

チューブ hidroフォーミングにおける 管材の増肉の研究

宇都宮大学 機械システム工学科
准教授 白寄 篤
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013004)

キーワード：チューブ hidroフォーミング，円管，増肉，組立て

1. 研究の目的と背景

金属管材を素材とする塑性加工は，部品の軽量化の観点から採用されている．中でも，チューブ hidroフォーミング (THF) は，主に自動車の構造部材を軽量化することができる技術として広く知られるようになった．しかし，このような THF で作製した中空の構造部品 (板材の部品から置き換えられた軽量化部品) を他の部品と合わせて組み立てる場合には，板材部品どうしの組み立てで使用されている溶接に代わり，THF 部品に穴をあけたり，一部を潰してフランジを成形したりして組み立てに対応することなどが行われている¹⁾．そのようなフランジを敢えて設けることの重要性は，技術開発が最近進められている STAF (Steel Tube Air Forming)²⁾ から改めて認知されている状況である．その一方で，ロボットアームの部品などとして実用化されている管材部品 (中実材の部品から置き換えられた THF 部品ではない比較的厚肉の軽量化部品) では，管材の端部付近の肉厚を塑性加工で増加させること (増肉) で，その部分にネジやセレーションを加工して他の部品との組み立てが行われている．

本研究は，

- 1) THF における管材の増肉を研究し，組み立て方法の拡充に寄与する
- 2) 金型の内部で厚肉化する管材は金型と高圧で接触する．このときの摩擦係数を実験と FEM シミュレーションとで求めることで，THF に必要な加工力の予測精度向上に役立てることを目的としたものである．

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

図 1 に，実験装置の主要部である金型と軸押しシリンダを示す．軸押しシリンダは図 2 に示すように中空であり，中心の穴 ($\phi 1.5$ ，長さ約 100mm) を通じて円管試験片の内部に圧力媒体 (油) を供給し，また，実験の準備段階では試験片内の空気を排出する．さらに，軸押しシリンダの役目は圧力媒体の供給路であることのみならず，試験片を軸方向に圧縮することにもあるので，強度に配慮する必要がある．軸押しシリンダの素材には SKD11 材 (焼入れ・焼戻し) を使用しており，穴の加工は放電加工で行った．図 3 は金型である．hidroフォーミングの金型の場合には，

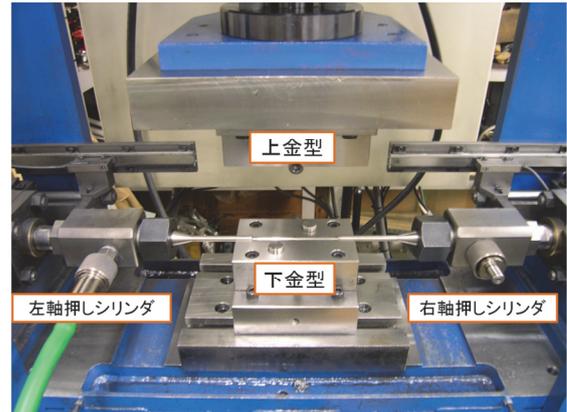


図 1 金型と軸押しシリンダ

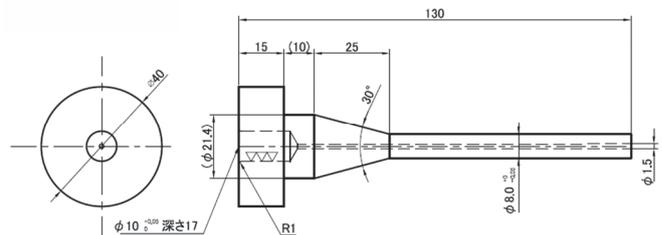


図 2 軸押しシリンダの寸法

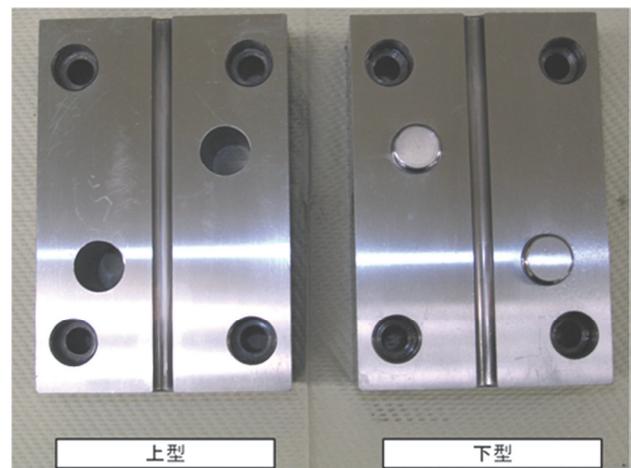


図 3 増肉加工用の金型 (上下割)

