

— 論文 —

博多湾奥における水質の季節・経年変動*

柳 哲雄[†]・石井 大輔[†]

要 旨

博多湾奥の上・下層における 1993～2006 年の毎月の水質観測データを解析し、博多湾奥における水質の季節・経年変動特性を明らかにした。

博多湾奥では 7 月に最も発達する成層構造が 9 月まで維持され、その間、水柱のクロロフィル *a* 濃度・COD・pH、表層の濁度が増加し、透明度が減少して、下層の低酸素化が進み、水柱の TP 濃度は増加し、TN 濃度は減少する。

また、近年博多湾の潮汐振幅が減少したことで、湾内の密度流が強化されて外海との海水交換がよくなり、底層の塩分上昇率が大きいため、湾奥の成層度は大きくなりつつある。またリン負荷量削減対策が進んで、湾内の TP 濃度は減少してきたので、水柱のクロロフィル *a* 濃度が減少して、透明度は増加、水柱の COD・濁度・pH は減少してきている。クロロフィル *a* 濃度減少の影響によって、酸素供給量が減少した結果、水柱の DO 濃度も減少してきている。

キーワード：内湾水質、季節変動、経年変動、リン削減影響

1. はじめに

博多湾は九州北部に位置する浅い閉鎖的内湾であるが、夏季の成層期には表層で赤潮、底層で貧酸素水塊が発生する富栄養状態にある。そこで、1993 年以降、沿岸からのリン・窒素負荷量の削減政策がとられてきたが、その効果がどの程度あがっているかは明らかにされていない。

本稿では、博多湾奥の 1 点で 1993～2006 年の毎月、上層と下層で得られた水質観測データを解析して、博多湾奥における水質の季節・経年変動特性を明らかにすることを試みる。

2. 解析データ

使用したデータは Fig. 1 に示した博多湾奥 Sta. H-1 (水深 4 m) の上層 (海面下 0.5 m) と下層 (海底上 1.0 m) で、福岡市港湾局が 1993 年 6 月から 2006 年 9 月まで、毎月第 1 水曜日 (荒天の場合は 1 週間後) に得た、水温 (T)・塩分 (S)・溶存酸素濃度 (DO)・透明度 (Tr)・濁度 (Tur)・クロロフィル *a* 濃度 (Chl. *a*)・全リン濃度 (TP)・全窒素濃度 (TN)・化学的酸素要求量 (COD)・pH である。水温はサーミスター、塩分はサリノメーター、濁度と pH は検定済みの水質計で計測された。また、DO はウインクラ法、クロロフィル *a* 濃度はアセトン抽出後に吸光法、全リンはペルオキシニ硫酸カリウム分解法、全窒素は銅・カドミウムカラム還元法、COD は過マンガン酸カリウム法で分析された。

この他に、湾奥海岸からの淡水・COD・TP・TN 負荷量 (Fig. 1 中の右上に矢印で示す)、福岡管区気象台

* 2007 年 7 月 24 日受領；2008 年 2 月 22 日受理
著作権：日本海洋学会，2008

[†]九州大学応用力学研究所 〒 816-8580 春日市春日公園 6-1
主著者 e-mail address : tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp

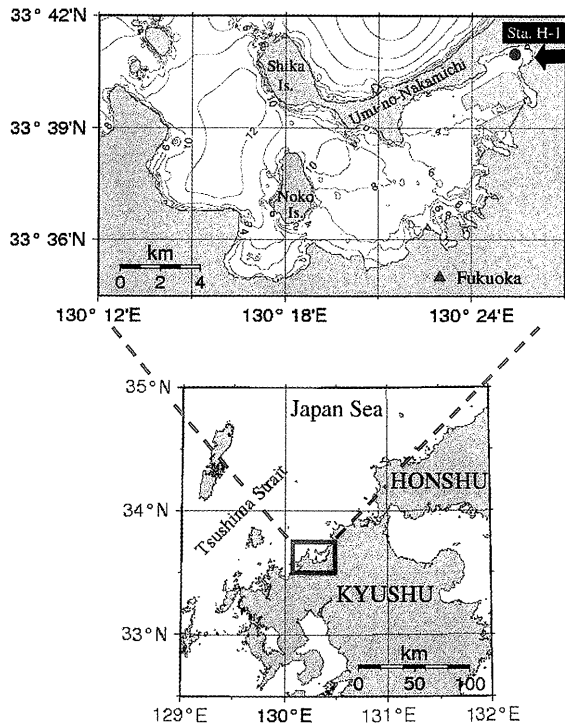


Fig. 1. Observation station, meteorological station (triangle) and outlet of COD, TP and TN (arrow). Numbers show the depth in meter.

