特定非営利活動法人有明海再生機構

有明海環境Q&A

Q5. 貧酸素水塊の発生

Q5-1.DOとは何ですか?

Q5-2.貧酸素水塊とは何ですか?

Q5-3.貧酸素水塊はどのように発生するのですか?

Q5-4.成層化とはどういう状態ですか?

Q5-5.成層の強弱はどのように表されるのですか?

Q5-6.長期的に成層化を強める要因にはどのようなものがありますか？

Q5-7.有明海における貧酸素水塊はどのように発生するのですか?

Q5-8.エスチュアリー循環とは何ですか?

Q5-9.有明海の貧酸素水塊はいつ、どこで発生するのですか?

Q5-10.有明海ではいつ頃から貧酸素水塊が発生するようになったのでしょうか?

Q5-11.貧酸素化は有明海にどのような影響を与えているのですか?

Q5-12.有明海の貧酸素化を防ぐには、どのような対策が有効だと考えられていますか?

Q5：貧酸素水塊の発生

Q5-1：DO とは何ですか？

A5-1：溶存酸素 (Dissolved Oxygen：DO) のことです。

水の中には酸素が溶けていて (溶存)、水中の生物は鰓 (えら) などで酸素を取り入れて生命を維持しています。どの程度の酸素が水中に溶けているかで、水中の生物が生存し易いかどうかが決まるので、海の環境を考えるときの最も重要な指標です。

溶存酸素濃度の表し方として２つの方法があります。１つは１ℓにどれくらいの酸素が溶けこんでいるかを示す方法です。さらに何㎎の酸素が溶け込んでいるか (mg/l) で表す方法と、何 ml の酸素が溶け込んでいるか (ml/l) で表す２つの方法があります。もう１つは、現在溶け込んでいる酸素量が、今の状態の水に溶けこむことができる最大の溶存酸素濃度 (飽和酸素濃度) に対する百分率で表す方法があります。その指標を飽和度と呼びます。

$$\text{飽和度} = \frac{\text{現在の酸素濃度}}{\text{飽和酸素濃度}} \times 100\ (\%)$$

飽和酸素濃度 (酸素がどの程度水中に溶けることができるか) は、温度や塩分の濃度で異なります。下の表は蒸留水中及び海水中にどの程度の酸素が溶け込めるかを示したもので、１ℓに何㎎の酸素が溶け込めるかで表しています (mg/l)。水の温度が上昇すると溶け込むことができる酸素の量は次第に減少しますし、塩分濃度が上昇しても飽和酸素濃度は減少します。水温が高くなって酸素濃度が減少し、魚が水面近くでパクパクしているのは、溶存酸素が少なくなったからです。

飽和酸素濃度は窒素と酸素がほぼ４：１の大気圧中での値ですから、水中で水草やプランクトンなどが光合成を行うと水中に酸素が増えて過飽和の状態になることがあります。

t℃	蒸留水中の飽和酸素濃度 ㎎ / ℓ	海水中の飽和酸素濃度㎎ / ℓ 海水中の塩分濃度				塩化物イオン 100㎎ / ℓ（100ppm）毎に減ずべき溶存酸素量
		20%	25%	30%	35%	
5	12.37	10.78	10.38	9.99	9.59	0.013
10	10.92	9.55	9.21	8.86	8.52	0.011
15	9.76	8.56	8.26	7.96	7.66	0.010
20	8.84	7.80	7.54	7.28	7.02	0.009
25	8.11	7.15	9.91	6.67	6.43	0.008
30	7.53	6.62	6.39	6.17	5.94	0.008
35	7.04	6.14	5.92	5.69	5.47	0.007

表 5-1.1　海水中の飽和酸素濃度

出典：　有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム　第３回 (2010)

Q5-2：貧酸素水塊 (すいかい) とは何ですか？

A5-2：水中溶存酸素 (DO) 濃度が極めて低い水の塊です。

社団法人水産資源保護協会が公開している水産用水基準 (2005) では「内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなくてはならない溶存酸素は 4.3mg/L(3mL/L) であること。」としています。この値より下がると水産資源に影響を与えるとして決められた値で、貧酸素基準の一つとして用いられています。

この値以下を貧酸素と呼ぶことにすると、例えば、25℃で 25‰の塩分濃度の場合は、25℃の飽和酸素濃度は 6.91mg/l ですから (Q5-1 の飽和酸素濃度表より)、下記計算にあるように飽和度 62％以下が貧酸素となります。

$$25℃で\ 4.3\ \mathrm{mg}/\ell の飽和度 = \frac{4.3}{6.91} \times 100(\%) = 62.23(\%)$$

