



Title	ファンビームを用いた高分解能魚群探知機
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), 384-392
Issue Date	1987-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23974
Type	departmental bulletin paper
File Information	38(4)_P384-392.pdf



ファンビームを用いた高分解能魚群探知機

飯田 浩二*・鈴木 恒由*

High Resolution Fan-beam Echo Sounder

Kohji IIDA* and Tsuneyoshi SUZUKI*

Abstract

Counting fish and measuring target strength acoustically requires resolving power high enough to identify an individual echoes. In general, bearing resolution is improved by increasing the aperture of the transducer, and ranging resolution is proportional to pulse width of the transmitted acoustic wave.

High resolution decreases the area where fish are detectable and it is difficult to realize a short acoustic pulse because of the high Q of a single element transducer.

The newly developed Fan-beam echo sounder system enables both high resolution and wide area of detection using transducer array techniques. The transducer has a long rectangular shape with a very sharp beam pattern along the long side and broader on the other side. Arraying hundreds of elements, consequently disperses the resonant frequencies and lowers Q of the transducer which results in a high resolution.

By setting this transducer's long-side parallel to the vessel's keel, the fan-shaped detectable cross section scans ahead and detects fishes widely while cruising.

Furthermore, by setting a secondary transducer at the other side of the vessel, it is possible to measure the time difference of the echo between these two transducers and to define the target direction and to estimate the target strength of fish by removing the beam pattern factor.

In experiments with the system at Lake Kuttara, numerous individual echoes from kokanee were detected with high resolution and the mode of the PDF of target strength (-44 dB) estimated *in situ* was in agreement with the mean size of kokanee (14 cm) caught.

まえがき

魚群探知機を用いて単体エコーの計数やターゲットストレングスの *in situ* (自然状態) 推定を行うためには、魚群密度に対し十分に高い分解能が要求される。

一般に、パルスエコー法では、距離分解能はパルス幅を短くすることによって、また方位分解能は指向性を狭めることによって向上する。短いパルスを電氣的に作成することは容易であるが、音響パルスの場合は電気音響変換器(トランスデューサ)の過度特性の影響をけるので現実的には制限される。また、指向性については原理的にトランスデューサの振動面を大きくすればするほど鋭くなり、方位分解能は向上する反面、同時に探知範囲が狭まるという問題が生ずる。

そこで本研究では、多数の振動子をアレイすることにより、トランスデューサを広帯域化し、パルス幅を短くして距離分解能を向上させるとともに、その指向特性を船の進行方向には非常に狭

* 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)

く、舷方向には広い扇状ビーム（ファンビーム）とし、高分解能で広範囲探知が可能なファンビーム魚探を試作、検討した。

さらに、第二のトランスデューサを付加することによって、ファンビーム内で探知される単体エコーの到達時間差を計測してその方位を求め、指向特性を補正してターゲットストレングスの *in situ* 推定を行った。

本魚探を北海道倶多楽湖で試用したところ、同湖のヒメマスが十分に高分解、広範囲で探知された。また本魚探で推定したターゲットストレングスの分布を捕獲魚の体長分布と比較し検討を行った。

本稿をまとめるにあたり、御助言頂いた北海道大学水産学部教授佐野典達博士、実験に御協力頂いた海上電機 ㈱ 山谷恭三氏ならびに虎杖浜漁業協同組合に感謝する。本研究は昭和 60 年度科学研究費補助金（奨励研究 A）の援助による。

トランスデューサアレイによるファンビームの形成

通常の魚群探知機に使用されるトランスデューサは、一般にその振動面が円形もしくは正方形に近い矩形である。したがって、探知範囲すなわちビームの形状はほぼ軸対称で円錐形に近いものとなる。このビームの方位分解能を向上させるためには、頂角の小さな円錐ビームを形成する必要がある。ところがビームを細くすることは、同時に魚の探知範囲を狭めることを意味する。

