

有明海奥部における海水中の栄養塩濃度の季節変化について

石谷 哲寛*・郡山 益実**・荒木 啓輔***

(*水環境工学研究室, **浅海干潟環境学研究室, ***環境地盤学研究室)

平成23年8月31日 受理

Seasonal Changes of Nutrient Concentrations in the Water Column in Interior Parts of Ariake Sea

Tetsuhiro ISHITANI*, Masumi KORIYAMA** and Keisuke ARAKI***

(*Laboratory of Water Environmental Engineering, **Laboratory of Environment of Shallow Sea and Tidal Flat, ***Laboratory of Environmental Geotechnics)

Accepted August 31, 2011

Summary

In this study, seasonal variations of nutrient concentrations and aquatic environment in the water column and nutrient flux between sediment and water column in the interior parts of the Ariake Sea were investigated on the base of observation data and laboratory experiments. DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen) concentration in the water column increased in summer and decreased in winter. PO_4^{3-} concentration in the water column increased from summer to autumn. Nutrient concentrations in the water column increased as increase of river discharge, however, nutrient concentrations increased in summer and autumn with low river discharge. It was guessed that this was caused by nutrient supply of sea area origin (nutrient release from sea bottom to water column).

Key words : Ariake Sea, Nutrient, Flux, Sediment, River discharge

緒 言

有明海は九州西岸に位置しており、長崎、佐賀、福岡、熊本の4県に周りを囲まれた閉鎖性の内湾である。海域の面積は約1,700 km^2 、湾長は約100km、平均湾幅は約20km、平均水深は約20mである。有明海は湾長に比べ湾幅が短く、また水深が非常に浅いことが特徴で、このような地形のために潮汐振幅が大きく、湾奥部では最大6mに達する。さらに、筑後川をはじめとする河川から多量の土砂が流入・堆積するため、湾奥部を中心に広大な干潟が形成されており、その面積は全国の干潟の約40%に相当する約207 km^2 である。

近年、この有明海奥部において、様々な海域の環境悪化が顕在化している¹⁻³⁾。例えば、2008年夏季には、有害藻類であるシャトネラ赤潮の発生と共に、小潮時に貧酸素水塊が形成され、魚類の大量斃死が発生した⁴⁾。また、2000年冬季には、ノリ養殖期に大規模な珪藻赤潮などの影響でノリ生産額が283億円に留まり、大きな社会問題となった。しかし、翌年の漁期は一転して秋芽網期、冷凍網期ともほぼ順調に推移し、ノリ生産額が526億円に達する豊作となった⁵⁾。このような赤潮の発生や貧酸素水塊の形成、さらに不安定なノリ養殖漁業は、有明海の気象条件や海水中の栄養塩動態に大きく左右される。したがって、有明海異変の原因究明やノリ養殖

期の安定的な作柄の確保を考える上で、海域における栄養塩のモニタリングや栄養塩循環の解明は不可欠である。渡辺ら⁵⁾は、29年間の福岡県と佐賀県による浅海定線調査データを用いて、有明海奥部における栄養塩の平均濃度と現存量の季節変化を解析した。その結果、海域における栄養塩の季節変化は、単純な河川からの栄養塩供給だけでは説明できないことを明らかにした。そこで、本研究では、有明海奥部浅海域に調査区を設置し、海水中の栄養塩濃度や水質環境の季節変化を把握すると同時に、底泥コアを用いた栄養塩の溶出実験を行い、海域への栄養塩供給源について検討、考察する。

現地調査及び室内実験の概要

2010年5月～2011年5月の毎月一回大潮の満潮時に、図1のSt.1(泥質, 含泥率93%)及びSt.2(砂泥質, 含泥率40%)において現地調査を行った。北原式採水器(C号, 離合社)を用いて、表層(水面下50cm), 中層, 底層(海底上1m)の海水をそれぞれ採水した。また、多項目水質計(AAQ1183, アレック電子)を用いて、表層から50cm, 1m, 以降海底まで1m間隔で、溶存酸素濃度(DO), 水温, 塩分, クロロフィル蛍光及び濁度の鉛直分布を測定した。さらに、ダイバーにより採取した未攪乱状態の底泥コア(内径5.5cm, 長さ50cm)を用いて、栄養塩の溶出実験を行った。実験室に持ち帰ったコアは、まず直上水をサイホンで抜き取り、濾過した現地の底層水を、底質の表層を乱さないように静かに注入した。このコアを、現地の底泥の温度に設定した暗条件の恒温室に静置し、実験開始時, 2, 4, 6, 8, 24時間後にコア内の直上水を採水した。なお実験中は、直上水中の栄養塩濃度が一樣になるように、攪拌機を用いてコア内の直上水を攪拌・混合した。溶出実験はSt.1, St.2それぞれ3本ずつ行い、その平均値を各月の値とした。

