短 報 [Note]

霞ヶ浦アサザ植栽地において消波施設が底質に与えた影響

加茂川優紀¹⁾・山室真澄¹⁾*

**Sediment signature inside and outside of breakwaters at the planting area
with *Nymphoides peltata* in Lake Kasumigaura**

Yuki KAMOGAWA¹⁾ and Masumi YAMAMURO¹⁾

要 旨

枯死体の増加を通じた有機物供給の増加や消波施設による波あたりの低下などを通じて、アサザ植栽事業が底質に何らかの影響を与えた可能性を検討する一環として、消波施設内外で堆積物の性状を調査した。アサザの植栽を行ったが消滅した地区における消波施設陸側では、底質の細粒化と有機物濃度・全硫化物濃度の増加が認められた。アサザの自然群落が存続している地点では細粒化や有機物の蓄積は認められなかった。これらの地点は消波施設の開口部が広いことから、消波施設の影響が少ないと考えられた。

キーワード：柱状堆積物・全硫化物・有機炭素・全窒素濃度・微細泥率

Abstract

Planting *Nymphoides peltata* may deteriorate sediment quality in terms of organic content through increase the supply of organic materials. Because breakwaters are often constructed at the planting of *N. peltata*, changing wave action may also alter the sediment quality. To examine the possible effect of *N. peltata* plantation, we analyzed the quality of sediments on both the landward and offshore sides of the breakwaters. Surface sediments sampled from the landward side of the breakwaters, where plantation of *N. peltata* had operated and disappeared afterwards, showed higher contents of fine particles, organic carbons and total sulfur compared to the offshore side. Surface sediments sampled from the landward side of the breakwaters, where natural populations of *N. peltata* had been remaining showed equivalent contents of fine particles, organic carbons and total sulfur with that of the offshore side's. Since the breakwaters constructed at the area where natural populations of *N. peltata* exist had wide openings, we assumed that these areas experienced less effects brought about by the breakwaters.

Keyword : Core sediment, total sulfur, organic carbon, total nitrogen, silt clay content

(2015年4月7日受付：2015年5月8日受理)

¹⁾ 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 環境棟562 Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 Japan

* 連絡対応者：山室真澄 (Masumi YAMAMURO) 電話：04-7136-4770 Fax：04-7136-4756 e-mail：yamamuro@k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

日本の湖沼では近年、水質浄化を目的として消波施設を設置して波浪を低減し、抽水植物や浮葉植物を植栽する工事が各地で行われている。たとえばアサザ(*Nymphoides peltata* (S.G.Gmel.) Kuntze) は環境省(2007)で「湖沼の水質の改善に資する植物」とされ、中学校の理科の教科書でも、ヨシやアサザを湖岸に植えると「水生植物の茎や根に付着した微生物が湖水中の有機物を分解し、水を浄化していく。」と解説されている(細矢ほか, 2010)。茨城県の霞ヶ浦や秋田県の八郎湖では消波堤を設置してアサザを植栽する事業が、実際に行われた。

水質浄化とはCODで表される湖水中の有機物を減らすことである。アサザ自体が有機物でできていることから、たとえアサザが基盤となって分解者である細菌が増えても、有機物供給自体が増えることで水質が悪化する可能性が十分ある。これについて上原・山室(2015)は100日間暗条件下でアサザの分解実験を行い、アサザから溶出する溶存有機物によって水質はむしろ悪化することを明らかにした。このときアサザから100日の間に溶出した有機炭素は植物体中炭素量の最大で15%であり、大部分が堆積物中に枯死体として埋没することになり、底質の有機汚濁化を通じて水質に悪影響を与える可能性がある。実際、Marion and Paillisson(2003)はアサザの植物体の蓄積による栄養塩増加効果を報告している。

広い湖沼では湖の形状や風向きとの関係によって波浪が高くなる場所も多く、かつては湖岸に砂浜が広がっていた場所も多い。砂質堆積物は水質改善効果も高いが、そのような場所に消波施設を設置して波浪を抑えて植生を生やすことで、砂質の湖岸をシルトや粘土質に変化させ貧酸素化をもたらす可能性が指摘されている(浅枝, 2011)。アサザは砂質堆積物に繁茂することから、アサザ植栽事業が行われることによって、砂質堆積物の水質浄化効果がかえって損なわれる可能性もある。

霞ヶ浦では2001年度の補正予算で、アサザの保全・再生を主目的とした緊急対策工事が行われた。工事では対象とした11地区全てに消波施設を設置して波あたりを弱め、一部の地区ではさらに垂直コンクリート護岸だったところに浅場を形成するなどの対策を施しアサザを植栽、もしくは既存の植生の保全を図った(戸谷・山内, 2008)。本研究では、一般的に水質浄化効果があるとされているアサザの植栽が消波施設の設置を伴って行われることで底質にどのような影響を与えたかを解明する一環として、霞ヶ浦のアサザ植栽地などの消波施設内外の底質の比較を行った。

2. 方法

調査対象地区

霞ヶ浦(Fig. 1)は茨城県南部に位置する海跡湖で、

Fig. 1. Position of the studied areas.

図1. 調査を行った地域の位置。

霞ヶ浦（西浦），北浦と外浪逆浦からなる。霞ヶ浦（西浦）は面積 167.6 km²，湖岸線距離 136 km，平均水深 3.4 m，最大水深 7.3 m（砂利採取地を除く）で，琵琶湖に次ぐ日本第2位の面積を有する。

本研究の予備調査として，保全対策が行われた11地区を2010年11月および2011年6月に視察した結果，波当たり，アサザの有無，陸上からのアクセスの可否などを考慮して，西浦3地区（境島，根田，麻生），北浦2地区（大船津，爪木）を調査対象地区に選定した（Fig. 1）。またアサザの自然群落が繁茂している西浦の和田岬でも調査を行った。

境島地区には湖岸から100 m弱の沖合に，消波施設が湖岸にほぼ平行に設置されている（Fig. 2）。個々の消波施設が互い違いに設置されているため，沖合から波が入る開口部はほとんどない。2008年に出版された事後モニタリングの報告では，植栽によってアサザが一時的に復元したと記載されているが（戸谷・山内，2008），筆者らが2007年以降に観察した限りでは，境島地区では消波施設陸側にアサザは繁茂しておらず，植栽が行われ

た形跡もなかった。一方，乾陸化した部分の窪地に池状に水がたまっている所があり，そこでは市民団体によりアサザが植栽され，2011年には水面の大部分をアサザが覆っていた。

根田地区も境島地区同様，個々の消波施設が互い違いに設置されているため，沖合から波が入る開口部はほとんどない（Fig. 2）。筆者らが2008年7月に観察した際には，根田地区石積堤の陸側をアサザが覆っていた。また食用ハスも侵入していた。このアサザ群落は翌年消滅し，その後，市民団体によって植栽が行われていたが，繁茂には至っていない。また調査を行った2011年は，植栽を行った形跡は認められなかった。

麻生地区は緊急対策工事以前からアサザ群落が広範囲に繁茂しており，アサザの植栽は行われていない。護岸はコンクリート垂直護岸である。湖岸に平行に設置された消波施設は岸から約200 m離れており，開口部が広いために強風時には波当たりが強くなる。麻生地区では2010年の予備調査でハスの侵入を確認したが，いつ侵入したかは明らかではない。

大船津地区は他の地区と異なり，コの字形の小規模な消波施設が設置されていて，陸側にアサザが植栽されている。消波施設は直径30 cm程度の丸太を湖面に平行に数本組んで作られており，丸太の間に10 cm程度の隙間がある。

爪木地区で2011年の調査時点で確認された群落が自然群落か植栽されたものかは確認できなかったが，市民団体が植栽時に設置する立て札が確認されなかったことから，緊急対策工事以降に市民団体が植栽したものではないと考えられる。消波施設は沖合約50 m地点に2基設置されており，開口部の岸側にアサザ群落が繁茂している。このため強風時の波当たりはかなり強くなる。

和田岬の湖岸一帯はコンクリート垂直護岸で，アサザの植栽は行われておらず，自然群落が繁茂している。消波施設が全く無いことから，強風時の波当たりはかなり強い。

これらの6地区において予備調査の結果に基づき，波当たりとアサザ群落の有無，岸からの距離などを考慮して，1地区において1～4箇所，柱状堆積物採取地点を設定した。

- *Nymphoides peltata* community
- Landward side of the wave-dissipating block with respect to the coast
- Landward side of the wave-dissipating block with respect to the lakeshore
- P Pond

Fig. 2. Sampling points at each studied areas.

