

カルマンフィルターを用いた海洋音響トモグラフィデータの 解析手法の研究(II) -カップリングスキーム-

新家 富雄^{*1}

吉川 泰司^{*2} 三寺 史夫^{*2, *3}

海洋音響トモグラフィで観測される海洋現象を物理過程に即して理解するために、海洋力学モデルへのデータ同化を用いた解析手法の研究を行っている。本解析手法は二層準地衡流モデルの流線関数とトモグラフィデータの伝搬時間を関係付けた上で、カルマンフィルターを用いてデータ同化することにより海洋構造の再構築を行う。その結果、トモグラフィデータから海洋力学現象が抽出でき、物理過程を研究することが容易となる。本稿では、音速変動量とモデルから得られる傾圧項を結びつけるカップリングスキームについて紹介する。次に、CTDデータから得られる音速場に対するスキームの記述性と再現性の評価を行った。さらに、トモグラフィ実験のデータとモデル結果から得られた音速場上での伝搬計算結果より、黒潮続流の変動とSOFAR層を伝搬する音線の平均音速との関係を示した。これらの結果から、カップリングスキームの有効性が明らかになった。

キーワード：海洋音響トモグラフィ，準地衡流モデル，データ同化

Research on Analysis Methods for Ocean Acoustic Tomography data using the Kalman Filter (II) - Coupling Scheme -

Tomio Shinke^{*4}

Yasushi Yoshikawa^{*5} Humio Mitsudera^{*5, *6}

An analysis method for ocean acoustic tomography (OAT) data has been studied using data assimilation technique to the ocean dynamical model to explain ocean phenomena observed by OAT in accordance with physical processes. The method reconstructs the ocean structures by a data assimilation technique using the Kalman filter after relating the stream function of the two-layer quasi-geostrophic model to the propagation time of the OAT data. The resulting OAT-derived dynamical ocean phenomena enable us to study the physical processes from the OAT data. In this paper, we introduced the coupling scheme linking variation of sound speed to the baroclinic component of the model, and evaluated descriptiveness and reproductiveness of the scheme for the sound speed field measured by CTD. We also showed the relationship between the shift of the Kuroshio extension and the average sound speed of an acoustic ray that propagates through the SOFAR layer derived both from the OAT data and the result of the sound propagation simulation on the model field. The present study demonstrated the feasibility of the application of the coupling scheme to the OAT data analysis.

Key words : ocean acoustic tomography , quasi-geostrophic model , data assimilation

* 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 第2研究グループ

* 3 地球フロンティア研究システム・国際太平洋研究センター

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

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

* 6 International Pacific Research Center , Frontier Research System for Global Change

1 はじめに

海洋音響トモグラフィ(以後OATと略す)は音響技術を用いて、海洋内部の水溫・密度構造を広域かつ立体的にモニターする有力な手段であり、近年、世界的に測器の開発、解析手法の研究、そして実海域での運用がなされてきた。我が国でも海洋科学技術センターを中心に200Hz低周波音源を核とした送受信システムの開発(中村他;1996)¹⁾、データ解析手法の研究(中埜他;1995)²⁾、そして黒潮続流域(Yuan *et al.*;1999)³⁾及び赤道熱帯海域(藤森他;1999)⁴⁾での観測とその解析がなされており、近い将来、再び黒潮続流域にOATを展開する予定である。

OATデータを利用する際には、観測された海洋変動現象を物理過程に則して理解することが重要である。個々のスナップショットデータを詳細に観察することは勿論重要であるが、海洋数値モデルへのデータ同化(data assimilation)手法を用いた解析手法も有効であると考えられる。本研究では、海洋モデルとして鉛直構造を二層化した準地衡流モデル(以後QGモデルと略す)を採用し、そのモデル方程式⁵⁾の「流線関数」とOATデータの「音波伝搬時間」という二つの物理量を関係付けた上で、カルマンフィルターを用いてデータ同化することにより、海洋現象をより良く理解することを目指している。本研究のモチーフは、三寺等(1999)⁶⁾の理論的研究により上記二つの物理量を関係付けた、カルマンフィルターに必要な観測方程式である。本稿では、それを受けた形で二層QGモデルの結果から音速場を得るための具体的な方法、即ち、傾圧項と音速変動量を関係付けるカップリングスキーム(coupling scheme)の作成を主題とし、このスキームに対する有効性の評価を行った。実海域の音速プロファイルに対するスキームの記述性及び音速場の再現実験を用いて再現性を確かめた後、黒潮続流域で計測された伝搬時間と数値モデル上で行った音波伝搬実験結果を比較することにより有効性を評価した。その結果、カップリングスキームの記述性は高く、二層QGモデルとこのスキームによって得られる音速場は中規模現象を適切に表現し、黒潮続流変動に伴う音速変動が数値モデルにおいても定性的に示される。以上のことから、このカップリングスキームの有効性が示されたのでここに報告する。

2 二層QGモデルにおけるCoupling Scheme^{8,9)}

カルマンフィルターを用いたデータ同化は、OATで観測される実際の音速場と二層QGモデルから算出される音速場における伝搬時間差を用いて行なわれる。その際、二層QGモデルから音速場を得る方法が必要となる。その方法の鍵となるのが、三寺等が⁷⁾二層QGモデルと伝搬時間を関係付けた際に明らかにされた、音速変動量と上下層の境界面変位(傾圧項)の関係である。ここでは、一般的にOATで用いられている音速変動量のモデル化手法を示した上で、傾圧項のみで音速場をモデル化する方法を再度示す。次に、実海域のCTDデータを基に、傾圧項と対応させる音軸付近のある深度の音速変動量の代表性を調査した。この代表深度の音速変動量とモデル化手

法を結合させることにより、傾圧項と音速変動量のカップリングスキームを導出した。

2.1 二層QGモデルにおける音速変動量のモデル化

OATでは限られた情報量を効率的に利用するため、関数による音速変動量のモデル化を行っている。ここでは、一般的な音速変動量のモデル化について示した上で、傾圧項によるモデル化の可能性を示す。