(Fig. 1 中の右下に△印で示す) による同期間の日射量・降水量の観測データも解析した。

3. 解析結果

3.1. 季節変動

得られたすべてのデータを毎月平均して、各パラメータの平均的な季節変動を調べた。水温・塩分・密度(σ_t)・透明度・DO 濃度・DO 飽和度に関する季節変動結果を Fig. 2 に示す。縦棒は標準偏差の 1/2 を示す (グラフの上の棒については + の部分, 下の棒については - の部分のみ)。水温は、上・下層とも 8 月に最大値, 1 月に最低値をとる。上・下層の水温差は 5~8 月にかけて生じている。塩分は、降水量が大きくなる 6 月 (後述) の一か月後の 7 月に上・下層で最低値をとり, 4~9 月にかけて上・下層の差が顕著になる。その結果, 4 月から 9 月にかけて密度成層が発達する。

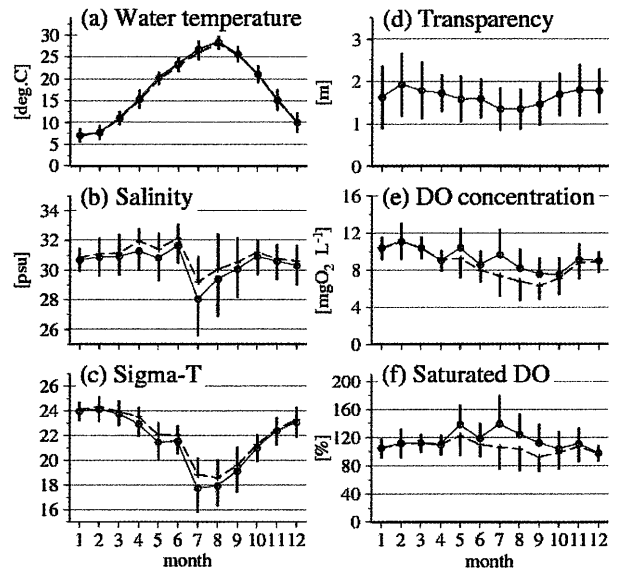


Fig. 2. Seasonal Variations in water temperature (a), salinity (b), sigma-t (c), transparency (d), DO (e) and saturated DO (f) in the upper (full line) and lower (broken line) layers. Vertical bar shows the standard deviation.

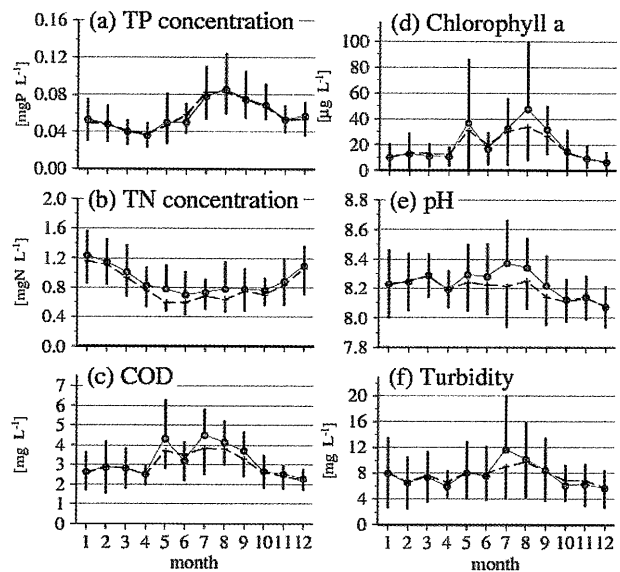


Fig. 3. Seasonal variations in TP (a), TN (b), COD (c), chlorophyll a (d), pH (e) and turbidity (f) in the upper (full line) and lower (broken line) layers. Vertical bar shows the standard deviation.

成層が形成されて一か月後の 5 月から 9 月にかけて、上・下層で DO 濃度に差が生じる。下層の DO 濃度と

DO 飽和度は成層期末期の 9 月に最低値をとる。上層の DO 飽和度は年間を通じて 100% 以上で、5 月と 7 月に極大値をとる。このことは博多湾の DO 濃度は海面を通じてのガス交換よりも水中の生化学過程によって主に決まっていることを示唆している。

