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 — チャンバー法によるCO₂フラックスの測定 —

Characteristics of Organic Matter Degradation at an Artificial Tidal Flat in the Vicinity of Urban Area - Measurement of CO₂ Flux Using the Chamber Method -

大谷優里¹・藤田哲朗²・矢持 進³

Yuri OTANI, Tetsuro FUJITA and Susumu YAMOCHI

Emissions of CO₂ from tidal-flat sediments were measured using the chamber method to investigate the characteristic of organic matter degradation at the north pond of Osaka Nanko Bird sanctuary. Indoor experiments were also conducted to clarify the effect of changes of the groundwater level on the CO₂ emission by manipulating the water table level of the sediment. The amount of organic matter degradation varied seasonally and increased with increase of temperature and biomass of benthic organisms in summer. Emissions of CO₂ from the bottom sediment were highest when the water table level was lowest at low tide in a day. These results demonstrate that the amount of organic matter degradation varies daily or seasonally depending on temperature, groundwater level and biomass of organisms of the bottom sediment.

1. はじめに

干潟や塩性湿地は生物生息や水質浄化、親水空間、さらには流域圏の物質循環などの観点から重要な場とされ、近年では各地で人工干潟の造成例が増えてきている。干潟生態系においては、底生生物や微生物が有機物の生産や分解・無機化を行い、干潟の炭素循環において大きな役割を果たしている。汚濁負荷量の多い都市域の内湾において生物活性は浄化機能として働き、近傍海域全体に対して水質や堆積物を浄化する役割を担っていると考えられている。干潟の浄化機能の一つとしてあげられる有機物分解能については、これまで干潟土壌の酸素消費速度や炭酸ガス生成速度から評価する方法等が報告されている(清木ら, 1998; 松尾・森本, 1994)。これらはすべて室内実験の手法によって検討されているが、室内実験については複雑な現場環境を再現することが困難であり、現場における分解能そのものを評価するのは難しいと考えられる。また干潟や塩性湿地は潮の干満によって冠水と干出が繰り返されるため、一日のうちでも温度や水位が変化する特殊な環境下にあり、生物による分解活性もこのような環境の変化に伴って大きく変動していることが予想される。しかし、干潟における有機物の分解特性について、現地測定手法によって検討した研究例

や一日の分解量の変化について着目している研究例は少ない。

生物による有機物の分解・無機化では、一般的に二酸化炭素(CO₂)が放出される。干潟堆積物から放出されるCO₂の起源は生物活動に起因するものであると考えられるため、干潟堆積物からのCO₂フラックスを測定、解析することは、干潟の有機物分解能特性の究明につながると期待される。しかし、潮の干満など、短時間で環境が変化する干潟においてはCO₂の放出・吸収動態に関する研究例がほとんどなく、現地における測定方法も確立されていない。

そこで本研究では、有機物分解の指標として干潟堆積物からのCO₂フラックスに着目し、チャンバーを用いた現地測定装置の試作とともに、それを用いて干潟干出時における有機物の分解特性について把握することを目的とした。

2. CO₂フラックスの現地測定

(1) 測定手法

干潟干出時のCO₂フラックスの現地測定方法として、チャンバー法による測定を試みた。チャンバー法による

図-1 現地測定装置の概要

1 修(工) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻
2 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

測定に関しては、これまで農学関連分野において土壌呼吸を測定する方法として、さまざまな手法が用いられてきた(木部・鞠子, 2004)。本研究で用いたチャンバー法は、干出時に堆積物表面をチャンバーで覆い、チャンバー内の空気をポンプで吸引し、流入、流出する空気の二酸化炭素濃度を測定してその濃度差からCO₂フラックスを試算するという測定方法である。この方法は外気が常にチャンバー内に送り込まれるため、チャンバー内の環境が改変されにくいことから測定手法として採用した。

