

展 望

UDC 621.762:669-492

粉末冶金の現状と問題点ならびに新しい技術について*

的 場 敏 夫**

The Present and Problem of Powder Metallurgy and New Development

Toshio MATOBA

1. ま え が き

粉末冶金は古くからかなり閉鎖的、秘密主義的な技術が多く、「職人かたぎ」の性格を持つて発達してきたものから、近代的な管理による製造方法が急速に受け入れられる状況に変化してきた。ここ数年の間に粉末冶金製品の増加とともに、新しい技術の発展がなされつつある。

1970年7月に米国ニューヨーク市で開催された国際粉末冶金会議において、米国粉末冶金工業会の専務理事ケンプトンロール氏は、「米国の自動車部品用鉄系粉末冶金製品は1980年までに年間50万tの使用量に達し、その中30万tは粉末鍛造といわれる新しい技術によつて製造されるであろう」と注目すべき発言を行なつた。さらに数年前にも粉末冶金国際会議において自動車の半分は粉末冶金技術によつて製造されるであろうとの発言を行なつた報告者もあつた。

従来粉末冶金といえば含油軸受のごとく粉末冶金そのものの特性を生かした製品、あるいは低級の小型機械部品などが連想されるように、ごく限られた一部の用途にのみ実用されてきた技術であるが、今日では精密鑄造、精密鍛造と競合しうるまでに成長を遂げた。また粉末冶金製品といえば小型製品に有利であるといわれてきたものが、粉末製造技術、プレス機械の発達により大型高強度部品を省力的に安価に量産しうる高度の技術にまで発展した。

本資料は最近進歩発展のめざましい粉末冶金技術の現状と、解決せねばならないいくつかの問題点、また問題点の解決によつて得られる新しい技術について概要を述べたものである。

2. 粉末冶金の現状

表1にわが国における粉末冶金製品の用途別の生産重量を、表2に昭和45年度における用途別の生産金額を示した。また図1に粉末冶金原料として使用される鉄

粉、銅粉の消費量の経過を示した。鉄粉の消費量は5年間に数倍の増加を示したが、銅粉は2倍程度の増加にすぎない。用途別の生産量、生産金額より見られるように生産量、金額共に機械部品、硬軟質磁性材料がいちじるしい増加を示しているが、一方軸受材料、摩擦材料、電気接点材料、導電材、電球材の伸びは比較的低い。生産金額においても機械部品と磁性材料が多いことを示している。昭和45年における産業部門別に軸受、機械部品摩擦材の3品目にわけ少し細かく生産重量、生産金額を図2に示した。

以上の図表から見られるように粉末冶金でなければでき難い軸受部門、電気接点材料の伸びが比較的低いの

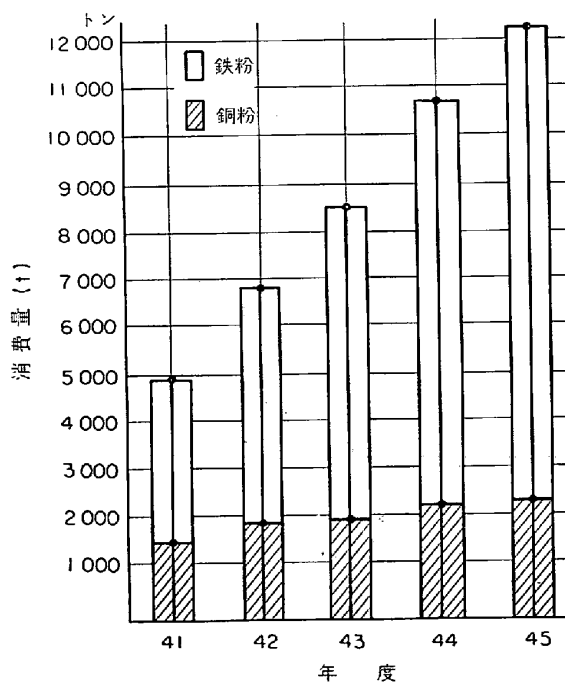


図1 粉末消費量 (日本粉末工業会)

