

海洋音響トモグラフィー解析手法(I)

— 音 線 同 定 —

中埜 岩男^{*1}

海洋音響トモグラフィーの解析手法では、順問題や逆問題と同時に音線同定が重要である。SOFARチャンネル内における、音源から受波器に至る音波の伝搬時間経路を検討した結果、音波の放射角と伝搬時間との間には、密接な関係があり、下方転回点の数が等しい4個の音線同士は、放射角の絶対値と伝搬時間との間で比例関係が成立することが明らかとなった。また、この比例関係により、すべての音線は、4個1組の音線群に分類されることが明らかとなった。

音線群は、音速分布の変化に対して、その性質を保持するので、この事実を音線同定に適用した結果、SN比が良好でない場合にも十分に音線同定が行えることが確認された。

キーワード：音線同定，多重音線の分類

Identification of Multipaths for Ocean Acoustic Tomography

Iwao NAKANO^{*2}

In ocean acoustic tomography, ray identification is as important as the forward and inverse problems. Reanalysis of propagation modes of sound waves in the SOFAR channel shows that the same number of lower turning points can make a group of multipaths at a point of tomographic view and that the travel times of multipaths belonging to the group are proportional to the absolute transmission angles of the corresponding multipaths. These properties are stable because they are based on the asymmetry of SOFAR channel and the geometrical conditions.

This fact can lead to a new ray identification which seems to be effective in almost all cases, particularly, in a case of poor SNR reception.

Key words : Multipath identification, Grouping of multipaths

* 1 海洋観測研究部(海洋音響トモグラフィー技術開発プロジェクトチーム)

* 2 Ocean Research Department

1 はじめに

海洋音響トモグラフィーでは、音速分布と海底地形を既知として、音源から放射された音波がどのような経路を伝わって受話器に辿り着くかを調べる順問題と、受波器で観測された音波の伝搬特性を基に、音源と受波器の位置を既知として音速分布を調べる逆問題とが重要である。しかし、実際に観測されたデータと順問題から予想される基準値とを比較し、音線と受信信号との対応付けを行う問題は、音線同定と総称されるが、順問題、逆問題と共に、海洋音響トモグラフィーを支える重要な要素である。この音線同定は、音速分布が比較的安定し、SN比が良好な受信データでは、特に困難というわけではない。しかし、雑音が大きい時、あるいは、信号の強度が何らかの原因により著しく減衰させられた時には、SN比は極端に悪化し、単純な計算値と観測データの突き合わせだけでは、音線同定が困難となる。海洋音響トモグラフィーの特徴は、音波の伝わる速さで観測が行えることである。この特長を生かすためには、音線同定が1回1回の観測データについて独立して確実に実行することが必要である。

Spiesberger et al. (1980)¹⁾は、多重音線の安定性を根拠に音線同定を行えるとしているが、単に音線計算値と受信波形データを比較しているに過ぎない。Worcester (1981)²⁾は、音波の伝搬時間と入射角を既知とすることにより、音線同定を行う方法を紹介しているが、その根本は、単なる比較でしかない。Howe et al. (1987)³⁾は、音線の伝搬時間と放射角の関係に触れながら、比較を主体とした音線同定を行っているが、音線同定を放棄している音線もある。

ここでは、音線の伝搬時間と放射角の絶対値の間に示される音線グループ分けと、グループ内音線の伝搬時間と放射角の絶対値との比例関係に基づいた新しい音線同定法について報告する。

2 音波の放射角と伝搬時間

海洋科学技術センターでは、沖電気工業(株)と共同して、伊豆-小笠原諸島東方の4000m海域で、400Hz音源および受波器による、250km及び317kmの長距離音波伝搬実験をそれぞれ1989年8月と9月に行った。この時に、日本海洋データセンター (JODC) から提供された海洋観測データを統計処理して得られた音速分布を図1に示す。水深200mから500mにかけて、この海域特有の亜熱帯モード水の存在により、音速がほぼ一定の均一な層がある。この層を通る音線は、複雑な挙動を示すこと

になる。

音源の深さを1186m、受波器の深さを1485m、音源と受波器間の距離を324.6kmとして、図1の音速分布に基づいて音線理論 (Weinberg, 1975)⁴⁾により、順問題を計算した結果は表1となった。各々の音線の放射角と伝搬時間の関係を表すと図2aのようになる。伝搬時間に対応する放射角の関係では、伝搬時間に影響を与える音線という立場からは、放射角は上向きの方であっても、下向きの方であっても差異を考えることは意味がない。そこで、放射角の絶対値を縦軸にとって図2aを再プロットしたものが図2bである。図2bのいくつかの点を連ねると、直線となることがわかる。図2bから、直線上に載る点は、代表的に4点であることがわかる。この4点を表1で調べてみると、下方転回点の数 (nbt) が等しい音線群であることが明らかとなる。

