

## 論文審査の結果の要旨

氏名 齋藤 冬樹

大陸上の氷床は気候システムの中の重要な要素の一つである。氷床は日射に対する高い反射率と 3000mにも及ぶ高い標高のため、大気をはじめ他の気候システムの構成要素に大きな影響を与える。氷期・間氷期の気候変動に伴って大きな氷床変動があったことが知られている。氷床の形状の再現・予測や氷床分布を決める物理の理解は重要な課題であり、数値モデルはそのための有効な手段である。本研究では、3次元氷床モデルの構築を行い、それを南極とグリーンランド氷床に適用した。とくに、モデルに用いられるパラメータ等の不確かさが、南極での氷床コアデータの年代決定や、地球温暖化によるグリーンランド氷床融解の見積もりに与える影響を定量的に評価した。また、現在標準的に用いられているよりも高精度の応力評価法を導入したモデルも構築し、古気候データの年代計算等に与えるインパクトを評価した。

本論文第1章で氷床とその数値モデルについて概観した後、第2章において、本研究で構築した3次元氷床モデルの解説がなされる。3,4章においては、現在この分野で標準的に用いられている浅い氷の近似を用いたバージョンが用いられる。モデルの構成、計算法は世界で先端的に用いられているものと同等のものであり、Abe-Ouchi(1993)の2次元版を基にしてはいるものの3次元化にあたっての定式化、コーディング、境界条件の設定、各種パラメータ化法の検討等々の作業はもっぱら申請者の手によるものである。

第2章では、構築したモデルを南極氷床に適用している。現在の南極氷床の形状、体積等がよく再現されることを示した後、dome Fuji と呼ばれる南極第2の頂上の位置変動を調べ、dome での深層コアデータの年代評価に与える影響の定量的評価を行なった。基盤地形データや氷の強度変化、地熱フラックス、底面すべり等の設定が、再現された dome の位置に与える影響が調べられた。また、氷期における氷床の広がり効果、および、氷期・間氷期の気候変動の影響も調べられた。氷床の広がりを替えた実験では、40 km以上の有意な位置評価の差異が現れることがわかった。また、Ross 海側より Amery 棚氷側の氷床面積の影響の方が大きい。地熱の与え方も位置の推定に少なからず影響を与える。また、氷期の海水準変化とそれに伴う降雪の変動により dome Fuji は氷期に最大 80km に及ぶ大きな位置変動をした可能性があることがわかった。この位置変動は年代計算に十分影響を与え

る大きさであり、今後さらに詳細に研究する必要がある。

本論文第4章では、地球温暖化に伴うグリーンランド氷床融解の評価実験が行なわれた。気候変動を一様な温度上昇で簡単に与える実験に加えて、高解像度大気大循環モデルによる温暖化実験結果を氷床モデルに与える実験を世界ではじめて行なった。まず、一様温度上昇に対する応答実験では、定常応答において、温度上昇  $4 \pm 0.5^\circ\text{C}$  で急激な体積減少が起こることが示された。これは想定されている温暖化の範囲内である。モデルの定式化等に対する感度も調べられ、定性的には結果は変わらないが、定量的には精度を高める必要があることが指摘された。高解像度大気大循環モデル結果を与え、温度上昇の時間変化を考慮した実験では、温暖化に伴う氷床融解の効果は100年で+1.4 cmと見積もられた。また、感度実験により、氷床の流動を考慮することで海洋への融解が減り、海水準上昇を抑制する方向に働くことが分かった。この効果は氷床流動を考慮しない場合に比べて100年で7%、300年で29%に及ぶ。温暖化に伴って積雪が増えることも融解を抑制する効果を持つ。

第5章では、現在多くの氷床モデルで用いられている浅い氷の仮定を廃し、世界ではじめて一次応力項を考慮した3次元氷床モデルを構築した。導入した応力項のうち、とくに氷床流動の発散域 (divide) で重要な水平法線応力項の効果について理想的な地形を設定して調べられた。また、一次応力は力学的効果のみならず変形による加熱を通して熱力学効果も持つため、熱力学と力学間の結合を切った実験も行なわれた。その結果、水平の法線応力は標高分布への影響は小さいが、鉛直速度の違いや変形熱を通して底面温度に  $\pm 1\text{ K}$  程度の影響が現れることがわかった。また、一次応力項を考慮したモデルを用いて divide における年代診断を行なうと、浅い氷の仮定を用いた従来モデルに比べて10%程度の精度向上が期待されることが示された。

以上のように本研究は、氷床の力学-熱力学モデルという野心的な分野に挑戦し、世界最先端の3次元モデルを構築したものである。さらに、モデルを用いて氷床コアの年代推定精度の向上、地球温暖化時の氷床融解の評価を行なえることを示した。本研究で構築されたモデルは今後大気大循環モデル等他の気候モデルと結合され、定量的な気候研究の発展に大いに貢献するものと期待される。

よって、博士（理学）の学位を授与できると認める。