* 昭和46年7月2日受付 (依頼展望)

** 三菱金属工業(株)

表 1. 年度別生産重量 (t) (日本粉末冶金工業会)

	40 年	41 年	42 年	43 年	44 年	45 年
軸受	1 350	1 930	2 529	3 805	3 612	3 780
機械部品	2 372	3 612	4 996	6 357	8 197	9 613
摩擦材	187	236	328	419	667	520
電気接点	63	86	116	113	146	157
集電材	163	175	217	180	250	176
磁性材料	1 555	2 238	2 416	3 597	6 092	8 077
硬軟	3 991	7 235	7 533	11 729	15 225	14 314

表 2. 生産金額 (百万) (日本粉末冶金工業会)

	軸受	機械部品	摩擦材	電気接点	集電材	磁性材料	
						硬	軟
44 年	4 902	6 867	1 184	1 842	231	9 620	3 440
45 年	5 252	8 510	1 347	1 879	290	28 036	5 700

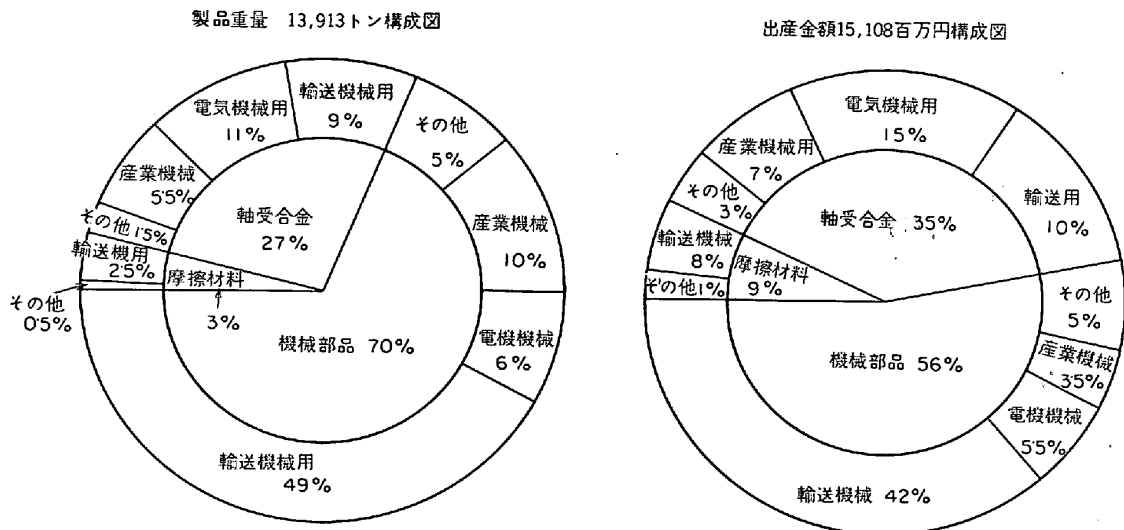


図 2 昭和 45 年度の製品重量と生産金額

比して機械部品の生産量の増加が多いのは、従来の溶解、切削法による部品が経済面より粉末冶金製品に置き換えられつつあることを示している。機械部品のなかでも輸送機部門への用途が生産重量において圧倒的に多い。が生産金額は重量割合程には高くないことが見られる。輸送機部門では自動車への応用が広いが、部品単価の上昇はほとんど認められずに数量の増加が大きい。なお自動車用焼結部品は品種において従来共それほど多く増加していない。したがって現在は動力伝達部門へ粉末冶金製品の適用を広げるために、高密度、高強度焼結材を得る手段として一般に焼結鍛造といわれる方法が開発され、すでに実用の域に入りつつある。

