

## ブリ幼魚の給餌に伴う窒素, リンの排出とセイヨウオゴノリによる吸収

高橋芳明\*・奥山芳生\*・濱地寿生\*・木村 創\*

Yoshiaki TAKAHASHI, Yoshio OKUYAMA, Toshio HAMACHI and Hajime KIMURA

**Key word** : ブリ, セイヨウオゴノリ, 窒素, リン

### まえがき

魚類養殖では、海水交換の小さい内湾域で対象魚を高密度に養成するため、残餌や排泄物は海底に堆積し、可溶性成分は栄養塩として環境水中に負荷される<sup>1,2)</sup>。その結果、魚類養殖は赤潮や貧酸素水塊、グリーン・タイドの発生など漁場環境問題の主要因となっている。

本県でも中南部を中心にマダイ、ブリ類が養殖されており、1970年代から1980年代にかけては有害プランクトンによる赤潮が頻発し<sup>3,4)</sup>、養殖漁場環境の改善は大きな課題となっている。

こういった状況に対処し、水産庁は1999年に施行された「持続的養殖生産確保法」を受けて、養殖漁場の環境指標と基準値の策定や環境負荷低減型飼料の開発、複合養殖試験など様々な研究を委託事業として実施し、各県試験場をはじめとする産官学共同のもとに多くの成果を上げてきた<sup>5-8)</sup>。しかし、複合養殖に関しては、アナアオサ、ワカメ、コンブ、ヒロメと魚類との複合養殖が検討されているが<sup>9-13)</sup>、アオサを除くこれらの海藻類は秋季から春季にかけての低水温期に生育するものであり、最も漁場環境が悪化する夏季に利用可能な海藻を用いての研究は少ない。

そこで本研究では、25°C前後の高水温で生育し、かつ寒天原料として利用されているセイヨウオゴノリ *Gracilaria lemaneiformis* をとりあげ、ブリ *Seriola quinqueradiata* 幼魚への給餌に伴い環境水中へ排出される窒素とリンの量の算出を行うとともに、セイヨウオゴノリによる窒素とリンの吸収速度を明らかにし、夏季の複合養殖種としての可能性について検討した。

### 材料および方法

**ブリ幼魚の栄養塩排出試験** 試験は、10月15日11時から10月17日11時に給餌区を2区(1, 2区)と無給餌区を2区(3, 4区)の合計4区で行った。

供試魚は、各試験区にブリ幼魚3尾(平均体重240g/尾)を0.2t水槽(ただし飼育水量は0.15t)に収容し、14日間流水により馴致飼育した。試験開始48時間前から試験開始まで無給餌とし、試験開始時に止水にし、給餌区では餌(20g)が残らないように給餌した。いずれの試験区も試験開始後は試験終了時まで新たに餌を与えなかった。餌の一般成分とリン含量を表1に示した。

表1 試験に用いた餌の成分

含有成分	割合(%)
全窒素	8.5
水分	7.4
粗蛋白質	52.9
粗脂肪	12.5
粗灰分	11.7
リン	1.8

飼育水の水温、DOの測定と採水は、給餌前、給餌直後、給餌後2, 4, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48時間に行い、無給餌区においても同じタイミングで実施した。水温和DOの測定はハンディフィールドメーター(Model 85, ワイエスアイ・ナテック社)を用いて測定した。また、採水はシリンジを用いて行い、飼育水10mℓをセルロースアセテートタイプのメンブレンフィルター(孔径0.45μm)で濾過し、分析まで-20°Cで凍結保存した。サンプル水の栄養塩濃度(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)は、比色法によりオートアナライザー(SWATT, ビーエルテック社)を用

\* 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場 (Fisheries Experimental Station, Wakayama Research Center of Agriculture, Forestry and Fisheries, 1557-20 Kusimoto, Kushimoto-cho, Higashimuro-gun, Wakayama 649-3503, Japan)

いて測定した。

**セイヨウオゴノリの栄養塩吸収試験** 試験には、千葉県船橋市三番瀬海浜公園沖で採取したセイヨウオゴノリを用いた。海藻表面の夾雑物を刷毛で丁寧に落とし、串本沖で採取した沖合水を前述のフィルターで濾過した海水で2日間培養した藻体を用いた。5 lの平底丸フラスコに培地を入れ、その中にセイヨウオゴノリ5 gを収容し、エアレーションしながら培養した。試験は夏季（8月4日7時から8月7日19時まで）と冬季（1月16日11時から1月19日19時まで）の2回行った。

