人工干潟におけるCO₂吸収量の定量化手法の課題と改善策

The Problem and Improvement on the Quantification Method of CO₂ Absorption at an Artificial Tidal Flat

田中俊行¹・藤田哲朗²・矢持 進³

Toshiyuki TANAKA, Tetsuro FUJITA and Susumu YAMOCHI

CO₂ concentrations were measured with light and dark chambers at an artificial tidal flat of Osaka Nanko bird sanctuary in the spring and summer of 2012 to examine the effect of benthic microalgae, macrobenthos and bacteria. CO₂ emission rate from the sediment was almost constant during a measuring interval in the dark chamber, while its absorption rate markedly decreased with time in the light chamber. The rapid decrease of CO₂ absorption rate was thought to be caused by low CO₂ concentration in the light chamber in accompanied with increasing photosynthetic activity of the benthic microalgae. To measure the absorption of CO₂ with a difference less than 40ppm from the atmosphere level, a ventilation rate of 10L air/min is indispensable for the light chamber along with a bottom area below 450cm².

1. はじめに

近年、CO₂等の温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化が深刻化しており、これを抑制する生物的機能としてブルーカーボン（海洋生態系の炭素固定機能）が注目されている。IPCCの第四次報告書（2007）によると、2000年～2005年における化石燃料由来のCO₂排出量は年間72億トンであり、その内森林では9億トン、海洋では22億トンのCO₂が吸収されていると報告されている。また、ブルーカーボンにおけるCO₂吸収段階の主な反応は植物による光合成であるが、干潟などの浅場に生息する底生微細藻類を含む底生性藻類のCO₂吸収量は植物プランクトンのそれに匹敵すると考えられている（Charpyら、1990）。

従来、底生微細藻類の光合成の測定には明瓶暗瓶法による酸素生成速度の測定（矢持ら、2007）、¹⁴C法によるCO₂の標識化（Whitneyら、1983）が広く用いられてきた。しかし、これらの方法ではCO₂の動態を現地で簡易かつ直接的に測定することができない。また、CO₂の動態という観点からは渦相関法を用いた例もあるが（田中ら、2006）、渦相関法はCO₂動態に関与すると考えられる底質や植生などについて考慮できない。よって、底生微細藻類によるCO₂吸収量を定量的に評価するためには、地表面と大気間のCO₂動態を簡易かつ直接的に測定することができるチャンバー法が適していると考えられる。

Mignéら（2002）は閉鎖型のチャンバー法を用いてイギリス海峡の砂浜とエスチュアリーでCO₂フラックスを

測定したが、夏季にチャンバー内の急激な温度上昇が起これ、現地環境が維持されていない問題を指摘した。また、Drösler（2005）は泥炭地や湿地のCO₂フラックスの計測手法として、閉鎖型チャンバー法に関する詳細な検討を行い、78 cm × 78 cm × 50 cmの直方体の閉鎖型チャンバーを提唱した。Chojnickiら（2010）がこの手法を用いて研究を行っているが、この手法はチャンバー内の空気を一定時間ごとにサンプリングしてガスクロマトグラフィーで分析する方法であり、CO₂フラックスの連続的な変化は得られない。さらに、潮汐により環境が刻々と変化する干潟、特に生物活性の高い都市近郊の人工干潟への適用に関しては検討されていない。以上のように、チャンバー法については測定手法が完全に確立されていない。

そこで、本研究では都市近郊の生物活性の高い干潟における底生微細藻類のCO₂吸収量の定量評価のために、CO₂フラックスを指標として現地調査および室内実験を行い、チャンバー法の課題と改善策に関して若干の検討を行った。

2. 現地調査およびチャンバー法の課題

(1) チャンバー法

従来、チャンバー法は土壌呼吸の測定で広く用いられてきた（木部ら、2004）。近年では、チャンバー上部に開口部を設けたオープントップチャンバーや、一定時間で開閉を繰り返す自動開閉式チャンバーなどの開発が進められている。しかし、これらは外力の影響を大きく受けることや、導入コストの面から本研究の対象外とし、本研究では単純通気型のチャンバーについて検討した。

干潟干出時に堆積物表面にチャンバーを設置し、ポン

1 学生会員 工 大阪市立大学工学部都市学科
2 非会員 修(工) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻
3 正会員 農博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科都市系専攻

