

魚類の鰯集行動のシミュレーションに関する研究

Study on Behavior of Fish School Around Aggregation Devices

松原雄平*・若松哲郎**・野田英明*

Yuhei Matsubara・Tetsuo Wakamatsu・Hideaki Noda

The behavior of the fish school around the aggregation devices is evaluated numerically and experimentally. Numerical model of the fish behavior is based on the Sannomiya's model and is applied to the behavior of the Goldfish. In the tank tests the movement of the fish near of the artificial aggregation devices was analyzed by video system. Results of numerical simulation are compared with experimental results. Finally the attraction and repulsion parameters of the devices found to be a very important in estimating the fish behavior.

Keywords: Fish behavior, Fish aggregation devices, Numerical model

1. はじめに

近年、沿岸域における水産資源の保護・培養が提唱され、コンクリートや鋼製の中空立方体構造をはじめ、様々な形態の人工魚礁が海底に沈設されている。こうした構造物が幾重にも堆積された群体魚礁は、小型魚の逃避場や摂餌の場あるいは幼稚魚の成育の場として大きな役割を果たしていると言えよう。そのような群体魚礁が設置された海域に魚類を放流すると、放流魚は数百メートルの距離からでも魚礁に向かって遊泳し魚礁周辺に鰯集・滞留することが知られている。柿元は、テレメトリーや魚群探査器を使ってヒラメ等の放流魚の挙動を調べ、放流された魚が数日間をかけて、いくつかの魚礁群を経由しつつ移動することを明らかにしている。同時に魚礁周辺での魚類行動は、メジナやインダイなど、魚礁性を有する魚種か否かによって異なることや、同じ魚類でも昼夜の時間帯によって行動が異なる、いわゆる日周期行動を取ることを示している。こうした放流後の魚群が示す行動特性、特に魚礁への鰯集行動は、魚礁から発生する音響による誘引作用、魚礁の逃避場機能、魚礁によるプランクトン等の餌料の捕捉機能等によって支配されると考えられている。これらの要因の中でも水中音響が誘引作用の主要因として、魚類ならびに海産動物の聴覚能力と水中音響の伝播特性との関係について検討した例がいくつかある。著者らの一部も種々の魚礁モデルから発生する水中音響を測定し、魚類の聴覚との関係を調べている。しかし現段階で、個々の誘因要因と魚類の鰯集との関係を定量的に示すまでには至っていない。このような魚類行動と環境要因との関係を知ることは、効率的な定置網やいけす等の水産施設の開発に重要なばかりでなく、魚類資源の保護・育成にも不可欠なものである。

一方、特定の魚類はなぜ群れを作るのか、あるいは魚群としての行動はどのように表現されるかという問題について、三宮ら¹⁾⁴⁾は、魚群行動を観察して得たデータに基づいてシミュレーションモデルを構築し、魚群行動を推定する方法を提案している。モデル化の基本的な考え方は、魚群を形成する各個体を質点とみなして質点系の運動方程式で魚群を記述するものである。また、個体の運動は2次元平面内に限定されると仮定し、1) 個体が単独で遊泳する力、2) 個体が環境から受ける力、3) 個体が群の中の他の個体から受ける力の三つの要因を考慮し、モンテカルロシミュレーションによって魚群行動を予測している。また梁ら⁵⁾は、同様のシミュレーション手法を用いて水槽内に網壁を設置した場合の魚群行動を推定している。しかし、これらの研究は、いずれも水槽壁あるいは網に囲まれた環境での魚類行動を取り扱ったもので、魚礁のもつ誘引機能と魚類の魚礁への鰯集性の関係を定量的に検討を試みたものではなかった。そこで本研究では、三宮らのモデルに基づいた魚群行動モデルによって、障害物設置時ならびに外敵来襲時の(1)水槽実験による魚群行動観察、(2)魚群行動シミュレーションモデルによる予測を行うとともに、(3)避難場設置時の遊泳行動シミュレーションと実験的検証を行うことで、魚類の魚礁への鰯集行動モデルを提案するための基礎資料を得ようとするものである。

* 正会員 鳥取大学工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目101)

