai, Y. Matsumoto, T. Yabuki, A. Asada, and O. L. Colombo: GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application, *Earth Planets and Space*, **58**, No. 3, 265-275, (2006)
- 石川直史, 藤田雅之: 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, (2005)
- 河合晃司, 藤田雅之, 石川直史, 松本良浩, 望月将志: 長基線KGPSの精度評価について, *海洋情報部技報*, **24**, 80-88, (2006)
- Kizu S., H. Yoritaka and H. Hanawa: A New Fall-Rate Equation for Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK.J. *Oceanogr.*, **61** No. 1, 115-121, 591-600, (2005)
- 社泰裕, 石井春雄, 藤田雅之, 加藤弘紀: XCTD-2Fの深度換算式校正の試み, *海洋情報部技報*, **23**, 93-98, (2005)