

## 有害赤潮ラフィド藻*Chattonella antiqua*と*C.marina*の増殖速度に及ぼす水温,塩分および光強度の影響

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	山口, 峰生 今井, 一郎 本城, 凡夫
巻/号	57巻7号
掲載ページ	p. 1277-1284
発行年月	1991年7月

## 有害赤潮ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *C. marina* の増殖速度に及ぼす水温, 塩分および光強度の影響

山口峰生, 今井一郎, 本城凡夫

(1990年11月26日受付)

Effects of Temperature, Salinity and Irradiance on the Growth Rates of the Noxious Red Tide Flagellates *Chattonella antiqua* and *C. marina* (Raphidophyceae)\*<sup>1</sup>

Mineo Yamaguchi,\*<sup>2</sup> Ichiro Imai,\*<sup>2</sup> and Tsuneo Honjo\*<sup>3</sup>

*Chattonella antiqua* and *C. marina* are known to be the most noxious red tide flagellates causing mass mortality of cultured fish. Their optimum environmental requirements for growth and survival ranges, such as temperature, salinity and irradiance, were determined with axenic cultures. The growth of *C. antiqua* and *C. marina* were observed at the irradiance of 30  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  or more and saturated at 110  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . The growth responses of the flagellates were examined at 30 combinations of different temperatures (10–30°C) and salinities (10–35‰) under saturated light intensity of 120  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . They grew at temperatures from 15 to 30°C and salinity from 10 to 35‰. Maximal growth rates of 0.97 divisions/day (*C. antiqua*) and 0.81 divisions/day (*C. marina*) were obtained with combinations of 25°C and 25‰ and 25°C and 20‰, respectively. At suboptimal temperatures, both species had reduced salinity-tolerance ranges. A statistical test indicated that temperature had the greatest influence on growth rates, followed by salinity and their interaction. The present study reveals that *C. antiqua* and *C. marina* are eurythermal and euryhaline organisms. These physiological characteristics presumably allow them to develop huge blooms during the summer in the Inland Sea of Japan.

海産ラフィド藻 *Chattonella antiqua* と *C. marina* は、大規模な赤潮を形成し養殖魚類の大量斃死を引き起こす原因種として知られている。1972年夏季に播磨灘で発生した *C. antiqua* の赤潮は、1,400万尾に上る養殖ハマチの大量斃死をもたらした大きな社会問題となった。<sup>\*3</sup> 以来 *Chattonella* (本報では *C. antiqua* と *C. marina* の2種を指すこととする)の赤潮の発生機構を解明するために、精力的な研究が行われてきた。特に生活史に関しては、*Chattonella* が冬季をシストの状態で海底泥中で過ごし、それらが翌年の赤潮のシードポピュレーションとして重要な役割を果たしていることが明らかになった。<sup>1)</sup> 一方栄養細胞に関しても、物理・化学的な要因に対する増殖生理についての知見が蓄積されてきている。しかしそれらのほとんどは単一要因に対する増殖応答の研究にとどまり、要因間の相互作用を取り扱ったものは *C. marina* に関する一報告<sup>\*4</sup>のみである。また同一条件下で *C. an-*

*tiqua* と *C. marina* の増殖生理を比較検討した研究報告は見あたらない。そこで本研究においては、2種の *Chattonella* の無菌培養株を用いてそれらの増殖速度に及ぼす水温、塩分および光強度の影響を調べ、さらにはそれら要因間の相互作用も併せて検討した。

### 実験方法

**供試株と培地** 実験に用いた *C. antiqua* と *C. marina* はそれぞれ1985年に大阪湾と周防灘から分離し、マイクロペット洗浄法<sup>2)</sup>により無菌化したクローン株である。継代培養および実験には、栄養強化培地である改変SWM-3培地<sup>3)</sup>を使用した。

**増殖速度に及ぼす光強度の影響** 光強度 120  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  で前培養を行った上記2種の *Chattonella* を、塩分 31.3‰のSWM-3培地 100 ml を分注した 200 ml 容の三角フラスコ各々 10本に約 50 cells/ml の濃度になる様

\*<sup>1</sup> 本研究の概要は平成2年度日本水産学会秋季大会で発表した。

\*<sup>2</sup> 南西海区水産研究所 (Nansei National Fisheries Research Institute, Ohno, Saeki, Hiroshima 739-04, Japan).

\*<sup>3</sup> 水産庁瀬戸内海漁業調整事務局: 昭和47年夏期東部瀬戸内海養殖はまち大量へい死事故の全容, 1973, 51 pp.

\*<sup>4</sup> 野沢治治: 「大規模赤潮の形成及び赤潮被害抑止に関する研究」5年間の研究成果, 南西水研・東海水研・水産大学校, 1984, pp. 139-152.

に接種し, 温度 25°C, 10  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  から 190  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  までの 10 段階の光強度下で培養を行った。光源には白色蛍光灯を用い, 明暗周期は 12L: 12D に設定した。培養開始から 1 日間隔で検鏡による細胞数の計数を行って片対数グラフにプロットし, その直線部分(対数増殖期)の傾きから増殖速度 ( $\mu$ ; divisions/day) を前報<sup>4)</sup>と同じく最小自乗法により計算した。増殖速度と光強度の関係を表すために, Lederman and Tett<sup>5)</sup> の直角双曲線モデルを改変した下式を適用した。

$$\mu = \mu_m \frac{I - I_0}{(K_s - I_0) + (I - I_0)}$$

ここで,  $\mu$  は増殖速度,  $I$  は光強度 ( $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ ),  $I_0$  は光強度のしきい値,  $\mu_m$  は最大増殖速度,  $K_s$  は  $\mu_m/2$  を与える光強度をそれぞれ示す。そして上式のあてはめは, 以下の関数  $f(\mu_m, I_0, K_s)$  を最小にするパラメータの値を, シンプレックス法による逐次計算によって求めることにより行った。

$$f(\mu_m, I_0, K_s) = \sum_i [\mu_i - \mu_m(I_i - I_0)/(K_s + I_i - 2I_0)]^2$$

ここで  $\mu_i$  は増殖速度,  $I_i$  は光強度の測定値である。

**in vivo クロロフィル蛍光による増殖速度の測定** 改変 SWM-3 培地 500 ml を分注した 2 本の三角フラスコに 2 種の *Chattonella* を各々接種し, 温度 25°C, 光強度 130  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ , 12L: 12D の明暗周期で培養を行った。1 日間隔で培養液 20 ml を採取し, 検鏡による細胞数および *in vivo* クロロフィル蛍光の測定を行い培養日数に伴う両者の関係を調べた。蛍光値は蛍光光度計 (TURNER DESIGNS 社製 model 110) で測定した。

**増殖に及ぼす水温と塩分の影響** 培養実験温度は, 10, 15, 20, 25, 30°C の 5 段階に設定した。また SWM-3 培地の塩分濃度は, 10, 15, 20, 25, 30, 35‰ の 6 段階に調整した。30‰ 以下の塩分は基本海水を超純水により希釈して, また 35‰ の濃度を得るためには, 海水を 50°C の恒温槽中で濃縮して調製した。この様にして塩分濃度を設定した後に培地成分を添加し培養液を調製した。培養実験は上記の水温と塩分のすべての組合せ, すなわち 30 通りについて実施した。

保存株を実験条件に馴致させるため以下の操作を行った。まず温度については, 保存株の培養温度である 22°C から少しずつ温度を上昇あるいは下降させながら, 実験温度条件に馴致させた。次に各温度で増殖した細胞を 6 段階の塩分濃度の培地に接種した。それぞれの実験条件下で少なくとも 1 カ月間継代培養したものを前培養とした。本培養は, 培地 4 ml を分注した PP キャップ試験管 (13×120 mm) に適宜希釈した前培養を 1 ml 接種し (3 本立て), 光強度 120  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ , 明暗周期 12L: 12D で前培養と同じ温度で行った。接種細胞密度は, 約 50 cells/ml に調整した。培養開始後 1 日おきに *in vivo* クロ

ロフィル蛍光を測定し, その結果から先の光強度の実験と同様の方法で増殖速度を求めた。結果は 2 因子要因計画法 (繰り返しは完全無作為化) により解析した。

## 結 果

**増殖速度に及ぼす光強度の影響** *C. antiqua* の増殖速度と光強度の関係を Fig. 1 に示す。本種は 10  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  では増殖できなかった。増殖は光強度 30  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  以上で認められ, 110  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  以上ではほぼ 1.0 division/day の増殖速度で飽和した。逐次計算によって得られた  $\mu_m$  は 1.34 divisions/day,  $K_s$  は 42.35  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ ,  $I_0$  は 10.31  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  であった。この結果に基づき, 増殖速度と光強度の関係は図中の式で表すことができた。

*C. marina* の増殖速度と光強度の関係を Fig. 2 に示す。本種は *C. antiqua* とほぼ同様の光強度と増殖速度の関係を示した。逐次計算により  $\mu_m$  は 1.39 divisions/day,  $K_s$  は 63.38  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ ,  $I_0$  は 10.51  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  と計算さ

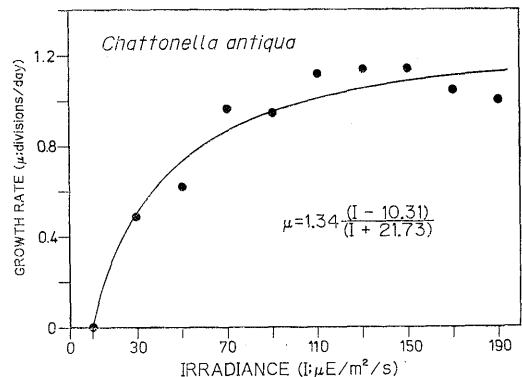


Fig. 1. The effect of light intensity ( $I$ ) on the growth rate ( $\mu$ ) of *Chattonella antiqua*. Rectangular hyperbola equation in the figure was fitted by simplex minimization procedure.

