

構造の内部空隙を考慮したオイラー型弾塑性解析

Eulerian elastoplastic simulation considering internal voids in the structure

尾寄悠利¹⁾ 西口浩司²⁾ 加藤準治³⁾

Yuuri Ozaki, Koji Nishiguchi and Junji Kato

¹⁾名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: ozaki.yuri.a0@s.mail.nagoya-u.ac.jp)

²⁾博 (工) 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 准教授, 理化学研究所計算科学研究センター AIforScience プラットフォーム部門上級研究員 (〒 103-0027 東京都中央区日本橋 1-4-1 日本橋一丁目三井ビルディング 15 階, E-mail: nishiguchi.koji.r9@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

³⁾Dr.-Ing. 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 教授 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: kato.junji.i5@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

The evaluation of structures containing unavoidable voids is crucial in manufacturing processes such as casting and injection molding. Voids form due to volume shrinkage, air entrapment, and gas release, affecting mechanical properties. Conventional FEM struggles with complex void geometries due to high computational costs and mesh distortion. This study employs Eulerian structural simulation, which uses a fixed spatial mesh, enabling efficient computation and avoiding mesh issues. Additionally, we investigate the spatial resolution required to accurately capture void-induced effects and assess convergence properties. By applying elastoplastic simulation, we aim to establish an efficient and reliable framework for void-influenced structural evaluation.

Key Words : *simulation, eulerian structural simulation, voids, elastoplastic, spatial convergence*

1. はじめに

近年、空隙を含まざるを得ない構造の強度や耐久性評価の重要性が増している。例えば、金属や樹脂の鋳造・射出成形プロセスでは、金属を冷却・凝固させた際の体積収縮や、溶融した金属を鋳型に流し込む際の空気の巻き込み、離型剤から生じる分解ガスに起因する微細な空隙が内部に残存することが避けられず、これらの空隙が機械的特性に与える影響を適切に評価する必要がある。また、発泡材料や多孔質構造など、意図的に空隙を含む材料の力学的挙動を把握することも重要である。特に、発泡材料は断熱材や衝撃吸収材、多孔質構造は人工骨やフィルターといったバイオメディカル用途など、幅広い分野で活用されている。しかし、上述した構造内部に発生する空隙の体積率や形状は不確定であり、単一の解析では十分な評価が困難である。そのため、多数の異なる空隙パターンを考慮した構造解析を行い、その影響を定量的に評価することが求められる。

従来の有限要素法 (FEM) においては、物体界面に適合するメッシュを生成することが求められるが、空隙のサイズや分布の特性に応じてメッシュが細分化されるため、解析に要する計算コストが著しく増大する傾向がある。さらに、空隙が複雑な形状を呈する場合、メッシュの破綻が発生するリスクが存在し、これが解析の適用範囲を大幅に制約する要因となっている。このような課題は、特に空隙を伴う構造物の挙動を正確に評価する際に顕著となる。そこで本研究では、メッシュ生成を迅速に行うことが可能であり、かつメッシュ破綻が発生しない固定メッシュを活用した解法、すなわちオ

イラー型構造解析 [1] に注目する。この手法は、空間固定メッシュ内で物体が変形や移動を行うという特徴を持ち、メッシュ生成が簡便であるだけでなく、メッシュ破綻を効果的に回避できるという明確な利点を有している。また、オイラー型固体解析は流体解析との連成が容易である点でも優れており、例えば Sugiyama らによって提案された有限差分法に基づく完全オイラー型固体-流体連成解法 [2] がその一例として挙げられる。ただし、この手法では固体界面を Volume-Of-Fluid (VOF) 法によって捕捉するため、移流計算が不可欠となり、その結果、固体界面および固体内部変数の数値拡散が課題として浮上していた。この問題を克服するため、西口らや Shimada らは、固体領域を表現する Lagrange 粒子を新たに導入し、固体の物理量をこれらの粒子の情報を基に計算するオイラー型固体-流体連成解法を開発した [3,4]。この改良により、オイラー型固体-流体連成解法において固体界面および固体内部変数の数値拡散が抑制され、解析の精度が飛躍的に向上するに至った。さらに、西口らは、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 [5] を採用した完全オイラー型流体-構造強連成解法を提案している [6,7]。このビルディング・キューブ法に基づくオイラー型解法は、数百万コア規模の超並列計算環境において極めて高い並列化効率を実現する特性を備えており、大規模計算への適応性も示している。以上の観点から、オイラー型構造解析は、メッシュ生成の迅速性、メッシュ破綻の回避、そして高い並列化効率という複数の利点を兼ね備えた解析手法であると言える。これらの特性は、空隙を含む構造物の解析において特に有用であり、従来手

法の限界を打破する可能性を秘めている。

こうした背景を踏まえ、本研究では、オイラー型弾塑性解析を適用することで、空隙の体積率や形状に起因する不確実性が構造特性に及ぼす影響を詳細に評価する。具体的には、空隙の形状が多様である場合にどの程度の空間解像度が求められるのかを慎重に検討し、計算効率と精度の両立を図る解析手法の確立を目指す。この取り組みを通じて、空隙を考慮した構造解析における新たな標準的アプローチの構築に寄与することを意図している。

2. 構成方程式

連続体の運動方程式において、Cauchy 応力テンソルに関する関係式を定義しない場合、方程式系は閉じた形にならず、結果として物質の運動を記述する方程式を解くことが不可能となる。方程式系を閉じ、物質の運動に関する解を求めることが可能となるためには、Cauchy 応力テンソルとひずみテンソルを関連づける構成方程式を導入する必要がある。本節では、本研究で採用する固体および流体の構成方程式について説明する。

(1) 固体の構成方程式

本研究では、線形等方硬化を考慮した von-Mises 型の降伏関数に基づく弾塑性構成則 [8] を採用する。

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{\sigma}' : \boldsymbol{\sigma}') - \bar{\sigma}_y} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}_y^0 + H\bar{\varepsilon}_p \quad (2)$$

$$l_p = \dot{\gamma} \frac{\partial f(\boldsymbol{\sigma}, \varepsilon_p)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は Cauchy 応力の偏差成分、 $\bar{\sigma}_y$ は降伏応力、 $\bar{\sigma}_y^0$ は初期降伏応力、 H は硬化係数、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみ、 $\dot{\gamma}$ は塑性乗数を表す。Mises の降伏関数 (1) が 0 以下の場合、変形は弾性領域に留まり、0 を超える場合には塑性領域に進む。塑性変形に伴う降伏応力 $\bar{\sigma}_y$ の変動は、線形等方硬化則 (2) により評価され、相当塑性ひずみ増分は塑性流れ則 (3) を用いて算出される。これにより、塑性変形領域における固体の挙動を記述する。

弾性変形に関しては、Hencky の超弾性モデルを用いて定式化を行う。

$$\Psi = \mu[(\ln \lambda_{e,1})^2 + (\ln \lambda_{e,2})^2 + (\ln \lambda_{e,3})^2] + \frac{\lambda}{2}(\ln J)^2 \quad (4)$$

ここで、 Ψ は Hencky 超弾性体のひずみエネルギー密度関数、 μ はラメの第 2 定数、 $\lambda_{e,\alpha}$ ($\alpha=1, 2, 3$) は各主方向における弾性ストレッチ、 λ はラメの第 1 定数、 J は体積変化率を示す。主方向弾性ストレッチ $\lambda_{e,\alpha}$ を求めるため、変形勾配テンソル \mathbf{F} を弾性成分 \mathbf{F}_e と塑性成分 \mathbf{F}_p に以下の通り乗算分解する。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_p \quad (5)$$

さらに、塑性右 Cauchy-Green 変形テンソル \mathbf{C}_p および弾性左 Cauchy-Green 変形テンソル \mathbf{B}_e はそれぞれ以下のように定義される。

$$\mathbf{C}_p = \mathbf{F}_p^T \mathbf{F}_p \quad (6)$$

$$\mathbf{B}_e = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_e^T \quad (7)$$

