

駿河湾内から沖合域における浮力振動数とクロロフィル *a* 分布の関係

青山 航^{*1}

静岡県周辺海域の一次生産の状況を明らかにするため、調査船でクロロフィル *a* の観測を行い、密度成層の強さの指標である浮力振動数 N^2 の鉛直分布と比較した。駿河湾央では、5～10 月において N^2 極大層と同じ水深帯または N^2 極大層直下にクロロフィル *a* 極大層が存在しており、表層への栄養塩供給の制限がクロロフィル *a* 分布に影響を与えたと考えられた。静岡県沖合域では、表層から 50m 深においては駿河湾内と比較してクロロフィル *a* が低かった。しかし、 N^2 極大層直下の亜表層 (60～100m 深) ではクロロフィル *a* が高かったことから、時期によっては亜表層を中心に駿河湾内に匹敵する一次生産が行われている可能性が示唆された。

キーワード：海洋観測、黒潮、クロロフィル *a*、浮力振動数

駿河湾は静岡県中央部に位置し、太平洋に面する開口性の湾であり、沖合には黒潮が流れている。御前崎から石廊崎までの東西距離は約 55km と広いため、しばしば黒潮系暖水の流入が起こる^{1, 2)}。一方、駿河湾奥から西側には大型河川が流入し、表面からおおむね水深 20m には沿岸河川系水が分布する³⁾。

黒潮は東シナ海を北東進し、トカラ海峡を抜け四国、本州を東に流れる海流である⁴⁾。静岡県周辺では、沖合を西から東に向かって直進するほか、蛇行して駿河湾や遠州灘に接近するなど流路が様々に変動する。

日本沖合の黒潮が流れる海域は、一般的に貧栄養で一次生産が低いと言われている。現場海水に ^{13}C を添加して培養した報告では、御前崎沖合の黒潮域の単位面積あたりの一次生産は、黒潮内側域に隣接する土佐湾に比べて低く見積もられている⁵⁾。しかし、Chen *et al.*⁶⁾によると、台湾東方沖の黒潮は表層よりも、黒潮の流速が最も早い水深帯直下で高い栄養塩輸送流が存在することを示唆している。また、植物プランクトンの増殖は密度成層の安定状態とそれに伴う鉛直混合、栄養塩供給との関係が指摘されている⁷⁾。これらのことから、静岡県の沿岸域のみならず、沖合域においても、表層以深の一次生産や成層状態について調査することで、黒潮からの暖水波及などの現象が静岡県周辺海域の生物生産に及ぼす影響について知見を得られる可能性がある。一次生産量の指標は、海洋において珪藻類等の主要なすべての植物プランクトンに含まれる物質であるクロロフィル *a*⁸⁾ を観測することで得られる。そこで、駿河湾内及び静岡県沖合域を対象とした、海洋観測装置 CTD (Conductivity Temperature Depth Profiler) による観測結果を行い、駿河湾内から沖合域のクロロフィル *a* の分布及び海洋構造との関係について分析したので報告する。

2025年2月7日受理

静岡県水産・海洋技術研究所(本所)業績第1190号

^{*1}静岡県水産・海洋技術研究所 資源海洋科

材料と方法

2022 年 5 月から 2024 年 3 月まで毎月 1 回、沿岸・沖合漁業指導調査船駿河丸による沿岸・沖合定線観測を実施した(図 1)。なお、荒天等の事情により該当月の観測が実施できなかった観測点が存在する(表 1)。このため、観測期間中の各観測点で観測実施できた 4~23 回のデータを用いた。観測は海洋観測装置 CTD(Sea-Bird 社製)及び CTD に付属した蛍光光度計(Sea-Bird 社製)を用いた。観測水深は、駿河湾内 11 測点(St17, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29)は表層(概ね 0~50m 深の水深帯)から最大 300m 深まで、沖合域 16 測点(St1, 3, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 40(saba3))は表層から最大 700m 深までとし、水温、ポテンシャル密度、クロロフィル *a* 濃度について水深 1m 毎に各項目のデータを取得した。

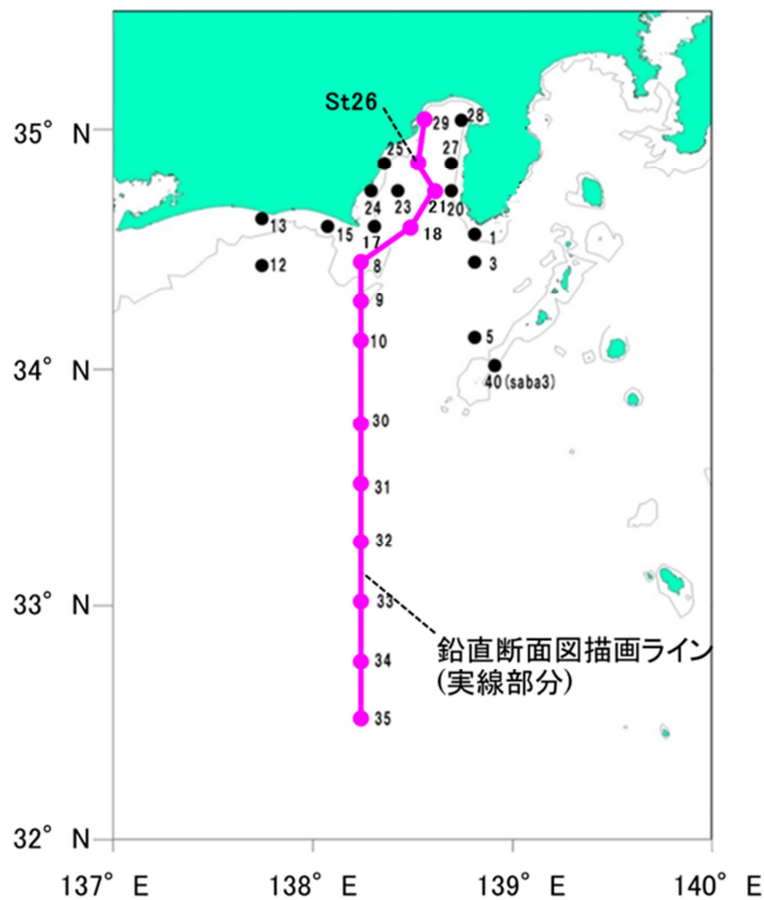


図 1 沿岸・沖合定線観測点及び鉛直断面図描画ライン
(地図上の数字は St 番号を表す)

成層の安定性を示す指標としてブラントバイサラ振動数が用いられ、 g を重力加速度(m/s^2), ρ_0 を本海域における代表密度(kg/m^3), σ_n をポテンシャル密度(kg/m^3), z を水深(m), $\partial \sigma_n / \partial z$ を密度勾配とし、浮力振動数 N^2 (s^{-2}) を次式により計算した⁹⁾。

$$N^2 = g \{ -(1/\rho_0) (\partial \sigma_n / \partial z) \}$$

なお、本研究の図においては、 N^2 の大小を比較しやすくするため、常用対数をとった値で示した。

水温、クロロフィル *a* 濃度及び算出した N^2 を用いた駿河湾中央の季節的な変化を把握するため、観測

表 1 沿岸・沖合定線観測実施点(*は観測を行った測点を表す)

| 観測実施年月 | St番号 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | 1 | 3 | 5 | 8 | 9 | 10 | 12 | 13 | 15 | 17 | 18 | 20 | 21 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 40(saba3) | | | | | | | | | | | | | |
| 2022年5月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 6月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 7月 | | | | | | | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 9月 | * | | | * | * | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 12月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2023年1月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | * | | | | | | | | | | | | | |
| 3月 | * | | | | | | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | * | | | | | | | | | | | | | |
| 5月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 6月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 7月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 8月 | | | | * | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9月 | * | | | | | | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | |
| 11月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12月 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2024年1月 | * | * | * | | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2月 | * | * | | * | * | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3月 | * | | | * | * | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

点 St26(34° 51' N, 138° 32' E)における鉛直時系列を作成した。さらに、空間的な変化を明らかにするために、駿河湾奥(St29)から静岡県沖合域(St35)までの沿岸・沖合定線観測点計 13 か所を南北方向に結び (図1)、横軸を緯度とした鉛直断面図を夏季(2022年8月, St29~35), 秋季(2022年11月, St29~33), 冬季(2023年2月, St29~10), 春季(2023年5月, St29~35)について作成した。

一次生産量の指標として、各観測点におけるクロロフィル *a* 濃度(mg/m³)を、①表層から 50m 深まで、②表層から 300m 深までの 2 つの水深帯で積分し、クロロフィル *a* 積分量 I(mg)を求め、水深 300m 以上まで観測を実施した駿河湾内 7 測点(St18, 21, 23, 25, 26, 27, 29), 沖合域 8 測点(St9, 10, 30, 31, 32, 33, 34, 35)における I を用いて、月別海域別の箱ひげ図を作成した。ただし、34° N 以南に位置する観測点(St30~35)での観測が実施できなかった月については、データ数不足とみなし図から除いた。また、駿河湾内と沖合域の一次生産量の比較として、月別海域別に I の中央値を求め、各月の駿河湾内における中央値 *C_s* と沖合域における中央値 *C_o* の変化率 *d* を次式により計算した。

$$d=C_s/C_o$$

結 果

駿河湾内における季節変化

駿河湾央(St26)における水温, *N²*, クロロフィル *a* の鉛直時系列を図 2 に示した。水温は、観測期間中、表層では年間最低水温が冬季(2023年2月及び2024年2月)に、年間最高水温が夏季(2022年9月及び2023年9月)に現れ、水深が深くなるにつれ年間最高水温及び年間最低水温が現れる月に遅れが見られた。*N²* は、5~8月には表層から 30m 深にかけて 10^{-2.4}~10^{-3.4}s⁻² 程度の明瞭な極大層(以下、*N²* 極大層)が位置していたが、9月以降は*N²* 極大層が徐々に深くなり、12月には 10^{-3.5}s⁻² 程度の*N²* 極大層が 100m 深に達した。1~4月には明瞭な*N²* 極大層が見られず、すべての水深帯で*N²* は 10^{-4.0}s⁻² 以下と低かった。また、2月には 10^{-4.5}s⁻² 程度の極めて低い*N²* が表層~130m 深に位置していた。クロロフィル *a* は、5~10月には表層で 0.2~0.5mg/m³ 程度と低く、0~50m 深に 0.8~1.8mg/m³ 程度の極大層(以下、ク

クロロフィル a 極大層) が位置していたが、11～1 月は他の月と比べ明瞭なクロロフィル a 極大層が見られず、表層～100m 深まで概ね $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 未満の様な値であった。2 月は表層～120m 深に $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 程度のクロロフィル a 極大層が位置していた。2023 年 3～5 月は表層から 50m 深にかけて $1.2\sim3.7\text{mg}/\text{m}^3$ 程度のクロロフィル a 極大層が位置していた。

以上のクロロフィル a と N^2 の鉛直分布から、クロロフィル a 極大層は、明瞭な N^2 極大層が位置していた 5～10 月において、 N^2 極大層と同じ水深帯または N^2 極大層直下に存在していた。

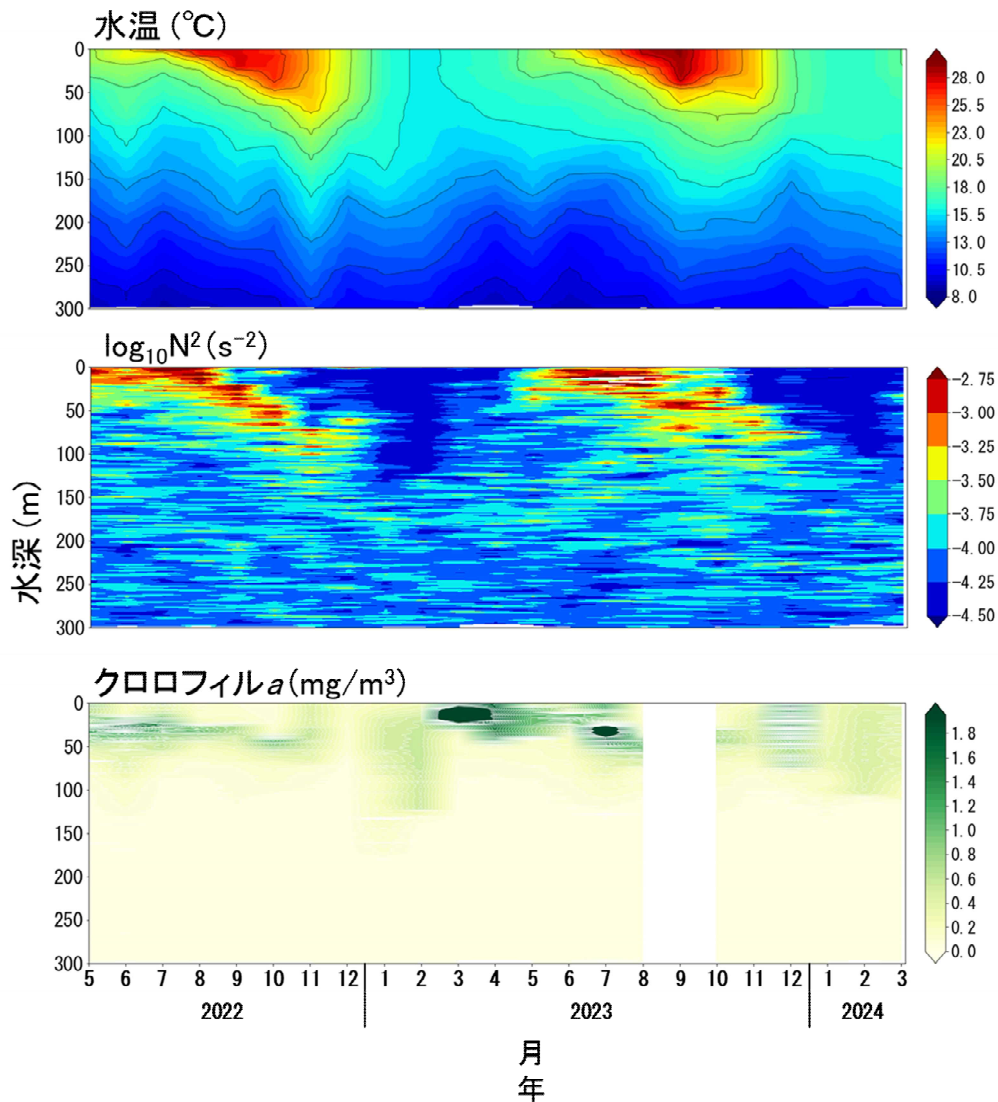


図 2 駿河湾央(St26)における水温、 N^2 、クロロフィル a の鉛直時系列

駿河湾内と沖合域におけるクロロフィル a 分布の季節変化

夏季(2022 年 8 月)

2022 年 8 月の水温、 N^2 、クロロフィル a の鉛直断面図を図 3(a) に示した。水温の鉛直断面図から、駿河湾内の表層水温が 28.0°C だったのに対し、沖合域の $34^\circ 16' \text{N}$ 付近から南は表層水温 29.0°C の海水が分布していた。 N^2 極大層は、駿河湾内では表層から 30m 深にかけて位置しており、30m 以深の N^2 はほぼ全層で $10^{-3.50}\text{s}^{-2}$ 以下と低かった。一方で、黒潮流路を含む沖合域では、表層の N^2 は低く、10～30m 深にかけて N^2 極大層が位置していた。また、30～80m 深にかけて、駿河湾内の同水深帯よりも高い 10^{-

$3.50 \times 10^{-2} \text{ s}^{-2}$ 以上の N^2 が位置していた。クロロフィル *a* は、駿河湾内では表層で低く、10~50m 深にかけて $1.0 \sim 3.0 \text{ mg/m}^3$ 程度のクロロフィル *a* 極大層が位置していた。一方、黒潮流路を含む沖合域においては、表層から 50m 深のクロロフィル *a* は概ね 0.1 mg/m^3 未満と極めて低く、 N^2 極大層下の 50~100m 深に最大 1.0 mg/m^3 程度のクロロフィル *a* 極大層が位置していた。

秋季(2022 年 11 月)

2022 年 11 月の水温、 N^2 、クロロフィル *a* の鉛直断面図を図 3(b) に示した。水温の鉛直断面図から、駿河湾内の表層水温は 24.0°C 以下であったが、駿河湾外の $34^\circ 26' \text{ N}$ 付近(St8 付近)からは表層水温 24.6°C 以上の海水が分布していた。駿河湾内では、表層の N^2 は低く、70~130m 深にかけて $10^{-3.0} \text{ s}^{-2}$ 程度の N^2 極大層が位置していた。黒潮流路を含む沖合域では、駿河湾内と同様表層の N^2 は低く、駿河湾内よりやや深い 80~150m 深に $10^{-3.0} \text{ s}^{-2}$ 程度の N^2 極大層が位置していた。クロロフィル *a* は、駿河湾内では数値がほぼ均一なクロロフィル *a* 極大層が N^2 極大層直上の表層から 70m 深にかけて位置していたが、クロロフィル *a* は最大 0.5 mg/m^3 程度であった。黒潮流路を含む沖合域においても同様に、クロロフィル *a* 極大層は N^2 極大層直上の表層から 60m 深にかけて位置していた。クロロフィル *a* は概ね 0.3 mg/m^3 程度であった。

冬季(2023 年 2 月)

2023 年 2 月の水温、 N^2 、クロロフィル *a* の鉛直断面図を図 3(c) に示した。水温の鉛直断面図から、駿河湾内の表層水温が約 16.0°C だったのに対し、駿河湾外の $34^\circ 16' \text{ N}$ 付近から南は表層水温 19.0°C の海水が分布していた。駿河湾内では明瞭な N^2 極大層は見られなかった。沖合域でも同様に、明瞭な N^2 極大層は見られなかった。クロロフィル *a* は、駿河湾内では $0.5 \sim 0.7 \text{ mg/m}^3$ 程度のクロロフィル *a* 極大層が表層から 120m 深にかけての幅広い水深帯に位置していた。沖合域では、クロロフィル *a* 極大層が表層から 80m 深にかけて位置していた。クロロフィル *a* は $0.6 \sim 0.7 \text{ mg/m}^3$ であった。

春季(2023 年 5 月)

2023 年 5 月の水温、 N^2 、クロロフィル *a* の鉛直断面図を図 3(d) に示した。水温の鉛直断面図から、駿河湾内(St18~29)の表層水温は 19.0°C 前後であったが、沖合域の $34^\circ 16' \text{ N}$ (St9 付近)から南は表層水温 22.0°C の海水が分布していた。駿河湾内では表層から 50m 深にかけて $10^{-3.0} \text{ s}^{-2}$ 前後の N^2 極大層が位置していた。一方で、黒潮流路を含む沖合域(St8~35)では、表層の N^2 は低く、60~80m 深に N^2 極大層が位置していた。クロロフィル *a* 極大層は、駿河湾内では N^2 極大層と同様に表層から 50m 深にかけて位置していた。一方、黒潮流路を含む沖合域においては、表層から 50m 深のクロロフィル *a* は駿河湾内と比べ 1.0 mg/m^3 程度低い $0.2 \sim 0.3 \text{ mg/m}^3$ であった。黒潮流路以南(概ね $33^\circ 20' \text{ N}$ (St32 付近)以南)における表層から 50m 深のクロロフィル *a* は 0.1 mg/m^3 未満であった。

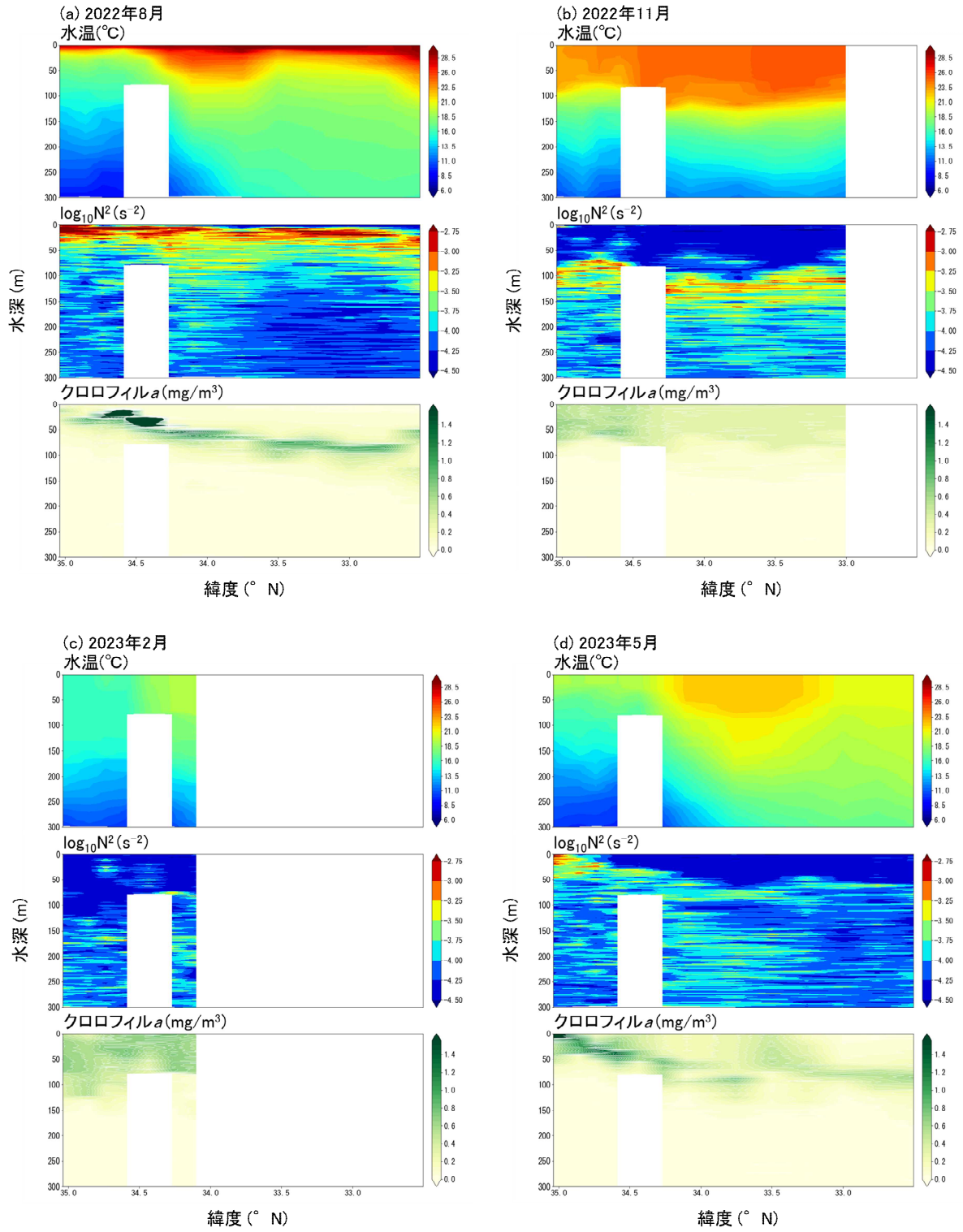


図3 (a)2022年8月, (b)2022年11月, (c)2023年2月, (d)2023年5月の
水温, N^2 , クロロフィル *a* の鉛直断面図

駿河湾内及び沖合域におけるクロロフィル α 積分量

駿河湾内 7 測点及び沖合域 8 測点におけるクロロフィル *a* 積分量の箱ひげ図を図 4 に示した。表層から 50m 深までのクロロフィル *a* 積分量 I_{50} は、駿河湾内で 16.1~76.4mg, 沖合域で 1.6~35.9mg であった。同様に表層から 300m 深までのクロロフィル *a* 積分量 I_{300} は、駿河湾央で 24.8~135.0mg, 沖合域で 9.1~229.1mg であった。 I_{50} , I_{300} とともにすべての月で駿河湾内の方が沖合域よりも高い傾向にあった。 I_{50} の四分位範囲は駿河湾内と沖合域とで重なり合う月がなく、海域間で明確に数値が異なっていた。また、クロロフィル *a* 積分量の中央値変化率 d_{50} は 1.7~13.7, d_{300} は 1.1~1.9 であった。

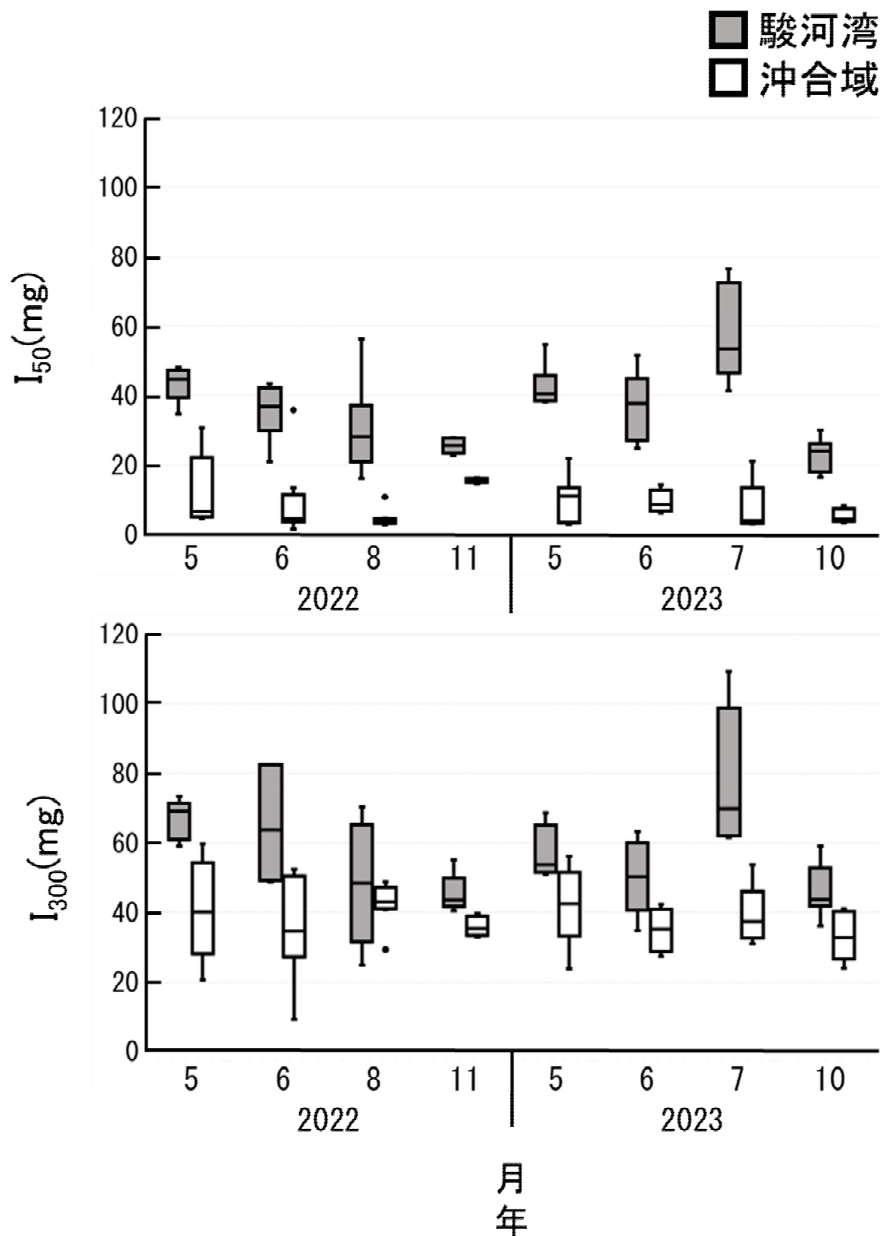


図 4 駿河湾内 7 測点及び沖合域 8 測点におけるクロロフィル *a* 積分量
(I_{50} は表層から 50m 深まで, I_{300} は表層から 300m 深までの積分量)

考 察

駿河湾における季節変化

観測期間中に見られた駿河湾内の水温構造は、中村¹⁰⁾と同様に、水深が深くなるにつれ年間最高水

温及び年間最低水温が現れる月に遅れが見られる典型的な水温構造であった。 N^2 は密度勾配が大きい水深帯ほど高く、密度勾配が小さい水深帯ほど低くなる。したがって、本報告では N^2 の数値が高い水深帯では成層が強く、数値が低い水深帯では成層が弱いと判断し、クロロフィル a の鉛直分布との比較に用いた。

今回の観測では、 N^2 極大層は 5～8 月には表層から 30m 深にかけて明瞭に出現した。これは海面が日射により加熱され下層との密度差が大きくなったことで、30m 以浅で密度躍層が形成されたと考えられた。9 月以降は日射による加熱が弱まり浅い水深帯での水温差が小さくなる一方、下層では依然として水温が高い水深帯が存在することで、それよりもさらに下層との密度差が大きくなり N^2 極大層が徐々に深くなったと考えられた。1～4 月は気温と風による海面冷却が進むことで N^2 の値が全体的に低下した。すなわち、水柱全体における密度差が小さくなることで、他の時期に比べ活発な鉛直混合が発生したと考えられた。

一次生産に不可欠である栄養塩は、夏季には下層から表層への補給がとだえ⁷⁾、冬季に活発な鉛直混合により表層に補給される¹¹⁾とある。今回、春季～秋季の N^2 極大層が表層～100m 深に存在したため、その水深帯では N^2 極大層に阻まれ、上層への栄養塩供給が少ない環境にあると考えられた。したがって、 N^2 極大層が見られた 5～10 月は、 N^2 極大層よりも上層では栄養塩が制限要因となり、表層での一次生産が活発に行われず、 N^2 極大層直下にある栄養塩を利用してクロロフィル a 極大層が現れたものと考えられ、これまで言われていた川原田⁷⁾の夏季に成層が強く鉛直混合が起こらないことは N^2 極大層の強さからも見て取れた。また、11～1 月は活発な鉛直混合により栄養塩が表層にも供給されたものの、光が律速要因となり¹¹⁾一次生産が不活発であったと考えられた。なお、この時期は 5～10 月と異なり、クロロフィル a 極大層が N^2 極大層の上部に形成されていたが、これは、5～10 月に比べて N^2 極大層の数値が低くなっていたことから、成層構造が弱くなり、 N^2 極大層の上部に輸送される栄養塩が増加したためと考えられた。さらに、静岡市駿河区の静岡気象台 ($34^{\circ} 59' N$, $138^{\circ} 24' E$) (<https://www.data.jma.go.jp/>)によると、月平均全天日射量 (MJ/m^2) は 2023 年 2 月では $12.7 MJ/m^2$ 、2024 年 2 月では $10.7 MJ/m^2$ であり、2022 年 11 月～2023 年 1 月及び 2023 年 11 月～2024 年 1 月の月平均全天日射量 $10.0 \sim 10.9 MJ/m^2$ と大きく値が変わらないことから、2 月も 11～1 月と同様に光律速の影響を受けると考えられた。しかし、この月は 11～1 月とは異なり表層～110m 深にクロロフィル a 極大層が形成されていた。これは、2 月は表層～130m 深において 11～1 月よりもさらに N^2 が低いため、 N^2 極大層の上部に輸送される栄養塩が 11～1 月よりも増加したことで、クロロフィル a 極大層が形成されたと考えられた。3～4 月は 11 月以降の鉛直混合により表層付近に供給された栄養塩と、3 月以降に季節的に増加する光量により、特に光量が多い表層付近で活発な一次生産が起こったと考えられた。

これらのことから、これまでの知見に N^2 の構造を合わせることで、一次生産の季節変化と成層状態との関係をより客観的に精査できる可能性があった。

駿河湾内と沖合域におけるクロロフィル a 分布の季節変化

夏季(2022 年 8 月)は、2022 年 8 月 2 日の関東・東海海況速報(図 5(a))によると、黒潮流路北端が御前崎沖 $138^{\circ} 15' E$ で $34^{\circ} 10' N$ に位置しており、水温の鉛直断面図(図 3(a))の表層水温 $29.0^{\circ}C$ の海水は黒潮本流と考えられた。このとき、駿河湾内においては栄養塩が制限要因となり、 N^2 極大層近辺の 10～50m 深でクロロフィル a が極大となったと考えられた。沖合域においては、 N^2 極大層は 10～30m 深に位置するものの、駿河湾内と違い極大層より下の 30～80m 深においても $10^{-3.50} s^{-2}$ 以上の比較的高い N^2 が分布しており、同水深帯への栄養塩供給が制限されている可能性が考えられた。これにより、亜表

層までは栄養塩が十分に供給されたものの亜表層以浅への栄養塩供給が制限されたことで、50～100m 深でクロロフィル *a* 量が極大となったと考えられた。

秋季(2022 年 11 月)は、2022 年 11 月 8 日の関東・東海海況速報(図 5(b))によると、黒潮流路北端が御前崎沖 138° 15' E で 34° 00' N に位置しており、そこから北～北西に向け暖水波及が起こっていた。よって、水温の鉛直断面図(図 3(b))の表層水温 24.5℃以上の海水は黒潮本流または暖水波及による黒潮系水と考えられた。このとき、駿河湾内と沖合域で表層水温差が 1℃未満であり、他の季節と比べ表層水温差が小さかった。これらのことから、沖合域から駿河湾内に暖水波及が起こっていたと考えられた。沖合域では、表層から亜表層にかけて密度差が小さくなったことで、鉛直混合により栄養塩が表層にも供給されたものの、光が律速要因となり一次生産が不活発であったと考えられた。駿河湾内においては沖合域と同様水深 70m 以深の亜表層(表層より下に位置する概ね 50～100 深の水深帯)に N^2 極大層が位置していた。駿河湾内で見られた数値がほぼ均一なクロロフィル *a* 極大層の数値は、黒潮流路を含む沖合域と比べ 0.2mg/m³ 程度高かったものの、他の季節のクロロフィル *a* 極大層と比べ低かった。2022 年 11 月は暖水波及に伴う貧栄養かつクロロフィル *a* 濃度が低い黒潮系水の駿河湾内への流入により、駿河湾内の海洋構造が沖合域と同様になったことで、 N^2 極大層分布が沖合域と同様になったことと、クロロフィル *a* 極大層の数値が他の時期と比べ低くなったことが考えられた。沖合域よりも駿河湾内でクロロフィル *a* 極大層の数値が高かった理由として、駿河湾表層に分布する沿岸河川系水³⁾により、駿河湾内表層には沖合域に比べ多くの栄養塩が供給されたことで、沖合域に比べ一次生産が活発に行われた可能性が考えられた。しかし、暖水波及による黒潮系水と、沿岸河川系水がそれぞれの程度駿河湾内におけるクロロフィル *a* 分布に影響を与えているのか検証するには、今回観測を実施した駿河湾内測点及び大井川などの主要河川河口域における栄養塩濃度データが不足しており、検証できなかった。

冬季(2023 年 2 月)は、2023 年 2 月 2 日の関東・東海海況速報(図 5(c))によると、黒潮流路北端が御前崎沖 138° 15' E で 33° 00' N に位置しており、2023 年 2 月の最南の観測点である St10(34° 06' N)から 1° 以上離れた場所に位置していた。一方、黒潮北縁から北西に向け暖水波及が起こっていたことから、水温の鉛直断面図(図 3(c))の表層水温 19.0℃以上の海水は暖水波及による黒潮系水と考えられた。クロロフィル *a* 極大層中のクロロフィル *a* の数値は、駿河湾内と沖合域とで同程度だった。冬季は光が律速要因となったことで、駿河湾内、沖合域ともに春季や夏季のクロロフィル *a* 極大層と比べて表層付近での一次生産が不活発であったと考えられた。一方、クロロフィル *a* 極大層中のクロロフィル *a* の数値は、秋季と比べ駿河湾内では 0.0～0.2mg/m³ 程度高く、沖合域では 0.3～0.4mg/m³ 程度高かった。冬季は N^2 極大層が存在せず鉛直混合が秋季と比べ活発だったことで、クロロフィル *a* 極大層への秋季よりは活発な栄養塩供給が起こったためと考えられた。しかしながら、表 1 に示すように、本研究では 12 月～2 月に沖合域の St30～35 で一度も観測が実施できず、黒潮流路を含む沖合域の冬季におけるクロロフィル *a* 分布の原因を解析するに至らなかった。

春季(2023 年 5 月)は、2023 年 5 月 10 日の関東・東海海況速報(図 5(d))によると、黒潮流路北端が御前崎沖 138° 15' E で 34° 16' N に位置しており、水温の鉛直断面図(図 3(d))の表層水温 22.0℃の海水は黒潮本流と考えられた。また、静岡気象台における降水量(mm/日)は駿河湾内の観測日である 2023 年 5 月 9 日の前々日(2023 年 5 月 7 日)に 80.5mm/日、観測前日(2023 年 5 月 8 日)に 52.5mm/日であった。このとき、駿河湾内においては前述のとおり栄養塩が制限要因となるが、降雨に伴う河川から表層への活発な栄養塩供給のため N^2 極大層近辺の表層でクロロフィル *a* が極大となったと考えられた。一方沖合域においては、 N^2 極大層中または直下の亜表層にクロロフィル *a* 極大層が位置していた。黒潮によ

り表層～50m 深では密度差が小さいが、その直下に N^2 極大層が現れることで表層付近への栄養塩供給が制限され、一次生産が阻害されたと考えられた。黒潮流路が位置する海域では前線が発達することで鉛直方向に二次循環が発生し、二次循環に伴う鉛直輸送による亜表層における栄養塩躍層が確認されている¹²⁾ことから、亜表層でクロロフィル a 量が極大となったのは、栄養塩が N^2 極大層直下である亜表層までは供給され一次生産が行われたためと考えられた。黒潮流路以南における表層から 50m 深のクロロフィル a は黒潮流路上よりもさらに低かった。黒潮流路以南では前線が発達せず、二次循環の発生及び亜表層における栄養塩躍層は確認されていない¹²⁾ことから黒潮流路以南における表層付近への栄養塩供給は黒潮流路上よりもさらに乏しくなり、表層～50m 深におけるクロロフィル a 量が黒潮流路上よりも少なくなったと考えられた。

駿河湾内及び沖合域におけるクロロフィル α 積分量

クロロフィル a 積分量の解析の結果、 I_{50} 、 I_{300} ともにすべての月で駿河湾内の方が沖合域よりも高い傾向にあった。 I_{50} を海域間で比較した結果は、クロロフィル a 積分量の解析結果は、表層～50m 深においては沖合域よりも駿河湾内の一次生産がシラスなどの生物生産を支えている可能性を示唆していた。一方で、 I_{300} を海域間で比較すると、8 か月中 4 か月で四分位範囲の重なりが見られた。さらに、 d_{300} はすべての月で 50m 深までの中央値変化率 d_{50} よりも小さかった。これらのことから、300m 深までのクロロフィル a 鉛直分布を考慮した場合、沖合域でも時期によっては亜表層を中心に駿河湾内に匹敵する一次生産が行われている可能性が示唆され、黒潮流路上においては表層ではなく亜表層での活発な一次生産により、シラスなどの生物生産が活発に行われている可能性が考えられた。Lasker¹³⁾は、表層直下約 16m 深のクロロフィル極大層の存在が、カタクチイワシ稚魚の成長を支えていると報告しており、本考察と一致している。また、静岡県周辺の黒潮は遠州灘、駿河湾、伊豆諸島周辺海域に暖水波及を起こし、沿岸のシラスなどの浮魚類の好漁場形成に寄与していることが示唆されている^{14, 15)}ことから、これらの海域での好漁場形成メカニズムには、黒潮流路の亜表層での一次生産が間接的に寄与している可能性が考えられた。

N^2 は、成層状態を数値で客観的に表現できることから、成層状態がクロロフィル a 分布に与える影響について、海域間の比較や異なる期間での比較を容易にするものと考えられた。また、今後、クロロフィル a 分布に影響を与える水温、光量、栄養塩濃度等とともに N^2 をパラメータとして用いることで、これらのパラメータが静岡県周辺海域におけるクロロフィル a 分布にどの程度影響するのか客観的に解析するのに有用であると考えられた。

本研究では観測期間が約 2 年、観測期間中の各観測点で観測実施できた回数は 4～23 回であったことから、静岡県周辺海域における生物生産メカニズムを議論するためにも、今後も調査を継続し、データを蓄積していく必要がある。

謝 辞

観測調査実施にご協力いただいた沿岸・沖合漁業指導調査船「駿河丸」乗組員の方々、観測調査にご参加いただいた静岡県水産・海洋技術研究所職員に感謝申し上げます。

文 献

- 1) 長谷川雅俊・藤田信一・石戸谷博範(2009): 駿河湾・相模湾への黒潮系暖水流入による急潮の前駆現象. 静岡県水産技術研究所研究報告, **44**, 1~10
- 2) 長谷川雅俊(2021): 2007年7月~2014年3月の駿河湾における黒潮系暖水流入による急潮・暖水波及事例リスト. 静岡県水産・海洋技術研究所研究報告, **54**, 26~31
- 3) 中村保昭(1972): 駿河湾の海況学的研究-I. 秋季における海洋構造の一特性. 静岡県水産試験場研究報告, **5**, 1~20
- 4) 宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 神奈川, 553.
- 5) 津田敦・横内克己・桑田晃・浅沼市男・足立久美子・市川忠史・廣田裕一・葛西広海・石田洋(2004): 衛星データを用いた海洋一次生産見積もりのための日本近海 Sea-truth データの集積. 地球環境, **9**, 145~152
- 6) Chen C. T. A., Liu C. T., Pai S. C. (1995): Variations in oxygen, nutrient and carbonate fluxes of Kuroshio Current. *La mer*, **33**, 161~176
- 7) 川原田裕 (1975): 第I編植物プランクトンの生態. 海洋科学基礎講座6海洋プランクトン(元田茂編), 東海大学出版会, 東京, 33
- 8) 高橋正征・古谷研・石丸隆監訳(1996): 生物海洋学 1, 東海大学出版会, 東京, 67~69
- 9) Guancheng Li, Lijing Cheng, Jiang Zhu, Kelvin E. Trenberth, Michael E. Mann, John P. Abraham (2020): Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nature Climate Change*, **10**, 1116~1123
- 10) 中村保昭 (1977): 駿河湾ならびに隣接海域の海況変動. 水産海洋研究会報, **30**, 8~38
- 11) 高橋正征・古谷研・石丸隆監訳(1996): 生物海洋学 2, 東海大学出版会, 東京, 55~56
- 12) Ito D., Kodama T., Shimizu Y., Setou T., Hidaka K., Ambe D., Sogawa S. (2023): Frontogenesis elevates the maximum chlorophyll *a* concentration at the subsurface near the Kuroshio during well-stratified seasons. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **128**(5), 1~20
- 13) Reuben Lasker (1975): Field criteria for survival of anchovy larvae: the relation between inshore chlorophyll maximum layers and successful first feeding. *Fishery Bulletin*, **73**(3), 453~462
- 14) 長谷川雅俊(2014): 静岡県海域におけるいわし類シラス春漁の漁場形成. 黒潮の資源海洋研究, **15**, 19~27
- 15) 五十嵐正治・沢田易治(1969): 静岡県沖合の黒潮流路と漁況について. 静岡県水産試験場研究報告, **2**, 1~18

Relationship between buoyancy frequency and chlorophyll a distribution in the Suruga Bay and offshore areas

Wataru Aoyama

Abstract Field campaigns were carried out in the Suruga Bay and adjacent offshore areas using research vessel “Surugamaru” to investigate primary production. Chlorophyll a concentration was measured and compared with the vertical distribution of buoyancy frequency (N^2), an index of density stratification. Chlorophyll a peaked at or just below the depth of maximum N^2 layer at the central area of the Suruga Bay from May until October, suggesting that the vertical distribution of chlorophyll a is influenced by limited nutrient supply to the surface. Chlorophyll a concentration from the surface to a depth of 50m was lower off the coast of Shizuoka compared to those within Suruga Bay. However, a high chlorophyll a concentration was observed in the subsurface layer (between 60 and 100m) just below the maximum N^2 layer off the coast of Shizuoka. This result indicates that primary production offshore can be comparable to that within Suruga Bay, depending on time.

Key words: Ocean observation, Kuroshio Current, Chlorophyll *a*, Buoyancy frequency