2.1 粉末冶金技術

粉末冶金の製造工程はすでに広く知られているが一般的に特色とされている点は次のごとくである。製造工程

面より見れば複雑な形状の部品を切削工程をできるだけなくして製作可能で、焼結部品の寸法精度は切削精度に比して劣らないものがある。したがって工程の自動化が容易なため省力化が可能であり、その生産設備投資は比較的すくなく、床占有面積もすくない。とくに大量生産の場合経済的に有利である。

材料素材面より見れば従来、鑄造、圧延などで組織不均一、偏析などのために塑性加工が困難とされた金属材料、分散強化型合金のような heterogeneous な組織の材料も製作できる。また最近、高速度鋼を焼結法により製作し、微細炭化物を均一に分散させ、従来の溶解法による材料に比し切削寿命その他にすぐれた材質のものも得られている。原料粉として合金粉末が得られるようになったので Super Alloy といわれる耐熱合金も粉末冶金法によつて製作することができるようになった。

表 3. 粉末冶金用鉄粉の JIS (H 2601)

種類	Fe %	C %	塩酸不溶解分 %	還元減量 %	流動度 sec/50 gr	粒度分布	見掛密度 g/cm ³
1 種	97.5 以上	0.1 以下	1.00以下	0.6 以下	35 以上	標準ふるい 149 μ を通過するものが全体の 99% 以上であつて、そのうち標準ふるい 44 μ を通過するものが全体の30% 以下であること。	2.3 をこえ 2.5 以下 2.5 をこえ 2.7 以下 2.7 をこえ 2.9 以下 2.9 をこえ 3.1 以下
2 種	99.0 以上	0.01 以下	0.05以下	0.3 以下	30 以下		2.4 をこえ 2.6 以下 2.6 をこえ 2.8 以下 2.8 をこえ 3.0 以下 3.0 をこえ 3.2 以下 3.2 をこえ 3.4 以下

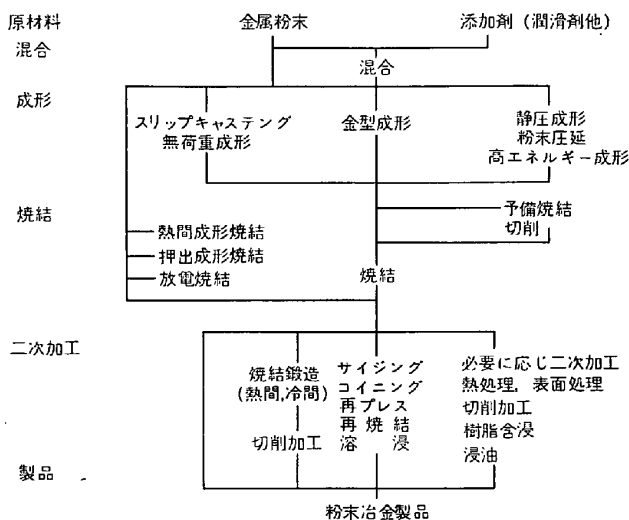


図 3 粉末冶金製造工程

粉末冶金製造工程の概略を図 3 に示した。

2.2 粉末

原料粉末として最も使用量の多い鉄粉について見ると粉末冶金による機械部品の始まった当初には鉱石の直接還元法による Sweden Hoeganaes 粉末が大部分を占めていた。しかし現在では国内数社によりミルスケール、電解鉄を基として鉄粉が生産されている。昭和46年6月の粉末工業会資料によると、粉末冶金用鉄粉は Hoeganaes が 500 t/月、ミルスケールが 500~550 t/月、電解鉄 250 t/月となっている。さらに近頃は溶湯噴射法（アトマイズ法）による鉄粉も少しずつ増加している。

表 3 に粉末冶金用鉄粉に関する JIS 規格 (H261) を示した。本規格は還元鉄粉は 1 種、電解鉄粉は 2 種を対象としているが、アトマイズ粉に対してはまだ決定されていない。これらの鉄粉はそれぞれ特徴を持っており、還元鉄粉は価格は安く、中、低密度の焼結部品用として最適であり、電解鉄粉は高価であるが、高密度部品用として用いられる。

