

八代海における淡水流入の影響を考慮した 海水中CO₂動態の数値モデリング

小森 博仁¹・Bing XIONG²・齋藤 直輝³・Lin HAO⁴・Baixin CHI²・
矢野 真一郎⁵・駒井 克昭⁶・中山 恵介⁷

¹学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail: komori.hiroto.977@s.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

³正会員 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1)

⁴学生会員 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

⁵フェロー会員 九州大学大学院教授 工学研究院環境社会部門 (同上)

E-mail: yano@civil.kyushu-u.ac.jp (Corresponding Author)

⁶正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境系 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

⁷正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

大気中のCO₂削減に関して沿岸域の吸収機能が注目されている。本研究では、沿岸域のCO₂動態に関する基礎的な知見を得ることを目的に、八代海における現地観測の結果を基に淡水流入の影響を考慮した海水中CO₂(pCO₂) 動態の数値モデルを開発した。開発したモデルは、異なる成層条件でのpCO₂や塩分・水温の時空間分布を良く再現できた。モデルによる計算結果より、河口周辺のCO₂吸収量は河川の出水に伴って時空間的に大きく変動することが確認された。さらに、出水が沿岸域のCO₂吸収量に及ぼす影響として以下が確認された。i) 出水直後は表層の淡水層によりCO₂放出が促進される。ii) 混合が進み塩淡水成層が弱まると、表層に植物プランクトンの極大層が現れ、光合成によりCO₂吸収が促進される。

Key Words : blue carbon, partial pressure of CO₂, air-seawater CO₂ flux, stratification

1. はじめに

近年、海洋生態系の生物活動によって固定（隔離・貯留）される炭素「ブルーカーボン」が国際的に注目されている¹⁾。その量は地球上の生物が固定する炭素の約55%に相当すると見積もられている。特に沿岸域には、アマモ場などの海草藻場が存在し、炭素を堆積物中へ貯留する機能が高く、温暖化ガスであるCO₂の削減において重要と考えられている^{2,3)}。しかしながら、沿岸域におけるCO₂吸収量の実態把握のための知見やデータは不足しており、推計結果はばらつきが大きく不確実性が高いといわれている⁴⁾。一般的に、大気から海水中へのCO₂吸収量の算出には、水温、塩分、風速、海水中CO₂分圧（以下、pCO₂）が必要となる。pCO₂が大気中CO₂分圧（以下、pCO_{2air}）を下回ると、海水中へCO₂が吸収される。また、逆の場合は放出される。

沿岸域のpCO₂は流動や成層等の物理過程や、植物相による光合成、ならびにサンゴ等による石灰化といった生物過程による影響を受けるため、時空間的に大きく変動する。よって、沿岸域のCO₂吸収量の推計精度を向上させるために、流動構造や生態系等の多様な条件に基づいたpCO₂に関わるデータの蓄積が求められている。

既往研究では、pCO₂は成層の発達に伴い変動することが分かっている^{5,6,7)}。例えば、成層発達期には、植物プランクトンの光合成により表層のpCO₂が低下することが、齋藤ら(2020)⁸⁾の現地観測により報告されている。しかし、未だ成層とpCO₂の関係に着目した詳細な現地調査やモデル開発の事例は少なく、成層が沿岸域のCO₂吸収量に及ぼす影響は解明されたとはいいがたい。

本研究では、沿岸域のCO₂動態に関する基礎的な知見を得ることを目的に、齋藤ら⁸⁾による3つの成層条件下で実施されたpCO₂に関する現地調査結果に基づき、各成層条件のpCO₂動態を再現できる数値モデルの開発を行った。さらに開発されたモデルを用いて、出水後のCO₂吸収量の時空間的変動の特性評価を試みた。

2. 現地調査の概要

本研究の対象海域とした八代海は、国内の主要な内湾と比べて極めて閉鎖性が強く⁹⁾、温帯域でありながら藻場だけでなくサンゴも生息する特徴を持つ希少な沿岸域である^{10,11)}。調査は図-1に赤点で示した地点（北緯32°27'30"、東経130°27'37"、水深20 m程度）で実施された⁸⁾。

