

## 千葉県データセットから見た東京湾における水質の長期変動

石井光廣\*, 長谷川健一, 柿野 純\*\*

### Long-term fluctuations of the water quality in Tokyo Bay judged from a data set of Chiba Prefecture

Mitsuhiro ISHII\*, Ken-ichi HASEGAWA and Jun KAKINO\*\*

Long-term fluctuations in water quality properties such as water temperature, salinity, density, pH, dissolved oxygen,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  and transparency in Tokyo Bay were examined using a data set observed by Chiba Prefectural Fisheries Research Center (CPFRC) for fifty-eight years during 1948–2005. As a result, it was shown that the changes of the properties were related to each other. Water temperature was gradually increasing for a long term especially in autumn and winter. This increase caused to prolong the existence of hypoxic water to late autumn. Also, difference in density between bottom water to surface water as indicator of the stratification strength was related to the horizontal coverage of hypoxic water. When the stratification was weak, the annual occurrence of red tides was small. Eutrophication factors such as hypoxic water, annual occurrence of red tides,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  and transparency were most remarkable in the 1960s.  $\text{NH}_4\text{-N}$  in 2004 has decreased to the same level of the first half of the 1960s.  $\text{PO}_4\text{-P}$  was higher in bottom water than in surface water because of the dissolution from reductive mud under hypoxia. It has decreased in the late 1990s, especially in March. Transparency increased to the same level as in the 1960s but hypoxic bottom water and annual occurrence of red tides have not always decreased. Eutrophication in Tokyo Bay has caused a large decrease in catch of the bivalves, flatfish and others. In addition, the recent rise of water temperature in autumn and winter has shortened the culture period of laver *Porphyra yezoensis*. Moreover, fall of  $\text{PO}_4\text{-P}$  in March has damaged the laver culture because nowadays no enough  $\text{PO}_4\text{-P}$  for the growth of laver remains in the water after diatom blooming.

**Key words:** Tokyo Bay, water temperature, oxygen deficient water,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , transparency

#### はじめに

東京湾（千葉県の富津岬と神奈川県のお観音崎を結ぶ線より北, Fig. 1）は、漁業の生産性が高く、浅海域ではのり養殖業およびアサリなどの貝類漁業、沖合域では底びき網・まき網・あなご筒などの漁船漁業が現在も盛んにおこなわれている重要な海域である。東京湾の富栄養化は1960年代半ばをピークにやや改善されてきているが（野村, 1995など）、今でも夏季には広範囲に貧酸素水塊が発生する（石井, 2003）。さらに安藤ほか（2003）や八木ほか（2004）により、秋冬季の水温が上昇傾向であることが示されてい

る。東京湾の漁獲量は1960年代以降減少傾向が続き（社団法人漁業情報サービスセンター, 2004）、比較的安定していたのり養殖においても、最近では冬季の珪藻赤潮によるのりの色落ちも目立つようになってくるなど（石井ほか, 2008）、水質環境の変化が水産業へ及ぼす影響は大きい。

千葉県水産総合研究センター（以後、千葉水総研セ）は、水質の状況を把握し、漁業者へ東京湾の漁業に関わる海況情報を提供するため、1947年に東京湾の水質調査を開始し、調査項目、調査点を変更しながら現在まで継続している（Fig. 1）。これまでに海老原（1972）が1956–1971年の栄養塩、COD、底質について、田辺・山口（1995）が1947–1994年の水温、塩分、底層のDOについて、野村（1995）が1991年までの約40年間の千葉水総研セのデータを含む塩分、栄養塩類、クロロフィルa濃度、透明度の解析を行なった。しかしながら1995年以降のデータを含む解析は行なわれていない。そこで我々は、東京湾の海洋環境が過去50数年間にどのように変化したのか定量的に明らかにするために、水質項目について長期変動の解析を行

2007年3月5日受付, 2008年3月15日受理

千葉県水産総合研究センター 東京湾漁業研究所

Tokyo Bay Fisheries Research Laboratory, Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 3091 Kokubo, Futtsu, Chiba 293-0042, Japan

\* 現所属 千葉県水産総合研究センター

Chiba Prefectural Fisheries Research Center, 2492 Chikuracho Hiraiso, Minamiboso, Chiba 295-0024, Japan

m.ishi26@ma.pref.chiba.lg.jp

\*\* 現所属 東京久栄

なった。

## 資料と方法

### 調査の概要と観測データの解析方法

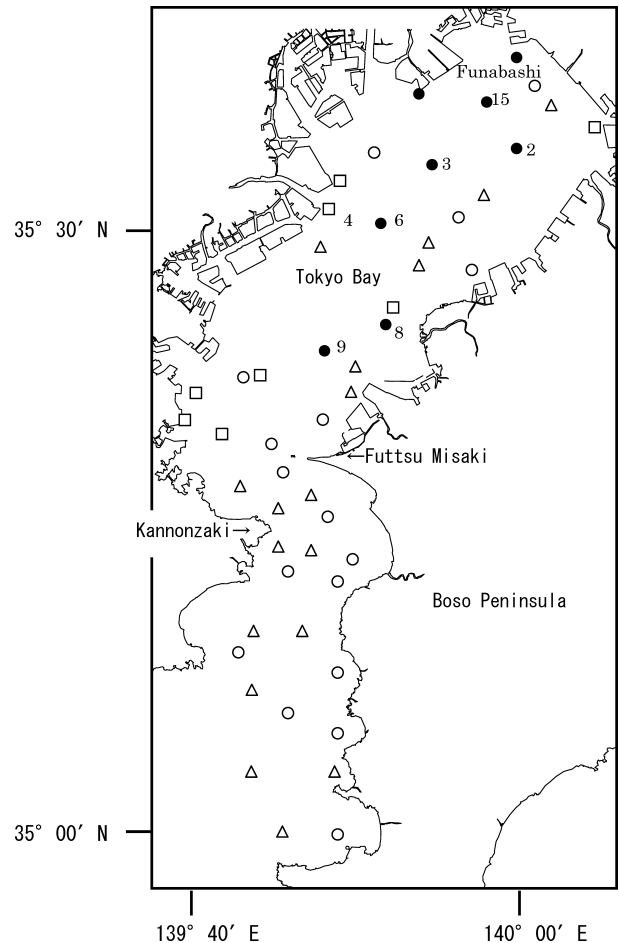
千葉水総研セ（前身千葉県水産研究センター、前々千葉県水産試験場、前々々千葉県内湾水産試験場）が1948~2005年に実施した東京湾水質調査データを解析に使用した。調査は、1951年までは不定期、1952年~1965年が2ヶ月ごとの奇数月、1966年以降は毎月実施している（ただし1974年4月~1975年3月の1年間は欠測）。

解析には、現在実施している26点のうち、調査開始当初から継続しているStn. 15, 3, 6, 9, 2, 8の6点を用いた（Fig. 1）。Stns. 15, 3, 6, 9は湾奥から湾口に向かって湾軸に沿って並んだ点であり、Stn. 2は湾奥の千葉県側、Stn. 8は湾南部の千葉県側に位置する。水深は、順に11, 17, 24, 17, 14および20 mである。

水質項目は、水温（°C）、塩分、海水密度（ $\sigma_t$ ）、pH、溶存酸素濃度（以下DO,  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$ ）、溶存酸素飽和度（%）、栄養塩類のアンモニア態窒素濃度（以下 $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\mu\text{M}$ ）とリン酸態リン濃度（以下 $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\mu\text{M}$ ）、透明度とした。測定方法はそれぞれの項目において年代により異なった。水温は2000年まで棒状水銀温度計およびSTD（model AST-1000, アレック電子製）、塩分は1976年まで硝酸銀滴定で求めた塩素量から換算、その後、卓上式塩分計（DIGI-AUTO, 鶴見精機製）、次いでSTD（AST-1000, アレック電子製）を用いて測定した。pHは比色法、DOはウインクラー法で測定し、2001年以降は水温、塩分、pH、DOを多項目水質計（ADR-1000, アレック電子製）、その後、別の多項目水質計（WQX-I, 三洋メトロジクス製）で測定した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の分析はネスラー法、その後1994年まではインドフェノール法による比色分析、 $\text{PO}_4\text{-P}$ はモリブデン青法による比色分析、1994年以降は自動化学分析装置（TRAACS800, ブラン・ルーベ製）で分析を行なった。1970年代以前の分析では信頼できるデータが得られなかったと考えられるため、今回の解析では硝酸態窒素、亜硝酸態窒素のデータは使用していない。これらの測定は表面から海底直上1 mまで行なった。なお、観測当初から1980年代にかけては、バケツで採水した表層水を用いて各項目を測定した。このため、その後のSTDなどの機器による観測値と比較して、大量降雨後の観測では塩分が低めに、日射の強い日には水温が高めになっている可能性があるが、本解析では特に考慮しなかった。透明度は直径30 cmのセッキ板を用いて測定した。

また、成層強度の指標を得るために、底層（海底上1 m） $\sigma_t$ の値から表層（水面下0.5 m）の値を減じて、表層と底層の密度差を算出した。

観測値は、項目毎に全期間の平均値、最大値、最小値、36ヶ月移動平均、月別年変動を求めた。36ヶ月移動平均



**Figure 1.** Observational stations in Tokyo Bay. Marine observations in Tokyo Bay by CPFRC were started at 1948. There have been six large alternations of the stations, and 26 are active at present. Data from six stations (15, 2, 3, 6, 8, 9; solid circles), which have been active since 1948, were mainly used for this analysis. Open circles were from an intermediated year to date. Open squares were from initial to the way. Open triangles are stations that were active from 1966 until 2001.

を算出するにあたって1966年までは前後のデータ数が9未満、以降は18未満の移動平均値は削除、1974年の欠測データの影響が強く出た1972年10月~1976年8月を削除した。50年間の変動率などを把握するため36ヶ月移動平均、月別の3ヶ年移動平均について回帰分析により、長期変動傾向を調べた。その際、月別の3ヶ年移動平均については1965年までの偶数月はデータがないので、奇数月のみを使用した。また年（x軸）と月（y軸）の等値線図を作成して変動の特性を調べた。富栄養化に関連する測定項目のDO、栄養塩類、透明度については汚濁当時の状況、現在の改善状況の把握に努めた。

### 秋季の水温降下時期の変化

ノリ養殖では、秋季に水温が18°C以下になると生産を開始し、15°C以下になると赤腐れ病などの病害の発生が少なくなり、安定して生産できる目安である。秋季の水温変化の解析には、1967~2001年に油監視船「七四郎丸」がノリ養殖時期にStn. 8で行なった毎日の水温測定結果を用いて、各年が18°C台であった最終日および15°C台であった最終日を求め、3か年の移動平均をした後、回帰分析により長期変動傾向を調べた。

### 貧酸素水塊の規模の推定

DO $2.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の海水は海生生物の生存に大きな影響を及ぼすことから、これを貧酸素水塊と定義し(柳, 1989)、さらに、 $0.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の海水を便宜上、底生生物が死滅する無酸素水塊と定義して、貧酸素水塊の毎年の最大規模を石井(2003)の方法に従って算出した。上記の調査点のほかに船橋の調査点を加えて、船橋, Stns. 15, 3, 6, 9のDOの鉛直分布から、 $2.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $0.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の面積割合を求め貧酸素水塊の規模の指標とした。データには、1956~2005年まで各年の最大値を採用した。1989年以降は月1回のデータだけでなく、その他に行なった内湾の水質調査のデータも併せて集計の対象とした。

### 赤潮発見数

東京湾では赤潮が発生していると判定する基準として、東京湾岸自治体環境保全会議(2005)により「色がオリーブ色~茶色、透明度が1.5m以下、クロロフィルa濃度がSCOR/UNESCO法で $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上、溶存酸素飽和度が150%以上、pHが8.5以上など」、また、野村(1998)により「透明度が1.5m以下、赤潮生物の細胞密度が、大型種で $10^3\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、小型種で $10^4\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ 以上、クロロフィルa濃度を指標とした現存量が $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 」が提唱されている。本研究では、このうち透明度1.5m以下、pH 8.5以上、表層の酸素飽和度150%以上の条件を満たす場合を赤潮とした。Stns. 15, 3, 6, 9, 2, 8の6点について月1回の観測データから積算し各年の赤潮発見数とした。赤潮の発生件数、継続期間は明らかにならないが、1966年以降は毎月1回の各年同じ条件下での観察結果であることから、長期的な赤潮発生の傾向をみるには十分だと考えた。上記赤潮判定の3項目のうち1項目が欠測の場合には2項目が該当すれば赤潮とし、2項目が欠測の場合はその値は除外した。

### 結 果

岸からの距離が最も離れているStn. 3を本解析の代表点として、水温、表層と底層の密度差、DO、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、透明度の経年変動を眺める(Fig. 2)。

### 水温

全期間の水温を調査点ごとにみると、表層水温の平均値は17.4~17.9°Cであり、湾奥で高い傾向にあった。底層水温

は15.9~16.5°Cで、湾奥で高い傾向にあるが、水深が深いStn. 6で最も低かった。最大値は、表層が28.5~32.4°C、底層が24.2~28.8°Cで、表層・底層とも湾奥のStn. 15で観測された。最小値は、表層が5.8~6.7°C、底層が6.0~6.8°Cで、表層はStn. 3、底層はStn. 9であった。

表層では7~8月に25°Cを超える最高水温期、2月頃に10°Cを下回る最低水温期がみられた。水温の経年変動をみると、秋冬季の9~1月頃は、15°Cの時期が徐々に11月から12月にずれ込んで、水温が徐々に上昇、近年10°Cを下回る期間が短縮もしくは消失していた。底層では9月頃に20°C以上の最高水温、2~3月に10°C以下の最低水温期となっていた。水温の経年変動をみると、底層でも10~2月頃の秋冬季に徐々に上昇し、近年10°Cを下回ることが少なくなっていた(Fig. 2)。

