

# チェーン状鈴形中空金属球による新超軽量ポーラス金属材料の開発

香川大学 工学部 知能機械システム工学科

准教授 吉村英徳

(平成 24 年度奨励研究助成 AF-2012029)

キーワード：超軽量ポーラス金属，中空金属球(MHS)成形体，ロータリープレス法

## 1. 研究の背景と目的

自動車等輸送機器の CO<sub>2</sub> 排出量や消費エネルギーの削減に有効な一手法として、車体の軽量化がある。一方で、衝突安全性向上のため、部材が追加され、車体重量は増加傾向にある。これらの相反する課題を解決する材料技術として、高比剛性、高比衝撃吸収特性を持つ相対密度 0.3 以下の超軽量ポーラス金属がある。しかし、従来のポーラス金属は、プロセスコストが高い、材料内部の気孔分布にばらつきがあり信頼性が低い、気孔生成が制御困難で気孔率、すなわち性能制御が難しい、引張り変形に弱いなどの問題があり、実用化には至っていない。

私研究では、これらの課題を改善すべく次のような新超軽量ポーラス金属材料の開発を行う。

- 1) 安価かつ均質で信頼性が高い
- 2) 圧縮の衝撃エネルギー吸収性のみならず、引張り変形に強く曲げエネルギー吸収性も高い
- 3) 中空球寸法や球間隔により成形体密度が容易に変更でき、吸収性能の制御性が高い

上記を満たす新材料として、これまでに塑性加工を用いて鈴形中空球<sup>1)</sup>を製造することを提案した。鈴形中空球は、薄板材から微細順送りプレスを用いて鈴形に成形され、成形体を作製する。作製した鈴形中空球成形体の性能評価<sup>2)</sup>を行ったところ、圧縮試験では従来の粉末冶金法で製造された中空球成形体と比較して、球同士の接合強度やメッキコーティングによる球強度の向上により圧縮変形抵抗および単位重量当たりのエネルギー吸収量の増加が見られた。曲げ試験では従来の中空球成形体と同様に球同士が点接触で固化成形されることから引張り変形には脆弱であるという結果になった。

そこで、本研究では、長手方向引張り強度を高くするために、中空球がブリッジで接続されたチェーン状鈴形中空球を提案し、固化成形技術を確認させ、その成形体の圧縮および曲げ試験を実施して機械特性を評価する。また、チェーン状鈴形中空球の製造では、ブリッジにて繋がった状態で鈴形中空球を作製し、それを積層・固化成形するが、ブリッジが繋がったまま順送りプレス絞り加工にて鈴形に成形するには、球間のブリッジが引張りによる破断するなどの問題があり、金型などの設計が困難である。そこで、ロータリープレスの適用を考え、板成形技術の向上を図る。本論文では、①チェーン状鈴形中空球を試作して性能評価をする、②半球絞り加工用ロータリープレスを試作し、チェーン状鈴形中空球の加工実験を行った結果の 2 テーマについて報告する。

## 2. 新超軽量ポーラス金属材料の提案

### 2.1 チェーン状鈴形中空球

これまでの中空金属球(MHS : Metallic Hollow Sphere)の課題を改善する新超軽量ポーラス金属材料として、チェーン状鈴形中空球を提案する。新提案のチェーン状鈴形中空球は、図 1 のように複数の鈴形中空球がブリッジで繋がって一体となったボールチェーン状をしている。試作する中空球の寸法を表 1 に示す。球の肉厚および直径に関しては、ポーラス金属材料を自動車のエネルギー吸収部材に適用するとして、5MPa 前後の圧縮プラトー応力を狙い、既開発の鈴形中空球同様、成形体の相対密度を $\rho=0.1$ 程度とするため決定した。また、球ピッチは、成形体の構造が FCC 構造となるように、図 2 の FCC 構造の一辺における原子間距離と等しい。材質は肉厚  $t=0.1\text{mm}$  の絞り用冷間圧延鋼板 SPCD を用いる。

成形体の作製としては、製造されたチェーン状鈴形中空球を積層し、球同士を接合することで実現する。球同士の接合には、低融点金属めっき後、炉内で加熱溶融させて接合するブレイジング固化成形法を用いる。表面に低融点金属を用いるのは母材への熱影響がないようにするため

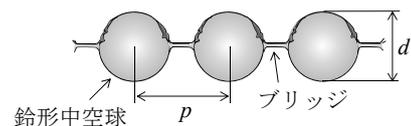


図 1 チェーン状鈴形中空球のイメージ図

表 1 チェーン状鈴形中空球寸法

肉厚 $t$ [mm]	0.1
直径 $d$ [mm]	5
球ピッチ $p$ [mm]	7.07

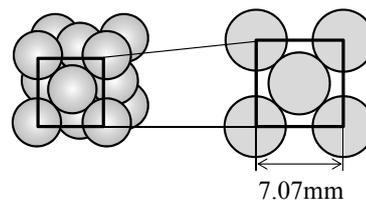


図 2 FCC 構造の原子間距離( $\phi 5$  の場合)

