

## 東京湾口部におけるクロロフィル $\alpha$ 濃度とカイアシ類個体数の変動要因

<sup>1</sup>橋本慎治 <sup>1</sup>網野義大 <sup>1</sup>加瀬田尚弥 <sup>2</sup>堀本奈穂

<sup>1</sup>帝京科学大学生命環境学部 <sup>2</sup>東京海洋大学海洋科学部

Variations of chlorophyll a concentration and copepod abundance in the entrance of Tokyo Bay

<sup>1</sup>Shinji HASHIMOTO <sup>1</sup>Yoshihiro AMINO <sup>1</sup>Naoya KASEDA <sup>2</sup>Naho HORIMOTO

Chlorophyll a concentration and copepod abundance were measured in the entrance of Tokyo Bay in June, July, September and November 2010. The chlorophyll a concentrations were more than 3 mg m<sup>-3</sup> in June and September within mixed layer. The chlorophyll a concentrations positively correlated with nitrate and nitrite, phosphate concentrations, which phytoplankton biomass is likely to be strongly affected by nutrient concentrations. In the 0-150m layer, mean abundance of copepods ranged from 39 to 421 inds. m<sup>-3</sup> and tended to increase from June to September. The abundance of copepods positively correlated with water temperature, whereas no significant correlation was found for the abundance of copepods and the chlorophyll a concentrations. The abundance of copepods may be affected by water temperature rather than chlorophyll a concentration in the entrance of the bay.

Key words : クロロフィル $\alpha$ , 硝酸塩 + 亜硝酸塩, リン酸塩, カイアシ類, 水温

### 1. はじめに

閉鎖的な東京湾には人間活動により排出される窒素やリンが河川を通じて流入する<sup>1)</sup>。このため、東京湾は世界でも最も富栄養化した湾の一つになっている。夏季には貧酸素水塊が存在し、漁業資源に被害を及ぼしている。また最近では冬季にも貧酸素水塊の発生が報告されている<sup>2)</sup>。

近年、東京湾における硝酸塩やリン酸塩濃度は1990年前後から減少傾向を示している<sup>3)</sup>が、表層でそれぞれ20 – 30  $\mu$ M、0.5 – 1.0  $\mu$ Mと依然高い値である。硝酸塩、リン酸塩ともに一年を通して枯渇することはほとんどなく、ほぼ一年を通してクロロフィル $\alpha$ 濃度が10 mg m<sup>-3</sup>以上の植物プランクトン生物量の高い状態が認められる<sup>3)</sup>。

植物プランクトン生物量を変動させる要因として、動物プランクトンによる捕食、栄養塩濃度、日射量などがある<sup>4,7)</sup>。相模湾では、動物プランクトンの捕食の影響により、植物プランクトン生物量の季節変化が観測されていない。また東京湾奥部では、植物プランクトン生物量は日射量に大きく影響されることが報告されている<sup>6)</sup>。

植食性動物プランクトンであるカイアシ類は沿岸域から外洋域にわたる広範囲の海域に生息し、植物プランクトンによって生産された有機炭素を高次の栄養段階へ伝達するのに重要な役割を果たす<sup>8)</sup>。カイアシ類個体数は外洋域よりもクロロフィル $\alpha$ 濃度の高い沿

岸域で高い値を示す<sup>9, 10)</sup>。東京湾口部は湾中央部や湾奥部ほど動植物プランクトン生物量の調査が行われていないため、動植物プランクトンの生物量、種組成、サイズ組成またその季節変動は十分に把握されていない。そこで東京湾口部における植物プランクトン生物量とそのサイズ組成やカイアシ類個体数の季節変動を明らかにし、それらの変動要因について考察した。

