

有明海における貧酸素発生への 気候変動影響評価について

九州大学大学院工学研究院 教授 矢野 真一郎

要 旨

2000 年冬の養殖ノリ色落ちに端を発した有明海異変からすでに 20 年以上経つ。近年の気候変動によると推測される大規模豪雨による出水は、大量の淡水を湾内に流出させ、それに起因する塩淡水成層の強化や長期化により、底層海水の貧酸素水塊の時空間的な大規模化が見られている。本報告では、著者らの研究グループがこれまでに行ってきた有明海における貧酸素水塊発生への気候変動影響評価に関する研究成果の紹介と、今後計画している新たな研究計画について解説する。

1. はじめに

有明海における 2000 年冬の養殖ノリの大規模な色落ちに端を発した、いわゆる有明海異変を契機に、国は「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」を 2002 年 11 月に施行した。それを根拠に、有明海・八代海総合調査評価委員会が設置され、2006 年 12 月に報告書が発表された。2011 年 8 月には、「有明海及び八代海等を再生するための特別措置に関する法律」(下線は著者。以下、特措法。)が改正施行された。ここで、「等」は両湾に隣接する橘湾と天草市牛深町周辺海域を対象海域に加えたことを意味している。2017 年 3 月には、特措法に基づき設置された有明海・八代海等総合調査評価委員会(以下、調査委員会)の報告書(以下、H28 年度報告書)が発表された。

H28 年度報告書では、両湾を豊かな海として再生するための再生目標が設定され、目標時期として 2026 年度(令和 8 年度)が設定されている。ベントスの変化、有用二枚貝の減少、ノリ養殖問題、ならびに魚類等の変化の 4 つの問題点について確認され、それらの原因・要因の考察、海域全体と個別に区分された海域毎に項目に対して再生方策が示された。

その後、2021 年 4 月に特措法が改正施行され、評価委員会は所掌事務¹の遂行状況を毎年公表し、H28 年

度報告書で掲げられた令和 8 年度の再生目標時期に最終報告書を発表する予定となっている。2022 年 3 月には、中間取りまとめ²りが公表され、各再生方策の実施状況が報告されている。加えて、これまでの報告書には示されていない新たな課題も整理され、令和 8 年度報告に向けて課題解決に取り組む必要があると示された。それらの課題とは、「気候変動に伴う気温や水温の上昇傾向による海域環境や生物・生態系への長期的な影響、マイクロプラスチックを含むプラスチックの海域への流出による懸念、近年多発化している豪雨やそれに伴う大規模出水等によるインパクトの大きい海域環境への影響等」とされており、それらの影響に関する調査研究の必要性が謳われた。

著者は、執筆段階(2023 年 5 月)で環境省が所管する調査委員会の委員兼委員長代理、その下に設置された 2 つの小委員会のうち海域環境再生方策検討作業小委員会の委員長、ならびに水産資源再生方策検討作業小委員会の委員等を拝命しており、先行的に研究してきた気候変動影響評価により中間取りまとめに寄与した。また、2023 年度より開始された環境省環境研究総合推進費「自然外力の増加に適応する水環境保全に向けた有明海・八代海等の気候変動影響評価」の研究代表者として、有明海・八代海における水環境(特に貧酸素)について研究を進めており、令和 8 年度報告書へ寄与することが求められている。本稿では、著者らが

に意見を述べることとされている。

¹ 国と関係県が行う総合的な調査の結果に基づき対象海域の再生の評価を行うこと、これらについて主務大臣等

行ってきた有明海における貧酸素水塊発生への気候変動影響評価に関するこれまでの成果と、今後予定している研究内容の紹介を行う。

2. 沿岸域環境への気候変動影響の一般論

最初に、一般論として沿岸域における水環境等への気候変動影響について概説する。

海洋全体については、日本海洋学会が気候変動影響についてまとめたものがあり、そこに詳しい²⁾。温暖化の進展により、海水温や海面の上昇が予測されている。また、海面での蒸発と降水の変化から塩分の変化が、さらに風況の変化なども加わることで海洋の循環構造の変化が発生する可能性も指摘されている。一方、温暖化ガスである大気中 CO₂ の上昇は、海水に溶ける CO₂ を増加させるため、海水の酸性化が進むことが予測されている。これらの変化は、当然ながら海洋の生物や生態系へ影響を与えるが、種々の変化予測の不確実性が高く、現状では確定的なことは明確でない。

一方、海洋中で最も生産性が高い沿岸域についても、上述の影響を受けるが、それに加えて、地形的特性で陸域に隣接しているため、陸域からの流出構造の変化の影響を多大に受けることが容易に推測される。まず、陸域での降水パターンの変化により淡水の流出パターンが変化するため、沿岸域の中でも特に閉鎖性内湾では塩淡成層構造に大きな影響が出ると予想される。つまり、大規模出水に伴い塩淡成層が強化された場合、対象内湾に固有の特性や発生のタイミング、すなわち、海水交換能や潮汐・潮流の強度、大潮・小潮の時期、ならびに台風等の気象・海象条件に依存して、貧酸素の消長(発生した貧酸素がどの程度持続し、どのタイミングで消失するかなど)が大きな影響を受けると考えられる。併せて、出水時に淡水とともに流出する物質である栄養塩や有機物、ならびに土砂の量的・質的变化も、中長期的に大きな影響を与えると予想される。

本稿で対象とする有明海は、九州で最大の閉鎖性内湾であるが、近年、九州では大規模な洪水が毎年のように発生していることから、影響を強く受けていると推測される。例えば、2012 年の九州北部豪雨(矢部川で堤防

が決壊し、柳川市の 1/3 が浸水した)、2017 年の九州北部豪雨(筑後川中流域の支川で近年最大規模の流木災害が発生した)、2018 年の西日本豪雨(中四国で大きな被害が出たが、筑後川などでも大雨を記録した)、2019 年の秋雨前線による豪雨(六角川がはん濫し、近隣の鉄工所から油の流出が発生した)、ならびに 2020 年の令和 2 年 7 月豪雨(球磨川で 50 名の犠牲が出て、筑後川では昭和 28 年の西日本水害以降で初めて本川が氾濫し、上流の下笠ダムでは昭和 48 年の竣工後初めての異常洪水時防災操作が実施された)などがあった。特に、2017 年豪雨、2018 年豪雨、ならびに 2020 年豪雨については、温暖化の影響を受けた可能性が指摘されている^{3),4),5)}。

