

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 †

石川直史，藤田雅之

Inverse method and precision improvement for seafloor positioning

Tadashi ISHIKAWA and Masayuki FUJITA

Abstract

For the precise GPS/Acoustic seafloor positioning, we are developing an analysis software, which combines a kinematic GPS result and an observed acoustic travel time to get a precise position of an array of seafloor stations. We summarize the method of this analysis, especially focusing on estimation of underwater sound velocity structure. In this analysis, vertical coordinates of seafloor stations and the sound velocity are not completely independent. Therefore vertical coordinates are greatly influenced by the error of sound velocity and in consequence their precision is more deteriorated than that of horizontal coordinates. So we present a new analysis strategy for precision improvement. In this strategy the vertical coordinates are no longer estimated values, but are fixed at known values. This strategy improves the estimation of sound velocity. As a result, the precision of estimated coordinates of seafloor stations got improved for the horizontal components.

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）及び海底基準点の展開を行っている．現在まで，主に日本海溝及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（海上保安庁海洋情報部・東京大学生産技術研究所，2002；Mochizuki et. al., 2003）．また，これらの観測を進めていく中で現れる，様々な技術上・運用上の問題点を改善することにより，センチメートルレベルの観測精度を目指している

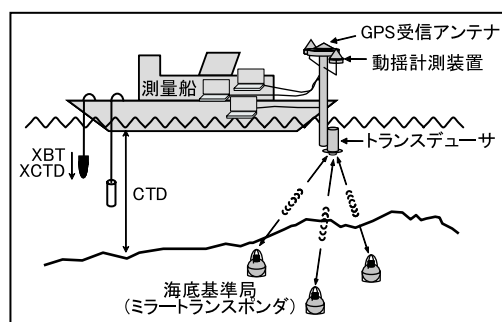


Fig.1 : Schematic figure of the observation system.

（畝見，2004）．

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

† Received
航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

のである。

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。本稿ではこの局位置解析について、現在用いている手法と精度向上のために行っている試みについて報告する。

2. 解析手法

(1) 概要

本観測におけるデータ解析は、大きく三つのプロセスに分けられる。一つ目は船の位置を求めるキネマティック GPS (KGPS) 解析、二つ目は船と海底局間の音波の往復走時を求める音響測距解析、そして三つ目が前二者の結果を結合して海底局位置を求める局位置解析である。全体の解析の流れを Fig.2 に示す。

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。最終的に行う局位置解析には藤田他 (2004) によるソフトウェア SGOBS を用いている。

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、及び CTD, XCTD, XBT から得られた海中の音速度構造プロファイルである。

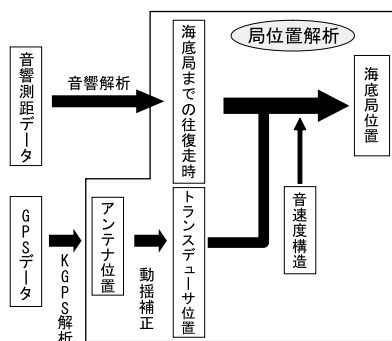


Fig.2: Flow chart of analysis.

まず GPS アンテナ位置と動揺計測パラメータから、観測支柱のもう一端に取り付けてあるトランスデューサの位置を求める。このトランスデューサ位置と音波走時から、音速度構造を介して、幾何学的原理に基づき海底局位置を決定する。その際、ベイジアン最小二乗法に基づくインバージョン法を適用している (松浦, 1994)。

(2) 音速度構造の推定

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。通常の観測では、1日の測距観測の前後にCTD観測を行い、測距観測中には約1時間ごとにXBT、又はXCTDによる観測を行っているが、これらの観測機器の精度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。さらに、観測値から音速度を求める経験式 (例えば、Del Grosso, 1974; Wilson, 1962; Chen and Milleo, 1977) の選択によっても有意な差が生じてしまうことになる。以上のことから、観測値に基づく音速度構造のみから数 cm レベルの高精度測位を行うことは極めて困難であると言える。