有明海の環境の状態を調べる際によく利用するホームページで (社) 水産資源保護協会が運営している「有明海等環境情報・研究ネットワーク」の自然情報＞貧酸素の欄には、貧酸素の解説とし

「貧酸素水塊は、主に夏季に底層で形成される DO(溶存酸素) 濃度の低い水塊であり、一般に DO 濃度が 2 ～ 3ml/ l (2.8 ～ 4.2mg/ l) 以下の海水として定義されています」と記述されており、一定の幅を持たせています。さらに、最も長期間データを蓄積し、有明海の環境変化の分析に用いられている「浅海定線調査」の水平分布表示は、0 ～ 2.8mg/l と 2.8mg/l ～ 4.3mg/l の二つの区分に分けて表示しています。

参照：社団法人水産資源保護協会 HP
有明海等環境情報・研究ネットワーク
有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム　第 3 回 (2010)

Q5-3：貧酸素水塊はどのように発生するのですか？

A5-3：水中・泥中の有機物を餌として増殖するバクテリアの酸素消費が、酸素供給を上回ると貧酸素になります。

貧酸素水塊は水中の酸素消費が酸素供給よりも大きい時に発生します。海中で発生したプランクトンの遺骸や生物の排泄物、陸域から運ばれた有機物などを餌とするバクテリア (真正細菌) が生存するのに酸素を使うと、水中・泥中の酸素が消費されます。一方、植物プランクトンが炭酸ガスと太陽光を使って光合成すると水中に酸素が供給されますし、満潮の時、酸素を多く含んだ海水が沖合から入り込んだり、河川から淡水が流れ込むことによっても酸素が供給されます。また、激しい風浪、台風時には激しく混ぜられて空気中の酸素が海水に供給されることもあります。

貧酸素水塊は、簡単には

酸素消費量＞酸素供給量

の状態が継続したときに発生すると表すことができます。

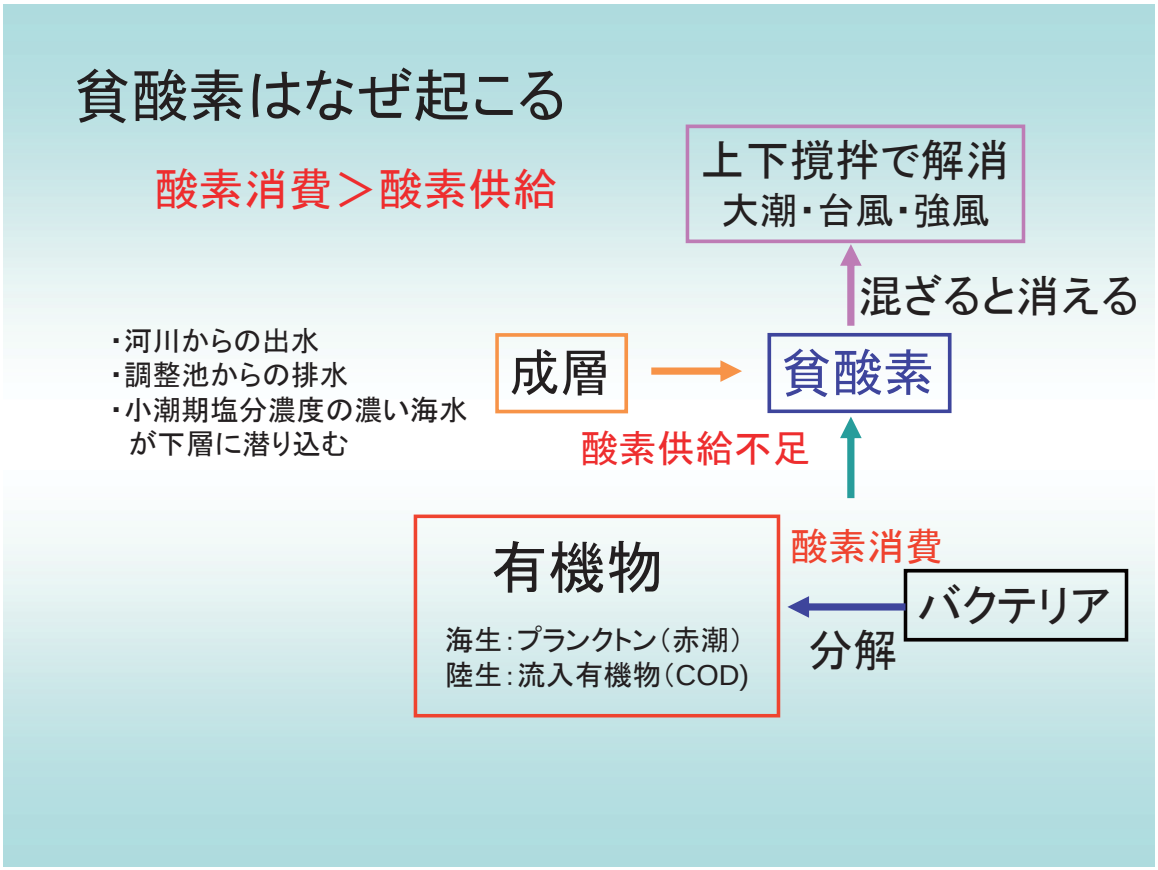


図 5-3.1　貧酸素水塊発生のメカニズム

出典：有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム　第 3 回 (2010)