TP・TN・COD・クロロフィル *a* 濃度・pH・濁度の季節変動を Fig. 3 に示す。TP は上・下層でほとんど差がなく、8 月に最大値をとる。これは海底からの溶出の影響だと考えられる。夏季には貧酸素化 (海底上 1 m は貧酸素化していなくても海底直上や海底泥内では貧酸素化する) の影響により、海底からのリン溶出フラックスが陸岸からのリン流入フラックスより大きくなる (Yanagi and Onitsuka, 2000; 神菌ら, 2001)。一方、TN は上層の方が下層より値が高く、夏季に低く、冬季に高くなる。これは、溶出よりも海底での脱窒の影響 (Yanagi and Onitsuka, 2000; 神菌ら, 2001) が大きいことを示唆していると考えられる。COD の極大値は 5 月と 7 月に現れるが、最大値は 7 月に現れる。これは後述するように、COD 負荷量の最大値が 7 月に現れるためである。濁度は COD とほぼ同様な季節変動をしていて、7 月に最大値をとる。また pH も上層の DO 飽和度と同様に 7 月に最大値をとる。光合成が活発になると、海水中の炭酸イオンが植物プランクトンに同化されて、海水はアルカリ化するからである。5 月も 7 月と同様にクロロフィル *a* 濃度と DO 飽和度は高いが、pH は 7 月ほど高くない。これは水温が低く、二酸化炭素の海中への飽和度が上がって、炭酸イオン濃度が 7 月よりも高いために因ると考えられる。クロロフィル *a* 濃度は 5 月と 8 月に極大値をとるが、これは 5 月と 8 月に日射量 (Fig. 5) が極大値をとることと対応している。一方、Fig. 2 に示した 5 月と 7 月の高い DO 飽和度は、高い基礎生産を反映していると考えられる。5 月は大きい日射量、上層の高い DO、高いクロロフィル *a* 濃度の位相が一致している。6 月は日射量 (Fig. 5) が小さくなるために、上層の DO 濃度・DO 飽和度は小さくなる。一方、8 月は日射量とクロロフィル *a* 濃度の位相は一致しているが、上層の DO・DO 飽和度は高くない。8 月はクロロフィル *a* 濃度は高いが、光合成活性そのものは 7 月ほど大きくないことを示している。成層が発達する 5 月～9 月の間透明度は低く

なり、7・8 月は 1.4 m となるが、他の月は 1.5 m 以上である。したがって、7・8 月を除いて、観測点 (H-1) の海底 (4 m) 付近まで有光層になっていると考えられる (橋本・多田, 1997)。その結果、下層の DO 飽和度も年間を通じて 90% を越えている。

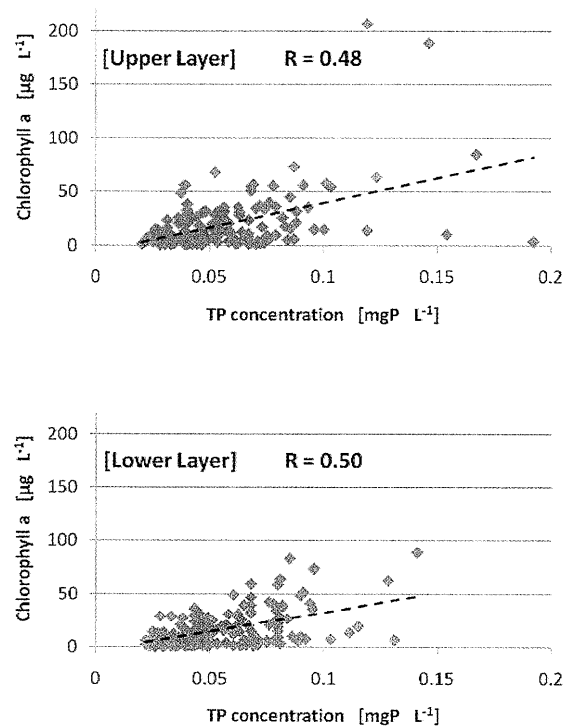


Fig. 4. Correlation between TP and chlorophyll *a* in the upper (upper) and lower (lower) layers.

Fig. 3 によると、TP とクロロフィル *a* 濃度の季節変動は夏季に大きな値をとり、冬季に小さな値をとるとい傾向が同様である。そこで、TP とクロロフィル *a* 濃度の相関関係を調べた。結果を Fig. 4 に示す。両者は上層・下層で統計的に有意な相関 ($p < 0.001$) を持っている。このことは博多湾の光合成がリンにより律速されていて、クロロフィル *a* 濃度が基本的にリン濃度に依存していることを示唆している。ちなみに TN とクロロフィル *a* 濃度の間に相関は見られなかった (図示しない)。また Fig. 3 の平均値を使って求めた TN/TP モル比は 33.7 で、レッドフィールド比の 16 よりはるかに大きい。このことは博多湾の光合成の律速栄養塩が窒素ではなく、リンである可能性の高いことを示唆

している (Yanagi and Onitsuka, 2000)。ただ、律速栄養塩に関しては、TP・TN の構成比を検討したり、溶存無機態リンと溶存無機態窒素の濃度を直接比較したり、現場海水に対する栄養塩添加実験を行ったりしないと、正確な結論は得られないので、TP・TN 濃度だけを用いた議論には限界がある。

