

東京理科大学 理工学部 正 宮本 博
 “ “ “ 菊池 正紀
 “ “ “ 学 ○大豊 浩史

1. 緒言

延性破壊は大きな塑性変形を伴う破壊機構の1つであり、その中心機構はボイドと呼ばれる微小空孔の発生、成長、合体にある。

本研究においてはGurson⁽¹⁾によって提唱され、Tvergaard⁽²⁾によって修正されたボイド材の弾塑性構成式を用いたFEM解析を行う。

従来、ボイド率のパラメータはTvergaardらが用いた値、即ち破壊時のボイド率 f_F は0.25、ボイド率臨界値 f_c は0.15を用いて解析してきた。ここでは、フラクトグラフィより岡安⁽³⁾らが求めた隣接するボイド間において合体する直前のボイド径 D_c とディンプル径 D_o を用いて f_c と f_F を決定し解析した。解析対象は2種類のAl合金7075-T6及び2017-T4とする。

2. ボイド材の弾塑性構成式及びパラメータの決定

破壊過程をFEM解析する際の弾塑性構成式について考える。Gursonが提案し、Tvergaardが修正して次式の降伏関数が導かれた。

$$\bar{\sigma} = \frac{3\sigma_m^2}{2\sigma_m^2} + 2f q_1 \cosh\left(\frac{\sigma_{KK}}{2\sigma_m}\right) - (1 + (q_1 f)^2) = 0 \quad (1)$$

ここで、 σ_{KK} は巨視的偏差応力、 σ_m は母材の相当応力、 q_1 はTvergaardにより導入された修正パラメータ、 f はボイド率である。

ボイド率の変化 $\dot{f}$ は、ボイドの発生、成長を考慮して次式を用いる。

$$\dot{f} = (\dot{f})_{\text{growth}} + (\dot{f})_{\text{nucleation}} \quad (2)$$

第1項はボイド率の成長を表す項であり、次式で表される。

$$(\dot{f})_{\text{growth}} = (1-f) \dot{\epsilon}_{KK}^p \quad (3)$$

また第2項は、ボイドの発生を表す項であり次式で与えられる。

$$(\dot{f})_{\text{nucleation}} = B \left(\dot{\sigma}_m + \frac{\dot{\sigma}_{KK}}{3} \right) + D \dot{\sigma}_m \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{A_m} \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\epsilon}_m^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right\}, \quad B = 0$$

ここで、 h_m は加工硬化率、 f_N は介在物の体積率、 s_N は標準偏差であり、 $\bar{\epsilon}_m$ は母材の相当塑性ひずみ、 ϵ_N はボイドの発生が開始するときの塑性ひずみ量である。

なおTvergaard⁽⁴⁾は、(1)式の f の代わりに次式に表される f^* を定義している。

$$f^*(f) = \begin{cases} f, & (f \leq f_c) \\ f_c + \frac{f^* - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & (f > f_c) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 f_c はこの値を境に応力伝達能力が弱まることを示すボイド率臨界値、 f_F は、材料が破壊する時のボイド率、また f^* は、Tvergaardによって導入された値でこの値を境に応力伝達能力が完全になくなる事示すボイド率臨界値である。

FEM有限変形解析に基く大変形解析を行った。用いた(1)-(5)式の構成式中のパラメータはAl合金に即して求めた。その結果については第2報で述べているのでここでは省略する。

3. FEMによるき裂進展解析

3.1 要素消去法によるき裂進展解析 き裂進展解析は、破壊条件として臨界ボイド率 f_F を用い、要素消去法により行なった。要素消去法は、Tvergaard⁽⁵⁾らが開発した方法であり、破壊条件を満たした要素については、それが受け持っていた節点力を解放し、以後その要素を消去することによりき裂進展を模擬する方法である。この方法によれば、き裂進展方向を決定する別の条件を導入することなく、屈折して進行する破壊を模擬することができる。本研究でFEM解析に使用した要素は、図1に示すCrossed-Triangle要素である。この四辺形を構成する四つの三角形要素のそれぞれでボイド率を計算し、 f_F を越えたものがあれば順次消去して行くものとした。

3.2 解析モデル 試験片形状は図2に示す1CT試験片である。図3に要素分割図を示す。き裂先端から6mmの位置に低応力で発生した直径4mmのボイドを想定する。き裂の曲率半径は2mmとする。ここで、それぞれの材料についてプロセスゾーン(強変形域)の

