

大阪湾の都市沿岸部の干潟における 水面・堆積物の二酸化炭素フラックス

大谷 壮介¹・上村 健太²・徳田 邦洋²
藤嶋 康平²・東 和之³・上月 康則⁴

¹正会員 大阪公立大学工業高等専門学校
(〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

E-mail: otani@osaka-pct.ac.jp (Corresponding Author)

²学生会員 大阪公立大学工業高等専門学校専攻科
(〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

³正会員 阿南工業高等専門学校技術部 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林青木 265)

⁴正会員 徳島大学環境防災研究センター (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

本研究では大阪湾沿岸部の13地点の干潟を対象に水質項目、底質環境、水面と堆積物のCO₂フラックスを定量化し、その関係性を明らかにすることを目的に調査を行った。大阪湾の干潟は全体的に砂質で構成されており、化学的性状から好気的な環境であった。水面におけるCO₂フラックスは13地点中8地点で放出を示し、湾奥の河川の影響が強い地点でCO₂は放出傾向にあった。堆積物における1日当たりのCO₂フラックスは矢倉海岸と男里川を除いてCO₂は放出であり、1日当たりのCO₂フラックスは水面より高いことから、堆積物では有機物の分解の場としてCO₂は放出されていることが推察された。以上のことから、干潟では水面からCO₂は放出傾向であり、堆積物は干出することで、有機物の分解が促進されてCO₂は放出していることが考えられた。

Key Words : CO₂ flux, tidal flat, sediment, water surface, primary production

1. はじめに

沿岸域におけるブルーカーボンに関する研究が進みつつあり、海域で二酸化炭素(以下:CO₂)は吸収されていることが示されている¹⁾。また、沿岸域において、大気-海水間のCO₂フラックスを対象にCO₂は水面から吸収・放出していることが示されているが^{2,3)}、大気-海水間のCO₂フラックスを堆積物のCO₂フラックスと関連付けて総合的に解析した研究事例は少ない。特に、冠水と干出を繰り返す干潟は、環境の変動が大きい特徴を有しており、浮遊生態系に加えて底生生態系がその場の物質循環に寄与していることが考えられるが、水面と堆積物のCO₂フラックスの関係は不明である。

沿岸域における干潟域は流域から流入した有機物の分解の場として捉えられているだけでなく⁴⁾、生物生産の場としても捉えられており⁵⁾、水面と堆積物のCO₂フラックスの関係性を明らかにすることで、底生系を含めた干潟のブルーカーボン効果のメカニズムの解明に寄与すると考えられる。これまで、筆者らは河口干潟において年間を通じた水面と堆積物のCO₂フラックスを定量化しているが⁶⁾、底質環境の異なる干潟を対象に湾全体のCO₂フ

ラックスの空間分布は検討されていない。

そこで本研究では、大阪湾を対象に都市沿岸部の干潟の底質環境、水面と堆積物のCO₂フラックスを定量化し、干潟間の比較、関係性を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 調査および分析方法

2019年6月に大阪湾沿岸部の須磨海岸、住吉川、御前浜、甲子園浜、矢倉海岸、淀川、大和川、高師浜、大津川、近木川、男里川、深日漁港、落合川の計13地点の干潟を対象に干潮時に調査を実施した(図-1)。

現場において、多項目水質計(MS5, HydroLab社)を用いて表層の水温、DO、pH、塩分を測定した。Chl.aはろ過後のろ紙についてDMF溶液を用いて抽出して、吸光度計(UVmini-1240, 島津製作所社)により吸光度を測定した(n=3)。水中の炭素濃度に関して、表層水を採水後、実験室に持ち帰り、NDIR方式のCO₂計(GMP343, VAISALA社)を用いて、水試料に8%リン酸を加えることで、DICを測定した。DOCは全有機体炭素計(TOC-L, 島津製作

所社), POCは元素分析装置 (FLASH EA1112, Thermo Finigan社) を用いて測定した.