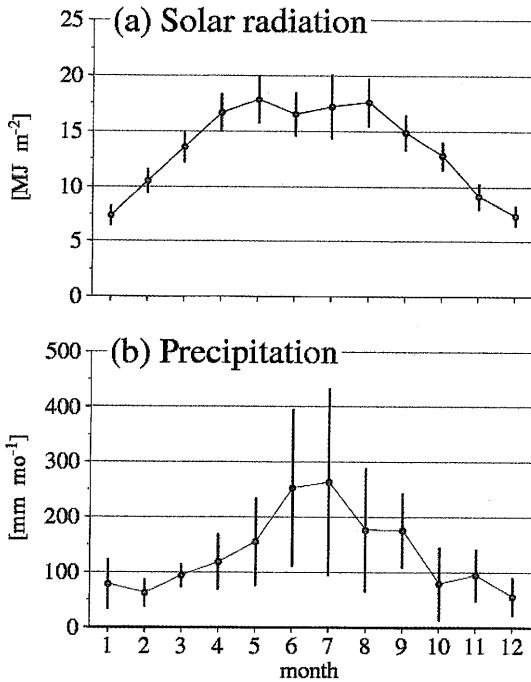


Fig. 5. Seasonal variations in solar radiation (a) and precipitation (b). Vertical bar shows the standard deviation.

福岡管区気象台で観測された日射量・降水量の季節変動を Fig. 5 に示す。日射量は 6・7 月の梅雨時期に低下して、5 月と 8 月に年 2 回の極大値をとる。また降水量は 6・7 月に多くなる。このことが 7 月に塩分の最低値を生じる原因である。

また観測点 Sta. H-1 のすぐそばにある小河川と下水処理場 (Fig. 1 の右上に矢印で流入点を示す) からの淡水流入量、COD・TP・TN 負荷量の季節変動 (1996, 1997 年の平均である。他の年の流入量・負荷量データはないが、他の年もほぼ同様な季節変動をしていると考えられる) を Fig. 6 に示す。COD 負荷量の季節変動は淡水流入量のそれに対応しているが、湾奥の COD 濃

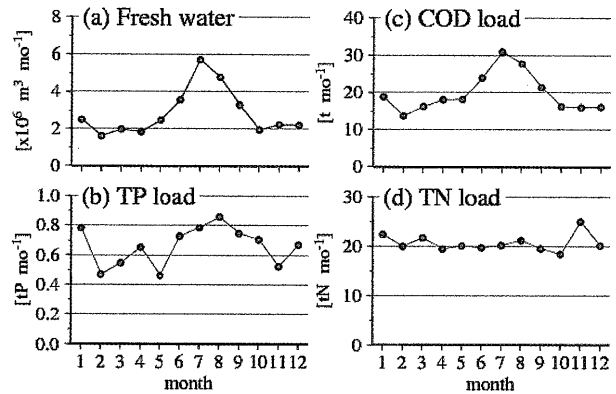


Fig. 6. Seasonal variations in fresh water discharge (a), COD (c), TP (b) and TN (d) loads from small rivers and sewage treatment plant, which are located at the head of Hakata Bay (arrow in Fig.1), averaged during 1996 and 1997.

度が 5 月に極大値をとることとは対応していない。このことは博多湾内の COD 濃度変動は、陸源 COD と湾内起源 COD の両方の影響によって決まっていることを示唆している。TP・TN 負荷量に顕著な季節変動は見られない。これらのことは、博多湾奥における COD・TP・TN 濃度の季節変動は、先述したような湾内の化学・生物過程の影響を大きく受けていることを示唆している。

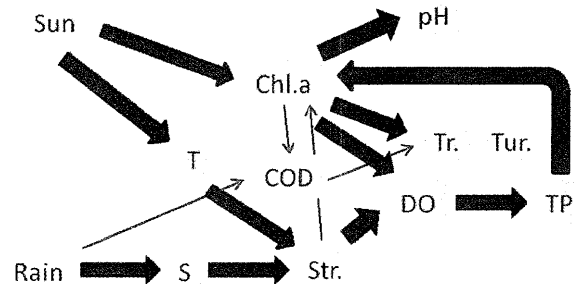


Fig. 7. Relations among seasonal variations in parameters estimated from their in situ data.

以上の気象・水質各パラメーターの季節変動特性の因果関係をまとめて、Fig. 7 に示す。矢印の太さは定性的な関係の大きさを表している。博多湾における水質の季節変動に最も大きな影響を与えている要因は、Figs. 2・3・5 に示されているように、日射 (Sun) と降水 (Rain)

