

福岡湾における海水－底泥間の栄養塩の挙動について

江崎 恭志・江藤 拓也・片山 幸恵
(研究部)

福岡湾における冬季のリン不足の原因を解明することを目的として、窒素・リンが海水中から底泥に沈降する速度と、底泥から海水中に溶出する速度を、季節別・海域別にそれぞれ測定することにより、海水－底泥間の栄養塩の挙動を明らかにした。

沈降・溶出とも、高水温期に速度が大きく、低水温期で小さい傾向にあった。湾全体の沈降・溶出間の収支では、通年では窒素が沈降が多く、リンでは逆に溶出が多かったことから、リンでは窒素に比べて湾外への排出傾向が大きい可能性が示唆された。また、窒素・リン間のバランスについては、溶出速度の比が Redfield 比に対して、高水温期ではリン寄りに、また低水温期では窒素寄りに、それぞれ偏っており、溶出により供給される栄養塩は冬季にリン制限的であることがわかった。

以上のことが、同湾冬季におけるリン不足の要因のひとつであることが推察された。

キーワード：福岡湾，底泥，栄養塩

福岡湾は、沿岸に大都市を擁する半閉鎖的な内湾であり、夏季の豊富な栄養塩を背景に、過去から湾奥部を中心に赤潮や貧酸素水塊が多発してきた。しかしその一方で、近年では冬季の海水中無機態リン濃度が極度に低下し、ノリ・ワカメといった藻類養殖業に悪影響を及ぼしている。こうした現象の原因として、同湾の栄養塩のバランスが近年変化している可能性が考えられる。

藻類養殖をはじめとした同湾漁業の持続的生産を確保するためには、まず基礎生産の要である栄養塩の挙動を正しく理解しておく必要がある。この挙動を決定する要素は種々あるが、一般に内湾域においては、海水中から底泥への沈降および底泥から海水中への溶出のプロセスが栄養塩の循環に重要な役割を果たしていることが知られている。¹⁾

そこで本研究では、同湾における窒素およびリンの沈降・溶出速度を実地に測定することにより、海水－底泥間の栄養塩の挙動を把握し、もって同湾冬季におけるリン不足の要因解明への一助とすることを目的とした。

方 法

1. 沈降・溶出速度および湾全体の収支

まず、全体的な傾向を把握するため、同湾内各海域に代表点を設定し、季節ごとに沈降・溶出速度の測定および収支の検証を行った。

調査定点は湾奥・湾央・湾口域それぞれ各1点、全3点



図1 調査定点

(図1)とした。なお、各定点周辺の水深帯(底質の性状)は、それぞれ3.5m(軟泥質)・5.0m(泥質)・10.0m(砂泥～砂質)であった。

調査時期は、春季(4～6月)・夏季(7～9月)・秋季(10～12月)・冬季(1～3月)の代表として、2008年5月・8月・11月及び2009年2月に各1回とした。なお、各調査時における底層水温は、春季16.8～17.4℃・夏季27.8～28.2℃・秋季17.9～18.5℃・冬季10.7～12.4℃であった。

湾内の海域区分およびその面積は、福岡市の博多湾環境保全計画²⁾に準拠し、湾奥29.1km²・湾央25.4km²・湾口71.6km²とした(図2)。季節ごとの日数は、前述の月区分に対応する日数とした。

