

# 水質連続モニタリングによる大和川河口域の 大気-水間 CO<sub>2</sub> 交換に関する研究

## A STUDY ON AIR-WATER CO<sub>2</sub> EXCHANGE AT THE YAMATO RIVER MOUTH BY CONTINUOUS WATER QUALITY MONITORING

環境水域工学研究室 今吉 紘頌  
Laboratory of Estuarine and Coastal Ecosystem Engineering Hironobu IMAYOSHI

本研究は大阪府を流れる大和川河口において、大気-水間の CO<sub>2</sub> フラックスとその影響要因を明らかにすることを目的に水質連続モニタリング調査を行った。大和川において上流部と沿岸部には塩分と全アルカリ度の間に別々の相関が得られ、河口部においては両者の混合型を得た。冬季を除き水面から大気へと CO<sub>2</sub> は放出されており、CO<sub>2</sub> フラックスについて年間の CO<sub>2</sub> 排出量は  $3.4 \pm 0.4 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{h}$  と推定することができた。

Continuous water quality monitoring was conducted to clarify the air-water CO<sub>2</sub> exchange and the influencing factors at the Yamato River mouth in Osaka. Separate correlations were found between salinity and total alkalinity in the upstream and coastal areas of the Yamato River, and a mixture of both was used at the mouth. Except in the case of winter, the air-water CO<sub>2</sub> exchange was positive throughout the year. The air-water CO<sub>2</sub> exchange was presumed to be  $3.4 \pm 0.4 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{h}$ .

### 1. 序論

産業革命以降、化石燃料の大量消費などによる CO<sub>2</sub> をはじめとした温室効果ガスの増加により、地球温暖化が進行した。それにより気温・海水温の上昇、氷河の減少、また干ばつなど様々な問題が発生している。また温室効果ガスの中で最も地球温暖化に影響を及ぼすと言われているものが CO<sub>2</sub> である。大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は著しく増加しており、直近 30 年間で約 60ppm 増加している。そこで現在、各国が COP3 などを基に削減目標を設定しており、その目標を達成するために種々の対策・施策の検討がなされている。また IPCC 第 5 次報告書によると、1750～2011 年の間に  $160 \pm 90 \text{ PgC}$  の CO<sub>2</sub> が陸域の生態系に、 $155 \pm 30 \text{ PgC}$  の CO<sub>2</sub> が海洋に吸収されていると報告されている<sup>1)</sup>。さらに、全海洋面積全体の 1% に満たない沿岸海域の海底で蓄積される炭素の量は海洋全体の 50% 以上であると報告されている<sup>2)</sup>。これまで大気-水間の CO<sub>2</sub> フラックスに関する研究として、沿岸域では大阪湾沿岸域<sup>3)</sup> や北海道風蓮湖<sup>4)</sup> を対象としたもの、河川域では岡山県旭川<sup>5)</sup> やジョージア州アルタマハ川<sup>6)</sup> を対象としたものがあるものの、河川から栄養塩類などが豊富に流入し、都市近郊に隣接した場所を対象とした事例は少ない。

大和川は背後に大都市を抱える水域は、陸域からの影響を強く受けるとともに、生物活性が高いため、炭素循環が活発な場である。また、河口域は外洋に比べると人為的な管理が行い易いという特長もあり、河口域を適切に管理することで、炭素の物質循環の過程に

おいて河口域への吸収・固定が期待できる。そこで、本研究では、海洋からも河川からも大きく影響を大きく受ける大和川河口域を対象に、1 年を通して大気水域間の水質の連続モニタリングを行い、河川河口域における CO<sub>2</sub> フラックス値とその水質との関係について把握することを目的とする。

### 2. 調査概要と実験方法

#### 2.1 調査地点

大和川は奈良県と大阪府南部を流れる全長 68km の 1 級河川である。大和川は笠置山地から始まり、佐保川、曾我川、竜田川などの奈良盆地の水を集め、奈良県と大阪府の境にある亀の瀬の溪谷部を経て、大阪平野に入る。奈良盆地を囲む山地や奈良盆地の地盤は火成岩からなり、奈良盆地の水はすべて亀の瀬に集まる。この後、石川や西除川等を合わせ、大阪湾に注いでいる。流域面積は 1070km<sup>2</sup> であり、奈良県、大阪府の 41 市町村に約 200 万人もの人が生活している。また、2000 年度の下水处理普及率は大阪府で 60%、奈良県では 62% と低くなっており、2000 年度の全国 1 級河川の BOD75% 値においてワースト 1 位を記録している。しかしその後 2010 年度の下水处理普及率は大阪府で 88%、奈良県では 78% と普及率の向上がみられる。本研究では図 1 に示す大和川河口域、堺観測所において連続モニタリングを行い、図 2 に示した地点で定期採水を行った。

## 2.2 調査時期・項目・分析方法

調査時期は2018年4月17日～5月1日, 7月11日～7月25日, 10月10日～10月25日, 2019年1月16日～1月31日とし, 対象地に機器を設置し1時間ごとの連続モニタリングで水質, 大気質を測定した。

