

— 原著論文 —

瀬戸内海および周辺海域における 海水中二酸化炭素分圧の空間的特徴*

藤田 真大^{1†}・林 美鶴²・山下 栄次³・廣川 綜一¹

要 旨

沿岸域における海水中の二酸化炭素 (CO₂) に関する研究は進みつつあるが、海水中での時空間変動や大気との交換量など不明な点が多い。本研究では瀬戸内海および周辺海域で測定したデータをもとに、海水中二酸化炭素分圧 (pCO₂) の空間的特徴とその要因を明らかにすることを目的とする。全ての海域において春季の pCO₂ は夏季よりも平均して約 100 μatm 以上低く、水温の影響を強く受けていた。大阪湾は両季節とも最も低く、高い基礎生産による pCO₂ 消費が示唆された。夏季の海峡部は非海峡部よりも pCO₂ が平均して 64 μatm 高く、湾灘部の底層に蓄積された高 pCO₂ 水塊が、海峡部底層へ水平移流し混合により表層へ輸送されたためだと考えられる。大気海洋間の CO₂ flux を見積もったところ、春季においては全ての海域で吸収域だったが、夏季においては外洋、豊後水道、紀伊水道、大阪湾は吸収域であり、他の瀬戸内海は放出域だった。瀬戸内海の海峡部と湾灘部の連なった構造が、季節による吸収・放出の変化をもたらしている。

キーワード：二酸化炭素分圧、二酸化炭素フラックス、瀬戸内海、成層域、混合域

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) は大気-海洋間で交換されており、海洋は人間活動により発生した CO₂ のおよそ 1/4 を吸

取していると考えられている (Friedlingstein *et al.*, 2023)。Takahashi *et al.* (2009) により、外洋は CO₂ を吸収していることが明らかにされたが、沿岸域における大気-海洋間の CO₂ 交換量は考慮されておらず、明らかにされていない。Roobaert *et al.* (2024) は沿岸域における大気-海洋間の CO₂ 交換量を見積もったが、まだ十分な理解は得られていない。CO₂ の吸収源である外洋域とは対照的に、沿岸域は陸域からの有機物が流入しそれらが分解されることで CO₂ が生じるため、CO₂ の放出源とみなされてきた (Borges and Abril, 2011; Chen *et al.*, 2013)。一方で、東京湾や伊勢湾など、植物プランクトンの光合成やブルーカーボンの蓄積等のため吸収源となる海域が明らかにされつつある (Kubo

* 2024年5月16日受領 2024年9月26日受理

著作権：日本海洋学会, 2024年

1 神戸大学大学院海事科学研究科
〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1

2 神戸大学内海域環境教育研究センター
〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1

3 岡山理科大学名誉教授
〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町 1-1

† 連絡著者：藤田 真大
e-mail : 230w325w@stu.kobe-u.ac.jp

et al., 2017; Tokoro *et al.*, 2021)。外洋域では大気中の二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2_{\text{air}}$) の増加に伴って表層の $p\text{CO}_2$ も上昇し、海洋酸性化が進行している (Lui *et al.*, 2015; Ishizu *et al.*, 2019)。その観点からも表層の $p\text{CO}_2$ への理解をより深める必要がある。

沿岸域における表層海水中の $p\text{CO}_2$ に関する研究は進みつつあるが、それでもなお外洋域ほど研究が蓄積されておらず、海水中での時空間変動や大気との交換量など不明な点は多い。外洋域における表層海水中の $p\text{CO}_2$ は、熱帯域や湧昇域において高く放出域となっており、中緯度から極域にかけて低く吸収域となっている。このような海域依存性は、水温や全炭酸濃度 (DIC) の違いによるものや、生物活動や淡水流入の影響など様々な要因により生じていると考えられている (Takahashi *et al.*, 2009)。沿岸域においては海域により $p\text{CO}_2$ の季節変化が大きく異なる。例えば、北太平洋中緯度域における $p\text{CO}_2$ は、冬季から春季にかけて低くなり夏季には高くなるのに対して、瀬戸内海の牛窓町 (岡山県瀬戸内市) 沿岸や大阪湾においては、同時期に低くなるが秋季に極大値をとる (山下, 2020; Hayashi and Yamashita, 2020)。東京湾における $p\text{CO}_2$ の時間変動は外洋や牛窓町沿岸とは異なり、さらにその湾内でも湾口部や湾奥部で異なっていた (Kubo *et al.*, 2017; 久保, 2022)。CO₂ の時空間変動や大気海洋間の交換量は沿岸域ごとに大きく異なるため、それぞれの海域を対象とした研究を行う必要がある。

瀬戸内海における $p\text{CO}_2$ の研究は、大阪湾を対象に藤井・藤原 (2012) や遠藤ら (2017) などにより行われているが、全体を通して行った研究は Hayashi and Yamashita (2020) しかない。瀬戸内海は、外洋と接続する水道部を端として、幅が狭く潮流が強い年中鉛直混合が卓越する海峡部と、幅が広く潮流が比較的弱い夏季に成層する灘部が連なった構造をしている。Hayashi and Yamashita (2020) は 17 年間に渡り $p\text{CO}_2$ を測定し、瀬戸内海と周辺海域を 7 海域に分け春季と夏季の空間変化を解析し、 $p\text{CO}_2$ が外洋と瀬戸内海の各海域 (大阪湾や備讃瀬戸など) で特徴が異なることを明らかにした。しかし、その研究の中では瀬戸内海の連なった構造が十分に考慮されておらず、海峡部や灘部の特徴をより明確にするためには海域をより細分化し、 $p\text{CO}_2$ の空間変化

を調べる必要がある。海域の特徴に注目して $p\text{CO}_2$ の空間変化を理解することができれば、瀬戸内海における $p\text{CO}_2$ の理解のみならず、他の沿岸域における CO₂ の理解にも役立てることができると考えられる。本研究では、瀬戸内海および周辺海域において測定した $p\text{CO}_2$ と同時に測定した関連項目とをもとに、 $p\text{CO}_2$ の空間的特徴を明らかにする。そして、瀬戸内海の海域特性に着目してその特徴となった要因を明らかにすることを目的とする。

