

マルチビーム音響測深の原理

浅田 昭：海洋研究室

Principles of Multi-beam Echo Sounding System

Akira Asada : Ocean Research Laboratory

1. 海底地形を探る

従来、音響測深機は1本の音響ビームを使って船の真下、測量船が走った航跡上を連続して水深を計測するものであった。海底地形調査に大きな変革をもたらしたのは、水路部が1983年に我が国で初めてシービームと呼ばれるマルチビーム音響測深機を測量船「拓洋」に導入した時からである。シービームは米国海軍が開発したモデルを商品化したもので、測量船の船底から左右両方向40度の幅（40度に扇を広げた形）に16本の指向性の鋭い音響ビームを海底に向けて発射し、一度に16点の海底の水深を計測するという当時としては画期的な超高性能機器であった。マルチビーム音響測深技術の導入により海底の測量は線から面の測量へと前進し、海底の精密な地形が初めて分かるようになった。シービームをモデルとして、世界中で各種のマルチビーム音響測深機が開発され、使われるようになってきた。

海底には大きな海山、断層、谷等が幾つも存在し、次々とその神秘のベールを剥がしてきた。太平洋プレートと日本列島下へのもぐり込みを示唆する、沈み行く第一鹿島海山の詳細な地形を海溝底に明確に捕らえた。チャレンジャー海淵の測量結果から、世界で最も深い水深は10920mであると国際水路機関に承認された。房総半島沖に全長100km、深さ1000mを超す巨大な海底大蛇行谷を発見した。北海道南西沖地震震源域の海底に数多くの断層やがけ崩れを、巨大地震が歴史的に繰り返し起こっている東海・紀伊沖に巨大断層等の存在を明確に捕らえた。このようにマルチビーム音響測深機を使って調査をすれば必ず新しい事実の発見をし、数々の成果を挙げてき

た。これらの海底地形情報は地球の活動史を探る学術研究の資料としても貴重なものである。また、日本は世界有数の地震国であり、歴史的な被害地震の多くは海底で起こっており、海底に潜む地震断層を明らかにすることは、地震予知研究を推進する上でも重要なことである。詳細な海底の地形情報はその他、海洋資源開発、防災等様々な面で活用されている。

沿岸航路域においても、マルチビーム音響測深機は海底を面的に捉えることができる。つまり、未測域を無くすことができるという特徴をもっていることから、浅所等の航路障害物の探査に非常に効果的であり、航海の安全確保という観点からその利用が期待されている。

ではこのマルチビーム音響測深機とは一体どのような調査機器であろうか。その基本原理を以下に記述する。

2. マルチビーム音響測深機とは何か

マルチビーム音響測深機は、何点もの測深を同時に行うので作業効率が良い。海底を面的に測量するので地形を正確に捉えると同時に、航路障害物等の航行安全上重要な情報を確実に把握することができる。音響ビームが鋭く細かい地形が分かる。デジタル測深なのでコンピュータによる資料整理ができ、電子海図時代にマッチしている。測量と同時に海底地形図を自動的に作成し、その場で海底地形が分かる。等、幾つもの利点をもっている。

2.1 クロスファンビーム測深

マルチビーム音響測深機の多くはクロスファンビームと呼ばれる、非常に鋭い音響ビームを形成す

る技術が主に使われている。SEA BEAMに代表され、SEA BEAM 2000/2100, HYDROCHART, EM12, HYDROSWEEP, SEA BAT, HS10, HS200等、多くの機器で使われている手法である。

(1) クロスファンビーム

ファンビームとは扇状の音響ビームの意味である。送波器を使い、海面から、左右に幅の広い、前後に非常に幅の狭い、つまり、左右直線状の音波を海底に照射する。これにより、この左右直線状の帯の当たった海底でのみ反射音が発生する。次に、海面から受波器を使い、この送波ファンビームと直交するスリット（のぞき窓）から海底をのぞいてみると、送波ファンビームとスリットの交差した部分の海底反射波のみを捉えることができる。この受波のスリットを受波ファンビームと呼ぶ。送波ファンビームと受波ファンビームのクロスした部分の指向性の鋭い音響ビームを作ることができることから、クロスファンビーム手法と呼ばれている。受波のスリットを左右にいっぱい並べておけば、多数のクロスポイントを作ることが可能となる。これにより、マルチビームを作ることができる訳である。

(2) 水深はどうやって測る

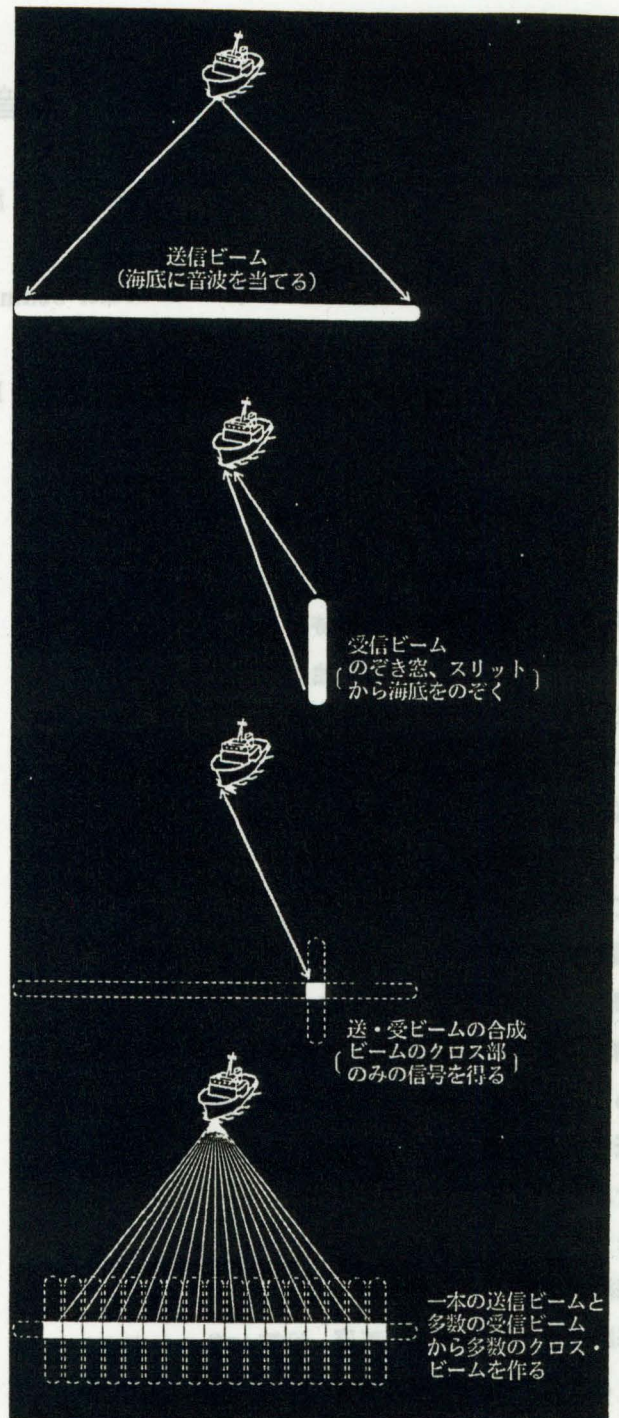
海の代表的な測量機器の一である音響測深機、これは、海面で音波を発信し、海底で反射して返ってくるまでの往復時間を計測し、片道伝搬時間に水中での音の伝わる速さを掛けて水深を求めるものである。音は海水中で大体1秒間に1500m進むので、往復2秒を計測した場合、水深は約1500mということになる。

クロスファンビーム法により、マルチビームを作った場合、ビームは斜めに傾斜しているので、その分補正が必要となる。

$$Z = \int C * \cos(\theta) dt \quad (1)$$

$$Y = \int C * \sin(\theta) dt \quad (2)$$

となる。Zは計測される水深、Yは横距離、Cは深さ毎に変化する音速、 θ は音速の変化によって屈折変化する深さ毎の鉛直方向からの傾斜角、dtは片道の伝搬時間までの微小変化時間である。マルチビーム音響測深機を使えば、例えば、1つの送波ビームと121個の1度間隔に並べた受波ビームから120度幅



第1図 クロスファンビーム法

の水深を一度に計測できる。マルチビーム音響測深機により横一列の水深計測を行いながら、測量船が前方に航行すると、海底地形を面的に捉えることができる。

2.2 送波ファンビームの作り方

送波器の形状を変えることにより、様々な音響ビームを作ることが出来る。円盤状の送波器（音波を出すもの）からは円錐形の音響ビームが作られ、

海底において円形の照射面を作る。線状の送波器からはファン状（扇状）の音響ビームが作られ、海底において送波器ラインと直交する帯状の照射面を作る。

送波ファンビームはどのようにして作られるのであろうか。まず、一列に点音源を並べてみる。一列に並べた送波素子や受波素子のことをラインアレイ、リニアアレイ、線状アレイ、線状配列等と呼ぶ。この時の送波素子の間隔を d_T 、個数を n とする。この一列の送波素子列の垂線から θ 方向の遠い点にマイクロホンを置く。水中におけるマイクロホンのことをマイクロホンという。この場合、周波数 f (波長 λ) の音波が個々の送波素子から送信されると、マイクロホンの受信信号は個々の送波素子からの合成信号（総和）となる。送波器の長さに比べて距離のほうがはるかに長いので、一個一個の送波素子から同じ強さで放出された音はマイクロホンの受信位置では皆同じ大きさの音となり、異なる位相差の信号の総和となる。今、マイクロホンを送波素子列に直交した方向 $\theta = 0$ に置くと、すべての点音源からの受信信号は位相が揃うので、受信信号の大きさは、1つの点音源からの受信音掛ける点音源の個数 (n) 倍となり、指向性が最大となる。他の角度では、 n 倍より小さくなる。 θ を $-180 \sim +180^\circ$ まで変えて受信信号の和を計算すればビームの指向特性が分かる。

(1) ラインアレイ送波器の指向性の計算

ライン状の各点音源（送波素子）と θ 方向の受信点の距離は

$$r_k = (k-1) * d_T * \sin(\theta) + R_0 \quad (3)$$

と表される。 k は送波素子並びの順番、 d_T は素子間隔、 R_0 は等距離成分を表す。

各点音源から位相も音圧も全く同じ正弦波の音波を発射した場合、受信点では各点音源から到達する音波の和、 $s(\theta)$ として音響信号を表すことができる。

$$\begin{aligned} s(\theta) &= \sum A_0 * \sin\{\omega(t-r_k/C)\} \\ &= \sum A_0 * \sin\{\omega t - (k-1) * d_T * \omega * \sin(\theta)/C - R_0 * \omega/C\} \\ &= \sum A_0 * \sin\{\omega t - (k-1) * 2\pi d_T * \sin(\theta)/\lambda - R_0 * \omega/C\} \end{aligned} \quad (4)$$

λ は波長、 ω は角周波数で、 \sum は $k=1 \sim n$ までの和を意味する。この式で、 $R_0 * \omega/C$ は削除して考えることができる。また、

$$u = -2\pi d_T * \sin(\theta)/\lambda \quad (5)$$

とし、これを複素数で表すと以下になる。

$$S(\theta) = \sum A_0 * \text{EXP}\{j(k-1)u\} * \text{EXP}\{j\omega t\} \quad (6)$$

