

大阪湾湾奥の御前浜における 二酸化炭素フラックスの時間変動

大谷 壮介¹・上月 康則²・松重 摩耶³・山中 亮一⁴

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

E-mail: otani@osaka-pct.ac.jp

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

E-mail: kozuki@tokushima-u.ac.jp

³正会員 徳島大学環境防災研究センター学術研究員 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail: mayaya77@gmail.com

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

E-mail: ryoichi_yamanaka@tokushima-u.ac.jp

本研究では兵庫県西宮市に位置する大阪湾湾奥の御前浜において渦相関法を用いたCO₂フラックスの時間変動およびCO₂フラックスと水質の関連性を明らかにすることを目的に調査を行った。観測期間中のCO₂フラックスは-0.90~0.67 mgCO₂/m²/sで変動しており、すべての小潮で吸収、大潮の3回の内、2回は放出を示した。また、小潮における昼間のCO₂フラックスは夜間の約2.8倍の吸収を示した。CO₂フラックスと表層の水質の関係性について、相関係数が0.5以上のCO₂フラックスと関係性の強い変数はなかった。大阪湾湾奥におけるCO₂フラックスは小潮で吸収傾向、大潮で放出傾向であり、貧酸素・無酸素状態、成層の緩和や硫化水素の発生といったイベントとの関連性は認められず、CO₂フラックスは時間変動していることが考えられた。

Key Words : CO₂ flux, eddy correlarion mthod, water quality, stratification, Osaka Bay

1. 結論

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、海域では二酸化炭素（以下：CO₂）は固定されていることが示されている。特に、それらの研究の多くは海草・海藻の炭素固定に関するもので、CO₂の排出量の多い都市の沿岸域には、それらの植物が生育できる場はほとんど失われているのが現状にある。一方で、富栄養化している東京湾¹⁾や大阪湾²⁾においてCO₂は吸収されていることが報告されている。さらに、沿岸域の中でもアマモ場や運河における大気と水面間のCO₂フラックスを算出することでCO₂の吸収に関する空間分布が明らかにされている⁴⁾。

しかしながら、それらの多くの研究はアルカリ度やDIC等の水質からCO₂分圧・CO₂フラックスを推定しており、空間的なCO₂フラックスの分布を把握するには効果的であるが、昼夜等を考慮した連続的なCO₂フラックスの詳細な時間変動まで示されていない。特にCO₂フラックスの時間変動に関しては、渦相関法を用いて干潟域⁶⁾・湿地帯⁷⁾やアマモ場⁸⁾において長期間のCO₂の時間変動を連続的に計測することでCO₂は吸収されていること

が示されている。また、渦相関法を用いたCO₂フラックスの季節変化は示されているが、CO₂フラックスと各要因の時間変動の関係性を示した研究事例は少ない。

そこで、本研究では青潮が発生するような大阪湾湾奥において渦相関法を用いたCO₂フラックスの時間変動およびCO₂フラックスと水質の関連性を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 調査地域

大阪湾湾奥に残る天然浜の一つ、兵庫県西宮市御前浜において現地観測を行った(図-1)。調査場所は閉鎖的な内湾で海水の交換率が悪く、過栄養状態の水域である。また、海草・海藻の生育は認められず、本海域は年間を通してChl_aが高く⁹⁾、藻類として植物プランクトンが卓越している地点である。観測は2016年9月17日~11月7日まで行った。調査期間中に4回の小潮、3回の大潮があった。