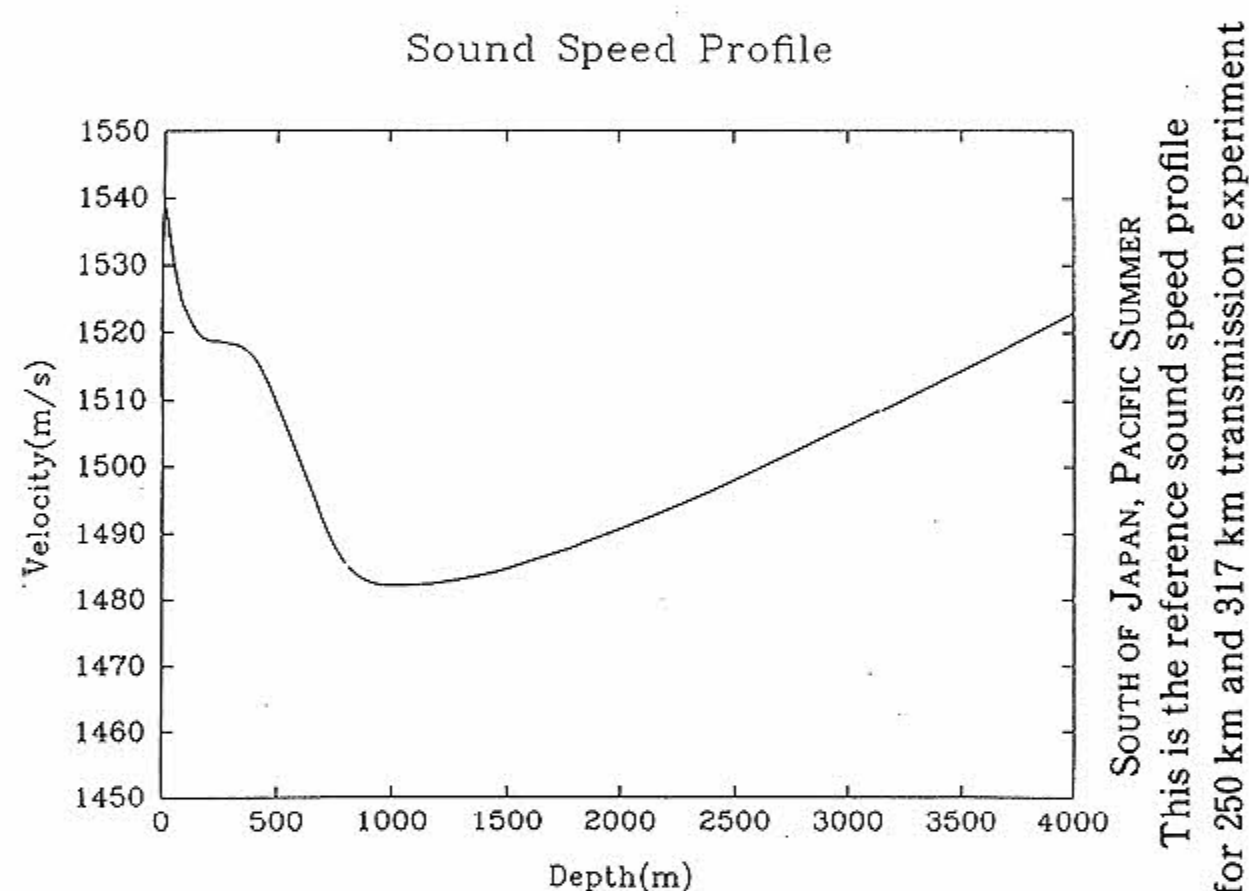


図1 音速分布の一例 (伊豆-小笠原諸島東方海域, 夏季)
Fig. 1 An example of sound speed profile.

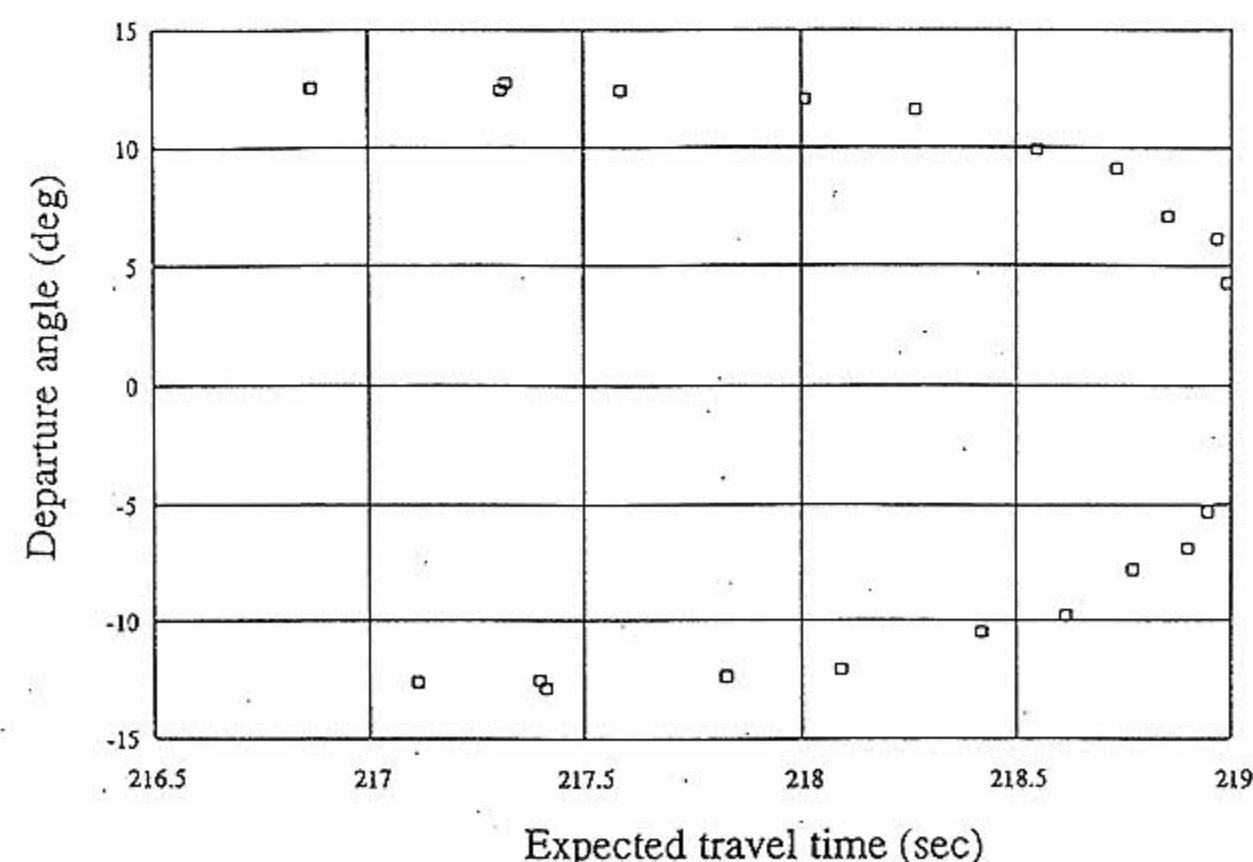


図2a 音波の放射角と伝搬時間
Fig. 2a Transmission angles and travel times of eigenrays.

