

紀伊水道東部海域における栄養塩濃度の月変化および年変化

陶山公彦・安江尚孝

和歌山県水産試験場

Monthly and Yearly Changes in Nutrient Concentrations in the Kii Channel

Kimihiko Suyama and Naotaka Yasue

Wakayama Prefectural Fisheries Experiment Station

緒 言

瀬戸内海において、1973年の瀬戸内海環境保全臨時措置法（後に特別措置法）の施行以降、海水中の栄養塩濃度は低下傾向である（阿保ら、2018）。瀬戸内海で栄養塩濃度の低下が進むことによって、ノリの色落ちが頻発するようになり、因果関係は科学的に立証されていないものの、瀬戸内海周辺の府県の漁獲量が減少した（反田ら、2014）。このように、栄養塩濃度の高低は漁獲量と関係している可能性があり、栄養塩濃度の長期変化を明らかにすることは、漁業資源の変動を説明する上で必要な情報の一つであると考えられる。

和歌山県の漁業生産量は海面漁業生産統計調査によると、1970年代は約6~7万tであり、1986年に約8万tの最高値を示したが、1990年代は約5~7万t、2010年代は約2~3万tとなっており（独立行政法人統計センター）、漁業生産量は長期的には減少傾向である。紀伊水道東部海域において、栄養塩濃度は和歌山県水産試験場が海洋観測調査の中で長期間にわたって測定してきた。紀伊水道への栄養塩の流出入については、高志ら（2002）が外洋からの流出入と海洋構造との関係を季節別に報告した。また、諏訪（2005）は1994年から2003年の栄養塩濃度データを用いて、季節変化とその要因について報告した。さらに、諏訪（2006）は1976年から2000年の栄養塩濃度データを黒潮離岸期と接岸期に分類し、両期の違いについて報告した。しかしながら、紀伊水道東部海域において、近年を含む栄養塩濃度の月変化やより長期にわたる栄養塩濃度の年変化は報告されていない。

本研究では、紀伊水道東部海域における栄養塩濃度の月変化と長期的な年変化を明らかにした。また、紀伊水道の海洋環境は黒潮の流路変動と関係が強く（柳、1996；竹内、2005）、黒潮の流路変動は紀伊水道への栄養塩の供給に影響を与えることから（笠井ら、2001；高志ら、2002）、黒潮の流路変動と紀伊水道東部海域における栄養塩濃度との長期的な関係を調べた。

材料および方法

1. 栄養塩濃度の測定

栄養塩濃度のデータは、和歌山県水産試験場が 1972 年 2 月から 2019 年 11 月までの間に、原則として年 4 回 (2, 5, 8, 11 月)、紀伊水道東部海域で行った 15 定点の海洋観測調査から得た (図 1)。この調査では、日中に漁業調査船を用いて、定点ごとに 2 層、表層ではバケツ採水、底層では CTD 観測装置または採水器を用いて海底直上の水深でそれぞれおおよそ 1 L の採水を行った。採集した海水サンプルは帰港後、原則として翌日までにろ過を行った後、冷凍庫に保管した。後日解凍し、ガス分画連続流れ方式の分析装置を用いた比色法によって測定した。栄養塩濃度 ($\mu\text{g/L}$) の測定は硝酸塩 (以下, NO_3)、亜硝酸塩 (以下, NO_2)、アンモニア (以下, NH_4^+)、りん酸塩 (以下, PO_4) について行い、このうち NO_3 と NO_2 と NH_4^+ を合計し溶存無機態窒素 (以下, DIN) を算出した。

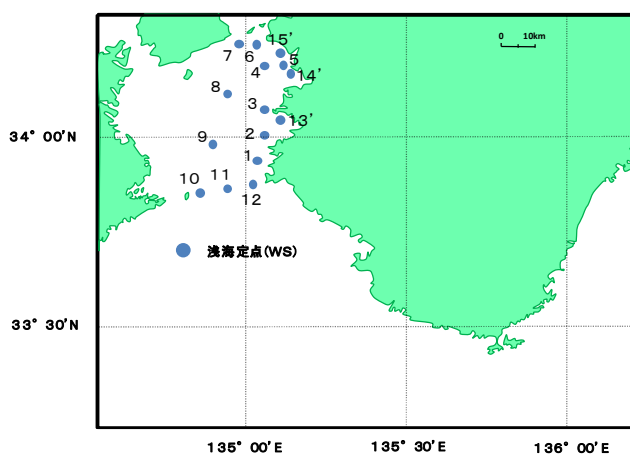


図 1 紀伊水道における海洋観測調査の定点図

2. 使用したデータとデータの解析

各月の栄養塩濃度は、全定点のうちの 10 定点以上の定点で測定結果が得られた場合を採用し、そのデータの平均値とした。採用したデータ数は、表層 DIN が 164、底層 DIN が 164、表層 PO_4 が 160、底層 PO_4 が 161 であった。

