

# マルチビーム音響測深機によって取得された海底地形データを用いた 水中平均音速の推定<sup>†</sup>

及川光弘\*

Estimation of an averaged sound speed by using swath data obtained by multi-beam echo sounders<sup>†</sup>

Mitsuhiro Oikawa\*

### Abstract

A sound speed profile is an essential parameter for the bathymetric survey with a multi-beam echo sounder. We developed a new program which estimates an appropriate sound speed for bathymetric surveys based on smile/frown curves in multi-beam echo sounder data. This program helps users in selecting the most appropriate sound speed profile when there are several actual sound speed profiles to choose from. In addition, the sound speed estimated by the program might be able to roughly correct smile/frown curves when actual sound speed profiles are not available.

## 1 序論

マルチビーム音響測深機を用いた海底地形調査において、水中における音速は極めて重要なパラメータの一つである。送波アレイから射出された音響ビームは、アレイ表面において表面音速による屈折をした後、各層の音速の違いによる屈折を経て海底に至る。適切な音速プロファイルを用いていれば、実際の海底地形を反映した水深データが得られるが、適用した音速プロファイルと、実際の水中の音速に差がある場合、放物線状のエラーが現れる。一般に下に凸の放物線状のエラーの場合は「スマイルカーブ」と呼ばれ、上に凸の場合は「フラウン (frown) カーブ」、[「アングリーカーブ」、[「逆スマイルカーブ」などと呼ばれるが、本稿ではまとめて「スマイルカーブ」と記す。

音速プロファイルの測定は、通常 XCTD など

により行われ、得られた音速プロファイルは測定地点における情報であるため、連続的に取得されるマルチビームデータに対して、どの音速プロファイルを採用すべきか迷う時がある。一般的には、調査に時間的かつ距離的に近い条件で計測された音速プロファイルを用いるが、海底地形などの影響により音速構造に空間的なギャップがある場合に、一般的な方法を用いて選択した音速プロファイルが最適とならずに、スマイルカーブを生じる場合がある。従って、より適切な音速プロファイルの選択方法について検討する必要がある。

そこで本稿では、スマイルカーブの傾斜の大きさから水中の平均音速の水平的な分布を推定し、適切な音速プロファイルを選択する方法を記述する。また、本プログラムを用いて推定した水中の

<sup>†</sup> Received October 11, 2013 ; Accepted December 26, 2013

\* 海洋調査課大陸棚調査室 Continental Shelf Surveys Office, Hydrographic Surveys Division

平均音速を用いて、スマイルカーブを軽減する方法について説明する。

## 2 スマイルカーブの原因

マルチビーム音響測深機を用いた測定には様々な誤差の要因が考えられる。誤差の原因と式については、IHO の水深測量マニュアル C-13 (IHO, 2011), Kongsberg 技術資料 (Erik, 2001) 及び及川・他 (2010) などに記載されている。本稿で扱う放物線状のエラーを生じる要因としては、それらの内、表面音速の誤差によるものと音速プロファイルの誤差によるものの二通りがある。

表面音速の誤差に起因する水深の誤差は、及川・他 (2010) より、アレイの形状がフラットアレイの場合で、実際の表面音速を  $V_{\text{surface}}$ 、表面音速の誤差を  $\Delta V_{\text{surface}}$ 、実際に音響ビームが当たった場所の水深を  $Z$ 、水深の誤差を  $\Delta Z$ 、水平位置の誤差を  $\Delta H$ 、音響ビームの射出時の直下からの角度を  $\theta$ 、アレイの表面と水平面との角度を  $\alpha$  とおいた場合、鉛直方向・水平方向の誤差はそれぞれ次の式の様に表示される。

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \frac{\Delta V_{\text{surface}}}{V_{\text{surface}}} \tan \theta \tan (\theta - \alpha) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta H}{Z} \approx (\tan \theta - \tan (\theta - \alpha)) \frac{\Delta V_{\text{surface}}}{V_{\text{surface}}} \quad (2)$$

大陸棚調査室で用いている Kongsberg 社製の EM の測深機は  $\alpha = 0^\circ$  である、 $\theta = 0^\circ$  の時 (1) および (2) 式において、鉛直方向・水平方向の誤差が 0 となり水深に影響を及ぼさないが、 $\theta$  が高角度側に行くにつれて、水深の誤差  $\Delta Z$  は  $\tan \theta$  の二乗となって急速に増えることがわかる。

音速プロファイルに起因する誤差 (Fig. 1) は、及川・他 (2010) より、海面から海底までの平均音速を  $V_{\text{average}}$  とおき、平均的な音速の誤差を  $\Delta V_{\text{average}}$  とおいたとき、鉛直方向・水平方向の誤差はそれぞれ次の式の様に表示される。

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \frac{\Delta V_{\text{average}}}{V_{\text{average}}} (1 - \tan^2 \theta) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta H}{Z} \approx 2 \tan \theta \frac{\Delta V_{\text{average}}}{V_{\text{average}}} \quad (4)$$

