

セルオートマトンを用いた環境影響評価シミュレーションの試み

AN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT SIMULATION USING
A CELLULAR AUTOMATA

白木渡*・井面仁志**・奥原浩之***・中村耕平****・福岡寛*****

Wataru SHIRAKI, Hitoshi INOMO, Hiroyuki OKUHARA, Kouhei NAKAMURA and Hiroshi FUKUOKA

*工博 香川大学工学部教授 信頼性情報システム工学科（〒761-0396 高松市林町 2217-20）

**博(工) 香川大学工学部助教授 信頼性情報システム工学科

***博(工) 広島県立大学経営学部助教授

****香川大学大学院工学研究科

***** (株) 富士クリーン

In this paper deals development of an environmental impact assessment simulation using a Cellular Automata for environmental protection is performed. In simulation, it is assumed the case where a reservoir is reclaimed for the development business. Using the technique that was developed by this research, simulations are carried out to evaluate about what influence comes out to the population number of fishes that inhabit in the reservoir. And it examined the way which is effective for the preservation of the environment.

Key Words : The Environmental Impact Assessment, Cellular Automata, *Rhodeus ocellatus kurumeus*

1. はじめに

環境影響アセスメント制度の施行により、開発事業を実施するにおいて事業の環境におよぼす影響評価を行う必要がある。しかし、開発事業による自然環境の変化を、微分方程式等の数理モデルで表現して解析し、事業の環境への影響評価を行うことは一般に困難を伴う。

そこで、本研究では複雑系のモデル化に有効性が認められているセルオートマトンを用いて、環境影響評価シミュレーションを行う手法を提案する。そして、その手法の適用事例として、ため池が開発事業のために埋め立てられる場合、ブラックバスを放った場合、ため池が汚染される場合の3ケースを想定し、そのシミュレーション手法を用いて生物への影響評価を行い、その手法の有効性を確認する。

2. セルオートマトン (CA)

セルオートマトン (以下 CA) とは離散時間、離散空間、離散状態変数によって定義され、ある局所的なルールにしたがって決定論的に時間発展する動的システムのことである。もともとはフォン・ノイマンにより生物の自己増殖をモデル化するため考えられたもので、以下の特徴を有する。

- (1) 空間は1次元、2次元、3次元中の規則的な格子によって表される。

- (2) CA格子のそれぞれのセルは、有限個の状態のどれか一つをとり、任意の状態は整数値で表される。

本研究では、空間を空間を2次元の格子で表した2次元CAを用いるので、ここでは2次元のCAを紹介する。

同じ大きさの正方形（以下セルという）で区切られた碁盤のような面があり、各セルに白または黒の石を置くことを想定する。各セルには辺が接する4個（図-1：ノイマン近傍）あるいは角で接するものも加えれば8個（図-2：ムーア近傍）のセルが隣に存在する。隣のセルの状態（石の色：黒または白）によって、各セルの状態（色）が変わるとし、その変わり方の規則を定める。

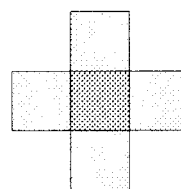


図-1 ノイマン近傍

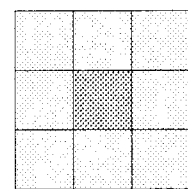


図-2 ムーア近傍

この規則を時間 $t=0$ における石の並び方に適用し、 $t=1$ における石の並び方を決め、 $t=1$ の石の並び方から $t=2$ における石の並び方を決め・・・、というように繰り返すと、ある時間からもうこれ以上変わらないパターンとなる。この手順がCA法の原型である。このCA法の特徴をまとめると以下ようになる。

- ・同じ大きさの均一なセルを想定する。
- ・上の例では白と黒の 2 種類の石としたが、各セルは k 種類の状態（色）をとることができる。
- ・次の時間のセルの状態（色）は現在の状態と隣り合うセルの状態だけの局所的な規則により決まる。
- ・出来上がるパターンは初期のセルの状態と適用する規則によって決まる。

