

温暖化と東京湾の水環境 —水温と水質との関係—

二宮勝幸、水尾寛巳（横浜市環境科学研究所）
 柏木宣久（統計数理研究所）
 安藤晴夫（東京都環境科学研究所）
 小倉久子、飯村晃（千葉県環境研究センター）
 岡敬一（神奈川県環境科学センター）
 吉田謙一、飯島恵（川崎市公害研究所）

Effects of global warming on water environment of Tokyo Bay —relationship between water temperature and water quality—

キーワード：地球温暖化、東京湾、水温、赤潮、貧酸素水塊

Katsuyuki Ninomiya, Hiromi Mizuo (Yokohama Environmental Science Research Institute)
 Nobuhisa Kashiwagi (The Institute of Statistical Mathematics)
 Haruo Andoh (The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection)
 Hisako Ogura, Akira Imura, (Chibaken Kankyo Kenkyu Center)
 Keiichi Oka (Kanagawa Environmental Research Center)
 Kenichi Yoshida, Megumi Iijima (Kawasaki Municipal Research Institute for Environmental Protection)

要 旨

東京湾内 41 地点の公共用水域水質測定結果に統計的手法を適用して作成した表層と底層における季節別の水質濃度分布図をもとに、水温が東京湾における季節毎の水の流動や水質濃度分布におよぼす影響について検討した。その結果、水温は季節的な成層構造の発達と崩壊、赤潮の発生および貧酸素水塊の形成等に大きく影響していることが明らかとなった。これらのことから、地球温暖化や都市廃熱などにより海面水温が経年的に上昇すると、20°C程度を増殖の最適温度とする赤潮の発生時期が早まると考えられた。また、年間を通して成層構造を形成する期間が長くなると推察されることから、CODの年間値を押し上げ、また、貧酸素水塊が長期間にわたり留まることなどが懸念された。

1. はじめに

地球温暖化や都市廃熱による環境への影響が様々な分野で指摘されており¹⁾、東京湾においても水質や生物などへの影響が懸念される²⁾。

東京湾のような閉鎖性水域は、異なる温度特性をもつ河川水と外洋水が流入し混合する場であり、水温や塩分などの分布は基本的に河口の位置や海底地形などによって規定され、また、日射や風などにより変化していると考えられる。

一方、温暖化等による水温の上昇傾向は水温の季節変化に比べて小さいことから³⁾、温暖化等による水質への影響を調べる前に、水温の季節変化にともなう水質への影響について検討しておくことは重要である。

著者らは、既に東京湾の水質濃度分布の季節別特徴を明らかにしたが^{4, 5, 6)}、ここでは、あらためて水温の視点から東京湾における水の流れを概観するとともに、水温が赤潮の発生や貧酸素水塊の形成などにおよぼす影響について検討した。

2. 解析方法

2-1 解析資料

次の東京湾の公共用水域水質測定結果^{7, 8, 9)}をデータベース化し解析に用いた。なお、対象期間については欠測値等を考慮して決定した。

期 間：1985年4月～1995年3月の毎月のデータ
 (120回分の調査結果)

地 点：東京都7地点、神奈川県15地点、千葉県19地点
 の計41地点(図1)

測定水深：表層は海面下0.5mの位置、

底層は海底上1mの位置

(ただし、深度が50m以上の場合の測定水深は50mである。)

項 目：水温、塩分、COD(化学的酸素要求量)、
 DO(溶存酸素)

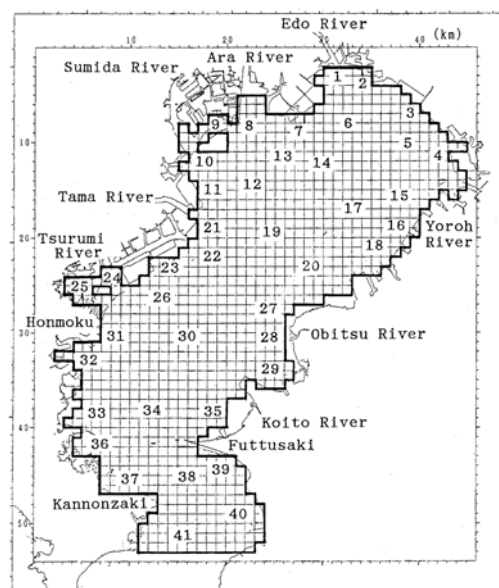


図1 測定地点

2-2 統計処理方法

各地点・各項目の時系列データは、統計的には、傾向変動成分、季節変動成分、および測定条件のばらつきに応じて一時的に変動する不規則変動成分からなるとみなすことができる。したがって、データから情報をより的確に抽出するためには、季節変動と傾向変動を分離して推定し、同時に不規則変動を除去すればよい。具体的には、まず、地点毎・項目毎にベイズ型季節調整¹⁰⁾という時系列解析手法により不規則変動成分を除去し、各月の平均的な推定値を求めた。次に、各月の推定値から離散薄板補間¹¹⁾により東京湾の水質濃度分布を作成した。

3. 結果と考察

3-1 塩分と水温の時系列

密度偏差によって駆動される季節毎の水の流れや鉛直対流の程度を知るためには、塩分と水温の季節変化を把握しておくことは重要と考えられる。東京湾のほぼ中央部に位置する地点(St. 30, 水深約30m)を例として、その表層と底層における塩分と水温の時系列(1987年度の毎月の推定値)を図2に示した。

3-1-1 塩分

夏期の塩分は底層に比べて表層がかなり低いことから、成層構造がよく発達していることが推察される。しかし、冬期には鉛直対流により表層と底層の塩分差はほとんどなくなった。ここで、冬期における底層塩分の約33psuを河川水と外洋水が完全混合した塩分、そして成層構造が最も発達した夏期における底層塩分約34psuを湾内に流入する外洋水の塩分、さらに河川水の塩分を0~1psuと仮定すると、河川水と外洋水の完全混合の塩分と外洋水の塩分の比率は約33/34となる。言い換えると、St. 30における冬期の河川水と外洋水の混合割合はほぼ3:97となることから、冬期の東京湾の水温は外洋水に大きく影響されていると推察される。

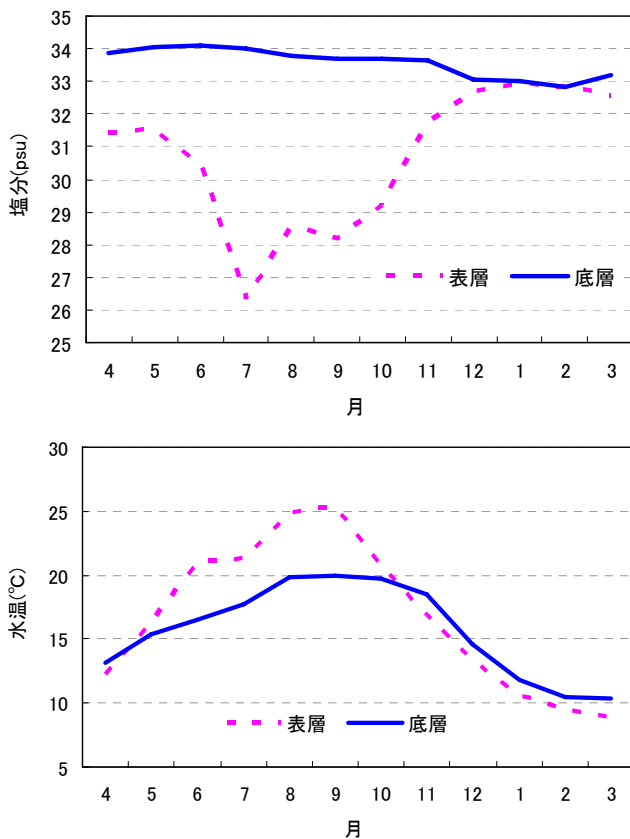


図2 塩分と水温の推定値の時系列 (St. 30の1987年度)

3-1-2 水温

水温は夏期に表層が底層よりも5°C程度高いことから、夏期は成層構造がよく発達していることが示唆された。しかし、表層と底層の水温差は10月過ぎには逆転し、11月以降は底層が表層より約1°C高くなった。冬期は表層に比べて底層が相対的に水温の高い外洋水¹²⁾の影響を強く受けているためと考えられる。

3-2 塩分分布の季節別特徴

図3に表層の塩分分布、図4に底層の塩分分布を示した。

3-2-1 表層の塩分分布

表層塩分については、4月に湾奥から西岸沿いに低塩分の水域が認められ、それから徐々に水域が拡大し8月、9月に最も広がった。特に、荒川河口のほか鶴見川河口などで塩分が低かった。10月以降、低塩分域は縮小し、1月、2月になると塩分はほぼ湾全域で30psu以上の値を示すとともに、湾奥と外洋との塩分差は縮小した。

このように夏期に成層構造が発達していることが示唆された。また、東京湾の人工衛星画像(図5:台風が通過して2日後の画像)によると、東京湾に流入する代表的な河川である荒川や多摩川などからの濁水が湾奥から西岸沿いに流れているのが認められるが、それは塩分分布とほぼ一致した。

3-2-2 底層の塩分分布

底層の塩分分布(図4)は、いずれの季節も表層の塩分分布とは異なるパターンを示した。底層の塩分分布の特徴は、高塩分域が湾口部から多摩川河口の沖合付近までの西岸沿いに存在していること、そして、そこから沿岸に向かって低塩分となっていることである。

底層における塩分分布は海底地形に大きく影響されると考えられる。海底地形¹³⁾については、観音崎の沖が最も深く70m程度あり、そこから西岸沿いに深い溪谷が多摩川の沖合まで達している。そして、深い溪谷から沿岸に向かって浅くなり、湾奥から東岸側では10m~20m程度の比較的浅い水域が広がっている。したがって、高塩分域が西岸沿いにある原因は、密度循環流すなわち低塩分の軽い水は表層を通して沖へ流れるが、それを補償するため高塩分の重い外洋水は底層から陸に向かうことによって説明ができる。また、高塩分域から沿岸に向かって低塩分となっているのは、底層水は水深が浅いほど低塩分の表層水の影響を受けやすいため、その結果、塩分の等濃度線と等深線がほぼ平行になったと考えられる。冬期でも同じような傾向は認められるが、夏期ほど明確ではないのは、鉛直対流が盛んで、その影響が底層にまでおよんでいるためと考えられた。

3-3 水温分布の季節別特徴

図6に表層の水温分布を、図7に底層の水温分布を示した。

3-3-1 表層の水温分布

表層水温は2月が最も低くほぼ湾全域で10°C以下となり、それから上昇し、6月には湾奥部から湾中央部にかけて植物プランクトンの増殖に最適な20°Cを超えた¹⁴⁾。8月、9月になると水温はほぼ湾全域で24°C以上を示し、それ以降は低下していった。水温の分布状況は夏期と冬期とで異なるが、その理由は後述する。

3-3-2 底層の水温分布

底層水温は表層水温とほぼ同様な季節変化を示すが、最高水温は9月に20°C前後の値を示し、その月の表層水温に比べて4°C程度低かった。また、夏期における底層の水温分布は表層のそれとは異なり、湾奥部や沿岸部で水温が高くまた等温線が込んでいた。これは、深い水域よりも浅い水域が大気の影響をより強く受けるので、等温線は等深線に平行な分布を示したと推察される¹²⁾。

