

25年ぶりに相模湾で発生した円石藻 *Gephyrocapsa oceanica* によるブルーム

矢野光一^{1)*}、梶正彦¹⁾、下出信次²⁾、村上浩³⁾、虎谷充浩⁴⁾、Victor S. Kuwahara¹⁾

1) 創価大学大学院理工学研究科 〒192-8577 東京都八王子市丹木町 1-236

2) 横浜国立大学大学院環境情報研究院附属臨海環境センター 〒259-0202 神奈川県足柄下郡真鶴町岩 61

3) 宇宙航空開発研究機構地球観測研究センター 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

4) 東海大学建築都市学部土木工学科 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

Coccolithophore *Gephyrocapsa oceanica* Bloom Occurrence in Sagami Bay for the First Time in 25 Years

Koichi Yano^{1)*}, Masahiko Kaji¹⁾, Shinji Shimode²⁾, Hiroshi Murakami³⁾, Mitsuhiro Toratani⁴⁾, Victor S. Kuwahara¹⁾

1) *Graduate School of Science and Engineering, Soka University, 1-236 Tangi-machi, Hachioji, Tokyo 192-8577, Japan*

2) *Manazuru Marine Center for Environmental Research and Education, Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, 61 Iwa, Manazuru, Kanagawa 259-0202, Japan*

3) *Earth Observation Research Center (EORC), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505, Japan*

4) *Department of Civil Engineering, School of Architecture and Urban Planning, Tokai University. 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan*

* *Corresponding author: koichiyano@soka.gr.jp*

2022年4月30日受付, 2022年5月16日受理

Abstract Coccolithophore is one type of phytoplankton that forms calcium carbonate plates called coccoliths, and is relatively diverse with about 200 species in the world's oceans. Coccoliths accumulate in massive calcareous deposits on the sea floor that serve as a sedimentary buffer of ocean chemistry and are also a major long-term carbon storage that has a significant impact on the global carbon cycle and climate. Coccolithophores are also a major producer of dimethyl sulfide (DMS) that is the dominant precursor for cloud condensation nuclei in the marine atmosphere; DMS emissions decrease solar radiation due to increasing cloud cover. Coccolithophores play an important role in biogeochemical cycles in the ocean by influencing the oceanic uptake of atmospheric carbon dioxide, and producing calcium carbonate sediments and DMS. Coccolithophores often bloom on massive scales. Around the Japan archipelago, coccolithophore blooms have also been reported; a *Gephyrocapsa oceanica* bloom in Tokyo Bay and Sagami Bay (1995) and Hakata Bay (2004, 2007, 2008), and a *Emiliana huxleyi* bloom in Suruga Bay (2007). In mid-May 2020, a massive bloom of coccolithophores were observed in Sagami Bay, Japan,

possibly for the first time in 25 years. The bloom was initially observed by the JAXA, GCOM-C ocean color remote sensing satellite “*Shikisai*” capturing a vast emerald green reflectance image in the bay. Researchers who received the report immediately conducted *in situ* observations, and found that coccolithophores caused the massive bloom. Coccolithophore is a common yet elusive group in the waters around Japan, and there has only been one report of a bloom observation in Sagami Bay. This study shows the characteristics of the coccolithophore bloom observed in Sagami Bay in 2020 and also reports on the marine environment during the bloom. Water temperature, salinity, nutrients, chlorophyll *a*, and cell density were collected from field samples. Satellite ocean color data was provided by “*Shikisai*”. Satellite images on May 13 and 17 in 2020 show that the bloom spread counterclockwise due to counterclockwise coastal currents in Sagami Bay. The species, *Gephyrocapsa oceanica*, was confirmed using light microscopy and a scanning electron microscope, and was the same species that occurred in 1995. Chlorophyll *a* concentration and cell density at the surface were $1.2 \mu\text{g L}^{-1}$ and $9.0 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$, respectively. NO_2^- and NO_3^- concentrations at the surface during the bloom were $0.10 \mu\text{mol L}^{-1}$ and $1.83 \mu\text{mol L}^{-1}$, respectively, which were relatively higher than previous years. The results suggest that one of the causes of coccolithophore bloom is the relatively high concentration of inorganic nitrogen. Previous studies of prokaryotic and eukaryotic community structure in the coastal areas of Sagami Bay using genetic analysis have reported occurrence of haptophytes and the occurrence of coccolithophores throughout the year. These results suggest that coccolithophores are frequently present in Sagami Bay and form massive blooms in a short time period if environmental conditions are favorable. Further investigation including culture experiments are needed to resolve the details and specific causes.

