

大船渡湾における窒素・リン分布の季節変動特性

豊田 政史*・日比野忠史**・細川 恭史***・鶴谷 広一****

1. はじめに

内湾域における水質改善のために、従来から行われている流入負荷削減のための対策策定だけでなく、実海域において行われた浚渫および覆砂による底質改善の効果の検討(村上, 1998)や新しい水質改善手法開発をめざした湾口部地形改変(山崎ら, 1998), 人工底面粗度を用いた潮流制御(小松ら, 1999)などの実験がなされている。

内湾域の富栄養化は、陸域からの栄養負荷の影響だけでなく底質や湾内流動が影響しているが、これまでの観測から外海との水交換も重要な要因であることがわかっている。最近では計測器の発達とともに陸域からの栄養負荷だけでなく、外洋から内湾に流入する栄養負荷も計測できるようになってきており、瀬戸内海においては外洋から窒素・リンが流入し、その輸送量は陸起源の負荷をしのぐ大きさであることが明らかになっている(藤原ら, 1997)。本論文で対象としている大船渡湾においても絶対値としての負荷量についてはふれられていないが、外海からの栄養塩の流入という観点の検討がなされており、栄養塩量の季節的な変動についてのべられている(Hayakawa, 1990)。

著者らは1996年から大船渡湾において現地観測を行っており、以下のことを明らかにしている。①湾口部では上げ潮時においても水面近くでは流出している(長坂ら, 1997) ②成層期には下げ潮時に湾内底層部の低温水塊が湾内水の流出にともなって上層へ持ち上げられ、マウンドをこえて湾外に排出される(豊田ら, 1999 a)。③湾内貧酸素水塊の形成・消滅は湾域のローカルな現象のみによって起こるのではなく、グローバルな大気の運動や海流等の外力に密接に関連している(日比野ら, 1999)。本論文は湾内における栄養塩分布の季節変動を明らかにすることを目的としている。このため、溶存酸素量および栄養塩分布の変化と外洋水の湾内への流入との

関係について検討した。さらに、貧酸素期に下げ潮にもなって防波堤開口部から排出される湾内底層水にどの程度の栄養塩が含まれ、それが湾内水質変動に対する寄与を検討している。

2. 観測の概要

1998年4月6日から1999年3月20日まで図-1中のStで示す測点において、水温(MDS-T:アレック電子(株)製)、塩分(MDS-CT:アレック電子(株)製)、溶存酸素(ADO-8 M:アレック電子(株)製, DATASON-DE 4:Hydrolab社製)、照度(MDS-L:アレック電子(株)製)の定点係留連続観測を行った。また; 1998年4, 5, 7, 8, 9, 10, 12月, 1999年3月に計8回の水質(水温・塩分・溶存酸素・クロロフィル・濁度・pH)移動観測(ACL-1183 PDK:アレック電子(株)製)と採水(窒素・リンの測定)を行った。水質移動観測は図-1の測線上に黒丸で示した17測点で実施し、採水はSt. 2, 4, 6, 12, 14, Dおよび河川(St. 0)の7測点で水深方向に10mごとに行った。なお、河川での採水については表層(水面下1m)のみとした。採水測定項目は、NH₄-N(アンモニア態窒素)、NO₂-N(亜硝酸態窒素)、NO₃-N(硝酸態窒素)、PO₄-P(リン酸態リン)、T-N(全窒素)、T-P(全リン)の6項目について測定した。溶存態物質(前の4項目)については、船上でフィルターによる濾過を行い、オートアナライザーで分析を行った。なお、本論文で示す溶存酸素および窒素・リンの分布(図-3および図-5~8)は図-1の測線上での分布である。さらに、貧酸素水塊が発達する1998年7月16日から1998年9月2日まで防波堤開口部にADP(スタンドアローン型, 0.5

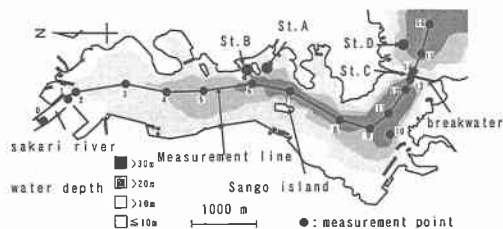


図-1 大船渡湾の概要

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部主任研究官
*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋環境部環境評価研究室長
**** フェロー 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部部長