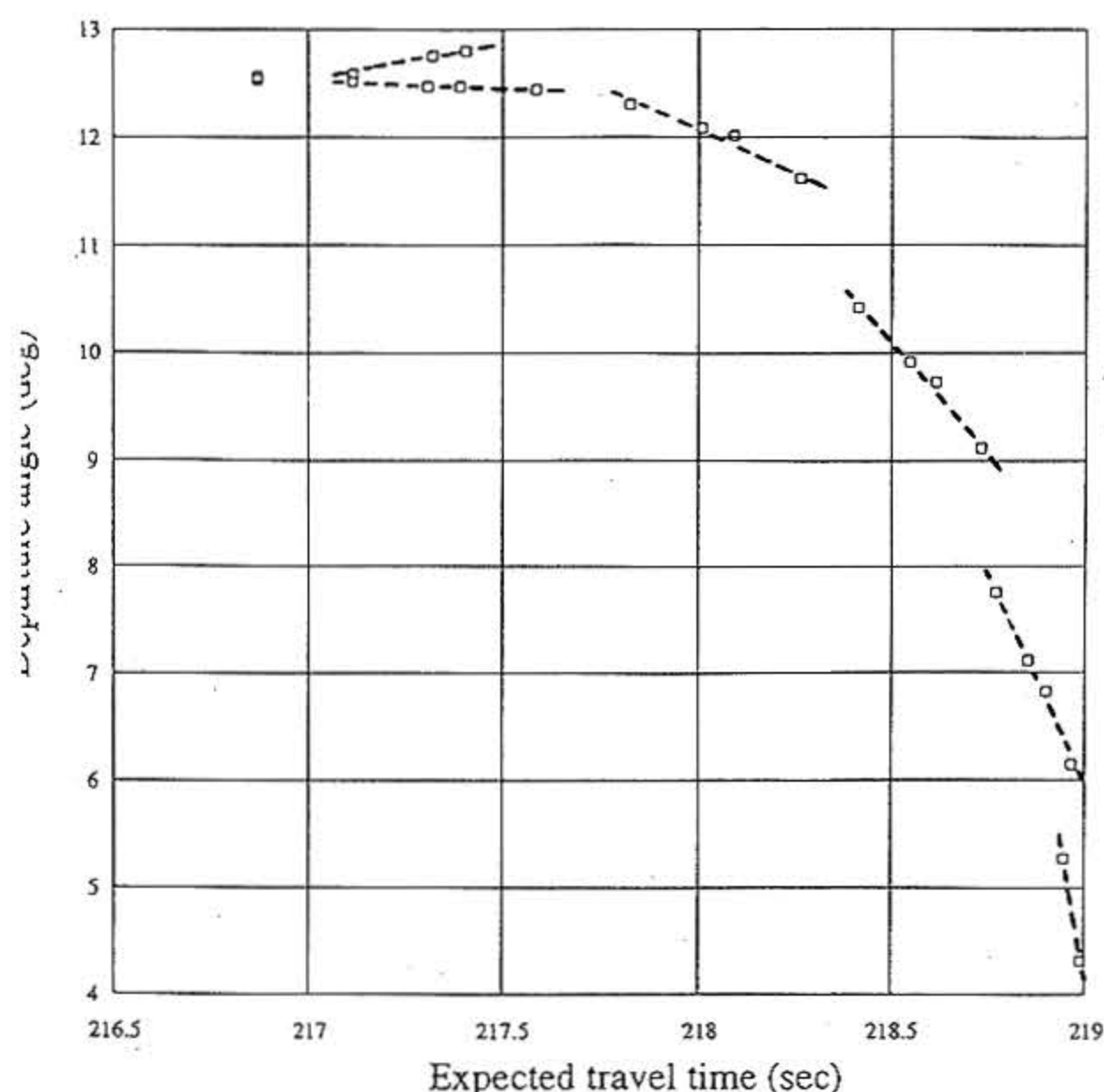


図 2 b 音波の放射角の絶対値と伝搬時間
Fig. 2 b Absolute transmission angles and travel times of eigenrays.

次に、音源の深さを1293m、受波器の深さを1300m、音源と受波器の水平距離を258.6kmとして、図 1 の音速分布により、計算した結果は表 2 のようになった。このうちの放射角と伝搬時間の関係を表したものが図 3 a, bである。図 3 bでは直線上には3点しか載っていない。表 2 および図 3 a, 3 bとを比較することにより、真中の点は、2点が重なりあって1点となっていることがわかる。すなわち、図 2 bと同じように音線は、4点で1群を形成していることがここでも確認される。

3 音線の群別

音波の放射角と伝搬時間との関係に基づいて形成される音波の群は、上方転回点の数 n_U と下方転回点の数 n_L とによって図 4 のように特徴付けられる。図 4 に示す音線は、Munk & Wunsch (1979)の記法に従うと、

$$\begin{aligned} \text{タイプ A : } & -(2n_L - 1) & n_U = n_L - 1 \\ \text{タイプ B : } & -2n_L & n_U = n_L \end{aligned}$$

表 1 固有音線の諸特性 (I)

