

A-016

格子気体モデルによるアユの最適放流方策

Optimal release policy for Ayu fish by the use of lattice gas model

勝又 雄基¹上原 隆司²一ノ瀬 元喜¹伊東 啓^{3, 4}吉村 仁^{1, 3, 5, 6}泰中 啓一³

Yuki Katsumata

Takashi Uehara

Genki Ichinose

Hiromu Ito

Jin Yoshimura

Kei-ichi Tainaka

1. はじめに

アユは内水面漁業において最も重要な水産資源のひとつであり、遊漁の対象としても人気が高い。一般に、縄張りを持つアユ(縄張りアユ)はサイズが大きく、水産資源としての質が高い[1]。また、人気の高い釣りの手法“友釣り”の対象となるのも縄張りアユである。そのため、漁協組合は縄張りアユを増やすための特別な放流を実施している。

アユの放流では、一度に大量の種苗を放流することを避けて、小規模の放流を多くの回数行う。この特徴的な放流方策は経験的に有効だと考えられているが、その理由は明らかではなかった。本研究では格子気体モデルを適用し、アユの縄張り競争における個体群動態モデルを構築した。これにより、なぜ特徴的な放流方策が必要なのかを明らかにした。

2. アユの生態と放流

2.1 生活史

アユは日本固有の回遊魚である。アユは一年魚であり、生活史は以下の通りである[2][3]。秋になると、河川の下流域に産み付けられた卵が孵化する。稚魚は数日中に河口域へ移動し、主に沿岸域の動物性プランクトンや小型水生昆虫を餌にする。春になると、稚魚は河床の石に藻類(珪藻)が繁茂している河川の中・上流域に遡上する。多くの若いアユはこの段階で縄張りを形成し、集団の中で縄張り競争を行う。春から秋までは、これらの藻類を餌にする。秋になるとアユは成熟し、下流域で産卵後まもなく死亡する。

2.2 縄張り競争

5月の初旬、下流域にいたアユは遡上を開始する。早くに中・上流域に到達したアユは、低密度下で採餌のための縄張りを形成し「縄張りアユ」になる。この縄張りは、餌となる藻類が豊富な「瀬」に形成される。その後、下流域のアユが次々と遡上してくると密度が日々増加し、縄張りを持たない「あぶれアユ」が現れる。あぶれアユは藻類の少ない「淵」に住み、縄張りアユの縄張りに侵入して藻類を盗む。それに対し、縄張りアユは自身の縄張りを防衛するために、あぶれアユを激しく攻撃して追い出す。“友釣り”はこの性質を利用した手法であり、針付きのアユを餌として縄張りに侵入させ、攻撃した縄張りアユを引っ掛ける。さらに密度が上昇すると、全ての縄張りアユは突然に縄張りを放棄し、集団は群れを形成する。

2.3 放流

漁協組合は縄張りアユを増やすため、盛んに放流を実施している。その放流回数は特異的であり、他の魚種と比べて圧倒的に回数が多く設定されている(表1)

表1. 気田川, 天竜川(静岡県)漁協組合による放流データ

気田川 漁協組合				
魚種	大きさ	放流数(匹)	期間	放流回数(回)
アマゴ	稚魚	10,000	3月	1
	成魚	1,500	3月	1
アユ	稚魚-成魚	30,000	3-5月	20-30
天竜川 漁協組合				
魚種	大きさ	放流数(匹)	期間	放流回数(回)
アマゴ	成魚	20,000	2-4月	5
サツキマス	成魚	20,000	10-11月	10
アユ	稚魚-成魚	215,000	4-8月	50
	成魚(親魚)	46,000	10月	

1 静岡大学 総合科学技術研究科 数理システム工学

2 名古屋短期大学 保育科

3 静岡大学 創造科学技術大学院

4 長崎大学 熱帯医学研究所 環境医学部門 国際保健学

5 千葉大学 海洋バイオシステム研究センター

6 ニューヨーク州立大学 環境科学林学校

3. モデル

3.1 概要

本研究では格子気体モデル“Lattice gas model”と呼ばれる格子モデルを適用した[4]。格子モデルは、物理学をはじめ多くの分野で利用される。生態学では、群集と生態系の空間的な動態を研究するために使われる。シミュレーションでは、各格子点(セル)を縄張りアユ、あぶれアユ、瀬の空地、淵の空地にそれぞれ分類した。これにより、縄張りアユとあぶれアユの縄張り競争における個体群動態モデルを構築した。このモデルによる動態の過程において、定期的に「放流」による個体数の増加を加えることで、放流回数の変化がアユの個体群動態に与える影響を明らかにした。

