

海洋深層水を利用した多段養殖システムにおける栄養塩濃度の日周変動と収支

Diel fluctuations in nutrient concentrations and flow in an integrated culture system using deep seawater

辻本 良¹・松村 航¹・渡辺 健^{1,2}・大津 順¹

Ryo TSUJIMOTO¹, Wataru MATSUMURA¹, Ken WATANABE^{1,2} and Jun OHTSU¹

Abstract

Diel fluctuations in concentrations of nutrients (ammonia-N, nitrate & nitrite-N, phosphate-P) and their flow were determined in an integrated culture system (started on Nov. 18, 2003) using deep seawater (DSW) pipelined from a depth of 321 m in Toyama Bay, Sea of Japan. In the system, ezo-abalone, *Nordotis discus hawaii* (260 shells, 6.19 kg on Aug. 26, 2004) were cultured in two indoor tanks (60 l in water volume (w. v.)) by using fresh warmed DSW (18 °C) and the wastes were supplied to an indoor tank (14 °C, 400 l in w. v.) in which barfin flounder, *Verasper moseri* (30 fishes, 21.0 kg), were cultured. The waste from the latter tank was used in another outdoor tank (10 °C, 3600 l in w. v.) in which makombu kelp, *Saccharina japonica* (600 plants, 55.8 kg) were cultured. For chilling, intact DSW (3 °C) was supplemented to the barfin flounder and kelp tanks. Nutrient outputs from the abalone and barfin flounder tanks and uptake in the makombu kelp tank were determined every hour on Aug. 25, 2004. On the day, abalones and barfin flounders were fed 450 g/tank of cut-off blade of kelp cultured in the system at 16:00 and 95 g/tank of artificial compounds at 9:30, respectively. The two notable features of nutrient variation were (1) increase of ammonium-N level in barfin flounder tank and its uptake in makombu kelp tank and (2) increase of other nutrients in ezo-abalone tank just after feeding. The utilization of ammonia-N, nitrate & nitrite-N and phosphate-P by makombu kelp were calculated to be 38 %, 6 % and 12 % from the difference of nutrient concentrations between supply and drainage. The low utilization rates of nutrients suggest that enlargement of the kelp biomass can improve the nutrient utilization in this system.

Key Words: integrated culture, deep seawater, abalone, kelp, barfin flounder, nutrient

要 旨

富山湾の水深321mから汲み上げた海洋深層水を利用して、エゾアワビ、マツカワ、マコンブの順に飼育する多段養殖システムの開発研究を行った。このシステムのなかで、栄養塩（アンモニウム塩、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩）濃度の日周変動と収支を調べた。エゾアワビは、屋内水槽（60l容量×2基）に260個体、6.19kgを収容し、18°Cに加温した深層水を用いて飼育した。この排水を屋内水槽（400l容量）に注水し、マツカワ30個体、21.0kgを飼育した。さらに、マツカワを飼育した排水を屋外水槽（3600l容量）に注水し、マコンブ600藻体、55.8kgを培養した。マツカワ水槽とマコンブ水槽には、深層水原水（3°C）を混ぜることによってそれぞれ14°C及び10°Cに調温した。エゾアワビには、マコンブ水槽で培養したマコンブを剪定し、16:00に

¹富山県水産試験場（〒936-8536 富山県滑川市高塚364）

²現所属機関：富山県水産漁港課（〒930-8501 富山市新総曲輪1-7）

1水槽あたり450 gを給餌した。マツカワには、9:30に配合餌料95 gを給餌した。2004年8月25日にそれぞれの水槽の注水と排水の栄養塩濃度を毎時測定し、水槽ごとの栄養塩収支を求めた。その結果、エゾアワビ水槽とマツカワ水槽において栄養塩の排出が、マコンブ水槽において吸収が確認された。このシステムにおける栄養塩濃度には2つの特徴が確認された。すなわち、(1)マツカワ水槽排水におけるアンモニウム塩濃度の上昇とマコンブ水槽による吸収(水槽段階による変化)、(2)エゾアワビ水槽におけるマコンブ給餌後の硝酸塩+亜硝酸塩+リン酸塩濃度の上昇(日周変動)であった。マコンブの栄養塩吸収割合を給水と排水の栄養塩濃度差から算出したところ、供給量のうちアンモニウム塩、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩をそれぞれ、38%, 6%及び12%吸収していた。マコンブによる栄養塩吸収割合が低かったことから、マコンブ培養量を増加させることによって、さらに栄養塩を効率良く利用できるシステムの構築が可能であることが示唆された。

キーワード：多段養殖、海洋深層水、アワビ、マコンブ、マツカワ、栄養塩

緒 言

海洋深層水には低温性、富栄養性、清浄性及び安定性といった特徴がある。これらの特徴を利用した海洋温度差発電や水産物の集約生産に利用する研究が行われ、植物プランクトン、二枚貝、海藻などの多段生産が検討された(Othmer and Roels, 1973)。本邦においては、水産分野、エネルギー分野における深層水の多段利用が、中島・豊田(1994)、高橋(2000a, b)によって提案されている。富山県では、深層水の特徴を生かし、水産生物の多段養殖システムを構築するため、エゾアワビ *Nordotis discus hawaii*、マツカワ *Verasper moseri* 及びマコンブ *Saccharina japonica* を対象とした養殖実証試験を行った(マリノフォーラム21, 2005)。エゾアワビやマツカワは高級水産物で、比較的低水温でも成長が良いことから、深層水の低温性を生かした養殖技術の開発が期待されている(藤田ら, 2006; 安藤ら, 1999; 松田, 2003)。マコンブは、深層水に多く含まれる栄養塩を吸収して生長し、深層水の富栄養性を利用できるばかりでなく、魚介類から排出される栄養塩、特にアンモニウム塩を吸収することによって飼育排水の浄化も期待できる。また、培養したマコンブの介在生長を利用しエゾアワビの餌料とする自給型アワビ養殖も提案されている(松村・藤田, 2002)。多段養殖システムにおいて、深層水に含まれる栄養塩と飼育生物から排出もしくは吸収される栄養塩の濃度変化と収支は、飼育生物量を決定する際の重要な要因となる。今回、エゾアワビ、

