

4Y-08

薄膜の破壊を考慮した破裂のビジュアルシミュレーション

佐原 淳允

藤代 一成

慶應義塾大学大学院 理工学研究科

1 背景と目的

近年、計算資源の発展により大規模な物理シミュレーションを必要とするCG映像も作成可能になってきたが、様々な自然現象を再現するため、より複雑なシミュレーションが要求されている。特に、風船やクッションなどの薄膜で覆われたオブジェクトの破裂表現は、日常頻繁に見られる現象であるが、正確にモデリングされた例はまだ無い。しかし、破裂のシミュレーションは効果的なCG映像を作成するために必要不可欠な要素の一つである。本研究では、現実の現象に忠実な映像を作成することを目的とした、破裂の表現モデルを提案する。

2 シミュレーション手法の概要

本研究では、『薄膜に覆われた内容物との相互作用により薄膜が破壊され、拘束されていた内容物が外部へ飛び出る』という問題を想定する。そのモデリングには、図1に示すように、薄膜の破壊と内容物の流出を表現する必要があるため、それぞれ最適なモデルを考案する。安定性の利点から、薄膜は三角形要素、内容物は四面体要素で記述する。薄膜は体積がゼロとしてモデリングされるため、その状況においても安定して計算可能な内容物の動的モデルを提案する。

次項以降、シミュレーションに必要なサブモデルについて詳細に説明する。

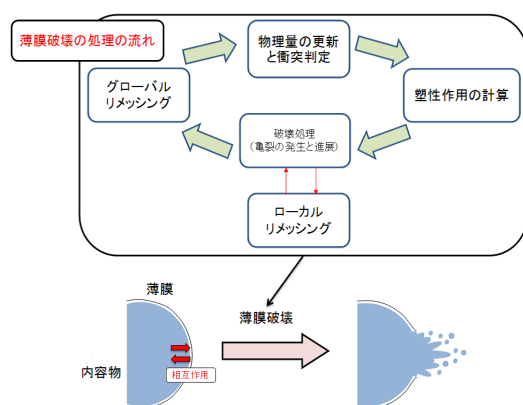


図 1: 破裂表現における処理の流れ

Visual simulation of burst taking covering thin-film disruption into account

Akichika Sahara, Issei Fujishiro

Graduate School of Science and Technology, Keio University

2.1 薄膜の破壊モデル

薄膜の破壊には Tobias Pfaff ら [1] の手法を参考にする。この手法では、様々な材質の薄膜破壊が表現でき、応力場を用いて適応的にリメッシングを行うことによって効率的な計算が可能である。リメッシングでは、三角形要素を正三角形に近い形状に保ち、有限要素法における応力計算の精度を上げるとともに、現実の破壊現象で観測される、応力の強弱により異なった大きさの破片が生成されるという表現を可能にする。

2.1.1 破壊における亀裂の発生と進展

破壊の評価には各節点の周囲の三角形要素の応力を用いる。各節点において最大分離強度をもつ最適な分離面を探し、その分離強度が材質の閾値を超えていた場合に、亀裂を進展させることによって薄膜の破壊を実現する。

2.1.2 薄膜のリメッシング

リメッシングには Rahul Narain ら [2] が提案している sizing-metric という指標を用いてリメッシングを行うべき三角形要素を選定する。Rahul Narain ら [2] では、sizing-metric を作成するために、曲率・圧縮・速度の3つの指標を使用していたが、Tobias Pfaff ら [1] は破壊とリメッシングを統合した指標にするため、新たに曲げ歪み・主応力の2つの指標を導入した。

図2に具体的なリメッシングの操作を示す。sizing-metric を用い、分割・反転・崩壊の3つの操作を行う。破壊の処理後、要素の形状を整えるため局所的にリメッシングを行い、その後大域的にリメッシングを行う。

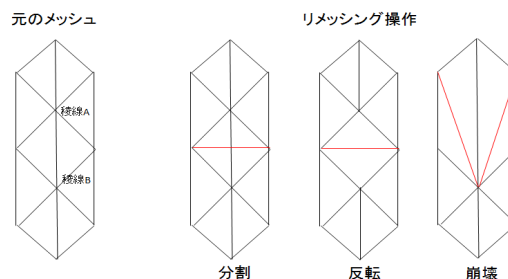


図 2: リメッシング操作

2.2 内容物の動的モデル

薄膜モデルとの併用が可能な内容物の動的モデルとして、四面体ラグランジアンメッシュを液体表現に用いた Pascal Clausen ら [3] の手法を用いる。この手法は、四面体メッシュを用いることにより、対象物の境界面を陽に構築することができ、表面張力のような、境界面に作用する効果を物理的に正しく表現できる。また、ラグランジアンメッシュを用いて離散化しているため、移流拡散誤差を抑えることが可能になり、離散化による体積の減少も避けることができる。

