漁具研究へのシステム工学的アプローチ—II^{*1}

トラップ内での魚の行動のモデリングとシミュレーション

三 浦 汀 介

(1978 年 7 月 14 日受理)

Systems Engineering Approaches to the Studies of Fishing Gear—II

Modeling and Simulation of the Fish Behavior in a Trap

Teisuke MIURA^{*2}

Computer simulation techniques to estimate the behavior of fish were used. For the modeling of fish behavior, one fish was released in a trap. The trajectory of swimming fish was analyzed to find out the distribution of swimming speed and the angular distribution to the direction of motion.

As the result, they were fitted considerably well for Erlang distribution and Gauss distribution. In addition, the modeling and computer simulation were tried with consideration to the shape of the trap.

Comparing the staying time in the trap of the computer simulation with that of observation, both were in close agreement.

前報¹⁾では、漁具というものを種々の漁具構成要素からなるサブシステム、またはそれらの集合からなるシステムとしてとらえ、一例としてトラップ漁具に着目して、モデルからその動特性を2次システムで記述する試みを行った。しかし、漁具の動特性を決定する状態方程式のパラメータ ζ (減衰比) や ω_n (非減衰固有周波数) などは、実験的に決められたものであるから、この意味では漁具のマクロな動特性を表わす状態方程式というものは現象論的であるといえる。

同じトラップによる実験でも、魚種、体長や魚体数が変わるとパラメータは異なる値を示すことが実験からわかるが、このことはつまり、ある魚種、体長、魚体数ではどうしてその条件に特有なパラメータが存在するのか、また、どうして条件が変わるとパラメータが変化するのか、また、パラメータ間の関係はどうか等を理解するためには、魚の行動のミクロな構造に立ち入らなければならないことを示している。すなわち、魚の行動を決定する基本因子が何であるか、また、それらがどのように互いに作用し合いながら魚に行動をおこさせていくことになるのかなどの魚の行動のメカニズムを明らかにすることである。

著者は、このような観点に立つて漁具研究を進めるにあたり、ひとつの試みとしてトラップ内における魚の行

動を何らかの形でモデリングを行い、それをもとに種々の条件下でシミュレーションを行えば、漁具に対する魚の行動の予測に役立たせることができると考え、以下の実験ならびに考察を行った。

なお本論文をとりまとめるにあたって、北海道大学水産学部佐藤修教授、川島利兵衛教授、西山作蔵助教授ならびに中村秀男助教授から有益な御助言と御指導を賜った。ここに深く感謝の意を表す。

Fig. 1. Schematic drawing of the experimental trap.

^{*1} 本研究の要約は、1978 年度日本水産学会春季大会において発表した。

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

データの収集

実験条件や装置は前回の場合と同様であり、実験用トラップを Fig. 1 に示しておく。実験魚には体長 4 cm のマゴイ (*Cyprinus Carpio Linne*) を使用した、比較的小さな体長のものを選んだのは警戒心が強くなりすぎる

ことと、トラップの1辺の大きさが 40 cm であることなどを考慮したためである。

実験は飼育水槽の中から任意に 1 尾を取り出して実験用トラップに移し、魚の落ち着くのを待つて開始され、8 mm 撮影機と VTR で連続的に記録を取った。これらの記録は魚がトラップに侵入し、ほぼ中央付近に達した

Fig. 2. Illustrations of tracks of the swimming fish in the trap (1 step=1 second).

所をスタート点として、トラップ内を遊泳した後、トラップの外に出て行くまでの過程をひとつのセットと考え、魚の位置を1秒ごとに座標データとして読みとり、XYプロッタによって魚の軌跡としてプロットした。その一部を Fig. 2 に例示する。

魚の行動モデルの要素

魚の遊泳軌跡のデータをもとにして、トラップ内における魚の行動モデル²⁾の要素を次のように分類し測定結果を整理した。

壁の効果 データから魚が壁にそう行動が顕著にみられるので、トラップの一边の長さや遊泳速度の間には何らかの相関がみられるものと思われる。壁が魚におよぼす影響を明らかにするために、それぞれの魚の位置のデータを壁からの垂直距離として読み取り、ヒストグラムにしたものを Fig. 3 に示す。この図から判るように魚が遊泳する際、壁からの垂直距離の平均値は 3.4 cm で、この分布の約 90% が含まれる場合の距離は 8 cm であり、これはちょうど標準偏差の 3 倍に相当する値となっている。そこで壁が魚におよぼす効果の範囲を 8 cm 以内としておけば妥当であると考えた。

ふたつの壁の交角 実験ではトラップの形状が正四角形であるから、その交角は 90° である。魚は隅では両眼でふたつの壁を同時に見ることになり、特に交角の垂直 2 等分線上に位置した時には両方の壁の効果が釣り合いの状態になるものと思われ、一時的にどちらの方向にも行かず止まってしまう場合があつた。これらのことを考えるとふたつの壁の交角は、魚のトラップ内での滞留時間と深い関係があると思われる。

