

## (25) 閉鎖性水域に対する高度な栄養塩管理の導入に関する一考察

横山 佳裕<sup>1\*</sup>・中野 裕香子<sup>1</sup>・吉次 祥子<sup>1</sup>・  
中嶋 雅孝<sup>1</sup>・内田 唯史<sup>1</sup>・中西 弘<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (財)九州環境管理協会 環境部 (〒813-0004 福岡県福岡市東区松香台1-10-1)

<sup>2</sup> 山口大学名誉教授 (〒759-0206 山口県宇部市東須恵987-18)

\* E-mail: yokoyama@keea.or.jp

生物生産力の向上と水域環境との調和に向けた栄養塩管理を検討するため、博多湾を対象海域に流入負荷量管理のあり方を考察した。近年、博多湾では下水の高度処理に伴いリン負荷量が減少し、珪藻やラフィド藻の赤潮が減少する一方、渦鞭毛藻の赤潮発生頻度が高くなっている。赤潮抑制の許容リン負荷量を試算した結果、多雨期では現状の下水処理による負荷量削減が困難であるため、赤潮の完全な抑制は難しいが、少雨期ではリン負荷量のある程度増やしても赤潮抑制は可能である。渇水期では、許容リン負荷量には不足していると考えられた。

**Key Words :** control and management of nutrient loads, red tides, advanced sewage treatment, Hakata Bay

### 1. はじめに

閉鎖性水域では、栄養塩類の過剰な供給による水質の富栄養化、底層の貧酸素化等が問題となり、水域保全対策として窒素やリンの水質規制が行われてきた。具体的には、海域の窒素とリンに係わる水質環境基準の設定や類型指定、海域における窒素とリンの発生負荷量の総量規制等があげられる。これら水質規制の結果、指定水域におけるCODや窒素、リン濃度は低下傾向、赤潮等の発生件数も減少傾向にある<sup>1)</sup>。

一方、窒素やリンは、生物生産に直接関与する重要な物質であるため、これら負荷量の減少に伴う海域の生物生産力の低下が懸念されている<sup>1)</sup>。例えば、東京湾や瀬戸内海及び有明海では、漁獲量が以前に比べて減少している。特に、水域の豊富な栄養塩の恩恵に浴していたノリ生産への影響が著しい<sup>1)</sup>。また、海域の窒素・リンの濃度やバランスが変化すると、植物プランクトンの出現状況にも影響を与え<sup>2,3)</sup>、瀬戸内海ではNP比の変化に伴う植物プランクトンの種の変化が顕著となっている<sup>4)</sup>。

沿岸部に都市機能を有し、閉鎖性が強い博多湾においても、福岡市をはじめとする流域市町の都市化による流

域人口の増加に伴い(図-1)<sup>5)</sup>、博多湾へ流入する負荷量は増加し、湾内の水質汚濁が懸念されたため、流入負荷量の削減を目的に、流域の下水道整備が急速に進められてきた(図-2)<sup>6,7)</sup>。また、福岡市では、水処理センター(西部、中部、東部、和臼、西戸崎)において、「博



図-1 博多湾流域と下水処理場の位置

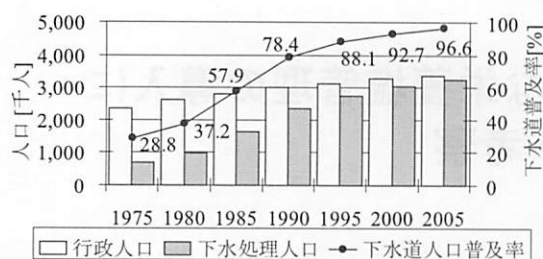
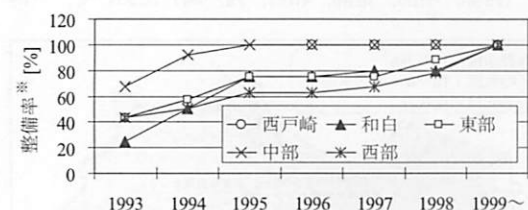


図2 博多湾流域市町における下水処理普及率の推移<sup>6)</sup>

多湾特定水域高度処理基本計画<sup>8)</sup>に基づき、主に嫌気好気活性汚泥法とリン酸マグネシウムアンモニウム法(MAP法)とを組み合わせた処理方法<sup>9)</sup>によるリンの高度処理設備を1993~1999年度に順次整備されてきた(図-3)<sup>9)</sup>。福岡県の流域下水道である御笠、多々良浄化センターでも2004年度以降、高度処理設備が一部導入されている<sup>7)</sup>。これら下水道整備率の向上やリンの高度処理により、博多湾では図-4に示すように、全窒素(T-N)濃度は横ばい傾向であるのに対し、全リン(T-P)濃度は顕著な低下傾向を示している<sup>10)</sup>。この栄養塩の流入負荷量の変化は、海域水質の栄養塩類のバランスにも変化を来しており、リンの減少に伴うノリ養殖への影響<sup>11)</sup>や植物プランクトンの種の変化<sup>12)</sup>が生じている。

本研究では、閉鎖性水域における生物生産力の向上と環境との調和に向けた栄養塩管理のあり方を検討するため、博多湾を対象海域とし、湾内へ流入する窒素やリン負荷量の変化に伴う植物プランクトンの出現の応答性を把握するとともに、赤潮の発生時の気象条件や流入負荷量の条件を解析した。さらに、水質ならびに生態系保全のための栄養塩の管理について考察した。