3-3-3 8月と2月の水温分布

図6と図7では年間を通した季節分布を把握するため水温間隔を2°Cとしたが、水域毎の水温分布の違いをより詳細に検

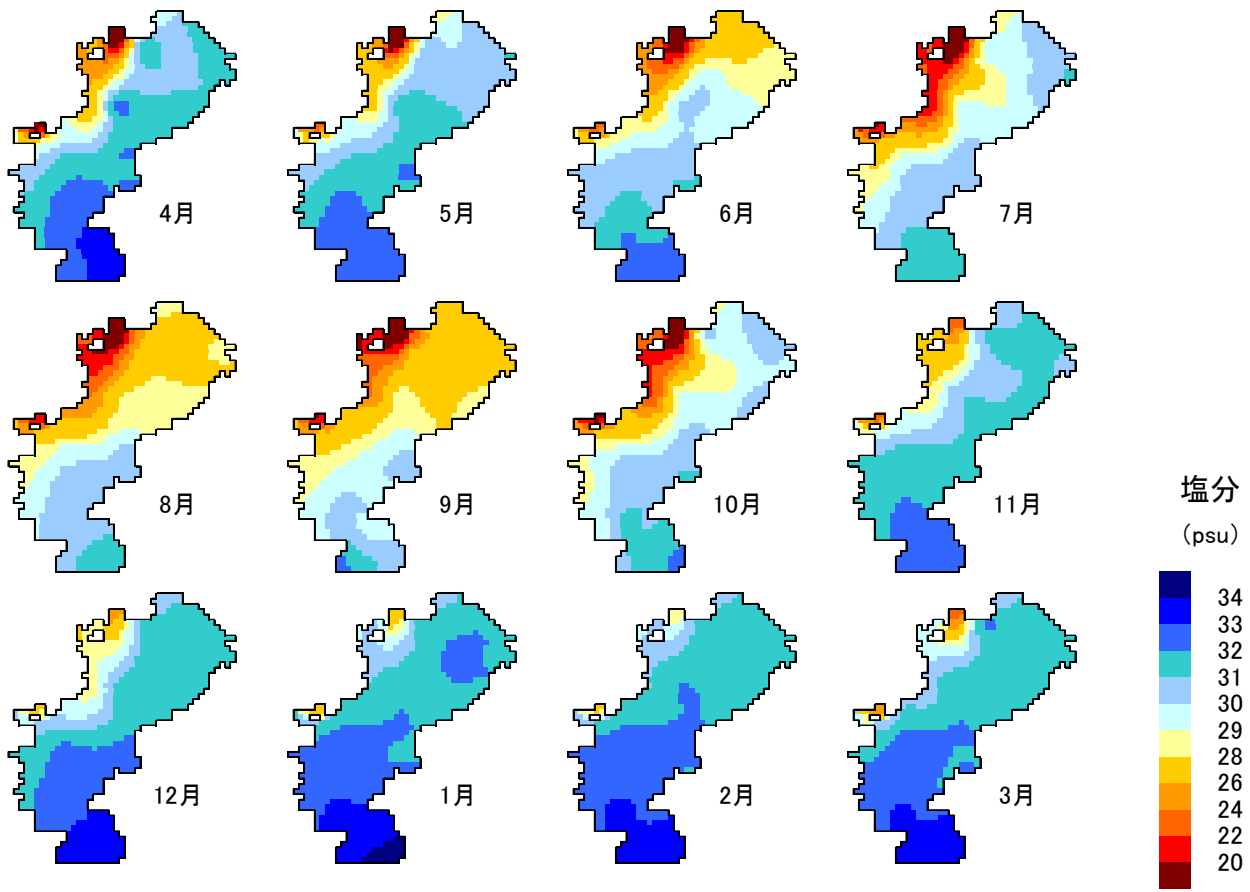


図3 表層塩分の季節分布

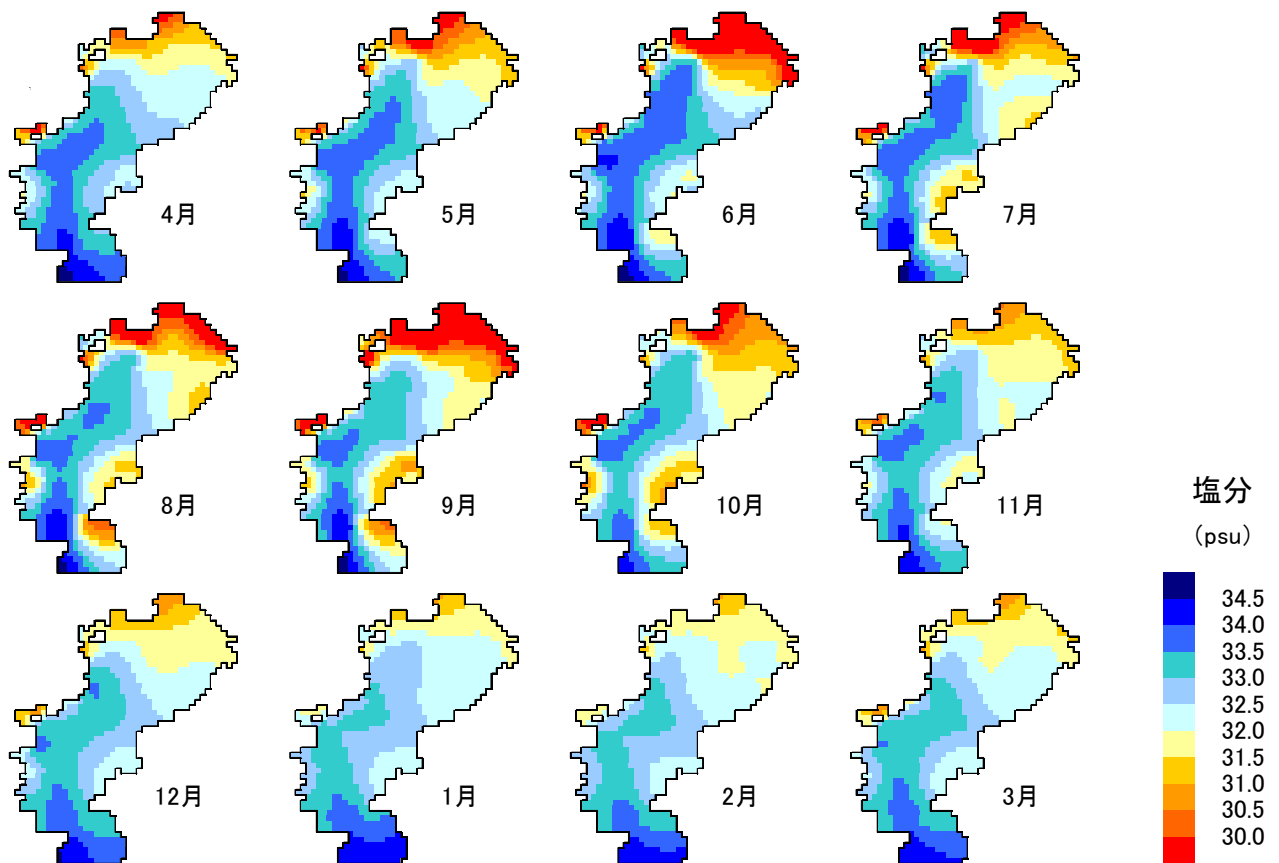


図4 底層塩分の季節分布

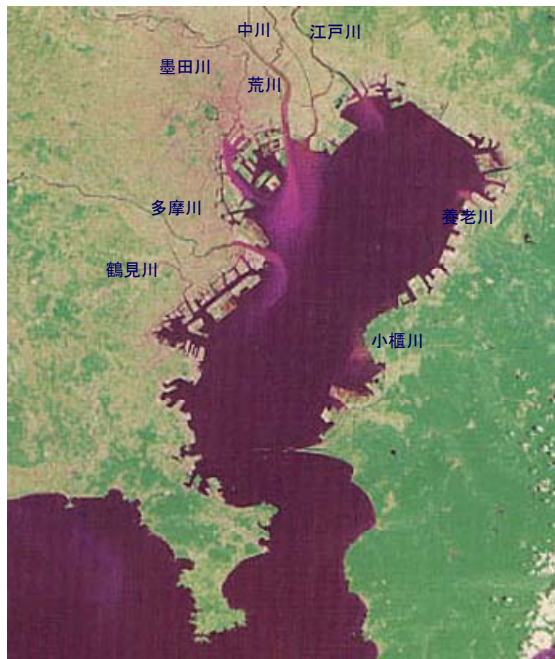


図5 東京湾の人工衛星画像(1986年8月6日)

討するため、図8に水温間隔を0.5度とした表層と底層における8月と2月の水温分布を示した。

(1) 表層の水温分布

8月の表層水温は湾奥部から西岸沿いに高く、湾口部から東岸側までは低くなる傾向が認められた。特に、湾奥の一部水域や鶴見川河口などで水温は比較的高い値を示した。2月は、8月とは逆に湾奥部に比べて湾口部が高温となり、また、2月の湾口部において等温線が密になった。

8月の表層水温が西岸側で高く東岸側で低い理由として、湾奥部では水温の比較的高い河川水の影響が大きい、湾口部では河川水に比べて低水温の外洋水が東岸側から湾内に流入してきたためと推察される。また、2月の湾口部では内湾と外湾の温度の異なる海水がぶつかり、熱塩フロント¹²⁾が形成されているため等温線が密になったと考えられる。

(2) 底層の水温分布

8月の底層の水温分布から、低温の外洋水が湾口の西岸側から流入し、多摩川河口沖合い付近の比較的大い水域まで達していた。このことから、夏期の東京湾では密度循環流がかなり強化されているものと推察される。2月は8月とは逆に高温の外洋水が湾口部から多摩川河口の沖合いにまで達しており、湾口部と最も水温の低い江戸川河口とは約5℃の差があった。このように、外洋水は夏期に冷源、そして冬期には熱源となって東京湾の水温に大きく影響を及ぼしていることが示唆された¹⁵⁾。

(3) 表層と底層の水温差の分布

表層と底層とで水温分布が異なることから、それらの水温差について検討した(図9)。水温差は4月に深度の大きい西岸沿いで0℃以下、すなわち表層よりも底層が高かったが、5月には湾全域で0℃以上と表層が高く、6月には湾奥部で+4℃前後まで高まった。水温差は8月に最大となり、多摩川河口の沖合いの比較的大い水域で+6℃以上を示した。9月以降、水温差は減少していき、10月にはほぼ0℃をやや上回る程度となった。その後、11月に水温差はほぼ湾全域で0℃以下となり、12月から3月にかけては多摩川河口の沖合い水域で-2℃以下の状態が続いた。

このように、表層と底層の水温差は夏期と冬期とも多摩川河口の沖合い水域が最も大きく、夏期に+6℃以上、そして、冬期には-2℃以下となった。この理由として、図8から推察さ