観測地点は、八代海に流入する最大の河川である球磨川の河口に比較的近いため、出水時に強い塩淡水層の発達が予想される海域である。この地点では、水中ドローンにより藻場やサンゴの生息がないことを確認している。

3回の調査日は全て大潮で、弱い成層（2018年8月26日）、混合状態（同年12月7日）、および強い成層（2019年8月2日）を示していた。満潮である9時頃から干潮の15時頃までの半潮汐間に水質測定と採水を行った。水質測定で水温・塩分等の鉛直分布、採水で溶存無機炭素濃度(DIC)と全アルカリ度(TA)が測定された。水質測定は多項目水質計（ProDSS, YSI社製）を用い、概ね20分毎に計測された。採水は満潮時、満潮1.5時間後、下げ潮最大時、干潮1.5時間前、干潮時の計5回、水深0, 3, 6, 9, 12, 15mの計6層において、合計30サンプルが採取された。得られたDIC, TA, 塩分, 水温から炭素系化学的平衡関係¹²⁾よりpCO₂が算出されている。

3. 数値モデルの概要

(1) 流動モデル

本研究では、田所・矢野(2019)¹³⁾によって用いられた流動モデルDELFT3D-FLOW¹⁴⁾を用いた。計算領域は、有明海と八代海を結合した範囲で、水平方向の解像度は、 Δx が250m程度であり、鉛直方向は σ 座標系で17層（上から2%×10層, 5%×1層, 10%×3層, 15%×3層）を設定した。水平方向の乱流粘性・拡散係数にはSGS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 $k-\epsilon$ モデルを使用した。開境界条件は長崎県の樺島水道から鹿児島県の阿久根を結んだ線上で40分潮成分を与えた。

河川流量は、計算領域に流入する各一級河川の国土交通省観測所のデータを用いた。9つの主な二級河川（鹿島川、塩田川、関川、坪井川、氷川、大坪川、佐敷川、湯ノ浦川、水俣川）からの流入を比流量法で考慮した。

気象データとして、日射量は気象庁アメダス熊本観測所の観測値を、風場は同八代観測所の観測値を用いた。風速は荒川ら(2007)¹⁵⁾が引用したカルザースの地衝風から海上風への変換係数を用いて相当する海上風へ変換した。開境界の海水温は福岡管区気象台による日別海況情報中の海面水温と50m深水温データを使用した。

(2) 低次生態系モデル

低次生態系モデルとしてDELFT3D-WAQモデル¹⁶⁾を用いた。低次生態系モデルの計算は、流動モデルの結果をカップリングして行った。モデルを構成する要素は、植物プランクトン（一種類）、無機態栄養塩（三種類）、粒子性有機物、溶存酸素DO、DICおよびTAとした（図-2）。これらに対して考慮した素過程は、植物プランクト

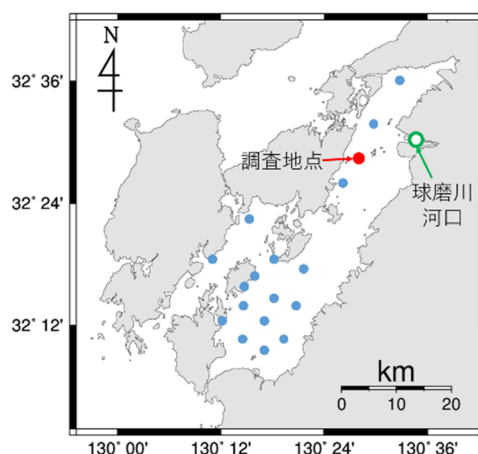


図-1 八代海の調査地点 [水色は鹿児島県水産技術センターの調査地点]

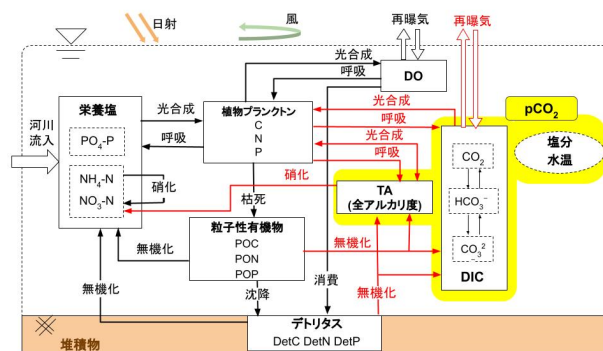


図-2 低次生態系モデルの概要 [黄色は田所・矢野(2019)のモデルに加えた部分]

