

# 有効積算水温を用いたガザミ種苗生産における稚ガニへの変態時期の推定

金丸彦一郎

現在、多くの魚種について栽培漁業が推進され、甲殻類の中でガザミ (*Portunus trituberculatus*) は、クルマエビに次ぐ主要対象種となっている。昭和60年には全国の種苗生産機関で合計4,600万匹の稚ガニが生産され<sup>1)</sup>、今後さらにその生産数は増加していくものと思われる。

ガザミ種苗生産過程において、Megalopa 期から1令期稚ガニ (C<sub>1</sub>) に変態した後は、共食いが激しくなり、生残数が急激に減少していく<sup>2,3)</sup>。そのため、稚ガニに変態するとすぐに放流されたり、または中間育成した後に放流されている。そこで、いつMegalopa 期幼生が稚ガニに変態するのかを、より正確に予測することは重要である。本報では、飼育時の積算水温を用いて、令期ごとに稚ガニへの変態時期を推定することを試みた。

ガザミ種苗生産を行なっている各機関における、幼生がふ化して稚ガニに変態するまでの、0℃を基準とした積算水温には、年ごと、飼育事例ごとに大きなばらつきがみられている。そのため0℃から水温を積算するよりも、一定温度から積算する方が、それらのばらつきは少なくなると考えられた。そこで、過去の当センターにおけるガザミ種苗生産飼育事例の資料から、幼生がふ化して稚ガニに変態するまでに要した積算水温を用いて、統計的手法により予測式を求め、その予測値から稚ガニになるまでの日数を推定する方法を検討した。

本稿に先立ち、懇切な御指導をいただいた長崎大学水産学部助教授松宮義晴博士には、心から感謝する。

## 資 料

昭和56年から60年までに当センターで50~100トン水槽を用いて行なったガザミ種苗生産18飼育事例の資料から、Zoea 1期から1令期稚ガニ (C<sub>1</sub>, 以下、稚ガニと略す) になるまでの、毎日の午前9時の水温と令期

別組成とを使用した。

飼育事例ごとの飼育日数、稚ガニの単位生産数および飼育環境などを表1に示す。昭和56年から58年までの種苗生産方法については山田ら<sup>4)</sup>が報告し、59、60年についてもほぼ同じ方法で種苗生産を行なっているので、本報では飼育方法についての記載は省く。

## 解析方法

ガザミは、Zoea (以下、Zと略す) の4期とMegalopa (以下、Mと略す) の1期とを経て稚ガニ (C<sub>1</sub>) になる。幼生がふ化してから稚ガニに変態するまでの0℃を基準とした積算水温は、本報の資料においても、前述したような飼育事例ごとのばらつきが大きかった。そこでそれらのばらつきを少なくするため、0℃を基準とした積算水温ではなく、一定温度 (以下、基準水温とする) を基準とした積算水温、すなわち有効積算水温を計算に用いた。

まず、基準水温を探索するために、図1に示す計算上の積算の基点となる水温 (以下、基点水温とする) を変数とし、有効積算水温の18飼育事例間のばらつきの総和を目的関数とした最適化法<sup>5)</sup>を行なった。目的関数が最小となる基点水温を基準水温とした。

次に、幼生がふ化して稚ガニに変態するまでに要する有効積算水温 (以下、総有効積算水温と略す) と、飼育途中のZ<sub>1</sub>期の有効積算水温またはZ<sub>1</sub>期から各令期までの有効積算水温との回帰直線を求め、これらを用いて総有効積算水温を予測した。

なお、Z<sub>1</sub>期の有効積算水温とは、(3)式のように、各飼育事例ごとに毎日の基準水温以上の有効水温とZ<sub>1</sub>期の割合とを乗じたものを加算して求めた。Z<sub>1</sub>期から各令期までの有効積算水温とは、経過した各令期までについて令期別にZ<sub>1</sub>期と同様な方法で求めたものを累積した。

