

魚群探知機記録の解析 - VII

魚の遊泳速度

柴田 恵 司

Analysis of Fish-Finder Records - VII

Swimming speed of fish

Keishi SHIBATA

Abstract

An echogram from an ultrasonic fish-finder appears to be an acoustic section of the sea, showing the distribution of fish in great detail from the surface to the deep⁶⁾. Therefore, the analysis of information obtained by a fish-finder for the purpose of studying the ecology of fish, i. e. size, abundance, swimming depth and speed of fish, is very important matter for fishermen. This paper deals with the method of estimation of swimming speed of fish from echo trace of vertical fish-finder.

Equations for estimating the swimming speed of fish are as follows.

1) General solution

$$V_F = \frac{-h_1 \cdot \cos \alpha - V_s \cdot t \cdot \sin \alpha + \sqrt{h^2 \cdot \cos^2 \alpha + (V_s \cdot t)^2 \sin^2 \alpha - 2h \cdot V_s \cdot t \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha - h^2 + h_1^2 - (V_s \cdot t)^2}}{t}$$

$$2) \text{ When swimming direction is only horizontal, } \alpha = \pi/2, \quad V_F = \frac{\sqrt{h^2 - h_1^2}}{t} - V_s$$

$$3) \text{ When swimming direction is only vertical, } \alpha = 0, \quad V_F = \frac{\sqrt{h^2 - (V_s \cdot t)^2} - h_1}{t}$$

where, V_F and V_s are the speed of fish and fishing boat per unit time respectively, α is the subtended angle of swimming direction to perpendicular, h_1 and h , respectively are the depths at the beginning of recorded echo trace of individual fish and the shallowest depth recorded on it. and t is the time required between h_1 and h .

The author analyzed the data of acoustic observations made in the Northwestern Pacific Ocean from 1961 to 1966 through use of a fish-finder installed on Nagasaki-Marui of Nagasaki University and estimated the speed of tuna crossing the sound beam of the 14 kc fish-finder. The speed of tuna like fish ranged from 0.05 knot to 15 knots but mostly from 0.05 to 4 knots.

まえおき

航走中下向け魚探で得られる記録は、海洋における音響散乱体の鉛直分布であり、これらの記録を音響学的考察により生物学的鉛直分布に置換えることが本研究の目的である。魚探記録から魚体に関するより多くの情報を取り出すことは漁業上極めて重要であると考える。

一般に漁業者は魚探記録から、魚体の分布の有無およびその深度を知ることによって漁場の判断を行なっている。

前報²⁾に述べた如く個体魚記録を更に検討することにより、魚体寸法および分布密度を推定する方法について述べたが、本報告において個体魚記録から、遊泳速度を推定する方法および若干の試算の結果について報告する。

解析の方法

1. 静止した個体魚記録の型について

超音波ビームの中心を通る個体魚の記録の型は使用魚探の周波数 f 、発振出力 P_{s1} 、振動子直径 $2a$ (正方形の場合辺の長さ) および魚の深度 h 、魚の反射損失 (全長および体幅が定まれば近似的に算出し得る) L_p 、魚および船の速度 V_F V_s が得られれば、作図し得る。即ち振動子の形が円形であれば、超音波ビームの拡がりは深度 h における水平面において振動子位置から鉛直

