

博多湾における栄養塩流入負荷の適正化の検討

(一財)九州環境管理協会 環境部 後藤 祐哉・横山 佳裕

1. はじめに

博多湾(福岡市)は、玄界灘に生息する魚の稚仔等、多くの生物が生まれ育つ「ゆりかご」機能を持っており、漁業も盛んである。河口部には干潟が残存し、多くの野鳥が飛来するなど、多様な生物の生息空間となっている^{1,2)}。閉鎖度が高いため良港ではあるが、富栄養化や有機汚濁が進行しやすいという一面も有している³⁾。

湾流域では、福岡市をはじめとする流域市町の都市化に伴い、人口増加の傾向が著しく、流域人口は約200万人に達している⁴⁾。人口の増加に伴う発生負荷量は年々増加しており、湾流入負荷量の削減のために下水道整備が急速に進められている^{3,4)}。

福岡市では、1993年度から1999年度にかけて市内6か所の下水処理場での高度処理によるリン除去を導入している^{5,6)}。福岡県では、流域下水処理場(御笠、多々良浄化センター)で2004年度以降、高度処理設備が一部導入されている⁴⁾。その後、福岡市は窒素の高度処理も一部、導入しており⁷⁾、人口増加の傾向にはあるものの、博多湾のT-N濃度はほぼ横ばいで推移している(図1)⁹⁾。

2002~2011年度の環境基準の達成状況をみると(図2)、T-N、T-Pは概ね全ての海域で環境基準を達成しているものの、CODは、西部海域の湾口部を除くほとんどの地点で未達成の割合が50%以上⁹⁾となっている。また、冬季におけるリン不足によるノリ・ワカメ養殖の色落ち¹⁰⁾や栄

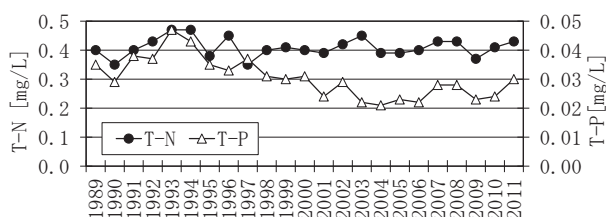


図1 T-N、T-Pの年平均値の経年変化⁹⁾より作成

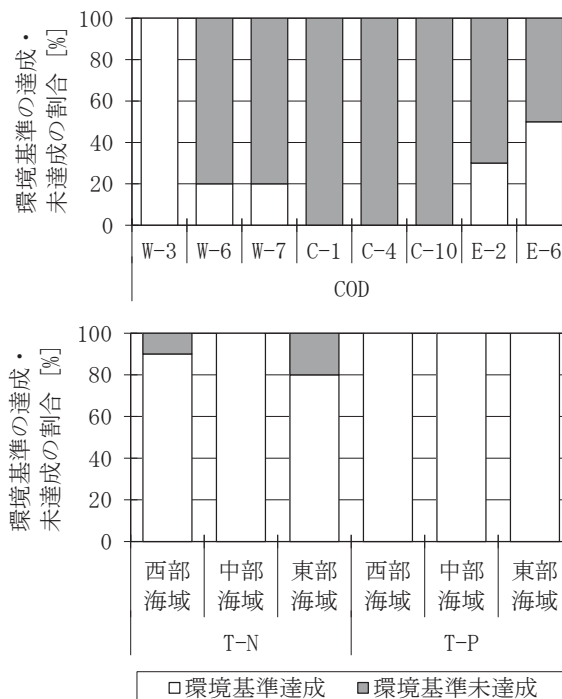


図2 COD、T-N、T-Pの環境基準の達成状況

養塩類の組成比変化に伴う植物プランクトン種の変化¹¹⁾などの問題も生じている。

そこで、本研究では博多湾における既存の調査結果⁹⁾を用い、「冬季のノリ・ワカメ養殖の生産力の向上」と、「CODの環境基準の達成」の2つの課題に対し、湾へ流入する窒素やリン負荷量の変動に伴うCODの変化を試算し、窒素

