

超軽量中空鋼球接合体の変形挙動解析手法開発およびクラスタ構造の最適化

研究代表者 岐阜大学工学部機械システム工学科 准教授 吉田佳典

1. 緒 言

近年の地球環境問題の観点から、輸送機器においては燃費特性の向上による温室効果ガスの発生量削減が重要視されている。この一対策として、構造部品素材における中実材から管材への移行が有効であるが、高剛性化が課題となる。一方、自動車事故においては搭乗者ならびに歩行者保護が最重要課題の一つに挙げられており、衝突エネルギー吸収性能の向上が同時に実現されなければならない。すなわち軽量性の保証と同時に高剛性化ならびにエネルギー吸収性能の向上を満たす高度な技術が必要となる。これらの課題に対して従来から多孔質構造を有するポーラス金属（porous metal）に期待が寄せられており、多孔質で比表面積が大きい構造のため、その高いエネルギー吸収能のみならず断熱特性ならびに吸音特性等を有する機能性材料としても有望視されている。

ポーラス金属における発泡金属は、溶融アルミニウムに水素等のガスを導入しポーラスアルミニウムを製造する発泡溶融法などによって製造される¹⁾。これによって典型的なクロードセル型のポーラス金属が得られ、90%以上の気孔率が得られている²⁾。しかしながら発泡金属においては、その工業的利用において例えば、①その多孔質内部構造が極めて複雑かつ再現性に乏しくすなわち不安定であり品質の保証が困難である点、②気孔率の制御は不可能ではないものの、その精度、自由度および信頼性は必ずしも高くない点、③一般に製造コストが高く、自動車構造部材への適用が困難な点が障壁となっている。これらの問題を克服し、環境保護ニーズに応えるべく抜本的な基盤技術の確立が急務である。また、プリカーサ法（粉末冶金法）³⁾においても同様の問題が伴う。

さらに、連続帯溶融法を用いて製造されるロータス金属は水素溶解度差を利用し、溶融金属の一方向凝固を行わせることで気泡に方向性をもたせることによって製造される⁴⁾。すなわち凝固方向に沿って成長したポアの構造が蓮根に似ていることから、このように呼ばれる。生体インプラントをはじめとする生体材料としての期待⁵⁾もあるが、本材料においてはその製造時間が極めて長く、生産性に劣るというデメリットがある。

これに対して、一般的に中空球の集合体により所要の形状に成形し、超軽量金属として利用する方法を MHS（Metallic Hollow Sphere）と呼ぶ。この特徴は、鉄球の大きさおよび肉厚をそろえて、機械的特性や物理特性のばらつきが少ない成形体を作ることができることにある。発泡型軽量金属に代替して寸法制御性において極めて安定かつ安価な超軽量中空鋼球を結合体（クラスタ）として用いることにより、上記の問題は一挙に解決されうるものと思われる。しかしながら MHS の製造法においてフランクフォーファー研究所（ドイツ）で実施されている方法は、発泡スチレン球を作製し、これに流動層による粉末金属のコーティングを施してグリーンボールを作成し、これを型内に充填して焼成することによって MHS 構造体（ク

ラスト)を得る。この工程によって、安定に焼結体を製造できるようになったが、焼結時に数 10%におよぶ収縮が発生し、このばらつきのために製品精度が悪く切削などの後加工が必要となる欠点がある。また粉末金属を利用しており、かつ工程が多いため高価になる。他にも転造により中空球を製造する新しい手法や、鋼板から深絞りによって製造する方法が提案されているが、やはりその生産性および価格が問題になる。しかしながらその構造体の機械的特性については種々調査されており⁶⁾⁻⁹⁾、再現性ならびに精度の高い中空構造を有する軽量部材を製造することは重要であり、安価でかつ形状のばらつきの少ない MHS クラスタ化技術の創成が必要である。

本研究では近年開発された JFE テクノリサーチ社製 TEC-BALL^{10),11)}に着目した。本材料はその素材に製鉄プロセスにおいて豊富に生成する副産物である酸化鉄を用い、酸化還元反応を利用して製造された MHS である。大量に製造可能なため比較的安価であり、上記の問題点を克服し、極めて優れたクラスタ製造の可能性を秘めている。しかしながら、そのクラスタ化の方法およびクラスタ構造がその機械的特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では接着材を用いて MHS 積層クラスタを作製し、そのエネルギー吸収能および圧壊挙動について調査した。また有限要素解析を用いてその構造特性について考察した。またクラスタのさらなる軽量化、引張特性の向上およびクラスタの可動性を実現するべくタングステン合金ワイヤー連結による MHS シートクラスタ構造を提案し、その積層クラスタの圧壊特性ならびに引張特性について調査し、その応用の可能性を検討した。また有限要素法を用いて諸特性について考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には JFE-テクノリサーチ社製 TEC-BALL を使用した (Fig. 1)。本製品は製鉄プロセスの副産物から精製した酸化鉄微粒子を還元・焼結して作製されており、内部に大きな空洞を持つ球体である。相対密度は小さく、鉄の 1/10 程度 ($0.8 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$) で軽量かつ衝撃エネルギー吸収能力に優れており、また安価である。本研究には直径 4 mm のものを用いた。

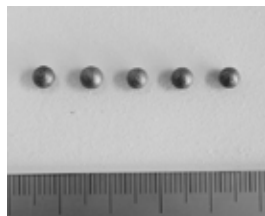


Fig. 1 TEC-BALL の外観写真

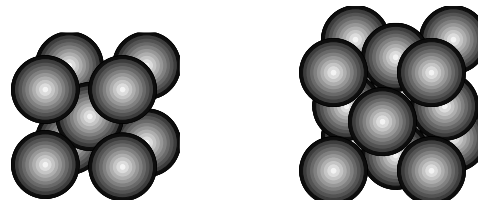


Fig.2 BCC 型 (左) および FCC 型 (右) 積層パターン

2.2 接着による中空鉄球の積層クラスタ化

α -シアノアクリレート系瞬間接着剤を用いて TEC-BALL を接着することによって積層クラスタを作製した．積層方法は体心立方格子（BCC）型および面心立方格子（FCC）型の 2 種類とした． Fig. 2 にその積層パターンの概念図を， Fig. 3 に積層クラスタの外観写真示す．密度は重量を見かけの体積で除した値とし， BCC 型および FCC 型でそれぞれ 0.600 g/cm^3 および 0.574 g/cm^3 であった．ここで見かけの体積とは，積層クラスタを包含する立方体領域の体積を意味する．

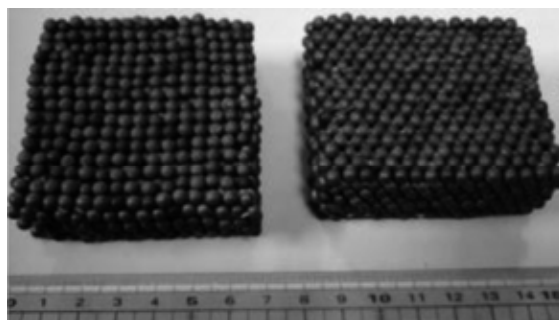


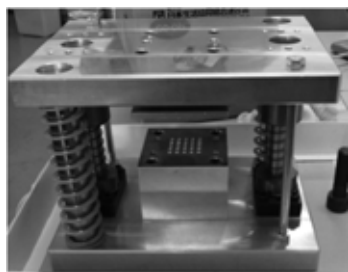
Fig.3 BCC 型（左）および FCC 型（右）積層クラスタ外観図

2.3 ワイヤー連結による中空鉄球のクラスタ化

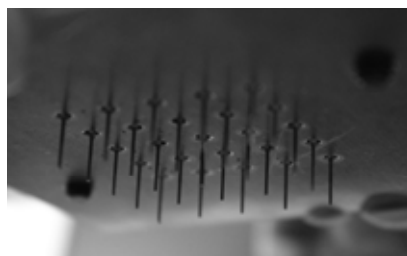
MHS 隔壁を穿孔し，そこにワイヤーを通すことによって MHS シートを作製した．これを積層することによって六方稠密格子（HCP）型クラスタを作製した．

a) 中空鉄球穿孔実験

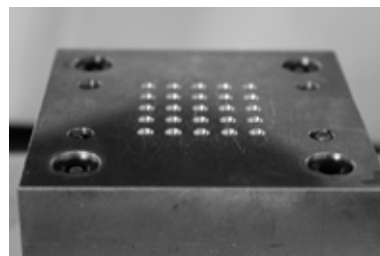
MHS にワイヤーを通して結束するためには，MHS に穿孔する必要がある． Fig. 4 に穿孔金型を示す．ピース直径は 0.44 mm とし，同時に 25 個の MHS に穿孔できる仕様とした．ダイス球面座に MHS を配列し，上部から圧縮することによって側壁を穿孔することができた．被加工材を Fig. 5 に示す．MHS 表面とパンチが接触する側では若干のだれが生じた (Fig.5(a))．



(a) 全体写真



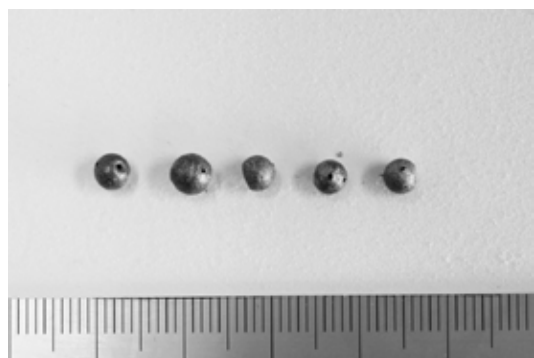
(b) 穿孔ピース



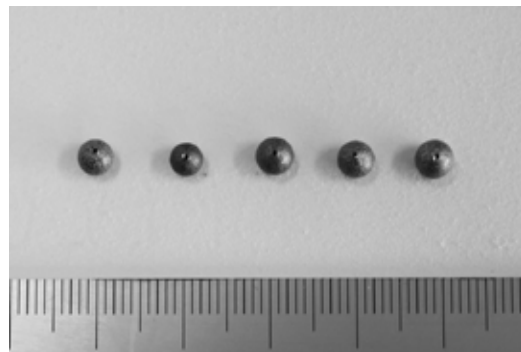
(c) ダイス球面座

Fig.4 MHS ワイヤー穿孔金型

また反対側は、パンチが内部から外側に貫通しかつダイスによって固定されているため、座屈は生じず良好に打抜きが完了している (Fig. 5(b)). 本研究中、打抜き穴が起点となった破壊は確認されなかった.



(a) パンチ入側



(b) パンチ出側

Fig.5 穿孔後の MHS

b) ワイヤー最大引張荷重および引張強度測定

穿孔 MHS の結束には線径 50 μm のタングステン合金ワイヤーを用いた. 引張試験には島津製作所製万能試験機 AG-X を用い, ワイヤーの両端をチャッキングして引張り, その最大荷重を測定した. その結果最大荷重は 7.5 N, 引張強度は 3.75 GPa であった.

c) ワイヤー連結条件

穿孔した MHS をワイヤーによって結束し, MHS シートクラスタを作製した. MHS シートは稠密に編まれ, これを積層することによって稠密六方格子 (HCP) 型構造 (Fig. 6) を構成する. 結束は 3 個の MHS にワイヤーを一周分貫通させ, これを繰り返すことによってシートクラスタを作製した (Fig. 7). シートクラスタの外観図を Fig. 8 に示す. MHS 間はワイヤ

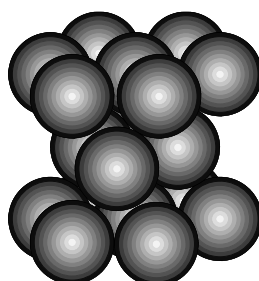


Fig.6 HCP 型積層パターン

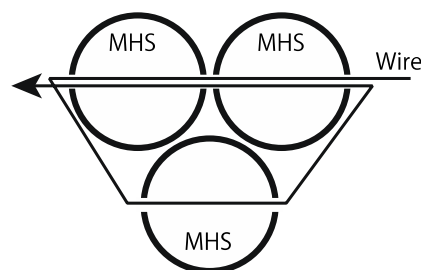


Fig.7 ワイヤー結束基本手順

一で結束されているため可動性があり，折畳むことや巻いて円柱状にすることができるため自由度が高い．また1個のMHSに3回以上ワイヤーが通過しているため，ワイヤーが一箇所切断してもそれぞれが離散しにくい構造となっている．シートクラスタを折畳んで積層方向にワイヤー結束し，HCP型積層クラスタを作製して圧縮試験に供した（Fig. 9）．クラスタの密度は 0.529 g/cm^3 であり，密度において BCC 型および FCC 型積層クラスタに比して最も小さく，極めて軽量である．



Fig.8 MHS シートクラスタ

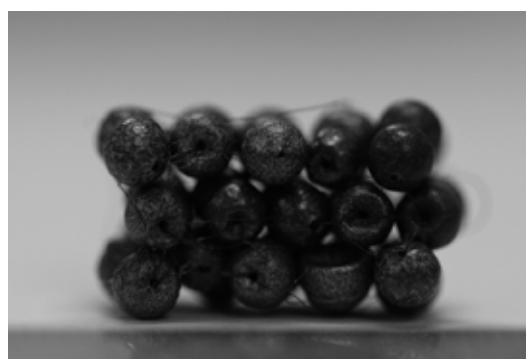


Fig.9 HCP 型積層クラスタ

2.4 積層クラスタの圧縮試験

BCC 型，FCC 型および HCP 型積層クラスタの圧縮試験を KOMATSU 製サーボプレス H1F110 を用いて，積層クラスタの上下面を平行圧盤によって挟んで圧縮を行った．圧縮荷重および上型降下量をそれぞれロードセルおよびレーザー変位計を用いて計測し，公称応力—公称ひずみ曲線を得た．また圧縮中の積層クラスタをビデオカメラによって撮影し，圧縮挙動を動画によって記録した．

2.5 MHS シートクラスタの引張試験

MHS シートクラスタの引張特性を調査するために引張試験を行った．引張試験機は前述の島津製作所製 AG-X を用いて実施した．シートクラスタの両端をチャッキングし，張力が発生する直前までクロスヘッドを上昇させ，ノギスにてチャック間距離を測定した．その後に試験機から荷重およびクロスヘッド移動量を出力し，引張荷重—クロスヘッド曲線および公称応力—公称ひずみ曲線を得た．

3. 有限要素解析

MHS の圧縮特性を調査するために有限要素法（FEM）解析を行った。FEM 解析には汎用有限要素解析コード DEFORMTM を用いた。Fig. 10 および 11 に解析条件を示す。2 つの MHS が上下に接触し、垂直方向に圧縮される際の圧縮挙動および荷重変化について調査した。上下圧縮盤と MHS 間の摩擦はアモン・クーロン則にて摩擦係数 $\mu=0.1$ とし、Fig. 11 の側方拘束モデルは積層クラスタにおいて水平方向に配列する MHS 同士が互いに干渉し合うことによる拘束を考慮したものである。

解析は弾塑性解析とし、MHS の寸法は内径および外径をそれぞれ 3.6 および 3.7 mm とした。1 step における工具降下量は 10 $\mu\text{m}/\text{step}$ 、MHS 間摩擦条件は摩擦係数 $\mu=0.1$ とした。

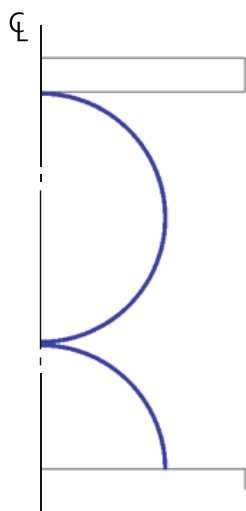


Fig. 10 積層モデル解析条件（据込み）

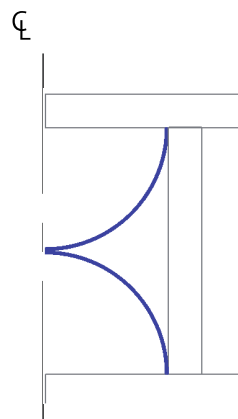
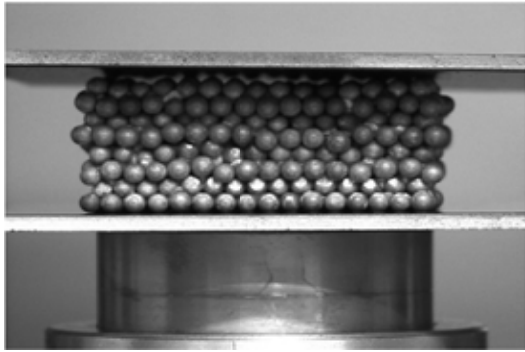


