都市沿岸域に造成された人工塩性湿地のCO₂収支に関する現地調査

A Field Investigation on CO₂ Budget at a Salt Marsh Located at Coastal Urban Area

遠藤 徹¹・中野雄介²・板谷天馬³・筏 紀晶⁴・矢持 進⁵

Toru ENDO, Yusuke NAKANO, Tenma ITAYA, Noriaki IKADA and Susumu YAMOCHI

It is thought that a salt marsh located at coastal urban area absorbs and emits large amounts of carbon dioxide (CO₂). In this study, a field investigation on CO₂ budget was conducted at Osaka-Nanko bird sanctuary, and CO₂ fluxes were measured at tidal flat, sea surface and reed field by using chamber methods in order to estimate CO₂ budgets of the salt marsh. The results of this study were as follows: (1) CO₂ fluxes of tidal flat and reed field were one order larger than that of sea surface. (2) It was estimated that CO₂ flux emitted from tidal flat was 3.26 g/m²/day and CO₂ flux absorbed by reed grass field was 1.53 g/m²/day in October 2013. (3) It was suggested from the result of seasonal change of fluxes that the absorbed amount of CO₂ becomes larger on summer than on autumn.

1. はじめに

記録的な猛暑や大雨など、地球温暖化が原因と考えられる異常気象が頻発するようになり、地球温暖化への関心が一層高まっている。しかしながら、我が国では国家戦略として低炭素社会の構築を目指しているものの、温室効果ガスについては、原子力発電の見直しにより火力発電への依存度増すことや、対策が困難である日常生活の多様化などの課題を抱えており、今後、温室効果ガス削減の様々な対策が必要になる。このような背景の中、地球温暖化対策の一つとして「ブルーカーボン」が注目されている。これは海域の生態系によって海中に吸収・固定される炭素固定能のことで、国連環境計画 (UNEP) の報告によると、地球上の生物が固定する全炭素量の内約55%が海洋生物によって固定されると試算されている (Nellemann, 2009)。また、IPCC第5次報告によると、化石燃料起源CO₂の年間排出量72億トンのうち、海洋全体で吸収されるのが約23億トンとも報告されている (IPCC, 2013)。このように、ブルーカーボンへの期待が高まっているが、ブルーカーボンに関する研究は新しく、情報量が少ないのが実情である。四方を海で囲まれた我が国は、ブルーカーボン機能を有効に活用できる可能性を秘めており、知見の収集が急務な課題であると言える。

海域の炭素収支に関する研究として、杉本ら (2010) は気液界面間におけるCO₂のガス交換機構をモデル化し太平洋全体のCO₂フラックスの評価を試みている。また、藤井ら (2012, 2013) は、大阪湾沿岸域におけるpHとアルカリ度の連続観測を実施し、炭酸系の化学的平衡関係

からCO₂分圧を推定し、大阪湾におけるCO₂の季節的な収支について調査している。これらは比較的大きなスケールのCO₂動態を対象としているが、ブルーカーボン機能は、その場の生態系やこれらを取り巻く環境が絶妙なバランスを保ちながら発揮される。このため、この機能を有効活用するためには、地域特性に応じた炭素循環機構を定量的に把握する必要がある。田中ら (2006) は、有明海において現地観測を実施し潟相関法を用いて干潟におけるCO₂の収支について評価している。また、所ら (2013) は、北海道の風連湖、沖縄県の吹通川においてCO₂動態に関する現地調査を実施し、海草場は吸収源であることを報告しており、今後も沿岸域における炭素循環機構の解明が重要であると考えられる。

一方、背後に大都市を抱える都市沿岸域に目を向けてみると、都市沿岸域に存在する湿地は人間活動の影響を強く受けるとともに外洋に比べて豊かな生態系が形成されるため、沿岸域の炭素動態に大きな影響を及ぼしていると考えられる。大谷ら (2011) や藤田ら (2013) は、現地調査により大阪南港野鳥園の干潟堆積物のCO₂フラックスを測定し、都市に存在する湿地のCO₂動態評価を行っている。しかしながら、CO₂フラックスの測定は日中の干潟面のみであり、夜間も含めた日変動特性や、干潟面以外の収支については計測されていない。

そこで、本研究は都市沿岸域に造成された湿地においてCO₂動態に関する24時間調査を実施し、都市沿岸域における湿地のCO₂収支について基礎的な知見を収集するとともに、今後、都市沿岸域における炭素循環機構を解明するための課題点を抽出することを目的とした。

2. 現地調査の概要

(1) 調査対象地

現地調査は、図-1に示す大阪南港野鳥園で実施した。

1 正会員 博(工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科
2 大阪市立大学大学院工学研究科
3 修(工) 大阪市水道局工務部計画課
4 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科
5 正会員 農博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科

図-1 大阪南港野鳥園

図-2 野鳥園におけるCO₂収支に関する現地調査の概要

(a) 干潟面のチャンバー

(b) 海水面のチャンバー

(c) 簡易ビニールハウス

写真-1 野鳥園におけるCO₂フラックスの測定の様子

大阪南港野鳥園は、大阪湾岸一帯に生息する水鳥を中心とした野鳥の保護を目的として大阪市の港湾海域に造成された湿地で、施設面積は19.3 ha、湿地部は12.8 haである。大阪湾奥部の地先に存在することから、人間活動の影響を受けやすい環境にある。また、これまでに大阪南港野鳥園では様々な環境調査が実施されており、日本における渡り鳥の重要な生息地であるとともに、都市に存在する貴重な湿地として知られている。

(2) CO₂フラックスの測定方法

大阪南港野鳥園におけるCO₂の収支として、図-2に示すように、①干潟面での交換、②海水面での交換、③陸上植物（ヨシ面）による交換に着目し、それぞれのフラックスを求めた。

フラックスを測定する方法には、バルク法・渦相関法・チャンバー法など種々の方法が存在するが、本研究ではチャンバー法を採用した。干潟面のフラックスの測定には、写真-1(a)に示すように、底面積が706.5 cm²、容積が21.2 lのチャンバーを干潟面に設置し、NDIR方式のCO₂計（T&D社：TR-76Ui）で測定したチャンバー内部のCO₂濃度の時間変化からフラックスを算出した。ここで、チャンバー内部の環境は密閉空間となるため、時間の経過とともに外部の環境と異なる。そこで、フラックスの算出には、図-3のチャンバー内部のCO₂濃度の時間変化に示すように、チャンバーを設置してから10分間のデータを用いることとし、1時間毎にチャンバー内を換気して測定を繰り返した。また、チャンバー内部のCO₂

図-3 干潟面に設置したチャンバー内と干潟面上のCO₂濃度変化

濃度が均一となるようにエアーモーターを作動して内部の気流を攪拌した。

海水面のフラックスは、写真-1(b)に示すように、底面積が616 cm²、容積21.6 lのチャンバーをビニールボートに固定して水面に浮かべ、上記の干潟面と同様にチャンバー内部のCO₂濃度の時間変化から求めた。一方、植生によるフラックスの測定には、写真-1(c)に示すように、脚立（天板高さ：172 cm、全幅：62 cm、奥行き：110 cm）をビニールシートで覆った簡易ビニールハウスをヨシが群生している地点に設置し、ハウス内のCO₂濃度の時間変化からの求めた。ここで、本調査で実施したチャンバー法は明条件のみのため、測定したフラックス

図-4 1時間毎のCO₂フラックスと光量子量の時間変化(フラックス正：放出，フラックス負：吸収)

は光合成によるCO₂の吸収と有機物分解や呼吸による放出の影響が含まれている。

フラックスの算出には、上記で測定したチャンバー内のCO₂濃度の時間変化から、式(1)に示すように1分間のCO₂フラックス： f_{CO_2} を求め、チャンバーを設置してから10分間分の f_{CO_2} の平均値をその時間帯におけるフラックス： F_{CO_2} [mg/m²/min]として解析に用いた。また、フラックスは正を放出，負は吸収とした。

$$f_{CO_2} = \frac{\Delta C^* \cdot V}{22.4} \times \frac{M \times 10^3}{A \cdot \Delta t} \quad (1)$$

