

# 大船渡湾への河川からの 栄養塩流入負荷量の評価

## EVALUATION OF THE AMOUNT LOADS OF THE NUTRIENTS FROM RIVER TO OFUNATO BAY

柏館信子<sup>1</sup>・オバダ オデニ フィデル<sup>2</sup>・佐藤博信<sup>3</sup>・野村宗弘<sup>4</sup>・沢本正樹<sup>5</sup>

Nobuko KASHIWADATE, Obadha Odeny Fidel, Hironobu SATO,

Munehiro NOMURA and Masaki SAWAMOTO

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 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)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>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. In order to prevent eutrophication, it is a very important subject to calculate correctly the amount loads of the nutrients from a river. We tried to calculate the amount loads of nutrients from the continuation data of turbidity. We led the L-L equation that presumed the load of the amount of the nutrient from impurity. The phytoplankton in the Ofunato bay shows the tendency to increase due to the flood that happens in June in the ordinary year from the observation result.

*Key Words : Ofunato Bay, Nutrient loads, Turbidity, Chlorophyll - a*

### 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。

近年, 水域の水環境管理を流域スケール(陸域 - 河川 - 海域)で考えることの重要性が認識されている。流域に降った雨や雪は地域の特性によって種々の物質を含有し, 河川を通じて海域に流出する。そのため閉鎖性水域の富栄養化防止にとって, 河川を通じて流入する栄養塩負荷

量の正確な算定は重要な課題である。

本研究では盛川からの栄養塩負荷量を算出するための基礎調査として, 2003, 2004年に大船渡湾にて, 2005年に大船渡湾と流入河川である盛川において現地観測を行った。盛川の河口部に濁度計を設置し連続的に観測し, 洪水や台風などによる水質の変化を捉えた。今回は実測結果をもとに河川流入水が湾内のプランクトンの増殖に与える影響について考察し, 濁度計の連続データから栄養塩の負荷量を算出するL - L式を導いた。

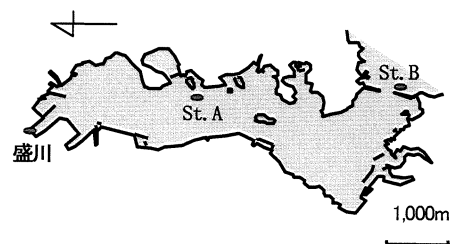


図 - 1 対象領域

## 2. 対象領域

岩手県の三陸沿岸に位置する大船渡湾を対象領域とした。湾内は、防波堤によって静穏な水域が確保され、港湾や養殖漁場として多面的に利用されている。その一方で、閉鎖度が高いために、河川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<sup>1)</sup>。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7.89km<sup>2</sup>、平均水深20mである。湾奥部に二級河川盛川が流入している。

盛川は流域面積：129km<sup>2</sup>、流路延長：約17kmである。上流部には鷹生ダムが建設され2005年5月から試験湛水が行われている。盛川の日平均流量は例年2.5m<sup>3</sup>/s程度と比較的少ない。しかしながら台風や洪水時には流量は10倍以上増えている。流域内人口は1万3千人である。(大船渡市：4万3千人)大船渡市の下水道普及率は16%で特に低い。(全国平均：67%、岩手県：43%)

## 3. 現地観測の概要

2003年7月28日から11月17日、2004年5月27日から10月22日、2005年の5月24日から11月1日の期間に年6回の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。

観測地点は図-1中の海域のSt.A、St.Bの2地点と盛川の河口からおおよそ2kmの佐野橋付である。St.A、Bの上・中・下層における水温、塩分濃度、DOの観測と盛川における濁度の連続観測を行った。観測項目を表-1に示す。使用計測機器は、後方散乱方式の濁度計(アレック電子)で、測定濃度範囲は0～2000ppm、使用波長は880nmである。測定間隔は20分である。水温の観測機器にはメモリー式水温・塩分計MDS-CT(アレック電子)を使用した。

採水は、海域ではSt.A、Bにおいて鉛直方向に表層(水面-1m)、中層(水深2)、底層(海底-1m)の3点と、盛川にて行った。採取されたサンプルは冷蔵して実験室に持ち帰った後、SS(懸濁物質)、TN(全窒素)、TP(全リン)、NH<sub>4</sub>-N(アンモニア態窒素)、NO<sub>2</sub>-N(亜硝酸態窒素)、NO<sub>3</sub>-N(硝酸態窒素)、PO<sub>4</sub>-P(リン酸態リン)について分析を行った。

## 4. 観測結果

### (1) 水温と溶存酸素の時系列変化

図-2に2005年のSt.Aにおける水温の時系列変化を示す。実測が開始日から表層と中層の間には水温差が生じている。その後、中層と底層の間にも水温差が生じ7月初めに水温成層が生じたと考えられる。8月後半にかけて水温差は最大となり、表層-底層間は約10℃、表層-中層間、中層-底層間でも約5℃の水温差が生じている。9月に入って気温が下がったことで表層の水温が低下し中層との水温差は解消されはじめる。10月初めに表層と中層の水温は均一になる。10月末には全層で均一となった。

図-3にSt.A底層のDOとSt.A中層と底層の水温差を示す。DOは機械の故障のため9/11～11/1の期間のデータが欠測している。そのため貧酸素水塊(DO3.5mg/l以下)の消滅時期を観測することができなかった。水温差の開きに合わせるように底層の溶存酸素濃度は低下し8月初めに貧酸素状態となった。

表-1 水質観測項目

|    | 湾内                  | 湾外    | 盛川               |
|----|---------------------|-------|------------------|
| 表層 | 水温、塩分、<br>濁度、Chl. a | —     | 水温、濁度、<br>Chl. a |
| 中層 | 水温、塩分、Chl. a        | 水温、塩分 | —                |
| 底層 | 水温、塩分、DO            | —     | —                |

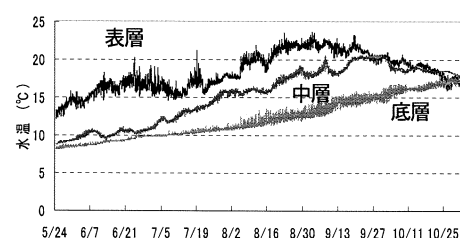


図-2 水温の時系列変化

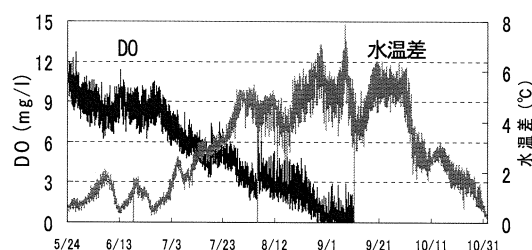


図-3 溶存酸素と水温差の時系列変化

## (2) 植物プランクトンの増殖特性

図-4に2005年、2004年におけるSt.A表層におけるChl.a濃度の時系列変化を示す。2005年の6月27日の62.5mmの降雨を境に盛川の流量が増加し、湾内のChl.a濃度も高い濃度を示した。2004年のデータにおいても低流量が続いた後の初めの大きな降雨イベントの後にChl.a濃度が上昇する現象が見られた<sup>1)</sup>。

植物プランクトン異常増殖には、気象（日射量等）、海象（流況・水温等）、栄養塩等、多くの要因が相互に関与しあっており、発生のメカニズムは明確ではない。この中で、季節変化が著しく、植物プランクトンの増殖に係わる、水温、日射量、栄養塩負荷量について植物プランクトン濃度と比較を行った。水温は観測値、日射量は大船渡市の日照時間を用いて計算した推定値、栄養塩負荷量は上記の方法から求めた計算値を用いた。それぞれを図-5に示す。Chl.a濃度は栄養塩負荷量が多い時期に増加している。また大船渡市は4月～6月にかけて日射量が多く、その後は減少する。梅雨の影響により6月末～7月にかけて河川を通じて、栄養塩類が豊富に供給される。こうした気象条件等の要因の組み合わせによって、毎年6月頃にプランクトンの増殖が観測されている。

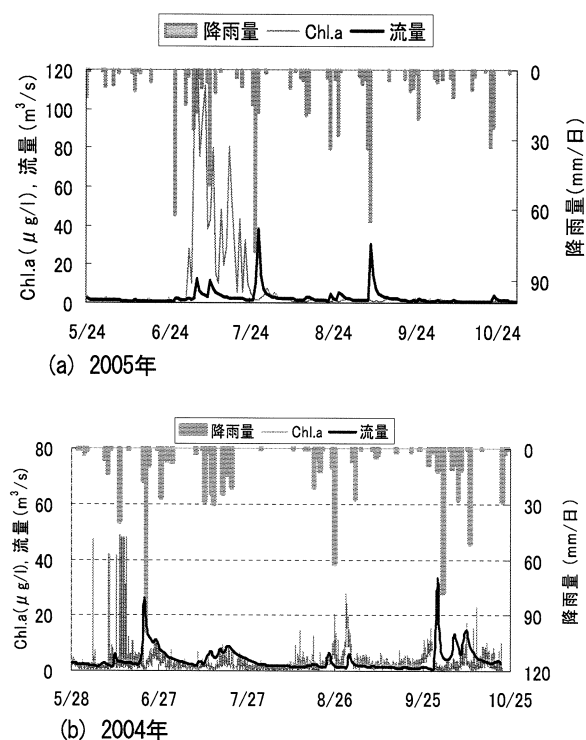


図-4 Chl.a濃度の時系列変化

## (3) 盛川における栄養塩濃度の変動特性

表-2に2003年、2005年の現地観測によって観測された盛川における各栄養塩濃度を示す。2003年7月28日は前日の降雨によって河川流量が大幅に増えている。盛川の日平均流量は例年 $2.5\text{m}^3/\text{s}$ で、およそ10倍である。それに伴いTNなどの窒素は高濃度となっており、平均流量時のおよそ3倍の値を示している。一方で、リンは流量の影響をあまり受けていないことがわかる。これは一般的にリンの発生源は点源が多く、窒素ほど濃度が流量に依存しないためだと考えられる。また、洪水時にはTNの約80%が $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TPの約80%が $\text{PO}_4\text{-P}$ と無機態の栄養塩であり、植物プランクトンの成長や増殖に利用されると考えられる。

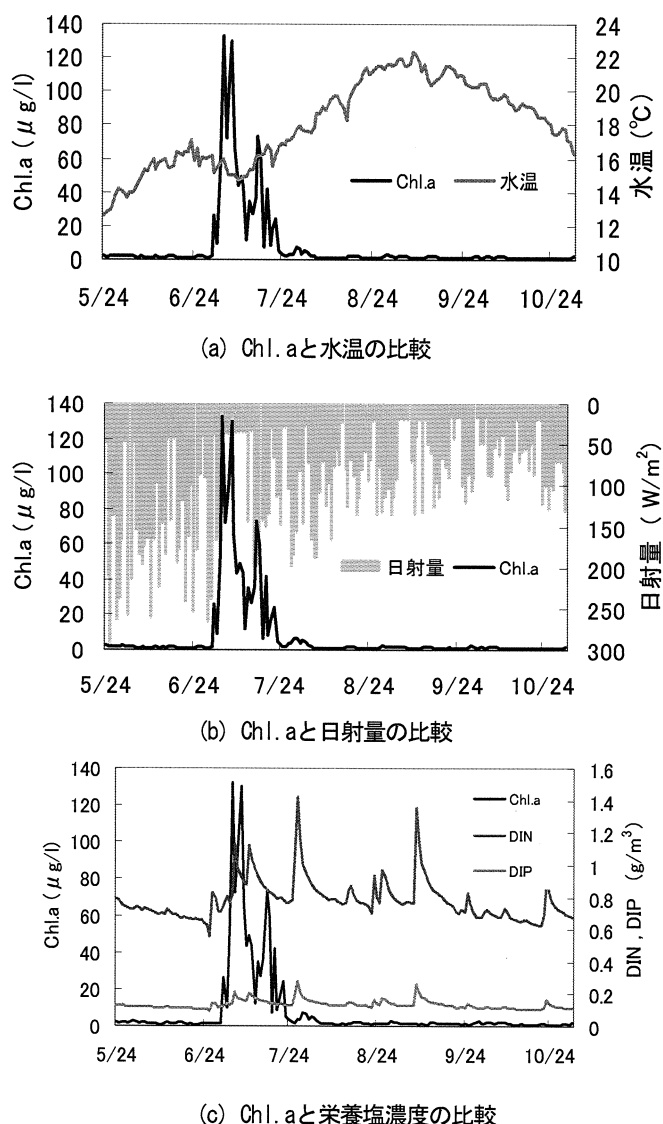


図-5 Chl.a濃度と各項目の比較

## 5. 濁度計による栄養塩負荷量の推定

閉鎖性水域の富栄養化の防止にとって、河川を通じて流入する栄養塩負荷量の算定は重要な課題である。河川からの栄養塩負荷は洪水時や、人為的な活動によって突発的に流出する。したがって年間の栄養塩流出負荷量の正確な算定のためには短い間隔で栄養塩濃度データを自動的に取得できることが望ましい。しかしながら、現状では年に数回採水が行われる程度である。現在では栄養塩濃度の現場設置型自動分析装置は存在するがコストや精度の問題で普及は難しい状況である。

山本ら<sup>2)</sup>は濁度計による懸濁態栄養塩負荷量を推定する方法を提案している。濁度計は水の濁りの程度を示すものであり、SSとの相関も高く自動測定できる装置として広く普及している。そこで、本研究では濁度計を用いて、第5次水質総量規制対象であるTN、TPの負荷量の推定をおこなうため盛川の河口部において濁度計による連続観測と採水による栄養塩濃度の測定を行った。

### 1) L - Q式の導出

河川水質は、一般に、晴天時には地質をはじめとする自然要素をバックグラウンドとして、これに人為的な要素が変動を支配している。河川の物質濃度の負荷量は流量 $Q$ と負荷量 $L$ の関係を経験式である(1)式の $L - Q$ 式で算定する手法<sup>3)4)</sup>が広く用いられている。

$$L(t) = CQ(t)^n \quad (1)$$

ここで、 $L(t)$ ：栄養塩負荷量、 $Q(t)$ ：流量、 $C, n$ ：係数である。

## 2) 濁度と流量の関連性

図 - 6に盛川における濁度と流量の時系列変化を示す。濁度は流量の増加に伴い、高濃度となる傾向が見られる。

(1)式を参考に観測から濁度の負荷量の算出を行い、濁度の負荷量 $L_{Tur}$ と流量 $Q$ を両対数グラフ上にプロットしたものが図 - 7である。(2)式は濁度の負荷量を表す $L - Q$ 式である。

$$L_{Tur}(t) = 222.47Q(t)^{1.2456} \quad (2)$$

ここに、 $L_{Tur}$ ：濁度負荷量(kg/日)、 $Q$ ：流量( $m^3/s$ )である。盛川の流量は岩手県によって日平均流量が推算されているものを用いる。相関係数 $R=0.82$ 、決定係数 $R^2=0.66$ と濁度の負荷量と流量の間に良好な相関が得られた。

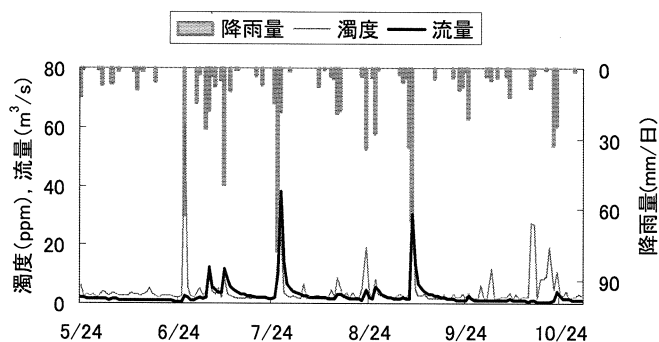


図 - 6 濁度と流量の時系列変化

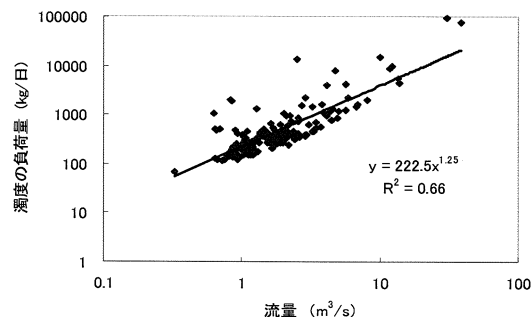


図 - 7 濁度の負荷量と流量の関係

表 - 2 盛川の水質組成

|            | 流量                | TN    | TP    | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>2</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N | PO <sub>4</sub> -P | DIN   | DIP   |
|------------|-------------------|-------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
|            | m <sup>3</sup> /s | mg/l  | mg/l  | mg/l               | mg/l               | mg/l               | mg/l               | mg/l  | mg/l  |
| 2003/7/28  | 21.46             | 0.756 | 0.018 | 0.623              | 0.003              | 0.023              | 0.015              | 0.649 | 0.015 |
| 2003/8/29  | 4.04              | 0.269 | 0.026 | 0.140              | 0.003              | 0.042              | 0.004              | 0.185 | 0.004 |
| 2003/9/14  | 1.90              | 0.135 | 0.021 | 0.039              | 0.002              | 0.021              | 0.003              | 0.062 | 0.003 |
| 2003/9/30  | 1.59              | 0.279 | 0.042 | 0.099              | 0.003              | 0.030              | 0.013              | 0.132 | 0.013 |
| 2003/10/17 | 1.09              | 0.182 | 0.023 | 0.038              | 0.003              | 0.037              | 0.002              | 0.078 | 0.002 |
| 2003/11/18 | 0.99              | 0.118 | 0.017 | 0.075              | 0.019              | 0.040              | 0.016              | 0.134 | 0.016 |

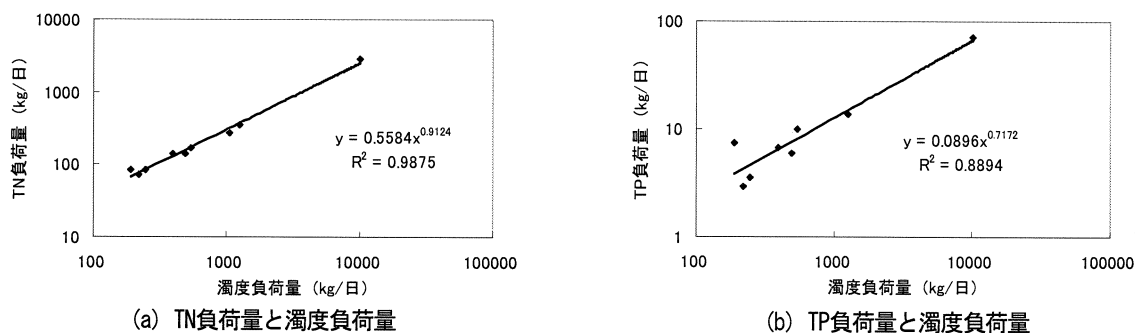


図 - 8 栄養塩負荷量と濁度負荷量の関係

表 - 3 栄養塩流出負荷量の算定結果の比較

|            | TN                |                    |        | TP                |                    |      |
|------------|-------------------|--------------------|--------|-------------------|--------------------|------|
|            | 実測値<br>負荷量 (kg/日) | L-L式<br>負荷量 (kg/日) | 誤差 (%) | 実測値<br>負荷量 (kg/日) | L-L式<br>負荷量 (kg/日) | 誤差   |
| 2003/7/28  | 2862              | 2506               | 12.5   | 71.4              | 69.6               | 2.5  |
| 2003/8/29  | 356               | 375                | 5.2    | 13.9              | 15.5               | 11.7 |
| 2003/9/14  | 157               | 159                | 1.2    | 6.0               | 7.9                | 30.5 |
| 2003/9/30  | 130               | 130                | 0.3    | 6.8               | 6.7                | 1.6  |
| 2003/10/17 | 88                | 84                 | 3.8    | 3.6               | 4.8                | 33.5 |
| 2003/11/18 | 80                | 76                 | 4.8    | 2.9               | 4.4                | 49.3 |
| 2005/5/24  | 169               | 171                | 1.7    | 10.1              | 8.3                | 17.5 |
| 2005/6/18  | 70                | 66                 | 6.0    | 7.4               | 3.9                | 46.9 |
| 2005/8/1   | 300               | 314                | 4.8    | 14.5              | 13.5               | 7.1  |
| 平均         | 468               | 431                | 4.5    | 15.2              | 14.9               | 22.3 |

### 3) 栄養塩と濁度の関連性

観測値から算出されたTNの負荷量と濁度の負荷量、TPの負荷量と濁度の負荷量をグラフ上にプロットしたものが図 - 8である。TN、TPの負荷量は濁度の負荷量の関数として以下のL-L式で表す。

$$L_{TN}(t) = 0.56L_{Tur}(t)^{0.91} \quad (3)$$

$$L_{TP}(t) = 0.09L_{Tur}(t)^{0.72} \quad (4)$$

ここに、 $L_{TN}$ ：TN負荷量(kg/日)、 $L_{TP}$ ：TP負荷量(kg/日)、 $L_{Tur}$ ：濁度負荷量(kg/日)である。

### 4) 栄養塩流出負荷量の推定精度

表 - 3は式(3)、式(4)のL-L式によって算出されたTN、TPの負荷量の計算値と実測値を比較したものである。TN負荷量の推定誤差は4.5%、TPの負荷量の推定誤差は22%であった。TNは洪水による流量増大時に、TPは流量が2m³/s以下の低流量時に誤差が大きかった。正確な算定を行うために様々な気象状況において採水を行う必要がある。

### 5) 年間負荷量の算出

(3)式、(4)式を用いて2004年と2005年におけるTN、TPの年間負荷量の算出を行った。その結果を表 - 4に示す。年間負荷量はTN、TPともに流量、降雨量が多い2004年が大きい結果となった。

次に大船渡湾において従来算定されている負荷量との比較を行う。表中の1990年の負荷量は岩手県<sup>9)</sup>によって算出された結果である。1990年は降雨量が例年よりも多かったためにTNの負荷量が大きかったと考えられる。図 - 9は大船渡市の年間の総降雨量と計算から求めたTNの日平均負荷量の関係を表している。盛川のTNの負荷量は降雨量に伴い線形的に増加している。従って、TNの負荷量を求めるL-L式は妥当な結果を示していると考えられる。それに対して、TPの負荷量は年度によってTNに比べて差が生じておらず、毎年一定量の負荷が発生していると考えられる。

表 - 5は降雨時と通常時に分けたTN、TPの平均負荷量の算定結果である。降雨時のTN、TPの平均負荷量は通常時よりも3倍以上多い結果となった。

## 5) 外海からの負荷量との比較

大船渡湾の内外における栄養塩の物質収支を考える場合に外部からの流入負荷として、河川からの流入と湾口部からの外海水の流入があげられる。内湾域の富栄養化は、陸域からの栄養塩負荷の影響だけでなく底質や湾内流動、外海との海水交換も重要な要因であるとされている<sup>6)</sup>。豊田ら<sup>7)</sup>は、大船渡湾において外海からの栄養塩の流入量の収支計算を行っている。

表-6は豊田らによって計算された湾口部での栄養塩流入量と本研究で求めた河川からの流入量をまとめたものである。外海からの流入負荷は河川からの流入負荷と比べると、TNは約6倍、TPは約4倍の負荷量が見込まれた。しかしながら、河川の流入水流量は外海水の50分の1であり、高濃度の河川水が湾内へ流入していることがここからわかる。また大船渡湾の湾口部においては、上げ潮時においても表層部では常に流出している。従って、河川からの栄養塩負荷は湾外水よりも湾内表層における植物プランクトンの増殖に大きな影響を与えていると考えられる。

