

連続体の散逸を伴う動的挙動解析手法の開発

課題責任者

廣部 紗也子 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術
研究開発センター

著者

廣部 紗也子^{*1}, 小國 健二^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター

キーワード：破壊解析，PDS-FEM，氷河，カービング

1. はじめに

本課題では、エネルギー散逸を伴う連続体の動的挙動を、材料や現象に依らず統一的に解析可能な汎用数値解析手法の構築を最終目標としている。これまで著者は、残留応力場を含む固体の動的破壊問題を対象に、粒子離散化有限要素法（PDS-FEM：Particle Discretization Scheme Finite Element Method）[1-3]に基づく解析手法を開発し、連続体変形と破壊に伴うエネルギー散逸過程を一貫して記述できることを示してきた。[4, 5]また、提案する解析手法の理論的枠組みを固体のみならず流体にも拡張することで、離散化されたナビエ・ストークス方程式に対するロバストかつ安定的な完全陽解法のアルゴリズムを提案し、問題ごとのパラメータチューニング[6, 7]やモデル[6, 8, 9]を必要としない解析手法の提案を行ってきた。

前年度までの研究により、著者らが提案する数値解析理論は、連続体一般の散逸現象へ拡張可能な汎用的な枠組みとして整理されつつある。今年度は、昨年度まで提案した流体の数値解析手法の妥当性・有用性を検証するために解析事例を積みあげるとともに、この汎用的解析枠組みを、既存手法では扱いが困難であった地球科学分野の課題へ展開する段階として、氷河・氷床のカービング現象に着目した。

カービングは、連続体としての氷の変形、応力集中、亀裂の発生および分離が強く結合した過程であり、本手法の有効性を検証する上で適切な対象である。一方で、現地観測はアクセス可能な氷河の数や観測範囲、期間に大きな制約があり、衛星観測においても数時間以下で進行する急激なカービング現象を直接捉えることは困難である。精度の高い数値モデルが構築されれば、限られた観測データをもとにカービングに伴う質量損失や力学過程の理解・推定が可能となり、将来予測や感度実験への応用が期待できる。本研究ではその第一段階として、簡略化した力学モデルを用いた基礎的検討を行った。

2. 解析モデルの設定

カービング現象の発生パターンは、引っ張りによるものや、浮力によるもの等、いくつかに分けられるが[10]、ここでは図1のように、氷河末端の底部が浸食や融解等によって削られ、自重によってカービングが発生する場

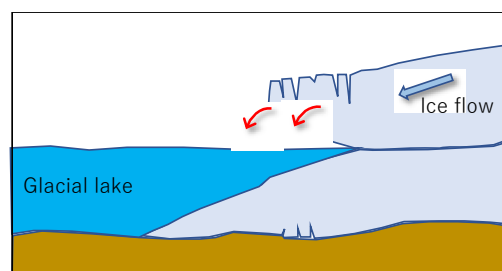


図1. 氷河カービングの概念図。

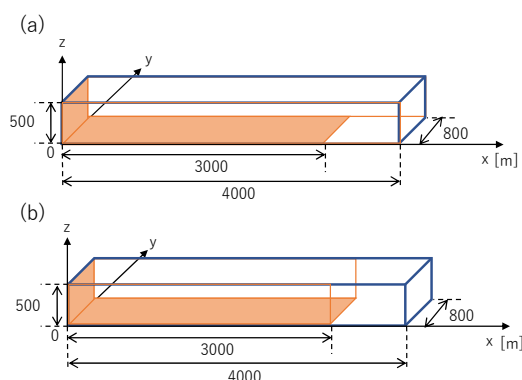


図2. 解析モデルと境界条件. オレンジ部分の変位は全て固定、青部分の変位固定はなし. (a)条件1, 2の境界条件. (b)条件3, 4の境界条件.

合を考える。本年度は用いる手法のカービングの再現性を確認するために基礎的な検討のため、氷河の解析モデルを図2に示すように、 $4000\text{m} \times 800\text{m} \times 500\text{m}$ の直方体形状とし、このモデルに対し四面体非構造メッシュを作成した。モデルの節点数は128549、要素数は758491である。物性値として、ヤング率 9.0GPa 、ポアソン比 0.3 、密度 917.3kg/m^3 を使用した。ここでは簡略化のため、モデルは線形弾性体を仮定している。

境界条件は次に示す条件1-4の4種類を使用した。図2に示すように、いずれの条件においても氷河基底部 ($x=0\text{m}$) は、全ての変位が固定されているが、底面 ($z=0\text{m}$) は、 $0 \leq x < 3000\text{m}$ の範囲の変位が全て固定されているだけで、 $x > 3000\text{m}$ の範囲の変位は固定されていない。また、氷河側面 ($y=0, 800\text{m}$) について、条件1と条件2では、全体の変位が全て固定されているのに対し、条件3と条件4では、 $0 \leq x < 3000\text{m}$ の範囲の変位が全て固定されているだけで、

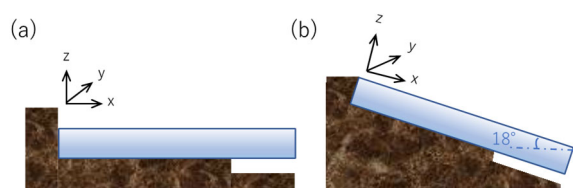


図 3. 解析モデルの斜面の設定. (a) 条件 1, 3 の境界条件. (b) 条件 2, 4 の境界条件.

$x > 3000\text{m}$ の範囲の変位は固定されていない. さらに, 条件 1 と 3 は, 氷河の底面が傾斜角 0° の水平な面上に接している場合を考えているのに対し, 条件 2 と 4 は傾斜角 18° の斜面上に接している場合を考える (図 3).

解析では, 最初に氷河全体に重力をかけた状態で静的解析を行うことで力の釣合いを解いた後, 動的破壊解析を行った. 破壊解析手法には PDS-FEM を使い, 時間ステップは $1.0 \times 10^{-3}[\text{s}]$ とし, ステップ数は 10000 とした. 時間積分法には 4 次のバイラテラルシンプレクティックオイラー法を用いた.

3. 結果と考察

図 4-7 に条件 1~4 に対応する解析結果を示す. いずれの条件においても, 氷河末端部が自重による曲げおよび引張応力の集中によって不安定化し, 亀裂の発生・進展を経て氷塊が分離する様子が再現された. このことから, 本研究で構築した PDS-FEM に基づく数値解析手法が, カービングに特徴的な動的破壊挙動を定性的に再現できることが確認された.

条件 1 と条件 2 の結果を比較すると, 条件 1 ではカービング面が xy 平面に対して斜めで比較的平滑な面を形成しているのに対し, 条件 2 では xy 平面に対してほぼ垂直で, かつ半円状の形状を有するカービング面が形成された. これは, 氷河末端部の斜面傾斜角の違いによって, 末端付近に生じる応力場の分布や応力集中位置が変化した結果であると考えられる. 一方で, 条件 3 および条件 4 の結果を比較すると, 形成された亀裂面の数には差があるものの, 斜面傾斜角の違いによらず, いずれの場合も xy 平面に対して垂直かつ比較的平坦なカービング面が形成された. このことは, これらの条件では斜面形状よりもむしろ氷河末端側面に課された境界条件が, 破壊挙動を支配していることを示唆している.

条件 1 に見られる xy 平面に対し斜めのカービング面, 条件 2 に見られる半円状の面, 条件 3 および 4 に見られる xy 平面に対し垂直な面はいずれも, 実際の氷河や氷床において観測されている代表的なカービング面形状と整合的である. この点から, 本研究で提案する解析手法は, 特定の破壊形状を事前に仮定することなく, 多様なカービング形態を再現できる可能性を十分に有しているといえる.

さらに, 条件 1・2 と条件 3・4 を比較すると, 氷河末端付近の側面境界条件の違いによってカービング面の形状や亀裂の発生様式が大きく変化していることが確認された. この結果から, 今後より現実的な条件で定量的解析を

行うためには, 氷河側面における拘束条件や摩擦の影響を正確にモデル化する必要があると考えられる.

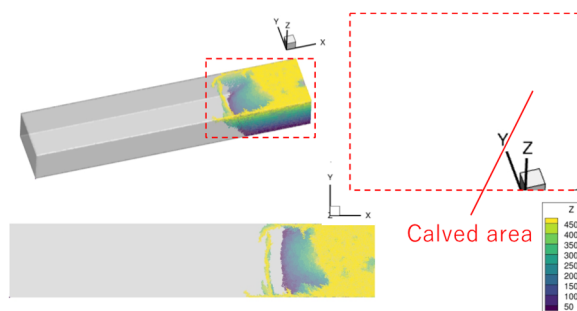


図 4. 条件 1 の解析結果.

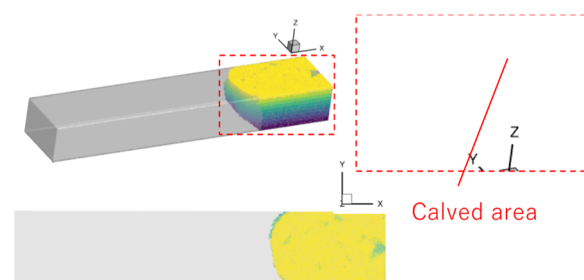


図 5. 条件 2 の解析結果. コンターは図 4 と共通.

