

特集 6

高密度焼結体の成形法

Compacting and Forming of High Density Sintered Powder

天野 富男*・中川 威雄*

Tomio AMANO and Takeo NAKAGAWA

粉末焼結品を機械部品として適用する上で最大の問題点は空孔の存在により強度と靱性が低いことである。これを補うため焼結体を高密度化することが行なわれている。本稿は著者らの塑性加工法を取り入れた最近の研究成果を含めて、焼結体を高密度にする各種の方法およびその問題点を概説した。

1. ま え が き

近年、粉末冶金技術の進歩とともに、焼結機械部品が広く用いられるようになり多くの注目を浴びるようになった。

粉末冶金とは、金属、金属酸化物、化合物の粉末あるいはこれらの混合体を原料として圧力と熱の作用により、その物質の溶融点以下あるいは主要成分の溶融点以下の温度で結合させ、所要の物理的、機械的性質を有する製品を作る方法である。今世紀の始め頃、電球のフィラメント用としてタングステン線の製造にこの方法が採用され、以来、高融点金属、超硬合金などの特殊材料、さらには含油軸受から始めて、電磁部品、自動車・事務機・電気機器用等の構造用機械部品へと次第にその応

用分野を拡げてきている。

粉末冶金の基本工程を示すと図1のようになる¹⁾。

まず種々の方法で製造された一種あるいは二種以上の原料粉を配合し、さらに粉末潤滑剤を添加する。これを押型内に充填し、機械プレスあるいは油圧プレスにて圧縮成形し、所定形状を得た後、高温の炉内に一定時間保持して焼結を行なう。この時、所要の性質や寸法精度を得るために焼結温度や炉内雰囲気調整することが肝要である。焼結されたものはそのまま製品

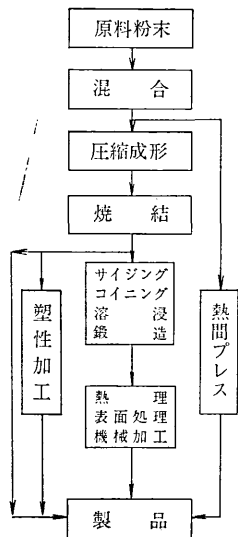


図1 粉末冶金の製造工程

として用いられる場合もあるが、目的によっては、寸法精度や機械的性質の改善のため、再圧縮、再焼結、熱処理、溶浸、表面処理、機械加工などの後処理が行なわれて製品とされる場合も少なくない。

粉末冶金法は、このようにほとんど無切削で複雑な形状の製品が比較的簡単に精度よく大量に生産され、歩留りもよく自動化も容易であり、その上この方法以外の従来の金属成形法ではかなり困難な複合材の製造や高融点金属や超硬合金など難加工材の成形も可能であるなど多く長所を持っている。しかし、粉末冶金では複雑な形状のものが可能とはいいながら、粉末を型で圧縮成形するため、通常の流体とは異なり圧力がすみずみまで均一に伝達しにくく、そのためかなりの形状的な制約がある。

また、このような工程を経て製造される焼結材には一方では多孔質という本質的な欠点を有している。したがって同一成分の溶製材と比較した場合、引張強さ、かたさ、伸び、衝撃強さ、疲れ強さなど種々の機械的性質においてかなり劣っている。このような焼結材が機械部品としてそのまま用いられるのは強度的にも好ましくないし、せつかくの粉末冶金法の長所もこの強度上の弱点と相殺され、その応用範囲を限定してしまう。この欠点を補うため、これまでに種々の改善法が研究されてきたが、その方法は基本的には次の二種類に大別される。一つの方法は粉末自体の材質改善法で、粉末の良質化と共に多種の金属粉の配合による合金化あるいは粉末自体の合金化による多孔質体の地の強化を計るものであり、他は焼結体の本質的な性質である多孔性の除去を計る方法である。この小文は前者の方法については触れずに、後者の方法、すなわち多孔性の除去——粉末成形体の高密度化——について、これまでに研究されてきた主な方法を紹介し、併せて実用化における問題点などを述べたいと思う。

2. 粉末冶金製品における高密度化の方法

粉末冶金の根本原理は金属粉末粒子どうしの結合であり、金属学的に考えれば、常温における粉末の集合体のままでも粒子間に原子の交換があり、結合が起こるわけであるが、その進行速度は非常に遅く実用には全くならない。そこで圧力あるいは熱の作用により、原子の活動

* 東京大学生産技術研究所 第2部

を活発にして、粉末粒子間の原子の結合を促進する措置が取られ、これが粉末冶金の基本操作になっている。しかしながら、単に圧力のみ、あるいは熱のみの作用で粒子間的結合を得て、しかも高密度にするには非常に大きな圧縮力あるいは長い時間を必要とする。

したがって、通常の粉末冶金法では圧力と熱の両作用によって、粒子間の結合を促進させている。高密度焼結体を得る幾つかの方法も全てこの根本原理に従うものであり、その基本プロセスを大別すれば、