2. データと手法

神戸商船大学/神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「深江丸」の研究航海のうち、1994 年から 2010 年の間に行われた春季 (3 月)、夏季 (7~9 月) の計 23 回の航海でデータを取得した (Hayashi and Yamashita, 2020)。Table 1 にその日程を示す。計 23 回行った観測のうち春季は 12 回、夏季は 11 回である。船底約 3m からのインテイク水を用いて、表層の $p\text{CO}_2$ (海水中二酸化炭素分圧, μatm)、T (海水温度, °C)、S (塩分)、pH、DO (溶存酸素, mg L^{-1}) を測定した。 $p\text{CO}_2$ は、岡山市自動測定バブリング式海水中二酸化炭素自動測定装置 (S-ONE Co. INC) の改良型を用いて、15 分毎に測定した (大滝ら, 1994; Yamashita *et al.*, 1993)。Fig. 1 にその測定器の構成を示す。測定装置の詳細は引用文献を参照されたい。まず、既知濃度の CO₂ キャリアガスを平衡器のヘッドスペースを通じて NDIR

Table. 1 Period of cruises measuring $p\text{CO}_2$.

year	spring	summer
1994	16 – 18, March.	–
1995	–	24 – 31, July.
1996	18 – 21, March.	–
1997	18 – 21, March.	26 – 29, September.
2000	7 – 10, March.	6 – 14, September
2001	12 – 16, March.	2 – 10, Augst.
2002	18 – 22, March.	1 – 8, Augst.
2003	–	1 – 8, Augst.
2004	18 – 22, March.	–
2005	14 – 18, March.	10 – 16, September.
2006	–	9 – 15, September.
2007	8 – 13, March.	4 – 10, September.
2008	3 – 11, March.	4 – 10, September.
2009	6 – 11, March.	3 – 9, September.
2010	5 – 10, March.	–

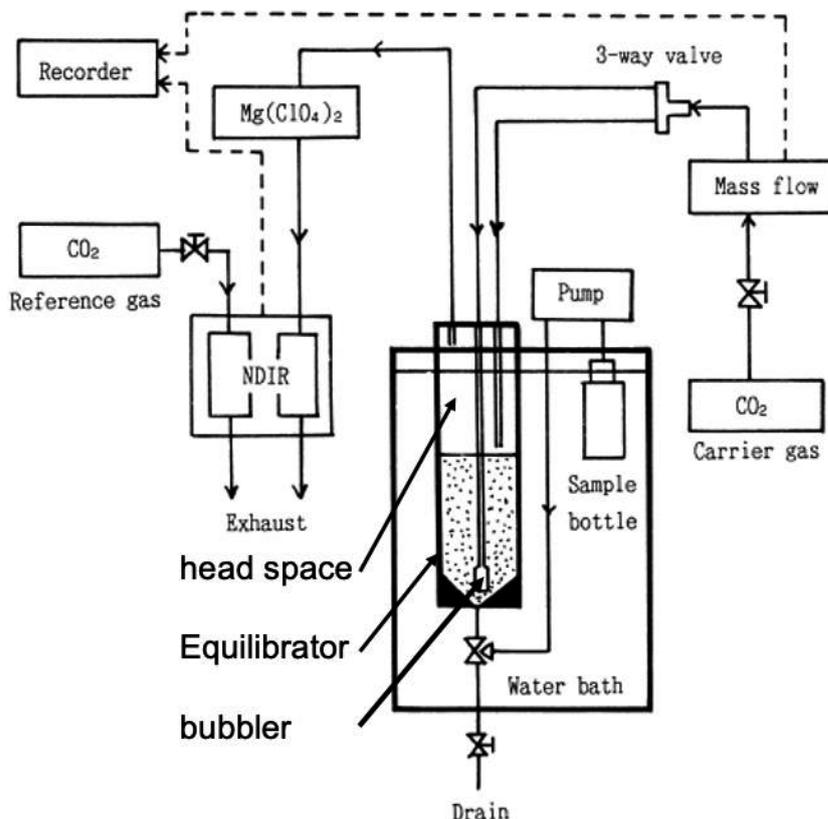


Fig. 1. Schematic of the pCO₂ measuring instrument setup (Yamashita *et al.*, 1993) (Revised).

ガス分析計 LI-6252 (LI-COR 社製) のセルに通し、次に平衡器内のバブラーを通じて CO₂ ガスを海水試料にバブリングさせ、ガス交換をさせた。そしてキャリアガスの濃度とガス交換後の濃度差とを記録した。一連の手順を、キャリアガスの濃度を変えて 5 回繰り返し検量線を作成し、検量線の濃度差が 0 に対応するキャリアガス濃度を pCO₂ の値とした。NDIR による pCO₂ の分解能は 0.25 μatm であり、この自動測定装置による pCO₂ の繰り返し精度は、水温によって異なるが最大 1.8 μatm である。検量線を作成する際に用いた 5 種類のキャリアガス濃度は、それぞれ 300, 340, 380, 420, 460 μatm である。T と S は Conductivity Meter DS-15 (HORIBA 社製) を用いて、pH は pH Meter F-52 (HORIBA 社製) を用いて、それぞれ 5 分毎に測定した。それらの分解能は、T は 0.1°C、S は 0.05 であり、pH は 0.001 である。DO は、DO Meter DO-25A (東亜 DKK 社製) を使用し 1 分毎に測定した。その分解能は 0.01 mg L⁻¹ である。

海面上約 10m に位置する大気採取口より得た大気より、pCO₂ air (大気中二酸化炭素分圧, μatm) を 1 分毎に測定した。pCO₂ の測定器に搭載してある NDIR を用いて測定し、その分解能は pCO₂ と同じく 0.25 μatm である。また、深江丸に搭載されている風速計より U (風速, m s⁻¹) も測定した。pCO₂ の測定間隔に合わせるため、得られた T や pH などのパラメータは 15 分毎の平均値とした。加えて本研究では、国土交通省中国地方整備局による「瀬戸内海総合水質データ」(<https://www.pa.cgr.mlit.go.jp/suishitu/download/input.html>) から、表層および底層の T, S, pH, DO, Chl.a (クロロフィル-a 濃度, μg L⁻¹) の値を使用した。それらのデータは深江丸で測定を行った年・季節のものを使用した。日付や時間及び計測場所には違いがある。