温暖化による貧酸素水塊発生への影響については、山室ら⁶⁾にまとめられている。まず、海水温の上昇により、海水の酸素溶解度が低下することによる溶存酸素濃度 DO の低下が予想される。加えて、水温成層が強化されることにより底層への酸素供給が減ることから、貧酸素の発生が促進されることも予想される。また、生物活性が上がり、呼吸量の増加や排泄物の増加が影響する可能性も指摘されている。さらに、海面上昇に起因して、背後で護岸整備された干潟や砂浜などの潮間帯が減少する可能性があり、水質浄化機能が劣化することによる影響が指摘されている。

加えて、最近の研究で、海水の酸性化と貧酸素化の同時生起により、生物の貧酸素耐性が下がることなどが報告されている⁷⁾。最近の気候変動の影響を受けた大規模豪雨の頻発化は、一般的に河川水中の CO₂ 濃度が海水より高いことも併せると、少なくとも短期的には酸性化と貧酸素化の同時生起の可能性を高めると推測されることから、生物や生態系への影響について詳細な研究が必要になると考えられる。藤井⁸⁾が指摘しているとおり、研究の深化や対策の検討が必要である。

3. 有明海における水環境への気候変動影響評価

3.1 水温・気温の変化による影響について

矢野ら⁹⁾は、有明海に流入する一級河川のうち筑後川と本明川を除く 6 河川(矢部川、嘉瀬川、六角川、白

川, 緑川, 菊池川)の感潮域より上流にあり最も下流に位置する国土交通省所管の流量観測所地点で毎正時河川水温の連続測定を 2015 年夏から 2016 年末まで一年以上にわたり実施した. なお, 筑後川は国土交通省の久留米大橋観測所で連続測定されているものを用いた. 本明川は現在, 諫早湾の締切堤による調整池内に流入し, 直接河川水が海域へ流出しないことから, 測定しなかった. 観測結果について, 1 日 24 時間を 4 時間毎に 6 つの時間帯に分けて観測所近隣の気象官署の気温データとの一次相関をとったところ, 決定係数 R^2 が 0.8 以上と高い相関性を示した.

この結果を用いて, 沿岸域 3 次元流動モデル Delft3D-Flow を適用した有明海・八代海を結合したモデルにより河川水温変動が熱成層構造に与える影響を評価した. モデルの概略は以下の通りである. 水平方向の解像度は, Δx が約 250m 程度(緯度・経度を 10 秒刻み)であり, 鉛直方向には座標系で均一に 10 層を設定している. 開境界条件として長崎県の樺島水道から鹿児島県の阿久根までを南北と東西の線で結んだ開境界上で 40 分潮成分を与えた. 干潟域では移動境界モデルにより水没・干出を表している. 水平方向の乱流粘性・拡散係数には SGS(Sub-Grid Scale)モデルを, 鉛直方向の乱流粘性・拡散係数には浮力項を含む $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いている. 淡水流入については, 一級河川(図 1)と 9 本の比較的大きい二級河川, ならびに諫早湾の締切堤南北排水門を考慮した. 河川水温については, 調査により得られた毎時データを使用した. 二級河川については, 近傍の一級河川と水温は同じに, 流量は比流量が同じになるように仮定した. 海面での熱 flux は, 村上モデル¹⁰⁾を用いた.

各河川に本測定データを用いた場合(ケース 1)と各河川で毎月一度測定し公開されている水温データを 1 ヶ月間与える場合(ケース 2)の比較により, 河川水温の時間変動が与える熱成層への影響を評価した. 有明海内で淡水の影響を最も強く受ける北部有明海 Sta.A(図 1)で比較した. 比較時期は水温観測データと河川流量が揃っており, 熱成層の発達期待される 2015 年 8 月とした. 図 2 に両ケースの水温差(ケース 2 からケース 1 を差し引いた)のインプレットを示す. 全体的にケース 1

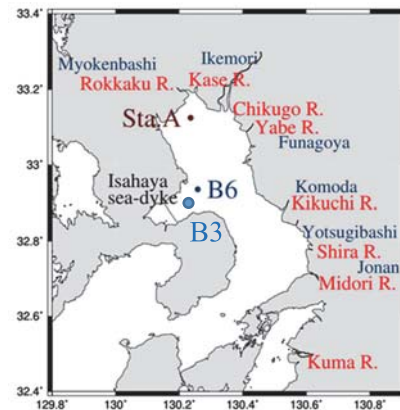


図 1 対象とする一級河川と水温測定位置⁹⁾

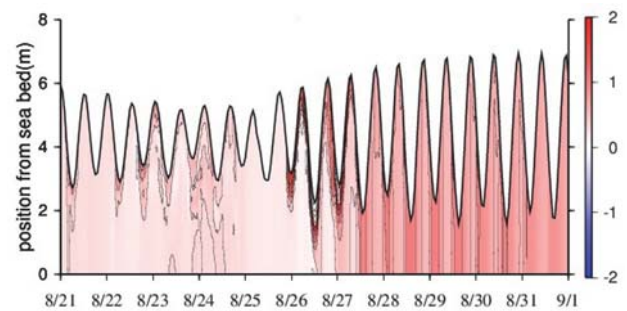


図 2 水温計算結果の差分(ケース 2 - ケース 1: 単位 $^{\circ}\text{C}$)⁹⁾

の水温が低いこと, 出水による河川水の到達が見られた 8 月 26 日~27 日の水温成層の違い, ならびに大潮で鉛直混合が強い 8 月 29 日以降の水温の違いが明瞭に確認できた. このことより, 水温の再現性において各河川における毎時連続データを与えることの有効性が確認できた. また, 出水に伴い比較的水温の低い河川水が大量に流出する状況では, 逆転成層が強化されていることも確認できた. 一方, 熱成層の発達が終息し, 混合期への移行が始まる 9 月についても水温を比較したところ(図省略), 両ケースとも加熱が弱まることと, 河川水の流入の減少から成層が弱まることは表現されていたが, 両ケースに数 $^{\circ}\text{C}$ の基底水温差が生じていた.