寸法を考えてみる。Rice⁽⁶⁾らによれば、き裂先端のプロセスゾーンの寸法はき裂先端開口変位(CTOD)の約1.9倍とされている。またCTODは2次元弾塑性破壊力学ではJ積分との間に一般に次の関係があることが知られている。

$$CTOD = \frac{\alpha J}{\sigma_{fs}} \quad (6)$$

ここで α は0.5-0.6の値を取るものされており、 σ_{fs} は流動応力である。(6)式のJ値として表1の J_{Ic} 値を、 σ_{fs} として有効降伏応力を用いてプロセスゾーンの大きさを計算してみると、7075-T6では約40 μ m、2017-T4では約60 μ mとなる。また岡安⁽³⁾らが先行ボイドの分布から推定したプロセスゾーン寸法は、7075-T6では約100 μ m、2017-T4では約120 μ mである。以上のように図3に示したボイドの配置はプロセスゾーン内に設定されたものと考えてよい。なおFEM解析は平面ひずみを仮定して行い、要素数は515、節点数は578である。

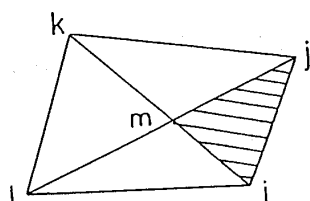


図1 Cross-Triangle要素

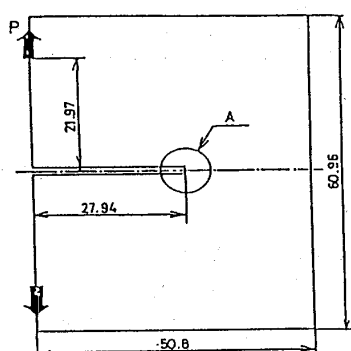
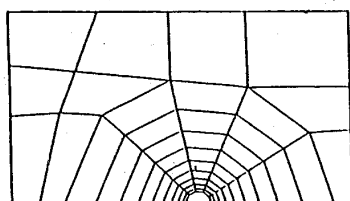
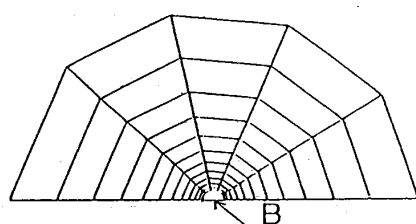


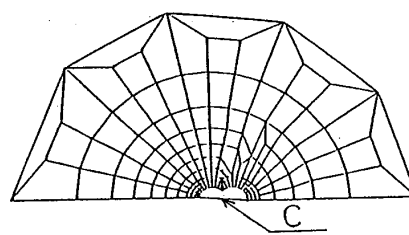
図2 試験片形状



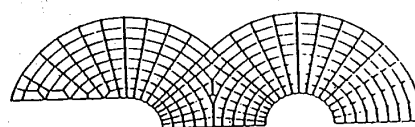
(a) 外部要素



(b) A部詳細



(c) B部詳細



(d) C部詳細

図3 要素分割図

表1 機械的性質

Material	σ_{ys} (MPa)	σ_B (MPa)	σ_{fs} (MPa)	E (GPa)	J_{Ic} (kJ/m)
2017-T4	272	529	401	71.8	22.9
7075-T6	421	529	475	71.8	16.1

σ_{ys} : 降伏応力 σ_B : 引張応力
 σ_{fs} : 有効降伏応力 $(\sigma_{ys} + \sigma_B) / 2$

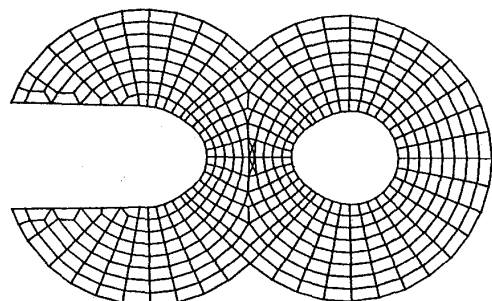
3.3 解析結果

図4(a)-(c)に7075-T6の変形図を示す。各図の変形レベルは、き裂先端から十分離れた位置に設定した経路によって積分したJ積分の値と表1の J_{Ic} との比で示すものとした。図4(a)は $J/J_{Ic}=0.024$ であり、き裂とボイドの中央部で局所破壊が起こった状態である。ここで、本研究では介在物の体積率 f_N を全要素にばらまき均等に発生させることで f_N を微視的パラメータとして

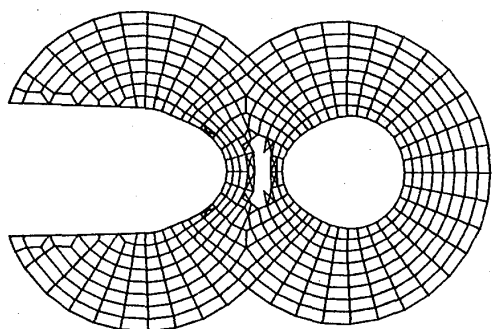
取り扱っている。この為、実際はき裂とボイドの中央部の辺りの大きな介在物から局所破壊が起きボイドが発生すると考えるべきである。図4(b)では上下1要素分ずつ破壊が進行した状態である。図4(c)ではき裂とボイドは完全に合体している。図4(b)の状態の局所化域を図5に示す。局所化域とは、均一変形状態中にすべり等の不均一変形を生じる条件を満たした領域のことである。その条件はRudnichi⁽⁷⁾らによって提案されている。き裂先端近傍は均一変形域ではないが、一応の目安としてその条件を満たす領域を局所化域とした。この一連の破壊過程は局所化域内で起こっており、局所化域と局所破壊とは密接な関係があると考えられる。

図6(a)-(b)は2017-T4の結果である。図6(a)は破壊直後の状態であり7075-T6と同様にき裂と大きなボイドの中央部で局所破壊が起こり、図6(b)に至って合体している。

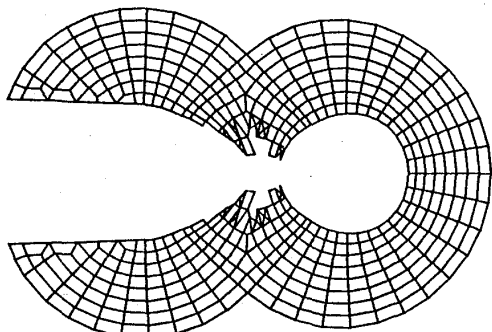
以上のように、2種類の材料ともき裂と大きなボイドの中央部において局所破壊が起こり合体に至るという延性破壊の特徴をよく表していると言えよう。破壊過程の細部での違いは、更に詳細に材料パラメータや解析モデルを検討しないと難しいものと思われる。



(a) $J/J_{1c} = 0.024$



(b) $J/J_{1c} = 0.052$



(c) $J/J_{1c} = 0.068$

図4 変形図(7075-T6)

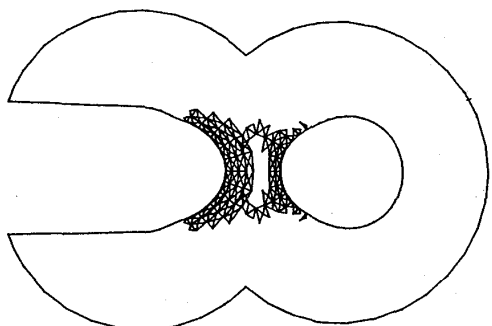
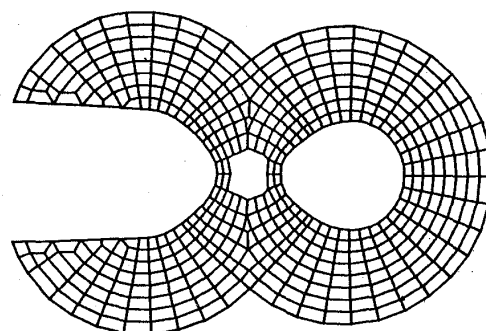
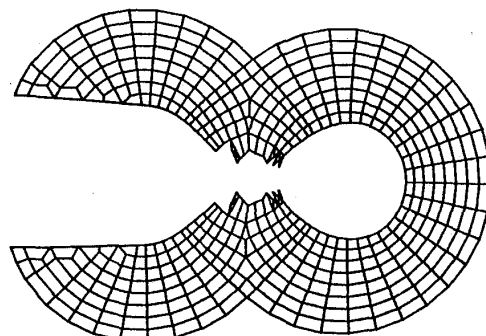


図5 局所化域(7075-T6)



(a) $J/J_{1c} = 0.037$



(b) $J/J_{1c} = 0.044$

図6 変形図(2017-T4)

4. 結言

2種類のAl合金7075-T6と2017-T4の延性破壊機構について調べ以下の結論を得た。

(1) ボイド材の構成式中のパラメータを実験結果をふまえて上記2種類の材料に即して決定した。

(2) それらをふまえてFEMによるき裂進展解析を要素消去法により行い、大きなボイドとき裂との間に生じたボイドによってき裂進展が進行するという、延性破壊に特徴的な現象を良く表現することができた。

5. 参考文献

- (1) Gurson, A. L., Trans. ASME, J. Eng. Mat. Tech., 1977, 2
- (2) Tvergaard, V., Int. J. Solids Structures Vol. 18, No. 8 (1982) 659-672
- (3) 岡安 他3名 機論 A53-488 (昭62) .732
- (4) Tvergaard, V. and Needleman, A., Acta Metall. Vol. 32, No. 1 (1984) 157-169
- (5) Tvergaard, V., J. Mech. Phys. Solids Vol. 30 (1982) 399-425
- (6) Rice, J. R. and Johnson, A. M. Inelastic Behavior of Solids, eds Kanninen et al., McGraw-Hill, (1970) 641
- (7) Rudnicki, J. W. and Rice, J. R. J. Mech. Phys. Solids, Vol. 23 (1975) 371-394