中空鉄ボールと円柱状成型体の圧縮変形挙動

福田 泰隆* 林 偉平* 豊岡 高明**

Compressive Deformation Behavior and Structures of Iron Hollow Spheres

Yasutaka FUKUDA*, Weiping LIN* and Takaaki TOYOOKA**

(Received on October 12, 2010)

Iron hollow spheres (IHSs) were manufactured by the reduction of iron oxides. The compressive deformation behavior and structures of IHS were systematically investigated. The strength of IHSs is proportional to the product of the IHS diameter and the shell thickness of IHSs, and is equivalent to the buckling strength of the IHS structure. A plateau stress region is observed during the compression of the IHS structure. The plateau stress is proportional to the strength of IHSs. The bonding of IHSs is indispensable to the occurrence of the plateau stress region. The average plateau stress does not depend on the distribution of the IHS strength but depends on the average IHS strength. The plateau stress decreases in the inclined compression of the IHS structure. The plateau stress increases with an increase in the strain rate during the compression. Its increasing ratio is larger than that of the porous aluminum.

Key words: iron hollow sphere, reduction sintering, structure, buckling strength, plateau stress, inclined compression.

1. 緒言

内部に空洞を持つセル構造材料は、軽量性に加えて圧縮時にプラトー応力領域が現れるため、衝撃エネルギー吸収特性に優れている。金属系のセル構造材料としては、ポーラスアルミニウムや中空金属ボールが代表的であり、次世代の構造用材料として注目されている。

ポーラスアルミニウム材料^{1),2)}は、熔融アルミニウム中にガスを導入して発泡させたもので、著しい低密度を実現できる材料として研究開発が進んでいる。しかしながら、気孔サイズにばらつきがあるため、材質の不均一性が実用化に際しての問題の一つと指摘されている³⁾。これに対し、中空金属ボール^{4),5)}成型体は、ボール同士の接合工程が別途必要となるが、均一セル構造を実現できる材料なため、信頼性のある材料となることが期待できる³⁾。このように優れた特徴を持つ中空金属ボールであるが、高価な微細金属粉末から作製されるため、コストの問題が存在していた。著者らのグループでは、還元・焼結を1工程で完了することで、酸化鉄から中空鉄ボールを直接作製することに成功した^{6),7)}。酸化鉄は、製鉄プロセスからの副産物を精製して作られるもので、環境負荷が小さいエコ素材である。汎用磁性材料であるフェライトの主原料に用いられており、

比較的安価に大量供給されている材料である。

中空金属ボールの変形挙動については、これまでにいくつかの報告例がある。Lim⁸⁾らは、中空鉄ボール圧縮変形挙動の FEM 解析を行い、座屈や緻密化挙動について議論している。一方、吉村ら³⁾は中空金属ボールについてボールや円柱状成型体の変形挙動を調査し、成型体の圧縮変形時に応力プラトー領域が発現し、その大きさは成型体密度に依存することを報告している。また、堀川ら⁹⁾は成型体圧縮挙動の FEM 解析を行い、プラトー応力発現にはボール同士の接着が重要なことを指摘している。しかしながら、個々のボール特性から成型体までの圧縮変形挙動を論じた報告は見られない。中空金属ボールの成型体は、突発的な衝撃に対して、人や物を守るためのエネルギー吸収体として用いられることが多く、高度な信頼性を要求される。したがって、成型体の構成要素となる個々のボール特性がどのように成型体の圧縮特性、特にプラトー応力に寄与しているかを説明することは重要なことである。本研究では、以下の内容を明らかにすることを目的とする。

- ①ボール形状(特性)と円柱状成型体プラトー応力の関係
- ②ボール接合状態や分布の成型体プラトー応力への影響
- ③円柱状成型体プラトー応力の圧縮角度およびひずみ速度依存性

2. 実験方法

中空鉄ボールは、球状の樹脂型材に平均粒径 $1\mu\text{m}$ の酸化鉄をコーティングした後、水素中 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ で還元・焼結を行って作製した。ボールの径は型材の径で、ボールシェルの厚さは、酸化鉄のコーティング量でコントロール

* JFEテクノリサーチ(株) 開発部 〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1
Development Dept. JFE TECHNO-RESEARCH CORPORATION,
1 Kawasaki-cho, Chiba, 260-0835, Japan.

** JFEテクノリサーチ(株) 知多分析・材料事業部 〒475-8611 半田市川崎町 1-1
Chita Analysis & Material Division, JFE TECHNO-RESEARCH CORPORATION, 1-1 Kawasaki-cho, Handa 475-8611, Japan.

