

学位論文内容の要旨

学位論文題目： Paleooceanographic reconstruction and Cordilleran Ice Sheet dynamics during the last deglaciation inferred from multiproxy geochemical records of the Gulf of Alaska sediment core

(アラスカ湾堆積物コアの地球化学データによる融氷期の古海洋復元とコルディエラ氷床の動態)

地球生命環境科学専攻

氏名 Md. Nurunnabi Mondal

During the last glacial maximum (26–19 ka, ka = kilo annum = 1000 years before present), the Cordilleran Ice Sheet (CIS) expanded in the northwest part of North America, and the western margin of the CIS was a marine-based ice sheet, like the present-day Greenland Ice Sheet. The CIS was rapidly decayed during the last deglacial period from Heinrich Stadial 1 (HS1, ~17.5–14.8 ka) to Preboreal (~11.7–10.8 ka) due to sea-level rise and oceanic and atmospheric warming. However, the exact timing of glacial meltwater injection and its source from the CIS into the northeastern Pacific has been debated, even though a large amount of glacial meltwater might have potential perturbing effects on the global thermohaline circulation and climate. In addition, the impact of meltwater injection on marine productivity has also been debated since Alaskan glacial meltwater provides large amounts of bioavailable iron (Fe) to coastal areas. These issues address in this thesis by reconstructing the paleoceanographic conditions and dynamics of the CIS in detail using marine sediment cores collected near the former CIS, where high-resolution geochemical analyses are available. This study analyzed a sediment core (KH17-3 CL14PC/MC, 59°33.35' N, 144°09.35' W, water depth 690 m), which covers sediment records for the Holocene to the last deglaciation from HS1 (~17 kyr ago), collected at the coastal area in the Gulf of Alaska (GOA), and generated high-resolution geochemical records.

First, this thesis assessed XRF core scanner multi-element count data of Core CL14PC (Chapter 2). Typically, the downcore variations in element counts measured by an XRF core scanner cannot be regarded as variations in element concentration because such element counts are decreased by higher water and organic matter contents. Downcore changes in elemental concentrations are important for inferring paleoceanographic and sedimentological conditions with time. Thus, these count data must be evaluated against concentration data or converted to concentration-equivalent elemental count data. This study measured element concentrations (Sr, Fe, Mn, Ti, Ca, and K) of selected 33 discrete sediment samples from Core CL14PC to evaluate the XRF core scanner elemental counts and found that high water contents largely decreased some elemental count. The effect of water contents on elemental counts could be successfully corrected by normalization by coherent/incoherent X-ray scatter ratio (CIR). Consequently, the CIR-normalized element counts are highly correlated with element concentrations ($0.56 < R^2 < 0.91$). The high-water contents in the sediments increase X-ray scatter and reduce element-specific X-ray fluorescence; CIR-corrected element count data can correct water content variability and retrieve the original intensity.

Secondly, %C_{37:4} alkenones, foraminifer $\delta^{18}\text{O}$, ice-rafted debris (IRD), and Sr-Nd isotopes records were used to determine detailed timing and sources of glacial meltwater injection from CIS into the GOA. This study found higher IRD deposition and higher %C_{37:4} alkenones (indicating low salinity or colder water masses) occurred at ~16.4, ~16.2, and ~15.6 ka during HS1. These data provide robust evidence for collapsing of CIS multiple times during the cold HS1, probably owing to subsurface warming in response to intensified Aleutian Low. In addition, higher %C_{37:4} alkenones (24% and 28%) were also found at ~14.1 and ~13.9 ka during early Bølling-Allerød (B-A) accompanied by depleted planktonic foraminifer $\delta^{18}\text{O}$ values. It is interpreted to reflect low salinity surface conditions due to meltwater. A prominent high peak of %C_{37:4} alkenone occurred again in the middle Younger Dryas (~12.2 ka, YD) and then decreased (<5%). These data suggest that most of the CIS stopped melting after the end of YD. The detrital Sr-Nd isotopic compositions demonstrate that the sources of detrital sediments are proximal areas to the core site and did not change throughout the last deglaciation (HS1–YD). This evidence indicates that the core site had been influenced by the melting of the northern part of the marine and land-based CIS. From these salinity and sediment provenance data, this thesis describes the meltwater events in the northern GOA, showing the northern CIS's melting history at least four times from ~16.4–15.2 ka during HS1 and at least three times from ~14.6–12.2 ka during B-A to YD. However, the CIS melted intermittently but gradually over a long

period throughout the last deglaciation and minorly contributed to the abrupt global sea-level rise (14.6–14.3 ka).

Furthermore, this study assessed the decadal- to centennial-scale paleoproductivity changes and their relation to CIS dynamics from XRF Bromine (Br), TOC, density, C-N ratio, and foraminifer $\delta^{18}\text{O}$ records. High peaks of Br and TOC, low C-N ratio, and low-density laminated sediments during B-A (~14.8–13.0 ka) and Preboreal (~11.6–11.1 ka) intervals indicate that B-A and Preboreal were higher productivity periods. However, timings of the higher productivity were not tightly matched to the inferred meltwater periods during the B-A. Instead, a minor offset between surface-and sub-surface-dwelling foraminifer $\delta^{18}\text{O}$ records suggests that high vertical mixing might have induced higher productivity. High XRF Fe data suggest that glacier Fe fertilization and/or remobilization of bioavailable Fe due to sea-level rising inundated coastal depocenter might have also been enhanced the productivity.

審査結果要旨：

当審査委員会は、申請論文「Paleoceanographic reconstruction and Cordilleran Ice Sheet dynamics during the last deglaciation inferred from multiproxy geochemical records of the Gulf of Alaska sediment core（和題：アラスカ湾堆積物コアの地球化学データによる融氷期の古海洋復元とコルディエラ氷床の動態）」を詳細に査読し、令和3年8月6日（金）の学位論文公聴会で精細な質疑応答において審査した。以下に審査および最終試験の結果を要約する。

コルディエラ氷床は、約2万年前の最終氷期に北米西部を広く覆い、海水準相当で約6m程度の氷床を有していたとされている。また、コルディエラ氷床西端は、海水に接するカービング氷河であり、現在のグリーンランド氷床や西南極氷床の存在形態と類似点を持つ。そのため、コルディエラ氷床の融解史の把握は、将来の温暖化環境下でのグリーンランド氷床や西南極氷床の動態の理解に繋がるとされている。また、コルディエラ氷床の融解によって大量に供給された淡水が、全球気候にどのような影響を与えたのかについても気候学の観点から近年多くの研究が行われている。さらに、コルディエラ氷床の融解によって、ベリンジアから北米南部の南北回廊が形成されたことで、人類の分散に大きな役割を果たしたと考えられており、人類学の分野においても氷床が融解した時期の特定が求められている。このような観点から、約2万年前の最終氷期以降に焦点を当て、コルディエラ氷床がどのような強制力によっていつどの程度融解していったのかを陸上の ^{14}C データや ^{10}Be データ、氷床モデルや海洋コアの解析などから、明らかにしようとする研究が現在精力的に進められている。

申請者の学位論文の研究では、コルディエラ氷床西端に近接する陸棚斜面から採取された堆積物コア試料を対象にしている。この試料に対して、浮遊性有孔虫殻の放射性炭素 ^{14}C 年代に基づく堆積物コア試料の年代モデルを構築した上で、XRF コアスキャナーデータの解析、浮遊性有孔虫殻の炭素・酸素安定同位体比分析、砕屑物のSr-Nd-Pb同位体比分析を行い、共同研究者らが実施したCT画像解析による冰山起源岩屑（Ice Rafted Debris, IRD）量の高時間分解データやアルケノンデータなどと統合し、過去1.7~1万年前におけるコルディエラ氷床の融解史を詳細に復元する研究を行なった。

博士論文の構成および特筆すべき重要な知見は以下の通りである。

第1章では、コルディエラ氷床融解史に関する先行研究および研究の重要性を述べ、研究対象としたコア試料を採取した研究海域の概略について述べた。第2章では、XRF コアスキャナー元素データの補正法の検討を行なっている。現在、堆積物コア試料から高時間解像度の元素データを得るために、コア試料半割後にXRF コアスキャナーで非破壊分析を行うことが一般的になってきている。申請者の研究においても、1cmもしくは0.2cm間隔（長さ約8.5mの堆積物コア試料）でXRF コアスキャナー測定を行なっており、これらのデータを古環境解析に活用している。しかし、蛍光X線分析で得られる元素カウント値は、堆積物中の含水率の変化や岩相の変化に応じて大きく影響を受けるため、コア下部から上部にかけての元素カウント値の時系列変動を、濃度の時系列変動として扱えるわけではない。XRFデータを濃度変化として議論に用いる場合には、カウント値の適切な補正が必要になる。申請者は、この問題に着目し、研究対象としたコア試料について、coherent/incoherent X-ray scatter (CIR)比で元素カウント値を標準化する方法が、含水率変動の補正に最も有効であることを明らかにした。第3章では、浮遊性有孔虫殻の酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）、4不飽和アルケノン含有率（ $\%C_{37:4}$ ）、

IRD 量データに基づき、ハインリッヒイベント 1 と呼ばれる北半球寒冷期にあたる 16.5–15.6 ka (ka=千年前) に、少なくとも 3 回にわたってコルディエラ氷床西端のカービング氷河が大きく融解したことを初めて明確に示した。さらに、コルディエラ氷床が短期間に融解したとされるボーリング・アレレード期においても、 $\%C_{37:4}$ 変動 (高い値を示す) から少なくとも 2 度の融解イベントが検出された。寒の戻り期にあたるヤンガードリアス期においても、再度 $\%C_{37:4}$ が増加しており、融氷期を通じて、断続的であるものの長期にわたり段階的に氷床の融解が進んだことを明らかにした。また、融氷期を通して、コア採取地点に供給される碎屑物の Sr-Nd-Pb 同位体比に顕著な差が見られず、コア地点近傍の後背地から継続的に碎屑物が流入していたことも明らかにした。このことは、融氷期に検出された氷床融解イベントがコルディエラ氷床北部の融解履歴を見ている可能性があり、氷床モデルによるコルディエラ氷床融解史との比較が地域レベルでできる重要なデータが得られたことを意味する。第 4 章では、含水率補正をした XRF コアスキャナーの臭素データ (Br) が生物生産の良い指標になることを示した上で、ボーリング・アレレード期に顕著に増加する生物生産がコルディエラ氷床の融解イベントと同期せず、陸棚海底面からの鉄の溶脱や大気循環の強化に伴う湧昇の影響で長期間高い生物生産が継続的に維持されていたと議論した。このことは、現在アラスカ山岳氷河の融解に伴って大量の溶存鉄が沿岸域に供給され生物生産の重要因子と位置付けられているものの、過去の大規模な氷床融解イベントにおいては、氷床融解によって供給されたであろう溶存鉄が、アラスカ湾沿岸域の生物生産の制限因子にはなっていなかったことを示唆している。

以上の博士論文の内容を総合的に判断した結果、本研究論文は、地球化学・地球科学分野において学術的に新しい知見を与えていることを認め、当審査委員会は博士の学位論文として十分な価値を有し、博士の学位を授与するに値すると判断した。