これを解決する一つの方法として細いビームを広範囲に走査するスキャニングソナーがあるが、そのトランスデューサや処理系は非常に複雑である。

本研究では送受信部の基本構成は従来型魚探と同様とし、指向性の形状を工夫して、この問題を解決する方法を考案した。

まず、魚探が常に航走中使われることを前提に、船の進行方向には非常に狭く、舷方向には広い指向性を有するファンビームを形成する。したがって、従来の円錐状ビームに比べると、同一距離にある複数の個体を分解する能力、すなわち方位分解能が向上する。方位分解能が向上した反面、一度に探知される範囲は減少するが、このファンビームをビーム面と直角な方向に移動することによって、広い探知範囲を得ることができる（図 1）。

トランスデューサの指向特性は振動面の形状と大きさおよび波長で決定される。たとえば、円形振動子の場合、その振動面半径を a とすると指向性関数 $D(\theta)$ は

$$D(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (1)$$

ここで θ は音軸からの角度であり、 k は波長定数 ($k=2\pi/\lambda$, λ は波長)、 J_1 は第一種第一次のベッセル関数である。

一方、矩形振動子の場合は、その振動面の大きさを $2b_1 \times 2b_2$ とすると、音軸で直交する二平面における音軸からの角度 θ_1, θ_2 を用いて、

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin(kb_1 \sin \theta_1)}{kb_1 \sin \theta_1} \cdot \frac{\sin(kb_2 \sin \theta_2)}{kb_2 \sin \theta_2} \quad (2)$$

(1), (2) 式に示される指向性関数は音軸で最大値 1 をとり、軸からの角度の増加とともに波打ちながら減少していく。この減少の割合は、波長 λ に対する振動面の大きさに比例する。すなわち、 a や b_1, b_2 を大きくするほど指向性は鋭くなり、小さくすると広がる。したがって、先に述べたファンビームの実現のためには船の進行方向には長く、舷方向に短い矩形振動子を用いればよい。ただし、このような大型のトランスデューサを単一振動子で実現することは困難であるので、小

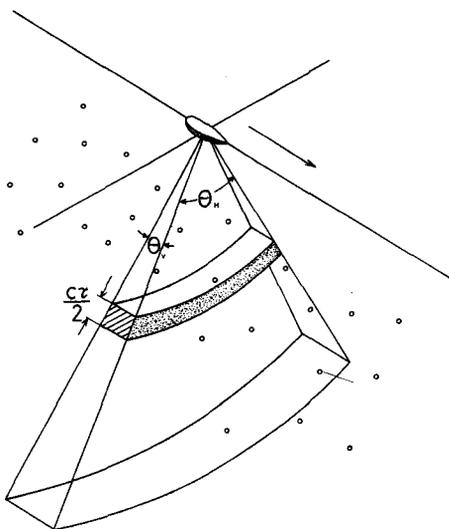


Fig. 1. Basic conception of fish detection with high resolution by a Fan-beam echo sounder. Small $cr/2$ and θ_v result in high resolution and large θ_H enables the beam to detect fishes widely.

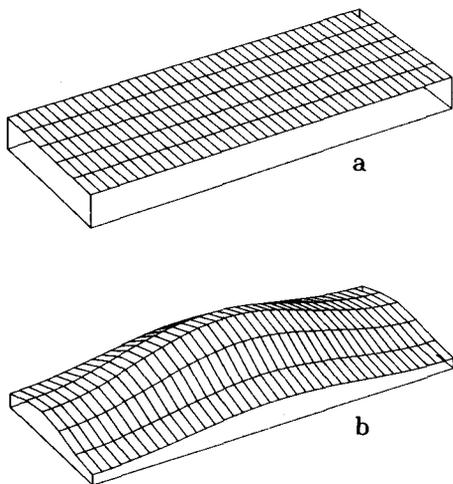


Fig. 2. Amplitude distribution of sound pressure on the arrayed transducer. a: without shading b: with shading