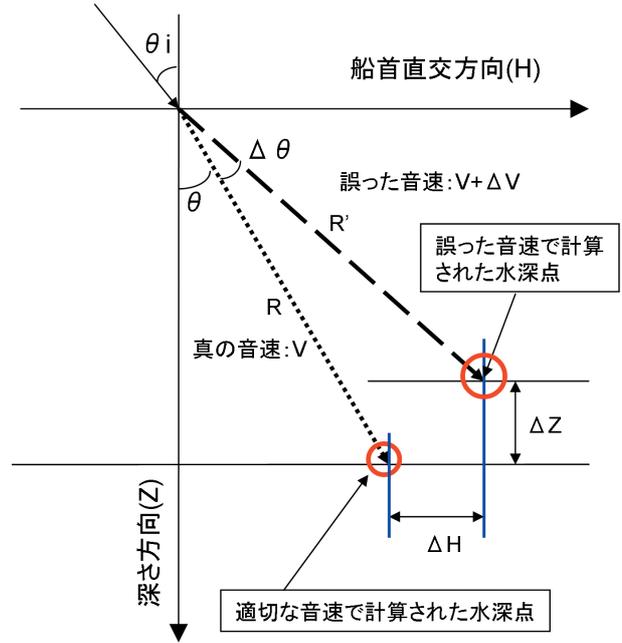


Fig. 1. Schematic drawing of the bathymetric errors derived from sound speed errors in a flat bottom.

図 1. 音速に起因する水深誤差の模式図。

$\theta = 45^\circ$  となる時、鉛直方向の誤差は (3) 式の右辺が 0 となるため、音速プロファイルの誤差の影響を無視することができる (Fig. 2).  $\theta = 0^\circ$  のときは、実際の音速よりも音速プロファイルが速ければ深く、遅ければ浅くなるので、表面音速と異なって直下の水深の誤差が 0 にならない。

## 3 平均音速の推定方法

前述の通り、表面音速又は音速プロファイルに起因する水深の誤差は、式の形こそ違うものの、いずれも  $\tan \theta$  の 2 次式で示される。従って、表面音速の誤差又は音速プロファイルの誤差の一方の値が導出できれば、もう一方の  $\tan \theta$  の二乗項の係数を導出することができる。海上保安庁で使用する測量船には、ほとんどの場合表面音速計が備え付けられているため、表面音速のエラーの寄与は十分に小さいと予想される。そこで、まずは音速プロファイルに起因する誤差について検討する。

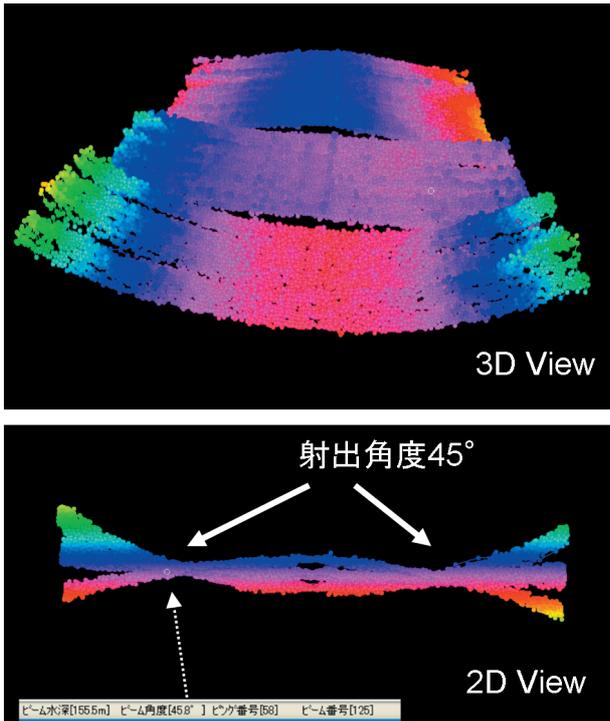


Fig. 2. Sound profile dependences of the multi-beam data. All profiles show an identical depth at 45 degree.

図2. 音速プロファイルを変更した場合のデータの例。どのプロファイルを用いても射出角度45度付近で水深が一致する。

### 3.1 平坦面の場合の推定方法

初めに、考えやすくするため海底面が平坦な場合を仮定する。音速プロファイルに起因する鉛直方向のエラーは $\theta=45^\circ$ のときに0となる。従って、 $\theta=45^\circ$ で得られる水深の値が確からしい水深の値と考えることができ $Z_0$ と置く。海底面が平坦であると仮定しているので、 $Z_0$ との水深の差がそのまま、そのビームの水深の誤差 $\Delta Z$ と考えることができる。 $\theta=45^\circ$ のビームで測定した水深までの平均音速を $V_{\text{average}}$ とする。ここで、(3)式において $\theta=0^\circ$ の時、 $\Delta Z/Z_0 = \Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$ で示され、 $\theta=60^\circ$ の時、 $\Delta Z/Z_0 = -2 \Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$ で示すことができる。直下及び両舷60度の3点の値から求めた $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$ の平均値から、 $\Delta V_{\text{average}}$ 及び適切な平均音速( $V_{\text{average}} + \Delta V_{\text{average}}$ )を算出できる。

