

オイラー型有限体積法による自動車コンポーネント構造の超並列弾塑性解析

Massively parallel simulation of vehicle component structure considering elasto-plasticity with Eulerian finite volume method

竹内秀輔¹⁾ 西口浩司²⁾ 干場大也³⁾ 加藤準治⁴⁾ 岡澤重信⁵⁾

Shusuke Takeuchi, Koji Nishiguchi, Ryohei Katsumata, Hiroya Hoshiba, and Junji Kato

¹⁾名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: takeuchi.shusuke.c5@s.mail.nagoya-u.ac.jp)

²⁾博 (工) 名古屋大学大学院 工学研究科 准教授 (E-mail: kojinishiguchi@civil.nagoya-u.ac.jp)

³⁾博 (工) 名古屋大学大学院 工学研究科 助教 (E-mail: hiroyahoshiba@nagoya-u.jp)

⁴⁾Dr.-Ing. 名古屋大学大学院 工学研究科 教授 (E-mail: junjikato@nagoya-u.jp)

⁵⁾博 (工) 山梨大学大学院 総合研究部 教授 (E-mail: sokazawa@yamanashi.ac.jp)

With the growing interest in large-scale parallel simulations of vehicle structure dynamics, Eulerian methods using Cartesian meshes have been a renewed attention. Eulerian methods are attractive for large-scale parallel computing, generating mesh fastly, and for simulating large deformations. In this study, we propose Eulerian finite volume formulation using marker particles with elastoplasticity. We spatially discretize basic equations with finite volume method using BCM for massively parallel computing of vehicle structures such as B-pillar.

Key Words : Eulerian method, Finite volume method, Elastoplasticity, Vehicle structure dynamics

1. 緒言

自動車構造解析の大規模並列シミュレーションへの関心と必要性が高まる中、固定直交メッシュに基づくオイラー型構造解析は有効な数値解法の一つである。過去数十年間に渡り、非構造メッシュを用いたラグランジュ型有限要素法は、衝突解析、強度・剛性解析など数多くの性能評価に用いられている。しかし、固定直交メッシュに比べ、非構造メッシュに基づく有限要素法で高い並列化効率を得ることは容易ではない[1]。さらに、幾何学的に複雑な構造である車両構造の非構造メッシュの生成は、数週間オーダーの時間を要する問題がある[2,3]。

直交メッシュを用いたオイラー記述に基づく固体解析[4]~[6]は、大規模並列計算、解析メッシュの自動かつ高速な生成、破断を含む大変形問題のシミュレーションに適している。西口ら[7,8]は、階層型直交メッシュ法的一种であるビルディング・キューブ法(BCM)[9]を用いた完全オイラー型流体-構造強連成解法を提案し、数十万コアレベルの超並列計算環境における高い並列化効率を確認している。また西口ら[11,12]は、固体領域を表現するためのマーカー粒子を新たに導入し、固体体積率や固体に関する物理量をマーカー粒子の情報を利用して計算するオイラー型構造-流体統一解法を提案している。オイラー型構造-流体統一解法は、固体界面及び固体内部変数の数値拡散を回避することで解析精度が向上された。しかし、これらの手法[10,11,12]は、弾塑性を考慮した自動車構造の超並列計算に適用するには至っていない。

以上の背景から、本研究では、マーカー粒子を用い

たオイラー型有限体積法による弾塑性解析手法を提案する。本手法の妥当性を円筒の3点曲げ問題により検証する。また、Bピラーなどの自動車コンポーネント構造の超並列計算を行う。

2. 基礎方程式

本研究においては、次に示す連続の式、運動方程式を支配方程式として利用する。塑性域での変形は非圧縮性と近似できること、また数値計算の安定性のため、本研究では非圧縮性の仮定の下で計算を行う。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

ここで、 ρ は質量密度、 \mathbf{v} は速度、 $\boldsymbol{\sigma}$ はコーシー応力テンソル、 \mathbf{b} は単位質量当たりの物体力をそれぞれ表す。

また、次に示す変形勾配テンソルの時間発展式を用いて、固体の変形勾配テンソル \mathbf{F} を評価する。ここで、 \mathbf{L} は速度勾配テンソルである。

$$\frac{D\mathbf{F}}{Dt} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{F} \quad (3)$$

3. 構成方程式

固体の構成方程式として、文献[13]に記載されている、線形等方硬化を伴う von-Mises 型の降伏関数を用いた弾塑性構成則を利用し、超弾性モデルを弾性変形の定式化に利用する。以降においてその概要を記載する。

まず、乗算分解をし変形勾配テンソル \mathbf{F} を次の様に弾性成分 \mathbf{F}_e と塑性成分 \mathbf{F}_p に分解する。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_s \mathbf{F}_p \quad (4)$$

また、塑性右コーシー・グリーン変形テンソル \mathbf{C}_p 、塑性左コーシー・グリーン変形テンソル \mathbf{B}_e はそれぞれ次のように表すことができる。

$$\mathbf{C}_p = \mathbf{F}_p^T \mathbf{F}_p \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_e = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_e^T \quad (6)$$

なお、塑性右コーシー・グリーン変形テンソル \mathbf{C}_p と塑性左コーシー・グリーン変形テンソル \mathbf{B}_e には次の関係が成り立つ。

$$\mathbf{B}_e = \mathbf{F} \mathbf{C}_p^{-1} \mathbf{F}^T \quad (7)$$

次に、超弾性モデルのひずみエネルギー関数 Ψ は、次の通りに表される。

$$\Psi = G [(\ln \lambda_{e,1})^2 + (\ln \lambda_{e,2})^2 + (\ln \lambda_{e,3})^2] + \frac{\lambda}{2} (\ln J)^2 \quad (8)$$

ここで、 G はせん断弾性係数、 $\lambda_{e,1}, \lambda_{e,2}, \lambda_{e,3}$ は主軸方向の弾性ストレッチ、 λ はラメの第一定数を表す。また、主軸方向の弾性ストレッチと弾性左コーシー・グリーン変形テンソルの関係は次の通りである。

$$\mathbf{B}_e = \sum_{\alpha=1}^3 \lambda_{e,\alpha}^2 \mathbf{n}_\alpha \otimes \mathbf{n}_\alpha \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{n}_α は主軸方向の単位ベクトルを表す。そして、超弾性モデルのひずみエネルギー関数 Ψ を用いて、コーシー応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}$ は次のように表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha\alpha} \mathbf{n}_\alpha \otimes \mathbf{n}_\alpha ; \sigma_{\alpha\alpha} = \frac{1}{J} \frac{\partial \Psi}{\partial \ln \lambda_{e,\alpha}} \quad (10)$$

なお、 $\sigma_{\alpha\alpha}$ はコーシー応力テンソルの主応力成分であり、実際にひずみエネルギー関数を代入して計算すると次の通りになる。

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{2\mu}{J} \ln \lambda_{e,\alpha} + \frac{\lambda}{J} \ln J \quad (11)$$

さらに、 $\sigma_{\alpha\alpha}$ を偏差応力成分 $\sigma'_{\alpha\alpha}$ と静水圧 p に分解すると次の通りになる。

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \sigma'_{\alpha\alpha} + p \quad (12)$$

$$\sigma'_{\alpha\alpha} = \frac{2\mu}{J} \ln \lambda_{e,\alpha} - \frac{2\mu}{3J} \ln J \quad (13)$$

von-Mises 型の降伏関数 f については、次の通りに表される。

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{\tau}' : \boldsymbol{\tau}')} - \bar{\tau}_y \quad (14)$$

ここで、 $\boldsymbol{\tau}'$ はキルヒホッフ応力テンソルの偏差成分、 $\bar{\tau}_y$ は降伏応力を示す。また、降伏応力 $\bar{\tau}_y$ については、線形等方硬化則に基づき、体積変化率 J 、初期降伏応力

$\bar{\sigma}_y^0$ 、硬化係数 H 、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ を用いて次の通りに求めることができる。

$$\bar{\tau}_y = J(\bar{\sigma}_y^0 + H\bar{\epsilon}_p) \quad (15)$$

塑性流れ則に関しては、次に示す関連流れ則を利用する。

$$\mathbf{l}_p = \dot{\gamma} \frac{\partial f(\boldsymbol{\tau}, \bar{\epsilon}_p)}{\partial \boldsymbol{\tau}} \quad (16)$$

ここで、 \mathbf{l}_p は塑性変形速度、 $\dot{\gamma}$ は塑性乗数である。

4. 数値解析手法

本研究では、著者らの既往論文 [10,11,12] に記載されている方法と同様に、空間離散化にコロケート変数配置による有限体積法を用いた上で、空間固定の直交メッシュで連続の式 (1) と運動方程式 (2) を計算する。時間進行方向については、フラクショナル・ステップ法を用いることで次ステップの速度と圧力を求める。

固体領域を表すマーカー粒子においては、マーカー粒子自体の移動、変形勾配テンソル \mathbf{F} の時間発展式、構成方程式に関する計算を行うと同時に、経路依存変数である変形勾配テンソル \mathbf{F} 、塑性右コーシー・グリーン変形テンソルの逆テンソル \mathbf{F}_p^{-1} 、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ を保持する。

また本研究では、メッシュの局所細分化が可能で並列化効率に優れたビルディング・キューブ法 (BCM) を用いる。BCM は階層型直交メッシュ法の一つであり、図-1 に示すように解析領域はキューブと呼ばれる立方体領域に分割された後、各キューブは同数のセルで等間隔に分割される。局所的に細かいキューブを配置することができるため複雑な形状を有する固体界面の補足が容易である。さらに、各キューブは同数の直交等間隔セルで分割されているため、シンプルなアルゴリズムを保つことができ、高い並列化効率を得ることが可能である。

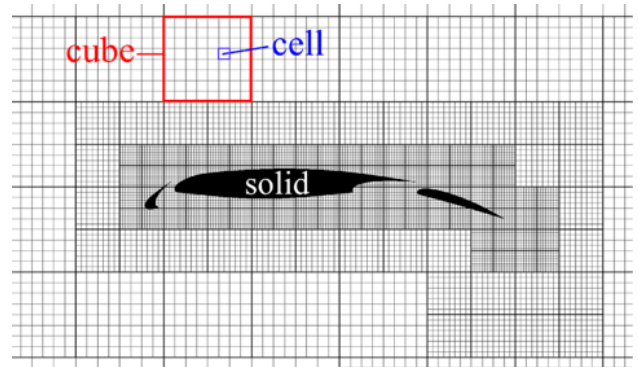


図-1 BCMにおけるキューブ分割の例

5. 数値解析例

本手法の妥当性を検証するため、図-2 に示すように円筒の3点曲げ問題の解析を行う。円筒の形状は、外半径 15.6 mm、厚さ 2 mm、長さ 200 mm である。また、半径 5 mm の円柱剛体を3点に配置する。上端の剛体に対して、z 軸負の方向に速度を与え、剛体の変位が

40 mm となるまで円筒を曲げる．使用ハードウェアはスーパーコンピュータ「富岳」であり，MPI ランク数 320，OpenMP スレッド数 8 のハイブリッド並列計算を行った．

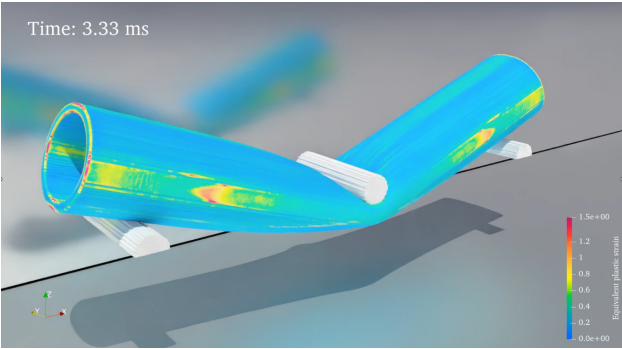


図-2 円筒の 3 点曲げ問題

円筒は，低炭素鋼を想定し，表-1 に示す材料物性を与える．解析結果については，講演会の当日に紹介する．

表-1 材料物性

Mass density ρ_s [kg/m ³]	7830
Young's modulus E [GPa]	207
Yield stress σ_Y [MPa]	210
Hardening coefficient H , [MPa]	300

6. 結言

本研究においては，自動車コンポーネント構造の超並列計算を目的とした，マーカー粒子を用いたオイラー型有限体積法による弾塑性解析手法の概要を説明した．提案手法，数値解析手法の詳細や，特に円筒の 3 点曲げ問題と B ピラーの超並列計算の解析例については講演会の当日に紹介する．

謝辞： 本研究は，HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp220249）を通じて，スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け，実施した．ここに記して謝意を表する．

参考文献

[1] Kondo K, Minami K, Hasegawa Y, Umetani H, Setoyama Y, Horita T, Kanazawa H. Performance evaluation using LS-DYNA hybrid version on the K Computer. Proceedings of 9th European LS-DYNA Conference. 2013, 9 pages.

[2] Leidinger LF, Breitenberger M, Bauer AM, Oberbichler T, Hartmann S, Wuchner R, Bletzinger KU, Duddeck F, Song L. Explicit Isogeometric B-Rep Analysis on Trimmed NURBS-Based Multi-Patch CAD Models in LS-DYNA. Proceedings of 12th European LS-DYNA Conference. 2019, 8 pages.

[3] スズキ株式会社 樫山武士,private communication, 2019.

[4] Benson DJ. COMPUTATIONAL METHODS IN LAGRANGIAN AND EULERIAN HYDROCODES. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. **99**(2-3), pp.235–394, 1992.

[5] Benson DJ. A MULTIMATERIAL EULERIAN FORMULATION FOR THE EFFICIENT SOLUTION OF IMPACT AND PENETRATION PROBLEMS. *Computational Mechanics*, **15**(6), pp.558-571, 1995.

[6] Nishiguchi K, Okazawa S, Tsubokura M. Multimaterial Eulerian finite element formulation for pressure-sensitive adhesives. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **114**(13), pp.1368–1388, 2018.

[7] 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), **73**-2, pp.I153–I163, 2017.

[8] 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*, **117**(2), pp.221–248, 2019.

[9] Nakahashi K. Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length. *Computational fluid dynamics 2002*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp.77–81, 2003.

[10] 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), **74**(2), pp.I253–I263, 2018.

[11] 西口浩司, 嶋田宗将, 大高雅史, 岡澤重信, 坪倉誠. ラグランジュマーカー粒子を用いたオイラー型有限体積法による圧縮性固体解析. 土木学会論文集 A2 (応用力学), **75**(2), pp.I237–I248, 2019.

[12] Shimada, T., Nishiguchi, K., Bale, R., Okazawa, S., Tsubokura, M. Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid–structure interaction problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **123**(5), pp.1294–1328, 2022.

[13] J. Bonet and RD. Wood: Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis, Cambridge university press, 1997.