最近高強度、高密度焼結材を得るために成形に当たって成形性のよい粉末の要求が高まり、この性質を満足する粉末製法として溶湯から直接粉末を得るアトマイズ法

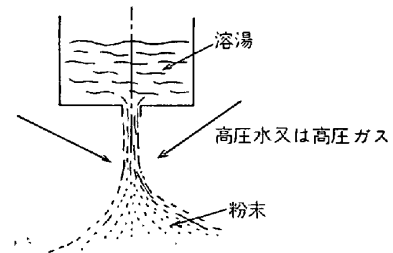


図 4 アトマイズ法

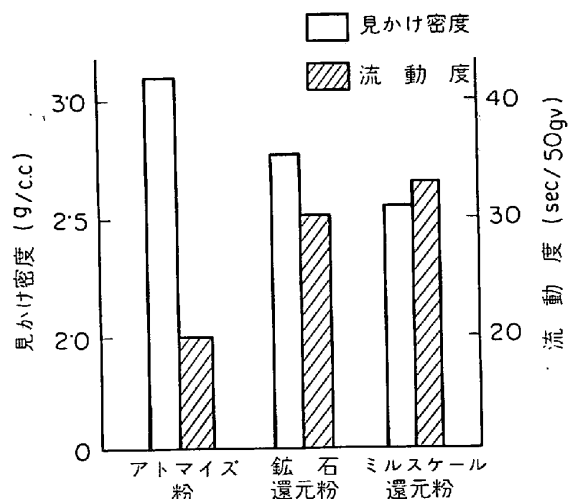


図 5 種粉の種類と見かけ密度、流動性

が現われた。とくに合金鋼、耐熱合金など合金成分の粉末が得られるので、従来の混合粉末拡散の焼結法に取って代わる傾向にある。

アトマイズ法は噴射法ともいわれ図 4 に示すごとく、溶湯状態にある金属を溶解容器の下部にある小孔より流出させ、溶湯の流れに高圧の水、ガスを吹きつけ、その圧力によつて溶湯を粉化させ金属粉末を得る方法である。なお酸化の恐れある金属粉末には中性ガスが用いられる。

本法は米国 A. O. Smith 社の研究開発により初めて良質鉄粉の量産に成功したもので、わが国においても科学技術庁金属材料技術研究所の技術をもとに生産に移りつつある。

図5に鉄粉の種類による見かけ密度と流動度を示した。アトマイズ粉末は見かけ密度は高く、流動性もよい。このことは粉末成形に当たって均一性のある高密度の部品のつくりやすさを示している。

粉末冶金用プレスの容量は、含油軸受用にはかなり小容量のものから使用されているが、機械部品のためのものとしては従来は100t または200t 程度のプレスが多く使用されてきた。しかし焼結部品が大型になるに従い、当然大型プレスが要望され、さらに多段複雑形状の成形が要求されるようになった。米国 Cincinnati 社ではこの要望に答えて、最近では1000t 多段押しプレスの製造を開始し、現在2000t, 3000t プレスを計画中といわれる。1000t プレスでは重量10kg 位までの焼結部品をつくりうるという。わが国においても500t 級プレスの製造が試みられているが、さらに大型容量のプレスの国産化が望まれる。大型プレスと大型製品とは常にあいまって粉末冶金製品分野の拡大に大きな力となっており、今後ますます大型プレスが発達するであろう。

表4～5に機械構造用焼結材料に関する規格を示した。

これらの表から注目されることは、焼結材の密度は、鋼材の真密度 7.8 g/cm^3 に比べるとはるかに低く、焼結材の内部にかなりの気孔を残していることを示している。一般に気孔率に応じて種々の機械的性質が劣る。