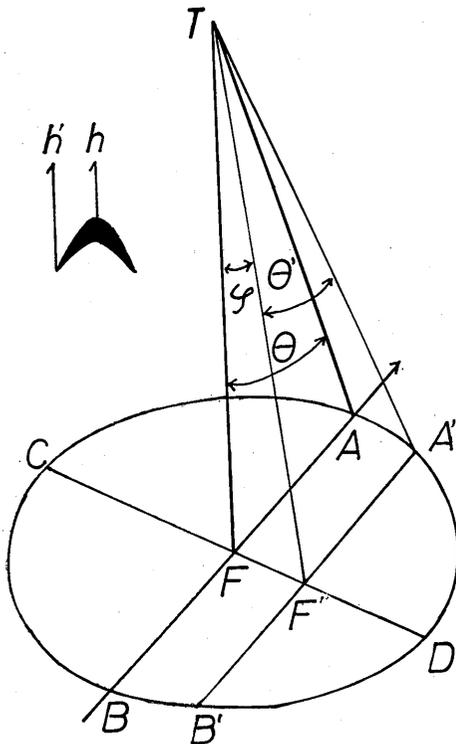


Fig. 1 Change of echo trace of individual fish by crossing points in the sound beam; TF: h , true depth of fish; TF': h'' shallowest depth on the echo trace of fish crossed sound beam off main axis; TA: h' , depth of fish trace at the beginning of recording, when the transducer surface is square or disk, TA=TA' B to A: steaming direction of ship; $\angle FTA = \theta'$, $\angle F'TA' = \theta'$, $\angle F'TA = \varphi$, $\frac{TF}{TA} = \frac{h}{h'} = \cos \theta$ \therefore echo margin of fish passed on sound axis: $M_F = 40 \log_{10} R(\theta)$ by the same method, echo margin of fish which passed off sound axis: $M_F' = 40 \log R(\varphi)$, but approximately from the information on echo trace echo margin of such a case is shown as $M_F' = 40 \log R(\theta') = 40 \log R(\theta, \varphi)$.

where $\theta' = \cos^{-1} \frac{h''}{h'}$, $\frac{h''}{h'} = \frac{TF'}{TA}$

$\cos \theta' = \frac{h \sec \varphi}{h'} = \cos \theta \sec \varphi$

$R(\theta) = \frac{\sin \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta}{\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta}$, λ : wave length

in sea water, $2a$: dimension of square transducer, α : subtended angle between main axes and direction of fish

下方の点（主軸上）Fを中心として円形を画く。又振動子が正方形の場合も近似的に円と考えることが出来る（長崎丸14KCの場合）。

上の諸条件においてこの魚からの受波音圧 PR は $20 \log_{10} PR = 20 \log_{10} P_{S1} - (40 \log_{10} h + L_p + 2\alpha h + 40 \log_{10} R) \dots (1)$ この式において魚の存在する方向と主軸との挟角が $\theta = 0$ の時 $R=1$ であり R は $R=0$ まで変化する。独立した魚体の記録は $20 \log_{10} PR = 0$ なる時記録が始まり記録が終る。従って(1)式にこの条件を代入すれば $20 \log_{10} P_{S1} - (40 \log_{10} h + L_p + 2\alpha h) = -40 \log_{10} R \dots (2)$ $-40 \log_{10} R$ は主軸上における距離 h の反射損失 L_p なる魚の Margin に等しい。

この式から得られた R の値に相当する角を θ とすれば、振動子を中心とし、角 θ で深度 h の水平面上に画いた円が、この魚が記録される範囲となる。この範囲は深度 h の平面上で考えれば中心 F から $h \tan \theta$ の半径で画かれた円となる。

Fig 1 に示した円形の平面において船の進行方向の直径を AB、これと平行な任意の弦を A' B' とし、これに直交する直径を CD とすると航行中記録を行なう場合、この円がそのまま進行すると考えればよいかから、最も浅く記録される点（最も大きな Margin を示す点）は魚が CD 上にある時である。

CD 上の任意の点下におけるこの魚のマージン MF は Fig.1 において $\angle FTF' = \varphi$ (振動子からの魚の方向と超音波主軸 TF とのなす角) とすると $MF = 40 \log R(\varphi)$ 。
 $R(\varphi)$ の変化する範囲は $1 > R(\theta)$ であり $0 \leq \varphi \leq \theta$ の範囲であり、進行方向に直角な直径と円周との交点で $40 \log R(\theta) = 40 \log R(\varphi)$ となりマージン MF = 0 になる。

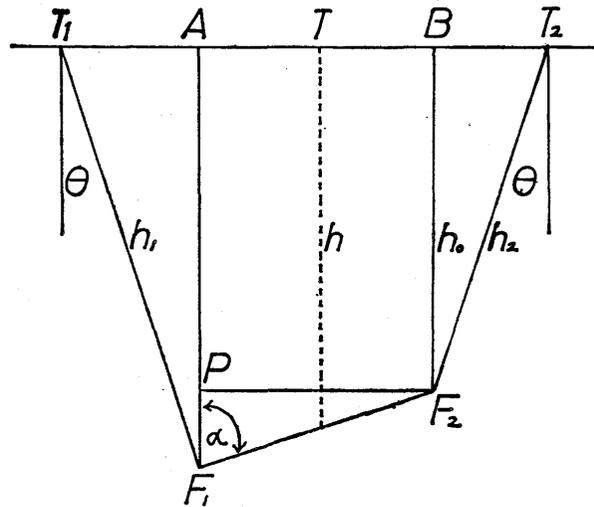


Fig. 2 Change of recorded depth with movement of fish and fishing boat on the echo trace of individual fish ;

T_1 to T_2 : steaming direction of ship (horizontal)

