

大船渡湾における栄養塩の季節変動特性と 負荷量の推定

SEASONAL VARIATION CHARACTERISTICS AND EVALUATION OF THE AMOUNT LOADS OF THE NUTRIENTS IN OFUNATO BAY

柏舘信子¹・野村宗弘²・沢本正樹³

Nobuko KASHIWADATE, Munehiro NOMURA and Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980 - 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6 - 6 - 06)

²正会員 博 (工) 東北大学大学院工学研究科助手 (〒980 - 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6 - 06)

³フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科教授 (〒980 - 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6 - 6 - 06)

Ofunato bay is highly enclosed because of a tsunami breakwater. Therefore, water quality problems, such as eutrophication and ocean anoxic, have been caused in the inside of the bay. Field observation was carried out to clarify the characteristics of water quality in Ofunato bay in 2003 and 2004. The purpose of this paper is to study the seasonal variation characteristics and the load of nutrients. The amount of inflow of nutrients was calculated using the material balance model using field observation data. It shows that a lot of nutrient is released from sediment when anoxic water has occurred. Unusual increase of phytoplankton was observed when river inflow was increased. They have great effect on water quality.

Key Words : Ofunato Bay, nutrients, substance cycle, inflow load, Chlorophyll -a, oxygen-deficient

1. はじめに

閉鎖性内湾の多くは養殖漁場や港として多面的に利用されている。一方で閉鎖度が高いために窒素、リン等の栄養塩類が蓄積しやすく湾内では富栄養化が進行し、底層部の貧酸素化など水質問題が発生している。湾内に窒素、リン等の栄養塩類が過度に集積すると、生物の生産力が増大し、プランクトンが異常増殖する。また、プランクトンの異常発生は、溶存酸素の低下による養殖魚の大量へい死、有毒プランクトンによる貝毒の発生など漁業に被害をもたらしている。さらに、底層ではプランクトンが死滅して沈降し、分解時に酸素が消費され貧酸素化が生じる。貧酸素化は、底泥からの栄養塩類の溶出を促進し、内部負荷として湾内水質に影響を及ぼす。したがって、内湾における富栄養化の機構とその影響を把握することは極めて重要な課題といえる。

本研究では、大船渡湾において現地観測を行い、湾内における栄養塩濃度の季節変動特性を明らかにするとともに、湾内に流入する栄養塩負荷量の推定を目的として

いる。流入負荷量は物質収支モデルを用いて、外洋、河川、降雨、底泥の4項目の算出を行った。また、流入負荷量が湾内の水質に与える影響も併せて考察を行った。

2. 対象領域

本研究では、岩手県の三陸沿岸に位置する大船渡湾（北緯39° 02' , 東経141° 44' ）を対象領域とした。

図-1に示すように湾の形状は細長く、長さは6km、幅1kmである。水表面積は7.89km²、平均水深20m、最大水深は40mである。1960年のチリ地震津波で多大な被害を受けたため、1967年に津波防波堤が設置された。そのため湾の開口部は幅200mと狭くなり、閉鎖度指数は防波堤の設置前の1.4から14.4まで上昇した。湾内は、防波堤が設置されてから静穏な水域が確保され、貨物を取り扱う県内有数の港湾として、また、カキ・ホタテの養殖漁場として多面的に利用されている。その一方で、湾内は閉鎖度が高いために、河川や養殖漁場からの流入負荷が蓄積しやすく水質の悪化が懸念されている¹⁾。

3. 現地観測の概要

(1) 観測期間

本研究では、2003年7月28日から11月17日の期間に6回、2004年5月27日から10月22日の期間に6回の現地観測を図-1中の各観測地点において移動観測と連続観測を行った。観測期間は、湾内で水温鉛直分布が成層する前後に設定した。移動観測は、各観測地点で昼間の下げ潮時と上げ潮時にそれぞれ1回ずつ行った。

(2) 観測項目

図-1の湾軸方向の12地点において水質（水温、塩分、濁度、クロロフィルa(以下、Chl. a)濃度、溶存酸素(以下、DO))の移動観測と採水（窒素、リン）を行った。