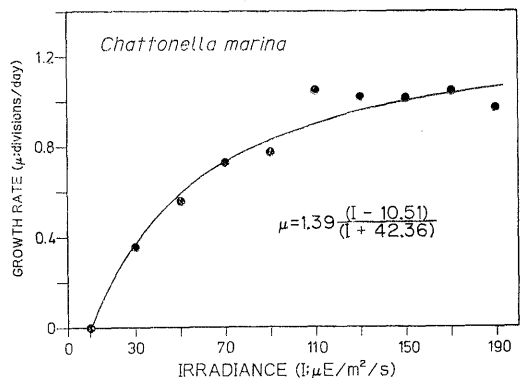


Fig. 2. The effect of light intensity ( $I$ ) on the growth rate ( $\mu$ ) of *C. marina*. Refer to Fig. 1 for remaining legend.

れた。この結果から増殖速度と光強度の関係は図中の計算式で表せた。*C. marina* における  $K_s$  は *C. antiqua*

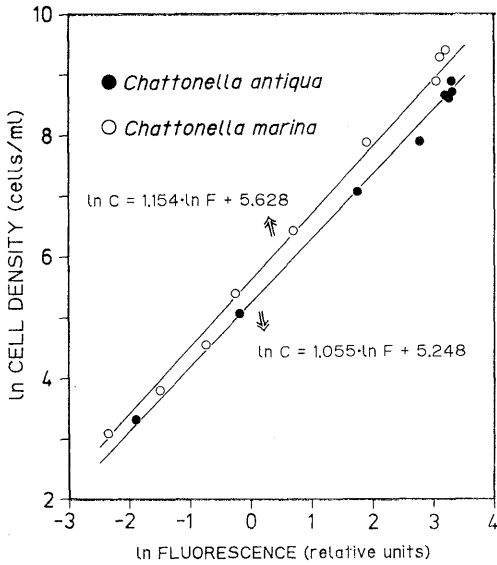


Fig. 3. Relationship between cell density ( $C$ ) and *in vivo* chlorophyll fluorescence ( $F$ ) in *C. antiqua* and *C. marina*.

よりも約  $20 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  大きいことから、*C. marina* はより高い光強度を増殖に要求することが示唆された。

**増殖に及ぼす水温と塩分の影響** *C. antiqua* と *C. marina* の増殖に伴う細胞密度 ( $C$ ) と、*in vivo* クロロフィル蛍光 ( $F$ ) の関係を Fig. 3 に示す。両者の間には次式で示される様に高い相関関係が認められた。

*C. antiqua*  
 $\ln C = 1.055 \cdot \ln F + 5.248 \quad (r = 0.998)$

*C. marina*  
 $\ln C = 1.154 \cdot \ln F + 5.628 \quad (r = 0.998)$

このことから細胞数の代わりに蛍光値を測定することによって、増殖速度が計算できることが判明した。

種々の水温と塩分条件下で培養した *C. antiqua* の増殖曲線を Fig. 4 に示す。本種は  $10^\circ\text{C}$  では全く増殖不可能であった。またそれ以上の温度でも前培養において増殖が見られなかった実験区については本培養は行わず、増殖速度は 0 とした。水温  $30^\circ\text{C}$  の場合、塩分  $20\text{‰}$  以上で増殖が観察されたが、 $20\text{‰}$  での増殖量は非常に低かった。 $25^\circ\text{C}$  の場合、すべての塩分条件下で本種は増殖した。ただし、 $10\text{‰}$  での増殖量は低かった。 $20^\circ\text{C}$  では  $15\text{‰}$  以上で増殖が見られたが、塩分の低下に従って曲線の傾きが小さくなった。 $15^\circ\text{C}$  においては  $15\text{‰}$  以上

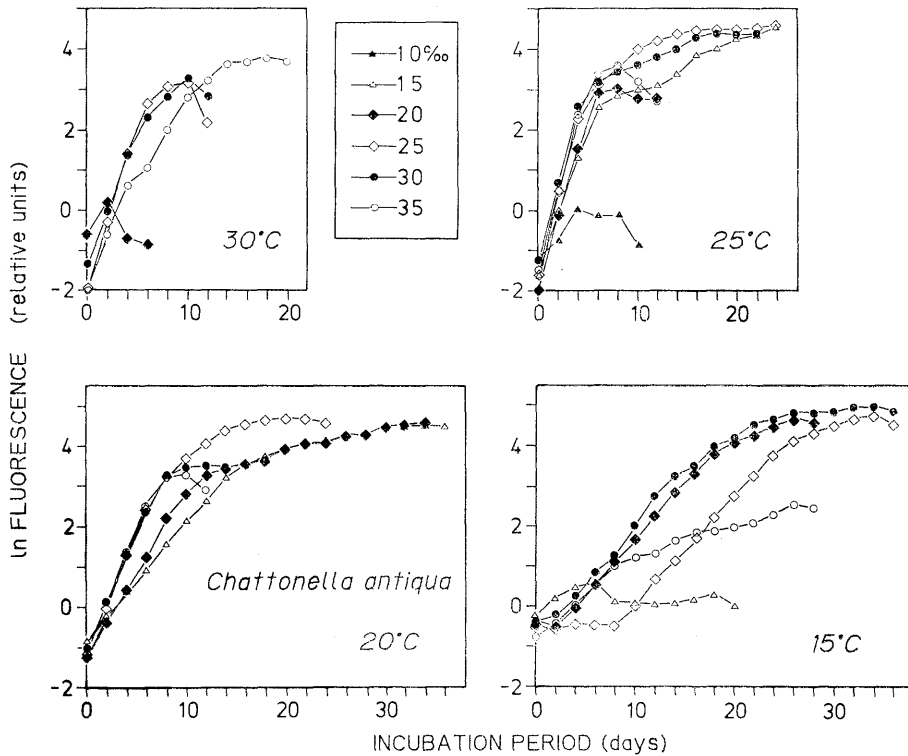


Fig. 4. Growth curves for *C. antiqua* grown at various temperature and salinity combinations. Growth expressed as natural logarithm of *in vivo* fluorescence intensity averaged over three replicates.

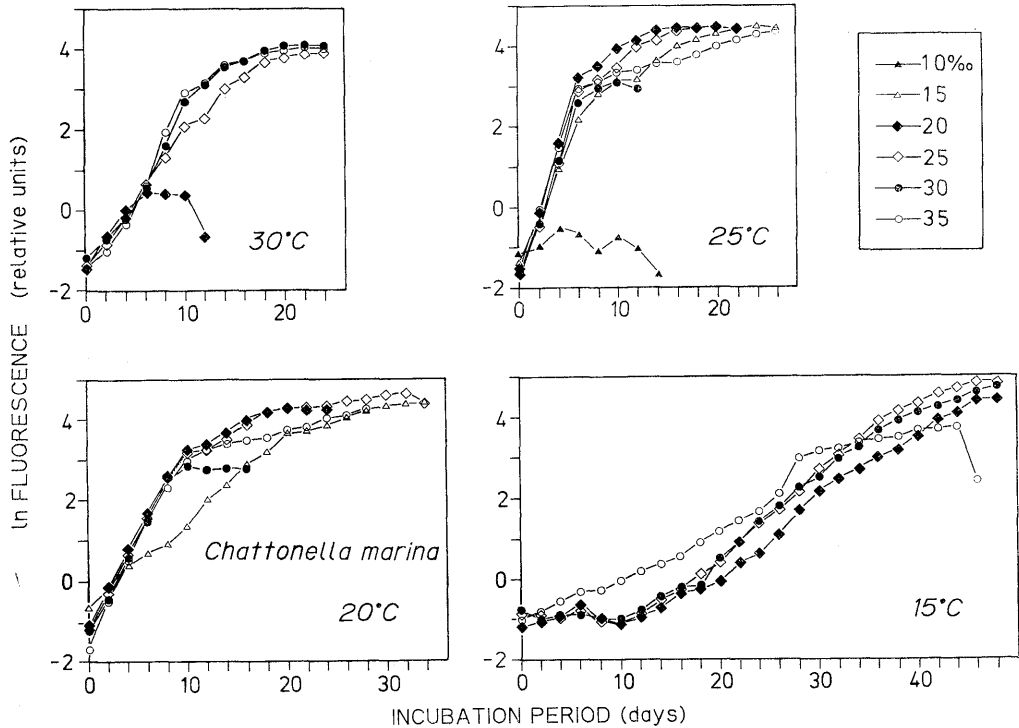


Fig. 5. Growth curves for *C. marina* grown at various temperature and salinity combinations. Refer to Fig. 4 for remaining legend.

Table 1. Summary of two-way analysis of variance of growth rate as a function of temperature, salinity and their interaction

Species	Source of variation	D.F.	Sum of squares	Mean square	F
<i>C. antiqua</i>	Temperature	4	6.207	1.552	1291.93***
	Salinity	5	2.348	0.470	391.02***
	Interaction	20	1.184	0.059	49.29***
	Error	60	0.072	0.001	
	Total	89	9.812		
<i>C. marina</i>	Temperature	4	4.229	1.057	1561.43***
	Salinity	5	1.566	0.313	462.40***
	Interaction	20	0.778	0.039	57.47***
	Error	60	0.041	0.001	
	Total	89	6.614		

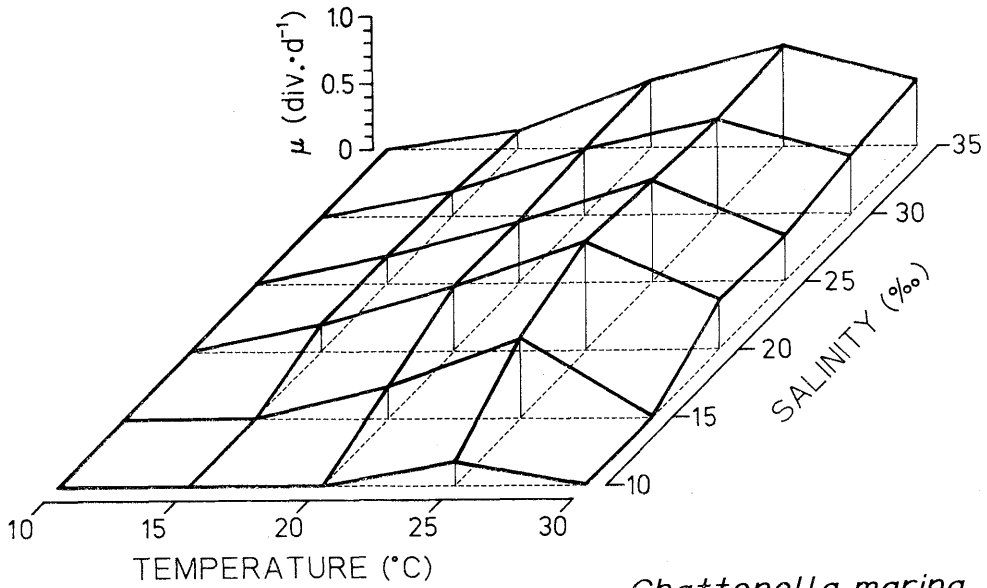
\*\*\* Significant at the 1% level.

で増殖が認められた。しかし、35‰と15‰で傾きおよび収量は共に小さかった。

*C. marina* の増殖曲線を Fig. 5 に示す。本種も *C. antiqua* と同様に 10°C では増殖できなかった。30°C では、20‰以上で増殖が確認されたが、20‰での増殖量は低かった。25°C ではすべての塩分条件下で増殖が見られた。しかし、10‰における増殖量は非常に小さかった。20°C においては、本種は 15‰以上で増殖したが、15‰における増殖速度および増殖量は共に小さかった。

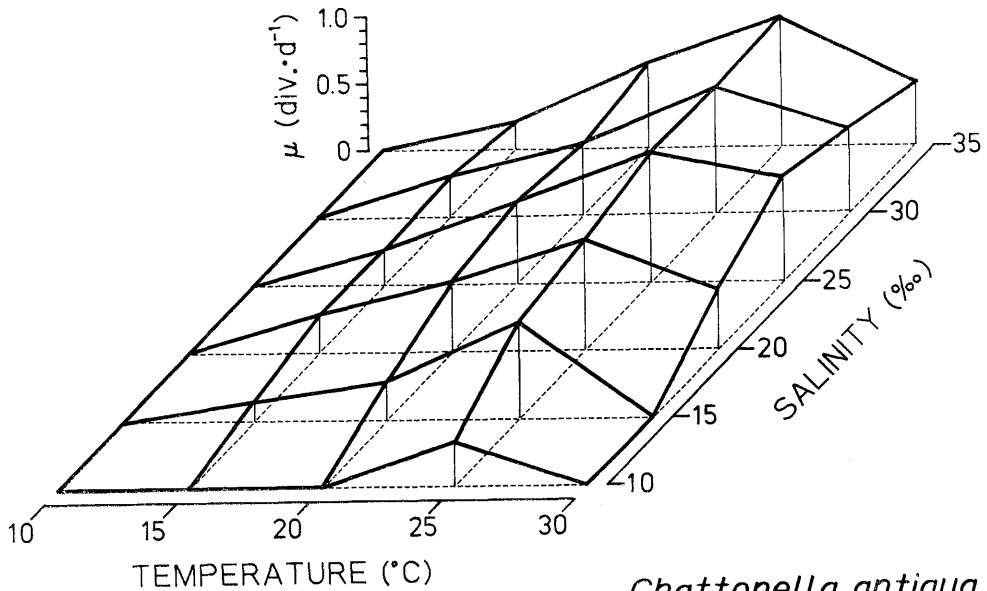
15°C の場合、20‰以上で増殖が観察された。ただし、35‰においても他の塩分と同程度に増殖できること、および 15‰では全く増殖できない点が *C. antiqua* と異なっていた。

以上の増殖曲線から計算された増殖速度を水温と塩分の 2 因子要因計画法によって解析した (Table 1)。その結果 *C. antiqua* と *C. marina* の両種とも、水温、塩分の主効果、およびそれらの相互作用が有意水準 1% で有意であった。また両種とも総平方和のうち 64% 程度が



*Chattonella marina*

Fig. 6. Multivariate response surface of growth rate of *C. antiqua* as a function of temperature and salinity.



*Chattonella antiqua*

Fig. 7. Multivariate response surface of growth rate of *C. marina* as a function of temperature and salinity.

水温によって占められていた。これにより水温が増殖速度に最も大きく影響していることが示唆された。

水温と塩分の組合せに対する *C. antiqua* と *C. marina* の増殖速度を 3 次元的に示すと Fig. 6 と Fig. 7 の様になる。水温と塩分に対する増殖応答は兩種ともほぼ同様のパターンを示した。温度の影響を見ると、25 $^{\circ}\text{C}$  を境に低温側でなだらかに、高温側でやや急激に低下する

と言った微細藻類に典型的な温度応答<sup>6)</sup>を示した。塩分について見ると、増殖の限界付近の低塩分で増殖速度は急激に低下するが、それ以上では変化は小さかった。最大増殖速度を与える水温と塩分の組合せは、*C. antiqua* では 25 $^{\circ}\text{C}$  と 25 $\text{‰}$  であり (Fig. 6)、一方 *C. marina* では 25 $^{\circ}\text{C}$  と 20 $\text{‰}$  であった (Fig. 7)。そして最大値としてそれぞれ、0.97 divisions/day, 0.81 divisions/day が

得られた。

## 考 察

数値モデルを構築しシミュレーションによって赤潮の発生予測を行う場合、定式化に重要な要素は増殖速度である。したがって、増殖速度に対する種々の環境要因の影響を、それらの相互作用も含めて、定量的に把握する必要がある。水温、塩分および光強度に対する *Chattonella* の増殖応答に関しては、池田,<sup>7)</sup> 岩崎,<sup>8)</sup> Nakamura and Watanabe,<sup>9)</sup> 矢持,<sup>10)</sup> 野沢<sup>\*1)</sup> の報告がある。しかし野沢<sup>\*1)</sup> の報告以外は単一要因に対する増殖応答しか調べられていない。また増殖を最大収量で検討している場合が多いが、最大収量を与える条件と最大増殖速度を与える条件とは必ずしも一致しないことが知られている。<sup>4)</sup> 以下の考察では、本研究で得られた結果に基づき *Chattonella* の増殖応答の特徴について論じ、さらに増殖速度と水温・塩分との関係を定式化した。

*C. antiqua* と *C. marina* は共に光強度  $10 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  では増殖できず、また増殖速度が飽和する光強度は  $110 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  であった (Figs. 1, 2)。また、*C. marina* は *C. antiqua* に比べ若干高い光強度を要求することが示された。播磨灘産の *C. antiqua* の増殖は  $0.011 \text{ ly}/\text{min}$  以上で見られ、増殖速度は  $0.04 \text{ ly}/\text{min}$  で飽和したと報告されている。<sup>9)</sup> これらの光強度は、波長  $550 \text{ nm}$  で換算すると<sup>11)</sup> それぞれ  $35$  および  $128 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  に相当する。したがって、今回の実験結果は播磨灘株の結果にはほぼ一致したと見なすことができよう。このことは、*Chattonella* の光に対する増殖応答は、株間にも種間にも、それほど差がないことを意味している。

周防灘においては、夏季に *Chattonella* が卓越する年と *Gymnodinium nagasakiense* が卓越する年とがあり、*Chattonella* が卓越するためには豊富な日照時間が必要であることが示唆されている。<sup>12)</sup> 先に示した様に弱光は *Chattonella* の増殖に不適であった。一方、*G. nagasakiense* は  $10 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  の低光強度下でも増殖可能であった。<sup>4)</sup> この様な現場観察と実験の結果は、現場での卓越種の交替過程において、低光強度に対する増殖応答の違いが深く関係している可能性を示唆するものである。現場海域におけるこれら赤潮生物の出現と、光強度との関係資料を今後さらに蓄積する必要がある。

*C. antiqua* の場合、 $170 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  以上の光強度で実験データと双曲線モデルの当てはめ結果との間に若干の相違が見られた (Fig. 1)。しかし、 $190 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  でも増殖速度はほぼ  $1.0 \text{ division}/\text{day}$  であることから、増殖速度

は飽和しているものと考えられる。さらに *C. marina* の光合成の強光阻害は  $50 \text{ klx}$  ( $800 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  に相当する) で起こるとの報告<sup>\*1)</sup> もある。したがって、この差異は強光阻害によるものとは考えにくく、高い光強度のデータに対して双曲線モデルが十分当てはまらなかった結果によるものであろう。ところで、現場海域における太陽の最大光強度は  $2,000 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  であり、<sup>13)</sup> 本研究ではその  $10$  分の  $1$  の光強度までしか実験していない。強光阻害の有無を調べるためには、さらに高い光強度下での培養実験と当てはめモデルの検討が必要であろう。

Nakamura and Watanabe<sup>9)</sup> によれば、*C. antiqua* は水温  $15^\circ\text{C}$  から  $28^\circ\text{C}$  の範囲で増殖し、 $25^\circ\text{C}$  で最大増殖速度を示したとされている。矢持<sup>10)</sup> は *C. antiqua* および *C. marina* の増殖量と温度との関係を調べ、*C. antiqua* の好適温度は  $20\sim 30^\circ\text{C}$  で、 $11^\circ\text{C}$  では全く増殖しないこと、*C. marina* は  $21\sim 30^\circ\text{C}$  で良好に増殖するが、 $13^\circ\text{C}$  では増殖せず、低温に敏感であることを報告している。彼はさらに、両種の間には  $13\sim 17^\circ\text{C}$  の間で応答に差が見られ、*C. antiqua* の方が高い増殖量を示したと述べている。野沢<sup>\*1)</sup> は、鹿児島湾産の *C. marina* の増殖が、 $17.5\sim 27.5^\circ\text{C}$  の温度範囲で見られ、その適温は  $22.5^\circ\text{C}$  であることを報告している。水温に関するこれらの知見は、2種の *Chattonella* の増殖可能水温が広範囲にわたることを示している。本研究で得られた結果は、上記の報告よりさらに広い温度範囲で、*Chattonella* の増殖が可能であることを示した。すなわち、水温  $15\sim 30^\circ\text{C}$  が *Chattonella* の増殖可能範囲と考えると良さそうである。しかも増殖速度は温度の変化に最も敏感に応答することが判明した (Table 1)。

最適増殖温度は、両種とも  $25^\circ\text{C}$  付近にあることが明らかとなった。Iwasaki<sup>14)</sup> によれば、 $25^\circ\text{C}$  以上に増殖の最適水温を有する植物プランクトン種は少ない。したがって、この様に高い最適水温を有することは、*Chattonella* が夏季に生息場を優占できる重要な要因の一つであると言えよう。

*Chattonella* は  $10^\circ\text{C}$  では全く増殖不可能であった (Figs. 6, 7)。この実験結果は、冬季に水温が  $7^\circ\text{C}$  付近まで低下する瀬戸内海<sup>15)</sup> において、両種が栄養細胞のままでは越冬できないことを示している。ところで *Chattonella* はシストの状態越冬するが、シストの成熟には  $11^\circ\text{C}$  以下の低温を必要とし、<sup>1)</sup> さらにその発芽の最適水温は  $22^\circ\text{C}$  であると報告されている。<sup>10)</sup> この様なシストの生理、およびここで明らかになった栄養細胞の温度応答を考慮すると、*Chattonella* は瀬戸内海の温度環境に極めて良く適応している生物と言える。一方鹿児島

\*1 野沢治治:「大規模赤潮の形成および赤潮被害抑止に関する研究」5年間の研究成果, 南西水研・東海水研・水産大学校, 1984, pp. 139-152.

湾においては、冬季の水温が 14~15°C であり、<sup>41</sup> 増殖可能な水温範囲の下限付近に相当する。そのため栄養細胞の状態越冬できる可能性がある。本研究で得られた *Chattonella* の温度特性は、現場におけるそれらの出現状況<sup>17,18)</sup>や、赤潮発生時の水温<sup>19-21)</sup>とも良く一致している。

岩崎<sup>8)</sup>は *Eutreptiella* sp. (= *Chattonella antiqua*) の増殖量と塩分の関係を調べ、本種が CI 10‰ (塩分 18.1‰) 付近で最も良く増殖し、好適塩分範囲は CI 8~17‰ (塩分 14.4~30.7‰) であると述べている。また池田<sup>7)</sup>も、*C. antiqua* の好適塩分は CI 9~17‰ (塩分 16.3~30.7‰) で、CI 4.6‰ (塩分 8.3‰) では増殖しないと報告している。さらに Nakamura and Watanabe<sup>9)</sup> は、25~41‰ の塩分範囲で *C. antiqua* の増殖速度が一定であったと述べている。一方、鹿児島湾産の *C. marina* は 15.5~30.1‰ で良く増殖することが報告されている。<sup>42</sup> 本研究結果によれば、最適増殖温度である 25°C における 2 種の *Chattonella* の増殖は 10 から 35‰ と、極めて広い塩分範囲にわたって観察された。以上の結果を総合すると、*C. antiqua* も *C. marina* も広塩分性種であると判断される。ただし、増殖可能な塩分範囲は温度によって影響を受けることに留意する必要がある。

*Chattonella* 赤潮は、降雨による塩分低下時と、<sup>19,20,22)</sup> 1984 年の周防灘<sup>23)</sup>や 1987 年の播磨灘<sup>43)</sup>の様塩分が高い場合、の両方で発生が確認されている。この様な現場観察は、*Chattonella* が広い塩分範囲で高い増殖速度を維持できると言った生理特性によって良く説明できよう。

赤潮による漁業被害を未然に防止するためには、*Chattonella* の増殖を的確に予測することが望まれる。先の分散分析の結果、水温と塩分の相互作用が有意であること (Table 1)、そして各水準が等間隔に設定されていることから、前報<sup>4)</sup>に従って増殖速度に及ぼす水温と塩分の関係を定量的に表すために多項式への当てはめを行った。モデルとしては次式が考えられる。

$$\begin{aligned} \mu = & \beta_{00} + \beta_{10} \cdot T + \beta_{20} \cdot T^2 + \beta_{30} \cdot T^3 + \beta_{01} \cdot S + \beta_{02} \cdot S^2 \\ & + \beta_{03} \cdot S^3 + \beta_{11} \cdot T \cdot S + \beta_{12} \cdot T \cdot S^2 + \beta_{21} \cdot T^2 \cdot S \\ & + \dots + \beta_{nn} \cdot T^n \cdot S^n + \varepsilon \end{aligned}$$

ここで  $\mu$  は増殖速度、 $T$  は水温、 $S$  は塩分、 $\beta_{nn}$  は偏回帰係数 (ただし  $\beta_{00}$  は定数項)、 $\varepsilon$  は誤差項をそれぞれ示す。ここでは実用性を考慮して 3 次までとし、変数増減法による重回帰分析によって偏回帰係数を求めた。その

Table 2. Cubic regression equations for predicting growth rates of *C. antiqua* and *C. marina*

	Estimated regression coefficients	
	<i>C. antiqua</i>	<i>C. marina</i>
$T$	-1.49979	-1.21833
$T^2$	0.07380	0.05924
$T^3$	-0.00117	-0.00092
$S^2$	ns	-0.00157
$S^3$	-0.00001	ns
$TS$	0.00389	0.00669
$TS^2$	-0.00003	0.00001
$T^2S$	-0.00003	-0.00015
Constant	9.34751	7.43755
Adjusted R <sup>2</sup>	0.93	0.92

ns: not significant at the 5% level.

結果 Table 2 に示す項が有意で残り、重回帰式が求まった。光強度や栄養塩濃度が制限的でない場合には、本多項式によって増殖速度を予測できると考えられる。

これまで述べたように、*Chattonella* の増殖には水温と塩分の 2 因子間でも相互作用が有意であった。また、*G. nagasakiense* でも同様の結果が得られている。<sup>4)</sup> これらの結果は、赤潮鞭毛藻の個体群動態と環境との関係を論ずる際に、要因相互の関係が無視できないことを強く示唆している。この様な相互作用は、水温と塩分以外にも、光条件<sup>24,25)</sup>や栄養塩<sup>26)</sup>の間にも存在することが報告されている。今後は実験計画法的手法を駆使することにより、増殖に及ぼすより多くの要因をそれらの相互作用も含めて解析して行く必要がある。

## 謝 辞

本稿をとりまとめるにあたり、研究の推進に対して多くの貴重なご助言を賜った前三重大学水産学部岩崎英雄教授、広島大学生物生産学部遠部 卓教授、養殖研究所環境管理部長伊藤克彦博士に深甚なる謝意を表す。また、双曲線モデルの当てはめに関して貴重なご教示を頂いた東京水産大学東海 正博士に厚く御礼申し上げる。

本研究は、環境庁の国立機関公害防止等試験研究費「有害赤潮の生態学的制御による被害防除技術の開発に関する研究」によって行われた。

## 引用文献

- 1) I. Imai and K. Itoh: *Mar. Biol.*, 94, 287-292

<sup>41</sup> 九万田一巳、武田健二、荒牧孝行: 昭和 61 年度九州海域赤潮調査報告書 (西海ブロック)、水産庁、福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県、鹿児島県、宮崎県、1987, pp. 149-168.

<sup>42</sup> 野沢治治: 「大規模赤潮の形成および赤潮被害抑止に関する研究」5 年間の研究成果、南西水研・東海水研・水産大学校、1984, pp. 139-152.

<sup>43</sup> 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所: 昭和 62 年夏期東部瀬戸内海シャットネラ赤潮の発生状況と被害の概要、1988, pp. 79.



- (1987).
- 2) 岩崎英雄: 微細藻類の分離と培養, 日本水産資源保護協会, 東京, 1967, pp. 1-55.
  - 3) 伊藤克彦, 今井一郎: 赤潮生物研究指針 (日本水産資源保護協会), 秀和, 東京, 1987, pp. 122-130.
  - 4) 山口峰生, 本城凡夫: 日水誌, **55**, 2029-2036 (1989).
  - 5) T. C. Lederman and P. Tett: *Bot. Mar.*, **24**, 125-134 (1981).
  - 6) R. W. Eppley: *Fish. Bull. U.S.*, **70**, 1063-1085 (1972).
  - 7) 池田武彦: 山口内海水試報, **2**, 4-9 (1971).
  - 8) 岩崎英雄: 日本海洋学会誌, **27**, 152-157 (1971).
  - 9) Y. Nakamura and M. M. Watanabe: *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **39**, 110-114 (1983).
  - 10) 矢持 進: 日本プランクトン学会報, **31**, 15-22 (1984).
  - 11) 有賀祐勝, 横浜康継: 藻類研究法 (西澤一俊, 千原光雄編), 共立出版, 東京, 1979, pp. 436-453.
  - 12) 今井一郎: 南西水研報, **23**, 63-166 (1990).
  - 13) J. T. O. Kirk: *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1983, pp. 219-253.
  - 14) H. Iwasaki: in "Biochemistry and Physiology of Protozoa" (ed. by M. Levandowsky and S. H. Hutner), 2nd ed., Academic Press, New York, 1979, pp. 357-393.
  - 15) 小村久美男: 神戸海洋気象台彙集, **201**, 10-39 (1983).
  - 16) 今井一郎, 伊藤克彦, 安楽正照: 日本プランクトン学会報, **31**, 35-42 (1984).
  - 17) 吉松定昭, 小野知足: 香川赤潮研報, **2**, 1-42 (1986).
  - 18) T. Honjo: *Bull. Plankton Soc. Japan*, **34**, 119-124 (1987).
  - 19) 田中俊次, 藤田真吾, 杉山元彦, 西岡 純, 中西雅幸: 京都府立海洋センター研報, **1**, 94-112 (1977).
  - 20) 寺田和夫, 神蘭真人, 佐々木和之: 福岡豊前水試研報 (昭和 55 年度), 91-106 (1982).
  - 21) 高山晴義: 広島水試研報, **13**, 59-64 (1983).
  - 22) 寺田和夫, 渡辺昭二, 佐々木和之: 福岡豊前水試研報 (昭和 54 年度), 87-93 (1981).
  - 23) 寺田和夫, 神蘭真人: 福岡豊前水試研報 (昭和 59 年度), 106-117 (1986).
  - 24) H. R. Jitts, C. D. McAllister, K. Stephens, and J. D. H. Strickland: *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **21**, 139-157 (1964).
  - 25) T. J. Smayda: *J. Phycol.*, **5**, 150-157 (1969).
  - 26) G-Y. Rhee and I. J. Gotham: *Limnol. Oceanogr.*, **26**, 635-648 (1981).