ここで、 ΔC^* は標準状態のCO₂濃度の1分間の変化量 [ppm]、 V はチャンバーの容積 [ℓ]、 M はCO₂の分子量 44g、 A はチャンバーの底面積 [m²]、 Δt は計測間隔 [min]である。また、計測されたCO₂濃度： C [ppm]は、式(2)により、標準状態(1気圧、25度)の値に換算した。

$$C^* = \frac{C \times 1013 \times (273 + T)}{298 \times p} \quad (2)$$

ここに、 T は気温 [°C]、 p は気圧 [hPa]である。

また、使用したCO₂計は、事前に488, 791, 1447 ppmのCO₂標準ガスで器差補正を行った。

(3) 関連項目の計測

調査では、野鳥園内外における交換について検討するために、干潟面上1.5mの地点と野鳥園と外海との境界の地点の風向風速と光量子量、CO₂濃度の時間変化を計測した。風向風速とCO₂濃度の計測には、風向風速計(ダイワシステム社：Wind Log)とCO₂計(T&D社：TR-76Ui)を用いた。光量子量の計測には、照度計(HOBO社：UA-002-64)で照度を求め、別途求めた補正関数を用いて光量子量に変換した。

また、海水面のフラックスに及ぼす水質の影響について検討するため、海水面のフラックス測定地点の水温、塩分およびクロロフィルの蛍光強度を小型水質計(JFEアドバンテック社：COMPACT-CTD)で、1時間ごとに計

測した。

(4) 調査日

調査は、2013年10月29日18時から1日間実施し、野鳥園のCO₂収支の日変動特性について検討した。また、予備調査として2013年7月24日の14時から17時に実施したデータとも比較し、季節変化について検討した。

3. 調査結果

(1) 日変動特性

a) 干潟面におけるフラックスの日変化

図-4に、各界面における1時間毎のCO₂フラックスと光量子量の日変化を示す。干潟面のフラックスは-3.0～5.31 mg/m²/minであり、日変動が最も大きかった。変動の傾向としては、夜間は常に放出であり、10月30日の午前9時から12時までの時間帯が吸収であった。これは、日が差している午前中は干潟干出面上の付着藻類の光合成の影響が強くなり、CO₂が吸収されたものと考えられる。しかし、気温が上昇した午後からは、堆積物の有機物分解やバENTOS類の呼吸の影響が光合成の影響よりも大きくなり、放出になったと考えられる。ただし、今回の結果だけでは結論には至らず、今後、暗チャンバーによる測定も実施し、生成量と吸収量の関係を整理する必要がある。

b) 海水面におけるフラックスの日変化

海水面のフラックスは-0.52～1.39 mg/m²/minで、日変動が確認できる。しかし、フラックスの値は干潟面やヨシ面のフラックスに比べて1オーダー小さい。ただし、夜間はCO₂を吸収し、昼間は放出しており、干潟面とは逆の傾向が見られた。海水面のフラックスと水質との関係について整理するため、図-5のように海水面のフラックスとチャンバーを設置した地点の水温とクロロフィルの蛍光強度の日変化を示した。海水面のフラックスの変動は気温の変動と傾向が似ているが、海水面のフラックスは今回計測した水質(水温・塩分・クロロフィルの蛍光強度)との間には明瞭な相関は見られなかった。田多

図-5 海水面のCO₂フラックスと水質(クロロフィルの蛍光強度, 水温)の時間変化 図-6 野鳥園内外のCO₂濃度と風速の時間変化(風速正:海風, 風速負:陸風)

ら(2013)は、北海道の風連湖で大気-海水間のCO₂フラックスを測定し、それに影響を及ぼす要因について整理している。この報告によると、海水面のフラックスに対する影響の大きな要因はTAとDICであり、水温の影響は小さいとされ、本研究結果でも同様な傾向が伺えた。今後は、水中のCO₂濃度のモニタリングを実施し、海水面と大気間での交換メカニズムについて検討する必要があると言える。

c) ヨシ面におけるフラックスの日変化

ヨシ面のフラックスは、夜間のフラックスはほぼ0であり、日照時に多くのCO₂を吸収していることが確認できる。特に、光量子量との間に明瞭な相関がみられ、光合成による吸収の影響が確認できた。

d) 野鳥園内外のCO₂濃度変化

野鳥園内外におけるCO₂濃度と風速の時間変化を図-6に示す。図-6によると、園内外とも450~500 ppmで変動し、深夜に濃度が上昇する傾向が見られた。しかし、10月30日の午前中に園内の濃度が園外の濃度よりも低くなっている時間帯確認できる。これは、各界面のフラックスの結果から、日照時に光合成の影響により野鳥園内のCO₂が吸収された影響であると言える。そこで、図-7に各フラックスと照度との関係について整理すると、ヨシ面のフラックスは光量子に依存している傾向がみられたが、干潟面には相関が見られなかった。これは、有機物分解やバントスの呼吸による放出の影響が混在しているためだと考えられる。本研究では、暗チャンバーの測定をしていないが、夜間のフラックスは有機物分解のみ