CA 法は、簡単なモデルと規則からは予想もできない、生物や生体の構造にも似た複雑なパターンを生み出すことから、1960～1970 年代には生物の自己複製、形態形成などに適用された。1980 年代前半にスティーブン・ウルフラムが CA 法が作り出すパターンを系統的に調べ、整理することによって CA 法の特徴を明らかにしたことにより、様々な分野に適用されてきた。たとえば、生き物の成長（生体組織、植物、バクテリアなど）、遺伝（DNA 配列、進化など）、生態（種の増減、種の棲み分け、捕食関係など）、反応・拡散現象（生物の模様形成、神経の刺激伝達、化学反応など）、経済（株価、景気の循環など）である¹⁾。

CA を環境影響評価に適用するには、まず対象となる環境空間をセルに置き換え、局所的なルールを設定し、セルの動きを観察することで、現状を再現する。その際、環境の変化による影響を、セルの変更や、セルの状態変数の初期値の増減によって予測する²⁾。

3. セルオートマトンを用いた環境影響シミュレーション

3.1 評価対象物

香川県では、1 万 5 千余りのため池を有し、全国的に見ても有数のため池県である。しかし、近年、開発事業に伴いたため池の埋め立て工事が行われることが多くなっている。工事をする際に、池に生息している生物が絶滅危惧種であるときは、その生物を保護のため、違う池に移す必要がある。その際重要になるのが生息に必要な環境の確保である。香川県内の、ため池に生息する生物の内、「ニッポンバラタナゴ」（以下タナゴ）は、絶滅危惧 IA 種に指定されており、保護の必要がある。本研究では、このタナゴを評価対象として取り扱うことにする。

3.2 シミュレーションモデル

環境影響シミュレーションモデルの構築ために、評価対象とするタナゴの生態を現実に近いように、CA を用いてモデル化する。本研究で用いる主なルールを以下に示す。

- ・タナゴは採食、移動、成長、発情、繁殖を行う。
- ・タナゴとブラックバスは被食の関係にある。
- ・タナゴは寿命がくると死亡する（約 2 年）。
- ・タナゴはエサがなくなると、体力が減少し死亡。
- ・四季の変化がある。
- ・タナゴはドブ貝の中に卵を産む（繁殖には貝が必要）。
- ・冬には他の季節に比べ行動が抑制される。
- ・エサは少しずつ成長する。
- ・春、夏、秋、冬終了で 1 年経過とする。

図-3 に示すフローチャートに従ってシミュレーションを実行する。

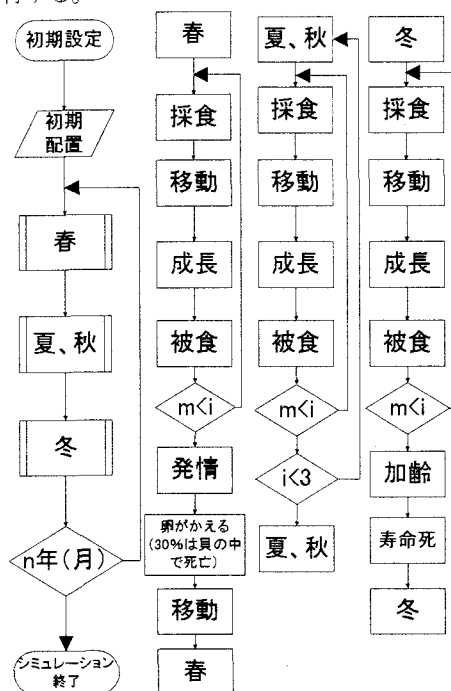


図-3 シミュレーションのフローチャート

3.3 シミュレーションモデルの詳細

(1) 初期設定

以下の変数の初期値を設定する。

- ・被捕食者（タナゴ）の数 NUM_F
- ・捕食者（ブラックバス）の数 NUM_C
- ・貝（ドブガイ）の数 NUM_A
- ・エサの最大値 MAX_FOOD
- ・シミュレーション年数 Y_S

(2) 初期配置

環境の状態を読み込み、各タナゴ (i) の性質と状態を記述する変数の初期状態を決定する。環境は池であり、その他の形状を次のように読み込む。20 × 11 個のセルからなる土地があり、0 と 2 を割り当て、2 を池、0 を陸地とする（図-4 参照）。

```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 2 2 0 2 2 0 2 0 0 0
0 0 2 2 0 2 2 2 2 0 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 2 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0
0 2 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 0 2 2 2 2 2 2 2 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0

