

スキャニングソナーを用いた船舶の接近に対する 魚群行動の評価法

李 遺元, 向井 徹, 飯田 浩二

(1999年12月13日受付, 2000年4月17日受理)

Evaluation Method of Fish School Response to an Approaching Vessel Using a Scanning Sonar

Yoo-Won Lee,* Tohru Mukai,* and Kohji Iida*

The response behavior of a fish school to an approaching vessel was observed using a scanning sonar. The evaluation method using six parameters which signify characteristics of school shape and behavior was proposed.

In the two trial survey cruises, fifteen fish schools were analyzed, and among them five schools were identified for their changing shape, swimming direction, and swimming speed. Moreover, by continuously tracing fish schools on the sonar display, these fish schools were seen to exhibit an apparent change of school shape and behavior. Therefore, the evaluation method of fish school behavior using six characteristic parameters indicating fish school shape and behavior is useful.

キーワード：スキャニングソナー, 資源量推定, 音響資源調査, 計量魚群探知機, 船体逃避行動

船舶が魚群に接近する時, 船体から発する騒音や水圧変化で魚群行動に影響を与える可能性がある。この時, 魚群行動の大きな変化や船舶から遠ざかるような行動は船体逃避行動と考えられる。音響資源調査において, 調査船に対する魚群の船体逃避行動は資源量の過小評価の原因となる。¹⁻³⁾一般に魚群の船体逃避行動は遊泳深度が浅く, 調査船の速度が速いほど大きいと考えられる。

船体逃避行動による魚群の行動変化を把握する方法として, 大きく2つの方法が挙げられる。

その方法の1つは, 調査補助船あるいはブイなどに魚群探知機を装備し, その付近を調査船で航行することにより魚群行動や魚群密度の変化を観察する手法である。この手法を用いた研究例として, Olsen *et al.* による接近船舶に対するニシン, カラフトシシャモ, タラ魚群の船体からの逃避の観察,^{4,5)} Ona *et al.* によるトロール漁具に対するタラ魚群の逃避の観察,⁶⁾ Fréon *et al.* によるモーターボートの接近によるニシンの魚群構造と魚群密度の変化の観察^{7,8)}などがある。

他の方法は調査船に装備されたソナーを用いるものである。ソナーを用いた魚群の調査船からの逃避行動の研究は, 主として北海におけるニシンやカラフトシシャモなどの表層性魚類を対象として行われている。この

方法においてはまだ資源量推定における逃避行動の影響を正確には把握できていないが, 魚群探知機よりも広い範囲を探査するソナーの長所を活用した方法である。ソナーを用いた魚群逃避に関する報告としては, ソナーを単独で用いた研究⁹⁻¹⁵⁾と, ソナーと魚群探知機を併用した研究がある。^{16,17)}

魚群探知機を用いた魚群の逃避行動の研究では, 魚群密度の変化から魚群逃避を定量化する方法が用いられる。⁵⁻⁸⁾しかしながら, ソナーを単独で用いて魚群の調査船からの逃避行動を定量化する手法は確立されておらず, 魚群の移動軌跡, 遊泳速度の変化, 調査船からの距離や深度別の出現頻度により魚群の逃避行動の有無を判別してきた。⁹⁻¹⁵⁾魚群の船体逃避行動に伴う魚群行動の変化を定量化できれば, 計量魚探による資源量推定精度の向上が期待され, また一步進んでソナーを用いた資源量推定手法の開発にもつながる。

そこで本研究では, 調査船の接近にともなう魚群行動の変化をスキャニングソナーを用いて観察し, 魚群の形状や行動の変化を6つのパラメータを用いて定量化し, それらのパラメータによる魚群行動の評価法と逃避行動の定量化の基礎資料を得ることを目的とした。

* 北海道大学大学院水産科学研究科 (Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan).

方 法

データ収集 調査は北海道噴火湾において1998年12月, 1999年8月の昼間に, 中層魚群と表層魚群を対象に北海道大学水産学部研究調査船うしお丸(128トン)を用いて行った。ソーナーは同船装備の半周型スキャニングソーナー(KCH-1827, カイジョー)を用いた。送信周波数は164 kHz, 送信ビーム幅は $180^\circ \times 8^\circ$, 受信ビーム幅は $8^\circ \times 8^\circ$ (いずれも公称値)である。

航走コースをFig. 1に示した。1998年12月は噴火湾の湾内に入り込むコース(図中—○—), 1999年8月は白尻と室蘭を結ぶ噴火湾の湾口部のコース(図中—●—)において魚群の行動を観察した。

ソーナービームを船首方向へ向け魚群を探索し, 魚群を捕捉してから探知方位と俯角を調整して魚群を追尾した。この時の俯角は魚群映像の変化に応じて, 1998年は $30^\circ \sim 80^\circ$, 1999年は $0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で手動で調整した。