図2. 各調査地域におけるサンプル採取地点。

現地での測定とサンプリング

底質分析に供した堆積物は，2011年8月21日（境島，根田，麻生，爪木）と9月17日（大船津，境島の池，和田岬）に，攪乱に注意しながら各地点で2本ずつテフロン管（内径6 cm，長さ25 cm）を湖底に差し込み，ゴム

栓をはめて採取した。採取時の攪乱（極表層の浮泥が認められないなど）が確認された試料は廃棄し、改めて採取した。採取した堆積物は天地を保ち密栓したまま冷温状態で実験室に持ち帰り、実験室では直ちに切り分けて冷蔵、もしくは冷凍保存した。

和田岬の堆積物には直径3 cm程度の角礫や、直径10cm以上の粘土塊が混在していたため、堆積物の採取もできなかった。これらの礫はその形状や岩石の種類から、人為的に搬入されたと考えられた。

堆積物中有機物濃度が高くなることで生じる弊害として、貧酸素化がある。この影響の有無を確認するため、2011年9月17日に各地点で堆積物を採取する前に測器（ポータブル水質計、東亜ディケーケーHQ40D）によって水温と溶存酸素濃度を表層と底層で測定した。

柱状堆積物の前処理と分析

柱状堆積物について粒度分析と全硫化物・有機炭素・全窒素濃度の分析を行った。

全硫化物は検知管（GASTEC社製ヘドロテック-S）を用いて分析した。持ち帰った柱状堆積物の中から各地点

につき1本、分析を行った。切り分けた1 cm層を十分に混合した後、湿重量1g分を分析に供した。

有機炭素濃度と全窒素濃度は各地点につき2本ずつ表層1cmについて、元素分析計（サーモエレクトロン社製NCアナライザー）で分析した。

粒度分析は篩（JIS Z 8801）を用いて行った。使用した篩の目合は1 mm, 500 μ m, 250 μ m, 125 μ m, 63 μ m, 38 μ mで、表層1 cm, 1～3 cm, 3～5 cmの3層について湿式法によって行った。それぞれの目合いの篩に残った堆積物は秤量前に目視し、植物片や貝殻片はピンセットを用いて除去した。篩に残った堆積物は秤量したワットマンGF/Cガラス繊維濾紙で濾過し、70℃で定量になるまで乾燥後、秤量した。本研究では上記によって求めた粒度分析結果から、シルトと粘土画分が全重量に占める割合を「微細泥率」として計算した。

3. 結 果

2011年9月17日に測定した底層での溶存酸素濃度と水温の結果をTable 1に示す。調査当日は強風によって

Table 1. Dissolved oxygen concentrations and water temperature of the bottom water at the study sites. Locations of the sites are shown in Fig. 1.
表1. 調査地の底層水の溶存酸素濃度と水温。調査地の位置は図1に表示。

Sampling site	Depth [cm]	Surface		Bottom	
		Dissolved oxygen [mg L ⁻¹]	Temperature [°C]	Dissolved oxygen [mg L ⁻¹]	Temperature [°C]
Tsumeki, <i>Nymphoides peltata</i> community	65	9.09	28.8	8.86	28.8
Ohfunatsu, <i>Nymphoides peltata</i> community	48	8.77	29.7	8.79	29.4
Ohfunatsu, Offshore side of the wave-dissipating block	65	8.87	29.5	8.96	29.4
Aso, <i>Nymphoides peltata</i> community	50	9.03	29.6	9.00	29.5
Sakaishima, Pond	70	2.24	28.6	0.32	26.6
Wadamisaki, <i>Nymphoides peltata</i> community	100	9.35	29.4	9.30	29.4

Table 2. Depth of the sediment sampling sites, and the silt and mud, organic carbon, nitrogen, and total sulfide concentrations of the surface (depth $\leq$ 1 cm) sediments. Locations of the sites are shown in Fig. 1.

