

気仙沼湾における貧酸素水の発生状況と底質の経年変化

伊藤 博*

The occurrence of oxygen-deficient water and yearly changes in environmental condition of bottom sediments
in Kesennuma Bay

Hiroshi ITO*

キーワード：気仙沼湾・貧酸素水・底質

気仙沼湾では養殖漁場の汚濁被害対策として、1960年代から継続して定期的な水質調査が行われてきた。これらの調査データより、富栄養化・有機汚濁の観点から、湾奥部の水質環境は改善されていることが報告されている¹⁾。しかし、溶存酸素量に注目すると、湾奥部底層での値は増加しているものの、夏季の湾央から湾奥部底層では依然として貧酸素水（本報告では溶存酸素量が日本水産資源保護協会の定める内湾漁場の夏季底層の水産用水基準4.3mg/l未満²⁾の場合を貧酸素水と定義する。）が観測されている^{3,4)}。

貧酸素水発生要因の1つとして底質の悪化による有機物の分解に伴う溶存酸素の消費が考えられる⁵⁻⁷⁾。気仙沼湾では1950年代から不定期に詳細な底質調査（1954年⁸⁾、1962~1963年⁹⁾、1971年¹⁰⁾、1985年¹¹⁾、1991年¹²⁾、2001年¹³⁾）が行われており、これらによると、底質の汚濁は1950年代には緩やかに、1960年代には著しく進行した。その後、底質汚濁の指標となる全硫化物は1970~1980年代にかけて低下したものの、1990年代には横這い、CODは1970~1990年代まで横這いの値を示し、2001年の時点では西湾・東湾ともに湾央から湾奥部で汚濁された状態となっている。

本報告では上述した定期的な水質調査に加えて、2000~2007年に夏季の西湾を中心に行った詳細な酸素量調査

の結果と1996~2007年に定期的に行った底質・ベントス調査の結果を取りまとめ、それぞれの経年変化とその相互関係を考察する。

材料と方法

定期的な水質調査のデータは1975~2007年の6, 8, 10月に気仙沼湾の西湾6測点および東湾1測点で行ったものを用いた（図1 (a)）。試水は底層から北原式採水器で採水し、ウィンクラー窒化ナトリウム変法を用いて酸素量の測定を行った。この他、水温やプランクトン沈殿量のデータを適宜使用したが、各年の調査方法・結果については宮城県気仙沼水産試験場事業報告（1976-2000）¹³⁾ および宮城県水産試験研究成果要旨集（2001-2008）¹⁴⁾ に掲載されている。

酸素量調査は2000~2007年の8~10月に月1回西湾の20測点および東湾の1測点で行った（2000年8月~2001年8月は西湾18測点（St. 1, 2, 6を除く）のみ、図1 (b)）。なお、2005年8月、2007年8, 10月は欠測し、2006年は7月にも行っている。酸素濃度の測定はDOメーター（YSI製, model 58）を用いた。

底質・ベントス調査は1996~2007年（St.1は1998~2007年）の5, 9月の年2回（1996年は5, 翌1月、2006年は5, 10月、2007年は5月のみ）西湾の3測点で行った（図1 (c)）。