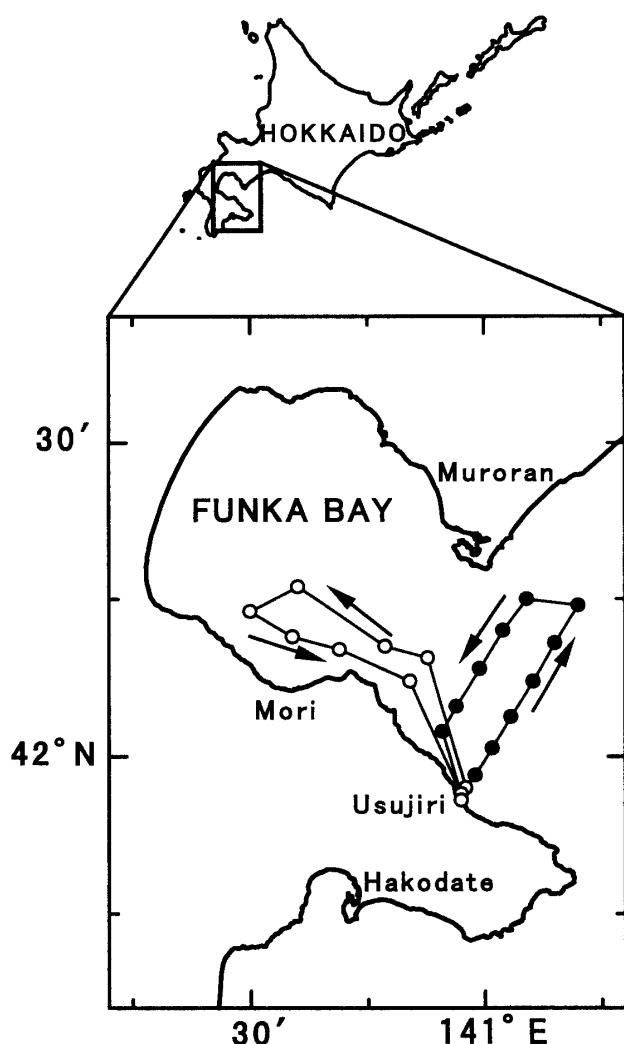


Fig. 1. Survey area and course in 1998 (—○—) and 1999 (—●—).

た。またソーナーの探査レンジは1998年は150 m, 1999年は300 mとし, 魚群の発見から消失まで手動により魚群を追尾して行動を観察した。

ソーナーディスプレイにはエコーの強さに応じて16色のPPI画像が表示される。これをビデオスキャンコンバータユニット(XVGA-1V, マイコンソフト)を通してNTSCビデオ信号に変換後, ビデオテープレコーダーに録画し, 解析に用いた。

データ処理 船上でビデオテープに収録されたソーナーの映像を再生し, 映像を5秒毎に停止させ, モニタ上の魚群の輪郭をトレーシング紙に転写した。そして各々の魚群のエコーが一番強い部分を確認し, その中心位置を魚群の中心位置とした。次に調査船から魚群の中心位置までの放射距離, 船首を基準とした魚群方位角, ソーナービームの俯角および船速を読みとり, 魚群の3次元相対座標と絶対座標を求めた。さらに, 魚群がその行動を変える場合, 魚群の形状が変化すると考え, トレーシング紙に転写した魚群の輪郭をデジタイザー(KD4610A, GRAPTEC)を用いて読みとり, 魚群形状の変化を調べた。魚群形状を示す指標としては, 偏平係数 E_{lon} , 丸み係数 C_{irc} , 凹凸係数 F_{rect} を用いた。これらのパラメータは魚種が混在する海域において魚種判別を行なうために用いられおり, これらのパラメータは次式で定義される。¹⁸⁻²⁰⁾

$$E_{lon} = \frac{L_{MAX}}{B} \quad (1)$$

$$C_{irc} = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (2)$$

$$F_{rect} = \frac{\ln \left(\frac{P}{4} \right) \cdot 2}{\ln (A)} \quad (3)$$

ここで(1)式の扁平係数 E_{lon} は, トレースした魚群の最大長さ L_{MAX} と幅 B の比率であり, 正方形や円形の魚群では1に近づき, 長方形や橢円の魚群では1から遠ざかる。また, (2)式の丸み係数 C_{irc} は, 魚群の外周長 P と面積 A で表現され, 魚群形状が円形のとき1になる。また頂点の数が同じであれば, 正多角形に近いほど1に近づく。最後に(3)式の凹凸係数 F_{rect} は, 魚群形状の複雑さを示す指標として魚群の外周長 P と面積 A を用いて表わされる。²¹⁾ 凹凸係数1はかなり平滑な魚群形状を示し, 魚群形状が複雑になればなるほど凹凸係数は大きくなる。

次に, 5秒毎に求めた魚群の中心位置の移動距離から魚群の遊泳速度 V を求めた。さらに魚群の行動軌跡を示す指標として, 水平方向性指数 D_H ^{10,11)}と垂直方向性指数 D_V を用いた。水平方向性指数 D_H は, 魚群発見時の魚群中心位置と消失時の魚群中心位置の水平方向の距

離 H_{dist} とその間の 5 秒毎の水平移動距離 $F_H(i)$ の総和の比であり、次式で示される。

$$D_H = \frac{H_{dist}}{\sum_{i=1}^n F_H(i)} \quad (4)$$

また垂直方向性指数 D_V は、魚群発見時の魚群の深さと消失時の魚群の深さを直線で結んだ距離 V_{dist} とその間の 5 秒毎の深さ方向の移動距離 $F_V(i)$ の総和の比であり、次式で示される。

$$D_V = \frac{V_{dist}}{\sum_{i=1}^n F_V(i)} \quad (5)$$

水平および垂直方向性指数は魚群が直線的な遊泳を示すと最大値 1 に近づき、途中で方向を変えたり、蛇行すると 0 に近づく。

以上 6 つのパラメータを用いて調査船の接近に対する魚群行動を調べた。

結 果

魚群形状のトレースによる魚群行動の観察 本調査において魚群形状のトレースができた魚群数は、1998 年では 6 例、1999 年では 9 例であった。これらの魚群映像について魚群の形状を 5 秒間隔でトレースしたものを、Fig. 2 と Fig. 3 に示した。Fig. 2 は 1998 年の 6 魚群 (A~F) を、Fig. 3 は 1999 年の 9 魚群 (G~O) を

示した。また両図のレンジは各々 150 m と 300 m、図の中心は自船位置、矢印は調査船の進行方向を示し、出現した魚群の形状変化を相対プロッティングで示した。これらの図から船の進行方向を横切る魚群 C と L や進行方向が途中で変化する魚群 E と O が見られる。また、5 秒毎の魚群の大きさや形の極端な変化は魚群 A, C, D, E, G, O で観察された。そこでこれら 6 魚群の形状を拡大したものを Fig. 4 に示した。この図は、魚群の形状に着目しているため魚群位置は実際と異なり、上から下に 5 秒毎の魚群を配置したものである。これを見ると魚群 A は上から 2 番目で長くなり、4 番目では分裂しそうな形状になっている。また魚群 C は遊泳過程で魚群の分裂、結合が見られ、魚群 D は上 2 つとそれ以後の魚群形状に変化があり、魚群 E では 3 番目と 4 番目で形状に大きな変化が見られた。一方、魚群 G は調査船に近づくほど形状が単純化され、魚群 O は最初の 4 つとそれ以後の魚群形状に違いが観察された。このようにこれら 6 魚群がソーナーディスプレイ上で明らかに魚群の形や大きさが変化した魚群であった。

魚群の水平・垂直移動について 魚群の中心位置を用いて各魚群の遊泳経路をトレースした結果を Fig. 5 に示した。Fig. 5A, B はそれぞれ自船位置に対する魚群の水平方向の変化と垂直方向の変化を示す相対プロッティングであり、変化の方向を矢印で示した。横軸は船首尾方向を表わし、右に船首方向を、左に船尾方向をとっ

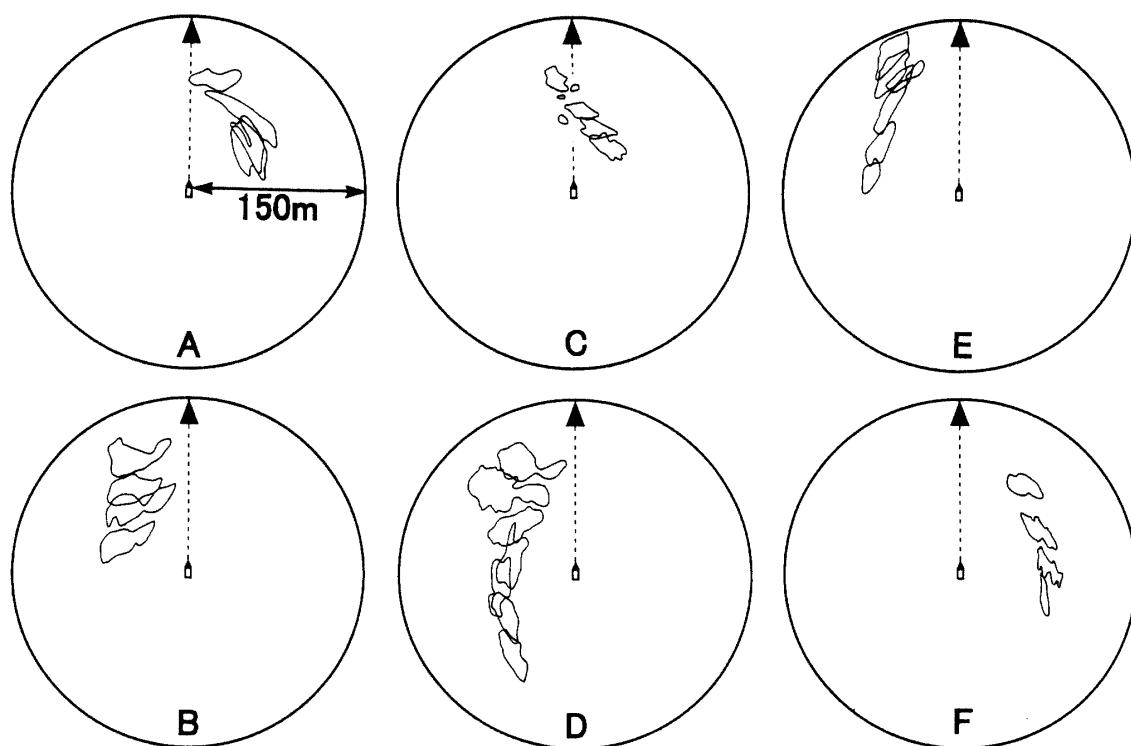


Fig. 2. Trace of mesopelagic school shape observed with the scanning sonar during the 1998 survey.