マツカワ及びマコンブを用いた上記の深層水多段養殖システムを開発するなかで、栄養塩の日周変動とその収支について知見が得られたので報告する。

1. 材料と方法

多段式システムの概要

試験は、富山県水産試験場内の多段利用研究棟において実施した。試験に用いたエゾアワビ、マツカワ及びマコンブによる多段飼育試験の概略図をFig. 1に示す。飼育水は、富山県滑川市沖距岸2.7 km、水深321 mから汲み上げた富山湾深層水日量3000トン(奈倉, 2000)のうち日量約47トンを使用した。

エゾアワビ水槽は、150 l プラスチック水槽(95×62×26 cm)内にネット籠を設置し、実容量を60 lとした。この水槽を並列に2基設置し、それぞれエゾアワビ水槽 A₁, A₂とした。飼育水は、約3 °Cで汲み上げられた深層水原水をボイラーで約18 °Cに加温し、a₁, a₂からそれぞれ4 l min⁻¹で注水した。また、それぞれの排水 a₁b, a₂b からマツカワ水槽 Bへ注水した。

マツカワ水槽 Bは、800 l FRP水槽(150×90×60 cm)を用い、水位を調整し実容量を400 lとした。マツカワ水槽には、エゾアワビ飼育排水 a₁b 及び a₂b をそれぞれ4 l min⁻¹ずつ、深層水原水 dsw1(約3 °C)を4 l min⁻¹の合計12 l min⁻¹を注水し約14 °Cに調温した。

マコンブ水槽 Cは、4000 l FRP水槽(300×

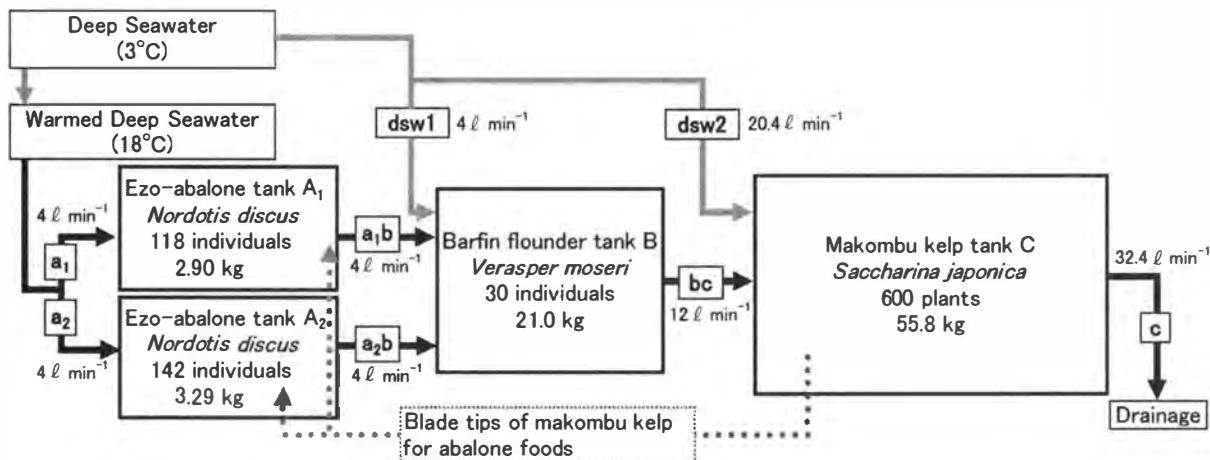


Fig. 1. Schematic diagram showing the integrated culture system in which pipelined deep seawater is flown and the waste is used in the downstream cultures. Water quality (temperature, pH, DO and nutrients were monitored at points a₁, a₁b, bc and c. Solid and shaded arrows indicate flow of warmed and intact deep seawater, respectively. Dotted line indicate food supply for ezo-abalone.

145×90 cm) で実容量を 3600 l とした。マコンブ水槽には、マツカワ飼育排水 bc を 12 l min⁻¹ 及び深層水原水 dsw2 を 20.4 l min⁻¹ の合計 32.4 l min⁻¹ を注水し、約 10 °C に調温した。1 基につきマコンブ 50 藻体を植えた基盤 (40×40 cm) を 12 基投入した。

飼育生物と飼育条件

エゾアワビ種苗（コスモ海洋牧場株式会社産）は、2003 年 11 月 18 日から当試験場において飼育を開始し、2004 年 8 月 26 日の平均体重土標準偏差（以下 SD と記す）は、水槽 A₁ で 24.6 ± 6.0 g（貝殻含む湿重量、以下同じ）、118 個体、総重量 2.90 kg、水槽 A₂ では 23.2 ± 5.7 g、142 個体、3.29 kg であった。餌としては、マコンブ水槽 C において培養したマコンブの葉状部の先端を切り取って月水金の週 3 回給餌し、水質測定日の 2004 年 8 月 25 日には 16:00 に A₁、A₂両水槽に 450 g（湿重量）ずつ与えた。

マツカワ（社団法人日本栽培漁業協会厚岸事業場（現独立行政法人水産総合研究センター厚岸栽培漁業センター）産）は、2003 年 11 月 18 日から当試験場において飼育し、2004 年 8 月 26 日の時点では、平均体重土 SD が 702 ± 92.0 g、30 尾、総重量 21.0 kg であった。マツカワには毎日給餌を行い、水質測定日には 9:30 に配合餌料（マルハ株式会社

ひらめ育成 6 号）95 g を与えた。

マコンブ 1 本あたりの平均重量土 SD は 93 ± 34 g、600 本の総湿重量は 55.8 kg であった。マコンブは上述したとおり生長に伴い先端部を剪定し、エゾアワビの餌料として利用した。

水質の分析

水質の測定は、各水槽の注水と排水の 4 ヶ所、すなわち a₁、a₁b、bc 及び c において行った（Fig. 1）。採水は、2004 年 8 月 25 日の 4:00 から 24:00 までの正時に 1 時間に 1 回ずつ行った。なお、加温深層水（18 °C）は深層水原水（3 °C）をボイラード加温して使用したため、加温によって栄養塩の濃度が変化しないことを確認したうえで、a₂、dsw1、dsw2 から注水した栄養塩濃度は a₁ と同じ濃度とみなした。

栄養塩、すなわちアンモニウム塩、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩の分析は、それぞれ、インドフェノールブルー吸光光度法、銅・カドミウム還元ナフチルエチレンジアミン吸光光度法及びモリブデンブルー吸光光度法によって、フローインジェクション分析装置（アクア・ラボ社製）を用いて行った。アンモニウム塩は採水後ただちに分析し、それ以外の栄養塩は冷凍保存し、後に解凍して測定した。なお、8 月 26 日の 1:00～3:00 は水質測定を行わなかったため、24 時と前日の 4:00 の数値から内挿した。

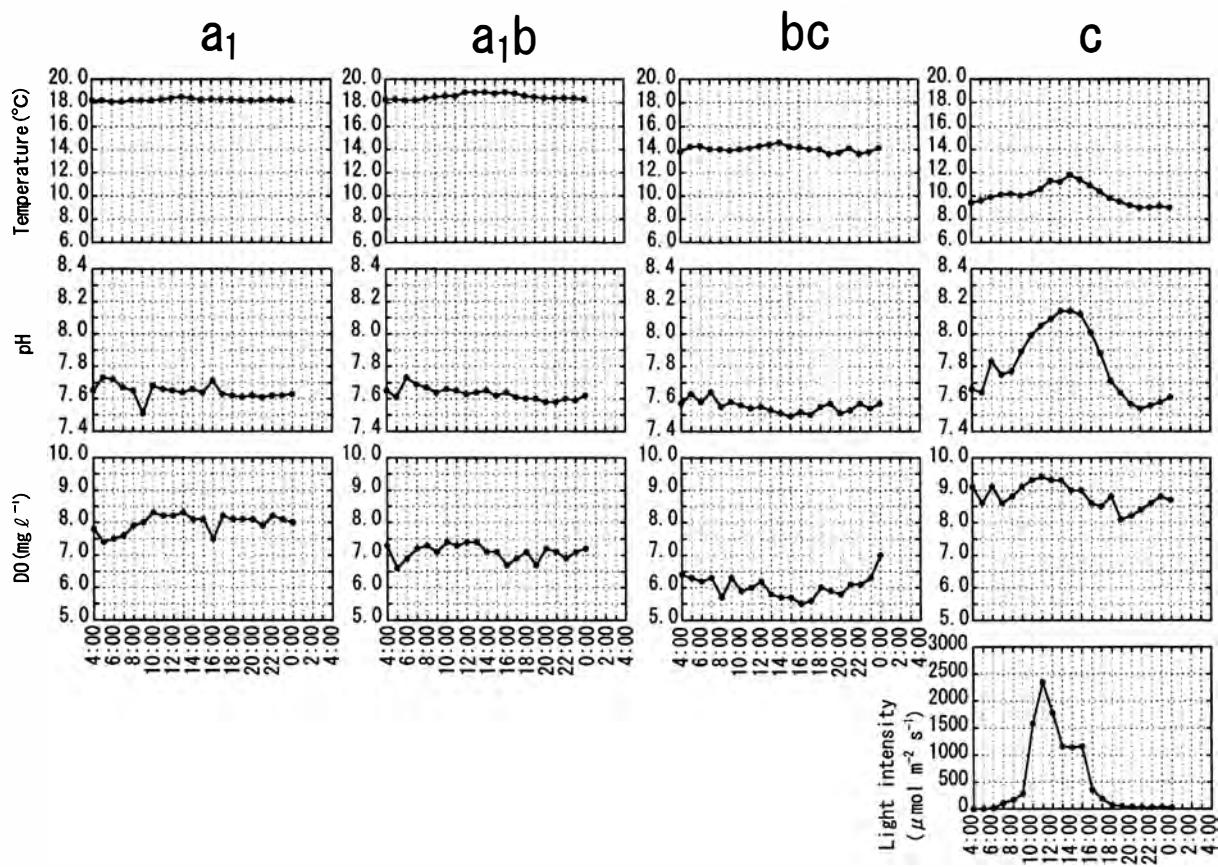


Fig. 2. Diel fluctuation of temperature, pH and dissolved oxygen monitored at points a₁, a₁b, bc and c in the integrated culture system shown in Figure 1. Light intensity was measured just below the water level at the makombu kelp tank C.

水温, pH, 溶存酸素濃度は HORIBA U-21XD によって、マコンブ水槽水面直下における光強度は LI-COR 社製 LI-189, SPHERICAL センサーによつて測定した。

各水槽における栄養塩の収支を把握するために、注水と排水の栄養塩濃度に流量を掛けて時間当たりの栄養塩の供給量と排出量を求めた。エゾアワビ、マツカワ及びマコンブの各水槽における飼育水の換水時間はそれぞれ 15 分, 33 分及び 111 分であったことから、エゾアワビ水槽とマツカワ水槽においては、1 時間後の排出量から供給量を差し引き、マコンブ水槽においては、2 時間後の排出量から供給量を差し引いて、水槽ごとの栄養塩排出量もしくは吸収量を求めた。なお、エゾアワビ水槽 A₂ への注水 a₂、排水 a_{2b} においては飼育量と給餌量がほぼ同じであるエゾアワビ水槽 A₁ の注水 a₁、排水 a_{1b}と同じとして計算した。

2. 結 果

水温, pH, 溶存酸素及び光強度

各水槽における注水と排水の水温, pH, 溶存酸素及びマコンブ水槽 C における光強度の日周変動を Fig. 2 と Table 1 に示す。エゾアワビ水槽 A₁ とマツカワ水槽 B は屋内に設置されているため a₁, bc における水温は安定していた。マコンブ水槽 C は屋外に設置されていることから、c では日周変動が認められた。pH では、c において顕著な日周変動が見られた。溶存酸素濃度と飽和度は、a₁, a_{1b}, bc の順に低下したが、c において再び上昇した。マコンブ水槽 C における光強度の範囲と日積算光量子量はそれぞれ 0 ~ 2352 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 及び 47 $\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ であった。

栄養塩濃度

各水槽における注水と排水の栄養塩（アンモニウ

Table 1. Range (upper) and average \pm SD (lower) of temperature, pH, DO, oxygen saturation, and light intensity measured at points a₁, a₁b, bc and c in the integrated culture system shown in Figure 1.

