オイラー型構造－流体統一解法による衝撃吸収構造の大変形解析

名古屋大学　学生会員　○勝又　稜平
名古屋大学　正会員　　西口　浩司
名古屋大学　正会員　　干場　大也
名古屋大学　正会員　　加藤　準治

1.　はじめに

近年，高齢者の転倒による骨折が大きな社会問題となっている．このような転倒事故を減らすため，ゴムと樹脂の混練材料からなる，転倒の衝撃を吸収する床構造が模索されている．転倒時の衝撃吸収に対して，より効果的な構造を設計するには，大変形の動的な構造解析および空気との連成を考慮する必要がある．しかし，従来の有限要素法による構造解析では大変形によるラグランジュメッシュの破綻やメッシュ生成・計算の時間的コスト，空気の影響を考慮した構造-流体連成解析が困難といった問題が生じている．

そこで, 本研究では, 著者らが開発してきた Building Cube Method (BCM) [1]-[4] に基づくオイラー型有限体積法を用いて，構造-流体連成解析を行う．しかし，既往の研究では，固体・流体間で同一の質量密度，連続的な速度場を有する問題への適用のみがなされている．そのため，ゴム・樹脂混練材料と空気のような，固体・流体間の界面で質量密度・速度場の不連続性がある問題に関しては，未検討の課題として残されていた．

以上の背景において，本研究では，質量密度および速度場の界面不連続性を考慮できるオイラー型構造-流体統一解析スキームの開発とその妥当性検証および，高齢者の転倒骨折予防のための衝撃吸収構造の超並列シミュレーションによる本手法の有効性の検証を目的とする．

2.　数値解析手法

本研究では，連続体力学における基礎方程式である，連続の式，運動方程式を検査体積において体積平均化 [1] を行った式を支配方程式として用いる．固体の構成方程式として非圧縮性 neo-Hooke 体を，流体の構成方程式として非圧縮性 Newton 流体を仮定する [3]．

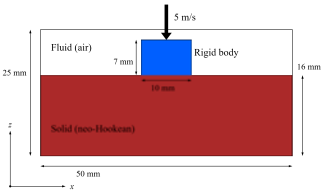
速度ベクトルをセル中心に定義し，有限体積法を利用して離散化を行う．この際，応力 $\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{mix}}$ を圧力 p と偏差応力 $\boldsymbol{\sigma}'_{\mathrm{mix}}$ に分け，フラクショナル・ステップ法 [2][3] を用いて速度場と圧力場を分離して計算する．また，固体の界面および内部変数の移流による数値拡散を回避するため，固体領域を陽に表現するだけでなく固体が持つ物理量を計算する役割を持つラグランジュマーカー粒子を用いる．

既往の研究では，固体・流体間で同一の質量密度を使用していたが，本研究においては，界面における質量密度の不連続性を，体積率で平均化することで平滑化した式を用いる．また，既往の研究では移流項の空間離散化において，2 次精度中心差分スキームを用いていたが，本研究では，界面における不連続な速度場を安定的に解くために，より高次の精度を持つ 5 次精度 WENO スキーム [5] を用いる．

3.　数値解析例

はじめに，本手法の妥当性を検証するため，図–1 に示す 2 次元押し込み問題の解析を行う．平面ひずみ状態の非圧縮性固体に対して，上端の剛体を滑りなしで押し込む．固体および流体に関しては，表–1 に示す物性を与える．

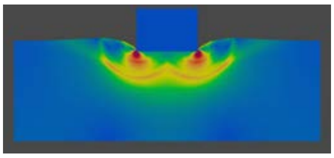
参照解として，数値解が収束した十分に細かいメッシュを用いた，商用固体解析コード LS-DYNA による有限要素解を用意する．図–2 は，t = 0.30 ms における変形図およびミーゼス応力分布を比較したものである．この図より，本手法による解は参照解とおおむね一致していることが確認できる．



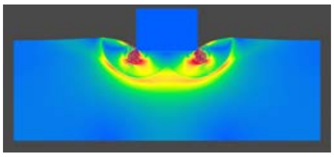
図–1　剛体による
2 次元押し込み問題

表–1　2 次元押し込み問題
における物性値

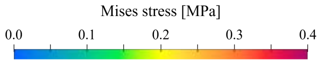
Solid: incompressible neo-Hookean solid	
Mass density ρ_{s} [kg/m^3]	1.0×10^3
Young's modulus E [Pa]	1.0×10^6
Viscosity μ_{s} [Pa · s]	0
Fluid: incompressible Newtonian fluid	
Mass density ρ_{f} [kg/m^3]	1.2
Viscosity μ_{f} [Pa · s]	1.8×10^{-5}



a) 参照解
800 × 256 cells



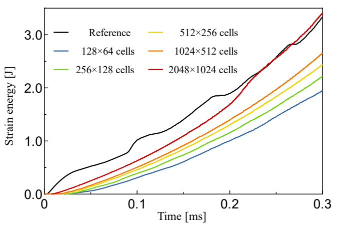
b) 本手法による解
2048 × 1024 cells



図–2　押し込み問題に
おけるミーゼス応力分布
（t = 0.30 ms）

キーワード　オイラー型構造-流体連成解析，有限体積法，大変形
連絡先　〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町　E-mail: katsumata.ryohei@k.mbox.nagoya-u.ac.jp