MHz : NORTEK 社製) を設置し, 防波堤開口部の中央において鉛直方向に流速の測定を行った。

3. 貧酸素水塊と栄養塩の分布特性の関係

3.1 貧酸素水塊の季節変動

図-2 に, St.A の水深 27 m 地点における 1998 年 4 月から 12 月までの溶存酸素量の変化を示す。1998 年は, 4 月中旬から徐々に溶存酸素量が減少し, 7 月中旬から 10 月下旬まで貧酸素状態 (3.5 mg/l 以下) となり, 11 月上旬には急激な溶存酸素量の回復が観測されている。

図-3 に, 湾内外での溶存酸素量の季節変動を示す。8~10 月は湾内では底層部で 2~3 mg/l の貧酸素水塊が存在しているが, 湾外では鉛直分布がほぼ一様で, 6~8 mg/l である。また, 8~10 月に湾内でみられる貧酸素水塊は湾口部から消滅に向かっており, 10 月観測では, 貧酸素水塊は湾中央部 (St.6 付近) の底層でみられ, 湾口部付近においては, 貧酸素水塊は解消されている。1998 年は, 10 月ごろから三陸沖では親潮系の低塩分水が北上し, 大船渡湾周辺海水が高塩分化するため, 密度が高くなっている。10 月ごろからの貧酸素水塊の消滅は, 重くなった外海水が湾内の深いところへ流入することによって, 外海水に含まれる溶存酸素が湾内底層部に供給されるようになるためと思われる。(日比野ら, 1999)。

3.2 栄養塩量の季節変動

図-4 に 1998 年 4 月から 1999 年 3 月まで湾外 (St. D, 水深 38 m) の中層 (10 m), 底層 (37 m) で測定した外洋水中の溶存態リン (DIP) の濃度を示す。DIP の濃度はともに 3, 4 月に高くなっており, 8~12 月頃は 0 である。Hayakawa (1990) によると, 大船渡湾外の DIP は春に多く, 夏季に少ないことがわかっているが, 本観測でも同様の結果が得られている。

図-5 に 1998 年貧酸素期 (7~10 月), 図-6 に 1998 年非貧酸素期 (4, 5, 12 月) における溶存態窒素 (DIN) および溶存態リン (DIP) のそれぞれの期間での平均値を示す。なお, 図中には湾外 (St.D) の中層 (10 m), 底層 (37 m) で測定した値も示してある。湾内での栄養塩分布 (DIN, DIP) の貧酸素期と非貧酸素期を比べると, 窒素・リンともに貧酸素期の方が高い値を示している。分布形をみると, 窒素は河口近傍と表層部で, リンは底層部で高い値を示している。この結果は窒素は河川からの流入の影響が大きく, 底泥からの溶出の影響がある底層部とほぼ同じ値を示しているのに対し, リンは底泥からの溶出の影響が大きく, 河川からの流入の影響がある表層部より大きな値になっていることを示している。湾内 DIP 分布をみると, 水深 15 m 近傍の濃度は貧酸素期と非貧酸素期で 0.01 mg/l 以下の差であるが, 15 m 以深では顕著な差があり, 濃度差は大きいところで 5 倍以上である。

