

## 渥美外海における栄養塩の動態

黒田伸郎・曾根亮太・中野哲規・中村元彦

(2022年9月30日受付, 2023年1月18日受理)

### Dynamics of nutrients in Atsumi Outer Sea

KURODA Nobuo<sup>\*1</sup>, SONE Ryota<sup>\*2</sup>, NAKANO Tetsuki<sup>\*2</sup> and NAKAMURA Motohiko<sup>\*2</sup>

**Abstract:** Nutrient concentrations were determined with depths at A1 in the mouth of Ise Bay and A10 offshore in the Atsumi Outer Sea during 2007-2020. Concentrations of NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P were highest in A10-50m during this period. These nutrients in A10-50m increased in winter every year and in summer for several years. At A10-50m, nutrient concentration tended to be high if water temperature was low, and significant negative correlations were indicated between those factors in many months, so it was considered that nutrients are supplied from deeper layers at A10. Changes in nutrient concentrations in every Layer of A1 except the surface were similar to those at A10-50m, and positive correlations were indicated almost every month, so it was considered that nutrients supplied from deeper layers offshore in the Atsumi Outer Sea could be a source of nutrients in the mouth of Ise Bay. After 2017, due to the Kuroshio's large meander, water temperature at A10-50m tended to be high and nutrients tended to be scarce. So it is necessary to study the correlation between ocean conditions and nutrients supplied from deeper layers in the Atsumi Outer Sea.

**キーワード:**無機栄養塩, 水温, エスチュアリー循環流, 外洋深層水, 伊勢湾

近年, 瀬戸内海をはじめとする内湾では栄養塩やクロロフィル *a* の濃度の減少がみられ, <sup>1)</sup> 伊勢・三河湾においても減少傾向にあることが報告されている。<sup>2)</sup> そして, 栄養塩やクロロフィル *a* の減少がノリやアサリの生産量低下の一因であることが指摘されている。<sup>3, 4)</sup>

内湾の生物生産を支える栄養塩の外部からの供給は,

主に陸域と外洋からの流入によると考えられる。伊勢・三河湾への陸域からの供給については, 河川の水質モニタリングデータと流量から河川負荷量が推定されている。一方, 外洋からは, 夏季にエスチュアリー循環流により伊勢湾内に供給されることが知られているものの,<sup>5)</sup> 湾口部外側の海域で栄養塩の継続した測定がほとんど行わ

<sup>\*1</sup> 愛知県農業水産局水産課 (Fisheries Administration Division, Bureau of Agriculture and Fisheries, Aichi Prefectural Governmental Office, Sannomaru, Nakaku, Nagoya, Aichi 460-8501, Japan), 現住所: 名古屋市中区千代田 2-10-24-201 (current address: 2-10-24-201, Chiyoda, Nakaku, Nagoya, Aichi, 460-0012, Japan)

<sup>\*2</sup> 愛知県水産試験場漁業生産研究所 (Marine Resources Research Center, Aichi Fisheries Research Institute, Toyohama, Minamichita, Aichi 470-3412, Japan)

れていないため、外洋からの供給の季節変動や長期変動の実態は明らかではない。

愛知県水産試験場では、伊勢湾の栄養塩に影響すると考えられる渥美外海（西部遠州灘）の栄養塩環境を把握するため、湾口部とその沖合の陸棚斜面に観測点を設け（Fig. 1）、2007年4月から栄養塩濃度と水温、塩分などの測定を行ってきた。伊勢湾では流入する河川流量が大きく、塩分の低い内湾水は湾口部（伊良湖水道）の外側まで張り出し、内湾水と外洋水が接触するフロントが湾外の陸棚にみられることから、海洋物理的には伊良湖水道より外側の浅海部の端付近を湾口と考えることが妥当と指摘されている。<sup>6)</sup> 設定した2つの観測点は概ね湾口部外側のフロントを挟む海域に位置している。本研究では2007年4月から2020年3月までの13年間の測定データを整理し、濃度の変動、外洋の下層からの栄養塩供給を左右する水温との関係、外洋水の湾口部への影響を調べた。

### 材料及び方法

栄養塩の測定を行った2つの観測点（Fig. 1）のうち、A1は伊勢湾口のすぐ外側に位置し、水深は約35mと浅く、強い潮汐流のため夏季でもある程度鉛直混合が進む。A10は伊勢湾口沖合の陸棚斜面にあり、水深は約125mある。夏季の表層付近を除いて内湾系水の影響は小さい。<sup>7)</sup>

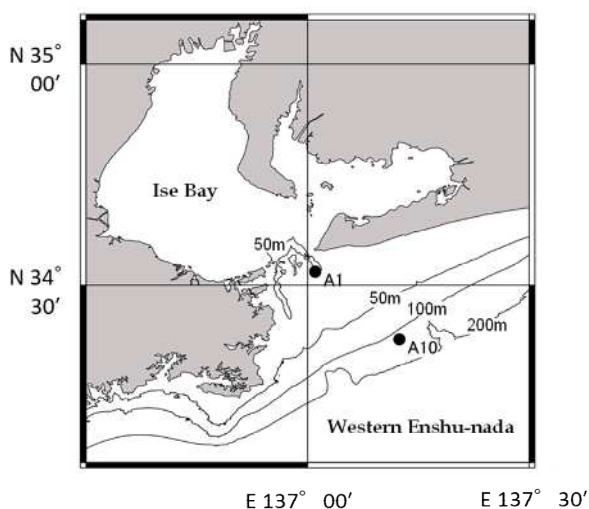


Fig. 1 Sampling stations in the mouth of Ise Bay (A1) and offshore (A10) in the Atsumi Outer Sea.

観測は、2007年4月から2010年3月までは原則として毎月2回、2010年4月から2020年3月までは原則として毎月1回行い、栄養塩測定のための採水とCTD（2007年4月～2016年1月はFIS社製ICTD、2016年2月～2020年3月はJFEアドバンテック社製ASTD152）による水温、塩分の測定を行った。栄養塩の測定層は、A1が0m層、10m層、20m層（2008年5月から）、底層（B層）、A10が0m層、10m層、20m層（2008年5月から）、30m層、50m層とした。採水は2L容量のバンドーン採水器（離合社）を用いて行い、採取した海水は実験室に持ち帰った後、孔径0.8μmのメンブレンフィルターでろ過し、原海水およびろ液をポリプロピレン製容器に入れ、分析まで-20℃で冷凍保存した。冷凍保存した原海水について全窒素（TN）、全リン（TP）、ろ液についてアンモニア態窒素（NH<sub>4</sub>-N）、亜硝酸態+硝酸態窒素（NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N）、リン酸態リン（PO<sub>4</sub>-P）の濃度測定を行った。栄養塩の濃度測定は2007年4月～2014年3月ではBRAN+LUEBBE社製AACSSIII、2014年4月～2020年3月ではBLTEC社製QuAAtro2-HRによって行った。機器の不調、試料の破損により、無機栄養塩は2016年4～10月、TNは2009年8月～2011年3月、2015年3月～2017年3月、TPは2009年8月～2011年3月、2016年4月～2017年3月の期間が欠測である。また、同一観測日で複数の項目や水深にわたり値が極端な大きさであった場合は、異常値と判断して除外した。水温・塩分については測定機器の故障により、2015年5月と7月から10月の期間はデータが取得できなかった。

濃度の分析限界は、2019年2月までの測定では0.1μg/L、2019年3月以降の測定では1μg/Lとみなしたので、分析限界を下回るデータは値を前者の期間では0.05μg/L、後者の期間では0.5μg/Lとし解析に用いた。栄養塩濃度の月平均値や移動平均値を求める際の平均は、値が対数正規分布であると仮定して、算術平均ではなく幾何平均によった。

## 結果

### (1) 栄養塩の変動特性

栄養塩の変動の特徴を概観するため、濃度の3ヶ月移動平均値を求めFig. 2に示した。NH<sub>4</sub>-Nは濃度が低く、測定機器が替わった2014年の前と後で1μg/Lを下回る低い

値の出現頻度が大きく変わっていることから、測定精度の違いが疑われる。そのため、本研究では  $\text{NH}_4\text{-N}$  について経年変動の検討は行わない。また、濃度の分析限界を変更した 2019 年 3 月の前後で低い値の出現頻度に不連続な

変化がそれぞれみられないことから、分析限界の変更の影響はないと判断した。なお、各栄養塩の濃度の月別出現範囲を Appendix 1 に示した。

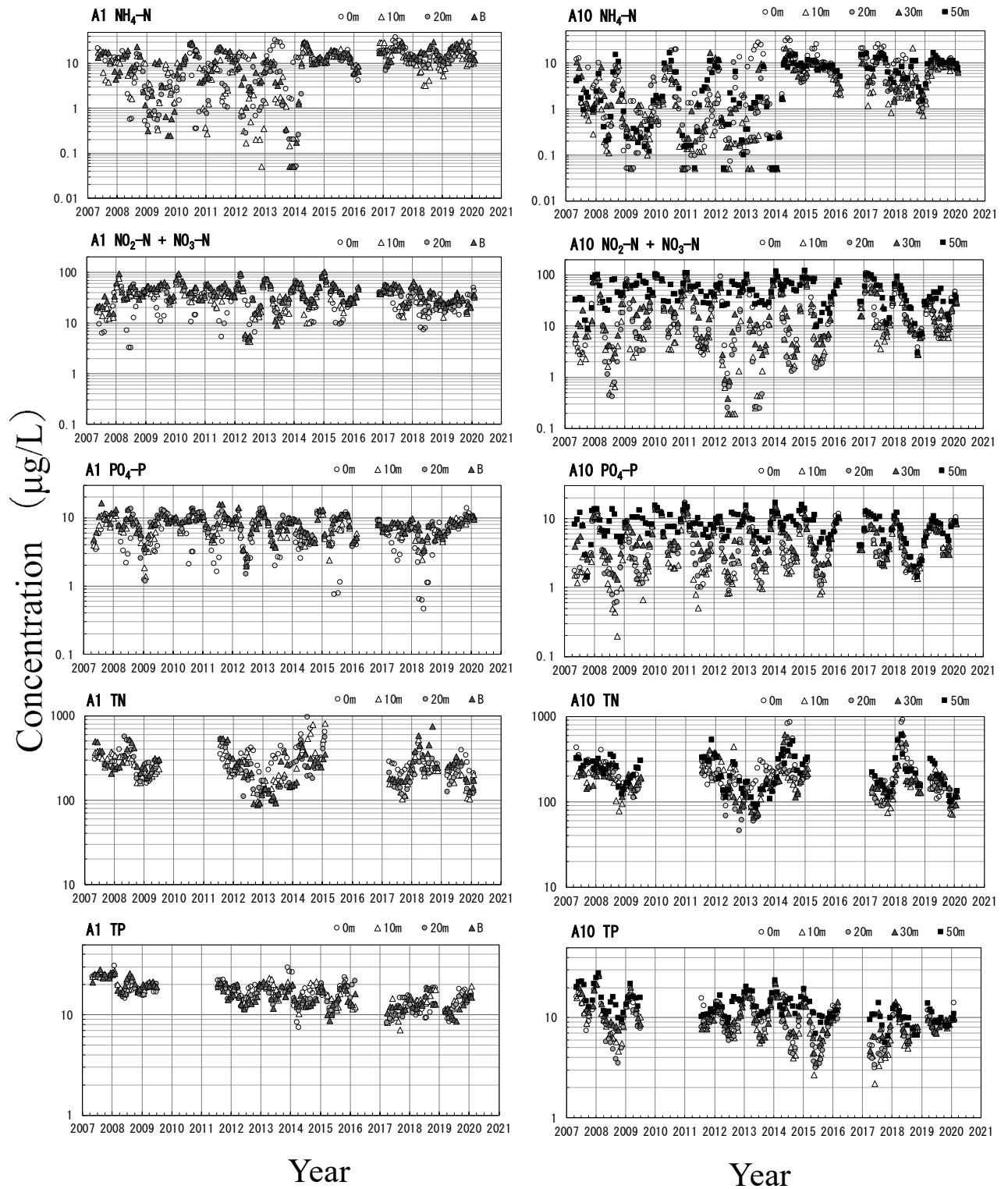


Fig.2 Fluctuations of the three months' running mean of nutrient concentrations.

