

研究ノート

海底地殻変動観測における海中音速測定頻度の局位置への影響について[†]

齋藤宏彰*, 佐藤まりこ*

Effect of the frequency of undersea sound velocity measurement on
seafloor positioning in seafloor geodetic observation[†]

Hiroaki SAITO*, Mariko SATO*

Abstract

As part of consideration of improving the observation efficiency, we have evaluated the effect of reducing the frequency of undersea sound velocity measurement on the horizontal components of the position of a seafloor reference point. As a result, it was suggested that balanced distribution of acoustic measurement points would enable us to reduce the present frequency of undersea sound velocity measurement to about one-fourth, keeping the present accuracy of seafloor positioning. After this, if the distribution of acoustic measurement points is more balanced by sailing-observation that can control observation lines, the undersea sound velocity measurement would be more efficient.

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、キネマティック GPS (KGPS) と音響測距の組み合わせ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。我々の海底基準点は、これまで主に日本海溝及び南海トラフ沿い陸側に十数点設置しており、測量船による観測を繰り返し実施している (Mochizuki et al., 2003; 藤田, 2006)。

本観測においては、新たな観測体制と観測機器の導入により観測回数・観測精度の向上が図られている。2007 年度には、一日あたりの観測時間を従来の 8 時間から 16 時間へ拡大することで従

来よりも多くの観測データの取得が可能となった (佐藤・他, 2008 a)。さらに 2008 年 3 月には測量船「明洋」の船底に音響トランスデューサを常設したことにより航走観測が可能となり、従来の支柱を使用した漂流観測と比較し音響測距データの空間的なバランスの改善、一海域に要する観測時間の大幅な短縮が見込まれている (佐藤・他, 2008 b)。海底地殻変動観測では海況の良し悪しによって観測できない場合があるため、安定したデータ取得のためには、以上のようなより少ない時間で効率良く観測を行うための観測システムの改良やインフラ整備等が重要となる。

そこで今回は観測の効率化における検討の一環として、海中音速測定の頻度を減らすことが海底

[†]Received December 12, 2008; Accepted February 6, 2009

* 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

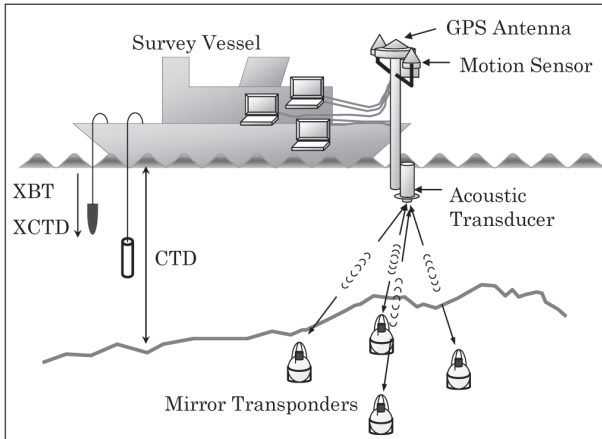


Fig. 1 Schematic picture of the GPS/Acoustic seafloor geodetic observation system.

基準局の位置（以下、局位置）の決定ほどの程度影響を与えるかを定量的に考察し、どの程度の頻度までであれば現行の観測精度（水平方向、約2～3 cm）に影響を与えることなく海中音速測定回数を減らすことができるかについて検討する。

2 海底地殻変動観測の概要と海中音速測定

海底地殻変動観測の観測システムの概念図を Fig. 1 に示す。ここで今回の考察においては2007年度のデータを使用するため、Fig. 1には支柱を使用した観測システムを示している。

Fig. 1 に示す観測システムは、海底に設置した3～4台の音響送受波器（海底基準局）と測量船の船尾に取り付けた約8 mの支柱及びその上下にそれぞれ取り付けたGPSアンテナ及び音響トランスデューサ、さらに支柱の方位と傾きを測定するための動揺計測装置から成る（畝見, 2004）。海底地殻変動観測は海中の音響測距と同時に長基線KGPS測位及び支柱の動揺計測を行い、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というものであり（例えば、藤田, 2006）、音響測距を海底基準点に対して空間的にバランス良く行うことにより、局位置の水平位置を精度良く決定している（佐藤・藤田, 2004）。観測では約1300ショットの音響測距を1セットとし、基本的に1海底基準点あたり4セット分の

データを2日かけて取得している（1日16時間観測の場合）。また同時に、音響測距により得られた音波の往復時間を距離に換算するために使用する海中音速の推定に必要な海中音速測定を行っている。

海中での音速は、CTD、XCTDおよびXBT観測によって得られた水温、塩分濃度、圧力（深度）から、Del Grossoの経験式（Del Grosso, 1974）を用いて計算する。機器の精度の面からCTDによる観測が最も望ましいが、実際の観測では、CTDを投入する際に使用するギャロスが、船尾に設置してあるKGPSアンテナの視界を遮ってしまうため、KGPS観測と並行して行う音響測距観測を同時に行うことはできない。そのため基本的に1日の音響測距観測開始前に一度、CTD観測を行っている。また、音響測距観測時の音速の時間変化を捉えるため、約1時間ごとにXBT又はXCTDによる観測を行っている。ただし、XBTでは塩分濃度の計測は行えないため、CTDから得られた塩分濃度を時間的に線形補間したものを用いて音速を算出している。XCTDはXBTよりも精度が良く、塩分濃度も測定できるため、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回または2回の観測に留まっている。海が時化している場合や夜間など、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、塩分濃度の線形補間についてもXCTDの観測値を用いて行っている。

3 データ解析の概要

データ解析は、GPSアンテナの位置座標を決定するためのKGPS解析（Colombo, 1998）、音響トランスデューサと海底基準局間の音波走時を求める音響解析（浅田・矢吹2001；富山2003）、これら2つの結果を結合することで局位置を求め、最終的にその平均位置を求める局位置解析（藤田・他, 2004；Fujita et al., 2006）から成る（Fig. 2）。

ここでは海中音速測定頻度の局位置への影響を

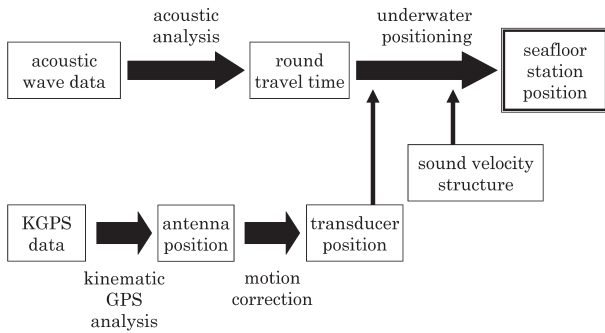


Fig. 2 Flow chart of analysis.

