魚群行動を表わす物理モデルの妥当性の検討*

三宮 信夫**・中 峯 浩**・岩崎 永弥***

A Study on the Validity of a Physical Model for Fish Behavior*

Nobuo SANNOMIYA**, Hiroshi NAKAMINE** and Hisaya IWASAKI***

In this paper, a physical model is presented for describing the behavior of fish in a water tank. The system equation includes several nonlinear terms representing the main causes for fish motion, which are introduced under the physical consideration. The model parameters are estimated by applying the least squares algorithm. It is observed from a water tank experiment that, in the case of small school, an individual acts as a leader and the others as followers. The parameter values estimated reflect the role of each individual in the school. Three models are proposed as an appropriate functional form of the interactive force. The best form is determined by examining a simulation result for the behavior of fish school encountered by a leader net.

1. 緒 言

魚群行動に関する研究は、古くから生態学的な立場で行われてきた¹⁻³。一方、大部分の魚獲方法は魚の群行動を利用しているので、魚獲性能の改善、水産資源の保護など人間の経済活動との関連においても、魚群行動の研究は重要である。

著者らは、これまでシステム工学手法を適用してこの問題を考察することを主張した⁴⁻⁸。すなわち、魚群行動を観察して得られたデータに基づいてその数学的モデルを構築し、シミュレーションにより種々の条件下の魚群行動を推定するものである。データは、取得が容易であるという理由で、これまで水槽実験を行なって求めている。前報⁸では、個体数の多い魚群の行動を、群の代表個体の運動と代表個体のまわりで群の大きさが時間的に変化する現象に分解できると仮定して、群の大きさを表わす自己回帰モデルを作成した。そのモデルは、モデル残差の白色性検定を満足し、シミュレーションも良好な結果を得た。

一方、代表個体の運動は、個体数が数尾程度の小さい

群の行動を観察し、これまでに得られている知見を取り入れた物理モデルによって表現するのが妥当であると考ええる。その理由は、比較的少ないパラメータで種々の環境条件に対応できるようにするためには、物理的考察を陽に取り入れたモデルの方が適しているからである。ただし、これまでの物理モデルに対する検討結果^{6,7}では、モデル残差の白色性検定を満足するには至らなかった。

本論文では、群を構成している各個体の運動を表わす物理モデルの妥当性を別の観点から検討する。すなわち、魚群行動モデルは運動要因を非線形関数で表現した質点系の運動方程式に基づいている。ただし、これまでの検討では、方程式に含まれる未知パラメータは個体に依存せず同一であるとみなしていた⁴⁻⁶。しかし、群の中の各個体はすべて同じ役割を担うわけではないので、本論文ではパラメータ値は個体に依存するとしてその値を求める。その結果、パラメータの物理的意味が明瞭となり、群の代表個体としてどの個体を選ぶべきかが明らかになった。また運動要因を表わす非線形関数は、単にデータに基づく曲線のあてはめだけでは妥当な形が決められないので、シミュレーションによっていくつかの候補の中から最適な形を選ぶことにする。その結果、個体間誘引力の関数形についてこれまでの検討結果を改善することができたことを示す。

2. 物理モデル

魚群行動の物理モデルは、1950年代の Breder の研

* 原稿受付 1989. 5. 30

** 京都工芸繊維大学 工学部 Kyoto Institute of Technology; Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606, JAPAN

*** 立石電機株式会社 Omron Tateishi Electronics Co., ; Hanazono, Ukyo-ku, Kyoto 616, JAPAN

Key Words : modeling, parameter estimation, simulation, physical model, fish behavior.

究¹がその端緒である。その基本的な考え方は、各個体を質点とみなして魚群の行動を質点系の運動方程式で記述するものである。いま、水深方向の運動を無視して個体の運動は2次元空間に限られると仮定する。このとき、システムの状態変数として、個体 i の位置ベクトルおよび速度ベクトルを、それぞれ $x_i = (x_i^1, x_i^2)^T$ および $\dot{x}_i = (\dot{x}_i^1, \dot{x}_i^2)^T$ とする。ここに、添字 T はベクトルの転置記号を示し、 $\cdot$ は時間 t に関する微分を表わす。これより、 N_f 尾の群の行動は、次の運動方程式で記述される。

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

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

ここに、 m は群を構成する個体の平均質量、 F_i は個体 i の運動要因を表わす外力、 ξ_i は外乱である。

著者らはこれまでに、水槽実験の観察結果に基づいて(1)式の形のモデルを検討してきた。そのモデルにおいて関数 F_i は、未知パラメータを含む適当な非線形の関数形に仮定されている。 F_i としては、次の三つの要因を考える。

2.1 個体が単独で遊泳するための力

単独で遊泳している個体に加わる力として次式を仮定する。

$$F_{il} = -\nu \|\dot{x}_i\| \dot{x}_i + a_i \dot{x}_i / \|\dot{x}_i\| \quad (2)$$

ここに、 $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルムを表わす。上式で、第1項は個体が遊泳するとき水から受ける抵抗、第2項は個体が固有の速度で泳ぐための前方推進力を表わす。 ν は抵抗係数で、流体力学の理論により次式で与えられる。

$$\nu = 0.5 \rho C_D A \quad (3)$$

ここに、 ρ は水の密度、 C_D は魚の無次元化された抵抗係数(≈ 0.1)、 A は流れに垂直な方向の個体の平均断面積である。

(2)式で a_i は個体 i の前方推進力の大きさを表わすパラメータである。すなわち、個体が F_{il} 以外の力を受けずに一定方向に等速度 $\bar{v}_i$ で遊泳する場合には、 $a_i = \nu \bar{v}_i^2$ が成り立つ。よって、 a_i は速度 $\bar{v}_i$ から定められるが、 $\bar{v}_i$ を計測することは難しいので、ここでは未知のパラメータとする。

魚群の各個体は、一般に等速運動を持続するのではなく、複雑な行動をする。よって、その運動要因を以下に考える。

2.2 個体が環境から受ける力

個体の運動は、環境によって強く影響を受ける。Balchen⁹は、魚が環境から受ける刺激量を安楽関数と呼ばれるスカラー関数で表現し、魚は常にこの安楽関数

を最大化するように運動するという仮説をたてた。しかし、本論文で考察の対象とする環境は、室内に設置された水槽なので安楽関数を同定するよりも、個体が水槽の壁から受ける反発力および引力を直接モデル化の方が容易である。

いま、魚群の行動空間は L 個の壁で区切られているとして、個体はそれぞれの壁から反発力と引力を受ける。それらの力は、次式のように仮定される。

$$F_{il} = k_{wi}^+ \sum_{l=1}^L f_{wil}^+ + k_{wi}^- \sum_{l=1}^L f_{wil}^- \quad (4)$$

$$f_{wil}^+ = \begin{cases} v_{il} \frac{d^+ - d_{il}}{d^+} e_l & \text{for } v_{il} > 0 \text{ and } d_{il} < d^+ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{wil}^- = \begin{cases} v_{il} \frac{d^- - d_{il}}{d^-} e_l & \text{for } v_{il} < 0 \text{ and } d_{il} < d^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 d_{il} は個体 i と壁 l の間の距離、 e_l は壁 l の法線方向の単位ベクトル、 $v_{il} = -e_l^T \dot{x}_i$ である。(4)式の第1項は壁からの反発力で、個体が臨界距離 d^+ 以内にいて壁に近づく($v_{il} > 0$)ときに作用し、第2項は壁からの引力で臨界距離 d^- 以内に存在する個体が壁から遠ざかる($v_{il} < 0$)ときに作用する。 k_{wi}^+ および k_{wi}^- はそれぞれの力の大きさを表わすパラメータである。

2.3 個体が群の中のほかの個体から受ける力

個体が単体でなく群を形成して遊泳する場合には、上述の二つの要因のみでは不十分である。すなわち、魚群行動には規則性があり、その要因として群の中の個体同士の相互作用を考える必要のあることが、多くの観察結果より知られている。ここでは、それを次のように定式化する。

$$F_{is} = \sum_{j=1}^{N_f} b_i(r_{ij}) \frac{x_j - x_i}{r_{ij}} + \sum_{j=1}^{M_i} c_i(r_{ij}) \frac{\dot{x}_j - \dot{x}_i}{M_i} \quad (7)$$

ここに、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、個体がほかの個体と一定の距離を保つ性質を表わし、その力の大きさ b_i は個体 i および j の間の距離 $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ の関数としてFig. 1のような概形で表わされる。これより、この力は個体 i および j の間で作用し、 r_{ij} が小さいときは $b_i < 0$ となり反発力、また r_{ij} が大きいときは $b_i > 0$ で引力となる。一方、成群力は個体がほかの個体との間で互に向きと速度をそろえる性質を表わし、個体 i から臨界距離 δ 以内に存在する個体(その個体数を M_i とする)との間で作用するものとする。この力の距離による依存性は、Fig. 2

Fig. 1 Graph of $b_i(r_{ij})$ Fig. 2 Graph of $c_i(r_{ij})$

のような関数 $c_i(r_{ij})$ で表わされる。

$c_i(r_{ij})$ は単調減少関数なので、その関数形を次のように仮定する。

$$c_i(r_{ij}) = \begin{cases} k_{ci} \left[1 - \left(\frac{1 - \cos \pi r_{ij} / \delta}{2} \right)^2 \right] & \text{for } r_{ij} \leq \delta \\ 0 & \text{for } r_{ij} > \delta \end{cases} \quad (8)$$

ここに k_{ci} は成群力の大きさを表わすパラメータである。一方、 $b_i(r_{ij})$ は単峰性の関数でその関数形は種々の形に表現できるが、ここでは次の三つの関数形を考える。

$$\text{関数形 1: } b_i(r_{ij}) = k_{bi} \frac{r_{ij} - \alpha}{(r_{ij} - \alpha)^2 + \beta^2} \quad (9)$$

$$\text{関数形 2: } b_i(r_{ij}) = \sum_{\mu=1}^2 k_{bi}^{\mu} \exp(-\alpha_{\mu} r_{ij}) \quad (10)$$

$$\text{関数形 3: } b_i(r_{ij}) = \sum_{\mu=1}^3 k_{bi}^{\mu} \exp(-\alpha_{\mu} r_{ij}) \quad (11)$$

ここに、 α, β および α_{μ} は適当な定数であり、 k_{bi} および k_{bi}^{μ} は個体間誘引力の大きさを表わすパラメータである。関数形 1 は、著者らがこれまでに提案したモデルで用いたものである。しかし、この関数形では力の大きさが距離の単調関数でないのに 1 個のパラメータ k_{bi} しか用いていないという難点がある。そこで、本論文では未知パラメータの個数を 2 個および 3 個に増やして、それぞれ関数形 2 および関数形 3 を導入し、これらの関数形の中から最適なものを選ぶことにする。

以下では、関数形 1, 2 および 3 を導入したモデルをそれぞれモデル 1, 2 および 3 と呼ぶことにする。

3. パラメータ推定

モデルに含まれるパラメータは、実験データを用いて定められる。本論文では、これまでに著者らが用いてきた水槽実験データ^{8,10}を利用することにする。水槽の大きさは、横 150 cm, 縦 100 cm で、水深は 7 cm である。実験魚は、体長 3~5 cm, 平均体重 2.58 g のタイリクバラタナゴである。魚群行動の様子はビデオテープに収録され、これより画像処理装置を用いて各個体の位置ベクトルの時系列データを得る（データ取得法については、文献 8）を参照されたい。

パラメータのうち、 m および ν は使用する実験魚から計測可能で、 $m = 2.58 \text{ g}$, $\nu = 0.01 \text{ g/cm}$ であった。一方、 $d^+, d^-, \delta, \alpha, \beta$ (または α_{μ}) はいずれも距離に依存するパラメータ（距離パラメータ）で、 $\alpha_i, k_{wi}^+, k_{wi}^-, k_{ci}, k_{bi}$ (または k_{bi}^{μ}) はモデルに含まれている力の大きさを表わすパラメータ（外力パラメータ）である。ここでは、距離パラメータは水槽実験の観察結果から概算できるとして、個体に依存しない値（つまり各個体の平均値）で与える。一方、外力パラメータは個体に依存するとして、時系列データより最小 2 乗法により推定することにする。

パラメータ推定のために (1) を離散時間系に変換する。便宜上、 $x_i(t)$ を Δt 間隔でサンプリングした値を $x_i(n)$; $n = 0, 1, 2, \dots, N$ で表わすことにする。また $x_i(t)$ の微分値を前方差分で近似することすれば、個体間誘引力に関数形 1 を採用した場合、(1) は次のように書きかえられる。

$$x_i(n+2) = H_i(n) + a_i H_{ai}(n) + k_{wi}^+ H_{wi}^+(n) + k_{wi}^- H_{wi}^-(n) + k_{ci} H_{ci}(n) + k_{bi} H_{bi}(n) + \xi_i(n) \quad i = 1, 2, \dots, N_f \quad (12)$$

ここに、 $H_i, H_{ai}, H_{wi}^+, H_{wi}^-, H_{ci}$ および H_{bi} は 2 次元ベクトルで、時刻 n および $n+1$ における状態ベクトルの既知関数である。その具体的な関数形を付録に示す。いま、次の変数を定義する。

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &\triangleq [a_i, k_{wi}^+, k_{wi}^-, k_{ci}, k_{bi}]^T \\ y_i(n) &\triangleq [x_i^T(n+2) - H_i^T(n)]^T \\ \omega_i^T(n) &\triangleq [H_{ai}(n), H_{wi}^+(n), H_{wi}^-(n), \\ &\quad H_{ci}(n), H_{bi}(n)] \\ i &= 1, 2, \dots, N_f \\ \theta &\triangleq [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_{N_f}^T]^T \\ y_n &\triangleq [y_1^T(n), y_2^T(n), \dots, y_{N_f}^T(n)]^T \\ \xi_n &\triangleq [\xi_1^T(n), \xi_2^T(n), \dots, \xi_{N_f}^T(n)]^T \\ \Omega_n^T &\triangleq \text{diag}[\omega_1^T(n), \omega_2^T(n), \dots, \omega_{N_f}^T(n)]^T \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

このとき、(12) 式は次のように表わされる。

$$y_n = \Omega_n^T \theta + \xi_n \quad (14)$$

(14) 式に最小 2 乗法を適用すると、 θ の推定値は次式から求めることができる。

$$\hat{\theta} = \left(\sum_{n=1}^N \Omega_n \Omega_n^T \right)^{-1} \sum_{n=1}^N \Omega_n y_n \quad (15)$$

個体間誘引力として関数形 2 および関数形 3 を採用した場合にも同様の手続きにより、対応する未知パラメータの推定値が得られる。

魚群行動を観察すると、 $N_f = 1$ のときの個体の行動と群をなしているときの行動には本質的な差異がみられた。すなわち、 $N_f = 1$ の場合には、個体の動きは緩慢で不規則な軌跡をえがいた。一方、 $2 \leq N_f \leq 10$ 程度の群の場合にはその動きは共通しており、いずれの場合も一団となって行動し、一定の速度で水槽の壁に沿う軌跡をえがくことが多かった。その場合には、魚群の中の個体は、群の動きを支配する個体（リーダー）とその動きに追従する個体（フォロワー）に大別でき、モデルパラメータはそれぞれの個体に依存してその特徴を表わすのではないかと考えられる。

そこで、このことを確かめるために、群の個体数が $N_f = 2$ の場合の観察データを用いてパラメータ推定を行なう。時系列データは、魚群行動が不安定な初期の部分を除いてデータ数 $N = 1000$ とした。サンプリング間隔を $\Delta t = 0.5$ s としたので、これは 500 s のデータである。Table 1 は、 $N_f = 2$ の場合の各個体の外力パラメ

Table 1 Parameter estimates ($N_f = 2$, $N = 1000$)

Model	Parameter	$i = 1$	$i = 2$
1	a_i [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	2.66	0.65
	k_{wi}^+ [g / cm]	5.96	4.74
	k_{wi}^- [g / cm]	1.98	1.56
	k_{ci} [g / s]	0.73	1.70
	k_{bi} [$\text{g} \cdot \text{cm}^2 / \text{s}^2$]	355	1150
2	a_i [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	2.37	0.20
	k_{wi}^+ [g / cm]	3.23	0.50
	k_{wi}^- [g / cm]	1.92	2.77
	k_{ci} [g / s]	0.89	1.70
	k_{bi}^1 [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	-34.5	-92.6
	k_{bi}^2 [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	26.3	76.8
3	a_i [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	2.37	0.23
	k_{wi}^+ [g / cm]	3.23	0.42
	k_{wi}^- [g / cm]	1.92	2.81
	k_{ci} [g / s]	0.89	1.68
	k_{bi}^1 [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	-29.2	242
	k_{bi}^2 [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	32.1	449
	k_{bi}^3 [$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$]	-11.1	-700

Note : The other parameter values are as follows :
 $d^+ = 10$ cm, $d^- = 20$ cm, $\delta = 50$ cm, $\alpha = 5$ cm, $\beta = 20$ cm
 $\alpha_1 = 0.1$ cm $^{-1}$, $\alpha_2 = 0.05$ cm $^{-1}$, $\alpha_3 = 0.07$ cm $^{-1}$

ータを示す。同表より、前方推進力パラメータは個体 1 の方が個体 2 よりも大きく、個体間誘引力および成群力パラメータは逆に個体 2 の方が個体 1 よりも大きいことがわかる。これより、個体 1 はリーダーで主として自己の前方推進力によって進み、個体 2 はフォロワーで個体 1 の引力によって追従していることが推測される。実際、ビデオ記録から各時刻でどの個体が先頭になっているかを調べると、Fig. 3 のような結果が得られた。これより、先頭の個体はたえず入れ替わっているが、先頭になる確率はどの個体も同じではないことがわかる。Table 2 は、観測時間中各個体が先頭になる割合とパラメータ a_i , k_{ci} および個体間誘引力の最大値、最小値の各個体に対する大きさの比率を比較したものである。同表より、 $N_f = 2$ の場合個体 1 がリーダーで個体 2 がフォロワーであることが明らかとなり、パラメータ値にこのことがよく反映されていることがわかる。

以上の結果から、外力パラメータは個体に依存するとしてその推定値を求めることにより、2 尾の群にはリーダーに対応する個体が存在することが見い出された。よっ

Fig. 3 Variation of the leader of fish school with time ($N_f = 2$)

Table 2 Probability of leader and relative values of parameters ($N_f = 2$, $N = 1000$)

Model		$i=1$	$i=2$
	Probability of leader [%]	74.0	26.0
1	a_i [%]	80.4	19.6
	k_{ci} [%]	30.0	70.0
	Maximum of interactive force [%]	23.6	76.4
	Minimum of interactive force [%]	23.6	76.4
2	a_i [%]	92.2	7.8
	k_{ci} [%]	34.3	65.7
	Maximum of interactive force [%]	23.9	76.1
	Minimum of interactive force [%]	34.2	65.8
3	a_i [%]	91.1	8.9
	k_{ci} [%]	34.6	65.4
	Maximum of interactive force [%]	16.0	84.0
	Minimum of interactive force [%]	47.7	52.3

て、群の代表個体としてはこのリーダーとなる個体を選ぶべきであることがわかる。また、個体数の多い群に対するシミュレーションを行なうときに、先頭グループの個体のパラメータとして個体1の値を、後続グループの個体には個体2の値を用いればよいことがわかる。

Table 1 より、 $b_i(r_{ij})$ の関数形を変更してもほかの外力パラメータにおよぼす影響は比較的少ないことがわかる。したがって、ほかの外力の形を一定にして $b_i(r_{ij})$ の形の妥当性を議論することができる。Fig. 4 は、 $N_f = 2$ の場合における三つのモデルのグラフを示す。すべてのモデルのグラフは $r_{ij} \rightarrow \infty$ のとき $b_i \rightarrow 0$ となるが、同図より特にモデル1ではモデル2および3に比べて b_i の値の減少する割合が小さいことがわかる。 r_{ij} の有限値に対するこのグラフの差異が有意であるか否かは、シミュレーションによって判断することにする。

Fig. 4 Graphs of $b_i(r_{ij})$ for various models

Solid line : Model 1
Dotted line : Model 2
Chain line : Model 3

4. モデルの妥当性の検討

本節では、モデルの妥当性をシミュレーションを行なうことによって検証する。シミュレーションとしては、このモデルが利用される状況にできるだけ近い事例で行ない、パラメータ推定に用いたデータとは異なる実験結果を基にしてその妥当性を判断することが望ましい。そ

こで本節では、魚群が垣網に遭遇したときの行動をシミュレーションし、従来得られている結果との比較を行なう。

垣網は、沿岸から海に突出して設置される。魚群は沿岸にそって遊泳するとき、この垣網に遭遇して進路を阻止され、以後垣網に沿ってどちらかの方向に進むかあるいは方向をかえて戻るかはいずれかの行動をとる。よって垣網を有効に配置して魚群行動を制御し、別に設置された捕獲用の網の中へ魚群を誘導することが必要となる。そのために、魚場での観察や水槽実験でこの問題が研究されてきた。従来得られている結果として、次の二つの理論が挙げられる¹¹。