三寺等によると、観測される実際の音速場 $C(r)$ に近い場として想定する基準音速場 $C_0(r)$ における双方向の伝搬時間との差で考える。双方向の伝搬時間差 s は音速変動量 C 及び上下層の境界面変位 d と下式のように結びつけられている。(文献7の26式参照)

$$\delta s_i = \frac{1}{2}(\delta \tau_i^+ + \delta \tau_i^-) \approx - \int_i \frac{\delta C}{C(r)_0^2} ds + \epsilon_r$$

$$= - \frac{\Delta \rho}{\alpha D} \left(\frac{\partial C}{\partial T} \right) \int_i \frac{\eta}{C(r)_0^2} ds + \epsilon_i \quad (1)$$

ここで、 $+$ と $-$ はトランシーバ間における音波伝搬の方向である。 ρ は海水の密度、 D は海洋における深度のScale height、 T は水溫、そして $\eta = -(r/T)p$ である。ここで p は圧力である。 i は $C_0(r)$ における i 番目の固有音線であり、積分はこの経路に沿って行われる。また、 ϵ_r は二層近似したことによる誤差、グリッド化したことによる誤差、及び非線形誤差を含む観測誤差である。式中の ϵ_i は傾圧項 η に置き換えが可能なため¹⁰⁾、 C は近似的に力学的な傾圧成分の変動量を記述する。 C は一般に以下のように鉛直方向の展開関数 Ψ で展開して表される。

$$\delta C(z) \approx \sum_j^n \alpha_j \cdot \Psi_j(z) \quad (2)$$

ここで、 j と n はそれぞれ Ψ のモード番号と最大モード数であり、 α_j はモードの展開係数である。音速プロファイルは、 $\alpha_j \cdot \Psi_j$ 、そして C_0 を加算して表現されるため、従来のデータ解析では、Cornuelle等(1985)¹¹⁾は Ψ として歴史的海洋資料のデータベースから算出した経験的直交関数(EOF)を適用した。また、Howe等(1987)¹²⁾はQGモデルから得られる流線関数のモード(力学モード)を使用していた。本研究で用いる二層QGモデルでは、展開係数が α_j だけであるため、この α_j 変動だけで $C(z)$ を記述する具体的な方法の導出が重要課題である。

2.2 Coupling Schemeの導出

2.1節で示した音速変動量のモデル化により、傾圧項 η を展開係数とした鉛直方向の展開関数(鉛直モード)を具体的に作成し、二層QGモデルにおけるカップリングスキームを導出する。

二層にモデル化された海洋構造の概念図を図1左側に示す。モデル化された海は、密度躍層(境界面)を境にした二つの等密度層に分割される。ここで海洋変動を表

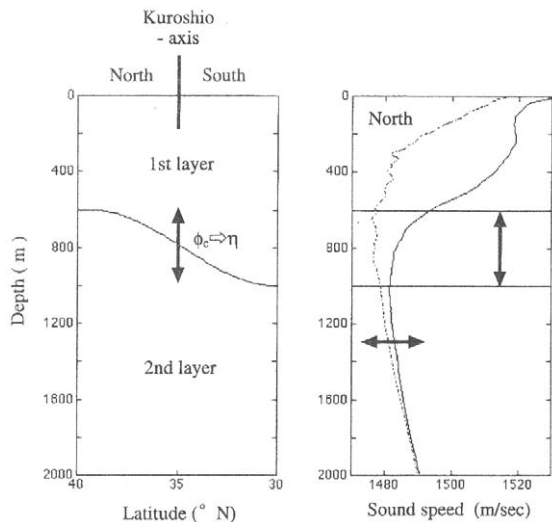


図1 黒潮海域における南北方向の二層海洋モデルと音速プロファイル
Fig.1 Two layer ocean structure model (left) and sound speed profiles at north and south of the Kuroshio (right).

す境界面変位は η に置き換えることができる。図1右側は黒潮続流域を挟んで南北両側の典型的な実海域の音速プロファイルである。海域により大きな差が見られ、亜熱帯海域(実線)と混乱水域(破線)の音速プロファイルでは、音速極小層の深度や極小層の以浅の形状が異なる。これらは水温躍層の深度とその形状の違いに対応する。ここでQGモデルの ϕ_c と音速変動量 C を対応付けるためには、如何に音速プロファイルを境界面付近深度の C だけで代表させるかが重要である。

この代表性を、CTDデータ(1988年4~5月)を用いて調べた。CTDデータの観測線を図2に示す。図中に示す観測線1~3は各々145°E, 147.5°E, 152.5°Eでの黒潮

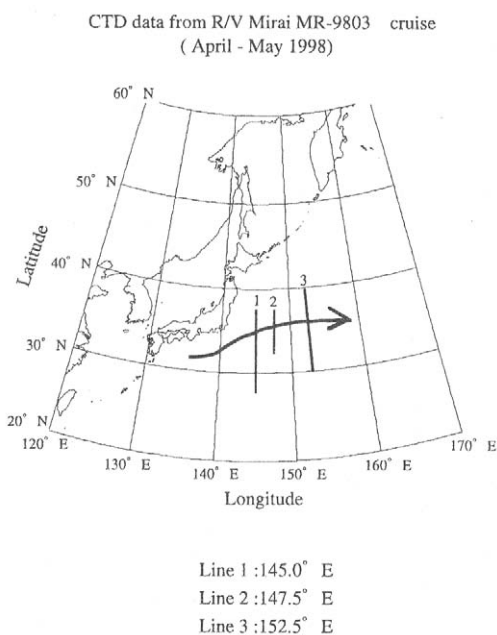


図2 MR-9803 航海におけるCTD観測位置(4月-5月1998年)
Fig.2 Location of CTD measurements in Kuroshio extension at MR-9803 cruise of R/V Mirai(April - May 1998).

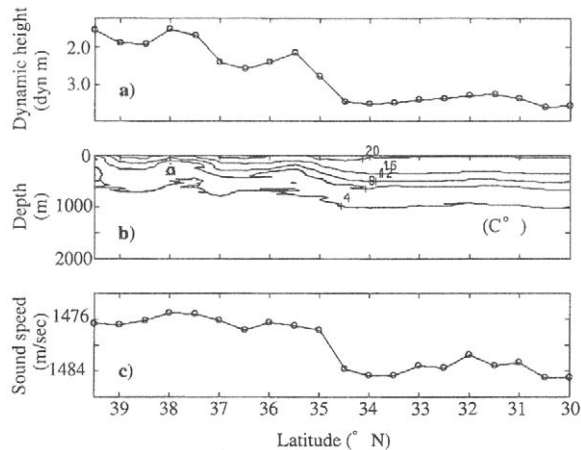


図3 測線3(152.5E)における海洋力学高度,水温断面,そして水深1000mにおける音速断面
Fig.3 a) Dynamic height (0/2000dbar) versus latitude; b) vertical section of temperature (the contour interval is 2.0 deg. C); and c) sound speed versus latitude at 1000 m deep along the line 3 (152.5E).