出入口の広さ この実験の場合は 12 cm と決めたが、一般に出入口の広さは滞留時間を決定する主たる要因と考えてよいであろう。

遊泳速度分布 1 秒ごとの魚の座標位置をもとに求めた遊泳速度の分布であるが、シミュレーションを実行する際、1 ステップの魚の遊泳距離を決定するものになる。遊泳速度 x の分布は、魚のトラップの隅における行動を特殊な場合と考え、それ以外の場合を自由遊泳と定義して、その時のデータを整理すると Fig. 4 のようになった。平均値は 4.5 cm/sec、標準偏差は 2.5 cm/sec であり、これはアーラン型ガンマ分布のパラメータをそれぞれ $k=3$, $\lambda=0.71$ sec/cm としたときの分布で非常によく近似した。一般に、アーラン型ガンマ分布の確率密度関数は、

$$f(x) = \frac{\lambda^k \cdot x^{k-1} \cdot e^{-\lambda x}}{(k-1)!} \quad (1)$$

で示される。

方位分布 進行方向に対して次の位置がとる方位の分

Fig. 3. Distribution of the distance between a fish and a wall. $n=762$, mean=3.4, variance=7.3

Fig. 4. Distribution of the swimming speed in the trap. $\chi_0^2=10.38 < \chi^2(10, 0.3)=11.78$, $n=462$, mean=4.5, variance=6.3, $k=3$, $\lambda=0.71$

Fig. 5. Angular distribution to the progressive direction in the trap. $\chi_0^2=5.16 < \chi^2(6, 0.5)=5.35$

布を方位分布とし、進行方向を中心に時計回りにまわるものを+として測定するものとする。方位分布の場合も自由遊泳時のデータを用い、結果は Fig. 5 に示されるように、平均値 0°, 標準偏差 15° の正規分布で比較的良好に近似した。

魚の行動のモデリング

実験結果から魚の持つそれぞれの要素を明らかにし、分析結果をもとにモデリングを行うわけである。その具体的モデルを Fig. 6 に示す。点線で区切られた各ゾーンはそれぞれ固有の特性を持ち、矢印で示された指向性を有する。壁に平行に引かれた点線は壁が魚におよぼす効果の範囲を示し、Fig. 3 の結果からこの間隔を 8 cm に設定した。また斜めの点線によつて各ゾーンの境界とした理由は、先にも述べたように、壁が魚におよぼす効果がこの点線を境に 1 方から他方に変ると考えたからである。また、このモデルでは中央の点からゲートに向つて方位を 0° として決めた。トラップに侵入した魚は中央にあるスタート・ポイントに到着するものと仮定して、そこからシミュレーションが開始される。まず最初のステップでは、このステップに限り、実験結果を考慮して 180° の方位を中心にして、Fig. 5 より標準偏差 15° のふれをもつて進むように決めた。最初のステップで 180° の指向性をもつ現象はトラップに進入する魚の慣性力に起因するものと思われる。第 2 ステップ以後は進行方向に対して標準偏差 15° のふれをもつて遊泳し続け壁の効果のおよぶ各ゾーンに進入したと同時に各ゾーン固有の指向性に支配される。たまたま、再び、中央ゾーンに出た時には、そこで $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲である角度を選択してそれを進行方向として標準偏差 15° のふれをもつて遊泳を続けるようにした。つぎに魚が壁にぶつかる場合については、実際の魚は壁を越えて外に出ることはなく衝突しそうな場合は途中で方向転換をするので、このメカニズムには光学の反射の法則⁴⁾を適用することにした。その具体的な例を Fig. 7 に示す。このトラップのように正四角形の場合は壁の交角は 90° になるので、トラップ内のどの位置で反射が起つてもこの図のふたつの例のどちらかにあてはまるので、この条

Fig. 6. Trap model. σ : standard deviation

Fig. 7. Dodging paths against the wall in the trap. (thick lines show the real tracks of the swimming fish)

Table 1. Directional characteristics of the swimming fish in the trap

Zone	Clockwise	Anti-clockwise	Total
a	23	25	48
b	63	92	155
c	100	81	181
d	90	87	177
e	59	66	125
out	52	58	110
Total	387	409	796

$$\chi^2_0 = 7.67 < \chi^2(5, 0.05) = 11.07.$$

件を満足すれば充分である。このようなプロセスを経て点線で囲まれたゲートのあるゾーンに到着した魚はそのままトラップの外に出てひとつのセットを完了する。

実際にこのモデルを動かすためにはこれまでに判つたパラメータに加えて、各ゾーンの反転する確率を決定しなければならない。そこで魚の遊泳軌跡のデータを Fig. 6 のトラップ・モデルにあてはめて、各ゾーンの指向性を決定するために Table 1 のようにまとめた。これは各ゾーンを時計回り、反時計回りに通過した場合の数をゾーン別にまとめたものである。これから判るように時計回り、反時計回りの場合の数には有意なる差が認められないので、反転確率 $\phi = 0.5$ としてさしつかえないと考えた。

シミュレーションとその結果

こうしてモデルとそれに用いるパラメータが決定さ

Fig. 8. Flow diagram of the trap simulation model.

