

令和 6 年度伊藤光昌氏記念学術助成金(研究助成)成果報告書

研究課題番号	R6-R7
研究課題名	富栄養化した干潟における海藻優占種のレジームシフトと水質変動
研究代表者氏名	千賀 有希子
所属・職 (または学年)	東邦大学理学部化学科・准教授

背景

谷津干潟は、東京湾の埋め立てによって取り残された約 40 ha の小さな干潟である。潮汐による水の交換は高瀬川と谷津川の 2 本の河川でのみ行われているため、物質が滞留しやすく富栄養化が進行している (Senga et al., 2019, 2021, 2022; Natori et al., 2024)。この富栄養化の進行にともなって、1995～2017 年まで海藻の緑藻類アオサ (*Ulva ohnoi* と *Ulva pertusa*) が異常繁殖するグリーンタイドが発生し問題となっていた。しかしながら、2018 年ごろ突然アオサが衰退し、紅藻類オゴノリ (*Gracilaria* spp.) が出現し優占するレジームシフトが起こった。このような干潟におけるアオサからオゴノリへのレジームシフトの報告例は存在せず、レジームシフトの要因や干潟環境に与える影響は全く不明である。本研究では、レジームシフトが生じた要因の 1 つが塩分の低下によるものか検証するとともに、アオサとオゴノリの栄養塩の要求性と枯死分解にともなう栄養塩の放出特性を明らかにし、レジームシフトが水質に与える影響を考察した。

方法

1) 塩分がアオサの生長に与える影響

塩分 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 55 psu に調製した培地 1 L を三角フラスコに加え、基質として 0, 7 日目に KH_2PO_4 を 1 mg-P/L, NH_4Cl を 10 mg-N/L になるように添加した。また、珪藻類の増殖を抑制するため GeO_2 を 5 mg/L になるように添加した。三角フラスコに 10 g-wet の *Ulva* spp. を加え、明：暗 = 12h : 12h 条件下で通

気しながら 14 日間培養を行った。このとき、光量子は約 $60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度で行い、培養の繰り返しは 3 回とした。また、実験前後に *Ulva* spp. を回収し、湿重量を測定して生長率を求めた。0 psu のみ腐敗により藻体の回収が困難だと判断したため、10 日間培養を行った。

2) アオサとオゴノリの栄養塩取込が水質に与える影響

ろ過をした海水 1 L を三角フラスコに加え、*Ulva* spp. または *Gracilaria* spp. をそれぞれ 10 g-wet, 12 g-wet 入れた (両海藻とも乾燥重量 1.6 g-dry)。この三角フラスコに N 源として NH_4Cl と KNO_3 を、P 源として KH_2PO_4 を加えた。これらの栄養塩は、 $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-}$ (重量比) = 3 : 3 : 1 (6NP 系), 5 : 5 : 1 (10NP 系), 10 : 10 : 1 (20NP 系) となるように調製した。全ての実験で PO_4^{3-} 濃度は 1 mg-P/L に固定し、 NO_3^- , NH_4^+ 濃度を調製した。また、 GeO_2 を 5 mg/L になるように添加した。これらを光量子束密度が約 $40 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の蛍光灯の下で明：暗 = 12h : 12h 条件下で通気しながら培養を行った。0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3 日目に各三角フラスコから 50 ml ずつ採水し、ろ過後 NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} 濃度を測定した。培養の繰り返しは 3 回とした。

3) アオサとオゴノリの窒素とリンの含有率と枯死分解によるそれらの放出が水質に与える影響

メッシュバッグに乾燥させた *Ulva* spp. と *Gracilaria* spp. の藻体をそれぞれ 138 g-wet, 169 g-wet (両海藻とも乾燥重量 22 g-dry) 入れ、

リターバッグ（縦 15 cm × 横 14 cm）を作成した。リターバッグは、谷津干潟の中央部にある木の柱に針金とロープで固定して設置した。夏期にリターバッグを 3 日間設置後、回収した。回収したリターバッグは水道水とイオン交換水で洗浄後、80 °C で 1 晩乾燥させ、重量を測定した。以下の式で分解速度、N と P 放出速度を算出した。リターバッグの設置の繰り返しは 3 回とした。