夏季の試験では、培地は前培養で使用した濾過海水1 lあたり窒素源として $\text{NaNO}_3$ を $150 \mu\text{mol}$ 添加したもの（1区）、リン源として $\text{K}_2\text{HPO}_4$ を $15 \mu\text{mol}$ 添加したもの（2区）、それらを両方添加したもの（3区）の3種類とした。また、両方添加した培地にセイヨウオゴノリを収容しないもの（4区）を対照とし、照度は自然状態とした。サンプリングは3時間毎に培地を10ml採水するとともに、水温と光量子量の測定を行った。なお、急激な水温変動をさけるためウォーターバス方式で試験を行った。

冬季の試験では、1～4区は夏季試験と同様に行い、加えて先に行ったブリ幼魚飼育試験の試験終了時の飼育水を培地としたものを5区とした。実験は $22^\circ\text{C}$ の恒温室で行い、照度は光量子束密度 $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、光周期12時間明期、12時間暗期とした。試験期間中は明期の2時間ごとに培地7 mlをサンプリングした。

両試験のサンプル水は $-20^\circ\text{C}$ で凍結保存し、栄養塩濃度の分析はブリの試験と同様に行った。得られた窒素及びリンの取り込み速度は藻体の乾物重量に換算して求めた。なお、セイヨウオゴノリの水分、窒素およびリンの含量を表2に示した。また、試験開始時と終了時に藻体の湿重量を測定し、増重率（ $100 \times (\text{終了時の湿重量} - \text{開始時の湿重量}) / \text{開始時の湿重量}$ ）を計算した。

**セイヨウオゴノリの海面養殖試験** 試験は、串本浅

表2 セイヨウオゴノリの成分分析結果

成分	割合(%)
水分	80.9
窒素	0.6
リン	0.033

海漁場内の当試験場の海上筏で7月23日から9月3日に実施した。吸収試験と同様の採集と処理を行った藻体を一束10gとし、 $\phi$  18mmのトリコットロープ（親

縄）1本（4m）に30cm毎に10束差し込んだもの計8本を水深0.5mに垂下した。藻体の採取は7日毎に親縄1本を取り上げて1束毎の重量を測定し、親縄毎に1束あたりの平均値を求めた。

## 結 果

**ブリ幼魚の栄養塩排出試験** 試験中の各試験区の水溫、DOおよび栄養塩濃度の推移を図1に示した。水溫は各試験区とも $20.9 \sim 23.8^\circ\text{C}$ の範囲であった。DOは給餌直後に大きく低下したが最小値が $6.11 \text{mg}/\text{l}$ であり、斃死や異常遊泳等はなく供試魚に悪影響を及ぼさなかったと考えられた。

窒素については、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度は経時的に微増し48時間後に無給餌区では $0.11, 0.12 \mu\text{mol}/\text{l}$ 、給餌区で $0.16, 0.17 \mu\text{mol}/\text{l}$ 増加した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は試験開始時の濃度が全試験区で $5.34 \sim 5.90 \mu\text{mol}/\text{l}$ と高く、明瞭な経時変化を示さなかった。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は経時的に大きく増加し48時間後に無給餌区で $89.22, 97.29 \mu\text{mol}/\text{l}$ 、給餌区で $326.60, 393.09 \mu\text{mol}/\text{l}$ 増加した。

リンについては、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は給餌区で経時的に大きく増加し24時間後に $37.67, 46.05 \mu\text{mol}/\text{l}$ 増加した。それに対し無給餌区ではほとんど増加しなかった（24時間の増加量： $0.57, 0.59 \mu\text{mol}/\text{l}$ ）。

### セイヨウオゴノリの栄養塩吸収試験

**夏季の試験** 試験期間中の水溫と光量子量の推移を図2に、各培地での $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の濃度の推移を図3に示した。対照区では $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の濃度に変化はなかった。一方、セイヨウオゴノリを入れた培地では経時的に両者の濃度が低下した。窒素のみ及びリンのみの培地よりも窒素とリンの両方が存在する培地の方が、それぞれの濃度が速やかに低下し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ については48時間でほぼ $0.00 \mu\text{mol}/\text{l}$ となった。窒素とリンの両方を添加した培地での $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の取り込み速度の最大値（3-6時間後の値）はそれぞれ $30.02 \mu\text{mol}/\text{dry-g}/\text{hr}$ 、 $0.70 \mu\text{mol}/\text{dry-g}/\text{hr}$ であった。

