

■原 著■ 2023 年度神奈川大学総合理学研究所共同研究助成論文

## ラベルム形成に注目したミョウガ (*Zingiber mioga* (Thunb.) Roscoe) の花発生に関する形態学的研究

山田大樹<sup>1</sup> 濱田拓見<sup>1</sup> 西井かなえ<sup>2</sup> Louis P. Ronse De Craene<sup>2</sup> 岩元明敏<sup>1,3</sup>

### Floral Development of *Zingiber mioga* (Thunb.) Roscoe with a Special Reference to Labellum Formation

Taiju Yamada<sup>1</sup>, Takumi Hamada<sup>1</sup>, Kanae Nishii<sup>2</sup>, Louis P. Ronse De Craene<sup>2</sup>  
and Akitoshi Iwamoto<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Department of Science, Faculty of Science, Kanagawa University, Yokohama City, Kanagawa 221-8686 Japan

<sup>2</sup> Royal Botanic Garden Edinburgh, 20A Inverleith Row, Edinburgh, EH3 5LR, Scotland, UK

<sup>3</sup> To whom correspondence should be addressed. E-mail: akitoshi@kanagawa-u.ac.jp

**Abstract:** Flowers of Zingiberaceae have a large labellum on their abaxial side. The labellum is a petaloid organ, devived from of staminodes. It is generally recognized that two inner whorl staminodes are fused to form the labellum and an abaxial outer staminode is lost in the flowers of Zingiberaceae. Recent research, however, demonstrated that in some species belonging to the tribe Globbeae in the subfamily Zingiberoideae, the labellum consists of three fused staminodes: two from the inner whorl and one additional staminode from the outer whorl (the third staminode). This study focuses on floral development in *Zingiber mioga*, a member of the Hedychieae subfamily, whose floral development has been rarely observed, and was aimed at elucidating the development of the labellum in this species. Our observations revealed that three sepal primordia and a common primordia for a petals and stamen were initiated at first, followed by a common primodium for two petals and a labellum. These common primordia then differentiated into each floral organ primordium for the petal, stamen, and labellum consisting of staminodes. Although we confirmed the initiation and development of a third outer whorl staminode in a labellum, the third staminode, it becomes indistinguishable at later developmental stages and embedded between the two inner staminodes. These findings suggest that the labellum in *Zingiber mioga* consists of three staminodes, with development similar to that of *Globba godefroyi* in Globbeae.

**Keywords:** *Zingiber mioga*, floral development, labellum, Zingiberaceae, Hedychieae

## 序論

単子葉植物 (Monocots) は、基本的に同一の環状に 3 つずつの花器官を形成する「3 数性」の花を持つ。特に雄蕊については、3 つずつの雄蕊から構成される環が交互に 2 つあり、通常計 6 つの雄蕊が形成される<sup>1)</sup>。しかし、ショウガ科 (Zingiberaceae) の花では、稔性を持つ雄蕊は向軸側の内環雄蕊 1 つだけであり、それ以外の雄蕊は不稔化して仮雄蕊となり、さらに花弁状化している。特に、背軸側に形成される 2 つの内環仮雄蕊が融合して形成された花弁状器官はラベルム (labellum) とよばれる。ショウガ科

のラベルムは大型化し、通常の花弁より大きくなることが多い。

前述したように、ラベルムは背軸側に位置する 2 つの外環仮雄蕊が融合することで形成されており、背軸側の外環仮雄蕊は退化していてラベルムには含まれていないとこれまで考えられてきた<sup>2)</sup>。しかし、最近の研究によりショウガ科ショウガ亜科グロバ連の *Gagnepainia harmandii*, *G. godefroyi* では、背軸側の外環仮雄蕊原基が発達し、内環仮雄蕊原基と明確に識別することができるという観察結果が得ら

れた。そして、この結果からこの属の花におけるラベルムは3つの仮雄蕊（背軸側の内環仮雄蕊2つと外環仮雄蕊1つ）によって形成されていることが明らかとなった<sup>3)</sup>。以降、これまで退化して存在しないとされてきたショウガ科のラベルムにおける外環仮雄蕊を「第3の仮雄蕊」とよぶ。また、同じグロバ連の *Globba geoffrayi* についても、ラベルムの発達初期に第3の仮雄蕊が発生することが明らかとなった。ただし、*G. geoffrayi* では第3の仮雄蕊は発生するものの発達せず、小さい状態のまま残り続ける<sup>3)</sup>。

グロバ連を含め、ショウガ亜科植物における花発生およびラベルムの形態形成については、これまでに比較的多くの形態学的研究が行われている<sup>3)</sup>。しかし、ショウガ科におけるもう1つの大きな亜科であるハナミョウガ亜科については、これまでにハナミョウガ属 (*Alpinia*) の *Alpinia oxyphlla* の花発生しか研究されていない<sup>4)</sup>。

そこで本研究では、これまでにほとんど観察例がないハナミョウガ亜科のミョウガ (*Zingiber mioga*) の花発生についての観察を行った。そして、特に本種におけるラベルムの形態形成に注目し、第3の仮雄蕊が形成されるかどうかについて明らかにすることを目指した。

## 材料と方法

### 植物材料

ミョウガ (*Zingiber mioga* (Thunb.) Roscoe; 図 1A, B) を神奈川大学湘南ひらつかキャンパス（神奈川県平塚市）で栽培し、2020年8, 9月, 2021年8月に発達段階の異なる花芽を採集した。採集した花芽の液浸標本は、神奈川大学理学部岩元研究室（神奈川県横浜市）にて保管されている。

### 材料の固定

採集した花芽は50% エタノールまたは FAA (= Formalin Acetic acid Alcohol; エタノール 30%, ホルマリン 5%, 酢酸 5%) に入れ、アスピレーター (WJ-20, SIBATA) を用いて約 20 分間の脱気固定を 2 回、常温で行った。その後 24 時間以上常温で固定し、観察に用いた。

### 走査型電子顕微鏡 (SEM) の試料作成と観察

固定した試料をエタノール系列で脱水し、酢酸イソアミルで置換した。この試料を、臨界点乾燥装置 (SYG LCP-81, 山友技術) を用いて約 85-95 気圧、42℃の臨界状態で乾燥した。乾燥後、試料をアルミニウム試料台上に貼付した。

