

個体ベースモデルによる魚類生息環境評価手法の構築

DEVELOPMENT OF FISH HABITAT EVALUATION METHOD APPLIED INDIVIDUAL BASED MODEL

石川雅朗¹・足立 恒²・平野弘晃³

Masaaki ISHIKAWA, Hitoshi ADACHI and Hiroaki HIRANO

¹正会員 工修 木更津高専助教授 環境都市工学科 (〒292-0041 木更津市清見台東2-11-1)

²東京大学工学部 都市工学科 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

³東京ネットウェイブ (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷1-8-17)

In this paper we describe development and verification of fish habitat evaluation method applied individual based model. We developed computer software reappeared fish school behavior. This software has visual function for making agreement tool with residents who related river improvement project.

We defined fish school radius that indicated expanse of fish school. We calculated time series data of fish school radius from each fish position data. In verification of individual based model, we compared computational results with experimental one, used power spectrum of fish school radius. The results have confirmed the certain extent reliability of the model.

Key Words : *Individual based model, Fish schooling behavior, Virtual habitat simulation
Power spectrum analysis, Japanese dace, Agreement tool*

1. はじめに

生態環境に配慮した河川計画を適正に進めるためには生態環境の現状を評価し、その計画で盛り込む工夫が生態環境にとってプラスに作用するのかマイナスに作用するのか吟味する必要がある。環境問題の多くは選択の問題であり、たとえマイナスに作用する施策であっても社会的な安全性を確保するために実施しなければならない場合もある。評価手法には高い精度で生態環境を評価するとともに、計画立案に関係する住民との合意形成ツールとしての明解さが求められる。

我国においても河川生態環境の評価手法として欧米で広く用いられている正常流量漸増法(IFIM)、その主要モジュールである物理的生息場シミュレーション(PHABSIM)について基礎的な研究が行われ、いくつかの河川計画では事業レベルで魚類生息環境の事前評価が行われている¹⁻⁵⁾。

PHABSIMでは魚類生存量と無関係な生息場の静的なポテンシャルである「重み付有効面積(WUA)」が評価結果として算定される。①河口堰などの河川横断構造物を建設

した場合どの位置に魚道を設置したらより多くの魚が遡上できるのか、②洪水時の魚の避難場をどのような形状にしたら魚が安全に避難できるのかといった魚の動的な動きが大きく関与する現象に関して静的な評価手法であるPHABSIMによる評価は予測精度が非常に低下する。

動的で複雑な自然現象は「 $1/f$ ゆらぎ」であることが様々な分野で確認されている⁶⁾。魚群行動についても室内観察実験の分析結果から魚群の広がり度合いの時間的変動は「 $1/f \sim 1/f^2$ ゆらぎ」であることが確認されている⁷⁾。

本研究は魚群行動モデルの適用により魚の動きを反映した動的な生息評価手法の構築を目的とする。魚の行動をモデル化できれば、魚道設置場所の選定といった実際に建設しなければ観察・評価できないことに対し、事前にコンピュータの中の仮想空間においてシミュレーション実施して吟味することが可能となる。洪水時における魚類避難場の設計のように、事後の観察・評価が現実的に不可能な現象についても検討することが可能となる。

魚群行動モデルの同定がなされれば魚類生息環境を動的かつ定量的に評価することが可能となる。コンピュータシミュレーションにより評価のためのコストを低く抑えられる。出力は時々刻々と変化する魚の位置座標なの

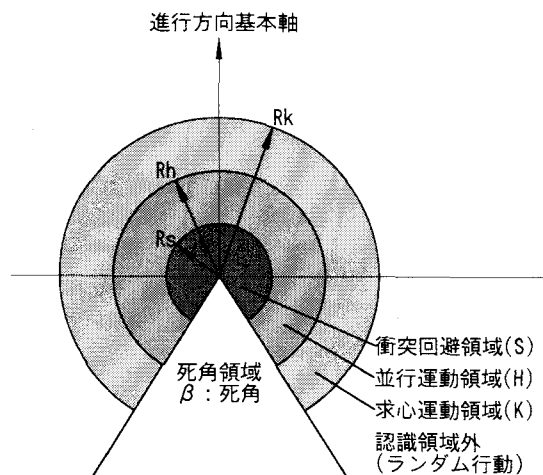


図-1 個体相互の基本行動決定領域。最近接個体との距離により、衝突回避行動、平行運動、求心運動、ランダム運動を選択する。

でCG機能を活用し表現することで、専門知識をもたない住民が感覚的に結果を評価することが可能となり、合意形成ツールとして高い有用性を備えることができる。

具体的には魚群行動が個体相互、および個体と環境因子（領域境界、流速分布など）との相互作用により成立するものと考え、基本理論として個体ベースモデルを適用した魚群行動モデルを構築し、この考え方を実装したソフトウェア（仮想生息場モデル）を開発した。

