浅海域における大気－海水間CO₂フラックスの予測手法の検討

Suite of the Statistical Prediction Method for Air-Sea CO₂ Flux in Shallow Water Areas

田多一史¹・所 立樹²・渡辺謙太³・桑江朝比呂⁴

Kazufumi TADA, Tatsuki TOKORO, Kenta WATANABE and Tomohiro KUWAE

The Blue Carbon, which is carbon captured by marine living organism, is recently focused as an important factor for the climate change initiative. However, the contribution of Blue Carbon sequestration to atmospheric CO₂ in the shallow water area has been unclear, because the investigation and analysis technology were unmaturing. In this study, we selected wind speed, water temperature, salinity, total alkalinity (TA), dissolved inorganic carbon (DIC), and the metabolism as the environmental factors affecting air-sea CO₂ flux. These data sampled at the Furen-ko Lagoon were analyzed using the scatter diagram matrix, tree model, and generalized additive model. Moreover, we proposed the stochastic prediction method using the multiple linear regression models.

1. 序論

将来の気候変動を緩和するために、大気中CO₂などの温室効果ガスを削減することは、喫緊の課題である（IPCC, 2007）。近年、炭素ストックとして注目されている「ブルーカーボン」は海洋炭素の総称であり、地球全体の光合成活動によって固定される炭素の約55%に相当する（Nellemannら, 2009）。特に、浅海域では堆積物中への有機炭素の蓄積量が多く、大気中CO₂を隔離・貯留し、気候変動の緩和に寄与する可能性を秘めている（Nellemannら, 2009；McLeodら, 2011）。一方でこの浅海域は、陸域からの流入有機物の分解の場となっているため、一般的に大気中へのCO₂の放出源として考えられている（Cai, 2011）。また、アマモなどの植生が生育している浅瀬の海草場では、大気-海水間CO₂フラックスの測定事例は少なく、実際にCO₂の放出源または吸収源になるかについての知見は乏しい（Borgesら, 2005）。このため、浅海域において大気-海水間CO₂フラックスの動態を把握・解釈するために、モデル化などの検討が必要である。しかし、自然環境や生物過程を対象としており、非線形で複数要因の相互作用を伴った複雑な集合体であることから、初期条件により一意的に決まる決定論的モデル（Deterministic Model）では、フラックスの動態を説明することが極めて困難となる。したがって、本研究では統計論的モデル（Stochastic Model）を用いて、大気-海水間CO₂フラク

スを予測することを目的とした。

まず始めに、文献などからCO₂フラックスの予測に必要な環境要因を整理・抽出し、それに基づいて現地調査を実施した。次に、現地で得られた測定データについて、統計学的な解析手順を検討し、最終的に予測式を構築するという一連の統計論的モデルの予測手法を提案した。

2. 大気-海水間CO₂フラックスに影響を及ぼす要因

(1) CO₂フラックスに係る環境要因の整理

a) 大気-海水間CO₂フラックスの算出過程

本論文では、大気-海水間CO₂フラックスについて、海水から大気へCO₂の放出を正の値、大気から海水へのCO₂の吸収を負の値として扱うこととする。大気-海水間CO₂フラックスの算出方法は、バルク法を用いることが多い。バルク法とは、大気と海水間のCO₂分圧差、交換係数 k 、溶解度 S を用いて算出する方法であり、式（1）で示される。

$$F = kS(fCO_{2water} - fCO_{2air}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、海水中CO₂分圧は fCO_{2water} （ μatm ）、大気中CO₂分圧は fCO_{2air} （ μatm ）と表している。溶解度 S （ $\text{mol}\cdot\text{C}/\text{m}^3/\text{atm}$ ）は水温と塩分による既存の経験式（Weiss, 1974）、交換係数 k （ m/s ）は式（2）が用いられる。

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

U_{10} は水面から10mの高さの風速（ m/s ）、 Sc はシュミット数と呼ばれる無次元数であり、水温と塩分による既存の経験式（Jähneら, 1987）が用いられる。

b) 水中炭酸系イオンの影響

水中の溶存CO₂濃度の変動は、陸域からの炭素流入や生物活動の他に、平衡状態にある炭酸水素イオン

1	正会員	修(工)	(独法)港湾空港技術研究所
沿岸環境研究チーム 依頼研修員
(中電技術コンサルタント(株))
2		博(理)	(独法)港湾空港技術研究所
沿岸環境研究チーム 研究官
3		修(農)	(独法)港湾空港技術研究所
沿岸環境研究チーム 研究官
4	正会員	博(農)	(独法)港湾空港技術研究所
沿岸環境研究チーム チームリーダー

