

魚探記録の解析—IX

西太平洋赤道域で観察したカツオの遊泳速度

西田 英明・高山 久明・柴田 恵司

Analysis of Fish-Finder Records—IX

Swimming Speed of Skipjack Observed in the
Western Tropical Pacific

Hideaki NISHIDA, Hisaaki TAKAYAMA, Keishi SHIBATA

A series of echo-survey was made in the Western Tropical Pacific, 3°-7° N, 138°-151°E, in November 1982 on board the R/V kakuyo-Maru (1044 G/T) of Nagasaki University.

By means of a shipborne echo-sounder of 38 kHz, many interesting fish traces were recorded, when the vessel was crossing just above boiling fish shoals at a speed of 9 knots. At that time, the fish was observed from deck to be skipjacks of about 80 m in total length.

Some acoustic and statistic considerations were taken on 23 clear echo traces from individual skipjacks among the above mentioned, i. e., 6 inverse V shape traces from stationary fish and 17 oblique and dotted traces from fish diving to deeper.

The results were: i) on the stationary fish traces, a detectable angular range of the echo-sounder was determined as 6.5° in maximum for a skipjack of 80 cm long at a depth of 0-230 m of water and ii) from 17 fish traces shown active diving, their swimming speeds were estimated as 1.9 or 4.5 m/sec mean in 40-85 m layer of water.

1982年11月、西太平洋赤道海域において、海面に白く沸いている様に見えるカツオの大群を発見し、これを魚群探知機 (EK-38S)、(以下魚探とする) で観察した。

これまで魚探記録から魚の遊泳速度を推定する方法に関する報告¹⁾はあるが、これとはやや異なった方法で、この魚探記録を解析し、激しく上下運動を繰り返している魚の遊泳速度を推定した。

資 料

1982年11月20日0800頃、長崎大学練習船 鶴洋丸 (1044 G/T) で北西太平洋の3°-54' N, 138°-12' E 付近において、カツオの大群を視認し、その真上を航行して約30分間に魚探によって密集した多くの個体魚記録を得た。

Fig. 1はこのときの典型的な魚探記録であって、深度0~100mの範囲で記録されており、時間的には左から右に描かれている。逆V字形の記録は、ほとんど静止状態の個体魚よりの、また斜方向の破線で示された記録に下方に急速移動中の個体魚記録である。このとき本魚探の周波数、パルス幅は38kHz、300μsec また TVG 回路を $40\log_{10} R$ ($R_{\max}=230\text{m}$) に設定してあった。

鶴洋丸甲板からの目視観測によれば、これらのカツオは体長約80cmと推定された。

解析の方法

1. 魚の標的強度

魚探において、魚からの反射波強度 (エコーレベル) が一定のレベルを超えるとときその魚は記録され

る。また、発射された音の強度、魚探の送受波器の指向性、受波利得が一定のとき、エコーレベル EL は魚の標的強度 Ts と魚までの距離 R ($40\log R + 2\alpha R$) お

