

貧酸素水塊に関する情報収集等

貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化について ~モデル解析とモデルの活用~







1

- 1. 検討の背景
- 2. 検討の目的
- 3. 検討結果(進捗)

(1)モデルの概要 (2)貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化の要因解析 (3)モデル計算結果を活用した海域特性図の作成

4. 今後の検討方針



1. 検討の背景

1. 検討の背景





 有明海・八代海等総合調査評価委員会中間取りまとめ(令和4年3月)

 第1章はじめに

 第2章有明海・八代海等の環境等の状況

 (1)汚濁負荷、(2)河川からの土砂流入、(3)潮汐・潮流、(4)水質、(5)底質、

 (6)貧酸素水塊、(7)藻場・干潟等、(8)赤潮、(9)生物

 第3章再生方策等の実施状況等と課題の整理

 第4章再生方策に共通する今後の課題

1. 検討の背景



有明海における問題点と原因・要因との関連の可能性と各事業等との関係 出典:有明海・八代海等総合調査評価委員会中間取りまとめ(令和4年3月)







2. 検討の目的

2. 検討の目的



①貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化の要因解析

- 入力値の変更により仮想的な計算を行うことで要因の大きさを把握することができる
- ・ 連関図中の関連性を定量評価することができる

モデル解析の特徴を生かしたアウトプットとして

②海域区分別の海域特性の把握

- モデル結果から海域特性図を作成して、これまで詳述できなかった海域区分別の環境特性を把握する
- 観測値がない場所、時間の環境特性が把握できる

※モデルの課題・限界を考慮した上で上記の結果を解釈

- 成層化・鉛直混合のメカニズムを理解
- 個別海域の環境特性を理解





3. 検討結果(進捗)

(1) モデルの概要

3. (1) モデルの概要(全体システム)



数値シミュレーションモデル構成



サブモデル	計算項目
流動サブモデル	流向・流速、潮位、水温、塩分
波浪サブモデル	波高及び周期
懸濁物輸送サブモデル	粒径別SS(鉱物)濃度及び堆積量
水質サブモデル	窒素(T-N,各態)、燐(T-P,各態)、DO、クロロフィルa、TOC、COD
底質サブモデル	T-S、TOC
底生生物サブモデル	付着藻類、懸濁物食者(アサリ、サルボウほか)、堆積物食者





流動サブモデル









Ministry of the Environment

再現性確認の例(潮位)







再現性確認の例(水温鉛直分布)







Ministry of

再現性確認の例(塩分鉛直分布)









再現性確認の例(上下層の密度差)





3. 検討結果(進捗)

(2) 貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化の要因解析





注)本報告書において関連があることを確認したものを実線で、その他を点線で示した。 なお、有明海の中で関連があることを確認した海域区分が一つでもあれば実線で示している。

有明海における問題点と原因・要因との関連の可能性 (H28年度委員会報告より) ・平成29年3月に報告された「有明海・八代海等総合 調査評価委員会報告 | (以下、「委員会報告」と呼 ぶ)において、有明海・八代海の環境変化を把握する ことを目的として第3章に(1)汚濁負荷、 (2)河 川からの土砂流入、(3)潮汐・潮流、 (4) 7k質、(5)底質、(6)貧酸素水塊、 (7)薖 場・干潟等、(8)赤潮、(9)生物の9項目につ いて、既往データや知見の整理が行われている。 「(3)潮汐・潮流しの節では、平均潮位や潮位差、 潮流の変化や平均流の状況等が掲載されているもの の、有明海・八代海等における流動、成層化・鉛直 混合等の物理的挙動が解明されているとは言い難い 状況である。

Ministry of the Environment

・委員会報告第4章に示されている、貧酸素水塊の発 生、赤潮の発生、底生生物の減少等の諸問題の原 因・要因の考察(左図:問題点と原因・要因との関 連の可能性)において、<u>海域の流動特性との関連を</u> 把握することで諸問題の原因・要因の考察を進める。





・連関図の全体のうち、成層化に係る部分を抽出する と、左図のとおり簡略化される。潮流・潮汐の変化と成 層化を結ぶ線は点線であるのは、関連性の確認が十 分でないためである。