栄養塩の年変化を調べる場合においては、季節の違いが栄養塩濃度に及ぼす影響を軽減するため、5 項 (1 年) 移動平均値 (データの欠測した月を含めた、当該月と前後二月ずつのデータの平均値) を用いた。5 項移動平均後のデータ数は、表層 DIN、底層 DIN、表層 PO_4 、底層 PO_4 のいずれも 188 (1972 年 8 月～2019 年 5 月) であった。なお、栄養塩の年変化を月別に調べる場合においては、移動平均を行わなかった。

黒潮流路の変動が栄養塩濃度に及ぼす影響を調べるため、串本と浦神の潮位差 (串本の潮位から浦神の潮位を引いた値。以下、潮位差) (藤田, 2001) と栄養塩濃度との関係を調べた。潮位差は黒潮の流路を知るうえで有効であり、潮位差が大きいときは、潮岬から黒潮北縁までの距離が近い傾向がある (竹内, 2005)。潮位差データは、気象庁 (2021) が公表しているもののうち、栄養塩濃度の測定を行った月のデータを用いた。潮位データの欠測月を除いたデータ月数は 182 (1972 年 2 月～2019 年 11 月) であった。

栄養塩濃度の月変化においては、DIN と PO_4 それぞれで、月間に差があるかどうかを検討するため、クラスカル・ウォリス検定を行った。また、月別の表層 DIN と底層 DIN との関係、表層 PO_4 と底層 PO_4 との関係を検討するため、ピアソンの相関分析を行った。栄養塩濃度の年変化においては、DIN と PO_4 それぞれの濃度の増減を検討するため、回帰分析を行った。また、月別の年変化に

ついて検討するため、DIN と PO_4 それぞれについて回帰分析を行った。さらに、潮位差と DIN 濃度との関係、潮位差と PO_4 濃度との関係を検討するため、回帰分析を行った。

結 果

1. 栄養塩濃度の月変化

図 2 に表層 DIN、底層 DIN、表層 PO_4 及び底層 PO_4 の濃度の月変化を示す。表層 DIN 濃度（平均 ± 標準偏差）は $2.57 \pm 2.20 \mu\text{g/L}$ （8月）～ $6.89 \pm 2.97 \mu\text{g/L}$ （2月）、底層 DIN 濃度は $4.16 \pm 2.43 \mu\text{g/L}$ （11月）～ $6.47 \pm 2.74 \mu\text{g/L}$ （2月）の範囲で変化した。DIN 濃度は表層（クラスカル・ウォリス検定、 $\chi^2 = 56.3$, $df = 3$, $p < 0.001$ ）および底層（クラスカル・ウォリス検定、 $\chi^2 = 20.4$, $df = 3$, $p < 0.001$ ）のどちらとも月によって異なっていた。表層では 2 月に最も高く、5 月から 8 月にかけて低下し、11 月に上昇した。底層でも 2 月に最も高かった。

表層 PO_4 濃度は $0.17 \pm 0.15 \mu\text{g/L}$ （8月）～ $0.40 \pm 0.23 \mu\text{g/L}$ （2月）、底層 PO_4 濃度は $0.39 \pm 0.19 \mu\text{g/L}$ （11月）～ $0.43 \pm 0.23 \mu\text{g/L}$ （2月）の範囲で変化した。表層の PO_4 濃度は月によって異なっており（クラスカル・ウォリス検定、 $\chi^2 = 43.1$, $df = 3$, $p < 0.001$ ）、2 月に最も高く、5 月から 8 月にかけて低下し、11 月に上昇した。一方、底層では有意な月変化は見られなかった（クラスカル・ウォリス検定、 $\chi^2 = 1.3$, $df = 3$, $p = 0.73$ ）。

図 3 に月別の表層 DIN と底層 DIN との濃度の関係、および表層 PO_4 と底層 PO_4 との濃度の関係を示す。表層 DIN と底層 DIN との関係においては、2 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.898$, $n = 38$, $p < 0.001$ ）、5 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.440$, $n = 43$, $p < 0.01$ ）、8 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.476$, $n = 43$, $p < 0.01$ ）、11 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.896$, $n = 40$, $p < 0.001$ ）のいずれも有意な正の相関があった。また、表層 PO_4 と底層 PO_4 との関係においては、2 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.941$, $n = 36$, $p < 0.001$ ）、5 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.799$, $n = 43$, $p < 0.001$ ）、8 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.732$, $n = 43$, $p < 0.001$ ）、11 月（ピアソンの相関分析、 $r = 0.794$, $n = 38$, $p < 0.001$ ）のいずれも有意な正の相関があった。すなわち、表層の栄養塩濃度が高いときは底層も高かった。