表1 飼育事例ごとの飼育日数、1令期稚ガニ(C<sub>1</sub>)取り揚げ数および飼育環境

年	No.	飼育日数	取り揚げ		飼育環境 (平均)	
			単位生産数 (/kl)	生残率 (%)	水温 (°C)	pH
56	1	21	7,042	23.1	20.3~26.5 (23.8)	8.0~8.4 (8.1)
	2	20	6,450	21.5	21.6~26.5 (24.1)	8.0~8.4 (8.2)
	3	21	6,428	17.5	23.6~27.9 (26.0)	7.8~8.5 (8.1)
	4	19	1,150	2.9	22.5~27.4 (25.2)	7.8~8.4 (8.1)
57	5	18	3,277	18.2	21.4~26.5 (24.4)	7.9~8.2 (8.1)
	6	20	5,637	22.6	21.5~25.4 (23.3)	8.0~8.3 (8.1)
	7	18	2,491	14.3	23.8~26.1 (24.9)	7.9~8.2 (8.1)
	8	18	1,285	6.3	23.4~26.1 (24.6)	7.7~8.2 (8.0)
58	9	18	5,668	19.6	21.8~26.2 (23.4)	7.8~8.6 (8.2)
	10	18	10,135	26.4	19.7~26.7 (24.4)	7.6~8.8 (8.2)
	11	18	7,507	25.0	22.2~25.3 (24.0)	8.0~8.8 (8.4)
	12	18	3,565	10.2	21.8~25.6 (24.0)	7.9~8.7 (8.2)
59	13	16	15,288	43.7	21.9~27.5 (25.7)	7.7~8.6 (8.1)
	14	16	12,383	33.3	23.8~27.3 (25.4)	8.0~8.5 (8.1)
	15	16	10,329	35.2	23.5~27.7 (25.5)	8.0~8.6 (8.2)
60	16	20	7,369	19.8	21.1~24.5 (22.9)	7.9~8.5 (8.1)
	17	18	15,276	36.6	21.9~25.5 (23.4)	7.8~8.3 (8.0)
	18	18	9,200	21.0	22.5~26.3 (24.1)	7.7~8.3 (8.0)

結 果

1. 基準水温の探索

基準水温を探索するために、各令期について最適化法を実施した。

令期  $i$  における飼育事例  $j$  の基点水温 (変数)  $t_k$  からの有効積算水温  $T_{ijk}$  は

$$T_{ijk} = \sum |t_{dj} - t_k| \cdot P_{di} \quad (1)$$

$t_d$ : ある日  $d$  の水温

$P_{di}$ : ある日  $d$  の  $i$  令期幼生の割合

で与えられる。この  $T_{ijk}$  をもとに(2)式のように、18飼育事例中の2事例  $j$  と  $j'$  間ごとの差の絶対値の総当たり18C<sub>2</sub>=153通りの総和  $S_{ik}$  (目的関数) を求めた。

$$S_{ik} = \sum_{j=1}^{18} \sum_{j'=j+1}^{18} |T_{ijk} - T_{ij'k}| \quad (2)$$

$t_k$  を 0.1 °C きざみで順次(1)式に代入し、各令期について  $S$  の値が最小となる  $t_k$ 、すなわち基準水温を求めた。

以上の計算手順を、M期を例として説明する。表2に示した一つの飼育事例の毎日の水温と令期別組成のM期の資料を(1)式に代入すると、

$$\begin{aligned} T_k &= (26.4 - t_k) \cdot 0.96 + (26.0 - t_k) \cdot 1.00 \\ &\quad + (24.5 - t_k) \cdot 1.00 + (24.2 - t_k) \cdot 1.00 \\ &\quad + (24.0 - t_k) \cdot 0.40 \end{aligned} \quad (3)$$

表2 基準水温の探索に用いた飼育事例の毎日の水温と令期別組成

飼育経過日数	水温	令期別組成 (%)					
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	M	C <sub>1</sub>
1	21.9	100					
2	24.0	100					
3	24.0	100					
4	26.2		100				
5	27.5		100				
6	25.0		3	97			
7	25.4			100			
8	25.6			2	98		
9	26.8				100		
10	26.4				100		
11	26.4				4	96	
12	26.0					100	
13	24.5					100	
14	24.2					100	
15	24.0					40	60
16							100

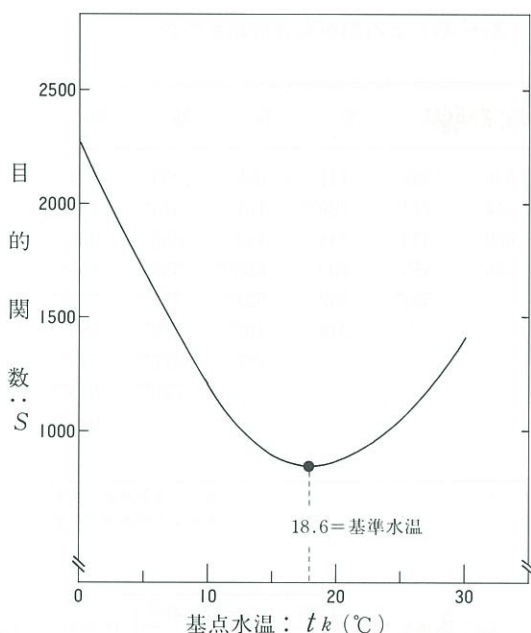


図1 M期における基点水温( $t_k$ )と目的関数(S)