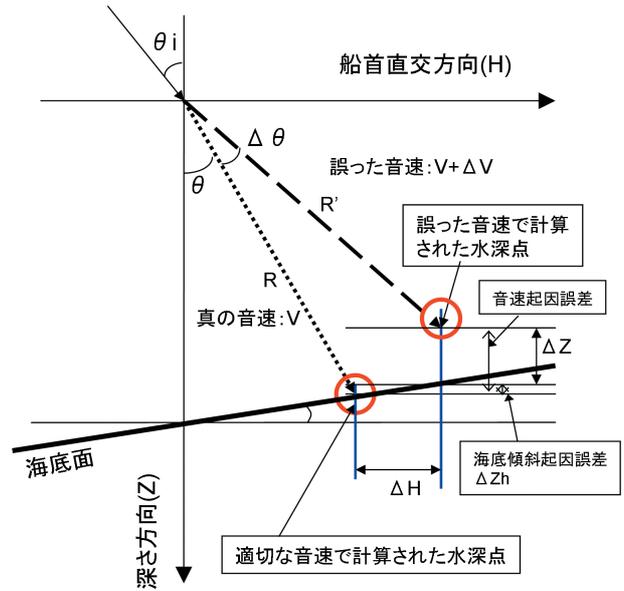


Fig. 3. Schematic drawing of the bathymetric errors derived from sound speed errors in a tilted bottom.

図3. 傾斜した海底面における水深誤差の模式図。

### 3.2 傾斜面の場合の推定方法

3.1では平坦面における場合を想定したが、次に海底面が傾斜した平面である場合を考える。3.1,での検討の通り、 $\theta=45^\circ$ に射出した水深は音速プロファイルの影響を受けにくい。そこで、始めに左舷と右舷の $\theta=45^\circ$ 方向の水深データをそれぞれ抽出し、その2点を結ぶ直線が海底面を傾斜した確からしい海底面とする。傾斜した確からしい海底面を基準として、左舷の $\theta=60^\circ$ 、右舷の $\theta=60^\circ$ 、直下方向のそれぞれの水深の差を計算する。この時、水深の誤差には、海底面が傾斜しているために、音速プロファイルの誤差によって音響ビームの水平位置がずれたことによる水深の誤差が寄与する。水深に寄与する水平方向の誤差による水深の誤差( $\Delta Z_H$ )の効果は、海底面の傾斜角度を $\beta$ とおくと、水平位置の誤差の式(4)式を用いて、次式で示される(Fig. 3).

$$\Delta Z_H = \Delta H \tan \beta \quad (5)$$

海底の傾斜を考慮し、水深の誤差を算出することで3点の値から求めた $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$ の平均値から、 $\Delta V_{\text{average}}$ 及び適切な平均音速( $V_{\text{average}} +$

$\Delta V_{\text{average}}$ )を算出できる。本プログラムでは、 $V_{\text{average}}$ が3点で同じ値と仮定しているが、傾斜が大きい場合には3点で $V_{\text{average}}$ 及び $\Delta V_{\text{average}}$ を同じ値として扱えなくなるため、傾斜が大きい場合にはそもそも計算対象としないなどの対応が必要である。どの程度の傾斜まで適用可能かどうかは、海底付近の音速の変化の状況に因るが、経験的には傾斜が5%程度(角度では3度程度)であれば比較的 normally  $\Delta V_{\text{average}}$ が求まるようである。

### 3.3 プログラムの構築

実際の水深データを用いて平均音速を計算する場合、海底面が3.1や3.2で想定したような平面とは限らないこと、動揺等の影響により常にデータがばらつくこと、ノイズが多いこと等の条件を想定しなければならない。

そこで、Fig.4のフローチャートに則ったプログラム(Fig.5)を作成し、補正値を算出している。尚、本プログラムは大陸棚調査室が現在使用しているマルチビーム音響測深データ処理ソフトウェアであるMarineDiscovery3で作成したpingファイルフォーマットに対応したものとなっている。

#### 3.3.1 各水深の音響ビーム射出角度の計算

水深の誤差が最小となる射出角度として、 $\theta = 45^\circ$ のデータを求める必要があるが、ここで $\theta$ は射出時の角度であって、着底地点と水深との角度ではない。そこで、水深の射出角度を求める必要がある。射出時の角度の算出には、沖野・泉(1996)にあるように、音速プロファイルを考慮した収束計算が必要になる。収束計算は非常に多くの計算時間を必要とするため、今回のプログラムには角度を収束計算で求める方法と、単純な水平距離と水深から求める方法の2通りの方法を選択できるようにした。なお、測量の際に用いた音速プロファイルと実際の音速構造との乖離が劇的に大きくない限りは、単純な方法で求めた確からしい平均音速を用いても大きな問題は無かった。