**冬季の試験** 各培地での栄養塩濃度の推移を図4に示した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ を用いた培地では、夏季試験と同様、窒素のみ及びリンのみの培地よりも窒素とリンの両方が存在する培地の方が、それぞれの濃度が速やかに低下した。窒素とリンの両方を添加した培地での $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の取り込み速度の最大値（0-2時間後の値）はそれぞれ $17.15 \mu\text{mol}/\text{dry-g}/\text{hr}$ 、 $2.53 \mu\text{mol}/\text{dry-g}/\text{hr}$ であった。また、ブリの飼育水を用いた培地では、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の取り込み速度の最大値（6-8時間後の値）はそれぞれ $9.25 \mu\text{mol}/$

ブリ幼魚の給餌に伴う窒素, リンの排出とセイヨウオゴノリによる吸収

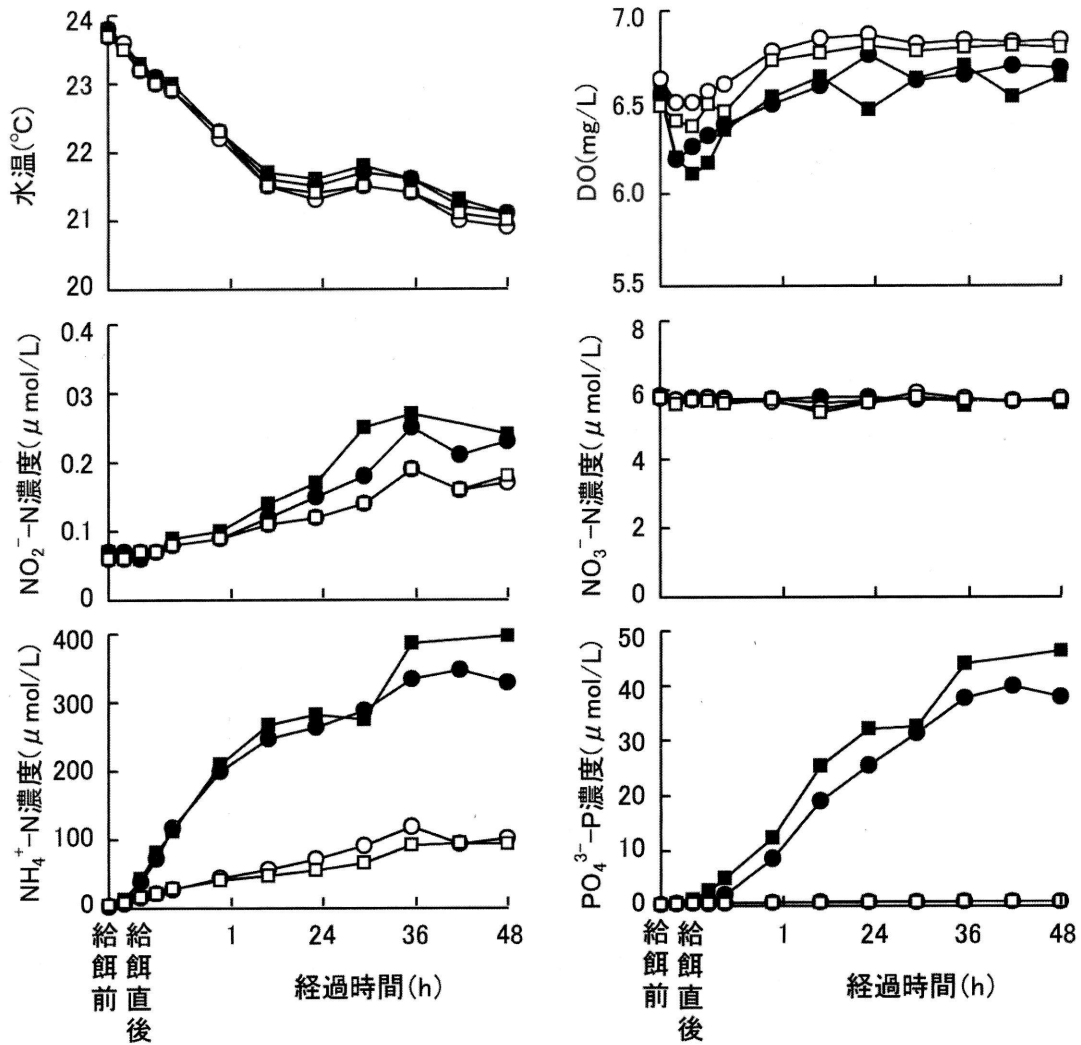


図1 ブリ幼魚の栄養塩排出試験における飼育水の栄養塩濃度の推移 (左上: 水温, 右上: DO, 左中:  $\text{NO}_2^-$ -N, 右中:  $\text{NO}_3^-$ -N, 左下:  $\text{NH}_4^+$ -N, 右下:  $\text{PO}_4^{3-}$ -P. ●: 1区, ■: 2区, ○: 3区, □: 4区.)

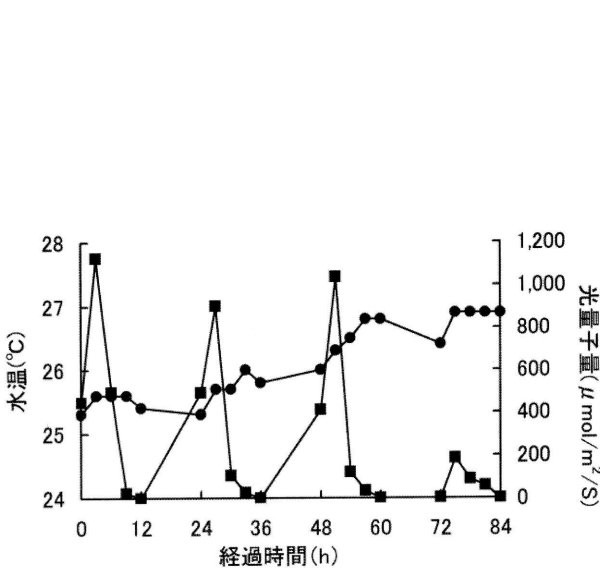


図2 セイヨウオゴノリの栄養塩吸収試験における試験期間中の水温と光量子量の推移 (●: 水温, ■: 光量子量.)

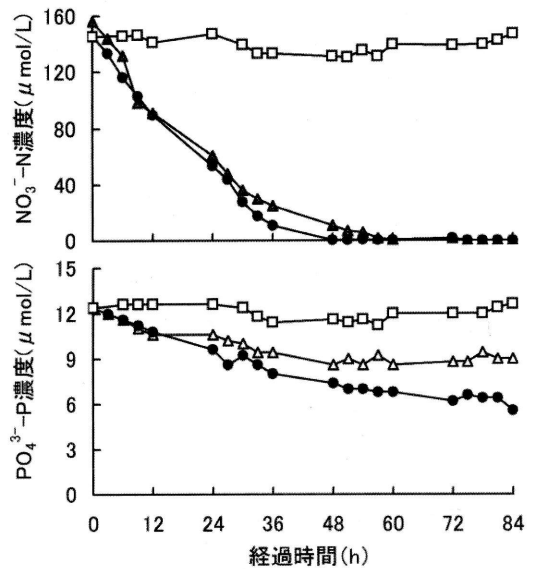


図3 セイヨウオゴノリの栄養塩吸収試験 (夏季) における栄養塩濃度の推移 (上:  $\text{NO}_3^-$ -N, 下:  $\text{PO}_4^{3-}$ -P. ▲: 1区, △: 2区, ●: 3区, □: 4区.)

