

マルチビーム測深データの音速改正について

沖野郷子：大陸棚調査室

泉 紀明：海洋調査課

Sound Velocity Correction for Multi Beam Data

Kyoko Okino : Continental Shelf Survey Office

Noriaki Izumi : Ocean Surveys Division

1. はじめに

マルチビーム測深が始まって10年あまりになるが、機器の進歩に伴い、音速補正の精度も著しく向上した。「拓洋」に搭載されている Sea Beam においては、XBT もしくはカーター表等で得られた音速構造を現場で入力すると、海水中の平均速度を各ビームごとに求めて平均のビーム屈折角を計算し、音線を直線として扱って横距離を計算している。水深値については音速を1500m/sとした値を収録し (Asada, 1993)、調査後にオフライン処理でカーター表等を用いて水深の音速補正をしている。Sea Beam の場合は、スワ幅が狭いために精度的にこのような方式で問題はなかった。

一方、Sea Beam2000ではスワ幅が120°に広がったため、外側ビームでは特に音線屈折の効果が大きく測深データに影響する。そのため Sea Beam2000 では、現場で入力した音速構造に従って各ビームにつき音線追跡を行い、音線屈折の補正をした水深値と横距離がデータとして出力される。また、ビームの形成角を制御する際に船の動揺によって誤差が生じるが、Sea Beam2000では表面水温とロール角をもとに正確なビーム形成をリアルタイムで行っている。従って、音速補正はすべて調査時にリアルタイムで行われていることになり、オフライン処理の必要はない。

このように、新しい機器においては、通常は調査者は適切な音速構造を随時入力するだけで、音速補正について手を煩わせることはない。しかしながら、

現場で入力した音速構造と異なる音速構造を用いて補正のやり直しをしたい場合、旧来の Sea Beam と違いきわめて多くの計算量が必要となる。本稿では、Sea Beam2000のように、現場で音速構造を用いてビーム形成の制御と音線追跡による音線屈折補正を行っているマルチビーム測深機において、オフラインで異なる音速情報を入れ直す方法を紹介し、実際にその作業を行ったケースとして秋田沖での測量結果を報告する。

2. 音線屈折補正の概要

現在 Sea Beam2000を使って測量を行う場合、表層460mは測量海域に到着してから XBT 観測を行って得た温度をもとに音速を計算し、XBT 観測では得られない深海の温度および塩分は過去の海象観測の統計値を使用して音速構造を作成することが多い。このうち、深海の温度は表層に比べて変動が小さく、塩分変化が音速に及ぼす影響も表層の温度変化によるものより小さい。従って、測量海域と季節によって大きく変化する XBT 観測に基づく浅海部の温度が、音速構造の最も大きな変化要因となる。特に外側ビームのデータでは、単に音波が海中を通る距離が長いだけでなく、音速の変化による音線の屈折が測深結果に大きく影響するため、スワ幅の広い最近の測深機では音速補正を正確に行うことが必要となる。また、Sea Beam2000では表面音速は音線屈折補正のみならずビーム形成の制御に使用されるため、音速構造は計測結果に大きく効いてくる。Sea Beam2000から私達が得るデータは水深と横距

離（各ビームの海底での反射点と船の直下の海底との距離）であるが、実際に測深機が計測しているのは音波の受信角（=射出角） i と信号を送信してから海底面で反射されて受信するまでの往復走時 $2t$ である。現場ではこの i と t から与えられた音速構造を用いて音線屈折補正を施し、水深 z と横距離 y を計算している。実際は音速は海水中でなめらかに変化するはずだが、計算上は第1図のように等速度層構造を仮定し、音線は層境界で速度比に対応して屈折するものとして近似する。第 n 層を音線が通過する際の走時 dt_n と横距離 dy_n は