※整備率：全体処理能力に対する高度処理施設の処理能力の比率

図3 福岡市水処理センターのリン高度処理施設の整備状況<sup>9)</sup>

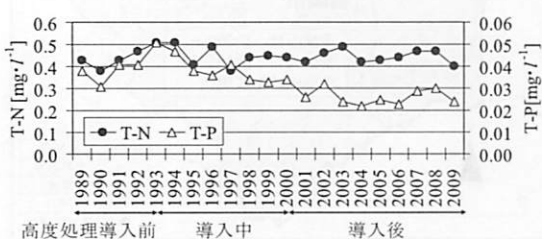


図4 博多湾内のT-N、T-Pの推移<sup>10)</sup>

## 2. 解析方法

本研究においては、既存資料を用いて、博多湾へ流入する経年の負荷量と湾内の水質状況、赤潮発生状況、その他赤潮発生に関連する気象条件等の検討を行った。

はじめに、湾内の水質の動向および赤潮発生状況の推移を整理した。流入負荷量は、「博多湾環境保全計画(福岡市)」に示されている1992、1997、2000、2002年度の負荷量算定結果<sup>9)</sup>をもとに、下水処理場からの負荷量は下水処理場の放流水質と放流量<sup>7,9,13)</sup>の積により、合流式下水処理場からの負荷量は降水量<sup>14)</sup>の比率により、その他の負荷量は流域の土地利用面積等<sup>15)</sup>から、流入負荷量と土地利用面積等との比より、1989~2009年度の年平均負荷量を試算した。さらに、月別流入負荷量を求めるために、(1)下水処理場由来の負荷量は月に依らず一定とし、(2)下水以外からの月別流入負荷量は、年平均負荷量より下水処理場由来の負荷量を除いた値に、年平均降水量<sup>14)</sup>に対する月平均降水量<sup>14)</sup>の比を乗じて求めた。(1)と(2)で求めた負荷量の合計値を博多湾へ流入する月別流入負荷量とした。博多湾内の水質状況には、福岡市が月1回の頻度で測定している公共用水域水質調査の環境基準点8地点のうち(図-5)、湾口部の地点を除く7地点における海面下0.5mの測定結果<sup>10)</sup>を用いた。赤潮発生状況は「九州海域の赤潮」の1979~2010年のデータ<sup>16)</sup>を、気象条件(降水量、気温、全天日射量)には1989~2010年の福岡管区気象台<sup>14)</sup>の値を用いた。

次に、赤潮発生状況について、渦鞭毛藻類、珪藻類、ラフィド藻類の赤潮発生日数別出現頻度を求め、環境条件(気温、降水量、全天日射量、T-N・T-P負荷量)毎に整理し、赤潮が発生しやすい環境条件を求めた。また、博多湾における赤潮構成種の変化とその要因、特に流入負荷量との関連性について考察し、赤潮発生頻度を低減するための流入負荷量の条件を求めた。

さらに、流入負荷量をコントロールする一手法として、適正負荷量条件を満たすための下水高度処理施設の処理率を降水量の大きさ毎に試算し、時期や降雨条件に応じた流入負荷量のあり方について考察した。

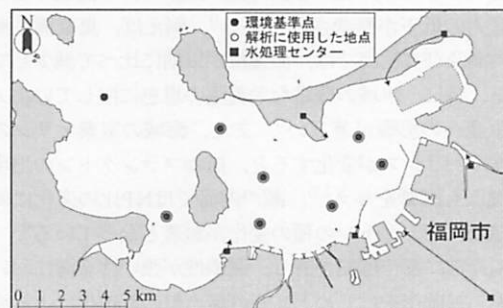


図5 博多湾内の環境基準点<sup>10)</sup>と解析に使用した地点の位置

### 3. 結果

#### (1) 博多湾への流入負荷量と水質の推移

1999～2009年度の博多湾に流入するT-NおよびT-P負荷量を、下水処理場由来とその他にわけて図-6に示す。T-N負荷量は、約80 %が下水処理場由来であり、1995年度以降、14000～15000 kg・day<sup>-1</sup>と横ばいで推移している。T-P負荷量は、1993年度から2001年度にかけてリンの高度処理が導入されたことにより減少し、2002年度以降は600 kg・day<sup>-1</sup>前後で推移している。

負荷量比T-N/T-Pの推移をみると、1989から1993年度まで12前後で推移したのち、近年は上昇傾向にあり、20～30を示している（図-7）。

博多湾内の水質の経年的な推移（図-4）<sup>10</sup>をみると、流入負荷量の推移と同様に、T-Nは横ばい傾向、T-Pは減少傾向である。N/P比（図-8）は、1993年度以降上昇し、近年では15～20と、Redfield比（7.24）の2倍以上の値を示していることから、T-Pの抑制に伴いリン制限が経年的に強くなっていることがわかる。クロロフィルa（chl-a）はT-Pの減少に伴い1993年度以降減少傾向にあるが、化学的酸素要求量（COD）は横ばい傾向にある。この要因には、以下の4点があげられる。

1) CODの7割を植物プランクトンの一次生産（内部生産）に由来しない溶存態COD（D-COD）が占めているため、T-Pの減少に伴う内部生産CODの減少（chl-aの減少）の寄与は小さい（図-8）。

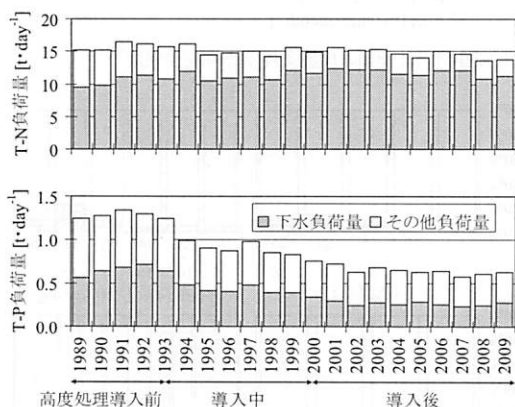


図-6 博多湾へ流入するT-N、T-P負荷量の推移

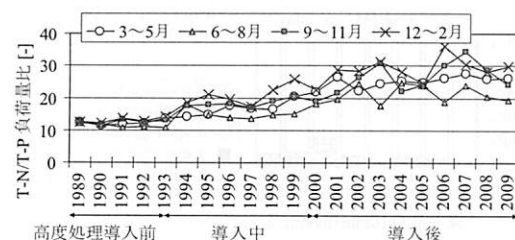


図-7 T-N/T-P負荷量比の推移

2) T-Pの濃度変化に対する内部生産由来のCODの変化はヒステリシス等の非線形性を示すため<sup>17</sup>、T-Pの減少がリニアに内部生産CODの減少に繋がらない。

3) 栄養塩律速を受けた植物プランクトンの細胞は、供給が限定されているリンの細胞内含量が、炭素に対して小さくなり<sup>18</sup>、窒素が豊富にある場合に、植物プランクトンは増殖を伴わず栄養塩を取り込む“ぜいたく消費”を起こした<sup>19</sup>。

4) 窒素やリンの濃度およびN/P比が変化したことにより、植物プランクトンの種（赤潮形成種）が変化し、C/chl-a比も変化した。

#### (2) 赤潮発生状況の推移

博多湾における植物プランクトン類別の赤潮累積発生日数<sup>16</sup>の季節別経年変化を図-9に示す。以下に経年の発生日数と主な赤潮構成種を類別に整理した。

渦鞭毛藻類の赤潮は季節を問わず発生し、夏季に発生日数が多い。また、T-P負荷量が経年的に減少し始めた1993年度以降、冬季にも赤潮発生日数が高くなり、2004年度の冬季の赤潮発生日数は過去最多の90日であった。

主な構成種は*Karenia mikimotoi* (*Gymnodinium mikimotoi*)、

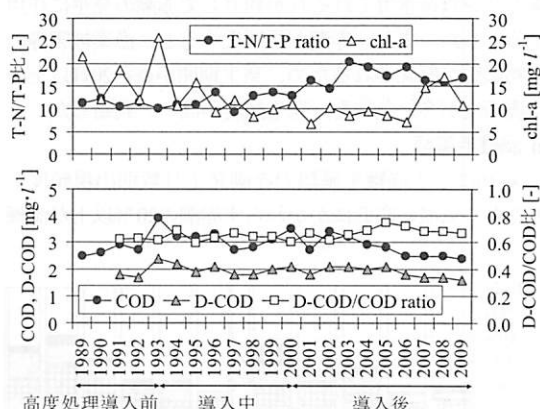


図-8 博多湾内のT-N/T-P比、chl-a、COD、D-COD、D-COD/COD比の推移<sup>10</sup>

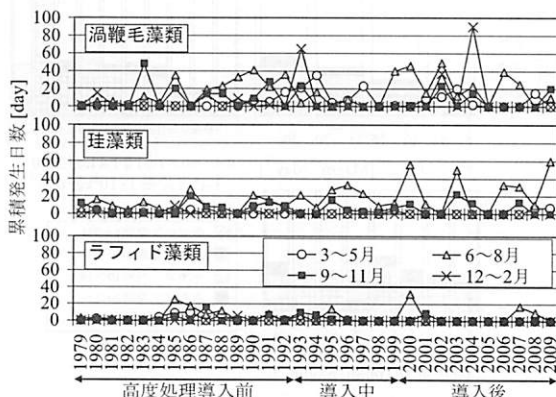


図-9 博多湾内の累積赤潮発生日数の推移<sup>16</sup>

*Akashiwo sanguinea* (*Gymnodinium sanguineum*)である<sup>16)</sup>。

珪藻類の赤潮は、夏季に発生頻度が高く、発生日数も夏季に長期に及んでいる。また、1992年度以前では気温が低い冬季にも発生がみられたが、1993年度以降、冬季での発生はみられていない。この冬季における珪藻類の赤潮の減少時期は、T-P負荷量が減少し始めた時期と同時期である。主な構成種は*Skeletonema costatum*である<sup>16)</sup>。

ラフィド藻類の赤潮は、1985～1995年度の夏季、秋季に発生頻度が高かったが、1996年度以降は発生頻度が大きく減少している。発生日数は渦鞭毛藻類や珪藻類と比べると短い。主な構成種は*Heterosigma akashiwo*である<sup>16)</sup>。

なお、赤潮による漁業被害は渦鞭毛藻類とラフィド藻類では報告されているが、珪藻では報告されていない<sup>16)</sup>。

### (3) 赤潮発生時の環境条件

1989～2009年度を対象に、赤潮発生に係わる環境条件毎に整理した赤潮発生日数別出現頻度を渦鞭毛藻類、珪藻類、ラフィド藻類にわけて、図-10～図-12に示す。博多湾ではリンの抑制によりNP比が経年的に変動しており（図-8）、後述ではこの環境条件より赤潮発生抑制の負荷量条件とコントロール手法を検討することから、窒素とリン負荷量はそれぞれが独立して赤潮の発生に作用するとした。また、赤潮が長期化すると、漁業被害等の生物影響が懸念されるため、発生期間が長い20日以上との出現頻度が多い条件を、発生頻度が高いと判断した。

#### a) 渦鞭毛藻類

図-10に示す渦鞭毛藻類の赤潮発生日数別出現頻度をみると、気温の高低にかかわらず赤潮の20%以上が渦鞭

毛藻類であり、気温が高い時期に赤潮が発生しやすくなり、発生日数が長くなる。また、気温が5～10℃と低い冬季や全天日射量が5～10 MJ・m<sup>2</sup>・day<sup>-1</sup>と低い時期でも出現頻度は珪藻類やラフィド藻類と比べて高く、発生日数が長くなる割合も高い。

月降水量では、降水量の大小にかかわらず、20%以上の頻度で赤潮が発生している。

負荷量による出現頻度をみると、T-N負荷量では16000 kg・day<sup>-1</sup>以上、T-P負荷量では800 kg・day<sup>-1</sup>以上と400 kg・day<sup>-1</sup>