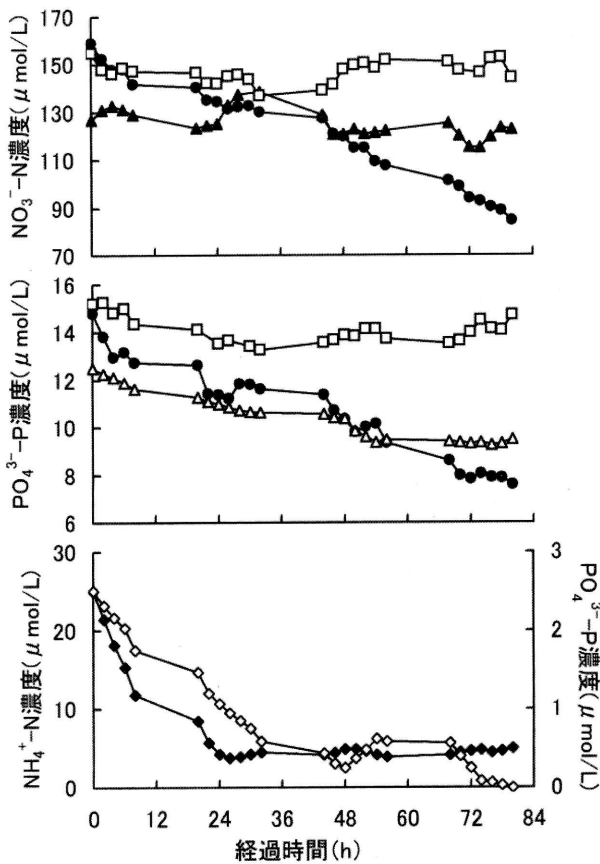


図4 セイヨウオゴノリの栄養塩吸収試験(冬季)における栄養塩濃度の推移(上, 中:  $\text{NO}_3^-$ -N と  $\text{PO}_4^{3-}$ -P の培地(▲: 1区, △: 2区, ●: 3区, □: 4区), 下: ブリ飼育水の培地(◆:  $\text{NH}_4^+$ -N, ◇:  $\text{PO}_4^{3-}$ -P))

dry-g/hr,  $0.74 \mu\text{mol/dry-g/hr}$ であった。

**セイヨウオゴノリの海面養殖試験** 試験期間中の水温の推移を図5に示した。水温は概ね  $23.5 \sim 27.7^\circ\text{C}$  の間で推移したが、8月5～6日には  $22^\circ\text{C}$  台に低下した。

海面におけるセイヨウオゴノリの生長を図6に示した。試験開始時  $10 \text{ g}$  であったセイヨウオゴノリは7月30日(1週間後)に  $21.1 \text{ g}$ , 8月6日(2週間後)に  $48.2 \text{ g}$ , 8月13日(3週間後)に  $99.6 \text{ g}$ , 8月20日(4週間後)に  $143.1 \text{ g}$ , 8月27日(5週間後)に  $206.1 \text{ g}$ , 9月3日(6週間後)に  $310.6 \text{ g}$  となり, 42日間(6週間)で約30倍の重量になった。その後, 9月5, 6日に台風の影響で残りの藻体は流失した。

また, 日間生長率(以下「生長率」)(%/日)を, 生長率 =  $100 \times (\ln(W1) - \ln(W0)) / d$ , ( $W0$ : 初日の藻体湿重量,  $W1$ : 最終日の藻体湿重量,  $d$ : 日数)により算出し<sup>14)</sup>, 1週間ごとの生長率の推移を図7に示した。試験期間を通じた生長率は  $8.2\%$  で, 試験

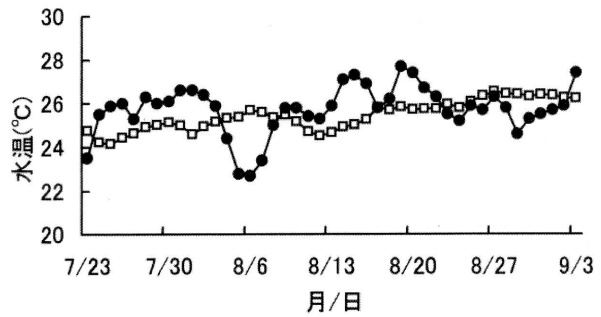


図5 海面養殖試験期間中の水温の推移(●: 2007年, □: 過去10年の平均値)

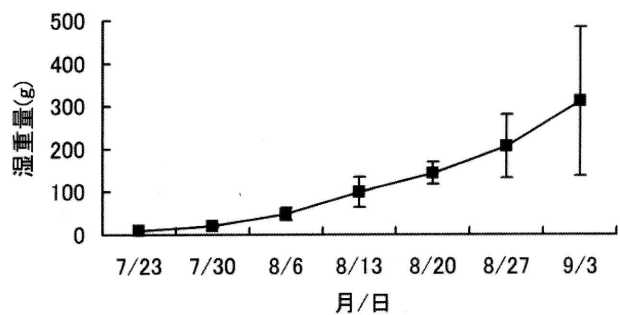


図6 海面養殖試験におけるセイヨウオゴノリの生長(■: 平均値, I: 標準偏差)

