

赤潮総合対策調査事業 - (赤潮対策技術高度化事業 - 1) 赤潮広域モニタリング高度化

西 広海・保科圭佑

【目的】

シャットネラ属やコクロディニウム属などの赤潮により漁業被害の発生している八代海や鹿児島湾において、有害赤潮プランクトンの発生状況及び海洋環境を広域的に監視するとともに、赤潮プランクトンの増殖特性等の把握により赤潮発生機構を解明し、漁業被害の防止に資する。

【方法】

1 漁場環境の周年モニタリング調査

鹿児島湾及び八代海における12定点（赤潮調査事業と同じ）において以下の事項を調査した。

調査項目：気象，海象（水温，塩分，透明度，水色）

水質（DO, pH, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, DIN, DON, TDN, DIP, DOP, TDP, Si, Chl-a）

プランクトン（各層採水）

：水質項目の略号の説明は、別稿「有害・有毒プランクトン情報伝達事業」に記載

2 赤潮発生動向調査

（1）プランクトン発生動向調査

鹿児島湾と八代海で周年モニタリングを行った。

（2）赤潮発生メカニズムの解明

ア．1回目試験

Skeletonema tropicum の増殖に及ぼす水温，塩分，光強度の影響について，八代海で採取し人工培養した株を用い，室内試験を実施した。試験区は，水温を25，27，29の3段階，塩分を28，30，33の3段階，光強度を10，50，100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の3段階を組み合わせた区を設定した。各区は3本ずつ試験管に，八代海で採集し，ろ過して滅菌した海水を用いて調整したf/2改変培地に，*S.tropicum* を細胞密度が100cells/mlとなるよう接種した。照明は14時間明，10時間暗周期とした。以上の条件で，14日間の培養試験を行い，期間中の最高細胞密度及び対数増殖している期間の細胞密度を基に最小二乗法で比増殖速度を算出し，それぞれに対する水温，塩分，光強度の3要因による影響および交互作用を，フリーソフトのRを用い，分散分析により検定した。また最高細胞密度及び比増殖速度とも，水温，塩分，光強度それぞれの平均値の差について，Tukeyの多重比較検定法により検定した。

イ．2回目試験

Chattonella antiqua と *S.tropicum* の増殖に及ぼす水温，光強度の影響及び相互作用について，人工培養した細胞株を用い，室内試験を実施した。試験区は，水温を18，20，23の3段階，光強度を10，50，100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の3段階に設定して組み合わせ，塩分は28の固定とし，それぞれ *C.antiqua* と *S.tropicum* の単独培養と，混合培養（1:1）した区を設定した。

単独培養区、混合培養区とも、3本ずつ試験管に、八代海で採集し、ろ過して滅菌した海水を用いて調整したf/2改変培地に、*C.antiqua* と *S.tropicum* を細胞密度が100cells/mlとなるよう接種した。照明は14時間明、10時間暗周期とした。以上の条件で、14日間の培養試験を行い、期間中の最高細胞密度及び対数増殖している期間の細胞密度を基に最小二乗法で比増殖速度を算出し、それぞれに対する水温、塩分による影響および相互作用について、単独培養と混合培養の平均値の差を検定した。

検定はフリーソフトのRを用い、あらかじめF検定で分散を比較し、母分散が等しいと推定された場合は「t 検定：等分散を仮定した2標本による検定（スチューデントのt検定）」で、母分散が等しくないとして推定された場合は「t検定：分散が等しくないとして仮定した2標本による検定（ウェルチのt検定）」で行った。

【結果及び考察】

1 漁場環境の周年モニタリング調査

鹿児島湾、八代海の海象及び水質については、別稿「有害・有毒プランクトン情報伝達事業」に記載

2 赤潮発生動向調査

（1）プランクトン発生動向調査

【鹿児島湾】

湾央部では、6月以降に珪藻類が増加して下旬にはピークとなった。8月以降は9月中旬に珪藻類がやや増加したほかは、概ね低水準で推移した。湾奥部では、6月以降に珪藻類が増加して下旬にピークとなった。7月中旬以降はプランクトンの細胞密度は低水準だったが、9月中旬に一時増加し、その後は低水準で推移した。

6月下旬～7月上旬には湾奥部で *Chattonella marina* が赤潮を形成した。5月下旬から *C. marina* が確認（1cell/ml）されていたが、6月23日に湾奥部の牛根地先や桜島沿岸に *C. marina* によるパッチ状の着色がみられ、最高1,600cells/mlであった。6月下旬までは潮目に小規模な着色域が確認された。7月以降は細胞密度は低密度ながら増減したが、7月7日にパッチ状の着色域が確認されたのを最後に見られなくなり、終息した。

山川湾では12月5日に *Psuedochattonella verruculosa* が初めて確認されたが、その後の細胞密度は低水準で推移した。2月19日に湾奥部で最高57cells/ml確認したため、赤潮注意報を発令した。翌21日には本種が最高83cells/ml確認されたがその後細胞密度は低下し、2月26日を最後に確認されなくなった。

