

赤潮総合対策調査事業－Ⅱ (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

中島広樹・村田圭助

【目的】

Chattonella 属や *Cochlodinium* 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 漁場環境のモニタリング調査

鹿児島湾の12定点（赤潮総合対策調査事業-Iと同じ）及び八代海全域における9定点（図-1）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,NO₂-N,NO₃-N,NH₄-N,PO₄-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

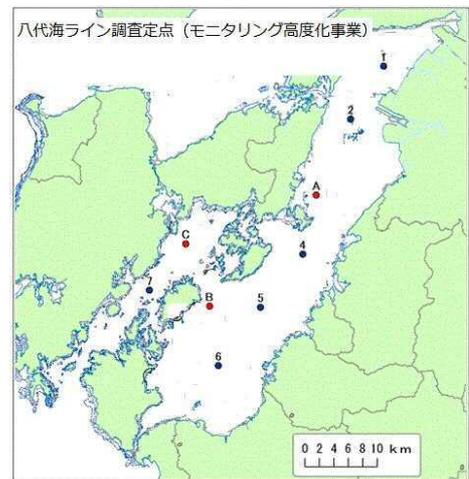


図-1 八代海全域における調査点

2 赤潮発生動向調査

(1) プランクトン発生動向調査

鹿児島湾で周年，八代海で5～9月にモニタリングを行った。

(2) 赤潮発生メカニズムの解明

ア 試験内容

鹿児島湾産の *Chattonella* 属 (*Chattonella marina*) の増殖に及ぼす珪藻類の *Cheatoceros* 属 (*Cheatoceros* sp.) の混合割合の違いによる影響及び相互作用について、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 23℃，塩分 30 の固定とし、光強度を 10, 50, 100μmol/m²/s の3段階に設定して組み合わせ、*Cheatoceros* 属の単独培養と、*Chattonella* 属と *Cheatoceros* 属を混合培養した区を設定した（表-1）。混合培養区では、*Chattonella* 属を細胞密度 100cells/mL に固定し、*Cheatoceros* 属は 10, 100, 500cells/mL の3段階に設定して、混合割合が異なる試験区を設定した。

各試験区は、鹿児島湾で採集した海水を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、試験管に3本ずつ準備し *Chattonella* 属と *Cheatoceros* 属を設定した細胞密度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、期間中の細胞密度の変化をそれぞれに対する混合割合による影響について平均値の差を検定

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推定された場合は「t 検定：分散が等しくないと仮定した 2 標本による検定（ウェルチの t 検定）」で行った。

表-1 培養試験区の設定

試験区	供試株	開始時の細胞密度 (cells/mL)	光強度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)
A1	<i>Cheatoceros</i> sp.	100	10
A2	"	100	50
A3	"	100	100
C1	<i>C.marina</i> + <i>Cheatoceros</i> sp.	100+10	10
C2	"	100+100	10
C3	"	100+500	10
C4	<i>C.marina</i> + <i>Cheatoceros</i> sp.	100+10	50
C5	"	100+100	50
C6	"	100+500	50
C7	<i>C.marina</i> + <i>Cheatoceros</i> sp.	100+10	100
C8	"	100+100	100
C9	"	100+500	100
備考	開始時 <i>C.marina</i> 100cells/mL <i>Cheatoceros</i> sp. 各試験区で調整 水温は23°C 塩分は30に設定		

(3) 既存データ等を用いた解析

鹿児島湾の *C.marina* 赤潮発生・非発生年における環境条件の違いを検討した。既存データで将来的にも同質なデータの入手が見込めること、海域を代表し得るデータであること、赤潮発生より以前に入手できることを念頭に、平成 12～28 年（過去 16 年）の本事業調査定点で得られた 1～12 月の毎月の表層及び底層水温、気象庁統計情報による溝辺の毎月の降水量、牧ノ原の毎月の平均気温、日照時間、鹿児島湾内で河川流量が最も多い天降川の湯田橋観測所における月別流量（河川課提供）、*C.marina* 初認日、入梅日（計 8 要素のデータ）を解析に使用した。

まず、鹿児島湾の年別赤潮発生状況から「大規模発生年」、「小規模発生年」、「非発生年」の 3 パターンに類型化し、それぞれ環境条件データとの関連性を解析した。なお、「大規模発生」は、最高細胞密度 100cells/mL 以上、赤潮継続日数 10 日以上を満たすものとした。パターン 1 では「大規模発生年」に対し「小規模発生年」と「非発生年」を合わせたグループを、パターン 2 では「大規模発生年」と「小規模発生年」を合わせたグループに対し「非発生年」を比較した。次に、類型別に各要素の差を、Welch の t 検定及び Mann-Whitney の U 検定によって統計処理した。その後、使用されたデータのうち、要素間の多重共線性を考慮し、互いの相関関係がない／弱いグループに分け、各要素の分布形状や等分散に考慮し、「線形判別分析」を行った。

【結果及び考察】

1 漁場環境のモニタリング調査

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、八代海のプランクトンの発生状況については、別稿「有害・有毒プランクトン情報伝達事業」に記載

(2) 赤潮発生メカニズムの解明

ア 試験：*Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の増殖に及ぼす混合割合の影響及び相互作用

(最高細胞密度)

Chattonella 属で最も最高細胞密度が高かったのは光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、スタート時 *Chaetoceros* 属 $10\text{cells}/\text{mL}$ と混合培養した試験区の $3,647\text{cells}/\text{mL}$ で、最も低かったのは光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、*Chaetoceros* 属 $500\text{cells}/\text{mL}$ と混合培養した試験区の $864\text{cells}/\text{mL}$ であった。*Chaetoceros* 属で最も最高細胞密度が高かったのは光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、単独培養区の $60,833\text{cells}/\text{mL}$ で、最も低かったのは光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、スタート時 $100\text{cells}/\text{mL}$ で混合培養した試験区の $13,466\text{cells}/\text{mL}$ であった (表-2)。

Chattonella 属の細胞密度の推移を見ると、光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では細胞密度の減少はみられなかったが、光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ でスタート時 $10\text{cells}/\text{mL}$ の *Chaetoceros* 属と混合培養した試験区、光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ でスタート時 10 及び $100\text{cells}/\text{mL}$ の *Chaetoceros* 属と混合培養した試験区では細胞密度の減少がみられた (図-2)。

Chaetoceros 属の細胞密度の推移を見ると、単独培養、混合培養ともスタート時の細胞密度の違いによる増殖の大きな差はみられなかった。また、単独培養、混合培養とも光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上では培養 1 日目以降に細胞密度の増加がみられ、光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では培養 7 日以降に、光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では培養 5 日以降に、 $10,000\text{cells}/\text{mL}$ を超えた。それに比べ光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では増殖が緩やかで 9 または 11 日以降に細胞密度 $10,000\text{cells}/\text{mL}$ 以上になった。混合培養区の光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の試験区では、試験開始 11 日以降に細胞密度の減少がみられた (図-2)。

Chattonella 属の最高細胞密度は、混合する *Chaetoceros* 属が少なくなるほど細胞密度が高くなる傾向にあったが、光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では *Chaetoceros* 属 $10\text{cells}/\text{mL}$ から試験スタートした区が最も低かった。(図-4)

Chaetoceros 属の最高細胞密度は、単独培養区では光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で最も高かった。混合培養区でも同様の結果となった。(図-3, -4) *Chaetoceros* 属混合培養区における試験スタート時の細胞密度毎の最高細胞密度は、光強度 $10\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ではスタート時に細胞密度が高いほど最高細胞密度が高くなる傾向にあったが、光強度 $50\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上ではあまり差がなかった。(図-4)

また、同条件下における混合区の *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の最高細胞密度を比較すると、総じて *Chaetoceros* 属が有意に高い結果となった (図-5)

(比増殖速度)

Chattonella 属で最も比増殖速度が高かったのは光強度 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, *Chaetoceros* 属 10 及び 100cells/mL と混合培養した区の 0.83ind/day で, 最も低かったのは光強度 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, *Chaetoceros* 属 100cells/mL と混合培養した区の 0.36 ind/day であった。*Chaetoceros* 属で最も比増殖速度が高かったのは光強度 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 10cells/mL で混合培養した試験区の 2.95 ind/day で, 最も低かったのは光強度 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, スタート時 500cells/mL で混合培養した試験区の 0.71 ind/day であった。(表-2)

Chattonella 属の比増殖速度は, 光強度による差はそれほどなかったが, 混合する *Chaetoceros* 属が少ないほど高くなる傾向にあった。(図-7)

Chaetoceros 属の比増殖速度は, 単独培養区では光強度が高いほど比増殖速度が高かった。混合培養区では 10cells/mL と混合培養した区では同様の結果となったが, 100 及び 500cells/mL と混合培養した区では光強度 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で最も比増殖速度が高かった。(図-5, 図-6)

また, 同条件下における混合区の *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の比増殖速度を比較すると, 光強度 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, *Chaetoceros* 属を 500cells/mL で混合培養した区を除いて *Chaetoceros* 属が有意に高い結果となった(図-8)

表-2 *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の増殖に及ぼす混合割合の影響及び相互作用試験結果

試験区		設定条件				試験結果	
		水温 ($^{\circ}\text{C}$)	塩分	光強度 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	スタート時の 細胞密度 (cells/mL)	最高細胞密度 (cells/mL)	比増殖速度 (ind/day)
A1	<i>Chaetoceros</i> 属(単独)	23	30	10	100	60,833	1.04
A2	"	"	"	50	100	21,567	2.02
A3	"	"	"	100	100	17,489	2.22
C1	<i>Chattonella</i> 属(混合)	23	30	10	100 (+10)	3,325	0.56
C2	"	"	"	10	100 (+100)	1,791	0.45
C3	"	"	"	10	100 (+500)	864	0.44
C4	<i>Chattonella</i> 属(混合)	23	30	50	100 (+10)	3,647	0.83
C5	"	"	"	50	100 (+100)	2,617	0.83
C6	"	"	"	50	100 (+500)	2,489	0.66
C7	<i>Chattonella</i> 属(混合)	23	30	100	100 (+10)	1,275	0.72
C8	"	"	"	100	100 (+100)	2,200	0.36
C9	"	"	"	100	100 (+500)	1,354	0.39
C1	<i>Chaetoceros</i> 属(混合)	23	30	10	10	32,194	1.34
C2	"	"	"	10	100	39,000	1.02
C3	"	"	"	10	500	48,055	0.71
C4	<i>Chaetoceros</i> 属(混合)	23	30	50	10	14,622	2.08
C5	"	"	"	50	100	13,466	2.27
C6	"	"	"	50	500	14,578	1.57
C7	<i>Chaetoceros</i> 属(混合)	23	30	100	10	14,733	2.95
C8	"	"	"	100	100	14,422	2.08
C9	"	"	"	100	500	17,167	1.56

※表中 () 内の数字は, *Chattonella* 属に混合した *Chaetoceros* 属の細胞密度を示す。

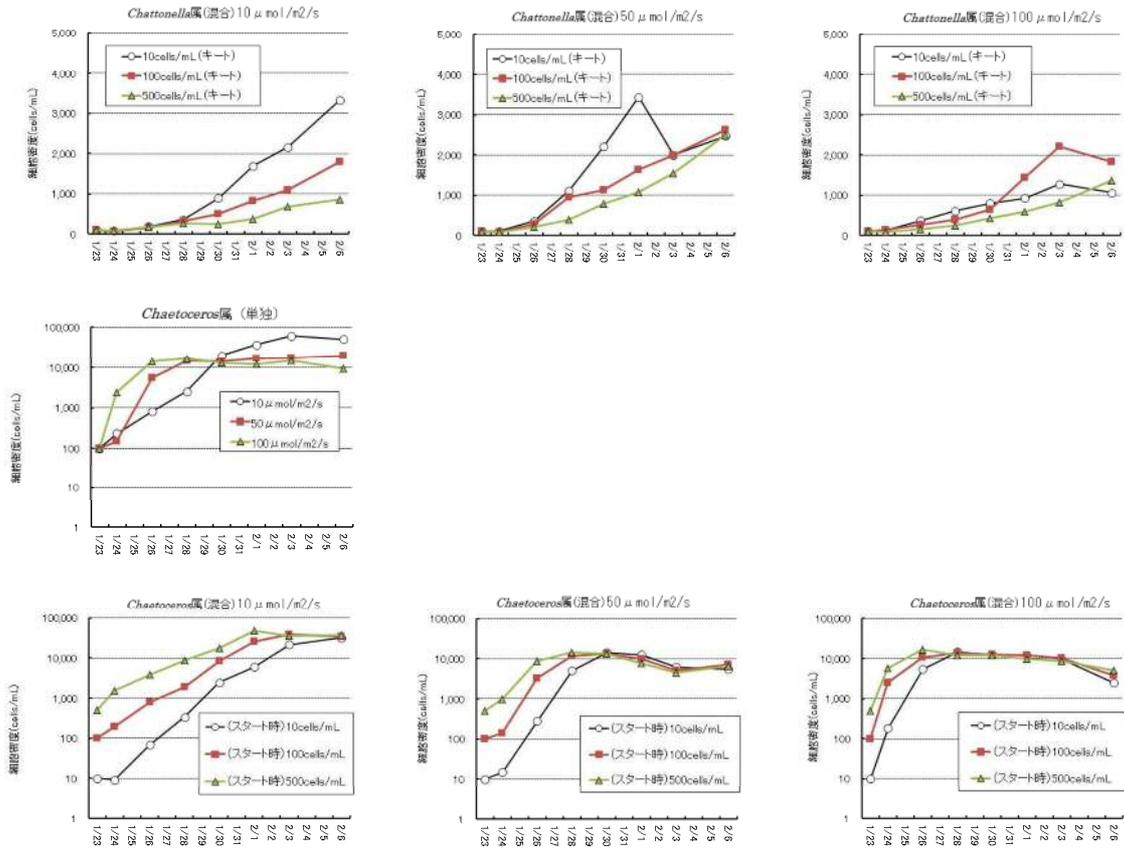


図-1

2 *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の細胞密度の推移

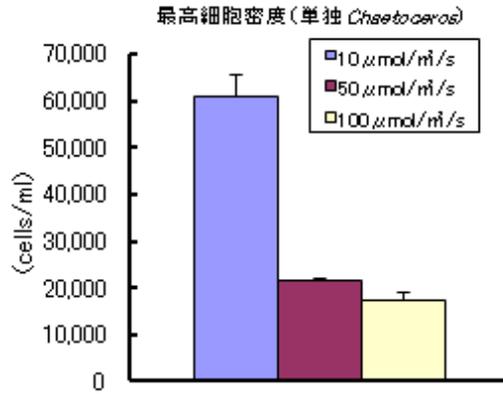


図-3 *Chaetoceros* 属の最高細胞密度の光強度別の比較 (単独区)

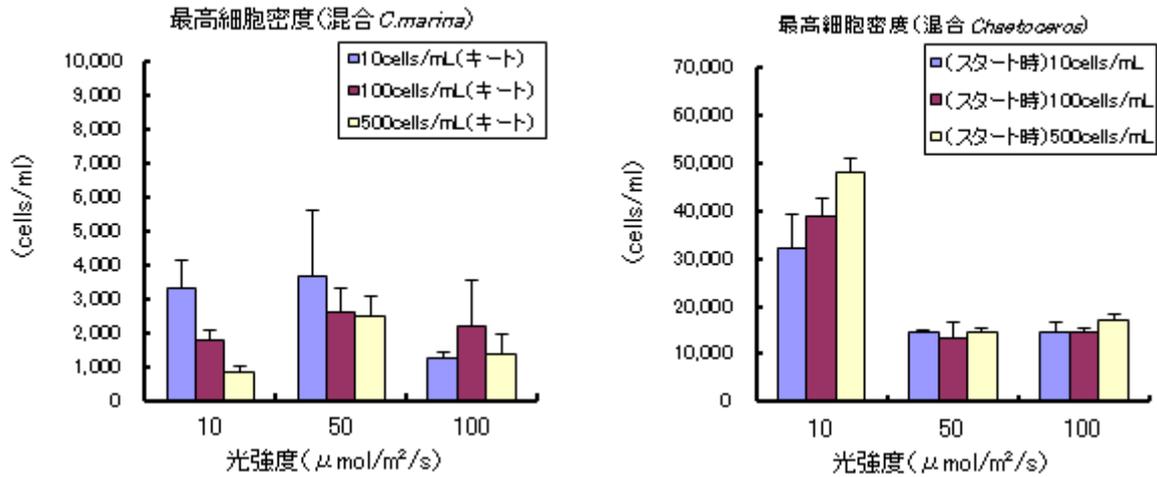


図-4 *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の最高細胞密度の光強度別の比較 (混合区での比較)

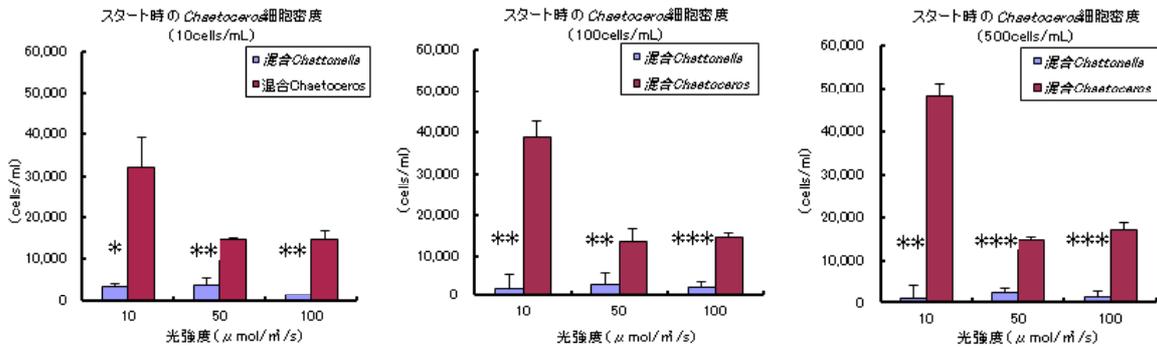


図-5 *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の最高細胞密度の光強度別, 試験開始時の *Chaetoceros* 属細胞密度別の比較(混合区での比較)

(* : $1 < p < 5$, ** : $0.1 < p < 1$, *** : $p < 0.1$)

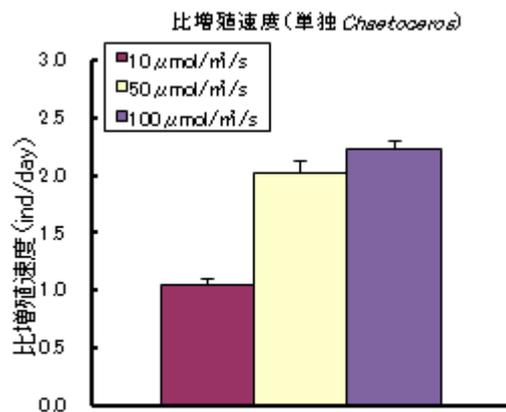


図-6 *Chaetoceros* 属の比増殖速度の光強度別の比較(単独区)

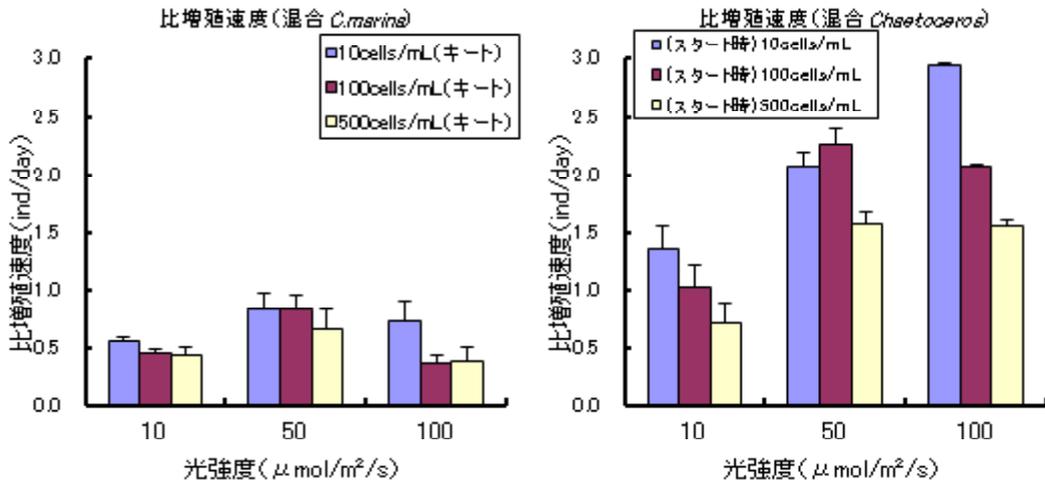


図-7 *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の比増殖速度の光強度別の比較
(混合区での比較)

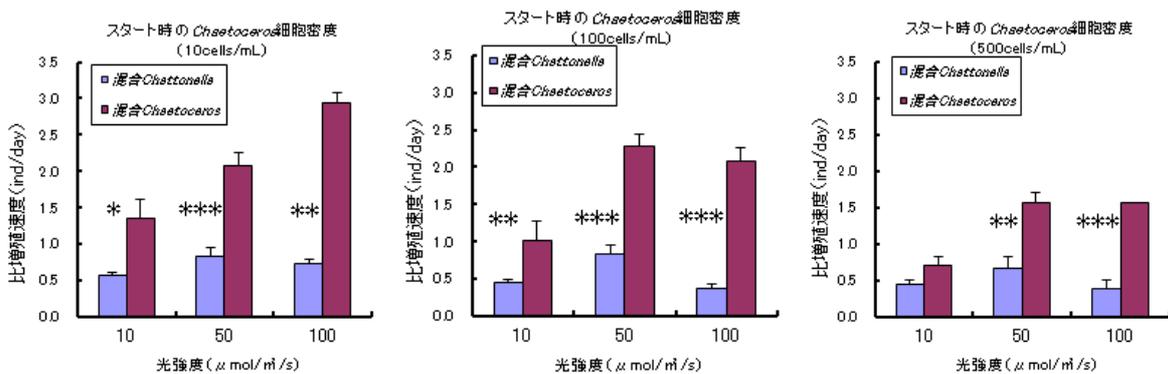


図-8 *Chattonella* 属と *Chaetoceros* 属の比増殖速度の光強度別、試験開始時の *Chaetoceros* 属細胞密度別の比較(混合区での比較)

(* : $1 < p < 5$, ** : $0.1 < p < 1$, *** : $p < 0.1$)

(要約)

最高細胞密度の推移を見ると、*Chattonella* 属はスタート時に混合する *Chaetoceros* 属の細胞密度が少なく、光強度が低い方が増殖に有利という傾向がみられた。*Chaetoceros* 属は光強度が低いと、スタート時の細胞密度が多い方が最高細胞密度が高くなるが、光強度が高いとスタート時の細胞密度による差はほぼなくなった。

Chaetoceros 属はいずれの試験区も光強度に関係なく最高細胞密度が 10,000cells/mL 以上となり、全体的に高密度で推移した。*Chattonella* 属は同数以上の *Chaetoceros* 属を混合させた試験区及び光強度 $100\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の試験区では低密度で推移しており、増殖が抑制された可能性がある。

(3) 既存データ等を用いた解析

C.marina 赤潮の発生時期は主に5月下旬から7月中旬であった。赤潮発生・非発生間で統計的に有意な差が認められたのは、パターン1においては、Welchのt検定で8要素 ($p < 0.05$)、Mann-WhitneyのU検定で6要素 ($p < 0.05$)、パターン2においては、Welchのt検定で6要素 ($p < 0.05$)、Mann-WhitneyのU検定で4要素 ($p < 0.05$)であった。抽出された要素は、両検定間及び両パターン間においてほぼ共通していた。

パターン1及びパターン2で両検定において有意差があった環境因子の中で8月及び11月の全天日射量などいくつかの要素が抽出されたが、赤潮発生時期を過ぎた頃の環境因子であることから、赤潮発生に直接結びつく要因の可能性が低いと考えられた。そのため、今回の解析する要素からは除いた。

両検定で有意な差が認められた要素(図-9)を確認すると、パターン1では、発生年・非発生年において冬季平均気温(2月)に顕著な違いが認められた。2月は年間で気温が最も低くなる時期であり、平均気温が低くなると発生年となる傾向があることから、シストの休眠解除に影響していた可能性が考えられた。また、発生年は6月の全天日射量及び1月の河川流量が低い傾向が認められた。6月の全天日射量は6月の平均気温と有意な相関が認められたことから、2月の平均気温及び6月の環境要因(全天日射量、平均気温)並びに1月の河川流量の多少が、5月下旬から7月中旬に赤潮化することが多い*C.marina*の動態に関わっていた可能性が考えられた。パターン2では、パターン1と同様に6月の環境要因(全天日射量、平均気温)、1月の河川流量が発生年において低い傾向であった。抽出された要素が両パターン間においてほぼ共通していたことから、*C.marina*の大規模赤潮発生には他の環境因子が影響したと推察された。

使用されたデータのうち、互いの相関関係がない/弱いグループに分け、「線形判別分析」を行った。これらのグループから要素を選択し、判別分析を行った結果のうち、代表的な解析例として、「6月の全天日射量と2月の平均気温」と「6月の平均気温と2月の平均気温」を用いた解析結果を図-10に示した。これらによると赤潮発生予測的中率は、それぞれ76.5%、82.4%であった。

今年度の解析結果から、鹿児島湾における*C.marina*赤潮の発生は、1月の河川流量、2月の平均気温、6月の全天日射量及び平均気温の組み合わせにより予察できる可能性が示唆された。今後は、他の環境因子を追加し、さらに詳細な解析を進め、これらの要因が赤潮発生メカニズムにどう関与するか検討する必要がある。

(要約)

鹿児島湾の*C.marina*赤潮発生・非発生年における環境条件の違いを検討した。平成12～28年(過去16年)の本事業調査定点で得られた1～12月の毎月の表層及び底層水温、気象庁統計情報による溝辺の毎月の降水量、牧ノ原の毎月の平均気温、日照時間、鹿児島湾内で河川流量が最も多い天降川の湯田橋観測所における月別流量(河川課提供)、*C.marina*初認日、入梅日(計8要素のデータ)を解析に使用し、Welchのt検定、Mann-WhitneyのU検定及び線形判別分析を行った。

その結果、鹿児島湾における*C.marina*赤潮の発生は、1月の河川流量、2月の平均気温、6月の全天日射量及び平均気温の組み合わせにより予察できる可能性が示唆された。

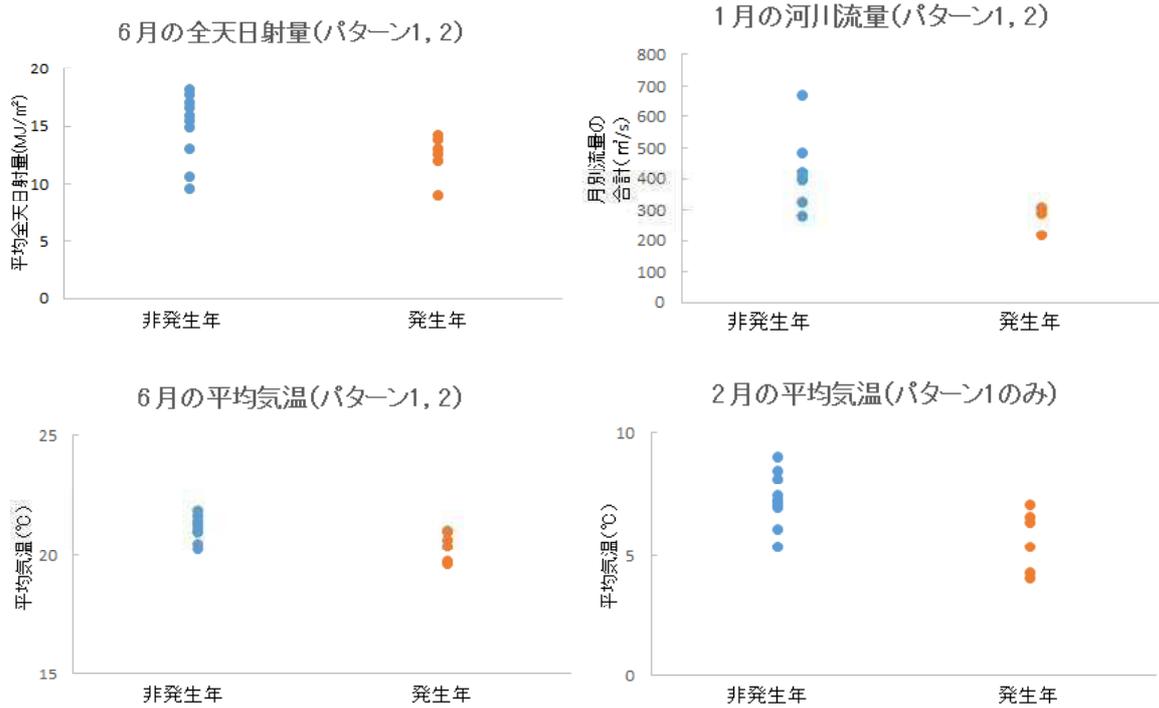


図-9 鹿児島湾における *Chattonella* 赤潮発生年の特徴解析例

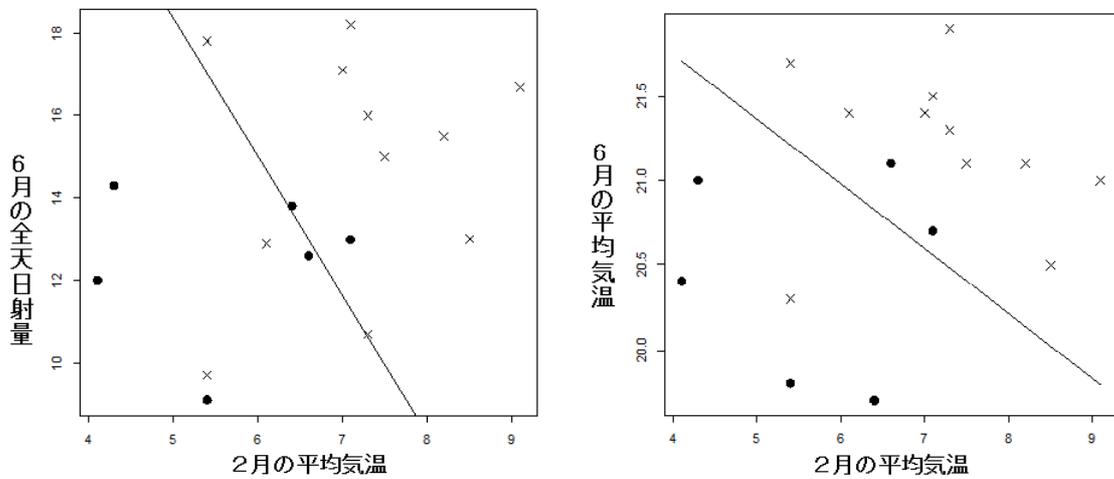


図-10 鹿児島湾における *Chattonella* 赤潮の発生判別（線形判別）結果例

使用データは、鹿児島地方気象台による鹿児島市の6月全天日射量と牧ノ原アメダスの6月平均気温、2月平均気温。色付きが発生年、×が非発生年を示す。