表-4 大船渡湾への栄養塩の流入負荷量

| 年度    | 日平均流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | 総降雨量<br>(mm/year) | TN負荷量 (ton) |      | TP負荷量 (ton) |      |
|-------|------------------------------|-------------------|-------------|------|-------------|------|
|       |                              |                   | 年間          | 日平均  | 年間          | 日平均  |
| 2004  | 2.8                          | 1439              | 95.9        | 0.26 | 15.4        | 0.04 |
| 2005  | 2.2                          | 1224              | 73.5        | 0.20 | 11.74       | 0.03 |
| 1990* | 2.2                          | 2081              |             | 0.45 |             | 0.04 |

\*1990年は岩手県による算定結果

表-5 通常時と降雨時の比較

|                          | 平常時  | 降雨時  |
|--------------------------|------|------|
| 平均流量 (m <sup>3</sup> /s) | 1.9  | 5.3  |
| TN負荷量 (ton/日)            | 0.16 | 0.5  |
| TP負荷量 (ton/日)            | 0.03 | 0.09 |

表-6 外海水との比較

|    | 流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | TN<br>(ton/日) | TP<br>(ton/日) |
|----|---------------------------|---------------|---------------|
| 外海 | 135                       | 1.50          | 0.17          |
| 河川 | 2.5                       | 0.23          | 0.04          |

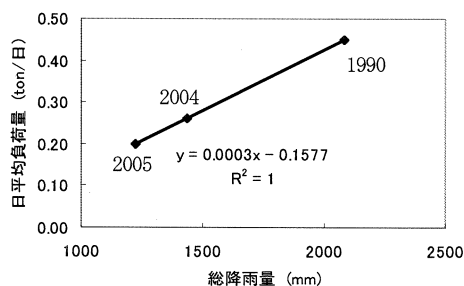


図-9 降雨量とTN負荷量の比較

## 6. まとめ

1. 大船渡湾のChl.a濃度は盛川の低流量が続いた後に起こる出水で高くなる傾向にある。大船渡湾の表層のChl.a濃度は盛川からの栄養塩負荷量の影響を強く受けている。日射量と梅雨による河川からの栄養塩供給によって6月が最も植物プランクトンの増殖に適した時期と言える。
2. 濁度計の連続データより盛川の流量より濁度を求めるL-Q式を導いた。これを用いてTN、TPの負荷量を求めるL-L式を導き、栄養塩の年間負荷量の算出を行った。
3. TNの負荷量の推定誤差は4.5%、TPの負荷量の推定誤差は22%であった。既存の算出結果との比較をおこなったところ、妥当な結果を示しており盛川の栄養塩の負荷量の算出に適応可能である。
4. 盛川のTNの負荷量は降雨に依存していることを定量的に示すことができた。降雨時のTN、TPの平均負荷量は通常時よりも3倍以上多い結果となった。

## 参考文献

- 1) 井上孝信・海老名潜一・今井章雄：農耕地河川におけるChl.a流出負荷量の評価，土木学会論文集，No.594，VII-7，11-20，1998
- 2) 山本浩一・二村貴幸・坂野章・日下部隆昭・末次忠司・横山勝英：濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究，河川技術論文集，第9巻，pp.515-520，2003.
- 3) 海老瀬潜一：5.「流出負荷量の解析モデル」，陸水域の富栄養化に関する総合研究(V)-霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価，国立公害研究所報告書，21，1981.
- 4) 比嘉榮三郎：降雨量と土壌流出量予測方法，沖縄県衛生環境研究所報，35，79-86，2001.
- 5) 岩手県（1990）：大船渡湾水質管理計画～きれいな湾を守りつづけるために～，p.38，1990.
- 6) 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.
- 7) 豊田政史・日比野忠史・細川恭史・鶴谷広一：大船渡湾における窒素・リン分布の季節変動特性，海岸工学論文集，第46巻，1061-1065，1999.