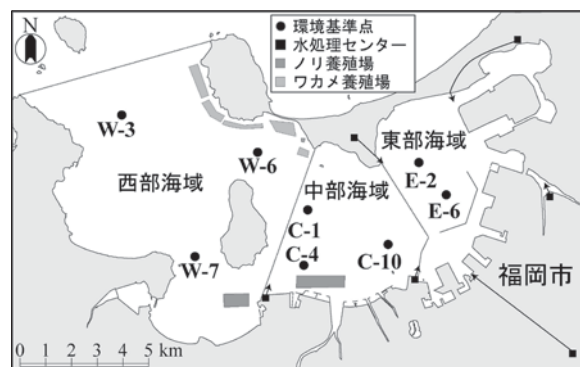


図3 環境基準点の位置

やリンの流入負荷量のあり方について考察した。

2. 解析方法

解析対象の地点は、**図3**に示す博多湾内の環境基準点8地点のうち、外海の影響を受けやすい湾口部のW-3を除く7地点とした。解析対象期間は1989～2009年度とした。

まず、博多湾への流入負荷量¹²⁾とT-N、T-Pの海域平均値の関係を西部・中部・東部海域のそれぞれで求めた。既存資料¹⁾に示されている1992、1997、2000、2002年度の負荷量算定結果¹⁾をもとに、「下水処理場からの負荷」、「合流式下水処理場からの負荷」、「その他の負荷」の3つの流入負荷要因別に^{4,6,13)}、下水放流量、放流水質、降水量¹⁴⁾、流域土地面積¹⁵⁾から1989～2009年度のそれぞれの年平均負荷量を試算した。次に、「下水処理場からの負荷」、「合流式下水処理場からの負荷」は毎月一定と仮定した上で、月別の流入負荷量を試算し、「その他の負荷」は年平均降水量¹⁴⁾に対する月平均降水量¹⁴⁾の比を乗じて月別流入負荷量を求めた。以上で求めた3つの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。

T-N、T-P濃度には、各地点における表層(海面下0.5m)、中層(海面下2.5m)、底層(海底上1.0m)の実測濃度⁹⁾の層平均の年平均値を海域別に平均したものをを用いた。

次に、懸濁態COD(P-COD)を内部生産由来のCODと見立てた上で、以下の中西ら(1994)の Δ COD法¹⁶⁾により内部生産効率 α_p を季節別(春季:3～5月、夏季:6～8月、秋季:9～11月、冬季:12月～翌2月)に算出し、T-N/T-P比と内部生産効率の関係を求めた。

$$\text{COD} = \text{D-COD} + \text{P-COD} = \text{D-COD} + \alpha_p \times \text{COD}_{\text{pn}}$$

ここで、COD、D-COD、P-CODにはT-N、T-Pと同様に、各地点における表層、中層、底層の実測濃度⁹⁾の層平均の季節別・海域別平均値を用いた。COD_{pn}はリン・窒素より内部生産可能なCODの理論的最大濃度であり、

$$\text{COD}_{\text{pn}} = 143 \times \min(\text{T-P}, \text{T-N}/7.24) / 2.26$$

より求めた¹⁶⁾。

これらの値を用いて、流入負荷量と海域水質の関係、T-N/T-P比と内部生産効率 α_p の関係をj用いて、窒素・リンの流入負荷量を変動させた場合の、COD濃度の値を季節別

に試算した。この試算結果から、CODの環境基準を満たしながら、生物生産を向上させる窒素・リンの流入負荷量の管理方法を考察した。

3. 結果及び考察

3.1 流入負荷量と水質の関係

博多湾へのT-P、T-Nの流入負荷量と海域別T-P、T-N濃度の関係を**図4**に示す。なお、海域のT-P、T-N濃度は、陸域等からの流入負荷が無ければ、外海水の濃度と同じとなることを想定し、ここでは各回帰式の切片に湾口部W-3のT-P、T-Nの同期間の層別平均濃度を与えた。

T-Pは、各海域ともに流入負荷量に比例して変動している。また、湾への負荷は、全体の約7割が東部海域に流入することから、東部海域での水質は流入負荷の変動に対する応答性が高く、回帰式の傾きは最も大きい。一方、外海水による希釈を受けやすく、湾に直接流入する負荷の割合が小さい西部海域では、傾きは最も小さい。T-Nは、流入負荷に対する変動傾向は、概ねT-Pと同様であったが、水温の変化に伴う底泥からの脱窒能の変動を含むため、T-Pに比べるとややばらつきがあり、特に底泥の脱窒等の影響を受けやすい東部海域で変動が大きい。