濃度の水深による差に注目すると、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  および TP は、沖合の A10 では、成層が強まり無機栄養塩の消費が進む夏季に概ね上層ほど低い。一方、年間を通じて鉛直混合がみられる湾口部の A1 では、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  が夏季には表層で他の層の数分の1~1/10程度に低下する年があるものの、総じて表層と底層の差は小さく、TP は差がほとんどみられない。 $\text{NH}_4\text{-N}$  と TN は A1 と A10 ともに水深による大きな差はみられない。

濃度の季節変動に注目すると、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  および TP は、A10 の 0m 層から 30m 層で冬季にピークを持つ明瞭な季節変動があり、50m 層では冬季に加え夏季にもピークがみられることが多い。また、A1 でも冬季に高い傾向がみられ、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  の 10m 層から B 層では A10 の 50m 層と同様に夏季にも高いことが多い。 $\text{NH}_4\text{-N}$  と TN は、A1 と A10 共に春・夏季にやや高い傾向がみられる。

濃度の経年変動に注目すると、A1 と A10 共に  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  では 2018~2019 年等、 $\text{PO}_4\text{-P}$  では 2018 年等、TN では 2012~2013、2017、2019 年等、年によって低い傾向がある。また、TP では長期的に低下する傾向がみられ、年に対して濃度の常用対数値を水深ごとに直線回帰した傾きは A1 が  $-0.017\sim-0.023$ 、A10 が 20m を除くと  $-0.012\sim-0.019$  で、いずれも有意であった ( $p < 0.05$ )。これらの傾きは 10 年間で濃度が  $59\sim 76\%$  ( $10^{-0.023 \times 10} \sim 10^{-0.012 \times 10}$ ) に低下するのに相当する。なお、A10 の  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  では、2017 年以降は以前に比べて水深による差が小さい傾向がある。

## (2) 栄養塩の季節変動

栄養塩の季節変動を詳しく検討するため、各層の濃度の月別平均値を求め、その変動を Fig. 3 に示した。データの詳細は上述のとおり Appendix 1 に示したので参考にされたい。

沖合の A10 では、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  と  $\text{PO}_4\text{-P}$  および TP は 0m 層から 30m 層では 12-3 月の冬季から初春に高く、4~11 月に低い。50m 層では 5~6 月と 10~11 月に低く、冬季に高いピークがあり、夏季にも冬季には及ばないがピークがみられる。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$  と TN は、3~5 月の春季と 7~9 月の夏季から初秋季に水深によって多少高い傾向はあるが、季節変動は明瞭ではない。

湾口部の A1 では、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  および  $\text{PO}_4\text{-P}$  は 0m 層

では冬季に高く夏季に低いが、その他の水深では冬季に加えて A10 の 50m 層と同様に 7~8 月の夏季にも高い。ただし、A10 の 50m 層では 4~6 月もやや高く、10~11 月に低いのに対して、A1 では 5~6 月に低く、10~11 月にやや高い。TP は 3~4 月の春季にやや低く、8~2 月の夏季から冬季にやや高い傾向がみられ、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の 0m 層を除く水深の季節変動と比較的類似している。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$  は 3~8 月、TN は 4~9 月の春・夏季に水深によってはやや高い。

濃度を A1 と A10 で比較すると、A10 の  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  は鉛直混合が進んでいる 12~2 月では全層で、3 月では 0m 層を除いて、成層が進む 4~6 月と 8~9 月では 50m 層で A1 より高い。 $\text{PO}_4\text{-P}$  も 1~3 月では全層で、4~6 月では 50m 層で A1 より高い。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$  と TN および TP は概ね A10 より A1 の方が高い。

次に、算出した月別平均値ごとに TN に占める  $\text{NH}_4\text{-N}$  の割合 ( $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$ ) および  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  の割合 ( $(\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N})/\text{TN}$ )、TP に占める  $\text{PO}_4\text{-P}$  の割合 ( $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$ )、DIP ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) に対する DIN ( $\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ ) の比 ( $\text{DIN}/\text{DIP}$ ) を求め、その変動を Fig. 4 に、割合および比率を Appendix 2 示した。 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TN}$  は A1 と A10 共に 0.06 以下で、TN に占める割合が小さい。 $(\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N})/\text{TN}$  は A1 では 0.02~0.32、A10 では 0.01~0.47 で、無機栄養塩の消費が進む夏季に小さく冬季に大きい。また、A10 の 0~30m 層では夏季 (6~8 月) に 0.01~0.06 と小さいのに対して 50m 層では 0.16~0.19 と比較的大きい。 $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  は A1 では 0.12~0.66、A10 では 0.18~0.80 と共に比較的大きい。 $\text{PO}_4\text{-P}$  と TP の季節変動がある程度似ているのは (Fig. 3)、TP に占める  $\text{PO}_4\text{-P}$  の割合が大きいことを反映している。DIN/DIP は A1 では 3.6~15.4 で、概ね 1~5 月の冬・春季に重量のレッドフィールド比 (7.2<sup>8)</sup>) より高く、6~12 月の夏・秋季に低い。A10 では 2.1~9.8 で、10m 層から 30m 層では 4~8 月にやや低いが、50m 層では 5.9~9.6 と周年レッドフィールド比の近くで安定している。

## (3) $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ と水温の関係

沖合の A10 における下層からの無機栄養塩の供給と海況との関係を調べるため、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  および  $\text{PO}_4\text{-P}$  について、A10 の 50m 層の濃度と水温の 3 ヶ月移動平均値の変

動を Fig. 5 に示した。図では水温は正負を逆にプロットしている。両者とも濃度と水温は季節的、経年的に変動が対応しており、2017 年半ば以降に濃度が低い傾向は水温の上昇をとまっている。

濃度と 50m 層の水温との関係を Fig. 6 に、月ごとの濃

度の常用対数値と水温の相関を Table 1 に示した。濃度は水温が低い月ほど高い傾向がある。また、どの月でも水温が低いほど高い傾向があり、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  では 4 月を除いて、 $\text{PO}_4\text{-P}$  では 8 つの月で有意な負の相関がみられた。なお、濃度と水温の関係は月によりやや異なる。

