

## 海底地殻変動観測における海中音速誤差の局位置への影響について

佐藤まりこ，藤田雅之：航法測地室

### Effects of sound velocity profiles in the seafloor geodetic observation

Mariko SATO and Masayuki FUJITA: Geodesy and Geophysics Office

#### 1 はじめに

海上保安庁海洋情報部は，東京大学生産技術研究所と共同で海底の地殻の動きを検出する海底地殻変動システムを開発し，平成 12 年度から観測を行っている（浅田・矢吹，2001）．このシステムは，長基線キネマティック GPS（KGPS）測位と音響測距を組み合わせ，海底に設置した基準局（海底局）の位置を船を介して精密に測定しようとするものであり（第 1 図），これまでに日本海溝陸棚斜面や三宅島周辺海域，東海沖など十数箇所に海底局を設置し，年に数回の観測を実施している．

観測を進める中で，様々な観測技術や解析上の問題点が顕わになり，その都度改良を加え，センチメートルオーダーの精度の観測を目指して日々努力しているところである（例えば，畝見，2004）．

海底地殻変動観測において，海底局の位置決定に大きな誤差を与えられ考えられる主な要因として，海中の音速構造と長基線 KGPS 測位の不安定

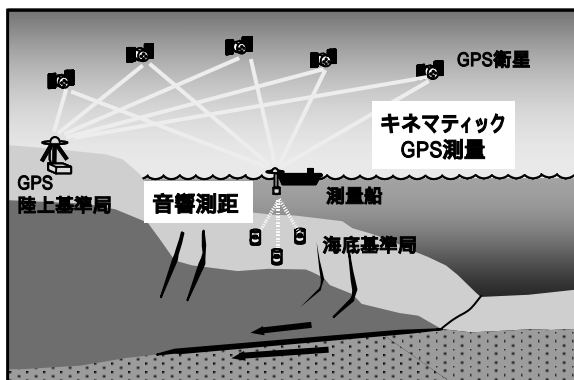
性が挙げられる．このうち，後者の KGPS 測位の不安定性については，藤田・矢吹（2003）等により不安定になる原因や対処方法についての研究が鋭意進められているので，ここではもう一つの誤差要因である海中の音速構造に着目することとする．

海中の音速構造は，音響測距による音波の伝播時間から船上局と海底局との間の距離を求めるのに必要不可欠であり，精密に海底局の位置を決定するためには，高精度に海中の音速構造を把握する必要がある．そのため，観測時には，CTD 観測や XBT 観測を行い，海中の音速構造の把握に努めている．しかしながら，海況は空間的にも時間的にも絶えず変化しており，観測回数や精度の面から見ても海中の音速構造を十分満足する精度で把握することは非常に難しい．

そこで，本稿では，このような正確に把握することができない海中の音速構造について，実際の観測で含まれ得る誤差の量を推定する．そして，それらの音速誤差が海底局の位置決定へ与える影響を取得データを用いた数値的なシミュレーションにより求め，音速構造の誤差に対する対処方法を提示する．

#### 2 海中の音速構造の観測誤差について

海中の音速度を測定する方法には，音速度計により直接音速度を測定する方法や CTD 観測，XCTD 観測，XBT 観測による水温，塩分，深度の値を Wilson（1960）や Del Grosso and Mader（1974）などの音速度計算式を用いて変換する方法がある．我々のデータ解析では，後者の音速度



第 1 図 海底地殻変動観測の概念図．

Fig.1 Schematic image of the seafloor geodetic observation system.

第 1 表 CTD, XCTD, XBT の測定精度 (カタログ値).

Table.1 Measurement accuracy of CTD, XCTD and XBT.