Table 1 These are calculated using the modified ray theory by Weinberg (1975).

frequency : 400.000 (Hz)
source depth : 1.186 (km)
receiver depth : 1.485 (km)
range : 324.600 (km)

Index	Theta	Travel Time	Propagation Loss (dB)	Turning Point		Ray Index		
				Upper	Lower	ind	nst	nbt
502	12.5309	216.8671	129.221	0.2315	3.7526	4	5	4
502	12.5613	216.8676	129.221	0.1933	3.7631	4	5	4
503	-12.5168	217.1124	131.244	0.2518	3.7476	4	4	5
503	-12.5822	217.1140	131.244	0.1852	3.7703	4	4	5
504	12.4758	217.3064	125.782	0.2998	3.7335	4	5	5
504	12.7582	217.3186	114.161	0.1522	3.8318	4	5	5
601	-12.4729	217.3922	126.146	0.3028	3.7325	5	5	5
601	-12.8040	217.4067	113.687	0.1462	3.8478	5	5	5
602	12.4424	217.5842	122.162	0.3253	3.7220	5	6	5
603	-12.3022	217.8229	114.972	0.3708	3.6739	5	5	6
604	12.0842	218.0053	112.261	0.4058	3.5999	5	6	6
701	-12.0129	218.0883	111.395	0.4141	3.5759	6	6	6
702	11.6197	218.2597	109.736	0.4491	3.4452	6	7	6
703	-10.4239	218.4118	108.136	0.5234	3.0705	6	6	7
704	9.9160	218.5437	107.540	0.5506	2.9241	6	7	7
801	-9.7288	218.6110	107.190	0.5603	2.8723	7	7	7
802	9.1237	218.7275	106.491	0.5905	2.7122	7	8	7
803	-7.7580	218.7662	105.395	0.6528	2.3830	7	7	8
804	7.1191	218.8471	105.807	0.6788	2.2349	7	8	8
901	-6.8301	218.8940	105.513	0.6899	2.1700	8	8	8
902	6.1515	218.9610	103.372	0.7142	2.0258	8	9	8
903	-5.2862	218.9400	102.760	0.7435	1.8573	8	8	9
904	4.3299	218.9849	100.621	0.7753	1.6842	8	9	9

タイプC : $+2n_L$ $n_U=n_L$
 タイプD : $+(2n_L+1)$ $n_U=n_L+1$

と表される。

これは、図1の音速分布のように、音速極小層をもつ SOFARチャンネル内の音波伝搬では、音速極小層に向

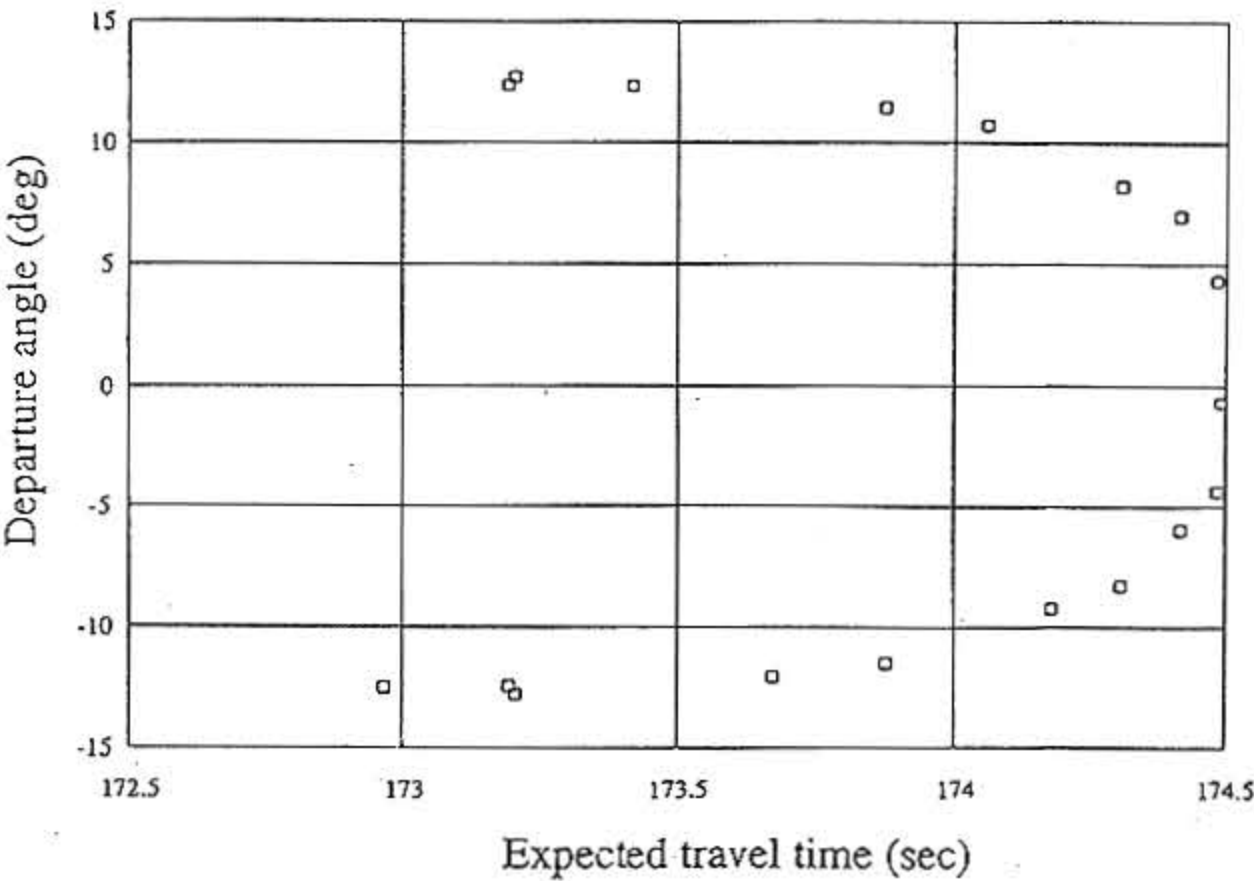


図3 a 音波の放射角と伝搬時間
 Fig. 3 a Transmission angles and travel times of eigenrays.

