

## 8. 河川流水域における淡水赤潮の発生機構 とその防除

——四万十川河口域を例として——

1. はじめに
2. 赤潮の実態と発生状況
3. 赤潮の発生条件
4. 赤潮原因生物 Plagioselmis SP. '87の増殖生理特性
5. 藻類生産潜在力試験 (AGP試験)
6. 中筋川の物理的環境と赤潮生物の集積
7. 赤潮生物の毒性
8. 総括

高知大学農学部教授

畠 幸彦

" 教授

木村 晴保

" 助教授

西島 敏隆

高知大学海洋生物教育研究センター教授

大野 正夫

"

助手 岩崎 望



## § 1 はじめに

近年、琵琶湖では*Uroglena*による淡水赤潮が頻発して、この湖の有機物汚染や富栄養化の進行との関係が論議されている。一方、多くのダム湖にも淡水赤潮が発生するようになり、この原因生物は殆どの場合、渦鞭毛藻類に属するPerioinum属であることが知られている。筆者らは、永瀬ダム湖（高知県）における淡水赤潮の発生状況とその機構について長年に亘る調査・研究を実施し、その原因生物の生理・生態、発生環境、発生機構等に関して多くを解明することが出来たが、現在更に穴内川ダム湖についての調査・研究を継続中である。

ところで、中筋川は図1に示すように清流として知られる四万十川の河口付近に流入する一枝川であるが、近年、秋季から冬期にかけてこの下流域に淡水赤潮現象が起こり、殊に1984年12月から翌年2月の赤潮は従来なく濃厚で長期にわたったので地域住民や漁業者に関心と不安感を与えた。その後も低水温期に、この赤潮現象は継続的に出現し、最後の清流といわれる四万十川のイメージをそないかねない。

そこで、赤潮現象として珍しい流水域での例としてこの河口域を対象に、赤潮の実態、発生環境、原因生物とその増殖生理、藻類生産潜在力試験（AGP試験）などを実施して赤潮発生機構を解明し、その防除対策を考究しようというのが、本研究の目的である。

## § 2 赤潮の実態と発生状況

中筋川における淡水赤潮は、11月中旬ないし12月中旬頃に始まり、翌年2月上旬ないし3月中旬頃に終わる。この間に2回ないし5回位にわたって発生・消滅し、短いときは2～3日で消滅するが、長いときは20～30日以上に及ぶこともある。

発生場所は、図2に示すように四万十川本流との合流点から3～4km上流の坂本橋付近を中心として、その上流域又は下流域にわたり1～2km以上に及ぶことがある。発生初期には、多くは茶褐色（レバー色）のやや薄い筋状ないし帯状の浮遊性集団として川幅の一部を細長く占めるが、盛期には川幅のほぼ全体が数百mないし1km以上にわたり濃厚な茶褐色に覆われる。

赤潮は潮汐、水の流下の影響を受け、赤潮の下流端はほぼ潮境付近にあって、潮汐と共に上流又は下流へ移動する。また、この赤潮生物は明瞭な走光性を有するので、早朝には赤潮は見られず、おそらく下層に滞留しているものと思われる。日中は表層の数cmないし数十cmにわたり分布するが、込み潮時には表層へ、引き潮時には底層へ移動する傾向がある。

ところで、この川に発生する赤潮の原因生物は褐色鞭毛藻に属するPlagioselmis sp. 及びIsoseimis sp. 並びに渦鞭毛藻のKatodinium sp. であつて、Plagioselmisを第1優占種（盛期には5,000～30,000細胞/ml）とし、Isoseimis（3,000～20,000細胞/ml）、Katodinium（100～500 細胞/ml）が混在している。褐色鞭毛藻による淡水赤潮は、今までCryptomonas 及びCyanomonasによるものが稀に報告されているのみで、PlagioselmisやIsoseimisによるという例は未だ報告を見ない。

また、淡水赤潮はダム湖の上流端付近や貯水池など水の滞留部に現れることが多く、この川のように水の流動している河口域に出現するという例も、おそらく報告はないであろう。

### § 3 赤潮の発生条件

1985年度及び1986年度の調査結果に基づいて、この川における淡水赤潮の発生時の環境条件を記すと以下のとおりである。

#### 3-1 水温

1985年度の発生期間中：17.5°C（11月上旬）～4.5°C（1月上旬）～6.0°C（3月上旬）

1986年度の発生期間中：14.5°C（11月上旬）～5.5°C（1月上旬）～9.0°C（2月上旬）

#### 3-2 栄養塩類

1985年度 坂本橋（赤潮中心点） 具重（上流点）

D TN (mg/1) 0.3～1.4 (平均0.6) <0.1～1.2 (平均0.4)

D TP (mg/1) 0.04～1.15 (平均0.10) 0.02～0.12 (平均0.07)

1986年度

D TN (mg/1) 0.1～0.8 (平均0.3) 0.1～0.7 (平均0.5)

D TP (mg/1) 0.02～0.09 (平均0.05) 0.02～0.08 (平均0.05)

これらの値を、栄養塩濃度に基づく湖沼の栄養度の分類（富栄養湖TN0.2mg/1以上、TP0.015mg/1以上）に照らすと、この水域は甚だしく富栄養状態にあることになる。

#### 3-3 塩分

1984年12月の赤潮発生時の現場塩素量は、0.01～0.8%であった。

#### 3-4 降水、日照及び流量

赤潮発生時には降水量がゼロか又は甚だ少なく、比較的安定した日照時間が継続した時で、一方、赤潮の消滅は日射量少なく降雨に伴うことが多い。

1984年度から1986年度の調査によれば、赤潮発生時の発生地点における流量は0.47～1.74m<sup>3</sup>/secで、消滅時には1.07～11.07 m<sup>3</sup>/sec であって、赤潮は流量の少ない安定時に発生し、流量増加に伴って流失・消滅するようである。

### § 4 赤潮原因生物 Plagioselmis sp. '87の増殖生理特性

#### 4-1 培養

試験に用いたプランクトンは、1987年9月に中筋川から採取し、ピペット洗浄法により分離・無菌化し、單一種株を得たものである。細菌検査は、STP<sub>ss</sub>培地を用いて1週間培養し、細菌の増殖のないものを無菌と判定した。

培養は、通常は修正Chu No.10 培地（表1）を用い、バッヂ培養法で、照度 9,000lux(L/D=14/10)、水温21°Cで行い、試験目的に応じて培地成分及び培養条件を改変した。

## 4-2 増殖に及ぼす物理・化学的要因の影響

### (1) 水温

培養試験の結果を図3に示した。*Plagioselmis* sp. '87は、水温10~25°Cにおいて良好に増殖し、20°Cにおいてその最大増殖量が267,445cells/mlと最も良く増殖した。また5°Cの低温においても増殖が見られ、最大増殖量は63,867cells/mlであった。以上から、この種は水温5~25°Cの広い範囲で増殖が十分可能であり、その至適水温は20°C付近であることが明らかとなった。

### (2) 照度

培養試験の結果を図4に示した。すなわちこの種は、試験した1,000~14,000luxの全ての試験区において良好に増殖し、至適照度は10,000luxであることが明らかとなった。

### (3) pH

培養試験の結果を図5に示した。すなわちこの種は、試験したpH 6~9.5の全ての試験区において良好に増殖し、至適pHはpH 8~9であることが明らかとなった。

### (4) 塩分

この種は、塩素量が0%で増殖が最良で、1.9%でかなり抑制され、3.8%以上では全く増殖が見られなかった(表2)。よってこの種の場合、塩分に対する抵抗性は1.9%以下であることが明らかとなった。

## 4-3 増殖に及ぼす栄養物質の影響

### (1) 窒素

増殖に及ぼす窒素源の要求性試験の結果を表3に、またNO<sub>3</sub>-Nの要求量試験の結果を図6に示した。要求性についてはこのプランクトン種は試験を行ったNO<sub>3</sub>-N NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N及びUrea-Nの全ての濃度範囲で要求を満たし、NO<sub>3</sub>-N 10mg N/lにおいては、その最大増殖量が510,000cells/mlと最も高かった。またNH<sub>4</sub>-Nは、高濃度では毒性を示すことが多いが、この種では10mgN/mlにおいても阻害が見られなかった。