参考：環境省有明海八代海総合調査評価委員会報告書 (2006)

有機物 Q10-2　参照

Q5-4：成層化とはどういう状態ですか？

A5-4：水温や塩分の違いで密度が異なる水塊が混ざらずに層をつくっている状態 (成層化) をいい、境界面を躍層と呼びます。成層化は貧酸素の大きな原因となっています。

水温や塩分が違うと水の密度が異なります。密度が違う二つの水塊は流れなどの外から力を加えないと混ざりにくく、層をつくります。この現象を成層化と呼びます。

成層化は貧酸素の発生機構において重要な要因の一つです。　海水の成層構造は、海面に近いほど海水の密度が小さく (一般には塩分が低く水温が高い)、水深が増すほど密度が大きくなる (一般には塩分が高く水温が低い) 性質をもっており、この構造が強まることで、上下の水の混合が起こりにくくなっている状態です。

成層化がおこると、大気から溶け込みあるいは光合成で生じた海面の酸素が底層に送られず、底層に貧酸素が生じることになります。

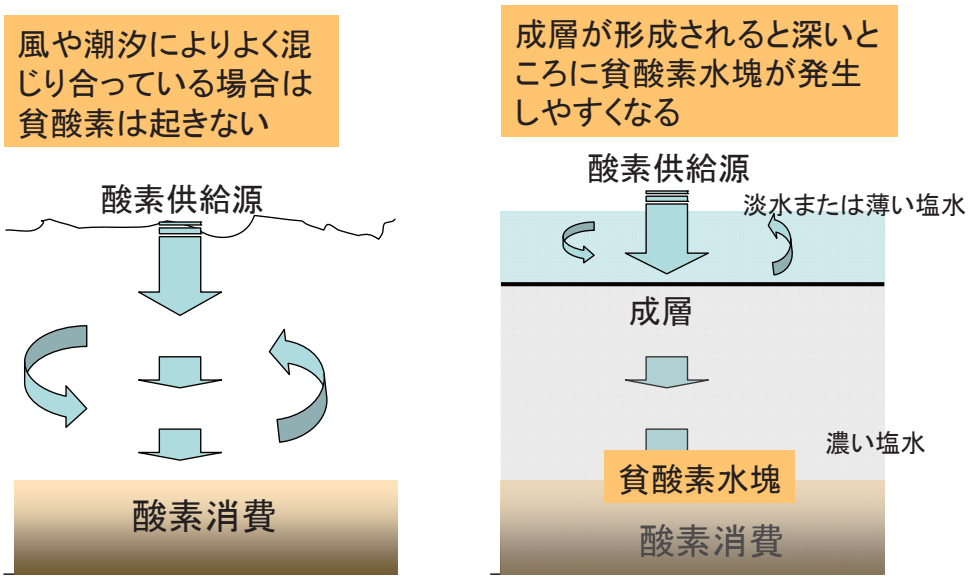


図 5-4.1　成層化と貧酸素

出典：有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム　第 3 回 (2010)

参考：恒星社厚生閣「有明海の生態系再生をめざして」 第 1 章 (2007)

Q5-5：成層の強弱はどのように表されるのですか？

A5-5：ある深さの層の密度と平均値の差の絶対値の和を深さで割ったものを成層度と呼び、その大きさで成層度の強弱を表します。

下図は、海の深さ方向の密度を表しています。左の図は、密度が深さ方向に大きく変化していないので成層度が小さく、右の図は、ある深さのところで明確な密度躍層が起こっていますので成層度が大きい状態です。

右図で成層度の定義を考えてみましょう。密度の深さ方向の平均値を赤い線で示しています。また、ある深さの密度と平均値の差も赤い線で示しています。その差の絶対値 (全部プラスとする) の和で成層の強さを表します。右図の方が大きな値になり、成層度の強い状態が表されることが理解できると思います。