かうように音波が常に屈折させられるためである。また、この群別では、下方回転点の数が等しい音線が同じ

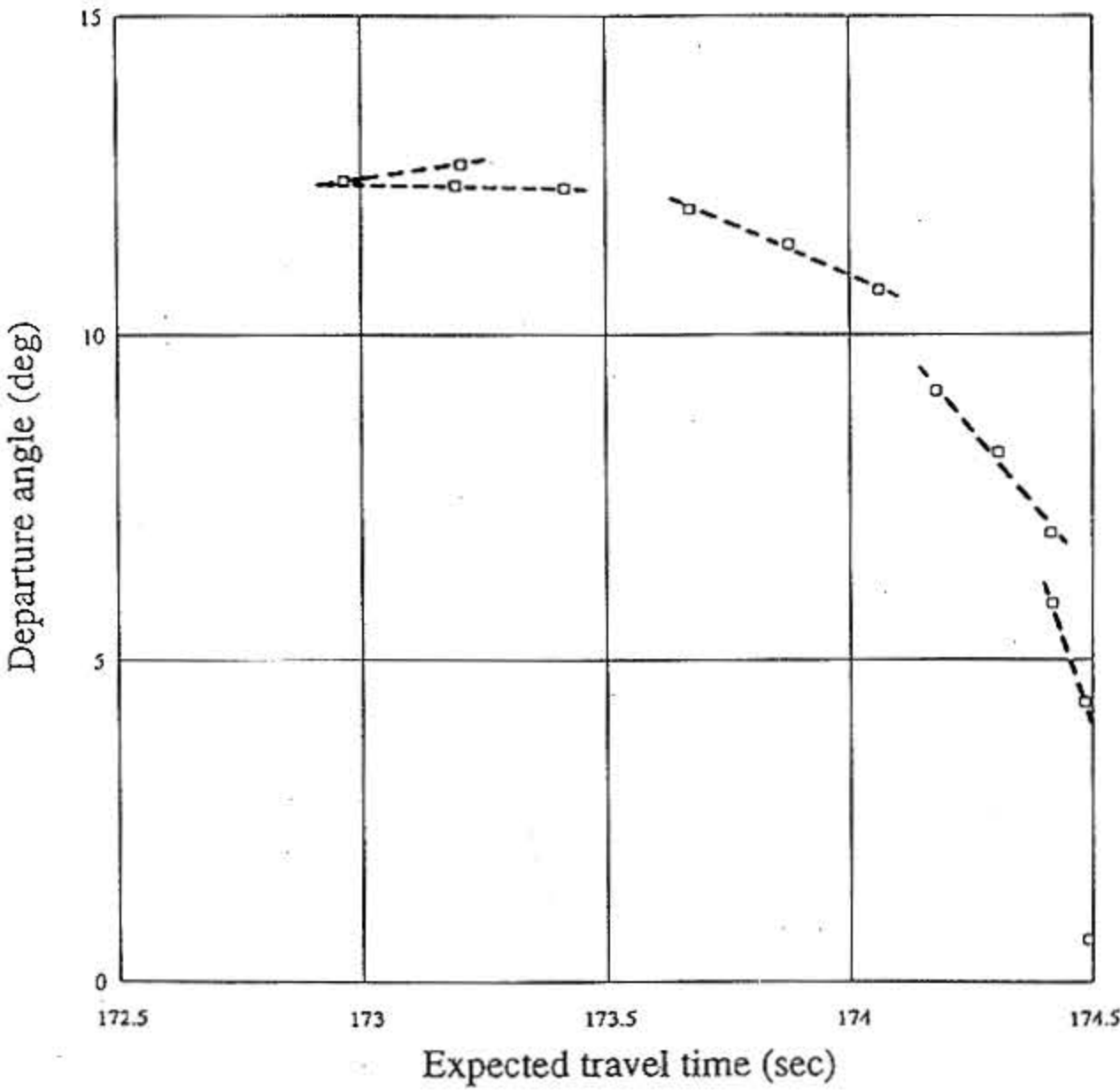


図3 b 音波の放射角の絶対値と伝搬時間
 Fig. 3 b Absolute transmission angles and travel times for eigenrays.

表2 固有音線の諸特性(Ⅱ)
 Table 2 calculated using the modified ray theory by Weinberg (1975).

frequency : 400.000 (Hz)								
source depth : 1.293 (km)								
receiver depth: 1.300 (km)								
range : 258.635 (km)								
Index	Theta	Travel Time	Propagation Loss (dB)	Turning Point		Ray Index		
				Upper	Lower	ind	nst	nbt
403	-12.4154	172.9650	125.976	0.2403	3.7506	3	3	4
403	-12.4579	172.9656	125.976	0.1905	3.7652	3	3	4
404	12.3629	173.1902	123.663	0.3026	3.7326	3	4	4
404	12.6954	173.2017	111.623	0.1463	3.8474	3	4	4
501	-12.3628	173.1922	123.664	0.3027	3.7326	4	4	4
501	-12.6968	173.2038	111.575	0.1462	3.8479	4	4	4
502	12.3165	173.4149	119.337	0.3329	3.7168	4	5	4
503	-11.9742	173.6703	109.954	0.4054	3.6012	4	4	5
504	11.4261	173.8715	107.309	0.4547	3.4209	4	5	5
601	-11.4222	173.8734	107.334	0.4550	3.4197	5	5	5
602	10.7262	174.0568	106.403	0.4991	3.2006	5	6	5
603	-9.1536	174.1763	105.165	0.5817	2.7586	5	5	6
604	8.2236	174.3041	103.145	0.6251	2.5314	5	6	6
701	-8.2135	174.3054	103.112	0.6255	2.5291	6	6	6
702	7.0083	174.4109	103.190	0.6755	2.2541	6	7	6
703	-5.9058	174.4141	102.915	0.7148	2.0226	6	6	7
704	4.3497	174.4799	99.701	0.7644	1.7416	6	7	7
801	-4.3270	174.4807	99.542	0.7651	1.7378	7	7	7
803	-0.6765	174.4881	93.132	0.8718	1.3100	7	7	8