Fig. 2 に海域区分を示す。海峡部や湾灘部といった海域の特徴による pCO₂ の違いを調べるために、瀬戸内海の外側を外洋 (Pacific) とし、豊後水道 (Bungo Chan-

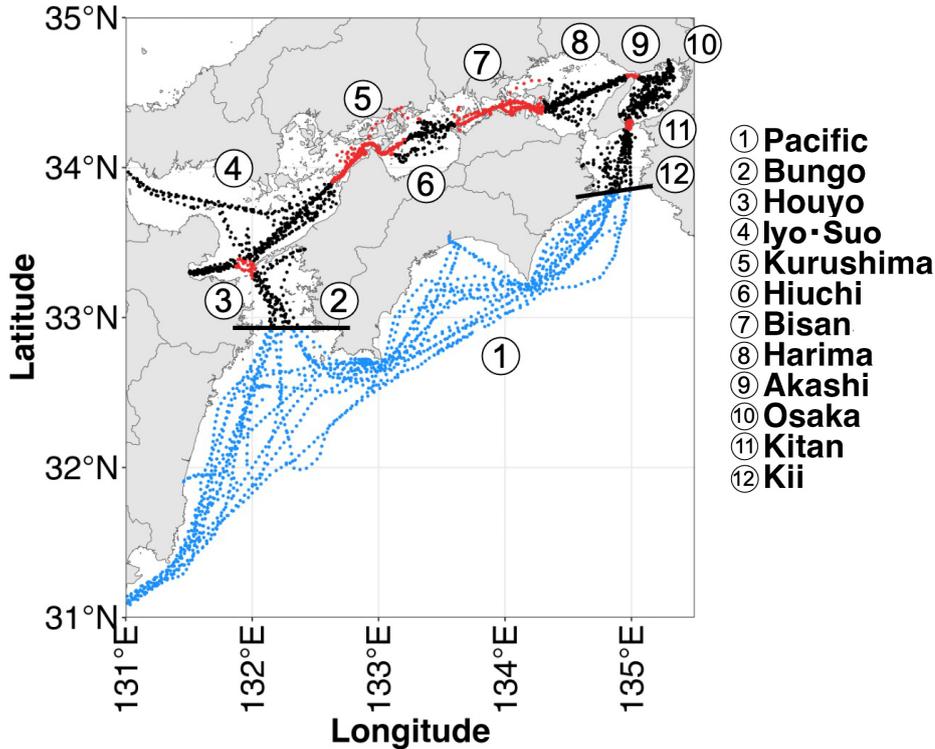


Fig. 2. Cruise tracks of Fukaemaru. Red points represent tracks in the straits; black points indicate other areas, and blue points in the southern area represent the Pacific.

nel), 伊予・周防灘 (Iyo・Suo Nada), 燧灘 (Hiuchi Nada), 播磨灘 (Harima Nada), 大阪湾 (Osaka Bay), 紀伊水道 (Kii Channel) の6海域を非海峡部とし, 豊予海峡 (Houyo Strait), 来島海峡 (Kurushima Strait), 備讃瀬戸 (Bisan Seto), 明石海峡 (Akashi Strait), 紀淡海峡 (Kitan Strait) の5海域を海峡部とし, 対象海域を合計12の海域に分けた。本研究では瀬戸内海の空間的特徴に注目するため, 外洋を1つの海域として扱った。瀬戸内海の非海峡部と海峡部とが交互になるよう, 伊予・周防灘を1つの海域として扱った。海峡部を分ける際には, 成層した海域と混合した海域の境目に発生する潮汐フロントの指標である $\log(H/U^3)$ (H は水深 (m), U は M_2 潮流振幅 ($m\ s^{-1}$)) の値が2.5以下になる海域を参考にした (柳, 1992)。取得されたデータを海域ごとに航海別に平均した後, 季節別に平均した。

大気-海水の CO_2 交換量 (CO_2 flux, $mmol\ m^{-2}\ day^{-1}$) は次の (1) 式を用いて算出した (Andrie *et al.*, 1986)。

$$CO_2\ flux = 0.24\ \alpha k \Delta pCO_2 \quad (1)$$

ここで, α は CO_2 の溶解度 ($mol\ kg^{-1}\ atm^{-1}$) であり, k はガス交換係数 ($cm\ h^{-1}$), ΔpCO_2 は海洋と大気の CO_2 分圧差 ($=pCO_2 - pCO_{2\ air}$ (μatm)) である。 α は Weiss (1974) の式, k は Wanninkhof (2014) の式を使用した。

3. 結果

各航海で測定した pCO_2 の海域別平均値を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から見て取れる pCO_2 の経年変化は, 両季節ともほとんどの海域で増加傾向にあった。Midorikawa *et al.* (2012) が報告した外洋における pCO_2 の増加率と, 本研究における外洋のものとを比較すると, 水温の低い時期である春季の方が夏季よりも上昇率が高かったという傾向が一致していた。ただし, 本研究では経年変化の議論は意図しておらず, 空間的特徴を議論す