れるように、その水域への外洋水の侵入による影響が大きいと考えられた。

3-4 密度の時系列と季節分布

成層構造の発達と崩壊は厳密には密度によって規定される。そこで、図10に表層と底層における密度の時系列(St. 30における1987年度の推定値)を、図11に底層と表層の密度差の季節分布を示した。なお、密度 ρ は水温と塩分と圧力によって決まるが、沿岸海域は比較的水深が浅く圧力変化が小さいので、1気圧における水温と塩分を関数とする海水の状態方程式から求めた。また、密度 ρ を直接表すと桁数が多くなって煩わしいので、ここでは次式で定義される σ_t (シグマテー)で表した¹⁶⁾。

$$\sigma_t = 1000 \times \rho - 1000$$

3-4-1 密度の時系列

図10から、表層と底層の密度差は4月に約2であるが、それから徐々に大きくなり、8月、9月には最大の約5になった。その後、密度差は減少し、11月に約1、そして、12月にはほとんど0となり、3月まで続いた。このように、4月から10月頃までは密度差は大きく、成層構造が発達しているが、11月頃を境にして密度差はなくなり、成層構造が崩壊しやすくなっていると推察される。

3-4-2 密度差の季節分布

底層と表層の密度差の季節分布(図11)によると、密度差は4月から11月、12月にかけて湾奥部から西岸沿いで5以上の値を示したが、湾奥東部から東岸側までは1以下であった。

前述したように、西岸沿いの表層は高温低塩分の河川水の流れの場であり、底層では低温高塩分の外洋水が侵入しているため、密度差が大きくなり成層構造が発達していると推察される。湾奥東部から東岸側までの水域では成層構造が未発達であり、なかでも青潮の発生域である北東部沿岸¹²⁾は北東風による底層水の湧昇が起こりやすい場になっていると考えられる。

一方、1月から3月までは、荒川河口や鶴見川河口で密度差は2~3程度と比較的高いが、それ以外のほぼ湾全域で1以下の値を示し、湾奥の一部水域では0以下であった。この期間は荒川河口や鶴見川河口を除いて鉛直対流が起こりやすい状況になっていると考えられる。これらの年間を通した密度差の分布は表層の塩分分布と類似していることから、塩分が密度を規定する大きな因子となっていることが示唆された。ただし、ここで示した密度差の分布は毎月の平均的な傾向を表したものである。実際には、ひと月のなかでも気温や風などの気象変化、例えば、気温の低下する夜間や北風が強まる時には表層水温はさらに低下し、その密度が大きくなることが予想され、成層構造が崩壊し鉛直対流が発生している可能性があることに留意する必要がある。

3-5 CODの季節分布

東京湾では、CODの環境基準超過が問題となっていることから、表層CODの季節分布について検討した(図12)。

CODは4月から10月にかけて湾奥部から西岸沿いに高い傾向を示し、なかでも6月は他の月よりも高く、湾奥部から横浜港までの水域で6mg/l以上の値を示した。これは、図11に示した成層構造の発達程度によく対応していた。したがって、表層水温が経年的に高まれば、成層化している期間が長くなり、年間のCOD値を上昇させる可能性が考えられる。ただし、東京湾に流入する外洋水の量が長期的に増加するため、水温は夏期に下降傾向として冬期に上昇傾向を示す可能性が指摘されていることから¹⁵⁾、今後はそのことを考慮に入れて水温とCODとの関連を注意して監視していく必要がある。

3-6 クロロフィルaと水温との関係

赤潮の発生に作用する因子のなかでも、水温の影響は大きいことから¹⁷⁾、水温と植物プランクトン量の指標であるクロロフィルaの関係を図13に示した¹⁴⁾。なお、クロロフィルa

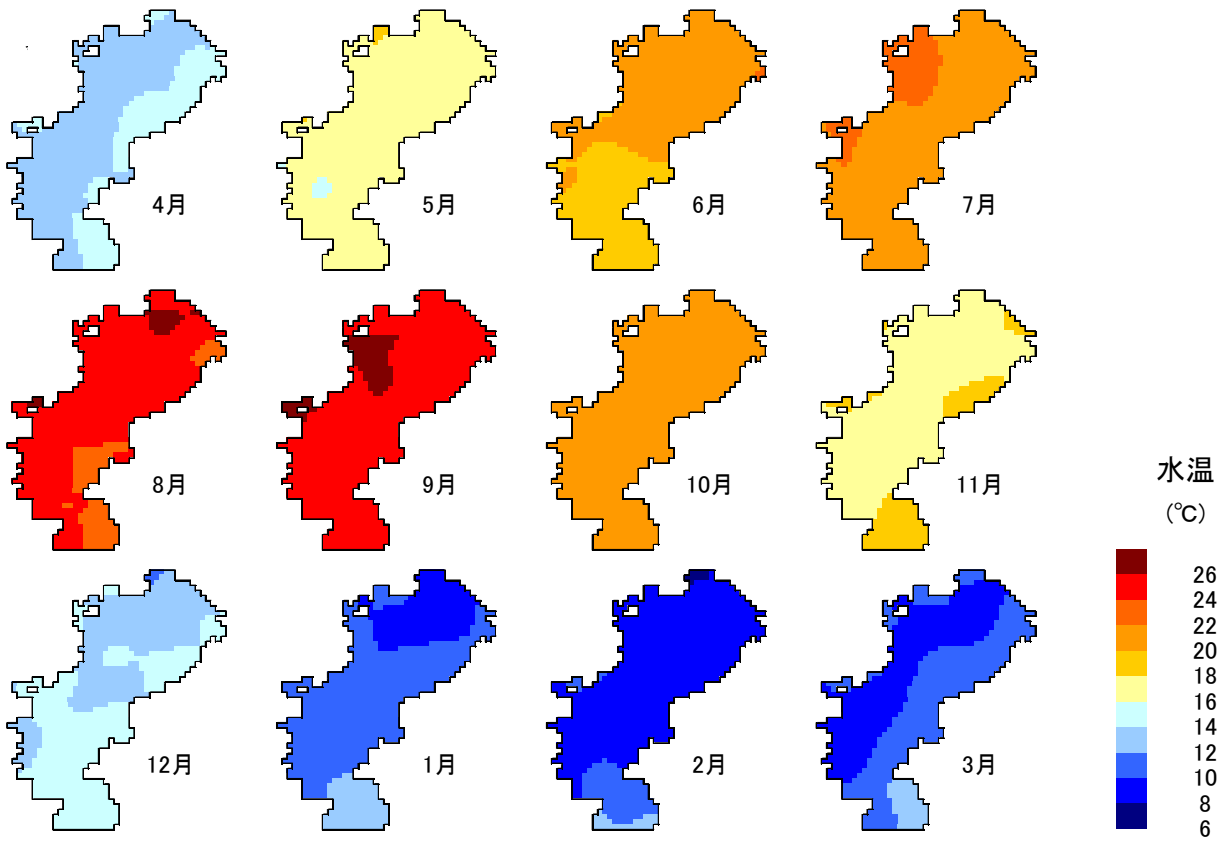


図6 表層水温の季節分布

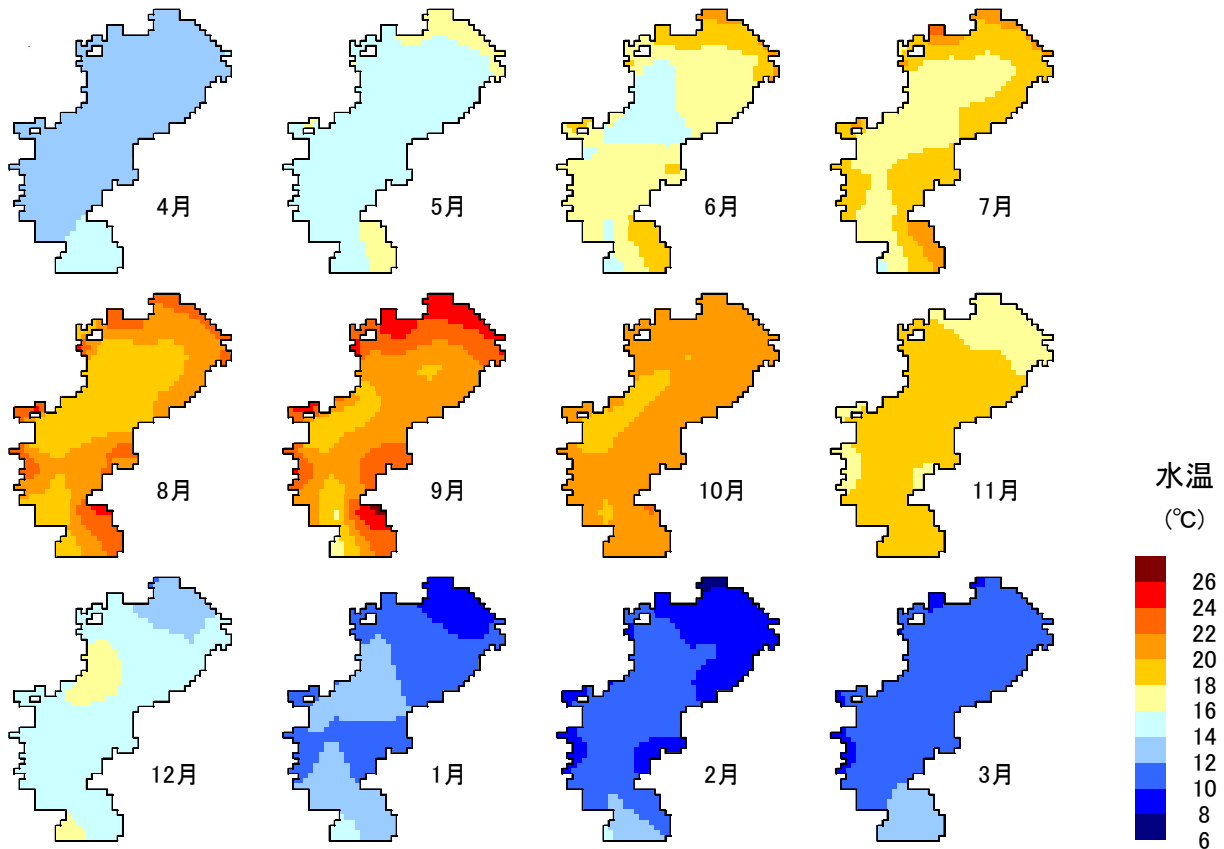


図7 底層水温の季節分布

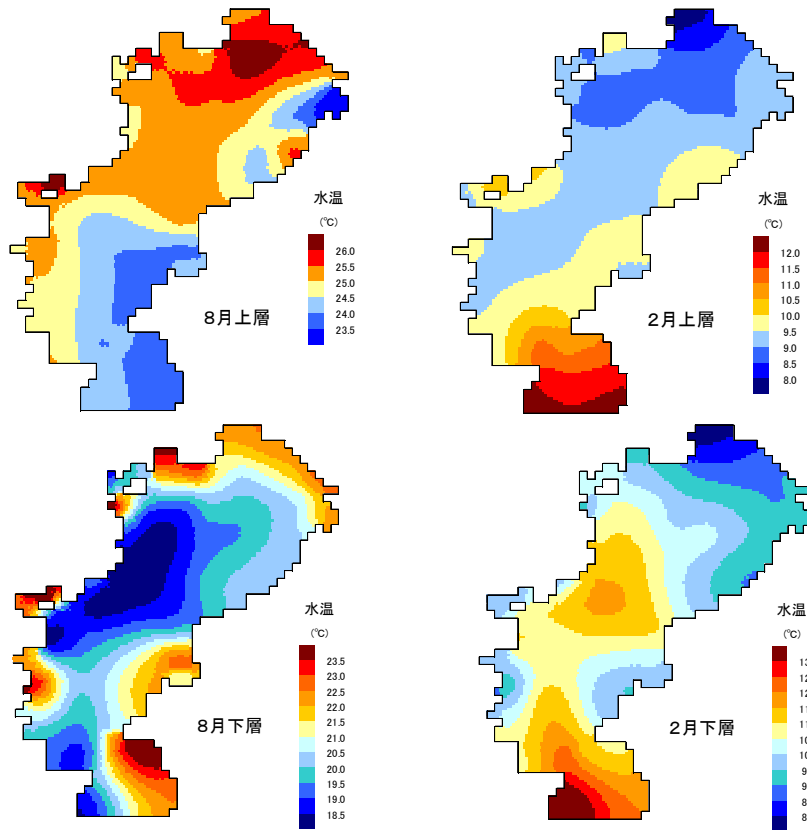


図8 表層と底層における水温の8月と2月の分布

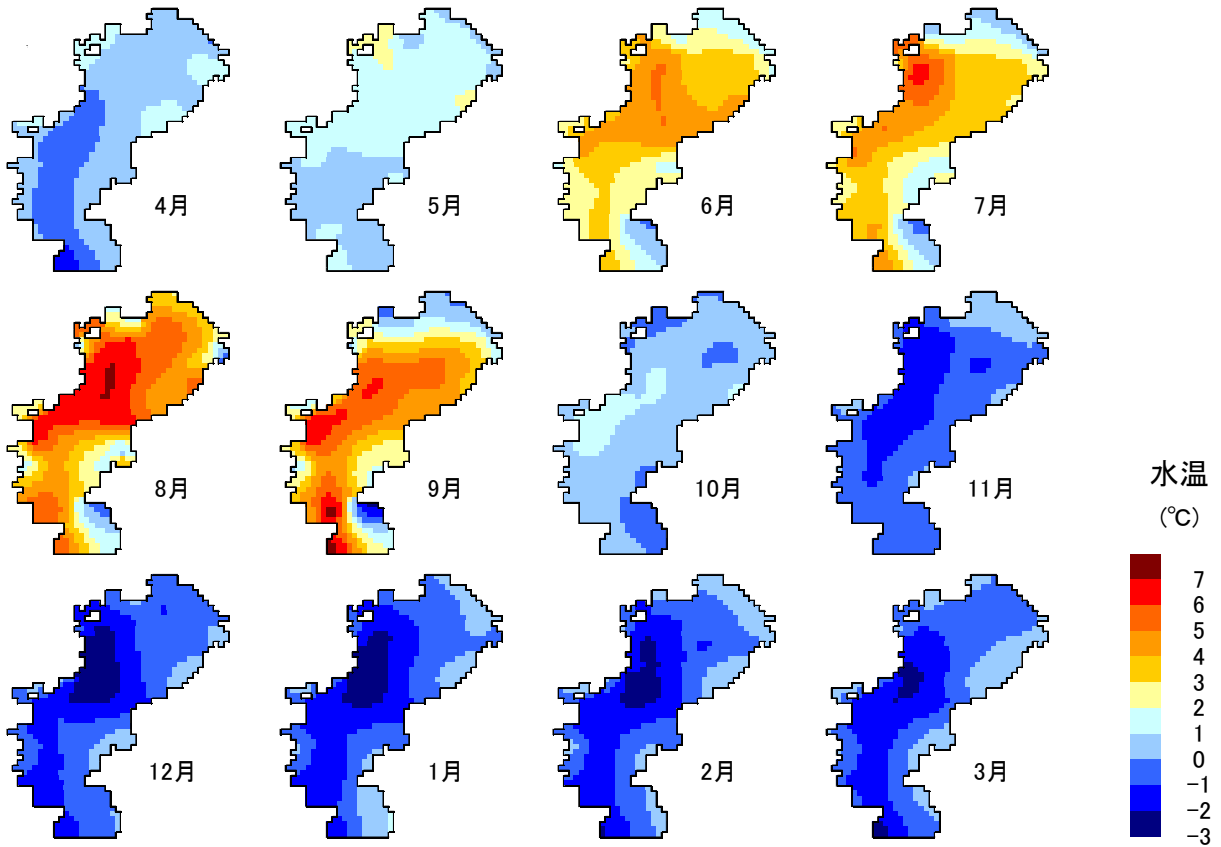


図9 表層と底層の水温差の季節分布

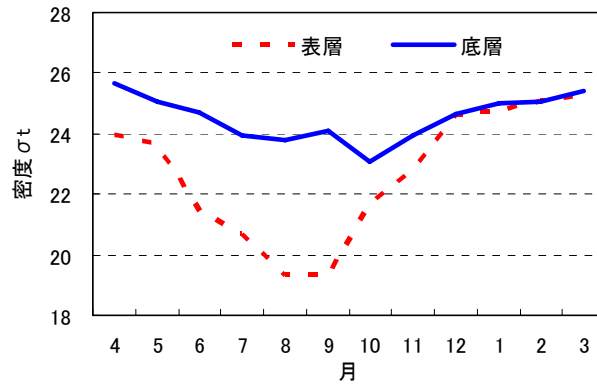


図 10 密度 σ_t の推定値の時系列(St. 30の1987年度)

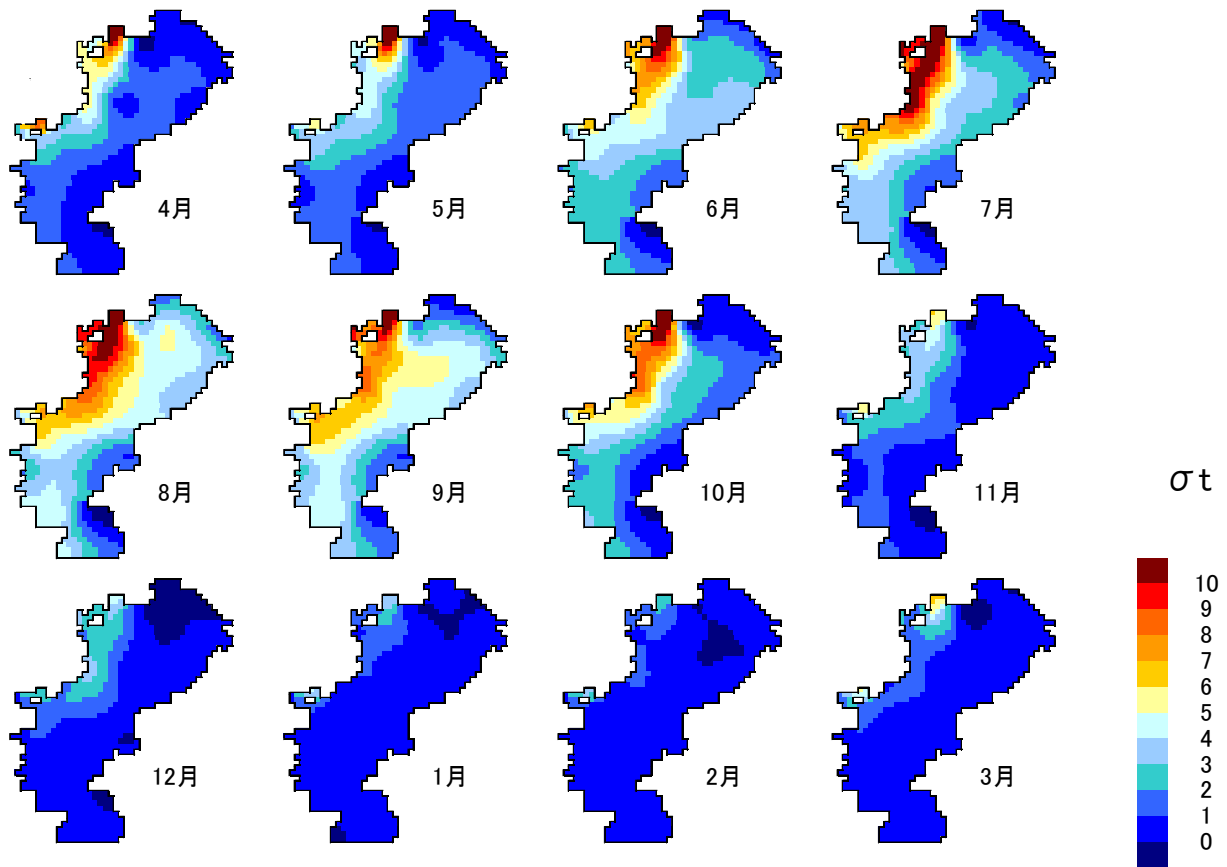


図 11 底層と表層の密度 σ_t 差の季節分布

が $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上のものを赤潮と定義されている。

クロロフィル a と水温の相関係数は -0.2 となり、両者に相関は認められなかった。しかし、クロロフィル a が $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上の値を示す赤潮は $20^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$ の狭い温度範囲に集中していた。なかでも $500 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上の値を示す特異的な赤潮は計 5 回あり、それらの発生時期はいずれも 6 月であった。