Fig. 9. Distribution of the staying time in the trap. $\chi^2_0 = 3.50 < \chi^2(5, 0.05) = 11.07$ $n=110$, mean=57.5, variance=1260.2

れ、シミュレーションが実行された。シミュレーション・プログラムのフロー・チャートを Fig. 8 に示す。プログラムの開始と同時に XY プロッタでトラップの形を描き、次のステップで魚のスタート・ポイントを指定してから、各パラメータを入力するとシミュレーションが実行される。このシミュレーション・プログラムは次の3個のブロックからなり、それらはゾーン・ブロック、リフレクション・ブロックとランダム・スイム・ブロックである。ゾーン・ブロックは Fig. 6 に示した制約を魚に与え、方向反転のメカニズムには一様乱数ゼネレータが使われる。リフレクション・ブロックは Fig. 7 の反射の法則が適用される。ランダム・スイム・ブロックでは遊泳速度にアーラン型ガンマ乱数が、また方位に正規乱数が使われるので、それぞれの乱数ゼネレータが内蔵されている。このモデルの時間進行機構としては、固定時間法 (Fixed time advancing) に属するもので、実験時のデータの離散化処理の際に決められた1秒単位でプログラムが実行されることになるから、プログラム中に1秒単位のクロックを内蔵したものと考えてもよいわけである。このようにして1秒ごとの魚の軌跡がプロットされて魚がゲートを通じたところで、それまでに要したステップ数 (秒数) が印刷されて1セットを終了する。

シミュレーションの有効性を確かめるために、約3000回にわたる試行がなされ、それに要した時間はセイコー S-5500 でおよそ70時間であつた。シミュレーションの有効性を評価する方法として、ここでは滞留時間分布を用いて実測値とシミュレーションによる値を比較すると、Fig. 9 のようになり、それらはかなりよく近似することが判つた。またシミュレーションによる魚の軌跡を Fig. 10 に例示する。

考 察

実際の魚を使つての実験結果と、それをモデリングし

Fig. 10. Illustrations of the tracks obtained from the simulator (1 step=1 second).

てシミュレーションを行つた結果を比較すると、滞留時間分布においてはかなりよい近似となつた。今回の実験ではシミュレーションの有効性の判定に、滞留時間分布を評価の基準にしたわけであるが、実際にはこれだけで充分とはいえない。実験例とシミュレーションによるもののそれぞれの魚の遊泳軌跡を比較すると、かなり類似

のパターンがみられるが、客観的にこの両者の類似性を判定する方法は簡単ではない。ここではトラップ漁具を対象に考えているので、その漁具の性格上、魚のトラップ内における滞留時間分布を用いて評価することは、ある程度妥当性があるものと考えてよいであろうが、より高度の類似性の判定を考えるならば、それはパターン認

識等を考慮した総合評価を行うことに帰着する。

ここで、トラップ・モデルをひとつのダイナミックシステムと考えたとき、遊泳速度分布を入力とし滞留時間分布を出力とする、1入力1出力系と仮定することもできるであろう。このような考え方が許されるならば、トラップ・モデルの伝達特性を明らかにすることによつて、それをラプラス逆変換することから、システムの動特性を表わす微分方程式の解が求まるが、この問題はこれからの研究に譲ることとする。

魚の行動を予測するひとつの手段としてシミュレーション手法を用いたわけだが、トラップ・モデルの場合は一応の満足できる結果を得ることができた。今後は、パラメータやトラップの形状を変化させて、種々の条件に

おける実験を試みようと考えている。また、このような手法は他の漁具研究、特に漁具のオペレーション等における有効な手法だと思われるので、これからの研究に活用したいと考えている。

文 献

- 1) 三浦汀介: 日水誌, **44**, 835-841 (1978).
- 2) 大久保 明: 生態学と拡散, 築地書館, 東京, 1975, pp. 129-134.
- 3) T.H. ネイラー・J.L. バリンフィ・D.S. パーディック・K. チュー著: コンピュータシミュレーション (水野幸男・小柳芳雄訳), 培風館, 東京, 1974, pp. 84-87.
- 4) 岸田孝一・藤井良治著: シミュレーションの演習, 産報, 東京, 1974, pp. 103-108.