



Title	四ビーム法による個体位置計測とターゲットストレングスのIn Situ推定
Author(s)	飯田, 浩二; IIDA, Kohji; 鈴木, 恒由 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 38(4), 375-383
Issue Date	1987-11
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/23973">https://hdl.handle.net/2115/23973</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	38(4)_P375-383.pdf



## 四ビーム法による個体位置計測とターゲットストレングスの *In Situ* 推定

飯田 浩二\*・鈴木 恒由\*

### Four-beam Echo Sounder System for *in Situ* Measurement of Position and Target Strength of Individual Fish

Kohji IIDA\* and Tsuneyoshi SUZUKI\*

#### Abstract

This paper describes a technique and implementation of the cross axis Four-beam echo sounder system to measure the position and the target strength of free swimming individual fish *in situ*. This technique is also applicable both for monitoring fish behavior under drifting conditions and to define spatial distribution of fish widely along the cruise and the target strength.

The technique described here uses a traditional transducer for transmission and four independent transducers for reception. Receiving transducers have no side-lobes which cross the Forward (F), Backward (B), Right (R) and Left (L) sound axes, respectively. Two perpendicular angles of the echo can be determined by the echo level ratio between F-B pairs and R-L pairs.

Consequently, the fish position can be calculated from these two angles and the echo delay and the target strength can be estimated from the echo level of any transducer by removing the beam pattern factor.

Field experiments were conducted in Lake Kuttara, many individual echoes of kokanee as typical echo patterns of each beam were recorded and identified. These data were analyzed and presented as 3-dimensional forms simultaneously with target strength.

#### まえがき

近年自然状態での魚のターゲットストレングスを推定しようとする試みが盛んである。自然状態で推定されたターゲットストレングスは、積分法を用いた計量魚探による資源量算出時の基本量となるばかりでなく、計数法における探知範囲推定の根拠となる。ターゲットストレングスの *in situ* 推定法の一つであるデュアルビーム法は、同軸の狭広2ビームを用い、各々の感度差を巧みに利用して指向性の影響を除去し、ターゲットストレングスを推定するものである<sup>1)</sup>。デュアルビーム法はその測定原理から、音軸からの魚の方位を測定することはできるが、その位置を特定することはできない。

これに対し、スプリットビーム法は一つの送波器と前後左右に隣合う独立した4個の受波器を用い、魚からのエコー波形の各受波器間での位相差を計測することによって、音軸からの魚の前後方位角と左右方位角を求め、これを基に指向性の影響を除去してターゲットストレングスを推定するものである<sup>2)</sup>。従って、スプリットビーム法では原理的に魚の位置を計測することが可能で

---

\* 北海道大学水産学部漁業測器学講座  
(Laboratory of Instrument Engineering for Fishing, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

ある。

しかしながら、個体からのエコー波形（搬送波）の位相差測定において、受波器群は互いに至近距離に配置されているため、これらに生ずる位相差は微小であり、その計測には搬送波周波数の数 10 倍以上の分解能が要求される。また位相差測定は、船体の動揺や魚の運動等の微小な位相変動の影響を受けやすい。さらに、単体エコー取得の必要性から方位分解能を極力上げることになるので、探知範囲が狭いという問題が生ずる。

以上のことから、本研究では、より広範囲の魚の空間的な分布位置や、魚の遊泳行動をモニタリングすることを主目的とした計測法を考案し、装置の試作とフィールド実験によってその有効性を検討した。

本方式は一個の送波器と音軸を前後左右に互いに斜交させた、独立した 4 個の受波器を使用する。このうち、前後方向の 2 個の受波器を前後対、左右方向の 2 個を左右対として用い、各受波器対における単体エコーのレベル比から、魚の方位角をそれぞれ測定し、魚の空間的な位置を求め、かつその方位情報を基に指向性の影響を除去してターゲットストレングスの推定を行うものである。

なお、本方式が個体の前後方向角と左右方向角を測定するのはスプリットビーム法と同様の考えに基づいているが、スプリットビーム法が個体エコーの位相差から方位計測を行うのに対し、本方式は斜交した 4 本の実ビームを用いて、個体エコーのレベル比から方位を求めようというものである。

