

周防灘大分県沿岸域の水質変動

岩男 昂*

Fluctuation in the Water Quality of the Coastal Zone along Suo-Nada in Oita Prefecture

Takashi Iwao

周防灘は瀬戸内海西部に位置し、山口・福岡・大分県に囲まれている。山口・大分県の周防灘東部の海岸線は岩礁帯で干潟はほとんど存在しない。他の海岸線は全般的に穏やかな勾配の海岸地形で、岩礁帯は少なく、広大な干潟となっている。

面積は3,100km²で、水深は浅く、平均水深は23.7mである。東部はやや深く、より深い伊予灘へとつながり、豊予海峡を経由して太平洋へと通じている。西部は浅く、狭く浅い関門海峡を経て日本海とつながっている。

環境的には、瀬戸内海水との交換率が高い豊予海峡(豊後水道)¹⁾に接している伊予灘の影響を受けやすいが、地形的には半閉鎖的な海域である。

潮流は上げ潮時は西流、下げ潮時は東流となるが、流速は緩やかである²⁾。残差流としては伊予灘から流入し、灘北部を西流し、その後反時計回りの流れとなり、国東半島沖を東流し、別府湾に至る環流がある。また、反時計回りになった流れの一部は時計回りの流れとなり、福岡県・大分県の沿岸域を北流する流れもあると言われているが、流速は微弱である³⁾。

風向は冬期には北から西の風が、夏期には東から南東の風が卓越している。

また、海底地質は海岸部の干潟域では砂質であるが、その他は砂泥質から泥質である。

周防灘の水質環境調査は浅海定線調査として1972年頃から各県で組織的に調査され、結果は国等へ報告されている。また、これらの資料は山口・福岡県と共同で解析され、灘全体の平均的な水質環境としても報告されてもいる⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

このように、周防灘全体の一般的な環境特性は示されているが、ここでは、浅海定線調査結果にもとづき、水温、塩分、栄養類などから、周防灘における大分県沿岸域のみの水質変動を検討した。

材料と方法

図1に示した周防灘大分県沿岸域(以下大分県海域)の16定点で、毎月上旬に1回、主に0・5・10・B・1mの各層から採水し、水温、塩分、溶存酸素、溶存無機三態窒素(DIN)、PO₄-Pなどを測定しているが、今回は水温、塩分、DIN、PO₄-P、クロロフィル-aを用いて検討した。

分析は主としてNH₄-Nはインドフェノール法、NO₂-NはN-(1-ナフチル)-エチレンジアミン法、NO₃-Nは硫酸ヒドラジン法、PO₄-Pはモリブデン青法、クロロフィル-aは吸光光度法に基づいて行った。

用いた資料は1973~1996年の間の24年間とし、これらの資料を月毎に、定点別、水深別に単純平均値を求めた。また、南北に3本の水平および鉛直断面を設け、図面上にプロットし、作図した。この線は福岡県境に近い西側より東に向けて、A・B・C線とした。

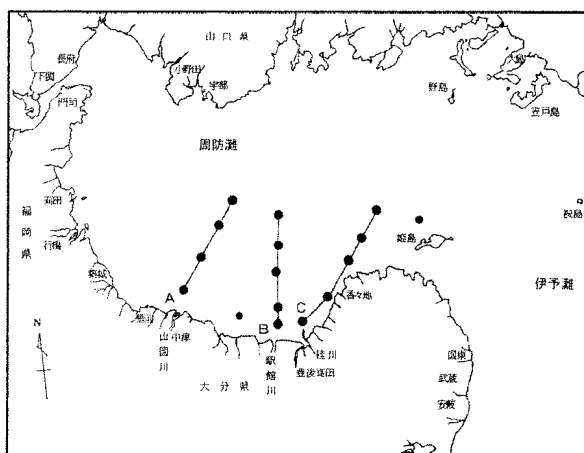


図1 浅海定線調査定点

* 浅海研究所

鉛直分布図は各水深ごとにプロットして作図したが、水平分布は0・B - 1m(クロロフィル - aは10m)の2層とした。等値線の間隔は水深間、水平間の変動の大小に応じて適時変化させて描いた。

