

定置網構造に対する魚群行動のモデリング

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
巻/号	602
掲載ページ	p. 185-191
発行年月	1994年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



定置網構造に対する魚群行動のモデリング*1

梁 振林, 松田 皎, 東海 正

(1993年9月28日受付)

Modeling of Fish Behavior for Netting Wall and Reverse Structure

Zhenlin Liang,*2 Ko Matuda,*2 and Tadashi Tokai*2

In this paper, the fish behavior model proposed by Matuda and Sannomiya was extended to behavior for the netting wall and reverse structure which are important substructures in set-nets. This model assumes that the netting wall repels fish like the walls of a water tank and that the center of reverse structure attracts fish. The swimming behavior of fish to the netting wall and reverse structure in an octagonal water tank was recorded by a video tape recorder. In this experiment, rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* and Japanese dace *Tribolodon hakonensis* were used. The model parameters were estimated by applying the least-squares algorithm to time-series data of fish positions obtained from the water tank experiment. The validity of the model was confirmed from the fact that the swimming trajectory of fish in the simulation was similar to that in the experiment. The swimming area of the school of fish was greatly reduced by setting the net structure in the water tank. However, this did not significantly change the non-dimensional model parameters except the propulsive force for Japanese dace. The value of the repulsive force against the netting wall was not larger than that against the wall of the water tank.

キーワード: モデル, 魚群行動, 定置網

Matuda and Sannomiya¹⁾によって提案されたモデリングおよびシミュレーション手法を用いた魚群行動の研究は、これまで、いくつかの魚種のデータを用いて検討が行われてきた。^{2~4)}また、モデリングに必要なパラメータ推定の方法⁵⁾やパラメータの感度解析⁶⁾なども検討されている。しかし、これらの研究はいずれも、境界条件として水槽壁に対する魚の行動を取り扱ったものであり、網地からできた壁や漁具に対する魚の行動を扱うまでには至らなかった。こうした魚群行動モデルを漁業に応用する一例としては、定置網に対する魚群行動のシミュレーションが考えられる。定置網は、魚の進路を遮断するように置かれた垣網により魚を網口まで誘導して、さらに入網した魚が入口の返し構造である障子網により網から出ないようにしている。つまり、定置網では構造の違いにより、入網尾数や出網尾数が左右される。しかし、定置網の構造とそれに対する魚の行動の情報は、これまで漁業者の経験や実験による知見^{7~9)}およびソナーによる観察¹⁰⁾などによるものがほとんどである。特にあまり垣網に沿って泳がないとされている魚種、例えばクロマダラ *Thunnus thynnus* などを漁獲対象とする定置網に

は、返し網付きの垣網が使用されている。¹¹⁾金ら⁹⁾は返し垣網の誘導特性を解明するために、数種の淡水魚の中から網に沿って遊泳する習性を持たないティラピアを供試魚として選び出し、このような垣網に対する魚の行動を観察した結果、その誘導効果があることを実験的に確認した。これらの知見は定置網の特定部分に関する設計の改良に役立ちはあるが、網全体やそれぞれの細部の改良の組み合わせに関する構造の最適化は困難である。そこで、魚群行動のモデリングおよびシミュレーション手法を用いれば、海上実験を行うことなく、さまざまな条件における定置網の改良が検討でき、定置網の構造の最適化が可能であると考えられる。本研究では、定置網について、垣網や箱網を構成する網地からなる壁と返し網や網口に見られる返し構造との二つの基本構造に分けて、それぞれモデリングを試みた。さらに、これまででは実験観察により決定していた壁の影響範囲などのパラメータや、また魚の遊泳空間の大きさによるパラメータの変化についても検討を行った。

*1 本論文の要旨は平成5年度日本水産学会春季大会(東京)で発表した。

*2 東京水産大学海洋生産学科 (Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

材料と方法

モデルの基本式 モデルの基本的な考え方は、 N_f 尾で構成される魚群の各個体を2次元平面上で運動する質点と見なして、個体*i*の行動を(1)式のような質点系の運動方程式で記述する。

$$m \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_i(t, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, \dot{\mathbf{x}}_i, \dot{\mathbf{x}}_j) + \xi_i(t) \quad (1)$$

$$i, j = 1, 2, 3, \dots, N_f; i \neq j$$

ここで、 m は群れを構成する個体の平均質量、 t は時間、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ は個体の位置ベクトル、 $\dot{\mathbf{x}}_i, \dot{\mathbf{x}}_j$ は個体の速度ベクトル、 $\ddot{\mathbf{x}}_i$ は個体の加速度ベクトルである。(1)式の右辺の \mathbf{F}_i 個体*i*の運動要因を表す外力、 ξ_i は \mathbf{F}_i だけでは説明が十分にできない要因を表す外乱である。

個体*i*が受ける外力 \mathbf{F}_i としては、個体が単独で水からの抵抗力に抗して遊泳するための力 \mathbf{F}_{i1} 、個体*i*が群の中の他の個体*j*から受ける力 \mathbf{F}_{i2} 、および個体が環境から受ける力 \mathbf{F}_{i3} の和で与えられると仮定する。 \mathbf{F}_{i1} は個体の前方推進力と水による抵抗力で、 \mathbf{F}_{i2} は個体間誘引力と成群力からなり、 \mathbf{F}_{i3} は水槽の壁からの反発力などで成り立っている。これらの力の関数形は、これまでの研究⁴⁾により、次のように与えられる。

$$\mathbf{F}_{i1} = a_i \dot{\mathbf{x}}_i / \|\dot{\mathbf{x}}_i\| - \nu \|\dot{\mathbf{x}}_i\| \dot{\mathbf{x}}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{i2} = k_{bi} \sum_{j=1}^{N_i} b_i(r_{ij}) \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{r_{ij}} + k_{ci} \sum_{j=1}^{M_i} c_i(r_{ij}) \frac{\dot{\mathbf{x}}_j - \dot{\mathbf{x}}_i}{M_i} \quad (3)$$

$$b_i(r_{ij}) = \frac{2(r_{ij}/\alpha - 1)}{(r_{ij}/\alpha - 1)^2 + 1} \quad \text{for } r_{ij} \leq \beta \quad (4)$$

$$c_i(r_{ij}) = \begin{cases} 1 - [(1 - \cos \pi r_{ij}/\delta)/2]^2 & \text{for } r_{ij} \leq \delta \\ 0 & \text{for } r_{ij} > \delta \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{i3} = k_{wi} \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{wil} \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_{wil} = \begin{cases} \nu_{il}(1 - d_{il}/d_w) \mathbf{e}_l & \text{for } \nu_{il} > 0 \text{ and } d_{il} < d_w \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、パラメータは

a_i : 前方推進力パラメータ

ν : 魚体の抵抗係数に相当するもので、 $\nu = \frac{1}{2} \rho C_D A$ (ρ は水の密度、 C_D は魚の無次元化された抵抗係数、 A は魚の体軸に垂直な面の最大断面積である。)

k_{bi} : 個体間誘引力パラメータ

k_{ci} : 成群力パラメータ

N_b, M_i : 個体間誘引力および成群力の作用範囲内の個体数

r_{ij} : 個体*i*と個体*j*の間の距離

α : 個体間の適正距離

β, δ : 個体間誘引力および成群力の作用範囲

L : 水槽の壁の枚数

k_{wi} : 壁の反発力パラメータ

ν_{il} : 個体*i*の壁*l*の法線方向の速度成分

d_w : 壁の反発力の作用範囲

d_{il} : 個体*i*と壁*l*の間の垂直距離

\mathbf{e}_l : 壁*l*の法線方向の単位ベクトル

である。

(3)式の第1項は個体間誘引力、第2項は成群力である。個体間誘引力は個体が他の個体と一定の距離を保つように作用する。成群力は(3)式の第2項に示すように、個体間で速度が平均化するように作用する。(6)式は壁からの反発力で、個体が壁から距離 d_w 以内で壁に近づくときに作用する。 $a_i, k_{bi}, k_{ci}, k_{wi}$ はそれぞれ外力の大きさを表す外力パラメータで、 $\alpha, \beta, d_w, \delta$ はそれぞれの外力の影響範囲や個体間の適正距離などを表す距離パラメータである。