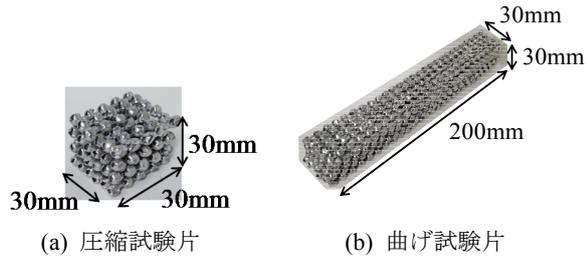


図3 チェーン状鈴形中空球成形体

あり、めっき材料にははんだ付け性に優れるスズハンダを選択している。母材との密着性を高めるため、下地に膜厚  $1\mu\text{m}$  の Cu をドーピングした後、膜厚  $30\mu\text{m}$  のめっきを施す。めっきされた中空球を交互に積層して FCC 構造とし、それを大気炉にて約  $300^\circ\text{C}$  で 20 分加熱保持した後、空冷することで固化する。固化成形体を図 3 に示す。

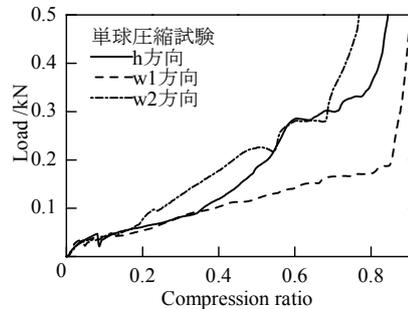
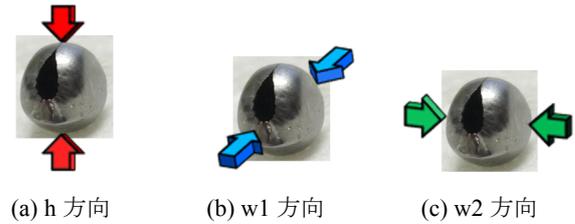
## 2.2 圧縮特性および曲げ特性評価

まず、ブリッジを切断して単球の性能について確認した。3 方向での単球圧縮をした結果それぞれの球で変形が異なり、図 4 に示すグラフのように強度に差が見られることが分かり、中空球が鈴形をしているために球に異方性があった。

作製した成形体を用いて、圧縮試験および 3 点曲げ試験を実施し、チェーン状鈴形中空球成形体の圧縮特性および曲げ特性を評価した。

圧縮試験片は各辺 30mm の立方体とし、速度  $10\text{mm}/\text{min}$  で圧縮した。圧縮試験機として、島津製作所製万能試験機 50kN オートグラフを用い、セル壁のみの接触となるため工具と試験片との摩擦はゼロと仮定している。応力-公称ひずみの結果を図 5 に示す。この結果より、鈴形中空球成形体と比較して荷重の初期立ち上がりが緩やかであること、応力が一定で変形が進行するプラトー領域が見られないことが分かる。この作製した成形体は、チェーン状鈴形中空球の開口部が全て上向きになっているため、圧縮時に球が横に広がりやすくポアソン比が大きくなり、荷重の初期立ち上がりが低くなったと考えられた。そこで、ランダムな向きで積層した成形体についても実施し、2.3 節にて報告する。

3 点曲げ試験片の横断面は  $30\text{mm}\times 30\text{mm}$ 、長さ 200mm の直方体とし、押し込み速度  $60\text{mm}/\text{min}$ 、標点距離 100mm にて試験を実施した。曲げ試験においても圧縮試験時と同様、島津製作所製万能試験機 50kN オートグラフを使用し、押し込み工具半径  $R_1=5\text{mm}$ 、支え工具半径  $R_2=15\text{mm}$  である。荷重-押し込み量の結果を図 6 に示す。押し込み量 21mm の時点で曲げ外側のブリッジが 1 本破断しただけで、この時点でのピーク荷重が  $0.34\text{kN}$  となる。ブリッジ破断までのエネルギー吸収量は  $3.57\text{J}$  で、鈴形中空球をブリッジで繋げず単球で固化成形した成形体と比較すると約 4 倍となっている。このことにより、引張り強度が増大したことが分かりブリッジの効果を確認できた。しかし、圧縮と同様に曲げ試験においても荷重の初期立ち上がりが緩やかとなっている。曲げ試験片もチェーン状鈴形中空球の開口部が全て上向きになった状態で成形体を作製したため、開口部が圧縮されると図 7 に示すように先端が折れ込みやすい変形をし、球の向きが全て一方向に向いていることで材料全体で同様の変形が起こり、変形抵抗に影響を及ぼしていると考えられた。



(d) 方向別単球圧縮試験結果

図4 球の異方性

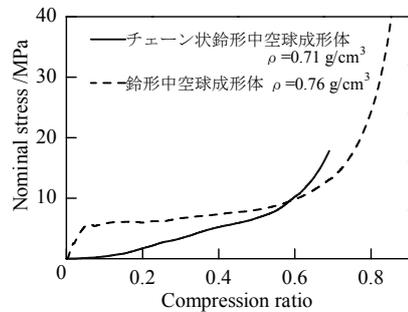


図5 圧縮試験結果(上向き積層)

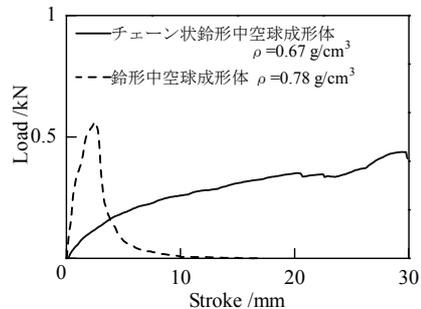


図6 曲げ試験結果(上向き積層)



図7 球圧縮の様子

## 2.3 ランダム方向での積層

成形体内のチェーン状ボールの開口部が全て一方向に向いていることの影響について調査した。圧縮および曲げ変形の性能向上対策として、チェーン状鈴形中空球の向きをランダムに配置する必要がある。ランダムな球配置の方が球の向きの影響を除去し、さらに球の変形の違いにより

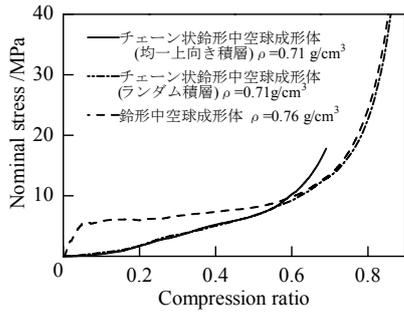


図8 圧縮試験結果比較(ランダム積層)

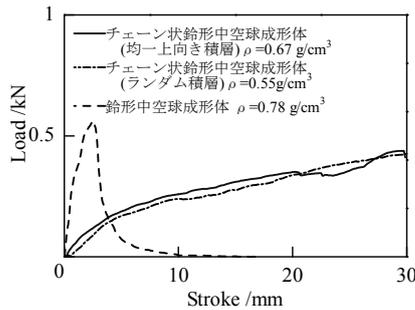


図9 曲げ試験結果比較(ランダム積層)

球同士の抵抗を生むと考えられる。そこで、球列をランダムな配置にした新たな成形体を製作し、再度圧縮試験および曲げ試験を実施し、その結果は図8および図9に示す。ランダムに積層することで球同士の接合については堅固になったのか、圧縮下での球同士の剥離は少なくなって良好になったものの、球の向きを全て上向きに積層した場合と比較して差は見られなかった。鈴形中空球成形体よりチェーン状鈴形中空球成形体の初期の立ち上がりが低い要因として、ブリッジと球の接触部で伸びやすく、それが荷重低下の要因と考えられる。よって現在は層毎に直交に積層する方法について検討中である。

### 3. 半球絞り加工用ロータリープレス法

#### 3.1 チェーン状鈴形中空球の製造法

鈴形中空球の製造では微細順送りプレスを使用していた。しかし図10に示すように、次工程に搬送するためブランクをブリッジで繋いでおり、カップ状への絞り工程でブリッジが引っ張られる。しかし、チェーン状鈴形中空球は最終形状が連結された状態であるため、長軸方向ブリッジを設けると絞り工程でブリッジが破断することになる。そこで、パンチ等3次元プロファイルを表面に付したロールで板材をプレスして加工するロータリープレスの適用を考える。これまでに、薄板材に貫通孔を開けるせん断加工においてロータリープレスの適用がなされているが、それ以外の加工については適用されていない。本研究では板材の成形技術向上も目標としており、ロータリープレスによる製造技術確立も図っている。

図1のようなチェーン状鈴形中空球を製造するために、加工工程を4工程に分け、それぞれロータリープレスを用いる。加工工程を図11に示す。(a)まず、薄板材から図12のような楕円がブリッジで繋がったブランク形状にせん断加工する。(b)次に、ブランクを半球に絞り、(c)その後長軸端部を起し、ブランクをカップ状にする。(d)最後に、カップ先端を丸めて鈴形に成形する。

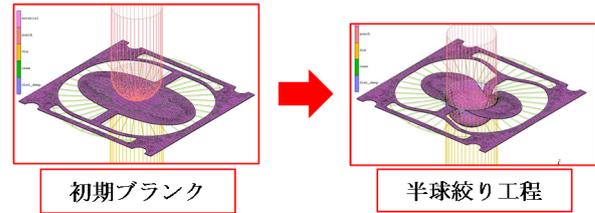


図10 微細順送りプレスによる半球絞り工程での変形挙動

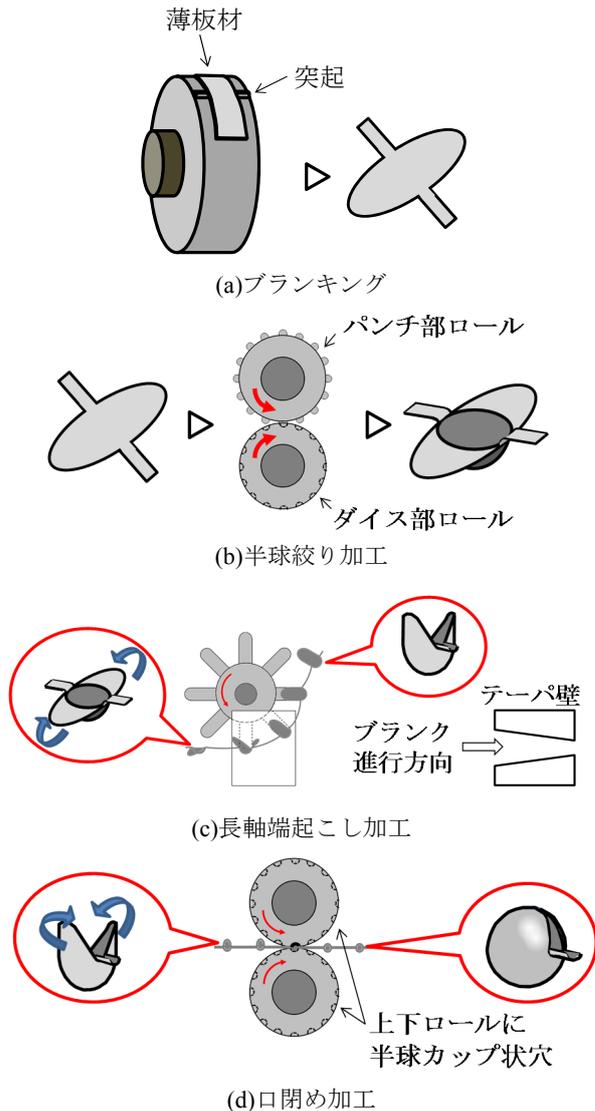


図11 ロータリープレスによるチェーン状鈴形中空球製造工程

#### 3.2 FEM解析シミュレーション

半球絞り加工用ロータリープレスを試作するにあたり、まずは有限要素法解析(FEM解析)を用いて加工シミュレーションを行い、最適な工具形状を検討する。計算には汎用非線形解析ソフト MSC.Marc2010を用いる。

製造する鈴形中空球の直径が $\phi 5\text{mm}$ であり、ブランクの板厚が $t=0.1\text{mm}$ であるため、解析に用いる工具の基本モデルは表2の通りである。解析条件を表3に示し、ブランクは短軸を中心とした線対称として1/2モデルとする。

### 3.3 モデル化

まず、モデル化の検討項目を挙げ、計算(収束性含む)可能なモデルを構築した。検討項目として、(1)要素数、(2)ダイス穴形状、(3)ブランク挿入方法を挙げ、それぞれについて検討を行う。

#### (1)要素数

要素数は解析の精度に関係しているが、要素数が多くなると長時間の解析時間を要し効率的ではない。要

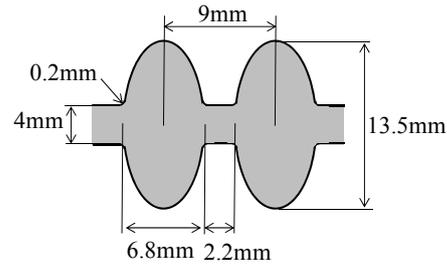


図 12 ブランク形状

表 2 モデル寸法

パンチ数Z	40
パンチ部ロール径 $D_p$ [mm]	98.8
ダイス部ロール径 $D_d$ [mm]	104
球頭パンチ半径 $R_p$ [mm]	2.4
半球ダイス穴半径 $R_d$ [mm]	2.6
ダイ肩半径 $r$ [mm]	1.0

表 3 解析条件

要素形状	8節点六面体要素
板厚方向の要素分割数	2
加工速度	50rad/s
クーロン摩擦	0.1
変形抵抗式(Swiftの式)	$\sigma=578(\varepsilon+0.002)^{0.2016}$

素数による変形挙動の違いを調査するため、図 13 のようにブランクの要素数を 4916、13572、28580 の 3 種類に分けて解析を行ったところ、要素数 4916 の場合、ダイ肩部のしわが再現されておらず、適正ではないと判断した。要素数 13572 と 28580 では変形挙動に大差は見られず、計算時間の点から要素数 13572 を用いることとする。

#### (2)ダイス穴形状

ダイス穴形状の影響を調査するため、半球形状と円柱形状の 2 種類で解析を行う。半球形状と円柱形状の違いは、絞られてブランクにしわが発生し始めた時のしわ押さえ効果の有無である。半球形状の場合ダイ肩部が拘束されブランクの移動ができないが、円柱形状にすることでダイ肩部の拘束が除去されブランクが一部自由に移動できる分ダイ肩部のしわを小さくできると考える。図 15 より、半球ダイス穴と円柱ダイス穴ではひずみ分布が異なることが分かった。半球ダイス穴は半球部分のブランクを拘束しているため、半球底部にひずみが発生し、さらにひずみ分布はブランク入り側と出側で対称となっているのに対して円柱ダイス穴はブランク入り側のダイ肩部付近範囲にひずみが分布している。半球ダイス穴はダイ肩部にひずみが集中してしわが発生しているが、円柱ダイス穴は広範囲にひずみが広がっている分発生するしわは小さい。

半球ダイス穴では接触判定が負担となり計算が収束し難いが、円柱ダイス穴では計算が収束した。したがって、計算収束性を考慮して円柱ダイス穴形状とするともに実機でも円柱ダイス穴とする。

#### (3)ブランク挿入方法

ブランクの挿入方法による変形挙動の違いを調査する。ブランクをロール表面と平行にして挿入するモデルとブランクを斜めにして挿入するモデルの 2 種類を用いて解析を行った結果を図 16 に示す。ブランクを斜めにして挿入することにより、平行に挿入した場合次のパンチが楕円ブランクの前方向から接触するのに対し、次のパンチが楕円ブランクの中心に当たりやすくなり、適切な変形となると考えられる。しかし、初めは中心を絞ることができたが少しずつ中心からずれていくため、成形球のピッチとパンチのピッチが一致していない可能性が考えられた。ロール半径によりパンチ、ダイス穴の干渉が生じることもあり、パンチ数およびブランクのピッチについても検討する。

### 3.4 加工条件の検討

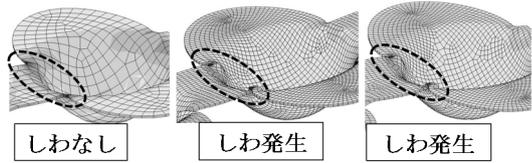
前節で構築した計算可能なモデルにて加工条件を検討する。加工条件の検討項目として、(1)ダイ肩半径、(2)ロールギャップ、(3)パンチ数およびロール径変更の影響、(4)ブランク寸法を調査する。

#### (1)ダイ肩半径

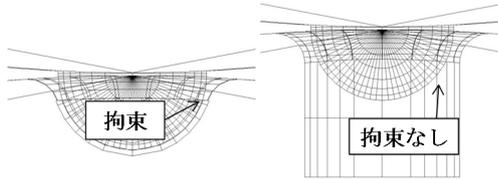
図 17 の絞りの変形挙動から、しわはダイ肩部で発生すること、しわはブランク進行方向に対して入り側で顕著であることが分かる。ダイ肩部でのしわの発生が球の精度に影響すると考えられるため、ダイ肩半径を  $r=0.6\text{mm}$  および  $1.0\text{mm}$ 、 $1.1\text{mm}$  として解析を行って、ダイ肩半径がブランクのしわ発生に与える影響を調査した。図 18 のように、ダイ肩半径が大きい方がダイ肩部に発生するしわは抑制される。しかし、ダイ肩半径を大きくしすぎるとブリッジの大部分がダイス穴に引き込まれるため、 $r=1.0\text{mm}$  程度が適当であると考えられる。

#### (2)ロールギャップ

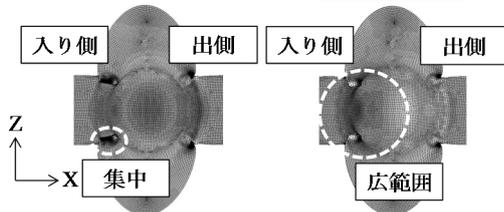
しわ抑制の対応策として長軸端部を押さえることが挙げられる。長軸端部を押さえる方法として、直動プレスの場合はブランクホルダを用いて完全に長軸端部を拘束するが、ロータリープレスの場合は平坦なブランクホルダを設置する構造ではない。そこでブランクホルダの代わりにロールギャップを小さくすることで板材幅方向に線状に押さえることが考えられる。ロールギャップを板厚分の  $0.1\text{mm}$  およびそれより小さい  $0.08\text{mm}$ 、 $0.07\text{mm}$  の 3 種類のモデルで解析する。ロールギャップ変更による変形挙動の比較を図 19 に示す。ブランク進行方向のひずみを見ると、ロールギャップを小さくすると長軸端部を押さえる力が大きくなりひずみは増大する。しかし、しわの抑制には効果が見られず、むしろブランクの偏りが大きくなる結果



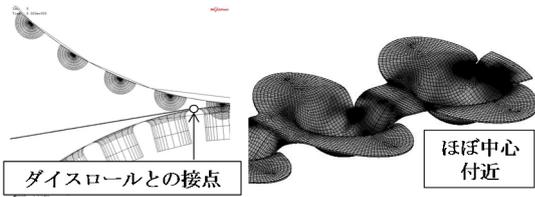
(a)要素数 4916 (b)要素数 13572 (c)要素数 28580  
図 13 要素数の違いによる変形挙動比較



(a)半球ダイス穴 (b)円柱ダイス穴  
図 14 ダイス穴形状



(a)半球ダイス穴 (b)円柱ダイス穴  
図 15 解析結果(X 方向全体ひずみ分布)



(a)解析モデル (b)解析結果  
図 16 斜め挿入モデル

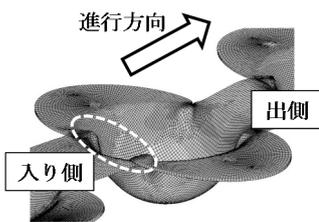


図 17 しわの発生

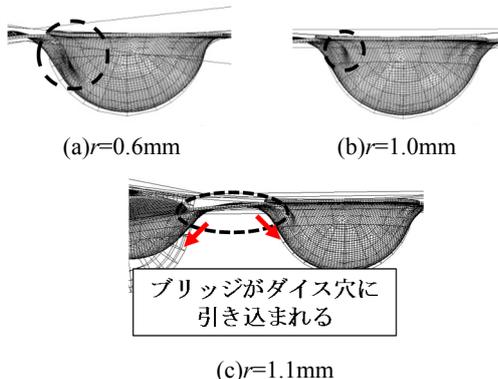
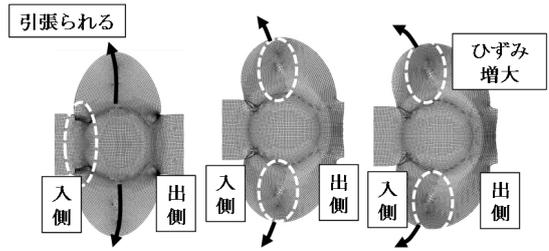


図 18 ダイ肩半径の違いによる変形挙動比較  
となった。これは、図 20 のように長軸端部が移動ししわ



(a)0.1mm (b)0.08mm (c)0.07mm  
図 19 ロールギャップ変更による変形挙動比較

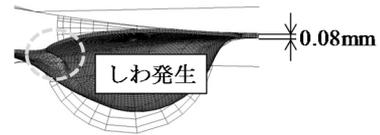


図 20 しわ発生開始

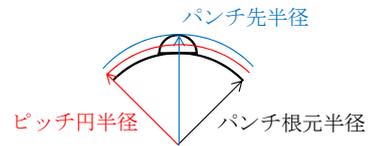


図 21 工具における各半径

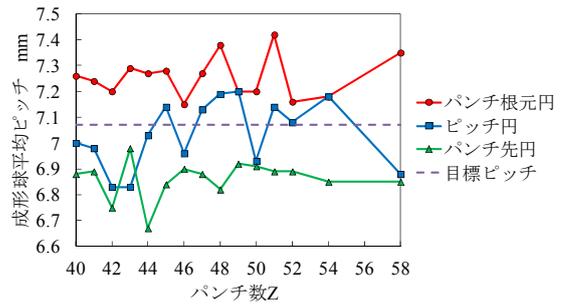


図 22 成形球ピッチ

が発生し始めるのがパンチとダイスが最接近する前であり、その後ロールギャップを通過していくためロールギャップが小さいほど長軸端部を押さえたまま引っ張る力が大きくなるのが原因であると考えられる。したがって、ロールギャップは板厚分の  $t=0.1\text{mm}$  とする。

### (3)パンチ数およびロール径

モデル化において成形球のピッチとパンチのピッチが一致していない可能性があるため、パンチのピッチを成形球のピッチ  $7.07\text{mm}$  に合わせることを考える。ここで、成形球のピッチを工具のどの部分の円弧長に合わせるかが問題となる。工具には、図 21 のようなパンチ根元円、ピッチ円、パンチ先円があり、パンチ数を固定して算出された半径を各円の半径としたモデルを作り解析を行う。この解析の結果、成形球ピッチが目標とする  $7.07\text{mm}$  に近くなるモデルを調査することで、工具ピッチ決定の基準ができる。ピッチ円半径は本来片側駆動の際の上下ロールの接触点までの半径のことであるが、工具の寸法決定においてギアの計算式を参考にしているため、今回はギアのピッチ円半径と同様の算出式を用いて出された値とする。

このとき半径  $R$  はピッチ  $p$  を用いて

$$R = \frac{pZ}{2\pi} \quad (1)$$

と表せる。  $Z$  はパンチ数、  $\pi$  は円周率である。ピッチ  $p=7.07\text{mm}$ 、パンチ数の  $Z=40\sim 58$  において、式(1)より半径を算出し、その半径をパンチ根元半径、ピッチ円半径、パンチ先円半径それぞれに適用した工具モデルパターンを作り、解析を行った。解析結果より成形球ピッチを算出した結果が図 22 の通りである。目標成形球ピッチ  $7.07\text{mm}$  に対して非常にばらつきはあるものの比較的パンチ数  $Z=52$  の場合はどのモデルパターンも目標成形球ピッチに近い。このことからパンチ数は  $Z=52$  と決定する。

ギアと異なり、歯の接触点を通るところにピッチ円をピッチ円を設定することが出来るが、パンチが根元まで押し込まれることでブランクは半球に成形されるため、目標成形球ピッチ  $7.07\text{mm}$  と一致するのはパンチ根元のピッチであると考えられる。また、ダイス穴に関してはブランクの半球部分がパンチによりダイス穴に完全に押し込まれるため、ダイスロール表面におけるダイス穴のピッチが目標成形球ピッチ  $7.07\text{mm}$  と一致すると考えられる。パンチ根元円の寸法はパンチ部ロール径であるため、パンチ根元円寸法とダイス部ロール径を一致させるということは、パンチ部ロール径とダイス部ロール径が等しくなるということである。3.2 節において工具の基本モデルはパンチ部ロール径とダイス部ロール径が異なっていたが、両者ともに  $D_p=D_d=117\text{mm}$  とする。

#### (4) ブランク寸法

第 1 球目の中心を絞っている際に、次のパンチとブランクとの接触が始まるため、その位置が次のブランクの中心を絞るためには非常に重要となる。基本ブランクモデルでは少し長いと判断されたため、 $l_b=1.0\text{mm}\sim 1.6\text{mm}$  に変更して解析を行う。解析結果は図 23 のようになり、全ての球が中心付近を絞られているのはブリッジ長さ  $l_b=1.5\text{mm}$  の場合であると考えられる。確認として、ブリッジ長さ  $l_b=1.5\text{mm}$  の場合のブランクの中心と半球の最深部との誤差および球ピッチを計算したところ、表 4 ようになる。この結果よりある程度中心を絞ることができ、目標成形球ピッチにも近いことが分かる。

### 3.5 ロータリープレスの設計および製作

FEM 解析を用いた半球絞り加工におけるロータリープレスの加工シミュレーションにより、工具形状がブランクの変形挙動に及ぼす影響を明らかにし、工具形状およびブランクの寸法がある程度決定した。解析から得られた結果を基にして半球絞り加工用ロータリープレスの設計を行った。ここで、解析シミュレーションでは中空球寸法を当初の目標直径  $d=5\text{mm}$  と想定してブランクおよび工具の寸法を決定したが、直径  $5\text{mm}$  ではメッキにより少し抵抗が大きくなることから目標中空球を直径  $d=7\text{mm}$  へ変更した。以上を加味して決定した工具寸法を表 5 にまとめる。

装置全体の設計として、第 1 球目の中心を絞ることができるようパンチ部ロールの筐体が上下する機構を取り入れる。この機構により、第 1 球目は真上から垂直に絞られるため、パンチがブランクの中心を絞り精度の高い半球を