通常、製品形状（例えば図4に示すような管継手形状）に成形するための溝が施されている。本研究では成形中に素管の外径が変わらないようにするため、素管の外径よりも少しだけ大きい（直径で0.04mm程度大きい）溝を加工したのみである。上下の金型は、上型の上部にある油圧シリンダにより成形中には型締めされており、その型締め力は200 kN（20 tonf）である。

2.2 円管試験片について

表1に試験片の寸法を示す。アルミニウム合金 A6063 の円管（引抜き材の継目無管）を購入し、所定の寸法に切断後、焼なましを施して試験片とした。試験片の加工硬化特性（表2）は JIS11 号引張試験片を作製して求めた。

2.3 軸押込みと内圧について

図5に示すように軸押込みは2段階に分けて試験片に加えた。第一段階の軸押しは、試験片両端部に軸押しシリンダの端面を押しつけて、油圧のシールをするための『シール押し』である。図2に示したように、軸押しシリンダの端面は平面としたため、試験片を長手方向にある程度圧縮する必要があり、本研究では『シール押し』は左右1mmずつとした。なお、『シール押し』は左右2mm程度ずつが限界であり、内圧ゼロの状態ですれ以上の軸押しを加えると、試験片に“しわ”が生じることを確認した。図6は、その限界のときの肉厚分布であり、管中央部は増肉していない。第二段階の軸押しは、成形内圧を加えながら試験片の肉厚を厚くするための軸押しであり、本研究では左右16mmずつとした。成形内圧については、試験片の引張強さ σ_B を基準として、その10%~90%とした。実験では、試験片と金型との間の摩擦をなるべく小さくするために二硫化モリブデンペーストスプレーを使用した。

3. 実験結果

図7に、実験によって試験片に生じた“しわ”の例を示す。このような“しわ”の発生の有無については目視および触感で判断し、『シール押し』の段階では“しわ”が生じていないことを確認した。“しわ”は『成形押し』の段階で生じているが、今回の実験では成形押し量の設定をあまりに大きくしすぎたようである。つまり、本実験範囲内の最大保持内圧である $p_h = 0.9\sigma_B$ （=84.2 MPa）の場合であっても“しわ”が生じる場合があり、結果が不安定であった。“しわ”が発生しない場合には図8のようになり、外観上の不具合はなく、肉厚を増加させることができた。図9は、管端部の外観の例である。

図10に肉厚分布を示す。実験では成形内圧を $0.1\sigma_B$ 刻みで $0.1\sigma_B \sim 0.9\sigma_B$ で実施したが、その結果を全て示すと図が見にくくなるため $0.1\sigma_B$ と $0.9\sigma_B$ の場合のみを示した。試験片の体積は変形前後で変わらないはずなので（塑性変形の体積一定から）、初期肉厚0.8mm・外径8mm