Ministry of the Environment

・連関図を修正するにあたって、今後必要な検討とし て、「日照、風、降雨・淡水流入」の項目から「成層 化」に延びるパスの確認として、モデルによる感度解析 を行う必要がある。感度解析の入力データの項目は、 ①淡水流入、②日射、③潮位差、④平均潮位とし、 各条件が変化した時に海域の成層強度がどの程度 変化するかを確認する。

要因	成層化・鉛直混合
淡水流入	・出水等により淡水流入量が増加すると、海域の上層の塩分が低下し、 <mark>塩分成層が発達</mark>
日射	・晴天が続いて淡水流入量が減少した場合でも夏季は <mark>水温成層が発達</mark>
風	・台風など強風の連吹により上下層の水が混ざり合って鉛直混合が発達する ※台風は規模や経路によって影響が大きく変わる可能性があるため今回の検討ケースからは除外
潮位差	・潮位差が大きいと <mark>鉛直混合</mark> 、潮位差が小さいと <mark>成層</mark> が発達する傾向
平均潮位	・平均潮位の上昇の影響については、研究者で意見が分かれる。 ・共振が弱まることにより <mark>成層化</mark> の方向か?
内部潮汐	・成層発達時に内部潮汐が励起されると、内部潮汐流のエネルギーが成層を破壊し、成層を 解消(<mark>鉛直混合</mark>)する? ※知見が少なく、よくわかっていない



成層、鉛直混合の重要性





成層状態が長期化すると、

- ・上下層の物質のやりとりが制限される
- ・酸素が下層まで届きにくくなる ⇒貧酸素水塊の発生
- ・淡水(栄養)流入と日射継続によりプランクトンが増殖しやすくなる ⇒赤潮の発生
- ・赤潮の発生により大量の有機物が底層に供給されて底層の酸素消費量が増加 ⇒ 貧酸素水塊の発生



内部潮汐の発生メカニズム



・成層状態にある海域において、海底地形に凹凸がある場合、斜面に流れがぶつかると鉛直流が生じて密度の異なる境界面が変動

- ・潮汐周期の潮流により内部潮汐が発生
- ・内部潮汐波が砕ける際に鉛直混合を促進する

参考文献

堤・松野(2014):有明海諫早湾湾ロ付近における外部,内部潮汐流およびそれに伴う乱流混合の観測,海の研究(Oceanography in Japan),23(2),45-72 吉川(2019):縁辺海や沿岸域における鉛直混合過程,沿岸海洋研究第57巻,第1号,5-13 日比谷・永井(2019):海底地形上での潮汐混合を引き起こす内部重力波に関する考察,沿岸海洋研究第57巻,第1号,39-42 増永(2023):沿岸域における混合過程と水理環境に関する研究:内部潮汐と混合現象,海の研究(Oceanography in Japan),32(2),37-65



要因解析の計算ケース

- ・1994年~2021年の中で、各項目で最大・最小の年を決める。
- ・対象期間は各年7~9月。
- ・対象項目は以下の通り。
- ①河川流量(筑後川) ②全天日射量(佐賀) ③平均潮位(大浦) ④潮位差(18.6年周期:f值)

	計算ケース	略称	内容			
	ベース	Reference	2011年の現況(平均的な年)			
	流量最大	riv_max	2020年の7-9月総流量としたケース(一級河川のみ)			
\mathbf{U}	流量最小	riv_min	1994年の7-9月総流量としたケース(一級河川のみ)			
\bigcirc	日射量最大	rad_max	1994年の7-9月合計日射量としたケース			
	日射量最小	rad_min	2014年の7-9月合計日射量としたケース			
	平均潮位最大	el_max	2012年の年間平均潮位としたケース			
9	平均潮位最小	el_min	1995年の年間平均潮位としたケース			
4	f值(M ₂)最大	f_max	f値(M2)が最大となるケース			
	f值(M ₂)最小	f_min	f値(M2)が最小となるケース			