$$dy_n = dz_n \cdot \tan(i_n) \quad (1)$$

$$dt_n = r_n / v_n = dz_n / \cos(i_n) \cdot 1 / v_n \quad (2)$$

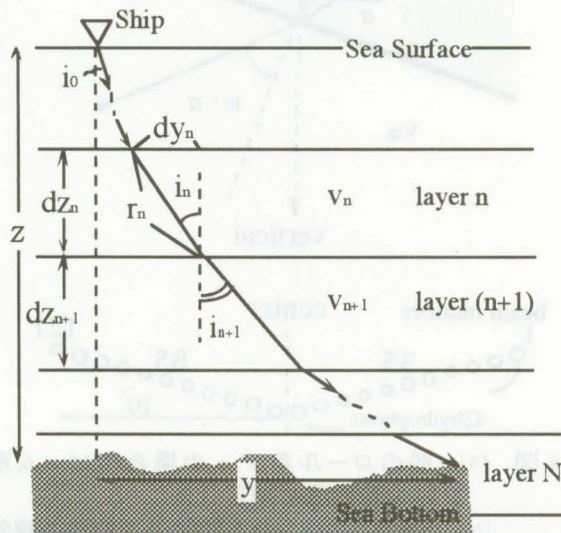
である。ここで dz_n 、 v_n はそれぞれ第 n 層の厚さと音速度、 i_n は第 n 層での音線の方向を鉛直から測った角度である。角度 i_n で第 n 層を通る音線は、第 n 層と第 $(n+1)$ 層の境界ではスネルの法則に従って屈折し、第 $(n+1)$ 層に入射する際には i_{n+1} となる。

$$\sin(i_n) / v_n = \sin(i_{n+1}) / v_{n+1} \quad (3)$$

$$i_{n+1} = \sin^{-1}(v_{n+1} / v_n \cdot \sin(i_n)) \quad (4)$$

このように船底で角度 i_0 で射出された音線を順次追跡していき、計算走時の和 $\sum dt_n$ が、観測走時 t をはじめて越えるまで計算を繰り返し、その時点での層厚 dz_n の和と横距離 dy_n の和が水深と横距離になる。

$$z = \sum dz_n + (\sum dt_n - t) / dt_N \cdot dz_N \quad (5)$$



第1図 等音速層構造を仮定した場合の音線の屈折

$$y = \sum dy_n + (\sum dt_n - t) / dt_N \cdot dy_N \quad (6)$$

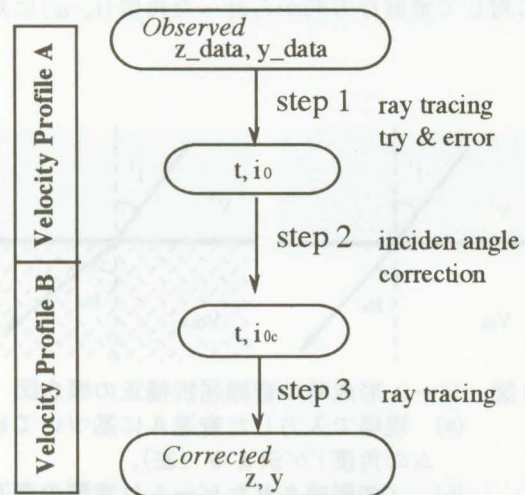
最後の第 N 層では音線は層の下面まで到達しないので、(5)、(6)の右辺第2項は第 N 層内での深さ、水平方向の音線の進行量である。

3. 音速再補正の原理

現場で入力したものと異なる音速構造で音速補正を行う場合の流れは第2図の通りである。観測データファイルに記録されている水深 z_data と横距離 y_data から、記録に残っていない射出角 i_0 と走時 t を計算し、さらに射出角については後述するように表面水温をビーム形成に使用しているためその補正を行い($i_0 \rightarrow i_{0c}$)、その後 t と i_{0c} から新しい音速構造で再度音線追跡を行い補正をやり直す。

ステップ1 (z_data, y_data) \rightarrow (t, i_0)

走時 t と射出角 i_0 から水深と横距離を計算する方法は前節で述べたとおりだが、この計算を逆に行うこと、すなわち水深と横距離から直接射出角と走時を求めることは出来ない。従って、私達はまず適当な射出角の初期値 θ を仮定して現場で使用された音速構造（音速A）を用いて音線追跡を行い、(5)式の z が観測値 z_data になるまで計算を繰り返す。その時に(6)式で得られる y と観測値 y_data を比較し、 $y > y_data$ ならば θ を少し小さくして、逆ならば θ を大きくしてもう一度音線追跡を行う。こうして、計算値 y と観測値 y_data の差を判断条件として θ を調整して繰り返し計算を行い、この差が十分



