

アワビの循環式陸上養殖の研究

大島 義徳 井上 昌士
(本社テクノ事業創成本部)

前田 茂哉 金井 貴弘
(本社テクノ事業創成本部)

Study on Abalone Land Aquaculture using Full-Scale System

Yoshinori Oshima Masashi Inoue

Shigeya Maeda Takahiro Kanai

Abstract

In the current global environment involving significant changes, land aquaculture is expected to be utilized practically to promote the sustainable use of marine resources. Abalone is a species that has high market value and attention of people who want regional revitalization; however, examples of abalone being cultivated on land aquaculture up to adult mussels are few. Therefore, we conduct a study aiming at the practical application of aquaculture on abalone, which uses seawater repeatedly. A demonstration test performed to understand the production efficiency, e.g., the growth rate and mortality rate of growth term from 3–4 cm to approximately 7 cm, indicates a faster growth rate in land aquaculture than in natural sea areas, and that approximately one year of land aquaculture is required. It is discovered that the pH should be maintained above 8.0, and the water temperature maintained below 17 °C.

概要

地球規模での環境変化が著しい状況の中、海洋資源の持続的な利用を推進するために、環境負荷が少なく、安定した生産が可能な陸上養殖の実用化が期待されている。市場価値が高く注目されることが多い種としてアワビがあるが、アワビを成貝まで陸上養殖している例は少ない。そこで本研究では、アワビを対象とし、海水を繰り返し利用する循環式陸上養殖の実用化を目指した検討を行った。3～4 cmの稚貝から出荷サイズの7 cmまでの成長速度とへい死率など生産効率の把握を目指した実証試験を行った結果、天然の海域よりも速い成長速度を示し、およそ1年で出荷サイズまで成長させることができた。その結果、pHは8.0以上に保つ必要があること、水温は17°C以下に保つことでへい死率を低く抑えられることが分かった。

1. はじめに

日本の漁業と養殖業は、1980年代後半から生産量を急速に減らし、1990年代半ばから現在にいたるまで、養殖業が一部安定した収益を上げるようになっても、全体の傾向として穏やかに減少し続けている¹⁾。原因として、気候変動による藻場の減少など不可逆的な影響があることも分かってきており¹⁾、漁業資源の持続的利用に向けて新たな工夫が求められている。世界的には、漁業の生産量が横ばいなのに対し、養殖業が急速に伸びており²⁾、2012年には天然漁獲量を養殖が上回っている³⁾。日本でも他国と同様に養殖業を成長産業とし、地域の特色を活かした産業や、食糧自給率の向上に貢献することが期待される。

筆者らは、海に環境負荷を与えない飼育水を浄化しながら繰り返し利用する循環式陸上養殖に着目し、その実用化に向けた試みを行っている。アワビは、地域の観光などとも結びついており、漁業者の熱意にこたえる形で全国的に種苗生産施設が設けられ、放流事業が行われているが、漁獲量は減少している²⁾。上述のようにアワビの

棲息適地である藻場の減少が各地で進行していることから、陸上養殖によりアワビを安定的に育てることで地域固有のアワビ生産量を確保できる意義は大きい。一方で、アワビを出荷サイズまで育てる中間育成について、具体的なデータを伴う報告はほとんどなくまだ確立された技術とはなっていない。そこで、アワビの中間育成を対象とし、海水の必要量や環境影響が少ない循環養殖における成長速度とへい死率、肥満度などの生産効率を明らかにすることを目的として実証試験を行った。また、実証試験に先立って安定した飼育に必要な環境条件を明確にすることを目的とした飼育試験を行った。

2. 方法

2.1 検討概要

本検討は大きく2段階で実施した。まず、100L飼育試験を実施し、アワビを飼育するのに適切な飼育温度、および、アンモニアや亜硝酸、硝酸濃度などの耐性を確認した。

得られた条件を参考に、循環式実証試験を行い、実際

に1年で得られるアワビの成長速度やへい死率、肥満度などの生産効率の把握と、水温や水質、飼育密度など適切な管理項目と管理値を検証した。

2.2 100L飼育試験の方法

100L飼育試験の主な試験材料をTable 1に、試験装置の概要をFig. 1に示した。殻長が3~4 cmの市販種苗を購入し、人工飼料を用いて572日間飼育した。水槽は、100L容量(626 mm×426 mm×365 mm)の樹脂製コンテナを用い、約80 Lの人工海水を満した。人工海水は、市販されている人工塩を水道水に溶かして用いた。

主な飼育条件をTable 2に示す。温度は、始めの100日間は室温を15°Cで一定にすることで、16.0~16.5°Cで推移させた。その後室温を上げて、450日目までは16.5~17.0°Cに、その後は17.0~17.5°Cになるように調整した。目に見えるフンや残餌を吸い出す清掃を、週に2回実施した。

φ125 mm高さ500 mmの円筒形のピペット洗浄器にセラミック製の担体を充填したものを硝化装置として用いた。硝化装置に飼育水を一定流速でポンプアップし、一定水面以上に達するとサイホンで急速に排水されて、担体が乾湿を繰り返すことで好気性のアンモニア硝化細菌と亜硝酸酸化細菌を活性化させる。これにより、アワビのフンや残餌から溶出するアンモニアと亜硝酸を毒性の低い硝酸に酸化させた。セラミック担体は、飼育開始時に菌の付着が十分でなかったため、飼育試験と並行して有用菌の活性化処理を行った。十分なアンモニア硝化作用を発揮するまで別の容器で高濃度塩化アンモニウムを与えて曝気養生し、25日後に硝化装置に戻した。

水質の悪化を避けるため、Table 3に示す頻度で新たに作成した人工海水と飼育水を入れ替えた。25日目までは主にアンモニア濃度が上がり過ぎないように毎日30Lずつ水交換し、それ以降は、主に硝酸が上がり過ぎないようにするために週に30Lまたは20L交換した。また、市販の泡沫分離装置を設置し、有機物を除去した。

アワビの成長測定は、全数を対象に行い、測定時は取り出して、殻長と湿重量を測定した。アンモニアと亜硝酸、硝酸の濃度および、pHと塩分濃度を週2回測定した。pHは、7.5を下回らないよう、低下した場合は、炭酸ナトリウム塩を添加してpHを8.0に戻した。

2.3 循環式実証試験の方法

アワビの循環式実証試験は、室内に設置した実証装置を用いて、100L試験と同様に3~4 cmの稚貝を購入して、人工海水により、およそ1年、370日の飼育を行う中間育成を行った。利用した実証飼育装置をFig. 2とPhoto 1に、飼育中のアワビの様子をPhoto 2に示した。装置は、3 m³の飼育水槽を2つ備え、有機物やアンモニアなどの窒素化合物を処理する水処理施設を通して循環利用した。循環水量は、約7 m³/hとした。硝酸は、循環経路を分岐して、炭素源の生分解性プラスチックとセラミックス担体を充填した水槽に送り、電磁弁を一定期間閉じたあと開いて水

Table 1 主な試験材料

Materials	
項目	試験条件
稚貝	岩手県産エゾアワビ。生後9カ月。殻長3~4cm
飼育用海水	人工海水
飼料	アワビ用人工飼料ペレット

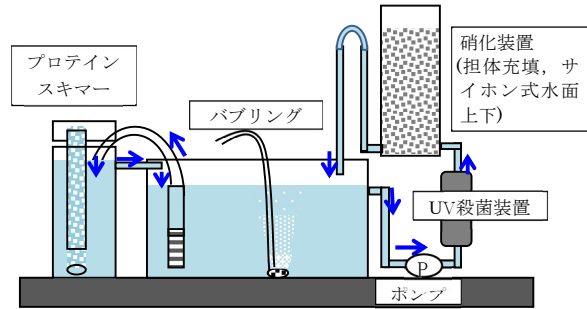


Fig. 1 100L試験装置の模式図
Outline of 100L Test Equipment

Table 2 100L試験飼育条件

100L Rearing Condition	
pH	7.5~8.0
塩分	29~31‰
水温	~100日 16.0~16.5°C
	~450日 16.5~17.0°C
	~572日 17.0~17.5°C
清掃頻度	2回/週

Table 3 飼育水の交換割合

Exchange Rate of Water		
期間	交換量	日あたり交換割合
~25日	30L/日	37 %
~160日	30L/週	5.3 %
~570日	20L/週	3.6 %

