

学位論文題名

A study of transformation processes
from snow to ice in polar ice sheets

(極域氷床における雪-氷変化過程の研究)

学位論文内容の要旨

氷床表面に堆積した雪は、次々と新たに降り積もる雪の下になって深部に移動し、雪自身の荷重による機械的な圧縮を受けながら圧密する。氷床表面付近の雪は、氷と通気性のある空隙との混合体であるが、深度が深くなり、密度が増加すると通気性空隙の一部が通気性のない気泡として氷の中に取り込まれ、最後には全ての通気性空隙が気泡に変化し、雪は通気性のない氷に変化する(部分的に気泡を含むこの雪の層を本研究では“雪-氷遷移層”と呼ぶ)。本研究では、この雪から氷への変化過程を実験的に明らかにした。得られた知識を利用して氷床氷に含まれる空気量の地域変動メカニズムを説明した。

本論文は、以下の6章から構成されている。

第1章は序章であり、極域氷床における雪から氷への変化過程に関するこれまでの研究成果とその問題点について述べ、本論文における論点を説明する。

第2章では、雪の密度の増加過程を南極氷床とグリーンランド氷床から採取された14本のコアサンプルの密度-深度分布を用いて調べた。結論として雪の密度とその上載荷重との関係を示す以下の2本の式が得られた。

$$\ln(P) = -12.9((\rho_i - \rho)/\rho_i)^2 - 0.0251 T + 7.602 \quad (1)$$

$$P = (0.0326T - 10.6) \ln((\rho_i - \rho)/\rho_i) - 1.82 \quad (2)$$

ここで、 P , T , ρ_i , ρ はそれぞれ上載荷重 (bar)、絶対温度 (K)、純氷の密度 (Mg/m^3)、雪の密度 (Mg/m^3) である。(1)式は、雪の空隙率の減少率が上載荷重の増加率の m 乗に比例すると仮定して解析を行なった結果であり、14本のコアの密度-深度分布曲線を用いると、 $m = -2$ が最も相関係数の高い関係となった。(2)式にお

いては、雪の空隙率の増加分が上載荷重の増加分の n 乗に比例すると仮定して解析を行なった結果であり、同じ14本の密度-深度曲線を用いると、 $n = -1 \sim 1$ で最も相関係数の高い関係となった。(2)式は、 $n = 0$ として解析した結果である。計算により求めた雪の密度と測定した雪の密度は、平均でそれぞれ 0.02 Mg/m^3 (3.2%の精度; (1)式による)、 0.03 Mg/m^3 (4.7%の精度; (2)式による)の違があった。

第3章においては、雪-氷遷移層における気泡の形成過程を南極氷床とグリーンランド氷床から採取された5本のコアサンプルを用いて、実験的に調べた。雪-氷遷移層における気泡の体積は、新たに製作した装置を用いて測定した。これは、理想気体の状態方程式に基づき、圧力と温度の測定により気泡の体積を測定するものである。5地点で採取されたコアサンプル中の単位質量当たりの気泡の体積(孤立気泡体積: $V_b \text{ m}^3/\text{Mg}$)は、試料の密度を関数として以下の2つの式で表せることがわかった。

$$\ln(V_b) = 48.66 \rho - 42.38, \quad 0.75 < \rho < 0.825 \quad (3)$$

$$V_b = 0.7234(1/\rho - 1/\rho_i), \quad 0.825 < \rho \quad (4)$$

ここで、 ρ は試料の密度 [Mg/m^3]であり、 ρ_i は純氷の密度である。 V_b の分布をさらに詳細に調べると、 V_b が急激に増加し始める密度(ρ_{ib})には地域特性があることがわかった。つまり、温度の低い地点で採取されたコア試料では ρ_{ib} が比較的大きな値を取り($0.785 \sim 0.79 \text{ Mg/m}^3$)、逆に温度が高い地点で採取されたコア試料では ρ_{ib} が小さな値($0.765 \sim 0.78 \text{ Mg/m}^3$)を取ることがわかり、 ρ_{ib} には以下に示す温度依存性があることがわかった。

$$\rho_{ib} = -1.8 \times 10^{-3} T_c + 1.22 \quad (5)$$

ここで、 T_c は絶対温度で示した雪-氷遷移層における温度である。また、雪-氷遷移層の試料中における最大の V_b は、試料の密度が $0.819 \sim 0.832$ で達成されることがわかった。この密度に相当する空隙率は $0.110 \sim 0.097$ であるが、この空隙率は5つの地点においては温度依存性や涵養速度依存性を示さなかった。以上の測定と同じ試料の非通気性係数(IP)を吸引法により測定した。IPは、以下の式で定義される。

$$\text{IP} [\%] = \Delta P_s / \Delta P_i \times 100$$

ここで、 ΔP_s は真空ポンプに連結されたチューブ(外形18mm、内径6mm)を試料の表面に密着させ、チューブ内を真空ポンプにより減圧させた時の大気圧からの差圧であり、 ΔP_i は氷を密着させた時の差圧である。IPが100%を示すと試料の通気性が氷と

同じである（通気性がない）ことを意味する。1つの試料に対して10カ所以上の測定を行い、平均値、最大値、最小値を求めた。試料中におけるIPの最大値が100%を示すサンプルは、密度 $0.813 \pm 0.001 \text{ Mg/m}^3$ 以上であり、IPの測定値が全て100%を示すサンプルの密度（ ρ_{co} ）は、 $0.828 \pm 0.002 \text{ Mg/m}^3$ 以上である事がわかった。この密度に相当する空隙率はそれぞれ 0.117 ± 0.001 、 0.101 ± 0.002 であるが、これらの空隙率は5つの地点でほぼ等しい値を示した。本研究では、以上の2種の異なる測定を雪-氷遷移層の試料に対して行い、結論として雪-氷遷移層が密度 ρ_{ib} から ρ_{co} の範囲として定義できる事を示した。

第4章においては、第3章で定義した雪-氷遷移層の範囲を示す密度（ $\rho_{ib} \sim \rho_{co}$ ）を利用して、これまでに南北両極域および山岳地域で採取された35地点の雪氷コアの密度-深度分布より、雪-氷遷移層の深さ分布を調べた。その結果、氷床の乾雪域で平均涵養量が 0.2 m/year （水当量）以下である地点については雪の温度の低下とともに、雪-氷遷移層が直線的に深くなることがわかった。また、乾雪域で平均涵養量が 0.2 m/year を越える地点や浸透域における雪-氷遷移層は、涵養量が 0.2 m/year 以下の地点よりも深いことがわかった。この雪-氷遷移層の温度依存性を雪の圧縮粘性係数の温度依存性で説明した。

第5章においては、第3章で定義した雪-氷遷移層が終了する密度（ ρ_{co} ）を用いて、極域で採取された雪氷コア中の含有空気量の地域変動のメカニズムを検討した。その結果、密度 ρ_{co} における気泡中の平均内圧（ P_c ）をその地点の気圧（ P_a ）で除した“規格化した気泡平均内圧”（ P_c/P_a ）に顕著な温度依存性があることが示された。この P_c/P_a は、密度 ρ_{ib} （雪-氷遷移層開始密度）や雪の圧縮粘性係数の対数とも線形関係があることがわかった。得られた P_c/P_a の温度依存性の式を用いて、現在とは異なる温度環境（氷期など）における極域の氷の含有空気量の変動を推定する方程式を導出した。この式を利用して、氷期における北西グリーンランドのCamp Centuryにおける過去の氷床高度を推定した。結論として、最終氷期におけるCamp Century地域は現在よりも氷床が $400 \text{ m} \pm 190 \text{ m}$ 程度厚かったことが示された。これは、従来推定されていた氷床の厚さよりも平均で $10 \text{ m} \sim 130 \text{ m}$ 低い値である。

第6章においては、本論文において新たに明らかになった知見をまとめ、今後の展望について述べた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	前野紀一
副査	教授	中尾欣四郎
副査	助教授	成瀬廉二
副査	講師	成田英器

学位論文題名

A study of transformation processes
from snow to ice in polar ice sheets

(極域氷床における雪-氷変化過程の研究)

氷床表面に堆積した雪は、新たに降り積もる雪の下になり圧密されながら深部に移動してゆく。氷床表面付近の雪は、通気性のある、水と空気との混合物であるが、圧密の進行とともに、空隙は切断され、空気は独立気泡として氷の内部に捕捉され、全体が氷へ変化してゆく。極域氷床の氷化過程で捕捉された空気は、過去の地球大気の組成や地球環境を知るために極めて有効な手段とされているが、その年代決定には重大な問題がある。それは、空気の氷中への捕捉が氷床の特定の深さで突然進行するのではなく、かなりの深さ範囲で徐々に進行する点である。そのため氷中の空気の実際の年代は場所によっては数百年から数千年というかなりの長い範囲に渡っていると考えられ、年代決定誤差の定量的研究が要求されている。本研究は、氷床中における雪の氷化過程を詳細に調べることによって、空気の捕捉メカニズムを明らかにし、空気取り込み開始密度の温度依存性から独立気泡の年代決定の精度を高めようとしたものである。

研究は四つの部分から成り立っている。第一の部分では南極氷床およびグリーンランド氷床から採取された14本のコアサンプルの密度と深さとの関係を詳細に調べ、密度、上載荷重、年平均気温の間の関係を求めた。第二の部分では雪-氷遷移層にお

ける独立気泡の形成過程を南極氷床とグリーンランド氷床から得られた5本のコアサンプルについて調べた。研究は水中に取り込まれた気泡の体積を測定する方法で進められた。その結果、独立気泡は雪の密度が約 0.75 Mg/m^3 から形成され始めること、形成開始密度には温度依存性があり、気泡形成は温度が高いほど低密度から始まることが明らかにされた。気泡形成の終了密度、すなわち氷化密度は $0.828 \pm 0.002 \text{ Mg/m}^3$ でほとんど温度依存性が見られなかった。また、氷の単位質量当たりの独立気泡体積は密度の増加とともに増えるが、雪-氷遷移層を越えると氷の塑性変形による気泡の圧縮によって減少する。独立気泡体積の最大値を与える密度は $0.819 \sim 0.832 \text{ Mg/m}^3$ に見出された。研究の第三の部分では、以上の乾雪域のデータに夏期に融解・再凍結の起こるグリーンランド氷床のデータを加え、雪-氷遷移層の深さが温度の低下とともに深くなることを示した。そしてその物理メカニズムが雪の圧縮粘性の温度依存で説明された。第四の部分では、上の解析で明らかになった雪-氷遷移層終了密度を使って、極域で採取された多くの雪氷コア中の含有空気量の地域変動を調べた。その結果、独立気泡内部の圧力に温度依存を考慮する必要が指摘され、それによって過去に推定された氷期の氷床高度が平均で $10 \sim 130 \text{ m}$ 過大評価されていたことが結論された。

上述のように、本論文は、これまで明らかにされていなかった氷床の氷への独立気泡の取り込みメカニズムについて詳細な研究を進め、取り込み開始密度には温度依存性があるが氷化密度にはないことを示すことによって、独立気泡中の空気の年代決定における問題を解決したといえる。ここで得られた知見は昨年ケンブリッジで開催された国際雪氷学会でも高く評価され、今後の極域氷床の研究に与える影響は非常に大きいと考えられる。審査員一同は申請者が博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を持つものと認める次第である。