焼結部品の伸び、衝撃値は一般の鋼材に比して、いちじるしく低い。焼結部品の持つ気孔の形状が球形に近い

ときはノッチ効果が現われ難いので衝撃は上昇する。しかし一般の焼結部品では粒界気孔がノッチ効果となる。後述する粉末鍛造技術は、これら低い靱性を大幅に改善し、一般鋼材と同程度の靱性を持たすことに成功したものである。

規格に見られる鉄に対し銅の添加は、一般鋼材にはあまり効果がないものであるが、粉末冶金法では焼結温度が銅の溶解点以上であり、液相焼結になるので高密度となり、高強度が得られやすい。さらに銅は焼結時において焼結による収縮をコントロールするので鉄系機械部品の機械強度が要求されるときに多く用いられる。

鉄系焼結材料では一般の鋼材と同様な熱処理、表面硬化処理がなされるが、低密度焼結材は浸炭深さ、焼入深さなど一般鋼材に比して深く侵入する。また表面処理においても塩類の使用は避けるべきである。この点においても焼結鍛造は焼結材の機械性質向上にある転機をもたらしたものと見える。

図6に Fe-C 系, Ni-鋼, 18-8 ステンレス鋼, 銅鋼について密度と抗張力の関係を示した。

2.3 焼結鍛造

自動車部品、または機械構造用部品として、機械的性質が一般溶解材と同程度の鉄系焼結部品を開発するために、かなり長い期間多くの努力がなされてきた。

従来焼結機械部品の機械的性質を向上するには、炭素、ニッケル、モリブデン、クロム、マンガンなど一般の鋼材に添加される金属を、多くは金属粉末として添

表4. 機械構造用焼結材料規格

種類	記号	合金系	特徴	用途例
SMF 1種	1号 SMF 1010 2号 SMF 1015 3号 SMF 1020	純鉄系	やわらかくなじみやすい。 含油性あり 磁化鉄心として使用可能。	スペーサ、ポールピース (カメラ、ミシン、繊維機械)
SMF 2種	1号 SMF 2015 2号 SMF 2025	鉄-銅系	含油性あり。浸炭処理して耐摩耗性を向上できる。	ラチェット、キー (事務機械、カメラ)
SMF 3種	1号 SMF 3010 2号 SMF 3020 3号 SMF 3030	鉄-炭素系	含油性あり。 軽負荷構造部品に適す。	スラストプレート、ピニオンギヤ (事務機械、自動車)
SMF 4種	1号 SMF 4020 2号 SMF 4030 3号 SMF 4040 4号 SMF 4050	鉄-炭素-銅系	含油性あり。 耐摩耗性あり。 一般構造部品に適す。 焼入れ、焼もどし処理可能。	オイルポンプ、ストライカー、ギヤ (自動車、農業機械、家庭電気機器)
SMF 5種	1号 SMF 5030 2号 SMF 5040	鉄-炭素-銅-ニッケル系	高強度構造部品に適す。 焼入れ、焼もどし処理可能。	クラッチハブ、スプロケット (自動車、農業機械)
SMF 6種	1号 SMF 6040 2号 SMF 6055 3号 SMF 6065	鉄-炭素(銅溶浸)系	高強度、耐摩耗性、熱伝導性にすぐれる。気密性あり。 焼入れ、焼もどし処理可能。	プレッシャープレート、ベンポンプロータ (圧縮機械、自動車、農業機械)
SMK 1種	1号 SMK 1010 2号 SMK 1015	青銅系	やわらかくなじみやすい。 耐食性、非磁性あり。	リンクアーム、ウォームホイール (事務機械、農業機械)

加焼結し、さらに熱処理、表面処理などによりある程度の機械的性質を得ていた。しかし焼結材に残存する気孔のために何とせよ一般鋼材には及ぶことができなかつた。

焼結鍛造そのものは粉末冶金技術としては新しいものではなく、粉末冶金法による最初の材料ともいえるタンゲステン、モリブデンの加工分野において最も古くから実施されていた。