本研究をまとめるにあたり、御助言を頂いた北海道大学水産学部教授佐野典達博士、装置の試作にご協力頂いた海上電機(株) 山谷恭三氏、倶多楽湖での実験に御便宜を計って頂いた虎杖浜漁業協同組合に感謝する。なお、本研究は昭和 61 年度科学研究費補助金（奨励研究 A）ならびに昭和 61 年度北海道新聞学術文化研究奨励金の援助によるものである。

#### 四ビーム法による個体位置計測と TS 推定の原理

今、図 1 において船底に装備されたトランスデューサの位置を原点とし、魚 (Target) が、水深  $V$ 、船のコースからの水平距離  $H$ 、前方距離  $J$  にいたとすると、トランスデューサから見た魚の位置は、魚の前後方向角  $\theta$ 、左右方向角  $\phi$  およびトランスデューサと魚の距離  $L$  で表すことができる。すなわち、

$$H = \frac{L \cos \theta \cdot \sin \phi}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \phi}} \quad (1)$$

$$J = \frac{L \sin \theta \cdot \cos \phi}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \phi}} \quad (2)$$

$$V = J \cot \theta = H \cot \phi \quad (3)$$

ここで、 $L$  はパルスエコー法で容易に測定できるが、 $\theta$  と  $\phi$  をどのように測定するかが本方式の特徴である。

まず、比較的指向性の広い送波器を用いて、鉛直方向に超音波パルスを送波する。魚からのエコーは送波器と至近距離に前後左右に傾けて配置された、独立した 4 個の受波器で受波される。受波信号はそれぞれ 4 チャンネルの増幅器を通して検波され、2 乗処理されてエコー強度波形が出力される。その際、超音波パルスの拡散や吸収にともなう距離減衰は TVG アンプで補正される。

今、サイドローブのない軸対称な受波器 F と B を、送波軸からそれぞれ  $\gamma$  傾けて配置すると (図 2)、これらの強度指向性関数  $b_F$  と  $b_B$  の比  $b_F/b_B$  は送波軸からの角度に対して単調増加 (また

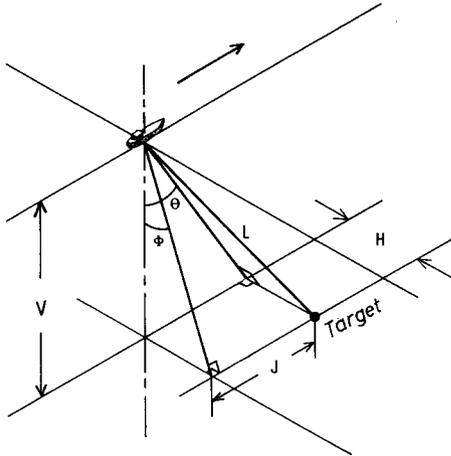


Fig. 1. Principles of measuring the position of individual fish. The target coordinates,  $V$ ,  $H$ ,  $J$  are calculated by measuring the two perpendicular angles  $\theta$ ,  $\phi$  and the distance  $L$  between ship and target.

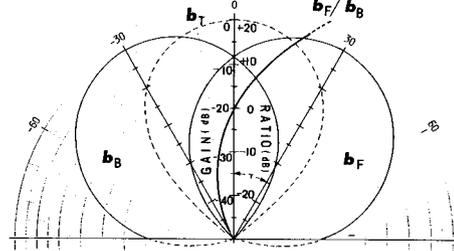


Fig. 2. Bearing measurement by the cross axis beam pair. The directivity function ratio of the two receiving transducers  $b_F/b_B$  is proportional to the direction of the echo.  $b_T$ : beam pattern of the transmitting transducer.  $b_F$ ,  $b_B$ : beam pattern of the receiving transducer (Forward and Backward).

