

瀬戸内海の海洋表層における二酸化炭素分圧と 炭素フラックスに関する研究*

熊本雄一郎**

広島大学大学院生物圏科学研究科
(現在の所属：国立環境研究所、茨城県つくば市小野川16-2)

Studies of partial pressure of carbon dioxide in surface seawater and carbon flux in the Seto Inland Sea

Yuichiro KUMAMOTO

*Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 724, Japan*

第1章 序 論

人間活動により大気に放出された二酸化炭素 (CO₂) による地球温暖化の可能性が指摘されている。しかしながら、全地球規模の CO₂ の収支に関しては、まだ不明な点が多い。現在最も確からしい CO₂ の収支をまとめると、人間活動により大気に放出された CO₂ の約半分近くが行方不明となり、これは CO₂ の “missing sink” 問題と呼ばれている。この行方不明の CO₂ が海洋に吸収されているのか、それとも陸上生態系によって固定されているのかという問題は、研究者の間で大きく見解が異なっている。海洋が大気中の CO₂ の吸収源 (Sink) になっているか、発生源 (Source) になっているかを議論する場合、表面海水中の二酸化炭素分圧、P_{CO₂} (CO₂ 平衡分圧、すなわち海水中に溶存している CO₂ の量に平衡な大気中の CO₂ 分圧) と大気中 CO₂ 濃度の差 (ΔP_{CO₂}) を測定しなければならない。しかし、全海洋の ΔP_{CO₂} を、限られた観測船による調査で把握する事は困難であり、現在推定されている海洋の CO₂ 吸収量は大きな誤差を含んでいると考えられている (IPCC, 1990)。

近年、CO₂ の “missing sink” 問題は、基礎生産力の大きな沿岸海域において大気から吸収され、外洋の深海へ輸送されている炭素によって説明でき得る可能性が指摘されている (例えば、Walsh *et al.*, 1981; Yanagi *et al.*, 1993)。しかしながら、沿岸海域の表面海水中 P_{CO₂} に関する研究は、これまでほとんど行われていない。そこで筆者は、典型的な沿岸海域である瀬戸内海をフィールドとし、以下の研究目的をもって研究を行い、6章から成る本論文をまとめた。

- (1) 瀬戸内海表面海水の P_{CO₂} の空間的、時間的変動、およびそれらの変動要因を明らかにする。
- (2) 沿岸海域と外洋海域の表面海水中 P_{CO₂} の違いを明らかにする。

広島大学総合科学部紀要Ⅳ理系編、第21巻 (1995)

*広島大学審査学位論文

口頭発表日：1995年2月10日、学位取得日 1995年3月24日

**現在の所属：国立環境研究所、茨城県つくば市小野川16-2

(3) (1)の結果をもとに瀬戸内海表面海水と大気間の CO_2 フラックスを評価する。

第2章 表面海水中二酸化炭素分圧の測定方法の検討

本章では、従来の表面海水中 Pco_2 の測定方法を検討し、本研究で新たに製作した装置の概略を示した。 Pco_2 の測定方法は、すでに多くの研究者によって報告されている。測定装置は、大きく分けて、「平衡器」と呼ばれる容器を用いて海水から CO_2 平衡ガスを得る部分と、 CO_2 平衡ガス中の CO_2 濃度を測定する部分から構成される。本研究では、表面海水をポンプで連続的に汲み上げ、体積約20Lの平衡器で CO_2 平衡ガスを得た。 CO_2 濃度は、非分散赤外分光光度計 (NDIR) で測定した。また、市販の Pco_2 測定装置 (紀本電子工業) との間で相互検定を行い、本研究で製作した Pco_2 測定装置が従来の装置に比較して簡便かつ軽量でありながら、再現性良く高精度に Pco_2 を測定できることを示した。

第3章 瀬戸内海伊予灘における二酸化炭素分圧の季節変動

本章では、1993年9月、1994年1月、5月上旬、5月下旬の4回の瀬戸内海伊予灘の表面海水中 Pco_2 の観測結果から、同海域における Pco_2 の時間 (季節) 変動を考察した。1994年1月から5月下旬の Pco_2 は、時間的変動が小さく (約 $300 \mu \text{ atm}$)、その変動はおおむね水温の変動によって説明できた。一方、夏季の1993年9月に観測された Pco_2 は伊予灘南部から中央部にかけて約 $150 \sim 250 \mu \text{ atm}$ と低く、伊予灘北部で $450 \mu \text{ atm}$ 以上と高くなっていった。このように大きな Pco_2 の変動は、夏季の伊予灘の鉛直構造に起因していることが考察された。伊予灘南部から中央部にかけては、伊予灘中央部の成層域と速吸瀬戸で海水が鉛直混合された海域との間に潮汐フロントが形成されていた。同海域における Pco_2 の減少は、そのフロント域における活発な植物プランクトンの一次生産によると考察された。夏季、伊予灘南部において潮汐フロントが形成されることは、Takeoka *et al.* (1993) によっても確認されている。一方、伊予灘北部で観測された高い Pco_2 は、伊予灘北端に位置する水道 (海峡) における潮汐流にともなう海水の鉛直混合によって、底層の全炭酸濃度の高い海水が表層にもたらされたことによるのではないかと考えられた。また、観測された大気中の CO_2 濃度の平均値は、 $366.6 \mu \text{ atm}$ であり、9月の伊予灘北部での測定値を除くと表面海水の Pco_2 は、大気中 CO_2 濃度よりも低かった。一年を通して平均すると、伊予灘表面海水は大気中 CO_2 の Sink として働いていると考察された。

