

学 位 論 文 題 名

高緯度海域における二酸化炭素および
栄養塩循環に関する研究

学位論文内容の要旨

人類活動によって大気中へ放出された二酸化炭素(CO_2)が引き起こすと考えられる地球温暖化のさまざまな影響が懸念されているが、その問題に適切に対処するためには、現在の地球上の CO_2 循環を定量的に評価する必要がある。特に地球上の 7 割以上の面積を占め、平均水深 3800m の厚みを持つ海洋は、人為起源 CO_2 の吸収源・貯蔵庫としての働きが注目されている。そのため大気-海洋間の CO_2 の交換量と、海洋中深層へ貯留された人為起源 CO_2 量を見積もる研究が盛んになされているが、その間を取り持つ輸送過程を調べた研究は少ない。中深層水の形成過程は、海洋表層が冷却されることで駆動されるので、地球温暖化が起これば大きな影響を受けると考えられる。ところが、中深層水が形成されるような海域は、気象条件も厳しい上、北極圏・南極圏といった遠隔地に存在するため観測が難しく、研究の進展を阻んできた。その一方で、比較的観測が容易な北海道オホーツク海沿岸において中層水の形成が行われていることが、本学低温科学研究所における研究で明らかになっている。日本海から流入する亜熱帯系の高塩分な宗谷暖流水が、冬季の水温低下で密度が $27.0\sigma_\theta$ 以上になり、千島海盆中層へ沈み込むという過程が存在する。その高密度な宗谷暖流水は、宗谷暖流前駆水と呼ばれている。

そこで、オホーツク海北海道沿岸域において、大気から海洋表層へ吸収された CO_2 が海洋中層へと運搬される過程を、現場観測から定量的に評価する試みを行った。当該海域においては、水産試験場および海上保安庁が定期的に海洋観測を行っていることに着目し、それらの観測航海へ便乗する機会を得たことにより、1997 年 2 月から翌年 6 月までおよそ 2 ヶ月ごとの高頻度な観測を実現させ、結氷期を含めた周年の海水の全炭酸濃度、全アルカリ度および栄養塩データを初めて取得することができた。

春季(4-6 月)に紋別沖陸棚上に存在した宗谷暖流前駆水には、人為起源 CO_2 を含まない太平洋の深層水にくらべて、 $70\text{--}100\ \mu\text{mol/kg}$ の過剰な全炭酸が含まれていた。宗谷暖流水の起源である沖縄本島近海の黒潮表層水には、この過剰な全炭酸はほとんど含まれていないので、黒潮表層水が対馬暖流水として、東シナ海・日本海を北上する過程で水温が低下(最大 27°C)し、 CO_2 の溶解度が増加することで、大気から CO_2 を吸収した結果と考えられる。この多くの過剰 CO_2 を含む陸棚上の宗谷暖流前駆水は、6-8 月に千島海盆の中層(300-500m)へ沈み込んでいくことが、全アルカリ度を指標として追跡できた。宗谷暖流前駆水の年間流量は $6.2 \times 10^{12}\text{m}^3$ (Watanabe and Wakatsuchi, 1998)であるので、この過程による大気由来 CO_2 の輸送量は、 $5.2\text{--}7.4 \times 10^{12}\text{gC/yr}$ と見

積もられた。一方、冬季(12-2月)にサハリン北方から当該海域へ表層を移流する東カラフト海流水にも、 $100\mu\text{mol/kg}$ の大気から吸収されたと考えられる過剰 CO_2 が含まれていた。この東カラフト海流水が、オホーツク海北西部において海氷生成に関わった際の性質を保存していると考えれば、海氷生成時に排出されるブラインによる高密度水生成量は、年間 $2.8 \times 10^{13}\text{m}^3$ (Wong et al., 1998) であるので、この過程による大気由来 CO_2 の輸送量は、 $3.4 \times 10^{13}\text{gC/yr}$ と見積もられる。したがって両者を合わせて、オホーツク海の中層には年間 $3.9\text{--}4.1 \times 10^{13}\text{gC}$ の大気由来 CO_2 が輸送されていることになる。その量は全海洋の年間の人為起源 CO_2 吸収量約 $2 \times 10^{15}\text{gC}$ にくらべれば小さな値であるが、全海洋に占めるオホーツク海の面積を考慮すれば、オホーツク海は単位面積あたり平均的な海洋の約 5 倍の CO_2 吸収能力をもっており、極めて効率のよい大気中 CO_2 の吸収源と言える。しかも一旦オホーツク海中層に運搬されたこれらの CO_2 は、千島列島の海峡を通して太平洋へ流出し、やがて等密度面混合で北太平洋中層水に取り込まれ、数十年から百年間は大気へ戻らないと考えられる。

次に、オホーツク海と同様に寒冷かつ富栄養な環境にある親潮流域および南大洋とオホーツク海との間で、大気海洋間の物質の収支や一次生産に影響を与える全炭酸および栄養塩濃度の分布の特徴を比較した。亜表層以深では、いずれの海域においても、栄養塩・全炭酸の濃度は、海水の密度分布に大きく依存していた。すなわち、表層の低気圧性循環の働きで高密度な水が表層へ向かって張り出している海域(親潮域、南極大陸沿岸域)では特に表層が富栄養になりやすい一方、高気圧性循環が千島海盆に存在し、低密度な水が留まりやすいオホーツク海南部の表層～亜表層はやや低全炭酸濃度かつ貧栄養であった。ただし、いずれの海域もごく表層を除いては、夏季でも栄養塩が枯渇するようなことはなく、亜表層の豊富な栄養塩を用いて、活発な一次生産による表層水中の全炭酸の消費が行われていた。

夏季の栄養塩・全炭酸濃度の表層鉛直プロファイルから見積もられた、冬季から夏季にかけての栄養塩・全炭酸の消費量(これを純生物群集生産量: NCP と呼ぶ)は、南大洋が $1.7\text{--}2.9\text{mol/m}^2$ であったのに対し、親潮域やオホーツク海は $3.6\text{--}9.4\text{mol/m}^2$ と 2-3 倍も大きかった。これはオホーツク海や親潮域の方が、南大洋にくらべ海氷が存在する期間や冬季鉛直混合が継続する期間が短く、またより浅い水深(10-30m、南大洋は 50-60m)に密度躍層があつて、栄養塩豊富な密度躍層付近に十分光が届き、植物プランクトンによる一次生産に有利な条件が整うためと考えられる。

夏季のオホーツク海南部から親潮流域にかけての表面水の fCO_2 計算値は、潮汐による鉛直混合で亜表層水の表層への露出が起こる中部千島海峡域を除いて、 $300\mu\text{atm}$ と大気の CO_2 分圧より小さく、大気に対して二酸化炭素の吸収域となっているが、これは上記のように生物ポンプが効率よく働き、表層水の全炭酸濃度を低下させているためである。一次生産によって栄養塩も全炭酸も大きく消費された夏季のオホーツク海の表層水は、冬季に向かって冷却が始まると、大気から多くの CO_2 を吸収し、その一部は北西部における海氷生成に伴う高密度水の形成過程によって、中層へと運搬されていると考えられる。一方、親潮域や南大洋高緯度海域では、表層水が大気から CO_2 を吸収したとしても、表層から中層への水の沈み込み過程が存在しないため、大気の CO_2 の貯蔵庫としての働きはオホーツク海にくらべて劣ると言えるだろう。

以上のように、オホーツク海は大気から海洋への CO_2 の吸収と海洋中層への運搬という重要な役割を果たしていることが明らかとなった。しかし、今後予想される温暖化によっては、海洋表面が

受ける冷却が弱まり、このような表層から中層への海水と CO_2 をはじめとする溶存物質の輸送量が減少することも考えられる。他の寒冷な中緯度海域も同様の働きを行っているとすれば、温暖化が地球上の CO_2 循環に与える影響は大きいであろう。今後も同様の観測を継続し、それらの海域における水循環や海洋炭酸系に変化が見いだされるかどうか、注意を払う必要がある。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	乗 木 新一郎
副 査	名誉教授	角 皆 静 男 (北海道大学)
副 査		田 中 教 幸 (アラスカ大学北極圏研究センター)
副 査		渡 辺 修 一 (海洋科学技術センター)
副 査	助教授	渡 辺 豊
副 査	助教授	大 島 慶一郎
副 査	教 授	蒲 生 俊 敬 (北海道大学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

高緯度海域における二酸化炭素および 栄養塩循環に関する研究

人類活動によって大気中へ放出された二酸化炭素 (CO_2) が引き起こすと考えられる地球温暖化のさまざまな影響が懸念されているが、その問題に適切に対処するためには、現在の地球上の CO_2 循環を定量的に評価する必要がある。特に地球上の 7 割以上の面積を占め、平均水深 3800m の厚みを持つ海洋は、人為起源 CO_2 の吸収源・貯蔵庫としての働きが注目されている。そのため大気-海洋間の CO_2 の交換量と、海洋中深層へ貯留された人為起源 CO_2 量を見積もる研究が盛んになされているが、その間を取り持つ輸送過程を調べた研究は少ない。中深層水の形成過程は、海洋表層が冷却されることで駆動されるので、地球温暖化が起これば大きな影響を受けると考えられる。ところが、中深層水が形成されるような海域は、気象条件も厳しい上、北極圏・南極圏といった遠隔地に存在するため観測が難しく、研究の進展を阻んできた。その一方で、比較的観測が容易な北海道オホーツク海沿岸において中層水の形成が行われていることが、本学低温科学研究所における研究で明らかになっている。日本海から流入する亜熱帯系の高塩分な宗谷暖流水が、冬季の水温低下で密度が $27.0\sigma_\theta$ 以上になり、千島海盆中層へ沈み込むのである。その高密度な宗谷暖流水は、宗谷暖流前駆水と呼ばれている。

