

学 位 論 文 題 名

The increase rate of CO<sub>2</sub> in the western subarctic  
North Pacific and the Okhotsk Sea

（西部北太平洋亜寒帯域とオホーツク海における二酸化炭素の増加速度）

学位論文内容の要旨

大気中人為起源二酸化炭素は、化石燃料の燃焼などにより 18 世紀から現在までに約 30%増加している。大気海洋間の二酸化炭素の気体交換などにより、大気中人為起源二酸化炭素は、1990 年代において、海洋へ約 1.7 GtC/yr 吸収され、その結果、海洋の中・深層へ輸送されている。特に、高緯度域は、高生物生産、高溶解度により、大気中人為起源二酸化炭素を海洋へ多く吸収し、中・深層水の形成により海洋内部へ輸送している。本研究の目的は、北太平洋中層水の形成域として重要な西部北太平洋亜寒帯域とその縁辺海であるオホーツク海において、海水中の溶存無機炭素（DIC）とそれに関わる成分（アルカリ度（TA）、溶存酸素、栄養塩）を用いて、海洋内部へ輸送された人為起源二酸化炭素の増加速度を直接見積もることである。

西部北太平洋亜寒帯域の Station KNOT (44°N, 155°E) における 1992～2001 年の詳細かつ高精度な 10 年間のデータセットを用いて、等密度面 26.9 – 27.3 .

（水深 230m～630m）の中層水において、DIC が増加していた。その増加速度は、1.3 – 2.6 （平均 2.0） . mol/kg/yr で有意に増加し、深さとともに減少していた。その中層水の TA において、10 年の変化は有意になく、一定であった。このことから、大気中人為起源二酸化炭素の増加速度に追隨して、その中層水へ取り込まれた人為起源二酸化炭素の増加速度は、0.5 – 0.7 （平均 0.6） . mol/kg/yr と見積もられた。一般に、海洋内部の DIC は、海面での二酸化炭素の大気海洋間の気体交換、有機物の分解、炭酸カルシウムの溶解により変化する。DIC の増加速度から人為起源二酸化炭素の増加速度を消去した結果、求められる有機物の分解に起因する DIC の増加速度（1.7 – 2.1 . mol/kg/yr）は、等密度面 26.9 – 27.1 . において、有機物の分解の指標である見かけの酸素消費量（AOU）から求めたもの（0.8 – 1.2 . mol/kg/yr）と有意に異なっていた。これは、

この等密度面の中層水を形成する海域において、海面での二酸化炭素の気体交換過程の結果によって増加したためである。すなわち、この水塊の形成域において、冬季混合層が浅くなり、水塊の形成量が低下し、大気に放出するはずのCO<sub>2</sub>（非人為起源二酸化炭素）が海洋中に蓄積したためである。よって、DICの増加速度の要因は、海洋内部に輸送された人為起源二酸化炭素の増加と水塊の形成速度の減少による非人為起源二酸化炭素の増加であることが示唆された。

北部オホーツク海において、海水形成に伴い排出されたブラインにより生成された高密度陸棚水は、オホーツク海中層水へ流出することにより、人為起源二酸化炭素を海洋内部へ輸送できる。冬季混合層の残存である中冷水は、海水形成時に表面に存在し、高密度陸棚水の起源である可能性がある。そこで、海水形成を伴う亜寒帯縁辺海（オホーツク海）において、沈み込む水（高密度陸棚水）とその起源水（中冷水）のAOUとDICを比較することにより、海洋内部へ輸送された人為起源二酸化炭素の増加速度を見積もる新しい方法を提示した。その方法をオホーツク海に応用した結果、高密度陸棚水により海洋内部へ輸送された人為起源二酸化炭素の増加速度は、1993～2000年までの8年間で、平均  $1.1 \mu\text{mol/kg/yr}$  と見積もられた。また、オホーツク海における表層水の人為起源二酸化炭素の増加速度は、平均 0.7(春-秋), 1.1 (冬)  $\mu\text{mol/kg/yr}$  と見積もられた。一般に、水温が高いほど、人為起源二酸化炭素の増加速度は大きくなる。オホーツク海は、海水形成により、西部北太平洋亜寒帯域の Station. KNOT よりも水温が低いにもかかわらず、オホーツク海の増加速度は、西部北太平洋亜寒帯域の Station. KNOT のものよりも大きかった。このことから、オホーツク海は、北太平洋に対して、大気海洋間の人為起源二酸化炭素吸収において、重要な海域であることが示された。高密度陸棚水によりオホーツク海中層水へ輸送された人為起源炭素の蓄積速度は、 $3.8 \times 10^{12} \text{ gC/yr}$  と見積もられた。オホーツク海における表層水の人為起源炭素の蓄積速度は、 $4.9 \times 10^{11} \text{ gC/yr}$  であった。北太平洋における人為起源炭素の蓄積速度 ( $0.55 \times 10^{15} \text{ gC/yr}$ ) と比較した結果、オホーツク海の人為起源二酸化炭素の蓄積量は、北太平洋よりも非常に小さかった。よって、オホーツク海は、海水形成により人為起源二酸化炭素を北太平洋亜寒帯域よりも多く、海洋内部へ輸送することができるが、その蓄積量は小さいことが示された。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 乗 木 新 一 郎

副 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 教 授 吉 川 久 幸

副 査 助 教 授 渡 辺 豊

副 査 研究主幹 渡 邊 修 一 (海洋科学技術センター)

## 学 位 論 文 題 名

### The increase rate of CO<sub>2</sub> in the western subarctic North Pacific and the Okhotsk Sea

(西部北太平洋亜寒帯域とオホーツク海における二酸化炭素の増加速度)

大気中人為起源二酸化炭素は、18世紀から現在までに約30%増加し、1990年代においては、海洋へ約1.7 GtC/yr 吸収され、海洋の中・深層へ輸送されている。特に、高緯度域では、中・深層水が形成されるため、海洋内部へ人為起源二酸化炭素が輸送されている。本研究の目的は、西部北太平洋亜寒帯域とその縁辺海であるオホーツク海において、海水中の溶存無機炭素 (DIC) とそれに関わる成分 (アルカリ度 (TA)、溶存酸素、栄養塩) を用いて、海洋内部へ輸送された人為起源二酸化炭素の増加速度を直接見積もることである。

西部北太平洋亜寒帯域の Station KNOT (44°N, 155°E) における 1992～2001 年の 10 年間のデータセットを用いて、等密度面 26.9–27.3  $\sigma_\theta$  (水深 230m～630m) における DIC は、1.3–2.6 (平均 2.0)  $\mu\text{mol/kg/yr}$  で有意に増加していた。そして、その増加速度は深さとともに減少していたことを明らかにした。TA は 10 年間、変化はなかったことから、大気中人為起源二酸化炭素の増加速度に追従した人為起源二酸化炭素の増加速度は、0.5–0.7 (平均 0.6)  $\mu\text{mol/kg/yr}$  と見積もられた。DIC の増加速度から人為起源二酸化炭素の増加速度を消去した結果、求められる有機物の分解に起因する DIC の増加速度 (1.7–2.1  $\mu\text{mol/kg/yr}$ ) は、等密度面 26.9–27.1  $\sigma_\theta$  において、有機物の分解の指標である見かけの酸素消費量 (AOU) から求めたもの (0.8–1.2  $\mu\text{mol/kg/yr}$ ) と異なっていた。これは、この水塊の形成域において、冬季混合層が浅くなり、水塊の形成量が低下し、大気に放出するはずの二酸化炭素 (非人為起源二酸化炭素) が、海洋中に蓄積したためであると考えられる。従って、DIC の増加速度の要因は、海洋内部に輸送された人為起源二酸化炭素の増加と水塊の形成速度の減少による非人為起源二酸化炭素の増加であることがわかった。これらの結果は、北大西洋亜熱帯域でも示唆

されているが、北太平洋亜寒帯域で見つけられたのは初めてであり、新しく非常に重要な知見である。大気中二酸化炭素濃度の長期観測が地球の気候変化を明らかにしたように、このような同一観測点での 10 年間のデータセットから見積もられた海洋内部に輸送された人為起源二酸化炭素増加速度の見積もりは、今後の地球環境の変化を予測することを可能にする。

北部オホーツク海において、海氷形成に伴い排出されたブラインにより生成された高密度陸棚水は、オホーツク海中層水へ流出することにより、人為起源二酸化炭素を海洋内部へ輸送できる。高密度陸棚水とその起源である冬季混合層の残存の中冷水における AOU と DIC を比較することにより、海洋内部へ輸送された人為起源二酸化炭素の増加速度を見積もる新しい方法を提示した。その方法をオホーツク海に応用した結果、高密度陸棚水により海洋内部へ輸送された人為起源二酸化炭素の増加速度は、1993～2000 年までの 8 年間で、平均  $1.1 \mu\text{mol/kg/yr}$  と見積もられた。また、オホーツク海における表層水の人為起源二酸化炭素の増加速度は、平均 0.7(春-秋), 1.1 (冬)  $\mu\text{mol/kg/yr}$  と見積もられた。一般に、水温が高いほど、人為起源二酸化炭素の増加速度は大きくなるが、オホーツク海は TA がより大きいため、その増加速度は、西部北太平洋亜寒帯域の Station. KNOT よりも大きかった。さらに、オホーツク海の人為起源二酸化炭素の蓄積速度 ( $0.78 \times 10^{12} \text{ gC/yr}$ ) は、北太平洋 ( $550 \times 10^{12} \text{ gC/yr}$ ) よりも小さいが、オホーツク海の人為起源二酸化炭素の吸収フラックス ( $10 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ ) は、北太平洋 ( $6.7 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ )、全海洋平均 ( $4.7 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ ) よりも大きかった。これらのことから、オホーツク海は、人為起源二酸化炭素の蓄積量は小さいが、他の海域よりもより効率良く人為起源二酸化炭素を吸収できる海域であることが示された。この新しく簡便な見積もり法は、非常に独創的であり、この方法を今まで見積もられていなかったオホーツク海に適用したことは、非常に重要な試みである。さらに、この方法を他の海氷形成域(例えば、ベーリング海、ウェッデル海など)に適用することにより、人為起源二酸化炭素の吸収における海氷形成域の役割をさらに解明できることが期待される。

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で熱心であり、大学院過程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士(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。