論文

固有音線の到達時間差を用いた受動的位位置局限

大川圭一（艦艇装備研究所）*¹

Abstract

A localization method is developed using time differences of eigenray arrivals in a two-dimensional range-dependent underwater multiple reflection environment. This fast and robust method applies a perturbation theory to a horizontal range and a travel time which are the ray solutions given as a functional of both horizontal slowness and the sound speed profile. The linearized equations for estimating the horizontal range and depth of an unknown sound source are derived in a Cartesian coordinate system. The method's only constraint is the applicability of the ray theory. That implies that a low-frequency sound in a shallow water environment is no more applicable than a high-frequency sound to the method because it violates the ray approximation. Identification of three eigenrays provides the passive range and depth estimation of underwater sources without a priori information on sub-bottom properties. Experiments with an impulsive source were conducted at coastal areas in Suruga Bay, Japan, to validate the patented method. The bathymetry gradually deepens toward the location of the receiver around 1 km from the source. Four arrivals were detected by the use of the Wigner distribution and identified as the corresponding eigenrays. The estimated range and depth of the source are in an excellent agreement with the measurements.

Classification: 音波伝搬, その他(観測, 計測等)

Key words: 位置局限, 固有音線, 時間差

1. はじめに

水中では電磁波の減衰が大きいため, 一般的に水中目標の探知には音波が利用される. アクティブソナーは, 音源から音を送波して目標からの反響音を検出し, 目標までの距離と方位を求める方式である. 一方, 水中目標の放射音を検出するパッシブソナーでは, 発音源の方位を求めることは容易ではあるが, 目標の距離を求めるため一般的に目標運動解析と呼ばれる, 音源の放射音を

音響センサにより観測して得られる音波の到来方位時系列データ及び周波数時系列データ, 自艦位置の時系列データ等を用いた目標の運動パターンに関する複雑な予測計算が必要である. 目標運動解析では連続的な放射音に対して目標の距離を推定することができる一方, 一時的な過渡音に対して目標の距離を求めることができない.

目標運動解析以外の受動的な目標の位置局限法には, マッチドフィールド法¹⁻³⁾(定常領域計算

Passive Localization Using Time Differences of Eigenray Arrivals

*¹ Keiichi OHKAWA (Naval Systems Research Center)

† okawa.keiichi.ve@ext.cs.aela.mod.go.jp

と時間領域計算がある), 音波の到達時間差を利用する方法⁴⁻¹⁰⁾, 時間反転(位相共役)波法¹¹⁾, ウェーブガイド不変量を利用する方法¹²⁻¹⁴⁾等がある。

対潜戦の重点がブルーウォーター(深海域)からグリーンウォーター(浅海域)に移行する可能性を見通したパッシブセンサによる浅海域での水中目標の位置局限の研究は, 東西冷戦下の1970年前後に始まっている。マッチドフィールド法では受波器で観測した実音場とコンピュータで計算したレプリカ音場との相関の一致から水中目標の位置局限を行うもので, Hinich¹⁾とBucker²⁾がその原理を提唱した。位置局限法は逆問題に分類される。逆問題とは順問題に対する用語で, 計算パラメータを与えて, 計算プログラム(例えばParabolic Equation(放物型方程式)近似)の意図するとおり結果を出力するものを順問題と呼ぶのに対して, 計算プログラムの出力から計算パラメータを逆算することを逆問題と呼ぶ。マッチドフィールド法で効率的に位置局限を行うためには, 事前に海洋環境を把握しておく必要があるが, 海底の音響特性を直接計測するのは困難であるだけでなく, 時間空間的に変化する海洋環境の複雑な特性をデータベース化するのは困難である。このため, マッチドフィールド法を応用して既知の送受波器により実音場を計測し, 海底の音響特性を逆問題として求めようとする試みも行われた³⁾。逆問題の多くは非線形であるため, 非線形問題に線形近似が適用できない場合には, 逆問題解法としてモンテカルロ法, Simulated Annealing(焼きなまし)法, Genetic Algorithm(遺伝的アルゴリズム)法等の確率論的解法が適用されることが多いが, 解の一意性が保証されるものではない。

音波のマルチパス(多重伝搬路)の到達時間差を利用する方法(Time Difference of Arrivalの頭文字を取って, 以下TDoAと呼ぶ)では, 受波アレイで受信した低周波音場から伝搬時刻や方位角を検出する研究に多くの労力が費やされてきた。

高周波領域ではレプリカ音場の計算時間が膨大

になるので, 位置局限法はTDoAが主流になる。本研究では音線近似の適用可能な周波数帯を対象としている。マッチドフィールド法は低周波連続音に対して用いられることが多く, 過渡音に対しては海面や海底のような境界面での反射音を利用して, TDoAの研究が行われてきた⁴⁻⁸⁾。著者は, この問題に対して, 一樣な海洋環境では目標の距離及び深度を解析的に求めることができることを示した⁹⁾。

