有明海奥部における栄養塩濃度分布の季節変化

Seasonal Variation in Nutrient Distribution in the Inner Area of the Ariake Sea

速水祐一¹・山本浩一²・濱田孝治³・郡山益美⁴・古賀あかね⁵
・吉野健児⁶・吉田 誠⁷・片野俊也⁸・山口創一⁹

Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Takaharu HAMADA, Masumi KORIYAMA, Akane KOGA
Kenji YOSHINO, Makoto YOSHIDA, Toshiya KATANO and Soichi YAMAGUCHI

In order to investigate the seasonal variation in nutrient distribution in the mudflat-shallow water system, we made field surveys once a month from August, 2007 to July, 2008 in the bay head of the Ariake Sea. The $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration increased in autumn and exceeded the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration. Then the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration increased and topped in January. Since the river discharge was small, such an increase of nitrogen concentration would be caused by the flux from the bottom sediments. The $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration was also increased in autumn moderately. It decreased from January to March and still low until June. Such a variation would be also affected by the seasonal variation in $\text{PO}_4\text{-P}$ release from the sediment. These facts suggest the important role of the variation in nutrient supply from the sediments of mudflat in this area.

1. はじめに

有明海奥部では、近年赤潮や貧酸素水塊の発生が大きな問題となっている（環境省、2006など）。2008年夏季には、7月下旬から8月にかけて有毒藻類であるシャットネラの赤潮が発生すると共に、小潮時に貧酸素水塊が形成され、8月中旬には魚類の大量斃死も発生した。赤潮の発生や貧酸素水塊の形成は、栄養塩動態と密接に関連している。一方、干出・冠水を繰り返す干潟域では、干出することがない浅海域とは異なった、複雑な栄養塩動態が知られている（児玉ら、2000など）。しかし、広大な泥干潟が広がる有明海奥部において、これまで干潟と潮下帯域を含めた栄養塩動態の季節変化について詳しく報告された例はない。そこで本研究では、有明海奥部において冠水した干潟から潮下帯域にかけての海域において、栄養塩動態の季節変動を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2007年8月から2008年7月にかけて、有明海奥部で毎月1回朔の大潮に合わせて船舶観測を行った。観測は図-1に示した測点A～Gの7点で行い、最も標高が高い測点

図-1 調査水域の地形および測点位置

Aの調査が満潮時にできるように、上げ潮から満潮にかけて2時間以内に実施した。測点Cよりも岸側の測点は大潮干潮時には干出する。各測点で、透明度測定、多項目水質計（Alec電子製、AAQ-1183）による水温・塩分・濁度、クロロフィル蛍光、溶存酸素濃度、pHの鉛直分布観測、およびニスキン採水器による採水を実施した。採水層は、測点A～Cでは0.5m深のみ、測点D～Fでは0.5m深及び底上1m、測点Gでは0.5m、5m及び底上1mの3層である。なお、基本的に同じ観測日に同じ測点で底泥調査も実施しており、こちらの結果は別報（郡山ら、2009）で報告する。

1	農博	佐賀大学准教授有明海総合研究プロジェクト
2	正会員 工博	山口大学准教授理工学研究科
3	正会員 工博	佐賀大学准教授有明海総合研究プロジェクト
4	正会員 農博	佐賀大学助教農学部
5	農博	佐賀大学大学院農学研究科
6	水博	佐賀大学准教授有明海総合研究プロジェクト
7	農博	佐賀大学研究員有明海総合研究プロジェクト
8	理博	佐賀大学研究員有明海総合研究プロジェクト
9	理博	佐賀大学研究員有明海総合研究プロジェクト