考察するため、局位置解析の中で行われている音速推定の方法について詳しく述べる。

3.1 局位置解析

我々は藤田・他 (2004) によるソフトウェア「SGOBS (Seafloor Geodetic OBServation)」を用いて局位置解析を行い、局位置を推定している。SGOBSでは、KGPS解析によるGPSアンテナの位置、音響トランスデューサと海底基準局間の音波走時、船体の動揺計測パラメータ（ヘディング、ロール、ピッチ）及び海中の音速プロファイルを入力とし、ベイジアン最小自乗法に基づくインバージョンを用いて局位置を推定する。

我々の海底基準点では、1点につき3, 4局の海底基準局を東西南北に配置している。解析では、まず各々の局位置を同一の音速構造で解いた後、これらの音波走時残差を用いて平均音速の時間変化パラメータを求める。このサイクルを局位置が収束するまで繰り返すことにより各々の局位置を求め、最終成果として各々の局位置の重心位置（平均位置）を海底基準点の局位置解とする。簡易なアルゴリズム図を Fig. 3 に示す。

3.2 音速推定の方法（二段階補正）

局位置解析のうち、音速推定のインバージョンでは音速構造を水平成層と仮定し、観測値を初期値として鉛直平均音速 $V(t)$ の時間変化パラメータを推定している。その際、深さ方向のプロファイルの形状は時間的に一定と仮定し、水深 200 m, 400 m, 800 m 及び 1600 m に境界をもつ層を設定して、各層の深さ方向に線形の変

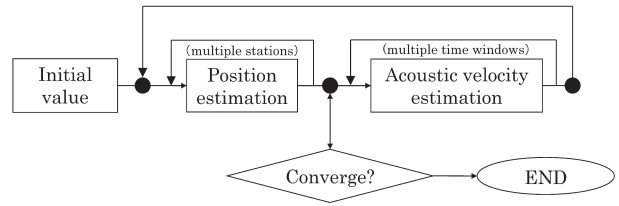


Fig. 3 Algorithm of parameter estimation applied to get the positions of seafloor stations by using the round-trip travel time of acoustic waves and sound velocity.

を与えている。

音速推定は二段階の補正から構成される。はじめに、CTD, XBT, XCTD による水温、塩分濃度、圧力の観測値から Del Grosso (1974) の式を用いて音速を計算し、時間で二次近似したものを一段階目の補正の初期値として与える (Fujita et al., 2006)。一段階目の補正では、1セット（概ね 13 測線、6~8 時間）に渡る音速の時間変化を二次近似により推定する。さらにその結果を初期値として、二段階目の補正を行い、最終的に測線毎 (20~60 分) の時間変化を推定する。

Fig. 4 に音速推定結果の一例を示す。Fig. 4 から、一段階目の補正 (SV₁) で全体の系統誤差

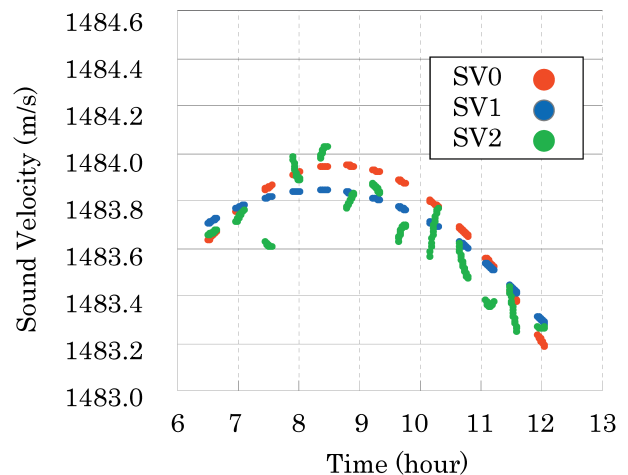


Fig. 4 Representative plots of estimated average sound velocity, on September 17, 2007 at the seafloor reference point off Boso Peninsula. SV₀ (red) is an initial value given by the observed sound velocity profile, SV₁ (blue) is the curve after the estimation for each set of observation as the first step and SV₂ (green) is the one estimated for each observation line as the second step.

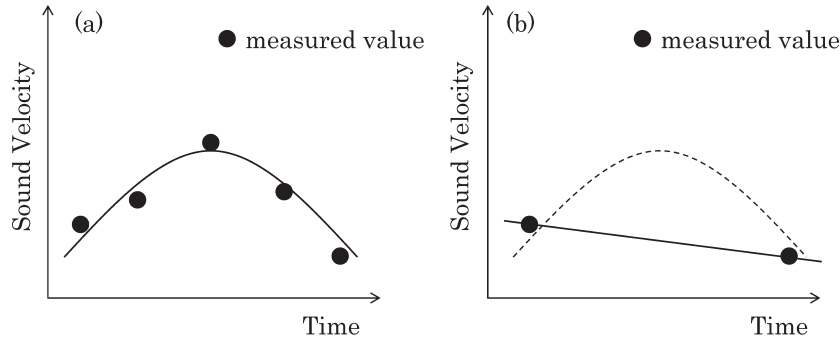


Fig. 5 Relationship between the frequency of undersea sound velocity measurement and an initial value for the estimation of sound velocity in case of (a) five data and (b) two data. Solid circles show observed values of sound velocity. Curves show the fitted curves.

が、二段階目の補正 (SV₂) で一段階目の補正の二次曲線で近似されない測線毎の細かい時間変化が補正されていることが読み取れる。このように二段階補正を採用しているのは、二段階目の補正で行っているような細かい時間間隔の補正のみでは、観測値に含まれている比較的大きなバイアス誤差を十分に補正することができないことによる (藤田・他, 2004)。

4 海中音速測定頻度と音速推定の初期値との関係

海底地殻変動観測で実施している海中音速の測定頻度と音速推定の初期値との関係を Fig. 5 に示す。

Fig. 5(a)は、5回分の音速測定値を時間二次式で近似した様子を模式的に示したものである。この二次曲線で表された近似値が一段階目の補正の初期値となる。一方、Fig. 5(b)は Fig. 5(a)の最初と最後の計2回の音速測定値を残し、それ以外の値を測定しなかったものとして除外したグラフを表している。Fig. 5(b)のように音速測定が最初と最後の場合のみであれば、Fig. 5(a)では二次であった近似曲線が直線となる。すなわち音速測定頻度を減らすことで音速推定の初期値が変化することとなる。

5 影響評価の方法

5.1 使用データ

海中音速測定頻度を変化させたときの局位置へ

Table 1 List of data used for analysis. "A" and "B" show the former data set and the latter data set of two-set data obtained on the same day.

海底基準点	観測時期	観測日数	観測セット	観測セット数
釜石沖2	2007.7	1日	7/24A, 7/24B	2
釜石沖1	2007.7	2日	7/20A, 7/20B, 7/21A, 7/21B	4
宮城沖2	2007.7	2日	7/14, 7/18A, 7/18B	3
宮城沖1	2007.7	2日	7/22A, 7/22B, 7/23	3
福島沖	2007.7	2日	7/1A, 7/1B, 7/2A, 7/2B	4
常磐沖	2007.7	3日	6/30, 7/3A, 7/3B, 7/13	4
房総沖2	2007.9	2日	9/21A, 9/21B, 9/22A, 9/22B	4
房総沖1	2007.9	2日	9/17A, 9/17B, 9/18A, 9/18B	4
三宅島A	2007.9	3日	9/13, 9/15, 9/16	3
三宅島B	2007.9	2日	9/14, 9/16	2
三宅島C	2007.9	2日	9/14, 9/15	2
相模湾	2007.9	2日	9/24A, 9/24B, 9/25A, 9/25B	4
東海沖1	2007.4	5日	4/15, 4/16, 4/18, 4/21, 4/22	5
東海沖2	2007.8	2日	8/20, 8/21A, 8/21B	3
熊野灘	2007.8	2日	8/22A, 8/22B, 8/23	3
潮岬沖1	2007.8	2日	8/28A, 8/28B, 8/29	3
潮岬沖2	2007.8	2日	8/24A, 8/24B, 8/25A, 8/25B	4
室戸沖	2007.5	5日	5/8, 5/11, 5/12, 5/13, 5/14	5

の影響評価について、使用したデータの一覧を Table. 1 に、各々の海底基準点の配置図を Fig. 6 に示す。

ここで、Table. 1 の観測セットの部分に書かれている A, B は、それぞれ同日に2セット分観測を行ったときの前半と後半のセットを示している。

5.2 評価方法

評価は、CTD, XCTD, XBT 観測について Table. 2 に示すような音速測定頻度を仮定し、各々の場合で得られた局位置解を比較することにより行った。具体的には Case 0 と Case 1~5 の局位置解析結果の差を取ることで、現行の観測精度

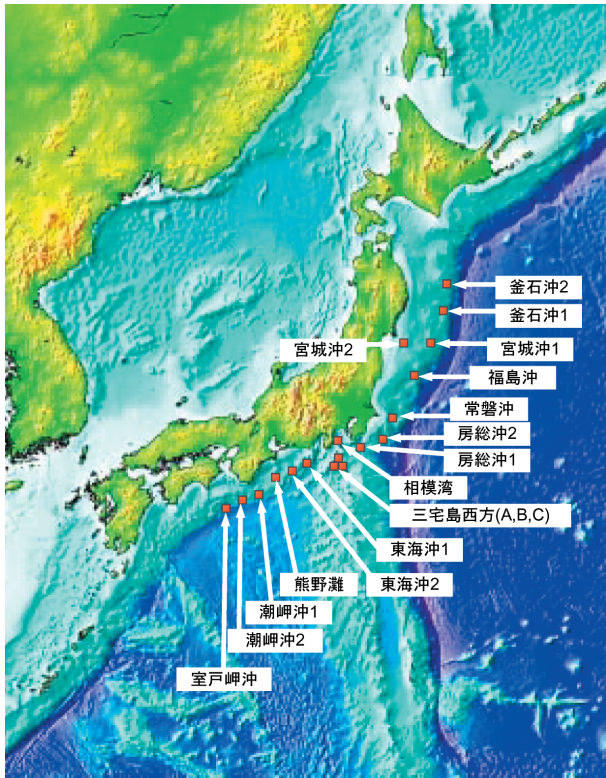


Fig. 6 Distribution of seafloor reference points (red solid squares).

Table 2 List of cases applied for analysis.

Case0	観測1セットあたり6~8回測定 (従来同様, 1時間毎に測定)
Case1	観測1セットあたり3回測定 (音響測距開始時, 終了時および中間に測定)
Case2	観測1セットあたり2回測定 (音響測距開始時と終了時に測定)
Case3	観測1セットあたり1回測定 (音響測距開始時のみ測定)
Case4	観測2セットあたり1回測定 (前半のセットの音響測距開始時のみ測定)
Case5	観測4セットあたり1回測定 (初回のセットの音響測距開始時のみ測定)

(水平方向, 約 2~3 cm) へ影響を与えずに, どの程度まで音速測定頻度を減らせるかを検討した。ここで Case 5 において, 観測セット数が 2 セットおよび 3 セットの海域については, 2 セットおよび 3 セットに一回音速測定した場合について解析を行った。

6 結果および考察

6.1 局位置解の Case 別比較結果

解析によって得られた局位置の水平成分 (東西成分および南北成分) について, Case 1~5 の Case 0 からの差を海域別にプロットしたものを Fig. 7~Fig. 11 に示す。

Fig. 7 に示されるように, Case 1 においては Case 0 との差 (Case 1-Case 0, 他も同様) は東西成分では $-0.4 \text{ cm} \sim 0.6 \text{ cm}$ の範囲にあり, Case 0 との差の絶対値を平均すると約 0.1 cm であった。また南北成分では東海沖 2 を除けば, $-0.2 \text{ cm} \sim 0.8 \text{ cm}$ の範囲にあり, Case 0 との差の絶対値を平均すると約 0.1 cm であった。東海沖 2 の南北成分の結果が他の海域に比べ大きく異なる理由については次節で考察する。次に Case 2 と Case 0 との差 (Fig. 8) に関しては, 東西成分では $-0.5 \text{ cm} \sim 0.4 \text{ cm}$ の範囲にあり, Case 0 との差の絶対値を平均すると約 0.2 cm であった。南北成分では, $-0.8 \text{ cm} \sim 0.2 \text{ cm}$ の範囲にあり, Case 0 との差の絶対値を平均すると約 0.1 cm であった。以上のように, Case 1 または Case 2 まで音速測定頻度を減らした場合については, Case 0 との差は概ね数 mm であった。

