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

高木 力, 梨本勝昭, 山本勝太郎, 平石智徳

(1992 年 12 月 8 日受付)

Fish Schooling Behavior in Water Tanks of Different Shapes and Sizes^{*1}Tsutomu Takagi,^{*2} Katsuaki Nashimoto,^{*2} Katsutaro Yamamoto,^{*2}
and Tomonori Hiraishi^{*2}

This paper describes the influence of water tank shape and size on the schooling behavior of fish. In this experiment, we used two dimensional water tanks of two different shapes, i.e. circular and square, of various diameters and side lengths between 50 and 125 cm. Fish schooling behavior was expressed mathematically in terms of the Sannomiya and Matuda model which comprises of seven linear forces influencing fish behavior. The results showed that all forces except the propulsive force were independent of tank size and that schooling and attractive forces against the walls were strongest in the circular tanks. The random force was greatest in magnitude, accounting for approximately 60-75% of the total, followed by the repulsive force to the walls and the schooling force which affected fish schooling behavior. Fish schooling in square tanks tended to behave irregularly and remain in the tank corners.

魚類の蓄養施設では、魚群は水槽や網生簀といった閉鎖された空間内に入れられることが多い。この閉鎖された空間の形状は一般に設計上の簡便さから方形が多く用いられている。しかし、どのような形状や大きさが蓄養に適しているのかは充分解明されていないのが現状である。魚群に対して空間の大きさや形状が及ぼす影響について研究した例は少なく、定置網の入網行動¹⁾やトラップ漁具に対する魚群行動²⁾、昇り勾配に対する魚群行動³⁾などの観測は行なわれているが、これらは定置網などの漁具の全体あるいは部分的な形状に対する魚群行動を研究したもので空間の大きさや形状と魚群行動との関係を定量化するまでには至っていない。

そこで本研究では、魚が群れをなして遊泳するのに適した閉鎖された空間の大きさや形状についての基礎的な資料を得るために大きさの異なる円形と方形の平面水槽内の魚群の動きを調べ魚群行動モデルを適用し、検討した。

実験方法

実験装置 本研究では、水温や照度などの特定の環境条件をほぼ一定に保つ理由から水槽内の魚群行動を恒温室内において観察した。照明には室内の天井に取り付けられている蛍光灯を使用し、照度を一定に保つため外部

からの光の進入は暗幕で防いだ。実験水槽の水面上での照度は 275 lx であった。

Fig. 1 に実験水槽を示す。縦、横が 180 cm、高さが 20 cm の塩化ビニール製の角形水槽の中に高さ 20 cm の白色塩化ビニール製の壁を設置し、直径が 50, 60, 80, 125 cm の閉鎖平面（円形平面水槽と呼ぶ）と、一辺の長さが 50, 60, 80, 100, 125 cm の正方形の閉鎖平面（方形平面水槽と呼ぶ）を作り、この閉鎖平面を実験水槽とした。Table 1 に使用した円形、方形平面水槽の直径および一辺の長さや面積を示す。

魚群の行動の観察は 3 次元に行なうことが最も望ましいが、この場合はデータ量が膨大になり解析が複雑になるので、本研究では 2 次元内の行動に限定することにした。実験魚は淡水魚のモツゴ *Pseudorasbora parva* を使用した。本種の成魚はあまり大群を形成せず、数尾が小群をなして泳ぐとされている。⁴⁾ 水槽内では比較的群れをつくり易いこと、適度に遊泳すること、大きさが適当であること、入手し易いこと、飼育が容易であることの 5 つの条件を考慮して、実験魚を本種に決定した。実験魚の平均体長は 6.5 cm、平均体高は 1.4 cm、平均体重は 4.1 g であった。水温は実験魚が活発に遊泳する 18°C から 20°C の範囲に設定した。実験水槽の水深は 2 次元内に行動を限定したことから実験魚の大きさから 5 cm と

*1 平成 3 年度日本水産学会春季大会において口頭発表した。

*2 北海道大学水産学部 (Faculty Fisheries, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041, Japan).

Fig. 1. Schematic diagram of experimental tanks.

A, circular experimental tank; B, square experimental tank.