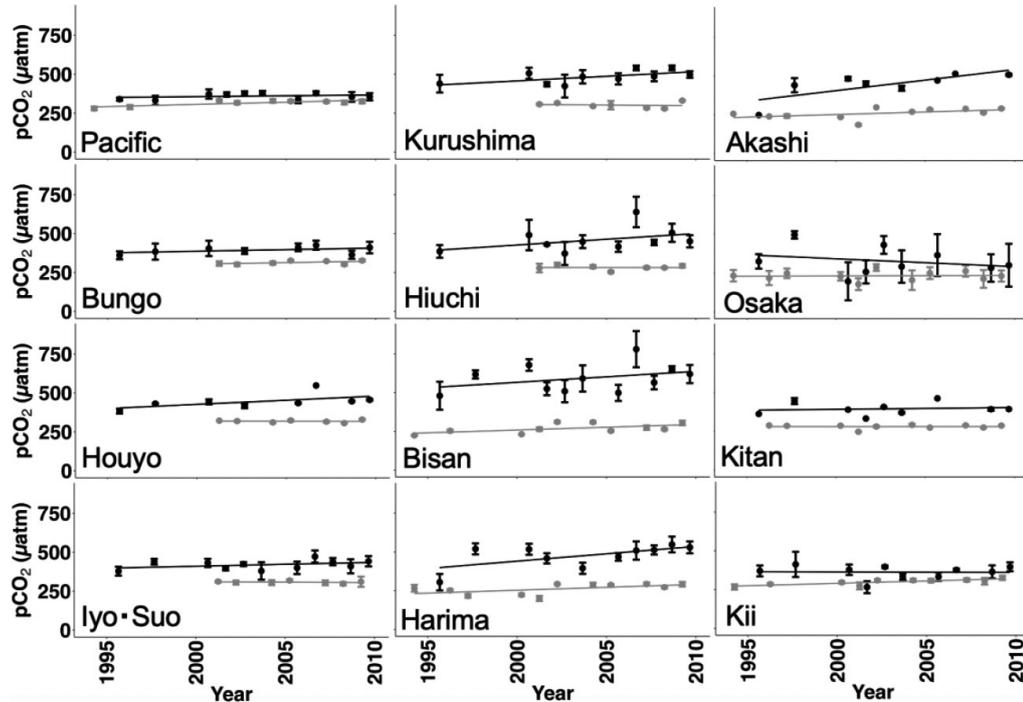


Fig. 3. Average $p\text{CO}_2$ values measured during each cruise by region. Gray bars represent spring, and black bars represent summer. Points denote average values; lines represent regression trends, and error bars indicate standard deviations.

ることが目的であるため、ここまでにとどめる。Fig. 3で示した各年の平均値を海域別に平均した $p\text{CO}_2$ および同様に求めた $p\text{CO}_{2\text{ air}}$, T, S, pH, DO, Chl.a を Fig. 4に示す。Fig. 4(a), (b) より、両季節ともに $p\text{CO}_{2\text{ air}}$ は $p\text{CO}_2$ よりも空間的な変化が小さく、全ての海域において $p\text{CO}_{2\text{ air}}$ の標準偏差は $p\text{CO}_2$ のものよりも非常に小さかった。大気は海水よりも移流や拡散が強いため、 $p\text{CO}_{2\text{ air}}$ が一定の場所に偏らず均一化されたと考えられる。 $p\text{CO}_{2\text{ air}}$ は両季節とも瀬戸内海の中央部において高く、これら海域周辺にある工場群の排煙の影響を受けたためと考えられる。

$p\text{CO}_2$ は全ての海域において、夏季の方が春季よりも高かった。それぞれの海域では、両季節とも大阪湾において最小であり、春季は豊予海峡で、夏季は備讃瀬戸で最大だった。非海峡部と海峡部に注目すると、非海峡部では平均して約 $100\ \mu\text{atm}$ 以上、海峡部では $150\ \mu\text{atm}$ 以上高かった。夏季の海峡部における $p\text{CO}_2$ の平均値 ($471.0\ \mu\text{atm}$) は非海峡部 ($407.0\ \mu\text{atm}$) よりも高く、

明石海峡以外の海峡部における $p\text{CO}_2$ は隣接する非海峡部よりも高かった。春季と夏季で $p\text{CO}_2$ に差があったことについて、大阪湾の湾奥部で行われた先行研究では、 $p\text{CO}_2$ は春季においては約 $50\sim 200\ \mu\text{atm}$ で、夏季においては約 $200\sim 900\ \mu\text{atm}$ で変動したことが示されている (遠藤ら, 2017)。また、播磨灘北部に位置する牛窓町沿岸において行われた先行研究では、 $p\text{CO}_2$ は1月から3月にかけて低くなり、8月から10月にかけて高くなる季節変化をしていることが示されている (山下, 2020)。本研究において夏季における $p\text{CO}_2$ が春季よりも高かった傾向は、先行研究と一致していた。

Fig. 4(c), (d) より、春季の T は夏季よりも空間的な変化が大きく、外洋側から播磨灘へ向かうにつれ低くなった。夏季における備讃瀬戸を除く海峡部の T は、隣接する非海峡部よりも低かった。表層と底層の水温差は、春季の方が夏季よりも非常に小さかった。Fig. 4(e), (f) より、表層と底層の塩分差も同様に小さいことから、春季においてはほとんどの海域が混合域だったと考えら