貼付した試料を実体顕微鏡 (SZX16, Olympus) の下でピンセットを用いてトリミングし、各ステージの花の構造が観察できるようにしてから、イオンスパッター装置 (JFC-1600, JOEL) を用いて白金/パラジウム粒子でスパッタリングを行った (1.2kV, 40mA で 3 分間)。このスパッタリングした試料を走査型電子顕微鏡 (SEM) (JSM-840A および JSM-IT200, JOEL) を用いて、加速電圧 5kV の条件で観察し、画像撮影を行った。

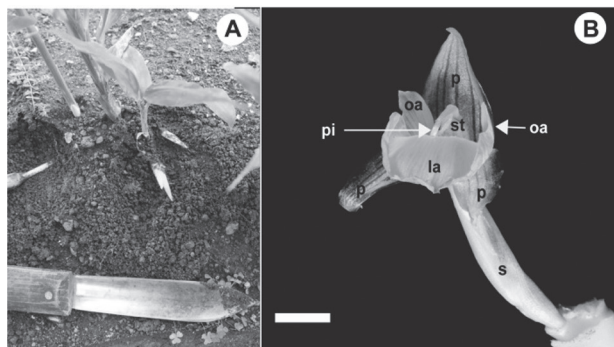


図 1. ミョウガ (*Zingiber mioga*) (A) 育成中のミョウガ. (B) ミョウガの花. ia, 内環仮雄蕊; la, ラベルム; oa, 外環仮雄蕊; p, 花弁; pi, 雌蕊; s, 萼片; st, 雄蕊. Scale bar = 1 cm.

## 結果

花序分裂組織の先端付近にドーム状の花芽原基が観察され、花芽原基の背軸側に苞原基が最初に形成された (図 2A)。その後、左右に側萼片原基が生じ、その間に大きな共通原基が形成された (図 2B)。その後、別の背軸側共通原基が発生した (図 2C)。この共通の原基は発生が進むとよりはっきりと認識できるようになり、最初に花弁原基が分化することが確認できた (図 2D)。

さらに発生が進むと、向軸側の共通原基は花弁原基と雄蕊原基に分かれて発達した。また、背軸側の共通原基からは、花弁と仮雄蕊原基が発達した (図 2E)。この時 2 つの内環仮雄蕊原基の間に挟まれる形で、外環仮雄蕊原基の形成も確認された (図 2E)。この 2 つの内環仮雄蕊と 1 つの外環仮雄蕊原基で形成される器官がラベルムとなる。次に苞原基、萼片原基が花芽の中心部分を覆うように発達し、花弁原基も発達することで仮雄蕊原基は観察できなくなり、雄蕊原基の先端のみが観察できる状態となった (図 2F)。なお、ミョウガでは苞が 2 つ形成されることが観察された (図 2A-F)。

雌蕊原基が発生した段階では、内環仮雄蕊原基と外環仮雄蕊原基の境界は不明瞭であった (図 3A)。雌蕊の花柱が伸長を始めた段階では、内環仮雄蕊原基と外環仮雄蕊原基の差はよりはっきりと確認でき



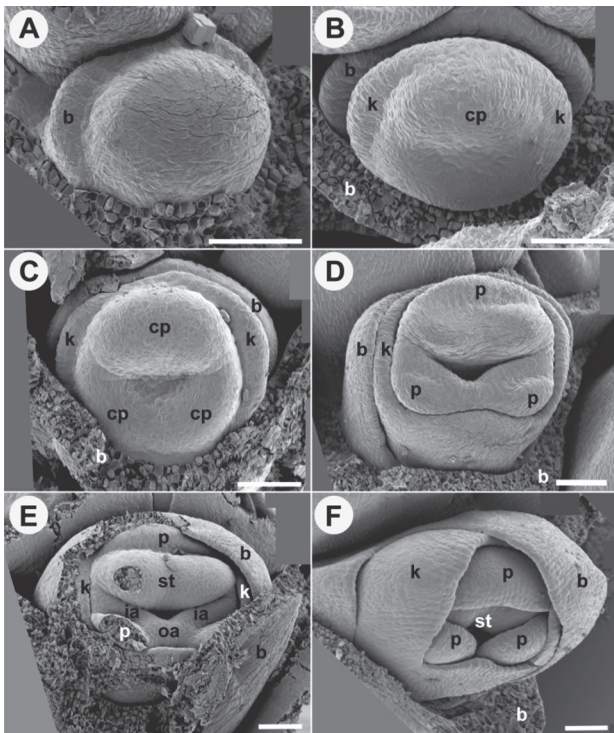


図2. ミョウガの花発生過程（初期から中期）. (A) 発生初期の原基. (B) 2枚の萼片原基と共通原基が形成された. (C) 共通原基が3つに分化. (D) 共通原基から花弁原基と雄蕊原基が発生. (E) 共通原基から雄蕊原基と仮雄蕊原基が発生. (F) 全体が苞と萼片原基に覆われた花. b, 苞; cp, 共通原基; ia, 内環仮雄蕊; k, 萼片; oa, 外環仮雄蕊; p, 花弁; st, 雄蕊. Scale bars = 100  $\mu$ m (A–F). Scale bars = 100  $\mu$ m (A–F).

た。この段階では雄蕊が雌蕊を取り囲むように発達していた（図3B）。

さらに発生が進むと、内環仮雄蕊原基と外環仮雄蕊原基の境界が不明瞭な個体と、明瞭な個体の両方が確認できた（図3C, D）。その後、内環仮雄蕊原基と外環仮雄蕊原基の境界は全ての個体で不明瞭になった（図3E）。雌蕊が雄蕊の2倍程度の高さまで伸長した発生段階では、内環仮雄蕊原基と外環仮雄蕊原基の境界が完全になくなり、ラベルムは2つの内環仮雄蕊原基で構成されているような形態となった（図3F）。

## 討論

### ミョウガの花発生（ラベルム形成以外）

花発生を詳細に観察した結果、ラベルム形成における背軸側の外環仮雄蕊の発生と発達以外は、ほぼこれまでに報告があるショウガ科植物と同様の花発生を示すことが明らかとなった（*Alpinia*<sup>4)</sup>, *Curcuma*<sup>5)</sup>, *Gagnepainia*<sup>3)</sup>, *Globba*<sup>3, 6)</sup>, *Hedychium*<sup>7)</sup>, *Hemiorchis*<sup>3)</sup>, *Scaphochlamys*<sup>8)</sup>）。このことから、ミョウガでは、ショウガ科植物の基本的な花発生が保持されているといえる。