	a ₁	a ₁ b	bc	c
Temperature (°C)	18.1–18.5 18.3±0.1	18.2–18.9 18.5±0.2	13.6–14.6 14.0±0.3	9.0–11.8 10.1±0.9
pH	7.51–7.73 7.64±0.05	7.73–7.58 7.63±0.04	7.64–7.49 7.55±0.04	7.54–8.14 7.82±0.21
DO (mg l ⁻¹)	7.4–8.3 8.0±0.3	6.6–7.4 7.1±0.2	5.5–7.0 6.0±0.3	8.1–9.4 8.8±0.4
Oxygen saturation (%)	96–109 104±4	86–98 93±3	66–84 72±4	88–105 97±5
Light intensity ^{*1} (μmol m ⁻² s ⁻¹)	—	—	—	0–2352 506±714

*1: Light intensity was measured just below the water level at the kelp tank C.

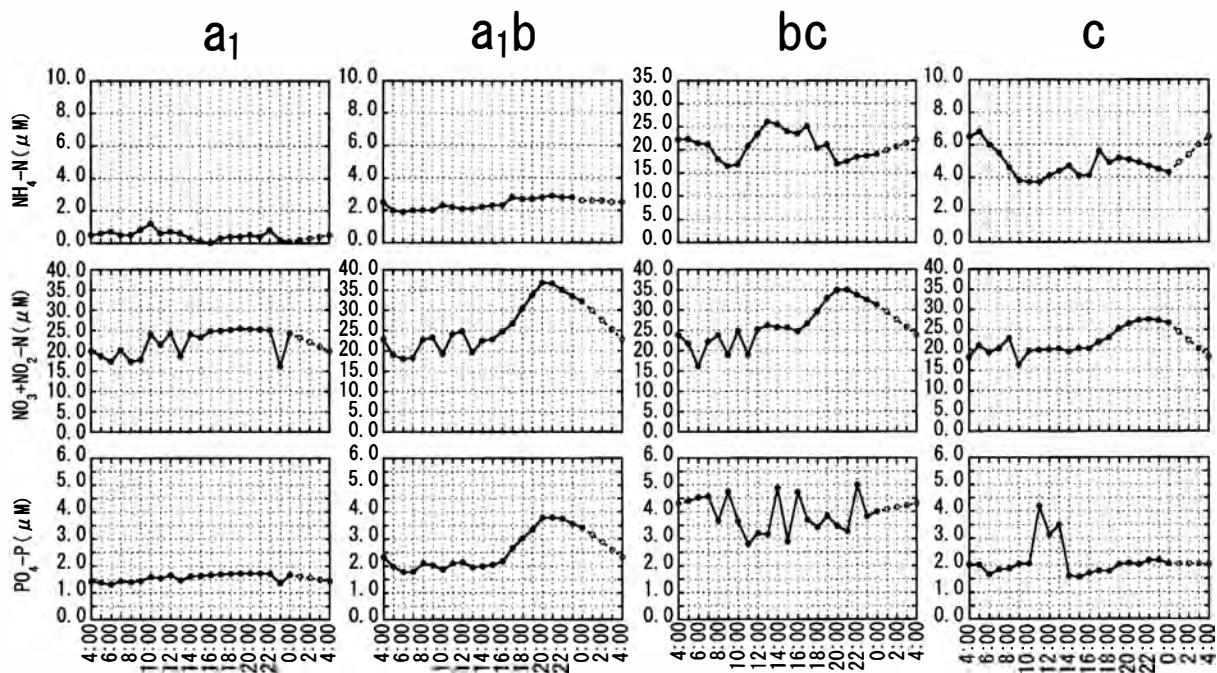


Fig. 3. Diel fluctuation of nutrient concentrations (ammonium-N, nitrate & nitrite-N and phosphate-P) measured at points a₁, a₁b, bc and c in the integrated culture system shown in Figure 1.

ム塩, 硝酸塩+亜硝酸塩, リン酸塩) の濃度変化を Fig. 3 と Table 2 に示す。

アンモニウム塩濃度では, a₁において<0.1~1.2 μM の範囲であったが, a₁b においては a₁と比べて濃度が高くなかった。さらに, bc においては 16.5~26.1 μM へ上昇し, この傾向は 11:00~19:00 に顕著に認められ, 13:00 (マツカワに給餌してから 3 時間 30 分後) にピークが確認された。c においては, bc と比べて 3.7~6.8 μM まで濃度が低下し, 夜間よりも日中において低下が顕著であった。

硝酸塩+亜硝酸塩濃度では, a₁において 16.2~25.4 μM の範囲であったが, a₁b ではこれよりも高く, 18.1~36.8 μM の範囲で推移し, 20 時にピークが現れた。bc においても a₁b における濃度と同様の日周変動が認められ, 21:00 にピークが現れた。c においても a₁b や bc と同様の日周変動が認められたが, 16.4~27.6 μM とやや低濃度で推移し, 増減幅も小さくなった。

リン酸塩濃度では, a₁における濃度は 1.30~1.72 μM であったが, a₁b においては 1.77~3.80 μM まで上昇した。a₁b におけるリン酸塩濃度の上昇パター

Table 2. Range (upper) and average \pm SD (lower) of nutrient concentration (ammonium-N, nitrate & nitrite-N and phosphate-P) measured at points a₁, a₁b, bc and c in the integrated culture system shown in Figure 1.

	a ₁	a ₁ b	bc	c
NH ₄ -N (μ M)	<0.1–1.2	1.9–2.9	16.5–26.1	3.7–6.8
	0.5 \pm 0.3	2.4 \pm 0.3	20.9 \pm 3.0	5.0 \pm 0.9
NO ₃ +NO ₂ -N (μ M)	16.2–25.4	18.1–36.8	16.2–35.0	16.4–27.6
	22.0 \pm 3.3	26.0 \pm 6.3	26.4 \pm 5.4	22.2 \pm 3.3
PO ₄ -P (μ M)	1.30–1.72	1.77–3.80	2.80–5.00	1.56–4.20
	1.56 \pm 0.14	2.55 \pm 0.75	3.91 \pm 0.68	2.17 \pm 0.65

ンは硝酸塩+亜硝酸塩濃度と同様の日周変動を示した。bcにおいてはさらにリン酸塩濃度は上昇したが、a₁bと同様の日周パターンは認められず、ばらつきが大きかった。cでは11:00～13:00にスペイク状のピークが現れた。

栄養塩の排出量・吸収量の日周変動

エゾアワビ水槽A₁、マツカワ水槽B及びマコンブ水槽Cにおける栄養塩の排出量と吸収量の日周変動をFigs. 4, 5, 6及びTable 3に示す。時間当たりの栄養塩排出量と吸収量について、ほとんどの時間帯でエゾアワビ水槽とマツカワ水槽から栄養塩の排出が、マコンブ水槽では栄養塩の吸収が認められた。硝酸塩+亜硝酸塩においてマツカワ水槽Bで一部吸収(Fig. 5B 4:00–5:00)、マコンブ水槽Cで一部排出が認められ(Fig. 5C 5:00–7:00, 8:00–9:00, 22:00–23:00)、リン酸塩においてもマコンブ水槽で排出(Fig. 6C 8:00–12:00)が認められた。

アンモニウム塩では、エゾアワビ水槽A₁から排出が認められ、夜間の排出量は昼間の値の約1.5倍であった(Fig. 4A₁)。マツカワ水槽Bにおいて、排出量は9時30分の給餌後から上昇し、12:00～13:00にピークが見られ、夜間にも緩やかな増加が確認された(Fig. 4B)。マコンブ水槽Cでは、吸収量が昼間に増加し、夜間に減少した(Fig. 4C)。

硝酸塩+亜硝酸塩では、エゾアワビ水槽A₁において5:00～16:00の安静時には排出はほとんどなく、17:00～5:00の摂餌時に排出量が増加した(Fig. 5A₁)。マツカワ水槽Bにおいて、平均1247 μ mol h⁻¹の排出を認めた(Fig. 5B)。マコンブ水

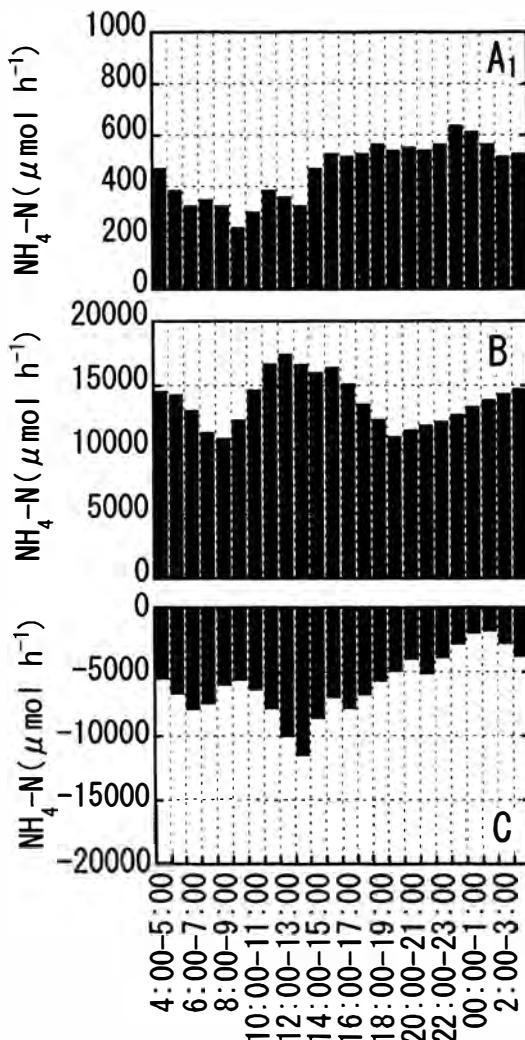


Fig. 4. Diel fluctuation of ammonium-N output in ezo-abalone tank A₁ (A₁) and barfin flounder tank B (B), and its uptake in makombu kelp tank C(C) in the integrated culture system shown in Figure 1.

槽Cにおいて、昼間と夜間に吸収ピークがみられた(Fig. 5C)。

リン酸塩では、エゾアワビ水槽A₁において、夜間に排出のピークが確認された(Fig. 6A₁)。マツ

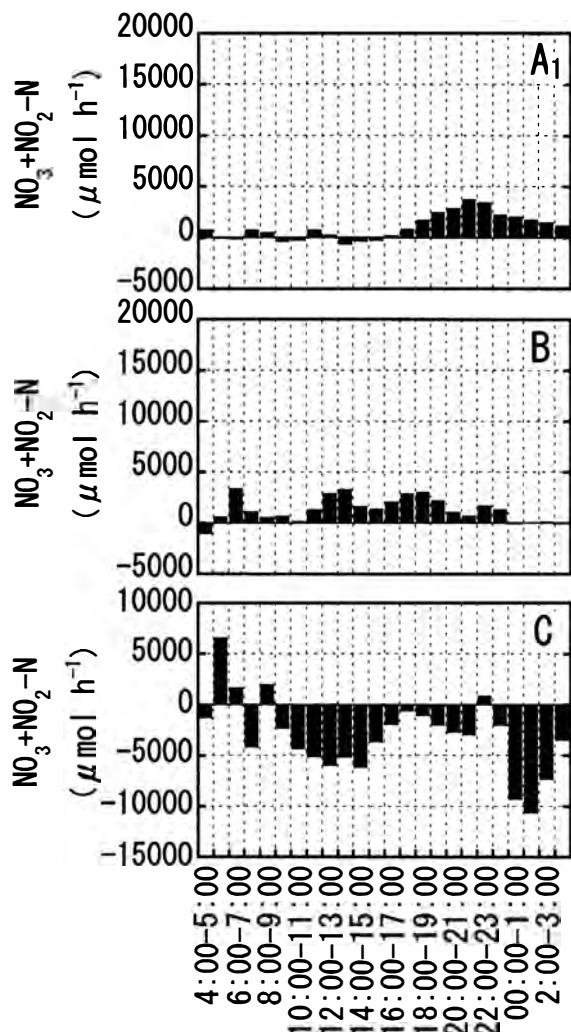


Fig. 5. Diel fluctuation of nitrate & nitrite-N output in ezo-abalone tank A₁ (A₁) and barfin flounder tank B (B), and their uptake in makombu kelp tank C(C) in the integrated culture system shown in Figure 1.

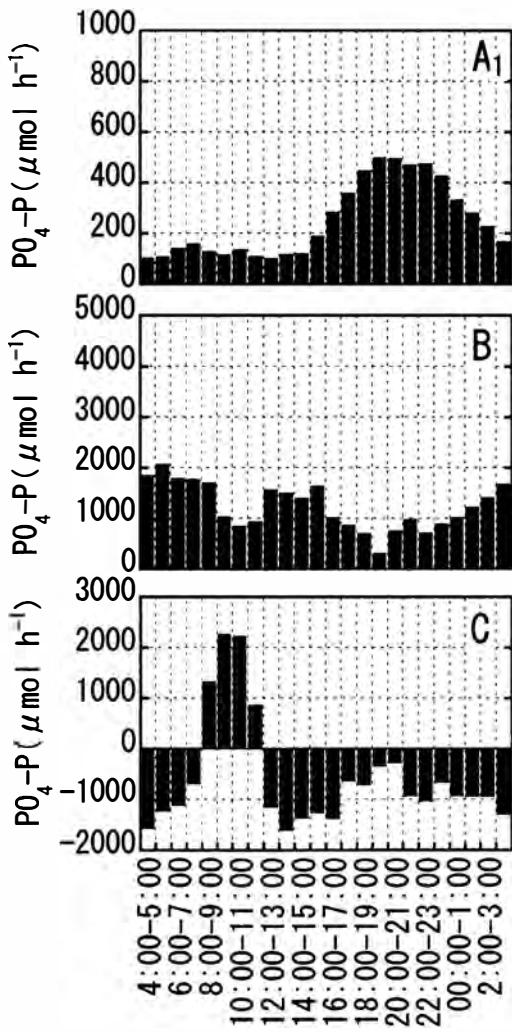


Fig. 6. Diel fluctuation of phosphate-P output in ezo-abalone tank A₁ (A₁) and barfin flounder tank B (B), and its uptake in makombu kelp tank C (C) in the integrated culture system shown in Figure 1.

カワ水槽 B において、平均 $1221 \mu\text{mol h}^{-1}$ の排出が認められた (Fig. 6B). マコンブ水槽 C において、8:00~12:00 の間を除いて吸収が認められた (Fig. 6C).

1日当たりの栄養塩の収支

時間当たりの栄養塩の排出量と吸収量が明らかになったことから、それらの数値を1日当たりに積分し、多段養殖システムにおける栄養塩の1日当たりの排出量と吸収量を求めた (Fig. 7).

アンモニウム塩では、エゾアワビ水槽 A₁ とマツカワ水槽 B からそれぞれ、 $11.1 \text{ mmol day}^{-1}$ 、 $330 \text{ mmol day}^{-1}$ が排出され、マコンブ水槽 C において

$142 \text{ mmol day}^{-1}$ が吸収された。硝酸塩+亜硝酸塩では、同じく水槽 A₁ と水槽 B からそれぞれ、 $24.0 \text{ mmol day}^{-1}$ 、 $29.9 \text{ mmol day}^{-1}$ が排出され、水槽 C において $71.2 \text{ mmol day}^{-1}$ が吸収された。リン酸塩では、水槽 A₁ と水槽 B からそれぞれ、 $5.9 \text{ mmol day}^{-1}$ 、 $29.3 \text{ mmol day}^{-1}$ が排出され、水槽 C において $13.4 \text{ mmol day}^{-1}$ が吸収された。

マコンブ水槽 C には、bc と dsw2 の2つの注水から、アンモニウム塩、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩がそれぞれ、 $375 \text{ mmol day}^{-1}$ 、 $1107 \text{ mmol day}^{-1}$ 及び $114 \text{ mmol day}^{-1}$ が供給された。マコンブ 55.8 kg は、そのうち $142 \text{ mmol day}^{-1}$ 、 $71.2 \text{ mmol day}^{-1}$ 及び $13.4 \text{ mmol day}^{-1}$ を吸収したことから、栄養塩の利用率は、それぞれ、38%，6%

Table 3. Range (upper) and average \pm SD (lower) of nutrient (ammonium-N, nitrate & nitrite-N and phosphate-P) output and uptake rates in ezo-abalone tank A₁, barfin flounder tank B and makombu kelp tank C in the integrated culture system shown in Figure 1.

	Ezo-abalone tank A ₁	Barfin flounder tank B	Makombu kelp tank C
NH ₄ -N ($\mu\text{mol h}^{-1}$)	240–636 $+463 \pm 113$	10872–17412 $+13762 \pm 1927$	$-11524 \dots -1800$ -5924 ± 2454
NO ₃ +NO ₂ -N ($\mu\text{mol h}^{-1}$)	–612–3660 $+1001 \pm 1234$	–1020–3300 $+1247 \pm 1188$	$-10663 \dots -6509$ -26.4 ± 5.4
PO ₄ -P ($\mu\text{mol h}^{-1}$)	100–498 $+248 \pm 149$	296–2051 $+1221 \pm 457$	$-1605 \dots -2250$ -557 ± 1095

Symbols of plus (+) and minus (–) before each average show output and uptake, respectively.

及び 12 %であった。

3. 考 察

本実験で認められた大きな栄養塩の変化は、マツカワ水槽排水におけるアンモニウム塩濃度の上昇とマコンブ水槽による吸収（水槽段階による変化）、アワビ水槽における給餌後の硝酸塩+亜硝酸塩濃度とリン酸塩濃度の上昇（日周変動）であった。以下にこの 2 点を中心に議論してから、最後に栄養塩の収支からみた多段式養殖の評価について考察する。

アンモニウム塩の変化

深層水多段利用の第 1 段目のエゾアワビ水槽では、夕方以降アンモニウム塩の排出量が増加した。この変化は、エゾアワビが夕方から夜間にかけて活動することや 16:00 にマコンブを給餌したことから摂餌活動が引き起こされた結果と考えられる。本試験におけるエゾアワビ水槽のアンモニウム塩濃度は、1.9~2.9 μM の範囲にあった。佐野・馬庭（1962）は、エゾアワビの飼育環境として、アンモニウム塩濃度は 10 μM 以下で飼育することが適当としていることから、アンモニウム塩濃度からみた水質は保たれていた。

多段利用の 2 段目の水槽であるマツカワ水槽では、給餌後にアンモニウム塩排出量のピークがあり、夜間にも緩やかな濃度上昇が認められた。摂餌後の排泄によるものと夜間に残餌や糞から次第にアンモニウム塩が溶出した結果、濃度上昇が生じたと考えら

れる（Fig. 3）。岩田・菊池（1999）は、摂餌後のヒラメ *Paralichthys olivaceus* のアンモニア排泄量を 18 $\text{mmol kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ と見積もっている。本試験では、マツカワ 21.0 kg のアンモニウム塩排出量が 330 mmol day^{-1} であったことから、1 kg 当たりでは 15.7 $\text{mmol kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ と計算され、ヒラメとマツカワのアンモニウム塩排出量は同程度であることが確認できた。マツカワ水槽からのアンモニウム塩排出量は、エゾアワビ水槽のそれよりも約 15 倍多く、アンモニウム塩の発生源として大きな割合を占めていた。

多段利用 3 段目のマコンブ培養水槽では、アンモニウム塩の吸収が確認され、供給されたアンモニウム塩のうち、38 %が利用された（Fig. 7）。この結果から、マコンブは養殖排水の環境への負荷を低減する海藻バイオフィルター（鈴木、2001）として機能することを認めた。

硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩の変化

硝酸塩+亜硝酸塩については、エゾアワビ水槽の排水において、マコンブを給餌した後、濃度上昇があり、その影響はマツカワ水槽、マコンブ水槽にまで及んだ（Fig. 3）。エゾアワビ水槽 A₁からは 24.0 mmol day^{-1} の硝酸塩+亜硝酸塩の排出が認められた（Fig. 7）。これには餌として与えたマコンブ藻体から再溶出分が含まれると考えられ、詳しくは後述する。マツカワ水槽からは 29.9 mmol day^{-1} の排出がみられ（Fig. 7），これはマツカワの排泄物や残餌等から溶出したアンモニウム塩が水槽内で硝

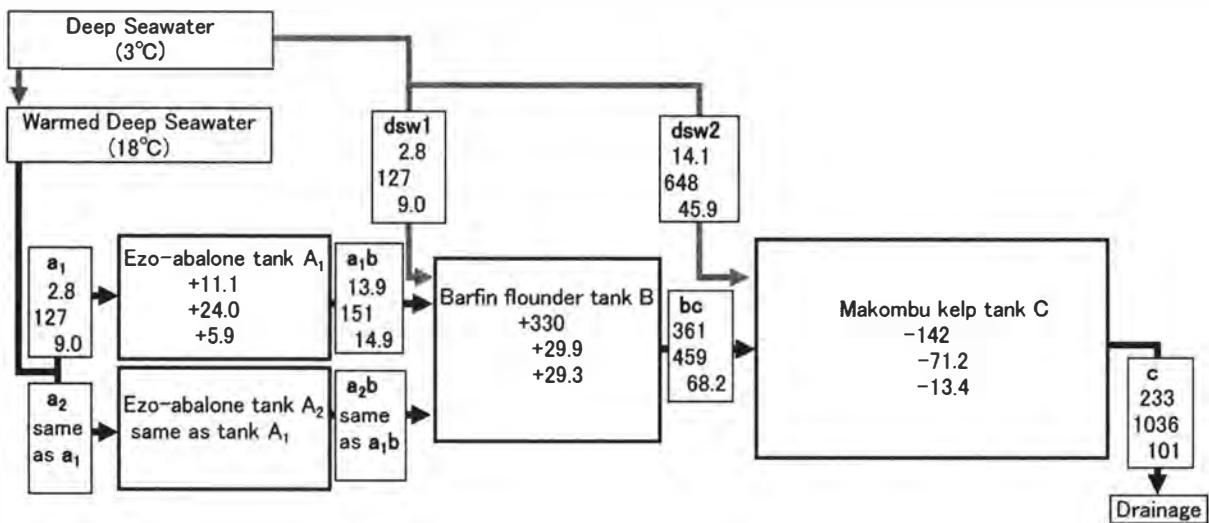


Fig. 7. Daily nutrient flows in the integrated culture system shown in Fig.1. The numbers in each box represent nutrient output and uptake amount per day; Upper, ammonium-N; middle, nitrate+nitrite-N; lower, phosphate-P in mmol day⁻¹.

酸塩にまで酸化されたものと思われる。マコンブ水槽では、71.2 mmol day⁻¹ の硝酸塩+亜硝酸塩の吸収が認められ、供給された硝酸塩+亜硝酸塩のうち6 %がマコンブによって利用された。

加温深層水のリン酸塩濃度は、1.30~1.72 μM の範囲にあったが、給餌後エゾアワビ水槽に濃度上昇が見られ、その変動は硝酸塩+亜硝酸塩の濃度変化と同様であった。マツカワ水槽の排水においては、リン酸塩の上昇と不規則な変化が確認された。マツカワ排水では残餌や糞に由来する懸濁体が採水において観察され、これらからの溶出による影響が考えられる。マコンブ水槽の排水で、11:00~13:00にスパイク状のピークが見られたことも同様の原因と思われる。マコンブ水槽において、13.4 mmol day⁻¹ のリン酸塩の吸収が認められ、供給されたリン酸塩のうち12 %がマコンブによって利用された。

なお、エゾアワビにマコンブを給餌した後、エゾアワビ水槽の排水 a₁b において硝酸塩+亜硝酸塩とリン酸塩濃度の上昇が起きた理由としては、マコンブ藻体内中に含まれていた栄養塩が、エゾアワビの咀嚼によって飼育水中に再溶出したことが原因のひとつとして考えられる。実際に、水槽 C で培養したマコンブ藻体中には、アンモニウム塩、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩がそれぞれ 4.1, 12.7 及び 9.3 μmol g⁻¹ (湿重量) 含まれていた (私信、未発

