

論文内容の要旨

論文題目 Development of a three dimensional ice sheet model for numerical studies of Antarctic and Greenland ice sheet

(三次元氷床モデルの構築と南極および Greenland 氷床に関する数値実験)

氏名 齋藤冬樹

はじめに 氷床(大陸規模の陸上の氷体)は一つの気候システムである。例えば氷期間氷期の気候変動に伴い氷床が大きく変動した。氷床は高い反射率と高い標高(~3000m)で他の気候システムに影響を与える。そのため氷床を知ることは気候研究にとって重要な要素である。また、地球温暖化による氷床の融解から海水準上昇が懸念され、このことは社会的な関心となっている。さらに、氷床 core 掘削によって得られる情報は古気候の復元の重要な要素の一つである。

いずれの観点にせよ、氷床の形状(体積)の再現、予測や氷床分布を決める物理の理解が重要であり、数値モデルはそのための有効な手段である。本研究では氷床の数値モデル構築をおこない、上記のようないくつかの氷床に関する問題について考察する。

氷床分布は降雪、融解などの表面質量収支と、氷の流動で決まる。氷は通常非圧縮粘性流体として扱い、流動は質量収支、応力の釣合い、構成方程式および熱力学の方程式で記述される。

通常応力の釣合いの式を解く際は scale 解析をして近似を行う。静水圧近似を行うと応力の式(x 方向のみ示す)は(1)式となる(応力 σ 、標高 h)。

$$(1) \quad \underbrace{2 \frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}}_{\text{FOA}} - \overbrace{\rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}}^{\text{SIA}} = 0$$

後ろの二項が零次の応力項であり、この二項のみを用いる方法を Shallow Ice 近似 (SIA) と呼ぶ。前の三項が一次の応力項であり、五つの項を用いる方法を First Order 近似 (FOA) と呼ぶ。現行の全ての三次元氷床 model では SIA を用いている。SIA で最高点の位置、標高分布、氷床の広がりおよび再現が出来、目的によっては十分実用的であることがわかっている。

本研究では SIA model を用いて二つの問題にあたり、さらに FOA model を開発して SIA model と比較し、一次の応力の効果を調べた。

drilling site の感度実験— dome Fuji の標高と位置 dome Fuji は南極第二の頂上で、深層 core 掘削から長期間の古気候の復元が期待され、解析も進んでいる (Dome-F Deep Coring Group, 1998, など)。dome とその他の領域では流動の性質が大きく異なり、氷厚の数倍程度 (~ 20km) の dome の位置変動でも、年代計算に影響を与えることが指摘されているが (Dahl-Jensen, 1989) これまで dome Fuji の位置変動についての研究はない。そこで本研究では、dome Fuji の氷期間氷期を通じた位置の範囲を調べた。

実験は二種類行った。一つは海陸分布 (氷床の端位置) の変化に対する感度実験である。氷期の海水準変動に伴い氷床の広がりが大きく変化したことが知られている。その効果を最大限に見積もった実験を行った (W)。次に三つの領域のみ広がりが増える感度実験を行い (A,F,R)、領域ごとの効果を分離した。もう一つは氷期間氷期の気候変動に対する感度実験である。Vostok の 22 万年の温度時系列を南極全体に適用して評価した。

図 1(a) は海陸分布変化の感度実験の結果で C が標準実験の位置を現す。C と W の位置から、氷期の海水準低下により有意な位置変動 (≥ 40 km) が起こり得ることがわかった。また、Amery 側 (A) の影響が大きく、Ross 側 (R) の影響がないこともわかった。

図 1(b) は気候変動による位置変動である。氷期の時期 (210-190,110ka) に有意な位置変動が生じる。従って海陸分布、気候変動いずれも氷期の位置変動は同じ方向であり、dome Fuji は氷期に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とっては十分影響する大きさであり、今後詳細に研究する必要がある。

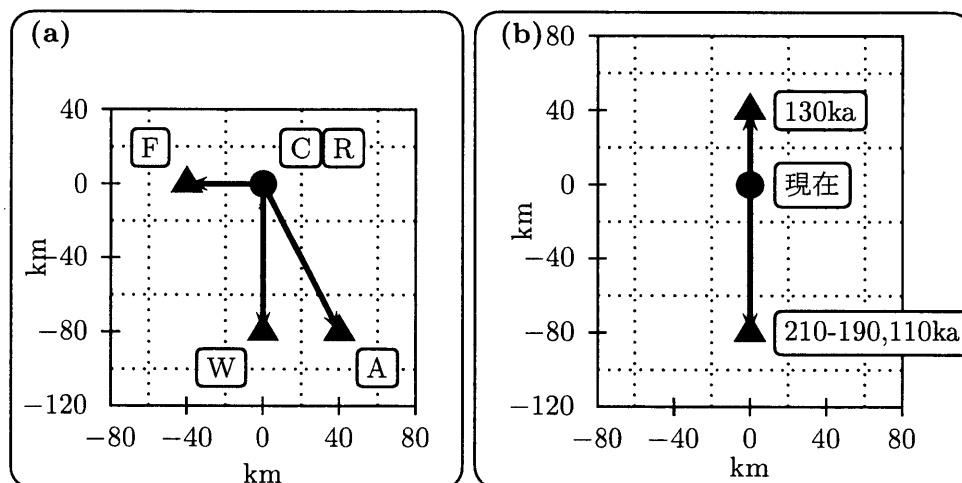


図 1.. dome Fuji 位置変動範囲

気候変動の下での氷床変動— Greenland の温暖化実験 全球的温度上昇による氷床の体積変動が社会的な関心事である。氷床変動は質量収支変化と氷床流動両方を考慮するのが望ましい。これまで行われている研究は、氷床 model を用いた単純な気候変化に対する応答 (Abe-Ouchi, 1993; Letréguilly et al., 1991; Fabre et al., 1995; Greve et al., 1998) や、高解像度の GCM を用いた温度上昇、降水量変化の推定 (Wild & Ohmura, 2000)、といずれか一方のみであった。そこで本研究では、高解像度 GCM の結果を氷床 model に入力し、海水準変動に対する氷床流動の効果を調べた。

まず一様温度上昇に対する Greenland の定常応答を調べ、体積変化が model や境界条件の不確定性にどれくらい影響されるか調べた。現行の氷床 model には二通りの差分表現の流儀がある (Hindmarsh & Payne, 1996)。図 2(a) は差分表現を変えてそれぞれの体積変化を示したものである。急激な体積変化となる温度が 4 ± 0.5 K であり、現実的な温暖化シナリオの範囲

($\sim +5K$)に含まれる。従って予測精度を高めることが今後必要である。

次に高解像度 GCM による温暖化実験をおこなった。用いた温暖化分布は Abe-Ouchi et al. の T106 AGCM time slice 実験で、 $CO_2 + 1\%/yr$ (A.D. 2060 で 2 倍) のシナリオに沿っている。標準実験と温暖化実験の差を温度、降雪量の観測値に加え氷床 model の入力とした。消耗 (\approx 融解) 量は夏の温度の線形関数とした (Ohmura et al., 1996)。

図 2(b) は温暖化終息後 300 年までの Greenland の体積変動を海水準への寄与に換算したものである。本研究では 100 年で 1.4cm、300 年で 5.1cm と推定された。上の曲線が氷床流動の変化を考慮した場合、下の直線が氷床流動が変化しないと仮定したものである。氷床流動の効果が 300 年で 20% 程度に及ぶことがわかった。従って氷床 model の構築が温暖化応答の研究にとって重要な手法である。

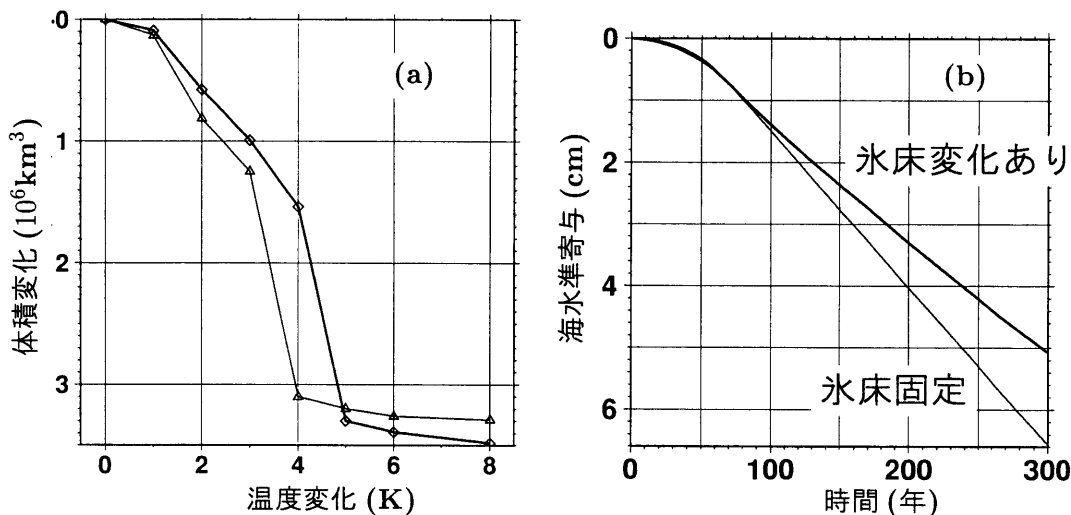


図 2.. Greenland 温暖化実験

高次の model 開発—一次応力の導入 現行の三次元氷床 model の基礎は SIA である。この近似は divide(発散域) や、ice stream(速い流れが集中した狭い領域) では成立しない。divide の流動は年代計算を、ice stream は氷床の不安定性を考える際に重要である。これまで三次元の一次応力項を含む model (FOA model) を用いた研究はなく、一次項の効果に対する研究が不十分である。そこで、本研究では FOA model を開発し、理想的な条件で氷床の定常解を求め、特に divide で重要な水平の法線応力 ((1) 式の $\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}$) の効果を調べた。FOA model は Blatter (1995) に基づき構築した。

FOA の効果は応力の式だけではなく、流動 (移流項) や変形による熱の違いを通じて、熱力学の式にもあらわれる。本研究では熱力学と力学の効果を分離するため、熱力学力学結合実験と非結合実験を行って両者を比較した。

実験設定は軸対称の境界条件で平らな基盤とした。その結果、底面温度に $\pm 1K$ の差を生じることがわかった (図 3(a))。divide で FOA の底面温度が高くなる原因は鉛直速度の違いから生じる。また、上流域で FOA の底面温度が低くなる原因は、応力の違いが変形熱を通じて生じるということがわかった。なお、水平の法線応力偏差の効果は標高分布には影響しないことがわかった。

さらに局所的な問題として divide の年代診断をした (図 3(b))。深さ 2000m の年代が FOA と SIA でそれぞれ 13 万年、12 万年であり、誤差が年代の 10% 程度に達することがわかった。

年代計算に数千年の精度を求められる場合があり、従って、本研究で開発した FOA model は divide の流動再現から、三次元年代計算の有効な model となるといえる。

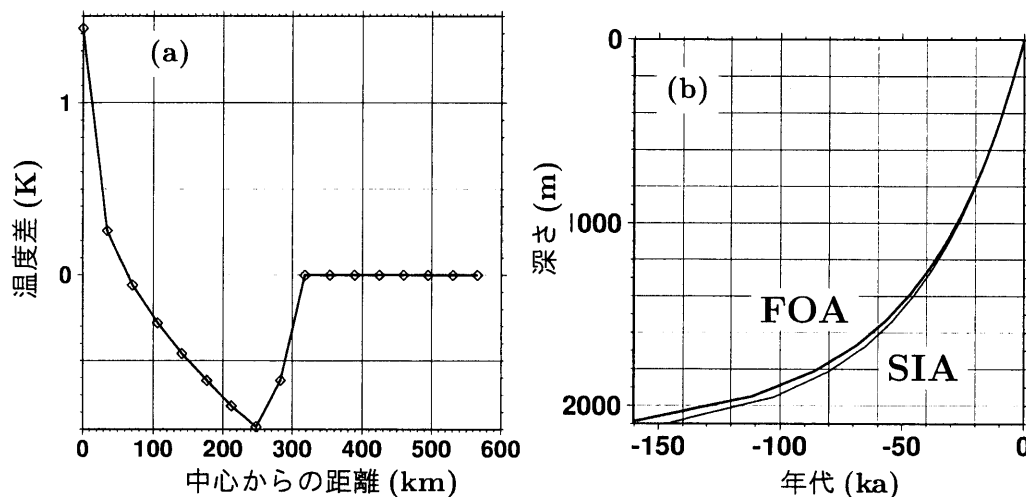


図 3.. FOA vs SIA

参考文献

- Abe-Ouchi, A. (1993): *Ice Sheet Response to climatic change: A modelling approach*. Ph.D. thesis, Zürcher Geographische Schriften, Geographisches Institut, ETH.
- Blatter, H. (1995): Velocity and stress fields in grounded glaciers: a simple algorithm for including deviatoric stress gradients. *Journal of Glaciology*, **41**, 138, 333–344.
- Dahl-Jensen, D. (1989): Steady thermomechanical flow along two-dimensional flow lines in large grounded ice sheets. *Journal of Geophysical Research*, **94**, B8, 10355–10362.
- Dome-F Deep Coring Group (1998): Deep ice-core drilling at Dome Fuji and glaciological studies in east Dronning Maud Land Antarctica. *Annals of Glaciology*, **27**, 333–337.
- Fabre, A., A. Letréguilly, C. Ritz, & A. Mangeney (1995): Greenland under changing climates: sensitivity experiments with a new three-dimensional ice-sheet model. *Annals of Glaciology*, **21**, 1–7.
- Greve, R., M. Weis, & K. Hutter (1998): Paleoclimatic evolution and present conditions of the Greenland ice sheet in the vicinity of summit: An approach by large-scale modelling. *Paleoclimates*, **2**, 2-3, 133–161.
- Hindmarsh, R. C. A. & A. J. Payne (1996): Time-step limits for stable solutions of the ice-sheet equation. *Annals of Glaciology*, **23**, 74–85.
- Letréguilly, A., P. Huybrechts, & N. Reeh (1991): Steady-state characteristics of the Greenland ice sheet under different climates. *Journal of Glaciology*, **37**, 125, 149–157.
- Ohmura, A., M. Wild, & L. Bengtsson (1996): A possible change in mass balance of Greenland and Antarctic ice sheets in the coming century. *Journal of Climate*, **9**, 2124–2135.
- Wild, M. & A. Ohmura (2000): Change in mass balance of polar ice sheets and sea level from high-resolution GCM simulations of greenhouse warming. *Annals of Glaciology*, **30**, 197–203.