となる。同様に、各飼育事例ごとに(1)式からTの値を求める。次に、18飼育事例のTの値を(2)式に代入して、各2飼育事例間ごとのTの差の絶対値からSを計算した。このようにして $t_k = 0^\circ\text{C}$ から $0.1^\circ\text{C}$ きざみで得られた目的関数S(レスポンス曲面)を図1に示す。このM期でSが最小(すなわち基準水温)となるのは $t_k = 18.6^\circ\text{C}$ の時であった。

このようにして、M期以外の各令期についてもSの値が最小となる基準水温 $t_k$ を求めたところ、Z<sub>1</sub>期18.9 $^\circ\text{C}$ 、Z<sub>2</sub>期20.9 $^\circ\text{C}$ 、Z<sub>3</sub>期21.9 $^\circ\text{C}$ そしてZ<sub>4</sub>期18.2 $^\circ\text{C}$ であった。本報では、基準水温として、計算上得られた最低値の18.2 $^\circ\text{C}$ に近い整数である18 $^\circ\text{C}$ を、全令期共通で用いて以後の計算を進めた。

## 2. 予測式の算出

表3に、18飼育事例の基準水温を18 $^\circ\text{C}$ とした、令期別の有効積算水温( $X_2 \sim X_6$ )の基本統計量を示す。

表3 18飼育事例における令期別有効積算水温の基本統計量

令期	平均	最小値	最大値	標準偏差	変動係数
Zoea 1期 ( $X_2$ )	15.52	10.80	23.20	3.24	0.208
2期 ( $X_3$ )	15.95	12.00	19.46	2.25	0.141
3期 ( $X_4$ )	17.33	12.41	22.29	2.67	0.154
4期 ( $X_5$ )	24.65	19.15	30.22	3.04	0.123
Megalopa期 ( $X_6$ )	30.63	19.15	36.82	4.86	0.159

表3に示した変動係数によると、Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub>、Z<sub>4</sub>期とM期の令期別の有効積算水温は、飼育事例ごとのばらつきがほぼ同じであった。

表4に、飼育日数( $X_1$ )、令期別の有効積算水温( $X_2 \sim X_6$ )およびZ<sub>1</sub>から各令期までの有効積算水温( $X_7 \sim X_{10}$ )を含めた単相関行列を示す。表4では相関係数が、5%水準で有意なものには\*、1%水準で有意なものには\*\*が付してある。総有効積算水温( $X_{10}$ )はZ<sub>1</sub>~Z<sub>4</sub>期( $X_9$ )とZ<sub>1</sub>~Z<sub>3</sub>期( $X_8$ )とに高い相関をもち、相関係数rは各々.931と.675であった。また、Z<sub>1</sub>~Z<sub>2</sub>期( $X_7$ )とZ<sub>1</sub>期( $X_2$ )とも相関があり、rは.574と.477であった。

Z<sub>1</sub>~Z<sub>4</sub>期の有効積算水温( $X_9$ )と、総有効積算水温( $X_{10}$ )との散布図と回帰直線とを図2に示す。このような回帰直線を用いて、各令期から稚ガニになるまでの総有効積算水温を求める予測式を算出した。

**Z<sub>1</sub>期からZ<sub>4</sub>期までの有効積算水温( $X_9$ )からの予測:**  
Z<sub>1</sub>~Z<sub>4</sub>期の有効積算水温( $X_9$ )と総有効積算水温( $X_{10}$ )の関係は回帰式

$$X_{10} = 1.57 X_9 - 10.92 \quad (4)$$

で表わされる。(4)式によると、Z<sub>1</sub>~Z<sub>4</sub>期の毎朝の水温の18 $^\circ\text{C}$ 以上の有効水温の総和( $X_9$ )が73.0 $^\circ\text{C} \cdot \text{日}$ のとき、総有効積算水温( $X_{10}$ )は103.7 $^\circ\text{C} \cdot \text{日}$ と計算される。つまり、103.7 - 73.0 = 30.7から、このM期幼生は、あと30.7 $^\circ\text{C} \cdot \text{日}$ で稚ガニになると予測できる。この後、水温が24.0 $^\circ\text{C}$ (有効水温6.0 $^\circ\text{C}$ )で推移したならば、あと5日ですべての幼生が稚ガニになると推定される。この推定の精度を上げるため、以下に総有効積算水温( $X_{10}$ )の予測値に幅をもたせる予測区間を求めた。

すなわち、新しいデータ $X_9 = x_0$ が得られた時、その $X_{10}$ の値 $y_0$ がどういう範囲におちるかを予測する。

そのときの予測誤差は

$$E = \sqrt{\left\{ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\} V_e}$$

表4 飼育日数 (X<sub>1</sub>), 各令期の有効積算水温 (X<sub>2</sub>~X<sub>6</sub>) とZ<sub>1</sub>期から各令期までの有効積算水温 (X<sub>7</sub>~X<sub>10</sub>) の単相関行列

	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>
飼育日数 (X <sub>1</sub> )	.029	.104	-.533*	-.096	-.065	.111	-.029	-.238	-.174
Z <sub>1</sub> 期の有効積算水温 (X <sub>2</sub> )		-.473*	.040	.344	.277	.739**	.161	.570*	.477*
Z <sub>2</sub> 期の " (X <sub>3</sub> )			-.057	-.060	.053	.244	.144	.065	.065
Z <sub>3</sub> 期の " (X <sub>4</sub> )				.186	.455	-.000	.660**	.555*	.556*
Z <sub>4</sub> 期の " (X <sub>5</sub> )					.567*	.332	.523*	.774**	.742**
M期の " (X <sub>6</sub> )						.346	.497*	.679**	.899**
Z <sub>1</sub> ~Z <sub>2</sub> 期の " (X <sub>7</sub> )							.287	.677**	.574*
Z <sub>1</sub> ~Z <sub>3</sub> 期の " (X <sub>8</sub> )								.720**	.675**
Z <sub>1</sub> ~Z <sub>4</sub> 期の " (X <sub>9</sub> )									.931**
Z <sub>1</sub> ~M 期の " (X <sub>10</sub> )									

\* : 5%水準で有意  
\*\* : 1%水準で有意

ただし  $V_e = (1 - r^2) \cdot S_{yy}$

$n$ : データ数  $S_{xx}$ :  $x$ の変動

$\bar{x}$ :  $x$ の平均  $S_{yy}$ :  $y$ の変動

$r$ : 相関係数

であり,  $y_0$ の99%予測区間は,

$$y_0: \hat{y}_0 \pm t(n-2, 0.01) \cdot E$$

で与えられる<sup>6)</sup>.

これらに(4)式の各値を代入すると,

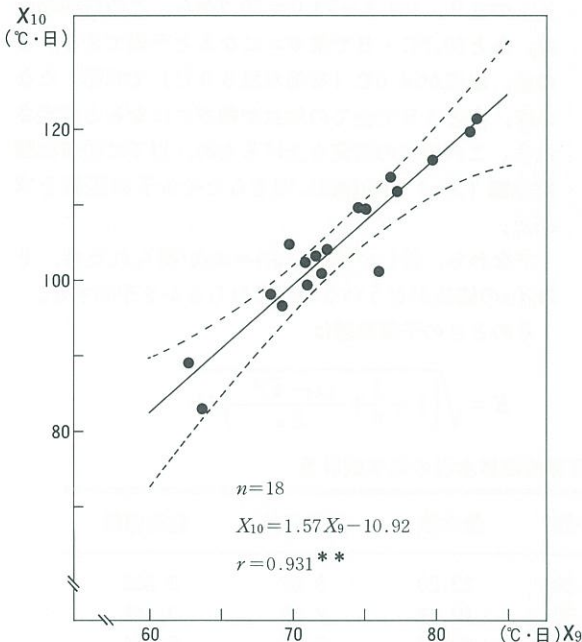


図2 X<sub>9</sub>とX<sub>10</sub>の散布図・回帰直線および99%予測区間

\*\* : 1%水準で有意

$$y_0: \hat{y}_0 \pm 2.921 \sqrt{\left\{ \frac{19}{18} + \frac{(x_0 - 77.448)^2}{33.974} \right\}} 0.800 \quad (5)$$

が与えられる。ここでは, 99%予測区間を求めるために  $t$  値に 2.921 を代入したが,  $t$  値に 2.120 を入れると, 95%予測区間が得られる。

このようにして, 全ての幼生がM期になった時点で, 18°Cを基準水温とした有効水温を積算し, その値を(4), (5)式に代入すると, M期幼生があとどの位で稚ガニに変態するかを予測, 推定できる。

M期以前の各令期からの予測式と予測区間を以下に示す。

**Z<sub>1</sub>期からZ<sub>3</sub>期までの有効積算水温 (X<sub>8</sub>) からの予測:**

Z<sub>1</sub>~Z<sub>3</sub>期の有効積算水温 (X<sub>8</sub>) と総有効積算水温 (X<sub>10</sub>) との関係は

$$X_{10} = 1.97 X_8 + 7.84 \quad (6)$$

で表わされ, 予測区間は

$$y_0: \hat{y}_0 \pm t(16, \alpha) \sqrt{\left\{ \frac{19}{18} + \frac{(x_0 - 48.802)^2}{15.772} \right\}} 2.170 \quad (7)$$

$\alpha$ : 危険率

で与えられる。

**Z<sub>1</sub>期からZ<sub>2</sub>期までの有効積算水温 (X<sub>7</sub>) からの予測:**

Z<sub>1</sub>~Z<sub>2</sub>期の有効積算水温 (X<sub>7</sub>) と総有効積算水温 (X<sub>10</sub>) との関係は

$$X_{10} = 1.92 X_7 + 43.81 \quad (8)$$

で表わされ, 予測区間は

$$y_0: \hat{y}_0 \pm t(16, \alpha) \sqrt{\left\{ \frac{19}{18} + \frac{(x_0 - 31.474)^2}{8.642} \right\}} 4.024 \quad (9)$$

で与えられる。

Z<sub>1</sub>期の有効積算水温 (X<sub>2</sub>) からの予測: 最も早い段階である, Z<sub>1</sub>期の有効積算水温 (X<sub>2</sub>) と総有効積算水温 (X<sub>10</sub>) との関係は

$$X_{10} = 1.44X_2 + 81.66 \quad (10)$$

で表わされ, 予測区間は

$$y_0: \hat{y}_0 \pm t(16, \alpha) \sqrt{\left\{ \frac{19}{18} + \frac{(x_0 - 15.524)^2}{10.468} \right\}} 4.634 \quad (11)$$

で与えられる。

以上のように, ガザミ種苗生産で飼育を開始して, 全ての幼生がZ<sub>2</sub>期になった段階で, まずZ<sub>1</sub>期の有効積算水温 (X<sub>2</sub>) を用いる(10), (11)式により総有効積算水温を予測し, 令期が進むにつれZ<sub>3</sub>期ではZ<sub>1</sub>~Z<sub>2</sub>期の有効積算水温 (X<sub>7</sub>) を用いる(8), (9)式, Z<sub>4</sub>期ではZ<sub>1</sub>~Z<sub>3</sub>期の有効積算水温 (X<sub>8</sub>) を用いる(6), (7)式そして全ての幼生がM期になった段階ではZ<sub>1</sub>~Z<sub>4</sub>期の有効積算水温 (X<sub>9</sub>) を用いる(4), (5)式により, おのおの総有効積算水温を予測し, その予測値 (および区間) から, 各令期の幼生が稚ガニになるまでの日数が推定できる。

## 考 察

本報では, 各令期の幼生があとどの位で稚ガニに変態するかを推定するために, 過去5年間の当センターにおける資料から, ガザミ種苗生産における基準水温として18℃を規定し計算を進め, 総有効積算水温の予測式を算出し, その精度を高めるため予測区間を設定した。

求めた予測式について, 昭和61年の当センターのガザミ種苗生産3飼育事例の資料を用いて, その有効性を検討した。事例ごとの18℃以上の, Z<sub>1</sub>~Z<sub>4</sub>期の有効積算水温 (X<sub>9</sub>) と総有効積算水温 (X<sub>10</sub>) の値 (x<sub>0</sub>とy<sub>0</sub>) は各々, 65.4と94.7, 70.2と101.8および72.6と101.1であった。このX<sub>9</sub>のx<sub>0</sub>から求めたX<sub>10</sub>の期待値 $\hat{y}_0$ とその99%予測区間を表5に示す。これによると, 昭和61年にガザミ種苗生産を行なった3飼育事例とも99%予測区間内であることがわかる。他の各令期までの有効積算水温からの予測も同様に3飼育事例とも99%予測区間内であった。これらの結果から本報で求めた予測式と予測区間は, 実際の使用にも耐え得るもの

表5 61年の観測値 (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>), 期待値 $\hat{y}_0$ と $\hat{y}_0$ の99%予測区間

