

中部熱帯太平洋トモグラフィー観測実験 —水温分布および平均流速解析—

藤森 英俊*¹ 中埜 岩男*¹ 中村 敏明*²
金泉 智之*¹ 財間 辰夫*³

中部熱帯太平洋トモグラフィー観測実験の2000年1月から8月までのデータ解析を行い、3次元水温分布及び測線間の平均流速を得た。北緯3度の水温の時間変化から、2000年1月～3月頃はLegeckis渦によるものと考えられる水温の変動が大きく、4月以降は変動が小さくなることが分かった。また、北緯9度から13度の間の深度70m～5000mまでの平均流速が計算された。この結果から流速は南北に70日程度の周期で変動し、最大3cm/sであり、この変動は4月過ぎから小さくなることが分かった。2000年当初はラニーニャであり、3月に終息したが、水温および流速変動が小さくなったのはこのラニーニャの終息時期と重なるものであった。

キーワード：海洋音響トモグラフィー、中部熱帯太平洋、レジキス波、ラニーニャ

Ocean Acoustic Tomography Experiment in Central Equatorial Pacific Ocean. —Data analysis of temperature profile and average flow—

Hidetoshi FUJIMORI*⁴ Iwao NAKANO*⁴ Toshiaki NAKAMURA*⁵
Tomoyuki KANAIZUMI*⁴ Tatsuo ZAIMA*⁶

The data analysis from January to August, 2000 of the central tropical Pacific Ocean tomography experiment was carried out, and the three-dimensional water temperature distribution and average flow rate between measurement line was obtained. From the time change of water temperature of 3 N latitude, the fluctuation of water temperature which seemed to base on the Legeckis vortex in January to March, 2000 was active, and the fluctuation decreases after April. The average flow rate to 70m～5000m depth between 9N and 13N was calculated. The flow velocity fluctuated from this result in north and south in the period of 70 days, and largest flow was 3cm/s, and decrease after April. It was La Nina at the beginning 2000 and it finished in March. Water temperature and current fluctuation became small overlapped with closure time of this La Nina.

Key Words : Ocean Acoustic Tomography, Central Equatorial Pacific Ocean, Legeckis wave, La Nina

* 1 海洋科学技術センター 海洋観測研究部

* 2 海洋科学技術センター 海洋技術研究部

* 3 (株)マリンワークジャパン

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

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

* 6 Marine Works Japan Co., Ltd.

1. はじめに

海洋科学技術センターは、熱帯の日付変更線付近である中部熱帯太平洋にてトモグラフィーによる観測実験¹⁾をおこなった。観測期間は平成11年1月～平成12年12月までの2年間の予定である。開始初年の半年ほどで、電池系のトラブルにより平成11年6月頃から観測を中断したが、その後トラブルは解消し、平成12年1月から観測を再開した²⁾。実験開始当初は5基のトモグラフィーシステム、2年目からは7基のシステムで観測を行った(図1)。

実験海域は熱帯から亜熱帯にまたがる範囲に及ぶ。亜熱帯と熱帯太平洋は、子午面循環という、表層では熱帯から亜熱帯へ、下層では亜熱帯から熱帯へ流れる循環によってつながっている。この循環が亜熱帯での水温変動を熱帯に運び、これによって熱帯の変動に影響を与えるという説³⁾がある。これによると、太平洋東部の南西から熱帯へ流れ込むこととなり、この日付変更線付近もそのルートと考えられる。

そこで本実験は、日付変更線付近での亜熱帯から熱帯への水の流れの直接計測を行い、計測海域における南北流量を算定し、熱帯変動への亜熱帯の影響の解明に貢献することを目的とする⁴⁾。また、赤道特有の波動現象による水温や流速の変動、および、ENSOによる水温変動などの計測を行う。

本報告では、3次元水温解析結果による北緯3度、北緯11度の水温の時間変化、およびT2-T4間(北緯約9°～13°、西経約172°、水平距離約500km)の双方向音波伝搬による流速の時間変化について報告する。データは平成12年1月～8月までの順次送信のものをを用いた。

2. トモグラフィー計測について

平成12年1月からの実験には7基の200Hzトモグラフィートランシーバ^{5),6)}を用いた。設置範囲は177°42'E～172°04'W, 0°29'N～13°37'Nの領域であった(図2)。東西の距離は約1200km, 南北は約1500kmである。計測線は21本であり、全ての計測線で双方向伝搬をおこなった。T6の東西対称の位置には本来もう1基のトランシーバを設置する予定であったが、諸事情により設置されなかった。

計測スケジュールは、同時送信と順次送信を2日おきに交互に行うものとした。同時送信とは、M系列のコードの中から互いの相関が低いものを選び、全トランシーバが同時に送信し、受信するものである。ほぼ完全な双方向性が得られる利点があるが、多少の相関があるためS/Nが下がる。また、この同時送信のデータは現在のシステムではリアルタイムで陸上に伝送することができない。同時送信は計測日の0時から始めて翌日の0時まで、4時間おきに合計7回の計測を行う。計測は平成12年1月3日から開始した。

次に順次送信とは、一つのトランシーバが発音した音波をその他のトランシーバが受信し、その後、次のトランシーバが発音し受信することを順次行っていくものである。一つのトランシーバの発音から次の発音までは30分の間隔である。そのため、1回の計測に3時間程度の時間を要する。よって、この間に実験海域の状態が変化すれば、その分の双方向性が失われることとなる。しかし、S/Nは確保され、また、現システムにてリアルタイムのデータ伝送が可能である。今回の解析には、リアルタイムデータ伝送された、順次送信のデータを用いている。この順次送信も

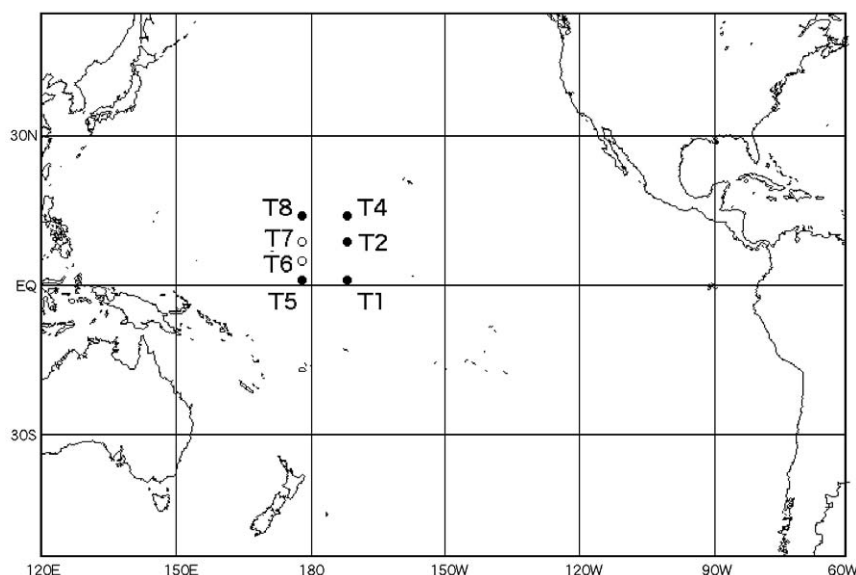


図1 実験海域図。T1～T8がそれぞれトランシーバの設置点。東西約1200km, 南北約1500kmである。図中黒丸は平成11年1月からの設置点、白丸は平成12年1月からの設置点を示す。

Fig. 1 Location map of this experiment. T1～T8 is the deployment point of the transceiver each. East and west range is about 1200km, north and south is about 1500km. Black circles show installation point from January, 1999 and white round show installation point from January, 2000 in this figure.