月別調査点別3か年移動平均の水温(°C)を回帰分析すると(奇数月のみ)、表層は、1月、11月の全点、5月のStns. 3, 6, 8, 9と9月のStns. 15, 2, 3, 8で統計的に有意差が認められた(Table 1)。1月、9月、11月は増加傾向であり、1年あたり0.03~0.05°C増加していた。しかし、5月はやや減少傾向がみられ、1年あたり0.02~0.03°C減少していた。底層は1月、11月の全点、3月のStns. 6, 8, 9、と7月のStns. 6, 8で統計的に有意差が認められ、1月、3月、11月は増加傾向であり、1年あたり0.02~0.05°C増加していた。7月は減少傾向であり、1年あたり0.03°C減少していた(Fig. 3)。

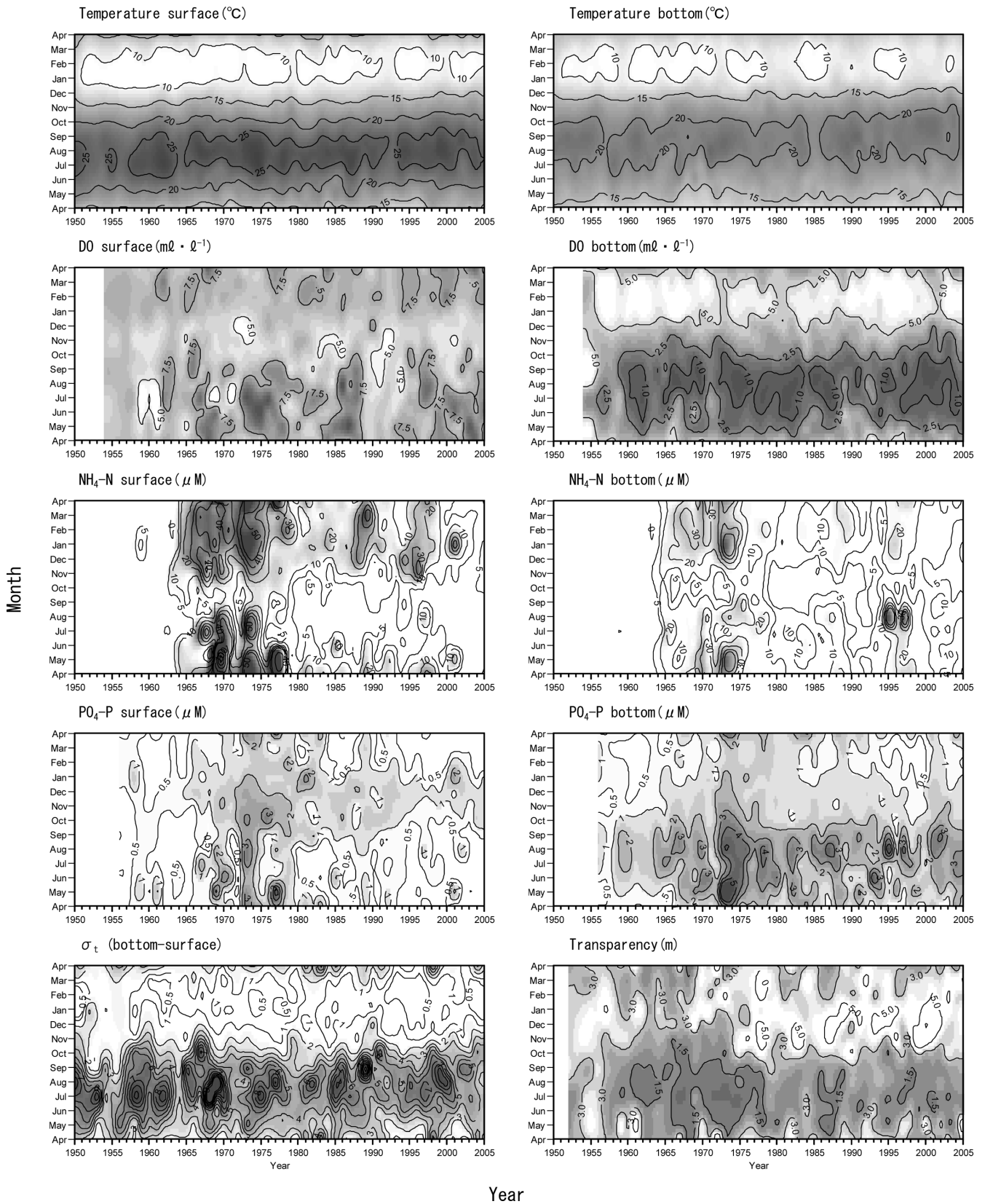
### 表層と底層の密度差( $\sigma_t$ )

Stn. 3における表層と底層の密度差の変動をみると(Fig. 2)、成層が発達する夏季には5を超え、鉛直混合が進む秋冬季には1以下に減少した。夏季の高い時期は周期的に増減を繰り返し、1960年頃、1968年頃、1975年前後、1985年前後、1998年前後に大きくなった。

### DO

全期間のDOを調査点ごとにみると(Table 2)、表層の平均値は $6.1\sim 6.9\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 、表層の最大値は $13.3\sim 17.4\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ で、いずれも湾奥で高い傾向にあった。底層の平均値は $3.4\sim 4.3\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。底層の最小値は $0.0\sim 0.2\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ で、すべての調査点で無酸素もしくはそれに近い状態になった。なお、底層の貧酸素水塊は1955年7月に羽田北(Stn. 4,  $2.0\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ )で初めて確認された。

Stn. 3における表層と底層のDOの変動をみると(Fig. 2)、表層では1960年頃から夏季に $7.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ を超える高い値がみられるようになった。1975年頃にはピークとなり、 $10\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ を超える値も目立った。1980年頃に一旦低下し、1985年頃再び上昇した。1990年頃再び低下し、1995年以降は上昇傾向を示している。底層では、1956年頃に $2.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の貧酸素水がみられ、1956年以降は夏季に $2.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の状況が常態化するようになった。さらに $1\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下となることも多くみられた。2000年以降、秋季



**Figure 2.** Temporal fluctuations of water temperature (°C), DO (mL · L<sup>-1</sup>), NH<sub>4</sub>-N (μM), PO<sub>4</sub>-P (μM), σ<sub>t</sub> (bottom-surface) and transparency (m) at Stn. 3. X-axis is for year; Y-axis for month.

