

気仙沼湾湾奥部における漁場環境の季節変動

伊藤 博*¹・藤田則孝*²・千葉充子*¹

The seasonal change of the aquaculture ground environment
at the innermost in Kesenuma Bay

Hiroshi ITO *¹, Noritaka FUJITA *² and Atsuko CHIBA *¹

キーワード：気仙沼湾・水質・赤潮・季節変動

気仙沼湾の水質調査は、1950年代にカキ養殖漁場の汚水被害対策として宮城県水産試験場気仙沼分場（現宮城県気仙沼水産試験場）により始められ、以来継続的な調査が行われてきた。これらの調査データから、1963年から2003年までの気仙沼湾湾奥部の水質環境の変遷について伊藤ら¹⁾が報告している。水質の季節変動に関しては1963年に酒井ら²⁾が通年、1973年に五十嵐ら³⁾が通年、1974年に藤田ら⁴⁾が5～12月、1982年に渡辺ら⁵⁾が6～11月に調査・報告しているが、いずれも単年のもののみである。

本報告では、1963年から2003年までの水質調査データを用いて気仙沼湾湾奥部における水質環境の季節変動を明らかにすることを目的とした。

調査方法

本稿で扱うデータは1963年4月から1990年3月にかけて毎月1回および1991年4月から2004年3月にかけて偶数月に1回行った水質調査のうち湾奥部の定点（図1）の4層（0, 1, 5 m, 底層：7～14m）で得られたものである。ただし、底層は1972年12月より行われた。

調査項目は1963年の調査開始時には水温、塩分、溶存酸素量（以下「DO」）、化学的酸素要求量（以下「COD」）、pH、透明度であり、1965年よりプランクトン沈殿量、1971年より硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素（三態窒素で以下「DIN」）、リン酸態リン（以下「DIP」）、ケイ酸態ケイ素（以下「DSi」）、懸濁物（以下「SS」、0 mのみ）が追加された。ただし、DIN、DSiは1997年ま

で、pHは1999年までのデータを解析に用いた。赤潮観測調査は1972年より行われた。

溶存酸素量（ウィンクラー法）、COD（ヨウ素滴定法）、SS（GF/F濾過）は水質汚濁調査指針⁶⁾、栄養塩濃度は海洋観測指針⁷⁾の方法による。水温は棒状およびデジタル水温計、塩分はサリノメーターおよびデジタル塩分計、pHは比色管法、透明度は透明度板を用いて測定した。プランクトン沈殿量は北原式定量ネット（目合い95 μ m）を用いて、5 mの垂直曳きを行い沈殿量を求めた。赤潮観測調査は赤潮発生時期に湾奥部のモニタリングステーションにおいて1日1回赤潮の分布および色調を観測し

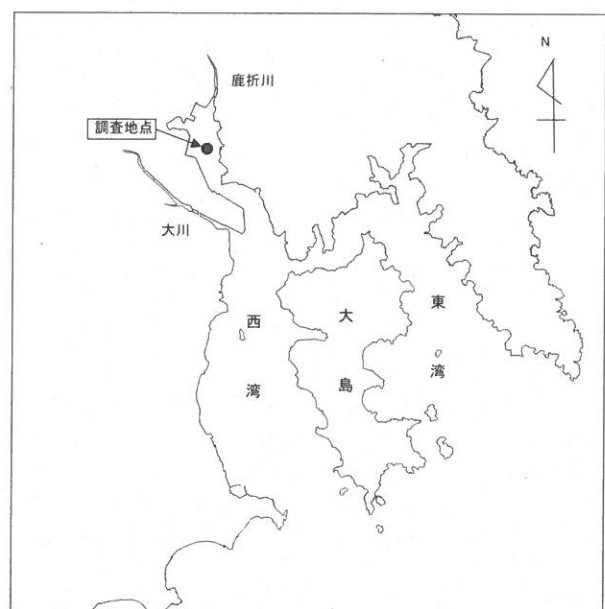


図1 気仙沼湾調査地点図

*¹気仙沼水産試験場 *²元気仙沼水産試験場

た。これと並行して、赤潮プランクトンの種査定を適宜行った。

各年の調査方法・結果の概要は宮城県水産試験場事業報告(1963-1969)⁸⁾、宮城県気仙沼水産試験場事業報告(1970-1999)⁹⁾、宮城県水産試験研究成果要旨集(2000-2003)¹⁰⁾に掲載されており、1974年以降の水質調査については宮城県気仙沼水産試験場事業報告(1974-1999)⁹⁾、宮城県水産試験研究成果要旨集(2000-2003)¹⁰⁾に全データが掲載されている。

結果と考察

各調査項目の季節変動をみるため、調査期間中の各月のデータの平均値を算出し、図2に示した。

水温は表層(0, 1 m)では2月に最低の値(7.4~7.5℃)を示した後上昇し、8月に最高の値(22.3~22.8℃)を示して9月以降低下した(図2(a))。中底層(5 m, 底層)では3月に最低(7.0~7.3℃)、9月に最高の値(20.3~20.6℃)を示した。5~8月の水温上昇期に水温躍層を形成したが、水温の低下が始まる9月に

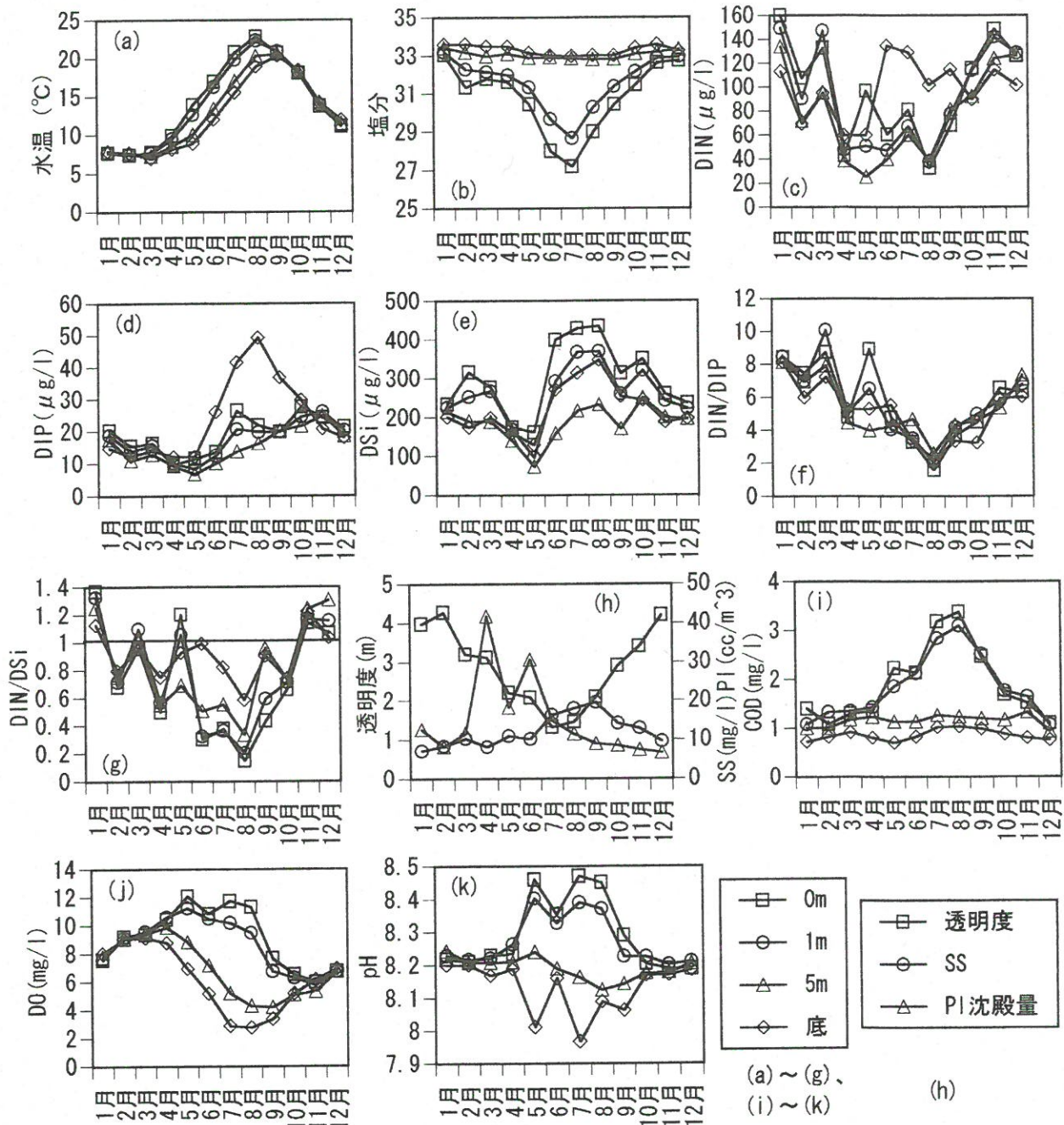


図2 (a)水温, (b)塩分, (c) DIN, (d) DIP, (e) DSi, (f) DIN / DIP, (g) DIN / DSi, (h)透明度, SS, プランクトン (Pl) 沈殿量, (i) COD, (j) DO, (k) pH の平均的季節変化
 ※(g)の横棒はレッドフィールド比

は躍層は解消した。塩分は表層では1月を除いて33以下の値を示していた(図2(b))。特に5月以降低下して7月に最低の値(27.2~28.7)を示し、8~10月にかけて上昇した。中底層では年間を通じて32.8~33.6の範囲にあり、大きな変化はみられなかった。塩分躍層は2~10月に形成されていた。塩分の低い夏季には降雨量が高い値を示しており(気象庁HP)、鹿折川等の流入河川を介した陸水の影響が大きいことが伺える。

DINは表層では4~9月に100 $\mu\text{g}/\ell$ 未満の低い値、それ以外の月に概ね100 $\mu\text{g}/\ell$ 以上の高い値を示したのに対し、底層では6~9月、11~1月に100 $\mu\text{g}/\ell$ 以上の値だった(図2(c))。DIPは表層では4~6月には15 $\mu\text{g}/\ell$ 以下の低い値、他の月でも30 $\mu\text{g}/\ell$ 以下であったのに対し、底層では7~9月に30~50 $\mu\text{g}/\ell$ と高い値を示した(図2(d))。DSiは表層、底層ともに5月に最低値(96~161, 121 $\mu\text{g}/\ell$)を示した後上昇し、6~8月に271~435 $\mu\text{g}/\ell$ の高い値を示した(図2(e))。栄養塩濃度の変動についてまとめると、表層では各栄養塩とも4~5月に減少してDIPは6月以降緩やかに増加、DINは9月以降大きく増加した。これに対してDSiは6月に急激に回復して8月まで特に高い値を示した。4~5月の各栄養塩の減少は後述する珪藻を主とした植物プランクトンのブルームによる消費が原因と考えられ、これ以降は前述した陸水の影響から表層への各栄養塩付加は増大したと予想されるが、後述する珪藻以外の種を主とする赤潮の発生で表層ではDIN、DIPのみが消費されたと考えられる。底層では各栄養塩は共に夏季に増加しており、高水温と分解層の発達による底泥からの溶出増大が原因といえるが、この時期には躍層が発達しているため底層にとどまり、9月になって鉛直混合が起こることによって表層に供給される。

植物プランクトンの制限栄養塩を推定するため、植物プランクトンの元素組成比にレッドフィールド比¹¹⁾ C:N:P=106:16:1を用い、このうち珪藻の場合にはLibes¹²⁾によって示された値を組み込み、C:N:P:Si=106:16:1:15を採用した。ここではこの比率を栄養塩の取り込み比率と仮定して議論する。DIN/DIP比は各深度とも8月に最低の値(1.6~2.6)を示し、9月以降は上昇した(図2(f))。最高値でも2月表層の10.1で、レッドフィールド比を下回っていた。DIN/DSi比は8月に最低の値(0.1~0.6)を示し、9月以降上昇した(図2(g))。DIN/DIP比、DIN/DSi比は共に夏季を中心に低い値を示しており、伊藤ら¹⁾も述べたとおり、この海域での植物プランクトンの増殖は基本的にはDINが制

限栄養塩となっており、夏季にその傾向が著しいことが理解される。

1972~2003年の32年間のうち赤潮発生年の割合と優占プランクトンを月別に示した(図3)。赤潮発生月は5~9月に集中しており、特に6~9月は70%以上の年で発生した。半数以上は珪藻以外の種(渦鞭毛藻、ラフィド藻、クリプト藻、プラシノ藻等¹⁾)が優占しており、特に7~9月は珪藻が単独で優占することは稀だった。前述したとおり、赤潮発生と栄養塩濃度の推移は密接な関係がある。

SSは1月に最低の値(7.2 mg/ℓ)を示して緩やかに上昇したが、7月以降大きく上昇し、9月に最大の値(19.7 mg/ℓ)を示した。10月以降は減少した(図2(h))。SSの増加は前述した赤潮発生が原因の一つと考えられる。透明度は12~2月に高い値(4.0~4.3m)を示した後減少し、7~8月に低い値(1.3~1.5m)を示した。9月以降は上昇した。SSが高い値を示す夏季には透明度は低い値、冬季には逆の傾向を示しており、透明度の変動はSSの変動が要因の一つと考えられる(図2(h))。95 μm 以上のプランクトン量を示すプランクトン沈殿量は4~6月に高い値(18.3~41.8 cc/m^3)を示し、特に4、6月に高い値を示した(図2(h))。この変動は4月に関しては赤潮発生およびSSの増大とは対応しておらず、大型または連鎖を形成する珪藻が赤潮に至らない程度に増加したことによるものと考えられる。5、6月に関しては連鎖を形成する珪藻 *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros spp.* が赤潮を形成することがあり¹⁾、これが要因の一つと予想される。

CODは表層では5月以降上昇して8月に最大の値(3.1~3.4 mg/ℓ)を示し、9月以降は減少した(図2(i))。中底層では年間を通じて0.7~1.3 mg/ℓ の範囲にあり、大きな変動はみられなかった。夏季の表層での高い値は

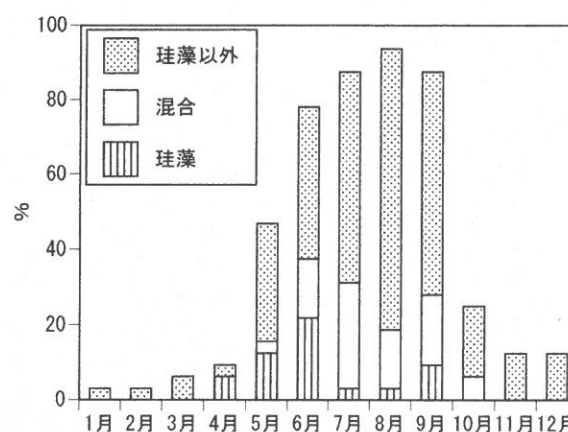


図3 1972~2003年の赤潮発生年の割合と優占プランクトン(月別)

前述した陸水の影響による付加および赤潮による内部生産の結果と考えられる。DOは表層では5～8月に高い値(9.5～12.1mg/l)を示して9月以降は減少し、11月に最低の値(5.8～6.0mg/l)を示した(図2(i))。底層では3月に最高の値(9.1mg/l)を示した後減少し、8月に最低の値(2.8mg/l)を示した。夏季には表層で主に赤潮プランクトンの光合成によって表層のDOが上昇したと考えられる。底層では透明度の減少による光量不足が植物プランクトンの光合成を妨げ、その結果酸素供給が減少し、加えて高水温および分解層の発達による酸素消費の増大が低い酸素量の原因となったと考えられる。pHは1～4、9～12月には8.1～8.2の範囲で推移したが、表層では5～8月に8.3以上の値、底層では5、7～9月に8.1未満の値だった(図2(k))。表層では光合成作用で炭酸が失われてpHが上昇し、底層では炭酸を放出するためpHは低下したものである。

上記により年間の平均的な漁場環境の季節変動が明らかとなった。

次に各データを1963～1970年、1971～1980年、1981～1990年、1991～2003年に分け、各年代の季節変動を示した(図4)。また、各項目の13ヶ月移動平均値の経年変動については伊藤ら¹⁾が報告しているが、月毎の経年変動をみるために偶数月の各項目についてSpearmanの順位相関を適用した(表1)。

水温の移動平均値には一定の傾向はみられなかったが¹⁾、月毎にみると8月には全層で減少し、10、12月は増加傾向を示した(図4-I, 表1)。塩分の移動平均値も一定の傾向はみられなかった¹⁾。月毎にみると4月の表中層での増加等一部で増加・減少傾向がみられたが、年代毎の変動が大きかった(図4-II, 表1)。

DINの移動平均値は全層で減少傾向にあったが¹⁾、月毎では10～2月にかけてこの傾向がみられた(図4-III, 表1)。底層では1980年代夏季に特に大きい値を示した。DIPの移動平均値は表層で減少傾向にあったが¹⁾、月別ではDINと同様、2月を中心に減少していた(図4-IV, 表1)。DIPもDINと同様、1980年代夏季底層で大きい値が目立った。DSiの移動平均値は全層で増加していたが¹⁾、月毎にみてもほぼ年間を通じて増加していた(図4-V, 表1)。DIN/DIP比の移動平均値は全層で減少していたが、月毎では4～6月の中底層、10～2月の全層で減少傾向であった(図4-VI, 表1)。最も大きい値を示した1970年代でもレッドフィールド比(=16)を上回することはなかった。DIN/DSi比の移動平均値も全層で減少していたが、月毎では8月を除いてほぼ全層

で減少していた(図4-VII, 表1)。1970年代にはレッドフィールド比(=1)を下回るのは夏季のみだったが、1990年代以降は年間を通じてレッドフィールド比を下回った値を示した。すなわち、DIN、DIPの減少は秋～冬季を中心にみられ、減少の程度はDINの方が大きいことが分かった。DSiの増加は年間を通じてみられた。DIN、DIP減少にはヘドロ浚渫、水質汚濁防止法による負荷汚濁量の軽減、公共下水道の整備、海藻養殖による栄養塩除去等が寄与しているが¹⁾。DSi増加の要因は不明である。人為的な起源としては洗剤、歯磨き粉、粉塵等にケイ素が含まれていることが知られているが、定量的な検討はされていない。

各年代における赤潮発生年の割合と優占プランクトンを図5に示す。1970年代は5～9月にかけて70%以上、10月でも50%以上の割合で発生し、このうち5～7月では60%以上珪藻が優占した(珪藻以外の種との混合を含む)。1980年代は6～9月にかけて80%以上の割合であったが、これ以外の月は50%未満であった。珪藻の優占する割合は30%以下だった。1990～2000年代は8、9月には70%を超え、6月に69%を示したものの、このほかの月は50%未満であった。珪藻の優占する割合は30%未満であり単独で優占することはなかった。これらより、上述したDIN、DIPの減少を主要因として赤潮の発生期間は年代を経る毎に減少し、珪藻によるものはほとんど出現しなくなったことが分かる。

SSの移動平均値は減少傾向にあり¹⁾、月毎では6、8月に減少していたが、2月では増加していた(図4-VIII, 表1)。透明度の移動平均値は増加していたが¹⁾、この傾向は年間を通じてのものであった(図4-VIII, 表1)。プランクトン沈殿量の移動平均値は増加しており¹⁾、月毎では8月に増加していた(図4-VIII, 表1)。4～6月の値は1970年代および1990年代以降に大きい値だった。すなわち、夏季には赤潮が減少したことによってSSも減少したが、透明度に関しては年間を通じて増加していた。春季にプランクトン沈殿量が大きいのは、1970年代の場合は前述した珪藻赤潮によるもので、1990年代以降の場合はDSiの増加に伴う赤潮に至らない程度の大型の珪藻や連鎖個体の増殖によるものと考えられる。8月に増加しているのも後者と同様の理由であろう。

CODの移動平均値は全層で減少傾向にあり¹⁾、この傾向は年間を通じてのものであった(図4-IX, 表1)。このことより、陸水起源および赤潮等の内部生産を原因としたCOD負荷量は年間を通じて減少したことが分かる。DOの移動平均値は中底層で増加傾向にあったが¹⁾、月毎

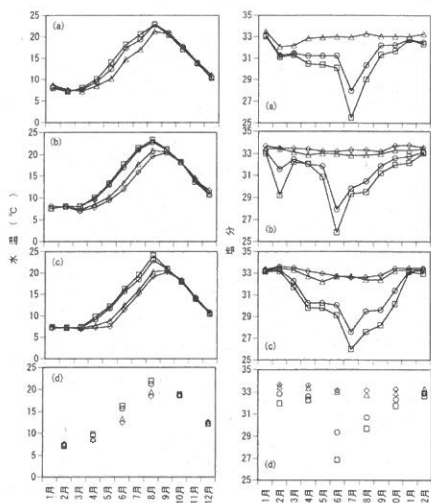


図4-I・II 水温・塩分の年代別季節変動
 (a)1963~1970年 (b)1971~1980年
 (c)1981~1990年 (d)1991~2003年

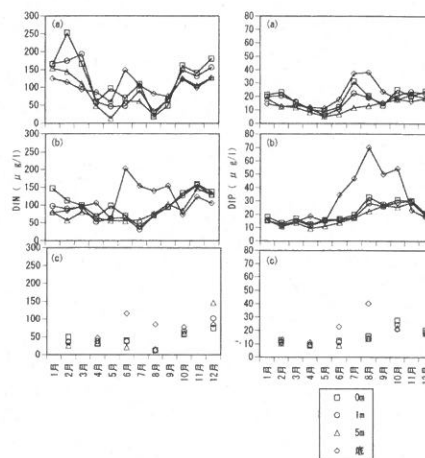


図4-III・IV DIN・DIPの年代別季節変動
 (a)1971~1980年 (b)1981~1990年
 (c)1991~2003年

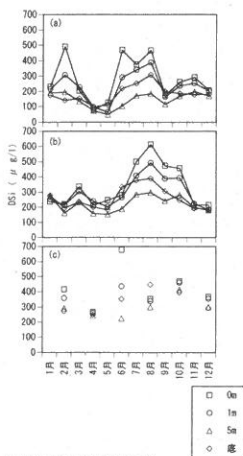


図4-V DSIの年代別季節変動
 (a)1971~1980年 (b)1981~1990年
 (c)1991~2003年

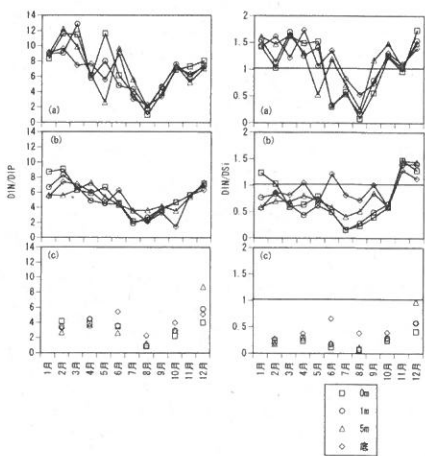


図4-VI・VII DIN/DIP・DIN/DSIの年代別季節変動
 (横棒はレッドフィールド比)
 (a)1971~1980年 (b)1981~1990年
 (c)1991~2003年

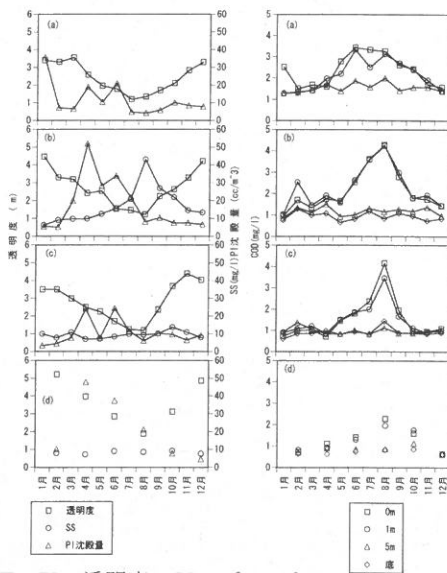


図4-VIII・IX 透明度・SS・プランクトン
 沈殿量・CODの年代別季節変動
 (a)1963~1970年 (b)1971~1980年
 (c)1981~1990年 (d)1991~2003年

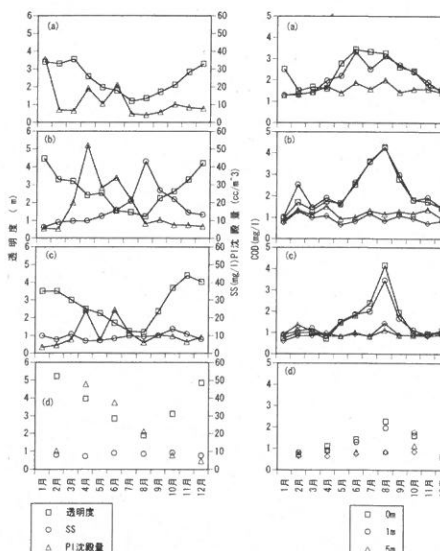


図4-X・XI DO・pHの年代別季節変動
 (a)1963~1970年 (b)1971~1980年
 (c)1981~1990年 (d)1991~2003年

表1 月毎の Spearman の順位相関分析の結果

月	深度	水温	塩分	DIN	DIP	DSi	N/P	N/Si	透明度	SS	PI	COD	DO	pH
2月	0m	-0.07	0.27	-0.81**	-0.57**	0.23	-0.83**	-0.85**	0.63**	0.38*	0.11	-0.86**	0.37	-0.52**
	1m	0.01	0.44*	-0.65**	-0.66**	0.24	-0.61*	-0.74**				-0.71**	0.27	-0.58**
	5m	0.08	0.08	-0.85**	-0.56**	0.45*	-0.80**	-0.83**				-0.72**	0.48**	-0.37*
	底	0.00	-0.05	-0.53*	-0.28	0.69**	-0.59*	-0.84**				-0.54**	0.03	-0.35
4月	0m	-0.15	0.40*	-0.34	-0.30	0.69**	-0.42	-0.68**	0.65**	0.24	0.28	-0.36**	0.01	-0.31*
	1m	-0.12	0.44**	-0.39	-0.33*	0.64**	-0.44	-0.70**				-0.64**	0.07	-0.41*
	5m	0.00	0.59**	-0.36	-0.06	0.70**	-0.73**	-0.71**				-0.66**	0.38*	-0.19
	底	-0.06	0.33	-0.42	-0.31	0.78**	-0.56*	-0.74**				-0.68**	0.31	-0.01
6月	0m	-0.25	-0.00	0.01	-0.15	0.37*	-0.12	-0.47*	0.40**	-0.31*	0.13	-0.65**	-0.07	-0.27
	1m	-0.29*	-0.03	0.25	-0.07	0.38*	-0.02	0.05				-0.70**	-0.05	-0.22
	5m	-0.27	0.19	-0.25	0.08	0.68**	-0.34	-0.40*				-0.65**	0.51**	0.27
	底	-0.11	0.12	-0.23	-0.27	0.49*	-0.81**	-0.56**				-0.31*	0.41*	0.51**
8月	0m	-0.26*	-0.20	-0.09	0.03	0.09	-0.09	-0.09	0.33*	-0.50**	0.53**	-0.25	0.03	0.02
	1m	-0.34*	-0.13	-0.12	-0.01	0.12	-0.21	-0.15				-0.42**	-0.03	0.01
	5m	-0.46**	-0.48**	0.01	0.10	0.64**	0.01	-0.13				-0.69**	0.68**	0.58**
	底	-0.32*	-0.24	-0.01	-0.09	0.59**	-0.02	-0.30				-0.35*	0.30*	0.80**
10月	0m	0.42**	0.00	-0.63**	-0.25	0.36*	-0.69**	-0.74**	0.40**	-0.11	-0.07	-0.37*	0.17	-0.01
	1m	0.36*	0.02	-0.53**	-0.02	0.44*	-0.70**	-0.69**				-0.40**	0.22	-0.13
	5m	0.31*	-0.18	-0.50**	0.13	0.63**	-0.75**	-0.70**				-0.46**	0.48**	0.16
	底	0.16	-0.65**	-0.31	0.00	0.64**	-0.63**	-0.70**				-0.32	0.11	0.16
12月	0m	0.59**	0.16	-0.63**	-0.33*	0.38*	-0.73**	-0.82**	0.55**	-0.19	-0.03	-0.76**	0.39**	-0.25
	1m	0.58**	0.28*	-0.45*	-0.24	0.29	-0.62**	-0.71**				-0.73**	0.42**	-0.47**
	5m	0.47**	-0.07	-0.16	-0.21	0.57**	-0.41*	-0.47*				-0.71**	0.52**	-0.29*
	底	0.45**	-0.17	-0.37	-0.04	0.46*	-0.80**	-0.66**				-0.41*	0.14	-0.20

(*P<0.05, **P<0.01)

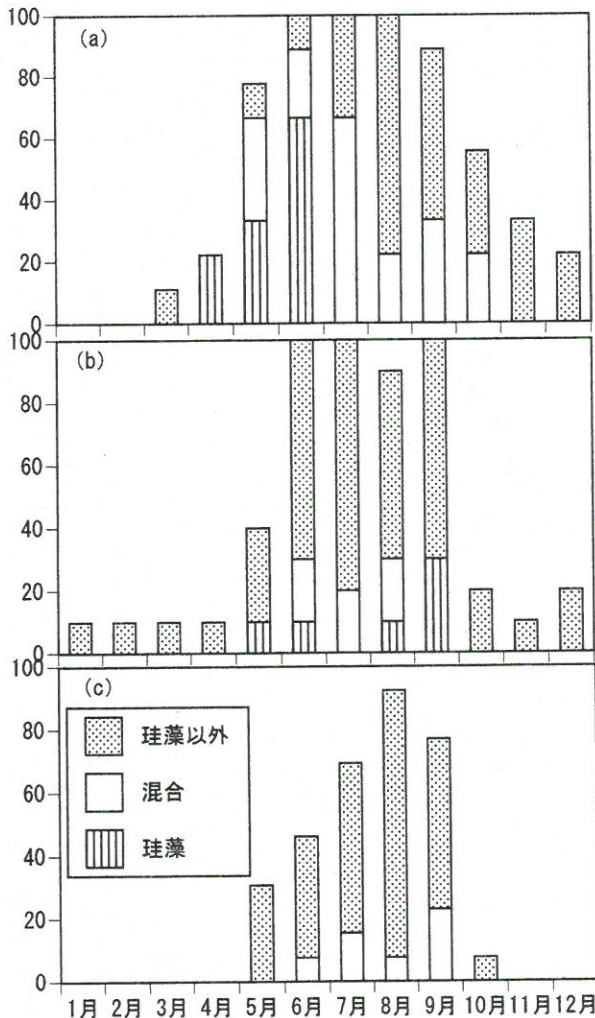


図5 各年代における赤潮発生年の割合と優占プランクトン(月別)
(a)1972~1980年 (b)1981~1990年 (c)1991~2003年

では中層では年間を通じて、底層は6、8月、表層は12月に上昇していた(図4-X, 表1)。すなわち、夏季中底層を中心にDO値は改善しており、夏季の赤潮発生と

SSの減少による海底への有機物負荷の減少、年間を通じた透明度の増加により有光層深度が深くなり、植物プランクトンの光合成による酸素供給が増えたことが要因であろう。pHの移動平均値は表層で減少傾向、底層で増加傾向にあったが¹⁾、月別では12~4月に表層での減少が、6~8月に底層での増加がみられた(図4-XI, 表1)。夏季底層での増加は赤潮発生減少の結果と予想される。この結果、1990年代以降では年間8.1~8.4の範囲と小さい変動となった。これらのことから、前述した栄養塩濃度の減少も含めて年間を通じて漁場環境が改善されていることが理解される。

本報告および伊藤ら¹⁾により、気仙沼湾湾奥部における水質環境の変遷と季節変動が明らかとなったが、さらに流入河川および湾全域における解析を行うことにより、これまで蓄積してきたデータが漁場の適正管理に役立つものになることが期待される。

最後に永年に亘り水質および赤潮観測調査に携わってきた宮城県気仙沼水産試験場の歴代の担当職員および赤潮現場観測者に対し厚く御礼申し上げる。

要約

1. 水温は5~8月に躍層を形成した。塩分は2~10月に躍層を形成し、夏季に特に強くなった。これは陸水の影響が大きいと考えられる。経年的には水温は8月に低下傾向、10、12月に上昇傾向にあり、塩分は年代毎の変動が大きかった。
2. 表層では各栄養塩とも4~5月に減少してDIPは6月以降緩やかに増加、DINは9月以降大きく増加した。これに対してDSiは6月に急激に回復して8月まで特に高い値を示した。4~5月の減少は珪藻を主と

- する植物プランクトンによる消費が原因であり、夏季に DIN, DIP 濃度が低いのは珪藻以外の赤潮プランクトンによる消費が原因と考えられる。底層では夏季に各栄養塩とも底泥からの溶出がみられ、9月には躍層の解消により表層に供給される。経年的には DIN, DIP は秋～冬季を中心に減少し、減少の程度は DIN の方が大きい。
3. 赤潮発生月は5～9月に集中しており、特に6～9月に顕著だった。優占種は珪藻以外の種であることが多かった。経年的にみると、赤潮発生期間は短縮され、珪藻による赤潮が減少したことがわかる。
4. SS は赤潮発生を原因として夏季に増加し、その結果透明度が低下していた。経年的には夏季に SS が減少し、透明度は年間を通じて増加した。プランクトン沈殿量は4～6月に大きい値を示し、これらは珪藻が主と予想される。経年的にみると1970年代と1990年代以降に大きい値だった。
5. COD は陸水の影響および内部生産により夏季に増加、DO は赤潮の影響、高水温、分解層の発達などにより、夏季の表層で高い値、底層で低い値を示した。pH も同様の結果であった。経年的には各項目とも夏季を中心に年間を通じて改善傾向にあった。

文 献

- 1) 伊藤博・藤田則孝・千葉充子 (2005) 気仙沼湾湾奥部における漁場環境の変遷. 宮城水産研報, 5, 27-35.
- 2) 酒井誠一・広沢一郎・高橋靖夫 (1964) 気仙沼湾カキ養殖場の生態学的調査, 第1報, 養殖場の環境とカキの生産性. 宮城水試気仙沼分場報告, 1-46.
- 3) 五十嵐輝夫・藤田則孝・広沢一郎 (1976) 気仙沼湾の環境-I 昭和48年の水質について. 宮城気水試研報, 2, 1-27.
- 4) 藤田則孝・五十嵐輝夫・渡辺誠樹 (1976) 昭和49年気仙沼湾に発生した赤潮 *Prorocentrum micans* について. 宮城気水試研報, 2, 66-75.
- 5) 渡辺正孝・渡辺信・木幡邦男・原島省・中村泰男・森栄 (1982) 気仙沼湾における赤潮発生環境. 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 昭和54/55年度特別研究報告. 環境庁国立公害研究所, 215-288.
- 6) 日本水産資源保護協会 (1980) 水質分析法. 新編水質汚濁調査指針, 東京, 恒星社厚生閣, 133-235, 552pp.
- 7) 気象庁 (1970) 海水の化学分析法. 海洋観測指針, 東京, 財団法人日本気象協会, 124-181, 252pp.
- 8) 宮城県水産試験場 (1963-1969) 浅海漁場水質汚濁調査. 宮城水試事業報告, 宮城水試.
- 9) 宮城県気仙沼水産試験場 (1970-1999) 浅海漁場水質汚濁調査・浅海漁場環境調査・沿岸漁場環境調査. 宮城気水試事業報告, 宮城気水試.
- 10) 宮城県気仙沼水産試験場 (2000-2003) 沿岸漁場環境調査. 宮城県水産試験研究成果要旨集, 宮城県水産関係試験研究機関.
- 11) Redfield, A. C., B. H. Ketchum, and F. A. Richard (1963) The influence of organisms on the composition of seawater. 26-77. In: The Sea, ed. M. N. Hill, vol. 2, New York, Inter Science.
- 12) Liebes, S. M. (1992) An Introduction to Marine Biogeochemistry. New York, John Wiley & Sons, 734pp.