** 正会員 山陽電気鉄道株式会社

2. 魚群行動観察実験

魚類の蛸集行動モデルを導くにあたって、まず水槽実験によって、実験魚の遊泳行動をビデオカメラで撮影し、その行動特性を解析した。実験水槽は、幅54cm、奥行54cm、高さ20cmの鋼製水槽で実験魚の遊泳行動を2次元面内に限定するため水深を3.5cmとした。実験魚の撮影のため水槽の1.5m上方にビデオカメラを設置し、水槽内での行動を記録した。実験魚には平均体長3.5cm、平均体重1.5gの金魚を用い、個体数を5尾とした。実験に用いた水槽およびビデオカメラの配置を図-1に示す。水槽実験では、3ケースの条件を設定した。すなわち水槽内に障害物を設置した場合、外敵が接近した場合ならびに避難場を設置した場合の各ケースについて、魚の遊泳行動を調べた。障害物実験では、水槽内のほぼ中央に直径5cm、高さ7cmのコンクリート円柱を障害物として設置し、その障害物に対する魚群の反応を記録した。次に、外敵接近実験では魚が魚群を形成し安定したところで、直径約3cmの球体を外敵に見立て、ほぼ一定の速度で魚群に接近させた。避難場設置実験では、水槽内のほぼ中央部と隅角部に避難場を設置した場合の2ケースの実験を行った。避難場は、幅10.5cm、奥行き6.5cm高さ1.4cmの透明容器が高さ2.1cmの4本の脚で支持されているものである。しかし中央部に設置した場合は、魚群は、側壁に沿って遊泳しつづけ、避難場に近付こうとしなかった。一方、水槽の隅角部に避難場を設置した場合には明確な蛸集が認められたので、この条件を避難場実験とした。各ケースの実験状況の模式図を図-2、3および4に示す。実験時は、実験魚を刺激しないように、あらかじめ1昼夜程度の時間をかけて水槽に馴致させた後実験を行った。また外界からの音響や人影による刺激をさけるために、別室からモニタリングしながら、魚類の行動が安定した状況を確認しながらビデオ撮影を行った。

魚類行動の解析では、ビデオ解析システムを用いて水槽実験で撮影したビデオ画像から各時刻ごとの実験魚個体の位置を測定し、そのデータを基に魚群行動の特性を調べた。各個体の位置は、モニタに表示された静止画面から、0.5秒ごとにマウスを用いて1尾ずつ手動で取得した。ただし、外敵を用いた場合のみ、遊泳速度が急激に増大するため、0.1秒ごとに実験魚の移動データを取得した。

3. 魚群行動モデル

本研究では、三宮ら¹⁻⁴⁾のモデルをもとに、水槽内に障害物および避難場を設置した場合の魚群行動の予測モデルを導いた。三宮らは、環境から個体に作用する力として側壁からの誘引力および反発力を定義して