底質環境は粒度組成, 酸化還元電位(ORP), 酸揮発性硫化物(AVS), Chl.a, TOCを測定した. 粒度組成, AVSはシリンジ(Φ2 cm)を用いて表層から4 cmの堆積物を採取して分析を行った(n=3). 粒度分析は粒径0.075 mm, 0.25 mm, 0.85 mm, 2 mm, 4.75 mmのふるいを用いて, シルトクレイ率, 細砂率, 中砂率, 粗砂率, 細レキ率を算出した. AVSは検知管法により測定した. ORPは現場にて堆積物表層から深さ4 cmになるようにORP計 (RP-30M, 東亜DKK社) を差し込んで地温と共に測定した(n=3). Chl.aとTOCはシリンジ(Φ2 cm)を用いて表層から1 cmの堆積物を切り取り, 分析に供した. Chl.aはDMF溶液を用いて抽出して吸光度計 (UVmini-1240, 島津製作所社) により吸光度を測定した(n=3). また, TOCは元素分析装置 (FLASH EA1112, Thermo Finigan社) を用いて測定した(n=3). これらの底質環境および後の分析・測定値は平均値±標準誤差で表記した.

現地で表層水を採水後, 実験室に持ち帰り, 明暗瓶法による水中の光合成・消費速度を測定した. 本実験ではフラン瓶に水試料を投入後, インキュベーター (日本医器器械製作所, LP-130P) で明暗条件を作って, おおよそ3-4時間程度の培養を行った(n=3). この時の光量子は約200 μmol/m²/sで統一した. 培養前後の溶存酸素の増減を蛍光溶存酸素計 (LDO-HQ40d, HACK社) で測定し, 光合成速度と消費速度を測定した.

明条件で培養した試料の溶存酸素の増加分を純生産速度として, 単位時間当たりの純生産速度とした. 一方で, 暗条件で培養した試料の溶存酸素の減少分を消費速度として, 単位時間当たりの消費速度とした. また, 本研究では光合成によって生産された酸素をマイナス, 呼吸によって消費された酸素をプラスで示した.

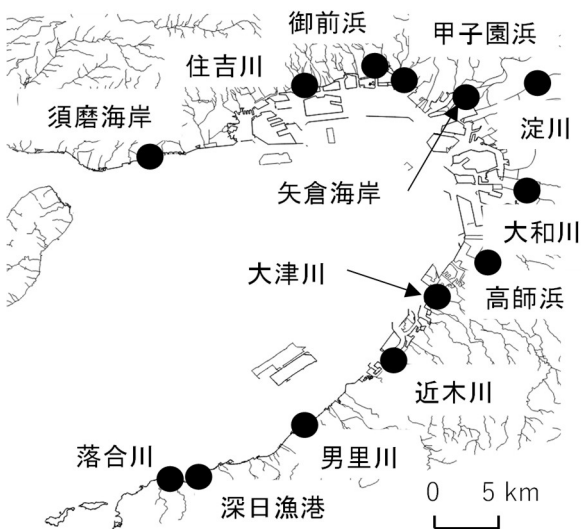


図-1 調査地点

(2) 堆積物の CO₂ フラックス

堆積物におけるCO₂フラックスの調査は, 干潟の干出時にアクリル製の明・暗のチャンバー (底面積1,195cm², 容積30.8L) を堆積物に差し込み, 容器内のCO₂濃度をNDIR方式のCO₂計 (TR-76Ui, T&D社) で10分間の測定を3回行った. 明チャンバーでは干潟堆積物に生息する底生微細藻類や微生物の呼吸に加え, 底生微細藻類の光合成が起こるので, 堆積物における正味のCO₂吸収速度を測定できる. 一方, 暗チャンバーでは, 底生微細藻類による光合成が起こらないため, 干潟堆積物におけるCO₂排出速度を測定できる. なお, チャンバー内の温度が上昇しないように透明の遮熱シートでチャンバーを覆った. 二酸化炭素の濃度変化からCO₂フラックスの換算は式(1)を用いた.

$$F_C = (C_t - C_{t+1}) \times V \times \rho \times (1/A) \quad (1)$$

ここで, F_C : CO₂フラックス(mg/m²/min), C_t : ある時間のCO₂濃度(ppm), C_{t+1} : ある時間から1分後のCO₂濃度(ppm), V : チャンバーの体積(m³), ρ : CO₂の密度(1.977g/L), A : チャンバーの底面積(m²)

現場において, チャンバーを用いたCO₂吸収・排出速度を計測後, 測定した地点で30×30 cmのコドラートを用いて深さ10cmまでの堆積物を採集して, 1 mmふるいでふるった. この作業を3回行って, ふるい上の残った残渣を持ち帰り, 底生動物をより分けた. 底生動物については, 湿重量を計測して, 各換算係数を用いて炭素量に変換した⁷⁾.