なお、弾性左 Cauchy-Green 変形テンソル \mathbf{B}_e は、塑性右 Cauchy-Green 変形テンソル \mathbf{C}_p を用いて以下のように表現可能である。

$$\mathbf{B}_e = \mathbf{F} \mathbf{C}_p^{-1} \mathbf{F}^T \quad (8)$$

ここで、弾性左 Cauchy-Green 変形テンソル \mathbf{B}_e を利用し、主方向弾性ストレッチ $\lambda_{e,\alpha}$ を以下の式で算出することができる。

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

ただし、 \mathbf{n}_α は各主方向の単位ベクトルを表す。

式 (4) において、 J は $\lambda_{e,1}$ 、 $\lambda_{e,2}$ 、 $\lambda_{e,3}$ の積に等しい。この関係を用いることで、Kirchhoff 応力の主方向成分 $\tau_{\alpha\alpha}$ は以下のように導出される。

$$\tau_{\alpha\alpha} = \frac{\partial \Psi}{\partial \ln \lambda_\alpha} = 2\mu \ln \lambda_\alpha + \lambda \ln J \quad (10)$$

Cauchy 応力テンソルは Kirchhoff 応力から体積変化率 J を除することで求められるため、以下の式によって Cauchy 応力テンソルとひずみテンソルを結びつけることができる。

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

さらに、Cauchy 応力を偏差成分と静水圧成分に分解することで、偏差 Cauchy 応力の主方向成分 $\sigma'_{\alpha\alpha}$ を以下の式で求めることができる。

$$\sigma'_{\alpha\alpha} = \frac{2\mu}{J} \ln \lambda_\alpha - \frac{2\mu}{3J} \ln J \quad (12)$$

(2) 流体の構成方程式

本研究では、流体の構成方程式として、非圧縮性 Newton 流体の構成方程式を採用する。Newton 流体とは、水や空気のように、せん断応力が速度勾配に比例するという Newton の粘性法則に従う流体を指す。また、流速が音速に比べて非常に小さい場合、流体の非圧縮性を仮定することが可能である。Newton 流体の構成方程式は以下のように与えられる。

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\mu \mathbf{D} + \left\{ -p + \left(\kappa - \frac{2}{3}\mu \right) \text{tr} \mathbf{D} \right\} \mathbf{I} \quad (13)$$

ここで、 μ は粘性係数、 \mathbf{D} は変形速度テンソル、 p は圧力、 κ は体積粘性率を表す。非圧縮性流体においては $\text{tr} \mathbf{D} = 0$ が成立するので、非圧縮性 Newton 流体の構成方程式は次のようになる。

$$\sigma = 2\mu D - pI \quad (14)$$

また、変形速度テンソル D は速度勾配テンソル L の対称部分であり、以下の式で表される。

$$D = \frac{1}{2}(L + L^T) \quad (15)$$

ただし、速度勾配テンソル L は以下の式で定義される物理量である。

$$L = \frac{\partial v}{\partial x} = \nabla v \quad (16)$$

3. 数値解析手法

オイラー型解法では、空間固定の直交メッシュと固体物質点を表す Lagrange 粒子を用いて解析を実施する。直交メッシュ上では、フラクショナル・ステップ法 [9] により運動方程式の時間発展を速度と圧力に関する式に分離して解き、Lagrange 粒子上では空間位置ベクトルや変形勾配テンソルなどの固体物理量を計算する。これらの結果を相互に補完し合う形で統合する。Lagrange 粒子の初期配置は、1つの計算セルを8分割したサブセルの中心に粒子を配置する方法を採用する。また、本研究では空隙の中心座標をランダムに設定し、任意形状の空隙を配置した後、各計算セルに対して空隙の内外を判定しフラグとして記録する。これにより、空隙部分に位置する計算セルに含まれる Lagrange 粒子には固体物理量を付与せず、空隙を構造体から除外する処理を実現している。

4. 数値解析例

本章では、本研究において作成した空隙生成モデルを扱った解析の有効性を検証するため、弾塑性体の一軸引張問題の相当塑性ひずみ分布と荷重変位曲線について、空隙なしの解と比較する。また、空隙の体積率・形状を変化させた幾つかのパターンに対して解析を行い、相当塑性ひずみ分布や荷重変位曲線を比較することで、空隙の不確実性が材料特性に与える影響を調査する。さらに、これらの解析を複数の空間解像度で行い、荷重変位曲線の空間収束性を確認することで、空隙の形状に応じてどの程度の空間解像度が必要となるのかを調査する。本研究では、提案手法による解析はすべてスーパーコンピュータ「富岳」を使用し、OpenMP と MPI によるハイブリッド並列計算により実施した。

(1) 空隙入り構造の一軸引張解析による本手法の有効性検証

本節では、弾塑性体の一軸引張問題について取り扱う。なお、オイラー型解法による弾塑性解析については、Nishiguchi らにより定量的妥当性が確認されている [10]。変形体は直径 20mm、高さ 30mm の円柱であり、この変形体の上端下端に、それぞれ縦横 30mm、高さ 1.5mm の剛体を取り付けられている。この剛体に対して、 z 軸正方向に加速度 $7.83 \times 10^4 \text{m/s}^2$ を与え、速度が 5m/s に達してからは定速で引っ張る。変形体内部には、直径 2mm の球体を仮定した空隙が配置されており、変

表-1 一軸引張問題における物性値

Solid: elastoplastic solid	
Mass density ρ_s [kg/m ³]	2.7×10^3
Young's modulus E [Pa]	7.0×10^{10}
Yield stress Y [Pa]	6.0×10^7
Work hardening coefficient H [Pa]	4.4×10^8
Fluid: incompressible Newtonian fluid	
Mass density ρ_f [kg/m ³]	1.0
Viscosity μ_f [Pa · s]	1.0×10^{-3}

形体に占める空隙の割合（空隙体積率）は 5% となっている。また、固体および流体に関しては表-1 に示す物性を与える。

解析領域には、キューブ分割数 $16 \times 16 \times 32$ の均一なオイラーメッシュを用いた。セルサイズは 0.015625mm、総セル数は 12,976,128 セル、生成される Lagrange 粒子数は 103,809,024 個である。また、ノード数・並列数（＝ランク数×スレッド数）は 99 ノード・3,168（396 ranks × 8 threads）並列で、時間ステップ数 Δt は、固体応力波の伝播速度に対するクーラン数（以降クーラン数）が 0.15 になるように設定しており、 $\Delta t = 7.973 \times 10^{-9}$ となっている。

解析結果は図-1 のようになった。図-1 から、空隙周辺に局所的に相当塑性ひずみが分布していることがわかる。多孔質材料を一軸引張または一軸圧縮した際には、孔と孔を結び付けるようにひずみが分布することが知られており [11]、ダイヤモンドのようなひずみ分布を描く（以降ダイヤモンドパターンと呼称）。図-1 においても、ダイヤモンドパターンが確認できる。

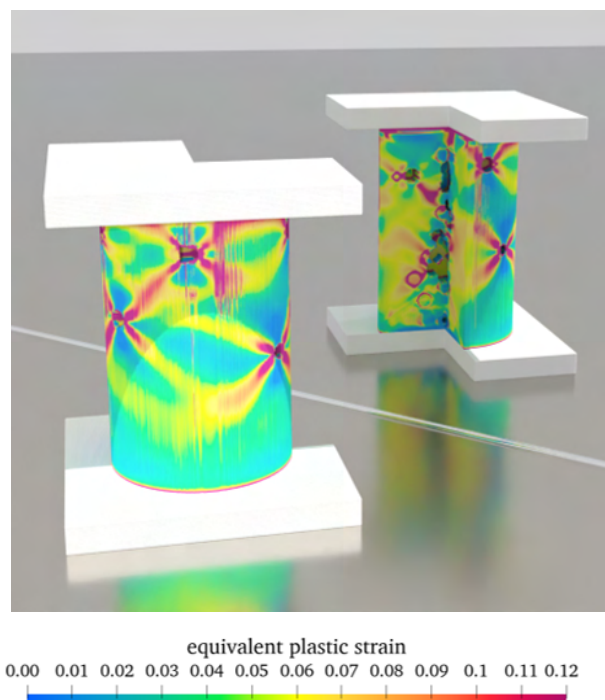


図-1 12,976,128 セルメッシュを用いた空隙を有する構造の弾塑性解析結果：相当塑性ひずみ分布

図-2 は、空隙の有無による荷重変位曲線の比較である。この図から、空隙の入っている変形体の方が空隙の入っていない変形体よりも荷重が小さいことが確認できる。この結果は空隙による材料特性の変化を定性的にあらわしており、本手法の有効性が示された。つまり、オイラー型構造解析による空隙を考慮した弾塑性解析は可能であることが確認された。