(2) 調査方法

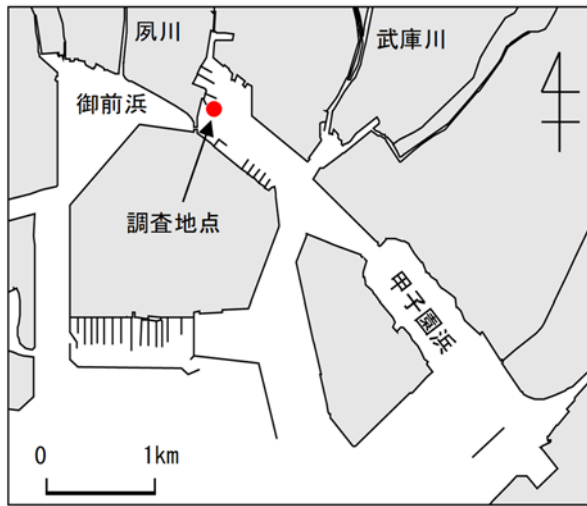


図-1 調査地域

観測機器はオープンパス CO₂/H₂O アナライザー(LI-7500, LI-COR 製), 3次元超音波風向風速計(SAT-540, SONIC 製)を使用した。それらの機器は水面より高さ約8 mに設置し、観測機器の測定間隔は10 Hzとして、CO₂濃度、3次元の風速成分を計測した(図-2)。また、湿度計(U23-001, Onset 製)を用いて湿度、気温、光量子計(S-LIA-M003, Onset 製)を用いて光量子の測定を行った。

上記の観測と同時に2016年9月17日～11月30日までDL-1.5 m(表層)と-6.0 m(底層)において多項目水質計(MiniSonde-5, Hydrolab 社製)を設置して30分毎の水温、塩分、DO、pH、ORPを計測した。水質計は2週間に1回のデータの回収およびメンテナンスを行った。なお、底層のpHについて、10月29日の11時以降のデータは欠損である。

(3) 解析方法

得られたデータを用いて30分毎にCO₂フラックス、潜熱および顕熱フラックスを算出した。算出方法について、CO₂フラックス(mgCO₂/m²/s)はWPL補正¹⁰⁾を含んだ式(1)を用いて算出した¹¹⁾。式(1)においてオーバーラインは平均を表し、プライム(′)は平均からの変動成分を表す。ここで、 w :鉛直成分風速、 ρ_c :CO₂の絶対密度、 ρ_a :湿潤空気の絶対密度、 ρ_v :水蒸気の絶対密度、 μ :乾燥空気の平均分子量と水蒸気の分子量の比、 σ :空気と水蒸気密度の比である。また、式(1)において右辺第1項は、直接求められる生のフラックス、右辺第2・3項はWPL補正項であり、潜熱・顕熱による補正項である。本研究ではCO₂および熱(潜熱・顕熱)フラックスの値について負の値は上空からの吸収、正の値は上空への放出とした。

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + \mu \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}} \overline{w'\rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}} \overline{w'T'} \quad (1)$$