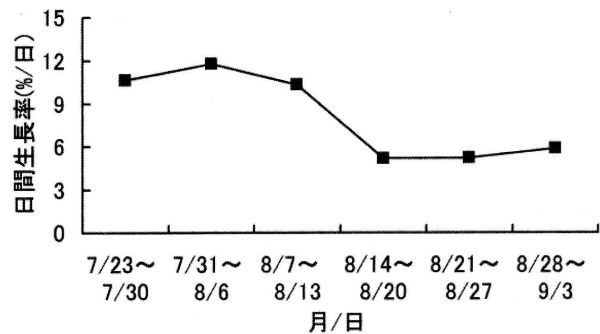


図7 海面養殖試験におけるセイヨウオゴノリの生長率の推移

開始後3週間目までは  $10\%$  以上の生長率が得られたが, その後は  $5\%$  前後となった。

## 考 察

ブリ幼魚飼育試験では,  $\text{NO}_2^-$ -N 濃度は経時的に増加したがその量はごく僅かであったこと,  $\text{NO}_3^-$ -N 濃度は試験中に明瞭な増加が見られなかったことから,  $\text{NO}_2^-$ -N と  $\text{NO}_3^-$ -N の添加は極めて微量であったと考えられた。それに対し,  $\text{NH}_4^+$ -N 濃度が大きく増加したことから, 環境水への窒素の添加はほぼ全て  $\text{NH}_4^+$ -N の状態で行われたことが分かった。また, 給餌区の  $\text{NH}_4^+$ -N 濃度の上昇は, 無給餌区の約4倍で

## ブリ幼魚の給餌に伴う窒素, リンの排出とセイヨウオゴノリによる吸収

あり, 給餌により窒素の排出が大幅に増加することが分かった。PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 濃度は, 無給餌区では1 μmol/l以下の増加に対し, 給餌区では約42 μmol/l増加したことから, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pは無給餌ではほとんど添加されず, 給餌により添加されることが分かった。リンは糞に多く含まれて排出されることが知られており<sup>15)</sup>, 給餌に伴い排出される糞からの溶出があった可能性が考えられた。

試験期間中に環境水へ排出された栄養塩量を, 試験期間における2試験区の増加量の平均値×飼育水量×分子量の式で算出すると, 無給餌区ではNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nが433.2mg, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pが2.7mg, 給餌区ではNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nが756.2mg, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pが88.0mgとなり, 給餌区と無給餌区との差から給餌に伴う負荷量は窒素が323.0mg, リンが85.3mgと算出された。給餌区への給餌量は各20g, 餌に含まれる窒素, リンの割合はそれぞれ8.5%, 1.8%であることから, 給餌により添加された窒素, リンのそれぞれ19.0%, 23.7%が環境水へ排出されたと算出された。以上のことから, 1tのブリ当歳魚(平均体重240g)を2.5%の給餌率で飼育した場合, 1日に環境水中へ窒素が2,125g, リンが450g排出されることが明らかとなった。

栄養塩吸収試験では, 夏季のセイヨウオゴノリは, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pの取り込み速度の最大値がそれぞれ30.02 μmol/dry-g/hr, 0.70 μmol/dry-g/hrであり, 冬季では17.15 μmol/dry-g/hr, 2.53 μmol/dry-g/hrであった。この値は, 過去に行なわれたアナアオサの試験結果<sup>13)</sup>と比較すると, 窒素は1/2程度であったが, リンはこれを上回っていた。また, 冬季において窒素の吸収速度が夏季のそれを下回り, リンの吸収速度が夏季のそれを上回る現象はアナアオサでも見られた<sup>13)</sup>。

ブリ飼育水を用いた培地でのNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pの取り込み速度の最大値はそれぞれ9.25 μmol/dry-g/hr, 0.74 μmol/dry-g/hrであり, 魚類給餌試験での環境水への窒素の添加はほぼ全てNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nの状態で行われたことから, 今回の海面養殖試験に準じて30cmごとに100gのセイヨウオゴノリを差し込んだロープを15m×15mのブリ養殖いけすに15本並べて養殖した場合, 窒素, リンをそれぞれ22.3g/日, 3.9g/日吸収できることが分かった。この量は, 1tのブリ当歳魚(平均体重240g)に2.5%の給餌を行った負荷量のそれぞれ1.05%, 0.88%であった。

セイヨウオゴノリの海面養殖試験では, 開始から3週間の日間生長率は10%以上であった。藻体には窒素, リンがそれぞれ0.6, 0.033%含まれていることから, 前述の15m×15mの養殖いけすにセイヨウオゴノリを同様に養殖した場合, 10%/日の生長で1日