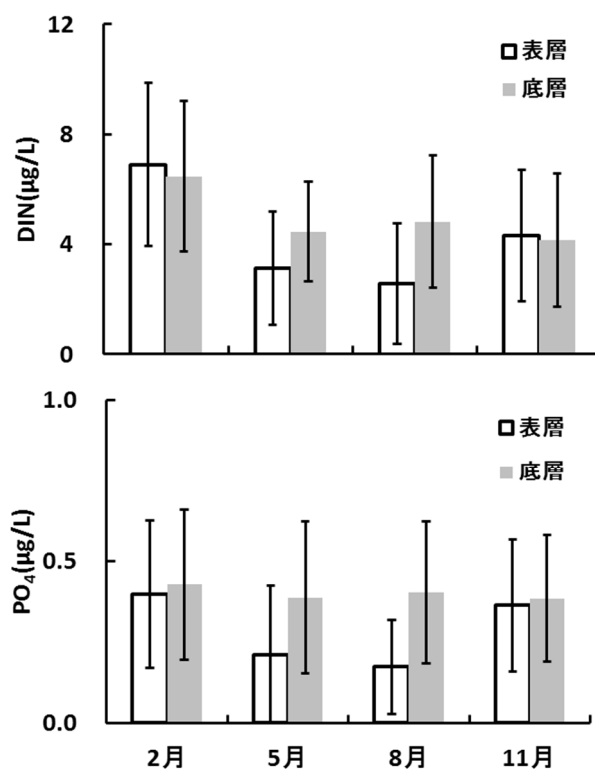


図 2 DIN 濃度および PO_4 濃度の月変化
※棒グラフは平均値、バーは標準偏差を示す

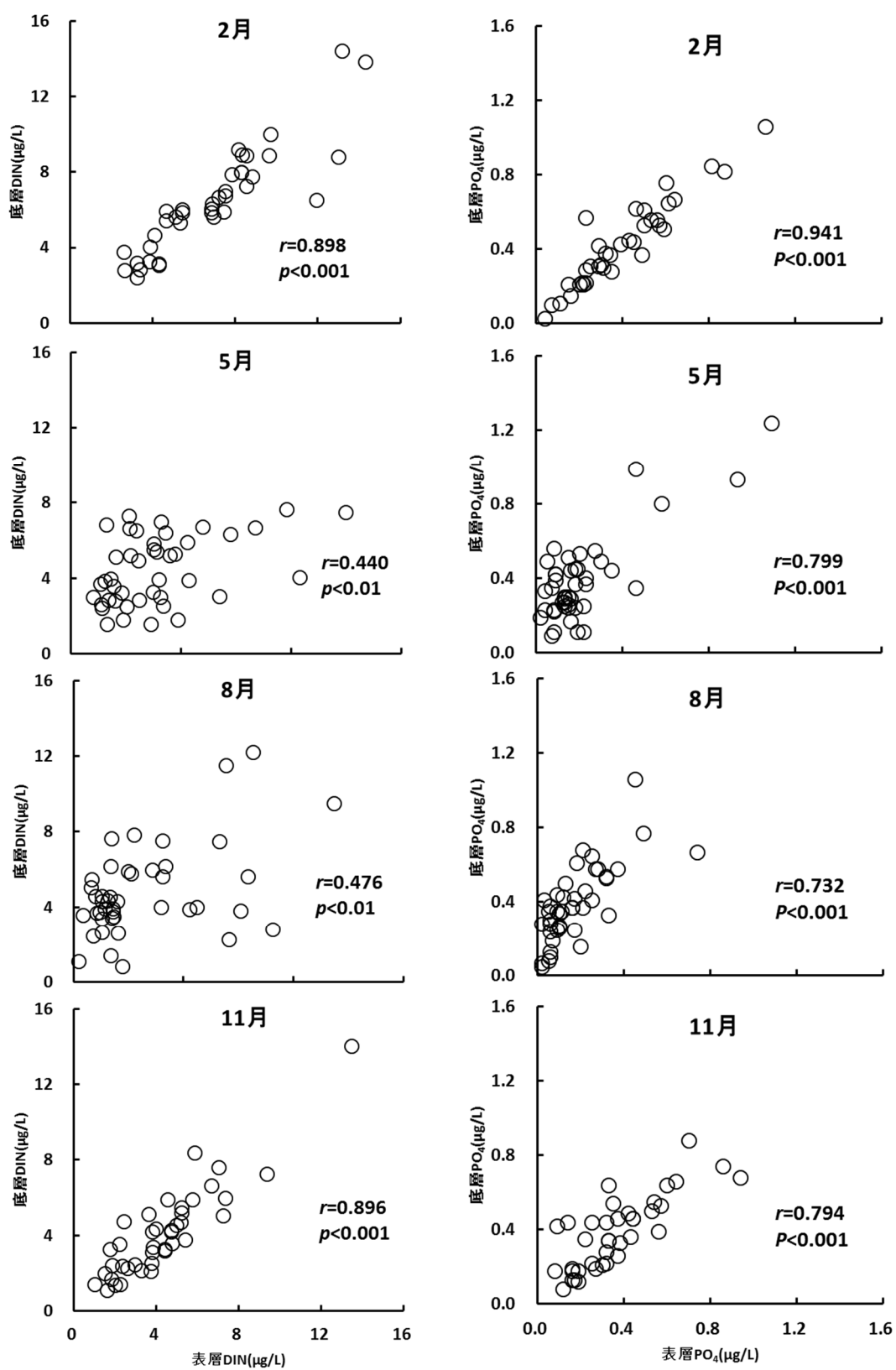


図3 月別の表層DIN濃度と底層DIN濃度との関係および表層PO₄濃度と底層PO₄濃度との関係

2. 栄養塩濃度の年変化

図4に栄養塩濃度の年変化を示す。年変動は大きいものの、表層DIN濃度は長期的には低下しており（回帰分析, $y = -0.00680x + 4.7960$, $r = -0.235$, $n = 188$, $p < 0.01$ ）、回帰式から計算すると、1972年8月～2019年5月で $1.28 \mu\text{g/L}$ (26.7%)低下した。また、底層DIN濃度も長期的には低下しており（回帰分析, $y = -0.00627x + 5.5656$, $r = -0.235$, $n = 188$, $p < 0.01$ ）、回帰式から計算すると、 $1.18 \mu\text{g/L}$ (21.2%)低下した。

年変動は大きいものの、表層 PO_4 濃度も長期的には低下しており（回帰分析, $y = -0.00102x + 0.3682$, $r = -0.406$, $n = 188$, $p < 0.001$ ）、回帰式から計算すると、1972年8月～2019年5月で $0.19 \mu\text{g/L}$ (52.1%)低下した。また、底層 PO_4 濃度も長期的には低下しており（回帰分析, $y = -0.00153x + 0.5466$, $r = -0.577$, $n = 188$, $p < 0.001$ ）、回帰式から計算すると、 $0.29 \mu\text{g/L}$ (52.6%)低下した。DIN濃度と比較すると、 PO_4 濃度は顕著に低下していた。