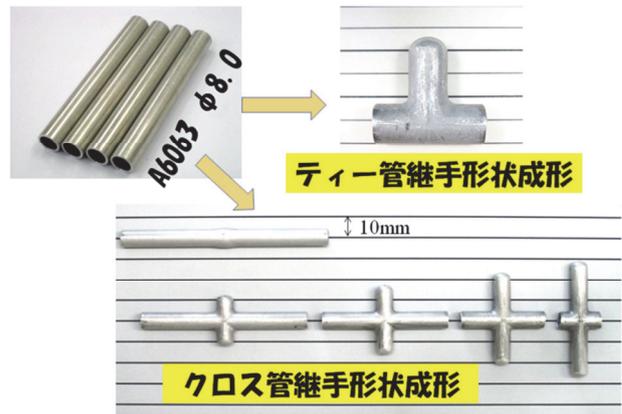


図4 管継手形状成形の例

表1 試験片の寸法

実験材料	A6063（継目無管）
初期公称外径 D /mm	8.0
初期公称肉厚 T /mm	0.8
初期試験片長さ L /mm	64

表2 試験片の加工硬化特性

加工硬化指数 n	0.230
強度係数 C /MPa	169

$$\sigma = C \varepsilon^n$$

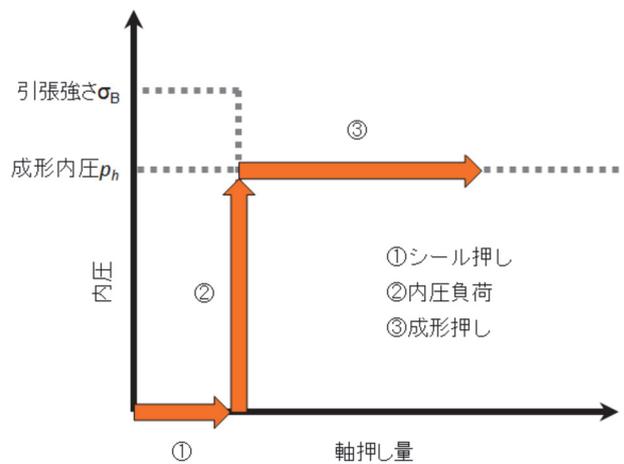


図5 試験片に加える軸押しと内圧

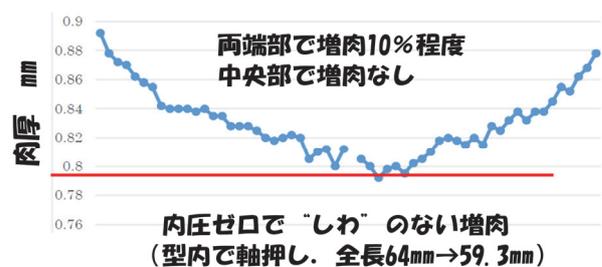


図6 軸押しのみで“しわ”のない増肉

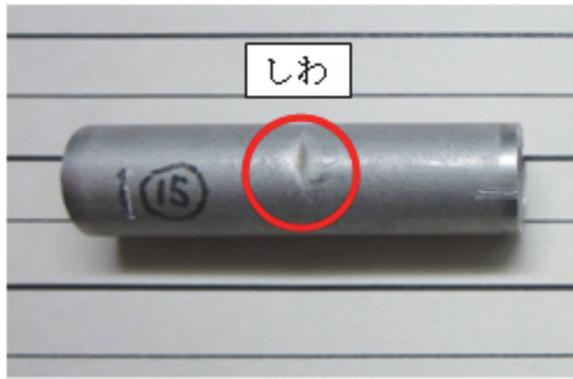


図7 成形押し段階で試験片に生じた“しわ”の例

の円管が、外径不変で軸方向に均一に増肉する場合には、計算上の肉厚は 2.07mm ($2.07 / 0.8 = 2.6$ 倍) となるはずである。実際には、試験片と金型との間の摩擦の影響があるため、同図に示すように、中央部付近よりも両端部付近のほうが大きく増肉し、均一には増肉しなかった。また、試験片の内面側の表面粗さが非常に大きくなったため、肉厚の測定値は不安定であったが、少なくとも素管肉厚の 2.3 倍 ($=1.85 / 0.8$ 倍) に増肉させることができた。なお、この図では、試験片に加える内圧が高い方が大きく増肉する結果となっているが、本実験の範囲内では必ずしもそのような傾向があることまでは確認できていない。円管の初期肉厚の公称値は 0.80mm であるが、実測値は $0.83\text{mm} \sim 0.73\text{mm}$ 程度であったので、このような初期肉厚のばらつきに十分に配慮した実験が必要である(今回の実験では配慮が必ずしも十分ではなかった)。図11に成形押し量と軸押し荷重の関係を示す。当然ながら、成形内圧が高いほうが軸押し荷重は高い結果となっている。また、成形押しに伴う軸押し荷重の推移から、『しわ』の発生が分かるのではないかと期待していたが、実際には判別できない結果となった。

4. FEA での検討

シミュレーション (FEA) には、LS-DYNA ver. 971 (アメリカ Livermore Software 製)³⁾ を使用し、動的陽解法有限要素法で解析を行った。図12, 13に FEA で求めた変形状と相当ひずみ分布を示す。肉厚分布には円管と金型との摩擦の影響が現れ、摩擦がゼロであれば長手方向に均一となることは FEA の結果として確認できた。相当ひずみ分布は、特に管端部の内外面で非常に大きく変わるため、肉厚方向のメッシュについてはできるだけ細かく分割すべきである。

図14は増肉加工中の軸押し荷重を FEA で再現することで管材と金型との間の摩擦係数(クーロン摩擦)を推定したものである。動摩擦係数=静摩擦係数= μ とした場合、 $\mu = 0 \sim 0.05$ 程度であると推定される。成形押し量が大きい場合には、 μ がほぼゼロになるような結果となっている

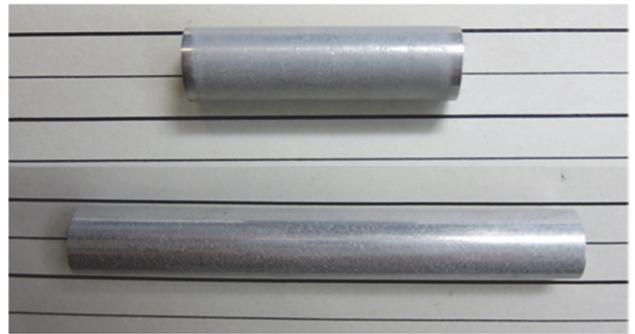


図8 “しわ”の発生がない場合
(上: 増肉加工後, 下: 増肉加工前の試験片)

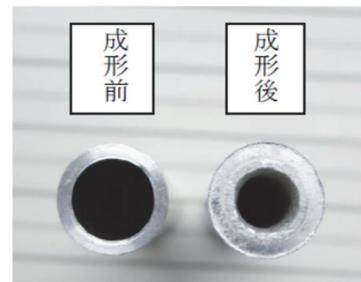


図9 液圧増肉加工後の管端部の例 (実験結果)

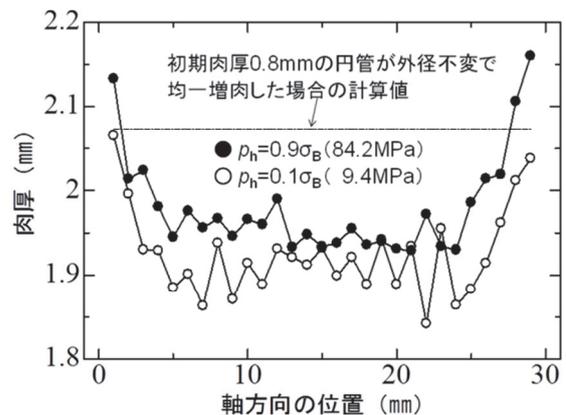


図10 液圧増肉加工後の肉厚分布の例 (実験結果)

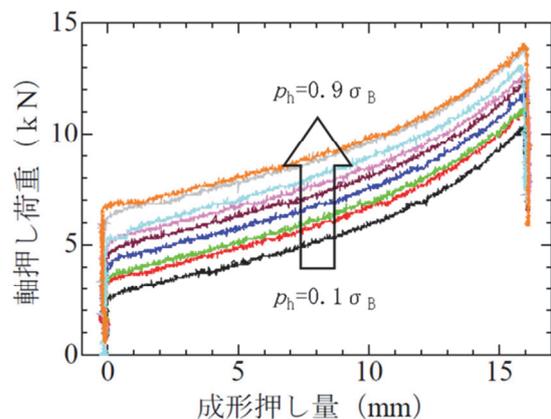


図11 軸押し荷重 (実験結果)

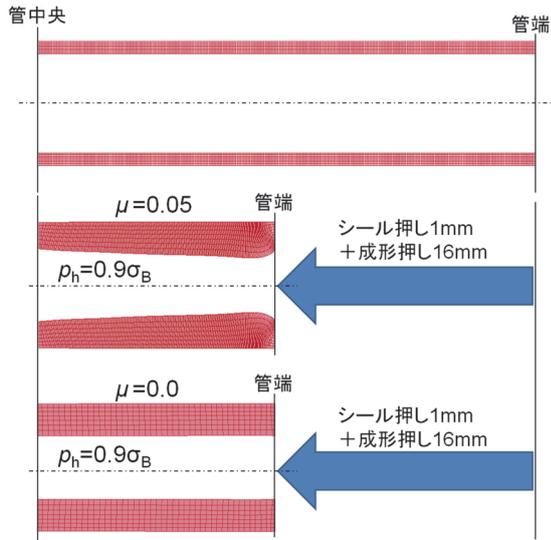


図 12 液圧増肉加工後の肉厚分布の例 (FEM)

が、管材に生じる相当ひずみが大きい範囲 (引張試験でのひずみの範囲を超える状態)での検討がさらに必要となる。今後、大きなひずみ範囲での応力-ひずみ曲線を求めて確認する必要がある。図 15 は摩擦係数を 0.3 とした場合である。管材と金型とが焼き付かなければ、このような増肉加工が実現する可能性がある。また、その場合、さらに一層大きなひずみ範囲での検討が必要となる。

5. まとめ

本研究では、チューブハイドロフォーミング (THF) における管材 (アルミニウム合金 A6063 円管, 初期外径 8mm・肉厚 0.8mm, 長さ 64mm) の増肉を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 管材に内圧を加えずに金型の中で軸押しのみを加える実験をしたところ、管材に“しわ”を生じさせない程度の軸押し量では管中央部を増肉させることはできなかった。このとき、両端部付近では 10%程度増肉した。
- (2) 管材に成形内圧を加えつつ軸押しする実験では肉厚を元の 2 倍程度に増加させることができた。このときに管端部に生じる相当ひずみは、FEM シミュレーションから、1.0 を超えると予測された。
- (3) “しわ”を生じることなく増肉させる際に必要となる最小限の内圧を、引張強さを基準にして求めようと試みたが、本実験の範囲では明確にできなかった。これは、管材に加える軸押し量の設定が過大であったためと考える。
- (4) 実験と FEM シミュレーションとで増肉加工中の軸押し荷重を比較することで管材と金型との間の摩擦係数 (クーロン摩擦で動摩擦=静摩擦の場合) を推定したところ、0~0.05 程度であった。
- (5) 摩擦係数が本研究での実験の場合よりも大きい場合、FEM シミュレーションでの検討には、引張試験での

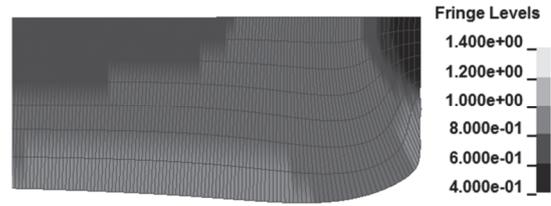


図 13 管端部の相当ひずみ分布の例 (FEM, 図 12 の $\mu=0.05$ の場合)

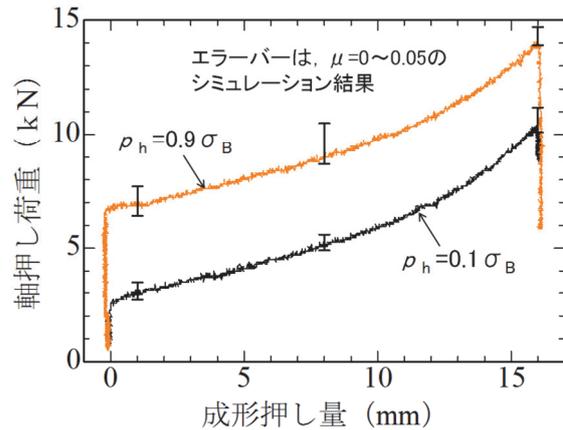


図 14 設定した摩擦係数の妥当性の検討 (FEM)

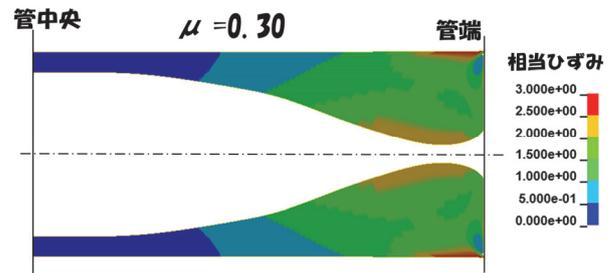


図 15 摩擦係数 $\mu=0.3$ の場合 (FEM)

ひずみ範囲をさらに大幅に超える応力-ひずみ曲線が必要であることが予測された。摩擦係数を 0.3 とした場合、相当ひずみは最大で 3.0 程度となった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013004 を受けて行われました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：チューブハイドロフォーミング, (2015), 168, 森北出版
- 2) 日経 Automotive 2016 年 5 月号, (2015), 24-25.
- 3) John O. Hallquist, LS-DYNA Theory Manual, (2006)
- 4) 白寄篤: アルミニウム合金小径管の液圧増肉加工の検討, 平成 28 年度塑加春講論, (2016), 161-162.