Keywords: coccolith, haptophytes, remote sensing, spatial variability

1. はじめに

円石藻は炭酸カルシウムからなる円石 (Coccolith) をもつ植物プランクトンの1グループで、ハプト藻に分類される。三畳紀後期から海洋プランクトン群集の重要な構成要素をなしており、約200種の現生種が確認されている (Bown et al. 2004, Hay 2004, Young et al. 2005)。円石藻による円石の形成過程では二酸化炭素が発生する一方、円石は石灰質の堆積物として海底に蓄積され、海洋化学における炭素の堆積バッファーとしての役割を果たすとともに、全球的な炭素循環や気候に大きな影響を与える炭素貯蔵源となっている (Iglesias-Rodriguez et al. 2002, Balch 2004)。円石藻は、表層における一次生産の1–10%、

外洋における炭酸カルシウム堆積物生成の50%に寄与していると推定されている (Poulton et al. 2007, Broecker & Clark 2009)。また同時に、硫黄化合物であるジメチルスルフィド (DMS) の生成者としても知られている。DMSは雲の凝集核となることから、円石藻の増殖によるDMSの生成は、雲量の増加による日射量の減少を引き起こす (Brown & Yoder 1994)。以上のように円石藻は、大気中の二酸化炭素を海洋へと取り込み、炭酸カルシウム堆積物およびDMSを生成することによって、炭素の生物化学循環に重要な役割を果たしていると考えられている。

円石藻はしばしば巨大なブルームを引き起こすことで有名である。その際、円石による高い反射特性により、ブルーム時には海が白く濁る。「白潮」と呼ばれるこの現象

は、人工衛星から度々確認されており、日本近海においてもその発生状況が報告されてきた。これまで、東京湾・相模湾（1995年）、博多湾（2004・2007・2008年）では *Gephyrocapsa oceanica*、駿河湾（2007年）では *Emiliania huxleyi* によるブルームが発生したことが知られている（小倉・佐藤 2001, 池田 2007, 萩原ほか 2011）。

2020年5月中旬、相模湾において大規模な円石藻のブルームが観測された。この現象は、まず宇宙航空開発研究機構（JAXA）の気候変動観測衛星「しきさい」によって捉えられ、海色がエメラルドグリーンに変化した湾内の様子が認められた。これを受け、現場観測を実施したところ、海色の変化は円石藻のブルームによるものであることが判明した。これまで相模湾において円石藻ブルームの観測が報告されたのは1995年の1件のみであることから、25年ぶりに同海域で円石藻がブルームを起こしたと考えられる（小倉・佐藤 2001）。

本研究では、1995年の報告から25年ぶりに相模湾において観測された円石藻ブルームの特徴を明らかにすることを目的として、ブルーム時の海洋環境についての調査結果を報告する。

2. 材料と方法

調査は、横浜国立大学の実習船「たちばな」によって、

海色の変化が沿岸部まで広がった2020年5月15日に、相模湾真鶴半島沖 St. 550 (35° 09' 938N 139° 10' 777E) で行った (Fig. 1)。

2.1 水質調査項目と手法

水温と塩分は、CTDセンサー（Ocean Seven 316, Idronaut S.R.L.）を使って鉛直的に測定した。さらに、表層0mと水深5m地点から採水を行い、栄養塩類（ NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SiO_2 ）をオートアナライザー（SWAAT, BLTEC）で測定した。クロロフィル *a* 濃度は、試料を孔径 $0.7 \mu\text{m}$ のガラス繊維濾紙（GF/F 25 mm, Whatman）で濾過後、Zepata et al. (2000) にもとづいてメタノールで抽出し、フォトダイオードアレイ紫外可視分光光度計（SPD-M10A, SHIMAZU）を用いて測定した。

2.2 プランクトンの計数と同定法

プランクトン用試料は、目合い $180 \mu\text{m}$ のナイロンメッシュで船上にて濾過した採水試料から1Lを分取し、0.5%中性海水ホルマリンで固定した。この試水を静置沈殿させ、サイフォンを使って濃縮し、均一化した後、0.1 mLを分取してマス目合計400区画の計数盤に滴下して光学顕微鏡下で細胞数を計数した。また、ブルームを起こした円石藻の同定のために、走査型電子顕微

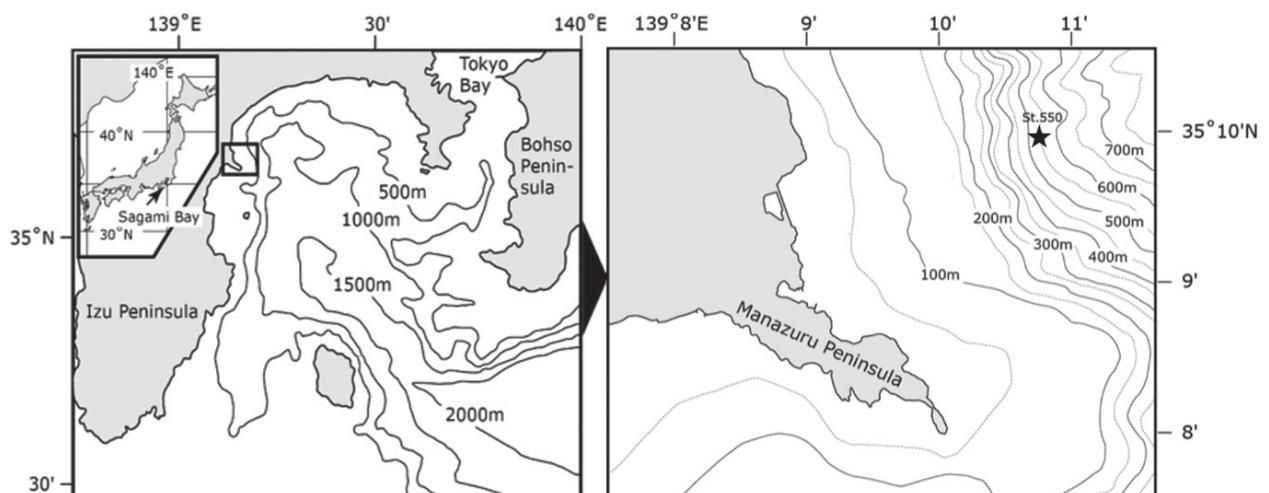


Figure 1. Map of the Pacific western boundary coastal region of Japan, bathymetry and sampling station (St. 550) in the temperate waters of Sagami Bay.

鏡 (SEM; JSM-7500F, JEOL) を用いた。

2.1 衛星観測

JAXA の気候変動観測衛星「しきさい」によって取得された衛星データを使用した。湾内の RGB 画像を出力するにあたり、海色をより強調するため、Ota et al. (2010) の放射伝達コードで大気分子散乱と透過率を計算して補正した。

3. 結果

3.1 環境要因

調査時には、真鶴半島沖全域において海色がエメラルドグリーンに変化していた。人工衛星からは、5月15日の海況は観測されなかったものの、その前後である5月13日と17日に観測された (Fig. 2)。

2020年5月15日の表層0 mと水深5 m地点における環境要因の結果を Table 1 に示した。また、比較のために1995年5月、東京・相模湾における円石藻ブルーム時の結果も同表に示した。両年の水質を比較すると、水温は同程度であるのに対して、塩分は2020年5月の方がやや高い結果となった。SiO₂ 濃度は1995年5月のデータがないため比較できないが、NO₂⁻・NO₃⁻・

PO₄³⁻ 濃度は2020年5月の方が高かった。また、2020年5月のクロロフィル *a* 濃度は、表層0 mと水深5 m地点でそれぞれ、1.2 μg L⁻¹と1.6 μg L⁻¹であり、1995年5月と比較するとかなり低かった。

3.2 種同定と細胞密度

光学顕微鏡による観察から、ブルームを起こしたのは円石藻であると確認された。さらに、走査型電子顕微鏡を用いて細胞の形状をより詳細に観察したところ、円石の低角から中角に橋を有する特徴が確認されたため、本種は *Gephyrocapsa oceanica* であると同定された (Fig. 3)。円石藻の細胞密度は、表層0 mと水深5 mでそれぞれ、9.0 × 10³ cells mL⁻¹と8.8 × 10³ cells mL⁻¹であった。

4. 考察

人工衛星によるリモートセンシングの強みは、広範囲を時系列に沿って観測できることである。本研究におけるブルームも、まず JAXA の気候変動観測衛星「しきさい」によって捉えられ、その報告を受けて採水を伴う現場観測が実施された。5月13日と17日の衛星画像を比較すると、ブルームは沿岸域を反時計回りに広がった。

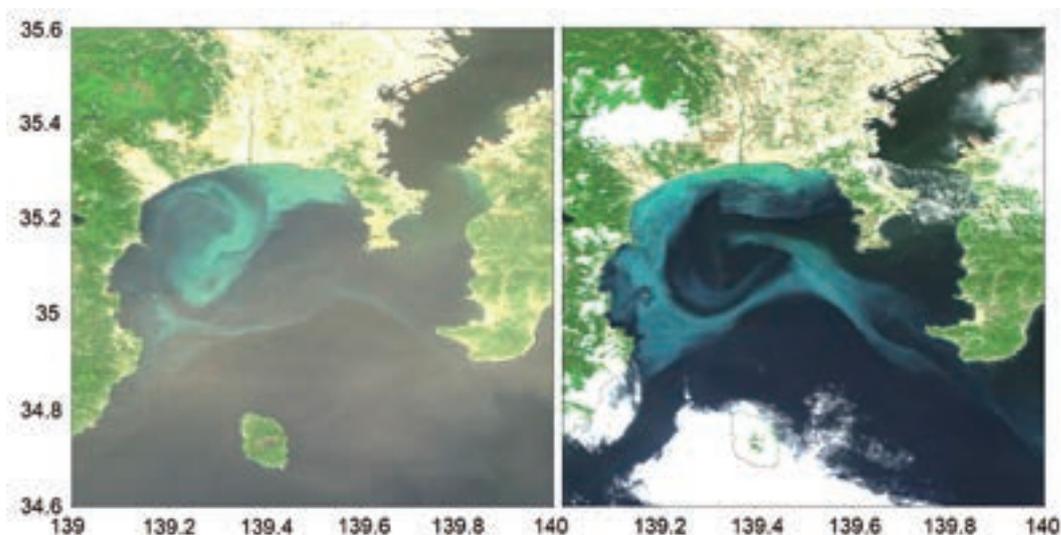


Figure 2. Initial remote sensing ocean color satellite images of the coccolithophore bloom in Sagami Bay on May 13 (left panel) and May 17 (right panel) 2020. The emerald green reflectance signal shows the extent of the bloom.

Table 1. Environmental factors collected from Station 550 during the onset of the coccolithophore bloom in Sagami Bay. Data in 1995 was based on Ogura & Sato (2001).

	May 15 2020	May 15 2020	May 9, 10 1995
	0 m	5 m	0.5 m
Water Temperature (°C)	18.7	18.3	18.7
Salinity	33.3	33.5	29.5
NO ₂ ⁻ (μ mol L ⁻¹)	0.10	0.09	0.05
NO ₃ ⁻ (μ mol L ⁻¹)	1.83	3.98	0.33
PO ₄ ³⁻ (μ mol L ⁻¹)	0.04	0.03	0.02
SiO ₂ (μ mol L ⁻¹)	3.34	5.01	—
Chlorophyll <i>a</i> (μ g L ⁻¹)	1.18	1.60	47.0

これは、相模湾内に存在する同方向の沿岸海流に起因するものだと考えられる（岩田ほか 1980）。

円石藻によるブルームの発生は、日本近海においても度々報告されており、これまでブルームを起こした種は *Emiliania huxleyi* か *Gephyrocapsa oceanica* のどちらかであった（小倉・佐藤 2001, 池田 2007, 萩原ほか 2011）。本研究においても、2020年5月に相模湾でブルームを起こしたのは *G. oceanica* であり、これは1995年5月に東京・相模湾においてブルームを起こした種と同種であった。また、相模湾という同一海域であっても、1995年5月の表層水における円石藻の細胞密度の最高値は、 1.5×10^5 cells mL⁻¹ であり、2020年5月の細胞密度はそれよりも2桁小さかった（小倉・佐藤 2001）。

環境要因との関係性については、小倉・佐藤（2001）は、1995年5月のブルーム時における NO₂⁻・NO₃⁻ 濃度は前年同月（1994年5月）よりも高いと結論した。2020年5月は、1995年5月よりもこれらの濃度が高いことから、無機態窒素が比較的豊富だったと考えられる。Skejić et al. (2021) は、海洋における円石藻の現存量と NO₃⁻ 濃度には正の相関があると指摘しており、比較的豊富な無機態窒素が2020年の円石藻ブルームの形成要因の一つであったことが示唆される。

駿河湾の沖合では、珪藻の増殖によりケイ酸塩と硝酸塩が枯渇した後、再び硝酸塩が供給された時期に *E. huxleyi* が増殖したと報告された（萩原ほか 2011）。また、2014年から2018年にかけてのバレンツ海では、*E. huxleyi* のブルームが毎年夏季に観測され、円石藻のブルーム時には珪藻がほとんど出現しなかったと報告された（Silkin et al. 2020）。温帯域に位置する相模湾では、2月から5月にかけて珪藻を主としたマイクロプランクトンの春季ブルームが発生し、栄養塩が消費される（Ara et al. 2019）。したがって、5月の相模湾は栄養塩が枯渇する傾向にあるが、2020年においては無機態窒素濃度が比較的高く、珪藻の増殖に不十分で、円石藻の増殖に十分であった可能性がある。*G. oceanica* は、日本近海に広く分布する種であることから、相模湾においても好適条件下では今回のように急増殖しブルームを形成すると考えられるが、その詳しい原因については、今後のさらなる調査と解析が必要である。

相模湾沿岸域における遺伝子解析を使った原核生物と真核生物群集構造の調査結果では、周年を通した円石を持たないハプト藻と円石藻の出現が確認されている（Sogawa et al. 2021）。また、同海域で2016年

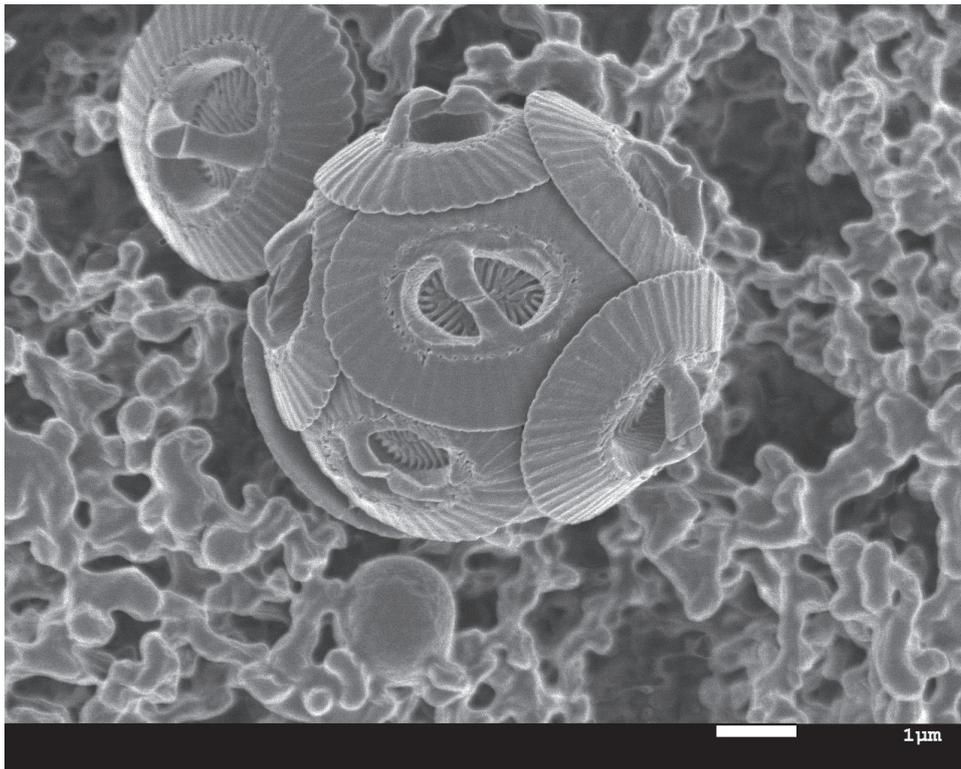


Figure 3. Scanning electron microscope image of the identified coccolithophore, *Gephyrocapsa oceanica*.

5月から2021年6月にかけて補助色素組成の変動を調査したところ、円石藻が細胞内に含有するとされている19'-hexanoyloxyfucoxanthinは、101回のサンプリングにおいて89回検出された(矢野 未発表)。これは同じ補助色素を含有する他のハプト藻が原因となっている可能性もある一方、円石藻由来である可能性も考えられる。また、円石を持たない状態の円石藻(非円石細胞)による寄与も含まれているかもしれない。培養実験においては、球形で2本の鞭毛を伴い、円石を持たずに浮遊する非円石細胞が観察されることが報告されている(Saruwatari et al. 2016)。これらの結果から、円石藻は相模湾に生息しており、環境状況が円石藻にとって良好であるなら、短期間に大規模なブルームが形成される可能性があると考えられる。今後は、円石藻がブルームを起こす良好な海洋環境を決定するため、その生理学的特徴の解明に焦点を当てた調査を行い、現場における生態学的説明に応用することが重要な課題といえる。そのため、高頻度の現場観測に加えて実験室での培養実験も行う必要がある。

5. おわりに

本研究は、2020年5月、25年ぶりに相模湾で発生した円石藻のブルームについて調査し、環境要因やブルームの特徴を記載した。本ブルームは、まずJAXAの人工衛星「しきさい」によって捉えられ、その報告を受けて行われた現場観測により詳細が明らかになった。ブルームを起こした種は、1995年と同種の*Gephyrocapsa oceanica*であったが、細胞密度は異なり、2020年の方が規模は小さかった。円石藻がブルームを起こした一要因は比較的豊富な無機態窒素であった可能性が示唆されたが、より詳細で具体的な原因については今後のさらなる調査・解析が必要である。

謝辞

本研究は宇宙航空開発研究機構(JAXA)地球観測研究センター(EORC)による第2回地球観測研究公募<ER2GCF312>の助成を受け実施された。

円石藻試料の固定方法および光学顕微鏡観察では、東京海洋大学名誉教授の石丸隆博士とマイクロワールドサービスの奥修博士にご助言頂いた。色素分析に際し、東京大学の高橋一生教授と片山智代博士にご指導賜った。SEM画像の撮影では名取則明博士にご協力頂いた。試料採集では、木村倫代船長を始めとする横浜国立大学臨海環境センターの皆様にご協力頂いた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