【八代海】

珪藻類は6月下旬から7月下旬まで概ね高水準で推移した。8月以降は10月下旬に増加したものの、概ね低水準で推移した。

有害種は、5月に *Heterosigma akashiwo* による赤潮が局地的に発生したほか、7月に *Cochlodinium polykrikoides* による赤潮が八代海中部で発生した。なお *C.antiqua* は八代海南部では低密度で推移し、赤潮は発生しなかった。

（2）赤潮発生メカニズムの解明

ア．1回目試験： *S.tropicum* の増殖に及ぼす水温，塩分，光強度の影響

（最高細胞密度）

S.tropicum の細胞密度の推移を見ると，水温25℃では，光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上では，塩分が高くなるほど増殖が早い傾向が見られた。水温27℃ 光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では塩分の差による増殖の差はあまり見られなかった。水温29℃ではどの光強度でも塩分の差による増殖の差は見られなかった（図-1）。

最も最高細胞密度が高かったのは水温27℃，光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，塩分30区の362,267cells/mlで，最も低かったのは水温25℃，光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，塩分28区の74,517cells/mlであった（表-1）。

また，試験期間中の最高細胞密度に対して，水温，塩分，光強度とも有意に影響し，最高細胞密度は水温が高くなるほど高く，塩分33で有意に低く，光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で有意に低くなった（図-2）。また塩分と光強度，水温と塩分と光強度の間に交互作用が有意に認められた（ $p<0.05$ ）（図-3）

表-1 *S.tropicum* の増殖に及ぼす水温，塩分，光強度の影響試験結果

試験区	設定条件			試験結果	
	水温 (℃)	光強度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	塩分	最高細胞密度 (cells/ml)	比増殖速度 (ind/day)
A1	25	10	28	305,533	0.96
A2	"	"	30	192,467	0.89
A3	"	"	33	165,133	0.84
A4	25	50	28	273,600	1.82
A5	"	"	30	297,267	1.85
A6	"	"	33	296,867	1.53
A7	25	100	28	74,517	1.54
A8	"	"	30	184,667	1.68
A9	"	"	33	209,933	1.93
B1	27	10	28	318,733	1.76
B2	"	"	30	362,267	1.60
B3	"	"	33	130,800	1.53
B4	27	50	28	261,733	2.48
B5	"	"	30	320,800	2.33
B6	"	"	33	262,733	2.59
B7	27	100	28	205,200	2.92
B8	"	"	30	224,267	2.95
B9	"	"	33	241,000	2.59
C1	29	10	28	317,733	1.11
C2	"	"	30	322,667	1.15
C3	"	"	33	257,800	1.12
C4	29	50	28	256,333	2.13
C5	"	"	30	273,733	2.29
C6	"	"	33	343,200	1.97
C7	29	100	28	244,667	2.39
C8	"	"	30	267,333	2.49
C9	"	"	33	178,267	2.77

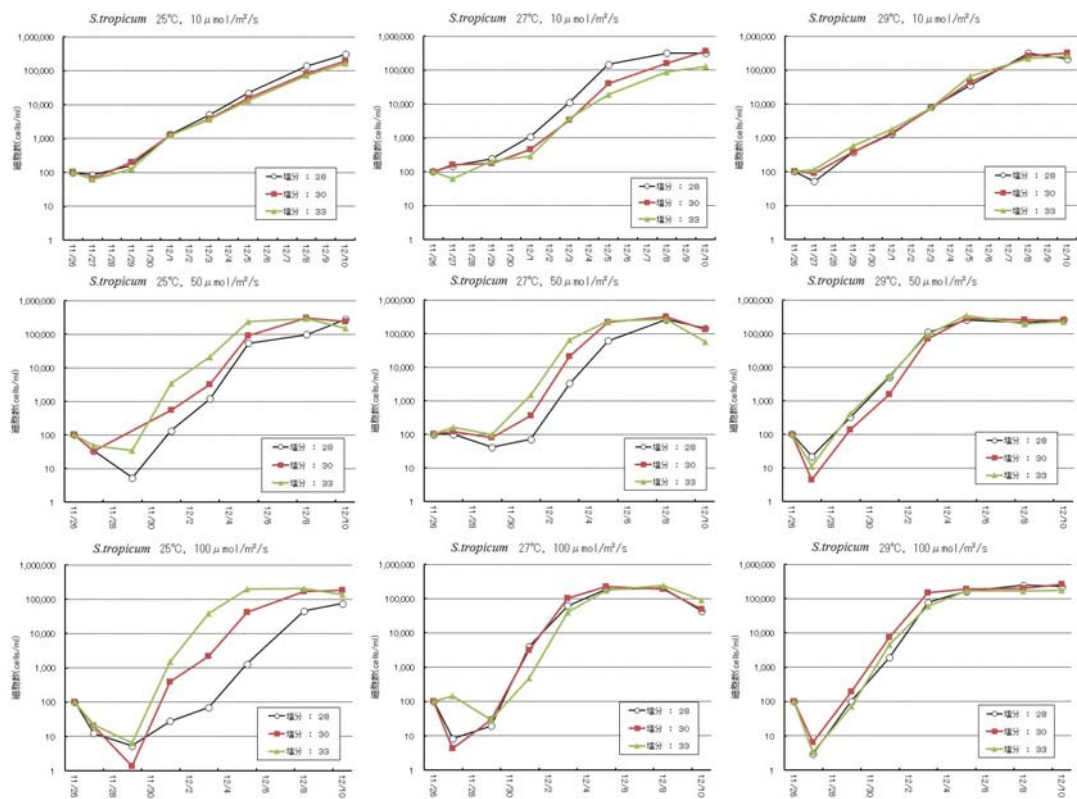
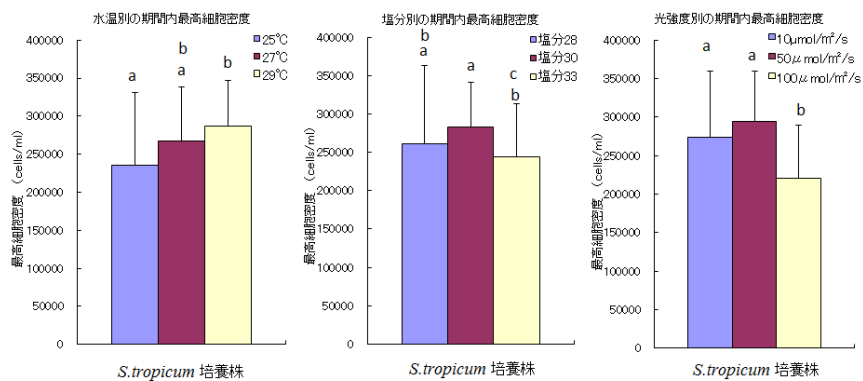


図-1 *S. tropicum* の細胞密度の推移



各項目の異なる文字間で、有意差があることを示す ($p < 0.05$)

図-2 *S. tropicum* の水温別、塩分別、光強度別の最高細胞密度

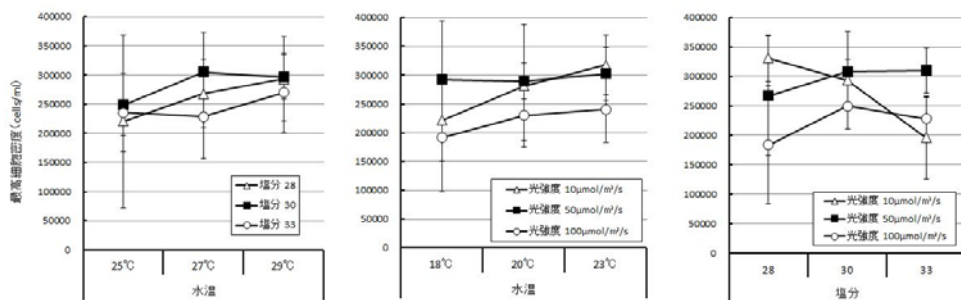
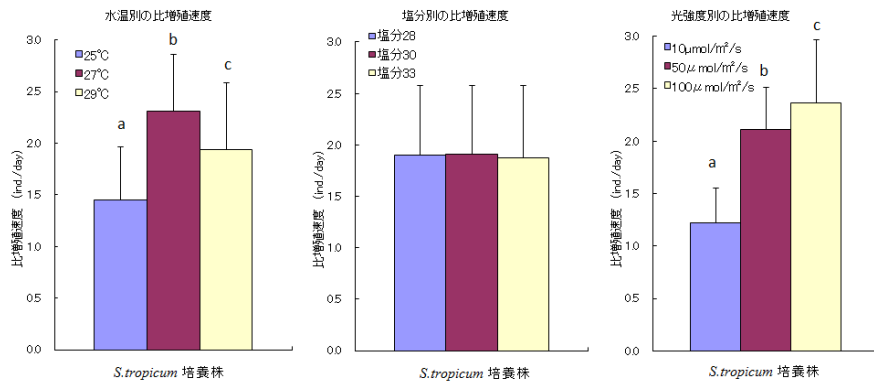


図-3 *S. tropicum* の最高細胞密度に対する水温、塩分、光強度の交互作用

(比増殖速度)

最も比増殖速度が高かったのは水温27℃，光強度100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，塩分30区の2.95 ind/dayで，最も低かったのは水温25℃，光強度10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，塩分33区の0.84 ind/dayであった（表-1）。

試験期間中の比増殖速度に対して，水温，塩分，光強度の3要因のうち，水温と光強度が有意に影響し（ $p < 0.001$ ），水温は27℃区が他の2つの水温区より比増殖速度が有意に高かった。また光強度が強くなるほど比増殖速度は増加し，光強度10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 区は他の2つの光強度区と有意に低かった（図-4）。



各項目の異なる文字間で，有意差があることを示す（ $p < 0.05$ ）

図-4 *S. tropicum* の水温別，塩分別，光強度別の比増殖速度

またどの塩分濃度でも，水温27℃が比増殖速度が高く，どの光強度でも水温27℃の比増殖速度が高かった。さらに水温と光強度の間には，交互作用が有意に認められた（ $p < 0.05$ ）（図-5）。

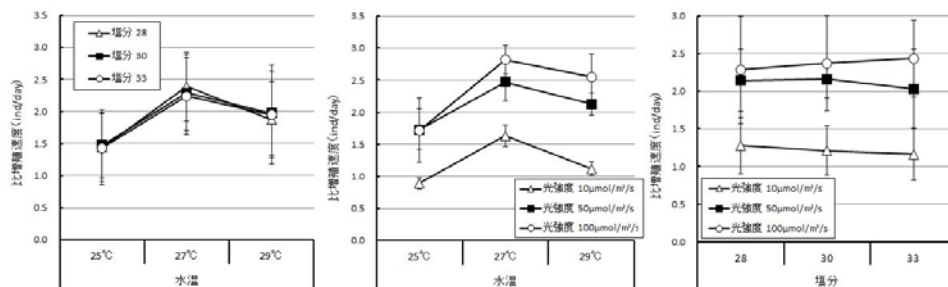


図-5 *S. tropicum* の比増殖速度に対する水温，塩分，光強度の交互作用

イ．2回目試験： *C. antiqua* と *S. tropicum* の増殖に及ぼす水温，光強度の影響及び相互作用

(最高細胞密度)

C. antiqua で最も最高細胞密度が高かったのは水温20℃，光強度50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，混合培養区の4,253 cells/mlで，最も低かったのは水温18℃，光強度10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，混合培養区の730 cells/mlであった。*S. tropicum* で最も最高細胞密度が高かったのは水温23℃，光強度50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，単独培養区の275,800 cells/mlで，最も低かったのは水温18℃，光強度50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，単独培養区の170 cells/mlであった（表-2）。

C. antiqua の細胞密度の推移を見ると，単独培養区では，どの水温区とも光強度が10

$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ より $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 以上のほうが細胞密度が高かったが、20 区では9日目以降、23 区では7日目以降に細胞密度が減少した。混合培養区と単独培養区は細胞密度が概ね同様に推移した（図-6）。

S.tropicum の細胞密度の推移を見ると、
表-2 *C.antiqua* と *S.tropicum* の増殖に及ぼす水温、
光強度の影響及び相互作用試験結果

いずれの試験区も9日目もしくは12日目までほとんど増殖が見られず、低密度で推移した。水温18℃、20℃の区は、単独培養、混合培養とも培養12日目以降に細胞密度の増加がみられた区が多かった。なお23 区の単独培養区は12日以後に急激に細胞密度の増加がみられたものの、混合培養区は試験終了まで増殖が見られなかった。（図-6）。

単独培養区の *C.antiqua* の最高細胞密度は、
光強度が $10\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$

試験区		設定条件			試験結果	
		水温 (℃)	光強度 ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)	塩分	最高細胞密度 (cells/ml)	比増殖速度 (ind/day)
A1	<i>C.antiqua</i> (単独培養)	18	10	28	843	0.19
A2	"	"	50	"	2,484	0.36
A3	"	"	100	"	2,686	0.40
A4	<i>C.antiqua</i> (単独培養)	20	10	28	1,507	0.29
A5	"	"	50	"	3,663	0.67
A6	"	"	100	"	3,091	0.72
A7	<i>C.antiqua</i> (単独培養)	23	10	28	1,927	0.25
A8	"	"	50	"	3,037	1.06
A9	"	"	100	"	2,783	1.00
B1	<i>S.tropicum</i> (単独培養)	18	10	28	883	0.79
B2	"	"	50	"	170	1.05
B3	"	"	100	"	725	0.75
B4	<i>S.tropicum</i> (単独培養)	20	10	28	2,127	1.23
B5	"	"	50	"	416	0.98
B6	"	"	100	"	992	1.61
B7	<i>S.tropicum</i> (単独培養)	23	10	28	8,340	0.41
B8	"	"	50	"	275,800	1.40
B9	"	"	100	"	206,800	1.40
C1	<i>C.antiqua</i> (混合培養)	18	10	28	730	0.26
C2	"	"	50	"	2,647	0.51
C3	"	"	100	"	2,605	0.55
C4	<i>C.antiqua</i> (混合培養)	20	10	28	717	0.36
C5	"	"	50	"	4,253	0.76
C6	"	"	100	"	3,672	0.76
C7	<i>C.antiqua</i> (混合培養)	23	10	28	873	0.63
C8	"	"	50	"	3,707	0.90
C9	"	"	100	"	2,843	1.00
C1	<i>S.tropicum</i> (混合培養)	18	10	28	2,789	1.05
C2	"	"	50	"	2,562	0.90
C3	"	"	100	"	1,209	0.93
C4	<i>S.tropicum</i> (混合培養)	20	10	28	3,570	1.32
C5	"	"	50	"	676	0.76
C6	"	"	100	"	572	0.36
C7	<i>S.tropicum</i> (混合培養)	23	10	28	13,797	0.60
C8	"	"	50	"	3,898	1.23
C9	"	"	100	"	491	0.80

※C1～C9は、*C.antiqua* と *S.tropicum* の混合培養区で、それぞれの最高細胞密度と比増殖速度を示した。

sでは水温が高くなるほど細胞密度が高くなったが、光強度が $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 以上では水温20 区が最も高かった。単独培養区の *S.tropicum* の最高細胞密度は、23 区の $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 以上が突出して高かった。どの光強度区とも、水温が高くなるほど細胞密度が高くなった（図-7）。

C.antiqua と *S.tropicum* の最高細胞密度を水温別、光強度別に比較すると、水温18 区、20 区では光強度が $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 以上の区で *C.antiqua* の方が *S.tropicum* より3.1倍から14.6倍と有意に高かった（ $p < 0.05$ ）が、水温23 区は *S.tropicum* の方が *C.antiqua* より4.3倍から90.8倍と有意に高かった（ $p < 0.05$ ）（図-8）。

C.antiqua と *S.tropicum* の混合培養による相互作用を水温別、光強度別に比較すると、*C.antiqua* は水温20 区では光強度 $10\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ では単独培養区のほうが有意に高かったが、 $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ では逆に混合培養区のほうが高くなった。（ $p < 0.05$ ）（図-9）。

S.tropicum は、水温18℃で光強度 $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 以下の区で、混合培養区の方が単独培養区より最高細胞密度が有意に高く、水温23℃、光強度 $50\ \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 区で単独培養区の方が混合培養区より最高細胞密度が有意に高かった（ $p < 0.05$ ）ほかは、単独培養と混合培養の有意な差はみられなかった（図-9）

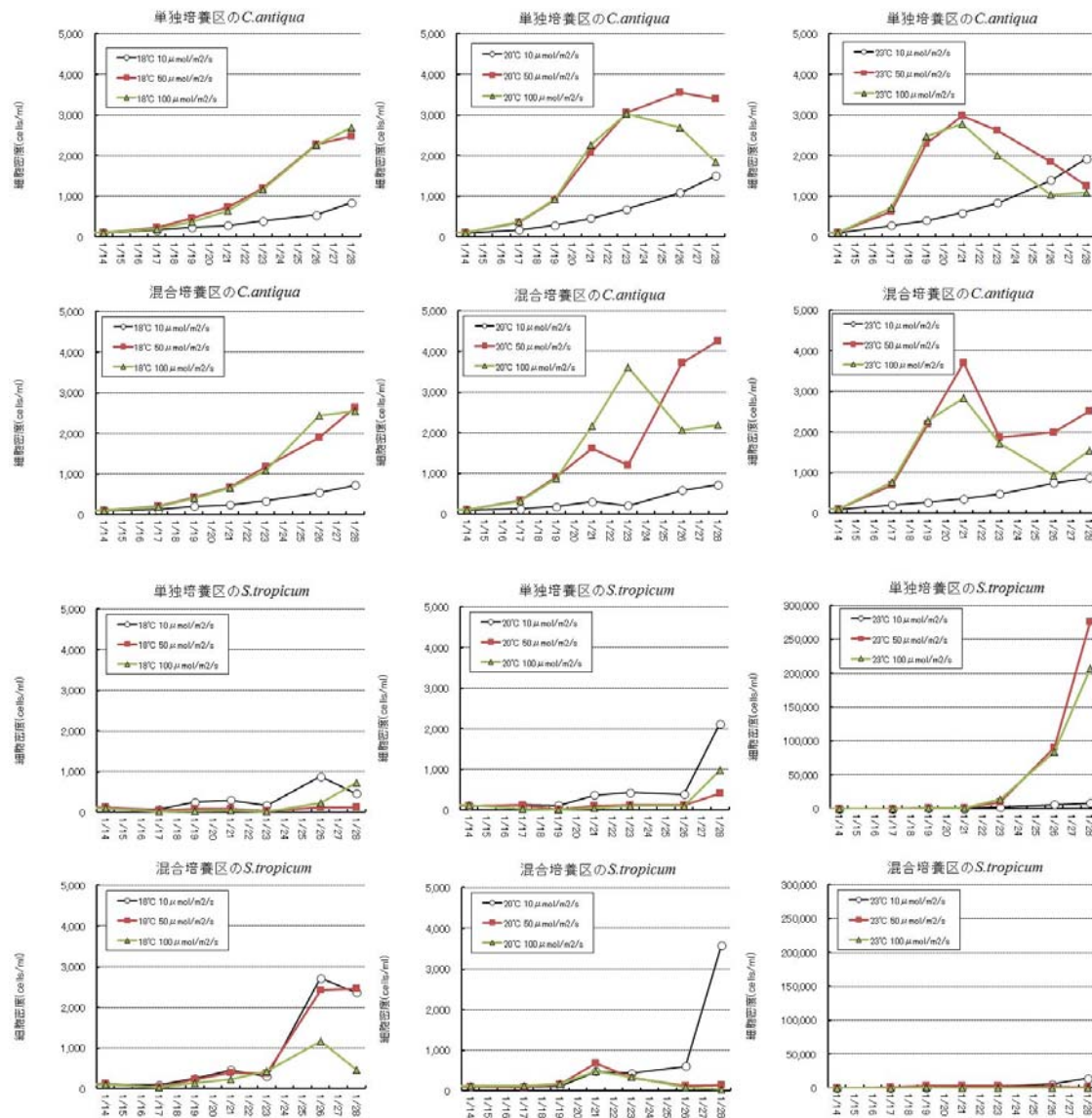


図-6 *C. antiqua* と *S. tropicum* の細胞密度の推移 (塩分濃度 28)

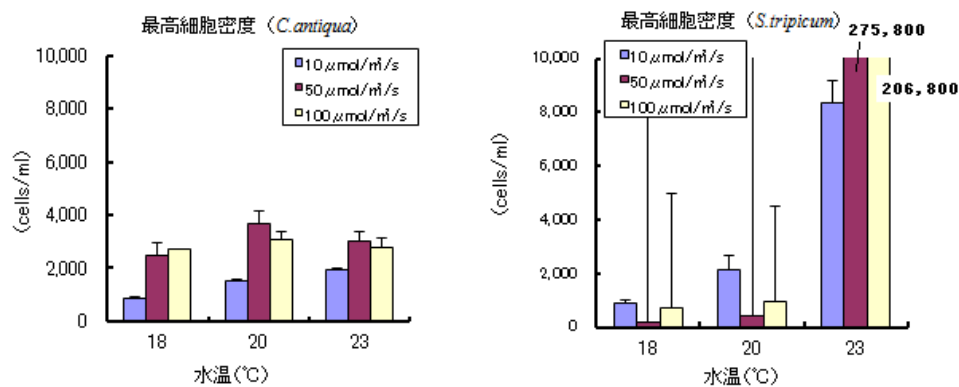
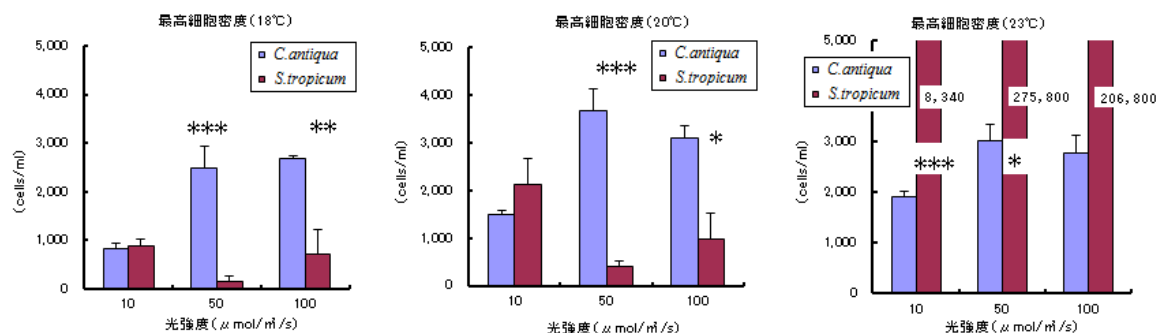
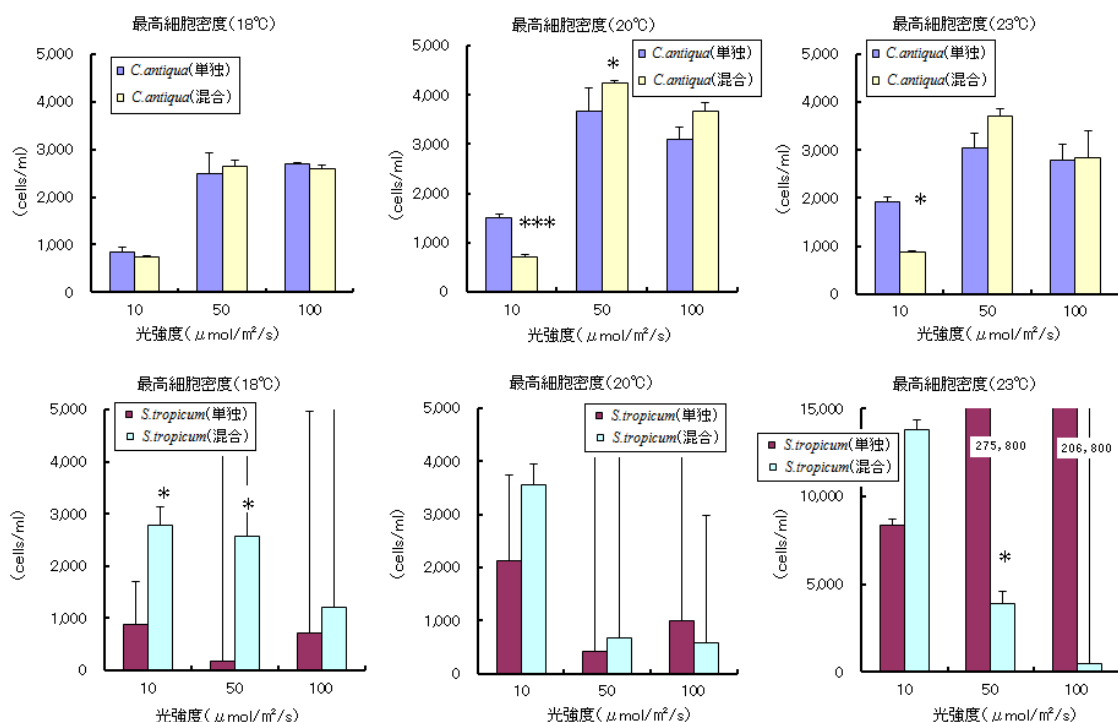


図-7 *C. antiqua* と *S. tropicum* の水温別，光強度別の最高細胞密度
(塩分濃度 28)



* : ($p < 0.05$) ** : ($p < 0.01$) *** : ($p < 0.001$)

図-8 *C. antiqua* と *S. tropicum* の最高細胞密度の水温別，光強度別の比較（塩分濃度 28）



* : ($p < 0.05$) ** : ($p < 0.01$) *** : ($p < 0.001$)

図-9 *C. antiqua* と *S. tropicum* の最高細胞密度に対する相互作用（塩分濃度 28）

（比増殖速度）

C. antiqua で最も比増殖速度が高かったのは水温 23℃，光強度 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，単独培養区の 1.06 ind/day で，最も低かったのは水温 18℃，光強度 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，単独培養区の 0.19 ind/day であった。*S. tropicum* で最も比増殖速度が高かったのは水温 20℃，光強度 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，単独培養区の 1.61 ind/day で，最も低かったのは水温 20℃，光強度 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，混合培養区の 0.36 ind/day であった（表-2）。

単独培養区の *C. antiqua* の比増殖速度は，光強度が 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の区では水温による差はそれほどなかったが，光強度 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上の区では，水温の上昇とともに高くなった。単独培養区の *S. tropicum* の比増殖速度は，光強度 10 及び 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の区では，水温 20℃ 区が最も高かった。（図-10）

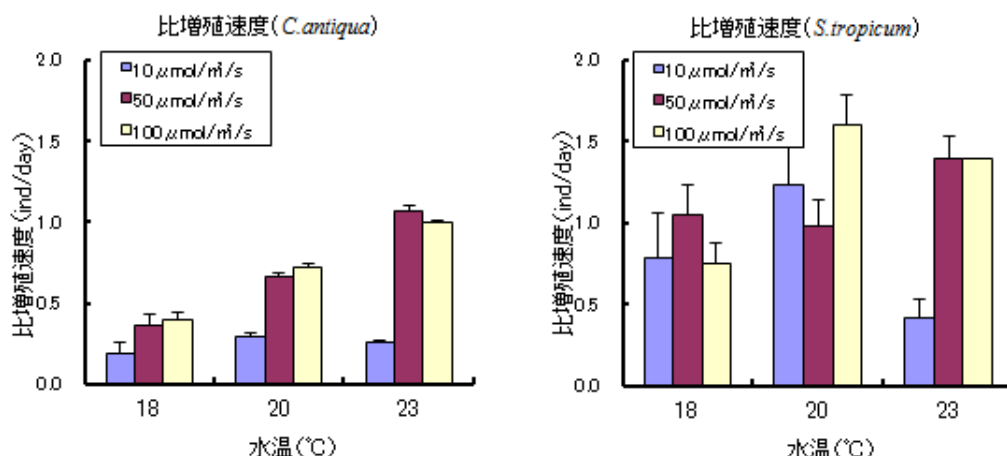
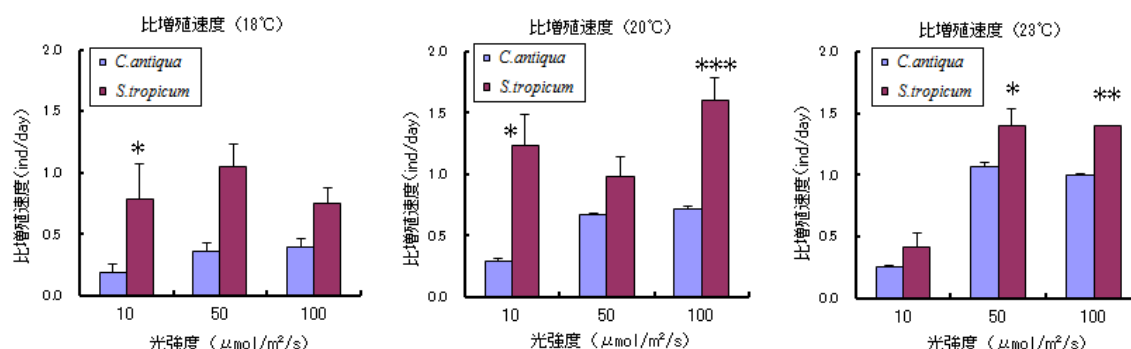


図-10 *C. antiqua* と *S. tropicum* の水温別，光強度別の比増殖速度（塩分濃度 28）

C. antiqua と *S. tropicum* の比増殖速度を水温別，光強度別に比較すると，どの水温，光強度区とも *S. tropicum* の方が *C. antiqua* より 1.3 倍から 4.2 倍と高く，水温 18 で光強度 10 μmol/m²/s 区，20 で光強度 10 及び 100 μmol/m²/s 区，水温 23 で光強度 50 μmol/m²/s 以上の区で有意に高かった（ $p < 0.05$ ）。（図-11）



* : ($p < 0.05$) ** : ($p < 0.01$) *** : ($p < 0.001$)

図-11 *C. antiqua* と *S. tropicum* の水温別，光強度別の比増殖速度比較（塩分濃度 28）

C. antiqua と *S. tropicum* の混合培養による相互作用を水温別，光強度別に比較すると，*C. antiqua* の比増殖速度は水温 18 ，光強度 50 μmol/m²/s 以上の区，水温 23 ，光強度 10 μmol/m²/s の区で混合培養区が単独培養区より有意に高く（ $p < 0.05$ ），水温 23 ，光強度 50 μmol/m²/s の区で混合培養区が単独培養区より有意に低かった（ $p < 0.05$ ）ほかは，単独培養区と混合培養区の有意な差は見られなかった（図-12）。
S. tropicum は，水温 18 でいずれの光強度も単独培養区と混合培養区の有意な差はみられなかった。20 区では単独培養区より混合培養区の方が 100 μmol/m²/s 区は有意に低かった。水温 23 区では，単独培養区より混合培養区の方が 100 μmol/m²/s 区は有意に低かった（図-12）。

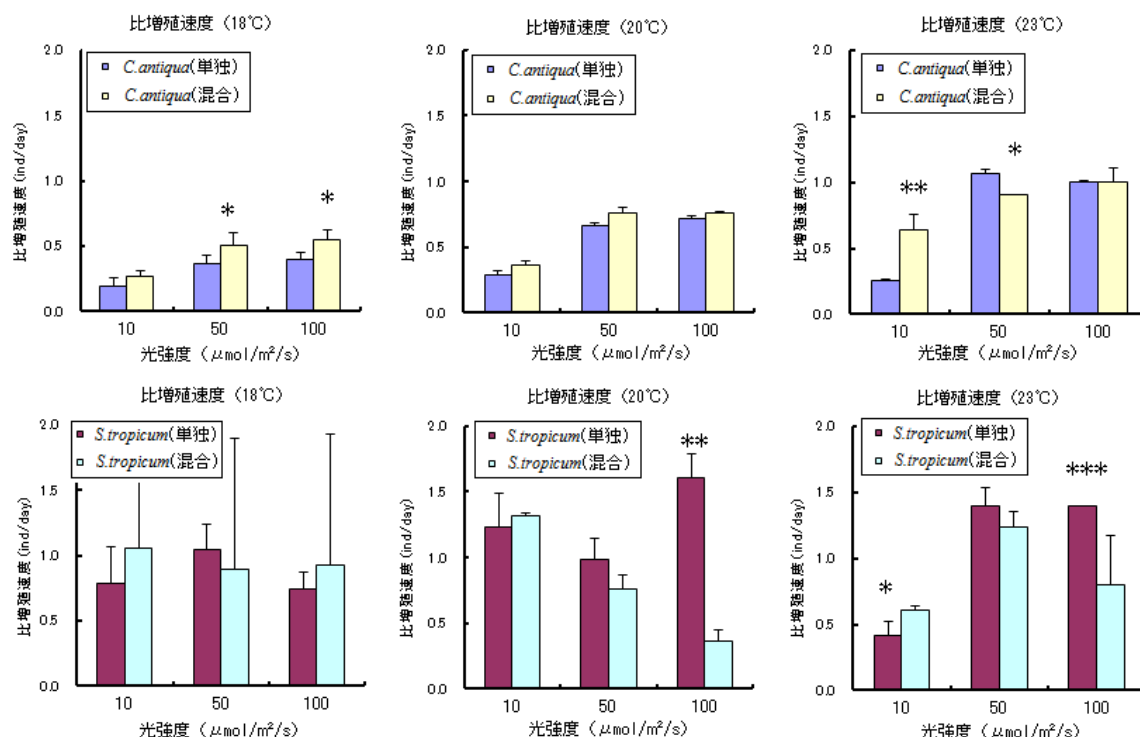


図-12 *C. antiqua* と *S. tropicum* の比増殖速度に対する相互作用（塩分濃度 28）

今回の試験では、*S. tropicum* はいずれの試験区も9日目もしくは12日目までほとんど増殖が見られず、全体的に低密度で推移した。

25年度の培養試験で、同じ条件（水温18, 20, 23℃, 光強度10, 50, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 塩分28）で単独培養した *S. tropicum* の増殖の推移を見ると、培養5日目で18℃区を除き1,000cells/mlを超え、最終的な最高細胞密度は39,383 ~ 81,740cells/ml、比増殖速度は1.02 ~ 2.06 ind/dayであったのに対し、本年度の単独培養区の最高細胞密度は、200,000cells/ml以上となった2試験区を除くと170 ~ 8,340cells/ml、比増殖速度は0.41 ~ 1.61 ind/dayと、増殖が劣っていた。両者とも同じ継代培養した *S. tropicum* 株を供試しているが、今年度のスケルトネマ属の細胞は、25年度の時より小型化しており、細胞の状態が悪かった可能性がある。

最高細胞密度の推移を見ると、*C. antiqua* は水温18 ~ 23℃で光強度が高い方が、*S. tropicum* は水温18 ~ 20℃では光強度が低い方が増殖に有利という傾向が見られた。

C. antiqua と *S. tropicum* の混合培養による最高細胞密度に対する影響をみると、水温18℃では、*S. tropicum* は *C. antiqua* との混合培養によって最高細胞密度は高くなり、特に光強度50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下では有意に高くなった。

C. antiqua の細胞密度は、混合培養区は単独培養区と概ね同様に推移したが、混合培養区では、*S. tropicum* の増殖が低水準であったことから混合の影響を受けていない可能性がある。混合培養区で *S. tropicum* がある程度増殖した試験区（水温20℃で光強度10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 水温23℃で光強度10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）は、*C. antiqua* は単独培養と混合培養の最高細胞密度に有意な差が見られているので、*C. antiqua* と *S. tropicum* の混合による影響や *C. antiqua* と *S. tropicum* の最高細胞数の比較などについて、再度検証する必要があるものと考えられた。