3.2 内部生産特性の算出

次に、 Δ COD法により求めた内部生産効率 α_p とT-N/T-P比の季節別の関係を**図5**に示す。

春季、夏季、秋季は、T-N/T-P比の上昇とともに α_p も上昇する傾向にあった。この要因には、次の2点が考えられる。

- 栄養塩類の濃度やバランス(T-N/T-P比)の変化に伴い植物プランクトンの種組成が変化し、T-N/T-P比の増加とともに内部生産効率 α_p も増加した。
- 栄養塩類濃度やその組成比によって生長の制限を受ける植物プランクトンでは、供給が限定されているリンの細胞内含量に対して、炭素量が大きくなる¹⁸⁾。これは、プランクトンの炭素/窒素比は生理学的に決まっているため、窒素が豊富にある場合には窒素をより多く取り込む“ぜいたく消費”を起こし¹⁷⁾、窒素を多く取り込んだ分だけ炭素も多くなるためである。これによ

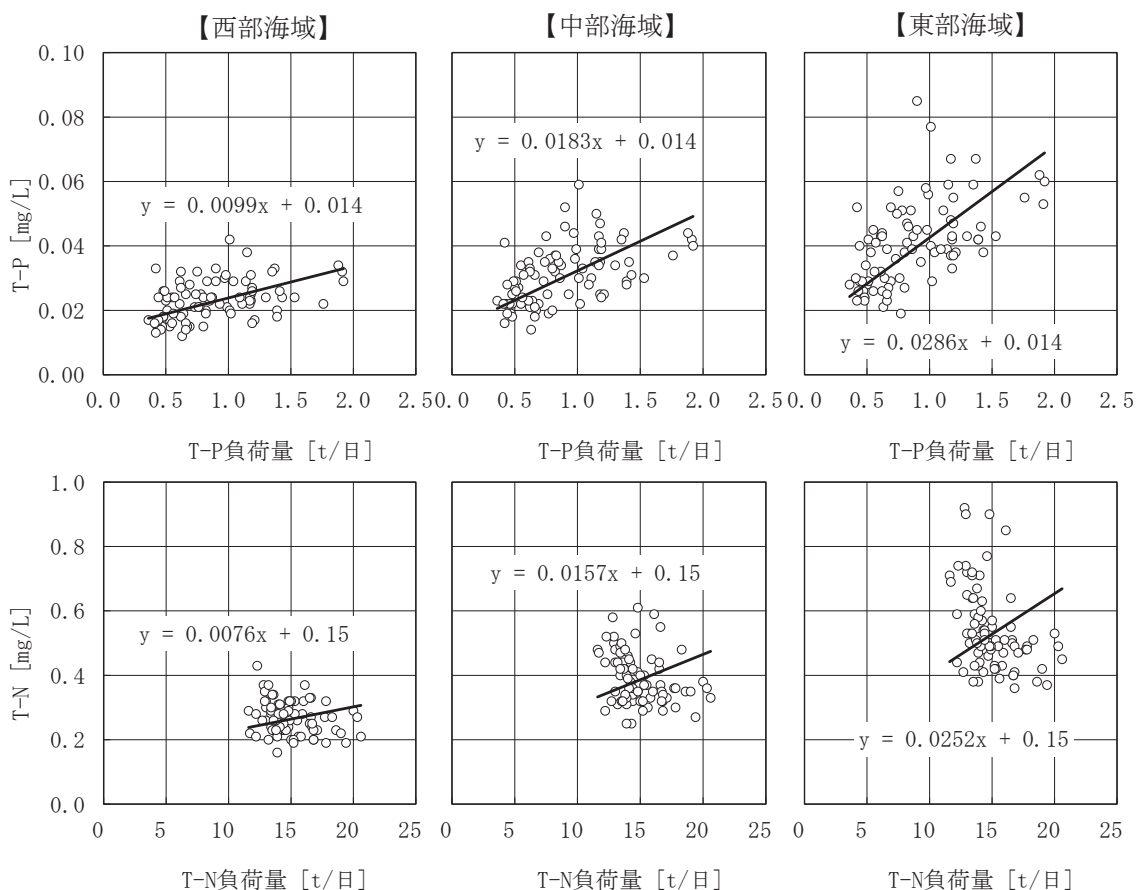


図4 流入負荷量と海域別水質濃度の関係

り、植物プランクトンの一細胞あたりの炭素量、つまり COD 量が増えて、内部生産効率 α_p が上昇した。

冬季は、T-N/T-P 比に対する内部生産効率 α_p の変動が小さかった。これは、気温の低下、全日射量の減少により、植物プランクトンの活動が鈍化し、必ずしも栄養塩類の量や組成比の増減に伴い内部生産量が変動するわけではないためと考えられる。

3. 3 流入負荷量の変動に伴う COD や N/P 比の変動

T-N、T-P 負荷量と水質の関係、及び内部生産効率 α_p と T-N/T-P 比の関係をを用いて、T-P、T-N 負荷量を変動させた場合の COD 濃度を試算し、負荷量と COD の関係を整理した結果を図6に示す。横軸は、2005～2009 年度の季節別 T-P、T-N 負荷量に対する試算に与えた負荷量の比である。なお、COD 環境基準値は、西部海域と中部海域が 2mg/L、東部海域が 3mg/L である。

T-P 負荷量と COD の関係をみると、T-P 負荷量を半分（負荷量比 0.5）にした場合でも環境基準を超過するケースは、西部海域で夏季、秋季、中部海域で春季、夏季、秋

