

平成23年 6月 20日現在

機関番号： 82401
 研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2009～2010
 課題番号： 21760064
 研究課題名（和文）
 レベルセット仮想粒子を用いた固定メッシュに基づくエアバッグ展開の大変形FSI解析
 研究課題名（英文）
 Large-deformation FSI analysis of airbag deployment based on fixed mesh using level-set virtual particles
 研究代表者
 橋本 学 (HASHIMOTO GAKU)
 独立行政法人理化学研究所・機能情報シミュレーションチーム・研究員
 研究者番号： 00455362

研究成果の概要（和文）：

レベルセット関数による界面表現，仮想粒子を利用した界面処理，流体変数・構造変数・レベルセット関数の分離型強連成解法の三つの特徴を持つような，固定メッシュに基づく大変形 Fluid-Structure Interaction 解析手法を開発した。そして，折畳まれていない状態からのエアバッグ展開の解析および折り畳まれた状態からのエアバッグ展開の解析を行い，開発手法が大変形 FSI 問題への適用能力を有していることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

A fixed mesh-based scheme was developed for large-deformation fluid-structure interaction, which has three features such as level-set interface representation, interface treatment using virtual particles and partitioned strong coupling algorithm of fluid variables/structural variables/level sets. It was confirmed that the developed scheme is applicable to the large-deformation FSI problems from the numerical results of unfolded airbag deployment and folded airbag deployment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,100,000	330,000	1,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・工学基礎

キーワード：(1) Fluid-Structure Interaction, (2) Coupled Problem, (3) Large Deformation Problem, (4) Airbag Deployment, (5) Interface Treatment, (6) Fixed Mesh, (7) Level Set, (8) Partitioned Solution Method

1. 研究開始当初の背景

流体と構造が相互作用する問題は FSI (Fluid-Structure Interaction) 問題と呼ばれ、機械工学・航空宇宙工学・土木工学・バイオエンジニアリングなどの多くの分野で存在する。流体の流れは構造を変形させる一方で、構造の移動・変形はその周囲の流れに影響を及ぼすために、その現象は複雑である。

構造が大変形する FSI 問題 (大変形 FSI 問題) は、従来の移動メッシュを用いるアプローチでは解析が難しい問題である。構造の変形がそれほど大きくない FSI 解析では、構造の変位を計算するメッシュとして、物体と共に移動する Lagrangian メッシュを用いることが多い。一方、流体の速度を計算するメッシュとして、構造の運動に従って移動する ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 移動メッシュが用いられる。しかし、ALE メッシュを大変形 FSI 問題に適用すると、メッシュの歪みが精度の悪化や計算の破綻を引き起こす。

自動車のエアバッグ展開は、大変形 FSI 問題の一つである。自動車が衝撃を受けると、エアバッグの内部に高圧・高密度の空気が急速に流入し、エアバッグはしわ (wrinkle) を形成しながら膨らんでいく。

エアバックはサイドエアバックも含めて製品化されていて、LS-DYNA, PAM-CRASH, MADYMO などの汎用ソフトによる解析がなされている。従来のエアバッグ展開のシミュレーションでは、乗員が既に十分に展開されたエアバッグと接触することが仮定される。そのため、UPM (Uniform Pressure Method) というエアバッグ内での一様な圧力の仮定がよく行われてきた。しかし、エアバッグに接近した状態 OoP (Out-of-Position) にある乗員の保護には、展開中のエアバッグの高精度な予測が必要とされる。近年では、UPM に代わり、計算流体力学によってエアバッグ内部の圧力分布を予想するモデルが汎用ソフトに導入されてきている。そこで、大変形 FSI 問題を高精度に解析することができるロバスタな計算手法を開発していくことは、重要な研究課題の一つであるといえる。

2. 研究の目的

エアバッグ展開の高精度な予測には、「(A) 大変形 FSI の解析」、「(B) エアバッグの空気流入口でのインフレーターモデル化」、「(C) エアバッグの布地の透過性の考慮」という3つの因子が必要とされる。本研究では、高精度な folded airbag deployment シミュレーター開発の初段階として、因子 (B) と (C) を考慮に入れない。本研究では、レベルセット関数 (符号付き距離関数) を利用した固定メッシュに基づく FSI 解析手法を開発し、折畳まれていない状態からのエアバッグ

展開 (unfolded airbag deployment) および折り畳まれた状態からのエアバッグ展開 (folded airbag deployment) の解析を行うことを目的とする。unfolded airbag deployment では、円盤状のエアバッグが風船のように膨張すると共に、流体領域は大きく変化し、エアバッグ表面では周方向に高周波数モードの wrinkle が形成される。folded airbag deployment では、空気流入直後においてエアバッグが自分自身と接触することも考慮する必要がある。これらの問題は、従来用いられてきた ALE 移動メッシュに基づく FSI 解析手法では、十分な精度でロバスタに解析するのが困難な問題であると考えられる。