図-1 現地測定装置の概要

図-2 大阪南港野鳥園の位置と調査地点

ブ（1.0 L/min）で大気をチャンバーに流し入れ、吸排両用ポンプで同量の空気を吸引した（図-1）。吸引した空気は冷温トラップと乾燥剤で過剰な水分を除去し、非分散型赤外ガス分析計（LI-COR製、LI-820；VAISALA製、GMP343）でCO₂濃度の変化を計測した。なお、チャンバー内のCO₂濃度分布を均一にするため、チャンバー内に小型ファンを設置し、緩やかに内部空気を攪拌した。測定は1Case（チャンバーを設置してから取り外すまで）につき20～30分程度とし、1Case毎にチャンバーを取り外して内部空気を完全に入れ換えた。

本研究ではポリカーボネート製の明チャンバー（LC；底面積1486 cm²、容積31.7 L）とポリエチレン製の暗チャンバー（DC；底面積1385 cm²、容積30.1 L）を用いた。LCでは藻類による光合成や底生動植物、菌類、細菌類による有機物の分解・無機化および呼吸が計測される。一方、DCは光を完全に遮光するため、有機物の分解・無機化および呼吸のみが計測される。堆積物表面でのCO₂の吸排出速度は単位時間、単位面積当たりのCO₂量として表され、フラックスの次元を有することからCO₂フラックス（Fco₂）と定義した。Fco₂は吸収を正、排出を負とした。

(2) 調査干潟および調査項目

調査地は大阪南港野鳥園人工塩生湿地（以下、野鳥園）とした（図-2）。野鳥園は北、西、および南の3つの池とヨシ原が設けられており、シギ・チドリなどの渡来地として重要な役割を果たしている。本研究では北池の干潟部を対象として現地調査を行った。なお、ここでは干潟部を干出と冠水を繰り返す場所と定義する。また、本研究では底生微細藻類に着目しているため、グリーンタイ

図-3 調査地点におけるCO₂濃度
（上から、2012年5月23日、7月4日、8月29日、9月26日）

ドの発生がなく、ヨシの地下部（根、根茎等）の影響を受けない地点を選定した。

調査は2012年5月23日、7月4日、8月29日、9月26日の日中、大潮の干潮時に行った。5月23日と8月29日はGMP343、7月4日と9月26日はLI-820でCO₂濃度を各々計測した。同時に光量や堆積物温度等も測定した。

(3) 調査結果および考察

CO₂濃度の変化を図-3に示す。5月23日のLC内のCO₂濃度の減少は小さく（最小360 ppm）、概ね大気レベル（約400 ppm）と等しかったが、DC内の濃度は700～800 ppm程度まで増加した。7月4日は5月23日と比べてLC内の濃度が大きく低下したが、DCに関しては明確な違いはなかった。8月29日のDCでは短時間で400 ppmから800 ppmまで増加し、有機物分解の活発さが窺えた。また、LC内のCO₂濃度も短時間で7月4日と同程度まで減少した。9月26日はLC内のCO₂濃度が短時間で急減したため、1Case当たり約10分の計測とした。一方、DC内のCO₂濃度は緩やかに上昇したため、連続的に約1時間計測した。季節的な変化として、光合成および有機物分解は春（5月）から夏（7～9月）にかけて徐々に増加した。また、春は光合成活性が低かったためにLC内のCO₂濃度低下量が小さかったと考えられた。夏は温度上昇に伴っ

図-4 調査地点のCO₂フラックス表-1 調査地点のCO₂フラックスとCO₂濃度および光量子量との関係

	Case	データ数n	決定係数R ²	
			CO ₂ 濃度とCO ₂ フラックス	光量子量とCO ₂ フラックス
5月23日	1	14	0.0022	0.03
	2	27	0.75	0.03
	3	22	0.21	0.01
7月4日	1	22	0.91	0.01
	2	24	0.87	0.77
	3	22	0.84	0.52
	4	11	0.95	0.98
8月29日	1	15	0.56	0.22
	2	16	0.19	0.04
	3	21	0.64	0.42
	4	19	0.04	0.0022
	5	14	0.84	0.15
9月26日	1	12	0.89	0.32
	2	10	0.98	0.62
	3	12	0.98	0.01
	5	5	0.99	0.16

