

# 東京湾における溶存態有機物と懸濁物による濁度の分布 および各起因物質との関係

成田美穂<sup>\*1</sup>, 荒川久幸<sup>\*1</sup>, 下田 徹<sup>\*2</sup>, 森永 勤<sup>\*1</sup>

(Received November 9, 2005)

## Distribution of Seawater Turbidity Due to Dissolved Organic Matter and Suspended Matter in Tokyo Bay and the Correlation with the Contributing Matter

Miho Narita<sup>\*1</sup>, Hisayuki Arakawa<sup>\*1</sup>, Toru Shimoda<sup>\*2</sup> and Tsutomu Morinaga<sup>\*1</sup>

**Abstract:** The seawater turbidity in Tokyo Bay was measured by origins, namely, from suspended matter and dissolved organic matter, and a seasonal change of each turbidity was investigated. In addition, the relationship between each turbidity and the quantity of contributing matter was examined.

The turbidity (beam attenuation coefficient  $C'_{(488)}$ :  $m^{-1}$ , wavelength: 488 nm) was high in the bay head, and it decreased near the mouth of the bay. The turbidity of the bay head was the highest in summer, showing  $4.4 m^{-1}$ . In winter, it decreased to ca. 1/4 of that observed in summer. The beam attenuation coefficient  $C'_{DOM(488)}$  due to the dissolved matter was the highest in the bay head, showing ca.  $0.6 m^{-1}$ . The turbidity of the dissolved matter was smaller near the mouth of the bay, measuring ca.  $0.1 m^{-1}$  off Sunosaki. The seasonal variation of this turbidity was large in the bay head, and it had a tendency to be smaller near the mouth of the bay.

The beam attenuation coefficient due to the dissolved organic matter had a high positive correlation ( $r=0.70$ ) with DOC. The beam attenuation coefficient due to the suspended matter had a high positive correlation with SS, POC, or Chl. *a*. Their correlation coefficients at wavelength 488 nm ranged from 0.72 to 0.87.

**Keywords:** Tokyo Bay, Turbidity, Suspended Matter, Dissolved Organic Matter, Contributing Matter, beam attenuation coefficient, POC, DOC

### はじめに

東京湾は大都市や工業地帯を流れる河川水が流入しており、その海水には多量の懸濁物および溶存物が含有されている。このことに加え、湾口部が狭く、閉鎖性が高いことから湾内では植物プランクトンの異常発生などが起こりやすい条件を有している。

東京湾の濁りは1950年代から増加し、1970年代前半の高度経済成長期を最大として、その後種々の排水規制に伴ってわずかに低下した(坪田ら, 1975)。しかし、観音崎と富津の以北では現在でも富栄養状態と相まって、懸濁態有機物による濁りが著しく、非常に高い濁度となっている。

従来、東京湾における濁りの分布および懸濁物量との関係に関する研究には、Matsuike *et al.* (1986)、森永 (1986)、才野 (1988)、Yanagi *et al.* (1989, 1990)、および Arakawa

*et al.* (2003)、がある。Matsuike *et al.* (1986) は海水の濁りの指標を濁度(光束消散係数)で定義し、春季から夏季にかけて湾口・湾奥部を広く観測した。その結果、4月から9月にかけての湾内の濁りは水平的には湾口より湾奥で高く、鉛直的には下層より上層で高いことを明らかにした。また、濁りの分布と水塊構造との関連については、湾口部では関連が低い、湾奥部では上層の高濁度と高温・低塩分、下層の低濁度と低温・高塩分が対応することを報告した。森永 (1986) は濁度と懸濁量との関係について理論的検討を行い、回帰直線の勾配には懸濁粒子の平均粒径と密度が関与することを明らかにした。また、湾内の両者の回帰直線式は  $Y = 0.24 X + 0.49$  ( $Y$ : 濁度 ( $m^{-1}$ ),  $X$ : 懸濁物量 (ppm)) で表された。才野 (1988) は栄養塩類の動態を明らかにする目的で、湾内の濁りの分布を調べ栄養塩の鉛直循環と関連付けた。Yanagi *et al.* (1989) は、湾口部における濁度(光束透過率)の詳細な鉛直分布の経時変化

\*1 Department of Ocean Sciences, Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology (4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan) (東京海洋大学海洋科学部海洋環境学科)

\*2 Ishigaki Tropical Station, Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency. (148-446, Fukai-Ohta, Ishigaki-shi OKINAWA 907-0451 JAPAN) (西海区研究所石垣支所海洋環境研究室)

から、濁った海水が湾外へ間欠的に流出する様相を述べた。また、Arakawa *et al.* (2003) は、浦賀水道の富津側と観音崎側の両測点において、濁度の潮汐変化を詳細に調べ、懸濁物の流入量と流出量を明らかにした。これらの研究によって、湾内における濁りの時空間分布や濁度と懸濁物量との関係に関する断片的理解は得られている。しかしながら、湾内の濁りがどのような物質に因って生じ、さらにどのように分布・変動しているのかという問題について、未だ詳細に検討されていない。海の濁りは海水中の溶存態有機物、懸濁態有機物および懸濁態無機物によって生起している。このため、濁りを起因物質に分けて明らかにすることは、東京湾の物質循環を解明する上で重要であるといえる。また、濁りの指標である光束消散係数と濁りに関連する指標物質量との定量的な関係が解明されれば、湾内の物質量の推定にも役立つと考えられる。

そこで、本研究では東京湾全域（洲崎～城ヶ島以北）において、海水の濁度を起因物質別に測定し、湾内の濁り分布の全体像を明らかにした。同時に各種の濁り指標物質（SS, IL, POC, Chl. *a*, DOC）を調べ、濁度との定量的な関係について検討した。

## 観測方法

観測は1999年7月、10月、2000年1月、4月に東京湾内の18の観測点で、東京海洋大学練習船青鷹丸により行った（Fig.1）。各観測点で光束透過率計（C Star；Wet Labs

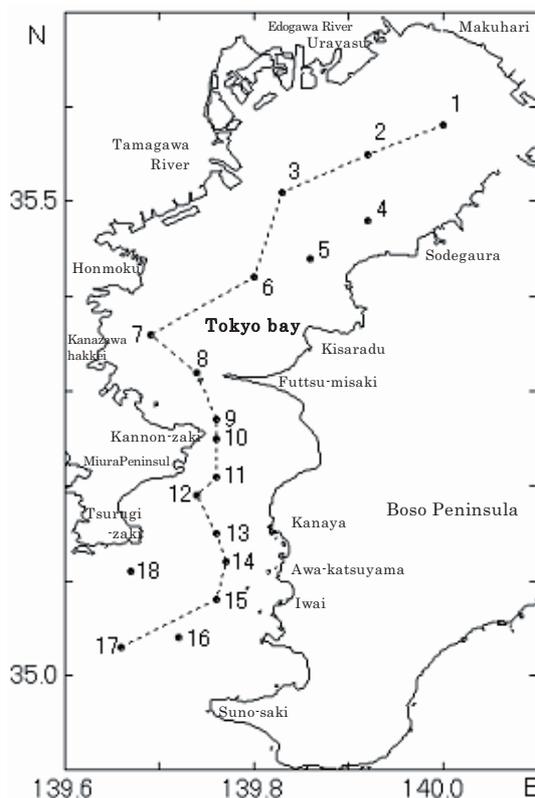


Fig.1 Observation stations in Tokyo Bay. The vertical section along broken line is shown in Fig.3, 6, and 9.