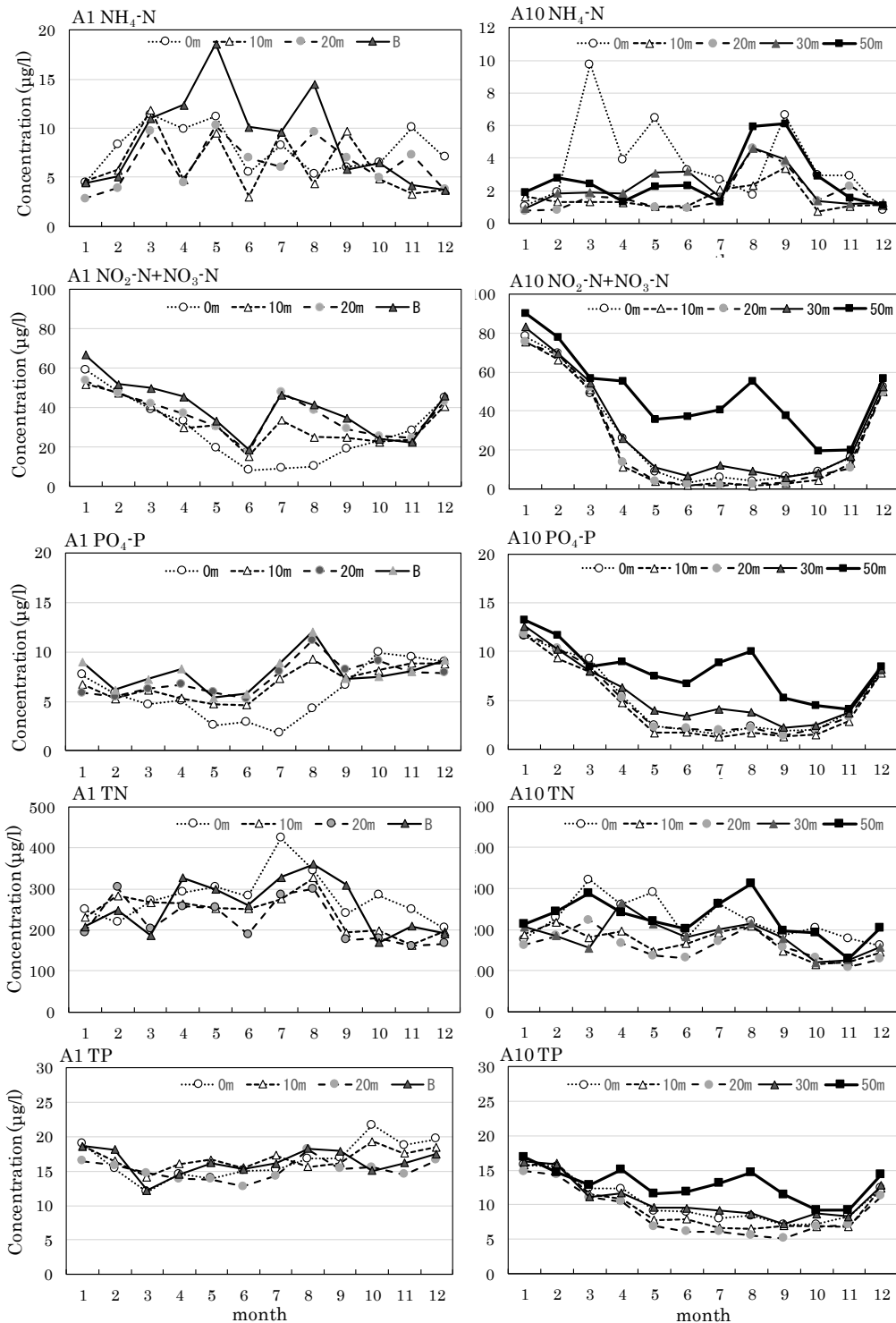


Fig. 3 Monthly mean of nutrient concentrations.