A group of multipaths consists of four ray types.

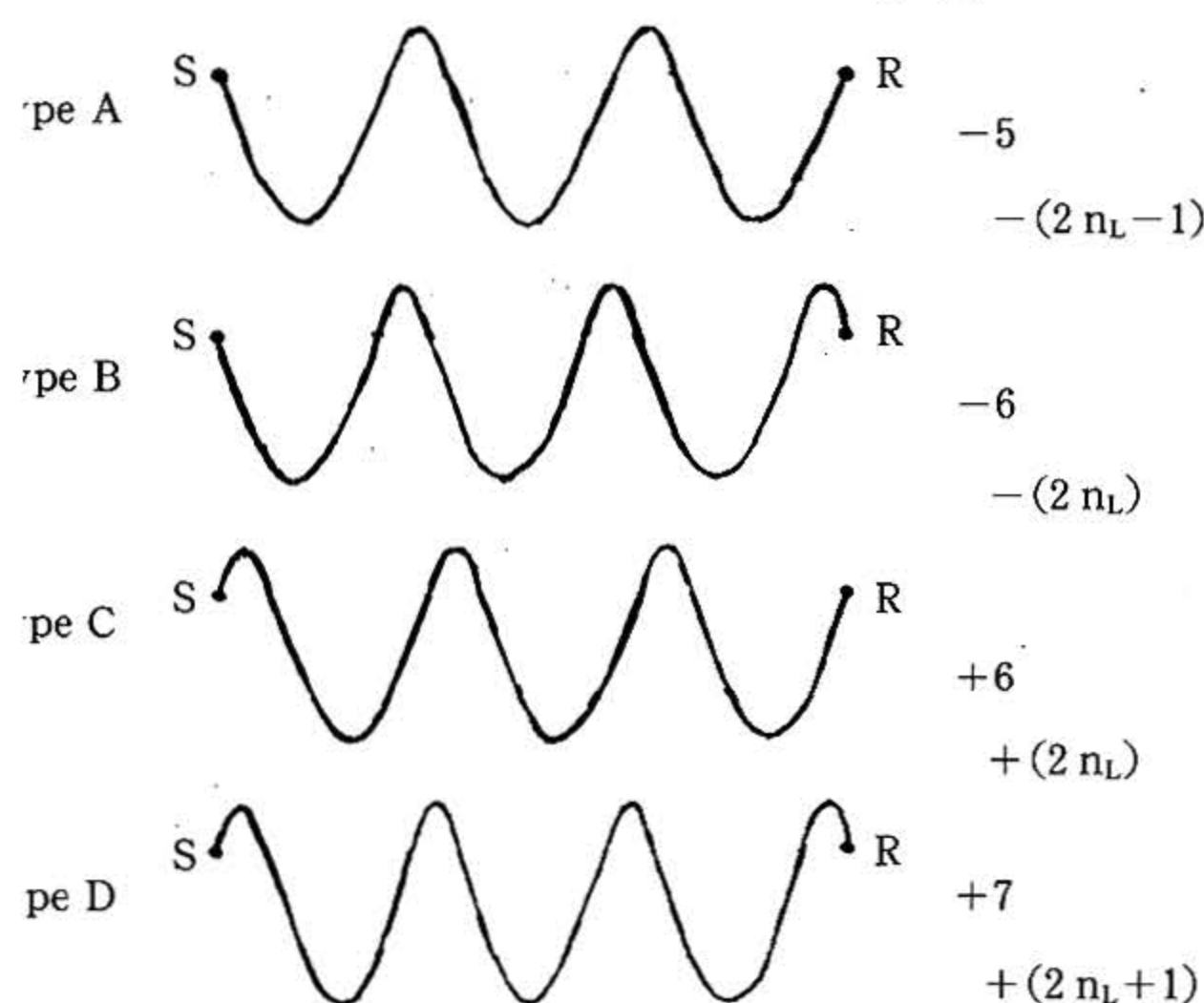


図4 同じグループに属する多重音線の伝搬経路

Fig. 4 Configuration of multipaths belonging to a group.

n_L is the number of lower turning points

群を形成している。この理由は、図1の音速分布では、SOFARチャンネルが上下で非対称となっているため、音速極小層より上層にある部分が小さく（伝搬時間は短い）、下層にある部分が大い（伝搬時間が長い）ため、下層部分の伝搬時間が音線の主要な性質を決定し、上層部分が個々の音線を識別することになる。しかし、音源と受波器が音速極小層に置かれることは少ないため、議論は単純ではないが、ここで述べた基本的な性質は、後で示すように実測データでもよく保存されている。

4 音線同定

音線が群別されること、同じ群に属する音線の伝搬時間は、比例関係を保ちながら変化する性質を利用すると、音線同定は、図5のように考えることができる。すなわち、順問題から示される音波の伝搬時間を横軸に取り、観測により得られた受信レベルピーク値の伝搬時間を縦軸に取り、直線で結べる4点を選ぶことである。基準値として採用した図1の音速分布と、観測時の音速分布が一致していれば、図5の図中の実線で示した直線の上にすべての観測された同定されるべき音波の伝搬時間が載ること、すなわち、予測値と実測値が一致するはずである。