目に7.5wet・kg増加することから, 窒素, リンをそれぞれ45.0g/日, 2.0g/日吸収できることが分かった。この値は冬季試験においてブリ飼育水で得られた値と比べ, 窒素は約2倍, リンは約1/2であった。この結果は, 夏季試験では冬季試験に比べ窒素の吸収速度が大きくなり, リンの吸収速度が小さくなることに起因していると考えられた。

また, 養殖試験の4週間目以降の生長率が落ちたことから, セイヨウオゴノリは生長に伴って藻体が密集し, 光合成の効率が低下したことが考えられた。以上のことから, セイヨウオゴノリは藻体が増加すると生長率の低下や藻体の流出が起こるが, 定期的に収穫を行うことで養殖が可能であると考えられた。

## 要 約

- 1) ブリ幼魚への給餌により, 飼料中の窒素の19.0%, リンの23.7%が環境水へ排出された。
- 2) 夏季におけるセイヨウオゴノリの窒素とリンの両方を添加した培地におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Pの取り込み速度の最大値は, それぞれ30.02 μmol/dry-g/hr, 0.76 μmol/dry-g/hrであった。
- 3) 夏季におけるセイヨウオゴノリの窒素とリンの吸収速度をアナアオサのそれと比較すると, 窒素は1/2程度であったが, リンは上回った。
- 4) セイヨウオゴノリは, 収穫方法の工夫により海面養殖も可能であった。
- 5) これらの結果から, セイヨウオゴノリは, 夏季における魚類との複合養殖種として十分に利用できると判断された。

## 謝 辞

本研究の一部は, 平成19年度地球環境保全等試験研究費(公害防止等試験研究費)で実施した。ここに記して感謝の意を示す。

## 文 献

- 1) 窪田敏文. 魚類養殖場. 「水産学シリーズ21 浅海魚類養殖と自家汚染」(日本水産学会編) 恒星社厚生閣, 東京. 1977;9-18.
- 2) 平田八郎. 増養殖環境の管理と保全. 水産増殖1989;37:311-316.
- 3) 平成6年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書. 和歌山県水産試験場. 2005;15.
- 4) 竹内照文. 和歌山県沿岸の赤潮-1971年から1979年までの赤潮発生状況. 昭和54年度和歌山

県水産試験場事業報告 .186-199.

- 5) 平成 14 年度海面養殖業ゼロエミッション推進対策調査事業報告書 ( 環境負荷低減型配合飼料開発事業 ). 水産庁 2003.
- 6) 平成 14 年度海面養殖業ゼロエミッション推進対策調査事業報告書 ( 複合養殖実証試験 ). 水産庁 2003.
- 7) 平成 15 年度水産庁委託事業 養殖漁場環境保全推進委託事業報告書 ( 環境負荷低減技術開発事業 ). 水産庁 2004.
- 8) 平成 15 年度水産庁委託事業 養殖漁場環境保全推進委託事業報告書 ( 複合養殖実証試験 ). 水産庁 2004.
- 9) 末代勇樹・門脇秀策 . 浅海漁場における養殖マコンブ, *Laminaria japonica* の成長過程と N,P 吸収速度 . 水産増殖 2003;51:15-23.
- 10) 末代勇樹・門脇秀策 . 浅海漁場における養殖アオサ, *Ulva pertusa* の成長と N,P 吸収速度 . 水産増殖 2004;52:65-72.
- 11) 末代勇樹・門脇秀策 . 浅海漁場における養殖ワカメ, *Undaria pinnatifida* の成長と N,P 吸収速度 . 水産増殖 2004;52:365-374.
- 12) 大山隼人・末代勇樹・門脇秀策 . 八代海の浅海養魚場における栽培マコンブ *Laminaria japonica* の生産量と N,P 吸収量 . 鹿児島大学水産学部紀要 2005;54:29-34.
- 13) 田中俊充・木村創 . 海藻 5 種による栄養塩の取り込みと複合養殖の試み . 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告 2005;6:195-203.
- 14) Stephen G. Nelson, Edward P. Glenn, Jeff Conn, David Moore, Ted Walsh, Malia Akutagawa. Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system. *Aquaculture* 2001;193:239-248.
- 15) Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II . Phosphorus. *Marine ecology progress series* 1991; 70: 263-272.