ンの光合成・呼吸・枯死、有機物の沈降・無機化、硝化、再曝気等である。河川からの栄養塩負荷量は、各一級河川の水質等データ（国土交通省観測所による）から作成したL-Q式より推定した。河川水のDICとTA値は齋藤ら(2020)で用いている球磨川河川水の実測値を与えた。外海の境界条件については、DICとTAは齋藤ら(2020)が適用した黒潮海洋水の測定値を、栄養塩類などは田所・矢野(2019)と同様に国交省による有明海での測定値から決定している。モデル式やパラメータについては、田所・矢野(2019)¹³⁾やSohma *et al.* (2018)¹⁷⁾などの既往研究を参考に設定した。pCO₂は、観測同様にDIC, TA, 塩分, 水温の計算値から炭素系化学的平衡関係より算出するため、モデル中で直接pCO₂は取り扱わない。

(3) モデルの再現性について

開発した数値モデルの精度評価を行った。全現地調査日を対象に再現計算を行い、モデルによる実測データの再現性を検討した。助走計算期間は2か月間として再現計算を実施した。流動モデルについては海水密度として α 、低次生態系モデルはpCO₂の再現性の検討結果を示す。

図-3に、 α とpCO₂について現地調査における観測結果（上段）と数値モデルの計算結果（下段）の比較を示す。 α の観測値より、各調査の強い成層、弱い成層および混

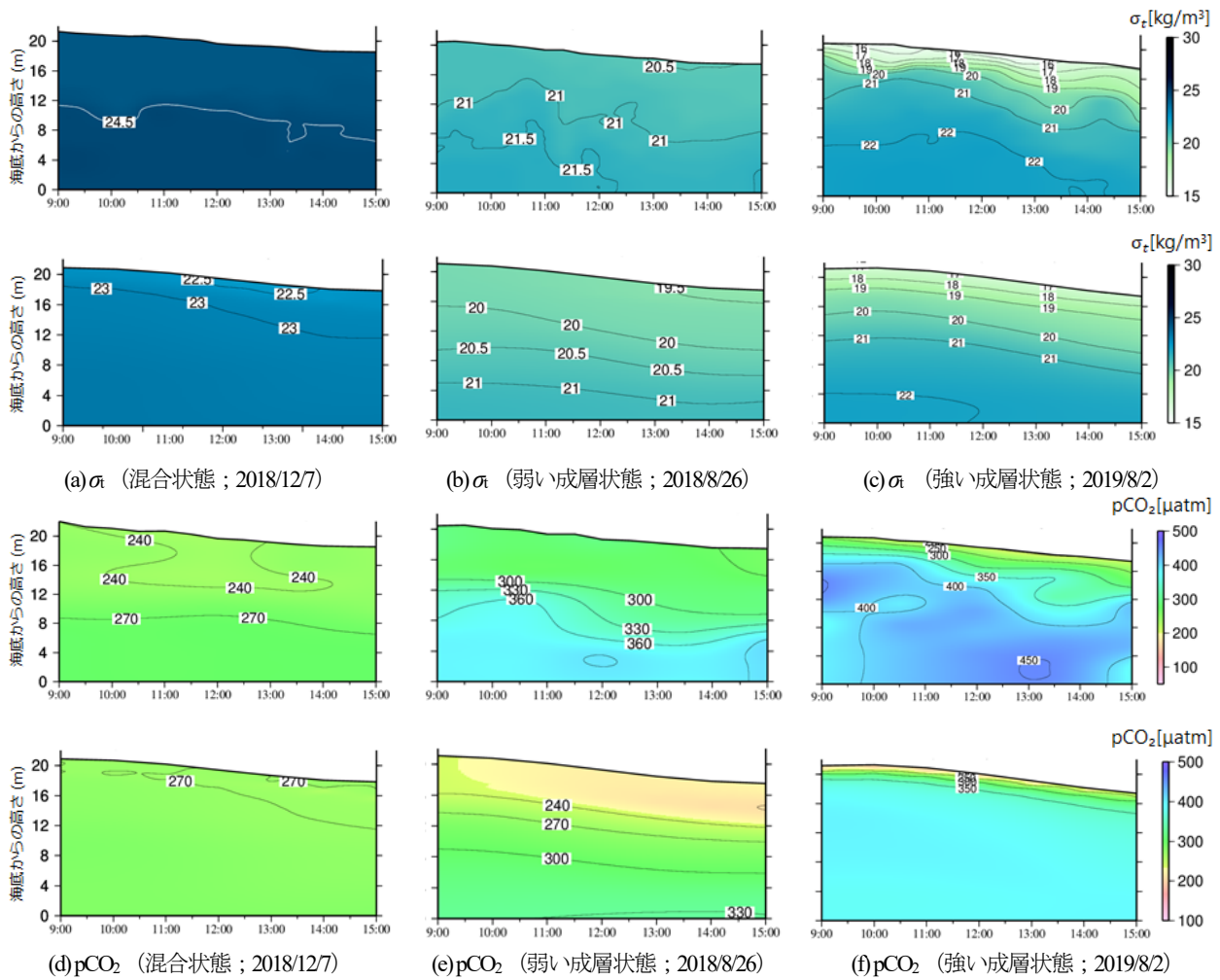


図-3 各混合状態における σ_t と $p\text{CO}_2$ の観測結果(上)と再現計算結果(下)の比較

合の状態が確認できる。観測結果との比較から、数値モデルは σ_t が示す成層状態と、 $p\text{CO}_2$ の鉛直構造を概ね良く再現できている。 σ_t と $p\text{CO}_2$ 以外では、混合期の水温と強い成層の塩分の鉛直分布がやや異なっていたが、それら以外の再現性は良く、ターゲットである $p\text{CO}_2$ の再現性が良いため、これらの差異は許容できると判断した。

さらに、観測値と計算値の間の相関係数 R および二乗平均平方根誤差率 $RMSPE$ から、再現性の定量的評価を行った。表-1に各項目の R と $RMSPE$ の値を一覧にして示す。 p は p 値(有意確率)を表す。また、 $p\text{CO}_2$ の観測値とモデル計算値の対応関係を図-4に示す。 $p\text{CO}_2$ はサンプル数 $N=89$ 、 $R=0.841(p<0.01)$ 、 $RMSPE=14.48\%$ であった。各項目の R 値より観測値とモデル計算値の間に強い相関が認められた。 $RMSPE$ より観測値と計算値の間の誤差は、 $p\text{CO}_2$ のみ1割を越えたが、これは他の項目の結果から化学的平衡式で算出する際に誤差が重なったためと推測される。以上より、開発された数値モデルは観測結果を精度良く再現できていることが確認された。

また、鹿児島県水産技術開発センターによる八代海表層の観測データを用いて、八代海全体における流動モデルによる塩分と水温の再現性を併せて検証した。

表-1 観測値とモデル計算値の相関係数 R と $RMSPE$

	サンプル数 N	相関係数 R	$RMSPE$
水温	423	0.977 ($p<0.01$)	6.25%
塩分		0.941 ($p<0.01$)	2.99%
σ_t		0.956 ($p<0.01$)	4.61%
DIC	89	0.940 ($p<0.01$)	1.90%
TA		0.937 ($p<0.01$)	2.02%
$p\text{CO}_2$		0.841 ($p<0.01$)	14.48%