て有機物分解量が増すが、それ以上に光合成によるCO₂吸収量が増加したと考えられた。

図-3に示したCO₂濃度の変化からFco₂を算出した(図-4)。LC-Fco₂は9月26日に最大となり、15.7 mgCO₂/m²/minを記録した。一方、DC-Fco₂は約-3.8 mgCO₂/m²/minと小さく、干潟全体としてはCO₂が大きく吸収されていたと考えられた。Fco₂の時間変化について着目すると、全測定日においてLC-Fco₂は時間経過に伴って低下したが、DC-Fco₂は概ね横ばいであった。両者の差は底生微細藻類の光合成であり、これは光合成によるCO₂吸収量の低下を意味する。この場合、実環境におけるCO₂吸収量を計測するには濃度変化の初期勾配が重要であり、Drösler (2005) のように一定時間ごとにガスをサンプリングする方法ではCO₂吸収量を過小評価する可能性があると考えられた。また、LC-Fco₂低下の原因として、光合成に

必要なCO₂、光、水分、栄養塩などのいずれかの要素が不足していることが考えられた。目視により堆積物は湿润状態であることを確認し、都市近郊の富栄養な人工干潟であることから、栄養塩も十分に存在していると考えられた。よって、LC内のCO₂濃度、あるいは光量が原因であると考えられた。LC-Fco₂とLC内のCO₂濃度の関係およびLC-Fco₂と光量子量との関係を表-1に示した。なお、9月26日のCase4は測定開始時点のCO₂濃度が約200 ppmと低かったため除外した。測器にLI-820を用いた7月4日と9月26日では、LC-Fco₂はLC内のCO₂濃度に大きく依存していたと考えられ、一方で光量子量との関係は一部を除いて見られなかった。これらより、LC-Fco₂が低下した原因はLC内のCO₂濃度が著しく低下したことによるCO₂律速であると考えられた。このことについて、次に室内実験で確認を行った。

図-5 室内実験装置の概要

表-2 実験条件

Case	CO ₂ ガス濃度 (ppm)	泥温 (℃)	水温 (℃)	水位 (cm)	光量子量 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$)
1	400	17	20	-5	350
	200	18			
2	400	19			
	200	19.5			
3	400	20			
	200	20			

* 水位は堆積物表面を基準とする

3. 底生微細藻類の光合成の律速要因に関する検討

(1) 実験概要

現地調査より、LC-Fco₂が測定時間内に著しく低下し、その原因はLC内のCO₂濃度低下によるCO₂律速であると考えられた。現地では地下水位や光量が刻々と変化するため、CO₂濃度のみの影響を見ることは困難である。そこで、現地堆積物を持ち帰り、水位、温度、光量を一定としてCO₂濃度の異なるガスをLC内に流入させた時のLC-Fco₂の違いからCO₂律速の有無を確認した。

(2) 実験方法

2013年1月10日に野鳥園にて内径55 cmの容器に堆積物を深さ約8 cm採取した。持ち帰った堆積物は濾過海水を入れた水槽に容器ごと入れ、水温10℃、水位+2 cm（堆積物表層を基準）で約1日保持した。実験は2013年1月11日に表-2の条件で行った。海水は空気で曝気し、水中ファンで緩やかに水流を起こした。CO₂濃度はLI-820を用いて現地調査と同様に計測した（図-5）。変更点として、LCに流入する気体をCO₂標準ガスとN₂標準ガスでCO₂濃度約400 ppmと約200 ppmに調整した点、流量を約0.7 L/minとした点、光源にHIDランプ（岩崎電気製、アイクリンエース）を用いて約350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ で照射した点である。各測定は流入ガスのCO₂濃度に達してから約30分とし、それぞれ3Case行なった（400 ppm→200 ppmを3回）。1Case終了ごとにリセットのため堆積物全体を湿らし、約30分間大気に曝した。

(3) 実験結果および考察

実験結果を表-3に示した。全てのCaseで、400 ppmのガスを流した時の方が200 ppmのガスを流した時よりもLC-Fco₂が大きく、前者は後者の約1.4～2.5倍の値をとった。このことから、LC内のCO₂濃度の低下によって光

表-3 異なるCO₂濃度のガスをLCに流した時のCO₂フラックスの平均値 μ と標準偏差 σ (mgCO₂/m²/min)

	400ppm	200ppm
Case1	1.05±0.10	0.75±0.06
Case2	1.51±0.09	0.72±0.08
Case3	1.53±0.12	0.62±0.06