なお、栄養塩などの経年変動は1～12月の観測結果の単純平均値を用いた。

結果および考察

水 温

月毎の水温変動で、特徴のある2・4・8・9月の等値線図を図2に示した。1・2・12月など冬季は鉛直混合が卓越しており、表層、底層間で大きな差は見られない。最低水温は2月に記録され、表層・底層も沿岸部で6台、沖合部で8台まで低下する。沖合は気温の影響を沿岸より受けにくいとされているため、冬季は沖合部の方が沿岸部より高水温となっている。その後、気温の上昇に伴い次第に昇温し、4月になると気温の影響を受けやすい沿岸部の方が沖合部より高い値を示すようになり、徐々に表層と底層の温度差が明確になってくる。5月以降その傾向はさらに強まり、表層水温は上昇を続け、これにともない次第に成層が発達し、8月に最高となり、表層水温は沿岸部で28台まで、沖合部で27台まで上昇する。この時の表層と底層の水温差は沿岸部で3、沖合部で6となる。9月に入ると気温の低下に伴い表層水温も低下し、次第に成層は消滅する。成層の消滅に伴って循環期にはいるため、表層の影響が下層までおよび、底層水温は年間で最高となり、沿岸部で26台、沖合で23台まで昇温する。10月になると表層では沖合の方が沿岸部より水温が高くなる。11月になると鉛直混合が進み、底層も沖合の方が沿岸部より水温は高くなり、表層、底層間の差はなくなる。

当海域の水温は豊後水道を経て伊予灘に流入してくる黒潮分枝流や気温の影響を受けて変動すると考えられているが、半閉鎖的水域で、かつ、水深の浅い内海域のため貯熱量も小さく、夏季はより高温に、冬季はより低温になるといわれている⁷⁾。これらのことから、当海域の水温変動は黒潮分枝流より気温の影響をより強く受けているものと考えられる。

また、武岡⁸⁾は表層と底層の密度差から成層の強さを算出し、さらに成層の種類を水温差型と塩分差型に分類し、周防灘は水温差型としている。したがって、当水域で形成される成層は塩分よりも水温の影響を強く受けているといえる。

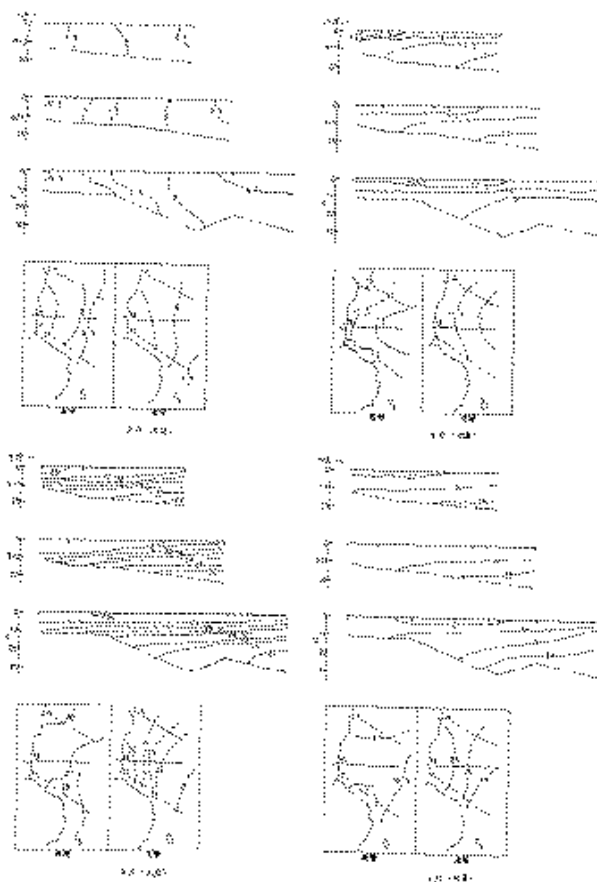


図2 水温水平・鉛直分布()

塩 分

月毎の変動で、特徴のある2・7・10・12月の等値線図を図3に示した。冬季は鉛直混合が卓越しているため、表層、底層間の差はあまりみられず、表層32台、底層32～33台で推移している。降水量が少ない2月は、淡水の影響が小さく、伊予灘水塊の影響を強く受けるため、表層では灘の中央部まで、底層では灘奥の福岡県との県境に近い沿岸部まで33台の水塊の流入が観察される。その後は降水量の増大に伴い、陸水など淡水の影響が徐々に強まるにしたがって、表層、底層間の差が大きくなり、塩分成層が顕著となる。梅雨時の降雨の影響の大きい7月は表層塩分の低下がみられ、表層では沿岸部で27台、沖合部で30台まで低下し、塩分成層はもっとも強く発達する。また、7月には29～30の低塩分水域が、国東半島沿いに沖合までおよび、淡水の流入量の多い時期は、かなり沖合まで淡水の影響がおよぶものと思われる。