引用文献

- Ara K, Fukuyama S, Okutsu T, Nagasaka S, Shiimoto A (2019) Seasonal variability in phytoplankton carbon biomass and primary production, and their contribution to particulate carbon in the neritic area of Sagami Bay, Japan. *Plankton Benthos Res* 14: 224–250.
- Balch WM (ed) (2004) *Coccolithophores—From Molecular Processes to Global Impact: Re-evaluation of the physiological ecology of coccolithophores*. Springer-Verlag New York, Berlin, pp. 165–190
- Bown PR, Lees JA, Young JR (ed) (2004) *Coccolithophores—From Molecular Processes to Global Impact: Calcareous nannoplankton evolution and diversity through time*. Springer-Verlag New York, Berlin, pp. 481–508.
- Broecker W, Clark E (2009) Ratio of coccolith CaCO_3 to foraminifera CaCO_3 in late Holocene deep sea sediments. *Paleoceanography* 24: PA3205.
- Brown CW, Yoder JA (1994) Coccolithophorid blooms in the global ocean. *J Geophys Res* 99: 7467–7482.
- 萩原直樹・千賀康弘・仁木将人・杉本隆成 (2011) 駿河湾における円石藻類の出現特性に関する研究. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)* 67: 871–875.
- Hay WW (ed) (2004) *Coccolithophores—From Molecular Processes to Global Impact: Carbonate fluxes and calcareous nannoplankton*. Springer-Verlag New York, Berlin, pp. 509–528.
- Iglesias-Rodriguez MD, Brown CW, Doney SC, Kleypas J, Kolber D, Kolber Z, Hayes PK, Falkowski PG (2002) Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: Coccolithophorids. *Global Biogeochem Cycles* 16: 1100.
- 池田嘉子 (2007) 博多湾における *Gephyrocapsa oceanica* の大量発生事例. *福岡市保健環境研究所報* 33: 85–90.
- 岩田静夫・細田昌宏・松山優治 (1980) 相模湾沿岸の流れの変動について I. 神奈川県水産試験場研究報告 1: 61–71.
- 小倉久子・佐藤正春 (2001) 1995年5月の東京湾に発生した *Gephyrocapsa oceanica* KAMPTNER 赤潮について. *水環境学会誌* 24: 115–119.
- Ota Y, Higurashi A, Nakajima T, Yokota T (2010) Matrix formulations of radiative transfer including the polarization effect in a coupled atmosphere-ocean system. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer* 111: 878–894.
- Poulton AJ, Adey TR, Balch WM, Holligan PM (2007) Relating coccolithophore calcification rates to phytoplankton community dynamics: Regional differences and implications for carbon export. *Deep-Sea Res, Part II* 54: 538–557.
- Saruwatari K, Satoh M, Harada N, Suzuki I, Siraiwa Y (2016) Change in coccolith size and morphology due to response to temperature and salinity in coccolithophore *Emiliania huxleyi* (Haptophyta) isolated from the Bering and Chukchi seas. *Biogeosciences* 13: 2743–2755.
- Silkin V, Pautova L, Giordano M, Kravchishina M, Artemiev V (2020) Interannual variability of *Emiliania huxleyi* blooms in the Barents Sea: *In situ* data 2014–2018. *Mar Pollut Bull* 158: 111392.
- Skejić S, Arapov J, Bužančić M, Gladan ŽN, Bakrač A, Straka M, Mandić J (2021) First evidence of an intensive bloom of the coccolithophore *Syracosphaera halledalii* in a highly variable estuarine environment (Krka River, Adriatic sea). *Mar Ecol* 42: e12641, doi.org/10.1111/maec.12641
- Sogawa S, Tsuchiya K, Nagai S, Shimode S, Kuwahara VS (2021) Annual dynamics of eukaryotic and bacterial communities revealed by 18S and 16S rRNA metabarcoding in the coastal ecosystem of Sagami Bay, Japan. *Metabarcoding Metagenom* 6: 41–58.
- Young JR, Geisen M, Probert I (2005) A review of selected aspects of coccolithophore biology with

implications for paleobiodiversity estimation.
Micropaleontolog 51: 267–288.

Zapata M, Rodriguez F, Garrido JL (2000) Separation
of chlorophylls and carotenoids from marine

phytoplankton: a new HPLC method using a reversed
phase C8 column and pyridine-containing mobile
phases. *Mar Ecol Prog Ser* 195: 29–45.