**Table 1.** Slope of water temperature (°C) per annum, obtained by regression analysis of three years running mean of each month. (\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ )

	Station	15	2	3	6	8	9	mean
surface	January	0.04**	0.05**	0.05**	0.05**	0.05**	0.05**	0.05
	March	-0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.00
	May	-0.02	-0.01	-0.02*	-0.03*	-0.02*	-0.02*	-0.02
	July	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.02	-0.02
	September	0.05*	0.04*	0.03*	0.03	0.03*	0.02	0.03
	November	0.04**	0.04**	0.04**	0.05**	0.05**	0.04**	0.04
bottom	January	0.05**	0.05**	0.05**	0.05**	0.05**	0.04**	0.05
	March	0.01	0.01	0.02	0.03**	0.03*	0.02*	0.02
	May	0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01
	July	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03**	-0.03*	-0.02	-0.02
	September	0.02	0.01	-0.01	-0.02	0.01	0.01	0.00
	November	0.04**	0.04**	0.04**	0.03**	0.05**	0.05**	0.04

**Table 2.** Mean, maximum and minimum of DO ( $\text{ml} \cdot \text{l}^{-1}$ ) at each station in all observation periods.

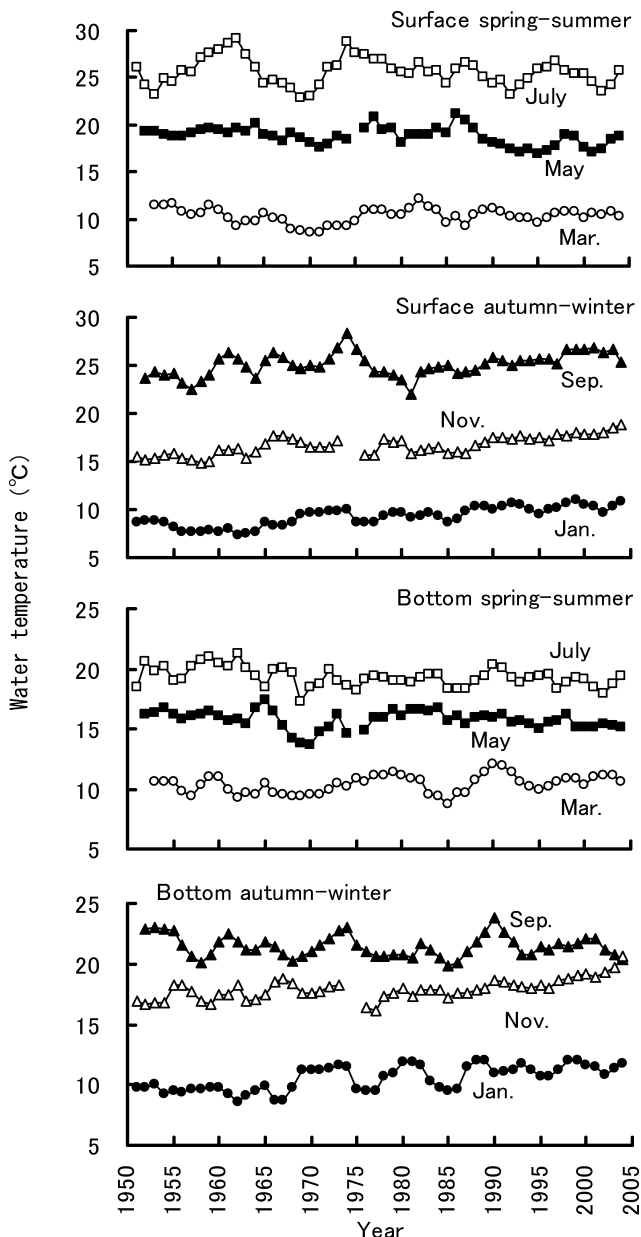
	Station	15	2	3	6	8	9	mean
surface	mean	6.9	6.8	6.8	6.6	6.1	6.4	6.60
	maximum	17.4	14.3	14.9	13.3	13.4	15.0	
	minimum	1.8	1.6	0.2	3.0	1.4	2.0	
bottom	mean	3.7	3.5	3.4	3.5	3.8	4.3	3.70
	maximum	7.9	9.6	8.2	7.6	8.2	9.1	
	minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	

**Table 3.** Mean, maximum and minimum of  $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $\mu\text{M}$ ) at each station in all observation periods.

	Station	15	2	3	6	8	9	mean
surface	mean	12	12	15	11	9	9	11.3
	maximum	407	151	679	108	77	326	
	minimum	0	0	0	0	0	0	
bottom	mean	14	13	12	7	8	7	10.2
	maximum	89	85	114	52	50	58	
	minimum	0	0	0	0	0	0	

**Table 4.** Mean, maximum and minimum of  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $\mu\text{M}$ ) at each station in all observation periods.

	Station	15	2	3	6	8	9	mean
surface	mean	1.0	0.9	1.0	0.8	0.9	0.8	0.90
	maximum	17.1	4.5	7.8	5.7	6.9	7.7	
	minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
bottom	mean	1.8	1.7	1.7	1.3	1.3	1.1	1.48
	maximum	15.1	7.1	10.7	7.1	5.4	5.1	
	minimum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	



**Figure 3.** Water temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) three years running mean of each month at Stn. 3. Values of January (solid circles), March (open circles), May (solid squares), July (open squares), September (solid triangles), November (open triangles) after 1950 were calculated.

の11月頃まで $2.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下が継続することもみられた。

#### $\text{NH}_4\text{-N}$

全期間の $\text{NH}_4\text{-N}$ を調査点ごとにみると (Table 3), 平均値は表層が $9\sim 15\ \mu\text{M}$ , 底層が $7\sim 14\ \mu\text{M}$ であり, 湾奥で高く, 湾口で低くなる傾向がみられた。最大値は表層が $77\sim 679\ \mu\text{M}$ , 底層が $50\sim 114\ \mu\text{M}$ であり, 表層での濃度が底層より著しく高かった。最大は表層・底層とも Stn. 3であった。

Stn. 3における表層と底層の $\text{NH}_4\text{-N}$ の変動をみると (Fig.

2), 表層は1962年頃までは少なく, 1963年頃から急上昇し, 1969~1970年に最大となった。1969年5月に全期間最大の $679\ \mu\text{M}$ を記録した。さらに1974年頃にピークがあり, その後減少し1980年以降, 夏季は $5\ \mu\text{M}$ 前後, 冬季はやや多く $10\ \mu\text{M}$ で推移した。2002年以降は年間を通して $5\ \mu\text{M}$ 程度で推移している。底層では1969~1970年には春季に $30\ \mu\text{M}$ 程度の増大がみられた後, 一旦減少し, 1974年に最大となった。1975年以降低濃度で推移したが, 1994~1998年頃には高めで経過した。1995年8月に全期間最大の $114\ \mu\text{M}$ を記録した。2004年以降は $5\ \mu\text{M}$ を下回る値もみられ, 1960年代前半と同程度になった。

