国内の様々な浅海域における 海水中CO₂分圧の実測と統計モデルによる予測

田多 一史¹・所 立樹²・渡辺 謙太³・茂木 博匡⁴・桑江 朝比呂⁵

¹正会員 中電技術コンサルタント株式会社 沿岸整備部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

E-mail: ktada@cecnet.co.jp

²国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究チーム 研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: tokoro-t@pari.go.jp

³国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究チーム 研究官

E-mail: watanabe-ke@pari.go.jp

⁴国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究チーム 専任研究員

E-mail: moki-h@pari.go.jp

⁵正会員 国立研究開発法人 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

E-mail: kuwae@ipc.pari.go.jp

本研究では、2010年～2013年に現地観測を実施し、それらを統計解析することにより、国内の様々な浅海域生態系（亜寒帯～温帯～亜熱帯の海草場、干潟、サンゴ礁）における海水中CO₂分圧の現況を推定することを目的とした。まず、取得データの構造を把握するために、変数間の関係性（散布行列、相関など）について整理した。次に、海水中CO₂分圧に及ぼす水温、塩分、生物過程による炭素増減量（ Δ DIC）、石灰化によるアルカリ度増減量（ Δ TA）、観測場所、生態系タイプといった影響要因を用いて、浅海域生態系における海水中CO₂分圧の統一的な推定式（一般化線形モデル）を構築した。感度分析の結果、生物活動自体を示す指標（ Δ DIC、 Δ TA）が非常に重要な影響要因であることがわかった。

Key Words : blue carbon, the fugacity of CO₂ in water, seagrass meadows, tidal flat, coral reef

1. 序論

近年、海洋生態系の光合成などによって固定される炭素「ブルーカーボン」が注目されており、特に浅海域（海草場、干潟、塩生湿地など）は炭素固定・隔離の場として期待されている^{1) 2) 3)}。例えば、人為起源で放出されたCO₂の約1/3は、毎年大気から海水中に除去される⁴⁾と見積もられているが、大気・海洋間のCO₂吸収量を把握するためには、海水中CO₂分圧を正確に推定する必要がある。一方で、これまで国内の様々な浅海域で海水中CO₂分圧が計測されているが、それらを総括した解析やCO₂分圧の推定手法は確立されていない^{5) 6)}。また、海水中CO₂分圧は、呼吸・分解、光合成、石灰化といった生物化学的な変化を含んでおり、非線形かつ多変量の相互作用を伴った複雑な集合体となることから、統計論的モデル（Stochastic Model）を適用する必要がある。そこで本研究では、2010年～2013年に現地観測を実施し、それらを統計解析することにより、国内の様々な浅海域（亜寒帯～温帯～亜熱帯の海草場、干潟、サンゴ礁）における海水中CO₂分圧の現況を推定することを目的とした。

2. 現地観測

海水中CO₂分圧と関連する環境要因について、現地観測を行った。対象サイトは、北海道 風蓮湖、コムケ湖、東京湾 走水海岸、野島海岸、松輪干潟、盤洲干潟、富津干潟、石垣島 吹通川河口、白保海岸の計9箇所（サンプル数n=311）である（図-1参照）。

(1) 各観測場所の特徴

a) 北海道 風蓮湖

日本の亜寒帯に属する風蓮湖（北緯 43° 19' 46.5", 東経 145° 15' 27.8"）は、根室半島と野付崎の間に位置する潟湖（約 60.5 km²）であり、河口付近に位置する海草場（水域の約 7割がアマモ場⁷⁾）である。2010年8月、11月、2011年6月～11月に48時間連続観測および平面移動観測を実施した（元データは、田多ほか⁸⁾から引用）。

b) 北海道 コムケ湖

風蓮湖と同様に、北海道内のコムケ湖（北緯 44° 15' 30", 東経 143° 30' 20"）は、オホーツク海沿いに3つの湖盆が連なる汽水湖である。湖内環境としてアマモ場が生育するとともに、ホッカイエビ、ホタテガイ、アサリ、カキなどの水産資源の養殖も行われている。2013年5月、8月に平面移動観測を実施した（元データは、田多ほか⁹⁾から引用）。

