



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A study on inclusions in ice layers formed by melting and refreezing processes in ice cores [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	川上, 薫
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第15265号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/89610">https://hdl.handle.net/2115/89610</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Kawakami_Kaoru_abstract.pdf, 論文内容の要旨



# 学位論文内容の要旨

博士（環境科学）

氏名 川上 薫

## 学位論文題名

### A study on inclusions in ice layers formed by melting and refreezing processes in ice cores

（アイスコアに含まれる融解再凍結によって形成された氷板内の不純物に関する研究）

近年の北極域の温暖化によりグリーンランド氷床の融解は加速している。氷床涵養域の融解水は積雪内部で再凍結し、掘削されたアイスコアで主に氷板として検出される。融解再凍結過程は大気エアロゾル由来の不純物を再配分し、氷板に含まれる大気環境プロキシを不明瞭にする。これまでアイスコア中の氷板がどの程度プロキシを不明瞭にしているのかについては氷板中のイオン濃度などいわゆるバルクな分析による  $10^2$  mm スケールでの議論にとどまり、詳細に理解されているとはいえない。温暖化による表面融解やそれに伴う氷板形成が増加するなかで環境プロキシを正しく理解するためには、氷板中の不純物の特徴を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、グリーンランド氷床の複数のアイスコアに含まれている氷板の不純物の存在状態や化学組成を  $10^{-3}$ ~ $10^2$  mm スケールで解析し、氷板中の不純物がどのように再配分されるかを考察し、氷板形成に伴う環境プロキシの再配分過程の定量化と氷板形成時の大気環境を反映する新たな環境プロキシを確立することを目的とした。

グリーンランド北西部 SIGMA-A アイスコア（SIGMA-A コア；全長 60 m）および南東部 SE-Dome II アイスコア（SE II コア；全長 250 m）を分析した。まず、これらのアイスコアの年代を推定し年平均涵養量を求めた。また透過光による目視観察と写真撮影から氷板の形成年代と厚さを記録した。その後、氷板試料を清浄な状態で融解させ融解水中のイオン濃度と水同位体比を分析した。さらに低温室（ $-22$  °C）において測定顕微鏡で氷板内部の不純物の存在状態を観察し、顕微ラマン分光器（ $-30$  °C）で不純物の化学組成を同定した。また氷板試料を  $-22$  °C 環境で昇華させ残渣として不揮発性不純物を抽出し、走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分析装置で不揮発性不純物の形態、粒径、表面積、元素組成を分析した。

厚さ 1 mm 以上の氷板が SIGMA-A コア(1903-2017)では 243 層（平均厚さ 14 mm）、SE II コア(1799-2020)では 89 層（同 10 mm）含まれていた。両コアにおける氷板の数や厚さ、年層厚に占める氷板厚の割合は北極域における 1995 年以降の急激な温暖化に伴い増加した。特に氷床表面で全域融解が生じた 2012 年には両コアともに 150 mm 以上の厚い氷板が検出された。SIGMA-A コアの 2012 年の氷板には融解再凍結によって形成されたと考えられる粒径  $30\ \mu\text{m}$  以上の不純物が存在し、形状から粒子状、ひも状、直方体状の三種類に分類された。直方体状不純物は主に固相の硫酸カルシウムからなり、氷結晶粒内部に存在しやすい。ひも状不純物は主に液相で  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  を含み、氷結晶粒界に存在しやすい。粒子状不純物はどちらの特徴も示した。ひも状不純物は長さ 1 mm にもなり、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  を含む多量の融解水の凍結末期に形成されたことが示唆された。他方で SE II コアの氷板においても粒径  $30\ \mu\text{m}$  以上の不純物が検出され、長さ 0.5 mm になるひも状不純物が検出された。しかしながら SIGMA-A コアの 2012 年の氷板中の不純物とは異なり、ひも状不純物は  $\text{SO}_4^{2-}$  を多く含んでいる化学組成であることがわかった。化学組成の違いは両コアの氷板を形成する融解水のイオンバランスの違いに起因し、不純物の化学組成は融解水中のイオン種や濃度などを反映した。粒径の大きいひも状不純物は過去の温暖期における大規模な融解再凍結を示唆するプロキシとなり、その化学組成は融解水のイオンバランスを示唆するプロキシとなることが考えられる。本研究はひも状不純物とその化学組成を新たな融解再凍結の形成環境のプロキシとして提唱する。