表). 試験当日にマコンブ 450 g (湿重量) を給餌したことは、栄養塩添加としてみると、それぞれ 1.8, 5.7 及び 4.2 mmol が水槽 A₁ に供給されたことになり、藻体内から栄養塩が再溶出する可能性が示唆される。

栄養塩の収支と多段式養殖の評価

本試験では、栄養塩の排出量・吸収量の日周変動において、排出量と吸収量が一部逆転する数値が現れることがあった。すなわち、エゾアワビやマツカワでは、本来栄養塩の排出があるべきところで吸収 (Fig. 5B) が、マコンブでは、吸収があるべきところで排出 (Fig. 5C, 6C) が認められた。栄養塩の収支は排水の栄養塩排出量から注水の栄養塩供給量を差し引いて求めたため、飼育池内の滞留時間の差やリン酸塩では懸濁態の影響によって生じたと考えられる。

今回実験を行った多段養殖システムでは、飼育生物に最適な水温を得ることを第1設定要件とし、エゾアワビ 18 °C, マツカワ 14 °C, マコンブ 10 °C になるように水量調整を行った。そのため、マコンブ水槽の回転率は 13 回 day⁻¹ と高くなり、マコンブ水槽に供給されたアンモニウム塩、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩のうち、それぞれの利用率は、38 %, 6 %及び 12 %にとどまった。栄養塩の利用率

が低い現状や十分なマコンブ餌料の確保を鑑みると、マコンブ水槽の大型化もしくは多段化によって水槽内の回転率の低下や藻体量の増加を図る必要がある。今回の多段的養殖システムにおけるエゾアワビとマツカワの飼育量からみて、排出されるアンモニウム塩の利用率を高めるためには、現在の約3倍の藻体量が必要と考えられる。アンモニウム塩がマコンブに吸収されアンモニウム塩濃度が低下すれば、窒素源として深層水に豊富に含まれる硝酸塩+亜硝酸塩の取り込み量が増加すると考えられる。また、Mizuta and Maita (1991)は、マコンブの栄養塩吸収において、硝酸塩とアンモニウム塩の共存によりアンモニウム塩の吸収・同化が促進されることを明らかにしている。したがって、マコンブ培養水を硝酸塩とアンモニウム塩が最も効率的に利用できる濃度比率にするための検討も必要であろう。

エゾアワビやマツカワから排出されたアンモニウム塩が存在する条件下では、深層水に多く含まれる硝酸塩を有效地に利用することができなかった。マコンブ水槽内ではアンモニウム塩濃度が6.2~9.6 μMの範囲で推移したと考えられるが、このような天然のマコンブ生育海域ではあまりみられないような比較的高いアンモニウム塩濃度が、長期的にマコンブの生長に及ぼす影響を検討する必要がある。

本研究において、エゾアワビ、マツカワからの栄養塩排出量、マコンブによる吸収量を見積もることができた。このことは飼育生物から排出された栄養塩、なかでもアンモニウム塩を効率的に利用し飼育排水の浄化を図り、さらに深層水に含まれる栄養塩を有効利用するためにマコンブ培養について適した量を決定する基礎知見となる。今回得られた知見をもとに、今後、多段式養殖システムを再構築していくことが必要である。

謝 辞

本研究は、社団法人マリノフォーラム21の深層水多段式利用技術開発事業の一環として行われた。マツカワ種苗については社団法人日本栽培漁業協会厚岸事業場（現独立行政法人水産総合研究センター

厚岸栽培漁業センター）の方々に便宜を図っていたいた。スクリップス海洋研究所フレデリック辻博士には英文の御校閲をいただいた。ここに記して関係者各位に感謝の意を表します。

文 献

- 安藤 忠・渡邊研一・松原孝博 (1999) マツカワの栽培漁業における問題点と将来展望（総説）。北水研報, 63, 19-33.
- 藤田大介・松村 航・山中弘雄 (2006) 海洋深層水による海洋生物の増養殖。海洋深層水利用学－基礎から応用・実践まで－（藤田大介・高橋正征編），成山堂書店，東京，pp. 46-66.
- 岩田仲弘・菊地弘太郎 (1999) 生物ろ過法を用いたヒラメの高密度養殖設計。水産学シリーズ 123 水産養殖とゼロエミッション研究（日野明徳・丸山俊朗・黒倉寿編），恒星社厚生閣，東京，pp. 87-97.
- マリノフォーラム 21 (2005) 深層水多段利用型水産増殖技術の開発技術資料。65 pp.
- 松田康平 (2003) マツカワ。新北海道のさかなたち（上田吉幸・前田圭司・嶋田宏・鷹見達也編），北海道新聞社，北海道，pp. 242-245.
- 松村 航・藤田大介 (2002) 海洋深層水培養コンブの介生生長に基づく自給型アワビ養殖の提案。海深研, 3(2), 53-63.
- Mizuta, H. and Y. Maita (1991) Effect of nitrate supply on ammonium assimilations in the blade of *Laminaria japonica* (Phaeophyceae), Bull. Fac. Fish. Hokkaido. Univ., 42(3), 107-114.
- 中島敏光・豊田孝義 (1994) 海洋深層水の資源的価値とその利用。月刊海洋, 26(3), 133-138.
- 奈倉 昇 (2000) 富山県における海洋深層水の資源利用。月刊海洋号外, 22, 186-191.
- Othmer, D. F. and O. A. Roels (1973) Power, fresh water, and food from cold, deep sea water. Science, 182, 121-125.
- 佐野 孝・馬庭玲子 (1962) エゾアワビの生育に及ぼす環境条件について。東北水研報, 21, 79-86.
- 鈴木祥広 (2001) 養殖場の水質浄化。アオサの利用と環境修復（能登谷正浩編），成山堂書店，東京，pp. 76-93.
- 高橋正征 (2000a) 海洋深層水による植物プランクトン・二枚貝・海藻などの多段生産。月刊海洋号外, 22, 85-90.
- 高橋正征 (2000b) 海洋深層水資源の多段利用。月刊海洋号外, 22, 152-158.

(2006. 11. 8 受付, 2006. 12. 28 受理)