両辺に $\text{EXP}(ju)$ を掛けて、もとの式との差を取ると以下の式が得られる。

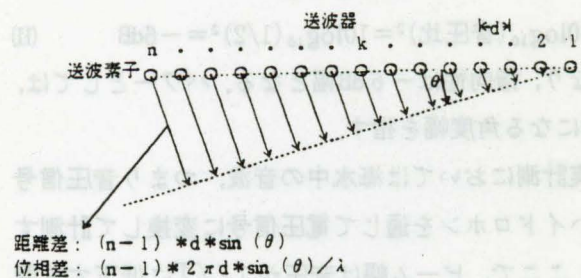
$$S(\theta) = A_0 * \{\text{EXP}(jnu) - 1\} / \{\text{EXP}(ju) - 1\} * \text{EXP}(j\omega t) \quad (7)$$

この式の振幅のみを取り出すと

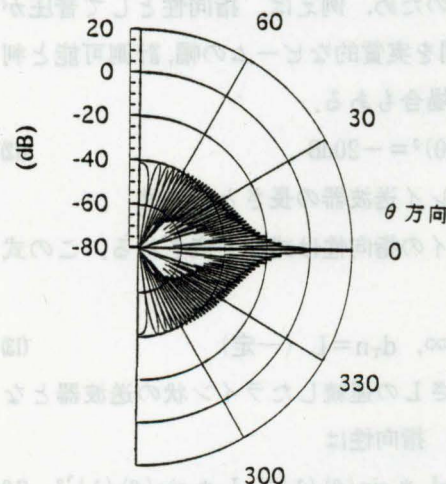
$$\begin{aligned} S(\theta) &= A_0 \sin(nu/2) / \sin(u/2) \\ &= A_0 \sin\{n\pi d_T * \sin(\theta)/\lambda\} / \sin\{\pi d_T * \sin(\theta)/\lambda\} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。指向性は、ビームの主軸 ($\theta = 0$) を基準としたパワーの比で表され

(A) 送波素子アレイから放出された音波の θ 方向における距離差、位相差



(B) 送波素子アレイから放出された音波のビームパターン (直下 $\theta = 0.0 \text{ deg}$)



第2図 ラインアレイ送波器とビームパターン

$$b(\theta) = \{S(\theta)/S(\theta=0)\}^2$$

$$= [\sin\{\pi n d_\tau * \sin(\theta)/\lambda\} / \sin\{\pi d_\tau * \sin(\theta)/\lambda\} / n]^2 \quad (9)$$

となる。送波アレイに直交した方向に主ビームが、また、この横にサイドローブという副ビームが幾つか作られる。

(2) ビーム幅とは

通常、指向性の主軸で音圧が最大となり、その軸を中心とし、音圧が $1/\sqrt{2}$ に下がる範囲の角度幅を、ビーム幅と言う。音圧が $1/\sqrt{2}$ は、パワーでは $1/2$ になる。パワーレベルで言うと

$$10\log_{10}(\text{音圧比})^2 = 10\log_{10}(\text{音響パワー比})$$

$$= 10\log_{10}(1/2) = -3\text{dB} \quad (10)$$

となり、指向性は -3dB 幅となる。dB を指標とした表し方をレベルと呼ぶ。

半減角、半減幅という言葉も時々使用することもある。半減角とは、音圧が $1/2$ になるまでの主軸からの角度、つまり、主軸からの片側の角度を言う。また、念を入れて、半減半角とも言う。半減幅とは音圧が $1/2$ になる主軸からの両側の角度幅を言う。これはエネルギーレベルで言うと

$$10\log_{10}(\text{音圧比})^2 = 10\log_{10}(1/2)^2 = -6\text{dB} \quad (11)$$

となり、指向性は -6dB 幅となる。パワーとしては、 $1/4$ になる角度幅を指す。

実計測においては海中の音波、つまり音圧信号を hidroホンを通じて電圧信号に変換して計測する。ここで、ビーム幅は音圧が $1/\sqrt{2}$ に低下する間の幅であるが、これは、水深計測する際の海底に当たるビーム面積の有為な指標と言えるであろうか。この種の疑問のため、例えば、指向性として音圧が $1/10$ までの間を実質的なビームの幅、計測可能と判断するような場合もある。

$$10\log_{10}(1/10)^2 = -20\text{dB} \quad (12)$$

(3) ラインアレイ送波器の長さとは指向性

ラインアレイの指向性は式(9)で表される。この式において

$$d_\tau \Rightarrow 0, n \Rightarrow \infty, d_\tau n = L \text{ (一定)} \quad (13)$$

とすると、長さ L の連続したライン状の送波器となる。このとき、指向性は

$$b(\theta) = [\sin\{\pi L * \sin(\theta)/\lambda\} / \{\pi L * \sin(\theta)/\lambda\}]^2 \quad (14)$$

となる。ここで、

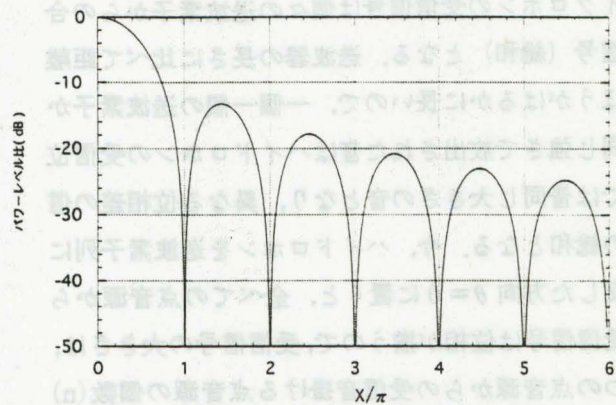
$$x = \pi L * \sin(\theta)/\lambda \quad (15)$$

とおくと、ビームの主軸に対するパワー比 $b(\theta)$ と音圧の比 $g(\theta)$ は

$$b(\theta) = [\sin(x)/x]^2 \quad (16)$$

$$g(\theta) = |\sin(x)/x| \quad (17)$$

となる。音圧の振幅比 $g(\theta)$ は、 $x \Rightarrow 0.0$ では、 1.0 となり、 x が大きくなるにつれ、序々に振幅が小さくなる正弦波に似た曲線を表す。つまり、 $g(\theta)$ は、 $x=0.0$ で 1.0 となって最大で、 $x=\pi, x=2\pi, x=3\pi$ 、というように π の整数倍毎に 0.0 となる。そのほぼ中央の $x=1.5\pi, x=2.5\pi, x=3.5\pi$ 付近にピークを持つ。このピークをサイドローブという。



第3図 ラインアレイ送受波器の指向性パターン

最初のサイドローブは

$$x = 1.43\pi$$

$$g(\theta) = |\sin(x)/x|$$

$$= 0.217 = 1/4.60 \text{ (-13.3dB)} \quad (18)$$

2番目のサイドローブは

$$x = 2.46\pi$$

$$g(\theta) = 0.128 = 1/7.79 \text{ (-17.8dB)} \quad (19)$$

3番目のサイドローブは

$$x = 3.47\pi$$

$$g(\theta) = 0.091 = 1/10.9 \text{ (-20.8dB)} \quad (20)$$

となる。

$-\pi \leq x \leq \pi$ の間に主ビームが存在することになる。これをビームの幅と定義することとすると、ビームの幅は

$$-\sin^{-1}(\lambda/L) \leq \theta \leq \sin^{-1}(\lambda/L) \quad (21)$$

で表される。つまり、ビームの幅は送波器ラインの

長さに反比例することとなる。指向幅について計算すると、音圧比が $1/\sqrt{2}$ になる角度を、先ず求める。(17式から

$$1/\sqrt{2} = \sin(x)/x \quad (22)$$

$$x = 1.39 \quad (23)$$

となり。(15式から

$$x = 1.39 = \pi L * \sin(\theta) / \lambda \quad (24)$$

$$\sin(\theta) = 0.442\lambda / L \quad (25)$$

となる。この時の角度 θ は主ビームの中心軸からの片側の角度であるから、指向幅は両側となり、

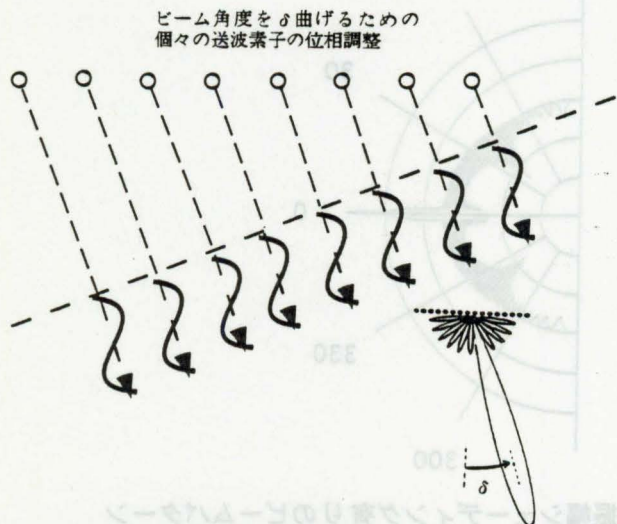
$$-\sin^{-1}(0.442\lambda/L) \leq \theta \leq \sin^{-1}(0.442\lambda/L) \quad (26)$$

の範囲となる。12kHzで、 $\lambda = 12.5\text{cm}$ とすると
 $L = 100.0\text{cm}$ で6.33度の指向幅
 $L = 200.0\text{cm}$ で3.17度の指向幅
 $L = 300.0\text{cm}$ で2.11度の指向幅
 $L = 400.0\text{cm}$ で1.58度の指向幅
 $L = 500.0\text{cm}$ で1.27度の指向幅となる。ただし、

サイドローブを抑制するシェーディングと呼ばれる振幅調整を行う場合には、これより指向幅は広がる。

(4) ビームの方向を変えるビームステアリング

送波アレイの垂直方向から角度 δ だけ主ビームをずらすビームステアリングが可能である。その一番簡単な方法は、送波アレイを δ だけ傾けて、垂線をその方向に向ければよい。実際には、アレイを傾けたのと同じようにするため、個々の送波素子を、送波アレイをピッチ角 δ だけ傾けた場合の距離に相当する分だけ位相を調整して発信するという操作



第4図 ビームステアリング法

を行う。つまり、送波アレイを角度 δ 傾けるには $(k-1) * d_T * \sin(\delta) / \lambda$ の位相調整をすれば、機械的に送波アレイを角度 δ 傾けたのと同じような効果を得ることが出来る。このときの指向性の計算式は以下により表される。

$$s(\theta) = \sum A_0 * \sin\{\omega t + (k-1) * 2\pi d_T \sin(\delta) / \lambda - (k-1) * 2\pi d_T * \sin(\theta) / \lambda\} \quad (24)$$

(5) 送波ビームの前後の揺れを防止するビームスタビライズ、ピッチ補正器

船が波のある海面上を航行していると、船首は上に向いたり下に向いたりする。このため、送波ビームは前後に揺れる。船首の上下の揺れ角、ピッチング δ と反対方向に送波ファンビームの向きを角度 δ ずらすと、常に真下方向を向けることができる。船のピッチングに起因する送波ビームの前後の揺れを補正するこの手法をビームスタビライズと言う。機械的に送波器を常に真下に向ける方法をメカニカルビームスタビライズと言う。この装置をビームスタビライザ、ピッチ補正器(機)等と言う。

送波ファンビームは左右に幅広い広がりを持っているので、クロスファンビーム手法においてはローリングは補正する必要は無いと考えられていた。指向性を鋭くしている前後方向、つまり、ピッチングのみ補正すればよい。しかしながら、最近では(6)で指摘されるビームスタビライズの不完全さの理由によりシービーム2100はビームスタビライズを行っていない。ビームスタビライズを行っていない場合には、後処理により、ピッチング、ローリングの動揺によるクロスポイントの位置を修正する必要がある。