- (1) 高圧力により高密度圧粉体を成形し、焼結して高密度焼結体を得る方法。
- (2) 熱と圧力を同時に加え圧粉成形と焼結を同時に行ない、高密度焼結体を得る方法。
- (3) 通常の焼結体と同じプロセスで得た多孔質焼結体を再び高圧力で圧縮して、内部空孔をつぶして高密度化を計る方法。
- (4) 多孔質焼結体を低融点溶融金属中に浸漬して内部空孔を埋める方法。

などがその主なものである。

(1)の高圧力による方法に属するものとしては、静水圧を利用した Cold Isostatic Pressing, Hydrostatic Extrusion, 塑性加工法を取り入れた粉末圧延, 粉末直接鍛造, 粉末のスエージング, 高速高エネルギー成形機による圧縮, 放電成形, 爆発成形等がある。これらの方法はいずれも常温での粉末粒子自体の変形抵抗, 粉末粒子間あるいはダイスと粉末粒子間の摩擦抵抗など大きな抵抗に打ち勝つ高圧縮力によって高密度圧粉体を得ている。

これらとは別に、高密度圧粉体を得るための重要なこととして粉末自体の特性がある。すなわち密度を支配する因子として粉末の形状, 粒子の大きさ, 粒度の分布状態, 粉末粒子表面の状態などがあげられる。特に粒子が微細化して金属粒子集合体の表面積が増大したときには、粒子は特別に活性化され、非常に緻密な結合体になると言われているが、逆にあまり活性なのでその取扱いが難しく、現在では実用の段階でない。また他の因子も圧粉性や焼結性に大きな影響を与えるものであるが、ここでは省略する。

(2)の高圧下で加圧する方法に属する代表的なものとしては、Hot Press 法, Hot Isostatic Press 法, 通電焼結法などがあるが、これらは粉末を高温に加熱することによって変形抵抗を減少させて、比較的低圧力で塑性変形させ、空孔をつぶして高密度化するものである。原理的には(1)の高圧力による方法に属する各種の方法も熱間で行なうことにより、粉末の成形と焼結を同時に行ない、しかも高密度な焼結体を得ることが可能である。

次に、多孔質焼結体を後で高密度化する(3)の方法では、熱間で行なわれるものと、冷間で行なわれるものがある。前者に属する代表的なものには粉末鍛造(Powder

forging)がある。これは焼結体を高温加熱することにより、焼結体の変形抵抗を低減させ、比較的低い圧力で空孔をつぶし、ほぼ真密度にする方法である。一方、後者には、最近研究が開始された焼結冷鍛法があり、これは大きな圧縮力により冷間で焼結体の空孔を押しつぶして減少させるものである。

このように、高密度焼結体を得る方法には沢山の方法があるが、実用化されたものはそれ程多くない。以下には現在実用化されている方法、あるいは実用化にそれ程遠くない方法に重点をおいて、その方法、さらにはその方法の長所、短所などを述べ、今後の動向をさぐってみたい。

3. 高密度粉末成形体を得る各種の方法

(1) 高密度圧粉体の成形法

1) ハイドロスタティックプレス法

これは均一な密度の粉末圧粉体を得る方法として開発されたもので、図2のようにゴムとかプラスチックといった柔軟なコンテナの中に粉末をつめ、高圧な流体中で圧粉成形する方法である。通常の金型ダイ方式による圧粉法の欠点を補うもので、圧粉形状における直径と高さの比率に影響されず、比較的複雑な形状が均一高密度なしかも圧粉強度も高いものが成形できる。しかしながら装置が大がかりなうえ、作業速度が遅いこと、成形品の寸法精度が悪く後加工を必要とし、大きさに限度があることが欠点である。したがって、通常金型方式では不可能な特殊な形状の少量生産に用いられている。

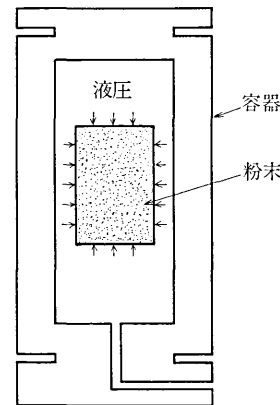


図2 ハイドロスタティックプレスによる粉末の成形

図3は、静水圧縮法にて成形した圧粉体の密度と圧力の関係で、この方法で圧粉したときの最終的空孔率は次式によって、かなり正確に表わされる²⁾。

$$H = H_0 e^{-kP}$$

ここで H は最終空孔率, H_0 は初期空孔率, k は粉末固有の塑性圧縮性係数, P は静水圧である。

2) 高速度成形

従来からの方法である油圧あるいは機械プレスによる粉末の圧縮成形では、プレス容量の関係で成形体の大きさに限度があった。また例え液圧などによる大容量プレスを用いた場合、プレスの物理的大きさが非常に大きいものとなり、設備費が莫大なものとなる。

そこで余り莫大な費用をかけず、大形成品を作るこ

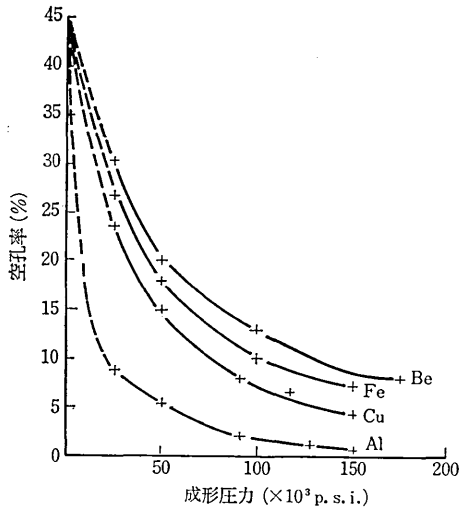


図 3 静水圧圧縮における金属粉の挙動 (Paprocki, Hodge)

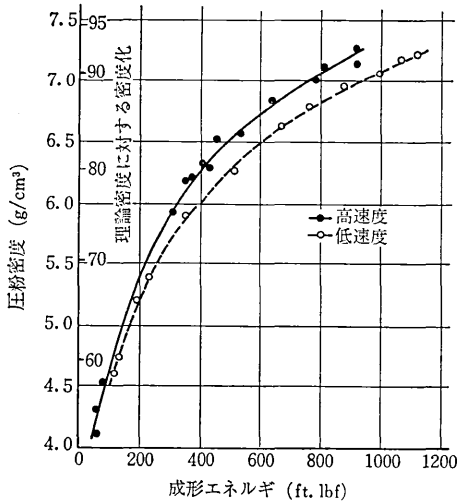


図 4 高速および低速における成形エネルギーと圧粉密度の関係

とが可能なものとしてダイナパックやベトロフォージのような高速高エネルギー鍛造機を用いて圧粉体を成形することが試みられた。

粉末を高速で成形することの有利な点はこの他高速域における摩擦の減少効果も期待できるが、実験的に次のようなことが報告されている³⁾。同一の密度の粉末成形体を得るのに、低速度成形と比べて最高圧で10%、成形エネルギーで20%程度低くて足りる(図4)。また、粉体中への圧力の伝達も良く、特に高密度での圧力伝達は低速度で85%位なのに対し、高速度では98%位までになり、密度分布が均一となり強度的にも低速度のものより良い結果が得られる。

3) 粉末圧延法

1916年にロール圧延によって金属粉末から直接板を

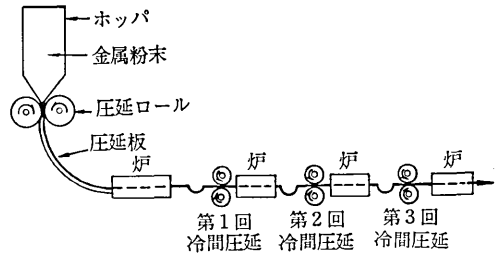


図 5 横型ロールを用いた連続粉末圧延法

製造する方法が Zwoyer により最初に提唱され、その後種々の形式のものが発表されている。図5は横形ロールを用いた連続粉末圧延法の概略⁴⁾で、金属粉を粉末圧延機で圧延し、板状の圧粉体を作り、引続き連続的に焼結し、その後熱間あるいは冷間で更に圧延して薄板を作る。この方法の利点は、主たる設備が粉末圧延機と焼結炉と熱間あるいは冷間の圧延機、それに焼なまし炉で、通常の溶解法からの圧延と比較して、設備費や作業費ともはずっと安いことである。見かけ密度もほぼ100%に達し、結晶粒が細かく異方性の少ない板を作ることができる。また、機械的性質も溶解法のそれと余り差はなく、鉄粉を用いて1回の圧延と焼結で作られたストリップの抗張力は8 kg/mm²を示し、4回の圧延と焼結なましを繰らしたものでは30 kg/mm²の抗張力と25%の伸びを示したと報告されている。なお、最近この方法を用いてクラッド板の製造が試みられている。

4) スエージングマシンによる連続成形

粉末圧延法が粉末からの薄板の製造法であるのに対し、この方法は粉末からの長尺棒の連続成形法である⁵⁾。この方法は長尺の金属管に粉末を封入したものを、従来からあるロータリースエージングマシンにより回転鍛造し、管の径を縮ませ内容積が減少することを利用して粉末を半径方向に圧縮成形するものである。

図6はこの方法の主工程を説明する概略図である。

この方法の最大の特長は、高密度な長尺の粉末圧粉棒が連続して成形される点で、Fe粉で最高7.7 g/cm³の高密度(理論密度の98%)に達しており、超硬圧延ロールや高速度鋼のドリルロッドの製造法としては期待で