図-7 フラックスと光量子量の関係

図-8 夜間のフラックスと気温の関係

の影響によるものと仮定し、夜間のフラックスと気温の関係を整理したものを図-8に示す。干潟面のフラックスの変動には気温が影響していることが確認でき、生物活

性に起因する反応が含まれると考えられる。

e) 1日の各界面におけるCO₂収支

本調査結果から、2013年10月における1日に単位面積当たりの収支を計算した結果を表-1に示す。干潟面は3.26 g/m²/day、海水面は0.17 g/m²/dayの放出で、ヨシ面は1.53 g/m²/dayの吸収であった。ただし、今回は単位面積当たりの吸・放出量を求めたが、野鳥園は導水管によって外海水との交換が行われるため、野鳥園全体の収支を評価するためには、潮汐変動に伴って変動する海水面や干潟干出面の面積を考慮して収支を求める必要がある。

(2) 季節変化

図-9に、7月に予備調査として14時から16時に測定した各界面のフラックスと10月の同時刻のフラックスを比較したものを示す。干潟面のフラックスは、14時から16時の間に、7月は-4.7から3.5 mg/m²/min、10月は3.8から5.3 mg/m²/minに変化している。また、10月は干潟面、海水面ともに常に放出であったのに対し、7月は16時の干潟面以外ですべて吸収であった。これは、7月に比べて10月の方が南中高度は低く、日が沈む時間が速いため光合成によるCO₂の吸収の影響が小さくなったためであると考えられる。また、海水面のフラックスは、秋季は常に放出であるのに対して、夏季は吸収であった。面積の観点から考えると、野鳥園における海水面は大部分を占めており、干潟干出面積よりも広い。このため、面積を考慮した野鳥園全体の収支を計算すると、吸収の影響が大きくなると考えられる。このことから、夏季は秋季に比べてCO₂の吸収量が增多することが示唆された。

4. 結論

本研究は、都市沿岸域に造成された湿地におけるCO₂収支を明らかにするために、大阪南港野鳥園を対象として、干潟面・海水面・ヨシ面のCO₂フラックスを測定した。2013年10月に実施した24時間観測により日変動特性と、2013年7月に実施した結果から季節変化について検討した。本研究により得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 干潟面とヨシ面は海水面よりも1オーダー高い値を示すことが明らかとなった。
- 2) 1日の収支として、干潟面は放出、ヨシ面は吸収の場であることが明らかとなった。
- 3) 7月と10月のフラックスを比較した結果、夏季は秋季に比べて光合成の影響が強くなり、野鳥園全体でCO₂吸収量が大きくなることが示唆された。

表-1 単位面積当たりの1日間のCO₂収支

	干潟面	海水面	ヨシ面
収支 [gCO ₂ /m ²]	3.26	0.17	-1.53

図-9 季節別のフラックス

参考文献

- 大谷優里・藤田哲朗・矢持 進 (2011): 都市近郊の人工干潟における有機物の分解特性に関する一考察 - チャンパー法によるCO₂フラックスの測定 -, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp.976-980.
- 杉本裕之・平石直孝 (2010): 太平洋における大気 - 海洋間の二酸化炭素フラックス推定手法の開発, 測候時報, Vol.77, 特別号, pp.159-187.
- 田多一史・所 立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂 (2013): 北海道風連湖における大気-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.
- 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, 2006.
- 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, 港湾技術研究所報告, 第52巻, 第1号, 49p.
- 藤井智康・藤原建紀 (2012): 大阪湾奥部の二酸化炭素の長期連続観測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1061-1065, 2012.
- 藤井智康・藤原建紀・中山浩一郎 (2013): 大阪湾東部の二酸化炭素の放出・吸収量, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1111-1115.
- 藤田哲朗・遠藤徹・田中俊之・矢持 進 (2013): 潮汐に伴う干潟堆積物からのCO₂フラックスの変動に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp.1181-1185.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (2009): Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon, UNEP (United Nations Environment Programme), 80p.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 471p.