次に田所ら¹¹⁾は, 地球温暖化により気温が上昇した場合を想定し, 疑似的な温暖化後の気象条件を想定した 3 次元流動シミュレーションとその結果を用いた鉛直 1 次元 DO シミュレーションを行った. DO モデルは, 流動モデルで得られた鉛直乱流拡散係数の分布を与えた 1 次元の拡散方程式を用いた. 比較対象期間として, 2015 年の夏季(7~9 月)を設定した. 助走計算は同年 4 月から始め, 3 ヶ月分を行った. 比較は諫早湾の湾口付

近である B6 地点 (図 1) で行った. この海域は例年貧酸素水塊が発生しており, 有明海内で影響を比較するのに適当である.

気温の上昇幅としては, 2100 年時の抑制目標値 +2°C と最悪シナリオを想定した +4°C を仮定し, 2015 年の気温データに一律に加えた. 河川水温, ならびに海洋の水温に相当する開境界での海水温についても気温上昇の影響を受けるように設定した. 河川水温の上昇幅は, 得られた気温との相関式より気温が +2°C または +4°C 上昇した場合について, 各河川の水温上昇幅を求めて河川水温に加えた. 開境界海水温は各河川の水温上昇幅の平均値を加えて設定した.

河川水温と海水温の上昇がそれぞれ成層構造に与える影響を確認するために, 表 1 に示す現在気候条件を含む 6 ケースで計算を行った. ケース①が現在気候, ケース②が +2°C 上昇, ケース③が +4°C 上昇の場合である. また, A は海水温も上げた場合, B は上げなかった場合である. ケース③では河川水温は上げず, 海水温のみ上げた場合 A も設定した.

熱成層が最も発達する 8 月に大きい出水が下旬に観測されたことから, 下旬の約 10 日間について検証した. 8 月 25 日から 26 日にかけて台風 1515 号の通過に起因する大きな出水があり, 風速も 20 m/s を超えるなどかなり荒れた状況であった. 出水は小潮期に発生したことから成層の発達が起りやすい状況であった.

現在気候を想定した条件であるケース①について, 図 3 に B6 地点における DO イソプレットを示す. 8 月 22 日から 24 日の期間で小潮かつ出水の影響を受けて強化された水温成層に起因し, 底層での DO 低下が著しいが, 25 日には成層が解消し底層 DO も上昇している.

次に, 図 4, 5 にケース②と③における現在気候 (ケース①) からの DO 増加率 (正値が増加, 負値が減少) を示す. 気候変動下においては, 全てのケースで現在気候からの DO の減少が見られた. 特に出水による成層が発達する 8 月 22 日から 25 日にかけて, 全ケースで底層の DO 減少率が大きい. 河川流量は同じであるため, 熱環境の変化に伴う水温成層の強化がもたらした結果と解釈できる. その後の大潮へ移るフェーズでも減少傾向が続いている. 表層で DO が減少したのは, 飽和酸

表 1 疑似温暖化実験の温度条件 [表中の a は河川水温の気温との相関式 (一次式) における比例定数. $\langle \rangle$ は全河川の平均値.]¹¹⁾

ケース	気温(°C)	河川水温(°C)	海水温(°C)
①	0	0	0
②(A)	+2	+2a	+2<a>
②(B)	+2	+2a	0
③(A)	+4	+4a	+4<a>
③(A')	+4	0	+4<a>
③(B)	+4	+4a	0

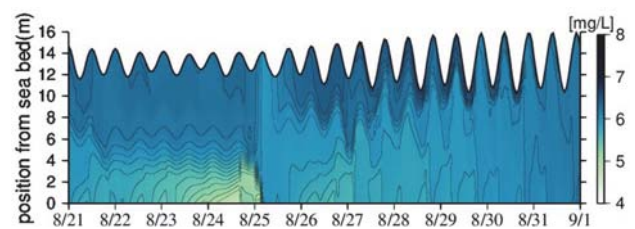


図 3 DO の計算結果(B6 地点. ケース①)¹¹⁾

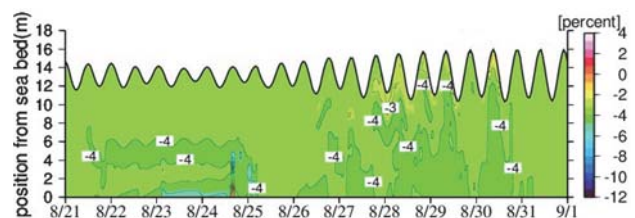
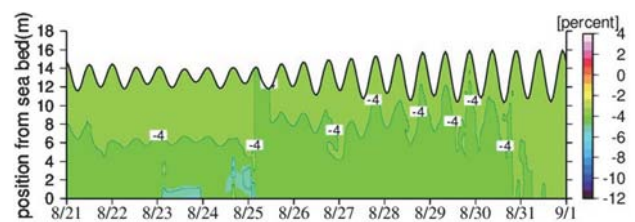


図 4 ケース①に対する DO 増加率の計算結果 (B6 地点. 上図: ケース②(A), 下図: ケース②(B))¹¹⁾

素濃度が水温の関数であり, 水温が上がる場合にはそれが下がることに起因している.

ケース②と③の系列の比較からは, ③の DO 減少率が大きく, 最大で 1 割程度の低減が見られた. ケース②(A)と②(B), または③(A)と③(B)の比較からは, 外海水温の影響を評価できるが, DO 減少率は全体的に同程度であり影響は小さい. ケース③(A)と③(A')の比較から河川水温の影響が評価できるが, 大きな違いが見られなかった. よって, 今回検証した範囲では気温場の影響が最も水温成層への影響が大きく, 河川水温と外海水温の影響はそれほど大きいものでなかった. さらに,

