

大阪湾・播磨灘における二酸化炭素の挙動と収支に関する研究（その2）

○藤井智康^{*1}, 小林志保^{*2}, 駒井幸雄^{*3}, 藤原建紀^{*4}
奈良教育大学・准教授^{*1}, 京都大学大学院・助教^{*2},
大阪工業大学・教授^{*3}, 京都大学大学院・教授^{*4}

1. はじめに

人為起源の栄養塩が豊富に流入する沿岸海域では、貧栄養の外海に比べて光合成が盛んであるため、大気 CO_2 の大きな吸収源となっている可能性がある。しかしながら日本の沿岸海域（東京湾・伊勢湾・大阪湾など）における CO_2 の挙動、吸収・放出量の情報はきわめて乏しい。短期変動の激しい沿岸海域における測定手法の確立と長期的な CO_2 の挙動については未だ課題として残されている。本研究では、これまでに明らかにされていない沿岸海域の CO_2 の短期変動（日から月スケール）を明らかにするために、大阪湾における海水中の CO_2 の挙動に関して長期連続観測を行い、当海域が大気 CO_2 の吸収源となっているのか放出源となっているのかを明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

2.1 連続観測

St. A（尼崎港）、St. B（新西宮ヨットハーバー；以下 YH）および St. C（須磨海釣り公園）において、海面下 1.0 m に多項目水質計 WQC-24（東亜 DKK 社製）およびメモリー式水温塩分計 ACT-HR（JFE アドバンテック社製）を設置し、10 分間隔で水温、塩分、pH および DO の連続観測を行った。調査期間は、St. A では 2011 年 8 月 11 日～10 月 5 日であり、St. B では 2011 年 10 月 5 日～12 月 5 日であり、St. C では、2011 年 8 月 18 日～11 月 25 日である。また、各地点では、約 1 週間毎に機器のメンテナンスおよびデータの読み取りを行った。このとき、直読式総合水質計 AAQ-177（JFE アドバンテック社製）を用いて水深 0.1 m 毎の水温、塩分、DO、pH の鉛直分布を測定した。

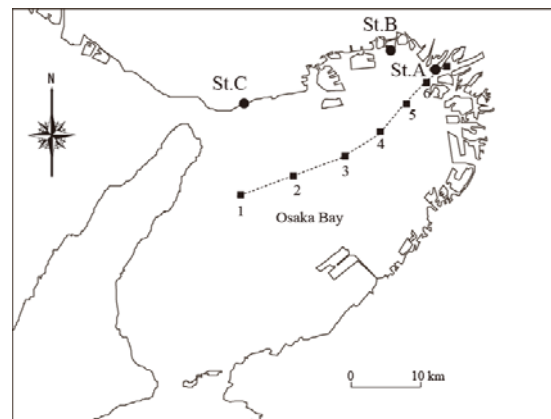


図-1 調査地点図。St. A: 尼崎港, St. B: 新西宮 YH, St. C: 須磨海釣り公園, ■は縦断観測測点を示す。

2.2 縦断観測

大阪湾西部から淀川河口に向かう測線上に 7 測点（図-1 の■）を設け、夏季（2011 年 7 月 12 日）および冬季（2011 年 12 月 7 日）に各測点において直読式総合水質計を用いて水深 0.1 m 毎の水温、塩分、pH、DO の鉛直分布を測定した。

2.3 海水中の CO₂ 系の測定

海水中の CO₂ 関連項目の測定は、全炭酸 (DIC), pCO₂ (海水の二酸化炭素分圧), pH, 全アルカリ度の 4 項目のうち、任意の 2 項目を測定すれば、その他の 2 項目は炭酸系の解離常数から計算で求められる。一方、沿岸海域では、pCO₂ の変動幅は外海に比べてはるかに大きく、変動周期も短いと見積られるものの、これらの変動の大きさは知られていない。そこで我々は、連続測定および自動記録ができることを測定項目の選択条件とし、全アルカリ度と pH を選択した。全アルカリ度は、塩分から十分な精度で求められることが田口ら (2009) によって示されている (海域ごとの経験式による)。pH はガラス電極による測定であり、相対的な変化はよく捉えるものの、JIS pH 標準液による校正では、かなりの大きさの誤差が生じる。そこで、観測ごとに現場において図-2 に示す容器とエアープンプを用いて、海水をエアレーションし、CO₂ 濃度が大気平衡の海水を作り、これによって $\Delta p\text{CO}_2 (= p\text{CO}_2 \text{ water} - p\text{CO}_2 \text{ air}) = 0$ の校正を行った。

2.4 エアレーションによる校正

現場で採水した海水を容器に移し、エアープンプを用いて海水をエアレーションした。エアレーション海水は、大気平衡となるまで直読式総合水質計 AAQ-177 により、一定時間間隔で水温、塩分、DO、pH を計測した (図-2)。エアレーション海水の pH の時間変化の例を図-3 に示す。採水時の pH が 7.77 であり、エアレーション開始後、徐々に上昇し、2 時間後 pH は 7.98 とほぼ一定となった。pH が一定の値を示した時を大気平衡とした。この海水により設置機器の pH の補正を行い、 $\Delta p\text{CO}_2 = 0$ の校正を行った。なお、DO が大気平衡になるのに要した時間は 1 分以下であった。

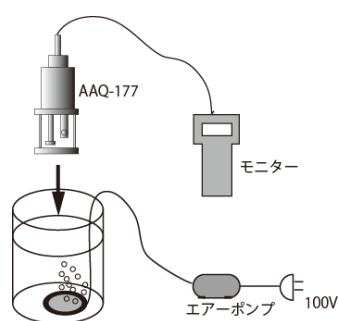


図-2 エアレーション実施状況

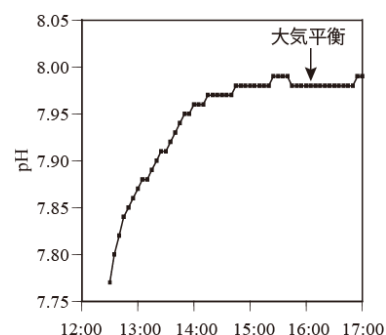


図-3 St. B(YH)におけるエアレーション海水の pH の時間変化 (2011年6月7日)

2.5 二酸化炭素の解析

本研究における CO₂ の解析については、実測した塩分から田口ら(2009)の大阪湾用の関係式によって求めた全アルカリ度および、実測した pH, 水温、塩分から CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) が提供する CO₂ SYS (Lewis・Wallace, 1998) を用いて pCO₂ を計算で求めた。

機器メンテナンス時に行ったエアレーション海水の pH と塩分より算出した pCO₂

の複数個の値を一次回帰し、一つの直線を求め、この直線からの偏差を $\Delta p\text{CO}_2$ とした(図-6中の■). この方法でエアレーションした海水の $\Delta p\text{CO}_2$ の標準偏差は、 $24.4 \mu\text{atm}$ であった. また同様にして求めた ΔDO の標準偏差は1.44%であった. ここで、 $\Delta p\text{CO}_2 (= p\text{CO}_2 \text{ water} - p\text{CO}_2 \text{ air})$ が正のとき CO_2 の海水から大気への放出、負のとき吸収とした.

3. 結果と考察

3.1 縦断観測による大阪湾の水塊構造

大阪湾における夏季および冬季の観測結果を図-4および図-5に示す. 2011年7月12日の夏季の大阪湾奥の海域(測点4~6)では強く成層しており、底層にDOが 2 mg l^{-1} 以下の貧酸素水塊が形成されていた. 測点3~6の表層では、 $\Delta p\text{CO}_2$ は $-300 \mu\text{atm}$ 以下であり、全ての測点の表層で $\Delta p\text{CO}_2$ は $0 \mu\text{atm}$ 以下となっていた. 一方、湾奥底層の貧酸素水塊においては、 $\Delta p\text{CO}_2$ が $+400 \mu\text{atm}$ 以上であり、 CO_2 は高濃度であった. 夏季の大阪湾は、表層全体が CO_2 吸収層($\Delta p\text{CO}_2 < 0$)になっており、その下の中層に、西部の強混合域でよく混合された大気平衡海水($\Delta p\text{CO}_2 \approx 0$)が進入している. この進入層の下は CO_2 を蓄積した低温の貧酸素水塊となっていた(図-4). また、2011年12月7日の冬季の大阪湾では、測点1~3までは成層は弱く、測点4~7の底層には、上層よりも高水温の海水があった.

この水塊は、成層期の水塊が残ったものであると考えられる. $\Delta p\text{CO}_2$ は測点1~5では $\Delta p\text{CO}_2 < 0$ であり、鉛直的にはほぼ一様となっていた. 一方で、測点6~7の表層では $\Delta p\text{CO}_2 > 0$ となっていた. つまり、冬季の大阪湾は、淀川河口部の狭い範囲で CO_2 を放出し、これより沖合の湾全体が CO_2 吸収域となっていた(図-5).

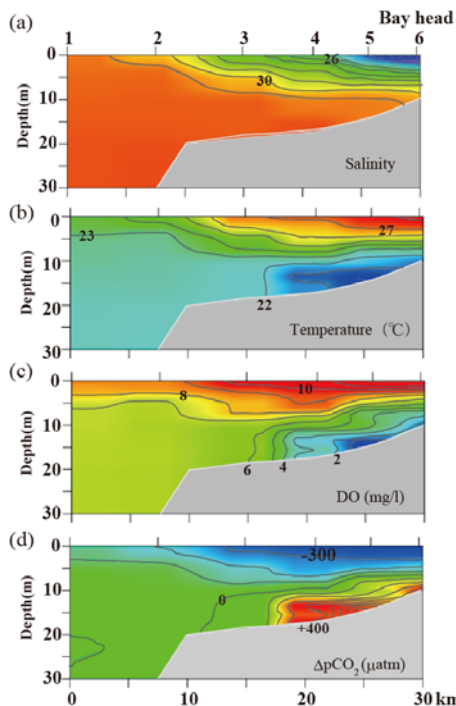


図-4 大阪湾における縦断観測結果

(2011年7月12日)

(a) 塩分, (b) 水温, (c) DO, (d) $\Delta p\text{CO}_2$

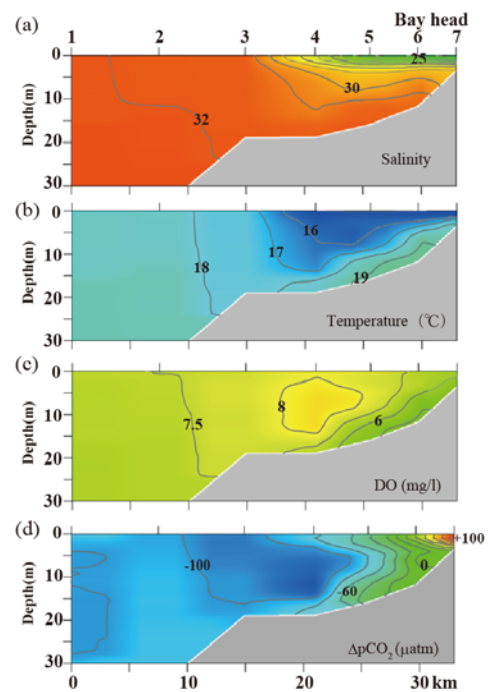


図-5 大阪湾における縦断観測結果

(2011年12月7日)

(a) 塩分, (b) 水温, (c) DO, (d) $\Delta p\text{CO}_2$

3.2 連続観測による CO₂ の変動

連続観測期間中の大阪港波浪観測塔の風向・風速と、St. B (YH) の海面下 1.0 m における DO, $\Delta p\text{CO}_2$ の変動を図-6 に示す。

成層期は、一時的に $\Delta p\text{CO}_2 > 0$ となり大気への CO₂ 放出となるものの、 $\Delta p\text{CO}_2 < 0$ の期間が長く、大気 CO₂ の吸収となっている。11 月中旬に $\Delta p\text{CO}_2$ が大きく上昇し、 $\Delta p\text{CO}_2 > 0$ となり、大気への CO₂ 放出となった。その後、11 月下旬以降はほぼ大気平衡 ($\Delta p\text{CO}_2 \approx 0$) となっていた。調査期間中の $\Delta p\text{CO}_2$ の日変動幅は、最大 447.2 μatm 、最小 25.4 μatm 、平均 172.6 μatm であった。DO が 100%以上となっている期間は、 $\Delta p\text{CO}_2 < 0$ であり、海水への CO₂ 吸収となっていた。一方、DO が 100%以下となっている期間では、 $\Delta p\text{CO}_2 > 0$ であり、大気への CO₂ 放出となっていた。また、北東風が吹くと表層の DO が低下するとともに表層の $\Delta p\text{CO}_2$ が上昇して 0 μatm 以上となり、大気への CO₂ の放出となる (図-6)。

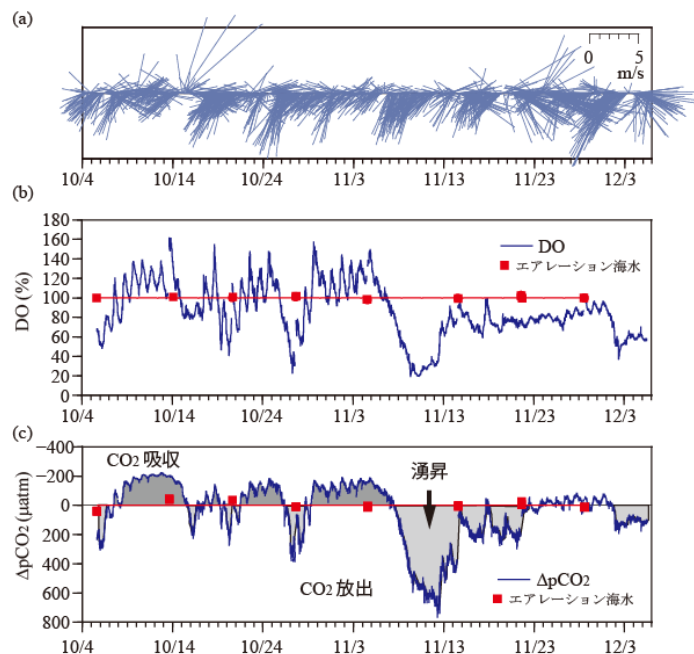


図-6 大阪港波浪観測塔の(a) 風向・風速と St. B (YH) の海面下 1.0 m の (b) DO, (c) $\Delta p\text{CO}_2$ (2011 年 10 月 5 日～12 月 5 日)

($\Delta p\text{CO}_2$ の縦軸は反転している)

5. 結論

本研究において用いた CO₂ の測定手法によって、pH, DO, 塩分の連続測定ができ、計算によって CO₂ の値を連続的に求めることが可能であることが示された。CO₂ の放出と吸収は、日周期変動をしており、平均値を求めるためには連続測定が欠かせない。本研究では、8 月以降の夏季から冬季までの調査であったが、今後は、この方法を用いて春季から夏季の調査を実施し、沿岸域の CO₂ の季節的な変動特性を明らかにするとともに、CO₂ フラックスを算出していきたい。