した。

ボール単体の圧縮変形挙動の観察には、直径 $D=12.7\text{mm}$ の大きなボールを用いた。通常は、 $D=2\sim4\text{mm}$ ボールを用いることが多いが、各変形モードが観察しやすいのでこのサイズの実験結果で議論した。

本論文で議論する円柱状成型体とは、中空鉄ボールを 0.1mm 厚さのステンレスパイプに詰め、エポキシ系接着剤を結合体として熱硬化したものである。接着剤の添加量は、予備実験で成型体の圧縮強度を安定して発現できることを確認して、成型体体積の約 7.5% 体積%とした。圧縮試験は後加工することなく、ステンレスパイプ付のままで行った。この場合のステンレスカバーが、円柱状成型体のプラトー応力におよぼす影響は 0.1% 以下である。円柱状成型体の寸法は、直径 50mm 、高さ 100mm である。ボールの詰め方は通常充填以外に、以下の方法を検討しその影響を調べた(3.3 節, 3.4 節)。

- ① ボール同士が無接合：接着剤を加えないでボールをパイプに詰めただけの状態。
- ② 積層接合：パイプの中で高さ方向に、 0.2mmFe 板/ボール層/ 0.2mmFe 板/ボール層……と重ねた状態で、 Fe 板とボールは接着剤で接合。
- ③ ランダム混合：2 種類の強さのボールを意図的に均一混合した場合。ボール同士は接着剤で接合。
- ④ 2 層混合：上部に強度の高いもの、下部に強度の低いものの 2 層に分けて充填した場合。ボール同士は接着剤で接合。

ボール単体、円柱状成型体ともに、圧縮試験は 1 軸圧縮試験機で行った。圧縮面が圧縮軸に対してなす角度を、圧縮角度と定義した。通常の圧縮試験は圧縮角度 0 度だが、3.5 節では 30 度まで傾斜を付けた圧縮面での圧縮試験を行った。圧縮速度は、ボール単体が 6mm/min 、成型体が 20mm/min である。圧縮面の潤滑は行っていない。ボールの圧縮強度 F_A は、成型体にしたときのプラトー応力との相関が良い荷重-変位曲線の勾配が変わる点(Fig.2 の A 点)で定義した。A 点の物理的な意味は、本編で議論する。また、円柱状成型体を圧縮試験したときの平均プラトー応力は、ひずみ量 $20\sim30\%$ の平均値を用いた。

3. 結果と考察

3.1 中空鉄ボールの圧縮変形挙動

代表的な中空鉄ボールの外観とシェル(殻)断面の写真を、Fig.1 に示す。均一な厚さの薄いシェルと大きな空洞から構成されていることが特徴的である。シェル断面には約 $20\mu\text{m}$ の結晶粒が観察される。原料酸化鉄粒径が約 $1\mu\text{m}$ なことを考えると、還元・焼結時に大きな結晶粒成長を伴って緻密化が進んだことが判る。結晶粒間には気孔が散在するがその割合は小さく、緻密な組織を形成している。酸化鉄粒子の還元が完了した段階は微細な Fe 粒子であり、その大きな表面積が焼結の促進に寄与して緻密な焼結体組織を形成したと考えられる。Fig.1 に示したボールの直径は、還元・焼結工程を経て約 25% (体積比で約 60%)収縮している。このような大きな収縮を伴ったにも関わらず、球体からのひずみは見られなかった。形状の対称性が良くシェル厚さ

Fig. 1 Appearance(a) cross-sectional views(b), (c) and micro structure(d) of iron hollow spheres

