

塑性加工工程の最適化システムの開発 ～素材の破壊を考慮した押出し・鍛造工程の最適化～

京都大学 工学部 機械工学科

教授 島 進

(昭和62年度研究開発助成 AF - 87009)

研究の目標

－破壊発生の予測システムの構築－

冷間における押出し鍛造においては素材の破壊が問題となる。そこで素材が破壊することなく加工されるための工程および素材形状が選択されねばならない。本研究では押出し・鍛造等の加工において破壊を防止するためのシステムを開発することを目的とする。

鋼の冷間鍛造や押出しは通常数工程に分けて行われ最終的な形状を得ている。これは工具への過負荷をさけたり、或は被加工材の破壊などを防止するためである。このような加工工程における工具の形状あるいは変形量の与え方は上述のような点を加味しつつ生産効率が高くなるよう最適になされる必要がある。そのためには実際の工程での実験データの蓄積は不可欠であるが、一方において力学的な解析も非常に重要である。

工具にかかる負荷については塑性力学に基いた各種解析手法によってかなり精確に見積ることが可能になっている。一方被加工材の破壊については、破壊の条件式がいくつか提案されているものの、充分応用されておらず、現在のところ経験的な対策がとられている程度である。

本研究では破壊の解析のための上界法を新たに考案し、これによって工具への負荷のみならず被加工材の破壊発生の有無をも考慮した加工工程の最適化システムを構築しようとするものである。

上界法による破壊の解析はAvitzurによる押出し加工での中心割れに関するものがある。しかしこの方法には材料の破壊に関する材料定数が含ま

れておらず、したがって実際の材料の押出し加工には適用できない。そこで本研究では圧縮性塑性理論を基礎とし、過去の破壊条件式からヒントを得て、破壊に関する材料定数を含みうる上界解析法を考案し、工程の最適化に応用しようとするものである。

実際の研究課題は以下の通りである。

- 1) 軸対象変形に対する速度場を開発すること。
- 2) 上界定理の中に含まれる材料定数を決定すること。
- 3) 本法を用いて破壊を防止する最適な加工工程を見いだすためのソフトウェアを開発すること。

1) に関しては、基礎的な実験は当研究室で行い、実際の押出し・鍛造等におけるデータについては企業から提供を受けることにしている。実際に実験結果と良く合う解析結果が得られれば、3)のソフトウェアの開発は比較的容易であり、それほど問題はないと考えられる。

以上新たに考案した延性破壊を解析し得る上界法を応用することによって、加工中の破壊を防止する最適な加工工程の設計を支援するための破壊発生を予測するシステムを構築する事を目的とする。

研究の成果

本研究では、塑性変形の進行と共に発生する破壊を上界法によって予測することが基本となる。上界法では材料内部に可容速度場を考えるが、破壊を取り扱うために、その中に速度不連続が存在

する場合について考えることになる。その際破壊は材料内の考えている速度不連続面において、その面に垂直な方向の速度不連続量が存在する場合に生じると考える。これを材料に圧縮性をわずかに考慮することによって、近似的に非圧縮性材料の破壊を圧縮性材料の塑性変形に対する構成式を用いて記述する。こうすることによって、以下に示すように破壊発生を予測することが可能となる。

破壊を取り扱い得る式（降伏関数）として

$$F = \frac{3}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' + \left(\frac{\sigma_m + a}{f} \right)^2 - \sigma^2 \quad (1)$$

を考え、この式を基礎として、破壊を記述し得る上界定理を導いた。

破壊を評価するために、式(1)に材料定数 f, a を導入してある。このうちまず f については次のように決定した。過去の実験結果からもわかるとおり、破壊の発生は破壊ひずみに至るまでの平均応力の履歴に大きく左右される。そこで f は σ_m の履歴の関数とし、また相当ひずみの関数でもあるといえるので、これらのことから f を次に示すように与えた。

$$f = f_0 (1 - C_1 \bar{\epsilon}) (1 - C_2 \kappa) \quad (2)$$

ここで C_1, C_2 は定数、 κ は過去の σ_m の履歴を表し

$$\kappa = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_m}{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

で計算されるとする。

つぎに a については、 a がひずみに比例する（その比例係数を κ ）とし、 κ を材料による定数とする。このようにすれば a は相当ひずみが大きくなるにつれて大きくなっていくが、相当ひずみが0のとき、圧縮の場合と引張りの場合で降伏応力が等しい（すなわち等方性ならば）

$$a = \kappa \bar{\epsilon} \quad \kappa: \text{材料定数} \quad (3)$$

となる。

以上式(2),(3)を用いれば、一般に延性破壊を記述できる。据込み加工、及び多段押出しにおける解析を行って f, a の妥当性を検証した。

1 拘束圧縮試験

拘束圧縮試験では、破壊のほとんどは試験片側面中央部（赤道面）で発生する。試験片全体の速度場を考えることは困難なのでこの部分の微小な正方形要素を取り出して上界法のための速度場を考え破壊発生を取り扱った。据込み加工においては、割れが試料円柱の円柱軸に対して 45° の方向に起こることが多い。そこでそのような速度場を想定した。

圧縮量が大きくなると相当ひずみが増加していき加工硬化を起こす。そこで式(2),(3)で示した f と a を用いて破壊が記述できるかどうかをまず確かめた。以下に示す実験は佐藤[1]による拘束圧縮試験のものである。試料はS55Cで、初期形状 H_0/D_0 は1.0, 1.25, 1.5の三種である。

まず式(2)で与えられる f を用いて破壊を記述できるかどうかを確かめた。ここで κ の積分の計算を行うことは困難なので κ の計算には10%圧縮する度の平均応力/変形抵抗の平均値をとって計算した。 $f_0 = 20, C_1 = 0, C_2 = 10$ として破壊するときの a の値 a_r の計算を試みたところ、これによってかなり正確に破壊を予測できることが明らかになった。

式(2)および式(3)において未定の材料定数は f_0, C_1, C_2, κ の4つである。しかしこれらの4つをすべて実験結果より決定するには参考とするデータが不足していたので、ここでは仮に $\kappa = 90$ とおいた。

2 軸対称多段押出し

軸対称押出しでは、速度不連続面でのエネルギー消費率だけでなく塑性変形によるエネルギー消費率も計算しなければならない。通常軸対称押出しの上界法による解析ではAvitzur[2]による速度場がよく用いられるが、破壊発生の解析のために修正して考えることは難しい。そこでまず平面ひずみによる解析を行って、破壊発生が予測できるかどうかについて検討を加えた。その結果式(2)(3)の材料定数を適当に選ぶことが出来るとかなりよく予測が可能であることを確認した。こ

の結果についてはIngenuiuer Archivに論文を投稿し、掲載された。

軸対称押出しについてはWilson [3] が示した軸対称問題を平面ひずみに変換する変換法を用いて解析を試みた。これによって軸対称における放物線は平面ひずみの座標において直線に変換される。逆に直線は放物線に変換される。

ここで簡単化のために次に示すような仮定を設けた。

1) 一段の加工中は材料は剛完全塑性材料とする。このとき1段の加工によって生じる相当ひずみを上界法によって求めた。

2) κ を求めるために押出し加工中の平均応力/相当応力を知る必要があるが、上界法では応力分布、従って平均応力は求められないので、初等解法によって求めた。この際ダイス入口付近と出口付近でこの値が変わってくるのでダイス中間での値をとった。

3) 材料とダイスとの間の摩擦は無視できるものとした。

また式 (2) κ については仮に $\kappa = 25$ とおいた。

仮定1) および2) より

$$\bar{\epsilon}_1 = 0.1$$

$$\sigma_m/\bar{\sigma} = -0.37 \quad (R = 1.11)$$

$$\bar{\epsilon}_1 = 0.14$$

$$\sigma_m/\bar{\sigma} = -0.44 \quad (R = 1.23)$$

よって κ の1段押し出すごとの増分は $R = 1.11$ のとき -0.037 , $R = 1.23$ のとき -0.062 となる。以上より

$$f_0 = 86.127$$

$$C_1 = 0.00148$$

$$C_2 = 0.00728$$

となる。このような計算によって得られた破壊段数と実際の破壊段数は一致した。

以上のように同一の材料を用いた据込み加工と軸対称押出しの実験データを用いて解析を行い、双方より求められる材料定数を比較検討すれば、式 (2),(3) によって材料定数を決定できる。そうすれば簡単な試験法、例えば拘束圧縮試験などによる結果より材料定数を決定し、その他の加工法、例えば押し出し加工、引き抜き加工、あるいはそれ以外の鍛造加工における破壊を予測できるであろう。

参考文献

- [1] 佐藤 ; 塑性と加工 15 - 165 (1974), 846.
- [2] B.Avitzur ; Tr.ASME, J.Eng.for Ind., Feb. (1968) 79.
- [3] W.R.D.Wilson ; Int.J.Mech.Sci., Vol.19. (1978) 103.

発表論文

S. Shima and Y. Nose : Development of Upper Bound Technique for Analysis of Fracture in Metal Forming, Ingenuiuer Archiv, Vol.60 (1990), pp. 311 - 322.

S. Shima and T. Oka : Upper Bound Approach for Prediction of Occurrence of Ductile Fracture in Metal Forming, Advanced Solid Mechanics (provisional title, ed.O. Bruller), Springer Verlag (投稿予定)