同時送信と同じく4時間間隔で翌日の初めまで、7回の計測を行っている。計測は1月5日からであり、この日から4日おきのデータが伝送されている。

なお、順次送信には10次2波のM系列信号を、同時送波

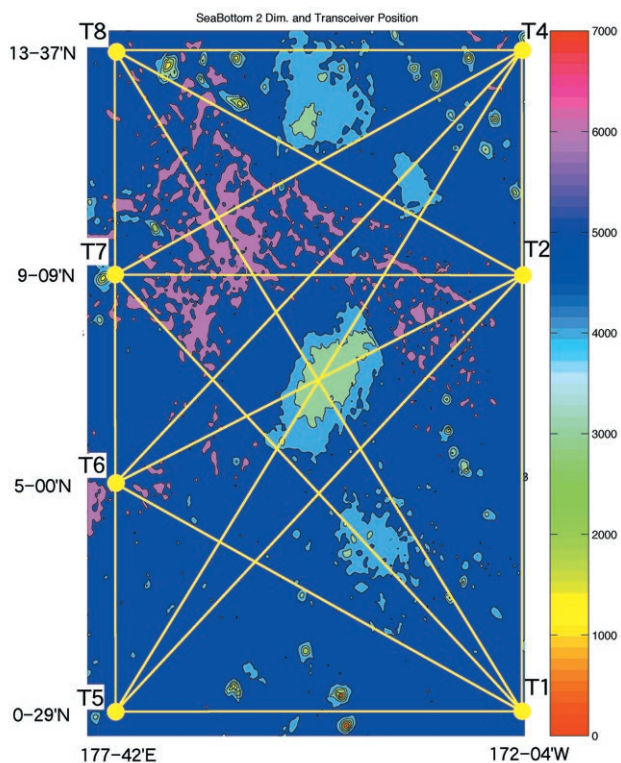


図2 設置海域拡大図および計測線。コンターは海底地形を示す。計測線は合計で21本である。

Fig. 2 Region map of installation area and measurement line (yellow solid line). The contour shows the sea bottom topography. The total measurement line is 21.

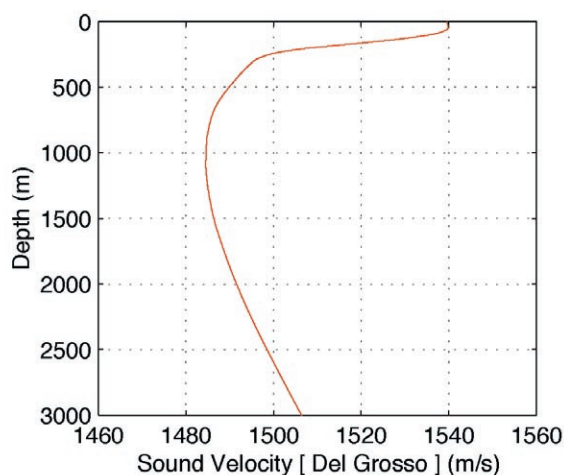
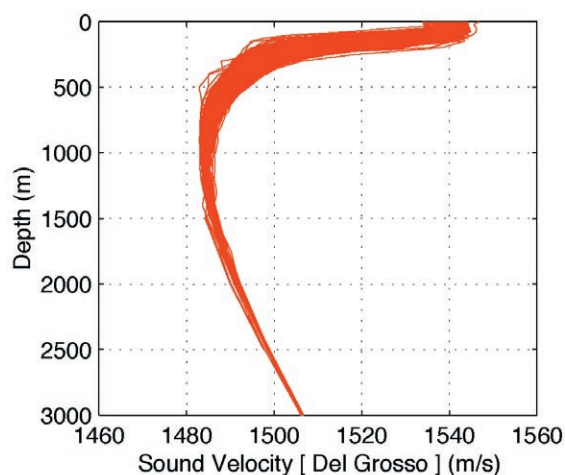


図3 基準音速分布作成に用いた全音速分布の重ね書き(左)および基準音速分布図(右)。海面から500m付近までは音速の変動が大きく、3000mに達するとほぼ変動しないことが分かる。基準音速分布はこの平均値である。深度1000m付近の音速極小層が深度方向に幅広くなっていることが分かる。

Fig. 3 Overwrite of all sound-speed profile for the reference sound-speed (left) and reference sound-speed profile (right). The fluctuation of sound speed is big to near 500m from the sea surface and not fluctuate almost at 3000m. Reference sound-speed profile is average of these profiles. The sound speed minimal layer near the 1000m depth is widened in direction of depth.

は初年度には10次2波、次年度は11次2波のM系列信号を用いた。

本実験の計測目的の中心である亜熱帯から熱帯への流れは非常に弱いものであり、また、広範囲におよぶ計測が必要となる。赤道付近は東西流が卓越し、そこに赤道特有の渦や不安定波動なども通過するため、この海域の流れはスナップショットで見ると複雑なものとなり、南北流の直接計測を従来型の計測手法を用いて行うには困難な部分がある。一方、トモグラフィーの流速の計測手法はトランシーバ間の双方向の音波伝搬の時間差から媒質の流速を求めるものである。この場合、測線に沿った方向の流速成分が求められ、これに直交する流速には影響を受けない。また、伝搬時間差によって得られる情報はトランシーバ間の積分値であり、音波伝搬が行われる領域の平均値(積分値)として流速を求めることができるという特徴がある。

この計測には高い計測精度が要求されるが、内部時計はGPSの時計により1日1回校正されているため、伝搬時間差の誤差要因となる時計のドリフトは殆ど無い。また、音波伝搬のS/Nも良好であり、計測に必要な精度は得られていると考えられる。

3. 基準音速分布および音線計算

トモグラフィーの計測⁷⁾は、送受波器間を伝搬する音波の伝搬時間を測定し、これを基準音速分布での計算値と比較し、水温や流速などの値を算出するものである。そのため、実験海域に適した基準音速分布を決定し、その分布を用いて音線計算を行い、伝搬時間および伝搬経路を算出する必要がある。

