

流体シミュレーションにおけるシャボン玉の 形状制御に関する一実験

高松 香佳^{1,a)} 佐藤 周平^{1,2,b)}

概要：コンピュータシミュレーションの分野においては、より自然に近い表現をするために流体の物理シミュレーションに関する研究が多くなされてきた。その中で流体の性質をもった曲面である石鹸膜やシャボン玉は複雑な構造をもったものとして、数学的なアプローチを含めた様々なシミュレーション方法が提案されてきた。一方で流体シミュレーションでは、動きや形状の制御など、演出的な映像を作成するための研究が多くなされているが、石鹸膜やシャボン玉のシミュレーションではそういった研究は少ない。本研究では、シャボン玉の形状を制御し、様々な形状のシャボン玉のシミュレーションを行うことを目的とする。本稿では、煙の形状制御の手法を2Dのシャボン玉のシミュレーションに応用し、形状の制御が可能か検証したので報告する。

キーワード：流体シミュレーション、石鹸膜、制御、駆動力

1. はじめに

コンピュータグラフィックス（以下CG）において、自然現象をリアルに表現するために物理シミュレーションがよく用いられる。特に自然現象の中でも、水や煙、炎などといった流体現象をシミュレーションするための手法がこれまでに数多く提案されている。本稿では、それら流体現象の中でも石鹸膜やシャボン玉のシミュレーションに着目する。石鹸膜やシャボン玉は流体の性質をもった曲面である。この複雑な物理現象を表現するために、数学的なアプローチを含めて様々なシミュレーション方法が提案されている [1], [2], [3]。これらの手法を用いることで、石鹸膜やシャボン玉の動きや見た目をリアルに表現できる。

一方、CG分野にて対象とされることの多い水や煙では、映像制作において演出的な表現をするために、ユーザ指定の形状に流体を制御するための研究がこれまでに数多く行われている [4], [5], [6]。これらの手法により、水や煙を物や動物、文字などの形として表現できる。しかし、これまでに石鹸膜やシャボン玉を所望の形状として表現するような研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、シャボン玉のアニメーションにおい

て演出的な表現を可能とするために、その形状を制御することで様々な形状のシャボン玉のシミュレーションを行うことを目的とする。本稿では初期実験として、2Dのシミュレーションを対象とする。シミュレーションにはシャボン玉の表面のみを扱い、かつ実装の容易さを考慮して文献 [1]の手法を利用する。このシミュレーションに、外力ベースの煙の制御手法 [4] を応用する。この手法では、ユーザの指定した目標形状に基づいて、その形状に向かうような力を算出し、外力として加えることで煙の形状を制御する。我々のシステムも同様に、目標となる形状を指定し、その形状から外力を算出する。そして、シャボン玉の表面を離散化する各頂点に算出した外力を加える。ただし、煙と異なり、シャボン玉ではその表面の挙動のみを計算するため、余計な外力が加わらないように目標形状を一定の幅の外形線のみに変換する。いくつかの例を作成し、シャボン玉の形状が制御可能か検証する。

2. 関連研究

CGにおいて、石鹸膜やシャボン玉を表現するためのシミュレーション手法がいくつか提案されている。Ishidaらは、流体シミュレーションにおいて幾何学的な見方を膜の物理学的シミュレーションに取り入れた新たな定式化を提案し、それが流体の挙動を解析するナビエ・ストークス方程式（以下NS方程式）を単純化した形と同等であることを示すことで、従来よりも複雑さを増すことなく、高速かつ