現地で採水した海水及び溶出実験のサンプル水は、0.45 μ mのフィルターで濾過後直ちに冷凍保存し、後日、オートアナライザー(BLTEC, SWAAT)を用いて栄養塩濃度の分析を行った。なお、今回測定した栄養塩は、アンモニア態窒素(NH_4^+ -N), 硝酸態窒素(NO_3^- -N), 亜硝酸態窒素(NO_2^- -N)及びリン酸態リン(PO_4^{3-} -P)の4項目である。

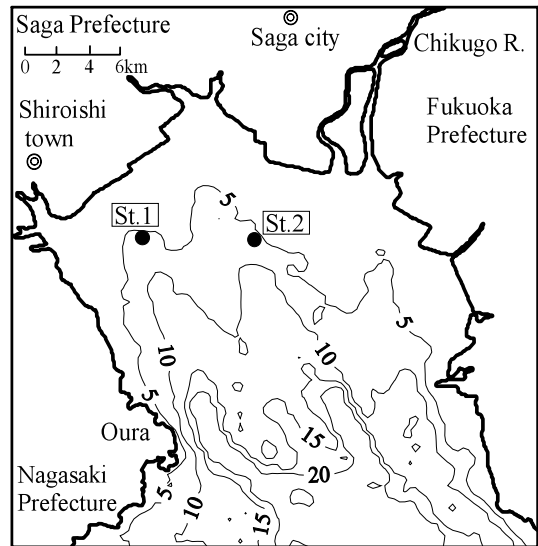


図1 有明海奥部における調査地点

結果及び考察

図2は、調査期間における筑後川(瀬ノ下)の日平均直下流量(Q)を示したものである。なお、図中の下向きの矢印は、現地観測を実施した日を示している。5～7月は出水期に当たるためQが多く、その平均流量は252.1 m^3/s であった。また、まとまった降雨の直後などにはQは急激に上昇し、最大2,756 m^3/s に達した(7/14)。出水期以外のQは概ね安定して

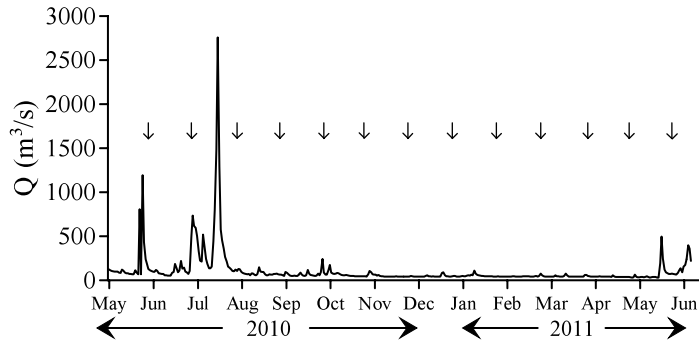


図2 筑後川（瀬ノ下）の日平均流量（2010年5月～2011年6月）

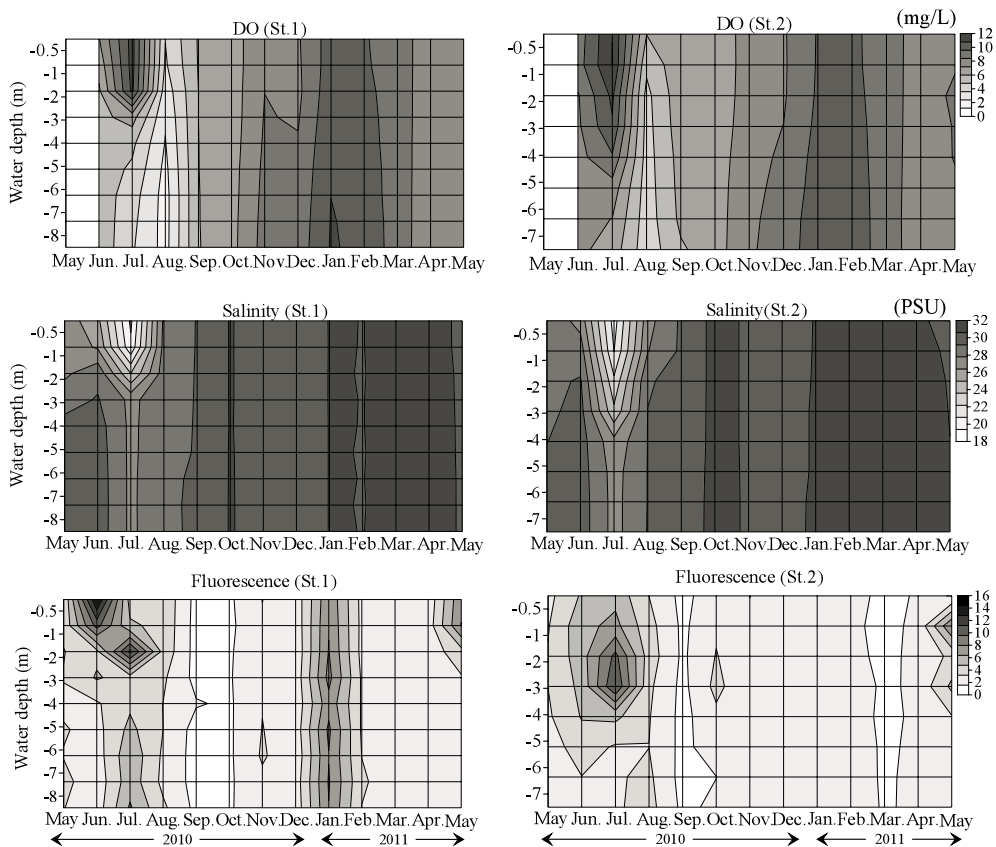


図3 St.1及びSt.2におけるDO、塩分及びクロロフィル蛍光の鉛直分布の季節変化（2010年5月のDOは欠測）

おり、その平均流量は $92.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、最大 $240.9 \text{ m}^3/\text{s}$ であった（9/23）。

図3は、St.1及びSt.2におけるDO、塩分、及びクロロフィル蛍光の鉛直分布の季節変化を示したものである。なお、2010年5月のDOは欠測である。図示されるように、出水期である夏季には、表底層間の塩分差が大きくなり、両地点共に成層構造が発達した。また、それに伴い底層付近ではDOが低下し、貧酸素状態となった。それに対して冬季は、河川流量の減少や、気温の低下に伴う海面冷却により、海水の鉛直混合が盛んになるために、塩分とDOは全層に

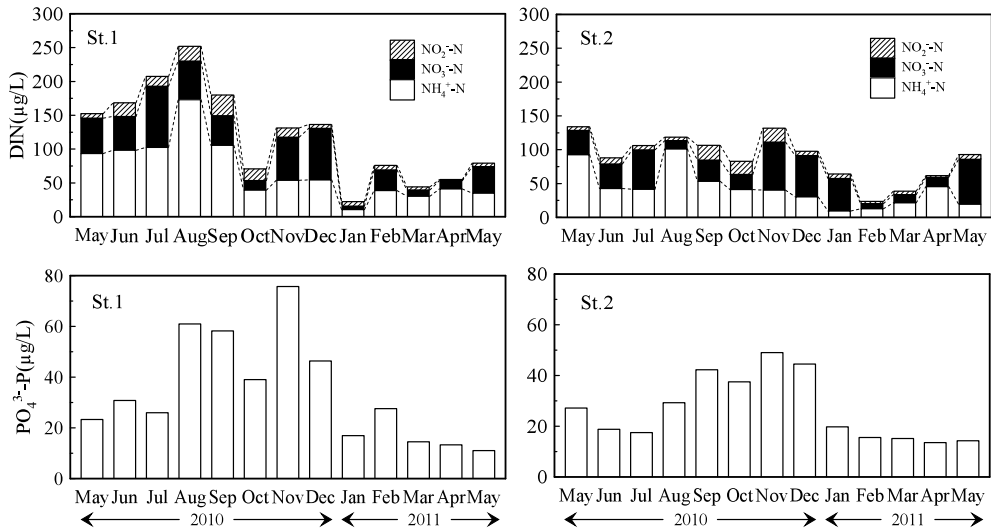


図4 St.1及びSt.2における $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度(平均値)の季節変化