Ministry of the Environment

要因解析の計算条件



3. (2) 貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化の要因解析 the Environment

計算結果例(水温)



7/1 7/11 7/21 7/31 8/10 8/20 8/30 9/9 9/19 9/29

3. (2) 貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化の要因解析 the Environment

計算結果例(塩分)



7/1 7/11 7/21 7/31 8/10 8/20 8/30 9/9 9/19 9/29



ベース計算 (2011年7, 8, 9月: Reference) と各実験の 成層強度(2乗浮力振動数 N² の平均値)間の比較

・各ケースのモデル計算結果から有明海全域の成層強度(N²)※を算定 ・N²の月別の棒グラフを作成(図中にベースケースからの変化率%を表示)





- ・河川流量の変化に関する感度が高い: ±40%強の変化 (7月)
- ・日射量の増加に関する感度が比較的高い:-2~15%の強化
- ・その他の要因に関しては1~6% (7月), 2~4% (8月), 1~9% (9月)の影響



成層・鉛直混合にとって重要な内部潮汐がどの程度発生しているか?

- 内部潮汐エネルギー生成率:内部潮汐がどの海域で多く発生しているのかを示す
- 内部潮汐運動エネルギー : 内部潮汐の強度の大きさを示す
- 内部潮汐エネルギーの割合:全体の潮汐エネルギーのうち、内部潮汐エネルギーが占める割合を示す
 - ・海底地形勾配が大きく、潮流が強い場所で内部潮汐が生成

→流れの分布を考える上で内部潮汐も重要である可能性を示唆



Ministry of the Environment

半日周期内部潮汐の生成率・運動エネルギーと成層強度



高い正の相関/極めて強い成層依存性 ⇒成層が強くなっているときに内部潮汐が強くなっている

※今後、成層・鉛直混合に対する内部潮汐の役割を詳しく解析することが必要



将来のサブ連関図(検討中)



※内部潮汐の影響は成層・鉛直混合、潮流の変化に相互に関係するため、引き続き検討を要する



3. 検討結果(進捗)

(3) モデル計算結果を活用した海域特性図の作成



・ 平成28年度委員会報告の中で水質をベースにしてクラスター解析から海域区分を設定
 ・ 海域区分別に問題点の原因・要因の考察(下表)して海域区分毎に再生方策を検討

