第Ⅲ部　シミュレーションモデルを用いた再生策の効果判定

3．1　JST 研究の成果

(H22 有明海成果報告書より)

有明海の生物生息環境を再生するための施策を抽出し、シミュレーションにより、その効果を検討し、再生施策としての優位性を検討した。その結果、なぎさ線の回復が持続性のある施策であり、覆砂が応急措置的対策として有効であることを明らかにした。

現地で実証されている再生技術を行使したときの生物生息環境の変化を予測し (低次生態系モデル)、指標種の目標値に照らして評価した (生活史モデル)。適用した技術は、底質改善のための囲繞堤 (アゲマキ放流)・覆砂・海底耕耘、なぎさ線の回復、微細懸濁物捕捉技術としての粗朶搦工、水産生物利用栄養塩系外取り出し技術としてのカキ礁の復元およびノリ養殖の適正管理であり、それぞれ施工規模の異なる 2 ケースを設定した。これらは主に湾奥部の環境改善を重視した施策である。各技術の評価は、2001 年の環境条件 (非定常) において、貧酸素化の低減効果 (底層 DO)、赤潮発生の低減効果 (クロロフィル a)、透明度上昇の抑制効果 (SS) とし、これらを含む環境変化に伴う指標種の漁獲量の変化で評価した。

各施策の施工面積を表 -12 に示した。

No	再生策	対象海域	格子数	面積[km^2]		備考
1	囲繞堤 1	湾奥部のかつてのアゲマキ漁場	15	12	0.8%	
2	囲繞堤 2	湾奥部および諫早湾沿岸全域	92	75	4.7%	
3	覆砂 1	5m以浅海域	370	300	18.9%	
4	覆砂 2	5m以浅海域	370	300	18.9%	アサリを5倍にした
5	海底耕耘 1	10m以浅海域	676	548	34.5%	底泥の酸素消費量を3/4
6	海底耕耘 2	10m以浅海域	676	548	34.5%	底泥の酸素消費量を1/2
7	なぎさ線の回復 1	人工海岸(湾奥部、諫早湾のみ)	62	50	3.2%	
8	なぎさ線の回復 2	人工海岸	123	100	6.3%	
9	粗朶搦工 1	湾奥部沿岸の一部	15	12	0.8%	
10	粗朶搦工 2	湾奥部と諫早湾の沿岸全域	92	75	4.7%	
11	カキ礁の復元 1	1977年のカキ礁	48	39	2.5%	1977年のカキ現存量
12	カキ礁の復元 2	1977年のカキ礁	48	39	2.5%	上記の5倍
13	ノリ養殖 1	現況のノリ養殖場	493	399	25.2%	ノリ養殖を 1/2
14	ノリ養殖 2	現況のノリ養殖場	493	399	25.2%	ノリ養殖を 0
		有明海	1,957	1,585	100.0%	

表 -12　各施策の施工面積

○予測結果

各技術の適用規模が同じではないので単純に比較できないが、貧酸素容積の低減効果を図 -110 に、湾奥部での一次生産量及び赤潮発生容積の低減効果を図 -111 に示す。なお、これらは表 -12 に示した計算条件下での予測結果である。これによると、なぎさ線の回復の施策により湾奥部の地形が変化し (海域面積が増加)、流動場の改善を通して、貧酸素化の解消や赤潮発生の抑制に一定の効果があると予測された。前述のように、流れ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一次生産量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る。流動場の改善により、貧酸素化の低減、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る。また、過去地形の流動場の方がサルボウとスズキの着底率が増大することが明らかになっており、スズキなど有明海の重要魚介類の多くが「湾央産卵－湾奥成育」型であることから、これらの浮遊幼生の無効分散を低下させ、資源を回復させることも期待できる。

一方、覆砂 (ケース 2) やカキ礁の復元といった懸濁物食者の増加による水中の懸濁態有機物の除去を目的とした再生方策についても、貧酸素化の解消や赤潮発生の抑制に効果があると予測された。前述したとおり、一次生産起源の有機物分解による酸素消費が水柱全体の全酸素消費の 50％を占めていることから、懸濁態有機物を効果的に除去できる技術が確立できれば、有効な再生方策となるものと考えられる。ただし、これら技術の適用にはノリ養殖との合意が必要である。また、これらの再生策の有効性は環境劣化の要因分析結果でも裏づけされている。