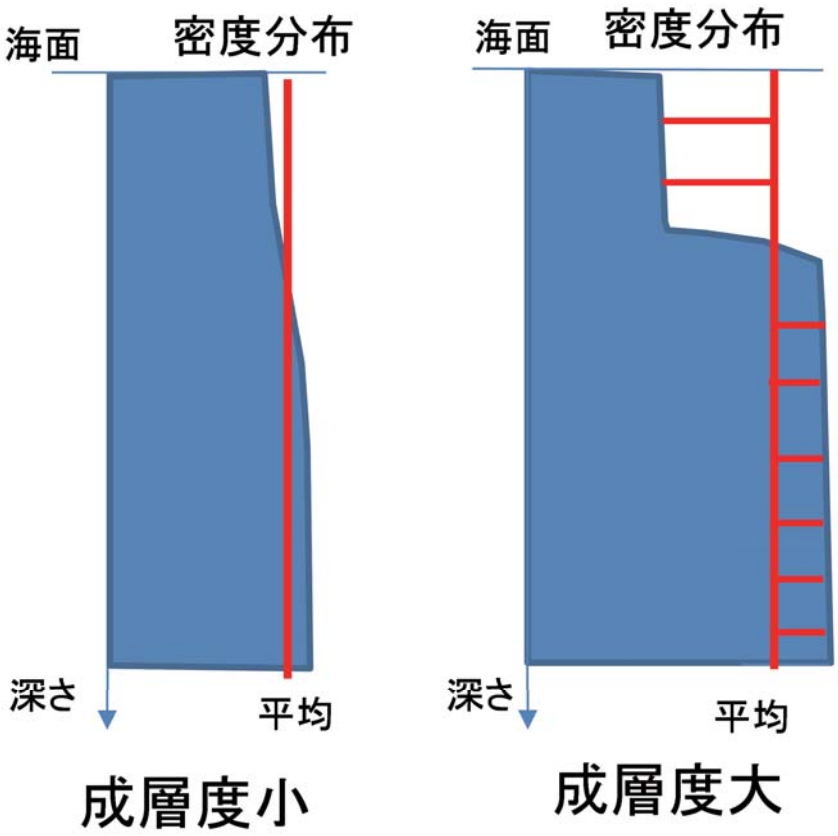


図 5-5.1　成層度の定義

Q5-6：長期的に成層化を強める要因にはどのようなものがありますか？

A5-6：外海における潮位差の減少、平均潮位 (水位) の上昇、干拓等の地形変化によって潮流速が減少し、成層度が強まったと考えられます。

有明海は、日本一大きな干満差によって非常に大きな潮流が起こるため、河川から流入した淡水と海水は上下方向に十分に混ざり合い、透明度が低くなって赤潮が発生しにくく、また、成層化しにくく貧酸素が起こりにくい海でした。しかし､外海における潮汐振幅の減少や平均潮位 (水位) の上昇､さらに干拓等に伴う地形の変形によって、潮流速が減少すると、河川水は攪拌されずに上層を流れるよう湾内にひろがり、強い成層状態が維持されやすくなり、その結果、酸素水塊が発生し易くなったと言われています。

参考：恒星社厚生閣「有明海の生態系再生をめざして」(2007)

潮汐、潮流、潮位 Q6-1 干拓 Q9-1 参照

Q5-7：有明海における貧酸素水塊はどのように発生するのですか？

A5-7：河川からの大きな出水と沖合からの塩水の潜り込みの際、十分に上下撹拌が起こらずに成層化すると、干潟縁辺部を中心に貧酸素が発生します。

有明海における貧酸素水塊は大きくは２つの原因で発生します。

一つは、春から夏、秋にかけ河川からの大出水の際、大量の淡水が海水の上に乗ったまま混ざらず、淡水と海水の大きな密度成層 (密度の異なる水塊が混ざり合わない状態) が起こったときに発生します。例えば、筑後川からの大出水があると、塩水の上に乗るように有明海の東海岸に沿って南下し、満潮の時に湾奥部に戻ってきます。干満を繰り返しながら、地球の自転の効果 (コリオリ力) により西向きに寄って流れ、次第に有明海湾奥西部海岸に到達し、干潟縁辺部付近で強い密度成層を起こします。密度成層のために表層からの酸素供給が遮断されるため、底層における酸素消費に酸素供給が追いつかなくなって貧酸素水塊が発生します。この場合、大潮になっても貧酸素が解消せず長期間継続する場合があります。台風や強風などで強い上下撹拌が起こるとほとんどの貧酸素は解消します。

もう一つは、干満の差が小さくなる小潮期に沖合から高塩分の海水が下に潜り込んで進入し、上と同じように密度成層が形成されて貧酸素水塊が発生します。ただ、小潮期に発生する貧酸素水塊は、大潮になって流速が大きくなり上下拡散が激しくなると密度成層が消えて次第に解消します。 密度躍層 (密度の違いで上層と下層にわけ得る状態) が海底に接する付近には海底フロントが形成され、エスチュアリー循環により底層水はフロントに向かって流れ、フロント付近に収束域を形成します。そのため、密度躍層が発達し、躍層以深への酸素輸送が制限される時には、新鮮な底層水は酸素消費によって徐々に酸素濃度を下げながら海底フロントに向けて輸送されます。したがって、海底フロントの沖側で最も低酸素になります。有明海奥部では密度躍層が浅いため、底層フロントは 5m 以浅の浅い水域に形成されます。また、泥干潟が広がるこの海域では酸素消費速度も大きくなっています。

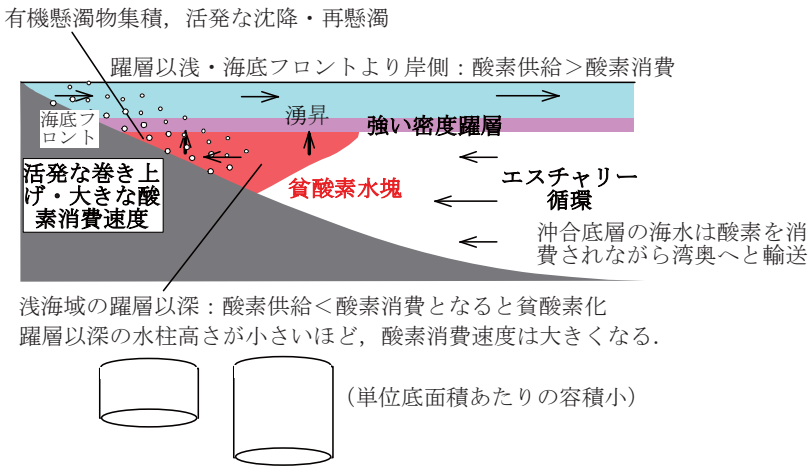


図 5-7.1　有明海浅海域における貧酸素水塊発生のメカニズム

参照：佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集 (2010)
有明海再生機構有明海のなぜシンポジウム第３回 (2010)

Q5-8：エスチュアリー循環とは何ですか？

A5-8：沖合から塩分濃度の濃い海水が低層に入り込むことにより、塩分濃度の低い水が沖合に流れて、循環が起こる現象。

密度流の一種で、密度の不均一分布に伴う圧力勾配が駆動力となって発生する流れのことをエスチュアリー循環といいます。すなわち河川からの軽い淡水 (一般に塩分が低く水温が高い) が上層を海側に向かい、湾外から流入する重い海水 (一般に塩分が高く水温が低い) が下層を陸側に向かう時、低密度水と高密度水が接する境界面では、両者の相対的な流速差により海水交換が起き、下層の塩水が上層の淡水に取り込まれて、上層の塩分が下流にゆくにつれて少しずつ増大し、海水の循環がおこる現象です。

参考：成山堂書店 「海流と生物資源」 杉本隆也 (2004)
恒星社厚生閣「有明海の生態系再生をめざして」(2007)

Q5-9：有明海の貧酸素水塊はいつ、どこで発生するのですか？

A5-9：夏季の河川からの出水時と小潮時に有明湾奥西部の干潟縁辺域と諫早湾で別々に発生します。

貧酸素水塊は、Q5-7 で示した 2 つの理由で密度成層が発達したときに湾奥西部の干拓縁辺域と諫早湾内において、夏の小潮から中潮期を中心にそれぞれ別々に発生します。下図は、平成 17 年 (2005 年)8 月 16 日に発生した貧酸素水塊の底層における溶存酸素濃度を調べたものです。飽和度 20％以下の貧酸素が有明海湾奥部と諫早湾で独立に発生していることがよく分かります。有明海奥部の貧酸素水塊は、沖合の深い層で発生する東京湾や伊勢湾とは異なり、比較的岸に近い浅い水域 (干潟縁辺部) の底層で発生するのが特徴です。