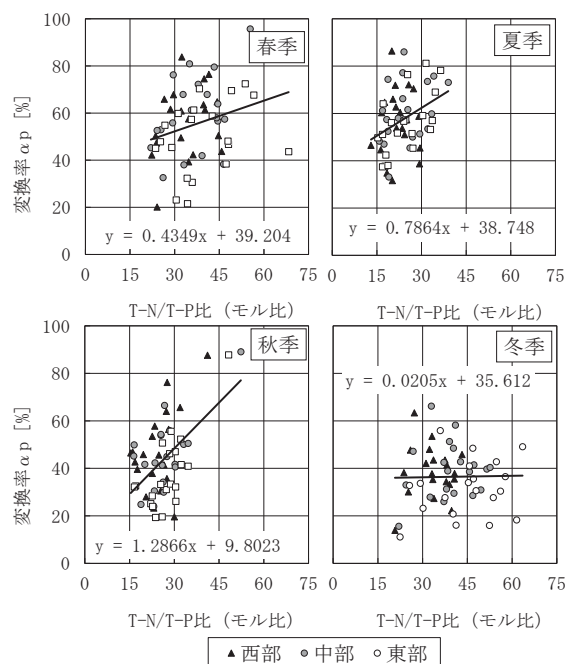


図5 内部生産効率 α_p と T-N/T-P 比の関係

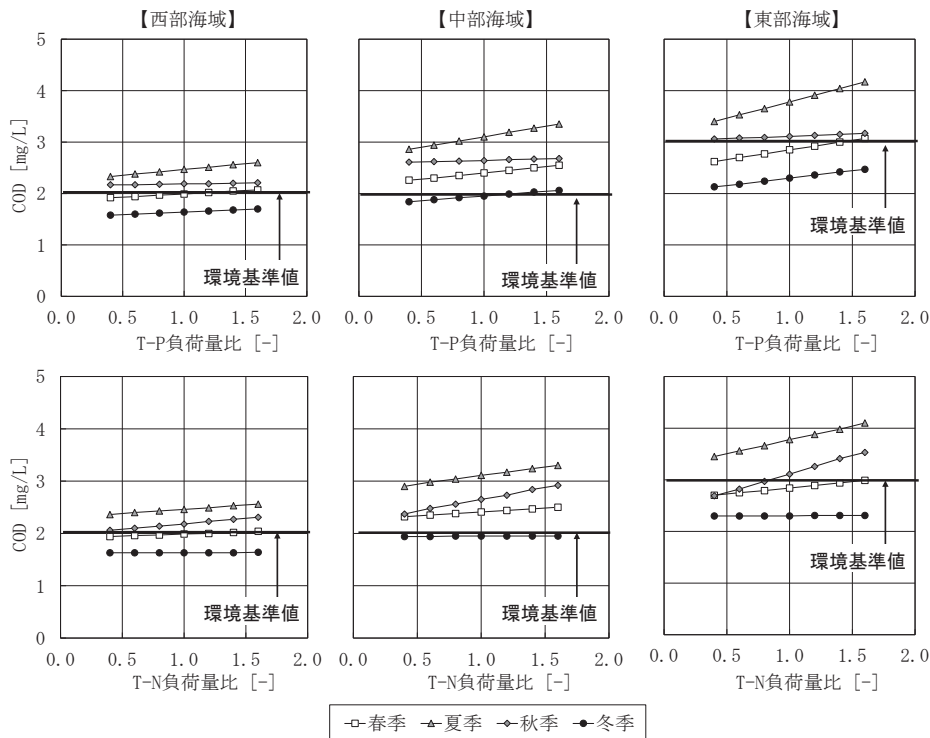


図6 T-N、T-P 負荷量と COD の関係

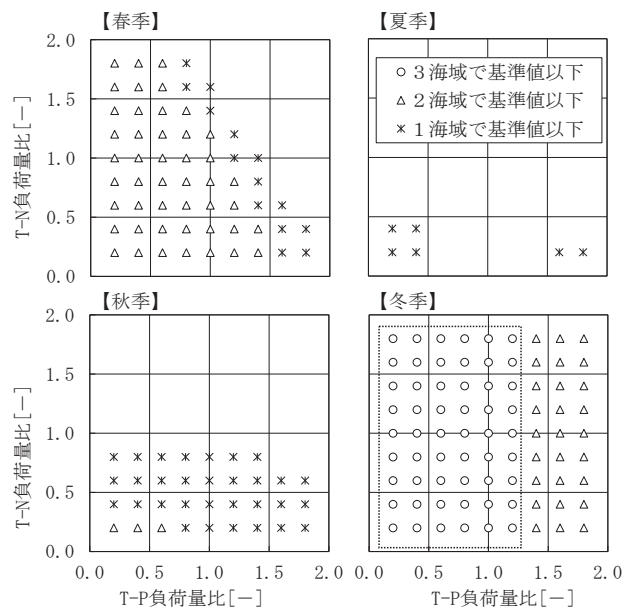
季、東部海域で夏季、秋季であった。一方、冬季は負荷量を現状の 1.5 倍（負荷量比 1.5）にした場合でも、西部海域、東部海域では環境基準値を下回る結果となった。

T-N 負荷量と COD の関係をみると、T-N 負荷量を半分（負荷量比 0.5）にした場合でも環境基準を超過するケースは、西部海域で夏季、秋季、中部海域で春季、夏季、秋季、東部海域で夏季であった。一方、冬季は負荷量を現状の 1.5 倍（負荷量比 1.5）にした場合でも、全海域で環境基準値を下回る結果となった。

現状の T-N、T-P 負荷量の変動に対して、各海域において環境基準値の超過の有無を整理した結果を図 7 に示す。春季、夏季、秋季には T-N、T-P 負荷量を減らしても、全海域で環境基準値を上回ると試算された。これは、5 カ年の季節別 D-COD 平均濃度（溶存態 COD）が西部海域で 1.2~1.5mg/L、中部海域で 1.4~1.8mg/L、東部海域で 1.7~2.1mg/L であり⁹⁾、西部・中部海域では環境基準値(2mg/L)の 3/4 前後、東部海域が環境基準値 (3mg/L) の半分前後に相当する濃度となっており、植物プランクトンの光合成により生産される P-COD がわずかであっても、環境基準値を上回りやすくなっているためである。

そこで、湾口部 W-3 における D-COD の濃度（季節別平

均濃度：1.0~1.3mg/L）を外海水の濃度と仮定し、各海域でその濃度を上回る分が陸域からの寄与分と仮定すると、陸域からの寄与分は、西部海域が 0.2~0.3mg/L、中部海域が 0.4~0.6mg/L、東部海域が 0.6~0.9mg/L と試算される。この寄与濃度が半分となった場合の、現状の T-N、T-P 負