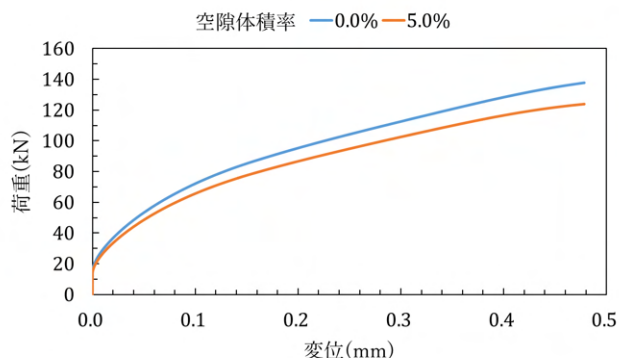


図-2 空隙の有無による荷重変位曲線の比較

(2) 空隙の不確実性が材料特性に与える影響調査

次に、(1) 節で示した変形体に対して、空隙の体積率・形状を変化させることで、空隙の不確実性が材料特性に与える影響を明らかにする。本解析には、(1) 節で用いたものと同様のオイラーメッシュを用いた。

a) 空隙体積率が材料特性に与える影響

まず、空隙体積率 0.0%、2.5%、5.0%、7.5% の全 4 パターンの解析を行い、それぞれの荷重変位曲線を比較することで、空隙体積率が材料特性に与える影響を調査する。

図-3 は各空隙体積率の荷重変位曲線を表している。この結果から、空隙体積率が大きい程荷重は小さくなることが確認できる。

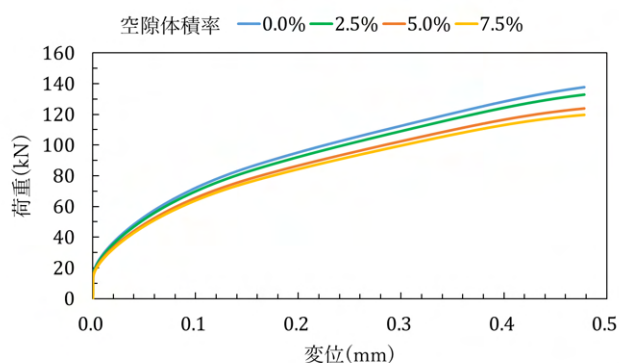


図-3 空隙体積率による荷重時変位曲線の比較

b) 空隙形状が材料特性に与える影響

(1) 節では空隙を直径 2mm の球体と仮定したが、本小節では、図-4 b) に示すような多面体を三次元データとして読み込み、変形体からくりぬくことで、多面体を空隙と仮定した構造に対して (1) 節と同条件下で解析を行い、空隙を球体と仮定した構造の解析結果と相当塑性ひずみ分布・荷重変位曲線の比較を行う。一般に、

空隙が材料特性に与える影響はその体積率による影響が大きいと考えられており、空隙形状の影響は小さいとされていたが、この解析によって、現実では調査が困難な、空隙形状が材料特性に与える影響を明らかにする。なお、空隙を球体と仮定したものと多面体と仮定したもので、空隙の体積率・生成位置を等しくすることで、空隙形状の違いのみによる材料特性の比較を行っている。

図-4 より、空隙を球体と仮定したものと、多面体と仮定したもので、相当塑性ひずみ分布に大きな違いはないが、多面体と仮定したもののほうが局所的に大きな相当塑性ひずみが発生していることが確認できる。

また、図-5 より、空隙を多面体と仮定した方が荷重が小さくなっていることが確認できる。これは、多面体の空隙が球体に比べて表面積が大きく、構造体内部の応力伝達経路が分断されやすいため、全体の剛性が低下したことが原因と考えられる。具体的には、多面体の形状はエッジや頂点を有するため、空隙周囲の応力伝達が妨げられ、力が構造体全体に効率的に伝わりにくくなる。これにより、同じ変形量に対して支持できる荷重が減少し、荷重変位曲線において荷重が小さく評価されたと解釈できる。この結果から、空隙の体積率だけでなく、空隙形状が材料特性に影響を及ぼす要因であることが明らかとなった。ただし、(3) にて後述するように、現段階の空間解像度では荷重変位曲線が収束していないため、空隙形状による荷重の差を定量的に評価することは現時点ではできていない。

(3) 空隙形状に対する空間収束性の調査

最後に、b) 節で示した変形体に対して、複数の空間解像度で解析を行い、荷重曲線を比較することで空間収束性を確認し、空隙形状に対して要求される空間解像度を調査する。本解析で使用する解像度は、以下の 4 つである。

- (1) セルサイズ：1.25mm，ノード数・並列数：1 ノード・16 (2 ranks × 8 threads) 並列，1 つの空隙に対するセル数：4 セル
- (2) セルサイズ：0.625mm，ノード数・並列数：4 ノード・128 (16 ranks × 8 threads) 並列，1 つの空隙に対するセル数：33 セル
- (3) セルサイズ：0.3125mm，ノード数・並列数：14 ノード・432 (54 ranks × 8 threads) 並列，1 つの空隙に対するセル数：262 セル
- (4) セルサイズ：0.15625mm，ノード数・並列数：99 ノード・3,168 (396 ranks × 8 threads) 並列，1 つの空隙に対するセル数：2,097 セル

図-6 にその結果を示す。本解析では、空隙を球体および多面体と仮定し、それぞれに対して上記の 4 つの解像度で解析を実施した。結果として、両形状において解像度 (1) (セルサイズ 1.25mm) および (2) (セルサイズ 0.625mm) の荷重が、解像度 (3) (セルサイズ 0.3125mm) および (4) (セルサイズ 0.15625mm) と比較して顕著に小さくなる傾向が確認された。これは、変形体から空隙を除去するプロセスにおいて、Lagrange 粒子ではなく計算セル単位でくり抜きを行っていることに起因する。解像度 (1), (2) では、セルサイズが大

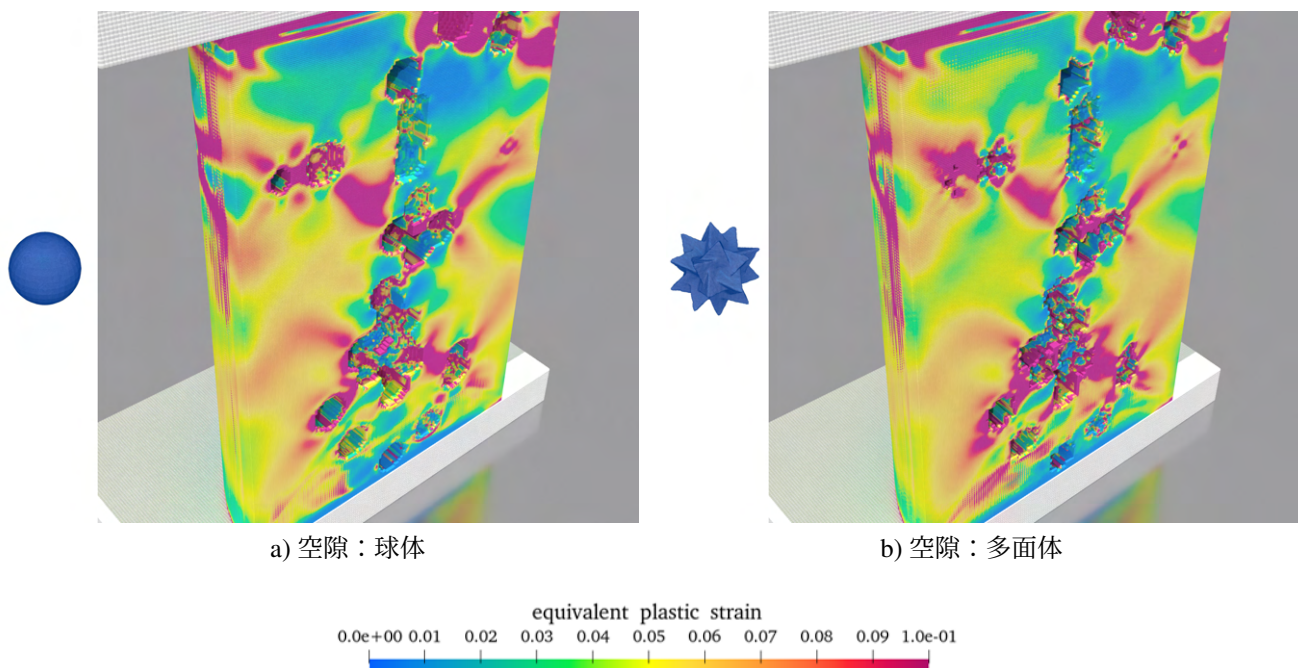


図-4 12,976,128 セルメッシュを用いた空隙を有する構造の弾塑性解析結果：空隙形状による相当塑性ひずみ分布の比較

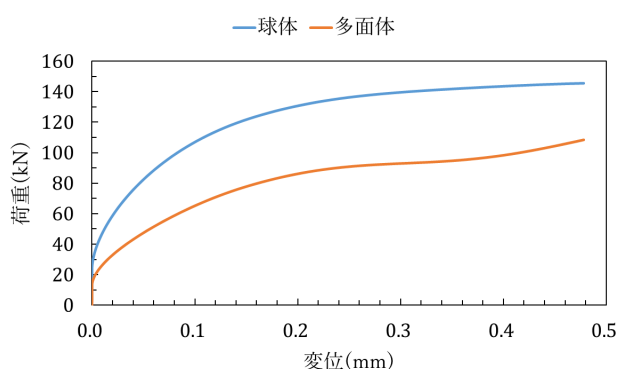


図-5 空隙形状による荷重時変位曲線の比較

きいため、空隙と判定される Lagrange 粒子の数が増加し、変形体の除去範囲が過大となる。これにより、想定以上に変形体が削られ、荷重が過小評価されたと考えられる。一方、解像度 (3)、(4) の結果に注目すると、球体の場合解像度 (3) における荷重が解像度 (4) よりも大きいのにに対し、多面体の場合は解像度 (4) における荷重が解像度 (3) よりも大きくなった。球体の場合、解像度 (3) ではセルサイズ 0.3125mm により空隙の球面形状が粗く近似され、界面近傍の応力集中が過大に評価される可能性がある。解像度 (4) ではセルサイズが 0.15625mm とさらに細くなり、球体の形状がより正確に再現されることで応力分布が適切に分散し、荷重が小さく評価されたと推測される。対して多面体の場合、解像度 (3) では角張ったエッジや頂点が十分に解像されず、応力集中が過小評価される可能性がある。解像度 (4) ではセル数の増加により多面体の形状が精緻に捉えられ、エッジでの応力集中が顕著に反映された結果、荷重が増大したと考えられる。以上の結果から、空隙形状の違いが空間解像度の影響を異ならせ、荷重評価

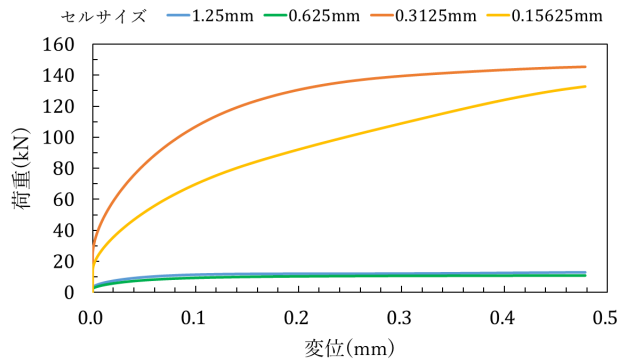
に相反する傾向をもたらすことが示唆される。本解析では荷重変位曲線は収束していないため、空隙を考慮した解析をするには十分な解像度が得られていないことが明らかとなった。今後、空隙形状と解像度の関係をさらに詳細に調査し、より高い解像度での解析を実施することで、高精度な解析条件の確立が求められる。

5. 結言

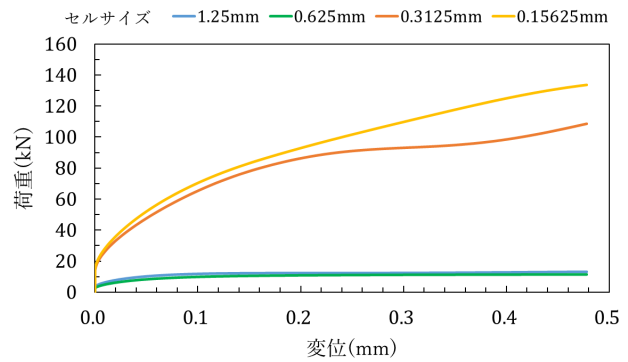
本研究では、空隙を考慮したオイラー型弾塑性解析を行うことで、その結果の有効性を確認するとともに、空隙形状に対して十分な空間解像度、空隙の体積率・形状の不確実性が材料特性に与える影響を調査した。以下に、本研究で得られた結論を示す。

- 最大 12,976,128 セルメッシュ（セルサイズ：0.15625mm）を用いたオイラー型弾塑性解析により、2mm サイズの空隙を考慮した構造の弾塑性解析を行った。
- 空隙体積率が増加するにつれて、荷重は低下した。この結果は、従来考えられてきた空隙が材料特性に与える影響と定性的に一致している。
- 従来は、空隙の体積率が材料特性に影響を及ぼすと考えられており、空隙形状が材料特性に与える影響に関しては既往研究では報告がなかった。しかし本研究により、空隙の急峻な界面近傍付近で塑性変形が進行し、球形状の空隙と比較して荷重変位曲線が低下することが明らかとなった。
- 空間収束性の調査により、空隙形状によらず 1 つの空隙に対し、約 2,097 セル確保しても不十分であり、より細かなメッシュ解像度が必要であることが明らかになった。

謝辞： 本研究は、HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp240296、課題代表者：西口浩司）を通じて、理化学研究所が提供するスーパーコンピュータ「富岳」の計



a) 空隙：球体



b) 空隙：多面体

図-6 空間収束性の確認

算資源の提供を受け、実施した。また、本研究は JSPS 科研費 24K14968 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Benson, D.J.: COMPUTATIONAL METHODS IN LAGRANGIAN AND EULERIAN HYDROCODES, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.99(2-3), pp.235-394, 1992.
- [2] Sugiyama, K., Ii, S., Takeuchi, S., Takagi, S., Matsumoto, Y.: A full Eulerian finite difference approach for solving fluid-structure coupling problems, Journal of Computational Physics, Vol.230, No.3, pp.596-627, 2011.
- [3] 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), Vol.75, No.2, pp.237-248, 2019.
- [4] Shimada, T., Nishiguchi, K., Rahul, B., Shigenobu, O., Makoto, T.: Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid-structure interaction problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.123, No.5, pp.1294-1328, 2022.
- [5] Nakahashi, K.: Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length, In Computational fluid dynamics 2002, Springer, pp.77-81, 2003.
- [6] 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.
- [7] 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, 2018.
- [8] Bonet, J., Wood, R.D.: Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis, Cambridge university press, 1997.
- [9] Kim, J., Moin, P.: Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations, Journal of Computational Physics, Vol.59, No.2, pp.308-323, 1985.
- [10] K Nishiguchi, S Takeuchi, H Sugiyama, S Okazawa, T Katsuhara, K Yonehara, S Kojima, K Kawahara, H Hoshiba and J Kato: Eulerian elastoplastic simulation of vehicle structures by building-cube method on supercomputer Fugaku, In Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 145-153, 2024.
- [11] Zhangyu, R., Huimin, X., Yang, J.: Determination of the stress and strain fields in porous structures by photoelasticity and digital image correlation techniques, Polymer Testing, Vol.102, 2021.