よびその魚の音軸に関する方向角 θ ($20\log b(\theta)$) によって変る。

間庭²⁾ の魚体反射損失, L_p の実験式により 体長80

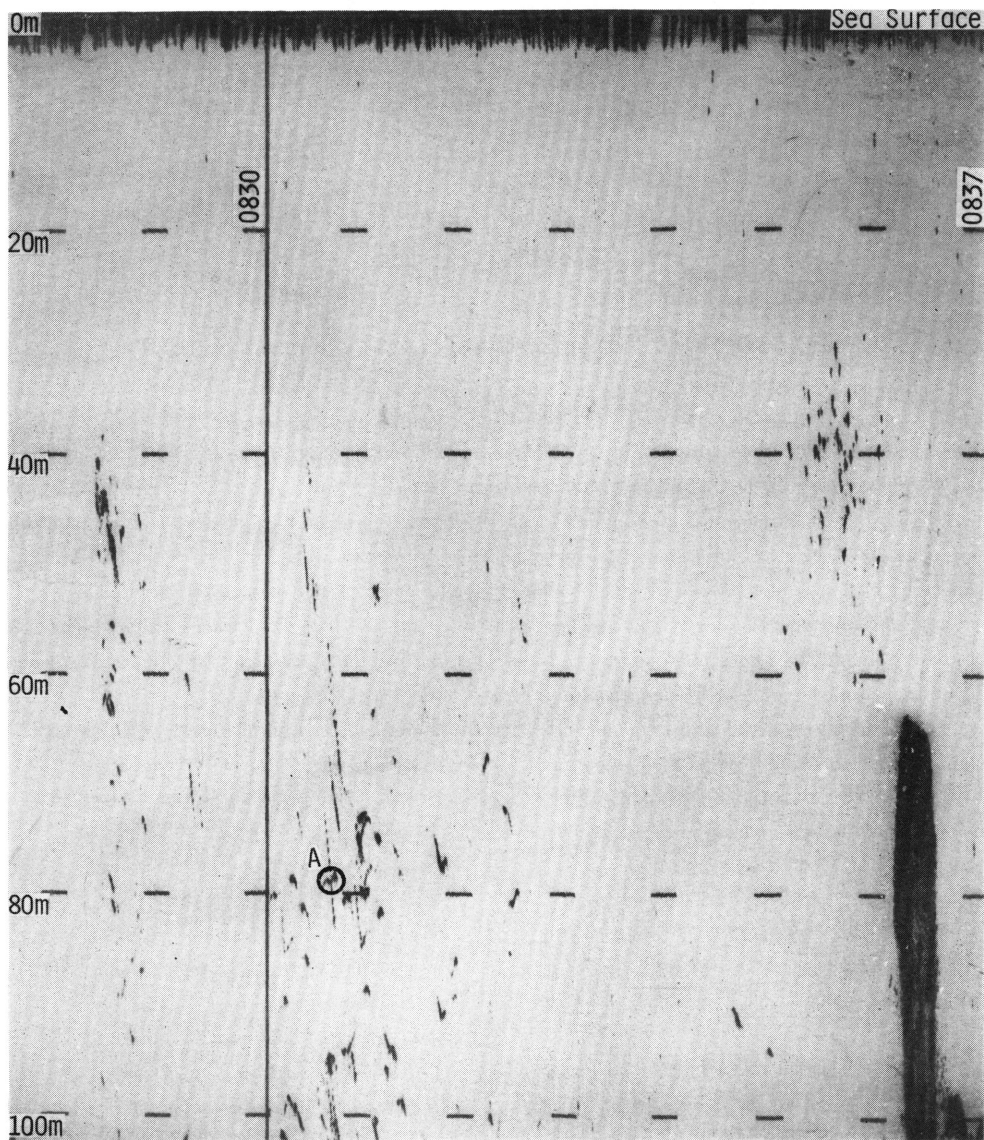


Fig. 1. A typical echogram just above dense shoals of skipjacks in shallow layer at $3^{\circ} 54' N$, $133^{\circ} 12' E$ on 20 November 1982. Echo traces of inverse V shape in a circle of A are from individual stationary skipjacks and the dotted traces of oblique lines are from the fish actively diving. While, cloudy traces in the lower right corner may be rings caused by a whale.

cm のカツオの標的強度 T_s を算出した。

$$-T_s = L_p = 20 \log_{10} \sqrt{\lambda/2r} \cdot \frac{100}{b} \cdot \frac{2}{\Delta\rho} \cdot \frac{1}{K} \quad (1.1)^*$$

すなわち, $\lambda=3.95\text{cm}$, $2r=12.6\text{cm}$, $b=80\text{cm}$, $\rho=0.09$, $K=1$ として, (1.1) 式により計算すると, 体長80cm のカツオの標的強度は -23.3dB である。