*気仙沼水産試験場

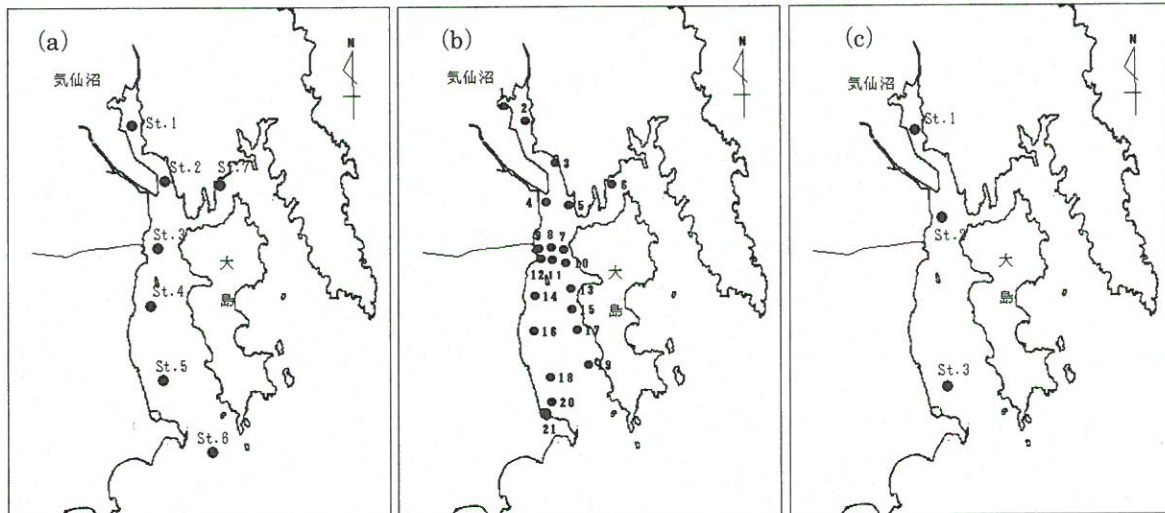


図1 (a) 水質調査7測点 (b) 酸素量調査21測点 (2000年8月～2001年8月まで St.1,2,6を除く18測点)
(c) 底質調査3測点

採泥はスミス・マッキンタイヤ型採泥器 (採泥面積 0.05m^2) を用い、 $0\sim 2\text{cm}$ 層の泥を分取し、持ち帰って含泥率 ($<0.062\text{mm}$)、全硫化物、強熱減量およびCODの測定を行った。St.1, 2では残りの泥をホルマリンを用いて固定し、 1mm のフルイを用いてベントスを選別した。さらに、多毛類、甲殻類、棘皮類、軟体類およびその他に分類し、個体数を計測した。加えて汚染指標種¹⁵⁾の個体数も計測した。St.1ではさらにもう1回採泥を行い、2サンプルについて上記に加えて種の同定も行った。

底質の分析方法は含泥率はふるい別法、全硫化物は検知管法、強熱減量は 550°C 6時間強熱の方法を用い (以上は漁場保全対策推進事業調査指針¹⁶⁾の方法)、CODはアルカリ法 (水質汚濁調査指針¹⁷⁾の方法)を用いた。

結 果

1 水質調査

1975～2007年の6, 8, 10月の底層における貧酸素水発生測点数を月別に示した (図2 (a))。貧酸素水は1997年を除いて毎年発生し、発生測点数は1975～1996年の期間では1～5測点の範囲で変動していたのに対し (平均3.1測点)、1997年以降は2006年に6測点であったのを除いては0～2測点に留まった。月別にみると、貧酸素水は8月には1997年を除いた31年間毎年発生し、6月には12年、10月には7年発生した。6, 8, 10月全ての月で発生がみられたのは1985, 1993, 2006年であった。同じグラフを測点別

みると (図2 (b))、St.1では30年発生がみられ、St.2で12年、St.3で19年、St.4で11年、St.7で2年発生していた。St.1～4まで広範囲に発生がみられたのは1989, 2006年であった。

調査期間中のSt.1, 3, 6における8月底層の溶存酸素量の経年変化を示した (図3)。St.1では $0.2\sim 5.8\text{mg/l}$ 、St.3

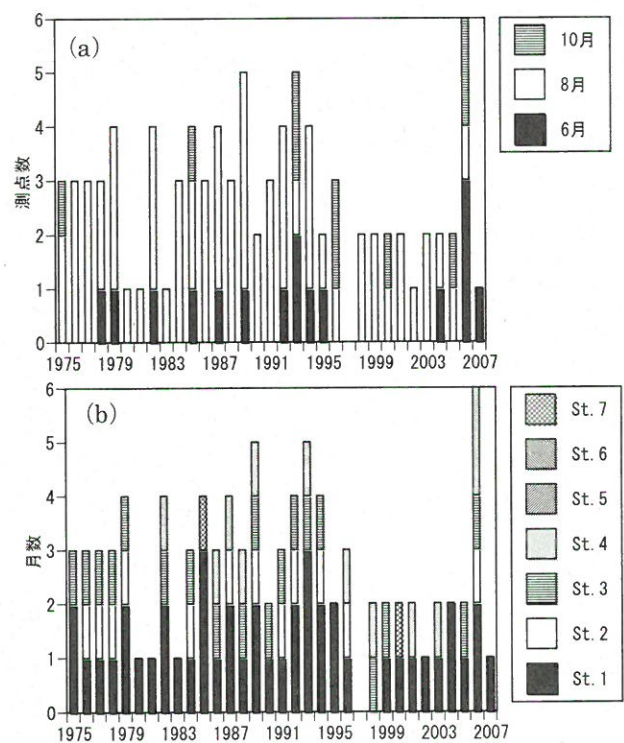


図2 (a) 月別貧酸素水発生測点数の経年変化
(b) 測点別貧酸素水発生月数の経年変化

では2.1~7.2 mg/l, St.6では5.5~8.7 mg/lの範囲で変動した。湾奥部で低く、湾口部で高い傾向だったが、1976, 1979, 1984, 1987, 1989年のSt.1で1.0mg/l以下という極めて低い値を示した。

2 酸素量調査

2000~2007年夏季の貧酸素水の発生状況を示した(図4)。湾奥部では8,9月には毎年貧酸素水が発生していた。湾奥部を除くと、2003, 2007年は発生がみられなかったが、これ以外の年は湾中央部を中心に発生しており、特に2000年9月, 2001年8, 9月, 2006年9月には10測点以上の広範囲に亘っていた。また、2.0mg/l以下の特に低い値を示した測点があったのは2001, 2006年で、特に2006年は8月に3測点で観測された。2006年は前述した6月の水質調査時に3測点と例年より多く貧酸素水が発生したため、7月にも調査を行ったところ、9測点で貧酸素水が発生していたほか、2.0mg/l以下の値を示した測点も湾中央部に1測点みられた。2005年を除いて各年とも10月には0~1測点に減少し、貧酸素水の発生は沈静化した。

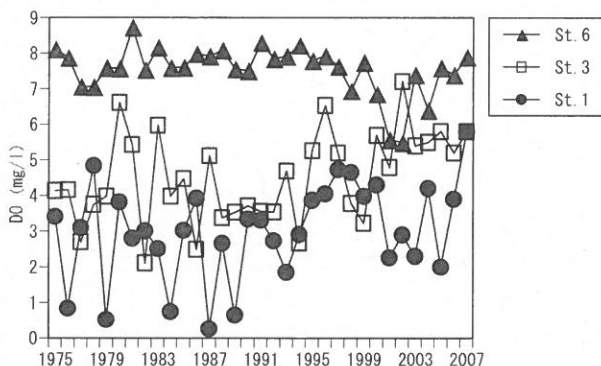


図3 8月底層の溶存酸素量の経年変化

3 底質・ベントス調査

気仙沼湾西湾湾奥部(St.1)・湾中央部(St.2)・湾口部(St.3)における含泥率, 全硫化物, 強熱減量およびCODの経年変化を示した(図5)。変動の傾向はSpearmanの順位相関分析によって求めた。

含泥率(図5(a))はSt.1, 2では1998年を除いて75%以上の値を示していた。St.3では最大でも2000年の32%であり、湾中央から湾奥で泥質を示していた。1998年を除けば季節的にも経年的にも顕著な変動はみられなかったが、季節別に経年変化をみるとSt.1の5月で増加傾向, St.3の9

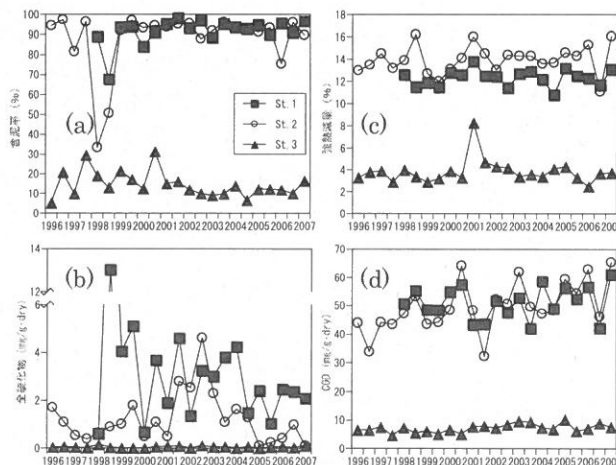


図5 底質の経年変化
(a)含泥率 (b)全硫化物 (c)強熱減量 (d)COD

月で減少傾向がみられた(表1)。

全硫化物は(図5(b))St.1で1998年の9月に13.0 mg/g·dryと高い値を示したのを除くとSt.1, 2では0.1~5.1 mg/g·dryの範囲で変動したが、St.3では水産用水基準0.2 mg/g·dry²⁾を超えることはなかった。St.1, 2で水産用水基準を満たしたのは2005年5月, 2007年5月のSt.2のみであり、湾中央から湾奥部で汚濁されていることを示していた。季節的にみると、1998~2003年のSt.1では同一年において5月より9月の方が高い値を示していた。経年的にみると、St.1では1998~2004年に4.0mg/g·dry以上の特に高い値を何度か示し、St.2では2001~2003年に2.0mg/g·dry以上の高い値を示すことがあった。季節別に経年変化をみると、St.1の9月で顕著な減少傾向がみられた(表1)。

強熱減量(図5(c))はSt.2で11~17%の範囲で最も高く、St.1で10~14%の範囲, St.3では2~5%の範囲で変動した。湾中央から湾奥部で湾口部より明らかに高い値を示していたが、季節的にも経年的にも顕著な変動はみられなかった。季節別に経年変化をみるとSt.2の5月で減少傾向がみられた(表1)。

表1 底質・ベントスの変動傾向
(Spearmanの順位相関分析結果)

	St.1			St.2			St.3			
	5月	9月	全体	5月	9月	全体	5月	9月	全体	
底質	含泥率	0.66*	-0.02	0.34	-0.17	-0.36	-0.15	0.13	-0.75**	-0.30
	全硫化物	0.39	-0.87**	-0.22	-0.45	0.00	-0.19	0.04	0.19	0.12
	強熱減量	0.18	0.06	0.10	-0.60*	-0.01	0.28	-0.05	0.29	0.11
	COD	0.82**	-0.43	0.18	0.85**	0.34	0.61**	0.46	0.62*	0.51**
ベントス	合成指標	0.39	-0.88**	-0.12	0.30	0.24	0.26	-0.27	-0.46	-0.34*
	個体数	-0.27	-0.48	-0.23	-0.06	-0.01	-0.01	-	-	-
	種類数	-0.23	-0.52	-0.34	-	-	-	-	-	-

(*<0.05, **<0.01)

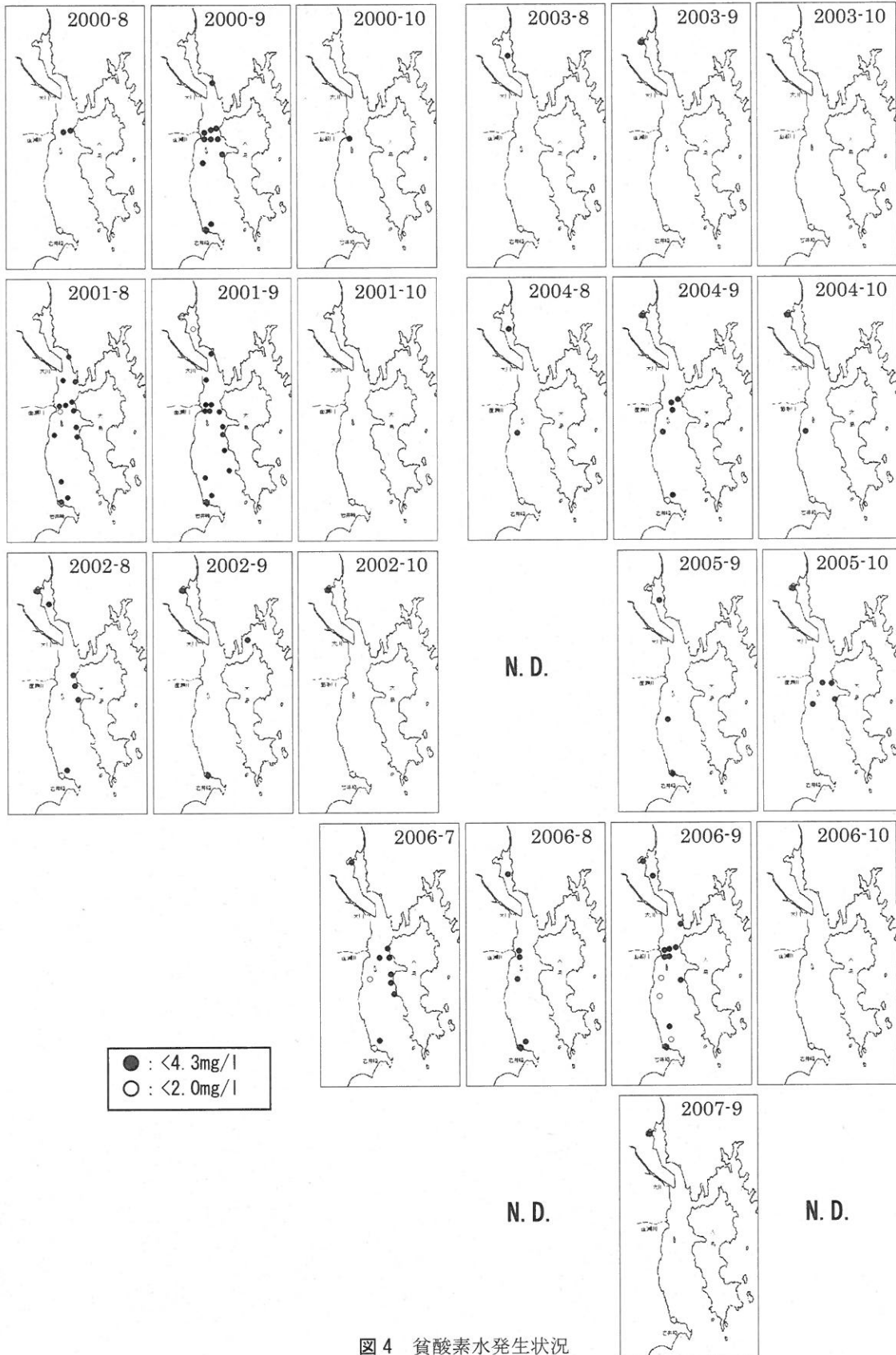


図4 貧酸素水発生状況

COD (図5 (d)) はSt.1, 2で32~66 mg/g·dryの範囲で変動し, St.3では4~11 mg/g·dryの範囲で変動した。St.1, 2では水産用水基準20 mg/g·dry²⁾を常に上回っており, 湾央から湾奥部で汚濁されていることを示していた。季節変動は明瞭でなかったが, 経年的にはSt.2, 3で増加傾向を示し, 季節別に経年変化をみるとSt.1, 2で5月, St.3では9月に増加傾向がみられた (表1)。

次に, ベントスの個体数 (St.1, 2) および種類数 (St.1) の経年変化を示した (図6)。変動の傾向は底質と同様に Spearmanの順位相関分析を用いた。

ベントス個体数はSt.1 (図6 (a)) では1998年5月に9200個体/m², 2003年5月に6490個体/m², 2007年5月に7570個体/m²と高い値を示し, 2001年9月に160個体/m², 2006年10月に85個体/m²と極めて低い値を示した。季節的には同一年において5月の方が9月と比べて高い値を示していたが, 経年的には明瞭な傾向はみられなかった (表1)。ほとんどの年で多毛類が優占していたが, 1999, 2003, 2005年5月には甲殻類が優占していた。このうち汚染指標種はシズクガイが0~650個体/m²の範囲で出現し, 2004, 2007年5月にチョノハナガイが10個体/m²出現したが, 最大でもベントス全体の12%にすぎず, 経年的な傾向もみられなかった。

St.2 (図6 (b)) では1998年9月に6040個体/m², 2003年9月に5360個体/m²と高い値を示し, 最低でも1000個体/m²を下回ることにはなかった。季節的にも経年的にも明瞭な傾向はみられなかった (表1)。St.1と同様, ほとんどの年で多毛類が優占していたが, 1996年5月, 1998年9月には

甲殻類が優占していた。このうち汚染指標種はシズクガイが0~480個体/m²の範囲で出現したが, 最大でも全体の11%であり, 経年的な傾向もみられなかった。

ベントスの種類数はSt.1のみで計測した (図6 (c))。種類数は2003年5月に47種類/0.1m²と大きい値だったが, 2001年9月に5種類/0.1m², 2006年10月に3種類/0.1m²と極めて低い値を示し, 個体数と似た傾向を示した。季節的には5月のほうが9月より大きい値を示すことが多かったが, 経年的には有意な傾向はみられなかった。

考 察

1975~2007年の水質調査結果から, 貧酸素水は湾央から湾奥部でほぼ毎年観測され, 特に8月の湾奥部では発生頻度が大きいことがわかる (図2 (a), (b))。

経年的にみると, 1989年以前には8月の湾奥部で溶存酸素量が1.0mg/l以下という値が観測されていたが, 1990年以降はこのような極めて低い値はみられなくなった (図3)。陸域からの有機物負荷の減少¹⁾に加えて, 1971¹⁰⁾, 1985¹¹⁾, 1991年¹²⁾の調査結果からこの期間に底質が改善傾向にあったことが示されており, 1976~1987年に湾奥部で行われた底泥浚渫¹⁸⁾による底泥の有機物除去が酸素濃度の上昇に繋がったと考えられる。

また, 1996年以前と比べて1997年以降では貧酸素水の発生範囲, 期間が小さくなっていった (図2 (a), (b))。貧酸素水発生の要因として植物プランクトンの枯死・沈降による底層への有機物負荷^{7, 19-21)}や底層の植物プランクトンの呼吸による酸素消費²²⁾が考えられる。気仙沼湾では1960年代より湾奥部で頻発していた赤潮発生日数が1997年頃から大きく減少しており¹⁾, 湾奥部ではこのような赤潮プランクトンを原因とした酸素消費が減少した結果, 貧酸素水発生の規模が小さくなったと推察される。しかし, こうした有機物負荷は減少したが, 1991年¹²⁾と2001年³⁾の調査結果から, この期間に底質は大きく変化しておらず, 底泥による酸素消費は減少していないと推定される。

1996~2007年の底質COD, 全硫化物 (TS), 含泥率 (MC) から合成指標 (=0.582 (COD-20.9) /15.4+ 0.568 (TS-0.51) /0.60+0.580 (MC-64.9) /30.5)²⁾を求め, 底質の評価を行った (図7)。合成指標はSt.3では期間中を通じて負の値を示し, 正常な底質と判断された, これに

