

海洋音響トモグラフィーによる赤道上の水温変動観測 －伝搬時間バイアスの補正法を適用して－

鴨志田 隆*¹ 藤森 英俊*² 吉川 泰司*²
新家 富雄*¹ 中埜 岩男*²

海洋音響トモグラフィーで観測された音波の伝搬時間と、基準とする音速場で計算される伝搬時間の間には、海洋現象と関わりが無いバイアスが存在することが知られている。このバイアスは海洋の水温分布を解析する際に大きな誤差要因となる。本研究では、中部熱帯太平洋で実施されたトモグラフィー実験データを用いて、このバイアスを評価した。実験と同時に得られたCTDデータをもとに計算した伝搬時間と比較すると、バイアスは全体の伝搬時間の0.05%に相当する。この値をオフセット値として伝搬時間を補正した。その結果、水温の推定精度が深度150m-300m間の標準偏差で2.92℃から0.27℃に向上し、CTDデータがバイアスの初期値として有効であることがわかった。そして、この手法を赤道上の約2ヶ月間のトモグラフィー実験データに適用した結果、合理的な水温変動が得られた。

キーワード：海洋音響トモグラフィー，中部熱帯太平洋トモグラフィー実験，バイアス補正

Variation of thermal field in the Central Equatorial Pacific using Ocean Acoustic Tomography Data - Applying Bias Correction method for Arrival Time -

Takashi KAMOSHIDA*³
Hidetoshi FUJIMORI*⁴ Yasushi YOSHIKAWA*⁴
Tomio SHINKE*³ Iwao NAKANO*⁴

Ocean Acoustic Tomography (OAT) is useful tool in order to observe oceanographic phenomenon in wide region. For the purposes of monitoring the ocean phenomena associated with the ENSO and observing the meridional cell between tropical and subtropical circulation, the central Equatorial Pacific tomography experiment was started in January 1999.

It is well known that there is an unknown bias of arrival pattern of the OAT data. That is the difference between measured and predicted (based on reference field) arrival pattern, which is not related to oceanographic phenomenon. Because the bias causes the serious estimation error in the OAT analysis, we investigated the correction method of the bias by comparing the arrival patterns of the OAT data to those of derived from CTD data in this experiment. As a result, the bias was estimated to be 350msec, which was about 0.05% of total arrival time. Using corrected the OAT data, estimated accuracy of temperature between 150m and 300m in deep was much improved from 2.92 °C to 0.27°C. Then useful and valid data set was obtained, which shows the signal of equatorial phenomena. Furthermore we found the CTD data is available as initial condition in order to obtain the temperature field of initial guess in the OAT analysis.

Key Words : ocean acoustic tomography , Central Equatorial Pacific Tomography Experiment , bias correction

* 1 沖電気工業株式会社 先端技術研究センター

* 2 海洋科学技術センター 海洋観測研究部

* 3 Advanced Technology Research Division, Oki Electric Industry Co., Ltd

* 4 Ocean Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

海洋の水温構造や流れを広域かつ立体的に観測するためには、海洋音響トモグラフィー(以後OATと略す)を用いた観測手法が特に有効である¹⁾。海洋科学技術センター(以後JAMSTECと称す)では、平成元年度より機器開発を進め、現状では実用段階に達している^{2), 3)}。平成11年1月からは、中部太平洋赤道域においてENSOに伴う海洋の内部構造の変化、亜熱帯と熱帯を繋ぐ循環の把握、を目指した観測研究を実施している。OATはトランシーバ(音波送受信システム)間の音波信号の伝搬時間を精密に計測し、海洋構造を推定する手法である。一般に海中における音波の伝搬時間は伝搬速度と海水の流れ分布に依存し、また、伝搬速度は水温・塩分・圧力に依存する。従って、OATで計測される伝搬時間には海洋の水温・塩分・流れの三次元分布に関する情報が反映される。

計測された伝搬時間に対して逆問題解析を行うことにより、三次元の音速分布が推定される。逆問題解析の際には、海洋データベース等から予め作成した基準音速場で計算された受波パターンと計測された受波パターンの伝搬時間差から海洋変動成分を導く方法が一般的である⁴⁾。しかし、実際に信号処理を行うと、この伝搬時間差に海洋現象と関わりが無い「ずれ」が存在する。図1は、今回の研究に使用した計測した受波パターンとこの受波パターンと同時期に観測したCTDデータから計算した受波パターンを示す。両者は、受波パターンはほぼ一致するものの、絶対的な到達時間に全体の0.05%に相当するバイアスが存在する。このバイアスは海洋現象に伴う伝搬時間の偏差と比べ1～数倍の大きさを持つ。逆問題解析では上記の様に音速場の偏差を扱うため、このバイアスが必然的に解析値に影響を及ぼし、海洋の水温分布推定値

の大きな誤差要因となる。

本研究では、デリケートな扱いが必要な伝搬時間の時間バイアスを補正して除去する方法を作成し、合理的なOAT解析結果を得られたので報告する。以下、第2節では中部熱帯太平洋のトモグラフィー実験と取得データについて記述する。第3節では、伝搬時間バイアスの補正・除去方法について記述する。そこでは、トランシーバ設置時に観測したCTDデータを用いて音波の伝搬時間を予測し、計測データと比較することで得られた差分を用いて時間バイアスの除去を行った。第4節ではこの補正法の適用例として、中部熱帯太平洋トモグラフィー実験の水温変動について記述する。さらに、第5節では伝搬時間のバイアスの原因を考察する。

