

伊勢湾の海洋環境特性と赤潮*

岩崎英雄・岩佐清和**・阿弥一起・矢島 勉

三重大学水産学部

Environmental Characteristics of Ise Bay and Red Tide Blooms*

Hideo IWASAKI, Kiyokazu IWASA**, Kazuki AMI and Tsutomu YAZIMA

Faculty of Fisheries, Mie University

The ecological studies of Ise Bay have been carried out with special reference to the red tide blooms. In this paper are described mainly the oceanchemical character of the bay and abundance of phytoplankton.

The bay water is influenced strongly by three rivers water which inflow into the inner part of the bay. Dissolved oxygen of the bottom water begins to decrease at the end of April to the beginning of May, and reaches the minimum less than 0.50 cc/l in August. The low oxygen water mass spreads up to near surface layer. Dissolved organic carbon (DOC) in the bay water ranges from 0.11 to 4.29 mg-C/l, and yearly mean is 1.29 mg-C/l. Distribution of DOC corresponds with the distribution of yearly mean chlorophyll-*a* contents. Organic carbon and nitrogen of the sediment are 24~29 mg-C/g. dry weight, 2.3~3.0 mg-N/g. d.w. respectively. The soluble iron content is mostly lower than 20 μ g-Fe/l, and higher in the inner part of the bay. In annual variation of average chlorophyll-*a* content, three peaks were observed in February, June and October, and the value in June is about 5 fold of the October. The average value in the all area and the water column is 4.17 mg/m³. Standing crop of phytoplankton in the bay is estimated to be about 7,200 tons of carbon. No relation is observed between the variations of total inorganic nitrogen (TIN), phosphorus and an abundance of phytoplankton. At the bottom layer, development of low oxygen water mass was accompanied with increase of inorganic phosphorus in summer season. A high correlation, $r=-0.97$, was found between the phosphorus contents and log dissolved oxygen at the central part of the bay. It is highly probable that formation of a low

* 練習船勢水丸研究業績

* 本研究は文部省科学研究費補助金，課題番号 00448057，課題番号 56030066，水産庁受託研究費による研究の一部である。

** 現在，愛知県三谷水産高等学校 (Miya Fisheries High School, Aichi Pref.)

oxygen water mass is caused by the decomposition of organic matter in the sediment.

In June to July, increased soluble iron and TIN from the land run-off preceded the blooms of mixed population of diatom and dinoflagellates.

Keywords : ecology of estuary, chemistry of seawater, red tide, Ise Bay

伊勢湾は、瀬戸内海、東京湾、三河湾などとともにわが国における赤潮多発海域の一つであるが、赤潮に関する研究は少なく、赤潮発生水域の環境についてはよく知られていない。それ故、伊勢湾における赤潮の発生機構を解明するには、主要な構成種の生理特性の解明とともに、赤潮多発水域の環境特性を明らかにし、赤潮の発生に関与すると考えられる環境諸因子の分布、変動を詳細に調べ、これらの諸因子と発生との関係を明らかにする必要があると考えられた。本研究はこの観点から計画され、特に研究資料がない海水中の溶存態有機物量(DOC)、溶存態鉄量の分布と変動、およびその挙動と赤潮発生との関係について重点的に調査研究を行なった。

本紙では、現在までに得られた知見のうち、伊勢湾の海洋化学的性状を主体に述べる。

方 法

伊勢湾に20の調査定点 (Fig. 1) を設定し、1979年には5月、6月、7月、9月に、1980年は7月に、また、1981年には7月と9月の前後8回にわたって、伊勢湾全域の調査を実施した。各調査点では、各深度の水温、塩分濃度、溶存酸素量を測定するとともに、表層と底層(海底上1m)から採水し、クロロフィル-*a*量、各種栄養塩、溶存有機炭素(DOC)量、溶存鉄量の分析に供した。また、1979年は Fig. 1の St. 4で、1980年には St. 1で、1981年には St. 1と St. 8において、赤潮多発期の5月下旬から7月下旬まで、3~4日ごとに表層、5m、10m、底層について、上記の項目の調査を実施した。各項目の測定と分析は次の計器と方法によった。

1) 水温、酸素量：マイコンB. T. 2型(鶴見精機)および溶存酸素計 YSI-57型 (Yellow Spring Instrument Co. Inc.)