しかしながら、音波走時は距離と速度の関数なので、走時データは距離の情報だけではなく伝播経路の音速度構造の情報も含んでいる。そこでSGOBSでは、観測値から得られた音速度構造の値をそのまま使うのではなく、平均音速度の時間変化係数を推定パラメータとしている。つまり、局位置解に加え、音速度構造も解として解くことによって、誤差の軽減を試みている。これはGPS測位で行われている大気遅延量の推定などと同様の考えである。

以上に基づく具体的なパラメータ推定手順は以下のとおりである。我々の海底基準点では、通常1点につき4つの海底基準局を東西南北に配置し、観測を行っているが、まず、これら複数の海底局について、同一の音速度構造で局位置解を求める。次にその残差データを用いて、一定の時間ウィンドウごとに音速度の時間変化を求める。こ

のサイクルを局位置解が収束するまで繰り返し、最終的な局位置解を決定している(藤田他, 2004)。

音速度構造の推定手法として、平均音速度の時間変化を以下のように2次式で表し、その係数をモデルパラメータとしている。

$$V(t) = V(t_0) + a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (1)$$

ここで t_0 は基準時刻、 $V(t_0)$ は t_0 における音速度初期値である。

しかしながら、現実の音速度変化は複雑であり、これをある特定の関数にあてはめて補正することには限界がある。そこで、現行バージョンでは以下のような手順に従って音速度補正を行っている。

- ・まず、観測から得られた音速度構造プロファイルを初期値として、1日単位の2次回帰式の各補正係数について補正值を求める。
- ・これにより求められた音速度構造を改めて初期値として、各測線単位の短い時間ウィンドウ内で2次回帰する。

この手法の考え方は、最初に1日単位でのバイアス的な補正を行った後、1日の変化について2次式で補正しきれない部分を測線単位の推定で補おうとするものである。なお、ここで入力値として与える音速度プロファイルはCTD, XCTD, 及びXBTの観測値からDel Grosso(1974)の式で計算したものを基に、1日単位の時間変化を2次式で回帰したものを用いる。

3. データサブセットによる再現性の評価

海底基準点の測位精度を評価するため、藤田・佐藤(2004)は、宮城県沖海底基準点における1

回のキャンペーン観測で取得した全データをいくつか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、同じく宮城県沖のデータを用いた精度評価結果を示し、これについて詳しく考察する。

(1) 宮城県沖海底基準点の結果

Table 1に、宮城県沖海底基準点において2004年4月24日～5月7日の期間に行った、8日間のキャンペーン観測で得られたデータ数を、Fig.3に、それぞれ1日ごとのサブセット解を比較した結果を示す。

図のプロットは、それぞれ東西・南北・鉛直成分について、4台の海底局の平均位置を全日解(基

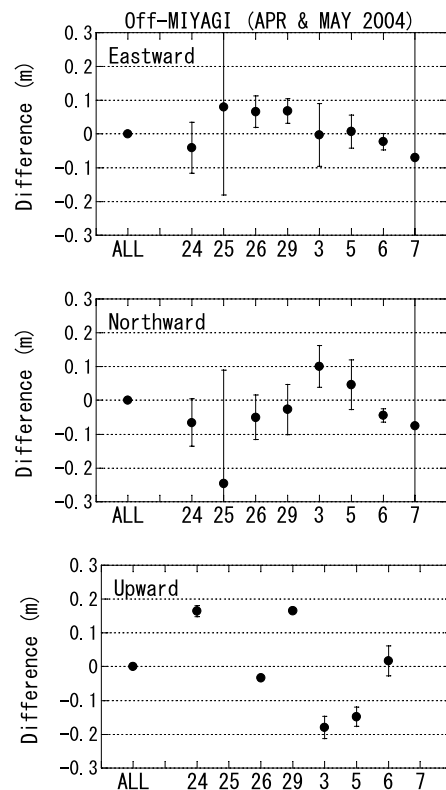


Fig.3: Repeatability of seafloor positioning at Off-Miyagi reference point at the epoch Apr & May, 2004.

Table 1: Number of data for Off-Miyagi reference point at the epoch Apr & May, 2004.