最近では, ウェーブガイド不変量を利用した音源までの距離の推定方法¹²⁻¹⁴⁾が研究されているが, 音源の深度まで推定できず, 低周波領域で適用されているため精度ではTDoAに劣る。

実際の海洋環境は, 音速分布や海底地形の空間的な変化があるため, 一般的に一樣な海洋環境に対するTDoAは適用できなくなるが, このような距離依存環境でもTDoAを行う必要があるため, 著者は2次元音線解に摂動法を適用し, 音源の位置を局限する方法を開発した⁹⁾。次章では, 一樣環境, 深度方向に音速が変化する距離非依存環境及び距離依存環境のTDoAによる位置局限原理を記述する。距離非依存環境と距離依存環境のTDoAは海底反射波の計算が異なるだけであり, 基本的な原理は同じである。第3章では, 原理検証のため行った海上試験及びその結果について記述し, 第4章に結論を記す。

2. 位置局限原理

本研究では, 音源から受波器に至る固有音線のうち音源から水中を伝搬して直接到達する音波(直接波)と海面又は海底面(或いはその両方)で1回反射して到達する音波(反射波)との到達時間差を用いて2次元内の目標位置を求める。直接波と海面・海底反射波だけに限らず, 一般的に固有音線は任意の3本でよい。最初に一樣な海洋環境のTDoAについて記述し, 次に深度方向に音速が変化する環境及び距離依存環境下でのTDoAについて記述する。

2.1 一様環境

水深及び音速分布が一様な海洋環境を仮定する。したがって、到達時間差に音速を乗じたものが経路差である。Fig. 1 に到達時間差(経路差)から目標音源の位置を求める TDoA の基本原理¹⁰⁾を示す。平面内の2点から経路差の等しい点の集合は双曲線になる。音源から海面で1回反射して受波器に至る反射波の経路長は海面に対する音源の虚像1から直接受波器に至る経路長に等しいので、音源から直接受波器に至る直接波と海面反射波との経路差の等しくなる点の集合は、音源とその虚像1を焦点とする双曲線1になる。同様に、直接波と1回海底反射波との経路差の等しい点の集合は、音源とその虚像2を焦点とする双曲線2になり、受波器は双曲線1と双曲線2の交点上に存在する。ただし、音源位置を求めるには、相反性を利用して受波器と音源の位置を交換して計算する方が簡単である。

ところで、解の一意性を保証するためには、どのような情報量が必要なのであろうか。2次元平面内の位置を決定するには2つの一次独立なベクトルが必要である。これをデータベクトル空間に置き換えると、2つの独立な到達時間差ベクトルが得られれば、これらベクトルが張る2次元平面内の目標位置(深度および距離)を決定することができるはずである。したがって3本の異なる固有音線間の到達時間差情報が得られればよい。

初期の研究では、音波の到達時間差情報のみを

Fig. 1 Principle of localization in a homogeneous environment.

用いて目標位置の推定を行っていたが、音源から受波器に到達する音波の到達時間差は正しいものの、真値とは異なる位置を推定するという事象が見られた。これは音の到達時間差のみに着目したことによるものであり、海底・海面反射波を区別する必要があった。このため、受波器をアレイ化し、ビームフォーミングにより音波の伝搬仰角(Grazing angle)を計算し、海底反射波と海面反射波を区別することで、逆問題における解の一意性の問題を解決した⁸⁾。

2.2 深度方向に音速が変化する環境

深度方向に音速が変化する海洋環境においても近距離(伝搬仰角が大きい場合)では上記の方法で近似できる。しかし、伝搬仰角が小さく音波の屈折の影響が大きくなる場合には上記の方法は使えなくなる。そこで、著者は、音線理論に摂動法を適用し、このような環境下で正確に位置局限可能な TDoA を開発した¹⁰⁾。

2.2.1 距離非依存環境

Fig. 2 は、音速の深度分布と伝搬音の音線の例を示したものである。深度方向(鉛直方向)を z 軸で表し、水平方向については、左図は音速 $c(z)$ を表し、右図では距離を r 軸で表すものである。

ふ仰角 θ_0 で深度 z_0 から出発し、深度 z まで伝搬する音線に沿って Snell の法則

$$\frac{\cos \theta_0}{c_0} = \frac{\cos \theta(z)}{c(z)} = p \quad (1)$$

が成り立ち、同じ音線経路上で値は不変である。この値 p はスローネス(遅度)の水平成分又は音線パラメータと呼ばれ、この p を使った表示を媒介変数表示と呼ぶことにする。

このとき、距離 r は媒介変数表示で

$$\begin{aligned} r &= \int_{z_0}^z \frac{dz}{\tan \theta(z)} = \int_{z_0}^z \frac{\cos \theta(z) dz}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta(z)}} \\ &= \int_{z_0}^z \frac{pc(z) dz}{\sqrt{1 - p^2 c^2(z)}} \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができる。この媒介変数表示による右

Fig. 2 Left: Sound speed profile $c(z)$. Right: A ray trajectory travels from point $(0, z_0)$ to point (r, z) in a Cartesian coordinate system, and the ray is refracted from an initial grazing angle θ_0 to angle $\theta(z)$.

辺の汎関数を $R(z_0, z, p)$ と表しておく。

いま、水深 h は一定で、受波点の座標 $(0, z_0)$ は既知であり、音源の座標 (r, z) は未知であると仮定する。2点を通る固有音線を計算する場合には、相反定理から、受波点から音源へ至る音線経路と音源から受波点へ至る音線経路は同一になる。未知の点を始点として音線を計算するよりも、既知の点を始点として音線を計算する方が便利であるので、以下では、受波点を始点として計算する。

受波点を始点として境界面で反射することなく到達する音波を直接波と呼び、この音線の音線パラメータを p_1 とすると、音線が区間 $[z_0, z]$ 内にある（すなわち、転回点を持たない）場合には、音源の r 座標は Eq. (2) から次式で与えられる。

$$r = R(z_0, z, p_1) \quad (3)$$

この汎関数は非線形であるが、 p_1 の単調増加関数である。したがって、 r, z の値を与えれば Eq. (3) は p_1 の関数となるので、ニュートン法に代表される非線形方程式の数値解法により音線パラメータ p_1 は容易に求めることができる。

受波点を始点として、海面で反射した後に到達する音波を海面反射波、海底で反射した後に到達する音波を海底反射波と呼ぶ。海面反射及び海底反射の場合、音源の r 座標はそれぞれ

$$r = R(0, z_0, p_2) + R(0, z, p_2) \quad (4)$$

$$r = R(0, z_0, p_3) + R(0, z, p_3) \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 p_2 及び p_3 はそれぞれ海面反射波及び海底反射波の音線パラメータである。これらの汎関数も非線形であるが、 p_2, p_3 の単調増加関数であり、 r, z の値を与えれば、非線形方程式の数値解法により音線パラメータ p_2, p_3 は容易に求めることができる。

ところが、ここでは音源の座標 (r, z) は未知であるので、方程式系の数に比べて未知数が2つ多く、すべての変数を決定することができない。このため、あと2つの独立な方程式が必要である。

次に音波の伝搬時間について考える。Fig. 2 右図に示す音線経路の伝搬時間 t は、音線経路 s に沿って

$$\begin{aligned} t &= \int_{z_0}^z \frac{ds}{c(z)} = \int_{z_0}^z \frac{dz}{c(z) \sin \theta(z)} \\ &= \int_{z_0}^z \frac{dz}{c(z) \sqrt{1 - p^2 c^2(z)}} \end{aligned} \quad (6)$$

と表すことができるので、この媒介変数表示による右辺の汎関数を $T(z_0, z, p)$ と表しておく。

直接波の伝搬時間 T_1 は、

$$T_1 = T(z_0, z, p_1) \quad (7)$$

となり、海底反射及び海面反射の伝搬時間 T_2, T_3 はそれぞれ

$$T_2 = T(0, z_0, p_2) + T(0, z, p_2) \quad (8)$$

$$T_3 = T(z_0, h, p_3) + T(z, h, p_3) \quad (9)$$

となる。

ところが、音源の送信開始時刻も未知であるために、直接波が到達してから反射波が到達するまでの時間差 $\tau_{12} = T_2 - T_1$, $\tau_{13} = T_3 - T_1$ のみ情報として得ることができる。

5つの変数 r, z, p_1, p_2, p_3 に対して、5つの方程式があるので原理的に方程式の解を求めることは可能である。しかし、一連の方程式は非線形で

あるので、解析的に解くことは困難である。複雑な非線形方程式系の解を求めるため、Simulated Annealing 法、Genetic Algorithm 法等の確率論的解法が試みられることがあるが、これらの方法では一般的に計算時間を要するうえ、解の収束判定の問題がある。このため、ここでは摂動法により非線形方程式系を線形化し、解を求める方法を用いる。

変数 r, z, p_1, p_2, p_3 を微小変化させたときの変分量をそれぞれ、 $\delta r, \delta z, \delta p_1, \delta p_2, \delta p_3$ とし、テラー展開の 1 次項までの摂動を考え、Eqs. (3)–(5) 及び Eqs. (7)–(9) に適用する。変分量 $\delta p_1, \delta p_2, \delta p_3$ は変分量 $\delta r, \delta z$ の 1 次従属であるので、独立変数は δr と δz の 2 つである。したがって、 $\delta p_1, \delta p_2, \delta p_3$ は δr と δz で表すことができるので、次の代数方程式を得る。

$$\delta \mathbf{r} = \mathbf{G} \delta \mathbf{r} \quad (10)$$

ここで、 $\delta \mathbf{r} = \begin{pmatrix} \delta r \\ \delta z \end{pmatrix}$ は 2 成分の列ベクトルであり、 $\mathbf{G}$ はスローネスの単位を持つ 2 行 2 列の行列で汎関数 R 及び T の $z, p_i (i = 1, 2, 3)$ に関する偏微分係数から構成される。