続流域の南北断面であり、各観測線とも観測点の南北間隔は約0.5度である。観測点数の合計は40点である。データは水深2,000m以浅のものを使用し、鉛直方向に10mの移動平均を施している。図3に測線3における海面力学高度(図a)、水温の鉛直断面分布(図b)、及び1,000mでの音速変化(図c)を示す。ここで横軸は緯度(観測点番号)を示している。海面力学高度は2,000mを基準として計算した。なお海面力学高度の縦軸は他のデータと比較するため、高度の増加方向を向下きに設定した。単位は $\text{dynm}(\text{Nm}/\text{kg})$ である。水温構造(図3b)から代表的な黒潮続流(34.5°N~35.5°N)や混乱水域及び亜熱帯海域の中規模渦(31°N~32°N, 36°N~37°N, 37°N~38°N, 38°N~39°N)の構造が分かる。なお海面力学高度(図3a)の水平勾配は海面での流れに対応するものである。ここで1,000mでの音速変化は、海面力学高度並びに水温構造と良い対応を示すことから、この海域の海洋変動を1,000mでの音速変動だけを用いて簡略化し、として取り扱えることが予想される。

そこで、1,000mでの C が如何に他の深度での音速変動を代表できるか、全CTDデータを用いて調べた。1,000mの C と他の深度(100m, 300m, 500m, 750m)での C のスカッタープロットを図4に示す。各図中、左側が混乱水域(1,000mの C が-)、そして右側が亜熱帯海域側(1,000mの C が+)を表し、破線が一次近似式、実線が二次近似式をそれぞれ示す。なお基準音速プロファイルには全データの平均音速プロファイルを用いた。1,000mでの C の代表性は、混合層(300m)以深の C に対しては線形性が強く、代表性が高い。代表深度層(1,000m)付近の変動を十分表現している。ただし混合層(300m以浅)の C に対しては線形近似することは困難であり、代表性も低いと考えられる。しかし、このモデルは混合層を扱わないため、1,000mをカップリングスキームの代表深度として取り扱える。以上の結果から、 η と1,000mの C をカップルさせ、 C のモデル化の

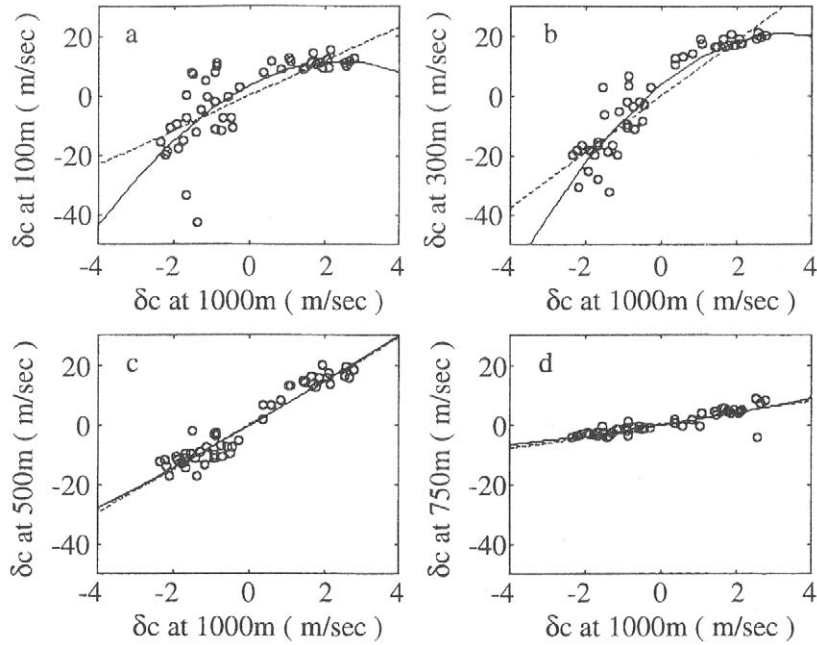


図4 水深 1000 mでの音速変動量と各深度の音速変動量の関係
a)100 m b) 300 m, c) 500 m d) 750 m

Fig.4 Perturbations of sound speed (δC) at a)100 m; b) 300 m; c) 500 m; and d) 750 m deep versus that at 1000 m deep. Solid line indicates straight-line fit and dotted curve indicates quadratic-polynomial fit.

展開係数とした。

次に C のモデル化における鉛直モードを導く。本研究においては、カルマンフィルターを用いるため伝搬時間と流線関数の関係を線形で閉じていることが望ましい。上記のように、混合層以深では、1,000mの C と各深度の C は線形で関係付けられる。さらに、解析時に混合層以深を通過する音線を使用すれば、一次式でも近似的に C をモデル化できる。他深度の C を以下に示す。

$$\delta C(z) = \phi_c \cdot \psi(z) + \chi(z). \quad (3)$$

here

$$\phi_c = \delta C(1000 \text{ m})$$

$$\chi(z) \approx 0$$

ここで、 $\psi(z)$ は近似式の一次項のプロファイルであり、鉛直モードである。即ち、このモードは1,000mの C に対する各深度の相関のモードである。同じく $\chi(z)$ は定数項のプロファイルである。これより、3式をもって二層QGモデルと $C(z)$ のカップリングスキームとした。次節においてスキームの詳細な評価を行う。

3 カップリングスキームの評価

カップリングスキームを適用すれば、代表深度の音速変動量 C から海面から海底までの音速プロファイルを作れる。しかし、このスキームには音速変動を線形化したこと、海洋の鉛直構造を二層化したこと、さらにQGモデルによるモデル誤差等の記述的な誤差が含まれている。そのため、音波伝搬計算やデータ同化解析を行う前

段階で、カップリングスキームの特性を把握しておく必要がある。本節では、カップリングスキームが実際の音速場をどの程度記述し、どのような現象を表現し又できないのか、さらに再現した音速場がどのような特徴を持つかを調査し、このスキームの有効性を評価した。