そこで申請者は、オホーツク海北海道沿岸域において、大気から海洋表層へ吸収された CO_2 が海洋中層へと運搬される過程を、現場観測から定量的に評価する試みを行った。

当該海域においては、水産試験場および海上保安庁が定期的に海洋観測を行っていることに着目し、それらの観測航海へ便乗する機会を得たことにより、1997 年 2 月から翌年 6 月までおよそ 2 ヶ月ごとの高頻度な観測を実現させ、結氷期を含めた周年の海水の全炭酸濃度、全アルカリ度および栄養塩データを初めて取得することができた。

春季（4-6 月）に紋別沖陸棚上に存在した宗谷暖流前駆水には、人為起源 CO_2 を含まない太平洋の深層水にくらべて、 $70\text{-}100\mu\text{mol/kg}$ の過剰な全炭酸が含まれていた。宗谷暖流水の起源である沖縄本島近海の黒潮表層水には、この過剰な全炭酸はほとんど含まれていないので、黒潮表層水が対馬暖流水として、東シナ海・日本海を北上する過程で水温が低下（最大 27°C ）し、 CO_2 の溶解度が増加することで、大気から CO_2 を吸収した結果と考えられる。この多くの過剰 CO_2 を含む陸棚上の宗谷暖流前駆水は、6-8 月に千島海盆の中層（ $300\text{-}500\text{m}$ ）へ沈み込んでいくことが、全アルカリ度を指標として追跡できた。宗谷暖流前駆水の年間流量は $6.2\times 10^{12}\text{m}^3$ (Watanabe and Wakatsuchi, 1998) であるので、この過程による大気由来 CO_2 の輸送量は、 $5.2\text{-}7.4\times 10^{12}\text{gC/yr}$ と見積もられた。一方、冬季（12-2 月）にサハリン北方から当該海域へ表層を移流する東カラフト海流水にも、 $100\mu\text{mol/kg}$ の大気から吸収されたと考えられる過剰 CO_2 が含まれていた。この東カラフト海流水が、オホーツク海北西部において海水生成に関わった際の性質を保存していると考えれば、海水生成時に排出されるブラインによる高密度水生成量は、年間 $2.8\times 10^{13}\text{m}^3$ (Wong et al., 1998) であるので、この過程による大気由来 CO_2 の輸送量は、 $3.4\times 10^{13}\text{gC/yr}$ と見積もられる。したがって両者を合計すれば、オホーツク海の中層には年間 $3.9\text{-}4.1\times 10^{13}\text{gC}$ の大気由来 CO_2 が輸送されていることになる。その量は全海洋の年間の人為起源 CO_2 吸収量約 $2\times 10^{15}\text{gC}$ にくらべれば小さな値であるが、全海洋に占めるオホーツク海の面積を考慮すれば、オホーツク海は単位面積あたり平均的な海洋の約 5 倍の CO_2 吸収能力をもっており、極めて効率のよい大気中 CO_2 の吸収源と言える。しかも一旦オホーツク海中層に運搬されたこれらの CO_2 は、やがて北太平洋中層水に取り込まれ、数十年から百年間は大気へ戻らないと考えられる。

なおここでは詳述しないが、申請者はこのほかにオホーツク海北海道沿岸域で見られる特徴的な栄養塩循環の仕組みや、オホーツク海と南大洋で見られる表層の一次生産に関する類似点・相違点についても、博士論文の中で報告・考察を行っている。

本研究を通じて得られた成果は、現在一部を除き未公表であるが、それらが順次論文の形で発表されれば、海洋の炭素循環や栄養塩循環に関する研究へ大きく寄与するであろう。本研究をまとめるにあたり、申請者は多くの時間を費やしてしまったが、身近な海域における現象や過程にグローバルな物質循環の研究につながる材料を見だし、自ら研究・観測計画を立てて実行し、一定の成果を導き出したという点で、審査員一同は申請者が博士（地球環境科学）学位を受けるのに十分な資格を有するものと判断した。