渡りほぼ一様の分布となった。一方、両地点のクロロフィル蛍光は、出水期の表層付近で高く、St.1の冬季(1月)では全水柱で高かった。

図4は、St.1とSt.2における海水中のDIN(= $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$)濃度と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の季節変化を示したものである。ここで、各月のDIN及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、表層、中層、底層の平均値である。St.1のDIN濃度は夏季に最も高く、冬季に低くなる季節変化が見られた。St.2においては、5~12月は $100\mu\text{g/L}$ 前後で推移したが、1~4月のDIN濃度は他の月よりも低かった。DINの形態別で見ると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、両地点共に夏季~秋季に高く、冬季に低下した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、夏季と冬季に増加した。一方、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、両地点共に夏季~秋季に高い季節変化を示した。

図5は、St.1及びSt.2における $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の鉛直分布の季節変化を示したものである。St.1における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の鉛直分布の季節変化は、全般的には夏季及び秋季に高く、冬季に低下した。7月の水柱内の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、中層~底層で高く、表層で低くなっている。これは、観測日直前の降雨による河川流量の増加に伴い多量の栄養塩が流入したが、表層付近では植物プランクトンが増加したため(図3)、水柱の $\text{NO}_3\text{-N}$ が消費されたためと考えられる。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度も夏季及び秋季にかけて高く、冬季に低下した。8月の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、中層~底層で高く、表層で低くなっている。これは、図3に示したように、底層付近の海水のDOが低下し、還元的な状態となっていたため、海底からの栄養塩の溶出が増大したことから、海水中の NO_3 が還元され、 NH_4 が生成されたことが原因と考えられる。11月~12月にかけて、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高くなっているが、これは海底からの $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶出量が増加したことが原因と考えられる。また、1月は $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度ともに低くなっているが、これは、植物プランクトンの増加により(図3)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NH}_4\text{-N}$ が消費されたためと考えられる。また、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、夏季から秋季にかけて高く、特に秋季に高かった。また、St.2における $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の鉛直分布の季節変化は、概ねSt.1におけるそれらと類似していたが、St.1と比べ、それらの濃度は全体的に低かった。

一般に、沿岸域における海水中の栄養塩濃度の変動は、河川流量の変動に大きく左右される⁶⁻⁸⁾。そこで、筑後川(瀬ノ下)の日平均流量(Q_{ave})とDIN及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度との関係を図

