

有明海奥部干潟域における脱窒活性と その環境要因について

DENITRIFICATION ACTIVITY AND ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE TIDAL SEDIMENT OF THE INTERIOR PARTS OF THE ARIAKE SEA

古賀あかね¹・瀬口昌洋²・郡山益実³
Akane KOGA, Masahiro SEGUCHI and Masumi KORiyAMA

- ¹ 農修 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-24)
² 正会員 農博 佐賀大学教授 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1)
³ 正会員 農博 佐賀大学助教 農学部生物環境科学科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1)

The relation between the denitrification activity and the environmental factors in the tidal sediment of the interior parts of the Ariake Sea was investigated based on the in situ and laboratory data. There was more number of the denitrifier of each season in the muddy tidal flat than the sandy and mud-sandy one. A high correlation was recognized between the monthly means of denitrification rate and those of $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ -N flux from the sea-water just above the sea-bottom to the tidal sediment. Therefore, it was considered that the denitrification was conducted using the $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ -N adsorption. It was clarified that the denitrification activity in the tidal sediment was influenced strongly by Org.-C as an electric-donor for the denitrification and $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ -N as an electric-acceptor for that.

Key Words : Ariake Sea, Tidal flat, Denitrification rate, Denitrifier, Environmental factor

1. はじめに

内湾沿岸域において、陸域由来や植物プランクトンなどの海域由来のデトリタスは、海水・堆積物の境界層(海底境界層)において高濃度に蓄積・濃縮され、その90%以上がベントス群集や微生物群集によって分解・無機化されている¹⁾。また、堆積物からの栄養塩類の溶出は、河川水の流入と並んで富栄養化に寄与する要因となっている。そのため、海底境界層における栄養塩類などの物質のフラックスは、沿岸域における水環境及び生態系などにおいて重要なファクターである²⁾。しかし、海底境界層の物理的・生化学的要因が栄養塩類の代謝・溶出過程に与える影響や海底境界層における有機物の分解・無機化に関わる微生物群集の種類や活性などについては、いまだ不明な点が多い。

有明海は閉鎖性内湾で、面積約 200km² の広大な干潟を有する。また、大量の微細土粒子やデトリタスが沈殿と再懸濁を繰り返すため、浮泥が海域奥部を中心に高濃度で存在している³⁾。近年、この海域において、二枚貝類の漁獲量の激減、赤潮発生の頻発化、貧酸素水塊発生の顕在化など環境悪化が急速に進んでおり⁴⁾、その原因解明と海域環境の再生について様々な研究が行われて

いる^{5)~7)}。このような状況の中で、干潟の持つ、富栄養化の低減すなわち窒素・リンの除去といった環境浄化機能に寄せる期待は大きい。特に、窒素収支において、総窒素除去量の約20%を占める脱窒作用⁸⁾に注目が集まっている。しかし、干潟域における脱窒活性と底質環境との関連性については、必ずしも十分に究明されているとはいえない。

筆者らは、前報⁹⁾において、有明海奥部干潟域における脱窒菌群数の広域的な分布状況や奥部に広がる典型的な泥質干潟における脱窒菌群数と脱窒速度の季節推移を明らかにした。本研究は、前報の研究に引き続き、同域における脱窒活性と底質の主な環境要因との関連性を明らかにすることを目的とする。特にここでは、泥質干潟での詳細な調査及び測定データを基に、両者の関連性について検討、考察した。

2. 実験概要

今回の実験において設定した有明海奥部における調査及び底質の採取地点を図-1に示す。これらの地点①~⑭は、沿岸域の泥質、砂泥質及び砂質の干潟域に点在する。また、地点A~C及び地点D~Gは、沿岸域から沖

