渦相関法による沿岸域の 大気中CO₂吸収・放出量のデータ品質管理

所 立樹¹・桑江 朝比呂²

¹非会員 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 研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail:tokoro-t@ipc.pari.go.jp

²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
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail:kuwae@ipc.pari.go.jp

近年、沿岸域生態系による大気中CO₂吸収機能の活用が、将来の気候変動対策における重要なオプションの一つとして注目されている。その定量的な評価のためには、沿岸域が大気中のCO₂をどの程度吸収・放出しているのか正確に計測する必要がある。しかしながら、従来の一般的な測定手法では長期的かつ広域でデータを採るために多大な労力を必要とするため、時空間変動の大きい沿岸域での解析に用いるのには限界がある。本研究では、無人計測・直接測定が可能な渦相関法に注目し、沿岸域での長期測定データをもとにした計測データの品質管理手法を開発した。

Key Words : air-water CO₂ flux, eddy covariance, coast, data management

1. 序論

CO₂をはじめとする大気中の温室効果ガス濃度の上昇による気候変動は、将来の農業や漁業への悪影響や気候災害の増加などを引き起こすことが予想されている¹⁾。そのため、大気中CO₂の濃度上昇対策は喫緊の課題となっている。

全球規模のCO₂収支において、海域は主要な吸収源の一つであり、人為起源のCO₂放出量の3分の1ほどが大気から取り除かれていると試算されている¹⁾。一方、大気中CO₂収支に関する沿岸域の役割については定量的な評価が確立していない。沿岸域は陸域からの有機物が最初に流入する海域であるため、大気中へのCO₂放出源とする知見が一般的である^{2,3)}。しかしながら、植生のある沿岸域では光合成活動により水中のCO₂分圧が減少するため、大気中CO₂の吸収源となることが確認されている⁴⁾。特に海草場は、近年再生・保全技術が確立しつつあるため、沿岸域における再生・保全事業による気候変動対策への貢献が期待される。

沿岸域の炭素固定量に関しては、複数の国際的な計測指針が提案されている^{5,6)}。しかし、これらは堆積物中への有機物の隔離貯留（以下、隔離貯留）に焦点を当てて

おり、大気とのCO₂吸放出量を主な対象としていない。沿岸域の有機物の隔離貯留、水中の溶存無機炭素やバイオマス量の変動、陸上からの有機物付加の影響を受けるため、それから直接大気中CO₂の吸収量を見積もることはできない。よって、沿岸域の大気中CO₂吸放出量の評価のためには、実際に現地で測定することが必要となる。

バルク法は既存の手法の中で最も広く使われている手法である。この手法では、大気と水中のCO₂分圧差と水面上の風速を用いた経験式から、CO₂吸放出量を算出する。この手法の沿岸域における最大の問題点は、1回の測定で得られる時間的・空間的な情報が限られていることである（30分程度、数m²以下）。沿岸域は時間的・空間的な変動が大きいいため、包括的な解析のためには広域で長期間計測する必要がある。そのため、これらの手法では多大なコスト・人的エフォートが必要となる。このことは、これまでの沿岸域のCO₂吸放出量の評価において、実測データが十分にそろっていないという問題点に繋がっている。

大気中CO₂吸放出量の計測手法の一つである渦相関法は、これまで森林などの陸域で広く使われている手法で、沿岸域ではCO₂^{7,8)}や熱⁹⁾、運動量¹⁰⁾の交換量の測定に使われた例がある。無人計測が可能であることから、広域・

長期測定に適する．よって，この手法を活用することで，沿岸域評価の研究が飛躍的に進展することが期待される．しかしながら，この手法では，大気中CO₂濃度などの複数の測定値を高速（10 Hz以上）で測定するため，解析に使用するデータ量が膨大であり，異常値の除去や変動成分の解析といったデータ品質管理手法が最大の課題となっている¹¹⁾．本研究では，渦相関法による沿岸域の長期測定データをもとにして，沿岸域の大気中CO₂吸放出量評価のためのデータ品質管理手法（Cross sensitivityの影響の除去，風速異常値の除去，ハイパスフィルター処理，WPL補正項の相対的な影響の評価）の開発を目的とした．