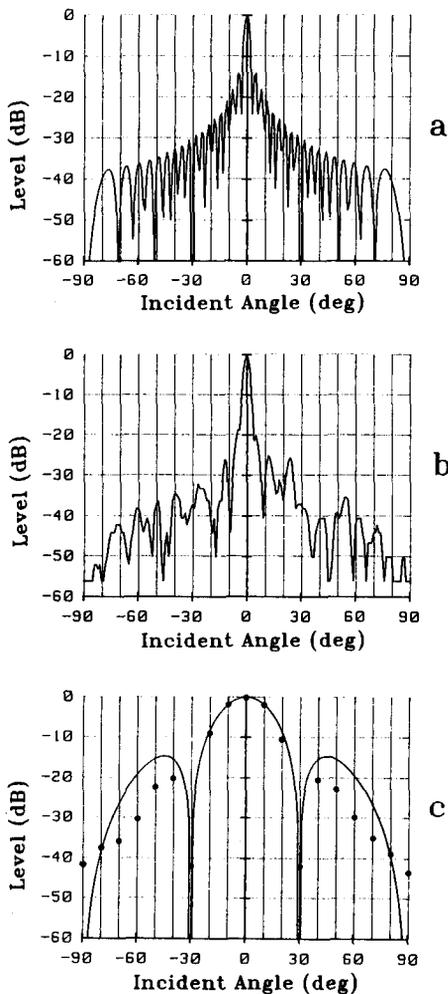


Fig. 3. Suppression of side-lobes by shading. The effects of side-lobe suppression by shading are 11 dB for θ_1 , and 5dB for θ_2 . a: Theoretical beam pattern in fore-aft aspect (θ_1), without shading. b: Measured beam pattern in fore-aft aspect (θ_1), with shading. c: Theoretical beam pattern (solid line) in port-starboard aspect (θ_2), without shading and measured (dots) with shading.

型振動子を多数アレイ（配列）して作る必要がある。

振動子を隙間なく平面上に配列してできるトランスデューサアレイの同相合成指向特性は、アレイの開口と同一の振動面をもつ単一振動子の指向特性に等しい。したがって、アレイの指向性関数 $D(\theta_1, \theta_2)$ は

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin\{(\pi L_1/\lambda)\sin \theta_1\}}{(\pi L_1/\lambda)\sin \theta_1} \cdot \frac{\sin\{(\pi L_2/\lambda)\sin \theta_2\}}{(\pi L_2/\lambda)\sin \theta_2} \quad (3)$$

ここで L_1, L_2 はアレイの辺の長さ、 θ_1, θ_2 は矩形振動子の場合と同様である。

本研究では周波数 50 kHz, 15×15 mm の矩形振動子を 200 個用いて 40 列×5 段、約 60 cm×7.5 cm の矩形アレイを製作した。(3) 式を用いて計算すると、3 dB 低下点のビーム幅は狭方向（進行方向）で 2.5°、広方向（舷方向）で 20.5° となる。

一方、(3) 式から $\theta = \sin^{-1}(4.5\lambda/\pi L)$ のときに、 $D(\theta)$ は極を有し、これが指向特性におけるサイドローブとなって現れ、方位分解における障害となる。

本研究では、アレイの中央部から両端にかけて徐々にその感度が低下する重みづけ、すなわちシェーディングを行ってサイドローブの抑圧に努めた¹⁾。

図 2.a はシェーディングをかけない時、図 2.b はシェーディングをかけた時のアレイトランスデューサの音圧振幅分布を示したものである。こうして作成したアレイトランスデューサの指向性の計算値と実測値を図 3.a~3.c に示す。

シェーディングを施さないアレイトランスデューサの狭方向の指向特性（図 3.a）のビーム幅（-3 dB 点）が 2.5°、第 1 サイドローブの抑圧比が -14 dB なのに対し、シェーディングを施したアレイトランスデューサのビーム幅が 4.4°、サイドローブ抑圧比 -25 dB とビーム幅が若干広がっているが、サイドローブの抑圧比は約 11 dB 改善されている（図 3.b）。また広方向の指向特性（図 3.c）から、シェーディングによりサイドローブが 5 dB 程改善され、指向幅（約 33°）への影響はないことがわかる。