ところが、音源と受波器の絶対位置の誤差、係留系の運動による位置変動、音速分布の変動、音波と海洋現象との相互作用等により、このようなことは起こり得な

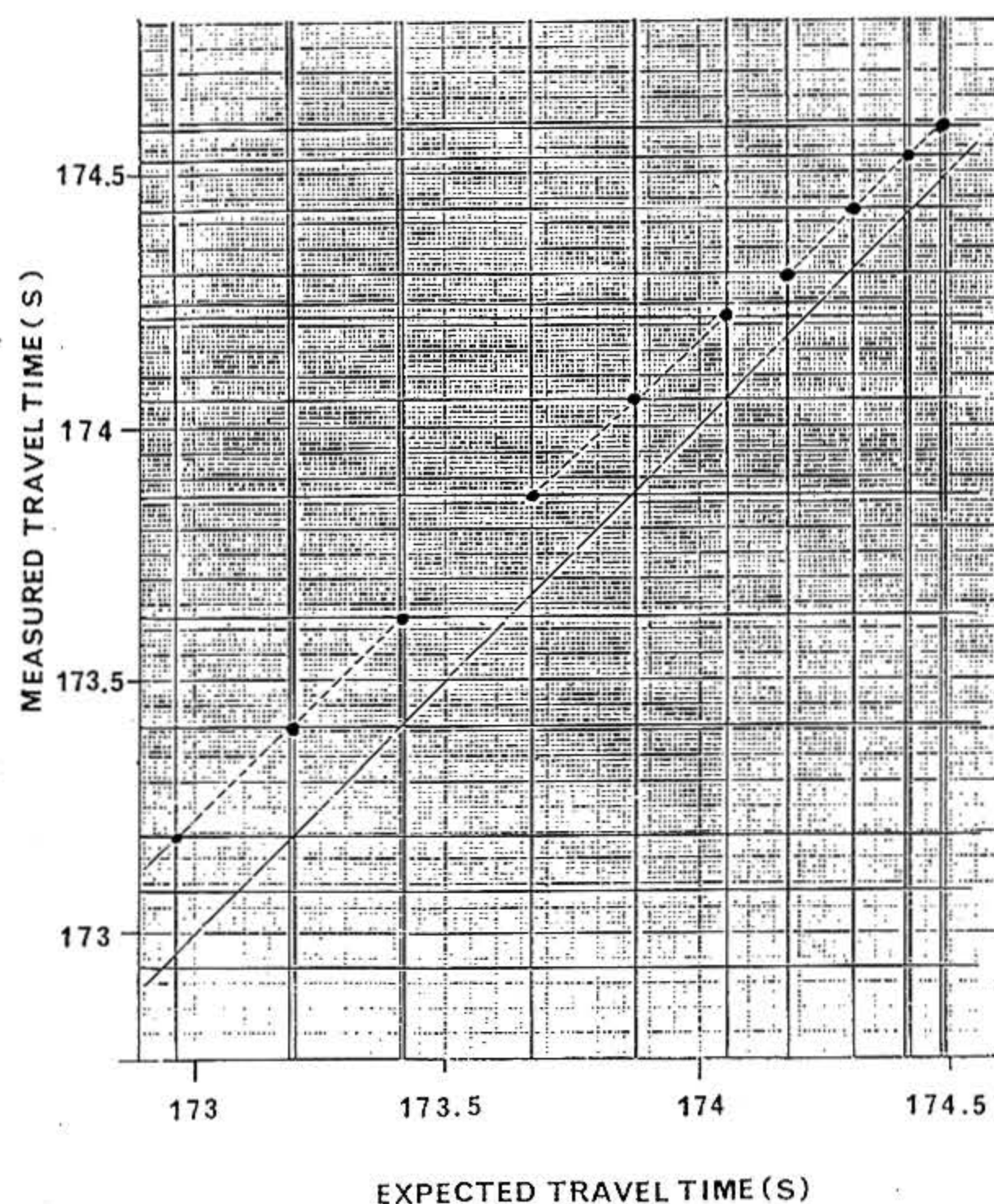


図5 音線同定図

Fig. 5 Identification lines for multipaths.

い。しかし、一つ一つの誤差及び変動を押さえ、実測値から誤差を充分に取り除くことができれば、予測値と実測値が一致することもあり得ることが期待される。図5に示す音線同定法の長所は、同じグループに属している4本の音線だけが、一つの直線上にあることを条件とするもので、全体としては折線となる。

5 適用例

1989年8月の観測データに、この方法を適用した例を示す。受信データは、図6に示す通りである。図6のピークデータを拾い出したものが表3である。表3では、大小48個のピークがあり、これがすべて音線同定の対象である。上述の音線同定法に従って、図示したものが図7である。表2で予想されている分離可能な音線はすべて同定されていると分かる。この例は、SN比が良好であったので、すべての音線同定を行うことができた。しかし、一般的にはSN比が芳しくなく、また、音線が欠落する場合もある。

6 まとめ

SOFARチャンネル内の音波伝搬に伴う、多重音線はよく知られていることであるが、この多重音線は、伝搬

Smoothed Arrival Pattern 107

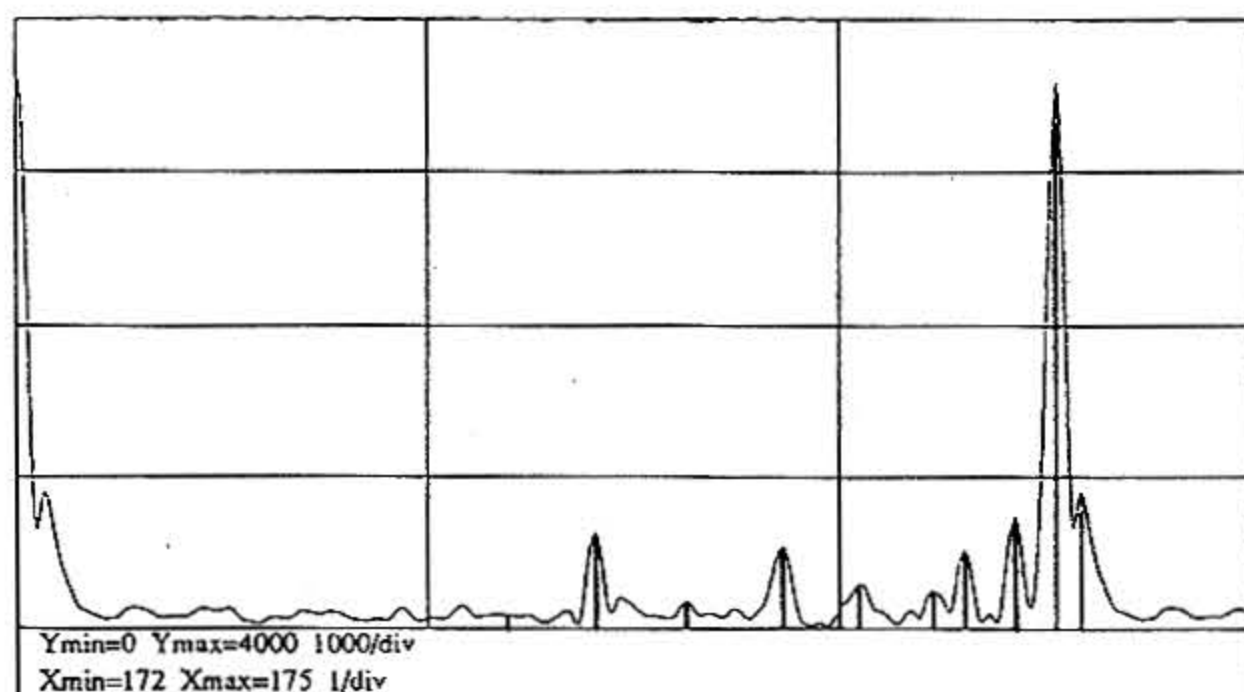


図6 伝搬時間スペクトラムと同定音線の一例

Fig.6 An example of a travel time spectrum and identified multipaths.

モードに従って、群別が可能であり、同じ群に属している音波の伝搬時間の変動は、比例関係を保持しながら変動するという事実が存在する。この事実に基づいた音線同定法は、従来の同定法に比較して、SN比の悪い音線の選別を可能にすると共に、基本的には1回の測定データのみで、音線同定を可能にする。この事実は、観測データは、必ずしも連続的に取ることを必要としないことを意味している。

ここでは触れていないが、この音線同定法は、基本的には人が行わなくても、コンピューターが肩替わりすることの可能なものである。1000km×1000kmの海域をリアルタイムで観測する海洋音響トモグラフィー観測システムの完成までには、自動音線同定の可能なアルゴリズムを完成させたいと考えている。

謝 辞

ここで示した音線同定法は、著者が1987年4月から1988年3月まで1年間、ウッズホール海洋研究所のJ.F. Lynch博士の下で、トモグラフィーのデータ解析を行っている時に考案し、帰国後、その正当性を確認したものである。トモグラフィーのデータ解析の場を与えていただいたリンチ博士に、心より感謝いたします。

また、海洋観測データを提供していただいた日本海洋データセンター（JODC）に感謝いたします。

参考文献

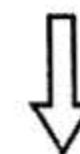
- 1) J.L. Spiesberger, R.C. Spindel, and K. Metzger : "Stability and identification of ocean acoustic multipaths," J. Acoust. Soc. Am., 67, 2011-2017 (1980).

表3 受信データの一例

Table 3 An example of received data.

172.23	86.2767
172.27	147.913
172.302	147.336
172.372	96.6816
172.445	144.656
172.52	143.414
172.568	59.048
172.607	79.7025
172.625	93.3863
172.655	80.5625
172.69	130.668
172.712	120.613
172.758	127.504
172.833	69.6877
172.87	80.4385
172.932	149.03
173.015	86.7385
173.087	165.463
173.135	102.241
173.158	108.591
●173.193	112.467
173.247	103.999
173.285	59.8361
173.34	128.474
●173.408	631.831
173.462	217.604
173.5	149.152
173.553	99.9098
●173.628	199.795
173.68	119.145
173.74	147.883
173.795	116.827
●173.863	551.191
173.925	39.0098
173.95	54.9534
174.003	164.998
●174.053	306.54
174.105	120.61
174.17	133.147
174.217	261.671
174.242	226.213
●174.3	534.653
174.363	121.42
●174.425	748.424
●174.527	3541.61
●174.587	911.979
174.648	273.296
174.702	111.678

48 potential candidates



9 candidates

- 2) P.F. Worcester, "An example of ocean acoustic multipath identification at long range using both travel time and vertical arrival angle": J. Acoust. Soc. Am., **70**, 2743-1747 (1981).
- 3) B.M. Howe, P.F. Worcester, and R.C. Spindel : "Ocean Acoustic Tomography : Mesoscale Ve-

- locity," J. Geophys. Res., **92**, 3875-3805 (1987).
- 4) H. Weinberg : "Application of ray theory to acoustic propagation in horizontally stratified oceans," J. Acoust. Soc. Am., **58**, 97-109 (1975).

(原稿受理 : 1993年10月19日)