

海底地殻変動観測における複数エポック一括局位置解析手法の導入

松本良浩：海洋研究室

藤田雅之：技術・国際課

石川直史：航法測地室

Development of multi-epoch method for determining seafloor station position

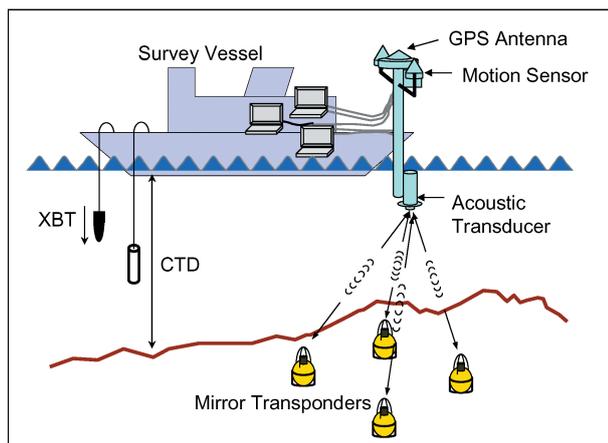
Yoshihiro MATSUMOTO: Ocean Research Laboratory

Masayuki FUJITA: Technology and Planning Division

Tadashi ISHIKAWA: Geodesy and Geophysics Division

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部は、東大生産技術研究所と技術協力を行いつつ、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。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設置しており、測量船による繰り返し観測を行っている（例えばFujita et. al., 2006）。観測システムの概念図を第1図に示す。



第1図 観測システムの概念図

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

このシステムによって取得された各種のデータは、藤田ほか（2004）による局位置解析ソフトウ

ア「SGOBS (Seafloor Geodetic Observation)」を用いて解析を行い、海底局の位置決定を行ってきた。SGOBSは実用化後も様々の技術上・運用上の問題に対応して改良が行われてきた。

本稿では最近のバージョン (Ver.3.1) において導入した「複数エポック同時解析」の手法を紹介するとともに、その効果と影響について考察を行う。

2 局位置解析ソフトウェア「SGOBS」の概要

SGOBSは、KGPS解析によるGPSアンテナの位置、音響解析による音波走時、動揺計測パラメータ（ヘディング、ロール、ピッチ）および海中の音速度構造プロファイルを入力してこれらの結果を結合し、ベイジアン最小自乗法に基づくインバージョン法（松浦，1994）を用いて海底局位置を決定するソフトウェアである。

我々が展開している海底基準点では、1点につき複数の海底局（おおむね東西南北に4局、一部3局）を配置している。まずこれら複数局について同一の音速度構造で局位置解を求めた後、その残差データを用いて、一定の時間ウィンドウ毎に音速度の時間変化係数を求める。得られた新しい音速度構造で再度局位置解を求める。このサイクルを音速度構造を変えても局位置の変化が十分小さくなるまで繰り返し、最終的な局位置解を求める（藤田ほか，2004）。

なお、最終成果としては複数の海底局の中心位置

(「仮想基準点」と呼ばれる)を算出する。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よ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(佐藤・藤田, 2004)。

3 複数エポック一括局位置解析のねらい

SGOBSが用いた上記のような局位置解析手法は、これまでの得られた成果から判断してロバストであり、海底の地殻変動に関する新たな知見を生み出すことに成功したといえる(例えば, Fujita et. al, 2006; Matsumoto et. al, 2006)。

だが一方で、解析手法と同時に観測の原理にも由来する問題点として、石川・藤田(2005)は「局位置の鉛直成分と音速度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」があることを指摘し、この問題を解消するために、局位置の鉛直成分を固定する解析手法を提示した。この手法はFujita et. al. (2006)においても宮城沖1海底基準点座標の解析に用いられており、移動量の水平成分を議論する上では非常に有用である。だが、本来取り出すことができる可能性のある鉛直成分の情報を犠牲にしていることは否めず、もとより鉛直方向の地殻変動が想定される場合には適用できないという欠点がある。

従来の局位置解析においては、2節で述べたとおり3~4局の中心位置を最終結果として用いているが、これは水深を直径とする円周上に配置された海底基準局アレイの相対位置関係は不変であることを前提としている。にもかかわらず各局の位置を独立の推定パラメータとしてきた理由は、相対位置関係の真値が不明であることによる。藤田ほか(2005)は、「何らかの方法で、海底基準局アレイの相対座標を既知とすることができれば、これを拘束することにより、重心位置のみを推定パラメータとする手法(重心推定法)が可能となる」ことに着目し、重心推定法の有用性を検討した。その結果、従

来の手法と比較して鉛直成分のばらつきが小さくなるなどの効果がみられたという。

海底基準局アレイの相対位置関係の真値を知る方法は現状では存在しないが、海底基準局アレイの相対位置関係は不変であるという前提に立つならば、キャンペーン観測を繰り返すことで蓄積された複数の観測エポックのデータを一括解析して、エポック間で不変な相対位置関係の最確値を推定することは可能と考えられる。そこで以下の節では重心推定法をさらに発展させた「複数エポック一括局位置解析」という手法を提示する。

4 「複数エポック一括局位置解析」におけるモデルパラメータと観測方程式

4.1 ベイジアンインバージョン法について

この手法は、正規分布を持つ誤差 e を含む観測データ y^0 とモデルパラメータ x の間に、 A を偏微分行列とした線形の観測方程式

$$y^0 = Ax + e \quad (1)$$

が成り立つと仮定し、モデルパラメータの初期値からの誤差分布がアприオリに与えられる場合に、モデルパラメータ解 \hat{x} が次式によって計算されるというものである(松浦, 1994)。

$$\hat{x} = x^0 + DA'(E + ADA')^{-1}(y^0 - Ax^0) \quad (2)$$

ここで、 x^0 はモデルパラメータ初期値、 D はモデルパラメータ解の初期値からのズレを特徴づける共分散行列、 E は e の誤差分布を特徴づける共分散行列である。

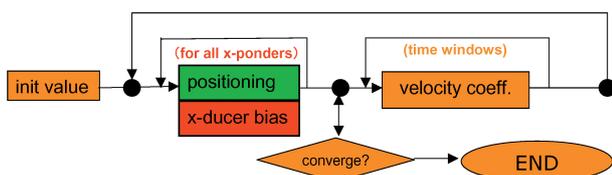
一般には、観測データとモデルパラメータの間の関係は非線形であることがほとんどであるが、その場合でも真値近傍における微小な変化に対しては線形関係が成り立つと仮定し、与えた初期値と真値との差を解として求める。これは式(1)および(2)において、 $x^0 = 0$ として y^0 と x をそれぞれ初期値に対する Δ 値と考えることに相当する。そして、実際の非線形の影響については、繰り返し計算により真値に収束させる。

ベイジアン手法、すなわちモデルパラメータの共分散行列 D を導入する意味は、初期値の信頼性に応じて拘束をかけられることである。その最も簡単

な適用例として、パラメータの固定、推定の選択を D の対角成分により自由に設定できることがある。

4.2 モデルパラメータと観測方程式

従来のSGOBSと同様に、本手法においても海底局位置等の推定と音速度構造の推定を逐次に繰り返して海底局位置を収束させる（第2図）。音速度構造の推定については、複数観測エポックを取り扱うよう拡張した点のほかには従来のSGOBSと大きく変わりはないが、局位置等の推定ではモデルパラメータの取り方を工夫した。



第2図 局位置解析ソフトウェアのアルゴリズム
Fig. 2 Algorithm used in the seafloor positioning software.

(a) 海底局位置等の推定

本来観測エポック間で局位置は変動するものであるため、海底局1局に対する局位置解はエポックの回数だけ存在するのが自然である。だが一方で、我々は「海底基準局アレイの相対位置関係は観測エポック間で不変である」という拘束条件をかけるため、各観測エポックに対する海底局Aの位置座標を次のようなパラメータで表現する。

(i) 第1観測エポック

$$X_{A_1} = \begin{pmatrix} x_{A_1} \\ y_{A_1} \\ z_{A_1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

(ii) 第n観測エポック ($n \geq 2$)

$$X_{A_n} = X_{A_1} + D_n = \begin{pmatrix} x_{A_1} \\ y_{A_1} \\ z_{A_1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_{nx} \\ D_{ny} \\ D_{nz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 X_{A_1} は第1観測エポックにおける海底局Aの位置座標、 D_n は第n観測エポックにおける海底局位置座標の第1エポックからの変動量である（ともにローカル座標系の3成分）。 D_n はアレイに属する海底局のいずれにも共通な変動量であると定義した

