

学位論文題名

Study on the Carbon Cycle in the Western North Pacific
Subtropical Gyre using the Stable Carbon Isotope of
Dissolved Inorganic Carbon

(溶存無機炭素の炭素安定同位体を用いた西部北太平洋亜熱帯域における
炭素循環に関する研究)

学位論文内容の要旨

近い将来、地球の気温が大気中の二酸化炭素濃度増加によってどの程度上昇するのか、その計算は今後の大気中二酸化炭素の濃度変化の見積もりに基づいている。我々の活動によって大気に放出された二酸化炭素は、全てが大気中に蓄積されていくわけではなく、IPCC(2007)によれば、放出された二酸化炭素のうち大気に残っているのは57%に過ぎず、12%と31%をそれぞれ陸域と海洋が吸収しているとの見積もられている。つまり、海洋は人類の放出した二酸化炭素を吸収することによって急激な気候変化を緩和する働きがある。しかし、海洋による二酸化炭素吸収は一様ではなく、主に緯度によって大きく異なる特徴を示す。さらに、その海域特有の季節変動や年々変動を示すことから、全球の海洋による二酸化炭素の吸収量(CO₂フラックス)の正確な見積もりは非常に難しい。よって、大気中の二酸化炭素濃度が今後どのように増加するかをより正確に予想するには、どこで・どのくらい・どのように二酸化炭素が吸収されるかを正確に評価することが必要不可欠である。北太平洋亜熱帯域は、北太平洋に占めるその広大な面積ゆえに、全球の見積もりに対する寄与も大きいと考えられるにもかかわらず、赤道域や亜寒帯域ほど研究は進んではいない。

そこで本研究では、北太平洋亜熱帯域における炭素循環を解明することを目的として、北太平洋亜熱帯域におけるCO₂フラックスの見積もりとその制御要因の解明、及び制御要因の変動及び寄与率の解明を試みた。

まず、北太平洋亜熱帯域において、海洋表層の二酸化炭素分圧(pCO₂sea)の季節変動やCO₂フラックスとその変動要因の東西による差異を明確にするために、ボランティア観測船によって得られた高頻度データを元に、pCO₂seaを表層の温度と塩分あるいは密度で回帰させ、黒潮続流域(WNP; 25–40°N, 140–170°E)及びカリフォルニア海流域(ENP; 25–40°N, 120–150°W)において高分解能(緯度経度1°×1°グリッド)でpCO₂sea及びCO₂フラックスの分布を求めた。東西共に、亜熱帯域の北縁で最も大きなΔpCO₂の変動が見られた。西部は大気からのCO₂の重要な吸収源であり、その吸収量は1999年で0.14 ± 0.03 Gt-C yr⁻¹ (6.7±1.6 mol m⁻² d⁻¹)、2000年で0.16 ± 0.04 Gt-C yr⁻¹ (7.6±1.7 mol m⁻² d⁻¹)と見積もられた。一方、東部はわずかしき吸収しておらず、吸収量は1999年で0.03 ± 0.02 Gt-C yr⁻¹ (1.9±1.3 mol m⁻² d⁻¹)、2000年で0.02 ± 0.03 Gt-C yr⁻¹ (1.1±1.4 mol m⁻² d⁻¹)であった。pCO₂seaの季節変動

の原因を明らかにするために、水温、塩分、全炭酸(DIC)、アルカリ度(TA) の変化が $p\text{CO}_2\text{sea}$ の変動に及ぼす影響を見積もった。その結果、東部では $p\text{CO}_2\text{sea}$ の変動はほとんど($\sim 70\%$)水温の変化で説明できるのに対し、西部では温度の効果によって $p\text{CO}_2\text{sea}$ が上がる効果が全炭酸の減少によって緩和されるなど、大気からの二酸化炭素吸収量の増減に全炭酸の変動が大きく関与していることが明らかになった。しかし、全炭酸が何によって変動するのかはわからなかった。