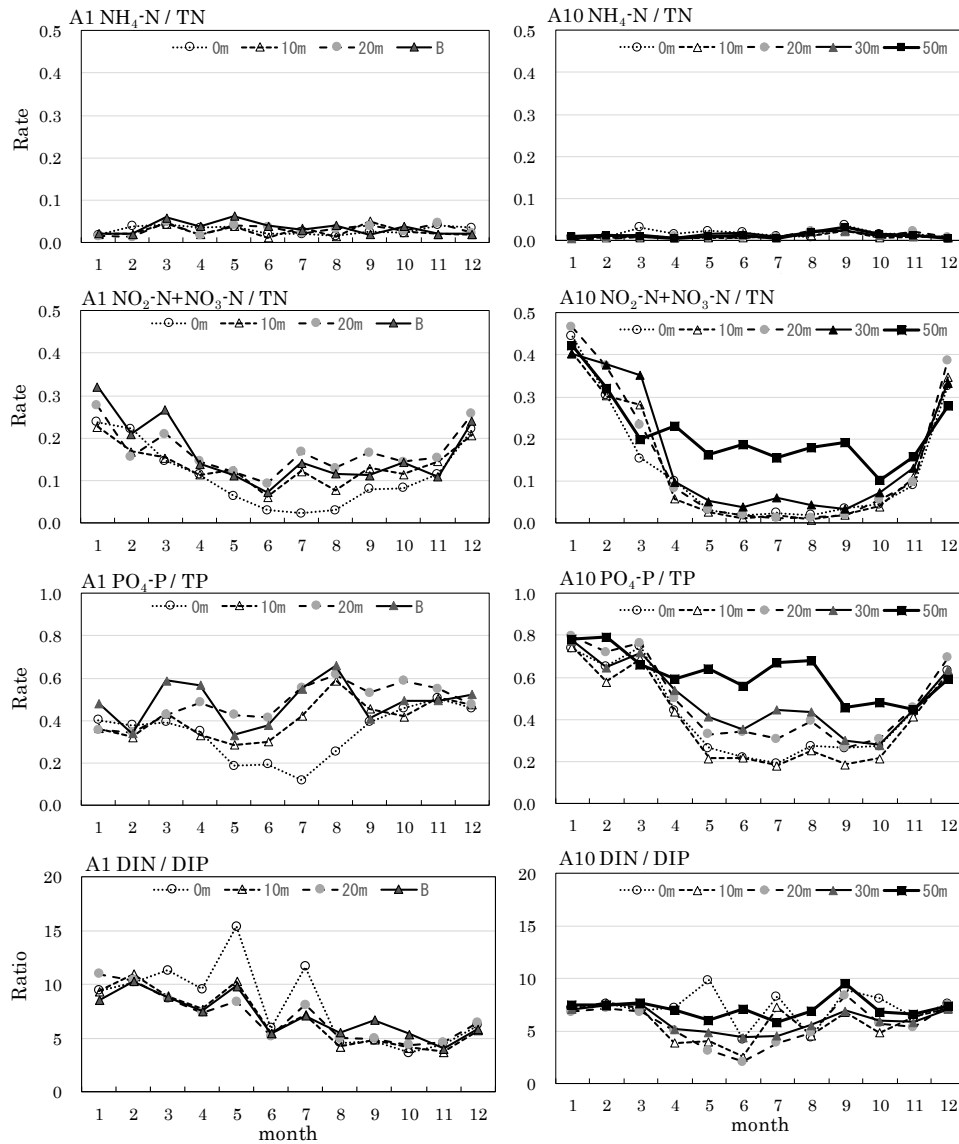


Fig.4 The rate of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$  to TN , of  $\text{PO}_4\text{-P}$  to TP and the DIN/DIP ratio with monthly mean of nutrient concentrations.

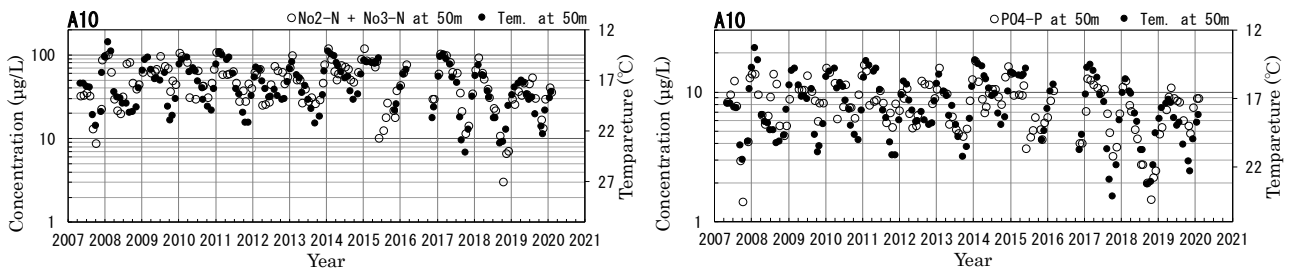


Fig.5 Fluctuations of the three months' running mean of nutrient concentrations and water temperature at depth 50m in A10.

Table 1 Monthly correlation coefficient between nutrient concentrations and water temperature at depth 50m in A10.

Month	NO <sub>2</sub> -N+NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P
JAN.	-0.706 **	-0.730 **
FEB.	-0.818 **	-0.617 *
MAR.	-0.859 **	-0.725 *
APL.	-0.542	-0.416
MAY	-0.748 **	-0.836 **
JUN.	-0.708 **	-0.838 **
JUL.	-0.646 *	-0.455
AUG.	-0.711 **	-0.885 **
SEP.	-0.635 *	-0.416
OCT.	-0.828 **	-0.789 **
NOV.	-0.780 **	-0.426
DEC.	-0.715 **	-0.624 *

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

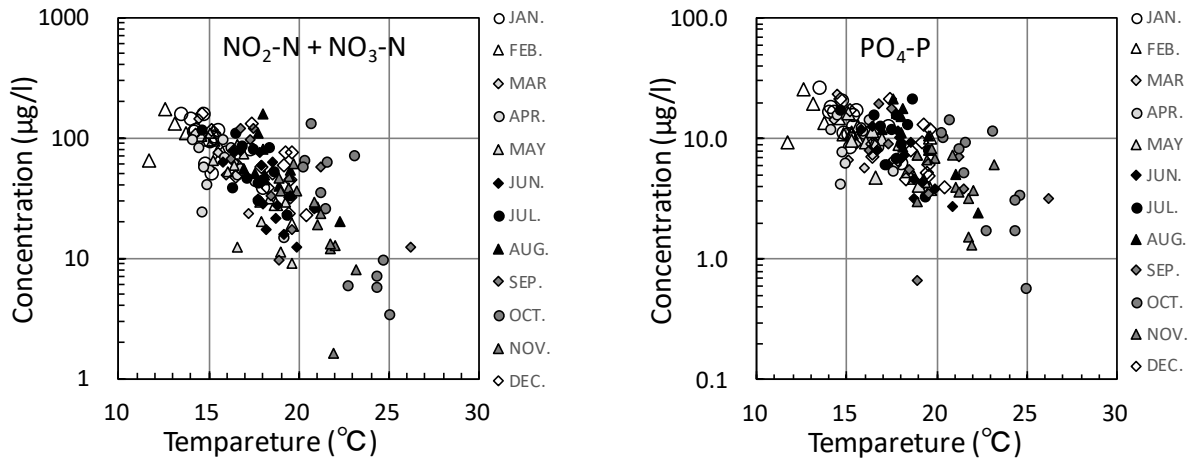


Fig.6 Correlation between nutrient concentrations and water temperature at depth 50m in A10.

Table 2 Monthly correlation coefficient between nutrient concentrations at depth 10m, 20m, bottom in A1 and those at depth 50m in A10.

Month	NO <sub>2</sub> -N+NO <sub>3</sub> -N			PO <sub>4</sub> -P		
	10m	20m	B	10m	20m	B
JAN.	0.597 *	0.657 *	0.713 **	0.494	0.423	0.539 *
FEB.	0.690 *	0.751 *	0.702 *	0.468	0.453	0.574
MAR.	0.315	0.479	0.486	0.234	0.259	0.105
APL.	0.220	0.197	0.119	0.249	0.383	0.115
MAY	-0.132	0.105	0.010	-0.280	-0.336	-0.609 *
JUN.	0.198	0.291	0.340	0.587 *	0.684 *	0.618 *
JUL.	0.353	0.337	0.240	0.178	0.293	0.356
AUG.	0.039	0.218	0.140	0.122	-0.174	-0.190
SEP.	-0.147	-0.166	-0.596	-0.048	0.311	-0.612
OCT.	0.138	0.000	0.108	0.662 *	0.227	0.159
NOV.	0.237	0.763 **	0.205	0.259	0.628 *	0.343
DEC.	0.096	0.547	0.064	0.286	0.272	0.332

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

#### (4) NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N および PO<sub>4</sub>-P における A1 と A10 の変動の類似性

A1 の 10m 層から B 層と A10 の 50m 層とで変動が類似していた NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N および PO<sub>4</sub>-P について、3 ヶ月移動平均値の変動を改めて Fig. 7 に示した。NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N および PO<sub>4</sub>-P とともに A1 と A10 の変動は概ね類似している。夏季（6～8 月）の濃度に注目すると、NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N と PO<sub>4</sub>-P 共に 2014 年の様に A10 で高い割に A1 で低い年もあるが、ほとんどの年で高低が A1 と A10 で同調している。

両者とも季節変動が卓越していることから（Fig. 3）、季節変動を除いて類似性を比較するため、濃度の常用対

数値について A1 の 10m 層から B 層それぞれと A10 の 50m 層との相関を月ごとに調べ、Table 2 に示した。相関係数は NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N では 1～3 月が 0.315～0.751, 6～7 月が 0.198～0.353, 11 月が 0.198～0.353, PO<sub>4</sub>-P では 1～2 月が 0.423～0.574, 6～7 月が 0.178～0.684, 10～12 月が 0.159～0.662 と概ね 0.2 を上回って大きく、いくつかの関係で有意の正の相関が認められた。このように、A1 の 10m 層から B 層の濃度が A10 の 50m 層と同調する関係は季節により異なり、1～2 月を中心とする晩秋から冬季にかけてと 6～7 月の夏季に強い。

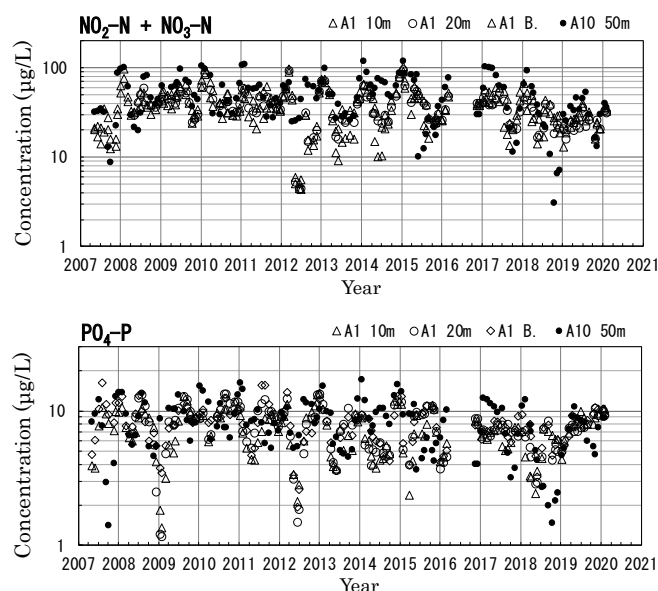


Fig. 7 Fluctuations of the three months' running mean of nutrient concentrations at depth 10m, 20m and bottom in A1, and 50m in A10.

#### 考 察

##### (1) 渥美外海の陸棚斜面における無機栄養塩の供給

世界中の海で、栄養塩濃度は水深が深く水温が低いほど多く、<sup>9)</sup> 当海域周辺でも無機態窒素の大部分を占める NO<sub>3</sub>-N や PO<sub>4</sub>-P は深層ほど多い。<sup>7, 10)</sup> 本研究によると、渥美外海の陸棚斜面に位置する A10 の NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N および PO<sub>4</sub>-P の濃度は、0～30m 層では冬季に高く夏季に低いが、50m 層では春・夏季にも高かった（Fig. 3）。A10 に近い熊野灘北部では、4～10 月にクロロフィル *a* (以下 Chl. *a* とする) の極大層が 50m 以浅に形成される。<sup>11)</sup> A10 の 50m 層では (NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N)/TN が夏季 (6～8 月) でも 0.16～0.19

と 0～30m 層の 0.01～0.06 より大きいことから (Fig. 4), Chl. *a* の極大層より深い 50m 層では無機栄養塩の消費は上層に比べ進んでいないと考えられる。DIN/DIP が深層でみられるレッドフィールド比の近くで周年安定していることも、活発な生物消費や生成が行われていないことを示している。また、NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N および PO<sub>4</sub>-P の濃度は 3 ヶ月移動平均値の変動が水温とよく対応し (Fig. 5), ほとんどの月で水温と負の関係がみられた (Fig. 6, Table 1)。これらのことは、50m 層の水は主として下層から供給されていることを示している。さらに A10 の上層の無機栄養塩濃度は消費の進む夏季には低下するものの秋～冬季に



は50m層の栄養塩濃度とほぼ同じ値を取ることは(Fig. 3), 渥美外海の陸棚斜面における有光層への無機栄養塩の供給は下層からの供給によることを示唆している。

Fig. 6 では季節的に水温が低い月で無機栄養塩濃度が高いことがわかるが, 同じ月でも年により水温が低いほど濃度が高いことがわかる。このように濃度と水温の間には季節的だけではなく, 年によっても負の関係があり, 栄養塩の動態を考える上では水温の変動特性を把握することが重要であると考えられる。

船越ら<sup>7)</sup>は, A10に近い陸棚縁辺周辺では水温の季節変動が100m以浅で大きく, 鉛直混合は1~3月に100m層まで及び, 水温は3~4月に最も低いこと, また, 3~4月とは別に50~400m層で同調した水温低下が夏季に起こることを報告している。この夏季の水温低下は, 冬季の水温(第一)極小に対して水温第二極小と呼ばれ,<sup>12)</sup> 遠州灘から駿河湾沖の東海沿岸で7~9月に頻繁にみられ, 低温状態が1ヶ月から長いもので3ヶ月続くこと,<sup>13)</sup> 渥美外海では陸棚の沖側で顕著であることがわかっている。<sup>7)</sup> 3~4月の水温低下が下層ほど遅れているのに対して, 夏季の水温低下は50m以深で同調した現象であり,<sup>7)</sup> 下層水の上昇を伴う。このように, 調査海域周辺では季節性のある鉛直混合と数ヶ月スケールの下層水の上昇による水温低下がある。

A10の50m層の $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ は12~3月と7~8月をピークとして濃度が高かった。冬季のピークは鉛直混合が100m付近に達する時期に, 夏季のピークは水温第二極小が頻繁に起こる季節に対応している。これらのことは, 有光層への無機栄養塩の供給が鉛直混合と下層水の上昇によること, 濃度に見られる供給の季節性が鉛直混合と下層水上昇の季節性によることを示唆している。鉛直混合による供給は冬季に大きく, 下層水上昇による供給は夏季に大きいと考えられる。以下, これらのことを考慮して栄養塩の変動について考察する。

## (2) 栄養塩の季節変動

本研究によると, A10の $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は, 0~30m層では冬季に高く夏季に低いが, 50m層では春・夏季にも高く,  $\text{PO}_4\text{-P}$ の割合が大きいTPも季節変動は同様であった。また,  $\text{NH}_4\text{-N}$ とTNは春季と夏季から初秋季に水深によってはやや高い傾向があった。有光層

での無機栄養塩の消費に関わる基礎生産については, 西村<sup>11)</sup>がA10に近い熊野灘北部の5定点でChl. *a*濃度を0m層から120m層まで1985年から1993年の8年間に渡り測定し, 0mから100mまでの濃度の積算値は春季(3~5月)と夏季(7~9月)に高く, これは100m層にみられる3月と8月の水温極小にほぼ対応することを明らかにしている。これらの知見と本研究の結果を合わせて考えると, A10のある伊勢湾口沖合の陸棚斜面の有光層における栄養塩類の季節変化は以下のように解釈される。

水温が低く鉛直混合が進む12~2月は, 無機栄養塩の下層からの供給は多いが, 生物活性が低い消費が進まず $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は高い。3~5月は水温の上昇に伴い生物活性が高まり, 冬季に供給された豊富な無機栄養塩を基にして基礎生産は高くなる。同時に成層が徐々に強まりChl. *a*の極大層がある30m以浅では消費が進んで $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が徐々に低下し, 6月には基礎生産もやや低くなる。しかし, 7~8月は50m層の $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度の上昇が示すように, 下層からの供給が増加して7~9月には基礎生産も高まる。10~11月は鉛直混合する水深が50m程度と浅いため,<sup>7)</sup> 無機栄養塩は下層からの供給が少なく, 濃度が高い50m層の水も上層の濃度の低い水で希釈され, 全層で $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は低い。

一方,  $\text{NH}_4\text{-N}$ とTNの濃度は, 有光層の植物プランクトンの現存量を反映すると考えられる0mから100mまでのChl. *a*濃度の積算値が高い春・夏季に,<sup>11)</sup> 多少高い場合があった。 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}/\text{TN}$ は年間0.5未満で, 冬季を除くと概ね0.3を下回り(Fig. 4), TNは植物プランクトン等の懸濁物の割合が高いこと,  $\text{NH}_4\text{-N}$ は動物プランクトン等の生物により生成されることが知られていることを考え合わせると,  $\text{NH}_4\text{-N}$ やTNの季節変動は植物プランクトンの現存量の季節変動に対応していると考えられる。

## (3) 外海水の湾口部への影響

A10の $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ は12~2月では全層で, 3月では0m層を除いて, 4~6月と8~9月では50m層で濃度がA1より高く,  $\text{PO}_4\text{-P}$ も1~3月では全層で, 4~6月では50m層で濃度がA1より高かった。このように, 沖合の無機栄養塩は, 冬季では概ね全層, 春・夏季では50m層で月平均濃度が湾口部より高く, 外洋水は湾内への栄養塩の供給

源に成りうる。

A1 の 10m 層から B 層の  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  および  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度の変動は、A10 の 50m 層と類似し (Fig. 7), 特に、年によってみられる夏季の濃度の上昇も両観測点で同調していた。伊勢湾の表層では、DIN は 8~9 月に低く、DIP は 2~8 月に低い。<sup>14)</sup> 河川流量の大きい伊勢湾は冬季でも弱く成層しており、<sup>15)</sup> エスチャリー循環流により伊勢湾の上層の影響が湾口部にある A1 に及ぶと考えられ、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  および  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度は A1 の 0m 層では伊勢湾と同様に夏季に低いが、10m から B 層では A10 の 50m 層と同様に 7~8 月に高い。さらに、月によっては A1 の 10m 層から B 層それぞれと A10 の 50m 層の濃度で正の相関が認められた (Table 2)。これらのことは、沖合 50m 層における無機栄養塩の変動が湾口部にまで及ぶことを示している。また、A1 の 10m 層から B 層それぞれと A10 の 50m 層の濃度の相関から (Table 1), 外洋水の湾口部への影響は季節により異なり、相関係数の大きい 1~2 月の冬季を中心とする 10~4 月と 6~7 月に強いことが示唆される。

1~2 月の冬季を中心とする 10~4 月は、塩分が 33 未満の低塩分水の張り出しは弱く、塩分が 34 以上の高塩分水が湾口部に迫っている。<sup>7)</sup> そのため、外洋水の湾口部への影響が強くなり、A1 と A10 の間に形成されるフロントにおける海水交換では、潮汐による往復流が大きな役割を担うと考えられる。

一方、夏季については、陸棚斜面の栄養塩の豊富な冷水の湾内への流入が、大阪湾の友が島水道や伊勢湾の伊良湖水道のそれぞれ外側に形成されるエスチャリー循環流により生じることが知られており、<sup>5, 16)</sup> 「底入り潮」と呼ばれている。<sup>17)</sup> 外洋の湾口部への影響が強い 6~7 月は、河川流量が最も多い時期<sup>6)</sup> に対応しており、エスチャリー循環流の強化で湾口部への影響も強まっていると考えられる。なお、2014 年の様に無機栄養塩の濃度が A10 で高い割に A1 で低い年もあり、外洋水の湾口部への影響は年によっても異なっている。

#### (4) 今後の課題

本研究では、伊勢湾口沖合の陸棚斜面における栄養塩の季節変動を明らかにし、無機栄養塩の濃度は、鉛直混合している冬季には 0m 層から 50m 層で、成層している夏季には 50m 層でも高く、50m 層の濃度は季節的、経年的に

水温と負の関係があることから、無機栄養塩が鉛直混合と下層水の上昇により下層から供給されること、それらの供給は季節性が強いことが示唆された。また、湾口部と沖合 50m 層の無機栄養塩の変動が同調していることから、外洋水の影響が湾口部にまで及んでいることが示された。今後、外洋水の影響が湾内の栄養塩環境にどのように影響しているか、栄養塩の供給量などの定量的な検討が必要である。

無機栄養塩の下層からの供給を反映すると考えられる沖合 50m 層の無機栄養塩の濃度は、年により異なり、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  および  $\text{PO}_4\text{-P}$  の濃度が 2017 年半ば以降に低い傾向は、水温の上昇をともなっていた (Fig. 5)。2017 年 8 月から黒潮は大蛇行離岸流路をとっており (気象庁「海洋の健康診断」: <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/knowledge/kuroshio.html>, 2022 年 9 月 12 日), 2017 年半ば以降の水温上昇は黒潮の大蛇行による。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の占める割合が比較的高い TP は長期的に低下する傾向がみられた (Fig. 2)。Fig. 6 で示されるように、月ごとに水温と濃度のデータは大きく変動しており、水温の年変動にともなう濃度の変動は大きい。このように、無機栄養塩の変動には、水温第二極小と呼ばれる数ヶ月スケールだけでなく、長い時間スケールの海況変動も影響していると考えられる。今後、陸棚斜面における無機態栄養塩の濃度の経年変動について、渥美外海や黒潮内側域の水温に影響する黒潮の流路型や流量に着目して検討していく必要がある。<sup>18-20)</sup>

無機栄養塩の陸棚斜面から湾口部への供給過程については、外洋水の湾口部への影響が季節により異なることから、海洋構造が異なる季節ごとの検討が必要である。また、影響が年によっても異なることから、海況の年ごとの違いも検討する必要がある。海上保安庁発行の海図によると湾口部の A1 のすぐ外側には水深約 25m の浅瀬があり、外洋の 50m 層の水が A1 に達するには下層水が陸棚斜面を這い上がる必要がある。海水交換に関わる潮汐による往復流やエスチャリー循環流に加え、等密度面の傾きを左右する流動構造の影響も重要と考えられる。

#### 要約

2007 年から 2020 年まで、渥美外海の伊勢湾口部に位

置する A1 と沖合部の A10 において、深さ別に栄養塩濃度を測定した。NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N と PO<sub>4</sub>-P は、A10-50m 層が期間を通じて最も高く、特に毎年の冬季と年によっては夏季に高い傾向があった。A10-50m 層のこれらの栄養塩濃度は水温が低いほど高い傾向がみられ、両者には多くの月で有意の負の相関がみられたことから、A10 ではより下層から栄養塩が供給されていることが示唆される。A10-50m 層と A1 の表層を除く各層の栄養塩濃度の変動は類似しており、ほとんどの月で正の相関がみられたことから、渥美外海の沖合深層から供給される栄養塩が湾口部にも供給され得ることが示唆された。2017 年以降 A10-50m 層の水温が高い傾向あり、それに伴って栄養塩が少ない傾向がみられる。これは黒潮大蛇行の影響と考えられる。今後はこうした海況と渥美外海深層から供給される栄養塩の関係をさらに詳細に検討していく必要がある。

## 謝 辞

本研究の試料採取に尽力された歴代の海幸丸乗組員および海洋資源グループ研究員に深く感謝します。また、多くの分析業務を抱える中で、労をいとわず分析にご協力いただいた歴代の漁場保全グループ研究員に心よりお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 藤原建紀 (2014) 内湾の貧栄養化. 沿岸海洋研究, 52(1), 11-27.
- 2) 蒲原聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野禎也 (2018) 三河湾における栄養塩の低下. 愛知水試研報, 23, 30-32.
- 2) 反田實・樋口和宏 (2017) 栄養塩類の管理方策と豊かな漁業生産. 海洋と生物, 39, 579-585.
- 4) 藤原建紀・樋口和宏・藤井智康 (2020) 海産生物の生育に必要な水質(窒素・リン濃度の下限値)の定量化調査. 水環境学会誌, 43(6), 175-182.
- 5) 藤原建紀・福井真吾・笠井亮秀・坂本亘・杉山陽一 (1997a) 伊勢湾の栄養塩輸送と亜表層クロロフィル極大. 海と空, 73(2), 33-39.
- 6) 宇野木早苗 (1978) 伊勢湾・三河湾の物理環境. 沿岸海洋研究, 15, 143-154.
- 7) 船越茂雄・柳橋茂昭・岩瀬重元 (1979) 渥美湾ならびに渥美外海の平均的海況. 水産海洋研究会報, 34, 115-127.
- 8) Redfield, A. C. (1958): The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.*, 46, 205-222.
- 9) Sverdrup H. U., M. W. Jonson, R. H. Fleming (1942) *The Ocean*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1087 pp.
- 10) 西村昭史 (1984) 水質からみた熊野灘の海洋構造. 三重浜島水試年報, 昭和 57 年度, 67-76.
- 11) 西村昭史 (1996) 熊野灘におけるクロロフィルの鉛直分布. 三重水技研報, 6, 7-25.
- 12) 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.
- 13) 宇野木早苗・海野裕 (1983) 東海・関東沿岸海域における暖候期の低温化現象. 水産海洋研究会報, 44, 17-28.
- 14) 山田智 (2012) 4-2 伊勢・三河湾におけるアサリ増殖によるノリ色落ち対策技術の開発 4-2-1 伊勢・三河湾におけるノリ色落ち原因プランクトンの発生と栄養塩濃度のモニタリング. ノリ色落ち対策に寄与する二枚貝増養殖技術ガイドライン, 独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所, 125-129.
- 15) 関根義彦 (1996) 伊勢湾. 沿岸海洋研究, 34(1), 45-51.
- 16) 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本亘 (1997b) 紀伊水道の流れと栄養塩輸送. 海と空, 73(2), 63-72.
- 17) 武岡英隆 (2001) 栄養塩供給機構調査. 宇和海漁場環境調査報告, 宇和海漁場環境調査検討会編, 53-88.
- 18) 中村元彦・鶴寄直史 (2007) 西部遠州灘の海況と黒潮流路との関係. 水産海洋研究, 71(3), 199-208.
- 19) 川辺正樹 (2003) 黒潮の流路と流量の変動に関する研究. 海の研究, 12(3), 247-267.
- 20) 中村元彦・鈴木達也・渡慶次力・清水学・秋山秀樹 (2009) 西部遠州灘沿岸における魚種交替と黒潮内側域の海況変動. 水産海洋研究, 73(4), 317-319.

