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

田多 一史¹・所 立樹²・渡辺 謙太³・桑江 朝比呂⁴

¹正会員（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)
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

E-mail: tada-k@pari.go.jp

²（独法）港湾空港技術研究所 沿岸環境研究チーム 研究官

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

³（独法）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正会員（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

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

北海道風蓮湖において現地調査を実施し、大気-海水間CO₂フラックスを推定した。そして、CO₂フラックスとその変動要因（風速、水温、塩分、全アルカリ度（TA）、溶存無機炭素濃度（DIC）、生物過程による炭素増減量）との関係性（時系列変化、単相関・偏相関等）について検討した。また、変動要因の相対的な影響度を把握するために、多変量解析（パス解析）を行った。解析の結果、大気-海水間CO₂フラックスに影響を及ぼす環境要因として、湖内の代表的な水質指標である塩分に起因するDICとTAが挙げられた。また、CO₂フラックスは風速からの直接的な影響、DICを介した生物過程（呼吸・分解、光合成）からの間接的な影響も受けていることが示唆された。

Key Words : blue carbon, coastal vegetation, air-sea CO₂ flux, seagrass meadows, path analysis

1. 序論

人間活動等に伴って排出される温室効果ガス（CO₂など）に起因する気候変動は、気温・海水温の上昇、気象災害の増加、生態系・自然環境の変化、食糧生産の低下などを引き起こす可能性があり、社会・経済活動への悪影響が懸念される。このため、CO₂をはじめとする温室効果ガスの削減は、喫緊の課題である¹⁾。近年、海洋に存在する炭素の総称「ブルーカーボン」が炭素ストックとして注目されており、ブルーカーボンは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²⁾。既往の研究によると、堆積物中への有機炭素の堆積速度は、ブルーカーボンの蓄積速度の代表的な指標の1つとして見なされており、沿岸域、大陸棚、外洋あわせて2.7億トン-C/year程度と見積もられている³⁾。特に、アマモなどの植生が生育し、有機炭素が多く堆積している浅海域は、炭素隔離・固定機能の場として有用であると考えられている^{2,3)}。さらに、このような場で大気-海水間のCO₂の放出・吸収過程を把握し、大気中CO₂の直接の吸収源として機能するかどうかを知ることは、気候変動

の緩和策を考える上で非常に重要である。しかしながら、浅海域における環境特性とそれに起因する大気-海水間CO₂フラックスの変動要因に関しては、未解明な部分が多い^{4,5)}。そこで、本研究では河口域において現地調査を実施し、大気-海水間CO₂フラックスに影響を及ぼす要因を検討することを目的とした。

2. 調査手法とデータ解析方法

(1) 調査場所

本調査水域は、河口付近に位置する海草場であり、陸域負荷と生物活動の影響の両方が捉えやすい閉鎖的な場であること、そして水域の約7割がアマモ場で占められていることを理由に⁶⁾、北海道の風蓮湖（北緯 43° 19' 46.5"、東経 145° 15' 27.8"）を選定した。風蓮湖は、根室半島と野付崎の間に位置する潟湖（約60.5 km²）である。湖内の底質は、春国岱の砂州付近では砂質、風蓮川河口部では泥質となっている⁷⁾。一方、湖内の水質は、流入河川の影響を強く受け⁸⁾、負荷源の流入や外海水の影響については、塩分が有効な指標となっている⁹⁾。

図-1 現地調査位置

また、水中の植物プランクトン量の指標となるクロロフィル a 濃度は、2006年~2008年の水質調査結果¹⁰⁾によると0.9~35.3 $\mu\text{g/l}$ の範囲で変動するとともに、風蓮川河口部付近で高くなる傾向を示している。なお、開口部の流況は、概ね同位相・同方向のほぼ滞筋に沿った潮汐流が主となっている⁹⁾。これらの湖内環境を勘案し、多変量解析に適した幅広い環境データを測定・収集するために、調査地点は風蓮川河口付近からオホーツク海に繋がる開口部付近まで、風蓮湖内の環境勾配に沿って縦断的に設定した(図-1参照)。

