

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02331

研究課題名（和文）メタン発酵消化液ペレットを用いた陸海を繋ぐ新たな貧栄養海域の肥沃化法

研究課題名（英文）An innovative strategy for fertilization of oligotrophic seas with land-ocean linkages using a terrestrial anaerobic digestate pellet

研究代表者

浅岡 聡 (Asaoka, Satoshi)

広島大学・統合生命科学研究科（生）・准教授

研究者番号：60548981

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：バイオガス発電の安定的な普及のためには、副生するメタン発酵消化液の新たな利活用先の開拓が必要である。本研究では畜産廃棄物のメタン発酵で生じた消化液をペレット化し、昨今、社会問題となっているノリの色落ちや漁獲量が低下した貧栄養化海域を肥沃化するための「海洋肥沃化ペレット」を作製した。室内実験、現場を模した水槽実験、現場におけるベンチスケール実験を行ったところ、海洋肥沃化ペレットを施用すると海洋肥沃化ペレットから栄養塩が溶出し、微細藻類の増殖、ワカメの生育改善が認められた。したがって、海洋肥沃化ペレットは陸と海を繋ぐ新たな栄養塩フローを創出できる可能性を秘める。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状、メタン発酵によるエネルギー生産における副産物（消化液）の通年にわたる有効利用方法が見つかっておらず、バイオガス発電の普及の妨げになっている。また、近年では栄養塩の流入負荷削減などによって、沿岸域の貧栄養化が進行し、ノリの色落ちや漁獲量の低下が社会問題となっている。本研究では、メタン発酵で副生する消化液に含まれる栄養塩が海洋肥沃化ペレットを介して藻類の生長に利用できることを立証した。したがって、消化液を新たに貧栄養海域における肥沃化材料としてリサイクルすることで、消化液の新たな利活用先を提案し、バイオガス発電の普及と貧栄養化対策の両立を達成するため要素技術を示した。

研究成果の概要（英文）：For the development and popularization of biogas power plants, it is necessary to develop alternative applications of anaerobic digestate which is a byproduct of methane fermentation.

In this study, we developed anaerobic digestate pellets to fertilize oligotrophic coastal seas. Batch experiments, tank experiments to simulate oligotrophic coastal seas and bench-scale experiments in the field were conducted. The results revealed that the nutrients dissolved from the anaerobic digestate pellets were taken up by marine microalgae and seaweed. The anaerobic digestate pellets enhanced the growth of marine microalgae and seaweed. The anaerobic digestate pellets proposed in this study can create novel nutrient mass flow by connecting terrigenous anaerobic digestate from biogas power plants to oligotrophic seas.

研究分野：環境分析化学

キーワード：貧栄養化 栄養塩 資源循環 メタン発酵 消化液 藻類 肥沃化 SDGs

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

農林水産省によると国内で年間8013万トンもの畜産系廃棄物が発生する<sup>1)</sup>。畜産系廃棄物は、堆肥化、液肥化、焼却処理などが行われているが、昨今、循環型社会形成の観点から陸域バイオマスの資源循環が重要視され、畜産廃棄物からバイオ燃料(メタンなどのバイオガス)と消化液(液肥)の両方が得られるメタン発酵によるバイオガス発電が脚光を浴びている。これまでメタン発酵プラントで副生する消化液は栄養塩に富むため、有効利用法として液肥として利活用されてきた。しかし、消化液(液肥)は主に春に農地に施肥され、他の季節は液肥の供給過剰が生じて排水処理されてきた。消化液の排水処理に係る消費電力量が大きいことから、メタン発酵による畜産廃棄物処理とバイオガス発電を両立させた循環型社会の形成のためには、通年に亘って有効利用が可能な新たな消化液の利活用先の開拓が社会的喫緊の課題である。

瀬戸内海では漁獲量の低下、ワカメ、ノリなどの色落ちが大きな社会問題となっており、原因のひとつとして貧栄養化が指摘されている。貧栄養化とは水質総量規制などの総合的水質保全対策によって水質は改善されたものの、陸からの栄養塩の流入負荷減少などによって、その水域の生産力が低下する現象である。

