

# 圧縮負荷状態における近接 2 円孔体の弾塑性変形解析

中山 恭秀\*・峯松 順子\*\*

## FEM Analysis of Elasto-Plastic Deformation Around Two Neighboring Holes in A Solid Metal Under Compressed Load

Yasuhide Nakayama\*・Junko Minematsu\*\*

### 1. 緒 言

延性材料中において、ボイドの形状変形や成長といった過程は、材料の機械的性質に影響を与える非常に重要な問題である。こうした問題に関して、これまでも、Tvergaardら [1]~[8] が様々な研究を行っている。ボイドの形状変形においては、ボイド近傍の応力・ひずみ状態が問題となるが、これにはボイドの分布状況も大きな影響を与えることが考えられるため、ボイドが単独で存在する場合の、ボイド成長過程のみを検討するのではなく、ボイドが近接して材料中に存在している場合について、ボイドの成長、形状変形を解析・検討することも必要である。また、負荷経路によって、ボイド間の干渉やボイド成長過程が異なることも考えられ、こうした様々な要因を考慮した解析が求められる。そこで本研究では、弾塑性有限要素法解析により、延性材料中にボイドが近接して分布するソリッドモデルを設定し、これに様々な圧縮負荷経路を与えた場合の、ボイドの変形過程について検討した。

### 2. 有限要素法解析

#### 2.1 構成式

本研究では、汎用有限要素法プログラムにより弾塑性変形解析を行う。この解析では、応力速度の定式化にCauchy応力のJaumann速度を用いるが、Cauchy応力のJaumann速度  $\bar{\sigma}_{ij}$  は次式で表される [9] [10]。

$$\bar{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (1)$$

ここで  $D_{ijkl}$  は、相当応力  $\bar{\sigma}$ 、偏差応力  $\sigma'_{ij}$ 、横弾性係数  $G$ 、ポアソン比  $\nu$ 、瞬間硬化係数  $H$  を用いて次式のように表される。

$$D_{ijkl} = G \left\{ \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk} + \frac{2\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right\} - \frac{3G \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{\bar{\sigma}^2 (H'/3G + 1)} \quad (2)$$

#### 2.2 解析モデル

本研究では、材料中にボイドが近接して分布しているモデルに、圧縮負荷をかけた場合のボイド形状の変形について取り扱う。単純モデルとして、 $10 \times 10 \times 5$  (mm) の直方体試験片に  $\phi 1$  の円孔を中央に 2 つ配列させた。円孔の中心間距離は 2 mm である。この要素分割モデルを Fig.1 に示す。要素は 6 面体 8 節点アイソパラメトリック要素であり、要素数はおよそ 12,000 である。

試験片材料は工業用純アルミニウムであり、ヤング率 70 GPa、ポアソン比 0.3、加工硬化指数 0.28 とした。このモデルに、Fig.2 に示すような負荷経路、①単純圧縮、②等 2 軸圧縮、③第 2 軸 (y 軸) に負荷後第 1 軸 (x 軸) 方向に圧縮、でそれぞれ圧縮をかけ、ボイド近傍の応力・ひずみ状態について比較検討を行う。