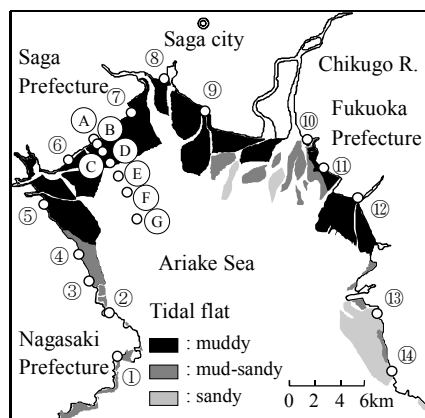


図-1 底質の採取地点

合に設定した測点のうち、それぞれ干潟域及び浅海域に位置する。

奥部干潟域における脱窒菌群数の広域的な分布性と底質との関連性を検討するため、地点①～⑭において2006年6, 8, 11, 12月及び2007年5, 8, 11, 12月の干潮時に、現地観測と底質の採取を行った。採取試料については、実験室で脱窒菌群数の計測と底質及び間隙水の化学分析を行った。なお、底質の採取に際しては、一般に脱窒菌群数が多く、脱窒活性の高い表面から深さ4cmまでの底質¹⁰⁾を採取した。

泥質干潟における干潮時の脱窒菌群数の鉛直分布性及びその季節推移と底質環境との関連性を検討するため、2006年4月～2008年3月に、地点⑨において各月2回の現地観測とコアサンプラー（内径83mm、長さ21cm）による底質の採取を行った。採取試料については、表面から深さ10cmまで2cm毎にスライスカットした底質を用い、実験室で脱窒菌群数の計測と底質及び間隙水の化学分析を行った。また、表面から深さ10cmまでの底質における脱窒速度及び無機態窒素フラックス速度の測定を行った。

干出及び冠水を繰り返す干潟域と潮下帯である浅海域での脱窒菌群数の分布性を比較するために、地点④～⑥において2007年8月から2008年7月の満潮時に、用船により現地観測とコアサンプラーによる底質の採取を行った。実験試料として表面付近（0～2cm）の底質を用い、脱窒菌群数の計測と底質及び間隙水の化学分析を行った。

現地では、温度とORPメータによる酸化還元電位(Eh)を測定した。また、脱窒菌群数はGiltay培地を用いて30℃で7日間培養した後、MPN法¹¹⁾に基づき算出した。底質については、含泥（粘土＋シルト）率及び、CHNコーダー(JM-10, J-Science LAB)を用いて有機態炭素(Org.-C)と有機態窒素(Org.-N)を定量分析した。底質直上水及び底質試料を遠心分離(4,000rpm, 10min)して採取した底質間隙水については、メンブランフィルター(0.45μm)でろ過し、冷凍保存した。後日解凍した試料について、オートアナライザー(SWATT, BL TEC)を用いてNH₄⁺-N,

NO₃⁻+NO₂⁻-Nを定量分析した。

脱窒速度は、アセチレン阻害法¹²⁾で測定した。すなわち、採取した未攪乱のコア試料にアセチレンを飽和させたる過海水100mLをコア試料内部及び直上に注入し、現地温度に設定したインキュベータで24時間培養した後、コア試料上のヘッドスペース中の気体を採取してガスクロマトグラフィー(G3810, Yanako)でN₂O濃度を測定した。そして、N₂O濃度の測定値から、(1)式により単位面積当たりの脱窒速度 R_d (mg-N m⁻² d⁻¹)を求めた。

$$R_d = \frac{1.25 C (V_g - \beta V_l)}{A T} \quad (1)$$

ここで、 C はヘッドスペース（気相）中のN₂O濃度、 V_g , V_l は、それぞれヘッドスペース及びろ過海水（液相）の容積、 A はコア試料の断面積、 T は単位時間、 β はオストワルド溶解度係数（例えば30℃のとき、 $\beta = 0.530$ mL mL⁻¹）である¹³⁾。

底質直上水－底質間の無機態窒素フラックス速度は、未攪乱で採取したコア試料上部をろ過した底質直上水で満たし、現地温度で培養した底質直上水中の無機態窒素濃度の経時変化から、(2)式により単位面積当たりのフラックス速度 F (mg-N m⁻² d⁻¹)を算出した。

$$F = \frac{(C_0 - C_T) V}{A T} \quad (2)$$

ここで、 C_0 と C_T は0及び T 時の無機態窒素濃度、 V は液相容積、 A はコア試料の断面積、 T は単位時間である。

3. 結果及び考察

(1) 底質及び季節による脱窒菌群数の変化

図-2は、有明海奥部干潟域の14地点における2006年の含泥（シルト＋粘土）率を示す。含泥率は西岸部の地点①～④で22～47%（砂泥質）、中央部の地点⑤～⑫で71～99%（泥質）、東岸部の地点⑬、⑭で6～11%（砂質）であり、奥部干潟域の大部分は泥質干潟となっている。この泥質干潟の形成には、有明海奥部の物質輸送に大きな役割を果たしている還流（残差流）の分布と奥部に流入する九州最大の河川である筑後川からの多量の土砂