2. 手法

(1) 渦相関法の概要

渦相関法とは，乱流によって輸送される物質やエネルギー量（ガス・熱など）を直接測定する手法である¹¹⁾．これまで，森林などの陸域のCO₂や水中のO₂フラックスの測定に広く使われている．渦相関法によるCO₂フラックスは，式(1)で示される．

$$F = \overline{\rho_c' w'} \cdot F_1 + \mu \frac{\rho_c}{\rho_d} \overline{\rho_v' w'} \cdot F_1 + \rho_c \left(1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d} \right) \frac{\overline{T_a' w'}}{T_a} \cdot F_2 \quad (1)$$

F は大気と海水間のCO₂フラックス（ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）， F_1 と F_2 は測定不可能な微小な空間スケールの乱流によるCO₂や熱，水蒸気フラックスを補完するための係数で，関連する測器の検出部の大きさや測器間の距離，測定時の風速や風向で決定される¹²⁾．式中の第一項はCO₂濃度 ρ_c （ mol/m^3 ）と鉛直風速 w （ m/s ）の共分散を示しており，見かけ上のCO₂の鉛直フラックスを示している．式中の上バーとプライムは，それぞれ測定値の平均値と変動成分を示す．大気中のガス成分の場合，30分間の平均値が良く使われる．変動成分の取り方には複数の種類があり，詳細は後述する．大気中のCO₂濃度の場合，湿度や気温の変化による空気塊の体積の変化により，実際はCO₂の移動が無い場合でも見かけ上のCO₂濃度変動が観測される．式中第2項と第3項は，それぞれ湿度と気温による空気塊の体積変化の影響を理論的に補正（WPL補正¹¹⁾）するものである．式中の μ は乾燥空気と水蒸気のモル比率， ρ_d ， ρ_v はそれぞれ乾燥空気密度と水蒸気密度（ $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ ）である． T_a は大気中の温度（K）である．

渦相関法における大気中CO₂濃度や水蒸気濃度は，赤外線吸収光度から計測される．よって，水滴や霧などがセンサーの検出部にある場合はデータが得られなかった

図-1 測定サイト

り，異常値が計測される可能性がある．特に，応答性が高いことから近年主流となっているオープンパス型のCO₂濃度計は，センサーの検出部が開放されているため，雨天や霧の影響を非常に強く受ける．また，検出部のレンズの汚れによる，大気中のCO₂濃度と水蒸気濃度の測定値同士が干渉しあう現象が報告されている（Cross sensitivity¹²⁾）．これらの問題は，特に沿岸域のような水域で大きな問題になりうる．

(2) 測定サイト

データ品質管理手法の検証データを得るため，北海道風蓮湖内に設置したプラットホーム（北緯 43° 19' 46.5"，東経 145° 15' 27.8"）（図-1, 2）において，結氷していない期間（2014年5月28日～10月21日），渦相関法による連続観測を行った．風蓮湖はほぼ全域（57.4 km²）がアマモ場となっている汽水ラグーンである．西湖盆と東湖盆を結ぶ水脈筋（水深5 mほど）を除くと，ほぼ全域で浅い（1～2 m程度）．湖には，風蓮川やヤウシュベツ川などの牧場地を経由した河川から淡水が流入し，オホーツク海に繋がるラグーン口で海水が交換している．この水域では，2010年に同じ場所で計測したデータ⁴⁾から，河川水流入や潮位変動による塩分の変化と植生の光合成や呼吸・分解による溶存無機炭素濃度の変化が，大気中CO₂の吸放出量と相関があることが報告されている¹³⁾．