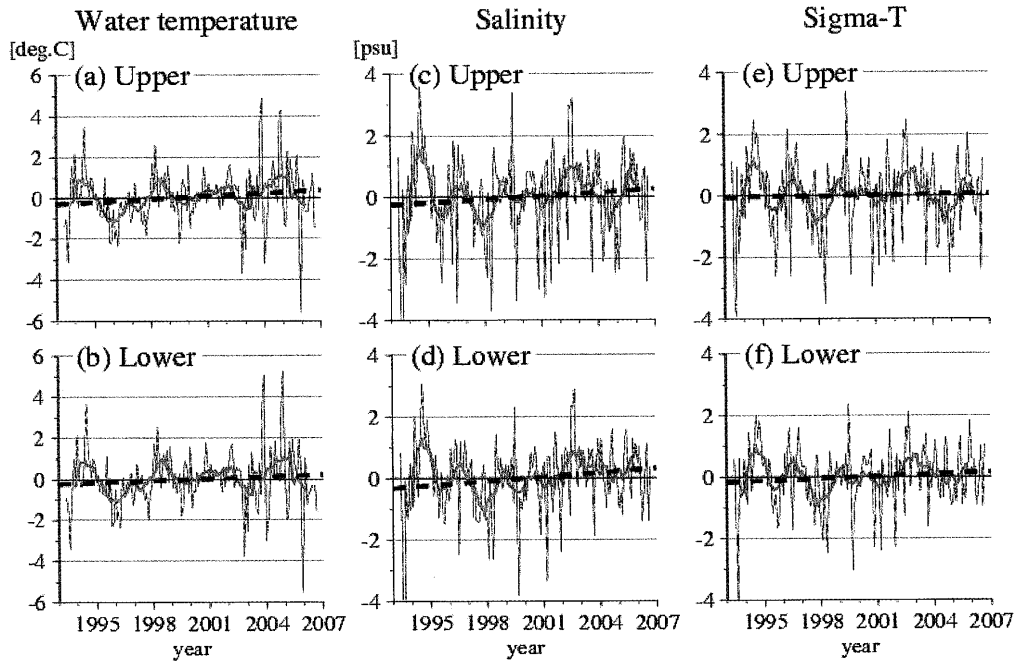


Fig. 8. Year-to-year variations in anomalies of water temperature, salinity and density in the upper (a, c, e) and lower (b, d, f) layers. Thick line shows the 12 months running mean. Dotted line shows the long-term trend.

の季節変動に起因する、成層 (Str.) とクロロフィル *a* 濃度 (Chl. *a*) の季節変動である。

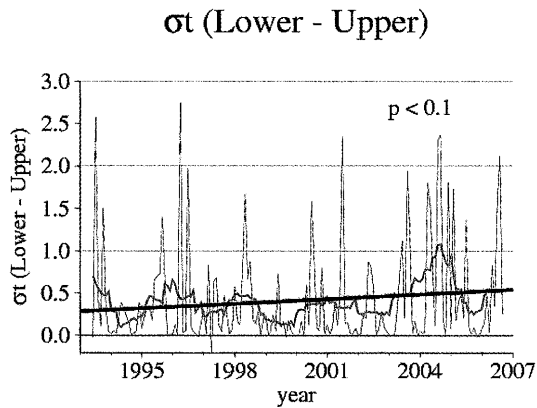


Fig. 9. Year-to-year variation in anomaly of density difference between the upper and lower layers. Thin line shows the 12 months running mean. Thick line shows the long-term trend.

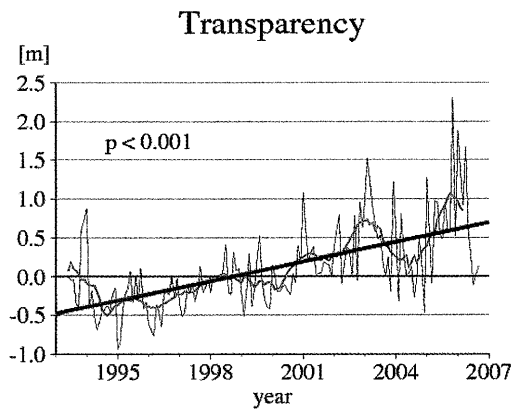


Fig. 10. Year-to-year variation in anomaly of transparency. Thin line shows the 12 months running mean. Thick line shows the long-term trend.

3.2. 経年変動

Sta. H-1 で得られた毎月の観測データから 3.1 節で述べた平均的な季節変動を差し引いて、各月の偏差値を求め、偏差値の経年変動を求めた。以下の図中には毎月の偏差値、偏差値の 12 か月移動平均値、最小自乗