3.1 記述性

カップリングスキームの記述性についての評価を行った。前節で得られた鉛直モード $\psi(z)$ (a図) と全CTDデータから作成したEOFの第一から第三モード(b図)を図5に示す。図より $\psi(z)$ とEOFの第一モードは振幅の絶対値が異なるが、振幅最大値が300m付近である等形状が相似である。さらに、両モードは黒潮統流の変動を非常に良く表現していることから、 $\psi(z)$ は力学的に傾圧第一モードに相当すると考えられる。

図6にカップリングスキーム(実線)及びEOF第一モード(点線)の記述率を示した。記述率はCTDデータから作成した音速プロファイルに対するカップリングスキーム及びEOF第一モードを用いて作成したそれとの標準偏差比とした。スキームの記述性は、導出の過程が示すように1,000m付近(800m ~ 1,600mでは0.9以上)での記述率が著しく高く、代表深度付近の変動(主水温躍層の変位)を非常に高く記述する。400m ~ 600mでも記述率が高い。このことは、主水温躍層や流軸を扱う上で都合が良い。ただし600m ~ 700mにおいて記述率が低下している。同様にEOFの記述率も低下していることから統計的に存在確立の低い太平洋中層水と考えられる。また、このモデルでは扱わない表層混合層でも記述率

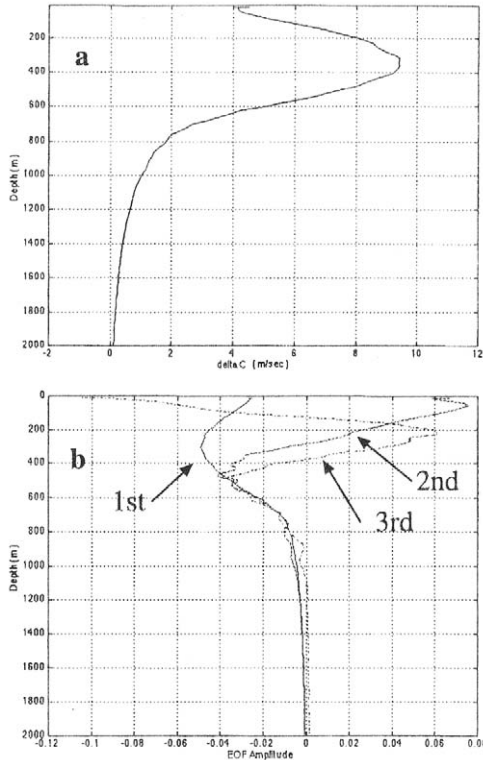


図5 水深 1000 m での音速変動量に対する各深度との相関値 $\psi(z)$ と EOF モード (第 1 モードが実線, 第 2 モードが破線, 第 3 モードが一点鎖線)

Fig.5 a) $\psi(z)$, perturbations of sound speed δC at each depth relative to that at 1000 m deep; and b) EOFs mode. Solid line indicates 1st mode, broken line indicates 2nd mode, and dot-dash line indicates 3rd mode.

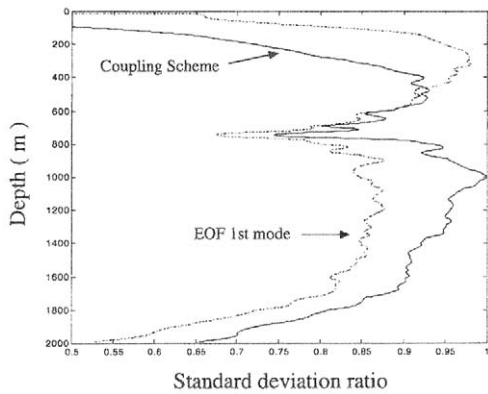


図6 CTDデータを用いた音速場に対するカップリングスキームを用いた音速場及び EOF 第 1 モードを用いた音速場の標準偏差比。

Fig.6 The standard deviation ration of sound speed computed from CTD data to sound speed reconstructed using the coupling scheme and sound speed reconstructed using EOF 1st mode. Solid line indicates the coupling scheme and broken line indicates EOF 1st mode.

が低下している。しかし,表層から2,000mの平均記述率が0.853 (EOF 第一モード:0.834) を示し,単独モードとしての記述性は高い。以上の結果から,このスキームは境界面付近と流軸変動の記述性が高く,また中層水と混合層の記述性が低いことから,その有効性が示された。

3.2 音速場再現実験

カップリングスキームを用いて音速場の再現実験を行った。測線3におけるCTDから算出された音速場(a図),及びカップリングスキームを用いて作成した音速場(b図),両音速場の差(c図)を図7に示す。各図共,横軸が観測点番号,縦軸が深度を示し,コンターライン間隔は5m/secである。なおa,b図中 印と点線は各音速プロファイルの音速極小深度とそれらを繋ぐものである。

各音速場の左側半分(35°N以北)は混乱水域で,等音速線間隔が密になるほど躍層深度と音速極小層が浅い。図3で示したように観測点38°N~39°Nに暖水塊,37°N~38°Nに冷水塊,36°N~37°Nに暖水塊が存在し,CTDデータから算出された音速場(図7a)も入り組んだ構造を示す。黒潮続流(34.5°N~35.5°N)を挟んで南側の亜熱

