

海域特性による赤潮被害防止技術開発試験*

竹内 照文・山内 信

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¹⁻⁷⁾。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⁸⁾や赤潮の発生には栄養塩などの増殖要因よりも海水交換が重要であることが明らかになった⁹⁾。

平成8年度は前年度に引き続き、*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ます。

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3日から9月13日まで毎週1回 (ただし、7月は週2回) の割合で合計19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K.K製 AST500-PK) を用いて表層から底層まで0.5m間隔に測定した。採水は北原式採水器を用いて、0、3、5mと海底上1mの4層で行った。溶存酸素量はウィンクラー法で測定した。*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 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。

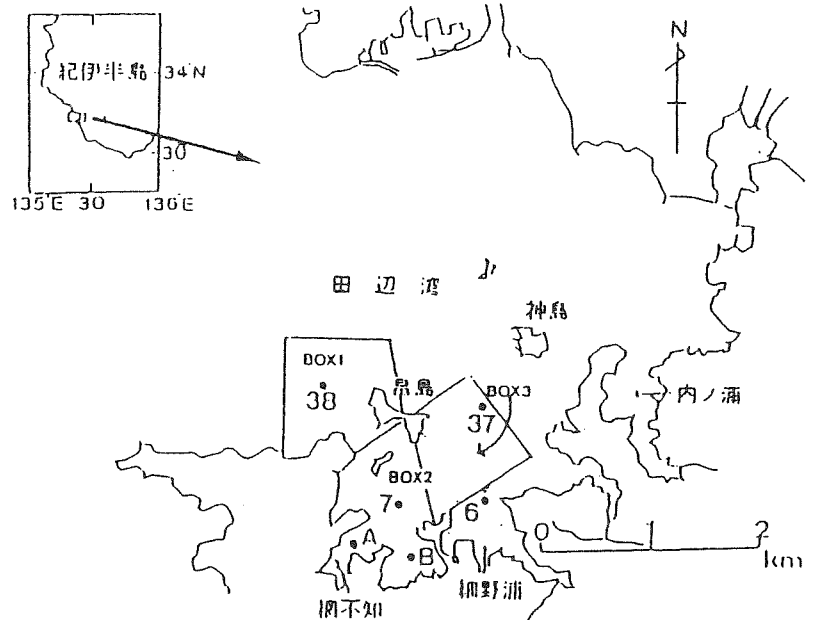


図1 調査定点

* 海域特性による赤潮被害防止技術開発試験費による。

ボックスモデルの設定と海水交換量

田辺湾では*G.mikimotoi*の初期発生域が南部域の奥部 (St.7、A、B) であることが明らかになっている^{8、9)}。そこで、この3定点を1つのボックス、また、このボックスに接する2つのボックスを設定し、各々の代表点をSt.37とSt.38とした (図1)。

ボックスモデルは1層ボックスを用い、木村ほか^{10、11)}、杜多ほか^{12、13)}に従って求めた。各定点の支配する深度別面積と容積を表1に示した。また、後背地面積は4.17km²とした。ここで湾内の物質収支を図2に模式的に示し、海水と物質の保存式は以下のとおりである。

$$Q_{10} = Q_{01} + Fr \dots\dots\dots 1$$

$$V_1 \cdot dC_1 / dt = C_0 \cdot Q_{01} - C_1 \cdot Q_{10} + Fr \cdot Cr + P_1 \dots\dots\dots 2$$

1、2より

$$Q_{10} = 1 / C_0 - C_1 \{ V_1 \cdot dC_1 / dt + (C_0 - Cr) Fr - P_1 \}$$

$$Q_{01} = Q_{10} - Fr$$

ここで、塩分の保存を考えると、 $P_1 = 0$ 、 $Cr = 0$ となり、

$$Q_{10} = 1 / C_0 - C_1 (V_1 \cdot dC_1 / dt + C_0 \cdot Fr)$$

また、湾内での物質の滞留の長さ、滞留時間 (T) は $T = V_1 / Q_{10}$

表1 定点ごとの層別面積と容積

St.	37	7	A	B	38	
0 m	0.71	0.38	0.15	0.32	0.58	
面	5 m	0.66	0.30	0.064	0.20	0.21
	10 m	0.57	0.24	0.05	0.14	0.11
積	15 m	0.40	0.05		0.016	0.063
	20 m	0.023				
容 積	9.7705	3.767	0.8745	2.454	2.861	

面積：×10⁶ m²
容積：×10⁶ m³

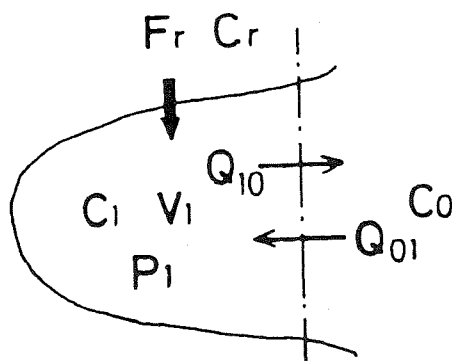


図2 塩分の収支を示す模式図¹²⁾
 Q_{10} ：湾内から湾口に向かう輸送係数 (m³/hr)
 Q_{01} ：湾口から湾内に向かう輸送係数 (m³/hr)
 Fr ：湾内への淡水流入量の総和 (m³/hr)
 V_1 ：湾内の容積 (m³)
 C_1 ：湾内の塩分
 C_0 ：湾口の塩分

結果および考察

1 *G.mikimotoi*の発生状況

*G.mikimotoi*は7月中旬から出現し始めたが、8月上旬までは0.1cells/ml以下の密度で、消長を繰り返していた。8月中旬から3 m層と5 m層を中心にいくぶん増加し始め、9月上旬にピークを示したが、最高密度は全定点の水柱平均値が2.72cells/ml (最高密度：St.7の5 m層で36cells/ml) で赤潮を形成することがなかった (図3)。

また、*G.mikimotoi*は全定点で出現していたが、9月9日や13日の結果に見られるように、湾奥部のSt.A、B、7でいくぶん高密度に出現する傾向が認められた(図4)。

これは従来から観測されている結果^{8,9)}と一致するものであり、ここが田辺湾における本種の初期発生域であると考えられ、赤潮の非発生年においてもこのことが裏付けられた。

2 *G.mikimotoi*の発生と環境要因の関係

ボックス2の表層と底層における水温、塩分と酸素飽和度の推移を図5に示す。なお、ここでは各項目の表層と底層の値をボックス2の3定点の平均値で示した。

表層水温は6月下旬から上昇し、7月上旬と中旬にいくぶん低下する時期もあったが、8月上旬までは緩やかに上昇し続け、29°Cに達した。8月中旬からは緩やかに下降していた。底層水温は、7月には22~26°Cの間で上下変動を繰り返

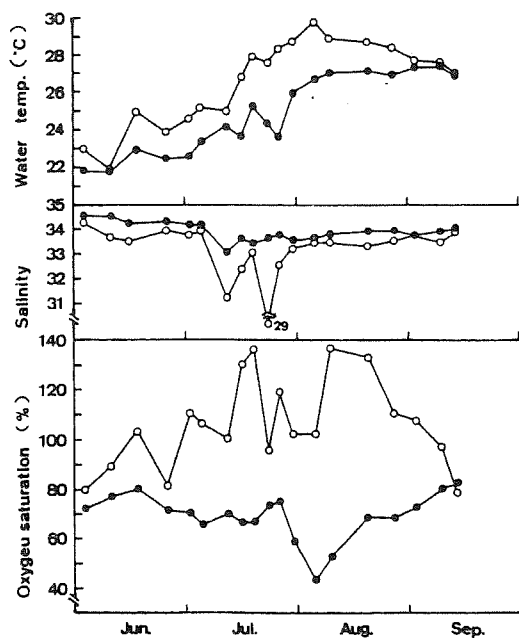


図5 田辺湾南部の表層と底層における水温(上段)、塩分(中段)と酸素飽和度(下段)の推移

St.7、A、Bの平均値で示す。
○：表層、●：底層

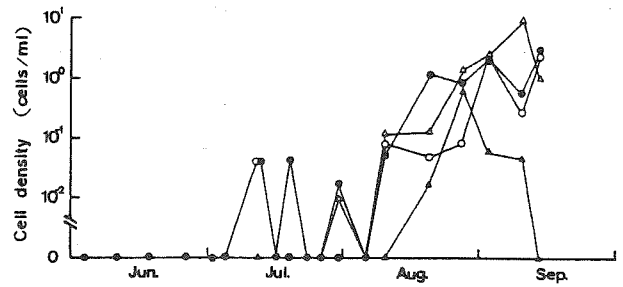


図3 田辺湾南部域における *Gymnodinium mikimotoi* の発生状況
6 定点の平均値で示す。

○：0 m、●：3 m、△：5 m、▲：B-1 m

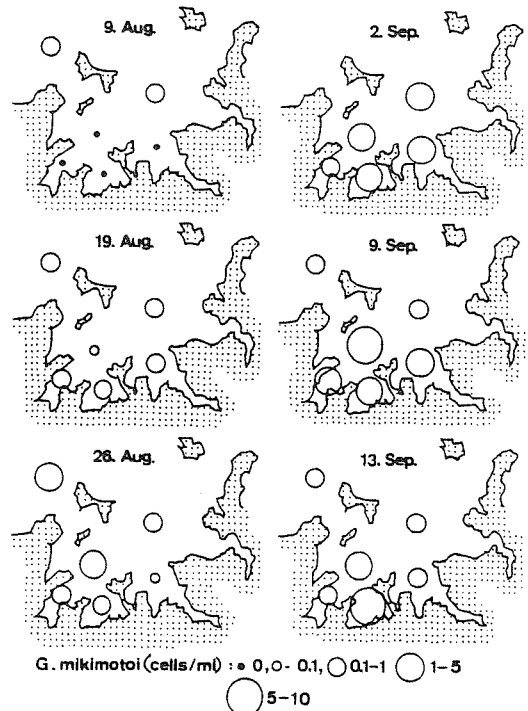


図4 田辺湾南部域における *Gymnodinium mikimotoi* の水平分布の推移

各定点とも水柱平均値(0、3、5、B-1 m)で示す。

返していたが、8月上旬には27°C台に上昇し、その後、横ばいで推移していた。塩分は、表層では7月中、下旬にいくぶん低下していたが、6月と8月には33.00台でほぼ一定していた。底層では6月が34.00台、7月が33.00台、また、8月には33.50~34.00で推移していた。

酸素飽和度は、表層では100%以上のことが多く、植物プランクトンの増殖している状況が窺えた。特に、7月中旬と8月中、下旬には130%以上を示し、著しく過飽和になった。一方、底層では60、70%台で推移

することが多かったが、8月上旬には60%以下の貧酸素水塊を形成していた。

St. 7の表層における主要プランクトンの推移を図6に示す。調査期間中は珪藻類 (*Skeletonema costatum*、*Chaetoceros spp.*、*Nitzschia spp.*)が優占し、 10^3 cells/ml以上の密度で出現することが多かった。特に、7月下旬と8月中、下旬には*Nitzschia spp.*と*Chaetoceros spp.*を中心に、 10^4 cells/ml以上の密度に達してうすく着色していた。一方、鞭毛藻類では*Heterosigma akashiwo*と*Prorocentrum spp.*

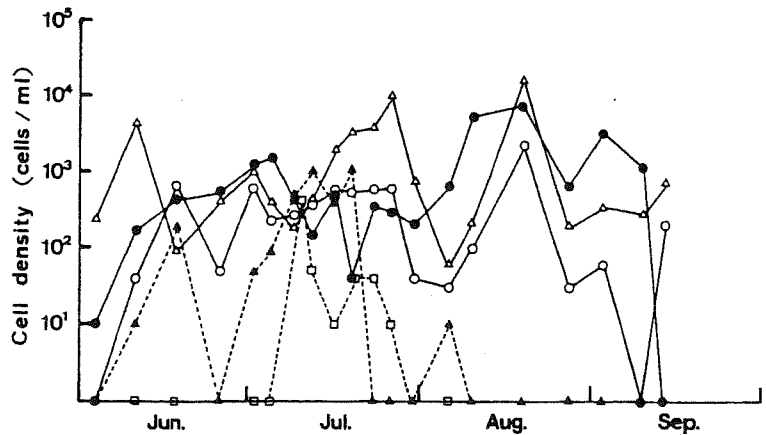


図6 St. 7の表層水における主要プランクトンの推移
○ : *Skeletonema costatum*、● : *Chaetoceros spp.*
△ : *Nitzschia spp.*、▲ : *Prorocentrum spp.*
□ : *Heterosigma akashiwo*

が6月上旬から8月上旬まで出現し、7月中旬には 10^3 cells/mlの密度に達して赤潮状に着色していた。

降水量は6月が116mm、7月が242mm、8月が75mmで、7月は平年値に比べるといくぶん多かったが、6月と8月は少なかった。

田辺湾では6、7、8月の赤潮発生期に降水量が少なく、底層の塩分が高めで一定し、水温が緩やかに上昇する年、すなわち、海水交換が弱いと考える年に赤潮の発生することが指摘されている⁹⁾。そこで、ボックス2の定点での6、7、8月の表層と底層における水温と塩分の関係を図7に示す。*G. mikimotoi*が出現し始めた7月には底層の水温がいくぶん上昇していたが、塩分は33.00~33.50で、赤潮発生年の塩分に比べると0.5~0.8程度低かった⁹⁾。また、この時には表層の塩分が30.00以下に低下し、必ずしも発生年のパターンを示していない。6月と8月は底層の水温がほぼ均一でほとんど上昇することがなかった。このことから海水交換が強かったことが窺える。

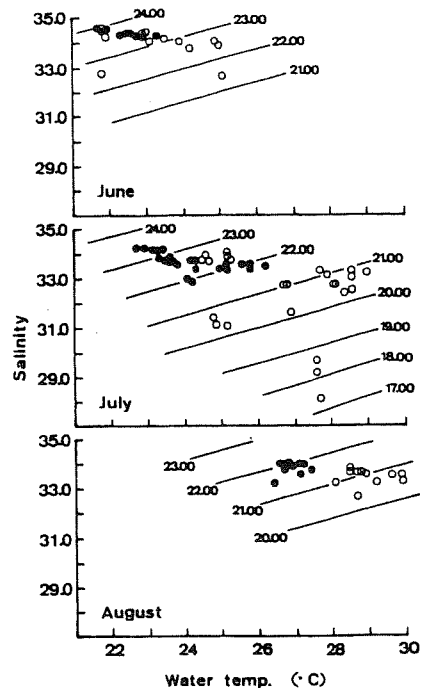


図7 田辺湾南部における6、7、8月の水温と塩分の関係
St. 7、A、Bの表層(○)と底層(●)
図中の数字は現場密度(σ_t)

以上より、今年の赤潮発生期の環境条件をまとめると、7月は降水量が平年値に比べるといくぶん多く、塩分が低めであったが、底層水温が緩やかに上昇し(図7)、海水が停滞していたことが窺える。しかし、7月中、下旬には底層水温や表層塩分が大きく変動していた(図5)ことから、一時的に大きな海水交換が起り、本種を散逸したものと考えられる。また、8月上旬から本種が増加し始めたが、8月下旬から9月上旬には表層水温が低下して底層水温とほぼ同じになり、しかも、表層の塩分がわずかに上昇

していたことや底層の溶存酸素量が回復していたことから外海水の進入が窺え、海水交換が活発になったものと考えられる。そこで、本種の増殖群を散逸し、赤潮を形成しなかったものと推察される。

3 G.mikimotoiの発生と海水交換

各定点の支配領域(表1)とSTDの塩分からボックス内の平均塩分を求め、更に、海水交換量と滞留時間を求めた(表2)。

まず、ボックス1、2、3の平均塩分と降水量の推移を図8に示す。平均塩分はボックス1が32.764~34.486、ボックス2が32.550~34.420、ボックス3が32.801~34.508で、ボックス間の差がほとんどなかったが、内側であるボックス2が外側のボックス1や3よりもわずかに低くなる傾向が認められた。また、3ボックスともほぼ同じように推移し、7月4~11日や7月18~22日に見られるように、降雨に伴ってボックス内の塩分が低下し、降水量と平均塩分は概ね対応していた。しかし、8月下旬~9月上旬のように降雨があるにもかかわらず塩分が低下し

