

福岡湾の水質環境の長期変動について

片山 幸恵・江藤 拓也・江崎 恭志
(研究部)

福岡湾の水質環境を長期的に解析し、変動特性と要因を検討した。水温は冬季の底層で上昇傾向にあった。栄養塩濃度については窒素・リンとも湾奥部が湾口部よりも高く、長期傾向としてT-P（全リン）、 $PO_4\text{-P}$ （溶性無機態リン）が大きく減少し、下降傾向にあったが、T-N（全窒素）、DIN（溶性無機態窒素）は上昇傾向であった。また、下水処理量と栄養塩濃度との関係では、DINについては湾奥部表層で有意な正の相関がみられ、T-P、 $PO_4\text{-P}$ では湾奥部表層・底層で有意な負の相関がみられた。Chl-a濃度についても栄養塩濃度と同じく湾奥部が高く、長期傾向としては大きく減少し下降傾向にあった。植物プランクトン増殖の制限要因となる栄養塩を季節別に検討したところ、 $PO_4\text{-P}$ は表層で冬季から夏季、底層で冬季から春季に制限要因になると考えられた。

キーワード：福岡湾、水質環境、水温、窒素、リン、Chl-a濃度

福岡湾は、九州最大の都市である福岡市に隣接する水深の浅い閉鎖的な内湾である。高度経済成長期以前の福岡湾には多様な生物が生息し生物生産機能は高く、また干潟やアマモ場等が形成される環境浄化機能の高い湾であった。高度経済成長期以降、福岡市をはじめ周辺都市から多量の栄養塩が負荷され、さらには人為的な環境改変等により、それらの機能は著しく低下した。

福岡市では、福岡湾の環境保全を図るため富栄養化対策として下水の高度処理を行い、リン等の除去を進めているが、福岡湾の漁場環境は夏季には湾奥部を中心に赤潮が発生し、底層では貧酸素水塊が形成されるなど生物に厳しい環境にある。

一方、漁業生産面からみると、湾内における漁獲量は減少傾向にあり、また養殖ワカメ、ノリが不作となるな

ど漁場の悪化が懸念される。

このため、漁場環境からみた福岡湾の現状を評価することを目的として、今回福岡湾の水質を長期的に解析し、その変動特性と要因を検討したので報告する。

方 法

福岡湾の水質の解析には、福岡市環境局が報告している「福岡市水質測定結果報告（1981～2006年）」の水温、栄養塩類濃度（T-N、T-P、DIN、 $PO_4\text{-P}$ ）、クロロフィルa濃度（以下Chl-aと記載）のデータを用いた。

解析に際しては、まず神菌¹⁾の方法により福岡湾を湾口部と湾奥部に海域区分するため、8観測点のうち3定点を湾口部、5定点を湾奥部とした（図1）。次に毎月の表層及び底層のデータを海域毎に平均した値を用いて、湾口部と湾奥部の表層及び底層の長期変動を整理した。

また、上記データのうち栄養塩類とChl-aについては、1981～2006年のデータを1980年代、1990年代、2000年代に3区分し、年代別季節別（1～3月：冬、4～6月：春、7～9月：夏、10～12月：秋）の長期変動の解析を行った。なお、検出限界以下の測定値については「0」として取り扱った。

水質の変動要因の解析には、1981～2006年の年間降水量、日照時間、下水処理量のデータを用いた。降水量、日照時間については福岡管区气象台のデータ、下水処理量は福岡市下水道局の「水処理センター管理年報」である。

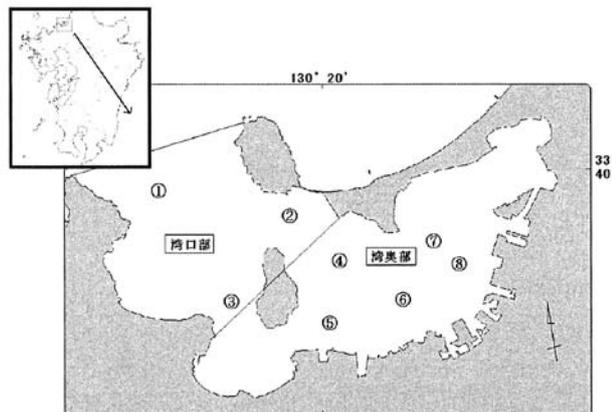


図1 調査定点図

結 果

1. 水質環境の長期変動

(1) 水温

水温の月平均値、13月移動平均値の推移を図2に、冬季及び夏季の年平均値の推移を図3に示す。なお、両図とも最小二乗法により求めた長期トレンドを示す直線を描いた。長期トレンドの直線に関しては、統計的に有意な場合には実線で、有意でない場合には点線で示した。

13月移動平均でみた水温変動については、湾口部（表層、底層）、湾奥部（表層、底層）とも有意な傾向はなく、この25年間で水温に有意な変動傾向は認められなかった。そこで、季節別水温に整理し水温が最も高くなる夏季と低くなる冬季の水温変動についてみると、冬季の湾口部底層で有意な上昇傾向がみられた。冬季の水温上昇は、福岡湾の外海に位置する筑前海でもみられる現象である。冬季の湾口部以外では有意な傾向は認められなかった。