一方, Fig. 9~Fig. 11 に示されるように, Case 0 との差は, Case 3 では東西: $-1.5 \text{ cm} \sim 0.9 \text{ cm}$, 南北: $-0.9 \text{ cm} \sim 0.5 \text{ cm}$, Case 4 では東西: $-1.3 \text{ cm} \sim 2.1 \text{ cm}$, 南北: $-1.3 \text{ cm} \sim 1.3 \text{ cm}$, Case 5 では東西: $-1.5 \text{ cm} \sim 2.2 \text{ cm}$, 南北: $-1.5 \text{ cm} \sim 1.6 \text{ cm}$ の範囲に含まれていた。さらに, 各 Case における Case 0 からの差の絶対値の平均はおよそ, Case 3 で東西: 0.4 cm , 南北: 0.3 cm , Case 4 で東西: 0.5 cm , 南北: 0.4 cm , Case 5 で東西: 0.8 cm , 南北: 0.5 cm という結果であった。Case 3~Case 5 に関しては現行の観測精度の範囲内であるものの Case 1 または Case 2 と比較し全体的にばらつきが大きい結果となった。

次に, Fig. 7~Fig. 11 の結果を海域別にまとめたグラフを Fig. 12 に示す。Fig. 12 から, Case 1 から Case 5 へ音速測定頻度を減らすにつれ, Case

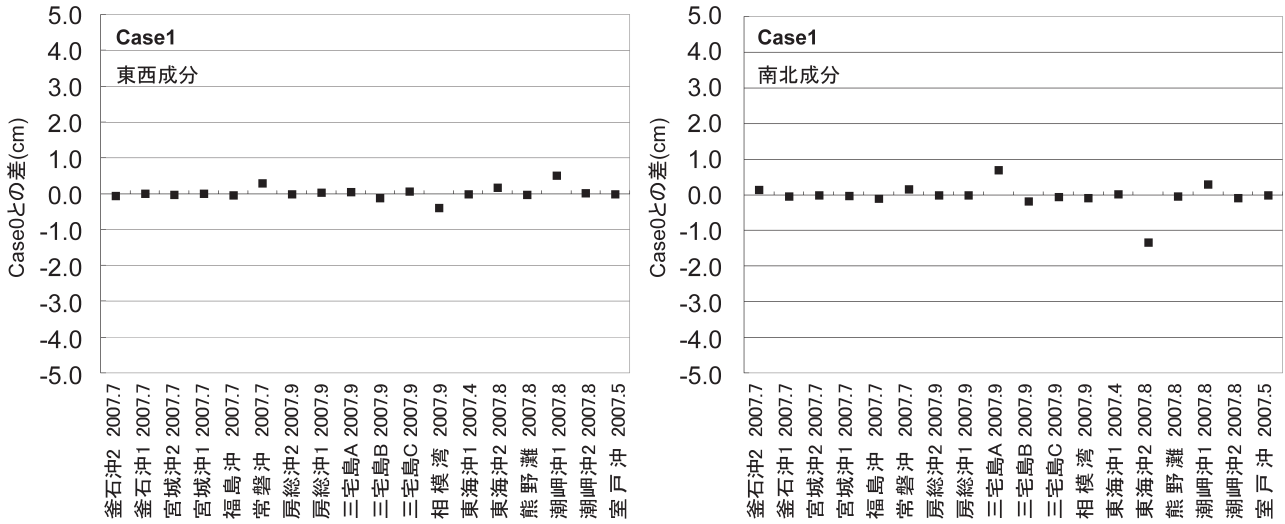


Fig. 7 Differences between the horizontal components of the position estimated in Case 1 and in Case 0. The left and right panels show the EW and NS component, respectively.

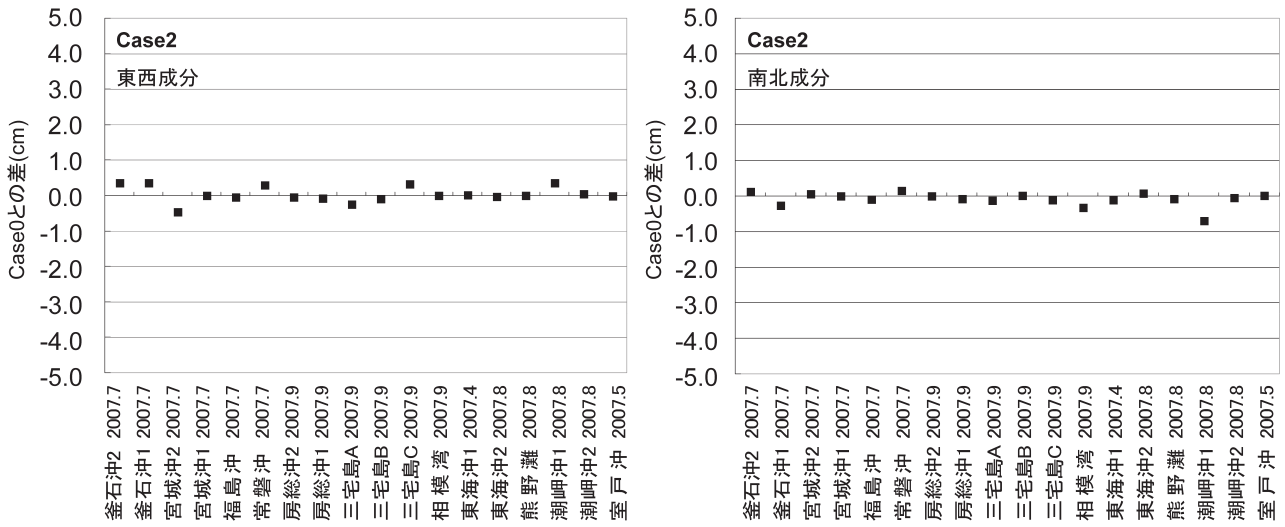


Fig. 8 Differences between the horizontal components of the position estimated in Case 2 and in Case 0. The left and right panels show the EW and NS component, respectively.

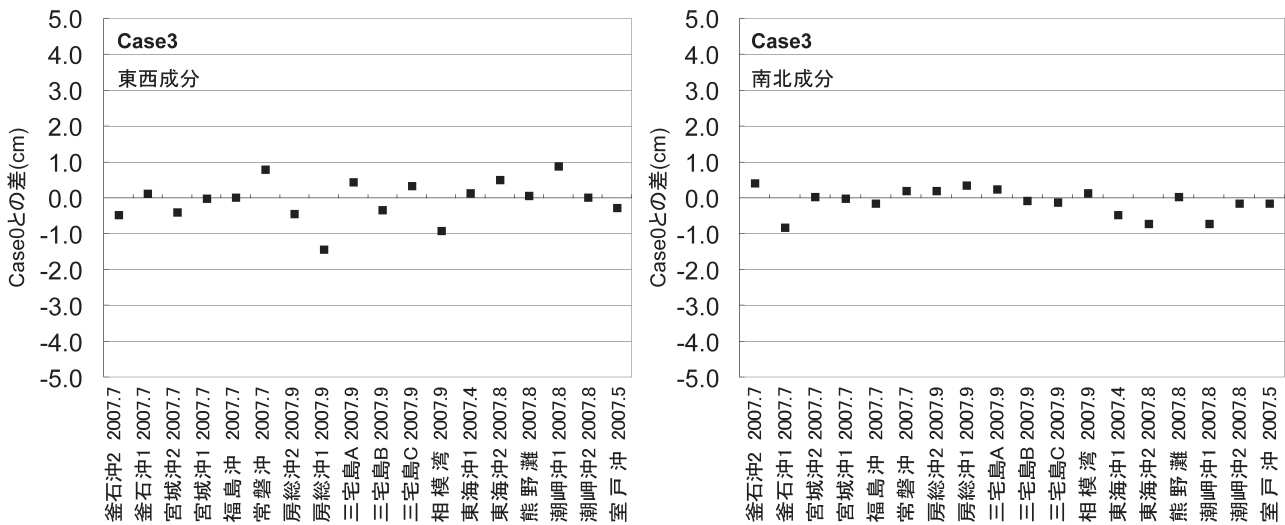


Fig. 9 Differences between the horizontal components of the position estimated in Case 3 and in Case 0. The left and right panels show the EW and NS component, respectively.

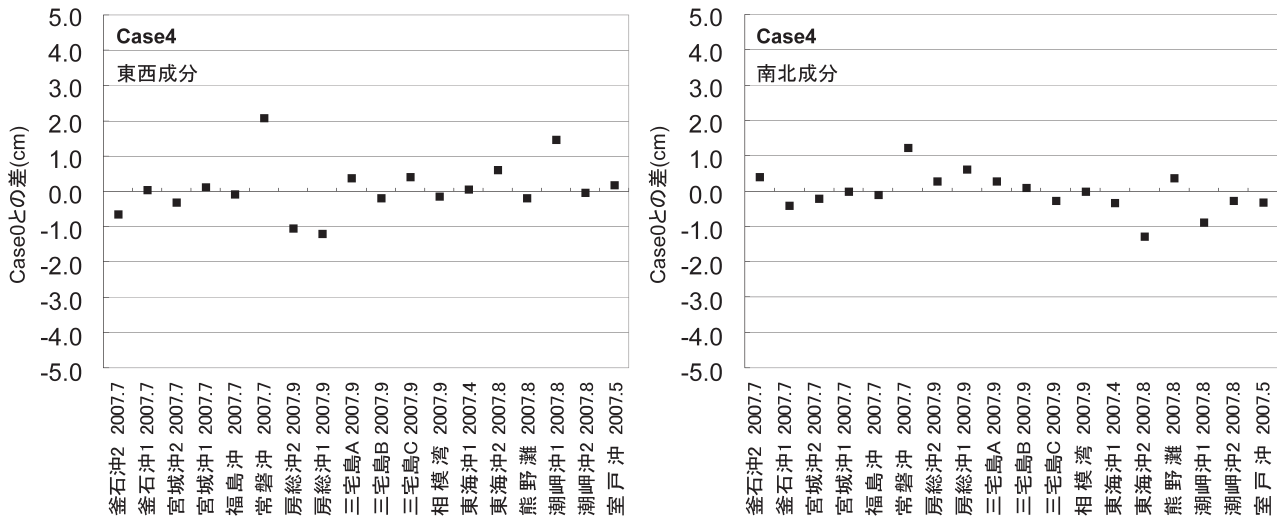


Fig. 10 Differences between the horizontal components of the position estimated in Case 4 and in Case 0. The left and right panels show the EW and NS component, respectively.

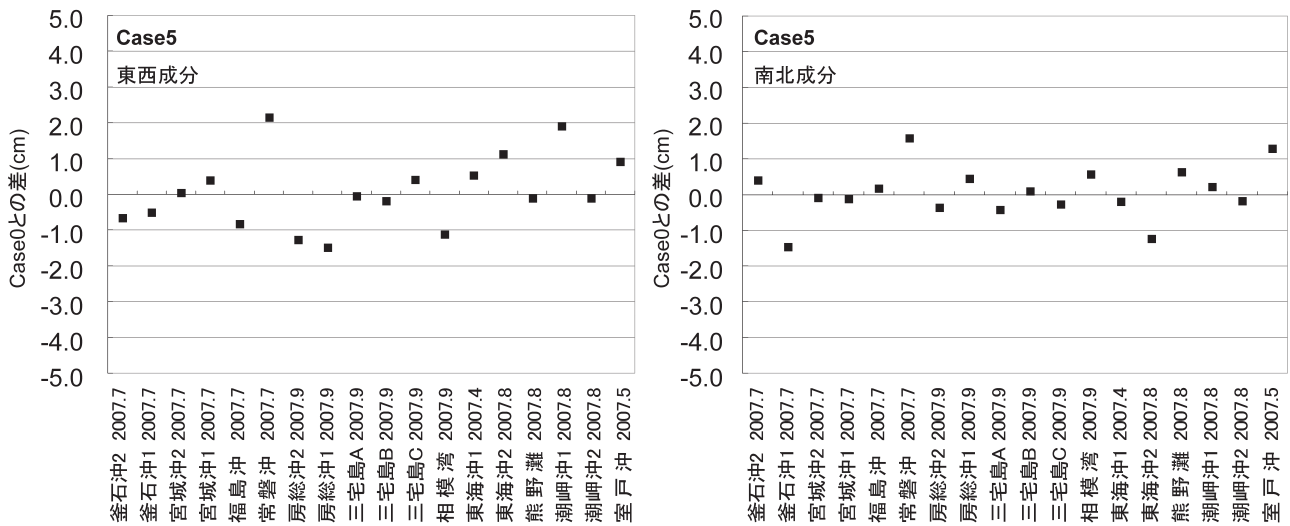


Fig. 11 Differences between the horizontal components of the position estimated in Case 5 and in Case 0. The left and right panels show the EW and NS component, respectively.