第5図 送波ファンビームのピッチ補正

(6) ラインアレイのビームスタビライズは円錐型送波アレイのファンビームを δ 傾けるといふことは、三次元空間で考えると、送波アレイ軸の回り

どこでも、ファンビームは δ の傾きを持つことになる。丁度、広げた傘のような形状となる。傘の軸が送波アレイに相当し、傘の布がファンビームの形状に相当する。ビームステアリング法によりビームの傾き α を変えるということは、傘の布を広げる角度を調節するのと同じことになる。送波ファンビームは、このようになかなかつぶれた形の円盤形状を持つため、海底表面での形は双曲線となる。 $\delta=0$ のときにのみ直線となる。幅の広いマルチビーム測深の場合には、ピッチングに対する、ビームスタビライズは悪影響を及ぼすことになる。つまり、クロスファンビームの傾斜角度が大きくなるほど、ビームスタ

ビライズは効果が小さくなる。

(7) 円盤状の指向性から扇型のファンビームへ

指向性はアレイの並び方向にビームが絞られる現象によって生まれる。実際の送波器はラインアレイと言っても、半円筒の形状とか、角柱状などの形をしており、ライン方向と直交する方向にもある程度の幅を持つ。この幅によって、わずかな指向性が生まれ、円盤を欠いた扇状の指向性となる。

(8) サイドローブの抑制, チェビシェフ (Chebyshev) の多項式

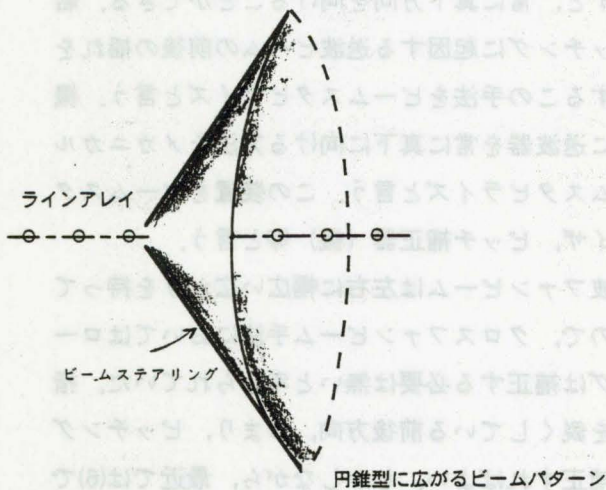
ラインアレイのビームフォーミングにおいて、N 個の等間隔アレイの各素子の音圧出力を系数列を使って調整してサイドローブを抑制することができる。この方法を振幅シェーディングと呼ぶ。この係数列としてチェビシェフの多項式 (Dolph, 1946) がよく使われている。サイドローブレベルを決めると主ビーム以外は全て指定したサイドローブレベルに抑えることができる。その計算方法 (電子通信学会, 1980) は以下の通りである。

$$a_1 = 1 \tag{27}$$

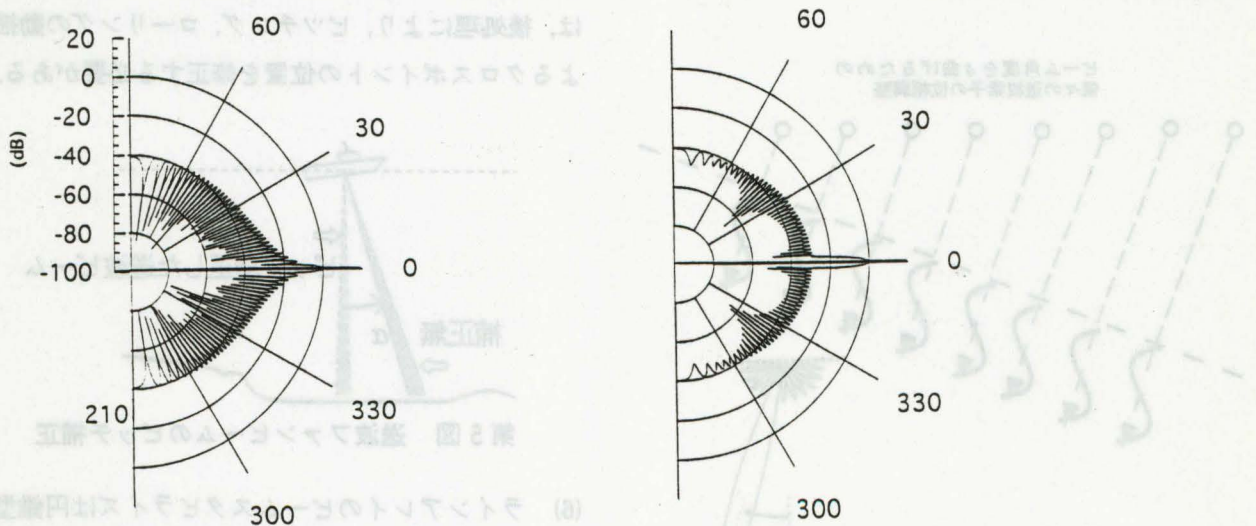
$$a_2 = (N-1)\eta \tag{28}$$

$$a_n = (N-1)\eta \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{n-2} \frac{(n-2)(n-3)\dots(n-m-1)}{1 \cdot 2 \dots m} \frac{(N-n-1)(N-n-2)\dots(N-n-m)}{3 \dots (m+1)} \eta^m \right\} \tag{29}$$

{ $3 \leq n \leq (N+1)/2$ }



第6図 ビームステアリングの三次元表現



(A) 振幅シェーディング無しのビームパターン (B) 振幅シェーディング有りのビームパターン

第7図 サイドローブの抑制

$$\eta = \tanh^2\{\log_{10}(1/\nu + \sqrt{(1/\nu^2 - 1)})\} \quad (30)$$

サイドローレベルは $20\log_{10}(\nu)$ である。例えば、8 素子に -25dB のチェビシェフ係数を適応した場合、各係数は以下になる。

$$\begin{aligned} a_1, a_8 &= 1.0 & a_2, a_7 &= 1.546 \\ a_3, a_6 &= 2.230 & a_4, a_5 &= 2.647 \end{aligned} \quad (31)$$

(9) 送波器のドップラ補正

送波器が下方に速さ v で下降するとき、水中に放出される音波の周波数 f はドップラ効果を受けて変化する。鉛直軸からの送波ファンビーム内の傾きを方向を θ とすると、ドップラ効果は以下によって表される。

$$f = f_0 * (1 + v/C) * \cos(\theta) \quad (32)$$

例えば、 $f_0 = 12\text{kHz}$ の音波を発信しているとき、送波器が下方に速さ $v = 1\text{m/s}$ で下降すると実際に水中に放出される鉛直方向における音波の周波数は 12.008kHz となる。C は水中音速である。5 m/s で下降すると、40Hz の変化となり、 12.040kHz となる。送波器が下方に速さ 1 m/s で下降している時、 11.992kHz の周波数で音波を発信すれば水中音は丁度 12kHz となる。このように、ドップラ効果を打ち消すような周波数で発信し、常に水中放出音の周波数を一定に保つことを、送波器のドップラ補正という。海底反射波の受信計測においてバンドパスフィルターの効果を上げる、または、ビームフォーミングの精度を高くするというような目的のためにはこの周波数変化を抑えることが考えられる。しかし、上式のようにビームの傾斜角度によって周波数変化は異なるので、鉛直方向のみを正確に補正することは可能であるが、全ての方向に対してリアルタイムで補正することは出来ない。受信時にもドップラ効果は起こるので、正確な補正法は送信時と受信時の送受波器のベクトル変移速度を計測し、受信ビームフォーミングの時に送信時と受信時のドップラ効果を補正して受信ビームフォーミング処理を行えば可能ではある。しかし、これはどの機種も行っていない。

2.4 受波ファンビームの作り方

送波器と受波器の指向特性の式は同じであり、基

本的なファンビームの作り方は同じである。N 個の受波ファンビームを作るには、ファンビームを傾けるステアリング角度 γ_i ($i = 1 \sim N$) を変えて、受波素子の受信信号の和の計算を N 組計算するだけで N 個の受波ビーム信号を形成することが出来る。

(1) ラインアレイ受波器による受波ファンビームの形成

ラインアレイ受波器のビームステアリングの計算は、ラインアレイ送波器と全く同じである。各ハイドロホンにおける、 γ 方向からくる音波信号の距離差は、ハイドロホンの間隔を d_R とすると

$$r_m = (m - 1) * d_R * \sin(\gamma) \quad (33)$$

と表される。この距離差を補正して、ハイドロホン信号の和をとれば、 γ 方向の受波ファンビーム $s(\gamma)$ が形成される。各ハイドロホンの計測した振幅を A_m 、位相を b_m とすると、受波ファンビームは下式によって形成することができる。

$$\begin{aligned} s(\gamma) &= \sum A_m * \sin\{\omega t + b_m - r_m/C\} \\ &= \sum A_m * \sin\{\omega t + b_m + (m - 1) * d_R * \sin(\gamma)/C\} \\ &= \sum A_m * \sin\{\omega t + b_m + (m - 1) * 2\pi d_R * \sin(\gamma)/\lambda\} \end{aligned} \quad (34)$$

λ は波長、 ω は角周波数である。

(2) IFFT, FFT を使ったファンビームの形成

各ハイドロホンの受信信号は

$$A_m \sin(\omega t + b_m) \quad (35)$$

により、表される。

各ハイドロホンの受信信号に発信用の基準周波数信号でミキシングを行い、ハイカットフィルターを通すことにより、ミキシング周波数信号との位相差に対応した DC 成分を得ることができる。ミキシングにより、2 倍の周波数信号と DC 成分が生まれる。

$$\begin{aligned} &A_m \sin(\omega t + b_m) * \cos(\omega t) \\ &= A_m/2 * \{\sin(2\omega t + b_m) + \sin(b_m)\} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} &A_m \sin(\omega t + b_m) * \sin(\omega t) \\ &= A_m/2 * \{-\cos(2\omega t + b_m) + \cos(b_m)\} \end{aligned} \quad (37)$$