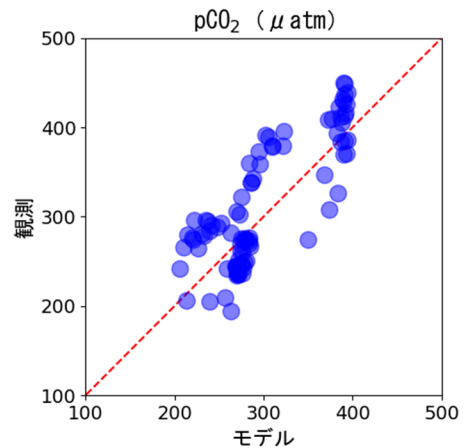


図-4 $p\text{CO}_2$ の観測値とモデル計算値の比較

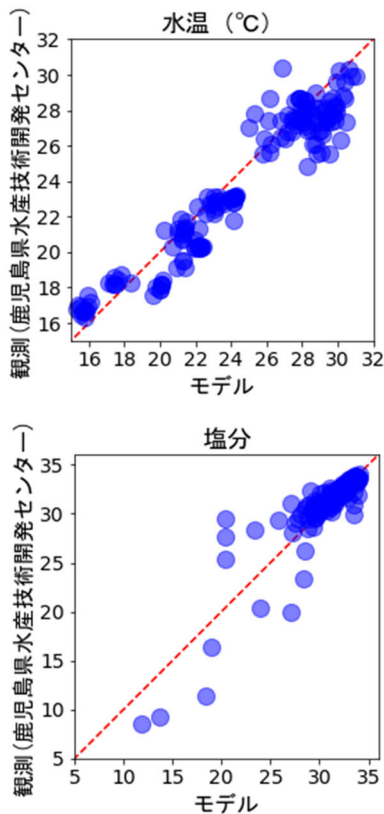


図-5 鹿児島県水産技術開発センターによる観測値とモデル計算値の比較 [上: 水温, 下: 塩分]

観測は図-1に青点で示した18地点において、月1~4回の頻度で、年間を通じて実施されている。検討に用いるデータは、後述する大気-海水間CO₂フラックスの算出対象期間である2018年の水温および塩分とした。観測値と計算値の間のRおよびRMSPEから、再現性の定量的評価を行ったところ、水温はN=160, R=0.956 (p<0.01), RMSPE=6.44%, 塩分はN=159, R=0.890 (p<0.01), RMSPE=9.21%であった。また、観測値とモデル計算値の比較をそれぞれ図-5に示した。Rおよび散布図より水温と塩分のどちらも観測とモデルの間に強い相関が認められ、RMSPEより計算誤差は比較的小さいことが確認された。以上より、塩分と水温についても八代海全体で精度良く計算されていると判断した。

4. モデルによるpCO₂動態シミュレーション

(1) 大気-海水間CO₂フラックスの算出方法

大気-海水間CO₂フラックスFは、海水中CO₂分圧pCO₂と大気中CO₂分圧pCO_{2air}, 溶解度K₀, および交換係数kを用いて、式(1)に示すバルク法で算出した。

$$F = k \cdot K_0 \cdot (pCO_2 - pCO_{2air}) \quad (1)$$

フラックスFが負のときは大気中から海水中への吸収, 正のときは海水中から大気中への放出を表す。溶解度

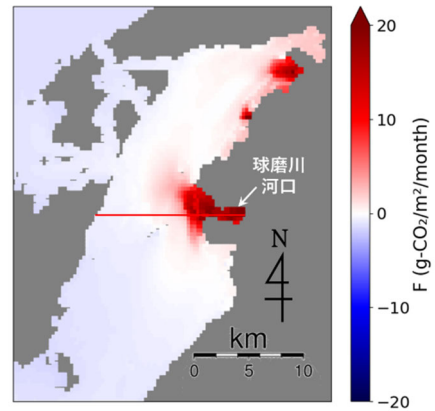


図-6 2018年7月の大気-海水間CO₂フラックスおよび鉛直断面の調査海域 (赤線部分)

K₀(mol-C/m³/atm)は、水温と塩分よりWeiss(1974)の経験式¹⁸⁾から求めた。交換係数kは式(2)より求めた¹⁹⁾。

$$k = 0.39 \cdot U_{10}^2 \cdot \left(\frac{S_c}{660}\right)^{-0.5} \quad (2)$$

ここで、U₁₀は海面から高さ10 mにおける風速(m/s), S_cはCO₂のシュミット数である。S_cは水温と塩分によりWanninkhof(1992)の経験式¹⁹⁾から求めた。

U₁₀は、気象庁アメダス八代観測所のデータをべき乗則²⁰⁾ [式(3)] により高度補正して用いた。

$$U_{10} = U_z \cdot \left(\frac{10}{z}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

ここで、U_zは海面から高さZ(m)における風速(m/s), nは観測点の地表状況によって決まる定数²¹⁾である。

pCO_{2air}は、気象庁による大気中CO₂濃度 (綾里地点)の観測データを基に設定した。大気中CO₂濃度(ppm)は、数値的には大気中CO₂分圧(μatm)にほぼ等しいことが知られている²²⁾。よって、2018年の年間平均観測値412 ppmを412 μatmと換算し、年間一定と仮定して用いた。

(2) 水平方向のCO₂動態

開発した pCO₂ モデルを用いて、一年間の大気-海水間CO₂フラックス変動を算出した。対象海域は、球磨川の出水によって強い成層が発達する八代海北部海域とした。対象期間は、比較的大規模な出水 (7月7日11時の最下流の横石流量観測所のピーク流量5,631 m³/s) が発生した2018年とした。

出水のあった7月における月累積CO₂フラックスの算出結果を図-6に示す。7月以外の図示は割愛する。出水時には、球磨川河口付近の海域はCO₂放出であり、河口から離れるにしたがってCO₂吸収となっていた。出水期以外では、八代海北部のほぼ全域がCO₂吸収源であった。このように河口周辺のCO₂フラックスは、出水に伴って時空間的に大きく変動することが確認された。なお、河川水はpCO₂が極めて高く、CO₂放出源であることが一般

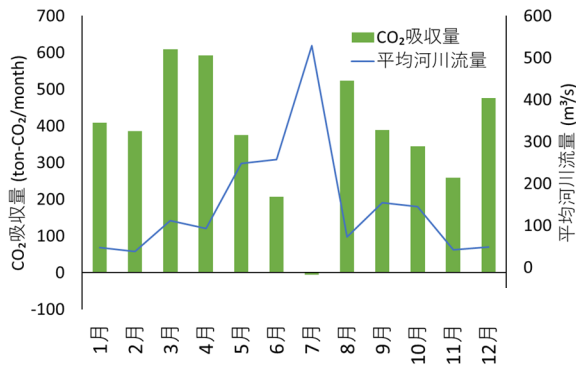


図-7 2018年の八代海北部全体の月別CO₂吸収量と球磨川の月平均河川流量

的に知られている。

八代海北部海域全体（図-6に示した海域全体）の月間CO₂吸収量の算出結果と、球磨川の月平均河川流量を図-7に示す。出水期の6~7月以外は、月400ton前後のCO₂が海水中へ吸収されている。一方で、最も河川流量が大きくなる7月には海水中へのCO₂吸収量はほぼゼロ（この年は若干の放出）となった。

(3) 鉛直方向のCO₂動態

図-6の赤線で示した断面を対象に、出水時におけるpCO₂の断面分布の変動を確認した。出水直後である2018年7月7日12時の塩分、pCO₂、植物プランクトン量の鉛直断面分布を図-8に、出水から20日経過した同年7月27日12時の分布を図-9にそれぞれ示す。pCO₂の図において、赤色はCO₂放出、青色はCO₂吸収を表す。また、右端が球磨川河口である。

塩分分布から7月7日12時には、流出した河川水が表層に集中していることが見て取れる。また、pCO₂分布から、pCO₂が極めて高い河川水と、pCO₂が低い海水とで成層が生じていることが分かる。以上より、出水直後は、河川水が表層に集中し淡水が蓋をする影響で、海から大気へのCO₂放出が促進されることが確認された。

一方、7月27日12時には、塩分分布から八代港がある河口直近の海域を除き河川水の影響は薄れている。河口から離れた海域では、植物プランクトンが増加している。また、植物プランクトン量とpCO₂の分布パターンは一致している。以上より、出水から時間が経過し流出した河川水が海水と混合すると河川水の直接的な影響が薄れ、出水による栄養塩流出に起因する植物プランクトンの増殖により光合成が集中する表層でpCO₂が減少し、海水中へのCO₂吸収も促進されることが示された。

