

### 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

日本の内湾および沿岸域のうち、瀬戸内海、伊勢湾、東京湾の閉鎖性海域では経済の発展に伴って人為的な汚濁負荷量が増加したことから、水質の総量削減規制政策が行われてきた。近年、この総量規制が功を奏して一定の水質改善効果をもたらしたとされる一方で、底層の貧酸素化によって海底に堆積した植物プランクトン由来の有機物から無機態の窒素やリンが溶出してひきおこされる二次有機汚濁が顕在化しており、富栄養化問題の根源の解消が望まれている。申請者が所属する東京海洋大学(旧東京水産大学)では、観測点 F3(多摩川河口沖)と F6(東京湾湾央部)において 1989 年から現在まで約 30 年間にわたる海洋学に視点をおいた観測を継続して実施している。本年度は、東京湾における観測データを用いて植物プランクトン現存量と生元素の時系列変動について変遷を示す。現代社会が大きく依存している海洋生態系サービスについて持続的な利用に関する道筋を示すために、国内における閉鎖的水域の海洋環境の変化と低次生物生産の応答を解明し、必要な政策的措置を講じるための素地としたい。

#### 研究内容

東京湾に位置する 2 定点(図 1)における 1989 年から 30 余年にわたる月 1 回の定期観測のデータ(魚ら, 1995; 松村ら, 2001; 神田ら, 2008; Kubo et al., 2019)をとりまとめ、現在も継続して実施している採水試料を用いた溶存態無機窒素(DIN)、溶存態無機リン酸、ケイ酸塩およびクロロフィル *a* (以降 Chl.*a*)濃度の分析データをもとに解析を実施した。なお、植物プランクトンに含まれる Chl.*a* は細胞の有機態炭素の一部であり、細胞あたりの Chl.*a* 含有量は環境や細胞の生理状態によって大きく変化する。そのため、Chl.*a* は植物プランクトン生物量を直接には表さないが、多様な植物プラ

ンクトン種が共通して有する物質であることからこれらを現存量の指標として用いた。また、時系列データの統計解析には統計ソフト R を使用した。

## 研究成果

図 2 は、各層採水から得た Chl.a 濃度の測定値を鉛直的に合算した水柱積算値について、1990 年から現在の全データをプロットしたもの(図中の“observed”)である。観測点 F3 は F6 よりも Chl.a 濃度が高く、湾奥は強い閉鎖性を有するほかに淡水流入による陸域からの栄養塩の供給を受けて物質が貯留しやすいことを反映した。また経年変化は両測点でゆるやかな減少傾向を示し、溶存態無機窒素およびケイ酸塩濃度の減少と連動した (Kubo et al., 2019)。次に長期変動の傾向をより可視化するために、季節などの影響を除いた変化を示した(図中の“trend”)。クロロフィル水柱積算値の長期変動は、F3、F6 とともに 2008 年を境にしてそれより前の年では減少、それ以降は 2017 年くらいまで増加のトレンドを示した。このトレンドを裏付けるため、観測点 F3 の深度 0 m について月毎の Chl.a の経年変化を調べ、明瞭な上昇および下降トレンドを示した月とそのほかの特徴を有した結果について 4 例を挙げ、図 3 に示した。

まず、図 3a は Chl.a 濃度について有意な上昇傾向を示した 1 月の経年変化 (Mann –Kendall test;  $\alpha = 0.01$ , Sen’s slope は  $0.56 \mu\text{g L}^{-1}/\text{Year}$ ) について特徴を述べる。全ての年で生元素の枯渇はないが、窒素とリンのモル比は 29-159 で変動したことからリンが植物プランクトンの増殖を制限する可能性を示した。また 1989-2009 年は全体的に生元素組成のバランスがよいにもかかわらず Chl.a は低いレベルで推移したことから、カイアシ類 *Acartia omorii* による捕食によるトップダウンの影響をうけていた可能性がある (Tachibana et al., 2013) ことや、2010 年以降はケイ素が大幅に減じて Chl.a が増大したことから珪藻を主体とする植物プランクトン群集へとレジームシフトしたことが示唆された。

4 月の Chl.a 経年変化(図 3b)について、リンは 2003 と 2004 年、ケイ素は 2005 年と 2008 年に枯渇し、ケイ素は 1999 年を除く全ての年で制限要因となったことから、4 月は年間で生元素による植物プランクトンの増殖の制限を最も受けやすいことが示された。塩分が著しく低下した 1991, 1999, 2014 年は河川由来の生元素供給の影響

が見られたが、Chl.*a* 濃度の増加を伴ったのは 2014 年のみであったこと、全期間で Chl.*a* 濃度は 2-70 $\mu\text{g L}^{-1}$  の間で変動し、リンとケイ素が著しく低下した 2003 年から 2013 年は概ね 30  $\mu\text{g L}^{-1}$  前後の高い値で推移したことから、ケイ素を必要としない鞭毛藻が卓越した可能性が示唆された。

次に、図 3c には有意な下降傾向を示した 6 月の経年変化 (Mann–Kendall test;  $\alpha = 0.05$ , Sen's slope は  $-1.00\mu\text{g L}^{-1} / \text{Year}$ ) を示した。2002 年にリンが枯渇したほかは河川水由来の生元素の供給をうけてモル比ともにバランスが良く、全期間を通して植物プランクトンの増殖の制限は受けないと考えられた。1999 年以前には比較的高い濃度で推移した Chl.*a* 濃度は、2000 年以降から現在にかけて 50 $\mu\text{g L}^{-1}$  を下回った。

最後に、図 3d に年間を通して Chl.*a* 濃度が最も高いレベルを示した 8 月の特徴を述べる。いずれの年も成層は維持されているように見えるが、底層水の湾外からの侵入 (八木ら, 2008) によって湾中央部の海底付近の水が中層へ湧昇して生元素が表面へ再供給されるためか、7 月よりも 8 月は各生元素の濃度が増加して枯渇はせず、水温が植物プランクトン種の増殖に好適環境にあり、高い Chl.*a* が検出されることを支持した。

水質汚濁防止法が施行されて 50 年目にあたる本年は、本州南方を北上する黒潮の流路が過去 3 番目に長い期間にわたって大蛇行型を示しており黒潮系暖水波が東京湾へ流入する (日向ら, 1999) 機会が増えることや、東京湾岸部の運河等を含む底質環境を改善させるさまざまな取り組みが始められており、低次生産や物質循環に影響が及ぶと考えられる。本年度は東京湾の環境変動について水質の量的変化を考察したが、今後は水の動きや生態系を構成する種組成などの質的検討を加えていきたい。

## 成果発表

(ポスター発表)

1. 宮崎奈穂 (2019): 東京湾 2 定点におけるクロロフィル濃度の長期変動, 2019 年度東京湾シンポジウム, 10 月, 横浜.
2. Naho MIYAZAKI, Chiho SUKIGARA, Karla Loza CHOQUE, Issei HAMANA, Yoshihisa MINO, Akihiko MORIMOTO (2019): A challenge

on measuring photosynthetic oxygen evolution by optical sensors in the Tokyo Bay, off Haneda, International symposium on coastal ecosystem change in Asia: hypoxia, eutrophication, and nutrient conditions, 11 月, 松山.

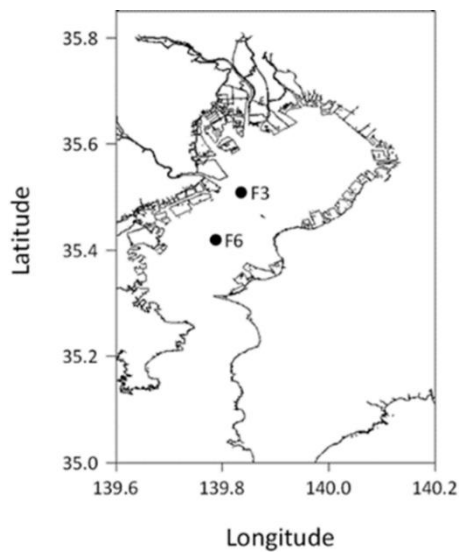


図 1. 東京湾における観測点の位置図.  
 Stn. F3 (35° 30' N, 139° 49' E)  
 多摩川沖, 水深約 20m  
 Stn. F6 (35° 25' N, 139° 48' E)  
 湾中央, 水深約 25m

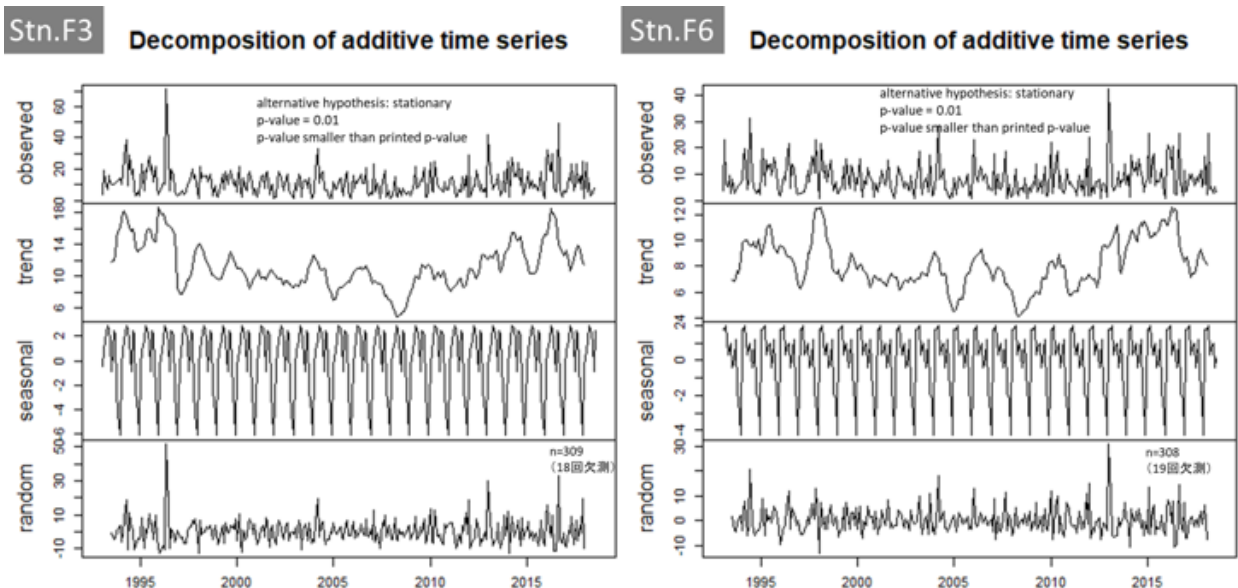


図 2. 観測点 F3 および F6 における水柱積算したクロロフィル *a* 濃度の時系列解析プロット(1993-2019 年). 単位は  $\text{mg m}^{-2}$ .

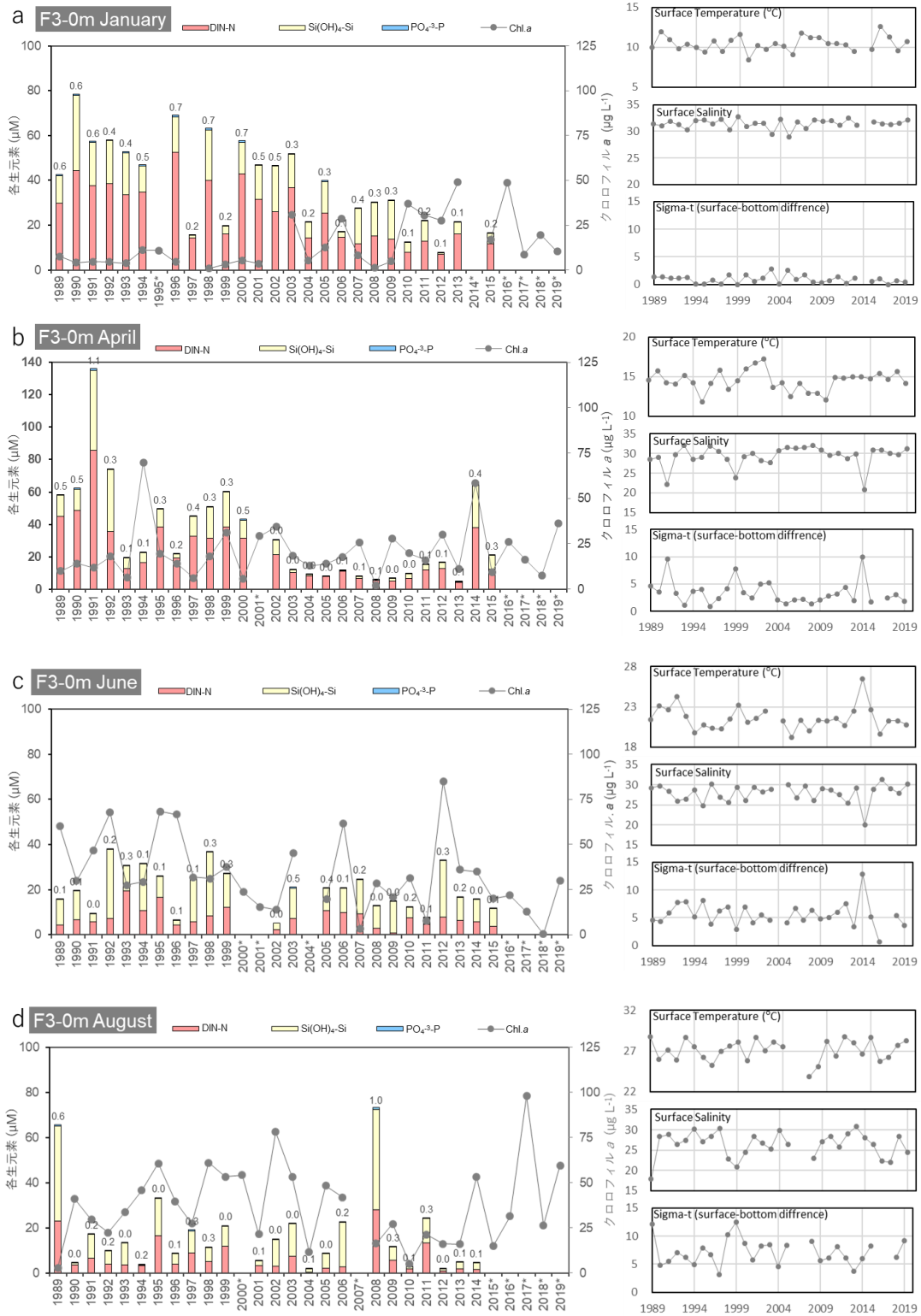


図 3. 観測点 F3 における各生元素の物質質量とクロロフィル *a* 濃度の経年変化.

\*は欠測, 棒グラフの上の数字はリンの物質質量を示す.