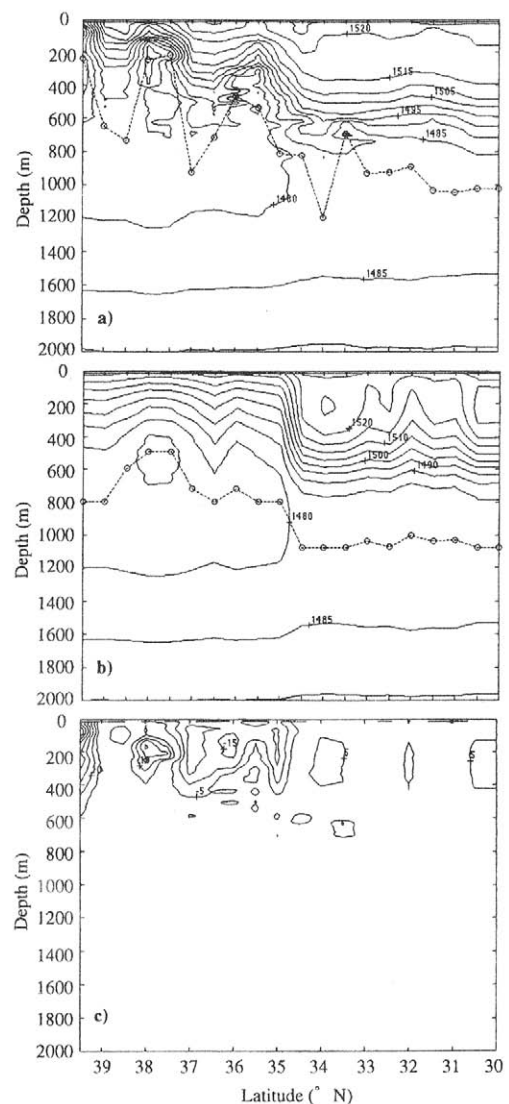


図7 測線3(152.5E)における音速場 a) CTDデータを用いた音速場, b) 水深 1000 m における音速変動量とカップリングスキームを用いて再構築した音速場, c) a)とb)の差

Fig.7 Vertical sections of a) sound speed computed from CTD data (the contour interval is 5 m/s); b) sound speed reconstructed using the coupling scheme (the contour interval is 5 m/s); and c) sound speed difference between computed and reconstructed sound speeds (the contour interval is 5 m/s) along the line 3 (152.5E). Dots indicate the positions of minimum sound speed.

帯海域(34.5°N以南)では、躍層深度は深い。観測点31°N~32°Nに冷水性の構造が見られるが、中規模構造は相対的には見えにくい。作成した音速場(図7b)は、全体的な構造と中規模構造を的確に表現している。しかし、音速プロファイルの変動量 $C(z)$ を線形近似したため、流軸における勾配の滑らかさや微細な変動は再現できない。両場の差(図7c)から明らかのように、黒潮続流の位置及び混乱水域・亜熱帯海域の全体構造の表現力が高い。

1,000m以深の深海域の表現力が高い。このことはOAT解析では特に重要である。記述性の評価では大深度の記述率が低下しているが、それは大深度の音速変動量の絶対値に関係しており、再現実験結果から問題ないことが示された。ただし、海洋混合層を評価していないこと、黒潮系の水塊が張り出す混乱水域表層を評価していないこと(誤差は-15~5m/sec若干大きい)、記述性の評価でも指摘したように600m~700mに存在する太平洋中層水を評価していないこと(両者の差は-5m/sec)等のため、誤差が大きくなる要素も存在する。しかし、黒潮及びその周辺の渦構造の位置に関する的確に表現していることから、二層QGモデルで十分扱える範囲内の誤差であると考えられる。以上の結果から、カップリングスキームは境界層付近の表現が高く、また音速場の再現性は非常に高いことから、その有効性が示された。

4 SOFAR層に着目した音波伝搬実験

SOFAR層を通過する音線は、受波信号系列の中でエネルギーが大きく、最も遅く到達するため、OATで最も検知し易いものと予想される。二層QGモデルへのOATデータの同化を行うときには、上下層の境界面、即ち主水温躍層(ほぼSOFAR層に対応)の変位とその音速場の変動を結びつけたい。ここでは、まず、実観測データからSOFAR層を通過する音線から音速場の変動が如何に観測されるか具体例を示す。次に、数値モデルで表現される境界面変位と前節までに示したカップリングスキームで導出される音速場の変動の対応について検討する。

4.1 実観測データを用いたSOFAR層の音速変動

1997年の7月から9月にかけて、黒潮続流域においてOAT実験が行われた⁴⁾。実験では、5基の200Hz送受信システム(以後トランシーバと略す)が五角形の形状に配置され(図8、図中Tの添数字はトランシーバ番号を示す)、各トランシーバ間(間隔は約400kmから約1,100km)の音線到達時間とその振幅が3時間毎に計測された。このとき、黒潮続流は35°N付近を時間とともに南北に変位しながら流れており、図中トランシーバT1、T2、及びT3は黒潮続流の南側の亜熱帯海域、T4とT5は黒潮続流の少し北側の混乱水域にそれぞれ配置されていた。

ここでは、3時間毎の計測データについて、それぞれSOFAR層通過時間とトランシーバ間の平均音速を算出する。処理手順は以下の通りである。SOFAR層を通過する音線は、受波エネルギーが最大となるため、受波信号強度の二乗値の時系列に対して、ガウシアンフィルタ

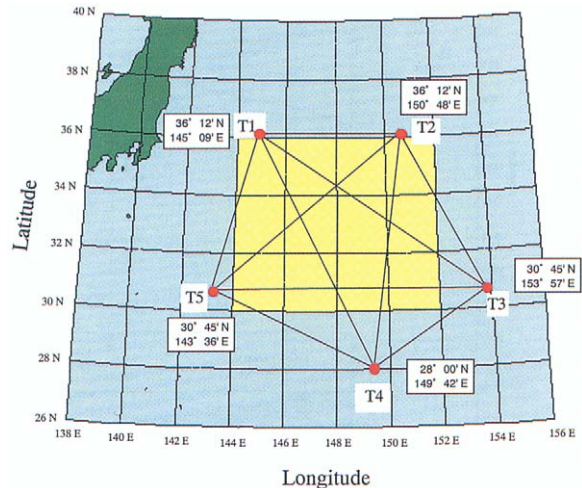


図8 黒潮続流域OAT実験におけるトランシーバの配置
(図中 T1 - T5はトランシーバ番号である)

Fig.8 Location map of Kuroshio Extension OAT experiment. T1 to T5 show tomography transeceiver position.

($1/e$ スケール:0.5sec,幅:±2.0sec)を通し、最大値となる到達時間を算出する。これをSOFAR層通過時間と定義する。トランシーバ間距離をSOFAR層通過時間で割り、トランシーバ間の平均音速を算出する。これをSOFAR層平均音速と定義する。図9に観測データを基に算出した各トランシーバ間のSOFAR層平均音速の時系列として、亜熱帯海域(T1-T3間;line13,図a)、混乱水域(T4-T5間;line54,図b)、黒潮続流を横切る場合(T1-T5間;line51,図c、T3-T4間;line34,図d)の事例を示す。図中、横軸が日付(20が7/20,62が8/31,82が9/20)、縦軸がSOFAR層平均音速を表す。平均音速は亜熱帯海域(図9a)で1482.3m/secでほぼ一定の値を示す。混乱水域(図9b)では、1475.0m/secから1478.2m/secの間の値をとり、時間変化が大きい。144°Eで黒潮続流を横切る場合(図9c)は、1479.2m/secから1482.8m/secと時間変化が大きいに対し、152°Eで横切る場合(図9d)は1480.6m/secから1482.4m/secと比較的変化が小さい。同じ黒潮続流を横切る場合でも、西方では8月1日からSOFAR層平均音速が上昇傾向、8月25日に最高値、以後低下傾向が見られるのに対し、東方では9月10日まで小刻みな振動があり、以後上昇傾向が見られる。

これらの結果から、混乱水域で平均音速が小さく、亜熱帯海域の平均音速が大きいこと、黒潮続流を横切る測線の平均音速は混乱水域と亜熱帯海域の各平均音速の間の値をとることが定性的に分かる。また、黒潮続流の流軸の南北変位が経度により異なる様相を示すことから、定量的評価とともに海面高度計など他の独立な計測と比較を行う価値がある。また、数値モデルにおける音波伝搬実験により確かめる必要がある。その際、SOFAR層を通過してくる音線は、海面付近や中層の微細構造を反映しにくいいため、二層QGモデルで表現する流れ場に対応し都合が良いであろう。

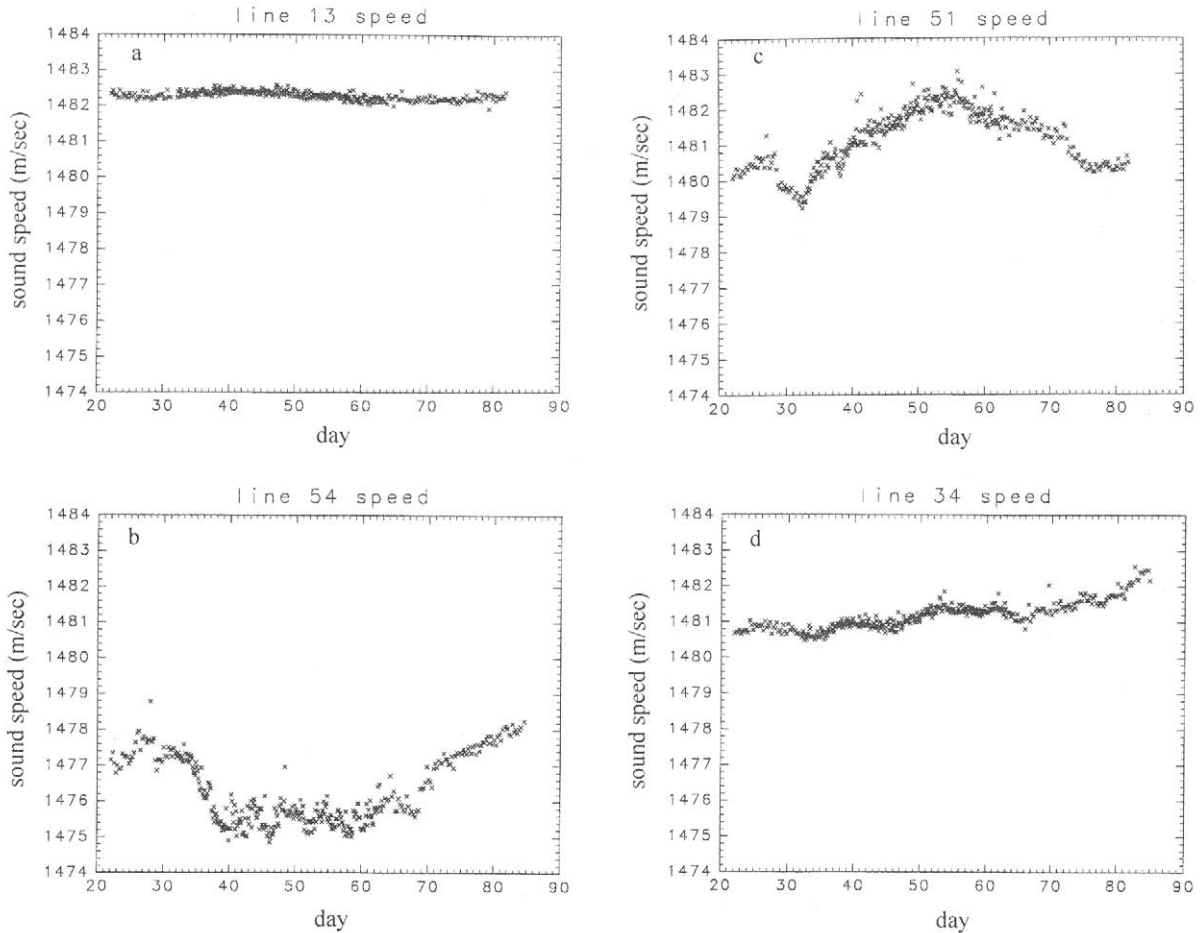


図9 OAT観測線におけるSOFAR層平均音速の時系列データ a)T1-T3測線, b)T4-T5測線, c)T1-T5測線, and d)T3-T4測線
 Fig.9 Time series data of average sound speed of SOFAR layer at each OAT observation line. a)T1-T3 line, b)T4-T5 line, c)T1-T5 line, and d) T3-T4 line.