Inc., 光路長 25 cm, 測定波長 488 nm および 660 nm) を装備した CTD (OS 200; Ocean Sensors Inc.) を海面から海底付近まで垂下し、水温、塩分および光束消散係数のデータを取得した。また、これらの計測と同時に採水バケツによる海面（0 m）採水、バンドン採水器による 10 m 深および 20 m 深での採水を実施した。

濁度の指標として光束消散係数を定義し、次式から海水の濁度（光束消散係数,  $C'_{( )}$ ,  $m^{-1}$ ）を算出した。

$$\text{算出式: } C'_{( )} = (-1/r) \times \ln[(V_{( )} - V_{d( )}) / (V_{r( )} - V_{d( )})]$$

ここで、 $r$  は光路長 (m),  $V_{( )}$  は海水サンプル測定時の電圧,  $V_{r( )}$  は純水測定時の電圧,  $V_{d( )}$  は暗電圧を表す。は測定に使用した光の波長である。

海水の濁度  $C'_{( )}$  は溶存態有機物による濁度  $C'_{DOM( )}$  と懸濁態の有機物および無機物による濁度  $C'_{P( )}$  の和である。

溶存態有機物による濁度（光束消散係数,  $C'_{DOM( )}$ ）は、以下のように測定した。サンプルは現場で得た試水をグラスファイバーフィルター（Whatman Inc. GF/F）にて吸引ろ過した後、ろ液を船上において -20 で凍結させた。研究室へ持ち帰り計測の直前に自然解凍した。光束透過率計 C Star にフロウセルを取り付け、フロウセル内へサンプルを満たした。海水の濁度と同様の算出式から溶存態有機物による濁度を求めた。

また、懸濁物による濁度（光束消散係数,  $C'_{P( )}$ ）は、海水の濁度（ $C'_{( )}$ ）から溶存態有機物による濁度（ $C'_{DOM( )}$ ）を差し引き求めた。

$$\text{算出式: } C'_{P( )} = C'_{( )} - C'_{DOM( )}$$

なお、溶存態有機物による濁度（ $C'_{DOM( )}$ ）および懸濁物による濁度  $C'_{P( )}$  のデータは海面、10 m 深、および 20 m 深の三層について求めた。

一方、同時に採水した試料は現場で直ちに前処理し、溶存態有機炭素濃度（DOC）、懸濁粒子量の指標として懸濁物濃度（SS）、無機懸濁物量（PIM）の指標として強熱減量（IL）、有機懸濁物量（POM）の指標として POC、および有機懸濁物のうち植物プランクトン由来の指標として Chl. *a* 濃度をそれぞれ測定した。

溶存態有機炭素濃度（DOC）は、試水をグラスファイバーフィルター（Whatman Inc. GF/F）にて吸引ろ過した後、ろ液に塩酸（1 N）数滴加え、冷凍保存して持ち帰り、溶存有機炭素分析計（TOC 5000 A; SHIMADZU Inc.）により測定した。

SS 濃度は、メンブレンフィルター（Millipore Inc. Type; HA, 孔径: 0.45  $\mu$ m）で減圧ろ過した後、サンプルを 60 で 72 時間乾燥し、秤量して求めた。

強熱減量は SS の測定後のフィルターを坩堝に入れ、500 のマッフル炉で 4 時間加熱し、坩堝内の残渣を秤量した。全懸濁物中の有機物含有率（%）は次式で求めた。

$$IL = (1 - m_i/m_s) \times 100$$

ここで、 $m_i$  は坩堝の残渣重量,  $m_s$  は懸濁物重量である。

POC は、船上でグラスファイバーフィルター（Whatman Inc. GF/F）にて吸引ろ過した後、暗所で冷凍保存して持

ち帰り、フィルターを錫コンテナで包み、元素分析計 (E A-1108 ; Fisons Instruments Inc) で測定した。Chl. *a* 濃度は、船上でガラスファイバーフィルター (Whatman Inc. GF/F) にて吸引る過後、フィルターを N, Nジメチルホルムアミドに浸して Chl. *a* を抽出し、蛍光光度計 (10-AU ; Turner Designs Inc) で測定した。

### 観測結果 東京湾における海水の濁度の分布と その季節変化

Fig.2 は 1999 年 7 月, 10 月, 2000 年 1 月および 4 月の東京湾海表面における海水の濁度 (光束消散係数,  $C'_{488}$   $m^{-1}$ ) の水平分布である。1999 年 7 月では、湾奥幕張沖 (Sta.1) から湾中央部の観音崎沖 (Sta.10) まで光束消散係数が  $3.0 m^{-1}$  以上となっており、湾奥全体が高濁度水で

覆われていた。特に、袖ヶ浦沖 (Sta.4) および金沢八景沖 (Sta.7) での濁度は高く、光束消散係数は  $4.4 \sim 4.5 m^{-1}$  であった。観音崎沖 (Sta.10) から湾口部に向かって濁度は低くなり、最南の観測点 (洲崎沖 : Sta.17) で最低値の  $0.30 m^{-1}$  を示した。また、湾口部では三浦半島よりも房総半島に近い観測点で濁度が低くなる傾向が見られた。10 月では、光束消散係数  $3.0 m^{-1}$  以上の高濁度水は湾奥の浦安沖 (Sta.2), 袖ヶ浦沖 (Sta.4) から多摩川河口沖 (Sta.3) にかけて存在したが、最も湾奥の幕張沖の濁度は急激に低下し  $0.84 m^{-1}$  となっていた。1 月は湾全体の濁度が低下した。幕張沖と多摩川河口沖で  $1.0 m^{-1}$  が観測されたが、他の海域ではそれ未満となっていた。特に、湾口部の房総半島側では  $0.2 m^{-1}$  以下の清澄な海水で広く覆われていた。4 月では、1 月に比べると湾奥全体の濁度が高くなり、木更津沖 (Sta.6) で最高値  $2.39 m^{-1}$  を示した。これに対し、

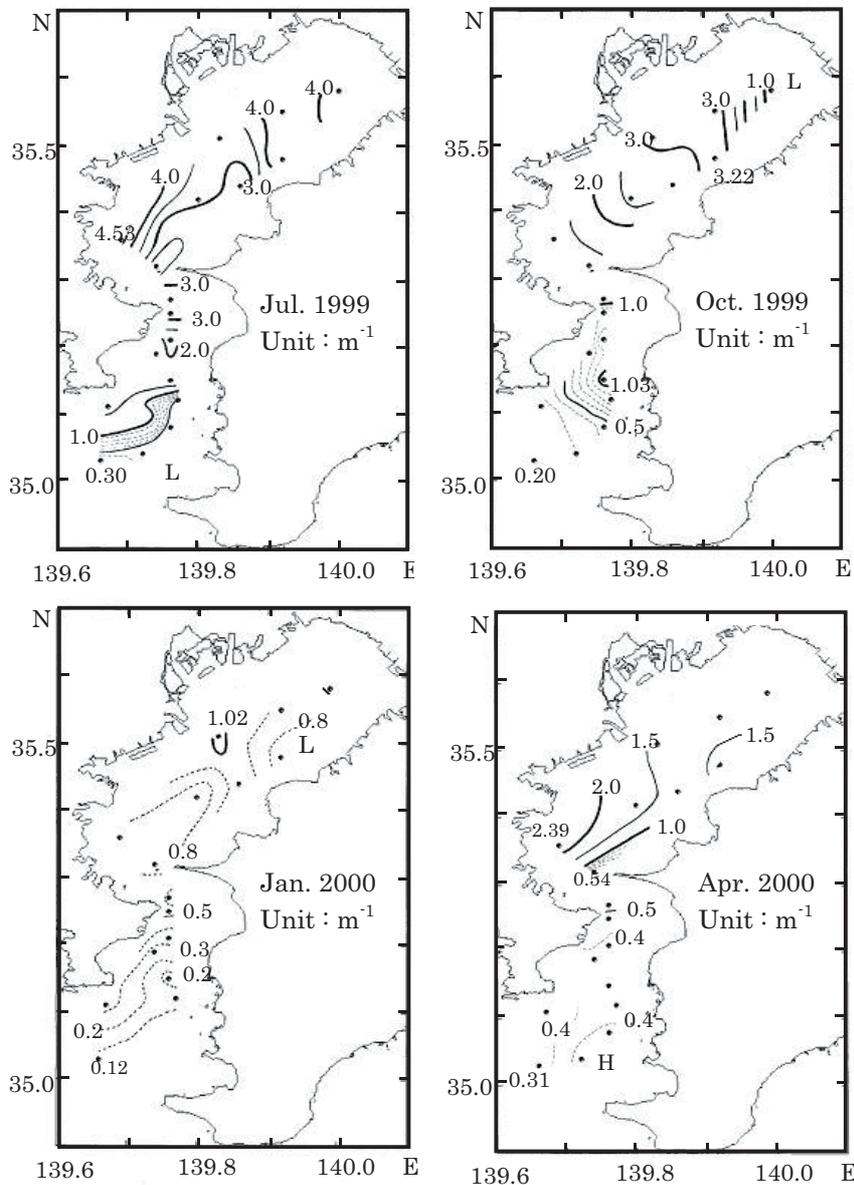


Fig.2 Seasonal changes of horizontal distributions of beam attenuation coefficient ( $C'_{488}$  :  $m^{-1}$ ) at the sea surface in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