(2) 調査時期・項目

調査時期は、2010年の8月と11月(No.10で48時間連続観測)、2011年の6月~11月(1回程度/月の頻度でNo.2~No.11の移動観測)とし、気象、水質データ等を測定・収集した。環境調査項目は、風速、水温、塩分、溶存無機炭素濃度(DIC)、全アルカリ度(TA)とした。サンプルは250 mlのSchott Duran瓶で採取され、200 μl の塩化第二水銀を添加して溶存無機炭素を固定した。DICの測定は、フロースルー型の炭酸系分析装置(MDO-02、紀本電子製¹¹⁾)、もしくはパッチ型分析装置(ATT-05、紀本電子製)を用いた。なお、両者の装置で、DICと同時にTAも測定した。調査時期およびサンプル数等は、表-1に示すとおりである。

(3) 大気-海水間CO₂フラックスの測定手法

大気-海水間CO₂フラックスは、バルク法を用いて算

表-1 調査時期・サンプル数等

調査時期	サンプル数	サンプル頻度
2010年		
8月5日~7日	42	1時間間隔
11月16日~18日	43	
2011年		
6月27日	10	各日1回
7月17日	10	
8月10日	10	
8月24日	10	
9月17日	10	
10月19日	10	
11月4日	10	

出した。バルク法とは、大気と海水間のCO₂分圧差、交換係数、溶解度を用いてCO₂フラックスを算出する方法である。CO₂フラックスの測定手法としては、最も多く使われる手法であり、現在、外洋における大気中CO₂の吸収量についてもこの手法で算出されている^{12) 13)}。バルク法による大気-海水間CO₂フラックスは、式(1)を用いた。

$$F = kS(f\text{CO}_{2\text{water}} - f\text{CO}_{2\text{air}}) \quad (1)$$

海水中のCO₂分圧($f\text{CO}_{2\text{water}}$ μatm)と大気中のCO₂分圧($f\text{CO}_{2\text{air}}$ μatm)は、CO₂濃度計(CO2-09¹⁴⁾、紀本電子製)を用いて測定した。溶解度 S ($\text{mol}\cdot\text{C}/\text{m}^3/\text{atm}$)は、水温・塩分計(Compact-CT、JFEアドバンテック社製)から水温と塩分データを測定・収集し、既存の経験式¹⁵⁾を用いて算出した。

また、交換係数 k (m/s)は、式(2)を用いた。

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

U_{10} は水面から10 mの高さの風速であり、現地測定した3次元風速データのうち、水平成分の高度補正¹⁶⁾を行った。 Sc はシュミット数と呼ばれる無次元数であり、水温と塩分を変数とする経験式¹⁷⁾を用いて算出した。

(4) 生物過程における炭素増減量の見積方法

生物による光合成や呼吸・分解の影響が無い場合、溶存無機炭素濃度(DIC)は境界地点濃度(河川水と外海水)の単純な混合割合から決定される¹⁸⁾。したがって、実際の採水サンプルから得られたDICから塩分の内挿値(河川境界地点と外海境界地点のデータを結んだ線)を減じた値を生物過程による炭素増減量($\mu\text{mol}\cdot\text{C}/\text{kg}\cdot\text{water}$)と見なすことができる(図-2参照)。この生物による呼吸・分解および光合成に起因する炭素増減量は、正の場合は従属栄養的な環境(呼吸・分解活動>光合成活動)、負の場合は独立栄養的な環境(光合成活動>呼吸・分解活動)を意味する。

図-2 生物過程による炭素増減量の見積方法
(2010年8月5日~7日の採水サンプル)

(5) 多変量解析による影響要因の検討方法

大気-海水間のCO₂フラックスの変動要因として、風速、水温、塩分、全アルカリ度 (TA)、溶存無機炭素濃度 (DIC)、生物過程による炭素増減量に注目した。これらの各環境要因の影響度や因果関係を把握するために、現地で測定・収集された合計155データセットを用いて、多変量解析 (パス解析) を行った。パス解析では、各環境要因と大気-海水間CO₂フラックスとの相関の大きさを、直接パス係数 (その環境要因の直接的な影響度) と間接パス係数 (他の環境要因を経由する間接的な影響度) とに分離して示すことが可能である。

統計解析には、R 2.15.0¹⁹⁾のソフトウェアを使用した。なお、パス係数 (標準化解) は、構造方程式モデル (SEM) を用いた最尤推定法により求めた。

3. 調査結果

(1) 時系列変化

a) 2010年夏季・秋季

2010年の夏季 (8月5日~7日) と秋季 (11月16日~18日) の調査結果 (No.10で48時間連続観測) は、図-

3(a),(b)に示すとおりである。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フラックスは、夏季に -0.14 ± 0.09 (平均値 $\pm$ 95%信頼区間, 以下同じ) $\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$, 秋季に 0.01 ± 0.01 $\mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$ となり、夏季の方が変動が大きく、大気から海水へ吸収傾向にあった。風速 (夏季: 5.0 ± 0.8 m/s, 秋季: 2.2 ± 0.3 m/s) や生物過程による炭素増減量 (夏季: -98.2 ± 17.7 $\mu\text{mol/kg}$, 秋季: 8.3 ± 5.9 $\mu\text{mol/kg}$) は、大気-海水間CO₂フラックスの変動と同様に夏季に変動が大きかった。なお、夏季の生物過程による炭素増減量は、概ね負の値 (夕方頃に極小値) を示しており、期間を通じて独立栄養的な環境 (光合成活動>呼吸・分解活動) であったことがうかがえる。また、水温と塩分について、夏季は高温 (23.2 $\pm$ 0.5 °C) と低塩分 (15.9 $\pm$ 1.0; 本論文では、塩分は無次元数として表記する), 秋季は低温 (5.7 $\pm$ 0.4 °C) と高塩分 (20.2 $\pm$ 0.9) の環境にあった。TA (夏季: 1,537 $\pm$ 45 $\mu\text{mol/kg}$, 秋季: 1,602 $\pm$ 42 $\mu\text{mol/kg}$) とDIC (夏季: 1,363 $\pm$ 32 $\mu\text{mol/kg}$, 秋季: 1,545 $\pm$ 32 $\mu\text{mol/kg}$) は、ややTAの方が高かったが、概ね同様な変動傾向を示した。

図-3 大気-海水間 CO₂ フラックスと環境調査結果 (2010年8月, 11月)

図4 大気-海水間 CO_2 フラックスと環境調査結果 (2011 年 6 月～11 月)

b) 2011年春季～秋季

2011年の春季～秋季(6月～11月)の調査結果(1回程度/月の頻度でNo.2～No.11の移動観測)は、図-4に示すとおりである。大気-海水間 CO_2 フラックスは、6月27日および8月10日に海水中へ吸収傾向、10月19日に大気中へ放出傾向にあった。地点別では、流入負荷の影響を受けやすい風蓮川河口付近(No.11)では、 CO_2 の吸収・放出の変動($-0.31 \sim +0.20 \mu\text{mol-C/m}^2/\text{s}$)が他地点よりも顕著であった。風速は6月27日に $3.3 \sim 4.8 \text{ m/s}$ 、8月10日に $1.4 \sim 3.2 \text{ m/s}$ とやや大きかったが、他の時期は概ね 2.0 m/s 以下と静穏であった。生物過程による炭素増減量は、6月27日と8月10日に負の値を示しており、独立栄養的な環境(光合成活動>呼吸・分解活動)にあった。また、全体的に風蓮湖奥部では、高水温・低塩分の状態にあり、TAやDICも開口部と比較してやや小さい傾向を示した。

(2) 相関係数

大気-海水間の CO_2 フラックスと各環境要因(風速、水温、塩分、TA、DIC、生物過程による炭素増減量)の相関関係を把握するために、単相関、偏相関、重相関の

表-2 相関係数

	大気-海水間 CO_2 フラックス	風速	水温	塩分	TA	DIC	生物過程による 炭素増減量
大気-海水間 CO_2 フラックス	0.69**	-0.59**	-0.37**	0.17*	0.11	0.32**	0.53**
風速	-0.41**	0.72**	0.46**	-0.38**	-0.31**	-0.50**	-0.57**
水温	0.13	0.24**	0.75**	-0.14	0.07	-0.22**	-0.58**
塩分	-0.15	0.00	-0.14	0.94**	0.88**	0.90**	0.34**
TA	-0.30**	-0.06	0.48**	-0.12	0.98**	0.92**	0.26**
DIC	0.30**	-0.01	-0.31**	0.53**	0.89**	0.99**	0.57**
生物過程による 炭素増減量	-0.07	-0.08	-0.03	-0.44**	-0.65**	0.78**	0.90**

注1) 上三角行列: 単相関係数 下三角行列: 偏相関係数 対角成分: 重相関係数 を示している。

注2) *は $p<0.05$ 有意水準, **は $p<0.01$ 有意水準を示している。

関係について整理・解析を行った。各相関係数は、表-2に示すとおりである。

a) 単相関係数

単相関係数は、単純に2変数の相関関係を見る際に用いられる。このため、2変数以外の要因の影響も内包されており、見かけ上の相関となる。大気-海水間 CO_2 フラックスとの単相関について、相関が高かった環境要因は、風速と生物過程による炭素増減量であった。これは時系列変化の結果(図-3, 4)においても、同様な変動を示しており、見かけ上の相関は高いことがうかがえる。

b) 偏相関係数

偏相関係数は、複数の要因が相互に関連している時、特定の2変数間の関係を、他の要因の影響を除去して評価するために用いられるものである。大気-海水間CO₂フラックスと各環境要因の偏相関について、風速は単相関と同様に高かったが、次にTAとDICの相関が高くなった。これらの環境要因は、直接的にCO₂フラックスに影響を及ぼしていることが予想される。

c) 重相関係数

重相関係数とは、ある変数を残りの変数で予測しようとする時、その説明率を表す係数である。重相関係数が特に高かった項目は、TAとDICであった。これらの項目は、他の変数によって殆ど説明できることがわかった。

4. CO₂フラックスに影響を及ぼす要因の検討

(1) 多変量解析（パス解析）結果

大気-海水間のCO₂フラックスに影響を及ぼす環境要因を検討するため、パス解析を試みた（図-5 参照）。パス係数は、各変数に与える影響の大きさと因果関係を示しており、大気-海水間のCO₂フラックスに対し、プラスの影響は海水から大気へCO₂の放出、マイナスの影響は大気から海水へのCO₂の吸収を表している。

パス解析の結果、大気-海水間CO₂フラックスに対する影響度が大きい環境要因はTAとDICであり、TAは負のパス係数（-0.93）、DICは正のパス係数（1.17）であった。この2つの要因は、塩分と正のパス係数（0.88、0.82）の関係にあった。一方、風速は大気-海水間CO₂フラックスに対し負の影響（-0.39）となった。また、水温、塩分の直接的な影響は、0.13、-0.23であり、それら自体がCO₂フラックスに与える影響は大きくなかった。

(2) 炭酸系イオンに関する考察

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（HCO₃⁻）と炭酸イオン（CO₃²⁻）による緩衝作用の影響を受けやすい。大気-海水間CO₂フラックスに対する影

響が大きかったDICとTAは、これらの炭酸系イオンと関係している。DICとTAの化学式は、式（3）と式（4）に示すとおり、水中CO₂濃度、炭酸水素イオン（HCO₃⁻）、炭酸イオン（CO₃²⁻）等で表わされる。[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等の陰イオンと水素イオン等の陽イオンが該当する。

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

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

TAは炭酸平衡系によるCO₂濃度への緩衝力の目安であり、TAが高い海水よりも低い淡水などの条件下では、CO₂濃度の増減が大きくなる傾向を示した（図-4 参照）。また、DICもTAとほぼ同様の変動を示し、相関も高かったこと（表-2 参照）から、本対象水域では水中の炭酸水素イオンと炭酸イオンが多く含まれ、TAやDICの濃度を規定していたことが予想される。

(3) 交換係数・溶解度に関する考察

大気-海水間CO₂フラックスに係る交換係数と溶解度は、式（1）と式（2）に示すとおり、風速、水温、塩分を用いて算出される。ここで、大気-海水間のCO₂フラックスと風速、水温、塩分の関係（図-5 参照）を見ると、直接的な影響は風速が最も大きい。一方、塩分はTAやDICを介し、水温は生物過程による炭素増減量（呼吸・分解、光合成）からDICを介し、それぞれ間接的な影響があることがうかがえる。

(4) 生物過程による炭素増減量に関する考察

大気-海水間CO₂フラックスに対する影響が最も大きかったDICは、生物過程による炭素増減量（呼吸・分解、光合成）とやや正のパス係数（0.30）の関係にあった。この生物過程による炭素増減量は、水温（-0.55）や塩分（0.27）からの影響も受けているが、それ以外の不確定要因（0.62）が大きかった。これは、海草の繁茂状況や日射量などの諸要因が考えられる。

(5) 今後の課題

本モデルで示された各パス係数（標準化解）は、全てP<0.05で有意となった。一方で、大気-海水間のCO₂フラックス（目的変数）に対する不確定要因が0.44と大きく、モデル自体の再現性は高くない。また、TAとDICはCO₂フラックスと極めて強い因果関係を示しているが、パス経路の単純化による影響も考えられるため、他の現地測定・文献データ等も含めた検討が必要である。これらの課題を踏まえ、今後、多変量解析モデルの精度向上が必要である。

図-5 大気-海水間 CO₂ フラックスと各環境要因のパス解析結果

5. 結論

陸域負荷と生物活動の影響を受ける閉鎖的な風蓮湖において、大気-海水間CO₂フラックスに影響を及ぼす環境要因として、湖内の代表的な水質指標である塩分に起因するDICとTAが挙げられた。また、CO₂フラックスは風速からの直接的な影響、DICを介した生物過程（呼吸・分解、光合成）からの間接的な影響も受けていることが示唆された。なお、本水域の生物活動は、植物プランクトンや広大なアマモ場の存在の可能性が考えられる。

参考文献

- 1) IPCC : Contribution of working group 2 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Ippc fourth assessment report : Climate change 2007*, 976p, Cambridge University Press, New York, 2007.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Laruelle, G. G., Dürr, H. H., Slomp, C. P. and Borges, A. V. : Evaluation of sinks and sources of CO₂ in the global coastal ocean using a spatially- explicit typology of estuaries and continental shelves, *Geophysical Research Letters*, 37, L15607, 2010.
- 6) 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.
- 7) 吉元豊 : 風蓮湖—その自然と開発保護（その 1）, 北海道の自然と生物, 5, pp.68-84, 1991.
- 8) 八戸法昭, 石川清, 高坂智, 長野満 : 風蓮湖水質環境の現状と問題点, 北海道大学衛生工学シンポジウム, pp.353-358, 1993.
- 9) 山本潤, 牧田佳巳, 山下彰司, 田中仁 : 風蓮湖に陸域からの汚濁負荷が及ぼす影響に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1006-1010, 2007.
- 10) 門谷茂, 真名垣友樹, 柴沼成一郎 : 酪農業の進展と風蓮湖の生物生産構造変化, 沿岸海洋研究, 第 49 巻, 第 1 号, pp.59-67, 2011.
- 11) 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.
- 12) McGillis, W. R., Edson, J. B., Ware, J. D., Dacey, J. W. H., Hare, J. E., Fairall, C. W. and Wanninkhof, R. : Carbon dioxide flux techniques performed during gasex-98, *Marine Chemistry*, 75, pp.267-280, 2001.
- 13) Wanninkhof, R. : Relationship between wind-speed and gas-exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 97, pp.7373-7382, 1992.
- 14) 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.
- 15) Weiss, R. F. : Carbon dioxide in water and seawater : The solubility of a nonideal gas, *Marine Chemistry*, 2, pp.203-215, 1974.
- 16) 近藤純正 : 風, 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版, 東京, pp.82-108, 2000.
- 17) Jähne, B., Heinz, G. and Dietrich, W. : Measurement of the diffusion-coefficients of sparingly soluble gases in water, *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, 92, pp.10767-10776, 1987.
- 18) 所立樹, 細川真也, 三好英一, 門谷茂, 茅根創, 桑江朝比呂 : 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, 2013.
- 19) 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.

FACTORS INFLUENCING AIR-SEA CO₂ FLUX AT THE LAKE FUREN, HOKKAIDO

Kazufumi TADA, Tatsuki TOKORO, Kenta WATANABE and Tomohiro KUWAE

Field investigations were performed to examine environmental factors (wind speed, water temperature, salinity, total alkalinity (TA), dissolved inorganic carbon (DIC), and the metabolism associated with DIC) affecting air-sea CO₂ flux at the lake Furen, Japan. We analyzed the time-series variations of the observed data and their correlations. In addition, we implemented a multivariate analysis (the path analysis) to examine the direct and indirect effects of the environmental factors on the air-sea CO₂ flux. The environmental factors that directly affect the air-sea CO₂ flux were indicated to be DIC, TA, and wind speed. In turn, the metabolism appears to indirectly affect the air-sea CO₂ flux through DIC, i.e., biological processes, including respiration, mineralization, and photosynthesis.