4.2 音波伝搬実験結果と実 OAT データとの比較

4.2.1 設定

数値モデルの対象海域は水平方向 $4,000\text{km} \times 2,000\text{km}$ (表示範囲は $1,100\text{km} \times 1,100\text{km}$), 鉛直方向 $0\text{m} \sim 5,000\text{m}$ の矩形の海域である。水平方向の格子間隔は $5\text{km} \times 5\text{km}$, 一層, 二層目の層厚は $1,000\text{m}$ と $4,000\text{m}$ とした。海底は平坦である。計算における緯度中心は 35°N とした。初期条件として, 一層目の流線関数の値を南側(下方)は亜熱帯水系を想定し $+1$, そして北側(上方)は混合水域を想定し -1 と設定した。流軸幅は $35^\circ\text{N}(y=0)$ を中心に 100km に設定した。二層目の流線関数は 0 とした。そして, 上層の $x=0, y=0$ に冷水渦(振幅 -0.5 , 半径 150km)を付加して計算を始めた。海上風の応力は加味していない。二層QGモデルによってシミュレートされた黒潮続流領域の流線関数, 傾圧項, 順圧項を図10a, b, c, dに示す。図a, c, dのコンターライン間隔は 0.2 であり, 図bのみ 0.02 である。図10aが示すように一層目の流線関数は, 黒潮続流の蛇行状況 東方に向かうほど流軸幅が広がる傾向, そして続流北側の冷水渦 ($x=300, y=200$ 付近を中心)や南側の暖水渦 ($x=200, y=-230$ 中心)の存在を表すものである。図10bは, 二層目の流線関数が $y=0$ のラインに沿って振幅が $+ \cdot -$ と交互に入れ替わる渦を形成し, 蛇行の様相を示している。

4.2.2 音波伝搬実験

4.1節に示した対応を確かめるには, 黒潮等の流れを様々な角度から音線が横切る場合について, それぞれ検証する必要がある。ここでは, まずモデル結果のデータを用いて, 亜熱帯海域, 混乱水域, 黒潮続流を横切る単純な場合の音波伝搬実験を行い, それぞれの平均音速の違いを考察する。次に, 流れが音線に対してほぼ直交する場合について, 流軸の位置を特定できるか実験を行った。音波伝搬計算には音線理論を用いた。

亜熱帯海域, 混乱水域, 黒潮続流を横切る単純な場合について音波伝搬実験を行った。図10cに実験に課した測線a, b, cを示す。測線aは $y=250\text{km}$ (混乱水域), 測線bは $y=0\text{km}$ (黒潮続流), そして測線cは $y=-250\text{km}$ (亜熱帯海域)に沿っており, 各測線の長さは $1,000\text{km}$ とした。これらの測線でのデータとカップリングスキームを用いて音速場を作成した上で, 音波伝搬時間を計算した。音源と受波器の設定深度は $1,100\text{m}$ とした。

図10c中の測線a, b, cの伝搬実験結果を各々図11a, b, cに示す。結果は受波器に到達する音線ピークの時間(受波信号系列)で示した。各図とも縦軸は信号ピークの振幅であり, 横軸が受波時間である。ピーク振幅が全て同値なのは, 伝搬損失を考慮していないためである。混合水域に比べて亜熱帯海域の方が受波信号系列全体が早く

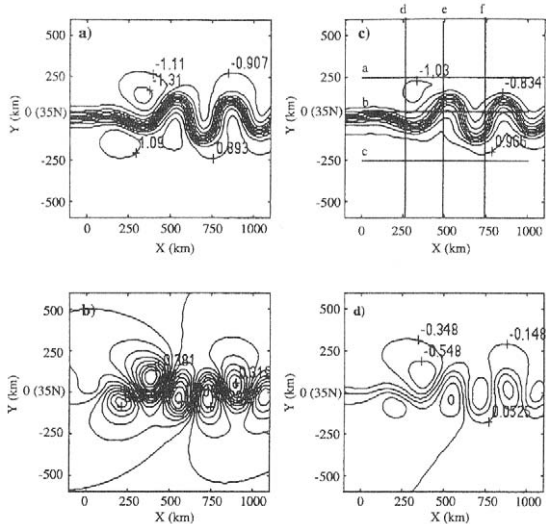


図10 二層QG modelモデルの計算結果 a) 一層目の流線関数, b) 二層目の流線関数, c)傾圧頂, d) 順圧頂 c)中, a, b, c, d, e, fは伝搬実験に用いた測線である。

Fig.10 Stream Functions of a) layer 1 (the contour interval is 0.2); b) layer 2 (the contour interval is 0.02); c) baroclinic component (the contour interval is 0.2); d) barotropic component (the contour interval is 0.2) at day 120 derived from the two layered QG model. Lines a, b, c, d, e and f are the sections of sound propagation simulation.

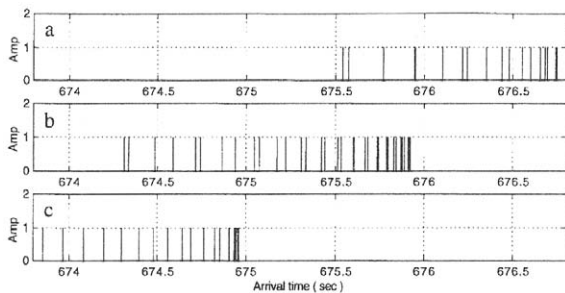


図11 混合水域, 黒潮統流, 亜熱帯域における音波伝搬実験結果 a) 混合水域 (亜寒帯域), b) 黒潮統流, c) 亜熱帯域

Fig.11 Simulated arrival patterns of sound propagation at subpolar (along line a), Kuroshio extension (along line b), and subtropical (along line c) (from top to bottom) at the baroclinic field derived from the two layered QG model.

到達することが分かる。ここで、4.1節に示した SOFAR 層の平均音速に着目する。各測線のSOFAR層の平均音速は、測線 a : 1478.1m/sec, 測線 b : 1479.5m/sec, 測線 c : 1481.6m/sec である。これらの値から、4.1節で示された混乱水域で平均音速が小さく、亜熱帯海域の平均音速が大きいこと、さらに黒潮統流を横切る測線の平均音速は混乱水域と亜熱帯海域の各平均音速の間の値をとることが、数値モデルにおいて確かめられた。

次に、流れが音線に対してほぼ直交する場合について伝搬実験を行った。図10cに伝搬実験に課した測線 d,e,f を示す。測線 d は x=250km (流軸 y=-50km), 測線 e は x=500km (流軸 y=100km), そして測線 f は x=750km (流軸 y=-50km) に沿っている。これら三測線について、幅 1,000kmの南北格子データを流軸に相対的に50kmずつシ

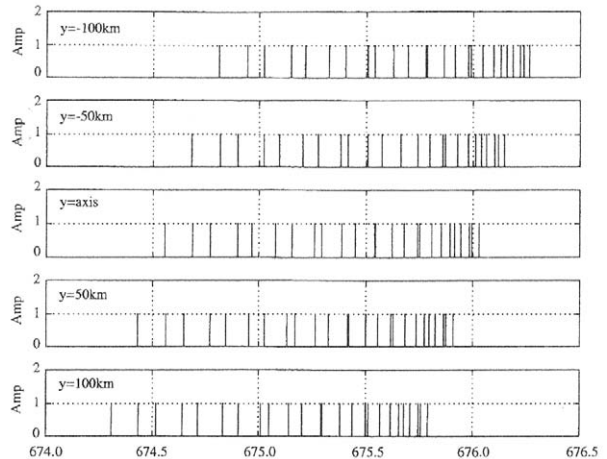


図12 流軸を移動させた場合の音波伝搬実験結果
Fig.12 Simulated arrival patterns of sound propagation at axis-100km (-20grids), axis-50m, axis, axis+50m, and axis+100km (from top to bottom) along line d at the baroclinic field derived from the two layered QG model.