Fig. 11 積層モデル解析条件（側方拘束）

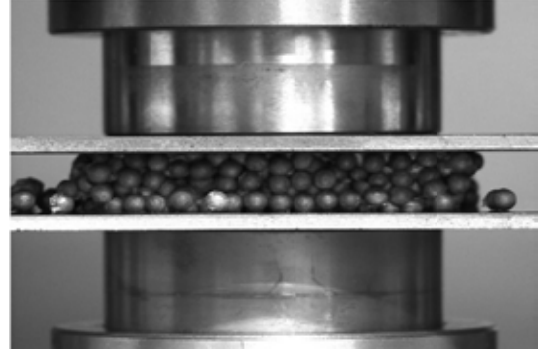
4. 結果と考察

4.1 圧縮試験結果

Fig. 12 および 13 に BCC 型および FCC 型積層クラスタの圧縮試験結果を示す。圧縮直後においてクラスタ側面から複数の MHS が剥離し、その後 MHS 自身の圧縮によって変形が進行した。Fig. 14 に HCP 型積層クラスタの圧縮試験結果を示す。HCP 型クラスタの圧縮過程においては、その初期段階に上層の MHS が下層の MHS 間空隙に侵入することによって巨視的緻密化が進行し、その後 MHS 自身の圧壊が進んだ。圧縮の最後までワイヤーの破断は観察されず、MHS の圧縮のみで完了した。

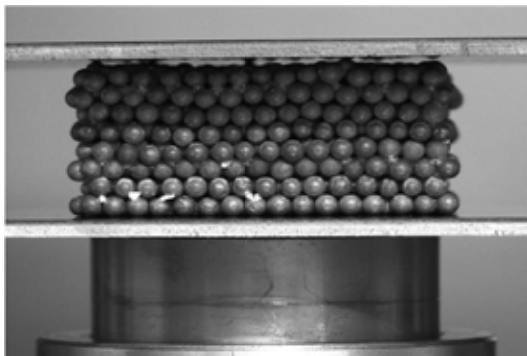


(a) 圧縮前



(b) 圧縮後

Fig. 12 BCC 型積層クラスタ圧縮試験結果



(a) 圧縮前

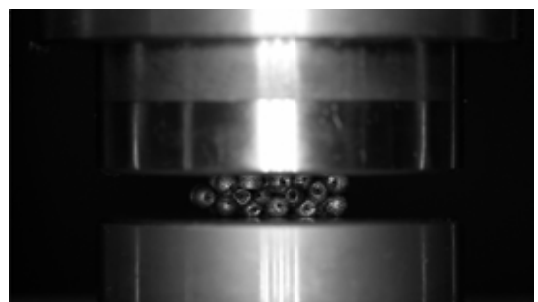


(b) 圧縮後

Fig. 13 FCC 型積層クラスタ圧縮試験結果



(a) 圧縮前



(b) 圧縮後

Fig. 14 HCP 型積層クラスタ圧縮試験結果

Fig. 15 に BCC 型および FCC 型積層クラスタ圧縮試験における公称応力-公称ひずみ曲線を示す。FCC 構造体の変形挙動は圧縮直後から荷重の上昇が見られたが、BCC 構造体においては圧縮初期において低い荷重で変形が進行する領域が見られ、その後荷重が上昇する。両積層クラスタにおいて、プラトー領域はほとんど観測されなかったが、これはクラスタの高さがその幅および奥行きに対して低かったためであると考えられる。