(HCO₃⁻)と炭酸イオン(CO₃²⁻)による緩衝作用の影響を受け易い。ここで、DIC(溶存無機炭素濃度)とTA(全アルカリ度)の化学式は、式(3)、式(4)に示される。 $[X]$ は、炭酸水素イオンと炭酸イオン以外のイオン寄与分を示しており、水酸化イオンや四ホウ酸イオンなどの陰イオンと水素イオンなどの陽イオンが該当する。

$$DIC = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$TA = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [X] \quad \dots\dots\dots (4)$$

c) 生物過程によるDICの増減

光合成や呼吸・分解の影響が無い場合、DICは河川・外海境界地点濃度(河川水と外海水)の単純な混合割合から決定されるが、生物過程によって影響を受けるDICの増減量(所ら, 2013; 田多ら, 2013)を代謝と定義した。ここで、正の値は従属栄養的な環境(呼吸・分解活動>光合成活動)、負の値は独立栄養的な環境(光合成活動>呼吸・分解活動)を示している。

(2) CO₂フラックスに影響を及ぼす環境要因の抽出

CO₂フラックスに係る環境要因の整理結果を踏まえ、既往文献の環境調査項目(Wang・Cai, 2004; Huntら, 2011)なども考慮し、データ収集および解析(例えば、図-1参照)を行うための潜在的な環境要因として、風速、水温、塩分、TA、DIC、代謝を抽出した(表-1参照)。海水中CO₂濃度は、水温、塩分、TA、DICから一意的に

表-1 CO₂フラックスに影響を及ぼす環境要因

環境要因	大気-海水間CO ₂ フラックスに及ぼす影響
風速	海表面の乱れによる交換係数 k
水温	海水中CO ₂ 濃度、溶解度 S 、シユミット数 S_c (代謝など)
塩分	海水中CO ₂ 濃度、溶解度 S 、シユミット数 S_c (代謝、海洋からの炭素負荷、イオン供給など)
TA	海水中CO ₂ 濃度(HCO ₃ ⁻ とCO ₃ ²⁻ による緩衝作用など)
DIC	海水中CO ₂ 濃度(HCO ₃ ⁻ とCO ₃ ²⁻ による緩衝作用など)
代謝	(光合成や呼吸・分解によるDICの増減)

注) ()は間接的な影響を示している。

注1) 上三角行列は単相関係数, 下三角行列は対散布図(平滑化曲線, 95%信頼限界楕円とその中心を含む), 対角成分はヒストグラム(カーネル確率密度を含む)を示している。

注2) 各変数の単位は、CO₂フラックス(μmol/m²/s)、風速(m/s)、水温(℃)、塩分(-)、TA(μmol/kg)、DIC(μmol/kg)、代謝(μmol/kg)である。

図-1 変数間の対散布図

決まるため、環境要因から除外した。また、大気中CO₂濃度も、約390ppm程度ではほぼ同様であるため除外した。

3. 現地調査

現地事例として、2010年8月・11月、2011年6月～11月に日本の亜寒帯に属するラグーンで調査を実施し、実測データ（152のデータセット）の収集を行った。調査場所は、北海道の風蓮湖（北緯43°19′46.5″，東経145°15′27.8″）で、河口付近に位置する海草場（水域の約7割がアマモ場（環境省自然環境局，2008））であり、陸域負荷と生物活動の両方の影響を受ける閉鎖的な場であった。

4. データ構造の把握

次に、現地事例のデータ構造を把握するために、変数間の対散布行列（図-1参照）、樹木モデル（図-2参照）、一般化加法モデル（図-3参照）を用いた解析を行った。データ解析には、R 2.15.0（R Development Core Team, 2005）のソフトウェアを使用した。

(1) 散布図行列

用いる変数が2つ以上で、かつ量的データを扱う場合、全ての変数を組み合わせた散布図行列（図-1参照）を作成することで、データ間の関係性を視覚的に把握することができる。各変数のヒストグラムから、大気-海水間CO₂フラックス（ -0.06 ± 0.02 （平均値 $\pm$ 95%信頼区間，以下同じ） $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ），塩分（ 21.3 ± 0.9 ；本論文では、塩分は無次元数として表記する），TA（ $1,734 \pm 41 \mu\text{mol}/\text{kg}$ ），DIC（ $1,584 \pm 36 \mu\text{mol}/\text{kg}$ ），代謝（ $-28.9 \pm 14.0 \mu\text{mol}/\text{kg}$ ）は、概ね単峰性分布となりピークは平均値付近にあった。一方、水温（ 15.3 ± 1.1 °C）は多峰性