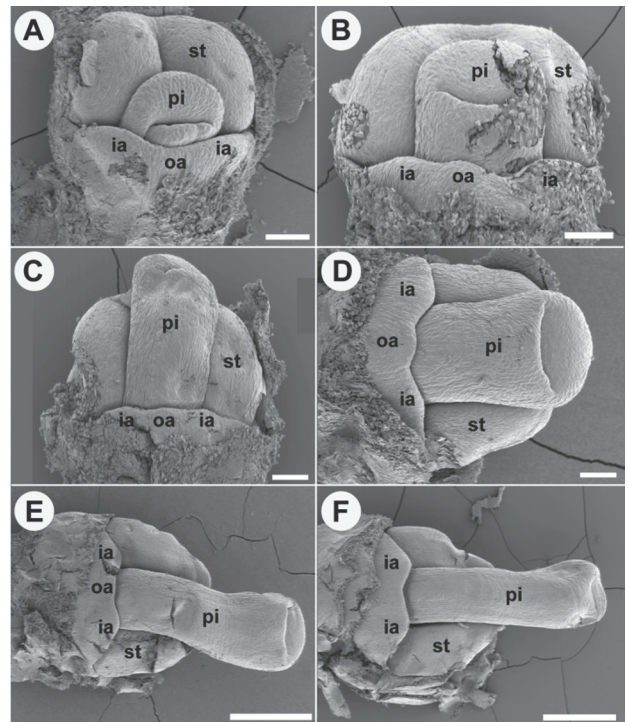


図3. ミョウガの花の発生過程. (A) 雌蕊が形成された花芽. (B) 雄蕊が発達し花柱が雄蕊の溝に入っている. (C) 雌蕊が伸長. (D) 第3の仮雄蕊が明瞭に確認できる花芽. (E) 内環仮雄蕊と第3の仮雄蕊の境界が不明瞭になりつつある花. (F) 内環仮雄蕊と外環仮雄蕊原基の境界が不明瞭になった花. ia, 内環仮雄蕊; oa, 外環仮雄蕊; pi, 雌蕊; st, 雄蕊. Scale bars = 100  $\mu$ m (A–D), 500  $\mu$ m (E, F).

### ラベルムの形成と構造

序論でも述べた通り、ショウガ科のラベルムでは背軸側の外環の仮雄蕊原基（＝第3仮雄蕊）は消失していると考えられてきた<sup>2)</sup>。実際に、これまでに花発生が観察されたショウガ科植物の多くで、ラベルムは発生せず、発生初期から2つの内環仮雄蕊のみが観察される<sup>3-8)</sup>。一方で、グロバ連の *Gagnepainia harmandii* と *G. godefroyi* のラベルムでは第3の仮雄蕊が発達する<sup>3)</sup>。 *Gagnepainia* では最終的なラベルムにおいても第3の仮雄蕊の存在を確認することができ、*Globba geoffrayi* でも痕跡的にはなるものの、完全には退化せずにラベルム中に保持されている<sup>3)</sup>。

ミョウガのラベルムにおいては、発生初期に2つの内環仮雄蕊原基の間にドーム状の隆起が確認できた（図2E）。これは第3の仮雄蕊原基と考えられ、発生中期まで存在を確認することができた。しかし、発生後期にかけて内環仮雄蕊との境界が不明瞭になり、最終的にラベルムは2つの内環仮雄蕊によって構成されているような形態になった（図3D-F）。これは、発生中期から後期にかけては内環仮雄蕊の発達が第3の仮雄蕊と比べて著しいためであると考えられる。また、発生段階がほとんど同じ個体で、第3の仮雄蕊が明瞭なもの、不明瞭なものも観察され

た (図 3C, D)。このことから、ミョウガではラベルムの発達の程度に個体差があると推定される。

いずれにしても、ミョウガのラベルムでは第3の仮雄蕊が形成されており、少なくとも発生中期までは退化しないことが確認された。このラベルム形成の特徴は、これまでに報告があるいずれのショウガ科植物でも見られないものである<sup>3-8)</sup>。しかし、ラベルムにおける第3の仮雄蕊が発生するものの、大きく発達せずに痕跡的になる *Globba godefroy*<sup>3)</sup> とは比較的近いラベルム形成であるといえる。

本研究により、ショウガ亜科だけではなく、ハナミョウガ亜科の植物においてもラベルムにおいて第3の仮雄蕊が形成される種が存在することが明らかとなった。ショウガ亜科のラベルムにおける第3の仮雄蕊の形成は、平行進化により再獲得されたものと考えられる<sup>3)</sup>。今回の結果から、ラベルムにおける第3の仮雄蕊の形成は、ショウガ亜科とハナミョウガ亜科、すなわちショウガ科ほぼ全体で平行進化していると推定される。今後は、他のハナミョウガ亜科植物についても花発生の観察を進め、ショウガ科におけるラベルム形成の進化についてより詳細に明らかにする必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は、2023 年度神奈川大学総合理学研究  
所共同研究助成 (RIIS202304)、研究課題「ショウ

ガ科におけるラベルムの形態進化の解明」を受けて  
行われた。ここに記し、感謝する。

## 文献

- 1) Ronse De Craene LP (2022) Floral diagrams: an aid to understanding flower morphology and evolution. Cambridge University Press.
- 2) Kress WJ (1990) The Phylogeny and Classification of the Zingiberales. *Ann. Missouri Bot. Gard.* **77**: 698-721.
- 3) Iwamoto A, Ishigooka S, Cao L and Ronse De Craene LP (2020) Floral development reveals the existence of a fifth staminode on the labellum of basal Globbeae. *Front. Ecol. Evol.* **8**: 133.
- 4) Song JJ, Zou P, Liao JP, et al (2007) Floral ontogeny in *Alpinia oxyphylla* Miq. (Zingiberaceae) and its systematic significance. *Gard. Bull. Singapore* **59**: 221-230.
- 5) Fukai S and Udomdee W (2005) Inflorescence and flower initiation and development in *Curcuma alismatifolia* Gagnep (Zingiberaceae). *Jap. J. Trop. Agri.* **49**: 14-20.
- 6) Box M and Rudall P (2006) Floral structure and ontogeny in *Globba* (Zingiberaceae). *Plant Syst. Evol.* **258**: 107-122.
- 7) Kirchoff BK (1998) Inflorescence and flower development in the Hedychieae (Zingiberaceae): *Scaphochlamys kunstleri* (Baker) Holttum. *Int. J. Plant Sci.* **159**: 261-274.
- 8) Kirchoff BK (1997) Inflorescence and flower development in the Hedychieae (Zingiberaceae): *Hedychium*. *Can. J. Bot.* **75**: 581-594.

■原 著■ 2023 年度神奈川大学総合理学研究所共同研究助成論文

## 相模川河口域における長期環境変動のモニタリング 11 海況と植物プランクトン分布 2023 年 12 月

水田眞輝<sup>1</sup> 川延京子<sup>1</sup> 西本右子<sup>1</sup> 西條光河<sup>1</sup> 鈴木祥弘<sup>1,2</sup>

Long-term monitoring of environmental changes  
in the Sagami River estuary XI  
Distribution of phytoplankton biomass in December 2023

Masaki Mizuta<sup>1</sup>, Kyoko Kawanobe<sup>2</sup>, Yuko Nishimoto<sup>1,3</sup>, Koga Nishijo<sup>1</sup>  
and Yoshihiro Suzuki<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup> Department of Science, Faculty of Science, Kanagawa University, Yokohama City, Kanagawa 221-8686, Japan.

<sup>2</sup> To whom correspondence should be addressed. E-mail: suzuki03@kanagawa-u.ac.jp

**Abstract:** We measured ocean conditions in the Sagami River estuary in December 2023. In this area, three water masses are often observed: river-derived water masses due to the inflow of river water, coastal water masses, and open ocean water masses. In this study, only river-derived and coastal water masses were observed, and no high-temperature, high-salinity open-ocean water masses were observed. Accordingly, the phytoplankton biomass was low. The increase in water temperature toward the coast indicated the possible presence of open ocean water masses offshore beyond 5000 m. The high species diversity found in the sample taken 5000 m offshore, closest to the open ocean water masses, suggests the importance of these masses in maintaining the productivity of the Sagami River estuary during this period.

**Keywords:** bio mass, Sagami River estuary, species diversity, vertical mixing

### 序論

相模湾は伊豆半島から三浦半島を経て房総半島に至る、太平洋に向かって開かれた湾である。この湾の沖合には黒潮が流れる一方で、複数の河川から淡水が流入し、湾内には複雑な環境が形成されている<sup>1)</sup>。中でも、相模川からの淡水の流入と平塚海谷と呼ばれる特異な海底地形が存在する平塚市周辺の海域は、環境が複雑に変動している<sup>2)</sup>。この変動する環境にあっても、植物プランクトンの行なう光合成・一次生産に支えられて様々な生物が生息していることに変わりはない。この海域で植物プランクトンを解析し、生息環境と対応づけて考えることはこの海域の生態系を理解するために重要である<sup>2-5)</sup>。近年の地球温暖化とそれに伴う気候変動は、この海域にも様々な影響を与えることが予想される。海域に普遍的特性と地球温暖化にともなう生じる現象とを分けて捉え、影響を正確に把握するためには、この海域での複数年にわたる測定が重要である。我々は、神

奈川大学総合理学研究所の助成を受け、2010 年以来継続した調査を実施してきた。本研究では、2023 年 12 月に植物プランクトン現存量とその種組成について調査を実施し、この海域の非生物的環境（海況）と対応づけて検討した。

### 材料と方法

#### 環境要因と植物プランクトン生物量の測定

非生物的環境要因と植物プランクトン生物量の測定を 2023 年 12 月 4 日に行った。相模川河口から南に向かって沖合に 0、100、200、500、1000、1500、2000、2500、3000、3500、4000、4500、5000 m の 13 測点を南北直線上に設定して測定した（図 1）。GPS を用いて緯度経度を測定することで調査船の位置を正確に決定した。決定した位置からの移動を小さくするため、位置決定後、できる限り速やかに測定を実施した。水深 50 m 以浅の観測点では、着



底した観測器の示す水深から、水深 50 m 以深の観測点では、音響測定器の示す水深から測定点の水深を求めた。各観測点では、調査船舷側より直読式総合水質計 (AAQ 126, JFE アドバンテック株式会社) を垂下して、電気伝導度、温度、圧力、クロロフィル蛍光強度を測定した。電気伝導度と圧力から、測定器付属のソフトウェアにより塩分濃度 (‰) と水深 (m) を求めた。海水の密度指標 ( $\sigma$ ) は、塩分濃度と温度、圧力から算出した海水密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ ) より 1000 を引いて求めた。観測と同時に採水した海水試料をガラス濾紙 (GF/F, ワットマン) で濾過し、濾紙上に残った粒子より N,N'-ジメチルホルムアミド (富士フイルム和光純薬株式会社) でクロロフィル a (Chla) を抽出した。溶液中の Chla 濃度は蛍光分光器 (TD-700, Turner Designs) を用いて蛍光法で求めた<sup>6)</sup>。この Chla 濃度で校正することで直読式総合水質計で測定したクロロフィル蛍光強度を Chla 濃度 ( $\mu\text{g l}^{-1}$ ) に換算した。各観測点で直読式総合水質計により求められた温度、塩分濃度、海水密度指数、Chla 濃度は、同時に求められた水深および各観測点の河口からの距離と対応づけ、海中の空間的分布を推定した。測定点の海底水深を境界条件として設定した上で、温度、塩分濃度、海水密度指数、Chla 濃度の分布を示すコンターマップを作成した (G-sharp, 日本電子株式会社)。また、既知の濃度の水溶液で校正した後、比色定量キット (HI736 & HI781, ハンナインストルメンツ) を用いて海水試料のリン酸塩、硝酸塩濃度を求めた。

### 植物プランクトン群集の解析

相模川河口から南に向かって沖合に 0 m、1000 m、

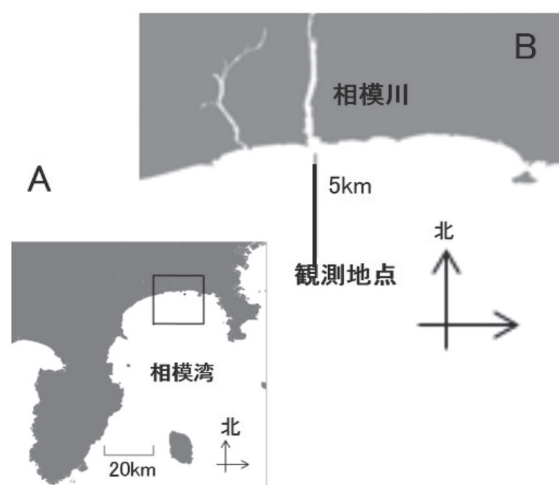


図 1. 観測海域。相模川河口から南方沖合 5000 m の線上に測点を設けた。A. 相模湾全景 図中の四角形は図 B の位置を示す。B. 観測海域 図中直線は調査した観測点を設けた南北の線を示す。