2) 塩分濃度： 塩分・電導度計 YSI-33型

3) 溶存有機炭素量： 全有機炭素測定装置 (JASCO-O. I. C., 52B-Auto型) を使用。

過硫酸カリウム ($K_2S_2O_8$, 2 ml) を $550^\circ C$ で焼いたガラスアンプルに入れ、これに試水 10 ml を注入後、8% のリン酸で酸性とし、無機態炭素および炭酸ガスを除去して密封した。このアンプルを $175^\circ C$ で1時間加熱して分解を行ない、発生した CO_2 ガスを赤外分光分析計で測定した。

4) 溶存態鉄量： 試水をグラスファイバーろ紙 (WHATMAN GF/F, $0.7\mu m$) でろ過後、STRICKLAND and PARSONS (1965) のバソフェナントロリン法で比色定量した。

5) 海泥中の窒素、炭素量： C, N コーダー (柳本 MT-500型)

6) その他の項目の分析、定量は海洋観測指針(1970)に記載の方法に準拠して行なった。

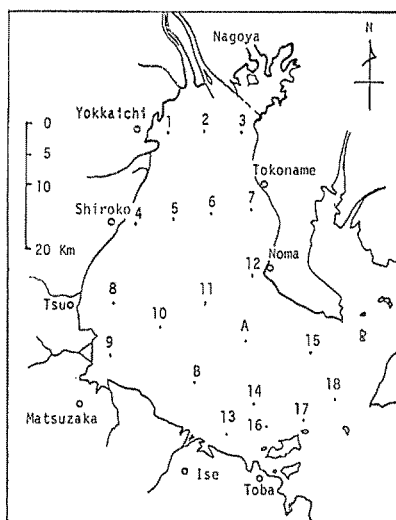


Fig. 1. Stations of observation.

結 果

伊勢湾の海洋環境特性 伊勢湾には湾奥部に木曾川、長良川、掛斐川などの大河川が流入し、また西岸には宮川、雲出川、その他多くの河川が流入している。これらの流入水量を産業公害防止協会（1973）の資料に基づいて計算すると、年間の平均総流入量は約 21.6 km^3 となり、湾内海水量（約 33.9 km^3 ）の約 64%にも達する。河川の流量は降雨量によって変るので年変動も大きい、内輪に見積っても年間に湾内水量の約半分程度の河川水が流入することになる。したがって、伊勢

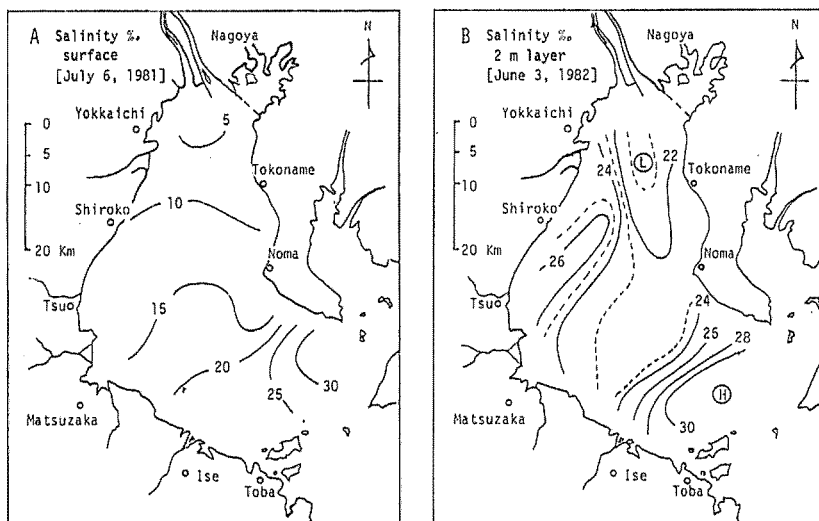


Fig. 2. Distribution of salinity in Ise Bay. A: After heavy rainfall (surface). B: After ordinary rainfall (2 m layer).

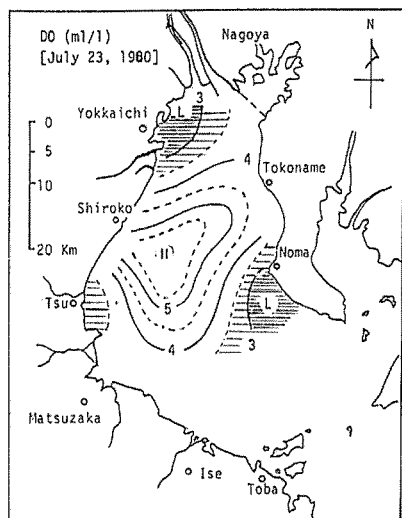


Fig. 3. Dissolved oxygen distribution at 5 m depth layer.

湾は陸水の影響を受けやすく、特に大雨後の影響はかなり大きく、変化の激しい内湾といえる。これが伊勢湾環境の大きな特徴である。その一例を Fig. 2, A に示す。これは1981年7月上旬の大雨後の表層水の塩分の濃度分布を示したものである。このように、大雨後には湾の表層水の過半が15% S 以下になることが多い。Fig. 2, B は1982年6月上旬（小降雨後）の2 m 層の塩分濃度分布を示したものである。この図は湾奥部からの陸水の影響度をよく示しており、後述する植物プランクトン現存量（クロロフィル-a量）、DOC量の水平分布ともよく符合している。

溶存酸素量の変動 伊勢湾では、4月下旬から5月上旬の間に底層で低酸素の水塊が形成される。1980年5月11日の観測では、湾中央部の St. 8, 9, 10, 11, 12, および St. Aの底層に溶存酸素量が $3 \text{ cc-O}_2/\text{l}$ 以下の水塊が見いだされた。この低酸素水塊は次第に発達して上

層に広がり、7月22日には水深10 m附近にまで達し、四日市、野間崎、および津市の沿岸では5 m以浅にまで及んだ (Fig. 3)。

この水域では赤潮がよく発生するので、低酸素水塊の浮上とある種の生物の大增殖との間に密接な関係があることが示唆された。

溶存有機炭素 (DOC) 量 伊勢湾海水中の DOC 量は年間を通して 0.11~4.29 mg-C/l の範囲で、季節によって異なる分布を示した。各調査定点における5月、6月、7月および9月の測定平均値を求めて、水平分布図を描くと Fig. 4 のようになる。春から秋にかけての DOC の分布は、このように、一般に両岸、特に西側の三重県沿岸で高い傾向を示した。

1979年の伊勢湾全域調査時の測定 DOC 値を月ごとに平均して示すと Table 1 のようになる。

Table 1. Dissolved organic carbon in the seawater of Ise Bay.

| Sampling date | Depth | Number of samples | DOC mg-C/l | | |
|------------------|---------|-------------------|------------|---------|--------------------|
| | | | Values | Average | Standard deviation |
| May, 16, 17 | Surface | 20 | 0.70-2.23 | 1.42 | 0.43 |
| | Bottom | 20 | 0.70-2.03 | 1.06 | 0.29 |
| June, 6, 8 | Surface | 20 | 1.21-2.59 | 1.57 | 0.29 |
| | Bottom | 20 | 0.67-1.67 | 1.20 | 0.21 |
| July, 2, 3 | Surface | 20 | 1.00-2.74 | 1.90 | 0.40 |
| | Bottom | 20 | 0.84-1.38 | 1.12 | 0.16 |
| Sept., 12 | Surface | 12 | 1.71-2.24 | 1.97 | 0.15 |
| | Bottom | 12 | 1.01-1.77 | 1.33 | 0.22 |
| Dec., 12, 13, 14 | Surface | 20 | 0.18-1.33 | 0.68 | 0.32 |
| | Bottom | 20 | 0.11-1.29 | 0.62 | 0.31 |

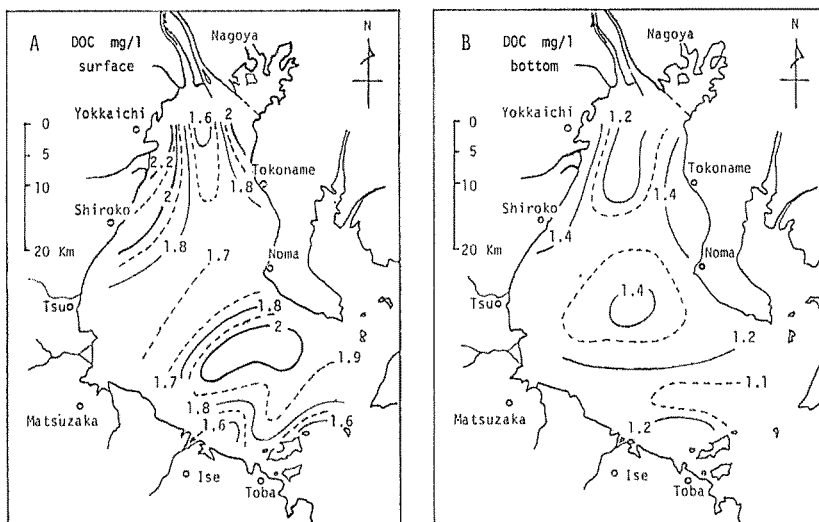


Fig. 4. Distribution of dissolved organic carbon shown in average values of May, June, July, and September in 1979. A: Surface. B: Bottom.

