

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560114

研究課題名(和文) 管材のハイドロフォーミングにおける摩擦利用技術開発

研究課題名(英文) Development of a hydroforming method taking advantage of friction

研究代表者

白寄 篤 (Shirayori, Atsushi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50272216

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、外径が数mmオーダーの管材のハイドロフォーミングにおいて、管材と成形金型との間の摩擦を成形に積極的に活用する新たな技術を開発するものである。成形金型の表面に”めっき被膜”を施すことで管材と成形金型との接触状態を変えて、その変化を成形に利用することを目的とした。成形形状は十字継手形状とティー継手形状とした。めっきの効果は成形形状や被膜位置によって異なると言えそうな傾向は確認できた。しかしながら、本研究の範囲内ではめっき被膜の有無による枝管長さの変化は小さかった。めっきによる摩擦力に及ぼす接触面圧の影響がある可能性や、めっきの被膜の厚さが枝管長さに影響した可能性も否定できない。

研究成果の概要(英文)：Feasibility of a new hydroforming technique for small diameter (at most 10-mm-outer-diameter) tubing was evaluated. The technique uses the friction between the tubular specimen (8 mm outer-diameter, 0.8 & 0.5mm thick) and the forming die to control the deformation behavior of the specimens made of copper tubing and aluminum tubing. Electroless plating (0.01mm thick) was adopted to change the frictional surface condition of a cross-shaped forming die and a tee-shaped die. Effect of the surface-plating on the tube deformation weakly appeared in this experimental study. It depended on the forming shape. Besides, it depended on the location of the plating. However, there might have been unclear effect of the contact pressure and plating thickness on the tube deformation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ハイドロフォーミング

1. 研究開始当初の背景

(1) 実用技術としてのチューブハイドロフォーミング (THF) 技術は、自動車構造部品の軽量化技術として 1990 年代に欧米で広く採用されはじめ、日本国内でも大きく発展した経緯がある。その技術展開の流れに乗って、THF 技術は、管材が軽量であることをさらに活かすことのできる加工技術として新たな技術が開発されるなどした。一方で、管材には流体等の流路としての機能もある。しかし、管材を素材とする流路の成形技術として THF 技術を高度化させようとする試みはほとんど行われていなかった。

(2) THF の素材としては、自動車の構造部品のサイズからして、外径が数十 mm で肉厚が数 mm 以下の薄肉素材が一般的に使用されている。管材に内圧を加えて成形金型 (分割型) の中で成形する場合、管材の径が大きい場合ほど、成形中に分割型が離れないようにするための大きな力 (大型プレスなどによる力) が必要である。また、管材の両端部から加える軸押しに必要な力も大きくなる。これらのことが、THF における加工条件 (内圧や管材の軸押し量の大きさ) を限定する状況となっていると考えられた。

(3) 流体の流路として使用されることが多い、外径が数 mm オーダーの小径管材を用いる場合、通常、“肉厚 / 外径” の値が径の大きい管材の場合よりも大きいため、径の大きい管材の加工の場合よりも成形に必要な内圧を大きくする必要はある。しかし、液圧が加わる部分の面積は小さいため、加工機の負担は小さい。このことが、加工条件の限定を緩めることとなり、小径管材を十字継手形状に成形する場合、従来技術よりも成形可能な枝管長さが長くできることが分かっていた。

(4) THF では、成形金型に彫られた溝に管材が接触した状態で溝に沿ってすべりながら成形されるため、その接触状態が管材の変形挙動に影響を及ぼす。しかし、その接触状態に関する研究事例は少ない状況であった。

2. 研究の目的

研究開始当初の研究目的は次の通りである。

(1) 成形金型の表面 (管材と接触する面) の状態を“めっき”を施すことにより元の状態から変化させ、その変化によって管材との接触状態を変える。このことで THF における小径管材の変形挙動を変えることが可能であるかを明らかにする。

(2) “めっき”を成形金型に部分選択的に施すことにより、管材の不整形の発生を抑制することが可能であるかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) “めっき”を施すための十字継手形状成形金型を作製する。“めっき”の種類は、無電解ニッケルめっきであり、めっき中に潤滑性を有する微粒子 (窒化ホウ素など) を分散したものである。

(2) 十字継手形状成形金型を用いて外径 8 mm の管材を成形する。管材としてアルミニウム合金円管および銅円管を用いた。成形実験には既存の装置を用いる。管材に加える内圧は、管材の破裂内圧を基準として、それ以下に設定した。内圧と軸押しの負荷経路の概略図を図 1 に示す。