0からの乖離がほとんど見られない海域と、Case 4およびCase 5で大きくなる海域、およびCase 5よりもCase 1の方がCase 0からの乖離が大きい海域があることが読み取れる。

6.2 考察

まず、Case 1の南北成分において東海沖2のCase 0との差が約-1.3 cmと他の海域と比較し大きく異なっている点について考察する。Case 1では1セットの中から3回分の音速測定データ(観測の開始時、終了時および中間に測定したもの)を使用し解析を行っているが、1セットの観

測開始時および終了時の2回分の音速測定データを使用するCase 2における東海沖2の南北成分のCase 0との差は約0.1 cmと小さい(Fig. 12)。これらのことから、1セットの中間の音速測定データがCase 1の結果へ大きく寄与した推測される。このとき、Case 1で使用したものと時間的に近い別の音速測定データを使用した場合には、Case 0との差について他の海域と同水準の結果が得られている。このことから、同じ音速測定データ数であっても、局位置の水平成分へ1 cm程度の影響が現れる場合があり得ると考えられる。

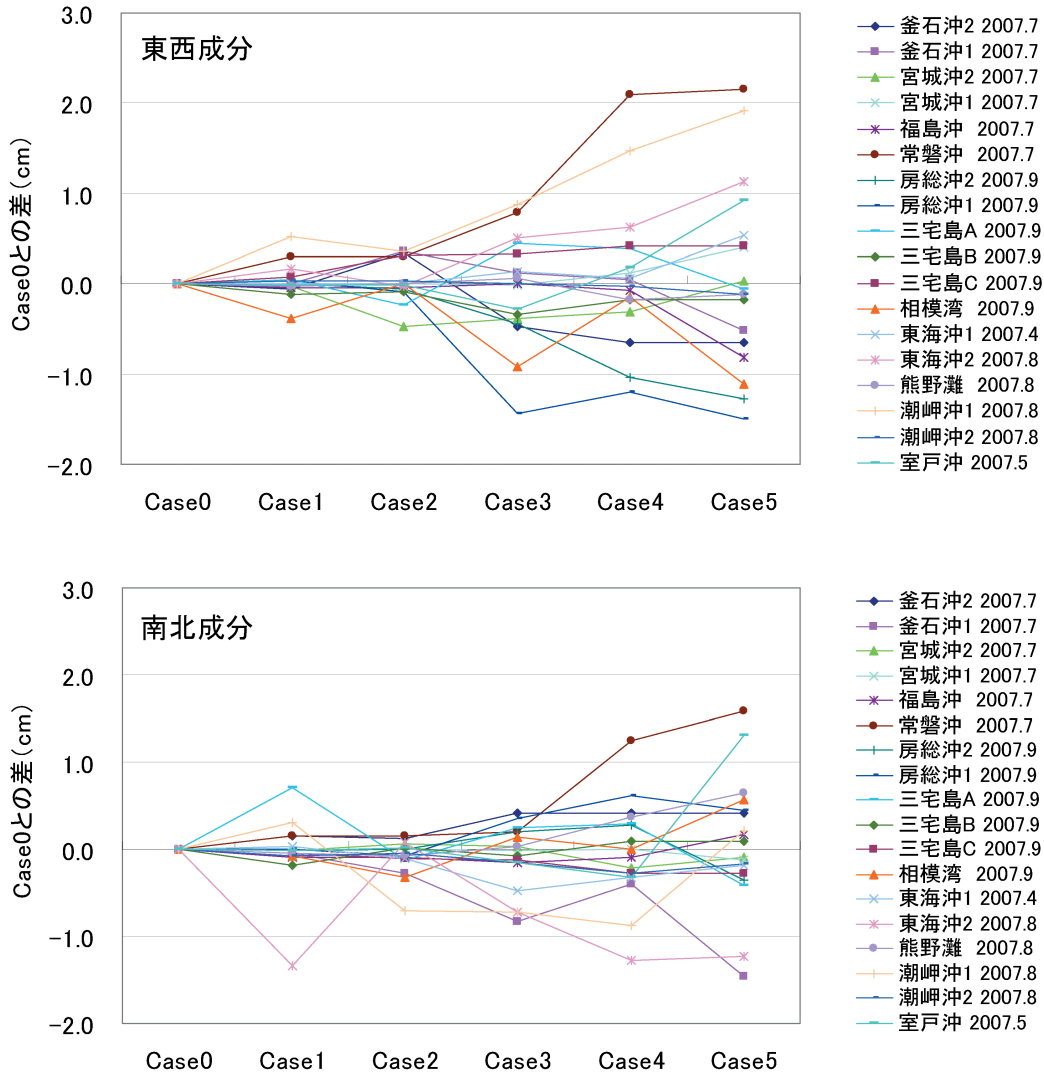


Fig. 12 Differences between the horizontal components of the position estimated in Case 0 and in each Case, for each seafloor reference point . The top and bottom panels show the EW and NS component, respectively.

次に、Fig. 12において常磐沖の結果を見ると、Case 1 から Case 5 へ音速測定の間隔が長くなるにつれ Case 0 からの乖離が大きくなり、特に Case 4 および Case 5 では他の Case と比較し大きな差が見られている。例えば、Case 5 の結果は 4 セットに 1 回測定することを仮定し、6/30 の初回の音速測定データを各セット (6/30, 7/3 A, 7/3 B, 7/13) の観測開始時の音速測定データとして解析したものであるが、このとき観測期間が約 2 週間に渡っており、音速が観測毎で大きく異なっていた可能性がある。ここで各セットにおいて測定した平均音速のプロット (水深 0~1000 m 鉛直平均) を Fig. 13 に示す。Fig. 13

に示されるように、6/30 と 7/3 A, 7/3 B の観測開始時の平均音速の差は約 2 m/s と大きく、7/13 と 7/3 A, 7/3 B の観測開始時の平均音速の差についても同程度の差が見られる。ここで、今回得られた局位置解析結果のうち鉛直成分を海底基準点別にまとめた結果を Fig. 14 に、音速推定により最終的に得られた鉛直平均音速を観測時間で平均したものについて、Case 0 との差を海底基準点別にプロットしたものを Fig. 15 に示す。常磐沖における Fig. 14 および Fig. 15 の結果は共に、全ての Case において Case 0 からの大きな差は見られない。これらのことから、解析時に与える初期値と実際の音速構造との差異が、Case 4 およ

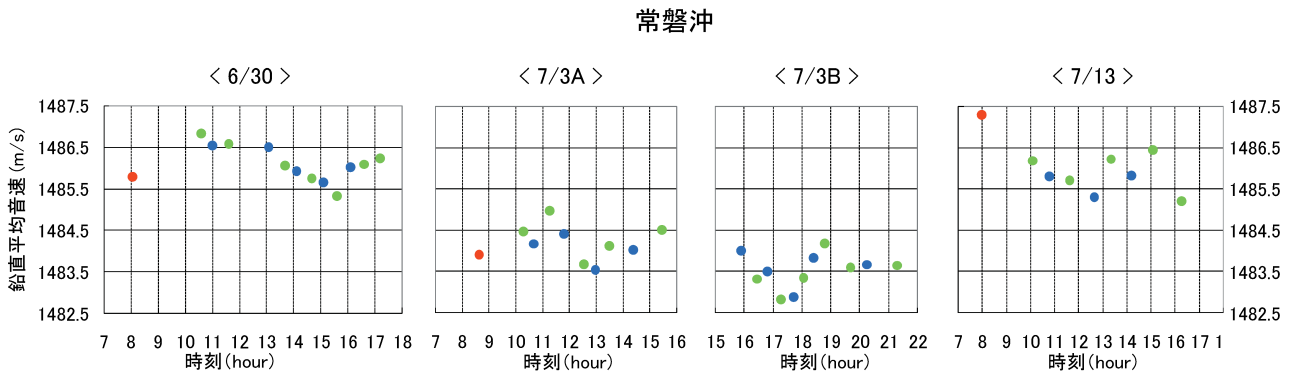


Fig. 13 Averaged undersea sound velocity (0 – 1000 m) at the seafloor reference point “Joban-Oki” for each data set. Red, green, and blue circles show the data of CTD, XCTD, and XBT, respectively.

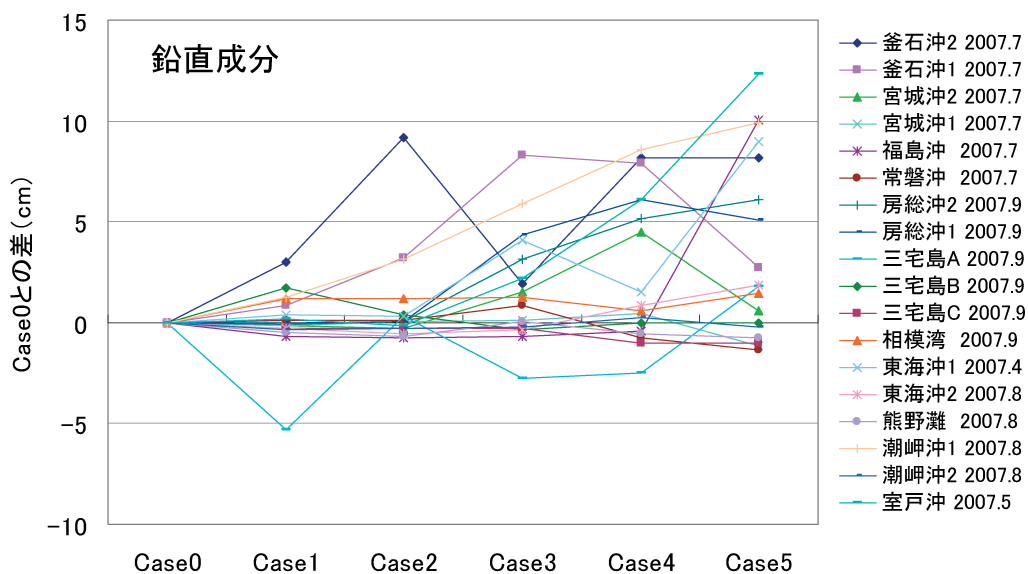


Fig. 14 Differences between the vertical component of the position estimated in Case 0 and in each Case, for each seafloor reference point .

び Case 5 の常磐沖の東西・南北成分における Case 0 からの誤差として現れた可能性が考えられる。

Fig. 14 を見ると、Case 毎の Case 0 からの乖離が最大で約 2 cm であった局位置水平成分と比べ、鉛直成分では最大で約 13 cm の差と大きい値を取る海域が見られる。Fig. 14 に示される鉛直成分において Case 0 からの差が大きい例として、福島沖および室戸沖が挙げられる。福島沖の鉛直成分については、Case 1~Case 4 と比べ Case 5 における値が大きく異なっている。前述の常磐沖における考察と同様に、福島沖の各観測セットの初回の音速測定データを調べた結果、2 セット

目と 3 セット目のデータに約 1.0 m/s の差が見られた一方、1 セット目と 2 セット目の間、および 3 セット目と 4 セット目の間においては、それぞれ差はほとんど見られなかった。Fig. 12 に示す東西および南北成分、Fig. 15 に示す音速推定結果の Case 0 からの差が福島沖において全ての Case において小さいことを考慮すれば、解析時に与える初期値と実際の音速構造との差異が Case 5 における鉛直成分の Case 0 に対する誤差として現れたと推測される。室戸沖の鉛直成分については、Case 4 および Case 5 において Case 0 からの差が大きい。このうち Case 4 については、福島沖の鉛直成分と同様の考察により説明さ