この他の視点として、干潟覆砂域が非覆砂域よりアサリ着底稚貝の生残率が高いという事実から、健全な土砂供給の

持続と応急措置的には覆砂が有効であると考えられる。

※ 貧酸素水塊は溶存酸素 2.1mg/ℓ以下と定義し、記述している。

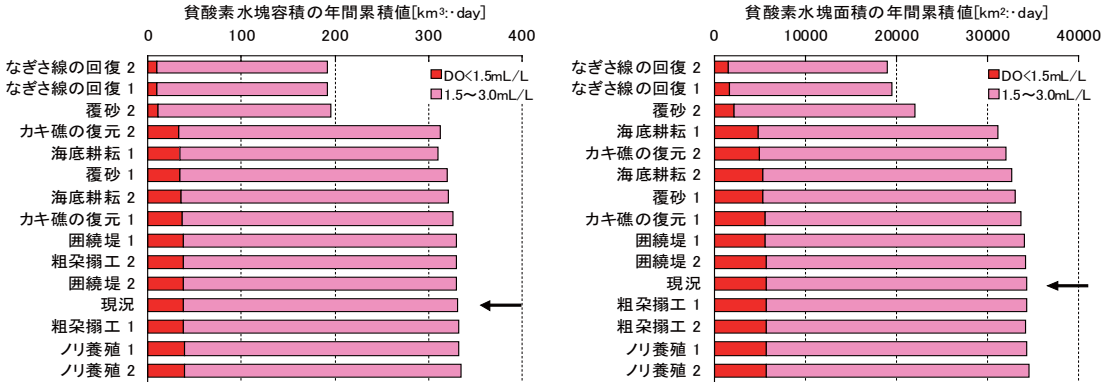


図 -110　各再生策による貧酸素水塊の容積・面積の年間累計値の予測

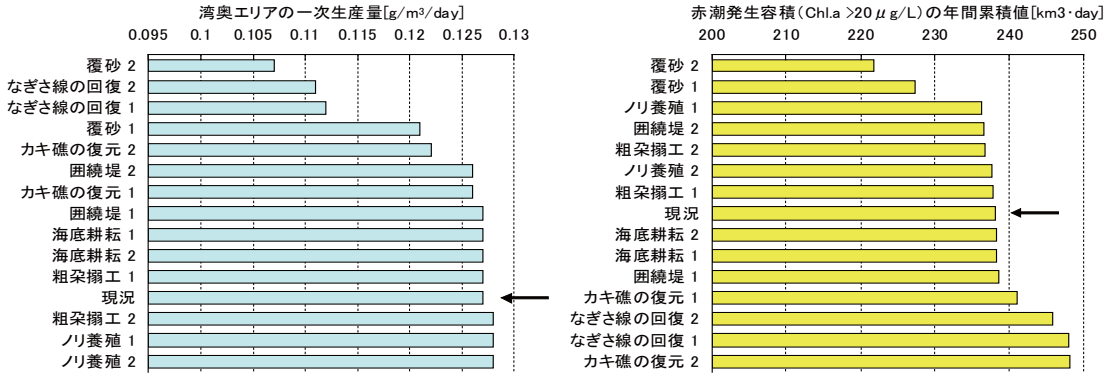


図 -111　各再生策による環境指数の変化 (2001 年を現況として 1 年間の計算結果)