```

図-4 池の形状（0 は陸地、2 は池）

タナゴ、ブラックバス、ドブ貝（産卵場所）を池（環境が2のセル）にランダムに配置する。ただし、貝及びブラックバスは移動、個体数の増減はないと仮定した。

各タナゴのパラメータは以下のようなものである。

[年齢] $AGE(i) \text{ Random}(0,2)$

初期配置での年齢は0~2歳とする。

[性別] $SEX(i) \text{ Random}(0,1)$

オスとメスの2種類。

[体格] $BS(i) = 1$

[発情度数] $IY(i)$

[寿命] $A_MAX(i) \text{ Random}(2,4)$
2~4歳とする。

[体力] $E(i) = 500 - 100 \times (rnd + 5)$

$E_MAX(i) = (rnd + 0.5) \times 1000$

[採食量] $T_F(i) = \frac{10}{6} BS(i) + \frac{0.2}{AGE(i)+1}$

池の環境においては、池の形状、およびエサ場の位置は任意に変更可能としている。

体力の多いタナゴ、エサを良く食べるタナゴ等の性質を、パラメータの変化によって幅広く表現できるようにするため、体力、採食量等の式の値は、モデル全体の個体数のバランスを考慮し、エサの量、貝の数等が互いに関係しているように設定した^{3) 4) 5)}。

(3) 採食モード

シミュレーションがこのモードにあるときは、各タナゴはエサを食べ、体力を蓄える。

(4) 移動モード

あるタナゴに着目する。タナゴは、エサの多いセルを探して移動する。今いるセルを含む周囲9個のセルの中で、タナゴが1匹以下かつ最もエサの量が多いセルを探して移動する。

(5) 成長モード

このモードでは、タナゴとエサがそれぞれ成長する。

・体格の成長 $BS(i) = BS(i) + \frac{1}{100} E(i)$

体格は体力 $E(i)$ に関係する。

・エサの成長

$FOOD(i, j) = FOOD(i, j) + 5 + 5 \times rnd$

$FOOD(i) > MAX_F(i)$ のとき

$FOOD(i) = MAX_F(i)$ とする。

(6) 被食モード

このモードのとき、ブラックバスのいるセルにタナゴが移動すると、次のようなルールで食われてしまう。

[ブラックバスのいるセルにタナゴが2匹いる場合]

・体格の小さいほうが食われる。

[ブラックバスのいるセルにタナゴが1匹いる場合]

・年齢が2歳以上ならば、1/2の確率で食われる。

・年齢が2歳以上ならば、全体の平均より体格が大きい方が食われる。

(7) 発情・繁殖モード

セルにタナゴが2匹で一方がオスの場合

・ $IY(i)$ が全体の平均よりも多く、かつ貝が1個あり、セル内のもう一匹がメスで $IY(j)$ が全体の平均よりも多い場合、オスの体格が平均より大きいならば、1/2の確率で子どもができる。

(8) 加齢

一年が終わると、年齢を1歳増やす。

・年齢 $AGE(i) = AGE(i) + 1$

・寿命を超えた場合

$AGE(i) > A_MAX(i)$ となると死ぬ。

・体力の調整

$E(i) > E_MAX(i)$ のとき、 $E(i) = E_MAX(i)$ とする。

4. 数値計算結果及び考察

3章で構築したシミュレーションモデルを用いて、具体的な状況を想定し、それに伴って評価対象物であるタナゴの個体数がどのように変化するかについて、シミュレーションを行って確認する。その結果、実際の池の工事によりタナゴの生態に影響を及ぼすパラメータを同定し、その対応策等について検討する。

4.1 池の大きさの影響評価

大きな池（池のセル数100セル、エサ場のセル数100、貝の数80、エサの最大値100）から、小さな池（池のセル数60、エサ場のセル数60、貝の数45、エサの最大値50）にタナゴを移した場合を考える。いずれもタナゴの初期値は100である。シミュレーション回数は5回である。この結果を図-5と図-6に示す。