装置は、チャンバー(円錐台:底面積1392cm²,高さ31cm,容積40.9l)、CO₂ガスアナライザー(LI-COR製,LI-820)と、15秒間隔でCO₂濃度を記録するデータロガー(LI-COR製,LI-1400)で構成される(図-1)。チャンバーからは一定流量(約2.5l/min)で空気を吸引し、同流量の大気をチャンバー内に送り込んだ。本研究では有機物の分解・無機化によるCO₂濃度変化を測定の対象としているため、測定には光を遮断する暗チャンバーを使用し、藻類による光合成の影響を除外した暗条件での測定を行った。

堆積物表面から大気にCO₂が放出される速度は堆積物表面のある面積から単位時間に放出されるCO₂量として表わされる。フラックスの単位を有しているため、本研究ではこれをCO₂フラックスと呼び、放出を正、吸収を負で表すこととする。本研究で測定しているCO₂フラックスは堆積物表面から放出されるCO₂すべてを指しており、そのCO₂の起源としては、堆積物中の底生動物、菌類、細菌類による有機物の分解・無機化であるといえる。これらの生物に関して個々の有機物分解能について測定することは困難であるため、堆積物表面からのCO₂フラックスを測定し、生物全体での有機物の分解特性について考察することとする。

(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干潟(以下、野鳥園)に設定した。野鳥園は大阪市地先海面の一部を埋め立てて造成された施設で、湿地部分には北、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。本研究では北池を対象として調査を行った(図-2)。測定地点は干出と冠水を繰り返し、グリーンタイドの非発生域で、ヨシ原から遠く、ヨシの地下部(根、根茎等)の影響を受けない点を選定した。

調査は2009年10月14日、2010年5月12日、5月26日、6月9日、7月21日、12月9日の計6回、大潮の干潮時に実施した。いずれも昼間の干出時に約30分～1時間の測定を数回行ったが、夜に潮位が下がる冬季の調査のみ、夜間の干出時に調査を行った。また、CO₂濃度の他に、CO₂濃度変化測定時の地下水位およびチャンバー内の温度、地下水表層の全炭酸濃度、チャンバー内堆積物の底生微細藻類量(0-5mm層)と小型底生動物量、さらに底質として粒度組成や有機物量などを測定した。

(3) 現地調査結果および考察

a) CO₂フラックスの季節変化と日変化

2010年5月26日(春季)、7月21日(夏季)、12月9日(冬季)に現地にて測定したチャンバー内のCO₂濃度変化を図-3に示す。これらはチャンバーをかぶせて測定を開始してから経過時間とチャンバー内におけるCO₂濃度の関係を表したもので、図の凡例中の番号(①-④)は各測定日における測定の順番を、括弧内はCO₂濃度測定中の平均地下水位を示している。野鳥園干潟上での大気のCO₂濃度は、季節に関係なく400ppm前後であるのに対して、7月のチャンバー内CO₂濃度は測定開始20分後には600ppmを超えている。一方、12月のチャンバー内CO₂濃度は開始20分後でも430ppm程度で、さらにその後も440ppmを超えることはなく、夏季と比べると濃度変化の傾きが小さい。

これらの濃度変化と大気CO₂濃度から、野鳥園干潟干出時におけるCO₂フラックスを算出した結果を図-4に示す。これらはチャンバーをかぶせて測定を開始してから経過時間とCO₂フラックスの関係を表したもので、前図と同様に、図の凡例中の番号(①-④)は各測定日における測定の順番を、括弧内はCO₂濃度測定中の平均地下水位を示している。なお、測定開始直後はチャンバーを伏せて間もないために藻類の光合成によるCO₂濃度への影響が考えられること、また、チューブ内に残存していた空気のCO₂濃度が測定されている可能性があることから、CO₂フラックスは測定開始5分後から表示した。5月はフラックスが平均1.9mgCO₂/m²/min、7月は12.4mgCO₂/m²/min、12月は1.3mgCO₂/m²/minであり、フラックスは冬季・春季に小さく夏季に大きい。すなわち、7月のフラックスは5月に比べると約6.5倍とかなり大きな値を示しており、CO₂フラックスは季節によって異なることが示された。そこで、全調査日におけるCO₂フラックスと、測定時のチャンバー内温度との関係を図-5に示す。各調査日における