さらに、静水場および動水場における魚群行動観察実験結果を用いて河川における魚類生息場評価法としてのモデルの妥当性を検討した。

2. 個体ベースモデル

個体ベースモデルは動物の群れのコンピュータ・アニメーション製作方法としてクレグ・レイノルズにより提案された、個体相互の局所的な相互作用規則から大域的な行動パターンを表現するモデルである^{8~10)}。個々の魚の特性をアルゴリズムにして、それらを相互に作用させると魚群が構成されるという手法である。

魚類の個体ベースモデルに関連する既研究成果の概要は次のとおりである。北米ではマス科、サケ科魚類の移動や回遊状況の把握など特にPHABSIMによる評価が困難な現象について個体ベースモデルの適用が試みられている^{11~13)}。我国においては青木による静水状態における基本行動規則に関する検討や¹⁴⁾、三宮らによる魚群行動モデルの感度解析などの研究がある^{15~16)}。

3. ソフトウェア開発

本研究では、個体ベースモデルによる魚群行動のシ

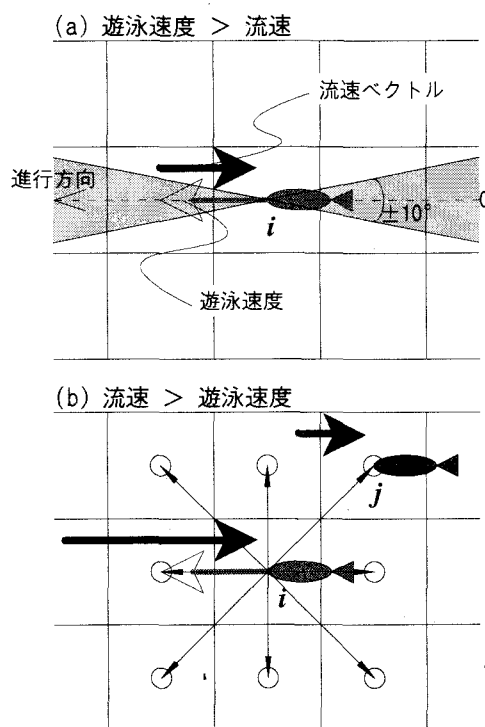


図-2 動水場における流速ベクトルに対する基本行動規則。最大遊泳速度は個体の特性として与えられ、遊泳速度は最小遊泳速度から最大遊泳速度の範囲内でランダムに設定される。

ミュレーションを行うため、独自にソフトウェアを開発した。レイノルズが提案した鳥の動きに関する行動規則を参考に、モデルに組み込む魚の基本行動規則を魚群行動観察実験により得られた知見から次のように定めた。仮想空間を遊泳する個体(魚)を仮想魚と呼ぶ。

(1) 個体相互間の基本行動規則

個々の仮想魚は自分に最も近い仮想魚（最近接個体）との距離に応じて順に、衝突回避行動、平行運動、求心運動、ランダム運動の行動をとる。死角にいる他の仮想魚については認識対象外とした。領域境界等にさえぎられる部分については死角とした（図-1）。

ある程度空間的な余裕が確保された場における魚群行動を見るとぶつかり合う個体はなく、群れから分離した個体は群れに向かう方向で移動することが多いように思われる。

(2) 領域境界に対する基本行動規則

仮想魚の領域境界との衝突については、領域境界に対する入射角と同じ角度で反射するものとした。

(3) 流速に対する基本行動規則

魚にとって流れに抗し切れないことは死を意味し、一時的に流されている場合はあっても、より小さな流速場で流れに定位することから行動規則を次のように定めた。設定した仮想魚の遊泳速度が流速より大きい場合は流