連続モニタリングの調査項目は, 水温, 電気伝導度 (EC), 照度, 水位, pH, 大気CO<sub>2</sub>分圧 (pCO<sub>2</sub>(air)), 気温とした。水温, ECは電気伝導度計 (HOBO U24 電気伝導率ロガー Onset 社), 照度は照度計 (HOBO MX-2202 水中用照度計測データロガー), 水位は水位計 (HOBO U20 ウォーターレベルロガー Onset 社), pHはpH計 (SPS-14 海水用pHセンサー kimoto 社), 大気CO<sub>2</sub>濃度, 気温は大気CO<sub>2</sub>計 (HOBO MX-1102 温度湿度CO<sub>2</sub>ロガー Onset 社) を用いて測定した。

またモニタリング期間中に複数回現地河川水の表層水を採水し, 実験室に持ち帰り全アルカリ度 (TA), EC, DIC の分析を行った。TA の測定方法は, JIS K 0400-15-10:1998 に準拠し, 試水を 0.01M の塩酸で滴定し, 試水が pH=4.8 となるまでの滴定量を求めた<sup>7)</sup>。

## 3 河川水中の各種パラメータ算出方法

### 3.1 河川水中の炭酸化学理論

本研究では大気水域間のCO<sub>2</sub>フラックスを把握するため, 河川水中のCO<sub>2</sub>分圧 (pCO<sub>2</sub>(aq)) が必要となる。しかしpCO<sub>2</sub>(aq)は機器で直接測定することは費用, 技術面共に困難である。そのため他の測定項目から間接的に求める必要がある。水中においてpCO<sub>2</sub>(aq), TA, pH, DICはそのうち2つが分かれば他の2つは求めることができるという特性を持つ。そこで本研究ではpH, TAを連続モニタリングすることで, 次の式(1)からpCO<sub>2</sub>(aq)を求めた<sup>8)</sup>。

$$[pCO_2(aq)] = [CO_2^*]/K_0 \quad (1)$$

$$K_0 = \exp\{9345.17/T' - 60.2409 + 23.3585 \times \ln(T'/100) - S \times (0.023517 - 0.023656 \times (T'/100) + 0.0047036 \times (T'/100)^2)\} \quad (2)$$

ここで, K<sub>0</sub>はCO<sub>2</sub>の溶解度であり, Weissの式を用いた。またCO<sub>2</sub>\*は水溶液中のCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の濃度を合わせたものであり, 式(3)より求められる。

$$[CO_2^*] = TA \times [H^+]^2 / K_1 \times ([H^+] + 2K_2) \quad (3)$$

ここで, TA: 全アルカリ度 (mmol/l), H<sup>+</sup>: 水素イオン濃度。K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>は解離定数である。

また解離定数は, 塩分と水温から求められ, 塩分はECから以下の式(4)を用いて求めた<sup>9)</sup>。

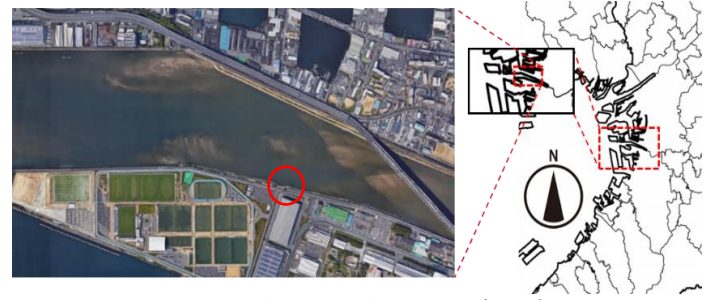


図1 大和川の位置と調査地点

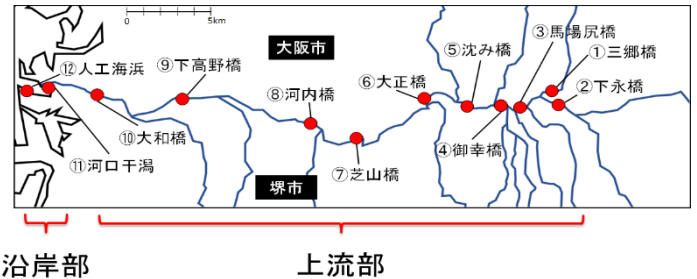


図2 上流部の採水地点

表1 実用塩分定数

	0	1	2	3	4	5
a	0.008	-0.1692	25.3851	14.0941	-7.0261	2.7081
b	0.0005	-0.0056	-0.0066	-0.0375	0.0636	-0.0144
c	0.67661	0.020056	0.00011	-7E-7	1E-9	-
d	-	0.03426	0.000446	0.4215	-0.00311	-
e	-	2.07E-05	-6.4E-10	3.99E-15	-	-

$$S = \sum_{f=0}^5 a_f R_t^{f/2} + \frac{t-15}{1+0.0162(t-15)} \sum_{f=0}^5 b_f R_t^{f/2} \quad (4)$$