図-2 大阪南港野鳥園の位置と調査地点

図-3 各測定におけるチャンバー内のCO₂濃度変化 (左: 5月, 中央: 7月, 右: 7月) 図-4 野鳥園干潟干出時におけるCO₂フラックス (左: 5月, 中央: 7月, 右: 12月)

CO₂フラックスの代表値として、干潮時の地下水位が最も低く、かつ測定中に地下水位が変動しない時間帯に測定したものの平均値を用いた。図から温度の上昇とともにCO₂フラックスが増加しており、温度が高いほど有機物の分解量は大きいことが分かる。また、温度の増加に対してCO₂フラックスが指数関数的に増加していることが読み取れる。佐々木 (2008) は室内実験の結果、温度の上昇によってCO₂放出速度が大きくなる傾向がみられ、周囲の温度と好氣的分解に伴うCO₂放出速度は、指数関数として近似できることを報告している。本研究においてCO₂フラックス (F_{CO_2}) は温度 (t) の指数関数で表され、回帰式 $F_{CO_2} = 0.44 \exp(0.084t)$ が得られた。また、温度が10℃増加するときの反応の増加率を意味する温度係数 (Q_{10}) を求めると2.3が得られ、この値は清木ら (1998) が干潟土壌を用いた室内実験で得た値と類似している。これは、野鳥園北池の干出時においては、温度が10℃上昇するごとに、堆積物表面からのCO₂フラックス、つまり有機物の分解・無機化量が約2.3倍増加することを示している。このことから、一年間を通してみると、概括的には有機物の分解量は温度の高い夏季に大きく、温度の低い冬季に小さいと言える。

温度によって有機物の分解量が異なることは一般に知られているが、図-4より一日のうちでもフラックスに差がみられることが分かる。また、5月および7月の測定時には一回の測定中にもフラックスが変化している。そこで、一日のうち干出時における有機物分解量の変化を、地下水位の変動に着目して考察する。図-6に5月26日のCO₂フラックスと地下水位の時間変化を示す。本研究における地下水位とは、干出時に堆積物中で上下変動している水位のことで、測定地点の堆積物表面を基準とした水位で表している。干出直後 (1回目) 測定時のCO₂フ

図-5 チャンバー内温度とCO₂フラックスの関係 図-6 5月26日におけるCO₂フラックスと地下水位の時間変化

ラックスよりも、少し地下水位の下がった2回目測定時のCO₂フラックスの方が大きい値を示している。このことは、干出後の経過時間、つまり地下水位の低下に伴って有機物の分解量が多くなることを推察させる。これはいずれの調査日においても示されており、水位が低下するにつれてフラックスが大きくなり、水位が一定になるとCO₂フラックスも安定する傾向が読み取れる。以上のことから、潮汐 (地下水位) の変動と干潟における有機物の分解・無機化量には対応関係があることが示唆された。地下水面の高さが湿地堆積物からのCO₂フラックスに影響を与えているという報告があるが (Magenheimerら, 1996), これは、地下水位が低い時に地表面を好気

的狀態にするためとされており、本調査でも同理由によって好氣的分解が活発に行われ、分解速度が大きくなっていると考えられる。また、沼地における研究でも、地下水位の低下は酸素の土中への拡散を増加させて好氣的分解を促進させ、その結果CO₂の放出量が大きくなると報告されている (Chimner and Cooper, 2003)。本調査でも時間経過に伴ってフラックスが変化していることから、干潟においても、潮汐変動による地下水位の変化に伴って、一日のうちでも分解量が変化していることが推察できた。これについては室内実験にて詳しく検討する。

b) 他の干潟の分解活性との比較

同じ都市近郊の干潟について、底質性状の異なる干潟では分解活性に差があるのかを検討するため、2009年10月14日に野鳥園で、2009年11月1日に和歌山市の和歌川河口干潟 (図-7) において、同様の測定方法を用いて調査を行った。