表-4 CO₂濃度とCO₂フラックスの関係 ($R^2 \geq 0.99$ を満たす)

	Case	n	R ²	CO ₂ 濃度下限値 (ppm)
7月4日	1	3	1.00	360.5
	2	12	0.99	326.6
	3	3	0.99	355.2
	4	3	0.99	359.7
9月26日	2	4	0.99	268.0
	3	4	0.99	312.7
	5	5	0.99	263.7

合成が律速されていることが確認された。なお、LC-Fco₂の値が現地調査と比較して小さい（最大： $\mu+3\sigma=1.8\text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{min}$ ）のは堆積物採取の際に酸素が堆積物全体に供給され、好氣的分解によるCO₂の排出が増大したこと等が考えられた。

4. チャンパー法の改善策に関する検討

(1) 概要

CO₂律速によるLC-Fco₂の低下を防ぐため、CO₂濃度低下の抑制方法を検討した。方法は2通り考えられ、LCの底面積を小さくしてCO₂吸収量を抑える方法と、通気流量を増やしてCO₂供給量を増やす方法である。

(2) CO₂濃度低下許容量の決定

CO₂濃度は初めの数分は直線的に低下したが、時間経過に伴って徐々に緩やかになった（図-3）。直線的に低下する範囲（大気レベル付近）では、LC-Fco₂はLC内のCO₂濃度に完全に依存していると考えられた。そこで、最も大気レベルでのLC-Fco₂に近いと考えられる測定開始時点を基準とし、LC-Fco₂とLC内のCO₂濃度の関係から $R^2 \geq 0.99$ を満たす範囲を抽出した。これは、LC-Fco₂がCO₂濃度に完全に依存している範囲では、LC-Fco₂が低下した場合でも、LC-Fco₂とLC内のCO₂濃度の関係を基に、計測したLC-Fco₂を大気レベルでのLC-Fco₂に補正可能であると考えたためである。なお、ここで $R^2 \geq 0.99$ としたのは、厳密にこの範囲を求めるためである。7月4日は全てのCase、9月26日は3CaseにおいてLC-Fco₂とLC内CO₂濃度の関係において $R^2 \geq 0.99$ を満たす範囲が存在した（表-4）。約260 ppmまで低下しても $R^2 \geq 0.99$ を満たすCaseもあるが、安全を見込んで最も400 ppmに近いCaseで判断すると、大気レベルから約40 ppmまでにCO₂濃度の低下を抑える必要があると考えられた。

(3) 通気流量に関する試算

通気流量はLC内部へのCO₂の供給速度と言い換えられる。他分野ではその重要性が指摘されており、通気流量が不十分な場合には光合成能が低下すると報告されている(石井ら, 1979)。今回、底生微細藻類に関しても同様のことが考えられたため、CO₂濃度の低下が大気レベルから約40 ppmまでとなるように式(1)～(4)を用いて必要な通気流量を試算した。なお、LCの規模は不変とした。

$$Q_{in} = C_{air} \times v \times \rho \times 273.15/T \times t \times 10^{-3} \quad \dots(1)$$

$$Q_{out} = C_{Cham} \times v \times \rho \times 273.15/T \times t \times 10^{-3} \quad \dots(2)$$

$$Q_x = F_{CO_2} \times t \times s \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_x \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 Q_{in} は一定時間 t の間にLCに流入するCO₂量(mgCO₂)、 Q_{out} は一定時間 t の間にLCから流出するCO₂量(mgCO₂)、 Q_x は一定時間 t の間に堆積物表面で吸収されるCO₂吸収量(mgCO₂)、 C_{air} は大気中のCO₂濃度(400 ppm)、 C_{Cham} はLC内でのCO₂濃度(360 ppm)、 F_{CO_2} はLCで計測されたCO₂フラックスの最大値(15.7 mgCO₂/m²/min)、 ρ は0℃ 1 atmにおけるCO₂密度(1.977 g/L)、 T は泥温(304.65 K)、 s はLCの底面積(0.1486 m²)を示す。

試算の結果、CO₂濃度の低下を約40 ppmに抑えるのに必要な流量は約32.9 L/minとなり、LCの容積が31.7 Lであるため、流量のみでの解決は困難であると考えられた。

(4) チャンバーの底面積に関する試算

通気流量のみによる解決は困難と考えられたため、LCの底面積を変えることで濃度低下を抑制する。その際に、通気流量はLCの容積の約1/3にあたる10.0 L/minとして試算した。試算は式(5)～(6)を用いて行った。

$$\Delta C_t = \{-F_{CO_2} \times s \times \frac{T}{273.15} \times \frac{1}{\rho} \times 10^3 + (C_{air} - C_t) \times v\} \times \frac{1}{V} \quad \dots(5)$$

$$C_{t+1} = C_t - |\Delta C_t| \geq 360 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 ΔC_t は時刻 t から $t+1$ におけるCO₂濃度の変化量(ppm)、 C_{air} は大気中のCO₂濃度(400 ppm)、 C_t は時刻 t におけるLC内のCO₂濃度(ppm)、 C_{t+1} は時刻 $t+1$ におけるLC内のCO₂濃度(ppm)、 F_{CO_2} はLCで計測されたCO₂フラックスの最大値(15.7 mgCO₂/m²/min)、 ρ は0℃ 1 atmにおけるCO₂密度(1.977 g/L)、 T は泥温(304.65 K)、 v は通気流量(10.0 L/min)、 V はLCの容積(31.7 L)、 s はLCの底面積(m²)を示す。

試算の結果、LCの底面積は約450 cm²以下とする必要

があると考えられた。ただし、これは都市近郊の生物活性の高い野鳥園における暫定的な試算であるため、さらに検討が必要である。

5. まとめ

大阪南港野鳥園を対象に、単純通気型のチャンバー法を用いて底生微細藻類の光合成によるCO₂吸収量、および動植物の呼吸や有機物分解によるCO₂排出量を計測した。排出量は測定時間内では一定であったが、吸収量は時間経過に伴って減少した。この原因は、LC内部のCO₂濃度の減少によるCO₂律速であった。また、大気レベル(約400 ppm)におけるCO₂吸収量を計測するには、LC内のCO₂濃度の低下を大気レベルから約40 ppm以内に抑える必要があると考えられ、通気流量を増やす対策とLCの底面積を小さくする対策が考えられた。流量のみで解決を図ると、約32.9 L/minと非常に大きな流量が必要であると試算されたため、流量をLCの容積の約1/3にあたる10.0 L/minとして底面積を試算すると、約450 cm²以下とする必要があると試算された。ただし、これは都市近郊の生物活性の高い大阪南港野鳥園における暫定的な試算であるため、さらに検討する必要がある。最後に、本研究は「科学研究費助成事業(基盤研究C)都市型人工塩性湿地における生物圏と環境圏間の炭素フラックスの実態と機序解明研究」により実施した。

参 考 文 献

- 石井現相, 長井晃四朗(1979): リンゴ個葉の光合成能測定手法と光合成特性, 果樹試報C, Vol.6, pp.65-8.
- 木部 剛, 鞠子 茂(2004): 土壌呼吸の測定と炭素循環, 地球環境, Vol.9, No.2, pp.203-212.
- 田中健路, 滝川 清(2006): 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.
- 矢持 進, 小林愛実, 平井 研(2007): 干潟域における底生微細藻類の総光合成速度に関する一考察, 水環境学会誌, Vol.30, No.8, pp.441-448.
- Chojnicki B. H., M. Michalak, M. Acosta, R. Juszczak, J. Augustin, M. Drösler and J. Olejnik(2010): Measurement of Carbon Dioxide Fluxes by Chamber Method at the Rzecin Wetland Ecosystem, Poland, Poloshu J. of Environ. Stud, Vol.19, No.2, pp.283-291.
- Drösler M.(2005): Trace Gas Exchange and Climatic Relevance of Bog Ecosystems, Southern Germany, Ph.D Dissertation, Lehrstuhl für Vegetationsökologie, Department für Ökologie, Technischen Universität München, pp.14-33.
- IPCC(2007): Climate Change 2007, The Physical Science Basis, pp.501.
- Migné A., D. Davoult, N. Spilmont, D. Menu, G. Boucher, J.-P. Gattuso and H. Rybczyk(2002): A closed-chamber CO₂-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions, Marine Biology, Vol.140, pp.865-869.
- Whitney D. E. and W. M. Darley(1983): Effect of light intensity upon salt marsh benthic microalgal photosynthesis, Marine Biology, Vol.75, pp.249-252.