分布となり、季節変動を含めた幅広いサンプリングデータとなった。

次に、各変数間の相関関係をみると、大気-海水間CO₂フラックスに対し、風速、水温は負の相関（ -0.72 ， -0.55 ），塩分、TA、DIC、代謝は正の相関（ 0.36 ， 0.25 ， 0.49 ， 0.62 ）であった。また、塩分、TA、DICの間に強い相関（概ね0.9程度）がみられた。これは、大気-海水間CO₂フラックスを目的変数とした予測モデルの構築では、塩分、TA、DICの多重共線性による影響が予想される。一方で、TAとDICはともに海水中に含まれる炭酸水素イオン（HCO₃⁻）などの影響を受けるため（式（3），式（4）参照），塩分で概ね説明できると考えられる。このため、ここでTAとDICを説明変数から除外することとした。

(2) 樹木モデル（Tree model）

大気-海水間CO₂フラックスと各環境要因（代謝、塩分、水温、風速）との関係性を把握するために、樹木モデル（Clark・Pregibon, 1992）を用いた解析を行った。樹木モデルは、モデルの構築が簡易で頑健な点、説明変数間の交互作用が表現される点、解釈が容易である点などで優れている（De'ath・Fabricius, 2000）。樹木の枝（縦線）の長さは、尤度度の減少度合いに比例し、それが長いほどその要因による分離が重要であることを示している。

樹木モデルで解析した結果（図-2参照），最も重要な説明変数は代謝であり、CO₂フラックスの各平均値を説明するために、大きく2つに分類する閾値（ $-93.3 \mu\text{mol}/\text{kg}$ ）が設けられた。代謝が小さくなると（ $<-93.3 \mu\text{mol}/\text{kg}$ ），風速の有意な影響が次に示され、風速が大きいほど（ $>4.4 \text{ m/s}$ ），CO₂フラックスの平均値のマイナス傾向が強まった。また、塩分も低くなるほど、CO₂フラックスの平均値はマイナス傾向となった。なお、代謝が

注1) 樹の頂点からスタートし、各ノード（節）で示される各変数の環境条件を満たせば左に、満たさなければ右に進み、最終的にターミナルノード（樹木の末端は、分類されたCO₂フラックスの各平均値）に到達する。

注2) 各変数の単位は、CO₂フラックス（ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ），風速（m/s），塩分（-），代謝（ $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ）である。

図-2 CO₂フラックスに対する樹木図

注1) 縦軸はCO₂フラックス，sは平滑化法としてスプライン関数を指定していることを表し、横軸は各環境要因（風速、水温、塩分、代謝），グラフ内の実線は平滑化スプライン、破線は95%信頼区間を示している。

注2) 各変数の単位は、CO₂フラックス（ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ），風速（m/s），水温（°C），塩分（-），代謝（ $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ）である。

図-3 平滑化関数を用いた一般化加法モデルの適用結果

大きくなると ($>-69.7 \mu\text{mol/kg}$), CO₂フラックスの平均値は $0.01 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ となり, ややプラスに転じた。

(3) 一般化加法モデル (GAM)

一般化加法モデル (Generalized Additive Model; GAM) とは, 目的変数と説明変数との関係をノンパラメトリックな平滑化関数を用いるモデルである。すなわち, 母集団の分布型 (例えば正規分布など) についての仮定を設けずに, 平滑化スプラインで表現する手法である (山田ら, 2006)。もし, 明確な関係性 (例えば曲線など) が見られた場合は, 多次元での回帰が可能となる。このため, 本解析では目的変数と説明変数の関係性を調べるために, 一般化加法モデル (GAM) を用いた検討を行った。

モデル解析の結果 (図-3 参照), 風速と塩分は線形に近い構造と仮定できたが, 水温と代謝では非線形性が強い複雑な構造であった。しかしながら, 次章のモデル検討では, 予測モデルの複雑化を回避するため, 全て線形 (一般線形モデル) で扱うこととした。

5. 大気-海水間CO₂フラックスの予測モデル

データ構造の把握を踏まえ, 大気-海水間CO₂フラックスに及ぼす代謝, 塩分, 水温, 風速の影響について, 一般線形モデル (General Linear Model, family = gaussian, link 関数 = identity) を適用し, CO₂フラックスの予測モデルの構築を試みた。統計解析は, データ解析と同様のソフトウェアを使用した。