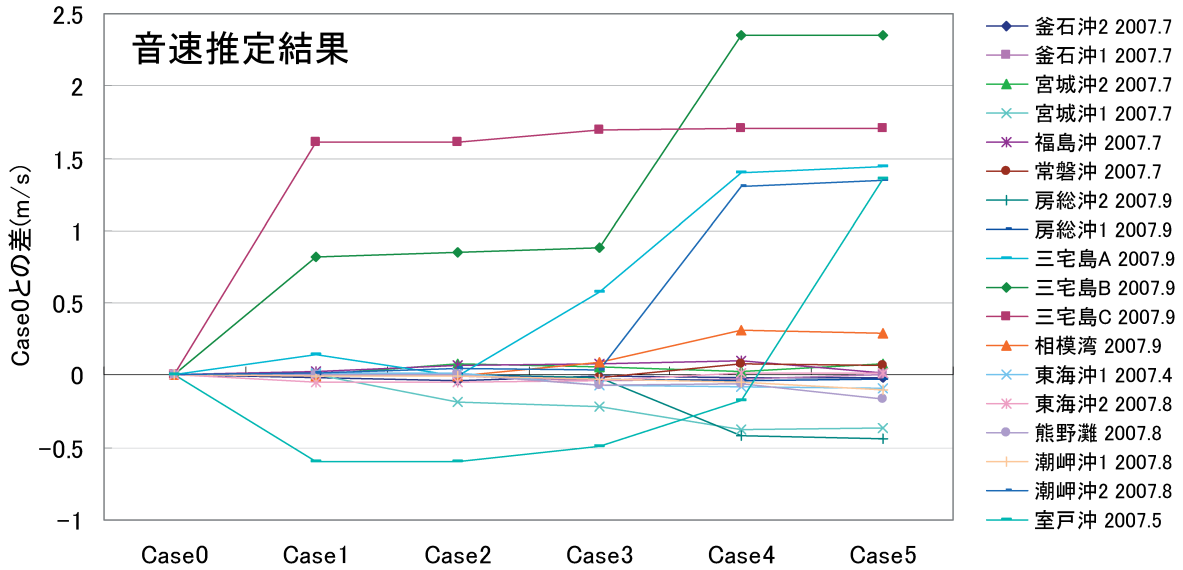


Fig. 15 Differences between the time average of SV_2 in Case 0 and in each Case, for each seafloor reference point .

れる．一方，Case 5 については Fig. 15 の音速推定結果が大きな値を取っていることから，解析時に与える初期値と実際の音速構造との差異が，鉛直成分および Fig. 12 に示す南北成分に加え，Fig. 15 に示す音速推定結果の Case 0 に対する誤差となって現れたと推測される．ここで Fig. 15 に示す室戸沖の Case 1 および Case 2 の音速推定結果が大きい点については，観測データを調べた結果，1 セット目および 5 セット目において観測時間内の音速の時間変化が大きかったことが理由の一つであった可能性が考えられる．

なお，Fig. 15 に示す音速推定結果について，Case 0 からの差の大きい例として，房総沖 1 および三宅島 A, B, C が挙げられるが，これらの理由について房総沖 1 に関しては，前述の室戸沖と同様の考察により説明される．また三宅島 A, B, C に関しては，他の海域と比較し水深の浅い地点に設置されていることから海底までの鉛直方向の音速の変化が他の海域と比べ大きい．このため音速測定を減らしたことによる影響が，他海域に比べ大きく音速推定結果へ現れたものと考えられる．

佐藤・藤田 (2004) で述べられているように，局位置水平成分 (Fig. 12) については，測線を空間的にバランス良く配置することで水平方向の誤

差が相殺され，鉛直成分 (Fig. 14) よりも比較的ばらつきが抑えられると考えられる．このように，空間的にバランス良く測線を配置しデータを取得することで Case 1 および Case 2 では局位置水平成分への影響を概ね 1 cm 未満で抑えられ，Case 2 までであれば，現行の観測精度を維持したまま音速測定頻度を減らせる可能性が示唆された．また Case 3~Case 5 についても 1 セット分のデータをより短時間で取得することができれば，1 セット中の音速測定の間隔が短くなり，その間の音速の変化が減少するため，音速推定，局位置推定についてさらに精度が向上する可能性があると思われる．

7 まとめ

今回は音速測定頻度を減らした場合の局位置への影響について考察した．その結果，支柱を使用した観測方法では，Case 2 (観測開始時および終了時に 2 回音速を測定) までであれば現行の精度を維持したまま音速測定頻度を減らせる可能性が示唆された．一方，今後航走観測によって音響測距データをさらに空間的にバランス良く取得し，かつデータ取得に必要な時間が短縮され観測時間内の音速構造の時間変化が小さくなれば，さらに音速測定頻度を減らした場合についても局位置

推定の誤差がより小さくなることが期待される。

観測の効率化を検討し、必要な観測データを短時間で簡便に取得できるようになれば、厳しい海況に対してより柔軟な対応が可能となる。今回示した内容はその一例であるが、さらに将来海底地殻変動観測の準リアルタイム化といった、ある程度の即時性が必要となる機動的な観測を目指す場合には、観測の簡便さ、解析時間の短さ等の効率化が一層重要となる。今後、観測の効率化についても視野に入れながら、より高精度な観測を目指していきたい。

謝 辞

本研究は、データを取得して頂いた海底地殻変動観測に関わっている航法測地室職員、測量船「明洋」および「海洋」乗組員、貴重なアドバイスをくださった東京大学生産技術研究所の望月将志氏、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

観測の効率化における検討の一環として、海中音速測定頻度を減らすことによる局位置への影響評価を行った。その結果、音響測距データを空間的にバランス良く取得することで、現行の観測精度を維持したまま、音速測定頻度を現在の4分の1程度（観測セットの前後に各一回）まで減らせる可能性が示唆された。今後、測線のコントロールが可能な航走観測により音響測距データの空間バランスが向上すれば、音速測定的面においてさらなる効率化が進められる可能性がある。

参考文献

浅田昭・矢吹哲一朗 (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 2nd edition", edited by Teunissen, P. J. G. and Kleusberg, A, pp.537-568,

Springer, Berlin.

Del Grosso (1974), V. A., New Equation for the Speed of Sound in Natural Water (with Comparison to other Equations), *J. Acoust. Soc. Am.*, 56, No.4, 1084-1091.

藤田雅之 (2006), GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～海上保安庁の取り組み (レビュー) ～, *海洋情報部研究報告*, 42, 1-14.

藤田雅之・佐藤まりこ・矢吹哲一朗 (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, 50-56.

Fujita, M., T. Ishikawa, M. Mochizuki, M. Sato, S. Toyama, M. Katayama, 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, 265-275.

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, 齋藤宏彰, 松本良浩, 藤田雅之, 矢吹哲一朗, 望月将志, 浅田昭 (2008 a), 海底地殻変動観測の新たな試み—観測の効率化を目指して—, *日本地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集*, J 164-020.

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誤差の局位置への影響について, *海洋情報部技報*, 22, 42-49.

佐藤まりこ, 木戸元之, 田所敬一 (2008 b), GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～観測成果と新たな取り組み～, *測地学会誌*, 54, 113-125.

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.

矢吹哲一朗 (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.