次にNO<sub>3</sub>-Nの要求量については、その最大増殖量がNO<sub>3</sub>-N 5.0 mg N/lまで濃度と共に増加したが、5~10mg N/lでほぼ最高となり、20mg N/lまで増殖量の低下は認められなかった。よってこの種の場合、最大増殖量を基準としたNO<sub>3</sub>-N要求量は、5 mg N/l程度であると思われる。

次に、これらの増殖曲線から得られたNO<sub>3</sub>-N濃度と比増殖速度及び平均世代時間との関係を表4に示した。これによると、比増殖速度は、NO<sub>3</sub>-N濃度10.0mgN/lまでは濃度の増加と共に増大したが、20.0mg N/lで最大となり、50mg N/lまで増殖速度の低下は、認められなかった。更に、これらの関係からWoolfプロットによって求めた最大比増殖速度及び半飽和定数(図7)は、それぞれ0.77/day及び0.15mg N/lであった。一般に半飽和定数の10倍の基質濃度は、最大比増殖速度の約90%の速度を与えると計算されるので、このプランクトンの増殖速度は、約1.5mg N/lでほぼ飽和することがわかる。

### (2) リン

培養試験の結果を図8に示した。PO<sub>4</sub>-P濃度0.5 mg P/lまでは、最大増殖量は濃度に依存して

増加したが、 $1.0\text{mgP/l}$  程度で最高となり、 $10\text{mg P/l}$  でもそれ程低下が認められなかった。よって、このプランクトンの最大の増殖量を基準とした $\text{PO}_4\text{-P}$  要求量は、約  $0.5\text{mgP/l}$  程度であることがわかった。

次に、表5に示す比増殖速度は、 $\text{PO}_4\text{-P } 0.1\text{mg P/l}$  ではほぼ飽和して $10\text{mg P/l}$  まで増殖速度の低下は見られなかった。更に、図9より、最大比増殖速度及び半飽和定数は、それぞれ $0.88/\text{day}$  及び $0.0078\text{mg P/l}$  であった。よって、このプランクトンは、 $\text{PO}_4\text{-P 約}0.88\text{mg P/l}$  程度で増殖速度がほぼ飽和することが明らかとなった。

### (3) ビタミン

ビタミン類の要求性試験の結果を表6に示した。赤潮形成植物プランクトンの殆どがビタミン $\text{B}_{12}$ を必須的に要求するが、このプランクトンも同様に要求性を持つことが、明らかになった。

ビタミン $\text{B}_{12}$ の要求量試験の結果を図10に示した。最大増殖量については、ビタミン $\text{B}_{12} 0.05\ \mu\text{g/l}$  まで共に増加し  $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1\ \mu\text{g/l}$  でも低下は認められなかったが、 $10\ \mu\text{g/l}$  ではやや増殖が抑制された。よってこのプランクトンの最大増殖量を基準としたビタミン $\text{B}_{12}$ の要求量は、約 $0.05\ \mu\text{g/l}$  程度であることがわかった。

次に、表7から比増殖速度は  $0.1\ \mu\text{g/l}$  程度でほぼ飽和して、 $10\ \mu\text{g/l}$  まで、大きな低下は認められなかった。更に、図11より、最大比増殖速度及び半飽和定数は、それぞれ $0.95/\text{day}$  及び  $0.0023\ \mu\text{g/l}$  であった。よってこのプランクトンは、ビタミン $\text{B}_{12}$ 約 $23\text{ng/l}$  で増殖速度がほぼ飽和することがわかった。

### (4) 金属

培養試験の結果を表8に示した。これによると、このプランクトンはCaとMgの両方を要求し、更にFeの添加により増殖量がより増加することがわかった。また、これらにP IV metalを加えると、増殖量が最高に達した。よってこのプランクトンの増殖には、様々な金属類が関与していると思われるが、植物プランクトンの増殖には、様々な微量金属類が相互に、あるいは他の栄養塩類との相乗効果によって関与しておりその詳細については、今回の実験だけでは不明である。

## § 5 藻類生産潜在力試験 (AGP試験)

### 5-1 AGPについて

AGP (Algal growth potential : 藻類生産の潜在力) の基本的な考え方は、試水を基礎とした培養液内で、ある一定条件で藻類の培養を行い、その増殖特性をもとに試水の持つ藻類増殖ポテンシャル (AGP) を、様々な角度から解析しようというものである。近年では、単に現状の把握のみにとどまらず、予測および制御のためや毒性物質の評価にも用いられている。

AGPに関する研究は、Bringman(1956)やSkulberg(1966)によって始められた。その後1969年に藻類培養試験暫定法(Provision Algal Assay Procedure:PAAP)が、また1971年にはP AAPを発展させた藻類培養試験回分法 (Algal Assay Procedure Bottole Test:AAP) が定められ、現在のAGP測定の基礎となっている。また、試水のポテンシャルを測定するだけでなく、変法として試水へ種々の栄養物質の添加による制御因子の検索や、天然の藻類群集を接種液とする混合培養法がある。

## 5-2 実験方法

本試験では、中筋川原水での赤潮プランクトンの培養により現場河川水の持つAGPを求め、また、栄養物質を単独あるいは組み合わせて原水に添加した8種類の試水のAGPと原水のAGPを比較することにより、現場河川水における制限物質を推定した。

供試生物としては、1987年9月に採水した中筋川河川水より、ピペット洗浄法で分離・無菌化した Plagioselmis sp. '87 を用いた。

培養は、バッチ培養法で、21°C 9,000lux(L/D=14/10)で行った。接種は、細胞内蓄積栄養物質量が少なく、かつ接種後の増殖が最も安定している指数増殖期後期に行った。増殖量の測定は、接種後2～3日ごとに行い、顕微鏡で直接計数法により細胞数を求めた。前培養は100ml三角フラスコを用い、AGP試験は3本法で行った。

## 5-3 試水の採取及び保存

採取は、1986年6月27日、8月6日、10月13日、11月19日、12月8日、1987年1月12日、2月13日、3月2日、5月23日及び6月26日の合計10回行った。採水は、図1に示した2地点、すなわち赤潮発生区域である坂本橋(St.1)と、これより上流で赤潮発生の見られない中島橋(St.2)で行い、それぞれ表層水を採水バケツにより採取した。採水後は、速やかに研究室に持ち帰り、孔径0.45μmのメンブランフィルターでろ過して、-20°Cで凍結保存し実験直前に解凍して供試した。

## 5-4 AGP試験の結果及び考察

### (1) 現場河川水におけるAGPの季節変化

上流域(St.2)と下流域(St.1)におけるAGPの季節変化を図12に示した。

20試水中、最も高いAGPを有していた試水は、赤潮発生時の1986年11月下流域(St.1)の試水で、最大増殖量は他の試水の2～500倍に達した。

この下流について見ると、1986年6月、11月、1987年1月、3月、4月及び5月の試水は比較的高いAGPを有し、最大増殖量は、33,900～98,700cells/mlの範囲を示した。しかし、12月の試水は、赤潮発生期間内に採水したものであるにもかかわらず、最大増殖量は16,800cells/mlを示したに過ぎなかった。これは、この他の全試水の採水が干潮時に行われたために、四万十川河川水がこの付近まで流入し、現場河川水が希釀されたためではないかと考えられる。1986年8月及び10月の試水は、増殖が全く認められなかった。また、1987年2月の試水は最大増殖量が540cells/mlにすぎず、AGPは非常に低かった。

上流域(St.2)では、1987年2月の試水は最大増殖量が540cells/mlにすぎず、AGPは非常に低かった。

上流域(St.2)では、1987年5月の試水を除き、最大増殖量は比較的低く0～13,950cells/mlであった。また、1986年10月の試水は、増殖が全く認められなかった。上流域の試水中、AGPが特異的に高かった5月の試水では、最大増殖量は60,000cells/mlに達した。これは、降雨による河川への流入水の増大や、流量の増大(図13)による底土中の増殖促進物質の溶出に起因する

のではないかと考えられる。

上流域と下流域のAGPを比較すると、AGP値の低かった1986年8月、10月及び1987年2月の試水と、降雨の影響を受けたのではないかと考えられる5月の試水を除いては、全試水において、下流域のAGPが明らかに高かった。

すなわち、中筋川河川水のAGPは、赤潮発生時の現場において最も高く、また、汚濁の進んだ下流域で高いことがわかった。そして、周年的にはその値はかなり変動するが、基本的にAGPは高いレベルにあると考えられる。

