

解 説

UDC 669.1-492 : 621.762

鉄粉の製造とその利用技術の進歩*

湯河 透**・河合 伸泰***

Recent Progress in Production and Consolidation Technology
of Steel Powders

Toru YUKAWA and Nobuyasu KAWAI

1. はじめに

近代粉末冶金技術は W, Mo などの難融金属, WC 超硬合金あるいは多孔質であることを利用した含油軸受やフィルターなどの製造に使用されたのがはじまりであり, さらに鉄系の機械構造部品の製造にも使用されて久しいが, 近年, 粉末製造設備, 成形設備の開発が進展し, 興味深い新技術が芽生えつつある。

一口に鉄系粉末冶金といつてもその範囲は広く, これを材質で分類すれば, 純鉄から高合金鋼まで, また用途で分類すれば, 鉄粉を粉末のまま利用するものから高合金鋼の鋼塊の製造まで種々雑多であり, それに応じて製造技術もそれぞれ異なっている。本稿でこれらすべての技術動向を紹介することは不可能であるので, まず鉄粉の製造技術と成形焼結技術の歴史的推移を簡単に述べ, 続いて最近話題になつている新製品, 新技術の解説を行うことにしたい。

2. 鉄粉製造技術の推移

Fig. 1¹⁾ は国内における最近 10 年間の粉末冶金用原料鉄粉の年間消費量の推移を示したものである。1971 年度は円切上げにより, また 74, 75 年度は石油危機により消費の一時的停滞はあつたものの, ほぼ順調な伸びを示している。1968 年度を基準にとれば 1977 年度で約 3 倍に達し, 日本粉末冶金工業会会員外消費分も含めれば, 粉末冶金用のみで 3.5 万 t が消費されている。この粉末冶金用以外に溶接棒, 溶断などに使用されている鉄粉が全消費量の約 40% を占め, これを合計すると 1977 年度で約 6 万 t の消費量となる。石油危機以前は溶接棒などの粉末冶金用以外の消費量が 50% 以上占めていたが, 造船不況の影響が大きく, 年々その比率は小さくなつて

Table 1¹⁾ は国内の粉末冶金用鉄粉の製造方法別消費量比率を年度別に示したものである。1968 年度には還元粉が 95%, 電解粉が 5% であり, 水噴霧粉はほとんど使用されていない。しかし, その後噴霧粉が着実に伸び, 1976 年度には 20% を越え, 今後もその割合が増加してゆくものと予想されている。この理由は水噴霧法が他の方法に較べて生産性が高いこと, 合金鋼粉の生産が可能なことおよびエネルギー消費量が少ないことなどの特長を

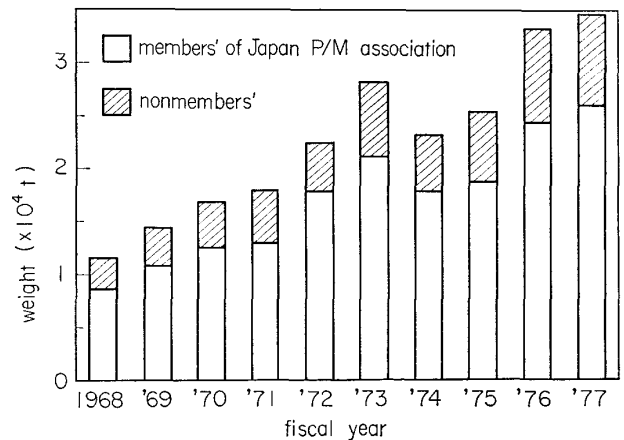


Fig. 1. Iron powder shipments for powder metallurgy (Japan).

Table 1. Iron powder consumption for powder metallurgy (Japan) (%).

Fiscal Year	'68	'69	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77
Reduced	95	93	91	89	86	81	79	79	79	78
Water Atomized	0	2	5	8	11	16	18	19	20	22
Electrolytic	5	5	4	3	3	3	3	2	1	0
Domestic	30	45	50	60	72	73	73	85	82	86
Imported	70	55	50	40	28	27	27	15	18	14

* 昭和 54 年 3 月 16 日受付 (依頼解説) (Received March 16, 1979)

** (株)神戸製鋼所 工博 (Kobe Steel, Ltd.)

*** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakino-hama-cho Hukiai-ku Kobe 651)

持つているためである。米国においても 1969 年に水噴霧粉製造能力が全体の 50% を越え、1977 年現在で 57% まで増加している²⁾。

表の下には国産と輸入の割合を併せて示しているが、1968 年度とは逆に国産粉が 90% 近い比率を占めるにいたっている。

2.1 還元法

高品位の鉄鉱石を粉碎、磁選処理後、コークス、石灰などとともトンネルキルン中で加熱し、スポンジ鉄を製造する方法³⁾である。別名ヘガネス法とも呼ばれる古い製造法である。この方法の特色は不規則形状で多孔質粉末の製造に適しており、圧粉体強度の高い粉末が得られる反面、非金属介在物が多く、清浄な粉末が得られないこと、合金鋼粉が製造できないことなどの欠点を有している。

上記の鉄鉱石の代りに鋼材の熱間圧延時に発生するミルスケールを原料に用いる方法もあり、この場合は鉱石の場合に較べて非金属介在物の少ない粉末が得られる。これ以外の特徴は鉱石還元法と同様である。

2.2 電気分解法

鉄塩の水溶液を電気分解することにより陰極に析出した純鉄を搗(とう)碎して粉末を得る方法⁴⁾であり、得られる粉末は純度が高く、圧縮性に優れるものの、粒形状が扁平であるため、層状割れが出やすいこと、合金鋼粉が製造できないこと、高価であることなどの欠点がある。最近では一部の磁性材料を除いて、ほとんど使用されなくなっている。

2.3 水噴霧法

この方法による鉄粉の製造工程を Fig. 2⁵⁾ に図示した。所定の化学成分に調製された溶鋼を取鋼に受け、その後、タンディッシュ底部の細孔から流出する溶鋼流に 100 kg/cm² 程度の高圧水ジェットを噴射して粉化する。この粉末は表面が酸化皮膜に覆われており、また溶鋼から急冷されて焼入状態にあるため、水素や分解アンモニアガスの還元性雰囲気中で還元と焼なましを行い、粉碎、ふるいわけを経て鉄粉を得る方法である。この方法で得られる鉄粉は Photo. 1 のように丸味を帯びた一次粒子からなる集合体であり、内部構造の緻密な不規則形状をしている。

この噴霧法の原型は、決して新しいものではなく、THOMPSON⁶⁾によれば、約 100 年前に鉛粉末の製造には

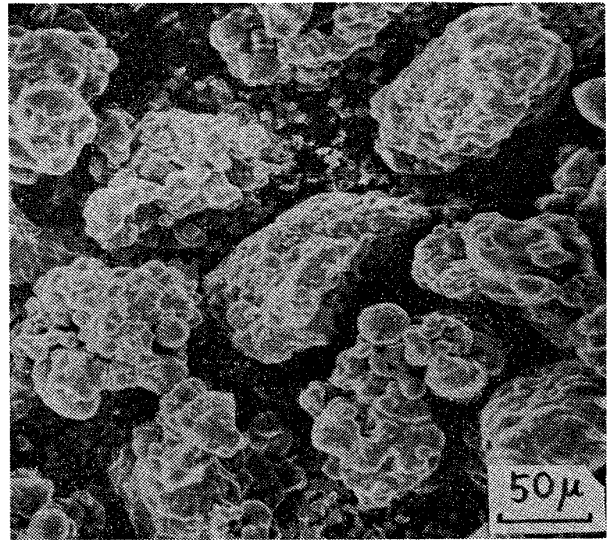


Photo 1. Scanning electron micrograph of water atomized powder.

じめて応用されている。その後多くの噴霧法が考案され、主として低融点金属粉の製造に使用された。工業用鉄粉の製造に水噴霧法が使用されたのは 1960 年代半ばの米国 A. O. Smith 社によるものが最初である。

Fig. 2 の製造工程の中心部分をなす噴霧では A. O. Smith は V 型カーテンノズルを用いているが、このほかにノズルとしては V 型プラグ、逆円錐型カーテンおよびプラグ方式が一般によく用いられている⁷⁾⁸⁾。この噴霧ノズルを含む噴霧装置に関しては主に粉化効率、操業安定性、酸化防止の観点からの開発がなされている。詳しくは BEDDOW⁹⁾、GUMMERSON²⁾、LAWLEY¹⁰⁾ の解説にゆずる。

これらの装置を用いて製造した鉄粉の平均粒子径と高圧水ジェットの速度、交角の関係を GRANDZOLL¹¹⁾ らが求めているが、これは限定された条件下での実験式である。岸高¹²⁾らは溶湯および噴霧媒に関するパラメータを導入して得た数式から計算値を求め、実験値と比較している。

Fig. 2 の還元工程ではスチールベルトやトレイ式還元炉を用いるのが一般的である。ここで用いられる分解アンモニアガスや水素ガスの使用量を少なくして、固溶あるいは添加炭素により還元を行おうという試みがなされている¹³⁾¹⁴⁾。

この還元過程は鉄鉱石の還元機構の解釈に用いられて

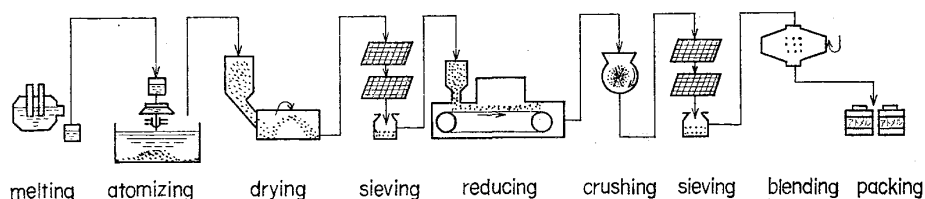


Fig. 2. Manufacturing process of water atomized steel powder.

いる未反応核モデルを修正すれば、適用が可能であるといわれている¹⁵⁾。また、粒子レベルで還元過程を観察すると、噴霧粒子表面の全面を覆っていた酸化物は600°C付近から凝集しはじめ、750°Cでは完全に球状化する¹⁵⁾。一方、粒子内部では昇温とともに脱炭とフェライト粒の成長が起こるが、後工程の圧縮成形過程で高密度成形体を得るためには、できるだけ高温で処理を行い、フェライト結晶粒を大きくすることが必要である。

以上述べたベルトあるいはトレイ式還元法とは異なり、ロータリーキルン型¹⁶⁾、流動層型¹⁷⁾あるいは堅型¹⁸⁾の還元炉に関する報告があるが、いまだ研究段階に留まっている。

この水噴霧法は他の方法と比較して種々の特長を持っているため、最近の需要の伸びが著しいが、合金鋼粉の製造面では一部問題点をもっている。これはCr, Mnあるいはそれ以上に酸化物が安定な合金元素を含有する場合、一度生成した酸化物の水素あるいは炭素による還元が高温でも困難となり、非金属介在物を多く含む鋼粉となることである。このため、真空中での炭素による還元が試験されている¹⁸⁾が、工業的には酸化物が還元容易なNi, Mo, Cuなどの合金元素を使用しているのが現状である。

2.4 ガス噴霧法

噴霧媒として水の代りにガスを用いる方法であり、Ar, N₂, 空気, 水蒸気などが一般に用いられる。この方法は低融点金属粉の製造に古くから利用されており、鉄粉としては鑄鉄を空気噴霧したRZ粉¹⁹⁾が工業的に使用された最初である。Ar, N₂が鉄系粉末の工業生産に使用されたのは比較的新しく、水, 空気, 水蒸気では難還元性酸化物が生成するために高級鋼の製造ができないことから、使用されている。この方法で製造される粉末粒

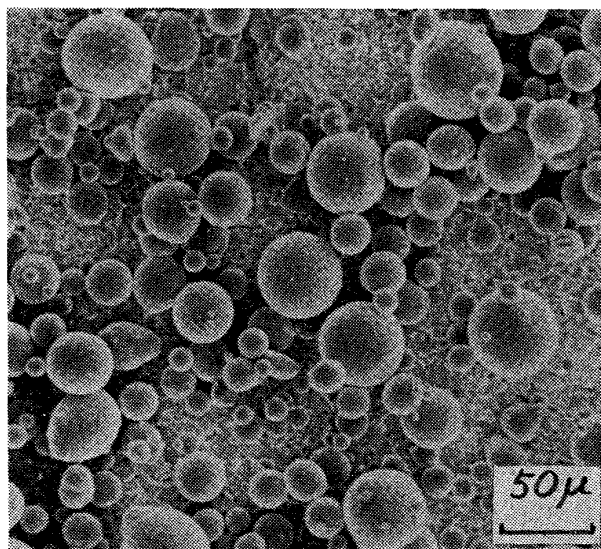


Photo 2. Scanning electron micrograph of gas atomized powder.

子の形状はPhoto. 2のように球状であり、金型あるいはゴム型を用いて室温で圧縮成形することはできない。このため、後で詳述する高温成形が必要であり、通常の焼結機械部品の原料としては使用されない。

溶鋼からガスによつて粉化される過程の研究はStage 1: 溶鋼から一次溶滴の生成, Stage 2: 2次粒子への粉砕, Stage 3: 凝集の3段階において古くから行われており、興味深い話題ではあるが、ここでは省略する。

粉化効率に関する報告あるいは平均粒径と種々の物理定数との関係についての報告がNICHIPORENKO²⁰⁾, SMALL & BRUCE²¹⁾, KIM & MARSHALL²²⁾, LUBANSKA²³⁾などからなされている。粒度分布についてもLUBANSKAの報告²³⁾があり、平均粒径が大きいほど、分布幅も大きいことが示されている。

ArやN₂による噴霧では高合金鋼やNi基耐熱超合金が対象となるので、粒子内の金属組織と冷却速度の関係^{24) 25)}や噴霧中の酸化に関する報告が比較的多い。デンドライトの二次アーム間隔 $S_{II}(\mu\text{m})$ は粉末粒子サイズ $d(\text{m})$ と関係があり、高速度鋼(SKH 9)では

$$S_{II} = 137\sqrt{d}$$

の関係が得られている²⁶⁾。

粒子表面の酸化は噴霧後の粒子の冷却をガス中で行うかあるいは水中で行うかで著しく異なり、また、前者の場合でも冷却塔内のガスの純度により影響を受ける。

最後に特殊なガス噴霧法を紹介しておく。数 μm 程度の微細粉末を製造するための超音波噴霧法^{27) 28)}、噴霧媒のAr, N₂ガスの影響をきらう材料で使用される真空噴霧法²⁹⁾、るつぼ溶解が不可能なTi, Zrなどに用いられる回転消耗電極法³⁰⁾などがあるが、いずれも鉄系粉末の製造には使用されていない。

2.5 その他

以上述べてきた鉄粉製造法は粒度として20~500 μm の範囲にあり、超音波噴霧法でも数 μm であつたが、さらに粒度が小さくなり、0.1 μm 程度以下になれば、粒子表面の影響が強くなり、特異な性質を持つようになることはよく知られている。この超微粉末の工業的用途が具体化しつつあり、製造法、特性、用途についての報告^{31)~33)}が増えている。

3. 鉄粉の成形・焼結技術の推移

国内における粉末冶金製品の生産重量(指数)の年度別推移を種類別に示したものがFig. 3¹⁾である。これらのうちで硬質磁性材料と機械部品の伸びが際立っている。この機械部品の製造用に前章の2.1~2.3で述べた3種類の鉄粉(還元粉, 電解粉, 水噴霧粉)が用いられている。Fig. 4¹⁾は軸受合金, 機械部品, 摩擦材料の用途別比率(1977年度)を示したもので、最近5年間でその比率は大きく変っていない。機械部品の中では自動車など

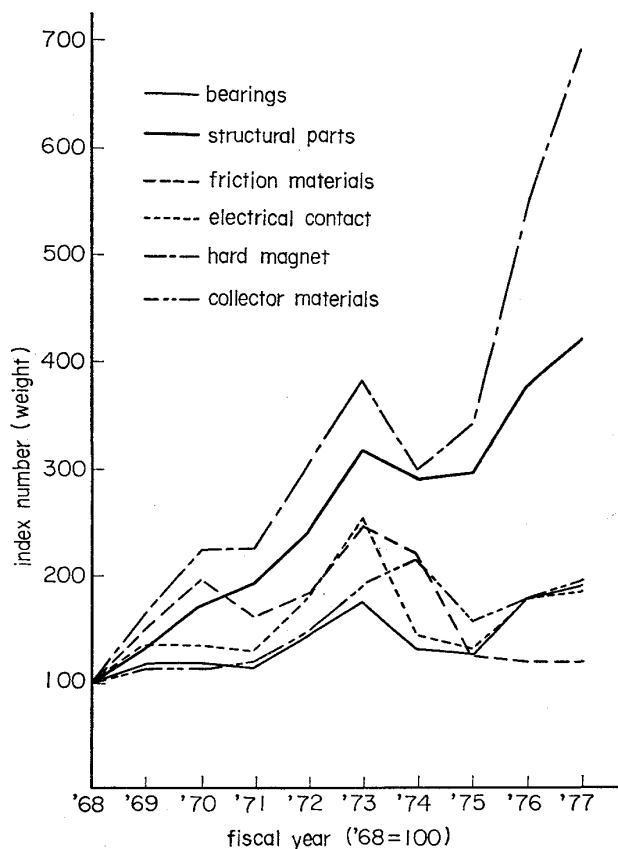


Fig. 3. Production index of powder metallurgy parts (Japan).

の輸送機械用が 70% を占め、これは全体の約 50% に相当している。一方、北米においては最近 5 年間で鉄粉の自動車部品への使用比率が 15% 程度増加し、1977 年で 66% に達している³⁴⁾。この数字は上記の 70% にほぼ対応していると考えてよい。

つぎに技術動向に話を移すが、大別して高付加価値化と省資源、省エネルギー化が活発に進められている。前者においては部品の大型化、高密度化はもちろんのこと複雑異形化も進んでおり、例えば、成形プレスおよび金型の機構に工夫をこらして、従来は成形が不可能であった高ねじれ角のはずば歯車や割型方式による異形部品の成形が行われるようになりつつある³⁵⁾。また、国内においては一時期排気ガス規制に関連して、各社が無鉛ガソリン用バルブシート材の開発に注力し、その結果、熱間で

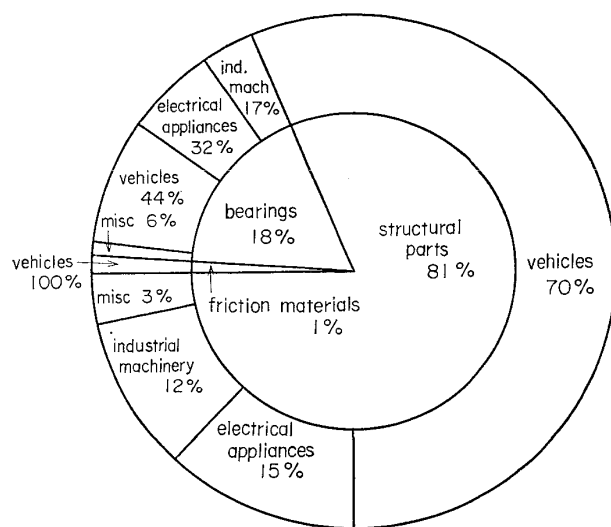


Fig. 4. Applications of powder metallurgy parts (Japan, 1977).

高い硬度を有し、耐摩耗性および潤滑性を併せ持った新規な合金を生み出している³⁵⁾。このように粉末冶金法以外では製造が不可能であり、高い機能を要求される部品が増加するにしたいが、焼結温度も高温化する傾向が見られる。

他方、後者の省資源、省エネルギー化に関する研究は焼結段階に関するものが多い^{36)~38)}。これは Fig. 5³⁹⁾ に示すような焼結機械部品の製造工程においてエネルギーの消費比率をみたとき、焼結に必要な加熱と雰囲気ガス発生のためのエネルギーが製造工程全体の 70% にものぼるためである。とくに保護雰囲気ガス発生に 40% ものエネルギーが消費されているため、従来から使用されている液化石油ガスや天然ガスを変成したガスを再検討する動きがあり、N₂ 主体のガス^{40)~42)}あるいは真空^{43)~45)}を用いることに関心が集まりつつある。真空焼結は依然として高価な方法であるという考えがある一方で、しだいに注目されはじめている理由は、(1) 雰囲気ガスの大半を無駄に使用していた従来法に較べて、雰囲気ガスの原料およびガス発生のための費用が不要となる。(2) 従来の雰囲気ガス焼結に較べて、工程管理、品質管理が容易である。(3) Mn, Cr などの酸化物は真空中で炭素により容易に還元されるため、従来のような厳密なガスの露

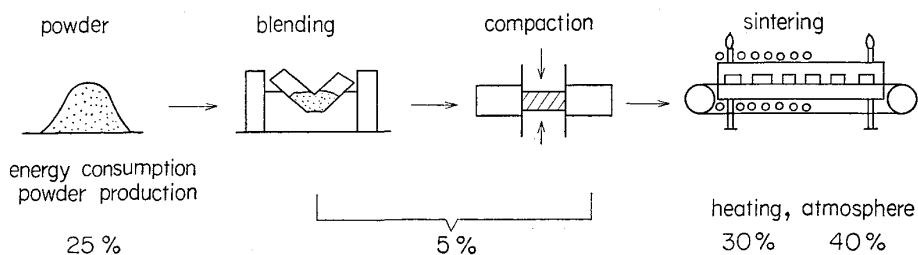


Fig. 5. Powder metallurgy process for structural parts and distribution of energy usage.

点管理，高温焼結炉あるいは低酸素粉末を必要としないなど⁴³⁾であろう。

粉末冶金法が他の部品製造法に比較して省資源，省エネルギーであるか否かの評価はどんな部品形状で比較するか，直接消費するエネルギーなどに限定して比較するかどうかで異なるため，難しい問題ではあるが，ある部品では $1/3 \sim 1/4$ という報告³⁹⁾⁴⁶⁾ もあり，一般的には粉末冶金法は省資源，省エネルギーに適した方法であると評価されている⁴⁷⁾⁴⁸⁾。作業環境のよさ，省力化など他の特長を考え合せれば，今後ますます粉末冶金法が採用され，成長することはまちがいないだろう。

4. 鉄粉を利用した新製品，新技術

4.1 粉末としての利用

鉄鋼製品として薄板，厚板，丸棒，線材など種々の形状の製品が用途に応じて使い分けられており，鉄粉もこのような製品群の中の1つと見なすことができる。それゆえ，純鉄から高合金鋼まで種々の鋼が他の製品と同様に製造されている。ここで基本にたちかえつて，なぜ粉末が利用されるのかを考えてみると，(1) 粉末化されることにより，固体でありながら，流体としての特性を具備し，その結果，自動化，省力化に結びつく，(2) 粉末化されることにより，比表面積が急激に増加し，酸化反応などガスとの反応が起こりやすくなる。(3) 噴霧法などで粉末化される過程で急冷凝固されるため，これを原料に用いて製造した材料はマクロの偏析がなくなる，などの理由に分けることができる。(1) の特性は前章で述べた焼結機械部品の製造に用いられ，また (3) は後述する高速度鋼やダイス鋼，Ni 基耐熱超合金の製造に利用されている。(2) の特性を利用した新製品として，今冬よく見かけたものを使いすて懐炉がある。これは鉄粉の酸化熱を利用したもので，鉄粉のほかに少量の酸化剤が同じ袋に封入されている。酸化熱を利用する懐炉とは異なり，酸化反応によりガス状の酸素を金属粉に固定し，これにより保存容器内の細菌の活動を抑え，食物の腐敗を防止する防腐剤（脱酸素剤）が最近注目されている。この場合に用いる金属粉末としては，酸化反応熱による食物の変質が起こってはならないため，Ti や Al などの活性金属粉末は使用できず，鉄粉を反応制御剤とともに使用することがよいとされている。米穀類や肉類の原材料から菓子類などの製品に到る広範囲の食物に使用でき，一部は冷凍保存にとつて代わるものと期待されている。

上記のユニークな製品とは異なる特性を要求され，粉末状態で使用されているものに電磁パウダークラッチ⁴⁹⁾・プレーキ⁵⁰⁾，ゼロックスなどのフォトコピー，溶接棒，溶断，各種化学用が古くから知られているが，ここでは説明を割愛する。

4.2 成形・焼結体としての利用

4.2.1 熱間静水圧成形技術

Fig. 6 のように高压容器と加熱炉を結合し，高温高压焼結を可能にした装置が熱間静水圧成形プレス (Hot Isostatic Press-HIP) である。この装置は 1950 年代後半に米国のバットル研究所で開発され，WC 超硬合金や精密鑄造材中の空孔除去に一部使用されていた以外は実験用装置の域を出なかつた。しかし，最近に到り，装置の大型化，生産性の向上が可能となり，一方，ガス噴霧法などの鉄粉製造技術の進歩により，高性能鉄系材料の粉末成形に使用されはじめています。

この HIP 成形技術を鉄系粉末に応用した最初の例としては高速度鋼があり，すでに 1970 年頃から企業化がはかられている⁵¹⁾。現在ではこの方法でスウェーデンのウデホルム社 (アセアストラ法)，米国のコルト社クルーンプル部門，我が国では神戸製鋼所が企業化を行つている。その製造工程は三者で少し異なつてはいるが，基本的には同じ方法であり，Fig. 7⁵²⁾ に神鋼プロセスを图示した。この方法ではまず高速度鋼の溶湯を高压の N_2 ガスにより粉化し，急冷凝固した粉末を捕集後，軟鋼製カプセルに充填，封入を行う。このカプセルを HIP 装置に入れ，高温高压下で真密度化する。通常，この HIP 処理は $1100^\circ C$ ， 1000 kg/cm^2 で， $1 \sim 3 \text{ h}$ 行われるが，さらに低圧力でも真密度化が可能である⁵²⁾⁵³⁾。

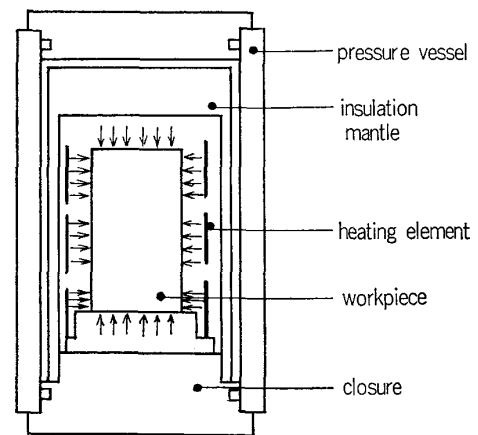


Fig. 6. Schematic illustration of hot isostatic press.

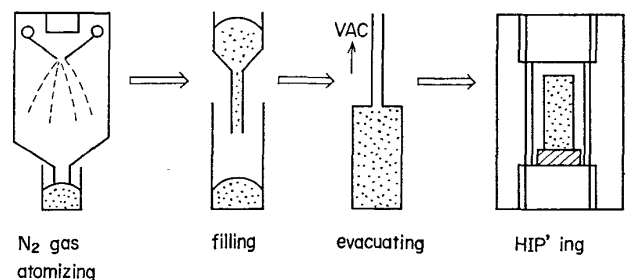


Fig. 7. Manufacturing process of high-speed tool steels through powder route.

この方法で製造した高速度鋼の特性は過去において数多くの論文⁵⁴⁾や解説⁵⁵⁾があり、詳しいことは省略するが、要約すると、炭化物が微細均一に分散しているため、熱間加工性が著しく向上し、高V鋼 SKH 10 のような難加工材でも、適正加工温度範囲が SKH 9 以上に拡がり⁵⁶⁾、鍛造時の加熱回数を削減できるとともに、材料歩留の大幅向上が可能となる。さらに高合金化して炭化物析出量を増加させても、靱性の低下はほとんどなく⁵⁷⁾、現用鋼と比較して高靱性であることが大きな特長である。また、この材料の被研削性の向上は著しく、砥石での仕上効率の向上、工具仕上面精度の向上、表面材質劣下の低減など優れた特長を有している。この材料の具体的な用途としては、切削工具はもちろんのこと、冷間鍛造、粉末冶金、精密打抜などの各種冷間金型にも使用されはじめている。切削工具では振動や衝撃の多い分野あるいは難削材（高硬度の調質材や耐熱合金）の分野でとくに優れた工具寿命を示し、また金型においては折損や欠けの起こるパンチなどでしだいに評価が高まりつつある。

粉末の製造技術と HIP 装置の技術向上にともない、この HIP 成形技術は前記の高速度鋼や Ni 基耐熱超合金のような高価な材料だけにとどまらず、しだいに安価な材料にも適用される傾向がみられる。例えば、高 Cr 工具鋼の現用鋼は高速度鋼よりも粗大な Cr 炭化物の偏析があり、材料特性は必ずしも満足できるものではない。このような鋼の粉末冶金化が検討される⁵⁸⁾とともに、さらに高性能の材料として、 $2.5\text{C}-0.5\text{Mn}-1.0\text{Si}-5.0\text{Cr}-10.0\text{V}-1.3\text{Mo}$ のような粉末冶金用に特別に設計された合金粉末がこの方法で製造され、冷間および熱間の金型あるいは圧延ロールとして優れた性能を発揮している⁵⁹⁾。

この HIP 成形技術は種々の新機能材料の開発および製造に用いられるとともに、複合材あるいは複雑形状部品の成形に用いられるものと思われる。

4.2.2 粉末押出技術

粉末あるいは粉末成形体を押出す技術を粉末押出技術と呼んでいる。この技術の歴史は古く、以前は粉末を金属容器に封入後、押出すことが行われていたが、(1) 押出材の表面に付着する容器の除去が容易でないこと、(2) 容器と粉末材の変形抵抗値の違いや、表面と内部の加工率の違いにより、均一な形状の押出材が得られにくいこと、また、(3) 粉末部分では緻密化にともない体積減少が起こり、容器の粉末材への折れ込み⁶⁰⁾が起こることなど種々の問題があつたため、最近までこの技術は特殊材料⁶¹⁾を除いてかえりみられることがなかつた。

上記の問題点のすべてが容器を使用することと関連があるため、この点に着目して最近英国で開発された方法⁶²⁾⁶³⁾は容器を用いていない点では画期的である。焼なましを行った水噴霧粉末を冷間静水圧プレスを用いて成形後、焼結加熱したピレットをある押出比以上の条件で押出せば、割れのない健全な材料が得られる。この方法

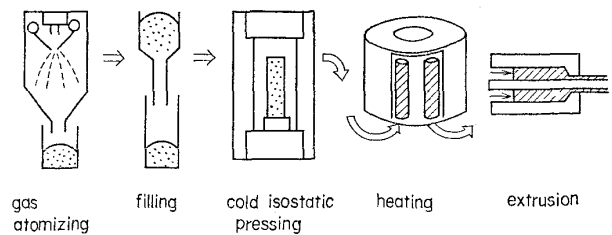


Fig. 8. Production process of stainless tubes from powder.

によつて製造される押出材の形状は丸棒、角棒をはじめ異形断面をもつパイプなど広範囲にわたっている。この方法は細径で長尺物の製造に限定される欠点はあるものの、高速度鋼を例にとれば、製造コストが安く、ドリルなど比較的安価な標準工具の素材製造法として適している。

他の1つは Fig. 8⁶⁴⁾ に示すようにステンレス鋼粉末からパイプを製造する方法である。ガス噴霧法により製造された粉末を容器に充填し、これを冷間静水圧プレスにより高密度化後、加熱、押出を行うものである。この方法は材料歩留りの向上をはじめ、消費エネルギーの節減が期待できること、Ti 安定化フェライト系ステンレス鋼のような鋼種では微細結晶粒が得られ、衝撃靱性が向上すること、MnS の微細分布により耐孔食性の向上が期待できることなど多くの利点を有している。

4.2.3 その他の成形技術

3章で述べた焼結機械部品の機械的特性はその密度と密接な関係があり、鋼材と同等の特性を得るためには、Fig. 5 に示した焼結工程のあとで熱間コイニングあるいは鍛造により、残留空孔を圧着させることが必要である。この技術は粉末鍛造技術と呼ばれ、広く世界各国で研究され、一部は実用化もされている。この技術に関する論文⁶⁵⁾や解説⁶⁶⁾は数百編にも及び、詳しくはそれらに譲るが、この技術の問題点は粉末をはじめプロセスコストが現状では高価なことである。これを解決するため、水噴霧のままの安価な粉末を用いる技術が二、三報告⁶⁷⁾~⁷¹⁾されている。また、鋼材の切屑を粉末化して用いる試みもなされているが、いずれも実用化はされていない。その他、特殊な鍛造法としてバクト鍛造法⁷²⁾ オスプレイ⁷³⁾鍛造法などの実用化が検討されている。

その他の成形法として粉末を圧延する技術がソ連、米国、カナダなどで実用化されているが、高価な非鉄系材料に限定されており、圧延速度を上げられないため、安価な鉄系では将来にわたつて実用化は不可能であると考えられている。

5. おわりに

最近 10 年間の鉄粉製造法とその利用技術の動向を紹介したが、限られた紙面に簡潔にとりまとめることは至

難のわざであり、そのため、冗長な箇所や説明不足の点が多々あるかと思われる。末尾の文献で補足していただければ幸いである。

文 献

- 1) 日本粉末冶金工業会資料
- 2) P. U. GUMMESON: Powder Metallurgy for High Performance Applications. ed. by B. WEISS, (1972), p. 27 [Syracuse Univ. Press]
- 3) J. S. HIRSCHHORN: Introduction to Powder Metallurgy, (1969), p. 18 [APMI]
- 4) 佐藤希夫: 粉体粉末冶金協会機械部品小委員会資料 (1973)
- 5) 山腰 登, 万戸博宗: R & D (神戸製鋼技報), 24 (1974) 2, p. 12
- 6) J. P. THOMPSON: J. Inst. Metals, 74 (1948), p. 101
- 7) 武田 徹: 第8回粉末冶金入門講座テキスト (1976), p. 1 [粉体粉末冶金協会]
- 8) 藤本弘文, 古田誠矢: R & D (神戸製鋼技報), 24 (1974) 2, p. 33
- 9) J. K. BEDDOW: The Production of Metal Powders by Atomization (1978) [Heyden & Son Ltd.]
- 10) A. LAWLEY: International J. Powder Met & Powder Technol., 13 (1977), p. 169
- 11) R. J. GRANDZOL and J. A. TALLMADGE: Ibid., 11 (1975), p. 103
- 12) 岸高 寿, 森岡恭昭, 田村皖司: 川崎製鉄技報, 3 (1971) 1, p. 21
- 13) 河合伸泰, 平野 稔: 粉体粉末冶金協会昭和 54 年春期大会講演概要, p. 38
- 14) 特許出願公告, 昭 52-19823
- 15) 河合伸泰, 平野 稔: 日本金属学会昭和 51 年秋期大会講演概要, p. 236
- 16) E. A. KRASHENINNIKOV, M. I. KONONOV, and Yu. M. SHISHKIN: Researches in Powder Metallurgy, 1 ed. by B. A. BOROK (1972) [Consultants Bureau]
- 17) A. A. SIGOV, B. I. BONDARENKO, A. I. STEZHENSKII, and B. S. STYSKIN: Soviet Powder Met & Metal Ceram., (1967) 12, p. 950
- 18) 伊藤俊治, 小倉邦明, 桜田一男, 新田 稔, 梶永剛啓: 粉体粉末冶金協会 昭和 53 年秋期大会講演概要, p. 18
- 19) M. MICHALKE: Chem. Ing. Tech., 41 (1969), p. 16
- 20) O. S. NICHIPORENKO: Soviet Powder Met & Metal Ceram., 11 (1969), p. 867
- 21) S. SMALL and T. J. BRUCE: International J. Powder Met., 4 (1968), p. 7
- 22) K. Y. KIM and W. R. MARSHALL: AICChEJ, 17 (1971) 3, p. 575
- 23) H. LUBANSKA: J. Metals, 22 (1970), p. 45
- 24) A. K. PETROV, I. S. MIROSHNICHENKO, V. V. PARABIN, G. I. PARABINA, G. N. SERGEEV, Yu. G. ORLOV, V. A. GOLOVKO, and G. P. BREKHARYA: Soviet Powder Met. & Metal Ceram., 12 (1973) 1, p. 13
- 25) O. S. NICHIPORENKO and Yu. I. NAIDA: Ibid., (1968) 7, p. 509
- 26) 藤本弘文, 石井 勝, 古田誠矢: 粉体粉末冶金協会昭和 54 年春期大会講演概要, p. 64
- 27) N. J. GRANT: Powder Metallurgy for High Performance Applications, (1972), p. 90 [Syracuse Univ. Press]
- 28) E. GRIESSHAMMER and E. G. LIESKE: VDI-Zschft, 110 (1968), p. 343
- 29) H. A. JOHNSON: Progress in Powder Met., 31 (1975), p. 223
- 30) E. L. THELLMANN: Preprints for the European Symposium on Powder Metallurgy, 1 (1978), p. 249
- 31) C. R. VEALE: Fine Powders, Preparation, Properties and Uses, (1972) [Applied Science Publishers]
- 32) 上田良二: 日本金属学会報, 17 (1978) 5, p. 403
- 33) 賀集誠一郎: 金属, 49 (1979) 2, p. 31
- 34) MPIF 資料
- 35) 川北宇夫: 日本金属学会報, 13 (1974) 5, p. 341
- 36) D. J. BRYAN, N. FRICKER, and P. J. WEDGE: Powder Met., 20 (1977) 2, p. 117
- 37) D. KNIGHT: Ibid., p. 121
- 38) A. P. CREASE: Ibid., p. 124
- 39) Metal Powder Report, 33 (1978) 11, p. 522
- 40) H. S. NAYAR: Progress in Powder Met., 33 (1977), p. 197
- 41) H. S. NAYAR: Modern Developments in Powder Met., 9 (1977), p. 213
- 41) 特許公開公報, 昭 51-78714
- 43) W. J. DOELKER: Progress in Powder Met., 33 (1977), p. 163
- 44) N. J. BLASKO and S. W. KENNEDY: Modern Developments in Powder Met., 9 (1977), p. 253
- 45) J. H. HOFFMANN and C. L. DOWNEY: Ibid., p. 301
- 46) Metal Powder Report
- 47) G. F. BOCCHINI: Preprints for the European Symposium on Powder Metallurgy, 1 (1978), p. 26
- 48) R. MEYER: Ibid., p. 104
- 49) 上之郷忠, 木本伸一, 岩本 弘, 田村英樹: 神鋼電機, 22 (1977) 5, p. 32
- 50) 坂本美智瑠, 岡野富久穂, 古谷浩三: 同上, p. 47
- 51) P. HELLMAN: Iron Steel (1970), Special Issue, p. 49
- 52) M. MORITOKI, H. TAKIGAWA, and Y. INOUE: Preprint for the 1st International Conference

- on Isostatic Pressing, (1978)
- 53) 河合伸泰, 滝川 博, 石井 勝, 古田誠矢, 井上陽一: 粉体および粉末冶金, 25 (1978) 8, p. 254
- 54) 例えば P. HELLMAN and H. WISELL: Bull. Cercle Etude Metaux, Special, (1975), p. 483
- 55) 例えば 湯河 透, 河合伸泰: 日本金属学会報, 13 (1974) 2, p. 131
- 56) 湯河 透, 辻 克己, 本間克彦, 藤本弘文, 平野稔, 立野常男: 鉄と鋼, 63 (1977), S. 832, p. 416
- 57) 辻 克己, 本間克彦, 平野 稔, 立野常男, 石井勝, 中原良雄: 鉄と鋼, 63 (1977) S. 831, p.415
- 58) Y. M. SKRYNCHENKO, I. Ya. KONDRATOV, and N. P. STADNICHENKO: Soviet Powder Met. & Metal Ceram., 16 (1977). p. 661
- 59) A. KASAK and E. J. DULIS: Powder Met., 21 (1978) 2, p. 114
- 60) N. R. GARDNER, A. D. DONALDSON, and F. M. YANS: New Methods for the Consolidation of Metal Powders ed. by H. H. HAUSNER, et al., (1967), p. 169
- 61) A. S. BUFFERD: Powder Metallurgy for High Performance Applications ed. by B. WEISS, (1972), p. 303 [Syracuse Univ, Press]
- 62) J. J. DUNKLEY and R. J. CAUSTON: International J. Powder Met & Powder Technol., 13 (1977), 1, p. 13
- 63) J. J. DUNKLEY and R. J. CAUSTON: Powder Met. International, 8 (1976) 3, p. 115
- 64) C. ÅSLUND: Preprints for the European Symposium on Powder Metallurgy, 1 (1978), p. 279
- 65) 例えば論文集では, Forging of Powder Metallurgy Preforms ed. by H. H. HANSNER, et al., (1973) [MPIF]
- 66) 例えば, 河合伸泰: 塑性と加工, 18 (1977), p. 234 又は金属材料, 16 (1976) 11, p. 82
- 67) R. L. RUECKL: Progress in Powder Met., 31 (1975), p. 23
- 68) 大野英治, 筑後和男: 小松技報, 23 (1977) 79, p. 32
- 69) 大野英治, 筑後和男, 山崎勝広, 佐藤悦郎: 小松技報, 24 (1978) 82, p. 15
- 70) 大野英治, 筑後和男, 佐藤悦郎: 同上, 24 (1978) 83, p. 13
- 71) 特許公開公報, 昭 51-78713
- 72) 梶永剛啓, 桜田一男, 伊藤俊治: 金属材料, 15 (1975) 6, p. 77
- 73) R. G. BROOKS, A. G. LEATHAM, and J. S. COOMBS: Met. and Metal Form., (1977), Apr. p. 157