

水槽実験による魚群行動の観察と数理モデル化

森 敬幸¹・岡口真希²・森井俊広*

(平成14年5月27日受付)

要約 静水浅水条件の室内水槽実験で魚群行動を観察した。実験には体長4～6 cmのタナゴを用いた。観察した魚群の遊泳軌跡を、ニュートン力学モデルによるシミュレーション結果と比較した。ニュートン力学モデルでは、魚群を構成する個体は質点とみなされ、複数の個体の相互作用と場の影響を取り込んだ非線形運動方程式によって魚群行動が記述される。ニュートン力学モデルによる数値シミュレーションにより、観察された遊泳軌跡をうまく再現することが可能であるが、実務面からみると、計算に必要なパラメータの決定が非常に難しく、また生物学的な理由に起因する複雑な動きを再現できないなどの制約があることを確認した。水理解析モデルと魚群行動モデルを結びつけるための今後の研究方向を示した。

キーワード：魚群行動、ニュートン力学モデル、水槽実験、タナゴ

はじめに

遡上にふさわしい魚道を建設しても、施設にいたる流れが変化したため、魚が魚道を認識できず、その結果、十分な遡上が達成できないケースがある。また、農業用水を送排水するために張りめぐらされた用水路網を、農村地帯に点在するビオトープを結ぶ水みちとして活用できないかとの見方がある。いずれも、水利施設がつくりだす水の流れに対し、魚群がどのような応答を示し、期待される行動を取るかを適切に予測し判断する手立てが必要になる。魚のためのさまざまな環境にやさしい施設や構造物、あるいはビオトープ水路網の構想を有効なものにしていくには、単純に、魚あるいは魚群は流れの方向に泳ぐだろうといった程度の認識では、おそらく不十分である。力学問題のように高い予測精度はとうてい無理であるとしても、50%あるいは30%程度といったイメージの精度で魚群の行動を予測することができれば、環境あるいは魚へのやさしさをより確実なものにしていくことができると考えられる。

水中での魚群行動の特性は、生物分野で古くから検討されてきた。魚群行動を表す数理モデルには、大別して、ニュートン力学モデルと行動パターンモデルがある¹⁾。前者は、魚群を構成する個体を質点とみなし、相互作用を受ける各個体の運動をニュートンの第2法則で記述したものである。後者のモデルでは、魚群の行動パターンを観察から定量化したうえで、個体の運動モデルを構成する。いずれにしても、さまざまな問題を抱えながらも、上で述べたイメージの精度で、魚群の行動をある程度予測できるようになってきている。

本研究は、農業用水路や小河川を対象に、魚群の行動を予測しうまくコントロール（誘導）できるような方法を検討し、これを、環境にやさしい構造物の具体的な設計法に反映させていくことを目的とする。この設計法は、上述した魚群行動の数理モデルと、水理学などの工学の分野で開発されている水理解析モデルをリンクさせたもので、流れの性状と魚群行動を結び付けるリンクパラメータとして、流速と流向を考える。水利構造物によってつくられる流れが、どのような魚群の行動をもたらすかを実務的な精度で予測できるようになれば、環境へのやさしさに対する信頼ある技術の下支えが実現できると考えられる。本研究がめざすテーマは、いわば、工学設計法から生態工学的設計法への拡張といえる。本報告では、研究の第1ステージとして実施した、静水条件における魚群行動実験の結果をまとめる²⁾。これは、上述した魚群行動の数理モデルの実務性と今後の展開方向を探るために実施したものである。室内水槽装置を用いて、平面状（浅水）の静水条件におけるタナゴの魚群行動を観察し、その特性を調べた。次いで、ニュートン力学モデルにもとづいて魚群の行

