

# 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3）

藤井智康

奈良教育大学 教育学部 准教授

## 1. はじめに

陸域から人為起源の栄養塩や有機物が豊富に流入する沿岸海域は、一次生産（光合成）が盛んであるため、大きな  $\text{CO}_2$  吸収量が見込める。また、沿岸海域は、河川が流入し、富栄養で一次生産が大きい岸近くの海域、比較的 low 栄養な沖合の海域など、様々な環境を有しており、 $\text{CO}_2$  の放出・吸収量（フラックス）は場所的あるいは時間的に異なっている。昨年までの研究では、時間的・空間的な変動が大きい沿岸海域の  $\text{CO}_2$  測定手法について開発を進めてきた。

本研究では、我々が開発してきた  $\text{CO}_2$  測定手法を用いて、大阪湾東部の  $\text{CO}_2$  フラックスを現地調査によって明らかにし、当海域が大気  $\text{CO}_2$  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。

## 2. 研究方法

### 2.1 連続観測

2012年6月29日～9月19日、および11月1日～21日まで、新西宮ヨットハーバー（以下 YH；図1の St. A）の、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。

### 2.2 大阪湾東部観測

大阪湾における面的な  $\text{CO}_2$  フラックスを明らかにするために、第五管区海上保安本部海洋情報部が毎月実施している大阪湾環境保全調査における 19 地点（図1の●印）の水温、塩分、pH および DO のデータを解析した。解析期間は、2011年7月～2013年3月である。

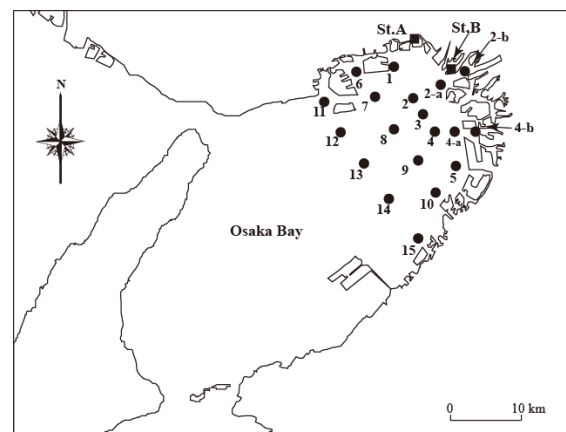


図1 調査地点図。 St. A：新西宮 YH，  
St. B：尼崎，大阪湾環境保全調査地点（●）。

### 2.3 海水中の $\text{CO}_2$ 系の測定

海水中の  $\text{CO}_2$  系の連続観測は、pH と全アルカリ度から計算で求める方法を用いた（藤井・藤原，2012）。計測機器による連続観測が可能な項目は、pH と塩分であり、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示されている（海域ごとの計算式による）（田口ら，2009）。

計算式は CDIAAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) が提供する CO<sub>2</sub>SYS (Lewis & Wallace, 1998) を用いた。

現地観測では、現場海水をエアレーションすることにより、水中の CO<sub>2</sub> 濃度が、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度と平衡状態になった海水を作り、この海水の  $\Delta p\text{CO}_2$  ( $= p\text{CO}_2 \text{ sea} - p\text{CO}_2 \text{ air}$ ) を 0 とし、pH と塩分から求められる  $p\text{CO}_2$  を補正した(藤井・藤原, 2012)。

## 2.4 CO<sub>2</sub>放出・吸収量の算定

海面の CO<sub>2</sub> 吸収量 (以下、CO<sub>2</sub> フラックス) は、大気と表面海水の CO<sub>2</sub> 分圧差とガス交換速度によって求められる。(1)式に CO<sub>2</sub> フラックス算出式を示す。フラックス  $F$  が正のときが吸収、負のときが放出である。

$$F = -k \cdot S \cdot (p\text{CO}_2 \text{ sea} - p\text{CO}_2 \text{ air}) = -k \cdot S \cdot \Delta p\text{CO}_2 \quad (1)$$

ここで、 $F$ : CO<sub>2</sub> フラックス (mol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)、 $k$ : ガス交換速度 (m h<sup>-1</sup>)、 $S$ : 海水中の CO<sub>2</sub> 溶解度 (mol m<sup>-3</sup> μatm<sup>-1</sup>)、 $\Delta p\text{CO}_2$ : 表面海水と大気の CO<sub>2</sub> 分圧差 (μatm) である。なお、(1)式より求めた CO<sub>2</sub> フラックスを炭素量 (g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) に換算して解析した。

ガス交換速度については、Waninkhof (1992) により風速の 2 乗に比例する次式を用いて算出した。大阪湾東部観測では、長期間の平均風速データを用いる (2)式を、連続観測では、短期的 (瞬間値) な風速データを用いる (3)式により算出した。なお、風向・風速データは、大阪湾東部海域の海上風の代表として、気象庁の神戸空港出張所のデータを用いた。

$$k = 0.39 u_{av}^2 (S_c / 660)^{-0.5} \quad (2)$$

$$k = 0.31 u^2 (S_c / 660)^{-0.5} \quad (3)$$

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

ここで、 $k$ : ガス交換速度 (cm h<sup>-1</sup>)、 $u_{av}$ : 平均風速 (m s<sup>-1</sup>)、 $u$ : 風速 (m s<sup>-1</sup>)、 $S_c$ : 海水中の CO<sub>2</sub> のシュミット数、 $t$ : 摂氏水温 (°C) である。

## 3. 結果と考察

### 3.1 大阪湾奥部のCO<sub>2</sub>吸収フラックスの時間変動

連続観測期間中の神戸空港の北向風速、水温、DO および CO<sub>2</sub> 吸収フラックスの時間変動を図 2 および図 3 に示す。

2012年6月29日～9月19日のYHでの海面のCO<sub>2</sub>フラックスの全期間平均値は、0.11 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>の吸収であった。この期間の吸収フラックスの最大値は2.14 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>、放出フラックスの最大値は0.45 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった。吸収時間が放出時間を大きく上回り、成層期～成層消滅期までは平均するとCO<sub>2</sub>吸収となっていた(図2)。

一方、成層消滅期にあたる2012年11月1日～21日のCO<sub>2</sub>フラックスの全期間平均値は、0.04 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>の放出であった(図3)。この期間の吸収フラックスの最大値は0.24 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>、放出フラックスの最大値は0.47 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった。CO<sub>2</sub>放出時間が長く、吸収フラックスも成層期と比較して小さい。

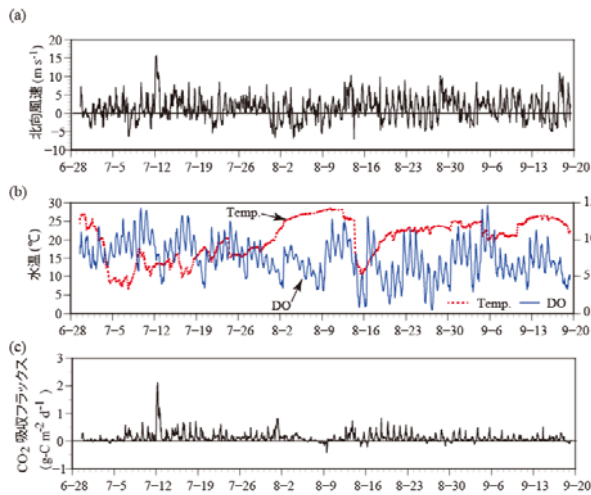


図 2 St. A (YH) における(a) 北向風速, (b) 水温, DO, (c) CO<sub>2</sub> 吸収フラックス (2012年6月28日~9月19日).