は減少)を示す。さらに、 $b_F$  と  $b_B$  の形状を工夫し、交角  $\gamma$  を適当に選ぶと、これらの指向性関数比  $b_F/b_B$  の対数 (dB) が送波軸からの方位角 ( $\theta$  または  $\phi$ (deg)) に等しい特性を得ることができる。

$$10 \log \frac{b_F(\theta - \gamma, \phi)}{b_B(\theta + \gamma, \phi)} = \theta(\text{deg}) \quad (4)$$

$$10 \log \frac{b_R(\theta, \phi - \gamma)}{b_L(\theta, \phi + \gamma)} = \phi(\text{deg}) \quad (5)$$

さて、個体の音響散乱は次のソナー方程式で記述される。

$$I_E = I_0 + G - (40 \log r + 2\alpha r) + 10 \log b_T(\theta, \phi) + 10 \log b_E(\theta, \phi) + TS \quad (6)$$

ここで  $I_E$  は受波エコー強度、 $I_0$  は送波強度、 $G$  は受信部利得、 $r$  は魚までの距離で  $40 \log r$  は拡散減衰、 $2\alpha r$  は吸収減衰を表し、 $\alpha$  は媒質の吸収減衰係数である。また、 $b_T$  は送波器の、 $b_E$  は受波器の強度指向性関数で、 $TS$  を個体のターゲットレンジとする。

今、送波器 T から鉛直方向に送波したとき、前後左右にそれぞれ  $\gamma$  斜交させた受波器 F, B, R, L に受波される個体エコー強度はそれぞれ

$$I_F = K + 10 \log b_T(\theta, \phi) + 10 \log b_F(\theta - \gamma, \phi) + TS \quad (7)$$

$$I_B = K + 10 \log b_T(\theta, \phi) + 10 \log b_B(\theta + \gamma, \phi) + TS \quad (8)$$

$$I_R = K + 10 \log b_T(\theta, \phi) + 10 \log b_R(\theta, \phi - \gamma) + TS \quad (9)$$

$$I_L = K + 10 \log b_T(\theta, \phi) + 10 \log b_L(\theta, \phi + \gamma) + TS \quad (10)$$

但し、送波強度と受信部利得をまとめてシステムゲイン  $K$  とし、距離減衰は TVG アンプで完全に補正したとする。

ここで  $I_F$  と  $I_B$ 、 $I_R$  と  $I_L$  の差をとると式 (4)、(5) から

$$I_F - I_B = 10 \log b_F(\theta - \gamma, \phi) - 10 \log b_B(\theta + \gamma, \phi) = \theta \quad (11)$$

$$I_R - I_L = 10 \log b_R(\theta, \phi - \gamma) - 10 \log b_L(\theta, \phi + \gamma) = \phi \quad (12)$$

となり、先に示したように  $\theta$  と  $\phi$  を直接求めることができる。さらに、この  $\theta$  と  $\phi$  を用いて (7) 式の変形

$$TS = I_F - \{10 \log b_T(\theta, \phi) + 10 \log b_E(\theta, \phi)\} - K \quad (13)$$

から、 $TS$  が求められる。 $K$  はあらかじめ  $TS$  が既知の較正球を用いて決定しておく。なお、 $TS$  の算出は送受波器の指向特性が既知ならば (6)~(10) 式のいずれの変形式を用いてもよい。

こうして、魚までの距離  $L$ 、その前後方向角  $\theta$ 、左右方向角  $\phi$  およびターゲットストレンジス  $TS$  という 4 つのパラメータが求められる。

#### 四ビーム魚探の試作

試作した受波器の外形 (図 3) および指向特性 (図 4) を示す。本魚探で用いる受波器には ① 軸対称であること、② サイドローブがないこと、③ 特性が揃っていること、という 3 つの条件が不可欠であるが、試作した受波器の特性はこれをほぼ満たしている。

図 5 は前後対  $F$  と  $B$  の指向特性を解析したものである。なお、図中  $b_T$  は送波器の指向特性を表す。図から交角を 60 度 ( $\gamma = 30$  度) にすると、 $b_F/b_B$  (dB) は、ほぼ傾き 1 (dB/deg) の直線となる。たとえば、魚のエコーの強さが  $F$  で 10 dB、 $B$  で 20 dB のとき、 $I_F - I_B = 10 \log (I_F/I_B) = -10$  dB となり魚の方位角が  $-10$  度と測定される ( $\theta$  の決定)。同様に、これと直角な左右対  $R$  と  $L$  を用いて方位角  $\phi$  を求めることができる。

図 6 は試作魚探のブロック図である。送信部で作られた 50 KHz, 1 ms のパルス波は送波器  $T$  を駆動する。魚からのエコーは  $F, B, R, L$  の 4 つの受波器で受信され、それぞれ増幅、検波され、AD 変換器で送信部のトリガー信号に同期して 100  $\mu$ s の周期でサンプリングされる。なお、距離減衰補正回路である TVG アンプにはデジタル制御方式のものを使用し、1~100 m の範囲で

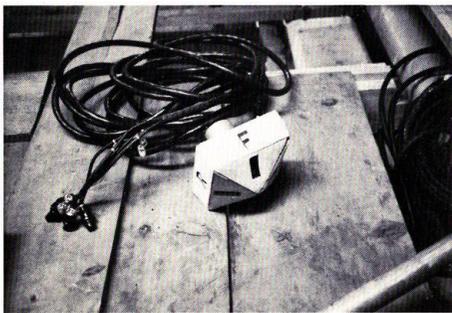


Fig. 3. The manufactured four beam transducer.

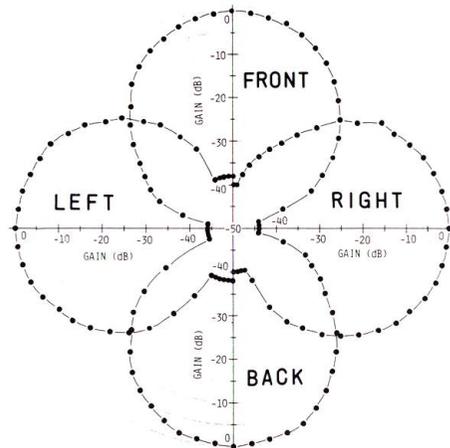


Fig. 4. Beam pattern of the cross axis four-beam transducer. Individual transducers are identical in axi-symmetry and no side-lobes.

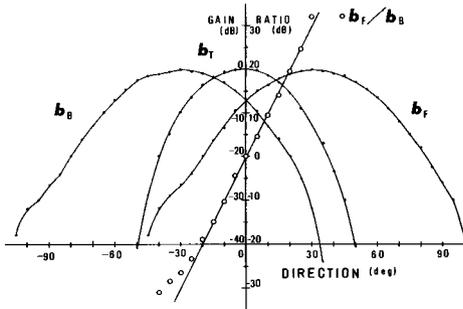


Fig. 5. Beam pattern analysis of the receiving transducer pair (F and B).  $b_f/b_B$  indicates the straight line with 1dB/deg as a slope.

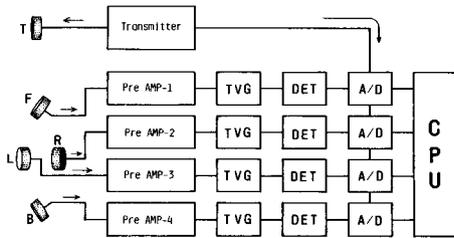


Fig. 6. Block diagram of the Four-beam echo sounder system. TVG: time varied gain amplifier, DET: envelope detector, A/D: analog to digital converter

F と B, R と L の対でそれぞれ減算を行い 2 つの方角  $\theta, \phi$  (deg) を得る。次に、あらかじめメモリ上に格納されている  $b_r(\theta, \phi)$ ,  $b_f(\theta, \phi)$ ,  $b_B(\theta, \phi)$ ,  $b_R(\theta, \phi)$ ,  $b_L(\theta, \phi)$  のテーブルを参照して (13) 式等からターゲットストレンジスを算出した。また、個体までの距離はサンプル番号から容易に計算でき、 $L, \theta, \phi, TS$  の 4 つのパラメータを求めた。

### フィールド実験とデータ解析

本方式の有効性を検討するため、1986年9月および11月に北海道倶多楽湖において同湖に生息するヒメマスの探知実験を行い、魚の位置計測、およびターゲットストレンジスの *in situ* 推定を試みた。図8は試作魚探によるヒメマスの記録例である。上から順に前方ビーム (F), 後方ビーム (B), 右方ビーム (R), 左方ビーム (L) である。同図は2値化表示を行っているため、いずれも40m以深はノイズレベルにマスクされているが、それぞれの記録に魚のエコーパターンの特徴が現れている。例えば、FとBを比べてみると、Fではほとんどのエコーが右上がりのパターンになっているのに対し、Bでは全てが右下がりである。これは前方ビームでは主に魚が近づきつつあるときに、後方ビームでは離れつつあるときに、探知されることを示している。また、右方ビームと左方ビームでは魚の方位に応じてエコーの強さが異なる。例えば魚が右方であればRビームでは強く、Lビームではそれより弱いかまたはまったく探知されない。

図9は図8の中央部を拡大して3D表示したものである。FとBの魚のエコーパターンにはそ

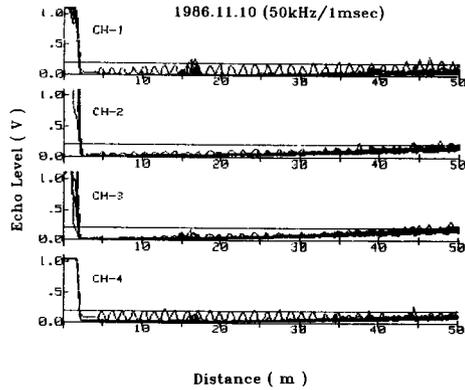


Fig. 7. Waveforms of echoes from a steel ball demonstrating the TVG processing.

±0.375 dB の精度を実現した。図7はこのTVGの特性を確認するため、鉄球をトランスデューサから鉛直方向に徐々に降ろしていったときの信号波形 (包絡線) を重ね書きしたものである。距離減衰が補正されていることがわかる。なお、感度の低い Ch-2 (B), Ch-3 (R) は後段のアンプで増幅率を上げてレベルを調整した。

演算部では、各チャンネルの最終的なレベル合わせを行った後、デシベル値に変換され、

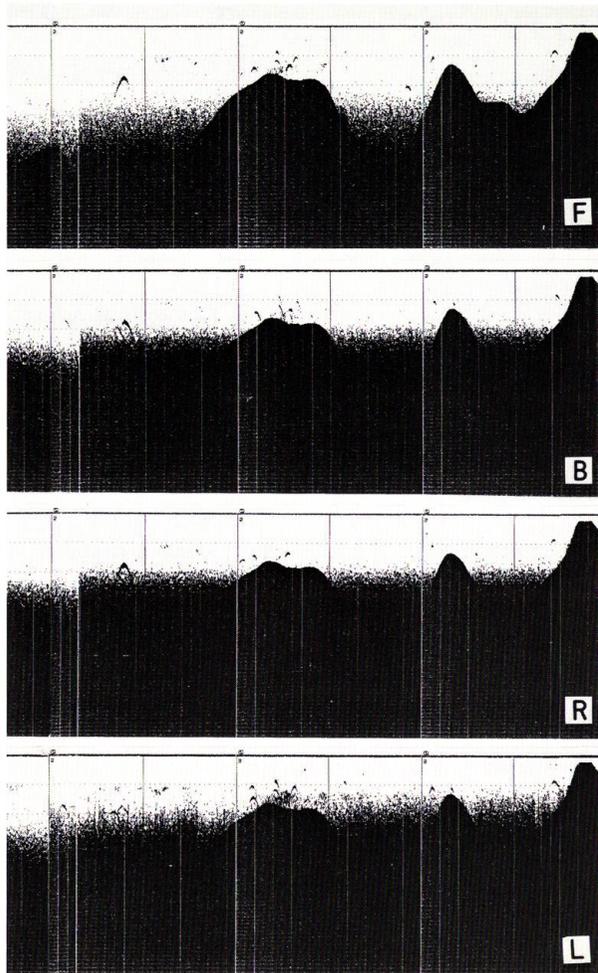


Fig. 8. Comparison of the echograms obtained by four beams (binary display).

の傾きの違いや時間的なずれがはっきり記録されている。RとLのパターンの違いは主に強さ(振幅)によるものであるが、エコー振幅の比がエコーの到来方向を示している。

そこで、これら魚の方位をより定量的に表現するため、FとB、RとLのレベル比をdB(この場合degに相当)で表した。図10はエコーの3D表示(Z), F/B(dB)(X), R/L(dB)(Y), およびターゲットストロングスTS(dB)(W)を同時表示したものである。なお、この記録はキャリブレーションのために、停船中鉄球を下降させている時のもので、それまで水深14m程にいた魚が一旦見えなくなり、鉄球を引き上げたところまた現れだしたものである。図からこの魚の動きを解析すると、魚は鉄球が近づいてきたので、船の後方、左方へ一旦逃避し、鉄球が引き上げられるとまたもとの方向に戻ってきたことがわかる。さらに、魚のTSが-41dBであることから体長約19cmと推定される<sup>3)</sup>。