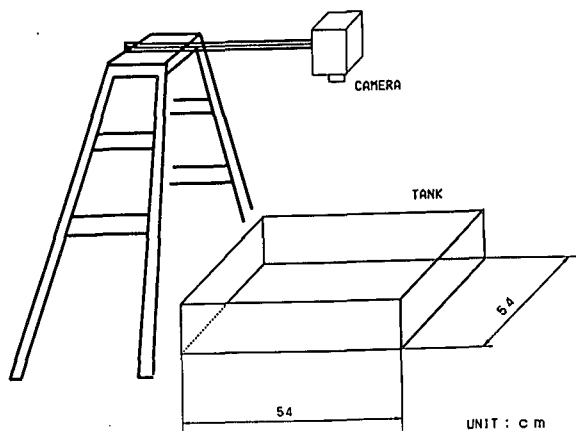


図-1 水槽およびビデオカメラ配置図

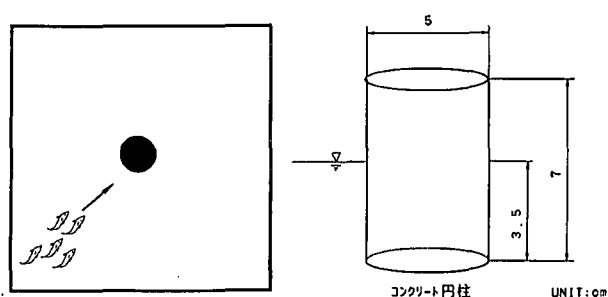


図-2 障害物設置時状況図

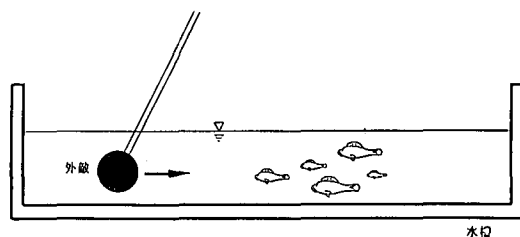


図-3 外敵接近時状況図

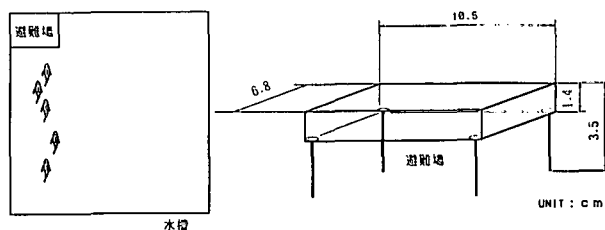


図-4 避難場設置時状況図

いるが、ここでは、側壁からの誘因力および反発力のみならず、障害物からは反発力が、そして避難場からは誘引力が作用するものとして、それぞれ個体にかかる外力としてモデルに組み入れた。したがって、運動方程式は次式のように示される。

$$m \dot{v}_i = F_{i1} + F_{i2} + F_{i3} + F_{i4} \quad (i=1, 2, \dots, N_f) \quad (1)$$

$$F_{i4} = F_{si} \text{ or } F_{ri} \quad (2)$$

ここに、 m は N_f 尾の個体の平均質量、 v_i は個体 i の遊泳速度、 $\dot{}$ は時間 t に関する微分、 F_{i1} は個体 i の前方推進力と抵抗との差で、単独で遊泳するための力、 F_{i2} は個体 i が側壁から受ける反発力（正值）あるいは誘引力（負値）、 F_{i3} は個体 i が群の中の他の個体から受ける力、 F_{si} は個体 i が障害物から受ける反発力、 F_{ri} は個体 i が避難場から受ける誘引力である。ただし、障害物からの反発力は、臨界距離内に存在する個体が障害物に近付くときのみ作用するが、避難場からの誘引力は、遊泳する向きを問わず、臨界距離内に存在するすべての個体に作用するものとした。

さらに、ビデオ解析の結果から水槽内を自由に遊泳する魚群に対して外敵を急接近させた時、魚群を形成していた各個体が一瞬にして散乱し、外敵との衝突を回避するように行動すること、すなわち各個体の遊泳速度が急激に増加し、外敵通過後は各個体は再び群を形成する状況が明らかとなった。そこで、この遊泳速度の増加を、外敵からの反発力の影響であるとして、新たな関数形の導入を試みた。まず、個体 i から臨界距離 D_s 内に存在する外敵が個体 i に接近するに従い、徐々に反発力 F_{si} が作用し、ある距離から、それが急激に増大するような関数形として三角関数を用いて次のように仮定した。

$$F_{si} = k_s \cos^3(\pi r_{si}/2D_s) \quad (3)$$

ここに、 k_s は外敵からの反発係数、 r_{si} は個体 i の外敵からの距離である。ただし、 $r_{si} > D_s$ のとき $F_{si} = 0$ である。

4. 魚類行動パラメータの抽出

モデルに含まれる側壁からの反発係数ならびに誘因係数や個体間誘因係数および反発係数の各値を実験結果をもとに算定した。これは三宮らの方法にならって水槽内に何も設置せず魚を自由に遊泳させたときの記録をもとに最小2乗法によって各係数を推定するものである。なおデータは魚群行動が極めて安定な3分間を選び出し、サンプリング間隔を $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$ としたので、1尾につき360個である。その結果、壁からの反発係数ならびに誘因係数は、それぞれ 2.48-2.91 および 1.65-2.64 の範囲に、また個体間誘因係数および成群力は 3.0 -19.4 および 0.80 - 0.97の範囲で変化することがわかった。そこで、実際のシミュレーションにはこれらの範囲の中で、もっとも実験値に一致する値を選んだ。各成分力の影響圏距離についても同様に算定し、側壁からの誘因力並びに反発力の影響範囲を10cm、個体間誘因力の臨界距離ならびに成群力の臨界距離を、それぞれ 20cm とした。図-5および図-6は、それぞれ実験とシミュレーションから得られた個体間距離の出現頻度を示したもので、シミュレーション結果の個体間距離がやや実験値より大きく生じているが、全体の傾向としては一致している。両者の遊泳速度の出現頻度を比較しても、ほぼ同様の結果となり、このような方法で実際の遊泳行動をほぼ再現できることがわかった。そ