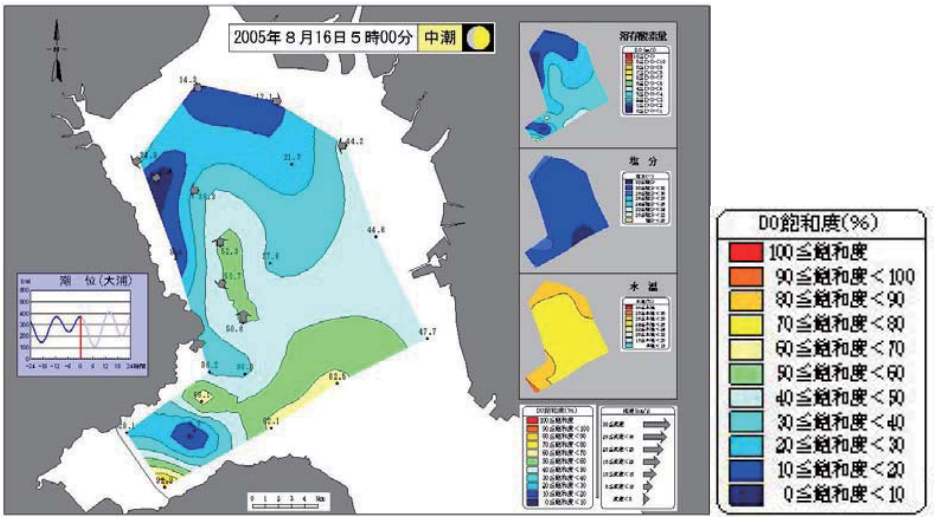


図 5-9.1　有明海貧酸素水塊調査結果」

出典：有明海八代海総合調査評価委員会報告書 (2006)

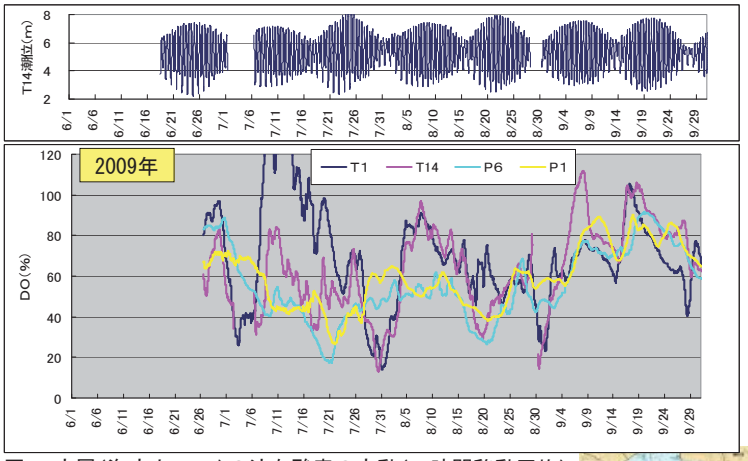
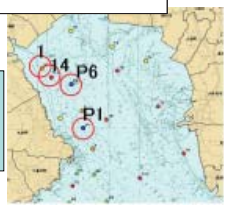


図　底層（海底上0.2m）の溶存酸素の変動（25時間移動平均）

2009年：7月上旬に出水による密度成層が形成され、奥部で貧酸素化が進んだ。シャトネラ赤潮が発生したが、7月末には北寄りの風の連吹があり、著しい貧酸素化が免れた。



左図によると、
小潮時に DO 飽和度 (%) の値が小さくなっており、小潮時の貧酸素水塊発生を示しております。

図 5-9.2　潮位及び底層の溶存酸素の変動

出典：有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム　（2010）

大潮、小潮 Q6-1　参照

Q5-10：有明海ではいつ頃から貧酸素水塊が発生するようになったのでしょうか？

A5-10：富栄養化の進展と湾奥部の干拓による流速低下により昭和 45 年 (1970 年) 頃から有明海湾奥西部で、平成 9 年 (1997 年) の諫早湾潮受堤防締め切りによる潮流速の低下により諫早湾で貧酸素が発生するようになりました。

