有明海奥部底泥における栄養塩フラックスの季節変化

Seasonal Variation of Nutrient Flux Between Sediments and Water Column in the Inner Area of the Ariake Bay

郡山益実¹・荒木啓輔²・伊藤祐二³・片野俊也⁴・石谷哲寛⁵

Masumi KORİYAMA, Keisuke ARAKI, Yuji ITO, Toshiya KATANO and Tetsuhiro ISHITANI

The seasonal variation of nutrient flux between sediments and water column in the inner area of the Ariake Bay was investigated during May, 2010–November, 2011. The supply amount of organic matter to sea bottom and sediment temperature had important effects on the seasonal variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in porewater. The seasonal variation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration in porewater was strongly dependent on those of redox environments in sediments. We found that the sediments were an important supply source of nutrient for the water column in the inner area of the Ariake Bay during summer–autumn. In the *Porphyra* aquaculture period, the phosphorus release from the sediments was thought to play an important role in the *Porphyra* production in the Ariake Bay.

1. はじめに

近年、有明海奥部では赤潮及び貧酸素水塊の大規模化・頻発化や不安定なノリ生産などが大きな問題となっている（環境省，2006など）。このような海域の環境異変には、有明海における窒素やリンなどの栄養塩動態が密接に関連していると考えられ、これまで海域の栄養塩環境に関する幾つかの研究例が見られる。例えば、渡辺ら（2004）は、1972～2000年の浅海定線調査データをもとに、有明海奥部における栄養塩の平均濃度と現存量を解析し、秋～冬季における海域の栄養塩供給には、河川以外の供給源が存在することを示唆した。また、速水ら（2009）と郡山ら（2009）は、有明海奥部泥質干潟～浅海域における海水と底泥間隙水中の栄養塩濃度の季節変化を明らかにし、秋～冬季における水柱栄養塩濃度の増加は、底泥からの栄養塩溶出が主要因であることを示唆した。これらの研究は、有明海奥部の栄養塩動態において底泥からの栄養塩供給の果たす役割の重要性を示すものであるが、底泥からの栄養塩溶出フラックスに関する実測データの報告例は少なく、その季節変化は今だ十分明らかにされていない。

本研究では、有明海奥部に泥質と砂泥質の2地点に調査区を設置し、年間を通した現地調査及び栄養塩溶出実験を行い、底質内の物理環境や栄養塩濃度及び底質－海水間の栄養塩フラックスの季節変化を明らかにする。次いで、対象海域における底質からの栄養塩溶出量を定量的に評価し、海域の栄養塩変動における底質からの栄養

塩供給の役割について検討、考察することを目的とする。

2. 現地調査及び分析の概要

2010年5月～2011年11月に毎月1回、有明海奥部に設定した泥質（St1）と砂泥質（St2）の2地点（図-1）で大潮の満潮時に調査を実施した。現地調査は、複数の底質コア（内径56mm、長さ50cm）をダイバーによって採取後、直ちにサイフォンによりコア内から底質直上の海水を採取した。そして、船上で底質コアを層別（表層～2cmは1cm間隔及び2～10cmは2cm間隔の計6層）に切り分け、各層の酸化還元電位（Eh）及び泥温を測定した。残りの底質コアについては、密栓して持ち帰り、速やかに実験室において各層の底質サンプルを採取し、水質及び底質分析に供した。

底質間隙水は、各層の底泥サンプルを遠心分離（4000

図-1 調査水域の海底地形と測点

1 正会員	博(農)	佐賀大学助教農学部生物環境科学科
2	農修	佐賀大学大学院農学研究科
3	博(農)	佐賀大学低平地沿岸海域センター
4	博(理)	佐賀大学低平地沿岸海域センター
5	博(農)	佐賀大学大学院農学研究科

rpmで5分間)にかけ上澄み液を抽出した。抽出した上澄み液は0.45 μ mのメンブランフィルターで濾過し冷凍保存した。底質直上水に関しても同様に0.45 μ mのメンブランフィルターで濾過し冷凍保存した。後日、これらを解凍しオートアナライザー (SWAAT, BLTEC) を用いて $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の定量分析を行った。

底質は、含泥率、含水率、有機態炭素 (TOC) 及び全窒素 (TN) の分析を行った。ここで、底質中の TOC の前処理として、採取した底質試料を乾燥後メノウ乳鉢で磨碎し、1NのHClを添加して試料中の炭酸カルシウムを処理した。前処理した底質の TOC 及び TN の測定は、CHN コーダ (JM-10, J-Science LAB) を用いて分析を行った。

栄養塩の溶出実験は、小野澤ら (2007) の方法に準じて行った。すなわち、現地で採取した底質コアと海水をそれぞれ冷蔵状態で実験室に持ち帰り、速やかに実験を開始した。実験は、まず底質が巻き上がらないように濾過した現地海水を注意深くコア内に注入した後、現地泥温に設定した恒温室内の培養水槽に静置した。そして、実験開始時、4、6、8及び24時間後の底質コア直上水を採水し、直上水における栄養塩濃度 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) をオートアナライザーで分析した。なお、溶出実験中は、攪拌機を用いて底質が巻き上がらないように直上水を十分攪拌、混合し、恒温室を暗条件とした。

3. 結果及び考察

(1) 底質環境

図-2及び3は、St1及びSt2における底質Ehの鉛直分布と底質TOC及びTNの季節変化を表したものである。なお、ここで底質TOC及びTNは底質表層～10cmの平均値である。図示されるように、2010年の場合、St1における底質のEhは、6月から徐々に低下し、7～10月の底質は全体的に $-43.2 \sim -141.0\text{mV}$ (表層～10cmの平均値)と還元的状態の層が卓越した。そして、11月以降、底質は表層部から酸化還元的層が徐々に拡大し、冬～春季において底質のEhは $+9.8 \sim +63.9\text{mV}$ とほぼ酸化還元的状態の層に移した。2011年の場合、St1の底質は6月にはすでに還元的層になっており (Eh= -90.3mV)、この還元的層は11月まで継続して見られた (Eh= $-79.1 \sim -187.4\text{mV}$)。また、2011年の夏～秋季におけるEhの平均値 (Eh= -139.5mV) は、2010年のそれ (Eh= -76.2mV) と比較して大きく低下し、St1の底質はより還元的状態であった。一方、St2の底質の酸化還元環境は、St1と同様の季節変化を示すが、St1ほどの夏～秋季における底質の還元化は見られなかった。

調査期間を通してSt1とSt2における底質TOC及びTNは、いずれも統計的に有意な差が見られ、St1のTOC及びTNはSt2のそれらより約2.4倍高かった。これは両地点における含泥率の差異を反映したためである。すなわち、St1の含泥率は年間を通して86.2～98.6%を推移する

図-2 St1及びSt2における底質Ehの鉛直分布

図-3 St1及びSt2における底質TOC及びTNの季節変化

のに対し、St2は出水期を除き21.8～46.3%の範囲で変動し、St1の含泥率がSt2のそれより高いためである。

また、St1のTOC及びTNは、出水期（2010年6月、2011年6月）とノリ養殖期（2010年11月～2011年1月）に増加する季節変化を示した。これは、出水やノリ養殖により海底への有機物供給量が増加したためと考えられる。しかし、このような2つの大きな有機物供給期以外に、2011年4月にSt1のTOCとTNは増加した。この原因については今のところ不明である。今後、海底面の侵食・堆積状況の連続モニタリング等により原因を明らかにする必要がある。一方、St2のTOC及びTNは、出水期に増加するが、それ以外の期間はそれぞれ5.36mg/g及び0.66mg/g前後を推移した。この出水期におけるTOC及びTNの増加は、出水に伴って微細な土粒子が海底に堆積し、含泥率が81.0～94.7%と大きく増加したためである。このことから、St2の底質は出水期における微細土粒子の堆積量に大きく左右されるものと考えられる。