ことに注意されたい。これはすなわち第2観測エポック以降の海底局位置は局間の相対関係を保持したまま平行移動するというモデルを与えている。同時に、第1観測エポックのみが4局の局位置座標を独立なパラメータとして持っているものの、第2観測エポック以降の観測データも X_{A_1} の推定に寄与することとなる。

また、各観測エポックにおける音響トランスデューサ位置のバイアス誤差も同時に推定する。この手法は松本ほか（2007）が行ったように、動揺計測の3つの計測軸に一致した直交座標系（前後、左右、上下）に沿って与えられる3成分の変位バイアス $B_n = (b_{n\xi}, b_{n\eta}, b_{n\xi})$ をパラメータとする。以上のような推定パラメータの模式図を第3図に示す。

海底局をA~Dの4局とすると、観測エポック1~nに対する式(1)のモデルパラメータは、実際には上述したパラメータに対する初期値からの補正量として次のように表現される。

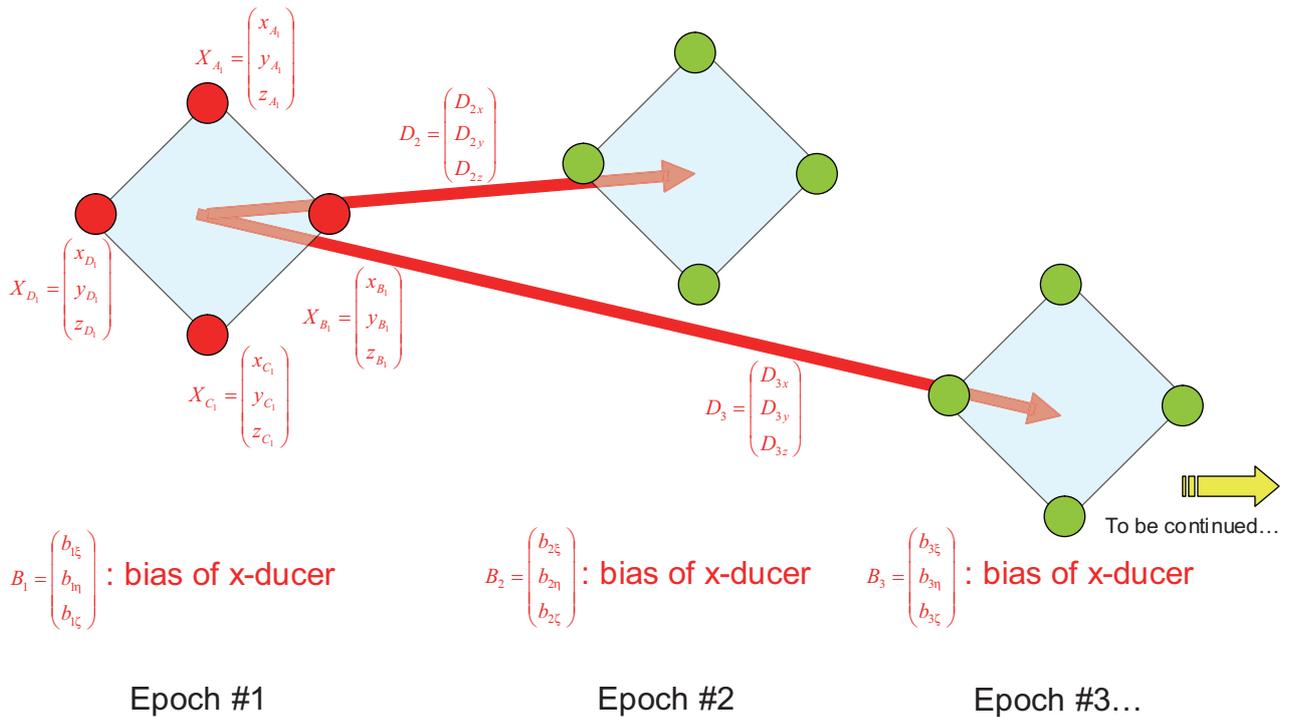
$$x = \begin{pmatrix} \Delta X_{A_1} \\ \Delta X_{B_1} \\ \Delta X_{C_1} \\ \Delta X_{D_1} \\ \Delta B_1 \\ \Delta D_2 \\ \Delta B_2 \\ \vdots \\ \Delta D_n \\ \Delta B_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

なお、観測エポックの序列は任意であり、必ずしも時系列順でなくともよい。単に解析対象となる複数の観測エポックの中で第1観測エポックが代表として独立な位置座標が推定されるにすぎない。

式(1)の観測データ y^0 は、例えば第k観測エポックにおける観測点Aについて以下のように記述される。

$$y^0 = (\Delta t_A^{k,1}, \Delta t_A^{k,2}, \dots, \Delta t_A^{k,n}) \quad (6)$$

右辺は観測された往復走時と理論走時との差の時系列を表している。1...nは第k観測エポックにおける海底局Aへの音響測距観測のショット番号を示す。ここに言う理論走時とは、KGPS解析と動揺補正により求められたトランスデューサの位置座標と



第3図 海底局位置の推定パラメータの模式図

Fig. 3 Parameters estimated with the new version of the seafloor positioning software SGOBS.

海底局Aの初期位置座標を用いて、与えられた音速度構造のもとで計算した往復走時をいう。

(b) 音速度構造の推定

従来よりSGOBSでは、音速度構造を推定パラメータとすることにより、誤差の補正を試みている(藤田ほか, 2004)。本稿で述べるVer.3.1においても、複数観測エポックを取り扱うための拡張を行った以外は手法に違いがないため、概略を述べるにとどめる。

音速度構造推定における観測データ y^0 は海底局を4局(A~D)とすると、例えばエポック k における音響測距の m 番目のショットから n 番目のショットまでのタイムウインドウ $[t_A^{k,m}, t_D^{k,n}]$ について、以下のように記述される。

$$y^0 = (\Delta t_A^{k,m}, \Delta t_B^{k,m}, \Delta t_C^{k,m}, \Delta t_D^{k,m}, \dots, \Delta t_D^{k,n}) \quad (7)$$

音速度構造推定におけるモデルパラメータは、音速度の時間変化を三次式で表したときの係数として推定を行う各タイムウインドウにおいて、平均音速度の時間関数 $V(t)$ を

$$V(t) = V(t_0) + a_0 + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 + a_3(t-t_0)^3 \quad (8)$$

と表すと、モデルパラメータ x はその係数の補正值として次式のように表現される。

$$x = (\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3) \quad (9)$$

式(8)において、 t_0 は各タイムウインドウにおける基準時刻、 $V(t_0)$ は音速度初期値の t_0 における値である。

4.3 「双子エポック」への対応

天候と測量船の運用上の理由により、バイアス値の異なる2船(海洋と明洋)で短期間のうちに続けて行った観測データを併合して、局位置の変位量を決定する必要が時に生じている。このような場合、バイアス値は独立に求める(もしくは個別の値に拘束する)のが適当である一方、変位量は単一の値に決定されなくてはならない。このようなエポックの対を便宜的に「双子エポック」と呼ぶ。この双子エポックを取り扱うために、SGOBS Ver.3.1においては、パラメータファイルの設定により任意の第 n エポックと第 $n+1$ エポック($n \geq 2$)の変位量を同一の推定パラメータとしつつ、トランスデューサ位置のバイアス値のみを独立とする仕組みを取り入れた。

なお、第1エポックと第2エポックを双子エポックとして扱うことは出来ない。これは、第1エポックでは局位置座標が推定されるのに対し、第2エポックでは第1エポックに対する変位量が推定されるため、原理的に同一視できないためである。ただし、その代わりとして第2エポックの変位量を0に拘束するように設定すれば、双子エポックと事実上等価となる。また、解析対象エポックの序列は時系列に従う必要がないため、解析対象が3エポック以上の場合には双子エポックを2番目以降に配置することでも対処できる。

5 実際の運用

5.1 従来のバージョン及び重心推定法との上位互換性

既に述べたとおり、SGOBS Ver.3.1はエポックごとに一組の局位置解が決定される従来バージョンの推定パラメータの組み立てを拡張したものである。解析対象エポック数を1とし、バイアス値を0に拘束して本バージョンを実行した場合、決定局位置は従来バージョン (Ver.2.10) による結果と比較して有意な差がなかったことを多数の解析結果から確認している。従来バージョンは局位置推定を1局毎のインバージョンによって行っているのに対し、本バージョンは全局同時推定を行うため、厳密には収束判定条件が異なっているが、これによる決定局位置の差は、これまで試行した解析結果の比較において高々0.1 mmであった。