網壁に対する魚の行動モデル 定置網では垣網や箱網などのような直立した壁状の網で構成されることが多い。こうした壁状に設置された網をここではまとめて網壁と呼称する。魚の進路を遮断し、その行動範囲を制限することでは網壁も水槽壁も同様である。しかし、網壁の場合は、網としての特性、例えば、網の向こう側が見えることや水槽壁に比べて柔軟性があるなどの特徴がある。したがって、モデルを定置網に応用するために、網壁に対する魚の行動をモデル化しておかなければならない。上述した基本モデルでは、水槽壁に対する扱いとして、個体が水槽壁に遭遇したとき、そのまま遊泳して壁に衝突することを防ぐ力として、壁からの反発力を受けるとした。このような壁状の物体に対する魚の行動は、水槽壁であっても、網壁であっても同様であると考えられる。ただし、反発力の大きさは水槽壁とは異なる可能性がある。そこで、網壁に対する魚の行動について水槽壁と同様な関数形を用いてモデル化することにした。すなわち、

$$\mathbf{F}_{iu} = k_{ni} \sum_{u=1}^U \mathbf{f}_{niu} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_{niu} = \begin{cases} \nu_{iu}(1 - d_{iu}/d_n) \mathbf{e}_u & \text{for } \nu_{iu} > 0 \text{ and } d_{iu} < d_n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

ここで、

k_{ni} : 網壁の反発力パラメータ

U : 網壁の枚数

ν_{iu} : 個体*i*の網壁*u*の法線方向の速度成分

d_{iu} : 個体*i*と網壁*u*の間の垂直距離

d_n : 網壁の反発力の影響範囲 (ただし、 $d_n = d_w$ とする)

\mathbf{e}_u : 網壁*u*の法線方向の単位ベクトル

である。

返し構造に対する魚の行動モデル 返し構造とは、

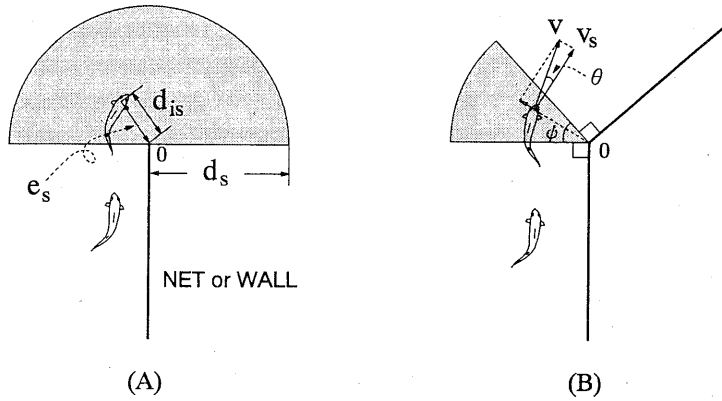


Fig. 1. Model of fish behavior for reverse structure.

e_s , unit vector to the direction of the center of reverse structure; d_s , critical distance from the center of reverse structure; d_{is} , distance between individual i and the center of reverse structure; v , velocity of fish; v_s , velocity component of fish normal to the line between individual and the center of reverse structure; θ , angle between v and v_s ; ϕ , angle between vertical lines of two netting walls.

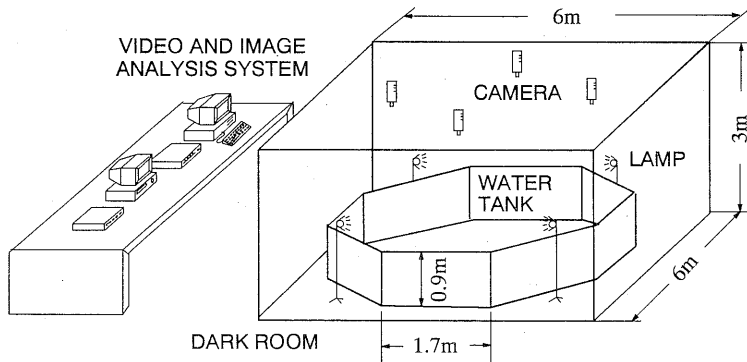


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 1(B) に示すように2枚の網壁がある角度をもって連結していることを指す。結合点における2枚の網壁の垂線の間の角度 ϕ ($0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$) を返し角とすると、Fig. 1(A) のような1枚の網壁の場合は返し角が 180° の返し構造と見なすことができる。ここでは、1枚の網壁の先端および2枚の網壁の結合点を返し構造の中心と呼ぶことにする。個体が返し構造付近を遊泳しているとき、しばしば壁に沿って遊泳進路を曲げる現象が見られる。このような魚の行動をモデル化する場合、個体が返し構造の影響範囲内 (d_s) にいるとき、返し構造の中心から誘引力が働くと考える (Fig. 1)。この誘引力に関わる要因として、個体から返し構造の中心までの距離 d_{is} と返し構造に対する個体の相対的な遊泳方向を表す角度、つまり個体と返し構造の中心を結ぶ線に直角な方向に対して個体の遊泳方向がなす角度 θ (Fig. 1) とが考えられる。返し構造の中心と個体を結ぶ線に対して個体が直角方向に遊泳しているときに誘引力は最も大きくなり、個体が中心に向かう方向あるいは離れる方向に遊泳してい

るときに誘引力はゼロとなる。また、 θ が一定で個体が返し構造の中心から離れるほど、誘引力は小さくなる。これらのことから考えて、誘引力 F_{si} は次式によって与えられるとする。

$$F_{si} = \begin{cases} k_{si}(1-d_{is}/d_s)\cos\theta e_s, & \text{for } d_{is} < d_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

式中で、

k_{si} : 返し構造の誘引力パラメータ

d_{is} : 個体 i と返し構造の中心との距離

d_s : 返し構造の誘引力の作用範囲

θ : 個体と返し構造の中心を結ぶ線に直角な方向に対して個体の遊泳方向がなす角度 ($0 \leq \theta \leq \pi/2$)

e_s : 個体から返し構造の中心方向への単位ベクトルである。

魚群行動観察実験 実験は1991年7月に東京水産大学にある室内八角水槽で行った。八角水槽は一辺長 1.7 m、深さ 0.9 m で、内壁面は白色である。実験の概略図を Fig. 2 に示す。八角水槽の周囲を暗幕で囲い ($6 \times 6 \times 3$

m³), 天井にTVカメラを4個設置した。この4個のカメラの画像をビデオスイッチャーによって1つの水槽画面に合成し、ビデオテープに録画できるようにした。また、本モデルでは平面上で二次元的に魚の行動を扱っているため、水深による位置のずれを少なくするために、水深は15 cmとした。Fig. 3は水槽の中に端口状に設置した仕切網を示すもので、点線は白色もじ網(PA マルチ, 目合10 mm, 直径1 mm)を張った塩化ビニールパイプ(灰色, 直径18 mm)の網枠による境界線を示す。

供試魚として、ニジマス *Oncorhynchus mykiss* とウグ

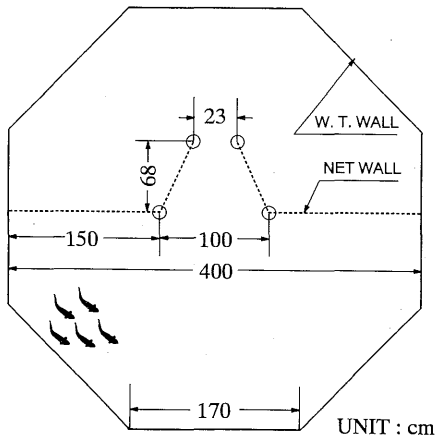


Fig. 3. Setting of the net in the experimental tank. The open circle (○) indicates the center of reverse structure.