日付	4/24	4/25	4/26	4/29	5/3	5/5	5/6	5/7
測線数	12	7	9	14	10	12	14	9
データ数	1241	693	935	1456	1315	1248	1456	936

準位置)からの差としてプロットしている。エラーバーは各海底局の基準位置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。

Fig.3 から、1日ごとのサブセット解について、水平成分では、全観測日でほぼ 10cm 以内、エラーバーの大きい 4月 25日と 5月 7日を除けばほぼ 5cm 以内の再現性が得られている。一方、鉛直成分では、20cm 以上ものばらつきがあり、鉛直成分の位置決定精度が水平成分に比べて低いことがわかる。こうした傾向はこのキャンペーンエポックに限らず他のエポックでもみられ、水平成分に比べて鉛直成分のばらつきが大きい、つまり位置決定精度が低いということが一般的に言える。

(2) 考察

この測位技術では、音速度構造の誤差が海底局位置決定の大きな誤差要因となっている。佐藤・藤田 (2004) は、数値実験により、水平方向に関しては、音速度構造に誤差があったとしても、データが各方位に対称に分布していれば、ある程度は相殺されるが、鉛直方向に関してはデータを上下対称に取ることは不可能であるため、音速度誤差の影響が局位置解に顕著に現れることを示した。

本解析手法では、音速度構造誤差を小さくするために音速度を推定パラメータとしているが、この推定の際、取得したデータの中に局位置と音速度構造を要求精度内で分離できるだけの情報が含まれているかどうか、が問題となる。この観点からみると、我々の観測データは、上述のように鉛直方向に対してデータ配置の偏りがあるため、局位置解の鉛直成分と音速度の補正パラメータの解が分離しにくい傾向がある。Fig.3 にみられる鉛直成分の決定精度の低下は、これらの理由によるものと考えられる。

次に、8日間の測位解のうち、Fig.3 において水平成分のエラーバーが最も大きい 5月 7日の結果について、詳しく検討する。同日の鉛直成分の全

日解との差は、約 -1.2m であり、この図ではスケールアウトしている。

この原因を考えるため、Fig.4 に 5月 7日の測線分布を、Fig.5 に、4台の海底局位置 (N, S, W, E) 及び、それら 4局の平均位置 (REF) のそれぞれについて、全日解で求められた位置との差を示す。

Fig.5 では、4局の平均位置 (REF) の水平成分の全日解との差は、10cm 程度に収まっている。

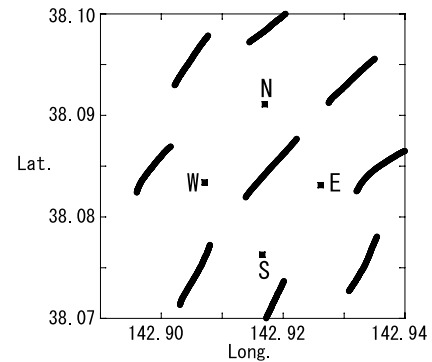


Fig.4 : Observation lines and distribution of the seafloor stations.

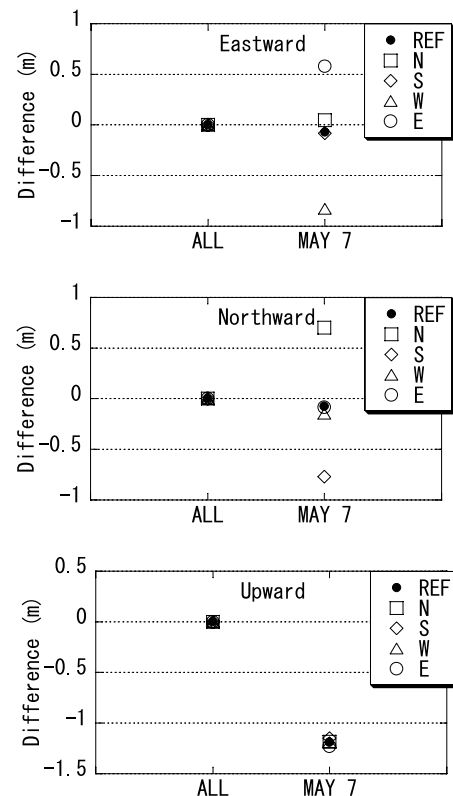


Fig.5 : Difference of positioning result between all day data and May 7 data.