Table 1. Details of the dimensions of two tanks used in fish schooling behavior

Circular tank		Square tank	
Diameter (cm)	Area (m ²)	Length (cm)	Area (m ²)
125	1.2	125	1.6
—	—	100	1.0
80	0.5	80	0.6
60	0.3	60	0.4
50	0.2	50	0.3

した。

Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。実験の手順は次のとおりである。まず飼育水槽で飼育されている約 200 尾ほどの実験魚の中から 3 尾を任意に抽出し、実験水槽に入れる。魚群の構成尾数を 3 尾と決定した理由は、尾数が多くなると各個体を識別することが困難になること、魚群が複数に分裂すること、また、群としての最小単位が 3 尾程度であるという Partridge⁵⁾ や兼廣ら⁶⁾ の報告による。

実験水槽内の魚群の遊泳行動はビデオカメラ (SONY

Fig. 2. Schematic view of experimental equipment.

A, experimental tank; B, video camera; C, time generator; D, video tape recorder; E, computer; F, monitor; G, curtain wall.

製 CCD-V900) によって撮影した。実験室内の高さの制約から水面とカメラのレンズまでの距離は 200 cm とした。水槽内の全景が撮影できるようにビデオカメラにはワイドコンバージョンレンズを取り付けた。撮影した映像はタイムジェネレータ (朋栄製 VTG-33) を介して 100 分の 1 秒までの時刻とともにビデオテープレコーダー (松下電器製 AG-7300) に録画した。実験魚が群れをなして遊泳し始めた後に撮影を開始した。どの実験魚の場合でも魚群として遊泳し始めるのに約 5 分程度を要した。撮影時間は約 10 分間とした。測定は同じ平面水槽について実験魚を交換して 3 回行なった。

ビデオテープに録画した映像をビデオテープレコーダーによって再生し、モニターに映し出した。魚群の各個体の吻端を魚群の座標位置としてモニター画面上で 0.5 秒ごとに読み取り、1 個体につき 1000 点ずつ計測した。座標位置データはワイドコンバージョンレンズを介して撮影しているため、歪んだ映像をもとに計測していることになる。そこで、補正はあらかじめ長さのわかっている格子板を水槽底面に設置して撮影し、実際の座標とモニター画面上から得られた座標との差を求めることを行なった。

解析方法 魚群の行動を正確に表現するには遊泳速度や個体間距離といったものだけでは行動の特徴を断片的に捉えるだけで不十分である。行動の特徴を定量的に表現するためには、魚群の行動を決定する要因を明らかにするとともに、その要因を数量化する必要がある。そこで本研究では、解析方法として Sannomiya and Matuda⁷⁾ が考案した魚群行動の物理モデルを用いることにした。このモデルでは魚群の行動を決定する要素が、魚群に働く 7 つの力の線形結合で表されているので、モデル内の未知パラメータを推定することにより様々な条件下での空間内の魚群の行動を定量的に把握して、比較検討することが容易にできる。

モデルの概要 モデルの推定方法は Sannomiya and Matuda⁷⁾ と同様な方法で行なった。以下にモデルの概要を述べる。

魚群を構成する個体を質点とみなし、個体 i に加わる外力 F_i を時間 t 、位置ベクトル x_i 、 x_j および速度ベクトル $\dot{x}_i$ 、 $\dot{x}_j$ の関数で与え、個体の運動方程式を次式のように表す。

$$m\ddot{x}_i = F_i(t, x_i, \dot{x}_i, x_j, \dot{x}_j) \quad (1)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j$$

ここに i, j は魚群の中のそれぞれの個体を、 m は個体の平均質量を、 F_i は個体 i に加わる外力を、 N は魚群を構成している個体数を表す。

(1) 式の外力 F_i は 7 つの力に分けて考える。

$$F_i = F_{dt} + F_{at} + F_{bt} + F_{ct} + F_{wt}^+ + F_{wt}^- + F_{rt} \quad (2)$$

F_{dt} : 個体が水からうける抵抗力

F_{at} : 個体の持っている前方推進力

F_{bt} : 個体間誘引力

F_{ct} : 成群力

F_{wt}^+ : 壁からの反発力

F_{wt}^- : 壁からの引力

F_{rt} : 個体の持つランダムな力

(2) 式に含まれるこれらの力はそれぞれ独自の関数形によって定義され、ランダムな力を除いて、力の大きさを表すパラメータ ν , a , k_b , k_c , k_w^+ , k_w^- で定義される。これらのパラメータは行動観察および魚群行動の時系列データから求める。さらに、(2) 式の各力を表す具体的な関数形の中には、個体と個体との接近臨界距離などを表す距離に関する未知パラメータ α , β , δ , d^+ , d^- が含まれているが、これらは遊泳運動の映像記録から求める。(2) 式は ν , a , k_b , k_c , k_w^+ , k_w^- だけを含む単純な線形結合の方程式となるので、これらの未知パラメータは魚群の各個体の位置ベクトルの時系列データから最小自乗法により求めることができる。本研究では最小自乗法は Sannomiya and Matuda⁷⁾ と同様に逐次型最小自乗法^{7,8)}を用いた。

結果および考察

遊泳行動および遊泳速度 円形平面水槽と方形平面水槽の遊泳行動の軌跡の一例を Fig. 3 に示す。図には 3 分間分の遊泳軌跡を示した。円形水槽で遊泳軌跡の一部が壁からはみ出している所も見受けられるが、これは実際の水槽壁を完全な真円に保つことができなかったことと、水槽の底面と表面では映像のスケールに若干の違いができたために生じたものと推測できる。しかし、これによって生ずる誤差はパラメータの推定にはほとんど影響が表れなかったため、解析には魚群行動の時系列データをそのまま用いた。遊泳行動の共通点として壁に沿って泳ぐ傾向が認められるが、方形平面水槽の場合は水槽の角に滞留し、この部分で不規則な運動をする傾向があった。また、各実験とも 3 個体の魚は常に群れをなして泳ぐ傾向が認められた。

Fig. 4 は各実験水槽の大きさに対する平均遊泳速度を示したものである。魚群の行動を 2 次元に限定したことから水槽の大きさは魚群の遊泳可能な広さである面積で表すことにした。プロット点は実験した全ての個体の遊泳速度の平均値から算出した。図から円形および方形平面水槽のどちらも水槽の大きさと遊泳速度との関係はほぼ同じ傾向を示し、水槽の大きさにともない遊泳速度は大きくなっていることがわかる。

モデルへの適合性の検討 モデル内の未知パラメータの推定結果を Table 2 に示す。水から受ける抵抗力の大

Fig. 3. Examples of fish movement in experimental tanks.
D, tank diameter in cm; L, side length in cm.

Fig. 4. Mean swimming speed of individuals for each tank size.

●, circular tank; ◆, square tank.

きさを表すパラメータ ν については、個体の断面積と抵抗係数、水の密度から求めることができ、 $\nu=0.048$ g/cm であった。距離に関する未知パラメータ α , β , δ , d^+ , d^- は魚群行動の映像から、おおよそその値を初期値として推定してからモデル内の残差項の分散が最も小さくなる様なパラメータを試行錯誤的に決定し、最終的に $\alpha=1$, $\beta=4$, $\delta=25$, $d^+=8$, $d^-=15$ とした。

モデル内のパラメータを推定することができても、現象をうまく表していなければそのモデルは意味のないも

のとなってしまう。そこで (2) 式に示した個体の持つランダムな力 $F_{r,i}$ をモデルの残差項とみなし、この残差項による統計的な有意性の検定を行なった。実際の観測値から得られる魚群の行動を $y(n)$, モデルによる推定値を $\hat{y}(n)$, 残差を $r(n)$ とすると、

$$r(n) = y(n) - \hat{y}(n) \quad (3)$$

とおくことができる。ここで、 n は $t=n\Delta t$ とすると、 t は観測時刻、 Δt はサンプリング間隔、 $n=1, 2, \dots$ である。魚群の動きがモデル内の各力によって表現されているならば残差 $r(n)$ は系統だった片寄りがなく時系列的に互いに独立であることが期待できる。そこで Sannomiya and Matuda⁷⁾ と同様、残差の時系列を順に結んだ線分が残差の平均値と交わる数を c とすると、 $r(n)$ が独立である条件は c が平均値 $(n-1)/2$, 分散 $\sqrt{n-1}/2$ の正規分布となることを用いて残差の独立性を検定した。このとき有意水準 1% とする c の信頼区間は 2899~3099 の範囲となる。Table 3 に示す c の値は円形平面水槽の大きさ 80, 125 cm の実験番号 3 を除く全てがこの信頼区間内におさまっており、本実験で得られた魚群行動の時系列データはモデルに概ね適合したものと考えられる。

また、モデルによるシミュレーションと実際の遊泳行動を比較することによってもモデルへの適合性の検討を行なった。Fig. 5 には直径または一辺がそれぞれ 60 cm の場合の平面水槽について推定したパラメータをモデルにあてはめたシミュレーションと実際の遊泳行動を示し

Table 2. The value of each force coefficient

Length (cm)	Experimental No.	Square tank					Circular tank				
		a (g·cm/s ²)	k_b (g·cm ² /s ²)	k_c (g/s)	k_w^+ (g/cm)	k_w^- (g/cm)	a (g·cm/s ²)	k_b (g·cm ² /s ²)	k_c (g/s)	k_w^+ (g/cm)	k_w^- (g/cm)
50	1	-0.02	36.48	1.98	11.91	4.13	-11.13	3.07	4.32	6.95	2.90
	2	-5.66	36.39	2.54	13.10	0.10	-7.16	17.75	2.89	9.84	3.93
	3	1.62	35.79	2.69	13.47	1.03	1.71	48.35	2.76	17.77	4.78
	mean	-1.35	36.22	2.40	12.83	1.75	-5.53	23.06	3.32	11.52	3.87
60	1	-2.20	29.69	2.72	10.31	2.67	0.78	35.77	2.75	16.26	5.05
	2	0.61	34.63	2.79	12.46	2.75	-3.08	31.14	3.76	14.34	3.68
	3	-2.08	32.43	2.48	11.68	1.87	-3.61	44.09	4.03	11.77	5.11
	mean	-1.22	32.25	2.66	11.48	2.43	-1.97	37.00	3.51	14.13	4.61
80	1	3.13	34.27	2.72	12.72	4.63	-5.05	25.68	2.45	14.04	3.50
	2	-0.16	31.82	2.89	11.50	1.59	-7.85	14.14	3.70	9.11	4.61
	3	0.23	31.37	3.10	12.25	1.64	-5.40	56.69	3.92	15.71	3.73
	mean	1.07	32.49	2.90	12.19	2.62	-6.10	32.17	3.36	12.95	3.95
100	1	-0.32	26.11	2.41	13.21	1.96	—	—	—	—	—
	2	-1.24	17.89	2.90	11.86	2.51	—	—	—	—	—
	3	0.06	28.03	2.06	11.78	2.42	—	—	—	—	—
	mean	-0.50	24.01	2.46	12.28	2.30	—	—	—	—	—
125	1	1.71	32.27	2.46	13.80	1.94	-1.94	43.61	4.83	13.56	2.43
	2	1.96	20.55	2.93	13.25	2.26	0.15	31.67	3.34	18.61	4.07
	3	2.13	40.95	3.11	15.37	0.73	3.97	40.97	3.82	19.27	5.81
	mean	1.93	31.26	2.83	14.14	1.64	2.18	38.75	4.00	17.15	4.10

Table 3. The estimated values of C in circular and square tank experiments

Experimental tank	Experimental No.	Length (cm)				
		125	100	80	60	50
Circular	1	2929	—	3053	3013	3024
	2	3067	—	3069	3012	3072
	3	3104	—	3202	2975	2965
Square	1	2984	2995	3008	2942	2958
	2	2974	3096	2976	3008	3030
	3	2981	3053	2964	3008	3030

Fig. 5. Comparison of fish behavior between experiment and simulation.
D, tank diameter in cm; L, side length in cm.

た。シミュレーションに用いた各パラメータの値は Table 2 の値を用いた。また、全ての実験について、(3) 式から残差の平均値と標準偏差の値の平均は、それぞれ概ね 0, 1.7 であったので、ランダムな力の値を平均 0, 標準偏差 1.7 の正規乱数として与えた。実際の遊泳行動とそれに対応するシミュレーションを比較してみると円形平面水槽の場合は水槽壁に沿って周回して動き回る行動がシミュレーションの場合にも見うけられ、実際の遊泳行動の特徴をよく表現しているものと思われる。また、方形平面水槽の場合は水槽に沿って動き回る行動がシミュレーションではあまり見うけられないものの、実際の行動で見られたように水槽壁の角部分に魚群が集まりやすく、かつ、この部分で不規則に動き回る行動がシミュ

レーションでも確かめられた。同様に他の平面水槽についてもシミュレーションは実際の行動の特徴をよく表現していた。以上の2つの方法で検討した結果、本実験で得られた魚群行動の時系列データはモデルに適合したものと判断できたので、以後これによって求められたパラメータをそれぞれの水槽について比較検討した。

パラメータの相違 モデルの各パラメータが水槽の形状と大きさの違いによってどのように変化するかを比較するため、得られたパラメータ a , k_b , k_c , k_w^+ , k_w^- と水槽の大きさを表す面積との関係を Fig. 6 に示した。図には3回の実験で得られた平均値も示した。円形、方形の水槽ともに推進力の大きさを表すパラメータ a の平均値は水槽の大きさが大きくなるにつれて、増加する傾

Fig. 6. Dependence of each force coefficient on the shape and size of the experimental tank.
 ○, circular tank; ◇, square tank; ●, mean value in the case of the circular tanks;
 ◆, mean value in the case of the square tanks.

Fig. 7. Comparison of force coefficients for the circular experimental tanks.
 D, tank diameter in cm.

向がある。その他のパラメータについては推定値のばらつきなどを考慮すると水槽の大きさとパラメータの間には顕著な関係は認められなかった。成群力の大きさを表すパラメータ k_c と壁からの引力を表すパラメータ k_w^- については常に円形平面水槽の方が方形平面水槽よりも大きかった。成群力はある個体が臨界距離内の他の個体と向きと速度を揃えるような関数形になっており、壁からの引力は一定距離内で個体に対して壁から垂直方向に引力が働く関数形になっている。これらのことから、円形平面水槽では方形平面水槽よりも、魚は群れとしての行動や壁に沿って行動しやすいことを表している。また、方形平面水槽では魚群が水槽の角付近で滞留することが観察され、この角付近の滞留が成群力と壁か

らの引力を小さくさせたものと考えられる。

各平面水槽で得られたパラメータの大きさから魚群行動に及ぼすそれぞれの力の大きさを比較した結果を Fig. 7, Fig. 8 に示した。ただし、各パラメータの単位が異なることから本論文では、全ての力が平均 0、分散 1 になる様に標準化して各パラメータの値を比較した。標準化は以下の様に行なった。

いま、(2) 式を

$$F_i = v f_{a_i} + a f_{a_i} + k_b f_{b_i} + k_c f_{c_i} + k_w^+ f_{w_i^+} + k_w^- f_{w_i^-} + F_{r_i} \quad (4)$$

とおく。このとき、例えば、推進力の大きさを表すパラメータ a の標準化された値 a^* は、 $a^* = a \sqrt{s_a / s_F}$ となる。⁹⁾ ただし、 s_a, s_F はそれぞれ f_{a_i}, F_i の分散を表す。

Fig. 8. Comparison of force coefficients for square experimental tanks.
L, side length in cm.

同様に、他のパラメータについてもそれぞれ標準化を行ない、 v^* , a^* , k_b^* , k_c^* , k_w^{+*} , k_w^{-*} を求めた。なお、標準化した値はその大きさのみが問題となるので、Fig. 7, Fig. 8 には各パラメータの絶対値を示した。図から、円形、方形平面水槽とも水槽の大きさに関係なく成群力を表すパラメータ k_c^* の値が最も大きく、次いで壁からの反発力を表すパラメータ k_w^{+*} の値が大きいことがわかる。従って円形、方形平面水槽ともランダムな力を除く6つの力のうちで成群力が最も大きく、次いで壁からの反発力が大きいことがわかる。これらの結果から、各個体の動きは他個体の速度と向きに影響され、また壁そのものの影響も魚群行動を制御する大きな要因となっていることを示唆している。また、魚群行動に及ぼす6つの力のそれぞれの大きさの割合については円形平面水槽と方形平面水槽で大きな違いは見られない。

ランダムな力 F_{ri} は他の力では説明されない残差項であるから力の大きさを表すパラメータは含まれておらず、モデル内における影響力の度合いについて、直接他の力と比較することはできない。そこでモデルにおける F_{ri} の寄与率 R^2 を次式で求めた。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (\hat{F}_i - \bar{\hat{F}})^2}{\sum_{i=1}^T (F_i - \bar{F})^2} \quad (5)$$

ここで $\hat{F}$, F は、それぞれ (2) 式のモデルにより推定された各時刻における個体に加わる力および実際に個体に加わる力を表している。 $\bar{\hat{F}}$, $\bar{F}$ はそれぞれ $\hat{F}$, F の平均値である。また、 $\sum$ は時刻についての総和を表している。水槽別に寄与率 R^2 と水槽の大きさとの関係を整理した結果を Fig. 9 に示す。ランダムな力の寄与率 R^2 は測定によって変動するものの円形、方形平面水槽とも大きさが変わってもその平均値は約 60~75% の範囲であった。

Fig. 9. Relationship between contribution rate R^2 and tank size.

○, circular tank; ◇, square tank; ●, mean value in the case of the circular tanks; ◆, mean value in the case of the square tanks.

モデル内の残差項の検定では互いに無相関であることが確認されているので、これを考慮すれば、魚群の行動は半分以上がランダムな成分であると考えられる。しかし、残差が実際に魚群行動のランダム性を反映したものであるのか、測定による誤差など物理モデルの持っている特性からきているものなのかは今後検討の必要がある。

本研究の結果から、水槽の大きさの違いによる魚群行動の差異は実際の観測結果およびモデル内のパラメータの推定結果ともに、遊泳速度と推進力のパラメータ以外

には大きな違いはなく、遊泳速度は水槽の大きさが大きくなるにつれて増加する傾向が見られた。このことは実際の施設では、ある空間の大きさまでは蓄養殖魚の遊泳速度に影響するものと考えられる。また、遊泳速度に影響を与えない空間の大きさが存在することを示唆しているものと考えられる。水槽の形状の違いによる魚群行動の差異は実際の観測結果からは、方形平面水槽は円形平面水槽に比べて角部分に滞留したり不規則な運動をすることが多く見られた。また、モデル内のパラメータ推定結果からは成群力と壁からの引力のパラメータが円形平面水槽の方が大きな値をとることが認められた。円形と方形平面水槽の形状的な違いは角の存在の有無であるから、行動やパラメータの推定値の違いは水槽の角の影響によるものと考えられる。従って、空間の形状の決定にはこの影響を考慮することが必要と考えられる。実際の蓄養殖条件では魚種によっては角の影響が現れると空間内で部分的に滞留し、群れ行動に乱れが生じてしまい、空間を有効に利用できず好ましくないことも生ずる。このことを考慮すれば空間の形状は角の影響のない円形の方が望ましく、また方形であっても角の部分に丸みをおびさせる工夫などが必要と考えられる。

本研究では、魚の個体数や水槽壁の色に関しては限定

された平面水槽で実験を行なったが、今後はさらに水深、個体数、照度、魚種、壁の基質などを変化させて3次元空間内の魚群の行動を解析し、蓄養殖施設の空間の大きさや形状を決定する基礎知識を得る所存である。

終わりに、本研究を進めるにあたり、有益な御助言を頂いた三宮信夫教授に深く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 兼廣春之, 鈴木 誠, 松田 俊: 定置網模型に対する魚群行動実験およびその解析. 日本誌, **51**, 1983-1988 (1985).
- 2) 三浦訂介: 漁具研究へのシステム工学的アプローチ-I. 日本誌, **44**, 835-841 (1978).
- 3) 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. 日本誌, **52**, 453-458 (1986).
- 4) 中村守純: 日本のコイ科魚類, 資源科学シリーズ, **4**, 緑書房, 東京, 1969, p. 175.
- 5) B. L. Partridge: The Structure and Function of Fish School. *Sci. Am.*, **246**, 90-99 (1989).
- 6) 兼廣春之, 松田 俊, 鈴木 誠: タイリクバラタナゴの群サイズによる行動特性. 日本誌, **51**, 1977-1982 (1985).
- 7) Nobuo Sannomiya and Ko Matuda: Least Squares Estimation in Fish Behavior Model. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **53**, 1951-1957 (1987).
- 8) 相良節夫, 秋月影雄, 中溝高好, 片山 徹: システム同定, 計測自動制御学会, 東京, 1981, p. 116-121.
- 9) 田中 豊, 壺水共之, 脇本和昌: パソコン統計解析ハンドブック, II, 共立出版, 東京, 1984, p. 4.