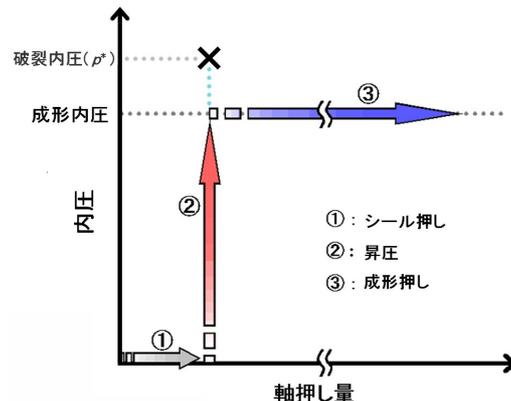


図 1 負荷経路の概略

(3) 有限要素法シミュレーションを用いて“めっき”による摩擦係数を推定する。

(4) “めっき”をティー継手形状金型に部分選択的に施すことにより、管材の不整形の発生を抑制することが可能であるかを明らかにする。

4. 研究成果

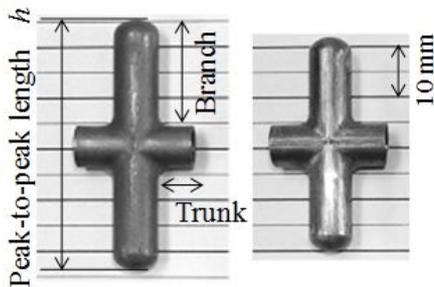
(1) 十字継手形状に成形するための金型を作製した。この金型に“めっき”を施すことになるが、その前にテフロン (PTFE) シートを管材に巻き付けて、摩擦力を下げた条件で実験を行い、管材の変形挙動に及ぼす摩擦の影響を確認した。

図 2 および図 3 に銅管 (初期外径 8 mm、初期長さ 64 mm) を用いた場合の結果を例に示す。成形時にテフロンシートを用いることで、管材と金型との間の摩擦力が減り、枝管長さを長く成形できるはずである。初期肉厚が 0.8 mm の場合には予想通りであったが、初期肉厚が 0.5 mm の場合には予想通りではない結果となった。テフロンシートを用いた場合には、管両端部からの軸押し (両側から 20 mm ずつ) による材料流動がより容易となり、枝管部への材料供給が促進されるが、初期肉厚が 0.5 mm の場合には材料供給が“しわ”の原因となる傾向があり、枝管の成形に有利には働かなかった。なお、

管材を成形するための内圧については、管材の破裂内圧を基準として、その30~80%とした。テフロンシートの有無に関わらず、破裂内圧のおおよそ50%以下では成形内圧が低すぎて枝管は成形できなかった。

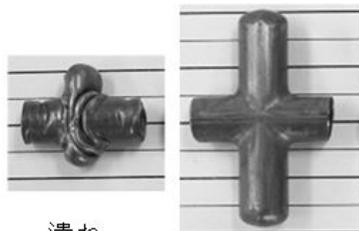
図4は、テフロンシートを用いた実験における銅管の初期凹みを示したものである。管材に内圧を加える前に、油圧シールのために軸押し（シール押し）を管材の両端から2mmずつ加えた後、成形内圧を加え、さらなる軸押し（成形押し）は加えない状態のものを形状測定器で測定した。成形内圧を加えた後であるにも関わらず、初期肉厚0.5mmの場合には大きく凹んだままであった。このような凹みが成形押しで“しわ”となったと考えられた。

シール押しの量を2mmから減らした実験も行ったが、この場合にも成形結果に及ぼす初期肉厚の影響が現れた。図5は初期肉厚0.5mmの銅管の成形において、シール押し1.1mmとした場合の結果である。これらの“しわ”や“潰れ”は、初期肉厚0.8mmの成形時には発生することはなかった。



(a) テフロンシートあり (b) テフロンシートなし

図2 初期肉厚0.8mmの銅管（外径8mm）を用いた成形実験結果



潰れ

(a) テフロンシートあり (b) テフロンシートなし

図3 初期肉厚0.5mmの銅管（外径8mm）を用いた成形実験結果

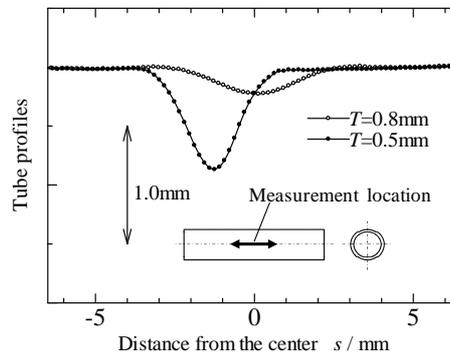


図4 テフロンシートを用いたときの銅管側面の初期凹み状況（内圧負荷後の成形押し直前）



図5 初期肉厚0.5mmの銅管に生じた“しわ”など（シール押し量低減後(1.1mm)）

有限要素法シミュレーションを用いた摩擦係数の推定に関しては、実験結果とシミュレーション結果（軸押し変位と軸押し荷重の関係）の乖離が大きく、正確な推定はできなかった。この原因の一つとして、継手形状成形で管材に生じるひずみが大きい（引張試験で得ることができる応力-ひずみ範囲を大きく超える）ことが考えられた。シミュレーションの入力データとして必要な、ひずみが大きい範囲における応力-ひずみ関係を求める方法が必要である。また、十字継手形状成形のシミュレーションでは、解析中に有限要素メッシュが大きく潰れるため、このことも解析結果に影響する。

(2) 有限要素法シミュレーションに頼ることのみならず、初等解析で摩擦係数を推定できるようにすることを考え、解析モデルを考案した。

図6に初等解析モデルのモデル化の違いを比較したものを示す。違いを大きく分類すれば、成形中の肉厚増加に伴う周方向ひずみを考慮する『厚肉管モデル』と考慮しない『薄肉管モデル』とに分けることができる。解析モデルを用いた軸押し荷重の推定結果を外径8mm・肉厚0.8mmのアルミニウム合金管を用いた継手形状成形の実験結果と比較することを念頭に置いて検討した。

	厚肉管モデル		薄肉管モデル		
	model-1	model-2	model-3	model-4	model-5
ϵ_0 の値の考慮	○	○	×	×	×
p_{die} に及ぼす σ_0 の影響	○	○	×	×	×
半径方向のひずみ分布	○	×	×	×	×
加工硬化の影響	○	○	○	×	×
断面積 A_1 と受圧面積 A_2 の変化	○	○	○	○	×

※摩擦係数はすべてのモデルで $\mu=0.05$ とした。

図6 初等解析モデルのモデル化の違い

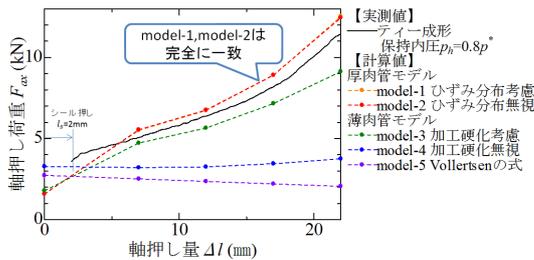


図7 初等解析モデルによる計算結果と実験結果との比較（摩擦係数 0.05 の場合）

図7にティー成形実験結果と初等解析モデルによる計算結果とを比較したものを示す。

初等解析モデルによる計算結果は、軸押し量が大きくなるにつれて、加工硬化を考慮するか否かで傾向が大きく違った。加工硬化を考慮したモデルでは、厚肉管モデル、薄肉管モデルを問わず実験結果に近い値となった。実験結果をほぼ予測できる初等解析モデルでは、計算結果を求めるための入力データとして成形中の素管部の肉厚の値を必要とするものである。本研究の計算では、素管部の肉厚の実測データから実験式を作成し、それを計算に用いたが、将来的に、肉厚を実測しなくとも軸押し量から計算で求められるようにするなどすれば、より使いやすい解析モデルとなると考える。また、解析モデルの妥当性をより明確にするためには、軸押し荷重のみならず、成型型(割型)が成型中に開かないようにするために必要な力(型締め力)を実測して、解析モデルによる計算結果と比較することも考えられる。

(3) 十字継手形状成形金型に“めっき”を施してアルミニウム合金円管の成形を行った。

表1に“めっき”の硬さと動摩擦係数の公称値を示す。“めっき”は窒化ホウ素と二硫化モリブデン粉末を分散した無電解ニッケルめっきであり、ベーキング(300 ×2 時間)を施したものである。

表1 “めっき”の硬さと動摩擦係数

硬度 (HV)	ベーキング前	500 ~ 600
	ベーキング後	1000 ~ 1100
動摩擦係数	PPS (Si40%)	0.22
	SUJ-2	0.60

桑名商事株式会社：907 機能めっきパンフレットより引用

実験には、初期外径8mm・初期肉厚0.8mmのA6063アルミニウム合金円管を用いた。焼なましを施した試験片と施さない試験片とでそれぞれ実験を行い、“めっき”の影響を調べた。いずれの場合にも“めっき”を施すと、“めっき”を施さない金型での実験結果と比べて結果の“ばらつき”が大きくなった。しかし、およそその結果として、継手形状の枝管長さが若干短くなり、また、軸押しに必要な荷重も若干高くなる傾向があったため、“めっき”によって摩擦係数が高くなったと考えられた。

当初の想定では、十字継手形状成形では、管材の変形挙動に及ぼす“めっき”の影響が大きく現れる(テフロンシートを用いた実験におけるテフロンシートの有無の影響と同程度に現れる)ことを期待していたが、結果的にはそれほど大きな影響は現れなかった。

(4) ティー継手形状成形金型の下型にのみ“めっき”を施してアルミニウム合金円管の成形を行った。

十字継手形状成形金型に施した“めっき”と同じ“めっき”をティー継手形状成形金型の下型にのみ施した実験を行った。アルミニウム合金円管試験片も十字継手形状成形の場合と同じものを用いた。図8に成形実験結果の例を示す。

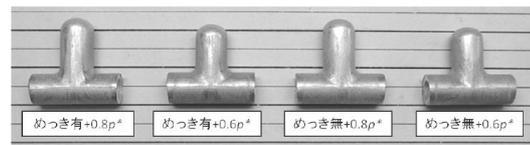


図8 ティー継手形状成形実験の例(下型にのみ“めっき”)

十字継手形状成形の場合と同様に、管材の変形挙動に及ぼす“めっき”の影響は大きくなかった。しかし、“めっき”による枝管高さの増減については十字継手形状成形の場合と逆であった。つまり、ティー継手成形形状では“めっき”を施したことで摩擦係数が下がったような結果(枝管の長さが長くなり、肉厚の増加が

抑えられ、また、軸押しに必要な荷重も下がる結果)となった。ティー継手形状成形では、十字継手形状成形に比べて肉厚の増加が大きい(図9)。成形金型と試験片との接触面圧を考えた場合、肉厚の増加が大きいほうが接触面圧は高くなるため、このことが“めっき”の摩擦係数に影響した可能性があるが、本研究の範囲ではそのことを確認するまでには至っていない。

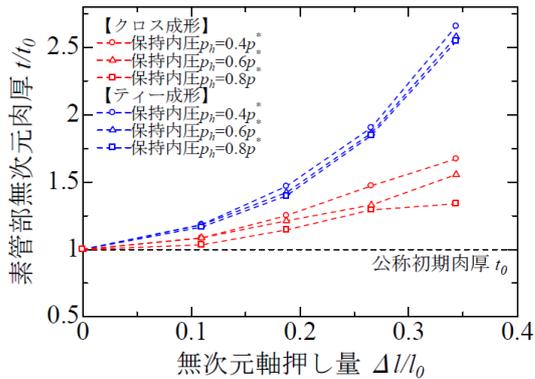


図9 ティー継手形状成形と十字継手形状成形における素管部の肉厚増加(アルミニウム合金 A6063 円管, 初期外径 8mm・初期肉厚 0.8mm, 焼なまし材の場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

白寄 篤, 安藤 嵩敏, 奈良崎 道治, 薄井 雅俊, 小径銅管の液圧バルジクロス成形に及ぼす初期肉厚の影響, 塑性と加工(日本塑性加工学会誌), 査読有, 54巻 634号, 2013, 988 - 992

〔学会発表〕(計4件)

白寄 篤, 小径管の液圧バルジクロス成形に及ぼす初期肉厚の影響, 第64回塑性加工連合講演会, 2013年11月1日~11月3日, 吹田市

白寄 篤, アルミニウム合金小径管の液圧バルジティー成形に及ぼす焼なましの影響, 第64回塑性加工連合講演会, 2013年11月1日~11月3日, 吹田市

Atsushi Shirayori, Effect of Initial Thickness on Cross-Shaped Tube Hydroforming of Small Diameter Tubing, 6th International Conference on Tube Hydroforming (TUBEHYDRO 2013), 2013年8月26日~8月28日, Jeju (Korea)

白寄 篤, 厚肉小径管の枝管成形における初等解析を用いた加工力の予測, 第63回塑性加工連合講演会, 2012年11月4日~11月6日, 北九州市

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.utsunomiya-u.ac.jp/mpl/labo>

6. 研究組織

(1)研究代表者

白寄 篤 (SHIRAYORI, Atsushi)

宇都宮大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 50272216