魚群密度と分解能

魚探の分解能には前項で述べた方位分解能のほかに、同一方位で距離の異なる複数の魚を分離する能力すなわち距離分解能がある。距離分解能 δ はパルス波がパルス幅 τ の時間内に往復できる距離であるから、

$$\delta = c\tau/2 \quad (4)$$

で表される。 c は水中音速である。したがって、距離分解能を良くするためには、パルス幅を短くすればよい。ところが魚探のトランスデューサは機械的共振を利用しているため、振動子のリングングに伴う音響パルスの伸びが予想される。たとえば、周波数 50 KHz, 水中音速を 1500 m/s とすると、75 cm の距離分解能を実現するためには (4) 式から 1 ms のパルス幅が必要となる。1 ms のパルスを忠実に作成または再生するためには、トランスデューサおよび送受信部には、 $2/\tau$ すなわち最低 2 KHz の帯域幅 B が必要となる。

$$B = 2\tau^{-1} \quad (5)$$

一方、共振系の帯域特性を表す「 Q 」は共振周波数 f_0 とその帯域幅 Δf との比で定義される。

$$Q = f_0/\Delta f \quad (6)$$

ここで Δf は -3 dB の帯域幅である。したがって、先の例でいえば Q が 50 KHz/2 KHz = 25 以下

の広帯域化が必要となる。送受信部の電気系では広帯域化が比較的容易であるが、一般に単一振動子 (PZT) の Q は 25 程度であり、(5), (6) 式から逆算するとパルス幅は 1 ms が限界となる。そこで、本研究では多数の振動子をアレイし共振周波数を分散させることで $Q=13$ を実現した。したがって、(5), (6) 式から約 0.5 ms のパルスが忠実に作成、再生できることになる。本装置では、最終的にパルス波の受信部における 90% の立ち上がり時間が 0.1 ms 以下の特性を得た。

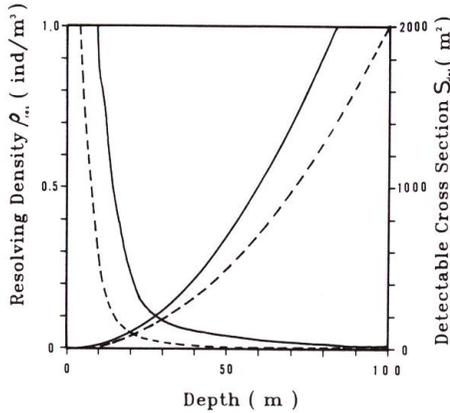


Fig. 4. Detectable cross section and resolvable critical density. Fan-beam (solid line) is more resolvable and has wider detectable area than a conical beam (broken line).

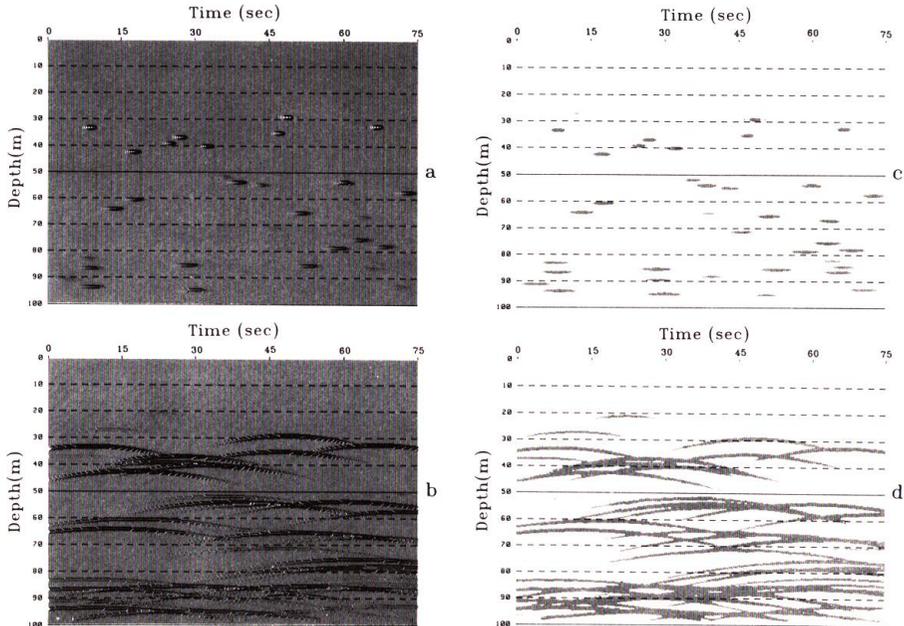


Fig. 5. Echograms of Fan-beam and conical beam by computer simulation. Simulation condition are: fish density 1.0×10^{-4} ind/m³, ship speed 1 m/s, ping rate 4 Hz, TS of fish -40 dB at 50 KHz. Using fan-beam transducer (600 mm \times 60 mm), 3-dimensional display (a) and binary display (c), also conical-beam transducer (60 mm ϕ), 3-dimensional display (b) and binary display (d).