第2図 音速再補正の流れ図

小さくなった時点 (たとえば0.1m) での θ を Sea Beam2000が現場で観測したであろうビーム角 i_0 とする。観測走時 t はこの時点で

$$t = \sum dt_n + (\sum dz_n - z) / dz_N * dt_N \quad (7)$$

で得られる。

実際の計算では初期値はビーム番号とビーム幅から与えることとした。

ステップ2 $i_0 \rightarrow i_{0c}$

Sea Beam2000は表面音速をもとにビーム形成を制御している。これは、第3(a)図に示すようにように表面音速 v_0 のところで射出角 i_0 にするために、測深機において角度 i' のビームを形成していると考えればよい。この場合 v_{0a} は現場で与えた表面(音速構造の最上層)音速である。ところが、正しい表面音速が v_{0b} とすると、 i' で形成されたビームは表面では i_c となる (第3(b)図)。

スネルの法則により

$$\sin(i_0) / v_{0a} = \sin(i') / v' \quad (8)$$

$$\sin(i_{0c}) / v_{0b} = \sin(i') / v' \quad (9)$$

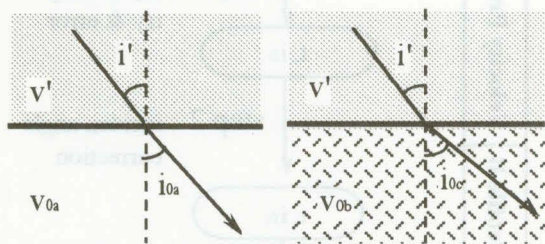
で、右辺が等しいので

$$\sin(i_0) / v_{0a} = \sin(i_{0c}) / v_{0b} \quad (10)$$

$$i_{0c} = \sin^{-1}(v_{0b} / v_{0a} * \sin(i_0)) \quad (11)$$

で i_{0c} が得られる。

以上は船底が水平であることを仮定した場合であるが、実際には船は動揺しており、Sea Beam2000においてはローリングの補正もビーム形成時に行われている。船底が水平から α 傾いていた場合 (第4(a)図)、スネルの法則は鉛直からの角度 i ではなく、船底に対して垂直な方向から計った角度 $(i_0 - \alpha)$ に対し



第3図 ビーム形成時の音線屈折補正の概念図
(a) 現場で入力した音速Aに基づいてビームの角度 i' が決まる (左)。
(b) i' で形成されたビームは実際の音速Bのもとで射出角 i_{0c} となる (右)。

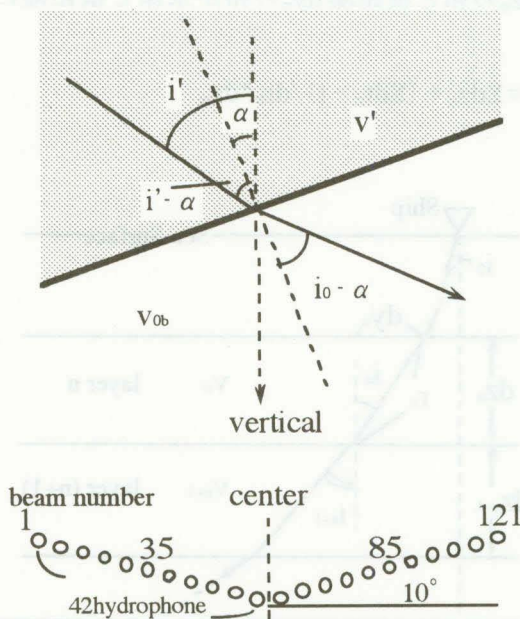
て成り立つ。すなわち(11)式は

$$i_{0c} - \alpha = \sin^{-1}(v_{0b} / v_{0a} * \sin(i_0 - \alpha)) \quad (12)$$

となる。ここで α は一般にはデータファイルに記録されている各ショットごとのロール角を用いれば良いが、「明洋」Sea Beam2000では受波器そのものが第4(b)図のように設計されているため、その傾斜角をロール角に加えたものを α とする必要がある。受波器は左舷側に 10° の傾きを持つ42本のラインアレイと、右舷側に 10° の傾きを持つ42本のラインアレイからなる。ビーム番号1~34までと86~121までは、それぞれ左右の42本のラインアレイのみを使用しているため、傾斜角は $\pm 10^\circ$ である。ビーム番号35~85までは左舷と右舷のラインアレイを合成しているため、実効上の傾斜は 0° となる。この傾斜はより広い範囲を測深するために行われている工夫である。

