

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560114

研究課題名（和文）高エネルギー吸収性を有する超軽量ポーラス金属の高機能化に関する研究

研究課題名（英文）Improvement of performance of Kushidango-shape MHS structure

研究代表者

吉村 英徳 (YOSHIMURA HIDENORI)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：30314412

研究成果の概要（和文）：衝撃エネルギー吸収性を持つ新超軽量ポーラス金属として開発した串団子状中空構造体の性能コントロールの方法について検討した。串団子状中空構造体の錫ハンダのブレイジングによる積層固化方法を提案し、それを用いて作製した様々な構造体の配列による成形体の異方性を圧縮試験および曲げ試験にて評価した。配列を変更することで性能を制御することが可能となった。また、管サイズや配列を変更した成形体の性能評価を仮想で評価できるよう FEM 解析モデルを構築した。

研究成果の概要（英文）： Control method of a new high energy absorbing ultra light porous metal called ‘Kushidango-shape MHS structure’ was examined. Kushidango-shape MHS is a tubular component in the shape of a string of hollow spheres. Consolidation method that the components are strongly brazed by tin solder at low temperature without heat affect was proposed. The structures in which arrangements of the components , that is, apparent density and internal deformation behavior were changed were consolidated and their mechanical properties were estimated by compression and bending tests. By these results, the performance can be controlled. To estimate the performance virtually, FEM simulation models of compression and bending were also established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
23 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
24 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：ポーラス金属，金属中空球，管バルジ加工，FEM，ブレイジング

1. 研究開始当初の背景

温室効果の主因ガスである二酸化炭素排出量削減のため、自動車の軽量化が求められ

ている一方で、衝突安全性の向上は車体重量増加を伴った相反する課題である。そのため、軽量かつ高比剛性、高比衝撃吸収性を有する

ポーラス金属材料が注目されている。しかし、一般に、気孔制御が難しく、均質度が高くなく、引張りに弱く、コストも高い。そこで、これらを解決する新ポーラス金属として、串団子 MHS 成形体を開発している。本材料は引張りに強く、塑性加工で作成するため均質性が高く、コストも比較的安価である。しかし、コストに見合った実用化に耐えうる性能を付与するため、その制御性について調査する必要が出てきた。

2. 研究の目的

既提案の串団子状 MHS 成形体の圧縮および曲げ衝撃吸収部材への実用化を可能とするため、串団子状 MHS の積層および固化成形の方法を提案し、串団子状 MHS の配列の仕方を変化させ、固化成形体の圧縮および曲げ性能について評価する。

3. 研究の方法

小径丸管から串団子状にバルジ（張出し）加工によって作られた MHS の加工硬化による強度を、固化成形時の熱影響によって焼きなますことなく固化するには低融点金属によるブレイジングが適切だと思われる。低融点金属を選択し、そのメッキ膜厚や加熱条件について堅固に固化成形できる条件を特定する。

確立したブレイジング法によって、様々な串団子 MHS の配置で固化成形された成形体を作製し、圧縮および曲げ試験を行って、その吸収性について評価する。また、その要因を FEM 解析を行って調査するとともに、そのモデル化を確立し、部材設計時の CAE を可能とする。

4. 研究成果

串団子 MHS 表面に錫ハンダメッキを $30\mu\text{m}$ メッキして、フラックスを塗布した後積層固化することにより、錫の酸化を防ぎ、 300°C 弱で 15 分加熱することで堅固にブレイジングすることができた。

(1) 串団子状 MHS 成形体は、積層方法により平行構造成形体とクロス構造成形体に分類する。平行構造成形体は、図 1 に示すように、長手方向の積層方向を同一方向にした FCC 構造体の成形体である。構造上、成形体の崩壊を防ぐためには外套材などの拘束部材が必要である。クロス構造成形体は、図