しかし最も用途の広い鉄系粉末冶金にこの技術が適用され、生産技術まで持ち来たされたのは、ここ2、3年のことである。しかしまだ多くの問題をかかえており、

経済的に一般鋼材と対抗するには粉末成形法、加熱方法、鍛造方法、鍛造潤滑剤、とくに金型技術などに解決を要するものが残っている。

焼結鍛造⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾、また時には粉末鍛造といわれるのは、従来の焼結素材と鍛造とを組み合わせた手法という意味から出てきたもので powder forging, sinter forging と一般にいわれるものである。1967年にケンプトンロール氏が来日し、G. M. がコネクティングロッドの試作を本法によつて成功し、量産に入る計画があると述べたことにより、日本の粉末工業会の話題として急激に盛り上がった。日本においては、これより以前からホットコイ

表 5. 焼結材料規格 (機械的性質, 密度, 組成)

記号	機械的性質			密度 g/cm ³	化学成分 %					
	引張強さ kg/mm ²	伸び %	衝撃値 kg, m/cm ²		Fe	C	Cu	Ni	Sn	その他
SMF 1010	10 以上	3 以上	0.5 以上	6.2 以上	残	—	—	—	—	1 以下
SMF 1015	15 以上	5 以上	1.0 以上	6.8 以上	残	—	—	—	—	1 以下
SMF 1020	20 以上	5 以上	1.5 以上	7.0 以上	残	—	—	—	—	1 以下
SMF 2015	15 以上	1 以上	0.5 以上	6.2 以上	残	—	3 以下	—	—	1 以下
SMF 2025	25 以上	1 以上	0.5 以上	6.6 以上	残	—	3 以下	—	—	1 以下
SMF 3010	10 以上	1 以上	0.5 以上	6.2 以上	残	0.2~0.6	—	—	—	1 以下
SMF 3020	20 以上	1 以上	0.5 以上	6.4 以上	残	0.4~0.8	—	—	—	1 以下
SMF 3030	30 以上	1 以上	0.5 以上	6.6 以上	残	0.4~0.8	—	—	—	1 以下
SMF 4020	20 以上	1 以上	0.5 以上	6.2 以上	残	0.8 以下	5 以下	—	—	1 以下
SMF 4030	30 以上	1 以上	0.5 以上	6.4 以上	残	0.8 以下	5 以下	—	—	1 以下
SMF 4040	40 以上	1 以上	0.5 以上	6.6 以上	残	0.8 以下	5 以下	—	—	1 以下
SMF 4050	50 以上	1 以上	0.5 以上	6.8 以上	残	0.8 以下	5 以下	—	—	1 以下
SMF 5030	30 以上	1 以上	1.0 以上	6.6 以上	残	0.8 以下	5 以下	—	—	1 以下
SMF 5040	40 以上	1 以上	1.0 以上	6.8 以上	残	0.4~0.8	7 以下	—	—	1 以下
SMF 6040	40 以上	1 以上	1.0 以上	7.2 以上	残	0.4 以下	15~25	—	—	4 以下
SMF 6055	55 以上	0.5 以上	0.5 以上	7.2 以上	残	0.4~0.8	15~25	—	—	4 以下
SMF 6065	65 以上	0.5 以上	1.0 以上	7.4 以上	残	0.4~0.8	15~25	—	—	4 以下
SMK 1010	10 以上	2 以上	0.5 以上	6.8 以上	—	1.5 以下	残	—	9~11	2 以下
SMK 1015	15 以上	3 以上	1.0 以上	7.2 以上	—	1.5 以下	残	—	9~11	2 以下

付表 1. 高炭素の SMF 3, 4, 5 種の焼入れ, 焼もどし後における引張強さ (参考値)

処理条件: 約 850°C から油中に焼入れ後約 200°C で焼もどし

種類	引張強さ kg/mm ²	密度 g/cm ³	化学成分 (%)					
			Fe	C	Cu	Ni	その他	
SMF 3 種	35 以上	6.4 以上	残	0.6~0.8	—	—	—	1 以下
	45 以上	6.6 以上		0.6~0.8				1 以下
SMF 4 種	40 以上	6.4 以上	残	0.6~0.8	3~5	—	—	1 以下
	55 以上	6.6 以上		0.6~0.8				1 以下
	60 以上	6.8 以上		0.6~0.8				3~5
SMF 5 種	55 以上	6.6 以上	残	0.6~0.8	3~5	—	—	1 以下
	65 以上	6.8 以上		0.6~0.8				3~7

付表 2. 高炭素の SMF 3, 4, 5 種の焼入れ, 焼もどし後におけるかたさ (参考値)
 処理条件: 850°C 約から油中に焼入れ後 200°C 約で焼もどし

種 類	処理後のかたさ		密 度 g/cm ³	化 学 成 分 (%)					処理前のかたさ	
	マトリック スカたさ mHv (200 g)	見掛かたさ HRA		Fe	C	Cu	Ni	その他	マトリック スカたさ mHv (200 g)	見掛かたさ H _{RB}
SMF 3 種		35 以上 40 以上	6.4 以上 6.6 以上	残 残	0.6~0.8 0.6~0.8	— —	— —	1 以下 1 以下	180~230	35 以上 45 以上
SMF 4 種	600~800	45 以上 50 以上 55 以上	6.4 以上 6.6 以上 6.8 以上	残 残 残	0.6~0.8 0.6~0.8 0.6~0.8	3~5 3~5 3~5	— — —	1 以下 1 以下 1 以下	200~240	50 以上 60 以上 65 以上
SMF 5 種		50 以上 55 以上	6.6 以上 6.8 以上	残 残	0.6~0.8 0.6~0.8	3~5 3~7	— —	1 以下 1 以下	180~230	60 以上 65 以上

付表 3. 高炭素の SMF 3, 4, 5 種の焼入れ, 焼もどし後における引張強さならびにかたさ (参考値)
 処理条件: 約 850°C から油中に焼入れ後約 200°C で焼もどし

引張強さ kg/mm ²	処無後のかたさ		密 度 g/cm ³	化 学 成 分 (%)				処理前のかたさ	
	マトリック スカたさ mHv(200 g)	見掛かたさ HRA		Fe	C	Cu	その他	マトリック スカたさ mHv (200 g)	見掛かたさ H _{RB}
70 以上	鉄骨格の部分 600~800	55 以上	7.2 以上	残	0.6~0.8	15~25	4 以下	200~240	70 以上
80 以上	鉄骨格の部分 600~800	60 以上	7.4 以上	残	0.6~0.8	15~25	4 以下	200~240	75 以上

付表 4. SMF 1, 2 種ならびに低炭素の SMF 3, 4, 5 種の浸炭後におけるらマトリックスかたさ (参考値)
 処理条件: 約 900°C で 1.5~2h ガス浸炭後約 850°C か油中に焼入れ, しかる後に
 約 200°C で焼もどし

種 類	処理後の 表面のマトリックスかたさ mHv (200 g)	化 学 成 分 (%)					処理前の マトリックスかたさ mHv (200 g)
		Fe	C	Cu	Ni	その他	
SMF 1 種	600 ~ 800	残	—	—	—	1 以下	80 ~ 120
SMF 2 種		残	—	2~3	—	1 以下	150 ~ 200
SMF 3 種		残	0.2~0.4	—	—	1 以下	150 ~ 200
SMF 4 種		残	0.2~0.4	3~5	—	1 以下	150 ~ 200
SMF 5 種		残	0.2~0.4	3~5	—	1 以下	150 ~ 200