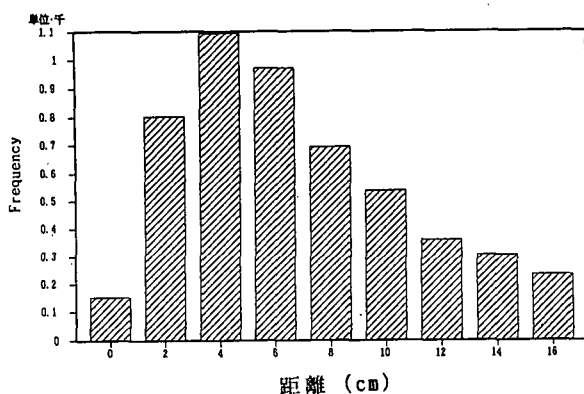


図-5 個体間距離の出現頻度（実験結果）

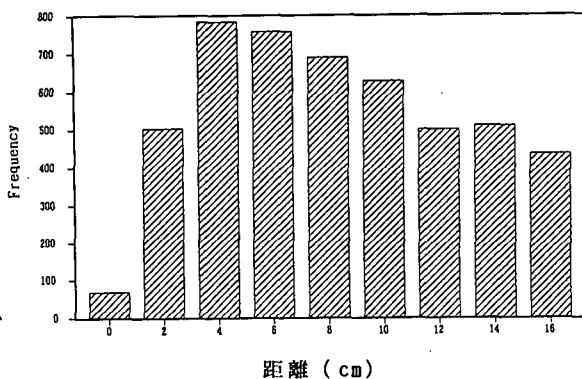


図-6 個体間距離の出現頻度（計算結果）

ここで、同じ係数を用いて、障害物、外敵接近時ならびに逃避場設置時のシミュレーションを行い、実測値と比較した。

5. シミュレーションと実験結果との比較

(1) 障害物設置時の魚類行動モデル

前節の魚類行動モデルを水槽内に障害物を設置した場合に適用し、魚群行動のシミュレーションを行った。個体を受ける反発力として側壁ならびに障害物からの反発力2種類を考慮し、その臨界距離を側壁の反発力の臨界距離と同様に10 cmとした。また外力係数を前述の範囲内で種々変化させ、シミュレーションによって魚群行動を推定した。図-7および図-8は、それぞれ実験魚とシミュレーションでの魚の遊泳速度と障害物までの距離の時間的変化を示しものである。結果にばらつきは見られるものの、遊泳開始後、遊泳速度を低下させながら約7sec後程度で障害物に最も接近し、その後遊泳速度を増しながら障害物から離れていく状況が両者に認められる。若干の相違はあるが、両者の結果は、ほぼ一致しているといえる。

(2) 外敵接近時の回避行動モデル

各個体の外敵からの回避反応を考慮した外敵回避関数式

(3) 式を用いて、シミュレーション結果が実験値と最も良く一致するような臨界距離および外力係数の組み合わせを検討した。ただし、各個体の反応時の推進方向は、観察結果からは精確に判断することが出来なかったため、試行的に外敵の進行方向に対して直角方向に反発力を作用させることとした。また、側壁からの反発力の影響も同時に考慮するため、水槽の一隅に魚群を形成させ、魚群と外敵と壁面との相互の位置関係を容易に確認できるよう、対角部からの外敵の接近速度を一定とした。実験から得られた金魚4個体の遊泳速度の時間的変化を図-9に示す。これより各個体間に差異はあるものの外敵接近時に急激に遊泳速度が増大し、最大回避速度が約35 cm/sec以上であることがわかる。外力係数を種々変化させ、シミュレーション上での各個体の最大遊泳速度と比較し、反応時の外敵との距離は各個体それぞれ異なるゆえ、臨界距離は、試行錯誤的に10 cmとした。図-10に外敵接近時のシミュレーションから得られた遊泳速度の時間的変化を示す。実験結果に比べて遊泳速度のばらつきが少ないが、急激な回避行動が認められることや最大回避速度はほぼ実験結果と一致していることなどから、ほぼ回避時の行動を再現することがわかる。しかし、回避後、実験値では各個体はいずれも遊泳速度を短時間で抑制するが、シミュレーション結果には、急激な遊泳速度の減少が認められず再度検討する必要があるといえよう。