¹ 新潟大学大学院自然科学研究科（現飛鳥建設株式会社）

² 新潟大学農学部生産環境科学科（現株式会社システク）

*代表著者：morii@agr.niigata-u.ac.jp

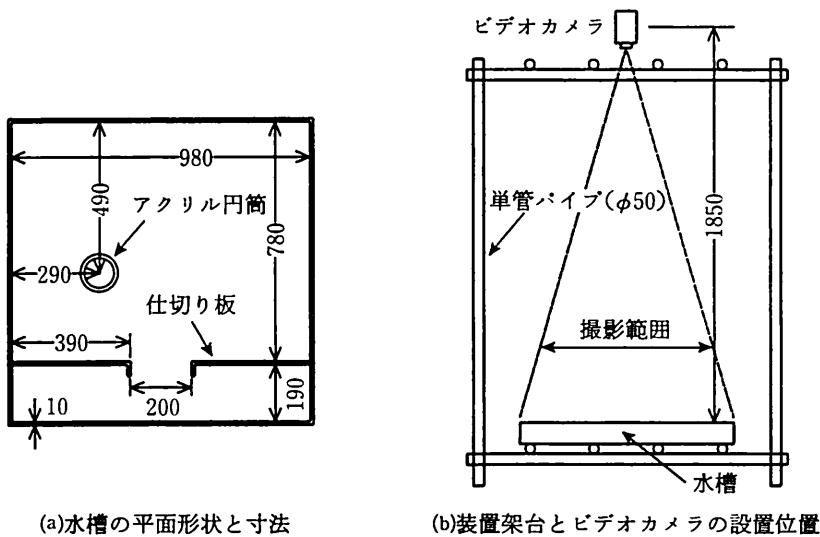


図1 室内水槽装置の構造概要

動軌跡のシミュレーションを行い、モデルのもつ実務性と問題点を検討した。次章に、室内水槽による観察実験の結果を、次々章にニュートン力学モデルの数値実験の結果をまとめる。最後の章では、一連の検討結果を要約するとともに、今後の検討課題を示した。

静水条件における魚群行動

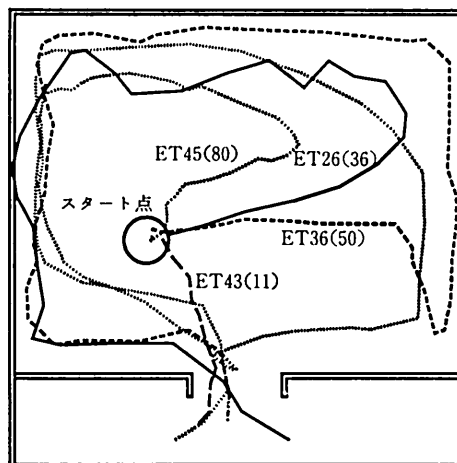
1. 室内水槽実験の方法

室内水槽装置で魚群行動を観察、撮影し、画像分析によってその遊泳軌跡を読み取った。図1(a)に水槽装置の構造概要を示す。水槽は厚さ1 cmの亚克力板を用いて作製した。内側の寸法が98cmの正方形で、魚群の行動を平面内に制限できるように、水槽の深さは10cmと浅くした。水槽は、仕切り板により2つのセクションに分けた。大きい方のセクション98cm×78cmに、内径10cm、高さ20cmの亚克力製円筒を設置し、この中に魚を入れたのち静かに吊り上げ、セクション内を自由に遊泳させた。この間、魚群の行動を撮影するとともに、仕切り板に設けた出口に到達するまでの遊泳時間を測定した。出口は仕切り板中央に設け、幅20cmとした。撮影には、デジタルビデオカメラを用いた。カメラは、図1(b)に示すように、実験水槽が1つの画面に収まるようにするため、水槽から高さ185cmの位置に取り付けた。撮影したビデオ画像は、ビデオキャプチャでパソコンに取り込んだのち、1秒間隔の静止画として取り出し、魚群を構成する各個体の頭部先端の座標を読み取った。このような静水条件での実験を50回実施した。

供試魚にはタナゴ (Rose bitterling) を使い、魚群の個体数を3尾とした。タナゴは、平野部の河川や水路、池沼に広く分布する魚種である。体長は4 cmから6 cm程度であった。通常は市販水槽で水温を20℃程度にして飼育し、餌は毎日午前9時に与えるようにした。実験に際しては、上述した亚克力製円筒の中に、タナゴ3個体を静かに入れ、10分間待機させた。これは、飼育水槽から実験水槽へ移したことによる環境の変化の影響を緩和するためである。魚群の行動には、周囲の雑音や日照等が大きく影響する。このため、人影に影響を受けないように実験装置の周囲をビニールシートで覆うとともに、床からの振動の伝播を防ぐため、水槽を設置した架台の支柱端に防振パットを敷いた。実験には水道水を用いた。水槽に水を満たしたのち、1日以上放置して曝気した。水深は平面状の行動に制限するため、7 cmの浅水条件とした。水温は、ヒーターを用いて20℃に維持した。水槽のビデオ設置位置の近傍に100ワットの照明を取り付けた。