#### $\text{PO}_4\text{-P}$

全期間の $\text{PO}_4\text{-P}$ を調査点ごとにみると (Table 4), 平均値は, 表層で $0.8\sim 1.0\ \mu\text{M}$ , 底層で $1.1\sim 1.8\ \mu\text{M}$ であり, 表層より底層の方が高く, 湾奥で高い傾向にあった。また, 内湾中央部付近より, 千葉県側で低い傾向にあった。最大値は表層が $4.5\sim 17.1\ \mu\text{M}$ , 底層が $5.1\sim 15.1\ \mu\text{M}$ であり, いずれも湾奥の Stn. 15が最大であった。

Stn. 3における表層と底層の $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動をみると (Fig. 2), 表層では,  $\text{PO}_4\text{-P}$ の上昇は $\text{NH}_4\text{-N}$ のそれ (1963年頃) よりもやや遅く1965年頃に始まり, ピークは1977~1978年頃にみられた。最大値 ( $7.8\ \mu\text{M}$ ) は1977年6月に観察された。その後は減少傾向で, 1990年代後半以降は春~夏季に著しく減少し,  $0.5\ \mu\text{M}$ を下回るようになった。底層では夏季に高く, 秋冬季に減少する。表層よりやや早く, 1960年代前半から上昇し, 1973年頃にピークがみられた。その後, 減少したが, 夏季に高い状況が続いた。秋冬季は1980年代後半から $1\ \mu\text{M}$ を下回る値がみられ, 1990年代後半は著しく減少し,  $0.5\ \mu\text{M}$ を下回ることもあった。2001年以降はやや増加している。

#### 透明度

全期間の透明度の平均値, 最大値, 最小値を調査点ごとにみると (Table 5), 平均は $2.7\sim 3.8\text{ m}$ であり, 湾奥で低く, 湾口部で高い傾向であった。全期間の最大値は Stn. 8の $19\text{ m}$ , 最小値は Stn. 15, 6, 2の $0.3\text{ m}$ であった。

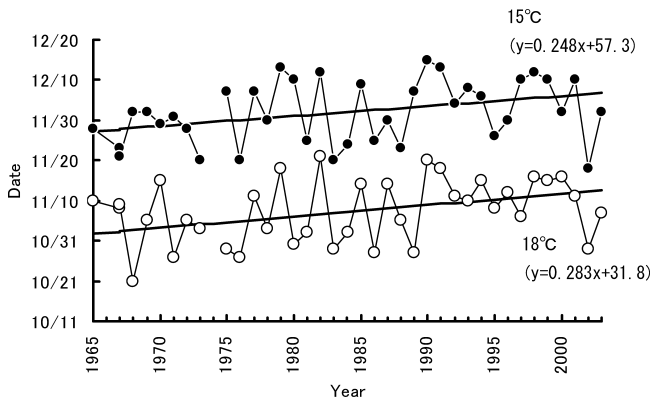
Stn. 3における透明度の変動をみると (Fig. 2), 1950年代後半から低下し始め, 1960年以降, 夏季に赤潮の基準となる $1.5\text{ m}$ 以下に低下するようになった。1965~1970年代後半が $1.5\text{ m}$ 以下の状況が多く, その後回復し, ほぼ $1.5\text{ m}$ 以上になった。1980年代後半以降は11月, 12月頃に $5\text{ m}$ 以上の値が観測されるようになった。1983年頃と2000~2003年頃に一時期上昇しているが, 前者は1983年11月に $10\text{ m}$ 以上, 後者は1999年11月, 2000年11月, 12月に $10\text{ m}$ 前後を記録したためである。

#### 秋季の水温降下時期の変化

Stn. 8における水温が $18^{\circ}\text{C}$ 台および $15^{\circ}\text{C}$ 台であった最終日の経年変化 (Fig. 4) をみると,  $18^{\circ}\text{C}$ 台を下回る時期は, 1960年代は11月初めであったが, その後徐々に遅くなり,

**Table 5.** Mean, maximum and minimum of transparency(m) at each station in all observation periods.

Station	15	2	3	6	8	9	mean
mean	2.7	3.0	2.9	3.4	3.7	3.8	3.25
maximum	12.0	15.0	12.0	13.0	19.0	16.0	
minimum	0.3	0.3	0.4	0.3	0.8	0.4	



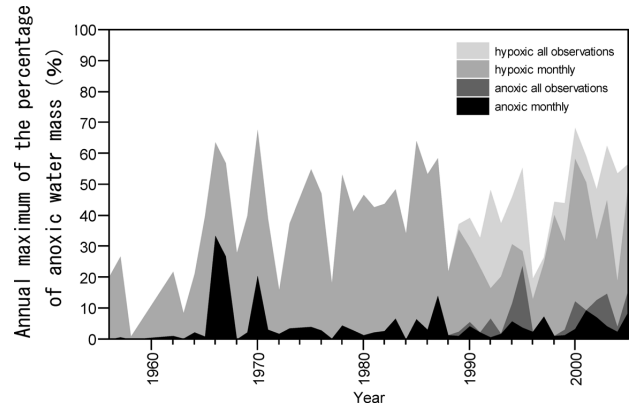
**Figure 4.** Changes of the dates to reach 18°C and 15°C at Stn. 8 each year. Three years running mean was calculated from the values observed from 1967 to 2001 at Stn. 8 by Shichishimaru, the watch ship for oil pollution, and then, last days in the periods of 18°C (open circles) and 15°C (solid circles) were determined for each year. Straight lines are regression.

1990年代には11月10日頃となっていた ( $y=0.283x+31.8$ , 10月1日を0とする)。15°C台を下回る日は、1960年代は11月末頃であったのに対し、1990年代には12月5日頃となった ( $y=0.248x+57.3$ , 10月1日を0とする)。いずれも統計的に有意な遅延傾向が認められた ( $p<0.01$ )。

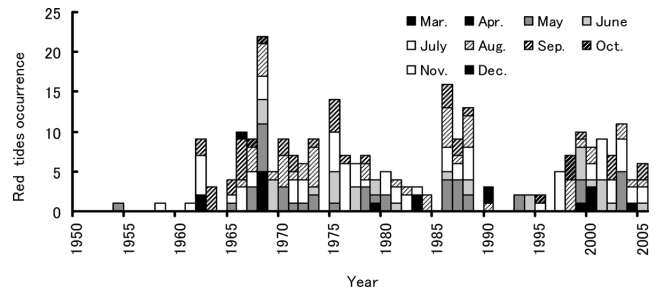
**貧酸素水塊の規模**

1956~2005年の鉛直縦断面の貧酸素水および無酸素水が占める面積割合の中で年ごとの最大規模割合の変化をみると (Fig. 5), 貧酸素水塊は1965年までは30%以下で小規模であった。1966~1987年は、1972年と1977年に20%以下に低下した2年を除いて、30~60%台で推移し、貧酸素水割合が大きかった。これに対して、1988年以降は、1988年から1996年の間に小さくなったが、2000年以降、再び上昇した。無酸素水塊は1965年までは1~2%程度であったが、1966年に33%、1967年に27%に急激に増加した。その後3年間は低下し、1970年に再び20%に増加した。その後減少し、1980年代、2000年以降やや増加していた。

夏季を中心として概ね週1回観測された値を解析に加えると、貧酸素水・無酸素水割合が増加する年もみられたことから、貧酸素水塊・無酸素水塊の大きさがその時の海況によって短期間で変動することが示された。



**Figure 5.** Change of annual maximum of the percentage of hypoxic ( $2.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ , gray and light gray) and anoxic ( $0.5\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$ , black and dark gray) water mass in the vertical cross section in Tokyo Bay. Gray and black show the results from monthly fixed observation only while light gray dark and gray for data since 1989 show all observations for each year.



