

T102 ニホンウナギ浮遊幼生の行動戦略

大阪大学大学院 (○)長谷川 和彦・グローバルオーシャンデベロップメント 工藤 君明

Migration Strategy of Japanese Eel

Kazuhiko HASEGAWA^{*}, Kimiaki KUDO^{**}

^{*} Graduate School, Osaka Univ., Osaka, Japan

^{**} Global Ocean Development Inc., Oppama, Japan

Abstract This paper deals with the relation between the physiological vertical migration strategy of Japanese eel (*Anguilla japonica*) and its transportation strategy. The authors investigated the Diel Vertical Migration of leptocephalus by Genetic Algorithm for understanding the various DVM. This study suggests that the DVM should not only be explained by physiological and local survival-strategy but also with the stable transportation process.

Keywords: Japanese eel (*Anguilla japonica*), leptocephalus, larval transportation, Diel Vertical Migration, Genetic Algorithm

1. はじめに

うなぎは日本人の食卓になくてはならない重要な水産資源の一つである。そのほとんどは養殖されているし、最近では韓国や中国からの輸入も多い。しかし、うなぎ(学名、ニホンウナギ、*Anguilla japonica*)の生態はほとんど知られておらず、したがって、いまだにその完全養殖は実現されていない。その謎ゆえ、その昔は川の泥の中から湧くとも信じられていた。その後、近年の海洋調査船の調査で、産卵海域はレプトケファルス(浮遊幼生)が採取された地点から、マリアナ海溝東側の水深約200mのパスファインダー海山(143:08E,16:32N)、アラカネ海山(142:45E,15:38N)、スルガ海山(142:56E,14:13N)の浅海域と推定されている¹⁾。4~7月の新月のころに産卵し、産卵後2日で孵化、10日程度で柳の葉に似たレプトケファルスになり、何らかの流れを利用して西方に輸送され、そこから、黒潮に乗って東アジアや日本沿岸に到達すると考えられるに至っている。しかしながら、幼生そのものの推進能力は低く、唯一成長により、あるいは周りの環境変化により自分の体密度を変化させることにより好みの深度に移動したり、また、流れを利用して移動していると考えられている。

これまで、その行動戦略解明のため定点観測等による海域調査が行われてきたが、このような生物学的アプローチではこれらを実証することが困難になってきた。そこで、実際に

各種センサーを搭載し、与えられた幼生の行動戦略に従って自身の浮力を調整するロボットを製作し、それを実海域に放流して、その行動を工学的に実証する手法を提案し、その基本的部分についての開発をすでに終えている(未発表)。ここでは、その幼生の行動戦略を遺伝的アルゴリズムを用いて推定する手法について報告する。

2. ウナギ浮遊幼生の鉛直移動

サルガッソー海におけるヨーロッパウナギ、アメリカウナギの調査によると²⁾、ウナギ浮遊幼生は日周鉛直移動し、成長に伴い平均深度及び移動振幅が変化するとされている。

ウナギの浮遊幼生がなぜ日周鉛直運動を行うかという理由は明らかにはなっていないが、海洋性の動物プランクトン群集にも同様の日周鉛直移動が遍く観測されており、その機能的意義については、捕食者逃避仮説といったものが提案されており、多くの議論がなされている³⁾。このような日周鉛直移動という行動戦略は遺伝子の中に組み込まれ、行動として発現していると考えられる。

3. 浮遊幼生モデルの定式化

この研究におけるウナギの輸送問題とは、産卵場から北赤道海流に乗って西向きに移動することと、フィリピン近海から北上しつつ、台湾東方のごく狭い範囲の黒潮源流域を見つけることにあり、日周鉛直移動が輸送問題とどのように関連し、どのような日周鉛直移動がこの輸送問題を解決できるの

かを検討することである。

Fig.1に北西太平洋の月平均流速分布の一例を示す。この流速分布は NOAA の太平洋海洋データベースを利用し図示したものである。当然ながらこれらの流速は深度、時期に伴って変化するものである。

ここで、問題を理解するために一定深度に留まった粒子がどのように流されるかを一例として Fig.2 に示す。流速場としては 1997 年 7 月から 4 ヶ月間のデータを用い、東経 140°、北緯 15° から深度を変えずに流されたものとしてシミュレーションした。おおむね、西方に輸送されているが、深度によってかなり異なる軌跡を描き、方向も輸送距離も違っている。もしニホンウナギの浮遊幼生が一定深度に留まるという行動戦略をとっているとしたら、種を維持することは難しかったのではないと思われる。この計算結果から予想されることは、幼生が環境要因を能動的に利用し、日周鉛直移動を行動戦略として深度を変化させることにより、輸送方向を安定化させ、輸送問題を解決していると考えられる。⁴⁾

