

海域特性による赤潮被害防止対策事業*

竹内 照文・小久保友義

目 的

田辺湾では夏季に有害種である *Gymnodinium mikimotoi* 赤潮がしばしば発生し、大きな漁業被害を及ぼすことがある。そこで、本種の赤潮発生機構を解明し、防除対策を確立することが緊急な課題となっている。

本県では平成元年度から上記の目的を達成するために水産庁の委託調査を実施してきた。¹⁻⁶⁾ その結果、本種は南部域で出現し、ここで増殖して小規模な赤潮を形成した後、湾全域に拡大することが明らかになった。⁷⁾

本年度は *G.mikimotoi* の発生と環境要因の関係や本種の増減と海水交換の関係について検討したので報告する。

事業を実施するに当り有益な助言と御指導を賜った南西海区水産研究所赤潮環境部と大阪府水産試験場中嶋昌紀氏、また、調査に協力いただいた堅田漁業協同組合に厚くお礼を申し上げる。

方 法

現場調査

調査は図1に示す田辺湾南部の6定点 (St.6、7、37、38、A、B) で、6月7日から9月26日ま

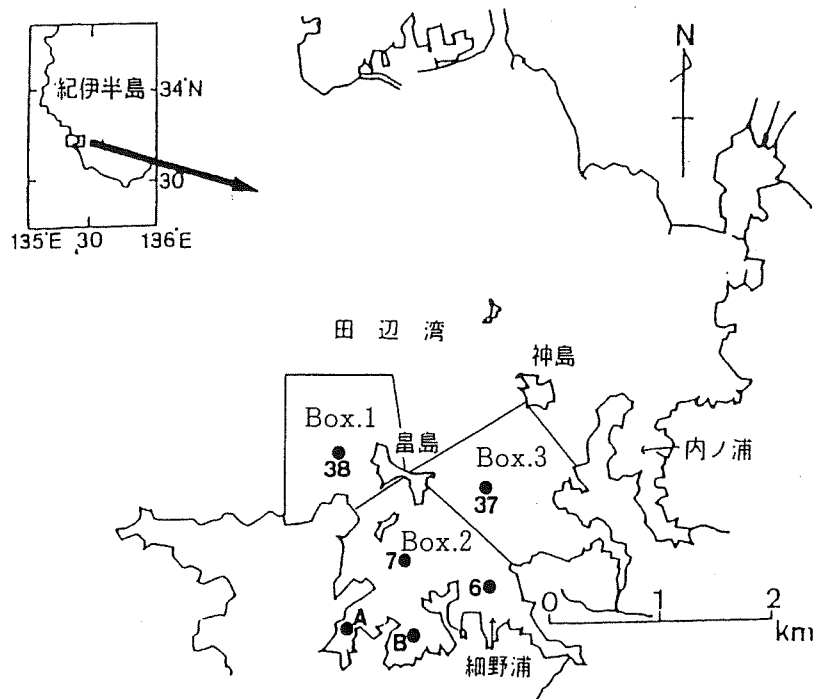


図1 調査定点

* 海域特性による赤潮被害防止対策事業費による。

で毎週1回の割合で合計17回実施した。調査項目は水温、塩分、溶存酸素量と *G.mikimotoi* の細胞密度である。水温、塩分はSTD (アレック電子社製AST500-PK) を用いて表層から底層まで0.5m 間隔に測定した。溶存酸素量はDOメーター (YSI社製) を用いて、表面、3、5、10、B-1m (海底上1m) の5層で測定した。また、北原式採水器を用いて、上記の5層で採水し、*G.mikimotoi* の細胞密度を計数した。*G.mikimotoi* は通常、原海水1ml中の細胞数を計数したが、1 cell/ml以下の密度の時は採水した300mlを、5.0 μ mのミリポアフィルターを用いて重力ろ過し、20ml程度まで濃縮した後、その試水1ml中の細胞を計数し、1ml当たりの細胞密度に換算した。

