

## 半透膜を用いた藻類養殖用施肥具の溶出特性について

池脇義弘\*

## Elution features of the fertilizer for algae cultivation using semi-permeable membrane

Yoshihiro IKEWAKI\*

We have developed a fertilizer for algae cultivation that gradually releases inorganic nitrogen through a semipermeable membrane. This fertilizer is filled with ammonium nitrate solution solidified with agar, and part of the surface is a semipermeable membrane, and the amount of elution can be adjusted by changing the area of the semipermeable membrane. Immediately after the start of use, the elution amount of inorganic nitrogen, which was over 10 mmol/h, rapidly decreased, but even after 10 days, the elution amount remained at about 3 mmol/h. The larger the area of the elution site, the greater the elution amount, and this tendency was particularly pronounced during the first few days of use.

キーワード：藻類養殖，施肥具，硝酸アンモニウム，半透膜，溶出試験

近年，沿岸域の無機態窒素などの栄養塩類が低下し（川口ら2004，石井ら2008，反田ら2014，阿保ら2018），瀬戸内海をはじめ全国各地で養殖藻類の色調低下，いわゆる「色落ち」による漁業被害が発生しており（松岡ら2005，多田ら2010，牧野ら2015，村山ら2015）その対策の一つとしては，養殖漁場への栄養塩の添加，すなわち施肥が考えられる。これまで，内湾や浅海のノリ養殖漁場などでは液肥の散布が行われたほか（野沢1953，川村ら2011，龍満2021），漁場への肥料の設置も試みられた（三浦1957，赤池ら1998，加藤ら2022）。

徳島県の藻類養殖漁場は，潮通しのいい開放的な海域にあり比較的水深も深いため，液肥の散布は肥料成分が速やかに漁場から拡散するため効率的でないと考えられる。そこで，筆者らは，肥料成分が徐々に溶け出すような施肥具を漁場の養殖施設に直接装着し色落ちを回復させる手法の開発を目指し，まず，硝酸アンモニウム溶液をゼラチンで固めることにより，海域に不足する無機態窒素が徐々に溶出する施肥剤を開発した（池脇ら2016a）。さらに，ポリ瓶にゼラチン等のゲル化剤で固めた硝酸アンモニウム水溶液を充填した施肥具を用いて，実際の養殖漁場で色落ちしたワカメの色調を回復させることに成功した（池脇ら2016b，2017）。しかしながら，養殖施設に吊り下げた施肥具が波浪で揺れ，施肥具の容器がワカメの藻体が当たり傷をつけるという欠点が漁業者の指摘で明らかとなったほか，その後の予備的試験により施肥具を漁場に設置した場合水温が12℃程度以上まで上昇すると波浪等の影響でゼラチンが崩れるなどの実用上の問題点が確認された。そこで，今回，これらの問題点を解決するため，①ゼラチンを使わない，②ワカメを傷つけないよう，施肥具をワカメの養殖ロープに沿わせる形状

にする，などの施肥具の改良を行い，室内試験により施肥具の構造とそこから溶出する無機態窒素の量の関係について調査した。なお，本研究で開発した施肥具については，「藻類養殖用施肥具」として特許を取得した（池脇 2020）。

## 材料と方法

本研究で開発する施肥具の形状は，ワカメの養殖ロープに沿って設置できるよう円筒形とした（図1）。また，無機態窒素を含む施肥剤は，硝酸アンモニウム（和光純薬製試薬一級）水溶液を寒天（和光純薬製，植物培地用）で固めた物を用いた。

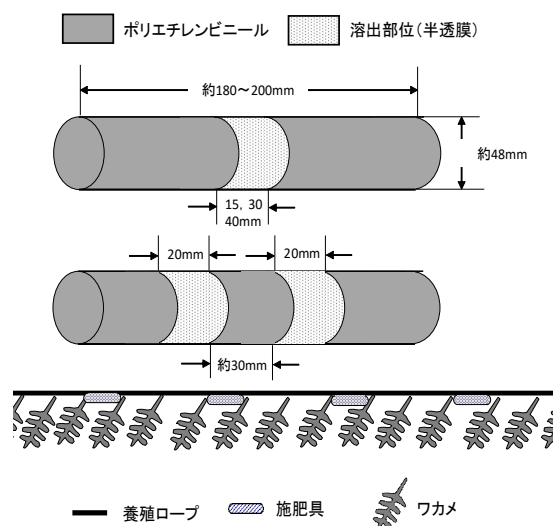


図1. 藻類養殖用施肥具の構造と漁場での設置方法

2025年3月3日受理

\* 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課(Fisheries Research Institute, Tokushima Agriculture, Forestry, and Fisheries Technology Support Center, Hiwasaura, Minami, Kaifu, Tokushima 779-2304, Japan)