が均一に形成されているため、収縮が等方的に進行したためと考えられる。

直径 $D=12.7\text{mm}$ 、シェル厚さ $t=0.18\text{mm}$ ボールを、圧縮試験したときの荷重-変位曲線と、圧縮中の外観写真を Fig.2 に示す。荷重データは約 $5\mu\text{m}$ ごとに採取している。小さな変位に対する荷重変動の測定だが、再現性の良い結果が得られており、Fig.2 はその一例である。荷重は圧縮開始とともに単調に増加し、 7.5mm 変位付近(B 点)でピークを持つ。途中、 7mm 変位付近(A 点)で勾配が変わるが、この点が本研究で定義したボールの圧縮強度である。その後、 $8.5\sim11\text{mm}$ の範囲で荷重変動の小さな領域が現れ、荷重は急激に増加する(C 点 11mm 以降)。変形モードの推移は、外観写真から以下のように観察できる。即ち、圧縮の開始と同時に上下端からの座屈が始まり、 7mm 変位付近(A 点)まで座屈部分の面積を広げながら変形が進む。A 点以降は側面が大きく凹む座屈モードへと変形が変わる。A 点の外観は、元のボール直径 D を直径とした円筒形に近い形状になっている。荷重が単調に増加する $0\sim7.5\text{mm}$ 領域で、勾配の変化する A 点での荷重 F_A は本研究でボール強度と定義した値であり、上下端から始まった座屈が、側面座屈へと変形モードが変わる点に相当する。A 点の変位は、いろいろなサイズのボール(直径： $0.5\sim12.7\text{mm}$ 、シェル厚さ： $0.01\sim0.2\text{mm}$)を検討してみても、ひずみに換算すると約 0.55 とほぼ一定である。ここで、B 点～C 点の圧縮曲線は、ボールのシェル厚さによって異なることについて述べておく。即ち Fig.2 の結果は、シェル厚さ t とボール直径 D の比が

Fig. 2 Stress-strain curve of iron hollow spheres by compressive test

$t/D=1.4 \times 10^{-2}$ と、比較的薄肉タイプの場合である。この場合、見てきたように上下端の座屈～側面の座屈～緻密化の様子が圧縮曲線に明確に現れる。しかしながら、 t/D の大きな厚肉タイプのボールでは、側面の座屈が始まるとほぼ同時に上下端から座屈した面同士がぶつかるため、見かけ上は B 点～C 点の挙動が消失して緻密化による荷重増加が進む圧縮曲線が現れる。

以上の結果をもとに、A 点における変形ボールの外寸法を、ボール直径 D に等しい円筒と近似し、A 点～C 点の変形を円筒の座屈変形と仮定して議論を行う。側面厚さ t (=シェル厚さ) と直径 D の比は、本研究で扱うボールサイズの場合 $t/D=1 \sim 5 \times 10^{-2}$ 程度と小さいので、変形荷重 F の算出には、次に示す薄肉円筒体の座屈式を適用する。なお、上下端からの座屈面同士のぶつかりによる荷重増加は無いとする。

$$F = \pi E D t / [12(1-\nu)]^{1/2} \quad (1)$$

Fig. 3 Relationship between strength of iron hollow spheres (F_A) and Dt

ここで、 E は弾性係数、 ν はポアソン比である。

式(1)の $\pi E / \{12(1-\nu)\}^{1/2}$ は定数と考えてよいので、次式の関係が得られる。

$$F \propto D t \quad (2)$$

直径(0.5～12.7mm)とシェル厚さ(0.01～0.2mm)を変えたボールを作製し、Fig.2 に示した B 点の荷重 F_B と Dt の関係を調べた結果を Fig.3 に示す。ボール強度 F_A も同様にプロットした。先に述べたように、 F_B は圧縮曲線上に明瞭に観察されない場合があるので、 F_A よりもデータポイントが少ない。 F_B と Dt の間には、概略、式(2)で示した比例関係が認められたことから、Fig.2 の A 点～C 点の変形を円筒の座屈変形とすることは妥当と考えられる。比例関係からのばらつきは、上下端からの座屈面同士の接触が影響している可能性がある。 F_A は F_B よりも良好な比例関係が認められている。また、B 点荷重 F_B と A 点荷重 F_A の比は $F_B/F_A = 1.3 \sim 1.5$ の範囲であった。 F_A は側面の座屈荷重ではないが、Fig.3 で得られた相関からボール側面の座屈荷重の目安となるパラメータとして、以下の議論で用いる。

3.2 円柱状成型体の圧縮変形挙動

強度 F_A の異なる 3 種類のボールを用いた円柱状成型体の応力-ひずみ曲線を Fig.4 に示す。いずれも直径 4mm のボールを用い、ボール強度の変化はシェル厚さを変えることで行った。図中に示した応力 σ_A は、次式で定義した値である。

$$\sigma_A = F_A / (\pi D^2 / 4) \quad (3)$$

Fig.5 には、 $\sigma_A = 12.1 \text{ MPa}$ のボールを $\phi 90 \text{ mm}$ 、高さ 150mm の型に成型した後型を外した状態の、円柱状成型体外観と断面の写真を示す。断面写真から、ボール間に接着剤が溜まることで太いネックを作っていることが判り(写真中、矢印で示したグレーの部分)、接合を補強する役目を担っていると考えられる。ボールが最密充填すると考えると、ボール間隙間の 20～25 体積%が接着剤で埋まることになる。なお、使用した接着剤は熱収縮が無いので、そのことによる残留応力の影響は無いと考えている。

