

相変化を利用した鍛造—液圧加工複合プロセスの研究

群馬大学 工学部 機械システム工学科

(現 (独) 産業技術総合研究所 ものづくり先端技術研究センター)

助手 大橋隆弘[†]

(平成 11 年度研究開発助成 AF-1999007)

1. 研究の目的と背景

近年、塑性加工におけるニアネット化や難加工性材料の採用に関する要求が高まっている。バルジ成形に代表される液圧張出成形においても、難加工材への対応や成形性向上のため、圧力媒体の工夫やそれによる高温度化が図られている。しかしながら、圧力の限界から鍛造やプレス成形などに見られるような詳細な形状を成形するのは容易ではない。上記の目的を達するためにプレス成形などを併用する場合、複数のプロセスが必要となったり、特殊または液圧発生用のやや大掛かりな装置が必要となることがあるが、できるだけ従来の装置を利用して少ない工程で成形できる加工法が望まれてきた。

そこで、本研究では、中空材料内部に充填した固相物体と共に中空材料を圧縮成形（鍛造）し、全体として転伸成形にはないバルクの鍛造の持つ圧縮成形としての利点を生かしつつ、一部を溶解し、圧力成形とすることで、圧力成形の持つ特徴を併せ持った加工プロセスを開発することを研究目的とした。

2. 研究方法

2. 1 プロセスの概要

開発するプロセスの模式図を図 1 に示す。提案するプロセスの内容は非常に簡単なもので、氷、低融点合金などの低融点の塑性体を、中空構造の素材内にコアとして充填し、一体のビレットとし、その後、軸方向に圧縮することにより側方に被加工材ごと押し出させるというものである。この溶融除去可能なコアを筆者らは「喪失（ロスト）コア」と呼んでいる。変形後に湯洗などで、ロストコアを融解し、除去することによって製品を得ることができる。また、プロセスの途中でロストコアの一部または全部を溶

融することで圧力媒体として用いることが出来る。

2. 2 実験方法

図 2 に実験に用いた金型を示す。上型と下型の距離はスペーサーを変更することにより可変である。表 1 に実験条件を示す。実験は C1220, A6063, A1050 押出管を対象として行なった。ロストコア材料として帝位融点合金および氷を用いて実験した。

3. 研究成果

3. 1 圧縮成形時のメカニズムと液圧成形との違い

図 3 は成形における加工力の変化を表している。荷重は初期にピークを迎えるが直ぐに下降し、再び上昇する。このことから、管の力学状態が縦圧縮の状態から押し広げの状態に遷移するタイミングが工程初期にあることがわかる。このような荷重変化は座屈を利用したビード加工時に見られるものと似ている。本法では座屈による不安定変形は、ロストコアによりある程度押さえられると考えられる。従って急速に座屈が進行・破綻することはない。実際の成形

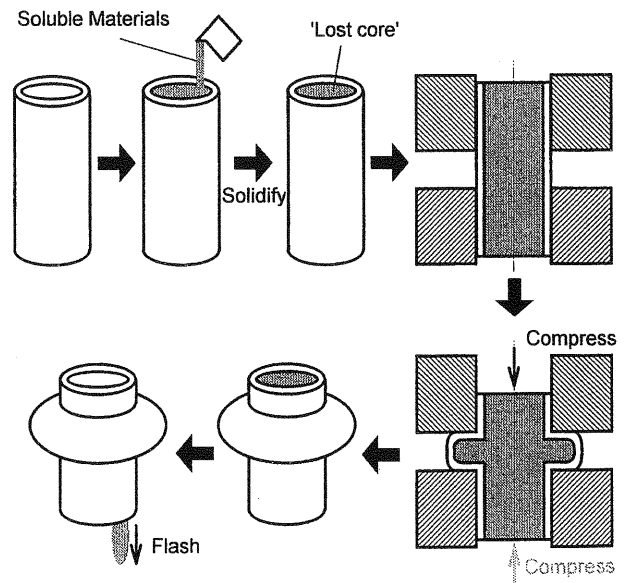


図 1 ロストコアを用いた圧縮成形¹⁾

[†]平成 13 年 4 月より

(独) 産業技術総合研究所 ものづくり先端技術研究センター
成形技術研究チーム チーム長 現在に至る

って急速に座屈が進行・破綻することはない。実際の成形品を観察すると、図中にあるように、荷重ピーク時において変形がほとんど変形は進行していないが、ピーク後にははっきりと拡管が進んでいる。数値解析結果²⁾により被加工材の流れを観察すると、ロストコアがマンドレルのように働き、上型コンテナから押し出された被加工材流れを受け止め、側方へ向けていることがわかっている。また、被加工材のフランジ部内にはほとんど内圧がかかっておらず、変形の様態はコンテナ出口部での押し出しでほとんど決まる。

図4に、被加工材の成形後のひずみ分布を、内圧を付加しない液圧バルジ成形と実験により比較した一例を示す。各ひずみの定義は下記に示した通りである。

$$\text{肉厚ひずみ } \varepsilon_n = LN\left(\frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

t: 加工後の肉厚
T: 初期の肉厚

$$\text{円周ひずみ } \varepsilon_\theta = LN\left(\frac{d}{D}\right) \quad (2)$$

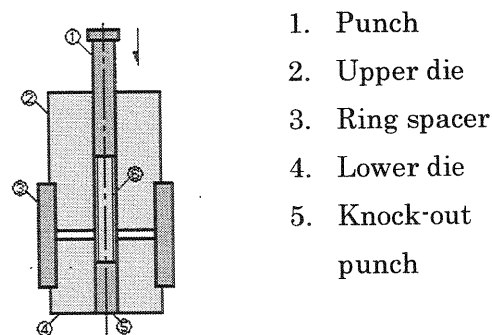
d: 成形後の外径
D: 初期の外径

$$\text{子午線ひずみ } \varepsilon_\phi = -(\varepsilon_n + \varepsilon_\theta) \quad (3)$$

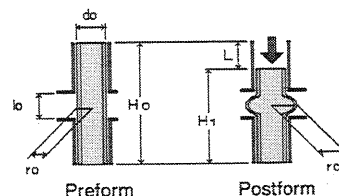
ε_ϕ は、液圧バルジ成形において子午線ひずみとして定義される量で、ロストコアを用いた側方押し出しにおいては、(乱暴な言い方を許せば) 管の押し込み量に対応する。従って、液圧バルジ成形では、基本的に内圧により板厚を薄くして (ε_n)、拡管 (ε_θ) に転じさせているのに対し、ロストコアを用いた側方押し出しでは、押し込み (ε_ϕ) (の多く) を拡管 (ε_θ) に転じさせていることが図6からわかる。特に側方の窓の大きさ(押し出し出口部の流れ方向を法線とした断面の面積)が上型コンテナ内径断面より十分大きい場合、フランジ部での内圧はほとんど変形に重要ではないと考えられる。(ただし、T字型フィッティング部品の成形のように側方の窓の大きさが小さくなると内圧

表1 実験条件

Testing machine	100 ton universal testing machine
Ram speed / mm · min ⁻¹	1.0
Materials of specimen	A1050 pipe (outer diameter: φ 16, thickness: 1.5 mm), A6063 pipe (outer diameter: φ 16, thickness: 1 mm), annealed at 350°C for 8 hours. C1220 pipe (outer diameter: φ 15.88, thickness: 1 mm) annealed at 550°C for 90 minutes.
Materials of lost core	Bi ₄₉ Pb ₁₈ Sn ₁₂ In ₂₁ low-temperature melting alloy, Ice
Lubricant	Nippon-kouyu NPC-MO (MoS ₂)



(a) Dies



(b) Specimen

図2 実験用金型と試験片¹⁾

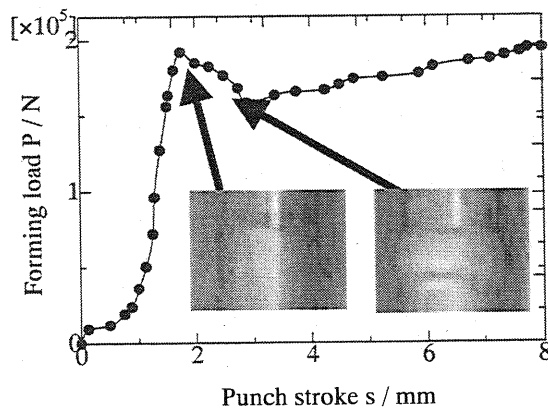


図3 成形ストローク中における荷重の変化の例 (A6063, l₀=8mm)

が変形に影響を及ぼすようになる。) 以上から, 本研究で明らかになった液圧成形とロストコアを用いた圧縮成形(側方押し)の相違点について, 変形メカニズムを模式的に図で表すと図5のようになる. このことは, ロストコアを用いた圧縮成形と液圧加工を組み合わせることで, ひずみ状態の点で補完的な役割を果たすことが出来る可能性を示している.