$$R_t = \frac{R}{R_p r_t} \quad (5)$$

$$R = \frac{C}{42.914} \quad (6)$$

$$R_p = 1 + \frac{P(e_1 + e_2 P + e_3 P^2)}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + (d_3 + d_4 t) R} \quad (7)$$

$$r_t = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 \quad (8)$$

ここで, c: EC (mS/cm), P: 圧力 (dbar), t: 水温 (°C) である。定数 a, b, c, d は表1と対応している。

### 3.2 塩分とTA

pCO<sub>2</sub>(aq)を求めるため, TAを用いたが, 連続モニタリングでは直接求めることはできないため, 間接的に求める必要がある。TAと塩分には相関があり, 伊勢湾, 大阪湾, 東京湾などにおいて報告がされている<sup>10)</sup>。しかし湾によって相関係数には相違があり, 大和川においても特有のものが存在すると考えられる。そこで大和川の複数地点において採水し, TAと塩分を分析, その相関を求めることで大和川特有の相関係数を算出し, 塩分からTAを算出した。

### 3.3 CO<sub>2</sub>フラックスの推定式

大気-水域間におけるCO<sub>2</sub>フラックスの推定にはバ

ルク法を用い、次に示す式(9)～(14)から算出した(11)～(14)。

$$F_{CO_2} = 158.4 \times K \cdot (pCO_2(aq) - pCO_2(air)) \quad (9)$$

$$K = 1/360 \times k \times L \quad (10)$$

$$k = \alpha \times U_{10}^2 \times (S_c/S_{c20})^{-1/2} \quad (11)$$

$$S_c = 2073.1 - 125.62T + 3.6276T^2 - 0.043219T^3 \quad (12)$$

$$\ln L = -58.0931 + 90.5069T'^{-1} + 22.294 \ln T' + (0.027766 - 0.025888T' + 0.0050578T'^2) \times S \quad (13)$$

$$T' = (T + 273.15)/100 \quad (14)$$

ここで、 $F_{CO_2}$ :  $CO_2$ フラックス ( $mgCO_2/m^2/hour$ )、 $K$ : ガス交換係数 ( $\mu mol\_C/m^2/sec/\mu atm$ )、 $k$ : ガス交換速度 ( $cm/hour$ )、 $L$ : 水域の  $CO_2$ 溶解度 ( $mol/L/atm$ )、 $\alpha$ : 経験定数、 $U_{10}$ : 水面から高度 10m における風速 ( $m/s$ )、 $S_c$ : 水中における  $CO_2$ のシュミット数、 $S_{c20}$ : 水温  $20^\circ C$  の水中における  $CO_2$ のシュミット数、 $T$ : 水温 ( $^\circ C$ )、である。また、式(9)中の 158.4、式(10)中の 1/360 は単位換算のためのものである。式(11)中の  $\alpha$  は経験的に得られた次元を持つ係数である。長期的な平均風速を用いるときは  $\alpha=0.39$ 、短期的(瞬間値)な平均風速を用いるときは  $\alpha=0.31$  とする。 $F_{CO_2}$  が負の値となるときの大気から水域への吸収を、正の値となるときの水域から大気への放出を示す。また風速は気象庁の観測データを使用した。

風速は大気の状態(気圧の大小関係、気圧の配置)に左右されるため、 $CO_2$ フラックスの 5 つの変数(水温、塩分、 $pCO_2(air)$ 、 $pCO_2(aq)$ 、風速)の中では、短期的に最も変動が激しいデータ項目である。そのため、風速の影響が大きく反映される  $CO_2$ フラックスの結果だけでは、一概にその水域の  $CO_2$ 吸排出特性を評価することは適当ではないといえる。そこで、その代替として風速の影響を考慮しないフラックス値、 $CO_2$ 吸排出ポテンシャルを次に示す式(15)の様に定義した。

$$\varphi = pCO_2(aq) - pCO_2(air) \quad (15)$$

ここで、 $\varphi$ :  $CO_2$ 吸排出ポテンシャル( $\mu atm$ )である。ここでも  $\varphi$  が負の値となるときの大気から水域への吸収を、正の値となるときの水域から大気への放出を示す。

## 4. 結果及び考察

### 4.1 塩分と TA の関係

季節別に色分けした塩分と TA の散布図を図 2-A に示した。また上流部で採水したものと河口部で採水したものを各図 2-B、図 2-C に示した。

表 2 に全流域、沿岸部、上流部の TA を塩分で回帰分析した時の回帰係数 a と切片 b、回帰式の標準誤差

SE、両者の相関係数 R、サンプル数 n、p 値を示した。

大和川全域において相関係数 R は 0.433 とあまり高くない値を示したが、河口部、上流部を別々に見た場合どちらの相関係数も 0.78 程度と高い値を示し、塩分と TA の散布図は直線を示した。また河口部における塩分オーダーは 0.0~20.0psu であったが、淡水である上流部の塩分オーダーは 0.0~0.3psu と非常に小さい値を示した。