海中の音速分布は一般に水温、塩分および圧力(深度)から音速の変換式を用いて計算する。今回の基準音速分

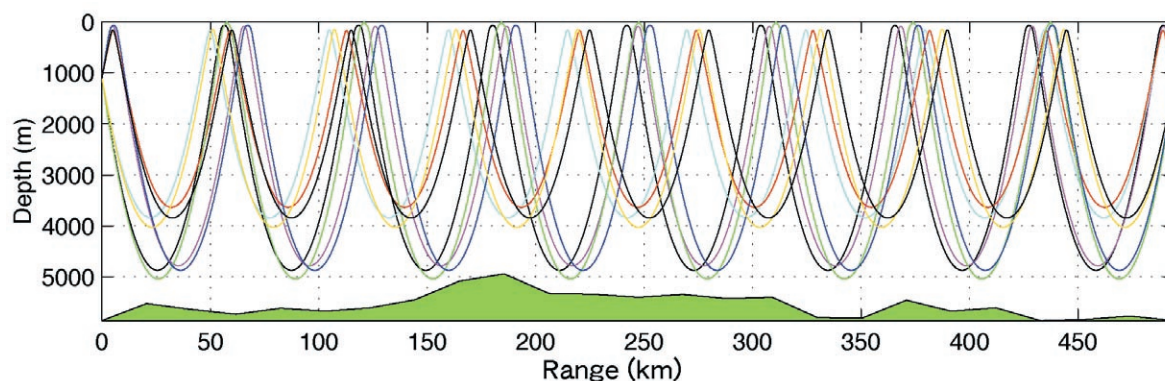


図4 T2-T4間の同定音線の音線経路図。下方転回回数が8回である4本の音線群と、9回の4本の音線群に分けられる。この図には軸付近を通る音線は示していない。

Fig. 4 Acoustic ray paths of the identification acoustic rays between T2-T4. Ray paths are divided ray groups of 4 rays which lower turning points are 8 times and 4 rays which are 9 times. In this figure, the acoustic rays which passes sound minimal layer are not shown.

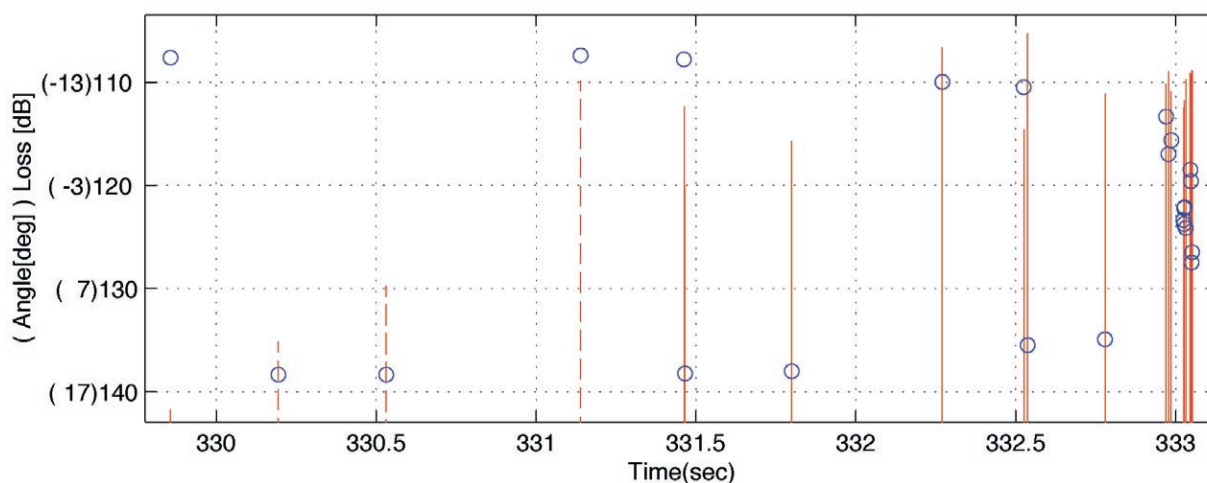


図5 T2-T4間の音波の伝搬時間および入射角度図。伝搬時間331～332秒の音線群が下方転回回数8回のも、次の4本の音線群が9回のものである。伝搬時間333秒付近は多数の音線が集中して到達する。

Fig. 5 Travel time and angle of the acoustic rays between T2-T4. 4 acoustic rays in propagation time 331～332 second are the rays of 8 times of lower turning points, next 4 rays are 9 times of lower turning points. Many acoustic rays reach near propagation time 333 seconds.

布の決定には、世界の海洋データベースであるNODCのCTDデータおよび設置時に測定したCTDのデータを用いた。用いたデータは合計で245本のプロファイルであった(図3)。基準音速分布にはこのプロファイルを平均した1本のプロファイルを用いることとした。音速計算にはDel Grossoの変換式⁹⁾を用いた。

基準音速分布は深度約1000mで極小層を持つものとなった。これは大洋中ではよく見られる分布である。また、音速極小層が深度方向に厚くなるのが赤道付近の特徴であり、今回の分布もそのようになっている。

音速極小層内での音波伝搬は、放射角の大きな音波が受波器に早く到達するが、これは伝搬距離が長くなること以上に音速の早い部分を通過する効果が優り、結果的に早く到達するものである。しかし、赤道付近では極小層が厚いため、音速による効果が小さくなり、軸付近を通過する音波はほぼ同じ時刻に受波器に到達する。この

ため、軸付近では音線同定が困難となる。

T2-T4間の音波伝搬では330秒～333秒の約3秒間に音波が到達した。このうち331秒以前のものは海面反射するものであり、S/Nが落ちるため実際の解析に用いるのは難しい。331秒～332.8秒には8本のピークが見られ、これはS/Nも良く、伝搬時間も比較的離れているため、分離が容易であり、音線同定が可能となる。333秒付近では、軸付近を通過した音波のピークが多数見られ、分離は困難である(図4, 5)。

分離が比較的容易な8本の音線に着目すると、331秒～332秒の4本の音線群は、入放射角は約15度、上方転向点深度は70～80m、下方転向点深度は4700m～5000mであった。332秒～332.8秒の4本の音線群は、入放射角は12～13度、上方転向点深度は150m～170m、下方転向点深度は3600m～4000mであった。

4. 双方向音波伝搬および解析手法について

4.1. 音速変動と流速変動の分離

ある基準音速分布 C_0 の中でトランシーバT1とT2間の音波伝搬を考える。伝搬経路を Γ_0 とすると、伝搬時間 T_0 はこの経路上の線積分で表される。つまり

$$T_0 = \int_{\Gamma_0} \frac{ds}{C_0} \quad (1)$$

となる。ここで ds は伝搬経路に添った長さ素分である。次に、双方向伝搬における順・逆の伝搬時間と音速変動・流速変動との関係について考える(図6)。トランシーバT1からT2への伝搬時間 T_{12} と、T2からT1への伝搬時間 T_{21} はそれぞれ次式のように表される。

$$T_{12} = \int_{\Gamma_{12}} \frac{ds}{C_0 + \delta C + u} \quad (2)$$

$$T_{21} = \int_{\Gamma_{21}} \frac{ds}{C_0 + \delta C - u} \quad (3)$$

ここで、 δC は音速変動、 u は流速変動、 Γ_{12} 、 Γ_{21} は、それぞれT1からT2およびT2からT1への伝搬経路である。それぞれの伝搬時間と基準音速分布での伝搬時間 T_0 との差を考えると次式の近似が成り立つ。

$$\begin{aligned} T_{12} - T_0 &= \int_{\Gamma_{12}} \frac{ds}{C_0 + \delta C + u} - \int_{\Gamma_0} \frac{ds}{C_0} \\ &\approx - \int_{\Gamma_0} \frac{\delta C + u}{C_0^2} ds \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{21} - T_0 &= \int_{\Gamma_{21}} \frac{ds}{C_0 + \delta C - u} - \int_{\Gamma_0} \frac{ds}{C_0} \\ &\approx - \int_{\Gamma_0} \frac{\delta C - u}{C_0^2} ds \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\delta C \ll C_0$ 、 $u \ll C_0$ とし、伝搬経路 Γ_{12} および Γ_{21} は、 Γ_0 と同じであると仮定し、摂動近似を用いた。この(4)式と(5)式の和を取ると、

$$\frac{T_{12} + T_{21}}{2} - T_0 \approx - \int_{\Gamma_0} \frac{\delta C}{C_0^2} ds \quad (6)$$

また、差を取ると、

$$\frac{T_{12} - T_{21}}{2} \approx - \int_{\Gamma_0} \frac{u}{C_0^2} ds \quad (7)$$

となる。これで音速変動と流速変動の分離が可能と

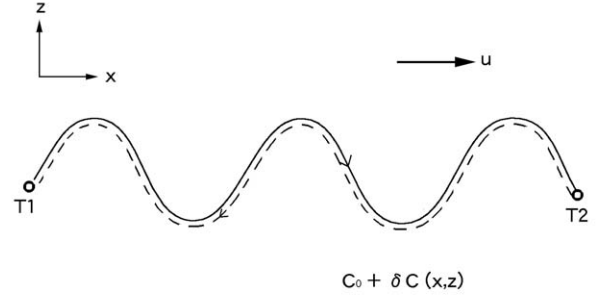


図6 流速場 $U(x, z)$ および音速変動 δC が存在する海域における双方向音響伝搬実験の模式図。

Fig. 6 A schema of the reciprocal sound propagation experiment in velocity field $U(x, z)$ and sound-speed fluctuation δC exists.

なった。この式の意味としては、双方向伝搬の伝搬時間の和からは音速変動、つまり水温変動が分離でき、双方向伝搬の差からは流速変動が分離できるというものである。

4.2. 音速変動の函数展開

次に、音速変動について函数展開を考える⁹⁾。海洋音響トモグラフィは音波の伝搬時間から音速変動などの推定を行う。音波の伝搬時間が既知の情報(計測値)であり、音速変動が未知数である。情報量は限られるため、音速変動を函数展開するなどの仮定を用いることにより、未知数を限定するという目的である。

音速変動を水平方向と鉛直方向の函数で展開する。

$$\delta C(r) = \sum_{j=1}^1 \sum_{k=1}^m \alpha_{jk} \cdot Y_j(x, y) \cdot \zeta_k(z) + \varepsilon \quad (8)$$

ここで、

Y_j : 水平方向の展開函数(1個)

ζ_k : 鉛直方向の展開函数(m個)

α_{jk} : 展開係数(1×m個)

ε : 函数展開では表せない変動量である。

水平方向の展開には、領域を場所毎に升目状に展開する場合(区間分割)や、三角関数展開などが用いられる。鉛直方向には過去のCTDデータなどを用いたEOF展開が用いられることが多い。

この函数展開された式を(6)式に代入し整理すると

$$\delta T_i = - \sum_{j=1}^1 \sum_{k=1}^m \alpha_{jk} \int_{\Gamma_{0i}} \frac{Y_j(x, y) \cdot \zeta_k(z)}{C_0^2(x, y, z)} ds + \varepsilon_i \quad (9)$$

となる。ここで左辺は δT_i としている。また、添字の i は固有音線の番号を表す。これを行列表現すると

$$\delta \mathbf{T} = \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (10)$$

となる。ここで R_{jk} は

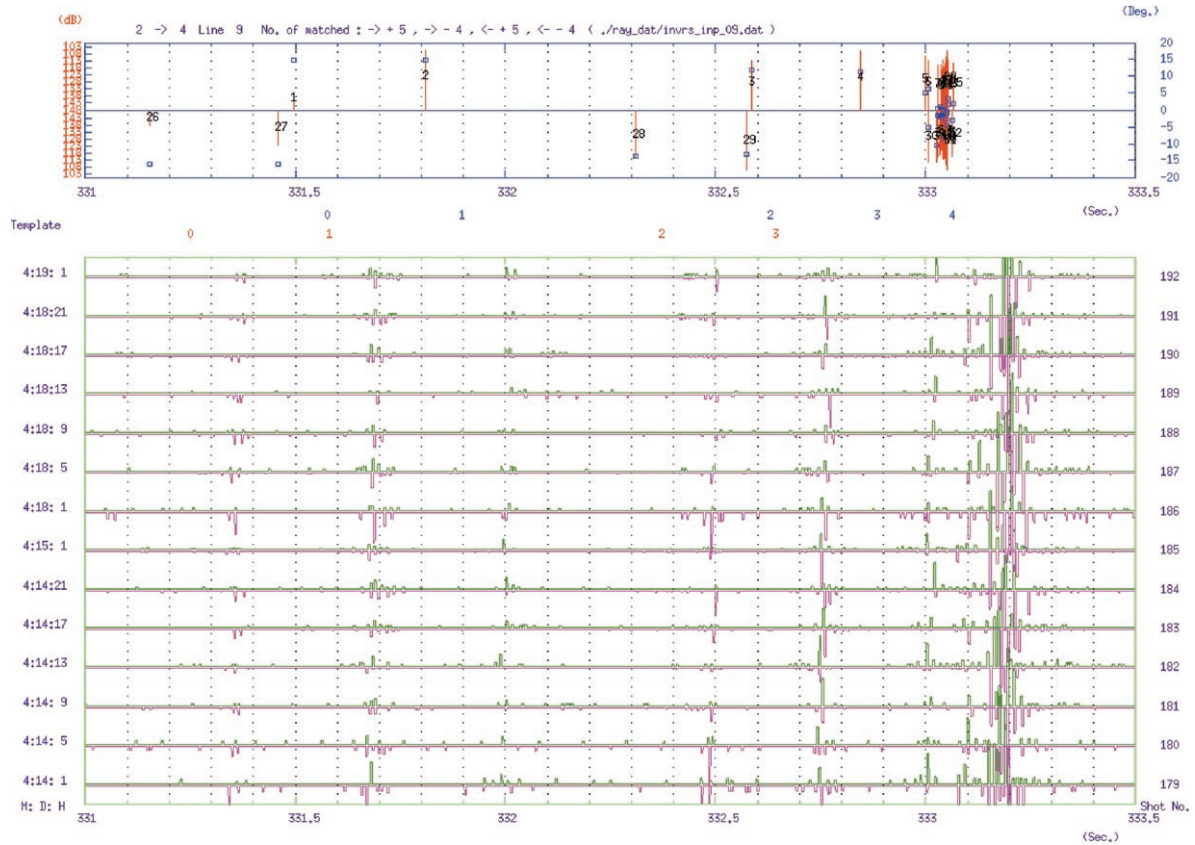


図7 T2-T4間の音線計算(上)と音波伝搬データ(下)の比較。実データは4月14日から15日と4月18日から19日の14ショットを示した。入射角度の上方向, 下方向をそれぞれ図中の上下のピークで示している。音線計算に対応したピークが実データに現れている。この対応付けが音線同定であり、同定された計算値と実測値の差が伝搬時間差である。

Fig. 7 The comparison of acoustic ray calculation (top) and acoustic wave propagation data (bottom) between T2-T4. Real data showed 14 shots in 14~15 of April and 18~19 of April. The incidence angle of upward and downward are shown in the top and bottom of the peak respectively in the figure. The peak in proportion to the acoustic ray calculation has appeared in real data. The difference of calculated travel time and measured that identified was the travel time difference.

$$R_{jk} = - \int_{\Gamma_0} \frac{Y_j(x,y) \cdot \zeta_k(z)}{C_0^2(r)} ds \quad (11)$$

である。 ϵ は線形化誤差である。

4.3. 逆問題

(10)式では δT および R が既知数であり、 α が未知数である。そこで、この α を求めるために逆問題手法を用いる¹⁰⁾。ここで

$$\alpha = L \cdot \delta T \quad (12)$$

となる演算子 L を仮定すると、この L が合理的に求まれば伝搬時間から音速変動を求めることができる。

今回のデータ解析では確率論的逆問題法が用いられた。この手法では L は、

$$L = G_{cc} \cdot R^T \cdot (R \cdot G_{cc} \cdot R^T + G_{ee})^{-1} \quad (13)$$

と表される。ここで G_{cc} は音速変動共分散行列と呼ば

れ、各展開関数の重みを表すものである。今回解析での G_{cc} はEOF展開時の固有値から求めている。 G_{ee} は測時誤差共分散行列と呼ばれ、伝搬時間誤差が入るものであるが、線形化誤差等のモデル化誤差もこの中に含める必要がある。

以上、音速変動についての解法を述べたが、同様の手法は流速変動にも用いることができる。

5. 双方向の和と差のデータ

音線同定は計算上の音波の伝搬時間と実際のデータのピークとを対比して、これらの対応付けをすることにより行われる(図7)。伝搬時間差はこの対応づけられたピークと計算上の伝搬時間との差である。双方向の差のデータは、双方向のデータについて音線同定を行い、同じ音線の伝搬時間の差を取るにより求められる。

5.1. 双方向の和のデータ

音速変動は双方向の伝搬時間の平均を取り、そこから基準音速分布の伝搬時間を差し引くことにより表される。T2-T4間を例に取ると、2000年通算日の80日付近まで

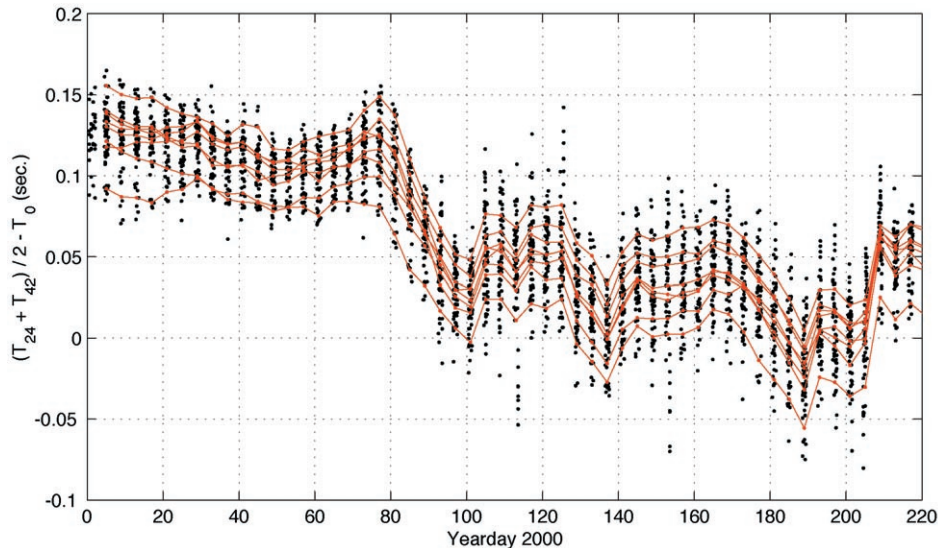


図8 双方向の伝搬時間の平均から音線計算による基準音速場での伝搬時間を差し引いたもの。図中のドットは1日7回のデータをそのまま表示したもの、実線は1日7回の平均を直線で結んだものである。同定された8本の音線を重ね書きしてある。横軸は2000年通算日、縦軸は秒。値がプラス側は基準場より伝搬時間が遅いことであり、水温は冷たいことを示す。80日を越えたあたりから温かくなっていることが分かる。

Fig. 8 The travel time difference from the ray calculation of the reference sound speed profile to the travel time of the average of the reciprocal. Continuous lines are displayed the data averaged 7 times in 1 day and dots displayed raw data of 7 times in 1 day. Overlaid of identify 8 acoustic rays. X-axis is total day of 2000 year and unit of Y-axis is second. The plus side of the propagation time is later than that of the reference field and that means the water temperature is cold. Water temperature change warm which exceeded 80-day.

はほぼ安定してプラスの値であり、その後変動しながら値が小さくなっている(図8)。伝搬時間差がマイナス側にシフトすることは音速が早くなること、つまりは水温が上昇することを意味する。この期間のデータでおよそ100msec以上の変動があった。なお、伝搬時間の変動と平均水温の変動とは水平距離500kmの場合、100msecでおよそ0.1℃の関係である。

5.2. 双方向の差のデータ

双方向の伝搬時間の差は、T2-T4間の場合、最大でも約20msec程度であった(図9)。また、1日の中での変動は、これも20msec程度ある。この1日以内の変動は潮汐によるものと考えられる。潮汐による効果はこの1日のデータを平均することにより除去することとした。潮汐に対しては調和解析することにより、もっと正確に分離できるものと考えられる。双方向伝搬の差を求める場合には時計の精度が求められる。本システムはGPSにより内部時計を校正しているため、1msec未満の精度と考えられる。

1日分を平均したデータの時系列は実験開始から100日位まで70日程度の同期でゆるやかに変動し、100日を過ぎた後はあまり大きく変動しなかった。

なお、平均流速と双方向の差の値との関係は、水平距離500kmの場合、10msecの差で4.5cm/sの流速である。

6. 解析結果について

6.1. 水温変動解析

水温変動に対しては三次元解析を行った。水平方向の展開は1度(緯度、経度とも)刻みの升目で区切って行った¹¹⁾。解析領域は東経177度～西経172度、および赤道(0度)～北緯14度であった。また、鉛直の展開はEOFを用いた。使用したモードは4次までである。この解析によって実験海域の3次元水温分布の時間変化が求まった。

北緯3度の時間変化(図10)を見ると、暖水や冷水が交互に現れていることが分かる。これは赤道のLegeckis渦(あるいは赤道不安定波動)によるものと考えられる¹²⁾。東太平洋の2度から4度付近で発達するこの現象は、Legeckis(レジキス)渦(あるいは赤道不安定波動)と呼ばれ、西向きに50cm/s(時速約1.8km)程度の速さで伝播することが、人工衛星による海面水温の観測等から知られている。

今年の4月頃までは水温の変動が顕著であり、Legeckis渦が観測海域にまで達しているものと考えられる。

このLegeckis渦はラニーニャの時に発達し、エルニーニョの時には衰退することが知られている。気象庁の発表によると、東部太平洋赤道域で発生していたラニーニャ現象は昨年6月に始まり今年3月に終息したことを確認したとのことであった。この終息と同時期に、この渦活動が弱まっていることが分かる。

次に北緯11度の時間変化(図11)を見ると、北緯3度のよ

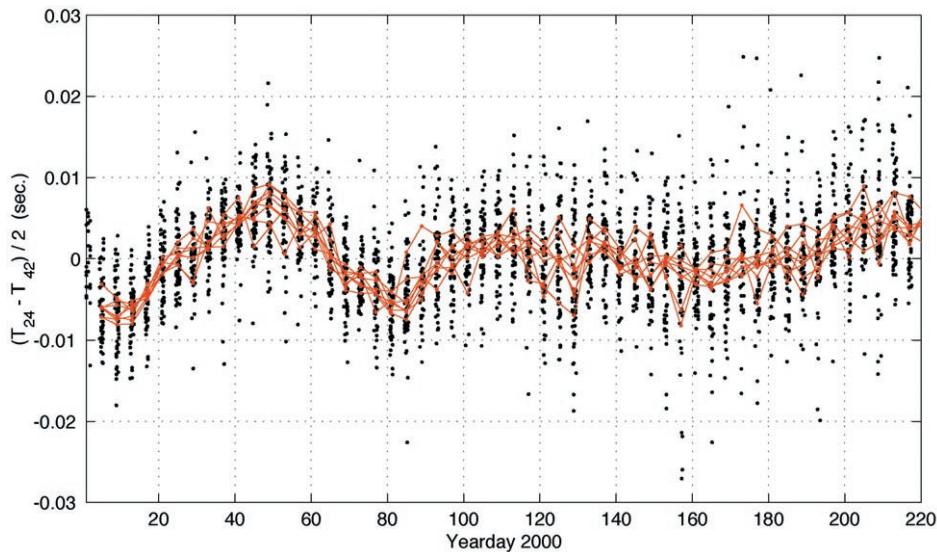


図9 双方向による伝搬時間差のデータ。T2からT4に伝搬した伝搬時間からT4からT2に伝搬した伝搬時間を差し引いたものである。図中ドットは1日7回のデータをそのまま表示したもの、実線は1日7回の平均を直線で繋いだものである。また、同定された8本のデータを重ね書きしてある。横軸は2000年通算日で、縦軸は秒。100日頃までは南北に流れが変動していたことが分かる。

Fig. 9 The data of the travel time difference of the reciprocal. The travel time propagated from T4 to T2 since travel time propagated from T2 to T4 was deducted. Continuous lines are displayed the data averaged 7 times in 1 day and dots displayed raw data of 7 times in 1 day. Overwrited of identify 8 acoustic rays. X-axis is total day of 2000 year and unit of Y-axis is second. The flow fluctuated in north and south by first 100-day.

うな活発な水温変動は見られない。しかし、時間が進むにつれて西から暖水が時々張り出していることが分かる。また、東側は水温が上昇していることが分かる。

6.2. 流速変動解析

流速の解析では測線間の平均流速を求めた(図12)。解析手法は確率論的逆問題法を用いたが、水平方向、鉛直方向ともに1層として解析したため、伝搬時間差を平均して流速変動としたものとはほぼ同じ結果となる。T2-T4間では音波伝搬が行われた水平約500km、鉛直約70m～約5000mをすべて1層とした。

流速は今年の1月から3月過ぎまでは変動が大きく、北向きから南向きへと流れる向きを変えていった。流速の大きさは最大3cm/s、周期は約70日であった。これはロスビー波によるものと考えられる^{13),14)}。この変動は通算日の100日を過ぎるとそれほど顕著でなくなった。

通算日の100日頃は3月となる。これは前述のとおりラニーニャ現象が終息した時期であり、南北流の変動が小さくなった時期と重なるものである。

7. 考 察

今回のデータ解析では潮汐成分は4時間毎7回のデータを平均することで除去することとした。しかし、この方法では完全には除去できず、エイリアジングの効果が残ることが考えられる。データは4時間毎7回が4日置きに1年間取得できる予定である。このデータを用いて調和分解すること

により潮汐の8分潮程度の分解は可能である¹⁵⁾。この調和解析を用いて潮汐成分を分離することは今後の課題である。

水温変動解析に対しては伝搬時間バイアスの補正を行った。補正量は設置時のCTD観測の値から測線毎に音速を計算し、測線毎に音線計算を行って求めた。また、CTD計測を行っていない測線は、他の測線のバイアスから類推して求めた。この値は全て負の値であった。負の値とは実際の伝搬時間が音線計算よりも遅いことを示すものである。次に、ある程度の距離依存性を示した。つまり、距離が大きくなるほどバイアス値も大きくなるものである(図13)。前報¹⁶⁾の考察の中で、音速の変換式をバイアス要因の1つとして挙げたが、バイアスの距離依存性はそれに合うものである。なお、現在の音線計算プログラムでは、地球はWGS84の回転楕円体と考え、この曲率を考慮して計算している。また、設置時の船の測地系もWGS84で統一している。GPSの測地系もWGS84である。距離依存性以外の誤差については、設置時の位置決定であるキャリブレーションの誤差や、さらにはWGS84の地球と真の地球との差などを考慮する必要があると考えられる。

今回の解析では誤差については論じていない。トモグラフィにおける誤差の要因については、ハード面では時計のずれによるものと係留系の挙動によるトランシーバ間の距離の変化が挙げられる。時計はGPSで補正し、距離変化はトランスポンダ3基によるナビゲーションによって補正しているが、補正後の残りが誤差要因として

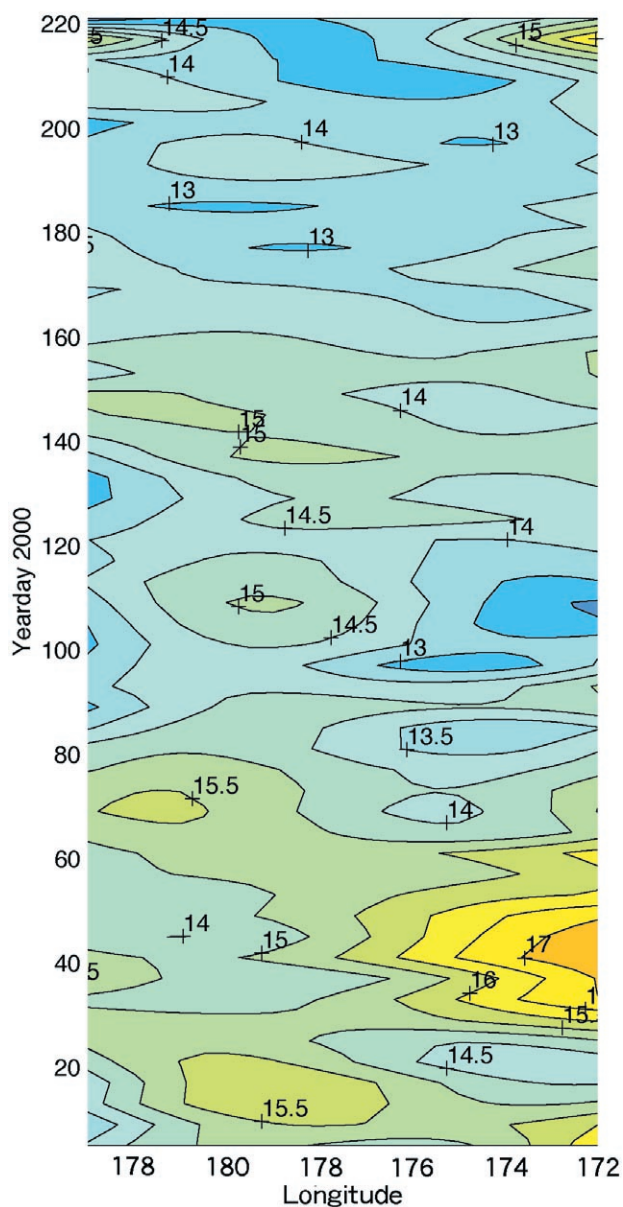


図10 北緯3度の水温変化図。横軸は経度で東西、縦軸は時間で2000年通算日、コンターは水温で100m~400mまでの平均である。80日頃までは水温変化が大きく、Legeckis渦による渦活動が活発であったと考えられる。その後は大きな変動はしていない。

Fig.10 Variation of sea water temperature of the 3 north latitude. X-axis is east and west at the longitude, and Y-axis is the total day of 2000 year, and the contour is the water temperature of average from 100m to 400m depth. The varying water temperature was big by 80-day, and vortex activity by the Legeckis vortex seemed to be lively in this term. Afterwards large fluctuation has not been seemed.

寄与する。次にソフト面では、音波伝搬や解析に関して種々の線形化を行っているため、その非線形性が誤差として寄与する。また、海洋自身が細かな変動をすることによってピークの消失や分裂などを起すため、中規模現象などの計測目標に対しては誤差として寄与する。現在の解析手法である確率論的逆問題法では、これら種々の

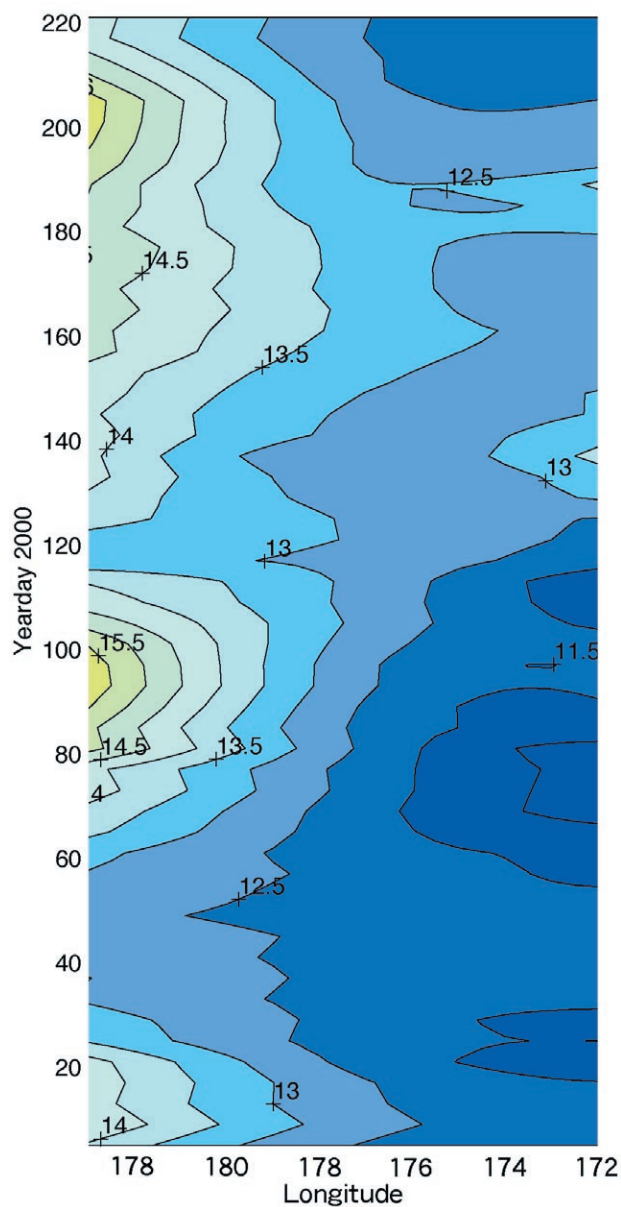


図11 北緯11度の水温変化図。横軸は経度で東西、縦軸は時間で2000年通算日、コンターは水温で100m~400mまでの平均である。西側から時々暖水が張り出していることや東側も100日を越えた頃から温かくなっていることが分かる。

Fig.11 Variation of sea water temperature of the 11 north latitude. X-axis is east and west at the longitude, and Y-axis is the total day of 2000 year, and the contour is the water temperature of average from 100m to 400m depth. The warm water sometimes overhang from the west and east side becomes warm from 100-day.