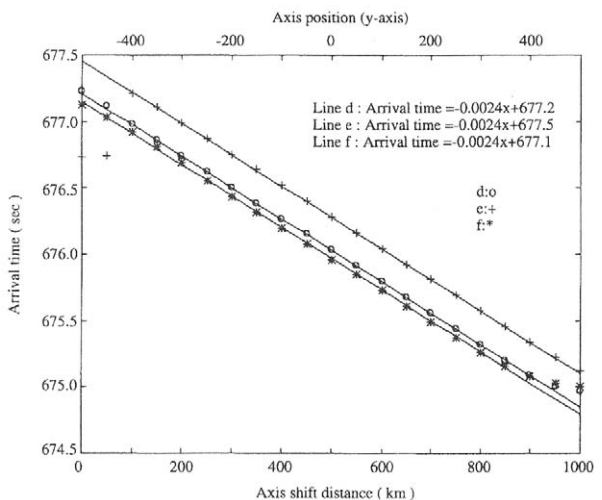


図13 最も遅く到達する音線と流軸変動距離の関係 測線 d:o, 測線 e:+, 測線 f:*
Fig.13 Last peak arrival time versus axis shift distance (y-axis) at simulation line d (solid circle), e (plus), and f (asterisk).

フトさせて場を設定し、伝搬時間を計算した。
測線 d における伝搬実験結果を図12に示す。図表示は図11と同様である。図最上段は流軸位置が y=-100km の受波系列である。以下、流軸位置が y=-50km, y=0km, y=50km, そして y=100km である。流軸が北側にあるほど受波信号系列全体が遅く到達し、南にあるほど早く到達する。図13に三測線における相対的な流軸の移動距離と最も遅く到達するピークの伝搬時間を示す。図中の一次式の係数から分かるように、流軸が 50km 移動すると伝搬時間に約 0.12sec の変化が表れる。ここでは、カップリングスキームが一定であるため、三測線の係数に差が生じなかったものと考えられる。一方、定数項の違いはモデルの計算結果における元々の流軸の南北位置が異なるために生じる。これは上記の係数の割合で伝搬時間を重ねると流軸位置が一致することが分かる。この結果から、受波信号で最も遅く届く信号ピークと流軸位置は線

形関係にあることが明らかである。以上により、観測データから得られる海域による音速の違いや黒潮統流変動に伴う音速変動が、数値モデルにおいても定性的に示された。これはカップリングスキームの有効性を示すものである。

5 おわりに

音速プロファイルと二層QGモデルを結びつけるカップリングスキームを提案した。記述性の調査、音速場再現実験及び実データとモデルを用いた伝搬実験結果の比較から、スキームの有効性が明らかになった。さらに、SOFAR層の平均音速値と黒潮統流変動の関係を示すことができた。これより、二層QGモデルと伝搬時間とのデータ同化の可能性が示された。

今後、流れを斜めに横切る場合、渦が存在する場合など、流れ場を容易に特定できない場合について、流軸位置特定の感度を調べる予定である。これよりモデルあるいはデータから得られ場の不確実性を定量的に捉え、データ同化実験を行う上での場の再現性を高めることを目指す。

本研究は海洋科学技術センターと沖電気工業株式会社との共同研究により行われたものである。CTDデータは「みらい」MR-9803航海で取得したものである。

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)
- 3) 中埜岩男 : 海洋音響トモグラフィ解析手法(1) - 音線同定 -, 海洋科学技術センター試験研究報告, **31**, 13-19. (1995)
- 4) Yuan, G., I. Nakano, H. Fujimori, T. Nakamura, T. Kamoshida, and A. Kaya : Tomographic measurements of Kuroshio extension mender and its associated eddies, Geophys. Res. Lett., **26**, 1, 79-82. (1999)
- 5) 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)
- 6) Pedlosky, J. : Geophysical Fluid Dynamics : second edition, Springer-Verlag, 416-424. (1979)
- 7) 三寺史夫, 吉川泰司, 新家富雄 : カルマンフィルターを用いた海洋音響トモグラフィデータの解析手法の研究(I) 準地衡流発展方程式と音響トモグラフィにより観測される物理量に関するノート, 海洋科学技術センター試験研究報告, 161-167. (1999)
- 8) 新家富雄, 吉川泰司, 三寺史夫 : データ同化手法を用いた音響トモグラフィの解析手法の研究 (II), 海洋理工学会, 平成11年度春季大会講演要旨集, 43-46. (1999)
- 9) 新家富雄, 吉川泰司, 三寺史夫 : 海洋力学を適用した海洋音響トモグラフィデータの解析手法, 電子通信学会技術研究報告. (1999)
- 10) Robinson, A. R. and D. Lee : Oceanography and Acoustics : Prediction and Propagation Models, AIP press, 88-89 (1994)
- 11) Cornuelle, B. D., C. Wunsch, D. Behringer, T. G. Birdsall, M. G. Brown, R. Heinmiller, R. A. Knox, K. Metzger, W. H. Munk, J. L. Spiesberger, R. C. Spindel, D. C. Webb, and P.F. Worcester : Tomographic maps of the ocean mesoscale. Part 1 : Pure acoustics, J. Phys. Oceanogr. **15**, 2, 133-152. (1985)
- 12) Howe, B. M., P.F. Worcester, and R. C. Spindel : Ocean acoustic tomography : mesoscale velocity, J. Geophys. Res. **92**, C4, 3785-3805. (1987)

(原稿受理:1999年8月10日)