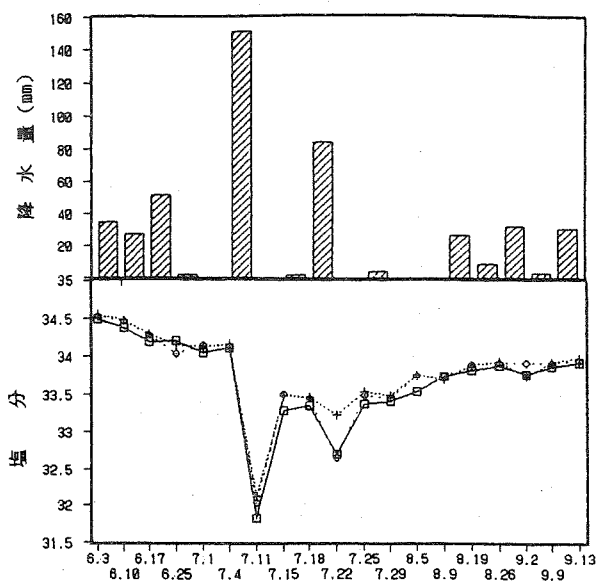


図8 ボックス1、2、3の塩分と降水量の推移
◇: ボックス1、□: ボックス2、+: ボックス3

表2 海水交換量計算結果

ボックス1と2						
期 間	塩 分 内 側	塩 分 外 側	期 間 (時 間)	海 水 交 換 量 (ト ン)	滞 留 時 間 (day)	
6.3 - 6.10	34.42	34.49	168	2.7×10 ⁵	1.09	
6.10 - 6.17	34.27	34.36	168	1.3×10 ⁵	2.28	
6.17 - 6.25	34.19	34.15	192	-7.0×10 ⁵	-0.41	
6.25 - 7.1	34.12	34.09	144	1.6×10 ⁵	1.81	
7.1 - 7.4	34.08	34.13	72	1.0×10 ⁵	2.95	
7.4 - 7.11	32.97	33.08	168	4.3×10 ⁴	6.96	
7.11 - 7.15	32.55	32.76	96	5.0×10 ⁵	0.59	
7.15 - 7.18	33.32	33.48	72	5.9×10 ⁴	5.03	
7.18 - 7.22	33.03	33.06	96	2.0×10 ⁶	0.15	
7.22 - 7.25	33.04	33.07	72	2.0×10 ⁶	0.16	
7.25 - 7.29	33.39	33.47	96	6.4×10 ⁴	4.63	
7.29 - 8.5	33.48	33.60	168	2.3×10 ⁴	13.04	
8.5 - 8.9	33.64	33.74	96	8.8×10 ⁴	3.37	
8.9 - 8.19	33.77	33.81	240	2.7×10 ⁵	1.09	
8.19 - 8.26	33.84	33.91	168	9.4×10 ⁴	3.14	
8.26 - 9.2	33.82	33.92	168	1.7×10 ⁵	1.73	
9.2 - 9.9	33.82	33.91	168	3.4×10 ⁴	8.79	
9.9 - 9.13	33.89	33.93	96	1.0×10 ⁶	0.29	

ボックス2と3						
期 間	塩 分 内 側	塩 分 外 側	期 間 (時 間)	海 水 交 換 量 (ト ン)	滞 留 時 間 (day)	
6.3 - 6.10	34.42	34.51	168	2.0×10 ⁵	1.46	
6.10 - 6.17	34.27	34.39	168	1.0×10 ⁵	2.87	
6.17 - 6.25	34.19	34.22	192	1.0×10 ⁶	0.29	
6.25 - 7.1	34.12	34.14	144	-5.0×10 ⁵	-0.64	
7.1 - 7.4	34.08	34.14	72	8.8×10 ⁴	3.35	
7.4 - 7.11	32.97	33.14	168	2.8×10 ⁴	10.72	
7.11 - 7.15	32.55	32.80	96	4.3×10 ⁵	0.69	
7.15 - 7.18	33.32	33.47	72	6.2×10 ⁴	4.77	
7.18 - 7.22	33.03	33.35	96	1.6×10 ⁵	1.80	
7.22 - 7.25	33.04	33.39	72	1.8×10 ⁵	1.60	
7.25 - 7.29	33.39	33.52	96	4.1×10 ⁴	7.18	
7.29 - 8.5	33.48	33.63	168	1.9×10 ⁴	15.52	
8.5 - 8.9	33.64	33.73	96	1.0×10 ⁵	2.87	
8.9 - 8.19	33.77	33.79	240	6.0×10 ⁵	0.50	
8.19 - 8.26	33.84	33.91	168	9.0×10 ⁴	3.28	
8.26 - 9.2	33.82	33.84	168	9.6×10 ⁵	0.31	
9.2 - 9.9	33.82	33.84	168	1.6×10 ⁵	1.83	
9.9 - 9.13	33.89	33.96	96	5.9×10 ⁶	0.50	

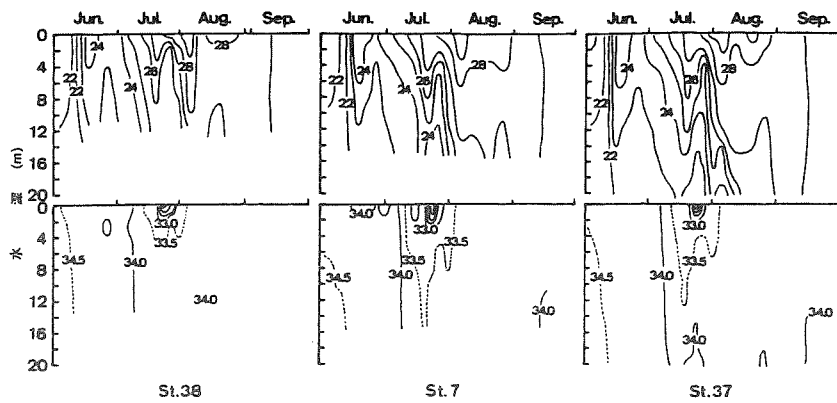


図9 ボックスの代表点による水温（上段）と塩分（下段）推移

ないこともあった。これは田辺湾が外海に面したオープンな水域であるため、降雨時であっても外海水の進入が優勢な時には雨水がすぐに拡散され塩分があまり低下しないものと考えられる。

次に、3ボックスの代表点による水温と塩分の垂直分布の推移を図9に示す。水温と塩分は3定点ともほぼ同じように推移し、しかも、定点間の距離が離れていないこともあり時間的な位相が認められなかった。ただ、定点の地理的位置や水深の違いから特徴が認められた。すなわち、St.38は外海水の進入経路に設定されているため、28℃の線が8月中旬に一度切れているが、他の2定点では7月下旬から8月下旬まで続いていた。また、7月中、下旬の塩分33.50の値がSt.38では5m深までしか達していないが、他の2定点では10m以深まで達しており、この定点が外海水に影響されやすい特徴を表している。また、St.37は水深が深いため表、底層間の水温差が大きく、底層にはSt.38やSt.7よりも水温が低く、かつ、高塩分水の進入が認められる。

次に、この水域の海水交換の状況を検討するため、ボックス1、2間とボックス2、3間における海水交換量と滞留時間の推移を図10に示す。

海水交換量と滞留時間はボックス1、2間が各々 $2.3 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^6$ トン、0.15~13.0day、また、

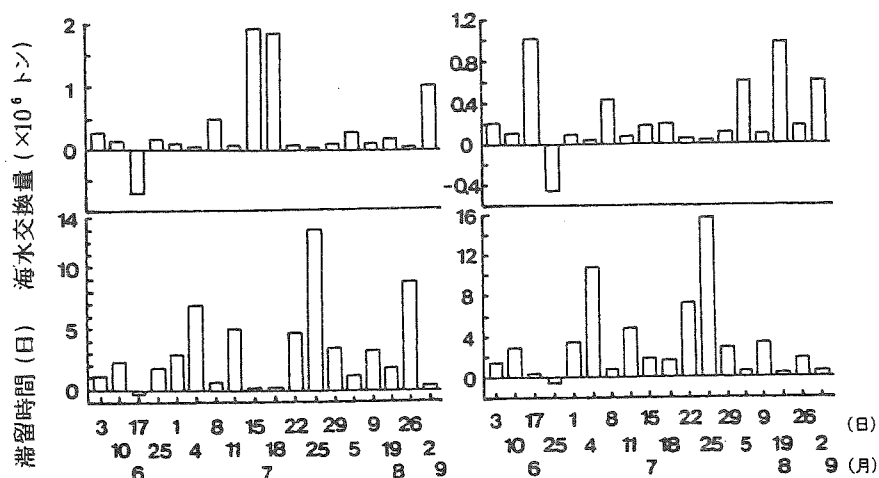


図10 ボックス1、2、と2、3における海水交換量（上段）と滞留時間（下段）の推移

ボックス2、3間が $1.9 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ トン、0.29~15.5dayで、ボックス1、2間の方が海水交換量がいくぶん大きかった。また、両項目とも調査日毎の変動が著しく、長期にわたって海水の停滞することがなかったが、このことは外海に接したこの水域の特色を表している。

次に、ボックス1、2間とボックス2、3間の滞留時間と降水量や塩分の関係を図11、12に示した。滞留時間と両者の間には必ずしもきれいな相関が認められなかったが、降雨と外海水の進入(高塩分)時に滞留時間が短くなり、海水交換の促進されることが窺える。

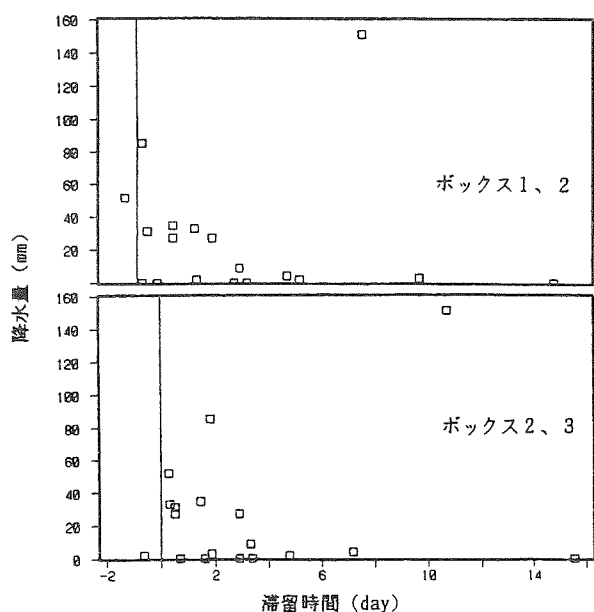


図11 滞留時間と降水量の関係

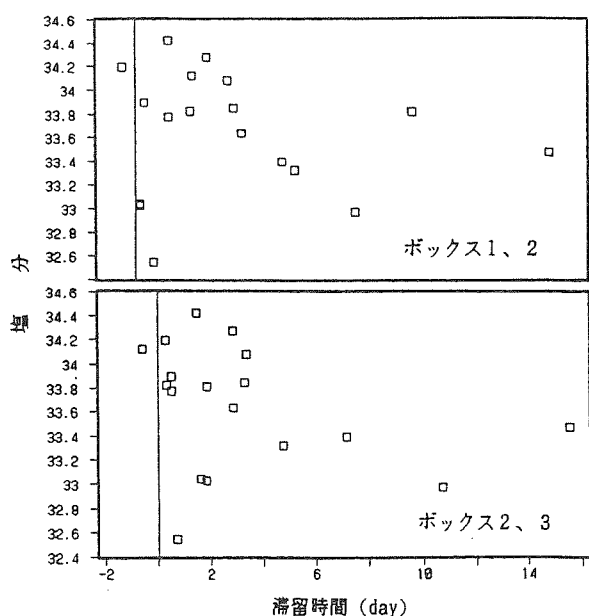


図12 滞留時間と塩分の関係

以上より、田辺湾の南部域では降雨や外海水の進入時に海水交換が促進され、その地理的条件により海水交換が良好で、短期間の内に頻繁に変動を繰り返していることが明らかになった。

*G.mikimotoi*の発生と海水交換の関係を検討するため、図13に本種の発生状況、増殖速度と滞留時間の推移を示した。なお、増殖速度は山口・本城¹⁴⁾による計算式から求めたものである。*G.mikimotoi*は7月中旬から出現し始め、8月上旬までごく低密度出現していた。このころは水温と塩分から求めた増殖速度が0.6~0.7 div./dayで、増殖するための条件は良好であった。また、滞留時間は0.29~15.5dayで、海水の停滞する期間もあったが、長期にわたることがなかった。田辺湾では本種の増殖が出現初期に

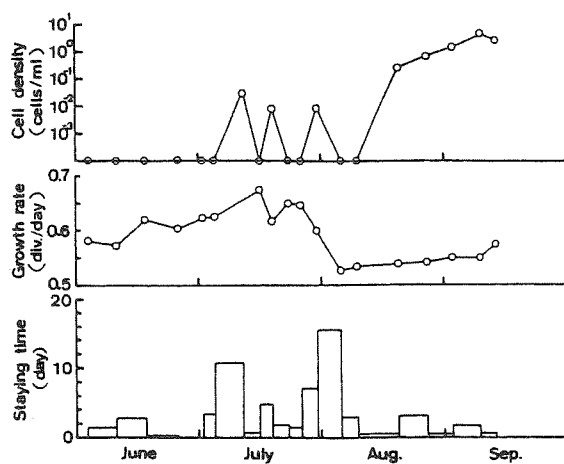


図13 *Gymnodinium mikimotoi*の発生状況(上段)、増殖速度(中段)とボックス2、3の滞留時間(下段)の推移
*G.mikimotoi*の発生状況はSt.7、A、Bの全層平均値で示す。
増殖速度は山口・本城の式¹⁴⁾による。

遅く、個体群密度の増加とともにしだいに速くなることが明らかになっている⁸⁾。そこで、この時期には海水の停滞することもあったが、出現初期であったため、増殖が遅く、本種は増加することがなかったのであろう。また、8月中旬から本種は増加し始めたが、このころは水温、塩分から求めた増殖速度は低く、しかも、滞留時間が短く、海水交換が良好になった。そこで、本種の増殖群は散逸され続けたため、最高密度は4.7cells/ml(ボックス2の水柱平均値)で赤潮形成密度に達することがなかったものと考えられる。

今後、赤潮発生年の結果について検討することが必要であるが、ここでの結果からボックス2と外側のボックスである1や3の平均塩分が近似して逆転することもあり、交換量で負の値が得られることもあった。そこで、ボックスの設定についても再検討することが必要であろう。

文 献

- 1) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1990: 平成元年度赤潮対策技術開発試験報告書—中層増殖性広域赤潮被害防止技術開発試験. pp.43.
- 2) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1991: 平成2年度赤潮対策技術開発試験報告書—中層増殖性広域赤潮被害防止技術開発試験. pp.79.
- 3) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1992: 平成3年度赤潮対策技術開発試験報告書—中層増殖性広域赤潮被害防止技術開発試験. pp.77.
- 4) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1993: 平成4年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書. pp.35.
- 5) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1994: 平成5年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書. pp.15.
- 6) 和歌山県水産試験場・アジア航測株式会社, 1995: 平成6年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書. pp.16.
- 7) 和歌山県水産試験場, 1996: 海域特性による赤潮被害防止対策事業報告書. pp.8.
- 8) 竹内照文・小久保友義・辻 泰俊・本城凡夫, 1995: 田辺湾における *Gymnodinium mikimotoi* 赤潮の群生長と流況による分布域の変化. 日本水産学会誌, 61(4), 494-498.
- 9) 竹内照文・小久保友義・内田卓志, 1997: 田辺湾における *Gymnodinium mikimotoi* の増殖域の環境特性と本種赤潮の発生環境. 日本水産学会誌, 63(2), 184-193.
- 10) 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳, 1985: 講座ボックスモデル. 水産土木, 22(1), 91-95.
- 11) 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳, 1986: 講座ボックスモデル [II] —高知県古満目湾への適用例. 水産土木, 22(2), 63-73.
- 12) 杜多 哲・阿保 勝・本城凡夫・山口峰生・松山幸彦, 1993: 迫間浦における *Gymnodinium* 赤潮の発生に及ぼす海水交換の影響. 海岸工学論文集, 40, 996-1000.
- 13) 杜多 哲・杉山元彦・本城凡夫・大和田紘一・浅川 昭彦・飯倉敏弘・熊田 弘・山本茂也, 1990: 五ヶ所湾とその支湾における海水交換の季節変動影響. 養殖研報, 18, 13-29.
- 14) 山口峰生・本城凡夫, 1990: 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium mikimotoi* (Dinophyceae) の同調的細胞分裂と分裂頻度による増殖速度の測定. 日本プランクトン学会報, 37, 3-18.