

3 研究内容 (別紙)

研究課題名

日本の閉鎖性海域における環境変動と低次生物生産の応答

共同研究者名

森本昭彦 (愛媛大学沿岸環境科学研究センター・環境動態解析分野)

研究目的

東京湾の富栄養化に関連する水質汚濁の過程について、20世紀初頭より海洋環境の視点から調査が行われ、首都圏に面する海域として環境を保全する努力は行政および科学的な立場から継続されてきた (例えば服部, 1983)。現在、本学青鷹丸で行っている羽田沖のモニタリング定点は、観測当初から各研究機関で観測が実施されてきた観測点を継承しており (図 1)、散発的にクロロフィル *a* (以降 Chl. *a*) 濃度が測定されてきた。

東京湾における水質汚濁の変遷を追って継続してきたモニタリング調査について、2020年に実施した観測データの解析状況をまとめるとともに、同観測で出現する植物プランクトンの季節変化と概観を報告する。

研究内容

2020年1月から3月、6月から12月に、東京海洋大学研究練習船「青鷹丸」にて定点 F3 (多摩川河口沖 0m ; 35° 30' N, 139° 50' E, 図 1) にて観測を行った (4月, 5月は航海中止)。観測は CTD (Sea-Bird Electronics, SBE 9 *plus*) による鉛直的な海洋環境要素の取得とニスキン採水器による採水を行った。採水試料から各栄養塩 (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , $\text{Si}(\text{OH})_4$) および Chl. *a* 濃度の測定 (Suzuki and Ishimaru, 1990) を行った。また植物プランクトンの顕微鏡観察試料は、海水を 1L に中性ホルマリンを最終濃度 1% になるように加えて固定し、静置沈殿をさせて最終的に 10ml 程度となるように濃縮した。この濃縮サンプルは再懸濁させて 200 μl をオートピペットで測りとり、オムニポアフィルター (JHWP, 孔径 0.45 μm) 上に吸引圧 10kPa 未満で粒子をろ過捕集した。このフィルターは、直ちにスライドガラスのせてカバーガラスをかけてプレパラートを作成し、蛍光顕

顕微鏡（キーエンス社，BZ-8000）の青励起を用いて細胞の観察と計数を行った。その後フィルターはデシケーター内で一晩乾燥させ、ろ紙を試料台に固定しイオンスパッターでPt-Pdによるコーティングをして、走査型電子顕微鏡（HITACHI，S-4000）により加速電圧を15~20kVにして観察した。

研究成果

図2に示したとおり2020年の表面Chl. *a*濃度は夏季に最大となる一峰型であり、1960年代初め（市村・小林，1964）と同様の季節変化となった。また7月21日を除くと本年は1970年代（柴田・有賀，1982）と同じ濃度レベルで推移し、春季と秋季に2度ピークのあった1980年代（Brandini and Aruga, 1983; 山口・有賀，1988），季節変化が消失していた1990-2010年代よりも若干濃度が低下した。

細胞数とChl. *a*濃度の変化は良く対応しており、年中赤潮であった状態（野村，1998）から脱しつつあることが種組成からも推測された。

まず、丸茂・村野（1973）より1960年代から70年代にかけて植物プランクトンの種多様性は低下し、富栄養化後の最優占種は *Skeletonema costatum*（2009年より電子顕微鏡と遺伝子解析を使った分類では本種と思われていた種を含めて8種からなる）となったことが報告されている（佐藤，1991; 野村・吉田，1997; 野村，1998; 吉田・石丸，2008）。しかし、2020年は植物プランクトン群集のなかで *Skeletonema* 属珪藻が第一優占種となることはなく、*Thalassiosira* 属珪藻に交代したことが特徴であった。この *Thalassiosira* 属に含まれる種について分子系統とその地理分布を合わせると、海生・淡水生・汽水生がパッチ状に分布し海から陸への移動やその逆方向へ適応放散していったことが推定されている（Alverson et al., 2007）。また藻類は水圏での二酸化炭素を効率的に利用するシステム（無機炭酸濃縮機構，CCM）を獲得しており、微細藻類のなかでも *Thalassiosira* 属珪藻はCCMの遺伝多様性が極めて高く、高温・高照度環境下でも高い光合成活性を示す可能性が示唆されている（たとえばJensen et al. 2020）。このCCMに関しては近年 *Skeletonema* 属でも研究が進んでおり（Thangaraj and Sun, 2021），東京湾での両者の種交代について解明されるだろう。

次に、本年の季節変化について海洋環境要素との関連を考えた（図3と図4）。

本地点は水深が20m程度と浅く、冬季の鉛直混合によって栄養塩が表層に十分供給されたところに、季節的な水温の上昇と光量子束密度の増加が加わると、栄養塩（特にケイ酸塩）が枯渇する4月までの期間にChl. *a*濃度が水柱全体で増加する。このブルームを形成する微細藻類は比較的大型の珪藻種（*Thalassiosira lineata*, *Cyclotella striata*や*Coscinodiscus granii*）で構成され、水柱の混合が発達する時期には、さまざまな光環境下でゆっくりと増殖するK戦略種（Souria, 1982）が卓越するとされる。その後、昇温期にはK戦略種は密度成層の発達によって生息域が縮小され、光合成ができなくなった細胞はそのまま海底に沈降してバクテリアに分解される。表層ではK戦略種のかわりに小型の珪藻種（r戦略）や渦鞭毛藻が増殖して、リン酸塩のほかに溶存態の無機窒素を使い尽くすまで細胞を増やす。本年はこの時期に*Th. binata*と*Th. tenera*, 渦鞭毛藻*Prorocentrum micans*が卓越し、その総細胞数は7月21日に最大 6.5×10^6 cells L⁻¹となりChl. *a*濃度は189.1µg L⁻¹を示した。特に*Th. binata*（平均直径2.5µm）は汽水に産する種として漁業被害を生じた記録があり（Takano, 1979）、自身が細胞外へ出す粘液塊に細胞が密集した群体を形成するためマット状に浮遊する性質をもつ（Okada et al. 2008）。*Th. binata*が全細胞の98.3%を占めていた7月21日の等価粒径（細胞の体積を求めて球とした場合の直径、等体積球相当径）が約3.5µmと非常に小さく、この時期に卓越した種はおおむね細胞を小型化し、栄養塩を吸収しやすくする生存戦略とする種であった。これらのr戦略の一部の種は窒素やリンの枯渇によって休眠孢子（または休眠期細胞）を形成して沈降し、海底で堆積する。

そして季節的に気温が低下しはじめると、成層が崩壊して栄養塩が表層に供給され、水温や光量等の必要な条件が整えばすばやく大量に増殖する種が優位になると考えられる。2020年は、本湾の底泥中に休眠孢子が多く産する*Chaetoceros*属や*Skeletonema*属のようなr戦略珪藻が増殖をして、混合期までの間に増殖した。

このように一般的な種の季節変化のほかに、特異なイベントも検出された。まず、1月31日に*Aulacoseira*属の淡水産珪藻種が確認され、それに伴った表面塩分

の低下と全栄養塩濃度の上昇がみられた。この時期は連続した降雨があり、大量の河川水が一時的に湾内に流入したことが推察された。つぎに、沿岸から黒潮にかけて広く分布する円石藻 *Gephyrocapsa oceanica* の出現について（荻原ら，2011），羽田沖に本種が出現することはかなり珍しい現象である。実は2020年4月に相模湾で本種のブルームが発生して海色が白濁してニュースとなった

(<https://www.pref.kanagawa.jp/documents/25020/202101-158.pdf>)。東京湾の湾奥部でも成層期には沿岸水が底層に陥入することがあり、沿岸種が検出されることがある（平野，2017）。*G. oceanica* は25°Cが適水温であるとされる（Buitenhuis et al., 2008）種であり、11月16日の表面水温は17.7°Cであったが、黒潮流軸が大きく変化した時期と重なりかなり大規模に表層へ沿岸水が入ってきたこと推察された。

今後の地球環境の変化に伴って、近年ゲリラ豪雨の頻発、巨大台風による暴風・河川の氾濫などが予想され、東京湾湾奥の環境の変化は激しさを増すと推測される。現在は年中赤潮という状態からは脱して、海洋環境を反映した植物プランクトン群集が生息していることがわかった。

成果発表 該当なし

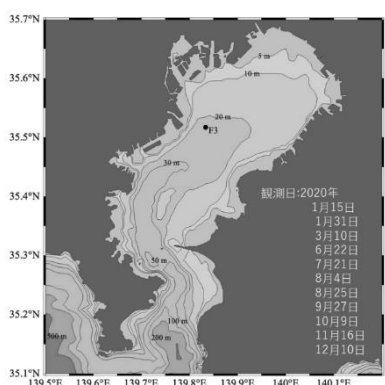


図1. 東京湾における観測点の位置図。
Stn. F3 (35° 30'N, 139° 49'E) 多摩川
沖，水深約20m

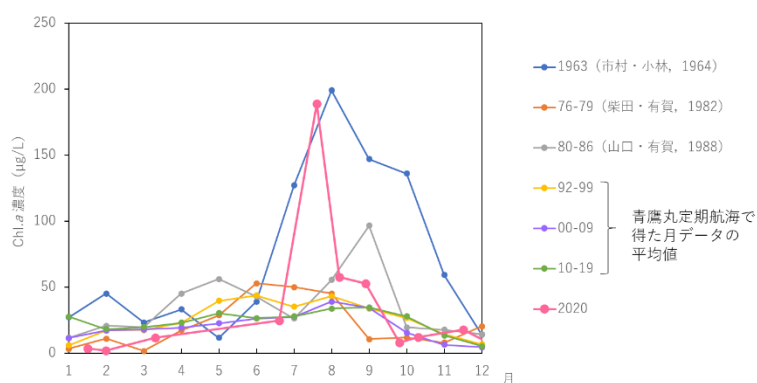


図2. 観測点 F3 におけるクロロフィル a
濃度の経年変化。

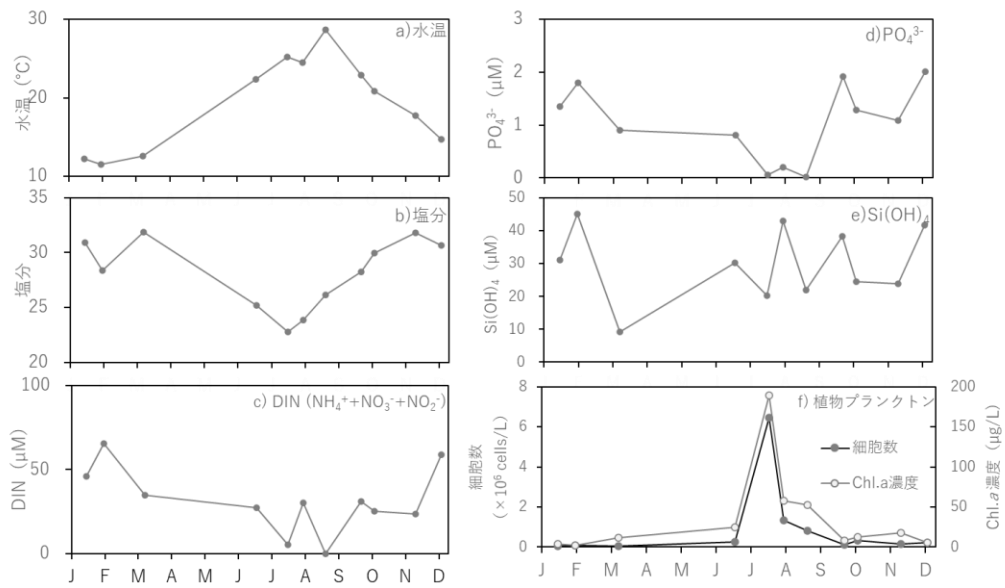


図3. 2020年1-12月の表面(0m)における各環境要素と植物プランクトンの季節変化。

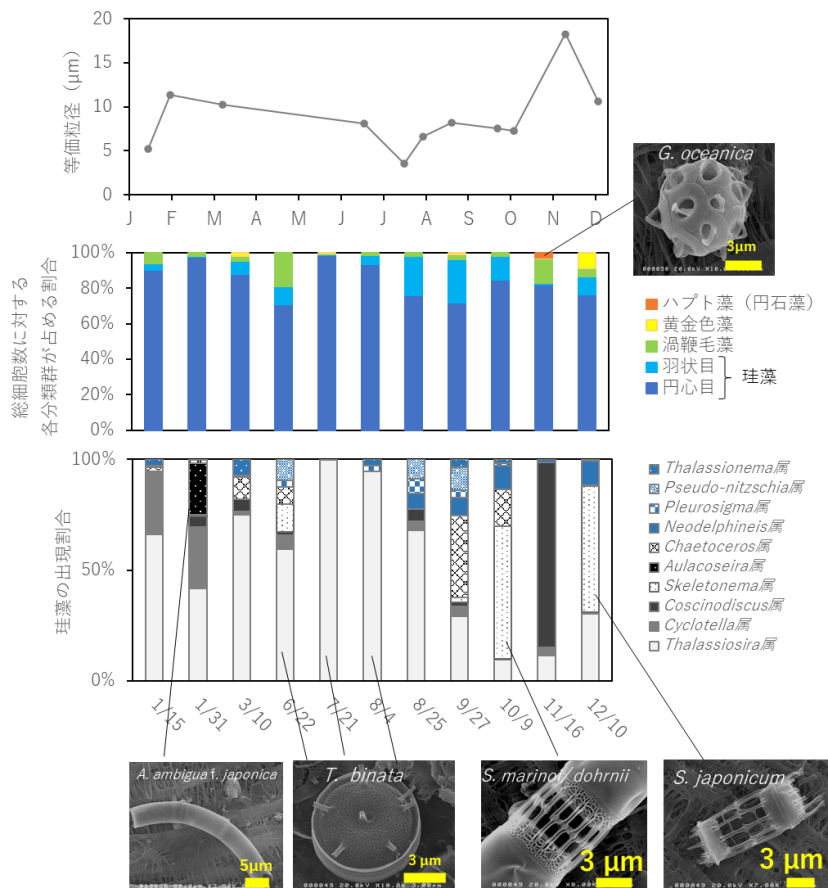


図4. 各観測日に出現した植物プランクトンの等価粒径(μm), 総細胞数に対する各分類群が占める割合と出現した珪藻細胞数に占める各属の割合。