**Figure 6.** Annual changes in the number of red tides occurrence defined as when transparency was less than 1.5 m, pH was more than 8.5 and DO was more than 150% at six stations (Stns. 15, 2, 3, 6, 8, 9). If one factor was not observed, the other two factors were referred to for judgment. If two factors were not observed, the data were excluded. The data were totalized by an odd number months from 1952 to 1965, and in all months since 1966 but 1974.

**赤潮の発見数**

6調査点での赤潮の発生 (Fig. 6) は、1954, 1958, 1961年にそれぞれ1回ずつみられた後、1962年以降急増した。最も多かったのは1968年の22件で、次第に減少したが、1986~1988年の3年間は多かった (9~16件)。1989年以降

1990年代前半は少ない状況が続き、1997年頃からやや多い状況が続いていた(4~11件)。

## 考 察

### 秋冬季の水温上昇とその影響

本研究により、東京湾の水温の長期変動は、36ヶ月移動平均では上昇傾向が認められたが、夏季に限ってはむしろ低下傾向にあり、秋~冬季の水温上昇によって年間平均値の上昇が起きていたことがわかった。このことは安藤ほか(2003)の1976~1998年の解析結果や八木ほか(2004)の1960~1975年と1993~2003年の比較結果(一部今回の解析データを含む)と一致していた。9月、11月の水温上昇は秋季の水温降下時期の遅れとなり、1月の水温上昇は最低水温の上昇となる。同様に7月に観察された密度差の低下は、表層水温が低下傾向を示していることと関係していると考えられた。一方、秋冬季の密度差は徐々に増加し、近年は鉛直混合の遅れが推察される。

秋季の水温上昇は、成層の長期化、鉛直混合の遅れにつながり、東京湾の海洋環境で大きな問題となっている貧酸素水塊の長期化、解消時期の遅れを引き起こしている。今回の解析結果から、近年10月の表層と底層の密度差が上昇しているのに併せて、11月の底層のDOが低下していることが示された。10月になっても十分に鉛直混合が行われないため、貧酸素水塊が晩秋まで継続することになる。東京湾では、夏季に広い範囲で底生生物が壊滅状態になるが、貧酸素水塊の解消後再び回復することが知られている(風呂田, 1988)。移動性の小さい二枚貝やゴカイなどの多毛類は、貧酸素水塊解消以降に浮遊幼生の着底がないと、その年の回復は望めないため、貧酸素水塊の解消の遅延は底生生物の再生産に大きく影響する。

また貧酸素化により底泥から溶出する $PO_4\text{-P}$ は、成層が強い間は底層に多く分布していた。これも鉛直混合の開始が遅くなったため、11月に増加傾向となったと考えられる。

### 水温の周期的な変化に伴うその他の水質項目への影響

7月および9月の表層水と底層水の密度差すなわち成層の強さは、1960年頃、1968年頃、1975年前後、1985年前後、1998年前後に大きい。一方、東京湾縦断面分布の貧酸素水割合は1965年~1977年、1985年前後、1990年代後半に大きくなっており、成層の強さと対応していることが窺われた。貧酸素水割合の増減は、透明度や赤潮発生件数とも連動する傾向を示していた。透明度が小さく、赤潮発生件数が多かった1960年代半ばから1970年代後半、1980年代後半および2000年前後の貧酸素水割合は高かった。その時期は東京湾底層水の貧酸素化によって底泥から溶出する $PO_4\text{-P}$ も11月に増加傾向であった。底層水中の $PO_4\text{-P}$ が高いことについては、底泥に蓄積されたリンが貧酸素状態で溶出した影響によるものと考えられる。また、1980年

代後半から1990年代の7月、9月の底層の $PO_4\text{-P}$ が減少する傾向を示しているが、この時期は貧酸素水割合(Fig. 5)も低下しており、底層の $PO_4\text{-P}$ は貧酸素水の発達と関連していることが窺われる。

赤潮の発生件数が少なかった1980年代前半および1989年~1990年代は、表層と底層の密度差が小さく、成層の形成が弱かったことや、貧酸素水割合も小さかったこと、透明度の最低値もやや高かったことなどほぼ一致しており、その時(年)の海況条件によって影響される富栄養化の程度によって赤潮の発生回数が異なったことが窺われる。

秋季の水温上昇は、東京湾の重要漁業であるノリ養殖に影響を与える。東京湾におけるノリ養殖では $18^\circ\text{C}$ 以下になると生産を開始し、 $15^\circ\text{C}$ 以下になると赤腐れ病などの病害の発生が少なくなり、この水温範囲が安定して生産できる目安となる。 $18^\circ\text{C}$ 台を下回る時期は、1960年代の10月末から、1990年代の11月10日頃に変化し、 $15^\circ\text{C}$ 台を下回る日は、1960年代の11月20日頃から、1990年代には11月末頃といずれも約10日間遅れたことになる。また最低水温の上昇は、近年ノリの色落ちで問題となっている冬季の珪藻赤潮に対しても、珪藻の増殖速度の増加の可能性が考えられている(西川, 2002; 佐々木・鬼頭, 2003)。

### 富栄養化関連項目の動向

栄養塩類の動向をみると、表層水の $NH_4\text{-N}$ は1965年頃から上昇し、1970年前後にピークとなり、その後は増減を繰り返しながら、減少傾向を示しており、最も濃度が高くなった時期以前の値と比べると、1960年代前半頃の状態まで回復したことになる。1960年代後半から1990年代前半までは、鉛直循環で底層から表層へ秋冬季に供給される $PO_4\text{-P}$   $0.5\ \mu\text{M}$ を超えていたが、近年は1月以降 $0.5\ \mu\text{M}$ を下回り、3月頃には著しく減少し、ノリ養殖業に問題が出てきている。1990年までを解析した野村(1995)によると、本海域の $PO_4\text{-P}$ は $1\ \mu\text{M}$ 前後で推移し、季節変化が明瞭でないと述べている。しかし、今回の結果から、1991年以降 $PO_4\text{-P}$ はさらに減少していることが示された。一方、底層水の $PO_4\text{-P}$ は表層水のそれと同様の変動傾向を示しているが、表層水よりも減少程度が小さい。陸域からの負荷量に大きく影響を受ける表層とは異なり、底泥からの溶出に影響を受けるため、貧酸素水塊が解消傾向にないことが原因と考えられた。