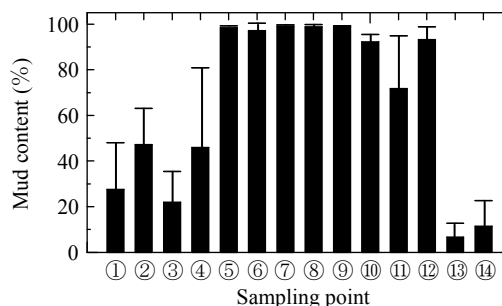


図-2 地点①～⑭の底質の含泥率

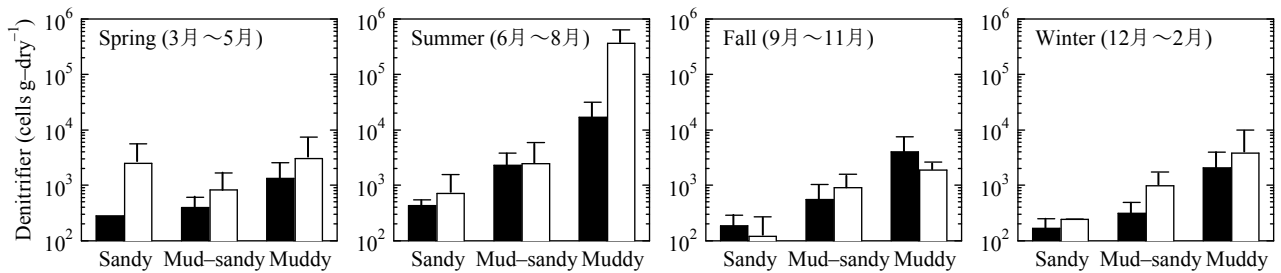


図-3 2006 年と 2007 年における底質の各季節平均の脱窒菌群数 (■ : 2006, □ : 2007)

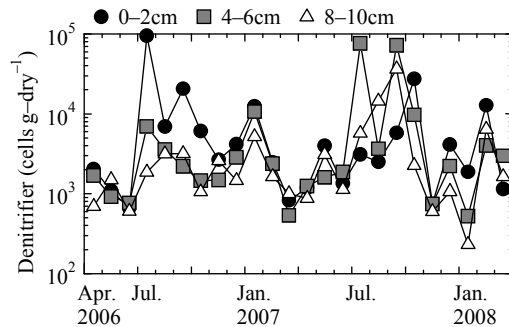


図-4 地点⑨ (泥質干潟) における各深さの各月平均の脱窒菌群数の経時変化

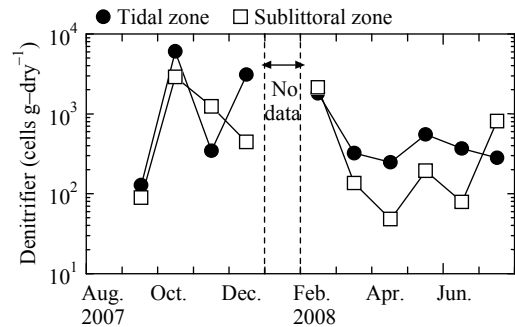


図-5 地点①～③ (干潟域) と地点④～⑥ (浅海域) における底質の各月平均の脱窒菌群数の経時変化

流入が大きく影響していると考えられる¹⁴⁾。

図-3 は、上記の砂質、砂泥質及び泥質の各底質における 2006 年と 2007 年の各季節平均の脱窒菌群数を示す。2007 年の春季を除き、いずれの季節においても泥質における脱窒菌群数が最も多い。各底質における脱窒菌群数は砂質で約 $5.8 \times 10^2 \text{ cells g-dry}^{-1}$ 、砂泥質で約 $1.1 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$ 、泥質で約 $5.0 \times 10^4 \text{ cells g-dry}^{-1}$ と、含泥率の増加に伴って増大する傾向が見られる。これは、含泥率の上昇に伴って底質中の有機物含有量が増大すること⁹⁾や脱窒菌の生息に適した嫌気的環境が形成されやすいことなどによるものと推察される。また、脱窒菌群数は夏季に最も多く、その他の季節と比較して 1 オーダー以上の差異が見られる。これは、脱窒菌の炭素源である有機物が夏季に筑後川をはじめ、奥部に流入する大小の河川からの出水に際して奥部干潟域に多く搬入されることや泥温が上昇することによるものと考えられる。