5000 m の南北直線上の 3 測点 (図 1) で表層水を採水バケツにより採水した。海水試料は 250 ml 黒色ポリびんに入れ、速やかに 0.1% パラホルムアルデヒド・0.025% グルタルアルデヒド固定液 (最終濃度) を添加した<sup>7)</sup>。静かに攪拌して固定した試料は、遮光した保冷庫に入れて実験室まで輸送した。試料は測定まで 4 °C、暗所で保存した。この試料 250 ml を、引圧せずに膜フィルター (孔径 0.2  $\mu\text{m}$ ) (ISOPORE, Millipore) で約 30 ml まで濃縮後、utermöhl 法により倒立光学顕微鏡 (DMIL, Leica 社) を用いて観察した。プランクトンマニュアル (Eder and Elbrächter 2010)<sup>8)</sup> に従い高倍率の対物レンズで細胞を観察し、低倍率の対物レンズで全視野面積を確認する方法で各種の密度を求めた。プランクトンの同定 (属名と種名) は、Tomas C R (ed.) (1997)<sup>9)</sup> および、Omura T. (ed.) (2012)<sup>10)</sup> に従った。

### 結果 海況

海水の温度は河口 (沖合 0 m) から沖合にむかって 17.5 から 18.5 °C に上昇した。温度の上昇は水深 2 m 以浅の表層で遅く、河口付近で 17.5 ~ 18.0 °C、沖合 3000 m で 18.0 °C、沖合 4000 m で 18.5 °C となった。水深 10 m 以深の温度も河口付近で 17.5 ~ 18.0 °C であったが、表層に比較して岸よりの沖合 1000 m で 18.0 °C、沖合 3000 m で 18.5 °C となった。各観測点の鉛直方向の変化を見ると、河口から沖合 1000 m までの沿岸では、表層から海底までほぼ等しい 17.5 ~ 18.0 °C であった。さらに沖合でも 10 m 以深の水温はほぼ等しかったが、表層の水温は水深 10 m 以深の水温はより 0.5 °C 低くかった。4000 m より沖では水温は再び鉛直方向に均一になり、18.5 ~ 19.0 °C となった (図 2 A)。沖合 500 m 付近の表層に 33.5 ~ 34.0 ‰ の低い塩分濃度の水塊が認められた。この水塊を含む最大深度 15 m 以浅の水塊の塩濃度は河口から 4000 m 沖合まで 34.0 ~ 34.5 ‰ で、その下の水塊の塩濃度の 34.5 ~ 35.0 ‰ に比べて低かった。上層の低い塩濃度の水塊の最大水深は沖合に行くにしたがって浅くなり、沖合 4000 m 以遠で認められなくなった。このため沖合 4000 m 以遠の塩濃度は表層から水深 50 m まで等しく 34.5 ~ 35.0 ‰ となった (図 2 B)。密度の指標  $\sigma$  は表層で 24.8 未満、3 ~ 10 m 以深では 24.8 ~ 25.0 でほぼ一定であった。河口付近の低塩濃度の水塊の周辺では 24.4 ~ 24.6 の例外的に低い密度の水塊が認められた (図 2 C)。

観測海域の Chla 濃度は沖合 1000 m の海底付近と沖合 4500 ~ 5000 m の水深 15 m 付近を除き、3.5  $\mu\text{g Chla l}^{-1}$  未満であった。河口から沖合 500 m ま

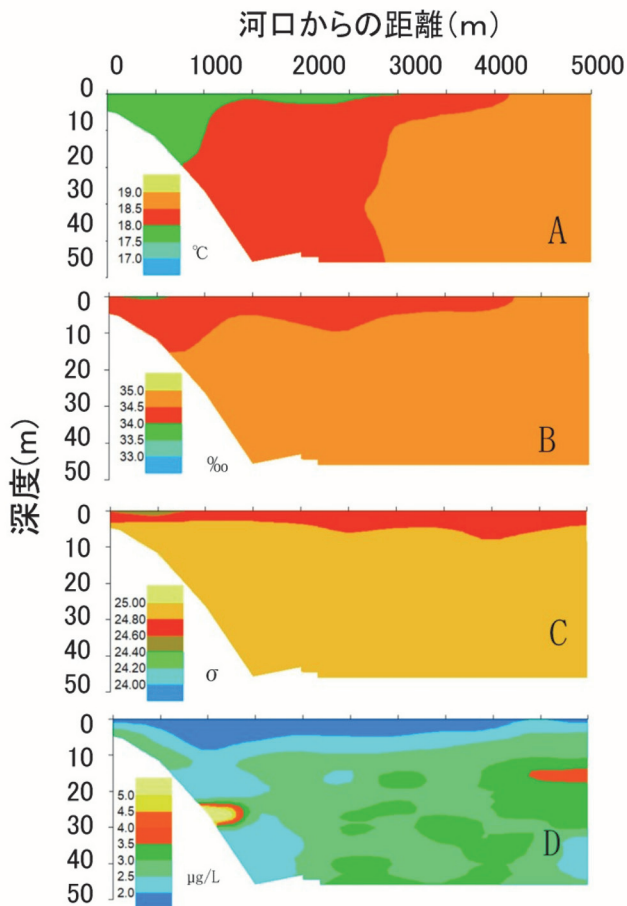


図2. 相模川河口域の環境要因の分布. 水温 (A). 塩濃度 (B). 密度 (C). クロロフィル *a* 濃度 (D) を記す.

で水深 0 m の Chl *a* 濃度は  $2.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  未満であったが、直下の水深 1 m 以深で  $2.0 \sim 3.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  に上昇した。河口から 500 ~ 4000 m 沖合までの表層の Chl *a* 濃度も  $2.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  未満であったが、その層は河口付近より厚く、沖合 1000 m 付近では水深 8 m に達した。さらに沖合 4000 m 以遠では、 $2.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  未満の植物プランクトンの希薄な層は再び、1 m 未満に薄くなった。この層の下ではクロロフィル濃度が上昇し、 $2.0 \sim 3.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  となった。さらに下層では、 $2.5 \sim 3.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  の濃度の水塊の中に  $3.0 \sim 3.5 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  の濃度の水塊が散在していた。沖合 4000 ~ 5000 m の水深 10 ~ 30 m の中層には  $3.0 \sim 3.5 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  の濃度の水塊が分布し、その中心には  $3.5 \sim 4.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  の濃度の水塊が認められた。沖合 1000 m 付近の海底付近には  $5.0 \mu\text{gChl} a \text{ } \ell^{-1}$  を越える濃度の水塊が認められた (図 2D)。この付近にはしばしば高いクロロフィル濃度の水塊が認められるが、その原因は今のところ不明である。