ステップ3 $(t, i_{0c}) \rightarrow (z, y)$

ステップ2で得られた補正した射出角 i_{0c} と新しい音速構造(音速B)を用いて、走時が t になるまで前節で述べた方法により音線追跡を行い、補正した水深 z と横距離 y を求める。



第4図 (a) 船のロール角が α の場合のビーム形成時の音線屈折補正 (上)
(b) 「明洋」Sea Beam2000の送波器の傾斜の概念図

4. 音速再補正の実例

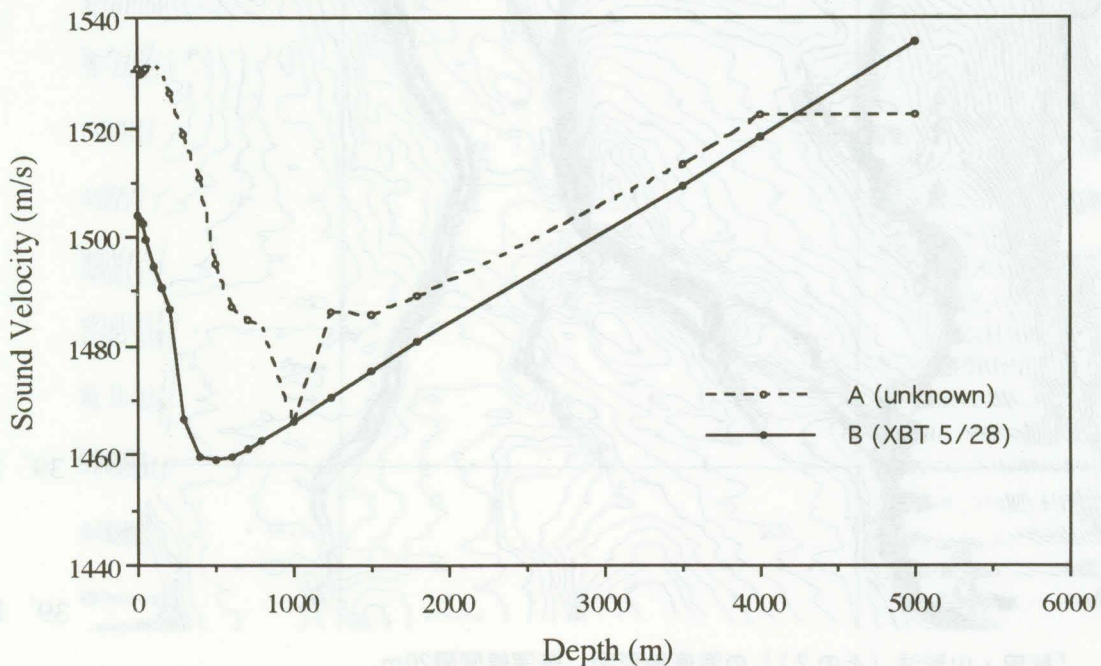
前節で述べたようなオフラインでの音速補正のやり直しは、通常のデータ処理ルーチンには含まれない。ここでは、94年5月に行われた海洋測量「秋田・山形沖（その2）」で得られたデータセットに対して再補正を行った例を報告する。

第5図に現地で入力された音速度構造A (○) と調査開始時に行われた XBT 観測から計算した音速度構造B (●) を示す。現地で入力されていた音速Aは、前の調査航海時のデータが残っていたものを誤って使用したと推定される。音速計算の元となった水温データは残っていなかったが、音速から推定すると表面水温は約24℃である。第5図で示した音速Bの根拠となっている XBT 観測では表面水温は14.9℃で、およそ10℃の差がある。調査開始から表面水温はやや上昇し、不適当な音速Aが使われていた約6日間の平均表面水温は約16℃であった。