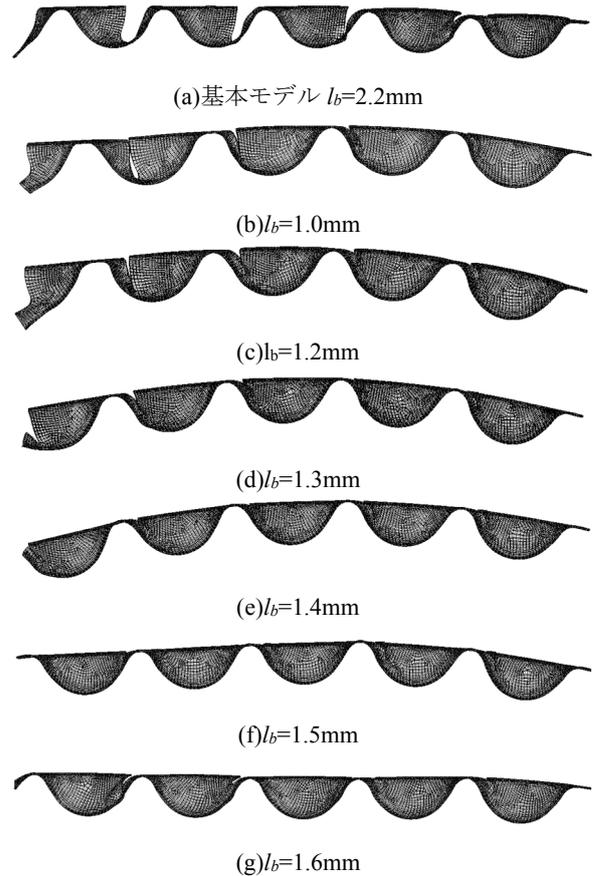


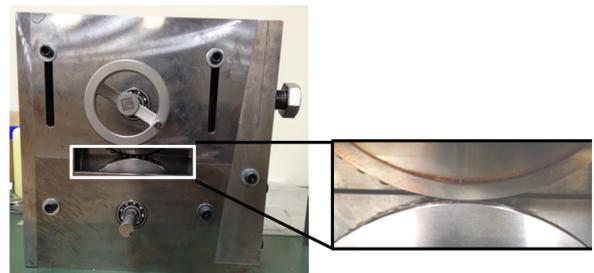
図 23 ブリッジ長さの違いによる変形挙動比較

表 4 誤差および成形球平均ピッチ

No.	誤差(mm)	成形球平均ピッチ(mm)
1	0.44	6.82
2	0.23	
3	0.23	
4	0	
5	0.67	

表 5 工具寸法

パンチ数 $Z$	52
パンチ部ロール径 $D_p$ [mm]	163.9
ダイス部ロール径 $D_d$ [mm]	163.9
球頭パンチ半径 $R_p$ [mm]	3.4
半球ダイス穴半径 $R_d$ [mm]	3.6
ダイ肩半径 $r$ [mm]	1.0



(a) 外観 (b) しわ押さえ拡大

図 24 ロータリープレス

成形することが可能となると考えられる。上下機構はパンチ部ロールの筐体の片側側面にテーパをつけることで実現する。パンチ部ロール筐体を上に持ち上げ、ねじを締めて側面筐体のテーパ部を一部切り取った部品を押しつけることでパンチ部ロール筐体を固定し、逆にねじを緩めることでパンチ部ロール筐体が下降する。また、パンチ部ロールとダイス部ロールは、ギアによりパンチ部ロールをハンドルで回転させることで同時にダイスロールも回転する。

強度計算を行った後図面を作成し、実際に製作された装置が図 24 である。しわ押さえとしてパンチ部ロールにアルミリングを取り付ける。

### 3.6 加工実験

製作されたロータリープレスを用いて、半球絞り加工の加工実験を行い、成形の精度を確認する。加工実験の結果を図 25 に示す。球ピッチは目標の 9.9mm を実現できているが、ブリッジ長さを調整したものの全ての球の中心を絞ることができていない。これは、板材を完全に絞り切れておらず、板材の引き込み不足により徐々にずれが大きくなったためと考えられる。さらに、半球部において板割れが発生しており、板材の伸び不足も確認された。以上はしわ押さえのわずかな差にあると考えられ、現在それを変更しながら調整中である。

### 4. 結論

従来のポラス金属の課題を改善する新超軽量ポラス金属材料としてチェーン状鈴形中空球を提案し、チェーン状鈴形中空球成形体の圧縮特性および曲げ特性を調査した。さらに、その製造法としてロータリープレス法を提



(a) ブリッジ 3mm



(b) ブリッジ 2.6mm



(c) ブリッジ 2.1mm

図 25 加工実験結果

案し、実際に装置を製作して半球絞り加工の加工実験を実施した。特性調査では、以前提案した鈴形中空球成形体と比較すると、圧縮特性および曲げ特性は十分な結果を得られなかったが、製造や接合における精度や積層方法の検討により性能向上の可能性はあると考える。ロータリープレスによる加工実験では、絞り加工可能であることは確認できたが、絞り不足により成形精度は低い結果となった。ロータリープレスも特性調査同様、今後の検討が必要である。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり奨励研究助成をいただきました公益財団法人天田財団に対し、深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 吉村英徳・内田尚利・品川一成・三原豊：塑性加工春季講演会講演論文集，(2012)，363-364