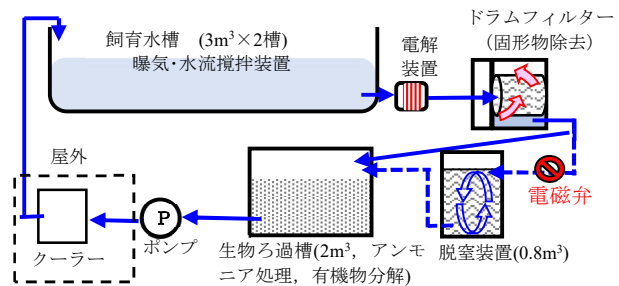


Fig. 2 循環式養殖実証装置の概要
Outline of Circulation Aquaculture Demonstration System



Photo 1 実証装置
Demonstration System

を入れ替える半バッチ式で自動処理できる脱室装置を導入した。固形有機物を除去するドラムフィルター(目開き60 μ m)の自動逆洗により、約120L/日(交換率約2%/日)が流入する以外は、水交換は行わずに、飼育水を積極的に交換せずに循環利用した。循環システムとは別に3 m³の一時貯留水槽を設置し、週に1度、飼育水槽から水を移し、水槽の水を完全に抜いた上で清掃を行った。一時貯留した飼育水は、別途ドラムフィルターを通した上で返送して再利用した。飼料は、アワビ用に市販されているペレットを用い、成長に合わせて、ちょうど食べきるように量を適宜調整した。

飼育密度が成長速度やへい死率に与える栄養を調べるため、飼育槽内をおよそ0.67 m²ごとに仕切り、条件を分けて飼育した。実施した試験区ごとの条件をTable 4に、実施した間引きの状況をTable 5に示す。アワビの殻幅は殻長の約0.7倍であることから、アワビが丁度収まる長方形は、殻長の2乗に0.7を乗じたもので近似できる。この長方形に個数をかけたものをアワビが占める面積とし、これを飼育区画の底面積で除したものを飼育密度と定義し、概ね100%未満で推移するように密度を調整した。

標準区は、飼育密度が60~90%となるよう初期値と間引き率を調整し、初期密度は63%となった。高密度区は、80-90%の密度になるよう調整、初期密度は77%であった。低密度区は、試験開始90日後に、標準区と同様に飼育していた区を半分に分けて、標準区の半分の密度で飼育を開始した。その後も、標準区よりも十分に密度が低くなるように間引きを行い、68%以下の飼育密度で推移した。生育の悪い個体は必ず存在するため、間引きは効率的な飼育には必須と考え、なるべく小さい個体を選んで実施した。

Table 6に主な水質測定管理項目を示した。水温は、設定値の0.5 $^{\circ}$ Cの上下幅となるよう自動制御した。16 $^{\circ}$ Cから段階的に設定温度を上げ、17 $^{\circ}$ Cに上げたところで、へい死が収まらなかったため、16.5 $^{\circ}$ Cに下げて一定とした。pHと塩分、硝酸等は、2回/週で測定し、必要に応じて塩類の添加などで管理値を維持した。pHは、飼育初期にPhoto 3に示すように殻の表面が溶けて内部層が見える銀化と呼ばれる傾向が一部の個体に見られたこともあり、8.0以上を保つように炭酸ナトリウム塩を添加した。

アワビの成長は月に1回、殻長と湿重量を測定した。計測はアワビへの大きなストレスになるため、ランダムに抽出した30個体を対象に測定した。低密度区では、全体



Photo 2 アワビの様子
Abalones in Culture

Table 4 実証試験の試験ケースごとの条件
Setting of Cases for the Demonstration Test

区画名	概要	初期殻長 (cm)	初期個体数	初期飼育密度 (%)	連数
標準区	飼育に適切とされる飼育密度 60~90%の範囲で飼育した	3.66	450	63%	3
低密度区	当初は標準区同様、90日から標準区の半分の密度に設定	3.69	450→204 (90日)	63%→37% (90日)	2
高密度区	アワビの上限密度とされる100%に近い77~109%設定	3.63	550	77%	1

Table 5 間引き実施日と個数
Thinning Number and Date

区画名	間引き個数					合計間引き率
	147日	214日	277日	335日	合計	
標準1	120	30	10	20	180	40%
標準2	120	25	25	30	200	44%
標準3	120	30	20	30	200	44%
低密度1	0	16	11	20	57	28%
低密度2	0	15	20	20	55	27%
高密度	160	35	10	30	235	44%

Table 6 水質調整範囲
Water Quality Adjustment Range

項目	設定値	項目	設定値
pH	8.0~8.3	水温 ±0.5 $^{\circ}$ C	~16日:16.0 $^{\circ}$ C
塩分	30‰以上		~31日:16.5 $^{\circ}$ C
アンモニア	0.2 mg/L 未満		~61日:17.0 $^{\circ}$ C
亜硝酸	0.02 mg/L 未満		以後 16.5 $^{\circ}$ C
硝酸	50 mg/L 未満		



Photo 3 銀化したアワビ
Abalone with Silver Changed Shell

数が少ないため20個体を対象とした。

3. 結果

3.1 100L飼育試験の結果

100L飼育試験において、30個体のうち、2個体が405日後の計測時の取り扱い時に傷ついたためにへい死したものの、成長不良によるへい死はなく28個体が572日後まで生存し続けた。

飼育期間の殻長およびアワビ重量の経時変化をそれぞれFig.3とFig.4に示す。殻長は、平均で3.5 cmから7.2 cmに成長した。最大では8.5 cmに達したものがあり、最低でも6.0 cmであった。重量は、平均で6.3 gから52 gに成長し、最大では81 gであった。

期間ごとの投餌量と肥満度、飼料要求効率をTable 7に示す。肥満度は、体重(g)を殻長(cm)の3乗で除した指標で、殻に対して体が充実していれば値が大きくなる。天然のアワビでは0.11~0.14程度が多い。飼料要求効率は、ある期間に与えた飼料の風乾重量の合計を湿重量の変化量で除したもので、湿重量が1増えるのに必要とされる飼料量を示し、この値が少ないほど経済的な養殖が可能になる。全期間での飼料要求効率は0.60であった。

3.2 循環式実証試験の結果

循環式実証試験における殻長の経時変化をFig. 5に示す。密度条件による差はほとんどなく、同一ケース内の差と同程度であった。370日と約1年の飼育で、3.6 cmの殻長が約6.5 cmと3 cm程度成長した。

月間のへい死数を全体数で割り、1年間同じペースでへい死するとした年間あたりに換算したものをFig. 6に示す。30日から60日の期間に50~70%と高いへい死率を示した後、概ね安定し、概ね20%程度で推移した。

肥満度の経時変化をFig. 7に示した。肥満度の傾向は、ケースごとの差はほとんどなかった。各区画とも、90日で最高になり、0.18~0.19まで増加した後、概ね0.145~0.17で推移し、最後は0.14~0.15であった。当初目標とし

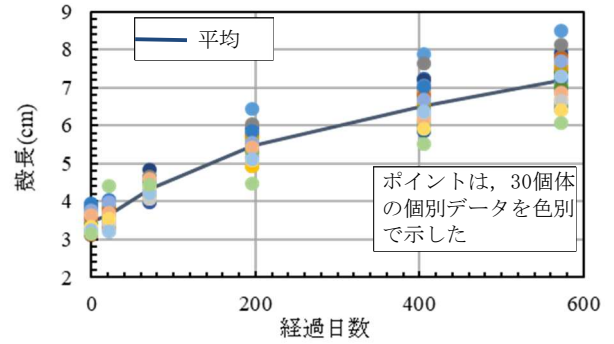


Fig. 3 100L飼育試験の殻長の経時変化
Shell Length of 100L Aquaculture

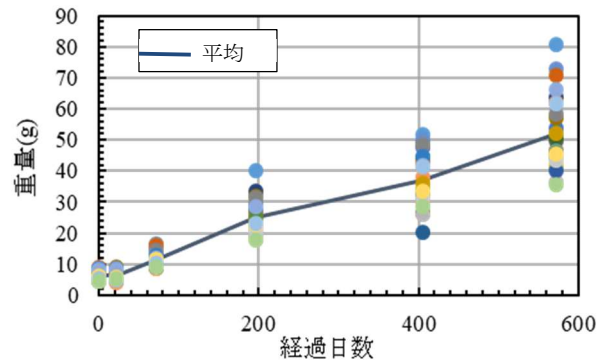


Fig. 4 100L飼育試験の重量の経時変化
Shell Weight of 100L Aquaculture

Table 7 投餌量と肥満度
Feeding Amount and Body Mass Index

飼育日数	開始	~22	~71	~196	~405	~572	全期間
期間投餌量(g)		29	74	517	951	865	865
飼料要求効率		*	0.48	1.3	2.6	1.9	0.60
肥満度	0.150	0.129	0.143	0.153	0.134	0.140	

