受賞記念講演：平成 12 年度研究功績賞

金属粉および磁性粉の圧縮成形・加工に関する研究

沖本 邦郎

摂南大学，〒572-8508 寝屋川市池田中町 17-8.

Study of Compaction and Forming of Metallic/Magnetic Powders

Kunio Okimoto

Setsunan University, 17-8 Ikeda-nakamachi, Neyagawa 572-8508.

Received July 12, 2001

SYNOPSIS

This paper reviews the researches in powder forming which were carried out by the author. In the compaction and forming of metal powders, first a compaction criterion in a stress state such that $\sigma_2 = \sigma_3$ was obtained; this gives a relation between principal stresses and density of the green compact. Next, by using the results obtained from the cold forgeability of sintered iron, a ductile fracture criterion for porous metals was proposed. The formation process of joint strength in the infiltration joining was made clear. Furthermore, rapidly solidifying superplastic powder was prepared by centrifugal atomization method.

In the forming processing of magnetic powders, meantime, a new type of composite magnetic material was fabricated by combination with electro-magnetic properties of ferrite powder and the superplastic properties of Zn-22Al alloyed powder. To improve the magnetic characteristics of the permanent magnets, orientation forming of magnetic powders mixed with a MIM binder was attempted and a new orientation forming process was proposed. Moreover, for the purpose of producing ferrite part with a complicate shape which has different alignment of the ferrite crystallites, the feasibility of combined sinter joining method was carried out. As another application of combined sinter joining, a stainless steel-permalloy composite was fabricated and the forming conditions to give sufficiently high joint strength to it were found.

KEY WORDS

Powder forming, powder compaction, metal powder, magnetic powder, infiltration joining, superplasticity, composite magnetic material, orientation forming, MIM binder, sinter joining

1 緒 言

粉末冶金，鋳造，塑性加工のような金型を用いる加工法を総称して素形材加工と呼ぶことがある。粉末冶金が素形材加工に対して占める割合は鋳造や塑性加工に比べて少なく，国内における 2000 年度の生産実績（金額）は 7.7%¹⁾である。しかし，粉末冶金の成形プロセスによれば複雑な形状の部品を製造することができ，金属組織の微細・均質化が可能で，材料成分の組み合わせの自由度が大きいなどの特徴がある。そのため，粉末成形は素形材加工において次第に重要性を増している²⁾。

本研究は，粉末冶金における主要プロセスである原料粉の製造，粉体の圧縮成形，焼結，後加工（後処理）の内で，粉体の圧縮成形および後加工を材料加工学的な観点から検討した

ものである。粉末成形を解析的に取り扱った研究³⁾もあるが，粉末の成形挙動に及ぼす要因が多いことを考慮して，本研究では実験的に取り扱った。研究の主な目的は，金属粉と硬質磁性粉（永久磁石用磁性粉）を用いた粉末成形において，加工プロセスを適正化することによって粉末成形体の高機能化・高性能化を図ることである。金属粉関連では簡易ラバープレス，成形・破壊条件式，焼結金属の延性破壊，溶浸接合および急冷凝固超塑性粉などについて研究した。一方，硬質磁性粉関連では超塑性金属粉複合磁性体や配向成形，焼結接合による機能性配向磁性体と複合材の作製などについて検討を行った。今回，研究功績賞を授与されたので，これを機会に，これまでの研究を取りまとめた。

2 金属粉の圧縮成形・加工

1965年に当時の通産省工業技術院九州工業技術試験所(現在、産業技術総合研究所九州センター)に入り、数年間は「超音波振動を付加した塑性加工の研究⁴⁻⁶⁾」を行った。1971年頃から粉末成形に従事するようになり、最初に手がけた研究テーマがFig.1のような“簡易ラバープレス法⁷⁾”である。周知のように、金型(密閉形)成形法で作製した粉末成形体は、粉末とダイスとの摩擦のために密度分布が不均一になりやすく、この傾向は加圧方向に長尺になるほど顕著である。そこで、Fig.1に示すダイス②の内側に配置した円筒状ゴム型③の内部に粉末④を充てんし、ゴム型と粉末を同時に圧縮成形すれば摩擦を低減させることができ、長尺物が得られるものと考えた。鉄粉を用いた実験の結果、Fig.2(a)で示すような高さH/直径D=8.8の圧粉体をつくることのできた。しかし、パンチと円筒状ゴムおよび粉末との摩擦条件によっては、Fig.2(b)のような圧粉体の高さ方向の中央部分における直径に比べて両端面での直径が大きくなる、いわゆる“象の足”現象が生じた。この形状が主因で、圧縮後の除荷過程で圧粉体が破壊することが時々あった。この成形法では粉末の充てん密度が大きく粉末を均一に充てんすることが重要であると判断されたので、金型とゴム型を同時に振動して見掛け密度の状態からできるだけタップ密度に近づけてから成形した。後に開発されたエアレート充てん法¹⁰⁾やエアータッピング法¹¹⁾の工学的重要性を再認識する次第である。