2. 中部熱帯太平洋トモグラフィー実験

JAMSTECでは、1998年12月から2000年12月まで中部熱帯太平洋において、OATシステムによる観測実験を実施している。実験目的はエル・ニーニョや気候変動に関係した水温分布や流速分布を観測することで、このシステムはエル・ニーニョや気候変動の予測に役立つデータを提供できるものと期待されている。実験の詳細については、中埜他(文献5)を参照されたい。

観測位置の熱帯太平洋日付変更線付近は、エル・ニーニョの消長と関係の深い熱帯暖水プール海域と赤道冷水域との境に当たる。図2に示すように、トランシーバネットワークは緯度方向約14度、経度方向10度の長方形に配置され、各トランシーバ間(間隔は約494.16kmから約1840.54km)の音波伝搬時間とその信号強度が計測される。本研究で扱うデータは赤道付近(トランシーバ1-2間)で取得されたものである。この海域では、海面から

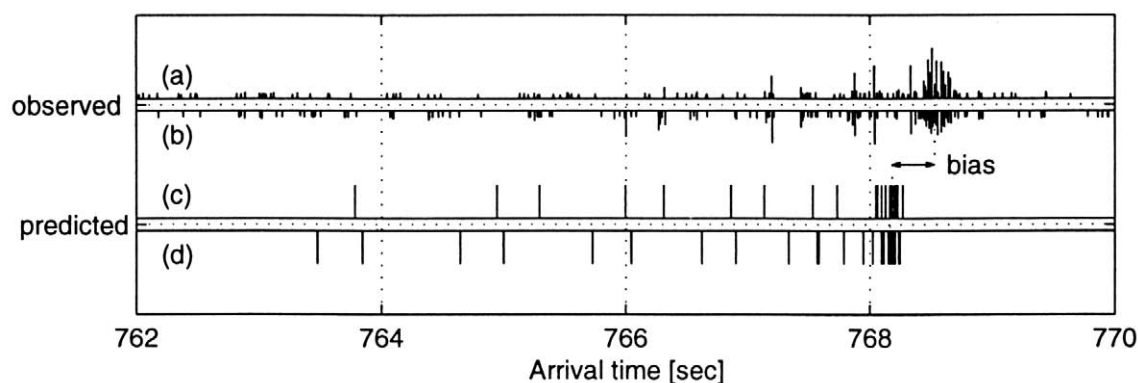


図1 海洋音響トモグラフィーで観測された受波パターンと平均的な水温鉛直分布 $C(z)$ をもとに音線理論を用いて計算された受波パターンの比較。 $C(z)$ は本実験で観測したCTDから作成した。上下の観測された受波パターンは受波器に上方向入射のパターンと下方向入射のパターンをそれぞれ示す。予測値も同様な表示である。

Fig. 1 Comparison of measured and predicted arrival patterns. The measured arrival pattern is derived from a shot data in 12 January. Predicted arrival pattern was calculated from the range-average sound-speed profile $C(z)$ using ray theory algorithm. $C(z)$ is constructed by CTD data obtained from this OAT experiments.

100m付近まで南赤道海流(西向流), その下の主水温躍層中100mから300m付近までを赤道潜流(東向流)という代表的な海流が存在する。

本研究で使用したデータは1月15日より3月15日まで計測された受波パターンである。なお, 1月15日から1月19日までは1日毎に3時間間隔で, 1月22日から3月

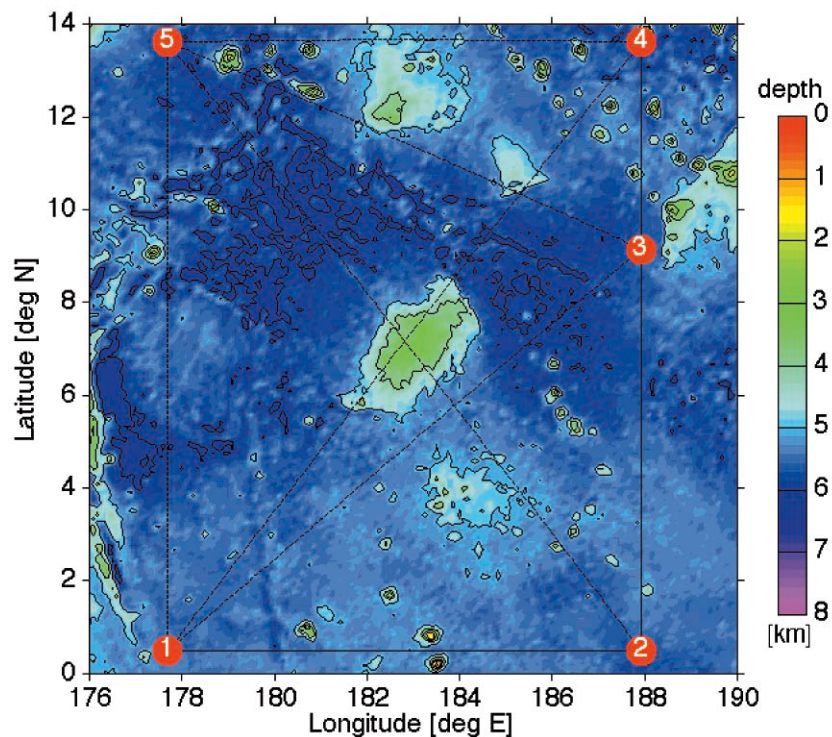


図2 中部熱帯太平洋トモグラフィ実験におけるトランシーバ配置図。5つの赤丸とその数字がトランシーバの位置と番号をそれぞれ示す。水深(カラーバー)とトランシーバ間の音線通過経路(実線)を併せて示す。

Fig. 2 Transceiver positions (red solid circles 1 - 5) of the central Equatorial Pacific OAT experiments. Color bar and solid line show water depth and eigenray path between transceivers, respectively.

