

# 持続可能なエネルギー吸収能をもつ 二層円管の鍛造/組付けの同時成形法の開発

奈良工業高等専門学校 機械工学科  
准教授 榎 真一

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014030)

キーワード：前後方押し出し、組付け、弾性歪み

## 1. 研究の目的と背景

従来の木造建築は、木製の柱の端部を削って作られる「ほぞ」という突起を木製の土台の「ほぞ穴」という溝に嵌め込んで組み立てられている。地震発生時には「ほぞ」が土台にめり込むことでエネルギーが吸収される。めり込み現象は木材の破壊に至ることが多く、そのエネルギー吸収の持続性は望めないのが現状である。持続的にエネルギー吸収をする装置には免震装置があり、ビルなどの比較的大きな建物へは導入されている。しかし、戸建て住宅の木造建築へ適用するには設置工事を含めて高価であるため、安価なもの開発が望まれている。このような背景から、筆者は、二層円管を一つのセルとして用いた持続可能な木造建築用エネルギー吸収デバイスを提案し、弾性域内において二層円管の円管同士の摩擦によってエネルギーが吸収されることを確認した<sup>1)2)</sup>。さらに内層円管の内側形状を異形にすることで、その能力が大きくなる可能性があることがわかった<sup>3)</sup>。また、内層円管が外層円管に対してしまりばめ状態の方がエネルギー吸収量は高いこともわかった<sup>4)</sup>。これらの知見を用いて、現在、このデバイスの木造建築用継手へ適用する応用研究を行っており、将来的にこの二層円管の量産手法が必要になると考える。

そこで、本研究では、二層円管の成形方法として、外層円管を金型の中に配置し、その外層円管の内側に円柱型ブランクを配置して、パンチを押し込むことで内層円管の内側形状を冷間鍛造で成形すると同時に外層円管と組み付ける方法を提案し、その最適条件について検討を行った。

この成形法を提案した理由としては、内層円管の内側形状を自由に決定しても成形が可能であること、内層円管の成形において内側から外層円管を押し広げるように成形することから成形後の外層円管の弾性回復によってしまりばめ状態が期待できることの2つである。この成形法は次工程で打ち抜き加工を想定している。

具体的には、まず、内層円管の内側形状が円形の場合に対して、解析と実験を比較することで解析方法の妥当性を確認した。次に、ブランク位置が異なる場合を検討して、内層円管を後方押し出しと前後方押し出しのどちらが良いかを検討した。成形後の評価方法は、円管どうしの接触部全周にヒステリシスを発生させる必要があり、内層円管が外層円管に締め付けられる状態が理想的であることから、その評価法を検討した後、最適な成形条件を検討した。

## 2. 解析の妥当性の検証

### 2・1 解析条件及び実験条件

解析の妥当性を確認するために、図1に示すような前後方押し出しを対象として解析と実験を行った。解析では、塑性加工解析ソフトウェア simufact.forming (MSC ソフトウェア社) を用いた。パンチ速度は 0.5mm/s とした。実験では図1に示す形状の金型を製作し、サーボプレス H1F60-1 (コマツ産機) を用いて成形実験を行った。ストローク 5.5 mm まで押し込んだ時点での解析結果および実験結果を比較した。

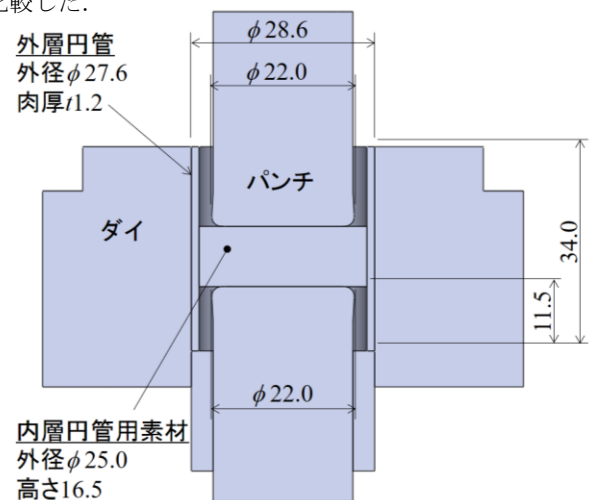


図1 解析の妥当性を検証するための前後方押し出しの金型の形状および素材形状

### 2・2 実験結果と解析結果との比較

実験後の成形品の写真および寸法測定位置を図2に示す。また、解析結果の弾性歪み分布を図3に示す。さらに、実験と解析の成形後の寸法を比較したものを表1に示す。

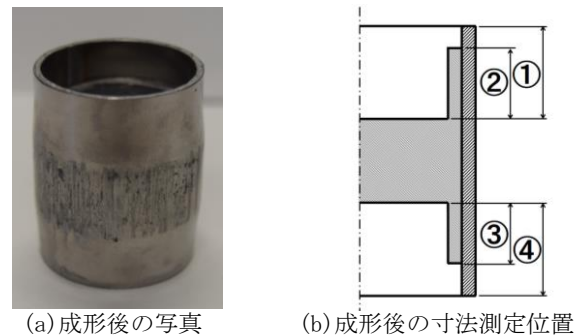


図2 実験結果

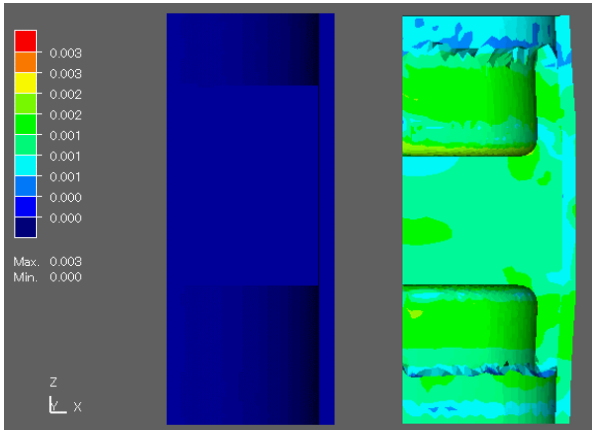


図3 解析結果（左：パンチ押し込み前，右：パンチ押し込み後，離型した素材の弾性歪み分布）

表1 実験及び解析における成形後寸法の比較（単位：mm）

寸法測定位置	①	②	③	④
実験結果	11.0	3.9	6.1	12.0
解析結果	11.6	2.8	4.9	11.5

### 2・3 検証結果

実験では弾性歪みを測定できなかったものの，成形後の形状は実験と解析で概ね類似しており，相対的に判断しておく上で，成形解析は妥当であると考ええる。

## 3. 工法の選択<sup>5)</sup>

### 3・1 二層円管と工法

本章では，後方押し出しと前後方押し出しの2ケースを対象として，それぞれ2種類のサイズのブランクを想定して解析を行い，その結果をもとに二層円管を成形する上で最適な工法を選択を行った．本章で対象とする二層円管は，外径30mm，肉厚1mm，長さ33mmの外層円管と，外径28mm，肉厚2mm，長さ33mmの内層円管とし，それぞれの材質を炭素鋼（S15C），アルミニウム（A1100）とした．図4に示すように，後方押し出しと前後方押し出しの2ケースを対象として，それぞれ2種類のサイズのブランクを想定して解析によって検討を行った．

### 3・2 解析条件

内層円管の内側形状が円形の場合を取り上げ，解析モデルは軸対称2次元モデルとして，パンチ及びダイは剛体要素とした．パンチ速度は2.5mm/s一定で設定し，パンチ及びダイとブランクとのクーロン摩擦係数及びせん断摩擦係数は0.5とした．解析には塑性加工解析ソフトウェアsimufact.forming（MSCソフトウェア社）を用いた．材料特性は，このソフトウェアのデータベースから設定した．

### 3・3 解析結果および考察

相当応力分布及び荷重-ストローク線図を図5及び図6に示す．図5(a-1)のストローク2.44mmと図5(b-1)のストローク2.69mmにおいて図5の荷重増分に着目すると，アルミニウムブランクが外層円管に接触するまでのパン