成層が形成されている時期の底層は、降雨の影響は及びにくく変化は小さいが、梅雨期の山国川河口域は流入量が多いため30台まで低下する。河口域以外はそのほど低下せず、ごく沿岸域で3台まで低下するが、

他の水域は 32~ 33 台を維持している。成層の弱まる 10月になると上下層の混合が生じるため、中央部付近まで 3 台の値が観測される。その後、成層の衰退がみられ、表層、底層間の差は小さくなり、成層は消滅する。これは伊予灘水塊の影響が再び強まるためと推測される。

塩分の変動は淡水の流入や外海水の浸入に左右されると考えられているが、当水域は半閉鎖的水域であるため、外海水の影響より、降雨などに伴う淡水の流入の影響を強く受けるものと考えられる。また、流入した淡水は前述の表層等値線図から推察すると、大部分は国東半島に沿って伊予灘水域に流出するものと推測される。

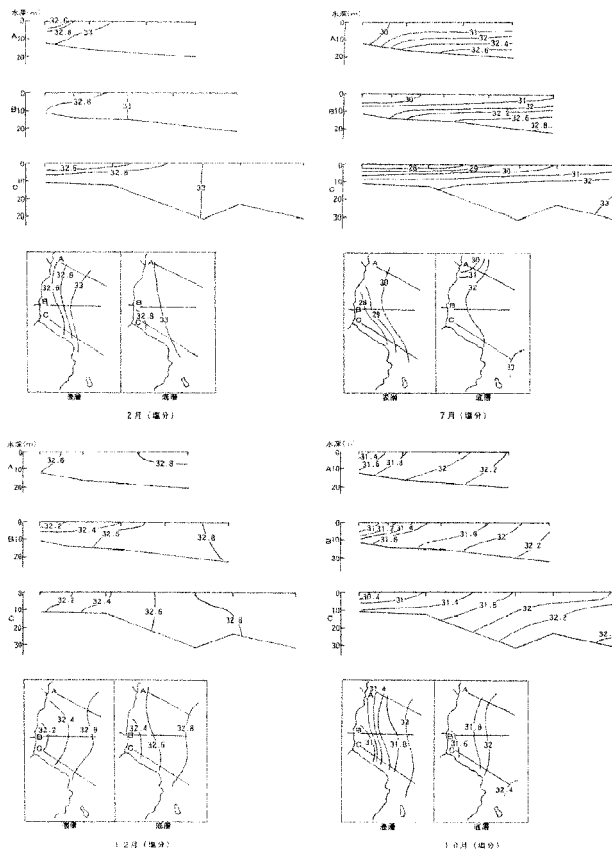


図3 塩分水平・鉛直分布

栄養塩類

1) 無機三態窒素(DIN)

特徴のみられる 1・7・9・10月の等値線図を図4に示した。冬季を代表的する1月は、鉛直混合が完了しているため、表層、底層間の差はない。沿岸部より沖合部の方が高い値を示すが、水域全域をとおして 1~ 3 μM L 台とほぼ同じような値となっている。

表層で最も高い値が観測されるのは7月で、大分県海域の最奥部の水域では高い値が観測され、沖合に行くに従い低下している。この高い水域では 7 μM L 台が、沖合では 1~ 2 μM L 台が観測されている。これは図3に示した7月の塩分の分布図とよく対比しており、塩分濃度の低い水域が DIN の濃度が最も高くなっている。この傾向はやや濃度の低下は見られるものの、鉛直混合が終了する11月まで継続して高い値を維持している。この時期はプランクトンの発生に伴う消費量より、DIN源の供給量が上回っているものと思われる。この高濃度出現域はほぼ年間をとおして他の水域より高い値が観測される。

前述したように、7月のDINの高い値は塩分濃度と対比していることから、供給は主に河川水によるものと考えられる。8~ 9月は供給量も減少するため多少減少するが、10月は再び増加がみられ、7月と同程度の濃度まで上昇する。これは上下混合による底層からの供給と考えられる。

底層は7~ 11月頃まで他の月と比べて 2~ 5 μM L 台の高い値が観測される。しかし、表層と異なり一部の水域で集約的に高い値が観測されるということではなく、沿岸域、および水深の深い水域で多少高い値が観測される程度である。このことから、供給源としては河川水の影響は少なく、大部分は底質からの溶出によるものと考えられる。夏季、成層が強く発達するのにもない、最深部では 5 μM L 台の値が観測される。これは表層から底層への溶存酸素の供給量が減少し、これに伴って、底泥からの栄養塩類、特にアンモニア態窒素の溶出が促進されることに起因するものと思われる。