4. 遺伝的アルゴリズム

ここでは、ウナギの幼生の最適行動戦略の決定に遺伝的アルゴリズムの手法を適用して、人工的な浮遊幼生を進化させ、生存戦略と日周鉛直移動の関係を検討する。

空間的、時間的に複雑でかつ変動する環境条件に対して安定した生存を可能とする行動戦略はより単純で、柔軟性に富んでいると考えられる。複雑なモデルはより多くの現象を説明することができても、環境条件の変化に対して生態学的に不安定となる可能性があり、また得られた結果からモデルを解釈することが困難となることが予想される。本論文では、遺伝的アルゴリズムのモデル化の基本設計を以下の通りとした。

- (1) 輸送シミュレーション期間を 4 ヶ月とし、流速は週平均データを用いる。
- (2) 成長に伴う行動戦略の変化を表現するために、1 ヶ月毎に深度分布パターンを変更する。
- (3) 日周鉛直移動に伴う各深度の滞在割合によって水平移動速度を計算する。
- (4) 代表深度を 8 層とする(15, 35, 55, 75, 95, 120, 155, 205m)。
- (5) 各深度の滞在割合を 4 ビット(0~15)の遺伝子で表し、8 層全体で正規化する。(Table 1)

- (6) 評価関数は台湾近海に到達するものを高得点とする。この研究では経度 x と緯度 y に対し、目的関数 = $\exp(123.75 \cdot x) \cdot \exp(y/20)$ とした。(Fig.3)

このようにすると、人工浮遊幼生 1 個体の遺伝子は 128 ビット(4 ビット×8 層×4 ヶ月)で表すことができる(Table 1)。人工浮遊幼生の存在可能空間は $2^{128} = 10^{30.5}$ となり、この巨大な空間から最適なものを探索するという問題に帰着する。人工浮遊幼生の遺伝子表現では最初の 32 ビットのバイナリー数字は 1~8 層の相対的な滞留度を表している。これらの各月の総和で正規化したものが滞留率であり、各深度の流速をこの重みで積算したものが幼生の平均流速となる。幼生個体総数を NoL とし、各幼生の輸送シミュレーションを行い、目的関

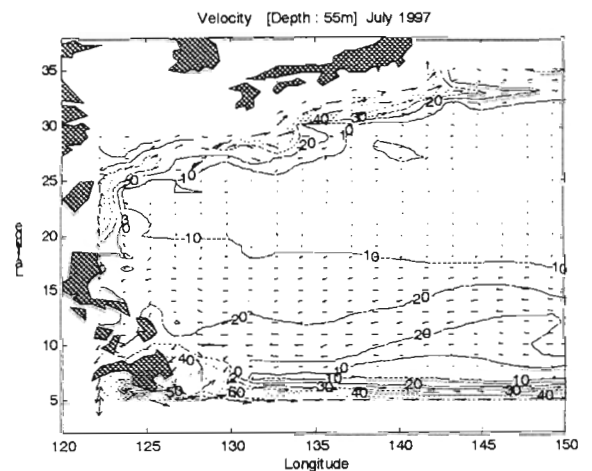


Fig.1 Velocity distribution at depth 55m
(Monthly mean July, 1997)

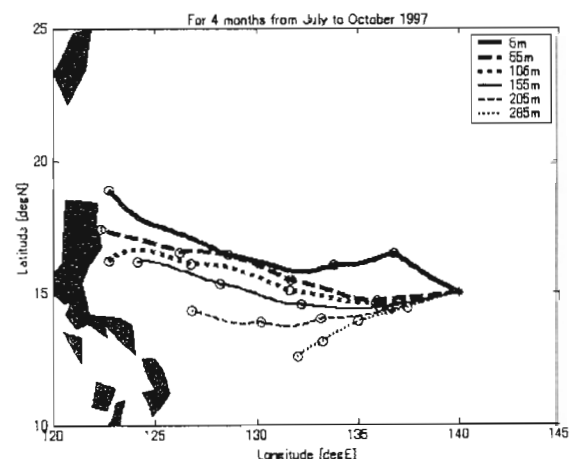


Fig.2 Trajectories of particles remaining at different depth
for 4 months starting at 140E, 15N