c) 東京湾 走水海岸

日本の温帯に属する神奈川県横須賀市の走水海岸（北緯 35° 15' 53", 東経 139° 43' 34"）は、東京湾の希少な天然アマモ場群落として残存している。走水海岸は水深約 2m以浅の静穏域に、約 4haのアマモ場が大小のパッチを形成しながら安定的に維持されている¹⁰⁾。2013年7月、12月に48時間の定点連続観測を実施した（元データは、田多ほか¹¹⁾から引用）。

d) 東京湾 野島海岸

神奈川県横浜市の野島海岸（北緯 35° 19' 48", 東経 139° 38' 09"）は、東京湾西岸最北に位置し、横浜市内唯一の自然海岸の砂浜である。小規模なアマモとコアマモの群落があり、近年拡大しつつある¹²⁾。2013年5月に平面移動観測を実施した。

e) 東京湾 松輪干潟

神奈川県三浦市の松輪干潟（北緯 35° 08' 38", 東経 139° 39' 48"）は、江奈湾奥に位置し、波は穏やかで泥湿地が広がっており、ヨシが生育し所々に浜や磯が見受けられる。2013年6月に平面移動観測を実施した。

f) 東京湾 盤洲干潟

盤洲干潟（北緯 35° 24' 12", 東経 139° 53' 50"）は、東京

湾の東岸に位置する前浜干潟であり、規模は長さが 8km、沖側に約 2kmの大きさを持ち、地形勾配は約 0.001と傾斜の緩やかな砂質干潟である¹³⁾。また、東京湾におけるアサリ、ノリの主生産地となっており、漁業生産の場としてだけでなく、潮干狩りなどの親水の間としても利用されている¹⁴⁾。2013年6月に平面移動観測を実施した。

g) 東京湾 富津干潟

富津干潟（北緯 35° 18' 56", 東経 139° 47' 36"）は東京湾内湾の干潟群の最南に位置し、北東に流れる小糸川の河口付近から西の富津岬までに突き出した砂洲の北側にあり¹⁵⁾。2013年6月に平面移動観測を実施した。

h) 石垣島 吹通川河口

日本の亜熱帯に属する吹通川河口（北緯 24° 29' 18", 東経 124° 13' 47"）は石垣島西岸に位置し、岸から沖に向けてサンゴ礁が連なっている。2013年7月に平面移動観測を実施した。

i) 石垣島 白保海岸

白保海岸（北緯 24° 22' 57", 東経 124° 15' 19"）は石垣島東岸に位置し、アオサンゴの大群落をはじめ、いくつかの種類の造礁サンゴ群集がリーフ上に存在している。2013年7月に平面移動観測を実施した。

(2) 現地観測取得データ

a) 観測項目・分析方法

各観測場所において、海水中CO₂分圧、水温、塩分、全アルカリ度（TA）、溶存無機炭素濃度（DIC）のデータセットを取得し、併せて生物過程による炭素増減量（ Δ DIC）、石灰化によるアルカリ度増減量（ Δ TA）を算出した（表-1、図-2 参照）。また、地域特性である生態系タイプについても、海草場、干潟、サンゴ礁に分類した。海水中CO₂分圧は、CO₂濃度計（CO2-09¹⁶⁾、紀本電子社製）による計測、もしくは炭酸系の化学的平衡関係（DIC、TA）による間接的な計算手法¹⁷⁾で算出した。水温と塩分は水温・塩分計（Compact-CT、JFEアドバンテック社製）を用いて計測した。TA、DIC測定用サンプルは、250mlのSchott Duran瓶で採取し、200 μ lの塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。これらは、フ