これまでの検討結果を含めて考察すると、6 月は成層構造が発達し東京湾表層には栄養塩の豊富な河川水が存在するとともに、植物プランクトンの増殖の最適温度である 20°C 程度まで上昇するため、植物プランクトンが異常増殖し COD が高まったと考えられる。

3-7 DOの季節分布

ここでは、水生生物の生息にとって重要な因子である DO の季節変化と水温との関係について検討した。図 14 に表層 DO の季節分布、図 15 に底層 DO の季節分布を示した。

3-7-1 表層 DO

表層 DO は 4 月に湾奥部から西岸にかけて $9 \text{ mg}/\text{l}$ 以上を示しており、同様な傾向が 7 月まで続いた。それ以降、DO は徐々に低下していくが、1 月頃から再び上昇し始めて、2 月には湾奥部で $10 \text{ mg}/\text{l}$ を超えた。

6 月の湾奥部において、DO が最高で約 $13 \text{ mg}/\text{l}$ の高濃度域が出現しているが、これは、COD の節で述べたように赤潮の発生によるもので、そこでは光合成が盛んに行われていたためと考えられる。飽和 DO 量は水温と塩分によって規定されるが¹⁸⁾、その水域のデータから計算すると飽和 DO 量は約 $8 \text{ mg}/\text{l}$ となり、それよりも $5 \text{ mg}/\text{l}$ ほど過飽和であった。一方、2 月に DO 濃度が高まったのは、水温の低下に伴う飽和 DO 量の増加によって説明できた。

