

## 飼育密度がエゾアワビ稚貝の成長に及ぼす影響の遺伝学的検討

小林 俊将

### Genetic effect of rearing density on growth rate of juvenile abalone *Haliotis discus hannai*

Toshimasa Kobayashi

#### Abstract

Six families prepared by factorial mating ( $\text{♀} 3 \times \text{♂} 2$ ) of the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai*, were reared for 65 days in three different rearing densities with an adequate supply of artificial diet. Their growth rates were compared to estimate a genetic effect of rearing density among different rearing densities within the same family and among genetically different background families in the same rearing densities. Specific growth rates in shell length decreased with increasing rearing density in all families. Two-way factorial ANOVA of specific growth rate in shell length suggested that interaction of families and rearing densities was not significantly, and the specific growth rate in shell length of one family was significantly higher than that of the other families in all rearing densities. From the above results, it might be difficult to develop a low-sensitive strain for rearing density on growth rate.

**keywords** : *Haliotis discus hannai*, growth, rearing density, genetic factor

キーワード ; エゾアワビ, 成長, 飼育密度, 遺伝的要因

#### はじめに

エゾアワビ *Haliotis discus hannai* は、種苗生産技術が確立していることから、近年多くの地域で養殖されるようになってきた。しかし、エゾアワビの成長は遅いうえにばらつきが大きく、そのことが養殖を行ううえでの問題点として指摘されている<sup>1-3)</sup>。その背景として、エゾアワビは、天然において高い遺伝的変異性を保有していることが示され<sup>3-5)</sup>、養殖技術の改良とあわせて選択育種による種苗の遺伝的改良が期待されている。実際に、成長に関しては選択育種の有効性が指摘されている<sup>1-3, 6, 7)</sup>。

飼育密度はアワビ類の養殖にとって重要な環境要因の一つであり、飼育密度が高いと成長が遅くなるのがエゾアワビ<sup>11-14)</sup>、クロアワビ *Haliotis discus discus*<sup>15-17)</sup>、メガイアワビ *Haliotis gigantea*<sup>18)</sup>、*Haliotis tuberculata*<sup>19)</sup>、*Haliotis iris*<sup>20)</sup>、*Haliotis asinina*<sup>21)</sup> などでも報告されており、環境要因の一つである飼育密度がアワビの成長に大きな影響を及ぼしていることはよく知られている。したがって、成長において飼育密度の影響を受けにくい

系統、すなわち高密度でも良い成長を示す系統を作出できればアワビ養殖の効率化が期待できる。しかし、その可能性を探るために必要な、飼育密度と成長の間に遺伝的要因が介在するののかということについての研究はなされていない。

選択育種では、集団の中からより優良な遺伝子型を持つ個体を選択することが求められる。しかし、ファルコナー<sup>8)</sup>は、遺伝子型と環境の相互作用が大きければ最適な遺伝子型は環境ごとに異なり、ある環境で最適な遺伝子型が異なる環境でも最適であるとは限らないことを指摘している。したがって、飼育密度と成長の間に遺伝的要因が介在するの否かを知るためには、同一の遺伝的背景を持つ集団を異なる飼育密度で飼育した場合の成長と、異なる遺伝的背景を持つ集団を同一の飼育密度で飼育した場合の成長を調べ、それらの相互作用を解析することによって明らかにしなくてはならないと考える。しかし、海産無脊椎動物の成長に環境が及ぼす影響について、集団の遺伝的な違いに着目して検証した試みは少ない<sup>9, 10)</sup>。

本研究では、総当たり交配により作出したエゾアワビ

稚魚を対象に、遺伝的背景が異なる交配組を同じ密度および異なる密度で飼育し、その成長を調べることにより、飼育密度と成長の関係への遺伝的要因の関与について検証した。

### 材料と方法

(株)岩手県栽培漁業協会にて天然貝から生産したエゾアワビの種苗を岩手県水産技術センターで養成して親貝とし、その雌3個体と雄2個体の総当たり交配により6つの交配組を作出した。Table 1に示したように6つの交配組のうち交配組AとB、CとDおよびEとFは母親が同じで父親が異なる半きょうだいの関係、交配組AとCとEおよびBとDとFは父親が同じで母親が異なる半きょうだいの関係、交配組AとD、AとF、BとC、BとE、CとFおよびDとEは両親とも異なる全きょうだいの関係にある。各交配組それぞれから無作為に35~97個の稚魚を3セットずつ抽出して供試貝とした。これらの供試貝の殻には個体を識別するためのプラスチック片を水中ボンドで貼り付けた。

Table 1. Parents of each family.

Parents	♀No.			
	1	2	3	
♂No.	1	A	C	E
	2	B	D	F

飼育装置として、塩化ビニール製のシェルター (Fig. 1) を入れたトリカルネット製の飼育カゴ (95×75×30cm) を容量 2 m<sup>3</sup> の水槽に設置した。水槽には調温したろ過海水 (21.6±0.5°C) を換水率0.5回転/時になるように注入するとともにエアレーションを行った。

6つの交配組それぞれから抽出した供試貝を1つの飼育カゴに収容して1実験区とした。実験区は3区準備し、うち2区にはさらに供試貝とほぼ同じサイズの稚魚を加えて各区の収容数を264, 365, 513個とし、それぞれを低、中、高密度区とした。各区に収容した稚魚の平均殻長はTable 2に示したとおりで、市販のアワビ用配合飼料を充分量与えて65日間飼育した。

実験開始時の殻長のばらつきによる影響を排除するために、供試貝ごとに殻長の瞬間成長係数 ( $G_{SL}$ ) を算出して成長を評価した。殻長の瞬間成長係数は殻長に対する1日あたりの増殻長の割合を示すもので、Hopkinsら<sup>22)</sup>の手法に従い次式で求めた。

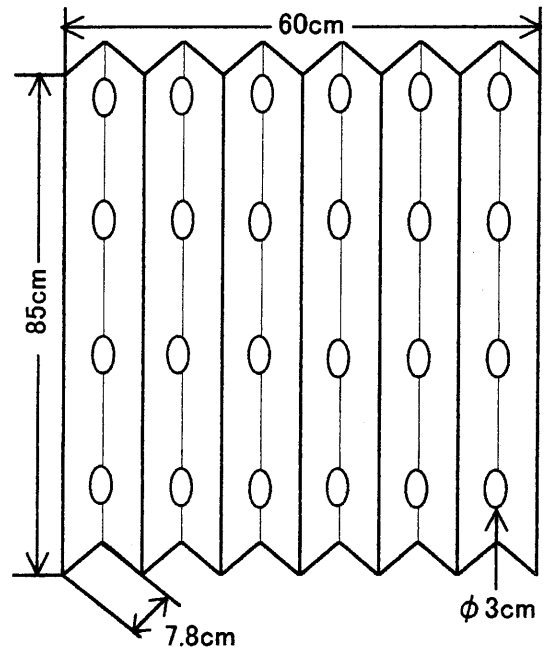


Fig.1. Structure of the shelter.

$$G_{SL} = \{(\ln SL_f - \ln SL_i) / T\} \times 100$$

SL<sub>f</sub> は実験終了時の殻長を、SL<sub>i</sub> は実験開始時の殻長を、Tは実験期間 (日数) を示す。

各交配組の各実験区での殻長の瞬間成長係数を、6つの交配組からなる要因と3段階の飼育密度からなる要因に分け、繰り返しのある二元配置分散分析により殻長の瞬間成長係数に対する交配組の効果と飼育密度の効果、およびその相互作用の有意性について検定した。また、各交配組の各実験区での殻長の瞬間成長係数から求めた変異係数を、6つの交配組からなる要因と3段階の飼育密度からなる要因に分け、繰り返しのない二元配置分散分析により殻長の瞬間成長係数の変異係数に対する交配組の効果と飼育密度の効果の有意性について検定した。各検定には統計ソフトStatcel<sup>23)</sup>を用いた。

### 結果

各実験区での各交配組の実験開始時の平均殻長と標準偏差 (SD)、実験期間中の平均増殻長と標準偏差および生残率をTable 2に示した。実験期間中の各交配組の平均増殻長は2.6mmから5.1mmであり、すべての実験区のすべての交配組で殻長の増加が認められた。また、低、中、高密度区における各交配組の生残率の平均はそれぞれ98.3%、100%、98.4%であり、各実験区の飼育密度に影響を

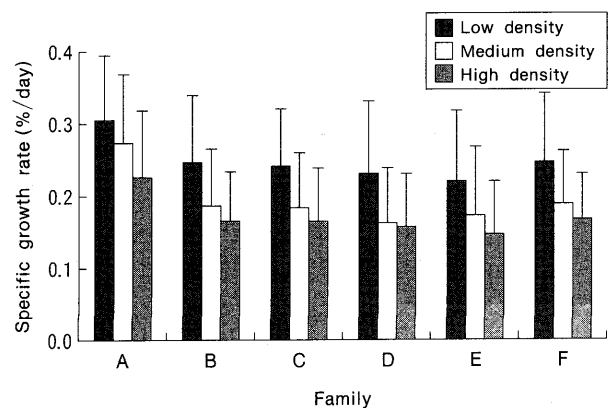
**Table 2.** Mean and standard deviation (SD) of initial shell length, mean and standard deviation of increases in shell length, and survival rate of each family of juvenile abalone reared for 65 days by three densities.

Experiment division	Family	Number of individuals /cage	Initial shell length	Increase in shell length	Survival rate (%)
			Mean $\pm$ SD (mm)	Mean $\pm$ SD (mm)	
Low density	A	40	27.9 $\pm$ 4.6	5.1 $\pm$ 1.5	97.5
	B	49	30.9 $\pm$ 5.5	4.5 $\pm$ 1.5	100
	C	40	29.3 $\pm$ 6.2	4.2 $\pm$ 1.5	92.5
	D	43	28.9 $\pm$ 6.3	4.0 $\pm$ 1.7	100
	E	35	27.9 $\pm$ 6.1	3.8 $\pm$ 1.9	100
	F	57	33.1 $\pm$ 5.6	4.9 $\pm$ 1.9	100
Medium density	A	40	28.1 $\pm$ 5.1	4.5 $\pm$ 1.3	100
	B	49	31.6 $\pm$ 5.9	3.5 $\pm$ 1.5	100
	C	41	29.3 $\pm$ 7.0	3.2 $\pm$ 1.4	100
	D	43	29.3 $\pm$ 6.1	2.8 $\pm$ 1.3	100
	E	35	27.5 $\pm$ 6.7	3.1 $\pm$ 1.9	100
	F	57	33.4 $\pm$ 5.7	3.7 $\pm$ 1.3	100
	G*	139	36.0 $\pm$ 3.7		
High density	A	39	28.1 $\pm$ 5.0	3.8 $\pm$ 1.3	100
	B	97	31.2 $\pm$ 5.3	3.0 $\pm$ 1.2	95.0
	C	38	29.2 $\pm$ 6.1	3.0 $\pm$ 1.4	100
	D	43	28.9 $\pm$ 6.0	2.6 $\pm$ 1.1	100
	E	35	28.3 $\pm$ 6.4	2.6 $\pm$ 1.3	97.1
	F	56	33.2 $\pm$ 5.7	3.3 $\pm$ 1.2	98.2
	G*	244	36.0 $\pm$ 3.7		

\*Group for adjustment of rearing density

及ぼすようなへい死はなかった。

各交配組の各実験区での瞬間成長係数をFig. 2に示した。いずれの交配組でも殻長の瞬間成長係数の平均値は、飼育密度が高い実験区ほど低い値を示した。同じ交配組で実験区が異なる場合の殻長の瞬間成長係数について有意差検定 (スチューデントの t 検定) を行った結果 (Table 3の縦横の項目がA-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-Fに当たる部分), 交配組Aの瞬間成長係数は低密度区と中密度区では有意差がなかったが, 高密度区が低密度区および中密度区よりも有意に小さかった。また, 交配組B, C, D, EおよびFの瞬間成長係数は, 中密度区と高密度区では有意差がなかったが, 中密度区と高密度区がいずれも低密度区より有意に小さかった。すべての交配組で瞬間成長係数は高密度区が低密度区より有

**Fig.2.** Specific growth rate in shell length of six families of juvenile abalone reared for 65 days by three densities. Error bar is standard deviation.

意に小さく、飼育密度の上昇にともない成長が停滞する傾向があった。

また、同じ実験区内の異なる交配組間で殻長の瞬間成長係数の有意差検定（スチューデントのt検定）を行った結果、母親が同じで半きょうだいの関係にある交配組（Table 3の縦横の項目がA-B, C-D, E-Fに当たる部分）のうち、交配組AとBの間では、いずれの飼育密度でも交配組Aの瞬間成長係数が交配組Bよりも有意に大きく、CとDおよびEとFの間では、いずれの飼育密度でも瞬間成長係数に有意差はなかった。さらに、父親が同じで半きょうだいの関係にある交配組（Table 3の縦横の項目がA-C, A-E, C-E, B-D, B-F, D-Fに当たる部分）のうち、交配組AとCおよびAとEの間では、いずれの飼育密度でも交配組Aの瞬間成長係数が交配組CおよびEよりも有意に大きく、交配組CとE, BとD, BとFおよびDとFの間では、いずれの飼育密度でも瞬間成長係数に有意差はなかった。さらに、両親とも異なる全きょうだいの関係にある交配組（Table 3の縦横の項目がA-D, A-F, B-C, B-E, C-F, D-Eに当たる部分）のうち、交配組Aと

DおよびAとFの間では、いずれの飼育密度でも交配組Aの瞬間成長係数が交配組DおよびFよりも有意に大きく、交配組BとC, BとE, CとFおよびDとEの間では、いずれの飼育密度でも瞬間成長係数に有意差はなかった。したがって、交配組Aの殻長の瞬間成長係数は、全きょうだい間、半きょうだい間に関係なく、他の全て交配組に対していずれの飼育密度でも有意に大きく（ $P < 0.01$ ）、Aを除く全ての交配組間の殻長の瞬間成長係数は、全きょうだい間、半きょうだい間に関係なく、いずれの飼育密度でも有意差がなかったことになる。

次に、殻長の瞬間成長係数に関する交配組の要因と飼育密度の要因による繰り返しのある二元配置分散分析の結果をTable 4に示した。交配組の要因と飼育密度の要因の相互作用変動は誤差変動と有意差がなく、交配組の要因と飼育密度の要因に相互作用は認められなかった。両要因に相互作用が認められなかったことから、各要因の効果を検定した結果、交配組の要因変動は誤差変動より有意に大きく（ $P < 0.01$ ）、交配組の違いに起因する瞬間成長係数の差が認められた。また、飼育密度の要因変動も誤差変動より有意に大きく（ $P < 0.01$ ）、飼育密度の

**Table 3.** Result of the student's t-test about specific growth rate in shell length.

Family	density	A			B			C			D			E			F		
		L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
A	L	ns	**	**				**			**			**			**		
	M		*		**			**			**			**			**		**
	H					**		**		**		**		**		**		**	
B	L				*	**	ns				ns			ns			ns		
	M					ns		ns			ns			ns			ns		
	H								ns		ns			ns			ns		
C	L							**	**	ns			ns				ns		
	M								ns		ns			ns			ns		
	H											ns			ns			ns	
D	L										**	**	ns				ns		
	M											ns		ns			ns		
	H														ns			ns	
E	L													*	**	ns			
	M														ns		ns		
	H																	ns	
F	L																**	**	
	M																	ns	
	H																		

\*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ ; ns=not significant

違いに起因する瞬間成長係数の差が認められた。

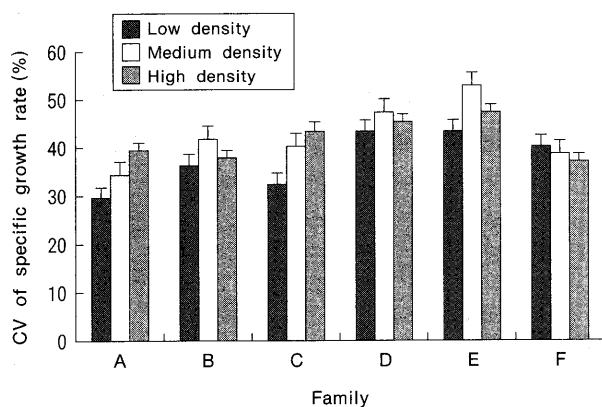
**Table 4.** Result of the two-way factorial ANOVA of specific growth rate in shell length by family and rearing density of juvenile abalone.

Source of variation	d.f.	MS	F
Family	5	0.126	18.984**
Density	2	0.416	62.696**
Family×Density	10	0.003	0.433
Error	812	0.007	

\*\* P<0.01

各交配組, 各実験区での殻長の瞬間成長係数の変異係数は, Fig. 3に示したとおり, 交配組A, Cでは低, 中, 高密度区の順, 交配組B, D, Eでは低, 高, 中密度区の順, 交配組Fでは高, 中, 低密度区の順で大きかった。また, 各実験区内の6つの交配組の殻長の瞬間成長係数の変異係数の平均は低, 中, 高密度区でそれぞれ37.7, 42.8, 42.1%であり, 低密度区で低い値を示した。

**Fig.3.** Coefficient of variation (CV) of specific growth rate in shell length of six families of juvenile abalone reared for 65 days by three densities. Error bar is standard error.



次に, 殻長の瞬間成長係数の変異係数に関する交配組の要因と飼育密度の要因による繰り返しのない二元配置分散分析の結果をTable 5に示した。各要因の効果を検定した結果, 交配組の要因変動は誤差変動より有意に大きく ( $P<0.01$ ), 瞬間成長係数の変異係数に, 交配組の違いに起因する差が認められた。また, 飼育密度の要因変動も誤差変動より有意に大きく ( $P<0.05$ ), 瞬間成長係数の変異係数に, 飼育密度の違いに起因するの差が認められた。

**Table 5.** Result of the two-way ANOVA of coefficient of variation of specific growth rate in shell length by the factor of family and rearing density of juvenile abalone.

Source of variation	d.f.	MS	F
Family	5	76.178	7.635**
Density	2	45.761	4.597*
Error	10	9.954	

\*\* P<0.01 ; \* P<0.05

## 考 察

本研究の結果は, 人工種苗を養成した個体からランダムに抽出した雌3個体, 雄2個体の総当たり交配によるものであり, 天然のエゾアワビが保有している遺伝的変異全体を反映したものとは言えない。したがって, 本研究結果についてはより多くの交配組での検証が望まれるが, 少なくともエゾアワビの成長に及ぼす遺伝的な影響と飼育密度の影響との関係を実験的に検証した初めての例である。

本研究において, 遺伝的な背景が異なる6つの交配組すべてで飼育密度の上昇にともなって殻長の瞬間成長係数が低下し, 成長が停滞する傾向を示した。また, 各交配組の低密度区から高密度区にかけての殻長の瞬間成長係数の低下幅は, 近縁度の異なる全きょうだい間, 半きょうだい間にかかわらずほぼ一定であり, 統計的にも交配組と飼育密度の相互作用は認められなかった。本研究の結果をみるかぎり, エゾアワビ稚貝の成長に対する飼育密度の影響は遺伝的な背景が異なる集団でも同じように現れ, ある飼育密度で遺伝的に成長が良い個体あるいは系統は, 異なる飼育密度でも遺伝的に成長が良い可能性が高いと考えられる。

本研究において, 交配組Aはいずれの飼育密度でも他の交配組より有意に成長が良かった。エゾアワビの成長については, すでに選択育種による遺伝的改良の有効性が示されている<sup>1-3, 6, 7)</sup>ことから, この交配組Aのような集団を選択することにより, 異なる飼育密度でも他の集団と比較して相対的に成長が良い系統の作出が期待できる。ただし, 交配組Aにおいても, 他の交配組と同じく飼育密度の増加にともない成長が低下していることから, 「成長において飼育密度の影響を受けにくい系統」の作出は容易でないと考えられる。

エゾアワビ<sup>14)</sup>および*H. tuberculata*<sup>19)</sup>の稚貝において, 飼育密度を高めると増殻長の変異係数が増加したことが

報告されている。本研究でも、殻長の瞬間成長係数の変異係数が中、高密度区と比較して低密度区で低い値を示す交配組が多かった。これは、飼育密度が上昇すると、飼育水槽内が物理的に混雑するため個体の行動の自由が制約され、水槽内で摂餌しやすい場所に居るか否かで個体間の摂餌量のばらつきが増加することがあるためと考えられる。常に餌がある飼育条件下でも、高密度になるにしたがって個体当たりの摂餌量が減少したことがエゾアワビ<sup>13)</sup> およびクロアワビ<sup>15)</sup> の稚貝で報告されているが、これも摂餌行動が制限されたことによるものであると考えられる。もし、飼育密度の上昇にともなう物理的な混雑の増大に起因して個体間の摂餌量のばらつきが増加したとすると、それにより生じた成長のばらつきは、遺伝分散よりも環境分散を多く含むと考えられる。

本研究の結果から、低密度で成長が良い個体は高密度でも成長が良い可能性が高いと考えられることから、成長が良いアワビ系統の作出を目標とした選択のための母集団の飼育は、環境分散が増加する可能性がある高密度下ではなく、低密度下で行うことが望ましいと考えられる。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたり、東北大学大学院農学研究科木島明博教授には原稿を校閲して頂いた。また、岩手県水産技術センター種苗開発部の支倉理部長および河原技術士事務所の河原郁恵技術士にはアワビを用いた飼育実験全般について多大なご指導・ご助言を頂いた。ここに記して深く感謝申し上げる。本研究は水産庁委託事業「水産生物育種効率化基礎技術開発プロジェクト」で行った。