列ベクトルは 1 次独立であるので、 $\mathbf{G}$ の逆行列が存在し、

$$\delta \mathbf{r} = \mathbf{G}^{-1} \delta \mathbf{r} \quad (11)$$

を得る。

音速分布 $c(z)$ 、受波点座標及び観測伝搬音の到達時間差 $\tau_{12}^{(ob)}, \tau_{13}^{(ob)}$ を入力した後に、音源座標の初期値 $(r^{(0)}, z^{(0)})$ を与えると、Eqs. (3)–(5) から音線パラメータの初期値 $p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, p_3^{(0)}$ が決まる。これらの初期値を用いて到達時間差の初期値 $\tau_{12}^{(0)}, \tau_{13}^{(0)}$ が計算できるので、Eq. (10) の $\delta \mathbf{r}$ を観測値と計算値との差 $\delta \mathbf{r} = \begin{pmatrix} \tau_{12}^{(ob)} - \tau_{12}^{(0)} \\ \tau_{13}^{(ob)} - \tau_{13}^{(0)} \end{pmatrix}$ とする。最後に汎関数 R, T の偏微分係数から Eq. (10) の行列 $\mathbf{G}$ を計算して逆行列を求め、Eq. (11) から音源座標の摂動量が決まるので、Eq. (12) により音源座標を $(r^{(1)}, z^{(1)})$ に更新する。

$$r^{(1)} = r^{(0)} + \delta r, z^{(1)} = z^{(0)} + \delta z \quad (12)$$

上記の処理を n 回繰り返した後の音源座標を $(r^{(n)}, z^{(n)})$ とし、 $n-1$ 回目の値との誤差の例として L^2 ノルム

$$L^2 = \sqrt{(r^{(n)} - r^{(n-1)})^2 + (z^{(n)} - z^{(n-1)})^2} \quad (13)$$

を定義し、この値があらかじめ設定した閾値を下回るか、計算回数が既定の値に達した場合、音源座標の推定値が出力される。

本手法は音源から受波点までの伝搬経路に転回点を持つ場合や距離依存環境にも容易に適用できる。

2.2.2 距離依存環境

Fig. 3 は傾斜のある海底面への音波の入射ふ仰角と反射ふ仰角の関係を示した図である。受波点を基準とした海底地形は既知であり、関数 $h(r)$ で与えられるものとする。このとき、水平面に対して傾斜角 $\alpha = dh/dr$ の海底面にふ仰角 θ_{in} で入射する音波の反射ふ仰角 θ_{out} は

$$\theta_{out} = \theta_{in} + 2\alpha \quad (14)$$

与えられる。したがって、反射の前後で音線パラメータは変化するので、反射後の音線パラメータは Eq. (1) 及び Eq. (14) から

$$\begin{aligned} \tilde{p}_3 &= \frac{\cos \theta_{out}}{c(h(\hat{r}))} \\ &= p_3 \cos 2\alpha - \frac{\sqrt{1 - p_3^2 c^2(h(\hat{r}))}}{c(h(\hat{r}))} \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (15)$$

となる¹⁵⁾。ここで

$$\hat{r} = R(z_0, h(\hat{r}), p_3) \quad (16)$$

は受波点から反射点までの r 座標であり、 $c(h(\hat{r}))$ は反射点における音速である。

受波点、海底反射点及び音源を通る固有音線について、音源までの距離は

$$r = \hat{r} + R(z, h(\hat{r}), \tilde{p}_3) \quad (17)$$

Fig. 3 A ray with grazing angle θ_{in} and horizontal slowness p_3 strikes a plane with declination α , and the reflected ray is changed to θ_{out} and horizontal slowness $\tilde{p}_3$.

となり、伝搬時間は

$$T_3 = T(z_0, h(\hat{r}), p_3) + T(z, h(\hat{r}), \tilde{p}_3) \quad (18)$$

となる。

海底反射点を求めるためには、音線パラメータ p_3 で表される音線と海底面との交点を求めればよいのであるが、ここでは反射点を決定することにより音線パラメータ p_3 を決定する方法を用いる。音源座標 (r, z) の初期値及び受波点から反射点までの水平距離 $\hat{r}$ の初期値を与えたとき、Eq. (17) を数值的に解くことにより音線パラメータ p_3 を求めることができる。

次に、Eq. (16) について数值的に解くことで、 $\hat{r}$ の値を更新し、これらの計算を繰り返し、誤差が既定の範囲内に入るか、既定の計算回数に達したとき、水平距離 $\hat{r}$ が決まるので、音線パラメータ p_3 が求められるのみならず、反射点の座標 $(\hat{r}, h(\hat{r}))$ も求めることができる。

距離依存環境の位置局限は、距離非依存環境の海底反射波の計算を上記の海底反射波の計算に置き換えるだけでよいので、Eq. (11) がそのまま利用できる。

3. 実海面試験

令和元年10月、静岡県沼津市大瀬崎沖北北東2.5kmの海域において、GIガンを用いたパルス音の計測を行った。

Fig. 4 CTD profiles taken after the acoustic data correction. Solid and dashed lines denote the water temperature and the salinity profiles, respectively.