野鳥園人工干潟と和歌川河口干潟の、暗条件でのCO₂フラックスの算出結果を図-8に、測定時のチャンパー内の温度および平均地下水位、底質の含水率・強熱減量・TOCを表-1に示す。和歌川河口干潟のCO₂フラックスは平均0.4mgCO₂/m²/minであるのに対して、野鳥園が平均

図-7 和歌川河口干潟の位置と調査地点

図-8 大阪南港野鳥園と和歌川河口干潟におけるCO₂フラックス

表-1 大阪南港野鳥園と和歌川河口干潟の測定時におけるチャンパー内温度および地下水位と底質

	チャンパー内 温度 (°C)	平均地下水位 (cm)	含水率 (%)	強熱減量 (%)	TOC (mg/g-dry)
野鳥園	26.6	-12	24.9	1.8	4.3
和歌川	28.2	-15	19.9	0.9	0.5

2.6mgCO₂/m²/minであり、和歌川に比べると約6.3倍大きな値を示している。生物活性は温度に依存することが知られているが、野鳥園と和歌川では測定時のチャンパー内温度に大きな違いがないにも関わらず、フラックスに差が出ていた。このことから、野鳥園においては有機物の分解・無機化が活発に行われていることが推察できる。礫分の多い野鳥園の堆積物中には、干出時に酸素が入り込みやすく、結果として好氣的分解が促進されていることが理由の一つとして考えられる。さらに、マクロベントス量が野鳥園の方が多かったことから、ベントスの呼吸による無機化量の違いもフラックスに差をもたらしている要因だと考えられる。なお、小川ら (2006) は、全炭素量に占める底生藻類由来の炭素量の割合が高いことで無機化量が高くなると報告している。そこで、野鳥園と和歌川の堆積物表層クロロフィルa量およびフェオフィチン量を比較すると、それぞれ野鳥園が18.1μg/g-wet, 20.6μg/g-wet, 和歌川が1.3μg/g-wet, 0.1μg/g-wetと、野鳥園の方がかなり大きな値を示している。特に死滅した藻類量の指標となるフェオフィチンについては、和歌川は0に近い値である。このことから、野鳥園の方が底生藻類由来の炭素量の割合が高いことが示唆され、これによって有機物の分解量が多くなったことも考えられる。また野鳥園は、夏季になるとアオサが大量に繁茂するグリーンタイドがみられることから、底生藻類由来の炭素量の割合が高く、分解量の多いことが推察できる。

以上のように、干潟の底質や生物量など、環境条件が異なる2つの干潟ではCO₂フラックスに大きな差があり、有機物の分解・無機化量も異なることが分かった。

3. 地下水位変動とCO₂フラックスに関する室内実験

(1) 実験概要

現地調査の結果、地下水位変動とCO₂フラックスには関係があり、干潟においては一日のうちでも有機物の分解量が大きく変化していることが示唆された。しかし、現地においては様々な環境条件が相互に作用し合うため、地下水位変動のみによるCO₂フラックスへの影響を明確に示すことは難しい。そこで、潮汐変動が干潟の有機物分解にどの程度の影響を及ぼしているのかを検証するため、現地堆積物を持ち帰り、温度や生物相などの環境条件を一定にした状態のもとで潮汐変動を模した室内実験を試みた。

(2) 実験方法

2010年11月14日の干潮時に大阪南港野鳥園の現地測定地点付近にて、内径30cm、高さ50cmのアクリル製円筒管を用いて、深さ約20cmまでの堆積物サンプルを乱さないように採取した。同時に北池内にて海水も採取し、

図-9 室内実験装置の概要

表-2 実験日と実験条件

	実験日	海水温度 (℃)	堆積物表面の温度 (℃)	水位変化 (cm)
実験①	2010.11.15	20	18	±0, -5, -10, -15
実験②	11.18	20	17	-5, -10, -5, ±0, +5
実験③	11.27	20	17	±0, -5, -10, -15, ±0