Fig. 4 Stress-strain curves of structures of iron hollow spheres

Fig. 5 Appearance(a) and cross-sectional view(b) of structure of iron hollow sphere

Fig. 6 Relationship between F_A and the average stress in plateau stress region

Fig.4に見られる円柱状成型体の圧縮曲線は、いずれの場合もボール単体の場合と異なり、ひずみの増加に対して応力変動の小さなプラトー領域が広い範囲に渡って現れることが特徴的である。また、プラトー応力は強度の大きなボールを用いたもの程、大きくなっていることが判る。さらにひずみ量を大きくすると応力が急激に上昇するが、これは個々のボール側面の座屈変形が終了したことに対応する。

強度 F_A を変えたボールを用いて多種類の円柱状成型体を作製し、同様の圧縮試験を行った。得られた平均プラトー応力を、 F_A に対してプロットした結果を Fig.6 に示す。両者には直線的な関係が認められた。

セル構造体を圧縮試験するときに出現するプラトー応力領域は、セル壁の座屈に起因していると説明されている¹⁰⁾。中空鉄ボール成型体の圧縮変形時において、ボールがセルの機能を担うと仮定すると、シェルの座屈現象がプラトー応力領域の発現に重要な役割を果たしていると考えられる。先に述べたように、 F_A はボール側面の座屈荷重の目安となるパラメータであり、Fig. 6 の結果は、そのような仮説を支持するものである。

3.3 接合状態と圧縮変形挙動

Fig.7 には3種類の接合状態((a)Fig.4に同じ、(b)ボール同士が無接合、(c)積層接合)での圧縮曲線および圧縮後の断面写真を示す。積層接合とは、一層ずつボールを並べて接合

Fig. 7 Stress-strain curves of bonded, non-bonded and layered structure

したもので、層間には0.2mmのFe板を挟んでいる。ここでは、ボールとFe板とは接合されているが、面内に並ぶボール同士は接合されていない。無接合、積層接合ともにプラトー応力領域は現れず、ひずみ量とともに応力は単調に増加する、ボール単体に近い圧縮変形挙動を示す。

無接合の場合の圧縮挙動については、堀川らがFEM解析結果などから、接合しない場合はボールが隙間に滑り込みながら変形する挙動を明らかにし、これがプラトー領域の現れない理由としている⁹⁾。一方、積層構造の場合は、圧縮後に個々のボールの上下面が座屈して凹んだ、Fig.2で示したボール単体の場合と同じ状況である。

これまでの議論から、成型体がプラトー応力領域を発現するには、以下のことが重要と考えられる。即ち、シェル(殻)は隣接するボールに拘束(接合)されて個々のボールが独立して変形できない構造を作ることが必要である。したがって、接合は点よりも面で行われることで局所的な独立変形(堀川らの示した滑り込みや、積層接合のボール変形)を抑えることができる。このような状況では、ボール単体の変形で見られる初期の上下端からの座屈変形が起きにくくなり、シェル側面の座屈変形を誘導するのであろう。

Fig. 8 Schematic views of compressive deformation behavior of an independent ball(lower flow) and a ball constitutes the structure(upper flow)

Fig.8 に、ボール単体と成型体中の 1 個のボールについて、圧縮変形の様子を模式的に示した。成型体の場合、初期状態からボール単体の側面座屈(Fig.8 の(c))変形が開始するため、大きな荷重を示す。このとき、上下端からの座屈は進行していないため、緻密化まで側面座屈の進行できる領域が大きくなり、結果として成型体に荷重プラトー領域が発現する。以上のモデルでは、接着剤の挙動については何も考慮していない。最後までボールの塑性変形に追従することは考えられなく、あるタイミングでボール/接着剤間での剥離もしくは樹脂内での破壊による界面が発生すると推測される。これらの影響を調べることは今後の課題である。