5. 結論

本研究では、沿岸域のCO₂動態に関する基礎的な知見

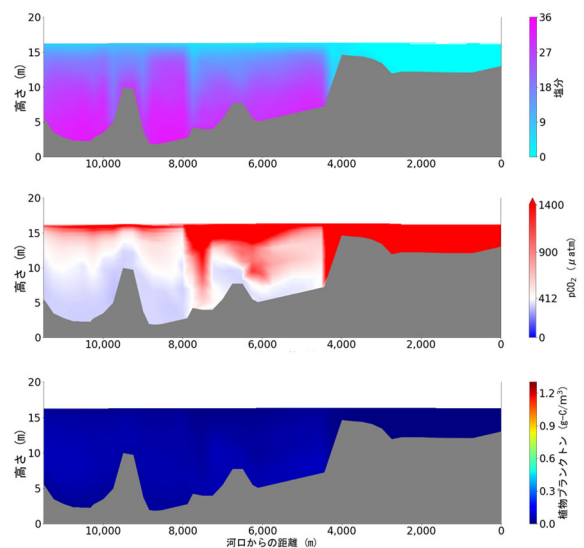


図-8 2018年7月7日12時の鉛直断面分布図（上：塩分，中：pCO₂，下：植物プランクトン量）

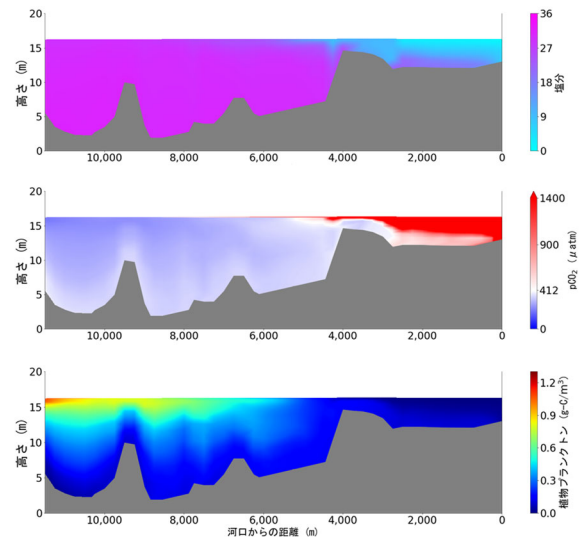


図-9 2018年7月27日12時の鉛直断面分布図（上：塩分，中：pCO₂，下：植物プランクトン量）

を得ることを目的に、過去に八代海で行われた観測結果を再現できるpCO₂動態の数値モデルを開発した。開発されたモデルは、異なる成層条件下のpCO₂分布や、塩分・水温分布を良く再現した。数値モデルによるハインドキャスト計算より、河口周辺のCO₂吸収量は出水イベントに伴って時空間的に大きく変動することが確認された。さらに、モデルで表現できるCO₂動態に関する各素過程は既知であるが、それらが複合的に作用する現場において大規模な出水が沿岸域のCO₂吸収量に及ぼす時空間的な影響として以下の2つが確認された。

- i) 出水直後は、河川水による海水表層での蓋の形成により、海水中から大気中へのCO₂放出が促進される。
- ii) 流出した河川水の混合が進むと、出水による栄養塩流出に起因する植物プランクトン増殖の効果と相まって海水中へのCO₂吸収が促進される。

今後は、八代海のアマモやサンゴの生息域での観測を

実施し、 $p\text{CO}_2$ に対する生物影響を把握する必要がある。さらに、それらの生物影響を本モデルに組み込み、 CO_2 吸収量の推計精度を向上させた上で、他の海域への適用も含めたより一般性のある実現象の解釈が必要である。