### 2. 試料および方法

東京海洋大学研究練習船「青鷹丸」により2010年6月16日、7月11日、9月11日、11月26日に

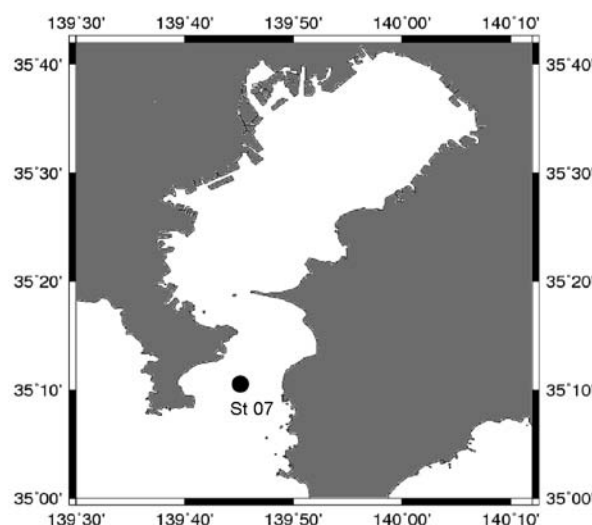


Fig. 1 Location of Station 07 in the entrance of Tokyo Bay

Table 1 Solar radiation, transparency and mixed layer depth in observation date.

	Solar radiation (MJ m <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> )	Transparency (m)	Mixed layer depth (m)
16 Jun	13	6	10
11 Jul	10.8	15	36
11 Sep	20.4	7	11
26 Nov	5.2	13	67

東京湾口部の定点 07 で CTD (Falmouth Scientific) 観測による水温、塩分の測定、採水、動物プランクトン採集、透明度の測定を行った (Fig. 1)。

海水試料は 0、5、10、20、30、40、50、75、100、125、150 m の 11 層から採取した。採取した海水は直ちに 10 μm および 2 μm ニュークリポアフィルターとワットマン GF/F フィルター (孔径約 0.7 μm) を用いてろ過した。ろ過はおよそ 150 mmHg の吸引圧で行った。ろ過に用いたフィルターはクロロフィル *a* の測定に供するまで -20°C で凍結保存した。クロロフィル *a* は *N,N*-ジメチルホルムアミド (DMF) で抽出した後<sup>11)</sup>、蛍光光度計 (Turner Model 10-AU) により測定した<sup>12)</sup>。ワットマン GF/F フィルター上に捕集されたクロロフィル *a* を全画分とした。10 μm ニュークリポアフィルター上に捕集されたクロロフィル *a* を >10 μm 画分とした。<2 μm 画分のクロロフィル *a* 濃度はワットマン GF/F フィルターと 2 μm ニュークリポアフィルター上に捕集されたクロロフィル *a* の差から算出した。また、2-10 μm 画分は 2 μm と 10 μm ニュークリポアフィルター上に捕集されたクロロフィル *a* の差から算出した。

カイアシ類は 330 μm 目合いのノルパックネットを用いて水深 150m からの鉛直曳きにより採集し、最終濃度が 5% となるように中性ホルマリンを添加して保存した。カイアシ類個体数は実体顕微鏡を用いて計数した。カイアシ類個体数はノルパックネットに取り付けられた濾水計によって補正された。栄養塩分析用の海水試料もまた分析に供するまで -20°C で凍結保存した。硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度はナフチルエチレンジアミン法<sup>13)</sup>、リン酸塩濃度はモリブデンブルー法<sup>14)</sup> により測定した。

日射量は気象庁のホームページ<sup>15)</sup> から東京における日射量を引用した。

### 3. 結果および考察

試料採取を行った日の日射量は 9 月に最も高く、11 月に最も低い値を示した (Table 1)。透明度は 6 月と 9 月が同程度で 7 月と 11 月よりも浅かった (Table

1)。有光層は透明度の約 3 倍である<sup>16)</sup> ことから、透明度から近似的に求めた有光層は 6 月が 18 m、7 月が 45 m、9 月が 21 m、11 月が 39 m であった。

水温、塩分、密度の月別鉛直分布を Fig. 2 に示す。表面水温は 6 月 (19.9°C) から 9 月 (24.5°C) にかけて上昇し、11 月 (20.0°C) に 6 月と同程度まで低下した。7 月には水深 40 m 付近に発達した水温躍層が存在した。9 月の表面における塩分は 33 程度で他の月よりも低い値で、河川からの淡水流入によると考えられる。密度の変化から求めた表層混合層は、6 月と 9 月が同程度で 7 月と 11 月よりも浅かった (Table 1)。有光層と表層混合層を比較すると、6 月から 9 月までは表層混合層よりも有光層の方が深かったが、11 月は表層混合層の方が深かった。

硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度の月別鉛直分布を Fig. 3 に示す。いずれの月も水深と共に増加傾向を示した。表層混合層内における硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度の平均値を Table 2 に示す。7 月の平均値は 0.56 mmol m<sup>-3</sup> と調査した中で最も低い値で、海表面の濃度は 0.11 mmol m<sup>-3</sup> であった (Table 2、Fig. 3)。一方、最も高い値を示したのは 11 月であった (Table 2、Fig. 3)。リン酸塩濃度の月別鉛直分布も硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度と同様の変動を示し、水深と共に増加傾向を示した (Fig. 3)。7 月の海表面のリン酸塩濃度は < 0.05 mmol m<sup>-3</sup> であった。表層混合層内におけるリン酸塩濃度の平均値も硝酸塩 + 亜硝酸塩濃度の平均値と同様の月別変化を示し、7 月が最も低く、11 月が最も高い値であった (Table 2)。神田ら<sup>3)</sup> によって報告された東京湾奥部の表層と比較すると、いずれの月もリン酸塩に関しては類似した値であったが硝酸塩 + 亜硝酸塩は十分の一程度の値であった。Redfield 比 (N/P=16) により植物プランクトンの制限栄養塩を推定することが出来る。表層混合層内における N/P 比をみると、いずれの月も 16 以下であった (Table 2) ことから、湾口部における制限栄養塩は窒素であると考えられる。

すべてのサイズ画分を合わせた全クロロフィル *a*

濃度の月別鉛直分布を Fig. 4 示す。いずれの月も栄養塩濃度の分布とは反対に表層で高く深度と共に減少傾向を示したが、6月、7月、9月は0mよりも5mの濃度が高かった。表層混合層内における全クロロフィル $a$ 濃度の平均値を Table 2 に示す。全クロロフィル $a$ 濃度の平均値は6月が最も高く、11月が最も低い値であった。神田ら<sup>3)</sup>によって報告

された東京湾奥部における表層の全クロロフィル $a$ 濃度は一年を通して $10 \text{ mg m}^{-3}$ 以上である。このことから、東京湾口部における全クロロフィル $a$ 濃度は湾奥よりもかなり低い濃度であった (Table 2)。Dugdale<sup>17)</sup>によると、沿岸性植物プランクトンについて生育可能な最低硝酸塩濃度は約 $1 \text{ mmol m}^{-3}$ である。7月の全クロロフィル $a$ 濃度は表層混合層よ

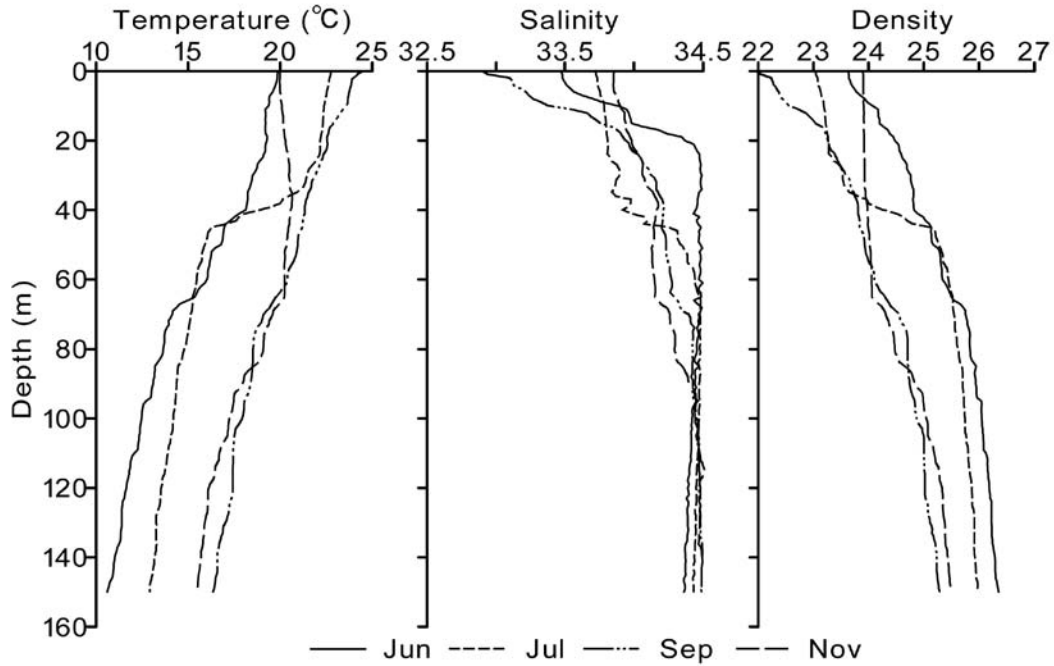


Fig.2 Vertical distributions of temperature, salinity and density.

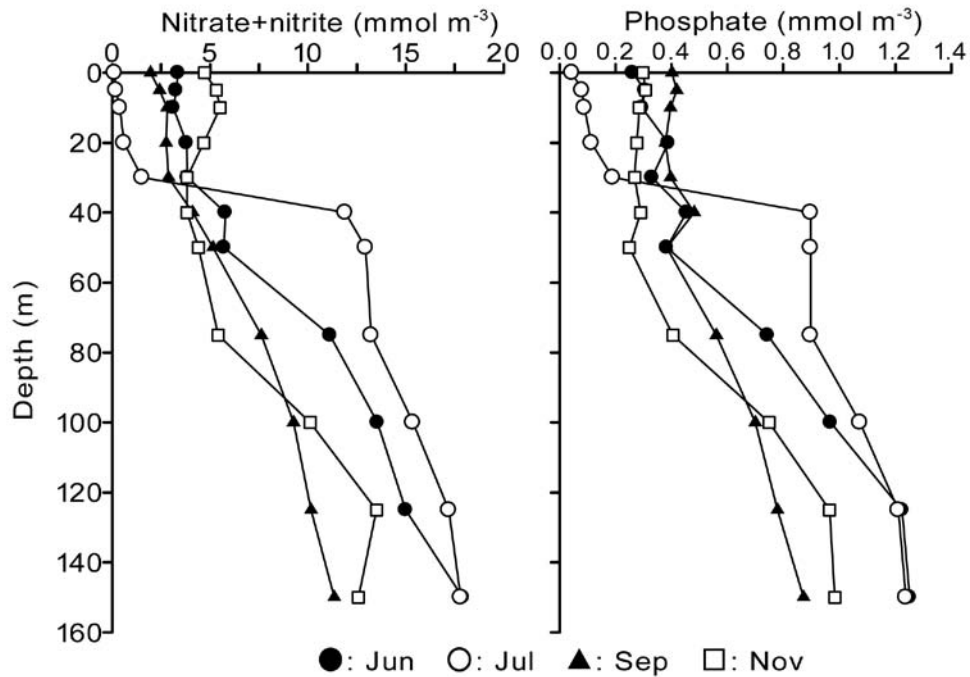


Fig. 3 Vertical distributions of nitrate+nitrite and phosphate concentration.

Table 2 Mean values of nitrate+nitrite, phosphate concentrations, N/P ratio, size-fractionated and total chlorophyll *a* concentrations within the mixed layer and mean abundance of copepod in the 0-150 m layer. Values (%) in parentheses indicate contributions of each size fraction to total chlorophyll *a* concentration.

	16 Jun	11 Jul	11 Sep	26 Nov
Nitrate+nitrite (mmol m <sup>-3</sup> )	3.25	0.56	2.40	4.71
Phosphate (mmol m <sup>-3</sup> )	0.29	0.10	0.41	0.30
N/P ratio	11.2	5.6	5.9	15.7
Chlorophyll <i>a</i> (mg m <sup>-3</sup> )				
>10 μm fraction	1.59 (28%)	0.53 (51%)	2.28 (61%)	0.32 (37%)
2-10 μm fraction	0.94 (16%)	0.11 (10%)	0.11 (3%)	0.18 (25%)
<2 μm fraction	3.28 (56%)	0.4 (39%)	1.38 (36%)	0.28 (38%)
total	5.81	1.04	3.77	0.78
Copepod (inds m <sup>-3</sup> )	39	224	421	266

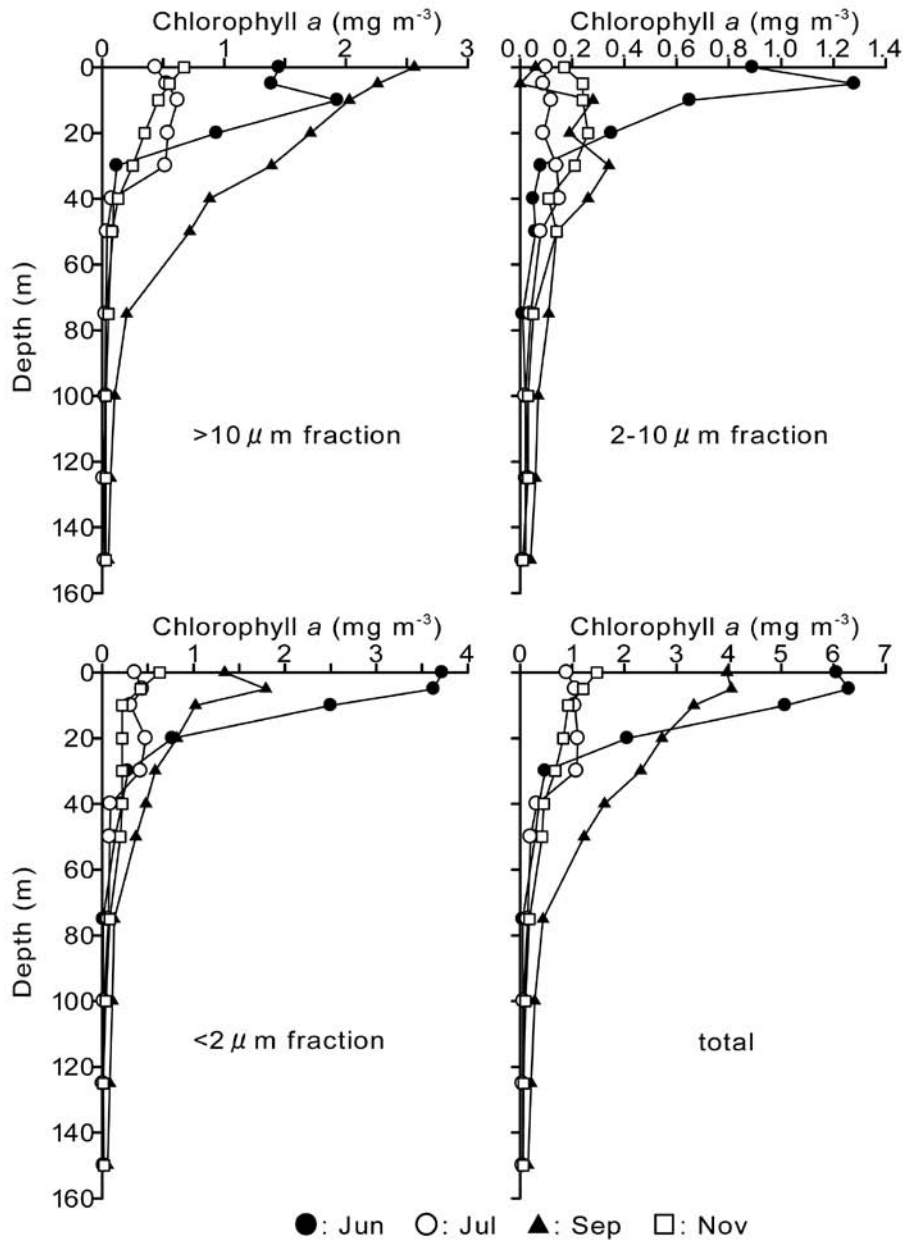


Fig. 4 Vertical distributions of size-fractionated and total chlorophyll *a* concentrations.

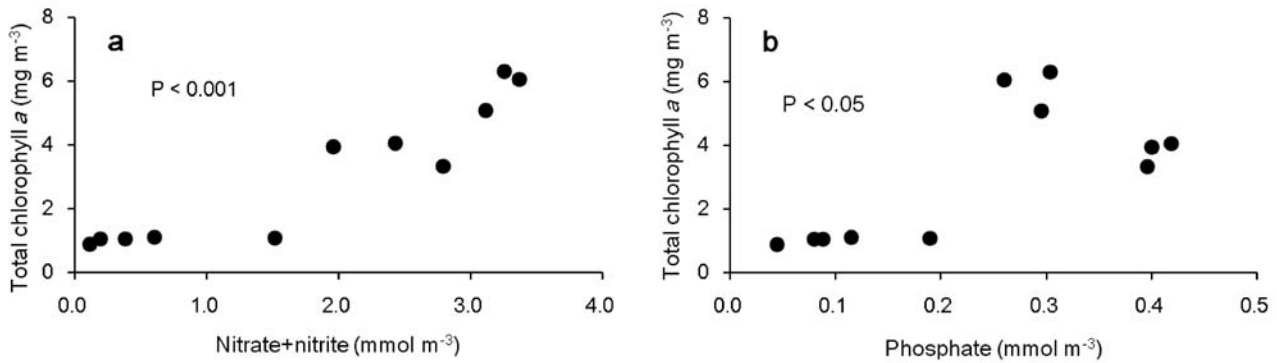


Fig. 5 Relationship between total chlorophyll  $a$ , and nitrate+nitrite (a) and phosphate (b) concentrations within the mixed layer during June-September.

りも有光層の方が深かったにもかかわらず、11月の全クロロフィル $a$ 濃度に近い値であったのは硝酸塩+亜硝酸塩濃度が他の月に比べて低い値 ( $0.56 \text{ mmol m}^{-3}$ ) であったことによることが考えられる。表層混合層内における6月の全クロロフィル $a$ 濃度の平均値が  $5.81 \text{ mg m}^{-3}$  と他の調査の時よりも高い値であったことから、植物プランクトンの取り込みより7月の栄養塩濃度が低い値になったと考えられる。また栄養塩濃度が他の時期より高い値を示したにもかかわらず11月の全クロロフィル $a$ 濃度の平均値が最も低い値を示したのは表層混合層が有光層よりも2倍近く深くなり、植物プランクトンの呼吸量が生産量よりも相対的に大きくなったことによると考えられる。ここで表層混合層内における全クロロフィル $a$ 濃度と硝酸塩+亜硝酸塩濃度、リン酸塩濃度との関係を調べた。11月は栄養塩濃度よりも光量の影響が大きいため、有光層が表層混合層よりも深かった6月から9月までのデータを使ってそれぞれの関係性を調べた結果、全クロロフィル $a$ 濃度と硝酸塩+亜硝酸塩濃度、リン酸塩濃度はともに有意な正の相関性を示した (Figs. 5a, b; t-test,  $P < 0.05$ ,  $n=11$ )。この結果から、東京湾口部の植物プランクトン生物量は湾奥部と違って光量が十分である時には栄養塩濃度に強く影響されるようである。

サイズ分画したクロロフィル $a$ 濃度の月別鉛直分布を Fig. 4 示す。いずれのサイズ画分も全クロロフィル $a$ 濃度の鉛直分布と類似していて表層で高く深度と共に減少傾向を示した。表層混合層内におけるサイズ分画したクロロフィル $a$ 濃度の平均値をみると、6月と9月の  $>10 \mu\text{m}$  画分と  $<2 \mu\text{m}$  画分が  $1 \text{ mg m}^{-3}$  以上の高い値を示した (Table 2)。また、 $>10 \mu\text{m}$  画分では全クロロフィル $a$ 濃度と異なり9月が最も高い値であった。2-10  $\mu\text{m}$  画分は他の

画分と比べて最も低い値であった。*Heterosigma akashiwo* が優占した際には  $<2 \mu\text{m}$  画分のクロロフィル $a$ 濃度が高い値を示すことが報告されている<sup>18, 19</sup>。*H. akashiwo* は5月から6月にかけて富栄養海域で大増殖することにより赤潮を形成する<sup>20</sup>。したがって、6月の  $<2 \mu\text{m}$  画分の多くは *H. akashiwo* である可能性が考えられる。一方、9月は大型の植物プランクトンである珪藻類や渦鞭毛藻類が大増殖したことが考えられる。

表層混合層内におけるサイズ組成の相対的な割合をみると、 $>10 \mu\text{m}$  画分では7月と9月が50%以上を占め、9月は最も高い61%であった (Table 2)。 $<2 \mu\text{m}$  画分では6月が56%を占めていたが、他の月は40%以下であった (Table 2)。外洋域では一般的に  $<2 \mu\text{m}$  画分の小型植物プランクトンが優占し、80%以上を占める<sup>7, 21</sup>。東京湾口部では観測期間中、 $<2 \mu\text{m}$  画分が最も高くても56%であり、大型植物プランクトンの寄与する割合が大きかった。全クロロフィル $a$ 濃度が高かった6月と9月ではサイズ組成に大きな違いが認められることから、前述したように優占する植物プランクトン種が異なっていたことが考えられる。一般的に硝酸塩が豊富な海域では大型植物プランクトンが優占し、N/P比が低く硝酸塩濃度が少ない貧栄養海域では小型植物プランクトンが優占する<sup>22, 23</sup>。6月のN/P比は9月よりも高い値であったが、小型植物プランクトンが優占していた。また表層混合層内の硝酸塩+亜硝酸塩濃度は6月、9月ともに  $>1 \text{ mmol m}^{-3}$  であり、生産力を制限するような低い値ではなかった。したがって、6月と9月の植物プランクトンサイズ組成に影響をもたらした要因は本研究結果からは明らかにすることができなかった。

150 m から鉛直曳きによって採集されたカイアシ

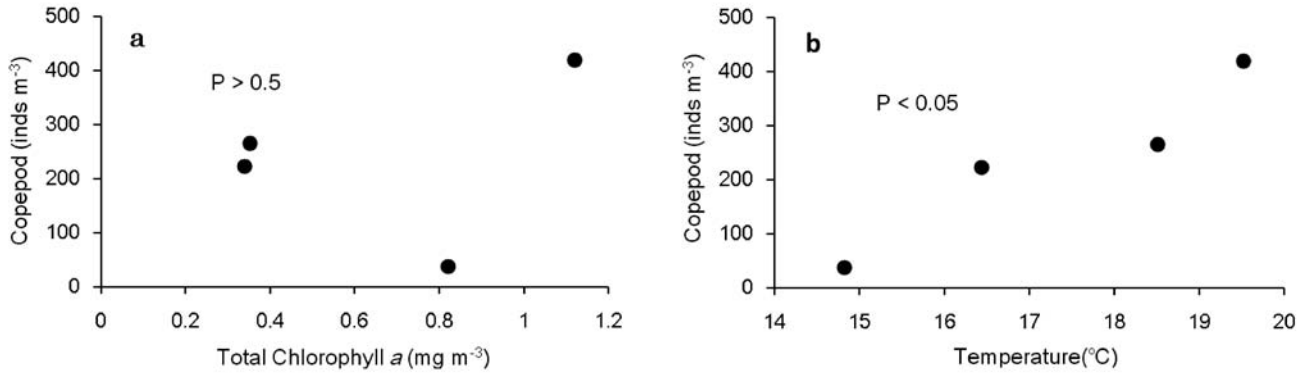


Fig. 6 Relationship between copepod abundance, and mean values of total chlorophyll *a* concentration (a) and temperature (b) within the upper 150 m depth.

類の平均個体数は、9月が最も高く6月が最も低い値であった (Table 2)。これまでに報告された東京湾奥部におけるカイアシ類個体数は、少ない時期で7600 inds.  $m^{-3}$ と湾口部よりも一桁以上高い値である<sup>9)</sup>。このことから、東京湾口部はクロロフィル *a* 濃度、カイアシ類個体数ともに湾奥よりも低い値であった。カイアシ類個体数と150 mまでの全クロロフィル *a* 濃度の平均値との相関性は認められなかった (Fig. 6a; t-test,  $P > 0.5$ ,  $n=4$ )。これは観測期間中、カイアシ類の餌である植物プランクトンが豊富に存在し、餌制限を受けていないのかもしれない。一般的にカイアシ類の成長、再生産は低水温で遅くなる<sup>24)</sup>。そこで、カイアシ類個体数と150 mまでの平均水温との相関性を調べると、有意な正の相関性がみられた (Fig. 6b; t-test,  $P < 0.05$ ,  $n=4$ )。従って、東京湾口部のカイアシ類個体数の変動は水温に大きく影響されるようである。カイアシ類個体数と水温との関係は、北海道沿岸域でも報告されている<sup>10)</sup>。今後はさらにデータを蓄積し、東京湾口部、湾中部、湾奥部における動植物プランクトンの生物量や種組成の変動要因を明らかにしていきたい。

## 謝辞

試料採取に際し東京海洋大学研究練習船「青鷹丸」船長はじめ乗組員、東京海洋大学の学生のご協力に謝意を表す。

## 引用文献

- 1) 高田秀重: 流入負荷, 「東京湾 - 100年の環境変遷 -」(小倉紀雄編), 恒星社厚生閣, 東京, 1993, pp.54-58.
- 2) 千葉県農林水産部水産総合研究センター: 貧酸素水塊速報. <http://www.pref.chiba.lg.jp/lab-suisan/suisan/suikaisokuhou/kako.html>, 2011.
- 3) 神田穰太, チョムタイソンパチャラー, 堀本奈穂, 山口征矢, 石丸隆: 東京湾2定点における栄養塩類濃度の経年変動. 水環境学会誌, 31(9):559-564, 2008.
- 4) T. Odate: Plankton abundance and size structure in the northern North Pacific Ocean in early summer. *Fish. Oceanogr.*, 3:267-278, 1994.
- 5) R. E. Hecky and P. Kilham: Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.*, 33:796-822, 1988.
- 6) Y. Koibuchi and M. Isobe: Phytoplankton bloom mechanism in an area affected by eutrophication: Tokyo Bay in spring 1999. *Coastal Eng. J.*, 49:461-479, 2007.
- 7) 李英植, 向井徹雄, 瀧本和人, 岡田光正: 瀬戸内海西部域, 太平洋における植物プランクトン群集のサイズ構造とその制限栄養塩に関する研究. 水環境学会誌, 18:717-723, 1995.
- 8) C. M. Lalli and T. R. Parsons: *Biological Oceanography, An introduction*, 2nd edn. Butterworth Heinemann, London, 1997.
- 9) 伊東宏, 青木延浩: 東京湾における浮遊性カイアシ類の時空間的分布 - 1990年代初頭の湾奥における季節的消長 -. 日本プランクトン学会報, 57:94-104, 2010.
- 10) 山口篤, 三輪善之, 井上勝夫, 松本稔範, 志賀直信: 沿岸親潮における動物プランクトン群集の特徴. 沿岸海洋研究, 41:23-31, 2003.
- 11) R. Suzuki and T. Ishimaru: An improved

- method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 46: 190-194, 1990.
- 12) J. D. H. Strickland and T. R. Parsons: *A practical handbook of seawater analysis*, 2nd edn. Bull. fish. Res. Board Can., 167:1-310, 1972.
- 13) K. Bendschneider and R. J. Robinson: A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 11:87-96, 1952.
- 14) J. Murphy and J. P. Riley: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27:31-36, 1962.
- 15) 気象庁: 気象統計情報 .<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2011.
- 16) T. R. Parsons, M. Takahashi and B. Hargrave: *Biological Oceanographic Processes* 3rd edn. Butterworth Heinemann, London, 1984.
- 17) R. C. Dugdale: Nutrient limitation in the sea: dynamics, identification and signification. *Limnol. Oceanogr.*, 12:685-695, 1967.
- 18) M.-S. Han and K. Furuya: Size and species-specific primary productivity and community structure of phytoplankton in Tokyo Bay. *J. Plankton Res.*, 22 (7) :1221-1235, 2000.
- 19) 多田邦尚, 一見和彦, 橋本俊也: 大阪湾・紀伊水道における植物プランクトン群集のサイズ組成. *沿岸海洋研究*, 40 (2) :197-204, 2003.
- 20) 岩国市立ミクロ生物館: 瀬戸内海プランクトン図鑑, 潮風, 山口, 2008.
- 21) T. Odate and Y. Maita: Regional variation in the size composition of phytoplankton communities in the western North Pacific Ocean, spring 1985. *Biol. Oceanogr.*, 6:65-77, 1888/1989.
- 22) A. Herbland, A. Le Bouteiller and P. Raimbault: Size structure of phytoplankton biomass in the equatorial Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, 32:819-836, 1985.
- 23) J. Ishizaka, H. Kiyosawa, K. Ishida, K. Ishikawa and M. Takahashi: Meridional distribution and carbon biomass of autotrophic picoplankton in the central North Pacific Ocean during late northern summer 1990. *Deep-Sea Res.*, 41:1745-1766, 1994.
- 24) 上真一: 汽水域における動物プランクトンの特徴. *沿岸海洋研究*, 35:49-55, 1997.