一方、各海底局別にみると、全日解に比べ大きな差が現れていることがわかる。

東西に配置した海底局については、南北成分は10cm以内の差であるものの、東西成分は50cm ~ 1m 近くの大きな差を持っており、東の局 (E) は東へ、西の局 (W) は西へ大きくずれてしまっている。南北に配置した海底局については、これとは逆の結果で、北の局 (N) は北へ、南の局 (S) は南へ大きくずれている。また、鉛直成分については4局ともに、全日解よりも約1.2m 深くずれている。

このように各海底局が大きなずれをみせている原因として、5月7日の推定音速度に大きな誤差が含まれていることが考えられる。このような誤差の影響は、データの配置に大きく依存している。

例えば北の局 (N) については、Fig.4 から、東西方向にはデータが対称に分布しているため誤差の影響が相殺されるものの、南北方向に関しては、南側にデータが偏っているため、誤差の影響を相殺しきれず、解がずれてしまっていると考えられる。他の局についても同様で、データ分布が偏っている方向に解がずれている。特に、データを対称に取ることが不可能な鉛直成分に、この影響が顕著に現れ、4局全てが大きなずれをみせている。

また、4局の平均位置 (REF) が、東西・南北ともに全日解とのずれが少なく留まり、相対的に良い結果を与えている理由は、Fig.4 にみられるデータ分布が、4局の中心に対してほぼ対称にバランス良く配置されていることによると考えられる。

このように Fig.5 における、各海底局の大きなずれは、推定音速度が真値よりも大きな値になっていると考えることによって説明が可能になる。これは佐藤・藤田 (2004) の数値実験の結果を実例で示すものである。

さらに、5月7日の解析で推定された音速度パラメータについて、具体的にみしてみる。Fig.6 は、同日の推定された音速度の時間的な変化曲線を示

している。図中、SV0 は初期値、SV1 は1日補正值、SV2 は測線ごとの補正值である。この図から、SV0 から SV1 の間に、約0.4m/s もの大きなバイアスの補正があり、最終的な結果である SV2 は SV1 に近い値となっていることがわかる。

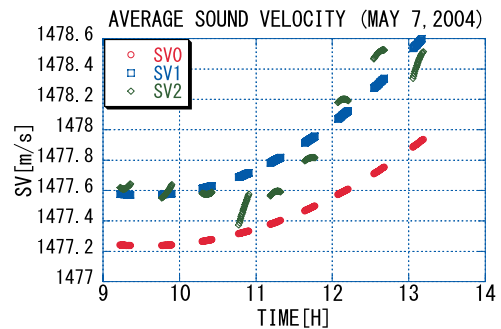


Fig.6 : Temporal variation of sound velocity on 7 May, 2004.

この結果だけでは、SV0 と SV1 のどちらが真値に近いのかは判断できないが、上述の測位結果比較を踏まえると、初期値である SV0 の方がより真値に近く、音速度の推定の際、SV1 が大きくずれてしまったと考えるのが妥当である。

この例の場合、解析後の走時残差を小さくするため、音速度を速くすることにより、無理矢理誤った値に収束させてしまい、その結果、海底局の推定位置が真値よりも、大幅に深くなってしまったものと考えられる。水平成分は鉛直成分に比べ、平均位置のずれは小さいものの、各局間のばらつき (Fig.3 におけるエラーバー) は大きくなる。また水平方向にもある程度のデータ分布の偏りがあるため、音速度の誤差が大きくなれば、水平成分も精度低下を免れない。

4. 海底局の高さを固定することによる精度向上

前節では、鉛直成分と音速度とのパラメータ分離が悪いことにより、相対的に鉛直成分の測位精度が悪くなり、極端な場合には、本来精度向上のために行っているはずの音速度パラメータの推定が、逆に精度低下をも引き起こしてしまう可能性

があることが示唆された．そこで，この問題を解消するための新しい解析ストラテジーを提示する．

(1) 局位置の鉛直成分を固定する解析手法

新たな解析ストラテジーとして，局位置の鉛直成分を既知として固定する方法について検討する．既に述べたように，局位置解の鉛直成分と音速度パラメータの分離が悪いため，鉛直成分の値を固定することにより，音速度をより正しく推定することができると思われる．