F_1 to F_2 : swimming direction of fish (not necessarily horizontal)

$V_F \cdot t = F_1 F_2$, $V_S \cdot t = T_1 T_2$

$$2\theta = \cos^{-1} \frac{h+1/2(h_1-h_2)}{h_1} + \cos^{-1} \frac{h-1/2(h_1-h_2)}{h_2}$$

$$V_F \cdot t \sin \alpha = PF_2 = AB = V_S \cdot t - h_1 \sin \theta - h_2 \sin \theta$$

$$V_F \cdot t \cdot \cos \alpha = F_1 P = (h_1 - h_2) \cos \theta$$

個体記録における見かけ上の深度 (最も浅く記録される深度) を h' とすれば

$$h' = h \tan \varphi$$

従って h' は $\varphi = 0$ で最小値となり $\varphi = \theta$ で最大値 $FF' = FA' = r = h \tan \theta = h' \sin \theta$

又単位時間当り紙送り速度 n , 魚と船の速度をそれぞれ V_F, V_s とすれば, 記録の脚の開き B は

$$B = \frac{2nh\sqrt{\tan^2\theta - \tan^2\varphi}}{V_s + V_F} \dots\dots\dots(3)$$

円周上の $\theta = \varphi$ の点で零となり中心 F で

$$h \tan \theta = r, B = \frac{nh \tan \theta}{V_s + V_F} \dots\dots\dots(4)$$

2. 遊泳速度の算定法

Fig. 2 に示す如く任意の深度 h にある魚が鉛直方向に関し, 角 α の方向に速度 V_F で移動し, 船もこの魚と同一鉛直平面上を航走し, この魚を t 時刻の間に記録し得たとする。この間, 記録紙上において記録始めの深度 h_1 , 記録終りの深度 h_2 および, 最も浅く記録された深度を h_0 とし, h_1 および h_2 の間の水平距離を記録紙上において, B_{mm} あったとすると $\{B = nt, n$: 紙送り速度 (mm) $\}$

$$V_F \sin \alpha = V_s - \frac{(h_1 - h_2) \sin \theta}{t} \dots\dots\dots(5)$$

$$V_F \cos \alpha = \frac{(h_1 - h_2) \cos \theta}{t} \dots\dots\dots(6)$$

一般に $V_F \cos \alpha$ の場合が多いから, 最も浅く記録された深度を h とすれば h_1 を記録した時の魚の深度 h_1 は

$$h_1 = h_0 + V_F \cos \alpha \frac{t}{2}$$

$\cos \theta$ は一般に $1 > \cos \theta > 0.94$ の範囲にあるから近似的に $h_1 = h_0 \pm \frac{1}{2}(h_1 - h_2)$ とおける, 従って

$$\cos \theta = \frac{h_0 - \frac{1}{2}(h_1 - h_2)}{h_1} \quad \text{or} \quad \frac{h_0 + \frac{1}{2}(h_1 - h_2)}{h_2} \dots\dots\dots(7)$$

$V_F \cos \alpha$ の速度を有しない記録の場合, 常に

$$\cos \theta = \frac{h}{h_1}$$

又, 以上の関係を θ を用いない式で表わすと次の様になる。但し此の式において h は(7)式における h_0 である。

$$V_F = \frac{-(h_1 \cos \alpha + V_s t \sin \alpha) + \sqrt{h^2 \cos^2 \alpha + (V_s t)^2 \sin^2 \alpha - 2h V_s t \sin \alpha \cos \alpha - h^2 + h_1^2 - V_s^2 t^2}}{t} \dots\dots\dots(8)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad \text{水平方向のみに移動する時} \dots\dots V_F = \frac{\sqrt{h_1^2 - h^2}}{t} - V_s \dots\dots\dots(9)$$

$$\alpha = 0 \quad \text{鉛直方向のみの移動する時} \dots\dots V_F = \frac{\sqrt{h^2 - (V_s t)^2} - h_1}{t} \dots\dots\dots(10)$$

式(9)は, 式(5)と較べて実用上やや不便であるから式(5)による方が便利である。

直線に近い記録については(7)式は適用できないから式(10)を用いる。

実用に当って, 記録紙上において h_1, h_2, h_0 , および B を測定する場合, 前項の反射損失の

推定でもふれた様に測定誤差を混入する事を防ぎ得ない。即ち長崎丸 14KC の場合深度尺 1 m 当り $\frac{470}{500}$ mm であり時間尺は 1 sec 当り 0.33mm であるから、読取り精度は深度尺で 0.5m, 時間尺で 1.5sec と考えられ、又深度尺では記録に残響、パルス巾等があつて実際には m 単位で読取られている。