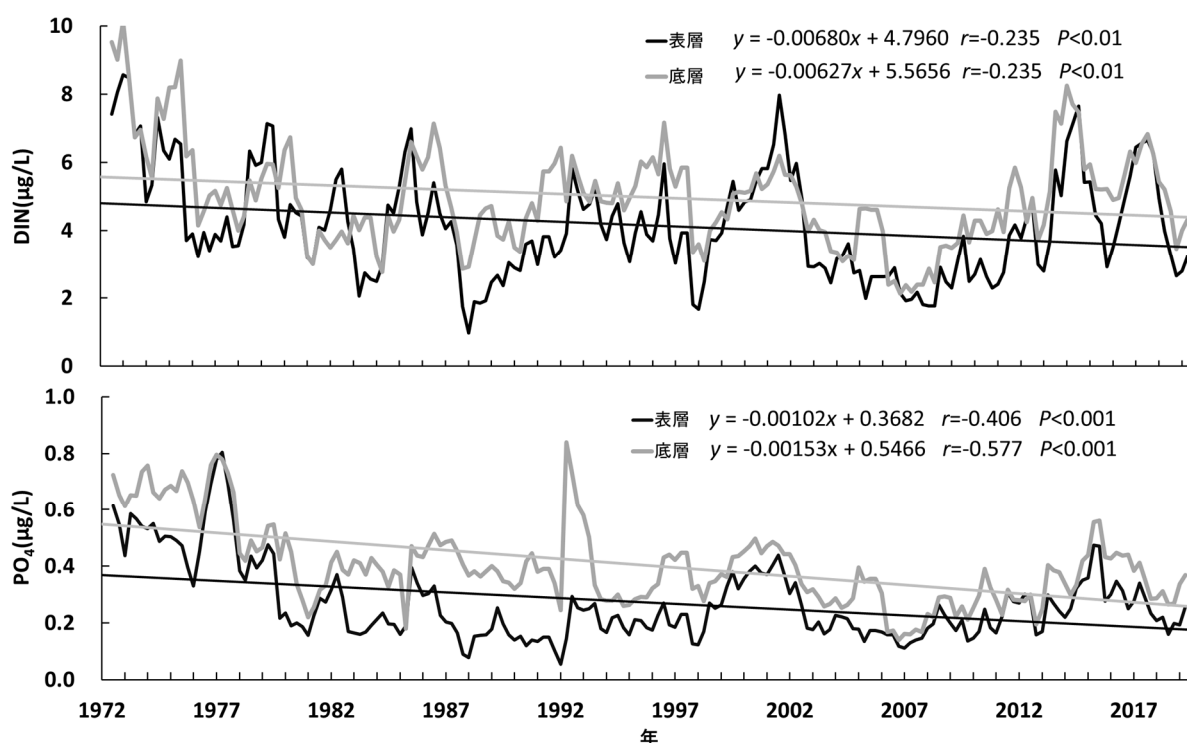


図4 DIN濃度および PO_4 濃度の年変化

3. 月別の栄養塩濃度の年変化

図5にDIN濃度の月別の年変化を示す。2月では、表層（回帰分析, $n = 38$, $p = 0.131$ ）および底層（回帰分析, $n = 38$, $p = 0.236$ ）とも有意な年変化は見られなかった。5月では、表層で長期的な低下傾向が見られたが（回帰分析, $y = -0.0451x + 4.1911$, $r = -0.306$, $n = 43$, $p < 0.05$ ）、底層では有意な年変化は見られなかった（回帰分析, $n = 43$, $p = 0.196$ ）。8月では、表層（回帰分析, $n = 43$, $p = 0.926$ ）および底層（回帰分析, $n = 43$, $p = 0.462$ ）とも有意な年変化は見られなかった。11月では、表層（回帰分析, $n = 40$, $p = 0.142$ ）および底層（回帰分析, $n = 40$, $p = 0.381$ ）とも有意な年変化は見られなかった。総じて、いずれの月においても、表層および底層

のどちらも年変動が大きく、明瞭な長期的変化は見られなかった。

図6にPO₄濃度の月別の年変化を示す。2月では、表層（回帰分析, $n = 36, p = 0.242$ ）および底層（回帰分析, $n = 36, p = 0.156$ ）とも有意な年変化は見られなかった。一方、5月では、表層（回帰分析, $y = -0.00698x + 0.3754, r = -0.456, n = 43, p < 0.001$ ）および底層（回帰分析, $y = -0.00975x + 0.6180, r = -0.577, n = 43, p < 0.001$ ）とも長期的に低下していた。8月では、表層（回帰分析, $y = -0.00504x + 0.2976, r = -0.488, n = 43, p < 0.001$ ）および底層（回帰分析, $y = -0.00491x + 0.5272, r = -0.320, n = 44, p < 0.05$ ）とも長期的に低下していた。11月では、表層（回帰分析, $y = -0.00497x + 0.4900, r = -0.351, n = 38, p < 0.001$ ）および底層（回帰分析, $y = -0.00466x + 0.5039, r = -0.345, n = 38, p < 0.05$ ）とも長期的に低下していた。DIN濃度と比較すると、PO₄濃度は顕著に低下していた。

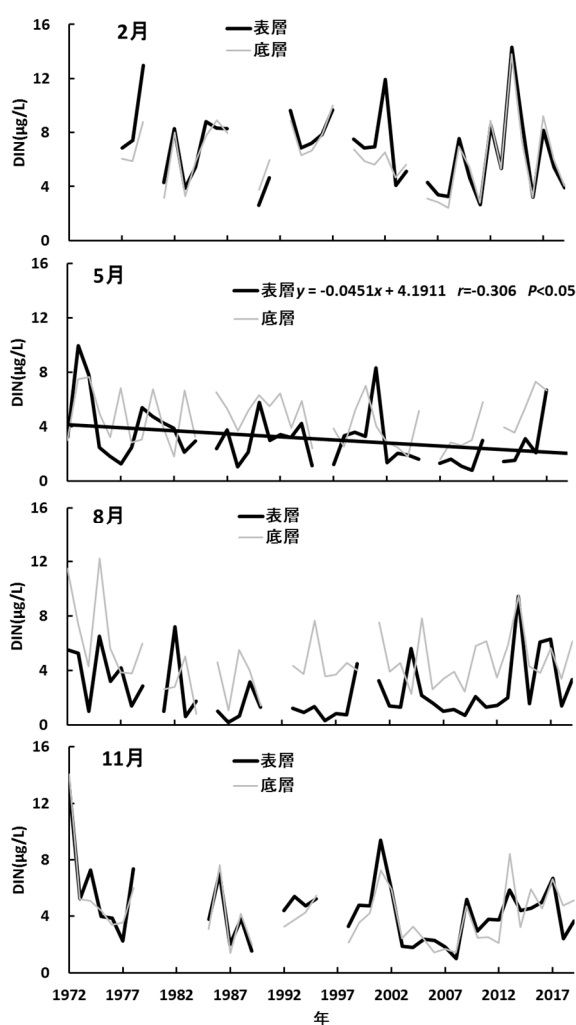


図5 月別のDIN濃度の年変化

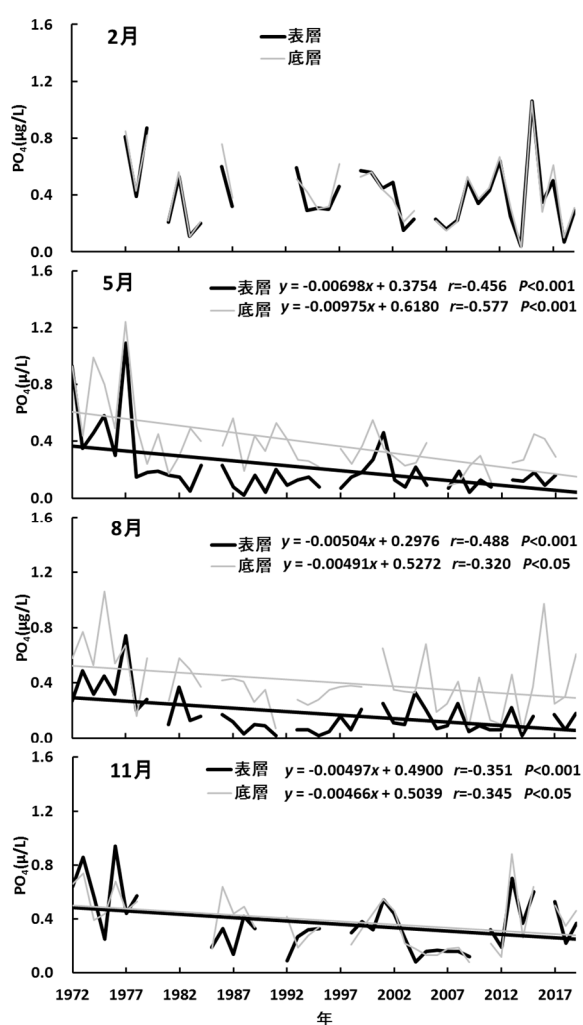


図6 月別のPO₄濃度の年変化

4. 串本と浦神の潮位差と栄養塩濃度との関係

図7に潮位差とDIN濃度との関係、潮位差とPO₄濃度との関係を示す。表層DIN濃度では潮位差と有意な負の関係があったが(回帰分析, $y = -0.0838x + 5.0562$, $r^2 = 0.052$, $n = 155$, $p < 0.01$), 底層DIN濃度では有意な関係が見られなかった(回帰分析, $n = 155$, $p = 0.70$)。表層PO₄濃度では潮位差と有意な負の関係があったが(回帰分析, $y = -0.00803x + 0.3681$, $r^2 = 0.083$, $n = 151$, $p < 0.001$), 底層PO₄濃度では有意な関係が見られなかった(回帰分析, $n = 152$, $p = 0.09$)。潮位差が大きいほど表層の栄養塩濃度は低かった。

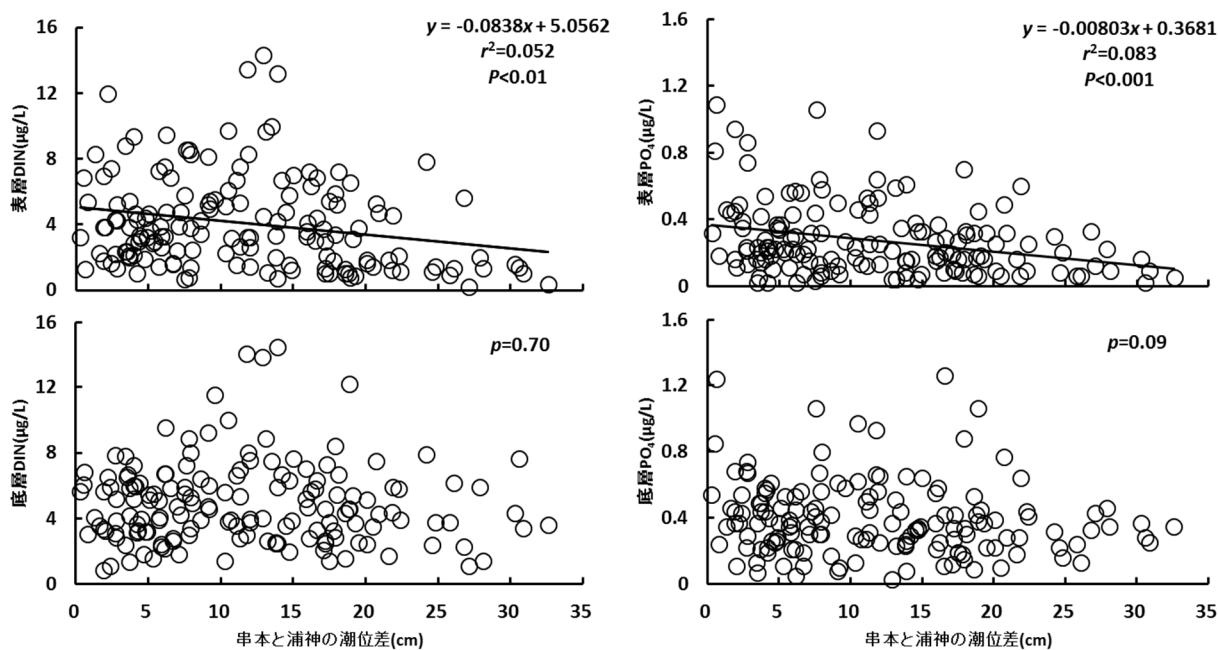


図7 潮位差とDINおよびPO₄濃度の関係

考 察

本研究では、各月の栄養塩濃度は、紀伊水道東部海域の海洋観測全15定点のうちの10定点以上で測定結果が得られた場合を採用し、それらの定点の平均値とした。すなわち、本研究の結果は、紀伊水道東部海域の栄養塩濃度の平均的な特徴を明らかにしたものである。

栄養塩濃度の月変化では、表層の月変化は底層と比較すると明瞭であった。DIN濃度、PO₄濃度ともに、表層は春季(5月)から夏季(8月)に低く、秋季(11月)から冬季(2月)に高くなった。秋季から冬季にかけての上昇は、鉛直混合によって底層の栄養塩が表層に供給されたためと考えられ、底層と表層の栄養塩濃度が類似した値になることと矛盾しなかった(諏訪, 2005)。春季における表層の栄養塩濃度の低下は、春季ブルームによる植物プランクトンの増加によって表層の栄養塩が消費された可能性がある。表層DIN濃度と底層DIN濃度との関係、および表層PO₄濃度と底層PO₄濃度との関係はいずれも高い正の相関を示し、表層の栄養塩濃度が高いときは底層も高かった。特に、2月のDIN濃度が $r = 0.898$, 11月のDIN濃度が $r = 0.896$, 2月のPO₄濃度が $r = 0.941$ と相対的に高い相関を示しており、秋季から冬季の鉛直混合を反映したものと考えられる。

栄養塩濃度の年変化については、紀伊水道東部海域において、年変動は大きいものの、1972年8

月～2019年5月でDIN濃度は表層で26.7%、底層で21.2%低下しており、 PO_4 濃度は表層で52.1%、底層で52.6%低下していた。栄養塩濃度の低下については、瀬戸内海環境保全臨時措置法などの環境施策に伴う陸域からの負荷量削減が大きな要因であるが、底泥や外海からの供給量の低下や近年の全天日射量の増加も栄養塩濃度の低下に影響を及ぼしていると考えられている（阿保ら、2018）。瀬戸内海において、DINは瀬戸内海周辺のいずれの府県においても低下傾向であるが、 PO_4 では一貫した傾向は見られていない（反田ら、2014）。紀伊水道東部海域では、 PO_4 濃度は低下しており、その度合いはDINと比較して顕著であった。

月別に栄養塩濃度の年変化を調べると、DIN濃度では、5月に表層で低下が見られたのを除き、有意な低下は見られなかった。これは、年変動が大きいことや1970年代から80年代までにデータの欠測が多かったことによると考えられる。しかしながら、有意ではないもののいずれの月と層においても低下傾向にあり、すべての月をプールして長期変化を調べたときに、各月の低下が積み重なって有意な低下となったと考えられる。一方、月別の PO_4 濃度では、2月では有意な傾きが見られなかったが、他の月の表層と底層においては有意な低下が見られた。有意な低下傾向になった理由としては、DIN濃度と同様に、年変動が大きく1970年代から80年代にデータの欠測が多かったが、より低下傾向が顕著であったことによると考えられる。栄養塩濃度の高い傾向にある1970年代から80年代の特に2月のデータの欠測が多いことから単純な比較は難しいが、総じて、 PO_4 濃度は月にかかわらず低下していた。

串本と浦神の潮位差と栄養塩濃度との関係では、表層DIN、表層 PO_4 のいずれも潮位差が大きいほど栄養塩濃度は低くなったことから、黒潮の接岸時には、表層の栄養塩濃度は低くなると考えられる。小林ら(2004)は、黒潮の離岸時には、紀伊水道では外海起源の窒素・リンが流入して高栄養になり、接岸時には貧栄養となることを報告した。また、諏訪(2005)は、表層DINは冬季から夏季に、表層 PO_4 は周年にわたって接岸時より離岸時で高くなる傾向があることを報告した。しかしながら、本研究で得られた潮位差と栄養塩濃度との関係の決定係数(r^2)は表層DINが0.052、表層 PO_4 が0.083と低く、また底層では有意な関係が見られないことから、栄養塩濃度が黒潮の流路変動以外の影響も受けていると考えられる。潮汐(山田ら、1977)による紀伊水道外との恒常的な海水交換などが影響している可能性がある。