#### 3.3.2 水深の誤差の基準となる平面の計算

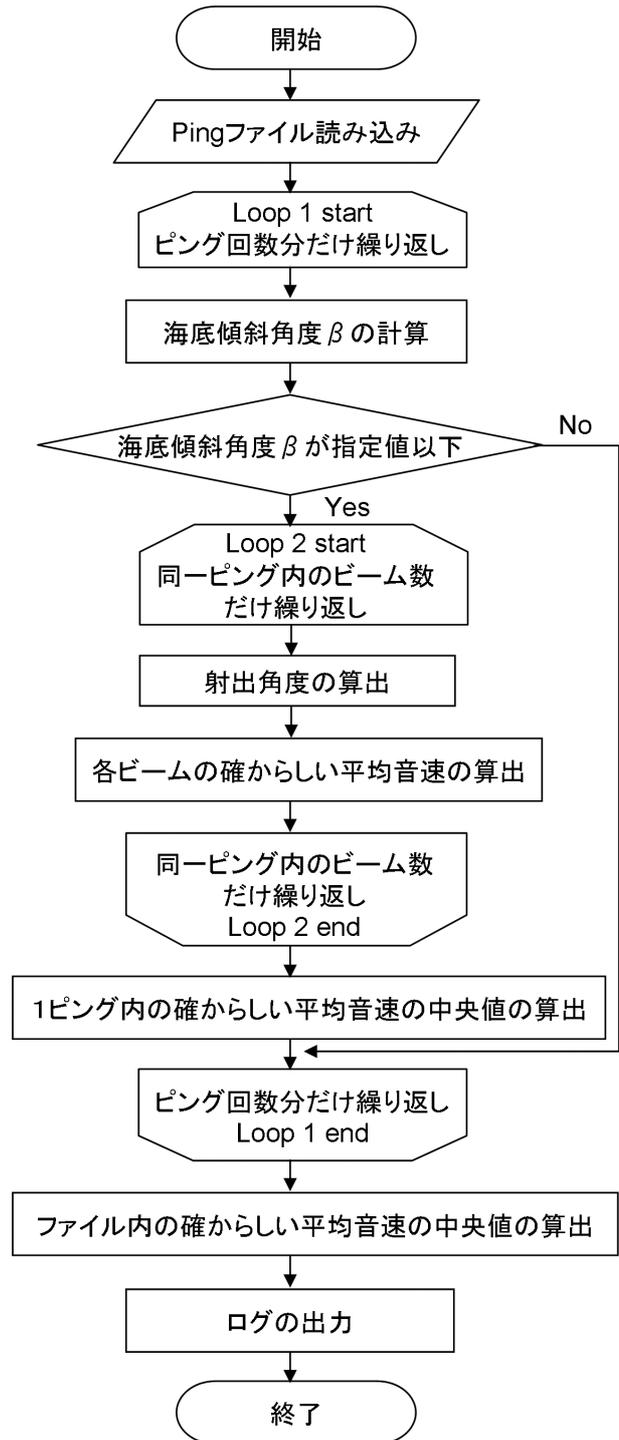


Fig. 4. Flowchart of the new program that estimates the averaged sound speed

図4. 適切な水中の平均音速の算出プログラムのフローチャート.

$\theta = 45^\circ$ のデータが理想的ではあるが、実際の角度は常に変化しているので、両舷の $\theta = 45 \pm 1^\circ$ の幅で基準となる平面の算出を行う。 $\theta = 45 \pm 1^\circ$ のデータのクロス方向(X)及び水深(Z)を

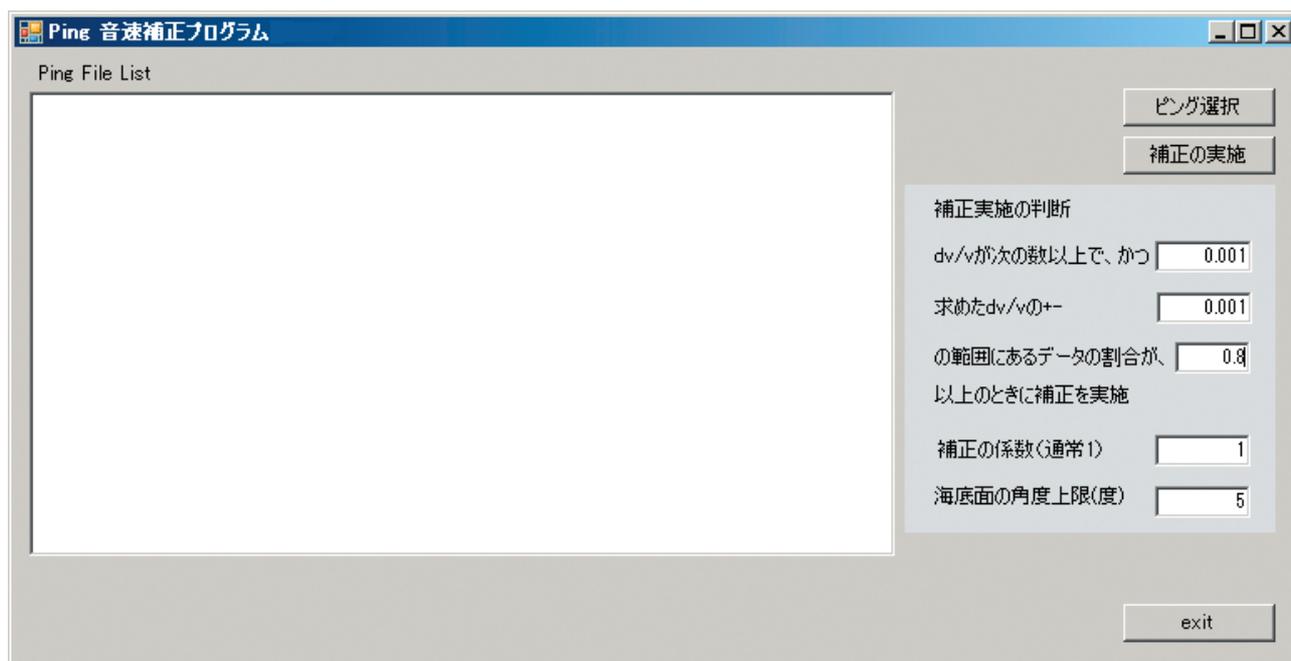


Fig. 5. Screen shot of the new program.

図5. 作成したプログラムのスナップショット.

用いて、最小二乗法を用いて近似直線を求めた。

### 3.3.3 ピング毎の確からしい平均音速の計算

$\theta=0^\circ$  及び  $\theta=60^\circ$  付近のデータについても、一定の範囲を考慮に入れる必要がある。直下方向については  $\theta=0\pm 3^\circ$  の範囲で、 $60^\circ$  付近のデータについては  $\theta=60\pm 2^\circ$  の範囲でデータを抽出し、それぞれの角度において  $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$  を算出した。算出した  $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$  の3点の平均を用いて、 $\Delta V_{\text{average}}$  及び確からしい平均音速 ( $V_{\text{average}} + \Delta V_{\text{average}}$ ) を算出する。

### 3.3.4 ファイル内での確からしい平均音速の中央値の計算

3.3.2 及び 3.3.3 で算出したピング毎の平均音速の誤差及び確からしい平均音速については、局所的なノイズ、微小な海底地形、及び動揺によるエラー等を反映している可能性が高い。

1 ピングのみのデータから求めた確からしい平均音速を用いて補正を行った場合、ノイズや動揺によるエラーと音速のエラーを分離できず、間違った補正を施す可能性が高い。

ピング数で区切った場合、水深が浅い場合にはすぐに指定のピング数に達してしまい、非常に狭いエリアからのデータのみを計算対象とする可能性がある。また、水深が深い場合には、指定のピング数に達するのに多くの時間を必要とする可能性がある。

そこで本プログラムでは確からしい平均音速の信頼性を高めるため、ピングデータのファイル単位での平均音速及び平均音速の誤差を算出する。本プログラムは Kongsberg 社製の EM シリーズを想定しており、一ファイルは概ね 20-30 分で区切られる。したがって、ファイル単位で区切るとは結果的に時間単位で区切ることとほぼ等しくなる。船速はほぼ一定であるため、時間によって区切ることにより、どのような水深においても、ある程度の空間的な広がりカバーすることができる。Kongsberg 社製の EM シリーズの場合、一ファイルに含まれるピング数は、水深 3000 m の海域では約 150 ピング、水深 300 m の海域では約 1500 ピングとなる。

船体動揺や気泡等の一時的なノイズを反映して算出した確からしい平均音速は極端に異常な値と

なっていることが多く、それらの異常な値を含めて平均すると、極端に異常な値に確からしい平均音速が引っ張られるため、不適切な計算結果が得られる。この様な状況においてより確からしい音速を得る場合には平均値よりも中央値を見るほうが適切な場合が多い。本プログラムではピング毎に算出した確からしい平均音速をファイル毎に中央値を求め、そのファイルの確からしい平均音速として求めている。

### 3.3.5 算出した値の妥当性の評価

中央値から算出した確からしい平均音速は概ね妥当な値となることが予想されるが、異常値の占める割合が大きい場合、適当な値に収まらない場合がある。

そこで、得られた確からしい平均音速を中心とする範囲にどれだけのピングが含まれるか、という観点から妥当性の評価を加えている。ファイルの確からしい平均音速の中央値から求めた  $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$  を中心として、3.3.2 で得られた  $\Delta V_{\text{average}}$  を用いてピング毎に求めた  $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$  が、ユーザーが指定した範囲内にどの程度含まれるのか評価を行う。

測深機の誤差などにより水深に 0.2% 程度の測定誤差があることを踏まえると、水深の誤差の割合 ( $\Delta Z/Z_0$ ) を (3) 式に当てはめると、 $\theta=60^\circ$  の時  $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$  は少なくとも  $\pm 0.001$  の誤差を持つことが予想される。

ユーザーが指定する値は  $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$  の範囲であり、指定した範囲内に含まれる変化は誤差の範囲と考えられる。試行の結果、指定する範囲を  $\pm 0.001$  とした場合、8 割以上のピングが指定する範囲に含まれていた場合は、概ね妥当な結果が得られていた。

### 3.3.6 ログの出力

本プログラムを用いて求めた平均音速が妥当な値となっているかを処理後の記録として保存するため、ログ情報を出力する。ログ情報には、ピングファイル名、 $\Delta V_{\text{average}}/V_{\text{average}}$ 、 $\Delta V_{\text{average}} + V_{\text{average}}$ 、

誤差を表面音速度の誤差とした場合の推定表面音速度、全ピング数、3.3.4 の計算に用いたピング数、妥当性の評価で妥当な値となった割合、先頭のピングにおける緯度、経度、及び平均音速の算出に用いた水深を出力するようにしている。ヘッダー情報を持つ csv 形式で出力されるため、ArcGIS 等のソフトウェアで容易に開くことができる。ログ情報として座標の情報を保持することにより、ここで求められた確からしい平均音速が空間的に妥当な値であるか、GIS ソフトウェア等を用い画面上で確認することが可能となる。

## 3.4 本方法における限界

本プログラムを用いる際に特に重要な注意点として、本プログラムは常に地形の凹凸を小さくする方向に確からしい平均音速を算出するということがある。尾根地形や谷地形あった場合に、その尾根・谷に平行に調査を行った場合、地形を平坦にする方向に平均音速を算出し、誤った補正を施してしまう。特に、尾根地形では最頂部の水深が深く見積もられるため注意が必要である。

不適切な補正を行い、隣接測線と重複して調査を行っている場合には、水深が一致しない現象が現れる。また直交する測線と結果を比較した場合には、全く違う地形が描かれることから、補正が不適切であるとの判別が可能になる。本プログラムを利用する際には、交差測線・隣接測線等との比較を十分に行い、誤った補正を施していないか、十分に確認を行う必要がある。

## 4 適用事例

### 4.1 適用事例 1：平均音速の分布の把握

Fig. 6 の結果は、不十分な音速補正によってスマイルカーブが現れてしまっている例である。この調査においては、調査海域の東西で音速プロファイルが大きく異なっていたことがスマイルカーブの原因となっている。東西で音速測定を行っているものの、どの地点を境界にすればよいか、判断が難しい一例である。本プログラムを用いて、適切と考えられる平均音速 ( $V_{\text{average}} +$

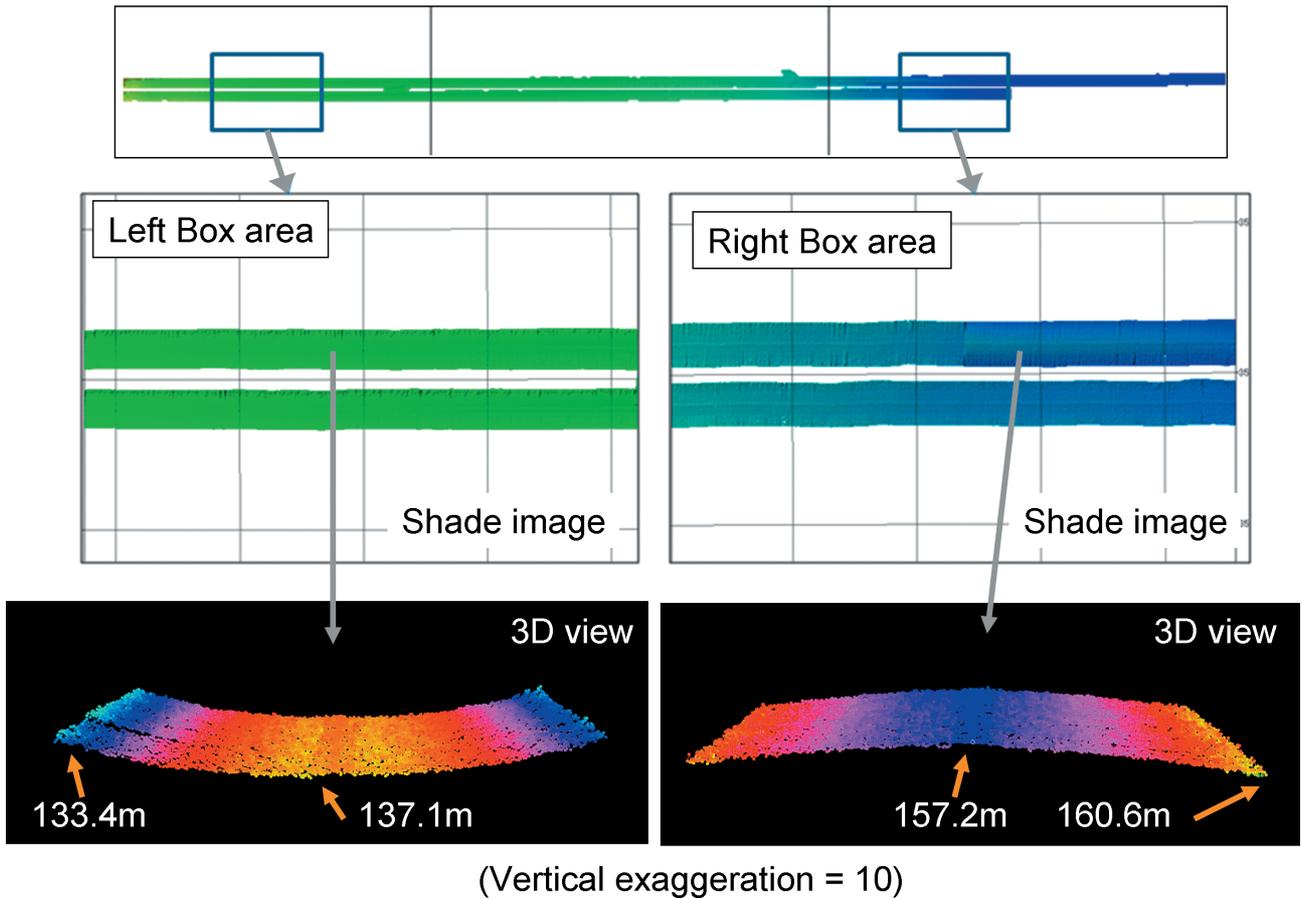


Fig. 6. Sample of bathymetric data with sound speed error. The left box area shows a smile curve and the right box area shows a frown curve.

図 6. スマイルカーブエラーが見られる海底地形の例。左の枠内では典型的な下に凸のエラーがある。

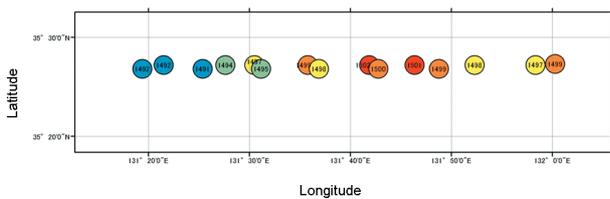


Fig. 7. Spatial distribution of averaged sound speeds estimated by this program.

図 7. 本プログラムを用いて計算された、適切な平均水中音速の分布の例。

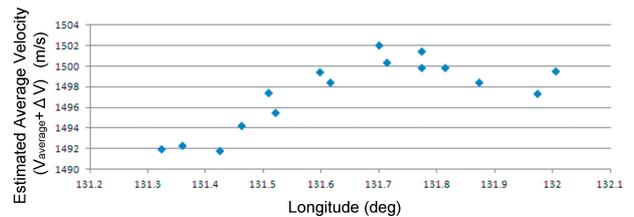


Fig. 8. Averaged sound speeds estimated by this program vs. longitude.

図 8. 推定された平均水中音速度と経度の関係。

$\Delta V_{\text{average}}$ ) の分布を GIS 上で示すことにより、音速の分布の状況を確認できる (Figs. 7 and 8). 図の例では、東経 131.5 度付近を境界に音速が大きく変化していることから、この経度を境界に東西で音速プロファイルに分けることで、より実際に近い音速プロファイルを選択することができる。

#### 4.2 適用事例 2: 音速プロファイルの修正

本プログラムでは、平均音速からの平均音速の誤差の割合を出力する。そこで、現場で採取した音速プロファイルに対して、誤差の割合を均等に乗算することにより、より適切と思われる音速プロファイルを推定することができる。

一例として、Fig. 6 のデータの一部に対し、本

プログラムを適用した例を示す。スマイルカーブの形状から平均音速の誤差を算出し、平均音速のずれをもととの音速プロファイルに均等に割り振ることにより Fig. 9 の様な音速プロファイルを作成した。作成したプロファイルを用いて得られた海底地形データの例を Fig. 10 に示す。スマイルカーブが改善され、妥当な海底面になっていると考えられる。

この方法は、海面から海底までの平均音速としては妥当な値と考えられるものの、音速の誤差が各層に均等に存在するとしているため、実際にはある層にのみ大きな誤差があるような場合、実際とは異なる音速を適用する結果となることに留意する必要がある。

### 5 議論

第2章で説明の通り、スマイルカーブの原因は、表面音速に起因する場合と音速プロファイルに起因する場合の二通りが考えられる。大陸棚調査室の調査においては表面音速計を常用しており、表面音速度によるエラーは微小であると考えられるため、本稿では表面音速ではなく音速プロファイルがスマイルカーブの主要因として平均音速の算出を検討したが、表面音速が正常に測定できていない場合も想定される。そこで、表面音速のエラーの影響を除去できない場合の補正の手順を参考までに示す。

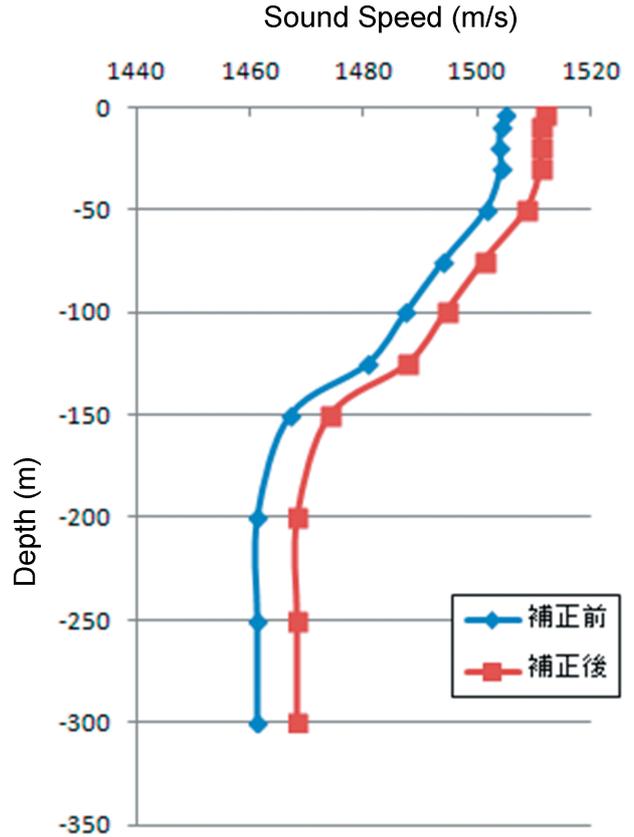


Fig. 9. Sound speed profile estimated by this program. The profile is applied to the Fig. 8 multi-beam data.