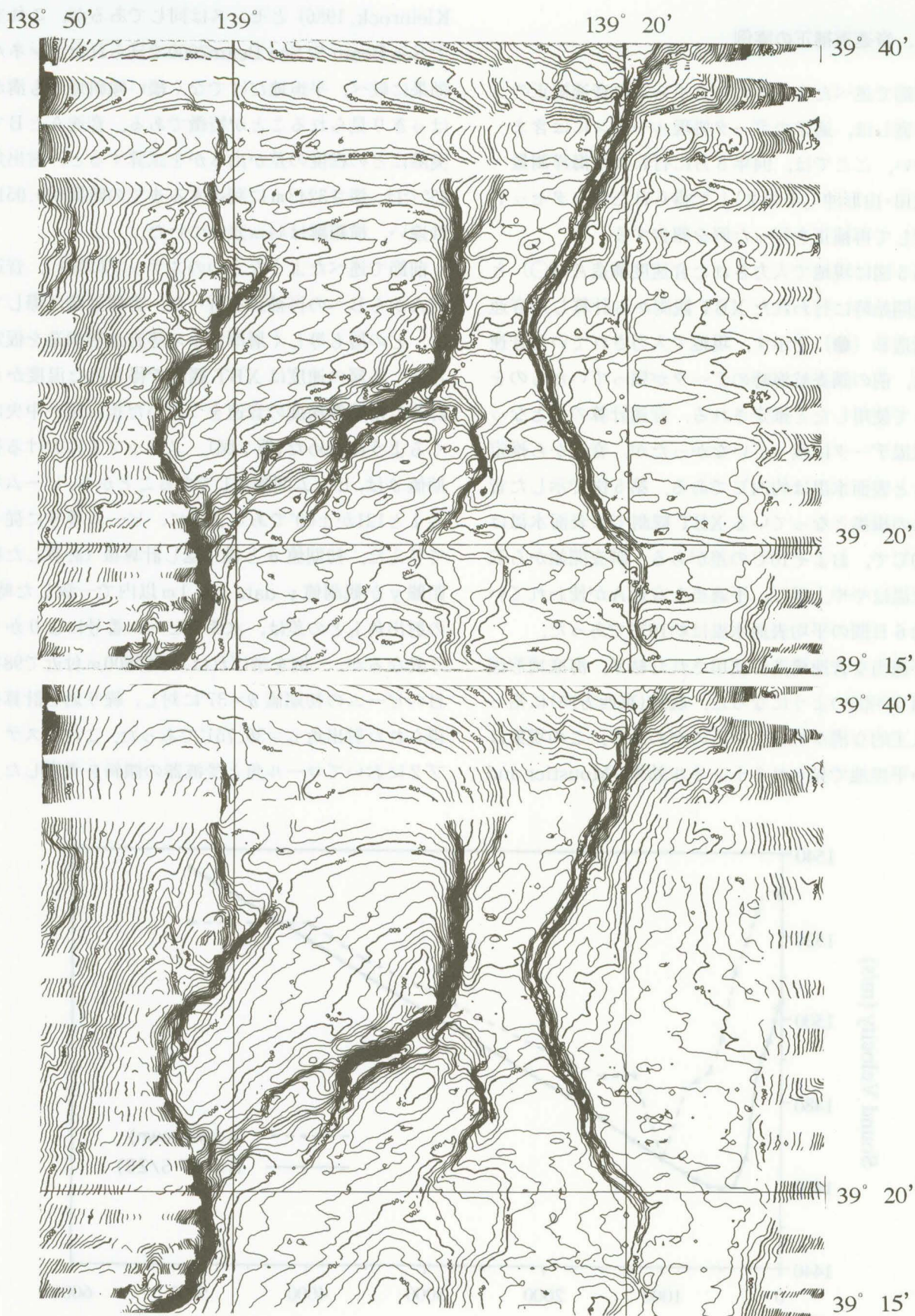
不適当な音速構造が使用された結果、海底地形図は第6(a)図のようになった。航跡(東西方向)に沿って人工的な溝がのびているのがわかる。この現象は浅い平坦地で見られるトンネル効果 (Moustier and

Kleinrock, 1986) とセンスは同じであるが、これまで See Beam や Sea Beam2000で見られたトンネル効果に比べ、平坦地だけでなく緩い傾斜地でも溝がはっきり見られることが特徴である。音速AとBで実際にどの程度の差が出るかを試算すると、射出角45°では、深さ3243mに到達するまでの時間が0.0512秒違い、横距離は44m差がついた。