垂直分布をみると、循環期は表層、底層の濃度差は少なくほぼ均一な値となっている。その後、成層が形成されるにしたがってしだいに上下層に濃度差が生じるようになる。成層形成初期は沿岸部の表層が高い値を示すが、成層が発達するのにもない、底質からの溶出も増大するため、底層でも高い値が観測されるようになり、中層の値は低く、表・底層に高い水塊が存在するようになる。この時灘奥で最も高い水塊が形成され、かなり広範囲に 4 μM L 以上の水塊の分布域が出現する。この傾向は成層崩壊期まで継続する。また、成層崩壊前に底層は最も高濃度となる。

大分県海域を1つの水塊としてみた場合、表層は 7・12月が高く、5・6月が低い。底層は 7・9月が高く、3月が低い値を示す。平均的には7月、9月、12月の順に高く、6月が最も低い。7月は河川水からの供給量が多く、9月は底質からの溶出が最大となり、12月は底質から溶出したものが拡散されるため、灘全体の値を引き上げることにより高くなるものと考えら

れる。また、6月は供給量が少ない上に消費による減少が加わるため、最小値を示すものと思われる。

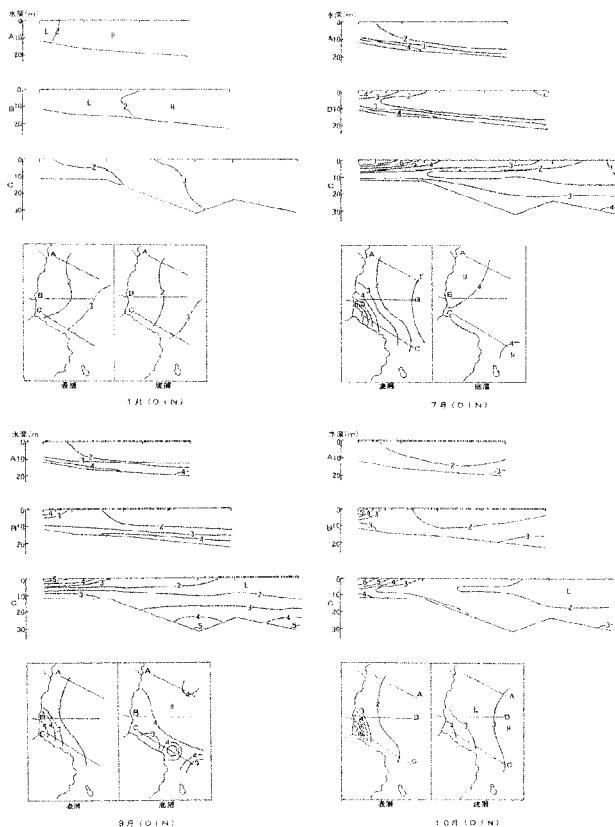


図4 DIN水平・鉛直分布($\mu M/L$)

2)リン酸態リン($PO_4 - P$)

特徴的な1・7・9月の等値線図を図5に示した。1月など冬季の $PO_4 - P$ はDINと同様に上下層の差はなく、沖合部の方が高い値を示し、 $0.03 \sim 0.3 \mu M/L$ の範囲でほぼ均一の値となっている。

表層で $PO_4 - P$ の最も高い値が出現するのは7月で、しかも、DINと同様に灘奥で $0.5 \mu M/L$ 台の高濃度となる。この高濃度域は表層部に限られていることから、河川水による影響と考えられる。DINが夏季から秋季後の循環期まで表層で高い値が観測されるのに比べ、 $PO_4 - P$ は7月のみに限られている。

底層の $PO_4 - P$ は成層の発達する7月以降、底層での有機物の分解が促進され、栄養塩類が溶出してくるため、次第に高濃度となり、最深部では9月に $0.5 \mu M/L$ 台が観測される。

垂直分布をみると循環期は沖合の方が高い値を示すが、表・底層間の差は小さい。7月の河川水流入量の

多い時期は、沖合はそれほど高くならないが、影響の及び沿岸表層域では高い。中層部は低く、底層で再び高くなる。河川水の流入量が減少すると表層での濃度は低下し、循環期にはいるまでは底層の方が高濃度となる。沿岸表層で高濃度となるのは、淡水が多量に流入する7月に限られており、 $PO_4 - P$ はDINより強く淡水の影響を受けていると考えられる。