Fig.7 に，Fig.3 と同じ宮城県沖海底基準点のデータについて，鉛直成分を固定した場合の局位置解析結果の水平成分を示す．

ここで固定した鉛直成分の値は，これまでの2年間に行ってきた宮城県沖の解析結果から，最も妥当だと思われる値を用いた．これについては後で述べる．

Fig.3 と比べてみると，ほぼ全ての日についてエラーバーが大きく減少している．すなわち，4つの海底局間の相対位置のばらつきが小さくなっていることがわかる．また，平均位置の再現性についても，明らかな改善がみられる．特に5月7日の結果については，双方に大きく改善されていることがわかる．

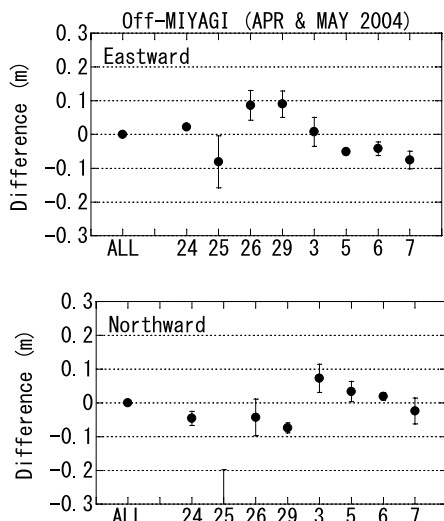


Fig.7 : Repeatability of seafloor positioning at Off-Miyagi reference point at the epoch Apr & May, 2004 using height constraint.

既にみたように，相対位置のばらつきが大きいことは音速度の誤差が大きいことを示唆しており，鉛直成分を固定する手法によりエラーバーが減少したことは，この手法の音速度推定の誤差を軽減する手段としての有効性を示している．

ただし，4月25日の結果は，この手法による改善がみられない．これについては，データ数の不足，データ配置の不均質，音速度の空間的な不均質など別の原因を考えなければならない．

最後に，鉛直成分を固定した場合の5月7日の音速度の推定結果を Fig.8 に示す．Fig.6 とは明らかに異なり，音速度の推定結果が観測値に近く求められている．このことは，前節で述べた判断を裏付けるものである．

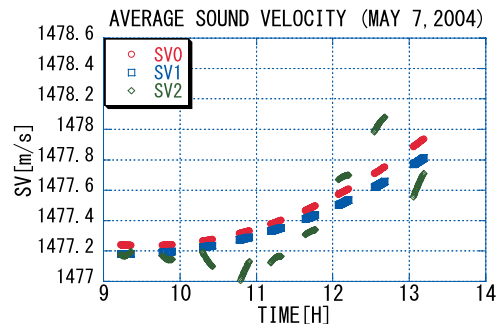


Fig.8 : Temporal variation of sound velocity on 7 May, 2004 using height constraint.

(2) 鉛直成分の固定値の誤差の影響

今回用いた局位置の鉛直成分の固定値は，宮城県沖における過去の解析結果から，最も妥当と判断した2002年5月の観測エポックの推定値である．しかしながら，この値にも，ある程度の誤差があると考えなければならない．

そこで，固定する鉛直成分の誤差の影響をみるために，固定値を変化させ，水平線分の推定結果への影響について調べた．Fig.9 は，固定値を±20cmまで変化させた場合の全日解水平成分を比較したものである．図から，この範囲で見ると，平均位置にはほとんど影響がないことがわかる．

この結果から，データ分布の対称性には注意する必要があるものの，現状の精度で平均位置を議

論する限り，海底局位置の鉛直成分は 10cm 程度の精度で与えれば十分であると考えられる．また実際に考える定常的な海底の地殻変動による僅かな高さの変化も，水平成分の結果にはほとんど影響はないと言える．ただし，この手法の適用は，地震や火山活動に伴う変動等，大きな鉛直方向の変位が予測される場合には十分注意する必要がある．

