

有明海奥部における貧酸素水塊の動態に関する現地観測

深山顕寛*・磯部雅彦**・鯉渕幸生***

本研究では、有明海における貧酸素水塊の形成および消滅過程を明らかにするため、多項目の水質観測結果および流動の長期連続観測結果を統合的に解析することにより、貧酸素水塊発生や消滅のプロセスを気象・流動・水質との関係を検討した。過去 4 年間の観測結果から、貧酸素水塊が発生するプロセスにおいて、密度成層の影響が大きいこと、また密度成層が崩壊に伴って底層 DO が回復するプロセスを示した。さらに諫早湾の表層の塩分低下とそれによる成層化に関して調整池からの排水よりも、筑後川の影響が支配的であることが明らかになった。

1. 序 論

2000年に発生した大規模なノリの色落ちは大きな社会問題に発展した。このことを受けて有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会（通称ノリ不作第三者委員会）が設置され、近年の、有明海における漁業を取り巻く環境が大きく変化し、実際にアサリやタイラギ等の二枚貝が減少していることや、この主要原因の 1 つが底層の貧酸素水塊の形成であることが確認された。貧酸素水塊については、佐藤ら（2001）をはじめ、多くの観測が実施され、小潮時に貧酸素水塊が発達すること等が報告されている（中山ら、2003, 2004）。しかし、観測事例が揃っていないため、貧酸素水塊の形成消滅過程が未だ十分に解明されていない。そこで本研究では、これらのプロセスを詳細に検討することを目的に、2001年から 4 年間に渡って行った水質の連続観測結果（鯉渕ら 2002, 2003）や 2004 年夏に行った流動の連続観測結果（鯉渕ら、2005）、さらに九州農政局が行った水質の連続観測結果を統合し、有明海奥部における貧酸素水の発生消滅過程の要因について検討を行った。

2. 観測方法

分析に使用した水質の観測地点は図-1 に示す有明海奥部に設置された観測槽 B6 と四本鋼管の 2 地点である。B6 は 2001 年 7 月から 2004 年 10 月、四本鋼管は 2004 年 5 月から 2004 年 8 月を対象とした。B6 での観測には自記式の水質計を使用し、海底から槽に立ち上げたワイヤーにセンサーを固定する方法で海底上 0.5 m, 5 m, 10 m において、また浮体を用いて水面下 0.5 m の深度で測定を行った。四本鋼管でも同様の観測方法で、海底上 0.5

m, 3 m, 水面下 0.5 m で DO, クロロフィル a, 水温, 塩分, 濁度を計測した。測定時間間隔は、両地点ともに 10 分である。

また流速の観測に関しては、水質観測と同様の 2 地点に ADCP を設置し、海底面上から海面までの鉛直的な多層の流向流速を、10 分間隔で昼夜連続観測した。B6 では 2004 年 5 月から 2004 年 8 月の 4 ヶ月間、四本鋼管では 2004 年 5 月から 2004 年 11 月の 7 ヶ月間観測を行った（観測の詳細については鯉渕ら（2005）を参照）。

さらに、九州農政局より図-1 に示す有明海奥部に設置された観測槽 B3, B4, B5, B6, S1, S6 の地点で自動昇降装置により測定された水質（DO, クロロフィル a, 水温, 塩分, 濁度）観測結果を分析に用いた。



図-1 現地観測地点

* 非会員 修(環) 元東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

** フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

*** 正会員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

3. 現地観測結果と考察

本研究においては貧酸素水塊を、溶存酸素 (DO) が 3 mg/l 以下として検討を行った。2001年と2002年の観測結果に関しては鯉渕ら (2002, 2003) により報告されており、ここでは2003年と2004年に観測された代表的な結果を以下に示す。

(1) 2003年のS1地点の観測結果

図-2は潮受け堤防北側のS1地点に設置してある観測槽で測定された2003年7月1日から8月1日までの水質測定結果の時系列である。上から順に全天日射量、降水量、密度、上下層の水温、塩分、表層のクロロフィル a、底層の DO である。全天日射量と降水量は佐賀気象台における測定結果を用いた。