表1. 各試験の概要と供した施肥具の構造・成分等

| 試験日                       | 試験<br>日数 | 施肥具名        | 施肥具の構造 |        |                |            | 施肥剤の成分(g)    |            |    | 溶出試験時の<br>1観測毎の換水量<br>(L) |
|---------------------------|----------|-------------|--------|--------|----------------|------------|--------------|------------|----|---------------------------|
|                           |          |             | 直径(mm) | 長さ(mm) | 溶出部位の<br>幅(mm) | 溶出部位<br>の数 | 硝酸アンモ<br>ニウム | イオン<br>交換水 | 寒天 |                           |
| ＜溶出試験1＞                   |          |             |        |        |                |            |              |            |    |                           |
| 2017/10/6 ～<br>2017/10/20 | 14       | 幅15mmタイプ    | 約48    | 約180   | 15             | 1          | 100          | 300        | 9  | 70                        |
| 2017/10/6 ～<br>2017/10/20 | 14       | 幅30mmタイプ    | 約48    | 約180   | 30             | 1          | 100          | 300        | 9  | 70                        |
| ＜溶出試験2＞                   |          |             |        |        |                |            |              |            |    |                           |
| 2018/4/16 ～<br>2018/4/29  | 11       | 幅30mm(2)タイプ | 約48    | 約180   | 30             | 1          | 100          | 300        | 9  | 190                       |
| ＜溶出試験3＞                   |          |             |        |        |                |            |              |            |    |                           |
| 2018/5/2 ～<br>2018/5/11   | 9        | 幅40mmタイプ    | 約48    | 約200   | 40             | 1          | 150          | 300        | 9  | 190                       |
| 2018/5/2 ～<br>2018/5/11   | 9        | 幅20×2タイプ    | 約48    | 約200   | 20             | 2          | 150          | 300        | 9  | 190                       |

予備試験の結果から、寒天で固めた場合、無機態窒素はゼラチンで固めた場合と比較してすみやかに溶出することが明らかとなっていたので、まず、無機態窒素に対しては透過性を示す半透膜のチューブ（Repligen社製スペクトラノボア4、直径48mm）に施肥剤を充填し、さらに、透過性のないポリエチレンビニール（アズワン社製ガスバリア袋）で半透膜チューブを部分的に覆うことにより、無機態窒素が溶出する部分を制限した。ポリエチレンビニールで覆われていない半透膜チューブが露出している部分（以下、「溶出部位」と記す。）は1箇所のもので2箇所のものを作製した。供した施肥具の構造や成分を図1および表1に示した。

作製した施肥具から溶出する無機態窒素の量を最長14日間の溶出試験に供して求めた。溶出試験は計3回行い、1回目の溶出試験（溶出試験1）では、溶出部位が1箇所その幅が15mmおよび30mmの施肥具（それぞれ、「幅15mmタイプ」および「幅30mmタイプ」と記す。）を供試した。2回目の溶出試験（溶出試験2）では、再度幅30mmタイプを供試した（以下、溶出試験1で供試したものと区別するため「幅30mm(2)タイプ」と記す。）。また、3回目の溶出試験（溶出試験3）では、溶出部位の場所および数の違いを検討するため、溶出部位が1箇所幅が40mmの施肥具および溶出部位が2箇所幅がともに20mmの施肥具（それぞれ「幅40mmタイプ」および「幅20mm×2タイプ」）を供試した。

溶出試験は、徳島県鳴門市瀬戸町にある徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課鳴門庁舎（以下、「鳴門庁舎」と記す。）の生物飼育棟に設置した500Lポリカーボネイト水槽（田中三次郎商店製、SPS-500、以下、「試験水槽」と記す。）を用いて次の方法で行った。水槽には500Lの海水を張り、その中央部に施肥具を1個設置し、水槽内の水が十分攪拌されるようにエアレーションを行った（図2）。なお、試験水槽の水位は観測用の水槽への送水や換水（詳細後述）により変動したが、施肥具は常に水中にあるように設置位置は調整した。また、試験水槽内の海水（以下、「試験水」と記す。）をワカメ養殖時期の海水温に近づけるため、海水クーラー（ゼンスイ製水槽用クーラーZR-75E）2台（設定温度12℃）により冷却を行った。試験水槽内の海水温はKNラボラトリーズ社製温度ロガー、サーモクロンSLタイプにより10分毎に水温を測定した。施肥具から溶出した無機態窒素の量を推定するため、観測用水槽に設

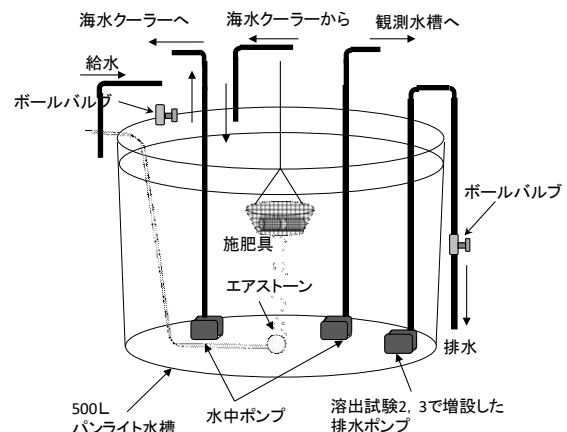


図2. 溶出試験を行なった水槽の外観

置したSea-Bird Scientific社製紫外線水中硝酸塩アナライザーSUNA V2（ワイパー付きモデル；以下、「硝酸塩センサー」と記す。）による硝酸態窒素濃度（以下、「硝酸塩濃度」と記す。）の観測を1時間毎に行った。観測に際しては、70 Lの試験水を水中ポンプにより試験水槽から観測用水槽に送り、観測直後に再び試験水槽の水が500Lとなるよう鳴門庁舎の汲み上げ海水を補給した（以下、この補給した海水を「補給水」と記す）。これら、硝酸塩センサーや水中ポンプなどの制御は、アクアトロニカ社製アクアリウムコントローラー（タイマー部ACQ110、パワーユニット部ACQ013J）を用いた自動観測システムによって行った。このシステムの詳細については池脇・柏（印刷中）を参照されたい。