上記のような東京湾の水質を富栄養化現象との関係で総合的にみると、 $NH_4\text{-N}$ と $PO_4\text{-P}$ が高かった1960年代半ばから1970年代半ばにかけて、透明度が低く、赤潮発生件数が多く、東京湾縦断面分布で示された貧酸素水割合も高かった。その後、総量規制による陸域からの窒素、リン、COD負荷量削減の効果によって、水質は改善されつつあることがわかる。また、これらの富栄養化に関わる項目は、年毎の海況条件によっても変動するが、このような変動は



表層と底層の密度差による成層の強さとも関連していることが示唆された。

しかし、夏季の貧酸素水割合の増加は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少と透明度の増加に比べてそれほど減少していないことが今回の解析によって判明した。上述したように、貧酸素水の発生は、上層における赤潮の発生および海底に分布する還元状態の底泥と密接に関係している。赤潮の発生は陸域からの窒素とリンの供給および成層化に依存する。このうち現在では、窒素、リン、COD物質の負荷量が減少している。しかし、秋冬季水温の上昇によって成層が晩秋にまで継続する傾向を示していることや、酸素消費量と関係する夏季の還元状態の底泥の分布域に変化がないことが、貧酸素水割合が減少しないことに大きく関係していると推定される。しかしながら、1990年代に入った後、大規模な青潮による貝類の大量へい死現象の発生件数は少なくなっている（柿野，1986，2006）。青潮の発生回数が少なくなったことと青潮によるアサリの大量死亡件数が少なくなったことから、貧酸素水中の硫化物濃度が減少している可能性が考えられる。

透明度については、赤潮の影響が主である夏季の7月、9月にはそれ程増加していないのに対して、11月、1月、3月では増加傾向にあった。特に、1999年以降、10m以上の高い透明度が観測されている。秋冬季の強い鉛直混合期間は、高水温を好む渦鞭毛藻の増殖が抑制され、松山(2003)によると遊泳力を持たない珪藻は光条件に恵まれた表層付近に留まることができず下層に運ばれ、増殖が抑制されると考えられている。このことは冬季において東京湾が赤潮以外の濁度成分も減少していることを示唆している。

#### 東京湾の海況長期変動と漁業との関係

東京湾の、養殖を含む漁業総生産量は最も多かった1950年代半ばから1960年代にかけて約16万tであったが、1993年には4万tを下回るまで減少した（社団法人漁業情報サービスセンター，2004）。減少量の最も多いのは二枚貝類であるが、このうち沖合に生息するアカガイ、トリガイ、サルボウなどについては、壊滅的に減少している。漁船漁業の重要生物であるカレイ類漁獲量の減少は大きく、1970年代後半から1990年代後半までは1000~2000t漁獲されたものが、1999年以降は500t以下に減少している（清水，2003）。カレイ類、アカガイ、トリガイ、ガザミ類の漁獲量の経年変化（関東農政局千葉農政事務所，1959~2006）と前述した無酸素水塊割合の各年の最大値の経年変化（Fig. 7）をみると、カレイ類は1960年代には300~1000tの漁獲があったが、無酸素水割合が拡大した数年後に、100~200tに激減した。その後1973年以降回復し、400~1500tで経過したが、1999年以降減少し、200t台で推移している。アカガイは、1969年以降のデータしかないが、1969年に5000t漁獲された後、減少し続け、1980年以降で

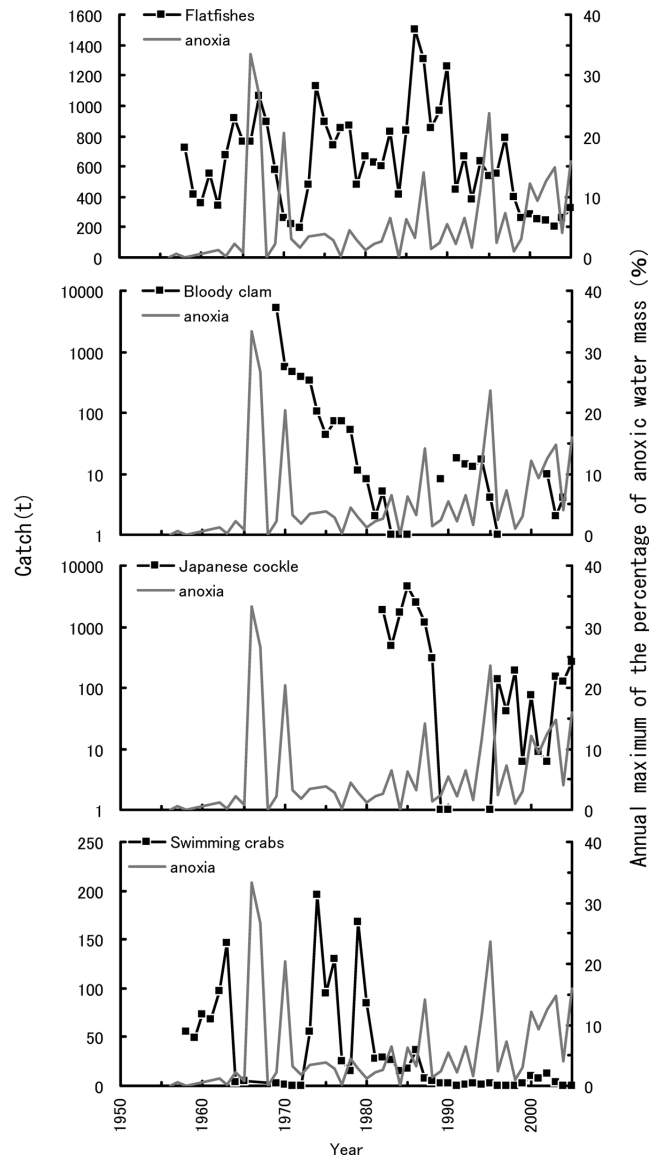


Figure 7. Annual catch of flatfishes, bloody clam (*Anadara broughtoni*), Japanese cockle (*Fulvia mutica*) and swimming crabs and change of annual maximum of the percentage of anoxic (gray line) water mass (after Chiba agriculture and forestry fisheries statistics annual report).