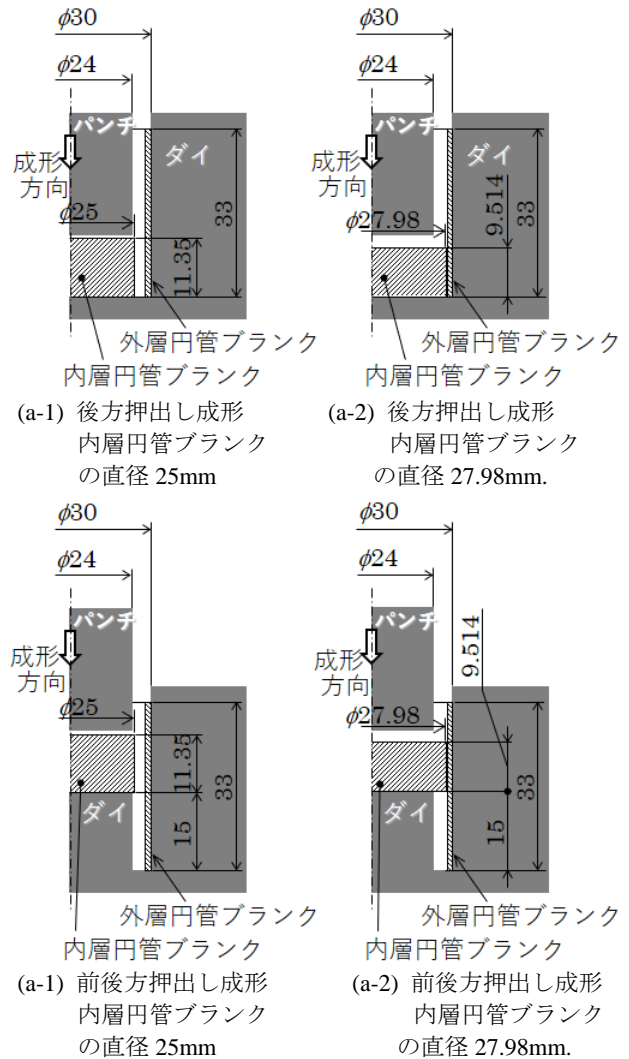
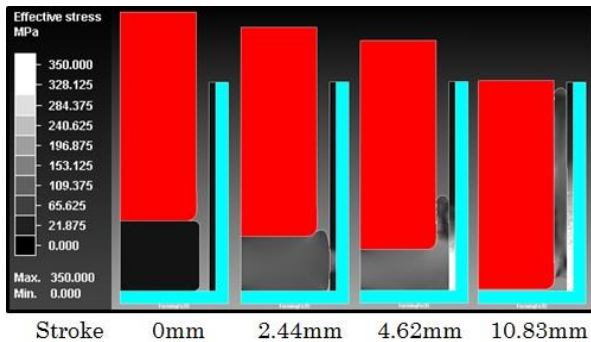


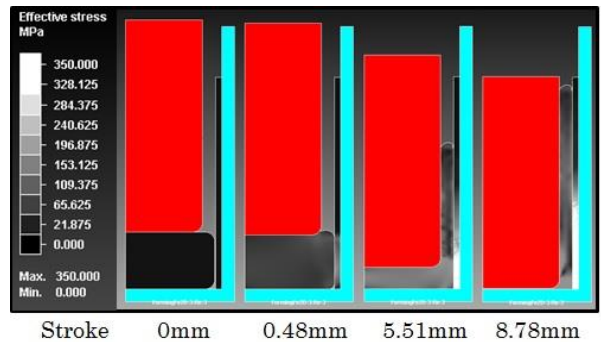
図4 工法選択のための解析条件

チ押し込み量における加工荷重の増分は小さいが，接触後に加工荷重の増分が大きくなる．一方，図5(a-2)(b-2)ではストロークが1mmに満たない段階でアルミニウムブランクが外層円管に接触しており，小さいパンチ押し込み量で加工荷重の増分は大きいことがわかる．図6からいずれの条件でもパンチ押し込み量が下死点付近で加工荷重の増分が大きくなるものの，成形後の加工荷重は，アルミニウムブランクの直径は外層円管の内径よりも小さい方が荷重値は低いことと，後方押し出しよりも前後方押し出しの方が荷重値は低いことがわかる．また，成形後の応力分布は，図5(a-1)(a-2)から後方押し出しでは外層円管は降伏応力を超えている領域が広く，図5(b-1)(b-2)から前後方押し出しでは，外層円管が中央部の一部に加工硬化が生じているものの全体的に弾性域内で加工されていることから，本研究の対象である二層円管の成形方法としては，前後方押し出しでアルミニウムブランクの外径は外層円管の内径よりも小さい方が良いと考える．