そこで、全炭酸の変動要因の寄与率を明らかにするために、その値の差を利用して起源の推定等に用いられる炭素安定同位体($\delta^{13}\text{C}$)を使用することとした。全炭酸とその $\delta^{13}\text{C}$ の質量収支式を解く事によって、全炭酸変動に対する生物活動(net community production; NCP)の影響及びその他の要因の寄与を見積もった。海水サンプル及びその他のパラメータは気象庁の凌風丸及び啓風丸によって西部北太平洋(137°E - 10°N , 20°N , 30°N)において、2003年6月~2008年1月の期間中に各季節4回の頻度で採取された。5年間で、この海域の表層の $\delta^{13}\text{C}$ は人為起源二酸化炭素の吸収によって 30°N で 0.030‰ yr^{-1} 、 20°N で 0.021‰ yr^{-1} 、 10°N で 0.011‰ yr^{-1} 減少し、同時に全炭酸の増加が見られた。塩分で規格化した全炭酸(NDIC)は、例えば、春から夏にかけて 30°N 、 20°N 、 10°N それぞれ平均して $18.7\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $9.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $11.4\mu\text{mol kg}^{-1}$ 減少していた。同時に、 $\delta^{13}\text{C}$ はそれぞれ平均して 0.09‰ 、 0.08‰ 、 0.08‰ 増加していた。対照的に秋から冬に掛けては、NDICは、 30°N 、 20°N 、 10°N それぞれ平均して $26.8\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $9.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $5.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 増加し、同時に $\delta^{13}\text{C}$ は平均で 0.23‰ 、 0.08‰ 、 0.05‰ 減少していた。 30°N において大きくNDICが増加・ $\delta^{13}\text{C}$ が減少するのは、混合層が時に200m近くまで深くなることによるエントレイメントによる効果が大きかったが、より南の点では、エントレイメントの効果は小さかった。また、一般に亜熱帯域は表層の栄養塩が枯渇しているために、ほとんど生産は起こっていないと考えられてきたが、本研究によって、これらの亜熱帯域においても無視できないほどの生産が起こっており、全炭酸の変動に大きく影響していることが示唆された。特に他の要因の寄与が小さい 20°N や 10°N では、生物による影響が全炭酸の変動に対して相対的に大きな役割を担っていた。

本研究によって、今まで明らかでなかった西部北太平洋の黒潮続流域における $p\text{CO}_2\text{sea}$ 及び CO_2 フラックスの詳細な分布を得た。さらに、北太平洋亜熱帯域では東部よりも西部において大気中 CO_2 の非常に重要な吸収域となっており、それは全炭酸の変動が大きく関わっていることを明らかにした。この全炭酸の変動には、今まで考えられていたよりも大きく生物活動が寄与している事が示された。本研究の結果は、今後の全球における CO_2 吸収量の見積もりに影響を及ぼす可能性がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 吉 川 久 幸

副 査 名誉教授 乗 木 新一郎

副 査 教 授 杉 本 敦 子

副 査 准教授 渡 辺 豊

副 査 チームリーダー

村 田 昌 彦 (海洋研究開発機構)

地球環境変動領域)

学 位 論 文 題 名

Study on the Carbon Cycle in the Western North Pacific Subtropical Gyre using the Stable Carbon Isotope of Dissolved Inorganic Carbon

(溶存無機炭素の炭素安定同位体を用いた西部北太平洋亜熱帯域における
炭素循環に関する研究)

近い将来、地球の気温が大気中の二酸化炭素(CO_2)濃度増加によってどの程度上昇するのかは、今後の大気中 CO_2 の濃度変化の見積もりに基づいて予測されている。現在は、人類の活動によって大気に放出された CO_2 は、全てが大気中に蓄積されていくわけではなく、IPCC(2007)によれば、放出された CO_2 のうち大気に残っているのは57%に過ぎず、12%と31%をそれぞれ陸域と海洋が吸収しているとの見積もられている。大気中の CO_2 濃度が今後どのように増加するかを正確に予想するためには、少なくとも現在、どこで・どのくらい・どのように CO_2 が吸収されているかを定量的に評価することが必要不可欠である。北太平洋亜熱帯域は、北太平洋に占めるその広大な面積ゆえに、全球の見積もりに対する寄与も大きいと考えられるにもかかわらず、赤道域や亜寒帯域ほど研究は進んではいない。そこで本研究では、北太平洋亜熱帯域における海洋炭素循環を解明することを目的として、大気-海洋間 CO_2 フラックスの見積もりとその制御要因、更にはその制御要因変動の解明を試みた。

まず、北太平洋亜熱帯域において、ボランティア観測船によって得られた高頻度データをもとに、海洋二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2^{\text{sea}}$) を表層の温度と塩分あるいは密度で回帰し、黒潮続流域(WNP; 25-40° N, 140-170° E)において緯度経度1° ×1° グリッドで $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ 及び CO_2 フラックスの分布を求めた。その結果、亜熱帯域の北縁で最も大きな大気-海洋間 CO_2 分圧差の変動が見られた。西部北太平洋は大気からの CO_2 の重要な吸収域であり、その吸収量は2000年で $0.16 \pm 0.04 \text{ Gt-C yr}^{-1}$ ($7.6 \pm 1.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) と見積もられた。 $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ の季節変動の原因を明らかにするために、水温、塩分、全炭酸、アルカ

り度の変化が $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ の変動に及ぼす影響を見積もった。その結果、温度の効果によって $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ が上がる効果が、全炭酸の減少によって緩和されることが明らかになった。しかし、全炭酸が何によって変動するのかは、不明のまま残った。

そこで、全炭酸の変動要因を明らかにするために、その値の差を利用して起源の推定等に用いられる炭素安定同位体($\delta^{13}\text{C}$)を使用することとした。全炭酸とその $\delta^{13}\text{C}$ の質量収支式を解く事によって、全炭酸変動に対する生物活動(net community production; NCP)の影響及びその他の要因の寄与を見積もった。海水サンプルは、気象庁の「凌風丸」及び「啓風丸」によって西部北太平洋(137°E - 10°N 、 20°N 、 30°N)において、2003年6月～2008年1月の期間中に年4回の頻度で採取された。塩分で規格化した全炭酸(NDIC)は、例えば、春から夏にかけて 30°N 、 20°N 、 10°N それぞれ平均して $18.7\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $9.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $11.4\mu\text{mol kg}^{-1}$ 減少していた。同時に、 $\delta^{13}\text{C}$ はそれぞれ平均して 0.09‰ 、 0.08‰ 、 0.08‰ 増加していた。対照的に秋から冬に掛けては、NDICは、 30°N 、 20°N 、 10°N それぞれ平均して $26.8\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $9.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、 $5.2\mu\text{mol kg}^{-1}$ 増加し、同時に $\delta^{13}\text{C}$ は平均で 0.23‰ 、 0.08‰ 、 0.05‰ 減少していた。 30°N において大きくNDICが増加・ $\delta^{13}\text{C}$ が減少するのは、混合層が時に200m近くまで深くなることによるエントレイメントによる効果が大きいことによったが、より南の点ではエントレイメントの効果は小さかった。また、一般に亜熱帯域は表層の栄養塩が枯渇しているために、ほとんど生産は起こっていないと考えられてきたが、本研究によって、これらの亜熱帯域においても無視できないほどの生産が起こっており、全炭酸の変動に大きく影響していることが示唆された。特に他の要因の寄与が小さい 20°N や 10°N では、生物による影響が全炭酸の変動に対して相対的に大きな役割を担っていた。

本研究によって、西部北太平洋の黒潮続流域における $p\text{CO}_2^{\text{sea}}$ 及び大気-海洋間 CO_2 フラックスの詳細な分布を得た。さらに、北太平洋西部亜熱帯域は大気中 CO_2 の非常に重要な吸収域となっており、それは全炭酸の変動由来であることを明らかにした。この全炭酸の変動には、今まで考えられていたよりも大きく生物活動が寄与している事が示された。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。