

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07536

研究課題名(和文) 環境変動に起因する相模湾沿岸域での栄養塩動態と植物プランクトン群集の応答

研究課題名(英文) Response of phytoplankton assemblage to nutrient dynamics caused by environmental changes in the neritic area of Sagami Bay

研究代表者

荒 功一 (ARA, Koichi)

日本大学・生物資源科学部・准教授

研究者番号：40318382

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：相模湾沿岸域での海況は、物理化学特性の季節変動パターンから乖離した短期変動により、平常時(沿岸水)、多量の河川水流入、東京湾水の相模湾への張り出し、ならびに黒潮系沖合水、親潮系中層水、陸棚(深層)水の相模湾内への進入時に区分され、それらの植物プランクトン群集に対する影響を評価した。さらに、一次生産速度からレッドフィールド比により推定した植物プランクトンの年間窒素・リン要求量を推定し、それらに対する陸・外洋起源栄養塩の影響(寄与率)を定量的に評価した結果、外洋起源のものが陸起源のものをやや上回った。

研究成果の概要(英文)：In the neritic area of Sagami Bay, from the short-term variations in physicochemical properties deviated from the seasonal variation pattern, water conditions were divided into the period of normal condition (coastal water), high freshwater discharge from rivers after rainfalls, the expansion of Tokyo Bay Water, and/or the intrusion of Kuroshio Water, Oyashio Intermediate Water or deep water from the continental slope. The effects of these water conditions on phytoplankton assemblage were evaluated. Moreover, annual requirement of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus (DIN and DIP, respectively) for phytoplankton was estimated from primary productivity, assuming a nutrient uptake molar C:N:P ratio of 106:16:1 (Redfield ratio). As a result, for annual primary production, the contribution of open-ocean-originated DIN and DIP was slightly higher than that of land-originated ones.

研究分野：農学

キーワード：プランクトン 栄養塩 クロロフィルa濃度 ピコ・ナノ・マイクロ植物プランクトン 一次生産 海況
陸・外洋起源 相模湾沿岸域

1. 研究開始当初の背景

沿岸域では、栄養塩が主に河川水によって陸域から供給されるので、温暖化による影響（栄養塩供給の減少）は小さいと考えられてきた。しかし、本邦周辺の幾つかの海域・沿岸域では、約 5~6 割もの栄養塩が外洋起源と推定されている。温暖化に伴って海で成層化が強まり、下層から上層への栄養塩の供給が減少することを考える限り、外洋起源栄養塩そのものが温暖化によって減少する可能性が高い。このように、気候変動によって沿岸域の栄養塩環境ならびに一次生産を基点とする生態系全体がどのように変化するかについては、未だに定まったシナリオは存在せず、その影響過程を早急に解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、陸域と外洋域の影響を受ける相模湾沿岸域での栄養塩濃度と低次生物特性（ピコ・ナノ・マイクロサイズに画分したクロロフィル *a* 濃度、ピコ・ナノ・マイクロ植物プランクトンの出現密度、一次生産速度）の変動と平常時、多量の河川水流入、ならびに様々な湾外水の相模湾への進入との関連性を調べ、また一次生産速度に対する陸起源栄養塩と外洋起源栄養塩の影響を定量的に評価することである。

3. 研究の方法

(1) 相模湾江の島沖での定期観測

観測は、2015年1月~2017年12月の期間中、相模湾江の島沖約 4.5 km に設けた 1 定点（水深約 55 m、図 1）で毎月 2 回の頻度で計 72

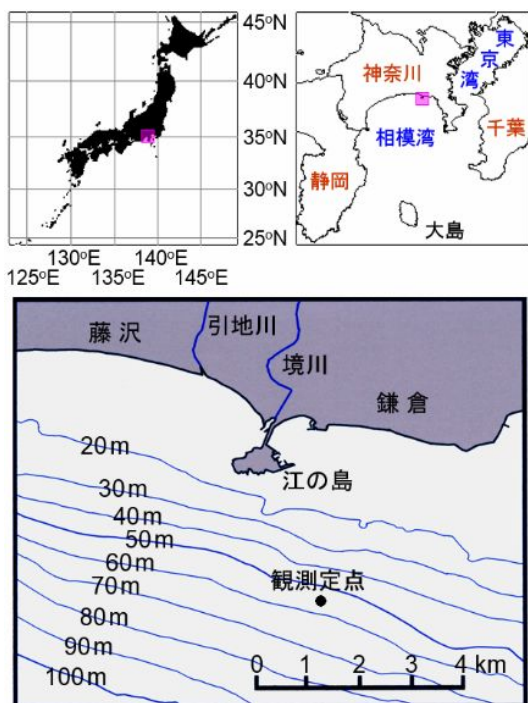


図 1 相模湾沿岸域（江の島沖）での観測定点.

回行った。水温・塩分は、表層から海底まで 1 m 毎に測定した。栄養塩・クロロフィル *a* 濃度分析用ならびにマイクロ植物プランクトン (>20 μm) 検鏡用の海水試料は、バンドーン採水器を用いて水深 0、5、10、20、30、40、50 m 層から採取した。海水試料は、Whatman GF/F で濾過後、ブランルーベ社製 AACSIII を用いて栄養塩 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- \text{-N}$, $\text{DIN} = \text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- \text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$, $\text{Si}(\text{OH})_4 \text{-Si}$) 濃度を測定した。クロロフィル *a* 濃度 (Chl-*a*) は、目合い 20 μm のメッシュを用いてサイズ分画した Whatman GF/F とヌクレポアフィルター(孔径 2 μm)で濾過後、90% アセトンまたは N, N-ジメチルホルムアミドで抽出し、ターナーデザイン社製 TD-700 または 10-AU を用いて測定し、各サイズ (<2 μm, 2~20 μm, >20 μm) の濃度を求めた。

マイクロ植物プランクトン (>20 μm) 用の海水試料は、目合い 20 μm のハンドネットを用いて 10 L 濃縮し、サンプル瓶に約 100 ml を移し入れ、直ちにグルタルアルデヒド溶液（最終濃度 1%）で固定した。ピコ (0.2~2 μm)・ナノ (2~20 μm) 植物プランクトン検鏡用の海水試料は、北原式採水器を用いて水深 0、10、20、30、40、50 m 層から採取した。ピコ植物プランクトン用の試料は、γ 線滅菌処理したポリプロピレン製スクリューキャップ付遠沈管に海水試料 40 ml を移し入れ、直ちにグルタルアルデヒド（最終濃度 1%）で固定した。ナノ植物プランクトン用の試料は、予め塩酸滅菌処理したガラス製容器に海水試料 100 ml を移し入れ、直ちにグルタルアルデヒド（最終濃度 1%）で固定した。

一次生産速度の測定には、表層 (100%) および海面光強度の 50、25、10、5、1% 層からニスキン採水器を用いて海水を採取し、各層の一次生産速度を ^{13}C 現場法で 24 時間現場係留実験を行い測定した。 ^{13}C 濃度は、SerCon 社製 INTEGRA-2 を用いて測定した。

(2) 植物プランクトン試料の処理

ピコプランクトンの試料は、4',6'-diamidino-2-phenylindole (DAPI, 最終濃度 $1 \mu\text{g ml}^{-1}$) で 10 分間染色し、そのうち 5~20 ml を孔径 0.2 μm の Whatman Nuclepore Track-Etch Membrane で濾過捕集 (引圧 10 mmHg 以下) した。ナノプランクトンの試料は、DAPI (最終濃度 $0.1 \mu\text{g ml}^{-1}$) と fluorescein-4-isothiocyanate (FITC-I, 最終濃度 $3 \mu\text{g ml}^{-1}$) で 10 分間二重染色し、そのうち 5~30 ml を孔径 0.8 μm の Whatman Nuclepore Track-Etch Membrane で濾過捕集 (引圧 10 mmHg 以下) した。ピコ・ナノプランクトンの試料は、それぞれ直ちにフィルターをスライドガラス上に置き、無蛍光イメージングオイルを滴下しカバーガラスを被せて封入し、紫外線 (UV) 励起光照射の落射蛍光顕微鏡下でクロロフィルが橙 (オレンジ) 色蛍光を発するシアノバクテリア (CBA) と赤色蛍光を発する独立栄養性ナノプラン

クトン (ANP) を識別して観察した。CBA は 3 ~ 1263 視野 (1 視野: 0.01 mm²) 計数して合計 300 細胞以上 (出現密度が極端に低い場合には合計 130 細胞以上)、ANP は 30 ~ 220 視野 (1 視野: 0.01 mm²) 計数して合計 20 細胞以上 (出現密度が極端に低い場合には合計 5 細胞以上) 計数した。マイクロ植物プランクトン (MPH) は、元サンプルの 0.1 ~ 4% を光学顕微鏡下で同定・計数した。