これらから大和川において塩分を用いて TA を算出する場合、大和川全域における相関ではなく調査地点の水が沿岸域に近い汽水もしくは上流に近い淡水であるかどうかといった状態を鑑みて決定する必要があると考えられた。

本研究では大和川の河口部を対象としているが、ここは河川において潮汐による塩分変化が最も大きい場所であったため、図 2-D に示したハイブリッド型を用いることにした。またここには別に報告されている大阪湾、東京湾、伊勢湾の散布図も参考にプロットし

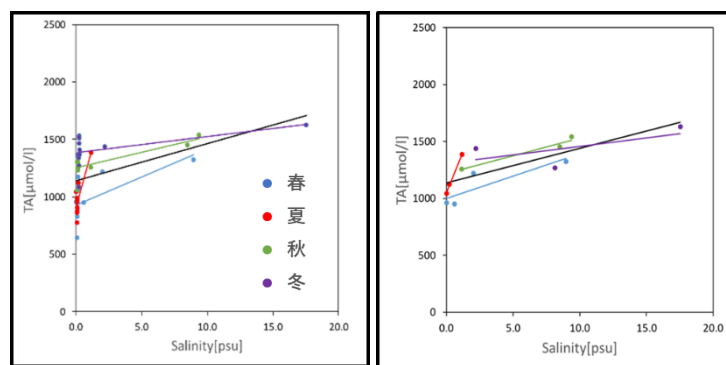


図 2-A

図 2-B

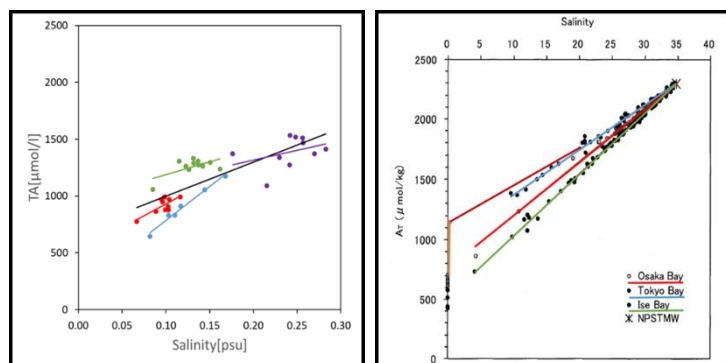


図 2-C

図 2-D

図 2 TA と塩分の散布図

A: 大和川全域 B: 沿岸部

C: 上流部 D: ハイブリッド

表 2 塩分に対する TA の回帰分析

	R	n	a	b	SE	p
全域	0.433	51	32.26	1142	32	6.46E-36
沿岸	0.779	13	31.57	1141	55	1.44E-09
上流	0.783	38	2990.40	700	64	5.67E-13

である。

これらから大和川河口における TA-EC の関係は式 (15) に示す回帰式を用いた。

0.15 > Sal の場合

$$y = 2990.4x + 700$$

0.15 ≤ Sal の場合

$$y = 31.57x + 1141 \quad (15)$$

ここで、 $y$  : TA (mmol/l),  $x$  : 塩分 (psu) である。場合分けの 0.15 は両直線の交点の塩分とした。

## 4.2 水・大気質の変化

図 3 に水・大気質の日変化を季節ごとに示した。各日程は春季：4月 22-23 日，夏季：7月 19-20 日，秋季：10月 20-21 日，冬季：1月 28-29 日である。また冬季  $p\text{CO}_2(\text{air})$  と夏季光度については機器紛失により欠測となっており、 $p\text{CO}_2(\text{air})$  については  $400\mu\text{atm}$  とした。

pH は年間 7.0~9.0 で変動し、夏季の昼間に大きな上昇が見られた。表層塩分は 0.0~24.0psu と変動していたが、主に冬季において多くの塩分流入が見られた。河底塩分は 0.0~24.1psu であり、こちらは潮汐による特徴が見られた。特に冬季にはより多量の海水流入が考えられた。また秋季はレンジが 0.7psu 程度と著しく低く、観測期間中海水が常に滞留していたと考えられる。気温は -0.6~38.1°C で変動しており、季節ごとのレンジはほぼ一定だった。表層水温は 2.5~33.6°C で変動しており、そのレンジは気温と比べ小さかった。日照時間は 4.9~12.0h/day であり夏季が 12h と最も長く、光合成能が高い季節であると考えられた。 $p\text{CO}_2(\text{air})$  は 188.5~757.6 $\mu\text{atm}$  であり、昼間に光合成による減少が見られたがそのレンジは最大で  $400\mu\text{atm}$  程度と  $p\text{CO}_2(\text{aq})$