3-7-2 底層 DO

底層 DO は湾奥部において 4 月頃から毎月ほぼ $1 \text{ mg}/\text{l}$

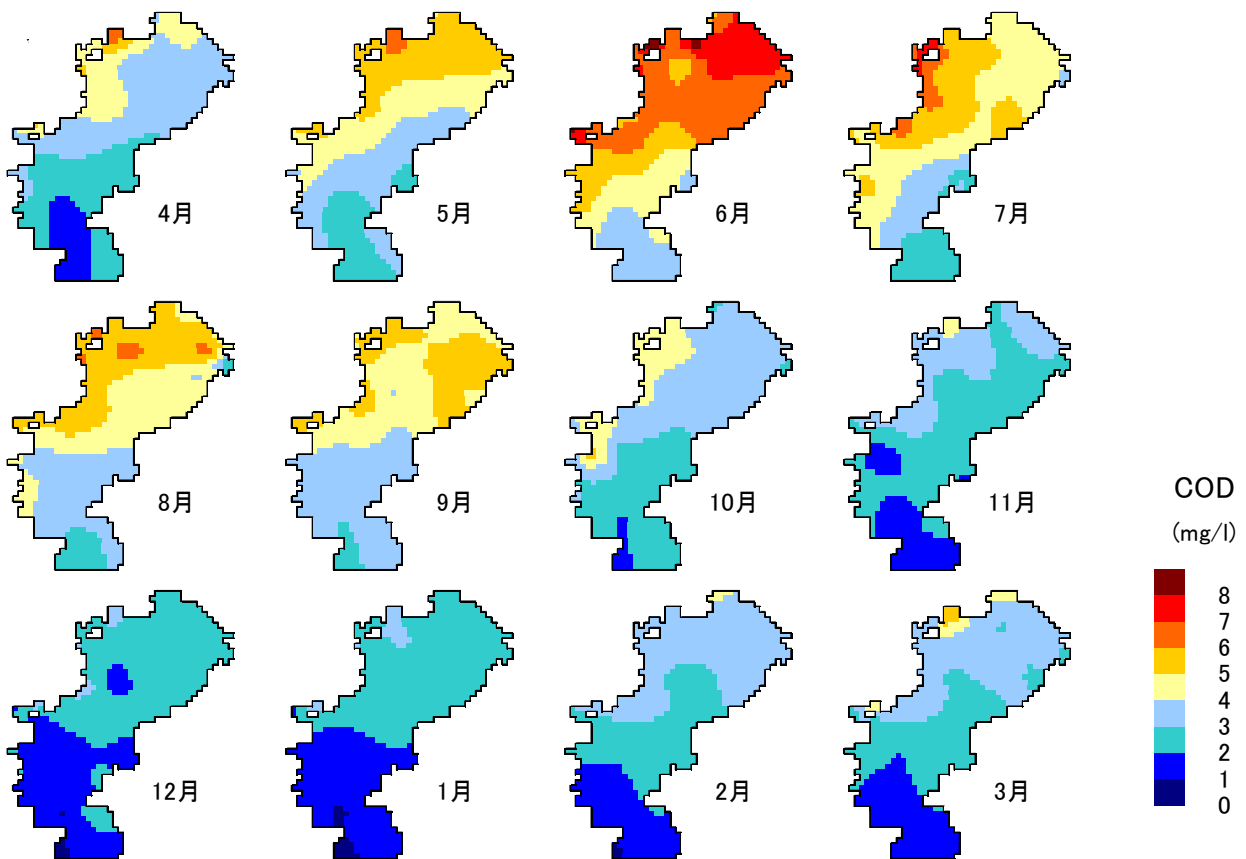


図12 表層CODの季節分布

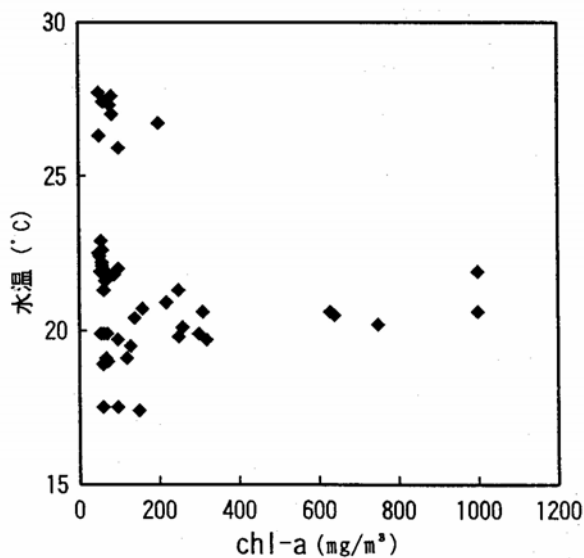


図13 クロロフィルa (>50 mg/m³)と水温の関係¹⁴⁾

程度の割合で低下していき、6月には3 mg/l以下の水域が現れた。9月になるとDOは最も低くなり、2 mg/l以下の貧酸素水塊が湾奥部のほとんどを占めた。その水域の飽和DO量は約7 mg/lであり、それよりも5 mg/l以上低かった。10月からDOは増加し、2月になるとほぼ湾全域で8 mg/lを超えた。

4月以降のDOの低下傾向は、図7に示した底層水温の上昇傾向とよく対応していることから、水温が貧酸素水塊の形成に大きく影響していることが示唆された。また、表

層から底層への植物プランクトン由来の有機物の供給¹⁷⁾なども貧酸素水塊の形成に寄与していると考えられるので、栄養塩類を含めて検討していく必要がある¹⁹⁾。

4. まとめ

東京湾の公共用水域水質測定結果に統計的手法を適用して作成した水質の時系列および季節別濃度分布をもとに、水温がおよぼす水質への影響について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 水温は季節的な成層構造の発達と崩壊、赤潮の発生および貧酸素水塊の形成等に大きく影響している。
- 2) 海面水温が経年的に上昇すると、季節的な赤潮の発生時期が早まると考えられる。
- 3) 年間を通して成層構造の安定期が長くなると推察されることから、COD濃度の高い期間が長くなりCODの年間値を押し上げることで、貧酸素水塊が長期間にわたり留まることなどが懸念される。

謝辞

公共用水域水質測定結果を利用するにあたり、東京都環境局・神奈川県環境農政部・横浜市環境創造局・千葉県環境生活部の協力を得ました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 環境省：
<http://www.env.go.jp/earth/cop3/ondan/ondan.html>
- 2) 環境省：
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rc_eff-adp/report/part2chpt3.pdf
- 3) 気象庁：