また、松本ほか (2007) におけるトランスデューサ位置のバイアス推定は、本バージョンを解析対象エポック数1とし、バイアス値を拘束せずに同時推定を実行した場合と全く等価である。

また、藤田ほか (2005) が提案した、既定の局位置を初期値とする重心推定法は、第1エポックを観測データ数0のダミーのエポックとして局位置を既定局位置に拘束し、第2エポック以降に観測データを与えてエポックの変位量のみを推定することにはならない。

5.2 解析結果の例

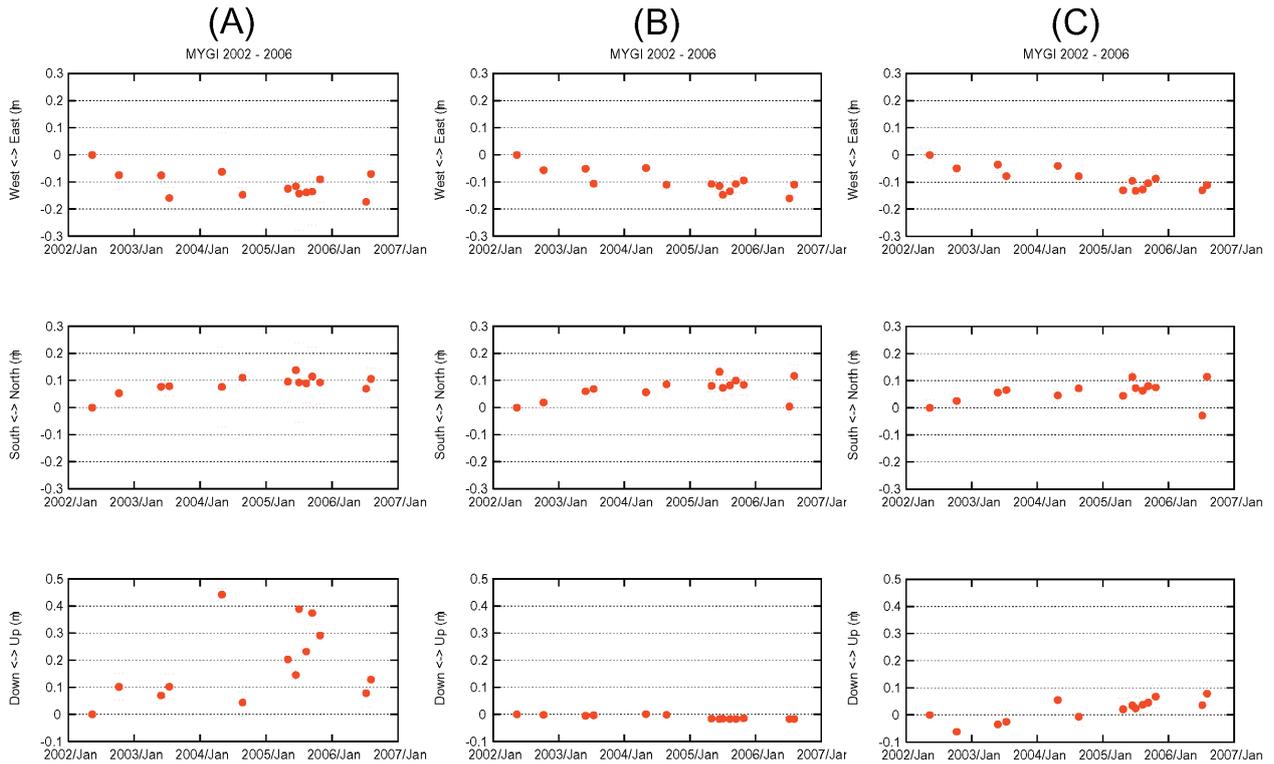
本手法を用いることにより局位置解の時系列変化が改善されるかどうかを検証するため、「宮城沖1」海底基準点における2002年10月から2006年8月までの13観測エポックのデータを再解析して、従来の解析結果と比較した。第4図では、従来手法による通常の解析結果を (A)、石川・藤田 (2005) の高さ固定の手法により鉛直成分を2005年8月の値に拘束した解析結果を (B)、本バージョンによる複数エポック一括解析の結果を (C) として示す。(B) では、鉛直成分がほぼ同一の値に拘束されているものの、水平2成分の再現性に向上が認められる。(C) では、水平2成分の再現性が (B) と同等以上であるとともに、鉛直成分も (A) と比較して大幅に改善され、ともに数cmの再現性を示している。得られた鉛直位置の推移が現実性のある結果であるかどうかについてはさらなる検討が必要である。とはいえこの結果は、これまで水平成分と比較して大きく再現性が劣っていたため、事実上無視されてきた鉛直位置データの利用に向けた可能性を示している。