採水した試水については、栄養塩、全リン (TP)・溶存態リン (DP), 溶存有機態リン (DOP)・粒状態リン (PP), 粒状有機炭素 (POC)・粒状有機窒素 (PON), 溶存有機炭素 (DOC), SSおよびSSの強熱減量 (VSS)の分析および植物プランクトンの計数を行った。栄養塩については、試水を孔径 $0.45\mu\text{m}$ のシリジフィルター (ADVANTEC, Dismic-25cs) で濾過し、濾液を -30°C で凍結保存、解凍後、オートアナライザー (BLTEC製, SWAAT) を用い、標準法によって硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$), 溶存態シリカ (D-Si) の5項目を測定した。なお、7月の栄養塩については、ミスにより欠測となっている。TP・DPについては、前者は生海水のまま、後者は孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで濾過後、ペルオキシ二硫酸カリウム分解-モリブデンブルー (アスコルビン酸還元) 吸光光度法で測定した。TPとDPの差をPP, DPと $\text{PO}_4\text{-P}$ の差をDOPとした。POC・PONについては、あらかじめ 450°C で1時間加熱したガラス繊維ろ紙 (Whatman, GF/F) で試水を濾過し、 60°C で乾燥後、CHNコーダー (ジェイ・サイエンス・ラボ製, MICRO CORDER JM10) を用いて測定した。SSについては、あらかじめ乾燥・秤量したガラス繊維ろ紙 (ADVANTEC, GS-25) で試水を濾過し、塩分が残らないように脱塩水で3回洗浄後、 105°C で2時間乾燥、デシケーター中で放冷後、秤量して質量を求め、SSを算出した。SS測定後のフィルターをろつばに入れ、硝酸アンモニウム溶液 (250g/L) を滴下して湿した後、 600°C の電気炉で30分間加熱し、デシケーター中で放冷後、秤量して質量を求め、VSSを算出した。DOCについては、孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで試水を濾過し、濾液について全有機炭素計 (島津製作所製, TOC-V) を用いて測定した。植物プランクトンについては、採水後、次の日までに計数した。計数にあたっては、試水をよく攪拌し、 1.0mL の資料をピペットマンで分取し、罫線入りスライドガラス上に滴下し、光学顕微鏡下で種の査定・計数を行った。スライドガラス上のプランクトンは全て計数した。顕微鏡の倍率は $40\sim 100$ 倍とし、計数対象とする細胞は細胞質がつまったもののみとした。

3. 結果

観測期間中の筑後川瀬ノ下における流量変化を図-2に示す。2007年7月7日には $3400\text{m}^3/\text{s}$ 以上、8月3日にも $1000\text{m}^3/\text{s}$ を越える出水があるなど、7、8月中は比較的流量が多い時期が続いたが、8月下旬から翌年の5月まではほとんどが流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ 以下の日が続いた。2008年6月に降、再び流量は増加し、6月下旬には $1000\text{m}^3/\text{s}$ を越える出水が発生した。

測点Bの 0.5m 深における栄養塩、TP・DOP・PP, POC・PON, SS・VSS, DOCおよび植物プランクトン、クロロフィル蛍光の季節変化を図-3に示す。窒素についてみると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が秋季に極めて高くなっていたことが特徴である。最も高濃度となった11月には、測点Bの $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は $138\mu\text{g/L}$ に達した。10、11月には、 $\text{NO}_3\text{-N}$ よりも $\text{NH}_4\text{-N}$ の方が高濃度になっていた。 $\text{NH}_4\text{-N}$ に少し遅れて $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上昇し、1月に最も高濃度となった。こうした変化を反映して、DIN濃度は10月以降上昇し、1月に最も高濃度となった。その後は急激に濃度が低下し、3月にはほとんど枯渇、5月まで低濃度の状態が続いたが、6月には再び上昇した。リンについてみると、

図-2 筑後川瀬ノ下における日平均流量変化 (速報値)。*は観測前3日間の平均流量

図-3 測点Bにおける水質・プランクトン量の季節変化

TPとしては、夏季に高く冬季に低いという季節変化をしており、特に7, 8月に高濃度となっていた。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ としては、8月から1月まで比較的安定して高濃度の状態が続いた後、急激に濃度が低下して、3月に最低濃度となった。その後は夏にかけて徐々に濃度が上昇した。PPはPOC, PON, SSおよびVSSと共通した季節変動をしており、夏から秋にかけて濃度が低下し、冬季は低濃度で終始、3月に急に濃度が上昇し、その後は一度濃度が低下して7月に再び高くなった。DOPの濃度はPP,