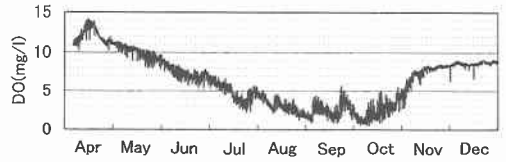


図-2 湾内底層 (St. A, 27 m) での溶存酸素量の季節変動

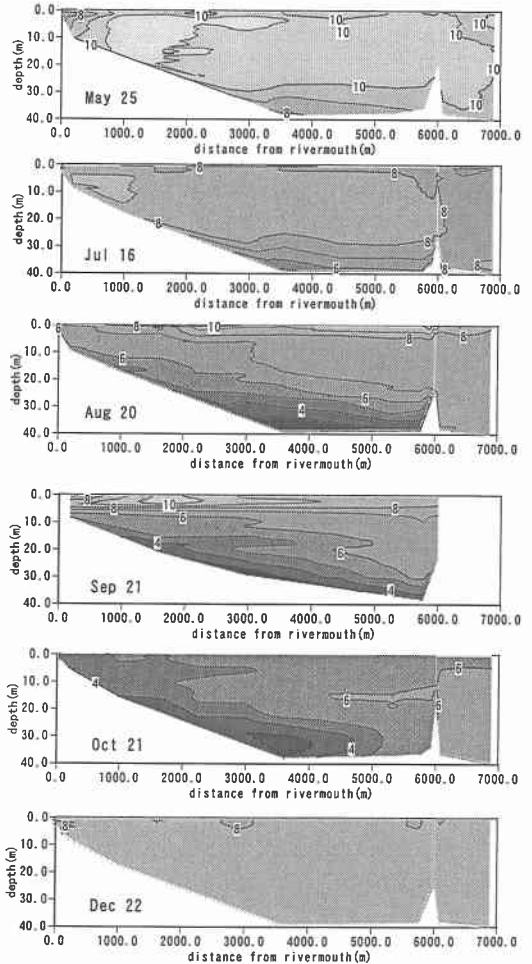


図-3 溶存酸素量の空間分布の季節変化

(表中の単位は mg/l)

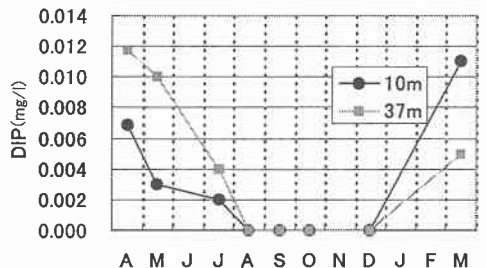


図-4 湾外水中の溶存態リンの季節変動 (1998.4~1999.3)

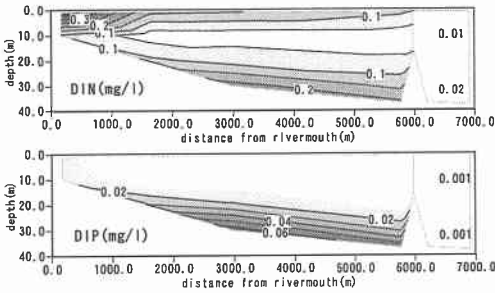


図-5 1998年貧酸素期(7~10月)の栄養塩分布

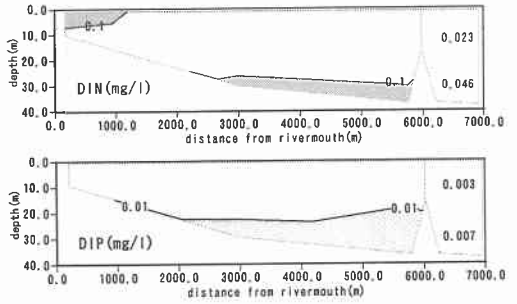


図-6 1998年非貧酸素期(4, 5, 12月)の栄養塩分布

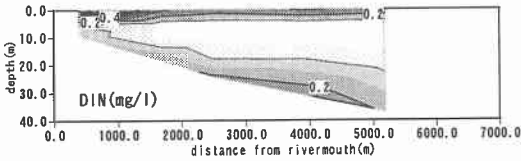


図-7 1983年貧酸素期(7~10月)の栄養塩分布

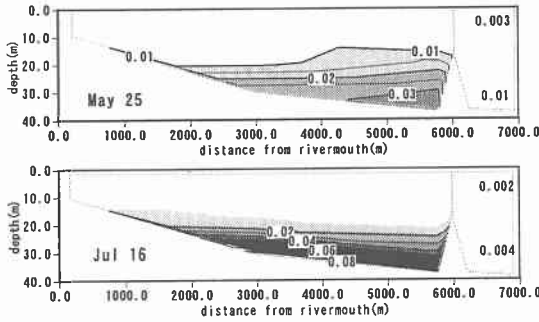
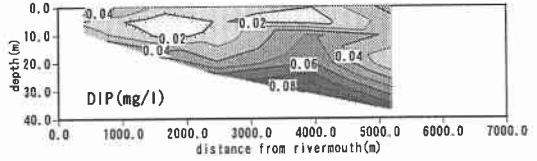


図-8 溶存態リンの季節変動(表中の単位はmg/l)

DINについてもDIPと同じ傾向がみられるが、貧酸素期と非貧酸素期の濃度差は2倍程度であり、DIPの濃度差と比べると1/2以下である。これらの結果から、従来からいわれているように、貧酸素水塊は底泥からの栄養塩の溶出を促進すること、窒素に比べてリンのDO依存性が高いことが確認された(たとえば、細川ら, 1981)。図-7に早川らによって行われた1983年貧酸素期(7~10月)における溶存態窒素(DIN)および溶存態リン(DIP)の観測結果の4ヶ月平均値を示す。この結果は図-5と比べると分布特性および量ともに差がないことから、1983年からの15年間で大船渡湾内の栄養塩分布の特性は変化していないと考えられる。

図-8に5, 7, 10, 12月における図-1に示す測線上のDIPの濃度分布図を示す。図-5, 6と同様、図中には湾外(St. D)の中層(10m)、底層(37m)で測定した値も示してある。上述のように底層の貧酸素化とともに

15m以深ではリンの濃度が高くなり、7月には湾内底層部で0.08 mg/lの値を示している。貧酸素水塊が湾奥で存在する10月にはリンの濃度は湾奥で高くなっている。また、貧酸素状態が解消された12月においては、湾内で溶存態リンは全くみられない。しかし、5月のDIP濃度と溶存酸素量との関係は貧酸素期ほど顕著に現れていない。5月には底層直上水中の溶存酸素量はほぼ全域で10 mg/lであるにもかかわらず、湾口部のDIP濃度(0.03 mg/l)は湾奥部(0.01 mg/l)に比べて高い値を示しており、10月の湾口部のDIP濃度(0.01~0.02 mg/l)より大きくなっている。しかし、底泥からの溶出量と溶存酸素量の関係から考えると、底泥からの溶出量は溶存酸素量の少ない10月の方が大きいと思われる。5月と10月の湾口部での栄養塩量の差が底泥からの溶出量によるものとは考えにくい。図-4でのべたように、1~4月に湾内に流入する外洋水はDIPを多く含む。この時期の外洋水は

湾内水に比べて水温が低く、湾内底層に流入するので(日比野ら, 1999), 5月には DIP が湾口部の底層に蓄積されていると考えられる。また, 10月に湾口部の DIP が少ないのは, 溶存酸素の回復に加えて湾外から湾内底層へ供給される外洋水の DIP が5月に比べて少ないことが要因の一つと考えられる。

4. 防波堤開口部における湾内での窒素・リン収支

4.1 貧酸素期の海水の流出入特性

図-9は1998年7月16日から7月22日までの防波堤開口部における法線方向の断面平均流速と水位の変化である。流速は、湾外から湾内への流入を正としており、水位は流速計の設置水深が示されている。水位の変化にともなって流速は変化しており、上げ潮時に流入、下げ潮時に流出傾向を示している。全体量で見ると、流入が流出に比べて多くなっており、日潮不等によって水位の減少量が約40cm以下のときは、下げ潮時にもかかわらず流出流速はほとんどみられない。

図-10に7月16日(小潮)から7月22日(大潮)および8月22日(大潮)から8月29日(小潮)のそれぞれ12潮汐間で平均した鉛直断面流速図を示す。7, 8月ともに下げ潮時は表層・底層から流出, 上げ潮時は中層からの流入となっていることがわかる。なお, 図中には水表面近傍の流速が示されていない。今回観測で用いた流速計の測定層厚が1mであり, 大船渡湾での潮汐の干満差が夏季には約1.2mあることを考えると, 水表面近傍の層では測定層が空中に出る可能性があるため, 水表面近傍の流速は測定できない。そのため, 図中には表層1m部分の流速は示していない。