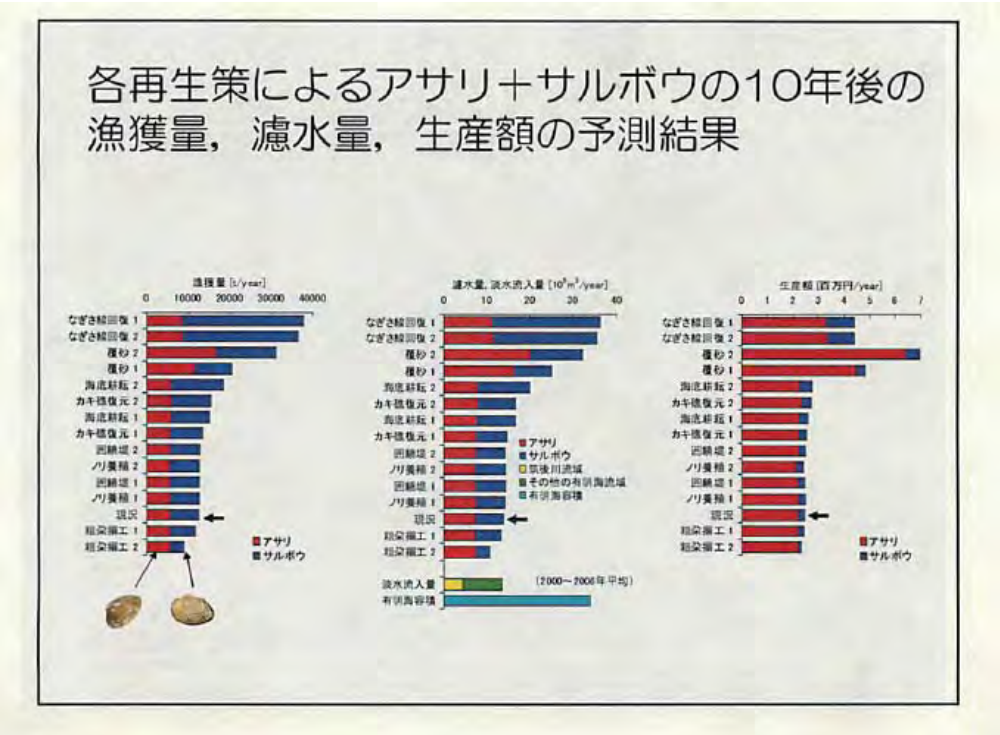


図 -112　各再生策によるアサリ + サルボウの 10 年後の漁獲量・濾水量・生産額の予測結果

No.	再生策	有明海全体の貧酸素化の低減	アサリ	サルボウ	スズキ
1	囲繞堤1	△	ー	△	ー
	囲繞堤2	△	ー	△	ー
2	覆砂1	○	◎	○	ー
	覆砂2	◎	◎	◎	×
3	海底耕耘1	○	△	○	ー
	海底耕耘2	○	△	○	ー
4	なぎさ線回復1	◎	○	◎	ー
	なぎさ線回復2	◎	○	◎	ー
5	粗朶搦工1	ー	ー	ー	ー
	粗朶搦工2	△	ー	×	ー
6	カキ礁復元1	○	△	○	ー
	カキ礁復元2	○	△	○	ー
7	ノリ養殖1	ー	○	○	ー
	ノリ養殖2	ー	○	○	ー

