

学 位 論 文 題 名

Formation of the Okhotsk Sea Intermediate Water clarified with chemical tracers

(化学トレーサーによるオホーツク海中層水形成過程の解明)

学位論文内容の要旨

オホーツク海で形成される低温・低塩分で新しい中層水は、千島海峡を通して太平洋へ流出して北太平洋中層水の形成に関与している。北太平洋中層水は北太平洋亜熱帯循環域に広く存在する低塩分水で、人為起源二酸化炭素の吸収源として注目されている。したがってオホーツク海中層水形成過程の解明は、オホーツク海周辺域だけではなく、全球的な地球環境を考える上でも重要である。そのオホーツク海中層水形成には、大陸棚高密度水の混合と、千島海境域での大規模な鉛直混合が重要であると考えられている。海水形成時、オホーツク海北部大陸棚域では、冷却とブライン排出によって、大気に接した新しい水から $26.8\sigma_\theta$ を越える高密度水が形成される。ほぼ結氷温度の大陸棚高密度水は同じ密度の太平洋水に比べて低塩分なため、オホーツク海中層水を低温低塩化する効果がある。一方、鉛直混合は、中層に水温極大(中暖水)のある太平洋水を上下に混合することで、中層を低温・低塩分化することができる。しかし、これまでに大陸棚高密度水の混合と鉛直混合の寄与を量的に比較した例はない。また、オホーツク海の海水面積の年々変動は世界の海で最も大きいものの一つであり、気候変動に敏感に反応すると考えられる。したがって、海水生成量の変化にともなうオホーツク海中層水および北太平洋中層水の性質の変化を予測するためにも、高密度水の寄与を明らかにすることは重要である。

そこで本研究は、オホーツク海水の酸素同位体比を初めて測定し、高密度水およびオホーツク中層水の形成過程の解明を試みた。海水の酸素同位体比と塩分の関係が海水形成時のブライン排出と同位体分別効果によって特異な変化をすることから、高密度水の形成過程の解明および中層水に混合した高密度水の識別が可能であると考えたからである。

オホーツク海内部および千島列島付近の太平洋において多数の海水試料を採取してその酸素同位体比を測定した結果、オホーツク海に入る前の西部亜寒帯太平洋水とオホーツク海水とでは、酸素同位体比-塩分の関係が特に中層において異なっていた。西部亜寒帯太平洋水は同位体比-塩分の間に良い直線関係がみられたため、この水がオホーツク海へ流入する際に海峡域で上下に混合しただけではこのような差異は生じない。また、オホーツク海内部での淡水流入の影響も直線からのズレを生じないという結果が得られた。これらのことから、オホーツク中層で見られた西部亜寒帯太平洋水との差異は、高密度水の影響をあらわしていると考えられる。

実際に北部大陸棚上で観測された水温 -1°C 以下、密度 $26.7\sigma_\theta$ 以上の低温高密度水の酸素同位体比-塩分の関係は、西部亜寒帯太平洋水のそれから最も大きく異なっていた。このズレの向きと大きさから、観測された高密度水の元となった冬季混合水の塩分は 32.6 と見積もられる。この値はこれまでに予想されていた値より低いものであり、沿岸域での活発な高密度水形成が示唆される。また冬季混合層を高密度水に変換するためには混合層水の 3% が氷として取り除かれていると算出される。その場で形成されたと思われる高密度水が存在した大陸棚上の観測点において、