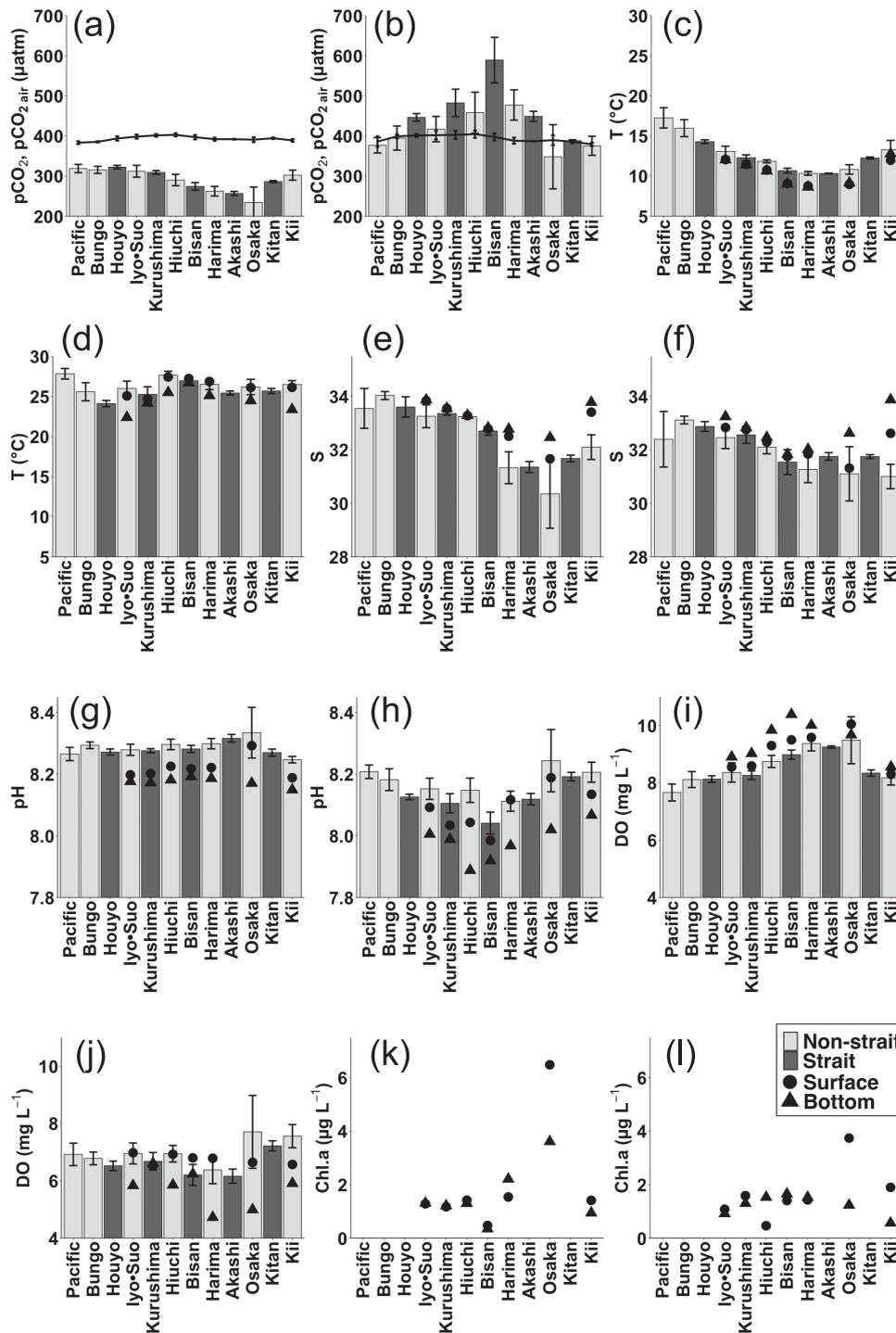


Fig. 4. Average parameter values by region: (a) and (b) represent $p\text{CO}_2$ and $p\text{CO}_{2, \text{air}}$; (c) and (d) seawater temperature (T); (e) and (f) salinity (S); (g) and (h) pH; (i) and (j) dissolved oxygen (DO); and (k) and (l) chlorophyll-a (Chl.a) for spring and summer, respectively. Bars indicate averages with error bars showing standard deviations. Points represent surface averages, and triangles represent bottom averages based on the Seto Inland Sea Comprehensive Water Quality Survey.

れる。一方で、夏季においては、表層と底層の水温差は海峡部では小さく混合域だったことが示唆される。夏季の非海峡部においては、表層と底層の水温差が大きく成層していた。

Fig. 4(g), (h) より、全ての海域において春季の pH は夏季よりも高く、特に両季節とも大阪湾において最も高かった。夏季において明石海峡を除く海峡部の pH は、隣接する非海峡部よりも低く、特に備讃瀬戸が最も低かった。両季節全ての海域において底層の pH は表層よりも低く、夏季の成層域において顕著な差があった。Fig. 4(a), (b) と (g), (h) で示した $p\text{CO}_2$ と pH の空間変化を比較すると、 $p\text{CO}_2$ と表層の pH は反対の分布傾向を示した。Fig. 4(i), (j) より、全ての海域にお

いて春季の方が夏季よりも DO は高かった。夏季の海峡部における DO は、隣接する非海峡部よりも低かった。夏季の底層における DO は表層よりも低く、pH と同様に成層域において顕著な差があった。Fig. 4(k), (l) より、Chl.a の空間分布は春季と夏季で大きく変化しなかった。DO と Chl.a は両季節とも大阪湾において最も高かった。

海域別に平均した $p\text{CO}_2$ と T, S, pH, DO の散布図を Fig. 5 に示す。春季においては、 $p\text{CO}_2$ と 4 つのパラメータとの間全てに強い相関があった。夏季においては pH と DO のみ強い負の相関があり、T と S には相関はなかった。

春季と夏季における海域別の CO_2 flux を Fig. 6 に示

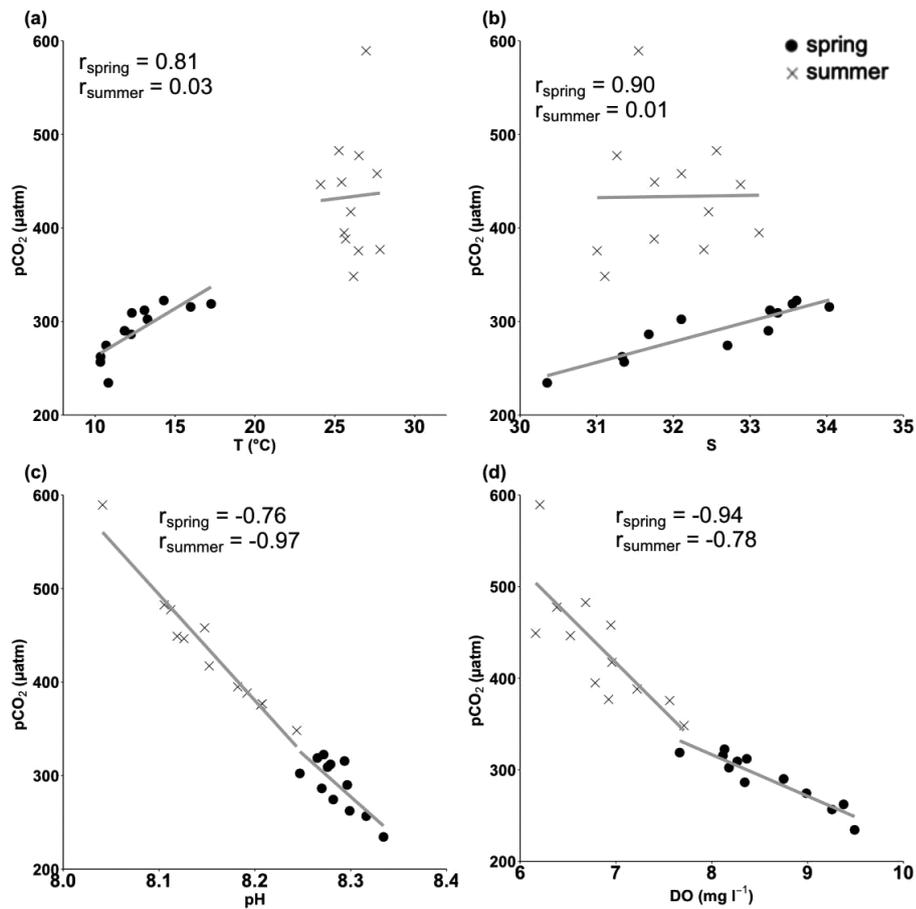


Fig. 5. Relationship between $p\text{CO}_2$ and (a) seawater temperature (T), (b) salinity (S), (c) pH, and (d) dissolved oxygen (DO), averaged by region, with correlation coefficients. The black and cross points represent the spring and summer seasons, respectively.