◎:効果が非常に大きい　○:効果が大きい　△:一定の効果がみられる　ー:大きな変化はない　×:再生の逆効果である

表 -13　再生効果のまとめ

個別技術	施策名	予測にあたって設定した主な計算条件	予測結果
底質改善技術	覆砂	・有明海内の水深 5m 以浅の海域にて覆砂を実施。 ・底質中の有機物・間隙水中溶存物質の初期濃度をゼロとした。 ・覆砂を実施した場所では懸濁物食者が増加するとし、設定する懸濁物食者の初期現存量を増加させた。 ・増加した懸濁物食者の 8 割が漁獲等により系外に持ち出されると仮定した。	・覆砂による改善効果としては、覆砂自体の底質浄化による効果と底生生物の発現による浄化効果が想定されるが、予測結果からは後者の浄化効果が貧酸素化の改善効果が大きかった。 ・覆砂自体の底質浄化による効果としては、貧酸素水塊の容積が現況より約 10%縮小するものと考えられる。 ・上記の底生生物の発現による浄化効果に加え、懸濁物食者が覆砂により現況の 5 倍の生息量となると仮定した場合、約 70% の貧酸素水塊の縮小が見られた。
	海底耕耘	・有明海内の 10m 以浅の海域にて海底耕耘を実施。 ・底泥からの酸素消費量・還元物質の溶出量が常時、低減すると仮定した。	・底泥からの酸素消費量・還元物質の溶出量が現況の半分になると仮定した場合、貧酸素水塊の容積は約 12%縮小するものと予測された。 ・酸素消費に対して水中での酸素消費が支配的であるため、底質改善施策が有する貧酸素化の直接的な改善効果は相対的には小さいと考えられる。
	囲繞提の造成＋ アゲマキの増産	・有明海湾奥沿岸部において囲繞提の造成を実施。 ・底質中の粒子状有機物・間隙水中溶存物質の初期濃度をゼロとした。 ・囲繞提の造成場所ではアゲマキを増産させるとして、設定する懸濁物食者の初期現存量を増加させた。	・囲繞提の造成・アゲマキの増産が、直接的に貧酸素水塊の発生規模に与える影響は小さく、貧酸素水塊の容積の変化として約 2%の縮小があると予測された。 ・予測にあたって想定した造成規模によって改善効果は変化するが、他の予測条件と比較して、今回想定した囲繞提の造成規模は小さいことに留意する必要がある。
細粒分捕捉技術	粗朶搦工	・有明海湾奥部沿岸部において粗朶搦工を実施。 ・粗朶搦工の実施場所では懸濁物（SS・有機物・植物プランクトン）の沈降速度が周辺海域の 1.56 倍となると仮定した。	・粗朶搦工実施場所では、表層 SS 濃度が年平均値として 10mg/L 程度低減することができると予測された。 ・粗朶搦工による直接的な貧酸素化の改善効果は小さく、貧酸素水塊の容積の変化として約 1%の縮小があると予測された。
なぎさ線の回復技術	人工海岸（直立護岸）の緩傾斜化および半自然海岸化	・有明海の海岸線においてなぎさ線の回復技術を実施。 ・なぎさ線の回復技術により、陸域であった 900m × 900m の格子が新たに海域となると仮定した。 ・新たに海域となる格子では、底質中の有機物・間隙水中溶存物質の初期濃度をゼロとした。 ・新たに海域となる格子では、その隣接する格子と同等の底生生物量が生息すると仮定した。	・本検討で想定したなぎさ線の回復に伴い改善する貧酸素水塊の容積は大きく、約 75%が縮小するものと予測された。 ・年平均の表層 SS 濃度は湾奥部で約 20mg/L 程度上昇するものと考えられる。 ・表層 SS 濃度の上昇、海水交換性の向上等により湾奥部での一次生産量が現況より約 10% 低下するものと考えられる。 ・当然ながら、貧酸素化の発生が顕著な湾奥部での施工（地形変化）が貧酸素化の改善には効果的であり、熊本県沿岸での施工は貧酸素化の改善効果として直接的には効果が小さかった。
水産生物利用栄養塩系外取り出し技術	カキ礁の復元	・有明海湾奥の海域にてカキ礁を復元させた。 ・カキ礁の復元を想定する格子ではカキの初期現存量を増加させた。 ・増産したカキはすべて漁獲により系外に持ち出されるものとした。	・湾奥部での一次生産起源の有機物のカキを通した系外除去効果として、貧酸素水塊の容積が約 4 ～ 15%縮小するものと予測された。 ・予測にあたって想定したカキ礁の造成規模によって改善効果は大きく変化することが想定される。他の予測条件と比較して、今回想定したカキ礁の復元規模は小さいことに留意する必要がある。 ・1977 年当時のカキ礁を復元した場合には、貧酸素水塊の容積が約 4% 縮小すると予測された。
漁業管理	ノリ養殖量の制御	・ノリの養殖量を制限した。 ・ノリの養殖場は変化しないと仮定し、養殖場でのノリ網による流れの抵抗やノリ養殖量、酸処理・施肥の使用量を変化させた。	・冬季に実施されるノリ養殖量の変化が、直接的に貧酸素水塊の発生規模に与える影響は小さいものと予測された。 ・一次生産量はノリ養殖の縮小に伴い、現況より約 1% 上昇するものと予測された。

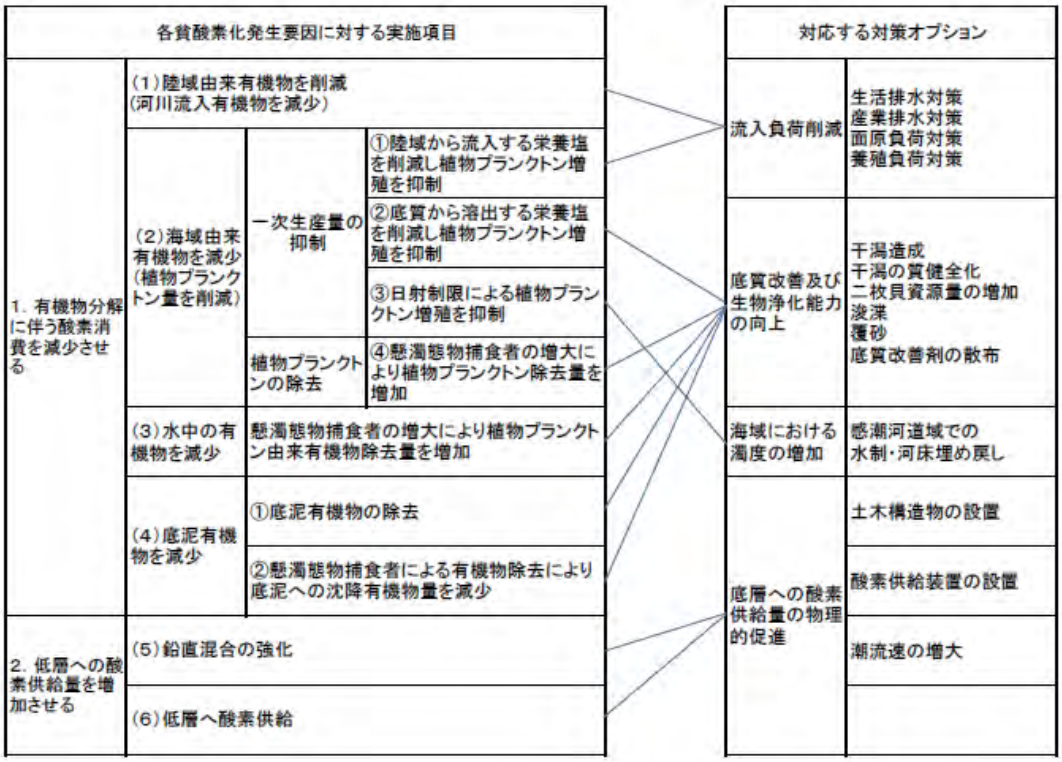
表 -14　各再生方策の効果予測にあたって設定した主な条件と予測結果の概要

3．2　環境省有明海貧酸素水塊発生シミュレーションモデル調査業務の成果

(平成 21 年度有明海貧酸素水塊発生シミュレーションモデル調査業務報告書より)

これまで蓄積された貧酸素水塊の観測データ、その他海域環境、気象、河川等のデータを基に、有明海の特異な海域環境を考慮に入れた、再現性の高い貧酸素水塊発生シミュレーションモデルを構築する。

まず有明海湾奥部における貧酸素水塊発生対策オプションを整理した。



下記３つの対策オプションについてシミュレーションを実施することとした。

対策１：流入負荷削減－生活排水、産業排水、面現負荷、養殖負荷

対策２：生物浄化能力の向上及び底質改善－１二枚貝(サルボウ)の資源量増加

対策３：生物浄化能力の向上及び底質改善－２二枚貝(カキ)の資源量増加

表 6.4.2　本調査で検討を行う対策とその実施内容

検討項目			モデルによる検討実施内容			計算条件名
			事業実施箇所	事業量	モデル上の設定	
流入負荷削減	生活排水対策 産業排水対策 面原負荷対策 養殖負荷対策		すべての河川	各県汚水処理整備計画や人口の変化、小規模養鶏畜舎の変化、環境保全型農業の普及といった、現時点において定量可能な施策及び社会情勢を盛り込み事業量を算定	左記事業量から算出したCOD、T-N、T-P削減率をすべての河川に適応し、流入負荷量を削減する。	対策1
生物浄化能力の向上及び底質改善	二枚貝資源量を増大	二枚貝資源量の増加(サルボウ)	二枚貝の増殖が見込める、現実的に想定可能な干潟域及び海域を設定(水産総合研究センターと協議)	現実的に想定可能な生物量を設定(水産総合研究センターと協議)	二枚貝の生物量は空間的には分布をもつが、時間的には変化しない強制関数として表現する(計算期間中生物量は一定)。二枚貝は濾過、呼吸、排泄、死亡といったプロセスをモデル化しており、生物量に応じた浄化能力の表現が可能となっている。二枚貝の各パラメータは、種(アサリ、サルボウ、カキ、タイラギ)に応じて適切な値を設定する。	対策2
		二枚貝資源量の増加(カキ)	2007年のカキ礁分布を再現(水産庁「有明海等漁業関連情報提供委託事業」のデータを利用)	2007年のカキ礁生息量を再現(水産庁「有明海等漁業関連情報提供委託事業」のデータを利用)		対策3