図-2 プラットホーム外観。左上は設置した渦相関装置を拡大したもの（左 CO₂濃度計、右 3次元風速計）

(3) 計測の概要

大気中 CO₂ 濃度と水蒸気濃度は、オープンパス型の CO₂ 濃度計 (LI-7500A, LI-COR 社製) で計測した。3 次元風速と外気温は、3 次元超音波風速計 (CSAT-3, Campbell 社製) で計測した。これらの測器は、水面から 4-5 m の高さに、40 cm ほどの間隔をあけて設置した。上記すべての観測データは 10 Hz で計測し、30 分間の平均値を 1 回の大気-海水間 CO₂ 吸放出量の計測結果として算出している。測定範囲は、風上側数百 m ほど（気象条件で変化する）である。なお、プラットホームにはこれらの装置の電源となるバッテリーと太陽光発電パネルを設置した。バッテリーおよびデータ記憶媒体は 2 週間に 1 回交換し、その都度装置のメンテナンスを行った。

(4) 異常値の除去と変動成分の算出方法

下記の計算処理により、2通りの CO₂ 吸放出量を算出した。

a) BA flux

ここでは、データ管理に使用した計算ソフト (EddyPro 5.1.1, LI-COR 社製) のデフォルト設定に準拠し、明らかな計測異常値（負の大気中 CO₂・水蒸気濃度）を除外している。また、風速計やプラットホームのフレームが風速の測定に影響を与えていると判断されたデータを除外している。式(1)における変動成分は、10 Hz で得られた瞬間値と 30 分間の平均値の差分として算出した。

b) HPF flux

上記の BA flux に加えて、下記の計算処理を行った。まず、大気中 CO₂ 濃度においては、前述した Cross Sensitivity の影響を除外するため、CO₂ センサーの受信信号強度 (RSSI) が 95 % 以下のデータを外した。また、風速の鉛直成分においては、他と比べて以上に大きなばらつきを示すデータが確認されたため、これを除外するために 30 分間の標準偏差が 1 m/s 以上のデータを外した。なお、

図-3 急激な CO₂ 濃度変化を示した計測例。上図：大気中 CO₂ 濃度の測定値 (Raw data) と、その変動成分を算出するための単純平均値 (BA value) と指数移動平均値 (HPF value)。下図：大気中 CO₂ 吸放出量の積算値。BA flux と HPF flux の比較。縦軸正の値、負の値がそれぞれ放出、吸収を示す。

この異常値は、風速センサー部分に水滴がついた影響と推測される。

また、上記の処理で除外されなかったデータの中でも、CO₂ 濃度が短時間のうちに急激な変動を示す測定データが確認された (図-3 上)。これらのデータは、大気中 CO₂ 濃度の不均一性（異なる空気塊の通過など）に起因すると考えられる。このようなデータを単純平均処理した場合、測定値と平均値に差がある時間帯に大きな CO₂ 吸放出量が算出されることが確認されている (図-3 下)。本研究では、計測した瞬間値にハイパスフィルター処理を行うことで上記の影響の除去を試みた。ハイパスフィルター処理は下記の指数移動平均の式を用いて計算した。

$$x_i' = A(x_i - x_{i-1}) + Ax_{i-1}' \quad (2)$$

$$A = \exp\left(-\frac{1}{\tau} \cdot f\right)$$

x_i は、任意のデータの時間 i の瞬間値で、CO₂ 濃度の場合

図-4 風蓮湖における測定結果. 上図: BA flux (n=2809), 下図: HPF flux (n=1922). 空白期間はデータ欠測による. 緑で囲われたデータは, 異常値として除外されたデータ例.

は式(1)の ρ_c に該当する. τ はフィルタリング定数 (s) で, ここでは文献値¹⁴⁾の150秒を適用した. f はサンプリング周波数 (=10 Hz) である. なお, このフィルタリング処理は, CO₂濃度以外の風速や気温などのすべての観測データに適用している. 図-3では, ハイパスフィルター処理によるCO₂の吸収量の減少が示されている.

3. 結果

図-4にBA fluxとHPF fluxの時系列変化を示す. BA fluxは平均で2.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の吸収を示しており, 非常に大きなばらつきを持っていた (ISD = 53 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). 一方, HPF fluxでは, 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を超える吸収・放出データはほとんど除外され, 期間全体の吸収量は0.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, ばらつき (ISD) は2.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ となった. 吸収データのうちの34%, 放出データのうちの24%が異常値として除外されており, 基本的に降雨・濃霧時のものであった. またハイパスフィルターにより, 吸収データ数が減少し (75%), 放出データ数が増加した (131%) (図-5).

図-5 計測データのヒストグラム. 点線・実線はBA fluxとHPF fluxを示す. また, 青と赤がそれぞれの吸収データと放出データを示す.

図-6 ハイパスフィルターの影響の例。縦軸正の値、負の値がそれぞれ放出、吸収を示す。Covariance term (共分散項、橙色)とWPL term (顕熱・潜熱による補正項、水色)の和としてCO₂フラックス(黒)が算出される。

4. 考察

バルク法と渦相関法は、測定範囲や変動要因(バルク法は水中CO₂分圧が主な変動要因となる)が異なるため、どちらが真の値に近いという議論は本研究では行わない。ただし、長期的な平均値は整合的であることが期待される。測定サイトにおける過去のバルク法による計測結果⁴⁾は、2010年8月と11月に行った48時間連続観測でそれぞれ0.12 μmol/m²/sの吸収と、0.01 μmol/m²/sの放出を示していた。また、2011年の5月から11月の間、月1回程度日中に計測した平均は、プラットホーム周辺では0.03 μmol/m²/sの吸収であった。渦相関法の測定結果は、HPF fluxがバルク法の結果のオーダーの範囲内であり、それより1桁大きいBA fluxと比べてバルク法とは整合的であった。

図-5で示すように、一部の吸収データが放出データにシフトした理由は、渦相関法によるCO₂吸放出量がCO₂濃度と風速鉛直成分の共分散項(式(1)右辺第一項)と、顕熱・潜熱による補正項(WPL補正項:式(1)右辺第二・三項)の和として算出されることに起因している。

まず、WPL補正項は熱や水蒸気の流入/流出による

図-7 規格化したパワースペクトルの比較。緑の箇所は左部分は24時間周期・右の部分は潮位変動周期(約半日)に該当する。

空気塊の膨張/縮小とそれによる見かけ上のCO₂濃度の減少/増加を補正するものである。地表面に近い大気では、顕熱・潜熱フラックスは基本的に上方向に働くことと、見かけ上のCO₂濃度の減少が吸収データとして計測されることを考慮すると、WPL補正項は基本的に放出方向に働くことになる。よって、CO₂吸収データにおいては、図-6で示すように、共分散項が吸収、WPL補正項が放出を示す傾向となる。次に、ハイパスフィルターの影響であるが、WPL補正項に与える影響は、共分散項に与える影響よりも小さい。これは、気温や水蒸気が大気中CO₂ほど急激な変化を示さなかったためである。よって、ハイパスフィルター処理により共分散項の吸収量が大きく減少した一方、WPL補正項による放出量は相対的にあまり変化しなかったため、その和であるCO₂吸放出量が放出方向にシフトしたと考えられる。この結果は、大気中CO₂濃度の変動が大きい環境下では、従来の渦相関法の計測結果が吸収方向に過大評価していた可能性を示唆している。

本研究のデータ品質管理手法による大きなばらつき(の除去もしくは補正は、観測データの高周波数帯の寄与分の減少に繋がっている(図-7)。両方のパワースペクトルで24時間付近の領域でピークが確認されているが、HPF fluxではさらに半日程度の領域のピークもみられる。前者のピークが日周期変動、後者のピークが潮位変動に該当すると仮定すると、この汽水ラグーンである測定サイトのCO₂吸放出量が塩分と生物活動と関連があるとする既往研究¹³⁾の結果と整合的である。