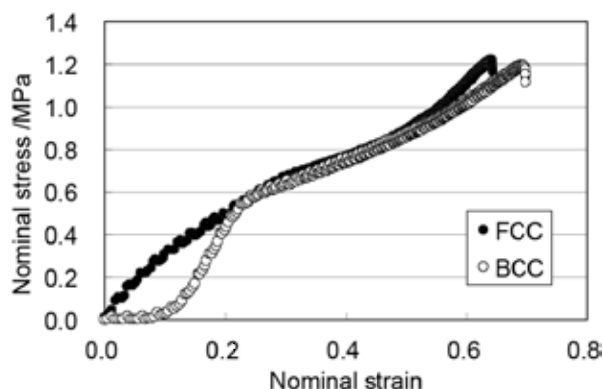


Fig. 15 BCC 型および FCC 型積層クラスタ圧縮試験における公称応力-公称ひずみ曲線

4.2 引張試験結果

Fig. 16 に MHS シートクラスタの引張試験結果を示す。引張試験の初期においては各 MHS 間隔は引張荷重によって広がろうとするが、これに対してワイヤーの結束があるために分離することは無く、主にワイヤーの張力によって結束が保持される。最終的にはワイヤーの破断によって引張は終了するが、その荷重は 12 N 弱であり、ワイヤーの破断荷重の 1.7 倍であった。Fig. 8 より、MHS シートクラスタの幅は狭い箇所でも MHS2 個分であり、破断荷重はワイヤーの強度でほぼ決定されていることがわかる。シートクラスタの引張強度はワイヤーの強度または線径を選択することによって制御が可能である。

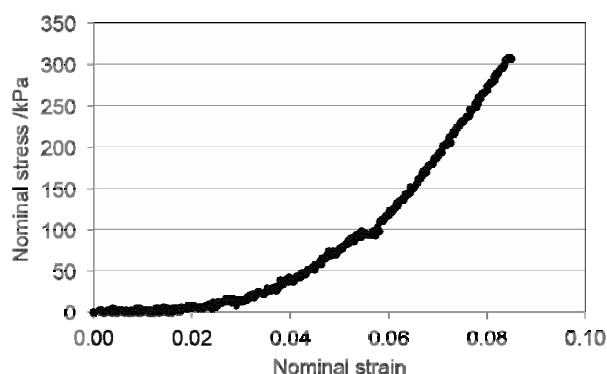


Fig. 16 MHS シートクラスタ引張試験における公称応力-公称ひずみ曲線

4.3 MHS 圧縮過程の FEM 解析結果

Fig. 17 に MHS 据込み圧縮解析結果を示す．MHS 中心部における MHS と圧盤およびもう一方の MHS との接触点から MHS 隔壁は離れ始める．すなわち点接触から，円周状の線接触へ変化し (Fig. 18(a))，その荷重は徐々に増加してゆく．これが進行し，MHS 内壁が接触した段階で荷重は急激な増加をはじめる (Fig. 18(b))．