3.4 ボール強度分布のプラトー応力への影響

ボール強度分布が、円柱状成型体のプラトー応力に及ぼす影響について示す。平均径 3mm で 2 種類(12.5MPa と 19.6MPa)の σ_A 値を持つボールを体積比 1:1 で混ぜ、樹脂で接着した場合の、応力-ひずみ曲線を調べた。圧縮後の断面写真とともに、Fig.9 に示す。ここで、「ランダム混合」とは均一に混ぜた場合で、「2 層混合」は上部に 19.6MPa、下部に 12.5MPa 強度のボールを配置したものである(体積平均強度はいずれも 16.1MPa)。比較のため、17.7MPa ボール単相での応力-ひずみ曲線、および、比較しやすいように、これを 16.1MPa 相当に比例換算($16.1/17.7$ 倍)した曲線(点線)の結果を併記した。ランダム混合および 2 層混合の応力-ひずみ曲線は、混合状態が違うにもかかわらず完全に一致するだけでなく、単相成型体(16.1MPa 換算曲線)にも一致している。2 層混合状態の圧縮後写真から、12.5MPa ボールの緻密化(Fig.9(c)写真の下半分)が進んでいるのに対し、19.6MPa ボールでは空洞が多く残っていることが判る。ランダム混合の場合、空洞の大きいボールがランダムに分散しており、これらが 19.6MPa 材と考えられる。

以上のことから、成型体のプラトー応力は個々のボールの強度平均値でのみ決まり、応力分布や分散状態には因らないことが判った。

Fig. 9 Stress-strain curves of single phase, random mixed and layered structure

Fig. 10 Influence of compression angle on plateau stress ratio

3.5 圧縮角度のプラトー応力への影響

圧縮角度を 0 度から 30 度まで変えて静的圧縮試験したときの、角度と平均プラトー応力比 (0 度の値を 1 とした時の値) の関係を Fig.10 に示す。圧縮角度の増加とともに平均プラトー応力は低下するが、その割合は小さい。角度を付けて圧縮した場合、圧縮変形に曲げ変形モードが加わる。プラトー応力が低下するのは、曲げ変形モードに起因する。中空パイプを曲げ変形すると容易に折れ曲がるのに対し、ボールを充填したパイプでは曲げ変形モードに対しても充填材が変形のエネルギーを吸収するため、応力低下の小さい圧縮変形挙動を示す。その他、中空鉄ボールが充填した場合、サイズ、強度が均一なボール集合体なため強度の異方性が無いことも角度依存性が小さい理由である。

3.6 ひずみ速度のプラトー応力への影響

ひずみ速度(対数表示)を変えたときの、プラトー応力の相対値を Fig. 11 に示す。ここで、プラトー応力の相対値とは、20mm/min (0.003s^{-1}) で圧縮したときを準静的圧縮とし、そこでの平均プラトー応力値を基準値 1 としたときの相対値である。また、ひずみ速度 10s^{-1} 以上のデータについて、線形表示した図を挿入する。比較のため、ポラスアルミニウムの場合を、文献 11 に示されたデータをもとに併記した。平均プラトー応力の相対値はひずみ速度とともに大きくなる。特にひずみ速度 20s^{-1} 程度までの増加分が、ポラスアルミニウムに比べて大きいことが特徴的である。さら

Fig. 11 Strain-rate dependence of plateau stress

にひずみ速度を大きくすると、中空鉄ボール、ポーラスアルミニウムともに平均プラトー応力が増加する。その増加率は低ひずみ速度領域に比べて大きくなり、挿入図に示したようにひずみ速度に線形比例している。

中空鉄ボールとポーラスアルミニウム平均プラトー応力のひずみ速度依存性の違いは、両者の結晶構造の違いによるところが大きい。変形応力の原因となる、転位運動に対する抵抗の主なものは、結晶固有の摩擦抵抗(パイエルス応力)と外因的な摩擦抵抗(林転位との相互作用)がある。パイエルス応力による摩擦抵抗は熱活性化過程であり、アルミニウムのような fcc 金属では無視できるほど小さいことが知られている。外因的な摩擦抵抗は、低ひずみ速度では転位が林転位を切る時の熱活性化過程が律速するのに対し、高ひずみ速度では林転位間を通過するときの粘性抵抗に律速される。3つの過程を数式化するとひずみ速度 v と応力 τ の関係は以下のようになる¹²⁾。

$$v \div (E/bA) \exp[-(E - \tau bA)/kT] \quad \text{パイエルス応力} \quad (4)$$

$$v \div \rho bL v \exp[-(E - \tau b^2L)/kT] \quad \text{林転位(低速変形)} \quad (5)$$

$$v \div \rho b^2 \tau / B \quad \text{林転位(高速変形)} \quad (6)$$

ここで、 E は活性化エネルギー、 b はバーガースベクトル、 A は活性化面積、 ρ は運動転位密度、 L は林転位の平均間隔、 v はデバイ振動数、 B はフォノン散乱や伝導電子散乱による摩擦係数、 k はボルツマン定数である。

以上のことから、中空鉄ボールとポーラスアルミニウム平均プラトー応力のひずみ速度依存性のメカニズムは以下のように考えられる。

- ① 低ひずみ速度領域：ポーラスアルミニウムで応力のひずみ速度依存性が非常に小さいことから、パイエルス応力による転位の摩擦抵抗律速となる。
- ② 高ひずみ速度領域：中空鉄ボール、ポーラスアルミニウムともに、応力の増加がひずみ速度に線形依存することから、転位が林転位間を通過するときの粘性抵抗が律速となる。

最後に、加工硬化現象との関わりについて考察する。加工硬化現象は、林転位の蓄積によって転位の移動が阻害される現象であり、加工速度(ひずみ速度)を大きくすると転位密度が大きくなることで硬化の増加が早くなることが知られている。式(5)によると、低ひずみ速度の熱活性化過程では、応力は林転位の密度($\propto L^{-3}$)に依存することが判るが、上述のように、この領域ではパイエルス応力による抵抗が支配的である。一方、高ひずみ速度では林転位の存在が重要になるが、式(6)に示すように転位密度に関わる L 値は現れてこない。以上のことから、Fig.11 に現れた現象の主要原因は、加工硬化現象とは異なる機構で現れていると考えるべきであろう。

4. 結 言

中空鉄ボールおよび円柱状成型体の圧縮挙動を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- ① ボール単体の変形は、上端からの座屈変形と、側面

座屈変形からなる。側面の座屈荷重の目安となるボール強度 F_A は、ボールの直径 D とシェル厚さ t の積に比例する。

- ② 円柱状成型体の応力プラトー領域の発現は、シェルの座屈に起因していると考えられ、その大きさはボール強度 F_A に比例する。
- ③ 円柱状成型体のプラトー応力を得るには、ボールのシェルが隣接するボールに拘束(接合)されて、個々のボールが独立して変形できない構造を作ることが重要である。
- ④ 円柱状成型体のプラトー応力は、使用するボール強度 F_A の平均値のみで決まり、ボール強度の分布には依存しない。
- ⑤ 角度を付けた圧縮時のプラトー応力は、垂直圧縮(0度)に比べると低下するがその割合は小さい。これは、角度付き圧縮時に生じる曲げ変形モードに対して、ボールがそのエネルギーを吸収するためである。
- ⑥ 円柱状成型体のプラトー応力は、ひずみ速度とともに増加し、その割合はポーラスアルミニウムのそれを超える。

以上のように、実験データから中空鉄ボールと円柱状成型体の圧縮変形挙動、および両者の関係などを明らかにした。ここで得られた知見は、この材料を実用部材に適用するときにより重要であり、さらなる応用展開の推進に寄与すると期待できる。

参 考 文 献

- 1) 金武直幸：素形材, 6(2006), 14-17.
- 2) 三好鉄二・濱田猛：素形材, 6(2006), 10-13.
- 3) 吉村英徳・品川一成・村上勝彦・鮎川佳弘・原田正祐・三原豊：日本機械学会論文集 A 編, 71-705(2005), 796-802.
- 4) Waag, U., Schneider, L., Lothman, P., Stephani, G. & Kieback, B. : Proc. 2000 Powder Metall. World Congress, (2000), 379-382.
- 5) Anderson, O., Waag, U., Schneider, L., Stephani, G. & Kieback, B. : Advanced Engineering Materials, (2000), 192-195.
- 6) 福田泰隆・林偉平・小倉邦明：平成 22 年度春季大会粉体粉末冶金協会講演概要集, (2010), 228.
- 7) 福田泰隆・林偉平・豊岡高明：平成 22 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2010), 263-264.
- 8) Lim, T.-J., Smith, B. & McDowell, D.L. : Acta Mater., 50(2002), 2867-2879.
- 9) 堀川雅史・吉村英徳・日浦悠香・品川一成・三原豊：平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 79-80.
- 10) Gibson, L.J. & Ashby, M.F. : CELLUR SOLIDS, PERGAMON PRESS (1988), (大塚正久訳：セル構造体, 内田老鶴圃, (1993)).
- 11) 吉村英徳・三原豊・三好鉄二・金橋秀豪・上村雄介・田中健一・小橋眞・金武直幸・小野文夫：平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 71-72.
- 12) 崎野清憲：J. Soc. Mat. Sci. Japan, 54(2005), 1301-1306.