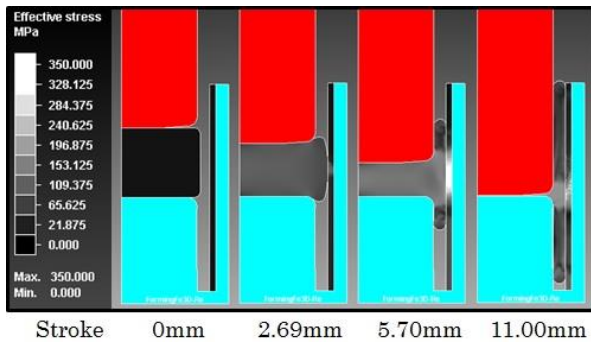
以上より，前後方押し出しでアルミニウムブランクの外径は外層円管の内径よりも小さい方が二層円管の成形に適していると考ええる．



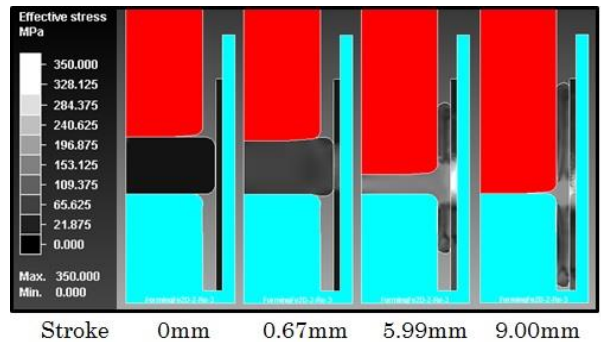
(a-1) 後方押し成形 内層円管ブランクの直径 25mm



(a-2) 後方押し成形 内層円管ブランクの直径 27.98mm



(b-1) 前後方押し成形 内層円管ブランクの直径 25mm



(b-2) 前後方押し成形 内層円管ブランクの直径 27.98mm

図5 工法を選択のための解析結果(相当応力分布)

#### 4. 二層円管の機能性評価を考慮した成形性評価

##### 4.1 評価方法および解析条件

成形後の評価方法は、二層円管の機能性を考慮すると、円管同士の接触部全周にヒステリシスを発生させる必要がある。内層円管が外層円管に締め付けられる状態であることを判断するには、成形後の弾性歪みが単なる残留歪みではないことを確認できれば、外層円管が内層円管を締め付けることによって発生している弾性歪みであると判断できる。本章では、図7に示すモデルを用いた前後方押しによる二層円管の成形解析を外層円管有りの場合と金型モデルは同じで外層円管無しの場合で行って、成形後の弾性歪み分布を比較した。外層円管無しの場合のブランクは外層円管の外径と同じサイズとした。パンチ速度は10mm/sとした。材質は、外層円管は機械構造用炭素鋼鋼管(STKM11A)、内層円管はアルミニウム(A1100)を想定した。ストロークは、成形後に2mmの肉厚が残るように設定した。

##### 4.2 解析結果及び考察

パンチおよび金型を取り除いた後の相当弾性ひずみの解析結果を図8に示す。図8(a)は外層円管有り、図8(b)は外層円管無し場合の結果である。これらを比較すると、外層円管有りの場合は内層円管と外層円管とが接触している部分で相当弾性ひずみが多く残っている。一方、外層円管無しの場合では相当弾性ひずみがゼロに近づいている部分が多く存在する。このことから、外層円管有りの場合は、外層円管が内層円管の弾性回復を妨げていると考えられる。このことから、外層円管が内層円管を締め付けているといえる。

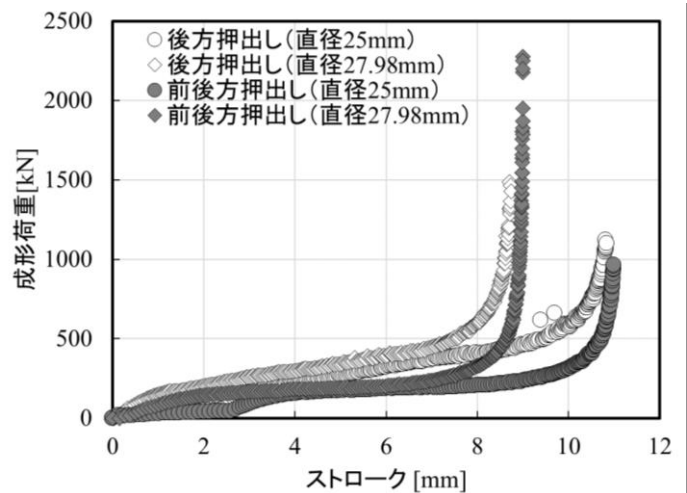


図6 解析結果(荷重-ストローク線図)