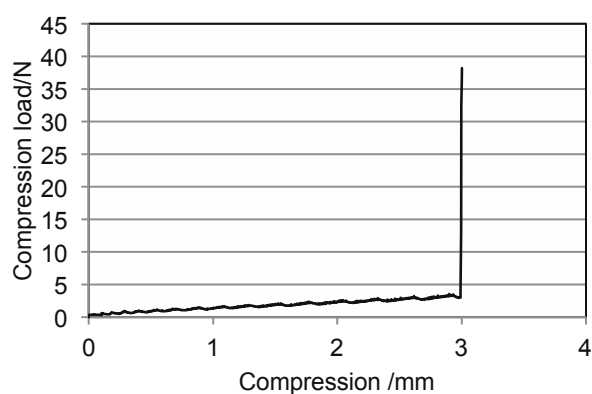


Fig. 17 MHS 据込みにおける荷重変化

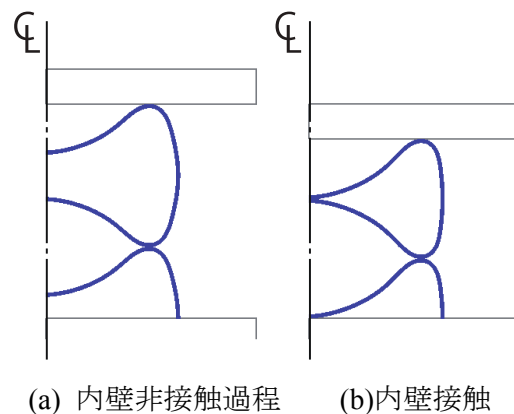


Fig. 18 MHS 据込み解析における形状変化

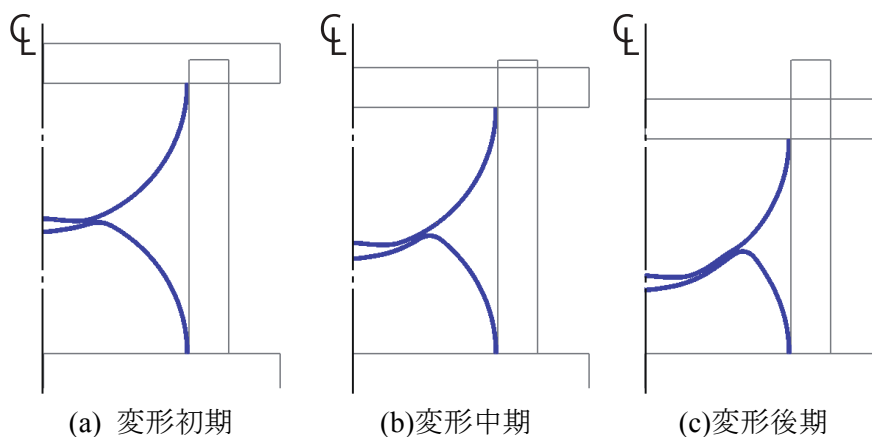


Fig. 19 MHS 側方拘束における圧縮形状変化

一方，側方拘束の場合，変形初期においては据込みと同様に MHS 間の接触点が離脱し，円周状線接触となる (Fig. 19(a))．しかし，側方拘束のため座屈変形が拘束され，一方の MHS がもう一方の内部に侵入する形式で変形する (Fig. 19(b), (c))．このため，変形後期でその圧縮荷重は据込み圧縮に比して極めて高くなったものと思われる．

5. 結 言

TEC-BALL を用いて BCC 型および FCC 型積層クラスタを作製した。また、タングステン合金ワイヤーを用いてシートクラスタを作製し、これを積層することで FCC 型積層クラスタを作製した。これらを圧縮することによって圧縮特性および引張試験によってシートクラスタの引張特性を調査した。また、有限要素法を用いることによってこれらの圧縮挙動について考察した結果、以下の知見を得た。

- ・ BCC 型および FCC 型積層クラスタの圧縮においては、その初期に MHS の剥離が見られ、その後緻密化する。BCC 構造体においては圧縮初期において低い荷重で変形が進行する領域が見られた。
- ・ MHS シートクラスタは BCC 型および FCC 型に比してその密度が最も小さく、ワイヤー結束後も柔軟に変形させることが可能で自由度が高くかつ引張特性にもすぐれており、従来の樹脂接着による MHS 積層クラスタには無い特性を有する。
- ・ 有限要素法によって MHS 積層クラスタ圧縮挙動が再現された。積層クラスタにおいては隣接する MHS による拘束のため、側方拘束がない場合に比して圧縮荷重が増大する。

謝 辞

本研究は、JFE21 世紀財団の技術研究助成(2009 年度)により実施されたものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 三好鉄二, 西誠治, 金属, 74-7 (2004), 10.
- 2) 石井栄一, 伊藤雅夫, 森沢吉孝, R&D 神戸製鋼所技報, 41-2 (1991), 921.
- 3) 小橋眞, 棚橋伸也, 金武直幸, 軽金属, 53 (2003), 427.
- 4) S., Yamamura, H., Shiota, K., Murakami, H., Nakajima, Materials Science and Engineering, A318, (2001) 137.
- 5) S., Gasser, F., Paun, A., Cayzele, Y., Brechet, Scripta Materialia, 48 (2003) 1617.
- 6) W., S., Sanders, L., J., Gibson, Materials Science and Engineering, A347 (2003) 70.
- 7) 三原豊, 素形材, 47-6 (2006) 22.
- 8) 三原豊, 機械の研究, 58-1 (2006) 166.
- 9) 品川一成, 吉村英徳, 三原豊, 鮭川佳弘, 塑性と加工, 47-543 (2006) 323.
- 10) JFE テクノリサーチ HP, <http://www.jfe-steel.co.jp/release/2009/03/g090324.html>
- 11) JFE-TEC News, 22, <http://www.jfe-tec.co.jp/jfetec-news/22/1p.html>