⇒モデル計算結果を活用することで、季節別やイベント毎の海域特性を把握

項目	問題点の原因・要因の考察、物理環境等の現状・変化			概況	
サルオ	原因・要因 • 夏期の底層における著しい貧酸素化(溶存酸素量 1mg/L 未満)と貧酸素化に伴う 底泥及び海底直上水中の硫化水素の増加により、へい死を引き起こしている可能性		水質	 筑後川等の河川が流入することから、DIN、POrP ともに有明海の中の他の海域と比較して高濃度の海域である。 夏期に西部干潟沖合域(A3海域との境界域)では貧酸素水塊が発生している。 000、T-Pは2009~2013年では環境基準値を上回っている。 	水質モデル結果から 季節変動やイベント
5		流動モデルや水質モ デル結果から対象生 物の生態に応じた環	底層溶存	 現状と変化 ・ ・	ことができる。
有 用 二 枚	 ・ <u>浮遊幼生や着底稚貝の量が過去と比較して2008年以降低位で推移していると類</u> <u>推される。このような状況の中で、資源の持続的な利用を進めるために確保すべき</u> 資源量等の知見が得られていないことが課題の一つとして挙げられる。 	物の生態に応じた煤 境条件(例えば、塩分 耐性や貧酸素耐性、 継続時間など)の目	酸素量 [®] (貧酸素 水塊)	 生している。 月1回の調査による底層溶存酸素量の年間最低値は、1972年以降、全3地点で2 ~5mg/L程度であり、有意な変化はみられなかった。 連続観測調査による底層溶存酸素量の日間平均値の年間最低値は、2004年以降 	
<mark>貝</mark> アサ	 ・ 覆砂によってアサリ等の有用二枚貝が増大するとの報告があることから、有用二 枚貝等の水生生物の保全・再生のため重要な地点について、底質改善が有効な場合 があると考えられる。 	施続時間などりの周 所性等を示すことが できる。		 のデータから、全2地点で毎年2.0mg/Lを下回っている。 現状と変化 ・ 全4地点のうち1地点(佐賀 A2)が環境基準A類型に指定された水域にあり、000 は2000~2013年では2~4mg/L/(万%/kh)で、基準値(A 新理)・2mg/L/L/TST を上回っ 	
	 (エイ類による費害について、有明海全体の項に記載。) Chattonella 赤潮の発生件数が有明海全体で増加しているが、これが直接アサリ資源に影響している可能性は考えにくい。 		COD (上層)=)	<u> ていろ</u> 。他の3地点がB類型に指定された水域にあり、COD は2009~2013年では1.4 へも、3mg/L(75%値)で、延~約1割で基準値(B類型:3mg/L 以下)を上回っている。 1974年から現在まで、COD は全4地点のうち2地点(佐賀 B2、佐賀 B3)で減少、	
底 啠	 ・ 西側は泥質干潟、東側は砂泥質干潟が形成されている。有明海の中では有機物、 硫化物が多い海域である。 	感濁物輸送モデルや 底質モデル結果から		<u>1 地点(佐賀 A2)で増加</u> 、その他の1 地点では有意な変化はみられなかった。 現状と変化 ・ 全4 地点とも環境基準Ⅲ類型に指定された水域にあり、T-N は 2009~2013 年では	
低 〕	 2000年以前の海域毎のデータがなく、1970年頃と現在の変化は不明である。2001 ~2015年のデータから、単調な変化傾向はみられなかった。 木海域では底質の動向とベントスの生息に明確な関係は確認されなかった。 	季節変動やイベントによる影響等を示す	(上層)®	 0.37~0.7 Ing/Lで、延べ1割で基準値(Ⅲ類型:0.6mg/L以下)を上回っている。 1981年以降のデータから、T¬N は全4地点のうち1地点(福岡 St.7)で減少、その他の3地点では有意な変化はみられなかった。 1941を変化 	
泥化	変化 ・ 全3 地点のうち1 地点(Asg-3)で粘土・シルト分が100%に近い値で推移し、他の2 地点では80~100%程度であり、単調な泥化傾向はみられなかった。		T-P (上層)≕	 ・ 全4地点とも環境基準Ⅲ類型に指定された水域にあり、T-Pは2009~2013年では0.065~0.18mg/Lで、基準値(Ⅲ類型:0.05mg/L以下)を上回っている。 ・ 1980年以降のデータから、T-Pは4地点のうち1地点(佐賀B3)で増加、1地点 (佐賀H4)) (50500/100 - 2010) 	
硫化物	 変化 ・ 全3地点で0.1~0.6mg/g程度であり、単調な増加・減少傾向はみられなかった。 変化 		流 況	(特徴化) (代代増加、その細の2 超良くは有意に変化はなられたのわった。 概況 ・ 平均流は反時計回りであり、エスチュアリー循環によって表層では湾口向きに、	流動モデル結果から
道熱》 有機物 CO	 全3地点で7~11%程度であり、単調な増加・減少傾向はみられなかった。 変化 全3地点で7~20mg/g程度であり、1地点(Asg-2)で増加傾向がみられたが、 (hの2)地点では単調な増加、減少傾向はなられなかった。 			 P層では湾奥回さの流れか形成されている。 M況 か温は有明海では最も低い。 <u>塩</u>分は有明海では最も低く、梅雨時期の河川からの淡水流入によって低下する。 	季節変動やイベント による影響等を示す ことができる。
堆積物	他の2地点では単調な増加・彼夕頃向はみられなわらた。なお、この3地点は、医 質の有機物含量が高いとの知見(後述)があるA3海域との境界域には含まれない。 変化 ・ 埋没測定板を用いて堆積厚の調査を行った 2009~2015 年のデータから、全3地		水温·塩分 (上層) ^{II}	現状と変化 ・ 水温は、全4地点で2009~2013年は18.2℃程度であり、有明海では最も低く、 湾口部(A7海域)と比較して1℃程度低い。1980年以降のデータから、水温は全 4地点のうち1地点(福岡St.7)で上昇、その他の3地点では有意な変化はみられ	
	点で顕著な増加・減少傾向はみられなかった。			<u>なかった。</u> 塩分は、全4地点で2009~2013年は26~29程度であり、A7海域と比較して4程 度低い、1980年以降のデータから、全4地点で塩分に有意な変化はみられなかった。 	30



計算ケース



・有明海全域を対象として通年の計算結果が出力されてい る平成28年度評価委員会報告に掲載された2006年を 対象とした計算結果を利用して解析図例を作成した。

・計算期間は2006年1月から12月までの通年であり、解析 期間の切り口は、表に示すとおり「通年」、「夏季」、「冬 季」、「台風」および「出水」の5パターンとしている。

⇒今回はこの計算結果を活用して海域特性図を試作

	解析期間	開始年月日	終了年月日
期間1	2006年1年間	2006年1月1日	2006年12月31日
期間2	夏季15日間	2006年8月1日	2006年8月15日
期間3	冬季15日間	2006年2月1日	2006年2月15日
期間4	台風接近を含む15日間	2006年9月10日	2006年9月25日
期間5	出水を含む15日間	2006年7月15日	2006年7月30日



海域特性図の作成方法

- ① 有明海全域(A1~A7海域)の各解析期間ごとの最大・最小・平均値を求める
- ②①の平均値が白色、最大値が赤色、最小値が青色になるカラーバーを作成する
- ③②のカラーバーを用いてコンター図を作成する
- ④ 各海域区分における平均値を求める
- ⑤④の平均値で各海域区分を塗りつぶした平面図を作成する

⑤は有明海内での相対的な大小関係を明らかにし、海域区分の概略の特徴を理解することができるが、一方で空間的・時間的なバラつきといった局所的な特徴を捉えることは困難



32



○海域特性図例:表層水温

通年では湾奥側で相対的に水温が低く、外海側で高い傾向であり、冬季にその傾向が顕著となる。夏季と出水ではその傾向は逆転し、浅 海域を中心とした湾奥側で水温が高く、外海側で低い傾向となる。台風と出水についてはイベントの時期、規模、発生場所によって様々な 特性を取り得ることに注意が必要。



33



○海域特性図例:底層水温

通年では湾奥側で相対的に水温が低く、外海側で高い傾向であり、冬季にその傾向が顕著となる。夏季と出水ではその傾向は逆転し、浅 海域を中心とした湾奥側で水温が高く、外海側で低い傾向となる。台風と出水についてはイベントの時期、規模、発生場所によって様々な 特性を取り得ることに注意が必要。





○海域特性図例:表層塩分

いずれの期間においても基本的に湾奥側で塩分が低く、外海側で高い傾向にある。淡水流入の多い出水時は河口域を中心に低塩分化する。台風と出水についてはイベントの時期、規模、発生場所によって様々な特性を取り得ることに注意が必要。





○海域特性図例:底層塩分

いずれの期間においても基本的に湾奥側で塩分が低く、外海側で高い傾向にある。淡水流入の多い出水時は河口域を中心に低塩分化する。台風と出水についてはイベントの時期、規模、発生場所によって様々な特性を取り得ることに注意が必要。





塩分15以下の継続時間の最大値をグラフ化している。閾値についてはアサリ成貝の低塩分耐性を考慮したもの。基本的に浅海域に限定 して低塩分の継続時間が長いことがわかる。台風と出水についてはイベントの時期、規模、発生場所によって様々な特性を取り得ることに 注意が必要。



37





今後の解析項目のリスト(案)

(優先的に検討)

流動サブモデル:

潮位差、潮流の強さ、水温、高水温継続時間、塩分、低塩分継続時間、成層強度

(今後検討していく予定)

懸濁物輸送サブモデル:

SS、高SS継続時間

水質サブモデル:

水質(COD, T-N, T-P, DIN, Chl-a, DO)、貧酸素継続時間

底質サブモデル:

T-S、TOC

底生生物サブモデル: 底生生物(アサリ、サルボウなど)

※水温、塩分、SS、DO等の継続時間の解析については、今後、対象となる生物を設定



4. 今後の検討方針

Ministry of the Environment

①貧酸素水塊の形成・消滅に関与する成層化の要因解析



- 成層化、鉛直混合に対する内部潮汐の寄与度の定量化
- 水質サブモデルへの影響検討(内部潮汐と貧酸素の関係等)

②モデルを活用した海域特性図の作成

委員会報告の記載内容の充実させ対策検討へ

- 潮位差、潮流の強さ、水温、高水温継続時間、塩分、低塩分継続時間、成層強度について海域特性図を作成して、各海域区分でどのような環境特性が記載できるか検討
- 将来的に波浪モデル、懸濁物輸送モデル、水質・底質・低次生態系モデルの結果から海域
 区分別の様々な海域特性を整理

③各サブモデルの精緻化

- 目的に応じたモデル精度を担保(必要に応じてモデルのバージョンアップが必要)
- モデルの課題や限界を整理して計算結果の解釈をするとともに必要に応じて課題解決を図る





3. (1) モデルの概要





					日周期 日	
項目			内容			[(
	流量		水文水質データベースの時間流量を使用。		半日周潮	۱ د
一級河川水温			水文水質データベースの河川水温データ(1か月 毎)と最寄りの気温観測所との単回帰式を推定。 得られた回帰式から気温(1時間毎)を使って推定。		長周期潮	1 1 2 1 2
その他河川 流量 水温			ー級河川流量から流域面積比をかけて推定。			1 1
			最寄りの一級河川と同様の水温を使用。			
開境界	珆	長周期	五島列島(福江)の調和定数。 *温			
		日周期、 半日周期	Matsumoto <i>et al.,</i> (2000) [※] を参考に、再現性を考慮。	30 25		
	水温、	塩分	JODCの値(1906年~2003年の平均値)を使用。	。) 20 県 ²⁰ 米		
	風向、風速		MSM-GPV(10m高)	*		
気象	全天日射量、 雲量、相対湿度		佐賀、長崎、熊本		1 06/01	0
	気温、降水量		佐賀、長崎、熊本、白石、久留米、岱明、島原、 三角、松島、大牟田、本渡、牛深、嬉野、野母崎、 口之津	() () () () () () () () () () () () () (

使用した調和定数(13分潮)

日周潮	K ₁	日月合成日周潮
	01	主太陰日周潮
	P ₁	主太陽日周潮
	Q ₁	主太陰楕率潮
	M ₂	主太陰半日周期
半口田湖	S ₂	主太陽半日周期
十口同州	N ₂	主太陰楕率潮
	K ₂	日月合成半日潮
	Sa	太陽年周潮
	Ssa	太陽半年周潮
長周期潮	Mm	太陰月周潮
	MSf	S_2-M_2
	Mf	太陰半月周潮



開境界水温塩分(JODC)

※ Matsumoto, K., Takanezawa, T., & Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. Journal of oceanography, 56, 567-581.



潮位時系列の再現性の定量化の例



・8月の1時間毎の観測値と計算値をプロットしている

3. (1) モデルの概要



流速時系列の再現性の定量化の例(S-3)







・観測期間は2013/8/12-2013/9/11 ・観測値は10分毎のデータを1時間平均 してプロットしている

流速時系列の再現性の定量化の例(St.F)







・観測期間は2013/8/12-2013/9/11 ・観測値は10分毎のデータを1時間平均 してプロットしている

水温塩分鉛直分布の再現性の定量化の例





・各地点の4回の鉛直分布(8/11, 8/18, 9/2, 9/12)を一つの散布図に まとめてプロット

3. (1) モデルの概要



130°25'

130°10'

130°15

130°20'

密度差の時系列の再現性の定量化の例



・観測期間は2013/8/12-2013/9/11

・観測値は10分毎のデータを1日平均し、計算値は1時間毎のデータを1日平均してプロットしている