

1982年度日本海洋学会賞受賞記念講演

赤潮に関する生物環境学的研究*

岡 市 友 利†

**Marine Environmental Studies on Outbreaks of
Red Tides in Neritic Waters**

—Lecture by the Member Awarded the Oceanographical
Society of Japan Prize for 1982—

Tomotoshi Okaichi†

Abstract: The cause of red tides appearing in neritic waters in Japan have been discussed by several workers in relation to the development of eutrophication. The author has been engaged in marine environmental studies on outbreaks of red tides, mainly, in the Seto Inland Sea since 1964 using a combination of the following approaches:

- (1) surveys of the red tides that have occurred,
- (2) elucidation of the oceanographical and biological characters of the water areas where red tides occur,
- (3) isolation of the red tide organisms for physiological studies of their growth,
- (4) chemical and biological assays of the growth promoting factors, and
- (5) estimation of the effects of pollutants on the growth of the red tide organisms.

The red tide organisms surveyed were *Eutreptiella* sp. (Euglenophyceae), *Dictyocha fibura* (Chrysophyceae), *Chattonella marina*, *C. antiqua*, *Fibrocapsa japonica*, *Heterosigma akashiwo* (Chloromonadophyceae), *Prorocentrum minimum*, *P. triestinum*, *Gymnodinium mikimotoi*, *G. nelsoni*, *Gymnodinium* type '65, *Noctiluca miliaris*, *Protogonyaulax catenella*, *Gonyaulax polygramma*, *Peridinium quinquecorne* (Dinophyceae) and *Mesodinium rubrum* (Ciliata). Most of these species were isolated and cultured for physiological studies.

Algal growth potential in sea water was assayed in Hiuchi Nada and Beppu Bay. Growth promoting activity was found in sea water about 2km off shore from the industrial zone which locates along the coast of Beppu Bay.

The effects of industrial wastes were examined for *Eutreptiella* sp., *Heterosigma akashiwo* and *Prorocentrum triestinum*. Sulfite pulp waste caused marked promotion of growth in these organisms. The growth promoting activity of the waste was elucidated by chelation of the waste with iron. After the oil spill which occurred at Mizushima Bay in 1974, a heavy red tide of *Noctiluca miliaris* appeared, followed by *Prorocentrum minimum*. Polycyclic and polar fractions in heavy oil separated by chromatography were suspected to be the growth promoting substances. Natural growth promoting chemicals, uracil and thymine, were found in interstitial water of bottom mud of Beppu Bay in concentrations of 58-120, and 28-83 μg per 100 g dry mud, respectively.

The mechanism of fish kills caused by red tides was another subject of study.

* 1982年4月8日, 日本海洋学会春季大会(於日本教育会館)における講演。

† 香川大学農学部 〒761-07 香川県木田郡三木町池戸; Faculty of Agriculture, Kagawa University, Ikenobe, Miki-cho, Kida-gun, Kagawa-ken, 761-07, Japan.

1. はじめに

わが国の赤潮研究は、明治末期の真珠養殖の発展を支え魚介類の被害を防ぐ目的で進められ、東京湾でも、古くは朝倉(1910)により、また1950年に入っては千葉県内湾水産試験場(1966)によってしばしば赤潮の観測結果が報告されている。これらの研究や調査結果から赤潮発生要因についていくつかの仮説が提出された。すでに1912年、朝倉により東京湾では、赤潮が降雨の後に出現すること、春季には珪藻を主として秋季には鞭毛藻赤潮が多く、とくに漁業被害は *Gymnodinium* によって生じることが報告されている。しかしこれらの研究結果は赤潮に関する一般的な説明を与えるものではあっても1965年以降の赤潮の頻発と大規模化を十分説明することはできなかった。その理由として、1960年位までは海洋環境の分析技術が未熟で、赤潮発生に関する化学的要因を明らかにしえなかったことと、赤潮鞭毛藻の種の同定と分離・培養があまり行なわれず、赤潮生物の生理・生態学的研究に欠ける点が多かったことなどをあげることができよう。このことは、1962年～64年に発生した相模湖の *Peridinium polonicum* による淡水赤潮の有毒成分の化学的研究(Hashimotoら、1968)が、bloomの終息とともに中止せざるをえなかったことに端的にあらわれている。

その後、1966年より開始された、赤潮発生要因の研究(代表者、花岡資前九州大学教授)においては、鞭毛藻培養法が積極的に取り入れられ、赤潮鞭毛藻の増殖条件と環境要因を結びつけることが試みられた。このような試みはわが国でも珪藻類などについて進められていたことではあるが、その後の赤潮研究のあり方を大きく変えるに至ったものということができよう。この頃から、さらに浅海の汚染と赤潮発生の関係が指摘され、赤潮のなかには自然生態系における異常現象としてあらわれるものばかりでなく、人為汚染の影響をこうむるものがあることが次第に明らかにされてきた。都市下水や工場廃水中の窒素(以下Nとする)やリン(以下Pとする)が海域の富栄養化を促し、これがパルプ廃水のような有機廃水と共に赤潮発生の大きな原因であるとされるに至った。現在、赤潮予察および発生防止の対策は、まだきわめて不十分であるにせよ、花岡らの研究成果によって方向づけられている部分が多いといえる。

このような赤潮研究の推移のなかで、筆者は、1965年頃より多発するようになった瀬戸内海における赤潮の発生を人為汚染の進行との関連で把握すべきであることを指摘し、研究を赤潮発生状態の把握、海水の生理特性の解明、汚染の影響、赤潮生物の生理、生化学的性質およ

び他の生物に及ぼす影響へと展開してきたが、それぞれの課題が海洋生物学的研究のなかで解決すべき大きな分野を包含しており、またその研究の方向を示した段階にとどまっているものもある。日本海洋学会賞受賞の栄を機にさらに研究の発展に努めたいと考える次第である。

筆者の赤潮研究は、故東京大学橋本芳郎教授の下で行なった1962～64年にわたる相模湖の有毒水の華 *Peridinium polonicum* の研究を契機にして始まったものである。1964年以降は香川大学において、瀬戸内海における赤潮の頻発にほぼ機を一にして研究を展開してきたが、1967年より開始された“赤潮発生要因の研究”(研究代表者九州大学花岡資教授)の活動のなかで、花岡資先生はもとより、共同研究者として故上野福三三重大学教授、岩崎英雄三重大学教授、飯塚昭二長崎大学教授の方がたから時には激しい討論を通じて、文献から求めることのできない貴重な御教示を頂き、筆者にとってまさに赤潮を学ぶ格好の機会であった。また南西海区水産研究所や瀬戸内海沿岸の水産試験場の方がたとの研究交流も大きな支えとなったことをあわせて記したい。海洋研究の面白さは、1966年から69年にわたる佐伯湾調査の際に、広島大学名誉教授松平康男先生から身をもって示され、海洋生物学については、東京大学名誉教授丸茂隆三先生からいろいろな角度から御教示を頂いた。この機会に筆者の赤潮研究について励ましを頂いたこれらの諸先生方に厚く感謝の意を表する次第である。

2. 瀬戸内海における赤潮の発生状況に関する研究

大阪湾や広島湾の奥部を除くと、瀬戸内海で大きな赤潮が発生するようになったのは1957年頃からで、徳山市経済部水産課(1964)の記録によると、57年に徳山湾櫛ヶ浜に発生した赤潮が岸沿い15 km、沖合5 kmにわたる大規模なものに発達し、それ以後徳山湾では例年のように赤潮が発生するようになった。1960年には姫灘西部に、63年には香川県大川郡引田沖合に大規模な赤潮が出現するなど、その頃から次第に瀬戸内海全域に拡大していった。

