

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月28日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21740349

研究課題名（和文） 棚氷数値モデルの開発と氷床棚氷境界の力学に関する研究

研究課題名（英文） Development of a numerical ice-shelf model for study on dynamics over boundaries between ice-sheet and ice shelf

研究代表者

齋藤 冬樹 (SAITO FUYUKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員

研究者番号：60396942

研究成果の概要（和文）：気候変動に対する氷床の応答をよりよく理解し再現するために、棚氷数値モデルを開発・実装した。既存の氷床モデルを用いた、南極氷床変動に対する棚氷着床寄与を定量的に評価し、南極氷床変動の理解のためには、棚氷領域の変動の理解が本質的であることを確認した。また、モデル内の数値的な表現の不備が計算結果に影響を与える潜在的な可能性を議論し、その不備を最小限にする方法を用いて、棚氷モデルを設計し、様々な条件下で棚氷モデルの試験を行った。

研究成果の概要（英文）：A numerical ice shelf model is developed in order to understand/simulate response of ice-sheets on climate variation. An ice-sheet model is used to evaluate the potential contribution of ice-shelf grounding to the ice-sheet volume and it is found to be an essential to understand the variation of ice-shelf to understand the whole Antarctic ice-sheet. After discussing influence of errors due to finite-precision numerics on ice-sheet evolution, the ice-shelf model is designed to reduce such numerical errors, and tested under various configuration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：氷床、棚氷、数値モデル

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い。棚氷とは、内陸からの流動で海まで到達した氷が融解、破壊しきれずに海洋に張り出して浮いている部分を指す。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、着床している部分の面積の変動も等しく重要であり、これはすなわち氷床棚氷境界の変動が重要であることを意味する。氷床変動は、氷床にとっての外部境界条件に相当する大気や海洋などの変動だけでなく、氷床自身の力学的性質にも依存する。氷床棚氷境界の変動も力学的

性質に大きく依存すると考えられているため、数値モデルによる氷床棚氷境界の精度の高い再現が必要不可欠である。特に地球温暖化の影響は、氷床棚氷境界を含む融解域である氷床の縁辺部でまず顕著に現れると考えられ、従ってそれに応答した氷床棚氷境界付近の振舞いの変動も顕著であると期待される。近年実際に棚氷の崩壊の観測報告が少なくない。今まで棚氷でおさえられていた内陸氷床の流動が棚氷の崩壊により加速され、より短期間で氷床変動が懸念され議論されている。棚氷モデルを開発し、氷床-棚氷システムを構築、包括的な議論が重要な課題である。

氷床部分では、着床しているために鉛直のずり応力が最も重要な力学効果であるが、それと対照的に、棚氷部分では水平のずり応力や垂直応力が重要となる。棚氷の流動は着床している内陸側の氷床形成に大きな影響があると考えられる。たとえば棚氷の流動がなんらかの理由で遅くなると、それに接続した氷床の流動も抑制される。棚氷と氷床の遷移境界である grounding line では両方の効果を同時に含み、さらに複雑な力学過程となっている。氷床-棚氷モデルの構築は、それぞれの過程をモデル内でどう表現するかだけでなく、それぞれの組み合わせ方法にも複数の方法が考えられ、得られる結果は不確実性が大きいのが現状である。棚氷-氷床系の基礎的な振舞いについての議論も十分ではないと考えられる。

2. 研究の目的

研究の主眼は、氷床変動に対して、氷床力学、棚氷力学、および両者の境界 (grounding line と呼ぶ) での力学が果たす役割の定量的評価である。将来の地球温暖化に対する氷床システムの応答や、過去の氷期間氷期サイクルの氷床変動を考察する上で、従来の氷床数値モデルによる研究では十分には考慮されていなかった効果が、氷床変動にいかに関与を与えるかの考察である。

3. 研究の方法

数値モデルを用いて温暖化応答や過去の氷床変動を再現する際は、現在の氷床の縁辺部の再現性の向上が重要な課題となる。氷床棚氷境界の力学については従来から多くの研究がある。

しかしながら数値モデルによる氷床流動過程から棚氷流動過程に遷移する領域の再現は非常に難しくその方法に関する手法も確立されてはいない。

Vieli and Payne (2005) では、grounding line の取り扱いの違いや差分などの数値的手法の違いの異なる複数のモデルを用いて

grounding line の進出後退について議論した。その結果、外力変化に対する grounding line の応答はモデル依存の程度が大きく、感度が定性的に異なることが示された。同様に格子の細かさにも感度が大きく依存していることが示された。結論として従来の氷床モデルで再現された grounding line の振舞いは信頼出来ないとしている。

また、Vieli and Payne (2005) の議論は水平と鉛直の計二次元のモデルを用いたものであり、水平ずり応力の効果は考慮されていない。従ってより現実的な三次元モデルでの氷床棚氷境界の再現性の考察など、重要な課題は残されている。

本研究で実施する、氷床棚氷境界の力学過程の考察および、有効な数値モデルの開発は、氷床モデルの再現性の向上と、氷床モデルの応用課題である温暖化応答や過去の気候変動の考察に対して本質的な要素となりうる。本研究では棚氷モデルを開発し、申請者が開発してきた氷床モデルと組みあわせることにより、

- (1) 有効な数値モデルの手法の考察
- (2) 三次元モデルへの手法の拡張に向けて有効な方法の考察
- (3) 外部条件の変化が、氷床棚氷の遷移を通じて内陸の氷床変動にどれくらいの影響を及ぼすか

の三つの観点で氷床棚氷境界の力学の考察と高精度の数値モデル開発を行う。

また、棚氷モデル実装の予備的な実験として、棚氷領域の変動に関する内陸氷床の応答についても定量的に評価し、棚氷流動の潜在的な影響性について吟味する。

さらにはモデルの高速化を視野にいれ、並列化モデルを実装し、数値モデル構築において不可避である、方程式の数値表現とその誤差について考察し、可能な限り不備の少ないモデル構築について考察、実装を行う。

4. 研究成果

- (1) 南極氷床変動に対する棚氷着床寄与の定量的評価

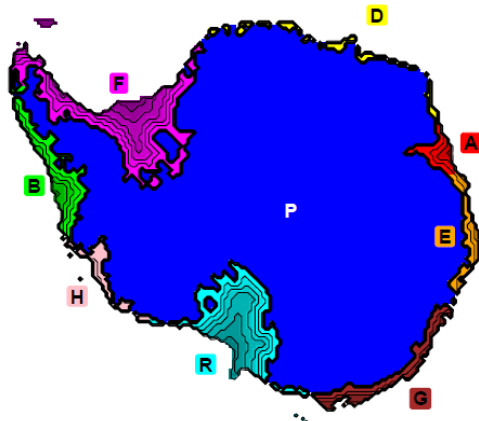
南極氷床の着床する領域 (すなわち逆にいえば棚氷の領域) の変動に対する南極氷床の応答を棚氷モデル導入前の氷床モデルで考察した。(投稿論文 2 として出版)。

南極の氷期間氷期サイクルにおける変動の大部分が、気候変動に伴う降雪の変化よりも、着床領域の変動に起因することを定量的に示した。また、その結果を、従来のさまざまな手法を用いた研究による南極氷床の過去の変動と比較した。

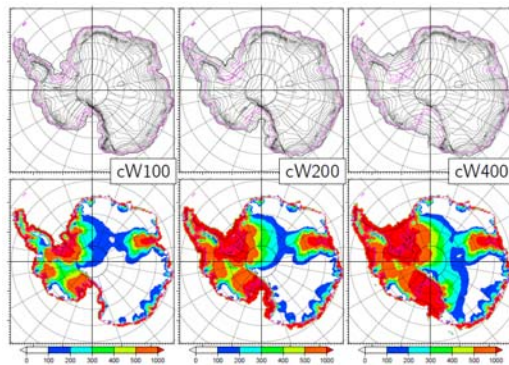
さらに、南極の主な棚氷領域の変動に着目し、それらの効果をモデル上で分割して、それぞれの相対的な氷床変動への影響を考察する感度実験を行った。各棚氷領域一つ一つの着

床に応答した最大限の氷床変動を求めた。その結果、いくつかの研究で議論されている、MWP-1a と呼ばれる過去の急激な海水準を南極氷床変動のみで説明するには単一の棚氷領域の変動だけでは説明が困難であることが判明した。

南極氷床変動の理解のためには、棚氷領域の変動の理解が本質的であり、棚氷モデルの開発が不可欠であることを確認した。

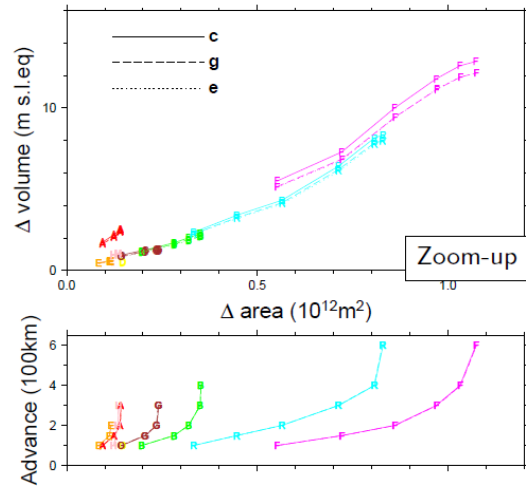


棚氷着床実験に用いた氷床棚氷境界の位置の設定。P(青)が現在の氷床領域、B, F, D, A, E, G, R, H の各領域で着床面積に対する感度実験を行った。各領域内の線は、現在から grounding line が 100, 150, 200, 300, 400, 600km 進出した場合である。



Surface topography (contour 200m) and Difference in ice thickness (relative to P)

Grounding line が全体に 100, 200, 400km 進出した場合の感度実験の結果。上は定常解の標高、下は現在実験との標高の差を表す。内陸への影響は 100m 程度以上ある。



Grounding line 進出(横軸)と面積(下、縦軸)、体積変動(上、縦軸)の関係。文字は実験設定の領域に相当し、c, g, e の三種類の氷床 parameter のもとで実験を行った。その結果、Parameter による不確定性よりも進出による面積増加の効果がずっと大きいことが分かった。

(2) 氷床モデル内の演算の非対称性とその数値実験への影響

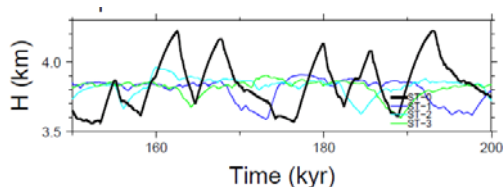
氷床変動にとって熱力学過程と力学過程の相互作用が非常に重要な要素であることが知られている。氷の温度変化と氷の流動の間に作用する正のフィードバックによって理論的に氷床流動や棚氷氷流過程に大きな影響があることが示されている。温暖化などによる氷床の不安定性や、古気候の復元から考えられた氷床の周期的な変動など、この相互作用が大きな役割を果たしている、と考えられ、氷床モデルの一つの大きな課題となっている。

Calov et al. (2010) は氷床モデルの比較を行った研究であり、その主な目的は、定常な気候条件など理想的な条件の下で、再現される氷床の自励振動の周期や振幅を比較し、Heinrich Event として知られる氷床の準周期的な振動を再現するための条件などを議論した(投稿論文 1 として出版)。

その結果の重要なものの一つが、実験設定が線対称であるにも関わらず、6 つの氷床モデルで非対称の結果が得られたことである。Calov et al. (2010) では、非対称の結果が得られた原因を議論するにとどまり、非対称性が氷床モデルで再現された自励振動の周期や振幅に対する影響に関しては議論していない。そこで本研究では対称性が壊れることによる実験への影響を議論した。

結果に非対称を許す理由は Calov et al. (2010) でも紹介されたが、一つには計算機内の数値表現が有限であるためである。これ

自体は不可避である。しかし、モデル内の全ての演算を注意深く吟味することにより、人工的な項を足したりすることなく、モデルの対称性を保つことは原理的に可能である。本研究では IceS の全ての演算順序を対称性を保つようにしたモデル、および意図的にある一部の式だけ演算順序のみを変え、対称性を保てなくてよいようにしたモデルを用いて、Calov et al. (2010) の実験を行い、再現される氷床の振動の周期や振幅を比較した。その結果、非対称性が氷床変動全体にまで影響をおよぼし、ついには数値実験で課題となっている氷床のふるまい(この場合は氷床の変動の周期と振幅)すら全然異なる性質を持つ場合があることがわかった。本研究の結果は、氷床/棚氷/氷流モデル、およびの従来の氷床モデル実験の信頼性にも大きな影響がある結果と考えられる。氷床モデル構築の際は、このような非常に小さな不具合も注意深く除去する必要があるといえる。注意すべきは、Calov et al. (2010) が、ある理想的な条件下での特殊な例であり、現実の氷床はこの実験設定のように空間的に対称となることはなく、対称/非対称モデルの違いが現実的な氷床変動の再現に必ずしも違いをもたらすとはいえないことである。しかし、氷床モデルで再現された変動を解釈するためには理想的な条件下、および現実的な条件下の実験を通して、氷床流動を多角的に議論しなければ、十分な理解が出来ないと考えられる。そのためにも、やはり本研究で議論される数値的な不備を氷床モデルから除去することは必須である、と考えられる。

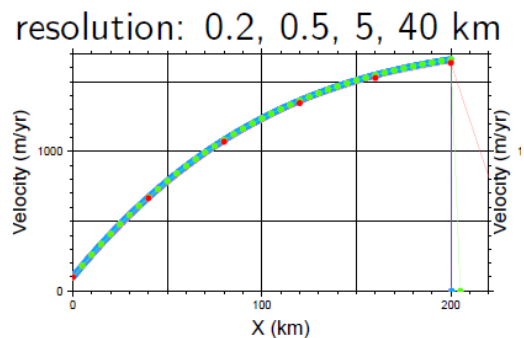


ある理想的な条件下での氷床モデルによる内部振動の再現結果。黒線が演算の対称性が保障されたモデル、色つきの三つの線が、単に演算の順番を変更することによって演算が非対称になったモデル。対称性を保ったモデルによる振幅の大きく、定常的な内部振動が、単に演算順序の変更だけでまったく再現されないことがわかった。

(3) 棚氷/氷流モデルの開発・実装と運用
(2) の考察と議論を踏まえ、棚氷/氷流モデルの実装について、同様の不備がおこらないよう設定した。また、高解像度実験を実用的な時間で実現するために、MPI による並列化の枠組みで最初から設計しなおした。一次元

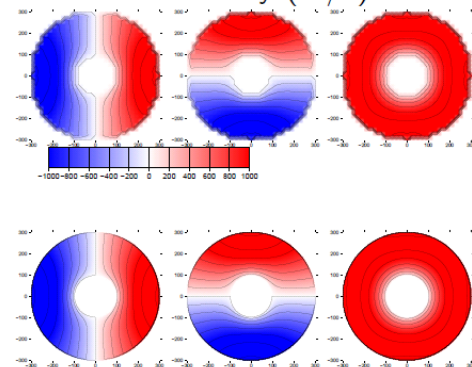
棚氷モデルと統一的に表現できる境界条件を二次元に拡張し、棚氷モデルを実装した。さらに、実装した棚氷モデルを拡張し、底面の境界条件をおきかえることで氷流過程を表現出来るようにした。先に開発してあった氷床部分に棚氷・氷流過程を導入し、氷床形状の時間発展を計算することが可能になった。(学会発表 1)。

棚氷部分に関しては解析解が求められる理想的な条件下で流動を求め、解の比較を行った。数種の水平解像度(棚氷の長さ 200km に対し最小解像度で 200m まで)で棚氷の流動を診断し、得られた解が解析解を非常によく再現していることを確認した。また、水平二次元の理想的な条件下での計算、および、計算した速度を用いて棚氷の厚さの時間発展計算を行い、実装した棚氷モデルの特性を調べ、収束条件がよくなる方法について吟味した。今後は開発した氷床/棚氷/氷流モデルを現実的な地形をふくむより多くの条件下で運用し、氷床/棚氷/氷流過程の理解と、気候変動下におけるその応答についての議論を進める。



解析的な解が求められる理想的条件下での棚氷モデルによる水平速度の再現。水平解像度 40km (赤)から 0.2km(緑)までの場合を示した。本研究で開発した棚氷モデルが比較的解像度の粗いモデルでも非常によい再現性があることがわかった。

Horizontal velocity (m/s):



二次元の理想的な条件下での水平速度の再

現。解像度 20km(上)と 2.5km(下)の場合をしめした。現実地形を用いた実験の場合水平解像度 5km 程度が現在の(実用的かつ)標準的な目標である。開発したモデルが高解像度でも十分に実用的であると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Saito Fuyuki, Impact of Arithmetic Asymmetries on Simulated Thermodynamical Ice-Sheet Evolution. Journal of Glaciology, 査読あり, 58, 2012, 767-775. DOI:10.3189/2012JoG11J247
- ② Saito Fuyuki, Ayako Abe-Ouchi. Modelled response of the volume and thickness of the Antarctic ice sheet to the advance of the grounded area. Annals of Glaciology, 査読あり, 51, 2010, 41-48

[学会発表] (計 7 件)

- ① Saito Fuyuki, Ayako Abe-Ouchi, Kunio Takahashi. Recent status of development of a numerical ice-sheet/shelf/stream model IcIES. WGOMD/SOP workshop. 2013/2/18. Tasmania, Australia.
- ② Saito Fuyuki, Impact of Arithmetic Asymmetries on Simulated Thermodynamical Ice-Sheet Evolution. International Glaciological Society. 2012/6/28. University of Alaska, Fairbanks, USA.
- ③ Saito Fuyuki, Ayako Abe-Ouchi, Kunio Takahashi. Response of Greenland ice sheet to global warming simulated by a high-resolution ice sheet model. International Union of Geodesy and Geophysics. 2011/7/2. Melbourne, Australia.
- ④ Saito Fuyuki, Ayako Abe-Ouchi, Modelled response of the volume and thickness of the Antarctic Ice sheet to the advance of grounded area. International Glaciological Society. 2009/7/29. Northumbria University, UK.

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 冬樹 (SAITO FUYUKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変

動領域・研究員

研究者番号: 60396942

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし