

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05664

研究課題名（和文）氷床・棚氷モデルへの高精度輸送スキームの導入とその影響に関する研究

研究課題名（英文）Development of higher-order transport schemes in an ice-sheet/ice-shelf model

研究代表者

齋藤 冬樹（SAITO, Fuyuki）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門（環境変動予測研究センター）・研究員

研究者番号：60396942

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：氷床の時間発展を計算する氷床数値モデルでは、氷厚、温度、氷年代の時間発展を表す方程式が含まれ、それぞれ輸送方程式は移流拡散方程式として表現される。それぞれに高精度の数値スキームを実装し、従来の古典的な手法のモデルと比較することで数値表現に由来する結果の精度を明らかにした。特に RCIP 法を氷年代計算に適用することで、氷の年代に加えて副次的に年層厚の計算精度が飛躍的に向上した。この手法を用いることで、例えば氷床コア掘削地点の選定にこれまでにない精度で情報提供することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地球温暖化に対する氷床応答によって起こりうる将来の海水準上昇に、世界的な関心が集まっている。このことに関連して数値モデルを用いた氷床応答の定量的評価への要請も高い。また、気候システムのより深い理解のために過去の気候復元とその要因の研究が重要な課題である。氷床数値モデルで得られる氷床変動再現の高精度化、氷年代の高精度化はこのために有用な課題の一つである。本研究で開発改良した氷床モデルにより特に氷年代計算が飛躍的に向上し、古気候復元への重要な手法となった。

研究成果の概要（英文）：Numerical ice sheet models include equations to solve evolution of ice thickness, temperature and ages, which are represented as either transport equation or advection-diffusion equations. In this study higher-order numerical schemes are implemented for these equations, in order to evaluate their efficiencies and accuracies with comparing the results obtained by classical numerical schemes such as the upwind schemes. In particular, implementation of one of the higher-order semi-Lagrangian scheme (the RCIP scheme) on the computation of ages achieved significant improvement not only the age itself but also annual layer thickness, which is inverse of the age derivative. It is expected that, using this novel technique, much accurate information can be provided for the decision of ice-core drilling site, for example.

研究分野：数値モデリング

キーワード：氷床モデル

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化に対する氷床応答によって起こりうる将来の海水準上昇に、世界的な関心が集まっている。このことに関連して数値モデルを用いた氷床応答の定量的評価への要請も高く、IPCC の報告書でも再三とりあげられてきた。海水準変動への寄与という観点での氷床変動の効果には、氷厚変動だけでなく、氷床の面積の変動も等しく重要である。一般には氷床変動は氷厚の水平分布の時間変化を非圧縮流体の連続の式から導かれる非線形輸送方程式の形で表現する。このような輸送方程式の式の離散化には単純なものから複雑なものまで多くが提唱されているが、上流差分などの基礎的な手法では、流体の変化が急激な領域で数値拡散が大きくなることや不自然な数値振動が起こることが知られている。

特に将来の温暖化に対する氷床の応答は、現在融解域であり形状の変化が比較的急激な氷床端でまず顕著であると考えられる、従って氷床の面積変動を精度よく再現する上で、端の時間変動の数値的な表現の改良や、従来の既存のモデルによる実験結果にその改良がどう影響するかをきちんと評価することが重要な課題である。

氷床モデルでは形状の変化だけでなく、熱力学方程式に基づく温度分布の時間変化の計算や、氷の年代計算を含んでいる。これらは移流拡散方程式で表現されているが、形状分布と同様に精度よく計算するために様々な手法が提唱されている。

近年 100 万年以上の時間スケールの古気候研究が盛んであり、それに伴い高精度古気候復元の機運が高まっている。International Partnerships in Ice Core Sciences (IPICS) の掲げる Oldest ice core project がその代表的なものであり、日本でも国立極地研究所を中心に新たな氷床コア掘削地点の選定研究が行われている。氷床モデルによる氷の年代計算は、掘削地点の決定にとって重要な手法の一つであり、より高精度の計算が期待される研究課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では各種の輸送方程式、移流拡散方程式の離散化手法を氷床流動モデルに実装し、それによる解の精度の評価や、モデル計算への影響を明らかにするものである。

近年発達した輸送・移流方程式の新たな数値手法を氷床モデルに適用したその効果を議論した研究はほとんどない。その点で本研究は意義が大きい。

## 3. 研究の方法

研究代表者が開発を続けてきた氷床流動モデル Ice sheet model for Integrated Earth system Studies (IceES)に各種の数値解法を実装することで影響評価を行う。対象となる方程式は氷床の厚さの時間変動の方程式(輸送方程式)熱力学方程式(移流拡散方程式)および年代の方程式(移流方程式)である。それぞれの効果を単純に評価するために一次元化モデルから始め、場合によっては多次元化まで拡張する。

文献調査から導入の比較的容易なCIP法(Constrained Interpolation Profile scheme),IDO法(Interpolated Differential Operator)や、それらから派生した方法(RCIP-CSL法や,IDO-CF法)を中心に検討した。

新しく実装した手法と古典的な手法を理想的な条件下での感度実験に適用しその効果をまとめ

た。

#### 4. 研究成果

(1) 解析的な解を求める新しい氷床モデル Unnas を構築した。これは氷床時間変動を求める一般的な氷床数値モデルではなく、純粋に特定の理想的な条件下での解析的な氷床形状解、速度解を求めるプログラムである。一般的な条件下では氷床モデルで近似的に求めることになるこれらの解を置き換えることにより、注目したい数値手法に焦点をあてた評価が可能となった。

(2) 氷厚の時間変動計算に IDO スキームを実装しその効果を明らかにした。現状の多くの氷床モデルで用いられている、上流差分や拡散形式の中央差分による基本的な手法に加え、Constrained Interpolation Profile スキーム(CIP)と呼ばれる数値拡散の少ない手法(Xiao et al., 1996 など)を単純化して導入した。

それらの手法を EISMINT phase ii 実験 A (Payne et al., 2000)に提示される、氷床モデルの比較プロジェクト EISMINT に使用された理想的な実験の設定を用い(ただし水平解像度は10kmと細かくした)、輸送方程式のスキームを変更して感度実験を行った。図が実験結果である。その結果、特に氷床縁辺部で再現の差が200m程度に達することが明らかになった。

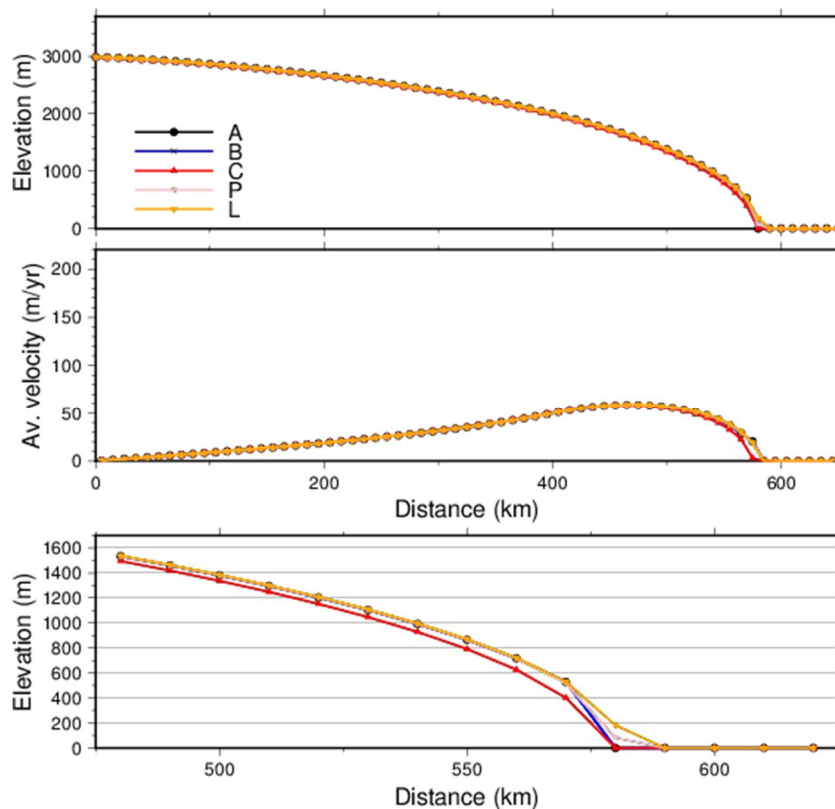


図 EISMINT phase ii (Payne et al., 2000)の実験設定による氷床モデル実験の結果。横軸は対称の中心からの距離で、上から氷厚(m)、鉛直平均速度(m/yr)、氷厚の縁辺付近の拡大図を表す。輸送方程式に関して五種類のスキームの感度実験であり、それぞれ、A(拡散形式), B(フラックス形式中央差分),C(フラックス形式上流差分),L(CIPスキームの実装1), P (CIPスキームの実装2)を表す。

(3) CIP 法(その派生であるRCIP 法)を鉛直一次元の年代計算に導入し、種々の状況下での感

度実験を行ったところ、今まで他のモデルで用いられてきた計算手法と比較して年代計算の精度が飛躍的に改良されたことを確認した。比較は基本的な手法としてよく用いられている、一次の上流差分および二次の上流差分を使用した。解析解は氷厚不変かつ降雪一定の場合で求められるが、上流差分で見られる解の拡散が CIP 法でよく抑制されていることが確認出来た。上流点を求めるためのさらなる工夫など行い、RCIP 法による包括的な感度実験の解析から年代計算の精度が向上されたことが確認された。特に、研究開始当初は思い至らなかった点ではあるが、RCIP 法のアルゴリズムの性質から自明の理として年層厚の計算において従来手法から飛躍的に精度が向上したことが明らかとなった。この年層厚は、現実の氷床コアの解析でも特に利用される指標の一つであり、RCIP 法による年代計算の有効性が確認されたといえる。年代計算に関して雑誌 Geoscientific Model Development に投稿し、出版された。

また本研究課題で開発改良した氷床モデル IcIES-2 は 2020 年からオープンソースとして公開された。

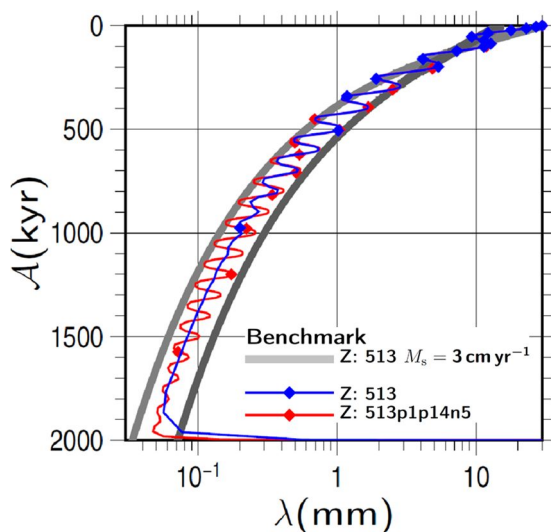
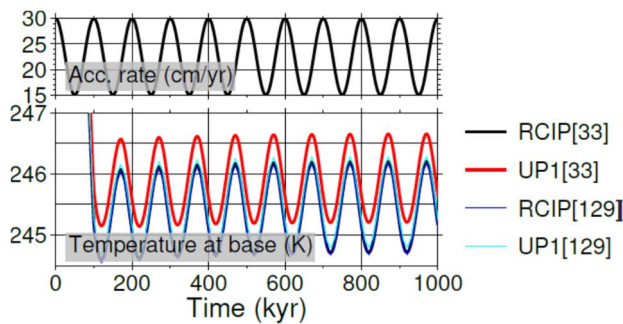


図: RCIP 法を用いた氷床鉛直年代計算例。鉛直流動速度は表面の降雪量に依存する分布 (Parrenin 2007) とし、氷が出来てからの経過時間と年層の厚さ (一年辺りの厚さ) を計算したもの。実験は降雪の時間変動周期を 10 万年、降雪量の最大・最小を 3cm/yr, 1.5cm/yr, 氷厚を 3000m と設定した。縦軸に年代、横軸に年層の厚さを示した。灰色の線は降雪一定として求められる解析的な分布を示す。青線(Z513)は等間隔 513 層で離散化した場合、赤線(Z513p1p14n5) は Saito et al (2020) で紹介する最適化した不等間隔 513 層の場合の計算結果である。最適化した鉛直離散化により、新しい年代の再現を保持したまま古い年代の年層の変動がよりよく保存されていることがわかる。

- (4) 移流拡散方程式である熱力学計算に RCIP スキームを導入しその効果を明らかにした。上記の年代計算では単純な移流計算のみであるが、一方、熱力学過程では移流項に加え拡散項などが加わり計算がかなり複雑になる。

従来の伝統的な上流差分スキームと RCIP を用いて流動が外部条件として与えられる、ごく簡単な設定下で氷温度の時間発展を計算した(図)。その結果、手法による違いは 0.5K 程度であることが明らかとなった。現実的には氷の温度の違いは氷の粘性に影響し、流動速度に影響するが、今回はその効果は含まれていない。今後は熱力学結合を含んだ系で各手法により熱力学計算がどのように影響されるかをより詳細に調べることが必要である。また、融解による相転移の効果の取り扱いをさらに精緻化することが重要である。



図：一次元氷床流動モデルでの熱力学計算例。RCIP 法と上流差分(UP1)について、解像度 33 層と 129 層のそれぞれで計算し、底面温度の時系列を図示した(下)。境界条件である表面温度は 223.15K に固定し、表面の速度を正弦関数で変動させた(上)。

(5) 本研究課題で開発した氷床年代熱力学モデルを用いた応用研究として、氷床コア掘削地点の選定に関する数値実験用に提供した。国立極地研究所を中心とした掘削地点選定会議での議論(研究代表者を含む)を通じて氷床コア掘削地点が決定した。また、その結果の一部は共著論文として投稿された。

特に古い年代に到達する氷掘削のための氷床コア掘削地点選定で重要な観点は、解析のためにある程度の年層の厚さが確保されていること、および情報の欠落を避けるためその期間を通じて融解が生じないことである。本研究課題で開発した高精度年代温度計算モデルを用いることで、候補地点の絞り込みに貴重な貢献ができたといえる。候補地決定については国立極地研究所を中心にプレスリリースとして報告された。数年後に達成される氷床コア掘削、およびそれにもとづく 100 万年スケールの高精度古気候復元が大いに期待される。

#### < 引用文献 >

Xiao, F. et al., Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function. *Comp. Phys. Comm.*, 93, 1, 1-12 (1996).

Payne, A. J. et al., Results from the EISMINT model intercomparison: the effects of thermomechanical coupling, *J. Glaciol.*, 46, 153, 227-238 (2000).

Saito, F., Abe-Ouchi, A., Takahashi, K., and Blatter, H., “SeaRISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet”, *The Cryosphere*(10), 43–63, doi: 10.5194/tc-10-43-2016, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Saito Fuyuki、Obase Takashi、Abe-Ouchi Ayako	4. 巻 13
2. 論文標題 Implementation of the RCIP scheme and its performance for 1-D age computations in ice-sheet models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development	6. 最初と最後の頁 5875 ~ 5896
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/gmd-13-5875-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Saito Fuyuki、Obase Takashi、Abe-Ouchi Ayako	4. 巻 -
2. 論文標題 Implementation of RCIP scheme and its performance for 1D age computations in ice-sheet models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoscientific Model Development Discussions	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/gmd-2020-53	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 齋藤 冬樹、小長谷 貴志、阿部 彩子
2. 発表標題 Implementation of higher-order advection schemes in a numerical ice-sheet model for ice-core studies
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤冬樹 阿部彩子 小長谷貴志 大石龍太
2. 発表標題 氷床流動モデルICES-2の開発と理想的・現実的氷床の感度実験
3. 学会等名 雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fuyuki SAITO, Ayako ABE-OUCHI, Takashi OBASE, Ryouta O'ISHI
2. 発表標題 Development of an ice-sheet model IcIES-1 and IcIES-2: benchmark simulation on idealized and realistic ice-sheet configuration
3. 学会等名 The 12th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fuyuki Saito, Ayako Abe-Ouchi, and Takashi Obase
2. 発表標題 Development of a numerical ice-sheet model for simulation of summit migration and dating
3. 学会等名 EGU General Assembly 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fuyuki SAITO, Ayako Abe-Oushi, Takashi Obase
2. 発表標題 Development of a numerical ice-sheet model for simulation of summit dynamics
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fuyuki SAITO, Takashi Obase, Ayako Abe-Ouchi
2. 発表標題 Performance of RCIP scheme on 1-d age computation of ice sheet
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SAITO Fuyuki
2. 発表標題 Sensitivities in ice-sheet simulation due to a variation of numerical formulation of the ice/temperature transport equation
3. 学会等名 第9回極域科学シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 SAITO Fuyuki, Takashi OBASE and Ayako ABE-OUCHI
2. 発表標題 Performance of RCIP scheme on 1-d age computation of ice sheet
3. 学会等名 JpGU 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 SAITO Fuyuki
2. 発表標題 Sensitivity of simulated ice-sheet topography to the Glen's flow-law exponent
3. 学会等名 第8回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 SAITO Fuyuki
2. 発表標題 Uncertainties in ice-sheet simulation due to a variation in the numerical schemes of the ice transport equations
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------