

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

○藤井智康^{*1}，駒井幸雄^{*2}，藤原建紀^{*3}

奈良教育大学・准教授^{*1}，大阪工業大学・教授^{*2}，京都大学大学院・教授^{*3}

1. はじめに

港内と沖合では有機物分解・酸素消費・二酸化炭素生成過程が異なることが明らかになってきた．また底層の酸素消費と二酸化炭素生成は連動しており，貧酸素・無酸素水塊中には二酸化炭素が高濃度で蓄積されて，海水の pH が低下し酸性化を起こしていることもわかってきた．そして，風による吹送にともない躍層面が昇降を繰り返し，底層に形成された貧酸素・無酸素水塊が動き，ときには水面まで湧昇することも観測された．これらのことから，貧酸素化が問題となる沿岸海域の二酸化炭素(CO₂)の吸収・放出は短期的に変動していることが推察される．本研究では，光合成・有機物分解速度が大きく，短期的変動が大きい沿岸海域において，CO₂系の測定手法の開発と，大阪湾・播磨灘において海面のCO₂分圧(pCO₂)の連続測定を行い，貧酸素水塊の発生・消滅に連動して変動するpCO₂の挙動を調べた．

2. 研究方法

2.1 連続観測

図-1に示すように，混合域に位置する St. 1 (垂水港)では，2010年9月22日～29日の間，海面下0.5 mに多項目水質計と水温・塩分計を設置し，10分間隔で水温，塩分，DO，pHの連続観測を行った．強閉鎖性海域に位置する St. 2 (新西宮ヨットハーバー：以下 YH と称す)では，2010年10月7日～28日および12月1日～16日の間，St. 1と同様な連続観測を行った．また，上記の連続観測期間中には，1週間間隔で設置機器の掃除および点検を行うと同時に，St. 1～3において水温，塩分，DO，pHの鉛直分布を水深0.5 m間隔で測定した．

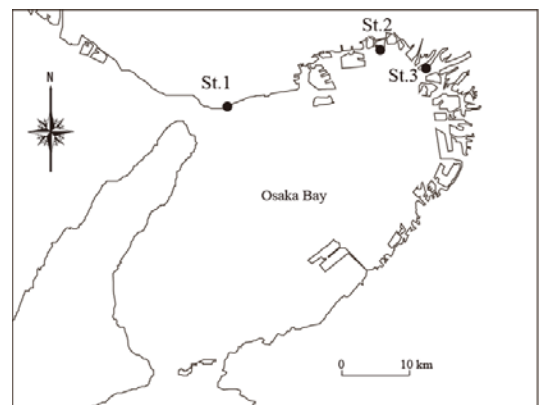


図-1 調査地点図． St. 1: 垂水港，
St. 2: 新西宮 YH, St. 3: 尼崎港

2.2 定点・定期調査

しらふじ丸 ((独)水産技術総合センター瀬戸内海水産研究所)に乗船し，2010年7月23日～28日，11月1日～5日，および2011年1月20日～25日の計3回実施した．調査地点は，図-2に示す瀬戸内海の大阪湾から伊予灘にかけての海域と広島湾の計30地点である．表層はポリバケツで，底層(海底上1 m)はバンドーン採

水器により採水し、CTD による水温、塩分、DO、Chl の鉛直分布の測定をした。試料は同日中に GF/C（孔径約 1.2 μm ）を使って吸引ろ過し、ろ過海水の pH を船内で測定した。ろ過海水の全アルカリ度は、7 月については同日中に船内で、11 月と 1 月は冷蔵保存して持ち帰り実験室で測定した。また、生海水を持ち帰りサリノメータで測定した。

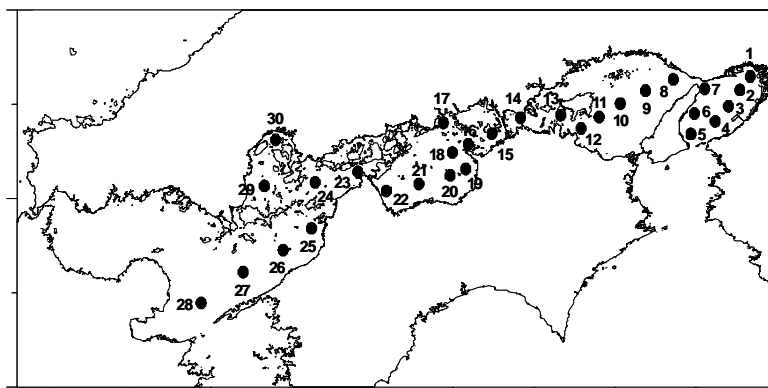


図-2 調査地点図.

2.3 二酸化炭素の解析

海水中の炭酸系の各濃度を求めるためには、 pCO_2 、DIC、pH、全アルカリ度の 4 項目のうち、任意の 2 項目を測定すれば他の 2 項目は計算で求めることができる。本研究では全アルカリ度と pH から求める方法を用いた。CDIAC が提供する CO_2SYS (Lewis and Wallace, 1998)を用いて計算した。全アルカリ度については、田口ら(2009)による全アルカリ度と塩分との関係式（大阪湾用）を用いて算出した。

3. 結果と考察

3.1 DO・pH・ pCO_2 の短期変動

図-3 に示すように、混合域の St. 1 の DO の変動は、飽和溶存酸素濃度以下の 5 ~6 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の間で変動し、日中に高く、夜間に低くなる日周期変動がみられた。pH の変動は 8.0~8.1 であり、表面海水の pCO_2 はほぼ大気平衡状態であった。また、図-4 に示す強閉鎖性海域の St. 2 の DO の変動は、日周期変動が顕著にみられた。夜間の DO の低下にともない、pH が低下し、 pCO_2 は上昇していた。DO が過飽和となっている 10 月 20 日頃までは、pH は 8.4~8.8 の変動であり、 pCO_2 は 100 μatm 程度と低く、 CO_2 の吸収となっていた。一方で、海面付近で 3.0 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の貧酸素水が確認された 10 月 24 日以降は、pH が 8.0 以下に低下し、 pCO_2 も徐々に 380 μatm 以上に上昇し、10 月 28 日には 700 μatm に達していた。日射量の日周期変動にともなう光合成強度の変動により、DO および pCO_2 は日周期変動をしていた。 ΔpCO_2 の日周期変動幅/平均値は、DO の日周期変動幅 (ΔDO) のその 1/4 と小さい。

図-5 に溶存無機態炭素 (DIC) と DO の時系列変化を示す。pH、全アルカリ度より計算で求めた DIC は DO と高い相関 ($R^2 = 0.97$) を持って変動していた。昼間に DO 増加・DIC 減少、夜間に DO 減少・DIC 増加の日周変化が 12 月上旬に明瞭に見られる。このように、一次生産量の大きな沿岸海域では、DIC と DO が逆位相で連動して変動している。

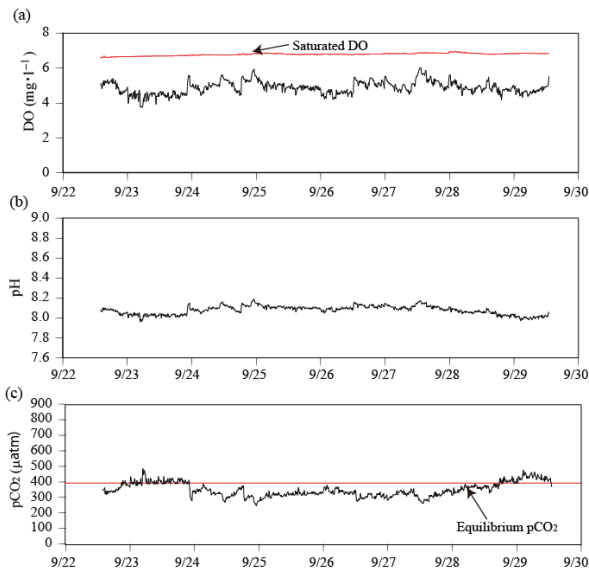


図-3 St. 1 (垂水港) の海面下 0.5 m における DO, pH, pCO₂ の変動 (2010 年 9 月 22 日～29 日)

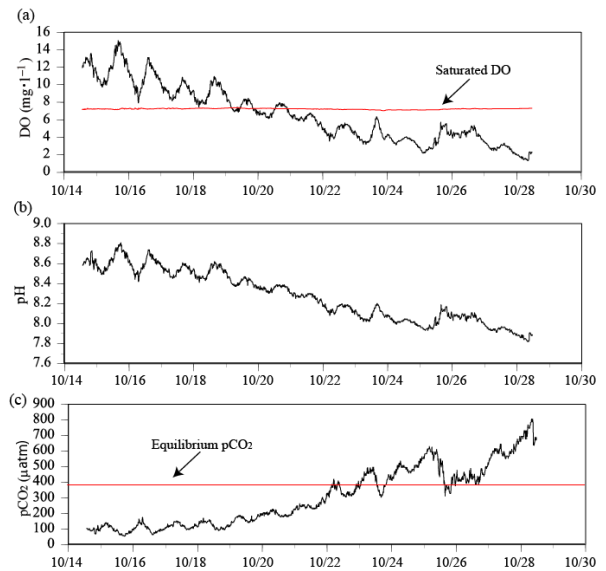


図-4 St. 2(YH)の海面下 0.5 m における DO, pH, pCO₂ の変動 (2010 年 10 月 14 日～28 日)

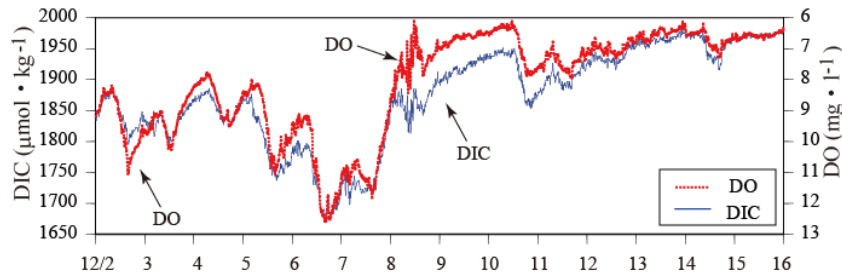


図-5 St. 2(YH)における DIC と DO の変動 (2010 年 12 月 2 日～16 日)

3.2 DO と pH および, pCO₂ との関係

図-6 に示すように, St.2 では, DO の低下とともに pH が低下し, pCO₂ が上昇していた. また, pCO₂ の上昇とともに, pH が低下していた. つまり, 貧酸素水塊中では有機物の呼吸分解によって水中の酸素が消費され, 生成された CO₂ が蓄積し, 海水が低 pH になっていた. St. 2 の場合, 大気平衡分圧の 380 µatm 以下となる条件は, DO は 5 mg · l⁻¹ 以上で, pH は 8.1 以上であった.