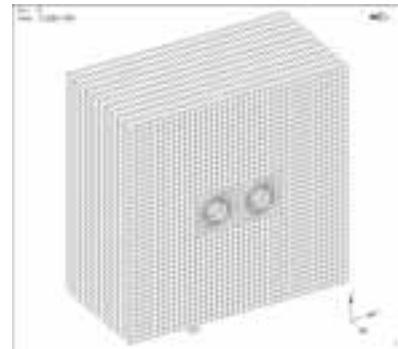


Fig. 1 Mesh data for FEM analysis

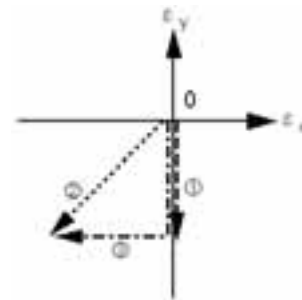


Fig. 2 Loading paths

\* 電子機械工学科

\*\* 専攻科生産システム工学専攻 1 年

### 3. 有限要素法解析結果

#### 3.1 単純圧縮 (負荷経路①)

単純圧縮負荷におけるシミュレーション結果をFig.3, 4, 5に示す。Fig.3は相当塑性ひずみ分布の解析結果であり, Fig.4は相当応力分布, Fig.5は円孔近傍の変形を拡大したものである。また, 解析モデルには,  $y$  軸方向 (紙面上下方向) に $-0.134$ の圧縮ひずみを与えた状態である。

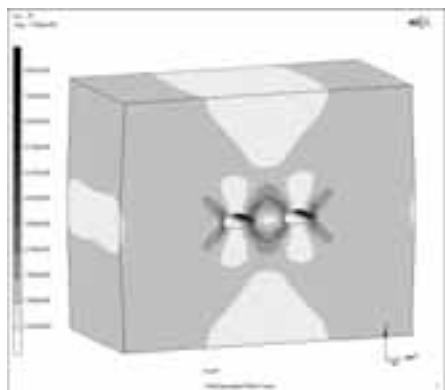


Fig. 3 Distribution of equivalent strain

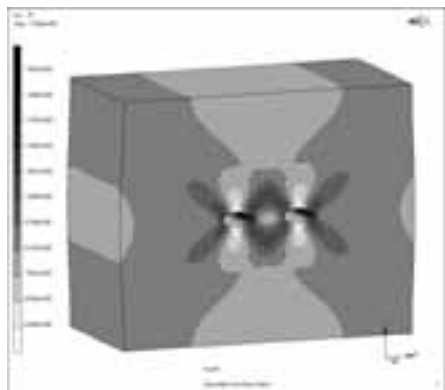


Fig. 4 Distribution of equivalent stress

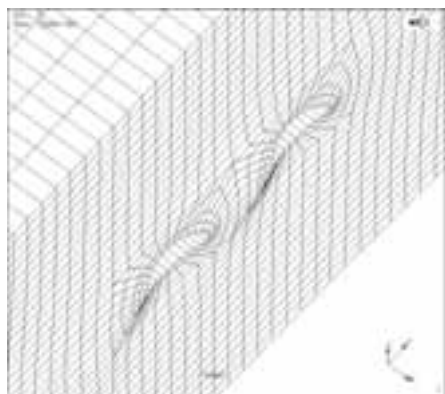


Fig. 5 Deformation of void shape

単純圧縮負荷におかれるため, モデル材料は, 自由表面において太鼓状に膨らみ, 負荷方向に円孔はつぶれ, 負荷垂直方向には円孔が伸長していることがわかる。相当応力・ひずみ分布からも, 円孔近傍の塑性変形において, 円孔相互に干渉していることも認められた。また, 相当塑性ひずみの最大値は  $\varepsilon_{max}=0.87$ , 応力の最大値は  $\sigma_{max}=145\text{MPa}$ を示し, これら, 応力・ひずみの最大値はともに, 円孔が隣接する側, かつ表面より内部において発生し, 円孔近傍においては, モデル表面が板厚方向 ( $z$  軸方向) に大きく突出していることが認められた。 $z$  軸方向における最大変位量は, 隣接する円孔がない箇所では $0.48\text{mm}$ , 隣接する側は $0.50\text{mm}$ であった。円孔形状は中央部で凹む形状自由端となり,  $z$  方向変位が,  $0.34\text{mm}$ であることから, 円孔近傍での応力状態が, 板厚がポイド近傍の塑性変形に影響していることがわかった。

