

学 位 論 文 題 名

A study on the anthropogenic carbon
in the western North Pacific based
on the time-series observation of stable carbon isotope

（炭素安定同位体比の時系列観測に基づいた
西部北太平洋における人為起源二酸化炭素に関する研究）

学位論文内容の要旨

産業革命を期に我々は化石燃料の燃焼、森林開発により大気中へ二酸化炭素（人為起源二酸化炭素）を放出し続けている。産業革命以後、約 30% の二酸化炭素の増加をもたらしている。放出されている人為起源二酸化炭素の約半分が大気中に残り、残り約半分以上を陸域、海洋が吸収していると考えられているが、陸域、海洋にどの程度分配されるか、さらにどの地域、海域に人為起源二酸化炭素が蓄積しているかが問題となっている。特に、海洋においては、高緯度域は、中・深層水が形成するため、海洋内部へ人為起源二酸化炭素を輸送している点で非常に重要となっている。

人為起源二酸化炭素は主に石油、石炭等であるので、特徴として炭素同位体組成が軽い炭素($\delta^{13}\text{C}$ が低い)を多く含む組成である。人為起源二酸化炭素は、二酸化炭素の増加とともに大気中二酸化炭素同位体組成をより軽い炭素を多く含む組成への変化をもたらしている。この影響は海洋へももたらされ、海洋中の溶存無機炭素(DIC)の同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$) も減少している（スウス効果）。スウス効果を推定することは化石燃料の消費等による人為起源の二酸化炭素の行方を直接的に明らかにすることとなる。さらに、スウス効果と DIC の増加速度比(D 値)が推定されることにより、海洋内部の人為起源二酸化炭素量を明らかにすることができる。現在、この $\delta^{13}\text{C}$ の減少速度を最も良く推定できる方法として、海洋中の定点における時系列観測であるが、全海洋で 2 測点、亜寒帯域には存在せず亜熱帯域のみという現状である。そこで、本研究では、北太平洋中層水形成域である北太平洋の亜寒帯域の定点で $\delta^{13}\text{C}$ の時系列観測を行うことし、その観測に基づいてスウス効果、D 値を見積もることとした。

西部北太平洋亜寒帯域である観測定点 KNOT (44°N, 155°E) でスウス効果を明らか

にするために 1997 年 7 月から 2001 年 7 月において $\delta^{13}\text{C}$ を中心に時系列観測を行った。この亜寒帯域での時系列観測は世界で初めて行ったものである。時系列観測の結果、表面海水中の $\delta^{13}\text{C}$ は、夏季に高く、冬期に低い値となった。これは、春季から夏季での生物活動による海水の $\delta^{13}\text{C}$ に比べ低い有機物の生成、すなわち、相対的に $\delta^{13}\text{C}$ が高くなり、秋季から冬期の減少は下層で分解した有機物の影響を受けた海水が鉛直混合の増加により供給された影響である。この季節変動は $\delta^{13}\text{C}$ で 1.2‰ となり、他の時系列観測による季節変動の 5-10 倍であった。表面海水中のスウス効果を見積もる際、観測した $\delta^{13}\text{C}$ を生物活動とスウス効果を単純なフーリエ展開で分離し、それを本研究で得られた 5 年の時系列データに適応することにより推定できることを提示した。その結果、亜寒帯域の時系列定点における初めてのスウス効果、 -0.012‰ yr^{-1} を見積もることができた。亜熱帯域の他の時系列点におけるスウス効果、 -0.025‰ yr^{-1} 、に比べ低い値であった。これは亜熱帯と亜寒帯の表面水での滞留時間の違いと考えられる。さらに、同時に全炭酸の増加速度も同様に見積もることにより、スウス効果/全炭酸の増加速度(D 値)を $-0.012\text{‰} (\mu\text{mol kg}^{-1})^{-1}$ 推定した。この比は、全球的に一定であると報告されていたが、海域毎に異なることが明らかになった。

北太平洋亜寒帯域は、北太平洋中層水の形成域であり、海洋内部へ人為起源二酸化炭素を輸送する海域として重要である。そこで、5 年の時系列データより新しく推定した亜寒帯の D 値からこの海域内部に輸送された人為起源二酸化炭素蓄積量を見積もることとした。海洋内部の $\delta^{13}\text{C}$ は、海面における大気海洋間の二酸化炭素の気体交換、有機物の分解、炭酸カルシウムの溶解により変化する。観測定点 KNOT での 1999 年 5 月から 2000 年 2 月の等密度面 $26.9-27.4\sigma_\theta$ (水深 240m~840m) の中層において、DIC と $\delta^{13}\text{C}$ の関係が表面との関係と同じ、すなわち、生物活動の影響が表面から中層まで同じ関係であることを初めて見つけ、この関係により二酸化炭素の気体交換での $\delta^{13}\text{C}$ 値を簡単に見積もることができた。この結果から、海洋内部に輸送された人為起源二酸化炭素量を $107 \pm 45 \text{ gC/m}^2$ と見積もられた。さらに、観測定点 KNOT 水柱での人為起源二酸化炭素量を $217 \pm 56 \text{ gC/m}^2$ と見積もり、これまでの北太平洋で見積もられた人為起源二酸化炭素量より低いものであった。これは、これまでの推定値に人為起源以外の二酸化炭素、すなわち非人為起源二酸化炭素量も加わっていたためと考えられる。人為起源二酸化炭素量を正確に見積もる手法として $\delta^{13}\text{C}$ のスウス効果を用いた推定法が有用であることを示唆した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 乗 木 新 一 郎