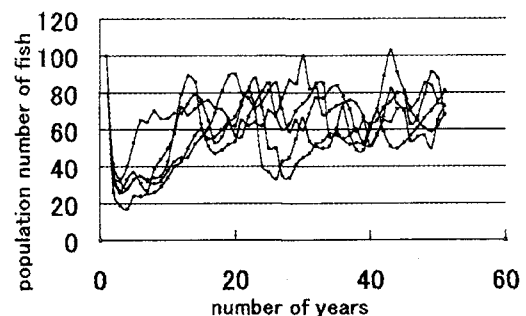


図-5 100セルにおけるタナゴの個体数の変化

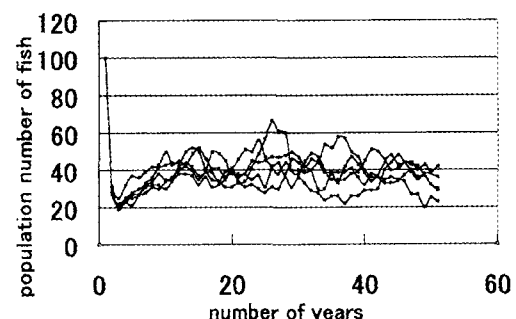


図-6 60セルにおけるタナゴの個体数の変化

池の面積の減少に伴って、えさ場の数と貝の数が減ったため、全体的にタナゴの数は減っているのがわかる。タナゴの繁殖にはえさの量と、繁殖に必要なドブ貝の数が大きく関係していることが分かる。

4.2 エサ場の増設の影響評価

池の一部が開発等によって埋め立てられることで池の形が変わった後（エサ場が減少した後）に、新しいエサ場を増設する際、タナゴの個体数の変化について検討する。図-7 は埋め立て前のタナゴの個体数の変化の図（タナゴの初期値 100、池のセル数 100、エサ場のセル数 50 セル）である。埋め立て後（タナゴの初期値 100、池のセル数 80、エサ場のセル数 30 セル）と、埋め立てた面積分だけエサ場を増設した結果を図-8、図-9 に示す。すべてシミュレーション回数は 5 回である。

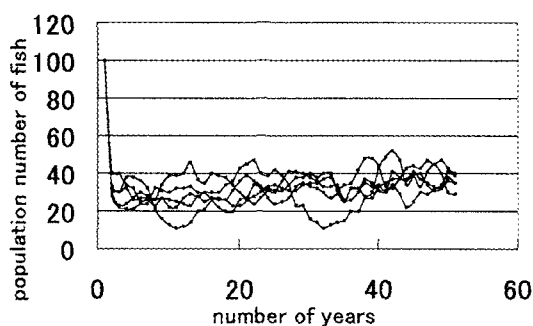


図-7 池の埋め立て前のタナゴの個体数の変化

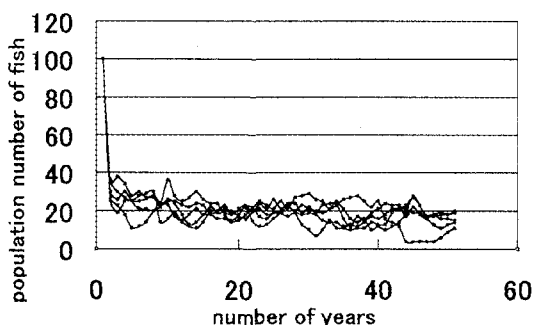


図-8 池の埋め立て後のタナゴの個体数の変化

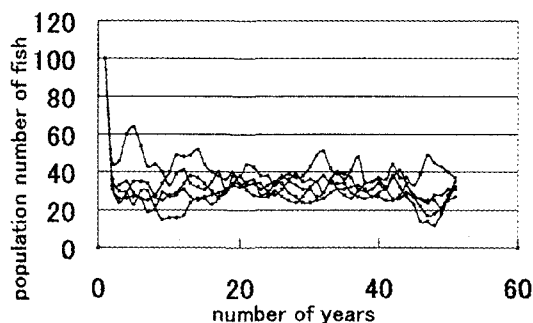


図-9 エサ場を増設した場合のタナゴの個体数の変化

図-7 と図-8 の計算結果を比較すると、エサ場が減った影響でタナゴの個体数は少なくなっていることが分かる。そこで同じ面積分だけ池（エサ場）を増設すると、図-9 に示すように埋め立て前のようなタナゴの個体数に戻っているのが分かる。以上の結果より、開発で一部埋め立てて

も、埋め立てた分だけエサ場を確保してやれば、タナゴは開発前の数に維持できるということが分かる。

4.3 ブラックバスの影響評価

ブラックバスを池に放した場合について検討する。

4.1 での池（池のセル数 100、エサ場のセル数 100、貝の数 80、エサの最大値 100）に、ブラックバスを 1 匹放流した場合のタナゴの個体数の変化について検討する。タナゴの初期値は 100 である。図-10 はブラックバスを 1 匹放流した時のタナゴの個体数の変化である。シミュレーション回数は 5 回である。

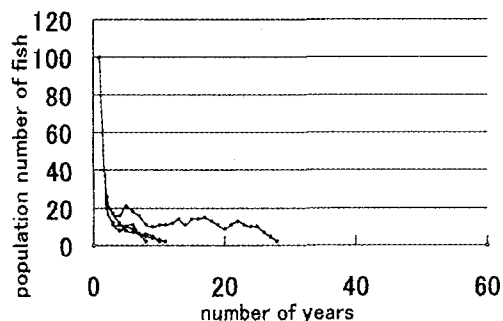


図-10 ブラックバスを放流した場合のタナゴの個体数の変化

図-10 からわかるように、5 回のシミュレーションの内、ブラックバスを 1 匹放流するだけでタナゴは最短で約 8 年、最高で約 28 年ではほぼ絶滅に向かった。タナゴの個体数を維持していくには、ブラックバスが存在しない池が最低条件となる。ブラックバスが存在すると、現実にはもっと短い年数でタナゴは死滅すると言われている。今回のシミュレーションではブラックバスは移動せず、一ヶ所に留まっていることにしているので、今後は自由に移動できるように現実に近いものにしていく必要がある。

4.4 池の水質の影響評価（2 年）

池が汚染された場合（例えば、アオコの大量発生などを仮定する）と、汚染されていない場合をシミュレーションし、タナゴの個体数の変化を比較する。なお、シミュレーション時間は、短期間（2 年）での個体数の変化を確認するため、1 ヶ月単位とした（タナゴの初期値 150、池のセル数 100、エサ場のセル数 100、貝の数 100、エサの最大値 100）。

まずは、短期間のシミュレーション年数 2 年での影響評価を行う。この結果を図-11 と図-12 に示す。

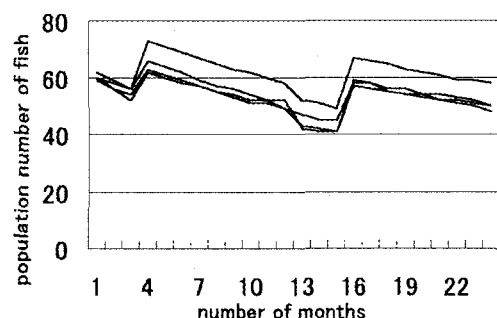


図-11 汚染なしでのタナゴの個体数の変化（2 年）

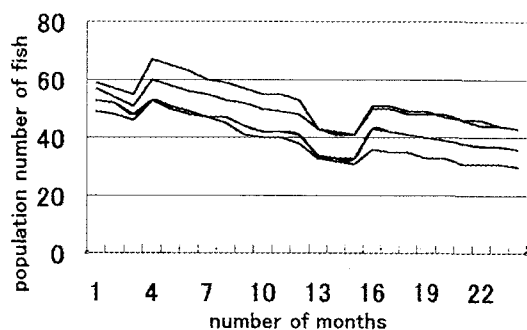


図-12 汚染有りでのタナゴの個体数の変化 (2年)

水質汚染の影響は、夏に表れるものとし、モデルのローカルルールを変更した。汚染の影響として、タナゴが繁殖に必要なドブ貝の数が、毎年少しずつ減少していく（死んでいく）という現象を考えた。シミュレーション年数 2 年では、若干の個体数の変化が確認された。

4.5 池の水質の影響評価 (100 年)

今度はこの汚染が長期間に渡って起こると、個体数にどのような影響が出てくるかということを確認するため、シミュレーション年数 100 年にして実行する。

シミュレーション年数 100 年での、水質汚染の状況の比較を行った。結果を図-13、図-14 に示す。初期値等は 4.4 と同じ条件である。

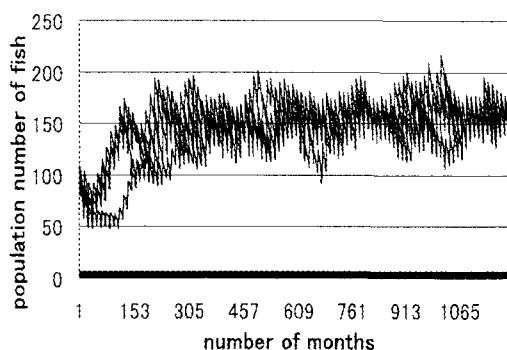


図-13 汚染なしでのタナゴの個体数の変化 (100 年)

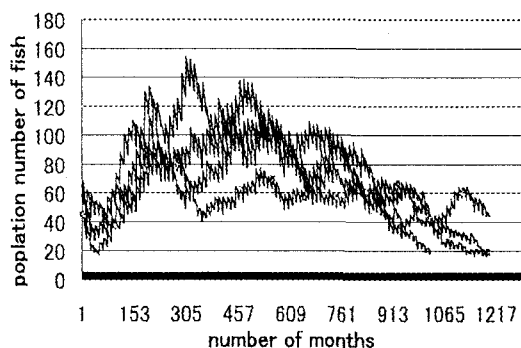


図-14 汚染有りでのタナゴの個体数の変化 (100 年)

シミュレーション年数 2 年では、若干個体数に変化が見られたが、シミュレーション年数 100 年という長期期間になると、個体数にも大きな影響が出ている事が確認された。

5. おわりに

本研究では、CA によってタナゴの生態シミュレーションモデルを構築し、池の大きさ、エサ場の増設、ブラックバス、及び水質汚染による池の環境変化が、タナゴの個体数の変化に及ぼす影響を調べるためにシミュレーションを行い、タナゴの個体数維持のための方法を提案することができた。

しかし、実際は環境に影響を及ぼす要因はここで考慮したよりもっと多く、要因間の関係も複雑である。さらに、今回作成したモデルの中で考慮したタナゴの各パラメータ、すなわち、エサの成長の度合い、池に生息するドブ貝の個体数、池のエサの量等については、実態はよく分かっておらず、多くの部分は限られた文献をもとに推測で決定した。

しかしながら、本研究で得られた結果は、上述したように多くの仮定のもとに得られたものであるが、池の環境の変化がタナゴの個体数に及ぼす影響を評価することができた。

今後の課題としては、現在のシミュレーションモデルによって長期間のシミュレーションを行う場合、各時間ステップでのモデル化は簡略化されたものとなっている。長期間のシミュレーションにおいて、できるだけ現実に近い環境影響評価を行うために、各時間ステップでのシミュレーションに関しても、詳細なモデルを作成し、正確なものにしていく必要がある。

さらに汚染の進行状況過程やタナゴの個体数の変化の様子を、確認できるモデルの作成も必要となる。そのため、モデルを可視化し、それらの変化の様子を時間、及び空間で把握することも必要となってくる⁶⁾。例えば、夏の一時期に突然、自然災害が発生した場合、汚染の拡散の状況がどのようになっている、魚、貝、エサのそれぞれの汚染状況を把握することも、環境影響評価において、大切な要因である。

本研究で開発したシミュレーションモデルをさらに正確で、現実的なものにするため、詳細なデータの収集、本質を捉えたパラメータの設定等も今後の課題である。

参考文献

- 1) 加藤 恭義, 光成 友考, 築山 洋 共著: セルオートマトン法, 森北出版株式会社, 1998.10.
- 2) R.J. ゲイロード, 西舘 数芽 著: Mathematica 自然現象の計算モデル化, トップラン, pp1~23, 1997.
- 3) 川那部 浩哉, 水野 信彦 著: 改訂版 日本の淡水魚, 山と溪谷社, p.364, 1989.
- 4) 監修 川那部 浩哉: フィールド図鑑淡水魚, 東海大学出版会, p16, 1987.
- 5) 香川県: 香川県希少野生生物保護対策強化事業 ニッポンバラタナゴ保護管理マニュアル, 2002.3.
- 6) 科学シミュレーション研究会: パソコンで見る生物進化, ブルーバックス, 2000.2.