※図中の空白は 3 海域ともに基準値超過を示す。

図7 T-N、T-P 負荷量の変動と COD 基準超過の有無

荷量の変動に対して、環境基準値の超過の有無を整理した結果を図8に示す。これを見ると、春季ではT-P 負荷量が半分以下にすると全ての海域で、夏季はT-P 負荷量を半分以下にすると1 海域（東部海域）で、秋季はT-N 負荷量を半分以下にすると2 海域（西部海域・東部海域）で環境基準値を下回ると試算された。このように、植物プランクトンの増殖を抑制し、植物プランクトンにより生産されるP-COD を減少させるだけでなく、D-COD も抑制・減少させると環境基準値を下回ることができることが示された。ただし、D-COD 流入負荷の削減にあたっては、陸域からのD-COD 流入負荷の起源等の実態把握と、そのD-COD を削減させるための技術開発が課題に挙げられる。

一方、ノリやワカメの色落ちが生じやすい冬季（12 月～翌2 月）の状況は、T-P 負荷を現状の約1.2 倍（負荷量比約1.2）まで増やしても、いずれの海域も環境基準値を下回ると推測された。

そこで、T-P 負荷量を現状の1.2 倍（負荷量比1.2）に増やした場合、図9より、各海域のT-P 濃度は現状（負荷量比1.0）と比較して、西部海域で約0.001mg/L、中部海域で約0.002mg/L、東部海域で約0.003mg/Lの増加と予測される。冬季における海域別のT-P 及びノリやワカメなどの栄養源となるとPO₄-P（無機態リン）の平均濃度は表1に示

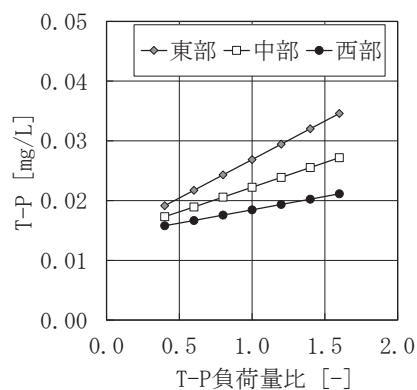


図9 T-P 負荷量の変動とT-P の関係

表1 T-P 濃度の増分から推測されるPO₄-P 濃度の増分

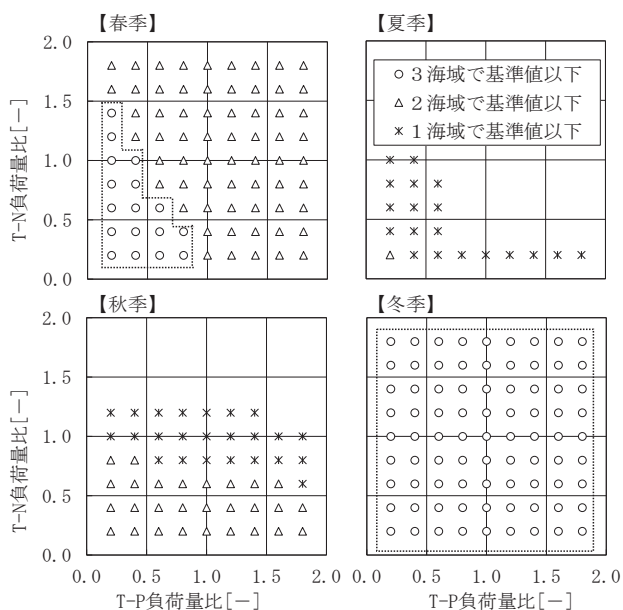
項目	海域		
	西部	中部	東部
T-P [mg/L]	0.018	0.024	0.033
PO ₄ -P [mg/L]	0.006	0.007	0.012
PO ₄ -P/T-P比 [-]	0.333	0.292	0.364
T-P増分 [mg/L]	0.001	0.002	0.003
PO ₄ -P増分 [mg/L]	0.000	0.001	0.001

すとおりである。これに前述のT-P 濃度増分が、PO₄-P/T-P 比に比例してPO₄-P 濃度も増加すると仮定すると、海域別のPO₄-P 濃度の増分は表1に示すとおりとなる。これによると、T-P 負荷量を約1.2 倍に増やしても、西部海域におけるPO₄-P 濃度はほとんど増加しないが、中部・東部海域ではわずかに増加すると予測された。水産用水基準によると、ノリの生長に必要なリン濃度は0.007~0.014mg/Lといわれており¹⁹⁾、現状の中部海域の濃度は必要濃度の下限値付近である。気象状況等により下限値を下回る可能性があるが、T-P 負荷量を約1.2 倍とすることで、必要なリン濃度を確保しやすくなると考えられる。