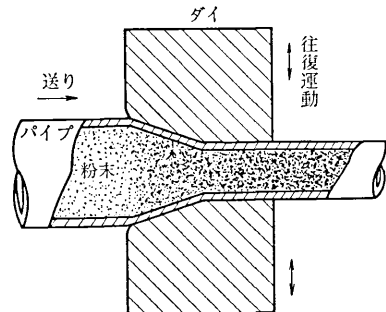


図 6 スエージングマシンによる粉末の連続成形

きよう。しかも主要装置はスエージングマシンのみであるから設備費が安く、作業性も良い。通常材のスエージングと同様に、芯金の使用により、異形内断面を有する粉末パイプも成形できる。難点はパイプを使用するため成形後に皮むき工程があることであるが、これもパイプ材質などを選ぶことにより簡単化される可能性がある。なお、同じ原理により異型圧延、転造、ピルガール等、管の内容積の減少を併なう方法により、高密度圧粉棒の成形が可能であろう。

5) 粉末直接鍛造

これは通常の冷鍛型を用いて圧粉末焼結ピレットあるいはダイキャピティーに充填した粉末を直接に冷鍛する方法である⁶⁾。従来の圧粉成形法が主として圧力負荷方向にのみ粉末粒子を変位させて密度を上昇させるのに対し、粉末直接冷鍛では通常の冷鍛と同様に高圧力により粉末を三次元的に塑性流動させるのが特徴で、その高密度変化の原因は高圧縮力による Cold Coining 効果と塑性流動による粉末粒子の圧着効果の相乗効果によるものと考えられる。図7は Al 粉末および Fe 粉末ピレットを直接冷鍛した例で、従来の圧粉成形法では困難なカッ

プ形状がほぼ理論密度に達する高密度に得られている。特にアルミの例では冷間成形で未焼結にもかかわらずかなりの強度があり、粉末同志がかなりの程度に圧着しているものと予想される。この方法は粉末に潤滑剤を混入できないことが、作業上の欠点となろうが、将来、従来法との組合せによって困難な形状の粉末成形や焼結後では塑性変形し得ない材料等には有効な方法となるであろう。

(2) 熱と圧力を同時に作用させて高密度焼結体を得る方法

これまで述べたような常温での圧粉成形では、粉末自体の変形抵抗が大きいので、高密度な圧粉体を得るためには非常に高い圧力を必要とする。そのため圧力容器や型の強度、耐摩耗性に問題があり、実用上はかなり大きな制約となっている。この節では、粉末を何らかの方法で加熱し、変形抵抗を低下させた状態で圧力を加え、同時に成形と焼結を行なう幾つかの方法について説明する。

1) ホットプレス法

金属粉を加熱して圧縮成形する方法は、現在幾通りかあるが、ホットプレス法と呼ばれるのは通常図8⁷⁾に示すように、耐火性の押型(多くは黒鉛型)に粉末を充填し、非酸化性雰囲気中で粉末を加熱しつつ圧力を加え成形と同時に焼結する方法を言う。

型および粉末の加熱は黒鉛型自体を電流によって直接加熱するものと、型の外側に抵抗発熱体あるいは高周波加熱コイルを取りつけて、間接的に加熱する方法があるが、短時間で均一な加熱が得られる点で高周波炉が最も理想的とされている。

この方法によれば、鍛圧品に匹敵するほどの高強度な高密度焼結体が得られる。焼結時間は圧粉後に焼結する通常の方法に比べ著しく短縮される。また、形状的に

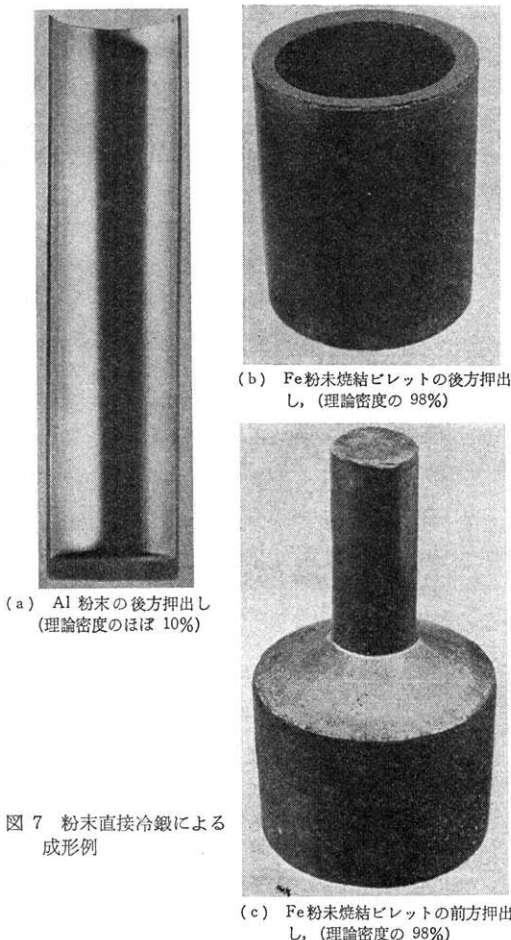


図7 粉末直接冷鍛による成形例

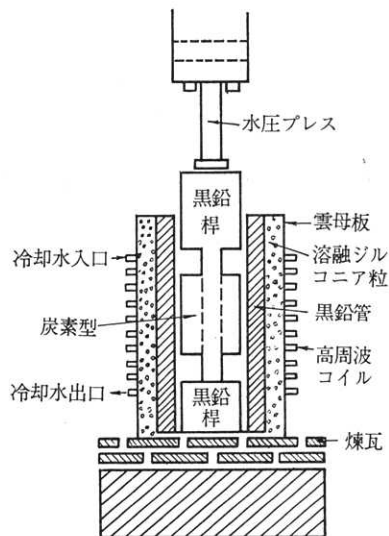


図8 縦型のホットプレス装置 (I. E. Campbell)

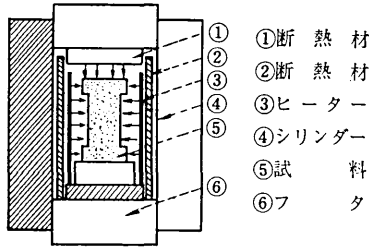


図 9 ホットアイソスタティックプレス装置

も寸法精度が比較的良好で、後加工費の節約ができる。したがって特に加工困難な材質の場合にはきわめて有利であるため、現在、硬質合金製品の製造に用いられている。

一方、押型には耐熱鋼や黒鉛が用いられ、その上、高熱による消耗が激しく材料費や加工費など型に要する費用がかかる。また、炉内で1個ごと焼結されるので大量生産が非常に困難である。

さらに、この方法では型の材料強度が高温になると著しく小さくなるので、十分に高い圧力を加えることができなかつたり、均一な密度の焼結体が得られないほど、いくつかの欠点をもっている。この欠点を補う方法としては、次に述べる静水圧下のホットプレス法が開発されている。

2) ホットアイソスタティックプレス

これはアメリカのバツェル・メモリアル研究所で開発された技術で、その方式は図9⁹⁾に示すように、薄い金属カプセルに粉末を真空封入し、ガス圧力によりカプセルごと圧縮し、同時に加熱する方法である。数千気圧という高圧ガス中で加熱するのでガスの熱伝導率が非常に大きく外部シリンダーへの熱の伝達が大きくなり断熱の方法に特別な工夫がなされている。

この方法によれば、高密度で機械的強度の優れた焼結体が得られるのだが、カプセルへの試料の真空封入に要する時間が長いことや、ガスの高圧化に要する時間が油圧に比べて100倍も長いこと、高圧容器の安全性に対する特別な配慮の必要なことから、生産速度作業性、設備費等から経済的に高価なものとなるため、現在この方法が使われているのは、超硬合金、耐熱材料などのうち特別高価なものに限られている。しかし最近高速度鋼インゴットをこの方法で作ることが進められ注目されている。

3) 通電焼結法

これまでのホットプレス法では、加熱焼結に時間がかかり、焼結雰囲気調整が必要であった。これに対し最近、押型内に充填された粉末に対し交流電圧および直流電圧を重畳した低電圧大電流を直接加え、数秒～数分のオーダーで瞬間的に加熱圧縮して高密度焼結体を得ようとする通電焼結(放電焼結)法と称する技術が開発された(図10)⁹⁾¹⁰⁾。

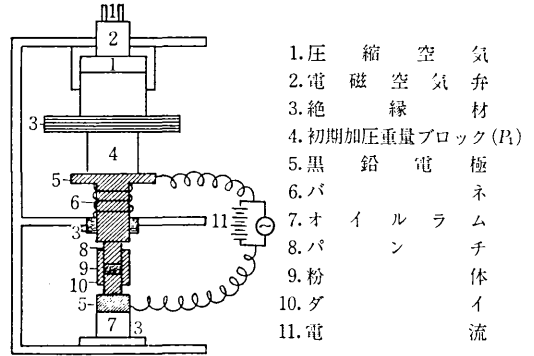


図 10 通電焼結装置(一軸加圧)

粉末に圧力を加えながら大電流を流すと、金属粉末の抵抗によるジュール熱の発生によるものか、あるいは、金属粉末表面の酸化膜を絶縁破壊して金属表面をきれいにし、ミクロ的な歪を与え、瞬間的に熱を発生させる放電効果によって金属粉末が瞬間的に加熱されると考えられている。この方法で難しいのは、成形される粉末の材質、形状、焼結体が要求される性質等によって最適な通電条件、加圧条件、焼結に要する時間を設定しなければならないことで、特に粉末の材質では、電気伝導率の高い材料は容易に成形焼結されるが、電気抵抗の大きい場合には、余り効果的でない。しかしながら、加熱時間が短いので、特別な非酸化雰囲気を用いなくても酸化の影響が少なく、また焼結中に結晶の成長がなく微細な組織が得られる点や同種あるいは異種材料に接合が可能な点は大きい利点である。

4) 放電アイソスタティックプレス

従来の静水圧プレスと放電焼結法を組合せた放電アイソスタティックプレス法(SIP)が最近開発され、短時間で高密度焼結体が得られる方法として注目されている¹¹⁾。これはホットアイソスタティックプレス法の発展したもので、粉末を高温加熱し、静水圧で成形する点では同じであるが、加熱焼結法に瞬間的な通電法を採用しているため、焼結時間が短かく、したがって高圧媒体として液圧が利用でき、製品は均一で高密度なものが得られることは大きな利点とされている。表1はチタニウムをこの方法で焼結したときの結果で、理論密度の99.1%以上の高密度焼結体が僅か5秒で得られている。

試料番号	圧力 kg/cm ²	直流電流 A/cm ²	交流電流 A/cm ²	時間 sec	密度 g/cm ³ (%)
1	300	1,640	409	5	4.31 (95.0%)
2	300	1,270	409	5	3.97 (87.4%)
3	300	2,030	409	5	4.49 (98.9%)
4	300	1,640	455	5	4.33 (95.6%)
5	300	1,640	773	5	4.36 (96.1%)
6	500	1,640	409	5	4.43 (97.6%)
7	500	2,030	409	5	4.50 (99.1%)

表 1 静水圧力下の放電焼結の実験結果-チタニウム(斎藤)

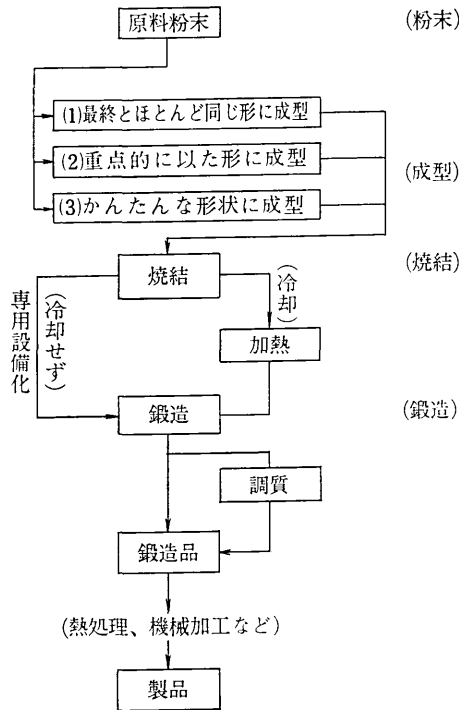


図 11 焼結熱間鍛造工程 (石丸)

(3) 多孔質焼結体の高密度化

1) 焼結熱間鍛造

これまで述べてきた方法は、高密度圧粉体を焼結するか、あるいは圧粉成形と焼結を高温で同時に行なって高密度焼結体を得る方法であった。ここで述べる焼結鍛造法というのは、従来のプロセスで成形後焼結された多孔質焼結体を、非酸化雰囲気中で加熱し、型鍛造するものである。これは、焼結体を加熱することにより、変形抵抗を低減し、高圧によって、焼結体を変形させ、内部空孔を押しつぶすことにより、高密度化を計っている。図 11 に加工プロセス¹²⁾を示すが、素材ビレットの形状と最終製品形状との関係で、次の 3 種に大別される。

第 1 の方法は最終製品とはほぼ同じ形状の焼結ビレットを等方的な高圧力によって圧縮する方法で、ホットコニングとも呼ばれ、材料の塑性流動を伴わず、バリが出ないので精度のよいものができ、密度も 98% 以上の高密度なものも得られる。

第 2 の方法は、最終製品とは主要な点で類似した、焼結ビレットを用い、高圧力により部分的に塑性流動を起させ、他の部分は、単に hot-coining する方法で、塑性流動を伴った部分での、部分的強化が可能で、バリも少ない上に密度もほぼ 100% の高密度に達する。

第 3 の方法は、円柱のような単純形状の焼結ビレットを大きく塑性流動させ、最終製品に仕上げる方法で、バリが出やすく寸法精度も多少劣るが、材料が流動しているので、強度的には、高密度で高強度なものとなる。

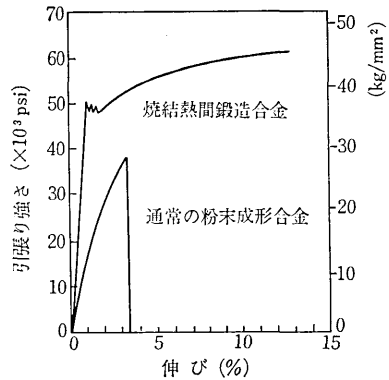


図 12 焼結熱間鍛造および通常の粉末成形法による 0.4% 炭素鋼の引張り試験結果 (石丸)

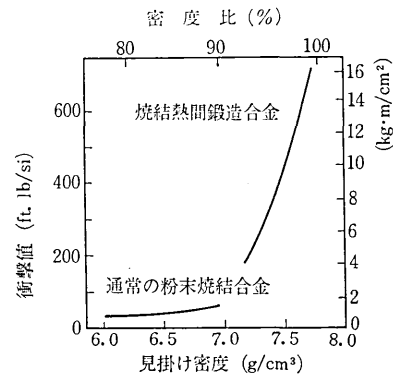


図 13 焼結熱間鍛造および通常の粉末成形法による 0.4% 炭素鋼の衝撃値の比較 (石丸)

焼結鍛造法によって得られた焼結体は、図 12 および図 13 に示すように、通常の焼結体とくらべて、引張り強さや衝撃値などの機械的性質が著しく改善されるので、現在では自動車用の Differential sidegear, Connecting rod, transmission の first-speedgear などに用いられている。しかしながら、これらの機械強度部品になると、通常の鍛造品と競合し、粉末の値段、全型の寿命、加熱時の雰囲気調整、寸法精度などの面から、同一性能を持つ焼結鍛造品を作る際の経済性が問題にされる。

2) 焼結冷間鍛造

焼結熱間鍛造より工程数を減らし、多孔質焼結体を冷間鍛造し高密度焼結製品を得ようとする焼結冷間鍛造と呼ばれる新しい技術が最近開発されてきた^{13)~17)}。これは、円柱のような単純な形状をした焼結ビレットを素材とし、通常の冷間鍛造型を用いて冷間で機械プレスにより高圧力を加えて鍛造を行なう方法である。図 14 は円柱状の鉄粉焼結ビレットを焼結冷鍛した例である。この方法の特徴は、高圧縮力により材料を大きく塑性流動させて所要の形状を得ることで、図 15・図 16 の前方押し出しを例にとると、加工初期に押し出された先端部を除け

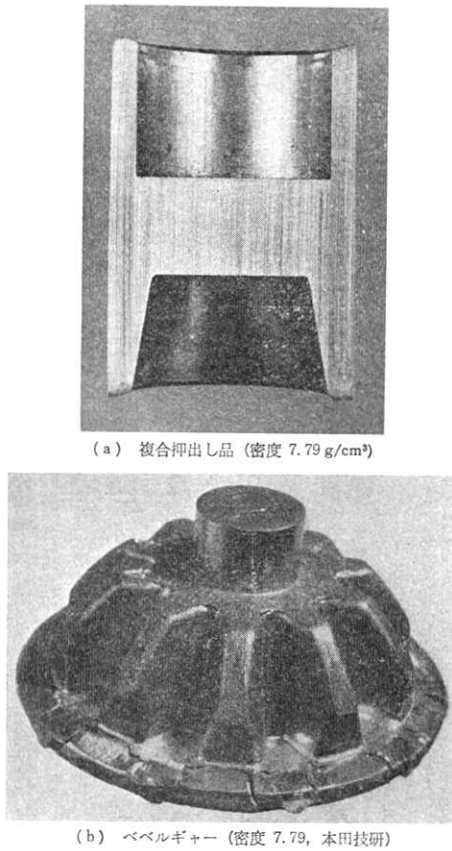


図 14 焼結冷鋳製品の例

ば、押し部では一様に大きな塑性流動をし密度も非常に上昇するばかりでなく高圧を受けただけの流動しない部分も高圧コニング効果により密度が上昇している。また焼結冷鋳製品の機械的強度も高密化のため大きく改善され、図 17 に示すように、鉄粉の焼結冷鋳品では電磁軟鉄並の性質を示す。

この方法は、冷間で行なわれるので焼結熱鍛のように零囲気炉によるピレット加熱に伴う技術的困難さが除去され、寸法精度や表面性状においても熱鍛のそれよりも優れていると思われるが、冷鋳材としてはできるだけ延性を要求されるので、材質的な制限があることや、鍛造圧力が高く型の破損、溶製材の冷鋳と比較した経済性等に問題があり、このまま用いることができるかどうかは疑問である。しかしながら焼結体も圧縮応力下では塑