また、St.7ではバンドーン採水器を用いて上記の5層で採水し、水温、塩分、溶存酸素量、クロロフィルaと栄養塩類 ($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIP) を測定、分析した。各項目の測定と分析方法は以下のとおりである。

水温：棒状水銀温度計

塩分：オート・ラブ社製サリノメーター

溶存酸素：ウインクラー・アジ化ナトリウム変法

クロロフィルa：吸光度法

$\text{NH}_4\text{-N}$ ：インドフェノール改良法

$\text{NO}_2\text{-N}$ ：ジアド化法

$\text{NO}_3\text{-N}$ ：Cdカラムにより $\text{NO}_2\text{-N}$ に還元

DIP：ストリックランド・パーソンズ法

ボックスモデルの設定と海水交換量

田辺湾では *G. mikimotoi* の初期増殖域が南部域の奥部 (St.7、A、B) であることが明らかになっている。⁷⁾そこで、この3定点の支配領域を1つのボックスにし、このボックスに接するSt.37とSt.38の支配領域をそれぞれのボックスとして図1に示すように3ボックスを設定した。

ボックスモデルは図2に示す1層ボックスを用い、中島⁸⁾に従って以下の式により求めた。

$$H_2 L_2 \frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{T_3 - T_1}{2} U - 2 \frac{T_2 - T_1}{L_1 + L_2} H_1 \times K + 2 \frac{T_3 - T_2}{L_2 + L_3} H_3 \times K + Q_s \times L_2 / c \rho$$

$$H_2 L_2 \frac{\Delta S}{\Delta t} = -\frac{S_3 - S_1}{2} U - 2 \frac{S_2 - S_1}{L_1 + L_2} H_1 \times K + 2 \frac{S_3 - S_2}{L_2 + L_3} H_3 \times K + Q_{SAL} \times L_2 / \rho$$

ρ ：海水の密度 (g/cm^3)

C：海水の比熱 ($\text{cal}/\text{g}/^\circ\text{C}$)

t：時間

Q_{SAL} ：塩分収支

K：拡散係数

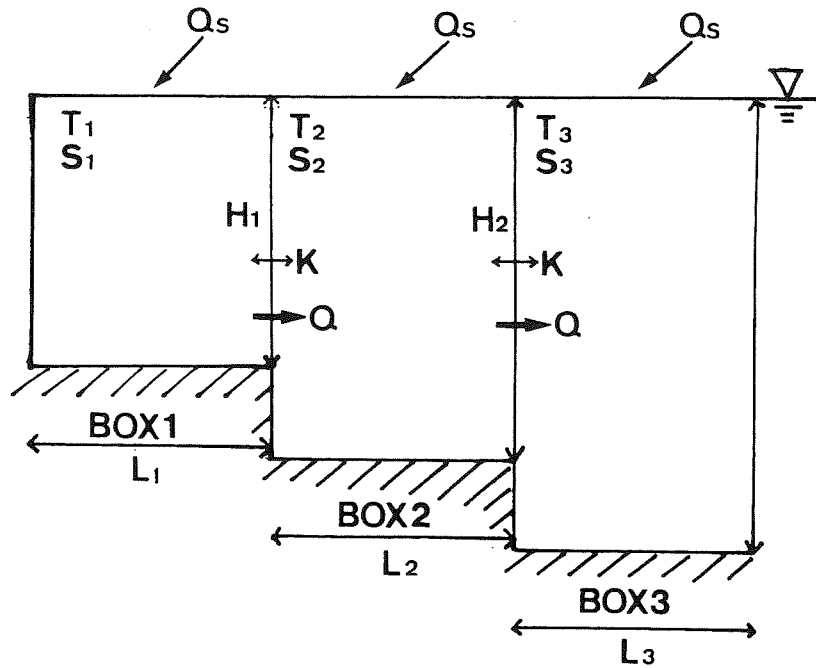


図2 1層ボックスモデル

H : 層厚, L : Boxの長さ
 T : 水温, S : 塩分
 Q_s : 海面熱収支
 U : 水平流速
 K : 拡散係数

結果および考察

1 G.mikimotoiの発生状況

*G.mikimotoi*の発生状況を全定点の各層平均値により図3に示した。本種は7月31日に0.1~0.8 cells/mlの密度で初めて観察されたが、この時点では底層を除くと全定点で出現し、きわめて分散していた。8月7日には全定点の水柱平均値が187cells/mlになり、一週間で1,463倍に増加した。この間の細胞数の増加を生長速度に換算すると $\mu_2=2.06$ divisions/dayになったが、これは本種で知られている最大生長速度⁹⁾よりも速い値である。ここでは増殖時の状況を精査するために田辺湾南部のごく狭い水域に6定点の5層を設定してきめ細かい調査を行っていたが、7月下旬からの短期間にこのような速い生長速

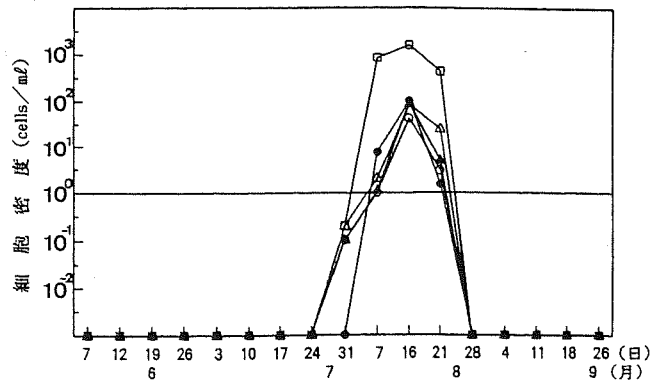


図3 *Gymnodinium mikimotoi* の発生状況
 表層 3m層 5m層 10m層 B-1m層
 ○ △ □ ▲ ●
 6 定点の層別平均値で示す。

度が得られたのは定点外にあった小さなパッチ状の濃密群が移動、集積してきたことによると考えられ、飯塚¹⁰⁾が指摘しているように、現場における生長速度を測定することの難しさを表している。また、この時、St. 7、A、Bの5 m層では 10^3 cells/mlを超えていたが、その他の定点では50 cells/ml以下の密度であり、本種はこの3定点の5 m層に局在していた。今まで指摘されている^{1, 4, 5)}ように、ここが田辺湾における本種の初期増殖域であることが再確認された。

8月16日には全定点の水柱平均値が404 cells/mlでピークを示したが、この時点でも5 m層の全点平均値が 1.6×10^3 cells/mlで最も濃く、その他の層では平均値が 10^2 cells/ml以下の密度であった。また、St. 7とSt. 37が最も高密度で、分布の中心がいくぶん東部側に移ってきた。8月21日には全定点の水柱平均値が100 cells/mlに減少し、更に、28日には全く検出されなくなった。

本種は中層域で増殖し、一定の密度になると表層に浮上することが知られている^{7, 11)}ので、今年の結果は従来までに知られている結果といくぶん異なっていた。*G. mikimotoi*は8月中旬に急速に減少していたが、この群集が生理生態的特性にもとづく本来のピークを示す前に何らかの要因が働いたことにより減少し、表層に浮上しなかったものと考えられる。

2 赤潮発生と環境要因の関係

*G. mikimotoi*は例年より遅れて出現したが、8月上旬には急速に増加して赤潮を形成した。以下に、赤潮の発生と環境要因の関係を検討した。

本種の初期増殖域であるSt. 7、A、Bの値を用いて、0 m (表層)、5 m (中層)とB-1m (底層)の層別平均値による水温と塩分の推移を図4に示した。

水温は表層が22.8~29.0°C、中層が21.8~28.6°C、そして、底層が21.2~27.8°Cで、6月中は緩やかに上昇していたが、7月上~中旬には表層で急上昇、また、中、底層では低下し、水温が大きく変動していた。7月中旬からは3層ともスムーズに上昇し、表、底層間の水温差が大きくなった。*G. mikimotoi*の出現した7月下旬から8月中旬には、表、中層では低下の後、急上昇していたが、底層水温は上昇し続けていた。この時期の底層水温の上昇は日射による熱の伝達によりおこり、海水交換が弱まった時に水温が上昇するものと考えられるので、赤潮形成時には海水交換の弱まっていたことが推察される。また、9月以降は水温が下降するとともに表、底層間の差がなくなった。