表-1 主な現地観測取得データ

観測場所	生態系タイプ	サンプル数	海水中CO ₂ 分圧 (μ atm)	水温 (°C)	塩分 (‰)	Δ DIC (μ mol/kg)	Δ TA (μ mol/kg)
風蓮湖	海草場	150	350 $\pm$ 30	15.3 $\pm$ 1.2	21.3 $\pm$ 0.9	- 62.0 $\pm$ 18.7	- 29.1 $\pm$ 22.6
コムケ湖	海草場	26	249 $\pm$ 138	14.5 $\pm$ 2.8	21.2 $\pm$ 4.2	- 230.3 $\pm$ 85.2	16.7 $\pm$ 119.3
走水海岸	海草場	98	291 $\pm$ 12	19.8 $\pm$ 1.0	32.0 $\pm$ 0.1	- 36.5 $\pm$ 9.0	9.5 $\pm$ 4.9
野島海岸	海草場	8	134 $\pm$ 114	23.4 $\pm$ 0.4	30.5 $\pm$ 0.5	- 311.7 $\pm$ 206.2	- 1.1 $\pm$ 21.9
松輪干潟	干潟	5	687 $\pm$ 359	25.2 $\pm$ 1.9	30.7 $\pm$ 2.1	8.9 $\pm$ 101.0	44.9 $\pm$ 48.8
盤洲干潟	干潟	5	710 $\pm$ 174	24.4 $\pm$ 0.6	22.7 $\pm$ 7.5	27.6 $\pm$ 15.6	50.3 $\pm$ 88.8
富津干潟	干潟	8	456 $\pm$ 286	25.3 $\pm$ 0.9	31.7 $\pm$ 0.5	- 85.6 $\pm$ 108.7	- 45.9 $\pm$ 27.5
吹通川河口	サンゴ礁	6	707 $\pm$ 152	31.1 $\pm$ 0.7	33.8 $\pm$ 0.2	17.5 $\pm$ 14.9	- 111.3 $\pm$ 21.9
白保海岸	サンゴ礁	5	630 $\pm$ 212	31.9 $\pm$ 1.8	33.4 $\pm$ 0.2	- 48.4 $\pm$ 177.7	- 132.1 $\pm$ 113.2

注) 表中の数値は、平均値 $\pm$ 95% 信頼区間を示している。

ロースルー型の炭酸系分析装置 (MDO-02¹⁸⁾, 紀本電子社製) もしくはパッチ型分析装置 (ATT-05, 紀本電子社製) で測定した。

b) 海水中CO₂分圧

観測場所ごとの海水中CO₂分圧は, 風蓮湖, コムケ湖, 走水海岸, 野島海岸で概ね大気中CO₂分圧 (約400ppm) より低く, 松輪干潟, 盤洲干潟, 富津干潟, 吹通川河口, 白保海岸で高い傾向にあった。海水中CO₂分圧は, 場の特性や環境変化に影響を受けやすく, 水質環境や生物活動に深く関係しているものと予想される。

c) 海水中炭酸系イオン (TA, DIC)

海水中CO₂分圧の変動は, 陸域からの炭素流入や生物活動の他に, 海水中に含まれる炭酸水素イオン (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(1), 式(2)に示されるとおりであり,

[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, 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。

$$DIC = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad (1)$$

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

d) 生物過程による炭素増減量 (ΔDIC)

生物過程による炭素増減量 (以下, ΔDICと呼ぶ) とは, 淡水と外海水の単純混合以外の生物過程によって影響を受けるDICの増減量のことであり^{8) 9) 11) 19)}, 正の値は呼吸・分解活動, 負の値は光合成活動が卓越することを意味している。

e) 石灰化によるアルカリ度増減量 (ΔTA)

石灰化によるアルカリ度増減量 (以下, ΔTAと呼ぶ) とは, 淡水と外海水の単純混合以外の石灰化などによ

図-2 変数間の対散布図

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, 海水中 CO₂分圧(μatm), 水温 (°C), 塩分 (‰), TA(μmol/kg), DIC(μmol/kg), ΔDIC(μmol/kg), ΔTA(μmol/kg)である。

て影響を受けるTAの増減量のことであり、正の値は炭酸カルシウム (CaCO_3) の溶解、負の値は CaCO_3 の析出を意味している。

f) 生態系タイプ

各観測場所は生態系別に概ね3種類に分類され、風蓮湖、コムケ湖、走水海岸、野島海岸は「海草場」、松輪干潟、盤洲干潟、富津干潟は「干潟」、吹通川河口、白保海岸は「サンゴ礁」と設定した。各生態系タイプの主な基礎生産者として、植物プランクトンや貝類などに加え、藻場は海草藻場、干潟は底生微細藻+海草藻場、サンゴ礁はサンゴ+海草藻場を想定した。

3. データ構造の把握

(1) 散布図行列 (Pairs, Panels)

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-2 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。データ解析には、R 3.0.3²⁰⁾のソフトウェアを使用した。各変数のヒストグラムから、海水中 CO_2 分圧 (343 ± 24 (平均値 $\pm$ 95%信頼区間、以下同じ) μatm)、DIC ($1,681 \pm 34 \mu\text{mol/kg}$)、 ΔDIC ($-70.7 \pm 15.3 \mu\text{mol/kg}$)、 ΔTA ($-13.6 \pm 15.3 \mu\text{mol/kg}$) は単峰性分布となり、ピークは平均値付近となった。一方、水温 (18.0 ± 0.8)、塩分 (25.8 ± 0.8)、TA ($1,901 \pm 38 \mu\text{mol/kg}$) はやや多峰性を含んだ分布となった。ここで水温に注目すると、幅広い分布となっていることから、季節間や高・低緯度帯も加味された多様なサンプリングデータであることがわかる。

次に、各変数間の相関関係をみると、海水中 CO_2 分圧に対し、 ΔDIC 、DICは正の相関 (0.37, 0.23)、TAは負の相関 (-0.17)、水温、塩分、TAの相関 (-0.09, 0.01, -0.03) は弱かった。また、塩分、TA、DICの間に強い相関 (概ね0.8~0.9程度) がみられた。これは、海水中 CO_2 分圧を目的変数としたモデル構築の場合、塩分、TA、DICの多重共線性による影響が懸念される。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 (HCO_3^-) などの影響を受けるため (式(1)、式(2)参照)、塩分で概ね説明可能と考えられる。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) 海水中 CO_2 分圧と ΔDIC の関係性

目的変数 (海水中 CO_2 分圧) と説明変数 (水温、塩分、 ΔDIC 、 ΔTA) の関係性を把握するにあたり、最も相関の高かった ΔDIC に注目した。海水中 CO_2 分圧と ΔDIC の相関図は図-3に示すとおりであり、指数関数に近い構造であることが仮定できた。また、目的変数は0以上の連

図-3 ΔDIC と海水中 CO_2 分圧の関係

続値をとることから、次章の現況推定モデルの検討ではガンマ分布を仮定した確率分布で扱うこととした。

4. 統計解析を用いた現況推定モデルの構築

データ構造の把握に基づき、海水中 CO_2 分圧に及ぼす水温、塩分、 ΔDIC 、 ΔTA 、観測場所、生態系タイプの影響について、一般化線形モデル (Generalized Linear Model, family = Gamma, link 関数 = log) を適用し、 CO_2 分圧の現況推定モデルを構築した。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) 連続変数 (水温、塩分、 ΔDIC 、 ΔTA) のみ考慮

全観測場所における海水中 CO_2 分圧を統一的に説明するモデルを構築するため、まず始めに連続変数 (水温、塩分、 ΔDIC 、 ΔTA) のみを説明変数の候補としたモデル選択を行った。海水中 CO_2 分圧に関するモデル推定結果は、式(3)に示すとおり、塩分、 ΔDIC 、 ΔTA が選択された。

$$\begin{aligned} & \text{海水中CO}_2\text{分圧}(\mu\text{atm}) \\ &= \exp \left(\begin{array}{l} -0.015 \times \text{塩分} + 0.005 \times \Delta\text{DIC}(\mu\text{mol/kg}) \\ -0.004 \times \Delta\text{TA}(\mu\text{mol/kg}) + 6.399 \end{array} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、実測値と推定値の比較は図-4に示すとおりである。モデルの評価基準として、 R^2 (決定係数)、AIC (赤池情報量基準: 統計モデルの当てはまりの良さ) を用いた。 R^2 は大きいほど実測値と推定値の相関が高い。一方、AICは小さいほど、データの当てはまりが良いとされている。本モデルでは、 $R^2 = 0.37$ 、AIC = 3,853.6となった。

図-4 実測値と推定値の比較 (連続変数のみ)

(2) 連続変数 + カテゴリー変数 (観測場所) 考慮

次に、上記以外の要因を考慮するため、カテゴリー変数 (観測場所) を付加した一般化線形モデルの解析を行った。海水中CO₂分圧に関するモデル推定結果は、式(4)に示すとおり、塩分、ΔDIC、ΔTA、場所係数が選択された。

$$\begin{aligned} & \text{海水中CO}_2\text{分圧}(\mu\text{atm}) \\ &= \exp \left(-0.019 \times \text{塩分} + 0.006 \times \Delta\text{DIC}(\mu\text{mol/kg}) \right. \\ & \quad \left. - 0.005 \times \Delta\text{TA}(\mu\text{mol/kg}) + \text{場所係数} + 7.072 \right) \quad (4) \end{aligned}$$

