

ウォータータンクを用いた大型藻類養殖用施肥具の溶出特性

池脇義弘*

Dissolution characteristics of large fertilizer for algae cultivation using water carry tanks

Yoshihiro IKEWAKI*

In order to restore the color of discolored cultured wakame seaweed, a large fertilizer for algae cultivation was developed to restore a wide area with one fertilizer. The container for the fertilizer was a commercially available water carry tank and the fertilizer component was a solution containing 1,500 g of ammonium nitrate solidified with agar. The fertilizer component was leached externally through holes at the side of the container. The leaching of the fertilizer component varied greatly depending on the water flow around the fertilizer and the movement of the container, so it was not possible to estimate the exact values when the fertilizer was applied in the wakame cultivation area, but it was considered that the fertilizer would leach out smoothly even at low water temperatures in winter, when wakame color fading occurs.

キーワード：養殖ワカメ，大型施肥具，ウォータータンク，硝酸アンモニウム

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いる（松岡ら2005，多田ら2010，牧野ら2015，村山ら2015）。そこで，筆者らは，藻類養殖の色落ち対策として，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2016）。

さらに，池脇（2025）が開発した，硝酸アンモニウム溶液を寒天で固めた施肥剤から半透膜を通して肥料成分が溶出する施肥具をワカメの養殖漁場に設置したところ，色落ちしたワカメの色調回復に成功した（池脇 未発表）。しかしながら，低水温では肥料成分が溶出しにくいことや潮流の方向によっては施肥具の効果範囲が狭くなる場合があることなどいくつかの課題が残された。

本研究では，施肥具の効果範囲を広げるため，より大型の施肥具を開発し，その肥料成分の溶出特性を調べた。

材料と方法

本研究で供試した施肥具の容器は，市販の10Lのウォータータンク（ミワックス社製 WA-10）を用いた。この中に，硝酸アンモニウム（和光純薬製，試薬1級）1,500 gをイオン交換水3Lで溶かし，90 gの寒天（和光純薬製，植物培養用）で固めたもの（以下，「施肥剤」という。）を入れ，肥料成分の溶出口として容器の上面に1個，側面の上端から5cmの箇所1面あたり6個，計24個の直径8mmの穴を開けた（表1，写真1）。なお，上面の穴は，空気抜きを兼ねている。

表1. 施肥具の形状と成分

施肥具容器	
形状	立方体
一辺の長さ	約210mm
容積	約10L
施肥剤の成分	
蒸留水	3L
硝酸アンモニウム	1,500g
寒天	90g
施肥剤の容積	約5L
溶出孔の大きさと個数	
直径	8mm
上面	1個
側面	24個

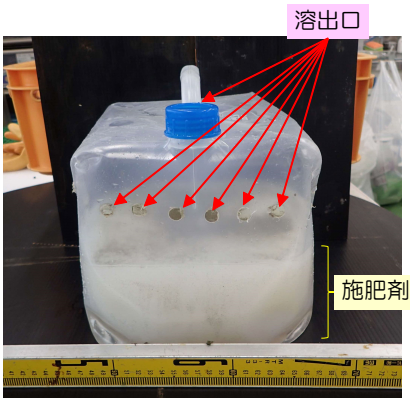


写真1. 施肥具の外形

施肥具の溶出特性を室内実験により次の方法で調べた。まず，500Lパンライト水槽（田中三次郎商店製S B F - 100）に500Lの海水を張り，その中央部に施肥具を1個吊り下げた。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。

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)

施肥具から溶出した無機態窒素の量を推定するため、施肥具を設置した水槽の水（以下、「試験水」と記す。）の硝酸態窒素濃度（以下、「硝酸塩濃度」）を、Sea-Bird Scientific社製紫外線水中硝酸塩アナライザーSUNAV2ワイパー付きモデル（以下、「硝酸塩センサー」と記す。）により観測した。試験水は小型水中ポンプ（エーハイム社製コンパクト1000）により硝酸塩センサーを設置した観測用の水槽に送水し1時間毎に硝酸塩濃度の観測を行った。1回の観測のために毎時140Lの試験水を排出し、そのうち70Lを硝酸塩センサーを設置した観測用水槽に送り、観測直後に排出した水と同量の海水を水槽に補給した。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が、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。