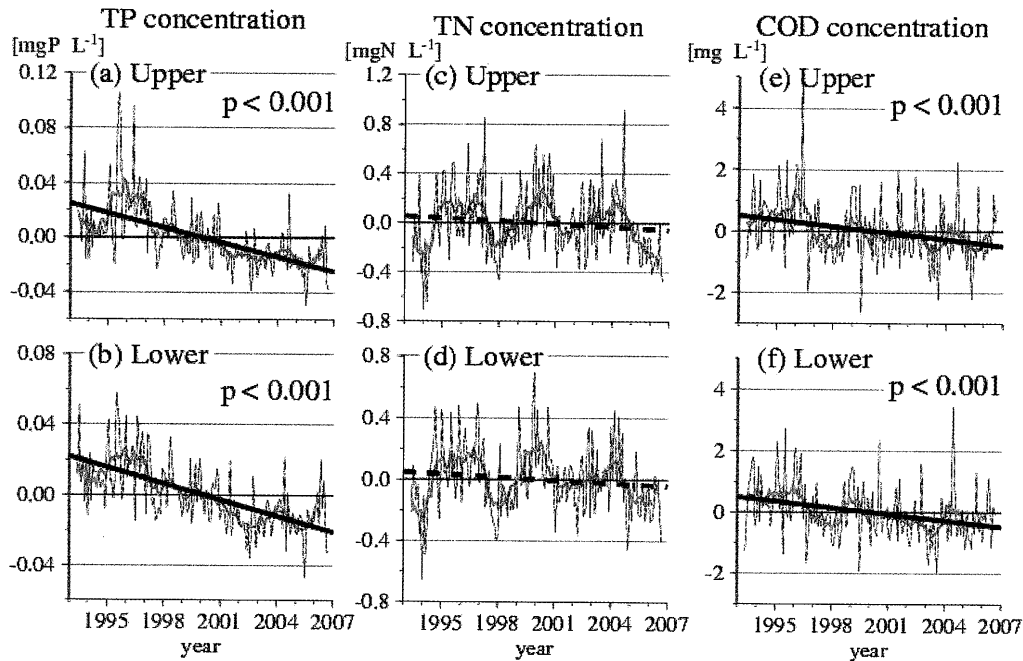


Fig. 12. Year-to-year variations in anomalies of TP, TN and COD in the upper (a, c, e) and lower (b, d, f) layers. Thin line shows the 12 months running mean. Thick and broken lines show the long-term trend.

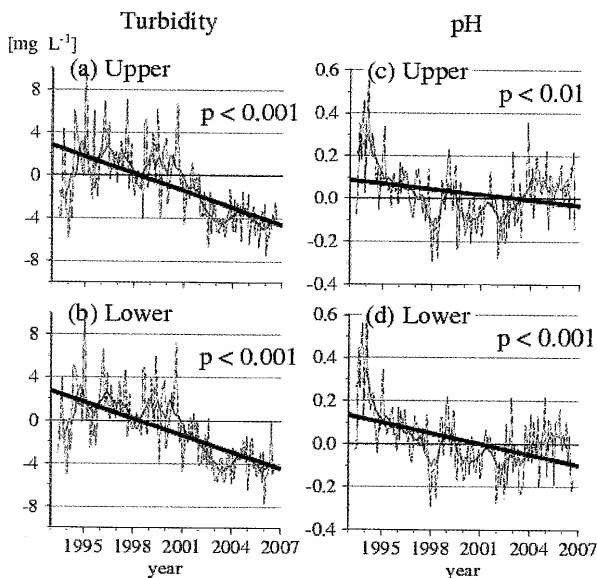


Fig. 11. Year-to-year variations in anomalies of turbidity and pH in the upper (a, c) and lower (b, d) layers. Thin line shows the 12 months running mean. Thick line shows the long-term trend.

法により求めた長期トレンドを表す直線を描いてある。長期トレンド直線に関しては、図中に示す有意水準で統計的に有意な場合には実線で、有意でない場合は破線で示してある。

Fig. 8 に上・下層の水温・塩分・密度偏差の経年変動を示す。統計的に有意ではないが、水温・塩分ともに上昇気味で、結果として密度はほとんど変化していない。近藤ら (2005) が指摘しているように、近年博多湾の潮汐振幅が減少して、湾内の密度流が強化され、外洋水の影響が大きくなったため、水温は夏季に減少、冬季に上昇しつつあるが、年間平均としてはやや上昇気味である。一方、塩分は強くなった外洋水の影響で上昇気味である (Aoki and Isobe, 2006)。

上・下層の密度差は Fig. 9 に示すように、近年やや大きくなりつつある。これは下層の塩分上昇の影響が表層より強く出ていて、下層の密度上昇の度合いが上層のそれより大きいためである。上・下層の密度差の増加は、下層への鉛直的な酸素供給を阻害し、貧酸素水塊の発生を助長するので、注意を要する。