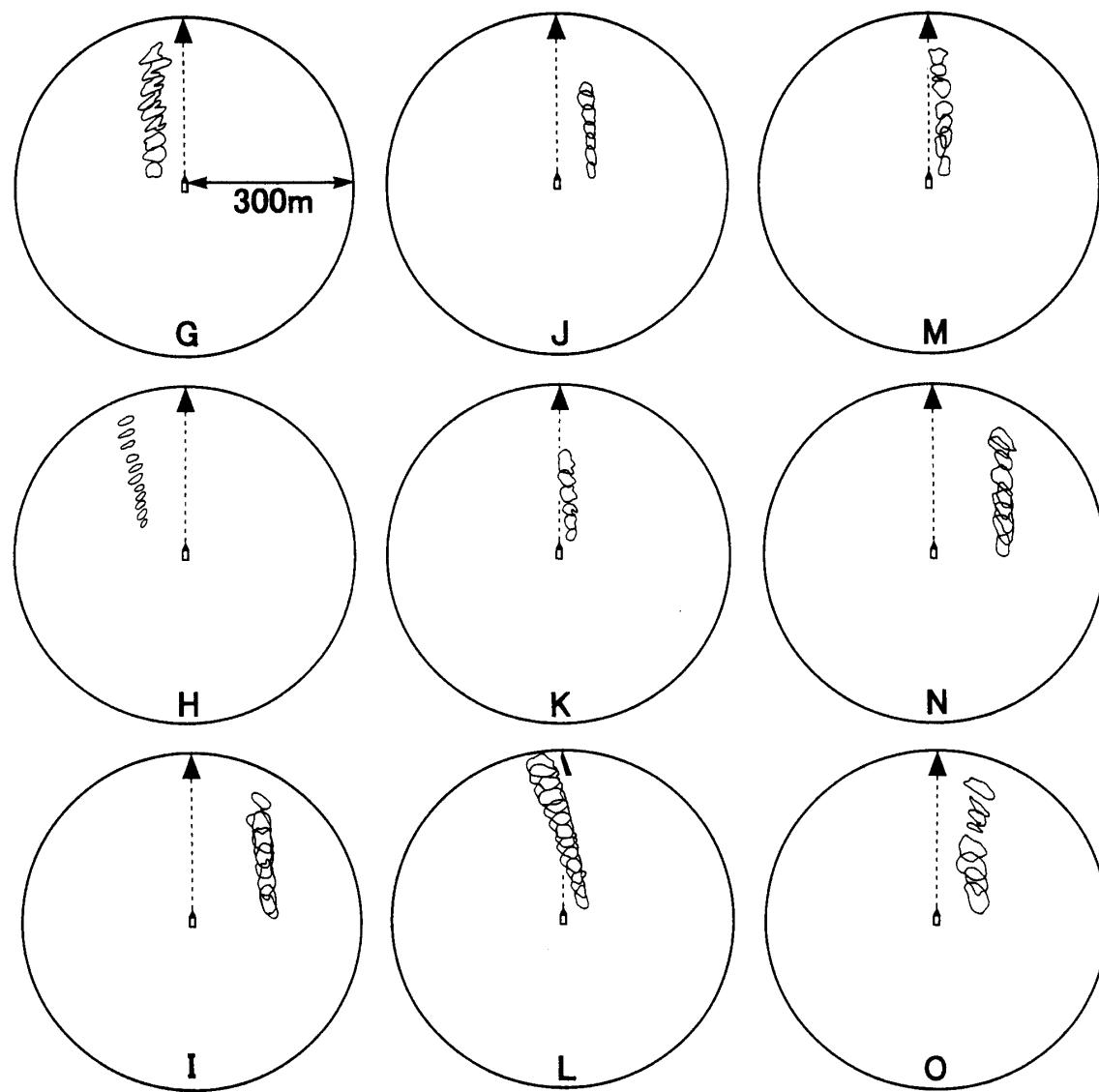


Fig. 3. Trace of pelagic school shape observed with the scanning sonar during the 1999 survey.

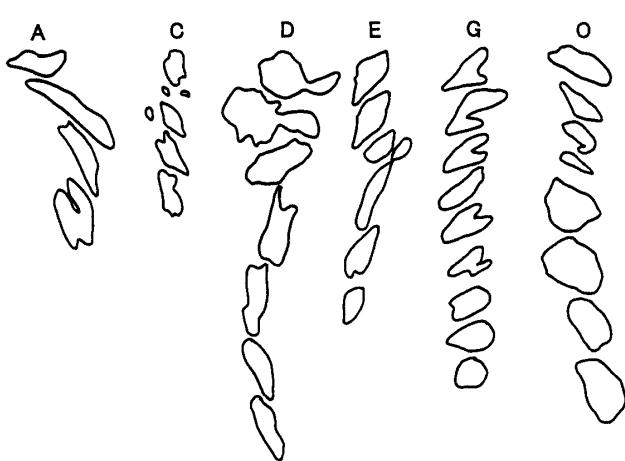


Fig. 4. Change of fish school shape with vessel approach.

ている。縦軸は舷側方向を表わし、軸は(−)が左舷を、(+)が右舷を示す。また自船位置を図中に示した。一方 Fig. 5C, D は調査船の船速を減じて魚群の実際の移動を示した絶対プロッティングによる水平方向および垂直方向の遊泳経路である。Fig. 5Cにおいて、A～F の中層魚群中の魚群 C は調査航路を横切って遊泳し、魚群 E は船首前方放射距離約 150 m で遊泳方向の変化が観察された。また、G～O の表層魚群の魚群 L は調査船の調査航路をほぼ直角に横切って遊泳し、調査航路に近い魚群 J, K, M は遊泳深度が浅いにもかかわらず調査航路と平行に遊泳した。しかし、魚群 G と O は魚群 J, K, M よりも調査船から離れているにもかかわらず、調査船の接近にともない遊泳方向を途中で変えた。

魚群形状を示す指標について 各魚群について求めた魚群形状の特徴を表す3つのパラメータの値を Fig. 6 に示した。横軸は観察時間、縦軸は扁平係数 E_{lon} 、丸み

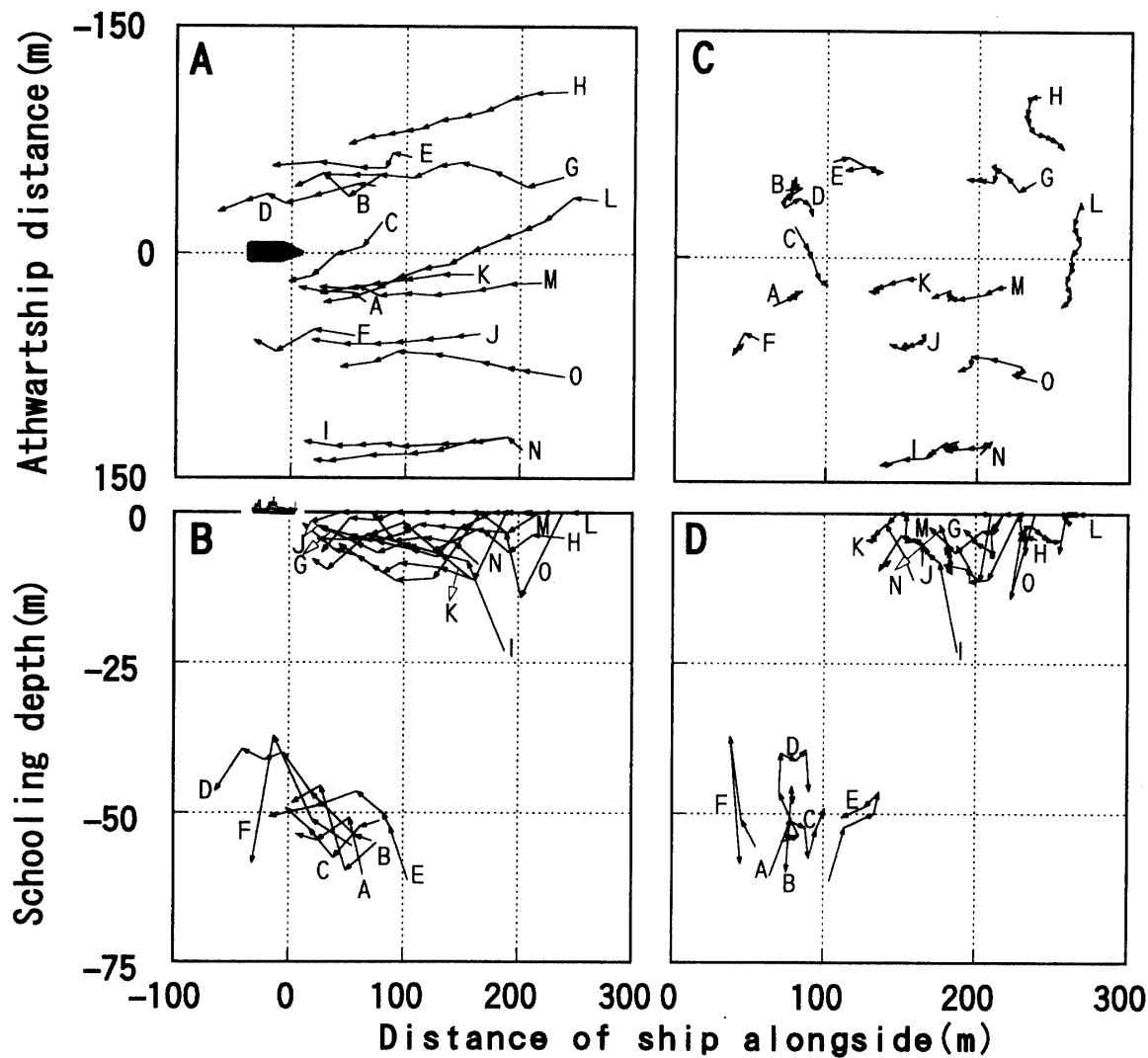


Fig. 5. Trace of swimming behavior of fish school observed with the scanning sonar.
A, B, relative plotting; C, D, true plotting.