## (2) AGPの水質の関係及び制限物質の推定

全試水中最大のAGPを有していた1986年11月下流域(St.1)の試水は、全窒素、全リン及びビタミンB<sub>12</sub>の濃度においても最大であった。

満潮時における採水のためAGPの低下が起きていたのではないかと考えられた1986年12月下流域の試水では、全窒素及び全リンの著しい低下が見られ、その濃度は下流域の全試水において最も低かった。この試水は、流量が安定していた時期に採水されたものであり、降雨による影響は考えられないことから、やはり潮汐による四万十川河川水の流入に原因があると考えられるのが妥当であろう。したがって下流域では、赤潮発生時においても、AGPは、潮汐により、地理的に著しい変動を繰り返していると考えられる。

上流域(St.2)では、特異的に高いAGPを有していた1987年5月の試水において、全リンの増加が見られた。しかし、この全リンとAGPの関係を除いては、水質とAGPの間に一定の傾向は見られなかった。また、この他の全試水においてリンの添加効果が見られたことから、この流域は周年に亘って強いリン制限下にあると考えられる。

下流域(St.1)と上流域(St.2)の水質を比較してみると、化学分析した全物質が、下流域において高い傾向を示した。このことは、AGPが上流域より下流域において高い傾向を示したことと一致する。

下流域(St.1)では、赤潮発生時にはAGPと各種栄養物質、特に全窒素及び全リンとの間に高い相関が見られた。しかし、周年的には、水質とAGPの間に一定の傾向は見られなかった。栄養物質添加効果は、低いAGP値を示した1987年2月の試水を除きあまり顕著でなく、一定の傾向も見られなかった。また、水質との対比でも高い相関は見い出せなかった。ビタミン類及び金属類の単独添加は、殆ど効果が見られず、一方全ての複合添加は単独添加より効果が高かった。

すなわち、中筋川下流域では、Plagioselmis sp.'87の窒素要求量(0.1~5.0mgN/ml)とリン要求量(0.01~0.50mgP/ml)は、かなり高いレベルで満たされており、通常は、これらとは異なる微量栄養物質や阻害物質あるいは、それらの複雑な相乗効果によりAGPが支配されていて、赤潮発生時には全窒素及び全リンの顕著な増加とともに、微量栄養物質の促進作用、あるいは阻害作用の解除によるAGPの飛躍的な増大が起きているのではないかと考えられる。

以上のことから、上流域ではリンが第一制限要因である中筋川河川水は、下流に至るまでの間に、窒素、リン、ビタミン類、金属類など各種栄養物質の添加を受けAGPを増大させるが、この時、最も明確に重要である要因は、リンの増加であると考えられる。そして赤潮発生時には、

窒素やリンの増加など各種化学的要因の変化により、A G Pは更に高められているのではないかと推測される。

## § 6 中筋川の物理的環境と赤潮生物の集積

以上に述べた赤潮生物*Plagioselmis*の増殖生理及びA G P試験と、現地の水質等の環境条件との関係から、この河川における赤潮発生の化学的側面は相当程度に解明できた。

しかしながら、赤潮の発現は赤潮生物の増殖と、これに並行または後続する集積の機構によって達成される。そこで、この集積について究明するため、室内におけるモデル実験と現地における調査を実施した。

### 6-1 赤潮生物の集積についての予察

#### (1) 中筋川の物理環境の概要

【流量】中筋川の流量は6～9月にかけて多く、11～3月にかけて少ない。

【流況】中筋川下流域の表層水の流下速度は遅く、なかでも森沢橋から具重にかけては特に遅い。

この中で、比較的速い場所は坂本橋から下流であった。この比較的流下速度の速い範囲内では潮汐の影響をうけ逆流する時もある。

【河床形状】赤潮発生域の河床形状を見ると、森沢橋から淵が続き、坂本橋上流部に瀬があり極端に浅くなる。坂本橋下流域では上流の凸部、下流の凹部に挟まれ、その形状はテラス状になっている。河床の地形は、所々に凹凸を形成する。

#### (2) 中筋川の淡水赤潮の挙動

中筋川下流域の赤潮はまず、坂本橋の下流側で発生し、その後まとまった降雨があるまで、主に上流側に分布を広げる。その最盛期には森沢橋付近から坂本橋下流付近(3km以上)の広い範囲にわたる。赤潮はまとまった降雨によって消滅する。しかし、一度消滅しても、その後降雨が少なければ再び発生して、同様の過程を経て分布域を広げる。発生初期には、多くは茶褐色のやや薄い筋状ないし帶状の浮遊性集団として川幅の一部を細長く占めるが、盛期には川幅のほぼ全体が濃厚な茶褐色を呈し、その細胞数は最高30,000cell/ml以上に達する。赤潮発生範囲は潮汐の影響を受け上・下流に水平移動するが、下流に向かっての移動距離は表層の浮遊物に比べて少ない。また、垂直的には込み潮時には表層に、引潮時には下層へ移動している。

中筋川の赤潮の原因種は主に褐色鞭毛藻類の*Plagioselmis* sp.である。本種は、体調15～25μm、体幅5～13μmの大きさで：その運動は活発で顕微鏡下の観察によれば、その移動距離は、1秒間に体長の10倍程度であった。

本種の最適光強度は比較的低く、昼には曇天時では表層に多く、晴天時には中・底層に多い傾向がみられた。

また、本種は他の淡水藻類に比べかなりの低水温性である。塩分についても相当高い抵抗性を有しているが赤潮と確認できるまで増殖できる限界は塩分が2%程度までだと思われる。(上述)

### (3) 河川流量及び潮汐の影響

流量が減少する冬季に発生すること、まとまった降雨によって消滅することから、赤潮の発生には河川流量の増減が重要な制限因子であることが示唆される。

また、河川流量と呼応して潮汐も赤潮の発生・移動に影響している。このことは赤潮発生時には塩水くさびが発達し、消滅時には認められないことから示唆される。

### (4) 赤潮生物の集積機構の推察

調査によると海水の影響を強く受けた中・底層の水は塩水遡上の限界点（坂本橋上流）まで上流方向に向かって流れる。限界点では急に浅くなっているために、中・底層の水は表層に近くなる。表層に浮き上がった、中・底層の水は表層の下流方向への流れに連行されて下流方向へ流れる。この流れの影響を受け、晴天時の日中には中・底層に留まろうとするPlagioselmis sp.が集積するのではないかと推察される。

## 6-2 室内水槽によるモデル実験

上のように、赤潮生物は海水の動きと連動して分布・移動することが考えられるが、それは主として海水フロントの遡上により発生する上流向きの流れに運ばれて、そのフロント付近に集積するのではないかと推論される。

そこで、室内実験として、流水水槽（全長 500×高50×幅20cm）において塩水くさび現象を再現し、塩水くさびにより循環流が発生するか否かを確かめ、またトレーサーとしてアルミニウム粒子を用いて浮遊物質（無生物）の挙動を観察し、これらの集積が起こるか否かを確認した。

### (1) 実験結果

塩水層、中・底層には塩水くさびのフロントに向かう流れがあり、界面付近では界面下側にも下流向きの流れがあった。界面直下から塩水層中層にかけて上・下流向きの流れに挟まれたセン断域が存在した。

シルの付近の流れはシル直上では塩水が上流向きに流れ、この上流向きの流れに界面直下の下流向きの流れの一部がぶつかり上流側へ戻り、循環流ができることが確認できた。

アルミ粒子の挙動を見るとすべての実験において、アルミ粒子のフロント付近での集積は確認できなかった。しかし、界面直下に帯状に分布することが確認できた。淡水流量を 5 l/s、10 l/s、15 l/sと変えてもアルミ粒子の分布・残留時間において大きな違いはなかった。

また、トレーサーに沈降速度が無視できるうる色素（フレオレスセインナトリウム）を用いた実験においても、アルミ粒子が帯状に分布したところでは色素が流失しにくいうことがわかった。

アルミ粒子や色素が流失しにくかった領域は循環流に囲まれた部分であった。

### (2) 考察

本実験では浮遊物質としてある一定の沈降速度を持つ物質であるアルミ粒子を用いたが、この場合その物質の挙動を支配する要因は流水の鉛直方向の速度成分とアルミ粒子の沈降速度のバランス、乱れ等があると考える。本実験でアルミ粒子が帯状に分布したところは界面付近の下流向きの流れと塩水層中層の上流向きの流れに挟まれた領域である。各々の流れの鉛直方向の速度成

分とバランスしたアルミ粒子がこの領域に残留し易いと考える。

淡水流量を変化させてもアルミ粒子の分布位置、残留時間に大きな違いが見られなかったのは、トレーサーに用いたアルミ粒子の大きさにかなりばらつきがあったため、それぞれの実験で、流速にバランスした粒子が残留したと考える。さらに、アルミ粒子が帶状に分布した領域が水代わりが悪いことはアルミ粒子の残留を助長すると考える。

本実験はトレーサーに無生物であるアルミ粒子を用いたこと、潮汐の影響を無視したことにより、必ずしも海水フロント付近の赤潮プランクトンの挙動を再現しているとはいえない。

実験結果から前6-1章で挙げられた推論を検討すると浮遊物質が塩水くさびのフロント付近に集積するためには①塩水層の中層にできる上流向きの流れに乗ること、②フロント付近の連行に負けない遊泳速度を持つことの二つの条件を満たす必要がある。遡上してくる海水の塩分濃度が高い、低流量時の中筋川では前章で挙げられた推論は的確に現象を説明できないと考える。

また、界面付近に浮遊物質が滞留しやすい領域ができるることは確かであり、この領域の環境条件が赤潮プランクトンに対して好適であれば、赤潮プランクトンが濃密に分布する可能性がある。

### 6-3 現地観測

赤潮プランクトンの鉛直分布と塩分濃度の関係を現地条件下で明らかにするため、赤潮プランクトン及び塩分の鉛直分布について調査した。

現地観測は1989年12月14、15日に実施した。観測は塩分と潮位、透視度を測定した。透視度は間接的に赤潮プランクトンの濃淡を表すものと考える。

観測日の中筋川では赤潮は坂本橋上流域に発生しており、観測は主に坂本橋上流で行った。

観測地点は図14に示した。

#### 6-3-1 観測結果

##### (1) 塩分

坂本橋付近の満潮時の塩分の縦断分布であるが、全層にわたってかなり塩分の濃い水が存在した。

森沢橋下流の満潮から干潮への移行時の塩分縦断分布であるが、森沢橋下流の深みに塩分2～5%の水塊が滞留し、成層化していた。

坂本橋上流の干潮から満潮への移行時の塩分縦断分布であるが、坂本橋上流にある瀬で上流から流れてきた水と下流から遡上してきた水が完全に混合していた。また、瀬の上流にある淵では中層から底層にかけて成層化し、底層には11%のかなり濃度の濃い塩水が滞留していた。

##### (2) 透視度

坂本橋上流の干潮から満潮への移行時の透視度縦断分布であるが、淵の後部から瀬にかけての中層に透視度が低い赤潮プランクトンが多く分布していた。中層から底層にかけては透視度は高く、赤潮プランクトンは分布していなかった。この透視度の低下は赤潮プランクトンの存在によるものであった。

St. 9の塩分及び透視度の横断鉛直分布であるが、水深1～1.5mのところは透視度が低く赤潮

ランクトン濃密に分布していた。さらに、この部分は塩分躍層と一致していた。

#### 6-3-2 考察

坂本橋上流にある瀬がシルの役割をして、森沢橋から坂本橋上流にかけての淵では中層から底層に比較的濃度の濃い塩水が常駐していて水代わりが悪いと考える。

透視度から判断すると赤潮プランクトンは中層の塩分躍層付近に濃密に分布していると考える。

込み潮により表層近くに移動した赤潮プランクトンは引潮により下流へ流されながら拡散し表層に姿を現すが、下流からの込み潮による上流向きの流れに圧されて坂本橋上流の瀬の上端付近で滞留するため、この付近の透視度が著しく低下したと考える。

赤潮プランクトンは表層に姿が見えなくても塩分躍層に分布していて、その塩分耐性は比較的高く4~6%の塩分にも耐えられると考える。

#### 6-4 赤潮生物の集積機構

以上に述べた室内的モデル実験と現地の水理調査の結果を総合すると、この中筋川においては、海水遡上の影響を受ける低流量時に、次のような機構で赤潮プランクトンが集積して顕著な赤潮現象が発現するものと思われる。

- (1) 河川流量の増減は赤潮の発生及びその分布幅、分布位置に大きく影響している。
- (2) 塩水くさびにより循環流が発生し、これの下ではある一定の沈降速度を持つ浮遊物質は界面直下に帯状に残留しやすい。さらに、その領域においては水の交換が悪い。
- (3) 坂本橋付近では河川水と海水がよく混合する。坂本橋上流の瀬より上流側では水深が深く、中層から底層にかけては7~11%の塩水が成層化する。この水塊は下流から遡上してきた塩水よりも濃度が濃いことから常在している可能性が高い。
- (4) 透視度から判断して、坂本橋上流の淵では赤潮プランクトンは中層の塩分躍層付近に分布する。干潮から満潮への移行時に瀬の上端の中層に透視度の極めて低い部分が存在する。このことから、干潮で表層に近くなった赤潮プランクトンは引潮により下流へと流されるが、下流からの込み潮により圧されて瀬の上流端に滞留すると考えられる。
- (5) 結局、赤潮発生時には坂本橋より上流域にかぎっては、赤潮プランクトンの分布及び流況は室内実験におけるトレーサーの分布及び流況に類似していて、赤潮プランクトンは環境水の交換の悪い中層の塩分躍層に分布し、かつこの場で増殖し、潮汐の影響で鉛直的に移動しながら、込み潮により表層近くまで昇ると下流向きの流れに連行されて次第に拡散し、この状態が安定的に続ければ、赤潮は川幅いっぱいに、かつ上下3kmの長さにも達するものと考えられる。

#### §7 赤潮生物の毒性

赤潮原因プランクトンPlagioselmis sp. の魚毒性については、この赤潮発生時に魚介類の斃死事故は生じていない。また、このプランクトン体を収集してヒメダカによる予備的毒性試験を実施した範囲では、魚毒性は認められなかった。

よって、現状規模の赤潮発生に伴う魚介類への毒性は、殆どないものと考えられる。

## § 8 総 括

清流四万十川に合流する中筋川河口域で発生する淡水赤潮は、その構成種が褐色鞭毛藻類のPlagioselmis sp. であるが、この種による淡水赤潮は国内外を通じて今まで他には報告がない。また、河口域という常に水の流動している水域での淡水赤潮の発生に関しても、極めてめずらしい。しかしながら、高知県内の下田川という小河川の河口域にも、この赤潮現象の発生がみられており、今後の推移が注目される。

この赤潮現象の発生機構を解明するために、本研究では赤潮構成種であるPlagioseomis sp. を純粋分離し、その増殖生理特性を解明するとともに、AGP試験によって現場河川水を評価し増殖制限因子を検討した。さらに現場水域の水理調査により、現場での赤潮生物による集積機構について解析を行った。これらの結果を以下に要約し、かつ総合的に考察する。

- (1) 河川水の全窒素及び全リンは、上流域(St.2)で各々 $<0.1 \sim 0.7 \text{ mg N/l}$ 及び $<0.01 \text{ mg P/l}$ であり、下流域(St.1)では、各々 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg N/l}$ 及び $0.01 \sim 0.13 \text{ mg P/l}$ であった。すなわち、赤潮発生の起こる下流域では、かなり富栄養化が進んでいる。これは、採水地点間の具同地区からの生活排水に起因するところが大きいと考えられる。この富栄養状態にある下流域で、赤潮発生時には、全窒素及び全リンの一層の増加が見られた。
- (2) 流量は梅雨期及び夏季に多く冬季に極めて少ない傾向にあり、赤潮発生は、流量が少なく、かつ長期間継続した時発生していた。すなわち流量が少なければ、窒素やリンなどを含む排水は希釀されず、水域の富栄養度は高まる。そしてこの富栄養水は、それ自身の緩慢な流れや、潮汐による潮境の形成などにより、拡散されず坂本橋付近に水塊となって滞留し、赤潮プランクトンを増殖させているように思える。
- (3) Plagioselmis sp. '87の至適温度は、 $20^\circ\text{C}$ 付近であり、 $5^\circ\text{C}$ においても赤潮形成に必要な増殖量は、十分満たしていた。高知県永瀬ダム湖に発生する、冬季の赤潮種であるPeridinium Penardiiの至適温度が $15 \sim 20^\circ\text{C}$ であり、一般に培養における増殖至適温度は現地条件のそれに比して数°C上まわることが多いことから、Plagioselmis sp. '87は、かなり低温性であると推定され、冬季の低温水域ではいくぶん増殖量が低下するものの、他のプランクトンよりも相対的に高い増殖速度を保つことにより優占種となることが可能であろう。
- (4) Plagioselmis sp. '87の栄養要求量は、 $\text{NO}_3\text{-N } 1.5 \sim 5 \text{ mg N/l}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P } 0.08 \sim 0.5 \text{ mg P/l}$ 及びビタミンB<sub>12</sub> 23~50ng/lであり、増殖には、鉄、カルシウム、マグネシウムなどのイオンが必要である。しかしこれらの要求量は増殖量の飽和から求めたものであり、赤潮発生時の細胞数を基準とすれば、 $\text{NO}_3\text{-N } 0.1 \text{ mg N/l}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P } 0.01 \text{ mg P/l}$ 及びビタミンB<sub>12</sub> 10ng/lで、十分にその要求を満たしていると考えられる。それ故、窒素、リン及びビタミンB<sub>12</sub>に関しては、中筋川下流水は、周年に亘って赤潮発生要求量を満たしていると思われる。また、最大増殖量から求めた要求量、すなわち、プランクトンが利用可能な最大量を、他の淡水植物プランクトンと比較してみると、窒素要求量（通常 $0.3 \sim 1.3 \text{ mg N/l}$ ）及びリン要求量（通常 $0.02 \sim 0.09 \text{ mg P/l}$ ）は、共に他種よりかなり高く、富栄養湖沼で水の華を形成する藍藻類のMicrocystis aeruginosa の要求量（ $6.8 \text{ mg N/l}$ 、 $0.45 \text{ mg P/l}$ ）に近かった。したがって、Plagioselmis sp. '87は、高度な富栄養

水域でも阻害を受けず、他のプランクトンを上回る増殖により赤潮を形成することが可能であると推定される。

(5) 下流域のAGPは、周年に亘ってかなり高く、特に赤潮発生期の11月の試水は際立っていた。

この11月の高いAGPには、窒素及びリンの增加との相関が見られた。そして、栄養添加物効果はあまり顕著ではなかったことから、この水域では、Plagioselmis sp. '87の栄養要求量は、ほぼ満たされていると考えられる。上流域のAGPは、常に下流域より低くリン添加効果が著しかった。また、試水中のリン濃度がこの時のみ要求量を満たしていた5月の試水で、AGPが高い値を示したことからも、この上流域は強いリン制限下にあると考えられる。

このように、中筋川河川水は、上流域ではリン制限下にあるが、流下するにしたがい家庭排水や農業排水の流入により、窒素、リン、ビタミン類金属類など各種栄養物質が添加されAGPは増大する。そしてこの時最も重要な要因はリンの流入である。

(6) 赤潮発生時の現場水域における水理観測によると、この河川では赤潮発生水域の上端にまで塩水くさびが発達しており、それに伴って赤潮プランクトンが敏感に上下移動し中層の塩分躍層に集積・滞留して、赤潮状態を呈するのに重要な寄与をしていることが判明した。

ここで、本河川における赤潮発生の機構を総合的に考察したい。Plagioselmis sp. が赤潮となるためには必ずしも以上の最適条件を満たしている必要はない。この種による赤潮の場合、その数が 3,000cells/ml以上で肉眼的に赤潮として映ることから、Plagioselmis sp. の赤潮発生のためのそれぞれの要因の最低レベルでの条件を培養試験の結果から推定すると、以下のようである。赤潮発現に至る環境条件としては水温 5°C以上、照度 3,000 lux以上、pH 6~9、塩分 1.9‰以下であり、また栄養物質についてはNO<sub>3</sub>-N 約0.01mg N/l以上、PO<sub>4</sub>-P 約0.02mg P/l以上、ビタミンB<sub>12</sub>約5ng/l以上と考えられる。これらの条件を他の藻類と比較すると、Plagioselmis sp. は10°C前後でも増殖可能であり他の淡水藻類に比べかなりの低水温性で、塩分についても水野（1984）が示した淡水藻類の塩分に対する抵抗性と比較すると、このPlagioselmis sp. は相当高い抵抗性を有していることがわかる。また赤潮の発生にとって重要な化学的因子となっている窒素とリンについてみると、このPlagioselmis sp. は窒素源ではNO<sub>3</sub>-N 約0.01mg N/l以上で十分に赤潮になる可能性があるが、これはダム湖の淡水赤潮生物である渦鞭毛藻Peridiniumの要求濃度0.05mg N/lに比してかなり低く、その他の淡水植物プランクトンの要求濃度を比べても相當に低い。またリンについては、この種の赤潮の最低必要濃度約0.02mg P/l以上は上のPeridiniumのそれに匹敵し、一般の淡水植物プランクトンの必要濃度の中では低い方である。

また、AGP試験の結果から、この川においては上流から下流へかけて赤潮発生を主として支配しているのはリンの増加であると推察されるが、下流域では赤潮発生のための化学的要因はリンを含めて周年にわたりほぼ満たされていると考えられる。それにも拘らず、中筋川の赤潮は毎年冬から春季にかけてのみ発生している。このことは、水温や日射等の変化に伴う他の藻類との競合や、動物プランクトンによる捕食作用、細菌との相互作用などの季節的な生物遷移が、この河川の赤潮発生にとって基本的ベースであることを推察させる。Plagioselmis sp. は前記のように、他の藻類に比べ低水温型であり、またその増殖の最低必要条件下においても増殖速度はかな

り速い。

結局、中筋川の赤潮の発生機構としては、先ず流量が少なくて安定した冬季に、他の藻類にとっては不適な10°C前後の低水温において、他の藻類に優占して比較的高い増殖速度によりいっきにその数を増し、更に現場河川の潮汐による水の流動と関連して塩水くさび上流端の中～表層に集積し、赤潮の発現に至るものと考えられる。

このような淡水赤潮の発生を防止するためには、河口域における窒素、リンをはじめビタミン、微量有機物など富栄養化関連物質の濃度を軽減するため、汚濁物質の流入負荷を削減することが基本である。その場合、この淡水赤潮は比較的初期段階の富栄養状態に発生するものであるだけに、防止対策にとっては厳しい条件といえよう。また、赤潮除去については、この赤潮が水の流動に伴う集積と密接に関係することから、できるだけ水の滞留を防ぎ、安定的流下をはかることが肝要と考えられる。