図-4 は、泥質干潟に位置する地点⑨の底質の上層 (0～2cm)、中層 (4～6cm)、下層 (8～10cm) における各月平均の脱窒菌群数の経時変化を示す。なお、測定値は、各月 2 回行った実験の平均値である。脱窒菌群数は、2006 年 7 月に上層で、また 2007 年 7 月に中層で、それぞれ $9.5 \times 10^4 \text{ cells g-dry}^{-1}$ 及び $8.5 \times 10^4 \text{ cells g-dry}^{-1}$ と最大値を示す。さらに、両年の各層の脱窒菌群数は、上層で $9.2 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$ 、中層で $8.8 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$ 、下層で $4.1 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$ となり、上、中層における生息数が多い。

図-5 は、干潟域 (地点①～③) と浅海域 (地点④～⑥) の底質中における各月平均の脱窒菌群数の経時変化を示す。なお、2007 年 8 月及び 2008 年 1 月のデータは欠測である。両地点における脱窒菌群数は、ほぼ類似した季節的推移を示す。干潟域の脱窒菌群数 ($1.3 \times 10^2 \sim 6.0$

$\times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$) は、浅海域の脱窒菌群数 ($4.8 \times 10^1 \sim 2.9 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$) に比べて、全般的にやや多く分布する傾向が見られる。

(2) 脱窒速度と脱窒菌群数及び無機態窒素フラックス速度

図-6 及び 7 は、それぞれ表面から深さ 10cm までの底質における各月平均の脱窒菌群数と脱窒速度の経時変化及び両者の関係を示す。なお、2006 年 11 月～2007 年 1 月の脱窒速度は、欠測のため表示されていない。脱窒菌群数の経時変化は各年によって異なるが、概ね夏季 (7 月～9 月) に増加し、春季 (3 月～5 月) に減少する傾向が伺われる。このような脱窒菌群数の経時変化は底質環境、主に泥温、有機物量及び Eh の経時変化が大きく影響していると考えられる。脱窒速度は、2006 年では 10 月、2007 年では 7 月に、それぞれ $8.46 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 及び $9.34 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ とピークを示す。また、脱窒菌群数と脱窒速度の経時変化は必ずしも一致しておらず、両者間の相関性も低い。これは、脱窒菌が通性嫌気性菌のため、底質が好気的環境の場合にはエネルギー効率の高い好気呼吸を行い、また嫌気的環境の場合には嫌気呼吸 (脱窒) を行う¹⁰⁾ ために脱窒菌群数と脱窒速度の間に差異が生じたものと推察される。

図-8 及び 9 は、それぞれ底質直上水と表面から深さ 10cm までの底質間における各月平均の無機態窒素フラックス速度の経時変化及び脱窒速度と $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ フラックス速度との関係を示す。ここで、フラックス速度の正の値は取込を、また負の値は溶出を表す。 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ フラックス速度は、2007 年 1 月を除いてすべて取込となっている。また、測定期間中の $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ フラックス

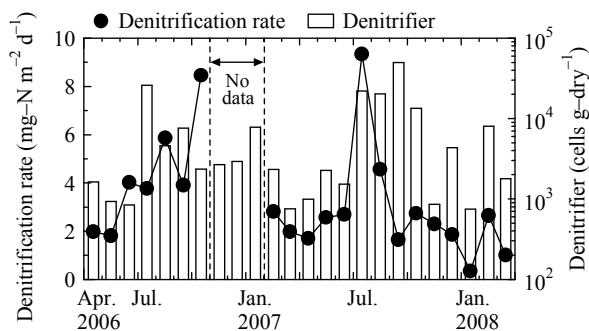


図-6 地点⑨（泥質干潟）における各月平均の脱窒速度と脱窒菌群数の経時変化

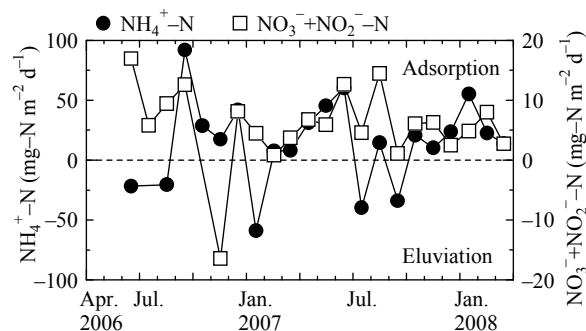


図-8 地点⑨（泥質干潟）における各月平均の無機態窒素フラックス速度の経時変化

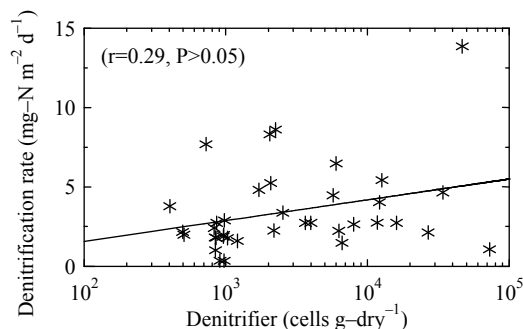


図-7 地点⑨（泥質干潟）における各月平均の脱窒速度と脱窒菌数の関係

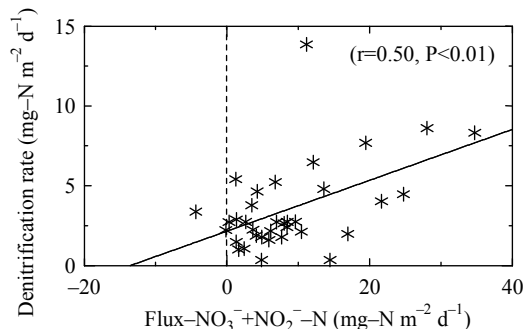


図-9 地点⑨（泥質干潟）における各月平均の脱窒速度とNO₃⁻+NO₂⁻-Nフラックス速度の関係

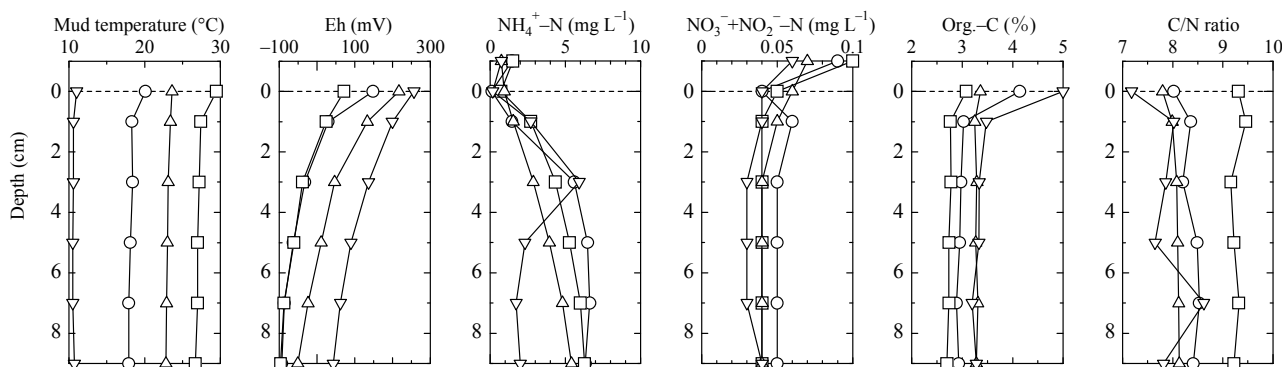


図-10 地点⑨（泥質干潟）における各季節平均の泥温、Eh、NH₄⁺-N、NO₃⁻+NO₂⁻-N、Org.-C、C/N比の鉛直分布（○：Spring，□：Summer，△：Fall，▽：Winter）

速度の平均値は ($6.94 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) は、脱窒速度のそれ ($3.24 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) を上回っている。このことより、底質中に取込まれた $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- \text{-N}$ の約半分は脱窒に、また残りの約半分は同化型硝酸還元の前駆体として利用されていると考えられる。さらに、脱窒速度と $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- \text{-N}$ フラックス速度の間には正の相関が見られる。したがって、脱窒活性は底質直上水中の $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- \text{-N}$ 濃度に大きく左右されると同時に、海底境界層での窒素収支に重大な影響を及ぼしていると考えられる。一方、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ フラックス速度は、2007年1月を除いて、夏季に溶出、秋季、冬季を中心に取込の傾向が伺われる。夏季では、泥温の上昇に伴って底質中の有機物が分解されて底質間隙水中の $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 濃度が上昇し、溶出が卓越したものと考えられる。また、秋季、冬季では、底質の好気化に伴って硝化が活性化し、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ の取込が増加したものと推

察される。

(3) 底質における環境要因の鉛直分布

図-10 は、地点⑨（泥質干潟）の脱窒活性を大きく左右すると考えられる主な環境要因について各季節平均の鉛直分布を示す。泥温は、底質表層から下層（深さ10cm）までほぼ一定であり、各季節におけるその平均値は春季 18.4°C 、夏季 27.5°C 、秋季 23.1°C 、冬季 10.7°C である。

Eh は、いずれの季節においても底質表層から下層に向けて減少する。しかし、その鉛直分布は春季、夏季から秋季さらには冬季へと移るに伴い、全体的に正の大きな値に推移している。特に冬季では、底質表層を中心に好気的環境が形成されている。これは、気温の低下する冬季では、底質中の有機物の好気的分解が抑制され、 O_2 の

消費が低下するためと考えられる。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、直上水中で $0.74\sim 1.50\text{mg L}^{-1}$ 、間隙水中で $0.11\sim 6.63\text{mg L}^{-1}$ の範囲にあり、冬季を除いて深さに伴って増加している。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、底質表層では硝化や直上水への溶出により減少する。しかし、底質下層では有機物の分解による生成、蓄積により深さと共に増大すると考えられる。また、冬季において、深さ 3cm を除いて全般的に $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が少ないのは、泥温の低下に伴い有機物の分解による生成が不活性化するためと推察される。

$\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$ は、直上水中で $0.03\sim 0.06\text{mg L}^{-1}$ 、間隙水中で $0.06\sim 0.10\text{mg L}^{-1}$ の範囲にあり、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と比較して約 2 オーダー低い値である。これは、表面付近を除いて全般的に嫌気的環境のため、硝化活性が低く、 $\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$ の生成が少ないためによるものと考えられる。また、 $\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$ は、底質表層から深さ 10cm までほぼ均一に分布し、季節間の濃度差が比較的小さい。

Org.-C は、いずれの季節においても表面付近を除いて、3%前後のほぼ様な鉛直分布であり、季節間の差異も小さい。ただ、冬季に表面で高い値を示しているが、これは、冬季に繁茂する渦華と呼ばれる付着珪藻に起因すると推察される。

C/N 比は、冬季を除いてほぼ様な鉛直分布を呈し、夏季に上昇、その他の季節で減少している。一般に C/N 比は有機物の種類や分解の状態によって大きく影響を受ける¹⁵⁾。したがって、C/N 比が冬季に低く、夏季に高いのは、有機物の主な由来源がそれぞれ付着藻類などの海域起源及び水生植物などの陸域起源であるためと考えられる。

(4) 脱窒速度と環境要因との関係

表-1 は、国内外の沿岸域や干潟域で採取された底質について測定された脱窒速度を示す。脱窒速度は、沿岸域

よりも干潟域において、また砂質よりも泥質の干潟において高くなる傾向が伺われる。これは、泥質干潟の底質において、脱窒の炭素源である有機物の含有量が高いこと⁹⁾や脱窒菌の生息に適した部位（不連続層）が形成されやすいことなどによるものと考えられる。また、有明海奥部の地点⑨の脱窒速度は、国内外の他の地点で測定された値とほぼオーダー的に等しい。

表-2 は、地点⑨における各季節平均の脱窒速度と主な環境要因との相関係数を示す。脱窒速度と主な環境要因との相関係数は、各季節において大きく異なる。例えば、春季では $\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$ フラックス速度と、また秋季では $\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$ フラックス速度及び Org.-C と、さらに冬季では C/N 比と脱窒速度との間に高い相関性が認められる。すなわち、生化学現象である脱窒活性には、底質中の種々な環境要因が複雑に関与し、またその度合は季節によって異なっていると考えられる。しかし、泥質干潟に位置する地点⑨の脱窒速度は、概して四季を通し、脱窒の際に電子供与体として直接的あるいは間接的に関与する Org.-C や C/N 比、さらには電子受容体として間接的に関与する $\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$ フラックス速度に大きく左右されていることが推察される。

4. まとめ

本研究では、有明海奥部泥質干潟における脱窒活性と環境要因との関連性などについて測定データに基づき検討、考察した。その結果、明らかになった主な知見を要約すると、次のようになる。

- 1) 有明海奥部干潟域における底質表層 (0~4cm) の各季節平均の脱窒菌群数は、夏季に泥質の底質で最も多かった (平均約 $1.9\times 10^5\text{cells g-dry}^{-1}$)。これは、脱窒菌の

表-1 沿岸域底質の脱窒速度の測定値^{16)~19)}

Locations	Samples	Denitrification rates ($\text{mg-N m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	References
Ariake Sea (Japan)	Mud flat (0-10cm)	0.35-9.34 (mean: 3.24)	Present study
Tokyo Bay (Japan)	Coastal sediment	2.73-4.69	Nishio T. (1982)
Hiroshima Bay (Japan)	Tidal flat	0.01-20.00	Seiki T. (2008)
	Coastal sediment	0.10-3.40	
Norsminde Fjord (Denmark)	Mud flat	2.00-10.00	Jørgensen K. S. (1988)
Delaware Inlet (N.Z.)	Mud flat (0-10.5cm)	1.23-10.96 (mean: 4.08)	Kasper H. F. (1983)
	Sand flat (0-10.5cm)	1.64-7.92 (mean: 2.94)	

表-2 地点⑨ (泥質干潟) における各季節平均の脱窒速度と主な環境要因との相関係数 (**: $p<0.01$, *: $p<0.05$)

	Denitrifier	Mud temperature	Eh	Org.-C	C/N ratio	$\text{NO}_3^+\text{+NO}_2^-\text{-N}$		
						Pore water	Overlying water	Flux rate
Spring	0.55	0.41	0.20	0.52	0.31	0.02	0.53	0.78*
Summer	0.55	0.34	0.08	0.24	0.52	0.12	0.15	0.03
Fall	0.43	0.01	0.52	0.78**	0.62	0.22	0.48	0.91**
Winter	0.16	0.05	0.01	0.14	0.76*	0.47	0.41	0.27

炭素源である有機物が夏季に大小の河川から出水時などに奥部の泥質干潟域に多く搬入されることが泥温が上昇すること、さらには脱窒菌の生息に適した部位（不連続層）が形成され易いことなどによるものと推察された。

- 2) 奥部の泥質干潟（地点⑨）において、脱窒菌は底質の上層（0～2cm）や中層（2～4cm）に多く分布し、さらに脱窒菌群数は、それぞれ年間を通して平均約 $9.2 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$ 及び $8.8 \times 10^3 \text{ cells g-dry}^{-1}$ であった。
- 3) 泥質干潟（地点⑨）の表面から深さ 10cm までの底質における各月平均の脱窒速度と脱窒菌群数との間には、必ずしも一意的な関係が認められなかった。これは、脱窒菌が通性嫌気性菌のため、底質が好気的環境の場合にはエネルギー効率の高い好気呼吸を行い、また嫌気的環境の場合には嫌気呼吸（脱窒）を行うため、脱窒菌群数と脱窒速度との間に差異が生じたものと推察された。
- 4) 泥質干潟（地点⑨）の底質直上水と表面から深さ 10cm までの底質間における各月平均の $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ フラックス速度は、2007 年 1 月を除いて全て取込であった。また、 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ フラックス速度 ($6.94 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) は、脱窒速度 ($3.24 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) を上回った。このことより、底質中に取込まれた $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ の約半分は脱窒に、また残りの半分は同化型硝酸還元の前駆物質として利用されていると考えられた。
- 5) 泥質干潟（地点⑨）の表面から深さ 10cm までの底質における各月平均の脱窒速度と主な環境要因との相関性は、各季節において大きく異なった。すなわち、生化学的現象である脱窒活性には、底質中の種々の環境要因が複雑に関与し、またその度合は季節によって異なっていると考えられた。しかし、この底質の脱窒速度は、概して四季を通し、脱窒の際に電子供与体として直接的あるいは間接的に関与する Org-C や C/N 比、さらには電子受容体として間接的に関与する $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ フラックス速度に大きく左右されていると推察された。

謝辞：本研究を実施するに際し、平成 20 年度科学研究費補助金（基盤研究（B））、代表者：瀬口昌洋）及び佐賀大学有明海総合研究プロジェクトより、資金援助を受けた。このことを、ここに付記し、深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Wollast, R.: The coastal organic carbon cycle; fluxes, sources, and sinks, *Ocean Margin Processes in Global Change*, Mantoura, R. F. C., Martin, J. M. and Wollast, R. eds., John Wiley & Sons, Chichester, pp.365-381, 1991
- 2) Cabrita M. T., Brotas V.: Seasonal variation in denitrification and dissolved nitrogen fluxes in intertidal sediments of the Tagus estuary, Portugal, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.202, pp.51-65, 2000
- 3) 代田昭彦：デトリタスと水産の関係，海洋科学，Vol.14, pp.473-481, 1982
- 4) 日本海洋学会：有明海の生態系再生を目指して，恒星社厚生閣，2005
- 5) 関口秀夫，石井 亮：有明海の環境異変—有明海のアサリ漁獲量激減の原因について—，海の研究，Vol.13, pp.403-411, 2004
- 6) 藤原考道，経塚雄策，濱田孝治：有明海における潮汐・潮流減少の原因について，海の研究，Vol.12, pp.21-36, 2003
- 7) 郡山益実，瀬口昌洋，石谷哲寛：ボックスモデルによる有明海奥部西岸域の貧酸素水塊の発生源機構の検討，農業農村工学会論文集，Vol.76, pp.41-49, 2008
- 8) 柳 哲雄，阿部良平：有明海における 1979 年と 1999 年の窒素収支の変化，海の研究，Vol.15, pp.67-75, 2006
- 9) 古賀あかね，瀬口昌洋，郡山益実：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，農業農村学会論文集，Vol.77, pp.121-128, 2009
- 10) 栗原 康 編著：河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー，東海大学出版会，1991
- 11) 土壤微生物研究会：土壤微生物実験方法，養賢堂，1997
- 12) 小池勲夫：海底境界層における窒素循環の解析手法とその実際，産業環境管理協会，2000
- 13) 駒田充生，竹内 誠：土壌を含む気液平衡系における亜酸化窒素溶解度，日本土壌肥科学会誌，Vol.70, pp.804-807, 1999
- 14) 戸原義男，渡辺 潔，加藤 治，瀬口昌洋：有明海の潮流と拡散，混合に関する研究—有明海湾奥海域の環流—，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp.483-486, 1989
- 15) Middelburg, J. J., Nieuwenhuize, J.: Carbon and nitrogen stable isotope in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary, *Marine Chemistry*, Vol.60, pp.217-225, 1998
- 16) Nishio, T., Koike, I., Hattori, A.: Denitrification, nitrate reduction, and oxygen consumption in coastal and estuarine sediments, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol.43, pp.648-653, 1982
- 17) 清木 徹，伊達悦二，岡田光正：干潟及び沿岸海底における脱窒と窒素固定，日本水産学会誌，Vol.74, pp.678-687, 2008
- 18) Jørgensen, K. S., Sørensen, J.: Two annual maxima of nitrate reduction and denitrification in estuarine sediment (Norsminde Fjord, Denmark), *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.48, pp.147-154, 1988
- 19) Kasper, H. F.: Denitrification, nitrate reduction to ammonium, and inorganic nitrogen pools in intertidal sediment, *Marine Biology*, Vol.74, pp.133-139, 1983
- 20) Vanderborght, J. P., Billen G.: Vertical distribution of nitrate concentration in interstitial water of marine sediment with nitrification and denitrification, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.20, pp.953-961, 1975

(2009. 9. 30 受付)