## 文 献

- 1) 原素之：アワビの育種—アワビにおける選抜・交雑育種—。水産育種，**18**，1—12 (1992)
- 2) 河原郁恵・野呂忠勝・大森正明・支倉理・木島明博：種苗生産施設で選抜されたエゾアワビの成長に対する選択効果。水産育種，**25**，81—90 (1997)
- 3) 河原郁恵・野呂忠勝・大森正明・木島明博：エゾアワビ稚貝期の成長に関する遺伝率の推定。水産育種，**28**，95—103 (1999)
- 4) 古殿太郎・木島明博・藤尾芳久：エゾアワビ天然集団と人工種苗の量的形質と質的形質の遺伝的差異。水産育種，**22**，31—37 (1995)
- 5) 木島明博・古殿太郎・藤尾芳久：エゾアワビ天然集団における身入りの変異性と遺伝的変異性。水産育種，**22**，39—44 (1995)
- 6) 原素之：エゾアワビ人工種苗の親貝による成長の差異。水産育種，**14**，39—38 (1989)
- 7) 原素之：エゾアワビ人工種苗の成長に及ぼす遺伝的要因。東北水研研報，**52**，73—77 (1990)
- 8) D. S. ファルコナー：量的遺伝学入門 (田中嘉成・野村哲郎)，蒼樹書房，東京，1993，pp. 546.
- 9) P.D.Rawson and T.J. Hilbish : Genotype-environment interaction for juvenile growth in the hard clam *Mercenaria mercenaria*. *Evolution*, **45**, (8), 1924—1935, (1991)
- 10) 河原郁恵・野呂忠勝・大森正明・支倉理：高成長系統の作出及び雑種有効利用技術の開発。平成8年度新品種作出技術開発事業研究成果の概要，水産庁資源生産推進部研究指導課，東京，1998，pp. 470—485.
- 11) 渋井正・坂下利光：アワビ稚貝の成長に及ぼす密度効果試験。昭和45年度岩手県水産試験場年報，97—99 (1970)
- 12) 松平清・川村享・鈴木金一：エゾアワビ稚貝の飼育密度と成長の関係。昭和62年度宮城県栽培漁業センター報告，69—75 (1987)
- 13) 有吉敏和・野田進治：エゾアワビ稚貝の飼育法—II 中間育成時の飼育密度について。佐賀県栽培漁業センター研究報告，第1号，61—63 (1987)
- 14) 菊地省吾・松田利光・中野哲也：アワビ稚貝育成における巡流水槽の性能。日本水産学会誌東北支部会報，**39**，56—57 (1989)
- 15) 遠山忠次・佐藤秀一・水口啓子・金子信一：アワビ稚貝の成長生残に及ぼす飼育密度の影響について。千葉県水産試験場研究報告，**34**，1—11 (1975)
- 16) 石井克也：クロアワビ稚貝の飼育密度と成長，昭和63年度愛媛県栽培漁業協会業務報告。66—71 (1988)
- 17) 石田修：クロアワビの成長に及ぼす飼育密度の影響。水産増殖，**41**，(4)，431—433，(1993)
- 18) 小西光一・浮永久：アワビ・アコヤガイの優良形質評価手法。アワビ・カキ等の育種技術の開発，農林水産技術会議事務局，東京，1993，pp. 6—18.
- 19) Y. D. Mgaya, E. M. Gosling, J. P. Mercer, and J. Donlon : The effects of size grading and stocking density on growth performance of juvenile abalone, *Haliotis tuberculata* Linnaeus.

*Aquaculture*, **136**, 279–312, (1995)

- 20) C. B. Clarke, and R. G. Creese : On-growing cultured abalone, *Haliotis iris*, in northern New Zealand. *J. Shellfish. Res.*, **17**, 607–613, (1998)
- 21) E. C. Capinpin Jr, J. D. Toledo, V. C. Encena II, and M. Doi : Density dependent growth of the toropical abalone, *Haliotis asinina* in cage culture. *Aquaculture*, **171**, 227–235, (1999)
- 22) S. H. Hopkins : Reporting fish growth : A review of the basic. *J. World. Aquacult. Soc.*, **23**, 173–179, (1992)
- 23) 柳井久江 : 4 Steps エクセル統計, オーエムエス出版, 埼玉, 1998, pp. 279.