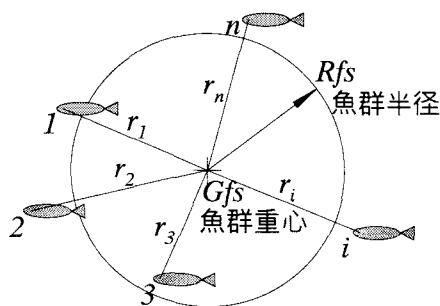


図-3 魚群半径 R_{fs} の定義。魚群半径は魚群の広がり具合を示す評価指標。

速ベクトルに対して仮想魚は定位するものとし、進行方向の決定は $\pm 10^\circ$ の範囲でランダムに選択するとした。

流速が遊泳速度より大きい場合には、隣接する流速ベクトルを探索し最も流速値の小さい方向に動くか、あるいは流速と遊泳速度の差分をもって下流方向へ移動するとした。ランダムにどちらかの行動を選択する（図-2）。

(4) 開発環境

ソフトウェアの開発環境等は次のとおりである。

開発環境：

SOTEC Micro PC STATION

CPU: Celeron 400MHz, メモリー: 64MB

オペレーティングシステムとソース記述言語：

Microsoft Windows 98 4.10.1998

Delphi Version 4.0 (PASCAL)

4. 評価指標とモデル検証

(1) 魚群半径 R_{fs}

魚群の行動特性を定量的に把握するために魚群の広がり具合を示す評価指標として魚群半径を(1)式のように定義する（図-3）。各々の仮想魚の位置座標データから魚群の重心を求め、重心から各魚の距離の二乗を求めその相乗平均を魚群半径と定義する。

$$R_{fs} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N r_i^2}{N}} \quad \dots (1)$$

ここに、 R_{fs} ：魚群半径、 N ：総個体数、 r_i ：魚群重心と各個体との距離。

(2) モデルの検証方法

モデルの検証方法を流れ図にして図-4に示す。観察実験、シミュレーション計算の供試魚、仮想魚の位置座標データから魚群半径の時系列データを算定する。さらに、高速フーリエ解析を適用し魚群半径のパワースペクトル図を求め「 $1/f \sim 1/f^2$ ゆらぎ」の傾向を示せば少なくとも動きについて仮想魚は供試魚と等価とみなされる。