と比べ相当に小さかった。 $p\text{CO}_2(\text{aq})$  は 21.0~3629.9 $\mu\text{atm}$  であり、夏季と冬季に低下傾向にあった。夏季は  $p\text{CO}_2(\text{air})$  と同様に光合成の影響であるが、冬季は水温の低下による  $\text{CO}_2$  溶解度の増加<sup>15)</sup> が原因であると考えられた。春季秋季では  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  が  $p\text{CO}_2(\text{air})$  を上回っており、 $\text{CO}_2$  は大気へと放出されていたことを示していた。夏季の昼間、冬季においては  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  が  $p\text{CO}_2(\text{air})$  を下回っており、 $\text{CO}_2$  が水中へ吸収されていたことを示している。また  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  の平均値は秋季が一番高く、これは海洋の成層崩壊により高  $\text{CO}_2$  濃度の海水が流入したためであると考えられる。淀川の河口域における  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  の最大値は 4968  $\mu\text{atm}$  と報告されており<sup>16)</sup>、本研究で得られた  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  の最大値は淀川と比べ低かった。

$p\text{CO}_2(\text{aq})$  と水質間の関係を図 4 に示す。冬季を除く  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  と水温との間には負の相関が見られた。特に夏季で高い相関がみられることから、水温上昇の昼間に光合成による  $\text{CO}_2$  の消費が要因だと考えられる。秋季、冬季の  $p\text{CO}_2(\text{aq})$  と塩分との間には弱い相関が見られた。これは春季、夏季と比べ、秋季は成層崩壊による高  $\text{CO}_2$  濃度海水の流入、冬季は低  $\text{CO}_2$  濃度海水の流入のためであると考えられた。また年間を通して pH との間には強い相関が見られた。

## 4.3 $\text{CO}_2$ フラックス、吸排出ポテンシャル時間変動

$\text{CO}_2$  フラックスと吸排出ポテンシャルの日変動を図 5 に、その平均値を図 6 に示した。河口部の  $\text{CO}_2$  フラックスは春季、秋季に水中から大気へと  $\text{CO}_2$  を放出し、冬季には吸収、夏季にはほぼ一定の季節変動特性があることが分かった。また年間では  $3.4 \pm 0.4 \text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{h}$  の放出を示した。しかし、昼間と比べ夜間は風速が弱まる傾向にあり、(年平均昼：1.8m/s，夜：1.1m/s) 昼