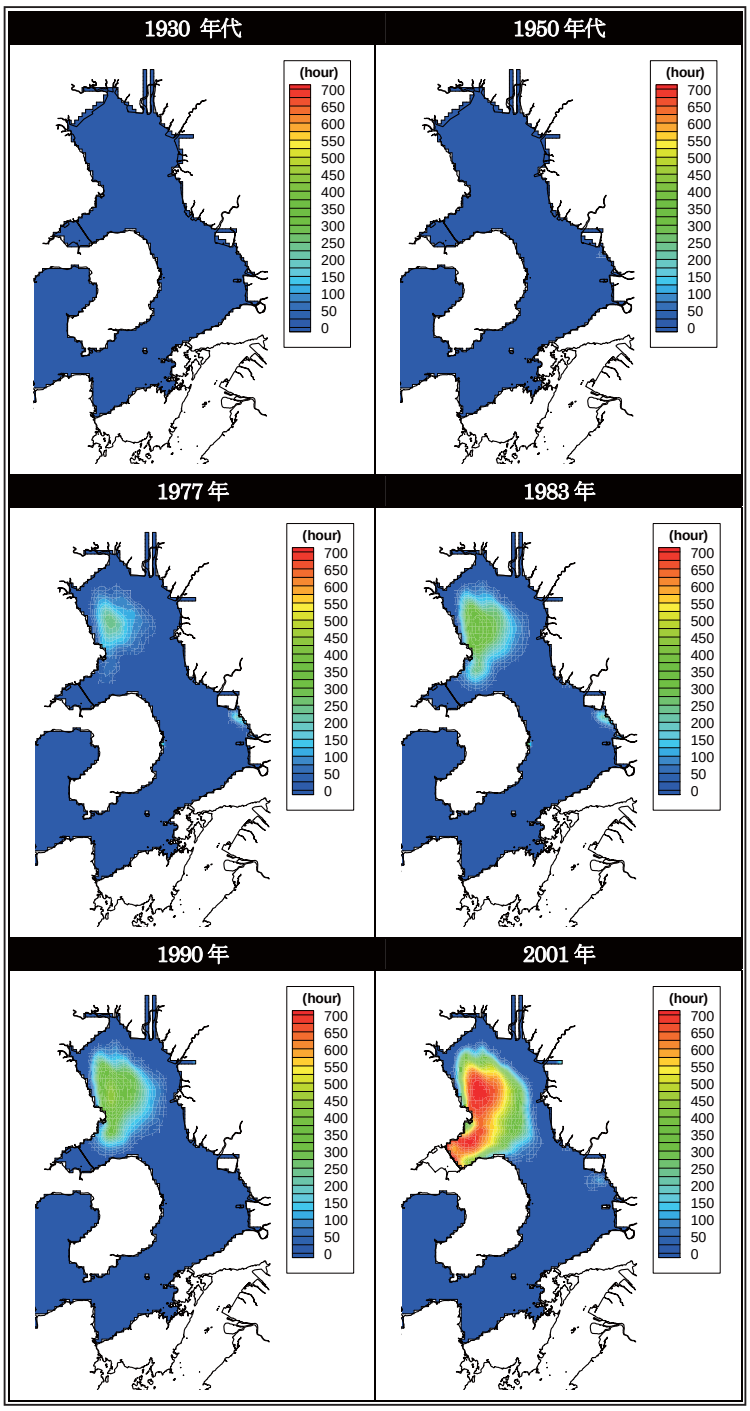


図 5-10.1 溶存酸素濃度 2.1mg/L 以下の累積

左記、JST モデル (シミュレーション) による解析からは、1950 年代までは貧酸素水塊は発生していなっかたことが推測されます。その後 1970 年代後半より次第に溶存酸素濃度 2.1mg/L 水塊の累積時間は増加傾向となり、2001 年においては、湾奥部および諫早湾で顕著な増加が表れています。

湾奥部の主な干拓事業は 1950 年代以降 1970 年代までに行われており、それらの干拓に伴う地形変形により、流速が低下し、貧酸素水塊発生を増加させたと指摘されています。同時に、1970 年代より、有明海の富栄養化も進行し、その結果赤潮を発生させ貧酸素水塊を生じやすくさせたとも言われています。

諫早湾においても、同様に、諫早湾の潮受堤防締め切りによる流速低下、浄化能力低下、それに伴う海域の富栄養化により、貧酸素水塊の発生が増加したとみられています。

出典：第有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム第 5 回 (2011)

参考：環境省有明海八代海総合調査評価委員会報告書 (2006)

潮流 Q6-1　赤潮 Q8-1 諫早干拓事業、諫早湾潮受堤防締め切り Q9-1　富栄養化 Q10-1　参照

Q5-11：貧酸素化は有明海にどのような影響を与えているのですか？

A5-11：二枚貝等のベントスの減少、漁獲量の減少を引き起こします。

酸素不足によりタイラギ、サルボウ、アサリ等の二枚貝を中心としたベントス、底棲性の魚類の斃死、魚類の稚仔魚の減耗を引き起こし、その結果、生態系を大きく棄損しています。

また、長期的な影響として、貧酸素化が進むと、赤潮等を誘発する栄養塩 (窒素やリン) が底質から供給されることが明らかになっており、生態系サイクルに悪影響を与える可能性についても指摘されています。

参考：有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム　第 3 回 (2010)

ベントス Q3　赤潮 Q8-1　栄養塩 Q10-1　参照

Q5-12：有明海の貧酸素化を防ぐには、どのような対策が有効だと考えられていますか？

A5-12：諫早湾の貧酸素の解消には諫早湾潮受堤防排水門の開門による潮流速の回復が有効である可能性があります。湾奥部の貧酸素解消には干拓地内に海水を導入し潮流速を回復する方法も考えらますが、現実的な方法としてはサルボウ貝、カキなどの二枚貝を増やす方法が提唱されています。