伊勢湾海水中の DOC 量は春先から増加して、夏期（7月～9月）に最も高く、10月に下降し始めて冬期には最低となる傾向が認められた。また、表層水と底層水との DOC 量を比較すると、一般に表層水に多く、底層水では少なかった。その差は春先に開き始め、夏期に最も大きく、冬期には最小となり上下層であまり変らなくなった。

海水中の DOC 量と化学的酸素要求量(COD)ならびにクロロフィル-a量の関係についてみると、6月と7月にそれぞれ高い相関関係（いずれも $r=0.71$ 以上）を示したが、それ以外の月では有意な相関は見いだせなかった。したがって、6月と7月における溶存有機炭素 (DOC) 量は、主に植物プランクトンに由来するものと考えられる。

溶存態鉄量 伊勢湾海水中の溶存態鉄量についてみると、湾奥部の St. 1, 2, 3, 4 において、時折、 $30 \mu\text{g-Fe/l}$ 以上の高値を示すこともあるが、その他の水域ではいずれも $20 \mu\text{g-Fe/l}$ 以下であった。ただ一度であるが、1979年5月に St. 2 で $500 \mu\text{g-Fe/l}$ 以上の高値が検出された。

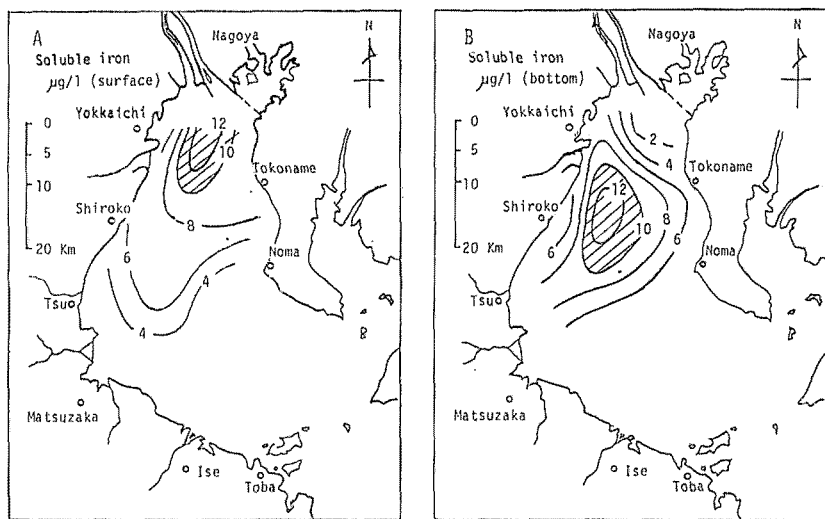


Fig. 5. Distribution of Soluble iron in July, 1980. A: Surface. B: Bottom.

一般に春期に高い傾向を示した。1980年7月の伊勢湾全域調査において測定された溶存態鉄量の水平分布を Fig. 5 に示す。表層では湾奥部が最も高く、湾口部に近づくとともに低くなるが、湾奥部からの木曾三川の流路で高い傾向がみられる。底層では白子沖の St. 5 で最高値 ($14.4 \mu\text{g-Fe/l}$) を示した。

海底堆積物中の窒素、炭素量 海底堆積物中には赤潮鞭毛藻の増殖を刺激する物質の存在を示唆する報告が数多くみられる。伊勢湾では、海底堆積物の化学組成に関する資料がないので、1981年9月に採泥を行ない、まず堆積物中の有機炭素、窒素量について定量した。その結果を Table 2 に示す。

伊勢湾における海底堆積物中の炭素量は $4.8 \sim 29 \text{ mg/g}$ 乾泥で、調査した範囲では St. 15 を除き大差はみられなかったが、St. 10 で僅かに高かった。St. 15 における低値は砂泥質のためである。有機窒素量は $0.3 \sim 3.3 \text{ mg/g}$ 乾泥で、炭素量と同じく大差がなかったが、St. 8, 10 で若干高値を示した。

Table 2. Organic carbon and nitrogen in the sediments of Ise Bay.

| Stations | Organic carbon mg/g* | Organic nitrogen mg/g* |
|----------|-------------------------|---------------------------|
| 5 | 24 | 2.4 |
| 6 | 25 | 2.6 |
| 8 | 26 | 3.0 |
| 10 | 29 | 3.3 |
| 11 | 24 | 2.4 |
| 15 | 4.8 | 0.3 |

* It shows mg per gram of dried sediment.

植物プランクトン現存量 本調査結果と三重県伊勢湾水産試験場の観測資料から、伊勢湾の各調査地点におけるクロロフィル-*a* (フェオ色素除去) 量の年間平均値を求め、表層、および底層までの水柱平均について水平分布を描くと Fig. 6 のようになる。

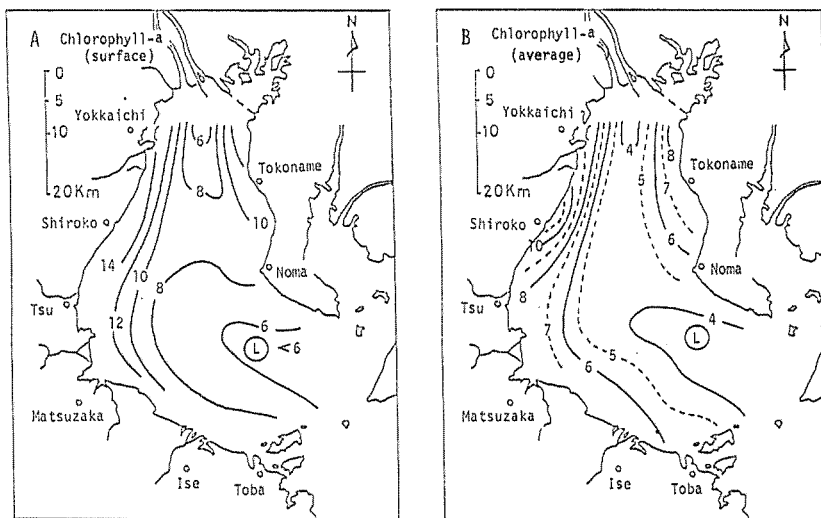


Fig. 6. Distribution of yearly mean chlorophyll-*a* in 1980. A: Surface. B: Average of water column.

表層におけるクロロフィル-*a* 量の分布 (Fig. 6, A) についてみると、木曾三川の河口部と湾口付近で最も低く、兩岸、特に西側で高い傾向がみられた。水柱平均のクロロフィル-*a* 量分布 (Fig. 6, B) でも値は少ないが、全く同様な傾向を示した。これらの水域は伊勢湾における赤潮の多発生水域である。伊勢湾の中央帯では、木曾三川からの淡水および外海からの高かんな海水の影響を受けるところは低く、その影響度が少なくなるとともにクロロフィル-*a* 量が高くなっている。

次に、各調査点における表層と底層のクロロフィル-*a* 測定値を用い、全水域について月ごとに平均値を求めてその変動を示すと Fig. 7 のようになる。

伊勢湾におけるクロロフィル-*a* 量は6月 (27.4 mg-chl. a/m^3) と9月 (11.7 mg-chl. a/m^3) にピークを示し、全域の表層の年間平均クロロフィル-*a* 量は 6.8 mg-chl. a/m^3 であった。この

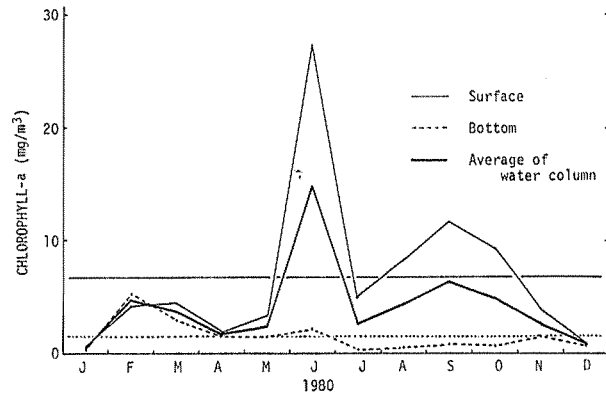


Fig. 7. Annual change of mean monthly chlorophyll-*a* in Ise Bay, 1980.

値は他の沿岸水域に比べるとかなり高い値である。一方、底層では2月に最高値(5.3 mg-chl. *a*/m³)を示し、以降多少の増減はあるが7月まで次第に減少して、11月に僅かに高く(1.6 mg-chl. *a*/m³)なり、その後再び減少して1月上旬に最低値(0.32 mg-chl. *a*/m³)を示した。伊勢湾全域の底層における年間平均のクロロフィル-*a*量は1.6 mg-chl. *a*/m³であった。また、1980年における全域全水層の植物プランクトン現存量の平均値は4.17 mg-chl. *a*/m³であった。

伊勢湾における環境因子と植物プランクトン量の変動 伊勢湾の恒常的な富栄養域である四日市港外の St. 1 と、湾のほぼ中央部にある St. 11 における全無機窒素、リン量の周年変化と植物

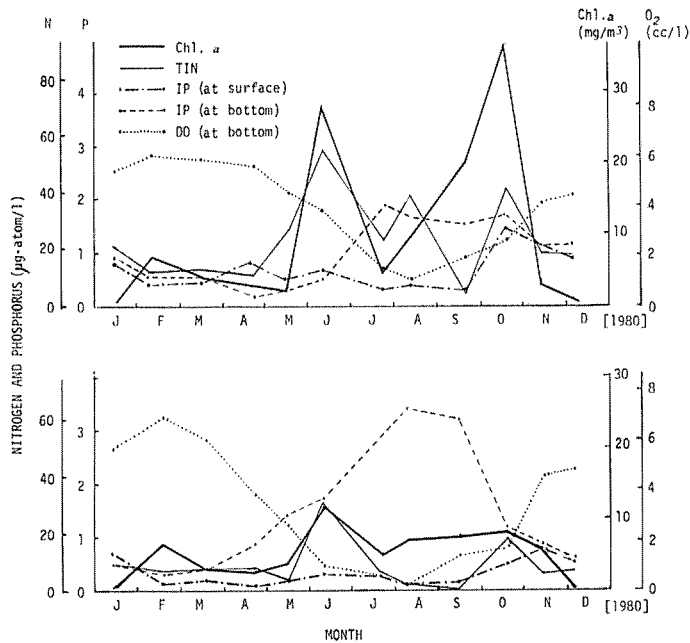


Fig. 8. Annual change of chlorophyll-*a*, total inorganic nitrogen, inorganic phosphorus, and dissolved oxygen at St. 1 and St. 11 in 1980.

プランクトン量の変動との関係を Fig. 8 に示す。植物プランクトン量の指標にはクロロフィル-*a* 量が使用された。

St. 1 では、冬季を除き植物プランクトンの現存量は他の水域よりも常に多く、6月と10月にピークを示したが、2月の増殖は目立たなかった。一方、St. 11 では2月、6月、10月に山がみられたが、St. 1 に比べるとはるかに少なく、1/2 以下であった。次に、海水中の窒素、リンの変動と植物プランクトン生産との関係についてみると、6月の大増殖前に St. 1 では窒素量の増加がみられたが、それ以外は両地点とも、窒素、リンの増加後に植物プランクトン量が増大するという関係は全くみられず、むしろ両者は併行して変動した。この傾向は特に窒素量で顕著であった。したがって、伊勢湾では、無機の窒素、リンは植物プランクトンの生産に対して制限因子とはならず、その生産に直接的に関与するのは他の因子であることは明らかである。

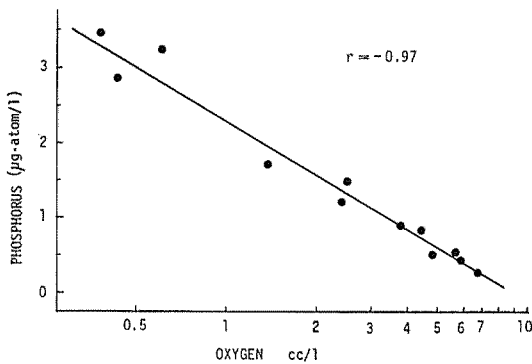


Fig. 9. Relation between phosphorus contents and dissolved oxygen of the bottom water at St. 11.

と溶存酸素量との間には高い相関は認められなかった。参考までに、底層水における酸素量の減少と表層の植物プランクトン量との関係についてみると、両者の間には関連はみられず、底層における溶存酸素の低減は、表層で生産された植物プランクトンの直接的分解によるとは考えられない。したがって、底層水に高濃度に出現する無機態のリンは、海底の有機堆積物の酸化分解によって生成されることは明らかであり、伊勢湾における無機態リンの主要な補給源は海底の有機堆積物であることがわかる。

1980年には、6月中旬に四日市市、津市、松阪市および伊勢市の沿岸水域に、*Cerataulina bergonii*, *Chaetoceros socialis*, *Skeletonema costatum*, *Prorocentrum minimum*, *Gymnodinium* sp. など混合種の大増殖がみられた。四日市沿岸の St. 1 では、6月10日から7月22日の間に前後3回にわたって海水が変色した。この海水の変色は上記の生物群の数種（7月上旬には *Heterosigma inlandica* を含む）の大増殖によるものであった。St. 1 における植物プランクトン量と環境諸因子の垂直分布の変動を Fig. 10 に示す。ここでクロロフィル-*a* 量が 50 mg/m³ 以上を赤潮状態として考えると、赤潮の形成はいずれも水温が 22°~25°C の間で、海水中の溶存態鉄と全無機窒素量の増加後、すなわち、前者は 10 µg-Fe/l 以上、後者は 20 µg-atom-N/l 以上に達して数日後に共通してみられた。St. 1 における表層海水中の溶存鉄量と植物プランクトン量の変動との関係を Fig. 11 に示した。