表2. 堆積物採取地点の水深と表層堆積物（1 cm）のシルト・粘土含有率、有機炭素濃度、窒素濃度、全硫化物濃度。調査地の位置は図1に表示。

Area	Positions at each area	Depth [cm]	Silt & mud [%]	Organic carbon [%]	Nitrogen [%]	Total sulfide [mg g ⁻¹]
Sakaishima	Offshore side of the wave-dissipating block	83	0.57	0.12	0.006	0.016
	Landward side of the wave-dissipating block with respect to the coast	60	1.8	0.30	0.029	0.067
	Landward side of the wave-dissipating block with respect to the lakeshore	72	2.7	0.74	0.094	0.034
	Pond	70	1.9	0.38	0.042	0.12
Neda	Offshore side of the wave-dissipating block	110	1.4	0.30	0.017	0.026
	Landward side of the wave-dissipating block with respect to the coast	62	8.0	0.42	0.071	0.12
	Landward side of the wave-dissipating block with respect to the lakeshore	67	8.5	1.48	0.113	0.041
Aso	<i>Nymphoides peltata</i> community	75	1.1	0.19	0.016	0.051
Ohfunatsu	Offshore side of the wave-dissipating block	65	1.3	0.21	0.019	0.011
	<i>Nymphoides peltata</i> community	48	4.0	0.19	0.020	0.008
Tsumeki	<i>Nymphoides peltata</i> community	67	0.27	0.10	0.001	0.024

Fig. 3. Particle size distribution of the core sediments at the depths 0-1 cm (top), 1-3 cm (middle) and 3-5 cm (bottom).

図3. 柱状堆積物の表層 (0-1 cm), 中層 (1-3 cm), 下層 (3-5 cm) における粒度分布。

波立っていた。このため境島の池以外の地点は底層も合わせて、好気的な環境になっていた。一方、アサザに全面が覆われた境島の池では、底層が 0 mg L^{-1} と無酸素に近い状態に達しただけでなく、表層でも 2 mg L^{-1} と低く、アサザ群落に覆われた水塊全体が貧酸素化していた。

堆積物表層から $0 \sim 1 \text{ cm}$, $1 \sim 3 \text{ cm}$, $3 \sim 5 \text{ cm}$ ごとに、各地点の粒度分布を比較したところ、根田地区の消波施設陸側の2地点が、どの深さでも最も細粒化が進んでいた (Fig. 3)。また大船津地区の消波施設沖側が全体的に粗い傾向にあった。その他の地点については、地点毎の特徴が見いだせなかった。また同じ地点で比較した場合、深さによる粒度分布の違いは認められなかった。

柱状堆積物試料表層 1 cm の全硫化物・有機炭素・全窒素濃度を Table 2 に示す。比較のため、表層 1 cm における

シルト・粘土含有率も示した。根田地区の消波施設陸側の湖岸寄りで採取した堆積物がシルト粘土含有率、有機炭素濃度、全窒素濃度ともに最も高い濃度を示した。全硫化物濃度は境島地区の池と根田地区の消波施設陸側の沖合寄りで採取した堆積物が 0.12 mg g^{-1} と最も高い濃度を示した。

4. 考 察

境島地区、根田地区、大船津地区では、消波施設の沖側と陸側で堆積物の性状を比較することができ (Table 2)、微細泥率については全地区において陸側の方が沖側より高い値を示した。有機炭素濃度と硫化物については、大船津地区では陸側の方が沖側より低かったが、境島地区と根田地区では全項目について、陸側の方が沖側よりも高い値を

示していた。このことから境島地区と根田地区では消波施設の設置によって、陸側で底質の細粒化、有機物の蓄積と還元化が進んだと解釈できる。

アサザの自然群落が続いて存在している麻生地区と爪木地区の消波施設陸側の底質では微細泥率が0.27～1.1%であり、境島地区、根田地区の消波施設陸側の1.8～8.5%と比べて著しく低い (Table 2)。有機炭素濃度も麻生地区と爪木地区では0.10～0.19%で、境島地区、根田地区の消波施設陸側の0.30～1.48%と比べて著しく低い。これらの結果は、麻生地区と爪木地区では消波効果が小さいために底質の細粒化が進んでいないこと、またアサザによって生産される有機物が波浪によって系外に流出するために、堆積物に蓄積しないことを示している。このように消波効果が小さい原因は、麻生地区と爪木地区では消波施設の開口部が大きいのにに対して境島地区、根田地区では開口部が小さいことが考えられる (Fig. 2)。