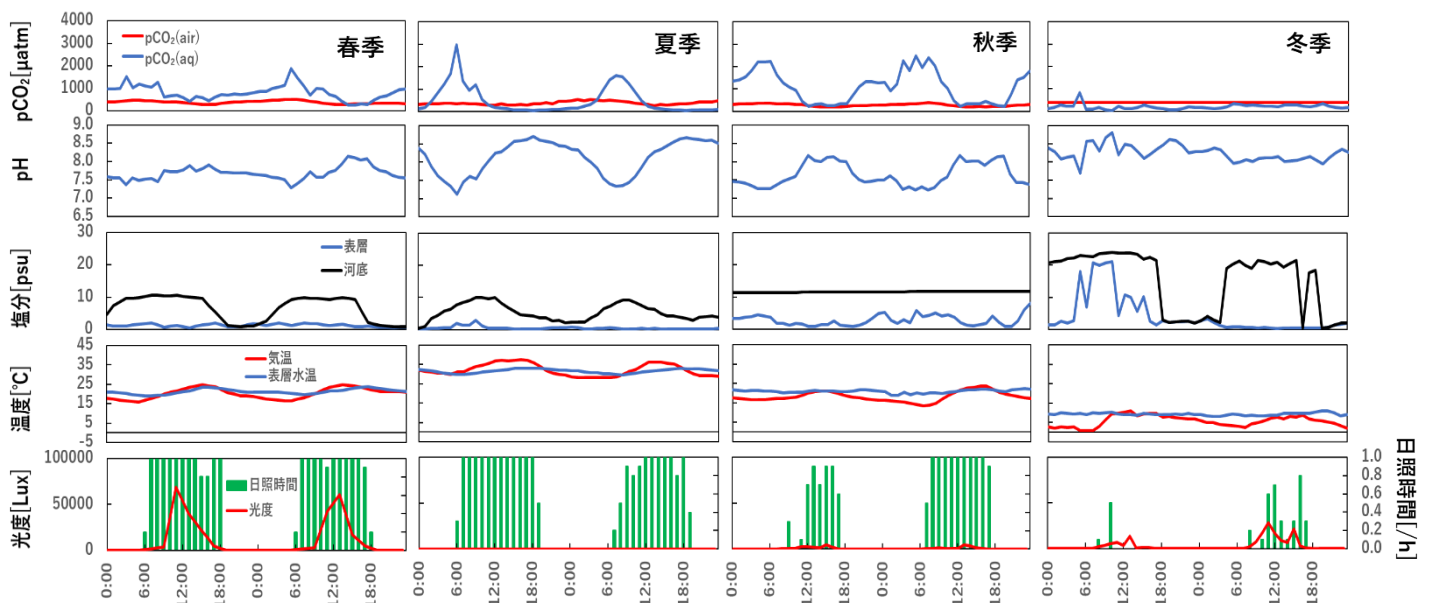


図 3 水・大気質の日変化

間のフラックスは夜間よりも大きく評価される恐れがあるため、ポテンシャル値による評価が必要となる。

河口部の吸排出ポテンシャルは春季、秋季ではフラックス値とほぼ同様の割合を示したが、夏季ではポテンシャル値の寄与率がフラックス値の 0.3% を大きく上回る 11.1% であり、逆に冬季の寄与率は 19.8% から 8.5% と減少していた。年間平均は  $413.1 \pm 18.9 \mu\text{atm}$  であり、特に夏季においてフラックス値では放出量を過小評価していることが認められた。そのためバルク法を用いてフラックスを算出する際、計測器の位置や精度についてもう一度吟味する必要がある。

またフラックス値、ポテンシャル値どちらも放出量最大の季節は秋季であり、他の季節に対して秋季の放出量が大きかった理由は秋季の河口域に成層消滅期の海水が滞留しており、河口域の水質が高  $\text{pCO}_2(\text{aq})$  となっていたためだと考えられる。

図 7 に吸排出ポテンシャルの決定木を示す。pH がポテンシャルに寄与している主要な要因であり、他の説明変数は選択されなかった。ただし冬季の吸排出ポテンシャルの決定木では塩分と水温も説明変数とし

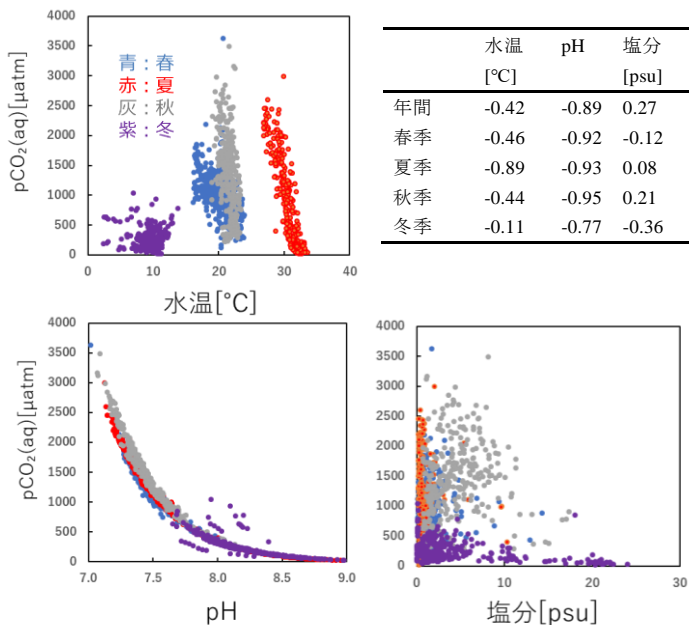


図 4  $\text{pCO}_2(\text{aq})$  と水質の関係

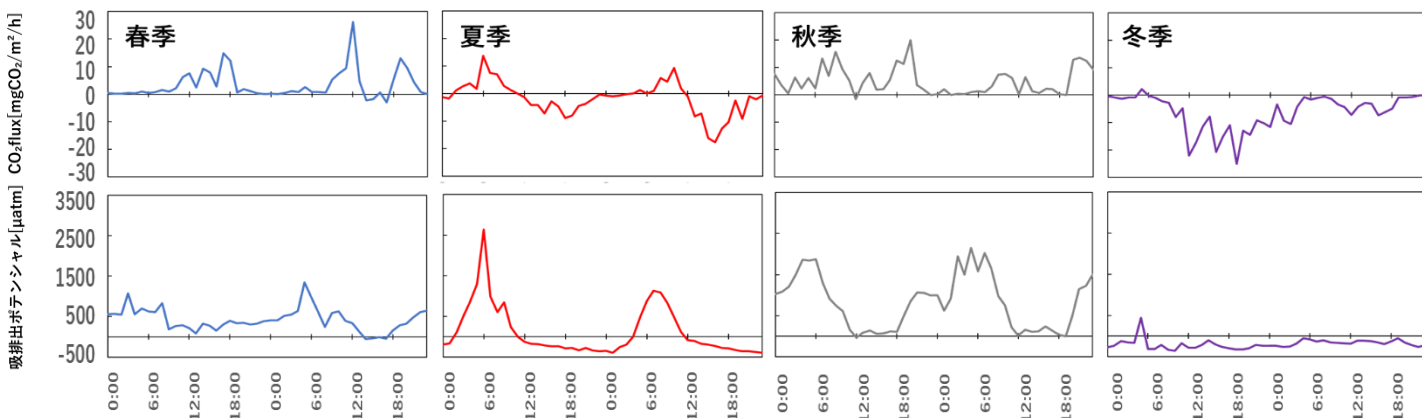


図 5 吸排出ポテンシャルと  $\text{CO}_2$  flux の日変化

て採用されており、他季節と違った環境であることが考えられた。

河川、海域等で報告されている大気-水間の  $\text{CO}_2$  フラックスとの比較を表 3 に示した。淀川河口干潟やヘイスティングス川河口のような河川支配の河口では  $\text{CO}_2$  フラックスは放出傾向であり、本研究でも春季、夏季、秋季では同様に放出の結果を示した。また、大阪湾湾奥部や風蓮湖、ウォリス湖などの海洋支配の水域では  $\text{CO}_2$  フラックスが吸収傾向にあり、本研究の冬季においても同様の結果を示した。