ハイカットフィルターを通すことにより、これらの DC 成分、つまり、ハイドロホンの位相成分と振幅成分を組み合わせた複素信号を取り出す訳である。

$$A_m \text{EXP}(jb_m) = A_m \cos(b_m) + jA_m \sin(b_m) \quad (38)$$

複素数で表される、上式の各 hidroホン信号を得る。これらデジタルの hidroホン信号を使ってステアリングしたビームフォーミングを行うことができる。

42個の半波長 ($\lambda/2=\pi$) 間隔のラインアレイについてIFFTを使い、ビームフォーミングを行う式は以下になる。これにより一度に $N/2$ 個のビームフォーミングを行う。

$$f(0)=\sum A_m\{\cos(b_m+0 * u_m)+j * \sin(b_m+0 * u_m)\} \quad (39)$$

$$f(1)=\sum A_m\{\cos(b_m+1 * u_m)+j * \sin(b_m+1 * u_m)\} \quad (40)$$

$$f(2)=\sum A_m\{\cos(b_m+2 * u_m)+j * \sin(b_m+2 * u_m)\} \quad (41)$$

$$f(X)=\sum_{m=1}^{N/2} A_m\{\cos(b_m+X * u_m)+j * \sin(b_m+X * u_m)\} \quad (42)$$

$$u_m=2\pi m/N, \quad u_1=2\pi/N=\pi \sin(\gamma_1) \quad (43)$$

γ_x はビームの傾斜角度である。求められるビーム角は $0 \sim 90$ 度となり、 $N=256$ の場合には

$$\pi/128=\pi \sin(\gamma_1)$$

$$\gamma_0 = \sin^{-1}(0/128)$$

$$\gamma_1 = \sin^{-1}(1/128)$$

$$\gamma_x = \sin^{-1}(X/128)$$

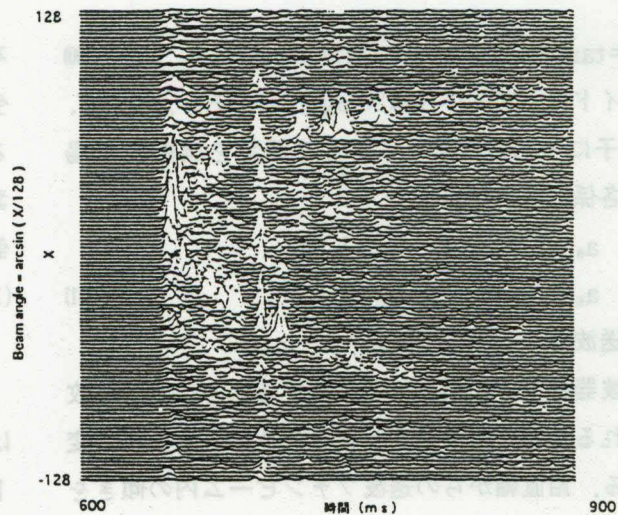
$$\gamma_{128} = \sin^{-1}(128/128)=90\text{deg.} \quad (44)$$

となる。

$m=1 \sim 42$ までの A_m, b_m は、各 hidroホン の計測値であり、 $m=43 \sim 128$ においては hidroホン が実在しないのでゼロを代入することとなる。以上のようにFFTの逆変換により、1度に多数のビーム計算を行うことができる。 N と θ_1 の関係式はIFFTの設計基準である。シェーディングを行う場合には、 A_m にシェーディング係数を掛けることで対処できる。このIFFTビームフォーミングにおいては、hydroホンのサンプリング時間間隔を短くすればそれだけ、細かいビームを計測できることになる。

$$F(X)=2/N * \sum_{m=1}^{N/2} A_m\{\cos(b_m+X * u_m)+j * \sin(b_m+X * u_m)\} \quad (45)$$

γ_x 方向から来る信号を上式のようにその周波数成分に対応する位相調整をした平均計算により求めたと考えると、この式はFFTの正変換による周波数成分はビームフォーミングが行えることを意味する。つまり、各 hidroホン信号に u_m の位相調整をした並びを作れば、FFTの正・逆どちらでもビームフォーミングが行える。



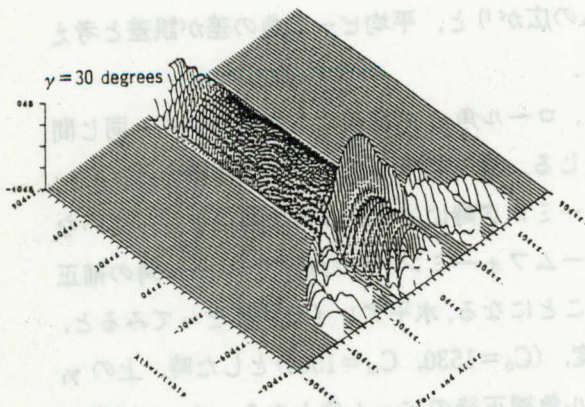
第8図 IFFT法により形成された受波ファンビーム信号

(3) 受波ファンビームの双曲線状の曲がり、クロス点の位置ずれ

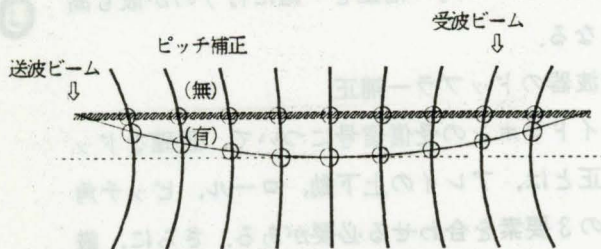
受波ファンビームは、ラインアレイのビームステアリング手法によって作られる。このため、海底面における受波ファンビームの形状は双曲線状のカーブを示す。また、ステアリングの角度が45度とか大きいときは、その曲がり方も非常に大きくなる。送波ファンビームとのクロス点を考えたとき、船のピッチングによりクロス点の位置は大きくずれることとなる。また、ローリングによってもクロス点の位置もずれることとなる。クロス点の位置ずれは、クロス点の位置計測ばかりではなく水深値計測の精度の劣化を招く。ほとんどのマルチビーム音響測深機ではこの補正は今まで行われていなかった。この補正を行うためシービーム2100では、送波ファンビームのピッチ補正を止めるとともに、クロス点の位置を送受、互いの曲線から求め、情報として横距離と前後距離の2次元の補正位置情報を持つようになった。

(4) 受波ファンビームの横揺れ、縦揺れ

受波ビームの実際の横揺れに対し、シービームのアナログ記録は、ロール補正器なるものを使っていた。これは、クロスファンビームによるシングルビーム測深機に使われる技術である。つまり、受波ビームを予め幾つかステアリング角度を変えて抵抗マトリックス回路で作っておく。このような予め用意し



第9図 サイドローブを抑制した受波ファンビームのパターン。30度のビームステアリングされている



第10図 受波ファンビームの双曲線状の曲がりとピッチングによるクロス点(○印)の位置ずれ

ておくビームをプリフォームドビームという。あとは、実際のロール角を計測し、どのプリフォームドビームが真下を向いているか選べば、常に、真下を向いた安定したアナログ信号を得ることが出来る。これを、アナログ記録器に記録する、あるいは、デジタル測深する。このビームを選択する装置、ロール補正器を装備していた。これは、プリフォームドビーム信号を回転端子に接続し、ロール角により回転する選択端子が、これらのどれかかつながるギアモータ式の機械である。選択端子も幾つか並べて、マルチビームの機械仕掛けの補正を行っていた。アナログ記録器は1台なので、記録は、これらのいずれかのビームを選択できるものであった。

しかし、最近のマルチビーム測深機は、コンピュータ計測器となっており、プリフォームドビームも計算機で作るためロール角に対応するビームの選択、補正は非常に簡単である。ビームの角度値として、ビームのステアリング角度からロール角度を差し引

くだけでよい。

以前は、固定ビーム角に揃える方法、プリフォームドビーム間隔より小さな角度の補正は、その値を挟む2つのビーム信号あるいは測深値の補間計算により行っていた。

受波ファンビームは、左右に狭く、前後方向に±7.5~±10度というように広がった形状をしている。いま、受波ファンビームが直線形状であり横方向の揺れに対し完全に補正されている場合には、前後方向に±7.5~±10度より小さい揺れ、ピッチ角があっても、送波ファンビームとのクロスポイントは変わらない。このため、受波ファンビームはロール角の補正は必要であるが、ピッチ角の補正は必要としないと考えられていた。

(5) 受波ビームのサイドローブの抑制

送波器のサイドローブからは小さな音波が出ており、受波器では低い感度で受信している。海底の反射波の強さは、海底の傾斜、底質により異なるので、サイドローブに対応した強い海底反射波が発生し、誤って計測する恐れが生じる。このため、送・受波器共にサイドローブをもっと抑える必要がある。これは、送受波器の中心付近の送波素子の出力を最大とし、左右に離れるに従って出力を下げる方法を取る。サイドローブを制御するこの係数列として、ドルフチェビシェフの多項式を使うものが多い。受波ビームフォーミングにおいても、送波と同じく式(27)~(30)により、サイドローブを任意の値に制御でき、しかも、全サイドローブの大きさを等しくできる。第9図はサイドローブを抑制した、SEA BEAM 2000の受波ファンビームのパターン例を示す。例えば、サイドローブを主ビームの約25分の1の大きさ(-28dB)に引き下げる。受波器については、受波素子個々の増幅率を調整してサイドローブの抑制を行う。

(6) 受信ビームフォーミングにおける表層海水の音速の影響、補正

水平なラインアレイ送波器を使って受信ビームフォーミングを行い、設計上使用する表層海水の音速と実際の音速に差がある場合、ビームの傾斜(ステアリング)角度に誤差を生じる。これは、スネル

の法則によって分かる。実際の表層音速が C_m である時、設計値 C_0 でビームフォーミングしたとする。また、この時の設計ビームの傾け角度を鉛直軸から γ_0 、実際に傾いた角度を γ_m とする。

$$C_0/C_m = \sin(\gamma_0)/\sin(\gamma_m) \quad (46)$$

($C_0=1530$, $C_m=1500$) とした時、

$$\gamma_0=60^\circ \text{ であれば, } \gamma_m=58.1^\circ$$

$$\gamma_0=45^\circ \text{ であれば, } \gamma_m=43.9^\circ$$

となる。

この誤差を小さくするため、常に固定の設計値 C_0 でビームフォーミングし、実際の傾き角度をスネルの法則から導き出して使うと大きな利点が生まれる。これは、簡単な方法であり、シービーム等多くの機器で使われている。設計上の表層音速層の下に、実際の表層音速層が存在し、その下に計測した音速海水がある。この場合、設計上の表層音速層と計測した音速海水層の間にスネルの法則が成り立つので、実際の表層音速 C_m は関係なくなり、不要となる。

この方法においても2つの問題がある。シービーム、シービーム2000などは、V字型の左舷、右舷に逆の傾きを持つアレイを合わせて使っている。例えば、 ± 5 度とか ± 10 度の傾き B を持っている。この時、左舷は

$$C_0/C_m = \sin(\gamma_0+B)/\sin(\gamma_m+B) \quad (47)$$

$$C_0/C_m = \sin(\gamma_1)/\sin(\gamma_m) \quad (48)$$

となる。右舷は

$$C_0/C_m = \sin(\gamma_0-B)/\sin(\gamma_m-B) \quad (49)$$

$$C_0/C_m = \sin(\gamma_2)/\sin(\gamma_m) \quad (50)$$

となる。 $B=10$ 度、($C_0=1530$, $C_m=1500$) とした時、設計音速層と同じ海水層を実際の表層海水層の下において、そこでの左舷、および、右舷のアレイが別々に作るビーム傾斜角 γ_1 , γ_2 を求めてみる。つまり、自動補正効果後における誤差ということになる。この γ_1 , γ_2 は水平アレイを使用したときのビーム傾斜角となる。これらと設計角度との差が誤差となる。

$$\gamma_0=60^\circ \text{ であれば, } \gamma_1=58.9^\circ, \gamma_2=60.6^\circ$$

$$\gamma_0=45^\circ \text{ であれば, } \gamma_1=44.5^\circ, \gamma_2=45.3^\circ$$

というように、両方のアレイで食い違いが生じてくる。つまり、アレイの水平面からの傾きが誤差を生

むということに注意しなければならない。これは、ビームの広がり、平均ビーム角の差が誤差と考えられる。

次に、ロール角 β の補正にも傾きアレイと同じ問題が生じる。多くのマルチビーム測深機では、ビームフォーミング時にはロール角の補正を行っていない。ビームフォーミングした後で、ロール角の補正を行うことになる。水平アレイを例にとってみると、 $\beta=10$ 度、($C_0=1530$, $C_m=1500$) とした時、上の γ_1 がロール角補正後のビーム角となる。 $\beta=-10$ 度の時、上の γ_2 がロール角補正後のビーム角となる。これらのように、完全には補正しきれない結果となる。ビームフォーミング時に、表層海水の音速、アレイの傾斜角、ロール角の補正を一緒に行うのが最も高精度となる。

(7) 受波器のドップラー補正

各ハイドロホンの受信信号について、正確なドップラ補正とは、アレイの上下動、ロール、ピッチ角の動揺の3要素を合わせる必要がある。さらに、厳密には、ビーム角方向によりドップラ効果が大きく変わるので、各ビームステアリング計算毎に、各ハイドロホンのドップラ補正を行う必要がある。

3. マルチビームによる水深計測

測量船「明洋」のシービーム2000は左舷の船底の42本のハイドロホンと右舷の船底の42本のハイドロホンにより、 $-120 \sim 120$ 度の範囲を3つに分けてビームフォーミングを行っている。現在のシステムについては、以下の仕様となっている。

-25~25度の範囲は84本のハイドロホンを使った1度間隔の51本の受信ビームを作る。水深計測はWMT法 (Farr, 1980) による。

-60~-25度の範囲および25~60度の範囲は、42本のハイドロホンによりFFTビームフォーミングを行っている。水深計測はインターフェロメトリック法による。

この分類は、計測方法の違いを表すので、注意が必要である。

(1) 動揺検出器

SEA BEAM, SEA BEAM 2000/2100, HYDRO

CHART IIでは、HIPPIY と呼ばれる動揺検出器を使っている。これはロール角、ピッチ角、上下位置 (HEAVE) の動揺を計測している。上下位置はリアルタイムのものと、77.2秒遅れの高精度のもの2つが出力される。システムでは後者を使用している。

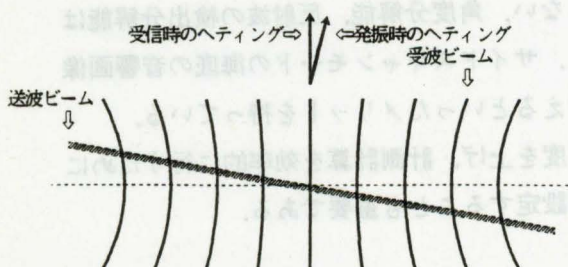
(2) ヨー補正, 回頭

深海において測量船が回頭とかヨーイングしているとき、送波ファンビームと受信ファンビームは送受の時間差のために直交しなくなる。特に、外側のビームのクロスポイントの位置ずれが大きくなる。水深が深いと音波を発信し、海底で反射し、受波器で信号を受け取るまでに、かなりの時間がかかる。120度 SWATH のマルチビーム音響測深機の場合、3000m の水深であれば4~8秒、9000m の水深であれば12~24秒も往復時間を要す。往復時間が長いほど、ビームのクロスポイントの位置ずれが大きくなる。また、各ビームの往復時間が大きく異なるため、受波ビーム毎に船のヘディングも大きく異なる。一般に、送信時のヘディングを計測の値として採用している。これは、送波ファンビームによって海底に反射ラインが作られることによる。

例えば、ビーム角60度、水深3000m と計測された場合、本当の水深値と横距離は、ヨー角10度では、水深2965m (3000m)、横距離5216m (5196m) となる。

括弧内は計測された値を示す。この場合のヨー角とは、往復時間におけるヘディング角のずれを表すものとした。また、往復時間は8秒となる。また、回頭運動が早くなると、外側ほどクロスポイントを消失しやすくなる。

ヨー角 ζ 、計測水深 D 、計測横距離 Y としたとき、



第11図 送信と受信時のヘディングのずれ, ヨーイングによるクロス点のずれ

真の水深 D' 、横距離 Y' は以下の計算式によって求まる。 γ は計測ビーム角、 R は計測斜距離とする。

$$\gamma = \tan^{-1}(Y/D) \tag{51}$$

$$R = D/\cos(\gamma) \tag{52}$$

$$\tan(\gamma') = \tan(\gamma)/\cos(\zeta) \tag{53}$$

$$D' = R \cos(\gamma') \tag{54}$$

$$Y' = R \sin(\gamma') \tag{55}$$

受波ファンビームはビームステアリングにより傾斜角を作るため、海底上に双曲線のように曲がった形状をする。この補正式においては、この双曲線効果は入っていない。正確に計算するためには、この双曲線効果の計算を行う必要がある。

(3) ゲイン補正, 球面拡散, 吸収

一般に、送波器から放出された音波は、伝搬距離を r とすると

$$TL = 20\log_{10}(r) + \alpha r \tag{56}$$

の伝搬損失を受ける。第一項は、球面拡散による減衰 SSL を示す。第二項は、吸収損失による減衰を示す。 α は吸収係数と呼ばれるものである。海水中を伝搬する音波は、周波数によって異なる吸収損失を受ける。

今、点音源から放出された距離 r における音波の強さを I_r 、距離 1 m における強さを I_1 とする。吸収損失が全く無いとすると、距離 r の球面上の音響エネルギーは不変である。よって、球面拡散による減衰は以下のように求まる。

$$4\pi r^2 * I_r = 4\pi 1^2 * I_1 \tag{57}$$

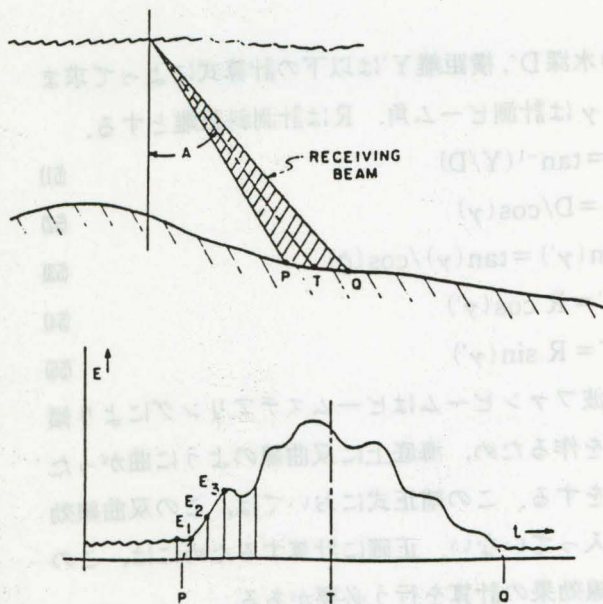
$$SSL = 10\log_{10}(I_1/I_r) = -20\log_{10}(r) \tag{58}$$

(4) 海底反射波の計測, ゲイト, WMT 法

各受信ビーム信号毎に海底反射波の到達時間を計測する方法が従来主に行われてきた。ビームの信号の中から反射波の到来時間を、波形の振幅をウェイトとした時間積分を行う以下のような式から求め、WMT (Weighted Mean Time) 法などと呼ばれている。

$$T_r = (\sum E_i * t_i) / (\sum E_i) \tag{59}$$

この場合、サンプリング時間を t_i 、ウェイトとして信号の強さを E_i とする。この方式の場合、幾つかの処理を組み合わせる必要がある。海底の反射信号そのままでは無く、バンドパスフィルターで不要な雑



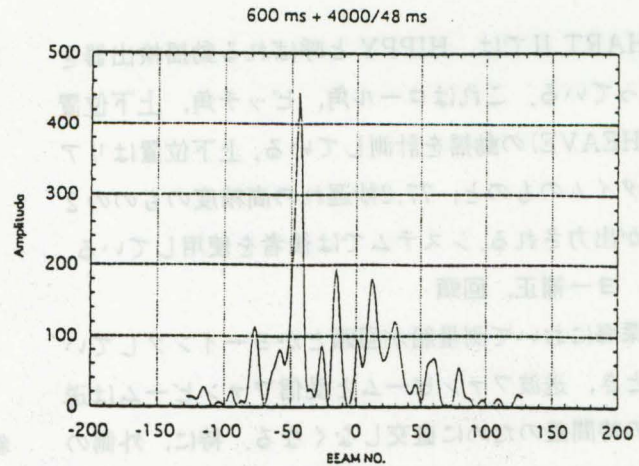
第12図 サイドビームによる海底への照射面の広がり
と信号の強さを加重とした中心点、海底
反射波の計測 (Farr, 1980)

音を落とし、信号の振幅成分のみを取り出す。過去の計測値からゲートを設定し、狭い時間範囲で計測する必要がある。例えば、積分時間を大きく広げた場合、シグナル成分の積分値は一定であるのに対し、ノイズの積分値は大きくなる。つまり、S/Nの劣化を招く。また、信号が弱いと積分する時間範囲の真ん中が求められ、計測不能となる。スレッシュホールドレベルの設定と信号の有無の判定を行う。また、他ビームのサイドローブ信号が干渉することがあるので、自分のビーム信号なのか、そうでないのかの判定を行い、できるかぎり信号を絞る必要がある。

(5) インターフェロメトリック法

以前のマルチビーム音響測深機は受波ビーム毎の受信信号を作り、往復時間を計測していたが、SEA BEAM 2000/21000等の最新のマルチビーム音響測深機は、FFTによるインターフェロメトリック法と呼ばれる、サンプリング時間毎に、海底反射波の到来方向を計測する方法が使われている。

例えば、発信してから、683.33ms目の42個のハイドロホン・サンプルを使ったIFFT受信ビームの強度分布(第13図)を見ると、ビーム位置 $X = -45$ 付近で、海底反射波の受信強度が最大になっている。発信してから683.33ms後に捉えた海底の反射波は



第13図 海底反射波の到来方向を計測するための時間断面。横軸は方向角に対応したビーム番号。(第8図の683.33msの時間断面)

γ_X の方向から到来したことになる。つまり式(42)、(44)より、 $\sin^{-1}(-45/128) = -20.6^\circ$ の入射角でハイドロホンアレイに音波が入ったことになる。

このようにして、各受信時間における γ_X 断面から到来方向角を計測し、ビーム X の水深値を計測できることがわかる。このような方法を BDI (Beam Direction Indicate) と呼んでいる。また、ハイドロホン・サンプルの合成により、様々な方向のビームを作り、その中から最大反応点を知るという原理からインターフェロメトリック法とも呼ばれている。最近よく使われるようになった新しい計測手法である。受信ビーム数を増やせば計測精度も高くなる。ピーク角付近の強度を近似式により補間計算し、最高点を正確に捉えるという手法が使われている。

基本的な干渉法とは、二つの受波素子を間隔において並べ二つの受信信号を干渉させる(和を取る)と干渉信号の大きさは音波の来る方向に応じて変化する原理に基づく。逆に干渉信号の大きさから音波の来る方向を計測するという方法である。インターフェロメトリック法を使えばトンネル効果は原理的に起こらない。角度分解能、反射波の検出分解能は高くなる。サイドスキャンモードの海底の音響画像計測が行えるといったメリットを持っている。