Table 1 Example of AL's genotype

Depth	Binary-coded weight table				Weight table for the AL			
	Month				Month			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
15m	0001	0000	1100	1111	1/42	0/56	12/79	15/67
35m	0000	0010	1011	0110	0/42	2/56	11/79	6/67
55m	1101	1010	1100	1010	13/42	10/56	12/79	10/67
75m	0110	1010	0001	1001	6/42	10/56	1/79	9/67
95m	0010	1000	1001	0100	2/42	8/56	9/79	4/67
120m	0100	1100	1100	1110	4/42	12/56	12/79	14/67
155m	1010	1100	1000	0010	10/42	12/56	8/79	2/67
205m	0110	0010	1110	0111	6/42	2/56	14/79	7/67

The bit string (0001000011010110001001001010011000000010101010101000110011000010110010111100000110011100100011101110110101001010011000100111) is the genome that encodes this Artificial Larvae (AL).

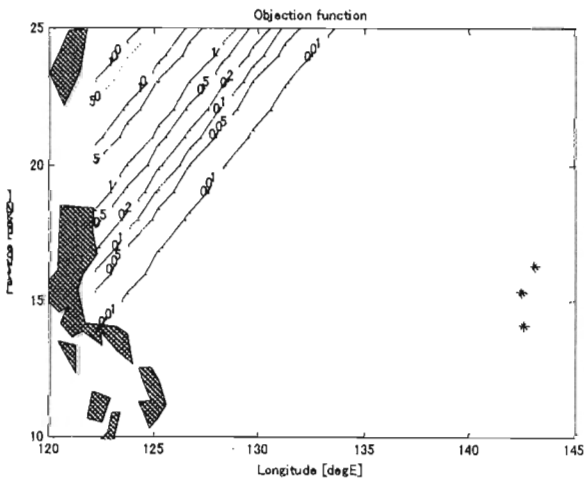


Fig.3 Objective function of artificial larvae of Japanese eel

数により全ての個体を評価する。その中から選択率 R_s により、得点上位のものから $(NoL * R_s)$ 個体だけを選択する。

このようにして選別された親プールから得点に比例する確率で一組の両親を選択し子を産ませる。子は親1と親2の遺伝子座において交叉確率 P_c により、交叉点をランダムに決め、それぞれの両親から遺伝子を受け継ぎ、さらに点突然変異率 P_m により遺伝子を反転させる。この手順を個体総数 (NoL) 回繰り返すことにより、新しい世代を発生することができる。以上の手順を規定世代回数 (NoG) 繰り返すことにより、最良個体を決定することができる。

今回の計算では個体数 $NoL=100$ 、選択率 $R_s=0.1$ 、点交叉率 $P_c=0.01$ 、点突然変異率 $P_m=0.01$ 、世代数 $NoG=500$ とし

た。

5. 進化の結果と考察

産卵海域をアラカネ海山とし、産卵月を1997年7月初めとして解析した結果から、人工浮遊幼生群の進化の過程を Fig.4 に示す。同図の上は、評価関数の最高得点と平均点の推移を示している。この例では、最高得点を示す個体の遺伝子が失われることはなく、また時々飛躍的に改善される様子がかがえ、最適化は収束していくことがわかる。同図の下は最良幼生個体の月別滞留深度の頻度分布を示している。生まれてまもなくは日周鉛直運動の存在を、そして成長とともに減少し表層に移動して行くという行動を示唆している。

Fig.5 は1997年7月にアラカネ海山で産卵した遺伝的アルゴリズムによって選出された最良幼生の輸送軌跡である。11月以降は10月の日周鉛直移動戦略のままとした。この最良幼生は実際のニホンウナギのように日本沿岸に輸送されることを示している。

Fig.6 は産卵海域における1997年の月平均水温の年変化である。ニホンウナギの産卵に適した水温は約 22°C と推定されており、同図から深度は150m程度と考えられる。初期の人工浮遊幼生がこの深度あたりに分布していることを裏付けている。

6. おわりに

本論文ではニホンウナギ浮遊幼生の行動戦略を理解するために、遺伝的アルゴリズムを適用して進化のシミュレーションを行った。その結果、ニホンウナギ浮遊幼生の日周鉛直移

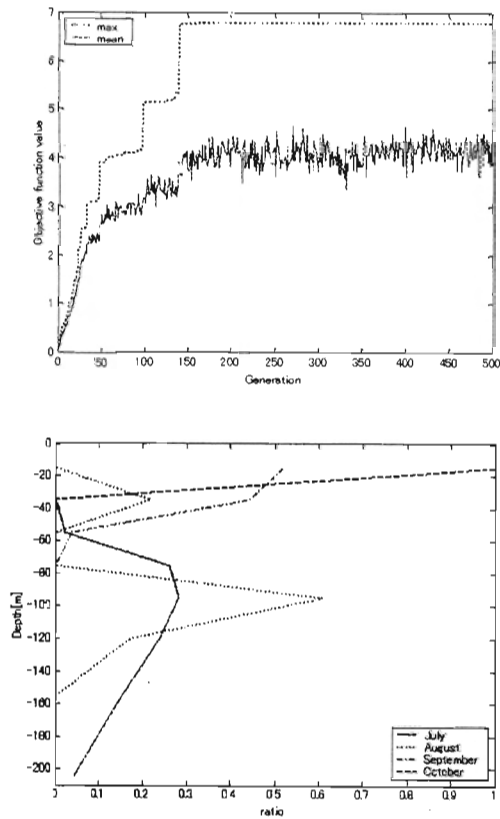


Fig.4 Evolution of artificial leptocephalus and monthly vertical distribution of best ones spawned Arakane Sea Mount July 1997 migrating for 4 months

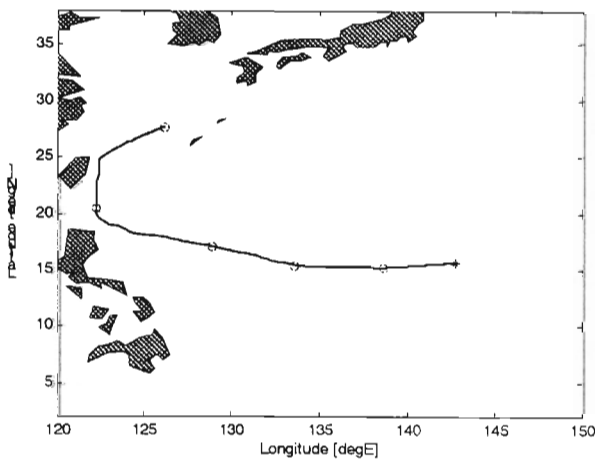


Fig.5 Trajectory of best artificial leptocephalus spawned at Arakane Sea Mount July 1997 migrating for 6 months

動と成長に伴う深度調整という行動戦略を導くことができた。そして、それは補食者逃避もさることながら、安定した輸送

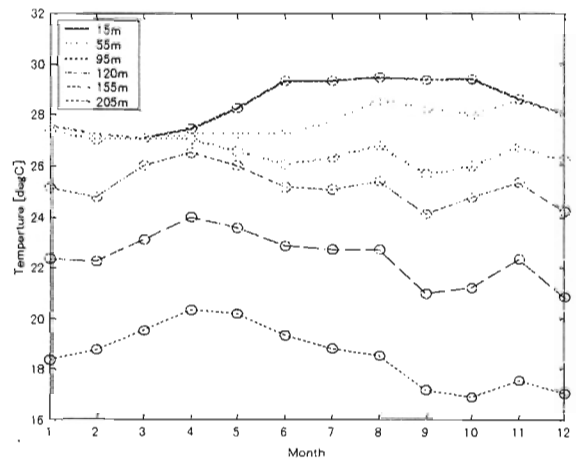


Fig.6 Monthly mean temperature at different depths near Arakane Sea Mount, 143.25E, 16N in 1997

を実現するために、不可欠な戦略であることがわかった。

エルニーニョが発生すると鰻の蒲焼きが高くなる。どことなく、「風が吹けば...」的だがこれからの水産資源の安定供給に地球環境の保護、工学的アプローチ、そして、知的情報処理システムでさえ、重要となる。

本研究を進めるにあたり、三菱自動車工業(研究当時大阪大学)の足立典子氏が卒業研究として解析を、そして、大学院前期課程の椎健太郎氏が再計算と図面の作成を行った。さらに、科学研究費の一部を利用した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 塚本克巳, 稲垣正, “産卵場:白鳳丸航海'98”, 月刊海洋, 号外(18), 12-19(1999)
- 2) M.Castonguay and J.D.McCleave, “Vertical distributions, diel and ontogenetic vertical migration and net avoidance of leptocephali of *Anguilla* and other common species in the Sargasso Sea”, *Journal of Plankton Research*, 9(1), 195-214(1987)
- 3) G.C.Hays, C.A.Proctor, A.W.G.John, and A.J.Warner, “Interspecific differences in the diel vertical migration of marine copepods: The implications of size, colour and morphology”, *Limnology and Oceanography*, 39(7), 1621-1629(1994)
- 4) 工藤君明, “人工浮遊幼生による移流拡散過程の研究”, 月刊海洋, 28(3), 189-194(1996)