方位分解能 θ_V , θ_H と距離分解能 $c\tau/2$ がつくる分解体積 V_{res} は近似的に

$$V_{res} = \frac{2\theta_V\theta_H}{3\pi} \left\{ \left(r + \frac{c\tau}{4} \right)^3 - \left(r - \frac{c\tau}{4} \right)^3 \right\} \quad (7)$$

ただし r はトランスデューサからの距離, θ_V , θ_H はファンビームのビーム幅 (rad) である。ここに $\tau=0.5$ ms, $c=1500$ m/s, $\theta_V \doteq 4.4^\circ$, $\theta_H \doteq 33^\circ$ を代入すると与えられた水深における分解可能な魚の密度 (臨界密度) ρ_{res} ($=V_{res}^{-1}$) が求められる。図4に探知断面積と本魚探の臨界密度特性 (実線) を示す。

比較のために、本トランスデューサの短辺と同じ直径の円形トランスデューサを使用した場合の臨界密度特性 (破線) を示した。これより、ファンビームを用いることによって探知範囲が減少することなく、かつ高分解能が保たれていることがわかる。図5.a~図5.dはファンビーム魚探 (矩形トランスデューサ, 60 cm×7.5 cm) と従来型魚探 (円形トランスデューサ, 75 mmφ) を同一条件 (周波数 50 KHz, パルス周期 0.25 s, 船速 1 m/s) で用い、 $TS=-40$ dB の魚を 1×10^{-4} 尾/ m^3 の密度でランダムに分布させたときに得られる魚探画像をシミュレーションしたものである。a, b は3次元表示, c, d は2値化表示による。

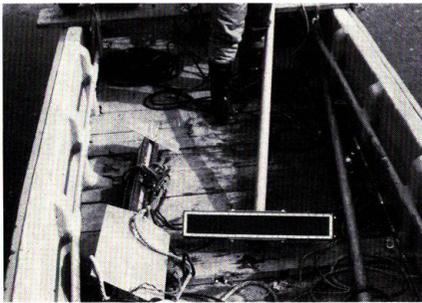


Fig. 6. The Fan-beam transducer.
The transducer was setting with the long side parallel to the vessel's keel.

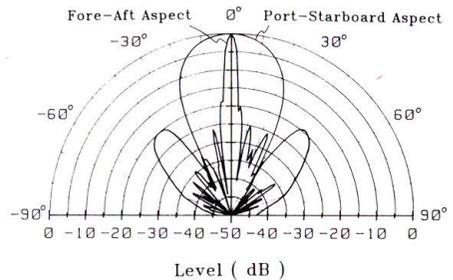
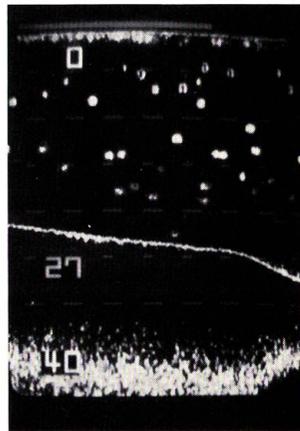


Fig. 7. Beam pattern of the Fan-beam transducer. Both angles of half power points are 4.4 degrees in wide aspect and 33 degrees in narrow aspect.

Fig. 8. Echograms obtained by the Fan-beam echo sounder in field experiments. Numerous individual echoes of kokanee in Lake Kuttara were recorded (photograph of the color CRT display).



b) の従来型魚探では単体エコーが重複しているが, a) のファンビーム魚探では完全に分解されている。また, 両者の探知個体数はほとんど差がなく, 広い探知範囲を有していることがわかる。試作したファンビームトランスデューサの外形 (図 6) と, 指向特性 (図 7) を示す。図 8 はこれを用いて倶多楽湖のヒメマスを探知したときに得られたカラーディスプレイ上の記録例である。記録されたヒメマスの単体エコーパターンがいわゆるコメット型でなく, 直線型であるのがファンビーム魚探の特徴である。

時間差計測によるターゲットストレングスの *In Situ* 推定

ファンビーム魚探で探知される個体からのエコーは次のソーナー方程式で記述される。

$$I_r = I_0 \frac{\exp(-2\beta r)}{r^4} D^4(\theta_1, \theta_2) \sigma_{bs} \tag{8}$$

ここで I_r は受波エコー強度, I_0 は送波強度, r は魚までの距離, β は吸収減衰係数で $1/r^4$ は拡散減衰を, $\exp(-2\beta r)$ は吸収減衰を表す。 $D^4(\theta_1, \theta_2)$ は往復 (送受) の指向性関数, σ_{bs} は後方散乱断面積でデシベルで表したターゲットストレングス TS との間には次の関係がある。

$$TS(\text{dB}) = 10 \log \sigma_{bs} \tag{9}$$

(8) 式において I_0 は既知だから, σ_{bs} すなわち TS を求めるためには距離減衰を補正した上で, エコーの方位 θ_1, θ_2 を知り指向性関数 $D^4(\theta_1, \theta_2)$ を補正すればよい。

いま, ファンビームトランスデューサから横方向 (舷方向) に一定距離隔てて設置した第二のトランスデューサを用いると, 両トランスデューサ間での単体エコーの到達時間差から魚の方位推定が可能となる。すなわち, 図 9.a において R_1 をファンビームトランスデューサ, R_2 を第二のトランスデューサとし, その距離を l とする。魚のエコーはファンビームの軸断面が魚を通過した

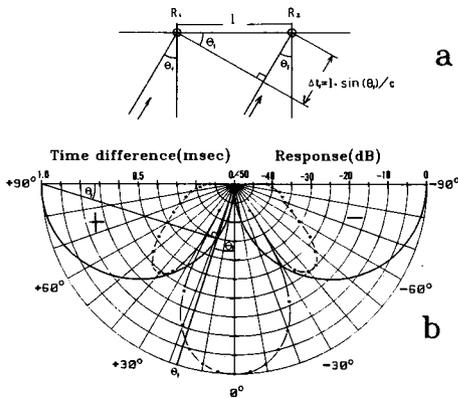


Fig. 9. Principles of *in situ* TS estimation by measuring the time difference of the echo. a: Between the fan-beam transducer (R_1) and the secondary transducer (R_2) with distance l , the time difference Δt_f from the target with bearing θ_f will be measured. b: knowing the echo bearing will correct the beam pattern factor, then the target strength of fish can be estimated.

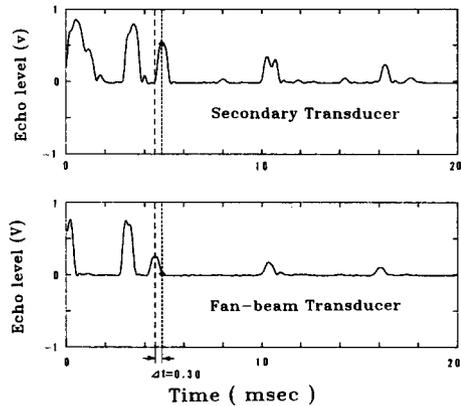


Fig. 10. Envelope waveforms of the individual echo received by two transducers. The echo of the fan-beam gains 0.3 msec against the secondary transducer, so the bearing of the echo is estimated as +18 degrees (refer to figure 9. b).

とき最大レベルとなり、このとき $\theta_1=0$ となる。魚が十分遠方でありその舷方向の方位を θ_f とすると ($\theta_2=\theta_f$)、魚と R_1 および R_2 間には $l \sin(\theta_f)$ に相当する時間差 Δt が生ずる。すなわち

$$\Delta t = \frac{l \sin(\theta_f)}{c} \quad (10)$$

ここで c は水中音速である。図 9.b はファンビームの舷方向の指向特性と Δt (最大値で正規化したもの) の関係を表したダイアグラムである。すなわち、魚のエコーに Δt の時間差を測定したとすれば (10) 式から魚の方位 θ_f が求る。さらに方位 θ_f に対するファンビームのレスポンス G_f 、すなわち (8) 式における $D^4(0, \theta_f)$ が求められるから、(9) 式により魚のターゲットストレングスが計算される。

本実験ではトランスデューサ間距離 l を 1.5 m とし、第二のトランスデューサとして 60 mm ϕ の円形振動子を用いた。両トランスデューサでのエコー波形を図 10 に示す。上が第二のトランスデューサ、下がファンビームトランスデューサによるものである。同図は両者のエコーの時間差が +0.3 ms であることを示している。したがって、(10) 式または図 9.b から魚の方位 θ_f が約 +18° と推定される。また、このときファンビームの指向性利得は -9 dB であるから (8), (9) 式から魚のターゲットストレングスが計算される。

図 11 は両ビームで受波されたエコー波形 (包絡線) の相互相関関数の変化を示したものである。刻々と現れる単体エコーがさまざまな時間差、すなわち方位から到来していることを示している。

図 12 は 1985 年 10 月に倶多楽湖のヒメマスの調査で得られた 112 個の単体エコーのターゲットストレングスをこの方法で解析したものである。同時期に捕獲したヒメマスの平均体長は 14 cm であった。体長 L と TS の間には一般に

$$TS \text{ (dB)} = 20 \log L + A \quad (11)$$

なる関係があるが、同湖ヒメマスの TS の制御測定から得た $A = -26.7$ dB (ピッチ角平均) を用いると²⁾、平均体長 14 cm は $TS = -43.8$ dB に相当し、図 12 の TS のモード -44 dB に近い。このことは試作したファンビーム魚探が体長分布の推定にも有効なことを示している。

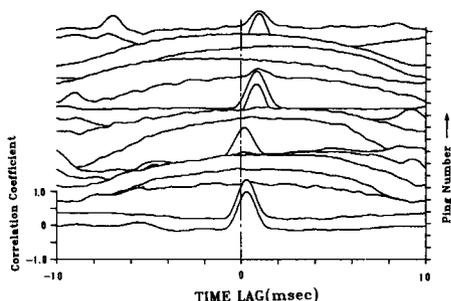


Fig. 11. Running cross correlation function of the echo waveforms in two transducers. The time differences are varying so the echoes are coming from every direction in the fan-beam.

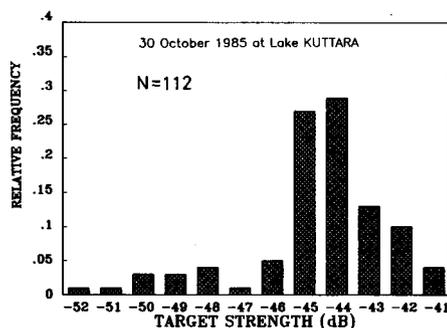


Fig. 12. PDF of the target strength estimated *in situ*. The mean length of kokanee caught by nets was 14 cm and converting the TS by the formula ($TS \text{ (dB)} = 20 \log L \text{ (m)} - 26.7$)²⁾ correspond to the mode of PDF (-44dB).

要 約

魚群探知機で個体の探知を行う場合、魚群密度に比べて高い方位および距離分解能が要求される。従来の魚探では方位分解能はトランスデューサの開口を大にすることで向上するが、同時に探知範囲が狭まる。また単一振動子を用いたものでは Q が高く、パルス幅すなわち距離分解能が制限される。

本研究では多数個の振動子をアレイすることにより進行方向と直角なファンビームを得、高い方位分解能と距離分解能および広い探知範囲を実現した。

さらに、第二のトランスデューサを併用してファンビーム内の魚の方位を知り、ターゲットストレングスを直接推定する方法を考案した。

試作魚探を倶多楽湖のヒメマスの調査に用いたところ、多数の単体像が得られ、推定したヒメマスの TS 分布のモードは -44 dB であった。この値は捕獲魚の平均体長 14 cm から換算した平均 TS -43.8 dB とほぼ一致し、広範囲、高分解能探知の他に体長推定の可能性を示すものであった。

しかしながら、現在のシステムでは魚の探知範囲が定量化できないため、課題であった密度の推定ができない。また、当然のこととして、ファンビーム内の方位分解ができず、今後改良すべき点として残された。

文 献

- 1) ユーリック R.J. (1978). 水中音響の原理, 土屋 明 訳, 共立出版, 414 p.
- 2) 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.