マグロ類の遊泳速度の試算例

マグロ類の遊泳速度については、既に報告^{1,3)}した如く、Manner⁵⁾等 (1966) は水槽飼育実験および表層附近の魚群を水中観測窓から目視観察 (シネカメラ) の結果、キハダは表層においては 1.6~5.5m/sec であり、107m (350ft) 深度における 1 m/sec より大きい値を持つと報告し、F. L. Cabo は Sonar によって Gibraltar 海峡のキハダ群の速度を 7 ノットと測定している。又通常の魚群探知機記録から西村は 1~2 ノットとし、柴田^{1,6)}は 0~0.5 ノット、緊急時約 4 ノットと報告している。

筆者は、マグロ類の遊泳速度の算定を行ない、二、三の知見を得たので前報の訂正を兼ねてここに報告する。使用した資料は長崎大学練習船長崎丸が 1965 年夏、東京、ハワイ、長崎間の航海を行なった際の 14kc 魚探記録約 73 時間分である。

解析および結果

反射損失 $15 > L_p > 30$ db の範囲のもの (111 個体) のみについて遊泳速度の試算を行なった。然し乍ら本資料は、反射損失算定を目的としたものであるから、記録の型から出来るだけ鉛直方向の速度を有しないものを取りあつてきている。そこで比較の意味で全記録紙からランダムに取出した 8 月 13 日および 8 月 23 日の記録について、鉛直方向の速度を有すると判断され算定可能な明瞭さを持つ大型魚体の記録を加えて遊泳速度 (V_f) の試算を行なった。

遊泳速度算定に当っては主として式 (5) および式 (6) によつたが、直線の記録となつた明らかに鉛直方向に進むと認められるものについては式 (10) に従つて計算を行なった。

以上解析の結果、マグロ類と思われる大型個体魚の水平方向遊泳速度 ($V_f \sin \alpha$) は、船と同方向のもの 24 個体 (0~1.5m/sec) であり、全体の 93.4% は 0~1 m/sec の範囲に含まれ、同じく 62% は 0.5m/sec より小さい値を示した。魚体の大きさおよび深度と遊泳速度 $V_f \sin \alpha$ の間には相関関係は認められなかつた。一方、本航海における記録紙全部のうちから、8 月 18

Table Swimming speed of tuna recorded on 13 and 23 August 1965

Condition of echo trace	Vf m/sec	Vf. sin α		Vf. cos α		Number of echo trace
		\bar{x}	Max	\bar{x}	Max	
stable	0.44	0.38	0.35+ 1.01-	0.07	0.39+ 0.33-	24
not stable	1.77	0.90	2.70+ 2.11-	1.72	2.2 + 7.1 +	9
other						37
average	1.14	0.56		0.55		

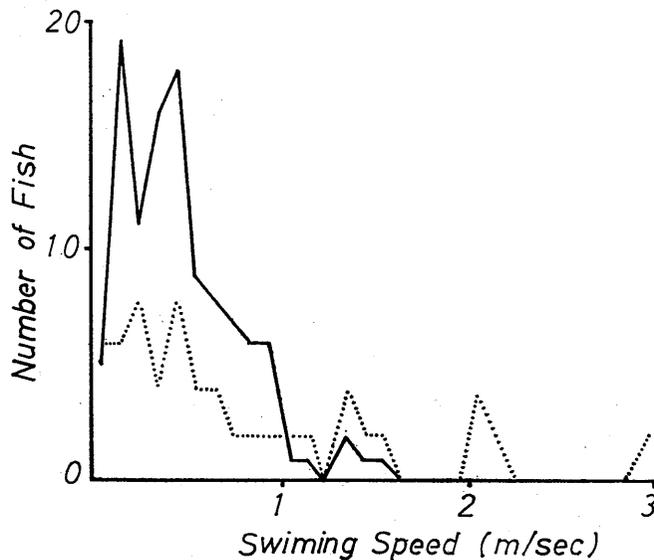


Fig. 3 Swimming speed of fish estimated from echo trace ($-30 \text{ db} < T_s < -15 \text{ db}$) recorded by 14 kc sounder installed on Nagasaki Maru in the Northwestern Pacific ;
 solid line : selected echo trace of fish without vertical movement from July 15 to September 10, 1965
 dotted line : August 13 and 23, 1965, these echograms were sampled randomly from all the echograms stated above including those with vertical movement

日および 8月23日の記録を任意に取出し、先の試算に用いられなかった鉛直方向の移動を示す魚体記録について(5)式および(6)又は(10)式によって同様の解析を行ない前表の結果を得た。

この表においては、反射損失測定過程において鉛直方向の移動速度を無視出来ると判断された魚体記録を stable, 明らかに鉛直方向の速度を有する個体魚記録を non stable とし、その他個体魚記録ではあるが、算定の資料を得る事が出来なかったものを other とした。

a) V_F の 0.1m/sec 毎の分布を調べた結果、全33個体のうち、 $V_F < 1 \text{ m/sec}$ は23個体 (69.7%) $V_F < 1.4 \text{ m/sec}$ は28個体 (84.8%) であり、70%のものが 2 miles/hour より小さい遊泳速度を有すると考えられる。尚最大速度は14ノットであった。

b) $V_F \sin \alpha$ (魚の遊泳速度水平分力) は stable と not stable ではやや後者の方が大きいですが、 $V_F \cos \alpha$ では両者の間に著るしい差が認められる。著者の行なった調査の範囲では全120個体 (111+9) のうち、64個体 (55+9) 53.3%については鉛直方向の速度を有する事が認められたが、他は全く無視出来る程度であった。

又最大速度は $V_F \sin \alpha$ で 2.7m/sec, $V_F \cos \alpha$ で 7 m/sec であった。然しながら平均値では両者の差はあまり認められなかった。この現象については次の様に思考される。即ちこれらの大型魚は通常水平方向の移動を主とし、例外的に例えば退避、索餌等の際のみ急速鉛直移動を行なうのかもしれない。 $V_F \sin \alpha$ において船と同方向の移動を示すものが反方向ものより極めて少かった。 $V_F \cos \alpha$ においてはその差は認められなかったが、日没上昇時は上向きの方向に移動する傾向が認められた。群としての上昇速度は大体 4 m/min であるが個体速度は V_F

$\cos \alpha$ は平均して 33m/min であり、 $(h_1-h_2) > 5$ m より小さい記録については 4 m/min の速度が認められた。

c) Stable と判断された ($V_F < 0.3$ m/sec) 個体記録個体 111 の V_F の分布は、0~0.5 m/sec は 69 個体 (62.1%)、0.5~1.0 m/sec は 36 個体 (31.5%)、1.0~1.6 m/sec は 6 個体 (5.4%) であり、ほとんどの魚体 (94%) が 2 ノット以下の速度であった。

これらの V_F の 0.1 m/sec 毎の分布を Fig. 3 に示したが、これによると 0.2 m/sec および 0.5 m/sec 附近にピークが認められ、 V_F が主として 1 m/sec 以下に分布する事が認められる。8 月 13 日、23 日のものも点線で附記しておいたが、1.5 m/sec までは大体同様な傾向を示すが、2.1 m/sec 附近および 3 m/sec にも分布が見られる。7.0 m/sec のものもこの他 1 例あったがこの図では省略してある。

結 論

1. 本調査の範囲ではマグロ類と思われる大型魚体の遊泳速度は通常 1 m/sec よりも小さい値を有し、最大値は 7 m/sec であるが一般に 0~3 m/sec の間に分布するものようである。又 0~0.1 m/sec のものは 120 例中 5 例にすぎず、全体として常に上述の範囲の速度を有しているものと判断された。

2. 同一魚群においても同一方向のみに移動する場合は極めて少かった。

3. 一個の個体魚の記録された時間は 9~50 sec でありそのうち 18 sec 前後のものが最も多かったので速度は大体 20 sec 間の平均値であろう。

4. 魚探記録から魚の遊泳速度を推定するに当って、多くの誤差が混入するものと想像されていたが、MANNER (1966) によればハワイにおける目視観察の結果、キハダの遊泳速度は表層において 1.6~5.5 m/sec であり、107 m (350 ft) で 1 m/sec であろうとしている事と比較して、大体一致して居り、魚探記録によっても平均値として取扱う限り可成りの精度を有するものと考えられる。

引 用 文 献

- 1 柴田 恵司：本誌 14, 15 (1963)
- 2 " : 本誌 19, 37 (1967)
- 3 西村, 柴田：日仏海洋学会誌 4, 1 (1966)
- 4 柴田 恵司：水産海洋研究会誌 11, 79 (1967)
- 5 Manner, T. A. : *U. S. Interior, Circular* (1966)
- 6 Cushing, D. H. : *FAO Review Paper FR:FB /67/R/5* (1967)