水温、塩分、濁度、Chl.aの4項目はクロロテックACL2180-TPM（アレック電子）によって鉛直方向に1m間隔で測定を行った。DO濃度は、DO計58型（YSI）によって鉛直方向に5m間隔で測定を行った。採水は、バンドーン採水器によって鉛直方向に上層（海面-1m）、中層（全水深/2）、底層（海底面+1m）の3層で行った。採水した水は速やかに船上で0.45 μ mメンブランフィルターによってろ過し、冷蔵保存、実験室に持ち帰った後に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）について栄養塩自動分析装置TRAACS800（BRAN+LUEBBE）を用いて分析を行った。また、St.Aの表層では、クロロフィル蛍光光度計DFLSB（Wet Labs.）を用いてChl.a濃度の連続観測を行った。観測期間は2004年5月28日から10月22日までの148日間である。

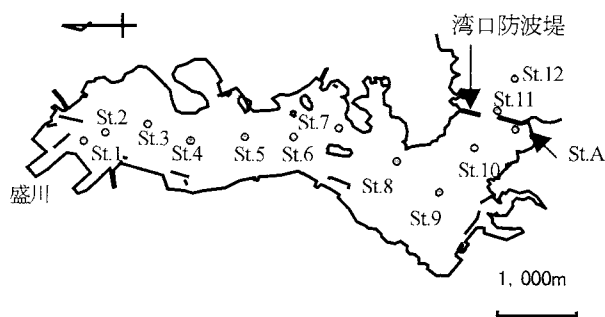


図-1 大船渡湾の形状と観測地点

4. 観測結果

(1) 水温分布

図-2に2003年7月の湾内の水温分布図を示す。湾口防波堤を境に水温成層が形成されている様子がわかる。このように大船渡湾では夏季に水温成層が形成され、鉛直混合が起こりにくく、湾内の底層の海水は交換されずに停滞する。図-3に2004年の観測期間におけるSt.Aでの水温の季節変化を示す。6月の初めから上層と中層の水温に差が生じている。鉛直方向の水温差は大きくなり、8月中旬にピークを迎えている。10月初めに水温差は解消され、水温成層は消滅した。