### 5. 考察

本研究において大和川河口部での  $\text{CO}_2$  フラックスは春季、夏季、秋季では放出、冬季と夏季の一部では吸収されており、その要因として主に pH が影響していることが明らかになった。これまでに、沿岸域の大気-水間の  $\text{CO}_2$  フラックスが計測されている事例として、遠藤ら<sup>17)</sup>は 24 時間調査において水温の影響は小さいと報告しているが、本研究では冬季においてはポテンシャル値から水温との間には関連性が認められ

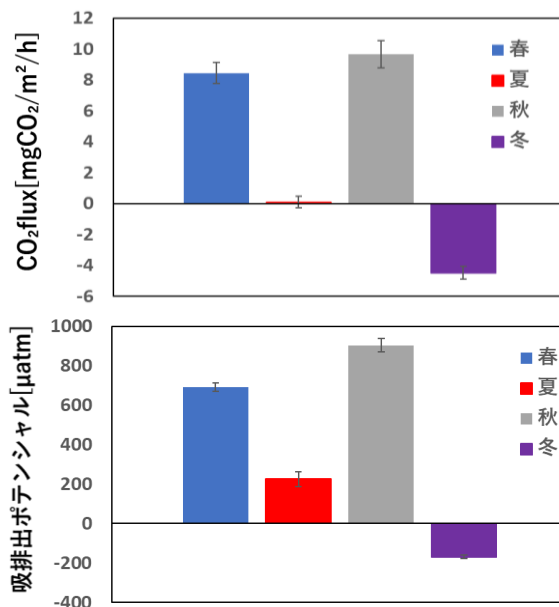


図 6 吸排出ポテンシャルと  $\text{CO}_2$  flux の平均値

た。また pH について大和川の遠里小野橋における 2017 年の年間の全測定値の pH の範囲は 7.8 ~ 8.5 であり、大阪湾における pH は 7.9 ~ 8.7 であったが、本研究の大和川河口における年間の pH は 7.0 ~ 9.0 と大和川上流及び海域よりも変動は大きく、その平均は 7.8 と低い値を示していた。大阪湾においては pH が高く、DIC と DO に関連性が認められていることから、植物プランクトンの光合成による CO<sub>2</sub> の吸収が示されている<sup>3)</sup>。本研究では河口の DIC の連続モニタリングは行っていないが、ポテンシャル値は pH の影響を受けていることから、pH の変動は生物学的な要因によるものと推察される。しかし河口域における DIC 変動の生物学的要因は光合成のほか硝化も存在する。特に放出期においては河口域での硝化による pH の低下が放出の原因である可能性が示されており<sup>19)</sup>、どの要因がポテンシャル値にどの程度寄与しているかは不明である。しかしながら河口域の DO や DIC、栄養塩等の連続モニタリングデータは現状存在せず、これらのデータを取得し、解析する必要がある。

## 6. 結論

大和川河口域の CO<sub>2</sub> フラックスの動態に関する知見を得ることを目的に、連続モニタリング調査を実施した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- 大和川において TA と塩分との間には上流部と河口部において 2 種類の相関が存在した。
- 大和川河口域において春季、夏季は河川支配であり、秋季、冬季は主に海洋支配であった。
- 大和川河口域では年間を通して、水面から大気へ CO<sub>2</sub> は放出されており、フラックス値は

3.4±0.4mgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/h であった。また大気への放出量は秋季>春季>夏季>冬季であった。

- 河口域のフラックスは pH が大きく寄与しておりそれは光合成や硝化といった生物影響が考えられた。
- CO<sub>2</sub> フラックスとポテンシャル値との比較から CO<sub>2</sub> フラックスは風速の影響を大きく受け、その調査方法によっては過大評価する可能性が示唆された。

## 7. 参考文献

- 1) IPCC (2013) : 気候変動第 5 次報告書, p.10.
- 2) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L., and Grimsditch, G. (2009) : Blue carbon : The role of healthy oceans in binding carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, p.5.
- 3) 藤井智康, 藤原建紀, 中山浩一郎 (2013) : 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 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I\_1111-I\_1115.
- 4) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂 (2013) : 北海道風連湖における大気-海水間 CO<sub>2</sub> フラックスに影響を及ぼす要因, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I\_1252-I\_1257.
- 5) 西村典子, 渡辺桂一郎, 岸田巧, 岩田徹, 大滝英治 (1998) : 河川水中の二酸化炭素濃度の変動特性, 環境科学会誌, Vol.11, No.3, pp.297-304.
- 6) Jiang L.Q., W.J.Cai., Y.Wang (2008) : A comparative study of carbon dioxide degassing in river- and marine-dominated estuaries, American Society of Limnology and Oceanography, Vol.53, issue.6, pp.2603-2615.
- 7) 日本興業標準調査会 (1998) : JIS K 0400-15-20:1998 水質-アルカリ度の測定-第 2 部 : 炭酸塩アルカリ度の測定, 日本規格協会, 東京, p.12
- 8) U.S. Department of Energy. (1994) : Handbook of Methods for the Analysis of the Various Parameters of the Carbon Dioxide System in Sea Water.
- 9) Unesco (1983) : Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine science, 44, pp.6-8.
- 10) 田口二三生, 藤原建紀, 山田佳昭, 藤田弘一, 杉山雅人 (2009) : 沿岸海域のアルカリ度, 沿岸海洋研究, 第 47 巻, 第 1 号, pp.71-75.
- 11) 杉本裕之, 平石直孝 (2010) : 太平洋における大気-海洋間の二酸化炭素フラックス推定手法の開発, 測候時報, 第 77 巻, 特別号.
- 12) Wanninkhof, R. (1992) : Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. J. Geophys. Res., 97, pp.7373-7392
- 13) Weiss, R. F. (1974) : Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a nonideal gas. Mar. Chem., 2, pp.203-215.
- 14) 土木学会水理委員会(1999) : 水理公式集, 土木学会, p.591.
- 15) 古川義宏, 高岡隆志(2001) : 二酸化炭素の溶解度-その温度変化と圧力変化の簡便な測定法の開発と熱力学的パラメーターの算出, 化学と教育, 6 号, pp.458-460.
- 16) 大谷壮介, 川崎太輝, 大和天, 渡邊隆太郎 (2015) : 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.I\_1321-I\_1326
- 17) 遠藤徹, 中野雄介, 筏紀晶, 田中俊行, 嶋野純平, 宮脇康平, 矢持進 (2015) : 都市沿岸域の人工湿地における CO<sub>2</sub> フラックスの四季調査と CO<sub>2</sub> 吸収・放出量の推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I\_1327-I\_1332.
- 18) A.P.Oliveira,G.Cabecadas,M.D.Mateus (2015) : Inorganic carbon distribution and CO<sub>2</sub> fluxes in a large European estuary, Scientific Reports, pp.1-14.
- 19) 相馬明郎, 中居瑞樹, 久保厚志, 桑江朝比呂 (2018) : 東京湾河口域における大気-海洋間 CO<sub>2</sub> フラックスの通年変化とその要因~炭酸化学理論を組み込んだ浮遊-底生系結合生態系モデルによる解析~, pp.1-5.

表 3 各水域における CO<sub>2</sub> フラックス

対象地	CO <sub>2</sub> フラックス[mgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /h]	参考文献
大和川河口域	3.4±0.4	本研究
淀川河口干潟	-1.6~66.5	16)
ヘイスティングス川河口	2.0±3.0	18)
大阪湾湾奥部	-15.3	3)
北海道風連湖	-22.2±14.3	4)
ウォリス湖	-10.0±4.5	18)

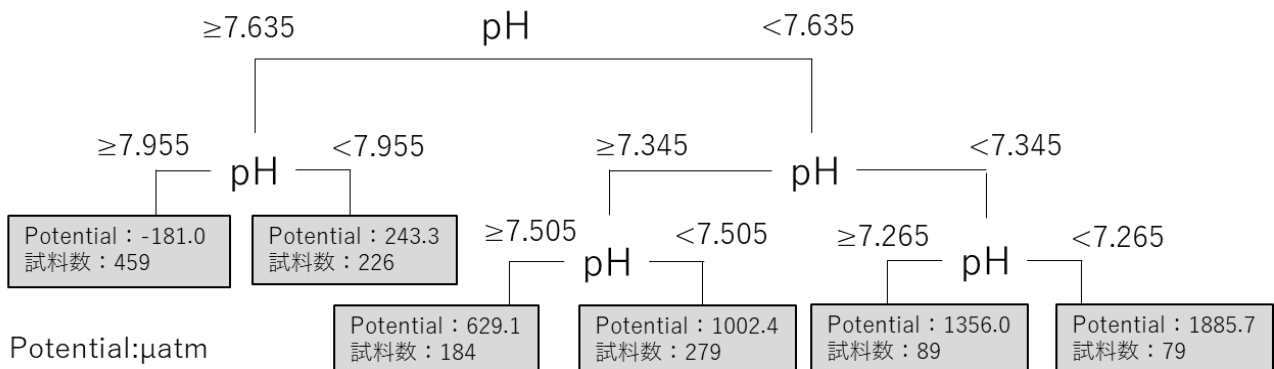


図 6 吸排出ポテンシャルの決定木