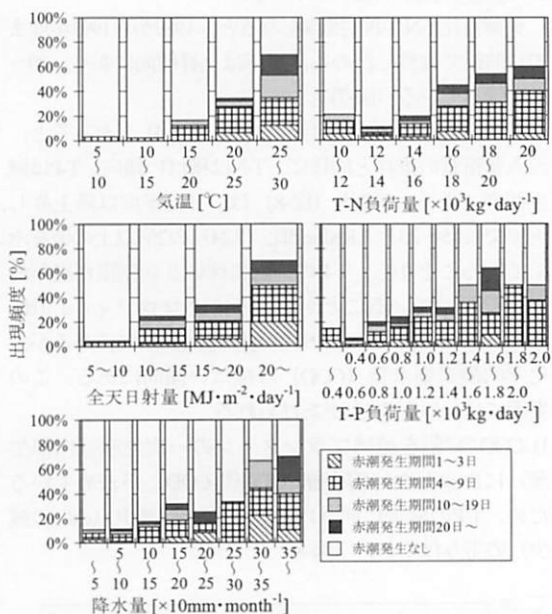


図-11 珪藻類の環境条件別赤潮発生頻度<sup>10,14,16)</sup>

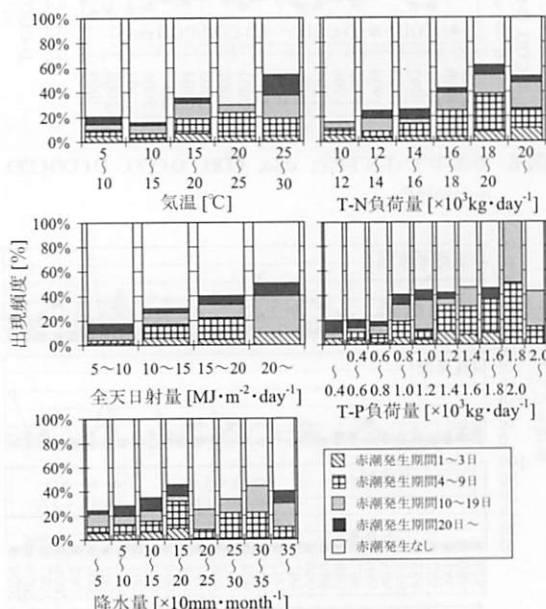


図-10 渦鞭毛藻類の環境条件別赤潮発生頻度<sup>10,14,16)</sup>

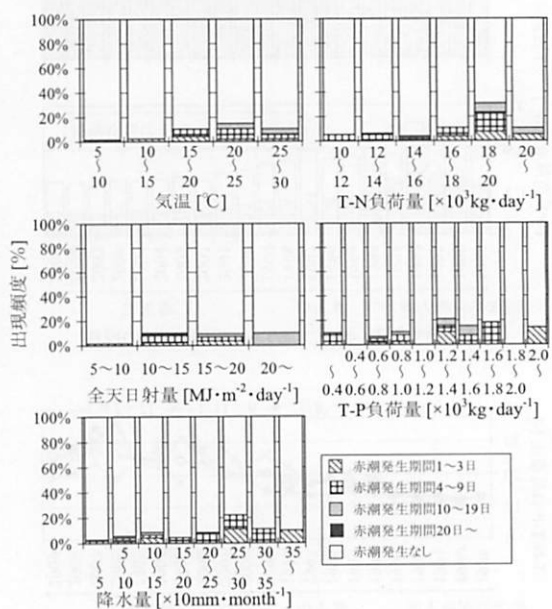


図-12 ラフィド藻類の環境条件別赤潮発生頻度<sup>10,14,16)</sup>

以下で20日以上の出現頻度が高く、特にT-P負荷量が400  $\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ 以下では赤潮発生日数が長くなる傾向にある。

#### b) 珪藻類

図-11に示す珪藻類の赤潮発生日数別出出現頻度をみると、20～25℃で出出現頻度が最も高く、全天日射量が10  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上になると発生日数が長くなりやすい。

月降水量が300 mm以上になると赤潮が発生しやすくなり、発生日数が長くなる傾向にある。

T-N、T-P負荷量でみると、T-Nでは16000  $\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上、T-Pでは1600～1800  $\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上で長期化する傾向にある。「博多湾環境保全計画」<sup>9)</sup>によると、T-P負荷量は、全負荷量のうち、山林や市街地等の降雨に伴い流入する負荷量の占める割合が高くなっている。降水量が多く、全天日射量が高くなると、赤潮発生頻度が増加し、日数が長くなることから、博多湾では珪藻類は降雨に伴う栄養塩の流入後、晴天が続くと赤潮が発生し、発生日数が長くなる特性をもっているといえる。

#### c) ラフィド藻類

図-12に示すラフィド藻類の赤潮出出現頻度をみると、気温が15℃以上、全天日射量が10  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上となると赤潮が発生しやすくなり、発生日数が長くなりやすい。

月降水量でみると、250～300 mmで赤潮が発生しやすくなり、発生日数が長くなるのは50～150 mmと比較的少雨の時期である。

T-N、T-P負荷量でみると、T-Nでは18000～20000  $\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ で、T-Pでは1200～1400  $\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ と1600～1800  $\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ の条件で赤潮が発生しやすい傾向にある。

### 4. 考察

#### (1) 博多湾における赤潮構成種の変化

近年における窒素・リンの濃度変化に伴う博多湾の赤潮構成種の特徴は、以下の2点があげられる。

##### 1) 冬季の赤潮発生状況の変化

- ・渦鞭毛藻類の赤潮発生日数の増加
- ・珪藻類の赤潮発生頻度の低下

##### 2) ラフィド藻類の赤潮発生頻度の低下

この2つの変化について、前述の赤潮発生上の環境条件と既存知見より、変化のメカニズムを考察した。

#### a) 冬季における渦鞭毛藻類の発生日数の増加と珪藻類の赤潮発生頻度の低下

冬季は降水量が少ないため、下水処理場以外から流入するリン負荷量は他の季節よりも少ない。さらに、1993年度から導入された下水の高度処理によって、下水処理場由来のリン負荷量が減少しており、下水の高度処理導入後は冬季にリンが枯渇する状況が続いている<sup>10)</sup>。

博多湾における珪藻類の主な赤潮構成種である *S. costatum*

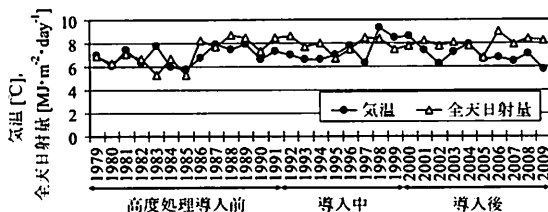


図-13 冬季(12～2月)の気温と全天日射量の推移<sup>10)</sup>

*costatum*の栄養塩摂取特性については、リンが増殖制限の第一因子とされている<sup>20)</sup>。著者らの解析によると<sup>12)</sup>、冬季における気温や全天日射量は経年的に上昇傾向にあり(図-13)、植物プランクトンにとっては増殖しやすい環境にあるが、湾内のT-P濃度の減少に伴い、本種が発生しにくい環境となっていること、珪藻類の赤潮が減少した時期(1993年度)と博多湾のリン負荷量が減少した時期が一致していることから(図-6、図-9)、近年における冬季のリン負荷量の減少が、本種の増殖に大きな影響を与え、赤潮出出現頻度が低下したと考えられる。

一方、渦鞭毛藻類の主な赤潮形成種である *K. mikimotoi*、*A. sanguinea*は、鉛直日周運動をし、流入するリン負荷量が減少した場合にも、底層のリンを摂取し、増殖することができる。また、*K. mikimotoi*は、海水中の無機態リンが枯渇した場合、溶存有機リンの利用による生残が可能である<sup>21)</sup>。このように、渦鞭毛藻類は、表層海水中のリンが枯渇した際も底層からリンを摂取し、かつ溶存有機リンを利用して他の種よりも生残が可能であるため<sup>22)</sup>、リン流入負荷量の減少による減耗の影響が珪藻類よりも小さいと考えられる。

さらに、*A. sanguinea*は珪藻類の分泌物によって増殖が抑制される特性を持っており<sup>23)</sup>、博多湾では冬季のT-Pの減少により競合種である珪藻類が減少したことから、渦鞭毛藻類が増殖しやすい環境となっている<sup>12)</sup>。

以上のように、渦鞭毛藻類の鉛直運動による底層のリンの利用や溶存有機リンの摂取による生残、珪藻類の減少に伴う増殖抑制作用の低下が、冬季における渦鞭毛藻類の赤潮発生増加の要因と考えられる。

#### b) ラフィド藻類の赤潮発生頻度の低下

主な赤潮形成種である *H. akashiwo*の赤潮発生時期は、気温が15℃以上となる春季～秋季(3月～11月)がほとんどであり、この時期には珪藻類や渦鞭毛藻類も発生している<sup>16)</sup>。珪藻類の主な赤潮構成種である *S. costatum*と *H. akashiwo*との競合培養実験結果では、*S. costatum*は窒素制限下、リン制限下のいずれにおいても *H. akashiwo*に比べて少ない栄養塩で大きな増殖速度が得られるといわれており<sup>2)</sup>、低栄養塩濃度条件では珪藻類の赤潮発生が有利になる。さらに、*S. costatum*が異常発生した場合には、増殖抑制作用により *H. akashiwo*の赤潮は発生しないこと

が報告されている<sup>29)</sup>。このように、常時流入する下水由来のリン負荷量が減少した中では、降雨に伴う栄養塩の流入時にいち早く珪藻類が栄養塩を取り込んで増殖するため、珪藻類と競合関係にあるラフィド藻類の増加が抑制されたものと考えられる。

以上の結果から、博多湾における赤潮構成種の変化をまとめると以下のとおりである。

- 1) 下水の高度処理導入によるリン負荷量の削減に伴う春季～秋季のラフィド藻と冬季の珪藻の減少
- 2) 冬季の珪藻類の減少に伴う渦鞭毛藻類への増殖抑制作用の低下による渦鞭毛藻類の赤潮の増加

下水の高度処理によるリン負荷量の削減により、ラフィド藻類の赤潮発生に伴う漁業被害は抑制されたが、渦鞭毛藻類の赤潮が増加しており、渦鞭毛藻類による漁業被害が懸念される。さらに、植物プランクトンの中でも増殖速度が一般的に速い珪藻類の減少は、一次生産を利用する動物プランクトン等の一次消費者の生産性低下、さらに食物連鎖を通じて魚類の生産性の低下にも繋がるおそれがある<sup>30)</sup>。

このため、健全な生物生態系の維持には、生物への被害が少なく、かつ増殖速度が速く高次生態系への回転率が速くなることができ珪藻類を優占させ、かつ珪藻類の赤潮が発生しないように、栄養塩の流入等を管理することが必要と考えられる。

## (2) 降雨変動を踏まえたリン負荷量の管理のあり方

近年、下水のリン高度処理の導入により、T-P負荷量が400 kg・day<sup>-1</sup>以下となる時期が多く、ラフィド藻類の赤潮は抑制されたものの、渦鞭毛藻類の赤潮が発生しやすく、かつ発生日数が長くなりやすい状況となっている。生態系や漁業生産への影響を現状よりも低減させるためには、流域からの負荷量をコントロールし、ラフィド藻類と渦鞭毛藻類の漁業被害が及ばないT-P負荷量を検討する必要がある。ラフィド藻類と渦鞭毛藻類のいずれの発生頻度も低いT-P負荷量（以下、「赤潮抑制T-P負荷量」という）は前述の赤潮発生の環境条件より、400～800 kg・day<sup>-1</sup>となる。

ここで、流域からの流入負荷量をコントロールする一手法として、降雨変動に応じて下水の高度処理施設の処理率より流入負荷量を変動させた場合の試算を行った。

T-P負荷量が400～800 kg・day<sup>-1</sup>の範囲内となるように、(1)～(4)式より（図-14）求めた高度処理施設の処理率の計算結果は、表-1に示すとおりである。

$$L_A = L_{A,b} - L_B = 350 \quad (1)$$

$$L_B = 250 \quad (2)$$

$$L_C = 2.6 \times R + 35.9 \quad (3)$$

$$L_{B'} = L_A \times \left(1 - \frac{X}{100}\right) = 350 \times \left(1 - \frac{X}{100}\right) \quad (4)$$