熱フラックスである顕熱フラックス H (W/m²)および潜熱フラックス IE (W/m²)は、式(2)、(3)により求めた¹¹⁾。こ

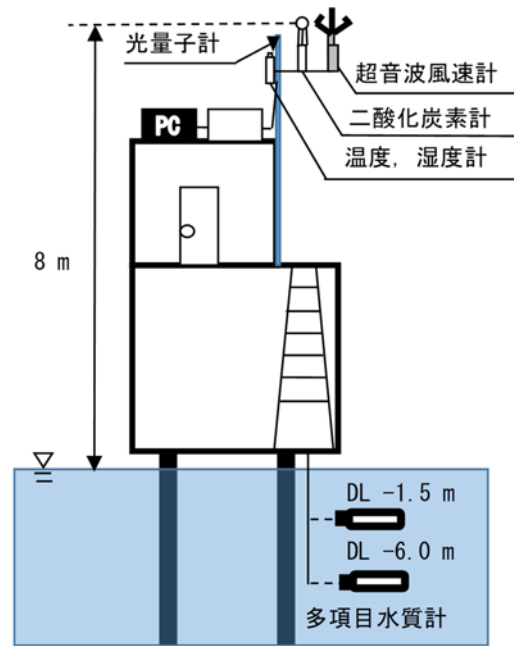


図-2 観測機器設置概要

ここで、 C_p :空気の定圧比熱、 l :水の気化熱、 E :水の蒸発量である。

$$H = C_p \rho_a \overline{w'T'} \quad (2)$$

$$IE = \overline{lw'\rho_v'} \quad (3)$$

なお、降雨の確認された期間のオープンパスCO₂/H₂Oアナライザーについて、雨の影響によってデータの異常値が確認されたため、解析から除去した。

3. 結果

(1) CO₂フラックスの時間変動

CO₂フラックスと各要因の時間変動を図-3、各小潮・大潮におけるCO₂フラックスと熱フラックスのまとめを表-1に示す。図-3より、CO₂フラックスは観測期間中において-0.90-0.67 mgCO₂/m²/sで変動しており、すべての小潮でCO₂の吸収、大潮の3回の内、2回においてはCO₂の放出を示した。大潮の吸収を示したCO₂フラックス(大潮3)は他の2回のCO₂フラックスと比べて2オーダー低く、±0 mgCO₂/m²/sに近かった(表-1)。小潮における昼間のCO₂フラックスは夜間の約2.8倍の吸収を示していた。

潜熱フラックスは-166-197 W/m²、顕熱フラックスは72-122 W/m²で変動していた。潜熱フラックスについて東京湾は水蒸気の放出源になっていたが¹²⁾、本水域では潜熱フラックスは正負の値を示していることから、放出源かつ吸収源であることが伺える。谷津干潟では顕熱フラックスは最大83 W/m²が観測されており¹³⁾、本水域においても大部分の時間帯で正の値を示していることから熱が放出されていた。全体的な潜熱・顕熱フラックスは大

表-1 各大潮・小潮におけるCO₂フラックスと熱フラックスのまとめ

潮	期間	CO ₂ flux (mg/m ² /s)	昼間CO ₂ flux (mg/m ² /s)	夜間CO ₂ flux (mg/m ² /s)	潜熱flux (W/m ²)	顕熱flux (W/m ²)	サンプル 数
小潮	1 9/22-24	-0.00600	-0.00905	-0.00214	10.4	3.64	93
	2 10/7-9	-0.0195	-0.0347	-0.0128	8.16	12.3	129
	3 10/22-24	-0.00884	0.0149	-0.0364	13.9	17.2	82
	4 11/6-8	-0.00473	-0.0248	0.0169	0.526	21.2	79
大潮	1 9/29-10/2	0.0139	0.00236	0.0274	7.22	8.53	139
	2 10/14-17	0.0228	0.0641	0.0114	1.99	20.5	121
	3 10/29-11/1	-0.000246	-0.00415	0.00305	12.5	24.9	107

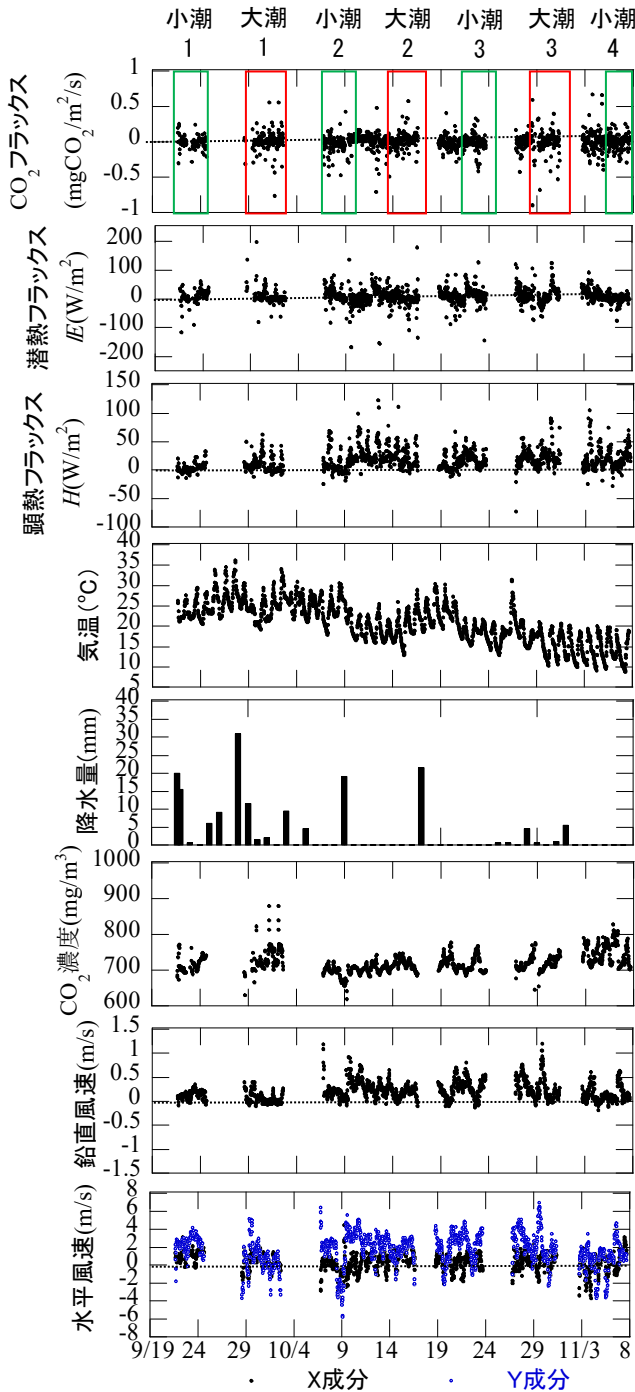


図-3 CO₂フラックスと各要因の時間変動

潮・小潮において正の値であったことから、今回の調査期間において本水域は水蒸気と熱を放出している場であった(表-1)。

本調査において、気温は8.7-36.2°Cで変動しており、観測期間中に大きく変動していた。また、1日あたり数回の10 mm以上の降水量が確認されており、降水後に気温は低下していることが伺える。CO₂濃度は619-879 mg/m³で変動しており、3次元風速の時間変動に関して、観測期間中の鉛直成分(上向きを正)は全体的に上向きの風であった。また、水平方向のX成分(東向きを正)は-3.70-4.46 m/s、Y成分(北向きを正)は-5.77-6.97 m/sであり、数回の北風が吹いていることが確認できたが、全体的に南西風の風が吹いていた。

(2) 水質の時間変動

水質の時間変動を図-4に示す。水温は表層において計測直後から9月下旬まで上昇しているが、それ以降の水温は徐々に低下していた。底層の水温は10月中旬まで概ね一定であり、それ以降は表層と同様の変動を示した。

塩分は表層において、10月中旬より若干低下しているが、概ね25 psu以上を示しており、底層においてほぼ大きな変化は認められず、30 psu以上を示した。pHは表層において8以上を示すことがあったが、7.5-8.0の間で時間変動しており、底層のpHは表層と同様の変動傾向であった。

表層のDOは10月上旬まで大きく変動しており、十分なDOがある状態と貧酸素状態を繰り返しながら、10月下旬からは徐々に増加傾向を示した。一方で、底層のDOは10月下旬まで無酸素状態が確認され、その後、表層のDOと同様に増加傾向を示した。

ORPは表層において概ね0 mV以上の正の値を示しており、酸化的环境であるが、底層において10月上旬まで常に負の値である還元状態を示していた。また、ORPは10月中旬まで酸化・還元状態を繰り返して、10月中旬以降のORPは正の値であることから酸化的环境であった。