透明度の偏差の変動を Fig. 10 に示す。透明度は近年

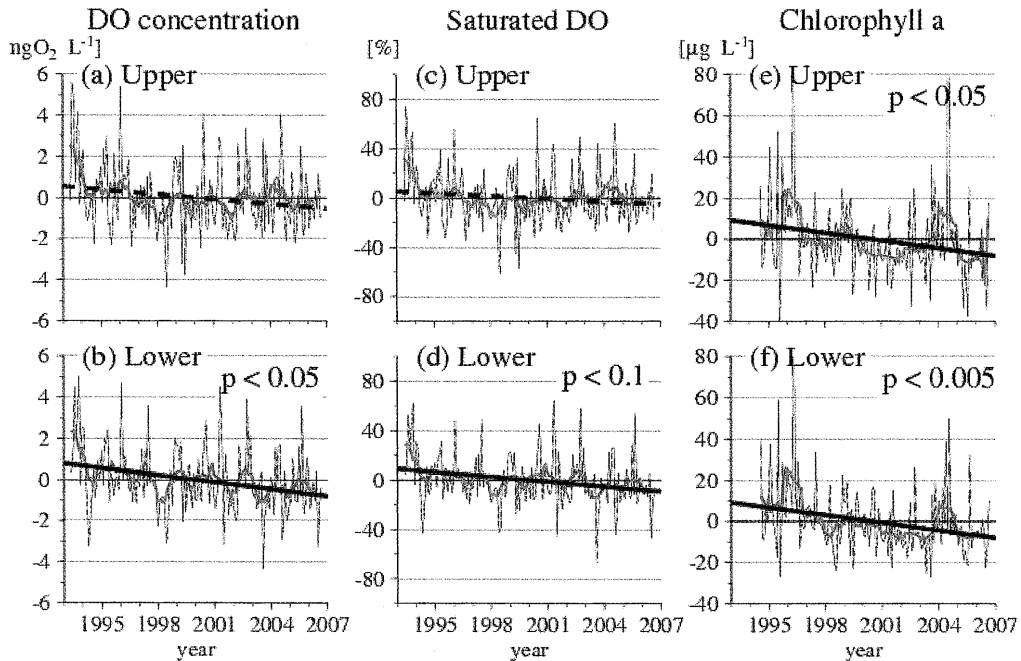


Fig. 14. Year-to-year variations in anomalies of DO, saturated DO and chlorophyll.a in the upper (a, c, e) and lower (b, d, f) layers. Thin line shows the 12 months running mean. Thick and broken lines show the long-term trend.

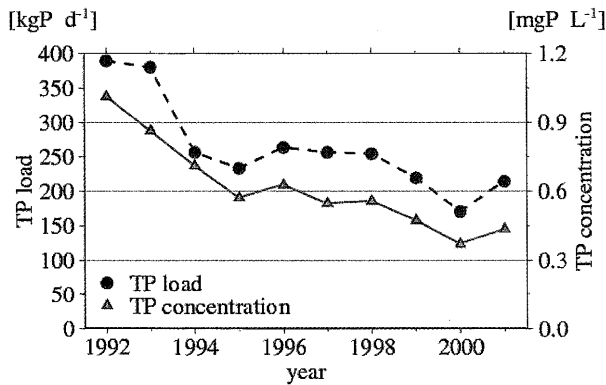


Fig. 13. Year-to-year variations in TP concentration (full line) in the discharge from sewage treatment plant and TP load (dotted line) from the sewage treatment plant (from Ueno and Miyahara, 2002).

明瞭な上昇傾向を示している。これは後述するように、博多湾のクロロフィル a 濃度が近年減少してきているためである。

上・下層の濁度と pH の偏差の経年変動を Fig. 11 に

示す。ともに上・下層で減少傾向が見える。これも近年のクロロフィル a 濃度の減少が原因であると考えられる。

上・下層の TP・TN・COD 偏差の経年変動を Fig. 12 示す。TP 偏差は大きく減少しているが、TN 偏差はやや減少しているものの減少の割合は小さい。TP 偏差の大きな減少は、リン含有合成洗剤追放と 1993~1999 年度に導入された下水処理場でのリン高度処理 (Fig. 13; 上野・宮原, 2002) の効果であると考えられる。また COD もやや減少している。これはクロロフィル a 濃度の減少により COD の内部生産が減少したためであると考えられる。

上・下層の DO・DO 飽和度、クロロフィル a 濃度偏差の経年変動を Fig. 14 示す。TP 濃度の減少により上・下層のクロロフィル a 濃度が減少し、上・下層 DO・DO 飽和度は減少している。特に下層の DO・DO 飽和度の減少は統計的に有意である。下層では大気との DO の直接的な交換がないために、クロロフィル a 濃度減少の影響が顕著に表れたためだと考えられる。

日射量と降水量の偏差の経年変動を Fig. 15 示す。日射量は近年増大しているが(おそらく太陽黒点変化のためであろう), 降水量はほとんど変化していない。

以上述べた各パラメータの経年変動の因果関係を Fig. 16 に示す。リン負荷量の減少により, 湾内のクロロフィル *a* 濃度が減少し, 下層の DO が低下, 透明度は上昇, 濁度は減少し, COD・pH も低下している。クロロフィル *a* 濃度の減少は有機物量の減少と下層 DO の上昇(有機物分解に伴う酸素消費量の減少)につながるはずである。しかし, Sta. H-1 は浅いため, 下層では有機物分解による酸素消費とともに, 光合成による酸素生産も行われている。今回の結果によれば, 博多湾奥における下層の DO トレンドに関しては, クロロフィル *a* 濃度減少による酸素生産量の減少の方が大きな影響を与えている。