(3) 避難場設置時の魚類行動モデル

以上、水槽内に障害物ならびに外敵を設置した場合の魚類行動については、ここで導いた行動モデルである程度は実

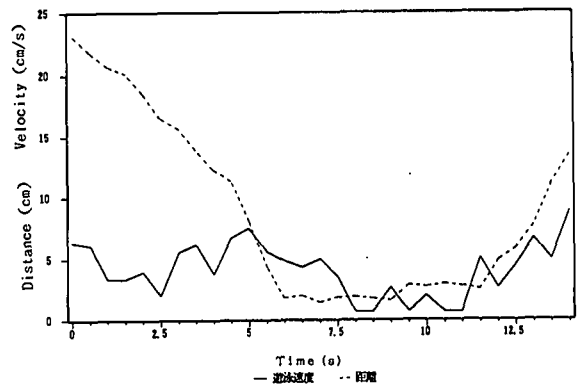


図-7 遊泳速度と障害物までの距離の時間的変化（実験）

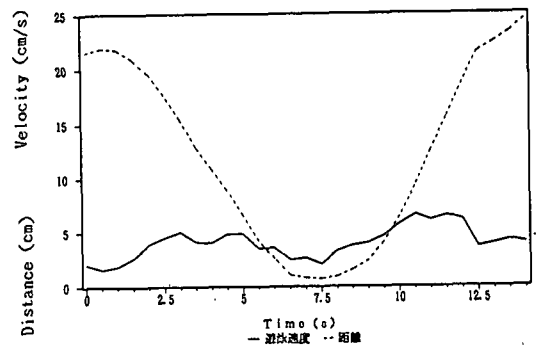


図-8 遊泳速度と障害物までの距離の時間的変化（計算）

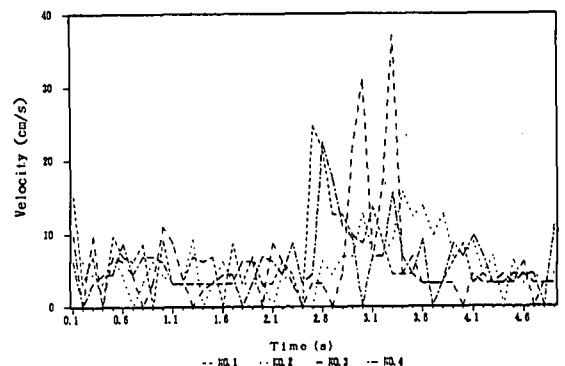


図-9 外敵接近時の遊泳速度の時間的変化（実験）

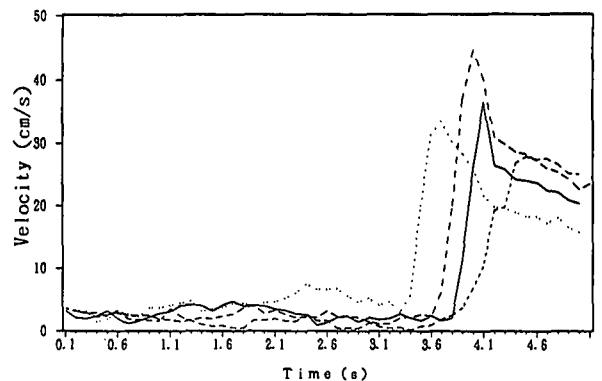


図-10 外敵接近時の遊泳速度の時間的変化（計算）

験結果を再現することがわかった。そこで、同じ行動モデルによって水槽内に避難場を設置した場合の実験魚の挙動について検討した。観察実験から得られた実際の軌跡を図-11に示す。魚群は5尾で構成され、魚群が安定した後、3度避難場を出入りした90秒間の映像を用いた。避難場の模型には、透明なプラスチックケースを使用し、避難場内の魚の行動も観察可能にした。避難場からの誘引力を考慮し、臨界距離を解析結果より30cmと設定し、同様に外力係数で変化させた。しかし、この外力係数を2以上にすると、一度避難場に入り込んだ魚は、再度避難場外に出るのに大半の時間を費やすことが明らかとなった。そこで、外力係数は、0.1~1.0の範囲で変化させて、シミュレーションによって最も適切な数値を検討した。また、実際の観察結果より、魚の避難場内での平均滞在時間は11.3秒であった。

図-12に、外力係数 k_r と避難場内での平均滞在時間との関係を表す。そこで、実際の平均滞在時間とほぼ一致する $k_r = 0.2$ を採用し、その軌跡を図-13に示す。実際の軌跡と比較して、避難場内およびその周辺に軌跡が集中していることから、完全に一致はしていないが、その傾向は類似しており、また、モデルにおける誘引力の影響も明らかに反映されることがわかった。

以上のことから、従来の魚群行動モデルを障害物、外敵ならびに避難場設置時に適用して、魚類の蜷集行動あるいは回避行動を説明できることがわかった。しかしながら、ここで実験対象としたのは、体長の小さな金魚であるために必ずしも普遍的ではなく、さらに他種の魚類を使用した検討が必要となる。

