駿河湾における円石藻類の出現特性に関する研究

Appearance Characteristics of Coccolithophores in Suruga Bay

萩原直樹¹・千賀康弘²・仁木将人³・杉本隆成⁴

Naoki HAGIWARA, Yasuhiro SENGA, Masato NIKI and Takashige SUGIMOTO

Coccolithophores are important microorganism for the carbon and sulfur cycles. Coccolithophores bloom was found on 3 October 2007 in Suruga Bay. The seasonal appearance of coccolithophores and the relationship between nutrients are as follows. 1. Coccolithophores generally increased in spring and showed the maximum in May. In spring they distributed more offshore surfaces than coastal area. The whole cell density decreased in summer and became the peak in October. 2. The dominant species was *Emiliania huxleyi*. 3. Increase of coccolithophores at the forehead of stratification appeared after the bloom of small diatoms. As for the nutrients, phosphate and silicate were less than the half of saturation constant of diatoms, while nitrate still remained, of which concentration sufficient for coccolithophores to increase.

1. はじめに

円石藻はハプト植物門に所属する単細胞生物である。光合成と石灰化による2通りの方法で無機炭酸を固定するため炭素循環を考える上で重要であり、また、ジメチルサルファイド (DMS) を放出するため硫黄循環においても重要な生物である。coccolithと呼ばれる炭酸カルシウムの鱗片を形成し、サイズ組成はナノプランクトン (2~20 μ m) であり珪藻より小型である。円石藻の多くは成長速度が小さいが、栄養資源効率が高いため競合に強く外洋に広く分布していることが知られている (Pianka, 1978)。

円石藻に関し、1997年ベーリング海、1999年ボースマス沖、2005年バレンツ海で *Emiliania huxleyi* (写真-1左) のブルームが報告されている。日本近海でも1992年鹿児島湾、1995年東京湾、相模湾、2007年博多湾などで *Gephyrocapsa oceanica* (写真-1右) のブルームが報告されている。ベーリング海でのブルームでは、サケの回帰率が低下し、また、水中の白濁により餌の取れにくくなった海鳥が減少する問題が生じている。博多湾でのブルームでは、ブルーム発生海域で魚の回避行動による漁獲量の低下や視界不良のため伝統的な素潜り漁が行えなくなる等の問題が生じた。また、ブルーム後に大量の粘着物質が海中に残存する現象が起こった (森脇, 2009)。駿河湾でも2007年10月3日に富士川沖で海水が白濁していたのを目撃し、採水して研究室に持ち帰り走査型電子顕微鏡で観察したところ深度10mにおいて細胞密度

写真-1 円石藻の電子顕微鏡写真 (左: *E. huxleyi* 右: *G. oceanica*)

1,000cells/ml以上の円石藻 *E. huxleyi* が確認された。こうした円石藻類に関する研究は実験室で実施される基礎研究が多く、日本近海の実海域における知見はまだ少ない。ブルーミングを起こした場合円石藻類のバイオマスは非常に大きくなるため、沿岸域へ様々な形でインパクトを与える。また、円石藻類は気候への寄与が知られており、地球温暖化に関連し、沿岸域での炭素循環に円石藻類が果たす役割を見積もる必要がある。そこで本研究では、開放的で沖合水の影響を強く受ける駿河湾を対象にして、円石藻の個体群動態を解明することを目的に、季節変動および地理的出現傾向を捉え、水温、栄養塩環境、珪藻および渦鞭毛藻類との競合関係を検討した。

2. 観測の概要

清水港と土肥港を約65分で横断し、昼間4往復する駿河湾フェリー航路にはほぼ等間隔に4定点 (図-1) を設け、船底 (海面下4m) から汲み上げたエンジン冷却水から採水した。中村ら (1979) が行った水塊構造の分類に従えば、sta.1は沿岸河川系水、sta.2は表層水、sta.3およびsta.4は黒潮系暖水とみられる。2008年6月より隔週で植物プランクトン同定と栄養塩定量を行った。植物プラン