これらの環境因子のなかで対蹠的に変動したのは、底層水の溶存酸素量と無機態リンの量である。富栄養域の浅い St. 1 では、その関係はそれ程目立たなかったが、両者は正反対の動きを示し、この関係は中央部の St. 11 (水深約40 m) で特に顕著であった。この関係を調べるため、St. 11 における底層水の溶存酸素量の対数を取り、無機リン量との相関を求めてみると、Fig. 9 に示されるように、極めて高い負の相関関係 ($r = -0.97$) がみられ、両者の間には、

$$P = 2.26 - 2.38 (\log O_2)$$

の関係式が得られた。一方、無機の窒素量

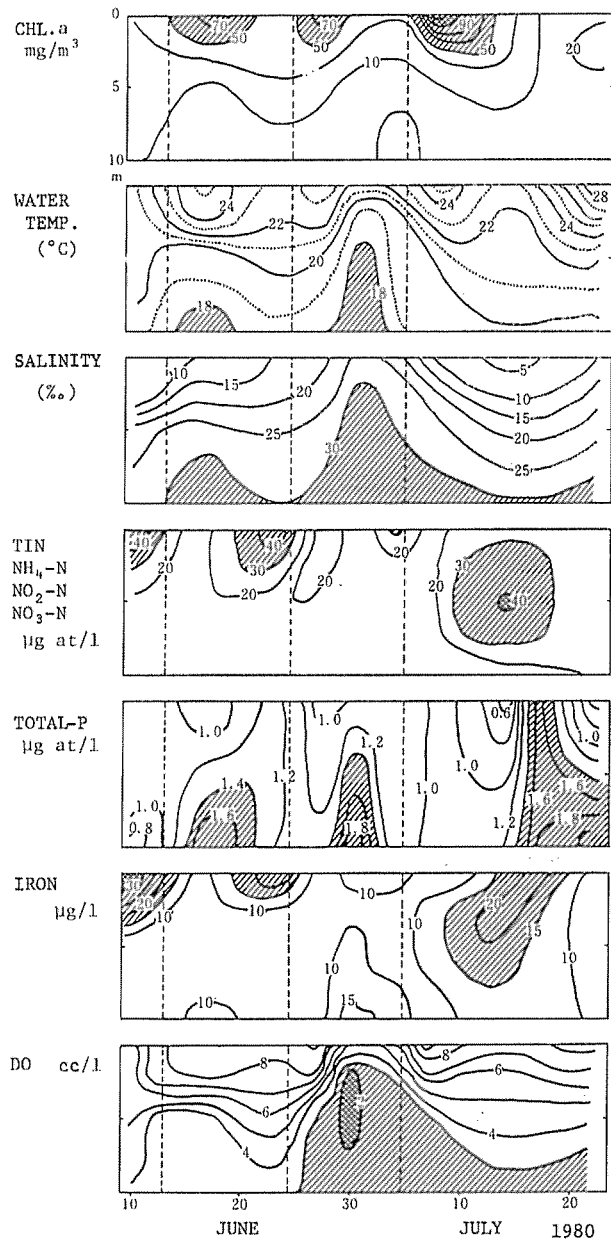


Fig. 10. Variations in the vertical distribution of chlorophyll-*a* and environmental factors at St. 1.

各環境因子の間で類似の挙動を示したものは、一つは塩分濃度、溶存酸素および全リン量で、いま一つは全無機窒素量と溶存鉄量であった。前者は底層水の動きと密接に関係しており、後者は陸水の影響を強く受けることが明らかにされた。

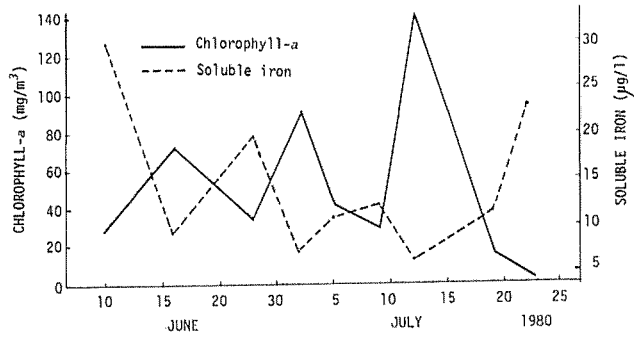


Fig. 11. Variations of chlorophyll-*a* and soluble iron in the surface water at St. 11, 1980.

考 察

伊勢湾は、湾奥部に流入する木曾三川の影響を強く受けるため変化が激しく、水質的には不安定な環境の内湾である。このため、ある時点での観測値が必ずしもその地点を代表するとは限らないので、季節または年間の平均値を用いて検討を行なった。

伊勢湾中央部の海底では、4月下旬から5月上旬にかけて底層水中の酸素量の減少がみられ、これが発達して次第に上層に広がってくる。この低酸素水塊の形成には、春季に大增殖した植物プランクトンの腐敗分解によるとの考えと、海底に堆積した有機物質に主原因を求める2つの考え方がある。本研究の結果では、Fig. 8 にみられるように、植物プランクトンが増殖する以前からすでに溶存酸素量の減少が始まっており、また、大增殖後の7月の調査における湾中央部の溶存酸素量の垂直分布構造からも、植物プランクトンの直接的分解によるものとは考えられなかった。したがって、本湾の場合、低酸素水塊の生成は主に海底に堆積した有機物の酸化分解によるものと考えてよいようである。

伊勢湾海水中における DOC 量は年間を通じて 0.11~4.92 mg-C/l (全平均 1.29 mg-C/l) であった。表層水中の季節変化は、他の海域における変動 (HOLMES *et. al.* 1967, MORRIS and FOSTER 1971, OGURA *et. al.* 1975) と類似している。これらの結果は、前に指摘したように、海水中の DOC は主に植物プランクトンに由来することを示唆するものである。瀬戸内海の播磨灘における 1978年6月と1979年11月の調査 (岡市 1981) では、1.62~3.7 mg-C/l の範囲で 1.8~2.0 mg-C/l が大部分を占めている。これに比べると、伊勢湾では海水中の DOC 量の幅が広く、変化量は大きい、平均的には播磨灘よりも低いといえる。

海底堆積物中の有機炭素、窒素量については、本湾の場合測定数が少ないが、調査した範囲では播磨灘に比べると両者とも高く、平均では2倍以上となっている。この結果から、伊勢湾においては海泥中に占める有機物量は播磨灘に比しはるかに高いことがわかる。

1980年における伊勢湾全域の全水層の植物プランクトン現存量の平均値は 4.17 mg-chl. *a*/m³ であった。ここで C/chl. *a* を 50 と仮定して計算すると、伊勢湾全域の植物プランクトン年平均現存量は炭素量にして概算 7,200 トン、生体量では約 72,000 トンと推定される。

1980年には6月上旬から7月下旬にかけて前後3回にわたって珪藻を主体に渦鞭毛藻を含む赤潮状態が観察された。1981年には、5月中旬に *Prorocentrum minimum* による赤潮が伊勢湾の西側沿岸に発生したが、準備の都合で環境調査が実施できず、その後大規模な赤潮の発生はみられ

なかった。このため、伊勢湾における鞭毛藻による赤潮の発生と環境要因との関係については、現時点では論議できない。

珪藻類の大増殖と環境要因との関係についてみると、いずれも溶存態鉄量と全無機窒素量の増加後に大増殖がみられた。調査点は非閉鎖水域であり、厳密には同一水塊とはいえないので、その因果関係については論議できないが、これらの結果は、春から夏の間の伊勢湾における珪藻類の大増殖の前駆現象として注目すべきことと思われる。

次に、この赤潮多発期における栄養物質の起源についてみると、窒素は垂直分布の変動(Fig. 10)から陸水によって補給されることは明らかである。一方、リンは表層で常に低く底層に多いこと、および底層水の浮上に伴って高くなることなどから、この水域では大部分のリンは海底から補給されるものと考えられる。また、溶存態の鉄は主に陸水によって補給されるが、一部は海底から補給されることが Fig. 10 から示唆される。すなわち、6月10日および7月15日頃にみられた $30 \mu\text{g-Fe/l}$ 前後の時の塩分濃度は 10 ‰ S 以下であり、これは明らかに陸水によるものといえる。7月上旬には底層水の浮上とともに高くなっており、海底からも一部補給されることを示している。

なお、溶存態鉄量の分析法について附言すると、本研究ではグラスファイバーろ紙(WHATMAN GF/F, $0.7 \mu\text{m}$)で海水をろ過して測定したが、Polycarbonate membrane ($0.2 \mu\text{m}$)でろ過した場合の値とは多少異なるので、その存在形態とともに、相互比較のためには使用するろ紙の孔径(pore size)についても、今後検討する必要があると考えられた。

最後に、本研究に協力戴いた本学練習船の陣野哲郎船長はじめ乗組員各位、および供試海水の採水に協力され、貴重な海洋観測資料を供与戴いた三重県伊勢湾水産試験場に深く感謝の意を表す。

文 献

- HOLMES, R. W., P. M. WILLIAMS and R. W. EPPLEY, 1967. Red water in La Jolla Bay, 1964-1966. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 503-512.
- MOHRIS, A. W. and P. FOSTER, 1971. The seasonal variation of dissolved organic carbon in the inshore waters of the Menai Strait in relation primary production. *Limnol. Oceanogr.*, 16: 987-989.
- OGURA, N., A. KAMATANI, N. NAKAMOTO, M. FUNAKOSHI and S. IWATA, 1975. Fluctuation of dissolved organic carbon in seawater of Sagami Bay during 1971-1972. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 31: 43-47.
- 岡市友利, 1981. 海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究〔データ集〕, 「環境科学」研究報告集 B110-R14-7. 産業公害防止協会, 1973. 伊勢湾における汚濁物質の循環機構に関する調査報告(昭和48年6月).
- STRICKLAND, J. D. H. and T. R. PARSONS, 1965. A manual of sea water analysis. *Fish. Res. Board Can.*, Ottawa. 95-106.