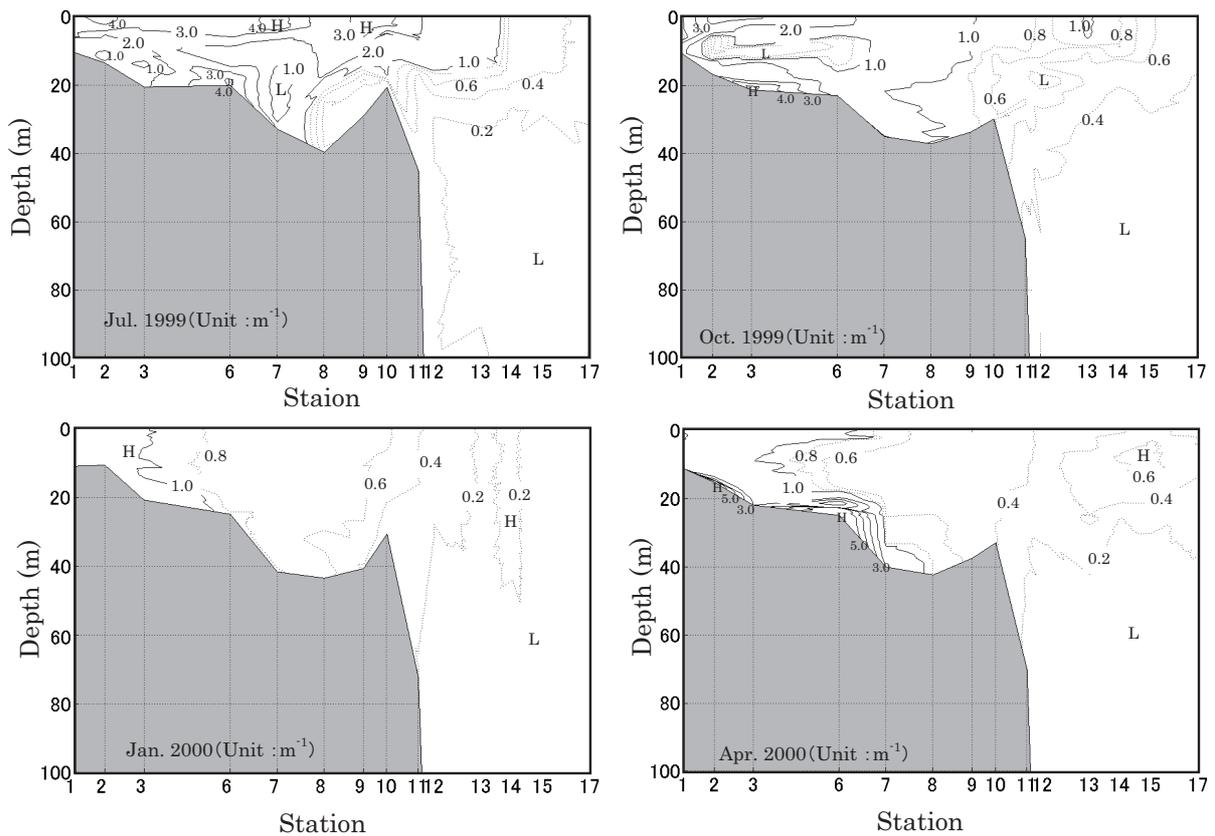


Fig.3 Seasonal changes of vertical distribution of beam attenuation coefficient ( $C'_{488}$ ;  $\text{m}^{-1}$ ) from Sta.1 to 17 in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

富津沖における濁度は  $0.54 \text{ m}^{-1}$  となっており、濁度が急激に低下していた。すなわち、東京湾の濁度は1年を通じて湾奥で高く、湾口ほど低かった。またこの変化の勾配は夏季に大きいことがわかった。

Fig.3 は東京湾における海水の濁度  $C'_{488}$  ( $\text{m}^{-1}$ ) の鉛直断面分布を示す。断面は Fig.1 の点線に沿っている。1999年7月の濁度の鉛直分布は、海表面で高く下層に向かって低くなった。特に湾奥部から湾中央部にわたる海域の5m以浅には光束消散係数  $3.0 \text{ m}^{-1}$  以上の高濁度水が分布していた。しかし、湾奥木更津沖 (Sta.6) では底層付近にも  $4.0 \text{ m}^{-1}$  の高濁度水が観測された。湾中央部の観音崎沖 (Sta. 9) 以南では底層付近に清澄な海水が分布していた。特に勝山沖 (Sta. 14) 以南では海表面から底層まで光束消散係数  $0.6 \text{ m}^{-1}$  以下であった。1999年10月では、 $3.0 \text{ m}^{-1}$  以上の高濁度水は湾奥幕張沖の10m以浅と浦安沖から木更津沖の海底付近に見られるだけであった。2000年1月には湾全体の海表面から底層まで鉛直的な勾配はほとんど無くなり、清澄な海水が一様に分布していた。2000年4月には、湾奥部から湾中央部の底層にかけて再び高濁度水が現れた。すなわち、濁度の鉛直分布は夏季には湾奥部から湾中央部の5m以浅において高濁度水 ( $3.0 \text{ m}^{-1}$  以上) が発達する。しかし冬季には濁度の鉛直的な勾配が小さくなることがわかった。

本研究では波長 488 nm による濁度の測定と同時に波長

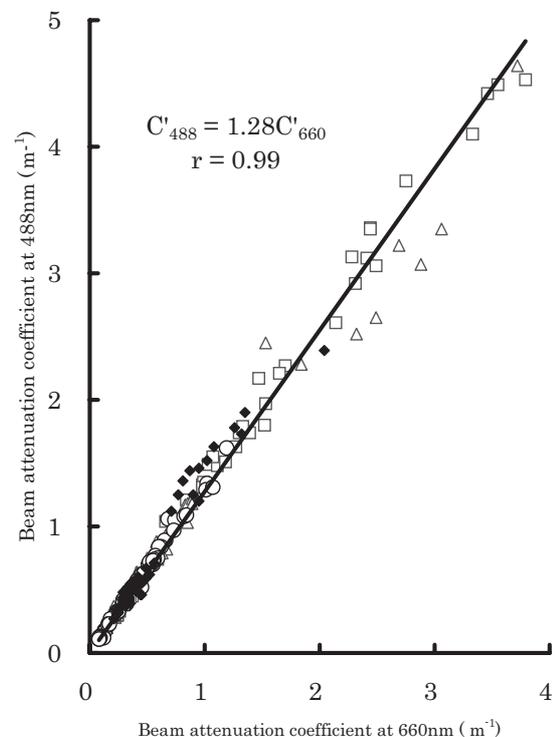


Fig.4 Relationship between beam attenuation coefficient at 488 nm ( $C'_{488}$ ) and beam attenuation coefficient at 660 nm ( $C'_{660}$ ). The symbols  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\triangle$ , and  $\blacklozenge$  indicate July 1999, October 1999, January 2000, and April 2000, respectively.

660 nm においても行った。1999 年 7 月, 10 月, 2000 年 1 月および 4 月の観測で得られた波長 488 nm および 660 nm における光束消散係数の関係を Fig.4 に示す。波長 488 nm における光束消散係数  $C'_{488}$  ( $m^{-1}$ ) と 660 nm における光束消散係数  $C'_{660}$  ( $m^{-1}$ ) は良い相関関係を示し, 次式で表される。

$$C'_{488} = 1.28 \times C'_{660} \quad (r = 0.999)$$

波長 488 nm における光束消散係数は 660 nm における光束消散係数よりも約 1.3 倍大きいことが分かる。これは溶存態有機物および懸濁態有機物による光の消散が長波長側より短波長側で大きいことに起因している。(Kalle, 1966. Burt, 1958) この関係式の傾きは, 溶存態有機物と懸濁態有機物の存在比で変化することから, 海域や季節で異なることが知られている。1999 年 7 月 ~ 2000 年 4 月において

季節ごとにわずかな相違が見られた。しかしその相違は顕著ではないため, 上式の関係が概ね成り立っており, 本調査期間において東京湾の濁度の分布は, 1 波長の分布 (たとえば 488 nm) で代表することが出来ると考えられた。

### 溶存態有機物による濁度の分布

Fig.5 は 1999 年 7 月, 10 月, 2000 年 1 月, および 4 月の東京湾海表面における溶存態有機物による濁度  $C'_{DOM(488)}$  ( $m^{-1}$ ) の水平分布を示す。

1999 年 7 月における溶存態有機物の濁度は湾奥幕張沖で光束消散係数  $0.64m^{-1}$  と最も高く, 湾口に向かって低下していた。特に, 湾口勝山沖以南で濁度は  $0.2m^{-1}$  以下となり, 湾口洲崎沖で最低値  $0.11m^{-1}$  であった。10 月の濁

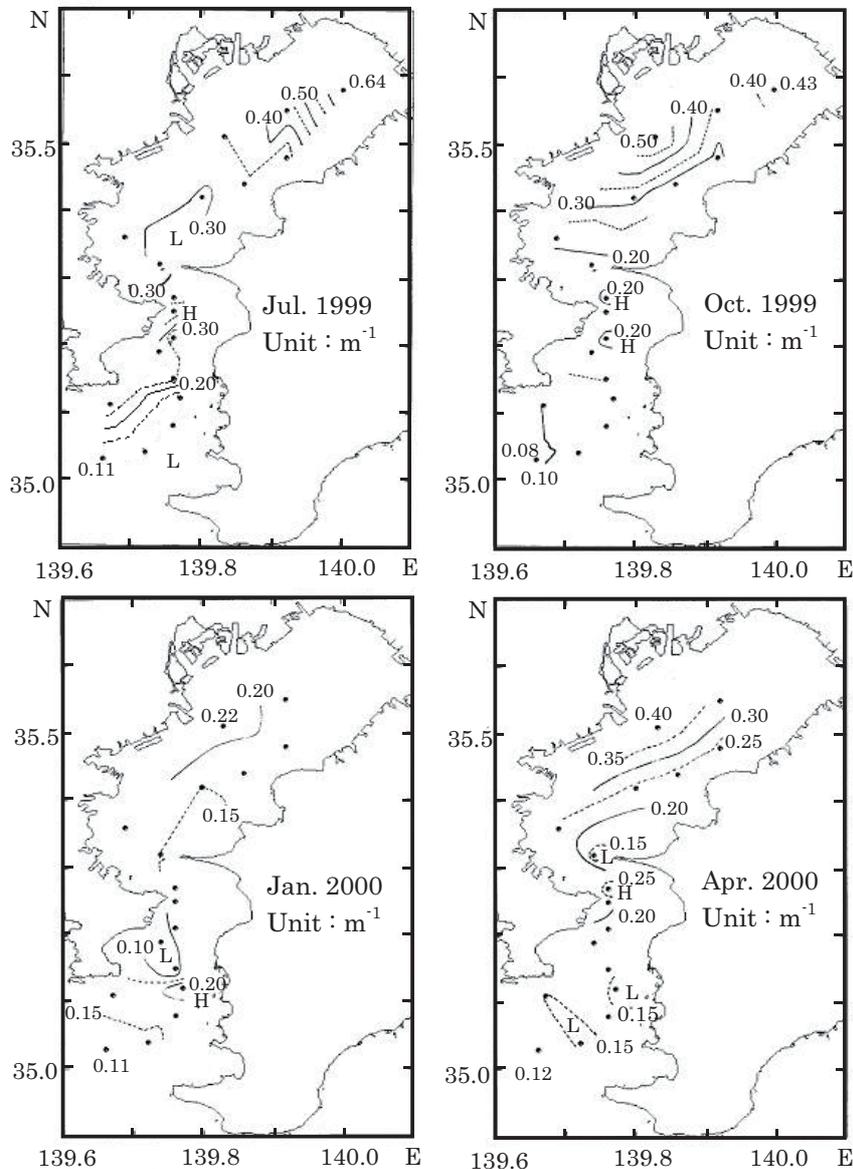


Fig.5 Seasonal changes of horizontal distributions of beam attenuation coefficient caused by dissolved organic matter ( $C'_{DOM(488)}$ ) at the sea surface in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

度は湾奥部で高く、湾口部で低い傾向が見られた。しかし、極大値を示す海域は幕張沖 ( $0.43\text{m}^{-1}$ ) および多摩川河口沖 ( $0.50\text{m}^{-1}$ ) に見られた。また、光束消散係数  $0.2\text{m}^{-1}$  の海水は7月には湾口部で見られたが、10月には金沢八景沖まで北上していた。2000年1月には濁度が低下し、湾奥部で  $0.2\text{m}^{-1}$  前後、湾口部で  $0.1\sim 0.2\text{m}^{-1}$  となった。4月には、湾奥の多摩川河口沖で極大  $0.40\text{m}^{-1}$  を示し、10月とほぼ同様の値まで増加した。

次に溶存態有機物による濁度  $C'_{\text{DOM}(488)}(\text{m}^{-1})$  の鉛直断面分布を示す (Fig.6)。断面は Fig.1 の点線に沿っている。この結果は海表面、10 m 深、および 20 m 深での試水の分析によっているため、水深軸は 20m 深までに限定して表示した。また1月および4月の Sta.1 は欠測である。1999年7月の鉛直分布は、湾奥 (Sta.1) の海表面で最も高く、深くなるほどわずかに低下していた。金沢八景沖 (Sta.7) 以南では、海表面から 20m 深まで  $0.1\sim 0.3\text{m}^{-1}$  の溶存態有機物による濁度が存在していた。10月では湾奥部ほど高い値を示したが、鉛直的な変化は小さかった。2000年1月では湾全体で溶存態有機物による濁度が低下して概ね  $0.2\text{m}^{-1}$  以下となり、海表面から 20 m 深まで一様に清澄であった。2000年4月には、湾奥海表面および湾口 20 m 深に再び  $0.3\text{m}^{-1}$  の海水が現れた。

ここで、東京湾における海水の濁度  $C'_{(488)}$  に対する溶存態有機物による濁度  $C'_{\text{DOM}(488)}$  の寄与を検討する。寄与率  $C_{R(488)}(\%)$  は以下の算出式で求める。

$$C_{R(488)}(\%) = (C'_{\text{DOM}(488)} / C'_{(488)}) \times 100$$

ここで、 $C_{R(488)}$  は寄与率、 $C'_{\text{DOM}(488)}$  は溶存態有機物による光束消散係数、 $C'_{(488)}$  は海水の光束消散係数である。

Fig.7 は東京湾の海表面における海水の濁度への溶存態有機物による濁度の寄与率の水平分布を示す。1999年7月および10月における寄与率は、Sta.1を除く湾奥の広い範囲で  $10\sim 20\%$  と、ほぼ均一な値であった。2000年1月では浦安沖から観音崎沖で寄与率が  $20\sim 30\%$ 、4月では浦安沖から富津岬沖で  $10\sim 30\%$  であり、安定していた。しかし、両月とも湾口洲崎沖に向かって寄与率は急激に上昇し、 $60\sim 90\%$  に達した。

これらのことから、溶存態有機物による濁度は湾奥部で高く、湾口ほど低下する傾向があり、湾奥部では夏季に高い値を示す季節的な変化が見られた。また湾奥部での溶存態有機物による濁度の寄与率はどの季節でも  $10\sim 30\%$  で安定しているが、湾口部では冬季および春季に著しく高くなるのがわかった。

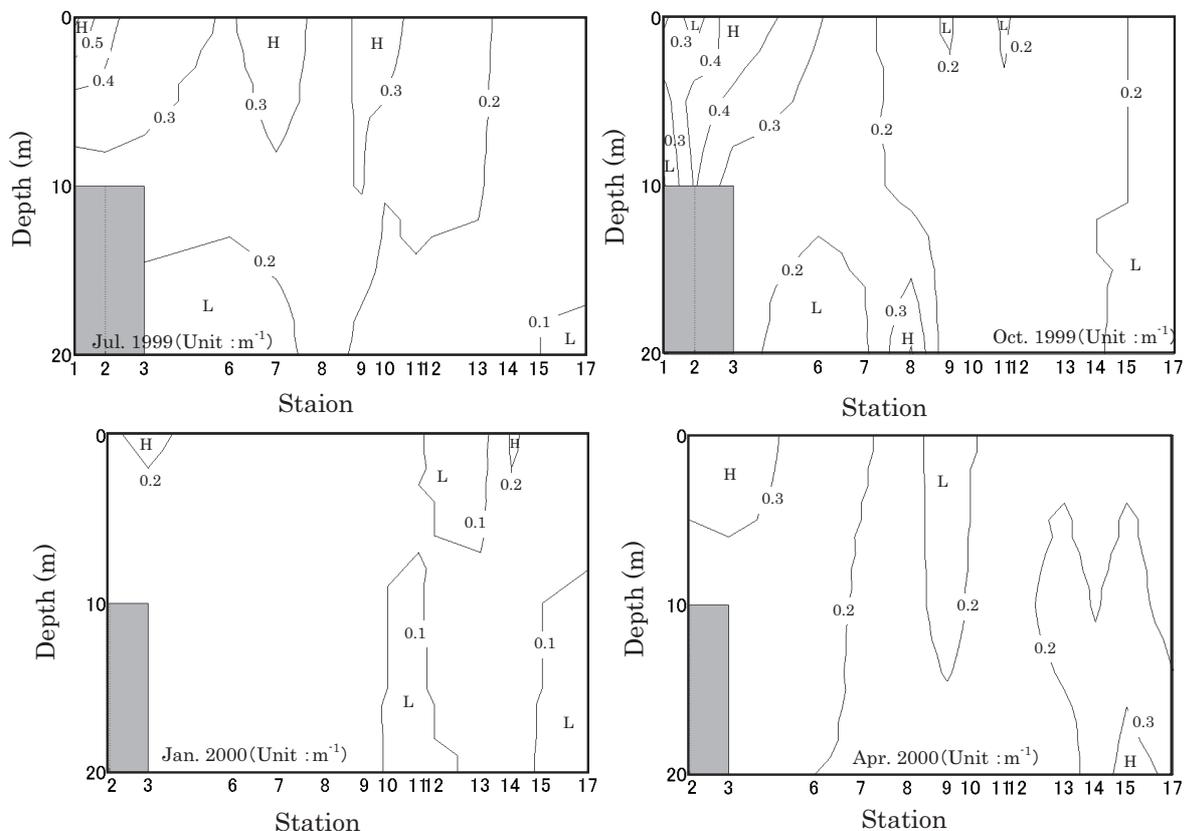


Fig.6 Seasonal changes of vertical distribution of beam attenuation coefficient caused by dissolved organic matter ( $C'_{\text{DOM}(488)}$ ) at the sea surface in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

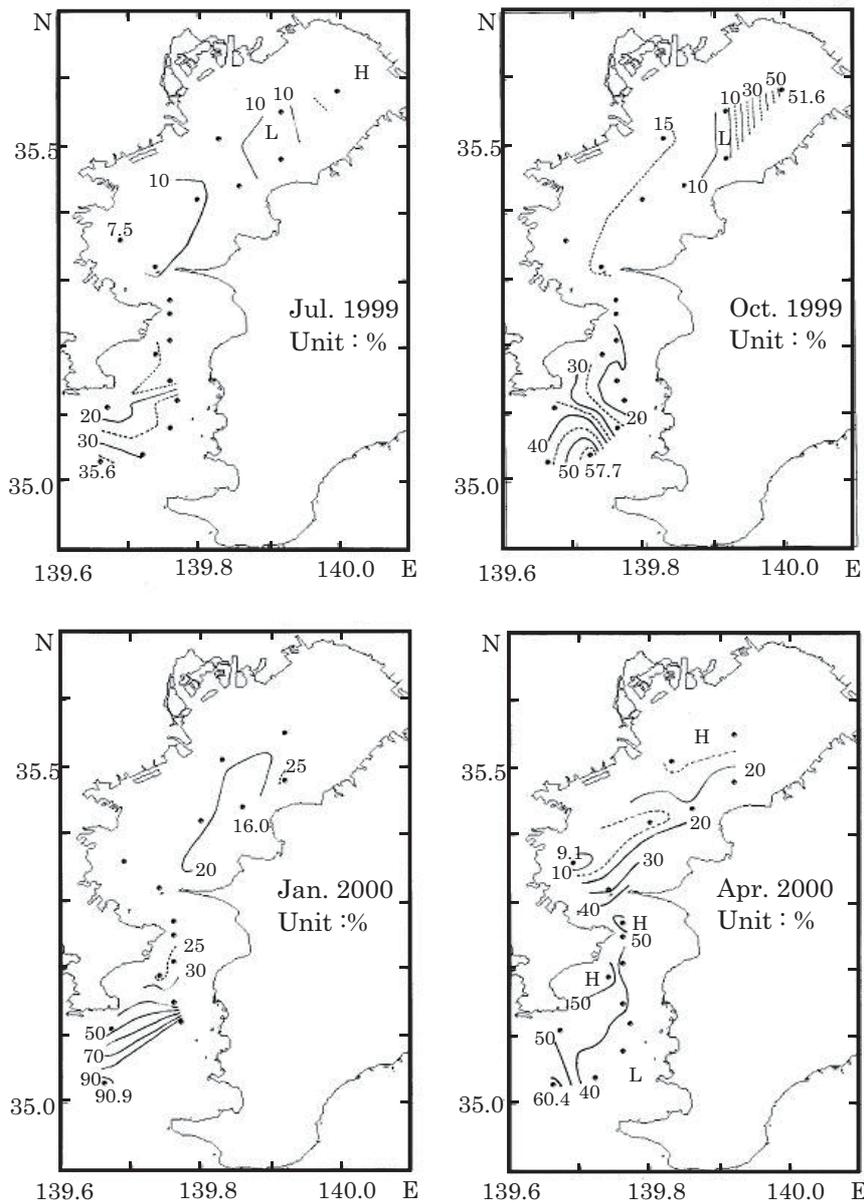


Fig.7 Seasonal changes of horizontal distributions of contribution ratio ( $C_{R(488)} : \%$ ) between  $C'_{P(488)}$  and  $C'_{DOM(488)}$  at the sea surface in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

### 懸濁物による濁度の分布

Fig.8 は東京湾の海表面における懸濁物による濁度  $C'_{P(488)}$  ( $m^{-1}$ ) の水平分布を示す。懸濁物による濁度は、1999年7月では湾奥幕張沖、浦安沖および袖ヶ浦沖で  $3.0m^{-1}$  以上の高い値を示した。多摩川河口沖から木更津沖にかけて濁度は低下したが、湾中央部の金沢八景沖で再び高濁度となり最大値  $4.2m^{-1}$  を示した。湾中央部以南では湾口部に向かって濁度は徐々に低下し、湾口洲崎沖で最低値の  $0.19m^{-1}$  となった。10月には多摩川河口沖 (Sta.3) で  $3.0m^{-1}$  以上の最大値を示したが、それ以外の海域では7月より低下した。光束消散係数  $1.0m^{-1}$  の等値線は金沢八景と富津を結ぶ位置まで北上した。2000年1月には湾全体の濁度

が低下し、全ての観測点で  $1.0m^{-1}$  以下となった。4月には湾奥部で濁度が上昇し、湾奥幕張沖から金沢八景沖まで概ね  $1.0m^{-1}$  以上であり、最高値は金沢八景沖の  $2.2m^{-1}$  であった。

Fig.9 は懸濁物による濁度  $C'_{P(488)}$  の鉛直分布を示す。断面は Fig.1 の点線に沿っているが、1月および4月の Sta.1 は欠測である。また、水深軸は採水した水深に対応し、20m 深までとした。1999年7月の懸濁物による濁度分布は、湾奥幕張沖から勝山沖までの海表面と木更津沖 20m 深で高かった。一方、勝山沖以南では海表面から 20m 深まで  $0.4m^{-1}$  以下の清澄な海水が存在していた。1999年10月では、湾奥部の海表面および 20m 深に光束消散係数  $1.0m^{-1}$  以上の海水が分布していたが、富津以南の海域ではそれ未満の海水が占め、鉛直的な濁度変化は小さかった。

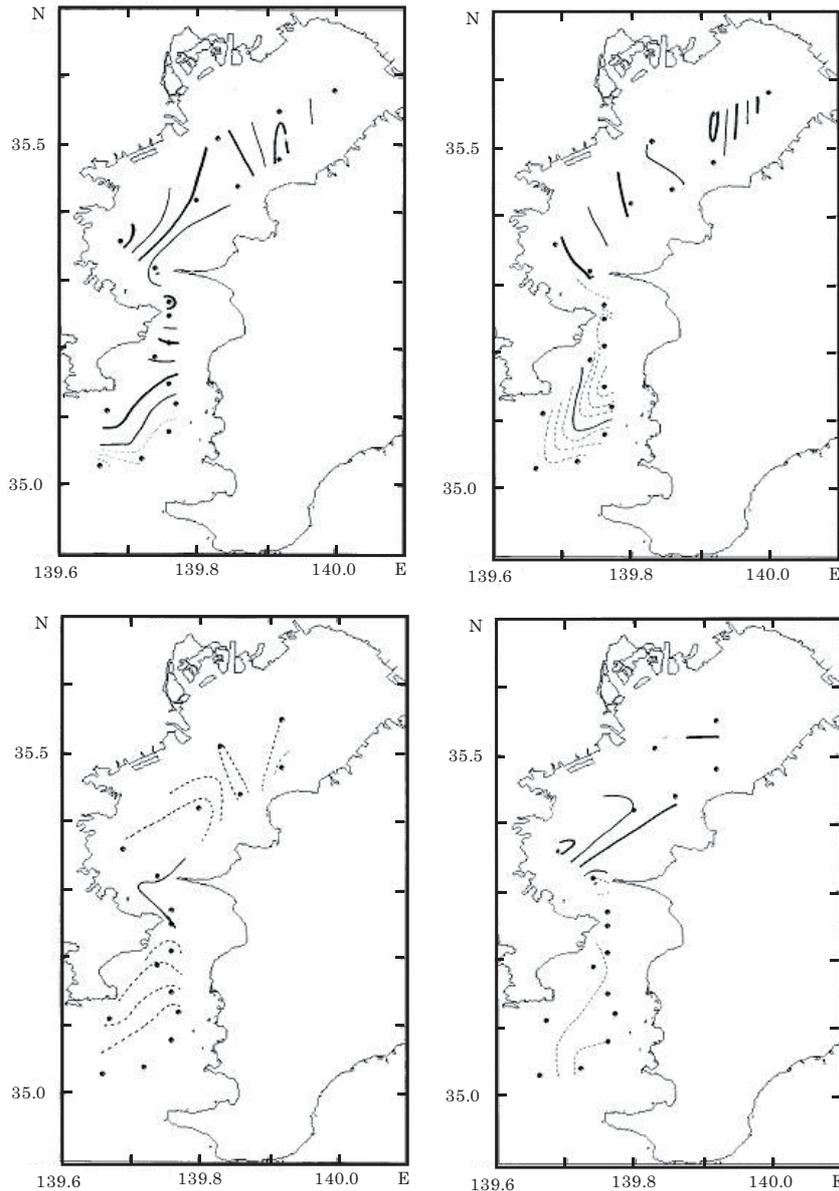


Fig.8 Seasonal changes of horizontal distribution of beam attenuation coefficient caused by particulate matter ( $C'_{P(488)}$ ) at the sea surface in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

2000年1月には湾全体で懸濁物の濁度が低下して概ね  $1.0 \text{ m}^{-1}$  以下となり、海表面から20m深まで清澄な海水が一樣に分布した。2000年4月には、金沢八景沖以北 Sta.7の湾奥部全域は再び  $1.0 \text{ m}^{-1}$  以上の海水に覆われた。

これらのことから、懸濁物による濁度は湾奥で高く湾口ほど低下すること、湾奥部では海表面と20m深で高いことがわかった。特に懸濁物による濁度  $C'_{P(488)}$  の水平分布は海水の濁度  $C'_{(488)}$  のそれと良く合致していた。

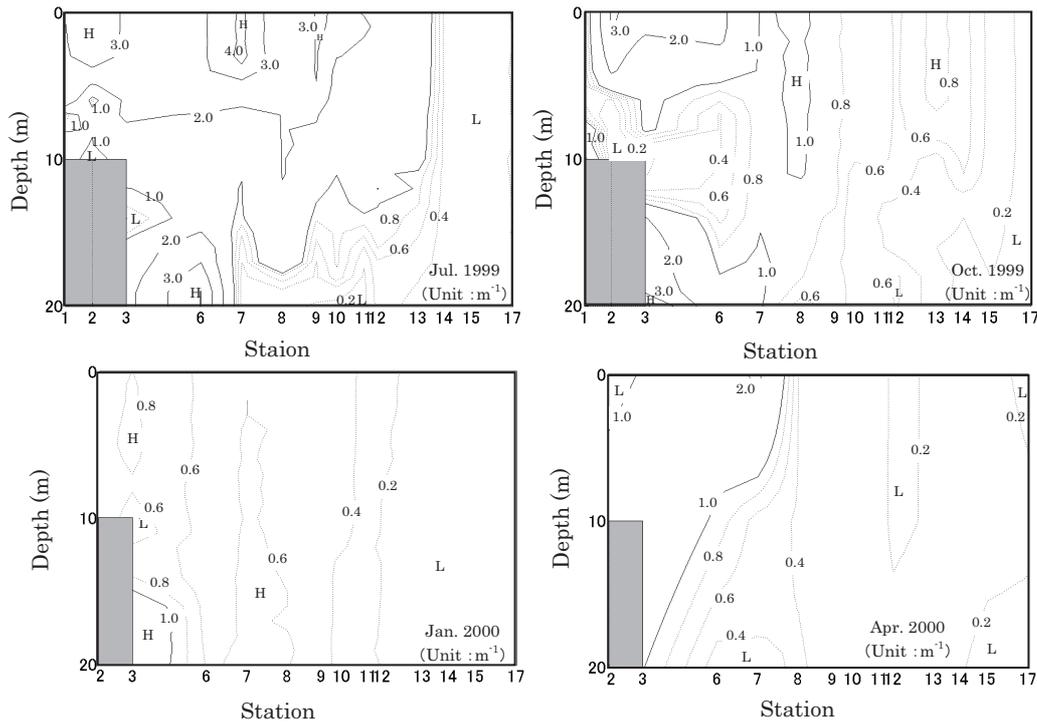
### 東京湾における起因物質別の濁度と濁り指標物質質量との関係

東京湾の溶存態有機物と懸濁物に起因する濁度の分布を前章で把握した。次に、それぞれの濁度と濁り指標物質質量

との関係を調べる。

Table 1は海水の光束消散係数  $C'_{( )}$  と各濁り指標物質質量、即ちSS, PIM, POC, およびChl. *a*の各濃度との関係を示す。濁度  $C'_{( )}$  とSSとの相関係数は、 $r = 0.71 \sim 0.73$  であり高い値を示した。この回帰直線の傾きは森永(1986)とほぼ合致していた。濁度  $C'_{( )}$  とPIMとの関係を見ると、その相関係数は  $r = 0.61$  であり、比較的lowかった。また、濁度  $C'_{( )}$  とPOC, Chl. *a*との各関係では、相関係数が  $r = 0.79 \sim 0.89$  であり、高い相関をそれぞれ示した。特に、 $C'_{488}$  とPOCとの相関係数は  $r = 0.89$  となり、最大である。また、いずれの指標物質質量との関係においても、波長による相関係数の相違はほとんど見られなかった。

次に、溶存態有機物による光束消散係数  $C'_{DOM( )}$  とDOCとの関係についてTable 2に示す。 $C'_{DOM(488)}$  とDOCとの関



**Fig.9** Seasonal changes of vertical distribution of beam attenuation coefficient caused by particulate matter ( $C'_{P(488)}$ ) at the sea surface in Tokyo Bay. Used wavelength is 488 nm.

**Table.1** Relationships between turbidity and suspended solid (SS), particulate inorganic matter (PIM), particulate organic carbon (POC), chlorophyll a (Chl.a) in Tokyo Bay.

Index	Wavelength	Relation line	r	number
SS (mg/L)	488	$C' = 0.31 \times SS + 0.88$	0.73	176
	660	$C' = 0.24 \times SS + 0.054$	0.71	176
PIM (mg/L)	488	$C' = 0.65 \times PIM + 0.23$	0.61	143
	660	$C' = 0.50 \times PIM + 0.16$	0.61	143
POC (mgC/L)	488	$C' = 3.1 \times POC + 0.085$	0.87	156
	660	$C' = 2.4 \times POC + 0.052$	0.84	156
Chl.a ( $\mu\text{g/L}$ )	488	$C' = 0.065 \times \text{chl.a} + 0.24$	0.79	169
	660	$C' = 0.051 \times \text{chl.a} + 0.16$	0.79	169

**Table.2** Relationships between turbidity caused by dissolved organic matter and dissolved organic carbon (DOC) in Tokyo Bay.

Index	Wavelength	Relation line	r	number
DOC (mgC/L)	488	$C' = 0.17 \times \text{DOC} + 0.0042$	0.70	129
	660	$C' = 0.071 \times \text{DOC} + 0.031$	0.54	129

係は  $r = 0.70$  と良い相関を示したが、 $C'_{\text{DOM}(660)}$  での相関係数は  $0.54$  と小さい。これは溶存態有機物による光の吸収が長波長側で小さいことに起因している。溶存態有機物による濁度から DOC を推算するためには、波長 488 nm の関係式を使用すべきである。

さらに、懸濁物による濁度  $C'_{P(488)}$  と濁りの各指標 SS, PIM, POC, および Chl. a との関係について Table 3 に示す。波長は 488 nm である。 $C'_{P(488)}$  と SS との相関係数は、全期

間で  $r = 0.72$  であった。各月で見るとその相関は  $r = 0.77 \sim 0.91$  とさらに高くなった。関係式の傾きは春と夏季に小さく、冬季に大きい傾向が見られた。

$C'_{P(488)}$  と PIM との関係は全般に悪い。月別に見ると 7 月、10 月および 4 月の相関係数は低く、1 月のみ  $r = 0.87$  を示し高かった。これは 1 月では他の月に比べ無機粒子の存在する割合が高くなることに起因していると考えられる。

$C'_{P(488)}$  と POC との相関係数は全期間で  $r = 0.87$  と高い値

**Table.3** Relationships between turbidity caused by suspended particles and suspended solid (SS), particulate inorganic matter (PIM), particulate organic carbon (POC), chlorophyll a (Chl. *a*) in Tokyo Bay.

Index	Term	Relation line	r	number
SS (mg/L)	Jul. 1999	$C' = 0.35 \times SS + 0.18$	0.89	39
	Oct. 1999	$C' = 0.43 \times SS + 0.090$	0.83	42
	Jan. 2000	$C' = 0.50 \times SS + 0.20$	0.91	37
	Apr. 2000	$C' = 0.21 \times SS + 0.17$	0.77	39
	All period	$C' = 0.23 \times SS + 0.0013$	0.72	171
PIM (mg/L)	Jul. 1999	$C' = 1.1 \times PIM + 0.12$	0.55	40
	Oct. 1999	$C' = 0.66 \times PIM + 0.57$	0.10	47
	Jan. 2000	$C' = 0.68 \times PIM + 0.020$	0.87	46
	Apr. 2000	$C' = 0.16 \times PIM + 0.43$	0.25	36
	All period	$C' = 0.47 \times PIM + 0.41$	0.32	171
POC (mgC/L)	Jul. 1999	$C' = 3.3 \times POC + 0.25$	0.88	39
	Oct. 1999	$C' = 3.2 \times POC + 0.076$	0.86	47
	Jan. 2000	$C' = 3.9 \times POC + 0.047$	0.76	46
	Apr. 2000	$C' = 1.0 \times POC + 0.18$	0.67	36
	All period	$C' = 2.8 \times POC + 0.017$	0.87	171
Chl.a ( $\mu\text{g/L}$ )	Jul. 1999	$C' = 0.072 \times \text{chl.a} + 0.03$	0.84	39
	Oct. 1999	$C' = 0.065 \times \text{chl.a} + 0.15$	0.92	43
	Jan. 2000	$C' = 0.055 \times \text{chl.a} + 0.13$	0.85	47
	Apr. 2000	$C' = 0.170 \times \text{chl.a} + 0.13$	0.61	36
	All period	$C' = 0.065 \times \text{chl.a} + 0.089$	0.83	165

を示した。各月で見るとその相関係数は  $r = 0.67 \sim 0.88$  であった。回帰直線の傾きは7月, 10月, および1月で3.3 ~ 3.9であり, 変化が小さかった。

$C'_{P(488)}$ と Chl. *a* との相関係数は, 全期間で  $r = 0.83$  と高かった。月別に見ると7月, 10月, および1月で  $r = 0.84 \sim 0.92$  の高い値を示した。回帰直線の傾きは7月, 10月, および1月で0.055 ~ 0.072と安定していた。

## 考 察

東京湾の濁度については Matsuike *et al.* (1986), 才野 (1988), Yanagi *et al.* (1989, 1990), および Arakawa *et al.* (2003) によって報告されている。本研究では濁度を起因物質別に計測して, さらにそれらの濁度と濁り指標物質との関係を把握した。東京湾の濁度は湾奥で高く, 湾口に近づくほど低下する。この変化の勾配は夏季に大きくなる。このことは Matsuike *et al.* (1986) の報告と一致する。

溶存態有機物による濁度の季節変動について検討する。溶存態有機物の起源としては, 植物プランクトンからの排出および溶出 (小倉, 1978; 佐久川・半田, 1983), 大気や河川を通じた陸上からの負荷 (小倉, 1978; 小川・小倉, 1990) が考えられる。小川・小倉 (1990) は東京湾内の溶存態有機物が湾奥河口域では河川水に, 湾央域では外洋水にそれぞれ起因していることを推定した。本調査結果では溶存態有機物による濁度は湾奥において夏季に増大する。Fig.10に東京湾におけるDOCとChl. *a*濃度との関係を季節別に示した。両者には高い相関が見られ, 特に7月お

び10月で高かった。すなわち, Chl. *a*濃度の増加に伴ってDOCが増加することがわかる。また, Mickinnon (1981) は植物プランクトンの現存量と溶存態有機物量の間に比例関係があることを報告している。さらに 小川 (1990) が植物プランクトンから溶存態有機物が放出されることを明らかにしている。これらのことから, 夏季における溶存態有機物の増加は植物プランクトンの増殖に起因している可能性が示唆される。しかしながら, 本研究結果からはその起源について言及することは出来ない。

東京湾の懸濁物による濁度の季節的な増減は大きい。その変化は湾奥部の海表面で著しい。また懸濁物による濁度は湾奥部では海水の濁度の約70~90%を占めているため, 海水の濁度分布と良く対応していた。懸濁物の濁度とPOCおよびChl. *a*濃度との関係には非常に高い相関が見られる。一方, PIMとの関係に相関は見られない。このことから湾奥で見られる懸濁物による濁度の著しい増加は, 懸濁態有機物, 特に植物プランクトン濃度の変化によるものと考えられる。

東京湾の濁度とSSとの関係は森永 (1986), Matsuike *et al.* (1986), 付ら (1988) によって報告されている。森永 (1986), Matsuike *et al.* (1986) によると, 東京湾のSS濃度は夏季で0.1~5.1 mg/L, 冬季で0.2~2.8 mg/Lと報告されている。本結果では, 夏季で0.8~8.1 mg/L, 冬季で0.3~2.7 mg/Lであり, 夏季におけるSS濃度は増大していた。一方, 小倉ら (1986) は夏季における東京湾の湾奥でPOC濃度として平均2.55 mgC/Lを報告している。本研究での夏季における湾奥のPOC濃度は0.71-1.17 mgC/Lの範囲にあり, 小倉らに比べて低い値を示した。この

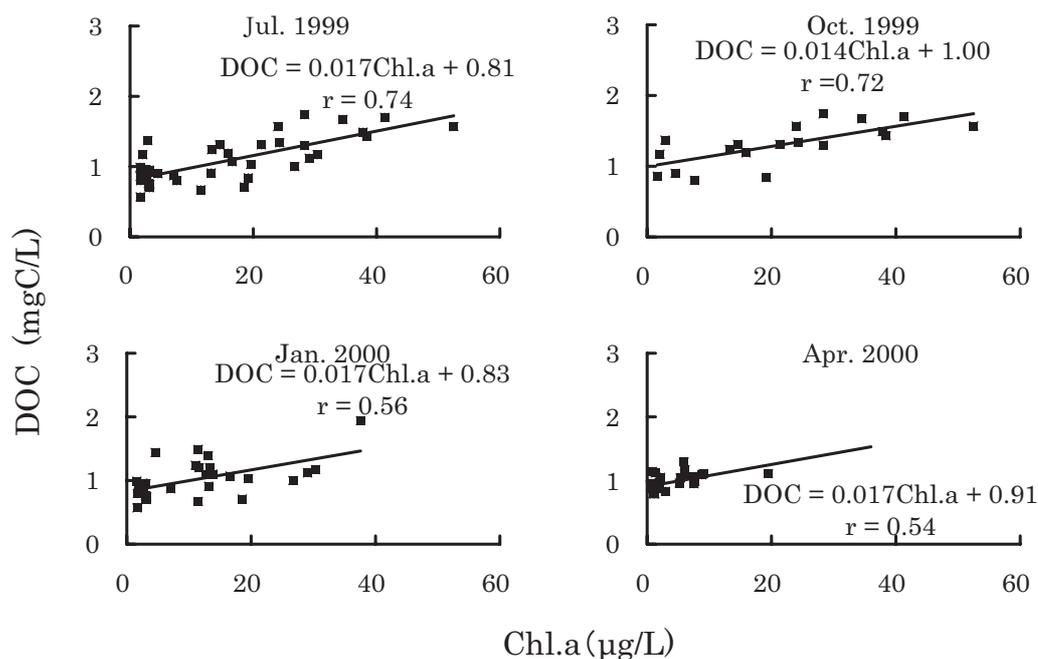


Fig.10 Relations between DOC(mgC/L) and Chl.a(µg/L).

ため、東京湾の POC 濃度は、年毎の変動が大きいと考えられる。しかしながら、東京湾における濁度と POC との関係に関する知見は始めて明らかにされた。

最後に、溶存態有機物による濁度と懸濁物による濁度からそれぞれの指標物質質量がどのくらい推算出来るのか検討する。

溶存態有機物による濁度と DOC との関係では良い相関が得られた。さらに、この関係式では季節的な変化がほとんどみられなかった。溶存物の濁度を把握することにより、DOC 量を推算できる可能性があると考えられる。

また、東京湾において懸濁物による濁度  $C'_{P(488)}$  から濁りの各指標を把握するためにはその項目ごとに、関係式を吟味する必要がある。SS, POC, および Chl. a は全期間での回帰直線から推算できる可能性がある。さらに、各月(季節ごと)の関係式を使用することでさらに精度を上げられることが判った。しかし、PIM は 1 月で相関が良いものの他の月では悪いことから、 $C'_{P(488)}$  からの算出は難しいと考えられる。

これらのことより、濁度を懸濁態および溶存態の起因物質に別けて明らかにすることは東京湾の物質循環を知る上で欠かせない知見であるといえる。本研究では濁度の起因物質を溶存態有機物と懸濁物に分けて調査した。さらに精度を高めて濁り物質の動態を解明するためには、今後、懸濁物による濁度を有機物と無機物に分離して検討する必要がある。

## 要 約

(1)東京湾海表面における海水の濁度の水平分布は、湾

奥ほど高く湾口ほど低い傾向にある。夏季には、湾奥部から湾中央部の海表面全体および底層に光束消散係数  $3.0 \text{ m}^{-1}$  以上の高濁度水が広く分布していた。これら高濁度水は秋季にも存在するが、その範囲は狭くなった。更に冬季には湾全体で濁度が低下した。春季には湾奥部から湾中央部の海表面および底層に、再び高濁度水が現れた。また、濁度の季節的な変動は湾奥ほど大きかった。

(2)東京湾海表面における溶存態有機物による濁度は、夏季には湾奥幕張沖から多摩川河口沖の  $10 \text{ m}$  以浅において高い値 ( $0.3 \text{ m}^{-1}$  以上) を示した。この海水は秋季にも存在するが、その極大値を示す海域は夏季の幕張沖から多摩川沖へと変化した。冬季には湾全体で濁度が低下し、水平的にも鉛直的にも清澄な海水が均一に分布した。春季には湾奥の海表面で、再び濁度の高い海水が現れることがわかった。また、湾口部では季節的な濁度変化は殆どなく、 $0.1 \text{ m}^{-1}$  前後であった。

(3)東京湾海表面における海水の濁度への溶存態有機物の寄与率は、湾奥部では年間を通じて  $10 \sim 30\%$  となっており、季節変動はあまり見られなかった。湾口部における寄与率は夏季に  $20 \sim 30\%$  程度であったのに対し、冬季では最大  $90\%$  となり、大きな季節変動が見られた。

(4)懸濁物による濁度は、東京湾奥部の  $10 \text{ m}$  以浅において顕著な季節変化が見られた。すなわち、夏季に湾奥から湾中央部にかけて広い範囲に分布していた光束消散係数  $3.0 \text{ m}^{-1}$  以上の高濁度水は、秋季には多摩川河口沖だけに縮小した。冬季には湾奥の全体で濁度が低下した。さらに、春季には金沢八景沖から濁度の上昇が見られた。一方、湾口部における懸濁物による濁度は季節による変化はほとんどなく、一年を通して光束消散係数  $0.2 \sim 0.5 \text{ m}^{-1}$  を示してい

た。

(5) 溶存態有機物による濁度 (波長 488 nm) と DOC との相関係数は 0.7 と高かった。また、懸濁物による濁度と SS, POC, および Chl. *a* との相関も高い。従って、東京湾における光束消散係数の観測値から濁りの各指標物質を推算できる可能性が示唆された。

## 謝 辞

本研究の海洋調査では東京海洋大学練習船青鷹丸の船長ならびに乗組員の皆様にご協力いただいた。また、サンプルの分析には水産庁水産総合研究センター中央水産研究所佐々木克之博士ならびに水産工学研究所足立久美子氏にご助力を賜った。心より御礼申し上げる。

## 引用文献

- 坪田 博之, 宇野木 早苗, 江角 比出朗, 堀越 増興. 海洋環境汚染に関連する地域別調査研究の現状と問題点・東京湾相模湾. 日本海洋学会誌 1975; 特集号: 91-104.
- Matsuike, K. Morinaga T. Hiraoka T. Turbidity Distributions in Tokyo Bay and Movement of the Turbid Water. Journal of the Tokyo University of Fisheries 1986; 73 : 97-114.
- 森永 勤. 海中の濁り (光束消散係数) の分布とその挙動に関する研究. Journal of the Tokyo University of Fisheries 1986; 73: No.1.
- 才野 敏郎. 東京湾における栄養塩の循環. 沿岸海洋研究ノート 1988; 25: 127-133.
- Yanagi, T. Tamaru, H. Ishimaru, T. Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in summer. La mer 1989; 27: 34-40.
- Yanagi, T. Okada, S. Ishimaru, T. Behavior of high turbidity water outflow from Tokyo Bay in summer. La mer 1991; 29: 45-51.
- Arakawa, H. Shimoda, T. Morinaga, T. Outflow and Inflow of Suspended particles at the Mouth of Tokyo Bay. Journal of the Tokyo University of Fisheries 2003; 89: 25-35.
- Kalle, K. The problem of the Gelbstoff in the sea. Oceanogra. Mar. Biol. 1966; 4: 91-104.
- Burt, W.V. Selective transmission of light in tropical Pacific water. Deep-Sea Res.1958; 5: 51-61.
- 小倉 紀雄. 内湾の有機物とその分解. 月刊 海洋科学 1978; 10: 807-812.
- 佐久川 弘, 半田 信彦. 海水の溶存有機物の化学組成. 月刊 海洋科学 1983; 2: 85-91.
- 小川 浩史, 小倉 紀雄. 東京湾における水質変動. 地球化学 1990; 24: 43-54.
- Mackinnon, M. D. The measurement of organic carbon in sea water. In: E. K. Duursma and R. Dawson (eds). Marine organic chemistry. Elsevier, Amsterdam. 1981; 415-443.
- 付 克村, 森永 勤. 東京湾における海面近くの上方向輝度と濁りとの相関. Journal of the Tokyo University of Fisheries 1988; 2: 201-212.
- 小倉 紀雄, 木村健司, 関川朋樹, 山田和人, 南川雅男. 東京湾内湾部における懸濁有機物の炭素安定同位体比. 地球化学. 1986; 20: 13-19.

## 東京湾における溶存態有機物と懸濁物による濁度の分布および各起因物質との関係

成田美穂<sup>\*1</sup>, 荒川久幸<sup>\*1</sup>, 下田 徹<sup>\*2</sup>, 森永 勤<sup>\*1</sup>

(<sup>\*1</sup> 東京海洋大学海洋科学部海洋環境学科)  
(<sup>\*2</sup> 西海区研究所石垣支所海洋環境研究室)

東京湾の海水の濁度を起因物質別、即ち溶存態有機物および懸濁物に分けて計測し、各濁度分布の季節変化を調べた。また、これらの濁度と各指標物質との関係を検討した。

湾内の濁度 (光束消散係数  $C'_{(488)}$ ;  $m^{-1}$ , 測定波長; 488 nm) は湾奥部で高く、湾口部に近づくほど低下した。湾奥の濁度は夏季に最大値  $4.4 m^{-1}$  を示したが、冬季には夏季の約 1/4 に低下した。溶存態有機物に起因する濁度  $C'_{DOM(488)}$  は夏季湾奥で最も高く、約  $0.6 m^{-1}$  を示し、湾口部に近づくると小さくなり、洲崎沖では約  $0.1 m^{-1}$  であった。また、溶存態有機物に起因する濁度の季節的变化は湾奥で大きく、湾口で小さかった。更に、溶存態有機物による濁度  $C'_{DOM(488)}$  が海水全体の濁度  $C'_{(488)}$  へ寄与する割合は湾奥ではどの季節でも 20~30% であった。懸濁物による濁度  $C'_{P(488)}$  の分布は海水の濁度の分布と一致した。

溶存態有機物による濁度  $C'_{DOM(488)}$  は起因物質の指標である溶存態有機炭素量 (DOC) と良い正の相関を示した (相関係数  $r = 0.70$ )。また、懸濁物による濁度は起因物質の指標である懸濁態粒子量 (SS), 粒状有機炭素量 (POC), および植物プランクトン量 (Chl. *a*) とそれぞれ高い正の相関を示し、それらの相関係数は 0.72~0.87 であった。さらに、溶存態有機炭素量 (DOC) は植物プランクトン量 (Chl. *a*) と良い正の相関関係にあり、特に夏季ではその相関係数は 0.74 と大きく、溶存態有機炭素量の起源の一つが植物プランクトンであることが示唆される。

**キーワード:** 東京湾, 濁度, 懸濁物, 溶存態有機物, 起因物質, 光束消散係数, POC, DOC