謝辞：本研究は科研費基盤研究(B)(JP18H01545)，ならびに河川財団2020年度研究助成により実施された。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) UNEP: *Blue Carbon, The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon*, 78p., 2009.
- 2) Mcleod, E., Chmura, L.G, Bouillon, S. and Salm, R.: A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 , *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol.9, pp.552-560, 2011.
- 3) Watanabe, K. and Kuwae, T.: How organic carbon derived from multiple sources contributes to carbon sequestration processes in a shallow coastal system?, *Global Change Biology*, Vol.21, pp.2612-2623, 2015.
- 4) 桑江朝比呂：ブルーカーボンの活用，沿岸域学会誌，第32巻，第4号，pp.9-14, 2020.
- 5) 藤井智康，駒井幸雄，藤原建紀：大阪湾沿岸域の二酸化炭素の挙動，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.I_911-I_915, 2011.
- 6) 藤井智康，藤原建紀：大阪湾奥部における二酸化炭素の長期連続観測，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68, No.2, pp.I_1061-I_1065, 2012.
- 7) 田多一史，中山恵介，駒井克昭，Tsai, J., 佐藤之信，桑江朝比呂：成層を考慮したアマモ場における溶存無機炭素の変動解析，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.74, No.2, pp.I_444-I_449, 2018.
- 8) 齋藤直輝，熊柄，小森博仁，矢野真一郎：八代海におけるブルーカーボン動態把握のための海水中 CO_2 に関する現地調査，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.76, No.2, pp.I_901-I_906, 2020.
- 9) 環境省：有明海・八代海等総合調査評価委員会報告，584p., 2017.
- 10) 環境省：第5回自然環境保全基礎調査海辺調査総合報告書，119p., 1998.
- 11) 環境省・日本サンゴ礁学会：日本のサンゴ礁，375p., 2004.
- 12) Zeebe, E.R. and Wolf-Glandrow, D.: *CO₂ in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes*, Elsevier Science, 364p., 2001.
- 13) 田所壯也，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)，Vol.75, No.2, pp.I_1231-I_1236, 2019.
- 14) Deltares: *Delft3D-FLOW, User Manual*, 674p., 2012.
- 15) 荒川洋，神田康嗣，石原孟：3次元風況モデルによる海上風推算手法の提案，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.54, No.2, pp.I_131-I_135, 2007.
- 16) Deltares: *Delft3D-WAQ, User Manual*, 288p., 2009.
- 17) Sohma, A., Shibuki, H., Nakajima, F., Kubo, A. and Kuwae, T.: Modeling a coastal ecosystem to estimate climate change mitigation and a model demonstration in Tokyo Bay, *Ecological Modeling*, Vol.384, pp.261-289, 2018.
- 18) Weiss, F.R.: Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas, *Marine Chemistry*, Vol.2, pp.203-215, 1974.
- 19) Wanninkhof, R.: Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research*, Vol.97, No.C5, pp.7373-7382, 1992.
- 20) 石崎潑雄，光田寧：強風時における突風の拡がり突風率について，京大防災研究所年報，第5号，A, pp.135-138, 1962.
- 21) 公益社団法人日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，295p., 2007.
- 22) 西村典子，渡辺桂一郎，岸田巧，岩田徹，大滝英治：河川水中の二酸化炭素濃度($p\text{CO}_2$)の変動特性，環境化学学会誌，Vol.11, No.3, pp.297-304, 1998.

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

NUMERICAL MODELING OF CO_2 DYNAMICS IN SEAWATER CONSIDERING EFFECTS OF FRESHWATER INFLOW IN THE YATSUSHIRO SEA

Hiroto KOMORI, Bing XIONG, Naoki SAITO, Lin HAO, Baixin CHI,
Shinichiro YANO, Katsuaki KOMAI, and Keisuke NAKAYAMA

Regarding the reduction of atmospheric CO_2 , the function of CO_2 absorption in coastal areas has been drawing attention. In this study, we developed a numerical model of $p\text{CO}_2$ dynamics considering effects of freshwater inflow based on the results of field observation in the Yatsushiro Sea, to obtain the basic knowledge about CO_2 dynamics in coastal areas. The model was able to reproduce well the tempo-spatial distribution of $p\text{CO}_2$ and the distribution of salinity and water temperature under different stratification conditions. From the results of the hindcast simulation, it was confirmed that the amount of CO_2 absorbed around the estuary fluctuated greatly spatiotemporally with the big flood. Furthermore, the following two effects of the freshwater inflow on the dynamics of CO_2 in the coastal area are confirmed as follows: i) After flooding, CO_2 release can be promoted by the surface freshwater capping; and ii) After mixing of freshwater and seawater, CO_2 absorption can be promoted by photosynthesis due to blooming of phytoplankton in the surface layer.