表-1は図-10に示した12潮汐間での断面平均流速から求めた防波堤開口部での水量の収支および河川からの流入量である。なお, この計算にあたっては, 前述の表層の流速を線形外挿することにより考慮してある。この補正により, 流速計によって計測できない水表面近傍の流出流速の分だけ過小評価されていると考えられる流出流量が考慮される。河川からの湾内への流入水量は開口部での流出入量と比べて1~2オーダー小さくなっている。

4.2 栄養塩量収支の試算

表-2に7月16日, 8月22日の流速および窒素・リンの測定結果をもとに防波堤開口部における栄養塩の収支を計算したものを示す。なお, 流速の観測結果をもとに水面より3m以浅を表層, 3~16mを中層, 16m以深を底層と定義し, 栄養塩は水面より1m, 10m, 16mの値をそれぞれの層における栄養塩の値として栄養塩量の試算を行ったものである。また, 表-3には窒素・リンの底

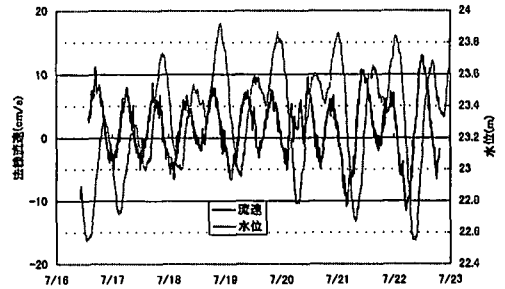


図-9 防波堤開口部における断面平均流速と水位変化

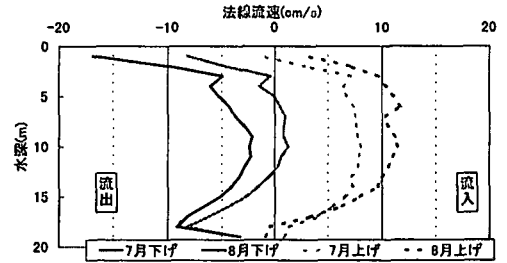


図-10 12潮汐間の防波堤開口部での断面平均流速分布

表-1 12潮汐間の流量収支

	7月	8月
上げ潮時の防波堤開口部における流入水量 (m ³)	5.82×10 ⁷	8.13×10 ⁷
下げ潮時の防波堤開口部における流出水量 (m ³)	2.84×10 ⁷	8.07×10 ⁷
河川からの流入水量 (m ³)	8.17×10 ⁶	9.36×10 ⁶

泥からの溶出量と河川からの流入量を示している。なお, 表中の溶出量は, 大船渡湾の底泥を使った室内溶出実験(大船渡市, 1995)の結果であり, 河川からの流入量は St. 0での観測値に河川流量をかけて求めたものである。これらの結果(表-2)から, 湾内底層より外洋に排出され

表-2 防波堤開口部から流入する栄養塩量 (kg/day)

	T-N(7月)	T-N(8月)	T-P(7月)	T-P(8月)
表層	-1920	-3273	-182	-77
中層	1479	1519	245	99
底層	-473	-273	-42	-11

(表中のプラスは湾外からの流入, マイナスは流出を表す)

表-3 湾内への窒素・リンの流入量 (kg/day)

	T-N		T-P	
	7月	8月	7月	8月
河川からの流入	108	1350	5	26
底泥からの溶出	239~439		94~287	

(底泥からの溶出は貧酸素状態での室内溶出実験の値)

る窒素・リンは底泥からの溶出量と比べるとリンは1/2~1/10となっているが、窒素はほぼ同じであることがわかる。以上の結果から、下げ潮時における湾内底層水の湾外への排出機構が大船渡湾内の窒素・リン収支に大きな役割を果たしていることがわかった。今後は、開口部全体を通した窒素・リンの流出入量を把握するために、表層流速の測定の検討を含めたより詳細な観測を予定している。

