

# 大変形を伴う膜変形シミュレーションを目指した OpenFOAM の Lagrangian ライブラリの改造

寺澤 弘泰\* (富山県立大学)  
水谷 光二郎 (富山県立大学)

中川 慎二 (富山県立大学)

Modification of OpenFOAM's Lagrangian library for large deformation analysis of film

Hiroyasu TERAZAWA \*  
(Toyama Prefectural University)  
Kojiro MIZUTANI  
(Toyama Prefectural University)

Shinji NAKAGAWA  
(Toyama Prefectural University)

**Key Words** : Membrane, Lagrangian, DEM, Basic implementation, OpenFOAM

## 1. 緒言

流体と物体の連成解析で、界面を扱う手法の一つに、境界適合法がある。この手法では、物体の動きに合わせて計算格子が変形する。本研究で対象とする物体は、大変形を伴う膜であるため、計算格子が大きく変形し、継続して計算ができない状況になる。そこで、膜変形の計算に、計算格子の移動や変形を伴わない、離散要素法 (DEM) を用いた連成手法を用いる。

現在、OpenFOAM では、この手法による固体の変形を扱う仕組みが存在しないため、既存の Lagrangian ライブラリを改造し、膜変形を表す基礎式を実装した。

## 2. 多粒子系膜モデル

膜変形を表すモデルには、山田ら(2005)による多粒子系ばねマスモデル<sup>(1)</sup>を採用した。このモデルでは、粒子間にばねを配置することにより、伸縮力や面外曲げの力を模擬し、膜の収縮や座屈を再現する。

粒子の支配方程式は、次のとおりである。

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = F_T + F_B + F_d$$

膜内で働く力として、伸縮力  $F_T$  と曲げの力  $F_B$  を考える。外力には流体抗力  $F_d$  を考慮した。伸縮力  $F_T$  は、フックの法則、面外曲げの力は、モーメントのつり合い式から導出した。

流体から粒子への作用のみを考慮する 1 方向カップリングを採用する。流体は粒子間を自由に流れることが可能であり、粒子からの影響を受けない。透過性の極めて高い膜を想定している。粒子間の衝突も考慮しない。

## 3. 実装方法

Lagrangian ライブラリに粒子同士の衝突を模擬するフォークトモデルが実装されている。これを膜変形モデルに改造した。解析には、同ライブラリが組み込まれている icoUncoupledKinematicParcelFoam を選択した。

## 4. 計算結果

片持ち梁を想定し、膜の境界を一端固定、他端自由と

し、固定端側には仮想粒子を配置した。膜のヤング率  $E$  は 2000Pa、長さ( $x$  方向)、厚み( $y$  方向)、幅( $z$  方向)はそれぞれ 50、0.5、0.5mm で、流体は、膜の自由端側から固定端に向かって一様に 5.0E-5m/s で流した。

膜は、流体の流れに伴って S 字を描くように大きく変形した。その変形中の様子を図 1 に示す。各粒子は、膜の一部を代表し、計算点として機能する。膜が変形し始めると、隣接する粒子間で伸縮力と面外曲げの力が働き、粒子間距離や角度の釣り合いが保たれるように力が働く。このため、粒子が離れていても、膜の変形を表すことができる。膜厚やヤング率を小さくした場合には、湾曲点が多くなり、膜の性質を定性的に表すことができた。

また、片持ち梁における微小変形論に基づいて検証を行った。自由端側に一定の荷重を掛けて、たわみの数値解と理論解を比較した。 $x$  軸方向に引っ張り荷重を付加する引張試験では、理論解と数値解が一致した。 $y$  軸方向に荷重を掛ける曲げ試験では、理論解に比べ数値解が 15% 大きい結果となった。

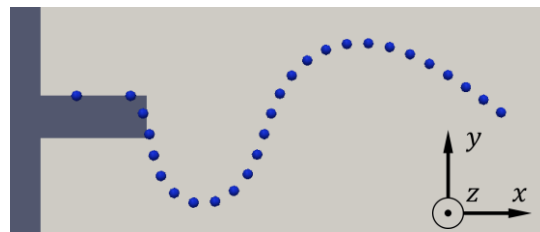


Fig. 1 Particle-based membrane model

## 5. 結言

本研究では以下の知見を得た。

1. 膜の性質を定性的に表す、大変形が可能な膜変形を再現することができた。
2. 検証において、引張では理論値と一致し、曲げでは 15% 程度の誤差が出た。

## 参考文献

- (1) 山田ら、「膜構造エアロシェルの変形を解析するための多粒子系モデルとその検証」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.53, No.613, pp.51~60 (2005)