※水位変化は測定順

実験用海水とした。

実験室にて現地堆積物の入った円筒管に底蓋をし、水位調整BOXの中に設置して、BOX内に現地海水を流し込んだ。円筒管内の水位を、堆積物表面を基準として±0cm, -5cm, -10cm, -15cmと変化させ蓋をして密閉し、暗条件にてそれぞれの水位における円筒管内のCO₂濃度変化を測定してフラックスを算出した。CO₂濃度測定装置は、サンプルの入った円筒管とCO₂ガスアナライザー (LI-COR製, LI-820), 15秒間隔でCO₂濃度を記録するデータロガー (LI-COR製, LI-1400) で構成される。円筒管内の圧力調整と空気のリセットのため、測定1回ごとに蓋を開け、水位調整を行った後、測定開始直前に再度蓋を閉めて密閉した。いずれの測定も、水位調整を行ってから30分後より測定を開始し、それぞれ約30分間のデータを使用した。測定装置の概要を図-9に示す。なお、実験は堆積物を持ち帰った後BOX内に設置し、1日間潮汐変動を模して海水を上下させ、安定させた後に開始した。

実験は2010年11月15日、18日、27日の計3回、すべて11月14日に採取した同じ堆積物と海水を用いて実験を行った。それぞれの実験条件を表-2に示す。

(3) 実験結果および考察

いずれの測定日も地下水位が±0cmにおいてCO₂フラックスが最も小さく、地下水位が下がるにつれてCO₂フラックスが大きくなる結果となった。これは現地調査で得られた結果と同様である。そこで、地下水位とフラックスに相関関係があるのかを確かめるため、地下水位とCO₂フラックス平均値の関係を図-10に示す。いずれの実験においても地下水位とCO₂フラックスには負の相関があることが読み取れる。このことから地下水位と有機物

図-10 室内実験における地下水位とCO₂フラックスの関係

分解量には関係があり、潮汐変動のある干潟では有機物分解量が一日のうちでも異なることが明らかとなった。

4. まとめ

干潟における有機物分解特性の把握を目的とし、チャンバー法を用いて、四季を通して暗条件下でのCO₂フラックスを測定した。干潟における有機物分解量は季節によって、また、一日の潮汐変動によっても変化し、温度が高くなるほど、また干出時の地下水位が下がるほど分解量が大きくなることが分かった。さらに、有機物分解量は温度、地下水位、生物量に依存することが示された。これらのことから、干潟における有機物分解量や炭素循環量などを定量化する際には、季節変化だけでなく一日における変化量も考慮にいれるべきである。これらを考慮せずに一日もしくはそれ以上の期間の浄化機能について定量化した場合、干潟の浄化機能を過大もしくは過小評価してしまう危険性が示された。

参 考 文 献

- 小川葉子, 坂巻隆史, 野村宗弘, 中野和典, 西村 修 (2006): 底質性状の異なる干潟の生物学的炭素収支, 土木学会論文集G, Vol. 62, No.3, pp. 278-286.
- 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.
- 佐々木晶子 (2008): 河口干潟における好気的有機物分解量: 温度・潮汐の影響を考慮した測定, 瀬戸内海, No. 52, pp. 48-51.
- 清水 徹, 平岡喜代典, 李 正奎, 西嶋 渉, 向井徹雄, 瀧本和人, 岡田光正 (1998): 広島湾における干潟の水質浄化能に関する研究 有機物の分解特性について, 水環境学会誌, 第21巻, 第7号, pp. 421-428.
- 松尾 信, 森本研吾 (1994): 海浜砂中有機物の生分解性状と環境因子との関係 - 室内実験手法による検討 -, 資源と環境, Vol. 3, No. 1, pp. 47-54.
- Chimner R. A. and D. J. Cooper (2003): Influence of water table levels on CO₂ emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study, Soil Biology & Biochemistry, 35, pp. 345-351.
- Magenheimer J.F., T.R. Moore, G.L. Chmura and R.J. Daoust (1996): Methane and Carbon Dioxide Flux from a Macrotidal Salt Marsh, Bay of Fundy, New Brunswick, Estuaries, Vol. 19, No. 1, pp. 139-145.