5.3 海底局の入れ替えへの適用可能性

従来の解析手法では、仮想基準点として重心位置を求めているため、海底局が不調や電池の消耗などで応答しなくなった場合、アレイの組み合わせが変わり、位置変化の継続性が絶たれてしまうという根本的問題がある。本稿で提示した複数エポック一括解析手法は、仮想基準点を必要とせずに海底局アレイ全体を「一枚岩」としてエポック間の変位量を推定できる。このため、アレイに属する海底局の利用可能な組み合わせが変わっても、原理的には変位量は推定可能である。これは早晚到来する電池の消耗に伴う海底局の入れ替えの際に、観測結果の継続性を確保する上で有効であろう。

6 まとめ

海底地殻変動観測において海底局位置を決定するソフトウェアを改良し、「複数エポック一括局位置解析」という手法を導入した。この手法は、蓄積された複数エポックのデータを用いて、未知である局間の相対位置関係を最適に推定すると同時に、局間



第4図 「宮城沖1」海底基準点において決定された海底局位置の時系列変化の比較。上から順に東西成分、南北成分、鉛直成分を表す。(A) 従来手法による通常の解析結果、(B) 石川・藤田(2005)の高さ固定による解析結果、(C) 複数エポック一括解析の結果

Fig. 4 Time series of estimated positions of the seafloor reference point MYGI. The top, middle and bottom panels correspond to the EW, NS and UD components, respectively. The results are obtained by (A) conventional method, (B) conventional method with height constraint (Ishikawa and Fujita, 2005), and (C) multi-epoch method.

の相対位置関係をエポック間で不変として拘束することにより、精度良くエポック毎の重心位置の変位量を推定する。

これまでに試行した解析結果からは水平成分のみならず鉛直成分でも数cmの再現性を示している。今後上下変動の検出にも有効となろう。

また、海底局の不調、入れ替え等で局の組み合わせが変わったときにも、エポック間の変位量を推定することが可能であるという特徴がある。

本手法は現在開発中の段階であり、手法及び得られる結果の妥当性についてはまだ評価ができていない。今後も検討を重ねていく必要がある。

謝辞

KGPS解析にはNASA/GSFCのColombo博士開発のソフトウェア「IT」(Colombo, 1998)を用いた。

KGPS陸上基準点として、国土地理院より電子基準点1秒データを提供いただいている。記して感謝します。

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 Verlag, Europe.

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.

藤田雅之・石川直史・松本良浩・望月将志・佐藤ま

りこ・矢吹哲一郎・浅田昭 (2005), 宮城県
沖海底の地殻変動と重心推定法による時系列
の検証, 日本測地学会第104回講演会要旨,
47-48.

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.

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.

松浦充宏, インバージョン解析法, 現代測地学, 「現
代測地学」編集委員会編, 477-482, 日本測
地学会, 東京.

Matsumoto, Y., M. Fujita, T. Ishikawa, M. Mochi-
zuki, T. Yabuki, and A. Asada (2006) : Un-
dersea co-seismic crustal movements associ-
ated with the 2005 Off Miyagi Prefecture
Earthquake detected by GPS/Acoustic
seafloor geodetic observation, *Earth Planets
Space*, **58**, 1573-1576.

松本良浩・石川直史・藤田雅之 (2007), 海底地殻
変動観測における音響トランスデューサ位置
のバイアス誤差の推定, 海洋情報部研究報
告, **43**, 17-28.

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.

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.