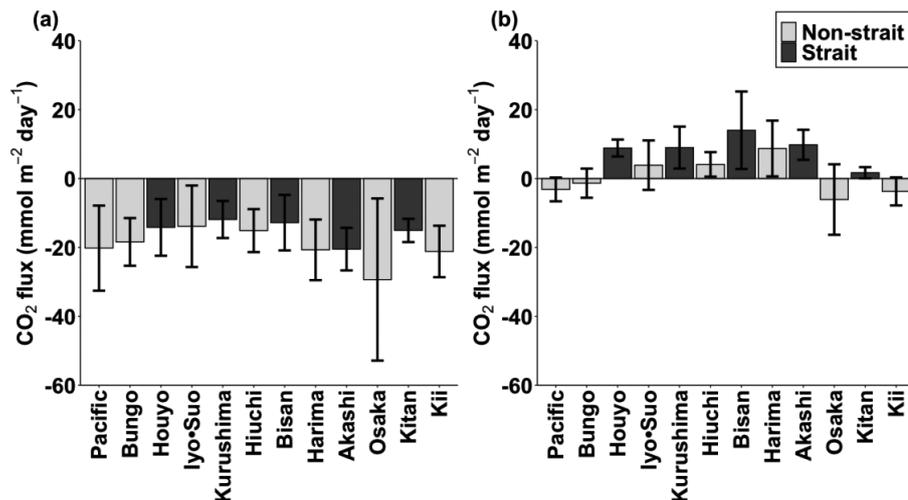


Fig. 6. Average CO₂ fluxes by region: (a) in spring and (b) in summer. Error bars indicate standard deviations.

す。春季は全ての海域で負の値であり、吸収域だった。夏季は外洋、豊後水道、紀伊水道、大阪湾のみ吸収域であり、それら以外の海域は放出域だった。

4. 考察

春季と夏季で pCO₂ の値および空間分布に違いがあったことについて検討する。夏季の pCO₂ が春季よりも高かったのは、水温が高くなるほど溶解度が減少するためだと考えられる。CO₂ の濃度を溶解度で割ったものが pCO₂ であるため、水温が上昇することで溶解度が減少し pCO₂ が高くなる (所・渡辺, 2017)。春季においては Fig. 5(a) より pCO₂ と水温との間に強い正の相関があったことから、春季における空間変化は水温の影響を強く受けていると考えられる。夏季における pCO₂ と水温との間に相関はなかったことから、海域による違いは水温以外の要因によるものだと考えられる。

大阪湾で pCO₂ が最も低かったことについて検討する。基礎生産により CO₂ は消費され酸素が生成される。DO と Chl.a を基礎生産の指標とすると、どちらの季節も大阪湾で最大だったことから、大阪湾の基礎生産が最も高かったといえる。先行研究においても、大阪湾は陸域から大量の栄養塩が供給されるため、他の海域よりも栄養塩が豊富で基礎生産が最も高いことが示されている (橋本ら, 1997)。生物活動が活発な海域では、基礎生

産だけでなく、有機物分解も盛んに行われていると考えられる。陸域から供給された有機物や表層で発生したデトリタスの沈降により、大阪湾の底層には有機物が堆積していると考えられる。その有機物が分解されることで CO₂ が生成されたとしても、大阪湾は塩分成層が強い海域であるため、CO₂ は表層に供給されにくいと考えられる。そのため、表層においては、有機物分解による CO₂ の生成を上回る、基礎生産による卓越した消費が示唆される。これらのことから大阪湾における pCO₂ は、高い基礎生産の影響を受けたと考えられる。

夏季の海峡部において pCO₂ が高かったことについて検討する。DIC と全アルカリ度 (TA) は pCO₂ と炭酸系の平衡関係があり、pH と pCO₂ は逆相関の関係がある。実際に Fig. 5(c) の通り、pCO₂ は pH と強い負の相関があり、その回帰直線の傾きは両季節ともほぼ同じであることから、季節に関係なく pH に依存している。pCO₂ が最も高い備讃瀬戸では、以下に示す通り隣接する非海峡部の影響を受けていると考えられる。小林・藤原 (2006) は、夏季の備讃瀬戸の表層では燧灘と播磨灘それぞれに向かう流れが存在し、底層ではその流出を補うように燧灘と播磨灘から備讃瀬戸に向かう流れが存在しており、備讃瀬戸の底層に移流したのち混合されると説明している。Fig. 4(g), (h), (i), (j) より、夏季の燧灘と播磨灘における底層の pH と DO は表層よりも低く、このことは Taguchi and Fujiwara (2010) によ