	CTD	XCTD	XBT
Temperature	0.01	0.02	0.2
Conductivity	0.001S/m	0.003S/m	-
Depth (Pressure)	0.15%fs	2%fs	2%fs

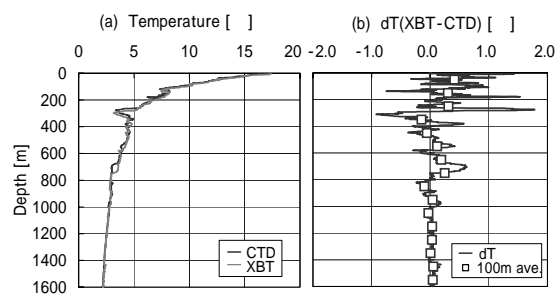
計算式による方法を採用している.

CTD, XCTD, XBT の測定精度 (カタログ値) を第 1 表に示す. 表に示した CTD は, 海底地殻変動観測で通常使用している Sea-Bird 社製の SBE-19 で, XCTD 及び XBT は鶴見精機製のものである. 第 1 表より, 最も精度良く測定できるのは CTD であるので, 精密に海底局の位置決定を行うためにはできるだけ多くの CTD 観測を行うことが望ましい.ところが, 実際の観測では, CTD 観測を行う際に船のギャロスがキネマティック GPS 用のアンテナを横切り, GPS データを途切れさせてしまうため, CTD 観測と KGPS 観測を並行して行うことは好ましくない.そのため, 観測では基本的に一日の観測の前後に CTD 観測を行い, その間の水温の日変化を捉えるため約 1 時間ごとに XBT 観測を行っている.そして, 解析では XBT 観測の水温に CTD 観測の塩分を補って音速度を求めている.しかし, XBT の測定精度は第 1 表を見て明らかのように CTD に比べて一桁劣っている.一方, XCTD は水温の測定精度が XBT に比べてかなり良いのに加えて塩分の値も得ることができ, また, ギャロスを使用する必要もないので, XCTD 観測を行うことができれば良いが, XCTD は XBT に比べてかなり高価であるため, 通常海底地殻変動観測では使用していない.そこで, 実際の観測データによる XBT の精度検証のため, 各海域で一行動に一度 CTD・XBT 比較観測を行っているのでその結果の一例を以下に示す.

第 2 図は 2002 年 7 月 4 日に釜石沖海底基準点

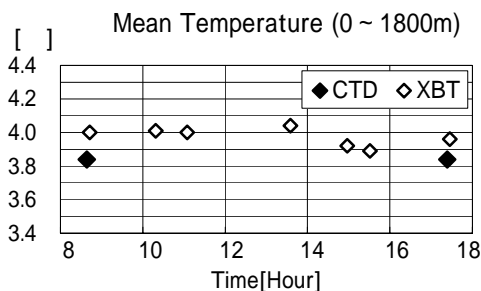
付近で実施した CTD・XBT 比較観測による温度プロファイルと CTD 観測値と XBT 観測値の差である. 観測では, ほぼ同時刻に両装置を投入した. CTD 観測においてはダウンキャストデータを用いた. 第 2 図(a)より, XBT 観測による温度プロファイルはだいたいの形状は捉えられているものの CTD 観測による温度プロファイルとのずれが確認できる. このずれは, プロファイルの形状に CTD と XBT とで同様の凹凸が見られることから, XBT 観測の水温の測定誤差というよりは深度の測定誤差が大きいと思われる.そして, その原因としては, XBT の着水時刻の読み取り誤差や時刻を深度に変換する際の係数の誤差が考えられる. また, XBT 観測による深度の測定値は CTD 観測による深度に比べて深く観測される傾向があり, これは他の比較観測結果でも同様である. このため, 第 2 図(b)の各水深における水温の差を見ると, CTD 観測値に対して XBT 観測値は全体的に温度が高く (すなわち音速が大きく) なっていて, その量は 0~200m の浅いところで約 0.5 (音速度で約 1.0m/s), 1000m 以深では両者の差はほとんど見られない.

次に, 同日に行った全ての CTD 観測, XBT 観測による一日の平均水温 (海面から海底付近までの水温の平均値) の変化を第 3 図に示す. 2 度の CTD・XBT 比較観測で, XBT 観測値は CTD 観測



第 2 図 CTD・XBT 比較観測結果 (2002 年 7 月 4 日, 釜石沖): CTD 観測, XBT 観測による温度プロファイル(a)とその差(b).

Fig.2 Temperature profiles obtained by CTD and XBT measurement (a) and their difference (b).



第 3 図 1 日の平均水温の変化 (2002 年 7 月 4 日, 釜石沖).

Fig.3 Time variation in the mean temperature at Off-Kamaishi during Jul. 4, 2002.

値より平均水温で 0.1 ~ 0.2 高く測定されている。これは、約 0.2 ~ 0.5m/s の音速度に相当する。また、7 回実施した XBT 観測の結果を見ると、一日を通して平均水温はほとんど変化がないことから、この日の海況は一日を通して非常に安定していたと推測できる。

これらより、XBT 観測による水温を用いて音速度を求めた場合、海面から海底付近までの平均水温で 0.1 ~ 0.2，平均音速で 0.2 ~ 0.5m/s 程度の誤差が含まれている可能性があると考えられる。そして、その傾向は、XBT 観測値が CTD 観測値に対して温度が高い(音速が大きい)。しかし、その一方で、XBT 観測は CTD 観測に比べて測定精度は劣るものの朝夕の CTD 観測だけでは知り得ない一日の大まかな海況の変化を捉えており、海況について知るための貴重な客観的資料となり得るということを強調しておく。

以下では、このような音速構造の誤差が海底局の位置決定に与える影響を実際の観測データを使用して数値的に求め、議論する。

### 3 海中音速誤差の局位置への影響評価

#### (1) 使用した観測データと解析方法

使用した観測データは、設置地点が比較的浅い三宅島 A 基準点 (Near-Miyakejima-A, 水深約 350m) と深い釜石沖基準点 (Off-Kamaishi, 水深約 2300m) で取得したデータである(第 2 表)。

第 2 表 本稿で使用した観測データ。

Table.2 Data summary used in this study.

海底基準点名	三宅島西方A	釜石沖
水深	約350m	約2300m
観測時期	2001年4月	2002年7月
観測日数	1日	5日
データ数	1122	4300

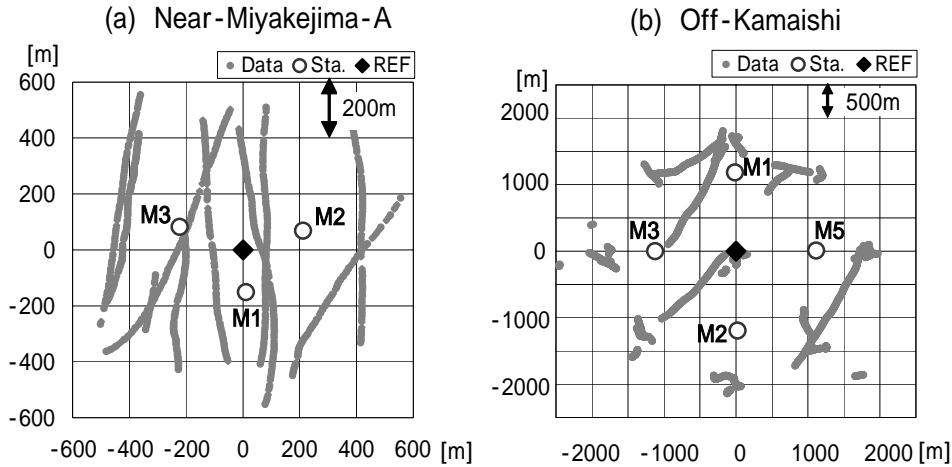


第 4 図 本稿で使用した海底基準点の配置図。

Fig.4 The locations of the seafloor geodetic points used in this study.

それぞれの基準点の位置を第 4 図、海底局とデータ取得位置を第 5 図に示す。両データとも比較的空間的にバランスの取れたデータである。

海底局の局位置推定は海洋情報部開発ソフトウェア SGOBS Ver.2.2 により行った。このソフトウェアは、本号別稿の藤田他 (2004) で紹介されている SGOBS の旧バージョンであり、これについては後で言及する。局位置解析で使用した音響測距解析結果は、東京大学生産技術研究所の浅田教授が作成したソフトウェアによる結果、KGPS 解析結果は、NASA/GSFC で開発されたソフトウェア IT (Colombo, 1998) による結果である。また、初期値として与えた音速度プロファイルは、観測時間に最も近い時刻に測定した XBT 観測の水温の値に、朝夕の CTD 観測で得られた塩分の値を観測時刻に合わせて線形補間した値を補って、Del Grosso の音速度計算式により音速度に変換



第 5 図 海底局と取得データの配置：(a)三宅島西方 A，(b)釜石沖。

Fig.5 Locations of the seafloor geodetic stations and the obtained data at Near-Miyakejima-A (a) and Off Kamaishi (b).

したもので、水深 1m ごとの音速度プロファイルである。局位置解析では、このようにして得られた音速度プロファイルを固定して解析を行った。

(2) 影響の評価方法と誤差モデル

海中の音速構造が海底局の位置決定に与える影響の評価は、CTD 観測と XBT 観測から得られた音速度プロファイルに次の 3 種類の誤差 (第 6 図) を与えて海底局の位置を求め、誤差を与えていないときの海底局の位置と比較することにより行った。

バイアス誤差

音速度プロファイルに深さ方向に一定のバイアス誤差 (+0.5m/s, +1.0m/s) を与える。

深さに対して線形の誤差

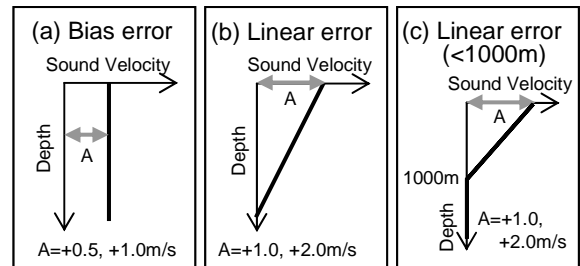
音速度プロファイルに深さ方向の線形誤差 (海面で +1.0m/s, +2.0m/s, 海底で 0m/s となるような誤差) を与える。

1000m 以浅の深さに対して線形の誤差

音速度プロファイルの 1000m/s 以浅に対して深さ方向の線形誤差 (海面で +1.0m/s, +2.0m/s, 水深 1000m で 0m/s となるような誤差) を与える。

(3) 局位置推定結果

局位置推定結果を第 7 図に示す。図は、誤差を



第 6 図 音速構造に与えた誤差モデル：(a)バイアス誤差，(b)線形誤差，(c)線形誤差(<1000m)。

Fig.6 Error models given to the sound velocity structures: (a) Bias error, (b) Linear error, (c) Linear error (<1000m).

与えていない時の位置を基準として、それぞれの誤差を与えた時に求められた位置をプロットしており、白抜き ( ) は各海底局の推定位置、黒丸 ( ) は 3 局又は 4 局の海底局の中心位置 (座標平均値) を示す。音速の誤差が海底局の推定位置へ及ぼす影響について図から分かったことを以下に記す。

全ての誤差モデルにおいて、音速の誤差は鉛直方向の位置決定に顕著な影響を与える。

音速構造に 0.5m/s のバイアス誤差があるとすると、浅い三宅島西方 A で -0.2m, 深い釜石沖では -1.0m の高さの誤差が生じる。

音速の誤差は、鉛直方向だけでなく各海底局の水平位置にも有意な推定誤差を与える。

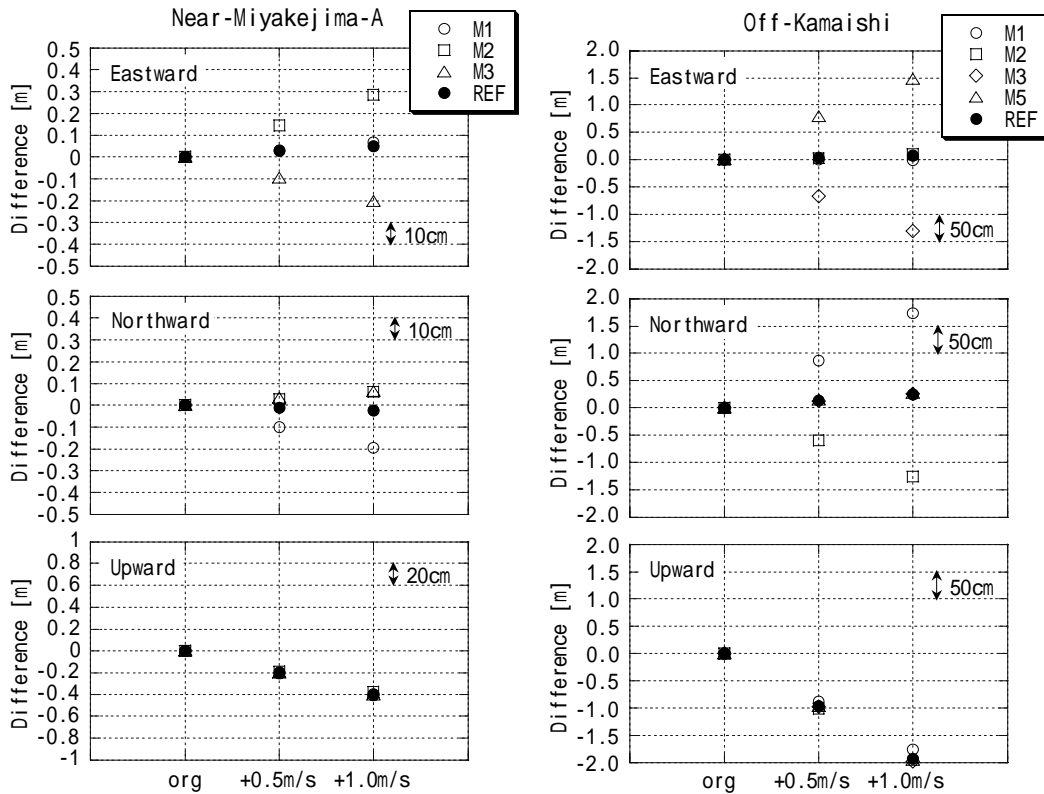
海底局の水平位置に与える誤差の量は、鉛直方向の誤差に比べて小さいものの三宅島西方 A で 0.2m、釜石沖で 0.5 ~ 1.0m である (0.5m/s のバイアス誤差の場合)。ただし、その量は後に示すようにデータ取得配置の状況により異なる。

各海底局の推定位置は、東西方向又は南北方向のどちらかに音速誤差の影響を受けやすく、それと直交する方向へはほとんど影響を受けない。

これは、各海底局からデータの配置を見た場合、必ず東西又は南北のどちらかに偏っているため、音速誤差がその偏った方向の位置決定に影響を及ぼしているということを示す。例えば、三宅島西方 A の M1 局は、第 5 図(a)より海底局の中心

位置に対して南側に位置しており、この海底局から見たデータ配置は、東西にはバランスが良いが、南北は北側にデータが多く、南側にデータが少ない。この時、音速構造にバイアス誤差が 0.5m/s あるとすると M1 局の推定位置は、データのバランスが良い東西方向は誤差がない時と比べてほとんど変化していないが、データが偏っている南北方向は約 10cm 南にずれている。このように、各海底局から見たデータ配置は必ず東西又は南北に偏っているため、その方向に音速構造の誤差の影響を受けてしまうことは避けられない。そして、水平位置に与える誤差の量は、データ配置が偏っているほど大きくなる。

(a) Bias Error



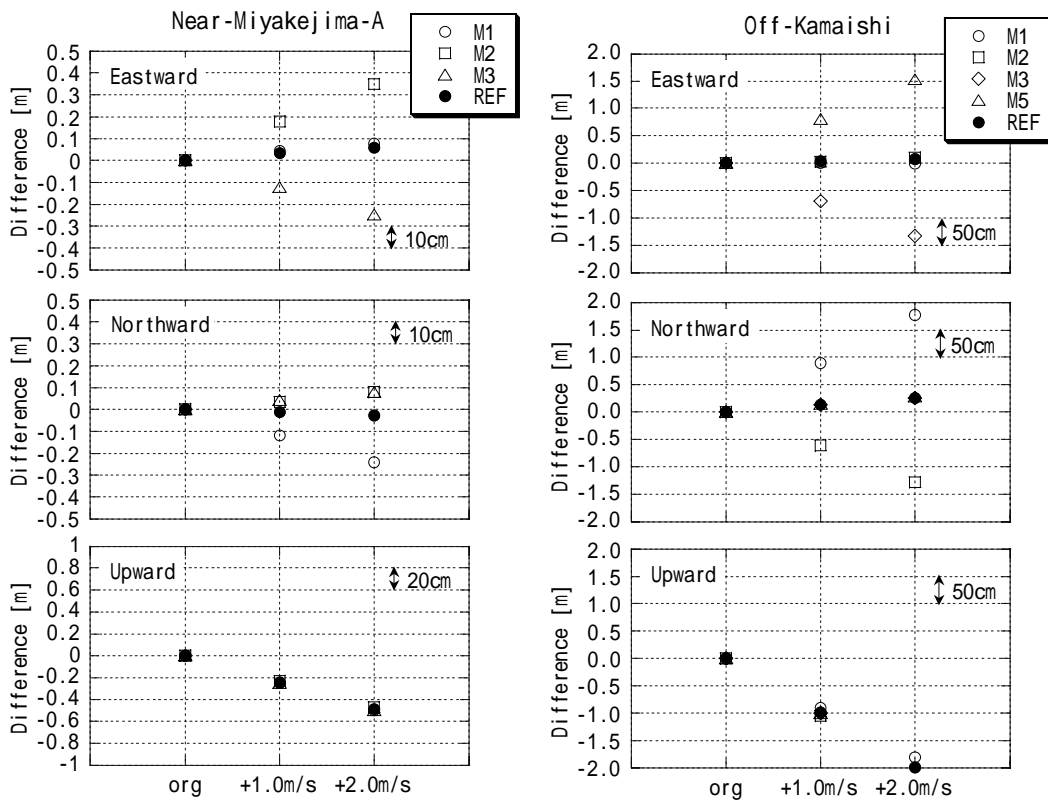
第 7 図 局位置推定結果。誤差を与えていない時の推定位置を基準として誤差を与えた時の推定位置をプロットしている (左: 三宅島西方 A, 右: 釜石沖): (a)バイアス誤差, (b)線形誤差, (c)線形誤差 (<1000m)。

○, □, △, ◇, ● : 各海底局の位置推定結果      ● : 3局又は4局の海底局の平均位置(REF)

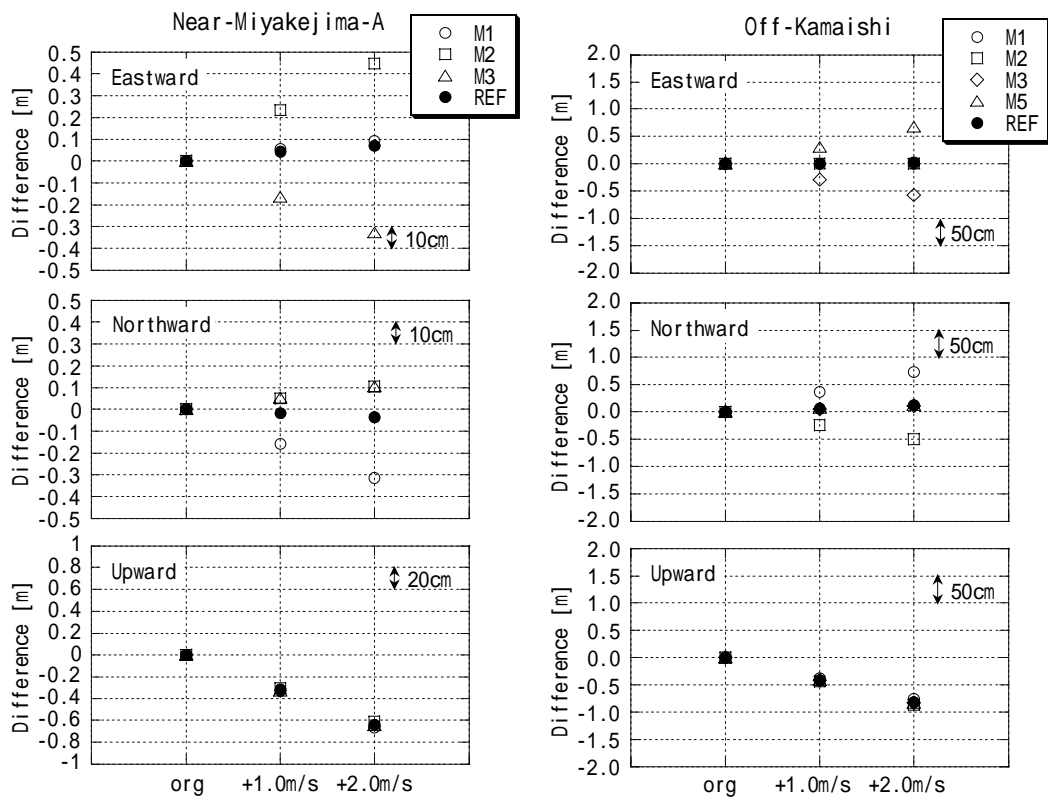
Fig.7 The differences between the original positions and the positions estimated using sound velocity structures including the given errors at Near-Miyakejima-A (Left) and Off-Kamaishi (Right): (a) bias error; (b) Linear error; (c) Linear error (<1000m).

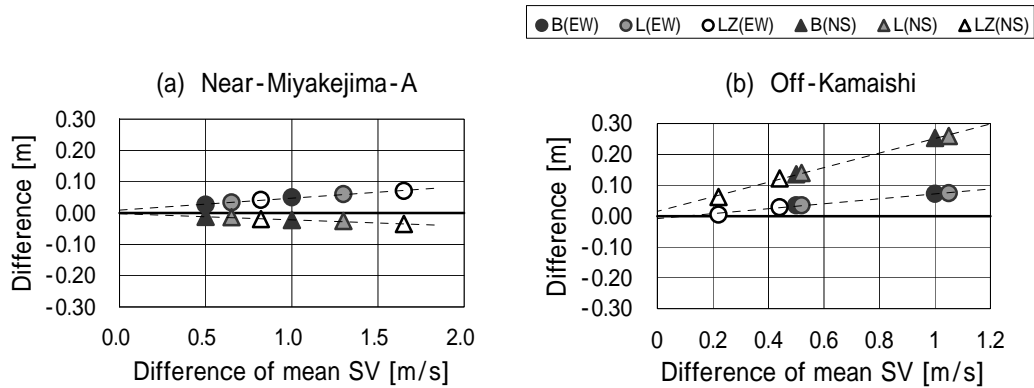
○, □, △, ◇, ● : the difference of each seafloor station      ● : the difference of the mean position (REF)

(b) Linear Error



(c) Linear Error (<1000m)





第 8 図 平均音速の変化量と推定された平均位置との関係：(a)三宅島西方 A，(b)釜石沖．

B：バイアス誤差，L：線形誤差，LZ：線形誤差 (<1000m)．

Fig.8 The dependency of the deviation of the estimated position of REF on the mean sound velocity at Near-Miyakejima-A (a) and Off-Kamaishi (b).

B: Bias error, L: Linear error, LZ: Linear error (<1000m).

取得データの空間的バランスが良い 3 局又は 4 局の海底局の中心位置では，東西，南北ともに音速構造の誤差による推定位置の変化が非常に小さい．

海底局の中心位置への音速構造の誤差の影響は，三宅島西方 A で数 cm，水深約 2300m の釜石沖でも数 cm から 10cm 程度である．これは，中心位置に対する取得データの空間的バランスが良いため，各海底局の音速構造の誤差による影響が相殺され，中心位置にほとんど影響していないということを示している．

以上から，海中の音速構造の誤差は各海底局の鉛直位置だけでなく，水平位置にも数 10cm の誤差を与えるが，観測データを 3 局又は 4 局の海底局の中心点に対して空間的にバランス良く取得することにより，海底局の平均位置への影響をかなり小さくすることができることが分かった．

また，一方で，与えた 3 種類の誤差モデルによる影響は全て同様の傾向を示しており，誤差の形状による違いは見られない．そこで，3 種類の誤差を与えたことによる平均音速の変化量と推定された海底局の中心位置との関係を第 8 図に示す．

は東西成分， は南北成分を示し，凡例中の B，

L，LZ はそれぞれバイアス誤差，線形誤差，1000m 以浅の線形誤差を示している．図より推定された海底局の中心位置の変化は，平均音速の変化と比例の関係にあることが分かる．これは，海底局の推定位置は音速誤差プロファイルの形状にはほとんど関係なく，平均音速に依存しているということを示唆している．

したがって，局位置解析においては，本稿で用いたような水深 1m ごとの音速度プロファイルに代えて，層の数を減らして平均音速を用いた音速度プロファイルを用いることが可能だと思われ，藤田他(2004)ではこの結果に基づき，ソフトウェア SGOBS を改良し，計算時間を大幅に短縮した．

#### 4 まとめ

本稿では，海底地殻変動観測において海中の音速構造に含まれていると考えられる観測誤差の量を推定し，それらの誤差が海底局の位置決定に及ぼす影響を数値的に求めた．

その結果，XBT による観測による水温と朝夕の CTD 観測による塩分から求めた音速には，平均音

速にして 0.2~0.5m/s の誤差が含まれていることが示唆され、その音速誤差は海底局の水平位置にも有意な誤差を与えることが分かった。しかし、観測データを3局又は4局の海底局の中心点に対してバランス良く取得することにより、その中心点における海中の音速誤差の水平位置への影響を数 cm 程度に小さくすることができる。そのため、海底地殻変動観測の成果としては、3局又は4局の中心位置を採用することが望ましい。十分なデータ量がある場合には、空間的に均一になるようにデータを選別して解析することも有効な方法であろう。

また、海底局の推定位置は音速度プロファイルの形状よりも音速度の平均値に依存することが分かった。これにより、層の数を減らした局位置解析が可能となり、計算時間が大幅に短縮された。

ただし、より高精度の観測を目指すためには、やはりできるだけ精度の良い観測を行うことが必要であることは言うまでもない。最近では、水深2000mまで対応可能な XCTD が登場しているので、高価であるという問題が解決すれば、XBT に代えて XCTD を用いることは海況の把握に大いに役立つと思われる。また、音速構造の空間的な変化を捉えるため、同時刻に複数の場所で CTD 観測又は XBT 観測を行うことも音速構造の実態を把握する上で非常に有効だと考える。

今後、本成果を実際の観測で活かして、より高精度な観測を目指していきたい。

最後に、本稿作成にあたり、データを取得して下さった測量船「明洋」、「海洋」の乗組員の方々、航法測地室の方々、東京大学生産技術研究所浅田昭氏、望月将志氏、吉田善吾氏に深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

浅田昭, 矢吹哲一朗: 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, (2001).

Colombo, O. L. : Long-Distance Kinematic GPS,

in "GPS for Geodesy 2nd Edition", edited by P. J. E. Teunissen and A. Kleusberg, Springer, 537-568, (1998).

Del Grosso, V. A. and Mader, C. W. : Speed of Sound in Pure Water, The Journal of the Acoustic Society of America, **2**, No.4, 1442-1446, (1972).

藤田雅之, 矢吹哲一朗: 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, (2003).

藤田雅之, 佐藤まりこ, 矢吹哲一朗: 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**, 50-56, (2004).

畝見潤一郎: 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, (2004).

Wilson, Wayne D. : Equation for the Speed of Sound in Sea Water, The Journal of the Acoustic Society of America, **32**, No.10, 1357 (1960).