平成21年度有明海貧酸素シミュレーションモデル調査業務

【貧酸素水塊発生抑止対策の整理】

NO	内 容	具体的内容	結 果
1	流入負荷削減-生活排水、産業排水、面現負荷、養殖負荷	現時点において定量可能な施策及び社会情勢を盛り込んだ2010年の計画値及び推定値を基に有明海への河川からの流入負荷削率を算定	・基準点におけるDOの変化：0.02～0.1mg/lの上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間は1～18時間の減少 ・最大継続時間：2～14時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：1.8～3.5%減少
2	生物浄化能力の向上及び底質改善-1 二枚貝（サルボウ）の資源量増加	湾奥部に現実的なレベルでの二枚貝の増加を想定し、サルボウ資源量33,000tまで増加するとした	・基準点におけるDOの変化：0.08～0.2mg/lの上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間は1～36時間の減少 ・最大継続時間：2～15時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：2.4～6.6%減少
3	生物浄化能力の向上及び底質改善-2 二枚貝（カキ）の資源量増加	湾奥部干潟域に存在するカキ礁の効果を把握するため、2007年のカキ礁の状況を再現	・基準点におけるDOの変化：0.08～0.2mg/lの上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間は3～41時間の減少 ・最大継続時間：2～11時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：3.0～11.6%減少

・現実的な範囲で設定された各対策の効果が定量的に評価された
・貧酸素水塊を完全に解消するレベルには達していないが、今後の対策立案において有用な資料になる

結果は、貧酸素水塊を完全に解消するレベルには達していないが、今後の対策立案において有用な資料になるものと考えられる。

仮想的な計算条件によるシミュレーション

貧酸素水塊発生抑止オプションに関する検討において、検討委員会から、現実的な対策とは別に、外的条件の変化によって貧酸素水がどのように変化するかをシミュレーションによって検討することは今後の対策検討に有用であるとの提案を受けた。そこで、下記の仮想的な計算条件によるシミュレーションを実施し、貧酸素水塊への影響を整理した。

仮想的な条件設定により、河川からの流入負荷と貧酸素水塊の面積については線形的な関係があること、二枚貝の湾奥貧酸素水塊に及ぼす影響は、湾奥に生息するサルボウ及びカキの資源量が大きく影響すること、潮汐と貧酸素水塊には相関関係があることが示された。ただし、ここでの設定は現実にはあり得ない条件であり、その解釈には十分注意する必要がある。その注意を十分踏まえた上で、本業務で得られた知見は、今後の貧酸素水塊発生の対策に活用できるものと考えられる。

【仮想的な計算条件による貧酸素水塊への影響】

NO	内　容	具体的内容	結　果
1-(a)	河川からの流入負荷量15%減少		・基準点におけるDOの変化：0.1～0.7mg/lの上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間：6～101時間の減少 ・最大継続時間：1～54時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：12.7～19.3%減少
1-(b)	河川からの流入負荷量30%減少		・基準点におけるDOの変化：0.2～1.0mg/lの上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間：9～246時間の減少 ・最大継続時間：-1～32時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：27.0～37.4%減少
2-(a)	1972年当時のアサリ・タイラギ・サルボウの状況再現	サルボウが多い年（湾奥）	・基準点におけるDOの変化：水深10mより沖側0.2～0.6mg/lの上昇 干潟縁辺部では減少、ただし貧酸素が著しい期間はDOは上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間：水深約10mより沖側　9～99時間の減少 干潟縁辺部　14～40時間増加 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：8.0～21.1%減少
2-(b)	1976年当時のアサリ・タイラギ・サルボウの状況再現	アサリ（熊本沿岸・湾奥東部）・タイラギが多い年	・基準点におけるDOの変化：水深10mより沖側±0.1mg/l程度 干潟縁辺部では0.1mg/l程度減少 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間：0～23時間の増加 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：1.35～7.5%増加
2-(c)	1977年当時のカキの状況再現		・基準点におけるDOの変化：水深10mより沖側0.02～0.3mg/lの上昇 干潟縁辺部では減少する期間もあるが、貧酸素が著しい期間DOは0.2～0.6g/l上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間：8～146時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：11.0～31.5%減少
3	月の昇降点運動に伴う最大潮汐振幅値の変化		・基準点におけるDOの変化：沖側1.0mg/lの上昇 干潟縁辺部2～3mg/lの上昇 ・基準点における底層DO3mg/l以下の累積時間：11～210時間の減少 ・最大継続時間：4～83時間の減少 ・有明海奥部底層DO3mg/l以下の総面積：22.2～34.7%減少

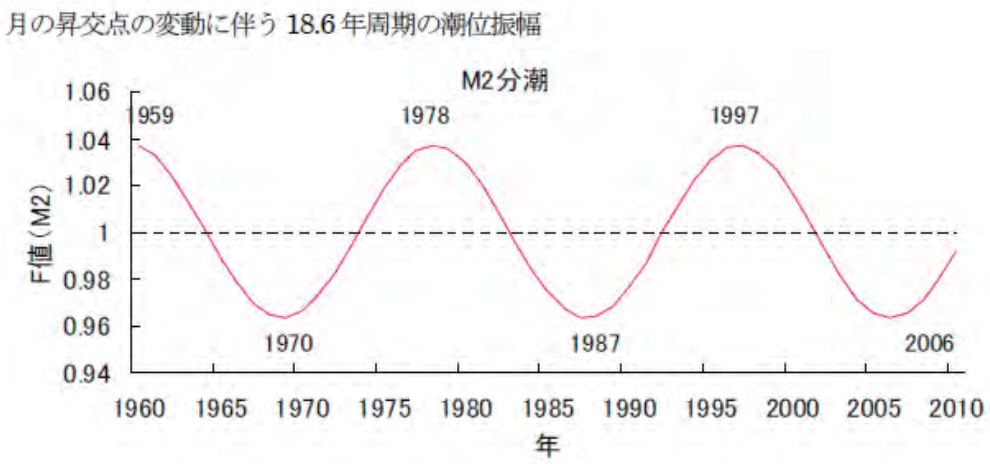
・河川からの流入負荷と貧酸素水塊の面積については線形的な関係がある
・二枚貝の湾奥貧酸素水塊に及ぼす影響は、湾奥に生息するサルボウ及びカキの資源量が大きく影響する
・潮汐と貧酸素水塊には相関関係がある
・ここでの設定は現実的にはありえない条件であり、その解釈には十分注意する必要がある
・その注意を十分ふまえた上で、本業務で得られた知見は、今後の貧酸素水塊発生の対策に活用できる

●現在の到達点

●貧酸素水塊の発生量削減に効果的な対策として、干拓地への海水の再導入、陸域からの負荷削減、二枚貝を主とするベントスの増加などが考えられるが、実現可能性を考えるとカキ礁復元、アサリ・サルボウ増殖等の二枚貝の復元が最も有効な手段だと考えられる。

● 1997 年に最大振幅となって以後、減少し続けていた月の昇交点の変動に伴う 18.6 年周期の潮位振幅は 2006 年を最下限として上昇に転じつつある。 f 値による潮位振幅の回復による貧酸素水塊発生抑制効果は、現実的な対策のいずれよりもその効果は大きい。

【参考】月の昇交点の変動に伴う M_2 分潮の潮位振幅は 18.6 年周期を持っています。1997 年に最大振幅となり、次第に減少し 2006 年に最少振幅となりました。



発　　行

NPO法人 有明海再生機構

〒840-0041 佐賀県佐賀市城内 1-5-14
TEL／FAX : 0952-26-7050
E メール : npo-ariake@ceres.ocn.ne.jp
ホームページ : http://www.npo-ariake.jp/

（表紙写真 : 撮影　江島 ）