3. 研究の方法

以下の三つの特徴を有する大変形 FSI 解析手法を提案する。

(1) レベルセット関数による界面形状の表現

レベルセット関数は、気液界面や燃焼の流体解析や Computer Graphics の分野でよく用いられてきた。しかし、これまで FSI 解析ではほとんど注目されてこなかった。レベルセット関数を利用すると、大変形する構造の幾何形状を関数値零の等値面として、流体の固定メッシュ上に容易に表現することができる。これによって、ALE 移動メッシュでは追従できないような大変形する界面形状を容易に捉えることが可能である。

(2) レベルセット仮想粒子による界面処理

FSI 解析に固定メッシュを用いる場合、構造メッシュの速度成分を流体メッシュの速度へ正確に渡す処理 (界面での運動学的条件の処理) が難しい問題となる。本研究では、レベルセット関数の値を持つ仮想粒子「レベルセット粒子」を構造メッシュの法線方向へ配置し、界面での運動学的条件の処理を行う。仮想粒子の利用によって、固定メッシュ上の界面近傍でのレベルセット関数の値を高精度に更新することができる。関数値は界面からの距離を表すという性質を利用して、界面での運動学的条件を容易に処理することが可能である。

(3) 流体変数・構造変数・レベルセット関数の分離型強連成解法

流体変数・構造変数・レベルセット関数を各時間ステップ内で別々に解き、各変数が収束するまで反復する分離型強連成解法を採用する (図 1 参照)。これによって、流体構造連成アルゴリズム内に上述した仮想粒子を利用した運動学的条件の処理を導入することが可能となる。wrinkle を表現できるシェル要素を用いた陰的構造解析手法と高速流に対して3次補間関数を用いる高精度な上流化を施した陽的流体解析手法の組み合わせのように、計算上の性質が異なる高度な計算手法を導入することが容易である。また、連成系全体の方程式から全変数を1度に解く方法よりも必要な記憶容量が少ないために、大規模計算に適したアルゴリズムも構築できる。

提案した大変形 FSI 解析コードを開発し、unfolded airbag deployment の解析および

folded airbag deployment の解析を実施する。3次元問題の場合、計算時間・記憶容量の点から並列計算が必要となる。そこで、流体の自由度は構造の自由度と比べて数桁多いことを考慮して、流体コードをMPI (Message Passing Interface) により並列化する。並列計算機として、RIKEN Integrated Cluster of Clusters (RICC) のLinux クラスタを使用する。また、本研究では有限要素解析を行うために、流体メッシュの領域分割にはフリーソフトのMETISを利用する。

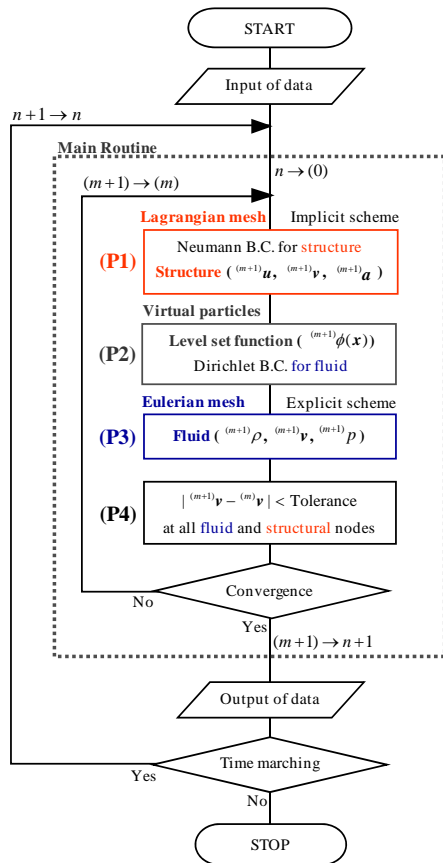


図1 Partitioned-solution coupling method (n : time step; m : iteration)

4. 研究成果

・2009年度の研究成果

提案したレベルセット関数を利用した固定メッシュに基づく大変形FSI解析コードを開発し、エアバッグ内側のみに流体がある場合 (Case 1) とエアバッグ両側に空気がある場合 (Case 2) の unfolded airbag deployment の3次元FSI解析を実施した (図2参照)。本研究で扱うFSI問題では流体の自由度が構造と比べて多いため、流体コードをMPIにより並列化した。

(1) Case 1において、コードの並列化が計算時間全体に与える影響を調べた。

(2) Case 1およびCase 2における計算結果では、エアバッグ入口から伝播する圧力が構造上部に到達し、エアバッグを引っ張る。そのとき、エアバッグの側面部が圧縮されるため、周方向へ wrinkle を形成する様子を確認した。

(3) Case 2において、エアバッグの膨張によって、エアバッグ外側の空気の圧力が減少する。この影響により内部と外部の圧力差が増加し、エアバッグ上部での変位がCase 1での計算結果に比べて増加することを確認した。