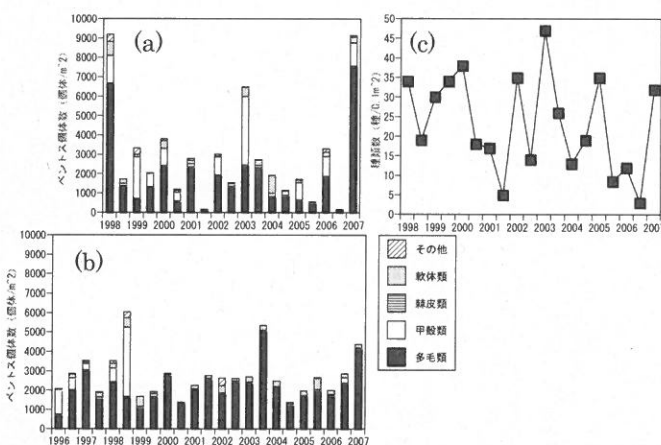


図6 ベントス個体数および種類数の経年変化 (a)個体数 St.1 (b)個体数 St.2 (c)種類数 St.1

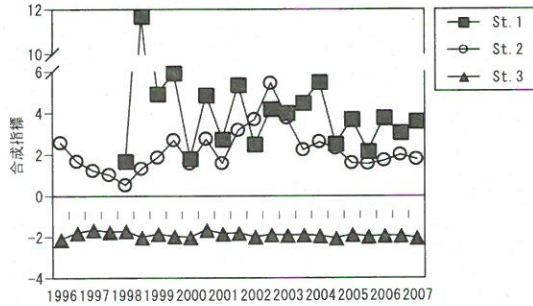


図7 底質の合成指標の経年変化

対し、St.1, 2では期間中を通じて正の値を示し、汚濁された底質と判断された。St.1, 2では全硫化物、CODの値自体も水産用水基準を超えており、2001年³⁾の調査以降も湾中央から湾奥部は汚濁された状態が継続していると考えられる。また、ベントスに着目すると湾中央から湾奥部では汚濁に伴って優占度が増加するとされる^{15, 23)}多毛類が優占し(図6(a), (b))、汚染指標種もみられることから、やはり汚濁状態にあることが示唆される。季節的には1998~2003年のSt.1で同一年において5月より9月の方が高い値を示していた。経年的にはSt.3で減少傾向、季節別にみるとSt.1の9月で減少傾向にあった(表1)。このことから、底質の状況は横這い~改善の傾向にあるといえる。しかし、個別の項目をみると、St.1で9月の全硫化物、St.2で5月の強熱減量、St.3で9月の含泥率が減少傾向にあるが、St.2, 3でCODが増加傾向にあり、季節別にはSt.1で5月の含泥率、CODが増加傾向を示すなど(表1)、一律に減少しているわけではなく、今後も各項目に注意してモニタリングを継続する必要がある。

前述したように、湾中央から湾奥部では毎年のように貧酸素水が発生しており、底質の汚濁状況と考え合わせると、1960~1980年代と比べて改善されてはいるものの、依然として汚濁された底泥が貧酸素水発生の原因の1つとなっているといえよう。

2000~2007年の酸素量調査と水質調査結果から、2000年9月、2001年8~9月、2006年6~9月は広範囲に貧酸素が発生し、特に2006年は長期間に亘り、溶存酸素量も低い値を示している(図4)。貧酸素水により二枚貝やベントスが影響を受けることが知られているが^{24, 25)}、ベントス個体数および種類数はSt.1で2001, 2006年9月に極めて低い値を示しており(図6(a), (c))、例年より貧酸素水の規模が大きかった影響と考えられる。また、St.1, 2で

は各年とも5月より9月に低い値を示しており(図6(a), (b))、夏季の貧酸素水によりベントスの個体数および種類数が減少したことを示している。

これらの貧酸素水発生状況とこの期間の底質の状況を比較すると、1998~2003年のSt.1では5月より9月に底質の合成指標が高く(図7)、この時期の底質汚濁が溶存酸素の消費を助長した可能性がある。しかし、経年的には明瞭な関係はみられず、底質の汚濁は貧酸素水発生の原因になっているが、例えば2006年のような単年の広域化・長期化の原因は他にあると考えられる。

図8に2006年1~6月の湾口部(St.6)における底層水温、底層DIN(溶存態窒素濃度)およびプランクトン沈殿量(北原式定量ネット目合い95 μ m, 0.5m鉛直引き)の推移を示した。2006年は3~4月にかけて水温が低く(図8(a))、DINは高い値を示した(図8(b))。これは、2006年冬春季に観測された親潮系冷水が接岸する異常冷水現象²⁶⁾の影響と考えられる。続いて5~6月にはプランクトン沈殿量が極めて高い値を示し(図8(c))、3~4月の高いDINが植物プランクトンの増殖を引き起こしたと考えられる。この傾向は湾口~湾中央部で顕著であり、このため、前述した赤潮プランクトンと同様の要因で酸素が消費され、例年より早い6月から湾中央部を中心として広範囲で貧酸素水が発生したと推察される。