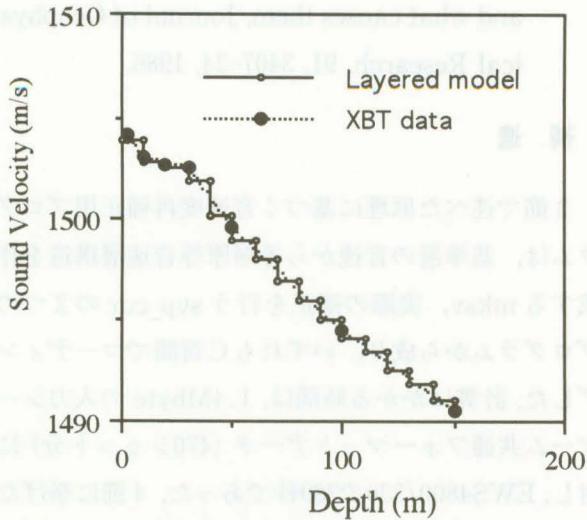
前節で述べたような3つのステップに従い、音速度AからBへの再補正を行った。音線追跡に際しては、どの層も等しく層厚10mの等音速層構造を仮定した。各層の速度は XBT 観測で得られた温度から計算した基準深度の音速をつないだ折れ線が中央にくるように決めた(第7図)。ステップ1における初期値 θ は、ビーム間隔が1°であることから、ビーム番号1と121が $\pm 60^\circ$ であるように、ビーム番号に従って与えた。初期値 θ と繰り返し計算後(計算した横距離 y が観測値 y_data と0.1m以内で一致した時)の射出角 i_0 との差は、水深やビーム番号によりかなり異なるが、一例を挙げれば、水深800m付近で98番目のビームの初期値 $\theta=37^\circ$ に対し、繰り返し計算後得られた射出角 $i_0=36.751^\circ$ であった。これにステップ2においてロール角と受波器の傾斜を考慮した上



第5図 「秋田・山形沖（その2）」海底地形測量時の音速構造。A (○) は測量時に誤って入力した不適切な音速構造。B (●) は測量時に行った XBT 観測をもとに計算した音速構造。現場で入力した構造は浅所での速度が大きい。



第6図 「秋田・山形沖（その2）」の海底地形図。等深線間隔20m。
 (a) 音速再補正を施す前の地形図。不適切な音速Aを使用しているため、航跡（東西方向）に沿って船の直下が深い溝状の人工地形が見られる。（上）
 (b) 音速Bを使って再補正を施した後の地形図。人工的な溝はほぼ消滅している。（下）



第7図 XBT観測から求めた音速構造(●)と使用した等層厚等音速層構造(○)

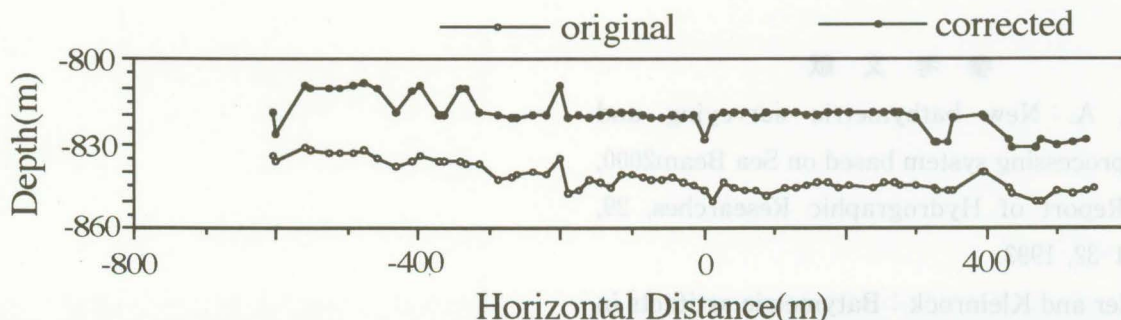
でビーム形成の補正を施すと、 $i_{0c} = 36.235^\circ$ となる。最終的に音速度Bを使って音線追跡を行った結果の1ショット分を示したものが第8図である。水深は全体に15~20m浅くなる。横距離は最大25m程度変化している。

すべてのショットについて再補正を行った結果が第6(b)図で、人工的な溝地形が消え、北端部できれいに等深線がつながるようになった。一部で等深線に不自然なつながりが残るのは主測線(再補正を実行)と補測線のデータが重なる部分である。補測は約半月ほど後で行われ、その時に行ったXBT観測から計算した音速構造を現地でも入力している。補測時のデータに対して、主測線の再補正に使用した音速度B(第5図)を与えて再補正したところ、この等深線の不自然さはやや軽減した。しかし、補測時に使用していた音速構造の表面水温は実際の補測期間中の1時間ごとの表面水温とよく一致しており、あ

えて音速度Bを採用する根拠に乏しい。一方、主測線では再補正をするにあたり測量開始時に行ったXBT観測による音速度B(表面水温14.9℃)を使ったが、実際の測量期間中に表面水温が徐々に上昇して平均すると1から1.5℃実際の水温は高かった。そこで、試みに表面水温を17℃に変えた音速度構造Bを作成して適応してみたが、縮尺20万分の1では大差はなかった。そのため「秋田・山形沖(その2)」測量に関しては、不適当な音速度Aが使用されていた期間についてのみ、XBT観測に基づいた音速度Bを用いて再補正を実施することで資料整理を進めることとした。

5. 考察

音速度補正においては、表面水温は音線屈折だけではなくビーム形成にも利用されるため大変重要な役割を果たす。ところが、表面水温は場所、季節、時刻によりかなり変動する。前節で紹介したケースは「明洋」のSea Beam2000を利用しているため、表面水温は入力した音速度構造のデータを使っており、XBT観測時と実際の調査時点での表面水温に差が生じていた。これを避けるためには、こまめにXBT観測を行うことが必要である。また、隣接する海域で異なる期間に地形調査を行った場合、両者の接続部で水深に20m程度のずれが生じることがあるが、この原因として位置精度等の問題以外に、音速度構造が表層の温度変化を追尾していない可能性が考えられる。同じSea Beam2000でも「海洋」搭載のものは、自動的に毎時表面水温を計測していて、その結果がSea Beam2000本体に送られ、表面に限っては音速度データが自動的に変化するように設計さ



第8図 水深800m付近でのSea Beam2000の1ショット分の音速再補正前後の水深データ。

れている。この場合、ビーム形成はほぼリアルタイムの表面音速度を用いて行われていることになり、より精度が向上している。

音速度の再補正をする際の層構造は、前節では層厚10mを仮定して実行している。層厚を薄くし層数を増やせば精度が向上するが、その分計算時間がかかる。試みに前節のデータを用いて層厚2mの構造を作成し再補正を行ったところ、層厚10mの場合との差は水深1m以内、横距離3m程度であった。前節のケースは縮尺20万分の1の測量であるため、10m層で十分であると考えられるが、より精密な結果が求められる場合は浅海部のみ層厚を薄くする等の工夫をすることが望ましい。

6. まとめ

現場で音速構造を入力し、音線屈折を考慮した音速補正を行っている Sea Beam2000のデータセットに対し、現地で採用したものと異なる音速構造を利用して音速再補正を行うプログラムを開発した。これにより、日本海で行われた海底地形調査の結果に対し再補正を施し、不適当な音速を入力したために生じていた人工的な溝地形を解消することができた。この方法は、現地での音速構造に入力ミスがあった場合だけではなく、音速度補正のされていないマルチビームデータ（一律1500m/sで水深計算をする場合がある）に対してオフラインで音速補正をする場合などにも利用できる。

謝 辞

音速補正のプログラム開発に際しては、水路部海洋研究室の浅田昭氏に貴重な助言をいただいたことを、ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- Asada, A.: New bathymetric surveying and processing system based on Sea Beam2000, Report of Hydrographic Researches, 29, 1-32, 1993.
- Moustier and Kleinrock: Batymetric artifacts in Sea Beam Data: How to recognize them

and what causes them, Journal of Geophysical Research, 91, 3407-24, 1986.

補 遺

3節で述べた原理に基づく音速度再補正用プログラムは、基準層の音速から等層厚等音速層構造を作成する mksv, 実際の補正を行う svp_cor の2つのプログラムから成り、いずれもC言語でコーディングした。計算にかかる時間は、1.4Mbyteの入力シーム共通フォーマットデータ(470ショット分)に対し、EWS4800/330で389秒であった。4節に挙げた「秋田・山形沖」の例では、約6日分のデータの再補正に約25時間かかった。現在、svp_corは「明洋」Sea Beam2000を想定して、ビーム数121, ビーム間隔1°, 外側ビームの受波器の傾斜10°に設定されているが、これらのパラメータの変更によりいずれのマルチビーム測深機にも適用可能である。