1	理修	東海大学	講師	
2	博工	東海大学	教授	
3	正会員	博(工)	東海大学	准教授
4	理博	東京大学	名誉教授

図-1 観測地点の概要

クトン同定は、採水試料10～20mlをNuclepore filter (0.2μm) でろ過したのち走査型電子顕微鏡で計数した。栄養塩定量はWattman GF/Fでろ過したのちParsonsら(1984)の方法により硝酸塩、ケイ酸塩、リン酸塩を比色定量した。クロロフィルa定量はろ過試料を90%アセトンで抽出した後、蛍光分光光度計(日本分光FP-777)にて行った。

3. 円石藻類の出現傾向

図-2に2008年から3年間の駿河湾における円石藻類の出現傾向を示す。円石藻は細胞密度20～200cells/mlで周年出現していた。円石藻は、春に増殖し始め5月に極大を迎え、夏に入るとほとんど出現しなくなる。秋になると再び増殖し10月に極大となり、冬に入ると減少する傾向がみられた。

次に円石藻の主要な2種 *E. huxleyi* と *G. oceanica* について計数し、年度ごとに出現頻度を整理した(図-3)。ただし、2008年については種組成の分類までは行っていないため省略した。種組成として2009年は *E. huxleyi* が優占し、2010年は初夏から秋にかけて *G. oceanica* が多くみられた。他の海域においては *G. oceanica* が一般的に見られるが(山田, 1997; 森脇, 2009), 駿河湾では *E. huxleyi* が優先する傾向がみられる。

次に地理的出現傾向を捉えるため富士川や興津川の影

図-2 2008年～2010年における円石藻細胞密度の合計

響を受けやすいsta.1を沿岸系水、黒潮系暖水の影響を強く受けるsta.3を沖合系水として円石藻の細胞密度を2009年と2010年に分けて図-4に示した。2009年春は沖合系水で多く分布した。夏には出現しなくなるが、秋になると沖合系水で春とほぼ同じ密度で分布した。通年で観測を実施した2009年に注目してみると、春に沿岸系水と沖合系水の間で傾向の違いがみられた。2010年は春先に観測を行っていないが、全体を通して沖合系水に円石藻が多くみられた。

図-3 代表的な円石藻の出現頻度(上:2009年下:2010年)

図-4 沿岸系水(sta.1)と沖合系水(sta.3)での円石藻の細胞密度(上:2009年下:2010年)

3年間を通して円石藻のブルームは確認されなかった。

4. 考察

(1) 円石藻類と水温との関係

2008年から2010年の水温の変動を図-5に示す。沖合系水は14～28.5℃（平均21.5℃）、沿岸系水は13～28℃（平均20.5℃）で変動し2月下旬から3月上旬が最低水温、8月下旬から9月上旬が最高水温となっていた。2008年3月の水温は低く、4月19日に黒潮分枝流が大規模に流入し4℃の水温上昇がみられた。2009年も4月中旬と5月上旬に黒潮分枝流が表層に流入してきたが5月中旬からは相模湾や伊豆沖の冷水の影響を受け夏季の水温上昇が抑えられ23.5℃が最高水温であった。2010年は7月に黒潮分枝流流入があり酷暑と連動し夏季水温は高く28.5℃であった。

室内実験から、水温との関係は*E. huxleyi*は20℃付近でもっとも増殖し、*G. oceanica*は25℃が適水温であるとの報告が行われている（Buitenhuisら、2008）。調査海域

図-5 2008年～2010年における沿岸系水と沖合系水の水温変化

図-6 2009年～2010年における沿岸系水と沖合系水の栄養塩変化（左：2009年右：2010年）

は水温13～28.5℃で変動し平均水温21℃であるので*E. huxleyi*にとっては生活しやすい水温である。また、増殖が見られた時期は適水温と一致している。2009年に比べ2010年において秋の出現が遅くなっていたが、水温から見られる夏季の長期化が影響を与えていたと考えられる。

(2) 円石藻類と栄養塩との関係

萩原ら（2009）が1994年から10年間行った駿河湾奥での栄養塩観測から、駿河湾奥の表層栄養塩に関して、混合期（1月～3月）には下層からの供給により潤沢であり、成層前期（4月～6月）には雪解け水や梅雨による供給があるもののリン酸塩が枯渇するとの傾向が分かっている。また、成層期（7月～9月）は硝酸塩およびリン酸塩ともに枯渇しやすく台風や集中豪雨により間歇的に大量の栄養塩が供給されることがあり、成層後期は秋雨に伴う河川からの栄養塩の供給量は多い。図-6に円石藻観測地点での硝酸塩、リン酸塩およびケイ酸塩の変化を示す。ただし、2009年の8月～12月の期間は欠測している。欠測が多いものの、本観測データも萩原ら（2009）の結果と同様の傾向を示している。

円石藻との関係で考えると、成層前期（5月頃）の硝酸塩の増加およびリン酸塩の枯渇がおこる時期に円石藻の増殖がみられる。また、成層期に入り硝酸塩の枯渇する時期に円石藻は減少している（塩本ら、1999）。

(3) 円石藻類と他の植物プランクトンとの関係

2009年冬から夏の期間における沿岸域と沖合域の円石藻、珪藻およびChl.aの観測結果を図-7に示す。また円石藻と渦鞭毛藻の観測結果を図-8に示す。珪藻ブルームが

図-7 2009年～2010年における沿岸系水（上）と沖合系水（下）の円石藻と珥藻の細胞密度とクロロフィルa濃度（左：2009年右：2010年）

図-8 2009年～2010年における沿岸系水（上）と沖合系水（下）の円石藻と渦鞭毛藻の細胞密度（左：2009年右：2010年）

3月にあり沿岸域、沖合域ともにクロロフィルが $7\mu\text{g/l}$ を超えている。珥藻は2月下旬から増殖し3月上旬に極大となり下旬にブルームが終わっている。その後、珥藻に代わり円石藻と渦鞭毛藻が増殖しはじめる。

年変化についてまずは混合期から成層前期について考えてみる。1～2月は約150mまでの鉛直混合により下層から栄養塩が供給され2月末から3月にかけて光が強くなると植物プランクトンが大増殖する。優占するのは細胞サイズ $10\sim15\mu\text{m}$ の小型珥藻 *Skeletonema costatum* と

Chaetoceros 属であった。この大増殖により栄養塩は減少し降雨による供給が少ないと硝酸塩とケイ酸塩が激減する。4月に入ると小型の珥藻から *Leptocylindras* 属のような中型珥藻に遷移する。調査期間中2008と2009年はこの季節には黒潮分枝流が伊豆半島石廊崎から西岸に沿って北上してきた。黒潮分枝流は水温が高く密度が低いため表層を北上し、表面水温を $3\sim4^{\circ}\text{C}$ 上昇させ短期的に成層する。そのため栄養塩は枯渇し植物は増殖速度が小さくて競合に強いK-選択種が残るようになる。細胞密度

は数10～数100cells/mlと低いがK-選択種である *Eucampia zoodiacus* や *Coscinodiscus wailesii* のような100 μ m以上の大型種が出現し栄養塩状況の悪くなるこの時期から円石藻と渦鞭毛藻が増殖し5月にピークを迎える。円石藻 *E. huxleyi* は有機リン酸を利用することができるためリン酸塩枯渇でも増殖するという報告 (Riegmanら, 2000) がある。栄養塩と珪藻の変化から類推すれば、珪藻によりリン酸塩が枯渇し硝酸塩が存在した場合円石藻が増殖しやすい環境になると考察できる。

次に成層前期から成層期までを考える。6月に入ると梅雨による降水で陸から栄養塩がもたらされ中型珪藻、渦鞭毛藻と円石藻の競合が見られる。その後水温の上昇と共に小型珪藻が優先する。水温・栄養塩の状況や小型珪藻との競合により成長速度の小さい円石藻が増えにくい環境となる。

最後に成層後期から混合期までを考えると、秋雨により供給された栄養塩により9月から10月は小型珪藻と中型珪藻が競合するが、細胞密度は $10^2 \sim 10^3$ cells/mlと春と比較すると1ケタ低く、Chl.a濃度も春季ブルームの半分程度になる。水温・栄養塩濃度が低下し、中型から大型の珪藻が優先するようになると円石藻も増殖する。

空間的に見ると沖合域では常に黒潮分枝流の影響を受けるため栄養塩が枯渇しやすく、沿岸域では降雨等により河川を通して陸から間欠的に栄養塩が供給される。そのため増殖速度の大きい小型珪藻が沿岸域では増殖しやすく、円石藻類が沖合系水よりも沿岸系水で出現しづらい傾向があると考えられる。

5. まとめ

- (1) 円石藻種組成は *Emiliania huxleyi* が優占し、時期によっては *Gephyrocapsa oceanica* が多くみられた。
- (2) 円石藻は、成層前期に沖合系水で多く、成層期には出現しなくなるが成層後期には再び増殖する。
- (3) 成層前期における沖合系水での増殖は、珪藻の大増殖によりケイ酸塩と硝酸塩が枯渇し増殖が一旦終了した後、再び硝酸塩が供給された時期に起きている。リン酸塩およびケイ酸塩が減少し硝酸塩が残っているとき、円石藻細胞密度が高くなるが、硝酸塩が枯渇すると低密度となる。円石藻は、増殖にケイ酸塩は必要とせず、また、無機のリン酸塩の代わりに有機リン酸も活用できるため、こうした時期に有利に増殖する事が

出来ると考えられる。

- (4) 珪藻との関係は逆相関がみられ、渦鞭毛藻とは正の相関がみられた。
- (5) 沖合系水と沿岸系水での水質の明らかな違いは沖合では常に黒潮分枝流の影響を受けるため栄養塩が枯渇しやすく、沿岸では陸からの間欠的な栄養塩の供給により増殖速度の大きい小型珪藻が増殖しやすい環境が作られる。そのため、沿岸系水よりも沖合系水で円石藻密度が高い場合が見られる。
- (6) 2009年は低水温であったが、2010年は夏の高水温期が長く続いた。このため適水温が低い *Emiliania huxleyi* が2010年の成層後期になかなか増殖出来なかった。
- (7) 駿河湾において2008年以降の3年間には円石藻ブルームは見られなかった。

謝辞: 本研究は東海大学連合後援会研究助成の補助を受けて行った。また、本研究を行うにあたり、駿河湾フェリー株式会社の皆様から多大なる協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 塩本明弘, 橋本慎治 (1999): 1996年5月の駿河湾におけるクロロフィルaと栄養塩との関係について, 水産海洋研究, Vol. 63, No. 1, pp. 1-7.
- 中村保昭・村中文夫 (1979): 駿河湾および遠州灘の海洋構造の変動特性, 水産海洋研究会報, 第34巻, pp.128-133.
- 萩原直樹, 澤本彰三, 仁木将人, 勝間田高明, 杉本隆成 (2009): 駿河湾奥部の栄養塩類・プランクトンの動態と流況変動との関わり, 月刊海洋, Vol. 41, No. 3, pp. 130-138.
- 森脇晋平 (2009): 2008年春季島根県沿岸に大量発生した円石藻の出現時期における気象の特徴, 島根水技研報, No. 2, pp. 19-22.
- 山田佳昭 (1997): 1995年5月の東京湾・相模湾における海水変色現象, 神水研研報, No. 2, pp. 65-75.
- Buitenhuis, E.T., T. Pangerc, D.J. Franklin, C.L. Quere and G. Malin (2008): Growth rates of six coccolithophorid strains as a function of temperature, Limnol. Oceanogr., 53(3), pp. 1181-1185.
- Persons, T. R., Y. Maita and C.M. Lalli (1984): A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analyses, Pergamon Press, Oxford, 173p.
- Pianka, E. R. (1978): Evolutionary ecology, Harper & Row Publisher, New York, 352p.
- Riegman, R., W. Stolte, A.A.M. Noordeloos and D. Slezak (2000): Nutrient uptake and alkaline phosphatase activity of *Emiliania huxleyi* during growth under N and P limitation in continuous cultures, J. Phycol., 36, pp. 87-96.