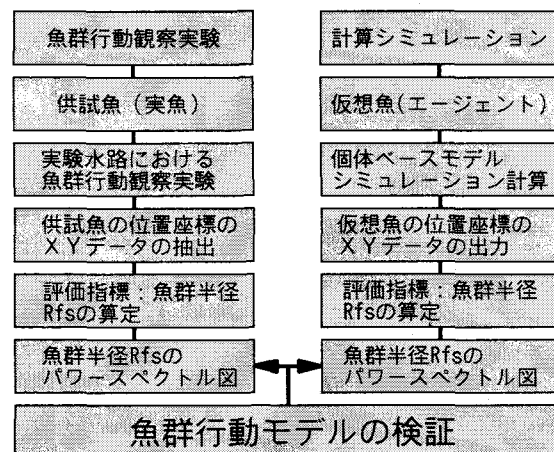


図-4 モデルの検証方法

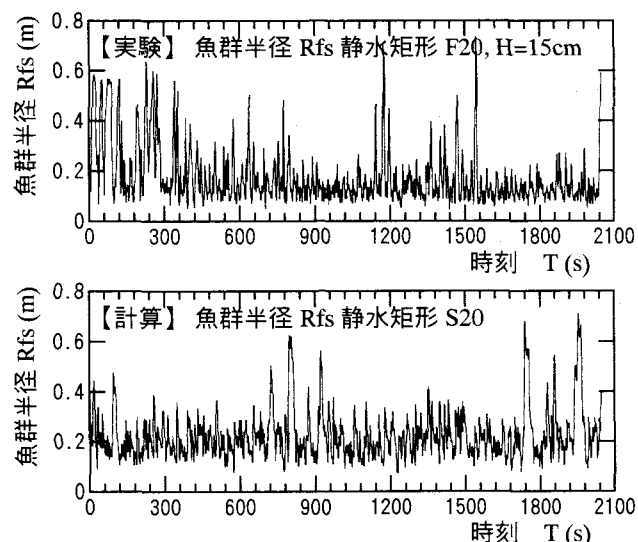


図-5 静水場・矩形領域における魚群行動についての魚群半径時系列変化図。

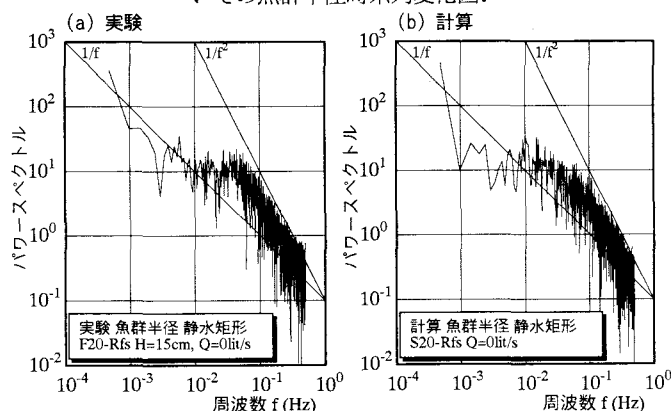


図-6 静水場・矩形領域における魚群行動についての魚群半径パワースペクトル図。

5. 静水場矩形領域における魚群行動計算

領域形状が矩形(0.8m×1.8m)で流況が静水状態の場合について試算し各仮想魚のパラメータを設定した。図-5は魚群半径の時系列図である。広がり具合のピークの発生やその発生間隔は一致していないが最小魚群半径は概ね0.10~0.14m程度に収束しており、若干、シミュレーション計算結果の方が大きめになっている。

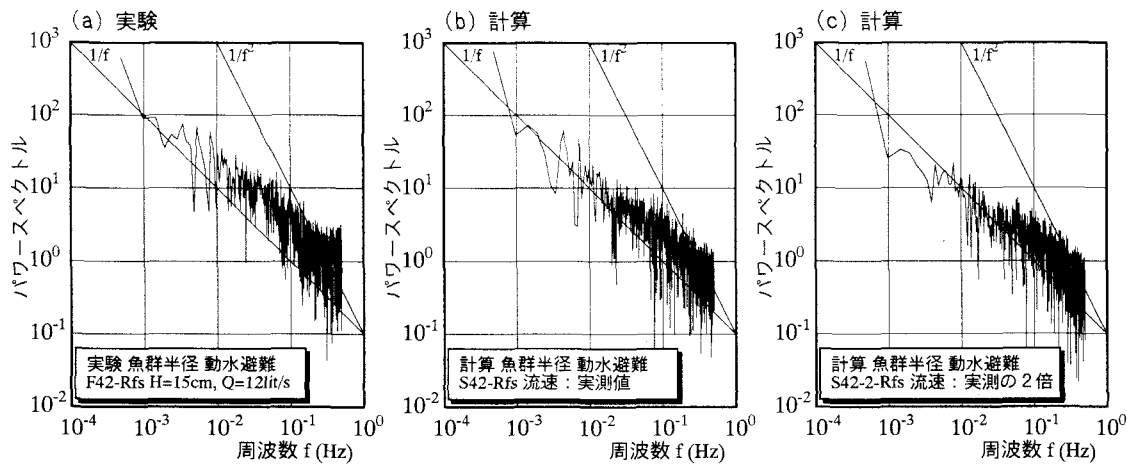


図-8 動水場・避難領域における魚群行動についての魚群半径パワースペクトル図。

図-6は魚群半径のパワースペクトル図である。特に高周波域においてパワースペクトルの分布が整合している。低周波域、すなわち大局的な動きについてはシミュレーション計算の方が実験結果よりやや単調な傾向にある。

6. 動水場避難領域における魚群行動計算

図-7は実験で測定された避難領域における流速分布図である。静水場への適用により得られたモデルの設定パラメータをそのまま用いて、避難領域形状の動水場に適用した結果を示す。シミュレーション計算に用いる流速分布については①実測値を用いる場合と、②流速のベクトル方向はそのままに流速値を2倍にした2ケースについてシミュレーション計算を行った。

図-8は魚群半径のパワースペクトル図である。計算結果(b)は観察実験結果(a)より若干ランダムな傾向が見られるが全体的には整合性は良好である。流速値を2倍としたケース(c)についても実測値を用いたケース(b)よりランダムな傾向が強いことが確認されるがその差異は微小である。

図-9は領域を10cmのメッシュで区切り、メッシュ毎に供試魚、または仮想魚が存在した頻度（出現頻度）を分布図にしたものである。(a)は観察実験による出現頻度分布図である。(b)(c)は計算シミュレーションによる結果である。図中の点線は水理的な観点から領域をさらに小さな区域に分けた場合の境界を示し、図中の文字は区域の名称である。