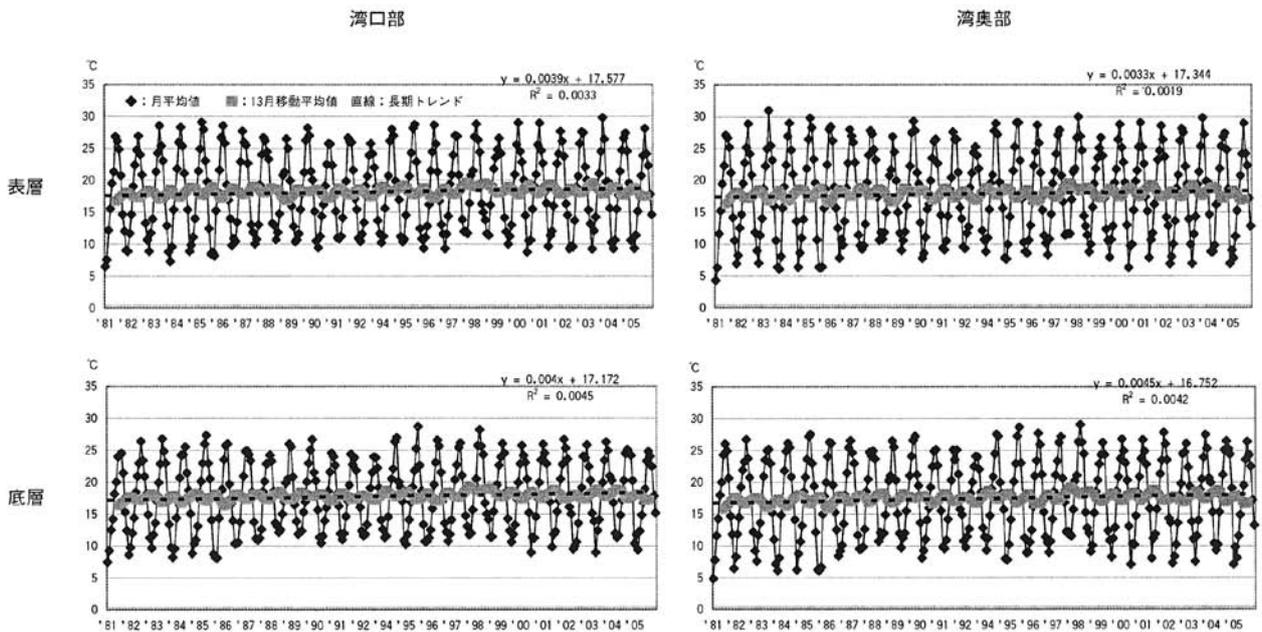


図2 水温の推移

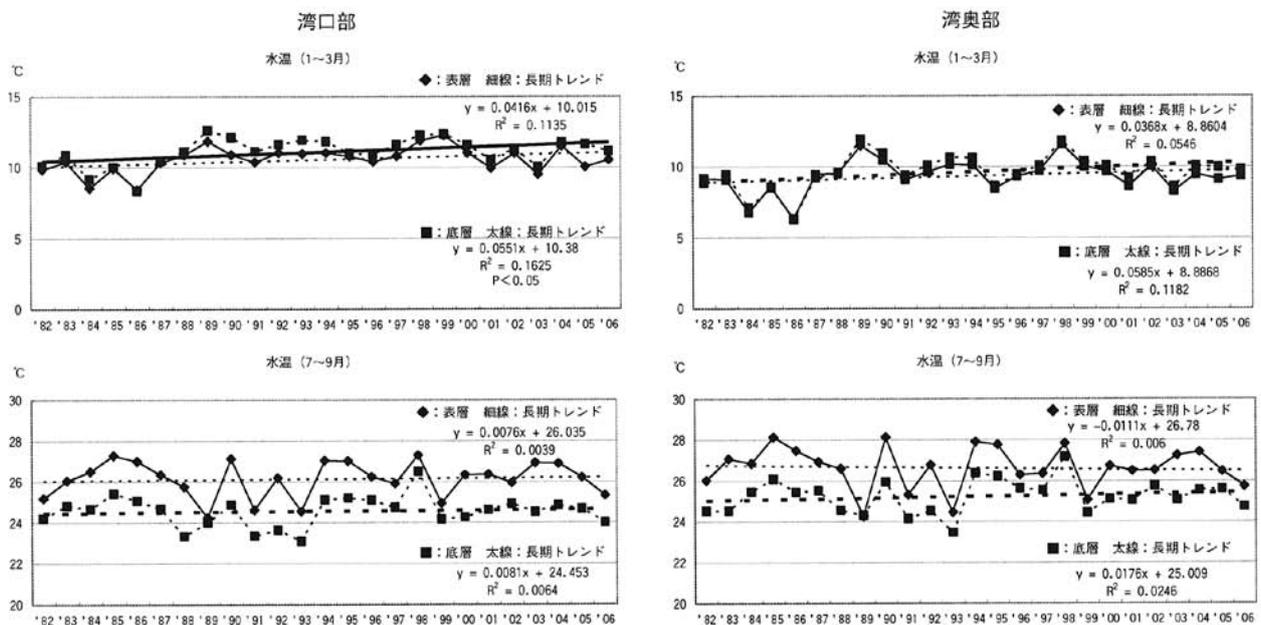


図3 時期別水温の推移

(2) 栄養塩

T-N, DIN, T-P, PO₄-P 濃度の月平均値の推移を図4～7に示す。水温の場合と同様に移動平均、長期トレンドを示す直線を示している。

13月移動平均でみたT-Nについては、巨視的には湾奥部が湾口部よりも高く、表層が底層よりも高い傾向を示している。最小二乗法による回帰直線でみた長期傾向として湾奥部では表層・底層とも有意な上昇傾向を示しており、湾口部では表層で上昇傾向にある。

DINについては、T-Nと同様の傾向を示し、湾奥部と表層で高い。長期傾向として湾口部底層を除いて有意な上昇傾向にあり、とくに湾奥部表層でその傾向が大きい。

T-P, PO₄-Pについては、湾奥部が湾口部よりも高い傾向を示しているが、表層と底層の違いは明瞭ではない。長期傾向として湾口部、湾奥部とも表層・底層で有意な下降傾向を示している。