観測海域の硝酸塩濃度とリン酸塩濃度を求めた。水深 10 m の硝酸塩濃度は沖合 500 ~ 5000 m で 10

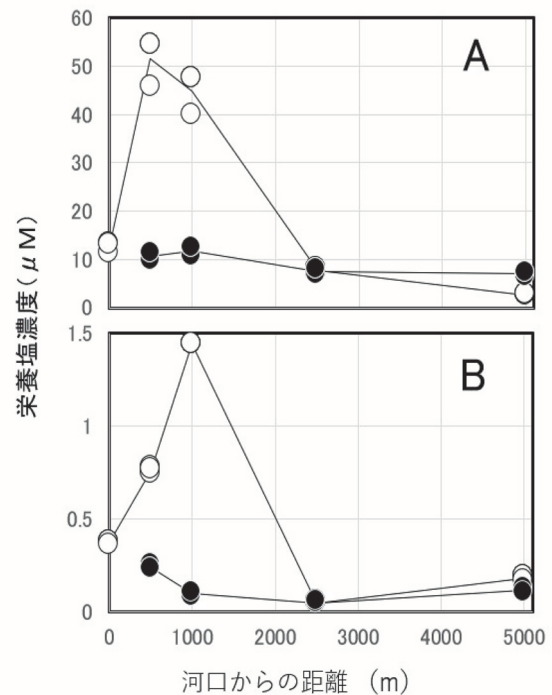


図3. 相模川河口域の硝酸塩濃度 (A) とリン酸塩濃度 (B) の分布. 水深 0 m (○) と水深 10 m (●) の濃度を記す.

$\mu\text{M}$  以下であった。河口 (沖合 0 m)、水深 0 m の表層でも  $10 \mu\text{M}$  と低かったが、沖合 500 m、1000 m では、50 と  $45 \mu\text{M}$  に上昇したが、さらに沖の 2500 m、5000 m では  $10 \mu\text{M}$  以下に低下した。リン酸塩濃度も同様の傾向を示した。水深 10 m のリン酸塩濃度は沖合 500 ~ 5000 m で  $0.3 \mu\text{M}$  以下であった。河口 (沖合 0 m)、水深 0 m の表層でも低く  $0.4 \mu\text{M}$  であったが、沖合 500 m、1000 m では、0.75 と  $1.5 \mu\text{M}$  に上昇した。さらに沖の 2500 m、5000 m では  $0.3 \mu\text{M}$  以下に低下した (図 3)。

### 藻類の群集構造

相模川河口 (0 m) と沖合 1000 m と 5000 m の 3 測点で表層の海水試料を採集し、各種の密度から藻類群集の群集構造を求めた。微細藻類には、珪藻 (Diatoms)、クリプト藻 (Cryptophyceae)、渦鞭毛藻 (Dino-phyceae)、ハプト藻 (Haptophyceae)、珪質鞭毛藻 (Dictyochophyceae)、プラシノ藻 (Prasinophyceae) と原核生物であるラン藻 (Cyanophyceae) に属する様々な藻類が認められた。珪藻以外の藻類の細胞は、珪藻に比較して小型であり、細胞当たりのバイオマスが小さい。また、これらの多く光学顕微鏡観察による種レベルでの同定に限界があった。さらに、固定処理により細胞の変形が生じやすい種もあり、種レベルでの同定が限られていた。このため、これらの藻類を鞭毛藻 (Flagellate) とラン藻とし、比較的種同定の容易な珪藻類とは区別して扱った (表

表 1. 植物プランクトン群集の種組成

Species	表層 ( 0m )			Species	表層 ( 0m )		
	0m	1000m	5000m		0m	1000m	5000m
Diatoms				Cyanophyceae			
<i>Detonula pumila</i>	<w		39	<i>Trichodesmium</i> sp.		36	
<i>Lauderia annulata</i>	w	143	4724	Flagellates			
<i>Skeletonema costatum</i>		1575	573	Cryptophyceae		380	1265
<i>Thalassiosira</i> spp.		286	573	Dinophyceae			
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>	<w		42	<i>Prorocentrum dentatum</i>			143
<i>Leptocylindrus danicus</i>			1432	<i>Prorocentrum micans</i>	i		143
<i>Corethron pelagicum</i>	wo	4	18	Gymnodiniaceae		143	143
<i>Coscinodiscus wailesii</i>	w	18	11	<i>Ceratium furca</i>	i		4
<i>Rhizosolenia bergonii</i>	w		72	<i>Ceratium fusus</i>		4	4
<i>Rhizosolenia decipiens</i>	w		54	<i>Ceratium kofoidii</i>	wo		18
<i>Rhizosolenia robusta</i>	w	4	18	<i>Ceratium trichoceros</i>	<w	4	4
<i>Guinardia flaccida</i>		143	143	<i>Oxytoxum</i> sp.			143
<i>Guinardia striata</i>		429	573	Peridinales			286
<i>Cerataulina pelagica</i>			429	<i>Noctiluca scintillans</i>			4
<i>Eucampia zodiacus</i>		752	91	Haptophyceae			
<i>Bacteriastrum elongatum</i>	<w		859	<i>Gephyrocapsa oceanica</i>		30372	32270
<i>Bacteriastrum</i> spp.		573	154	Coccolithophorid		143	286
<i>Hemiaulus hauckii</i>			286	Dictyochophyceae			
<i>Chaetoceros atlanticus</i>		787	21	<i>Dictyocha fibula</i>		143	286
<i>Chaetoceros concavicornis</i>			573	<i>Dictyocha speculum</i>			143
<i>Chaetoceros eibonii</i>	w	14	39	Prasinophyceae			
<i>Chaetoceros affinis</i>			394	<i>Pyramimonas</i> sp.		1139	759
<i>Chaetoceros compressus</i>			5297				
<i>Chaetoceros constrictus</i>	<c		573				
<i>Chaetoceros debilis</i>	<w		286				
<i>Chaetoceros diadema</i>		286	1,575				
<i>Chaetoceros didymus</i>	<w		716				
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	w	143	4,152				
<i>Chaetoceros pseudocurvis</i>	w		429				
<i>Chaetoceros socialis</i>			573				
<i>Chaetoceros tenuissimus</i>	ib	949	380				
<i>Chaetoceros tortissimus</i>			143				
<i>Ditylum brightwellii</i>			21				
<i>Odontella aurita</i>			107				
<i>Thalassionema nitzschioides</i>		3,436	573				
<i>Thalassiothrix</i> spp.			18				
<i>Cymbella</i> sp.		143					
<i>Navicula</i> spp.		573	143				
<i>Pleurosigma</i> / <i>Gyrosigma</i> sp.			18				
<i>Cylindrotheca closterium</i>		143	1,432				
<i>Fragilariopsis</i> spp.			1,002				
<i>Nitzschia</i> spp.			143				
			143				
Total (cell l <sup>-1</sup> )		10400	6744				
			53292				

w: warm water region, &lt;w is tended to have that personality.

c: cold water region.

i: inshore or coastal region.

b: brackish

f: fresh water

o: open water region.

blank: cosmopolitan or world wide, and unknown.



1)。全 3 測点の海水試料中に観察された珪藻類は 42 種群で、鞭毛藻は 16 種群、ラン藻は 1 種であった。同定が難しく上位の分類群で不明種としてまとめた種群には、採水した測点により異なる種が含まれていた可能性がある。

ラン藻は沖合 1000 m で 1 種のみが認められ、その細胞密度は 36 糸状体  $\ell^{-1}$  と鞭毛藻や珪藻に比べ低かった。鞭毛藻類の全細胞数の 94% を占める優占種 *Gephyrocapsa oceanica* (ハプト藻) の密度は 3 測点でほとんど変化しなかった。このため、鞭毛藻類全体の細胞密度の変化はわずかであった。鞭毛藻類の平均密度は 33000 細胞  $\ell^{-1}$  であり、珪藻類の細胞密度の 3 測点の平均 23500 細胞  $\ell^{-1}$  を 40% 上回っていた。河口では優占種以外に 3 種類しか認められないのに対し、1000 m、5000 m 沖合の測点ではそれぞれ 8 種、15 種が認められた。河口だけに特有の種は無く、1000 m の測点だけに特有の種は 1 種で、5000 m 地点だけに特有の種は 8 種であった。全 16 種中 15 種が 5000 m 沖合の測点で認められた。鞭毛藻 16 種群には生息環境と対応づけられる種群はわずかで、沿岸性種が 2 種、外洋性種が 1 種で、全体に占める細胞数もわずかであった (0.1% と 0.01%)。珪藻類の細胞密度は河口 (0 m) で 10400 細胞  $\ell^{-1}$  であったが、1000 m の測点で 6744 細胞  $\ell^{-1}$  に低下し、5000 m で 53000 細胞  $\ell^{-1}$  となった。3 測点で細胞数が大きく変化した。河口では *Skeletonema costatum* と *Thalassionema nitzschioides*、1000 m では *Cylindrotheca closterium* と *Fragilariopsis* spp. が、沖合 5000 m では *Guinardia striata* と *T. nitzschioides* がそれぞれ優占していた。河口、1000 m、5000 m の 3 測点で認められた珪藻種はそれぞれ 19、19、39 種群で、河口から沖にかけて全ての測点で確認できた種は 12 種群であった。沖合 5000 m で確認された種の一部が、河口や沖合 1000 m でも確認されたが、残りの 17 種群は 5000 m でのみ確認された。河口だけで認められた種群、1000 m だけで認められた種群がそれぞれ 1 種、河口と 1000 m 測点で認められ、5000 m で認められなかった種群が 1 種であった。中でも、1000 m 測点でのみ認められた *Fragilariopsis* spp. は、この海域で優占する種群の一つであった (表 1)。沖合 5000 m では確認できず、河口や沖合 1000 m でのみ確認された種群はわずかであったが、その海域の藻類群集を特徴づけていた。珪藻類 42 種群のうち 1/3 にあたる 14 種が暖海性かその傾向を示す種であった。そのうち 7 種は 5000 m 沖合でのみ認められたが、6 種は河口で、4 種は 1000 m 沖合でも認められた。全細胞数に占める暖海性珪藻の細胞数は 26.5% に達し、調査海域に広く、

高密度で分布していることが示された。一方、冷海性の珪藻種は *Chaetoceros constrictus* のみであった。

## 考察

観測された海域の密度分布から、均質な密度の水塊とその上部の水深 10 m 以浅に低密度の層が存在することがわかる (図 2C)。下層の均質な密度の水塊は塩分濃度が均一で (図 2B)、水温も鉛直方向にほぼ一定であった (図 2A)。冬季温帯海洋では大気により冷却された表層水が沈降することにより鉛直混合が生じる。各点で測定された 10 m 以深の均一な塩分濃度、水温、密度は、50 m 以深にまで達する鉛直混合を示していた。一方、水平方向の温度の分布をみると、温度は河口付近で低く、沖合に向かって上昇していた。さらに、水深 10 m 以浅の表層では、下層の均質な水塊に比較して温度の低い水塊が沖に向かって伸長していた (図 2A)。密度が高くなる低温であるにも関わらず、表層に水塊が留まっていたのは、河川から流入した淡水に由来し、塩分濃度が低いためであった (図 2B)。表層で低温水塊が顕著であることは相模川から流入した低温の淡水により、海水が冷やされたことを示唆していた。冬季の鉛直混合に加えて、低温・低塩濃度の河川水による冷却と塩分成層により、この海域の水塊の密度分布が生じていたと考えられる。表層の水塊には、栄養塩濃度にも大きな変動が認められた。河口と沖合 1000 m の表層に認められた硝酸塩とリン酸塩の高い濃度は、低温・低塩分濃度の表層水塊が、高栄養塩濃度の河川水に由来することと対応していた。相模川河口周辺海域には、淡水の流入により直接形成される河口付近の低い塩分濃度の水塊 (河川由来水塊) と、河川水と海洋水塊の混合により生じる沿岸域の水塊 (沿岸水塊)、さらに、外洋の水塊 (外洋水塊) の異なる 3 つの水塊が区別されることが多い<sup>3-5, 10-12)</sup>。低温や高い塩分濃度は海水の密度を高める。河川由来水塊の低温・低塩分濃度、外洋水塊の高温・高塩分濃度の特性は海水密度を高くも低くもする要因を含んでいる。沿岸水塊を加えた 3 つの水塊が同時に存在することで、相模川河口水域に複雑な水塊構造を形成する。これにより生ずる不安定な成層は、河川や深層からの容易な栄養塩供給を可能にし、植物プランクトンの生産性を高めていると予想される、しかし、本研究では、二水塊しか認められなかった。この二水塊の内一つは、低温、低塩分濃度、高栄養塩濃度の特徴をもつ河川由来水塊であり、塩分濃度を指標とすると、河口から 4000 m 沖合まで表層 10 m 以浅に広がっていた (図 2B)。この水塊の中で硝酸塩、リン酸塩濃度が高かったのは、沖合 1000 m を中心