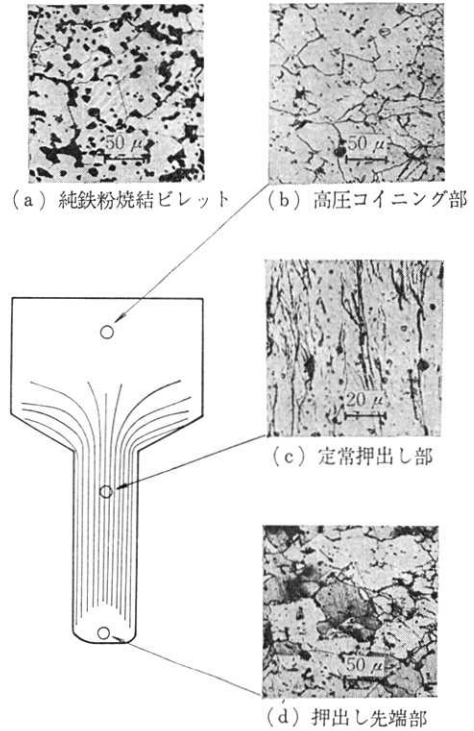


図 15 焼結冷鋳された鉄粉焼結体の組織

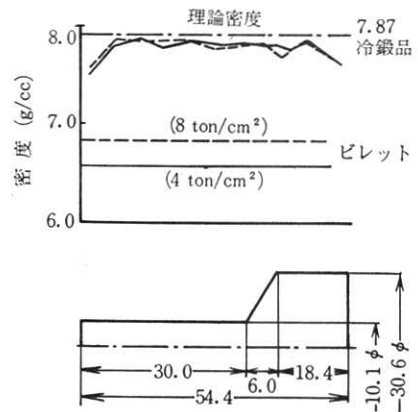


図 16 焼結冷鋳品の密度分布

性変形可能であることを明らかにしたことは、焼結体の後加工等に塑性加工法の手法が採用できその方面での応用は期待できる。

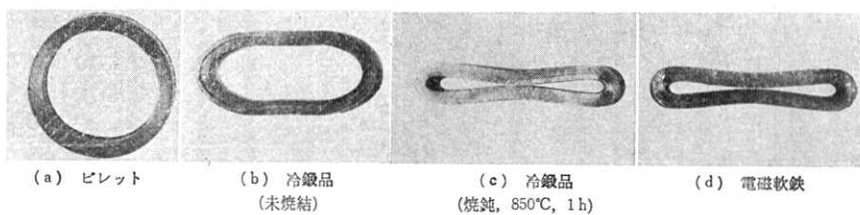


図 17 焼結ピレットおよび冷鋳品の圧環試験の比較

4. む す び

機械部品として用いることのできる高密度焼結体の成形法に関して、現在実用化されている方法や近い将来実用化されそうな開発途上の方法について、その特徴や利害得失について簡単に紹介した。複雑な機能が要求される機械部品が次々と開発されてゆく現状を考えると、経済的には多少問題は残るにしても多くの利点を持つ粉末冶金製品が今後ますます用いられ、それとともに上で述べたような高密度粉末成形法によって作られる製品も増加することであろう。

なお本文を書くにあたって、先輩諸氏の貴重な報告、文献、著書から、多数の引用をさせていただいたことを心から感謝致します。
(1972年6月7日受理)

文 献

- 1) 中西典彦：第3回粉末冶金入門講座テキスト，粉体粉末冶金協会，(1971)，2
- 2) S. J. Parrocki, E. S. Hodge: The Mechanical Behaviour of Metrials under Pressure, Elsevier Publishing Co. Ltd. (1970), 591
- 3) S. Wang, R. Davies: Some Effects of High Speeds in Metal Powder Conpaction

- 4) 川北宇夫：第3回粉末冶金入門講座テキスト，粉体粉末冶金協会，(1971)，84
- 5) 中川威雄，天野富男：昭和47年度粉末冶金協会春季大会講演概要集，(1972)，40
- 6) 中川威雄，天野富男，長瀬正雄：昭和47年度粉末冶金協会春季大会講演概要集，(1972)，75
- 7) I. E. Campbell, High Temperature Technology (1961), 277
- 8) 齋藤進六：高密度焼結体とその応用に関するセミナー，粉体粉末冶金協会，(1971)，30
- 9) 同上
- 10) 原善四郎，坂井徹郎：昭和42年度春秋大会講演概要集(1967)，22
- 11) 齋藤進六：高密度焼結体とその応用に関するセミナー，粉体粉末冶金協会，(1971)，30
- 12) 石丸安彦：高密度焼結体とその応用に関するセミナー，粉体粉末冶金協会，(1971)，6
- 13) 中川威雄，長瀬正雄，土野一清：昭和46年度粉末冶金協会春季大会講演概要集，(1971)，48
- 14) 中川威雄，天野富男，長瀬正雄，小原邦夫，西野良夫：(同上) 秋季大会講演概要集，(1971)，37
- 15) 中川威雄，天野富男，齋藤雄一，小原邦夫，西野良夫：(同上) (1971)，40
- 16) 天野富男，中川威雄：昭和47年度粉末冶金協会春季大会講演概要集，(1972)，69
- 17) 中川威雄，天野富男，齋藤雄一，小原邦夫，西野良夫：(同上) (1972)，72

次 号 予 告 (9月号)

研究解説

鉄ウイスカ(針状単結晶)の量産化について.....	大 蔵 明 光
逆浸透について.....	山 辺 武 郎
—I. 逆浸透法の原理—	
高分子溶液のレオロジー.....	甘 利 武 司

研究速報

A COMPUTER AIDED ANALYSIS ON VIBRATION OF ELEMENT AND INTEGRATED STRUCTURE OF MACHINE TOOL BY THE FEM Part 1	佐 藤 詩 芳 黒 田 佳 男 大 堀 真 敬
A COMPUTER AIDED ANALYSIS ON VIBRATION OF ELEMENT AND INTEGRATED STRUCTURE OF MACHINE TOOL BY THE FEM Part 2	佐 藤 詩 芳 黒 田 佳 男 大 堀 真 敬
合せ板圧延の初等理論による一考察.....	鈴 木 弘 荒 古 甚 鏗 宗 一 木 堅 郎 野 勝 誠
MEASURMENT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL SYSTEMS.....	棚 沢 一 勝 田 郎 直
矯正における力学的諸特性に関する数値解析.....	荒 木 甚 一 郎
有限要素法による電解反応の解析 第2報	木 多 健 一 本 原 昭 渡 辺 正 川 井 忠 藤 谷 義 雅 章 椎 信 二
—2次元イオン拡散問題—	

研究室紹介

柴田研究室.....	柴 田 碧
------------	-------