表層の気温と水温の差は、気温に対して水温の時間変

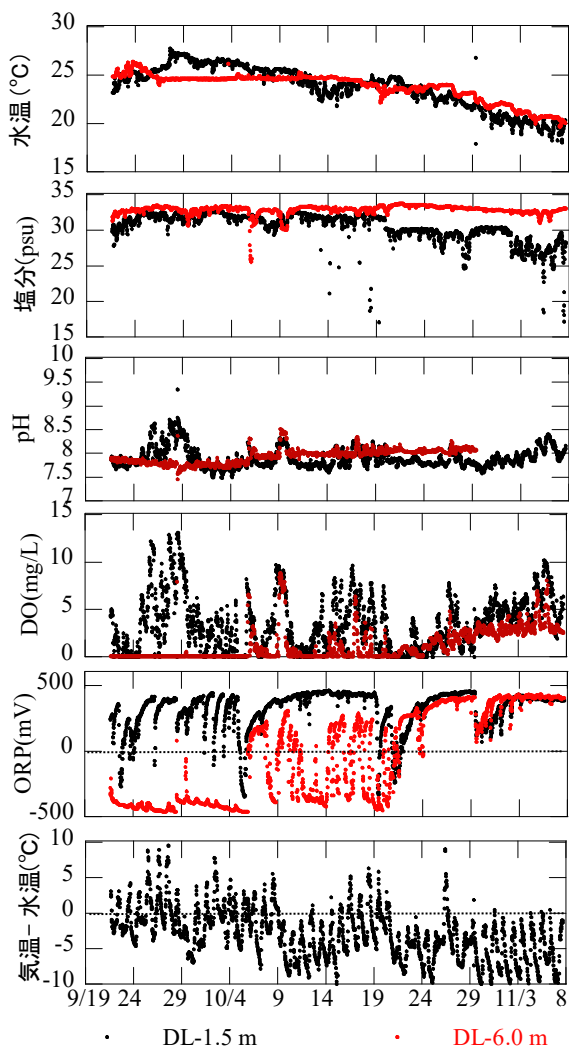


図-4 水質の時間変動

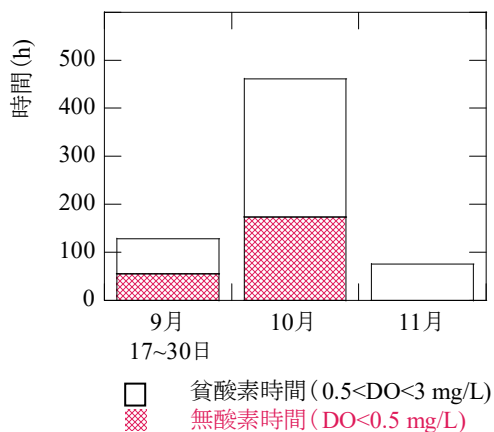


図-5 表層の貧酸素・無酸素状態

動は小さいこともあり、10月上旬まで水温より気温は高かった。しかしながら、それ以降の10月下旬まで気温と水温の差は正負の値を繰り返して、10月下旬以降の気温は水温より低かった。

表層の貧酸素・無酸素状態を図-5に示す。10月は全体

のうち288時間(39%)の貧酸素状態、174時間(23%)の無酸素状態であり、10月の62%が貧酸素・無酸素状態であった。一方で11月の表層では無酸素状態は確認されず、11月は全体で75時間(10%)が貧酸素状態であった。

(3) CO₂フラックスと水質の関係

CO₂フラックスと代表的な気象条件・表層水質の関係を図-6に示す。観測期間中のCO₂フラックスと各変数の関係性について、各変数はCO₂フラックスと線形的な関係性はなく、相関係数が0.5以上を示す関係性の強い変数はなかった(図-6)。特に、光量子、DOやpHがCO₂フラックスと線形的な関係性を示しているわけではなく、温度差(気温と水温の差)による物理的な要因もCO₂フラックスに強い影響を及ぼしていなかった。一方で、ORPが酸化的である時、CO₂フラックスは吸収・放出の大きな変動を示していたが、ORPが還元的である時、CO₂フラックスの変動は小さくなる特徴があった(図-6)。なお、各小潮、大潮ごとのCO₂フラックスと表層水質の間には、相関係数が0.5以上を示す関係性の強い変数はなかった。