このように栄養塩の長期的変動については、窒素は増

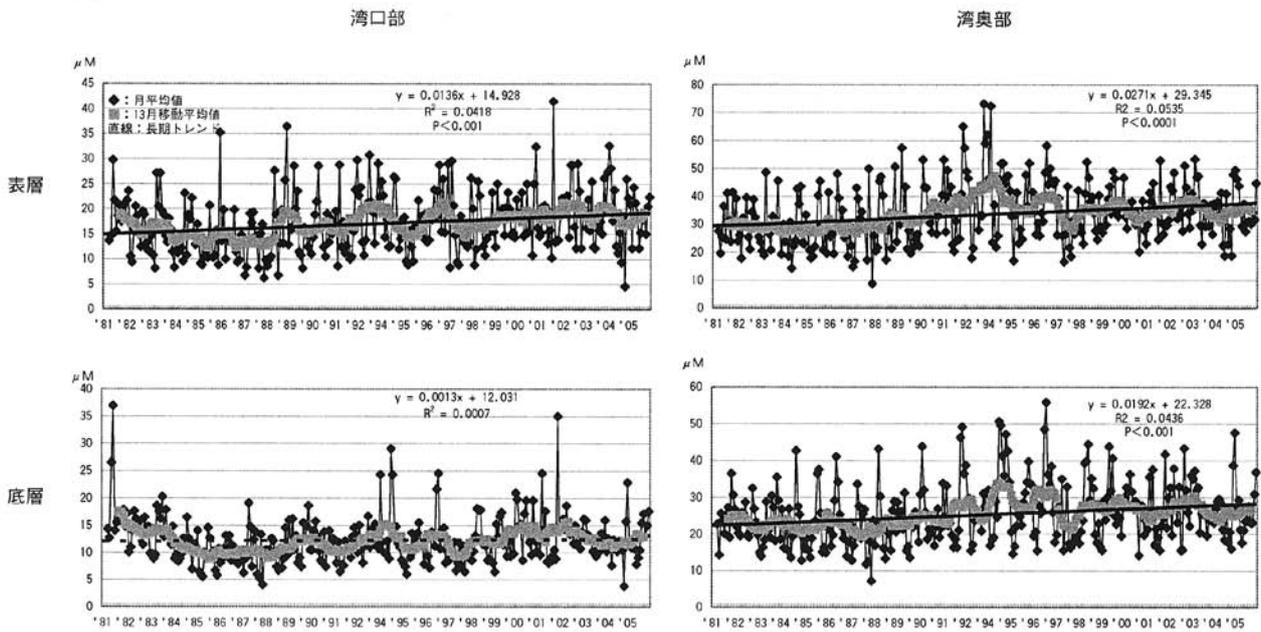


図4 T-N濃度の推移

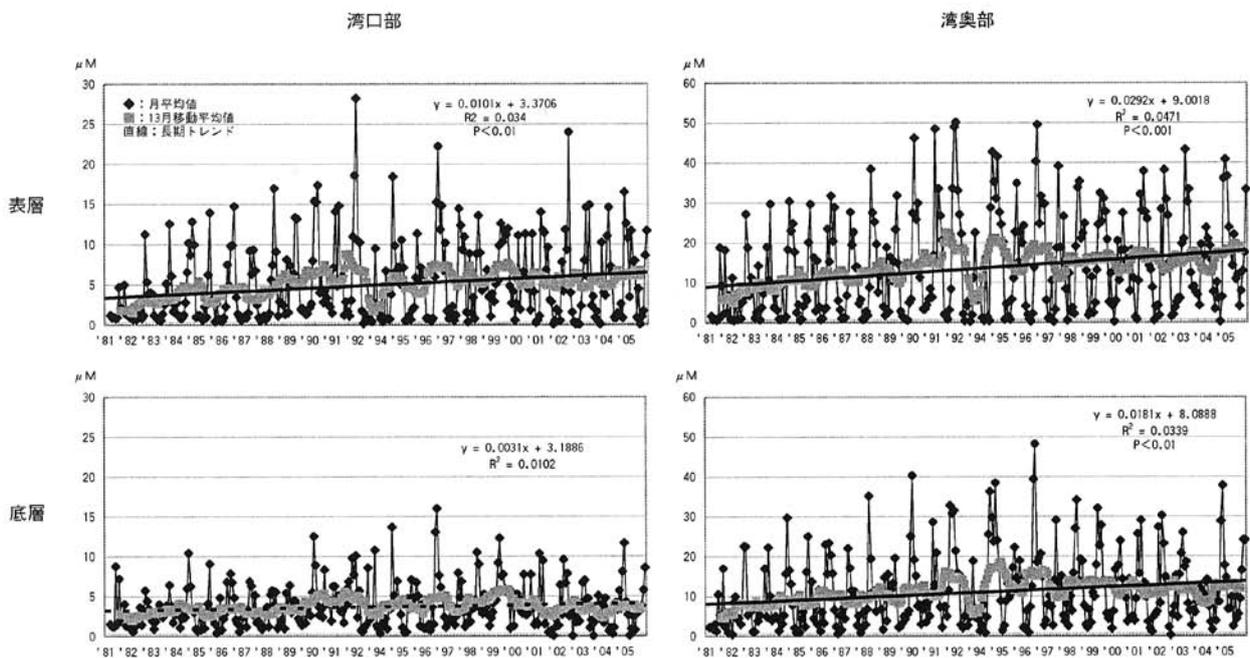


図5 DIN濃度の推移

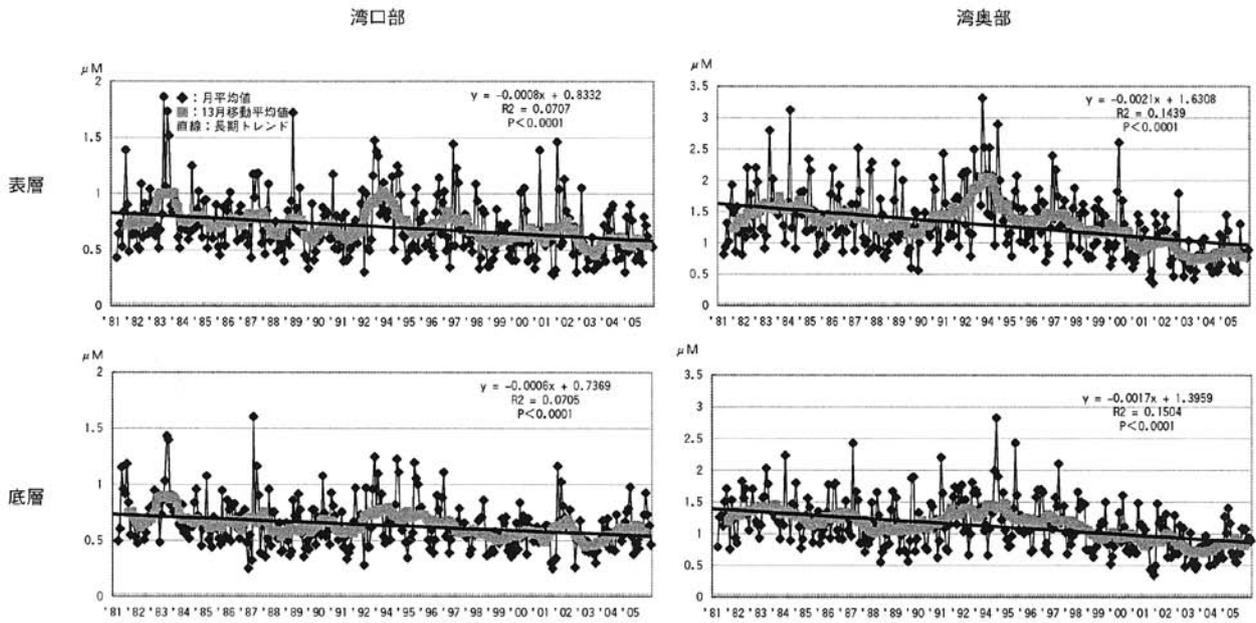


図6 T-P 濃度の推移

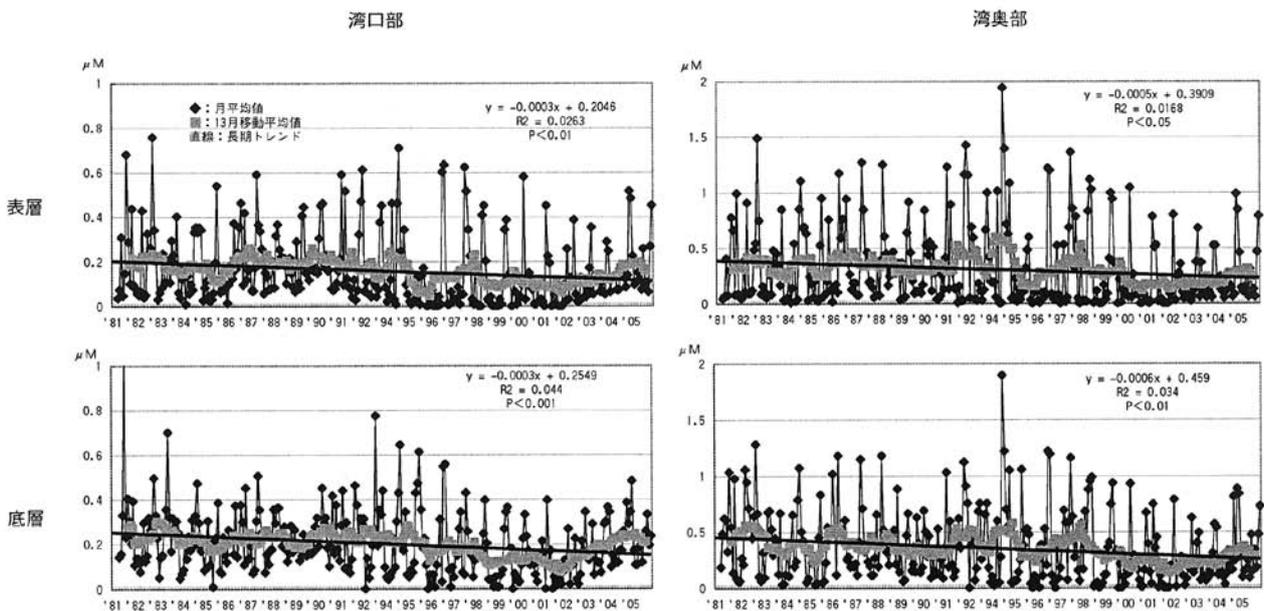


図7 PO₄-P 濃度の推移

加傾向にあり、リンは減少傾向にあるが、特にリンは福岡湾全域で減少している。

(3) 栄養塩の負荷要因

降水量及び下水処理量をそれぞれ図8, 9に示す。降水量については、1981～2006年に長期的な変動傾向は認められなかった。下水処理量については有意な増加傾向にあり、この25年間で1.5倍程度の処理量になっている。

そこで、処理水の影響を最も受ける湾奥部の栄養塩と

処理水の関係を図10に示す。T-Nについては、表層・底層とも処理量と有意な相関は認められなかったが、DINは表層で正の相関がみられた。一方、T-P、PO₄-Pでは表層・底層とも有意な負の相関がみられ、その傾向はT-Pで大きい。