さて、この簡易ラバープレス法の場合、粉末は軸対称の応力状態の下で固化される。ゴム型の厚さによって圧粉体に作用する応力状態が変化し、圧粉体密度はこの影響を受ける。しかし、応力状態と密度との関係は不明であった。このような成形を行うに際しては、粉末が固化成形されるときの一般的な3主応力と密度との関係式、すなわち粉末の成形条件式

① Upper punch, ② Die, ③ Rubber cylinder,
④ Powder, ⑤ Lower punch

Fig.1 Schematic illustration of a simple rubber-press method.

について基礎的なことを理解しておくことが重要であると痛感した。そこで、当時、焼結金属を塑性加工学的に取り扱っており、顕著な業績をあげておられた京都大学の矢根守哉教授(現在、京都大学名誉教授)のところで、約1年間、研究する機会を得た。

その期間中に軸対称成形の場合における粉末の成形条件式と圧粉体の破壊について研究した。成形条件式における材料定数の求め方として、金型成形における成形圧力 σ_1 と密度との関係(圧縮性)および側圧係数 $\xi^{12)} (= \sigma_2/\sigma_1; \text{ここで } \sigma_2 \text{ はダイスに作用する側方向の応力})$ を用いる方法を提案し¹³⁾、粉末成形の現場において粉末特性を評価するための重要な物性値とされている“圧縮性”に、力学的な意義付けを行うことができた¹³⁾。また、銅圧粉体の破壊について研究し、粉末の成形条件式と破壊条件を統一的に表示することができた¹⁴⁾。

次に、鉄系焼結体の延性破壊¹⁵⁾について検討し、鉄系焼結体の鍛造中における加工限界の予測や焼結鍛造品の延性を評価するのに役立てることができた。また、金属焼結体の再圧着¹⁶⁾においては、鍛造過程において一旦生じたクラックが、その後の鍛造過程で押しつぶされて見掛け上は再圧着したような状態になるが、このような過程を経て得られた鍛造品の延性は、鍛造中に全くクラックが生じなかったものに比べて格段に劣っていることが分かった。そこで、再圧着体の延性を向上させるために、再圧着後に1100°C程度で熱処理を行ったところ、クラックが生じなかった場合に比べてほとんどその色の無い程度にまで鍛造性が回復した。

Fig.2 Appearance of green compacts fabricated from a simple rubber-press method.

金属粉末成形体の圧接^{17,18)}においては、接合強度に及ぼす接合圧力、接合時のクリアランス、密度、接合面の粗さおよび接合温度の影響を調べ、接合部の強度が非接合部と同等になるための条件を明らかにした。一方、金属粉末成形体の気孔を積極的に活用する溶浸接合¹⁹⁻²²⁾においては、摩擦圧接などの場合と同様に、衝撃値や延性は一体ものの溶浸体に比べてやや劣っていた。しかし、静的接合強度に関しては一体ものの溶浸体に匹敵する強度が得られ、接合と母材の強化を同時に図ることができ、かつ接合部近傍の硬度分布は一体ものの場合とほとんど変わりなく、本接合法の有効性が明らかとなった。また、溶浸接合体の静的強度は、複合材料における混合則より予測することができた。

当時、元の職場においては、研究の重点分野が新素材関連に移行しつつあった。そこで、これまでの研究を一段落として²³⁾、粉末成形の分野における“(新)材料”と“加工”という内容で展開を図ることとし、超塑性急冷凝固粉の作製とその成形加工プロセスの適正化のテーマを取り上げた。

周知のように金属組織を微細・均質化すれば、高強度・高靱性の材料をつくることができ、場合によっては超塑性・形状記憶のような機能性も発現する。組織微細化の手段としては、添加元素法、急冷凝固法、メカニカルアロイング法などがあるが、著者らは急冷凝固法の一つである遠心力噴霧法に注目し、Zn-22Al合金粉の作製とその成形体の変形特性について研究した²⁴⁻²⁹⁾。

Fig. 3 Schematic illustration of centrifugal atomization equipment.