(1) 予測モデルの構築

大気-海水間CO₂フラックスを目的変数, 代謝, 塩分, 水温, 風速を説明変数の候補としたモデル選択を行った。モデル選択では, 各々の説明変数について全ての組み合わせの16通りについてモデルを作成した。本検討では各要因の単独効果を把握するために, 交互作用を含む項は扱わなかった。なお, サンプル数 ($n=152$) とフルモデルにおける説明変数の数 ($n=4$) との比が40未満となったため, 赤池情報量基準 (AIC) にかかるバイアスを補正したAICcを用いた (Hurvich・Tsai, 1989)。各モデルに対し, AICの差 Δ_i を $AIC_i - AIC_{\text{best}}$, モデル*i*が最良な予測モデルとして選択される確率を Akaike weight (w_i)

として算出した (Burnham・Anderson, 2002)。

これらのモデルの中で, AICcが最小となるものが最も予測が良いモデルとなるが, 1つのベストモデルでは不確実性を伴うため, 推定の偏り (バイアス) が生じる可能性がある (Burnham・Anderson, 2002)。このようなモデル選択による推定の偏りを低減するために, 信頼集合 ($\Delta_i < 4$) を用いた複数モデルによる推定を行った。なお, $\Delta_i > 4$ のモデルは, 真のモデルを近似することが殆ど無いとされている (Burnham・Anderson, 2002)。また, 各説明変数の選択確率は, 信頼集合において説明変数が含まれている w_i を足し合わせることで求められる。このような w_i で重み付けされたモデル平均手法を用いて, 係数推定とその標準偏差, バイアスを求めた。

大気-海水間CO₂フラックスに関するモデル推定結果は, 代謝, 水温, 風速の影響 (選択確率: 1.0, バイアス: 0.1~0.2) を強く支持し, 塩分 (選択確率: 0.5, バイアス: 0.5) の影響をやや支持した (表-2 参照)。すなわち, 代謝や塩分の上昇に伴いCO₂フラックスはプラス (水中から大気へ放出) 方向, 水温と風速の上昇に伴いCO₂フラックスはマイナス (大気から水中へ吸収) 方向になることを支持した。これらを踏まえ, 大気-海水間CO₂フラックスの予測モデルについて, 式 (5) のように定式化した。

$$\begin{aligned} & \text{大気-海水間 CO}_2\text{フラックス} \\ &= 0.0003 \times \text{代謝 } (\mu\text{mol} / \text{kg}) + 0.0006 \times \text{塩分} \\ & - 0.0032 \times \text{水温 } (^\circ\text{C}) - 0.0295 \times \text{風速 } (m / s) + 0.0739 \\ & \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

本モデルの各説明変数に係る符号について, 対散布図行列による相関関係, 樹木モデルによる分類結果と整合がとれており, 各環境要因からの影響 (プラス, マイナス) を概ね表現できていると考えられる。

(2) 感度分析

次に, 本予測モデルの確率論的な評価を行うため, 各環境要因 (代謝, 塩分, 水温, 風速) が大気-海水間CO₂フラックスに与える影響度の分析 (感度分析) を行った。他のパラメータを平均値に固定した上で, 1パラメータずつ現地観測で得られた範囲内で変化させ, その変動幅

表-2 予測モデル結果

	代謝	塩分	水温	風速	[切片]	AICc	Δ_i	w_i
AIC best	x		x	x	x	-309.2	0.00	0.54
	x	x	x	x	x	-308.5	0.67	0.38
選択確率	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00			
$\bar{\beta}$	0.0003	0.0006	-0.0032	-0.0295	0.0739			
SE($\bar{\beta}$)	0.0000	0.0003	0.0002	0.0028	0.0141			
バイアス	0.1	0.5	0.1	0.1	0.2			

注) 選択されたモデルに含まれる説明変数を「x」で表している。 Δ_i : $AIC_i - AIC_{\text{best}}$, w_i : Akaike weight, $\bar{\beta}$: モデル平均された係数推定値, SE($\bar{\beta}$): $\bar{\beta}$ の標準誤差, バイアス: SE($\bar{\beta}$) / $|\bar{\beta}|$ を示している。

注) 各環境要因の変化に伴い、大気-海水間 CO₂ フラックスが変動する幅を示しており、変動幅の大きい要因から順に上から並べている。

図-4 感度分析結果 (トルネードチャート)

をトルネードチャートに示した。感度分析の結果、風速の変化が最も大きく大気-海水間 CO₂ フラックスを変動させ、続いて代謝、水温の影響がみられた (図-4 参照)。一方、塩分による変動幅は小さく、CO₂ フラックスに与える影響は小さかった。