場所係数は、風蓮湖=-0.657、コムケ湖=-0.338、走水海岸=-0.554、野島海岸=-0.221、松輪干潟=0.074、盤洲干潟=0.000、富津干潟=-0.368、吹通川河口=-0.523、白保海岸=-0.410と算出され、R²=0.41、AIC=3,822.2となった。この場所係数については、規則性などは確認されず、観測場所ごとの固有値となっており、統合モデルの一般性に欠けると懸念される。

(3) 連続変数 + カテゴリー変数 (生態系タイプ) 考慮

カテゴリー変数として、観測場所の代わりに生態系タイプを付加した一般化線形モデルの解析を行った。解析の結果、塩分、ΔDIC、ΔTA、生態系係数が選択され、R²=0.47、AIC=3,831.1となった (式(5)、図-5参照)。

$$\begin{aligned} & \text{海水中CO}_2\text{分圧}(\mu\text{atm}) \\ &= \exp \left(-0.016 \times \text{塩分} + 0.005 \times \Delta\text{DIC}(\mu\text{mol/kg}) \right. \\ & \quad \left. - 0.004 \times \Delta\text{TA}(\mu\text{mol/kg}) + \text{生態系係数} + 6.559 \right) \quad (5) \end{aligned}$$

生態系係数は、海草場=-0.165、干潟=0.305、サンゴ礁=0.000と算出され、海草場で最も小さくなったことから、海水中CO₂分圧の相対的な大小関係と概ね整合がとれたものとなった。

(4) 感度分析

本推定モデルの確率論的な評価を行うため、各説明変数 (塩分、ΔDIC、ΔTA、生態系係数) が海水中CO₂分圧に与える影響度の解析 (感度分析) を行った。他パラメータを平均値で固定し、1パラメータずつ現地観測データの80%レンジ (上下位10%を除く) で変化させ、その変動幅をトルネードチャートに示した。感度分析の結果 (図-6参照)、ΔDICとΔTAが海水中CO₂分圧を大きく変動させていることがわかった。一方、塩分と生態系係数

図-6 感度分析結果 (トルネードチャート)

注) 各要因の変化に伴い、海水中CO₂分圧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。

による変動幅は小さく、CO₂分圧に与える影響は小さかった。

(5) 総括

海水中CO₂分圧は、ΔDICやΔTAとの関係性が強く、共に重要な影響要因となった。ΔDICは、海水中の生物活動を表していることから、プラス方向 (呼吸・分解活動) になると海水中CO₂分圧を高め、マイナス方向 (光合成活動) になると低下させている。併せて、石灰化 (サンゴの成長など) も、CaCO₃の析出および海水中CO₂分圧の上昇に寄与していると考えられる。一方で、観測場所 (地理・地形) や生態系タイプなどの影響は比較的小さいと考えられるが、海水中CO₂分圧の動態に係る推定精度を向上させるためには、このような固有データの収集・蓄積も重要になってくると考えられる。

今後の課題として、観測データの精度向上と均質性の確保が挙げられる。ΔDICやΔTAは、河川水と外海水の単純混合割合で説明できないDICとTAの差を算出しているため、河川・外海境界地点の設定が非常に重要となってくる。このため、陸域負荷による影響などを精度良く適切に見積もる必要がある。また、今回の取得データにおいては、観測場所ごとのサンプル数の相違や日周期変動 (夜間) データの不足が生じており、平面移動観測だけでは把握しきれない低塩分域 (海水中CO₂分圧の日変化が大きい場所) をターゲットとした連続観測の充実が必要となる。

5. 結論

国内の主要な浅海域生態系 (海草場、干潟、サンゴ礁) において、海水中CO₂分圧とその規定要因に関する項目 (水温、塩分、生物活動など) を計測し、それらの現地観測結果 (引用データを含む) の統合によって、海水中CO₂分圧の統一的な推定式を構築した。感度分析の結果、生物活動自体を示す指標 (ΔDIC、ΔTA) が非常に重要な影響要因であることがわかった。今後、観測データの精度向上や均質性を図るとともに、ΔDICやΔTAに関する規定要因の解明とそれらの推定モデルの構築が必要となる。

図-5 実測値と推定値の比較 (連続変数 + 生態系タイプ)

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，No.26630251）」（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

- 1) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds) : *Blue carbon. A rapid response assessment.*, 80p., United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009.
- 2) Mcleod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H. and Silliman, B. R. : 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, 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*, 21, pp.2612-2623, 2015.
- 4) IPCC : Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Ippc fifth assessment report : Climate change 2013*, 1535p., Cambridge University Press, New York, 2013.
- 5) Borges, A. V., Delille, B. and Frankignoulle, M. : Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean : Diversity of ecosystem counts, *Geophysical Research Letters*, 32, pp.1-4, 2005.
- 6) Koné, Y. J. M., Abril, G., Kouadio, K. N., Delille, B. and Borges, A. V. : Seasonal variability of carbon dioxide in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa), *Estuaries and Coasts*, 32, pp.246-260, 2009.
- 7) 環境省自然環境局：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.30-31，2008．
- 8) 田多一史，所立樹，渡辺謙太，桑江朝比呂：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，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.69，No.2，pp.1252-1257，2013．
- 9) 田多一史，所立樹，渡辺謙太，茂木博匡，桑江朝比呂：北海道コムケ湖における大気 - 海水間 CO₂ フラックスの空間分布特性と要因分析，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.70，No.2，pp.1188-1193，2014．
- 10) 工藤孝浩，秋元清治：横須賀市走水海岸アマモ場における春・夏季の魚類相について，神奈川県水産技術センター研究報告，第6巻，pp.35-40，2013．
- 11) 田多一史，所立樹，渡辺謙太，茂木博匡，桑江朝比呂：アマモ場における大気 - 海水間 CO₂ フラックスの連続観測，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70，No.2，pp.I_1191-I_1195，2014．
- 12) 工藤孝浩，滝口直之，柵瀬信夫：横浜市平潟湾流域の魚類相と人為的環境変化，神水研研報第7号，pp.135-148，2002．
- 13) 藤野智亮，古川恵太，三好英一，桑江朝比呂，野村宗弘：干潟の地形変化に関する現地観測，日本海洋学会秋季大会講演概要集，pp.175，2000．
- 14) 野村宗弘，中村由行：盤洲干潟における潮汐に伴う水質変動に関する現地観測，水環境学会誌，第25巻，第4号，pp.217-225，2002．
- 15) 山北剛久，仲岡雅裕，近藤昭彦，石井光廣，庄司泰雅：東京湾富津干潟における海草藻場の長期間動態，保全生態学研究，10，pp.129-138，2005．
- 16) Saito, H., Tamura, N., Kitano, H., Mito, A., Takahashi, C., Suzuki, A. and Kayanne, H. : A compact seawater pCO₂ measurement system with membrane equilibrator and nondispersive infrared gas analyzer, *Deep-Sea Research Part 1 : Oceanographic Research Papers*, 42, pp.2025-2033, 1995.
- 17) Zeebe RE and Wolf-Glandrow D : CO₂ in seawater : equilibrium, kinetics, isotopes, 346p., Amsterdam, Elsevier, 65, 2001.
- 18) Watanabe, A., Kayanne, H., Nozaki, K., Kato, K., Negishi, A., Kudo, S., Kimoto, H., Tsuda, M. and Dickson, A. G. : A rapid, precise potentiometric determination of total alkalinity in seawater by a newly developed flow-through analyzer designed for coastal regions, *Marine Chemistry*, 85, pp.75-87, 2004.
- 19) Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E., Tada, K., Watanabe, K., Montani, S., Kayane, H. and Kuwae, T. : Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, 20, pp.1873-1884, 2014.
- 20) R Development Core Team : 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>, 2005.

(2015.3.18 受付)

OBSERVATIONS AND STATISTICAL PREDICTIONS OF CO₂ FUGACITY SHALLOW WATERS IN JAPAN

Kazufumi TADA, Tatsuki TOKORO, Kenta WATANABE,
Hirofumi MOKI and Tomohiro KUWAE

The Blue Carbon is recently recognized as an important option for the climate change initiatives. In this study, we selected water temperature, salinity, total alkalinity (TA), dissolved inorganic carbon (DIC), the metabolism (Δ DIC) and calcification (Δ TA) as the environmental factors affecting CO₂ fugacity in the water column. The data sampled at a variety of Japanese shallow coastal ecosystems were analyzed using the scatter diagram matrix. Moreover, we proposed the stochastic prediction method using the generalized linear model.