

せん断変形が支配的な延性破壊に対する マルチスケールシミュレーション

Multi-scale simulation for ductile fracture dominated by shear deformation

唐木創生¹⁾, 松井和己²⁾, 山田貴博³⁾

Tsukuru Karaki, Kazumi Matsui and Takahiro Yamada

1) 横浜国立大学 大学院環境情報学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7)

2) 博(工) 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 准教授 (E-mail: kzm@ynu.ac.jp)

3) 博(学) 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授

To take the ultimate state of materials into account I, many studies focus on the behavior of voids in the microstructure to predict ductile fracture in metals. The elementary process of ductile fracture is known to be a process of void generation, growth, and coalescence. However, the behavior of voids is known to change depending on the stress state within the material. In ductile fracture, where shear deformation is dominant, voids do not grow. It is also known that the failure mode of ductile fracture differs depending on the stress triaxiality. This study aims to visualize the behavior of voids in ductile fracture where shear deformation is dominant, using multiscale modeling by loading the unit cell model.

Key Words : Ductile fracture, Shear deformation, Multi-scale simulation

1. 緒言

(1) 材料の終局

現代の設計では、材料の降伏後から延性破壊までの過程も設計で考慮する限界状態設計法が使われている。この設計法では材料が限界状態に達する際の延性挙動を考慮することで、単に強度予測ができるだけでなく破壊の仕方の予測ができる。また材料の壊れ方を制御したり壊れることで意味を持つような部品の設計・開発に生かしたりすることができる。つまり、破壊のメカニズムを明らかにすることが製品設計の分野にとって重要になってきている。

(2) 延性破壊と損傷モデル

材料はミクロスケールで観察を行うと複雑なミクロ構造を有しており、一種の複合材料であることが知られている。マクロスケールでの材料物性はミクロ構造で生じている力学現象の影響を受け決定される。金属の延性破壊の素過程はマイクロボイドの発生・成長・合体であると知られており[1]、その過程に基づいた損傷変数を用いて延性挙動を再現したGTNモデルなどの損傷モデルが提案されている。しかしながら、これらの損傷モデルはミクロスケールにおける延性破壊の素過程であるボイドが成長する様子を直接評価しない現象論的アプローチである。そこで延性破壊に対して、ミクロスケールでのボイドの成長過程とそれに対するマクロでの力学的応答を関連付けたマルチスケール解析が適用されてきた[2]。

(3) 応力三軸度と延性破壊

現在、材料内部の応力状態が金属の延性挙動に影響を与えることが実験から確認されている[3]。引張が支配的な応力場においては前述したボイド成長のプロセスが損傷進展のメカニズムであることが知られている。しかし、低応力三軸度の応力場ではボイドはつぶれるように変形しボイドは成長しない。ボイドの成長プロセスでは損傷の説明が困難となる。Fig.1の曲線は応力三軸度によって破壊時のひずみが増加することを表している。注目すべ

きは単軸引張での実験結果である応力三軸度 0.4 を境に曲線が異なっていることであり、引張が支配的な応力場とせん断が支配的な応力場では破壊の仕方が異なると考えられる。そこで Nahshon, Hutchinson は、低応力三軸度での破壊を表現するために GTN モデルを修正した[4]。

本研究ではマルチスケール解析を用いてボイドを含んだミクロモデルに応力状態を制御した载荷をし、低応力三軸度域での材料の損傷を表現し、そのときのミクロ構造の挙動を可視化することを目的とする。

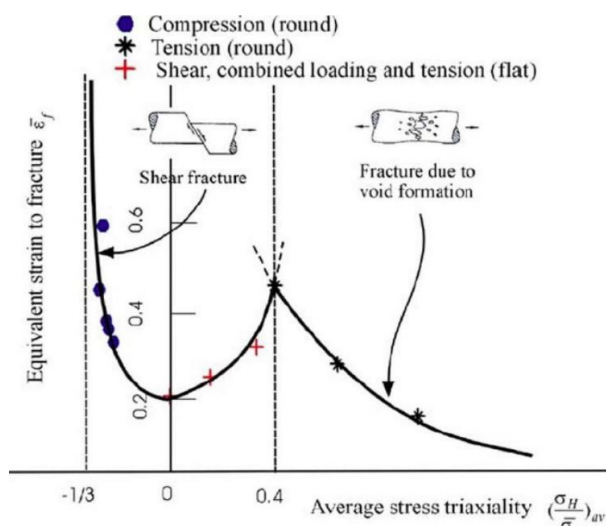


Fig.1 Dependence of the equivalent strain to fracture on the stress triaxiality[3].

2. 数値解析

3.1 解析モデル

(1) 解析モデル

マルチスケール解析で使用するモデルを Fig.2 に示す。ボイド周辺の局所変形を観察するためミクロモデルに球

状ボイドを直接モデル化した．このとき，マイクロモデル全体の体積に対するボイド体積の割合をボイド分率と定義した．今回のモデルの初期ボイド分率は 0.265 である．マクロモデルの二つの面に圧力荷重を加えて，応力三軸度を変化させ($T=0,0.1,0.2,0.3,1/3,0.4,0.5,2/3$) マルチスケール解析を行った．マイクロモデルの材料特性は Table.1 に示す．また硬化則は次の式を採用している．

$$\sigma_y(\bar{\epsilon}^p) = \sigma_y + H\bar{\epsilon}^p + (\sigma_y^\infty - \sigma_y)[1 - \exp(-\delta\bar{\epsilon}^p)] \quad (1)$$
ここで σ_y は初期降伏応力， H ， σ_y^∞ ， δ は硬化に関する材料定数である．

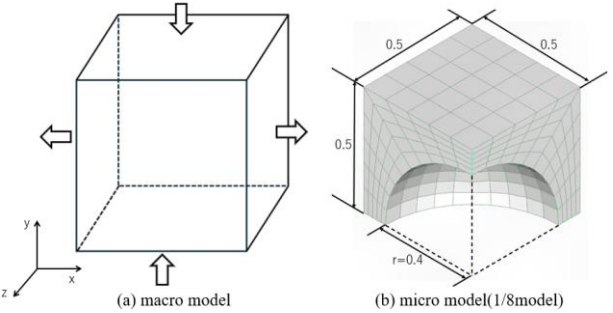


Fig.2 The chosen model (Macro-model and Micro-model)

Table.1 Macroscopic material parameters		
ヤング率	E [GPa]	200
ポアソン比	ν	0.3
初期降伏応力	σ_y [MPa]	200
加工硬化係数 1	H [MPa]	0
加工硬化係数 2	δ	20
最大降伏応力	σ_y^∞ [MPa]	400

(2) 異方性材料

マルチスケール解析ではマイクロ構造の影響を受けて，得られるマクロの力学的応答は本質的に異方的なものになる．特に破壊のような局所的に生じた変形が材料全体の強度を支配するような場合においては，マイクロ構造の持つ異方性が結果に与える影響は小さくないと予想される．実際に本研究室で行われた過去の調査において，载荷方向を変化させたことにより，マイクロ構造の変形の局所化の生じ方が異なることでマクロの最大応力に差が生じることが報告されている[5]．今回はマクロ主軸に対してマイクロ構造の座標軸（材料軸）を一致させたものとZ軸周りに $\theta_z = 15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 回転させたもので解析を行った．

(3) 解析結果

a) 純せん断での延性破壊

純せん断でのマクロ応力とマクロひずみ，マイクロ構造におけるボイド分率の関係を Fig.3 に示す．破線はボイド分率を表す．また，Fig.3 の相当塑性ひずみと相当応力の関係において最大応力が生じた a 点 b 点 c 点におけるマイクロモデル断面図の相当塑性ひずみ分布を Fig.4 に示す．最大応力が生じなかったモデルにおいてマクロひずみが 0.1 のときのマイクロモデル断面図の相当塑性ひずみ分布を Fig.5 に示す．

Fig.3 から純せん断ではどのモデルでもボイド分率は減少していき，ボイドはつぶれていった．载荷方向を変えた

$\theta_z = 15^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ のモデルで最大応力が生じた．Fig.4 からボイドはつぶれていき b と c では引張と圧縮の荷重方向に対して 45° の最大せん断応力が生じる方向に相当塑性ひずみが集中した．また，z 方向（Fig.4 の奥行方向）のボイド間の壁面にひずみが集中した．この変形の局所化によりマクロ応力が減少したと考えられる．Fig.5 の最大応力が生じなかった $\theta_z = 0^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ のモデルでは 2 方向に相当塑性ひずみが集中し，Fig.4 の最大応力が生じたモデルと比べて相当塑性ひずみが広い範囲に発生した．

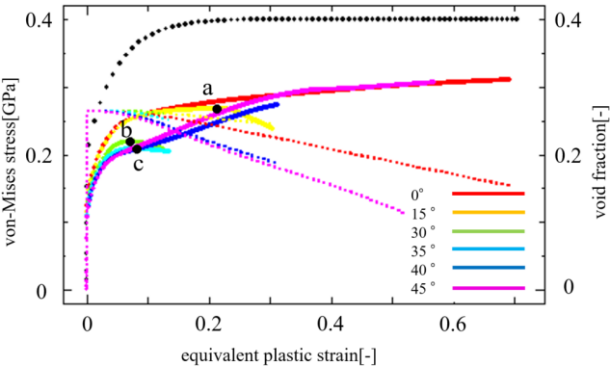


Fig.3 Macroscopic stress versus Macroscopic strain.

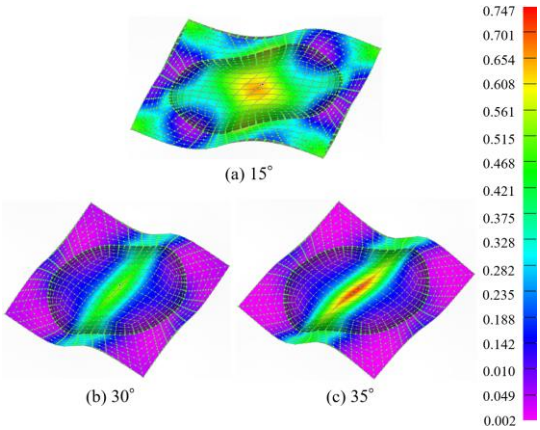


Fig.4 Contour plots of equivalent plastic strain for void model in micro-structure.

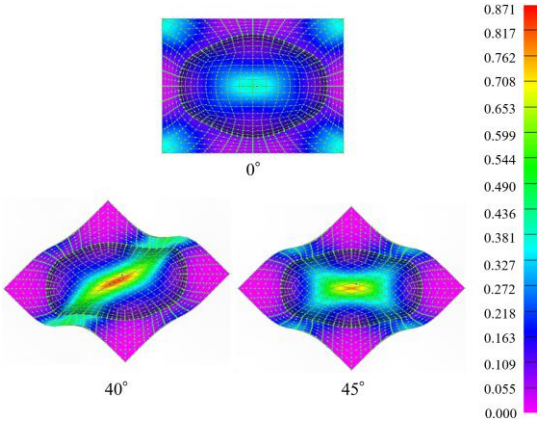


Fig.5 Contour plots of equivalent plastic strain for void model in micro-structure.

b) 応力三軸度によるマクロ応答の変化

それぞれの応力三軸度，载荷方向でピークが生じたときのマクロひずみ，マクロ最大応力の関係をそれぞれ Fig.6, Fig.7 にしめす．実際の材料では最も損傷しやすい部分から損傷が始まるため，Fig.7 のピーク時のひずみの値がそれぞれの応力三軸度で最も小さい値で損傷が始まると考えられる．

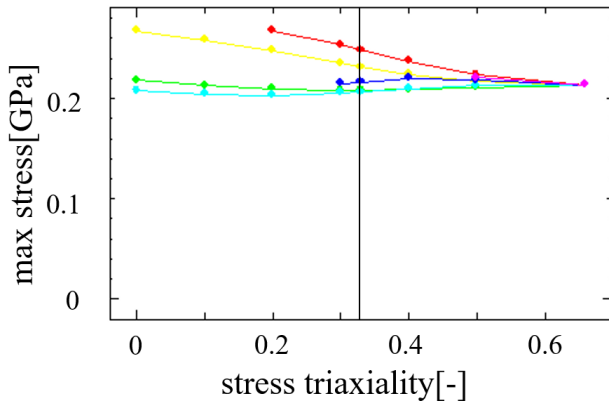


Fig.6 Macroscopic max stress versus stress triaxiality.

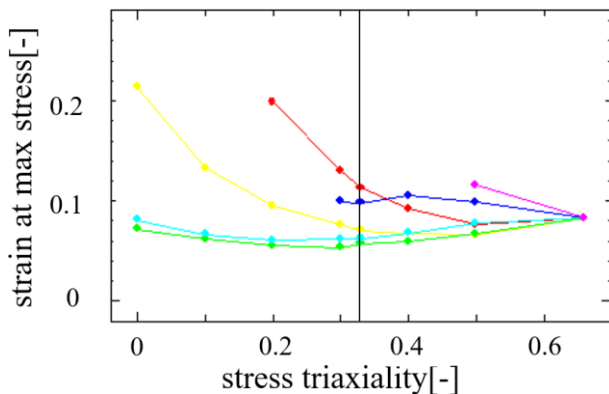


Fig.7 Strain at max stress versus stress triaxiality.

すべての応力三軸度 ($T=0, 0.1, 0.2, 0.3, 1/3, 0.4, 0.5, 2/3$) でピークが生じたのは载荷方向が $\theta_z = 15^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ のモデルで，応力三軸度が上がると $\theta_z = 0^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ でもピークが生じた．

Fig.7 からピーク時のひずみの値が最も小さいのは载荷方向が $\theta_z = 30^\circ$ となった．今回のモデルでは $\theta_z = 30^\circ$ から損傷が始まる．実験から得られた Fig.1 と比較すると，Fig.1 では低応力三軸度で応力三軸度の増加とともに破壊に至るまでのひずみが増加し，高応力三軸度では応力三軸度の増加とともに破壊に至るまでのひずみが減少している．一方 Fig.7 を見ると低応力三軸度では応力三軸度の増加とともにピーク時のひずみが減少，高応力三軸度で

は応力三軸度の増加とともにピーク時のひずみが増加し，Fig.1 とは異なる曲線が得られた．

マルチスケール解析により，金属材料の損傷に応力三軸度が影響を与えていることが確認できた．一方で，応力三軸度だけでなく，Lode-Parameter も金属の損傷を考えるうえで重要となることが知られている．今回の解析では二つの軸に圧力荷重を载荷する平面応力状態で応力三軸度を変化させ解析を行った．応力三軸度を変化させる際に Lode-Parameter も変化している．より詳しく応力状態を表すには Lode-Parameter も考慮する必要がある．今後は応力三軸度，Lode-Parameter とともに制御し，Lode-Parameter を一定に保ち応力三軸度を変化させたときの曲線がどのようなになるか，マイクロボイドにどのような局所変形が発生するかなどを考える必要がある．

3. まとめ

本研究では，マルチスケール解析を用いて主に低応力三軸度における延性破壊でのマイクロボイドの挙動を可視化し，マクロ応答との関係を整理した．

ボイドを含んだマイクロモデルを用いてマルチスケール解析を行うことで，ボイドがつぶれる応力状態でもマクロ応力とマクロひずみの関係が軟化することを確認した．また，マルチスケール解析において，载荷方向が材料内部の変形の仕方やマクロの力学的応答に与える影響が大きいことを確認した．応力三軸度とのピーク時のマクロひずみの関係を比較してみると，Fig.1 の実験による結果とは異なる曲線が得られた．応力三軸度だけでなく Lode-Parameter も材料内部の微小ボイドの挙動に影響を与えており，それによってマクロ応答も変化していると考えられる．

参考文献

- [1] A.L.Gurson: *J.Eng.Mat.Tech.*,99,1977.
- [2] 中村真太郎: マルチスケールモデリングによるボイド成長過程の応力三軸度/Lode 角への依存性評価，計算工学会論文集，Vol.24, 2019.
- [3] Y. Bao and T. Wierzbicki: On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.46(1), 81-98, 2004.
- [4] K. Nahshon, J.W. Hutchinson: Modification of the Gurson Model for shear failure, *European Journal of Mechanics – A/Solids*, Vol.27(2008), 1–17, 2004.
- [5] 伊本咲矢: 隣接ボイド間距離が延性損傷に与える影響のマルチスケールモデリングによる評価，横浜国立大学 大学院環境情報学府 修士論文，2023.