(3) 今後の検討課題

本検討では1事例 (亜寒帯に属するラグーン) の解析結果のみであり、統計解析モデルの他海域へ適用を考えた場合、場所差 (温帯、亜熱帯など) や海域特性の違いなども含めた更なる実測データの収集が必要である。また、多様な収集データを用いたモデルの妥当性の検証に際し、分散の均一性や誤差の正規性などを確認する必要がある。さらに、環境要因の非線形関係や相互作用の適用についても検討を行っていく必要がある。

6. 結論

浅海域における大気-海水間 CO₂ フラックスのモデル化の必要性を踏まえ、統計論的モデルの予測手法の検討を行った。始めに、大気-海水間 CO₂ フラックスの算出過程などを踏まえ、CO₂ フラックスに影響を及ぼす環境要因の抽出と実測データの収集を行った。次に、データ構造を把握するために、散布図行列、樹木モデル、一般化加法モデルを用いた解析を行った。予測モデルの構築では、一般線形モデルを適用した係数推定を行い、感度分析によって各環境要因の影響度の評価を行った。一連の統計解析の結果、大気-海水間 CO₂ フラックスに係る各環境要因の影響について、算出過程などの理論と矛盾することなく、各モデル間で整合的に説明することができた。

謝辞：本研究の一部は、キャノン財団研究助成プログラム「理想の追求」と (独法) 日本学術振興会科学研究費助成事業「挑戦的萌芽研究 (No.24656316)」(共に研究代表者：桑江朝比呂) の助成によるものである。

参 考 文 献

- 環境省自然環境局 (2008) : 第7回自然環境保全基礎調査, 浅海域生態系調査 (藻場調査) 報告書, pp. 30-31.
- 田多一史・所立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013) : 北海道風蓮湖における大気-海水間 CO₂ フラックスに影響を及ぼす要因, 土木学会論文誌B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2.
- 所立樹・細川真也・三好英一・門谷茂・茅根創・桑江朝比呂 (2013) : 沿岸域のブルーカーボンと大気中 CO₂ の吸収との関連性に関する現地調査と解析, 港湾空港技術研究所報告, 第52巻, 第1号.
- 山田雄二・飯田愛実・椿広計 (2006) : トレンド予測に基づく天候デリバティブの価格付けと事業リスクヘッジ, 統計数理, 第54巻, 第1号, 統計数理研究所, pp. 57-78.
- Borges, A. V., B. Delille and M. Frankignoulle (2005) : Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean : Diversity of ecosystem counts, *Geophysical Research Letters*, 32, pp. 1-4.
- Burnham, K. P. and D. R. Anderson (2002) : Model Selection and Multimodel Inference : a Practical Information - Theoretic Approach, Springer, New York, 488p.
- Cai, W. -J. (2011) : Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO₂ sinks or sites of terrestrial carbon incineration? , *Annual Reviews Marine Science*, pp. 123-145.
- Clark, L. A. and D. Pregibon (1992) : Tree-based models. In Chambers, J.M. and Hastie, T.J. eds. *Statistical Models in S*, California, Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, Pacific Grove, pp. 377-419.
- De'ath, G. and K. E. Fabricius (2000) : Classification and regression trees, A powerful yet simple technique for ecological data analysis, *Ecology*, Vol.81, pp. 3178-3192.
- Hunt, C. W., J. E. Salisbury, D. Vandemark, and W. McGillis (2011) : Contrasting carbon dioxide inputs and exchange in three adjacent New England estuaries, *Estuaries and Coasts*, 34, pp. 68-77.
- Hurvich, C. M. and C. L. Tsai (1989) : Regression and time series model selection in small samples, *Biometrika*, Vol.76, pp. 297-307.
- IPCC (2007) : Contribution of working group 2 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Ipcc fourth assessment report : Climate change 2007*, Cambridge University Press, New York, 976p.
- Jähne, B., G. Heinz and W. Dietrich (1987) : Measurement of the diffusion-coefficients of sparingly soluble gases in water, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 92, pp. 10767-10776.
- McLeod, E., G. L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C. M. Duarte, C. E. Lovelock, W. H. Schlesinger and B. R. Silliman (2011) : A blueprint for blue carbon : Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, pp. 552-560.
- Nellemann, C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdes, C. De Young, L. Fonseca and G. (Eds) Grimsditch (2009) : Blue carbon. A rapid response assessment., United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 80p.
- R Development Core Team (2005) : R : A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Wang, Z. A., and W. -J. Cai (2004) : Carbon dioxide degassing and inorganic carbon export from a marsh-dominated estuary (the Duplin River) : A marsh CO₂ pump, *Limnology and Oceanography*, 49(2), pp. 341-354.
- Weiss, R. F. (1974) : Carbon dioxide in water and seawater : The solubility of a nonideal gas, *Marine Chemistry*, 2, pp. 203-215.