誤差を伝搬時間誤差として測時誤差共分散行列の中に加えて解析している。また、解析結果から伝搬時間残差を計算し、加えた誤差と比較検討している。この誤差については今後検討の余地を残している。

流速については今回は測線間の平均値の解析を行ったが、流線関数で展開することにより、2次元もしくは3次元の解析が可能となる。この場合、流速変動共分散行列を何

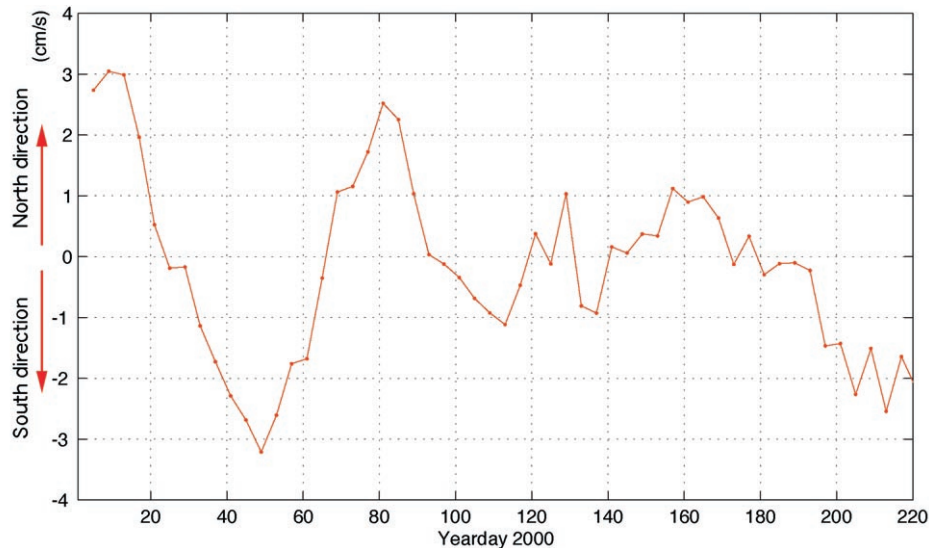


図12 双方向伝搬による流速の時系列図。これはT2-T4間約500kmの深度約70～5000m間の平均流速である。図中に示しているとおり、プラスを北向きにとっている。図9と比べて符号を反転させるとほぼこの解析結果となる。通算日100日頃までは約70日周期の変動があり、その後変動は小さくなった。

Fig.12 Time series of the flow velocity by the reciprocal propagation. This is an average flow rate between about 70～5000m depth in about 500km between T2-T4. The plus is taken in the north direction. Inverted in comparison with fig.9 almost this analytical result. There was the fluctuation of about 70 day period in the 100-day and the fluctuation decreased afterwards.

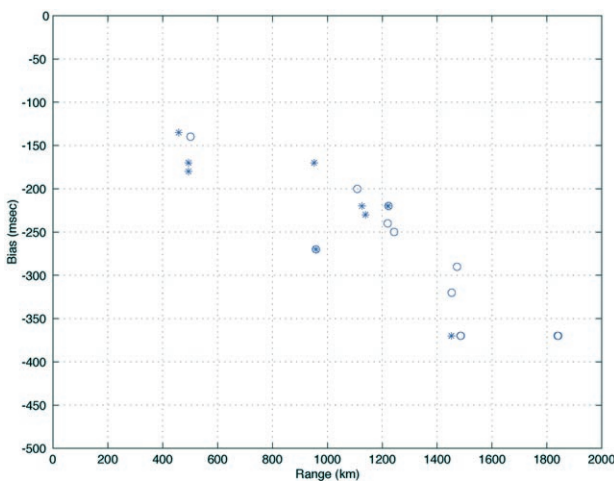


図13 伝搬時間バイアスと伝搬距離との関係図。図中アスタリスクは設置時の測線のCTD計測から音線計算を行い、バイアス値を求めたもの。伝搬距離とバイアス値が比例していることが分かる。図中丸印は測線のCTD計測が無いもののバイアス値であり、他のバイアス値から類推して求めた値。

Fig.13 The relation between propagation time bias and propagation range. The asterisk in this figure is the bias that is obtained from comparison real propagation data and ray calculation using CTD measurement of the measurement line of the deployment. The propagation range and propagation time bias are nearly linear. The value that the white round in the figure is the bias value of which there is no CTD measurement of the measurement line and was analogized from other bias value.

から仮定するかが問題となるが、数値モデルの結果を用いるのも一つの方法と考えられる。また、流速については双方向の差のデータを用いるため伝搬時間バイアスの影響を受けない利点がある。この流速解析は今後の課題である。流速解析ができれば水温と比較することができ、ここから水温と流速の整合性の検討が可能となる。

今回の結果はトモグラフィー単独で導出したものである。この客観的な評価としてTAOブイの値や衛星など他のデータとの比較検討が必要である。

8. おわりに

中部熱帯太平洋トモグラフィー観測実験について、2000年1月から8月までの順次送信のデータ解析を行い、3次元水温分布および測線間の平均流速の時間変化の結果を得た。この結果から北緯3度の水温および北緯9度～13度の流速では、1～3月頃までは変動が大きく、その後その変動が小さくなることが分かった。また、北緯11度の水温は徐々に上昇していることがわかった。また、この年の3月まではラニーニャの時期であり、その後は通常の時期に移ったものであった。

本実験は子午面循環に伴う南北流の計測が一つの目的であり、これは年間を通したデータが得られた後に解析されるものである。

本研究はプロジェクト研究「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。海洋音響トモグラフィーは広範囲(数100km～数1000km)の水温や流速分布を音波伝搬を用いて求めることを目的とするもの

である。今回の実験および解析により、この目的に対して近づいたものと考えられる。今後は海洋学的に有為なデータを如何に計測し、また、解析するのかを検討する必要がある。

文末に当たり、本実験を支援して頂いた湯川船長以下、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) 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).
- 2) 藤森英俊, 中埜岩男, 中村敏明, 金泉智之, 鴨志田隆: 中部熱帯太平洋トモグラフィー観測実験(1) - 水温の時系列変動と他観測との比較 -, 海洋音響学会2000年度研究発表会講演論文集, 87-90, 2000
- 3) Gu, D., and S. G. Philander: Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics, *Science*, 275, 805-807, 1997.
- 4) Bruce Howe and Brain D. Dushaw: "Observation of the subtropical cell", Proposal to the National Science Foundation No.9876528 (1998).
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) W. Munk et al: *Ocean Acoustic Tomography*, Cambridge Univ. Press (1995).
- 8) 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)
- 9) T. Shinke, T. Itoh, T. Kamoshida, A. Kaya, and M. Matsushita: Horizontal expansion function in OAT, *IEEE Oceans'97 Proceedings*, 1, 441-446 (1997)
- 10) Aki, K., and P. Richards: *Quantitative Seismology; Theory and Methods*, Freedom (1980)
- 11) Kuragano and Kamachi: Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. of Geophysical Research*, vol. 105, 995-974, 2000.
- 12) D. Chelton, F. Wents, C. Gentemann, R. Szoek, M. Schlax: Satellite Microwave SST Observations of Transquatorial Tropical Instability Waves, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No.9, 1239-1242, 2000.
- 13) 小倉義光: 気象力学通論, 東京大学出版会 (1978)
- 14) A Gill: *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academic Press (1982)
- 15) B. Dushaw, P. Worcester, B. Cornuelle: Barotropic currents and vorticity in the central North Pacific Ocean during summer 1987 determined from long-range reciprocal acoustic transmissions, *J. of Geophysical Research*, Vol 98, No.C2, 3263-3272, 1994.
- 16) 鴨志田隆, 藤森英俊, 吉川泰司, 新家富雄, 中埜岩男: 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 -, 海洋科学技術センター試験研究報告, 41, 81-88 (2000)

(原稿受理: 2000年8月24日)