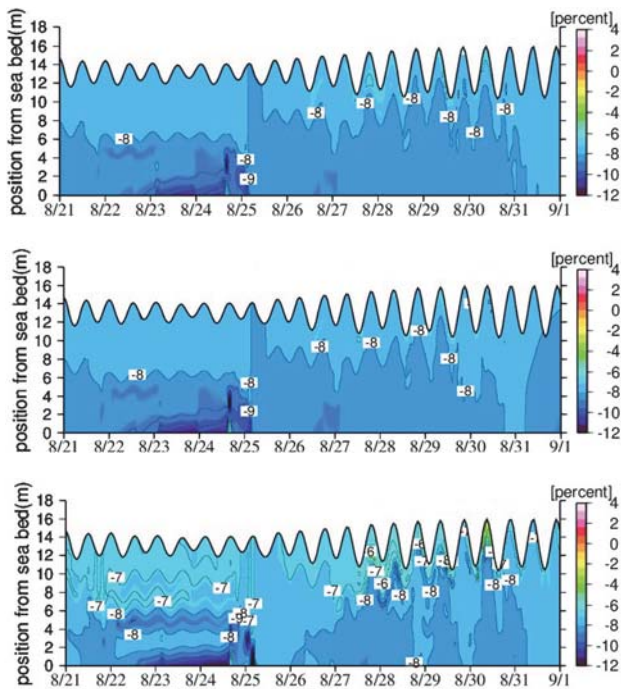


図 5 ケース①に対する DO 増加率の計算結果 (B6 地点。上:ケース③(A), 中:ケース③(A'), 下:ケース③(B))¹¹⁾

4°C上昇で DO が 1 割程度低減し、潮汐のフェーズによらず低下する傾向が見られた。検証した出水規模は想定される出水としては中規模であることから、最大規模の出水に対する分析が必要と考えられる。

3.2 河川流量変化による影響について

田所・矢野¹²⁾は、3次元流動モデルと低次生態系モデルを用いて、前述の気温・河川水温・海水温に加えて河川流量の変化を含めた総合的な評価を試みた。

低次生態系モデルとして DELFT3D-WAQ モデルを用いた。モデルを構成するコンパートメントは、図 6 に示すように植物プランクトン(一種類)、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リン、粒状態有機物 POM、ならびに溶存酸素 DO とした。これらに対して考慮した素過程は、光合成・呼吸・枯死、有機物の分解・沈降、硝化、再曝気等である。モデル式やモデルパラメータについては数が多いので詳細を省くが、有明海の貧酸素水塊の消長について検討している Yamaguchi・Hayami¹³⁾の値を主に参照し、その他に Blauw *et al.*¹⁴⁾と Gurel *et al.*¹⁵⁾も参照してパラメータ値を決定した。

気温の上昇幅として、最悪シナリオに基づく+4°Cとその半分の+2°Cを想定し、2015年の気温データに一律に

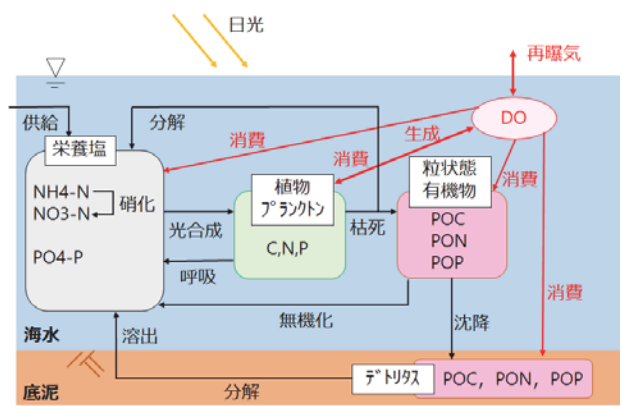


図 6 低次生態系モデルの構成¹²⁾

表 2 疑似温暖化実験の設定条件 [表中の a は河川水温の気温との相関式(一次式)における比例定数. $\langle \rangle$ は全河川の平均値.]¹²⁾

Case	気温(°C)	河川水温(°C)	海水温(°C)	流量倍率
I	0	0	0	
II(A)	+2	+2a	+2a	×1
II(B)			0	
III(A)	+4	+4a	+4a	
III(B)			0	
III(C)		0	+4a	
III(D)		+4a		× β

加えた。本来この上昇幅は、産業革命以前からの偏差を意味しているが、九州の産業革命以前の気温データが不明確なことがあり、以下の様に考えた。IPCC(2013)¹⁶⁾では、1986年から2005年までの平均気温からの偏差で各シナリオに対する気温上昇が議論されており、2015年での世界平均の地上気温偏差は温暖化のシナリオによらず+0.5°C程度であった。最悪シナリオである RCP8.5 では、2100年時点での予測値が+4.1°C±1.3°C程度であり、2015年から見ると+2.3~4.9°Cとなることから、その中間値程度として+4°Cを設定した。

河川水温と外海水温は前述と同様に設定した。河川流量については、比較対象期間内に起こった8月25日の中規模出水における流量を2倍、3倍、…、10倍と引き延ばしたケースを想定した。低水時については、引き延ばしを行っていない。なお、河川流量の影響評価

は、気温が 4℃上昇した最悪の場合についてのみ行った。計算は、気温・河川水温・外海水温の上昇および河川のピーク流量の変化それぞれが与える有明海への影響を評価するために、表 2 に示すケースで行った。

疑似温暖化実験の結果を比較するために、B3 地点と Sta.A (図 1) における現在気候(Case I)からの DO 変化率を各ケースで求めた。ここでは主に河川流量変化による影響についての結果を示す。図 7 に現在気候 Case I の B3 地点における DO の計算結果を示す。加えて、図 8 に同地点の Case III(A)と Case III(D)の $\beta=6.4$ 、ならびに Sta.A における Case III(D)の $\beta=6.4$ の DO 変化率のインプレットをそれぞれ示す。なお、 $\beta=6.4$ は、有明海に注ぐ河川の中で最も規模の大きい筑後川での計画高水流量(荒瀬地点, 生起確率 1/150, 10,300 m³/s)に相当するピーク流量が発生する場合であり、大規模出水の代表値として選んだ。

Case III(A)は、現在気候よりも全体的に DO 濃度が減少し、特に 8 月 22 日から 25 日の小潮期に底層で 2~3 割程度の減少が確認できる。また、出水後の 26 日から 30 日にかけても DO 濃度の減少が確認される。なお、表層付近でも DO 濃度の減少がみられるのは、気温の上昇によって表層水温が上昇し、飽和酸素濃度が減少したためである。Case III(D)についても Case III(A)と同様な傾向を示したが、8 月 26 日以降の底層の DO 減少が Case III(A)より著しかった。また、塩分躍層より上層で DO 濃度が増加しているのは、淡水流入により塩分が低下したことで、飽和酸素濃度が上昇したためである。このように表層と底層で変化の傾向に差が生じたのは、強い塩淡水成層が発達したためと考えられる。