3.1 計測概要

音源船及び計測船を約1km離隔して係留した。音源船及び計測船の各位置はGPSで記録し、水温及び塩分濃度の深度分布はCTDで計測した。Fig. 4に水温及び塩分濃度分布を示す。音速は、これらの値を用いてMackenzieの式¹⁶⁾から計算した。

音源船からGIガン(Seismic Systems社製 Mini GI Gun, Fig. 5参照)を吊り金具に通したロープでAフレームから吊り下げ、ロープの長さでGIガンの深度を20mに調整した。GIガンの発振音は、計測船から深度50mと80mに吊下したブリアンプ内臓のハイドロフォン(オキシーテック社製 OST2130)で受信し、デジタルデータレコーダ(TEAC社製 WX-7016)にサンプリング周波数100kHzで収録した。データレコーダはサンプリング周波数に応じたローパスフィルタを通して収録するように設計されており、アンチエイリアシングのためフィルタを別途準備しなくともよい。

音源船と計測船を結ぶ直線(以下、計測線という。)を含む鉛直断面の海底地形は、GPSで記録した音源船及び計測船の緯度経度を用いて海図の5m間隔の等深線から読み取った。水深125–135mにかけて勾配約0.01(10m/1000m)の緩やかな下り傾斜になっている。Fig. 6に試験海域の海底地形図を、Fig. 7に計測の概要を示す。海

Fig. 5 GI Gun and its hanging jig.

Fig. 6 Trial area. Dots denote source (S) and receiver (R) positions.

Fig. 7 Configuration of experiment.

底地形図のSとRはそれぞれ計測開始時刻における音源船及び計測船の位置を示し、緯度経度はそれぞれ $N35^{\circ}02.954'E138^{\circ}48.422'$, $N35^{\circ}02.961'E138^{\circ}47.731'$ であった。

3.2 信号処理

海上試験は、浅海域においてパルス音の群速度を計測し、モードの群速度分散特性から海底下の音響特性を推定するために行われたので、GIガンから発生する音波は500Hz以下の低周波数帯域に集中していた。信号処理は、サンプリング周波数を20kHzにダウンサンプリングして行なった。低周波音は多重反射のある浅海域では音線近似による誤差が大きくなるので、信号に周波数1kHz以上を透過帯域とする7次のバターワースハイパスフィルタを施し、低周波成分を除去して固有音線の到達時間差の計測に使用した。

インパルス信号では、音波の到達時間はウィグナー分布を周波数に関して積分して得られる瞬時パワーから求めることができる(Appendix 参照)。従来、信号のパルス長を仮定して受信波形から直接波を切り出して受信波形との相互相関を計算していたが、これにより、未知の信号に対してパルス長を仮定しなければならないという欠点が解消される。また、直接波と海面反射波が近接して分離できない場合や直接波が存在しない場合には相関値が計算できないという欠点も解消される。

Fig. 8 に受信信号のフィルタ処理後の波形、相関値と瞬時パワーの一例を示す。受波深度ごとの相関値又は瞬時パワーの比較から直接波(D)、海面反射波(S)、海底反射波(B)及び海面-海底反射波(SB)を同定した。ただし、横軸は直接波の到達時刻からのオフセット時間であり、相関値のピークは波形の立ち上がり時刻を、瞬時パワーのピークはエネルギーの到達時刻を示すことに注意する必要があるが、時間差を検出するのでどちらでも問題はない。相関値と瞬時パワーの包絡線のピークから求めた到達時間差は時間分解能の範囲で一致した。

3.3 試験結果

音源船と計測船の距離が 1052.5 ± 1.5 m で安定していた時の5ショットからそれぞれ固有音線の到達時間差を求めた。サンプリング周波数から時間分解能は0.05msである。**Table 1** はショット

Fig. 8 Top: Wave forms of arrivals. Middle: Correlation between the direct wave and arrivals. Bottom: Instantaneous power of arrivals. Each vertical scale is normalized by the maximum value. Four arrivals: direct (D) , surface-reflected (S) , bottom-reflected (B) , and surface-bottom-reflected (SB) waves are observed.

Table 1 Receiver depths and time differences measured. Values below shot numbers denote the time differences in millisecond.