・2010年度の研究成果

folded airbag deployment の大変形FSI解析に取り組むため、接触モデルを導入し、小さい空間に折り畳まれたエアバッグの2次元FSI解析を行った。その結果、構造が自身と接触しながら、流体中を大変形することを確認した。その知見から、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した。

(1) 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を設定することによって、構造の接触部の位置で圧力分布が不連続になり、流れが構造を通り抜けないことを確認できた。

(2) 初期時刻において構造の側面部が接触していると、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、構造の側面部に流体節点が最低3点入るほどの隙間が必要となることがわかった。

(3) 3次元解析では、構造メッシュにはシェル要素を用い、初期時刻において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には、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が適していると考えられる。

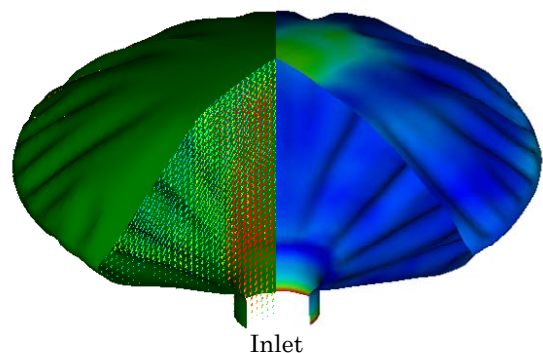


図2 エアバッグ展開の様子 (左側: 速度場とレベルセット関数の零等値面, 右側: 圧力分布)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

・ 公刊論文 (査読有)

- (1) Gaku Hashimoto and Kenji Ono, "Interface treatment under no-slip conditions using level-set virtual particles for fluid-structure interaction," Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.58, pp.325-342, 2010.

[学会発表] (計 12 件)

・ 口頭発表 (国際会議)

- (1) Gaku Hashimoto and Kenji Ono, "Development of fixed mesh-based partitioned solution method for large-deformation FSI analysis with contact," WCCM/APCOM 2010, Sydney, Australia, July 19-23, 2010.
- (2) Gaku Hashimoto and Kenji Ono, "A fixed Eulerian mesh-based scheme using level set function for airbag deployment simulation including the effect of outside air," ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, June 14-17, 2010.
- (3) Gaku Hashimoto and Kenji Ono, "Application of a partitioned coupling algorithm using level set function to folded airbag deployment," IWACOM-II, Yokohama, Japan, March 30-31, 2010, (invited talk).
- (4) Gaku Hashimoto and Kenji Ono, "A fixed mesh approach using level set function for fluid domains divided by large-deformable thin elastic structure," USNCCM10, Columbus, USA, July 16-19, 2009.

・ 口頭発表 (国内講演会)

- (1) 橋本 学・小野 謙二, "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)," 日本流体力学会 第24回数値流体力学シンポジウム, 横浜市 (慶應義塾大学), 2010年12月20日-22日.
- (2) 橋本 学・小野 謙二, "FSI問題のためのAMRを用いたEulerianメッシュベーススキーム," 日本学術会議 第59回理論応用力学講演会, 東京都 港区 (日本学術会議), 2010年6月8日-10日.

- (3) 橋本 学・小野 謙二, "レベルセット関数を用いた partitioned coupling algorithm の folded airbag deploymentへの適用," 日本計算工学会 第15回計算工学講演会, 福岡県 福岡市 (九州大学医学部百年講堂), 2010年5月26日-28日.
- (4) 橋本 学・小野 謙二, "接触を考慮した大変形FSI解析のための固定メッシュに基づく partitioned solution methodの開発," 日本流体力学会 第23回数値流体力学シンポジウム, 宮城県 仙台市 (仙台市民会館), 2009年12月16日-18日.
- (5) 橋本 学・小野 謙二, "外側の空気の影響を考慮したエアバック展開シミュレーション," 日本機械学会 第22回計算力学講演会, 石川県 金沢市 (金沢大学), 2009年10月10日-12日.
- (6) 橋本 学・小野 謙二, "FSI問題のためのレベルセット仮想粒子による滑り無し条件を考慮した界面処理," 日本学術会議 第58回理論応用力学講演会, 東京都 港区 (日本学術会議), 2009年6月9日-11日.
- (7) 田中真人・橋本 学・渡邊浩志, "超弾性体・シェル要素・流体構造連成解析," 日本計算工学会 第14回計算工学講演会, 東京都 目黒区 (東京大学生産技術研究所), 2009年5月12日-14日, (招待講演).
- (8) 橋本 学・小野 謙二, "大変形する薄い弾性構造を介した流体領域に対する固定メッシュアプローチ," 日本計算工学会 第14回計算工学講演会, 東京都 目黒区 (東京大学生産技術研究所), 2009年5月12日-14日.

[その他]

・ 成果発表のホームページ

- (1) http://nihonbashi.race.u-tokyo.ac.jp/~ghashimoto/index_report.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 学 (HASHIMOTO GAKU)

独立行政法人理化学研究所・機能情報シミュレーションチーム・研究員
00455362

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし