

マルチスケールモデリングによるボイド成長プロセスのモデル化とGTNモデルとの比較

FE2 Modeling of Void Growth Process in Metals & its comparison with GTN damage model

松井 和己¹⁾, 山田貴博²⁾

Sakuya Imoto, Kazumi Matsui and Takahiro Yamada

¹⁾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.jp)

²⁾学博 横浜国立大学大学院環境情報研究院 教授 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7)

Various papers have pointed out that the distance between micro voids affects the macroscopic damage behavior of materials. In this study, multiscale analysis is used to evaluate the effect of micro voids spacing on macroscopic ductile failure. The macroscopic loading conditions are transformed by the multiscale method. By changing the macroscopic stress direction in FE2 simulations, evaluate the anisotropic responses in macro-scale, which are caused by their microscopic structure. In addition, the effects of micro-void distances are also evaluated in their macroscopic failure behaviors.

Key Words : Damage, Void Growth, Void Adjacent, Multi-scale Simulation, Anisotropic Material

1. はじめに

金属材料の終局状態における延性破壊を予測するために、微視組織レベルでのボイドに注目した研究が多く行われている。このような数理モデルは連続体損傷力学¹⁾と呼ばれています。微視領域におけるマイクロボイドの発生・成長・連結を延性破壊の素過程と考え、ボイド分率に代表される損傷パラメータによって材料の剛性低下を表現しようとするものである²⁾。このような延性破壊現象に対して、マルチスケールモデリング手法を適用して、延性破壊の素過程と考えられている微視領域におけるボイドの発生・成長・連結過程を直接評価し、巨視的に観察される応力・ひずみ関係との関連を定量的に評価してきた³⁾。

しかしながら、マルチスケールモデリングにおいては、想定するミクロ構造の影響を受けて、得られる巨視的応答は本質的に異方的なものになる。特に、破壊現象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、ミクロ構造の持つ本質的な異方性が結果に与える影響は決して小さくないことが予想される。

そこで、本研究では、延性破壊の素過程に対するマルチスケールモデリングにおいて、ミクロ構造の異方性が巨視的応答に与える影響を評価する。つまり、延性破壊のモデル化で用いられる応力三軸度やLodeパラメータだけではなく、この応力状態の主軸とミクロ構造の座標軸（材料異方性軸に対応）との関係を変化させることで、巨視的応答がどのように変化するかを確認する。

2. 実空間座標系への変換手法

延性破壊を議論する際には相当応力と応力三軸度、Lodeパラメータの3変数で応力状態を表現することが多く、これは主応力空間における応力状態を、主応力とは異なる独立な3成分で表現していることに対応する。本研究では、応力状態の向きとミクロ構造の座標軸との関係を

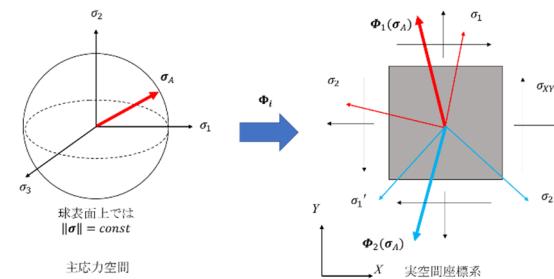


Fig. 1 Coordinate transformation from principal stress space to real space coordinate system

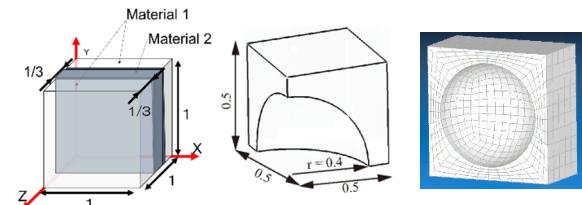


Fig. 2 Microscopic Models

主要なパラメータと定義するため、ここではこれらの座標変換則概説する。

Fig.1のような、ある種応力空間における応力状態(σ_A)を考える。これは相当応力・応力三軸度・Lodeパラメータによっても一意に定められる。このとき、主応力軸とマクロ座標系との座標変換を表す行列(P)を以下のように定義する。

$$P = R_Z(\gamma)R_Y(\beta)R_X(\alpha) \quad (1)$$

ここで、 α, β, γ はそれぞれX,Y,Z軸に対する回転角である。この座標変換行列を用いれば、主応力空間における応力状態はマクロ座標系における応力テンソル(σ^* , 対称性を考慮して独立6成分)に次のように変換する。

$$[\sigma^*] = P^{-T}[\sigma_A]P^{-1} \quad (2)$$

Table 1: Microscopic material parameters

	Material 1	Material 2
Young's modulus E [GPa]	200	400
Poisson's ratio ν	0.3	0.3
Initial yield stress σ_y [MPa]	200	∞
Hardening parameter 1 H [MPa]	100	-
Hardening parameter 2 σ_y^∞ [MPa]	800	-
Hardening parameter 3 δ	3	-

Table 2: Macroscopic Loading Parameters

	Stress Triaxiality [-]	Lode Parameter [-]
单軸引張	0.333	1.0
单軸圧縮	-0.333	-1.0
純せん断	0.000	0.0
等二軸引張	0.667	-1.0
单軸引張+せん断	0.167	0.5
单軸圧縮+せん断	-0.167	-0.5

3. 解析モデルと荷重条件

ミクロモデルには、極端な異方性を有する3層構造のモデルと、等方的であるように見える内部に球状の空孔を持つモデルを用意してFE2シミュレーションを実施する。層状モデルでは両端を弾塑性材料(Material 1)，中間層を弾性体(Material 2)，ボイドモデルの構成材料はすべて弾塑性体(Material 1)とした。それぞれの材料に定義した材料パラメータをTable.1に示す。

4. 解析結果

FE2シミュレーションにおけるマクロ応力状態はTable.2に示す6パターンを用意し、式(1)における α, β のそれぞれを $0^\circ \sim 45^\circ$ の間で変化させた。

(1) 層状モデル

FE2シミュレーションにおけるマクロ応力ノルム $\|\sigma\|$ が300[MPa]となるときのマクロひずみノルム $\|\epsilon\|$ の逆数を応力三軸度ごとにプロットしたものをFig.3に、マクロ応力状態が純せん断となるときの、ミクロ構造の変形ならびに相当塑性ひずみ分布をFig.4に示す。

載荷した応力状態は同じであるにもかかわらず、ミクロ構造が有する異方性との関係によって、異なるマクロ応答が得られていることが確認できる。Fig.4左に示すような層に平行なせん断応力が作用する場合には、ミクロ

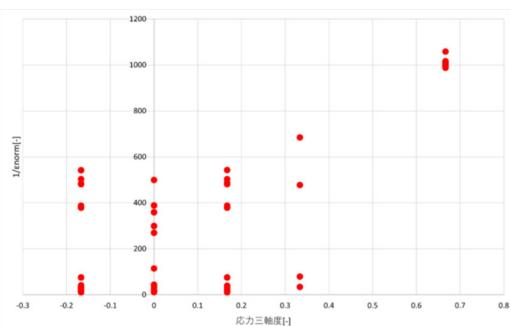


Fig. 3 Relationship between strain norm and stress triaxiality in uniaxial tension, biaxial tension, and pure shear

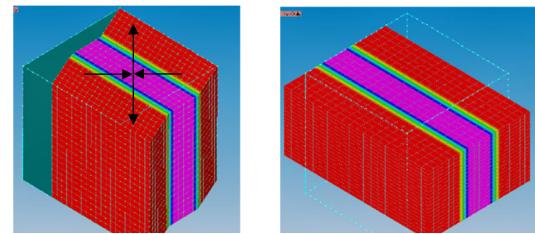


Fig. 4 Microscopic effective plastic strains in macroscopic pure shear stress state

構造においてもせん断変形が支配的になるのに対して、Fig.4右に示すような応力主軸を 45° 回転させた場合にはミクロ構造には直交軸方向の変形しか生じないことになる。これが典型的なミクロ異方性の影響であり、異方性によって巨視的に観察される強度が大きく変化するため、強度評価の際に異方性を考慮しなければならないことは明らかである。

(2) ボイドモデル

マクロ応力ノルム $\|\sigma\|$ が200[MPa]となるときのマクロひずみノルム $\|\epsilon\|$ の逆数を応力三軸度ごとにプロットしたものFig.5に、マクロ応力状態が等二軸引張となるときの、ミクロ構造の変形ならびに相当塑性ひずみ分布をFig.6に示す。

弾性応答ではほぼ等方的な応答を示す球状ボイドのミクロ構造であっても、マルチスケールモデリングにおいて周期性を仮定していることに起因して、特に塑性変形が十分に発達した載荷状態において、ミクロ構造の変形やその結果として生じるマクロ応答にも載荷方向による差

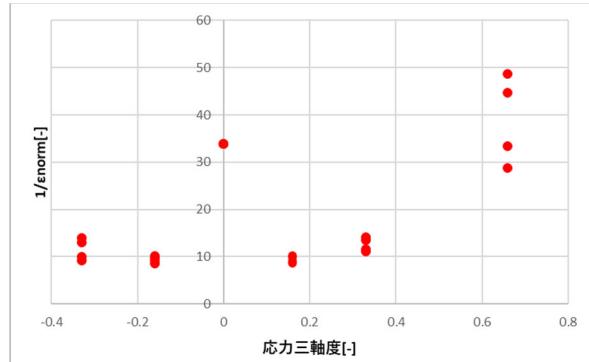


Fig. 5 Relationship between strain norm and stress triaxiality for void type micro structure

異が確認できる。ここで観察される局所的にひずみが高い場所が破壊現象の起点となることを想定すると、ここでの結果は、同じ応力状態であっても載荷方向に依存して破壊の形態が変化することを示唆するものである。こ

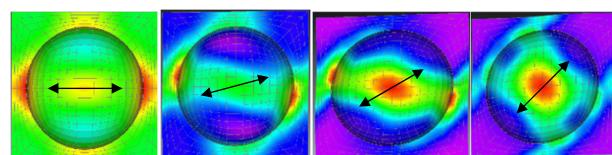


Fig. 6 Microscopic effective plastic strain in various directions of macroscopic stress (uniform tension)

こで示した例は、球形ボイドが規則的に整列した理想的なモデルに対する結果であるが、それであってもここで示したような差異が生じる点が重要である。つまり、現実に即した複雑な微視構造を想定する場合は、ボイド・介在物間の相互間距離などに起因する異方性が必ず存在するため、より載荷方向に対する依存性が強く影響することになる。

5. まとめ

マルチスケールモデリングを用いてマクロ延性破壊のメカニズムを評価するためには、応力状態だけで分類するのではなく、応力の主軸とミクロ構造との相互作用が重

要な要因であることを示した。今後は、複雑なミクロ構造内に生じる局所的な異方性を考慮したモデルを取り扱い、局所的な異方性と巨視的に観察される延性強度との関係を評価する予定である。

参考文献

- [1] 村上 澄男: 連続体損傷力学, 森北出版, 2008.
- [2] Lemaître, J.: A continuous damage mechanics model for ductile fracture, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.107, pp.83--89, 1985.