塩分は、表層では6月から7月下旬に大きく低下していたが、8月からは33.00台でほぼ一定していた。一方、中、底層では33.00、34.00台で推移していた。

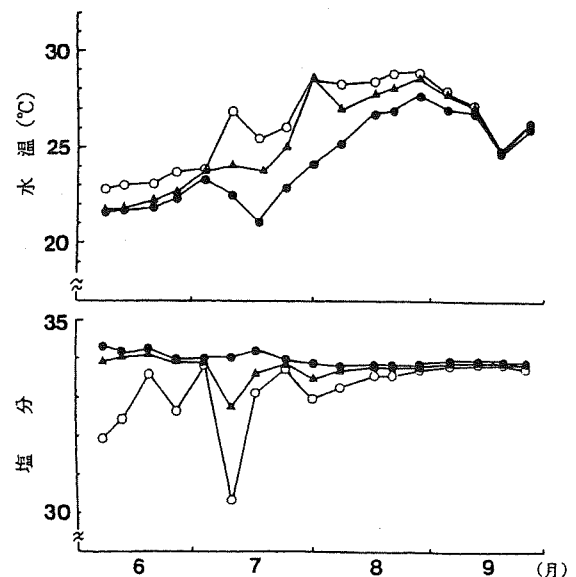


図4 田辺湾南部における水温、塩分の推移
St. 7、A、Bの層別平均値による
○：表層，▲：5 m層，●：底層

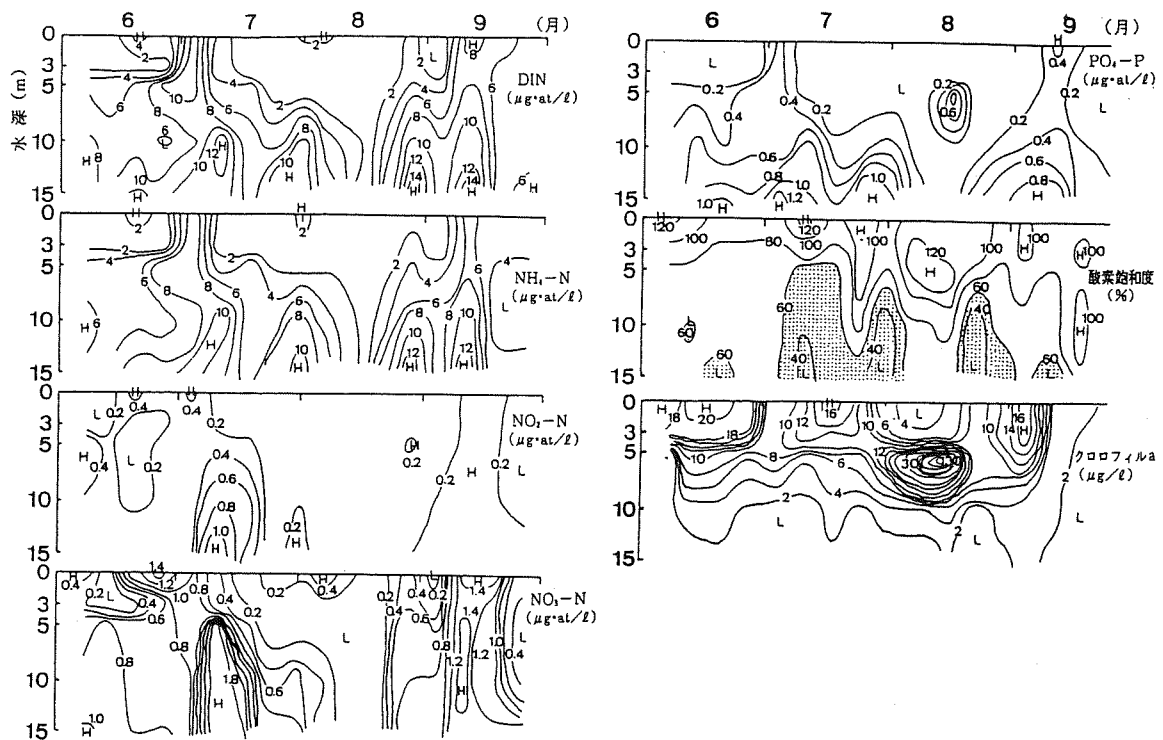


図5 St. 7における酸素飽和度、クロロフィルaと栄養塩類の垂直分布の推移

St. 7における酸素飽和度、クロロフィルaと栄養塩類の垂直分布の推移を図5に示した。

クロロフィルaは表層では $10 \mu\text{g}/\text{l}$ を超えることが多く、植物プランクトンの増殖していることが窺えた。特に、6月、7月中旬や8月下旬～9月上旬には $15 \mu\text{g}/\text{l}$ 以上を示し、各々、珪藻類と*Heterosigma akashiwo*が優占して赤潮状に着色していた。この時期、田辺湾の南部域では植物プランクトンがたえず高密度に出現しながらも一定の間隔を持って種類が遷移し、その時々において増殖要因と集積要因が合わさった時には赤潮形成密度に達するものと考えられた。また、8月上旬～中旬には表層が $5 \mu\text{g}/\text{l}$ 以下であったが、3～10m層では $30 \mu\text{g}/\text{l}$ 以上の高い値(最大 $131 \mu\text{g}/\text{l}$)を示し、同時期、高密度に出現していた*G.mikimotoi*を捉えたものと考えられる。酸素飽和度はクロロフィルaとよく対応し、表層では100%以上の過飽和状態で推移することが多かったが、中、底層では60%以下の貧酸素水塊がたびたび形成されていた。また、8月上～中旬には中層の酸素飽和度が120%以上の値を示したが、クロロフィルaと同様に高密度に出現していた*G.mikimotoi*の活発な光合成活性を捉えたものと考えられる。

DINは、表層では7月上旬や9月中旬を除くと $2 \mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$ 以下のことが多く、この時期、高密度に増殖していた植物プランクトンにより窒素の取り込まれている状況が窺えた。一方、底層では $10 \mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$ 以上を示すことが多かったが、大部分が $\text{NH}_4\text{-N}$ の増加によるものであり、貧酸素水塊の形成時期と概ね対応していたことから、底泥から溶出してきたものを捉えたものと考えられる。また、6月中旬～7月上旬や9月中旬には表層や中、底層で $\text{NO}_3\text{-N}$ が $1.0 \mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$ 以上に増えていたが、降雨に伴って陸上から負荷されたものや湾外底層水の進入によりもたらされたものを捉えたものと考えられる。また、*G.mikimotoi*の出現した7月下旬～8月中旬には表層～底層まできわめ

て低くなっていたが、これは本種による窒素の取り込みを表したものと考えられる。

DIPもDINと同様に表層で低く、底層で高い分布を示したが、*G.mikimotoi*の出現時には表層から底層にわたって著しく低下していた。

このように、栄養塩類は大きな変動を示しながらも底層ではDINが $10 \mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$ 以上の値を保持することが多かった。広島湾では*G.mikimotoi*が赤潮を形成するのにDINで $5 \mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$ 以上必要とされている(大内 私信)。また、本種の細胞内窒素とリンの含量¹²⁾を用いて、ここでの栄養塩濃度から*Gymnodinium mikimotoi*がどのレベルの細胞密度にまで増殖するかを試算すると、 $10^3 \text{ cells}/\text{ml}$ 以上の密度に達して赤潮を形成することがわかった。そこで、田辺湾南部域では、本種が赤潮を形成するための栄養塩濃度を絶えず保持しているものと考えられ、栄養塩濃度が赤潮を形成するための制限因子になるとは考えられない。

また、*G.mikimotoi*赤潮の形成期における植物プランクトンの種間関係を検討するために、St. 7の表層水における主要植物プランクトン5属と*G.mikimotoi*の出現状況を図6に示した。珪藻類の3属は6月、7月中旬と8月下旬には $10^3 \text{ cells}/\text{ml}$ を超えて赤潮状にうすく着色していたが、7月上旬と8月中旬にはこれらがほとんど消滅していた。また、*Prorocentrum spp.*と*Heterosigma akashiwo*は6月、7月下旬と8月下旬に出現していたが、 $10^2 \text{ cells}/\text{ml}$ 以下の密度であった。*G.mikimotoi*の出現した7月下旬から8月中旬には、珪藻類の3属が減少し、珪藻類の衰退した間隙をぬって本種が増殖してのような状況が認められた。

3 ボックスモデルによる海水交換と本種の増減

設定した3ボックスの代表点であるSt. 7、37とSt.38における水温と塩分の垂直分布の推移を図7に示した。

水温は表層が $22\sim 29^\circ\text{C}$ 、底層が $19\sim 28^\circ\text{C}$ 、塩分は表層が $30\sim 34$ 、底層が $33\sim 34$ で3定点とも似かよった値で推移し、時間的な位相もほとんど認められなかった。また、7月上旬には表層塩分が30.00台に低下していたが、これは降雨に伴うものであり、密度流に伴う海水交換の促進されていることが推察される。また、7月中旬に底層水温が低下していたのは湾外水の進入を捉えたものである。一方、9月上旬からは表、底層間の値が近似し、成層の崩壊していたことが窺えるが、この

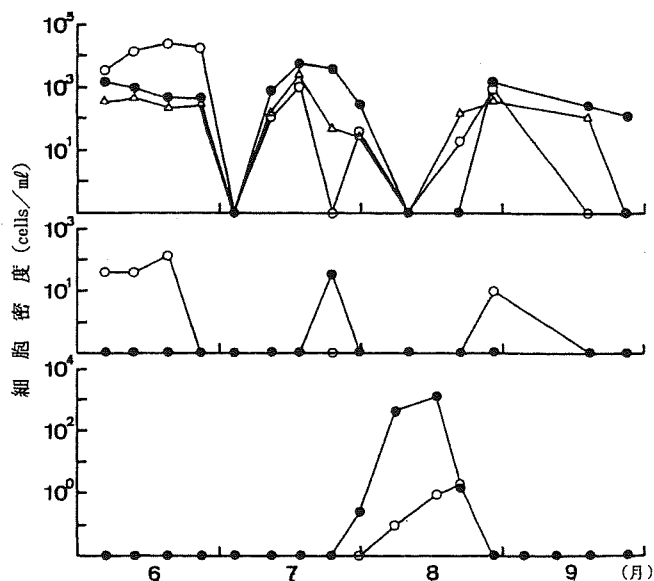


図6 St. 7の表層水における主要プランクトンの出現状況

- 上段：○*Skeletonema costatum*
●*Chaetoceros spp.*, △*Nitzschia spp.*
中段：○*Prorocentrum spp.*
●*Heterosigma akashiwo*
下段：*Gymnodinium mikimotoi*
○表層水 ●水柱平均値(0,3,5,10,B-1m)

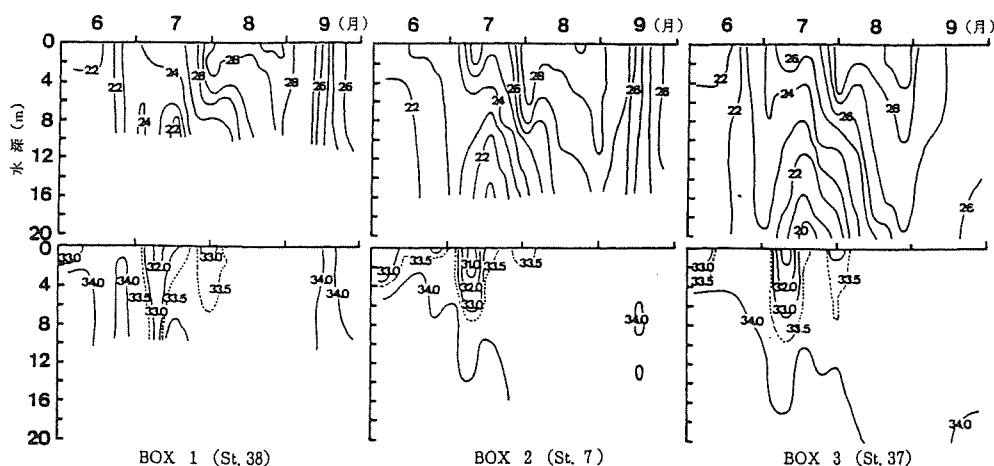


図7 各ボックスの代表点による水温、塩分の垂直分布の推移
上段：水温，下段：塩分

時には上下混合が大きくなり、更に、海水交換の促進されていたことが推察される。

海面での熱収支の時系列変動を図8に示した。海面での熱収支は、6月は200~300cal/cm²・dayであったが、7月から上昇し始め、梅雨明け後の7月下旬から8月上旬には500cal/cm²・day近くになり、ピークを示した。その後、8月下旬までは400~500cal/cm²・dayの範囲で緩やかに減少していたが、9月上旬からは急速に減少していた。

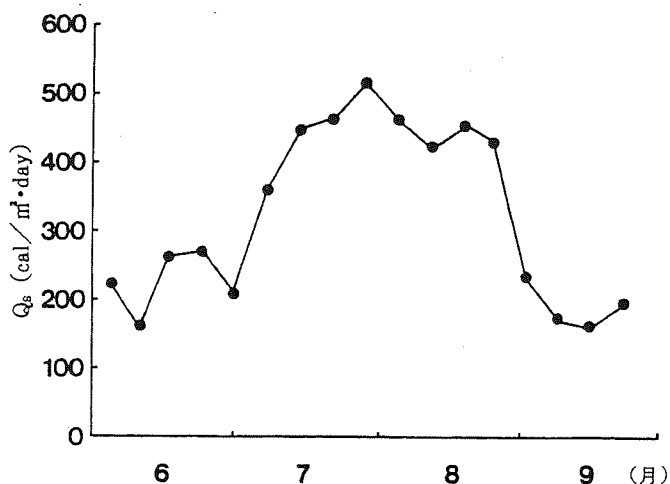


図8 海面熱収支 (Q_s) の推移

ボックスモデルにより得られた移流

流速の推移を図9に示した。ここで正の流れはBox 1 → Box 2 → Box 3 に向かう流れで、負は逆方向の流れをさす。調査開始時から8月上旬までは±0.2cm/sec以下の弱い流れで、海水はほとんど動くことがなかったが、その後、移流流速は強くなり、8月上旬に2.5cm/secの負の流れ、また、中旬からは正の流れに転じ、8月中旬には1.0cm/sec、そして、9月中旬には6.2cm/secの流れがあった。ここでの結果を本種の発生と合わせて考えると、移流流速の弱かった7月下旬~8月上旬に本種は急速に増加して小規模な赤潮を形成した。ところが、8月上~中旬には流れが強まったことにより赤潮は長期化することなく消滅したものと考えられる。また、前述したように今年の赤潮では本種がピーク時にも表層に浮上することがなく、急速に消滅していたのはこの時期の強い流れにより拡散されたものと考えられる。

以上より、*G.mikimotoi*の発生と海水交換は概ね対応していることが明らかになった。ただ、図7に示したように、7月上、中旬には降雨に伴う河川水の流入や湾外水の進入が観察されており、

- 種)の最高生長速度. 日本プランクトン学会報, 16, 139-145.
- 10) 飯塚昭二, 1987: 赤潮の生態学的諸問題. 赤潮の科学(岡市友利編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.91-123.
 - 11) 本城凡夫, 1987: 6・3ギムノディニウム. 赤潮の科学(岡市友利編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.228- 237.
 - 12) 山口峰生, 1994: *Gymnodinium nagasakiense*の赤潮発生機構と発生予知に関する生理生態学的研究. 南西水研報, 27, 251-394.