Fig.3は設置した遠心力噴霧装置の概念図である。この装置で急冷凝固粉を製造する場合の冷却速度は、Al-33Cu合金粉のラメラ間隔やAl-1%Si合金粉のデンドライトアーム間隔の測定結果から、 $10^4 \sim 10^5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ のオーダー³⁰⁾と推定された。本装置による研究を通じて、遠心力噴霧法における粉末の収率は回転円盤と溶解金属との濡れ性によって大幅に変化し、収率を向上させるためには回転円盤表面に適切な溶着層³¹⁻³³⁾を形成させなければならないことが判明した。

作製したZn-22Al合金粉の金属組織はFig.4(c)のようである。この粉末を密閉金型で予備成形した後に250°Cで押出し加工(押出し比:10)したものを引張り試験すると、Fig.5で示すように伸びは最大で1000%に達し、従来からの空気噴霧法で作製した成形体の伸びが300%、溶解鋳造材が80%であるのに比べて、格段に大きくなった。このように遠心力噴霧法が超塑性材の製造手段として有効であることが確認できた。遠心力噴霧装置は、Cu-Al-Ni系形状記憶合金粉など^{34,35)}を作製するためにも使用された。その後、共同研究者であった佐藤富雄氏によってAl-Mn系およびAl-Si系の急冷凝固合金粉^{30,36-39)}への展開が図られた。

Zn-22Al合金は超塑性を有するだけでなく、拡散接合性、電

Fig. 5 Elongation of compacts made from rapidly solidified Zn-22Al alloyed powders.

Fig. 4 Microstructures of Zn-22Al alloyed powders and the ingot observed by SEM.

磁波シールド性、制振性がすぐれていると言われている。そこで、Zn-22Al合金粉と磁性粉から成る複合磁性体が作製できれば、磁性粉が硬磁性の場合には成形後の着磁処理により永久磁石となり、軟磁性粉の場合には周波数帯域の広い電磁波シールド材や制振材としての用途が期待できる。そこで、Zn-22Al合金粉の応用例としてハードフェライト粉との複合化^{28,40-44)}を手がけ、これを契機として磁性粉の配向成形の研究に至っている。

3 磁性粉の成形加工

3.1 複合磁性体(ボンド磁石)の磁気特性

Zn-22Al合金粉を用いた複合磁性体における Zn-22Al合金は、慣用の樹脂ボンド磁石やゴムボンド磁石におけるバインダー用のプラスチックやゴムの代替材料として使用したことに相当する。Zn-22Al合金はプラスチックやゴムに比べて耐熱性・耐候性がすぐれており、またプラスチックやゴムが一般に絶縁性で一旦成形すると可塑性が無くなるのに対して、導電性や再加工作などの金属性機能を有しているという特徴がある。

製造工程は次のようである。Zn-22Al合金粉とハードフェライト粉を混合し、次に室温または250℃で密閉金型成形し、得られた成形体を着磁処理することにより複合磁性体とした^{42,49)}。この成形プロセスで作製した複合磁性体の磁気特性(残留磁束

密度 B_r) を、成形体の単位体積当たりの磁性粉(フェライト)重量 γ) との関係で Fig.6 の図中⑤(▲印)に示す。図から明らかなように、 B_r は成形圧力、成形温度および粉末混合法に関係なく、単位体積当たりの磁性粉重量 γ で整理することができ、 B_r は γ にほぼ比例する。したがって、磁気特性を向上させるためには γ が大きくなるような成形条件を選んでやればよい。Fig.6 の⑤の場合、 B_r の最大は約0.14 T(テスラ)、すなわち約1400 Gである。

磁性体の磁気特性を更に向上させるためには、磁場配向⁴⁵⁻⁴⁷⁾や機械的配向⁴⁷⁻⁴⁹⁾(圧延や押し出しのような塑性加工の手法)によって磁性粉の磁化容易軸(C軸)を並べ、異方性を付与すればよい。Sr-フェライト粉の配向が完全に達成され、かつ複合磁性体の γ が Sr-フェライトの真密度である $5.11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ に到達すれば B_r は0.465 Tになるとされている。そこで Fig.6 において B_r の理想的な最大値と原点を結ぶ直線を A で定義する。図中で直線 B は A の勾配の 1/2 として引いたものである。磁界が作用しない状態の下で成形した実験結果⑤は、直線 B でほぼ近似できる。

一方、配向成形した複合磁性体の場合には、磁気特性を単位体積当たりの磁性粉重量 γ で一意的に評価することができず、磁性粉の配向状態により直線 A と B の間で磁気特性が変化する。そのため γ に対応する直線 A 上にできるだけ近づけるように適切な成形加工プロセスを選定することが重要となる。このように配向成形プロセスの適正化によって磁気特性が約2倍向上することに磁性粉を配向成形することのおもしろさと有用性がある。

3.2 複合磁性体(ボンド磁石)における磁気特性の限度

Fig.7 は、磁界がない状態で冷間金型成形した複合磁性体に

- ① magnetic forming, ② rolling, ③ rolling of rubber magnet, ④ closed-die compaction, ⑤ closed-die compaction of isotropic powder

Fig.6 Relationship between residual flux density and ferrite content per unit volume of compacts.

Fig.7 Effect of ferrite content on density and ferrite content per unit volume of compacts.