図9. 本プログラムによって推定された、図8の海底地形データに適用された音速プロファイルの例。

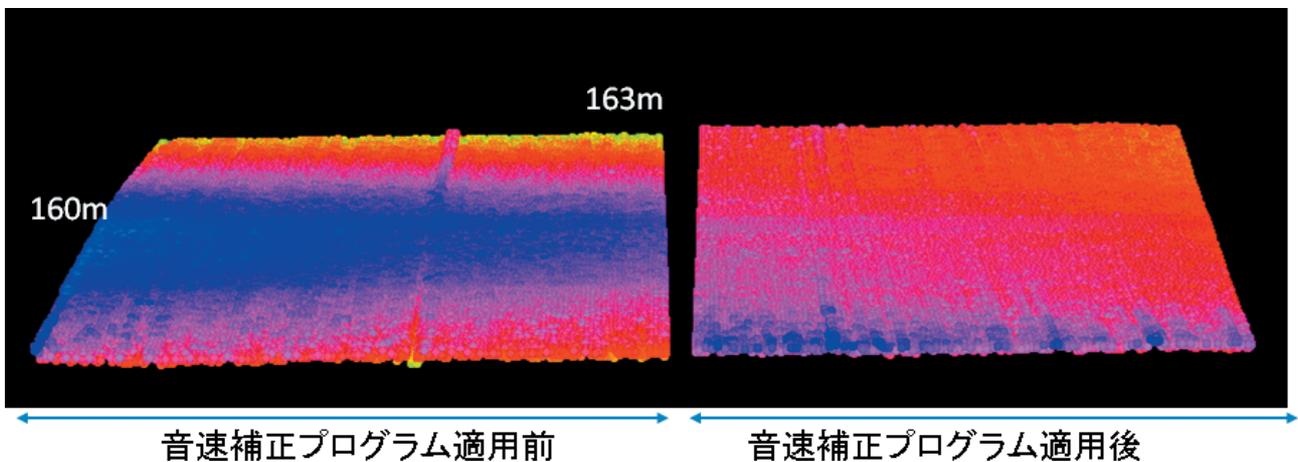


Fig. 10. Corrected bathymetric data by using this program. Left : before. Right : after.

図10. 本プログラムを用いて補正された海底地形データの例 (左：補正前，右：補正後)。

補正のための条件として、表面音速が適切に測定されていないデータの補正には、別途、正確な音速プロファイルを用いて調査した交差測線のデータが必要である。加えて、潮汐のデータが利用可能であることが必要になる。

予め潮汐補正を行った後、表面音速に異常があるデータと交差測線によるデータとの差分をとった場合、直下付近の水深は一致し、ピングの射出角が高角度側になるにつれて水深の差が大きくなる傾向となる。そこで、交差測線との差分を計算し、直下の水深が一致するかどうかを確認し、表面音速によるものであると確定する。その後、本プログラムを用いて補正値を算出し、適切な表面音速を求めて音速プロファイルの適用計算を改めて行うことで、真に近い水深を得ることが可能となる。

差分の値が、直下付近でも  $\theta=45^\circ$  付近でも一致しない場合、表面音速と音速プロファイルのどちらにも誤差があると推定されるため、そのような場合には、再調査の実施を検討するべきであろう。

## 6 まとめ

本報告では、スマイルカーブのエラーの傾向から音速の誤差の大きさを見積もり、音速プロファイルの補正を行う方法について検討し、適当な平均音速を推定するプログラムを構築した。本プログラムを用いることで、現場で取得した音速プロファイルの適用する範囲について迷った場合等に、適切な音速プロファイル選択を一助することが可能となる。

本プログラムのもう一つの機能として、適切と思われる水中の平均音速の算出も行うことができる。本プログラムから求められた水中の平均音速を用いることにより、大まかにスマイルカーブを軽減することが可能になる。しかしながら、本プログラムで得られる音速の値はあくまでも推定された値であり、現場で測定された音速プロファイルを用いるのが適切であることは言うまでもない。特に、海底地形の形状が複雑である場合には

本プログラムによる結果を一律に用いるのは間違った結果を得る可能性が非常に高い。本プログラムによって得られた平均音速を用いる場合には、対象とする範囲の地形が比較的平坦であることを予め確認の上、適用する範囲を可能な限り限定して用いると共に、適用後には交差測線・隣接測線のデータを参照し、補正の結果が妥当なものとなっているかどうかについても十分確認を行う必要がある。

## 文 献

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (2011) MANUAL ON HYDROGRAPHY, Publication C-13, Chapter 3, p 175-178.

Erik Hammerstad (2001) Multibeam Echo Sounder Accuracy, Kongsberg EM Technical Note.

及川光弘, 渡邊奈保子, 橋本崇史, 吉田剛, 千葉未子 (2010) 深海域のマルチビーム音響測深データの不確かさと管理, 海洋情報部研究報告, 46, 39-46.

沖野郷子・泉紀明 (1996) マルチビーム測深データの音速改正について, 水路部技報, 14, 104-110.

## 要 旨

マルチビーム音響測深機を用いた海底地形調査における重要なパラメータの一つである音速プロファイルについて、実際に取得された海底地形データをもとに平均的な水中の音速を推定するプログラムを構築した。このプログラムを用いることにより、音速プロファイルデータが複数存在している場合に、どのプロファイルが最も適当か選択することができる。また、このプログラムで算出した平均音速を用いることにより、大まかではあるがスマイルカーブを補正することが可能となる。