$\text{PO}_4\text{-P}$ に比べて低かった。D-Siについては、夏と冬にピークがある2峰型の季節変動となっていた。DOC濃度は夏に高くなる傾向が見られたが、窒素・リン・シリカに比べると変動は小さく、年間を通して安定していた。植物プランクトン量およびクロロフィル蛍光は、夏季に高かったほか、3, 4月にもピークがみられた。

測点AからGまでの測線に沿った水質および成層強度分布の季節変化を図-4に示す。また、2007年8月15日と2008年1月10日における測線に沿った水質の鉛直断面分

図-4 測点A～Gの測線に沿った0.5m深における水質および成層強度分布の季節変化（縦軸は測点Aからの距離）

布を図-5, 図-6に示す。

8月の塩分断面をみると、塩分躍層が4m付近にあり、測点CとDの間で海底に接している。その結果、測点Cより岸側では成層は弱くなっている。これは、図-4cで8月の表層と底層の密度差が測点Dより沖側で大きくなっているのに対応する。図-4cからは、7, 8月の測点Dより沖側の水柱は強く成層していたが、9月～6月は全域で成層は弱かったあるいは鉛直混合していたこと、測点A～Cでは（少なくとも大潮時には）年間を通して成層が弱かったことがわかる。

成層した8月には、躍層を境にして上層でクロロフィル蛍光が高く、下層で低溶存酸素濃度となっていた。栄養塩濃度分布も成層の影響を受け、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 D-Si 濃度は表層で高く、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は下層で高濃度となっていた。ただし $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は成層を反映せず、干潟域底層で高くなっていた。一方、全域で水柱が鉛直混合していた1月には、栄養塩は鉛直一様に近い濃度分布になっていた。

図-4からは、測点Bにみられた栄養塩濃度の季節変化パターンは基本的に測線全域で共通していることがわかる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は秋季に上昇し、遅れて $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が上

昇、1月にピークに達した。どちらも岸側で濃度が高く、沖にいくほど低濃度となっていた。図-5, 6からも分かるように、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は測点A～Cで特に高かった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は9月に一度下がった後、10月から1月まで再び高濃度の時期が続いた。秋季の高濃度期間中は岸側で特に高濃度となっていた。 D-Si は夏と冬に高濃度となり、冬季には測点A～Cで特に高濃度であった。PP, POC, クロロフィル蛍光の変化はよく似ており、いずれも夏季に高いほか、2月から4月にかけて岸よりの測点を中心に高濃度がみられた。2月から春にかけての岸側における濃度上昇は、SSの変動とも一致した。TPについては、8月には測線全域で高かったものが、沖合側から徐々に濃度が低下し、翌年の7月に再び濃度が上昇するまで続いた。特に春季の低濃度化が著しい。

4. 考察

渡辺ら（2004）は、有明海湾奥部を広くカバーする福岡県・佐賀県の浅海定線調査データを解析し、この海域の栄養塩濃度は夏季に増加、冬季に減少し、夏季の増加は河川流量増大に起因すると述べている。本研究で夏季

図-5 2007年8月15日の測線に沿った水質断面分布

図-6 2008年1月10日の測線に沿った水質断面分布

よりも秋季～冬季の方が高濃度になった原因は、出水の影響が少ない時期に調査したためである。山口・速水(2009)は、福岡県・佐賀県の6～9月の浅海定線調査データを解析し、調査前3日間の筑後川の平均河川流量が200m³/sec以上の場合には表層塩分とDIN濃度の間に高い負の相関があるが、それ以下の場合には相関が低く、DIN濃度も低いことを示した。これは、夏季でも特に高栄養塩濃度となるのは出水後であることを示す。本研究の栄養塩データは、いずれも観測前3日間の河川流量が200m³/sec以下の日に得られている。

秋季～冬季のNH₄-N、NO₃-N濃度の上昇は、河川流量が少ない時期に起きており、図-4をみてもほとんど塩分変動なしに生じている。したがって、これは陸域起源ではなく、海域における栄養塩再生起源であると考えられる。秋季の高いPO₄-P濃度、冬季のD-Si濃度上昇についても同様である。