本研究では、大気中CO₂濃度データへのCross sensitivityの影響と風速異常値の除去を行い、各データの変動成分の算出においてハイパスフィルター処理とそれによるWPL補正項の相対的な影響の評価を行った。上記の結果から、本研究で開発したデータ管理手法は、沿岸域の

CO₂吸放出量を評価するうえで有効な手法であると考えられる。ただし、本研究で使用したハイパスフィルターの時間定数は陸上の測定結果によるものであるため、沿岸域ではより適した定数の同定が必要である。また、一部データの削除もしくは線形近似の組み合わせによるフィルタリングを用いた品質管理手法の開発と比較検討が今後の課題として挙げられる。

謝辞: 本研究の基となる野外調査では、北海道大学の門谷茂氏、柴沼成一郎氏、港湾空港技術研究所の三好英一氏・渡辺謙太氏・茂木博匡氏からの多大なご助力を頂いた。また、計測データの解析においては、中電技術コンサルタントの田多一史氏から貴重なコメントをいただいた。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)日本学術振興会科学研究費助成事業「挑戦的萌芽的研究(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

- 1) IPCC: Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 273-278, 2014.
- 2) Borges, A.V., B. Delille and M. Frankignoulle: Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystem counts, *Geophysical Research Letters*, Vol.32, L14601, 2005.
- 3) Laruelle G.G., H. H. Dürr, C. P. Slomp and A. V. Borges: 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*, Vol.37, L15607, 2010.
- 4) Tokoro, T., S. Hosokawa, E. Miyoshi, K. Tada, K. Watanabe, S. Montani, H. Kayanne, and T. Kuwae: Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, gcb. 12543, 2014.
- 5) Hiraishi, T., T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, and T. G. Troxler (eds.): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, IPCC, Switzerland, 2014.
- 6) Howard, J., S. Hoyt, K. Isensee, E. Pidgeon, and M. Telszewski (eds.): Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows, Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA, 2014.
- 7) Zemmeling, H. J., H.A. Slagter, C. Slooten van, J.W. Snoek, B.G. Heusinkveld, J.A. Elbers, N.J. Bink, W. Klaassen, C.J.M. Philippart, and H. J. W. de Baar: Primary production and eddy correlation measurements of CO₂ exchange over an intertidal estuary, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L19606, 2009.
- 8) 田中健路, 滝川清: 有明海干潟上における二酸化炭素フラックス観測, *海岸工学論文集*, Vol. 53, pp.1136-1140, 2008.
- 9) 成松明, 田中健路, 滝川清: 乱流渦相関法に基づく有明海干潟上の地表面フラックス直接観測, *海岸工学論文集*, Vol. 52, pp.1081-1085, 2005.
- 10) 杉原裕司, 安東卓哉, 桜木幸司, 芹澤重厚, 吉岡洋: 渦相関-慣性散逸併用法に基づく海面運動量伝達の変動性に関する研究, *海岸工学論文集*, Vol. 55, pp. 46-50, 2008.
- 11) Lee, X., J. Finnigan, and U. Kyaw Tha Paw: Coordinate system and flux bias error, *Handbook of micrometeorology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2004.
- 12) Massman, W. J.: A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 104, pp. 185-198, 2000.
- 13) 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(2), pp. 1252-1257, 2013.
- 14) McMillen, R. T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.43, pp. 231-245, 1988.

(2015.3.18 受付)

Data management of air-sea CO₂ gas exchanges by the eddy covariance technique

Tatsuki TOKORO and Tomohiro KUWAE

Atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems has been recently focused as a promising option for the future climate change mitigation initiatives. The precise measurement of the CO₂ absorption is necessary for the quantitative evaluation of the option. However, the existing method requires too much efforts and costs for the management of long-term and wide-range data. In this study, we focused on the eddy covariance method, which enables auto-measurement, and developed the data management (Rejection of cross sensitivity effect and outlier wind data, High-Pass filtering, and evaluation of relative effect of WPL correction) based on a long-term coastal measurement data.