沈降・溶出速度の測定は、後述の測定装置を24時間現

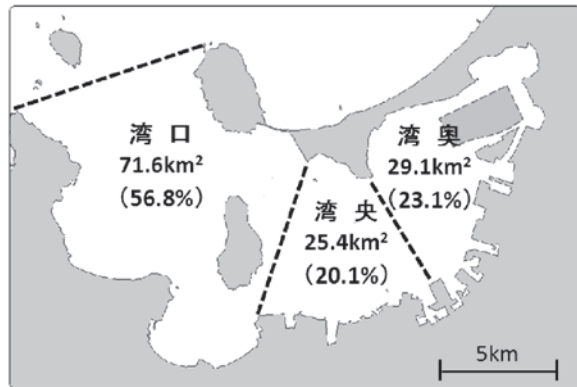


図2 海域区分および面積

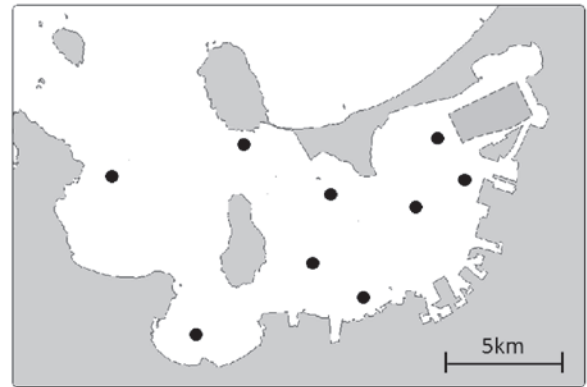


図3 調査定点

表1 分析方法

項目	方法
NH-N	インドフェノール青吸光度法
NO3-N	銅・カドミウムカラム還元・ナフチルエチレンジアミン吸光度法
NO2-N	ナフチルエチレンジアミン吸光度法
PO4-P	モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光度法
PON	ベルオキシニ二硫酸分解法
POP	ベルオキシニ二硫酸分解法

場海底に設置して行い、試料をオートアナライザーによる定量分析(表1)に供した。

(1) 沈降速度の測定

プラスチック製の堆積物トラップ(口径4.3cm・深さ16cm)を1定点につき1個、口部を底上0.5mの高さに設置し、測定期間中にこれに捕集された堆積物を実験室に持ち帰り、粒子態有機窒素・リンとして定量した。

なお、この捕集された堆積物は、海水中の懸濁物が新たに沈降してきた成分のほか、すでに海底に沈降していた海底表面の底泥が潮流等により巻き上げられて再懸濁した成分が混合したものであるため、真の沈降速度を評価するためには、この再懸濁分を控除する必要がある。そこでこの評価手法として、福島ら³⁾の方法を準用し、別途に海水懸濁物中および海底表面泥中の粒子態有機窒素を測定しこれを指標物質として真の沈降速度を見積もった。すなわち、捕集された総堆積物量に占める真の沈降量の比 γ を、以下の式により求めた。

$$\gamma = (Ct - Cr) / (Cs - Cr)$$

ここで、 Ct : 捕集堆積物中の指標物質質量

Cs : 海水懸濁物中の指標物質質量

Cr : 海底表面泥中の指標物質質量

(2) 溶出速度の測定

アクリル製のコアサンプラー(口径3.8cm・長さ23cm)を1定点につき1個、上口部をゴム栓で密栓して底

泥に差し込み、測定期間終了後に静かにサンプラーを抜き取って下口部を密栓、中の海水を実験室に持ち帰り、溶存態無機窒素・リンとして定量した。

なお、真の溶出速度を見積もるためには、サンプラー内の溶出前の栄養塩レベルに加え、海水中懸濁有機物の分解に伴う二次的な栄養塩増加分も考慮する必要がある。そこで、コアサンプラーの直近にその現場海水のみを収容したプラスチック製ビン(100ml容)を設置し、同様に期間終了後に実験室に持ち帰って分析に供し、データの補正に用いた。また、サンプラーおよび補正用ビンは、光合成による二次的な栄養塩減少を防止するため、光を透過しない不透明なものを用いた。

(3) 湾全体の収支

前述(1)(2)で測定した速度を用いて、湾全体における窒素・リンの沈降・溶出量を算出し、双方を比較することにより、海水中一底泥間の収支を季節別に試算した。

2. 窒素・リン間の溶出バランス

底泥は栄養塩の供給源としての意義を有するが、その栄養塩中の元素間の量的なバランスは、海域の基礎生産に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、福岡湾全体について、底泥から溶出する栄養塩中の窒素・リン間のバランスの検証を年間を通じて行った。

調査定点は湾内全域を網羅する9点(図3)とし、毎月1回(2009年4月～2010年3月)調査を行った。

溶出速度の測定は、スミスマッキンタイヤ型採泥器を用いて船上から採取した底泥を実験室に持ち帰り、容器内に海水とともに封入して行った。すなわち、採取した底泥を目合い1mmの金属製フルイに通して大型のベントスや生物の死骸等を除去後、よく混合して均質化し、アクリル製のコアサンプラー(口径3.8cm・長さ23cm)1定点につき1個の底部に10cmの厚さで詰め、泥上に濾

過海水をコア口部まで静かに乗せた。これを材料とし、調査当日の現場底層水と同水温に設定した恒温室内に24時間静置した後、コア内の海水を取り出し、前述の方法1. (2) で述べたのと同様に、溶存態無機窒素・リンとして定量した。

ところで、この室内試験では、閉鎖的実験系という性質上の問題として、現場海域での測定値に対して過小評価となる傾向がある³⁾。そこで、この調査では、高木ら⁴⁾の手法に準じ、室内試験での測定値にあらかじめ算出しておいた係数を乗じることにより補正を行った。すなわち、方法1. (2) の溶出速度測定と同時に室内試験を並行し、窒素・リンそれぞれについて季節ごと・海域ごとに補正係数(=現場海域での溶出速度/室内試験での溶出速度)を算出した。