(3) 他機関からのデータ取得・解析

降水量データは、藤沢市辻堂で測定された気象庁のアメダスより取得した。江の島・湘南港で 1 時間毎に測定された気象 (実測潮位、海面気圧) データは、神奈川県藤沢土木事務所を通して (株) 湘南なぎさパークより提供を受けた。江の島の予測潮位は、海上保安庁により推定した。

江の島での潮位差 (cm) は、実測潮位 (cm) から予測潮位 (cm) を差し引き、海面気圧 (hPa) により気圧補正 (1 hPa の気圧変化は 1 cm の潮位変化を引き起こす) を施して算出した。

水温偏差、塩分偏差、栄養塩濃度偏差は、それぞれ本研究で得られた実測値と同海域で測定された過去 14 年間の平均値から算出した。相模湾周辺の海況は、関東・東海海況速報を参照した。

4. 研究成果

(1) 物理化学特性

水温は 12.76 ~ 27.01°C、塩分は 29.25 ~ 34.74、密度 δt は 18.78 ~ 25.93 の範囲でそれぞれ変動した。秋 ~ 春季 (10 月下旬または 11 月 ~ 4 月上旬) に鉛直混合が起こり、水温・塩分・密度 δt は表層から底層までほぼ均一だった。夏 ~ 秋季 (6 ~ 9 月) には、水深 20 ~ 30 m 層付近に季節躍層が形成された。

栄養塩濃度は、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が 0.09 ~ 2.92 μM 、 $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-\text{-N}$ が 0.12 ~ 13.31 μM 、DIN が 0.43 ~ 14.29 μM 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ が検出限界 (0.02) 以下 ~ 0.98 μM 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が 0.35 ~ 23.40 μM の範囲でそれぞれ変動した。栄養塩濃度は、底層 (水深 30 m 以深) で常に高濃度を維持したが、夏季 (6 ~ 9 月) の上層 (水深 20 m 以浅) で著しく低く枯渇状態だった。本海域での物理化学特性、即ち水温・塩分・密度 δt ・栄養塩 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ を除く) 濃度は、それぞれが 3 年間ほぼ同様な季節変動パターンを呈した。

(2) Chl-*a*濃度

全 Chl-*a* は 0.07 ~ 8.93 $\mu\text{g L}^{-1}$ の範囲で変動した。Chl-*a* のサイズ組成は、水柱全体で <2 μm が 12.5 ~ 80.0% (平均 32.8%)、2 ~ 20 μm が 8.6 ~ 44.8% (平均 23.2%)、>20 μm が 5.0 ~ 78.6% (平均 43.9%) を占めた。春季には >20 μm のサイズ、夏 ~ 冬季には <20 μm のサイズが全 Chl-*a* の大部分を占めた。

(3) ピコ・ナノ・マイクロ植物プランクトンの出現密度

CBA の出現密度は、 $1.96 \times 10^4 \sim 7.22 \times 10^7$ cells L^{-1} の範囲で変動し、2 ~ 4 月に水柱全体で低く、7 ~ 11 月に上層 (水深 20 ~ 40 m 以浅) で高かった。ANP の出現密度は、 $1.03 \times 10^4 \sim 3.75 \times 10^7$ cells L^{-1} の範囲で変動し、2 ~ 3 月に水柱全体で低く、5 ~ 11 月に上層 (水深 20 m 以浅) で高かった。MPH の出現密度は、 $6.25 \times 10^1 \sim 2.04 \times 10^6$ cells L^{-1} の範囲で変動し、12 ~ 1 月に水柱全体で低く、2 ~ 3 月に水柱全体ならびに 7 ~ 9 月に上層 (水深 10 m 以浅) で高かった。

(4) 一次生産速度

有光層の深度は、15.7 ~ 52.4 m の範囲で変動した。一次生産 (純生産) 速度は、ほぼ 0 ~ 669.1 $\mu\text{g C L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の範囲で変動し、春 ~ 秋季に上層 (水深 10 m 以浅) で高い値を示した。有光層内積算の一次生産量は、0.16 ~ 3.47 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (平均 1.04 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) の範囲で変動した。

(5) 短期変動・海況

夏季成層期に表層での低塩分、栄養塩 (DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$) 濃度ならびに Chl-*a* 濃度の高い値は、まとまった雨に伴う多量の河川水流入あるいは東京湾水の相模湾への張り出しにより引き起こされた (図 2)。

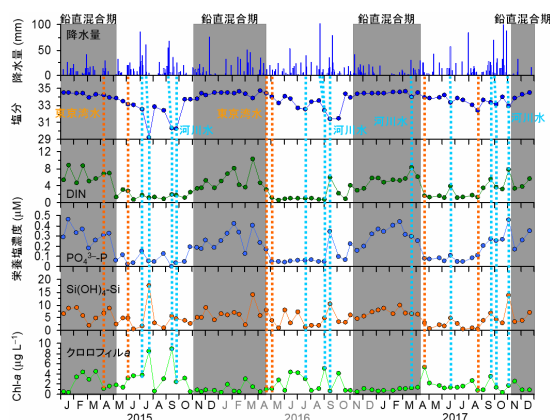


図 2 2015 年 1 月 ~ 2017 年 12 月の期間中の降水量、模湾沿岸域 (江の島沖) の表層での塩分、溶存態無機窒素 (DIN)、リン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、ケイ酸態ケイ素 ($\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$)、クロロフィル *a* 濃度の変動。水色点線は多量の河川水流入時、橙色点線は東京湾水の相模湾への張り出し時を示す。

水温偏差・塩分偏差・栄養塩 ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-\text{-N}$ 、DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$) 濃度偏差は、数日あるいは数週間急激に変動した。このような 14 年間平均の季節変動パターンから乖離した短期変動は、潮位差の変動と同調し、このうち、高潮位・高水温・高塩分・低栄養塩濃度、低潮位・低水温・やや低塩分・高栄養塩濃度、低潮位・低水温・高塩分・高栄養塩濃度の 3 パターンが顕著に現れた (図 3)。これらの短期変動パターンは、主として本州の南岸に沿って流れる黒潮経路の変動の影響によるものであった。これらの短期変

動の要因は、黒潮系沖合水、親潮系中層水、陸棚（深層）水の相模湾への進入であることが明らかとなり、併せてこれら3水塊が相模湾内へ進入した時期を特定できた（図3）

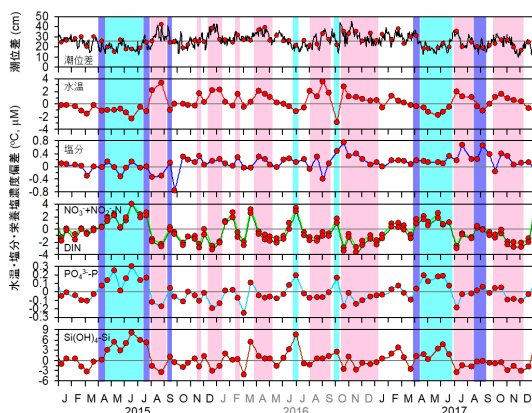


図3 2015年1月～2017年12月の期間中の潮位差、模湾沿岸域（江の島沖）での水温・塩分・栄養塩（ $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4 - \text{Si}$ ）濃度偏差の変動。白色は通常時（沿岸水）、赤色は黒潮系沖合水、水色は親潮系中層水、青色は陸棚（深層）水の相模湾内への進入時を示す。

潮位差と水温偏差との間には、有意な正の相関関係（直線近似、 $r^2 = 0.352$ 、 $p < 0.0001$ ）が認められた。また、水温偏差と栄養塩（ $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4 - \text{Si}$ ）濃度偏差との間には、それぞれ有意な負の相関関係（いずれも直線近似、 $r^2 = 0.230 \sim 0.414$ 、いずれも $p < 0.0001$ ）が認められた。得られた関係式より、潮位偏差から水温偏差、ならびに水温偏差から各栄養塩濃度偏差を推定することが可能となった。

(6) Chl-a 濃度・植物プランクトンの出現密度に対する海況の影響

Chl-a 濃度は、冬季（12～2月）に平常時よりも黒潮系沖合水の進入時に低く、春季（3～5月）に平常時よりも東京湾水の進入時に高く、逆に黒潮系沖合水・親潮系中層水の進入時に低く、夏季（6～9月）に平常時よりも多量の河川水流入時に高く、逆に黒潮系沖合水・親潮系中層水・陸棚（深層）水の進入時に低く、秋季（10～11月）に平常時よりも多量の河川水流入時・黒潮系沖合水の進入時に高く、逆に親潮系中層水の進入時に低かった（図4）

冬季（12～2月）にCBAとANPの出現密度は平常時よりも黒潮系沖合水の進入時に高く、一方でMPHの出現密度は平常時よりも黒潮系沖合水の進入時に低かった。春季（3～5月）にCBA・ANP・MPHの出現密度はいずれも平常時と比べて多量の河川水流入時に低く、それに加えてCBAは陸棚（深層）水、MPHは黒潮系沖合水の進入時にそれぞれ

低かった。夏季（6～9月）にCBA・ANP・MPHの出現密度は、いずれも平常時と比べて多量の河川水流入時に高かった。秋季（10～11月）にCBAとANPの出現密度は平常時と比べて多量の河川水流入時に高く、一方でMPHの出現密度は多量の河川水流入時と陸棚（深層）水の進入時に低かった。

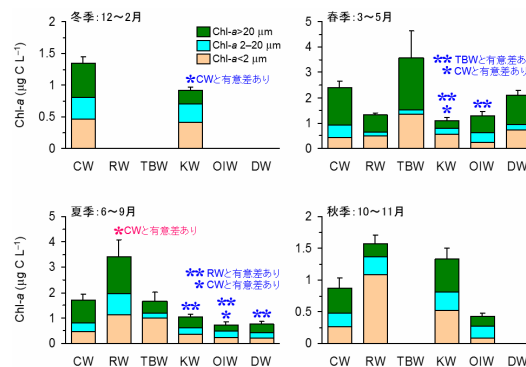


図4 2015年1月～2017年12月の期間中の模湾沿岸域（江の島沖）での季節毎の平常時ならびに他水塊進入時のクロロフィルa濃度の比較。CW：沿岸水（平常時）、RW：多量の河川水、TBW：東京湾水、KW：黒潮系沖合水、OIW：親潮系中層水、DW：陸棚（深層）水。エラーバーは標準誤差を示す。

(7) 一次生産に対する陸起源栄養塩と外洋起源栄養塩の寄与率

年間一次生産量（±SE）は、 $379 \pm 43.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と見積もられた（図5）。一次生産速度からレッドフィールド比により推定した植物プランクトンの年間栄養塩要求量（±SE）は、窒素が $4.77 \pm 0.54 \text{ g N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、リンが $0.30 \pm 0.03 \text{ g P m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と推定された。そのうち、各水塊由来の栄養塩の割合（寄与

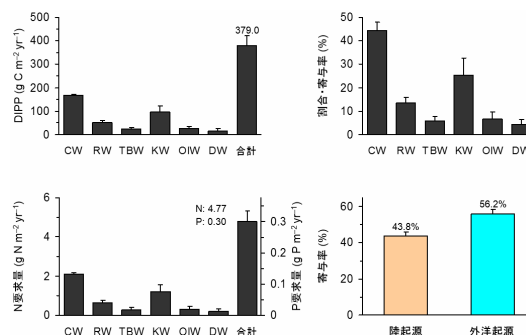


図5 2015年1月～2017年12月の期間中の模湾沿岸域（江の島沖）での年間一次生産量、植物プランクトンの年間窒素・リン要求量とそれに対する沿岸水（平常時）ならびに他水塊進入時（由来）の栄養塩の寄与率、ならびに陸・外洋起源栄養塩の寄与率。CW：沿岸水（平常時）RW：多量の河川水、TBW：東京湾水、KW：黒潮系沖合水、OIW：親潮系中層水、DW：陸棚（深層）水。エラーバーは標準誤差を示す。

率：年間 \pm SE)は、沿岸水(平常時)が $44.4\pm 3.6\%$ 、河川水が $13.6\pm 2.2\%$ 、東京湾水が $5.8\pm 1.9\%$ 、黒潮系沖合水が $25.3\pm 7.4\%$ 、親潮系中層水が $6.6\pm 3.1\%$ 、陸棚(深層)水が $4.3\pm 2.1\%$ を占めた(図5)。さらに、植物プランクトンの年間窒素・リン要求量のうち、陸起源(夏季成層期平常時の上層混合層の沿岸水、多量の河川水流入、東京湾水の相模湾への張り出しにより供給された)のものは $43.8\pm 2.1\%$ 、外洋起源(鉛直混合期平常時の沿岸水、黒潮系沖合水、親潮系中層水、陸棚(深層)水の相模湾内への進入により供給された)のものは $56.2\pm 2.1\%$ とそれぞれ見積もられた(図5)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

荒 功一・島本章広: 相模湾沿岸域での栄養動態と植物プランクトン群集の応答.
2017年度水産海洋学会研究発表大会.
2017年11月18日. 広島.

島本章広・荒 功一: 相模湾沿岸域での微小プランクトン食物網の構造と栄養動態.
2017年度水産海洋学会研究発表大会.
2017年11月19日. 広島.

6. 研究組織

(1)研究代表者

荒 功一 (ARA, Koichi)
日本大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号: 40318382