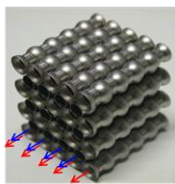


図 1 平行構造

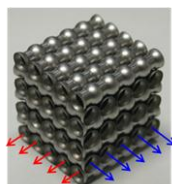


図 2 クロス構造

2 に示すように、層毎に 90° ずらし、交差させて積層した FCC 構造体の成形体である。成形体は非接合でも崩壊せず、図 3 のように成形体に用いる串団子状 MHS の本数を減らすことで密度制御が容易に行える。串団子状 MHS の長手方向ではプラトー応力領域において応力振動が現れるが、成形体でもこの影響が大きければ、圧縮方向によって機械特性に異方性が現れる。また、平行構造成形体とクロス構造成形体において半径方向での圧縮特性はほとんど同じであり、従来の粉末冶金法による MHS と同等以上の性能を持つことも明らかになっている。

クロス構造成形体において、図 3 の方法で疎にする方法を変えた積層にて検討する。成形体の構造を変更することで密度や変形挙動に影響を及ぼすと考えられる。以下に基本的な積層方法とその特徴をそれぞれ述べる。

図 4 に示すように隔層の串団子状 MHS が同列に並ぶ積層方法で作製した成形体を同列構造成形体とする。同列構造成形体は、図 2 と球の変形は同様で、密度を変更することができると考えられる。また、図 5 に示すように成形体サイズと串団子状 MHS 同士の間隔を大きくすることでさらなる低密度化が可能である。

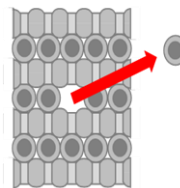


図 3 密度制御法

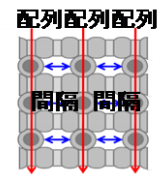
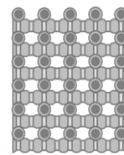
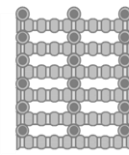


図 4 同列積層方法



a)高密度(1本間隔)



b)低密度(3本間隔)

図 5 同列構造成形体

図 6 に示すように、各層では串団子状 MHS の間隔が統一されているが、隣接層では串団子状 MHS の配列をずらした積層方法で作製した成形体を非同列構造成形体と呼ぶ。この

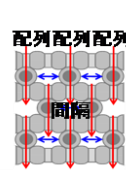


図 6 非同列積層方法

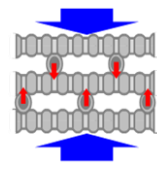


図 7 曲げモーメントの発生

ように積層したものを圧縮したとき、図.7のように串団子状 MHS に曲げモーメントが作用し、球が圧潰するよりも曲げ変形が優先的に発生するなどの従来と異なる変形挙動が期待できる。図.8 に示すように非同列構造成形体においても同列構造成形体と同様、成形体サイズを大きくし間隔を変更することでさらに密度を変えることができる。また、密度とともに曲げの支点間の距離調節も可能である。



a)高密度(1本間隔) b)低密度(3本間隔)

図.8 非同列構造成形体

(2) 積層方法および接合による影響

SUS304 の t0.1mm, D3.6mm のパイプを D5mm の串団子球列に油圧バルジにて成形したものを、5球および9球で切断し、サイズの異なる成形体を作製する。密度は、疎にしていない FCC クロス構造、同列構造の高密度と低密度、非同列構造の高密度と低密度を用意する。このとき、中空体同士を接着や接合せず単に積み重ねた非接合成形体と、ステンレス用ハンダにて接合したものを準備して、中空体の半径方向に 10mm/min の試験速度で圧縮して、その応力-ひずみ関係を調べた。

図 9 に非接合成形体の公称応力-公称ひずみ曲線を示す。密に並べた FCC のクロス構造成形体のプラトー応力において、5球列および9球列の中空体による成形体サイズの違いはほとんど見られなかった。従来の粉末冶金法と異なり、きわめて周期的な高精度球の配置のため、材料内部がほとんど均質であり、信頼性が高い。中空体端部の影響で多少密度が変わったため、多少曲線は異なるが、観察した変形挙動は5球列と9球列でおおよそ同じであった。