副 査 教 授 吉 川 久 幸

副 査 助 教 授 渡 辺 豊

副 査 主任研究官 石 井 雅 男

(気象研究所地球化学研究部)

学 位 論 文 題 名

A study on the anthropogenic carbon in the western North Pacific based on the time-series observation of stable carbon isotope (炭素安定同位体比の時系列観測に基づいた

西部北太平洋における人為起源二酸化炭素に関する研究)

産業革命を期に我々は化石燃料の燃焼、森林開発により大気中へ二酸化炭素（人為起源二酸化炭素）を放出し続けている。人為起源二酸化炭素の約半分が大気中に残り、残り約半分を陸域、海洋が吸収していると考えられているが、陸域、海洋にどの程度分配されるか、さらにどの地域、海域に人為起源二酸化炭素が蓄積しているかが問題となっている。特に、海洋においては、高緯度域は、中・深層水が形成するため、海洋内部へ人為起源二酸化炭素を輸送している点で非常に重要となっている。

人為起源二酸化炭素は主に石油、石炭等であるので、特徴として炭素同位体組成が軽い炭素($\delta^{13}\text{C}$ が低い)を多く含む組成である。人為起源二酸化炭素は、二酸化炭素の増加とともに大気中二酸化炭素の $\delta^{13}\text{C}$ を減少させる。この影響は大気と気体交換している海洋にも影響し、海洋中の溶存無機炭素(DIC)の $\delta^{13}\text{C}$ も減少させる（スウス効果）。スウス効果を推定することは化石燃料の消費等による人為起源の二酸化炭素の行方を直接的に明らかにすることとなる。さらに、スウス効果と DIC の増加速度比(D 値)が推定されることにより、海洋内部の人為起源二酸化炭素量を明らかにすることができる。本研究では、北太平洋中層水形成域である北太平洋の亜寒帯域の定点で $\delta^{13}\text{C}$ の時系列観測を行うことし、その観測に基づいてスウス効果、D 値を見積もることとした。

西部北太平洋亜寒帯域である観測定点 KNOT (44°N, 155°E) でスウス効果を明らかにするために 1997 年 7 月から 2001 年 7 月において $\delta^{13}\text{C}$ を中心に時系列

観測を行った。この亜寒帯域での時系列観測は世界で初めて行ったものである。表面海水中のスウス効果を見積もる際、観測した $\delta^{13}\text{C}$ を生物活動とスウス効果を単純なフーリエ展開で分離し、それを本研究で得られた 5 年の時系列データに適応することにより推定でき、 -0.012‰ yr^{-1} と見積もることができた。さらに、同時に全炭酸の増加速度も同様に見積もることにより、スウス効果/全炭酸の増加速度(D 値)を $-0.012\text{‰ }(\mu\text{mol kg}^{-1})^{-1}$ と推定した。この比は、全球的に一定であると報告されていたが、海域毎に異なることが明らかになった。

北太平洋亜寒帯域は、北太平洋中層水の形成域であり、海洋内部へ人為起源二酸化炭素を輸送する海域として重要である。海洋内部の $\delta^{13}\text{C}$ は、海面における大気海洋間の二酸化炭素の気体交換、有機物の分解、炭酸カルシウムの溶解により変化する。観測定点 KNOT での 1999 年 5 月から 2000 年 2 月の等密度面 $26.9 - 27.4\sigma_\theta$ (水深 240m~840m) の中層において、DIC と $\delta^{13}\text{C}$ の関係が表面との関係と同じ、すなわち、生物活動の影響が表面から中層まで同じ関係であることを初めて見つけ、この関係により二酸化炭素の気体交換での $\delta^{13}\text{C}$ 値を簡単に推定することができた。この結果から、海洋内部に輸送された人為起源二酸化炭素量を $107 \pm 45 \text{ gC/m}^2$ と見積もられた。さらに、観測定点 KNOT 水柱での人為起源二酸化炭素量を $217 \pm 56 \text{ gC/m}^2$ と見積ができ、これまで北太平洋で見積もられた人為起源二酸化炭素量より低いものであった。これは、これまでの推定値には非人為起源二酸化炭素量も加わっていたためと考えられる。人為起源二酸化炭素量を正確に見積もる手法として $\delta^{13}\text{C}$ のスウス効果を用いた推定法が有用であることを示唆した。

申請者は海洋へ的人為起源二酸化炭素の吸収について海水中溶存無機炭素の炭素安定同位体比の時系列観測を用いて推定した。西部北太平洋亜寒帯域において世界で初めて時系列観測を行い、単純なフーリエ展開を用いることにより亜寒帯域のスウス効果、D 値を初めて推定した。さらに、鉛直的な 1 年の時系列観測を行うことにより、 $\delta^{13}\text{C}$ と DIC の関係が時間で変化しないことを初めて発見した。この事実と上述の D 値から海洋内部へ吸収された人為起源二酸化炭素量を推定することが出来た。これらの知見は、オリジナリティが非常に高く、重要な研究である。

審査員一同は、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、大学院課程における研鑽や取得単位などもあわせ申請者が博士(地球環境科学)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。