1965年に岡市(1967)が瀬戸内海沿岸で聞き取り調査を加えて調べたところ、比較的大規模な赤潮は12件でそのうち8件に漁業被害の発生していることが判明した。丁度、その年に大村湾で *Gymnodinium* 65年型種の赤潮が発生し、アカガイ、ナマコなどが死んで、約7億5,000万円の被害を生じ、翌1966年にこの問題を含め赤潮の研究体勢を論ずるために、赤潮研究協議会が開催されるに至り、ようやく、内海、内湾域における赤潮が研究者の関

心をひくようになった。

2.1. 燧灘の赤潮

1) *Eutreptiella* 青潮

1966年5月、愛媛県新居浜市垣生港および同年7月、今治市桜井港付近にかなり広汎な青潮が発生した。とくに垣生港付近では岸沿い数 km にわたり鮮やかな浅緑色を呈した。この原因赤潮種は平均 $40 \times 9 \mu$ の紡錘形で、*Euglena* とよく類似するが、体長より多少長いかほぼ等しい鞭毛と体長の約 1/2 の 2 本の鞭毛を有し、*Eutreptiella* に属する。

垣生港付近で表層海水 1 ml 当り細胞数は約 4.1×10^5 、桜井港では 3.1×10^5 に達していたが、水深 1 m で 1×10^5 以下に減少していた。

この種類は、チアミンおよびシアノコバラミンを添加した Erd-Schreiber 培地できわめてよく増殖し、簡単に赤潮濃度に達する。活性炭 (Darco G, 5%, w/v) を加えて、15分間沸騰させてビタミン類を除いた海水を用いてビタミン要求を調べたところ、増殖にチアミンが必須であることが判明した。しかし、この場合活性炭処理海水より通常の生海水を用いた方がよく増殖するので、チアミンやシアノコバラミン以外の他の成分も増殖に関係していると思われる。最大増殖に要するチアミン量は ASP-2 および ASP-12 で $2 \sim 5 \mu\text{g l}^{-1}$ とかなり高い値を示した。Lewin (1965) によれば、*Cylindrotheca fusiformis* のチアミン要求量は $0.1 \mu\text{g l}^{-1}$ で、Tokuda (1966) は *Nitzschia closterium* で $1.0 \mu\text{g l}^{-1}$ と報告している。*Eutreptiella* sp. は、これらに比較してかなり高い要求量を示している。しかし、 $0.5 \mu\text{g l}^{-1}$ 程度でも約 $6 \times 10^4 \text{ ml}^{-1}$ の増殖が可能で、海水中のチアミン量からすれば、最大増殖を維持するためのチアミン量よりも、この結果の方が重要な意味を有するものと思われる。本種は 2 本の鞭毛により活発に運動をし、培養容器中でも光の強い方へ集まる性質がきわめて強いので、天然では数百 ng l^{-1} のチアミンが存在すれば十分青潮を形成しうるものと思われる (Okaichi, 1969a; 岡市, 1979)。

2) その他の赤潮

燧灘では、新居浜市から今治市に至る西部沿岸域と観音寺市を中心とする東部海域に赤潮が多く、岸から数 km、時には 10 km 以上におよぶ大規模なものもしばしば発生している。

1969年5月および1970年6月にいずれも西条市から今治市桜井港にかけて、*Heterosigma akashii* Hada による赤潮が発生した。69年には西条市沖で表層水 1 ml 当り20万をこえた。この種の赤潮が発生すると海水中に著しく炭水化物が増加し、西条市沖で 22 mg l^{-1} 、桜井

港内で 39 mg l^{-1} の炭水化物 (グルコース換算) が検出された。

桜井港周辺では升網中の魚がかなり死亡し、へい死魚 (ボラ) の鰓の表面に黄褐色のデトリタスがいちめん付着しており内側の鮮紅色の部分と著しい対比を示した。付着物を検鏡しても *Heterosigma* そのものを認めることはできなかった。魚の鰓に付着した物質がへい死の原因となったかどうかは不明のまま残された。いずれの赤潮時においても、赤潮の濃密なところは塩素量が 16% またはそれ以下の所が多く、*Heterosigma akashii* が低塩分の培地で比較的良好に増殖するという培養実験結果に合うように思われる。

1970年にはこの他、最初備後灘に発生した *Chattonella antiqua* (Hada) Ono が8月末から9月はじめの間に、燧灘西部の島嶼部から西条市にかけて赤潮となり養殖魚類に被害を与えた。

1971年には、6月、9月および10月の3回にわたり大規模な赤潮の発生をみた。6月の赤潮は、*Fibrocapsa japonica* Toriumi & Takano によるもので、新居浜沖で表層水 1 ml 当り 7,300 細胞を数えた。新居浜東港沖では表層と底層 (10 m 深) に多く、それぞれ 2,100 および 2,000 細胞であった。赤潮域に直径数 cm からそれ以上のボール状の塊が数多く浮んでおり、顕微鏡観察でこの塊が本赤潮種によるものであることが判明した。

本種は細胞膜が破れると繊維状の物質を四方に放出し、これからみ合い塊を形成するのであろう。*Fibrocapsa japonica* という種名は後に渥美湾で分離され、Toriumi および Takano (1973) によって命名されたものである。

ついで、8月はじめに燧灘北部の百貫島付近で小規模に発生した *Gymnodinium mikimotoi* Miyake & Kominami の赤潮が次第に灘中央部の魚島に拡がり、9月はじめには伊予三島市から香川県三崎半島におよぶ長さ約 20 km、幅 10 km 以上にわたる赤潮に拡大した。この時の細胞数は 1 ml 当り 90 万細胞におよぶところもみられた程に濃密なものであった (岡市, 1972)。

Eutreptiella 青潮と71年6月に発生した *Fibrocapsa* 赤潮を除き、以上の赤潮はいずれも備後灘にも発生しており、瀬戸内海中部の赤潮問題は、備後灘、燧灘に共通する問題を多く含んでいる。

2.2. 播磨灘の *Chattonella* 赤潮

わが国の赤潮で漁業養殖業に最も大きな損害を与えたのは、1972年7月から8月にかけて播磨灘全域に発生した *Chattonella antiqua* による赤潮で、1,400 万尾にのぼる養殖ハマチがへい死した。7月中旬頃から水が次第

に黒緑色を帯びるようになり、8月下旬まで消長を繰り返しながら続いたが、とくに被害の大きかったのは小潮時であった。その後の赤潮でも小潮時に赤潮が濃密になり被害も発生しやすいことが観測されている。ただこの時の *C. antiqua* の細胞密度はその後の赤潮に比べてそれほど高くはなく、岡山県沿岸で $1,500$ 細胞 ml^{-1} 、徳島県沿岸で 500 細胞 ml^{-1} 程度が確認されているに過ぎず、灘の大部分ではこれより少なかったと考えられている。

C. antiqua 以外にも、夜光虫や *Heterosigma akashiwo* などの赤潮が出現し、75年には香川県沿岸で *Protogonyaulax catenella* によりアサリなどの貝類が毒化する事件も発生した。

Chattonella による赤潮は、しばらく跡絶えていたが、77年8月下旬に再び出現して、ハマチをへい死させ、78年7月～8月、79年7月～8月と3年間継続したが灘全体における発生状況が判明したのは、78年以降である。