4. おわりに

本研究では、夏季の海域のCOD の改善、冬季のノリ、ワカメ養殖の改善に着目し、窒素、リン負荷量の削減量、増加量について考察を行った。

春季、夏季、秋季にはリン負荷量を削減だけでなく、D-COD を削減することで、COD が環境基準値を下回りやすくなると試算された。一方で、冬季にリン負荷量をやや増やしても、COD の環境基準値は下回るものであり、ノリやワカメの色落ち等の軽減に対して、わずかに効果が期待できると予測された。



※図中の空白は3 海域ともに基準値超過を示す。

図8 陸域からのD-COD 負荷の寄与を半分にした場合のT-N、T-P 負荷量の変動とCOD 基準超過の有無

今回の検討結果は、湾全体の水質改善を目的とした検討であるが、湾内に局所的に位置するノリ、ワカメの養殖場水質の改善には、対象近傍での負荷量配分の検討や養殖場での施肥の投入等も対策として検討する必要がある。さらに、T-N/T-P 比の増加に伴う植物プランクトンの種の変化¹⁾などの問題解決にあたっては、水域の生態系や漁業資源の保全のための、季節や水域利用に応じた栄養塩類の要求量を検討する必要がある。

今後は、本研究で得られた結果を用いて数値モデル化を試み、COD などの環境基準の達成とノリやワカメの色落ち軽減とのバランスについて、検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 福岡市環境局 (2008) 博多湾環境保全計画、p.95、福岡市ホームページ
- 2) 福岡市農林水産局 (2012) 福岡市水産業総合計画、福岡市ホームページ
- 3) 総務省 (2010) 国勢調査結果、総務省ホームページ福岡県建築都市部下水道課 (2010) 福岡県の下水道 (平成 21 年度) .
- 4) 福岡県、福岡市 (2002) 博多湾特定水域高度処理基本計画.
- 5) 福岡市下水道局 (1994~2000) 平成 5~11 年度福岡市水処理センター管理年報.
- 6) 福岡市環境局 (2013) 博多湾に係る施策・調査結果 (平成 24 年度調査結果)、福岡市ホームページ.
- 7) 福岡市総務企画局 (2013) 「福岡市の人口が 150 万人を突破!」、福岡市ホームページ.
- 8) 福岡市環境局 (1991~2013) 福岡市水質測定結果報告書 (平成元~23 年度) .
- 9) 淵上哲 (2009) 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.
- 10) 横山佳裕、吉次祥子、中嶋雅孝、内田唯史、中西弘 (2011) 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、No.2、pp.I_340-I_345.
- 11) 横山佳裕、中野裕香子、吉次祥子、中嶋雅孝、内田唯史、中西弘 (2011) 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、土木学会論文集 G (環境)、Vol.67、NO.7、pp.III_203-III_201.
- 12) 福岡市道路下水道局 (2010) 下水道の水質、福岡市道路下水道局ホームページ.
- 13) 気象庁 (2011) 気象データ電子閲覧室、気象庁ホームページ.
- 14) 国土交通省計画局 (2010) 国土数値情報、国土交通省ホームページ.
- 15) 中西弘、浮田正夫、宇野良治 (1976) 海域における COD 生産について、用水と廃水、Vol.24、No.6、pp.43-46.
- 16) T.R. Persons、高橋正征、B. Hargrave (1996) 「生物海洋学 2 粒状物質の一次生成」(高橋正征、古谷研、石丸隆監訳)、pp.61-72、東海大学出版会.
- 17) T.R. Persons、高橋正征、B. Hargrave (1996) 「生物海洋学 1 プランクトンの分布/化学組成」(高橋正征、古谷研、石丸隆監訳)、pp.59-72、東海大学出版会.
- 18) 社団法人 日本水産資源保護協会 (2006) 水産用水基準 (2005 年版)、p.16、社団法人 日本水産資源保護協会.