係数 C_{irc} 、および凹凸係数 F_{rect} を表す。これらの値はそれぞれの係数の平均値で規準化した。また、図中□は扁平係数、○は丸み係数、*は凹凸係数を示す。Fig. 6を見ると扁平係数は魚群 A, C, E, F および G, H, L, M, O、丸み係数は魚群 B, C, E, F および G, H, K, M、凹凸係数は魚群 C で変化が認められた。

遊泳速度および水平・垂直方向性指数について 魚群中心位置を用いて計算した魚群の遊泳速度の変化を Fig. 7 に示した。Fig. 7A は 1998 年、Fig. 7B は 1999 年の魚群である。両図とも横軸は観察時間、縦軸は遊泳速度であり各魚群の遊泳速度の平均値で規準化した。両図から遊泳速度の変化が激しいことがわかる。

次に、(4)式と(5)式を用いて水平方向性指数 D_H と垂直方向性指数 D_V を求めた。水平方向性指数については魚群 B, D, E, F および N が 0.17~0.44 の小さな値を示し、垂直方向性指数については魚群 B, D, E, F および

H, L, N が 0.21~0.43 の小さな値を示した。

6つのパラメータを用いた総合的な魚群行動の評価
魚群行動を総合的に評価するため、1998 年と 1999 年の両年について規準化後の各特徴パラメータの平均 (Mean) と標準偏差 (SD) を求め、各パラメータについて次のような得点化を行なった。すなわち、各魚群各パラメータについて 5 秒毎に計算した規準化後の値 (Fig. 6, 7) が各パラメータの平均から ± 1 SD 以内に入っている場合は 1 点、 ± 1 SD から ± 2 SD に入っている場合は 2 点、それより離れている場合は 3 点とした。そして 5 秒毎のデータについて得られたこれらの値を平均化し、ある魚群のあるパラメータの代表値とした。次にこの代表値が 1 以上 1.5 未満の場合は無印、1.5 以上 2 未満の場合は * 記号を、2 以上の場合は ** 記号を付した。したがって、無印はあまり変化しない、* は変化あり、** は非常に変化したことを表わす。また水平

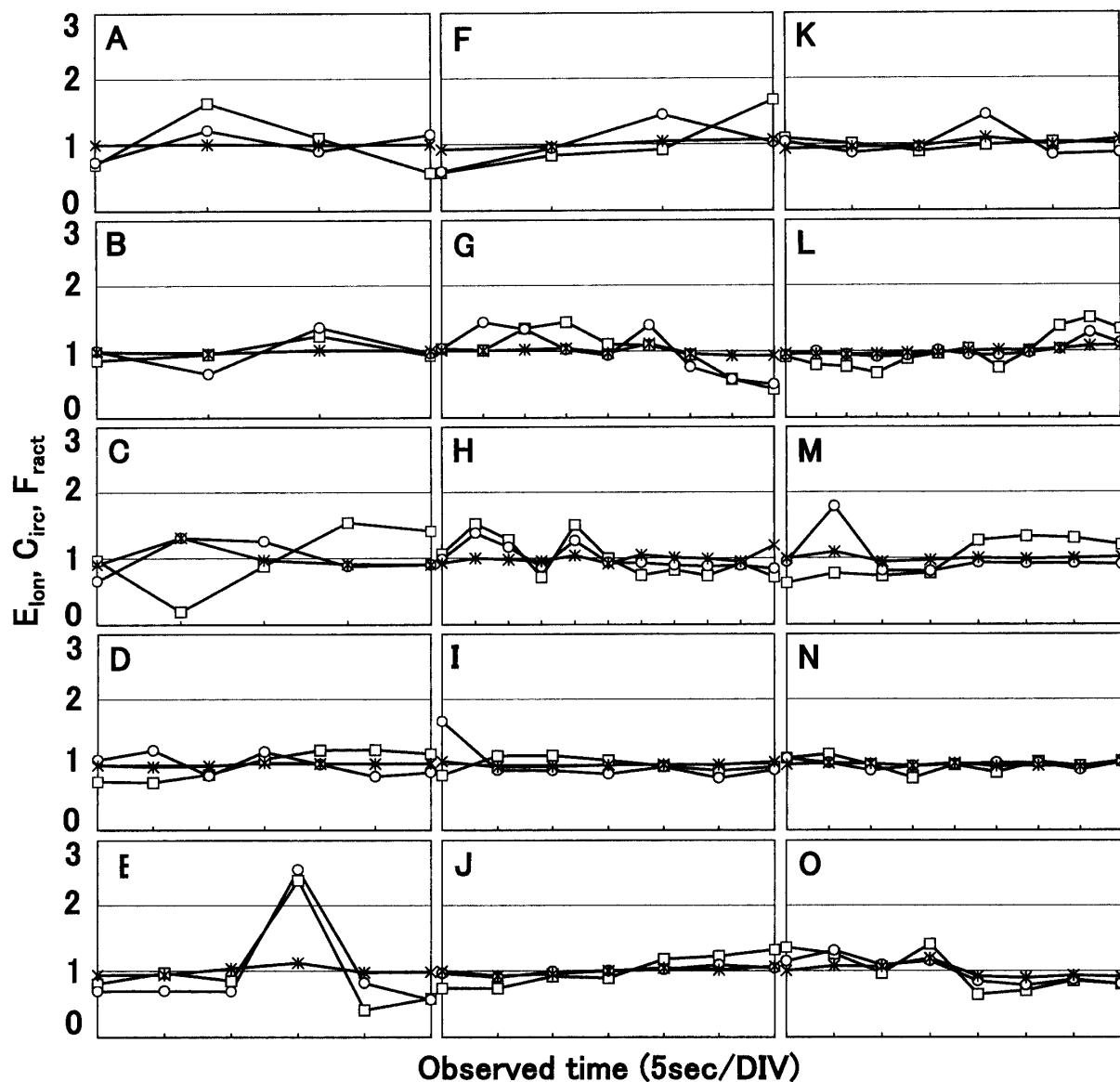


Fig. 6. Change of characteristic parameters of fish school shape.
□, elongation; ○, circularity; *, fractal dimension.

・垂直方向性指数に関してはそれぞれの値が Mean+1 SD 以上の場合無記号, Mean±1 SD の範囲にある場合は * 記号を, Mean-1 SD 未満の場合は ** 記号を付した。その結果を Table 1 に示した。ここで表中の数値は、各魚群各パラメータの規準化前の平均値である。この表より全てのパラメータで総合的に判断すると、* あるいは ** 記号が 6 つのパラメータの半数以上に付けられている魚群は魚群 A, C, E, F, O であり、これらの魚群では行動に変化があったと判断された。またこのうち ** 記号を半数獲得した魚群 E は魚群形状および行動の変化が大きく、船体逃避の可能性が高いと考えられた。

考 察

今回観察された 15 の魚群に対し、ソーナーディスプレイ上の魚群の形状をトレースし魚群の形や大きさを 5 秒毎に見たところ、魚群 A, C, D, E, G, O で変化が見られた。一方、魚群形状を示すパラメータ、すなわち扁平係数 E_{lon} , 丸み係数 C_{irc} , 凹凸係数 F_{rect} および遊泳速度 V , 水平方向性指数 D_H , 垂直方向性指数 D_V を用いて魚群行動を調べたところ、魚群 A, C, E, F, O の 5 つの魚群で変化があったと判断された。これら両者は完全に一致していないが魚群 A, C, E, O に関しては今回の方法によっても行動変化が検出された。従って本方法は魚群行動の評価に有効と思われた。しかし、今回観察された 15 魚群については極端な船体逃避は認められなか

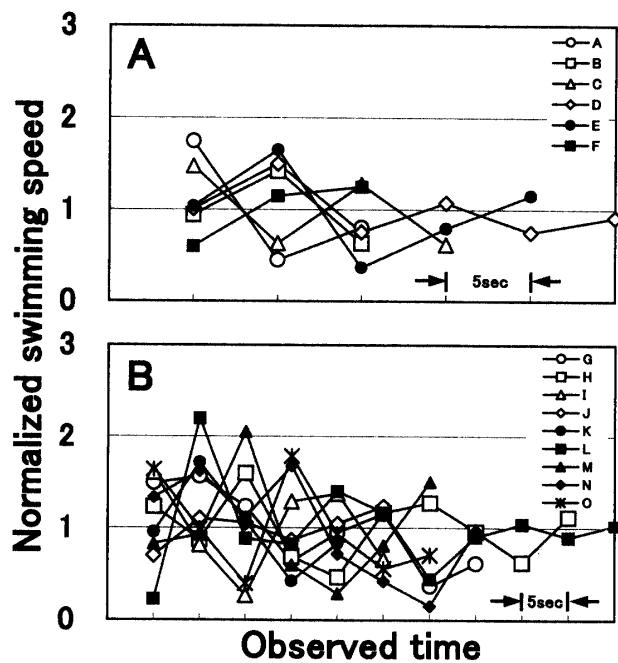


Fig. 7. Change of swimming speed of fish schools.

A, 1998 survey; B, 1999 survey.

Table 1. Evaluation of characteristic parameters of shape and behavior of fish school in relation to avoidance behavior toward approaching vessel

Items	Shape parameter			Behavior parameter		
	E_{lon}	C_{irc}	F_{rad}	V	D_H	D_V
A	3.03*	2.49	1.61	2.07*	0.83*	0.70*
B	1.94	2.24*	1.43	2.99	0.20**	0.34*
C	1.58*	1.63*	1.84**	2.45	0.98	0.78*
D	2.51	2.09	1.44	2.23	0.42*	0.35*
E	2.79*	2.43**	2.16	2.64	0.17**	0.21**
F	3.43*	2.74*	3.91*	3.79	0.28**	0.22**
G	2.29	2.26*	0.89	1.70	0.70*	0.86
H	2.46	1.62	0.86	1.14	0.70*	0.40*
I	1.86	1.58	1.33	2.40	0.74*	0.68*
J	1.58	1.26	1.06	1.17	0.80*	0.72*
K	1.36	1.39	0.85*	1.59	0.87*	0.86
L	1.37	1.27	0.81	1.48	0.88*	0.43*
M	1.49	1.45	0.89	1.81*	0.81*	0.88
N	1.65	1.31	1.12	1.71	0.44*	0.41*
O	1.99	1.48	0.98**	2.66*	0.67*	0.61*

unmarked: little change

* change

** remarkable change

った。また、これらの魚群の漁獲は行っておらず魚種確認ができなかったためこれが今回の魚群に特有の事がどうかはわからない。一般に魚群の船体逃避行動は、船体

が発する水中騒音、船舶の接近による水圧の変化、あるいは船影の視覚刺激が原因だと言われている。今後さらにデータを蓄積し、パラメータの有効性を確認する必要がある。また、魚群の遊泳速度 V と水平方向性指数 D_H および垂直方向性指数 D_V は、魚群の中心位置の求め方によって誤差を含むと考えられる。さらに、ソナーによって観察された魚群形状は、魚群のある断面の形状にすぎず、魚群が大きくなればなるほど魚群中心位置と実際の魚群中心位置との差が大きくなる確率が高くなる。また、観察した魚群の断面も常に同じ断面を観察したとは言えない。従ってこれらのうちの一つのパラメータのみで魚群行動を評価するのではなく、複数のパラメータで総合的に評価する事が重要だと思われる。今回、各魚群に関する解析は5秒毎のトレースが基本となっている。今後はソナー映像をパソコンに取り込んで形状解析や行動解析を行ない、さらに、パラメータの抽出やデータ処理の自動化を行ってデータを増やした上で統計的検討が必要であると思われる。

また、資源量推定において逃避行動は精度の低下を招くが、逃避にともなう魚の姿勢変化によるターゲットストレングスの変化も考えられ、魚群逃避の問題に対して総合的な調査が必要であると考えられる。

文 献

- 1) J. J. Traynor, N. J. Williamson, and W. A. Karp: A consideration of the accuracy and precision of fish-abundance estimates derived from echo-integration surveys. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer.*, **189**, 101–111 (1990).
- 2) K. Olsen: Fish behaviour and acoustic sampling. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer.*, **189**, 147–158 (1990).
- 3) P. Fréon, F. Gerlotto, and O. A. Misund: Consequences of fish behaviour for stock assessment. *ICES mar. Sci. Symp.*, **196**, 190–195 (1993).
- 4) K. Olsen, J. Angell, and A. Løvik: Quantitative estimations of the influence of fish behaviour on acoustically determined fish abundance. *FAO Fish. Rep.*, **300**, 139–149 (1983).
- 5) K. Olsen, J. Angell, F. Pettersen, and A. Løvik: Observed fish reactions to a surveying vessel with special reference to herring, cod, capelin and polar cod. *FAO Fish. Rep.*, **300**, 131–138 (1983).
- 6) E. Ona and O. R. Godø: Fish reaction to trawling noise: the significance for trawl sampling. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer.*, **189**, 159–166 (1990).
- 7) P. Fréon, F. Gerlotto, and M. Soria: Changes in school structure according to external stimuli: description and influence on acoustic assessment. *Fisheries Res.*, **15**, 45–66 (1992).
- 8) P. Fréon, F. Gerlotto, and M. Soria: Variability of *Harengula* spp. school reactions to boats or predators in shallow water. *ICES mar. Sci. Symp.*, **196**, 30–35 (1993).
- 9) O. A. Misund: Sonar observations of schooling herring: school dimensions, swimming behaviour, and avoidance of vessel and purse seine. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer.*, **189**, 135–146 (1990).

- 10) O. A. Misund: Avoidance behaviour of herring (*Clupea harengus*) and mackerel (*Scomber Scombrus*) in purse seine capture situations. *Fisheries Res.*, **16**, 179–194 (1993).
- 11) O. A. Misund, A. Aglen, S. ø. Johansen, D. Skagen, and B. Totland: Assessing the reliability of fish density estimates by monitoring the swimming behaviour of fish schools during acoustic surveys. *ICES mar. Sci. Symp.*, **196**, 202–206 (1993).
- 12) M. T. Hafsteinsson and O. A. Misund: Recording the migration behaviour of fish schools by multi-beam sonar during conventional acoustic surveys. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 915–924 (1995).
- 13) F. Gerlotto, M. Soria, and P. Fréon: From two dimensions to three: the use of multibeam sonar for a new approach in fisheries acoustics. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 6–12 (1999).
- 14) M. Soria, P. Fréon, and F. Gerlotto: Analysis of vessel influence on spatial behaviour of fish schools using a multi-beam sonar and consequences for biomass estimates by echo-sounder. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 453–458 (1996).
- 15) 飯田浩二, 向井 勝, 堀内則孝: スキャニングソナーを用いた表中層魚群の三次元分布と形状の解析. 海洋音響学会誌, **25**, 240–249 (1998).
- 16) O. A. Misund, A. Aglen, and E. Frønæs: Mapping the shape, size, and density of fish schools by echo integration and a high-resolution sonar. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 11–20 (1995).
- 17) O. A. Misund: Dynamics of moving masses: variability in packing density, shape, and size among herring, sprat, and saithe schools. *ICES J. Mar. Sci.*, **50**, 145–160 (1993).
- 18) A. Weill, C. Scalabrin, and N. Diner: MOVIES-B: an acoustic detection description software-application to shoal species' classification. *Aquat. Living Resour.*, **6**, 255–267 (1993).
- 19) C. Scalabrin and J. Massé: Acoustic detection of the spatial and temporal distribution of fish shoals in the Bay of Biscay. *Aquat. Living Resour.*, **6**, 269–283 (1993).
- 20) R. W. Nero and J. J. Magnuson: Characterization of patches along transects using high-resolution 70-kHz integrated acoustic data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, 2056–2064 (1989).
- 21) B. B. Mandelbrot: The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and company, New York, 1983, pp. 109–115.