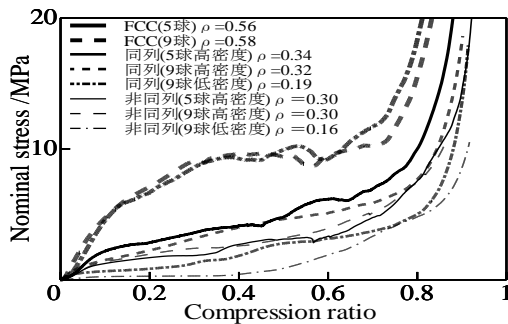


図 9 クロス構造圧縮結果 非接合

5球列の非同列構造高密度成形体において、

10~30%圧下時と 40~60%圧下時にそれぞれプラトー領域が発現している。20%圧下で2本の層が曲げの変形挙動を示し、50%圧下で3本の層の球同士が接触することによる球の圧縮変形が進行している。一本間隔のため、小サイズの成形体では層毎の中空体の数が異なることで抵抗が変わり、少ない層から変形し、その層の抵抗が大きくなると他の層の変形が開始すると思われる。9球列では層毎の本数の違いの影響がなくなり、同時にすべての層が変形しているため5球列のような段階的な変形はみられない。成形体が大きくなればこの影響は無視できると思われる。

同列および非同列では、ほぼ同密度の成形体でも非同列構造成形体の方がかなり低い圧縮応力を示している。曲げ変形が発生する非同列構造成形体では、球の圧潰よりも曲げモーメントによる曲げ変形が優先されるため、同列構造成形体よりも圧縮応力が下がり、予想通りの結果となった。

一本もしくは3本間隔にして密度の影響を比較した場合、同列、非同列構造ともに、応力は密度が低いほど小さくなり、緻密化が遅くなっていることがわかる。非同列構造の応力は、密度が小さいほど串団子状 MHS の間隔が広くなり、曲げ剛性が低くなることで極めて応力が小さくなったと考えられる。緻密化は低密度化によって串団子状 MHS 同士の間隔が大きくなり、変形した串団子状 MHS が逃げ込む空間が増えたため遅れたと考えられる。

図 10 は串団子 MHS 同士を接合、非接合した場合の比較である。両構造とも接合によって、初期応力が大きく立ち上がっており、プラトー領域が増加、エネルギー吸収率が向上している。接合によって、ブリッジング効果が生じ、串団子状 MHS 同士が拘束され隙間に逃げ込むことができず、初期増加が大きくなったと考えられる。同列構造成形体は、FCC 構造成形体と非同列構造成形体とは異なり、60~80%圧下時に接合した成形体の応力が非接合と比べて低いという特殊な特性を示している。これは、同列構造成形体にお

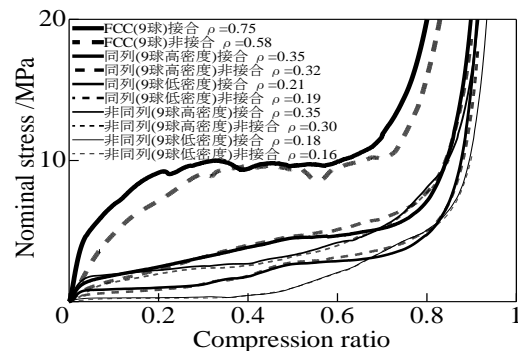


図 10 クロス構造圧縮結果 接合

ける特有の性質ではないかと考えられる。また同列構造の3本間隔である9球列が2段階のプラトーとなっている。

(3) 串団子状 MHS 成形体曲げ試験

接合した串団子状 MHS 成形体の曲げ特性を評価するため、3点曲げ試験を行った。支え間距離は従来のポーラス金属と同様に $L=70\text{mm}$ とした。試験片寸法は、 $W30 \times B27 \times L200\text{mm}$ で B の方向に圧縮する。被加工材である SUS304 パイプを積層したパイプ成形体とも比較したが、パイプ成形体は串団子状 MHS 成形体を積層する際に使用した本数で作製したため、マクロ的な断面積は異なる。パイプ成形体の試験片寸法は $W22.4 \times B23.8 \times L200\text{mm}$ である。