このように下水処理量が増えるほど、リンは減少する傾向にあるが、窒素についてはなぜ表層のDINだけで有意なのかは今後の検討が必要である。

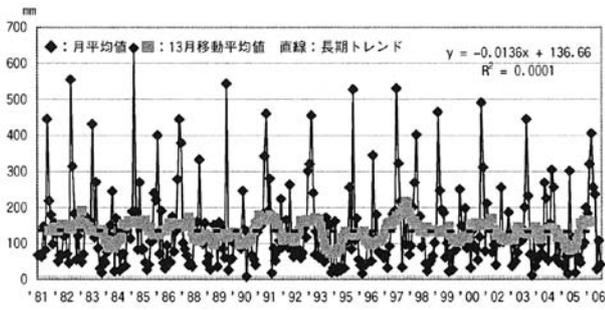


図8 月別降水量の推移

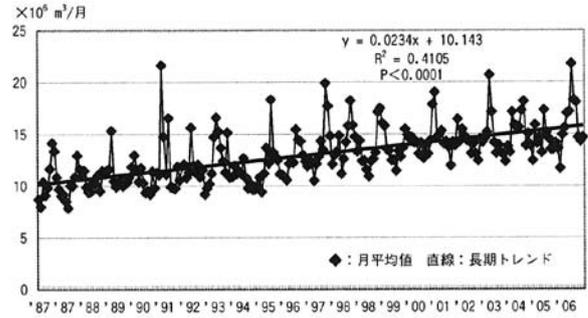


図9 下水処理量の推移

(湾奥部)

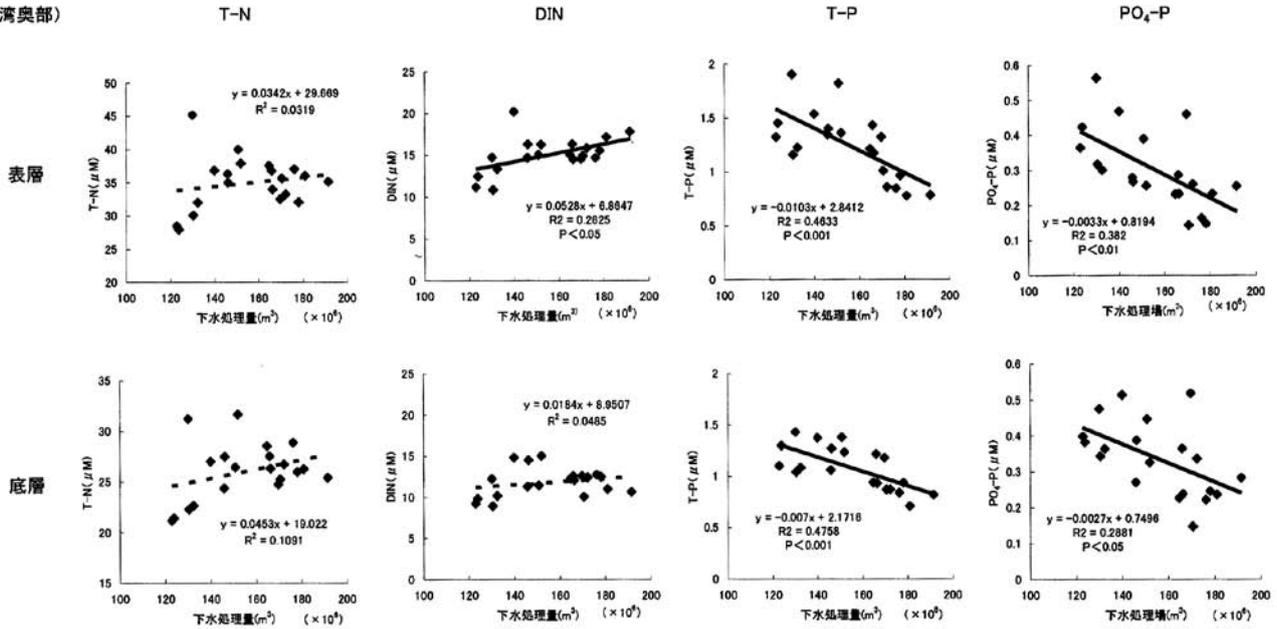


図10 下水処理量と湾奥部栄養塩濃度の関係

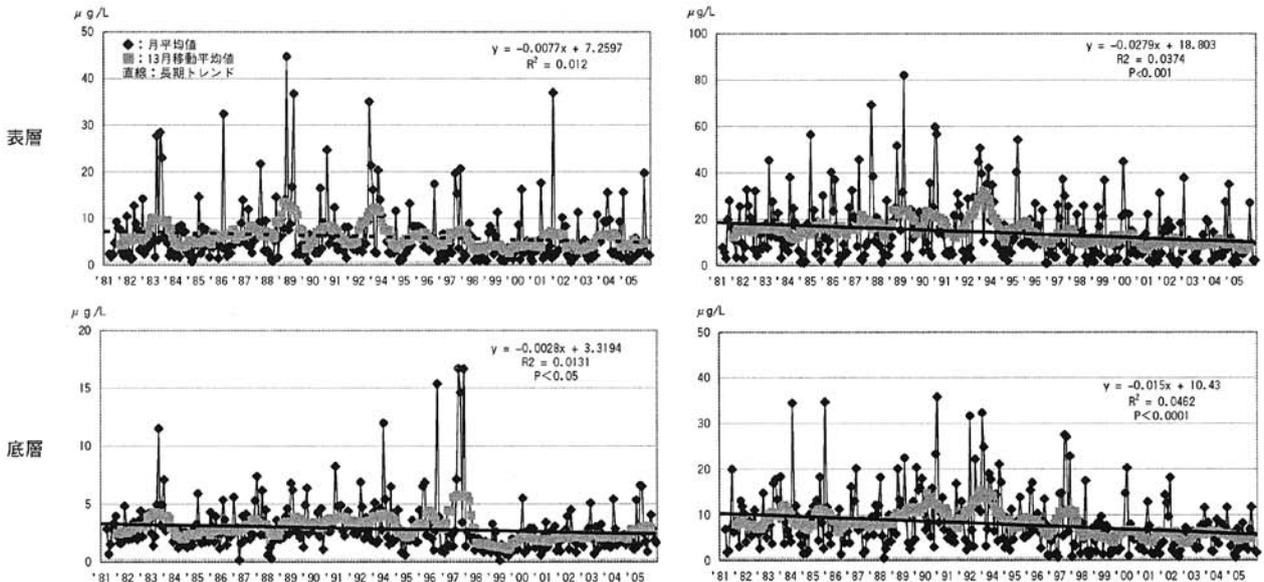


図11 Chl-a 濃度の推移

(4) Chl-a 濃度

Chl-a 濃度の月平均値の推移を図11に示す。Chl-a は湾奥部が湾口部よりも高く、表層が底層よりも高い傾向を示している。長期的にみると Chl-a は T-P、 $PO_4\text{-P}$ と同様の変動を示し、湾口部の底層、湾奥部の表層・底層で有意な下降傾向を示している。