硝酸塩センサーによる硝酸塩濃度の観測値（以下、「観測値」と記す。）は、有色溶存有機物（CDOM）などの影響で、実際の濃度との誤差が生じる場合がある（Bricaud *et al.* 1981, Hojerslev and Aas 2001, 高木 2015）ので、試験期間中に硝酸塩センサーが観測した海水に含まれる硝酸塩濃度をビーエルテック社製連続流れ分析装置swAAtで分析し、得られた値（以下、「分析値」と記す。）と観測値との関係を用いて観測値の補正を行った。この分析のための試験水および補給水の採水は、観測値の変動状況をみながら様々な観測値が含まれるよう適宜行うこととした。以下では、この補正された観測値を用いた。

施肥具から溶出した無機態窒素の量は、観測値を用いて次のように求めた。溶出試験1では1回の硝酸塩濃度観測のための補給水の量は70Lで、試験水槽の換水率は毎時 $70/500=0.14$ となり、また、溶出試験2および3では排水用ポンプを1台増設し、さらに120Lの試験水を1回の観測で排水したので、換水率は $(70+120)/500=0.38$ となった。 $n$ 回目の観測における試験水槽内の硝酸塩濃度を $X_n$ （硝酸塩濃度の単位は $\mu\text{M}$ 、以下同様。）とし、観測直後に補給された海水の硝酸塩濃度を $K_n$ とすると、溶出試験1では、海水補給直後の試験水槽内の硝酸塩濃度は計算上、 $\{X_n \times (1-0.14) + K_n \times 0.14\}$ となり、 $n$ から $n+1$ 回目の観測の間に施肥具から溶出した硝酸態窒素によって試験水の硝酸塩濃度が $Y_n$ 上昇したとすると、 $Y_n$ は次式で近似される。

$$Y_n = X_{n+1} - \{0.86 X_n + 0.14 K_n\}$$

同様に、溶出試験2および3では、

$$Y_n = X_{n+1} - \{0.62 X_n + 0.38 K_n\}$$

また、事前に行った予備試験結果から、施肥剤からは硝酸態窒素とアンモニア態窒素がほぼ同じモル数溶出することが確認されたので、 $n$ 回目から $n+1$ 回目の観測の間の1時間に溶出した無機態窒素のモル数 $M_n$ mmol（ミリモル）は、次の式で計算される

$$M_n = Y_n \times 2 \times 500 / 10^3 = Y_n$$

さらに、施肥剤から溶出した無機態窒素の割合を $Elu\%$ （以下、“累積溶出率”と記す。）とすると、溶出前の施肥剤に含まれる無機態窒素のモル数 $M_{total}$ mmolと、溶出試験中の無機態窒素の累積溶出モル数 $\Sigma M_n$ を用いて、 $Elu$ は次式で計算される。

$$Elu = \Sigma M_n / M_{total} \times 100$$

## 結 果

溶出試験は計3回行ったが、溶出試験2および3は観測システムのトラブルが原因で試験期間が14日より短くなった（表1）。図3に試験水槽の水温変動を示した。水槽内の水温は、溶出試験2および3ではそれぞれ、概ね13～14℃および12～14℃の範囲で推移したが、溶出試験1では、実験室のエアコンが故障したため、室温の影響で海水温を十分下げることができず、18℃前後で推移した。表2に観測値の補正に用いた連続流れ分析装置による分析結果と分析を行った海水を採取した時の観測値を示した。

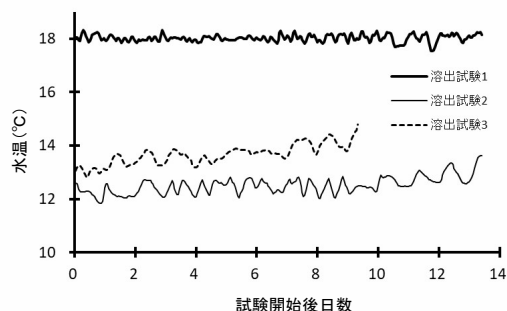


図3. 溶出試験時の水槽水温の変化

表2. 観測値の補正に用いた無機態窒素分析結果と分析した水を採水した時の観測値

| 水の種類<br>年月日 | 分析値 (μM)  |            |              | 観測値    |
|-------------|-----------|------------|--------------|--------|
|             | 硝酸態<br>窒素 | 亜硝酸態<br>窒素 | アンモニ<br>ア態窒素 |        |
| 補給水         |           |            |              |        |
| 2017/10/06  | 2.37      | 0.83       | 0.63         | 8.05   |
| 2017/10/11  | 2.83      | 0.78       | 0.74         | 7.57   |
| 2017/10/17  | 2.26      | 0.80       | 1.04         | 9.86   |
| 2018/04/13  | 0.86      | 0.23       | 1.25         | 3.73   |
| 2018/04/13  | 1.13      | 0.22       | 1.51         | 4.03   |
| 2018/04/17  | 1.50      | 0.23       | 0.54         | 3.86   |
| 2018/04/18  | 1.48      | 0.29       | 1.22         | 4.09   |
| 2018/04/20  | 1.63      | 0.21       | 0.63         | 3.47   |
| 2018/04/23  | 0.99      | 0.25       | 0.80         | 3.49   |
| 2018/04/24  | 1.45      | 0.23       | 0.69         | 3.57   |
| 2018/04/27  | 1.82      | 0.21       | 1.17         | 4.34   |
| 2018/05/01  | 1.47      | 0.22       | 1.03         | 4.05   |
| 2018/05/02  | 1.32      | 0.21       | 0.98         | 3.96   |
| 2018/05/07  | 1.27      | 0.22       | 1.09         | 3.80   |
| 2018/05/09  | 1.11      | 0.23       | 1.13         | 3.87   |
| 試験水         |           |            |              |        |
| 2017/10/06  | 3.18      | 0.62       | 0.46         | 8.86   |
| 2017/10/06  | 3.60      | 0.45       | 0.62         | 9.37   |
| 2017/10/06  | 90.56     | 1.51       | 81.62        | 85.67  |
| 2017/10/06  | 247.92    | 1.88       | 233.88       | 246.82 |
| 2017/10/06  | 102.53    | 1.41       | 96.60        | 99.47  |
| 2017/10/11  | 32.69     | 4.79       | 21.44        | 38.92  |
| 2017/10/11  | 29.91     | 6.54       | 15.24        | 39.11  |
| 2018/04/16  | 46.75     | 0.30       | 46.43        | 49.42  |
| 2018/04/16  | 61.67     | 0.45       | 57.93        | 61.22  |
| 2018/04/16  | 51.79     | 0.34       | 51.39        | 53.20  |
| 2018/04/16  | 44.79     | 0.28       | 43.59        | 47.20  |
| 2018/04/17  | 50.56     | 0.32       | 48.85        | 29.36  |
| 2018/04/17  | 22.91     | 0.30       | 22.26        | 23.22  |
| 2018/04/18  | 19.15     | 0.38       | 19.24        | 21.98  |
| 2018/04/18  | 19.60     | 0.41       | 19.12        | 21.54  |
| 2018/04/20  | 13.08     | 0.30       | 11.30        | 15.13  |
| 2018/04/20  | 13.02     | 0.32       | 11.95        | 14.69  |
| 2018/04/23  | 8.05      | 0.27       | 7.17         | 10.24  |
| 2018/04/23  | 6.64      | 0.19       | 5.79         | 11.89  |
| 2018/04/24  | 9.02      | 0.50       | 8.07         | 11.97  |
| 2018/04/24  | 7.25      | 0.32       | 6.21         | 9.88   |
| 2018/04/27  | 5.73      | 0.22       | 5.45         | 9.30   |
| 2018/04/27  | 7.18      | 0.28       | 7.48         | 10.53  |
| 2018/05/01  | 4.95      | 0.22       | 4.40         | 7.94   |
| 2018/05/01  | 4.05      | 0.23       | 3.87         | 7.61   |
| 2018/05/02  | 159.50    | 0.72       | 153.10       | 134.06 |
| 2018/05/02  | 134.98    | 1.10       | 129.96       | 128.94 |
| 2018/05/07  | 12.27     | 0.35       | 12.71        | 15.19  |
| 2018/05/07  | 11.39     | 0.26       | 11.18        | 15.08  |
| 2018/05/09  | 8.55      | 0.34       | 8.49         | 11.88  |
| 2018/05/09  | 8.42      | 0.32       | 7.71         | 11.66  |

図4に、溶出試験における観測値と分析値の関係を示したが、両者を用いて当てはまりのよい一次回帰式 ( $y=1.06x-3.27$   $R^2=0.99$   $n=50$ ,  $x$ ; 観測値,  $y$ ; 分析値) が得られたので、この式を用いて観測値を補正して溶出量等の計算を行った。

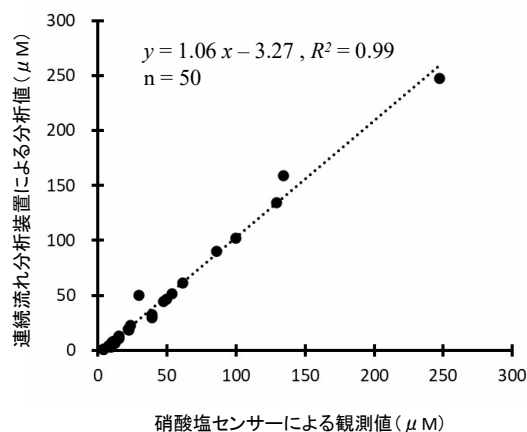


図4. 溶出試験時における硝酸塩センサーによる観測値と連続流れ分析装置による分析値との関係

各施肥具の1時間あたりの無機態窒素溶出量（以下、「溶出量」と記す。）を計算した結果を図5に示した。試験開始直後は数十mmol/h以上あった溶出量はその後すみやかに減少し、全ての施肥具で5日目には、4～5 mmol/hまで低下した。0～5日目までの期間の溶出量は、幅30mmタイプ、幅40mmタイプの順に多く、幅15mmタイプ、幅20mm×2タイプはやや少なく、幅30mm（2）タイプは最も少なかった。とくに、幅30mm（2）タイプの溶出量は、1日目にすでに10 mmol/h以下になるなど、他の施肥具と異なる傾向が見られた。5日目以降の溶出量の減少は次第に緩やかになり、溶出試験1および2で供した施肥具では10日目におよそ3 mmol/hとなった。一方、溶出試験3で供した施肥具では5日目以降の溶出量の他の施肥具に比べて減少が顕著で、試験が終了した9日目の溶出量は2 mmol/h程度まで低下した（図5）。