5. おわりに

本研究は、三宮らのモデルを基にして側壁による影響のみならず、各種の環境からの反発力および誘引力を取り込んだ新たなモデルを構築し、水槽内に障害物、外敵ならびに避難場を設置したときの魚群行動をシミュレーションによって検討した。また水槽実験とシミュレーションの比較は、実験魚の個体間距離の出現頻度ならびに各個体の遊泳速度の出現頻度を対象として行った。その結果

- 1) 魚群行動の基本的な外力要因を考慮して、5つの外力係数を最小2乗法により推定した。

この推定値は、基本的な外力係数として採用し、その他種々の外力係数を求める際、参考値としても引用し、適当な範囲を設定して外力係数を変化させた。このため、外力の強弱による、反応の相違も比較することができた。

- 2) 障害物および避難場を設置した場合、双方とも実際の魚群行動と類似した傾向を得、モデルを採用する際に考慮した反発および誘引力の影響をシミュレーション上で明らかに反映されることがわかった。

- 3) 外敵接近時の反応も、モデルを構築する際に想定した急激な遊泳速度の増加をシミュレーションによって再現することができた。しかし、反応後の特性を把握していなかったため、反応後も速度を抑制しきれず、慣性的な直進運動をする結果となった。

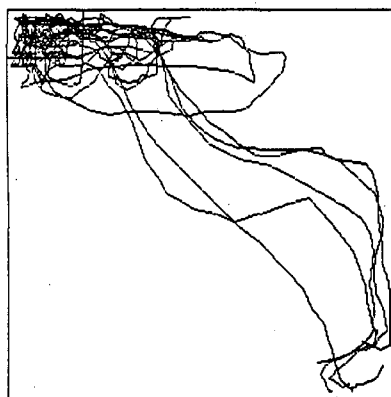


図-11 避難場設置による魚類の蜷集行動(実験)

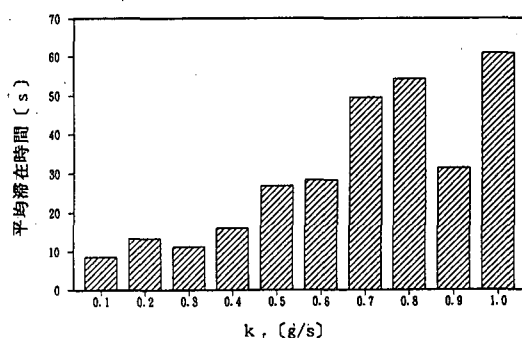


図-12 避難場の誘因係数と平均滞在時間との関係

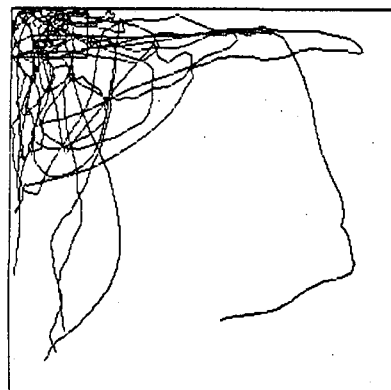


図-13 避難場設置による魚類の蜷集行動(計算)

今後より満足しうるモデルを構築するためには、さらに多くの現象を記録し、その特性を把握する必要がある。本研究の結果から、魚礁に誘引因子を与えてシミュレーションモデルに組み込むことで、魚礁周辺部への魚類の蜆集状況ならびに魚礁内部への魚類の挙動が明らかにできるものと考えられ、これまで不明とされている魚類の蜆集の因果関係が明らかになるものと思われる。

参考文献

- 1) 三宮信夫, 中峯 浩, 田中晶子, 松田 敏; 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 Vol. 2 No. 1 pp. 23~31 1989
- 2) 三宮信夫, 中峯 浩, 岩崎永弥; 魚群行動を表わ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 Vol. 3 No. 1 pp. 14~20 1990
- 3) 梁 振林, 松田 敏, 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考察; 日本水産学会誌 58 (5) 853-860 (1992)
- 4) 三宮信夫, 島田 亮, 中峯 浩; 魚群行動における自律分散機構のモデリング; 計測自動制御学会論文集 Vol. 29 No. 2 211-219 (1993)
- 5) 梁 振林, 松田 敏, 東海 正, 定置網構造に対する魚群行動のモデリング; 日本水産学会誌 60 (2) 185-191 (1994)