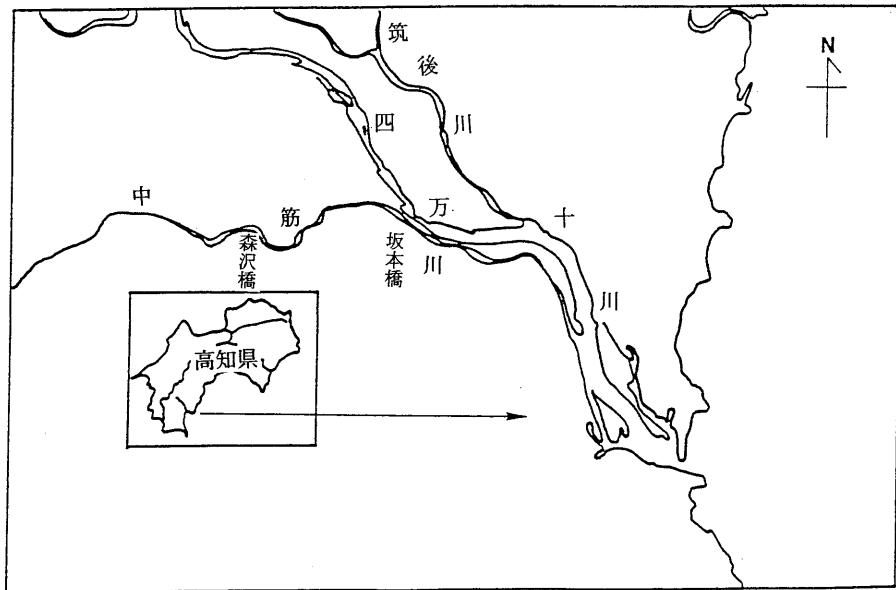


図1. 中筋川概要図

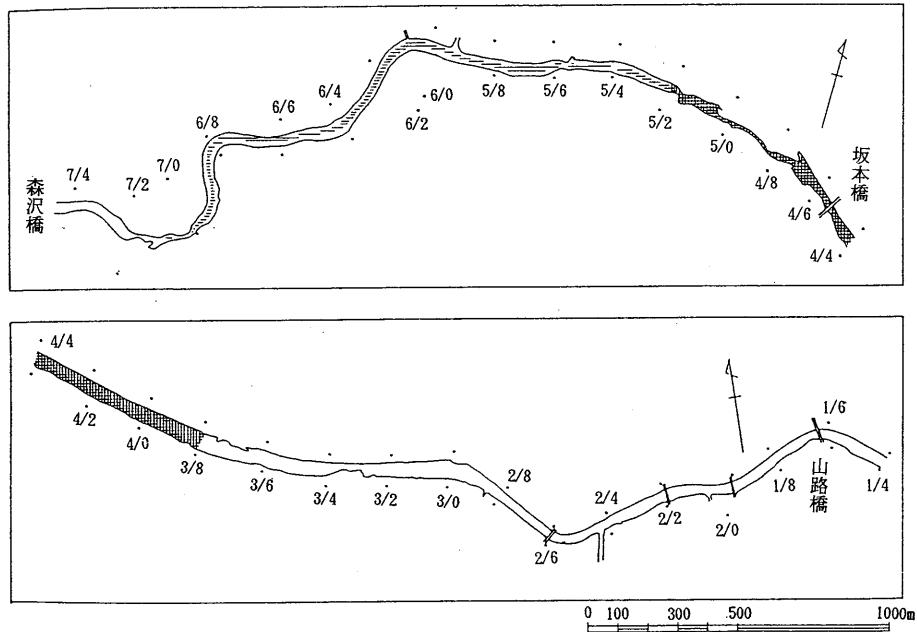


図2. 赤潮の発生状況 (1986年2月9日)

数字は、四万十川との合流点からの距離km/100m を示す

表1. Chu No. 10 改変培地

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40	mg
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	30	mg
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	25	mg
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	20	mg
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	25	mg
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.8	mg
P IV metal *	0.5	ml
Vitamin mix S, **	10	ml
Vitamin B <sub>12</sub>	0.2	$\mu\text{g}$
Tris buffer	1	g
Distilled water	1000	ml
pH 8.0		
P IV metalの組成		
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	97	mg
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	41	mg
$\text{ZnCl}_2$	5	mg
$\text{Na}_2\text{MoO}_4$	4	mg
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2	mg
$\text{Na}_2\text{EDTA}$	750	mg
Distilled water	500	ml

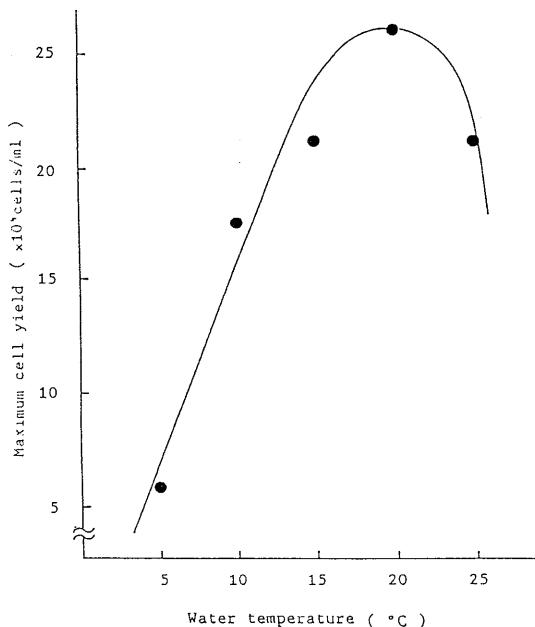


図3. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼす水温の影響

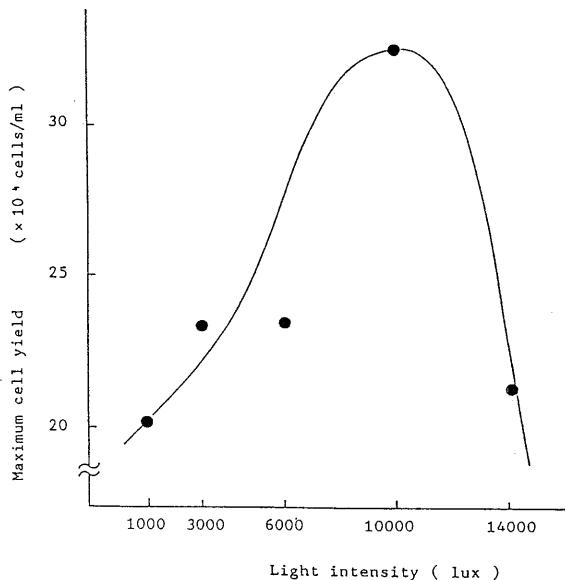


図4. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼす照度の影響

表2. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼす  
塩素量の影響

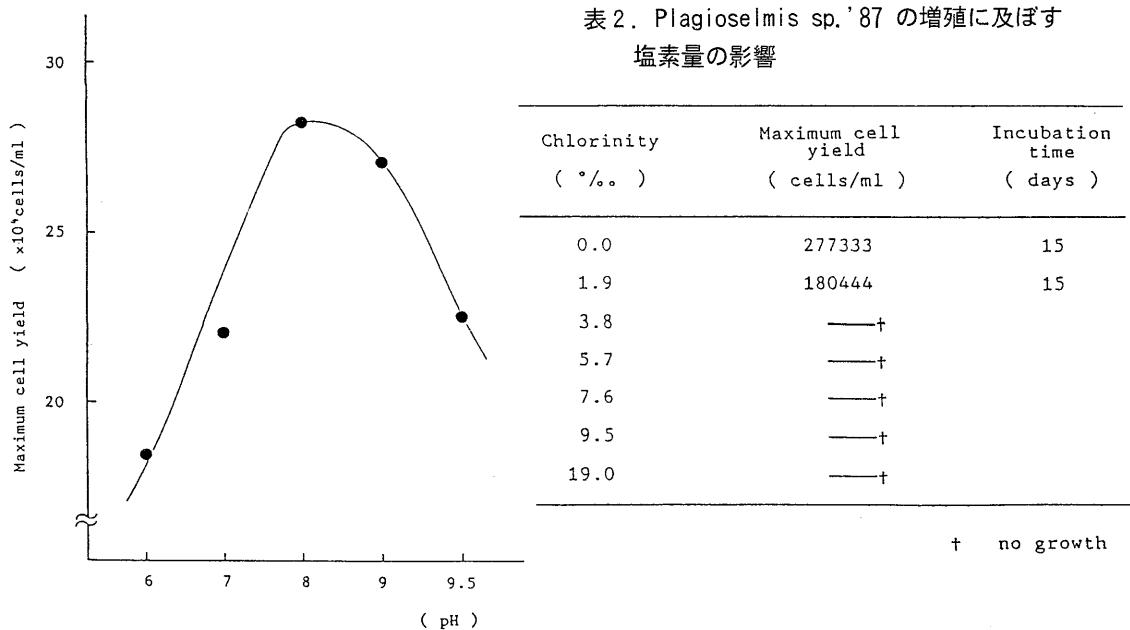


図5. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼす  
pHの影響

表3. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼすN源の影響

Nutrients	Concentration ( mgN/l )	Maximum cell yield ( cells/ml )
None	0. 0	4067
NO <sub>2</sub> -N	1. 0	89522
	5. 0	381600
	10. 0	420800
NH <sub>4</sub> -N	1. 0	69767
	5. 0	259833
	10. 0	396356
NO <sub>3</sub> -N	1. 0	105875
	5. 0	293267
	10. 0	510400
Urea-N	1. 0	119733
	5. 0	346711
	10. 0	435022

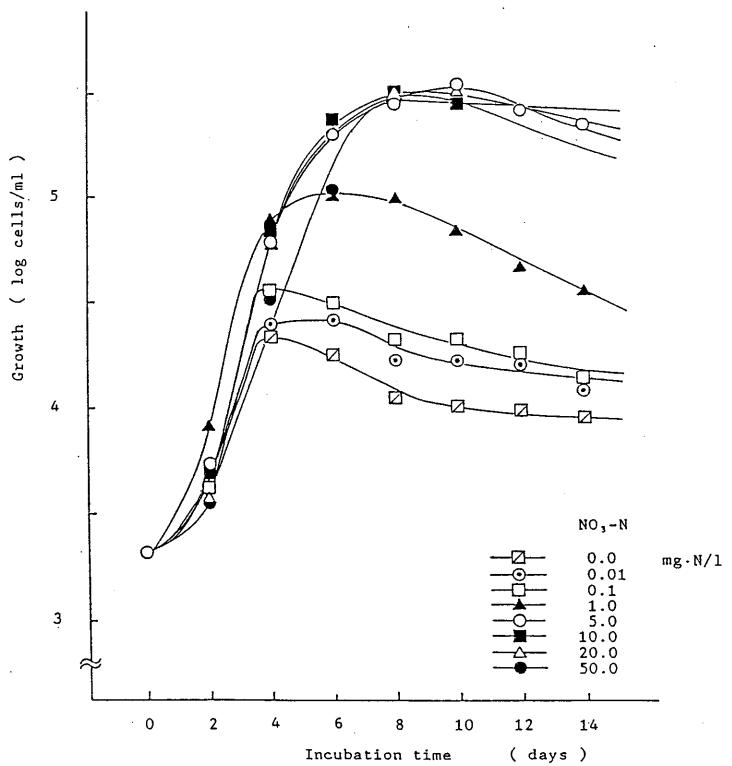


図6. 各種濃度の $\text{NO}_3\text{-N}$ における*Plagioselmis* sp. '87 の増殖

表4. 各種濃度の $\text{NO}_3\text{-N}$ における*Plagioselmis* sp. '87 の  
比増殖速度及び平均世代時間

$\text{NO}_3\text{-N}$ ( mg N/l )	Specific growth rate ( day <sup>-1</sup> )	Mean generation time ( hr )
50. 0	1. 130	12. 5
20. 0	1. 295	12. 8
10. 0	1. 265	13. 1
5. 0	1. 220	13. 6
1. 0	1. 040	16. 1
0. 1	1. 015	16. 4
0. 01	0. 920	18. 1

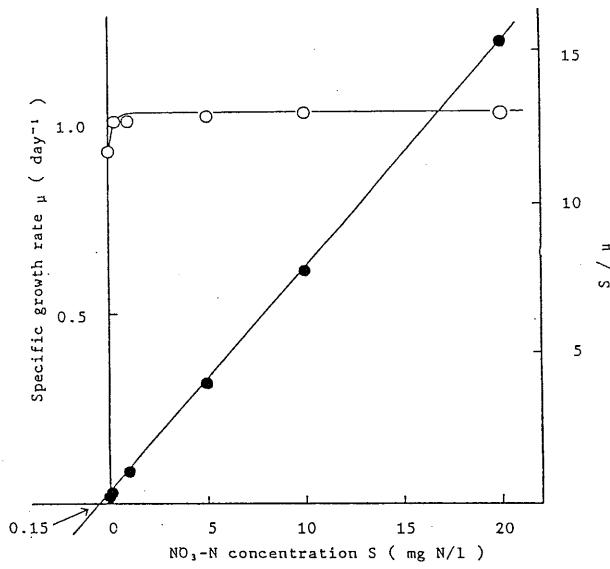


図7. 各種初発濃度の $\text{NO}_3\text{-N}(S)$ における $\text{Plagioselmis}$  sp.'87の比増殖速度( $\mu$ ) : ○  $S/\mu$  : ●

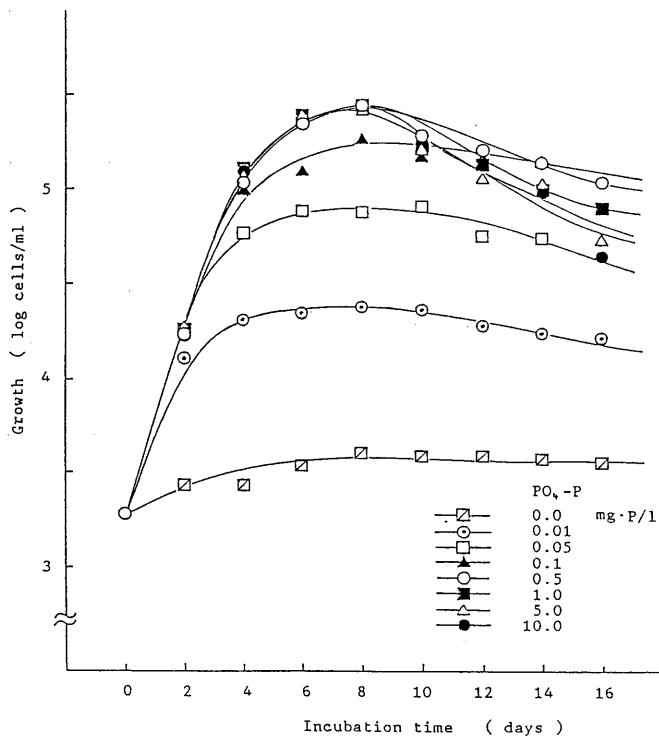


図8. 各種濃度の $\text{PO}_4\text{-P}$ における $\text{Plagioselmis}$  sp.  
'87 の増殖

表5. 各種濃度のPO<sub>4</sub>-PにおけるPlagioselmis sp.'87の  
比増殖速度及び平均世代時間

PO <sub>4</sub> -P ( mg P/l )	Specific growth rate ( day <sup>-1</sup> )	Mean generation time ( hr )
10. 0	1. 07	15. 7
5. 0	1. 14	14. 6
1. 0	1. 13	14. 7
0. 5	1. 08	15. 5
0. 1	1. 14	14. 6
0. 05	1. 13	14. 7
0. 01	0. 94	17. 8

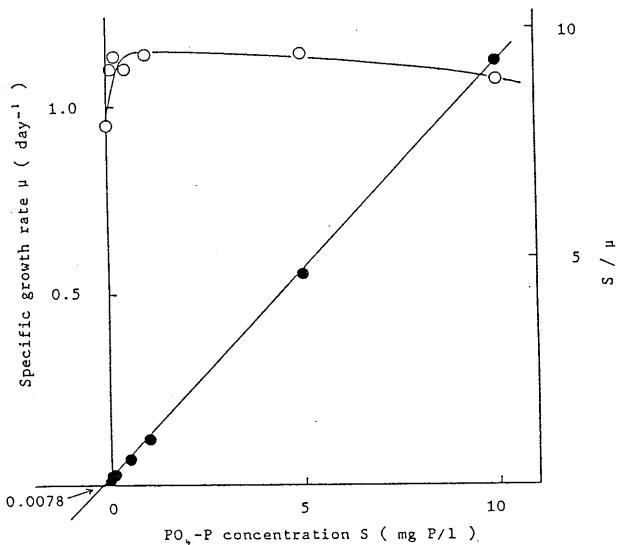


図9. 各種濃度のPO<sub>4</sub>-P(S)におけるPlagioselmis sp.  
'87の比増殖速度(μ) : ○ S/μ : ●

表6. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼす各種ビタミン類の影響

Nutrients	Maximum cell yield ( cells/ml )
None	—†
Vitamin B <sub>12</sub>	293250
Biotin	—†
Vitamin B <sub>1</sub>	—†
Vitamin B <sub>12</sub> + Biotin	340000
Biotin + Vitamin B <sub>1</sub>	—†
Vitamin B <sub>1</sub> + Vitamin B <sub>12</sub>	279556
Vitamin B <sub>12</sub> + Biotin + Vitamin B <sub>1</sub>	271200
Vitamin mix S <sub>3</sub> + Vitamin B <sub>12</sub>	272533

Concentration	Vitamin B <sub>12</sub> : 0. 2 $\mu\text{g/l}$	+ no growth
	Biotin : 0. 2 $\mu\text{g/l}$	
	Vitamin B <sub>1</sub> : 0. 2 $\mu\text{g/l}$	
	Vitamin mix S <sub>3</sub> : 10. 0 ml/l	

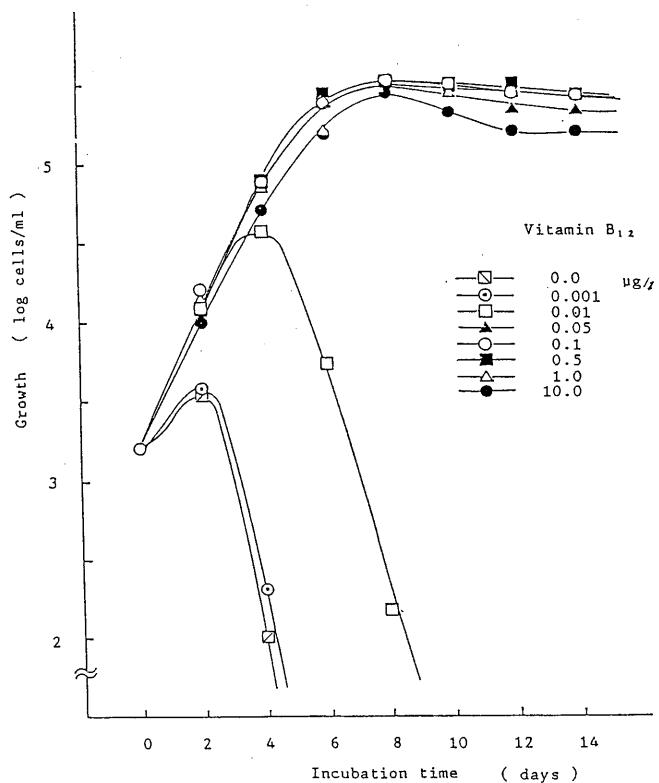


図10. 各種濃度のビタミンB<sub>12</sub>における*Plagioselmis* sp.  
'87 の増殖

表7. 各種濃度のビタミンB<sub>12</sub>における*Plagioselmis* sp.  
'87 の比増殖速度及び平均世代時間

Vitamin B <sub>12</sub> ( μg/l )	Specific growth rate ( day <sup>-1</sup> )	Mean generation time ( hr )
10. 0	0. 895	18. 5
1. 0	1. 065	15. 5
0. 5	0. 990	16. 8
0. 1	1. 140	14. 6
0. 05	1. 065	15. 5
0. 01	1. 030	16. 1
0. 001	0. 430	39. 0

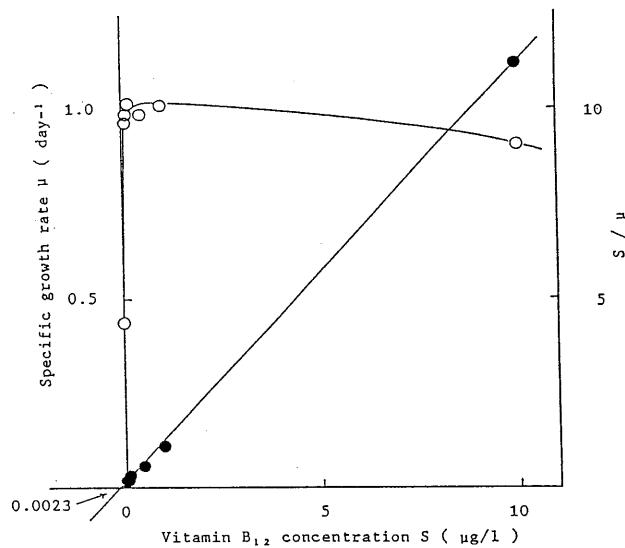


図11. 各種濃度のビタミンB<sub>12</sub>(S)における*Plagioselmis* sp.'87 の比増殖速度(μ) : ○ S/μ : ●.  
 $\beta_{max}=0.95/day$ ; Ks=23ng/l

表8. *Plagioselmis* sp.'87 の増殖に及ぼす金属の影響

Nutrients	Maximum cell yield ( cells/ml )
None	—†
Fe	—†
Ca	—†
Mg	—†
Fe + Ca	—†
Ca + Mg	31150
Mg + Fe	—†
Fe + Ca + Mg	39767
Fe + Ca + Mg + PIV metal	253167

† no growth

Concentration :  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.8 mg/l  
 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  28.0 mg/l  
 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  25.0 mg/l  
PIV metal 0.5 ml/l

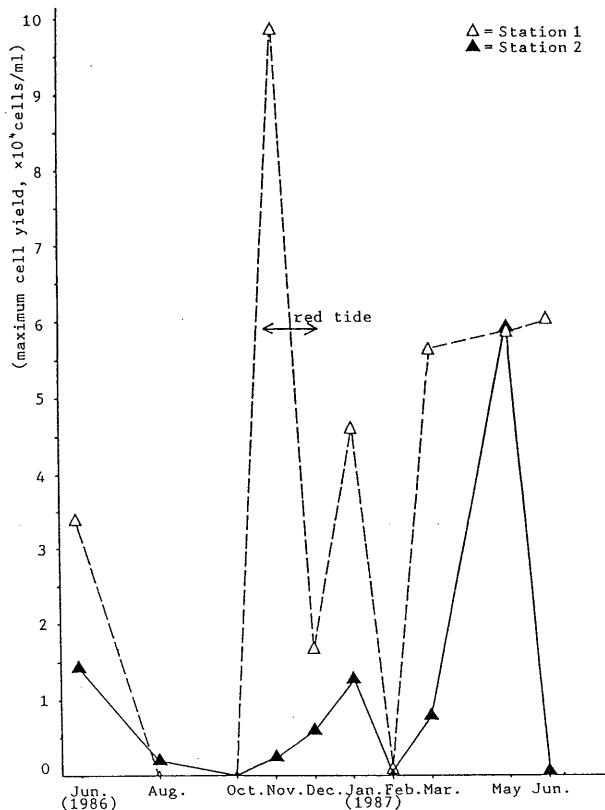


図12. A G P の季節変化

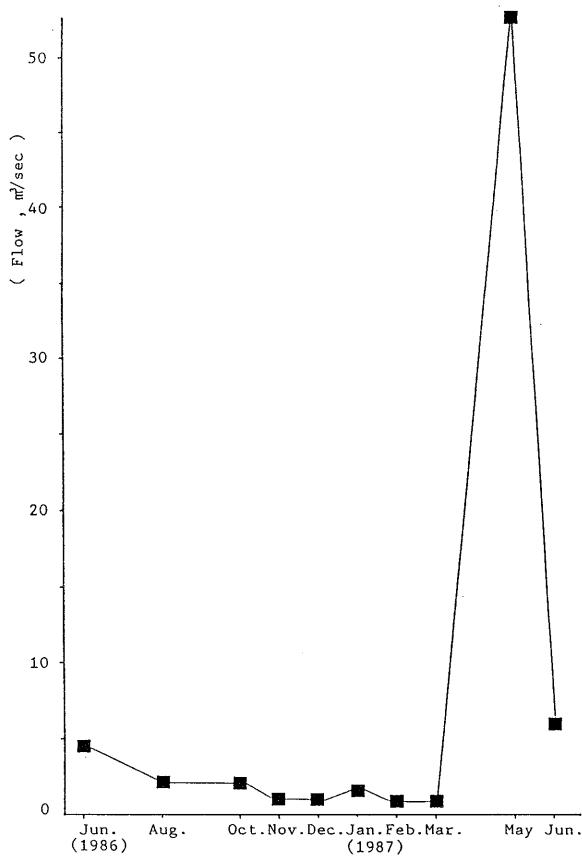


図13. 採水時のいその川観測点における中筋川の流量

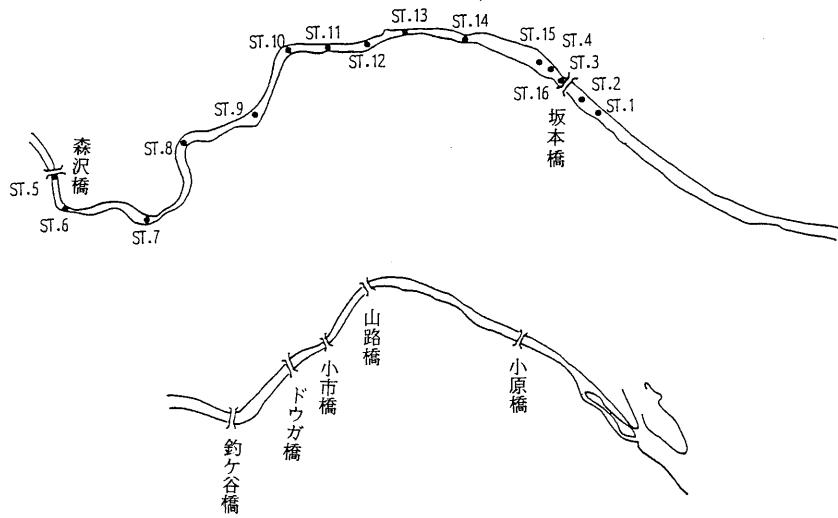


図14. 観測地点