試験水の海水温はK N 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。硝酸塩センサーによる観測値（以下、「観測値」という）を用いて施肥具から無機態窒素が溶出した量（モル数）を次の方法で算出した。なお、観測値は有色溶存有機物（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）。そこで、観測用水槽の水を適宜採取し、中に含まれる硝酸塩濃度を連続流れ分析装置（ビーエルテック社製s w A A t）で分析し、得られた値（以下、「分析値」という）と観測値との関係を用いて観測値の補正を行った。なお、施肥具からの無機態窒素溶出量を調べる試験（以下、「溶出試験」と記す。）は、2019年2月22日～3月5日の11日間おこなったが、補正に用いた硝酸塩濃度の分析結果は、この溶出試験とその前に同年2月5日から実施した予備試験の期間中のものを用いた。以下ではこの補正された観測値を試験水槽内の硝酸塩濃度として扱い以下の計算を行った。

1回の観測のために500Lの試験水のうち140Lを毎時交換したため換水率は0.28/hとなるので、 n 回目の観測時における試験水の硝酸塩濃度を X_n （硝酸塩濃度の単位は μM 、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、海水補給直後の試験水の硝酸塩濃度は計算上、 $\{X_n \times (1 - 0.28) + K_n \times 0.28\}$ となる。したがって、 n から $n+1$ 回目の観測の間に施肥具から溶出した無機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。

$$Y_n = X_{n+1} - \{0.72 X_n + 0.28 K_n\} \cdots \textcircled{1}$$

施肥具から溶出した無機態窒素のモル数は Y_n と前述の補正に用いた無機態窒素の分析結果から次のように求めた。まず、試験水の分析結果から、試験水槽内の硝酸塩濃度 $[NO_3^-]$ とする）とアンモニア態窒素濃度 $[NH_4^+]$ とする）の比率 $a = ([NH_4^+] / [NO_3^-])$ を求めた。そして、 n 回目から $n+1$ 回目の観測の間に施肥具から溶出した硝酸態窒素のモル数を $M_n \text{ mmol}$ （ミリモル）とすると、

$M_n = (Y_n + aY_n) \times 500 / 1000 = (1 + a) Y_n / 2$ となる。さらに、施肥具から溶出した無機態窒素の割合を $Elu \%$ （以下、“累積溶出率”という。）とすると、溶出前の施肥具に含まれる無機態窒素のモル数 $M_{total} \text{ mmol}$ と、溶出試験中の無機態窒素の累積溶出モル数 ΣM_n を用いて、 Elu は次式で計算される。

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

なお、試験水槽内では施肥具は静止しているため施肥具周囲の水流はほぼ一定と考えられるが、実際の養殖漁場では施肥具は波浪で揺れ、周囲の潮流も変動する。そこで、あわせて波浪や潮流が溶出に与える影響をみるため、試験中に表2に示した操作をおこない、溶出量の変化を見た。

表2. 溶出試験において施肥具からの無機態窒素の溶出量の変化を見るためおこなった操作

試験開始後日数	行った操作
3日目	施肥具を数回揺らす
7日目	エアレーションの位置を施肥具から離す
10日目	施肥具を一回上下反転させる

結 果

溶出試験中の試験水槽の水温は、概ね11～11.5℃付近で推移した（図1）。図2に硝酸塩濃度の観測値と分析値の関係を示した。両者を用いて当てはまりのよい一次回帰式（ $y = 1.45x + 5.13$ $R^2 = 0.99$ $n = 20$, 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、この補正値を用いて以下の計算を行った。