結 果

1. 沈降・溶出速度および湾全体の収支

(1) 沈降速度

季節別・海域別の沈降速度(元素ベース、 $\text{mg} / \text{m}^2 \cdot \text{日}$)を表2に示した。窒素・リンとも、概して夏季、次に秋季が速度が大きく、次いで春季>冬季となり、高水温期に速度が大きくなる傾向が見られた。

(2) 溶出速度

表2 窒素・リンの沈降速度

		(mgN・P/m ² ・日)			
海域区分		春季	夏季	秋季	冬季
窒 素	湾 奥	26.0	48.4	70.2	12.0
	湾 央	27.6	70.3	28.2	6.9
	湾 口	5.4	84.7	18.8	18.0
リ ン	湾 奥	4.2	6.9	6.1	2.2
	湾 央	4.1	10.2	3.0	1.7
	湾 口	1.0	13.2	1.3	0.8

季節別・海域別の溶出速度(同上)を表3に示した。

沈降速度と同様に、窒素・リンとも、概して夏季>春・秋季>冬季となり、高水温期に速度が大きくなる傾向が見られた。またリンでは、湾奥>湾央>湾口と、湾奥方向ほど速度が大きくなっていた。

これら各海域の溶出速度を各面積で引き伸ばして合計した湾全体の溶出量に対する、各海域の寄与率を示したものが図4である。窒素については、3つの海域区分中で面積が最大である湾口(56.8%)の寄与が(秋季を除いて)ほぼ半分程度と最大だった。これに対して、リンでは面積の小さい湾奥(23.1%)が半分程度を占め、湾口の寄与は相対的に小さくなっていた。

(3) 湾全体の収支

湾全体の沈降・溶出量を、季節別に図5に示した。沈降・溶出とも、また窒素・リンとも、ほぼ夏季>秋季>春季>冬季と、高水温期ほど量が大きくなっていた。

通年の沈降-溶出間の差し引きでは、窒素は約44トンの沈降超過となり、リンでは逆に約47トンの溶出超過となっていた。

2. 窒素・リン間の溶出バランス

補正係数を用いて推算した窒素・リン溶出速度の経月変化を図6に示した。窒素・リンとも、試験1.と同様、高水温期ほど速度が大きかった。

表3 窒素・リンの溶出速度

		(mgN・P/m ² ・日)			
海域区分		春季	夏季	秋季	冬季
窒 素	湾 奥	31.3	141.9	32.0	19.8
	湾 央	25.5	38.8	38.8	11.2
	湾 口	26.1	69.7	30.5	7.2
リ ン	湾 奥	9.9	31.5	9.2	1.9
	湾 央	1.8	6.9	4.3	0.6
	湾 口	1.1	6.7	3.5	0.5

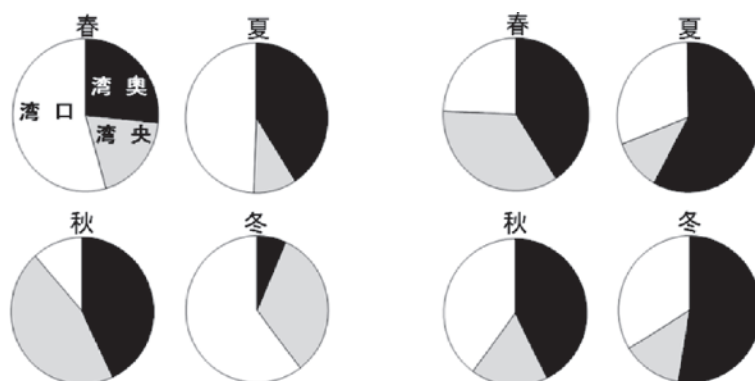
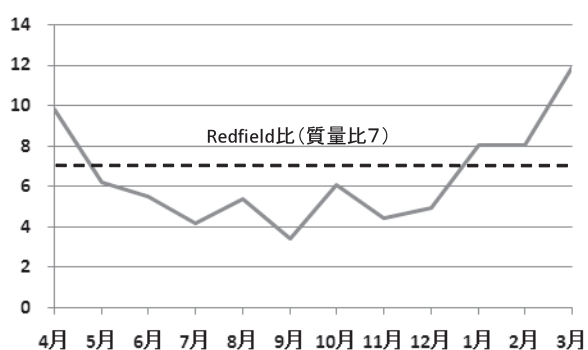
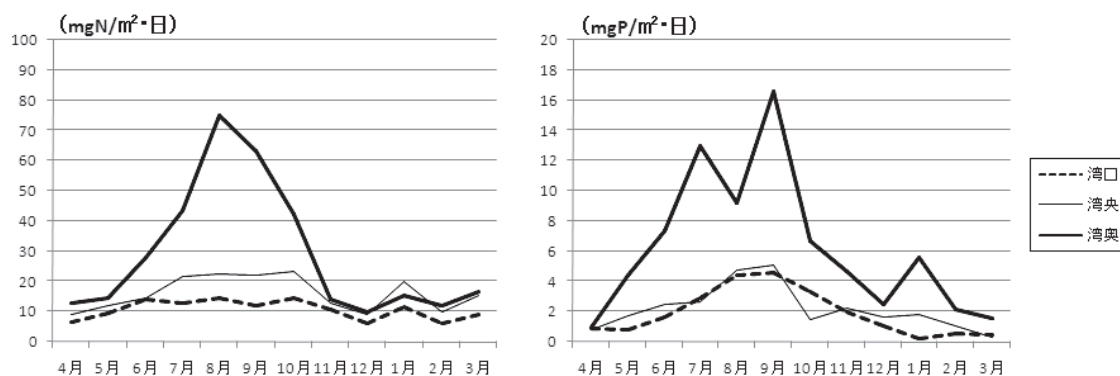
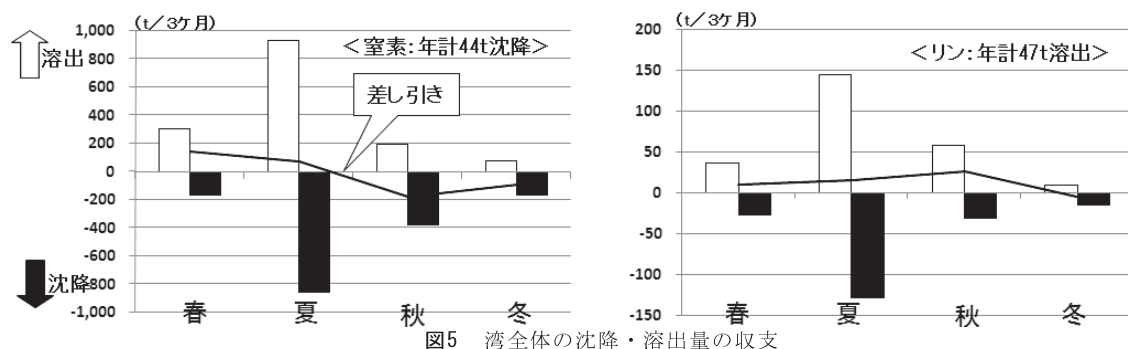


図4 湾全体の溶出量に対する各海域の寄与率(左:窒素 右:リン)



この溶出速度から求めた窒素・リン比(=窒素/リン)の経月変化を図7に示した。この値は、高水温期で低く、低水温期で高くなっていた。また、Redfield 比⁵⁾ (光合成に伴って藻類が取り込む元素量の比。質量比で約7)との比較では、5～12月ではより低く、1月～4月では高くなっていた。

考 察

底泥から溶出する窒素・リンの大部分はアンモニア態窒素 (89%)・リン酸態リン (84%) であり、⁹⁾植物プランクトンをはじめとした藻類による基礎生産に利用されやすい無機態塩の形を取っている。半閉鎖的内湾におい

ては、赤潮・貧酸素水塊対策の観点から、栄養塩供給源としての底泥について多くの調査・研究がなされてきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾が、多くは高水温期に焦点を当てており、冬季の栄養源として議論した例は少ない。

福岡湾における沈降・溶出速度の季節性については、本研究の結果から、窒素・リンともに水温との強い関連性が窺われる。沈降粒子中の窒素・リンは、プランクトンその他の生物の死骸・老廃物中の有機物に由来するものと思われるが、高水温期において植物プランクトンを始めとした生物生産が活発に行われていることが、沈降速度の増大の原因と考えられる。また溶出については、底泥間隙水中の溶存態窒素・リンと、泥粒子吸着態または結合態のそれとの間の平衡状態が環境温度¹⁰⁾や酸化還元状態¹¹⁾に依存していることがその速度に強く影響しているものと考えられる。すなわち、高水温期ほど生物生産に関わる物質循環の速度が大きく、低水温期ほどそれが小さいものと推察される。

海域間の関係では、リンでは窒素に比べ、溶出が湾奥方向に偏りがちであることが窺える。このことは、湾口・湾央に位置するノリ・ワカメ養殖漁場へのリン供給という点では不利である。もちろん湾奥底泥から溶出したリンも、潮流によって湾口・湾央へ拡散はするが、供給源から距離的に隔たっていることは、そのリンが途中で植物プランクトン他の藻類に消費される程度がそれだけ大きいことを意味している。また、福岡湾への河川・下

水道等経由でのリン負荷量の約70%が湾奥へのものである²⁾ことを考慮すると、湾口・湾中央域におけるリン源としての底泥の意義は相対的に大きく、冬季の溶出減少が海域の栄養塩環境に及ぼす影響もそれだけ大きいといえることができる。

湾全体の物質収支については、湾内の物質循環に関わる要素が非常に多岐にわたるため、海水中－底泥間の関係だけで全てを説明することは不可能である。しかし、窒素・リンそれぞれの、沈降と溶出の差し引きを比較することで、いずれが湾内への蓄積傾向（または湾外への排出傾向）が相対的に大きいかわかるとおおよそに議論することは可能であろう。本研究の結果では、窒素が沈降超過・リンが溶出超過となっていた。このことは、溶出した無機態リンが生物生産により有機物として固定された後、再び湾内底泥中に沈降回帰する確率よりも、潮流に伴ってまたは遊泳生物の形で湾外へ持ち去られる確率が高い（窒素ではその逆）傾向にあることを意味すると思われる。本研究の抽出調査という手法の性質上、測定対象とした時間・面積が限定的であるため、沈降・溶出の差し引きの値それ自体の定量的な精度に問題なしとは言えないが、リンが窒素に対して相対的に湾外への排出傾向が大きいという推論は可能であろう。

窒素・リン間の溶出バランスについては、どちらも冬季に溶出が減少するが、特にリンでその傾向が大きいために、結果として冬季ではバランスが窒素寄りに偏っていることが窺える。すなわち、冬季における溶出分の栄養塩はリン制限的であるといえることができる。湾内海水中にリンが豊富に存在する場合は、海底からの溶出分の寄与は小さく影響は少ないと思われるが、冬季の少雨やプランクトンの増殖等の要因で海水中のリンが極端に減少した場合、底泥からの供給は期待できないために、リン制限状態から回復することができず、内部生産の進行に伴って容易にリン不足に陥ることが予測される。

以上に挙げた点は、いずれも冬季の福岡湾におけるリン不足の要因と推察することができる。今後の課題として、漁業生産も考慮した適正な栄養塩管理のための施策

の実施に向け、知見の蓄積を継続的に行っていく必要があると考えられる。

文 献

- 1) 城久. 大阪湾底泥中に含まれるリンの存在形態と溶出分画. 日本水産学会誌 1983 ; **49** (3) : 447-454
- 2) 博多湾環境保全計画. 福岡市環境局, 福岡. 2008
- 3) 福島武彦, 相崎守弘, 村岡浩爾. 浅い湖における沈殿量の測定方法とその起源. 国立公害研究所研究報告 1984 ; **51** : 73-86
- 4) 高木雅子, 村瀬茂世, 寺田和光, 松原英隆. 博多湾底質からの窒素, リン溶出速度の簡易測定方法の開発. 用水と廃水 1998 ; **40** (6) : 19-25
- 5) Redfield AC, Ketchum BH, Richards FA. :The influence of organisms on the composition of sea-water. *TheSea2 Interscience* 1963 ; 26-77
- 6) 浮田正夫, 中西弘, 天谷満徳. 底泥よりの N,P 溶出量推定における種々の問題点について. 用水と廃水 1975 ; **17** (10) : 21-34
- 7) 曾田京三, 安藤晴夫. 東京湾の富栄養化に関する研究 (その5) 底質からの栄養塩類等の溶出実験結果について. 東京都環境科学研究所年報 1988 ; 81-83
- 8) 白柳康夫, 大矢正代. 横浜港底質からのリン, 窒素の溶出－溶存酸素濃度と温度の影響－. 横浜市公害研究所報 1991 ; **15** : 57-65
- 9) 細川恭史, 三好英一, 堀江毅. 栄養塩溶出速度の温度・DO 依存性について. 港湾技術資料 1981 ; **40** (5) : 3-39
- 10) 神山孝吉, 奥田節夫, 河合章. 水域底泥中のアンモニア態窒素の分布と水中への溶出. 用水と廃水 1979 ; **21** (3) : 29-35
- 11) 鈴木昌弘, 國分治代, 伊藤学. 東京湾における堆積物－海水間のリンの挙動. 海の研究 2003 ; **12** (5) : 501-516