図11は航走中の記録を解析したものである。F/Bプロット図(X)で(+ )から(-)にゼロ

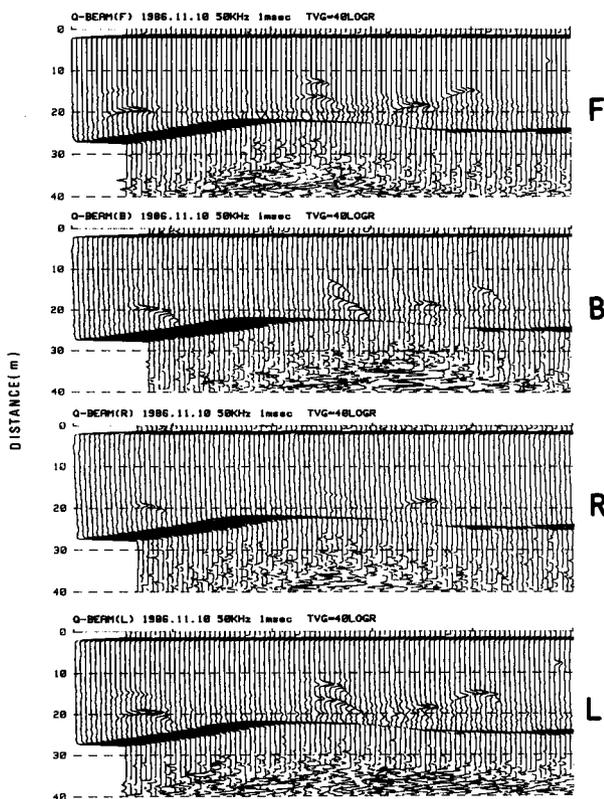


Fig. 9. Enlarged echograms obtained by four beams (3-dimensional display)

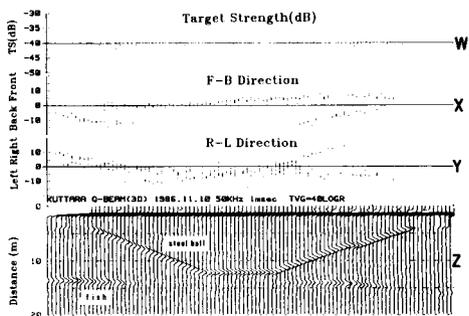


Fig. 10. Analysis of the echo obtained by a drifting ship.  
The curves of direction plots (middle columns) indicate the fish escape from the steel ball.

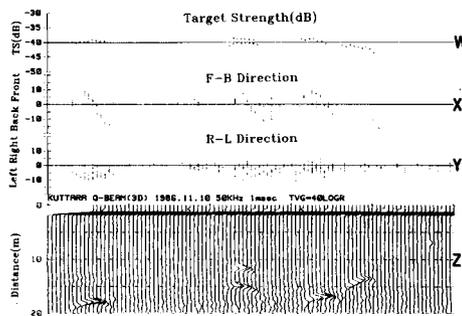


Fig. 11. Analysis of the echo obtained by a cruising ship.  
Zero crossing of the F-B plots is characteristic of a cruising ship.

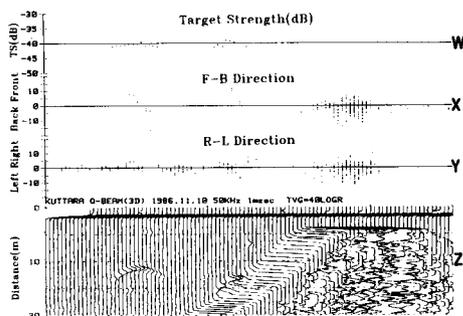


Fig. 12. Analysis of the echo obtained by a veering ship. Zero crossing of the R-L plots is characteristic of a veering ship.

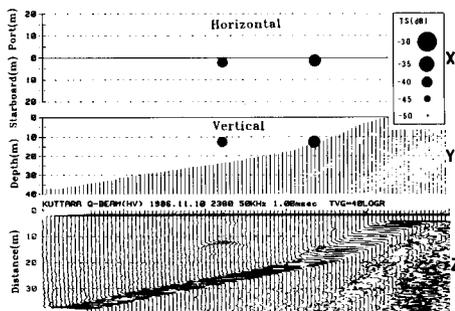


Fig. 14. Spatial expression of fish distribution with side view and top view (from Figure 12).

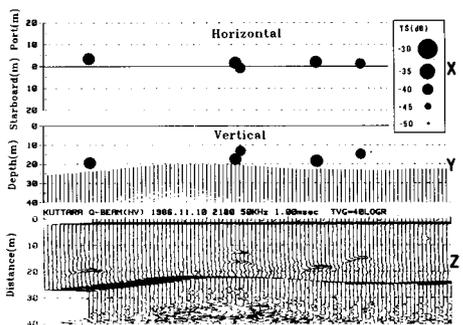


Fig. 13. Spatial expression of fish distribution with side view and top view (from Figure 11).

クロスしているのは魚が船の前方から後方へ移動していることを示す。R/Lプロット図(Y)では魚が左舷寄りに分布していたことを示している。TSは-39~-43 dBであり、体長は15~24 cmと推定される。

図12は調査船が減速しながら着岸するときを得られた記録である。R/Lプロット図(Y)で(+)から(-)にゼロクロスしているのは船が旋回しながら進んでいることを示す。TSは-40~-41 dBで体長16~17 cmと推定される。

図13はF/B, R/Lおよび距離情報を基に、魚探記録を垂直成分と水平成分に分解し、平面図(X)、側面図(Y)として表したものである。両図を対比して見ることにより、魚の立体的な分布位置を把握することができる。(Zは距離とエコー振幅を表す3Dプロットである。)この平面図では紙面の右方が進行方向となる。従って魚はコースの左側に多くいたことになる。側面図では魚の水深(垂直距離)を読み取ることができる。●印の大きさはターゲットストレングスを表している。

図14は同様に、着岸時の魚探記録を立体的に表したものである。魚が湖底付近に一尾いることがわかる。

このように四ビーム魚探を用いることによって、魚の立体的な分布位置がターゲットストレングスとともに計測することができ、その有効性が確かめられた。また、今回解析した個体エコー数が少ないので行わなかったが、本魚探では個体の位置がわかることから、人為的に探知範囲を設定することができる。従って、個体の絶対密度を求めることが可能であり、これも本方式の大きな特長といえることができる。

### 要 約

本研究では音響的方法により自然状態での魚の位置やターゲットストレングスを推定する計測

法を考案し、これを実現する四ビーム魚探の試作を行った。

計測法は、個体からのエコーを、音軸を前後左右に互いに斜交させた、独立した4個の受波器を用い、その前後対および左右対のエコーレベル比から個体の前後方向角と左右方向角を求めるものである。さらにその方位情報を基に、送受波器の指向性の影響を除去し、エコーレベルから直接ターゲットストレングスを推定することができる。本方式の特長は次の6点である。

① 個体の位置計測ができるので、調査コース付近の魚の立体的な分布状態や、停船時の魚の遊泳行動のトラッキングが可能である。② ターゲットストレングスの *in situ* 推定が可能である。③ 探知範囲が広い。④ 測定法が単純で、装置の構成が容易である。⑤ エコー信号の振幅情報を利用するので、小魚群の位置計測にも対応可能である。⑥ 個体の位置が明確なので個体エコー数から絶対密度を算出できる。

さらに試作した四ビーム魚探を用いて倶多楽湖のヒメマスの探知を試みたところ、各ビームにおけるエコーパターンに特徴的な違いが認められた。これを基に個体の位置およびターゲットストレングスを推定することができ、魚の遊泳行動のトラッキング、魚の立体的な分布状況、体長の推定に有効な情報を与えることが確認された。

## 文 献

- 1) Ehrenberg, J.E. (1974). Two Applications for Dual-Beam Transducer in Hydroacoustic Fish Assessment Systems, Proc. 1972 IEEE Conf. on Engineering in the Ocean Environment, 1, 152-155.
- 2) Ehrenberg, J.E. (1983). A review of *in situ* target strength estimation techniques. FAO Fish. Rep., (300), 85-90.
- 3) 飯田浩二 (1987). 魚群探知機を用いた倶多楽湖ヒメマスの資源と生態に関する研究, 昭和61年度倶多楽湖ヒメマス資源調査報告書, 31 p.