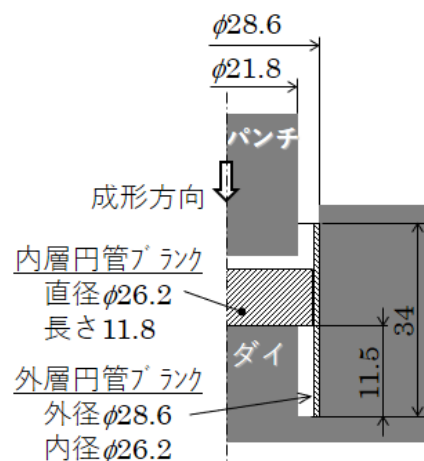
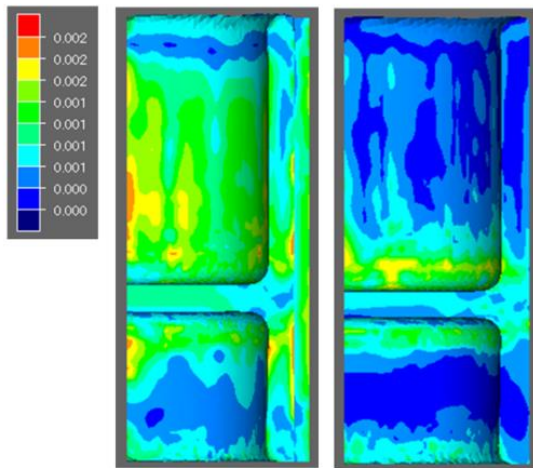


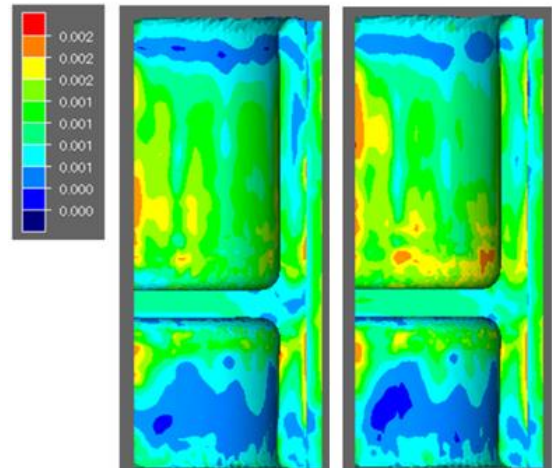
図7 成形性評価のための解析条件





(a)外層円管有り (b)外層円管無し

図8 外層円管の有無による弾性歪み分布の比較



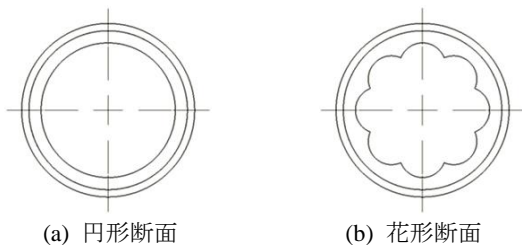
(a) 10mm/s の場合 (b) 50mm/s の場合

図10 内層円管の内側形状が円形断面におけるパンチ速度の違いによる弾性歪み分布の比較

## 5. 最適な成形条件の検討

### 5・1 解析条件

本章では、パンチ速度の影響について、機能性評価でエネルギー吸収能が高いと考えられる内層円管の内側形状が花形の場合も含めて検討を行った。内層円管の内側形状は、本研究で提案している成形法では、パンチの断面形状を設定することで決定することができる。図9にパンチの断面形状を示す。パンチ速度は10mm/sおよび50mm/sを設定した。他の解析条件はすべて4章と同じとした。



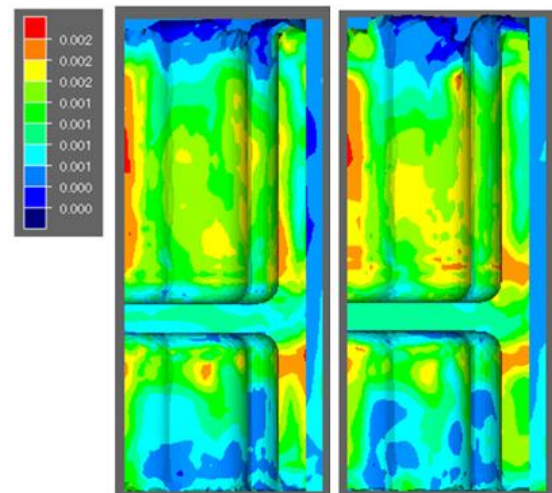
(a) 円形断面

(b) 花形断面

図9 パンチ断面形状

### 5・2 解析結果及び考察

パンチ速度の違いによるパンチ形状が円形の場合の相当弾性歪み分布の比較を図10に、パンチ速度の違いによるパンチ形状が花形の場合の相当弾性歪み分布の比較を図11に示す。図10、図11からいずれの条件においても、内層円管と外層円管の接触部に弾性ひずみの残っている部分が存在することがわかる。図10からパンチ速度10mm/sでは隔壁近傍の弾性歪みが大きく、接触部の上の方に弾性歪みが低い領域があるのに対して、パンチ速度50mmの方は、隔壁近傍も軸方向にほぼ均一に弾性歪みが分布しているのに加えて、接触部の上の方も弾性歪みがパンチ速度10mm/sの場合よりも高い値を示していることがわかる。これより、パンチ速度が高い方が、弾性歪み分布は軸方向に比較的均一に発生しており、二層円管のエネルギー吸収能が高くなると考えられる。図11から花形形状の場合においても、同様の傾向があることがわかる。



(a) 10mm/s の場合 (b) 50mm/s の場合

図11 内層円管の内側形状が花形断面におけるパンチ速度の違いによる弾性歪み分布の比較

図10と図11を比較すると、内層円管の内側形状が花形形状の方は外層円管の相当弾性歪みが小さいことから、花形形状の成形後の軸方向の弾性歪みが支配的であり、内層円管の内側形状が円形断面の方が、外層円管が内層円管を締め付けているといえる。

## 6. まとめ

エネルギー吸収能を持つ二層円管の成形法として、外層円管の内部で内層円管を鍛造で成形すると同時に組み付ける方法は有効であることがわかった。その最適な条件は、前後方押しでパンチ速度が大きい方がいいことがわかった。また、機能性の面からは、内層円管の内側形状は花形形状の方がよいという知見があるが、本成形法で二層円管を成形する場合には、円形断面の方がエネルギー吸収能を高く成形できる可能性があることがわかった。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり研究助成をいただいた公益財団法人天田財団に深く感謝の意を表す。また、2014年度に Nanyang Polytechnic からの短期留学生であった Son Yuher 君および専攻科生であった上田大君、2015年度に本科生であった山岡修一郎君、現専攻科生の河原田将也君の協力を得て研究を行った。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) A.Nomura et al. “Design condition of a sustainable two-layer circular tube with absorbing energy capacity”, Computational Methods and Experimental Measurements XVI, WIT Transactions on Modelling and Simulation Vol.55(2013), pp.103-114.
- 2) 野村垂未他 3 名, “摩擦および肉厚の影響を考慮した横圧縮荷重下における二層円管の設計条件の補正法”, 日本設計工学会 2013 年度秋季大会研究発表講演会講演論文集, (2013), pp.155-156
- 3) A.Nomura et al. “Study on hysteresis in sustainable two-layer circular tube under a lateral compression load”, WASET International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, Vol. 8, No. 12(2014), pp.1885-1889.
- 4) 野村垂未他 5 名, “ヒステリシスロスによるエネルギー吸収能力を持つ持続可能な二層円管に関する研究”, 日本機械学会 2015 年度年次大会講演講演論文集 CD-ROM, (2015), 講演番号 G1100103.
- 5) 榎真一他 3 名, “二層円管の鍛造/組付けにおける成形性に及ぼすパンチ押し込み量の影響”, 第 66 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2015), pp.261-262.