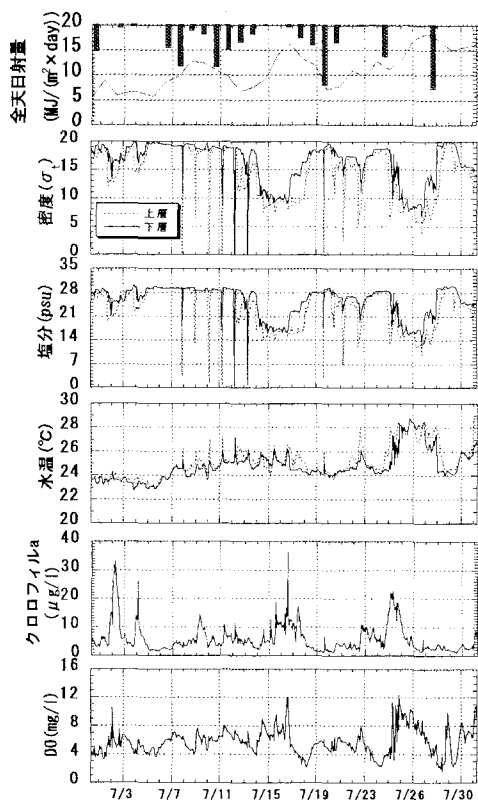


図-2 2003年7月の水質の時系列 (上から順に佐賀気象台の全天日射量、佐賀気象台の降水量、S1の密度、S1の表層のクロロフィル a、S1の底層の DO)

この図から2003年は貧酸素水塊として7月17日から7月27日の間 DO が 3 mg/l 以下の値を4期間記録した。7月は降雨のない日がのべ9日で、総降水量は415 mmであった。2001年、2002年と同様に降雨後、筑後川等の淡水が諫早湾に流入し、上層の塩分が最大で13 psu ま

で低下した。上層と下層の塩分差は最大で14 psu あり、7月中塩分の差が記録され、塩分躍層が形成していた。ほとんど毎日降雨があったため、7月全天日射量平均は2001年、2002年に比べて小さく $11.5 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ であった。全天日射量が小さかったので上層の水温は2001年、2002年に比べて低く、最高で 28°C であった。また塩分ほど顕著ではないが水温成層が形成されていた。この塩分と水温の成層形成のため、安定した密度成層が形成されていたと考えられる。成層が形成されている期間には底層の溶存酸素の低下が起り、貧酸素水塊が形成されることも観測された。

(2) 2004年の四本鋼管地点の観測結果

図-3は四本鋼管において測定された2004年8月1日から8月25日までの水質測定結果の時系列である。上から順に風速ベクトル、四本鋼管における密度、塩分、水温、底層の DO、潮位を示す。風速ベクトルは佐賀気象台での測定結果、潮位は大浦での測定結果である。

海底の DO は、密度の中層と底層の差が大きくなり始めると、次第に減少し始める。そして8月10日には生物の生息に影響を与えるとされる 3 mg/l に達し、8月12日まで減少し続けた。中層と底層の間に成層が形成さ

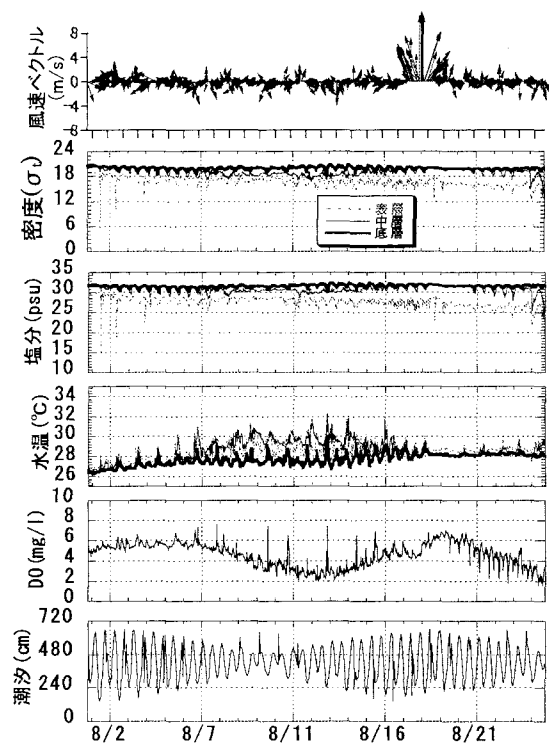


図-3 2004年8月の水質の時系列 (上から順に佐賀気象台の風速ベクトル、四本鋼管の密度、四本鋼管の塩分、四本鋼管の水温、四本鋼管の DO、大浦の潮位)

