

# 水底質統合モデルを用いた東京湾における炭素収支の評価

Evaluation of Carbon Budget in Tokyo Bay  
Using Benthic-Pelagic Coupled Numerical Model

学籍番号 47-156742  
氏 名 佐藤 文也 (Sato, Fumiya)  
指導教員 佐々木 淳 教授

## 1. はじめに

地球温暖化の原因である大気中の二酸化炭素濃度は増加の一途を辿り、気候変動の緩和策、適応策の策定が重要となっている。

近年、海洋生態系が二酸化炭素の高い貯蓄力を有するとして注目を集めており、「ブルーカーボン」と呼ばれている。光合成活動によって固定された炭素の一部が堆積物中に蓄積されるプロセスで、二酸化炭素を大気中から数千年間隔離することができる。桑江ら (2014) や神田 (2011) の現地調査によって、浅海域を含む東京湾海表面ではCO<sub>2</sub>を吸収している傾向にあることが明らかになった。しかし、湾内に取り込まれた二酸化炭素のうち実際に固定される割合を観測で追跡することは困難であり、湾全体としての炭素収支は未だ不明瞭である。

そこで本研究では水底質統合モデルに炭酸系計算モジュールを付加することで、海面における二酸化炭素フラックスを計算可能とし、さらに湾内に流入した炭素の行方を計算することで炭素収支を評価する。湾内における炭素は（有機 or 無機）、（懸濁態 or 溶存態）の形態をとるが、いずれも二酸化炭素溶解などの化学作用、移流拡散や沈降などの物理作用、光合成や呼吸、分解などの生物過程によってその濃度変化が記述さ

れる。炭素収支を求めるにあたって①陸域からの流出入、②大気との交換、③底質との交換、④外洋への流出入の 4 つの境界に分類してフラックスを求めた。

## 2. 大気-海面CO<sub>2</sub>フラックス算定方法

大気-海面CO<sub>2</sub>フラックス算出には大気中と水面中の二酸化炭素分圧(pCO<sub>2</sub>)の差を用い、海面からの放出を正の向きとして次のように表される。

$$\text{Flux} = kK_0(p\text{CO}_{2\text{water}} - p\text{CO}_{2\text{air}})$$

pCO<sub>2</sub>は炭酸系パラメータの一つであり、全アルカリ度(TA)、全炭酸濃度(DIC)、二酸化炭素分圧(pCO<sub>2</sub>)、pH の 4 種のうち、少なくとも 2 つを測定すれば化学平衡式から他を計算できる。本研究ではまず TA と DIC を状態変数として計算し、後に pH と pCO<sub>2</sub> を算出する。TA と DIC の定義を以下に示す。

$$\begin{aligned} \bullet \text{ TA} &= [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] \\ &+ [\text{OH}^-] + [\text{HPO}_4^{2-}] + 2[\text{PO}_4^{3-}] + [\text{H}_3\text{SiO}_4] \\ &+ [\text{NH}_3] + [\text{HS}^-] - [\text{H}^+] - [\text{HSO}_4^-] - [\text{HF}] \\ &\quad - [\text{H}_3\text{PO}_4] \end{aligned}$$

$$\bullet \text{ DIC} = [\text{CO}_2^*] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

## 3. 数値モデルの概要

2011 年 4 月から 2012 年 3 月を対象にして、時々刻々の気象、潮位、河川流量データ

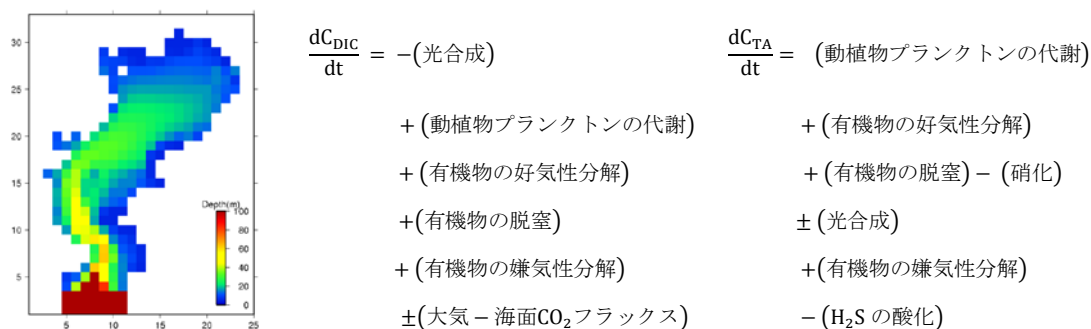


図 1. (左) 計算領域, (右)TA, DIC の生成項

を入力データとして与えた. 計算領域を図 1 に示す. 格子サイズは水質, 底質中ともに水平方向には 2km メッシュを使用し, 鉛直方向にはそれぞれ 10 層の  $\sigma$  座標系, 厚さが可変の 25 層を適用した. 大気中の二酸化炭素濃度は日変化, 季節変化を考慮して与えた.

数値モデルは図 2 に示すように流動モデル, 波浪追算モデル, 底層せん断応力モデル, 生態系モデルから構成され, 流れのモデルは静水圧と Boussinesq 近似を仮定した佐々木ら (2000) をベースにし, また生態系モデルは Amunugama(2015)らの水底質統合モデルに改良を加え, 水質, 底質に TA と DIC を状態変数として加えた. また 3 次元移流拡散方程式中の生成項は図 1 (右) のように設定した. ここで  $C_{DIC}$  は全炭酸濃度,  $C_{TA}$  は全アルカリ度を示す.

水質パラメータには実測で得た標準的な

値を空間一様に初期値として与える一方で, 底質パラメータは初期値ゼロと設定し, 長期計算を行う過程で現実に近い状況を再現していった. それによりリン, 窒素の実測値と整合性が高かったため, 同様の計算で求められた TA, DIC の分布も妥当であるとした. 生態系モデルは独立した水質モデルと底質モデルに分かれており, 1 タイムステップ計算が進む毎に水質の最底層と底質の最上層間でフラックスの受け渡しが行われ, 底質への堆積および底質からの溶出といった現象を考慮している. ここで, TA と DIC は底質内で全て溶存態として存在しているものとした.

#### 4. 計算結果

本モデルの妥当性を検証するために水温, 塩分の計算結果を東京湾水質連続観測値と

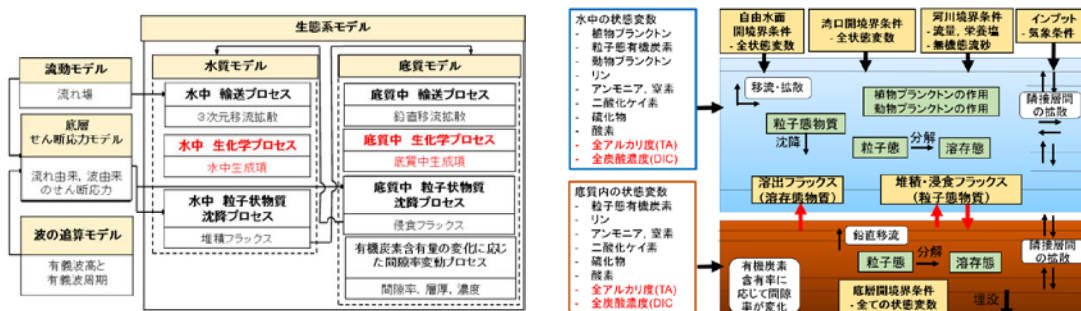


図 2. (左) 数値モデル概要, (右)生態系モデル概念図

比較した結果, 整合性の高かった河川流量2倍, 風速1.25倍を適用し, 生態系の計算を行った. Yamamoto-Kawai et al.による $p\text{CO}_2$ 実測値を図3, 本モデルの $p\text{CO}_2$ 計算結果を図4に示す.

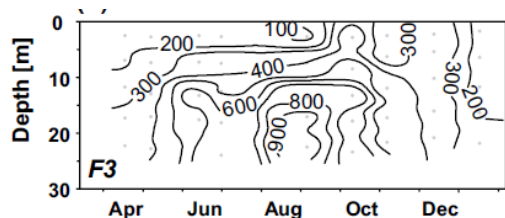


図3. Yamamoto-Kawai et al. (2015)による $p\text{CO}_2$ 実測値

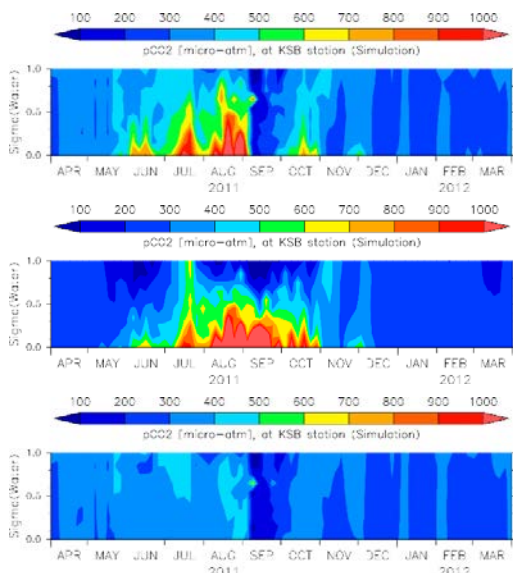


図4.  $p\text{CO}_2$ 計算結果(上), 海面フラックス無し(中), 水底質フラックス無し(下)

図4から上層の $p\text{CO}_2$ は, やや過大評価であるものの, 夏季底層で急増する傾向や冬季に鉛直一様化する傾向は概ね再現できている. また海面フラックスを除いた場合と水底質間フラックスを除いた場合の結果から, それぞれの影響が正しく考慮されていることが確認され, 特に底質からの溶出分が与える影響が大きいことが分かった.

また, 図5に $\text{CO}_2$ フラックスの年平均値の計算結果を示す. ここで, 正の値が海面からの放出, 負の値が大気からの吸収を表す. 河

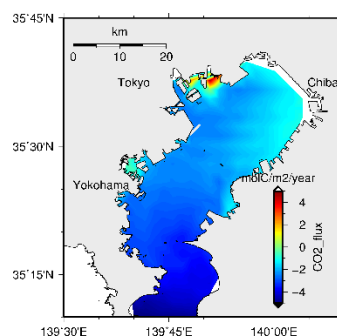


図5.  $\text{CO}_2$ フラックス年平均の平面図(計算結果)

口付近, 港付近で放出傾向, それ以外では吸収傾向となり, 神田(2011)による実測値と合致している.

このモデルを用いて炭素収支を推算した結果を図6に示す. ケース(A)の結果から湾内に流入してきた炭素のうち1割強が底質へ堆積し固定され, 残りは水平方向の移流の影響によって湾外へ流出していると推定された. また, IPCCが発表した二酸化炭素濃度将来予測を適用し, 2100年における環境を想定した. ここでRCP8.5は気候変動対策無し, RCP6.0は中程度の対策, RCP4.5は小規模の対策を行うと仮定したシナリオである. いずれも予測される上昇値は幅を持つが, 最も変化が大きい場合を想定した. また, 水温変化量は気温の半分, DIC変化

量は $(\frac{\Delta p\text{CO}_2}{p\text{CO}_2})/(\frac{\Delta \text{DIC}}{\text{DIC}}) \approx 10$ という関係式から

計算した. ケース(B), (C), (D)の結果の大気海面フラックスに着目すると, 初めは大気中二酸化炭素濃度が増えていくにつれて吸収量が増加していくが, ある値より濃度が高くなると逆に吸収量は低下傾向に転じた. その他のフラックスは大きな差はなかった.

## 5. 考察と結論

以上の炭酸系計算結果から, 水中の二酸化炭素分圧は大気-海面フラックスは勿論

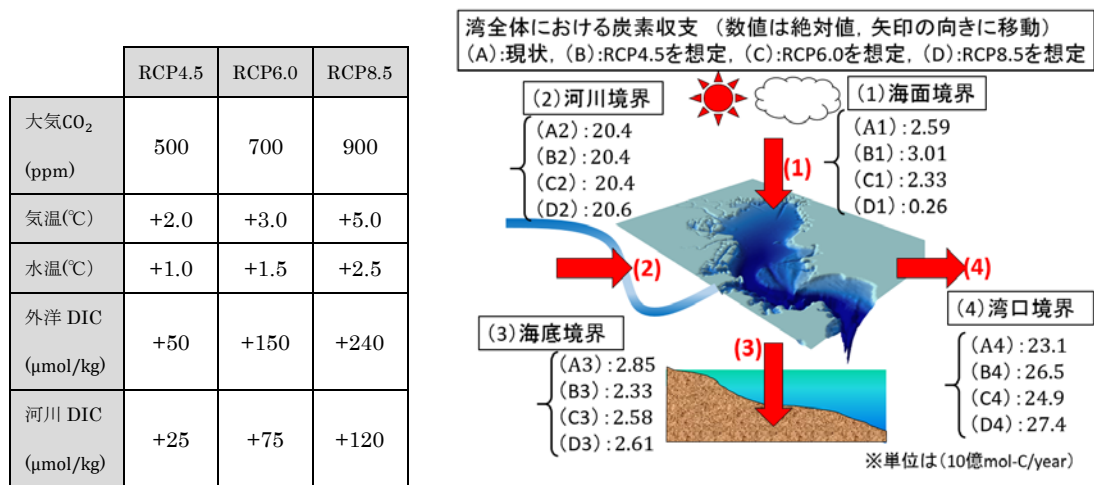


図 6 各シナリオの計算条件（左），各ケースの計算結果(右)

のこと，水底質間のフラックスの影響が大きいことが分かった．これには底質中有機物の分解により発生する二酸化炭素が水中に溶出するプロセスが強く影響しており，溶存酸素濃度が減少するメカニズムと同様の理解ができる．また，表層pCO<sub>2</sub>の再現性向上のためには一次生産をより高い精度で再現することが重要である．底質内の DIC, TA 濃度や，底質からの溶出フラックスに関しては不明確な部分が多いので今後，現地観測や実験によるデータ収集が求められる．

大気-海面フラックスの年平均値は実測値と整合しており，また河川流入による炭素の量を適切に見積もることで，河口域での二酸化炭素放出傾向を再現できた．

さらに，湾全体としての収支を推算したところ，湾内に流入する炭素は大部分が陸域由来であり，流入炭素の行方は 1 割強が底質内へ貯留され，残りは湾外へ流出するという結果になった．堆積量は有機物の沈降速度や，侵食/堆積を決定づける限界せん断応力の値により大きく左右されるが，フラックスの向きは変わらないと考えられる．

また気候変動を想定した 2100 年の東京

湾における炭素収支を推算した結果，大気中の二酸化炭素濃度がある一定の値を超えると海水の二酸化炭素吸収量が急激に低下した．これは海水中の二酸化炭素分圧の増加および海水温の上昇により，本来海水が持つ酸に対する緩衝機能が低下したためであると考えられる．また，いずれのケースにおいても炭素流入分よりも流出分がやや多い結果となったが，これは外洋の DIC 境界条件設定値によるものだと考えられる．

今後の展望として藻場による二酸化炭素吸収や炭酸カルシウムの生成，溶解に伴う炭酸系の変化などもモデル化することによる，より精密な計算が求められる．

[主な参考文献]

- Amunugama, “Development of a Benthic-Pelagic Coupled Numerical Model for Analyzing Water and Sediment Quality in Tokyo Bay”, PhD Dissertation, Yokohama National University, 2015
- Yamamoto-Kawai Michiyo, et al., “Calcium carbonate saturation and ocean acidification in Tokyo Bay, Japan,” J. Oceanogr., Vol. 71, No. 4, pp. 427–439, 2015.
- Zeebe, “CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes”, Vol 65. Elsevier Oceanography Series, 2001