(3) 水面における CO₂ フラックス

現場で測定した表層水の pH および分析で得られたDIC から CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)が提供するCO₂SYSを用いてCO₂分圧(pCO₂)およびCO₂フラックスを算出した. CO₂フラックスは正を水面からの放出, 負を吸収とした. CO₂フラックスFは以下の式(2)で求められる.

$$F = k \cdot S \cdot (pCO_{2 \text{ 水面}} - pCO_{2 \text{ 大気}}) = k \cdot S \cdot \Delta pCO_2 \quad (2)$$

ここで, F : CO₂フラックス(mol/m/d), k : ガス交換速度(m/d), S : 水中のCO₂溶解度(mol/m³/μatm), ΔpCO_2 : 水面と大気の間での分圧差(μatm), $\Delta pCO_{2 \text{ 水面}}$: 水面のCO₂分圧(μatm), $\Delta pCO_{2 \text{ 大気}}$: 大気CO₂分圧(μatm)である. 大気CO₂分圧は400 μatmを一定と仮定して, 中溶解度Sは水温と塩分から既存の経験式を用いて計算した⁸⁾. ガス交換速度kは以下の式(3)⁹⁾と(4)¹⁰⁾で求められる.

$$k(\text{cm h}^{-1}) = 1.91 \times \exp [0.35 \times u_{10} \times (S_c / S_{c20})^{0.5}] \quad (3)$$

$$S_c = 2073.1 - 125.62t + 3.6276t^2 - 0.043219t^3 \quad (4)$$

ここで, k : ガス交換速度(cm/h), u_{10} : 高度10 mにおける風速(m/s), S_c : 水中のCO₂シユミット数, S_{c20} : 水温20°CでのCO₂のシユミット数, $S\%$: 塩分(psu), t : 摂氏水温(°C)である. なお, 風速データは国土交通省気象庁の

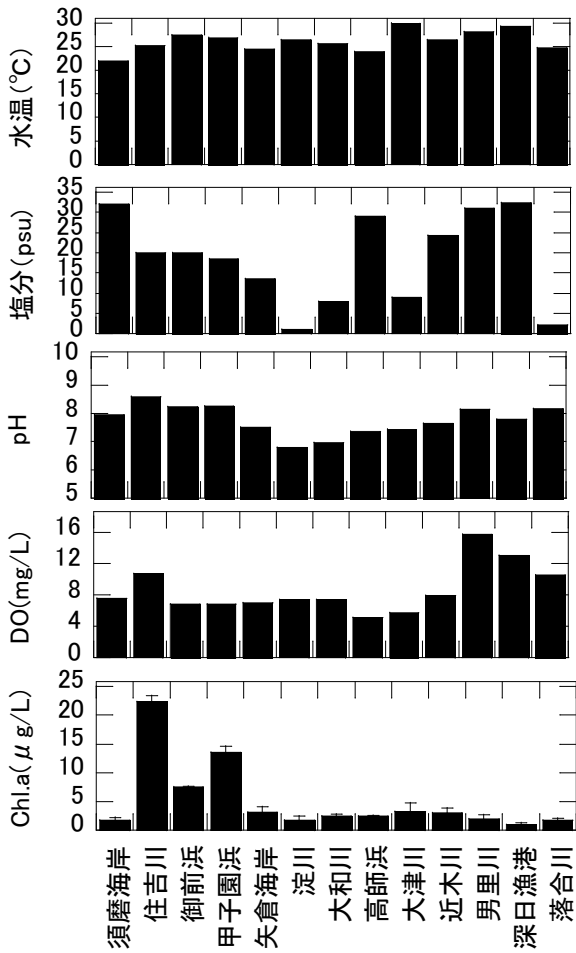


図-2 水質の分布

各調査地点に最も近い観測点のデータ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) を, 高度 10 m の風速に変換して用いた¹⁾.

3. 結果および考察

(1) 水質と底質環境

水質の分布を図-2に示す。水温は調査日と調査時刻の違いにより 22.0–30.2°Cであった。塩分は、河口の調査地点が含まれることから 1.1–32.4 psu であった。pH は 6.79–8.15, DO は 6.0–15.8 mg/L であった。Chl.a は 0.9–22.4 μg/L であり、湾奥部に位置する住吉川から甲子園浜の Chl.a は他の地点と比べると高く、大阪湾南部の干潟の Chl.a はほとんど違いがなかった。

底質環境の分布を図-3に示す。底質環境の比較について、AVS は淀川と深日漁港において水産用水基準である 0.2 mg/g を超えていたが、ORP はマイナスを示すことなく、好気的な環境であった。Chl.a は 0.00–9.43 μg/g であり、須磨海岸の Chl.a は 0.00 μg/g であった。粒度組成に

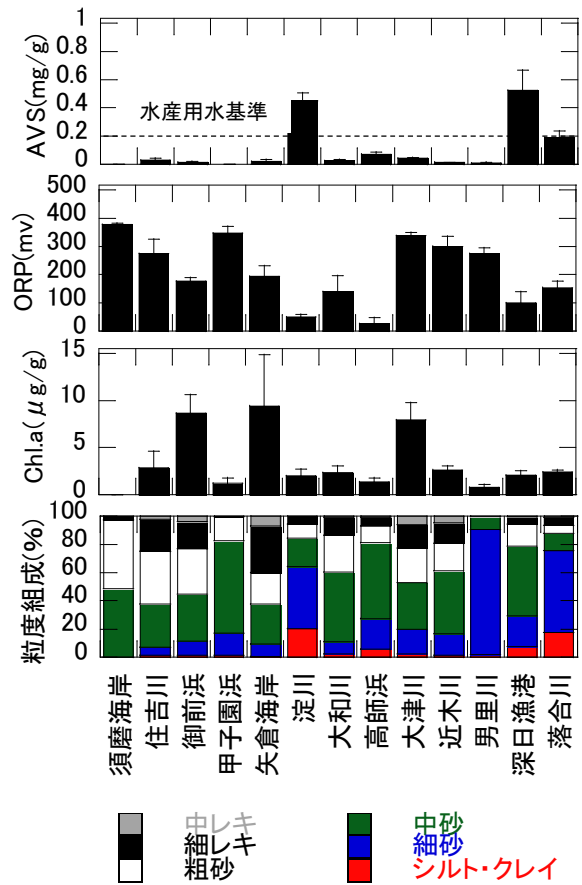


図-3 底質環境の分布

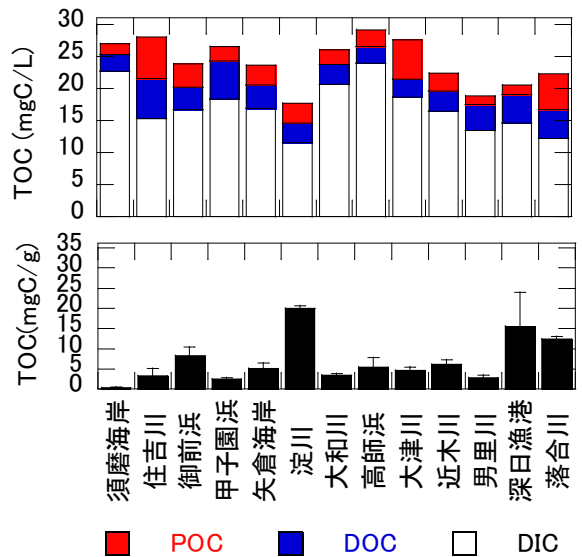


図-4 水質と堆積物の有機物濃度
a) 水質, b) 堆積物

関して、シルトクレイ率は 0–20.2%と低い地点が多く、調査した地点は主に中砂や粗砂で構成されている地点が多かった。大阪湾の干潟のほとんどは砂質の干潟であり、シルトクレイ率は低い傾向であった。また、男里川は 88.7%が細砂であり、同一の粒径で構成されていた。

水質と堆積物の有機物濃度を図-4に示す。水質の有機物濃度 TOCは17.7–29.2 mgC/Lであり、高師浜の TOCが最も高かった。また、有機物の構成として、DICは11.5–29.2 mgC/L、DOCは2.61–6.27 mgC/L、POCは1.44–6.48 mgC/Lであった。DICはTOCに対して、約70.2%を占めており、DOCは約16.2%、POCは約13.5%であった。堆積物のTOCは0.35–20.0 mgC/gであり、淀川のTOCが最も高かった。

底生動物の現存量の比較を図-5に示す。底生動物の炭素現存量は0.0014–1.85 gC/m²であり、落合川の底生動物はほぼ節足動物であった。本調査における干潟では、堆積物中に埋入している節足動物が少なく、軟体動物および環形動物で構成されている地点がほとんどであった。

(2) 水面と堆積物のCO₂フラックス

水面のCO₂フラックスと堆積物のCO₂吸収・放出フラックスを図-6に示す。図-6aより、干潟の水面におけるCO₂フラックスは、-0.203–5.20 mgCO₂/m²/minであり、13地点中8地点で放出を示し、湾奥の河川の影響が強い地点でCO₂は放出傾向にあった。図-6bより、堆積物における吸

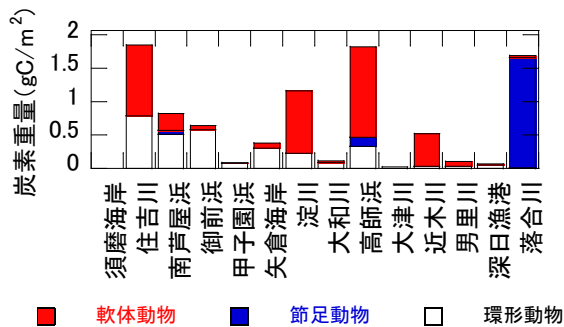


図-5 底生動物の現存量

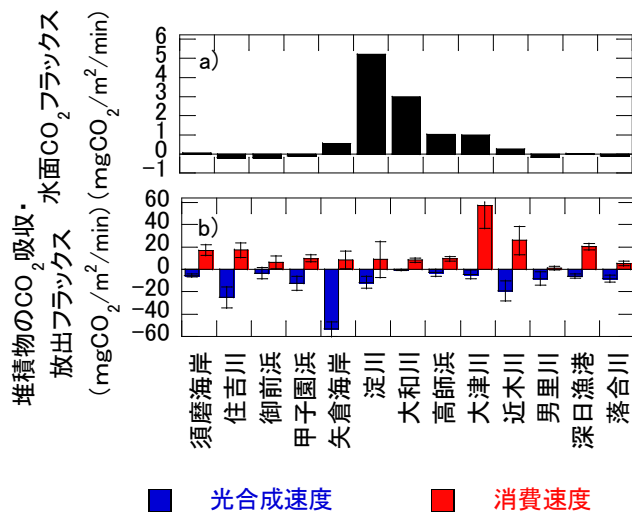


図-6 CO₂フラックス a)水面, b)堆積物 (正: 大気への放出, 負: 水中・堆積物への吸収)

収フラックスは、-53.4–0.47 mgCO₂/m²/min, 放出フラックスは1.23–57.0 mgCO₂/m²/minと13地点中7地点で吸収フラックスより、放出フラックスが高かった。

1日あたりの水面と堆積物のCO₂フラックスを図-7に示す。水面の1日当たりのCO₂フラックスは-0.29–7.49 gCO₂/m²/day, 堆積物の1日当たりのCO₂フラックスは-20.0–79.5 gCO₂/m²/dayであり、矢倉海岸と男里川を除いてCO₂は放出であった。さらに、水面と堆積物の1日当たりのCO₂フラックスは淀川を除いて、水中より堆積物のCO₂フラックスが高く、その収支は大きいことから、堆積物では有機物の分解の場としてCO₂は放出されていることが推察される。

(3) 水面と堆積物の一次生産速度

水面の光合成・消費速度と1日あたりの一次生産速度を図-8に示す。図-8aより、水面の水中の光合成速度は-394–35 mgC/m³/hour, 消費速度は2.5–109 mgC/m³/hourであった。図-8bより、水面の1日あたりの一次生産速度