計測精度を上げ、計測計算を効率的に行うためにゲートを設定することも重要である。

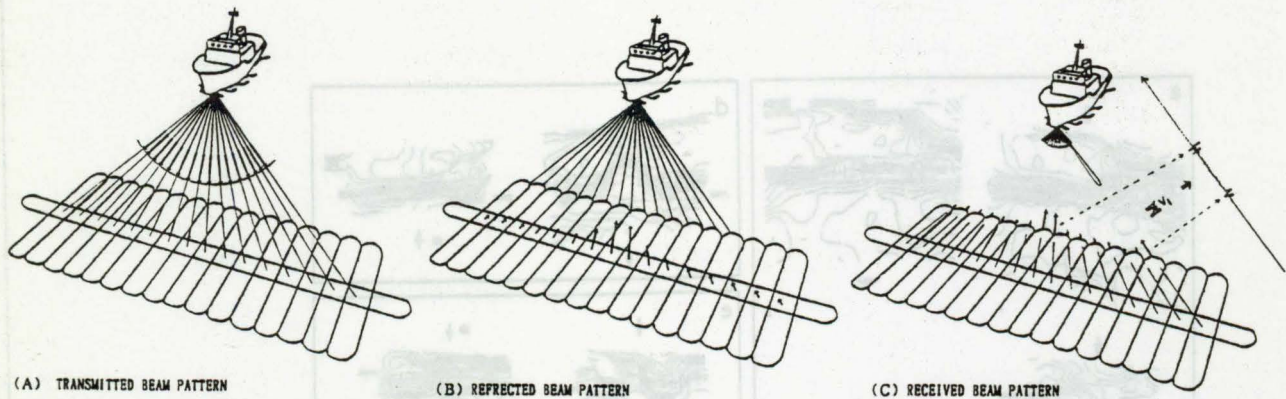
(6) トンネル効果

トンネル効果とは平坦な海底で起こるマルチビーム音響測深機に特有な異常計測地形であり (de Moustier, 1986) によって報告された。どろのような反射強度が弱く、かつ、滑らかな深海平坦面ではシービーム, HS10等に良く現れる。日本海盆でよく現れる現象である。インターフェロメトリック法を採用している場合には、反射波の到達時間が同じ、海底での反射点が同じため、計測原理的に起こらない。

この現象は、クロスファンビーム手法の弊害とも言える現象である。直下ビームの反射強度が非常に強く、反射強度の非常に弱いサイドビームにそれが入り込む現象である。従って、全ての受信ビームにおいて往復計測時間が同じになる。直下水深を半径

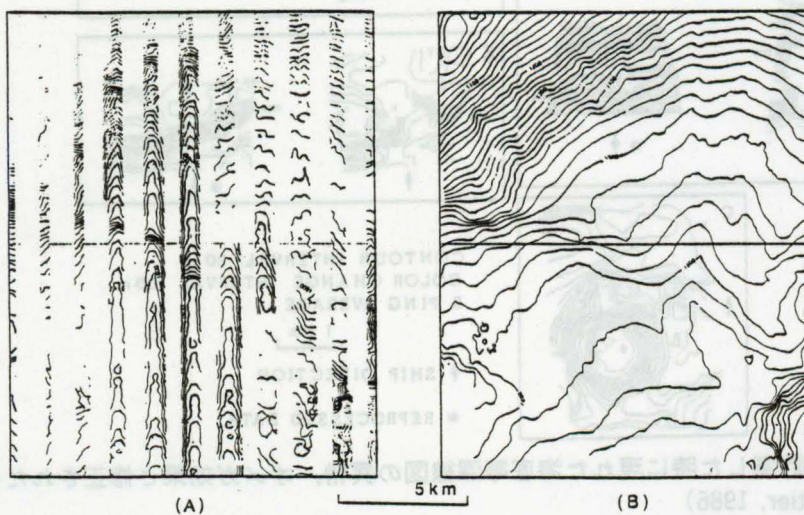
として、円弧を描いた海底プロファイルが得られる。この現象は、部分的に現れることもある。通常、受波ビームは指向性というブロック塀により、ビーム間を間仕切りしている。海底の反射信号が弱いと、完璧にブロックされるが、直下信号だけが異常に強いと、このブロック塀にトンネルを開けたように突き抜けてしまう。

第14図にこの現象を示す。(A)で示すように送波ビームは全方向に同じ強さの音波を発信している。ところが、(B)で示すようにどろのような反射強度が弱く、滑らかな深海平坦面では直下ビームの反射波は鏡に直角に光を当てたときのように非常に強い。しかし、その角度を少しずらすと、全反射のように前方には強い反射波が現れるが、後方への散乱波



第14図 トンネル効果の起こる概念図

(A)送波ビームパターン, (B)海底の後方散乱波強度, (C)反射パターンと受信ビームパターンの合成効果により滑らかな海底平坦面でトンネル効果が起こる



第15図 トンネル効果により計測された異常等深線図(A), 修正した正しい等深線図(B)

(バックスキタリング)は殆ど無くなる。マルチビーム測深機は、この後方散乱波を使って往復距離、斜距離を計測している。

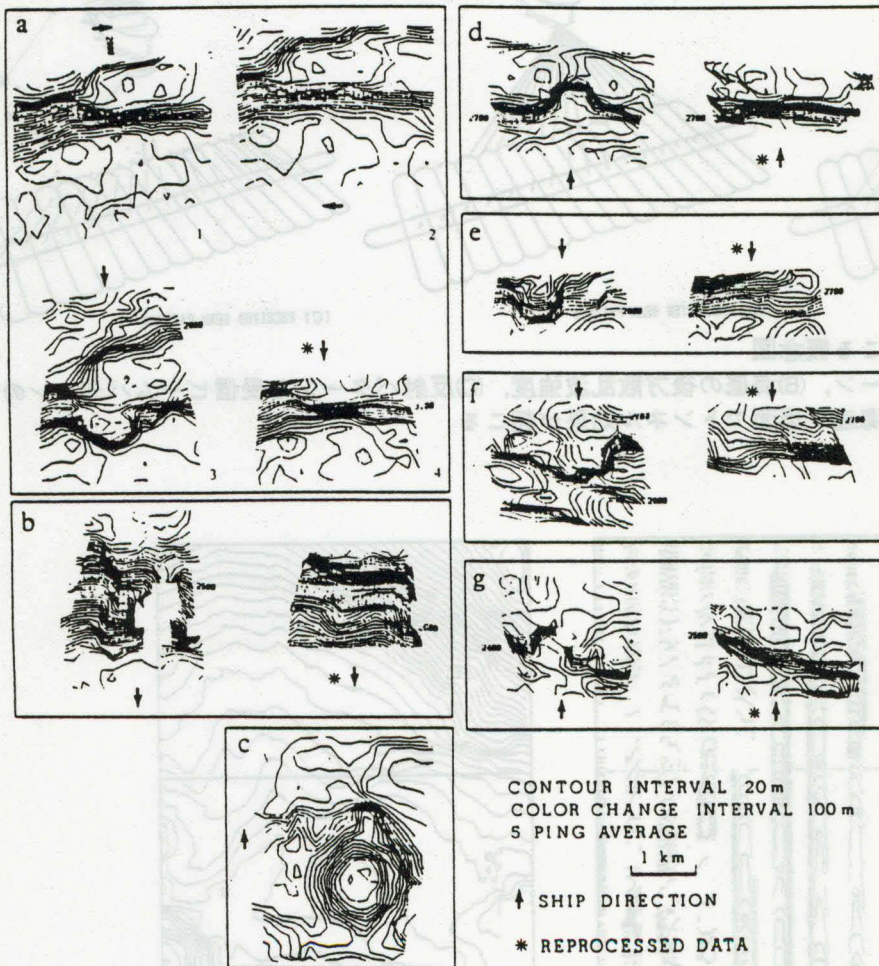
一方、(C)で示すように斜め横を向いた受波ビームについては、そのビーム角度の後方散乱波を捉えようとするが、弱すぎて捕まえることが出来ない。ところが、目隠しをしているはずの直下方向からは、その目隠しを通り抜けるほど強い反射波があり、通り抜けてしまったために、直下の海底反射波を信号として計測してしまう現象である。黒い下敷きを通して、天空を見たとき、スリットが無いにもかかわらず、太陽のある場所は光が透過して見えるのに似ている。

BDI(インターフェロメトリック)手法を使った場合、直下の海底反射波が現れたサンプリング時間の全ビームには、この強すぎる反射波が現れる。しか

し、全体的にレベルは高いが、直下方向はずばぬけて強いパワーを示す。この γ 方向の断面パターンでは、この信号はまぎれも無く直下方向から来ていることを示す。このため、トンネル効果の現象はBDI計測においては、起こらないといえる。

(7) オメガ効果

崖を下る方向に航走した場合に起きる、異常計測地形として (de Moustier, 1986)によって報告された。今、山頂部が平坦になった海山が深い平坦な海底面上にあった場合を考える。平坦な頂き上をマルチビーム測深している場合は正常である。序々に山頂から斜面を下る方向に計測した場合、送波ファンビームは真下に強く扇状に音波を照射しているが、急斜面のため、真下からは弱い反射波しか返ってこない。ところが、斜め後方には、わずかな強さであるが、サイドローブとして音波が放出されている。



第16図 崖を下る方向に航走計測した時に現れた海底等深線図の異常、オメガ効果と修正されたその正しい等深線図 (de Moustier, 1986)

山頂の平坦部と崖の角からは散乱波が弱いけれど反射してくる。受波ビームは前後に窓を開けているので、後方からのこの散乱波をそのまま受け入れてしまう。結果的に直下よりもこの後方からの散乱波が強い場合、あるていど船が進むまで、間違っただけで計測してしまう現象である。この場合、左右方向の全ビームを見た場合、直下付近のビームに起こり易い。深海平坦面から山頂へ船が向かう場合には起こらない。これは、ゲイトの関係である。山頂から深部へ下る場合、この散乱波は、真の海底と連続してしまうので、誤ってゲイトを散乱波の起点に向けっぱなしになってしまう。逆に、下から上に計測する場合、計測している海底より、突然前方に離れて、この散乱波が現れるためこの現象は起こらない。海底斜面に Ω の字のような地形を計測することから、オメガ効果と名付けられた。海底の傾斜、斜面の反射強度等の関係から必ず起こるとは言えない。ある条件が重なったときに起こる現象である。第16図にこの現象の現れる方を説明した観測例が報告されている。a-1とa-2では崖に平行に走った時に計測された海底地形は同じである。ところが、崖を直交するa-4のように崖を下る方向に走ると崖が下側に膨らんだ形になる。a-3は修正された正しい地形である。b, d, e, fは、同じく崖を下る方向に計測した場合には、崖が Ω の字のように崖下側に膨らんで計測された例を示し、*印が付いた右側が修正された正しい地形を示す。cは海山を下る時にこの現象が起こった例である。等深線のケバは深い方向を示している。

(8) 海底計測のつの現象

S/Nの悪いとき、計測した海底プロフィールにおいて、 ± 10 度付近にものが2本とび出たような現象が現れることがある。これは、明洋のSEA BEAM 2000の場合、ハイドロホンアレイが ± 10 度の傾きを持っていることと関係する。電気雑音、水中雑音など全てのハイドロホンに同時に混入した場合、これらの雑音は、受波ビーム角 ± 10 度では、そのまま加算され、雑音が強調されるために起こる。ハイドロホンアレイの受信時の位相調整等によりかなり軽減されるようになった。出力を上げる、速力を下げる

などのS/N向上策により、この現象を抑えることが期待される。

(9) 海底計測の弓なり現象

海底が平坦な場合、ビームの両側が持ち上がった弓なり形状の海底地形を計測する現象が現れることがある。200mより浅い海域では良く起こる。この1つの原因は、浅海モードによるビーム幅の広がりであろう。200mより浅いところは大陸棚のため、スロープがゆるく計測例として目立っている。シービーム2000/2100の場合、10mでも測深しようとして、そのためには送受波器が5mと大きすぎるため、浅い海域では送波器アレイも受波器アレイも、それらの有効長を半分にしてしている。このため、ビーム幅は2倍に広がる。中深海モードの作動開始水深の設定を浅くすることによって、この、弓なり現象を軽減することが期待される。

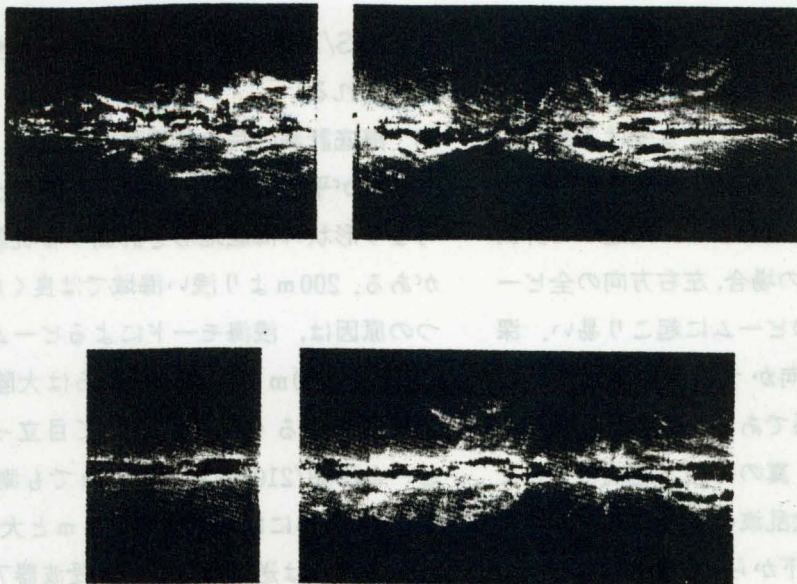
また、深海においても、平坦面では、両側的水深が浅く持ち上がる現象がときどき見受けられる。この現象は、平坦面におけるビームの後方散乱波の低下により、信号が非常に弱くなることが原因と思われる。送信出力を上げ、速力を下げ、増幅率を上げるなどにより、S/Nを向上させることが有効と思われる。

黒潮、冷水塊、暖水塊など、極端に音速プロフィールが変化する海域を測量した場合、計測精度の劣化をまねき、特に平坦面においては海底が弓なり状になった記録を等深線図等に見ることがある。このような海域においては、航走する測線を計画を立てて、正確な音速プロフィールを適切に入れ替えながら計測する必要がある。

海底の弓なり現象がトンネル効果と似ているために、トンネル効果と混同する人が多いが全く別の現象である。

(10) サイドスキャンデータ、インテンシティ計測

ビームインテンシティは、当初、シービームで計測されるようになり、ビームの受信信号の時間積分強度であった。FFTビームフォーミングにおいては、そのビームの最大受信強度となった。SEA BEAM 2000では、WMT法とBDI法が混在するようになったため、前者の時間項を削除した、最大受

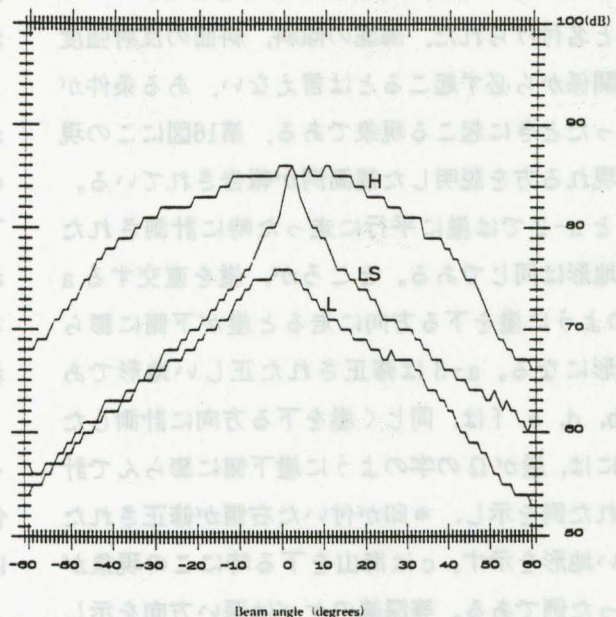


第17図 シービーム2000によるサイドスキャン記録

信強度になっているものと考えられる。

FFT を使った計測処理において、例えば 1 ms 間隔毎に、信号強度と信号の到来方向角度が計測される。これから、横距離と信号強度のデータセットを作ったものが、サイドスキャンデータとなる。第17図は、SEA BEAM 2000で観測された大島と館山の中間の相模トラフのサイドスキャン画像の例である。140度 SWATH 幅を2048ピクセルの画素として捉えることが出来る。左上から房総側の斜面を下り、崖を平行に航走し、平坦面、トラフの谷軸を捉えている。また、計測データとしては、水深、横距離、前後距離の他に、各ビームの信号強度レベルを記録するようになっている。SEA BEAM 2100は、送波ファンビームのビームスタビライズを行っていないので、前後距離がデータに加えられている。

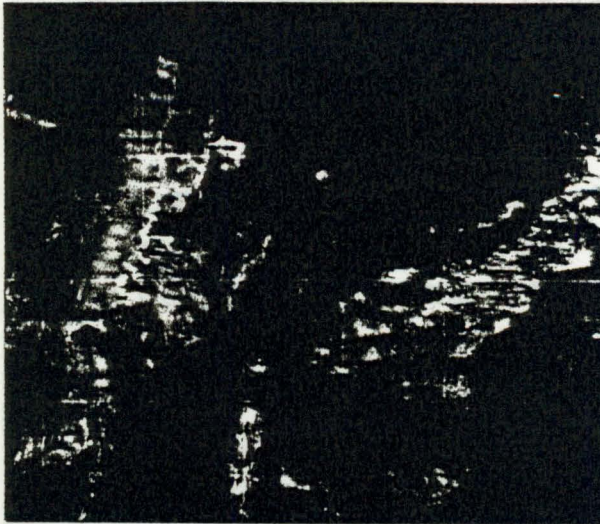
(II) 音響画像、ビーム角によるインテンシティ補正
マルチビーム音響測深機は海底に鋭い音響ビームを実際に投射して、その反射強度の測定を行っている。この反射強度に相当する強さの光のビームを印画紙を地図として音響ビームが当たった位置に当てて現像すると、海底の音響画像図ができる。音波は岩のように固いものからの反射は強く、泥の表面の場合は反射は弱い。海底表面の地質・粗さ等の違いにより反射波の強さが異なる。海底表面が泥か、砂か、岩か位の推定は行える。また、海底の断層は直



第18図 シービーム2000による、海底の底質、粗さの違いによるビームインテンシティパターン。ゴツゴツとした岩盤が露出したと思われる海底H、泥のような底質で特に直下のみが反射の強い鏡のような特性を持った滑らかな海底LS、砂のような後方散乱波のやや弱い海底L。

線状に現れ、がけ崩れ等も良く分かり、海底の音響画像は海底地形調査において活用が期待される。

ビーム角に対する後方散乱波のパターンは、海底の底質、粗さによってかなり異なる。泥のように滑らかな平坦な海底では、直下のみ強く、直下からず



第19図 シービーム2000のビームインテンシティによる海底の音響画像

れるとすぐにレベルは下がり、全体的にレベルは低い。ゴツゴツした岩が露出した海底では、全体的に後方散乱波は強くその差も少ない。

海底の急斜面の場合、柔らかい表層堆積物は流され、地肌が浸食され、固い物質が表面に現れていることが多い。このため、斜面は後方散乱波は強く正確に地形が計測され易いことが多い。平坦な海底においては、泥のような柔らかい堆積物におおわれていることが多く、直下のみは強い反射で計測されるが、斜め横方向は正確に計測しにくいといえる。

(12) ピッチバイアス計測と補正

ピッチバイアス計測としては、一様な急傾斜面軸を往復計測する方法がある。正確にピッチバイアス計測を行うには、直下付近のビームを使うことを勧める。また、サイドビームでは補正効果が減少する

ので、ピッチングが大きい計測条件下ではワイドSWATH 測深は適さないことが分かる。DGPS 等の正確な位置計測のもとに往復計測を行えば、等深線の位置が行きと帰りで前後にずれる。同じ等深線の現れた位置の前後距離を p 、その水深を D とすると、ピッチバイアス角 ΔP は

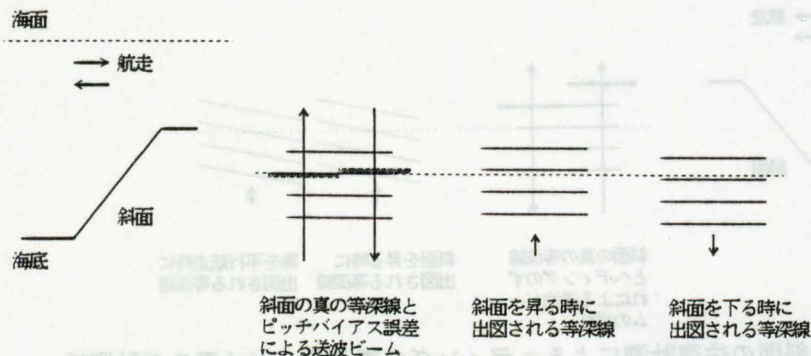
$$\Delta P = \sin^{-1}(p/2/D)$$

となる。ピッチバイアス補正をシステムが行えるものでは、このピッチバイアス値を設定する。また、ピッチバイアス補正をシステムで行えないもの、あるいは、後処理で補正する場合は、全てのビームの水深値に $\cos(\Delta P)$ を掛ける。(水深値) $\times \sin(\Delta P)$ の前後方向の位置補正を行う。

(13) ロールバイアス計測と補正

ロールバイアス計測としては、平坦な海底を往復計測する方法がある。動揺検出器の水平基準面と受波器アレイの水平基準面との間に差があると、完全に平坦な海底を計測した場合、斜めに緩く傾斜した海底地形を結果として計測する。この差を、ロールバイアスといい、船底固定装備の場合は、非常に小さくコンマ数度以下であり、1年に1回程度は計測したほうが良い。SEA BAT のように、可搬型の測深機の場合は大きく数度となる。

平坦な海底の往路で数百ピングの計測を行い、各ビーム毎の平均水深を計算する。良質な計測値を持つSWATH 幅のデータを使い、海底の横傾斜プロフィールを計算する。さらに、復路でも同じように計測して、海底の横傾斜プロフィールを計算する。両者の傾斜の差の半分の値が、補正すべきロールバ



第20図 海底斜面の往復計測によるピッチバイアスの計測法

イアス値として求められる。SEA BEAM 2000/2100 はシステムにロールバイアス計測モードが組み込まれている。通常、計測値で修正した後、もう一度往復計測し、正しく修正されていることを確認する。S/N 良く計測するため低速で計測する。また、精度良く計測するには、船の動揺が小さい好天の時の良い。

(14) ヘディングバイアス計測と補正

ヘディングバイアス計測としては、一様な斜面を持つ海底において、斜面を真っ直ぐ上下する平行測線を設定して、同一等深線のずれ量からヘディングバイアスを計測する方法がある。正しくロールバイアスが修正された後、ヘディングバイアス計測を行うと良い。

ジャイロコンパスとラインアレイ送波器の軸との間で、ずれ量を持っている場合、隣接した平行航走で等深線の回転現象による食い違いが生じる。この食い違いを解消する逆回転角が補正バイアス値である。通常、バイアス修正した後、もう一度計測し、

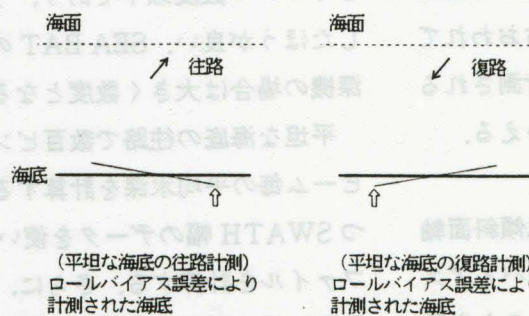
正しく修正されていることを確認する。S/N 良く計測するため低速で計測する。また、精度良く計測するには、船の動揺が小さい好天の時の良い。