4.3 湾内底層水排出機構を用いた水質管理手法の可能性

窒素は、表層に多く存在するため河川流量にともなった湾外排出が期待できるが、リンの排出は窒素に比べると期待できない。夏季においてリンは湾内底層部に蓄積されているので、リンの排出法として下げ潮時における湾内底層水の湾外排出機構を利用する方法が考えられる。現在、運輸省第二港湾建設局(1997)によって、図-11に示すような湾外上層水を湾内底層に流入させる海水交換型防波堤の開発が進められている。この防波堤は湾内底層水の排出機構を促進し、リンの湾外排出のための有効な手段となることが期待される。

5. おわりに

本論文では、現地観測結果をもとに大船渡湾における栄養塩量の季節変動と貧酸素水塊の消長との関係および夏季における防波堤開口部での栄養塩収支の検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 夏季に湾内底層でみられる貧酸素水塊は湾口部から解消されていく。これは、10月ごろから親潮系の低塩分水が北上し外海水が高塩分化するため、重くなった外海水が湾内の深いところに流入し、溶存酸素が湾内底層部に供給されるようになるためである。

(2) 窒素は河口近傍と表層部で多くみられるのに対し、リンは底層部で多くみられる。

(3) 貧酸素水塊は底泥からの栄養塩の溶出を促進し、窒素とリンの海水への溶出量を比べるとリンの方がDO依存性の高いことを確認した。

(4) 湾内の栄養塩量は湾内水の溶存酸素量にともなって変動しているが、これに加えて外海水に含まれる栄養塩量の季節変動の影響をうけている可能性がある。

(5) 成層期には、防波堤開口部において、下げ潮時に表層・底層から流出、上げ潮時に中層から流入している。

(6) 栄養塩収支計算の結果、下げ潮時における湾内底層水の湾外への排出機構が大船渡湾内の窒素・リン収

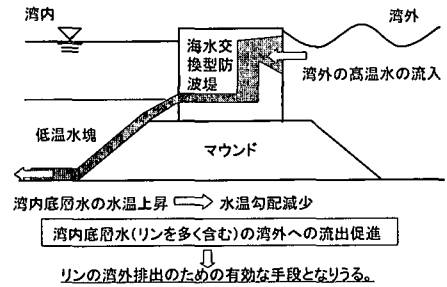


図-11 海水交換型防波堤を用いた水質管理手法
(運輸省第二港湾建設局)

支に大きな役割を果たしていることがわかった。

(7) 現在運輸省第二港湾建設局で開発が進められている湾外上層水を湾内底層に流入させる海水交換型防波堤は、湾内底層水の排出機構を促進し、湾内底層部に蓄積されているリンの湾外排出のための有効な手段となることが期待できる。

謝辞：盛川の流量データについては岩手県庁生・綾里川ダム建設事務所から提供を受けた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所(1997):平成9年度海水交換技術検討調査報告書。
大船渡市(1995):大船渡湾関連水質等調査業務報告書。
小松利光・小橋乃子・和田真人・藤田和夫・矢野真一郎・安達貴浩(1999):任意の方向に潮汐残差流を創造するための偏流型粗度の開発,水工学論文集,第43巻,pp.833-838。
豊田政史・日比野忠史・西守男雄(1999):大船渡湾での海水交換機構と自然力を利用した水質管理手法の検討,水工学論文集,第43巻,pp.1079-1084。
長坂 猛・鶴谷広一・村上和男・浅井 正・西守男雄(1997):大船渡湾の成層と貧酸素水塊に関する現地観測,海岸工学論文集,第44巻,pp.1066-1070。
日比野忠史・豊田政史・深和岳人(1999):大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構,水工学論文集,第43巻,pp.1073-1078。
細川恭史・三好英一・堀江 毅(1981):栄養塩溶出速度の温度・DO依存性について,港研資料 No. 405。
村上和男(1998):閉鎖性内湾域の海水浄化に係わる水理・水質環境に関する研究,港研資料 No. 900。
山崎宗広・宝田盛康・上島英機・朝田孝二(1998):湾口部地形改変による停滞性海域の流況改善に関する実験的研究,海岸工学論文集,第45巻,pp.1026-1030。
Yasuhiro Hayakawa(1990): Mean Seasonal Changes of Dissolved Inorganic Nutrients in the Ofunato Estuary, Nippon Suisan Gakkaishi vol. 56, pp. 1717-1729。