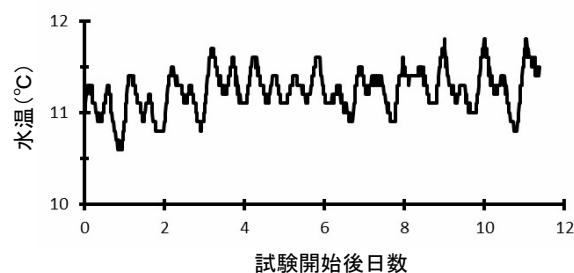


図1. 溶出試験時の水槽水温の変化

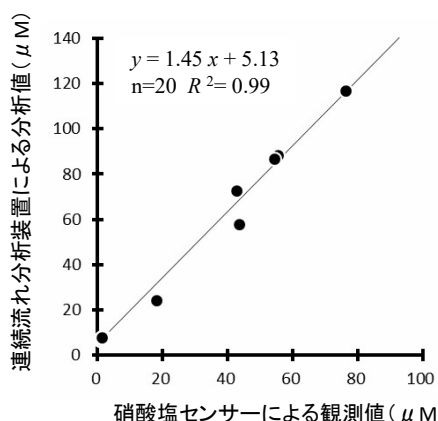


図2. 溶出試験時における硝酸塩センサーによる観測値と連続流れ分析装置による分析値との関係

また、 M_n を求めるために用いた試験水の分析結果を表3に示した。これらの分析結果の硝酸塩濃度とアンモニア態窒素濃度との関係を図3に示したが両者を用いて当てはまりのよい一次回帰式 ($y=1.52x-3.41$ $r^2=0.98$ $n=6$, x : 硝酸塩濃度, y : アンモニア態窒素濃度) が得られたことから、試験期間中の a はこの一次回帰直線の傾き1.52で一定と仮定して施肥具からの無機態窒素の溶出量 M_n の計算を行った。なお、無機態窒素の溶出により試験水の無機態窒素濃度が100 μ M以上と高濃度になった場合でも亜硝酸態窒素は3 μ M未満であった(表3)ので、この計算をするにあたり亜硝酸態窒素濃度は考慮しなかった

表3. 試験水の無機態窒素濃度分析結果

なお、2つある試験水槽のうち2019/2/5から行った予備試験はTank1を、2019/2/19から行った溶出試験はTank2で実施した

年月日	水槽番号	分析値 (μ M)			観測値
		硝酸態窒素	亜硝酸態窒素	アンモニア態窒素	
2019/02/05	Tank1	76.27	2.34	108.84	117.05
2019/02/12	Tank1	55.46	1.57	85.15	88.19
2019/02/19	Tank1	43.42	2.76	57.93	57.92
2019/02/19	Tank2	18.05	1.31	21.92	24.24
2019/02/26	Tank2	42.67	1.55	65.87	72.53
2019/03/05	Tank2	54.45	2.23	81.20	86.75