実験(a)と流速値を用いた計算(b)では出現度数の大きさに差があるが、定性的な傾向として両ケースとも遮水ユニットにより作り出される2箇所の淀み部とそれをつなぐ部分の出現頻度が高いことが確認された。

実験結果では上流側左右岸隅部における出現頻度が相対的に高いが計算では再現されていない。下流側についても実験では右岸側の出現頻度が高くなっているが計算では表現されていない。

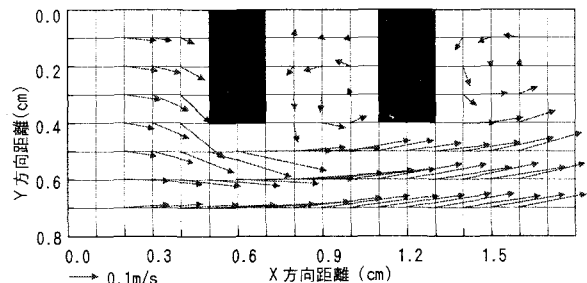


図-7 避難場領域の実測流速分布図。水深 $H=15\text{cm}$ 、流量 $Q=0.012\text{m}^3/\text{s}$

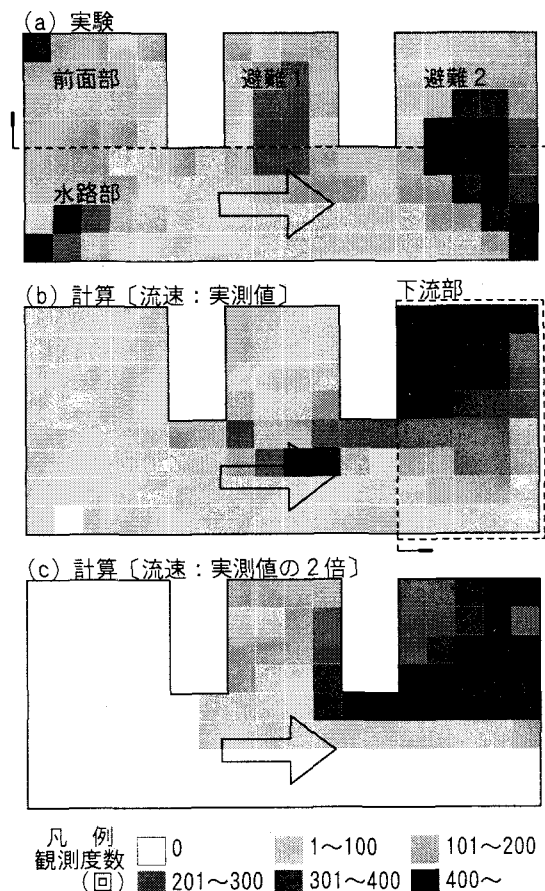


図-9 個体（魚）の出現頻度分布図。1メッシュの大きさは $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 。

表-1 区域別の1メッシュ当たり出現頻度(単位:回)

	(a)実験	(b)計算	(c)計算
前面部	121	25	0
水路部	160	100	89
避難1	147	89	137
避難2	210	567	593
避難1+2	182	355	390
下流部	245	357	410
備考		流速分布: 実測値	流速分布: 実測値の2倍

区域「避難2」を見ると、実験では水路および遮水ユニットの壁に隣接する部分の出現頻度が相対的に低いのにに対し、計算では区域全体に一律な出現頻度となった。

流速値を実測の2倍とした計算ケース(c)では仮想魚が流れに抗しきれず下流側に流される傾向が認められた。

表-1は前面部、水路部、避難1、避難2、および下流部といった区域別の1メッシュ当たり出現頻度を一覧表にしたものである。各ケースの総データ数は20480、メッシュ数は128であり、仮に一律に分布したとすれば1メッシュ当たりの出現頻度は160回となる。

下流側避難場の「避難2」の計算(b)(c)による1メッシュ当たりの出現頻度は、実験の2.5~3倍程度となっているものの水路部より出現頻度が大きいという点では同様な傾向が確認された

7. 考察

個体ベースモデルの適用において個体相互の行動規則の設定は最近接個体との距離のみを用いて次時刻の当該個体の行動を決定させた。魚群の広がり狭くなり個体間隔が小さくなった場合には複数の個体の影響が関与することが考えられる。静水、動水ともに若干ではあるが実験より計算の結果の方が単調な傾向にある理由ではないかと思われる。

生物学的な現実性を高めれば高めるほどモデルは複雑になり親和性が失われるため現時点では個体ベースモデルにも適用限界がある。生息場規模、流域規模など大規模モデルとして適用する場合、データ入力とパラメータ同定に時間がかかり計算プロセスが非常に困難になる。現状では評価対象の現象を見極め動的な現象への適用を考える必要がある。

8. 結論と今後の課題

漁業従事者等に対するヒアリング調査結果から良好な生息場を特定し実際に採捕調査を実施した場合、多くの個体を採捕できることもあればできないこともある。魚類の生息環境は時間的かつ動的に変動すると考えられる。本研究ではその動的特性のモデル化の検証のため、群

付表-1 設定パラメーター一覧表

パラメータ名	変数	単位	設定値
計算時間間隔	TCAL	(s)	0.20
計算出力間隔		(s)	1.00
衝突回避領域	RS	(m)	0.03
平行運動領域	RH	(m)	0.20
求心運動領域	RK	(m)	0.80
最小遊泳速度	SMN	(m/s)	0.00
最大遊泳速度	SMX	(m/s)	0.20
ランダム行動率	RMR	%	25
死角	β	度	180

れの広がり指標として魚群半径を定め、パワースペクトル解析を適用した。

その結果、単純な基本行動規則の個体ベースモデルで、実際の魚類と同様な魚群規模の時間的変動を再現できることが確認された。現実の魚群行動の場合と同様に計算シミュレーションにおいても魚群半径の応答パワースペクトルが「 $1/f \sim 1/f^2$ ゆらぎ」の分布であることが確認された。

さらに、今後の課題として次のようなことが考えられる。

- ① 出現頻度分布について、ある程度の定性的な表現はできたが、定量的には大きな差異があった。実用化のために流速に対するパラメータの同定とともに壁に対するアルゴリズムを改良することが必要である。
- ② 精度を向上させるために底質が魚群行動に与える影響を反映させる必要がある。
- ③ 魚種数、1種（実験ではウグイ）について検討したが、より現実的なモデルとして異魚種間の相互作用を組み込む必要がある。
- ④ 構築したモデルは平面2次元モデルであるが、瀬と淵の影響や水深のあるストリームタイプの魚道内における魚群の行動をシミュレーションするには3次元モデルへと拡張する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたって千葉県銚子水産事務所・梶山誠氏ならびに千葉県内水面水産試験場・尾崎真澄氏より水産分野の立場からの適切な助言をいただいた。ここで記して感謝の念を表しておきたい。

付録 設定パラメータと開発ソフトウェア

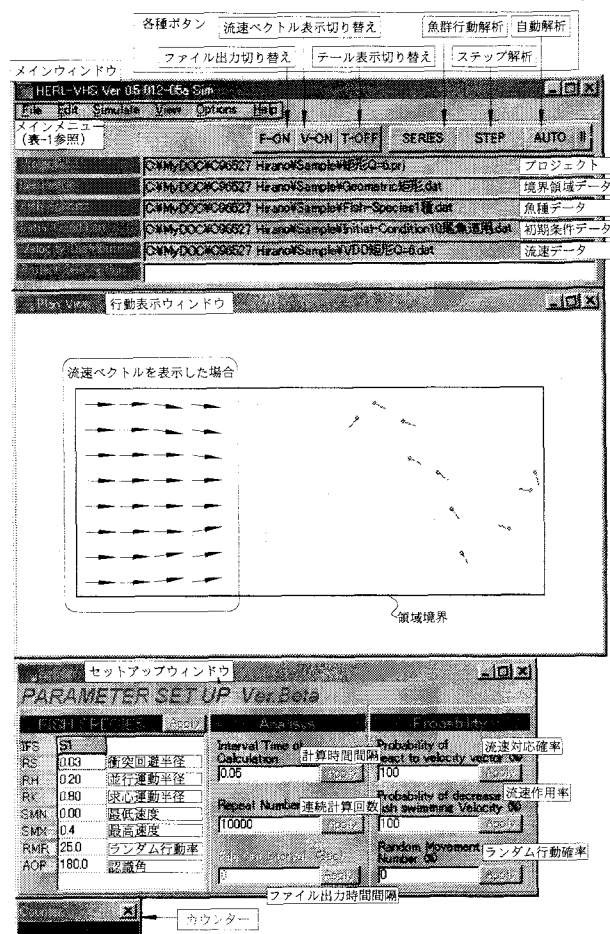
付表-1にシミュレーション計算で用いた設定パラメータを示す。付図-1に本研究で開発した仮想生息場シミュレーションソフトの主画面に主な機能の概略説明をつけて示す。

