



T. Ohashi

相変化を利用した喪失コアを用いた中空製品の鍛造成形

大橋 隆弘*

1. はじめに

軽量部品の実現方法の一つとして、素材に抛らず実施可能な方法である中空構造が注目されている。しかし、部品の中空構造の採用に際しては、その安価な製造方法が問題となる。

筆者らは、素材と比較して低融点の液相材料を中空素材に充填し、固化した後、圧縮成形（鍛造）する加工プロセスについて検討してきた^{1)~7)}。充填物は、液相化することで除去できる。射出成形で使われる類似した喪失中子の名称の例に倣って、筆者はこの充填物を「喪失コア (lost core)」と呼んでいる。充填物は、固相状態から何らかの手段で再び液相化できる物質全般に利用可能性を探ることができる。特に、低融点の金属、氷に関し、手軽に用いることができる。

仮に液層状態の充填物に加压した場合は、充填物が圧力媒体となりハイドロフォーム加工が行われる。このとき、素材中には主に引張場が生じ、素材は減肉の傾向となる。一方、充填物（喪失コア）が固相状態であれば、素材に関し喪失コアもろとも圧縮成形（鍛造）を行うことが可能となる。

類似した形状の創成であっても、上記二者では、プロセス中の材料の流動や、加工限界における破壊、ひずみ分布に関して顕著な相違点がある。本稿では、この充填物が液層である場合のハイドロフォームと、固相状態の喪失コアもろとも素材を圧縮成形した場合の変形プロセスの違いについて解説する。

2. 管のフリーバルジ成形における比較

管の上下部を拘束し、拘束されない中央部をディスク状に張出成形したフリーバルジ成形の場合について述べる。一般にハイドロフォームで成形する場合は、管の両端より軸力をかけ、圧力媒体に内圧をかけることにより減肉を抑えつつ管を張り出させる。これに対して図1に示すように、管に喪失コアを充填し、垂直方向に圧縮することで、側方へ押し出し、比較する。変形メカニズムの検討のため、成形試験およびシミュレーションを行った。その一例について紹介する。

図2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、再びゆるやかに上昇する。このプロセス初期の急激な荷重の上昇と下降は座屈によるものであると考えられる。しかし、変形

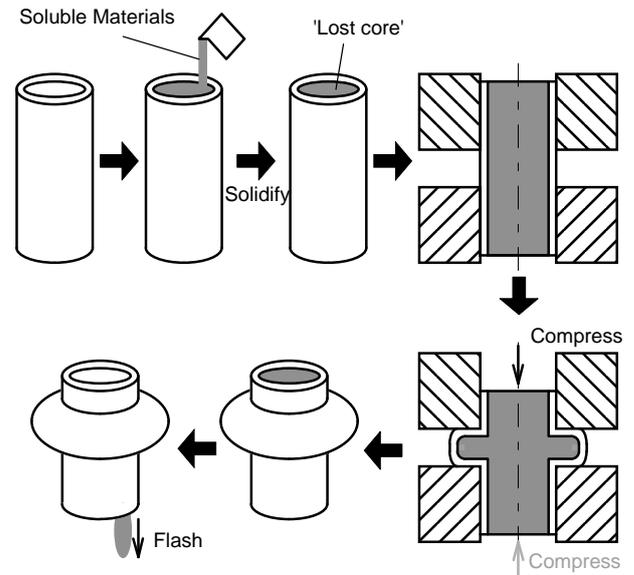


図1 固相充填物（喪失コア; lost core）を利用した圧縮成形

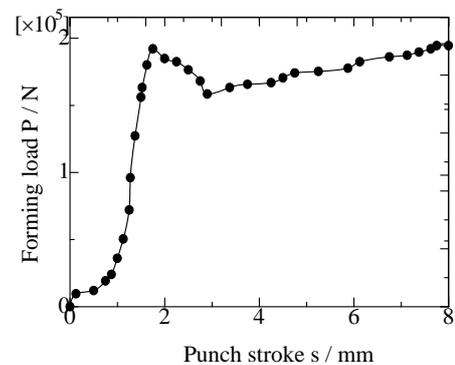


図2 A6063 管（外径 ϕ 16 肉厚 1mm）および $\text{Bi}_{49}\text{Pb}_{18}\text{Sn}_{12}\text{In}_{21}$ コアの円周張出し成形時の荷重—ストローク線図（張出ディスク部厚さ（上下型間隔）8mm）⁶⁾