れたことで、表層からの酸素供給が抑制されたことが要因だと考えられる。また別の期間とこの期間を比較すると、大潮から小潮時にかけて、底層の貧酸素化が起る傾向や、逆に小潮から大潮時にかけて DO が上昇する傾向もみられた。そこでこれらの時期における流速の鉛直速度勾配を検討した（図-4）。白抜きの所が上下の速度差が大きいことを表している。8月12日には底層から表層にかけて全体的に鉛直速度勾配が大きい。上下で速度がある程度異なると、水塊が乱され混合する要因になる。そしてこの影響が徐々に効いてくることで、上げ潮時の8月12日から8月17日にかけて成層が破壊され、8月18日には密度差がなくなったと予想される。これに対応するように8月12日以降 DO が上昇している（図-3）。

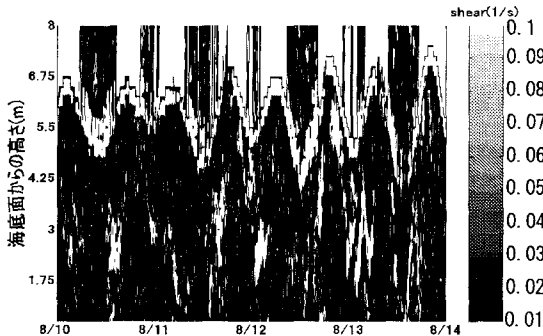


図-4 四本鋼管における流速の鉛直速度勾配の時系列

(3) 2004年の諫早湾の観測結果

同様の現象は諫早湾においても観測され、2004年の夏季には底層の DO が減少する現象が数回発生した。7月は降雨が少なく、総降水量は176 mm であり、2001年、2002年、2003年と比べて一番値が小さかった。また2004年は7月中旬に、強い南風が連吹した。そのために表層の塩分の顕著な低下が見られず、際立った塩分層の形成もなかった。他方水温に関しては、7月の全天日射量の平均は、2001年、2002年、2003年に比べて大きく、月平均で $19 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ であった。そのため上層の水塊は、強く加熱された。風速が大きい水塊が乱され、大きな水温差はできていなかったものの、弱い水温成層は残った。その結果、上層と下層の密度差は小さいものの弱い成層が形成され、DO の低下が起こった。

(4) 2003年の B6地点の観測結果

図-5 は観測槽 B6 における2003年8月14日から9月15日の観測結果である。8月14日から9月15日にかけて DO の値が時間と共に下がっていく傾向が捉えられている。また同時に水温成層が形成され、この成層により底層の貧酸素化が進行している。また8月25日の水温にお

いて上層と下層の水温がほぼ等しくなっている。しかしこれは成層が崩壊したわけではない。すなわち底層の DO は一旦上昇するが、上層と下層の水温に差ができると同時に底層 DO が低下している。これは内部セイシュによって説明される。そして界面が振動しながらも、底層の水塊では酸素が消費され、DO は徐々に低下していると考えられる。したがって、セイシュにともなって往復運動する間にも、DO が徐々に低下し、貧酸素水塊が観測されたと考えられる。

次に底層 DO と風との対応を検討する。8月24日から8月27日は南風が卓越し、このとき底層 DO は下降傾向にあり、8月27日に北風が吹き、底層 DO は上昇傾向になる。8月28日から9月4日まで南風が卓越し、底層 DO は下降傾向に進行し長期間貧酸素水塊を形成する。9月4日から9月6日にかけて北風が吹き底層 DO は上昇傾向になる。9月6日以降様々な方向に吹いたために、変動を繰り返す。ついに、9月14日に強い南風により成層が崩壊している様子がわかる。

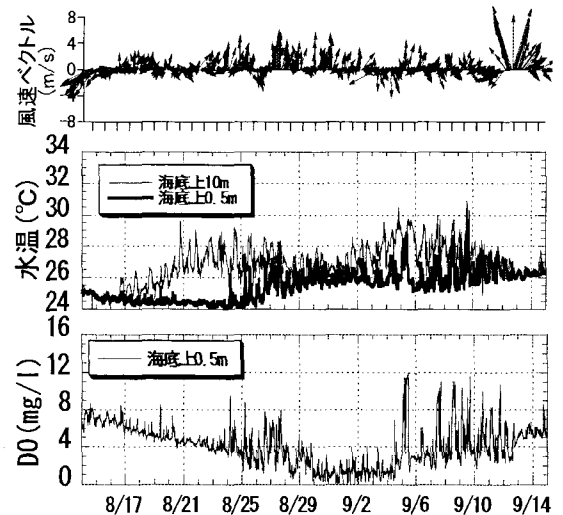


図-5 2003年 B6 の水質の時系列（上から佐賀気象台の風速ベクトル、B6 の水温、B6 の底層の DO）

以上により、北風が吹くと、底層に DO の高い外海水が流入することにより底層 DO が上昇し、南風が吹くと、湾奥の DO の低い海水が流入することにより底層 DO が下降するという、内部セイシュが捉えられ、さらに強風が吹くことにより成層が崩壊の様子が捉えられた。

4. 有明海湾奥における貧酸素化の特徴

(1) 密度成層への水温と塩分の寄与率

貧酸素化に深く関係する密度成層に対する塩分および水温の寄与率を調べる。ここで塩分・水温の寄与率は

① 塩分の影響を算定するため、水温は表層と底層の平均値、塩分は観測値を用いて密度差を算定。密度を求める際にはクヌーセンの式を用いた。

② 水温の影響を算定するため、水温は観測値、塩分は表層と底層の平均値を用いて密度差を算定。

クヌーセンの式を用いた上記の①および②の計算値を基に、①+②は、水温と塩分が同時に変化した場合の密度変化にほぼ等しいので、

$$\text{塩分の寄与率} = \text{①} / (\text{①} + \text{②}) \times 100$$

$$\text{水温の寄与率} = \text{②} / (\text{①} + \text{②}) \times 100 \text{ として求めた。}$$

表-1 に分析期間を図-6 に上記の方法で算定した結果を示す。この図から密度差への寄与は、塩分差の方が50～70%と大きいことがわかる。また表-1 は図-6 の観測番号と観測地点および観測日の対応表である。この結果からほとんどの、塩分の寄与分50～70%であることがわかり塩分差の影響が大きいことがわかった。

表-1 分析に使用した観測期間

観測点	年	月日	観測番号 (図-6 の番号)
B3	2002	7/3-7/6	1
		8/2-8/6	2
	2003	8/23-8/31	3
		9/3-9/6	4
	2004	7/27-7/29	5
		8/13-8/16	6
B4	2002	8/2-8/7	7
		8/16-8/23	8
	2003	8/25-8/31	9
		9/1-9/7	10
	2004	7/27-7/30	11
		8/10-8/16	12
B6	2004	7/12-7/18	13
		7/22-7/31	14
		8/10-8/18	15
		8/22-8/26	16
S1	2003	8/22-8/23	17
S6	2004	7/10-7/11	18
		8/15-8/15	19
四木鋼管	2004	8/10-8/14	20

(2) 諫早湾内の表層塩分低下に関する淡水供給源

図-7 は筑後川河川流量と諫早湾内の観測地点 B3 (湾口)、B4 (湾央)、S1 (湾奥) における2003年の塩分時系列である。河川流量が600 m³/s 程度あると約2日後に、1200 m³/s 程度あると約1日後に B6や B4の塩分が低下する傾向が見られ、低塩分状態は数日間持続していることが分かる。鯉渕ら (2003) の2002年における観測結果と同様の現象が観測された。