2. 魚群行動の特徴

魚群を、統一的な行動をとる個体魚の集合状態と考える。50回の実験のうち、9割程度で、3個体がともに



[注] 図中の記号は実験番号、かっこ内の数値は遊泳時間(秒)を表す。

図2 静水浅水条件の水槽内における魚群行動の観察例

行動する魚群行動を観察できた。また、先頭の個体は不規則に入れ替わり、タナゴの魚群ではリーダーが存在しないことが確認できた。魚は、常に、接する他の個体に対して一定の距離を保とうとする性質があり、この距離は最適個体間距離と呼ばれる³⁾。観察によると、この最適個体間距離はおおむね3から6 cmであり、個体の体長とほぼ対応したものであった。

図2は、魚群の軌跡の測定例である。静止画から読み取った3個体の座標データの平均位置を、アクリル円筒のスタート点から1秒ごとにプロットしている。魚群の行動はさまざまで、セクション全体に広がるようにゆっくりと壁に沿って移動していくケース、あるいはスタート点からいきなり出口に到達するケースなど多様である。図2に示されているように、魚群行動の多くの部分で、水槽の壁に沿った動きをみることができる。これは、壁に近づき体側の一方だけでも安全にすることにより、外敵の攻撃などからくるストレスを軽減するためにとる動きであるといわれている。図2には、スタート点から出口に到達するまでの時間を示しているが、これには、魚群行動の軌跡の違いに応じて、大きな差がみられる。この到達時間の違いを、50回の実験について、頻度分布の形でまとめると図3のようになる。これをみると、30～60秒あたりを中心にして相対的に速く出口に達するケースと、120～160秒あたりの遅いケースの2通りがある。これは、アクリル円筒を吊り上げた際の、魚群個体の頭の向きに起因したものと考えられる。つまり、出口と反対向きの方角を向いてスタートした場合には相対的に時間が長くなり、逆の場合には短くなる。図4は、アクリル円筒を、出口がある仕切り板と平行な直径で2つの領域に分割し、スタート時における魚群個体の向きを分類した上で、この向きの違いによって、出口に到達するまでに要する時間の平均値を比較したものである。明らかに、出口がある仕切り板と反対方向に行動を開始する場合には、時間が相対的に長くかかっているのを確認できる。

魚群行動のモデル化

1. ニュートン力学モデル

魚群行動の数理モデルに関する研究が大きく進歩したのは、計算機環境がととのった比較的最近になってからのことである。先に述べたように、数理モデルには、大別して、ニュートン力学モデル(Newtonian dynamics model)と行動パターンモデル(Behavioral pattern model)がある。ニュートン力学モデルでは、魚群を構成する個体を、外的な駆動力と個体間相互作用力をもつ質点とみなし、各個体の運動をニュートンの第2法則で記述する。BREDER⁴⁾は、個体間にファン・デル・ワース型の分子間力に類似した相互作用力が働いているとした運動方程式を提案した。SANNOMIYA and MATUDA⁵⁾は、BREDERのモデルを基本にしたニュートン力学モ