#### 3.2 等2軸圧縮 (負荷経路②)

次に等2軸圧縮におけるシミュレーション結果をFig.6, 7, 8に示す。単純圧縮と同様Fig.6は相当塑性ひずみ分布, Fig.7は相当応力分布, Fig.8は円孔近傍の変形を拡大したものである。また, 解析モデルには,  $x$  軸 (紙面左右方向)・ $y$  軸方向 (紙面上下方向) に $-0.134$ の圧縮ひずみを与えた状態である。

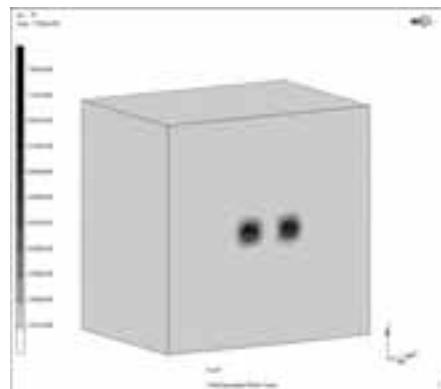


Fig. 6 Distribution of equivalent strain

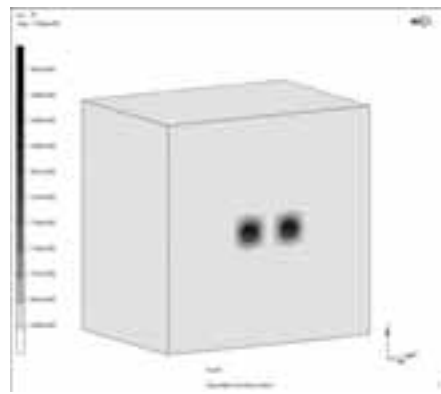


Fig. 7 Distribution of equivalent stress

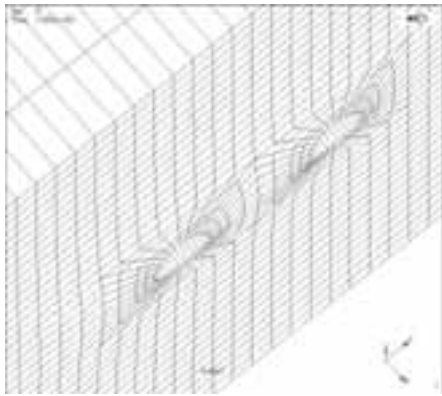


Fig. 8 Distribution of void shape

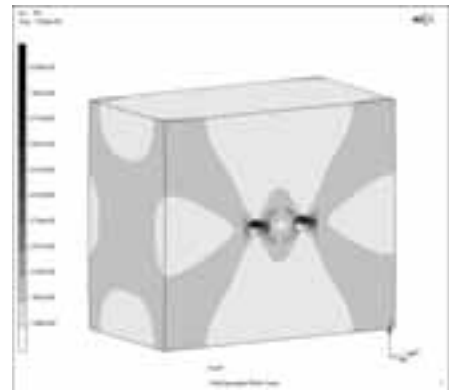


Fig. 9 Distribution of equivalent strain

等 2 軸圧縮のため、モデル材料は x 軸・y 軸方向ともに拘束され、円孔形状は、ほぼ円孔形状のまま小さくなっていることがわかる。そのため単純圧縮のときのような円孔相互の著しい干渉は認められない。相当塑性ひずみの最大値は  $\epsilon_{max}=0.77$ 、応力の最大値は  $\sigma_{max}=140\text{MPa}$  を示し、ひずみ・応力の最大値は、単純圧縮と同様な結果となり、モデル表面が板厚方向に突出していることも認められた。最大変位量は、隣接する円孔がない箇所では  $0.80\text{mm}$ 、隣接する側は  $0.83\text{mm}$  であり、自由端での z 方向変位が、 $0.72\text{mm}$  であったが、円孔形状は、前節とは異なり、中央部が凹む形状には変形していない。これは、円孔間の干渉がさほど大きくないことと、等 2 軸圧縮により z 軸方向にのみモデル材料が膨らむことによるものと考えられる。

