水温・給餌回数・飼育密度の調整による ウナギ *Anguilla japonica* 仔魚期間の短縮

増田 賢嗣,^{1*} 神保 忠雄,¹ 今泉 均,¹ 橋本 博,²
小田 憲太郎,³ 松田 圭史,¹ 照屋 和久,² 薄 浩則⁴

(2012 年 8 月 21 日受付, 2012 年 11 月 8 日受理)

¹水産総合研究センター増養殖研究所, ²水産総合研究センター西海区水産研究所,
³水産総合研究センター開発調査センター, ⁴水産総合研究センター北海道区水産研究所

Regulation of water temperature, feeding frequency and larval stocking density leads to
shorter duration of larval stage of Japanese eel *Anguilla japonica*

YOSHITSUGU MASUDA,^{1*} TADAO JINBO,¹ HITOSHI IMAIZUMI,¹ HIROSHI HASHIMOTO,²
KENTARO ODA,³ KEISHI MATSUDA,¹ KAZUHISA TERUYA² AND HIRONORI USUKI⁴

¹National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Shibushi, Kagoshima 899–7101,

²Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Ishigaki, Okinawa 907–0451,

³Marine Fisheries Research and Development Center, Fisheries Research Agency, Yokohama, Kanagawa 220–6115, ⁴Hokkaido National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Kushiro, Hokkaido 085–0802, Japan

Under the current rearing conditions (control) of eel larvae, the larval period of Japanese eel *Anguilla japonica* in captivity is longer than that in nature. In this study, we first investigated the effects of feeding frequency and rearing temperature on larval growth and survival. Based on these results, we demonstrated that eel larvae grew faster than the control by three modifications: rearing at higher temperature, feeding at higher frequency and decreasing the number of rearing larvae by dividing them into several rearing tanks. As a result, we obtained an average larval period of eel of 210 days from hatch to completion of metamorphosis, in contrast to 303 days in the control. These results suggest that careful modifications of rearing conditions can shorten the larval period of eel.

キーワード：ウナギ, 種苗生産, 成長, 変態

近年のウナギ養殖は生産量にして2万トン強、生産額にして200から400億円程度の規模を維持しているが、¹⁾日本における天然ウナギの漁獲量は300トン以下であり、²⁾食卓に上るウナギのほとんどは養殖魚である。一方、養殖の種苗であるシラスウナギはすべて天然に依存しているが、2008年の国内でのシラスウナギの漁獲量は約6トンであり、²⁾1963年には232トンの漁獲があった³⁾ことと比較すれば、長期的には資源量が減少しているとみられる。これらのことから、人工的なシラスウナギの量産技術の一刻も早い確立が求められている。ウナギ仔魚の飼育技術開発は、Tanaka *et al.*⁴⁾によってサメ卵の有用性が見出され、2003年には初めてシ

ラスウナギまでの飼育の成功が報告されたことから、^{5,6)}現在の研究は、健全なシラスウナギの量産技術の開発に焦点を結んでいる。

ウナギ仔魚飼育上の問題点の一つは、変態までに長期間を要することである。耳石の解析によれば、天然で変態が始まる日齢はふ化後116～138日⁷⁾ないしふ化後100～160日⁸⁾であるとされるが、飼育下ではそれよりも長く、ふ化から変態まで250日前後、^{5,9)}あるいは300日近く¹⁰⁾と報告されており、700日以上を要した例もある。¹⁰⁾仔魚期の長さには成長の速さが影響すると考えられるが、100%海水中よりも50%海水中の成長が良いことから、¹³⁾環境条件が初期から中期の仔魚の成長に一

定の影響を及ぼすものとみられる。他に仔魚の成長が遅くなる原因としては、飼育水温（22～23℃）^{4,9,11)}が天然生息域の水温（27～28℃）¹²⁾よりも低いことが考えられる。また、飼料の栄養価あるいは摂餌量が仔魚の成長に十分であるかどうかは明らかにされておらず、摂餌量の不足等が成長に影響している可能性も考えられる。このような環境・飼育条件のうち、著者らは先に、飼育水温、給餌頻度および仔魚の収容密度を調整することによって、最短131日でふ化からシラスウナギまで達することが可能であることを示した。¹⁰⁾しかしこれは最良個体の事例であり、このような飼育条件の改善が集団としての成長や生残にどのように影響するのかという点についてはまだ報告していない。