今回の調査地区で最も消波効果が高かったのは、境島地区の池である。ここでは植栽されたアサザが繁茂し、溶存酸素濃度は底層ではほぼ無酸素になるほど嫌気化していた (Table 1)。底質の有機物濃度は0.38%、全硫化物濃度が0.12 mg g⁻¹と、アサザ群落がある他の地区で得られた値と比べて著しく高くなっていた (Table 2)。波当たりの少ない、閉鎖的な場所にアサザを植栽して繁茂させると、有機物が蓄積して底部が嫌気化することを示していると考えられる。

境島地区の消波施設陸側の湖岸寄りや根田地区の陸側全地点での底質の有機炭素濃度は、境島地区の池の底質の有機炭素濃度よりも高い値を示した (Table 2)。特に根田地区の消波施設陸側沖合寄りでは、貧酸素状態にあった境島地区の池と同等の0.12 mg g⁻¹という、高い全硫化物濃度を示した。境島地区の調査地点では現在アサザは繁茂しておらず、根田地区も岸よりにハスが侵入しているだけで、アサザは繁茂していない。それにもかかわらずこれら二地区の消波施設陸側で有機物濃度が高いのは、これら二地区では消波施設の設置により、陸上から流入するものも含め、流入した有機物が蓄積しやすい構造になっていることを示すと考えられる。

本研究では生物にとって致死的な硫化水素を直接測っていないが、境島地区の池では底層水が無酸素に近く全硫化物濃度が高かったことから、堆積物中や直上水では硫化水素が発生していた可能性が高い。また同等の全硫化物濃度を現在も示す根田地区でも、過去にアサザが水面を覆ったときは非常に嫌気的な環境になり、堆積物中では硫化水素が発生していた可能性がある。

霞ヶ浦においてアサザ保全を目的として行われた消波施設の設置とアサザの植栽は、消波と有機物供給の増加のどちらか、もしくは両方の影響によって、堆積物中の有機物や硫化物の増加が生じている可能性が高かった。環境省はアサザを植えることで、刈り取りなどを行わなくても水質浄化効果があるとしているが (環境省, 2007)、水中や堆積物中の有機物濃度がアサザを植えるだけで減少するとのデータはこれまでに存在しない。水質浄化を目的としたアサザ植栽を勧める以上、本当に浄化効果があるのか、効果を出すにはどのような管理が必要かなどを再検討する必要があると考えられる。アサザは海外では侵略的外来種とされ (<http://www.issg.org/database/welcome/>)、種多様性の低下や環境変化などの弊害が報告されていることから (例えばLarson 2007)、自然再生の観点からも、消波施設設置を伴うアサザ植栽事業は事前に環境アセスメントを行うなど、慎重な対処が望まれる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、炭素・窒素濃度の分析に際しては、東京大学大学院新領域創成科学研究科 (当時) の小田あゆみ博士に指導いただいた。現地調査では東京大学大学院新領域創成科学研究科の下田研人氏に手伝っていただいた。また同研究科の廣中美里さんには論文の加筆修正を手伝っていただいた。記して感謝いたします。本研究は河川整備基金助成事業 (助成番号23-1215-009) 「底質環境要因による湖岸植生保全対策の影響評価」の助成を受けて行った。

引用文献

- 浅枝隆 (2011) 湖岸の埋め立てと護岸、離岸堤、湖底の浚渫・生態系の環境, 浅枝隆 (編著): 104. 朝倉書店, 東京.
- 細矢尚夫・養老猛司・下野洋・福岡敏行ほか25名 (2010): 自然の探求 中学校理科3, 教育出版, 246pp.
- 環境省 (2007): 逐条解説湖沼水質保全特別措置法, 78pp.
- Larson, D. (2007): Growth of three submerged plants below different densities of *Nymphaea peltata* (S.G.Gmel.) Kuntze. Aquatic Botany, 86: 280-284.
- Marion, L. and J.-M. Paillisson (2003): A mass balance assessment of the contribution of floating-leaved

macrophytes in nutrient stocks in an eutrophic macrophyte-dominated lake. *Aquatic Botany* 75: 249-260.

戸谷英雄・山内 豊 (2008) 霞ヶ浦湖岸植生保全対策のモニタリング・評価と順応的管理. 河川環境総合研究所報告, 14号, 81-95.

上原達弥・山室真澄 (2015) アサザとヨシから溶出する有機炭素量とその分画, 陸水学雑誌, 76: 1-10.