ここで、 $L_A$ ：リンの高度処理施設で除去される負荷量 [kg・day<sup>-1</sup>]、 $L_{A,b}$ ：リンの高度処理施設導入前の下水負荷量 [kg・day<sup>-1</sup>]、 $L_B$ ：リンの高度処理施設を100%導入した後の下水負荷量 [kg・day<sup>-1</sup>]、 $L_C$ ：2000～2009年度における月別のその他負荷量と降水量の関係より求めたその他負荷量 [kg・day<sup>-1</sup>]（図-15）、 $R$ ：月降水量 [mm]、 $L_{B'}$ ：高度処理の処理率をX%とした時の下水負荷量 [kg・day<sup>-1</sup>]、 $X$ ：高度処理の処理率 [%]である。 $L_A$ は高度処理導入前の1989～1992年度の下水処理場由来のT-P負荷量（600 kg・day<sup>-1</sup>）からリンの高度処理導入後の2000～2009年度の下水処理場由来のT-P負荷量の平均値（ $L_B$ ：250 kg・day<sup>-1</sup>）を引いた値（350 kg・day<sup>-1</sup>）を用いた。

表-1の結果は試算であるため一概にはいえないが、おおまかな傾向として、月降水量が25 mm以下の場合、処理率100%の場合、T-P負荷量が400 kg・day<sup>-1</sup>以下になり、赤潮抑制T-P負荷量となるにはT-P負荷量が不足する。月降水量が25～50 mmの場合は、高度処理施設の稼働の有無に依らず、赤潮抑制T-P負荷量を維持できるレベルに

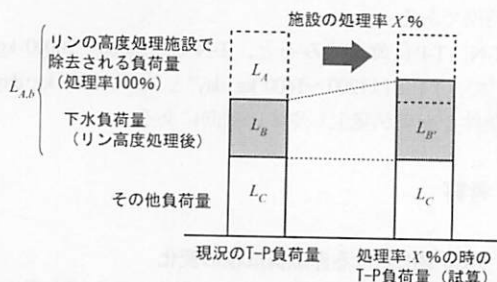


図-14 下水処理率を変化させた場合のT-P負荷量の試算方法

表-1 降水量と下水処理率が変動した時のT-P負荷量

| 降水量<br>[mm・<br>month <sup>-1</sup> ] | 現況のT-P負荷量<br>[kg・day <sup>-1</sup> ]<br>(処理率100%) |      |      | 処理率X<br>[%] | 処理率X%の時の<br>T-P負荷量<br>[kg・day <sup>-1</sup> ] |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|------|------|-------------|-----------------------------------------------|
|                                      | 下水                                                | その他  | 合計   |             |                                               |
| 25                                   | 250                                               | 101  | 351  | 0～85        | 404～701                                       |
| 50                                   | 250                                               | 166  | 416  | 0～100       | 416～766                                       |
| 75                                   | 250                                               | 231  | 481  | 10～100      | 481～796                                       |
| 100                                  | 250                                               | 296  | 546  | 30～100      | 546～791                                       |
| 125                                  | 250                                               | 361  | 611  | 50～100      | 611～786                                       |
| 150                                  | 250                                               | 426  | 676  | 65～100      | 676～799                                       |
| 175                                  | 250                                               | 491  | 741  | 85～100      | 741～794                                       |
| 200                                  | 250                                               | 556  | 806  | ～100        | 806～                                          |
| 225                                  | 250                                               | 621  | 871  | ～100        | 871～                                          |
| 250                                  | 250                                               | 686  | 936  | ～100        | 936～                                          |
| 275                                  | 250                                               | 751  | 1001 | ～100        | 1001～                                         |
| 300                                  | 250                                               | 816  | 1066 | ～100        | 1066～                                         |
| 325                                  | 250                                               | 881  | 1131 | ～100        | 1131～                                         |
| 350                                  | 250                                               | 946  | 1196 | ～100        | 1196～                                         |
| 375                                  | 250                                               | 1011 | 1261 | ～100        | 1261～                                         |

：負荷量が400～800 kg・day<sup>-1</sup>であることを示す。

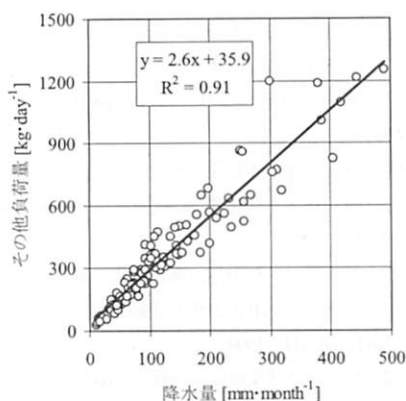


図-15 降水量<sup>14)</sup>とその他の負荷量の関係式

ある。月降水量が75～175 mmの場合は、現状と同じ処理状況であっても、赤潮抑制T-P負荷量とすることができるが、処理率を降雨の状況に応じて10～85%の範囲でT-P負荷量を管理することにより、漁業被害を及ぼす赤潮を抑制できる可能性が示された。ここで赤潮発生環境条件(図-10～図-12)をみると、高度処理導入前の1989年度から導入後の2009年度のデータであるため、月降水量が75～175 mmの場合でも、高度処理導入前には渦鞭毛藻類の赤潮が発生している。赤潮発生の抑制効果については数値シミュレーションを用いた更なる検討に加えて、負荷量の管理については、降雨条件だけではなく、気温や海象条件を踏まえた海域の状況にも留意しながら実施する必要があると考えられる。また、月降水量が200 mmを上回ると、下水処理以外の降雨によって変動するその他の負荷量が増加し、現状の施設の処理率ではリン制御による赤潮の発生抑制は難しいと考えられる。

1999～2009年の月降水量の出現頻度を図-16に示す。10

月は降水量25 mmを下回る頻度が年間で最も高いため、渇水年では処理率85%以下の稼働でも赤潮が制御できる可能性がある。1月、12月は降水量50 mm以下の出現頻度が約40%であり、少雨年であれば処理率を低くすることも可能となる。前述の1月、10月、12月だけではなく、2～4月、11月も月降水量175 mm以下がほとんどであり、処理率は現状維持または降雨の状況によっては10%程度の処理率でも赤潮抑制T-P負荷量とすることができると考えられる。一方、6、7月は降水量200 mm以上が多く、高度処理施設の処理率を現状以上としない限り、赤潮の抑制には対応できない。

近年における博多湾へ流入する負荷量は、図-17に示す構造のとおり、自然由来の負荷量の寄与が大きく、降雨により変動しやすい状況となっている。そのため、降雨の多い時期では降雨に伴う自然由来の負荷量の割合が大きくなり、赤潮発生抑制のための適正負荷量に制御することは難しいことから、赤潮を抑制するための面源負荷対策や現状の処理率を上回る新たな高度処理技術の開発が望まれる。しかし、降雨の少ない時期では、前述のように下水処理率を調整することも可能と考えられる。

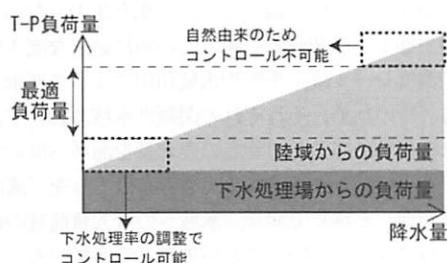


図-17 降水量と博多湾への流入するT-P負荷量との関係図

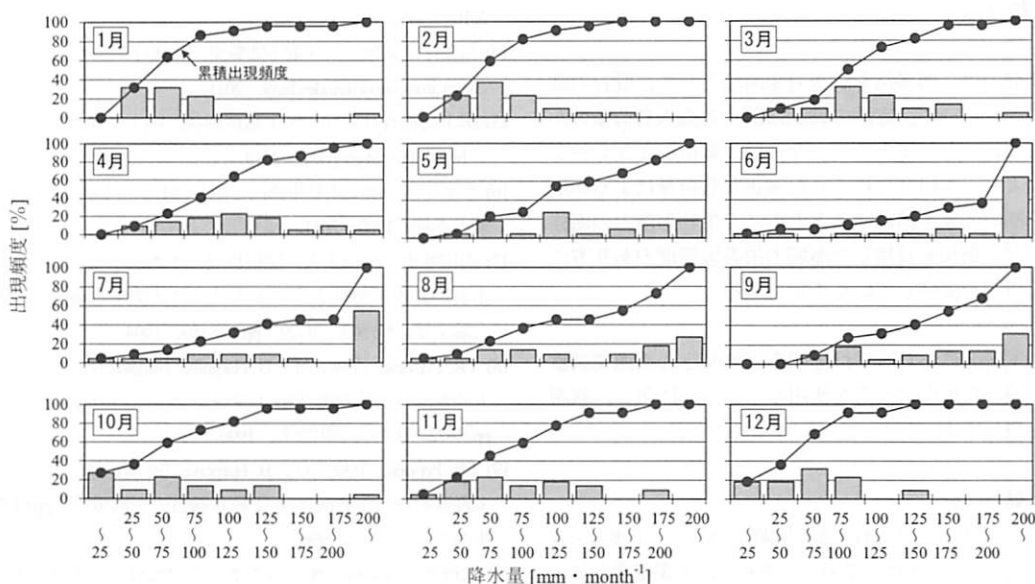


図-16 月降水量の出現頻度 (1989～2010年)<sup>14)</sup>

## 5. まとめ

博多湾では、1993年度以降の下水のリン高度処理の導入に伴い、流入するT-P負荷量が減少傾向にある。このT-P負荷量の減少に伴い、赤潮の発生傾向に変化がみられ、珪藻類やラフィド藻類については減少傾向、これに対して渦鞭毛藻類についてはT-P負荷量を400 kg・day<sup>-1</sup>以下まで削減すると赤潮の発生頻度が高く、かつ、発生日数が長くなる傾向がみられた。このため、赤潮の発生の一要因ともなっているリンについて、流域からの負荷量をコントロールする一手法として、リン高度処理施設の処理率や降雨の変動を考慮した赤潮の抑制が可能なT-P負荷量の管理条件を試算した。この結果、降雨の多い6、7月はリン高度処理施設の制御では限界があり、完全な赤潮の抑制は難しく、面源負荷対策や新たな高度処理技術の開発が望まれる。しかし、降雨の少ない1月～4月、10月～12月のT-P負荷量は水域管理の目的を十分果たしていることがわかった。さらに、月降水量が25 mm以下となる渇水期（主に10月）のリン負荷量は、赤潮を抑制できる負荷量に対して若干不足していると考えられた。

本論文では、海域の赤潮発生抑制のための流入負荷量管理のあり方について論じたが、赤潮発生のみならず、水域の生態系や漁業資源の保全のために必要な流入栄養塩類の濃度レベルは、季節や水域利用によって要求量が異なる。そのため、それぞれの閉鎖性水域において、季節や水域利用に応じた栄養塩の要求量を海域へ供給することを考えていく必要がある。著者らはこれを「高度な栄養塩管理」と称しており、水域への流入負荷量の適正化をさらに検討していくことが重要と考えている。

## 6. おわりに

本研究では、博多湾を調査対象海域として、既存の調査データを用いて、赤潮の抑制に関する流入負荷量のあり方についてとりまとめた。今後は、数値シミュレーションにより、本研究で得られた適正な負荷量による赤潮発生抑制の効果を検証するとともに、生物生産力の増強と環境との調和を目指した海域の栄養塩管理のあり方について研究を継続していく予定である。

謝辞：本研究にあたっては福岡市、水産庁九州漁業調整事務所等の貴重なデータを使用した。ここに記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 中西弘：閉鎖性内湾の貧栄養化問題について－高度な栄養塩管理、環境と生物生産力との調和－、水環境学会誌、

Vol.34 (A), No.2, p.33, 2011.