植物プランクトンの増殖に関する気象条件として日照時間が考えられるが、解析期間中に一定の傾向はみられなかった。

2. 年代別の窒素とリンの組成比

植物プランクトンが良好な増殖をするためには、栄養塩類が下限濃度以上で存在し、それらの組成比がある一定値に近いことが望ましいと考えられる。そこで、これまでに報告されている下限濃度 ($N: 1\mu\text{M}, P: 0.1\mu\text{M}$)²⁾ 及び組成比 ($N:P = 16:1$)³⁾ を基準として湾内の栄養塩と比較した。年代別・季節別の栄養塩の組成比を図12に示す。図には DIN、 $PO_4\text{-P}$ 濃度の下限値を点線で、N/P比16の値を実線で示した。

湾口部表層については、冬季に $PO_4\text{-P}$ が $0.1\mu\text{M}$ の下限

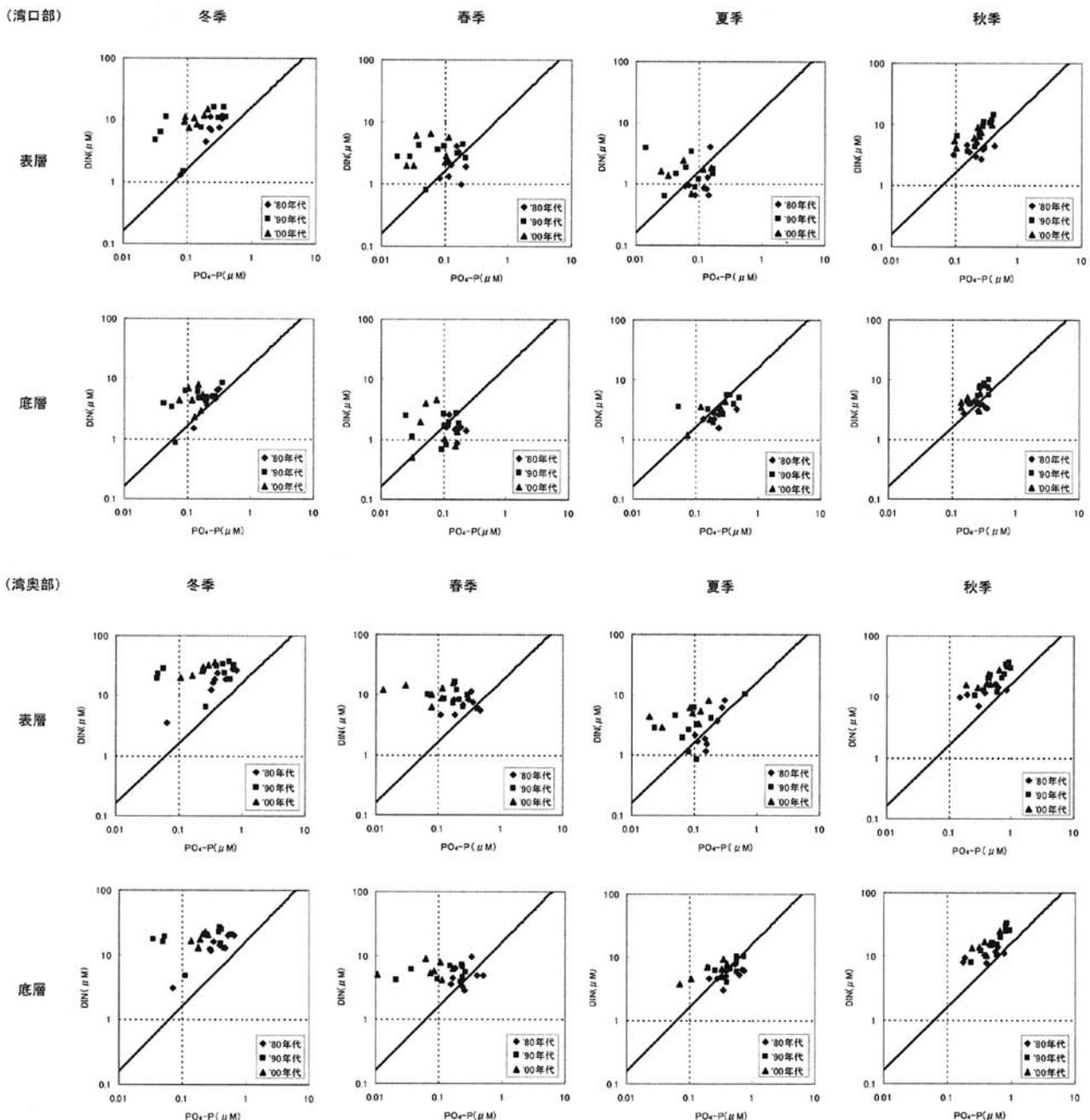


図12 年代別季節別栄養塩の関係

値を下回る年があり、この傾向は春季にさらに拡大する。夏季には $\text{PO}_4\text{-P}$ だけではなく DIN も $1\mu\text{M}$ の下限値を下回る年が増える。秋季には $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN とともに下限値を下回することはほぼなくなり、年間を通してレッドフィールド比に相当する直線付近に最も収束してくる。

湾口部底層については、冬季には湾口部表層と同じ傾向を示すが、春季になると湾口部表層の夏季と同じように $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN とともに下限値を下回る年がある。成層が強くなる夏季には底質から $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出することが知られており^{4) 5)}、福岡湾においても夏季に $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の不足はほぼ解消され、直線付近に収束してくる。この傾向は秋季まで持続する。

湾奥部については、表層は湾口部表層と同様の季節的な変動を示し、湾奥部底層は湾口部底層と同じ変動を示す。しかし、湾奥部が下限値を下回るのは $\text{PO}_4\text{-P}$ だけで、DIN が下限値を下回ることはないという点で湾奥部と湾口部は異なる。

このように DIN は夏季の湾口部表層と春季の湾口部底層でプランクトン増殖の制限要因となる場合があるが、基本的には充足されていると考えられる。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は表層では冬季から夏季、底層では冬季から春季に制限要因となる場合が多く、柳⁶⁾の報告と一致する。

また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が制限要因となるのは湾口部、湾奥部とも1980年代よりもむしろ1990～2000年代以降が多い。

3. 年代別のリンの季節変化

植物プランクトン増殖の制限要因となる $\text{PO}_4\text{-P}$ に関して、負荷の影響を最も受ける湾奥部の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を年代別月別に整理したものを図13、Chl-a 濃度を図14、月別降水量を図15、月別下水処理量を図16に示した。

湾奥部表層での $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変動は、平均的には冬季から夏季にかけて減少し、秋季から冬季にかけて上昇する周年変化を示している。一方、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度に関係する Chl-a、降水量、処理量は夏季にピークを迎える周年変化をする。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動を詳細にみると、1～5月の $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少期には、1980年代と1990年代との比較では $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動に年代間の明瞭な違いはない。しかしながら、2000年代は1980年代、1990年代年とは明らかに異なり濃度は常に低く推移している。このような $\text{PO}_4\text{-P}$ の傾向は Chl-a にもみられ、2000年代の Chl-a は他年代よりも低位に安定した傾向を示している。一方、下水処理量との関係では、2000年代の $\text{PO}_4\text{-P}$ は年代間で最も少なくなる反面、処理量は最も多くなる負の関係がみられる。

6～9月には湾内は成層期となり、1980年代と1990年代の $\text{PO}_4\text{-P}$ は漸減し、最も濃度の低い時期となる。2000

年代も同様の傾向を示すが、年代間で最も低い傾向が継続する。一方、Chl-a は $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動とは異なり増加傾向を示すが、2000年代の Chl-a は年代間で最も低い。この時期の $\text{PO}_4\text{-P}$ は底層からの供給は減少し、降雨・処理水等の淡水供給が増加し成層をさらに強くする。このため、降水量がほとんど同じである6、7月には各年代の $\text{PO}_4\text{-P}$ 、Chl-a の動向は年代によって異なり、また9月には各年代の Chl-a がほとんど同じであるが $\text{PO}_4\text{-P}$ 、降水量、処理量は異なるなど成層期の変動の複雑さが伺われる。

10～12月の $\text{PO}_4\text{-P}$ の増加期においては、1980年代より1990年代の方が $\text{PO}_4\text{-P}$ は常に高いものの両年代とも上昇傾向を示し、12月に年間のピークを迎える。しかしながら、2000年代は11月にピークとなり12月から減少傾向を示している。

一方、底層での $\text{PO}_4\text{-P}$ の季節変動は、冬季から春季にかけて減少し、夏季から冬季にかけて上昇する周年変化を示している。その変化を詳細にみると1～9月の1980年代と1990年代において $\text{PO}_4\text{-P}$ は3月を除いて1980年代で高い傾向を示し、2000年代は各年代の中で最も低く推移している。10～12月には表層と同様の傾向を示す。一方、Chl-a については、日射量等の条件もあり表層のような明瞭な季節変動はないものの年代間では常に2000年代が低くなっている。

このように湾奥部の $\text{PO}_4\text{-P}$ については、2000年代は他の年代の変動傾向とは異なり、常に濃度は低く推移し、12月のピークもなくなっている。この傾向は Chl-a についても同様に認められる。

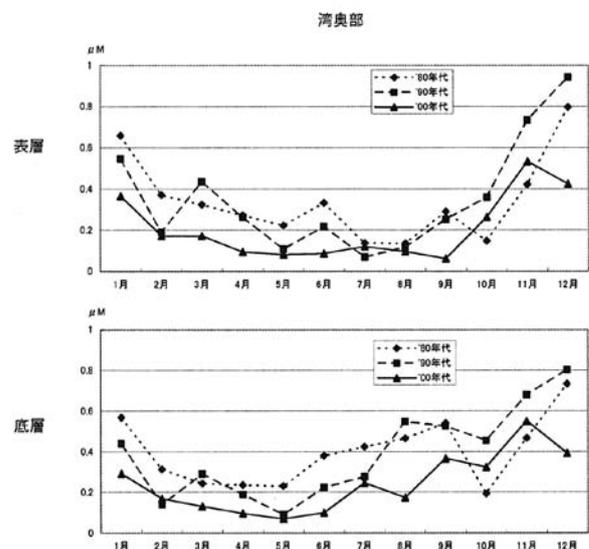


図13 月別 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変動

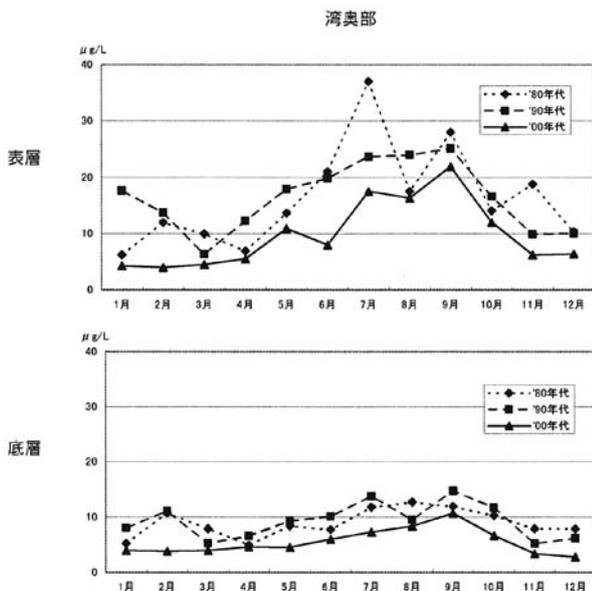


図14 月別 Chl-a 濃度の変動

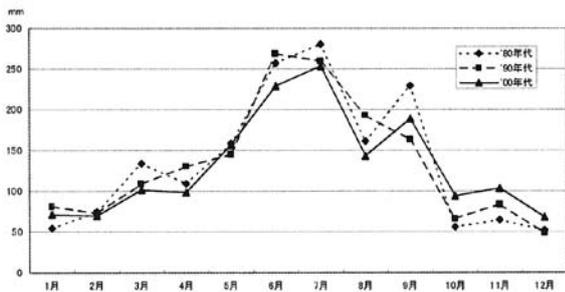


図15 月別降水量の変動

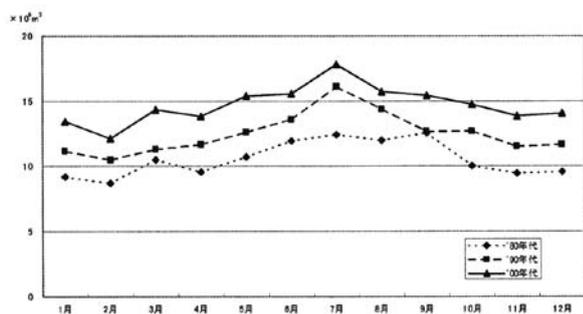


図16 月別下水処理量の変動

考 察

今回、福岡湾の25年間の水質データを解析した結果、窒素は長期的に増加傾向にあり、リンは減少傾向にあることが確認された。特にリンについてはT-P、PO₄-Pとも湾全域で減少傾向にあることも明らかとなった。

このような栄養塩の平均値を他海域と比較してみる

と、福岡湾と同じように閉鎖的な内湾である大阪湾では、表層DINとPO₄-P濃度の1985～1998年の平均値がDINでは11.8μM、PO₄-Pでは0.49μMであった。同時期の福岡湾湾奥部では、DINが14.14μMであり大阪湾の1.2倍大きく、PO₄-Pは0.37μMであり、大阪湾の7割であった⁸⁾。

福岡湾の湾奥部については、大阪湾よりN/P比が高い海域であると言えるが、福岡湾での窒素の増加、リンの減少は湾全体の傾向になりつつあり、この傾向が今後も継続するのであればN/P比はさらに高くなっていくことが予想される。

N/P比増加の要因であるPO₄-Pの減少は、植物プランクトン増殖の制限要因として直接的に植物プランクトンの生産能力に影響することが懸念される。実際、植物プランクトンに必要なPO₄-Pの下限濃度0.1μMを下回るのは1980年代より1990～2000年代に入ってから割合が高くなり、Chl-aは長期的に減少傾向を示している。

上野⁷⁾によると福岡市下水道の脱リンを目的とした高度処理導入が平成5年から11年にかけて行われ福岡湾内へのT-Pの負荷量が導入前と比較して半減し、その減少とChl-a濃度の減少との関連を報告している。今回の解析でT-P、PO₄-Pの減少と下水処理量とに負の相関関係があり、リンの減少が高度処理による影響である可能性が示唆されるため、今後もリンの供給量の増加が期待できない。

一方、近年福岡湾の湾外と湾口の海水交換率が大きくなっていることが報告されている⁸⁾。このことは湾口部の栄養塩濃度をさらに減少させるとともに湾口と湾奥間の栄養塩類の濃度差がより大きくなり、PO₄-Pの供給の減少と併せて今後さらにバランスの悪い海域へと変化することも予想される。

このように窒素の増加、リンの減少、それに伴うN/P比の増加など長期的な漁場環境の変化が漁場生産力に与える影響を検討すると、直接的な影響としてノリ養殖やワカメ養殖など栄養塩を直接吸収する植物が想定される。特にPO₄-Pが植物プランクトンに必要な下限濃度を下回り制限要因となるのは一年のうちで冬季の割合が最も高いため、これら養殖への影響は懸念されるであろう。一方、間接的には植物プランクトンの減少に伴い植物プランクトンに始まる食物連鎖で水産動物に影響する可能性もある。漁場環境の変化による漁業生産との関係は今後の課題であるが、そのためには海域の栄養塩の収支を検討することが必要であると考えられる。

文 献

- 1) 神菌真人：福岡湾の窒素・リン収支，沿岸海洋研究 Vol. 38, 131-138 (2001).
- 2) D. Justic：Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters：stoichiometric nutrient balance and its consequences, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Vol.40, 339-356 (1995).
- 3) 山口峰生・西島敏隆：植物プランクトンの増殖に及ぼすN:P比の影響，水産学シリーズ「水域の窒素：リン比と水産生物」，恒星社厚生閣11-28 (1993).
- 4) 佐々木克之：三河湾の夏季の海水交換と窒素の循環，沿岸海洋研究ノート Vol.16, 51-64 (1980).
- 5) 城久：大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について，大阪水産試験場研究報告 Vol.7, 1-174 (1986).
- 6) 柳哲雄：博多湾奥における水質の季節・経年変動，海の研究 Vol.17, 255-264 (2008).
- 7) 上野祐子：博多湾東部海域における栄養塩及びクロロフィル a の経年変化について，福岡市保健環境研究所報 Vol.28, 106-109 (2002).
- 8) 近藤明希子：福岡湾における水温長期変動とその要因，海の研究 Vol.14, 399-409 (2005).