Receiver depth	Time difference	Shot#					Mean value	Standard deviation
		1	2	3	4	5		
50m	τ_{12}	1.65	1.65	1.68	1.65	1.65	1.66	0.01
	τ_{13}	16.03	16.03	16.00	16.00	15.98	16.01	0.02
	τ_{14}	21.15	21.18	21.20	21.18	21.12	21.16	0.03
80m	τ_{12}	2.08	2.08	2.08	2.05	2.05	2.07	0.01
	τ_{13}	11.83	11.83	11.80	11.80	11.80	11.81	0.01
	τ_{14}	15.90	15.85	15.88	15.88	15.82	15.87	0.03

毎の到達時間差を示す。ここで、 τ_{14} は直接波と海面-海底反射波との到達時間差である。直接波と海面反射波の経路差が小さく、これらの音線間の到達時間差の計測には厳しい条件であったが、データのばらつきは極めて小さかったことがわかる。バターワースフィルタはIIRフィルタであり、少ない次数で急峻なフィルタ特性を得ることができる一方、位相遅延が線形にならないものの、ゼロ位相デジタルフィルタ処理を行い、位相歪補正を行った。信号長が短いので位相遅延は問題にならないと思われるが、比較のため、ダウンサンプリング後の波形に位相遅延が線形なFIRフィルタを適用して固有音線の到達時間差を計測した。同じ透過帯域を持つ200次のFIRフィルタを用いて計測した到達時間差は時間分解能の誤差の範囲でIIRフィルタを用いた計測値と一致した。

はじめに、Table 1の到達時間差 τ_{12} 及び τ_{13} を用いてTDoAによる音源の位置局限を行う。ここでは海底傾斜による音線の反射角の変化(Eq. (15))は考慮したが、伝搬距離が短いので転回点を持つ音線は考慮していない。Fig. 9に各ショットの音源位置の推定値を示す。真距離(True range)はGPSによる実測距離を表し、真深度(True depth)はGIガンを下するロープの調整値を表す。

推定された音源の距離は真距離よりも小さく、深度は真深度よりも大きかった。距離誤差は、いずれのデータも11–31mの間にあるが、受波深度50mの方が受波深度80mよりも精度がよい。深度誤差は1.5–3.5mの間にあるが、逆に、受波深度80mの方が受波深度50mよりも精度がよい。受波深度によって推定距離と推定深度の精度

Fig. 9 Estimated range and depth with range-dependent TDoA.

Fig. 10 Range and depth sensitivity to bias of time difference. Δr and Δz denote the range increment and the depth increment, respectively.

が逆転する要因として、海底地形の精度または到達時間差の計測精度の影響が考えられる。

到達時間差の計測精度の影響を調べるため、各受波深度における固有音線の到達時間差にバイアスを加算して、誤差に対する距離と深度の感度分析を行う。計算は、Table 1 の 5 ショットの平均値に対して行った。Fig. 10 に各受波深度での到達時間差 τ_{12} 及び τ_{13} に対する感度分析の結果を示す。縦軸(左)及び縦軸(右)はそれぞれ距離の増分(Δr)及び深度の増分(Δz)を表す。

全般的に到達時間差の変化に対する感度は、距離に対して高く、深度に対して低く見えるが、深度及び距離の範囲に対する相対的割合では同程度の感度である。Fig. 10 から距離の増加とともに

深度が減少するケースは、どちらの受波深度でも直接波と海面反射波との到達時間差 τ_{12} に負のバイアスを加算する場合である。一方、どちらの受波深度でも直接波と海底反射波との到達時間差 τ_{13} に対して距離と深度の変化に正の相関が見られるので、海底地形の精度は誤差の主因ではないと考えられる。

したがって、受波深度によって距離と深度の推定精度が逆転する 1 次的要因は、直接波と海面反射波との到達時間差 τ_{12} の計測誤差によるものと考えられる。この原因は、Fig. 8 上図に見られるように、直接波と海面反射波が近接しており、直接波が到達し終わる前に海面反射波が到達したため、海面反射波の立ち上がりの検出が遅延したこ

Fig. 11 Estimated range and depth with range-dependent TDoA. Direct, bottom-reflected, and surface-bottom-reflected arrivals are used for the localization.

Fig. 12 Estimated range and depth with range-dependent TDoA based on the assumption of a local bottom gradient. Direct, bottom-reflected, and surface-bottom-reflected arrivals are used for the localization.

Fig. 13 Intermodel comparison of range and depth estimation.

とによるものと考えられる。モニタハイドロフォンで記録したGIガンの波形から計算した有効パルス幅は5msあるので、直接波と海面反射波は完全に被っている。

直接波の立ち上がりエネルギーピークの検出は海面反射波の到達前であるので問題ないと考えられるが、海面反射波の検出時刻に遅延が生じている。このため、海面反射波の代わりに海面-海底反射波を用いてTDoAを行うこととした。このとき、直接波と海面反射波との到達時間差 τ_{12} を直接波と海面-海底反射波との到達時間差 τ_{14} に置き換え、Eq. (4) 及び Eq. (8) を海面-海底反射波の経路に対して修正することで既存のプログラムが利用できる。Table 1 から受波深度50mでは、海底反射波と海面-海底反射波との到達時間差($\tau_{14} - \tau_{13}$)は5ms以上の遅延があるのでピーク分離は可能である。一方、受波深度80mでは、海底反射波と海面-海底反射波との到達時間差は5ms未満であるので海面-海底反射波の検出に影響を及ぼす