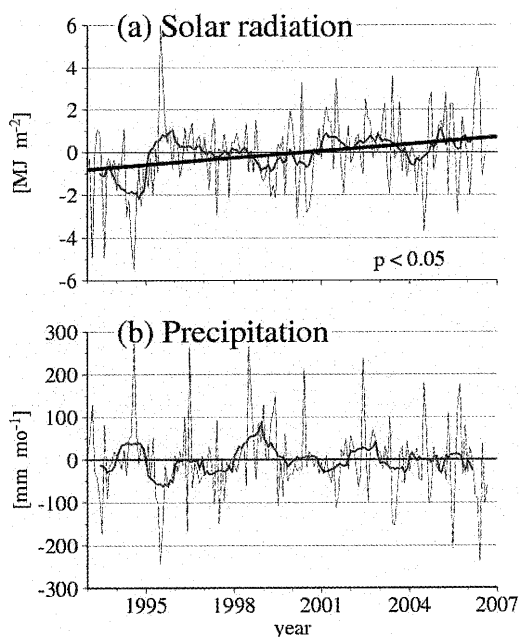


Fig. 15. Year-to-year variations in solar radiation (a) and precipitation (b). Thin line shows the 12 months running mean. Thick line shows the long-term trend.

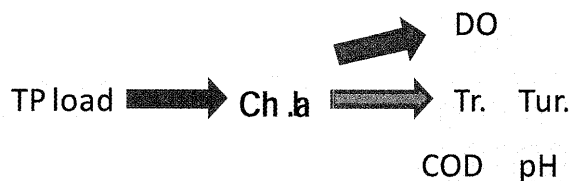


Fig. 16. Relations among year-to-year variations in parameters estimated from their in situ data.

4. おわりに

以上の解析の結果, 博多湾では近年, リン含有合成洗剤追放と下水処理高度化の効果により, 湾への TP 負荷量が減少して, 湾内の TP 濃度が減少し, その結果, 水柱のクロロフィル *a* 濃度が減少し, 透明度が増加, 水柱の濁度・pH が低下していることがわかった。

3.1 節で述べた季節変動における下層 DO の平均値は, 最低の 9 月でも, 6.2 mg L^{-1} と高い値を示しているが, 実際には夏季に博多湾東部全域でしばしば貧酸素水塊が発生する。このことは, 下層の観測が海底上 1.0 m と海底からやや離れて行われているためと, 貧酸素水塊の発生は月 1 回の観測では捉えられないような短い時間スケールで起こっていることを示唆している。Fig. 2 で下層 DO の標準偏差が 7・8・9 月に大きいことも, 夏季には短い時間スケールで下層 DO が変動しているという推察を支持している。今後, より時間間隔の短い 1 週間程度間隔の観測データを解析して, 博多湾における貧酸素水塊の発生・維持・消滅機構を明らかにしていきたいと考えている。

本研究を進めるにあたり, 貴重な観測データを提供していただいた福岡市港湾局に感謝すると共に, 長年にわたり, モニタリングを行ってこられた現場担当者に敬意を表する次第である。さらに有意義なコメントを頂いた査読者に感謝する。

References

- Aoki, K. and A. Isobe (2006): Numerical study of the summer temperature decrease induced by the enhancement estuarine circulation in Fukuoka Bay. *J. Oceanogr.*, **62**, 207-217.

- 橋本 俊也・多田 邦尚 (1997) : 広島湾の海水の光学的特性. 海の研究, **6**, 151-155.
- 神岡 真人・池内 仁・杉野 浩二郎。本田 清一郎・佐藤 利幸・磯辺 篤彦 (2001) : 福岡湾の窒素・リン収支. 沿岸海洋研究, **38**, 131-138.
- 近藤 明希子・磯辺 篤彦・篠原 満寿美 (2005) : 福岡湾の水溫長期変動とその要因. 海の研究, **14**, 399-409.
- 上野 祐子・宮原 正太郎 (2002) : 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, **28**, 106-109.
- Yanagi, T. and G. Onitsuka (2000) : Seasonal variation in lower trophic level ecosystem of Hakata Bay, Japan. *J.Oceanogr.*, **56**, 233-243.

Seasonal and Year-to-year Variations in Water Quality at the Head of Hakata Bay

Tetsuo Yanagi * and Daisuke Ishii *

Abstract

Seasonal and year-to-year variations in water quality at the head of Hakata Bay were examined. Monthly observed data at the upper and lower layers were analyzed from 1993 to 2006.

Stratification is most active in July and is kept until September. During that period, chlorophyll *a*, COD and pH in the water column and turbidity at the upper layer increase but transparency decreases. At the same time, DO at the lower layer decreases and TP in the water column increases, but TN decreases.

In recent years, the water temperature and salinity has increased due to the intensification of estuarine circulation. The stratification has increased due to larger increase of salinity at the lower layer. TP, chlorophyll *a*, COD, pH and turbidity have all decreased but transparency has increased due to the decrease of TP load from the land. DO in the water column has decreased due to a decline in primary production.

Key words: water quality, seasonal variation, year-to-year variation, TP load reduction

(Corresponding author's e-mail address: tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp)

(Received 24 July 2007; accepted 22 February 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

* Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan