

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560102

研究課題名 (和文) 薄板材料の塑性加工における材料破断 (材料分離) の解析

研究課題名 (英文) Analysis of Material Fracture (Material Separation)  
in Sheet Metal Forming

研究代表者

小森 和武 (KOMORI KAZUTAKE)

大同工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10178379

研究成果の概要：材料に力を加えた後に材料から力を取り除く。材料が元の形に戻らないという材料の性質を塑性と呼ぶ。そして、材料の塑性を利用して様々な形状の物を作ることを塑性加工と呼ぶ。塑性加工において、材料がどのような条件で破壊するかを知ることは重要である。塑性加工は、塊材料の塑性加工と薄板材料の塑性加工に大別される。我々は塊材料の塑性加工における材料破壊を、実験と我々の提案したモデルによる解析より明らかにした。本研究では、薄板材料の塑性加工における材料破壊を、実験と我々の提案したモデルによる解析より明らかにすることを試みた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：塑性力学, 塑性加工, 延性破壊

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 材料が大きな塑性変形を受けてから破壊する現象、すなわち延性破壊は非常に厄介であり、従来から数多くの延性破壊に関する研究が行われている。しかし、「どのような条件が満足された時に材料が破壊するか」ということでさえ、未だに明らかにされていない。そこで、研究代表者は有限要素法 (FEM) 等による計算結果と実験結果の比較より、延性破壊現象を明らかにしてきている。これらの研究成果をもとに、研究代表者は延性破壊に関する研究をより大きく発展させたい。

(2) 延性破壊はボイド (空孔) の発生、成長そして合体により起こると言われている。従来、例えば Thomason モデル (内部くびれモデル) によりボイドの合体の解析が行われている。しかし、主応力方向及び主ひずみ方向が材料の変形と共に変化する塑性加工過程では、Thomason モデルを用いてボイドの合体の解析を行うことはできない。そこで研究代表者は、改良された Thomason モデルを提案した。改良された Thomason モデルを用いれば、主応力方向及び主ひずみ方向が材料の変形と共に変化する塑性加工過程においても、ボイ

ドの合体の解析を行うことができる。研究代表者はまた、無次元化された静水圧応力がある値以上の場合にボイドが発生するというモデルを提案した。以後、研究代表者が提案した、ボイドの発生、成長そして合体を表すモデルを、微視的(破壊評価)モデルと呼ぶ。

## 2. 研究の目的

(1) 塑性加工は、バルク(塊)材料の塑性加工と、非バルク材料である薄板材料の塑性加工に、大別される。研究代表者は今まで、圧延加工、引抜き加工そしてせん断加工といった、バルク(塊)材料の塑性加工における延性破壊に関する研究を行ってきた。そして、今までの研究により、微視的(破壊評価)モデルが、引抜き加工やせん断加工といった、バルク(塊)材料の塑性加工において延性破壊を評価するために有効である、ことが明らかになった。

(2) 本研究では、バルク(塊)材料の塑性加工において延性破壊を評価するために有効であった微視的(破壊評価)モデルが、非バルク材料である薄板材料の塑性加工において延性破壊を評価するために有効である、ことを明らかにしたい。言い換えると本研究により、微視的(破壊評価)モデルがあらゆる塑性加工において延性破壊を評価するために有効である、ことを明らかにしたい。

## 3. 研究の方法

(1) 薄板材料の塑性加工において延性破壊を評価するためには、従来穴拡げ試験が広く行われている。穴拡げ試験は円形に打ち抜いた穴を円錐ポンチあるいは球頭ポンチで拡げる試験である。そして、穴縁部の材料が破壊した時の穴の直径を $d$ 、打ち抜いた穴の直径を $d_0$ とすれば、穴拡げ率は、 $(d-d_0)/d_0$ で与えられる。この穴拡げ率が材料の極限変形能と密接な関係にあると言われている。

(2) 現在、JT トーシ(株)製の深絞り試験機を保有する。そして、その試験機を用いて円筒深絞り実験を行える。しかし、その試験機を用いて穴拡げ試験を行うことはできない。そこで、穴拡げ試験を行うための工具を製作した。一般に穴拡げ試験には、円錐ポンチあるいは球頭ポンチが用いられる。ここで、ポンチの先端形状がより鋭くなく鈍くなるほど、穴縁部以外の材料が破壊し易く、穴縁部の材料が破壊し難くなる。そこで、常に穴縁部の材料が破壊するように、先端角度が45度である円錐ポンチを製作した。図1に製作した円錐ポンチを示す。

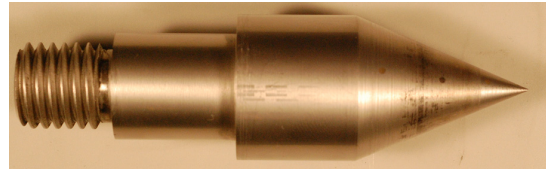


図1 円錐ポンチ

(3) 穴拡げ試験において得られる情報は、穴拡げ率のみである。すなわち、穴拡げ試験においては、一つの材料に対して一つの材料破壊に関する情報しか得られない。一般に、材料に予め与えられたひずみすなわち予ひずみは、材料破壊に大きな影響を及ぼすことが知られている。そこで、保有する圧延機を用いて材料に予ひずみを与えた。そして、予ひずみを与えられた材料の穴拡げ試験を行うことにより、予ひずみが穴拡げ率に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

(4) 研究代表者が行った、バルク(塊)材料の塑性加工における微視的(破壊評価)モデルを用いた研究では、予ひずみを考慮する必要が無かった。そこで、上記の微視的(破壊評価)モデルに予ひずみを考慮する方法を考えた。そして、予ひずみを考慮した微視的(破壊評価)モデルを用いて、穴拡げ試験の数値シミュレーションを行い、考えた予ひずみの導入方法を検証した。

## 4. 研究成果

(1) 図2に穴拡げ試験(バーリング試験)前後の試験片形状の一例を示す。ここで、試験前の試験片外径は85mm、試験片内径は9mmであり、ボール盤を使って試験片に穴を空けた。また、図1に示した円錐ポンチを使って穴拡げ試験を行った。

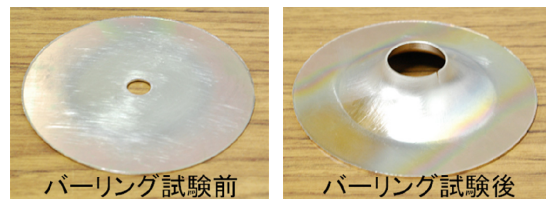


図2 試験片形状

(2) 図3に一実験条件における穴拡げ率の一例を示す。ここで、材料はアルミニウム合金A5052である。また、ボール盤のドリルを使って、10枚程度重ねられた試験片に穴を空けた。すなわち、1回のボール盤の使用により、約10枚の試験片を作成した。図より、穴拡げ率は試験片番号に依存する。また、各試験片の穴拡げ率は大きくばらつく。そこで、一実験条件における穴拡げ率を、30枚~50枚の試験片の穴拡げ率の平均値にした。

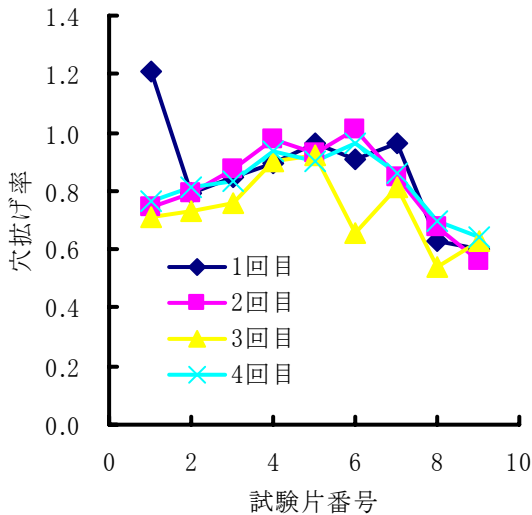


図3 一実験条件における穴拡げ率

(3) 図4に冷間圧延軟鋼板 SPCC 及び熱間圧延軟鋼板 SPHC における穴拡げ率に及ぼす予ひずみの影響を示す。まず、板厚が1mm, 2mm, 3mmのSPCCを購入した。そして、板厚が1mmのSPCCを得るために実験室で圧延を行った。さらに、その板厚が1mmのSPCCを使って穴拡げ試験を行った。同様に、板厚が1.6mm, 2.3mm, 3.2mmのSPHCを購入した。そして、板厚が1.6mmのSPHCを得るために実験室で圧延を行った。さらに、その板厚が1.6mmのSPHCを使って穴拡げ試験を行った。ここで、図中の平行または垂直は、購入した材料の圧延方向と実験室で行った圧延の圧延方向が平行または垂直であることを意味する。図より、予ひずみの増加と共に穴拡げ率は減少した。また図より、予ひずみの大きさが等しい時、購入材料の圧延方向と実験室圧延の圧延方向が平行の場合の穴拡げ率は、それが垂直の場合の穴拡げ率よりも、若干小さかった。

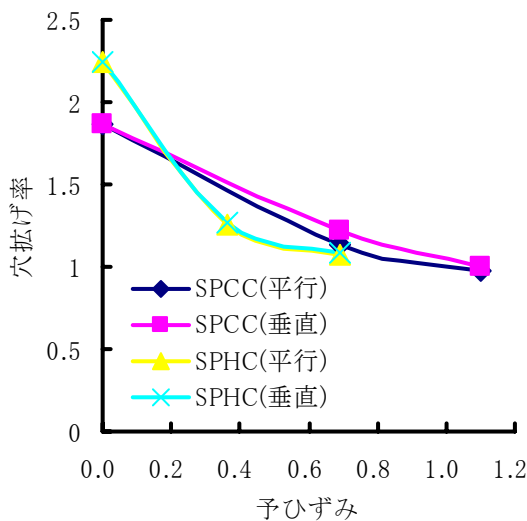


図4 穴拡げ率に及ぼす予ひずみの影響 (一般鋼)

(4) 図5にオーステナイト系ステンレス鋼板 SUS304 及びフェライト系ステンレス鋼板 SUS430 における穴拡げ率に及ぼす予ひずみの影響を示す。まず、板厚が1mm, 1.5mm, 2mmのSUS304及びSUS430を購入した。そして、板厚が1mmのSUS304及びSUS430を得るために実験室で圧延を行った。さらに、その板厚が1mmのSUS304及びSUS430を使って穴拡げ試験を行った。図より、予ひずみの増加と共に穴拡げ率は減少した。また図より、予ひずみの大きさが等しい時、購入材料の圧延方向と実験室圧延の圧延方向が平行の場合の穴拡げ率は、それが垂直の場合の穴拡げ率よりも、小さかった。

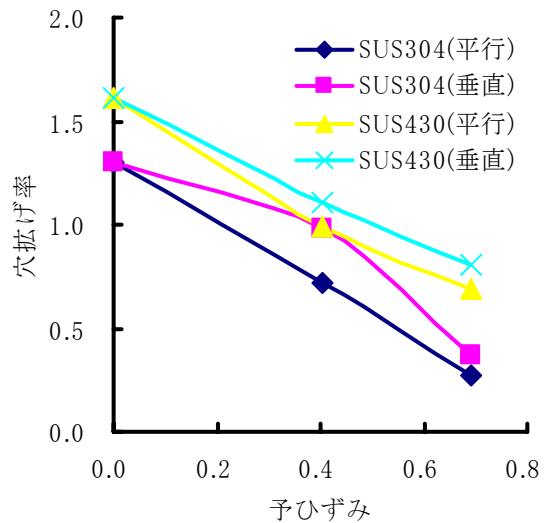


図5 穴拡げ率に及ぼす予ひずみの影響 (ステンレス鋼)

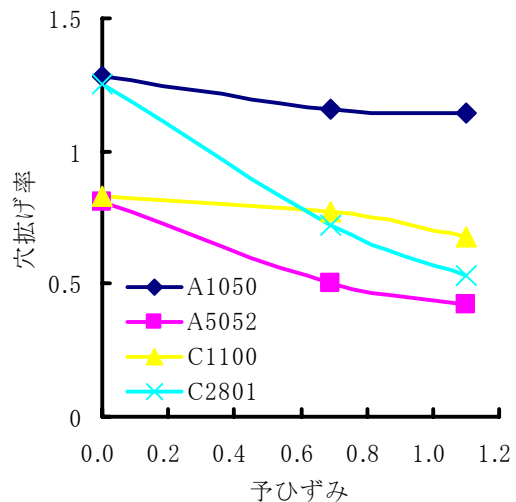


図6 穴拡げ率に及ぼす予ひずみの影響 (非鉄金属)

(5) 図6に純アルミニウム A1050, アルミニウム合金 A5052, タフピッチ銅 C1100, 六四黄銅 C2801 における穴拡げ率に及ぼす予ひずみの影響を示す。まず、板厚が1mm, 2mm, 3mm

の A1050, A5052, C1100, C2801 を購入して焼鈍した。そして、板厚が 1mm の A1050, A5052, C1100, C2801 を得るために実験室で圧延を行った。さらに、その板厚が 1mm の A1050, A5052, C1100, C2801 を使って穴抜き試験を行った。図より、予ひずみの増加と共に穴抜き率は減少した。また図より、予ひずみが穴抜き率に及ぼす影響は材料に依存した。

(6) 穴抜き試験の解析を行う前に、引張試験の実験及び解析を行った。対象とした材料は SPCC である。まず、短冊状の試験片を用いて引張試験の実験を行い、SPCC の応力-ひずみ関係式を求めた。次に、平面ひずみ引張試験片を用いて、実験及び解析を行った。そして、解析より得られる材料の絞りが実験より得られた材料の絞りと一致するように、空孔の体積変化率に関する発展方程式の中の材料定数を求めた。この材料定数の値を、次に示す穴抜き試験の解析で利用する。

(7) 図 7 に穴抜き試験における解析開始時と解析終了時の要素分割を示す。ここで、予ひずみは零である。また、穴縁部の材料が破壊した。

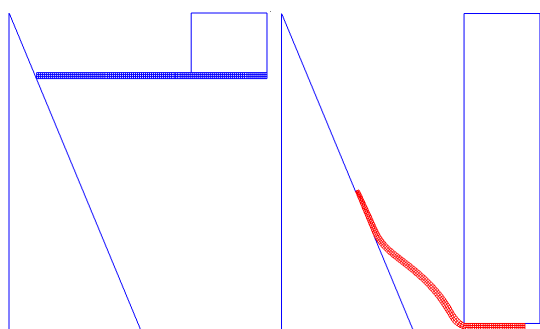


図 7 穴抜き試験における要素分割

(8) 図 8 に穴抜き率に及ぼす予ひずみの影響を示す。研究代表者が提案した微視的(破壊評価)モデルにおいて、予ひずみは考慮されていない。そこで本研究において初めて、微視的(破壊評価)モデルにおいて予ひずみが考慮される。本研究では試行的に、次の二種類の考えにより予ひずみが考慮された。

- ①加工前のポイド形状を予ひずみに適合させる(図において加工前と表記)。
- ②ポイド発生時のポイド形状を予ひずみに適合させる(図において発生時と表記)。

図より、①の考えによる予ひずみが穴抜き率に及ぼす影響は、実験におけるそれよりも小さい。一方、②の考えによる予ひずみが穴抜き率に及ぼす影響は、実験におけるそれよりも大きい。

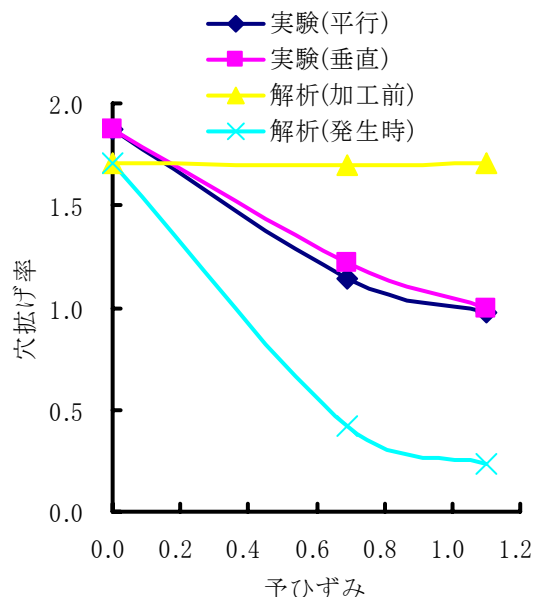


図 8 穴抜き率に及ぼす予ひずみの影響

(9) ①, ②では微視的(破壊評価)モデルにおいてポイド形状を予ひずみに適合させた。一方、微視的(破壊評価)モデルにおいてポイド配置を予ひずみに適合させるという考えもある。どの考えを採用するかを最終的に決定するために、更なる検討が必要である。

(10) 卒業研究として穴抜き実験を行った、本学卒業生の出口君, 仲川君, 角君, 檜西君に感謝する。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

①小森和武, 板成形における延性破壊の評価のためのポイドモデルの提案と利用, 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 365-366, 2009, 査読無

[学会発表] (計 1 件)

①Kazutake Komori, Proposal and Use of a Void Model for the Evaluation of Ductile Fracture in Sheet Metal Forming, 8th World Congress on Computational Mechanics & 5th European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering, 4 July 2008, Venice, Italy

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小森 和武 (KOMORI KAZUTAKE)

大同工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 10178379