γ) 単位体積当たりの磁性粉(フェライト)重量 γ = 複合磁性体の密度 × 磁性粉の混合割合
ここで、磁性粉の混合割合 = [磁性粉 / (磁性粉 + Zn-22Al合金粉)] mass%

おける密度 ρ および単位体積当たりのフェライト重量 γ を、磁性粉の混合割合との関係で示したものである。図中の○と●印は銘柄が異なるSr-フェライト粉を指している。図中には磁性粉の混合割合が80mass%までを示したが、これ以上の状態では成形体にラミネーションクラックが発生しやすく、 ρ と γ を測定することが困難であった。100mass%の状態における γ 、すなわち $\gamma_{100\text{mass\%}}$ はFig.7のデータを外挿して求めることもできるが、Fig.8に示すフェライト粉の冷間“圧縮性”のデータ(○印)における最大値(飽和値)がこの値に相当するとみなせる。Fig.8の○印のデータから明らかなように、冷間圧縮成形したフェライト圧粉体の密度はほぼ $3.20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ で飽和し、フェライトの真密度($5.11\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)に対して65%程度に過ぎない。ここで、粉末を均一球でモデル化した場合における見掛け密度比(見掛け密度の相対密度表示)の理論値は菱面体配列の0.74が最大で、最小は立方配列の0.52⁵⁰⁾である。実際の粉末は粒子形状が不規則状であるので、前記の相対密度を低下させる要因になり、その一方で粒度分布があるので、これは相対密度を上げる要因になる。また圧縮成形の初期においては粉末粒子の再配列によって密度が向上するが、その後の過程においてはフェライトのようなセラミック粉は塑性変形しないので圧粉体密度はほとんど増加しない。これらの要因が組み合わさり、圧粉体密度はFig.8のようにほぼ $3.20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、すなわち相対密度0.65の前後で飽和する。以上より、フェライト粉を用いた複合磁性体を冷間圧縮成形した場合における磁気特性の最大値は、 B_r を例にとれば配向が完全になされた場合 $B_r \leq 0.465 \times (\gamma_{100\text{mass\%}}/5.11)T = 0.465 \times (3.20/5.11) = 0.29\text{ T}$ 、無配向の場合 $B_r \leq (0.465/2) \times (3.20/5.11) = 0.15\text{ T}$ であると判断される。前者の0.29 TはFig.6の図中③で示したゴムボンド磁石の圧延配向成形⁴⁸⁾における到達目標値である。

したがって複合磁性体のようなボンド磁石タイプのもので焼結プロセスがない場合、その磁気特性は磁性粉の“圧縮性”

により左右されることが分かる。そのため複合磁性体の磁気特性を向上させるためには、“圧縮性”のよい磁性粉が望ましく、その一手段として粒度分布を持たせることが考えられる。一方、磁性粉の粒子そのものの磁気特性に注目した場合、単磁区臨界粒子径(フェライトの場合約 $1\mu\text{m}$)以上のものでは磁気特性が低下するので、この粒子径以下のものが望ましい。しかし、粒子径が小さくなると成形時のハンドリングなどが一段と困難になる。したがって、粒度分布を与えることによる成形体密度の向上と単磁区粒子の磁気特性との両立という点において、ボンド磁石は成形上の難しさがある。

また、複合磁性体の機械的強度も考慮する必要がある。複合磁性体の強度はZn-22Al合金粉を混合することにより向上するが、その一方でZn-22Al合金粉の混合割合に応じて磁気特性が低下する。そのため、できるだけ少ないZn-22Al合金粉の使用により複合磁性体の強度が発揮されることが望ましい。この点からZn-22Al合金粉と磁性粉の適合性が問題となる。そこで、複合磁性体の強度に及ぼす粉末混合条件や成形温度などの影響について検討した。その結果、成形温度が 400°C 前後で急激に緻密化し、機械的強度が急増⁴⁴⁾することを見出した。

3.3 配向成形

(a) 焼結磁石 磁気特性を最も重要視する場合においては、当然のことながらZn-22Al合金粉を用いない方がよい。このような場合を対象として、粉末射出成形(MIM)用の熱分解性バインダーを用いてハードフェライト粉を混練しておき、これを配向成形した後に脱バインダー・焼結してフェライト単味の焼結体、すなわち焼結磁石とする方法について検討した。配向成形の具体的手段としては、磁場成形(磁界中配向成形)⁴⁹⁾と圧延成形⁴⁹⁾を行った(Fig.6の①と②)。その結果、MIMバインダーが極めて良好な配向剤として作用し、磁場成形ではFig.6の図中①のように磁気特性のすぐれた焼結磁石が得られた。MIMプロセスによる磁場成形は、水バインダーを用いる従来からの磁場成形に比べて、小物で複雑形状の永久磁石を製造するための手段として適していると思われる。

(b) 配向度 B_r/J_s に及ぼす磁性粉の粉碎粒度と成形圧力 Sr-フェライト磁性粉の配向度 B_r/J_s に及ぼす粉碎粒度と成形磁界の影響⁵¹⁾について調べ、粒子径が比較的大きい $1\mu\text{m}$ 程度以上では B_r/J_s は粒子径にほとんど依存しないが、 $0.7\mu\text{m}$ 程度の微粒子では B_r/J_s の飽和値が小さいことを明らかにした。一方、樹脂を用いたSr-フェライトボンド磁石の成形⁵²⁾において、Sr-フェライト粉の保磁力の変化は金型成形(一軸加圧成形)と冷間静水圧成形(CIP)では異なり、金型成形の方がその低下度合いが大きいことを明らかにした。ただし、この実験の場合、金型成形ではSr-フェライト粉とエポキシ樹脂粉との混合粉を使用したのに対して、CIP成形では水バインダーを用いたスラリー状のSr-フェライト粉を使用しており、粉末の使用環境が同一でない。そのため、保磁力の低下度合いが異なった原因は、成形法の相違によって磁性粉に作用する圧力形態が異なる(金型成形においてはせん断応力成分がある)ためであると

Fig.8 Relationship between green density of ferrite powder and compacting pressure at closed-die compaction.

は早急に結論付けることができない。この原因がどこにあるかを究明することは、ボンド磁石の成形条件の適正化を図るに際して大変興味深い課題であると思われる。

(c)新しい配向成形プロセスの試み 現在の磁場成形の一般的な方法は、磁場配向プレス機を用いて、配向と成形を一工程で行う方式である。この方法の場合、磁場配向プレス機に組み込まれた磁極間に成形用金型を配置するため成形できる形状・寸法に制約があり、また大容量の磁界発生装置が必要である。生産性にも問題があると言われている。そこで、これらの問題点を解消することを目的として、慣用のプレス機を用いて作製した成形体をプレス金型から取り出した後で配向を行う方法に着目した^{53,54)}。この場合、成形によって一旦圧密された磁性粉単味の成形体に磁界を印加しても成形体中の磁性粉はほとんど身動きがとれないと予想されるので、磁性粉に特定の樹脂からなるバインダーを添加・混合した混練物(コンパウンド)を用いて、バインダーの硬化・軟化を利用することによって成形体内部の磁性粉を配向することを考えた。その具体的な方法は、紫外線(UV)硬化樹脂を用いる方法⁵³⁾とMIMバインダーを用いる方法⁵⁴⁾である。

UV硬化樹脂を用いる方法の場合、まだ着想の域を出ておらず、これまでに得られた最大の配向度 Br/J_s は0.83程度で不十分な値である。混練物と型との離型性やUV硬化樹脂の粘性などに関して課題があり、現在、検討中である。なお、この用途に用いるUV樹脂は、UV硬化だけでなく熱硬化性も兼ね備えたタイプが適していると考えられる。一方、MIMバインダーを用いる場合には配向度 Br/J_s は最大で0.95が得られ、型との離型性にも問題が少ないことが明らかになっている⁵⁴⁾。

3.4 磁性体の焼結接合

(a)ハードフェライトの焼結接合 1つの磁性部品内において微結晶粒の配向方向が異なり、かつ複雑な形状を有する硬磁性体が、制御モーター用部品などで要請⁵⁵⁾されている。磁場配向プレス機によってこのような部品を一体成形しようとすると、金型の構成や配向装置が複雑になる。そこで、Fig.9のように配向成形したインナーと無配向成形したアウターを組み立てた後に焼結接合して一体化させる方法⁵⁶⁻⁵⁹⁾によって、1つの部品内で配向が異なる磁性体を作製することを考えた。この場合、ハードフェライト粉を配向成形すると焼結収縮の異方性が生じるので、この現象を焼結ばめ効果に利用して接

Fig.9 Combined sinter joining of ferrite compacted under magnetic field.