本稿では、まず、現行のウナギ仔魚の飼育条件のうち、水温および給餌回数がウナギ仔魚の成長、生残および変態に及ぼす影響を短期の飼育試験で検討した結果を報告する。それによって得られた知見を基に、給餌開始からシラスウナギに変態するまでの飼育条件を詳細に設定し、現行の飼育方法と比較して、最良個体ではシラスウナギが出現する日齢が早くなることを示した先の速報¹⁰⁾で得られた実験結果を詳細に解析した。その結果、平均の成長が速まること、およびシラスウナギまでの期間が短縮されることを明らかにしたので報告する。

試料および方法

親魚養成と催熟 ウナギ親魚は、雌は宍道湖産の成鰻を購入し、催熟開始まで無給餌で飼育管理したもの、または(株)水産総合研究センター増養殖研究所志布志庁舎において2006～2008年に得られたシラスウナギを養成したもの¹⁰⁾を用いた。雄は養鰻業者から購入し、催熟開始まで無給餌で飼育管理したものを用いた。ウナギ親魚は、雌に対してはサケ脳下垂体抽出物を毎週投与し、卵径の増大を基準として17β-ヒドロキシプロジェステロンを投与して排卵を誘導した。¹⁴⁾雄に対してはヒト胎盤性性腺刺激ホルモンを毎週投与した。¹⁵⁾ウナギ仔魚は誘発産卵¹⁶⁾または人工授精¹⁷⁾によって得られた受精卵から得た。得られたふ化仔魚には試験開始まで給餌せず、25℃で飼育管理した。

試験1 初期の飼育成績に及ぼす水温の影響を検討した。本試験には、誘発産卵で得られた受精卵からふ化した仔魚を供し、3回試行した。各試行とも、アクリル製10 Lポウル型水槽¹⁸⁾3面に1面あたり250～252尾の仔魚（試行1および試行3ではふ化後5日、試行2ではふ化後6日）を収容した。飼育水温を1面は23℃（23℃区）、1面は25℃（25℃区）、1面は07：00から15：00までを25℃、15：00から07：00までを23℃とした（23/25℃区）。飼育水温以外の条件は各水槽とも同一とした。すなわち給餌は収容翌日から開始し、2時間毎の

1日5回（07：00～15：00）とした。アブラツノザメ卵主体飼料¹⁹⁾（SE）を1面あたり7 mL給餌し、1回あたりの給餌時間は15分間とした。照明は1500～2000 lxとし、給餌および水槽交換等の作業時以外は消灯した。注水量は0.6～0.7 L/分とし、1日1回、サイホンを用いて水槽交換を行った。死亡魚は発見次第除去した。ふ化後20日（試行2および3）または21日（試行1）で試験を終了し、水槽毎に生残尾数を計数するとともに、20尾ずつをフェノキシエタノール400 ppm下で麻酔し、万能投影機（Nikon, V-12B）を用いて全長および体高を測定した。生残率は以下のように計算した。

$$\text{生残率}(\%) = \text{生残尾数} / \text{収容尾数} \times 100$$

試験2 初期の飼育成績に及ぼす水温の影響と追加の給餌の効果を検討した。本試験には、誘発産卵で得られた受精卵からふ化した仔魚を供した。試験区の設定では、まず飼育水温を23℃および25℃とした。給餌は試験1と同様に2時間毎の1日5回とした試験区（STD）および5回目の給餌の8時間後（23：00）にも給餌を行った試験区（add23）を設けた。これらの組み合わせにより、23_STD, 23_add23, 25_STD, 25_add23の4試験区を設け、各試験区はアクリル製10 Lポウル型水槽を3面ずつとした。1面あたりふ化後5日の仔魚を250～255尾収容した。飼料や給餌方法、照明、注水および水槽交換等は試験1と同様とした。ふ化後20日に試験を終了し、生残尾数を計数して試験1と同様に生残率を算出するとともに、仔魚をサンプリング・麻酔して全長および体高の測定を行った（各面2～20尾）。なお脊椎湾曲²⁰⁾を起こした仔魚が発生したため、測定の際にはそれらを除外して行った。

試験3 変態に及ぼす水温の影響を検討した。本試験には、人工授精で得られた受精卵からふ化した仔魚を供した。ふ化後243日の仔魚をアクリル製10 Lポウル水槽6面に1面あたり4尾を収容し、3面を27.5℃区、3面を27.5/25℃区とした。27.5℃区は飼育水温を27.5℃とし、試験終了まで飼育した。27.5/25℃区は当初27.5℃に設定し、試験開始後7日目、14日目および21日目から24時間は25℃とし、その後再び27.5℃とした。この温度変化は1～2時間のうちに実施した。それ以外の条件は両区共通とした。給餌は2時間毎の1日5回を基本とし、7日あたり6日の割合で5回目の給餌から8時間後にも1回を加えて、計1日6回の給餌を行った。飼料はSEを1面あたり7 mL給餌し、1回あたりの給餌時間は15分間とした。注水量は0.8～0.9 L/分とした。照明および水槽交換は試験1と同様とした。変態開始個体の有無を毎日確認した。試験開始後7日目までに変態を開始した個体は、その時点までの両区の温度履歴が同一であることから、変態開始率の計算から除外した。試験開始後28日（ふ化後271日）で試験を