(15) 浅海計測モード

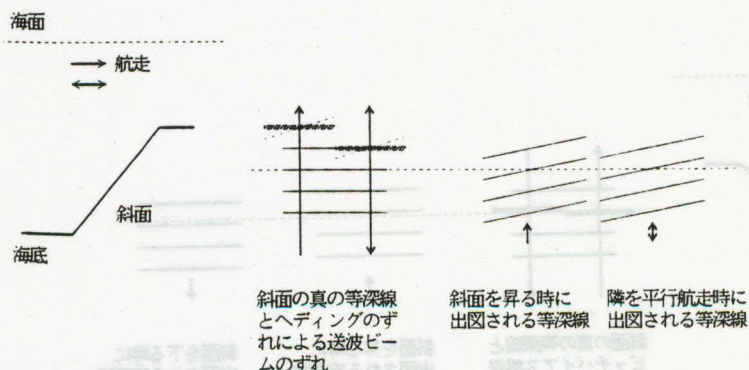
シービーム2000/2100の場合、10mでも測深しようとして、そのためには送受波器が5mと大きすぎるため、浅い海域では送波器アレイも受波器アレイも、それらの有効長を半分にしている。また、計測ビーム数も半分にしている。浅海と中深海モードの切り替わりでは、ほとんど計測のリセットに近い状態になるので、切り替わり目の測深データは不良になる事が多い。測量中に、切り替わりが少なくなるように、作動水深範囲を設定するべきである。中深海モードの方が、計測精度が良いので、なるべく中深海モードを優先するようにしたい。

(16) 喫水補正, 平均音速補正, 音速プロファイル補正

シービームでは表層から音速計測した水深までの音速プロファイル(D_i, C_i)を入力する。シービーム



第21図 海底平坦面の往復計測によるロールバイアスの計測法



第22図 海底斜面の往復計測によるヘディングのずれ量, バイアスの計測法

2000/2100では、表層から最大計測水深までの音速プロファイルを入力する。

式(61)による海底までの伝搬時間で対応水深距離を割る平均音速を計算する方法もあるが、シービームでは式(60)により斜めビーム角の音線の屈折補正には平均音速補正を行っている。表層から今計測している水深 D_m までの平均音速 C_m を計算する。最大計測水深より深い水深の音速は、入力した最大水深の音速に、圧力の増大に伴う音速の増大項を加えて、システム内で自動計算する。

$$C_m = \{ \sum (C_i + C_{i+1}) * (D_{i+1} - D_i) / 2 \} / D_m \quad (60)$$

$$C_m = D_m / \{ \sum (D_{i+1} - D_i) / (C_i + C_{i+1}) / 2 \} \quad (61)$$

表層音速を C_0 、表層部でのビーム角を γ_0 、海面から海底までの片道伝搬時間を T とすると、海面から海底に伝搬する音線は直線と見なして補正する。

$$C_0 / C_m = \sin(\gamma_0) / \sin(\gamma_m) \quad (62)$$

$$\gamma_m = \sin^{-1} \{ \sin(\gamma_0) * C_m / C_0 \} \quad (63)$$

$$Z = T * 1500.0 * \cos(\gamma_m) \quad (64)$$

$$Y = T * C_m * \sin(\gamma_m) \quad (65)$$

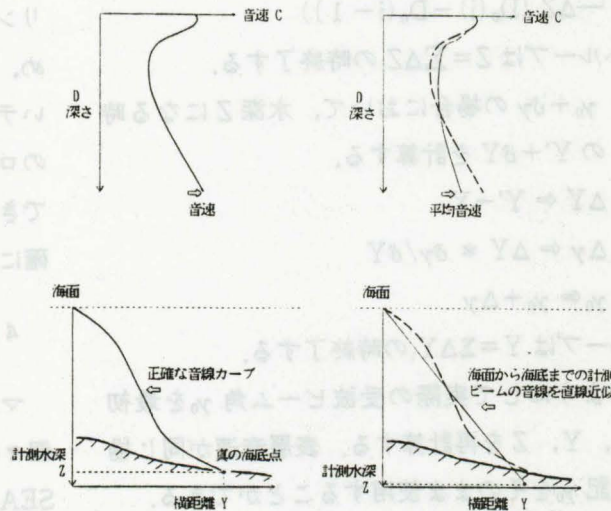
により、仮定音速による水深と、実横距離を計算している。後処理において、水深値のみ音速補正を再度行わなければならない。

シービーム2000/2100では、表層から最大計測水深までの音速プロファイルを入力する。システム内で入力データより深いテーブルは作成しないので、かならず最大計測水深より深い音速を入力する必要がある。海面から海底に伝搬する音線は曲線として、一定水深毎に音線の傾きを計算し、区間水深と、区間横距離を求め、これらを積分することにより、実水深と実横距離を計算する。傾斜角の大きいビームでは、音線は曲線として処理しないと精度が上がらない。また、最近のコンピュータの計算能力からして、シービームの時のような、計算時間を短縮する必要がかなり無くなってきた事による。

シービーム2000/2100では、喫水は音速プロファイルの表層水深値として入力されるので、注意する必要がある。

(17) 海水の音速プロファイルの補正原理と後補正法
シービーム2000は音線の屈折カーブを補正しており、その再計算は複雑となる。今までの多くのマル

チビームは、音線は直線と仮定し、水深に応じた海水中の平均音速から音線の屈折補正を行っていただけである。



第23図 サイドビームによる音線の屈折補正。正確な音速プロファイルによる海底反射点の計測と、音線を直線と見なした海面から海底までの平均音速による屈折補正

誤って音速プロファイルを入力して測量を行った時、現場ではどうしても正確なプロファイルによる計測を行えなかった時等、後で正確な音速プロファイルを取得した時などに音速プロファイルの補正処理を行っている。測量時には、適当な間隔で深海用 XBT を使用すると効果的である。

計測時の音速プロファイルを $D_0(N)$ 、 $C_0(N)$ とし、再計算する時の音速プロファイルを $D_1(N)$ 、 $C_1(N)$ とすると再計算の基本的考えは以下になる。例えば、1 m 水深間隔毎の音速プロファイルをつくと簡単に計算できる。

Y : 計測横距離

Z : 計測水深値

$D_0(0)$: アレイ深度

$C_0(0)$: 表層の設計音速

β : ローリング角

① 計測水深値と横距離値から、片道時間 t とアレイの受波ビームフォーム角 γ_0 を求める計算

$$\gamma_0 \approx \tan^{-1} (Y/Z)$$

→ $D_0(0 \sim N)$ 、 $C_0(0 \sim N)$ を使い、水深 Z になる時の X' 、 $\sum \Delta t_i$ を計算する

$$\rightarrow \cos \theta_i / \cos \gamma_0 = 0.5 * (C_0(i) + C_0(i-1)) /$$

$$C_0(0)$$

$$\Delta t_i \Leftarrow 2 * (D_0(i) - D_0(i-1)) / \cos \theta_i / (C_0(i) + C_0(i-1))$$

$$\Delta Y_i (D_0(i) - D_0(i-1)) * \tan(\theta_i)$$

$$\Delta Z_i (D_0(i) - D_0(i-1))$$

この小ループは $Z = \sum \Delta Z_i$ の時終了する。

- ・ $\gamma_0 + \delta\gamma$ の場合において、水深 Z になる時の $Y' + \delta Y$ を計算する。
- ・ $\Delta Y \Leftarrow Y' - Y$
- ・ $\Delta\gamma \Leftarrow \Delta Y * \delta\gamma / \delta Y$
- ・ $\gamma_0 \Leftarrow \gamma_0 + \Delta\gamma$

このループは $Y = \sum \Delta Y_i$ の時終了する。

②上記のようにして実際の受波ビーム角 γ_0 を最初に計算し、 Y 、 Z を再計算する。表層音速が同じ場合には上記 γ_0 をそのまま使用することができる。

ビーム角によって、使用する受波アレイは以下の3種に分類される。

★左舷側-120~-45度のビーム角の場合

左10度上がりの受波アレイ： $\gamma_0 \Leftarrow -10^\circ + \beta$

★真ん中-45~45度のビーム角の場合

水平アレイ： $\gamma_0 \Leftarrow 0^\circ + \beta$

★右舷側-120~-45度のビーム角の場合

右10度上がりの受波アレイ： $\gamma_0 \Leftarrow 10^\circ + \beta$

各アレイにおいて、以下のようにして正確な海水の音速プロファイルを使用して再計算する。

- ・ $(\gamma_0 - \theta_0)' = \cos^{-1}(\cos(\gamma_0 - \theta_0) * C_1(0) / C_0(0))$
- ・ $\gamma_0 (\gamma_0 - \theta_0)' + \theta_0$
- ・ $\cos \theta_i / \cos \gamma_0 = 0.5 * (C_0(i) + C_0(i-1)) / C_0(0)$
- ・ $\Delta t_i \Leftarrow 2 * (D_0(i) - D_0(i-1)) / \cos \gamma_i / (C_0(i) + C_0(i-1))$
- ・ $\Delta Z_i \Leftarrow (D_0(i) - D_0(i-1))$
- ・ $\Delta Y_i \Leftarrow (D_0(i) - D_0(i-1)) * \tan(\theta_i)$
- ・ $Y \Leftarrow \sum \Delta Y_i$
- ・ $Z \Leftarrow \sum \Delta Z_i$
- ・ $t' \Leftarrow \sum \Delta t_i$

上記ループにおいて、 $t = \sum \Delta t_i$ となる Y 、 Z が正確な再計算値となる。上記でわかるように、真ん中のセクションのビームにおいては、左舷と右舷のハイ

ドロフォンアレイのビーム角は異なる。しかし小さな表層音速の差の場合には問題とならない。正確に補正するためには海底反射波の受信毎のローリング値を必要とする。しかし、シービーム2000ではローリング値を発信時のみしか収録していない。このため、発信時のロール角を並べ、補間計算により細かいテーブルを作成して対処する必要がある。短周期のロール角運動、水深が深い場合には、正確に補間できなくなるので、計測時には表層海水の音速を正確に計測し、使用することが重要である。

4. おわりに

マルチビーム音響測深機は機種によって、また、個々の機器によって計測手法が異なる。ここではSEA BEAM 2000を主として、その基本的原理、計測時の問題とバイアス計測法を一通り解説した。今後のマルチビームを使った測量における基礎知識として、測量・データ処理時の参考になることを願ってまとめたものである。ビームの形成法などは様々な方法が現在使われている。また、浅海用のマルチビーム音響測深では、送受波器の装備の仕方により、ブレが生じたり、ここに記述していない問題も多々起こることを注意して欲しい。

参考文献

電子通信学会：アンテナ工学ハンドブック，オーム社，688，1980。

Dolph, C.L. : A current distribution of broadside arrays which optimizes the relationship between beam width and side-lobe level, *Poc. Inst. Radio Eng.* 34, 335-348, 1946.

Farr, H.K. : Multibeam Bathymetric Sonar : SEA BEAM and HYDRO CHART, *Mar. Geodesy*, 4, 77-93, 1980.

de Moustier, C. : Signal Processing for Swath Bathymetry and Concurrent Seafloor Acoustic Imaging, *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration*, 329-354, Canadian Gov't, 1993.

de Moustier, C. and Kleinrock, M.C. : Bath-

ymmetric Artifact in Sea Beam Data : How
to Recognize Them and What Causes
Them, *J. Geophys. Res.*, 91, 3407-3424, 1986.