1つの水塊としてみると表層は夏季よりも循環期後の11・12月の方が高濃度となり、5～6月が最低濃度となる。底層は成層形成期から循環期に高い値が観測され、春季に最低となる。平均的には7月、9～12月が高く、春季に低くなる。

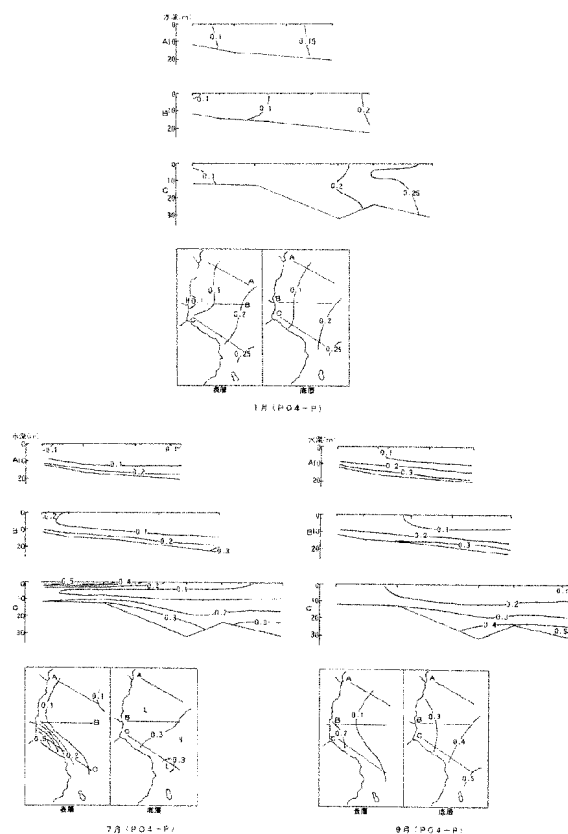


図5 $PO_4 - P$ 水平・鉛直分布($\mu M/L$)

このようにDIN、 $PO_4 - P$ とも最大濃度域は大分県海域の灘奥に形成される。

大分県海域には一級河川が1水系と二級河川が5水系、その他小河川が数本流入している。一級河川の山国川は福岡県との県境沿いのAライン近くに、二級河川で流量の多い駅館川は真ん中のBライン近くに流入している。市街地を流下する二級河川の桂川はCライ

ン近くに流入している。流量から灘への流入栄養塩量を算出すると、山国川や駅館川の方が高い値を示す。しかし、D I Nなどの高濃度分布域はこの2河川の河口域には形成されていない。前述したように周防灘では上げ潮時は西流、下げ潮時は東流となり、また、残差流としては沿岸に沿って時計回りの流れがあるといわれている。停滞域がなく流れているとすれば、特定の水域でのみ高濃度にはならないと考えられる。

この原因を推測すると、濃度の高い水域は、地形的には一番奥まったところに位置することから考えて、前述の時計回りの流れの奥に、部分的に小規模な反時計回りの残差流的な流れが存在し、当水域が閉じこめられたようになり、部分的な停滞水域が形成される。または、山国川・駅館川の河口はほぼ直線的な海岸線に開口しているため、流入水は速やかに拡散するのに対し、奥まった地形に河口のある桂川の場合は拡散しにくく、この水域に停滞するため高濃度となるなどの理由が考えられるが、結論を出すまでには至らなかった。いずれにせよ、地理的な特性などが関係し、この水域に集積されやすい条件を備えているものと考えられる。

クロロフィル - a

特徴的な1・7月の等値線図を図6に示した。なお、水平分布図は表層とプランクトン分布密度の高い10m層の等値線図を示した。プランクトン発生量の多い7・8月以外の月は、一部水域で4 $\mu\text{g} / \text{L}$ の濃度域も観察されるが、ほぼ2~3 $\mu\text{g} / \text{L}$ で推移している。7・8月の高濃度域は、栄養塩類の高濃度域と多少異なり、やや国東半島よりの小規模な入り江付近、またはやや北部沿岸域に多少ずれて出現する。7・8月以外でもこの水域付近でしばしば周辺水域よりやや高い値が観測されることがある。何らかの原因により

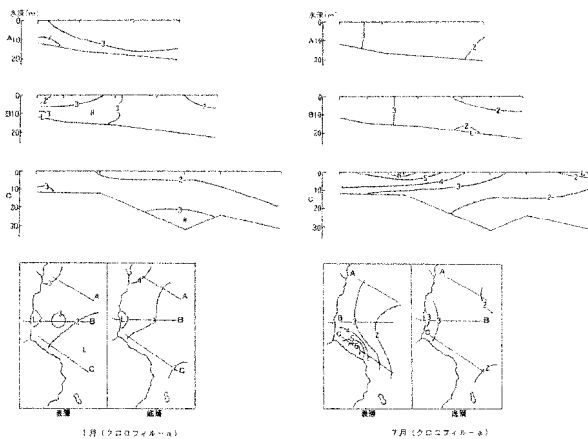


図6 クロロフィル - a 水平・鉛直分布($\mu\text{g} / \text{L}$)

この付近に集積するものと考えられる。

経年変動

D I Nの表層と底層の年変動を図7に示した。D I Nは表層に比べ底層の方がやや高めで推移しており、表層はプランクトンなどにより消費されて減少するのに対し、底層は底質からの供給量が多いために高くなっているものと思われる。D I Nは1973~1978年にかけては減少傾向で、その後増大に転じ、1982年に最高値を記録した。その後、多少の変動はあるものの減少傾向で推移している。窒素は生活廃水より産業廃水の排出負荷量の影響を強く受けるといわれている⁹⁾ことから、1978年にかけての減少は1977年施行された瀬戸内海環境保全臨時措置法や海洋汚染防止法による規制、および1974年のオイルショックによる産業活動の一時的な低下に伴うものと思われる。その後、生産力が回復するにしたがい、再び増加へと転じるが、1978年に臨時措置法に変わる瀬戸内海環境保全特別措置法が施行され、この規制の効果および公共下水道の整備などが関与して1983年以降の減少につながったものと考えられる。しかし、1995年頃からは増加傾向に転じているようにも見受けられ、今後の変動に注目する必要がある。

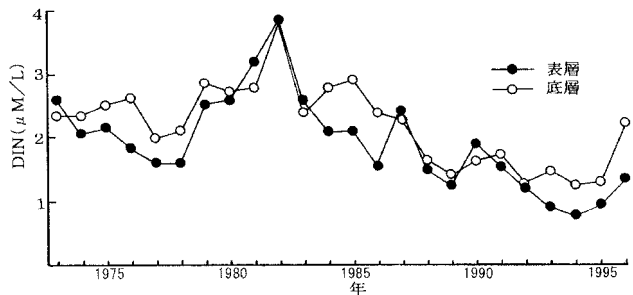


図7 D I N経年変動

P O₄ - Pの表層と底層の年変動を図8に示した。D I Nと同様に、表層に比べ底層の方が常に高い値で推移している。観測が開始されて以来、P O₄ - Pは年々増加傾向にあったが、1980年に高い値を記録した後、減少傾向に転じたが、1983~1984年以降はD I Nと異なり、多少の変動幅はあるものの、ほぼ横這い傾向で推移している。リンはD I Nと異なり、生活廃水の排出負荷量の影響を強く受けるといわれており、また、海域のリン濃度と排出負荷量の関係は、3~4年の時間的遅れをもって対応する傾向がある⁹⁾といわれ

ている。このことから、1980年以降の減少は、1975年頃以降の無リン合成洗剤の普及によるものと推察される。

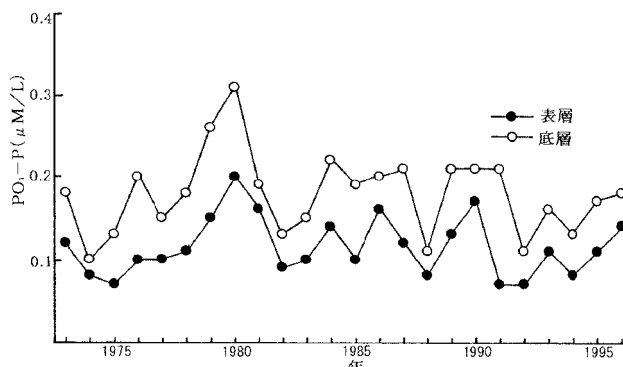


図8 PO₄-P 経年変動

クロロフィル-aの年変動を図9に示した。1981年以前と1985年以降では測定値に大きな開きがあるが、原因は不明である。

1985年以降は表層より底層の方が高い値で推移している。また、クロロフィル量は、減少傾向で推移しており、DINの変動とほぼ同じような傾向を示している。1983年以降、PO₄-Pはほぼ横這い傾向で推移しているにもかかわらず、クロロフィル量は減少していることから推測して、当海域ではプランクトンの発生にはPO₄-PよりDINの方が大きな比重を占めていると推測された。

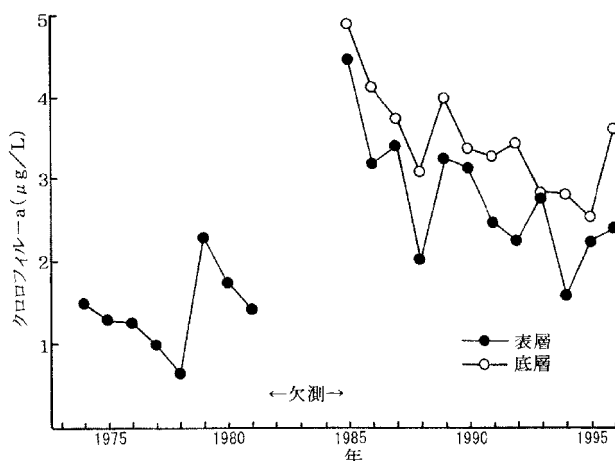


図9 クロロフィル-a 経年変動

図10に周防灘における赤潮発生件数の推移を示した¹⁰⁾。赤潮の発生は周防灘の排出負荷量の増加とともに増大したと考えられているが、当研究所で調査を開始した1973年以降、相対的にみれば発生件数は減少傾向にあるといえる。近年の赤潮発生件数の減少は栄養塩類の減少とほぼ同じ傾向を示しており、赤潮の発生と栄養塩類の間には関連性が伺われ、窒素の影響をより強く受けていると推測される。

また、以前よく発生のみられた *Gymnodinium mikimotoi* や *Chattonella antiqua*, *C.marina* などになり、過去にほとんどまたは一度も発生のみられなかった *Gonyaulax polygramma*, *Heterocapsa circularisquama* などの発生がみられるようになっている。

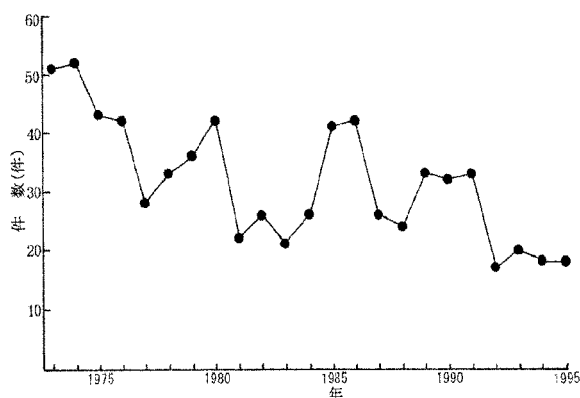


図10 赤潮発生件数

山本他¹¹⁾はNP負荷比の変化が同一種の細胞内NP比を変えたのではなく、種組成を変化させたと考えるのが妥当であると述べており、栄養塩類の減少や変化は出現プランクトン組成にも影響を及ぼしている可能性が伺われる。

このように、栄養塩類と植物プランクトン現存量、および赤潮発生件数の間にはある程度関連が見られ、栄養塩濃度の減少が起こり、この減少がプランクトン現存量の減少、赤潮発生件数の減少へとつながったと推察される。また、栄養塩量には底質からの溶出量の占める割合も大きいことから、プランクトン現存量が減少した場合、沈殿、分解する量も減少し、その結果、底質からの溶出量の減少へと影響がおよぶと考えられる。したがって、この植物プランクトン現存量の減少も、栄養塩類減少の要因の1つとなっていると考えられる。

武岡¹²⁾は豊後水道底層の高水温傾向が近年続いており、これは、太平洋から豊後水道への栄養塩の豊富な低温水の流入が弱まっていることを示しており、この

傾向は紀伊水道でもみられ、豊後水道だけの局所的な現象ではなく、大規模な現象である。また、このことは、小泉¹³⁾が測定した宇和海における珪藻類の細胞密度の低下からも伺えると述べている。

藤原¹⁾は太平洋からの水塊は、豊後水道を通して瀬戸内海へと流入していると述べ、また、藤原ら¹⁴⁾は豊後水道から瀬戸内海への窒素の流入量を計算し、夏季は約70t / 日の流入があると述べている。

このことから、この豊後水道での外洋からの影響が伊予灘、周防灘へと波及し、プランクトンの増殖に影響をおよぼしていることも考えられる。

以上のことから、栄養塩類の低下とそれに起因すると考えられるプランクトン現存量(クロロフィル-a)、および赤潮発生件数の減少は、各種の法規制の施行、および下水道の整備などによる排出負荷量の減少が大きな要因の一つとなっていると考えられるが、海洋変動なども無視できないことから、これらが相互に作用した結果と考えられた。

摘 要

- 1) 水温は表層では4～9月、底層では4～10月の間は沿岸部の方が、沖合部より高い水温となる。冬季は6～8 台まで低下し、夏季は27～28 台まで昇温する。また、半閉鎖的水域の水温は気温の影響を強く受けて変動すると思われた。
- 2) 塩分は冬季は33台の高塩分水塊が灘奥まで侵入する。低塩分は7月に観測され、国東半島沿いになり沖合まで、低塩分域を形成する。冬季は32～33台、夏季は27～30台で推移する。変動は淡水の流入量の影響が大であると考えられた。
- 3) 成層は8月に最も顕著となり、9月は崩壊へと進む。また、成層の形成には水温の方が塩分より強い影響をおよぼしているものと考えられた。
- 4) 成層形成期に湾奥の水域にD I Nは7 μ M L 台、P O₄ - Pは0.5 μ M L 台の高濃度域が出現する。
- 5) D I Nは1982年に最高値を記録した後、減少傾向にある。P O₄ - Pは1980年を境に減少し、その後はほぼ横這い傾向で推移している。
- 6) 栄養塩の減少に伴い植物性プランクトンの発生量は減少傾向にある。また、赤潮発生件数も減少傾向にあり、出現プランクトン組成にも変化が伺われた。

文 献

- 1) 藤原建紀：瀬戸内海と外洋水の海水交換．海と空，59(1)，7 - 17(1983)．
- 2) 第7管区海上保安部：周防灘(宇部沖)潮流観測報告書，(1962)．
- 3) 柳 哲雄・樋口明生：瀬戸内海の恒流．沿岸海洋研究ノ - ト，16(2)，123- 127(1979)．
- 4) 田森裕茂・吉岡貞範・神園真人：周防灘の海況と水質の経年変化．南西海区ブロック海洋研究会報告，3，13- 20 (1986)．
- 5) 吉岡貞範・神園真人・田森裕茂：周防灘の平均的な海況．南西海区ブロック海洋研究会報告，4，11- 32(1987)．
- 6) 神園真人，田森裕茂，吉岡貞範：周防灘の平均的水塊構造．南西海区ブロック海洋研究会報告，5，21- 30(1988)．
- 7) 平田貴文・千手智晴・杉原滋彦：周防灘における透明度の変動特性．水産大学校研究報告，46(1)，1- 11(1987)．
- 8) 武岡英隆：瀬戸内海の密度成層．海と空，60(3)，145- 152 (1985)．
- 9) 城 久：大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について．大阪府水産試験場研究報告，7，1- 174(1986)．
- 10) 水産庁瀬戸内海区漁業調整事務所：瀬戸内海の赤潮，(1996)．
- 11) 山本民次・橋本俊也・松田 治・多田邦尚：瀬戸内海における植物プランクトン態N：P比とその変動要因．水産海洋研究，63(3)，6- 13(1999)．
- 12) 武岡英隆：外洋から瀬戸内海への栄養塩の流入とその最近の変化．瀬戸内海，19，4- 7(1999)．
- 13) 小泉喜嗣：沿岸の植物プランクトンの中期変動．月間海洋，30，419- 423(1998)．
- 14) 藤原建紀，宇野奈津子，多田光男，中辻啓二，笠井亮秀，坂本 亘：外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量．海岸工学論文集，44，1061- 1065(1997)．

編集委員

石川 佑司 ・ 家長 和敏 ・ 宮脇 純一
米田 寛 ・ 福岡 和光 ・ 平嶋 豁
安部 和智 ・ 岩男 昂 ・ 阿部 登志勝

平成 13年 12月 18日 発行

大分県海洋水産研究センター調査研究報告 No.3 (2001)

発行者 大分県海洋水産研究センター

〒 879- 2602 大分県南海部郡上浦町津井

TEL 0972- 32- 2155

大分県海洋水産研究センター浅海研究所

〒 879- 0617 大分県豊後高田市大字高田 3008- 1

TEL 0978- 22- 2405

大分県海洋水産研究センター内水面研究所

〒 872- 0504 大分県宇佐郡安心院町大字荘 42

TEL 0978- 44- 0329

印刷所 株式会社双林社

〒 870- 0048 大分県大分市碩田町 2- 2- 13

TEL 097- 536- 4111