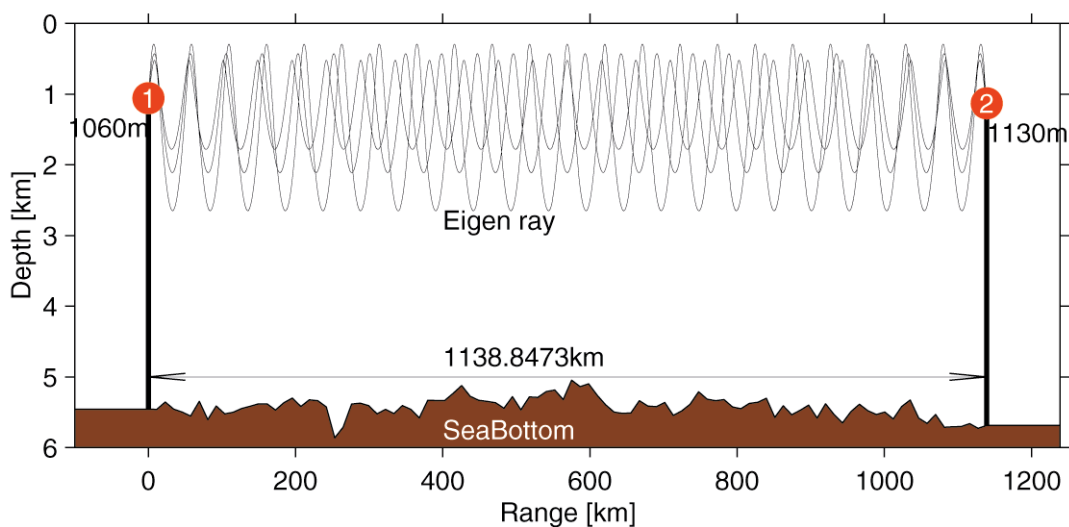


図3 トランシーバ間(1と2)の固有音線の経路図。図は代表的な3つの音線経路を示す。音線経路は平均的な水温鉛直分布をもとに音速を計算し, トランシーバ間の固有音線を求めた。

Fig. 3 Examples of eigenray paths between transceivers 1 and 2 based on $C_0(z)$.

15日までは4日毎に1日に当たり4時間間隔で計測が行われている。図3にトランシーバ間の代表的な3本の固有音線経路の模式図を示す。この測線では20本以上の音線情報を識別することが可能ではあるが、ここでは、ほぼ全期間で安定して検出できる14本の音線信号を本研究の解析に使用した。なお、赤道域におけるSOFARチャネル(海中の音速プロファイルが形成する導波管)の深度は約500mから1500mであり、そのため、全トランシーバは約1100m深に設置されている。

3. 伝搬時間バイアスの補正法の検討

3.1 従来のデータ処理法

計測された受波パターンは、図4に示されるフローチャートに沿って処理される⁹⁾。データ処理は2つ処理群

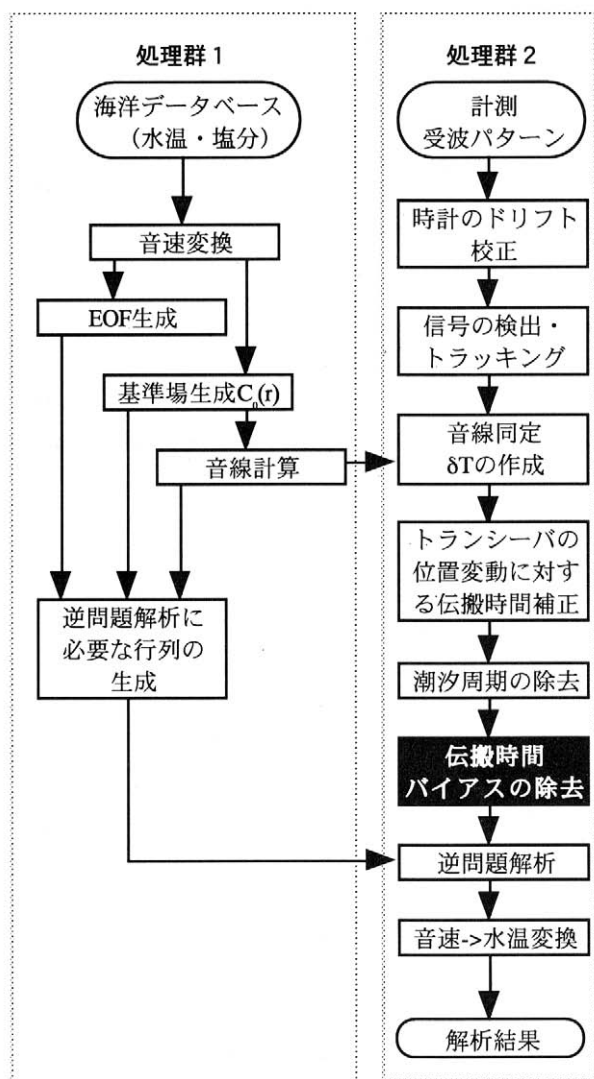


図4 OATデータ処理フローチャート

Fig. 4 Flowchart showing the OAT data processing algorithm.