本研究では、一次生産にとって必要である栄養塩の濃度が長期的に低下していることを明らかにした。陶山・安江(2021)は、透明度の変化が水質の変化を総合的に表したものと仮定し、紀伊水道東部海域の海水が長期的により透明になったこと報告した。栄養塩濃度の低下、透明度の上昇、漁獲量の減少は紀伊水道東部海域における生物生産力の低下を示している可能性がある。多田ら(2014)は、栄養塩濃度が低下していく過程で、植物プランクトンの生物量が減少するのかどうかについては明らかではなく、栄養塩濃度の減少に対しては、生物量としての減少よりも、種組成の変化という応答を示す可能性が高いと報告した。和歌山県水産試験場の海洋観測調査においては、植物プランクトンの種組成のデータは得られておらず、種組成の年変化を調べることは不可能である。植物プランクトンの生物量の年変化を明らかにすることが今後の課題である。

摘 要

本研究では、紀伊水道東部海域における栄養塩濃度(DINと PO_4)の月変化と長期的な年変化を明らかにするとともに、串本と浦神の潮位差(黒潮の流路変動)と栄養塩濃度との関係を調べた。

1. 栄養塩濃度は、DIN 濃度、PO₄濃度ともに、表層は5月から8月に低く、11月から2月に高くなったのに対し、底層は変化が小さかった。
2. 1972年8月～2019年5月で、DIN 濃度は表層で26.7%、底層で21.2%低下した。また、PO₄は表層で52.1%、底層で52.6%低下した。
3. 表層 DIN、底層 DIN、表層 PO₄、底層 PO₄のいずれも潮位差が大きい（黒潮が潮岬に接岸する）ほど濃度が低くなる傾向があった。

引用文献

- 阿保勝之・秋山 諭・原田和弘・中地良樹・林 浩志・村田憲一・和西昭仁・石川陽子・益井敏光・西川 智・山田京平・野田 誠・徳光俊二. 2018. 瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因. 沿岸海洋研究. 55 : 101-111.
- 独立行政法人統計センター. 政府統計の総合窓口 e-start 海面漁業生産統計調査 長期累年. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalistsearch/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500216&tstat=000001015174&cycle=0&tclass1=000001034726> (2021年11月19日閲覧)
- 藤田弘一. 2001. 日本南岸の黒潮流路の変動と串本・浦神の潮位差との関連に関する研究. 三重県科学技術振興センター水産研究部研究報告. 10 : 1-50.
- 笠井亮秀・藤原建紀・多田光男. 2001. 紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送. 海岸工学論文集 48 : 436-440.
- 気象庁. 2021. 海洋の健康診断表 黒潮の数か月から十年規模の変動 (流路). https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/b_2/kuroshio_stream/kuroshio_stream.html (2021年11月22日閲覧)
- 小林志保・高志利宣・藤原建紀. 2004. 瀬戸内海における栄養塩輸送の長期変動とその低次生態系への影響. 海と空. 80 : 61-67.
- 諏訪 剛. 2005. 紀伊水道東部海域における栄養塩の季節変化. 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告. 6 : 169-184.
- 諏訪 剛. 2006. 黒潮離岸期と接岸期における紀伊水道東部海域の表層海洋環境. 黒潮の資源海洋研究. 7 : 67-72.
- 陶山公彦・安江尚孝. 2021. 和歌山県沿岸海域における透明度の月変化および年変化. 和歌山県農林水産試験研究機関研究報告. 9 : 131-136
- 多田邦尚・西川哲也・樽谷賢治・山本圭吾・一見和彦・山口一岩・本城凡夫. 2014. 瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響. 沿岸海洋研究. 52 : 39-47.
- 高志利宣・藤原建紀・住友寿明・竹内淳一. 2002. 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. 海岸工学論文集. 49 : 1076-1080.
- 竹内淳一. 2005. 紀伊半島周辺の海洋構造と変動および漁業への影響. 和歌山県農林水産総合技術センター特別研究報告. 8 : 1-123.
- 反田 實・赤繁 悟・有山啓之・山野井英夫・木村 博・團 昭紀・坂本 久・佐伯康明・石田祐幸・壽 久文・山田卓郎. 2014. 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業. 水産技術. 7 : 37-46.
- 山田 久・坂本久雄・久岡 実. 1977. 紀伊水道域における海況の短期変動に関する研究. 南西海

区水産研究所研究報告. 10 : 33-52.

柳 哲雄. 1996. 大阪湾・紀伊水道の海況変動に対する外洋の影響. 沿岸海洋研究. 34 : 53-57.