合強度の向上も併せて図ろうとするものである。検討の結果、磁界配向の大きさは $250\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 程度で十分であること、組み合わせた圧粉体をCIP処理してから 1225°C で焼結すると50MPa程度の接合強度が得られることが分かった。

(b)ステンレス鋼/パーマロイの焼結接合 近年における情報技術の進展に伴い、1つの部品内で磁性(硬磁性、軟磁性)と非磁性を有する複合磁性体⁶⁰⁾の用途が生じている。そのための具体例として、軟磁性材料の代表的なものであるFe-Niパーマロイとステンレス鋼との焼結接合^{61,62)}を行った。供試粉末として一般粉末冶金用の-100mesh粗粉、MIM用微粉およびその造粒粉を用い、またインナーとアウターの材質の組み合わせはFig.10で示すAタイプとBタイプについて検討を行い、接合強度を大きくするための適切な成形条件を調べ、強度の形成機構について考察した。その結果、Table 1に示すように十分な接合強度を得ることができた。

4 結 言

粉末を出発原料とすれば結晶組織の微細・均質化が可能であり、粉末成形プロセスは生産工程の自動化が図りやすく材料歩留まりがよい。そのため、粉末成形は素形材加工において現在よりも重要性が増すことが期待できる。本研究は、粉末成形の更なる発展を期待して、材料加工学的な観点より金属粉の圧縮成形・加工と磁性粉の成形加工を取り扱ったものである。一連の研究で得られた成果が、粉末冶金の拡大・発

Fig.10 Fabrication of stainless steel-permalloy composite by combined sinter joining and combination of materials for inner disk and outer ring.

Table 1 Joint strength of stainless steel-permalloy composite by combined sinter joining.

(a) SUS316L/Fe-47Ni (1300°C×1 h)		
Powders	Joint strength (MPa)	Type
-100mesh	38	Type A
MIM	263	Type A
Granulated	309	Type B

(b) SUS410L/Fe-47Ni (1255°C×1 h)		
Powders	Joint strength (MPa)	Type
-100mesh	54	Type A
MIM	155	Type A
Granulated	327	Type B

展に対して基礎と応用の点から多少なりとも役立つことがあれば幸いである。

謝 辞

最後に、受賞に際してお世話になりました本協会の関係者、ならびに共同研究者として協力していただきました多数の方々に深謝します。

文 献

- 中野節, 堤信久, 中丸善明, 西村尚, 浅見淳一, 松野健一, 関口勇, 落合俊彦: 素形材, "平成12年の素形材産業・工学年鑑 1. 総論", 42(2001)2-13.
- 例えば, R.M.German 著, 三浦秀士, 高木研一訳: 粉末冶金の科学, 内田老鶴圃, (1996)2-12.
- 例えば, 島進: "粉体成形における粉体の力学的挙動に関する研究", 粉体および粉末冶金, 42(1995)269-276.
- 沖本邦郎, 松島峰生, 萩尾剛, 山川俊夫: "超音波振動を付加した深絞り加工に関する研究", 九州工業技術試験所報告, No.2, (1969)73-82.
- 沖本邦郎, 山川俊夫: "超音波を付加した鉛の中空円筒圧縮試験について", 九州工業技術試験所報告, No.6, (1971)307-314.
- 沖本邦郎, 松島峰生: "超音波付加成形実験装置とプレス加工", プレス技術, 7(1969)33-35.
- 沖本邦郎, 山川俊夫: "超音波のプレス加工への応用", 金属プレス, 2(1970)1-7.
- 沖本邦郎, 山川俊夫: "超音波の利用—絞り加工—", プレス技術, 9(1971)27-32.
- 沖本邦郎, 山川俊夫, 佐藤富雄: "簡易ラバープレス法に関する実験的研究", 九州工業技術試験所報告, No.9, (1973)506-518.
- 近藤幹夫, 竹本恵英: "粉末充填挙動の可視化技術", 粉体および粉末冶金, 45(1998)833-838.
- M.Sagawa, H.Nagata, T.Watanabe and O.Itatani: "Rubber isostatic pressing (RIP) of powders for magnets and other materials", Mater. Design, 21(2000)243-249.
- 沖本邦郎, 佐藤富雄, 山川俊夫: "金属粉末の側圧係数について", 粉体および粉末冶金, 22(1975)205-212.
- 沖本邦郎, 大矢根守哉, 島進: "金属粉末の圧縮成形に関する研究(第1報)(軸対称圧縮成形の場合)", 粉体および粉末冶金, 22(1975)177-184.
- 沖本邦郎, 大矢根守哉, 島進: "銅圧粉体の破壊について", 粉体および粉末冶金, 22(1975)185-191.
- 大矢根守哉, 島進, 沖本邦郎: "鉄系焼結体の延性破壊", 塑性と加工, 20(1979)1037-1044.
- 沖本邦郎, 佐藤富雄: "金属焼結体の鍛造における再圧着について", 九州工業技術試験所報告, No.24, (1980)1446-1452.
- 沖本邦郎, 島進, 大矢根守哉: "金属圧粉体の接合", 塑性と加工, 18(1977)319-324.
- 沖本邦郎, 大矢根守哉, 島進, 佐藤富雄, 山川俊夫: "金属粉末成形体の圧接", 九州工業技術試験所報告, No.29, (1982)1900-1909.
- 大矢根守哉, 沖本邦郎, 佐藤富雄: "溶浸を応用した鉄系焼結体の接合(第1報)", 粉体および粉末冶金, 26(1979)254-258.
- 大矢根守哉, 沖本邦郎, 佐藤富雄: "溶浸を応用した鉄系焼結体の接合(第2報)", 粉体および粉末冶金, 26(1979)259-264.
- 沖本邦郎, 佐藤富雄: "溶浸を応用した鉄系焼結体の接合(第3報)(接合強度に及ぼす溶浸温度と溶浸時間の影響)", 粉体および粉末冶金, 29(1982)84-89.
- K.Okimoto and T.Satoh: "Joining of Iron Powder Compacts by an Infiltration Method", Int. J. Powder Metall., 23(1987)163-169.
- 沖本邦郎: "金属粉末および焼結金属の成形・破壊・接合に関する研究", 粉体および粉末冶金, 34(1987)51-59.
- K.Okimoto and T.Satoh: "Compaction of Zn-22Al Superplastic Powder and Deformation Behaviour of the Compacts", Modern Development in Powder Metall., 16(1984)507-522.
- K.Okimoto and T.Satoh: "Superplastic Forming of Zn-Al Pre-alloy Powder", Proc. IISS Symposium (SINTERING 87), 1 (1987)611-616.
- 佐藤富雄, 沖本邦郎, 西田稔, 今村喜八郎, 千葉昂: "超急冷法と熱処理法による Zn-22Al 合金粉末の超塑性化の促進", 粉体および粉末冶金, 35(1988)91-95.
- 佐藤富雄, 沖本邦郎, Chul-Jin Choi and Won-Wook Park: "単ロール法と回転円盤アトマイズ法による Zn-22Al 急冷凝固材の特性比較", 粉体および粉末冶金, 38(1991)6-9.
- 沖本邦郎, 佐藤富雄: "粉末法による組織微細化とその応用—Zn-22Al 合金の粉末冶金工学的研究—", 九州工業技術試験所報告, No.52, (1994)3259-3267.
- K.Okimoto, T.Satoh, Won-Wook Park and Young-taik Choi: "Development of fine-structured prealloy powders and their applications", Proc. 2nd Pacific Rim Int. Conf. Advanced Mater. Process., (1995)365-370.
- 佐藤富雄, 沖本邦郎, 権田峰夫, 西田新一: "回転円盤アトマイズ法によるアルミニウム系急冷凝固粉の表面形態と金属組織", 粉体および粉末冶金, 41(1994)1426-1430.
- 佐藤富雄, 沖本邦郎, 安武良祐: "遠心力噴霧法における回転円盤へのセラミック溶射皮膜の適用", 溶射, 29(1992)1-6.
- T.Satoh, K.Okimoto and S.Nishida: "Material of Rotating Disk in Centrifugal Atomization Method", Proc. 1993 Powder Metall. World Congress, (1993)730-733.
- 佐藤富雄, 沖本邦郎, 西田新一: "遠心噴霧急冷凝固粉の収率に及ぼす要因", 粉体および粉末冶金, 40(1993)1149-1153.

