

三河湾における苦潮発生時の海洋構造と 硫化水素及び硫黄粒子の鉛直分布

鵜寄直文・甲斐正信

Oceanographic conditions and vertical distribution of hydrogen sulfide and sulfur particle during occurrence of *Niga-shio* ("bitter tide") in Mikawa Bay.

UZAKI Naofumi*¹ and KAI Masanobu*²

Abstract: Oxygen-deficient waters sometimes upwell in coastal areas and this phenomenon is known as *Niga-shio* ("bitter tide") in Mikawa Bay. It occasionally causes damage to fisheries. Before and during occurrence of bitter tide, vertical distributions of water temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, hydrogen sulfide, and sulfur particles were measured in Mikawa bay. Before the occurrence of the bitter tide, it was observed that thermocline had been formed at a depth of about 6 m and hypoxic water mass had been developed below the thermocline. It was observed with the occurrence that the thermocline and the hypoxic water mass rose up to the surface. Results indicated that the rising distance of the thermocline was 5-6 m. Hydrogen sulfide was detected in the hypoxic water mass, and also rose up to the upper layer during the occurrence of the blue tide. Sulfur particles had dominantly existed in the layer of thermocline before the occurrence. On the other hand, during the occurrence, sulfur particles existed more widely from the surface to the bottom. And it was suggested that the change of sea water colour by occurrence of bitter tide caused not only by new formation of sulfur particles from hydrogen sulfide by autoxidation in surface layer, which had been inferred in previous studies, but also by transport of sulfur particles to the upper layer from the layer of thermocline.

キーワード；苦潮，三河湾，硫化水素，硫黄

夏から秋にかけての内湾沿岸域では、離岸風によって海底に形成されていた貧酸素水塊が表層にまでに湧昇し、海面が青白色から青緑色に変色する現象がみられる。これは三河湾では苦潮、東京湾では青潮と呼ばれている。苦潮の発生は水深の浅い海域にも貧酸素水や硫化水素をもたらす、浅瀬や干潟に生息する魚介類に悪影響を与える。

これまで苦潮に関しては、発生機構や生物への影響を調査した研究がいくつかなされている。しかし、苦潮の

発生に備えて観測船や様々な測定器具を調整しておくことは困難であるため、苦潮発生時の水質や化学的成分を調査した報告は少ない。本研究では、苦潮発生時の実海域において、水温、塩分、溶存酸素濃度、pH、硫化水素濃度、および硫黄粒子濃度について鉛直分布を調査し、苦潮発生前との比較から、苦潮発生海域の海況についていくつかの知見を得たので報告する。

*1 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

*2 愛知県栽培漁業協会 (Aichi Sea Farming Center, Atsumi, Aichi 441-3615, Japan)

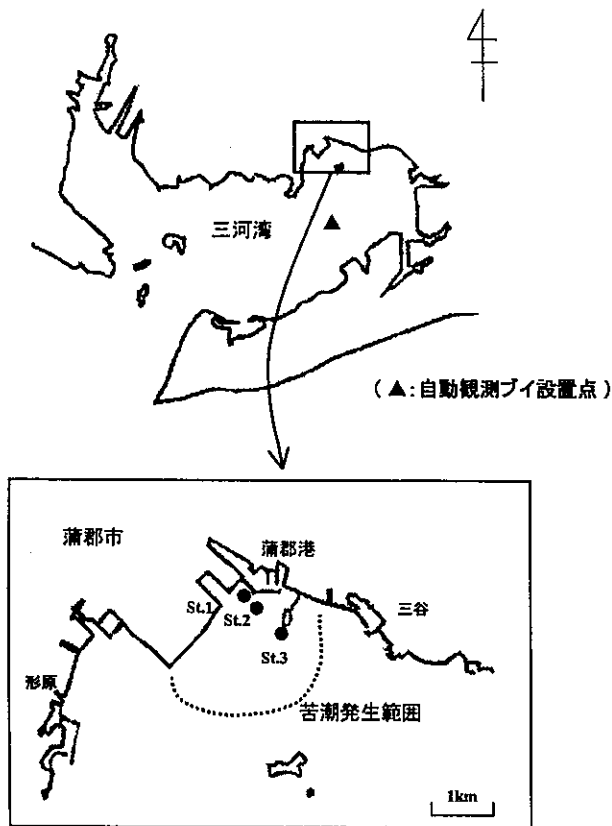


図1 苦潮発生範囲と観測点

材料および方法

三河湾奥部蒲郡地先に3点の調査地点を設けた(図1)。各調査点の水深は、St.1が約12.0m, St.2が約8.5m, St.3が約3.0mであった。これら調査地点では、St.1からSt.2にかけて蒲郡港への航路であるため海底が浚渫されて窪地となっており、海水が滞留し易く汚濁が進行しているため貧酸素水塊が発達しやすい。そのためこの付近では例年苦潮の発生が観測されている。

苦潮発生前の1998年8月10日の午前10時頃から午後0時頃に、そして苦潮が発生した1998年8月14日の午後1時頃から午後3時30分頃にかけてそれぞれ、水温、塩分、pH、溶存酸素濃度(DO)を観測し、硫化水素および硫黄粒子の定量のための採水を行った。水温塩分は、アレック電子社製水温塩分計(ACT 20-D)、pHは横河電機社製pHメーター(pH8111-J)、DOは飯島電子工業社製DOメーター(F-102)によりそれぞれ測定した。硫化水素濃度(硫化物イオン濃度)はJIS K1020(工業廃水試験)記載の方法^{*)}に従い、硫酸亜鉛固定-ヨウ素滴定法により定量した。硫黄粒子濃度は黒田らの方法^{*)}に従い定量した。即ち、海水250mlを採水後直ちにTOYO GA200 ガラスろ紙にてろ過し、実験室に戻った後恒温

乾燥機により60℃でろ紙を乾燥させた。続いて、乾燥したろ紙をn-ヘキサン50mlに浸漬し、超音波洗浄機により600kw, 25kHzで30分間振とうして分子状硫黄を抽出した。抽出された分子状硫黄は、分光光度計により波長276nmの吸光度を測定し、検量線より濃度を求めた。

また、調査期間中の風向、風速値は、三河湾奥部に設置されている自動観測ブイ(1号、図1)から愛知県水産試験場へ1時間毎に転送されているデータを使用した。

結果

1 苦潮発生前(1998年8月10日)

苦潮発生前の水温、塩分の観測結果とそれらから求めた σ_t の鉛直分布を図2にpH、溶存酸素濃度(DO)の観測結果を図3に硫化水素および分子状硫黄の定量結果を図4に各々●で示した。

これらの結果から、苦潮発生前はSt.1からSt.2にかけて水深約6m付近に躍層が形成されているのが認められる。即ち、水温、塩分は水深5mまでは大きな変動はなくほぼ一定の値であったが、水深6mからは水温が低下し塩分が上昇している。躍層下ではDOが急激に低下しており、無酸素の海水がSt.1からSt.2にかけての躍層に深に停滞しているのが確認できた。同様に、pHも躍層下で急激に低下する傾向がみられた。硫化水素はSt.1およびSt.2の躍層下に存在しており、硫化水素が存在し始める水深は海水が無酸素状態となりpHが低下し始める水深とほぼ一致した。また、硫化水素は水深が深くなるほど濃度が高くなっており、最も高い値はSt.1の底層で6.7 mg/Lであった。分子状硫黄はSt.1において躍層下に存在が確認され、躍層付近で最も濃度が高い特徴的な分布を示し、その最高値は水深7mにおいて0.6mg/Lであった。St.2でも、微量ながら躍層下に存在が確認された。

2 苦潮発生中(1998年8月14日)

苦潮発生前の状況を観測した8月10日から苦潮の発生が観察された1998年8月14日までの風向、風速の時系列変化を図5に示した。観測を行った10日から翌日の11日にかけて優勢であった南よりの風はその後風速を弱めて西よりに変わり、13日の19時頃から北西風が優勢になった。その後14日の6時には時間平均風速8.6 m/sを記録するなど、14日の15時頃まで時間平均風速5 m/sを越える北-西よりの風が吹き続けた。この風により、調査地点周辺の海域では14日の12時ころ苦潮の発生が確認され、その範囲は最高で1.1km×2.4km程度であった。その後この苦潮は、日没頃までは継続が確認されたが、

^{*)} 黒田伸郎・向井良吉・原保(1997)青潮(苦潮)海水中の分子状イオウの測定.1997年度日本海洋学会春期大会講演要旨集,pp177.