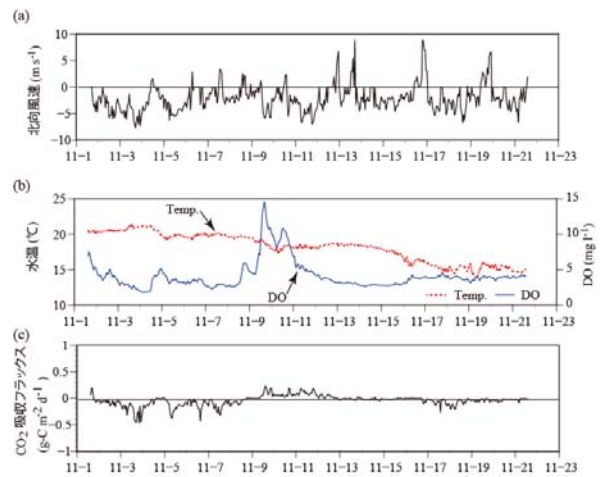


図 3 St. A (YH) における(a) 北向風速, (b) 水温, DO, (c) CO<sub>2</sub> 吸収フラックス (2012年11月1日~21日).

### 3.2 大阪湾東部のCO<sub>2</sub>吸収フラックスの月別・地点別の变化

2011年7月~2013年3月の、月ごとの全測点平均値を図4に示す。

大阪湾東部海域のCO<sub>2</sub>フラックスの全測点、全期間の平均値は、0.10 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>のCO<sub>2</sub>吸収であった。

水温が上昇する2012年4月~7月にかけてDOは上昇し、7月に最大となっていた。DO上昇期には、CO<sub>2</sub>吸収フラックスは0.1 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>程度のほぼ一定の吸収であった。年間を通して1月が他の月と比較してCO<sub>2</sub>吸収フラックスが大きかった。水温が低い時期に、CO<sub>2</sub>吸収フラックスが大きくなっており、水温低下によるCO<sub>2</sub>溶解度の増大が関係していると推察される。また、2011年および2012年ともに9月が最もCO<sub>2</sub>吸収フラックスが小さく、ほぼ0 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった。秋季の9月は、成層期に形成された底層の貧酸素・高CO<sub>2</sub>水が北東風の卓越にともない海面に湧昇し、湾奥部の港内海域に放出域があるため、他の月と比べてCO<sub>2</sub>吸収フラックスが小さいことを示している。

次に、測点ごとの全期間平均値を図5に

示す。場所的な違いについて河口域(St. 2-a, 2-b, 4-a, 4-b)と沖合海域を比較すると、淀川河口(St. 2-a, 2-b)では、DO飽和度が小さいにもかかわらず、CO<sub>2</sub>吸収は大きい。一方、大和川河口(St. 4-a, 4-b)では、DO飽和度は沖合海域と同程度に大

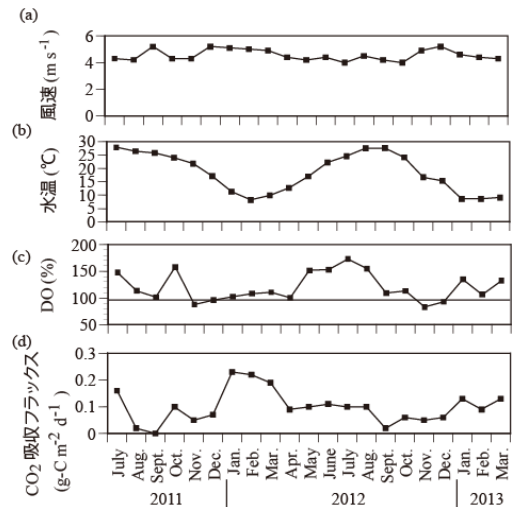


図 4 大阪湾東部観測の月ごとの値 (2011年7月~2013年3月). (a) 神戸空港月平均風速および (b) 表層水温, (c) 表層 DO, (d) CO<sub>2</sub> 吸収フラックスの全測点平均値.

大きく、CO<sub>2</sub>吸収も大きい。沖合海域の中でも河口域から遠い、西の測線 (St. 11～15) では、高塩分 (塩分 30 程度) で、DO 飽和度は小さいにもかかわらず、CO<sub>2</sub>吸収は特に小さくはない。

次に、2012 年 8 月と 10 月の地点別 CO<sub>2</sub> 吸収フラックスを図 6 に示す。河口域では夏と秋で CO<sub>2</sub> 吸収フラックスの値の符号が逆転しており、夏は CO<sub>2</sub> 吸収、秋は CO<sub>2</sub> 放出となっている。一方、沖合海域では、大きさに違いはあるものの、夏も秋も CO<sub>2</sub> 吸収となっていた。最も西の測線 (St. 11～15) の沖合海域では、秋季の CO<sub>2</sub> 吸収フラックスの方が、夏の CO<sub>2</sub> 吸収フラックスよりも大きくなっている。

2012 年 1 月と 2013 年 1 月の地点別 CO<sub>2</sub> 吸収フラックスを図 7 に示す。両年の冬季を比較すると、湾奥部の港内海域ではほぼ同程度の CO<sub>2</sub> 吸収であったが、沖合海域では大きく異なっていた。

#### 4. 結論

大阪湾東部海域の湾奥部での連続観測や第五管区海上保安本部海洋情報部の大阪湾環境保全調査データより、CO<sub>2</sub> フラックスの解析を行った。

YH での全期間平均値は、6～9 月では 0.11 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> の CO<sub>2</sub> 吸収、11 月では、0.04 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> の CO<sub>2</sub> 放出であった。大阪湾東部では、淀川河口部や港内で一時的な放出がみられるものの、ほぼ全域で CO<sub>2</sub> 吸収となっていた。また、神戸港側の CO<sub>2</sub> 吸収フラックスが、大阪港側と比較して大きく、明瞭な場所的な違いが見られた。全測点、全期間の平均値は、0.10 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> の CO<sub>2</sub> 吸収であった。

この値は、太平洋全体の年平均 CO<sub>2</sub> 吸収フラックス 0.013 g-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> の約 10 分の 1 であった。また、大阪湾東部の年間の CO<sub>2</sub> 吸収量は、51 kt-CO<sub>2</sub> y<sup>-1</sup> (面積 : 387 km<sup>2</sup>) となり、神戸市域の大気への CO<sub>2</sub> 総排出量 10,681 kt-CO<sub>2</sub> y<sup>-1</sup> (2008 年度) の 0.4% に相当する値となった。

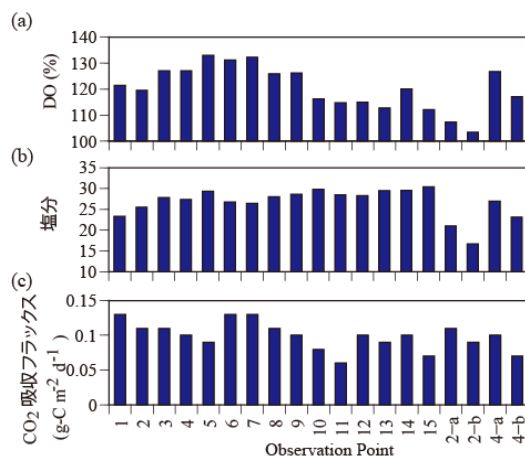


図 5 大阪湾東部の地点別の全期間平均値 (2011 年 7 月～2013 年 3 月)。

(a) DO, (b) 塩分, (c) CO<sub>2</sub> 吸収フラックス。

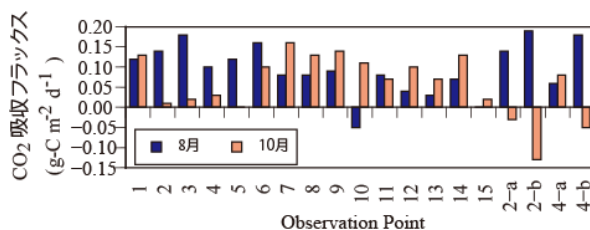


図 6 大阪湾東部の地点別の 2012 年 8 月および 10 月の CO<sub>2</sub> 吸収フラックス。

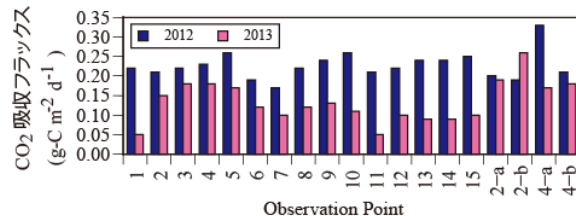


図 7 大阪湾東部の地点別の 2012 年 1 月および 2013 年 1 月の CO<sub>2</sub> 吸収フラックス。