本研究では、メタン発酵で副生する栄養塩に富む消化液と高炉セメントを混合し、貧栄養化した沿岸域を肥沃化するための「海洋肥沃化ペレット」を作製し、海洋肥沃化ペレットから徐放的に栄養塩を溶出させることで新規な貧栄養海域の肥沃化方法を提案する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、メタン発酵消化液の新たな利活用方法の開拓と貧栄養化海域の肥沃化を両立させるため、メタン発酵で副生する消化液と高炉セメントを混合した「海洋肥沃化ペレット」を作製し、海洋肥沃化ペレットから徐放的に栄養塩を海水中へ溶出させ、新たな陸と海を繋ぐ栄養塩のマテリアルフローを創出することで貧栄養化問題を解決できるかどうかを検証することである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 海洋肥沃化ペレットからの栄養塩溶出挙動

海洋肥沃化ペレットからの栄養塩の溶出試験では、基質の異なるメタン発酵消化液にバインダーとして高炉セメントを25%添加し作製した海洋肥沃化ペレット0.2 g、30 psuの人工海水50 mLをシリコ栓付きの100 mL三角フラスコに添加し、25°Cの恒温器内で100 rpmにて振とうした。7日後、人工海水を採取し、海洋肥沃化ペレットから溶出した栄養塩を測定した。

#### (2) 海洋肥沃化ペレットによる微細藻類の増殖試験

微細藻類の増殖試験では、瀬戸内海の安芸灘で採取した自然海水を目開き200  $\mu\text{m}$ の網でろ過し、大きな動物プランクトンを除去した。その自然海水(125 mL、塩分30 psu)を、260 mL容の組織培養フラスコに分注し、0.5 gの海洋肥沃化ペレットを添加した。また、海洋肥沃化ペレットを添加しない対照区を設けた。その後、人工気象器内で12:12時間の明暗周期で光量50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、20°Cで培養した。経日的に培地内の海水のサンプリングを行いクロロフィルa濃度を測定した。

#### (3) 屋外水槽によるワカメの養殖試験

屋外の100 L黒色ポリエチレン水槽に、砂ろ過自然海水を交換率2回/日でかけ流した。大型水槽1基あたり海洋肥沃化ペレット区では海洋肥沃化ペレット4個(170-180 g x 4個)設置した。また、対照区はコンクリートペレット4個を設置した。また、それぞれの水槽にワカメの幹縄2本を設置した。以降、適宜ワカメの色落ちの状況に応じて海洋肥沃化ペレットの追加、ワカメの間引きを行った。

水槽内の栄養塩濃度、クロロフィルa濃度、水温、塩分を経日的に測定した。また、実験最終日にはワカメの湿重量等を測定した。

#### (4) ワカメ養殖の現場試験

広島県水産海洋技術センター(広島県呉市音戸町)の栈橋においてワカメ養殖について現場実証試験を行った。1.5 kgの海洋肥沃化ペレットおよび消化液の代わりに純水を用いて作製した高炉セメントペレット(対照区)を3個、ネットに包んでワカメの幹縄に設置した。幹縄には50 cm間隔でワカメの幼葉を挿し込んだ。試験の途中で3個のペレットを両試験区に追加した。現場海水の水温、塩分、クロロフィルa濃度、栄養塩濃度、ワカメの全長、葉長、葉の最大幅に

ついて経時変化の測定、実験終了時にワカメの湿重量、クロロフィル a 量、窒素含有量、リン含有量などを測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 海洋肥沃化ペレットからの栄養塩溶出挙動と微細藻類の増殖試験<sup>2)</sup>

海洋肥沃化ペレットに好適な消化液の作製においては、メタン発酵過程において pH を低下させることで消化液中のリン濃度が上昇した。このことからメタン発酵時の pH 制御により、微細藻類の生長に必要な栄養塩について消化液中の溶存量を増加させることができる可能性が示された。また、畜産廃棄物を基質に膜分離リアクターを用いたメタン発酵試験では従来の CSTR 型リアクターと比較して消化液中の SS 濃度や一般生菌数は顕著に低くなり、膜分離メタン発酵によって高品質な消化液を生産できる可能性が示された。

海洋肥沃化ペレットから溶出する溶存態全リンのうち、61.1 ~ 94.1%が無機リン酸であった。これに対して、海洋肥沃化ペレットから溶出する溶存態全窒素は主としてアンモニア態窒素と有機窒素であった。アンモニア態窒素は海洋肥沃化ペレットから溶出する溶存態無機窒素の 78.9 ~ 93.4%を占めていた。海洋肥沃化ペレットから溶出する無機リン酸およびアンモニア態窒素の量は、それぞれ海洋肥沃化ペレットに含まれる無機リン酸量 ( $r=0.9977$ ,  $P<0.01$ : 図1)、無機窒素量 ( $r=0.9990$ ,  $P<0.01$ : 図2) と強い相関があった。これらの相関により、メタン発酵消化液に含まれるそれらの濃度から、海洋肥沃化ペレットから溶出する無機リン酸およびアンモニア態窒素の量を推定することができると考えられた。

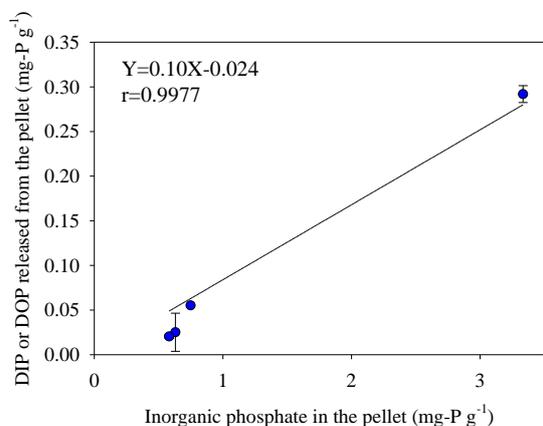


図1 海洋肥沃化ペレットの無機リン酸含有量と無機リン酸の溶出量の関係<sup>2)</sup>

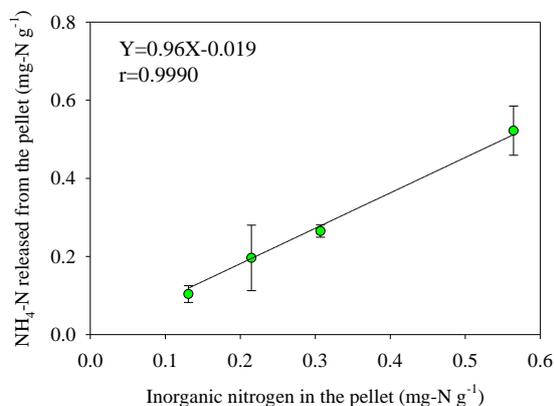


図2 海洋肥沃化ペレットの無機窒素含有量とアンモニア態窒素の溶出量の関係<sup>2)</sup>

##### (2) 海洋肥沃化ペレットによる微細藻類の増殖試験<sup>2)</sup>

微細藻類の増殖試験では、安芸灘で採取した自然海水（ネットで動物プランクトンを除去、初期のクロロフィル a 濃度:  $1.3 \mu\text{g L}^{-1}$ ）に海洋肥沃化ペレットを添加したところクロロフィル a 濃度は、3 日目以降に大幅に増加した。培養 14 日目では、海洋肥沃化ペレット区のクロロフィル a 濃度は  $98.7 \mu\text{g L}^{-1}$  に達し、対照区 ( $98.7 \mu\text{g L}^{-1}$ ) よりも 116 倍高かった ( $P<0.01$ )。したがって、貧栄養海水に海洋肥沃化ペレットから溶出した栄養塩が供給され、栄養塩が微細藻類の増殖に利用されたと考えられた。

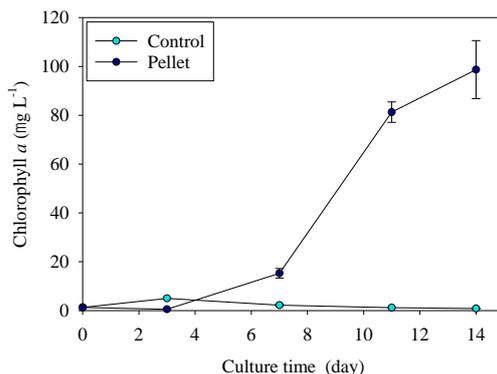


図3 海洋肥沃化ペレットによる安芸灘海水中の微細藻類の培養試験におけるクロロフィル a 濃度の経日変化<sup>2)</sup>

##### (3) 屋外水槽によるワカメの養殖試験<sup>3)</sup>

水槽内の海水のアンモニア態窒素濃度は全期間にわたり  $<0.008 \text{ mg-N L}^{-1}$  であり、藻類の増殖によって消費されたと考えられた。水槽内の硝酸態窒素濃度は試験開始から 14 日目までは、 $0.003\text{--}0.007 \text{ mg-N L}^{-1}$  の範囲であったが、27 日目以降は枯渇し  $<0.001 \text{ mg-N L}^{-1}$  であった。水槽へ供給した海水の硝酸態窒素濃度 ( $0.004\text{--}0.02 \text{ mg-N L}^{-1}$ ) に比べて、水槽内の硝酸態窒素濃度が低くかつ、海洋肥沃化ペレット区と対照区間で有意差は認められなかった。この原因として藻類の生長に伴って、硝酸態窒素が消費されたためと考えられた。水槽内のリン酸態リン濃度は、海

洋肥沃化ペレット区で 0.007-0.015 mg-P L<sup>-1</sup>、対照区で 0.003-0.017 mg-P L<sup>-1</sup> で試験開始から 7 日目のみ海洋肥沃化ペレット区で統計的に有意に高かった (p<0.01)。溶存態無機窒素同様にリン酸態リンも藻類に消費されたためと考えられた。

実験最終日のワカメの湿重量の平均値は、海洋肥沃化ペレット区で 13.8 g、対照区で 4.9 g となった。しかし、ワカメの個体差が大きく統計的な有意差は認められなかった。水槽 1 基あたりの海水中、水槽壁付着、海洋肥沃化ペレット表面付着、ワカメそれぞれのクロロフィル a 量は、海洋肥沃化ペレット区で対照区と比べて海水中で 3.6 倍 (p<0.05)、海洋肥沃化ペレット表面付着で 10 倍 (p<0.05) であった (図 4)。また、水槽壁付着および、ワカメのクロロフィル a 量はバラつきが大きく有意差は認められなかったが、海洋肥沃化ペレット区で対照区に対し、それぞれ 1.6 倍、5.1 倍と高い傾向を示した。これらの結果より、海洋肥沃化ペレットから溶出した栄養塩が藻類の増殖によって消費されたことが示された。

屋外水槽によるワカメの養殖試験を総括すると海洋肥沃化ペレットから溶出した栄養塩が藻類に取り込まれて藻類が増殖した。ワカメの生長は水槽の容積の制約から個体差が大きく、かつ栄養塩供給不足となり生長が滞るなどの課題が残った。

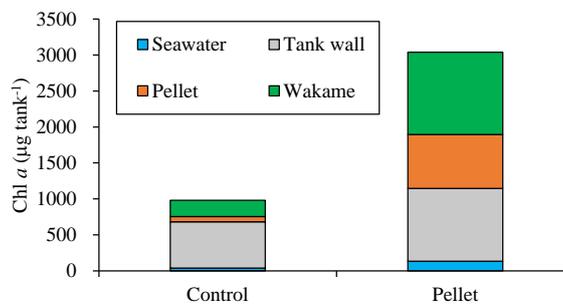


図4 実験終了時の海洋肥沃化ペレット区と対照区における水槽1基あたりのクロロフィルa量<sup>3)</sup>

#### (4) ワカメ養殖の現場試験 (図 5)

現場試験期間内の両試験区の水温は、10.7~16.4℃、塩分は 33.2~34.0 psu であった。ワカメ近傍の海水の硝酸態窒素濃度について実験開始時は 0.064 mg-N L<sup>-1</sup> であったが経日的に低下し、70 日目には <0.001 mg-N L<sup>-1</sup> まで低下した。アンモニア態窒素濃度は <0.008-0.017 mg-N L<sup>-1</sup>、リン酸態リン濃度は 0.006-0.032 mg-P L<sup>-1</sup> であり、ワカメの生長に伴う栄養塩の取り込みによって栄養塩濃度が低下したと考えられた。ワカメの全長の初期値は 40.6 mm であ



図5 ワカメ養殖の現場試験

った。現場試験開始から 25 日目でワカメの全長は海洋肥沃化ペレット区 (291 mm) となり、対照区 (176 mm) に対して統計的に有意 (p<0.05) に大きくなった。実験終了時の 99 日目では、海洋肥沃化ペレット区のワカメの全長 (885 mm) は対照区のワカメの全長 (664 mm) に比べて統計的に有意 (p<0.05) に大きくなった。また、海洋肥沃化ペレット区のワカメの湿重量 (174 g) は対照区 (99.5 g) に対して統計的に有意 (p<0.05) に大きくなった。その他のパラメーターにおいても、乾燥重量ベースのメカブの窒素、リン含有量は、対照区に比べて海洋肥沃化ペレット区で統計的に有意 (p<0.05) に大きくなった。以上より、海洋肥沃化ペレットから溶出した栄養塩がワカメに取り込まれ、ワカメの生長を促進したと考えられた。一方で、海洋肥沃化ペレットの設置位置とワカメの距離によってワカメの生長が不均質となり、均質に栄養塩をワカメに供給する技術開発が今後の課題である。

#### 引用文献

- 1) 農林水産省、家畜排せつ物の発生と管理の状況  
[https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyotaisaku/t\\_mondai/02\\_kanri/](https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyotaisaku/t_mondai/02_kanri/) (最終アクセス日:2024年4月30日)
- 2) Asaoka S., Yoshida G., Ihara I. (2023) Sustained release properties of cement-bonded composites with organic waste based anaerobic digestate as nutrient carriers for marine microalgae, Environ. Sci. Pollut. Res., 30, 56343-56352. DOI: 10.1007/s11356-023-26355-0
- 3) 浅岡 聡、松村実乃里、吉田 弦、井原一高 (2023) 嫌気性消化液タブレットを用いた藻類の増殖試験、第 26 回日本水環境学会シンポジウム講演要旨集、p. 202

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Satoshi Asaoka, Gen Yoshida, Ikko Ihara	4. 巻 2023
2. 論文標題 Sustained release properties of cement-bonded composites with organic waste based anaerobic digestate as nutrient carriers for marine microalgae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Environmental Science and Pollution Research	6. 最初と最後の頁 56343-56352
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11356-023-26355-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川井拓真, 吉田弦, 井原一高
2. 発表標題 メタン発酵消化液ペレットを用いた貧栄養海域への栄養塩供給に関する基礎的検討
3. 学会等名 第57回 日本水環境学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅岡 聡, 松村実乃里, 吉田 弦, 井原一高
2. 発表標題 嫌気性消化液タブレットを用いた藻類の増殖試験
3. 学会等名 第26回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川井拓真, 吉田弦, 井原一高, 浅岡聡
2. 発表標題 貧栄養海域の肥沃化のための消化液ペレット開発に向けた基礎的検討
3. 学会等名 関西農業食料工学会第147回例会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	梅原 亮  (Umehara Akira)  (40825791)	広島大学・環境安全センター・助教   (15401)	
研究 分担者	井原 一高  (Ihara Ikko)  (50396256)	神戸大学・農学研究科・教授   (14501)	
研究 分担者	吉田 弦  (Yoshida Gen)  (60729789)	神戸大学・農学研究科・助教   (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------