次の日には消滅していた。

苦潮発生中の水温、塩分の観測結果とそれらから求めた $\sigma-t$ の鉛直分布を図2にpH、溶存酸素濃度(DO)の観測結果を図3に硫化水素および分子状硫黄の定量結果を図4に各々○で示した。この結果から、苦潮発生中は躍層の位置が上昇しているのが確認された。DOをみると、無酸素の海水もSt.1およびSt.2において水深2m付近

にまで上昇しており、St.3の底層にも存在するようになっていた。同様に、硫化水素も検出される水深が上昇しており、St.3の底層でも検出できた。分子状硫黄も検出される水深が上昇していたが、より広い範囲で検出されたこと、St.2では表層から底層までほぼ全ての水深で検出されたこと、St.3の底層でも検出されたことなど、苦潮発生前とは異なる分布を示した。

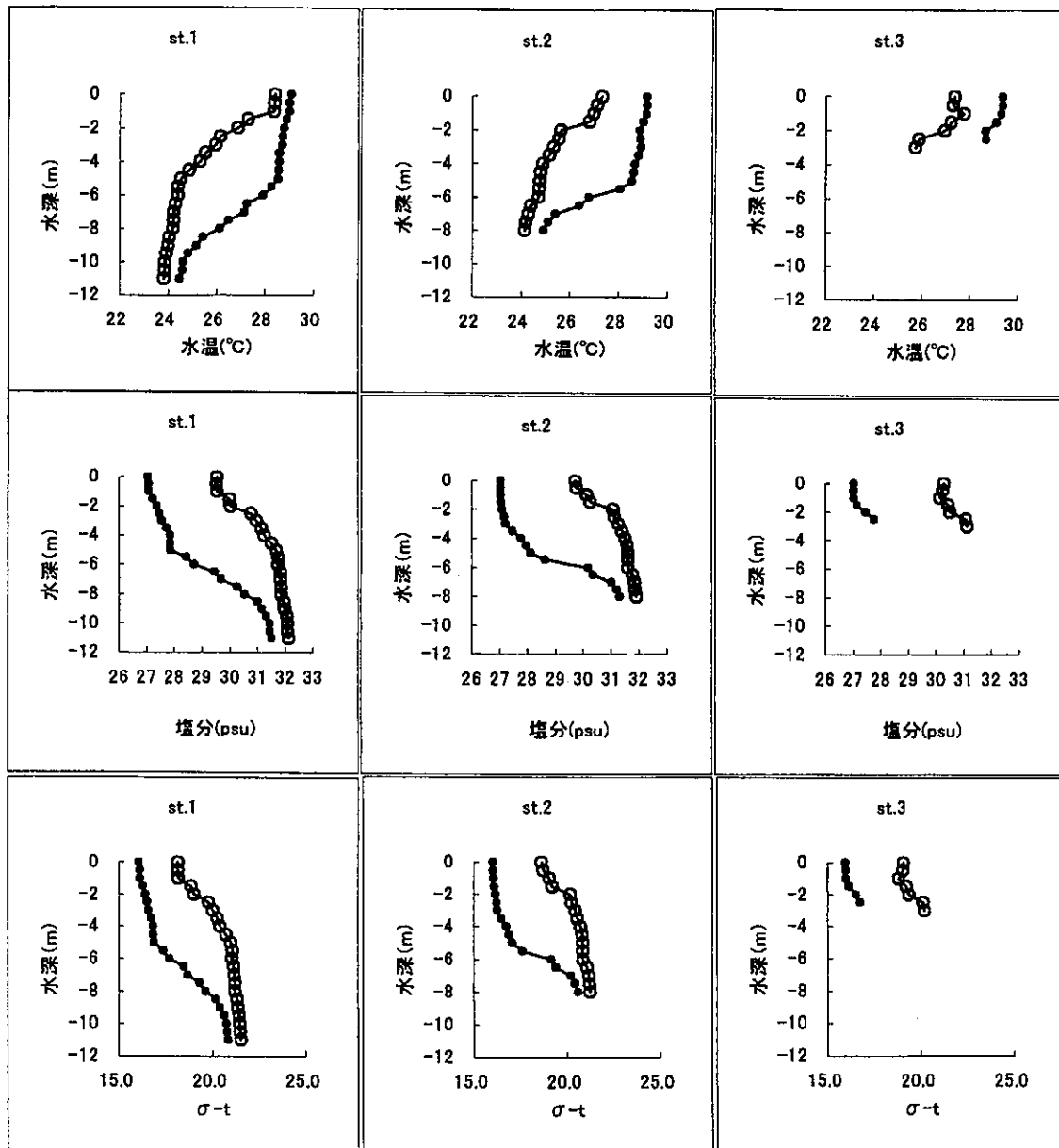


図2 苦潮発生前(1998年8月10日:●)と苦潮発生中(1998年8月14日:○)における水温、塩分、 $\sigma-t$ の鉛直分布
水深(10日), st.1:11.7m, st.2:8.4m, st.3:2.7m 水深(14日), st.1:11.9m, st.2:8.8m, st.3:3.2m

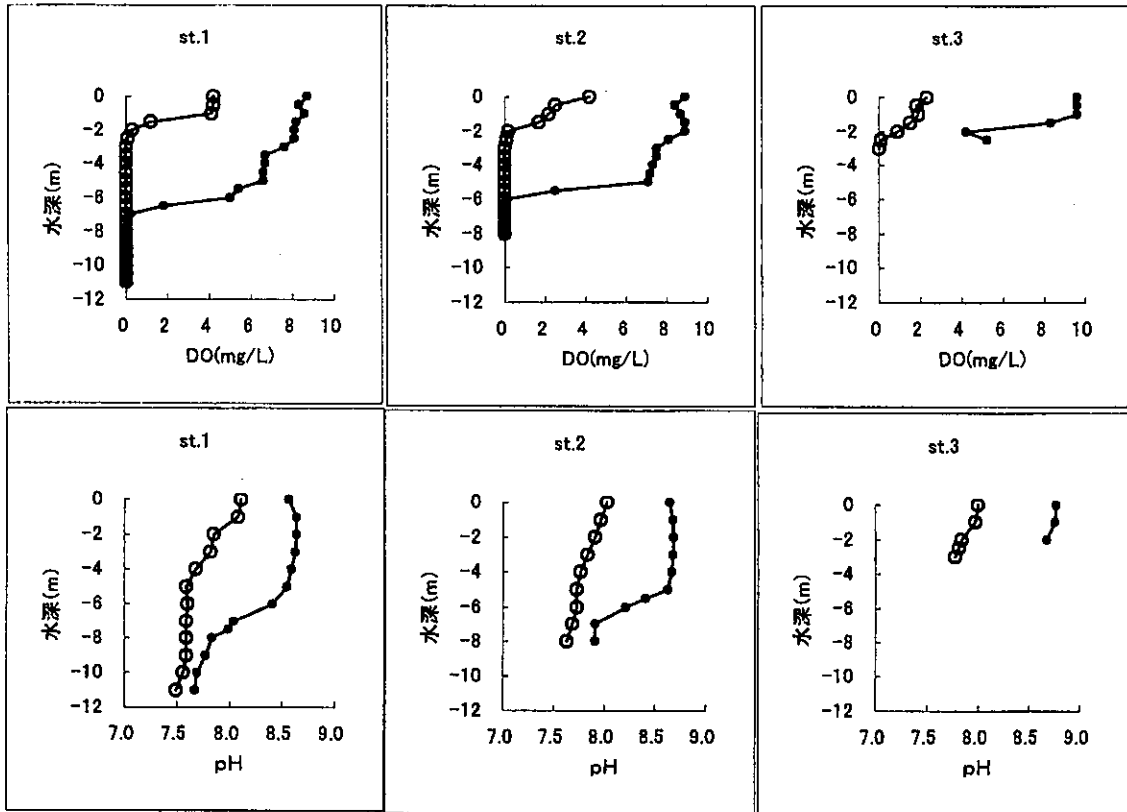


図3 苦潮発生前(1998年8月10日:●)と苦潮発生中(1998年8月14日:○)における溶存酸素濃度(DO)とpHの鉛直分布

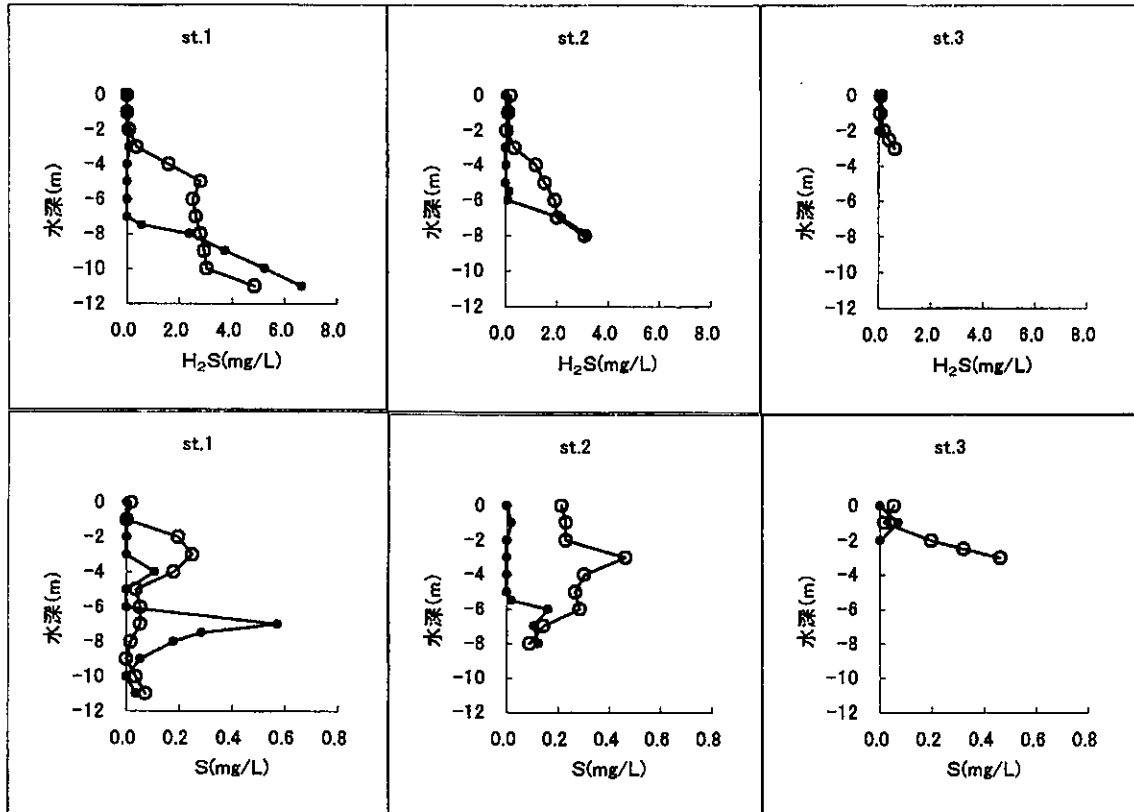


図4 苦潮発生前(1998年8月10日:●)と苦潮発生中(1998年8月14日:○)における硫化水素(H_2S)と硫黄粒子(S)の鉛直分布



図5 自動観測ブイにおける風向風速 (1998年8月10日-14日)

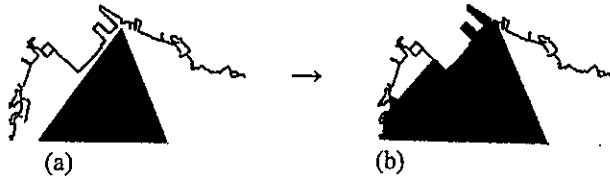


図6 苦潮発生に伴う貧酸素水塊の移動
 予想される苦潮発生前 (a) と苦潮発生中 (b) における貧酸素水塊の位置を影付きで示す。

表1 苦潮発生前と発生時における観測値の比較による躍層上昇距離の推定

躍層上昇距離(X)		+4m	+4.5m	+5m	+5.5m	+6m	+6.5m
水温	st.1	0.49	0.18	0.04	0.20	0.59	1.36
	st.2	1.12	0.68	0.41	0.60	1.33	2.71
塩分	st.1	1.23	0.82	0.45	0.19	0.11	0.22
	st.2	1.72	1.08	0.56	0.33	0.45	1.05
Sigma-t	st.1	1.03	0.60	0.26	0.10	0.16	0.47
	st.2	1.72	1.07	0.56	0.42	0.73	1.63

値は実測値との分散 (S²), 本文を参照, 太字は最小値

考 察

貧酸素水塊の出現が苦潮発生の前提と考えられるが、実際に苦潮発生状況の経年変化は貧酸素水塊発達状況の経年変化とよく一致することが示されている。²⁾ 本調査では、苦潮発生前のSt.1からSt.2にかけて水深約6m付近に密度躍層が形成され、躍層下には貧酸素水塊が停滞しているのが確認できる。そして、苦潮が発生した8月14日の調査結果からは全ての調査地点において躍層の位置が上昇しているのがみられた(図2, 3)。これは、北よりの風によって表層水が沖側(南方向)へ流れ去り、その補流により沖側底層の貧酸素水塊が岸側(北方向)に移動した結果であると考えられる(図6)。このことは東京湾において報告されてきた苦潮発生機構^{2), 4)}と類似している。実際には、苦潮発生時の観測点における貧酸素水は、沖側から移動してきたものであるが、その水質は発生前の観測点における水質とほぼ等しいと考え、次のような方法で躍層の位置が上昇した距離(X)を推定した。水温、塩分およびσ-tについて、苦潮発生前(10日)の観測値を水深Xm(X=4.5, 5, 5.5, 6, 6.5m)上昇させ、苦潮発生時(14日)における実測値との適合性を式(1)より調べた。

$$s^2 = \sum (a-b)^2 / n \dots \dots \dots (1)$$

- a : 苦潮発生前の観測値をXm上昇させた値
- b : aの値と同水深の苦潮発生時の観測値
- n : 比較した値の数

その結果、両値の分散 (s²) は、水温では5m, 塩分ではst.1において6m, st.2において5.5m, σ-tでは5.5mで最小であった(表1)。従って、躍層の位置は5-6m上昇したと考えられ、水温、塩分、σ-tについて、苦潮発生前(10日)の観測値を5.5m上昇させたものと苦潮発生時(14日)の観測値を重ね合わせたグラフ(図7)からも良好な適合性が伺えた。これより、苦潮発生時には上層の海水がほぼ全て沖側に流れ去り、躍層が表層にまで達していたと推測される。

硫化水素が生物に与える影響については、これまでに多くの実験結果が報告されている。そのうちアサリ(*Ruditapes philippinarum*)については、硫化水素濃度3.9mg/ℓでは、17-20℃で72時間後もへい死しない⁵⁾

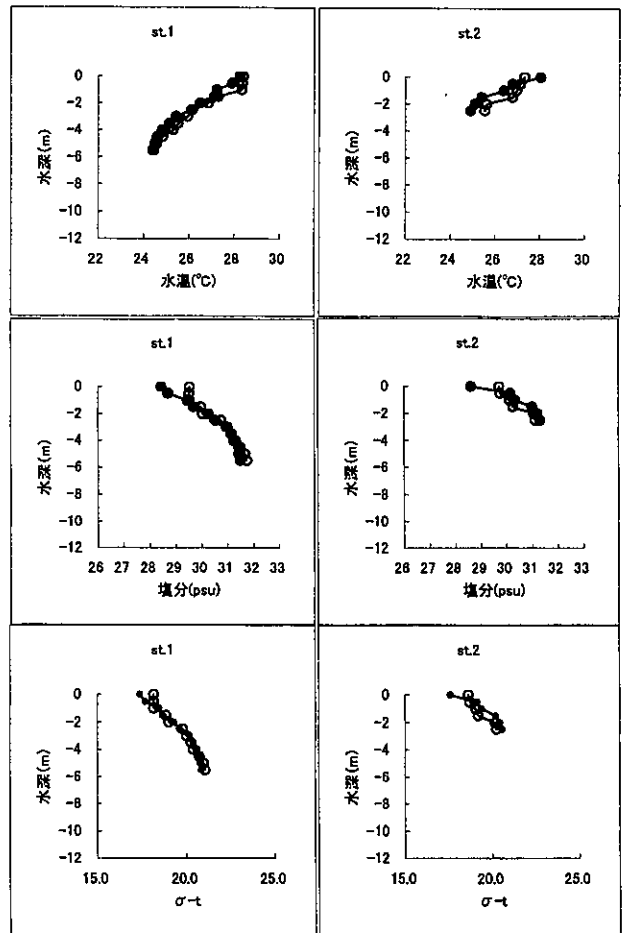


図7 推定された躍層上昇距離から予測される苦潮発生時の鉛直分布と実測値の鉛直分布
 ●: 苦潮発生前(10日)の観測値を5.5m上昇させたもの
 ○: 苦潮発生時(14日)の観測値

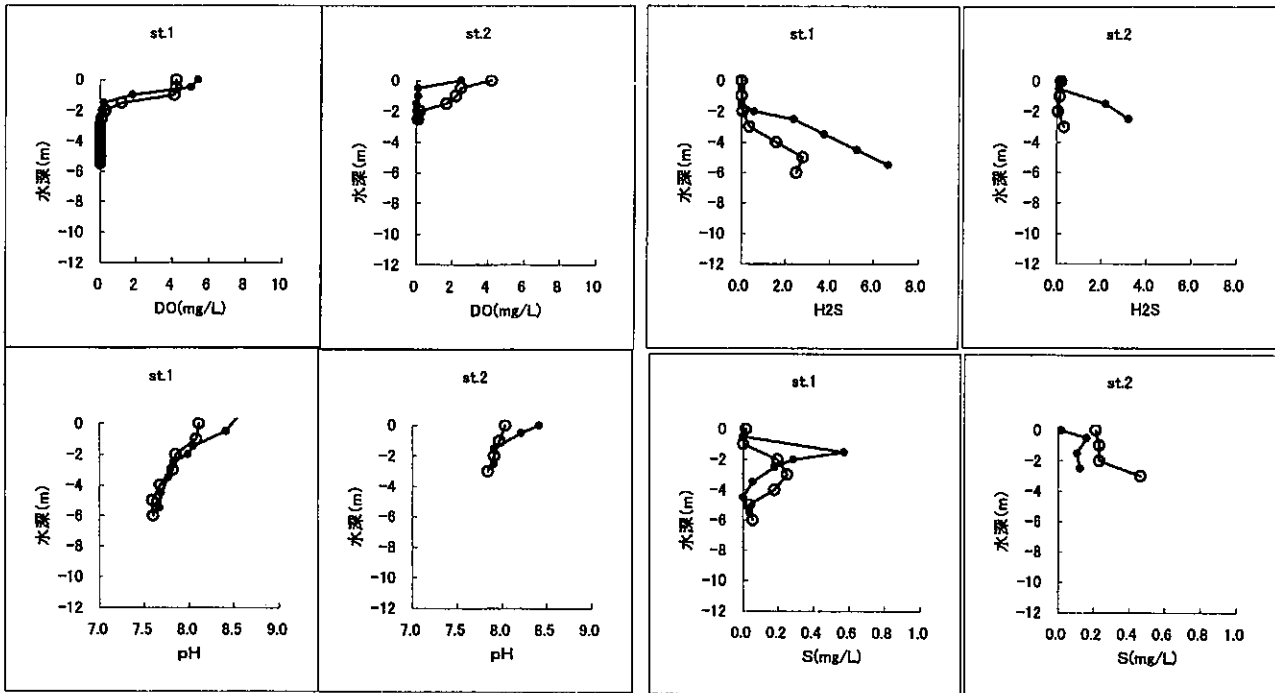


図8 推定された躍層上昇距離から予測される苦潮発生時の鉛直分布と実測値の鉛直分布

●：苦潮発生前(10日)の観測値を5.5m上昇させたもの
○：苦潮発生時(14日)の観測値

という報告がある一方で、濃度 $3.7\text{mg}/\ell$ でDOが0%であれば、 20°C で72時間後に80%がへい死する⁶⁾と報告されるなど、生物の状態やDOの条件によって、その影響は大きく異なると考えられる。しかし他の生物に関しては、シズクガイ (*Theora fragilis*) の50%致死時間は濃度 $0.4\text{mg}/\ell$ で23時間であること、⁷⁾ ガザミ (*Portunus trituberculatus*) 幼生48時間後の生存率が濃度 $0.005\text{mg}/\ell$ において55%であること⁸⁾等の報告があり、水産用水基準の硫化水素の基準値は $0.001\text{mg}/\ell$ と定められている。⁹⁾ これらのことから、本調査における底層の硫化水素濃度(図4)は、明らかに底棲生物の生存を妨げていると考えられる。また図4は、苦潮の発生に伴って硫化水素含有海水が生物層の豊富な水深の浅い海域へ移動することを示している。

本調査の結果から、苦潮発生前と苦潮発生中の海域における硫黄粒子の存在が明らかとなった。まず、苦潮発生前には、躍層付近に局在する特徴的な鉛直分布で硫黄粒子が存在していることが示された(図4)。この硫黄粒子の生成機構としては、次の2つの可能性が考えられる。①貧酸素水塊は躍層付近において酸素の豊富な海水と接しており、ここで硫化水素の自動酸化が起こっている。②貧酸素水塊中の特に上層部に存在するという光合成硫黄細菌¹⁰⁾ *4)の生物活動によって硫化水素から生成す

る。硫黄粒子の生物に対する毒性は明らかではないが、いずれの機構により生成したとしても、硫化水素に起因しているのであれば、この硫黄粒子の生成は苦潮の発生以前に貧酸素水塊から有毒な硫化水素を消費する重要な現象であると考えられる。一方、苦潮発生時には、表層から底層まで広い範囲で硫黄粒子が存在することが確認された(図4)。これまでの報告では、苦潮発生時には貧酸素水の湧昇に伴う硫化水素の自動酸化により表層で硫黄粒子が生成し、さらに酸化が進むと硫黄の重合体であるポリスルフィドが形成され、これらが苦潮の有色に関与する¹¹⁾と推測されてきた。DO、pH、硫化水素、硫黄粒子について、苦潮発生前(10日)の観測値を5.5m上昇させたものと苦潮発生時(14日)の観測値を重ね合わせたグラフを図8に示す。これを見るとst.2では、苦潮発生時の表層付近の硫化水素濃度は、躍層上昇距離から予測される濃度よりも低く、また、硫黄粒子濃度は逆に高くなっている。このことは、本調査においてもこれまでの推測どおり、硫化水素の自動酸化によって表層付近で硫黄粒子が生成していた可能性を示している。また、苦潮発生時の観測中に海上で硫化水素臭がしたにもかかわらず、海水からは硫化水素はほとんど検出されず、硫黄粒子が検出されたこともこの可能性を支持していると考えられる。ただし、前述のとおり水温、塩分の

*4) 平石明・北村博・太田一之・寒川強・鬼塚正光(1985)東京湾の青潮に関する研究,その3,青潮のバクテリア.1985年度日本海洋学会春期大会講演要旨集,pp254.

鉛直分布から、今回の苦潮では海水の移出入により、結果的に躍層の位置は5-6m上昇したと考えられ、苦潮発生時に表層付近で検出された硫黄粒子は、躍層付近に存在していた硫黄粒子が表層に運ばれたものが含まれると考えられる。よって本調査の結果は、苦潮発生時に存在する硫黄粒子は、従来考えられてきた生成過程によるものに加えて、苦潮発生の初期においては、発生以前から躍層付近に局在していた硫黄粒子にも由来する可能性を示唆している。

これまでの苦潮に関する報告によると、東京湾では、底層水の流程距離が解析された結果、漁業に大きな被害を与えるような苦潮の発生源は航路筋や浚渫窪地ではなくて湾中央部に大きく広がる貧酸素水塊であると推測されている。^{11), 12)} 三河湾においても過去の事例をみると、航路筋や浚渫窪地とは明らかに関係のない海域にも多くの漁業被害が発生している。よって、航路筋を調査点とした本調査が三河湾における代表的な苦潮現象を観測しているとは断言できない。しかし、化学的成分の消長にはどのような苦潮にも共通した部分があると考えられることから、本調査の結果は苦潮による生物被害の対策を考える上で重要な基礎資料になると思われる。今後さらに有益な知見を得るためには、貧酸素水塊の上昇から苦潮の消滅まで、関連項目の変化を時系列に追跡する、より詳細な観測が必要であろう。

要 約

海面が青白色に変色する苦潮は夏から秋にかけての内湾沿岸域に発生し、魚介類に悪影響を与える。本研究では、苦潮対策の基礎資料を得るため、三河湾において苦潮発生前後の海洋構造と硫化水素および硫黄粒子の鉛直分布を調査した。その結果、苦潮発生直前の観測点には水深約6mに躍層が形成され、底層には貧酸素水塊が停滞しているのが観測された。苦潮の発生に伴って躍層の位置は上昇し、上昇距離は5-6mと推定された。貧酸素水塊中には生物に有害な濃度の硫化水素が存在していた。苦潮発生時に存在する硫黄粒子は、発生前の躍層付近に局在する硫黄粒子の表層への上昇と、湧昇した硫化水素の自動酸化に起因することが示唆された。

謝 辞

本稿を取りまとめるに当たり、中央水産研究所海洋生産部佐々木克之博士、並びに愛知県水産試験場漁場環境研究部鈴木輝明博士に有益なご助言をいただきました。また、自動観測ブイデータの作図にあたっては、同漁場環境研究部青山裕晃技師にご協力いただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 日本規格協会(1998) 硫化物イオン. 詳解工業排水試験方法. 日本規格協会, 東京, 257-265.
- 2) 石田基雄・原保(1996) 伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について. 愛知県水産試験場研究報告, 3, 29-41.
- 3) 柿野純・松村皐月・佐藤善徳・加瀬信明(1986) 風による流れと青潮の関係. 日本水産学会誌, 53(8), 1475-1481.
- 4) 松山優治・当麻一良・大脇厚(1990) 東京湾の湧昇に関する数値実験. 沿岸海洋研究ノート, 28(1), 63-74.
- 5) 柿野純(1982) 青潮によるアサリへい死原因について. 千葉県水産試験場研究報告, 40, 1-6.
- 6) 萩田健二(1985) 貧酸素水と硫化水素のアサリのへい死に与える影響. 水産増殖, 33(2), 67-71.
- 7) 玉井恭一(1994) シズクガイの硫化水素耐性. 日本ベントス学会誌, 46, 41-48.
- 8) 姜柱賛・松田治・山本民次(1993) 広島湾の貧酸素と硫化水素がガザミ幼生の初期発達段階に及ぼす影響. 広島大学生物生産学部紀要, 32, 61-70.
- 9) 日本水産資源保護協会(1995) 硫化水素. 水産用水基準(1995年版), pp52.
- 10) 畑幸彦(1974) 硫黄サイクルと微生物の関連. 海洋微生物. 海洋学講座11, 多賀信夫編, 東京大学出版会, 東京, 187-204.
- 11) 太田一之・寒川強・鬼塚正光・富永衛(1987) 東京湾の青潮における光学特性. 公害, 22(6), 23-30.
- 12) 佐々木克之(1993) 東京湾の青潮の形成機構. 海洋と生物, 15(4), 249-254.