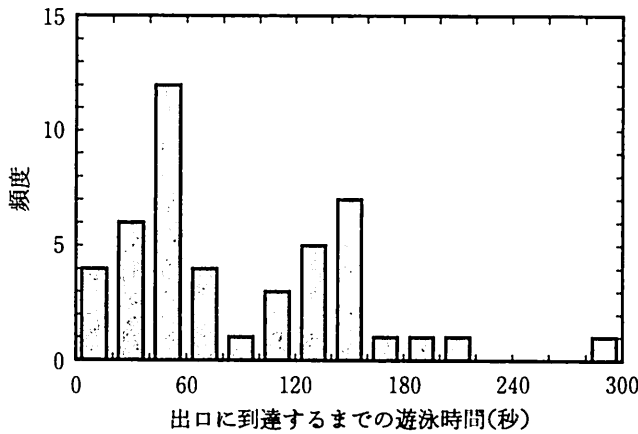


図3 スタート点から仕切り板に到達するまでの遊泳時間の頻度分布

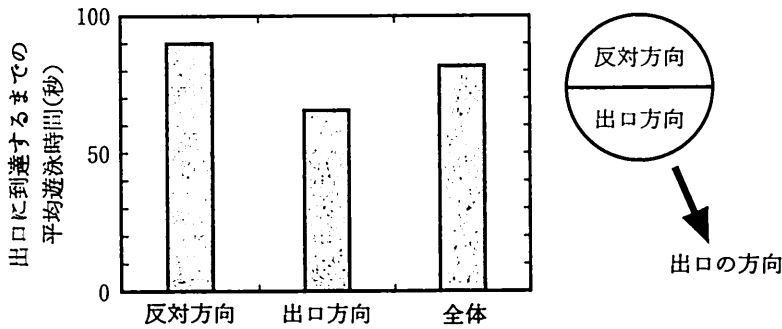


図4 スタート時の魚群個体の向きによる遊泳時間の違い

デルにより、水槽実験との比較検討を行なっている。

本研究では、SANNOMIYA and MATUDA⁵⁾が提案したニュートン力学モデルを用いて、魚群行動の数値予測方法を検討する。計算対象は、水槽内の静水中を自由に遊泳する魚群とする。魚群を構成する個体魚 i の位置は、図5の2次元平面図に示すように、頭部の座標で表す。 $I_i = (x_i, y_i)^T$ をその位置ベクトル (T は転置記号) とすると、魚群を構成する各個体 i の運動方程式は次式で与えられる。

$$m_i \ddot{I}_i + \nu \dot{I}_i \parallel \dot{I}_i \parallel = F_i(t, I_i, \dot{I}_i, I_j, \dot{I}_j) \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

ここで N は魚群の個体数、 m_i は個体魚 i の質量、 ν は抵抗係数である。式(1)および図5で、1個のドット記号がついた位置ベクトルは時間についての1階微分項、つまり速度を、2個のドット記号がついた位置ベクトルは2階微分項、つまり加速度を表す。ノルム記号は絶対値の大きさを表す。一般に、動物の群と異なり、魚群ではリーダーが存在しないといわれており、このことは前章の水槽実験でも観察できた。このため、式(1)は、すべての個体は同一の行動モデルに従うことを前提に組み立てられている。式(1)の左辺第2項に示すように、本モデルでは、個体が遊泳するときに水から受ける抵抗力は、移動速度の2乗に比例すると考える。これにより、比較的大きな個体が速い速度で移動する場合にも、式(1)が適用できる。式(1)の右辺の F_i は、個体 i の運動要因を表す外力である。これには、前方推進力、個体間力、並進力、壁からの反発力、場の力、および外乱による力の6個の要素が含まれ、 F_i はこれらの和で与えられる^{1,5)}。