### 3.3 第 1 軸に負荷後第 2 軸方向に圧縮 (負荷経路③)

負荷経路③の圧縮においては、まず y 軸方向にモデルを圧縮し、後に x 軸方向の圧縮を与えており、解析モデルには x 軸・y 軸方向にそれぞれ  $-0.134$  の圧縮ひずみを最終的に与えた。

まず y 軸方向に圧縮した場合のシミュレーション結果を Fig.9 に相当塑性ひずみ分布、Fig.10 に相当応力分布を示す。

負荷経路①と同様に、モデル材料は、負荷方向に円孔がつぶれ、負荷垂直方向には円孔が伸長し、円孔相互に干渉していることも認められた。しかし、x 軸方向が拘束状態となっているため太鼓状には膨らまずに負荷垂直方向 (z 軸方向) に膨らんでいることがわかる。また相当応力・ひずみ分布から、円孔近傍の塑性変形において、円孔相互に干渉していることも認められた。相当塑性ひずみの最大値は  $\epsilon_{max}=0.82$ 、応力の最大値は  $\sigma_{max}=143\text{MPa}$  となった。解析結果は、負荷経路①とほぼ同様となり、円孔近傍においての、板厚方向の突出の変位量は、隣接する円孔がない箇所では  $0.46\text{mm}$ 、隣接する側は  $0.49\text{mm}$  であり、自由端での z 方向変位が、 $0.37\text{mm}$  である突出の変位量も単純圧縮とほぼ同じ結果となった。

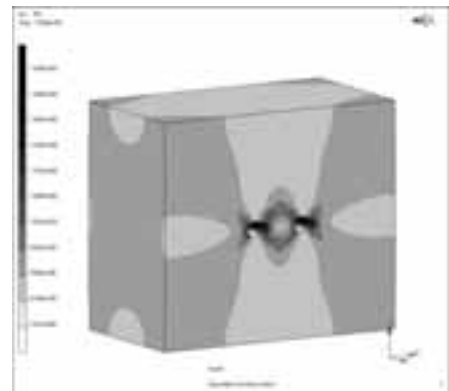


Fig.10 Distribution of equivalent stress

次に、先ほどの状態から x 軸方向に圧縮した場合の、解析結果を示す。Fig.11 は相当塑性ひずみ分布、Fig.12 は相当応力分布、Fig.13 は円孔近傍の変形を拡大したものを示す。

モデル材料の外形状は、x 軸方向の圧縮により等 2 軸圧縮と同様であるが、円孔の形状はだ円となり、等 2 軸圧縮の場合とは異なっている。

これは始めに y 軸方向に圧縮を行っているため、その負荷履歴が円孔近傍に塑性変形を起こし、加工硬化している領域として残っていることが、大きく影響していると考えられる。

このとき相当塑性ひずみの最大値は  $\epsilon_{max}=0.99$ 、応力の最大値は  $\sigma_{max}=150\text{MPa}$  を示し、本研究で行った 3 つの負荷経路で変形を与えた解析の中で、応力・ひずみの最大値が最も高い値となった。円孔近傍においての、z 軸方向の突出の変位量は、隣接する円孔がない箇所では  $0.85\text{mm}$ 、隣接する側は  $0.90\text{mm}$  であり、自由端での z 方向変位が、 $0.71\text{mm}$  であった。また、円孔形状は、中央部が凹む形状となっており、円孔間の干渉が認められ、負荷経路①ほどの大きな変位量の差となっていないものの、負荷経路②の場合より、円孔形状の z 軸方向に関する変形が大きく、負荷経路の影響が現れている。

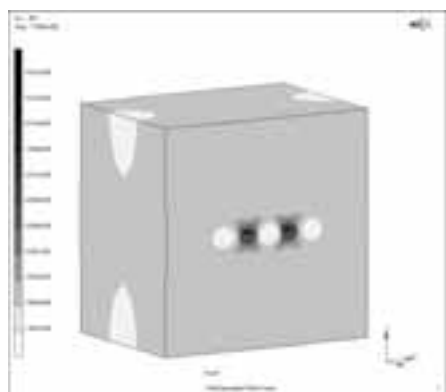


Fig.11 Distribution of equivalent strain

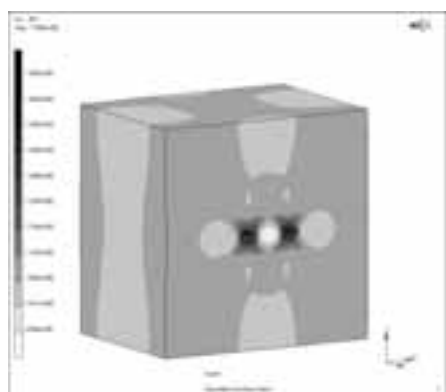


Fig.12 Distribution of equivalent stress

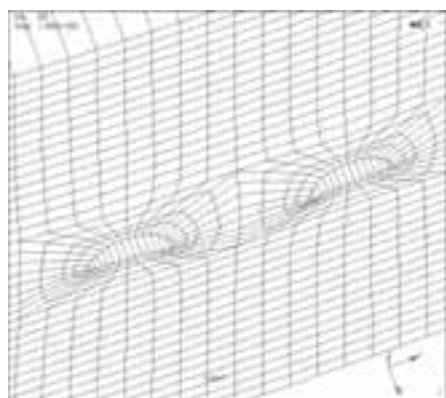


Fig.13 Distribution of void shape

#### 4 結 言

本研究において、ポイドを近接して含む延性材料において、3つの異なる負荷経路で圧縮負荷を与え、応力・ひずみ分布、およびポイド形状の変形について、有限要素法解析を行った。負荷経路により、モデル材料外形状、円孔形状の変形にそれぞれ違いが認められ、特に円孔近

傍においては、モデル表面の突出に大きな違いが認められた。負荷経路①の場合では、円孔が大きくだ円状となり、中央部が $z$ に湾曲形状に変形することがわかった。こうした傾向は、 $z$ 軸方向の変位量が大きく、円孔間の干渉が最も弱い負荷経路②では、円孔形状の変化は認められず、中央部の湾曲もほとんどみられない。負荷経路③においては、円孔は①ほど大きくはないが同様にだ円状となり、中央部も湾曲形状に変形し、円孔間の干渉が影響していることがわかる。この違いは、それぞれの $z$ 軸方向の突出の変位量からもわかる。このように負荷経路によって、その負荷が2円孔に与える影響は大きく異なり、それによって成長・変形過程も変化することがわかった。これは、負荷履歴が円孔近傍に塑性変形を起こし、加工硬化している領域が塑性変形初期段階において、どのような分布・発達をしているかが、大きく影響していると考えられる。

#### 参考文献

- [1] Viggo Tvergaard : Int. J. of Solids and Structures Vol.18 No.8 (1982), p.659.
- [2] Viggo Tvergaard : J. Mech. Phys. Solids Vol.30 No.4 (1982), p.265.
- [3] Viggo Tvergaard : Computational Mechanics 20 (1997), p.186.
- [4] Viggo Tvergaard : Int. J. of Mechanical Sciences 42 (2000), p.381.
- [5] Thomas Ørts Pedersen : Computers and Structures 67 (1998), p.279.
- [6] Yasuhide Nakayama : Key Engineering Materials Vol.233-236 (2003), p.797.
- [7] John W. Hutchinson : Numerical Solution of Nonlinear Structural Problems 7 (1973), ASME, New York.
- [8] Viggo Tvergaard : J. of Mech. Phys. Solids Vol.24 (1976), p.291.
- [9] M.Rappaz, M.Bellet and M.Deville : it Numerical Modeling in Materials Science and it Engineering (Translated by R.Snyder, Springer, Germany 2002).
- [10] 富田佳宏, 数値弾塑性力学, 養賢堂 (1990).