終了し、変態を開始しなかった仔魚について全長を測定した。試験期間中の死亡および形態異常の発生は無かった。変態開始率は以下の式により求めた。

$$\text{変態開始率(\%)} = \text{変態開始尾数} / \text{収容尾数} \times 100$$

試験 4 これまでに得られた飼育条件に関する知見を基に、ふ化からシラスウナギに変態するまでの飼育条件を詳細に設定し、従来の飼育方法と比較した。本試験には、人工授精で得られた受精卵から得られた仔魚を供した。ふ化後 6 日の仔魚はアクリル製 10 L ポウル水槽 6 面に 1 面あたり 255~324 尾を収容した。6 面のうち 3 面を試験区 1 (treatment 1)、3 面を試験区 2 (treatment 2) とした。飼育水温は試験区 1 では試験開始から終了まで一貫して 23°C とした。試験区 2 では 25°C とし試験を開始した。飼育下のウナギ仔魚は成長につれて比重が低下するため、¹¹⁾ 浮上死亡を防ぐ目的で試験区 2 では飼育水温をふ化後 65~73 日にかけて徐々に上昇させ、ふ化後 73 日以降は 27.5°C とした。さらに、ふ化後 118 日以降は 27.5°C を基本としつつ、7 日あたり 1 回、1 回あたり 24 時間、25°C とした。給餌は両区ともふ化後 6 日の 13:00 から開始した。試験区 1 では給餌は 07:00 から 15:00 まで 2 時間毎の 1 日 5 回行った。試験区 2 では、ふ化後 6 日の 13:00, 15:00, 18:00, 21:00, 24:00 およびふ化後 7 日の 03:00 に給餌を行い、ふ化後 7 日の 07:00 以降は、ふ化後 133 日までは 2 時間毎の 1 日 5 回と 5 回目から 8 時間後に 1 回の、計 1 日 6 回給餌を行った。ふ化後 134 日以降もふ化後 284 日までは 7 日あたり 6 日の割合で同様に 1 日 6 回の給餌を行ったが、それ以外の日は試験区 1 と同様の 1 日 5

回とした。ふ化後 284 日以降は両区とも 2 時間毎の 1 日 5 回とした。飼料は SE を 1 回あたり 7 mL とし、給餌時間は 1 回あたり 15 分間とした。注水量は当初 0.6~0.7 L/分とし、仔魚の成長に応じて増加させ、最終的には 0.9 L/分とした。試験区 2 では分槽を行ったため、収容時の水槽 1 面に由来する集団を本稿では「群」と称する。試験区 2 ではふ化後 10 日に 1 群あたり 2 面に分槽し、ふ化後 17 日までに 1 群あたり 4 面とした。ここまでの分槽は、給餌時間 (15 分間) 終了後に残餌がほぼなくなる時点で行った。その後は用意できる水槽数の制約のため、ふ化後 74 日に各群 1 面ずつを増やして、それ以降は各群 5 面ずつとした。試験区 1 では分槽を行わなかった (Fig. 1)。照明および水槽交換は試験 1 と同様とした。

分槽に先立ってふ化後 9 日に各水槽 10~11 尾を麻酔して全長および体高を測定し、ふ化後 10 日に生残尾数を計数した。その後はふ化後 20 日以降 20 日毎に生残尾数を計数し、試験 1 と同様の方法で生残率を求めるとともに、各面 5~20 尾を麻酔して全長および体高を測定した。変態を開始した個体は、肛門が全長の中央付近に達した段階で飼育水槽から隔離して別途収容し、以降は変態完了まで給餌せずに飼育管理した。従って、設定した条件のもとでの飼育は隔離した時点で終了しているが、本稿における変態率は変態完了まで達した個体数をもとに計算した。変態率は以下のように計算した。

$$\text{変態率(\%)} = \text{変態完了尾数(累積)} / \text{収容尾数} \times 100$$

また試験区 2 では 1 群に複数の水槽が含まれているため、各群の平均全長・体高は以下の通り加重平均とし

Days after hatching		6	7	8-16	17-64	65-73	74-117	118-133	134-212	213-283	>284
Treatment 1	Temperature	23									
	Feeding	13:00 15:00	5 times (07:00, 09:00, 11:00, 13:00, 15:00)								
	Tank/group	1									
Treatment 2	Temperature	25				25 →27.5	27.5	27.5/25			
	Feeding	13:00 15:00 18:00 21:00 24:00	03:00 07:00 09:00 11:00 13:00 15:00 23:00	6 times (07:00, 09:00, 11:00, 13:00, 15:00, 23:00)					6 times/ 5 times		5 times
	Tank/group	1		1→3	4		5				

Fig. 1 Rearing conditions in experiment 4. 27.5/25 means that water temperature was kept at 25.0°C for 24 hours from 07:00 to 07:00 once a week. Tank/group means the number of tanks used for rearing the initial one group of larvae. 6 times/5 times means that larvae were fed 6 times a day for 6 days a week, and 5 times a day for one day a week.

て算出した。

平均全長 = $\sum$ 水槽 t の平均全長 $\times$ 水槽 t の生残尾数 / 群全体の生残尾数

平均体高 = $\sum$ (水槽 t の平均体高 $\times$ 水槽 t の生残尾数) / 群全体の生残尾数

統計処理 データは、Student の t 検定または二元配置分散分析を行った後に Tukey-Kramer の多重検定で解析した。 $p < 0.05$ で有意な差があるものと認めた。生残率および変態率に関しては逆正弦変換を行った後に検定処理を行った。統計的解析の結果については本文または図表の説明で言及した。データは平均値と標準誤差で示した。

結 果

試験 1 各試行に供した卵の受精率およびふ化率は、試行 1 で 98.5% および 87.9%，試行 2 で 90.7% およ

び 33.5%，試行 3 で 94.9% および 91.9% であった。各試行における生残率、全長および体高は Table 1 の通りであった。生残率については、23°C 区と 23/25°C 区との間には 3 試行に共通する傾向は認められなかったが、全試行において 25°C 区における生残率が低かった。全長および体高については試行ごとに異なり、試験区間で 3 試行に共通する傾向は認められなかった。

試験 2 本試験に供した卵の受精率およびふ化率は 6.0% および 4.3% であった。試験終了時の生残率、全長および体高は Table 2 の通りであった。生残率については試験区間で有意な差は認められなかった（二元配置分散分析、水温効果、 $p = 0.67$ ；給餌回数効果、 $p = 0.47$ ；交互作用、 $p = 0.22$ ）。ふ化後 20 日での平均全長については試験区間に有意な差が認められ（二元配置分散分析、水温効果、 $p = 0.12$ ；給餌回数効果、 $p = 0.008$ ；交互作用、 $p = 0.17$ ）、25_add23 の平均全長は 23_STD より有意に大きかった（Tukey-Kramer 検定、 $p < 0.05$ ）。ふ化後 20 日での平均体高については試験区

Table 1 Survival rate, and initial and final body size of Japanese eel larvae under different water temperatures in experiment 1

	Water temperature (°C)	Initial				Final			
		DAH*1	Number of larvae	Total length*2 (mm)	Body depth*2 (mm)	DAH*1	Survival rate (%)	Total length*2 (mm)	Body depth*2 (mm)
Trial 1	23		250				76.8	11.94 $\pm$ 0.13	1.18 $\pm$ 0.03
	23/25*3	5	250	6.85 $\pm$ 0.07	0.63 $\pm$ 0.01	21	86.8	11.73 $\pm$ 0.30	1.13 $\pm$ 0.06
	25		252				52.8	12.29 $\pm$ 0.12	1.21 $\pm$ 0.04
Trial 2	23		250				82.0	10.78 $\pm$ 0.12	1.01 $\pm$ 0.03
	23/25*3	6	250	6.92 $\pm$ 0.07	0.61 $\pm$ 0.01	20	78.4	10.83 $\pm$ 0.18	1.04 $\pm$ 0.04
	25		250				48.4	10.54 $\pm$ 0.17	0.98 $\pm$ 0.03
Trial 3	23		250				58.4	10.14 $\pm$ 0.18	0.96 $\pm$ 0.03
	23/25*3	5	250	6.84 $\pm$ 0.03	0.58 $\pm$ 0.01	20	60.4	10.11 $\pm$ 0.21	0.94 $\pm$ 0.03
	25		250				39.6	10.09 $\pm$ 0.31	0.99 $\pm$ 0.03

*1 Days after hatching.

*2 Values are mean $\pm$ standard error of the mean ($n = 20$).

*3 25°C, first to fifth feeding; 23°C, fifth to first feeding.

Table 2 Survival rate and body size of eel larvae under different water temperatures and feeding frequencies in experiment 2

	Water temperature (°C)	Feeding times/day	Initial				Final			
			DAH*1	Number (inds.)	Average total length*2 (mm)	Average body depth*2 (mm)	DAH*1	Survival rate*3 (%)	Mean total length*3 (mm)	Mean body depth*3 (mm)
23_STD	23	5		250				73.1 $\pm$ 2.9	11.40 $\pm$ 0.17 ^a	1.16 $\pm$ 0.04
23_add23	23	6		254–255	7.15 $\pm$ 0.04	0.64 $\pm$ 0.01	20	47.0 $\pm$ 19.2	11.85 $\pm$ 0.10 ^{ab}	1.21 $\pm$ 0.03
25_STD	25	5		250–254				50.0 $\pm$ 2.1	11.66 $\pm$ 0.08 ^{ab}	1.19 $\pm$ 0.01
25_add23	25	6		250				54.3 $\pm$ 1.2	12.00 $\pm$ 0.09 ^b	1.24 $\pm$ 0.02

*1 Days after hatching.

*2 Values are mean $\pm$ standard error of the mean ($n = 20$).

*3 Mean value of three tanks. Values are mean $\pm$ standard error. Values with the same superscript within the same column are not significantly different ($p > 0.05$).

間で有意な差は認められなかった (二元配置分散分析, 水温効果, $p=0.23$; 給餌回数効果, $p=0.12$; 交互作用, $p=0.43$)。

試験 3 試験開始後 7 日までに変態した個体は両区とも 1 尾ずつであった。これらを除いて試験開始後 28 日までに変態を開始した個体は一貫して 27.5/25°C 区が多かったが, 試験開始後 19 日および 20 日のみに有意な差が認められた (t 検定, $p<0.05$) (Table 3)。

試験 4 本試験に供した卵の受精率およびふ化率は 93.7% および 77.8% であった。ふ化後 9 日における平

均全長は試験区 2 が試験区 1 より有意に大きかった (t 検定, $p=3.70\times 10^5$)。ふ化後 9 日における平均体高は試験区間で有意な差が認められなかった (t 検定, $p=0.073$) (Table 4)。生残率は 10 日齢では試験区 2 で有意に高く, ふ化後 20 日からふ化後 120 日までの各時点では試験区間で有意な差は認められなかった (t 検定, $p>0.05$)。平均全長および平均体高は, ふ化後 20 日からふ化後 120 日までの各時点で試験区 2 が有意に大きかった (t 検定, $p<0.05$) (Fig. 2)。試験区 1 のうち 1 群が, ふ化後 97 日に事故により逸失した。試験区 1 に

Table 3 Metamorphosis under different water temperatures from 243 days after hatching till 271 days after hatching in experiment 3

Tank no.	Water temperature (°C)	Initial (243 days after hatching)			Metamorphosis (till 271 days after hatching)				
		Number (inds.)	Total length (mm)	Body depth (mm)	till 7* ¹	8–28* ²	Unmetamorphosed* ³	Metamorphosis starting rate (%)	Total length* ⁴ (mm)
Treatment 1	1	4	46.55 ± 2.73	6.66 ± 0.72	0	2	2	50.0	50.7, 49.2
	2	4	48.91 ± 2.07	8.52 ± 0.89	1	2	1	66.7	54.1
	3	4	49.73 ± 1.86	8.04 ± 0.60	0	3	1	75.0	51.5
Treatment 2	1	4	49.98 ± 0.58	8.03 ± 0.36	0	4	0	100.0	—
	2	4	47.98 ± 2.80	8.39 ± 0.87	1	2	1	66.7	50.4
	3	4	46.80 ± 1.05	7.52 ± 0.30	0	4	0	100.0	—

*¹ Numbers of larvae metamorphosed till 7 days after the start of the experiment (250 DAH).

*² Numbers of larvae metamorphosed from 8 till 28 days after the start of the experiment (251–271 DAH).

*³ Numbers of larvae which were not metamorphosed till 28 days after the start of the experiment.

*⁴ Total lengths of larvae which were not metamorphosed till the end of the experiment (271 DAH).

*⁵ Water temperature was kept at 27.5°C during the experiment, except for 250, 257 and 264 days after hatching. The water temperature of these three days was kept at 25.0°C for 24 hours from 07:00 to 07:00.

Table 4 Body size at 9 days after hatching and survival rate at 10 days after hatching under different conditions in experiment 4

Water temperature (°C)	Feeding* ³ (times/day)	Initial* ¹ (6 DAH* ²)	Body size at 9 DAH* ²		Survival at 10 DAH* ²
		Number (inds.)	Mean total length (mm)	Mean body depth (mm)	Mean survival rate* ^{4,5} (%)
Treatment 1	23	255–270	8.10 ± 0.02	0.72 ± 0.02	93.7 ± 0.46
Treatment 2	25	305–324	8.45 ± 0.00	0.77 ± 0.01	97.9 ± 0.70

*¹ Initial TL, 7.00 ± 0.04 mm; initial BD, 0.57 ± 0.01 mm ($n=20$, mean ± standard error).

*² Days after hatching.

*³ See Fig. 1.

*⁴ Mean value of three tanks. Values are mean ± standard error.

*⁵ Significant difference between treatments.

Fig. 2 Survival rate (a), average total length (b) and average body depth (c) in experiment 4. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$.

Fig. 3 Metamorphosis rate (accumulative) in experiment 4. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

おける変態開始個体はふ化後 180 日で初めて現れ、ふ化後 671 日に飼育が終了して、最終的な変態率は $7.6 \pm 0.8\%$ ($7.0 \sim 8.2\%$) であった。試験区 2 における変態開始個体はふ化後 137 日で初めて現れ、ふ化後 414 日に飼育が終了し、最終的な変態率は $12.5 \pm 1.4\%$ ($10.8 \sim 15.1\%$) であった (Fig. 3)。ふ化後 160 日からふ化後 420 日までの各時点で、試験区 2 の変態率が有意に高かった (t 検定, $p < 0.05$)。シラスウナギが得られた日齢の平均は、試験区 1 がふ化後 300.5 日および 304.6 日、試験区 2 がふ化後 216.0 日、191.6 日および 223.6 日であり、試験区 2 が有意に短かった (t 検定, $p < 0.01$)。

考 察

耳石の分析によれば、天然ウナギではふ化から変態までの仔魚期は 100 日以上に及ぶが、^{7,8)} 飼育下ではそれよりもさらに長い。^{2,6)} 飼育下で仔魚期が長くなる原因として、成長が遅い可能性が考えられる。すなわち飼育下ではふ化後 150 日で 39.0 mm ⁵⁾ という報告があり、また著者らは、標準的な飼育法のもとで、ふ化後 120 日で最大の個体が全長 41.1 mm という結果を得ているが、¹⁰⁾ 増養殖研究所志布志庁舎で 2004 年から 2010 年 7 月までに得られたシラスウナギで、サイズを測定できた 454 尾のうち、全長が 42 mm 未満のものは 6.4% にすぎず (未発表)、この程度のサイズで変態した例は少ないといえるからである。著者らはまず、高い水温の下で成長が向上する可能性を考えて、飼育水温を従来の 23°C ^{4,9,11)} に代えて 25°C とした場合の初期の飼育成績について検討した。その結果、試験区間で成長に違いが認められない一方で、3 回の試行すべてにおいて、 25°C 区の生残率が 23°C 区および $23/25^\circ\text{C}$ 区よりも劣った。このことから、ウナギ仔魚にとって、 25°C では代謝が活発になるために、1 日最大 16 時間の無給餌状態が、 23°C よりも生残率が劣る原因となっているのではないかと推測された。この仮説が正しければ、16 時間の中間に給餌を

行うことによって、無給餌状態は最長でも 8 時間となるので、生残率が向上することが期待された。しかし、試験 2 において追加 (6 回目) の給餌効果を検討したが、試験区間で生残率について差が認められず、結論を得られなかった。しかし、試験 4 ではふ化後 10 日までの生残率について追加の給餌をした試験区 2 が試験区 1 よりも高く、給餌回数の増加により、 25°C における初期の生残率が改善される可能性は否定できない。一方で試験 2 においては、 $25^\circ\text{C} \cdot 6$ 回給餌では、 $23^\circ\text{C} \cdot 5$ 回給餌よりもふ化後 20 日の全長が大きく、高水温と給餌回数の増加の組み合わせで成長が速くなることが示唆された。そこで試験 4 においてもふ化後 9 日までの成長を検討すると、高水温と給餌回数の増加の組み合わせで全長が大きくなる結果が得られた。以上により、飼育水温は 25°C 、給餌回数は 2 時間毎に 5 回に加え、5 回目の給餌から 8 時間後に 1 回の計 1 日 6 回という飼育条件が導かれた。

一方で、仔魚が摂餌の様子を観察すると、給餌開始当初は 15 分間の給餌時間が経過しても飼料が残っているが、給餌量が一定のため、仔魚が成長するにつれて飼料が残らない事例がしばしば見られる。したがって、一定程度成長した後には、飼料の欠乏により成長が阻害される可能性が考えられた。こうした問題を改善するために、試験 4 の試験区 2 においては摂餌量を増やす目的で分槽を行った。このようにして、飼育水温を高め、給餌回数を増やし、かつ分槽して飼育密度を下げた結果、ふ化後 20 日からふ化後 120 日までの各時点で試験区 1 と試験区 2 の生残率に差が認められない一方で、全長・体高の両方で試験区 2 の仔魚が大きかった。著者らは先にこのような飼育条件の改善によって各群中の最大の個体の成長が速まることを報告したが、¹⁰⁾ 本研究ではさらに群全体の成長が速まることが明らかとなった。

ふ化からシラスウナギになるまでの平均日数についても、試験区 2 では試験区 1 よりも短縮された。本研究においては最終的な変態率について試験区間で有意な差

が認められなかったが、数値上は試験区2が試験区1を上回っており、またふ化後160日からふ化後400日までは試験区2の変態率が試験区1よりも有意に高かった。この結果、試験区2ではすべての群で10%以上の変態率であり、かつ得られたシラスウナギのうち $95.4 \pm 2.2\%$ (91.7~100%)をふ化後300日までに得ることができた。試験区1では、ふ化後300日までに得られたシラスウナギは $47.5 \pm 0.1\%$ (47.4~47.6%)であった (t 検定, $p=0.012$)。このように試験区2では試験区1よりも仔魚期が短縮された。この結果には成長の促進が相当に寄与した可能性がある。一方で、試験3で見られた水温変化と変態開始の関係については、試験期間を通じて27.5/25°C区の変態開始率が27.5°C区を上回ったこと、および一部の日齢で変態開始率に有意な差が認められたことから、飼育水温の変化が仔魚期の短縮に寄与する可能性を考慮し、試験4の試験区2には試験3の27.5/25°C区と同様の水温設定を採用した。しかし、変態可能と考えられる全長50 mm前後のウナギ仔魚を十分量用意することは現時点では困難であるため、水温変化と変態との関係についてはこれ以上の考察はできなかった。

飼育下におけるウナギ仔魚の成長の個体差が大きいことは経験的に知られている。これに加えて変態開始の機構についても未解明な部分が多いこともあって、²¹⁾シラスウナギが得られる日齢はたいへん幅広い。¹⁰⁾このため、個々の要素を検討して成長の促進、あるいはシラスウナギまでの期間の短縮等の効果を検証することは困難であった。そこで本研究では、まずは成長の促進に効果が期待された数種類の要素を組み合わせることで効果を拡大することを目指し、飼育条件の調整によって成長を速め、仔魚期を短縮できることを証明した。成長の促進および変態までの期間の短縮に、これらの要素のどれがどの程度寄与しているかは明らかでなく、またそれらの寄与の度合いは発達段階によって異なる可能性もあるため、この点の解明は今後の課題である。最適な飼育水温、給餌頻度および飼育密度が解明されれば、さらに成長の促進および変態までの期間が短縮される可能性がある。また本研究では、試験3および試験4の後期において水温を27.5°Cまで高め、さらに低水温刺激を採用したが、このような水温設定が成長あるいは変態に及ぼす影響の解明も今後の課題である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、作業に協力いただいた山元栄一氏、恒吉守一氏、上野裕幸氏、湯地幸枝氏、清水武宏氏、春口嵩紘氏、白鳥智恵美氏、田中佑次郎氏、津曲良子氏、下村絹子氏および山川忍氏、また論文の作成に協力いただいた桐原久子氏にお礼を申し上げる。また佃水

産総合研究センター西海区水産研究所の虫明敬一博士、佃水産総合研究センター増養殖研究所の岩本明雄養殖技術部長、田中秀樹ウナギ量産研究グループ長および野村和晴博士には有用な助言をいただいたことに感謝する。佃不二製油および佃日本水産には飼育に用いた飼料原料を提供していただいたことに感謝する。本研究は農林水産技術会議委託プロジェクト研究「ウナギおよびイセエビの種苗生産技術の開発」によって行われた。