内圧に起因する変形ではなく, 主に圧縮(押し)変形を利用して成形する利点は,

- (1) 減肉 (ϵ_n) が抑えられ, 側方方向への拡張の限界が大きく取れること
- (2) 加工力が内圧による変形と比較して大変小さくて済み, 装置・金寿命の点でメリットがあること

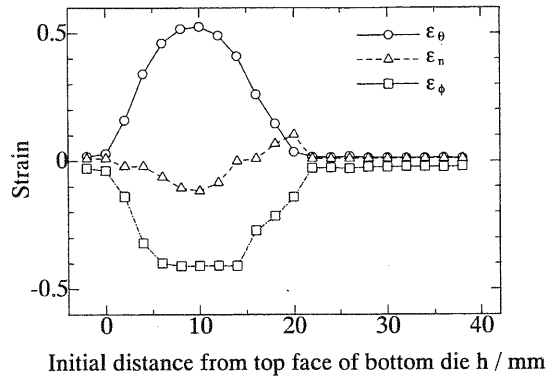
が挙げられる. 一方, 内圧による拡張(バルジ)加工に存在しない問題点として

- (1) 工数が多くなること
- (2) 工程設計が材料の流れに支配され, 自由度が少ないこと
- (3) 複雑形状への対応は複数工程からなる工程設計によること

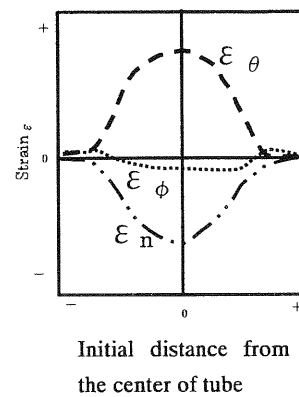
がある.

上記のようにロストコアは, 圧縮成形時において液圧成形における圧力伝達媒体というより, 押し成形におけるマンドレルと似た役割をする. そのため, ロストコア材質について, 液圧成形の圧力伝達媒体と異なるいくつかの注意点がある. すなわち, ロストコアは, 凝固時に膨張性があり, かつ被加工材の側方への変形を支えるのに十分な強度(変形抵抗)を備える必要がある. 一方で, 高すぎる強度は, 全体の加工力を大きくしてしまうため, 被加工材にかかる荷重を高めてしまい工程初期段階での座屈を誘引してしまう可能性がある.

図6にA6063管の加工限界についての実験結果を示す. 拡張率が2倍近い比較的高い加工限界が得られている. 特にフランジ部厚さが小さい条件は, 液圧成形が不得手とするところであるが, 本法では高い加工限界が得られる.



(a) ロストコア側方押し (C1220, $l_0=8\text{mm}$)



(b) 液圧バルジ成形 (イメージ)

図4 ロストコア側方押しと軸力を負荷しない液圧バルジ成形におけるひずみ分布パターンの違い

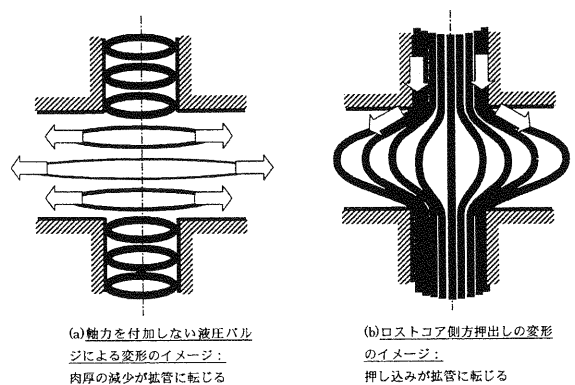


図5 軸力を負荷しない液圧バルジ成形とロストコア側方押しの変形様式の違い

4. 成形中のロストコア溶解による成形形状変化

充填物に氷を用いた条件において, 成形中に氷を溶解させ圧縮を続けた. 図7に成形結果の例を示す. 周方向に均等に変形せず, 変形部のスロープの角度が一部で変化し, 側方への広がりが付均一になっている. これは成形中にロス

トコアの一部が溶融したために、前述の、「ロストコアがマンドレルのように働き、上型コンテナから押し出された被加工材流れを受け止め、側方へ向ける」機能が損なわれ、かつそれを補うに足る液圧が発生されないためである。これらの結果から、製品の圧縮成形の一サイクルの中で、同時に性必携上の一部を液圧加工することは、ロストコアの一部を溶融するだけでは難しいといえる。同時にロストコアに独立して圧力をかけるなどの工夫をしなければいけない。工程を分け、マルチステージのプロセスの中でロストコアを押し出すパンチを利用したプロセスを設定することは可能である。

5. 結び

本研究では、成形後融解し除去可能なコア（ロストコア）を充填し、その相変化も併せて利用する中空材の圧縮成形プロセスについて検討した。

検討されたプロセスの特徴は、

- (1) 従来の鍛造と同様な金型・プレスの利用を前提とすること
- (2) 側方方向への拡管の限界が大きく取れること
- (3) 加工力が小さくてすむこと

である。一方、

- (1) 工数が多くなること
- (2) 複雑形状への対応は複数工程からなる工程設計によること

という液圧バルジ加工に存在しない問題点がある。

ロストコアを直接圧縮しない場合、内圧の発生の大小は、側方方向の窓の大きさ（押し出し出口部の流れ方向を法線とした断面の面積）によって変わるため、加工限界を勘案して、マンドレル等を工夫したり、パンチ先端形状を工夫する必要がある。

成形中にロストコアの一部を、溶融させたところ、不均一成形が観察された。これは「ロストコアがマンドレルのように働き、上型コンテナから押し出された被加工材流れを受け止め、側方へ向ける」機能が損なわれ、かつそれを補うに足る液圧が発生されないためである。製品の圧縮成形の一サイクルの中で、同時に製品形状の一部を液圧加工することは、ロストコアの一部を溶融するだけでは難しいといえるが、工程を分け、マルチステージのプロセスの中

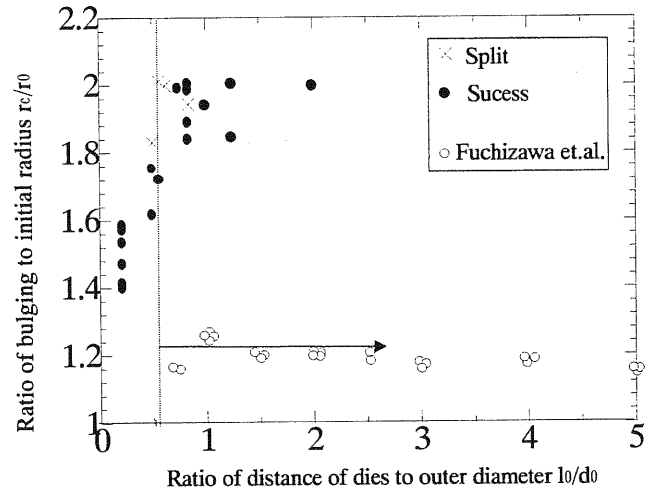


図6 ロストコア側方押し出しにおける加工限界(A6063)と淵沢の液圧成形限界との比較

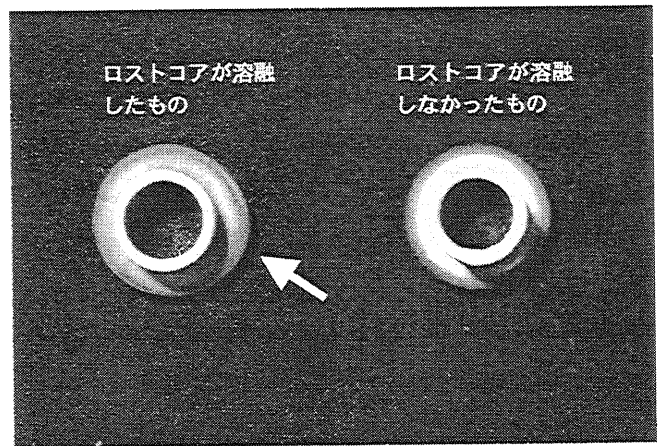


図7 充填物の溶融により不均一変形が現れた例²⁾

でロストコアを押し出すパンチを利用したプロセスを設定することは可能であり、また、複動プレスで、通常の液圧加工と同様に軸およびロストコアを圧縮することもできよう。今後、本研究の成果は従来液圧成形では加工できないような、加工荷重が高くなる難成形品（肉が厚かったり難成形材料を採用したもの）に対する応用が期待される。

参考文献

- 1) Ohashi, T. et al.: J.Mater.Process.Technol., **113**: 1-3(2001), 98-102.
- 2) Ohashi, T. et al.: Proc. Int. Conf. Adv. Manuf. Process.Technol., (2001), 187-190.