表中*は、体重変化がマイナスで算出不能

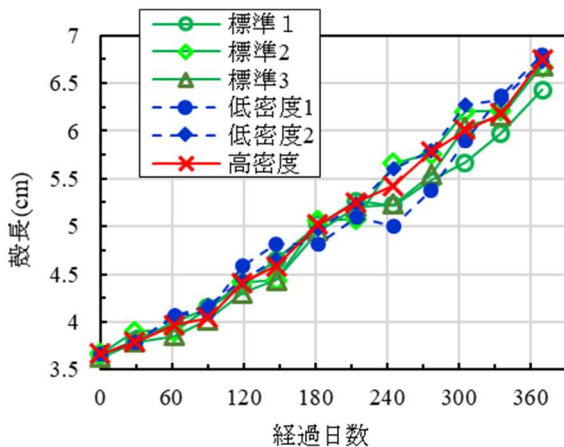


Fig. 5 殻長の経時変化
Shel Length Change

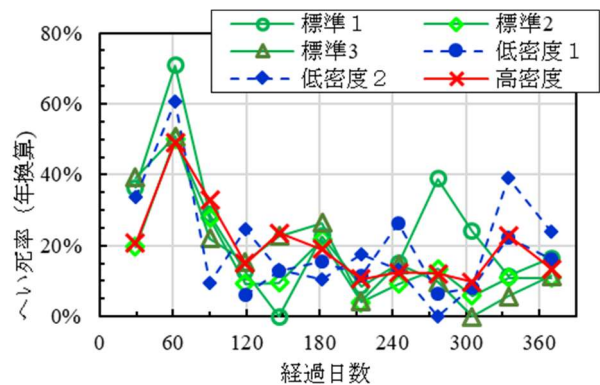


Fig. 6 月間へい死率(年換算)
Monthly Death Rate (Annualized)

ていた、0.145以上という目標をほぼ達成できた。最終計測時のアワビの例をPhoto 4に示す。概ね肥満度が0.145程度のアワビであるが、多くの天然のアワビに比べても十分に身が詰まった状態であることがうかがえた。

飼料要求効率をTable 8に示す。飼料要求効率は、期間ごとにばらつきが見られたものの、全期間を通じてみた場合に、1.1~2.5であった。ケース間の差は、同一ケース内の期間でのばらつきよりも小さく、飼育密度が飼料要求効率に与える影響はほとんどないことが示唆された。これら全ケースの平均の飼料要求効率は1.81で、投入した飼料の55%の重量増加が得られたことになる。

4. 考察

4.1 循環式陸上養殖でのアワビの成長速度

天然アワビの殻長の成長近似曲線として報告³⁾があるvon Bertalanffy近似を用いて、100L試験の結果と循環養殖試験の殻長の経時変化を近似することを試みた。その結果を、それぞれFig. 8とFig. 9に示す。

von Bertalanffy近似は、式(1)に示すように、殻長L cmを生長期間t年の関数として表現するもので、成長速度係数kが大きいほど、ある目標殻長に育てるまでの必要期間は短くなる。

$$L = \alpha \cdot (1 - \exp(-kt + \beta)) \quad \text{--- (1)}$$

L : 殻長(cm)

k : 成長係数(/年)

t : 飼育期間(年)

α : 想定最大殻長(cm)

β : 期間補正定数

Fig. 8より100L水槽における成長係数は0.36 /年であり、Fig. 9より循環式実証試験の成長係数は0.49 /年であった。

天然アワビについて、同様に近似の成長速度を求めた調査報告例^{3),4)}と本実験結果との比較をTable 9に示す。秋田県と千葉県のエゾアワビの近縁種のクロアワビにおいては0.25~0.32 /年の成長であり、今回の実証試験や100L飼育試験はこれを上回っている。特に実証試験においては、1.5~2倍の成長係数であった。

4.2 飼育環境について

循環式実証試験において、Fig. 9のように、初期の3カ月程度の成長が遅く、そこから成長が速くなる傾向が見られた。成長の遅い期間は最適温度を求めて、温度を徐々に上げていた期間であり、温度を16.5°C(±0.5)設定としてから成長が安定したと考えられる。また、この期間はへい死亡率が高かった期間とも重なる。岩手県産エゾアワビの種苗に関しては、温度を17°C以下にすることで成長が安定することが示唆された。初期の成長低下がなければ

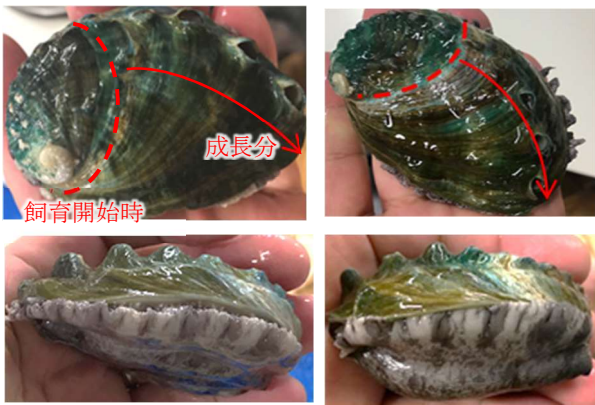


Photo 4 最終計測時のアワビの様子
Abalones at the Final Measurement

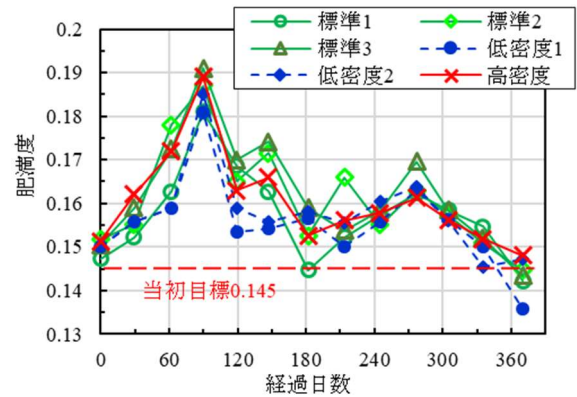


Fig. 7 肥満度の経時変化
Body Mass Index Changes

Table 8 飼料要求効率
Feed Conversion Ratio

区画名	経過日数												全期間
	~29	~62	~90	~119	~147	~182	~214	~245	~277	~305	~335	~370	
標準 1	1.74	1.52	2.37	3.50	1.80	4.06	1.18	*	1.89	4.25	2.02	1.91	2.00
標準 2	1.08	2.34	2.29	4.44	5.82	1.08	2.86	1.07	3.15	1.42	*	1.64	2.04
標準 3	1.49	2.58	2.34	4.50	2.98	1.15	1.76	6.75	1.12	1.13	20.8	1.20	1.79
低密度 1				1.95	1.85	50.5	1.95	*	1.06	0.98	1.20	2.50	1.08
低密度 2				4.44	5.82	1.08	2.86	1.07	3.15	1.42	*	1.64	2.50
高密度	1.41	1.29	3.66	2.67	2.09	1.54	1.13	1.63	0.96	2.18	4.64	0.73	1.47

全期間は、合計投餌量を、期間ごとの湿重量の増減とその時の個数の積の全期間の総和で除したもの。ただし、低密度のケースについては、90日後に分割して以降とした。表中*は、成長がマイナスで算出不能。

ば、1年で3.5 cmを7 cmに成長させる速度である。再現性など確認する必要があるものの、7 cmまで成長させるために必要な中間育成期間は、1年程度と推定される。

殻長の成長がやや遅かった初期期間では、肥満度は上昇し、平均で0.18~0.19に達した。これは良好なかけ流し養殖の例から定めた目標値を大きく上回っている。この期間に殻長成長は十分でなかったことを考えると肥満度が高すぎると、なんらかのストレスで殻長成長が滞っている可能性がある。したがって、少なくとも飼育途中にあつては高すぎる肥満度の場合には、飼育環境の不具合があることを疑ってみる必要があることが示唆された。

また初期には、一部の貝に銀化が見られた。100L水槽では、pHが8をやや下回る範囲で調整して、銀化は起こらなかったが、実証規模の飼育では、部分的に銀化が見られた。pHを8.0~8.5に保つてからは、銀化が起こらなかったため、pHは8.0を下回らないことが重要であることが示された。

飼育密度は、37%~109%で比較したが、この範囲内では成長速度やへい死率には影響しないことが示された。

以上のことから、エゾアワビの中間飼育に関して、pHは8.0以上に保つ必要があること、水温は17℃以下に保つことで十分な肥満度で成長させられることが分かった。ただし、良好な飼育環境であっても、1~2割のへい死率は見込む必要があることも示唆された。

5. まとめ

人工海水を用いた循環式陸上養殖の循環式実証試験を行い、成長速度やへい死率など生産効率を明らかにすることを試みた。その結果、天然よりも成長係数が1.5~2倍に促進され、1年で3~4 cmの稚貝を7 cmの出荷サイズまで養殖が可能であることが分かった。へい死は20%程度と見込まれた。

また、アンモニアや亜硝酸、硝酸などへの耐性や適正なpH、水温の管理値の知見を得た。飼育密度は概ね109%以下であれば、成長速度やへい死率に与える影響がないことが示唆された。

本検討により、少ない海水を循環して用いることで、生じる排水を削減し環境負荷の少ないアワビの中間育成が可能であることが分かった。

今後、再現性を確認し、コストの検討を加えることなどにより、この飼育方法の確実性の向上と経済合理性の改善を達成することが課題である。これらの課題に取り組み、この飼育方法を実用化することで、海洋資源の持続的利用や地域活性化に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 水産庁：令和元年度水産白書，2020
- 2) 小島博：日本産アワビ類の諸問題と今後の課題，豊かな海No.36，pp.49-56，2015
- 3) 松石隆ら：アワビの成長曲線について，北海道大学

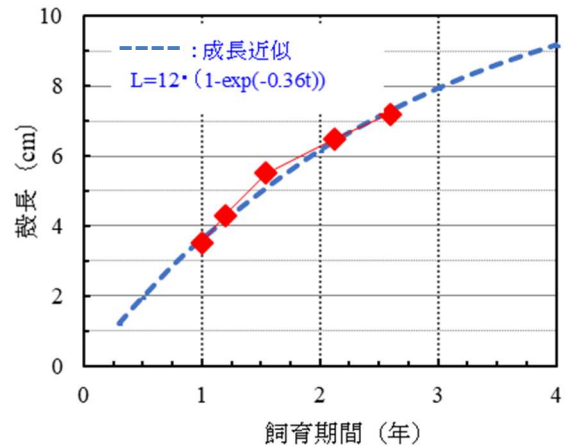


Fig. 8 100L飼育試験の殻長変化と近似曲線
Shell Length and Approximate Curve at 100L Culture

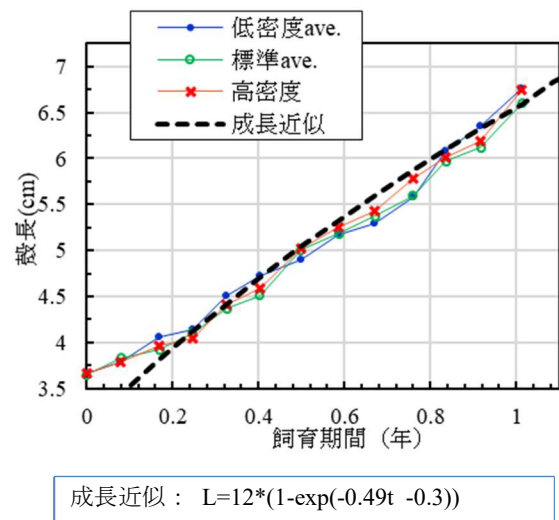


Fig. 9 循環式実証試験の殻長変化と近似曲線
Shell Length and Approximate Curve at 100L Culture

Table 9 天然アワビの成長係数との比較

Comparison with Growth Coefficient				
出典	アワビ区分	種	成長係数 (/年)	最大殻長 (cm)
本試験	100L	エゾ	0.36	12.0
	実証標準	エゾ	0.49	12.0
	実証間引き	エゾ	0.30	12.0
秋田県調査	自生種	クロ	0.30	12.5
	人工種苗	エゾ	0.28	11.5
	北海道産	エゾ	0.32	10.
千葉県調査	川津	クロ	0.25	18.8
	川下	クロ	0.27	17.7

水産学部研究彙集，No.46，pp.55-62，1995

- 4) 田中邦三ら：千葉県沿岸のクロアワビの年齢と成長について，日水研報告No.31，pp.115-127，1980