可能性があると考えられる。このため、以下では、受波深度 50m の受信波形から得られる直接波と海面反射波との到達時間差 τ_{12} の代わりに、直接波と海面-海底反射波との到達時間差 τ_{14} を用いて TDoA を行う。Fig. 11 に各ショットの音源位置の推定結果を示す。

推定された音源の距離は、GPS の誤差を考慮すれば、すべてのショットで真距離と極めて良く一致する。一方、推定された音源の深度はすべてのショットで誤差 2m 以内であったが、ロープによる音源吊下深度の調整誤差は 1m 以内であると推定されるので、このことを考慮しても誤差は残る。これは海底地形の影響と考えられるので、海底反射波に対する海底勾配を 10.7m/1000m、海面-海底反射波に対する海底勾配を 7.3m/1000m と仮定して TDoA を行った。Fig. 12 に各ショットの音源位置の推定結果を示す。推定された音源位置は距離、深度とも真値と良く一致する。したがって、Fig. 11 の結果に対する誤差要因は海底地形であると考えられる。

最後に、モデル間の推定精度の比較のため、1) 距離依存環境に加え、2) 距離非依存(深度依存)環境、3) 一様環境を仮定したときの TDoA を用いて計算した。到達時間差の計測値のばらつきが小さかったので、これらの計算には到達時間差の平均値を用いた。距離非依存(深度依存)環境に TDoA を適用する場合、水深を平均値とした。さらに、一様環境では音速も平均値とした。各モデルによる推定誤差を Fig. 13 に示す。

距離依存環境と距離非依存環境の結果を比べた場合、距離非依存環境の TDoA では、誤差が生じる。これは、海底傾斜の影響を無視した結果である。誤差の最も大きいものは一様環境と仮定した場合であり、これは水温の深度分布を無視し、音波の屈折を考慮しなかった結果である。

4. 結論

音線理論に摂動法を適用し、2次元の距離依存環境において固有音線の到達時間差を用いた音源

の位置局限法を導出した。

原理検証のため、水深 125–135m にかけて緩やかな下り傾斜になっている海域において実海面試験を行い、音波のマルチパス(多重伝搬路)の到達時間差を利用する方法(TDoA)で音源の位置局限を行った。音源船と計測船の船間距離 1km における位置局限誤差は、海底の局所的な勾配を考慮しない場合、距離 1m 以内、深度 2m 以内であった。一方、海底の局所的な勾配を考慮した場合には、正確に位置局限できた。このことから距離依存型 TDoA の位置局限精度は極めて高いといえる。

位置局限誤差を生じる主な要因は、(1) 到達時間差の計測精度、(2) 海底地形、(3) 水温の深度分布である。

(1) 到達時間差の計測精度について、位置局限誤差の 1 次的要因と考えられる。誤差を生じる原因は、サンプリング周波数による時間分解能、計測される波形歪等によるもので、複数の受波器をアレイ化してビームフォーミングを利用することで、ある程度の精度改善が期待される。ただし、フィルタの種類、すなわち、IIR フィルタ、FIR フィルタどちらを使用しても到達時間差の計測分解能に有意な差異はみられなかった。

(2) 海底地形については、海底の局所的な勾配が位置局限誤差の 2 次的要因になると考えられる。また、計測線は等水深線に垂直ではないが、海底の勾配は音源船から計測線に沿って約 0.01 の比較的ゆるやかな下り傾斜になっており、伝搬距離が 1km 程度であるので、3次元音波伝搬の海底傾斜による水平方向の屈折¹⁷⁾は考慮しなくてもよいものと考えられる。ただし、海底傾斜や水温変化が顕著な距離依存環境では音波の 3次元伝搬に伴う水平方向の屈折を考慮しなければならないため、2次元の距離依存伝搬環境を仮定した本手法の推定精度は劣化することが予想される。

(3) 水温の深度分布については、音線計算において、一般的に水温分布の揺らぎも誤差要因になるが、5ショットの計測時間は3分以内であり、

固有音線の到達時間差の計測値にばらつきが少なかったことから、本計測において水温の揺らぎの影響はなかったと考えられる。しかし、CTDによる水温の計測時間と到達時間差の計測には40分程度のズレがあるので、水温分布の計測誤差が位置局限誤差の一因ではあるが、計測時期が10月であり、かつ計測距離が1km程度であることから水温分布の計測誤差は位置局限誤差の副次的要因であると考えられる。

ここでは、距離依存性のある海洋環境で船間距離1kmの位置局限精度を検証してきたが、同じ海域で船間距離2–5kmにかけて約1kmおきに同様の計測を行っている。今後、距離が増加するにつれ直接波や海面反射波が消失する環境において位置局限精度を検証するとともに、より詳細な海底地形を考慮した場合の位置局限精度の検証は今後の課題とする。