からなり、処理群1は逆問題解析に必要な行列を算出し、処理群2は観測された受波パターンに対して、トランシーバの挙動等の先見情報を用いた補正を施す。その後、処理群1で生成された受波パターンの基準値及び行列等を用いて実海洋の音速場から水温場を推定する。ここでは、この従来の処理法の設定とそれを用いた解析結果を示す。

OAT解析では三次元の音速変動量を水平・鉛直方向の直交関数で展開しているため⁷⁾、推定するパラメータは直交関数の係数になる。解析には、鉛直方向の直交関数として、経験的直交関数(EOF)を用いた。水平方向にはトランシーバ間の平均場を推定するため東西平均の成層とした。逆問題には確率的逆問題手法⁸⁾を採用した。上記のEOF解析及び成層場の作成には、そのデータベースとしてNODCの海洋データベースと本海域実験時に観測されたCTDデータを併せて用いた。音速式にはDel grossoの式⁹⁾を採用した。音線計算はJAMSTECの音線理論アルゴリズム¹⁰⁾を用いて行った。この処理群1により、逆問題解析に必要な三つの行列(直交関数の係数を伝搬時間差に変換する行列、直交関数の係数の共分散行列、伝搬時間差誤差の共分散行列)が出力される。

次に処理群2では、第一に計測された受波パターンの伝搬時間の校正、即ち、トランシーバを管理している高精度時計のドリフト成分の校正を行う。第二に、信号ピークの検出とトラッキングを行う。計測された受波パターンには信号と雑音が混在するため、信号を検出し、計測データ全体から信号のトラッキングを行うことにより、受波パターンの変動のトレンドの検出や更なる信号数の増加が期待される。第三の音線同定では、計測した受波パターンとそれに対応する基準音速場の受波パターンを結び付ける作業を行い、OAT解析の唯一の情報である伝搬時間差が作成される。第四に、作成された伝搬時間差に対して、海中のトランシーバの挙動による位置変化をトランスポンダによる測位データを用いて補正する。最後に、目的の海洋現象を抽出するため、潮汐等対象外の海洋現象を除去する。

逆問題解析では、直交関数の係数を推定し、係数と直交関数そして基準音速場を用いて、音速場を再構築する。最後に再構築された場を変換することによって水温場を推定する。この従来の方法による逆問題解析結果(水温プロファイル)とOATとは独立なCTD観測データを比較すると(図5)、水深150mで約4.3℃、300mで0.38℃、1000mで0.15℃の偏差が生じる。なお、解析に用いた固有音線の通過最浅深度が150mであるため、比較する深度範囲を150m以深とした。OATの予測精度(深さ150mで約1.1℃、深さ300mで約0.5℃、及び深さ1000mで約0.13℃)を上回る偏差が水温躍層より浅い部分(250m以浅)で見られる。これは、海洋の水温変動特性(EOFモード)で記述できない音速場のバイアスを含めた偏差を解析データとして扱っていることに起因するものと考えられる。

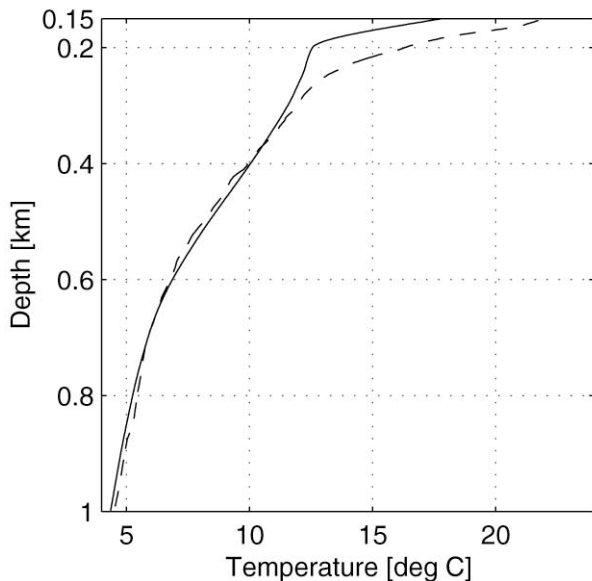


図5 CTDと時間バイアス補正前のデータを用いたOATデータ解析(1月15日)の比較。実線と破線はそれぞれOATとCTDで得られた水温プロファイルを示す。

Fig. 5 Comparison between temperature profile from OAT result in 15 January and that from range-averaged CTD data of this experiments. The OAT result is analyzed using time bias-uncorrected arrival time. Solid and dash lines indicate profiles from OAT and CTD, respectively.

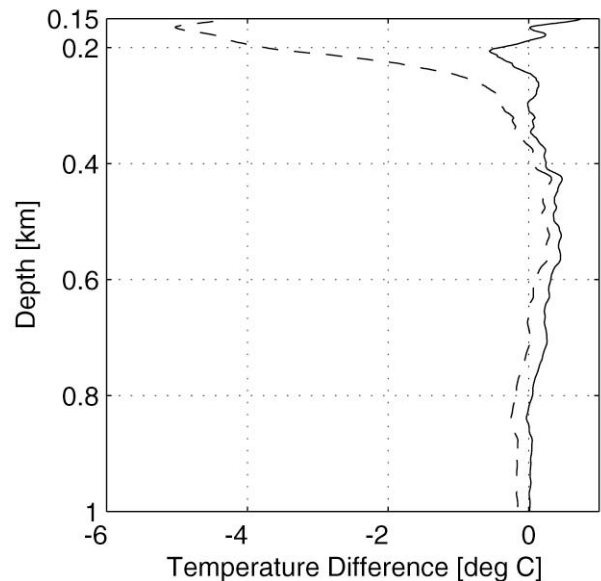


図6 時間バイアス補正後データから得られたOAT解析結果とCTD平均水温プロファイルの差(実線), 及び時間バイアス補正前データから得られたOAT解析結果とCTD平均水温プロファイルの差(破線)。

Fig. 6 Difference between OAT-derived time bias-corrected and CTD-derived temperature profiles (solid line) and those between OAT-derived time bias-uncorrected and CTD-derived temperature profiles (dash line).

3.2 伝搬時間バイアス補正法

従来のデータ解析処理では、逆問題解析の出力に明らかに異常な偏差が現れた。これは逆問題解析の入力、すなわち計測した受波パターンの伝搬時間に問題があることが容易に想像される。実験時に観測したCTDデータから予測されたトランシーバ間の伝搬時間と、CTD観測と同時期に計測した音波の伝搬時間を比較すると、図1に示すように明らかにバイアス的なずれを生じているのが確認できた。そこで、予めこのずれを検出し、逆問題解析の前で除去する処理を加えた(図4中の白抜き処理)。なお、伝搬時間バイアスの検出には、浅深度の激しい海洋変動の影響がなく、かつ伝搬損失が少ないSOFAR層の軸付近を伝搬する音線信号を用いた¹¹⁾。ただし、軸付近には異なる経路を通る複数の音線が存在し数100msecの幅をもった固まりとして観測されるため、この固まりの中心を代表値とした。そして、観測した受波パターンと同時期に観測したCTDデータで計算した受波パターンからこの代表値を検出し、その差を伝搬時間バイアスとした。

図6実線は補正後のOAT解析結果とCTDデータの平均値の差を示す。同様に、破線は補正前のOAT解析結果の差である。水深200mでは3.3°C、1000mでは0.14°C改善され、全水深でCTDプロファイルとほぼ等しく、水温変動が大きい水深150mから300m付近の推定精度(標準偏差)

が2.93°C(補正前)から0.27°C(補正後)に著しく向上し、十分誤差範囲内に入る結果を得ることができた。ここでは図示しないが、この両者の差は解析に用いられたこの海域のEOFの第一モードと似ている。従って、本手法によってバイアスの除去することは、過大評価していたEOFの第一モードを正常に戻す効果がある。

4. 伝搬時間バイアスを補正法を適用したOAT解析結果と補正法の評価

4.1 OAT解析結果

前節に示した伝搬時間バイアス補正法を中部熱帯太平洋トモグラフィーデータの解析に適用する。図7にトランシーバ間(1と2)の平均水温プロファイル時系列のOAT解析結果を示す。解析期間は1999年1月15日~3月15日(15-73 Yearday,1999)である。カラーバーは水温を示す。解析結果は赤道海域の混合層下の2カ月間の水温変動を顕著に捕らえている。

20°C等温線の深さの時間発展に着目する。観測当初(1月15日)は約170m深であったが、その後10日間のうちに約150m深まで上昇し、混合層付近が低温化する傾向が見られる。低温化は約一ヶ月間続き、48日(2月17日)前後から急激に等温線の深まり(高温化)する傾向が見られた。一方、12°C等温線は300m深付近で安定して存在し、海面付近の変動とは独立な挙動を示した。この混合層か

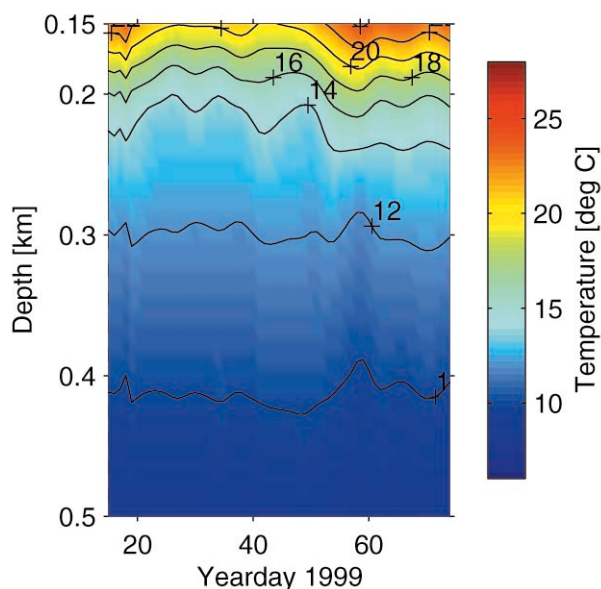


図7 時間バイアスの補正後データから得られた、トランシーバ間(1と2)の平均水温場時系列のOAT観測結果。横軸はYeardayであり、観測期間は1999年1月15日-3月15日(15-73 Yearday,1999)。カラーバーは水温を示す。

Fig. 7 Time series of range-averaged temperature profile between transceivers 1 and 2 derived from OAT results using time bias-corrected arrival time. The horizontal axis is Yearday, and the observation period is from 15 January to 15 March 1999 (15-73 Yearday). Color bar indicates temperature.

ら主水温躍層上部の変動がENSO(この時期、ラ・ニーニャに相当)のシグナルをいかに捕らえているのか、今後解析が行われる予定である。

4.2 補正法の評価

図8は、この解析期間の伝搬時間残差の標準偏差を固有音線毎に上方転回点深度の関数として表したものである。伝搬時間残差とは、解析した水温で音波を伝搬させたときの伝搬時間(解析値)と解析に用いた音波の伝搬時間(計測値)との差で定義され、伝搬時間から見た解析値の誤差を表している。また、上方転回点とは、固有音線が海中を伝搬していく中で、浅い方向から深い方向へ伝搬する向きを変える点のことであり(図3参照)、固有音線の到達深度を表している。図8から、200m深以浅の深さまで到達する音線は誤差が大きく、SOFAR軸付近を通る音線は誤差が小さくなっているのが分かる。

今回の解析では、予測される伝搬時間誤差を20msecと仮定し、推定演算子(伝搬時間差を音速変動量に変換する行列)を作成しており、推定誤差は同程度あるいはそれより小さく現れているのが分かる。この結果、逆問題解析は矛盾なく動作していることが確認され、解析結果も妥当なものであると言える。

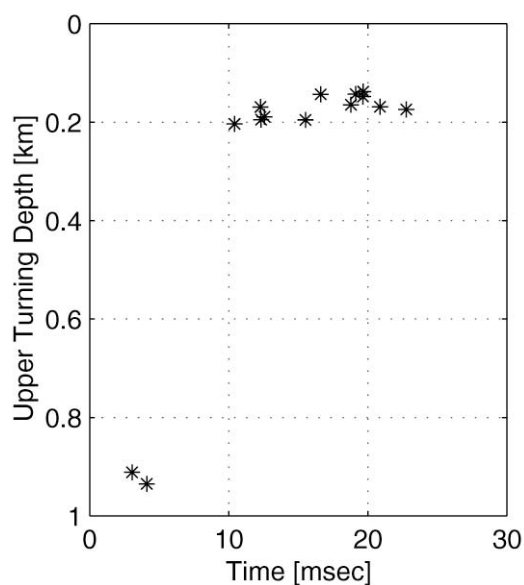


図8 伝搬時間差の残差と上方向の音線展開点深度の関係

Fig. 8 Relationship between residual of arrival time perturbations and upper turning point of eigenray.

5. 考 察

3節では、音波の伝搬時間に関して計測値と予測値の間にバイアスが存在し、これを除去することで妥当な解析結果を得ることを示した。本節では、この伝搬時間のバイアスの原因について計測誤差と解析誤差を検討した。

音波の計測誤差として、音波の伝搬時間はトランシーバの内部時計で管理されるため、時計の精度が誤差の要因になる。本システムでは、観測スケジュールに従いGPS衛星の時計信号を海面ブイで受信し、各トランシーバの内部時計の同期、時刻校正を行っている¹²⁾。そのため時間精度は 3.2×10^{-10} sec/yearと非常に高く、本研究で得られたバイアスを説明できない。また、トランシーバ設置位置の計測誤差は、測線距離の基準化を行う際に伝搬時間のバイアスとして作用し、誤差の原因となり得る。GPS測位を用いた本システムの測位誤差は最大で100m程度となり、伝搬時間に換算すると130msec程度である。従って、測位誤差がバイアス要因の一つである可能性がある。

データ解析に関わる誤差について考える。まず、音線計算アルゴリズムによる違いを評価するため、本実験中に観測したCTDデータからトランシーバ間の音速場を作成し、他の音線計算アルゴリズムによる比較を行った。図9中段にJAMSTECのアルゴリズムによる計算結果を、下段は米国ウッズホール海洋研究所(WHOI)のアルゴリズム¹³⁾による計算結果を示す。図中各受波パターンの上段(a, c, e)が上方向から受波器に入射する信号、下段(b, d, f)は下方向からの受波パターンである。両者の差は最大で5msec程度であった。従って、音線計算アルゴ

リズムの特性による違いは、今回のバイアスに本質的ではない。

次に非成層場 (Range-Dependent ; RD) であるものを成層場 (Range-Independent ; RI) に近似する解析法に起因する伝搬時間バイアスを考える。そこで、CTDデータを水平方向に平均した成層場と水平分布を持たせた非成層場について音線計算を行い、近似による誤差を見積もった。図9上段は非成層場の音速場におけるJAMSTECのアルゴリズムによる計算結果を、中段は成層場に近似し

た音速場での結果を示す。両者の差は最大で5msec程度であった。従って、この近似誤差はバイアスの主要因ではない。

音線計算に用いる音速値の信頼性について考える。一般に海中の音速は直接観測ではなく、水温・塩分等の情報から音速変換式を用いて間接的に求められる。この音速変換式は現在までに幾つか提案されている。そこで、代表的な音速変換式を用いて、伝搬時間への影響を見積もった。図10上段は、本研究で採用したDel Grossoの音

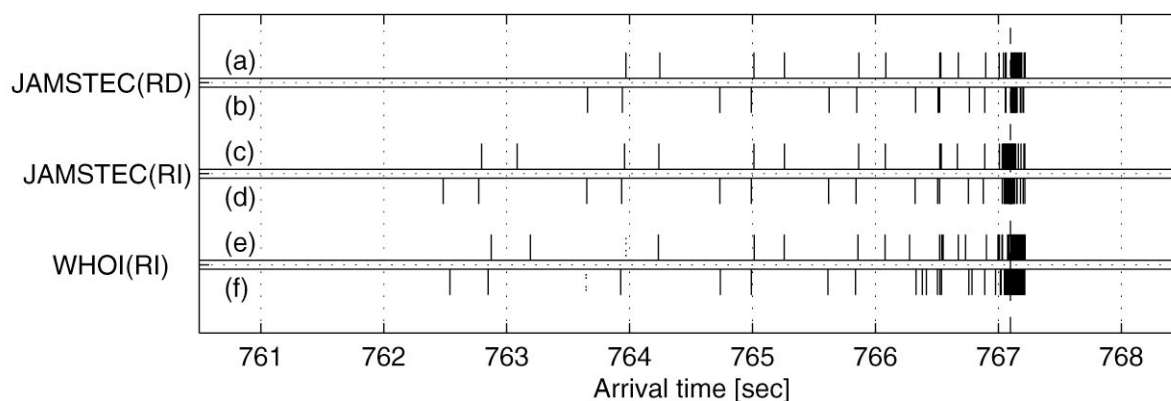


図9 JAMSTECの音線計算プログラムを用いて非成層場で計算した結果(上段)；JAMSTECプログラムを用いて成層場で計算した結果(中段)；WHOIプログラムを用いて成層場で計算した結果(下段)。音速プロファイルは本実験で得られたCTDデータからDel grossの音速式を用いた計算された。

Fig. 9 Arrival pattern calculated from the range-dependent sound-speed profile using JAMSTEC ray theory algorithm (upper); from the range-independent sound-speed profile using JAMSTEC algorithm (middle); and from the range-independent sound-speed profile using WHOI algorithm (bottom). All sound-speed profiles were calculated from CTD data obtained from this OAT experiments using Del gross sound-speed equation.

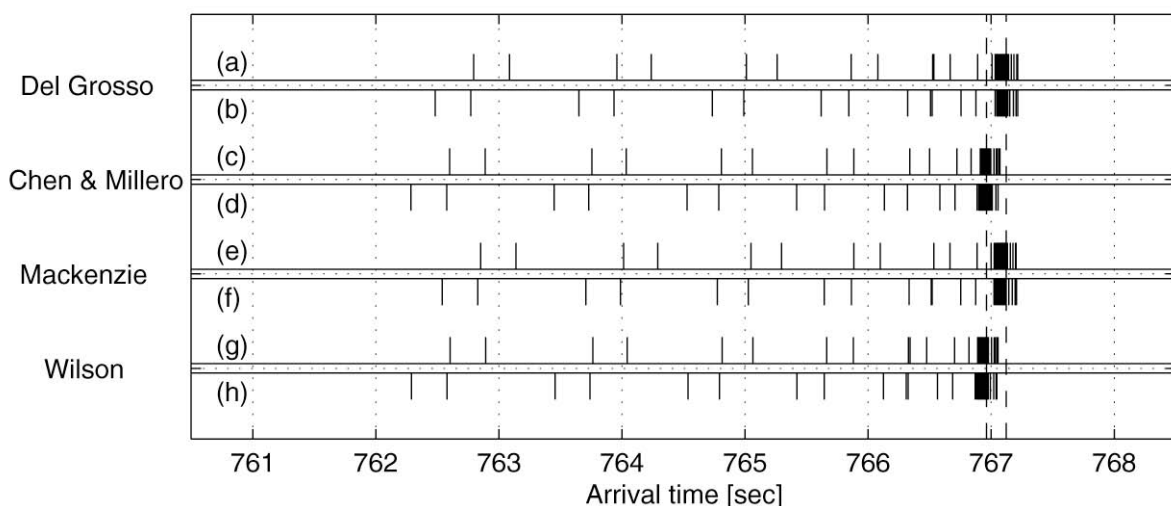


図10 上段からDel grossの音速式を用いて計算された音速場上で計算した受波パターン，Chen & Milleroの音速式，Mackenzieの音速式，そしてWilsonの音速式である。音線計算はJAMSTECアルゴリズムを用いて成層場で行った。

Fig.10 Arrival pattern calculated from the range-dependet sound-speed using Del gross sound-speed equation; Chen & Millero; Mackenzie; and Wilson (from top to bottom). All arrival patterns were calculated from the range-independent sound-speed profile using JAMSTEC algorithm.

速変換式を用いて計算された受波パターンを示す。以下、同様にChen & Milleroの式¹⁴⁾、Mackenzieの式¹⁵⁾、Wilsonの式¹⁶⁾を用いた受波パターンである。図中各受波パターンの上下段の表示は図9と同様である。Del Grossoの式が最も遅く到達し、速いものとの差は160msec程度であった。Del Grossoの式は現在提案されている式の中で最も認められており、計測値に最も近い値を示す。しかし、図1からも分かる通り計測値との間にバイアスが存在し、今回のOAT実験では音速変換式の信頼性が疑問視される結果となった。

以上、有力な要因を検討したが伝搬時間のバイアスを定量的に説明できる原因を見い出すことができなかった。それ以外に基準音速場による非線形誤差¹⁷⁾や音速変動量の記述誤差等に起因する影響があるかもしれない。今後、総合的なバイアスの扱い、除去法について検討が必要であろう。また、浅深度における水温プロファイルの推定誤差の大きさも検討する必要がある。さらに、解析のパラメータや観測の情報量に改善の余地がある。例えば、解析に使用する音線として、今回は確実な14本を使用した。その他信号として有為な数本の情報を使用することでさらに浅深部の水温場の推定が可能となる。これにより海洋学的情報(混合層)の推定精度の向上が期待される。

6. おわりに

OAT解析における伝搬時間バイアスの補正法について検討した。本補正法を導入することにより、水深150mから300m付近の推定精度(標準偏差)が2.93℃(補正前)から0.27℃(補正後)に著しく向上し、海洋物理現象の解析に耐える精度を得ることが可能となった。さらに、中部熱帯太平洋トモグラフィーデータに適用することにより、赤道域の水温変動を捕らえることができた。時間バイアスの主たる要因を究明するまでには到らなかったが、本補正法が有用なことが確かめられた。

本研究は海洋科学技術センターと沖電気工業株式会社の共同研究「海洋音響トモグラフィーデータの解析手法の研究」、及び海洋科学技術センターのプロジェクト研究「海洋音響トモグラフィー技術の研究開発」のもとで行われたものである。今後、本研究結果も踏まえて、本格的な海洋物理現象の解析が行われる予定である。文末に当たり、トモグラフィー実験を支援をいただいた海洋調査船「かいよう」乗組員各位に対し深謝致します。

参考文献

- 1) Munk, W. and C. Wunsch : Ocean acoustic tomography - a scheme for large scale monitoring-, Deep-Sea Research, **26**, 123-161. (1979)
- 2) 中埜岩男 : 海洋音響トモグラフィーシステム, JAMSTEC, **9**, 1, 18-26. (1997)

- 3) 中村敏明, 中埜岩男, 土屋利雄, 網谷泰孝, 越智寛, 藤森英俊, 新家富雄, 榊田尚志, 海法宇治, 中西俊之 : 200Hz送受信システムの開発, 海洋科学技術センター試験研究報告, **34**, 103-113. (1996)
- 4) 新家富雄, 鴨志田隆, 伊藤隆夫 : 海洋音響トモグラフィーにおける次元性の比較と実海洋要素を取り込んだ3次元シミュレーション, 海洋理工学会誌, **3**, 1, 11-22. (1996)
- 5) 中埜岩男, 中村敏明, 藤森英俊, 金泉智之, 袁剛, B. Howe : 中部太平洋赤道域トモグラフィー実験(1)-観測計画と実験速報-, 海洋音響学会平成11年度研究発表会講演論文集, 87-88. (1999)
- 6) 鴨志田隆, 賀谷彰夫, 中埜岩男, 藤森英俊, 袁剛 : 200Hz海洋音響トモグラフィーシステムによる黒潮続流域立体観測-解析手法-, 海洋理工学会平成10年度春季大会講演要旨集, 15-16. (1998)
- 7) Shinke T., T.Itoh, T.kamoshida, A.kaya, and M. Matsushita: Horizontal expansion function in OAT, IEEE Oceans'97 Proceedings, **1**, 441-446. (1997)
- 8) Aki, K., and P. Richards : Quantitative Seismology, Theory and Methods, Freeman. (1980)
- 9) Del Grosso, V. A. : New equation for the speed of sound in natural waters (with comparison to other equations), J. Acoust. Soc. Am., **56**, 1084-1091.(1974)
- 10) 奥島基良, 大槻茂雄 : 黒潮を横断する音波伝搬の計算, 音響学会秋季講演論文集, 537-538. (1981)
- 11) 新家富雄, 吉川泰司, 三寺史夫 : カルマンフィルターを用いた海洋音響トモグラフィーデータの解析手法の研究(II)-カップリングスキーム-, 海洋科学技術センター試験研究報告, **40**, 169-177. (1999)
- 12) 前島芳充, 中埜岩男, 中村敏明, 茨田和生, 海法宇治, 長内正憲, 相田雅史, 塩野入六成 : 200Hz海洋音響トモグラフィーシステムの時間計測手法, 海洋科学技術センター試験研究報告, **37**, 119-133. (1998)
- 13) Bowlin, J. B., J. L. Spiesberger, T. F. Duda, and L. F. Freitag: Ocean Acoustical Ray-Tracing Software RAY, Tech. Rep., Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI-93-10. (1992)
- 14) Chen, C.-T., and F.J.Millero : Speed of sound in seawater at high pressures, J. Acoust. Soc. Am., **62**, 1129-1135.(1977)
- 15) MacKenzie, K. V. : Nine-term equation for sound speed in the oceans, J. Acoust. Soc. Am., **70**, 807-812.(1981)
- 16) Wilson, W. D. : Equation for the speed of sound in seawater, J. Acoust. Soc. Am., **32**, 1357L.(1960)
- 17) 藤森英俊, 中埜岩男, 中村敏明, 金泉智之, 鴨志田隆, 賀谷彰夫 : 中部太平洋赤道域トモグラフィー実験(3)-水温分布の算出とその推定誤差-, 海洋音響学会平成11年度研究発表会講演論文集, 93-96.(1999)

(原稿受理 : 2000年 2月 1日)