した喪失コアがマンダレルの役割を果たし、管を内側から軸圧縮力に対抗して支えるため、座屈によりそのまま急激に管が潰れることはない。座屈の後、管の変形は座屈から側方押し出し変形に移り、再び成形荷重はゆるやかに上昇する。成形品を観察すると、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張が進んでいる。これらの変形はハイドロフォームの場合（の型締め力）と比較して比較的能

* 国士館大学理工学部理工学科機械工学系・准教授

力の低いプレス機でも実施できる。このことから、肉厚が相当厚い素材であっても、このような圧縮成形（鍛造）で中空部品を製造できることが期待できる。図3は実験により得られた成形後の試験片のひずみ分布の一例を示している。各ひずみの定義は下記に示す通りである。

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

t: 加工後の肉厚, T: 初期の肉厚

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

d: 成形後の外径, D: 初期の外径

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

ハイドロフォームのフリーバルジにおける典型的なひずみ分布(図4)と比較すると、拡張(すなわち ϵ_θ の増加)を得る過程において、 ϵ_ϕ と ϵ_n の役割が逆になっていることがわかる。 ϵ_ϕ は、液圧バルジ成形において子午線ひずみと呼ばれる量で、管の押し込みに対応する。液圧バルジ成形では基本的に、内圧により板厚を薄くすることで(ϵ_n の増加)、拡張(ϵ_θ の増加)を生じさせているのに対し、喪失コアを用いた圧縮成形では、主に押し込み(ϵ_ϕ の増加)により拡張(ϵ_θ の増加)を生じさせていることがわかる。この、メカニズムのおかげで、図5に示すように喪失コアを用いた圧縮成形では、ハイドロフォームに対し、拡張比を比較的大きくとることができる。

図6の数値解析は、喪失コアを用いた圧縮成形における、管の内壁と喪失コア間の内圧の分布の一例を示している。ディスク状に張出しを行っている領域ではほとんど内圧がかかっていないのがわかる。この解析結果も、上記のような変形メカニズムの違いを強く裏付けている。

3. 枝管の成形における比較

継手部品を想定し、枝管を十字形状およびT字形状の部品を成形する場合について述べる(図7)。この場合、喪失コアを用いた圧縮成形では、側方への材料の移動に関し、側方方向の円周に沿った断面積が不変である。

十字継手の成形においては、枝管外径が素材管外径と等しいとき、図8に示すようにしわが生じた。また、枝管外径が素材管外径以上になると、2つの正反対の枝管方向へそれぞれ材料が流動する速度領域が接する部分例えば継手の十字の中心)への材料供給がなく、プロセスの進行と共にひけが生じ、ここを起点として押し出し割れ(extrusion defect)が生じる現象が見られた(図9)。逆に枝管外径が素材管外径より小さい場合は、十字の中心付近は増肉し(図10)、限界を超えるとこの部分に圧縮割れが起きる。T字管においては、図11に示すように、最大相当ひずみ位置は、張出部反対側の面の増肉部分ではなく、増肉部分と張出部分への材料流入領域の境界となる側面部分となる。

図12に喪失コアを用いた圧縮成形によって作られた

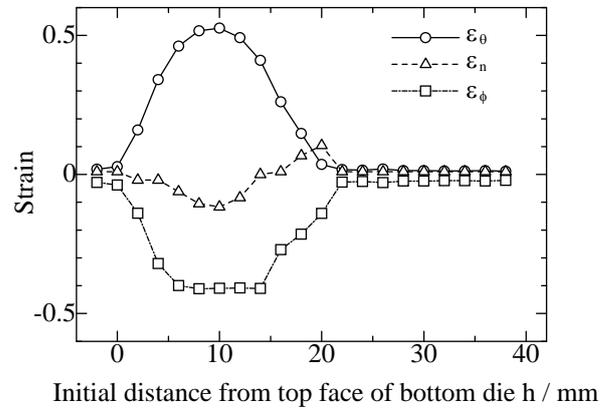
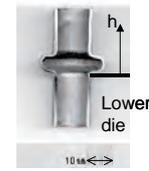


図3 試験片のひずみ分布 (C1120 銅管, ϕ 15.88 mm, 張出ディスク部厚さ(上下型間隔) 8mm)⁵⁾

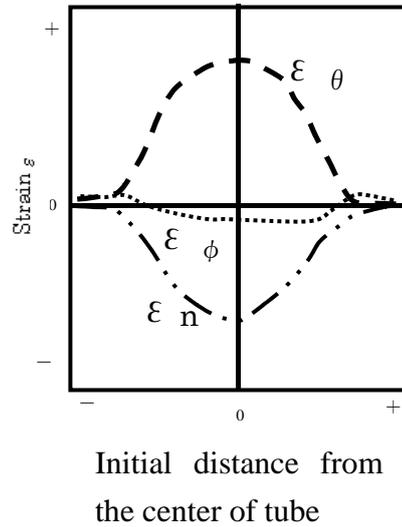


図4 ハイドロフォームにおけるひずみ分布の模式図

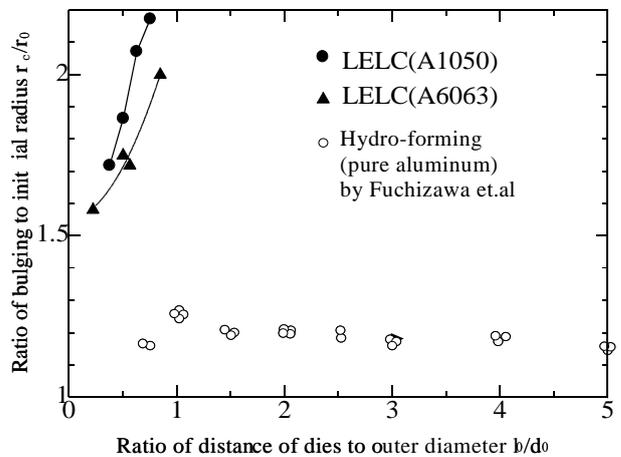


図5 拡張限界 (LELC: 喪失コアを用いた側方押し出し)⁷⁾

十字継手の肉厚分布の例を示す。ハイドロフォームでは、一般に枝管部は肉厚が減少し張り出ししているが、喪失コアを用いた圧縮成形では、枝管の先端部分はほとんど変形していないことが特徴である。従ってハイドロフォームの場合は枝管部の張り出し長さ長くしていくと、薄肉化して破裂するが、喪失コアを用いた圧縮成形では、いくら押し出し長さを長くしていても、枝管部が破壊することはない。

このメカニズムを応用すると、枝管の張り出しと同時にすることもできる、枝管部に対向パンチを置き（図13）、枝管の張り出しと同時に穿孔も行ったところ、穴はプロセスの進行によって広がることなく、そのまま側方方向に運ばれることが確認できた。また、この方法をとることで前述のしわの問題も解決できた。

4. 考察とまとめ

中空素材に喪失コア(lost core)を充填し、圧縮成形を行った場合、素材の側方への変形は、内圧による張り出しではなく、側方への押し出しが主たる変形メカニズムとなる。フリーバルジのように、材料が側方へ移動すればするほど、移動方向を法線とした断面の面積が拡大するようなプロセスにおいては、ハイドロフォームと同様、張り出しに伴い、素材の減肉が進む。しかし拡管に伴う円周ひずみの増大が主に子午線ひずみの増大によってもたらされるため、ハイドロフォームと比べて薄肉は穏やかである。そのため、内圧による張り出し成形と比較すると大きな張り出し量を得ることができる。その一方で、成形後の製品の肉厚の分布（肉厚ひずみの分布）に関しては不均一となる。

枝管の成形のように、側方への材料の移動に関し、移動方向の断面積が不変である場合においては、ハイドロフォームと異なり、一旦、押し出された素材はほとんど変形することなく、側方方向に運ばれていく。そのため、変形量をいくら増加させても、張り出し部において破壊が生じることはなく、非張り出し部の圧縮限界等により、成形量の限界を迎える。また、プロセスの途中において、枝管の先端に対向するパンチにより穿孔した場合においても、穴は広がることなくそのまま側方へ運ばれていく。

最後に、側方方向の張り出しに関し、円周に沿った断面積が小さい場合、あるいは減少していくような場合、素材内壁を喪失コアが押し、ハイドロフォームと同様な、内圧による張り出しのメカニズムが優位になると考えられる。

また、充填物が固体であることによる問題点として、側方方向の円周に沿った断面積が大きくなると、素材が押し出される速度に対して、追従する喪失コアの押し出し体積に限界があることが挙げられる。十分な喪失コアの追従が得られないとき、フリーバルジのような加工においては、金型から素材が離れてしまう。また、枝管の成形のように側方方向の断面積が変化しないプロセスにあっては、素材の枝部に十分な引張りが得られず、しわを生じる。

このことについて、密閉型中においてはさらに加圧することにより、型内に素材を充満させることができる。

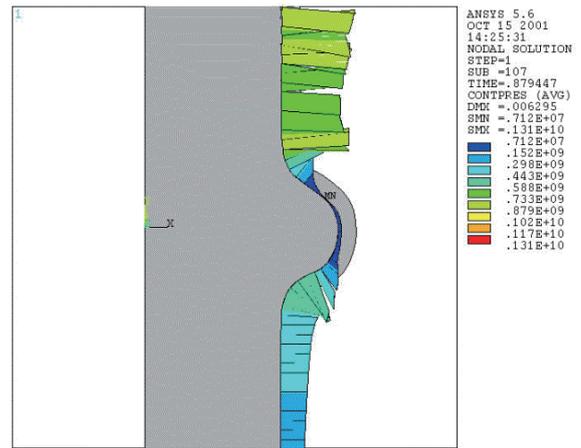


図6 管の内壁と喪失コア間の内圧分布の解析⁷⁾

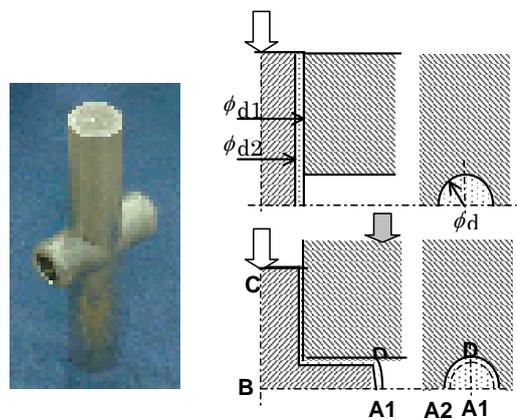
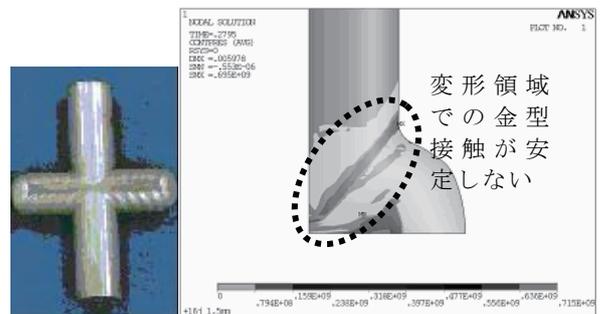


図7 十字枝管の成形



(a)しわ (b)金型との接触圧力分布の解析

図8 枝管径と素材管径が等しい場合（しわの発生）

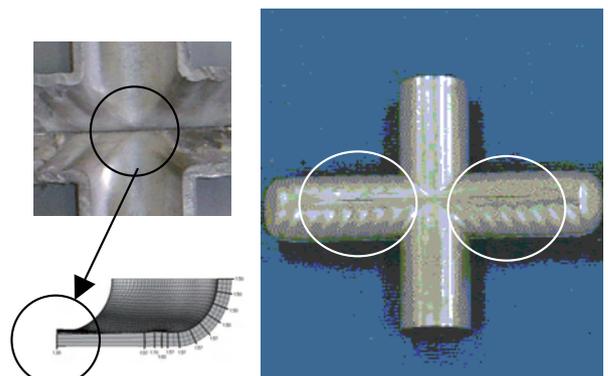


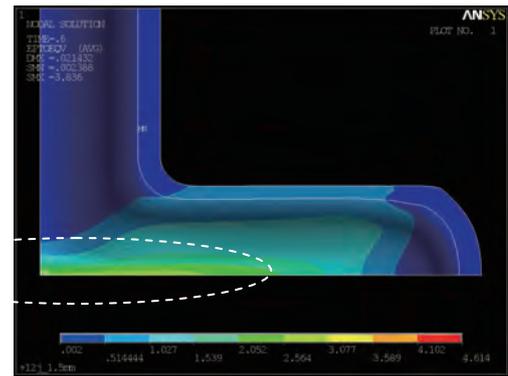
図9 十字中心部の管内側の肉のひけと押しきず (extrusion defect)

このとき、肉厚は不均一となり、表面にも痕が残ってしまうことがある。また、しわの問題に関しては枝管穿孔用の対向パンチを入れることで解決できた。

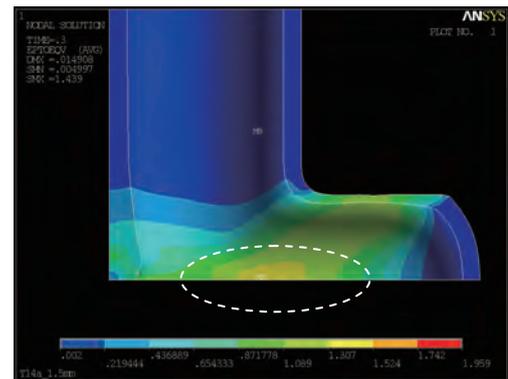
上記のように、固相充填物（喪失コア）を利用した圧縮成形と液層の圧力媒体を用いたバルジ成形では、類似した変形後形状であっても、その変形メカニズムやひずみ分布は相補的な関係になる。しにため、用途に応じ、また組み合わせてプロセスを考えることができる。

参考文献

- 1)大橋隆弘：ロストコア式側方押出成形法，特許第3837562号
- 2)大橋隆弘：薄肉材のバルジ加工装置，バルジ加工法及び薄肉材バルジ加工用充填材，特許第4280393号
- 3)T.Ohashi et al.: Analytical and experimental study on lateral extrusion of cross fittings with a lost core, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol.18 No.1-2 (2006), pp.399-402.
- 4) T.Ohashi and Y.Saotome :Lateral Extrusion of Aluminum 1050 Pipes with Ice Core, Proceedings of the International Conference on Advanced Materials Processing Technologies, (2001), pp.187-190.
- 5) T.Ohashi et al.: The lateral extrusion of copper pipes with lost core of low temperature melting alloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol.113 No.1-3(2001), pp.98-102.
- 6) T.Ohashi and K.Hayashi: Lateral extrusion of A6063 aluminum alloy pipes with a lost core, Journal of Materials Processing Technology, Vol.138 (2003) pp.560-563
- 7) 大橋 隆弘：ロストコア側方押し出し法による中空部品の成形，機械と工具，46-10(2002), pp. 42-45.



(a)十字管



(b)T字管

図 1 1 素材における最大の相当ひずみの位置（枝管径 1 2 mm）

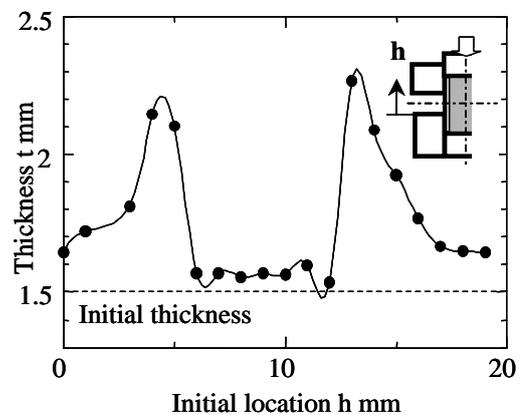


図 1 2 枝管部の厚み分布

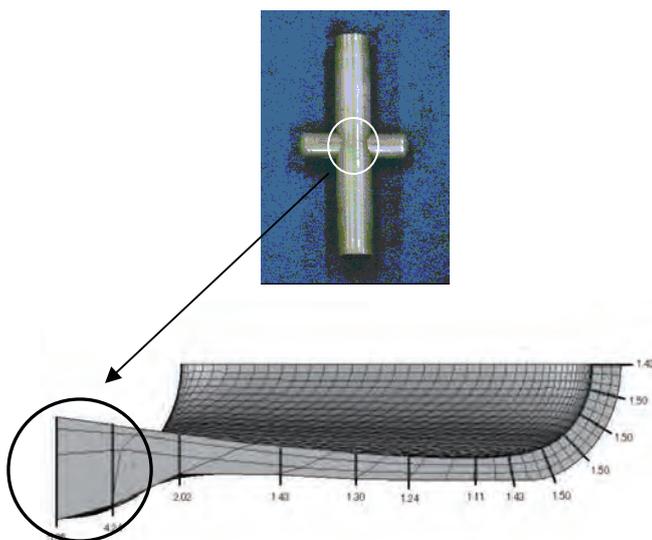


図 1 1 非張出し部の増肉（数値解析による肉厚分布の評価；初期管厚 1. 5 0 mm）

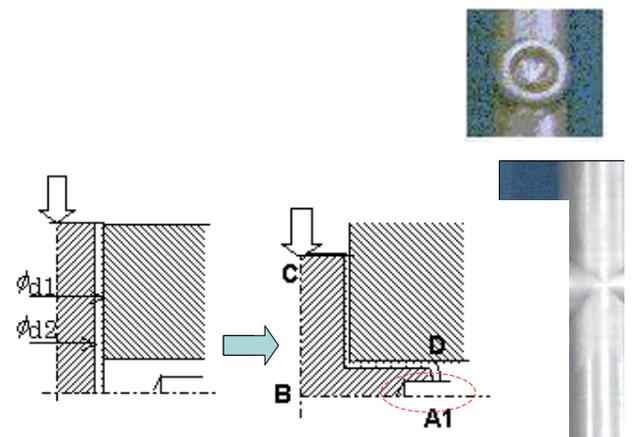


図 1 3 枝部対向パンチによる穴あけとしわの解消