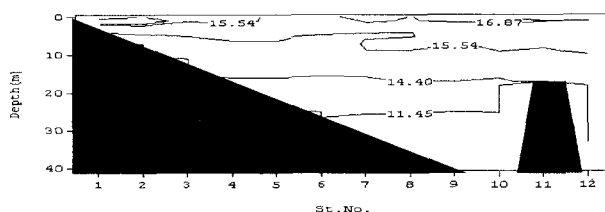


図-2 2003年7月28日 水温分布図（単位：℃）

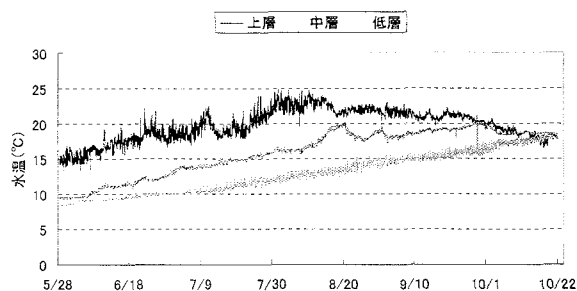


図-3 2004年 水温の時系列変化（5/28～10/22）

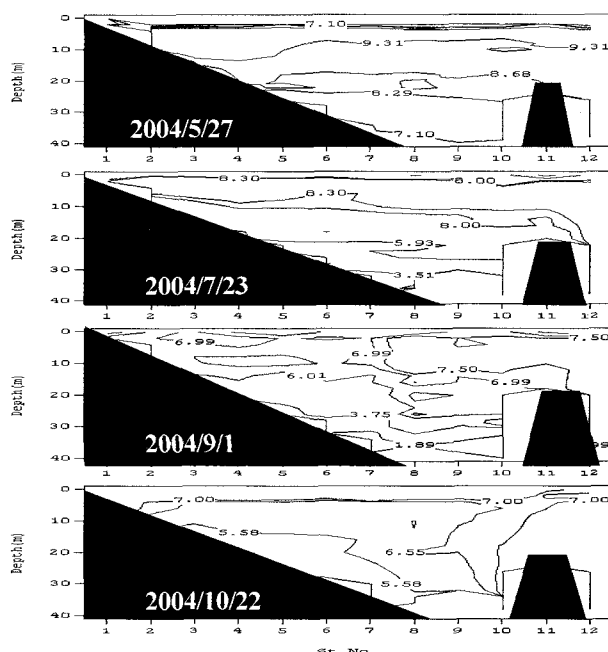


図-4 DOの季節変化（単位：mg/l）

(2) 溶存酸素

図-4に湾内外でのDOの季節変動を示す。水温成層が形成された7月中旬から底層部で貧酸素水塊（DO 3.5mg/l以下の状態）が発生している。底層の貧酸素化は9月にピークを迎え10月中旬には湾口部から解消され、湾内のDO濃度は一様になった。湾内で貧酸素水塊が発生する要因は、大船渡湾は底層部が防波堤マウンドで塞がれているため、水温成層が形成されると鉛直混合が生じず、徐々に底層の海水は交換されずに停滞する。したがって、底層部では酸素が消費されるだけで供給されないため貧酸素化が進行する。そして10月になって水温成層が消滅すると鉛直混合が起こり、底層部にも湾外からの酸素を多く含んだ海水が浸入し貧酸素化が解消されたと考えられる。

(3) 栄養塩濃度

図-5に湾内のDIN（無機態窒素）の季節変動を示す。DINは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_{2+3}\text{-N}$ を合わせた指標で植物の栄養素として利用されるため、閉鎖性水域における生物の内部生産を考えるうえで主要な因子である。7月から9月にかけて底層部での濃度が高くなっている。貧酸素水塊の発生と消滅に併せて湾内底層部の栄養塩濃度も変化している。リンも同様の変動を示していることがわかる。DIP（無機態リン）の貧酸素時期と非貧酸素時期との濃度差は6倍、DINも3倍程度の濃度差が確認できる。貧酸素時期には、底泥から栄養塩の溶出が促進されるために濃度が増加していることが確認できる。環境省の環境基準値では、全窒素0.2mg/l以下、全リン0.02mg/l以下と定められているが夏季の底層部は、無機態だけで環境基準値を満たしていないことがわかる。

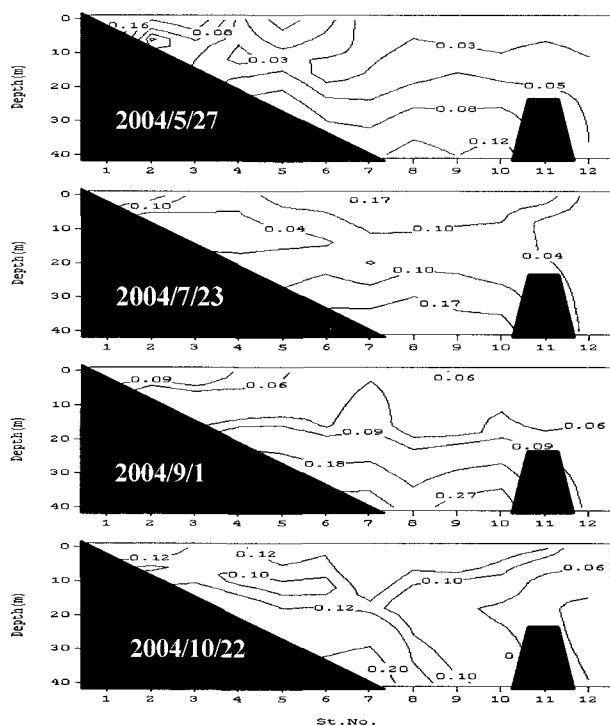


図-5 DINの季節変化（単位：mg/l）

5. 栄養塩の物質収支

沿岸海域には、塩分、窒素やリンなど様々な物質が存在し循環している。上記で述べたように、湾内の栄養塩濃度は季節によって変化していることがわかった。本章では、栄養塩の物質収支モデルを用いて湾内への外部負荷量と内部負荷量を推定する。その結果から両負荷が湾内水質にどのような影響を与えているのかを考察する。

(1) 物質収支モデル

図-6に示すように大船渡湾全体を1ボックスとして湾の内外における栄養塩の物質収支を考えた^{2,3)}。栄養塩の物質収支式は、次式で表される。

$$V \frac{dC_i}{dt} = R_f C_r + P C_p - Q_{10} C_i + Q_{01} C_o + \Delta C \quad (1)$$

ここに、 C_i ：湾内の栄養塩濃度、 V ：湾の体積、 R_f ：淡水流入量、 C_r ：河川の栄養塩濃度、 P ：海面への降水量、 C_p ：降雨の栄養塩濃度、 Q_{10} ：湾内から湾外への流出流量、 Q_{01} ：湾外から湾内への流入流量、 C_o ：湾外の栄養塩濃度、 ΔC ：生成・消滅項である。

式(1)は、左辺が湾内中での栄養塩の現存量の時間変化を表している。右辺の第1項は河川からの流入負荷量、第2項は降雨からの負荷量、第3項は湾口部からの湾内水の流出量、第5項は湾口部からの湾外水の流入負荷量についての項である。式(1)の中で未知な項は ΔC （生産・消滅項）のみで、他の項を全て観測データから見積もることにより ΔC を推定することができる。 ΔC には、光合成、摂食、分解、沈降、溶出など全ての化学・生物過程による物質収支が含まれている。

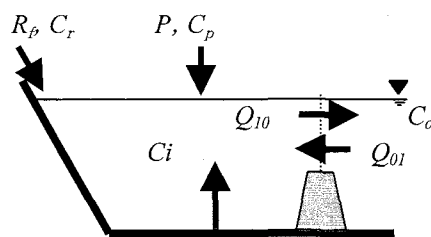


図-6 ボックスモデル 概念図

(2) 使用データ

a) 栄養塩濃度

湾内の栄養塩濃度 C_i は、St.2～10の観測データの平均濃度を使用した。物質収支を計算するうえで毎日の栄養塩濃度は、実測日と次の実測日までの間の実測データを線形補間して使用した。

湾外の栄養塩濃度は、St.12の平均濃度を使用した。実測日間の濃度は上記と同じように線形補間を行って濃度を与えている。

河川の栄養塩濃度は今回の実測では計測できなかったため湾内の盛川の河口付近である図-1の観測地点St.1の表層の濃度を使用した。DIN濃度は河川流量が多いほど

高い傾向にあり、実測値の間には相関がみられた。以下の近似式を用いて、毎日の河川流量から濃度を与えた。

$$x = \frac{192,655 + y}{2 \times 10^6} \quad (2)$$

ここに、 x ：河川のDIN濃度(mg/l), y ：1日あたりの河川流入量(m³/day)

リンは、窒素に比べて河川からの影響は小さく、河川流量と濃度の間に相関はみられなかった。したがって、湾内外の濃度と同じように線形補間により毎日の濃度を算出した。

降雨濃度は、岩手県環境生活部環境保全課の酸性雨測定結果を用いた。過去10年間の平均濃度を降雨濃度として降雨時に一定に与えた。リンについては、降雨濃度のデータが入手できなかったため本稿では考慮しなかった。

b) 海水流出量

今回は、湾における単純な海水の流出入を考えるため潮汐流による湾口部での流出入量を用いた。一般に潮汐流は湾口部が狭い閉鎖性水域において卓越する流れとなる。本稿では、気象庁が発表している潮位観測資料から大船渡湾における干潮から満潮にかけての潮位差を算出し海水流入出量を求めた。

c) 河川流量

大船渡湾に流れこんでいる二級河川盛川の流量は、岩手県によって日平均水位が観測され、定期的な横断測量により日平均流量が推算されている。そこで、岩手県大船渡地方振興局土木部鷹生ダム建設事務所の盛川の水位流量年報を使用した⁴⁾。盛川の日平均流量は例年2.5m³/s程度と比較的少ない。

(3) 溶出量の算出

先に述べたように大船渡湾の栄養塩濃度の変化には、底泥からの溶出の影響が大きいことがわかった。上記の栄養塩の物質収支式(1)は、外部からの負荷(河川、降雨、湾口流入)は算出できるが、底泥からの溶出量は、 ΔC (生産・消滅項)として全ての生物・化学要素にまとめられている。そこで内部負荷である溶出量を溶出速度から求め、毎日の底泥からの溶出量を算定する。底泥からの溶出に影響を及ぼす環境因子として、温度、pH、DO、底泥の間隙率等が考えられる。これらの環境因子の変動によって、溶出が促進・抑制される。中でも水温とDOの影響が大きいとされる。そこで、大船渡湾の栄養塩の溶出速度を表す式を水温とDOの2つのパラメータを用いて算出する必要がある。

大船渡湾における溶出速度式を求めるにあたって、1995年に大船渡市によって測定された大船渡湾の栄養塩の溶出速度⁵⁾を使用した。表-1にその測定で得られた大船渡湾における窒素、リンの溶出速度を示す。溶出実験の条件は、夏季の貧酸素の状態を想定して、還元状態(DO:0mg/l)で、常温(20℃)、低温(4℃)で実験を実施している。大船渡市の測定データではDOは嫌気状

態のみで行われたのでDOが変化した場合には対応できない。そこで志津川湾の底泥を用いて算出された栄養塩溶出速度式⁶⁾のDO項を大船渡湾に適用するため、温度定数 θ を修正した。また、栄養塩溶出速度の温度依存性については、次の温度定数の実験式が示されている⁷⁾。

$$R(T) = R(T_1) \cdot \theta^{(T-T_1)} \quad (3)$$

ここに、 $R(T)$ ： T ℃における溶出速度、 $R(T_1)$ ： T_1 ℃における溶出速度、 θ ：温度定数

表-1に示す2つの溶出速度から温度定数を逆算すると、大船渡湾の温度定数は $\theta=1.072$ という結果になった。

以上から温度、DOの依存特性を踏まえた溶出速度式を求めた。それを組み合わせることで温度とDOの変化に対応した大船渡湾の溶出速度式とする。大船渡湾における栄養塩の溶出速度式を以下に示す。式(3)が窒素、式(4)がリンの溶出速度式である。

$$R_{DIN}(T,C) = (26.02e^{0.04T}) \cdot \exp(-(1.82-0.08T) \cdot C) \quad (4)$$

$$R_{DIP}(T,C) = (8.99e^{0.07T}) \cdot \exp(-0.76 \cdot \theta^{(T-18)} \cdot C) \quad (5)$$

ここに、 R_{DIN} ：DINの溶出速度(mg/m²/day)、 R_{DIP} ：DIPの溶出速度(mg/m²/day)、 T ：温度(℃)、 C ：DO(mg/l)、 θ ：温度定数(1.072)

この溶出速度式を用いて湾内の栄養塩の溶出量を求める。溶出速度に必要なDOと水温はそれぞれの観測データを用いて計算する。実測日の間は実測値を線形補間して毎日の水温とDOを求めた。

表-1 底泥からの栄養塩の溶出速度

	常温(mg/m ² /day)	低温(mg/m ² /day)
窒素	55.7	30.3
リン	36.4	11.9

(4) 計算結果及び考察

a) 現存量の変化

観測データを用いて湾内のDIN、DIPの現存量を算出し季節変化について考察する。大船渡は湾の規模に対して水深が深く、上述したように季節によっては、防波堤を境に強い成層状態が形成される。そのため湾内を上層(海面～1m)、中層(2～16m)、底層(16m～海底面)の3層に分けて層別の栄養塩の現存量を示す。表-2に層別の体積を示す。現存量は、層別の体積に観測値で得られた濃度を掛けたものである。2004年の現存量の変化を図-7、図-8に示す。非貧酸素時期と貧酸素時期でDINは2倍、DIPは3倍程度の現存量の差がみられる。層別の現存量をみると底層部の占める割合が非常に高い。したがって、底層においては栄養塩類の溶出負荷が非常に高いことがわかる。また、DIN、DIPともに貧酸素水塊が解消された後に中層の現存量が多くなった。成層が解消されたことで鉛直混合が起こり、底層の高濃度の栄養塩を含んだ海水が循環したためと考えられる。また、表層は盛川の流量の影響を受けやすく、流量の多い日には湾口部まで淡水が流れ込んでいる。

表-2 層別の体積

層	体積 (m ³)	割合 (%)
上層	7,890,000	7
中層	80,790,000	69
底層	28,560,000	24

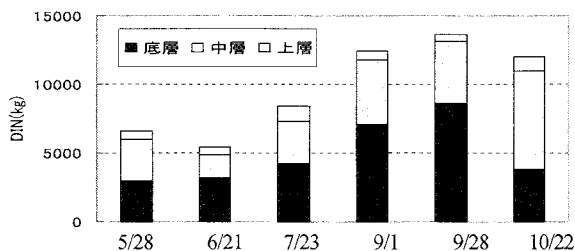


図-7 2004年DINの現存量の変化

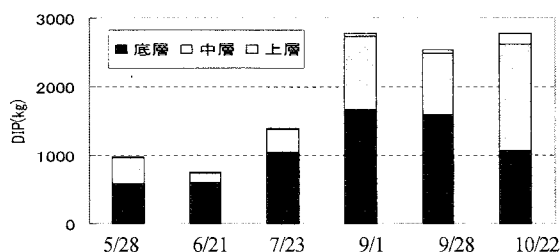


図-8 2004年DIPの現存量の変化

b) 外部負荷量

大船渡湾における実測期間の1日あたりの平均流入量を表-3、表-4に示す。近年では、外洋からの栄養塩供給が無視できないほど大きいことが明らかになりつつあり⁸⁾、沿岸海域における新たな栄養塩供給源として注目されている。大船渡湾においても、表-3、表-4をみると湾外からの流入負荷量が最も多いことがわかる。しかしながら、大船渡湾の場合は湾外水の栄養塩濃度は湾内濃度よりも低いため、外海水の流入は湾内の栄養塩濃度を低くする働きがあると考えられる。

次に、河川からの負荷量は、河川流量の多い期間で大きかった。盛川の年平均流量はそれほど大きくないが、降雨量の多い夏季には10倍以上になることもあった。河川のDIN濃度は、流量が大きいほど濃度が高くなる傾向があり、湾への流入負荷量はさらに増加する。

降雨に伴う栄養塩類の負荷量は、これまであまり考えられていなかった。ここでは、硝酸態窒素濃度を利用して負荷量を算出した。負荷量は、外海水の流入に比べるとかなり小さい値となった。しかし、これは期間ごとの平均値なので実際の降雨のある日の負荷量はもっと大きなものになる。また、今回は硝酸態窒素のデータのみを与えたが、降雨にはアンモニウム態窒素なども含まれているので、さらに負荷量が大きくなる。今後さらに検討していく必要がある。

表-3 2004年DINの1日あたりの流入負荷量 (kg/day)

期間	外部負荷			内部負荷		湾口流出
	河川	降雨	湾口流入	溶出	ΔC	
①5/28-6/21	14	7	255	0	32	357
②6/21-7/23	225	19	176	4	125	455
③7/23-9/1	48	7	310	72	248	584
④9/1-9/28	22	2	528	140	-142	508
⑤9/28-10/22	270	19	582	95	-280	754

表-4 2004年DIPの1日あたりの流入負荷量 (kg/day)

期間	外部負荷		内部負荷		湾口流出
	河川	湾口流入	溶出	ΔC	
①5/28-6/21	1	23	6	-6	33
②6/21-7/23	3	10	13	22	28
③7/23-9/1	2	40	59	14	81
④9/1-9/28	1	72	70	-44	109
⑤9/28-10/22	8	80	25	55	158

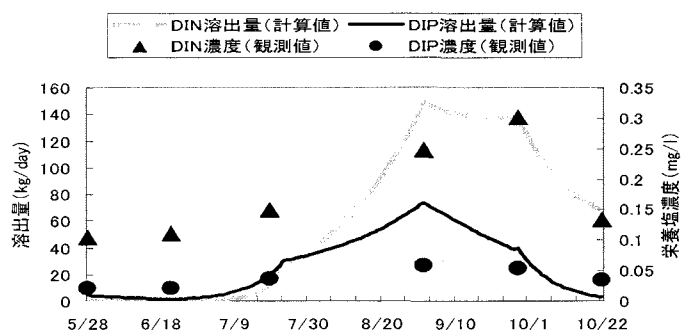


図-9 2004年1日あたりの栄養塩の溶出量と観測濃度

c) 内部負荷量

表-3、表-4のΔCは流入する栄養塩負荷量から湾外への流出量を差し引いて得られる生物・化学作用による生産・消滅を表している。生物・化学作用には、底泥からの溶出や植物プランクトンによる摂取、有機物の無機化など複雑な循環が行われている。ΔC>0の場合は、底泥からの溶出や有機物の無機化などに伴う生産量が多く、ΔC<0の場合は、プランクトンの成長などによる消費量が多いと考えられる。生産・消滅項の中で底泥からの溶出量は溶出速度式より求めることができたので、それを除いたものを生産・消滅項とした。以下に生産を底泥からの溶出量、消滅を植物プランクトンによる消費と関連させて考察する。

溶出速度式から底泥からのDIN、DIPの溶出量を算出した。図-9に実測期間の1日あたりの溶出量と底層の栄養塩濃度の観測値を示す。2004年の貧酸素水塊の発生時期は7月19日～10月11日の84日間であった。DIN、DIPともに貧酸素水塊発生時期の7月中旬から溶出量が増加し、9月初めにピークを迎えている。10月に水温成層が消滅すると溶出量も減少した。栄養塩濃度も同様の推移を示しており、溶出速度式は大船渡湾の底泥からの溶出速度の変化を概ね再現できている。また、2004年は8月14日

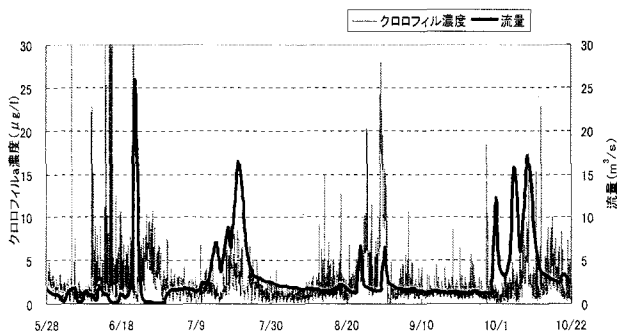


図-10 2004年盛川の流量とChl.a濃度の変化

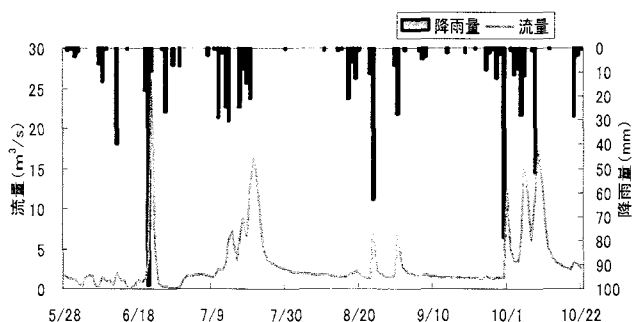


図-11 2004年 盛川の流量と降雨量

～9月24日の42日間はDOが2mg/l以下を示し、1日あたりの平均溶出量はDINが125kg/日、DIPが72kg/日で貧酸素時期の総溶出量はDINが5,250kg、DIPが3,150kgであった。貧酸素水塊発生前後の底層部の現存量の変化は、DINが5,000kg、DIPが1,000kgであることからDINの溶出量は、ほぼ表現されているといえる。また、DIPの溶出速度は過大であり、実際の溶出量はもっと少ないと考えられる。

2004年のDINの生産・消滅項は、期間①、②、③で正、期間④、⑤は、負の値を示した。図-10に2004年のChl.a濃度の季節変化および盛川の流量を示す。期間①、④、⑤の間にChl.aが急増する日がある。植物プランクトンは、水中から二酸化炭素や窒素・リンを吸収し、光合成を行って増殖する。期間④、⑤は植物プランクトンの増殖の過程で大量に栄養塩類が消費されたために、生産・消滅項が負の値を示していると考えられる。また、植物プランクトンの増殖によって、それが後に死滅し有機物となって海底に堆積し分解されるため期間④の溶出量が最も大きい。DIPは、2004年の期間①、④で生産・消滅項が負の値を示している。リンにおいても植物プランクトンの増殖によって消費されたのと考えられる。

d) 湾内水質への影響

図-11は、2004年の実測期間の降雨量と盛川流量の変化を示している。図-10からChl.a濃度の急激な上昇時期と盛川の流量の増加時期に関連性がみられる。Chl.a濃度は出水時の後の晴天時に急激な上昇がみられた。河川の栄養塩濃度は流量が多いほど高濃度となる傾向があることから、出水時には高濃度の河川水が湾内に流入する。

それを栄養源として植物プランクトンが晴天時に光合成を活性に行ったため急激な上昇が起こったと考えられ、大船渡湾においては、河川からの栄養塩の流入負荷が水質に与える影響は大きいことが示唆された。近年、大船渡湾では養殖カキの貝毒の被害が発生している。そのため、植物プランクトンの異常発生を防ぐことが重要な課題である。

6. まとめ

- ・ 貧酸素水塊の発生と消滅にあわせて湾内底層の栄養塩濃度が変化している。貧酸素時期には底層部の栄養塩濃度がかなり高くなっている。
- ・ 貧酸素時期の平均溶出量はDINが125kg/日、DIPが72kg/日であった。貧酸素時期のDINの総溶出量は底層の現存量の増加分とほぼ同じくらいであった。
- ・ 植物プランクトンの増殖に河川からの流入負荷と気象条件が大きな影響を与えている。河川からの流入負荷量を削減することで、プランクトンの異常発生を防ぐことができる。

謝辞：本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学工学部）：研究課題「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究（研究代表：小野沢元久）」の一環として実施した。また、科学研究費補助金基盤A（代表：澤本正樹）の援助を受けた。盛川の流量は岩手県大船渡地方振興局土木部鷹生ダム建設事務所より提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 早川康博：大船渡湾における湾口防波堤建設が湾内の水環境に及ぼす影響，水環境学会誌，Vol.24，No.10，pp.652-657，2001.
- 2) 柳 哲雄：沿岸海域の物質収支モデル，海の研究，Vol.6，No.3，pp.163-171，1997.
- 3) 松梨史郎・今村正裕：閉鎖性海域の窒素・リンに関する許容負荷量の推定の試み，海岸工学論文集，第45巻，pp.1001-1005，1998.
- 4) 岩手県大船渡地方振興局土木鷹生ダム建設事務所：水位流量年報，2003，2004.
- 5) 大船渡市：大船渡関連水質等調査業務報告書，1995.
- 6) 野村宗弘・千葉信男・徐 開欽・須藤隆一：内湾底泥からの栄養塩溶出に及ぼす溶存酸素の影響，第31回日本水環境学会年会講演集，p.301，1997.
- 7) 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，港研資料，405，pp.3-39，1981.
- 8) 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘：外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量：海岸工学論文集，第44巻，pp.1061-1065，1997.