図 11 は荷重-押込み量の結果である。接合によって荷重が2倍以上になっており、エネルギー吸収効率が向上していることがわかる。これは、接合によって串団子状 MHS が拘束され、曲げ変形中に断面形状が変化しないことによって、荷重が高くなっていると考えられる。接合は有効な手段であると言える。

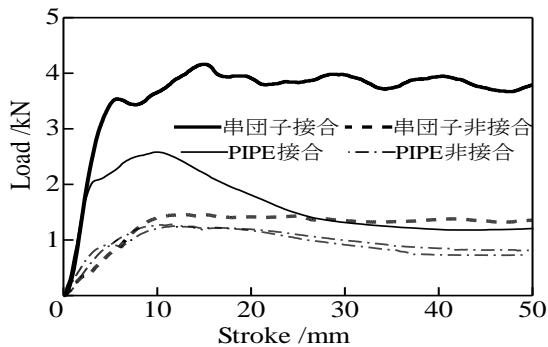


図 11 曲げ試験結果

(4) FEM による曲げの解析

図 12 のように、串団子状 MHS 成形体の3点曲げの解析を行った。要素数が多いため、メモリーや計算時間がかかる。そのため、6面体要素ではなく、シェル要素を使用し、また個々の串団子 MHS を別物体にすると接触のモデル化に手間がかかるため、MHS 同士の接触部の要素を除去し、全てを一体の物体として取り扱うことで、自己接触での判定として

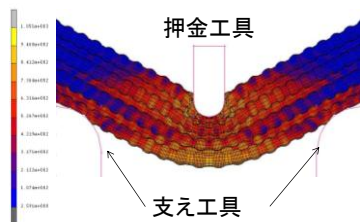


図 12 串団子状 MHS 成形体の3点曲げシミュレーション

いる。これにより、マイクロモデル的な解析でもメモリーや計算時間が軽減でき、部材フルモデルでの解析が可能となった。

図 13 は、解析と実験の荷重-押込み量の比較であるが、おおよそ一致する結果が得られた。一般的なポーラス材料のマクロモデルは材料の不均一性から、まだ完全な構成式が提案されていないが、本材料は極めて均質な材料なため、フルモデルを容易に描くことができ、正確な計算を実施することができるようになったと考えている。

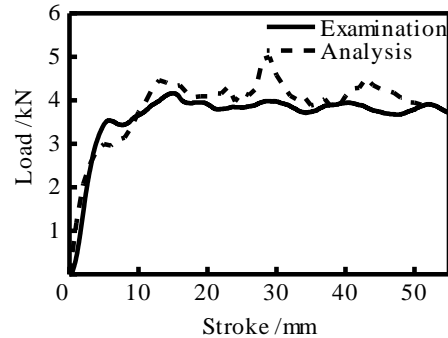


図 13 串団子状 MHS 成形体の曲げ変形における荷重-ストローク曲線の解析および実験結果の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

1. 吉村英徳ら, H24 年度塑性加工春季講演会, 串団子状の中空金属集合体の製造法(第 6 報 曲げにおける性能評価と変形挙動の究明), 2012, (石川県)

2. 吉村英徳ら, H24 年度塑性加工春季講演会, 鈴形 MHS 成形体およびその外套材の製造法と機械特性, 2012, (石川県)

3. 吉村英徳ら, 第 62 回塑性加工連合講演会, 串団子状の中空金属集合体の製造法(第 5 報 曲げにおける変形挙動), 2011, (愛知県)

4. 吉村英徳ら, 第 62 回塑性加工連合講演会, 鈴形中空球のブレイジングによる固化成形技術, 2011, (愛知県)

5. 吉村英徳ら, 第 61 回塑性加工連合講演会, 通電加熱による中空金属球の成形体への固化技術の検討, 2010, (山形県)

6. 吉村英徳ら，第 61 回塑性加工連合講演会，串団子状の中空金属集合体の製造法（第 4 報），2010，（山形県）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 英徳 （YOSHIMURA HIDENORI）

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：30314412