4. 考察

(1) CO₂フラックスに及ぼすイベントの影響

本水域では青潮の発生がたびたび確認されているが¹⁴⁾、青潮の発生は突発的であることや発生時間が限られているなど、青潮の発生とその確認にはタイムラグがある。したがって、本研究では硫化水素の発生とCO₂フラックスの関係を把握することとした。

pHとORPの関係を図-7に示す。本水域において、pHとORPの関係から、硫化水素の発生が検討されており¹⁴⁾、本研究において、その関係性を適用すると底層で硫化水素が発生していることが推定できた(図-7)。また、pHとORPの時間変動から(図-4)、硫化水素が発生していた期間は9月中旬から10月上旬の期間であり、硫化水素が発生していたのは底層のみであった。一方で、観測期間中の表層において貧酸素・無酸素化は確認されるが(図-5)、硫化水素が発生していた期間のCO₂フラックスは吸収を示しており、底層の水質が表層のCO₂フラックスに直接的に寄与しているとは考えにくい。

また、DOとORPの時間変動より、10月下旬から表層と底層において同様の変動を示しているが(図-4)、塩分の時間変動より表層塩分は低下することで塩分成層が強化されていた。一方で、CO₂フラックスは吸収と放出を繰り返しながら、10月下旬以降の期間のCO₂フラックスは吸収を示していた。大阪湾湾奥の水面CO₂フラックスの季節変化について、成層期に底層において有機物分解等で発生・蓄積されたCO₂が成層の緩和に伴って放出されることが示されているが¹⁶⁾、本研究における大気間の

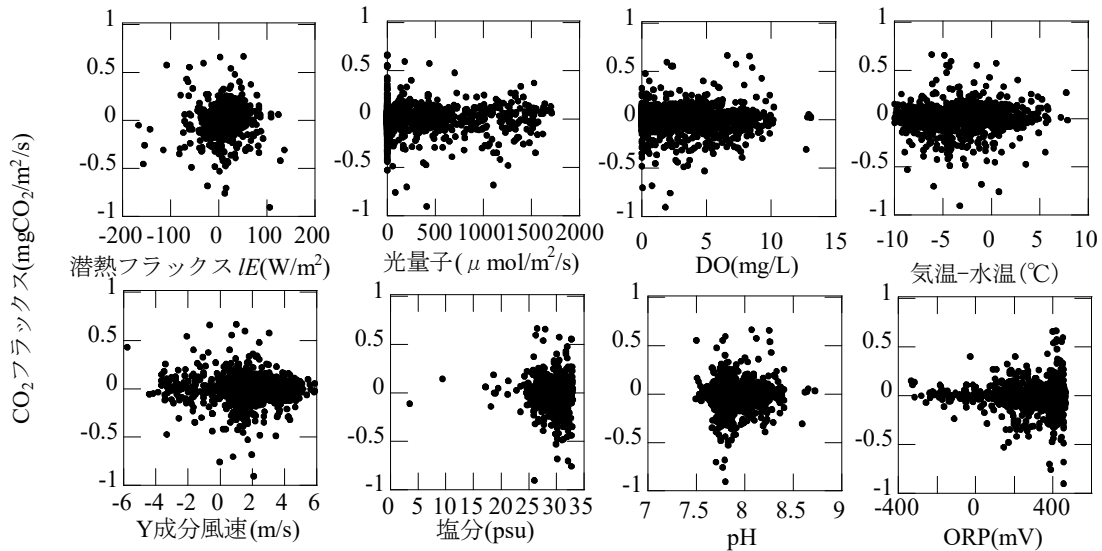


図-6 CO₂フラックスと気象条件・表層水質の関係

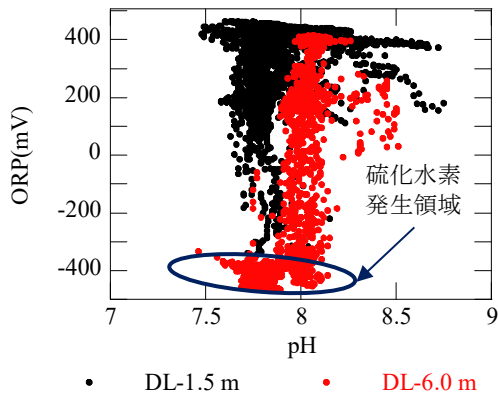


図-7 pHとORPの関係

CO₂フラックスの連続観測では、調査期間において成層の崩壊・解消はなく、上記のような現象を捉えることはできなかった。

(2) CO₂フラックスの変動特性

本水域におけるCO₂フラックスは-0.90-0.67 mgCO₂/m²/sで変動していた(図-3)のに対して、淀川湿地帯のCO₂フラックスは-0.90-0.30 mgCO₂/m²/s⁷⁾、晴天日の安定した天候下における干潟域では-0.3-0.50 mgCO₂/m²/s⁶⁾であることから、本水域のCO₂フラックスは湿地帯や干潟域より変動は大きいことが伺える。CO₂フラックスの変動要因として、湿地帯では気温と地温の差による物理的な要因とヨシの光合成⁷⁾、河口域では風速とpH¹⁶⁾、塩分¹⁷⁾がCO₂フラックスに寄与していることが示されているが、本水域においては各気象条件・水質項目とCO₂フラックスの間には関連性が認められなかった(図-6)。また、大阪湾湾奥において表層の二酸化炭素分圧とDOの時間変動¹⁸⁾お

よび季節変化¹⁵⁾の間には関連性が認められることが報告されており、水質項目が水面のCO₂フラックスに寄与していることが伺える。一方で、本水域における表層のDOと大気間のCO₂フラックスの間には関連性はなく、有機物の分解や生物の呼吸によってDOが消費されて、CO₂が発生するといった明確な関連性はみられなかった。

本研究では小潮と大潮に分けて、CO₂フラックスを算出すると小潮時のCO₂フラックスは吸収を示したのに対して、大潮時のCO₂フラックスは放出を示した(表-1)。ここで、大潮の方が小潮より移動する流量が大きいため、それに伴って水質の変動が大きく、潮汐によって水質が変化していることが考えられる。また、昼夜におけるCO₂フラックスの変動について、小潮では夜間よりも昼間のほうがCO₂フラックスは大きいことから(表-1)、CO₂の吸収には植物プランクトンが寄与していることが示唆される。したがって、大潮時は潮汐によって、水質の変動は大きいですが、小潮時は海水の交換率が低いため、昼間に植物プランクトンが安定的にCO₂を吸収していることが示唆される。これまでも水質から推定したCO₂フラックスでは植物プランクトンの生物活性が寄与していることが示唆されている⁴⁾。本研究では植物プランクトンの量や活性については考慮することができていないが、それらに伴う水質の応答およびCO₂フラックスの寄与の解明が今後の課題であると考えられる。

5. 結論

本研究は閉鎖性水域である大阪湾湾奥の御前浜を対象にCO₂フラックスの時間変動と水質の関係性を明らかにすることを目的に調査を行った。

大阪湾湾奥におけるCO₂フラックスは小潮で吸収傾向、大潮で放出傾向であり、貧酸素・無酸素状態、成層の緩和や硫化水素の発生といったイベントとの関連性は認められず、CO₂フラックスは時間変動していることが考えられた。

謝辞：本研究を進めるにあたって、諏訪禎男氏(チーム御前浜・香櫨園浜里浜づくり副代表)に観測機器の設置にご協力頂いた。また、井元大樹氏(現：クリアウォーター大阪株式会社)には調査、データ解析の協力を得た。本研究はJSPS科研費JP15K18146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) Kubo, A., Maeda, Y., Kanda, J.: A significant net sink for CO₂ in Tokyo Bay. *Scientific Reports*, 7, 44355, 2017.
- 2) 藤井智康, 藤原建紀, 中山浩一郎: 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, 2013.
- 3) 遠藤 徹, 嶋野 純平, 池永健二, 国分秀樹: DIC の空間分布調査による大阪湾, 播磨灘および英虞湾の CO₂ フラックスの評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 74, No.2, pp.1315-1320, 2018.
- 4) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 茂木博匡, 桑江朝比呂: アマモ場における大気-海水間 CO₂ フラックスの連続観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.1191-1195, 2014.
- 5) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 中山恵介, 桑江朝比呂: 都市型浅海域における海水中 CO₂ 分圧の日周変化, 土木学会論文集 B2 B2(海岸工学), Vol. 73, No.2, pp.1297-1301, 2017.
- 6) 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, 第53巻, pp.1136-1140, 2006.
- 7) 大谷壮介, 鞠川純平: 河口湿地帯の二酸化炭素フラックスの動態解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No.2, pp.1303-1308, 2017.
- 8) 所立樹, 細川真也, 三好英一, 門谷茂, 茅根創, 桑江朝比呂: 沿岸域のブルーカーボンと大気中 CO₂ の吸収との関連に関する現地調査と解析, 港湾空港技術研究所報告, 52(1), pp.3-49, 2013.
- 9) 中辻啓二, 入江政安, 西田修三, 湯浅楠勝: 大阪湾湾奥部閉鎖性海域における貧酸素水塊の現地調査, 水工学論文集, 第47巻, pp.1285-1290, 2003.
- 10) Webb, E.K., Pearman G.J., Leuning R.: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transport, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, pp.85-100, 1980.
- 11) タワーフラックス観測マニュアル編集委員会: タワーフラックス観測マニュアル, 森林総合研究所, pp.1-169, 2012.
- 12) 小田僚子, 森脇亮, 神田学: 東京湾におけるエネルギー・H₂O・CO₂フラックスの季節変化, 水工学論文集, 第50巻, pp.463-468, 2006.
- 13) 小田僚子, 伴内祐太, 番場勇介, 高岡大晃, 仁平学, 矢内栄二: シンチロメータを用いた都市干潟における夏季の顕熱フラックスの変動特性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No.2, pp.11012-11017, 2013.
- 14) 上月康則, 山中亮一, 津山拓郎, 松重摩耶, 大谷壮介, 森紗綾香: アサリの生息する極浅い水深帯での硫化水素濃度の推定とその影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.1146-1150, 2014.
- 15) 遠藤 徹, 嶋野 純平, 酒井大樹, 藤原隆一: 大阪湾奥部における pCO₂ の鉛直分布と大気海水間の CO₂ 交換の関係, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No.2, pp.1231-1231, 2017.
- 16) 大谷壮介, 川崎太輝, 大和天, 渡邊隆太郎: 河口干潟における大気-海水間の二酸化炭素フラックス, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.1321-1326, 2015.
- 17) 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, 6509-6544, 2013.
- 18) 藤井智康, 藤原建紀: 大阪湾奥部における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.11061-11065, 2012.

(2019.3.13 受付)

TEMPORAL VARIATION OF CARBON DIOXIDE FLUX ON OMAEHAMA IN INNER PART OF OSAKA BAY

Sosuke OTANI, Yasunori KOZUKI, Maya MATSUSHIGE and Ryoichi YAMANAKA

To reveal the relationship between temporal variation of CO₂ flux and water quality using eddy correlation method at Omaehama beach in the inner part of Osaka Bay was conducted in this study. During the observation period, the CO₂ flux fluctuated between -0.90 and 0.67 mgCO₂/m²/s. CO₂ was absorbed in all the neap tides, and was emitted in spring tides. In addition, CO₂ flux at daytime was absorbed about 2.8 times than that at night in the neap tide. There was no strong correlation CO₂ flux and the surface water quality. It was thought that CO₂ flux in the inner part of Osaka Bay fluctuated with neap and spring tide. Therefore, CO₂ flux was effected by tide, but not events such as hypoxia, stratification and occurrence of hydrogen sulfide.