水槽 No.	観 測 値		期 待 値	
	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	$\hat{y}_0$	$\hat{y}_0$ の99%予測区間
19	65.4	94.7	91.8	87.3~96.3
20	70.2	101.8	99.3	96.2~102.3
21	72.6	101.1	103.1	100.4~105.8

と思われる。

一般に, 植物や変温動物を対象として積算温度を論議する場合, 0℃を基準とするよりも一定温度を基準とした有効積算温度を用いるのが, 実際的とされている<sup>7)</sup>。本報でも0℃ではなく, 18℃を基準とした有効積算水温を用いて計算を進めたことにより, 予測式の精度は向上したものと考えられる。本報で用いた基準水温の18℃については, 現在全国各地でガザミ種苗生産が行なわれている中で, 近年18℃以下の温度でガザミ種苗生産を行なっている機関がほとんどないことからも<sup>8,9)</sup>, ほぼ妥当なものと考えられる。

なお, 本報の資料では, 各飼育事例の平均水温は22.9~26.0℃, 最低と最高水温は19.7と27.9℃である。これらは, 一般にガザミ種苗生産において安定した生産がえられることが多いとされる適水温<sup>10)</sup>の範囲内である。その資料として用いた18飼育事例は, 経過日数16~21日のものである。したがって, これらの飼育事例とは異なった飼育経過を示したりあるいは違った飼育方法を用いている他の種苗生産機関の事例では, 本結果とは必ずしも一致しない場合があることも予想される。本報の総有効積算水温の予測には, 他の機関の資料を用いておらず, 本報で求めた予測式の汎用化のためには, このような点について詳細に検討する必要がある。

## 要 約

昭和56~60年の当センターにおけるガザミ種苗生産飼育事例の資料を使用して, 統計的手法により, 幼生がふ化して稚ガニ (C<sub>1</sub>) に変態するまでに要する日数を推定するために総有効積算水温の予測を試みた。

- 1) 予測の精度を高めるため, 最適化法により基準水温18℃を探索し, これを基準とした有効水温を用いて計算を進めた。
- 2) 途中の各令期までの有効積算水温から総有効積

算水温 ( $X_{10}$ ) を求める予測式およびその予測区間を求めた。各予測式は

Z<sub>1</sub>期からZ<sub>4</sub>期までの有効積算水温 ( $X_9$ ) からの予測式が

$$X_{10}=1.57 X_9-10.92 \quad (4)$$

Z<sub>1</sub>期からZ<sub>3</sub>期までの有効積算水温 ( $X_8$ ) からの予測式が

$$X_{10}=1.97 X_8+7.84 \quad (6)$$

Z<sub>1</sub>期からZ<sub>2</sub>期までの有効積算水温 ( $X_7$ ) からの予測式が

$$X_{10}=1.92 X_7+43.81 \quad (8)$$

Z<sub>1</sub>期の有効積算水温 ( $X_2$ ) からの予測式が

$$X_{10}=1.44 X_2+81.66 \quad (10)$$

であった。

- 3) 予測式の有効性は、昭和61年の当センターの3飼育事例の資料により確かめられた。

## 文 献

- 1) 水産庁・日本栽培漁業協会編(1986)．昭和60年度栽培漁業種苗生産，入手・放流実績(全国)．373 pp.
- 2) 田畑和男・勝谷邦夫(1973)．ガザミ稚ガニ期における共喰い現象について．栽培漁業技術開発研究，2(2)，27～32.
- 3) 岩谷芳自・中島輝彦・大江秀彦(1983)．ガザミ種苗生産における稚ガニ期の生残率について．栽培漁業技術開発研究，12(1)，19～23.
- 4) 山田徹・伊藤史郎・伊賀田邦義・小澄千尋(1985)．ガザミ種苗生産．昭和55～58年度佐賀県栽培漁業センター事業報告書，20～27.
- 5) 近藤次郎(1984)．最適化法．コロナ社，280pp.
- 6) 応用統計ハンドブック編集委員会編(1980)．応用統計ハンドブック．養賢堂，827 pp.
- 7) 高橋史樹(1982)．個体群と環境．東京大学出版会，118 pp.
- 8) 高知県栽培漁業センター編(1984)．西日本種苗生産機関連絡協議会甲殻類分科会，ガザミ資料．
- 9) 鹿児島県栽培漁業センター編(1985)．西日本種苗生産機関連絡協議会甲殻類分科会，ガザミ資料．
- 10) 瀬戸内海栽培漁業協会(1978)．栽培漁業技術開発の歩み，178 pp.