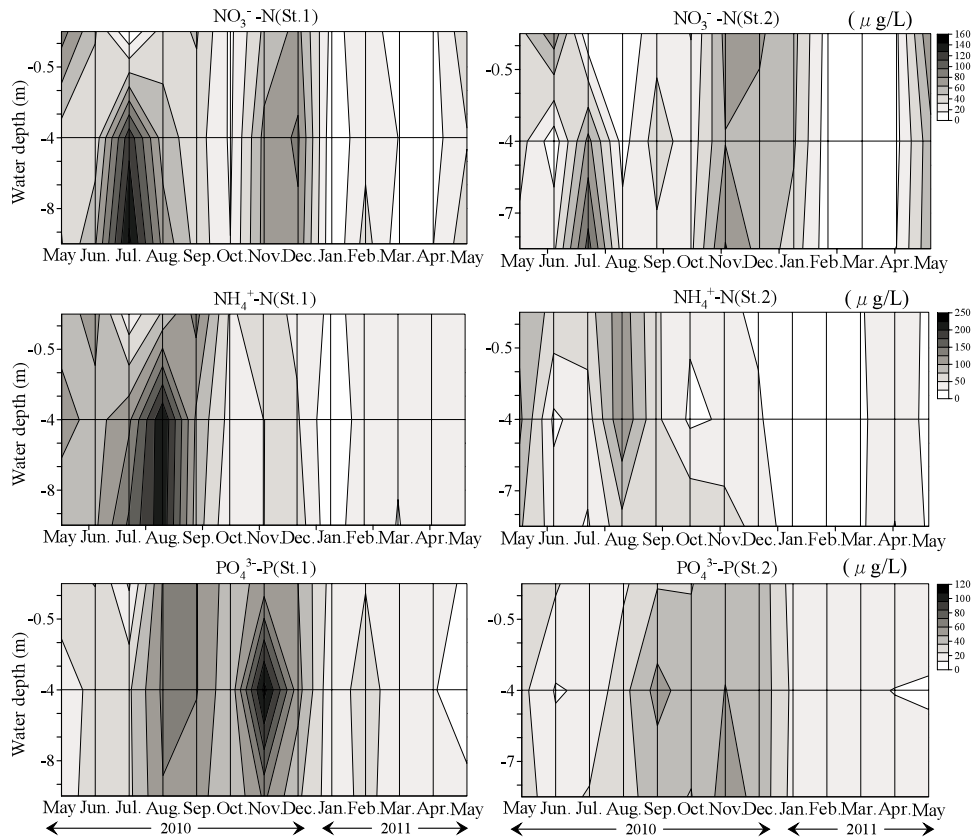


図5 St.1及びSt.2における NO_3^- -N、 NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度の鉛直分布の季節変化

6に示す．ここで Q_{ave} は、山口と速水⁹⁾にならい、筑後川から流入する河川水が、St.1及びSt.2を含む海域に最も影響を及ぼすと考えられる、観測日の2日前を中心とした3日間の平均流量である．St.1、St.2いずれの地点においても、 Q_{ave} の増加に伴いDINと PO_4^{3-} -P濃度が増加する月が見られた（図中の破線Aで囲んだ月）．これらの月におけるDINと PO_4^{3-} -P濃度の増加は、主に河川からの流入による陸域起源の栄養塩供給によるものと考えられる．一方、DIN濃度の7～9月と11～12月、 PO_4^{3-} -P濃度の8～12月のように、 Q_{ave} が低い時期にも関わらず両濃度が高いケースが見られた．これは、河川による陸域起源の栄養塩供給より海域起源の再生産栄養塩供給の影響が強く反映されたためと考えられる．

図7は、St.1及びSt.2において採取した底質コアと底層水を用いて行った栄養塩の溶出試験の結果より求めた、底質-直上水間の栄養塩フラックスの季節変化を示したものである．なお栄養塩フラックスは、直上水の栄養塩濃度の時間変化から回帰分析により算出した．ここで、栄養塩フラックスが正の場合、底質から直上水への栄養塩の溶出を、負の場合、直上水から底質への栄養塩の取り込みをそれぞれ意味する．また、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N及び PO_4^{3-} -Pの溶出速度をそれぞれ J_{NH_4} 、 J_{NO_3} 、 J_{NO_2} 及び J_{PO_4} とする．

図示されるように、2010年5月～2011年3月において、両地点の J_{NH_4} は夏季に高く（平均St.1：48.25 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、St.2：29.62 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）、冬季に低かった（St.1：8.26 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、St.2：1.35 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）．また、 J_{PO_4} も J_{NH_4} と同様の季節変化を示し、夏季に増加し（平均St.1：3.85 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、St.2：4.75 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）、冬季に減少した（St.1：0.49 $\text{mg m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 、St.2：