2. 探知範囲角

すべての魚の記録は, その大きさで定まる最大探知角の範囲でのみ得られる連続した魚からのエコーパルスの集合である。

Fig. 1において, 円Aで囲まれた正しい逆V形の記録は, 静止した魚の上を航走とき得られる。この例に近い形の6個の個体魚記録から, それぞれについて最も浅い部分と最も深い部分の深さを記録紙上で計測し, それぞれ h および h' とした。

Fig. 2において, Tを送受波器とし, 船がBA方向に移動するとすれば, 深度 $h_0 = \overline{TO}$ において一定の標的強度 T_s を持つ魚は, 深度 h_0 の水平断面における音軸上の0点を中心とする半径 $r = h_0 \tan\theta$ の探知範囲円内を通過するときのみ探知される。なお, θ はその魚の大きさによって定まる最大探知範囲角であり, この魚探では $40 \log R$ ($R_{\max}=230\text{m}$) の TVG 回路をかけてあるので θ は230m までは魚の大きさのみによって変り, また一定の大きさの魚に対しては一定の値を適用できる。

一方, ランダムに分布する魚がランダムな方向及び速力で移動しているとすれば, 船の進行方向に直角な直径 \overline{CD} に関する通過位置は中心から $r/2$ の点で統計的に代表できる³⁾。したがって, 魚が静止しているとき, この半径 r の探知範囲円上に与える魚の軌跡は, 直径 \overline{AB} に平行な $\overline{A'B'}$ である。すなわち, すべての個体魚記録において, h は P 点で得られ, A' または B' を通過するとき記録は始まりまたは終り, h' が得られたと統計的に考えてもよい。この h および h' から $\alpha = \text{Cos}^{-1}(h/h')$ として, 統計的探知範囲角 α を求めた。

さらに, α は音軸が魚の真上を通過しなかったとして求めたから, 次の補正計算を行った。すなわち, この図で, 半径 $r = \overline{OA} = 2h \cdot \tan\alpha/\sqrt{3}$, 最大探知範囲

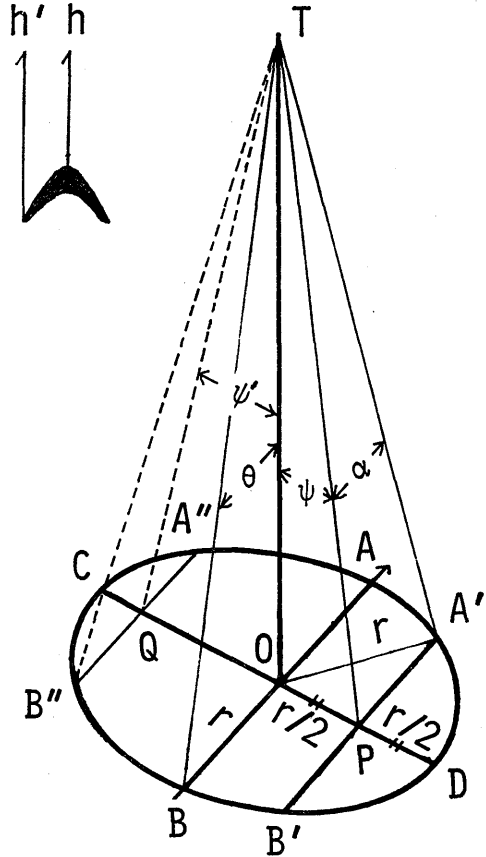


Fig. 2. A fundamental geometric consideration for an echo trace of individual stationary fish.

A certain sized fish at a certain depth of water, h_0 , can be detected only within a sound beam of a directional angle, θ , and the horizontal section of it is given as a circular area of ACBD.

The point of $r/2$ from the center of circle on the diameter normal to the moving direction of the transducer, T, may be represented as a provable passing point for all of the fish across the circle, when the circular range moves horizontally and the fish of a certain size are distributed randomly at a depth range of h_0 .

In this figure, $h_0 = \overline{TO}$, $h = \overline{TP}$, $h' = \overline{TA'}$
 $= \overline{TB} = \overline{TB'}$, $h_0 = \sqrt{h'^2 - r^2}$, $r = h \cdot \tan\theta =$
 $\overline{OA} = \overline{OA'} = \overline{OD}$, $r/2 = \overline{OP}$, $\overline{AB} \perp \overline{CD}$,
 $\overline{AB} \perp \overline{TO}$, $\overline{CD} \perp \overline{TO}$, $\alpha = \text{Cos}^{-1}(h/h')$,
 $\psi = \text{Sin}^{-1}(r/2h)$, $\overline{A'B'} = \sqrt{3} \cdot r = 2h \cdot \tan \alpha$

* λ は波長, r は魚の背面における曲率半径で $2r$ は体幅で近似できる。マグロ類の場合, 体幅は体長の18~18.5%いわれる³⁾。カツオの形状はマグロ類と近似であるから, 体長を b とするとき $2r=0.18b$ とした。 $\Delta\rho$ は魚肉と水の密度差であり, 魚肉中の音速 C_r と海水中の音速 C が $C_r=C$ のとき, 魚肉の音圧反射率 $\mu = (\rho_r C_r - \rho C) / (\rho_r C_r + \rho C) = \Delta\rho/2$ である。 K は魚体に関する形状係数で, 魚の形および音の入射角によって変わる。カツオの場合背面からの入射において, $K=1$ である。後述するカツオの遊泳速度における水平, 鉛直両成分から見て, カツオの体軸は水平面に関して約20度以下の傾角を持つと考えられるから, ここでは $K=1$ とした。

角 $\theta = \angle OTA = \angle OTA' = \sin^{-1}(r/h')$ であり、この魚の真の深度は $h_0 = \sqrt{h'^2 - r^2}$ である。

3. エコーレベル EL 及び船速

Fig. 2 において個体魚からの EL は、音軸上の点 O を魚が通過するとき最大値を示し、エコーレベルは $EL = SL + Ts$ で表わされる。また前述のように、この魚が最大探知範囲角 θ の円周を横切るとき記録が始まりまた終るので、この瞬間の EL を零とする相対レベルを用いると $EL = SL + Ts + 20 \log b(\theta)^*$ は $-SL = Ts + 20 \log b(\theta)$ となる。したがってこの式に前述の θ を代入して、SL が求められる。

次に、船速の推定法について簡単にのべる。記録紙の移動速度を M (mm/min)、静止した個体魚の記録の時間軸方向の幅を S (cm) とすると、記録された時間は $t = S/M$ (min) である。魚が探知範囲内に切る長さは前述の弦 $A'B'$ 、すなわち $2h \cdot \tan \alpha$ であるから、船速は $V_s = 2h \cdot \tan \alpha / t$ である。

4. 遊泳速力

この魚探では 3~230m の深度範囲で $40 \log R$ ($R_{\max} = 230m$) の TVG 回路をかけてあり、また魚の任意の深さの探知半径 r の円上の通過位置を $r/2$ で代表できるので、深度 230m までは一定の探知範囲角 α が適用できる。すなわち魚の通過位置を Fig. 2 における平面 $TA'PB'$ 上で代表できる。この平面 $TA'PB'$ を Fig. 3 に示す。

Fig. 1 に見られる斜の破線で示されている個体魚記録は、時間の経過と共に深くなっていることから下方に急速潜行中の魚の記録であると判断できる。なお、この点線状の記録はそれぞれ魚からの単一エコーパルスである。この記録は Fig. 3 において、魚が探知範囲の内側に入ったとき始まり、その外側に出たとき終わったものである。

例えば魚がこの探知範囲限界の $\overline{TB_2'}$ 上の記録深度 h_1' の B_1' で入り、i) $\overline{TB_2'}$ 上の記録深度 h_2' の A_2' で出たとすると、船に対する魚の相対遊泳速力の水平成分 ΔV_H は、

$$\Delta V_H = A_2'S = (h_1' + h_2') \sin \alpha \quad (4.2)$$

であり、また ii) $B_1'B_2'$ に沿って移動し、記録深度 A_2' の B_2' で出たとすると、 ΔV_H は、

$$\Delta V_H = SB_2' = (h_2' - h_1') \cdot \sin \alpha \quad (4.3)$$

である。

一方、この個体魚記録を得たとき、本船は距離約 3

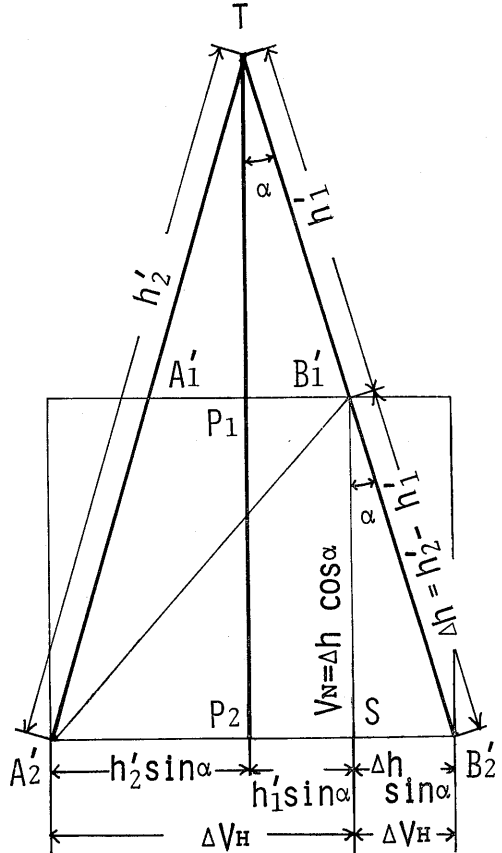


Fig. 3. Change of recorded depth with relative movement of a fish and a boat on an oblique echo trace from an individual skipjack actively diving.

This figure shows a sectional area through the points of T, A', P and B' in Fig. 2. Assuming the fish is detected only within a provable angular range, α , a transducer, T, moves from A to B and a fish moves from B_1 to B_2 or to A_2 . ΔV_H is the relative speed of the fish and boat on a horizontal plane and V_N is the vertical component of fish swimming speed.

マイルに見た白沸き状態の魚群を追跡して船速約 9 ノットでその真上を横切った。このときの状況から見て、この魚群の移動速力は本船速力の 9 ノットより小さいと判断される。また、個々のカツオの遊泳速力はこの群速度より当然大きいと予想される。そして個体魚を記録するためには $V_{FH} \leq V_s$ である。 ΔV_H と V_s より魚の遊泳速力の水平成分 V_{FH} は $V_{FH} = V_s - \Delta V_H$ により求まる。また魚の遊泳速力の鉛直成分

* SL は音源レベルで音軸上において音源から 1m の点で計測される。 $b(\theta)$ は指向性関数で、音軸上の $\theta = 0$ のとき $b(\theta) = 1$ で常に 0~1 の間に変る。角型送受波器の場合、 $b(\theta) = |(\sin z)/z|^2$ ここで $z = 2\pi a(\sin \theta)/\lambda$, $2a$ は送受波器の辺長 (30cm), λ は波長 (3.95 cm) である。

V_N は $V_N = B_1' S = (h_2' - h_1') \cos \alpha$ である。この V_{FH} と V_N より、魚の遊泳速力 V_F を $V_F = \sqrt{V_{FH}^2 + V_N^2}$ により推定できる。

急速潜行中であると判断される17個の個体魚記録より、各記録の最も浅い部分 h_1' と最も深い部分 h_2' を各パルスの上縁で求め、この2点間のパルス数 N_B を数え、記録された時間 t を $t = N_B / P_r$ (min), (P_r は毎分パルス発射回数) により求めた。これらに、前述の統計的探知範囲角 α 、船速 V_s を与えて、魚の遊泳速力 V_F を推定した。

結果及び考察

1. 探知範囲角

探知範囲角などの推定結果を Table 1 に示す。これは、記録紙上において静止していると判断される6個の個体魚記録について行なった。ただしカツオの体長を80cmとして、計算した。

本表は左から順に資料番号、個体魚記録の上縁で読み取った最も浅い部分 h 、最も深い部分 h' 、記録時間 S 、統計的探知範囲角 α 、真の魚の深度 h_0 、最大探知範囲角 θ 、エコーレベル EL および推定船速 V_s である。なお本表の最下行には、それぞれの平均値を載せた。

この6個体について、魚の深度は78~101m 平均86.2m、記録時間は平均3.8sec、体長80cm ($T_s = -23.3dB$) のカツオの統計的探知範囲角 α は平均 $5.5^\circ \pm 0.9^\circ$ 、最大探知範囲角 θ は平均 $6.5^\circ \pm 0.9^\circ$ 、これから求めた相対的音源レベル SL は $52.9dB$ 、船速は 9 ± 1 ノットと推定された。なお、当時の航海日誌によれば船速は約9ノットであり計算値と一致している。

2. 魚の遊泳速力

急速潜行中であると判断された17個の個体魚記録について推定した魚の遊泳速力を Table 2 に示す。本

表は左から順に資料番号、個体魚記録で読み取った最も浅い部分 h_1' 、最も深い部分 h_2' 、パルス数 N_B 、魚の遊泳速力の出平成分 V_{FH} 、鉛直成分 V_N 、遊泳速力 V_F である。なお、最下行にはそれぞれの平均値を載せた。魚の平均遊泳速力は1.9または4.5m/sec、その鉛直成分は1.4m/sec、水平成分は0.1または4.3 m/sec と推定された。

なお、魚の遊泳速力の水平成分は魚が本船に近づく方向に移動すると仮定した式 (4.2)、遠ざかる方向に移動すると仮定した式 (4.3) の両方で計算された。これらの推定値のうち、負となるものが6例あるが、これは船の進行方向と反対の方向へ移動する場合である。これまで観測した範囲では、白沸きの魚群は高速で本船から遠ざかる方向に移動し、本船に近づく方向に移動するカツオはほとんどないと判断される。

一方、魚の遊泳速力について Bainbridge⁴⁾ は、次式を示している。

$$V = L(3f - 4) / 4 \text{ (cm/sec)}$$

ここで、 V は遊泳速力 (cm/sec)、 L は魚体長 (cm) および f は尾柄運動頻度 (回/sec) である。ただし、この遊泳速力は表層におけるものであるから直ちに本報のような深層のものとは比較できないかも知れない。

さらに、Nakamura⁵⁾ は Pacific bonito, Skipjack-tuna などの遊泳速力を実験的に求めているが Skipjack-tuna の尾柄運動頻度はほぼ3~11回/sec である。これと体長80cmを上式に代入すると Skipjack-tuna の遊泳速力は1.0~5.8m/sec となる。これは本研究の結果と大体一致している。また、Manner⁶⁾ は、ハワイにおける目視観測の結果、Yellowfin tuna の遊泳速力は表層で1.4~5.5m/sec 深度107m では1 m/sec 前後であろうという。

今後、機会を得て、魚体からのエコーの磁気テープ録音など、できるだけ多くの方法を用いて、更に明ら

Table 1. Estimated ship's speed and directional angular range for detecting a skipjack of 80 cm long, from 6 echo traces of stationary individuals.

Data No.	h m	h' m	S sec	α deg	h_0 m	θ deg	EL dB	V_s Kts
1	78.3	78.7	3.8	5.5	78.2	6.4	29.9	7.7
2	79.8	80.4	4.1	7.2	79.6	8.3	42.4	9.4
3	80.8	81.2	3.8	5.8	80.7	6.7	36.4	9.2
4	88.3	88.7	4.1	4.8	88.2	5.5	19.7	6.9
5	89.4	89.7	3.4	4.8	89.3	5.5	19.4	8.4
6	101.4	101.9	3.8	5.5	101.3	6.4	29.8	10.0
Mean	86.3	86.8	3.8	5.6	86.2	6.5	29.6	8.6

Table 2. Estimated swimming speeds of skipjacks from various oblique echo traces recorded in the Western Tropical Pacific in November 1982 on board the Kakyuo-Maru. The set of readings of 17 echo traces, h_1' , h_2' and NB are the beginning and finishing depths of an oblique fish trace and the number of pulses counted on the trace. V_F , V_N and V_{FH} are the estimated swimming speed and its vertical and horizontal components as it descends at an oblique angle. A negative V_{FH} indicates that the fish swam in the opposite direction the boat was moving.

Data No.	h_1'	h_2'	NB	V_F		V_N	V_{FH}	
	m	m		m/sec		m/sec	m/sec	
				eq. (4.2)	eq. (4.3)		eq. (4.2)	eq. (4.3)
1	68.0	73.0	7	1.5	4.5	1.5	0.3	4.3
2	68.5	74.0	6	1.9	4.6	1.9	-0.4	4.2
3	57.5	63.7	7	2.0	4.6	1.8	0.9	4.2
4	63.5	69.5	7	1.9	4.6	1.8	0.6	4.2
5	72.5	75.0	4	3.3	4.5	1.3	-3.1	4.3
6	73.5	83.3	12	2.4	4.6	1.7	1.8	4.3
7	68.0	74.5	12	2.3	4.5	1.1	2.0	4.3
8	79.5	84.8	8	1.4	4.5	1.4	0.2	4.3
9	53.2	57.0	6	1.5	4.5	1.3	0.7	4.3
10	80.0	85.0	8	1.3	4.5	1.3	0.2	4.3
11	40.8	43.0	3	2.0	4.5	1.5	-1.3	4.3
12	45.0	47.0	5	1.1	4.4	0.8	0.7	4.3
13	51.5	54.0	4	1.6	4.5	1.3	-0.9	4.3
14	47.2	55.8	12	3.1	4.5	1.5	2.7	4.3
15	59.0	62.0	4	2.3	4.5	1.6	-1.7	4.3
16	39.8	41.5	4	0.9	4.4	0.9	0.3	4.3
17	40.7	42.5	3	1.7	4.5	1.2	-1.2	4.3
Mean	59.3	63.9	6.6	1.9	4.5	1.4	0.1	4.3

かにしたいと考えている。

要 約

本考察の結果、鶴洋丸の魚探 EK-38S では、全長 80cm のカツオを最大 6.5° の角範囲で探知できることが判った。また、カツオの魚群は本船が接近したとき深層に急速移動したが、このときのカツオの平均遊泳速度は 1.9、または 4.5m/sec であり、その鉛直成分は 1.4m/sec、水平成分は 4.3m/sec と試算された。

引 用 文 献

- 1) 柴田恵司 (1968) 本誌, (25), 59-65.
- 2) 間庭愛信 (1962) 漁船研究報告, 4, 1-62.
- 3) 柴田恵司 (1965) 本誌, (19), 37-46.
- 4) Bainbridge, R. (1957) *J. Exp. Biol.*, 35, 109-133.
- 5) Nakamura, E. L. (1965) B. C. F. Hawaii Area, Circular, 206, 1-32.
- 6) Manner, T. A. (1966) U. S. Interior Circular.