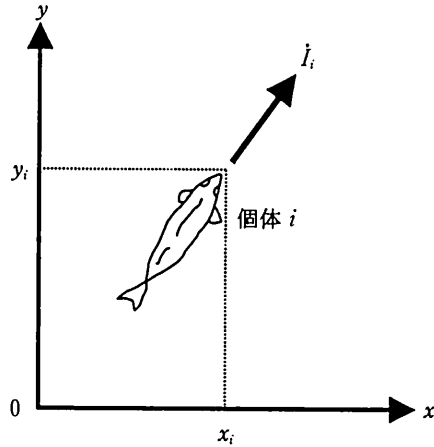


図5 魚群を構成する個体魚 i の座標の定義

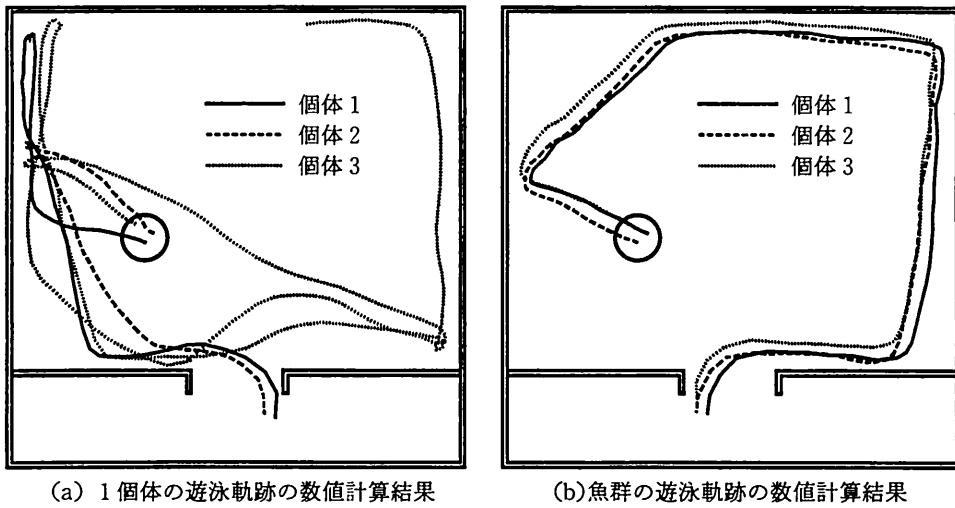
表1 ニュートン力学モデルの数値計算に用いたモデルパラメータ

パラメータ	推定値
個体の質量 m_i	1.0 g
抵抗係数 ν	0.01 g/cm
遊泳能力 a	3.5 g \cdot cm/s ²
個体間相互作用の範囲 α	5.0 cm
個体間相互作用の範囲 β	10.0 cm
並進の限界距離 σ	50.0 cm
壁からの力の作用限界 d	10.0 cm
個体間力係数 k_b	30.0 g \cdot cm ² /s ²
並進力係数 k_c	5.0 g/s
壁からの反発係数 k_w	10.0 g/s
場の力を与える係数 p	7.0 g \cdot cm/s ²
コーナー部の場の力を与える係数 k_{pc}	2.0 g \cdot cm/s ²
出口近傍の場の力を与える係数 k_{pe}	140.0 g \cdot cm/s ²
コーナー部の限界速度 v_c	3.0 cm/s
出口近傍における最小遊泳速度 v_{e1}	12.0 cm/s
出口近傍における最大遊泳速度 v_{e2}	22.0 cm/s

2. 魚群行動の数値実験

式(1)の数値計算には4次のルンゲ・クッター法を用いた。表1に、数値計算に用いたモデルパラメータをまとめる。これらは、SANNOMIYA and MATUDA⁹⁾がタナゴの魚群行動を計算するために採用した値を参考にして、試行錯誤的に決定した。初期条件として、前章の水槽実験で観察されたスタート時の各個体魚の位置ベクトルと速度ベクトルを既知量として与えた。数値シミュレーションの時間きざみは0.3秒とした。

まず、式(1)によって魚群行動が適切に再現できるかを調べるため、式(1)を魚1個体ごとに解いた場合と、3個体の魚群で解いた場合の行動軌跡を比較する。図6(a)は、前章の水槽実験で観察した初期条件を用いて、1個体ずつ行動軌跡を計算し、3個体分の計算結果を1枚の図にまとめたものである。1個体では、式(1)の右辺の外力のうち個体間力と並進力が作用しないため、これら2項を計算式からはずしている。図6(b)には、同じ初期条件を用い、式(1)により、3個体からなる魚群として計算した行動軌跡を示している。単独だとまったく



(a) 1 個体の遊泳軌跡の数値計算結果

(b) 魚群の遊泳軌跡の数値計算結果

図6 1 個体魚の遊泳軌跡と魚群としての遊泳軌跡の比較 (数値計算による)