本ソフトウェアでは合意形成ツールとしての活用を考え、魚群行動計算を実行すると同時にグラフィック表示機能を用いて仮想魚の行動を逐次ディスプレイ画面に表示する機能を実装した。これにより特別な専門的知識がなくても魚の動きを感覚的に吟味し判断することが可能となる。

検証データを得るための魚群行動観察実験は、千葉県内水面水産試験場において育成された生後1年3ヶ月、体長10cm程度のウグイを供試魚として用い実施した。行動観察はビデオカメラを用いて無人で行い、録画テープより1秒間隔で約34分(2048秒)間の供試魚位置座標を抽出した。計算シミュレーションでは計算時間間隔0.2秒で計算し1秒間隔で個体の位置座標を出力した。

参考文献

- 1) Reiser,D.W., et al. :Status of Instream Legislation and Practices in North America, Fisheries, Vol.14, pp.22-29,1989.
- 2) 中村俊六, 石川雅朗, 築坂正美, 東 信行, 中村緩徳: 河川における魚類生息環境評価 (IFIM適用) のための基礎調査, 河道の水理と河川環境シンポジウム, JSCE, pp.127-134, 1995.
- 3) 金 亨烈, 玉井信行: 乙川におけるIFIMを用いた魚類の生息域評価に関する研究, 環境システム研究, Vol.24, pp.77-82, 1996.
- 4) 小出水規行, 藪木昭彦, 中村俊六: IFIM/PHABSIMによる河川魚類生息環境評価 -豊川を例にして-, 河川技術に関する論文集, 第6巻, JSCE, pp.155-160, 2000.
- 5) 日本道路公団: 平成10年度 館山自動車道 相川地区環境保護対策検討報告書, 日本道路公団 東京建設局 木更津工事事務所, 1999.
- 6) 武者利光: ゆらぎの発想, NHKライブラリー79, 日本放送出版協会, 1998.
- 7) 石川雅朗: ウグイの魚群行動特性に関する実験的研究, 河川技術に関する論文集, 第6巻, JSCE, pp.101-106, 2000.
- 8) Creg W.Reynolds :Flocks, Herds, and Schools, A Distributed Behavioral Model, The Proceeding of SIGGRAPH'87, Vol.21(4), pp.25-34, 1987.
- 9) 吉永良正: 「複雑系」とは何か, 講談社現代新書1328, 講談社, 1996.
- 10) 科学シミュレーション研究会: パソコンで見る複雑系・カオス・量子, ブルーバックスB-1160, 講談社, 1997
- 11) Russell B.Rader and N.LeRoy Poff :Development of an Individual-Based Trout Instream Flow Model, STREAM NOTES, USDA Forest Service, pp.5-7, 1999.
- 12) H.I.Jager, W.Van Winkle, and B.D.Holcomb :Would Hydrologic Climate Change in Sierra Nevada Stream



付図-1 仮想生息場シミュレーションソフトウェアの主画面。セットアップウィンドウから設定パラメータの変更が可能。

Influence Trout Persistence, Transaction of the American Fisheries Society, Vol.128, pp.220-240, 1999.

- 13) Peter S.Rand, James P.Scandol, and Emily E.Walter: NerkaSim: A Research and Educational Tool to Simulate the Marine Life History of Pacific Salmon in a Dynamic Environment, Fisheries, Vol.22(10), pp.6-13, 1997.
- 14) 青木一郎: 魚の群れ行動のシミュレーション, 海洋科学 Vol.15, No.4, pp.207-210, 1983
- 15) 三宮信夫, 中峯 浩, 松田 皎: 魚群行動モデルの感度解析, 日本水産学会誌56(12), pp.1973-1977, 1990
- 16) 梁 振林, 松田 皎, 三宮信夫: ウグイの水槽実験による魚群行動モデルの考察, 日本水産学会誌58(5), pp.853-860, 1992.

(2001. 4. 16 受付)