は10tを下回るようになった。1990年代に数年間10tの漁獲がみられたが、その後も低迷している。トリガイは1982年以降の漁獲データがあり、1988年までは変動が大きいものの300~4000tの漁獲があったが、以降ほとんど漁獲がみられなくなった。1996年以降再び漁獲されるようになり、変動が大きい、6~200tの漁獲で推移している。ガザミ類は1963年までは50~140tの漁獲がみられたが、1964~1972年は10t未満の漁獲が続いた。1973~1986年に再び漁獲がみられ、15~200tで推移したが、1987年以降はほぼ10t以下で推移している。1960年代後半に東京湾で最

も水質が悪化し、漁獲量が大きく減少したとき、栄養塩やCODだけでなく無酸素水塊が大規模に発生したため、直接的に水産生物に影響を及ぼしたと推察される。

このように、総じてベントスや底魚類漁獲量の減少が大きいことについては、夏季から秋季にかけて東京湾の底層に発達する貧酸素水によって生息域を制限されることが大きく影響していると考えられる。実際マコガレイやスズキなど海底もしくは海底付近に生息する水産生物は、夏季貧酸素水塊を避けて分布し(石井, 1992; 石井・加藤, 2005など)、夏季には毎年東京湾の広い範囲の海底で無生物域が広がる(風呂田, 1988)ことが知られている。しかし、近年になって、トリガイの資源量がやや増加し、漁場を形成することがある(千葉農林水産統計年報による)。また柿野(2006)、青木(1999)および千葉県環境生活部の資料によると、青潮の発生による湾奥部海域のアサリ大量へい死事例は近年少なくなった。今回の解析ではうまく捉えられなかったが、一部生物に対する貧酸素水の影響がやや弱まったのかもしれない。ただし、貧酸素水塊の晩秋化が懸念される。夏季に海底で死滅したベントス、特に移動性の小さい種は、貧酸素水塊解消後に着底して翌春に豊富な生物量になっているようである。今林(1998)は、著しく貧酸素化してベントス相が崩壊した海域では、その後の回復が速く、豊富な酸素下のマクロベントス群集を凌駕することがあると報告している。トリガイやアカガイの発生状況をみても、台風や青潮などにより、例年より早く貧酸素水塊が解消もしくは縮小した年に発生している可能性が大きい(石井・庄司, 2005)。今回示された秋季の貧酸素水塊の解消の遅延は、ベントスの資源回復に大きな妨げになる可能性が大きい。

一方、東京湾のノリ養殖は、浮き流し養殖の発達など多くの技術開発によって、経営体数や浅海漁場が大きく減少したにも関わらず、生産を維持していた。近年になり、秋季の水温低下の遅れによる漁期の短縮や漁期末のリン不足の影響を受けている。ノリ養殖では23°C以下で網を張り込み、育苗を開始し、18°C以下で生産を開始する。そして15°C以下になると、赤腐れ病などの病害が発生しにくくなるので、生産が安定する目安とされている。今回の分析結果から、秋冬季の水温は上昇が示された。18°C以下となる時期が20年間で1週間、15°C以下になる時期が5日間遅くなっていることが示された。結果としてノリ養殖の生産開始時期の遅れにより、生産期間が短縮している。くわえて、今回の長期変動の解析で、 $PO_4\text{-P}$ は3月に顕著に減少することが明らかになったが、この減少した $PO_4\text{-P}$ が珪藻赤潮の発生によって更に低栄養の状態となり、養殖ノリの色落ちによる品質低下などの重大な影響が発生していることが考えられる(石井ほか, 2008)。東京湾では、総量規制などにより負荷量が減少し、水質が改善されているが、夏季の貧酸素水の発生が抑制されるには至っていない。

一方、降雨などリンの負荷要因が少なくなる冬季には、低栄養の状態が出現していると解釈するのが合理的である。よって、これらのことを総合すると、夏季には窒素、リンなど栄養塩類の負荷量をさらに減少させ、冬季にはむしろ内湾本来の生産力を増大させるなどの、きめの細かい水質規制が必要な状況になりつつあると考えられる。

## 謝 辞

水質調査・水質分析に携わってきた皆様に敬意を表するとともに、本研究をまとめるにあたり、東京海洋大学の荒川久幸准教授にご指導いただきました。ありがとうございます。また原稿に対して建設的なご指摘を頂いた査読者に深謝します。

## 引用文献

- 安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・山崎正夫(2003) 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**, 407-413.
- 青木延浩(1999) 貧酸素水塊形成機構とその挙動。月刊海洋, **31**, 477-485.
- 海老原天生(1972) 最近の東京内湾千葉県沿岸部における水質について。水産海洋研究会報, **20**, 20-38.
- 風呂田利夫(1988) 東京湾における貧酸素水の底生・付着生物群集に与える影響について。沿岸海洋研究ノート, **25**, 104-113.
- 今林博道(1998) 貧酸素下のベントスの生残戦略。月刊海洋, **30**, 125-132.
- 石井光廣(1992) 東京湾におけるマコガレイの分布・移動。千葉水試研報, **50**, 31-36.
- 石井光廣(2003) 東京湾に発生する貧酸素水塊の規模の評価方法について。千葉水研研報, **2**, 29-37.
- 石井光廣・長谷川健一・松山幸彦(2008) 東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因: 栄養塩の長期変動および最近の珪藻赤潮発生。水産海洋研究, **72**, 22-29.
- 石井光廣・加藤正人(2005) 東京湾の貧酸素水塊分布と底びき網漁船によるスズキ漁獲位置の関係。千葉水研研報, **4**, 7-15.
- 石井光廣・庄司泰雅(2005) 東京湾における2003年のアカガイ大量発生。千葉水研研報, **4**, 35-39.
- 柿野 純(1986) 東京湾奥部における貝類へい死事例 特に貧酸素水の影響について。水産土木, **23**, 41-47.
- 柿野 純(2006) アサリの減耗に及ぼす物理化学的環境の影響に関する研究。水産工学, **43**, 117-130.
- 関東農政局千葉農政事務所(1959-2006) 千葉農林水産統計年報, 1958-2005
- 松山幸彦(2003) 有害渦鞭毛藻*Heterocapsa circularisquama*に関する生理生態学的研究-I *H. circularisquama*赤潮の発生および分布拡大機構に影響する環境要因等の説明。水研センター研報, **7**, 24-105.
- 西川哲也(2002) ノリの色落ち原因藻*Eucampia zodiacus*の増殖に及ぼす水温、塩分および光強度の影響。日本誌, **68**, 356-361.
- 野村英明(1995) 東京湾における水域環境構成要素の経年変化。うみ, **33**, 107-118.
- 野村英明(1998) 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷。海の研究, **7**, 159-178.
- 佐々木和之・鬼頭 鈞(2003) 有明海で発生した珪藻*Rhizosolenia imbricata* Brightwellの増殖特性。日本プランクトン学会誌, **50**, 79-87.
- 社団法人漁業情報サービスセンター(2004) 東京湾の漁業と資源

- その今と昔. 273 pp.
- 清水 誠 (2003) 漁業資源から見た回復目標. 月刊海洋, **35**, 477-482.
- 田辺 伸・山口利夫 (1995) 東京湾の長期水質変化について—I 水温・塩分・底層の溶存酸素量の変化. 千葉水試研報, **53**, 63-72.
- 東京湾岸自治体環境保全会議 (2005) 東京湾水質調査報告書 (平成15年度), 東京湾岸自治体環境保全会議, 東京都同胞援護会事業局, 東京都, 48 pp.
- 八木 宏・石田大暁・山口 肇・木内 豪・樋田史郎・石井光廣 (2004) 東京湾及び周辺海域の長期水温変動特性. 海岸工学論文集, **51**, 1236-1240.
- 柳 哲雄 (1989) シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 141-145.