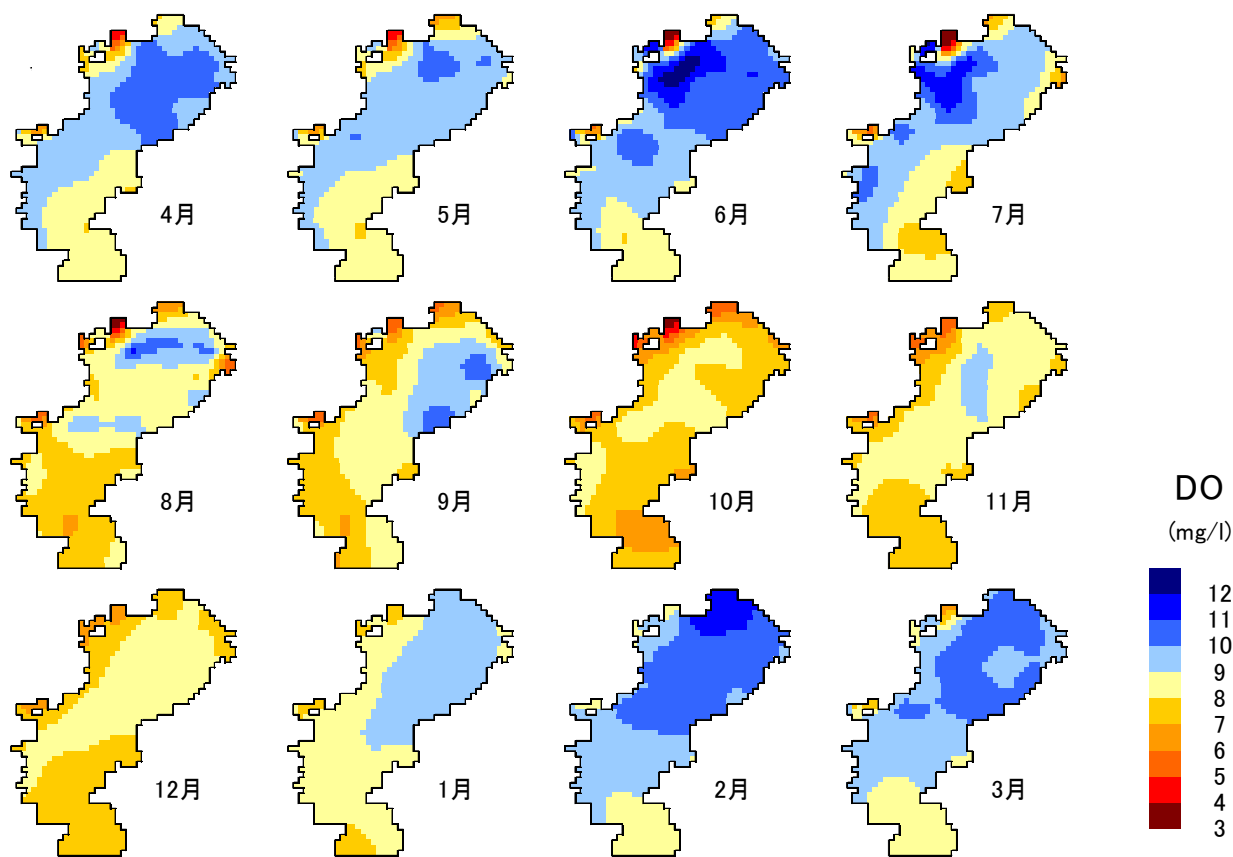


図 14 表層DOの季節分布

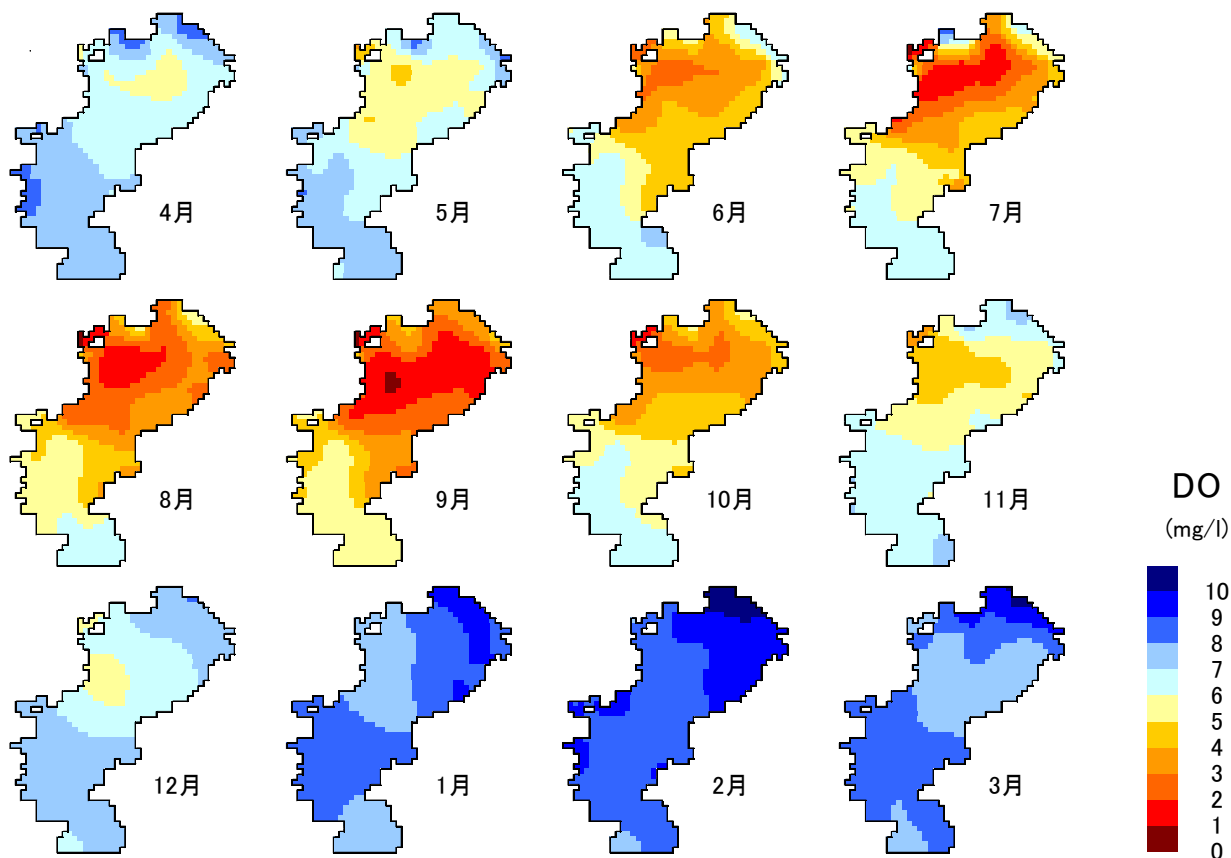


図 15 底層DOの季節分布

<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>

- 4) 二宮勝幸、柏木宣久、安藤晴夫：東京湾における水温と塩分の空間濃度分布の季節別特徴、水環境学会誌、**19**、480～490(1996).
- 5) 二宮勝幸、柏木宣久、安藤晴夫：東京湾における COD と DO の空間濃度分布の季節別特徴、水環境学会誌、**19**、741～748、(1996).
- 6) 二宮勝幸、柏木宣久、安藤晴夫、小倉久子：東京湾における溶存性無機態窒素およびリンの空間濃度分布の季節別特徴、水環境学会誌、**20**、457～467(1997).
- 7) 東京都環境保全局：昭和 60～平成 6 年度版、公共用水域の水質測定結果(資料編) (1985～1994).
- 8) 神奈川県環境部：昭和 60～平成 6 年度版、神奈川県水質調査年表(1985～1994).
- 9) 千葉県環境部：昭和 60～平成 6 年度版、公共用水域水質測定結果(1985～1994).
- 10) Akaike H: *Likelihood and the Bayes procedure*, *Trabajos de Estadística*, Vol. **31**, 143～166. (1980).

- 11) Matusita K., Kashiwagi N., Aki S. and Kuboki H: *Statistical analysis of air pollution data with graphical methods*; location characteristics of the monitoring stations, *Statistical theory and data analysis*, Elsevier Science Publishers B.V. (1988).
- 12) 柳哲雄：沿岸海洋学、恒星社厚生閣(2001).
- 13) 貝塚爽平編：東京湾の地形・地質と水、第 5 章、築地書館(1994).
- 14) 横浜市環境科学研究所：東京湾の富栄養化に関する調査報告書、環境研資料 No. **117**、47～52(1995).
- 15) 安藤晴夫、柏木宣久、二宮勝幸、小倉久子、山崎正夫：東京湾における水温の長期変動傾向について、海の研究、**12**(4)、407～413(2003).
- 16) 気象庁編：海洋観測指針、日本気象協会(1990).
- 17) 岡市友利編：赤潮の科学、恒星社厚生閣(1987).
- 18) 日本工業規格 (JIS) K 0102、pp94(1998).
- 19) 白柳康夫、大矢正代：横浜港底質からのリン、窒素の溶出、横浜市公害研究所報、**15**、57～66(1991).