違った動きをするのに対し、魚群になると、個体間力と並進力が作用するため、まとまった群行動が再現されるのがわかる。

次いで、前章の水槽実験で観察された初期条件を用いて、数値シミュレーションによる魚群行動の再現実験を行なった。スタート点を離れた魚群は、初め、壁に向かってほぼ直線的に進み、そのあと、おおむね一定の距離を保ちながら壁に沿って行動し、遊泳セクション内を数回周回したのち出口に向かうといったパターンを確認することができた。この動きは、水槽実験でも数多く観察された魚群行動である。図7に、水槽実験で観察した遊泳軌跡が、数値実験の結果と比較的良好に対応している例を示す。遊泳軌跡は、3 個体の位置座標の平均値でプロットしている。図8は、図7(a)の比較例について、水槽実験および数値実験それぞれの魚群半径 R_g の時間変化をまとめたものである。 R_g は、3 個体の位置座標の平均値に対する 2 乗平均距離として定義される。図8から、式(1)により、魚群の広がりはやや小さいもののおおむね水槽実験の観察結果を再現できていると考えられる。しかし、魚群を構成する個体の突発的な行動に起因した複雑な動きはうまく再現できておらず、この点は、質点力学に依拠したニュートン力学モデルの重要な制約であるとみることができる。

おわりに

魚類にとって良好な生息活動環境を、主として水理学的側面から検討するための第一歩として、水槽実験により魚群行動を観察した。合わせて、魚群行動を記述する数理モデルであるニュートン力学モデルに着目し、数値実験により水槽実験の観察結果を分析した。数値実験により、魚群行動の一部を良好に再現できることを確認した。ただし、水槽実験に近い遊泳軌跡を数値実験から得ることは非常に難しく、外乱の種や初期条件を試行的に何度も変えて計算を繰り返す必要があり、この点がニュートン力学モデルの重要な制約になることが判明した。また、ニュートン力学モデルでは、魚群の突発的な行動などに起因する複雑な動き適切に再現できないことも確認できた。

このようなニュートン力学モデルの制約から、今後は、行動パターンモデルの導入をはかっていくことが必要になると考えられる。行動パターンモデルでは、反発や並行定位、誘引などの個体間の行動パターンを魚群の観察から定量化して運動モデルを構成するため、より生物学的な見地からのモデル化が可能になると期待される。さらに、魚群行動を考慮した水路の設計へ展開していくためには、流水中における魚群行動のデータを蓄積し、合わせて、水理解析モデルと魚群行動モデルを適切にリンクさせた数理モデルを組み立てていく必要がある。いずれも、今後の重要な課題と考える。