¹ 法政大学

Hosei University

² プロメテック CG リサーチ

Prometech CG Research

a) kyoka.takamatsu.6x@stu.hosei.ac.jp

b) ssato@hosei.ac.jp

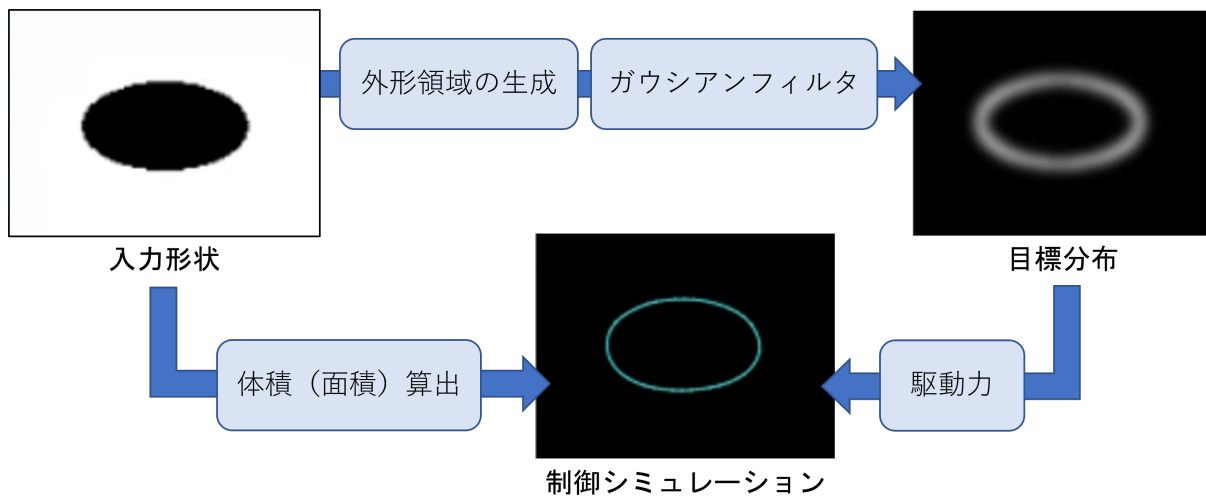


図 1: 本手法の処理の概要.

高精度なシミュレーションを可能にした [1]. また Ishida らはその後、それまでに考慮されていなかった石鹸膜の厚さを考慮したシミュレーション手法を提案した [2]. Deng らは、薄い膜や泡上で非圧縮性流体をシミュレーションするための方法を提案した [3]. 本稿では、実装の容易さから文献 [1] のシミュレーション手法を用いる.

映画等での演出的な表現を目的として、流体を指定の形状に制御する手法がこれまでにいくつも提案されている. Fattal と Lischinski は、物体や文字などを目標形状として与えると、その形に煙を制御するための方法を提案した [4]. この手法では、与えられた目標形状から煙がその形状に向かうような外力（駆動力）を追加することで煙を目標形状へ押し込むように制御する. Shi と Yu は、2つの異なる外力を導入することで、高速に変化する目標形状へ水を制御するための手法を提案した [5]. Thürey らは、制御粒子によって定義される局所的な外力場によって流体の動きを制御する手法を提案した [6]. この手法では、流れの粗いスケールの成分に対してのみ制御力を適用することで、詳細な動きを保持した制御を可能とした. Dobashi らは、曲線で指定された雲の目標の高さと現在の雲の高さを差分から、雲の発達に起因するパラメータを制御することで、雲の形状制御を実現した [7]. 本手法では、Fattal の手法 [4] をシャボン玉のシミュレーションの制御に応用し、指定した形状への制御が可能かどうか実験する.

3. 提案手法

本手法では、Ishida らの手法 [1] を用いてシャボン玉のシミュレーションを行う. Ishida らの定式化の元となった双曲的平均曲率流は、加速度が平均曲率のみによって与えられる振動膜をモデル化したものであり、Ishida らの定式化はシャボン玉の接合部にも対応できるよう、平均曲率の代わりに曲面の面積関数の偏微分をシャボン玉における表

面張力として用いている. 本手法では、2次元平面上に上記の条件を満たす曲線を定義し、それをシャボン玉のモデルとしてシミュレーションを行う. 表面張力は曲線の各点において面積を小さくする方向に働く. 同時に、曲線の法線方向に面積補正の力を加えることで曲面内の面積を保存し、シャボン玉の形状を保つ. また Ishida らの定式化では外力の付加を外力項の追加によって行うことが可能とされており、この特徴を利用して本手法では形状制御のための力を外力項に加える. シミュレーション手法の詳細については文献 [1] を参照いただきたい.

図 1 に本制御シミュレーションの概要を示す. まずユーザにより与えられた入力形状から、体積（本稿では2次元を対象とするため面積）を求める. 体積は、入力形状の画像においてピクセル数をカウントすることで求め、シミュレーションの際にこの体積が保持されるように体積補正を行う. 次に、入力形状から目標分布を求める. 本手法では、Fattal らの提案した駆動力 [4] をシャボン玉のシミュレーションの外力として加えることで形状を制御する. 駆動力は目標分布から算出されるが、Fattal らのように入力形状に直接ガウシアンフィルタをかけた分布を用いると、常に形状の中心に向かう力が生成されてしまう. これを避けるために本手法では、入力形状の外形となる曲線に沿って一定の幅を持つ領域を定義し、その分布に対してガウシアンフィルタを施すことで目標分布とする. そして、シャボン玉の表面の各点において、目標分布の空間的な勾配から駆動力を求め外力として作用させる.

4. 実験結果

本手法による実験結果を図 2 に示す. 図中の青色の曲線がシャボン玉の表面を表しており、各結果の右上が目標分布である. いずれの結果においても、およそ目標に近い形状のシャボン玉が得られているが、(b) や (d) にある尖っ

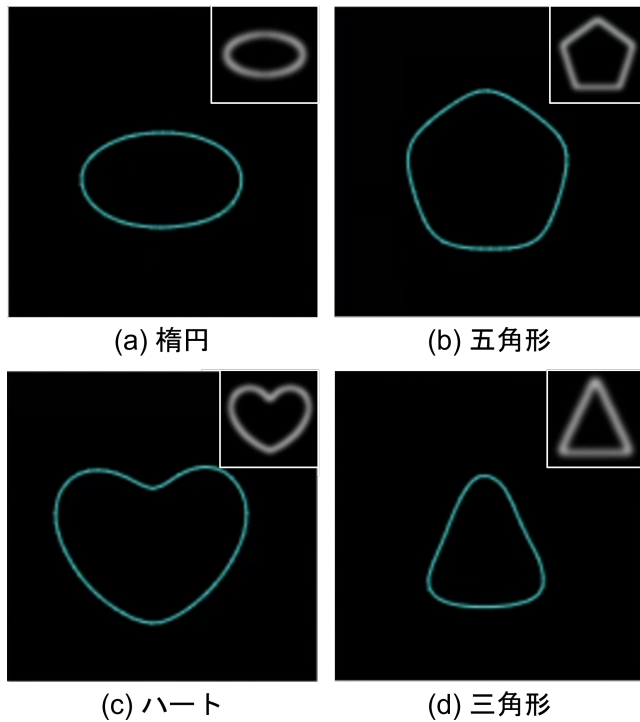


図 2: 本手法による制御結果. 青色の曲線がシャボン玉の表面を表しており, 各結果の右上の画像が目標分布である.

た部分ではシャボン玉の形状が丸くなってしまっており, 現状の枠組みでは制御が難しいと考えられる. また, アニメーションとして確認した場合, (c) と (d) では目標分布付近でシャボン玉が小刻みに上下に動いてしまう結果となった. これは, (c) のように大きく凹んだ部分を持つ形状や, (d) のような鋭角な箇所がある形状の場合に確認しており, 今後原因を詳しく調査する予定である.

5. まとめと今後の課題

本稿では, 煙の形状制御手法を応用することで, 2D のシャボン玉の形状制御が可能かどうかを検証した. 曲線のみのシミュレーションであるシャボン玉の制御に適するよう, 目標形状を外形線のみに変換し, それを基に制御のための外力を計算した. いくつかの目標形状を用いて実験を行い, 形状に近い制御ができた.

一方で, 細く尖ったような部分や, 大きく凹んだ部分では制御ができない場合があることを確認した. またシミュレーションの初期の段階で, シャボン玉の表面が目標の分布の付近を行ったり来たりしてしまう場合がある. この問題については, 文献 [4] の運動量減衰項の追加が有効であると考えられるため, 本手法にも導入し実験を行う予定である. また, 指定の形状のままシャボン玉が移動する様子を表現する方法の考案や, 3次元への拡張についても今後取り組んでいく.

参考文献

- [1] Sadashige Ishida, Masafumi Yamamoto, Ryoichi Ando, and Toshiya Hachisuka: *A Hyperbolic Geometric Flow for Evolving Films and Foams*, ACM Trans. Graph., Vol. 36 (6), Article No. 199 (2017).
- [2] Sadashige Ishida, Peter Synak, Fumiya Narita, Toshiya Hachisuka, and Chris Wojtan: *A Model for Soap Film Dynamics with Evolving Thickness*, ACM Trans. Graph., Vol. 39 (4), Article No. 31 (2020).
- [3] Yitong Deng, Mengdi Wang, Xiangxin Kong, Shiyong Xiong, Zangyueyang Xian, and Bo Zhu: *A moving eulerian-lagrangian particle method for thin film and foam simulation*, ACM Trans. Graph., Vol. 41 (4), Article No. 154 (2022).
- [4] Raanan Fattal, and Dani Lischinski: *Target-driven smoke animation*, ACM Trans. Graph., Vol. 23 (3), pp. 441–448 (2004).
- [5] Lin Shi, and Yizhou Yu: *Taming liquids for rapidly changing targets*, SCA '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 229–236 (2005).
- [6] N. Thürey, R. Keiser, M. Pauly, and U. Rüdiger: *Detail-preserving fluid control*, SCA '06: Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 7–12 (2006).
- [7] Yoshinori Dobashi, Katsutoshi Kusumoto, Tomoyuki Nishita, and Tsuyoshi Yamamoto: *Feedback control of cumuliiform cloud formation based on computational fluid dynamics*, ACM Trans. Graph., Vol. 27 (3), Article No. 94 (2008).