また図-8 は諫早湾奥の南排水門の排水量と観測槽 S6 における2004年の塩分時系列である。調整池から排水されると、直後に塩分が低下するものの、数時間で回復し

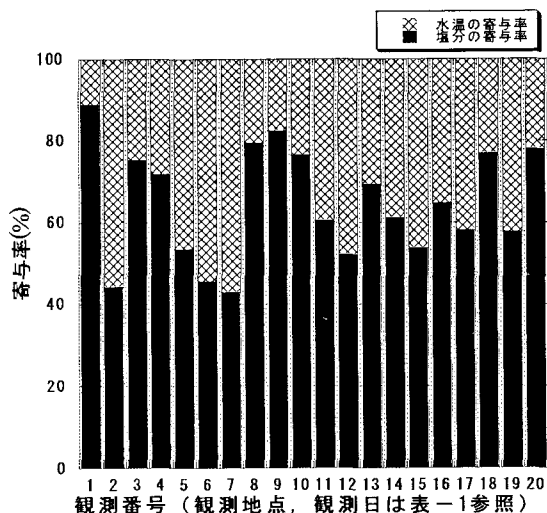


図-6 密度成層への水温と塩分の寄与

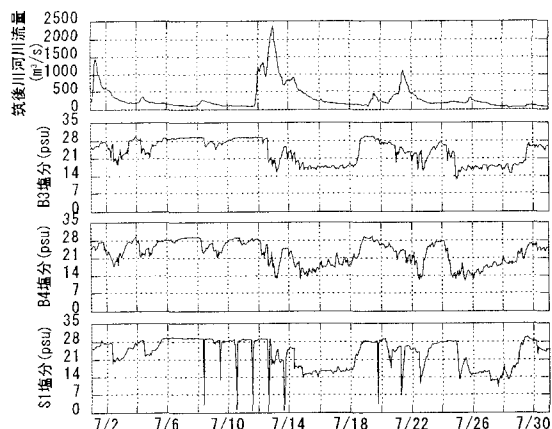


図-7 2003年の筑後川河川流量と塩分の時系列 (上から筑後川河川流量, B3, B4, S1の塩分)

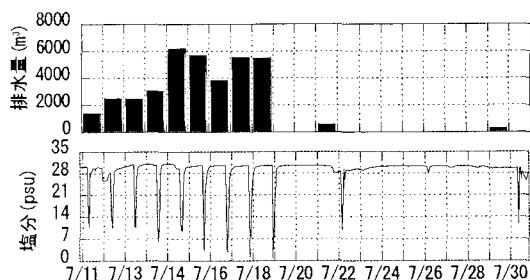


図-8 南門排水排水量とS6の塩分の時系列

ており、筑後川が流入した際の塩分低下と比較して、期間が圧倒的に短いことが分かる。以上のことより継続的な塩分成層の形成に対しては、筑後川の流量の方が排水門の排水よりも大きな影響を与えているといえる。

5. 成層崩壊過程

次に成層の崩壊過程について、B6における2004年7月1日から7日を対象に検討を行った。図-9は、上から順に底層のDO、佐賀気象台における風速ベクトル、密度、流速の鉛直速度勾配とバイサラ角周波数の時系列である。

7月2日、3日において南風が吹き始めると、湾奥からDOの若干小さい海水が底層に流入するという内部セイシュが観測された。これは2日、3日の流速の鉛直速度勾配が明瞭に残っていることから理解できる。そして3日には、鉛直混合によって成層が崩壊し始めるのに対応して、流速の鉛直速度勾配が大きくなる深さが次第に下方に移動し、それに対応して底層DOが上昇した。4日以降は強い南風が連吹し、成層が弱まったこともあ

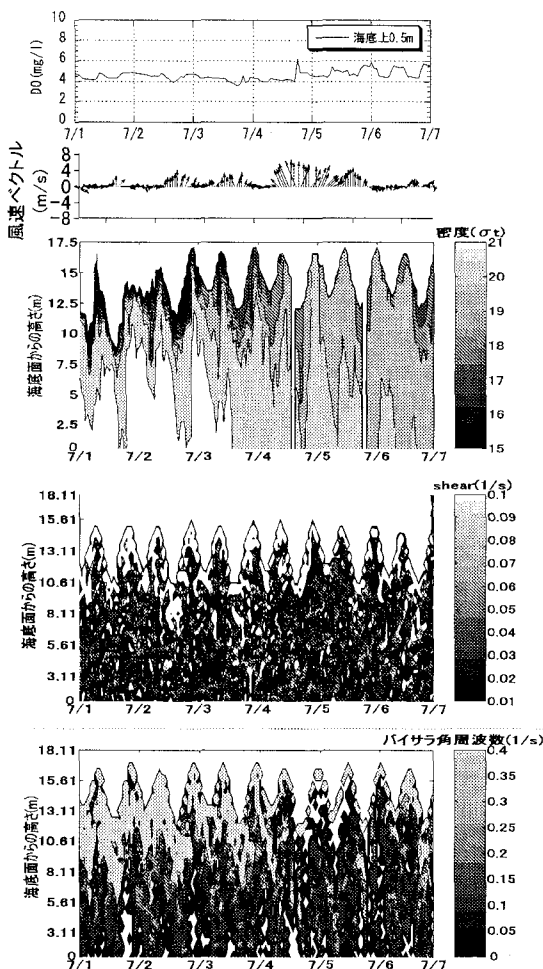


図-9 B6における2004年7月初旬のDO、風速ベクトル、密度、流速の鉛直速度勾配とバイサラ角周波数の時系列

り、全層で流速の鉛直速度勾配の値は小さくなった。そして鉛直混合がほぼ完了し、密度勾配が小さくなった。これは、バイサラ角周波数の減少につながり、したがって不安定な状態で混合を維持し、底層DOも高い値を保つことになる。

6. ま と め

過去4年間における現地観測結果を統合的に分析した結果、筑後川から淡水が諫早湾に流入し、表層の塩分低下により密度成層が発達し、貧酸素水塊が発生することが示された。また、貧酸素水塊の消滅の過程として、南の弱風の変動により内部セイシュが起こって水塊が振動し、強風になって連吹すると流速の鉛直速度勾配が短期間に下降し、鉛直混合が起こることが明らかになった。この際、混合が完了すると、密度差がなくなり不安定な状態で混合状態を維持し、底層DOが高濃度に保たれることが明らかになった。また密度成層の形成要因として、塩分差の寄与分が50~70%であることから、塩分差の影響が大きいことがわかった。そして塩分差のできる要因として、諫早湾においては排水門からの排水の影響よりも、筑後川の影響の方が大きいことがわかった。

謝辞：九州農政局には諫早湾の観測データの提供を受けた。また国土交通省には筑後川河川流量データの提供を受けた。本研究の一部は、科学研究費若手研究B（課題番号：16760403，研究代表者：鯉淵幸生講師）の補助を受けて実施したものである。ここに示して謝意を表します。

参 考 文 献

- 梶原義範・富田友幸・中野拓治・磯部雅彦(2003)：有明海湾奥西部海域における2002年夏季の貧酸素水塊の発生状況について，土木学会論文集 No. 747/II-65, pp. 187-196.
- 鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2002)：2001年の有明海における水質の動態解明，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1056-1060.
- 鯉淵幸生・佐々木淳・有田正光・磯部雅彦(2003)：有明海における水質変動の支配要因，海岸工学論文集，第50巻，pp. 971-975.
- 鯉淵幸生・藤田昌史・阿部哲也・磯部雅彦(2005)：有明海奥部の底性微生物群集構成に及ぼす物理環境の影響，海岸工学論文集，第52巻，(印刷中)。
- 佐藤正典・東幹夫・佐藤慎一・加藤夏絵・市川敏弘(2001)：諫早湾・有明海で何がおこっているのか？，化学，第71巻，No. 7, pp. 882-894.
- 中山哲蔵・佐伯信哉・時吉学・木元克則(2003)：有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査，海岸工学論文集，第50巻，pp. 976-980.
- 中山哲蔵・佐伯信哉・木元克則(2004)：諫早湾での夏季における流動，成層安定性と底層の溶存酸素の関係，海岸工学論文集，第51巻，pp. 906-910.