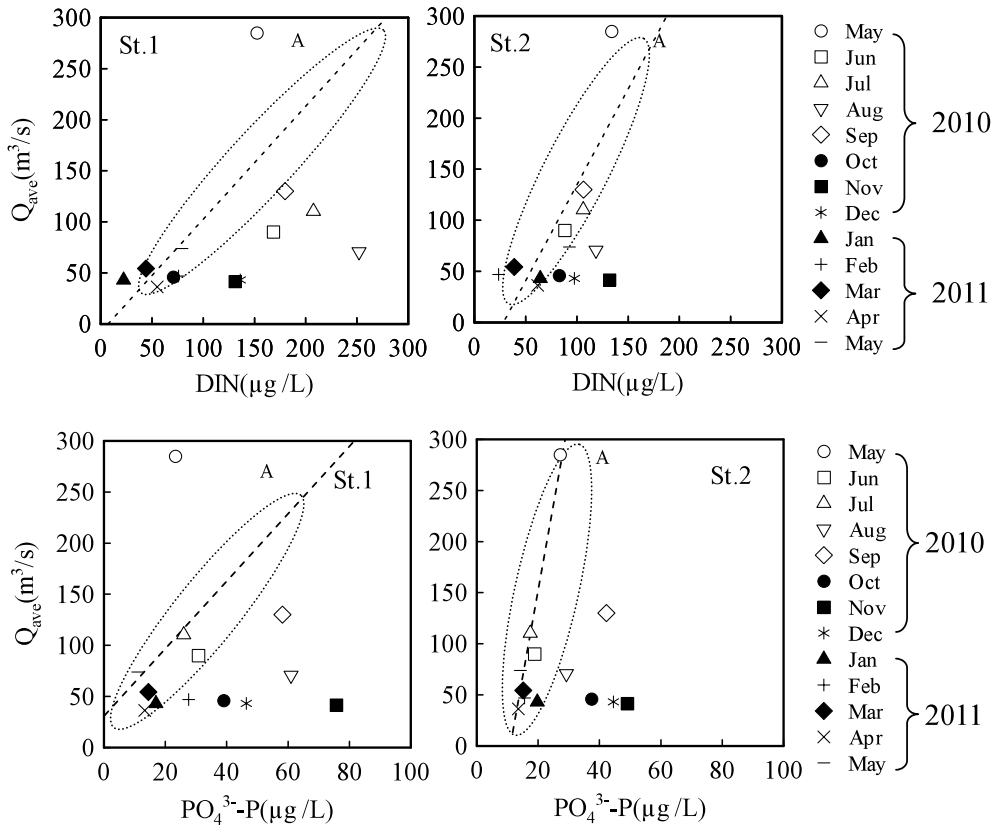


図6 筑後川の河川流量(Q_{ave})とDIN及び PO_4^{3-} -P濃度との関係

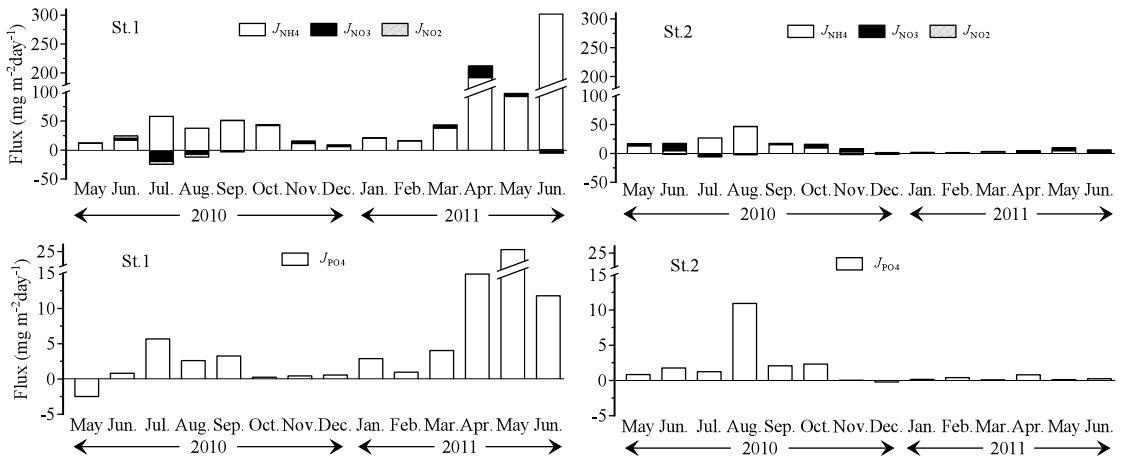


図7 底質 - 直上水間の栄養塩フラックスの季節変化

0.03mg m⁻²day⁻¹). このような J_{NH_4} と J_{PO_4} の季節変化は、海水中の NH_4^+ -N と PO_4^{3-} -P 濃度のそれと概ね対応している。すなわち、夏季に底泥から海水中への NH_4^+ -N と PO_4^{3-} -P の溶出が活発化するため水柱内の NH_4^+ -N と PO_4^{3-} -P 濃度が増加する。一方、冬季では底泥からの溶出が大きく減少するため、水柱内の NH_4^+ -N と PO_4^{3-} -P 濃度が減少する。したがって、特に海底が

泥質の浅海域である St .1の水柱内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、底泥からの供給量の変動に大きく左右されるものと推察される。一方、 J_{NO_3} は両地点共に5～6月は溶出であるが、7～9月は底泥への取り込みとなり、10月以降再び溶出する季節変化が見られた。7～9月における St .1の底泥への $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 取り込みは平均 $9.29 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で、有明海泥質干潟における夏季の脱窒速度は $4.1 \sim 9.3 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であることから¹⁰⁾、底泥へ取り込まれた $\text{NO}_3^-\text{-N}$ の多くは脱窒によって消費されるものと推察される。また、海水中の $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度は、7月と11～12月に増加するが、7月における $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の上昇は、河川流量が増加する時期であることから陸域起源であると考えられる。一方、11～12月における $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の上昇は、河川流量が少ない時期であることと(図2)、10月以降底泥から $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が供給されることから、海域の栄養塩再生起源であると考えられる。また、図6から明らかなように、 Q_{ave} が低い時期に DIN と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度が高い月が見られるが、それは J_{NH_4} と J_{PO_4} が高い時期と概ね一致する。これは、夏～秋季における海域への栄養塩供給減の1つに海底からの $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の溶出が大きく寄与しているためと推察される。今後、海水中の栄養塩濃度の季節変化に海底からの栄養塩溶出がどの程度寄与しているかを定量的に評価する必要がある。

なお、2011年4～6月における St .1の J_{NH_4} 及び J_{PO_4} は、それぞれ $91 \sim 301 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 及び $11 \sim 25 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と他の月と比較して高いにも関わらず、海水中の DIN と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の上昇は見られなかった。現在、この原因については不明である。今後、St .1においてなぜこの時期に J_{NH_4} と J_{PO_4} が高くなったのか？ また、なぜ J_{NH_4} と J_{PO_4} が高いにも関わらず海水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度に変化は見られないのか？ について底質データの分析や観測日前の対象海域の赤潮・海況情報等を収集し検討を進める予定である。

結 言

本研究では、現地観測及び室内実験により、有明海奥部における海水中の栄養塩濃度の季節変動について検討・考察した。その結果、以下のような知見が得られた。

1. 有明海奥部における海水中の DIN 濃度は、特に泥質の St .1において7～9月と11～12月に増加し、1月以降は低濃度で推移する季節変化が見られた。また、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、St .1と St .2共に8～12月に高い季節変化を示した。
2. 海水中の DIN 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、河川流量の増加に伴い増大する傾向を示す一方で、河川流量が低い時期(夏～秋季)にも関わらず両濃度は高かった。この時期は、 J_{NH_4} と J_{PO_4} が高い時期と概ね一致することから、海底からの $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の溶出が海水中の DIN 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の変動に寄与しているものと推察された。

摘 要

有明海奥部における、海水中の栄養塩濃度、水質環境及び底泥-水柱間の栄養塩フラックスの季節変化について、現地調査や室内実験を基に検討した。その結果、海水中の DIN 濃度は夏季に上昇、冬季に低下する傾向を示した。 PO_4^{3-} 濃度は、夏～秋季に上昇する傾向を示した。また、海水中の栄養塩濃度は河川流量の増加に伴い上昇したが、河川流量の少ない夏～秋季の一部でも上昇しており、これは海域起源の栄養塩供給(海底からの栄養塩溶出)によるものと推察された。

引用文献

1. 石谷哲寛, 瀬口昌洋, 郡山益実, 加藤 治 (2007). 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生と密度躍層. 農業土木学会論文集 247, 65-72.
2. 宇野木早苗 (2004). 有明海の潮汐・潮流の変化に関わる科学的根拠と社会的問題. 沿岸海洋研究 42, 85-94.
3. 児玉真史, 田中勝久, 藤田孝康, 木元克則, 岡村和磨, 森雄一郎 (2005). 有明海湾奥西部における貧酸素水塊と底質環境の変動過程. 2005年日本海洋学会春季大会講演会要旨集, 197.
4. 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) 2 65 (1), 991-995.
5. 渡辺康憲, 川村嘉応, 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 (1), 47-54.
6. 山尾理, 笠井亮秀, 藤原建紀, 杉山陽一, 原田一利 (2002). 河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化. 海岸工学論文集 49, 961-965.
7. Antonio, C. Z., Velásquez, M., d., C. Pérez, N., Bahamón, N., S., Grimaldo, and F., Ridolfi. (2002). Nutrient fluxes from the Ebro River and subsequent across-shelf dispersion. *Continental Shelf Research* 22(2), 349-360.
8. 熊谷香, 内藤剛 (2007). 有明海福岡県地先への栄養塩供給量の動向. 福岡県水海技セ研報 17, 73-80.
9. 山口創一, 速水祐一 (2009). 有明海湾奥における出水後の低塩分水塊の挙動および水質への影響. 沿岸海洋研究 46 (2), 161-173.
10. 古賀あかね, 瀬口昌洋, 郡山益実 (2010). 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. 水工学論文集 54, 1633-1638.