2.2.1 支配方程式

この手法は、弾性または塑性の固体と液体を統合的に扱うフレームワークを提供する。支配方程式は

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_S + \mathbf{f}_V \quad (1)$$

と表現される。ここで ρ は密度、 $\boldsymbol{\sigma}$ は弾塑性応力・圧力・熱応力、 $\mathbf{f}_S$ は外力、 $\mathbf{f}_V$ は物体力を示す。式 (1) を離散化しシミュレーションを行う。支配方程式のなかで熱応力の影響を考慮することで融解や凍結の効果を実現している。

2.2.2 四面体要素のリメッシング

四面体要素を用いて近似する際、高品質な要素を保ち、液体の形状を正確に表現するため、リメッシングを行う。提案手法で用いた Pascal Clausen らのリメッシング手法 [3] は、Pulsar のメッシュ改善手法 [4] に非圧縮性の液体のための修正を加え、表面の分裂や結合にも対応した手法である。

3 結果

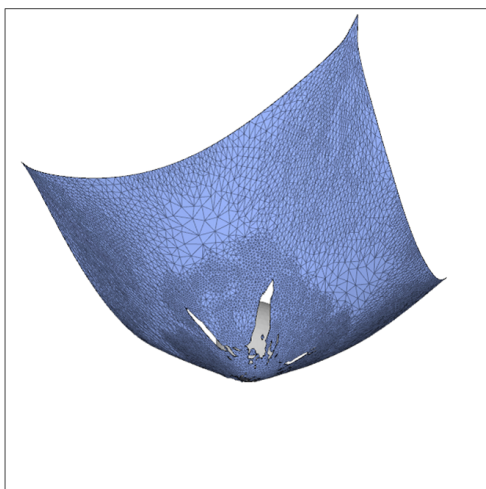


図 3: Tobias Pfaff ら [1] の手法を利用した薄膜の破壊シミュレーション結果

開発環境は標準的な PC (プロセッサ: Intel Core i7-3770 3.40GHz CPU, 実装メモリ: 16GB) で、描画用 API には OpenGL を用いて処理系を開発している。文献 [5] と同様に、図 3 に Tobias Pfaff ら [1] の破壊・リメッシングのアルゴリズムを用いて、球の落下によって四隅が固定されている薄膜が破壊されるシミュレーション結果を示す。この結果から、亀裂の周辺及び薄膜が伸びている箇所は細かく、力のかかっていない箇所は粗く、適応的にリメッシングが行われ、破片の生成と薄膜の伸縮において効率的な計算が行われていることが視認できる。

薄膜と内容物を組み合わせたモデルについては、発表時に結果を示す予定である。

4 結論と今後の課題

本稿では破裂のビジュアルシミュレーションを実現するための手法を提案した。しかし、薄膜の破壊に伴い内容物が外部へ飛び出る際に、境界の圧力などの物理量が瞬時に変化するため、薄膜と内容物の相互作用を正確に表現しなければならない。そのため、Avi Robinson-Mosher らの手法 [6] のような、構造の異なるモデルを組み合わせた問題でも安定に計算可能な手法を考案する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成 26 年度科研費基盤研究 (A) 26240015 の支援により実施された。

参考文献

- [1] Tobias Pfaff, Rahul Narain, Juan Miguel de Joya, and James F. O'Brien, "Adaptive Tearing and Cracking of Thin Sheets," *ACM Transactions on Graphics*, Volume 33, Issue 4, Article No. 96, 2014.
- [2] Rahul Narain, Armin Samii, and James F. O'Brien, "Adaptive Anisotropic Remeshing for Cloth Simulation," *ACM Transactions on Graphics*, Volume 31, Issue 6, Article No. 52, 2012.
- [3] Pascal Clausen, Martin Wicke, Jonathan R. Shewchuk, and James F. O'Brien, "Simulating Liquids and Solid-Liquid Interactions with Lagrangian Meshes," *ACM Transactions on Graphics*, Volume 32, Issue 2, Article No. 17, 2013.
- [4] Martin Wicke, Daniel Ritchie, Bryan M. Klingner, Sebastian Burke, Jonathan R. Shewchuk, and James F. O'Brien, "Dynamic Local Remeshing for Elastoplastic Simulation," *ACM Transactions on Graphics*, Volume 29, Issue 4, Article No. 49, 2010.
- [5] 佐原淳允, 藤代一成, "薄膜の破壊表現に着目した破裂のビジュアルシミュレーション", *Visual Computing ワークショップ 2014*, 2014 [要旨: 画像電子学会誌, Vol. 44, No. 1, 2015 掲載予定].
- [6] Avi Robinson-Mosher, Tamar Shinar, Jon Gretarsson, Jonathan Su, and Ronald Fedkiw, "Two-way Coupling of Fluids to Rigid and Deformable Solids and Shells," *ACM Transactions on Graphics*, Volume 27, Issue 3, Article No. 46, 2008.