郡山ら(2009)は、底泥間隙水中のNH₄-N濃度が8～11月に高く、直上水へ活発な溶出が起きたことを示している。溶出速度は1.2～9.8mg-N/m²/dayに達する。また、間隙水中のNO₃-N濃度は通常低いが、11、12月に限って高濃度となり、この時期には直上水へ溶出が起きたことを示している。したがって、秋季～冬季の水柱内NH₄-N、NO₃-N濃度の上昇に対しては底泥からの溶出の影響が大きいと考えられる。なお、底泥からのNH₄-N溶出は8、9月も多いが、この時期の水柱内NH₄-N濃度は高くない。これは植物プランクトンの生産が活発で、速やかに消費されるためだと考えられる。

郡山ら(2009)は底泥間隙水中のPO₄-Pについても調べ、PO₄-P溶出量は夏季に多く、徐々に減少して1月にはほとんど溶出しなくなり、その後も溶出量が少ない状態が5月まで続くという結果を得ている。したがって、秋季の水柱内PO₄-P濃度の上昇についても、底泥からの溶出と、植物プランクトン減少の影響が大きいと考えられる。また、春季の低PO₄-P濃度の要因は、河川流量が少ないことに加えて底泥からの溶出も少ない状態が続くためと考えられる。

水柱内のTP濃度は夏季に最も高く、その後は初夏にかけて減少、特に春季の低濃度化が著しかった。有明海では、河川流量は夏季に多く、それ以外の季節は少ない。したがって、陸域からのリンの供給は主に夏季に生じる。底泥からの溶出は、夏季～秋季には大きい、冬季～初夏は少ない。TP濃度の季節変化は、こうしたリン供給量の変化を反映しているものと推測される。

渡辺ら(2004)は、Mixing Diagram上における直線とのずれから、9月から1月にかけて河川以外にDINの供給源があり、こうした供給は12月から2月にかけて急激に

減少すると推察している。本研究の結果は、ちょうどこの時期に干潟域でDIN濃度が大きく上昇し、底泥からの溶出がその主要因であると考えられることを示した。したがって、干潟域からの栄養塩溶出は有明海湾奥の広い範囲に影響を及ぼしているものと考えられる。また、渡辺ら(2004)は、冬季のDIN減少は養殖ノリと赤潮による海域からの除去によると推定している。これに対して我々の研究は、藻類による除去だけではなく、底泥からの供給がストップすることが、水柱内栄養塩濃度減少の要因になっていることを示唆している。

最後に、秋季～冬季の高濃度期に、栄養塩はしばしば岸寄りで特に高濃度となっていた。これについては、干潟域で特に活発な溶出が起きている他に、水深の影響も大きいと考えられる。すなわち、底泥からの溶出量が同じであれば、水柱が鉛直混合している場合は水深が浅いほど濃度上昇は大きくなる。

5. まとめ

有明海奥部の干潟～潮下帯域では、秋季にアンモニア態窒素が高濃度になり、硝酸態よりも高くなった。続いて硝酸態窒素濃度が上昇、1月にピークに達した。これらは、植物プランクトンによる消費の減少と、底泥からの溶出によると考えられた。リン酸態リンも秋季に増加し、同様の機構によると考えられた。リン酸態リン濃度は春から初夏に顕著に低下し、これは河川流量が少ない上に底泥からの溶出も減少するためと考えられた。以上の結果は、有明海奥部の栄養塩濃度変動に対して干潟底泥からの回帰量の変動が重要な要素であることを示す。

謝辞：本研究は、NPO法人有明海再生機構からの受託研究として実施した。調査の実施にご協力いただいた佐賀大学農学部瀬口研究室の学生諸氏、いであ株式会社、藤井正春氏に感謝する。

参 考 文 献

- 環境省(2006)：有明海・八代海総合調査評価委員会報告，85p。
郡山益美・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，第56回海工論文集(投稿中)。
児玉真史・松永信博・水田健太郎(2000)：干潟底泥—海水間の栄養塩フラックスに関する現地観測，第47回海工論文集，pp. 1126-1130。
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その水質への影響，沿岸海洋研究，第46巻，第2号，pp. 161-173。
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ックス，沿岸海洋研究，42巻，1号，pp. 47-54。