第4章 瀬戸内海全域における二酸化炭素分圧の分布

本章では、1994年1月の瀬戸内海各海域の表面海水中 Pco_2 の分布と、その要因について考察した。1994年1月の瀬戸内海表面海水の Pco_2 は、 $160 \sim 350 \mu \text{ atm}$ の範囲で空間的に変動していた。 Pco_2 の水平分布は、以下にあげる3つの要因で説明できると考えられた。相対的にクロロフィル濃度が高かった周防灘西部、燧灘東部、備讃瀬戸西部、播磨灘北部、大阪湾北部では Pco_2 が相対的に低くなっていた。それらの海域は閉鎖性が強く富栄養化が進んだ海域であり、植物プランクトンの一次生産によって全炭酸濃度が減少し、 Pco_2 が低下したと考えられた。一方、広島湾奥部ではクロロフィル濃度が高かったにも関わらず Pco_2 が高くなっていた。これは、同海域で沿岸湧昇が起これ、底層の pH の低い海水が表層にもたらされたためではないかと考えられた。クロロフィル濃度が低

かった豊後水道、伊予灘、周防灘東部、安芸灘、備後灘、燧灘西部、備讃瀬戸東部、播磨灘南部、大阪湾南部、紀伊水道では、 P_{CO_2} が相対的に高かった。これらの海域の P_{CO_2} の分布は、相対的に全炭酸濃度が低く pH の高い外洋水系の海水と、相対的に全炭酸濃度が高く pH の低い閉鎖性の強い沿岸海水の混合によって説明できた。また、観測を通して瀬戸内海海上で測定された大気中の CO_2 濃度の平均値は、 $370.9 \mu atm$ であり、表面海水中 P_{CO_2} よりも高かった。したがって冬季（1月）の瀬戸内海表面海水は、大気中 CO_2 のSinkとなっていると考えられた。

第5章 沿岸域と外洋域における二酸化炭素分圧の比較

本章では、1994年5月～6月の瀬戸内海伊予灘、豊後水道から四国沖太平洋にかけてと、1994年8月の東京湾から浦賀水道、相模湾、大島南沖太平洋にかけての表面海水中 P_{CO_2} の測定結果から、沿岸域と外洋域の P_{CO_2} を比較した。四国沖太平洋（黒潮域）の表面水はクロロフィル濃度が低く、 P_{CO_2} の水平分布は水温に依存していることが考察された。水温の影響を補正した沿岸域から外洋域にかけての表面海水中 P_{CO_2} は、生物活動の影響が小さい場合、相対的に P_{CO_2} の低い外洋水と P_{CO_2} の高い沿岸水の混合によって支配されていることが考察された。一方、夏季（8月）の東京湾の表面海水は、植物プランクトンの活発な一次生産を反映して海水のpHが上昇し、 P_{CO_2} は外洋に比較して低くなっていた。太平洋から東京湾にかけて、 P_{CO_2} は低下する傾向が見られたが、その水平分布は、クロロフィル濃度の水平分布の増減に対応して、浦賀水道付近の海域で増減していた。このような P_{CO_2} とクロロフィル濃度の分布は夏季、瀬戸内海伊予灘で観測された潮汐フロントにおけるクロロフィル濃度と P_{CO_2} の関係とよく似ており、夏季、浦賀水道付近の海域に潮汐フロントが形成されていたことが推察された。

第6章 総合考察

最終章の本章では、第3章～第5章の結果を総合的に考察した。第3章～第5章の結果から瀬戸内海表面海水の P_{CO_2} の分布と挙動は、次のようにまとめられた。「瀬戸内海は富栄養化が進んだ海域であり、その中で閉鎖性が強く栄養塩が豊富な陸水の影響が大きい海域では、植物プランクトンの一次生産によって1年を通して P_{CO_2} が低下している。しかし、外洋域と比較すると海水のpHが高く、夏季、水温の上昇にともなう P_{CO_2} の上昇も大きいと考えられる。さらに水深が浅いため、海底の富栄養化の影響を強く受けた底層水が、海峡部の海水鉛直混合などによって表層に供給されやすく、表面海水中 P_{CO_2} が大気中 CO_2 濃度よりも高くなる海域がある。」

外洋海域（高緯度海域は除く）の P_{CO_2} は、概ね水温に依存しているのに対して、沿岸海域である瀬戸内海の P_{CO_2} は季節、及び海域によって大きく変動していることがわかった。また、薄層モデルから、1年間の瀬戸内海表面海水と大気間の CO_2 フラックスは 1.2×10^5 トン炭素と見積もられた。本研究の結果からは、沿岸海域における大気中 CO_2 の吸収の過小評価だけでは CO_2 のmissing sinkを説明することは困難であると結論された。

参考文献

IPCC (1990): Climate Change The IPCC Scientific Assessment. the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, 365 pp.

- Takeoka, H., O. Matsuda and T. Yamamoto (1993): Processes causing the chlorophyll a maximum in the tidal front in Iyo-Nada, Japan. *J. Oceanogr.*, **49**, 57-70.
- Walsh, J. J., G. T. Rowe, R. L. Iverson and C. P. McRoy (1981): Biological export of shelf carbon is a sink of the global CO₂ cycle. *Nature*, **291**, 196-201.
- Yanagi, T., T. Saino, T. Ishimaru and S. Uye (1993): A carbon budget in Tokyo Bay. *J. Oceanogr.*, **49**, 249-256.