河川水温変化の影響を評価するために Case III(A)と(C)を比較したところ、DO 変化率に大きな差がみられなかったため、影響は大きくないと判断した。外海水温変化の影響は、Case III(A)と(B)の比較から小さい変化が確認されたが、寄与は大きくないと判断された。この傾向は気温が 2℃上昇した場合の Case II(A)と(B)の比較からも同様に読み取れた。最後に気温変化の影響(Case II(A)と III(A)の比較)に着目すると、DO 変化率に大きな違いが見られた。よって、温度変化のうち気温変化が DO 分布に与える影響が最も支配的であることが

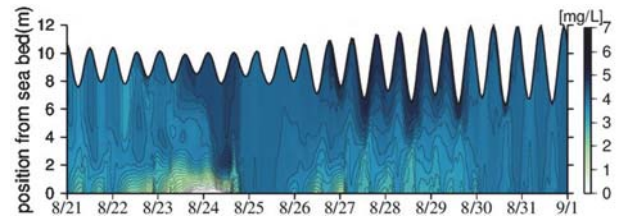


図 7 DO の計算結果(B6 地点, Case I)¹²⁾

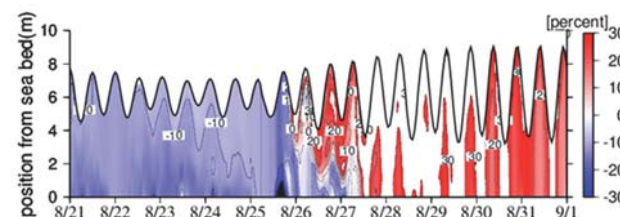
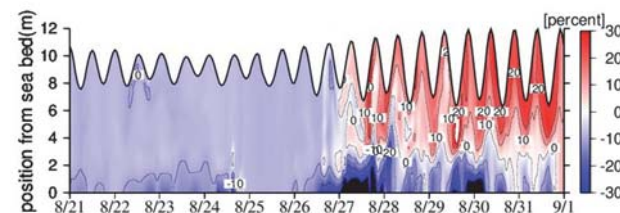
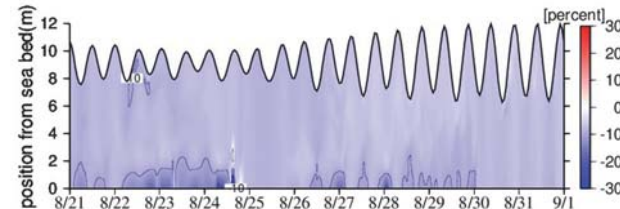


図 8 Case I に対する DO 増加率の計算結果 (上: Case III(A), B3. 中: Case III(D), B3, $\beta=6.4$. 下: Case III(D), Sta.A, $\beta=6.4$)¹²⁾

分かった。このことは、前述の一次元モデルによる解析でも同様の傾向が得られており、この生態系モデルに含まれている素過程については水温変化により極端に DO を改変することがないと解釈できる。

最後に、温暖化後の流量変化が貧酸素水塊の消長に与える影響を定量的に評価するために、B3 と Sta.A の両地点において、貧酸素水塊の一般的な基準である DO 濃度が 3 mg/L 以下になった時間を積分して得られる時間スケールを持続時間と定義し、流量の増加率 β との関係を検討した。対象期間は出水によるピーク流量発生以後の 8 月 25 日から 9 月 1 日までの 7 日間とした。 β は、1.0 (Case III(A)相当) から 10.0 まで変化させた。

表 3 にこれらの結果と後述する正規化に用いる現在気候(Case I)の結果を示す。また、図 9 には現在気候(Case I)の結果を基準に正規化した貧酸素水塊の持

表3 底層の貧酸素水塊の持続時間¹²⁾

β	貧酸素水塊持続時間(h)		備 考
	B3	Sta.A	
1.0	66	67	
1.3	67	69	
2.0	65	63	
3.0	80	55	
4.0	81	55	
5.0	85	51	
6.4	84	50	計画高水流量相当
7.0	81	47	
8.3	74	43	計画高水流量1.3倍
9.0	68	42	
10.0	56	42	
Case I	27	20	

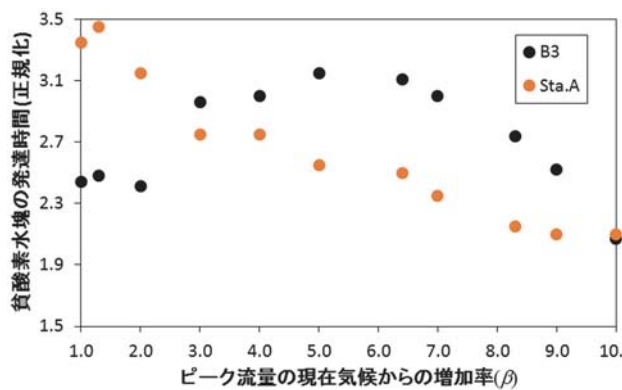


図 9 Case III(D)における β と正規化された持続時間の関係¹²⁾

持続時間と β の関係を示す。貧酸素水塊の持続時間が最も長くなる β 値は、B3 で 5~6, Sta.A では 1.3 程度であり、地点により異なる。これは Sta.A の方が B6 に比べて、筑後川の河口に近いために河川流量変化による影響を受けやすいことと、最奥部であるために河川流量が一定規模以上となると全体が淡水で一様化して、B3 より小さい β でピークを示したと考えられる。また、ピーク以降貧酸素水塊の持続時間が減少に転じているのは、河川からの淡水流入量が潮汐による海水の遡上量を大きく上回り、表層から底層まで塩分濃度が減少したため、成層が発達せず、DO が表層から底層まで輸送された

ためである。一方で、B3 は $\beta = 5 \sim 6$ 程度までは上昇を続けていた。このことは、河川流量規模に応じて海域ごとの貧酸素水塊発達の傾向性の違いがあることを意味しており、タイラギやサルボウといった底生生物に多大な影響を及ぼす貧酸素水塊の発達については、海域毎の対応を考慮する必要があることを意味している。

Hao *et al.*^{17), 18)} は、3次元流動モデルと低次生態系モデルを用いて、近年の出水イベントによる有明海と八代海での貧酸素水塊の発達について再現計算を行い、出水規模による貧酸素水塊の持続時間について調べた。ここでは、有明海の結果のみ紹介する。

モデルの再現性について、B3 地点における 2020 年夏季の底層 DO で比較した(図 10)。観測値は、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所 (<https://akashiwo.jp/index.php>)により公開されているものを使用した。観測値の変動は概ね再現できていることが分かる。図 11 に、2020 年夏季の筑後川河口での流量ハイドログラフを示す。2020 年は球磨川流域で甚大な被害をもたらした令和 2 年 7 月豪雨が 7 月 4 日に発生

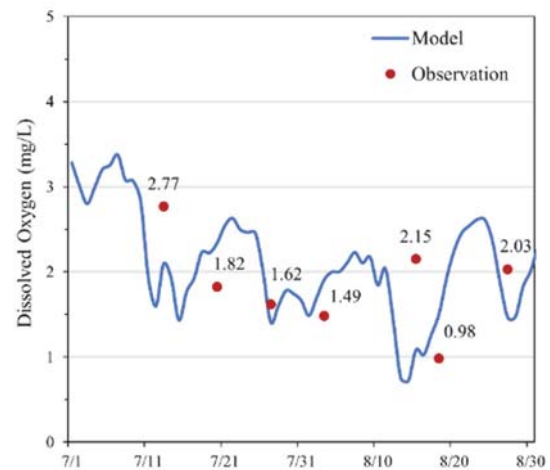


図 10 2020 年夏季の B3 地点の底層 DO の再現性¹³⁾

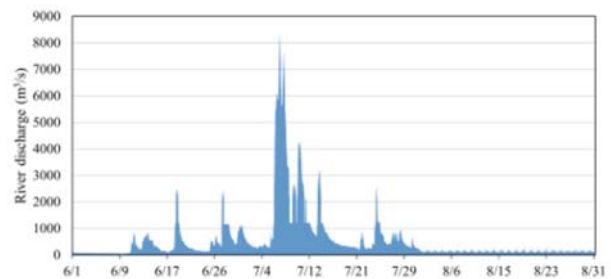


図 11 2020 年夏季の筑後川河口での流量ハイドログラフ¹³⁾

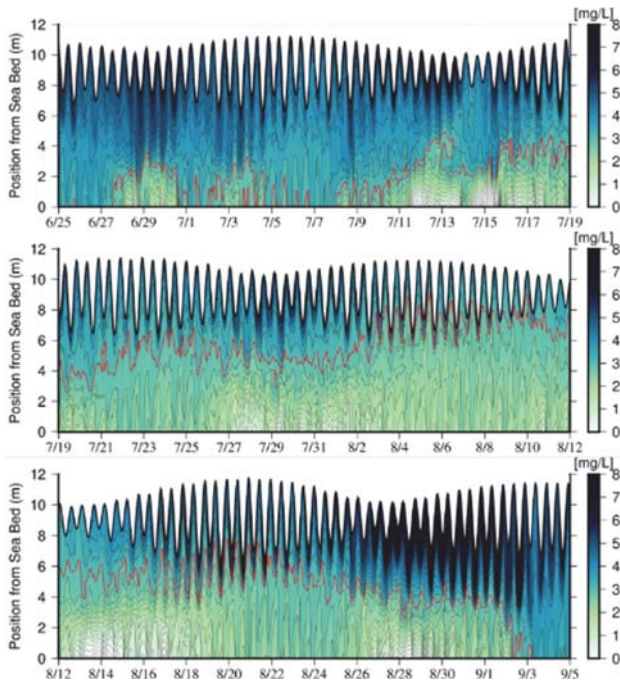


図 12 2020 年夏季の B3 地点における DO 計算結果のイソプレット (赤線は 3 mg/L)¹³⁾

したが、その後 7 月 5 日から 7 日にかけて筑後川流域においても豪雨が発生し、上流の下釜ダムでは 1973 年の竣工後初めて異常洪水時防災操作が行われ、また日田市内では昭和 28 (1953)年の西日本水害以降初めて筑後川本川ではん濫が発生している。

ここでは、表 4 に示した 6 年分の計算を行って、筑後川からの 1 洪水イベントの総流出量に対して貧酸素水塊の持続時間を比較した。2009 年は 2 回出水があったので、それらを個別に取り扱っている。2020 年の出水は近年で最大のピーク流量と総流出量を記録していた。また、2020 年以前で近年最大の貧酸素が発達したといわれる 2006 年は、2020 年と比べてピーク流量は半分程度、総流出量は約 2 割減であった。対象年中で最も総流出量が少なかった 2004 年で正規化した総流出量も示したが、2020 年が最も大きく、次に 2006 年が続いていた。図 12 には 2020 年夏季の B3 地点における DO の計算結果を示した。貧酸素の基準を 3 mg/L (図中の赤線) 以下とすると、底層で長期間にわたり貧酸素が維持していることが分かる。図 13 に、各対象年の計算で底層 DO が最も低いレベルとなった時点における底層 DO の平面分布のスナップショットを示す。全ての年で、北部有明海と諫早湾湾奥部で貧酸素が発達する様子が

表 4 筑後川流量と貧酸素継続時間の評価結果¹³⁾
[注:KS73-1 は前述の Sta.A を示す.]

Case	Year	Q_{max} (m ³ /s)	Total volume of effluent (10 ⁶ m ³)	Normalized total volume of effluent	Duration of hypoxia (day)		
					Sta.B3	Sta.B6	Sta.KS73-1
1	2020	16,457.33	8,263.50	11.77	59.6	45.5	60.4
2	2018	16,000.46	2,925.55	4.17	23.9	6.8	20.0
3	2017	9,571.35	1,493.07	2.13	6.0	0	5.5
4	2009 (1st)	10,410.90	1,672.60	2.38	0.2	0	0
	2009 (2nd)	9,608.09	2,394.19	3.41	5.8	0	4.9
5	2006	8,789.71	6,800.86	9.68	46.4	22.3	42.4
6	2004	3,936.39	702.27	1.00	0.3	0	0

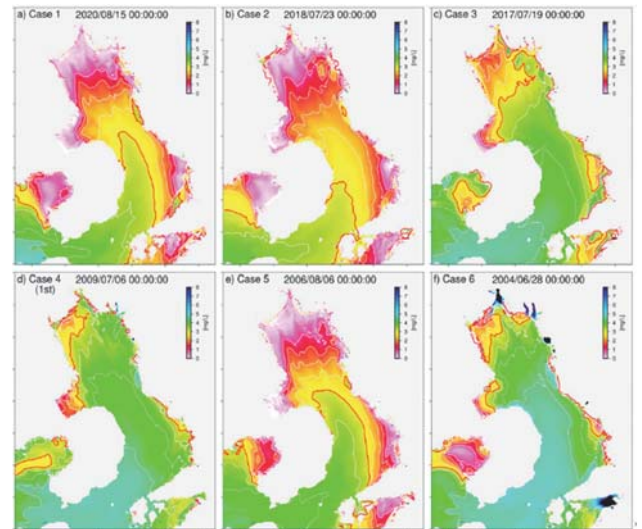


図 13 底層 DO が最も低い際の平面分布計算結果 (a)2020 年, b)2018 年, c)2017 年, d)2009 年, e)2006 年, f)2004 年.)