貧酸素水の発生には底層水温の上昇^{20, 21, 27)}、鉛直安定度(水温・塩分躍層)の強化^{6, 19, 21, 28-31)}、河川からの流入負荷の増大^{19, 27, 32)}およびエスチュアリー循環流の影響^{32, 33)}等の要因が考えられ、これらには気温^{28, 29)}、日照時間^{19, 27, 34)}、降水量・河川流量^{6, 19, 29, 31, 35)}、風力^{20, 28, 29, 35, 36)}等の気象条件や湾外からの海流の波及²⁴⁾等が影響している。

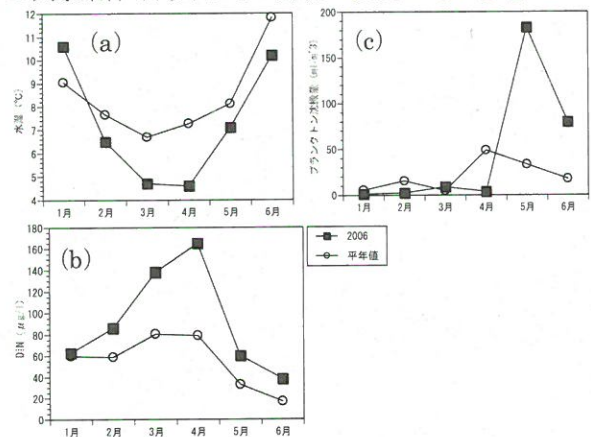


図8 2006年1~6月のSt.6における(a)水温・(b)DIN・(c)プランクトン沈殿量の推移

本報告より気仙沼湾の貧酸素水発生と底質や植物プランクトンの消長には密接な関係があることが分かったが、海域によっては貧酸素化には底泥以外のものによる影響が大きいとされており^{37,38)}、これらの項目についても今後解析を進めていく必要がある。気仙沼湾における貧酸素水の発生機構を解明することにより、漁場環境の保全および養殖生物を含む多様な生物の持続的生産が可能となる。

要 約

1975～2007年の水質調査、2000～2007年の酸素量調査、1996～2007年の底質・ベントス調査結果から気仙沼湾西湾の貧酸素発生状況および底質の経年変化を調べた。

- 1) 1975～2007年にかけて、貧酸素水は湾中央から湾奥部でほぼ毎年発生し、特に8月の湾奥部で発生頻度が高かった。
- 2) 湾奥部では、1989年以前には1.0mg/l以下と特に低い溶解酸素量が観測されていたが、底質の改善により1990年以降はみられなくなった。
- 3) 赤潮発生日数の減少により、1996年以前と比べて1997

年以降は貧酸素水の発生期間が短く、範囲が狭くなっていた。

- 4) 1996～2007年にかけて湾中央から湾奥部では底質が汚濁状態を示しており、貧酸素水発生の原因となっていた。
- 5) 貧酸素水発生に伴い、ベントス個体数・種類数の減少がみられた。
- 6) 2006年には貧酸素水発生が広域化・長期化した。親潮系冷水の接岸を発端とする植物プランクトンの枯死・沈降が要因の1つと考えられる。

謝 辞

永年に亘り水質、酸素量および底質調査に携わってきた気仙沼水産試験場の歴代の担当職員の方々、本稿を取り纏めるにあたりご指導、ご協力いただいた児玉純一場長、小林一郎栽培部長、小野寺毅副主任研究員、千葉充子技師(主任)を始めとした気仙沼水産試験場職員の方々に対し厚く御礼申し上げます。また本研究の一部は漁場環境保全推進事業(国庫補助)により実施した。記して謝意を表す。

参考文献

- 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) 日本水産資源保護協会(2006) 水産用水基準, 2005年版, 96pp, 東京, 日本水産資源保護協会.
- 3) 鈴木貢治・千葉充子(2003) 気仙沼湾の底質および水質の経年変化. 宮城水産研報, 3, 53-62.
- 4) 伊藤博・藤田則孝・千葉充子(2006) 気仙沼湾湾奥部における漁場環境の季節変動. 宮城水産研報, 6, 51-57.
- 5) 畑幸彦(1990) 堆積物. 海面養殖と養魚場環境, 日本水産学会監修, 渡辺鏡編, 東京, 恒星社厚生閣, 51-68, 130pp.
- 6) 岩井拓郎(2006) 仙台湾における貧酸素水発生多発期の年別発生状況と気象要因および発生海域と底質との関係. 宮城水産研報, 6, 27-39.
- 7) 岩井拓郎(2008) 近年の仙台湾における貧酸素水発生状況と発生要因の検討. 宮城水産研報, 8, 5-13.
- 8) 今井丈夫・伊藤進・中村捷・小野寺弘(1957) 気仙沼湾カキ養殖場の生態学的研究—環境条件とカキの生産性. 気仙沼湾開発研究会, 1-39.
- 9) 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.
- 10) 広沢一郎・五十嵐輝夫・藤田則孝(1974) 気仙沼湾の底質について I. 気仙沼湾底質調査報告書, 宮城県気仙沼水産試験場, 1-14.
- 11) 太田裕達・五十嵐輝夫・武川治人(1989) 気仙沼湾および大川下流の底質環境. 宮城水試研報, 8, 77-80.
- 12) 伊藤章・田口滋之・千葉充子(1994) 気仙沼湾および大川下流の底質環境 II. 宮城水試研報, 9, 85-99.

- 13) 宮城県気仙沼水産試験場 (1976-2000) 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.
- 14) 宮城県気仙沼水産試験場 (2001-2008) 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.
- 15) 菊池泰二 (1982) 海域における富栄養化と底棲生物の指標性. 沿岸海域の富栄養化と生物指標, 日本水産学会編, 東京, 恒星社厚生閣, 84-100, 155pp.
- 16) 水産庁研究部漁場保全課 (1997) 底質調査. 漁場保全対策推進事業調査指針, 東京, 水産庁研究部漁場保全課, 48-66, 113pp.
- 17) 日本水産資源保護協会 (1980) 底質調査法. 新編水質汚濁調査指針, 東京, 恒星社厚生閣, 237-272, 552pp.
- 18) 宮城県 (1988) 気仙沼湾大規模漁場保全事業 (ヘドロ浚渫) の効果について, 宮城県, 1-125.
- 19) 松川康夫 (1992) 三河湾・東京湾. 漁場環境容量, 日本水産学会監修, 平野敏行編, 東京, 恒星社厚生閣, 37-48, 120pp.
- 20) 青山裕晃・石田基雄・木村仁美 (2002) 海峡自動観測ブイ10ヶ年観測結果 (1991~2000年) からみられる三河湾の赤潮と貧酸素. 愛知水試研報, 9, 1-10.
- 21) 堤裕昭・堤彩・高松篤志・木村千寿子・永田紗加香・佃政則・小森田智大・高橋徹・門谷茂 (2007) 有明海湾奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム. 海の研究, 16, 183-202.
- 22) 木村知博 (1999) カキ筏養殖場の溶存酸素量の変動機構とカキの生育低下. 水産増殖, 47, 119-127.
- 23) 玉井恭一 (1990) 底生生物. 海面養殖と養魚場環境, 日本水産学会監修, 渡辺競編, 東京, 恒星社厚生閣, 69-78, 130pp.
- 24) 風呂田利夫 (1988) 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物に与える影響について. 沿岸海洋研究ノート, 25, 104-113.
- 25) 今林博道 (1989) 富栄養海域における底生群集と貧酸素水塊の相互作用. 沿岸海洋研究ノート, 26, 119-128.
- 26) 伊藤寛 (2007) 岩手県沖で観測された春季異常冷水について. 地域研究集会「三陸沿岸における春季異常冷水の接岸と水産業への影響, 2006年の実態と既往の知見からその対策を探る」講演要旨集, 3.
- 27) 岩井拓郎 (2004) 近年の仙台湾における貧酸素水発生状況と発生要因の検討. 宮城水産研報, 4, 1-12.
- 28) 城久 (1989) 大阪湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26, 87-98.
- 29) 鬼塚正光 (1989) 東京湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26, 99-100.
- 30) 田森裕茂・岩男昂・神園真人・吉田幹英・池田武彦・馬場俊典・小泉喜嗣・内間満明・三浦秀夫・矢沼隆 (1991) 西部瀬戸内海における *Gymnodinium nagasakiense* の初期出現域とその環境特性. 日本水産学会誌, 57 (12), 2179-2186.
- 31) 神園真人・江藤拓也・荒田敏生 (1993) 豊前海の貧酸素水塊形成と降水量との関係. 福岡水技研報, 1, 217-224.
- 32) 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一 (2000) 伊勢湾における外洋系水進入深度と貧酸素水塊の季節変動. 海の研究, 9, 265-271.
- 33) Fujiwara, T., T. Takahashi, A. Kasai, Y. Sugiyama and M. Kuno (2002) The role of circulation in the development of hypoxia in Ise Bay, Japan. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 54, 19-31.
- 34) 原保・向井良吉・黒田伸郎 (1995) 三河湾における貧酸素水塊の経年変化について. 愛知水試研報, 2, 47-49.
- 35) 木村知博 (1975) 広島湾北部水域における養殖カキの生育と貧酸素水塊の出現について. 水産増殖, 22, 27-33.
- 36) 神園真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996) 周防灘南西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係. 沿岸海洋研究, 33, 179-190.
- 37) 神園真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996) 周防灘南西部の浅海域下層における酸素収支. 海の研究, 5, 87-95.
- 38) 川口修・高辻英之 (2007) 広島湾北部海域の酸素収支に関わる物理, 生物・化学過程の評価. 広島水技研報, 2, 1-7.