分解速度 (%/day) = {(回収後の藻体の減少量 / 分解前の藻体の重量) × 100} / 分解日数

N と P 放出速度 (mg-N/day または mg-P/day) = (回収後の藻体の減少量 × N または P 含有率) / 分解日数

結果と考察

1) 塩分がアオサの生長に与える影響

アオサの成長は、培地の塩分が 20~55 psu で確認され、35 psu で最も成長率(約 25%)が高かった(図 1)。0~15 psu では、実験終了後にアオサのバイオマスは減少しており、成長できないことが示された。谷津干潟において、レジームシフト後の電気伝導度(EC)はレジームシフト前よりも低下している。したがって、アオサからオゴノリへのレジームシフトは、塩分の低下も要因の 1 つと考えられた。

2) アオサとオゴノリの栄養塩取込が水質に与える影響

アオサとオゴノリとも全ての系において NO_3^- 濃度の減少は見られず、 NO_3^- 取込み速度は算出できなかった(表 1)。したがって、両海藻とも NH_4^+ が十分存在する場合は、 NO_3^- の取込みは無視できると考えられた。10NP 系のアオサの NH_4^+ 取込み速度はオゴノリより有意に高かったが ($p < 0.05$)、6NP 系と 20NP 系では有意な差がみられなかった。また、両海藻の NH_4^+ 取込み速度は、 NH_4^+ 濃度の増加にともない高くなった ($p < 0.001$)。この結果は、谷津干潟の両海藻とも NH_4^+ 要求性が非常に高いことを示している。谷津干潟におけるこれらの海藻の異常増殖は、 NO_3^- 動態にはほとんど影響を与えないが、 NH_4^+ 動態に大きく関与すると考えられた。

6NP 系と 10NP 系のオゴノリの PO_4^{3-} 取込み速度は、アオサよりも有意に高かった ($p < 0.05$)。20NP 系の PO_4^{3-} 取込み速度は、両海藻に有意差は見られなかったものの、オゴノリの方が高い傾向にあった。このことから、オゴノリの出現はアオサより PO_4^{3-} 動態に影響を与えたと考えられた。また、両海藻とも PO_4^{3-} 取込み速度は、 NH_4^+ 濃度と NO_3^- 濃度の増加に関与せず、ほぼ一定であった。

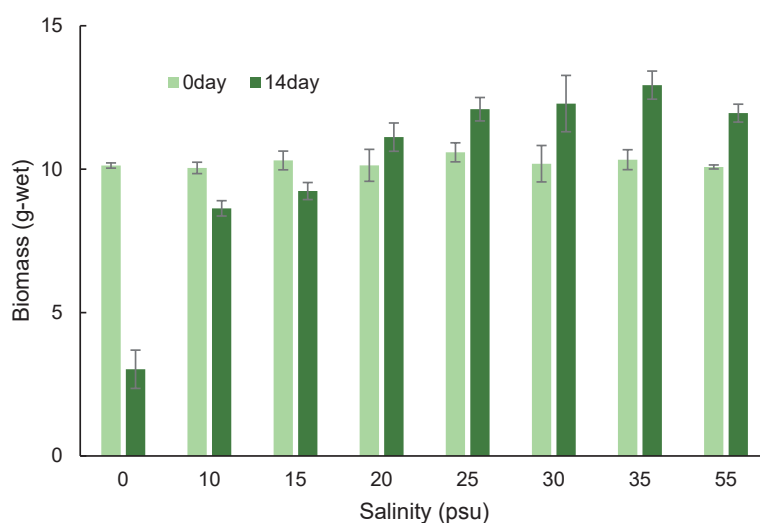


図 1. 各塩分における実験前後のアオサバイオマスの変化

表 1. 6NP, 10NP, 20NP 系におけるアオサとオゴノリの NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} の取込み速度 ($\mu\text{g-N/gdry/h}$ or $\mu\text{g-P/gdry/h}$).