4.1 Fridman の理論

この理論は、魚群を密度および速度が一様な流体とみなして導かれたものである。したがって、個体数の極めて多い魚群に適用し得ると考えられる。

Fig. 5 に示すように、個体数 q の魚群が垣網と角度 ϕ で遭遇した場合を考える。いま、垣網に沿って B の方向（逆方向と呼ぶ）に進む個体数を q_1 、 C の方向（順方向と呼ぶ）に進む個体数を q_2 とすると、流体の運動量保存則より次式が成り立つ。

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{1 - \cos \phi}{1 + \cos \phi} \quad (16)$$

ただし、 $q = q_1 + q_2$ で、垣網を離れて A の方向に戻る個体は存在しないとする。

Fig. 5 Swimming behavior of fish school encountered with a leader net

4.2 長谷川・余座・添田の実験式

長谷川ら¹¹ は、 $N_f = 1$ および 10 の魚群の垣網に対する行動を水槽実験で調べたが、Fridman の理論値に合わなかったので実験結果を反映する式を導いた。その考え方は、次のようである。すなわち、魚群が順方向および逆方向に分かれる割合は、垣網に遭遇した時の個体の速度 v に依存する。速度の垣網に沿う成分 $v \cos \phi$ は、個体が順方向に進む要因であるとする。他方、速度の垣網に垂直な方向の成分 $v \sin \phi$ は、確率 1/2 ずつで順方向および逆方向に進む要因を与えると考える。この結果、次式が成り立つ。

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{0.5 \sin \phi}{\cos \phi + 0.5 \sin \phi} \quad (17)$$

ただし、速度 v の各成分は同じウエイトで q_1 および q_2 に影響を与えるものとする。

4.3 シミュレーション結果

シミュレーションは、(1)の離散時間系で行なう。3.で求めたパラメータ値を用い、外乱 ξ_n として平均値0で標準偏差が1.0の正規乱数を与えて実行した。

Fig. 6は、個体数別の遭遇角度 ϕ に対する q_1/q_2 の変化を示す。同図より、 $N_f = 2$ の場合、モデル2と3では、長谷川らの実験式とよく合っているが、モデル1はあまり合っていない。また、個体数が増えるにつれてモデル2と3では q_1/q_2 の値が Fridman の理論に近づくことがわかる。これは、個体数の増加によって、魚群が流体と見なせるようになることを意味するが、モデル1ではこの傾向が現れていない。これらのことからモデル2と3の方がモデル1に比較して妥当であると判断できる。また、モデル2と3を比較したとき、シミュレーション結果は同程度であるが、パラメータ数の少ないモデル2の方が望ましいモデルであると考ええる。

Fig. 6. Relation between q_1/q_2 and the encounter angle ϕ

□ : $N_f = 2$, ○ : $N_f = 5$, △ : $N_f = 10$, × : $N_f = 20$

5. 結 言

本研究では、水槽における魚群行動を記述する物理モデルを作成し、その妥当性を検討した。モデルの形は、これまでに得られている知見を参考に水槽実験の観察結果に基づいて、状態変数の非線形関数を仮定して構成した。モデルに含まれるパラメータは、水槽実験より得られたデータを用いて最小2乗法により推定した。その結果、群のリーダーとなる個体が存在することが確かめられ、モデルパラメータの値にそれが反映されていることがわかった。この事実は、水槽実験のビデオを単に観察するだけでは明らかでなかったもので、モデリングの一つの成果であると考ええる。

魚群行動を表わす物理モデルは、個体の運動要因を組み合わせて作成されている。運動要因のうちでモデル化が困難なものは、個体間誘引力である。その理由は、この力は反発力と引力からなり、個体間の距離に依存して複雑なふるまいをするからである。従来の著者らのモデルでは、個体間誘引力を未知パラメータ1個を含む関数で仮定した。未知パラメータの個数を増加するとデータに基づく曲線のあてはめという点では容易になるものの、シミュレーションなどモデルの利用という点では望ましくない。そこで本研究では、魚群が垣網に遭遇したときの進路の選択問題を事例として取り上げ、シミュレーション結果と水産学の分野で従来得られている結果を比較して、個体間誘引力の望ましい形を決定した。それによれば、個体間誘引力の形としては従来のものよりもパラメータを2個または3個に増やしたモデルの方が妥当であることがわかった。

本研究では魚群の個体数は2尾の場合しか扱っていない。その理由は、モデルパラメータの個体に対する依存性を詳細に調べることに主眼があったからである。個体数が多い場合には、魚群行動を代表個体の運動と代表個

体のまわりの群の形状の変化に分解してモデル化することができると考えられる。本研究の結果より、代表個体の運動モデルとして群のリーダーとなる個体の運動モデルを用いることができることがわかった。それを用いた個体数の多い群を扱うモデルについては、今後の検討課題としたい。

最後に、水槽実験のビデオテープを提供していただいた東京水産大学の松田皎助教授および

兼広春之助教授に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) C. M. Breder : Studies in Social Grouping in Fishes ; Bull. Amer. Mus. Natural Hist., Vol. 117, pp. 399~468 (1959)
- 2) E. Shaw : Schooling in Fishes, in Development and Evolution of Behavior ; L. S. Aronson, et al. Eds., Freeman, pp. 452~480 (1970)
- 3) D. V. Radakov : Schooling in the Ecology of Fish, Wiley (1973)
- 4) 三宮, 松田 : 魚群の行動のモデリング ; 計測と制御, 19巻, 7号, pp. 704~707 (1980)
- 5) N. Sannomiya & K. Matuda : A Mathematical Model of Fish Behavior in a Water Tank ; IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-14, No. 1, pp. 157~162 (1984)

- 6) N. Sannomiya & K. Matuda : Least Squares Parameter Estimation in Fish Behavior Model ; Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 53, No. 11, pp. 1951~1957 (1987)
- 7) N. Sannomiya, H. Nakamine & K. Matuda : Generalized Least Squares Parameter Estimation in Fish Behavior Model ; Proc. of 12th IMACS World Congress, pp. 649~651 (1988)
- 8) 三宮, 中峯, 田中, 松田 : 魚群行動の群の大きさを推定する自己回帰モデル ; システム制御情報学会論文誌, 2巻, 1号, pp. 23~31 (1989)
- 9) J. G. Balchen : Modeling, Prediction and Control of Fish Behavior, in Control and Dynamic Systems, C. T. Leondes Ed., Academic Press, pp. 99~146 (1979)
- 10) 松田, 鈴木, 兼広 : 定置網の網型模型に対する魚群行動の水槽実験 ; 日本水産学会誌, 50巻, 7号, pp. 1109~1114 (1984)
- 11) 長谷川, 余座, 添田 : 垣網に遭遇した魚群の行動に関するFridmanの理論の実験的検証と考察 ; 日本水産学会誌, 54巻, 6号, pp. 975~982 (1988)

付録

(12) 式に含まれる $H_i, H_{ai}, H_{wi}^+, H_{wi}^-, H_{ci}$ および H_{bi} は, 次式で与えられる.

$$H_i(n) = 2x_i(n+1) - x_i(n) - \frac{\nu \Delta t}{m} v_i(n) \cdot [x_i(n+1) - x_i(n)] \quad (A1)$$

$$H_{ai}(n) = \frac{\Delta t}{m} \cdot \frac{x_i(n+1) - x_i(n)}{v_i(n)} \quad (A2)$$

$$H_{wi}^+(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} \sum_{l=1}^L f_{wil}^+(n) \quad (A3)$$

$$H_{wi}^-(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} \sum_{l=1}^L f_{wil}^-(n) \quad (A4)$$

$$H_{ci}(n) = \frac{\Delta t}{m} \sum_{j=1}^{M_i} c_i(r_{ij}(n)) \frac{[x_j(n+1) - x_j(n)] - [x_i(n+1) - x_i(n)]}{M_i} \quad (A5)$$

$$H_{bi}(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} \sum_{j=1}^{N_f} b_i(r_{ij}(n)) \frac{x_j(n) - x_i(n)}{r_{ij}(n)} \quad (A6)$$

ただし

$$v_i(n) = \|x_i(n+1) - x_i(n)\| / \Delta t \quad (A7)$$

$$r_{ij}(n) = \|x_i(n) - x_j(n)\| \quad (A8)$$