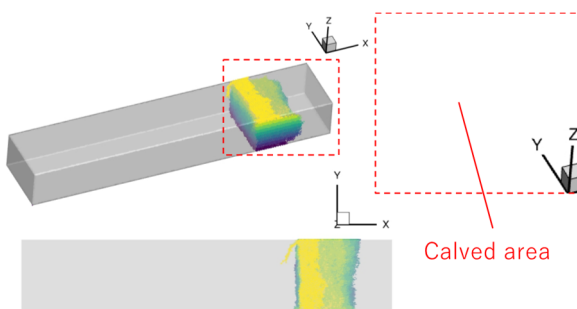


図 6. 条件 3 の解析結果. コンターは図 4 と共通.

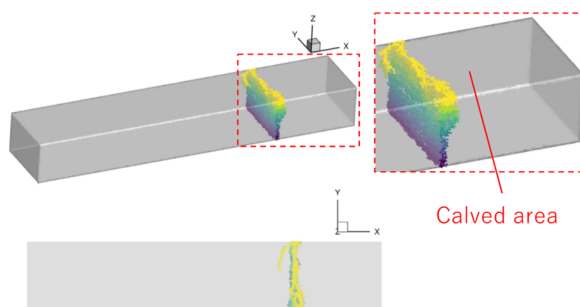


図 7. 条件 4 の解析結果. コンターは図 4 と共通.

4. まとめ

本研究では, エネルギー散逸を伴う連続体の動的挙動を統一的に解析可能な汎用数値解析手法の構築を目的とし, これまでに開発してきた粒子離散化有限要素法 (PDS-FEM) に基づく破壊解析手法を, 氷河・氷床のカービング

現象へ展開した。今年度はその初期段階として、簡略化した三次元モデルを用いた基礎的な数値解析を実施した。

解析の結果、いずれの条件においても氷河末端部が自重によって不安定化し、亀裂の発生・進展を経て氷塊が分離する一連のカービング挙動が再現された。また、斜面の傾斜角や側面境界条件の違いに応じて、斜め、半円状、あるいは垂直なカービング面が形成されることが確認され、これらは実際の氷河で観測される多様なカービング形態と整合的である。このことから、本手法は破壊面や破壊様式を事前に仮定することなく、カービング現象を定性的に捉えうる可能性を示した。

一方で、本研究では構成則や境界条件を簡略化しており、得られた結果は定性的な議論にとどまっている。今後は、より現実的な氷の力学応答を表現するため、粘弾塑性構成則の導入を行い、時間依存性や非線形変形を含む挙動の再現を目指す。また、実際の氷河や氷床の形状を反映したモデルを用いることで、地形や幾何形状がカービング過程に与える影響を詳細に検討する必要がある。さらに、温度依存性を考慮した物性値変化を取り入れることで、熱力学的条件と力学的挙動の連成を扱う枠組みへ拡張することが課題である。加えて最終的には、現地観測や衛星観測によるデータとの比較を通じてモデルの妥当性を検証し、カービングに伴う質量損失量や発生頻度の定量的評価へと繋げることが目標である。

以上より、本研究は、連続体の散逸を伴う動的挙動を統一的に扱う数値解析手法を地球科学分野へ展開するための基礎的段階を示すものであり、今後は手法の高度化により、氷河カービングの理解や将来予測に資する数値解析基盤へと発展することを目指す。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP20K14812 と JP 23H01497 の助成を受けて実施されたものです。

文献

- [1] M. Hori, K. Oguni, and H. Sakaguchi, "Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomenon," *J. Mech. Phys. Solids* 53, 681 (2005).
- [2] K. Oguni, M. L. L. Wijerathne, T. Okinaka, and M. Hori, "Crack propagation analysis using PDS-FEM and comparison with fracture experiment," *Mech. Mater.* 41, 1242 (2009).
- [3] M. L. L. Wijerathne, K. Oguni, and M. Hori, "Numerical analysis of growing crack problems using particle discretization scheme," *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 80, 46 (2009).
- [4] S. Hirobe, K. Imakita, H. Aizawa, Y. Kato, S. Urata, and K. Oguni, "Simulation of Catastrophic failure in a residual stress field," *Phys. Rev. Lett.* 127, 064301 (2021).
- [5] S. Hirobe, K. Imakita, H. Aizawa, Y. Kato, S. Urata, and K. Oguni, "Mathematical model and numerical analysis method for dynamic fracture in a residual stress field," *Phys. Rev. E* 104, 025001 (2021).

[6] J.H.Ferziger, M.Perić, R.L.Street, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer Nature, 2020.

[7] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *The Finite Element Method Volume 3: Fluid Dynamics*, Butterworth-Heinemann, 2000.

[8] S. B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, 2000.

[9] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, 2006.

[10] D. I. Benn and J. A. Åström, "Calving glaciers and ice shelves", *Advances in Physics: X*, 3(1), 1048-1076, (2018).