イ *Tribolodon hakonensis* を使用した。魚を購入して、実験水槽と同じ部屋で自然状況下に一ヶ月ほど飼育して実験に供した。画像解析装置の処理能力を考慮して、それぞれの魚種について、魚の尾数を1~5尾にして実験を行った。実験の手順は以下の通りである。飼育水槽から魚を取り出し、実験水槽に入れて、約20分間魚を水槽内で馴致させた。馴致後、魚の行動の映像をビデオテープに10分間録画した。実験中は水面上の照度をほぼ135 lxにした。また実験は10時から17時までの間で行った。各実験における供試魚の平均体長と水温をTable 1に示す。録画した映像から画像解析システムを用いて、0.5秒間隔で魚体頭部の座標データを読み取り、時系列データに変換して、フロッピーディスクに記録した。

パラメータの推定方法 モデルの中の距離に関するパラメータについては、これまでは実験観察をもとに試行錯誤的に適切な値を与えていたが、その値が必ずしも最適であるとは限らない。ここでは、返し構造および壁(水槽壁と網壁)の影響範囲 d_s と d_w を10~200 cmの範囲で変化させたとき、それぞれモデルの外力パラメータを推定した後、残差の平方和を計算し、これを最小にする d_s または d_w を最適なパラメータ d_s^* と d_w^* とした。また、個体間の適正距離 α は梁ら³⁾の方法で与えた。本実験の最大尾数が5尾で、群の広がりが小さく、個体間誘引力および成群力の影響範囲 β と δ の最適値の検討が難しいので、従来通りに実験観察より与えた。

Table 1. Experimental fishes and conditions

Fish species	Mean length (cm)	Water temperature (°C)	Experimental date
Rainbow trout <i>Oncorhynchus mykiss</i>	18.0	19.0	13 May 1991
Japanese dace <i>Tribolodon hakonensis</i>	10.4	21.0	5 Jun 1991

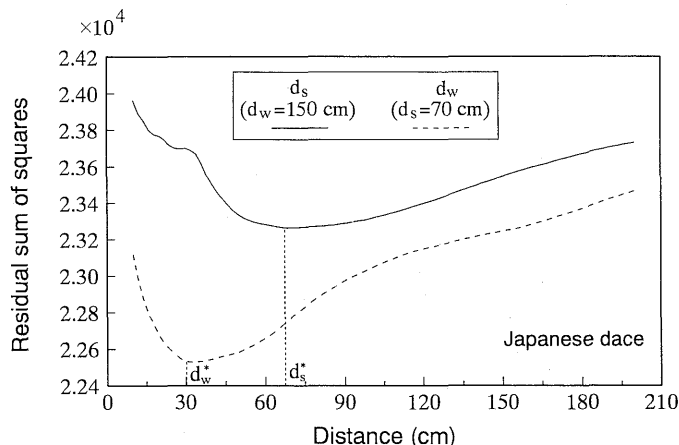


Fig. 4. Optimal values of d_w , the critical distance from the tank wall, and d_s , the critical distance from the center of reverse structure for Japanese dace *T. hakonensis*.

Table 2. Values of known parameters

Fish species	ν (g/cm)	α (cm)	β (cm)	δ (cm)	d_w^* (cm)	d_s^* (cm)
Rainbow trout <i>O. mykiss</i>	0.31	25	150	150	100	—
Japanese dace <i>T. hakonensis</i>	0.11	12	150	150	30	70

Table 3. Estimated values of parameters for Japanese dace *T. hakonensis*

No. of fish	No.	Parameters					
N_f	i	a_i	k_{wi}	k_{ni}	k_{si}	k_{bi}	k_{ci}
1	1	22.6	23.5	23.2	305	—	—
	2	7.9	22.3	19.2	195	43.7	1.5
2	1	21.5	14.8	16.1	159	28.6	11.0
	2	26.4	25.3	21.9	477	27.4	5.0
	3	36.8	23.6	28.3	293	26.6	6.5
3	1	39.3	22.0	25.0	323	54.2	9.1
	2	18.1	21.9	24.2	492	32.8	4.1
	3	55.9	27.0	24.0	592	37.4	7.8
	4	20.8	23.4	26.8	636	32.8	6.8
4	1	39.7	21.4	24.6	443	43.1	8.6
	2	25.2	21.7	21.6	76	12.8	6.6
	3	32.4	21.3	17.1	43	21.5	7.5
	4	22.7	20.3	20.6	87	17.3	9.5
	5	16.8	15.3	15.3	48	22.4	10.9
5	1	9.6	17.1	12.2	80	22.2	9.7
	Mean value	26.38	21.39	21.34	283.3	30.20	7.47
	S. D.	12.19	3.28	4.41	197.9	10.96	2.55
	Coefficient of variation (%)	46.2	15.3	20.7	96.9	36.3	34.1

外力パラメータについては、Sannomiya and Matuda⁹⁾の方法に準じて、最小自乗法により魚の行動の時系列データから推定した。

結果および考察

パラメータ推定 影響範囲 d_s, d_w に対する残差平方和を Fig. 4 にウグイの例として示す。 d_s と d_w はそれぞれ約 70 cm, 30 cm に残差平方和を最小にする値を持ち、これらのパラメータには最適値が存在することが分かる。そこで、本論文では d_s と d_w として、ここで得られた最適値で与えた。その値およびそのほかの距離パラメータ、魚体の抵抗係数を Table 2 に示した。

モデルの外力パラメータ $a_i, k_{wi}, k_{ni}, k_{si}, k_{bi}, k_{ci}$ の推定結果を Table 3 と Table 4 に示した。ウグイについては、すべての個体に対して返し構造の誘引力パラメータ (k_{si}) および網壁の反発力パラメータ (k_{ni}) を推定できた。ニジマスの場合、実験中に端口に接近する個体は1尾もいなかったため、返し構造の誘引力パラメータ (k_{si}) お

よびこの誘引力の作用範囲 (d_s^*) を推定できなかった。ニジマスに対する返し構造の影響については、改めて検討する必要がある。

水槽壁と網壁による反発力パラメータの比較 Table 3 と Table 4 に示したように、魚種によって水槽壁による反発力パラメータ (k_{wi}) と網壁による反発力パラメータ (k_{ni}) の関係はそれぞれ次のような特徴がある。ウグイの場合、 k_{wi} と k_{ni} の平均値±標準偏差はそれぞれ 21.39 ± 3.28 と 21.34 ± 4.41 で、ほぼ同じ値を示した。ニジマスの結果では、平均値が k_{ni} より k_{wi} で約 20% ほど大きくなっている。しかし、F 検定の結果、両者には 5% の有意水準では差が認められなかった。パラメータの値からみれば、2 尾での実験の 1 尾目を除けば、残りのすべての個体の k_{wi} が k_{ni} より大きくなっている。2 尾の実験の 1 尾目の k_{ni} が k_{wi} より 2 倍以上も大きいことが検定の結果を大きく左右していると考えられる。このことから、ニジマスについては、 k_{wi} が k_{ni} より若干大きいと考えられる。このように、本実験に用いた 2 種類の魚で

Table 4. Estimated values of parameters for rainbow trout *O. mykiss*

No. of fish	No.	Parameters					
N_f	i	a_i	k_{wi}	k_{ni}	k_{ci}	k_{bi}	k_{ci}
2	1	157.0	152.0	341.0	—	41.1	5.0
	2	133.0	71.0	70.4	—	331.0	3.7
3	1	38.7	94.2	52.4	—	107.0	8.4
	2	97.6	80.9	49.1	—	65.9	12.3
	3	120.0	84.0	70.4	—	180.0	24.8
4	1	40.1	95.6	76.1	—	68.9	2.8
	2	34.3	131.0	111.0	—	73.2	17.7
	3	274.0	139.0	105.0	—	33.3	31.7
	4	16.1	153.0	81.5	—	86.1	10.0
5	1	101.0	98.1	66.8	—	170.0	18.4
	2	152.0	79.9	67.0	—	212.0	22.6
	3	113.0	224.0	85.1	—	171.0	21.9
	4	209.0	145.0	104.0	—	240.0	28.8
	5	80.4	97.6	67.6	—	155.0	25.0
Mean value		111.87	117.52	96.24	—	138.18	16.64
S.D.		69.12	40.56	70.22	—	82.58	9.28
Coefficient of variation (%)		61.8	34.5	73.0	—	59.8	55.8

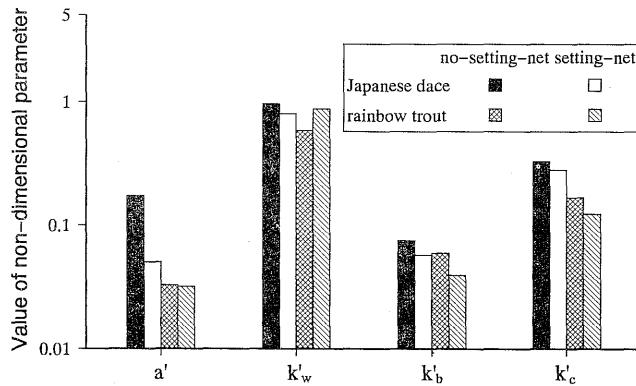


Fig. 5. Difference in non-dimensional parameter values between setting the net and not setting the net. a' , propulsive force; k'_w , repulsive force; k'_b , interactive force; k'_c , schooling force.

は, k_{wi} と k_{ni} はほぼ同じか, k_{wi} の方が若干大きくなること分かる。

パラメータに対する遊泳空間の大きさの影響 Matuda *et al.*⁴⁾ は本実験と同じ水槽において, ウグイ, ニジマス, ティラピアとコイの行動実験データ (一種につき1~5尾) に基づいて, 魚種間におけるパラメータの相違を検討した。本実験では水槽内に設置した仕切網によって, 魚の遊泳空間はほぼ水槽の半分になる。ここで, このような魚の遊泳空間の大きさの違いによるパラメータの変化を検討した。比較のために, 本研究で得られた壁の反発力の影響範囲の最適値 d^* を用いて, Matuda *et al.*⁴⁾ のデータから外力パラメータ a_i , k_{wi} , k_{bi} , k_{ci} を推定し

直した。これと今回得られたパラメータを Matuda *et al.*⁴⁾ と同様な方法で無次元化して, Fig. 5 に示した。同図によると, ウグイの場合では, 無次元化した前方推進力パラメータは仕切網の存在下でかなり小さくなっている。一方, 他の無次元化パラメータには仕切網の有無によって大きな差が認められなかった。この結果は高木ら¹²⁾がモツゴ *Pseudorasbora parva* を用いて水槽サイズによるパラメータの変化を検討した結果と一致している。しかし, ニジマスの場合では, いずれの無次元化パラメータでも大きな差は認められなかった。ウグイは水槽壁に沿って遊泳することが多いので, 仕切網の存在によって直線で遊泳できる距離が短くなったことが前方推

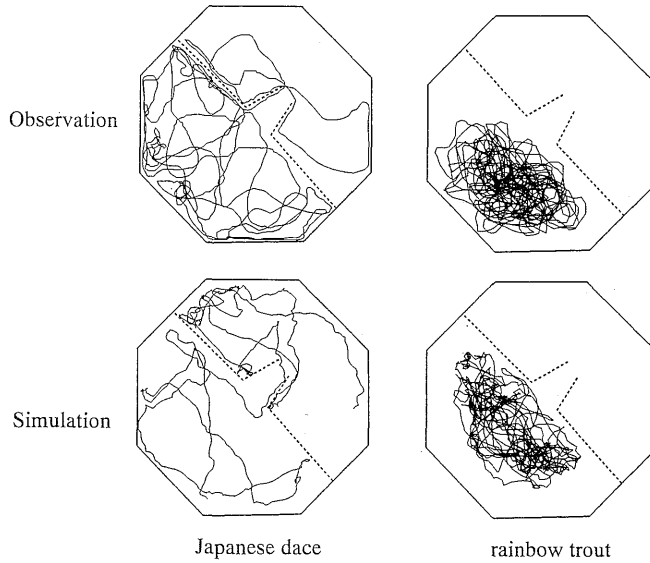


Fig. 6. Comparison of fish swimming trajectory between observations and model simulation.

Left, Japanese dace *T. hakonensis*; right, rainbow trout *O. mykiss*; upper, observation; lower, simulation.

進力パラメータを減少させた原因であると考えられる。これに対して、ニジマスは壁に沿って遊泳しないため、そうした影響を受けなかったと思われる。

端口に対する魚の行動シミュレーション 先に推定したパラメータを用いて、実験と同様な境界条件でシミュレーションを行い、魚の遊泳行動を再現できるかどうかによってモデルの妥当性を検討する。シミュレーションを行うとき、外乱⁸⁾は梁ら³⁾と同様に、平均値0、実験で得られた残差の分散の8割の値を分散とした正規乱数で与えた。Fig. 6に示したのは5尾の場合の観察実験結果とパラメータを用いたシミュレーションにおける魚の遊泳軌跡である。魚はほとんど群をなして遊泳したので、5尾の中の1尾の結果を代表として示した。同図によると、ウグイは網や壁に沿って遊泳するのに対して、ニジマスは網や壁にあまり接近せずに遊泳するなど、両魚種の行動はそれぞれ異なる。これはシミュレーションでもよく再現されている。特にウグイにおける端口付近での遊泳行動は観察実験とシミュレーションの結果がよく似通っている。この結果から本論文の網壁と返し構造に対する魚の行動モデルは妥当であると考えられる。

本研究は網壁と返し構造に対する魚の行動をモデル化して、ウグイとニジマスの水槽実験データを用いてパラメータを推定した。このパラメータを用いて、シミュレーションを行った結果、モデルの妥当性が認められた。また、水槽壁と網壁の反発力パラメータの関係については、今回の2実験魚種では、水槽壁と網壁ではほぼ等しいか、若干水槽壁で反発力パラメータが大きかった。今後はさらに多くの遊泳行動の異なる魚種のデータで検

討する必要がある。また、垣網に沿って泳ぐ魚種と沿って泳がない魚種があるとされている。^{9, 11)} 垣網に沿って泳ぐ魚種には網壁の誘引力が働くのではないかと思われる。これについては今後の研究課題としたい。

文 献

- 1) K. Matuda and N. Sannomiya: Computer simulation of fish behavior in relation to fishing gear—1. *Nippon Suisan Gakkai-shi*, **46**, 689–697 (1980).
- 2) 三宮信夫, 中峯 浩, 岩崎永弥: 魚群行動を表す物理モデルの妥当性の検討. システム制御情報学会論文誌, **3**, 14–20 (1990).
- 3) 梁 振林, 松田 皎, 三宮信夫: ウグイの水槽実験データによる魚群行動モデルの検討. 日水誌, **58**, 853–860 (1992).
- 4) K. Matuda, Z. Liang, and N. Sannomiya: Comparison among fish species on parameters in fish behavior model. *Proc. ICES Mar. Sci. Symp.*, **196**, 103–107 (1993).
- 5) N. Sannomiya and K. Matuda: Least squares parameter estimation in fish behavior model. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **53**, 1951–1957 (1987).
- 6) 三宮信夫, 中峯 浩, 松田 皎: 魚群行動モデルの感度解析. 日水誌, **56**, 1973–1977 (1990).
- 7) 井上 実, 王 明彦, 有元貴文: 昇り勾配に対する魚の行動に関する水槽実験. 日水誌, **53**, 453–458 (1986).
- 8) 松田 皎, 兼広春之, 鈴木 誠: 魚群行動実験による定置模型の端口の性能の比較. 日水誌, **50**, 609–615 (1984).
- 9) 金 文官, 鈴木 誠, 兼広春之: 返し網付垣網の誘導効果に関する基礎的研究. 日水誌, **58**, 1641–1646 (1992).
- 10) 井上喜洋: 垣網の阻止効果. 日水誌, **53**, 1135–1140 (1987).
- 11) 宮本秀明: 定置網漁論. 河出書房, 東京, 1952, pp. 260–261.
- 12) 高木 力, 梨本勝昭, 山本勝太郎, 平石智徳: 形状と大きさの異なる水槽内における魚群行動について. 日水誌, **59**, 1279–1287 (1993).