の表層のみで、表層 10 m ではいずれの栄養塩も全ての測点で低い値であった (図 3)。栄養塩の分布は河川由来水塊の範囲は極めて限定的であることを示していた。一方、10 m 以深の水塊では水温が河口から沖合に向かって上昇する温度勾配が認められた。沿岸に伸長した巨大な外洋の水塊の一部である外洋水塊がほぼ一定の温度であることを考えると、観測された水塊は沿岸水塊としてとらえることができる。水平方向の温度勾配からは (図 2A)、さらに沖合に外洋水塊が存在する可能性が示唆された。

相模川河口の水域に二つの水塊しか認められない単純な海況は 2022 年冬期にも観測されている。三つの水塊が観測された 2021、2020 年で植物プランクトン生物量と比較すると、二つの水塊しか認められない本年のような海況で生物量が低い傾向がある<sup>5)</sup>。本研究では低い植物プランクトン生物量は河川由来水塊と河口に近い沿岸水塊で顕著であった。河川由来水塊では高い栄養塩濃度の測点でも、植物プランクトン生物量が低く、栄養塩濃度と生物量は対応していなかった (図 2D、図 3)。この結果は栄養塩の流入後、未だ藻類が増殖を介していない状況を示しており、この観測の後に藻類が増殖する可能性がある。しかし、実際に生物量が増えるかどうかについては、本研究の観測からは推定できない。生物量との対応を検討するためには、継続した観測が必要であった。一方、沖側の沿岸水塊には比較的高い植物プランクトンの生物量が認められた (図 2D)。外洋水塊の影響が殆ど認められなかった 2023 年 1 月と比較すると<sup>5)</sup>、5 倍以上の密度の生物量が認められている。この結果は、この海域の一次生産への外洋水塊の重要性を示している。植物プランクトン群集の種組成をみると、外洋水塊の影響を強く受ける 5000 m 沖合の種数が最も多く、その一部の種群が、河口 (0 m) や 1000 m 沖合の試料で認められている。生物量のみならず、さまざまな藻類種群の分布からも、植物プランクトンの供給源としての外洋水塊の重要性を伺うことができる。河口 (0 m) で優占していた *S. costatum* は、5000 m 沖合では優占しておらず、1000 m 沖合で優占していた *Fragilariopsis* spp. は 5000 m 沖合に認められない。近接した海域でありながら、それぞれの測点に特徴的な海況とそれと対応した珪藻種が優占することも、藻類種群の分布状況から推察された。

この海域で特徴的な植物プランクトンの分布に、沖合 1000 m 付近海底の高密度の分布がある (図 2D)<sup>3-5, 10-12)</sup>。この地点に高い密度で植物プランクトンが存在することについては不明な点が多い。この特異的な分布の解明は、今後の課題であると考えられる。

## 結論

本研究では 2024 年 12 月、相模川河口付近の海況の測定を実施した。この海域では河川水の流入による河川由来水塊と沿岸水塊と外洋水塊の三つの水塊がしばしば認められる。本研究では河川由来水塊と沿岸水塊しか認められず、高温高塩分濃度の外洋水塊は認められなかった。これと対応して植物プランクトン生物量は少なかった。水温の沖合へ向かっての上昇は 5000 m 以遠の沖合に外洋水塊が存在する可能性を示していた。外洋水塊に最も近い沖合 5000 m の試料に認められた高い種多様性は、この時期の相模川河口水域の生産性の維持に外洋水塊が重要であることを示唆していた。

## 謝辞

本研究は、2023 年度神奈川大学総合理学研究所共同研究助成 (RIIS202304) を受けて行った。

研究にご理解を頂き、支援いただいた神奈川大学理学部総合理学研究所の所員の皆さんに深くお礼申し上げます。

## 文献

- 1) 日本海洋学会編 (1985) 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京.
- 2) 児玉壮史, 鈴木祥弘 (2010) 相模川河口域の海況と植物プランクトンの分布. *Sci. J. Kanagawa Univ.* **21**: 65-69.
- 3) 平賀義路, 児玉壮史, 鈴木祥弘 (2011) 相模川河口域の植物プランクトンの分布への淡水流入の影響. *Sci. J. Kanagawa Univ.* **23**: 59-66.
- 4) 栗飯原海人, 平賀義路, 鈴木祥弘 (2014) 相模川河口域海況の日変化. *Sci. J. Kanagawa Univ.* **25**: 111-116.
- 5) 西條光河, 川延京子, 西本右子, 鈴木祥弘 (2023) 相模川河口域における長期環境変動のモニタリング 10 海況と植物プランクトン分布 2023 年 1 月. *Sci. J. Kanagawa Univ.* **34**: 65-70.
- 6) Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study(JGOFS) Core Measure Ments( 1994UNESCO)
- 7) 川延京子, 池谷透 (2016) 海洋植物プランクトン計数試料の品質管理と保存管理策にもとづく固定・保存法の検討. *日本プランクトン学会報* **63**: 55-65.
- 8) Edler L. and Elbrächter M. (2010) The uter möhl method for quantitative phytoplankton analysis. IN: *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis.* Bengt K, Caroline C, And Eileen B. eds, UNESCO. pp. 13-20.
- 9) Tomas C. R. (ed.) (1997) Identifying marie phytoplankton. *Acade mic press. Inc., San Diego, CA.*
- 10) Omura Takuo (ed.) (2012) Marin Phytotoplankyon of the Western Pacific. *Kouseisha Kouseikaku Co., Ltd., Tokyo.*
- 11) 酒井駿輔, 川延京子, 多田雅章, 金沢謙一, 西本右子 & 鈴木祥弘 (2020) 相模川河口域における長期環境変動のモニタリング (冬期相模川河口域の特徴的な水塊中に認められた植物プランクトンの群集構造). *Sci. J.*

*Kanagawa Univ.* 31: 83-88.

- 12) 酒井駿輔, 川延京子, 金沢謙一, 西本右子 & 鈴木祥弘 (2021). 相模湾河口域における長期環境変動モニタ

リング 8 降雨量が非生物的・生物的環境へ与える影響. *Sci. J. Kanagawa Univ.* 32: 73-79.