

レベルセットに基づいた Lagrangian-Eulerian 連成手法の

接触モデルについての検討 (Folded Airbag Deployment の 3 次元解析に向けて)

Examination of a contact model for Lagrangian-Eulerian coupling method based on level sets toward 3D folded airbag deployment analyses

- 橋本学, 理所, 埼玉県和光市広沢 2-1, E-mail: ghashimoto@riken.jp
 小野謙二, 理研, 埼玉県和光市広沢 2-1, E-mail: keno@riken.jp
 Gaku Hashimoto, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama
 Kenji Ono, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama

In this study, we investigate into application of a contact model to Lagrangian-Eulerian coupling method based on the level sets in order to simulate folded airbag deployment. The coupling algorithm uses block Gauss-Seidel iterations and combines advanced Lagrangian structure and Eulerian fluid solvers, and has characteristics of generation of the accurate level set function and application of the Dirichlet boundary conditions for the fluid solver by using the level set function and the derivatives so as to satisfy the kinematic condition. We deal with 2D airbag deployment model of a high-speed air flow and a thin elastic structure folded in a small space. Some of the problems which confront us are examined toward 3D folded airbag deployment model.

1. 諸言

エアバッグ展開では, 高密度かつ高圧の空気の流入が折りたたまれたエアバッグを膨張させる. エアバッグ近くにいる乗員に対する安全性を向上させるためには, 自己接触を伴うエアバッグ展開の高精度な予測が必要とされる.

我々は, レベルセットに基づいた Lagrangian-Eulerian 連成手法をこれまで提案してきた⁽¹⁾. このアルゴリズムでは, Lagrangian 構造ソルバーと Eulerian 流体ソルバーを組み合わせた block Gauss-Seidel 法を使用する. 近年, 様々な Lagrangian-Eulerian 連成解析手法が提案されてきた⁽²⁾⁻⁽⁶⁾. これらの手法との違いは, 界面での運動学的条件を満足するために, レベルセット関数とそのこの配を高精度に生成し, それらを利用して流体メッシュ上に Dirichlet 境界条件を与えることである.

本研究では, 高速に流れる空気と小さい空間に折り畳まれた薄い弾性構造のエアバッグ展開モデルを扱い, 接触モデルを導入するときの問題点について基礎的な検討を行う.

2. 支配方程式

流体には, 圧縮性かつ非粘性を仮定した支配方程式を扱う. このとき, 変数は, 密度 ρ , 速度 \mathbf{v} , 圧力 p である. さらに, 本研究では, CIP (Constrained Interpolation Profile) 有限要素法⁽⁶⁾を用いるために, 変数の微分量の支配方程式も扱う.

構造には, 圧縮性かつ弾性を仮定した支配方程式を扱い, St. Venant-Kirchhoff 体の構成方程式を用いる. このとき, 変数は, 変位 \mathbf{u} , 速度 \mathbf{v} , 加速度 \mathbf{a} である.

流体と構造の界面上では, 接線方向へのスリップを考慮した運動学的条件と動力学的条件が成り立つ.

3. 数値計算法

計算領域は, 物理的な流体領域 Ω_f , 構造領域 Ω_s , ボイド (架空の流体) 領域 Ω_v から構成される. ボイド領域では, 流体変数に対する Dirichlet 境界条件が, 界面での運動学的条件を満足するように与えられる. 計算メッシュには, 構造の Lagrangian メッシュと流体の Eulerian メッシュを用いる. 構造の中立面が界面に一致するように, 構造は十分に薄いと仮定する. そして, 変形する構造の中立面の幾何形状は, 流体メッシュ上でレベルセット関数

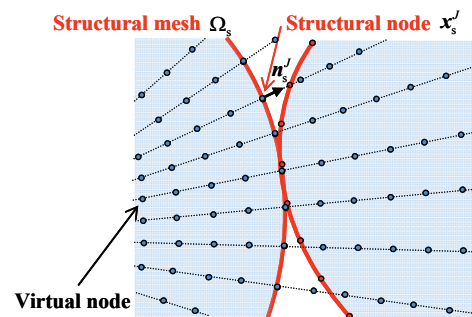


Fig. 1 Structural mesh and virtual nodes

零等値面として表わされる.

計算の手順を以下に示す. 我々が用いてきた連成手法⁽¹⁾の構造ソルバー部分に接触力の計算を追加する.

- (P1) 構造変数の Neumann 境界条件となるトラクション (非粘性流体の場合, 構造に作用する圧力) を求める. 構造の自己接触の探索を行い, 接触点を求める. 有限変位/回転増分を考慮した構造要素 (2次元の場合は梁要素⁽⁷⁾, 3次元の場合はシェル要素⁽⁸⁾) を用いる有限要素法によって, 構造節点での変位 \mathbf{u} , 速度 \mathbf{v} , 加速度 \mathbf{a} および接触点での集中接触力 f_n を計算する. ただし, 本研究で扱う構造の接触問題では, 摩擦を考慮せず, 接触点の位置と接触面の方向を考慮した接線剛性マトリクス⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を求める.
- (P2) 構造の法線方向にレベルセットの値と構造の法線速度の値を持つ仮想節点を等間隔に配置する (Fig. 1 参照). 流体節点の位置 \mathbf{x}^f に対する構造節点 \mathbf{x}_s^j の相対位置を求め, その相対位置と構造節点での法線ベクトル \mathbf{n}_s^j の内積を計算する. 内積の値が正であるならば, その構造節点の法線方向に配置されている仮想節点の位置を moving least squares 近似のサンプリング点として, 流体節点でのレベルセット ϕ^f を求める. $\phi^f < 0$ となる流体節点に流体の Dirichlet 境界条件を与える点 P を設定する (Fig. 2 参照). 点 P からレベルセット関数のこの配方向に点 Q と点 R を設定し, 3 点の外挿から点 P での流体変数の値を与える. 自己接触が生じる場合, 接触面においてレベルセット関数の零等値面が消失する. 流れが構造を通り

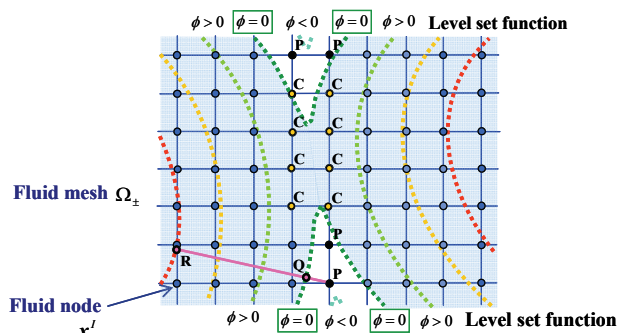


Fig. 2 Isosurfaces of the level set function on a fluid mesh

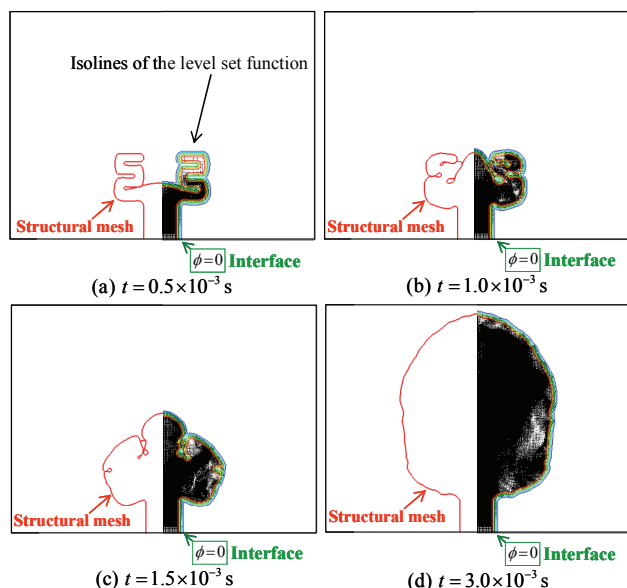


Fig. 3 Deformation of structural mesh and velocity vectors

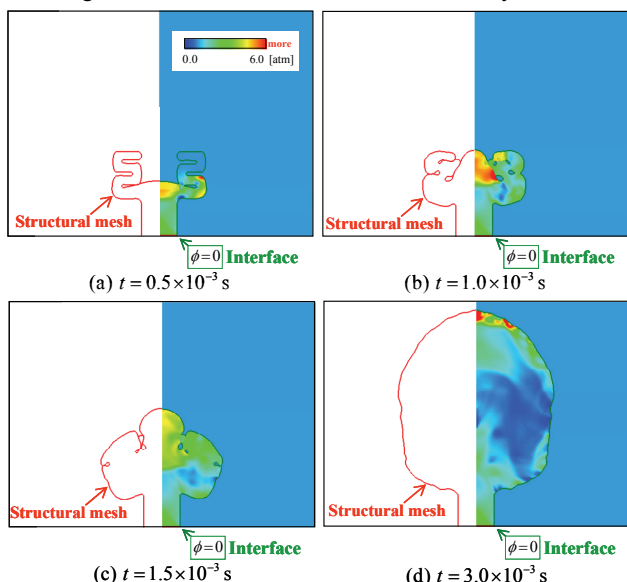


Fig. 4 Deformation of structural mesh and pressure contours

抜ける非物理的な現象が生じないように、Dirichlet 境界条件を与える点 C も追加する必要がある。

- (P3) CIP 有限要素法を用いて、流体節点での密度 ρ 、速度 \mathbf{v} 、圧力 p を計算する。
- (P4) 流体節点と構造節点での速度 \mathbf{v} が収束していれば、構造変数と流体変数を次時刻の値とする。

4. 計算結果およびその検討

エアバッグの下部の流入口から高密度・高圧の空気が高速で流入する 2 次元エアバッグ展開モデルを解析する。解析モデルは、Cirak and Radovitzky⁽²⁾ によるエアバッグ展開の計算条件に基づいている。Cirak and Radovitzky のエアバッグモデルは折り畳まれていない平らな状態からエアバッグは展開するが、本解析で扱うエアバッグモデルは折り畳んだ状態から展開する。また、対称条件を考慮して、半分の解析領域を扱う。

Fig. 3 に時刻 $t = 3.0 \text{ ms}$ までの構造メッシュの変形および空気の流れを示す。Fig. 4 に時刻 $t = 3.0 \text{ ms}$ までの構造メッシュの変形および空気の圧力分布を示す。伝播してきた圧力は、 $t = 0.5 \text{ ms}$ で構造の上部に到達し、構造の上部が垂直方向へ移動する様子が見える。また、自己接触によって、折り畳まれていた構造の側面部分が展開される様子が見える。このとき、構造の接触部の位置でレベルセット関数の零等値面が消失する。Dirichlet 境界条件を与える点 C の設定によって、構造の接触部の位置で圧力分布を不連続になり、流れが構造を通り抜けないことを確認できる。

初期時刻において構造の側面部分が接触していると、圧力が構造の上部に到達したときに、計算が破綻する。そのため、構造の側面部分に流体節点が最低 3 点入るほどの隙間が必要となる。また、3 次元解析では、構造メッシュにはシェル要素を用いる。初期時刻では、シェル要素の境界をエアバッグの折れ目と一致させる。折れ目の形状が複雑になる場合、4 角形シェル要素より要素数が多くなるが、3 角形シェル要素の使用を検討する必要がある。

5. 結言

本研究では、接触モデルを導入したレベルセットに基づく Lagrangian-Eulerian 連成手法を用いて、小さい空間に折り畳まれたエアバッグの 2 次元解析を行った。解析結果から、今後完全に折り畳まれた状態からエアバッグ展開を行うための問題点について検討を行った。

謝辞：本研究は、科研費（課題番号 21760064）の助成を受けたものである。ここに記して、心から感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 橋本, 小野, 野口, 日本計算工学会論文集, 論文番号 20080028, (2008), pp. 1-15.
- (2) Cirak, F. and Radovitzky, R., Computers & Structures, Vol.83, (2005), pp.491-498.
- (3) Legay, A., Chessa, J., and Belytschko, T., Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.195, (2006), pp. 2070-2087.
- (4) 澤田, 手塚, 計算工学講演会論文集, Vol.14, No.2, (2009), pp. 765-768.
- (5) Gerstenberger, A. and Wall, W.A., Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.197, (2008), pp. 1699-1714.
- (6) 榎原, 棚橋, 松本, 日本機械学会論文集B編, Vol.63, No.609, (1997), pp.1612-1619.
- (7) Dvorkin, E., Onate, E. and Oliver, J., International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.26, (1988), pp. 1597-1613.
- (8) 野口, 久田, 日本機械学会論文集A編, Vol.58, No.550, (1992), pp. 943-950.
- (9) 久田, 野口, "非線形有限要素法の基礎と応用," (1995), 丸善.
- (10) Zhong, Z.H., "Finite element procedure for contact-impact problems," (1993), Oxford University Press.