



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Quantitative assessment of factors contributing to variations in sea surface pCO ₂ in the polar oceans [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	戸澤, 愛美
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第16205号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95349
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Manami_Tozawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（水産科学）

氏名：戸澤 愛美

学 位 論 文 題 目

Quantitative assessment of factors contributing to variations in sea surface $p\text{CO}_2$ in the polar oceans
(極域海洋における海洋表面二酸化炭素分圧の季節変化の定量評価)

近年問題となっている地球温暖化の主な要因は温室効果ガスであり、中でも二酸化炭素 (CO_2) が最も大きな影響を与えている。化石燃料の燃焼や森林伐採などの人間活動によって放出された CO_2 の半分は大気に残存するが、残りの 25%は陸上植物、25%は海洋によって吸収される。海洋による CO_2 吸収量は、主に大気と海洋の二酸化炭素分圧 ($p\text{CO}_2$) の差によって決定する。北極海や南極海といった極域海洋は $p\text{CO}_2$ が低いため、多くの CO_2 を吸収することができ、全海洋による CO_2 吸収の半分近くを担っている。 $p\text{CO}_2$ は水温変化や淡水流入、生物活動によって変化することが知られているが、極域海洋の $p\text{CO}_2$ 変化要因を定量的に評価した例は少ない。本研究では、極域海洋における現場観測データを用いて、 $p\text{CO}_2$ の季節変化の要因を定量的に評価する新しい手法を提案する。また、栄養塩分布や海水中の炭酸系成分を調べることで、 $p\text{CO}_2$ の変化要因に影響を与える周囲の海洋・海水環境についての知見も提供する。

第 2 章では、南極海における $p\text{CO}_2$ の季節変化の要因を定量的に評価した。2018 年 12 月から 2019 年 2 月に、南極海東インド洋セクター ($80\text{--}150^\circ\text{E}$, 60°S 以南) において、水産庁漁業調査船「開洋丸」による海洋観測 (KY18) を行った。航行中、海洋表面 $p\text{CO}_2$ 、水温、塩分が測定された。また、表面海水のポンプ採水および鉛直採水によって海水試料を採取し、溶存無機炭素 (DIC)、全アルカリ度 (TA)、栄養塩濃度を測定した。観測海域の $p\text{CO}_2$ ($358 \pm 22 \mu\text{atm}$) は大気 $p\text{CO}_2$ ($389 \pm 4 \mu\text{atm}$) に対して低く、大気中 CO_2 の吸収源 ($-8.3 \pm 12.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) となっていた。 $p\text{CO}_2$ の変化要因を明らかにするため、観測した DIC、TA、栄養塩データを用いて、冬季から夏季の $p\text{CO}_2$ 季節変化を推定し、水温変化・淡水流入・生物活動による $p\text{CO}_2$ 変化 ($\delta p\text{CO}_2$) をそれぞれ推定した。水温変化、淡水流入、生物活動による $\delta p\text{CO}_2$ の平均値は、それぞれ $+38 \pm 21 \mu\text{atm}$ 、 $-8 \pm 4 \mu\text{atm}$ 、 $-92 \pm 28 \mu\text{atm}$ であり、淡水流入の効果に対して、水温変化と生物活動の効果が大きいことが明らかとなった。12 月から 1 月初旬に観測した観測海域西部 ($80\text{--}120^\circ\text{E}$) では、生物活動による $\delta p\text{CO}_2$ の変動が大きく、1 月末から 2 月に観測した観測海域東部 ($120\text{--}150^\circ\text{E}$) では、水温変化による $\delta p\text{CO}_2$ の変動が大きくなっていた。このことから、時期および海域によって、 $p\text{CO}_2$ 空間分布の決定要因が異なっていることが示された。また、1996 年から 2019 年までに海洋表面 CO_2 濃度 ($x\text{CO}_2$) は、23 ppm 上昇していた。大気 $x\text{CO}_2$ や水温、栄養塩の観測結果から、 $x\text{CO}_2$ 変化には、大気 $x\text{CO}_2$ と海洋表面水温の上昇に加え、フロント構造が変化し、南極周極流 (ACC) の南限が南下したことによる栄養塩濃度の変化が寄与している可能性が示唆された。

第 3 章では、KY18 における栄養塩の現場観測データを用いて、栄養塩分布と決定要因を調査した。ACC 域では、深層からの栄養塩の供給と、強い成層化による躍層内での有機物

分解・栄養塩再生によって、栄養塩濃度が増加していた。さらに、成層強化は、植物プランクトンの成長と光合成による栄養塩消費を促進していた。一方、subpolar 域では、海水形成時のブラインによって栄養塩濃度が上昇し、海水融解による希釈で栄養塩濃度が低下していた。これらの結果から、海洋フロント構造によって、栄養塩濃度とその決定要因が変化することが明らかになった。さらに、栄養塩の現場観測データとクロロフィル a の衛星観測データを用いて、それぞれ基礎生産量を推定した。いずれの推定方法でも、subpolar 域で基礎生産量が大きいことが示された。衛星観測による基礎生産推定では海水や雲の影響で推定ができない海域でも、栄養塩データを用いれば基礎生産量を推定することができ、沿岸域における高い基礎生産量を明らかにすることができた。季節海水域では、研究目的に応じた推定方法の選択や、複数の推定方法を組み合わせた解析によって、基礎生産に関する評価を行う必要があることが示された。

第 4 章では、北極海における $p\text{CO}_2$ 季節変化に着目し、第 2 章で構築した評価手法の改良を行なった。2021 年 9–10 月に、北極海太平洋セクター（チュクチ海およびカナダ海盆）において、JAMSTEC の海洋地球研究船「みらい」によって海洋観測を行った。航海中、海洋表面 $p\text{CO}_2$ 、水温、塩分が連続測定された。また、表面海水のポンプ採水および鉛直採水によって海水試料を採取し、溶存無機炭素（DIC）、全アルカリ度（TA）、栄養塩濃度、酸素安定同位比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）、有色溶存有機物（CDOM）を測定した。観測海域の $p\text{CO}_2$ ($315 \pm 41 \mu\text{atm}$) は大気 $p\text{CO}_2$ ($404 \pm 4 \mu\text{atm}$) に対して低く、大気中 CO_2 の吸収源 ($-10.5 \pm 11.0 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) となっていた。塩分、 $\delta^{18}\text{O}$ 、CDOM を用いて、淡水の由来（淡水フラクション）を計算したところ、海水融解水が海域の大部分に分布し、 68°N 付近に河川水、 72°N 以北に融雪水が分布していたことが明らかになった。DIC、TA、栄養塩に加えて、推定した淡水フラクションを考慮して、水温変化・淡水流入・生物活動による冬から夏の $p\text{CO}_2$ 変化をそれぞれ推定した。チュクチ海では、生物活動と水温の変化が $p\text{CO}_2$ を大きく変化させ、カナダ盆地では淡水の流入が $p\text{CO}_2$ を大きく減少させた。また、海水サンプルを採取し、融解水中の炭酸系成分を測定したところ、塩分の高い融解水は、塩分の低い融解水と比べて、 $p\text{CO}_2$ を低下させる能力が小さいことが観測結果より確認された。今回の研究結果より、淡水の起源による $p\text{CO}_2$ に与える影響の違いは非常に大きく、 $p\text{CO}_2$ の将来予測において、淡水の種類の変化を考慮することが重要であると示唆された。

本論文で提案した手法は、両極域海洋の $p\text{CO}_2$ 変化要因を同じ手法で定量的に評価し、比較することを可能にするものである。また、栄養塩分布や海水中の炭酸系成分に関する新たな知見は、今後の環境変化とそれに伴う $p\text{CO}_2$ の変化を予測するのに資すると期待される。