- 2) 山口峯生（吉田陽一編、日本水産学会監修）：水域の窒素：リン比と水産生物 水産学シリーズ 95, pp.11-19, 恒星社厚生閣, 1993.
- 3) 西島敏隆, 深見公雄（吉田陽一編、日本水産学会監修）：水域の窒素：リン比と水産生物 水産学シリーズ 95, pp.20-28, 恒星社厚生閣, 1993.
- 4) 山本民次, 橋本俊也, 松田治, 多田邦尚：瀬戸内海における植物プランクトン態 N:P 比とその変動要因, 水産海洋研究, Vol.63, No.1, pp.6-13, 1999.
- 5) 福岡市環境局：博多湾環境保全計画, 77pp., 福岡市環境局ホームページ <http://kankyo.city.fukuoka.lg.jp/shiryo/keikaku/keikaku4.html>, 2008.
- 6) 総務省：国勢調査結果, 総務省ホームページ <http://www.stat.go.jp/data/index.htm>, 2010.
- 7) 福岡県建築都市部下水道課：福岡県の下水道（平成 21 年度）, 2010.
- 8) 福岡県, 福岡市：博多湾特定水域高度処理基本計画, 2002.
- 9) 福岡市下水道局：平成 5～11 年度福岡市水処理センター管理年報, 1994～2000.
- 10) 福岡市環境局：福岡市水質測定結果報告書（1989～2009 年度版）, 1991～2011.
- 11) 洲上哲：博多湾の栄養塩環境とノリ養殖, 特集 海の貧栄養化とノリ養殖, 海洋と生物, Vol.31, No.2, pp.171-172, 2009.
- 12) 横山佳裕, 吉次祥子, 中嶋雅孝, 内田唯史, 中西弘：博多湾における栄養塩濃度の変化に伴う植物プランクトンの種の変化の解析, 土木学会論文集 B3（海洋開発）, Vol.67, 印刷中, 2011.
- 13) 福岡市道路下水道局：下水道の水質, 福岡市道路下水道局ホームページ <http://gesui.city.fukuoka.jp/sewer/quality/index.html>, 2010.
- 14) 気象庁：気象データ電子閲覧室, 気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, 2011.
- 15) 国土交通省計画局：国土数値情報, 国土交通省ホームページ <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 2010.
- 16) 水産庁九州漁業調整事務所：昭和 54 年～平成 22 年九州海域の赤潮, 1980～2011.
- 17) 内田唯史, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘：富栄養化海域の水質の非線形特性とそのモデリングに関する研究, 土木学会論文集, No.503, II-29, pp.187-195, 1994.
- 18) T.R. Persons, 高橋正征, B. Hargrave（高橋正征, 古谷研, 石丸隆監訳）：生物海洋学 1 プランクトンの分布/化学組成, pp.59-72, 東海大学出版会, 1996.
- 19) T.R. Persons, 高橋正征, B. Hargrave（高橋正征, 古谷研, 石丸隆監訳）：生物海洋学 2 粒状物質の一次生成, pp.61-72, 東海大学出版会, 1996.
- 20) 矢持進（吉田陽一編、日本水産学会監修）：水域の窒素：

- リン比と水産生物 水産学シリーズ 95, pp.84-95, 恒星社厚生閣, 1993.
- 21) 山口晴生, 足立真佐雄: 海洋真核植物プランクトンによる有機リンの利用 (総説), 日本プランクトン学会報, Vol.57, No.1, pp.1-12, 2010.
- 22) 松原賢, 長副聡, 山崎康裕, 紫加田知幸, 島崎洋平, 大嶋雄治, 本城凡夫: 渦鞭毛藻類 *Akashiwo sanguinea* に対する中心目珪藻類による増殖抑制作用, 日本水産学会誌, Vol.74, No.4, pp.598-606, 2008.
- 23) 松山幸彦, 内田卓志, 小谷祐一: ラフィド藻類 *Heterosigma akashiwo* および *Chattonella antiqua* の培養ろ液が珪藻類 *Skeletonema costatum* の増殖に及ぼす影響, 瀬戸内海水産研究所報告, No.2, pp.57-66, 2000.
- 24) 山本民次 (山本民次, 河野賢治, 藤田耕之輔編著): 沿岸海洋環境の崩壊ーリン負荷削減とダム建設による人為的貧栄養化, 「公開講座シリーズ3 私たちの生活と環境ー環境修復・改善にどう取り組むかー」, pp.55-74, 広大生物圏出版会, 2004.
- (2011.5.30 受付)

## A Study about the Introduction of Advanced Management of Nutrients for Enclosed Sea

Yoshihiro YOKOYAMA<sup>1</sup>, Yukako NAKANO<sup>1</sup>, Sachiko YOSHITSUGU<sup>1</sup>,  
Masataka NAKASHIMA<sup>1</sup>, Tadashi UCHIDA<sup>1</sup> and Hiroshi NAKANISHI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kyushu Environmental Evaluation Association

<sup>2</sup>Emeritus Professor of Yamaguchi University

In order to study management of nutrients for the harmony with buildup of biological productivity and aquatic environment, we calculated weather conditions and variations of nutrient loads flowing into Hakata Bay during the days when red tide was occurred. Furthermore, we estimated the nutrient loads required for reducing red tide frequency and considered ideal methods for nutrient management in a enclosed sea. Recent sewage treatment decreasing phosphorous and T-P loads were corresponded with the reduction of red tides caused by Diatoms and Raphidophyceae. On the other hand, the frequency of red tides caused by Dinoflagellates was high and lasted for longer periods.

The control of red tides at the time of high precipitation was difficult unless T-P loads could be reduced by improving sewage treatment levels or controlling the loads from non-point source. When precipitation was low, the reduction of red tides was possible with present loads. However, phosphorus loads in a dry season were run short to the requirements that red tides could be controlled.

Essentially, the concentrations of nutrients required for the healthy maintenance of the bay ecosystem were differed seasonally. We will continue to study proper load levels and effective management of nutrients in the future.