高密度水形成のために淡水として取り除かれた海水量は 2.7m と見積もられ、この結果に相当する高密度水形成量は 0.3Sv と算出される。

次に、オホーツク中層水に含まれる高密度水の割合を酸素同位体比-塩分の関係から算出すると、 $26.8\sigma_{\theta}$ で 23% となる。これは中層水が大陸棚高密度水と西部亜寒帯太平洋水との等密度面混合で形成されると仮定して水温・塩分から見積もった場合に比べて約半分の小さな値である。このことは、大陸棚高密度水との混合以外の中層を低温・低塩化する過程、すなわち等密度面を横切る鉛直混合の寄与が重要であることを示している。酸素同位体比・塩分・水温を用いた計算の結果、 $26.8\sigma_{\theta}$ においてオホーツク海水を西部亜寒帯太平洋水よりも低温にする効果のうち、大陸棚高密度水によるものは 26% で、74% は鉛直混合によることがわかった。さらに、塩分に関しては大陸棚高密度水の寄与はわずか 8% で、92% が鉛直混合による低塩分化であることがわかった。これほどの低温化・低塩分化をもたらすのは、オホーツク海亜表層の中冷水のような低温・低塩分水が鉛直混合によって等密度面を横切って中層に混入しているためと推察される。そこで、鉛直混合過程を西部亜寒帯太平洋中暖水、西部亜寒帯太平洋深層水、オホーツク海亜表層中冷水の 3 成分混合であらわし、これらが混合した水に高密度水が加わってオホーツク海中層水を形成すると仮定すると、それぞれのオホーツク海中層水形成時の混合比を見積もることができる。その結果、高密度水:オホーツク中冷水:太平洋中暖水:太平洋深層水の混合比は、オホーツク海中層水上部 ($26.8-27.0\sigma_{\theta}$) ではおよそ 20:30:40:10 で、中冷水と高密度水が低温・低塩分化の原因となっており、中層水下部 ($27.1-27.4\sigma_{\theta}$) ではおよそ 10:5:25:60 で、深層水が中層を低温・低塩分化に重要な役割を果たしていることがわかる。

本研究の結果から、オホーツク中層水に低温・低塩分な性質をもたらすのは海水形成時につくられる高密度水との混合よりもむしろオホーツク中冷水を含む鉛直混合が重要であることが明らかになった。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	角 皆 静 男
副 査	教 授	若 土 正 暁
副 査	教 授	乗 木 新一郎
副 査	教 授	河 村 公 隆
副 査	教 授	蒲 生 俊 敬 (大学院理学研究科)
副 査	助教授	田 中 教 幸
副 査	助教授	中 塚 武
副 査	助教授	大 島 慶一郎

学 位 論 文 題 名

Formation of the Okhotsk Sea Intermediate Water clarified with chemical tracers

(化学トレーサーによるオホーツク海中層水形成過程の解明)

オホーツク海は世界で最も低緯度に位置する季節海氷域である。海氷形成時には、浅い大陸棚上で低温で高密度な水が形成される。太平洋水に比べて低温、低塩分で新しいという特徴を持つオホーツク海中層水の形成には、大陸棚域における上層水の沈み込みが重要であると考えられている。オホーツク海中層水は、やがて北太平洋に流出し、人為起源二酸化炭素を多量に蓄えた北太平洋中層水を構成することからも、オホーツク海中層水の形成過程の解明は、人為起源二酸化炭素の海洋による吸収を明らかにするために重要な意味を持つ。過去の研究では水温・塩分という基本的なトレーサーから、オホーツク海中層水の約 50%は、大陸棚起源の高密度水からできていると見積もられていた。

申請者の研究は、オホーツク海水の形成・循環の解明に、初めて酸素同位体比という有力な化学トレーサーを適用し、海氷形成時に沈み込んだ水がオホーツク海中層を北部大陸棚域から南へ広がっていることを証明した。また、オホーツク海中層水に占める大陸棚起源水の割合を約 20%と見積もり、過去の研究で見積もられた値が過大評価であることを明らかにした。さらに、この過大評価の原因についても議論し、オホーツク海中層水の形成には、鉛直混合が重要な役割を果たしていることを示した。申請者は、オホーツク海中層水に低温・低塩分な特徴をもたらす過程として、海氷生成時の高密度水形成過程と、鉛直

混合過程の役割を定量的に比較し、鉛直混合はオホーツク海中層水の低塩化の 92%、低温化の 74%もの寄与をしていると見積もった。鉛直混合の寄与の可能性は以前にも指摘されていたが、大陸棚高密度水の影響との分離が困難なため、無視されることさえあった。鉛直混合効果を高密度水の効果と分離・定量してその重要性を明らかにしたのは今回が初めて。また、別の化学トレーサー、フロンを用いて、鉛直混合が千島列島の海峡部で実際に起こっていることも示した。

このように、新しいトレーサーの酸素同位体比およびきわめて有用だが測定が難しかったトレーサーのフロンを用いた本研究は、オホーツク海研究に重要かつ新たな知見を与えるものであり、また、北太平洋の熱塩循環や、人為起源二酸化炭素の吸収源としての海洋の役割を解明する研究に発展することが期待されるものである。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。