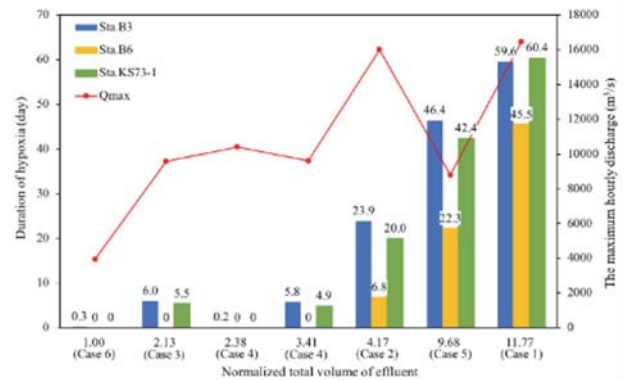


図 14 正規化した筑後川の総流出量に対する底層貧酸素の持続時間との関係
[注:KS73-1 は前述の Sta.A を示す.]

分かる。また、総流出量が大きくなると、貧酸素の空間規模が大きくなっている。図 14 に、正規化した総流出量に対する 3 つの比較地点における貧酸素持続時間を比較した。また、図にはピーク流量も示した。Case 2 は最もピーク流量が大きい Case 1 と同レベルのピーク流量であるが、総流出量は異なっている。その差が持続時間

の差となって現れている。一方、ピーク流量が Case 1 と比べて小さい Case 5 は総流出量が Case1 よりやや小さいが、他と較べれば非常に大きいため、持続時間は長くなっている。有明海では総流出量が貧酸素の時空間的規模の主要な決定要因であることが示唆された。

4. 有明海・八代海等における貧酸素水塊発生に対する気候変動影響研究の今後の展開

最後に、2023 年度より著者が研究代表者として実施している環境省環境研究総合推進費によるプロジェクトの研究内容を紹介する。本プロジェクトでは自然外力が有明海・八代海等の水環境・生態系に及ぼす影響を総合的に評価する陸域－海域モデルを開発し、気候変動予測データに基づく将来予測を行うことを計画している(図 15)。以下に示す 3 つのサブテーマの連携のもと、豪雨・気象場、有機物・栄養塩循環と海水交換、貧酸素水塊について各要素の類型化と生起確率、要素間の同時・条件付き生起確率、これらの将来変化などを統計的に解析し、大規模貧酸素水塊が発生しやすい気

象・海象パターンと気候変動の影響を明らかにする予定である。

サブテーマ 1 「貧酸素化に影響する豪雨パターンの気候変化解析」: 近年頻発化している豪雨に着目し、継続時間や総降雨量など過去の豪雨事例の特性や気候変動の影響を解析する。貧酸素化への寄与が相反する前線性豪雨と台風の気象成因について両者の同時生起や連続生起などの発生パターンを解析し、貧酸素水塊の消長を支配する豪雨の特徴や生起確率およびこれらの将来変化を明らかにする。

サブテーマ 2 「海水交換および有機物・栄養塩循環の将来変化と底生動物への影響」: 外洋の海象場(対馬暖流由来の暖水渦)に着目し、有明海・八代海等の海水交換と有機物・栄養塩循環への影響とその将来変化を解析する。豪雨や台風、気温・水温等の気象場も踏まえ、海水交換の低下など貧酸素化に繋がる気象場・海象場の生起確率と将来変化を明らかにする。また、過去の底生動物と底層環境の関係を解析し、モデルの水質・底質予測値に基づいて底生動物への気候変動影響を予測する。