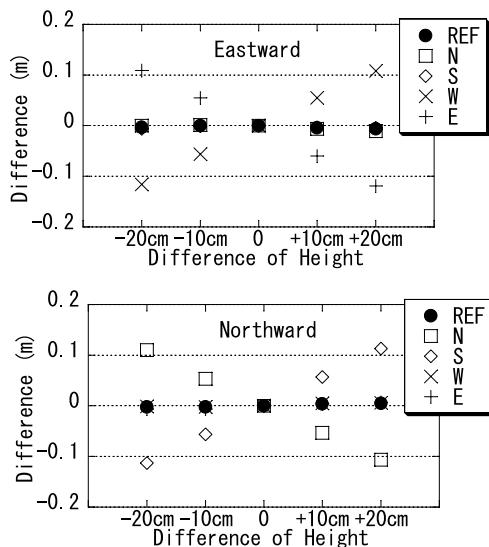


Fig.9 : Comparison of positioning result at difference of height values.

5. まとめ

海底地殻変動観測における海底局位置の決定精度について検証した結果，鉛直方向の決定精度は水平方向に比べて低い傾向にあることがわかった．その原因として，データ分布の偏りから，局位置解の鉛直成分は音速度と分離しにくく，音速度の誤差の影響を受けやすいことが考えられる．

現在，我々が用いている解析手法では，音速度を推定パラメータとして補正し，局位置推定誤差の軽減に努めているものの，十分には補正しきれていない場合がある．また，データに含まれる何らかの別の要因を音速度構造に押しつけて，音速度を誤って推定してしまう可能性もある．これらの要因が局位置解の鉛直成分の推定に影響を与え，精度低下を引き起こしていると考えられる．

水平成分に関しては，データ分布をバランス良く対称とすることで，音速度誤差の影響をある程度小さくすることができるものの，誤差が大きくなった場合には精度低下は免れない．

そこで，新たな解析ストラテジーとして，局位置の鉛直成分を既知の値に固定する方法を示した．2004年4月～5月に宮城県沖海底基準点で取得した8日間のデータにこの手法を適用したところ，従来の手法に比べサブセット解のばらつき，エラーバーともに小さくなり，精度が向上する結果が得られた．これは，局位置の鉛直成分を正しい値に固定することにより，音速度の推定精度が向上し，その結果，局位置の水平成分の決定精度も向上したと考えられる．

本研究で示した手法は，海底地殻変動観測における当面の目標である水平変動の把握のために大変有効な方法である．しかしながら，地震や火山活動のみならず定常変動においても，鉛直成分の変動もまた非常に重要な情報であり，将来的には，海底局の位置を3次的に精度良く決定することも目標としたい．

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，及び矢吹哲一郎，富山新一，片山真人，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を決定するための解析ソフトウェア SGOBS では，音速度の誤差の影響を軽減するため，局位置のほかに音速度のパラメータを推定することにより位置決定精度の向上を図っている．しかしながらこの方法では，局位置解の鉛直成分と音速度が分離しにくいため，鉛直成分の決定精度が水平成分に比べて悪くなる傾向にある．さらに，場合によっては大

きく音速度の推定を誤り，水平成分の決定精度を逆に劣化させる場合がある．そこで新たな解析ストラテジーとして，鉛直成分を既知として固定する手法を示した．これを宮城県沖海底基準点の2004年4月～5月のキャンペーンデータに適用することにより，手法の有効性について検証した．その結果，鉛直成分を固定することによって，音速度がより正確に補正され，水平位置の決定精度が向上することが示された．

参 考 文 献

- 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.
- Chen, C. T. and F. J. Milleo (1977) : Speed of Sound in seawater at height pressures, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62, No.5, 1129-1135.
- Colombo, O. L. (1998) : Long-Distance Kinematic GPS, in “*GPS for Geodesy 2nd edition*”, Springer, 537-568.
- 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.
- 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.
- 海上保安庁海洋情報部，東京大学生産技術研究所（2002）：海上保安庁海洋情報部の海底地殻変動観測，地震予知連絡会会報，68，557-565.
- 松浦充宏（1994）：インバージョン解析法，「現代測地学」日本測地学会，477-482.
- 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.
- 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.
- Wilson, W. D. (1962) : Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34, No.6, 866.
- 矢吹哲一郎（2002）：海底地殻変動観測を目指した音響技術開発，水路部研究報告，38，47-58.