	6NP		10NP		20NP	
	アオサ	オゴノリ	アオサ	オゴノリ	アオサ	オゴノリ
NO_3^-	—	—	—	—	—	—
NH_4^+ (0~0.5 day)	76.3	90.9	230.2	176.8	414.3	477.8
PO_4^{3-} (0~3 day)	3.9	7.5	1.8	5.0	6.7	8.0

3) アオサとオゴノリの窒素 (N) とリン (P) の含有率および枯死分解によるそれらの放出が水質に与える影響

アオサの N 含有率は平均 4.0% であり, P 含有率は平均 0.2% と報告されている (Senga et al. 2021). 一方, オゴノリの N 含有率は平均 3.2%, P 含有率は平均 0.3% であった. N 含有率はオゴノリの方が有意に高く ($p<0.05$), P 含有率はオゴノリの方が高いことがわかった ($p<0.01$). この値を用いて, 夏期の分解速度から N と P の放出速度を見積もったところ, N の放出速度はアオサが有意に高く ($p<0.01$), P の放出速度はオゴノリが高かった ($p<0.001$). したがって, アオサは枯死分解することで N を素速く供給し, オゴノリは P を供給すると考えられた.

まとめ

谷津干潟におけるアオサからオゴノリへのレジームシフトの要因として高水温と日照不足が報告されている (矢内ら, 2021). 本研究において, その要因の 1 つが塩分の低下であることを実証することができた. また, 水質に与える影響として, アオサからオゴノリへのレジームシフトは干潟内の N と P の動態を改変する可能性を示すことが

できた. 両海藻は窒素基質として NO_3^- より NH_4^+ を速い速度で取り込むことが示され, 両海藻の出現は NH_4^+ 動態に大きく影響することがわかった. 加えて, アオサはオゴノリよりも N の含有率および放出速度も高かったため, 谷津干潟におけるアオサの異常増殖は N 動態に大きく影響すると考えられた. 一方, オゴノリの PO_4^{3-} 取込み速度はアオサよりも速く, さらにオゴノリの P の含有率および放出速度も高かったことから, アオサからオゴノリへのレジームシフトは P 動態に影響している可能性が示唆された.

謝辞

本研究は, 公益財団海洋化学研究所伊藤光昌氏記念学術助成金を用い行われた. この場を借りてお礼を申し上げます. 現地への立ち入り調査は, 環境省の許可を受けて行ったものである. 野外調査にあたり, 谷津干潟自然観察センターと習志野市都市環境部環境政策課の関係各位に深く感謝いたします. また, 東邦大学地球化学教室千賀研究室の全ての学生が, 野外調査, サンプルング, 化学分析をサポートしてくれた. ここに心から感謝の意を表します.

引用文献

Natori A, Sanada Y, Sugahara S, Nohara S, Seike Y, Senga Y (2024) Exploration of the nitrification process in surface sediment of a hypereutrophic intertidal zone via hydroxylamine monitoring. Marine

表 2. アオサとオゴノリの N と P の放出速度 (mg-N/h or mg-P/h).

	アオサ	オゴノリ
N	166.0	130.6
P	8.3	12.2

Chemistry 259, 104353.

- Senga Y, Sato T, Kuroiwa M, Nohara S, Suwa Y (2019) Anammox and denitrification in the intertidal sediment of the hypereutrophic Yatsu tidal flat, Japan. *Estuaries and Coasts* 42: 665–674.
- Senga Y, Kobayashi W, Mikawa K, Kitazawa T, Lee S, Shiraki Y (2021) Influences of green macroalgae blooms on nutrients and sulfide dynamics in hypereutrophic intertidal ecosystems. *Limnology* 22: 187–196.
- Senga Y, Sato T, Shibaki K, Kuroiwa M, Nohara S, Suwa Y (2022) Alteration of dissimilatory nitrate reduction pathways in the intertidal sediment during macroalgae blooms. *Water* 14, 3022.
- 矢内栄二, 若林駿, 鳥居明弘, 小田僚子 (2021) AI による谷津干潟におけるグリーンタイド予測の試み. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 77 : 931–936.