でも確認されている。それらの底層水が、備讃瀬戸の底層に水平移流し混合により表層に輸送されるため、備讃瀬戸において $p\text{CO}_2$ が最も高かったと考えられる。燧灘および播磨灘底層において pH と DO が低かったのは、微生物による有機物分解により酸素が消費されるとともに CO_2 が生成されたためだと考えられる。湾灘部底層には、陸域から流入した有機物やデトリタスが沈降し蓄積される。それらが分解されることに加え、夏季の湾灘部底層においては成層により表層との海水交換が抑えられるため、有機物分解により生成された CO_2 が蓄積されていると考えられる。Taguchi and Fujiwara (2010) の図中で示されている播磨灘下層における pH と DIC の値より下層の $p\text{CO}_2$ を計算すると (Gattuso *et al.*, 2021), 約 $570 \mu\text{atm}$ だった。この値は本研究における播磨灘表層の $p\text{CO}_2$ よりも約 $100 \mu\text{atm}$ 高かったことから、播磨灘底層に高 $p\text{CO}_2$ 水が存在していたことを示唆している。Fig. 4(g), (h), (i), (j) より播磨灘以外の湾灘部においても、pH と DO は表層と底層の差が大きく底層の方が低いため、それら海域の底層においても高 $p\text{CO}_2$ 水が存在すると考えられる。備讃瀬戸以外の海峡部も同様に、表層の pH と DO は湾灘部よりも低い傾向にあることから、湾灘部下層において有機物分解により生成された $p\text{CO}_2$ の高い底層水が、隣接する海峡部に水平移流し鉛直混合により表層に輸送されたため、夏季の海峡部は隣接する非海峡部よりも $p\text{CO}_2$ が高かったと考えられる。備讃瀬戸においては西村ら (1998) が、その海域に流入する河川において河川水の $p\text{CO}_2$ を測定し、夏季に高かったことを報告している。備讃瀬戸は河川水の影響が強い海域であるため (武岡, 1985), その影響も $p\text{CO}_2$ が最も高かった要因の1つであると考えられる。一方で、備讃瀬戸において河川水の流入や底層との混合により、栄養塩が供給されることで基礎生産が高まり $p\text{CO}_2$ 消費も生じると考えられる。実際に Fig. 4(l) より、夏季の備讃瀬戸における Chl.a は隣接する燧灘よりも高かった。それにも関わらず備讃瀬戸で $p\text{CO}_2$ が最も高かったのは、基礎生産による消費を上回る $p\text{CO}_2$ が、河川水の流入や鉛直混合により表層に輸送されたためだと考えられる。5 海域ある海峡部のうち、明石海峡は他の海峡部とは異なり、夏季において隣接する播磨灘よりも $p\text{CO}_2$ は低かった。隣接する基礎生産の高い大阪湾の影響

を強く受けたためと考えられる。

各海域における CO_2 flux について、外洋と水道部、大阪湾は両季節とも吸収域であった。Takahashi *et al.* (2009) によると、日本周辺海域の $\Delta p\text{CO}_2$ は春季は大幅に負であり、夏季は 0 に近かったことが示されており、本研究の外洋における CO_2 flux は、先行研究の結果から推測される CO_2 flux と一致していたと考えられる。豊後水道と紀伊水道は隣接する外洋の影響を強く受けたため吸収域だと考えられる。一方で、大阪湾は高い基礎生産のため $p\text{CO}_2$ が低く吸収域だった。大阪湾については、藤井ら (2013) や Tokoro *et al.* (2021) により年間を通じて吸収域であることが報告されており、大阪湾は年間を通じた高い基礎生産によって、瀬戸内海における最大の CO_2 吸収源になっていると考えられる。

水道部と大阪湾を除く瀬戸内海は、春季は吸収域であるのに対し、夏季は放出域だった。この結果は、山下 (2020) による牛窓町沿岸域での 1 年を通じた $p\text{CO}_2$ 測定結果と一致していた。春季において吸収域だったのは、水温が低く $p\text{CO}_2$ が低いためであり、夏季において放出域だったのは、春季よりも水温が高いことに加え、海峡部において表層に輸送された高い $p\text{CO}_2$ を含む水塊が、隣接する湾灘部にも輸送されたことにより、瀬戸内海全体的に $p\text{CO}_2$ が高くなったためであると考えられる。瀬戸内海の海峡部と湾灘部の連なった構造が、季節による吸収・放出の変化をもたらしている。

5. まとめ

本研究は、瀬戸内海および周辺海域を対象に、 $p\text{CO}_2$ の空間的特徴とその要因を調べた。外洋は先行研究と同じく吸収域だった。豊後水道および紀伊水道は外洋の影響を受けたため、大阪湾は高い基礎生産のため、両季節とも $p\text{CO}_2$ が低く吸収域だった。大阪湾と水道部を除く瀬戸内海は、 $p\text{CO}_2$ が春季に低く夏季に高かったため、春季は吸収域、夏季は放出域だった。その理由の1つに水温の影響が挙げられる。もう1つの理由として、海峡部において、底層から高 CO_2 水が表層に輸送され、隣接する湾灘部に広がったことが考えられる。瀬戸内海の海峡部と湾灘部の連なった構造が、この季節による吸収・放出の変化をもたらしている。

謝 辞

本研究で使用した $p\text{CO}_2$ および関連項目を測定した、岡山理科大学山下研究室の卒業生の皆様に心から感謝申し上げます。観測にあたり深江丸の運航に尽力された深江丸乗組員および運航関係者の皆様に感謝いたします。本稿の改訂にあたり、編集委員長、編集担当者および2名の査読者に、文章表現や内容等に関して多数の有益なご指摘およびご助言をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。学会および研究集会等で議論およびコメントをいただいた方々に感謝を申し上げます。国土交通省中国地方整備局より瀬戸内海総合水質データを使用いたしました。本研究は、日本科学協会の笹川科学研究助成による助成を受けたものです。

References

- Andrie, C., C. Oudot, C. Genthon, and L. Marliat (1986): CO_2 fluxes in the Tropical Atlantic During FOCAL cruises. *J. Geophys. Res.*, **91**, C10, 11, 741–755.
- Borges, A.V., and G. Abril (2011): Carbon dioxide and methane dynamics in estuaries. *Treaties on estuarine and coastal science* 5, Elsevier, 119–161.
- Chen, C.-T. A., T.-H. Huang, Y.-C. Chen, Y. Bai, X. He, and Y. Kang (2013): Air-sea exchanges of CO_2 in the world's coastal seas. *Biogeosciences*, **10**, 6509–6544.
- 遠藤徹・嶋野純平・酒井大樹・藤原隆一 (2017) : 大阪湾奥部における $p\text{CO}_2$ の鉛直分布と大気海水間の CO_2 交換の関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **73**, 2, 1231–1236.
- Friedlingstein, P. *et al.* (2023): Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, **15**, 5301–5369.
- 藤井智康・藤原健紀 (2012) : 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), **68**, 2, 1061–1065.
- 藤井智康・藤原健紀・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 (海洋工学), **69**, 2, 1111–1115.
- Gattuso, J.P., J.M. Epitalon, H. Lavigne and J. Orr (2021): Seawater carbonate chemistry. R package version 3.3.0. <http://CRAN.R-project.org/package=seacarb>
- 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田治・永末寿宏 (1997) : 瀬戸内海の一次生産と海洋構造, 沿岸海洋研究, **35**, 1, 109–114.
- Hayashi, M., and E. Yamashita (2020) : Spatial Variation in $p\text{CO}_2$ Based on 16 Years of In Situ Measurements in the Seto Inland Sea, Japan. *Evolution of Marine Coastal Ecosystems under the Pressure of Global Changes*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-43484-7_6.
- Ishizu, M., Y. Miyazawa, T. Tsunoda., and T. Ono (2019): Long-term trends in pH in Japanese coastal seawater. *Biogeosciences*, **16**, 4747–4763.
- 小林志保・藤原健紀 (2006) : 瀬戸内海における海峡部混合水の灘部への進入深度の季節変化, 海と空, **82**, 1–11.
- 久保篤史 (2022) : 東京湾における二酸化炭素収支の解明を主とした沿岸域の物質循環研究: 流域の下水設備に伴う炭素・栄養塩循環変化, 海の研究, **31**, 23–38.
- Kubo, A., Y. Maeda, and J. Kanda (2017): A significant net sink for CO_2 in Tokyo Bay. *Sci. Rep.*, **7**, doi: 10.1038/srep44355.
- Lui, H.K., C.T. Chen, J. Lee, S.L. Wang, G.-C. Gong, Y. Bai, and X. He (2015): Acidifying intermediate water accelerates the acidification of seawater on shelves: An example of the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **111**, 223–233.
- Midorikawa, T. *et al.* (2012): Recent deceleration of oceanic $p\text{CO}_2$ increase in the western North Pacific in winter. *J. Geophys. Res.*, **39**, L12601, doi: 10.1029/2012GL051665.
- 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 ($p\text{CO}_2$) の変動特性, 環境科学会誌, **11**, 3, 297–304.
- 大滝英治・藤原福一・山下栄次・伊藤はる奈・劉小虎 (1994) : 海水中の二酸化炭素濃度 ($p\text{CO}_2$) 測定器の開発, 海の研究, **3**, 6, 413–418.
- Roobaert, A., P. Regnier, P. Landschützer, and G.G. Laruelle (2024): A novel sea surface $p\text{CO}_2$ -product for the global coastal ocean resolving trends over 1982–2020. *Earth Syst. Sci. Data*, **16**, 421–441.
- Taguchi, F., and T. Fujiwara (2010): Carbon dioxide stored and acidified low oxygen bottom waters in coastal seas, Japan. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **86**, 429–433.
- Takahashi, T. *et al.* (2009): Climatological mean and decadal change in surface ocean $p\text{CO}_2$, and net sea-air CO_2 flux over the global oceans. *Deep-Sea Res. II*, **56**, 554–577.
- 武岡英隆 (1985) : 瀬戸内海の密度成層, 海と空, **60**, 145–152.
- 所立樹・渡辺謙太 (2017) : 大気からの CO_2 吸収, p. 33–64, ブルーカーボン, 堀正和・桑江朝比呂 編著, 地人書館, 東京.
- Tokoro, T., S. Nakaoka, S. Takao, T. Kuwae, A. Kubo, T. Endo, and Y. Nojiri (2021): Contribution of biological effects to carbonate-system variations and the air–water CO_2 flux in urbanized bays in Japan. *J. Geophys. Res. Oceans*, **126**, e2020JC016974. doi: 10.1029/2020JC016974
- Wanninkhof, R. (2014): Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr. Methods*, **12**, 351–362.
- Weiss, R.F. (1974): Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Mar. Chem.*, **2**, 203–215.
- 山下栄次 (2020) : 瀬戸内海沿岸の渋川と牛窓における海水中二酸化炭素の季節変化 —1990～2010年の測定—. フロンティア理工学研究 所研究報告, 第2号.
- Yamashita, E., F. Fujiwara, X. Liu, and E. Ohtaki (1993): Measurements of Carbon Dioxide in the Seto Inland Sea of Japan., *J. Oceanogr.*, **49**, 559–569.
- 柳哲雄 (1992) : 瀬戸内海の流動とそれに関連する諸問題, 海の研究, **1**, 2, 9–19.

Spatial characteristics of seawater pCO₂ in the Seto Inland Sea and adjacent region.

Masahiro Fujita^{1†}, Mitsuru Hayashi², Eiji Yamashita³ and Soichi Hirokawa¹

Abstract

The behavior of CO₂ in coastal seas has been less extensively studied than in open oceans. In this study, we examined the spatial characteristics of pCO₂ (partial pressure of CO₂ in seawater) based on measurements taken from the Seto Inland Sea, with a focus on regional characteristics. Across all regions, pCO₂ levels were lower in spring than in summer, with an average difference exceeding 100 μatm, suggesting sea temperature-related influences. During summer, pCO₂ characteristics varied between the strait and non-strait regions. In Osaka Bay, pCO₂ was consistently lower during both seasons, likely due to considerable CO₂ uptake driven by high primary production. In most straits, summer pCO₂ levels were higher than in adjacent non-strait regions, with an average difference of approximately 64 μatm. This suggests that high-pCO₂ water masses, formed through organic matter decomposition in the lower stratified layers flowed horizontally into nearby straits and were subsequently transported to the surface through vertical mixing. In spring, CO₂ was absorbed across all regions, whereas in summer, most regions of the Seto Inland Sea experienced CO₂ emission. The interconnected structure between the straits and Bay–Nada areas contributes to seasonal variations in CO₂ absorption and emission.

Key words: partial pressure of CO₂, CO₂ flux, Seto Inland Sea, stratified region, mixing region

(Corresponding author's e-mail address: 230w325w@stu.kobe-u.ac.jp)

(Received 16 May 2024; accepted 26 September 2024)

(doi: 10.5928/kaiyou.33.5-6_77)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2024)

¹ Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, 5-1-1, Fukaeminamimachi, Higashinada, Kobe 658-0022, Japan

² Research Center for Inland Seas, Kobe University, 5-1-1, Fukaeminamimachi, Higashinada, Kobe 658-0022, Japan

³ Professor emeritus at Okayama University of Science, 1-1, Ridaicho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

† Corresponding author: Masahiro Fujita
e-mail: 230w325w@stu.kobe-u.ac.jp