文 献

- 1) 平成23年度水産白書. 水産庁, 東京, 2011.
- 2) 平成20年漁業・養殖業生産統計年報. 農林水産省, 東京, 2011.
- 3) 昭和38年漁業養殖業生産統計年報. 農林省, 東京, 1965.
- 4) Tanaka H, Kagawa H, Ohta H. Production of leptocephali of Japanese eel *Anguilla japonica* in captivity. *Aquaculture* 2001; **201**: 51-60.
- 5) Tanaka H, Kagawa H, Ohta H, Unuma T, Nomura K. The first production of glass eel in captivity: fish reproductive physiology facilitates great progress in aquaculture. *Fish Physiol. Biochem.* 2003; **28**: 493-497.
- 6) Kagawa H, Tanaka H, Ohta H, Unuma T, Nomura K. The first success of glass eel production in the world: basic biology on fish reproduction advances new applied technology in aquaculture. *Fish Physiol. Biochem.* 2005; **31**: 193-199.
- 7) Cheng PW, Tzeng WN. Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996; **131**: 87-96.
- 8) Arai T, Otake T, Tsukamoto K. Drastic changes in otolith microstructure and microchemistry accompanying the onset of metamorphosis in the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1997; **161**: 17-22.
- 9) Okamura A, Yamada Y, Horita T, Horie N, Mikawa N, Utoh T, Tanaka S, Tsukamoto K. Rearing eel leptocephali (*Anguilla japonica*) in a planktonkreisel. *Aquacult. Res.* 2009; **40**: 509-512.
- 10) 増田賢嗣, 今泉 均, 小田憲太郎, 橋本 博, 照屋和久, 薄 浩則. 飼育環境下でのニホンウナギ *Anguilla japonica* 仔魚は最速で131日齢までに変態しうる. 日水誌 2011; **77**: 416-418.
- 11) Tsukamoto K, Yamada Y, Okamura A, Kaneko T, Tanaka H, Miller MJ, Horie N, Mikawa N, Utoh T, Tanaka S. Positive buoyancy in eel leptocephali: an adaptation for life in the ocean surface layer. *Mar. Biol.* 2009; **156**: 835-846.
- 12) Otake T, Inagaki T, Hasumoto H, Mochioka N, Tsukamoto K. Diel vertical distribution of *Anguilla japonica* leptocephali. *Ichthyol. Res.* 1998; **45**: 208-211.
- 13) Okamura A, Yamada Y, Mikawa N, Horie N, Utoh T, Kaneko T, Tanaka S, Tsukamoto K. Growth and survival of eel leptocephali (*Anguilla japonica*) in low salinity water. *Aquaculture* 2009; **296**: 367-372.
- 14) Kagawa H, Tanaka H, Ohta H, Okuzawa K, Iinuma N. Induced ovulation by injection of 17,20 β -dihydroxy-4-pregnen-3-one in the artificially matured Japanese eel, with special reference to ovulation time. *Fish. Sci.* 1997; **63**: 365-367.

- 15) Ohta H, Kagawa H, Tanaka H, Okuzawa K, Hirose K. Changes in fertilization and hatching rates with time after ovulation induced by 17, 20 β -dihydroxy-4-pregnen-3-one in the Japanese eel, *Anguilla japonica*. *Aquaculture* 1996; **139**: 291–301.
- 16) Satoh H, Yamamori K, Hibiya, T. Induced spawning of the Japanese eel. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1992; **58**: 825–832.
- 17) Yamamoto K, Yamauchi K. Sexual maturation of Japanese eel and production of eel larvae in the aquarium. *Nature* 1974; **251**: 220–222.
- 18) 橋本 博, 足立純一, 西 明文, 今泉 均, 加治俊二. ウナギ仔魚飼育における初期飼育水温の検討. 栽培漁業 センター技報 2009; **10**: 35–37.
- 19) 増田賢嗣, 今泉 均, 橋本 博, 小田憲太郎, 古板博文, 松成宏之, 照屋和久, 薄 浩則. イタチザメ卵とアイザメ卵を主体とした飼料によるウナギ初期飼育の可能性. 水産技術 2011; **4**: 7–13.
- 20) Okamura A, Yamada Y, Mikawa N, Horie N, Tanaka S, Tsukamoto K. Notochord deformities in reared Japanese eel *Anguilla japonica* larvae. *Aquaculture* 2011; **317**: 37–41.
- 21) Kuroki M, Fukuda N, Yamada Y, Okamura A, Tsukamoto K. Morphological changes and otolith growth during metamorphosis of Japanese eel *leptocephali* in captivity. *Coast. Mari. Sci.* 2010; **34**: 31–38.