いわゆる球型 *Chattonella* が、出現するのは5月中旬で *C. antiqua* の赤潮に先立って6月中～下旬には全域で数 10 細胞 ml^{-1} 程度に増殖している。そういう意味で、シストの“種場”は全域にあると考えられるが、79年6月の調査では明らかに北部沿岸に数が多く、とくに赤穂岬沖は他よりも卓越しており 300 細胞 ml^{-1} が見出された。72年にはじめて赤潮が発生した時に紡錘型の細胞は、岡山県東部で $1,500$ 細胞 ml^{-1} が検出された以外は 500 細胞 ml^{-1} またはそれ以下で、とくに濃く着色したという報告はない。77年の航空機観測では、北部、中央部および南部に濃い着色域が認められている。78年7月下旬には北部 ($5,840$ 細胞 ml^{-1}) と中央部 ($1,000\sim 1,600$ 細胞 ml^{-1}) に、79年には北部沿岸 ($1,750\sim 4,000$ 細胞 ml^{-1}) と南部の香川県沿岸 ($1,100\sim 2,000$ 細胞 ml^{-1}) にかかなり濃い着色域が認められた。これらの観測結果から *C. antiqua* は全域でほぼ同一時期に出現し、赤潮を形成するが、細胞密度には差があり、それぞれの海域の赤潮発生要因には共通する部分と異なる部分があるように思われる。共通する部分は *C. antiqua* の生理的要求の面から考えられる N, P, シアノコバラミンおよび有機鉄が一定量以上存在するという事実であり、異なる部分はそれぞれの海域の環境特性に現われている。すなわち、北部は流入する河川水や各種の廃水の影響を受け、塩分はしばしば極端に低下する環境としてはきわめて不安定な海域である。ここでは水温の上昇が早く、栄養塩類や B 群ビタミン濃度が中央部や南部に比べて高く、有機鉄についても陸水の流入や堆積物からの溶出による補給が大きい。塩分濃度の低下が *C. antiqua* の増殖に有利に働くとすれば北部沿岸では赤潮発生に関する

環境条件はかなり整っているとみてよいであろう。

一方、潮流は明石海峡から東→西方向および北東←南西に動き、鳴門海峡からの潮の出入は一時的には中央部まで作用するにしても、流量からみて灘全体に影響するほどではなさそうである。恒流については、北部沿岸を西から東へ向い明石海峡に抜ける流れとそれから別れて家島諸島の東部を南西へ向き変えて中央部で弱まる流れがあり、さらに小豆島の東を南に向いそれから鳴門海峡へ進む流れの存在が示されている(水産庁, 1979)。これらの点を考慮すると北部の環境変化は時間を要するにしても中央部に影響し、さらに南部にいたる可能性も考えられる。一方、南部や中央部の影響が北部海域にいたるとは考えにくい。

北部沿岸海域は陸水や各種の廃水の影響で富栄養化が進行していることと、比較的浅いため、底泥から溶出する栄養塩や B 群ビタミン、有機鉄などが容易に表層に輸送されて、赤潮を発生させやすく、また発生した赤潮が継続しやすい特性を有している。高砂港内の常時的な *Skeletonema costatum* の赤潮の存在などは規模は小さいが、東京湾や大阪湾の奥部と似た様相を示しているものといえよう。中央部は水深約 40m で海水が停滞し、沖合にもかかわらず夏には底層が貧酸素化し、それに伴う栄養塩の溶出が認められる。深瀬(1982)は鳴門海峡から流入する紀伊水道系の海水が中央部の底層からシストや栄養塩を表層に輸送することを指摘している。この付近の恒流はきわめて緩やかであるため、夏の台風などによる攪拌を含めたこのような栄養塩の表層への輸送により赤潮が発生する可能性は認められる。一方、南部の沖合部の水質は北部に比べて良好であるが、沿岸部には、かなり規模の大きいハマチ養殖場があり、赤潮発生に及ぼす影響については検討すべき余地がある。備讃瀬戸からの流れは中央部からの流れを引込みながら鳴門海峡へ進み、香川県引田湾はその南側の渦流域となっているために赤潮が濃くなる可能性が大きい。

以上のように播磨灘では、*C. antiqua* のシストがあるとすれば、それは全域に分布し、初期の出現条件はきわめて共通しているといえよう。しかしそれが増殖して赤潮を形成するには、北部、中央部および南部のそれぞれ性格の異なった海域を背景としていることを理解しておかなければならない。発生状況が明らかにされている78年、79年および82年の赤潮について検討してみると、濃密な赤潮は78年には北部と中央部、79年には北部と南部、82年には北西部に出現している。ハマチが水温や溶存酸素濃度によっては、 150 細胞 ml^{-1} 程度(海水がやや黒緑色を帯びる程度)の *C. antiqua* が出現しても死

亡するために、南部に濃い赤潮が出現しているように報道されがちであるが、実際には北部の赤潮の方が濃密になり、表面の着色域の範囲も広い。魚類養殖において残餌や排泄物に由来する栄養塩その他の物質による富栄養化の防止は、環境保全の問題であると同時に、直接生産に関わる問題で養殖技術としても解決を図らなければならないであろう。

3. 浅海海水の生理的性質

3.1. 瀬戸内海各地の海水による赤潮種の培養

赤潮生物の増殖が海水中の栄養塩の量によって左右されるのはいうまでもないが、いわゆる栄養塩以外の微量成分が海水の生理学的な性質を決定することは、Johnston (1963) や Menzel および Ryther (1961) の報告によってよく知られていたところである。このような海水の生理的性質の差は海によってかなり顕著で、これが赤潮発生の難易と結びつくようにも思われる。化学的手法による微量成分の分析とともに、生物学的方法を併用することは今後とも赤潮発生要因の研究に欠くべからざるものである。

1967年2月から3月にかけて、備讃瀬戸を中心に、8カ所の海水を集めて *Eutreptiella* sp. を培養した。海水に栄養塩類などを添加しない場合 1 ml 当り $17 \times 10^3 \sim 44 \times 10^3$ の間にあり、愛媛県垣生港海水が最大値を示した。この際は海水中の COD と増殖量との間にくに明確な関係はなく、COD の高い安戸池海水で細胞数は少なかった。安戸池海水では数は少ないが、細胞の長さが他の海水の場合の約 1.5 倍に増大し、無機窒素化合物が不足していたとも考えられる。栄養塩類を加えると細胞数は 2~4 倍になり、安戸池海水で培養した *Eutreptiella* の形状も他の海水と変りなかった。チアミンを補給すると各海水中の細胞数は $110 \times 10^3 \sim 130 \times 10^3$ に達した。この実験で、*Eutreptiella* sp. の増殖が海水によって多少異なり、栄養塩類やチアミンの添加が海水の質の違いを減少させることがうかがわれた (Okaichi, 1969b)。

一方、1966年5月および9月に大分県佐伯湾と同年9月徳島県橋湾で採取した海水に硝酸塩と磷酸塩を加えて培養すると、佐伯湾海水では橋湾海水にくらべて、*Eutreptiella* sp. の増殖が著しく、9月に佐伯湾の8カ所で採水(表面水)して調べた時の平均増殖量は 99×10^3 で、一方、橋湾の3カ所の海水の平均増殖量は 47×10^3 にとどまった。佐伯湾と橋湾の海水では採水時期に多少のちがいがあるが、*Eutreptiella* sp. に対する作用にかなりの差が認められた。佐伯湾には亜硫酸パルプ工場があり、COD ($\text{O}_2 \text{ mg l}^{-1}$) 500~1,500 の廃水が1日 80×10^3

~ 100×10^3 ton 排出されていた。一方、橋湾は当時は周辺に小規模な食品工場が存在する程度で、湾内で真珠養殖が行なわれていた。橋湾もしばしば赤潮に襲われているが、徳島県水産試験場や漁業者の話では、主として湾外で発生した赤潮が湾内に流入することが多かったといわれている。

佐伯湾海水でも採水場所により、増殖の程度に差があり、9月の海水では、COD が2から $6 \text{ O}_2 \text{ mg l}^{-1}$ の間では COD と増殖量の間に関係が認められた。佐伯湾海水の COD は他の海域にくらべて比較的高く、先に述べたように亜硫酸パルプ廃水がかなり影響していることが示されている。亜硫酸パルプ廃水の効果については後述するが、廃水中の COD であらわされるような成分が、*Eutreptiella* の増殖に有効であると思われる。

海水の生理分析は、さらに燧灘および別府湾のそれぞれ全域で、*Eutreptiella* sp. *Heterosigma akashiwo* を用いて、実施された。燧灘における1976年8月の調査では新居浜市および伊吹島南部の海水に増殖活性のつよいことが明らかにされた (Fig. 1) (岡市・延沢, 1976)。別府湾では1973年9月に高崎山下および大分港沖合が赤潮種の増殖に好適であることが指摘された (Fig. 2)。この結果は当時の別府湾の赤潮発生状況とよく一致した (岡市, 1976b)。

3.2. チアミンの測定

Droop や Provasoli その他の研究者によって、鞭毛藻の増殖に必要なビタミン類はシアノコバラミン、チアミンおよびビオチンに限られることが明らかにされている。これらのビタミン類の海水中の消長が赤潮発生に重要な役割を果していることはいうまでもない。

青潮 *Eutreptiella* がチアミンを要求するので、まず燧灘におけるチアミンの分布を調べるとともに、他の内湾についても赤潮発生との関連において検討した (岡市, 1972)。

チアミンは、微生物定量法により分析したが、使用した海産酵母 *Cryptococcus albidus* は東京大学多賀信夫教授より分与されたものである。

燧灘では1968年6月13~15日および9月11~12日に上・中・下の3層の海水を採取し、分析した。一般的に、燧灘海水にはチアミンが多く、とくに西条市から川之江市に至る南岸部に著しい。9月12日の西条市沖の海水中に 584 ng l^{-1} のチアミンが見出された。さきの *Eutreptiella* のチアミン要求の実験結果から、これは 1 ml 当り約 60×10^3 の *Eutreptiella* を増殖させ、赤潮を形成させる量である。

この海域のチアミンの起源は明らかではないが、観音

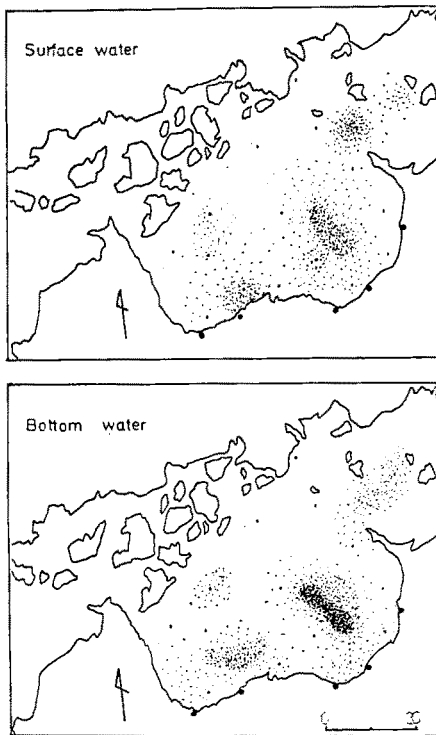


Fig. 1. Algal growth potential of seawater of Hiuchi Nada. Dense stippling indicates strong growth promoting activity. *Heterosigma akashiwo* was used as the test organism (1976).

寺港内や新居浜港内の海水にもチアミンが多いので、底泥からの溶出とともに何らかの形で人為汚染の影響をも考えることができるかもしれない。

佐伯湾に排出されるパルプ廃水中には、1 l 当り 30 μ g 程度のチアミンが含まれていた。廃水量を1日 100×10^3 ton とすると毎日約 3 kg のチアミンを海水に溶解していることになる。1968年10月15日に、佐伯湾におけるチアミンの分布を調査したところ、佐伯湾の全域で $100 \sim 150$ ng l⁻¹ 程度であったが、廃水口から約 500 m 離れた観測点で 2.2μ g l⁻¹ が検出され、チアミンのような物質でも工場廃水によりかなり増加することが明らかにされた。さきに述べたように佐伯湾海水の *Eutreptiella* に対する効果はチアミンだけの作用では説明しえず、他の溶存有機物に依存していると思われるが、このような多量のチアミンの補給が赤潮発生と無関係であるとは考えられない。

8月の英虞湾海中には $244 \sim 404$ ng l⁻¹ とほぼ燧灘と同程度のかんりのチアミンが含まれていた。その主な給源は底泥にあり、底泥の表層 0.5 cm に 1 m² 当り

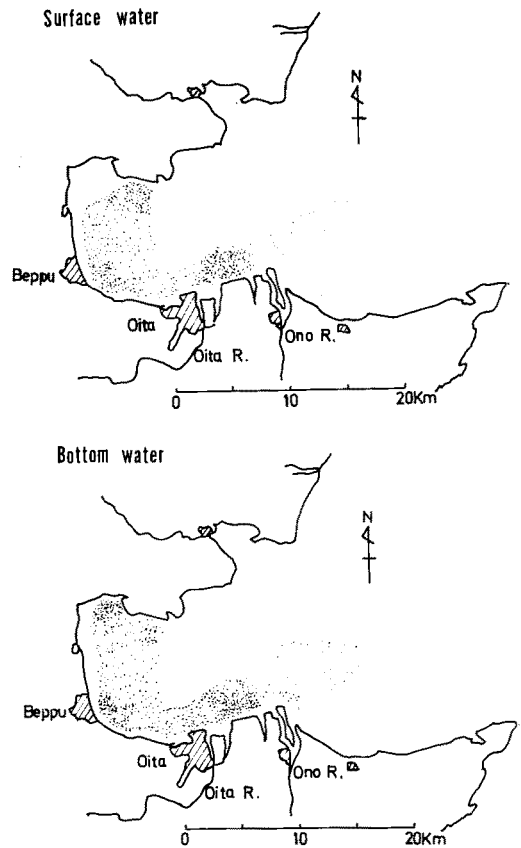


Fig. 2. Algal growth potential of seawater of Beppu Bay. Dense stippling indicates strong growth promoting activity.—*Heterosigma akashiwo* was used as the test organism (1973).

350μ g が含まれている量に相当している。

大村湾海水中のチアミン量は燧灘や英虞湾にくらべてかなり低いが、1968年6月下旬から9月下旬までの変動を調べた結果では、7月はじめから8月末までの成層期にはチアミンはかなり規則的に増減し、循環期になるとこの規則性は認められなくなる。英虞湾と同様に、底層からの溶出がかなりの量を占めると考えられるが、表層水では珪藻類によってチアミンが生産された可能性もある。この点は赤潮種の遷移と関連させて考えると興味深い。いずれにしても、大村湾では海水中のチアミン量の変動はかなり急速で、しかも成層期にはその変動に規則性があるので、チアミン要求性の鞭毛藻が赤潮を形成するためには、短期間にチアミン以外の他のいくつかの赤潮発生要因が重なり合うことが必要になるとされる。一方、佐伯湾では、恐らく燧灘においても、1970年頃まではこのようなチアミンの規則的な変化がくずれて

夏季にはとくに高濃度に維持され、少なくともチアミンについては常時赤潮を発生させやすい状態にあったと考えられる。瀬戸内海の赤潮の大規模化と長期化は、このような特殊な条件が広い海域にわたって普遍化したためと考えられる。

3.3. 底泥間隙水中の増殖促進物質

1) ウラシルおよびチミンの測定

別府湾の底泥間隙水を濃縮して、Sephadex G 10 で展開し、260 nm の紫外外部吸収で分画すると 4~5 の成分がえられるが、Cl' の溶出位置よりかなり遅れて 260 nm につよい吸収極大を示す物質が溶出した。この成分を日立 034-004 型液体クロマトグラフを用い、日立 2612 イオン交換樹脂で 0.01 N HCl を溶媒として展開するとウラシルおよびチミンが分離溶出した。乾泥 100 g 当り、ウラシルおよびチミンはそれぞれ 58~119 および 28~83 μg であった。このような核酸塩基が底泥間隙水中に比較的高い濃度で含まれることは、底泥の有機汚染が赤潮発生の原因となることを示している (岡市, 1980)。

2) 可溶性鉄とその作用

Chattonella antiqua の増殖が EDTA-Fe によって促進されることが岩崎 (1971) によって報告されている。播磨灘で出現する *C. antiqua* の発生要因を明らかにするために、海水および底泥中の有機鉄の作用について検討中であるが、これまでのところ、底泥間隙水中に同種の増殖を促進する可溶性成分の存在を認めた。

減圧ろ過で採取した間隙水を 40~50 倍に濃縮し、Sephadex G 10 (2-8×70 cm) のカラムで、再蒸留水を溶出液として分画した。10 ml ずつに分画し、各分画を濃塩酸で分解した後、ortho-phenanthroline 法で鉄を分析した。各分画の紫外外部吸収もあわせて測定した。紫外外部吸収は、16, 20 および 33 番の分画に溶出したが、鉄の主成分は、25, 29 および 36 番目に検出された。これらの成分による *C. antiqua* の増殖試験では、紫外外部吸収成分としては 20 および 33+34 の分画に、鉄成分としては 25 の分画に強い増殖促進作用を認めた。この鉄成分がどのような化学的性質かはまだ検討中であり、とくに底泥の有機化による鉄の溶出過程の研究が今後の課題となると思われる (岡市ら, 1982)。

赤潮生物とくに *Chattonella* 属のプランクトンの増殖における可溶性鉄の意義については環境中の鉄の存在形態と濃度の問題だけでなく、*Chattonella* における鉄吸収機構における問題点を明らかにする必要がある。

Chattonella antiqua の培養細胞の抽出液中に鉄キレート物質である hydroxamate の存在を認めたが、その化学的性質はまだ明らかにされていない。*Chattonella*

属の赤潮がとくに播磨灘に頻発する理由については、環境特性と生物の生理特性の適合性から説明する必要がある。現在播磨灘の環境特性は次第に明らかにされつつあるが、*Chattonella* の生理、生化学的性質の解明が今後の課題として残されている。

4. 人為汚染の影響

4.1. パルプ廃水およびその他の工場廃水

1970年6月に観測したところ、燧灘西部の西条市沖および東部の香川県側の表層水に POC (particulate organic carbon), DOC (dissolved organic carbon) とともに著しく多かった。燧灘東南部の伊予三島市および川之江市には、紙・パルプ工業が発達し、1970年には1日42万 ton の廃水が流され、燧灘全体の BOD 負荷 285 ton 日⁻¹ のうち約 64% に当る 168 ton 日⁻¹ を占めており、東部海域の有機汚染の原因となっていたと思われる。この付近の海水は、DOC が高いと同時に 275~280 nm の紫外外部にかなりの吸収を示した。1970年10月に東部海域をさらに詳しく調査したところ、伊予三島から北方にむけて 5~7.5 km にわたり、海水にかなり著しい紫外外部吸収を認め、精製リグノスルホン酸をその付近の紫外外部吸収の比較的低い海水に溶解した場合の吸収とよく一致し、パルプ廃水がかなりの海域に拡散していることが判明した (岡市ら, 1971)。

ついで亜硫酸パルプ廃水を海水で稀釈して、*Eutreptiella* sp., *H. akashiro* などを培養すると、COD として 2~5 の範囲でとくに良く増殖し、これが廃水の酸性成分によることを示したが (Okaichi and Yagyū, 1969c) さらに廃水中のリグノスルホン酸が鉄イオンとキレートを生成し、これが鞭毛藻の増殖を促進することも明らかにされた (Okaichi, 1975)。

木金廃液から分離精製したリグノスルホン酸に重量比で 100:1 になるよう Fe³⁺ を加え、pH を 5 以上にすると、濃色化し、500~600 nm に吸収の増大が認められる。そして、この状態では鉄は Dowex 50 に吸着されなくなる。

太平洋海水に N および P を加えて作った基礎培地に、亜硫酸パルプ廃水または精製リグノスルホン酸と Fe³⁺ を加えると、*Eutreptiella* sp. の細胞数も ¹⁴C の取り込みも対照にくらべて著しく増加した。この際のリグノスルホン酸の添加量は -OCH₃ として、0.227 mg l⁻¹ であり、Fe³⁺ は 0.034 mg l⁻¹ である。亜硫酸パルプ廃水や Fe³⁺ の単独の添加でも効果はあるが、両者をあわせるとその効果が著しい。また、Fe³⁺ では ¹⁴C の取り込みが、リグノスルホン酸では細胞数の増加が促されるようにみ

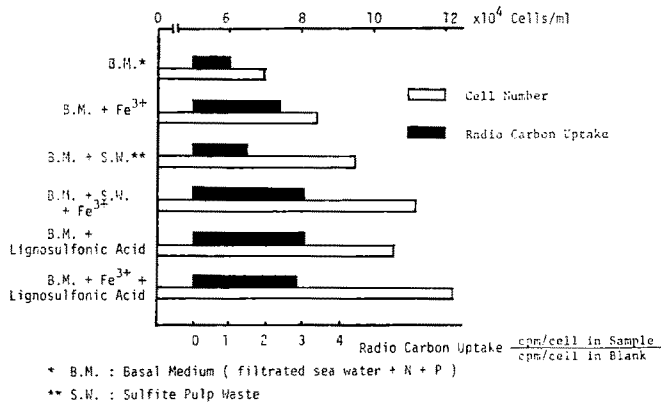


Fig. 3. Effect of the addition of Fe^{3+} to sulfite pulp waste and lignosulfonic acid on the growth of *Entreptiella* sp.

えた (Fig. 3)。

上記の亜硫酸パルプ廃水以外に、別府湾沿岸の化学工業3種、製鉄所、製紙、パルプ、肥料、石油精製の各工場廃水計8種についても増殖効果を検討した。予備実験で基礎培地 10 ml に廃水を 0.02 および 0.05 ml を添加して調べたところほとんどの廃水で 0.02 ml の添加がとくに有効であったので以後は COD 値のいかんにかかわらず基礎培地 10 ml に廃水 0.02 ml を添加して実験を行なった。化学工業の廃水とパルプ廃水がとくに増殖促進的であった。この効果は COD の大小とは必ずしも一致せず、富栄養化防止の見地からは、工場廃水の規制は単に COD だけではなく、生物に対する作用からも考慮しなければならない。

4.2. 重油汚染の影響

1974年12月18日夜半に三菱石油水島製油所より流出した重油が、備讃瀬戸および播磨灘南部の海域を覆い、469 km にわたる海岸線が汚染された。この時のタンクからの総流出量は 42,888 kl で、そのうちの 7,500~9,000 kl が海上に流れ出たといわれ、わが国で生じた石油流出事故のうちで最大規模のものとなった。

ノリやハマチの養殖などに対する直接的被害と共に、海洋および沿岸生態系の蒙る長期的影響が憂慮されたので、香川大学、岡山大学などの瀬戸内海沿岸の4大学の研究者が緊急に研究班を組織し、調査・研究を開始した。その結果は、『瀬戸内海の重油汚染』(岡市・辰巳編, 1975) および文部省科学研究費特定研究 (1) の研究報告書 (岡市, 1976a) に取りまとめた。

これまで石油のプランクトンに及ぼす影響については、主として生育阻害作用が調べられている。しかし、これらの研究で問題にされている油分濃度は 1~10 ppm

以上と比較的高く、この時も沿岸部はともかく沖合部では高濃度の油分は短期間認められただけで、長期的影響や常時流出している石油の影響を考えると、もっと低濃度の石油の作用を、海藻類のガン化の問題まで含めて、いろいろな観点から調べる必要があると思われる。

この時の重油流出の場合も、高松市の調査では1ヵ月後には高松市沖合で 0.1 ppm またはそれ以下に減少したと報告され、筆者らの分析結果 (Ochi and Okaichi, 1979) もそれを裏付けている。重油汚染の長期的影響や常時船舶その他より流出している油分の影響を考えると、むしろ 1 ppm 以下の油分の生態系におよぼす役割についても検討しておく必要がある。さらに、長期的影響の一つとして春から夏にかけての赤潮の発生が懸念されたので、赤潮鞭毛藻の一種である *Heterosigma akashiwo* を用いて、稀薄な油分濃度の影響について実験を行なった。

香川県庵治町沖の海水をろ過して N, P を添加した海水培地と、ASP2 の無機塩組成を有する人工海水にチアミン、シアノコバラミンおよびピオチンを加えた合成培地の2種類の培地を使用し、これに流出重油および4ヵ月後に採取した風化油を適量添加した。重油の濃度は蛍光法により測定した。これらの培地で *Heterosigma akashiwo* を培養し、細胞数の増加 (増殖係数を含む) と ¹⁴C の取りこみ量を比較した。

海水培地では流出重油、風化油ともに 25 μg l⁻¹ 前後に最大増殖効果がみられ、それより濃度が増すと増殖効果は減少した。もとの重油より風化油の効果がやや劣るようである。重油成分中、多環式および極性化合物分画が最も増殖に有効であるが、この分画は他の分画に比べて環境中で減少する傾向があり、このために風化油の効

果が劣るものと思われる。

いずれにしても $25 \mu\text{g l}^{-1}$ という濃度は従来の赤外線分光分析法による定量限界値 $100 \mu\text{g l}^{-1}$ の $1/4$ にすぎず、このような微量な油が影響するとすれば、今回の重油汚染にとどまらず現在も瀬戸内海で進行している石油汚染に対してこのような観点から適切な対策を講ずる必要がある。

一方、合成培地を用いた試験では $150 \sim 200 \mu\text{g l}^{-1}$ に最大増殖効果があり、海水培地の $6 \sim 8$ 倍の濃度になる、2つの培地でなぜこのような差が生ずるのか理由は不明のまま残されたが、合成培地には EDTA とビタミン類以外の有機物は含まれておらずバクテリアによる石油の分解がリグノスルホン酸の存在によって促進されるという報告 (Liu and Townsley, 1970) もあるので、海水中の有機物と石油成分の共働作用を考える必要があると思われる。

一方増殖阻害は海水培地では $100 \mu\text{g l}^{-1}$ 前後から、合成培地では $200 \mu\text{g l}^{-1}$ 以上の濃度で現われるようである。

^{14}C の取りこみ活性や増殖係数の測定結果も細胞数測定の結果ととくに変わることはなかった。

次に流出重油中の各成分を、まずアルミナとシリカゲルの重層クロマトグラフィーで分取し、パラフィン類、単環式芳香族、二環式芳香族および多環式芳香族、極性化合物の4成分に分画した。これらの各成分を *Heterosigma akashiro* の培地に適量添加したところ、培養5日後にパラフィン類で多少の増殖を示したが、とくに多環式および極性化合物で細胞数の増加や ^{14}C の取りこみが大きく、 $30 \mu\text{g l}^{-1}$ で増殖効果は最大であった。この最適増殖促進濃度はもとの重油に換算すると約 $150 \mu\text{g l}^{-1}$ となり重油の効果の多くはこの画分に依存しているように考えられる。重油の作用は、対数増殖期の増殖係数を増加させるように働き、最大増殖に達する日数が短縮されるのが特徴である。多環式および極性化合物の作用については現在のところこれ以上は不明である。

重油流出の約2カ月後から香川県沿岸に夜光虫赤潮が出現し、6月下旬まで継続し、一部には *Prorocentrum minimum* の赤潮を伴ない、養殖ハマチのへい死を招いた。トレーキャニオン号が坐礁してイギリス海峡を汚染した時にも夜光虫赤潮が観察されている (J. E. Smith 編, 1973)。この問題については、瀬戸内海では重油汚染直後はプランクトンが減少し、その後に珪藻の増殖が生じて夜光虫赤潮の出現に至る遷移が考えられた (岡市, 1976a)。

5. 富栄養化水域の形成

以上のように、工場廃水等が赤潮鞭毛藻の増殖を促すことが判明してきたが、その濃度には最適範囲があり、高濃度では増殖は抑えられる。海水中の COD と赤潮鞭毛藻との関係についてもほぼ同様なことが観察されている。

大分県佐伯湾の海水で、*Eutreptiella* sp. を培養すると、海水の COD $2 \sim 6 \text{ O}_2 \text{ mg l}^{-1}$ の間で COD の増加にともない細胞数がふえるが、6以上では多少低下する傾向が認められた。大阪湾でも赤潮の発生が最も多いのは COD 2 付近で8以上では赤潮は発生しないと報告されている (安達, 1973)。このように海では赤潮発生に適当な COD の範囲がある。

工場廃水の流入する海域でも鞭毛藻の増殖は必ずしも COD の分布と一致するとは考えられないが、鞭毛藻の増殖やその他の微生物の活性を高める海域が廃水の適当な稀釈域に形成されることが認められた。

1973年、74年と別府湾の海水を採取し、培養試験をしたところ、廃水の流入域の海水では鞭毛藻の増殖は抑えられるが、その沖合に増殖を促進する海水が見出された (Fig. 4)。このように廃水の流入域では赤潮鞭毛藻の増殖は抑えられるが、適当に稀釈されると増殖は促進される。つまり阻害域のすぐ外側に増殖促進域が生じ、さらに稀釈が進むにつれて、廃水の二次的な影響である増殖促進作用もうすれていく。河川でも排水口からある程度離れたところで生物の多いことは観察されている。

これと似た現象が、瀬戸内海の越前東部海域では別な形で認められている。1970年10月に調査した時の愛媛県三島港から香川県伊吹島の東側にかけての DOC と溶存炭水化物態炭素 (DCC) の比をとってみると、パルプ廃

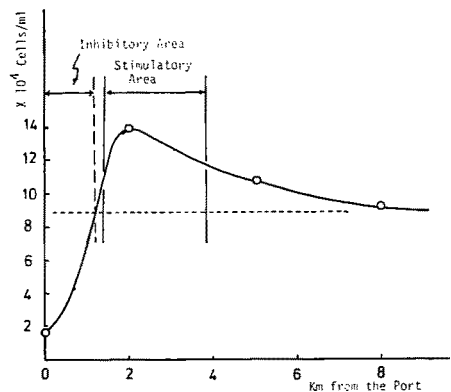


Fig. 4. Phytoplankton growth in a polluted area of Beppu Bay (1973).

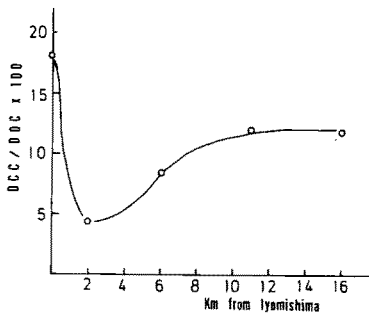


Fig. 5. Ratio of dissolved carbohydrate carbon (DCC) to DOC in Hiuchi Nada (1970).

水の流入する三島港では DCC は DOC の 18% を占めたが、2 km 沖では 4% に減少し、それから徐々に回復して、10 km 沖より北では 12% となりほぼ一定した (Fig. 5) (岡市ら, 1971)。三島港内では炭水化物分解菌の活性があまり高くないが、2 km から 6 km にかけて高まり、それ以北で一つの平衡に達するようになる。この海域の有機栄養細菌によるグルコースの 1 細胞当りの分解活性を調べてみると明らかに沿岸部で低い (Okutani ら, 1972)。この時の表層海中には難分解性のリグノスルホン酸によると考えられる 275 nm の吸収がかなり大で三島港から同じ方向にとった減衰状況は廃水の稀釈・拡散の典型的なパターンを示していた。

以上のように、汚染物質は連続的に稀釈・拡散していくのに対して、廃水の直接的、間接的な生物に対する作用は、むしろ非連続的に現われるといってもよく、汚染物質の流入域では生物の活性は抑制され、そのすぐ外側に赤潮鞭毛藻の増殖や細菌の活性を高める海域が形成される。その海域の範囲は汚染物質の流入量や海水流動の状況によって異なるが、70 年当時の隠灘東部では三島港から北へ 2 km から 6 km 位の範囲に及んだと思われるし、別府湾では沿岸 2 km から 4 km の範囲にあるとして良いであろう。このような生物活性の増進域に水の停滞や他の条件が整うと赤潮が出現しやすくなると考えられる。

6. 赤潮鞭毛藻の毒性

まひ性貝毒 (paralytic shellfish poison, PSP) の起源が *Gonyaulax catenella* によることが明らかにされたのは、Riegel ら (1949) が赤潮海水を連続遠心分離機で捕集して毒性を確認したことによって。わが国で鞭毛藻類の毒性が確認されたのは相模湖の有毒水の華 *Peridinium polonicum* (Hashimoto ら, 1967) をもって最初とするが、それ以前にも赤潮による魚類のへい死につ

いては多くの報告があり、毒性の確認を含めへい死原因に関する研究が要望されていた。これまでは、(1) 赤潮時における水中の溶存酸素減少、(2) 赤潮の死滅後に生ずる酸素不足と硫化水素等有害物質の発生、(3) プランクトンが魚貝類の鰓に付着して生ずる窒息、(4) 有毒物質の作用、などが考えられてきた。瀬戸内海周辺では、1957 年以降 35 件以上の赤潮による魚貝類のへい死が報告され、被害金額もこの 10 年間に 160 億円以上に達している。このような赤潮による魚貝類のへい死に関する観察から、基本的にはやはり有害または有害物質の作用を考えざるをえない。

夜光虫赤潮は被害を伴わないものとされているが、それでも、被害発生の事例は少なくない。その原因物質はアンモニアで、香川県沿岸の夜光虫を採取し、その含量を測定したところ、夜光虫乾物 1 g 当り $\text{NH}_3\text{-N}$ として 6.6~69 mg が、含まれきわめて濃密な赤潮の場合には十分魚を殺しうる量であることが示された (岡市・西尾, 1976)。この $\text{NH}_3\text{-N}$ は夜光虫体内の全窒素量に対して 14.3~72.8% に及ぶもので、夜光虫における窒素代謝そのものもきわめて興味ある課題であると考えられる。

一方、*Chattonella antiqua* によるハマチのへい死はまだ研究途上であるが、現在のところ遊離脂肪酸による二次鰓弁表皮細胞の壊死が酸素交換能の低下を招くこと (岡市・西尾, 1978) とハマチの血液中のヘモグロビンの酸素結合能が血液の pH が酸性に傾くことで阻害されやすいことが明らかにされている (Yamaguchi ら, 1981)。

今のところ、*Protogonyaulax* 属を除けば、瀬戸内海の赤潮から人体に影響を与えるような特殊な物質は分離されていない。むしろ、アンモニアや遊離脂肪酸のようないわばありふれた物質が局在することで生態系に影響を与えることに問題があると思われる。この問題の海洋生態学における重要性については日本プランクトン学会のシンポジウム (1981) で指摘し、海洋科学の小論 (岡市, 1982) に述べた通りである。今後、海洋生態系における生物相互作用について論ずるには、このような化学物質の作用の検討が必要で、生物学の研究者も必要な分析法を身につけると共に化学分野の研究者との共同研究を積極的に進める必要があると思われる。

現在では、100 l 規模の大量培養槽も設計され、*Protogonyaulax catenella* では乾重量で 100 l 当り 8.3 g、*Prorocentrum minimum* でも同じく、8.1 g の収量がえられている (岡市, 1981)。今後鞭毛藻に関する生化学的研究が発展して、海洋の生化学資源としての鞭毛藻類の役割が認められる日も遠くないと思われる。

おわりに

最近、分類手法や培養技術の進歩により、赤潮鞭毛藻類の生物学的研究は著しい発展をとげつつある。赤潮研究の基礎を固めることが赤潮発生防止につながり、また、海洋学の裾野を広げることとも非常に喜ばしいことである。さらに最近では、赤潮発生予知・予報に対する関心が深まっているが、赤潮発生防止の学問的基礎を探ることを目標とした1970年代と比較すると、最近の研究のあるものには、赤潮発生の現状をふまえない実験室内の外に持出すことのない理論や狭い経験上の事実の羅列に留まる恐れがある。赤潮研究は本来的に生物環境学の分野に属しており、赤潮発生防止もこの立場を取り続けることで果すことができると考えられる。とはいうものの赤潮研究が単に海洋生物学者の手中のみ留まることを意味するのではなく、生物環境学それ自身が物理、化学および生物学の研究者の共同作業により構築されるものとして広がっていることを指摘しておきたい。

本研究を進めるに当たり、研究費の一部は文部省科学研究費環境科学特別研究によったが、その研究では1978年以来、一貫して生物環境学に関する学際的研究の立場をとり続け、1982年からは「内海域における赤潮発生環境のモデリングに関する研究」として発展させようとしている。今後の海洋学研究の一つの発展方向は、学際的な基盤に立った生物環境学の組立てのなかに見出さるのではなかろうか。

文 献

- 安達六郎 (1973): 赤潮生物と赤潮実態. 水産土木, **9**, 31-36.
- 朝倉慶吉 (1910): 赤潮ニ就テ. 気象集誌, 29年, 286-294.
- 朝倉慶吉 (1912): 赤潮と気象に就テ. 気象集誌, 31年, 159-164.
- 千葉県内湾水産試験場 (1966): 東京湾において発生した赤潮. 赤潮に関する研究協議会, 日本水産資源保護協会, 40-83.
- 深瀬 茂 (1982): *Chattonella antiqua* (Hada) Ono による赤潮の発生に関する研究. 環境科学研究報告書, B148-R14-8, 海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究. 海洋環境特性と赤潮発生研究班, 127-136.
- Hashimoto, Y., T. Okaichi, L.D. Dang and T. Noguchi (1968): Glenodinium, an ichthyotoxic substance produced by a dinoflagellate, *Peridinium polonicum*. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., **34**, 528-534.
- 岩崎英雄 (1971): 赤潮鞭毛藻に関する研究 IV-1970年備後灘に出現した *Eutreptiella* sp. と *Exuviaella* sp. について. 日本海洋学会誌, **27**, 152-157.
- Johnston, R. (1963): Sea water, the natural medium of phytoplankton—I, General features. J. Mar. Biol. Assoc. U.K., **43**, 427-456.
- Lewin, J.C. (1965): The thiamine requirement of marine diatoms. Phycologia, **4**, 141-144.
- Liu, D.L. and P.M. Townsley (1970): Lignosulfonates in petroleum fermentation. Jour. WPCP., **42**, 531-537.
- Menzel, D.W. and J.H. Ryther (1961): Nutrients limiting the production of phytoplankton in Sargasso Sea, with special references to iron. Deep Sea Res., **7**, 276-281.
- Ochi, T. and T. Okaichi (1979): Drifts of oil residues in sea water of Bisan Seto after oil spill accident in Mizushima, as assessed by fluorescence spectrophotometry, Tech. Bull. Fac. Agric. Kagawa Univ., **30**, 157-162.
- 岡市友利 (1967): 1965年に瀬戸内海および周辺水域に発生した赤潮について. 香川大学農学部学術報告, **18**, 181-185.
- Okaichi, T. (1969a): Water bloom due to marine *Eutreptiella* sp. in the Seto Inland Sea. Bull. Plankton Soc. Jap., **16**, 115-121.
- Okaichi, T. (1969b): Growth of *Eutreptiella* sp. in sea water collected from different area, Bull. Plankton Soc. Jap., **16**, 121-126.
- Okaichi, T. and A. Yagyu (1969c): The effect of sulfite pulp wastes on the growth of marine phytoplankton, Bull. Plankton Soc. Jap., **16**, 126-132.
- 岡市友利・越智 正・平野正子 (1971): 燧灘東部海域の有機汚染. 香川大学農学部学術報告, **23**, 104-111.
- 岡市友利 (1972): 浅海の汚染と赤潮の発生. 内湾赤潮の発生機構. 日本水産資源保護協会, p. 58-76.
- Okaichi, T. (1975): Organic pollution and the outbreaks of red tides in Seto Inland Sea, Proceedings of the International Congress on the Human Environment, Asahi Evening News, 455-466.
- 岡市友利・長巳修三編 (1975): 瀬戸内海の重油汚染. アジア企画, 1-177.
- 岡市友利 (1976a): 重油汚染のプランクトン生態におよぼす影響. 文部省特定研究 (1) 海洋環境保全の基礎的研究. 重油汚染による瀬戸内海東部海域の生物環境変化に関する研究 (岡市友利編) p. 1-9.
- 岡市友利 (1976b): 沿岸における赤潮発生域の形成と工場廃水の影響. 環境技術, **5**, 12-17.
- 岡市友利・延沢文代 (1976): 赤潮生物培養法の水圏環境アセスメントへの応用-III. 燧灘の測定結果. 文部省特定研究 (1) 海洋環境保全の基礎的研究. 瀬戸内海の汚染と指標生物の動態に関する研究 (藤山虎也編) p. 75-80.
- 岡市友利・西尾幸郎 (1976): 夜光虫 *Noctiluca milia-ris* の毒性について. 日本プランクトン学会報, **23**, 75-80.

- 岡市友利・西尾幸郎 (1978): *Hornellia* sp. によるハマチのへい死原因. 鹿児島湾赤潮発生調査報告書—昭和52年6月発生の *Hornellia* 赤潮. 水産庁. p. 7-781.
- 岡市友利 (1979): 培養中にみられる鞭毛藻類のパッチ形成について. 海洋科学, **11**, 650-654.
- 岡市友利 (1980): 瀬戸内海底泥中の可溶性有機物とその鞭毛藻に対する作用. 海と空, **56**, 93-105.
- 岡市友利 (1981): 赤潮鞭毛藻の生産する生物活性物質. ライフサイエンスの現状と将来. 理化学研究所編, 1091-1105.
- 岡市友利 (1982): 対話「プランクトン生産物」生態系における役割. 海洋科学, **14**, 4-11.
- 岡市友利・門谷 茂・越智 正 (1982): 播磨灘における *Chattonella* 赤潮の発生に関する海洋環境学的研究. 環境科学研究報告書 B148-R-14-8 海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究. 海洋環境特性と赤潮発生研究班, 93-107.
- Okutani, K., T. Okaichi and H. Kitada (1972): Mineralization activity and bacterial population in the Hiuchi Nada, Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., **38**, 1041-1049.
- Smith, S.E. (1968): トレー・キャニオン号海難による海洋汚染と生物環境. 英国海洋生物学協会. プリマス研究所報告 (日高孝次・宇田道隆共訳. 日高海洋科学財団) 1-229.
- 水産庁 (1979): 播磨灘潮流解析報告書. 流況図, 流程图.
- Tokuda, H. (1966): Studies on the growth of a marine diatoms, *Nitzsca closterium*—I. Its requirement of thiamine, Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., **32**, 568-572.
- 徳山市経済部水産課 (1964): 徳山湾における海水の異常現象. 1-23.
- Toriumi, S. and H. Takano (1973): *Fibrocapsa*, A New Genus in Chloromonadophyceae from Atsumi Bay, Japan, Bull. Tokai Reg. Fish. Res. lab., No. 76, 25-35.
- Yamaguchi, K, K. Ogawa, N. Takeda, K. Hashimoto and T. Okaichi (1981): Oxygen Equilibria of Hemoglobins of Cultured Sea Fishes, with Special Reference to Red Tide-Associated Mass Mortality of yellowtail, Bull. Japan. Soc. Sci. Fish., **47**, 403-409.