

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420747

研究課題名(和文) 微視的空孔モデルによる鍛造加工時の延性破壊予測

研究課題名(英文) Ductile fracture prediction in upset forging by a microscopic void model

研究代表者

小森 和武 (Komori, Kazutake)

大同大学・工学部・教授

研究者番号：10178379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：材料が大きな塑性変形を被った後に起こる延性破壊は、金属加工過程において厄介である。数多くの延性破壊条件が様々な材料に対して提案されている。しかしながら、全ての金属加工過程に対して適用可能な延性破壊条件は見いだされていない。延性破壊は空孔の発生、成長そして合体を通して起こるため、それは微視的な現象である。しかしながら、金属加工過程において広く使用されている延性破壊条件は巨視的な視点から導かれている。筆者は微視的な視点から空孔モデルを提案した、そのモデルでは空孔の合体がその物理的意味が明確な上界法により予測されている。本研究では、据込み鍛造時の延性破壊がその微視的空孔モデルにより予測された。

研究成果の概要(英文)：Ductile fracture, which occurs when a material is subjected to large plastic deformation, is troublesome during metal-forming processes. Numerous ductile fracture criteria have been proposed for various materials. However, a ductile fracture criterion that is applicable to all metal-forming processes has not been found. Ductile fracture is a microscopic phenomenon because it occurs through nucleation, growth, and coalescence of voids. However, ductile fracture criteria that are widely used for metal-forming processes are derived from a macroscopic viewpoint. The author proposed a void model from a microscopic viewpoint, in which void coalescence is predicted by the upper bound theory whose physical meaning is definite. In this study, ductile fracture in upset forging was predicted by the microscopic void model.

研究分野：塑性力学, 破壊力学

キーワード：延性破壊 微視的空孔モデル 鍛造加工

1. 研究開始当初の背景

(1) 塑性加工では、生産性を向上するために、材料の成形限界近くまで材料を加工する。ここで、成形限界は主に材料の破壊により決定される。そこで、今までに様々な破壊を予測する式、すなわち破壊条件式が提案されている。しかし、未だにあらゆる塑性加工において適用可能な破壊条件式は無い。

(2) 研究代表者は、板材加工の一種である穴拡げ加工において、様々な破壊条件式を評価した。すなわちまず、板の穴拡げ加工の実験を行って、穴縁が破壊する時の穴拡げ率を求めた。次に、塑性加工の分野でよく知られた破壊条件式及び研究代表者が提案している微視的空孔モデルを使って、板の穴拡げ加工の解析を行って、穴縁が破壊する時の穴拡げ率を求めた。

(3) 図 1 に板に加えられた予ひずみが、穴拡げ率に及ぼす影響を示す。実験では、予ひずみの増加と共に穴拡げ率が減少した。まず、Cockcroft and Latham の破壊条件式、Brozzo らの破壊条件式、そして Oyane の破壊条件式では、予ひずみは穴拡げ率に影響を及ぼさなかった。また、Freudenthal の破壊条件式における予ひずみが穴拡げ率に及ぼす影響は、実験におけるその影響よりも大きかった。一方、研究代表者が提案している微視的空孔モデルでは、解析結果は実験結果と概ね一致した。

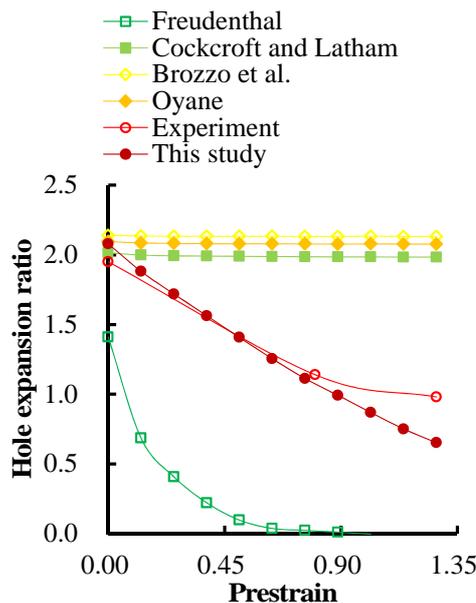


図 1 予ひずみが穴拡げ率に及ぼす影響

(4) 以上より、塑性加工の分野でよく知られた破壊条件式により破壊を予測することは、必ずしも適切ではない。そこで、延性破壊の本質である空孔の合体により破壊を予測すること、を試みる価値がある。

2. 研究の目的

(1) 塑性加工は板材の塑性加工と塊材の塑性加工に大別される。研究代表者は、板材の塑性加工において、微視的空孔モデルの妥当性を示した。代表的な塊材の塑性加工は鍛造加工であり、代表的な鍛造加工は円柱の据込み加工である。

(2) そこで、円柱の据込み加工において、微視的空孔モデルの妥当性を示す。まず、初年度に圧縮予ひずみが材料破壊に及ぼす影響を実験より求める。次に、第二年度に引張予ひずみが材料破壊に及ぼす影響を実験より求める。そして、最終年度に解析結果と実験結果の比較より、研究代表者が提案している微視的空孔モデルの妥当性を示す。

(3) 図 1 においては、板材の塑性加工において、微視的空孔モデルによる解析結果は、実験結果と概ね一致した。そこで、本研究においては、塊材の塑性加工において、微視的空孔モデルによる解析結果は、実験結果と概ね一致する、と予想される。以上より、あらゆる塑性加工において、微視的空孔モデルによる解析結果は、実験結果と概ね一致する、と予想される。すなわち、本研究により、あらゆる塑性加工において、微視的空孔モデルにより延性破壊を予測することが可能になる。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者が行った穴拡げ加工の解析において、次のことが明らかになった。すなわち、従来の破壊条件式では、材料に与えられた予ひずみが材料破壊に及ぼす影響が求まらない。一方、研究代表者が提案している微視的空孔モデルでは、材料に与えられた予ひずみが材料破壊に及ぼす影響が求まる。そこで、微視的空孔モデルの妥当性を明らかにするために、予ひずみが与えられた円柱の据込み加工の実験を行う。

(2) 円柱に予ひずみを与える場合、引張の予ひずみを与える場合と、圧縮の予ひずみを与える場合がある。ここで、引張の予ひずみを与えるために引抜き加工を行うが、圧縮の予ひずみを与えるために据込み加工を行う。すなわち、引張の予ひずみを与える加工法と、圧縮の予ひずみを与える加工法は異なる。そこで、初年度には据込み加工により、円柱に圧縮の予ひずみを与える。

(3) 当然のことながら、予ひずみの無い試験片の据込み加工もまた行う。そして、予ひずみが破壊時のひずみに及ぼす影響を求める。

(4) 研究代表者が提案している微視的空孔モデルでは、材料に与えられた予ひずみが材料破壊に及ぼす影響が求まる。そこで、予ひずみが与えられた円柱の据込み加工の実験を行う。円柱に予ひずみを与える場合、引張

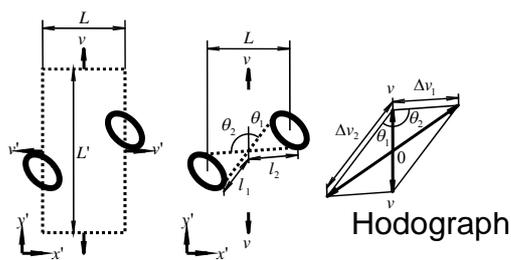
の予ひずみを与える場合と、圧縮の予ひずみを与える場合がある。初年度には据込み加工により、円柱に圧縮の予ひずみを与えた。そこで、第二年度には引抜き加工により、円柱に引張の予ひずみを与える。

(5) 以下、昨年度と同様にして据込み加工の実験を行う。また、予ひずみの無い試験片の据込み加工もまた行う。そして、予ひずみが破壊時のひずみに及ぼす影響を求める。

(6) 研究代表者が提案している微視的空孔モデルにより、円柱の据込み加工の解析を行う。そして、予ひずみが破壊時のひずみに及ぼす影響を求める。ここで、微視的空孔モデルは既に確立されている。そして、解析結果と実験結果の比較より、研究代表者が提案している微視的空孔モデルの妥当性を示す。

#### 4. 研究成果

(1) 研究代表者の提案している微視的空孔モデルにおける空孔の合体条件のみを説明する。図2に微視的解析における変形様式を示す。材料はまず均一に変形すると仮定される。図2(a)に均一変形のための変形様式を示す。 $y'$ 方向が最大主応力の方向に、そして $x'$ 方向が最小主応力の方向に一致させられる。降伏条件及び空孔体積率 $f$ を使えば、均一変形による材料内部のエネルギー消散率は $(1-f)4kvL$ になる。ここで $k$ は母材のせん断降伏応力を示す。



(a) 均一変形 (b) 内部括れ  
図2 微視的解析における変形様式

次に材料が不均一に変形すると仮定される、すなわち空孔が内部括れにより合体すると仮定される。図2(b)は内部括れのための変形様式を示す。二つの隣接する空孔が内部括れによって合体する時の速度不連続線上のエネルギー消散率は $4kv(l_1 \sin \theta_2 + l_2 \sin \theta_1) / \sin(\theta_1 + \theta_2)$ になる。内部括れのエネルギー消散率が均一変形のエネルギー消散率よりも小さい時に空孔が合体すると仮定される。従って、空孔の合体条件は次式で与えられる、

$$(1-f)L \geq \frac{l_1 \sin \theta_2 + l_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

(2) 具体的な実験方法を説明する。焼鈍された直径 13mm の機械構造用炭素鋼を用いた。

まず、多数のダイスを使用して多数回引抜くことにより、材料に引抜きによる予ひずみを与えた。ここで、様々な引抜き回数の引抜きを行うことにより、材料に様々な大きさの予ひずみを与えた。ただし、内径が 5.0mm 以下のダイスを引抜くために、試験片先端に先付け部を作ることは危険であったため、材料直径が 5.0mm になるまで引き抜いた。なお、ダイス全角は 15 度であり、一回の引抜きにおける試験片の断面減少率は 20%であった。そして、偶数回引き抜いた後の材料から試験片を作成した。次に、引き抜かれた材料を据込み加工した。ここで、据込み加工における試験片の(高さ/直径)を 1.0 から 2.5 の間で変化させた。そして、材料が破壊した時の、材料の円周方向ひずみ及び軸方向ひずみを格子法によるひずみ解析から求めた。更に、これらのひずみに引抜きによる予ひずみを加算して、材料破壊時の軸方向ひずみ及び円周方向ひずみを計算した。そして、これらの破壊時のひずみから成形限界図を作成した。

(3) 図3に実験より得られた S15C の成形限界図を示す。予ひずみの増加と共に、材料破壊時の軸方向ひずみは大きくなり、円周方向ひずみは小さくなった。

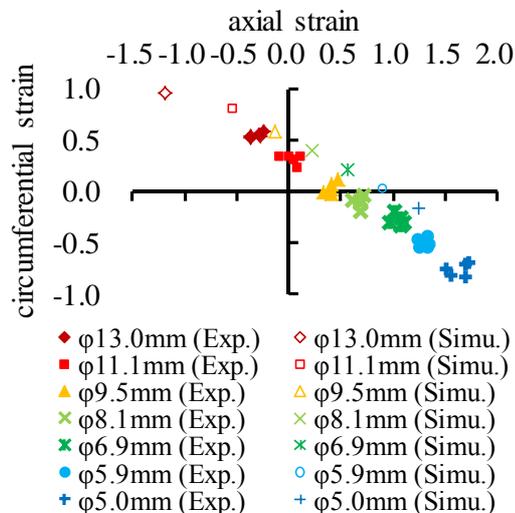


図3 成形限界線図(S15C, 単軸引張試験)

(4) 図3に解析より得られた成形限界図を補足する。ここで、据込み加工における試験片の(高さ/直径)を 1.0 にした。予ひずみの増加と共に、材料破壊時の軸方向ひずみは大きくなり、円周方向ひずみは小さくなった。しかしながら、解析結果は実験結果と大きく異なる。ここで、予ひずみ無しの解析結果が、予ひずみ無しの実験結果に近づけば、解析結果は実験結果とより一致すると予想される。

(5) (4)において予ひずみ無しの解析結果が予ひずみ無しの実験結果と異なることを全く想定していなかった。この相違の原因が解析法にあると考えて、相当量の試行錯誤の解析を行った。しかしながら、この相違は全く解消されなかった。

(6) (4)では、丸棒の単軸引張試験において、解析より得られた絞り値が実験より求めた絞り値に一致するように、解析における材料定数が定められた。この丸棒の単軸引張試験により解析における材料定数を求めることに、何の疑いも抱かなかった。しかしながら、このことに問題があった。

(7) 図4に実験より得られたS55Cの成形限界図を示す。予ひずみの増加と共に、材料破壊時の軸方向ひずみは大きくなり、円周方向ひずみは小さくなった。

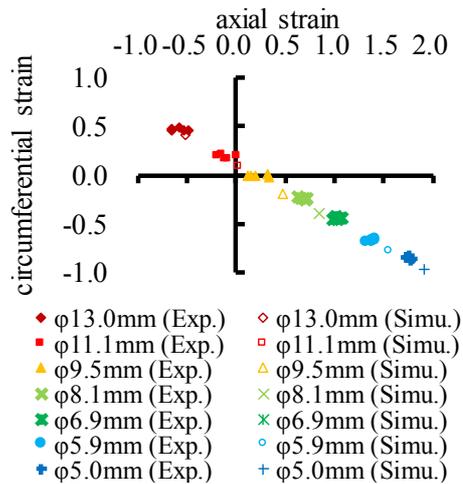


図4 成形限界線図(S55C,平面歪引張試験)

(8) 図4に解析より得られた成形限界図を補足する。ここで、据込み加工における試験片の(高さ/直径)を1.0にした。予ひずみの増加と共に、材料破壊時の軸方向ひずみは大きくなり、円周方向ひずみは小さくなった。また、解析結果は実験結果と概ね一致した。

(9) (8)では、特殊な加工が施された丸棒の平面ひずみ引張試験において、解析より得られた絞り値が実験より求めた絞り値に一致するように、解析における材料定数が定められた。

(10)単軸引張試験ではなく、平面ひずみ引張試験により解析における材料定数を求めることによって、解析結果が実験結果に大幅に近づいた。このことは、延性破壊現象を明らかにするために非常に重要であると考えられる。そのため、現在も本研究を継続中である。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計10件)

Kazutake Komori, Predicting ductile fracture in ferrous and nonferrous metals during upset forging using an ellipsoidal void model, 10th European Solid Mechanics Conference, 2018.

小森 和武, 楕円空孔モデルによる据込み加工時の延性破壊予測, 日本塑性加工学会塑性加工春季講演会, 2018.

小森 和武, 楕円空孔モデルによる据込み加工時の延性破壊予測, 日本鉄鋼協会春季講演大会, 2018.

Kazutake Komori, Predicting ductile fracture in ferrous and nonferrous metals during upset forging using an ellipsoidal void model, International Conference on Fracture, 2017.

小森 和武, 楕円空孔モデルによる据込み加工時の延性破壊評価, 日本機械学会計算力学講演会, 2016.

小森 和武, 楕円空孔モデルによる据込み加工時の材料破壊予測, 日本鉄鋼協会秋季講演大会, 2016.

小森 和武, 楕円空孔モデルによる据込み加工時の延性破壊予測, 日本塑性加工学会塑性加工連合講演会, 2016.

Kazutake Komori, Predicting ductile fracture in ferrous and nonferrous metals during upset forging using an ellipsoidal void model, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 2016.

小森 和武, 楕円空孔モデルによる据込み加工時の延性破壊予測, 日本塑性加工学会塑性加工春季講演会, 2016.

小森 和武, 予歪みを与えられた棒線の据込み加工による材料破壊評価, 日本鉄鋼協会春季講演大会, 2016.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小森 和武 (KOMORI, Kazutake)

大同大学・工学部・教授

研究者番号: 10178379