3.2 個体群動態モデル

典型的な日本の河川中流域は、およそ 55%の瀬と 45%の淵から成る[5]。この瀬のうち、採餌のための藻類を豊富に有するのは、およそ 20%程度だと思われる。よって本モデルでは、縄張りを形成するのに適した瀬は河川中流域全体の 10%と設定する。これより、二次元格子空間において縄張りアユの密度 y_{Th} 、あぶれアユの密度 y_{Fl} 、瀬の空地の密度 x_{rapid} 、淵の空地の密度 x_{pool} は、次の条件式を満たす。

$$\begin{cases} y_{Th} + x_{rapid} = 0.1 \\ y_{Fl} + x_{pool} = 0.9 \\ y_{Th} + y_{Fl} + x_{rapid} + x_{pool} = 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

アユの生態から、個体群における縄張りアユの密度(y_{Th})とあぶれアユの密度(y_{Fl})は以下のように変化する:

- ① あぶれアユが瀬の空地を見つけて縄張りアユになる
- ② 縄張りアユが縄張りを放棄してあぶれアユになる
- ③ アユが自然死する

これより、次の密度変化の差分方程式を得る。上記①-③と式(2)の右辺 第 1-3 項がそれぞれ対応している。

$$\begin{cases} \Delta y_{Th} = x_{rapid} y_{Fl} - r y_{Th} - d y_{Th} \\ \Delta y_{Fl} = -x_{rapid} y_{Fl} + r y_{Th} - d y_{Fl} \end{cases} \quad (2)$$

ここで d , r は、それぞれ「アユの死亡率」と「縄張りアユの縄張り放棄率」を表す。 r は、縄張りへの侵入者であるあ

ぶれアユの密度 y_{Fl} に依存する。縄張りアユの縄張りの防衛行動に関する実証実験より[6][7]、 $r(y_{Fl})$ を次のような関数

$$r(y_{Fl}) = 1.0 / \{1.0 + \exp(300 \times (0.02 - y_{Fl}))\}$$

に設定した(図 1)。

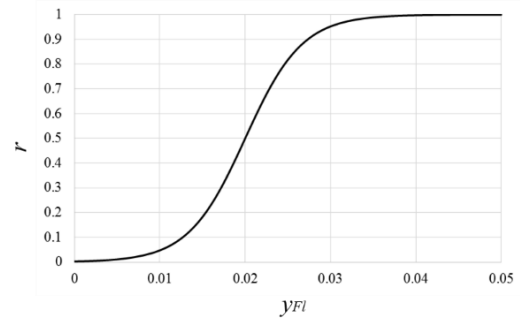


図 1. 縄張りアユの縄張り放棄率 $r(y_{Fl})$ 。縄張りアユが自身の縄張りを放棄する確率 $r(y_{Fl})$ の曲線を示す。 r は $y_{Fl} = 0.02$ 変曲点、 $r = 1$ を漸近線にもつロジスティック関数である。

3.3 放流プロセス

式(1)と(2)より、縄張りアユとあぶれアユの縄張り競争における個体群動態が得られる。この動態の過程において、放流方法として総量 $V (=const)$ の種苗を m 回に分けて格子空間に加えていく。放流された直後のアユは縄張りを持っていないため、あぶれアユと仮定する。放流を実施したときの密度の差分方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} \Delta y_{Th} = 0 \\ \Delta y_{Fl} = V/m \end{cases} \quad (3)$$

放流は、時刻 $t = 0$ から $T (1 \ll T)$ において等しい時間間隔で実行する。

4. 結果

本研究では、時刻 $t = 0$ において $y_{Th} = 0$, $y_{Fl} = 0$ とする。つまり、初期状態ではアユがいない状態を想定する。そこから、時刻 $t = 1$ において最初の放流を行う。以降は、放流が行われない場合は式(2)、放流が行われる場合は式(3)によって、アユの個体群動態が変化していく。シミュレーションでは、 $t \rightarrow t + 1$ におけるアユの死亡率を $d = 0.0001$ 、放流する種苗の総量を $V = 0.1$ と設定する。

4.1 アユの特徴的な放流方策による動態

アユの放流では、一度に大量の種苗を放流すること避けて、小規模の放流を多くの回数行う。このような放流方策を再現するため、放流回数 m を大きく設定する。 $m = 50$ としたとき、時刻 $t = 0$ から 20000 において、縄張りアユとあぶれアユは図 2 のような動態を見せた。