現在、大学や企業による貧酸素水塊の発生と消長の解析のためのシミュレーションモデルを用いて有明海の再生策の有効性が検証されています。シミュレーションによると流入負荷量の削減、覆砂 (底質を砂で覆う) や養殖などによる二枚貝などのベントス (底生生物) の復活、なぎさ線 (干潟や本来水辺や海岸線にあたる潮間帯から潮上帯までの連続した地形の場所) の復活や諫早湾潮受堤防排水門の開門、干拓地への海水導入などの地形改変の緩和などの有効性が明らかになっています。

下図は、科学技術振興調整費 (JST) の支援を受けて開発された JST モデル ((株) いであ開発) で解析された有明海全体での DO<2.1mg/L(二枚貝等に重大な被害を与えるレベル) の累積容積に与える各要因の影響度を示したものです。

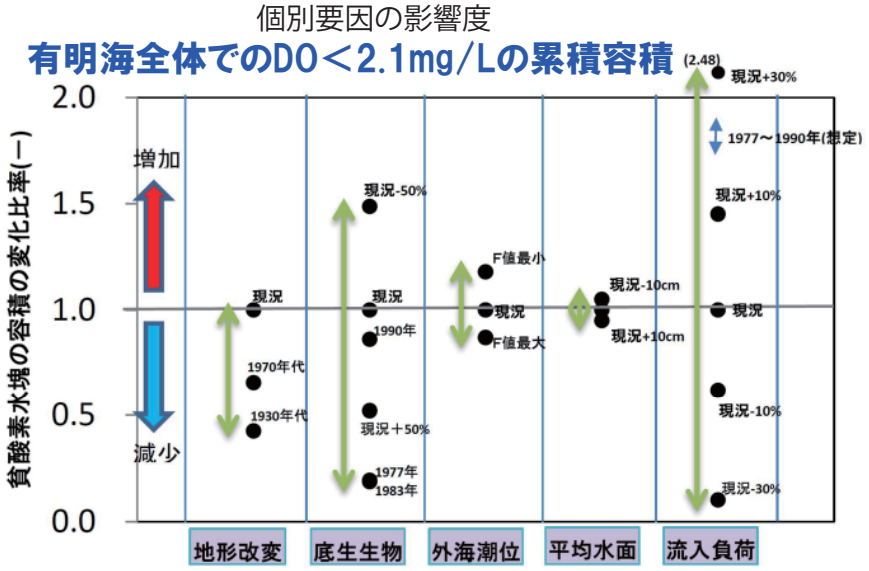


図 5-12.1　有明海全体での DO<2.1mg/ℓの累積容積に与える各要因の影響度

上記解析は、流入負荷を現況より 30% 減らすことができれば重大な被害を与えるレベルの貧酸素はほぼなくすことができることを示しています。また、1977 年～ 1990 年代の流入負荷量が入ってくると今の 2 倍近くの貧酸素が発生します。昔のように汚濁物質 (栄養塩) を増加させるとは厳に慎まなければいけません。ただ、有明海の生物多様性、ノリ養殖を考えると栄養塩の流入を減少させることには議論が分かれるところです。

最も現実的な方法は、覆砂によるアサリやカキ礁の復元です。貧酸素水塊の原因は、有機物が分解される過程で起こる過度の酸素消費であるため、有機物の削減が貧酸素化を防ぐ一つの方策となります。その対応策として、覆砂やカキ礁の復元があげられます。覆砂の実施は、赤潮の原因となる栄養塩などの溶出や汚染底質の巻き上げを防ぎ、貧酸素水塊の削減への応急措置として期待されています。カキ礁の復元は、カキの濾過作用により水中の汚濁物質 (有機物) を除去することによりプランクトンの異常発生 (赤潮) を防ぐ働きがあります。

なぎさ線の回復による、湾奥部の地形の変化、流動場の改善を通して、貧酸素化の解消や赤潮の発生の抑制に一定の効果があると予測されています。流場の改善は底層への溶存酸素の供給量を増大させるとともに、水中での溶存酸素の消費に寄与する有機物を低減させる効果を有しており、もっとも効果的に貧酸素化を解消できる手法であると考えられています。流動場の改善により、貧酸素化の低減、アサリ、カキやサルボウなどの二枚貝資源の回復、水質浄化量の増大、貧酸素化の解消といった正のスパイラルを誘導することが期待できます。

出典：有明海再生機構　有明海のなぜシンポジウム第 5 回 (H22/2010)

ﾍﾞﾝﾄｽ Q3, 潮流 Q6-1, 赤潮 Q8-1, 諫早湾潮受堤防 Q9-1, 栄養塩 Q10-1, 有機物 Q10-2, 流入負荷 Q10-3　参照