(2) 底質間隙水中の栄養塩濃度

図-4は、St1及びSt2における底質間隙水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の季節変化を表したものである。なお、これらの値は、表層～10cmの平均値である。両地点共に $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は夏～秋季に増加し、冬季に減少した。しかし、両地点の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の間には統計的に有意な差があり、St1の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は平均してSt2のその約3.4倍高かった。また、St1の2011年夏～秋季における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は、2010年のその約1.6倍高かった。このような地点間や経年的な $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の差異は、底質有機物量と密接に関連するものと考えられる。すなわち、表-1に示されるように、地点間の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度差は、主に底質（含泥率）の違いによる有機物含有量の大小によるものと考えられる。また、2011年夏～秋季の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度が2010年のそれより高い原因の1つに、2010年と比較して底質有機物量が約1.6倍増加したため、有機物の分解・無機化により生成された NH_4^+ が底泥内に多く集積したためと考えられる。このことから、底質間隙水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の変動は、基本的には底質有機物量と泥温に依存していると推察される。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は、両地点共に始め5月に高く、その後減少し6～11月は低濃度であるが（0.4～2.4 $\mu\text{mol/l}$ ）、11月以降増加し、3～4月に5.9～7.7 $\mu\text{mol/l}$ と大きく増加した。

図-4 St1及びSt2における底質間隙水中の栄養塩濃度（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ）の季節変化

この2010年夏～秋季における $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の低濃度は、底質が還元的状態であるため、底質内で硝化が抑制されていたことに加え、脱窒により大部分の NO_3^- が消費されたためと考えられる。また、3～4月における $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 濃度の増加後に遅れて増大することから、底質表層部の酸化層の発達に伴い硝化が促進され NO_3^- が集積されたためと考えられる。しかし、2011年夏～秋季における $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は、St1において底質がより還元的環境であるにもかかわらず、2.4～5.2 $\mu\text{mol/l}$ と比較的高い濃度を示した。この原因は今のところ不明であるが、2011年は出水期以降多雨であったため、河川流入量が平年より多く、海水中の $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度が高かったことが影響して

表-1 底質間隙水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度と底質TOC、TN及び含泥率

Period (Station)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($\mu\text{mol/l}$)	TOC (mg/g)	TN (mg/g)	Mud content (%)
May, 2010–November, 2011 (St1)	395.04±154.93	18.28±4.70	2.06±0.51	94.15±3.49
May, 2010–November, 2011 (St2)	117.69±48.95	7.28±2.79	0.86±0.33	47.32±18.79
June–October, 2010 (St1)	349.04±95.05	12.81±1.81	1.62±0.14	90.97±4.31
June–October, 2011 (St1)	569.31±115.06	21.29±4.06	2.42±0.55	97.22±1.50

いるものと考えられる。すなわち、2011年8～10月における筑後川日流量は平均約147.7m³/sであり（2010年の約1.6倍）、海水中のNO₃⁻-N濃度は3.8～8.8μmol/lと比較的高濃度であった。このため、海水から底泥へのNO₃⁻の取り込みが活発に行われ、脱窒によるNO₃⁻消費を差し引いたNO₃⁻が底泥内に集積した結果、St1において夏～秋季にNO₃⁻-N濃度が高くなったものと推察される。

両地点におけるPO₄³⁻-P濃度の差異や季節変化は、底質の酸化還元環境の変動と密接に関連した（図-2）。すなわち、夏～秋季の底質は全体的に還元的層であるため、水酸化第二鉄に吸着していたリンがイオン化し、間隙水中のPO₄³⁻-P濃度が増加する。しかし、冬～春季の底質表層部は酸化的状態であるため、間隙水中の第一鉄イオンが酸化されることにより生じる水酸化第二鉄にリンが吸着され、間隙水中のPO₄³⁻-P濃度が減少するものと考えられる（郡山ら、2009）。したがって、St1は夏～秋季に底質のEhが大きく低下し、底質の有機物含有量が高いためSt2よりPO₄³⁻-P濃度が高くなり、また、顕著な底質の還元化が見られる2011年夏～秋季にSt1のPO₄³⁻-P濃度が大きく増加するものと考えられる。