- 34) Young-Taik Choi, Bong-Sun You, 佐藤富雄, 沖本邦郎: "回転円盤アトマイズ法によるCuAlNi系形状記憶合金粉とその焼結体の特性", 粉体および粉末冶金, 41(1994)602-607.
- 35) 佐藤富雄, 鎌田政智, 沖本邦郎: "急冷凝固粉を用いた2相ステンレス鋼の作製法", 塑性と加工, 32(1991)1148-1153.
- 36) 佐藤富雄, 沖本邦郎, 西田新一, 松木賢司, 小西義隆: "遠心噴霧急冷凝固法によるAl-10%Mg合金粉とその押出し材の機械的性質", 粉体および粉末冶金, 41(1994)933-938.
- 37) 佐藤富雄, 沖本邦郎, 西田新一: "遠心噴霧法による過共晶Al-Si系P/M合金の超塑性特性", 材料, 44(1995)608-613.
- 38) T.Satoh, K.Okimoto, S.Nishida and K.Matsuki: "Superplastic-like behavior of rapid-solidification-processed hyper-eutectic Al-Si P/M alloys", Scr. Metall. Mater., 33(1995)819-824.
- 39) T.Satoh, K.Okimoto and S.Nishida: "High-temperature deformation behavior of aluminum alloys produced from centrifugally-atomized powders", J. Mater. Process. Technol., 68(1997)221-228.
- 40) K.Okimoto, T.Satoh, T.Yamakawa and N.Horiishi: "Composite Magnetic Compacts and Their Forming Methods", U. S. Patent, No.4, 952, 331(1990).
- 41) K.Okimoto, T.Satoh, T.Yamakawa and N.Horiishi: "Composite Magnetic Compacts and Their Forming Methods", U. S. Patent, No.5, 002, 727(1991).
- 42) 沖本邦郎, 佐藤富雄, 堀石七生: "Zn-22Al超塑性粉末を用いた複合磁性体", 粉体および粉末冶金, 35(1988)47-52.
- 43) K.Okimoto, T.Satoh and N.Horiishi: "Fabrication of a Magnetic Composite Material by Use of Zn-22Al Superplastic Powder", Modern Development in Powder Metall., 18(1988)799-813.
- 44) 沖本邦郎, 佐藤富雄, 松山博進, 岡三嘉: "Zn-22Al超塑性粉末を用いた複合磁性体(第2報)", 粉体および粉末冶金, 38(1991)673-680.
- 45) 沖本邦郎, 山口勝, 佐藤富雄, 渡部正之, 堀石七生, 木下浩光: "熱分解性バインダーを用いた異方性磁性粉末の磁場成形", 粉体および粉末冶金, 39(1992)970-976.
- 46) K.Okimoto, M.Yamaguchi, H.Mizue, T.Satoh, M.Watanabe, N.Horiishi and H.Kinoshita: "Orientation Forming of Ferrite Powders Using a MIM Binder", Proc. 1993 Powder Metall. World Congress, (1993)296-299.
- 47) 沖本邦郎, 佐藤富雄, 山口勝: "磁性粉末の配向成形に関する研究", 九州工業技術試験所報告, No.51, (1993)3151-3171.
- 48) 沖本邦郎, 水江宏, 山口勝, 佐藤富雄, 渡部正之, 堀石七生: "バインダー用ゴムを用いた異方性磁性粉末の圧延加工", 粉体および粉末冶金, 39(1992)964-969.
- 49) 沖本邦郎, 山口勝, 水江宏, 渡部正之, 堀石七生, 木下浩光: "熱分解性バインダーを用いた磁性粉末の密閉型成形と圧延加工", 塑性と加工, 34(1993)198-203.
- 50) 三輪茂雄: "粉粒体工学", 朝倉書店, (1972)129.
- 51) 細川誠一, 豊田幸夫, 山下治, 沖本邦郎: "Srフェライトの配向度に及ぼす粉砕粒度と成形磁場の影響", 粉体および粉末冶金, 45(1998)77-81.
- 52) 細川誠一, 豊田幸夫, 沖本邦郎, 和泉克尚: "Srフェライト粉末を用いたボンド磁石の磁気特性に及ぼす成形条件の影響", 粉体および粉末冶金, 46(1999)72-76.
- 53) 沖本邦郎, 和泉克尚, 豊田幸夫, 細川誠一: "紫外線硬化樹脂を用いた磁性粉末の配向成形", 粉体および粉末冶金, 46(1999)83-87.
- 54) 沖本邦郎, 和泉克尚, 豊田幸夫, 細川誠一: "高性能配向磁性体の新成形プロセス—MIMバインダを用いる場合—", 平成11年塑性加工春季講演会論文集, (1999)269-270.
- 55) 例えば, 安保武志, 元根隆博: "制御用モーターの界磁用プラスチック磁石", 特公平5-37330, (1993.6.2)35-41.
- 56) 沖本邦郎, 和泉克尚, 佐藤富雄, 豊田幸夫, 細川誠一: "焼結接合によるフェライト部品の作製", 粉体および粉末冶金, 45(1998)763-768.
- 57) 沖本邦郎, 和泉克尚, 豊田幸夫, 細川誠一: "Sr-フェライトの収縮異方性と組み合わせ焼結接合への応用", 粉体および粉末冶金, 46(1999)67-71.
- 58) 沖本邦郎, 和泉克尚, 豊田幸夫, 細川誠一: "磁界配向したSr-フェライト圧粉体の組み合わせ焼結接合", 粉体および粉末冶金, 47(2000)151-154.
- 59) K.Okimoto, K.Iwamoto, S.Toyota and S.Hosokawa: "Sinter Joining of Ferrite Compacted under Magnetic Field", Proc. 2000 Powder Metall. World Congress, Part 1, (2000)895-898.
- 60) 例えば, 杉山聡, 石川孝司, 中西広吉: "複合磁性材料の強磁性化に及ぼす加工発熱の影響", 塑性と加工, 41(2000)141-145.
- 61) K.Okimoto, K.Izumi, T.Satoh and Y.Kato: "Fabrication of Stainless Steel/Permalloy Alloy Composite by PM Process", Proc. 1998 Powder Metall. World Congress, 3(1998)357-362.
- 62) 沖本邦郎, 和泉克尚, 豊田幸夫, 細川誠一, 加藤欽之, 島進: "SUS316Lステンレス鋼とFe-47Niパーマロイの圧粉体の組み合わせ焼結接合", 塑性と加工, 41(2000)1123-1128.