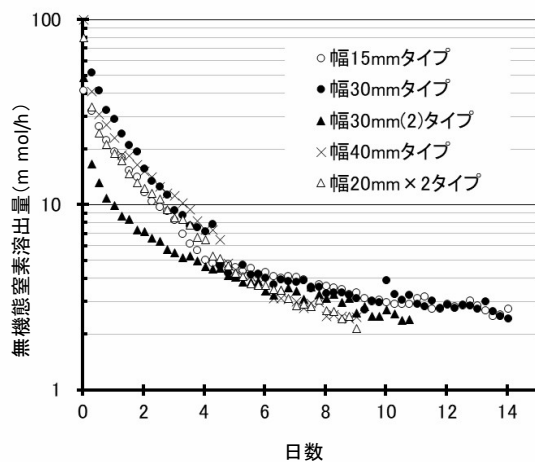


図5. 各施肥具の無機態窒素溶出量  
溶出量の計算は時間毎に行ったが、グラフ上では見やすいよう6時間毎にプロットした

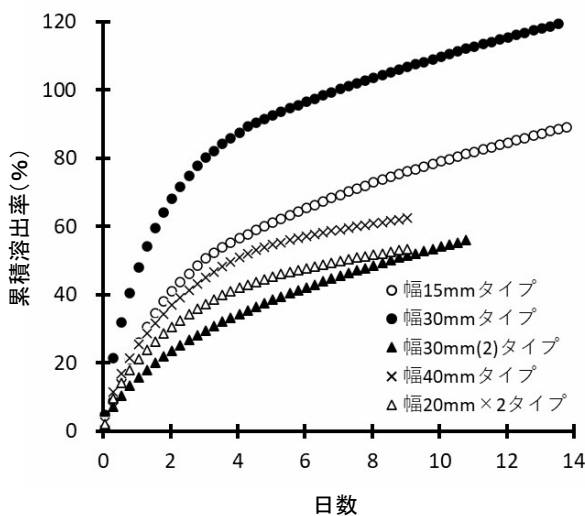


図6. 各施肥具の無機態窒素累積溶出率の推移  
プロットは図5と同じく6時間毎

図6に、溶出量から求められた各施肥具の累積溶出率の推移を示した。溶出試験1における幅30mmタイプの累積溶出率は、3日目で約80%、7日目には約100%となった。計算上、7日目には施肥具から無機態窒素が溶出し尽くしたことになるが、その後も溶出は続いたため最終的に14日目の累積溶出率は約120%となった。また、幅15mmタイプの累積溶出率は3日目でも約50%にとどまり、80%に達したのは10日目で、試験が終了した14日目におよそ90%となった。一方、幅30mm（2）タイプの累積溶出率は、3日目におよそ30%、試験が終了した11日目に約55%となり、同じ溶出口の幅が30mmの溶出試験1との差異が見られた。溶出試験3においては、幅40mmタイプおよび幅20mm×2タイプを供試したが、幅40mmタイプの方が試験を開始してから5日目までの溶出量が多く、その結果累積溶出率は、7日目の時点で前者が約60%、後者が約50%となった。

## 考 察

溶出試験により構造が異なる施肥具からの溶出特性の検討を行ったが、溶出試験1においては算出された累積溶出率は他の試験時よりも高い傾向がみられ、とくに幅30mmタイプでは、試験終了時の累積溶出率が約120%と施肥具の含有量以上の無機態窒素が溶出した結果となり、溶出量の計算方法に何らかの問題があったことが考えられた。

今回、予備試験の結果から、施肥具からは硝酸態窒素とアンモニア態窒素が同モル数溶出すると仮定し、硝酸塩センサーの観測値のみで溶出量の計算を行い、アンモニア態窒素濃度については検討しなかった。ただし、この仮定が間違っていたとしても、今回の計算方法では施肥具の含有量以上の硝酸塩が溶出したという結果は導かれなため、想定外の要因で硝酸塩の溶出量を過大に評価していた可能性が考えられた。

例えば、溶出したアンモニア態窒素が観測システム内で酸化されて硝酸態窒素に変化した場合などが考えられる。そこで、観測値を補正するために実施した連続流れ分析装置による分析結果から、試験水の硝酸塩濃度 ( $[NO_3^-]$  とする) とアンモニア態窒素濃度 ( $[NH_4^+]$  とする) の比率 ( $[N-N比] = [NO_3^-] / [NH_4^+]$  とする) の変化を調べた。なお、試験1を終了後も試験水槽の換水はそのまま継続し、2017年10月27～31日にも溶出試験を実施（この試験は、システムのトラブルにより5日間で中止）したので、これらの期間も含めて  $[N-N比]$  の変化を調べた（図7）。その結果、溶出試験2および3を含む期間中は  $[N-N比]$  はほぼ1で一定であったが、溶出試験1については試験開始直後に約1であった  $[N-N比]$  が試験開始後5日目には1.5～2程度に上昇し、さらに別の溶出試験を行った2017年10月31日（溶出試験1を開始してから24日目）には3前後まで上昇した。このことから、溶出試験1では施肥具から溶出したアンモニア態窒素の一部が酸化されて硝酸態窒素に変化していた可能性が考えられたため、まず、その酸化率の推定をおこなった。

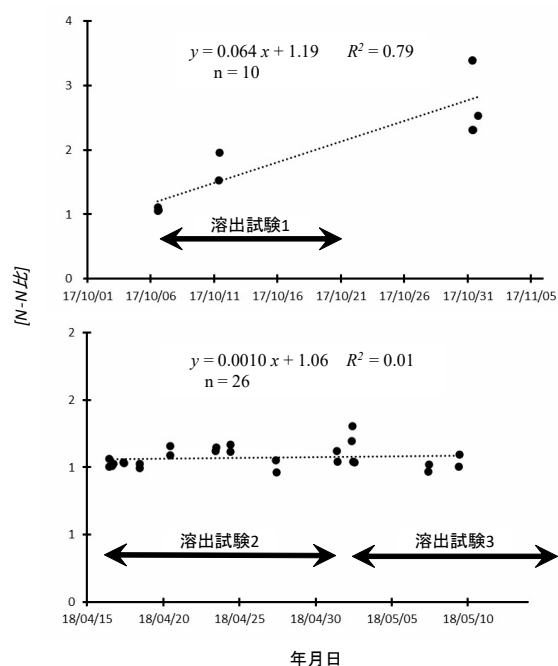


図7. 溶出試験実施時の[N-N比]の変動

施肥具から硝酸態窒素とアンモニア態窒素が同モル数溶出し、溶出したアンモニア態窒素が試験水槽内で酸化された割合（以下、「酸化率」と記す）を $a$ とすると、硝酸塩センサーによって観測された試験水の硝酸塩濃度 $NO_3\text{ suna}$ は、実際に施肥具から溶出した硝酸態窒素による硝酸塩濃度 $NO_3\text{ elu}$ の $(1+a)$ 倍、すなわち $NO_3\text{ suna} = (1+a)NO_3\text{ elu}$ となるので、

$$NO_3\text{ elu} = (1 / (1+a)) NO_3\text{ suna} \cdots \textcircled{1}$$

となる。そして、溶出試験1を実施した期間中のアンモニア態窒素の酸化率は次の方法で推定した。まず、[N-N比]と $a$ との間には、 $[N-N比] = (1+a)/(1-a)$ の関係が成り立つ。したがって、

$$a = ([N-N比] - 1) / ([N-N比] + 1) \cdots \textcircled{2}$$

となる。このとき、試験期間中の分析で検出された補給水に含まれたアンモニア態窒素濃度は、 $0.63\mu\text{M}$ 、 $0.74\mu\text{M}$ および $1.04\mu\text{M}$ （表2）で、補給水によるアンモニア態窒素の供給量は一時間当たり数十 $\mu\text{M}$ 程度と施肥具からの供給量に比べて極めて少ないと考えられたためその影響は算入しなかった。

また、試験期間中の[N-N比]は、図7に示した[N-N比]と試験開始後日数（ $x$ ）との関係から導かれた次の一次回帰式を用いて推定した。

$$[N-N比] = 0.064x + 1.19 \cdots \textcircled{3}$$

式①、②および③より、 $NO_3\text{ elu}$ を求め、 $n$ 回目の観測値（ $X_n$ ）の代わりにこの値を用いて溶出試験1における施肥具からの無機態窒素溶出量の再計算（[N-N比]による補正）を行った。再計算の結果求められた累積溶出率を他の溶出試験とともに図8に示した、再計算により、溶出試験1における無機態窒素の溶出量は減少し、7日目の溶出量は再計算前の約 $4\text{ m mol/h}$ から約 $3\text{ m mol/h}$ となり、例えば幅30mmタイプの累積溶出率は試験終了時でもおよそ100%と含有する以上に溶出するという結果にはならなかった。再計算で用いた試験期間中の無機態窒素の分析回数は少なく、また、試験水槽内での

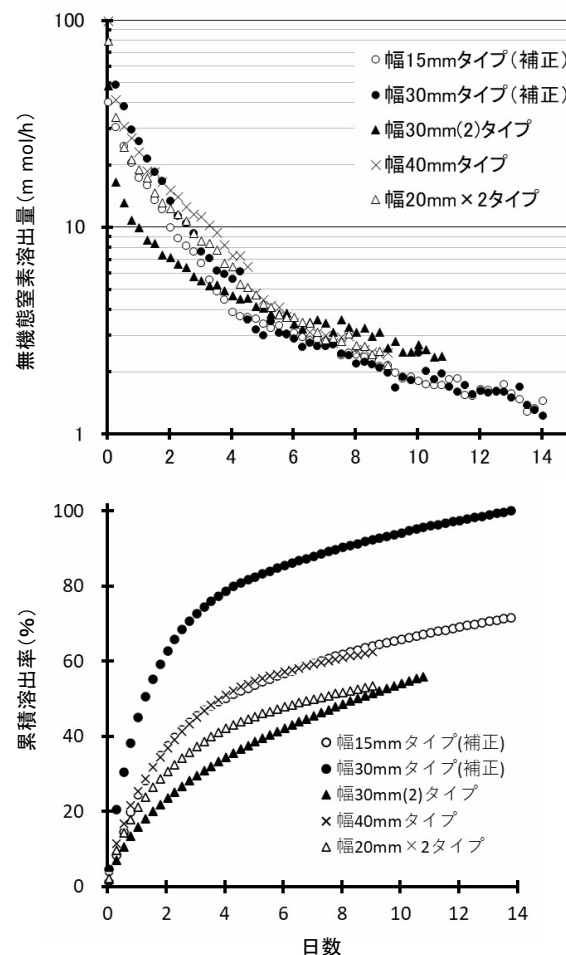


図8. 各施肥具の無機態窒素溶出量と累積溶出率の推移（溶出試験1の結果は[N-N比]による補正を行った）  
グラフのプロットは図5と同じく6時間毎

アンモニア態窒素の酸化過程、とくにその過程で生成される亜硝酸態窒素の濃度を考慮していないなど酸化率の推定には精度上の問題があるが、再計算の結果より妥当な値となったことや、試験開始前に観測システム内の洗浄を行った溶出試験2、3では[N-N比]がほぼ1であったことから、アンモニア態窒素の酸化が起こった可能性が高く、今後同様の試験実施時には、硝酸態窒素以外の無機態窒素濃度のチェックも必要と思われる。また、再計算によりやや低下したものの溶出試験1における施肥具からの溶出量は多い傾向が見られたが、その原因については、溶出試験1の水温が他の試験よりも高かった（図3）ことによる影響が考えられ、今後、溶出量と水温の関係についても検討する必要がある。

供試した各施肥具の溶出特性を比較すると、溶出試験2で供試した幅30mm(2)タイプは、他の施肥具と比べて試験開始後数日の溶出量が少ないにも関わらずその後の溶出量が多い傾向がみられた（図8）がその原因は特定できなかった。一方、幅30mm(2)タイプ以外の施肥具には、試験開始後6日目以降の溶出量にほとんど差が見られず、累積溶出量の差は、もっぱら試験開始後数日間の溶出量の差によるものであった（図8）。これは、本研究で供試した半透膜を用いた施肥具に共通にみられる特徴の可能性もあるが、前述の幅30mm(2)タイプに見ら

れた他とは違う溶出特性も含めて、同様の試験を繰り返すことでその要因を明らかにする必要がある。

今回実施した試験結果から硝酸アンモニウム100～150 g 含有する直径48mm、溶出部位幅15～40mmの半透膜を用いた施肥具の無機態窒素の溶出特性は次のようなものと考えられた。

- ① 溶出量は溶出開始直後は数十m mol/h以上になるなど多く溶出するが、その後速やかに減少する
- ② 水温が低いと溶出量が少なくなる可能性がある
- ③ 溶出部位の面積が大きいほど溶出量が多くなり、とくに使用開始して数日間はその傾向が顕著であるが、その一方で、使用開始後数日以降は、溶出部位の面積が大きくても溶出量に顕著な差は見られない

これらの特性のうち②に関しては、試験時の水温が低かった溶出試験2および3では、試験を終了した溶出開始後10日前後の時点で施肥具内には溶出前のおよそ50～60%の無機態窒素が残っていた（図8）。また、試験終了時における各施肥具の1時間あたりの溶出量はおよそ2 m molで、これは、その時点で施肥具内部に残っていた無機態窒素量の0.2%未満に過ぎず、ワカメの色落ちが発生する冬季の海水温では施肥具内に長期間無機態窒素が残留して順調に溶出しないことが考えられた。このことから、低水温下でも順調に成分を溶出させるには、施肥具の構造（形状や溶出部位の位置・面積など）を再検討する必要がある。

加藤ら（2022）は、ペットボトルが管体の半透膜を利用した藻類養殖用の施肥具により、色落ちした養殖アマノリの色調を回復させた。この施肥具は安価であることが大きな利点であるが、溶出部位はボトルキャップにあり、ボトルの口径以上にその面積を拡大できず、さらなる溶出量の増加は困難と考えられる。一方、本研究で開発した施肥具は大きさや溶出部位の面積についての自由度が高く、肥料成分の溶出量を増加させ易い。しかしながら、試算した原材料費は1個あたり千数百円程度と実用化のためにはコストダウンが必要と考えられた（表3）。寒天や硝酸アンモニウムは今回高額な実験用の試薬を用いたが、これらのものについては、業務用の寒天や農業用肥料（硝安）を用いることで大幅なコストダウンが可能と考えられる。一方、半透膜は1個あたりの経費がおよそ900円と半分以上を占めた。施肥具の構造を工夫し、溶出部位以外の部分の半透膜をできるだけ少なくするなどの改良が必要である。

表3. 試験実施当時の施肥具1個あたりの原材料費（概算）の計算結果

| 品名       | 規格                             | 単価(円)  | 施肥具1個あたり |       |
|----------|--------------------------------|--------|----------|-------|
|          |                                |        | 使用量      | 経費(円) |
| ガスバリア袋   | 300mm×450mm                    | 60     | 0.5枚     | 30    |
| 寒天       | 植物培地用(粉末)500g入り                | 7,000  | 9g       | 130   |
| 硝酸アンモニウム | 試薬一級、500g入り                    | 2,000  | 150g     | 600   |
| 半透膜      | Repligen社製スペクトラノボア4、直径48ミリ、15m | 53,000 | 250mm    | 880   |
| 合計       |                                |        |          | 1,640 |

## 謝 辞

本研究は、平成29年度水産庁補助事業、漁場環境・生物多様性保全総合対策事業のうち赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「漁場生産力向上のための漁場改善実証試験」の成果の一部によるものである。本研究を行うにあたり、栄養塩分析をしていただいた鳴門庁舎の職員に感謝する。また、半透膜を用いた施肥具の設計に関していろいろと助言いただいた、当時の徳島県水産研究課長の上田幸男氏に心より感謝申し上げます。

## 文 献

- 阿保勝之・秋山 諭・原田和弘・中地良樹・林 浩志・村田憲一・和西昭仁・石川陽子・益井敏光・西川 智・山田京平・野田 誠・徳光俊二（2018）瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因. 沿岸海洋研究, **55**, 101-111.
- 赤池章一・菊池和夫・門間春博・野澤 靖（1998）1年目リシリコンブ胞子体の生長に及ぼす窒素、リン施肥の影響. 水産増殖, **46**, 57-65.
- Bricaud A, Morel A, Prieur L (1981) Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. Limnol, Oceanogr, **26**, 43-53.
- Hojerslev K N, Aas E (2001) Spectral light absorption by yellow substance in the Kattegat-Skagerrak area. Oceanologia, **43**, 39-60.
- 池脇義弘 藻類養殖用施肥具. 特許第6709942号 (2020)
- 池脇義弘・柏 俊行（印刷中）一台の硝酸塩センサーによる複数系統水の交互観測システムの開発. 水産技術, **18**.
- 池脇義弘・牧野賢治・西岡智哉・平野 匠・上田幸男（2016a）ゼラチンを用いた藻類養殖用施肥剤の開発. 日水誌, **82**, 917-922.
- 池脇義弘・牧野賢治・西岡智哉・枝川大二郎・平野 匠（2016b）紀伊水道西部及び周辺海域のノリ・ワカメ養殖場における施肥による栄養塩供給実証試験. 平成27年度漁場生産力向上のための漁場改善実証試験成果報告書, 49-68.
- 池脇義弘・牧野賢治・西岡智哉・平野 匠・石川陽子・上田幸男（2017）紀伊水道西部及び周辺海域のノリ・ワカメ養殖場における施肥による栄養塩供給実証試験. 平成28年度漁場生産力向上のための漁場改善実証試験成果報告書, 51-63.
- 石井光廣・長谷川健一・松山幸彦（2008）東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因：栄養塩の長期変動. および最近の珪藻赤潮発生. 水産海洋研究, **72**, 22-29.
- 加藤慎治, 朝田健斗, 池脇義弘, 吉田和貴, 岡 直宏, 團 昭紀, 濱野龍夫（2022）ペットボトルと半透膜を用いた安価で簡便な藻類養殖用施肥具の開発. Algal Resources, **15**, 33-42.

川口修・山本民次・松田治・橋本俊也（2004）水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明．海の研究，**13**，173-183.

川村嘉応・久野勝利・横尾一成（2011）佐賀有明海で実施されている栄養塩添加の現状．佐賀県有明海水産研究所報告，**25**，81-87.

牧野賢治，住友寿明，中西達也，加藤慎治，平野匠，上田幸男（2015）養殖ワカメの色落ちのメカニズムと対策．海洋と生物，**37**，254-260.

松岡聡・吉松定昭・小野哲・一見和彦・藤原宗弘・本田恵二・多田邦尚（2005）備讃瀬戸東部（香川県沿岸）におけるノリ色落ちと水質環境．沿岸海洋研究，**43**，77-84.

三浦昭雄（1957）ノリ養殖における施肥の方法．水産増殖，**4**，43-48.

村山史康・清水泰子・高木秀蔵（2015）岡山県ノリ漁場における栄養塩濃度とノリの色調および乾海苔単価との関係．日水誌，**81**，107-114.

野沢 洽（1953）浅草海苔に対する尿素肥料の施肥について．水産増殖，**1**，34-36.

龍満直起・宮川昌志・阿保勝之・末永慶寛・多田邦尚・本城凡夫（2021）香川方式ノリスカートによるノリ養殖漁場への新施肥技術．日水誌，**87**，23-30.

多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫（2010）瀬戸内海の水質環境とノリ養殖．分析化学，**59**，945-955.

高木秀蔵・清水泰子・阿保勝之・柏俊行（2015）硝酸塩センサーを用いたノリ漁場栄養塩テレメトリーシステムの開発．水産技術，**7**，97-103.

反田 實，赤繁 悟，有山啓之，山野井英夫，木村博，團 昭紀，坂本 久，佐伯康明，石田祐幸，壽 久文，山田卓郎（2014）瀬戸内海の栄養塩環境と漁業．水産技術，**7**，37-46.