(3) 底質-水柱間の栄養塩フラックス

図-5は、栄養塩溶出実験より得られたNH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-Pの溶出速度（ J_{NH_4} 、 J_{NO_3} 、 J_{NO_2} 、 J_{PO_4} ）の季節変化を表したものである。ここで、溶出速度が正の場合、底質から水柱への溶出を、負の場合、水柱から底質への取り込みを示している。図示されるように、 J_{NH_4} は両地点共に夏～秋季に増加、冬季に減少する季節変化を示し、年間を通してNH₄⁺は底質から溶出した。また、St1の J_{NH_4} は、調査期間を通してSt2の平均約6倍高い値を示し（St1:5.39mmol m⁻²d⁻¹、St2:0.90mmol m⁻²d⁻¹）、特に、2011年夏～秋季では3.2～21.5 mmol m⁻²d⁻¹と大きく増加した。このような地点別あるいは経年的な J_{NH_4} の変動は、

底質間隙水のNH₄⁺-N濃度の変動と概ね対応し、間隙水NH₄⁺-N濃度の増加に伴い J_{NH_4} も増大した（図-6）。このことから、 J_{NH_4} は間隙水NH₄⁺-N濃度と密接に関連し、基本的には海底への有機物供給量と泥温に支配されるものと推察される。また、 J_{NH_4} のDINフラックスに占める割合は、両地点共に調査期間を通して約6～9割であった。

St2における J_{NO_3} は、夏季に-0.11～-0.38mmol m⁻²d⁻¹と底質へのNO₃⁻の取り込みを示すが、それ以外の期間は底質からNO₃⁻の溶出を示した。一方、St1における J_{NO_3} は、2010年11月～2011年4月に底質からのNO₃⁻溶出を示すが、それ以外の期間は底質へのNO₃⁻の取り込みを示した。特に、2011年6～10月における J_{NO_3} は平均-0.57mmol m⁻²d⁻¹であり、2010年の同時期のそれ（平均-0.34mmol m⁻²d⁻¹）と比較して約1.7倍高く、水柱から底質へのNO₃⁻の取り込みが活発であった。そこで、St1の脱窒速度を有明海奥部泥質干潟で得られた夏～秋季の平均的な脱窒速度（0.29mmol m⁻²d⁻¹）（古賀ら、2009）と見なした場合、2010年6～10月に取り込まれたNO₃⁻の約85%は脱窒により消費されるが、2011年では取り込まれたNO₃⁻の約41%が底泥内に蓄積する結果となった。このことから、St1において底質が強い還元的環境であるにも関わらず2011年夏～秋季の底質間隙水中のNO₃⁻-N濃度が高い原因の1つに、海水から底質へのNO₃⁻の取り込みが活発に行われ、底質へのNO₃⁻供給量が増加したことが考えられる。

J_{PO_4} は J_{NH_4} と同様の季節変化を示し、両地点共に夏～秋季に増加し、冬季に低下した。また、St1の J_{PO_4} は調査期間を通してSt2の約4倍高く（St1:0.22mmol m⁻²d⁻¹、St2:0.06mmol m⁻²d⁻¹）、特に、底質の還元化が顕著で間隙水PO₄³⁻-P濃度が急増する2011年夏～秋季に0.24～0.66 mmol m⁻²d⁻¹と大きく増加した。このことから、 J_{PO_4} の変動は、 J_{NH_4} と同様に底質間隙水のPO₄³⁻-P濃度と密接に関連し、基本的には底質の酸化還元環境の変化に大きく影

図-5 St1及びSt2における底質-水柱間の栄養塩フラックスの季節変化

図-6 底質間隙水中の NH_4^+ -N濃度(底質表層～10cmの平均値)と NH_4^+ -N溶出速度(J_{NH_4})との関係

響されるものと推察される。

図-7は、有明海奥部海底からのDIN及び PO_4^{3-} -Pの総溶出量(L_{DIN} , L_{PO_4})と筑後川からのDIN及び PO_4^{3-} -Pの供給量(R_{DIN} , R_{PO_4})の季節変化を表したものである。ここで、 L_{DIN} 及び L_{PO_4} は、本研究で得られた栄養塩フラックスとSt1及びSt2に対応する含泥率85～100%及び25～40%の有明海奥部における海底面積より算出した。