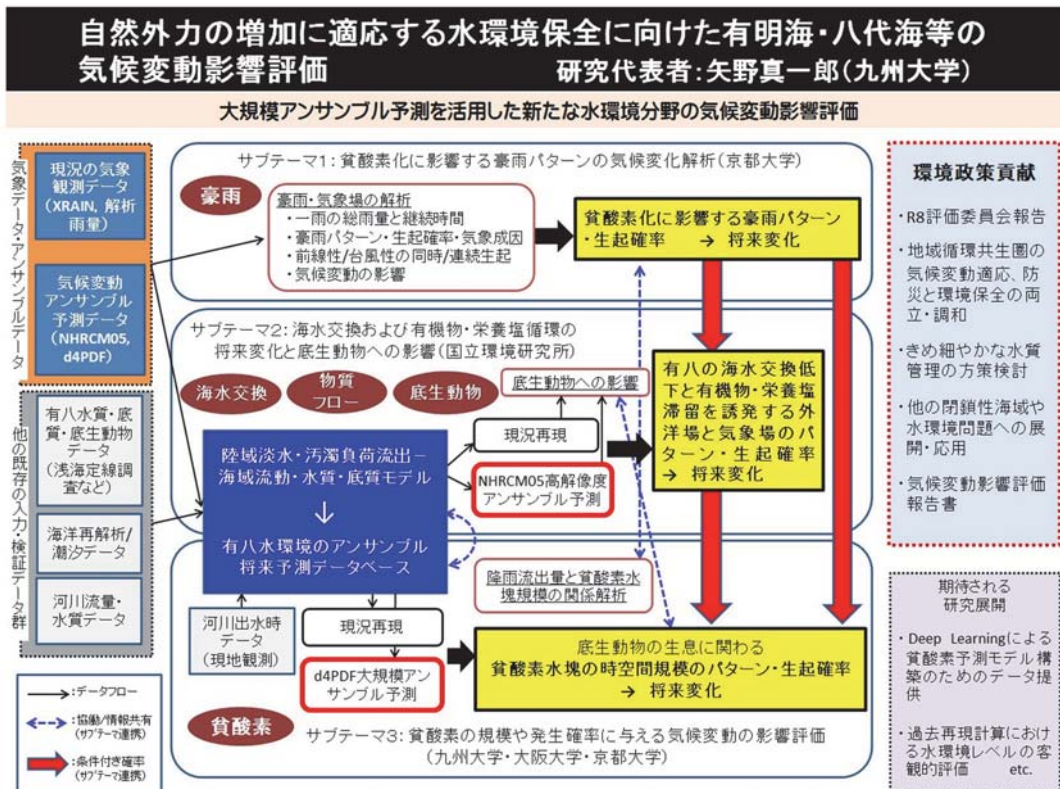


図 15 研究計画の概要図

サブテーマ 3 「貧酸素の規模や発生確率に与える気候変動の影響評価」: 陸域-海域モデルの再現性, 特に近年の豪雨出水時の水質に着目して検討し, モデルの改良を行う. 気候変動予測データのバイアス補正を行うとともに, 陸域-海域モデルを用いたアンサンブル予測計算を実施し, 貧酸素水塊の時空間規模に対する発生確率と気候変動の影響を明らかにする.

5. おわりに

我が国の閉鎖性海域の水環境政策は, 瀬戸内海の栄養塩類管理制度や第 9 次水質総量削減制度をはじめ, 水質の保全と生物多様性・生産性の確保が両立するきれいで豊かな海の実現に向けて, 栄養塩類の一方的な削減から順応的管理へと基本方針が大きく転換したが, その背景には気候変動への適応も含まれている. 今後の水質管理は気候変動によって増大する自然外力にも適応する必要があるが, 自然を相手にする以上, 対応できる範囲には自ずと限界がある. 治水とは異なり, 水環境保全では平時, すなわち発生頻度が高い問題への対応が肝要であり, それを特定することによって有効かつ効率的な水質管理の検討がはじめて可能になると考えられる.

このような観点のもと, これから進める研究では, 典型的な水環境問題で多くの知見が蓄積されている貧酸素水塊に着目し, 自然外力から大規模貧酸素水塊の発生に至るプロセスのパターンや生起確率を解析し, これを連関させることで高頻度の事象を特定することを計画している. 本研究の枠組みは, 有明海・八代海等の貧酸素水塊のみならず, 他海域の水環境問題へも展開可能であるため, 新たな水環境保全の基礎構築へ貢献したい.

謝辞: 本研究の一部は環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20231003)により実施した.

参考文献

- 1) 有明海・八代海等総合調査評価委員会: 有明海・八代海等総合調査評価委員会中間取りまとめ (2022).
- 2) 日本海洋学会(編): 海の温暖化 変わりゆく海と人間活動の影響, 朝倉書店 (2017).
- 3) 小坂田ゆかり, 中北英一: 領域気候モデルによる梅雨豪雨継続時間と積算雨量の将来変化予測と過去の事例を用いた検証, 土木学会論文集 B1 (水工学), 74(5), I_19-I_24 (2018).
- 4) Y. Imada, *et al.*: Advanced risk-based event attribution for heavy regional rainfall events, *npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 37 (2020).
- 5) 気象庁: 令和 2 年 7 月の記録的大雨や日照不足の特徴とその要因について, <https://www.jma.go.jp/jma/press/2008/20a/kentoukai20200820.pdf> (2020).
- 6) 山室真澄, 石飛裕, 中田喜三郎, 中村由行: 貧酸素水塊 現状と対策, 生物研究社 (2013).
- 7) 小埜恒夫, 村岡大祐, 林正裕, 依藤実樹子, 鈴木洋, 井口亮, 藤井賢彦, Lawrence P. Bernardo: 沿岸域における海洋酸性化と貧酸素化の複合影響評価, 沿岸海洋研究, 60(1), 85-88 (2022).
- 8) 藤井賢彦: 地球温暖化・海洋酸性化・貧酸素化が海洋生態系に及ぼす影響, 沿岸海洋研究, 60(1), 51-60 (2022).
- 9) 矢野真一郎, 中村潤幸, Arifin N. Abdul: 河川水温の時間変動が有明海の密度成層構造に与える影響の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73, 2, I_481-I_486 (2017).
- 10) M. Murakami, Y. Oonishi, H. Kunishi: A numerical simulation of the distribution of water temperature and salinity in the Seto Inland Sea, *J. of the Oceanographical Society of Japan*, 41, 221-224 (1985).
- 11) 田所壮也, 中村潤幸, 秦培植, 矢野 真一郎: 気候変動に伴う気温・河川水温・海水温の変化が有明海の密度成層構造と貧酸素水塊の消長に与える影響の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74, 2, I_1147-I_1152 (2018).

- 12) 田所壮也, 矢野真一郎: 気候変動による温度や河川流量の変化が与える有明海の貧酸素水塊の消長への影響の評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 75, 2, I_1231-I_1236 (2019).
- 13) S. Yamaguchi and Y. Hayami: Impact of Isahaya dike construction on DO concentration in the Ariake Sea, *J. Oceanography*, 74, 565-586 (2018).
- 14) A. N. Blauw, H. F. J. Los, M. Bokhorst, L. A. Paul, P. L. A. Erftemeijer: GEM: a generic ecological model for estuaries and coastal waters, *Hydrobiologia*, 618, 175-198 (2009).
- 15) M. Gurel, A. Tanik, I. E. Gonce, R. C. Russo, : *Biogeochemical Cycles, in Coastal Lagoons*, J. P. Wolflin and I. E. Gonenc (eds), CRC Press (2005).
- 16) IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 1535p. (2013).
- 17) L. Hao, *et al.*: Effects of Large-Scale Effluent of the Chikugo River due to 2020 Kyushu Floods on the Development of Hypoxia in the Ariake Sea, *J. JSCE B2 (Coastal Engineering)*, 77, 2, I_865-I_870 (2021).
- 18) L. Hao, B. Chi, S. Yano: Influence of Summer Effluent on the Bottom Water DO Variation in the Yatsushiro Sea, Japan, *J. JSCE B2 (Coastal Engineering)*, 78, 2, I_817-I_822 (2022).