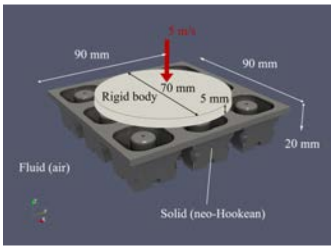
© Japan Society of Civil Engineers



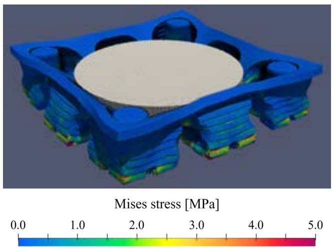
図–3　ひずみエネルギーの時刻歴

表–2　骨折予防床の解析における物性値

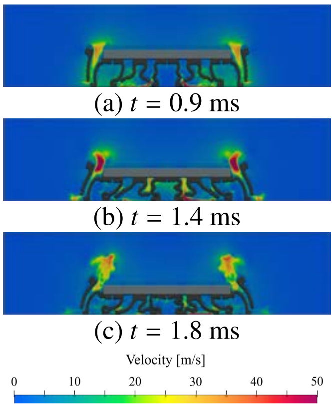
Solid: incompressible neo-Hookean solid	
Mass density ρ_{s} [kg/m^3]	1.0×10^3
Young's modulus E [Pa]	3.0×10^7
Viscosity μ_{s} [Pa · s]	1.8×10^{-5}
Fluid: incompressible Newtonian fluid	
Mass density ρ_{f} [kg/m^3]	1.2
Viscosity μ_{f} [Pa · s]	1.8×10^{-5}



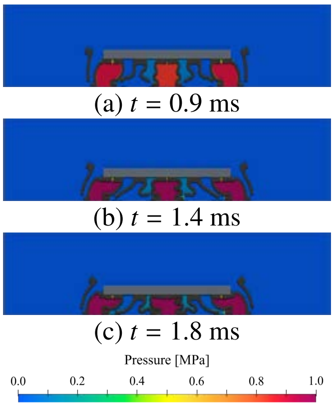
図–4　骨折予防床の解析



図–5　変形の様子とミーゼス応力分布（t = 1.8 ms）



図–6　速度場の分布



図–7　圧力場の分布

図–3 は，空間解像度の異なるメッシュを用いた本手法による解と有限要素法による参照解の，ひずみエネルギーの時刻歴を表したグラフである．この図より，本手法による解は参照解と比較して低い値が出ていることが確認できる．これは，剛体領域に変形体粒子が重なってしまうことが原因で，応力およびひずみが実際よりも低い値となったと考えられる．

次に， 図–1 に示す骨折予防床の変形解析を行う．変形体に対して，上端の剛体を滑りなしで押し込む．固体はゴム・樹脂の混練材料，流体は 20°C の空気を仮定し，表–2 に示す物性を与える．最小セルサイズ約 0.35 mm，総セル数 11,190,272 として分割した階層型直交メッシュを用い，解析時間を 1.8 ms までとしている．

図–5 は，骨折予防床の変形解析における，変形の様子とミーゼス応力分布である．大変形をする構造と空気との連成問題が安定して計算できていることが確認できる． 図–6 は，速度場の分布である．剛体の押し込み速度の約 10 倍の速度を持った空気が変形体の隙間から流出していることが確認できる． 図–7 は，圧力場の分布である．1 MPa 以上の高い圧力が発生している部分があることが確認できる．構造の厚み（約 2〜3 mm）やヤング率（30 MPa）を考慮すると，これらの影響は無視できず，構造と空気との相互作用が強い現象であることが示唆された．

4.　結論

本研究では，質量密度の体積平均化や移流項の空間離散化スキームの変更によって，質量密度および速度場の界面不連続性を考慮したオイラー型構造-流体統一解法を提案した．そして，2 次元押し込み問題を通して本手法の妥当性を検証し，骨折予防床の解析を通して本手法の有効性を検証した．今後は，剛体による速度境界条件の修正や，荷重・変位曲線について実験との定量的な比較を行うことが課題である．

参考文献

[1] Nishiguchi, K., Okazawa, S., Tsubokura, M.: Multimaterial Eulerian finite element formulation for pressure-sensitive adhesives, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.114, No.13, pp.1368-1388, 2018.

[2] 西口浩司，岡澤重信，坪倉誠：大規模並列計算に適した階層型直交メッシュ法による完全オイラー型固体-流体連成解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.73，No.2，pp.153-163，2017.

[3] Nishiguchi, K., Bale, R., Okazawa, S., Tsubokura, M.: Full Eulerian deformable solid-fluid interaction scheme based on building-cube method for large-scale parallel computing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.117, No.2, pp.221-248, 2019.

[4] 西口浩司，岡澤重信，坪倉誠：非圧縮性固体-流体連成解析のための陰的 Particle-in-cell 法，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.74，No.2，pp.253-263，2018.

[5] Liu, X.D., Osher, S., Chan, T.: Weighted essentially non-oscillatory schemes, Journal of Computational Physics, Vol.115, No.1, pp.200-212, 1994.

© Japan Society of Civil Engineers