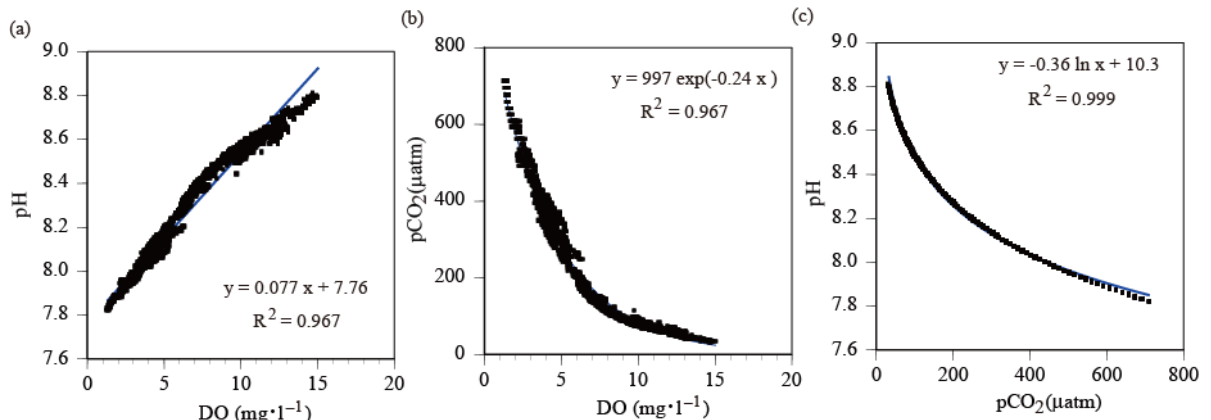


図-6 St. 2(YH)における(a)DO と pH, (b)DO と pCO₂ および(c) pCO₂ と pH

3.3 瀬戸内海の pH とアルカリ度の空間分布

図-7 に示すように、夏季（7月）の瀬戸内海では、灘部（播磨灘，燧灘）の表層と底層の pH の値を比較すると底層で低い。灘部では、夏季では成層形成によって大阪湾と同様に底層に CO_2 が蓄えられ、pH の低下が見られたと推察される。一方、海峡部（備讃瀬戸）では、他の測点と比較して pH は表層で低下し、底層で上昇し、表層と底層の差はみられなかった。したがって、播磨灘及び燧灘の底層で蓄えられた CO_2 が海峡部の備讃瀬戸で放出していることが伺える。また、大阪湾最奥部の St. 1 と広島湾の St. 30 の pH は表層で高く底層で低い。表層は植物プランクトンによる光合成によって CO_2 が消費され、底層は有機物分解に伴う CO_2 生成・蓄積によるものと推察される。表層の全アルカリ度も他の海域に比べて低い。これは流入する淀川および太田川の影響を反映したものである。

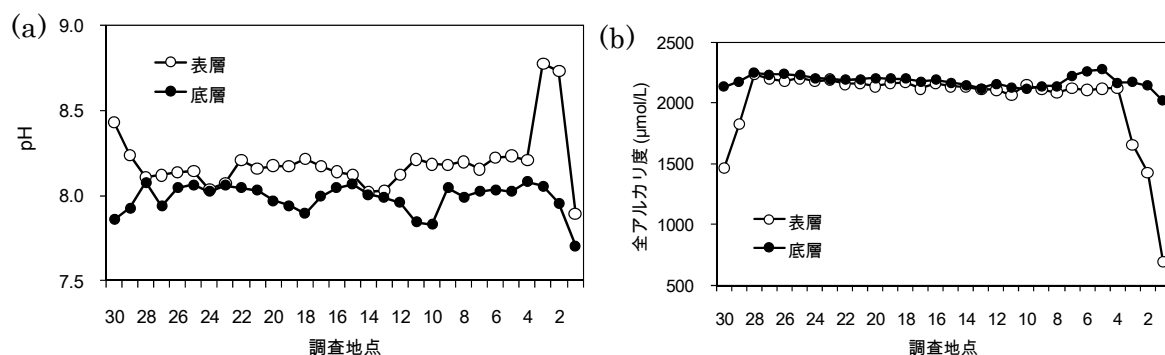


図-7 瀬戸内海縦断調査における表層と底層における(a)pH , (b)全アルカリ度(2010年7月).

4. 結論

大阪湾沿岸部では、成層期の底層では有機物の呼吸分解で水中の O_2 が消費され、貧酸素水塊が形成されると同時に、 CO_2 が蓄積されていた。秋季から冬季の成層消滅期には、底層の高 CO_2 水が表面まで達し、大気への CO_2 放出が起きていた。沿岸海域では pCO_2 の時間変動および鉛直的な変化も大きい。このため沿岸海域では、炭酸系の時間的・空間的な連続測定が欠かせない。海水中の炭酸系の各濃度を求めるためには、 pCO_2 、DIC、pH、全アルカリ度の4項目のうち、任意の2項目を測定すれば他の2項目は計算で求めることができる。本研究では全アルカリ度とpHから求める方法を用いた。炭酸系4項目のうち、係留系による連続測定やCTDによる鉛直測定ができるのは、pHと塩分（これから全アルカリ度が算定できる）だけであり、沿岸海域での炭酸系の測定ではpHと全アルカリ度の組合せが適していると考えられる。pHはイオン電極による測定であり、JIS-K-0101に基づく(pH_{NBS} スケール)。 pH_{NBS} と pH_{total} の違いを補正するため、観測時の海水をエアレーションし、 pCO_2 の大気平衡状態($\Delta\text{pCO}_2 = 0$)を作り、この状態のpHを測ることによってpHスケールの違いによる補正值を求めている。

現在の pCO_2 やDICの高精度直接測定に比べ、pH電極によるpH測定は精度が劣るものの、変動幅の大きな沿岸海域では、かなりの相対精度で炭酸系の各項目の値を求めることができる。