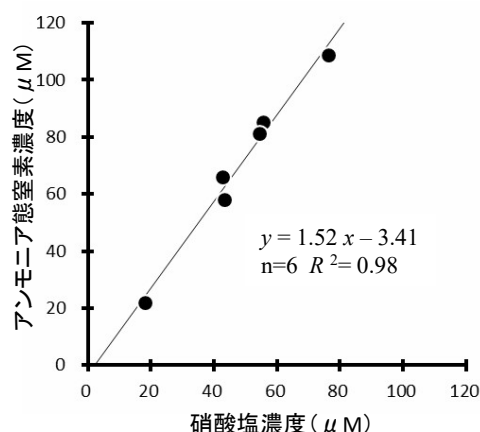


図3. 溶出試験時の試験水に含まれていた硝酸塩濃度とアンモニア態窒素濃度の関係

図4に溶出試験における施肥具からの1時間あたりの無機態窒素の溶出モル数の変化を示した。施肥具からの無機態窒素の溶出モル数は、試験開始直後のおよそ十数 m mol/h から徐々に増加し、試験開始後3日には20 m mol/h 以上となった。また、試験開始後3日目に施肥具を揺らした直後の数時間に最大約170 m mol/h までの溶出量の急増が見られた。その後は図4に示したB, Cの時点でおこなった操作直後以外の無機態窒素の溶出モル数は、30 m mol/h 前後でほぼ横ばいの変動を示した。一方、試験開始後7日目のエアレーションを行う位置を水槽の中心部から端に移動させた直後は一時的に無機態窒素の溶出量が最も低い時で3.2 m mol/h まで低下した。また、試験開始後10日目の施肥具を上下に一回転させた操作の後には、無機態窒素の溶出量が最大約1,400 m mol/h まで急増した。

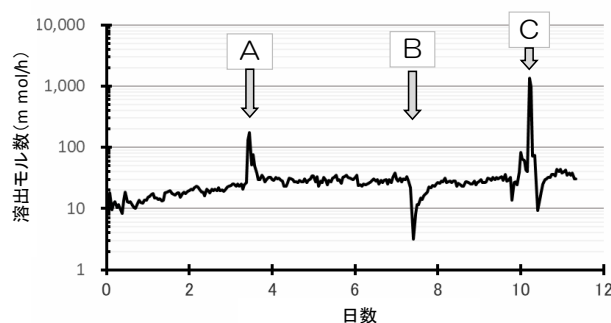


図4. 施肥具からの1時間あたりの無機態窒素の溶出モル数の変化

図に示したA, BおよびCの時点で、施肥具に対して次の操作を行なった

- A: 施肥具を数回揺する
- B: エアレーションを施肥具から遠ざける
- C: 施肥具を一回上下反転させる

図5に、施肥具からの無機態窒素の累積溶出率の経時の変化を示したが、施肥具に対して計3回行った操作時以外は、ほぼ直線的になだらかな上昇を示した。一方、3回行った操作のうち3回目の施肥具を一回転させる操作の直後は、無機態窒素の溶出量の急増により累積溶出量は数時間の間におよそ13%上昇し、試験終了時には約50%となった。

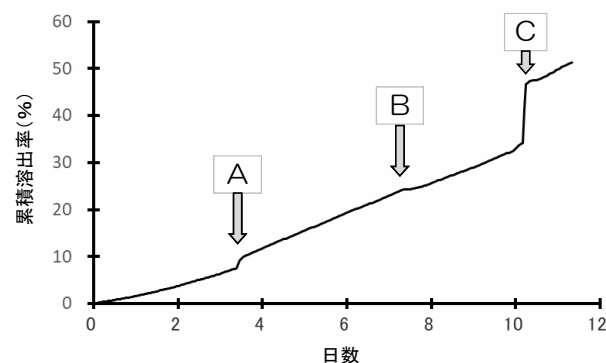


図5. 溶出試験における施肥具からの累積溶出率の変化

図に示したA, BおよびCの時点で、施肥具に対して表2に示した操作を行なった

考 察

本研究で開発した施肥具は、施肥具内の施肥剤の容積を施肥容器の容積の半分程度にして施肥具内に空洞を作り、また、溶出口を施肥具の上面から5 cmと容器の上寄りに開けたのは、まず空洞に海水よりも比重が重い溶出した肥料成分を高濃度に含む海水が溜まり、その後、肥料成分が拡散しながら溶出口から施肥具外部へ徐々に溶出することで施肥の効果を長持ちさせる狙いがあった(図6)。溶出試験では、10日以上肥料成分の溶出が続くことが確認され、当初の狙いどおりの結果となった。また、試験期間中に行なった操作(表2および図4にA, B, Cとして示したもの)により成分の溶出量は増減したが、この操作と溶出量との関係から、肥料成分は、施肥具が

水流の弱い水中に静置していたときには外部に出てゆきにくい、施肥具の周囲の水流が強くなったり施肥具自身が揺れたりすることで溶出量が増加すると推察された。とくに、溶出試験で施肥具を一度回転させただけで成分の約13%が溶出したことから、実際の養殖漁場に設置した場合には波浪などで施肥具が揺れ続けることがあるため、溶出試験時よりもかなり速いペースで溶出する可能性が考えられた。

池脇（2025）は、本研究と同じ硝酸アンモニウム水溶液を寒天で固めた施肥剤を用いた藻類養殖用施肥具を開発し、その溶出特性を調べたが、溶出する硝酸態窒素とアンモニア態窒素のモル比は施肥剤に含まれる両無機態窒素の存在比率と同じ1:1であった。一方、本研究で開発した施肥具からは溶出する両無機態窒素のモル比は1:1ではないと推定された。このような違いが起こる理由については不明であるが、池脇（2025）の施肥具は、無機態窒素が半透膜を介して溶出するのに対して、今回開発した施肥具は施肥容器に開けた溶出口から無機態窒素が溶出する。施肥剤は、寒天を溶かすため一度90℃以上に温めた後に室温で冷却し数日間冷蔵庫で保存した後に供試したが、施肥具容器内には溶出口を通して自由に細菌等が侵入可能なため、作製後試験に供する間に施肥剤に何らかの化学的変化が生じた可能性も考えられた。

池脇（2025）の半透膜を用いた施肥具は、2週間後も溶出が継続したがその量は時間の経過とともに減少し、ワカメの色落ちが発生する冬季の海水温条件下では含有する無機態窒素が溶出しにくいことが考えられた。一方、本研究で開発した施肥具は、溶出開始から10日以上経過しても40 mmol/h程度無機態窒素の溶出が続いており、11～12℃（図1）と、ワカメの色落ちが発生する冬季の水温条件下でも順調に成分が溶出し続けると推察された。ただし、流れや波浪などの漁場の海況に左右されるため溶出量をあらかじめ予測はできないことが欠点として挙げられる。

本研究で開発した施肥具は1個当たり1,500gと、池脇（2025）が開発した半透膜を用いた施肥具の10倍の硝酸アンモニウムを含有している。溶出試験において、水槽中で静置した状態での無機態窒素の溶出量はおおよそ30 mmol/hと前述の半透膜を用いた施肥具を供試して7日経過したときのおおよそ10倍である。このことから、本研究で開発した施肥具により、より広い範囲で色落ちを回復させる効果があることが期待される。

謝 辞

本研究は、平成30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。

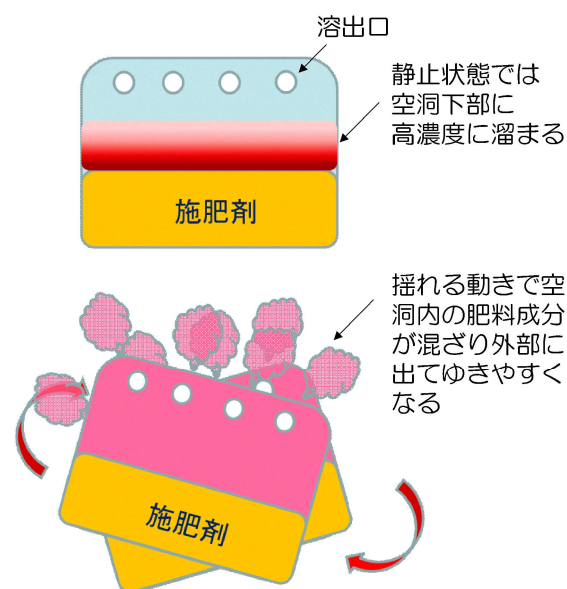


図6. 施肥具から肥料成分が溶出する概念図

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.
- 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（2025）半透膜を用いた藻類養殖用施肥具の溶出特性について。徳島水研報, **15**, 1-7.
- 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（2016）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.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

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.