また、 R_{DIN} 及び R_{PO_4} は、調査期間における筑後川(瀬ノ下)の日平均流量(速報値)を用いて、瀬ノ下で得られたL-Q式(山本, 私信)より算出した。図示されるように、出水期以降の8～10月における L_{DIN} 及び L_{PO_4} は、それぞれ $9.06 \pm 6.81 \text{ ton d}^{-1}$ 及び $1.17 \pm 0.80 \text{ ton d}^{-1}$ であった。一方、同期間における R_{DIN} 及び R_{PO_4} は、それぞれ $7.74 \pm 2.25 \text{ ton d}^{-1}$ 及び $0.37 \pm 0.35 \text{ ton d}^{-1}$ であることから、出水期以降の夏～秋季において河川から供給される同程度のDINと3倍近い PO_4^{3-} -Pが海底から溶出することが示された。したがって、夏～秋季における海底からの栄養塩溶出は、海水中への重要な栄養塩供給源の1つであり、秋季の水柱内栄養塩動態に及ぼす影響は大きいものと考えられる。また、ノリ養殖期(11～3月)における L_{DIN} 及び L_{PO_4} は、それぞれ $2.92 \pm 1.83 \text{ ton d}^{-1}$ 及び $0.28 \pm 0.22 \text{ ton d}^{-1}$

図-7 有明海奥部における L_{DIN} 及び L_{PO_4} と筑後川からの R_{DIN} と R_{PO_4} の季節変化

d^{-1} であった。これは、それぞれ R_{DIN} 及び R_{PO_4} の67%及び341%に相当するDINと PO_4^{3-} -Pが海底から溶出したことを示しており、このことから、ノリ養殖期において海底は特にリンの重要な供給源の1つであることが明らかにされた。

5. まとめ

本研究によって得られた主な知見は、以下のように要約される。

- (1) 両地点における底質間隙水中の NH_4^+ -Nと PO_4^{3-} -P濃度は、夏～秋季に増加し、冬季に減少する季節変化を示した。これは、基本的に前者は泥温と底質有機物量の変動が、後者は底質の酸化還元環境の変動が大きく影響するものと考えられた。
- (2) 両地点における底質間隙水中の NO_3^- -N濃度は、2010年夏～秋季において低濃度であったが、底質の還元化が顕著な2011年夏～秋季のSt1において比較的高濃度であった。この原因の1つに海水から底質への活発な NO_3^- の取り込みが考えられた。
- (3) 栄養塩溶出実験より得られた J_{NH_4} 及び J_{PO_4} は、夏～秋季に高く、冬～春季に低くなる季節変化を示し、DINフラックスに占める J_{NH_4} の割合は6～9割であった。また、出水期以降の夏～秋季における L_{DIN} は R_{DIN} と同程度、 L_{PO_4} は R_{PO_4} の約3倍であり、海底は夏～秋季において重要な窒素とリンの供給源であることが明らかにされた。また、ノリ養殖期における L_{PO_4} は R_{PO_4} の約3.4倍と高いことから、ノリ生産にとって海底からのリンの供給は重要な役割を果たすものと考えられた。

謝辞：本研究を実施するに際し、佐賀大学低平地沿岸海域研究センター有明海研究プロジェクトより、多大な支援を受けた。

参考文献

- 速水祐一・山本 浩一・濱田孝治・郡山益実・古賀あかね・吉野健児・吉田 誠・片野俊也・山口創一 (2009)：有明海奥部における栄養塩濃度分布の季節変化，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.65, No.1, pp.991-995.
- 環境省 (2006)：有明海・八代海総合調査評価委員会報告，85p.
- 郡山益実・瀬口昌洋・古賀あかね・アリム イスナンセテヨ・速水祐一・山本浩一・濱田孝治・吉野健児 (2009)：有明海奥部の干潟・浅海域底泥における窒素・リンの季節変化，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.65, No.1, pp.1031-1035.
- 古賀あかね・瀬口昌洋・郡山益実 (2009)：有明海奥部干潟域における脱窒菌群の生息分布と脱窒活性，農業農村工学学会論文集，第260号，pp.15-22.
- 小野澤恵一・鯉渕生・阿部哲也・寺田一美・磯部雅彦 (2007)：有明海奥部における栄養塩溶出フラックスの時空間変動，海岸工学論文集，54，pp.1116-1120.
- 渡辺康憲・川村嘉広・半田亮司 (2004)：ノリ養殖と栄養塩ダイナミクス，沿岸海洋研究，42巻，1号，pp.47-54.