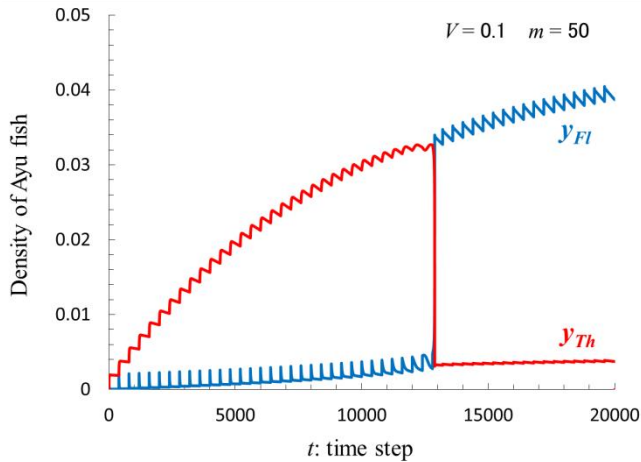


図 2. アユの放流方策による個体群動態。アユの放流方策では、小規模の放流を多くの回数行うため、一回の放流によるあぶれアユの増加が小さい。放流された少量のあぶれアユは、直ぐに縄張りを形成して縄張りアユになる。そのため、縄張りの保持を妨害するあぶれアユは増加しにくい。しかし、縄張りアユが多くなると新たに放流されたあぶれアユが瀬の空地を見つけ難くなり、少しずつあぶれアユが増加していく。この状態からさらに放流を行うと、ある時点において縄張りアユの多くが一斉に縄張りを放棄して群れを形成する。

4.2 他の魚種の一般的な放流方策による動態

アユの放流とは対照的に、他の魚種の放流では一度に大量の種苗を放流する。その理由として、一回の放流に掛かる費用(設備費や人件費)の削減がある。このような放流方策を再現するため、放流回数 m を小さく設定する。 $m = 4$ としたとき、時刻 $t = 0$ から 20000 において、縄張りアユとあぶれアユは図 3 のような動態を見せた。このシミュレーションは、放流回数 m を除いて図 2 における条件と同様である。そのため、図 2 と図 3 を比較することで、放流回数の違いによるアユの個体群動態の変化を比較できる。

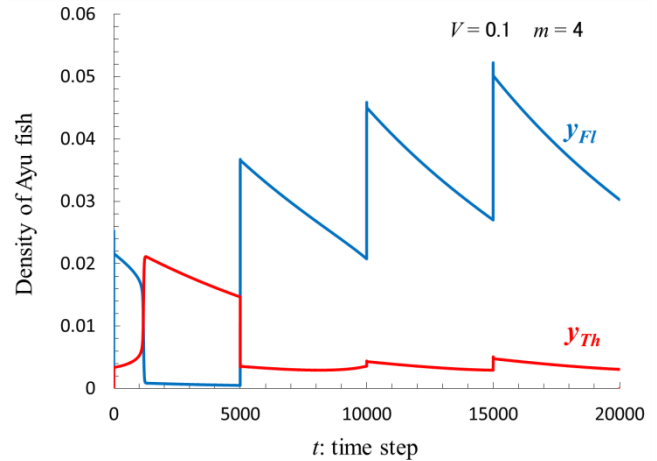


図 3. 他種の放流方策による個体群動態。他の魚種の放流方策では、大規模の放流を少ない回数行うため、一回の放流によるあぶれアユの増加が大きい。最初に放流された大量のあぶれアユは、互いに縄張りの保持を妨害し合うため、縄張りアユになることができない。時間経過に伴い、自然死によってあぶれアユが減少すると、僅かな生き残りは縄張りを形成して縄張りアユになる。しかし、次の放流によってこれらの縄張りは容易く崩壊する。

4.3 放流回数と縄張りアユの定着度

アユの放流の主目的は、縄張りアユを増やすことである。そこで、図 2 や図 3 のような個体群動態から、放流による縄張りアユの増加を評価する。時刻 $t = 0$ から $T (1 \ll T)$ において放流した種苗のうち、どの程度が縄張りアユとして定着したかを表す「放流効果 W 」を求める。時刻 t までに放流した種苗の総量を v とすると、 W は次の式で得られる。

$$W = \int \frac{y_{Th}}{v T} dt \quad (4)$$

放流した全ての種苗が縄張りアユとして定着した場合、時刻 $t = 0$ から T において、 $y_{Th}/v = 1$ が常に成り立つ(ただし、自然死による個体の減少は考慮しない)。このとき、 y_{Th}/v の積分値は T となるため、 $W = 1.0$ である。式(4)を用いて、放流回数 m と種苗の総量 V の変化が W に与える影響を明らかにした(図 4)。シミュレーションにおいては、 $T = 20000$ と設定している。また、放流は等しい時間間隔で行うため m は T の約数である。

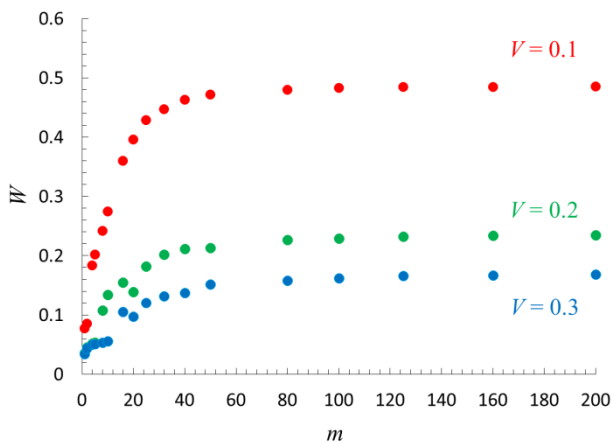


図4. アユの放流効率 W 。 W は時刻 $t=0$ から 20000 において放流した種苗のうち、どの程度が縄張りアユとして定着したかを表す。この結果は、放流回数 m の増加は W を高めることを示す。種苗の総量 V は W と m の関係に定性的な変化を与えない。この結果から、アユの特徴的な放流方策は縄張りアユを増やすために必要だと言える。

5. 結論

本研究では、格子気体モデルを適用して、縄張りアユとあぶれアユの縄張り競争における個体群動態モデルを構築した。定期的にあぶれアユの個体を新たに格子空間に加えていくことで、放流による個体数の増加を再現した。放流回数を変化させてシミュレーションすることで、放流回数がアユの動態に与える影響について解析を行った。

アユの放流方策では、小規模の放流を多くの回数行うため、一回の放流によるあぶれアユの増加が小さい。そのため、放流された少量のあぶれアユは直ぐに縄張りアユになり、縄張りの保持を妨害するあぶれアユは増加しにくい。対照的に、他の魚種の放流方策では、大規模の放流を少ない回数行うため、一回の放流によるあぶれアユの増加が大きい。そのため、放流された大量のあぶれアユは互いに縄張りの保持を妨害し合うため、縄張りアユは増加しにくい。

さらに、得られた縄張りアユの動態を積分することで、放流した種苗のうち、どの程度が縄張りアユとして定着したかを解析した。この結果は、放流する種苗の総量に関わらず、放流回数を増やす方策がアユの個体数増加に有効であることを示す。

アユの放流の主目的は縄張りアユの増加であるが、その他の目的として「種の保全」が挙げられる。アユは付着藻類専食という特異なニッチ(生態的地位)から、河川生態系の中では重要な役割を担うと考えられており、生物多様性の枠組みの中でキーストーン種(中枢種)として重要な位置を占めている。しかし、近年ではダムや堰堤などによって河川が分断されたことにより、アユが中・上流域へ遡上できない河川が少なくない。それを補うため、大量のアユが種苗放流されている。本研究の結果は、放流がアユの動態にもたらす影響を明らかにした点で、放流の目的に適した方策を模索するための重要な手がかりになるものである。

今後の展望として、コスト・ベネフィット分析の手法を導入し、放流に掛かるコスト(一回の放流における設備費や人件費)を考慮し、ベネフィット(放流効果 W)から引くことで、模式的に最適な放流回数を導出する方法を確立したい。

6. 参考文献

- [1] 中嶋 康生, 服部 克也, 曾根 亮太, 河根 三雄 “木曾川由来の海産系アユ人工種苗における体サイズとなわばり性” 愛知県水産試験場研究報告, **15**, 21-24, (2009)
- [2] 川那部 浩哉(1969)「川と湖の魚たち」中央公論社
- [3] 宮地 伝三郎(1960)「アユの話」岩波書店
- [4] Iwata, S., Kobayashi, K., Higa, S., Yoshimura, J. & Tainaka, K., A simple population theory for mutualism by the use of lattice gas model. *Ecological Modelling*, **222**, 2042–2048 (2011).
- [5] 川那部 浩哉 “アユの「なわばり」とは何か—群集の論理への一つの試み—” 科学, **43**, 74-83 (1973) (『川と湖の生態学』(1985) 所収)
- [6] Iguchi, K. & Hino, T., Effect of competitor abundance on feeding territoriality in a grazing fish, the ayu *Plecoglossus altivelis*. *Ecological Research*, **11**, 165-173 (1996)
- [7] 井口 恵一郎 “アユのなわばり再考” 月刊海洋, **28**, 281-285 (1996)