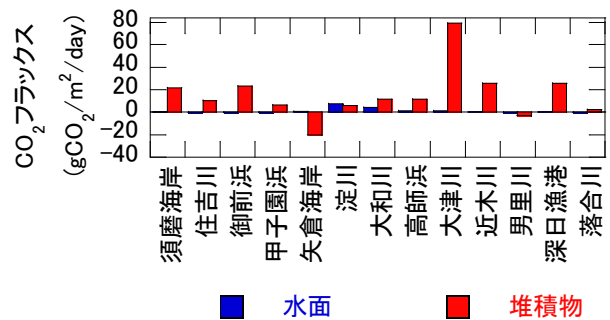


図-7 1日あたりの水面と堆積物のCO₂フラックス (正: 大気への放出, 負: 水面, 堆積物への吸収)

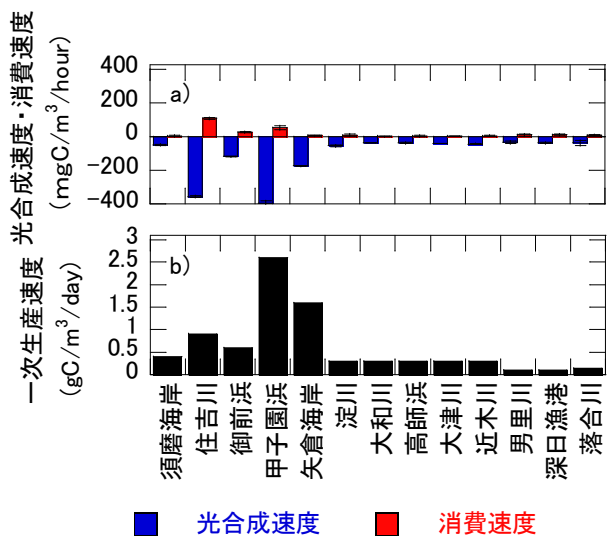


図-8 水面の光合成・消費速度(a)と1日あたりの一次生産速度(b)

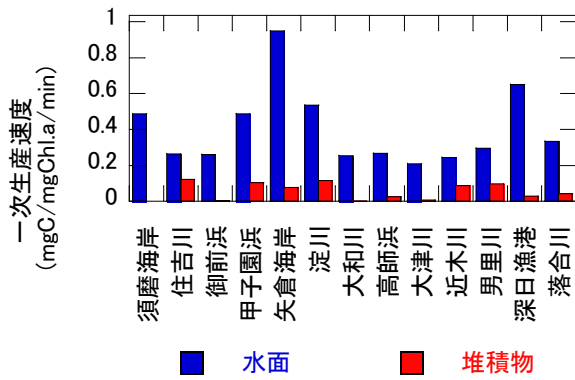


図-9 水面と堆積物のChl. aあたりの一次生産速度

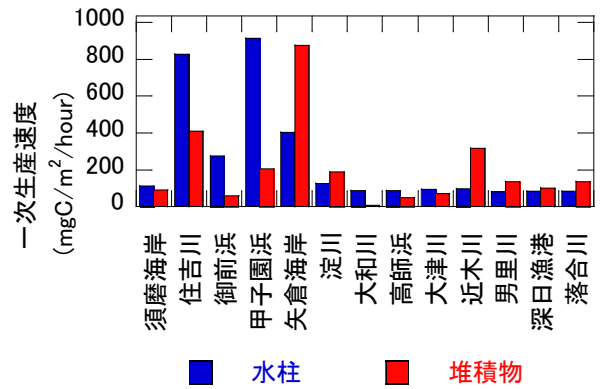


図-10 単位面積あたりの一次生産速度

は0.10–2.63 gC/m³/day と大阪湾奥部の甲子園浜や矢倉海岸で高く、Chl.a と正の相関関係が認められた($r=0.90$, $p<0.01$).

水面と堆積物の Chl.a あたりの一次生産速度を図-9 に示す。水面の Chl.a あたりの一次生産速度は 0.21–0.95 mgC/mgChl.a/min, 堆積物の Chl.a あたりの一次生産速度は 0.00–0.12 mgC/mgChl.a/min であった。すべての地点において、水面の Chl.a あたりの一次生産速度は堆積物よりも高く、植物プランクトンの生産効率は底生微細藻類より高かった。水面の Chl.a あたりの一次生産速度は堆積物の平均と比較して 7.3 倍であった。

ここで、単位面積当たりの一次生産速度を図-10 に示す。水中の単位面積当たりの一次生産速度は図-8a の光合成速度に平均水深を乗じて算出した。水深は各地点によって異なるが、各地点に近い潮位の観測地点から年最低潮位と最高潮位の差から潮間帯の水深を算出した。図-10 より、水柱の一次生産速度は 79.7–914 mgC/m²/hour, 堆積物の一次生産速度は 7.5–874 mgC/m²/hour であった。干潟の堆積物 1m²あたりの底生微細藻類による一次生産速度は水柱 1m²あたりの植物プランクトンによる一次生産速度と比べても非常に大きく、干潟が高い生産機能を有していることが示されている⁹⁾。本研究においても矢倉海岸を代表に淀川や、近木川以南の干潟では水柱の一次生産速度より堆積物の一次生産速度が高かった。一方で、特に兵庫県側の干潟において堆積物より水柱の一次生産速度は高いが、堆積物と同オーダーであり、底生系の生産性の高さが伺えた。

(4) CO₂ フラックスと各要因の関係

CO₂ フラックスに寄与する要因として、水面の CO₂ フラックスは pH($r=-0.70$, $p<0.01$)と塩分($r=-0.57$, $p<0.05$)と相関関係にあった。水面における光合成速度は消費速度より大きかったことから(図-8a), pH の変動要因として寄与していることが示唆される。また、水面の CO₂ フラックスは塩分と関連していることが示されており³⁾、本研

究においても塩分勾配によって CO₂ の吸収・放出が概ね一致していた。一方で、堆積物の CO₂ フラックスは粒度組成、Chl.a 等の堆積物性状や底生動物の現存量、水面の CO₂ フラックスと相関関係は認められなかった。水面と堆積物の CO₂ フラックスの間には統計的に相関関係は認められなかったことから、堆積物の CO₂ フラックスは水面の CO₂ フラックスに直接的に影響を及ぼしていないと考えられる。

これまでに淀川における毎月調査の堆積物の CO₂ 排出速度とヤマトシジミの炭素現存量の間に統計的な正の相関関係が認められているが⁹⁾、本研究では堆積物の CO₂ 排出速度と底生動物の炭素現存量の間には統計的な相関関係は認められなかった($r=-0.27$, n.s.)。ここで、ヤマトシジミの炭素現存量は 11.7–35.3 gC/m²であり⁹⁾、本研究における底生動物の炭素現存量はヤマトシジミの炭素現存量の 1/10 以下であることから(図-5)、底生動物の呼吸による堆積物の CO₂ 排出速度への寄与は小さいことが考えられる。つまり、二枚貝の炭素現存量と比べると本調査における底生動物の炭素現存量は小さく、ほとんどが微生物の有機物分解による CO₂ の排出であることが考えられた。

また、水面と堆積物における有機物濃度と各 CO₂ フラックスにおいて、統計的な正の相関関係は認められなかった。有機物濃度が高ければ、微生物により有機物が分解されることで CO₂ 排出速度も高くなると考えられるが、微生物の基質である有機物濃度は分解による CO₂ 排出速度に寄与していないことを示唆している。

以上のことから、大阪湾の干潟は全体的に砂質で構成されており、化学的性状から好気的な環境であり、底質の汚濁は進行している状況ではなかった。特に、干潟では水面から CO₂ は放出傾向であり、堆積物は干出することで、有機物の分解が促進されて CO₂ は放出していることが考えられた。

4. おわりに

本研究では大阪湾沿岸部における干潟の水面と堆積物のCO₂フラックスの空間分布とその関連性を明らかにすることを目的に調査を行った。以下、本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 大阪湾の干潟は全体的に砂質で構成されており、化学的性状から底質環境の汚濁は進行している状況ではなかった。干潟の水質は、湾奥部の河川の影響が強い地点の塩分は低く、湾奥部においてChl.aが高かった。
- 2) 干潟の水面におけるCO₂フラックスは、 $-0.203\text{--}5.20\text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{min}$ であり、13地点中8地点で放出を示し、湾奥の河川の影響が強い地点でCO₂は放出傾向にあった。また、堆積物における吸収フラックスは、 $-53.4\text{--}0.47\text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{min}$ 、放出フラックスは $1.23\text{--}57.0\text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{min}$ と13地点中7地点で吸収フラックスより、放出フラックスが高かった。さらに、堆積物の1日当たりのCO₂フラックスから、矢倉海岸と男里川を除いてCO₂は放出であった。水面と堆積物の1日当たりのCO₂フラックスは淀川を除いて、水中より堆積物が高かった。
- 3) すべての地点において水中のChl.aあたりの生産速度は堆積物よりも高く、植物プランクトンの生産効率は底生微細藻類より高かった。干潟では水面からCO₂は放出傾向であり、堆積物は干出することで、有機物の分解が促進されてCO₂は放出していることが考えられた。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 JP19K04679 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Laruelle, G. G., Durr, H. H., Lauerwald, R., Hartmann, J. Slomp,

C.P., Goossens, N., Regnier, P. A. G.: Global multi-scale segmentation of continental and coastal waters from the watersheds to the continental margin, *Hydrology and Earth System Sciences* 17, pp.2029–2051, 2013.

- 2) Cotovicz, L. C., Jr., Knoppers, B. A., Brandini, N., Costa Santos, S. J., Abril, G.: A strong CO₂ sink enhanced by eutrophication in a tropical coastal embayment (Guanabara Bay, Rio De Janeiro, Brazil), *Biogeosciences* 12, pp.6125–6146, 2015.
- 3) Chen, C.T.A., Huang, T.H., Chen, Y.C., Bai, Y., He, X., Kang, Y.: Air-sea exchanges of CO₂ in the world's coastal seas, *Biogeosciences*, 10, pp.6509–6544, 2013.
- 4) Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P., Mackenzie, F., Gruber, N., Janssens, I.A., Laruelle, G.G., Lauerwald, R., Luysaert, S., Andersson, A.J.: Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean, *Nature Geoscience*, 6, pp.597–607, 2013.
- 5) 門谷茂: 沿岸浅海域における物質循環—潮下帯から河口干潟まで—, 水環境学会誌, Vol.22, No.7, pp.533-538, 1999.
- 6) 大谷壮介, 川崎太輝, 遠藤徹, 東和之: 泥質河口干潟の底質環境と二酸化炭素吸収・排出速度の季節変化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp.I_630-I_635, 2017.
- 7) 小川葉子, 坂巻隆史, 野村宗弘, 中野和典, 西村修: 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, 62(3), pp. 278-286, 2006.
- 8) Weiss, R. F.: Carbon Dioxide in Water and Seawater: The Solubility of a Non-ideal Gas, *Marine Chemistry*, 2, pp.203–215, 1974.
- 9) Raymond, P. A., Cole, J. J.: Gas Exchange in Rivers and Estuaries: Choosing a Gas Transfer Velocity, *Estuaries*, 24, pp.312–317, 2001.
- 10) Jähne, B., Heinz, G., Dietrich, W.: Measurement of the Diffusion Coefficients of Sparingly Soluble Gases in Water with a Modified Barrier Method. *Journal of Geophysical Research*, 92, pp.10767–10776, 1987.
- 11) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学-理解と応用, 東京大学出版会, p.336, 2000.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

CARBON DIOXIDE FLUXES AT WATER AND SEDIMENT IN THE URBAN COASTAL TIDAL FLAT OF OSAKABAY

Sosuke OTANI, Kenta UEMURA, Kunihiro TOKUDA
Kohei FUJISHIMA, Kazuyuki HIGASHI and Yasunori KOZUKI

The objective of this study was to quantify the relationships between water surface and sediment CO₂ fluxes on 13 tidal flats in the coastal area of Osaka Bay. The tidal flats are generally composed of sandy sediments, and their chemical properties indicate an aerobic environment. CO₂ fluxes at the water surface of the tidal flats showed a release at 8 of the 13 sites, and CO₂ tended to be released at the sites with strong river influence at inner part of Osaka bay. The daily CO₂ flux in the sediments was higher than that in the water surface, suggesting that CO₂ is released in the sediments as decomposition of organic matter. These results suggest that CO₂ tends to be released from the water surface on tidal flats, and that CO₂ at sediments is released by the decomposition of organic matter accelerated in low tide.