謝辞

試験データの取得にあたり、ご協力頂いた関係者各位に感謝します。

Appendix

ウィグナー分布と相関関数の関係性

自己ウィグナー分布は次式で定義される。

$$W(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \bar{s}\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (\text{A1})$$

ここで、 $s(t)$ は時間信号である。自己ウィグナー分布 $W(t, \omega)$ は2次元の実数分布であり、

1) 時間に関して積分することにより、時間信号のパワースペクトル

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(t, \omega) dt = |S(\omega)|^2 \quad (\text{A2})$$

2) 周波数に関して積分することにより、時間信号の瞬時パワー

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(t, \omega) d\omega = |s(t)|^2 \quad (\text{A3})$$

を得る。

一方、自己相関関数は次式で定義される。

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{s}(t) s(t + \tau) dt \quad (\text{A4})$$

ここで、 τ は時間遅延であり、自己相関関数をフーリエ変換することにより、時間信号のパワースペクトル

$$\int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = |S(\omega)|^2 \quad (\text{A5})$$

を得る。したがって、自己相関関数をフーリエ変換したものは、自己ウィグナー分布を時間平均したものに等しい。

次に、Eq. (A5) を逆フーリエ変換し、 $\tau=0$ のとき Parseval の定理を用いて

$$R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt \quad (\text{A6})$$

を得る。自己相関関数のピーク値 $R(0)$ は時間信号のパワー（全エネルギー）を表し、自己ウィグナー分布を時間及び周波数に関して二重積分したものに等しい。

ここで、時間信号としてインパルスを考えると、 $s(t)$ はデルタ関数で与えられる。デルタ関数のパワースペクトルは1になるので、Eq. (A5) を逆フーリエ変換したものは

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega = \delta(t) = s(t) \quad (\text{A7})$$

となり、Eq. (A3) 及び Eq. (A7) から

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(t, \omega) d\omega = |s(t)|^2 = |R(t)|^2 \quad (\text{A8})$$

を得る。

したがって、インパルス信号の自己相関関数のピーク位置を求める問題は、自己ウィグナー分布を周波数に関して積分して得られる瞬時パワーのピーク位置を求める問題に帰着できる。

References

- 1) M. J. Hinich, "Maximum-likelihood signal

- processing for a vertical array," *J. Acoust. Soc. Am.*, **54**, 499-503 (1973).
- 2) H. P. Buckner, "Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, **59**, 368-373 (1976).
 - 3) 大川圭一, 太田和彦, "Simulated Annealing 法を用いた海底音響特性の推定," 防衛庁技術研究本部技報(6592) (1995).
 - 4) P. Hursky, M. B. Porter, M. Siderius, and V. K. McDonald, "Highfrequency (8–16 kHz) model-based source localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, **115**, 3021-3032 (2004).
 - 5) E. Zamanizadeh, J. Gomes, and J. M. Bioucas-Dias, "Source Localization from Time-Differences of Arrival using High-Frequency Communication Signals," OCEANS 2011.
 - 6) K. Mio, N. Sentenac, A. Frassati, and Y. Chocheyra, "QUICK PASSIVE LOCALIZATION," UDT Europa 2005, (2005).
 - 7) 大川圭一, 戸田康永, "水中目標のパッシブ測位方式に関する研究," 防衛技術シンポジウム 2013 発表要旨, (2013).
 - 8) 大川圭一, "水中目標のパッシブ測位方式に関する研究," 防衛技術ジャーナル, **400**, 38-43, (2014).
 - 9) 防衛省技術研究本部長(出願人), 大川圭一(発明者), "位置推定方法及び位置推定装置," 特許公報(B1), 特許第 5716219 号, 平成 27 年 5 月 13 日.
 - 10) 防衛装備庁長官(出願人), 大川圭一(発明者), "位置推定装置及び方法," 特許公報(B2), 特許第 6718098 号, 令和 2 年 6 月 16 日.
 - 11) 大川圭一, "位相共役波による音源の位置局限," 防衛庁技術研究本部技報(6903), (2005).
 - 12) L. Sunwoong and C. M. Nicholas, "The array invariant," *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**, 336-351 (2006).
 - 13) K. L. Cockrell and H. Schmidt, "Robust passive range estimation using the waveguide invariant," *J. Acoust. Soc. Am.*, **127**, 2780-2789 (2010).
 - 14) C. Cho, H. C. Song, and W. S. Hodgkiss, "Robust source-range estimation using the array/waveguide invariant and a vertical array," *J. Acoust. Soc. Am.*, **139**, 63-69 (2016).
 - 15) J. M. Hovem, "Ray trace modeling of underwater sound propagation," SINTEF Report **A21539** (2011).
 - 16) K. V. Mackenzie, "Nine-term equation for sound speed in the oceans," *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**, 807-812 (1981).
 - 17) M. B. Porter, BELLHOP3D User Guide in Acoustics Toolbox, <https://oalib-acoustics.org/>