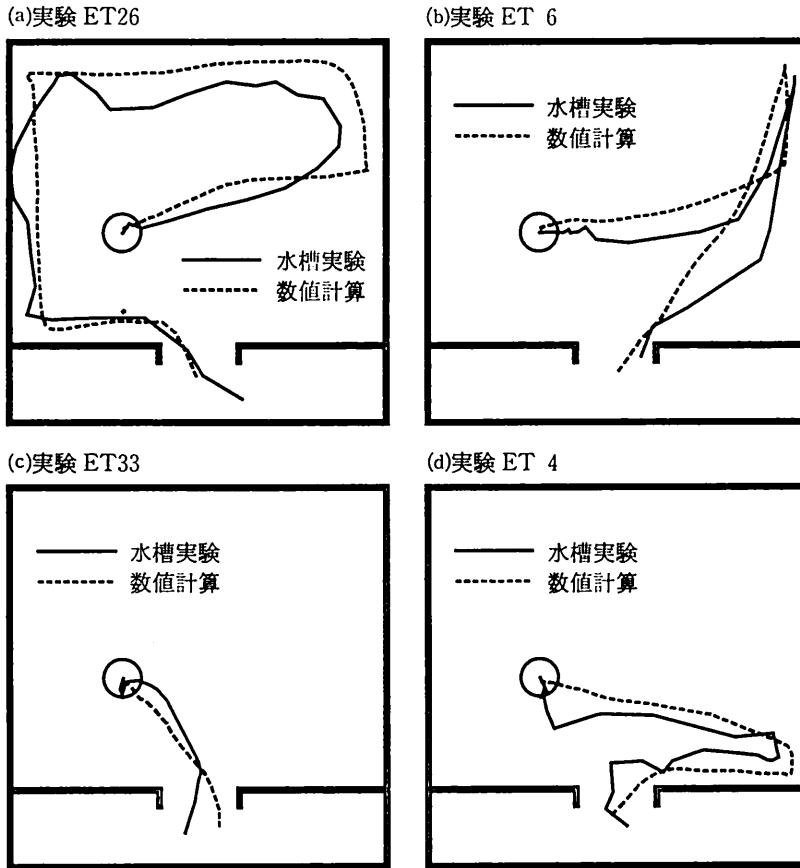


図7 代表的なケースにおける水槽実験と数値実験による遊泳軌跡の比較

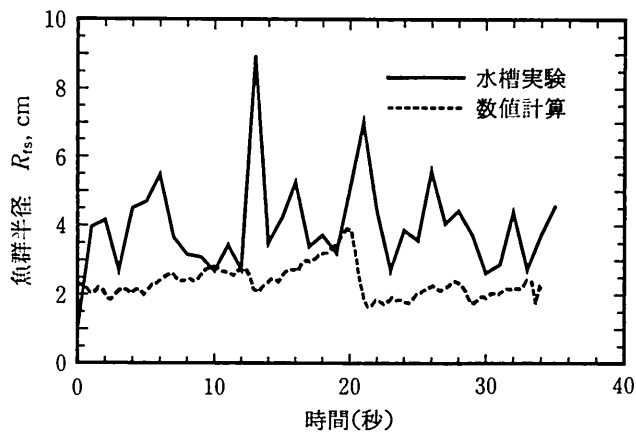


図8 魚群半径の時間変化の比較

謝 辞

本研究を進めるにあたり、平成12年度新潟大学プロジェクト推進経費、ならびに社団法人農業土木学会の平成12年度研究グループ助成金による補助を受けた。室内水槽実験では、新潟大学大学院自然科学研究科(現新潟県土木部)の松本智氏から多大なご協力をいただいた。新潟大学農学部生産環境科学科権田豊助手からは、ニュートン力学モデルの数値プログラミングに際して適切なアドバイスをいただいた。室内水槽実験での魚群行動の画像分析には、新潟大学大学院自然科学研究科崎岡健児氏が開発された Two Screen Digitizer を使用させていただいた。ここに記して、これらの方々に深く感謝したい。

参考文献

1. 平松和昭・四ヶ所四男美・森健. 1999. 水理環境に対する魚群の応答行動の数理モデルについて. 農業土木学会平成11年度応用水理研究部会講演集, pp. 21-28.
2. 森敬幸. 2002. 魚群行動を考慮した水路設計法の研究—静水中の魚群遊泳実験による Newton 力学モデルの検討—. 新潟大学大学院自然科学研究科平成13年度修士論文.
3. 玉井信行・水野信彦・中村俊六. 1993. 河川生態環境工学, 東京大学出版会, pp. 80-82.
4. Breder, C. M. 1954. Equations descriptive of fish schools and other animal aggregations. *Ecology*, 35, pp. 361-371.
5. Sannomiya, N. and Matuda, K. 1984. A mathematical model of fish behavior in a water tank. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-14(1), pp. 157-162.

Mathematical Model of Schooling Behavior of Fish Observed in Laboratory Water Tank Experiment

MORI Takayuki¹, OKAGUCHI Maki² and MORII Toshihiro*

(Received May 27, 2002)

Summary

Schooling behavior of fish is observed in a shallow water tank. Bitterling about 4-6 cm in body length are employed in the laboratory experiments. The schooling behavior of fish observed is compared with results of a numerical simulation based on a Newtonian dynamics model. An individual fish that forms the fish school is assumed as a mass particle in the Newtonian dynamic model. Interactions acting among the mass particles are introduced into a set of nonlinear differential equations of motion to take external forces that cause the schooling behavior of fish into account. Effects of environmental field within the water tank are also considered in constructing the set of differential equations. A part of laboratory observations of the schooling behavior is well explained by the Newtonian dynamics model. But a practical difficulty to determine a set of model parameters that are required in the numerical calculations is noticed. As well it is shown that the Newtonian dynamics model cannot describe the behavior of individual fish induced by a biological but unforeseen impact. A small recommendation to couple a hydraulic engineering model with the mathematical model of schooling behavior of fish is given lastly.

Key words: Schooling behavior of fish, Newtonian dynamics model, water tank experiment, bitterling

¹ Tobishima Kensetu Co., Ltd. Formerly, Graduate School of Science and Technology, Niigata University.

² SYSTECH Co., Ltd. Formerly, Faculty of Agriculture, Niigata University.

*Corresponding author: morii@agr.niigata-u.ac.jp