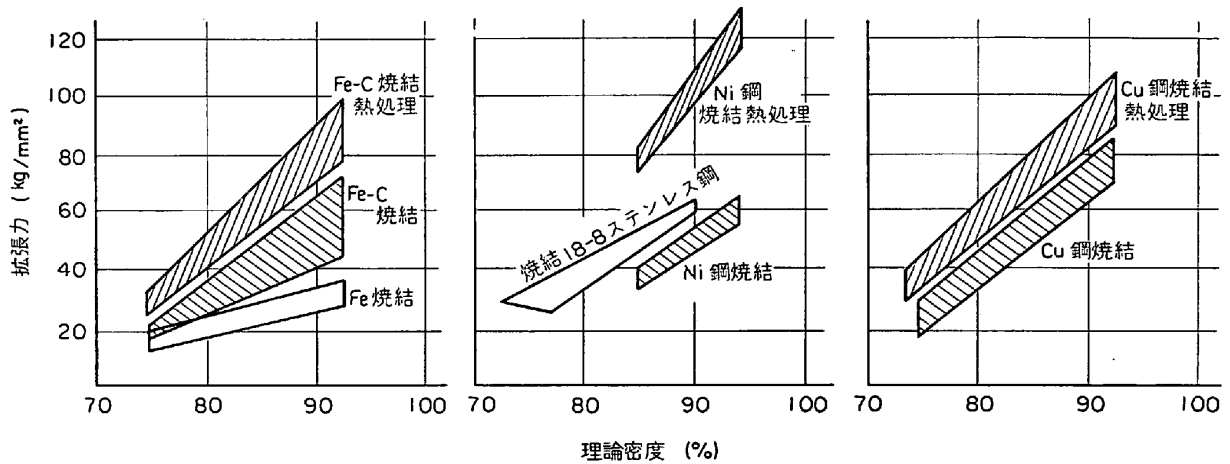


図6 密度と抗張力の比較

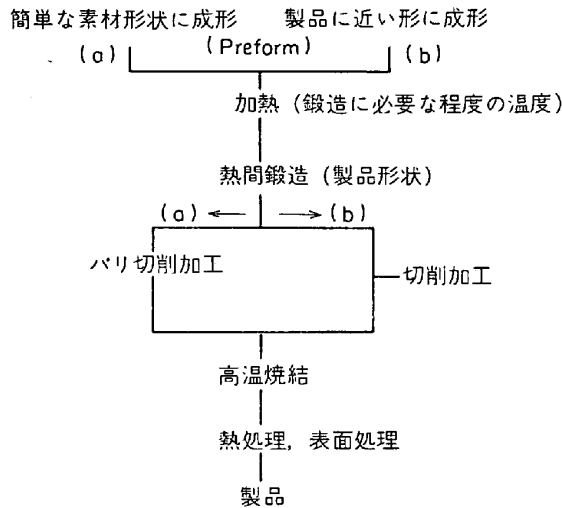


図7 焼結鍛造工程

ニング法によつて密度を高める研究はなされていた。焼結鍛造には2つの方法があり、図7に図示した。焼結鍛造に使用される金属粉末としては非金属介在物のできるだけ少ないことが必要である。焼結鍛造法でとくに有利なのは合金粉末がそのまま使用できることである。

焼結材を熱間鍛造するに際し、製品に近い形の成形体から出発するときも、簡単な形状の成形素材から出発する場合でも、焼結と鍛造のための予備加熱は同時に行なうことができる。鍛造に際し素材が変形しやすい状況に置くために、鉄焼結材の場合は800~900°Cでも十分である。鍛造部品は一般にはバリ切削後高温焼結によつて製品を得ることが多い。また成形に際し製品に近い形状より出発する場合には、普通は切削加工を必要としないように鍛造することが必要である。鍛造品は熱処理、表面処理によつて機械強度を与えることが多い。

鍛造のための加熱は短時間加熱で十分であり、高周波誘道加熱が好ましく、寸法精度を得るためには±5°Cの温度範囲が望ましい。

焼結鍛造に際しての問題点のいくつかを次にのべる。

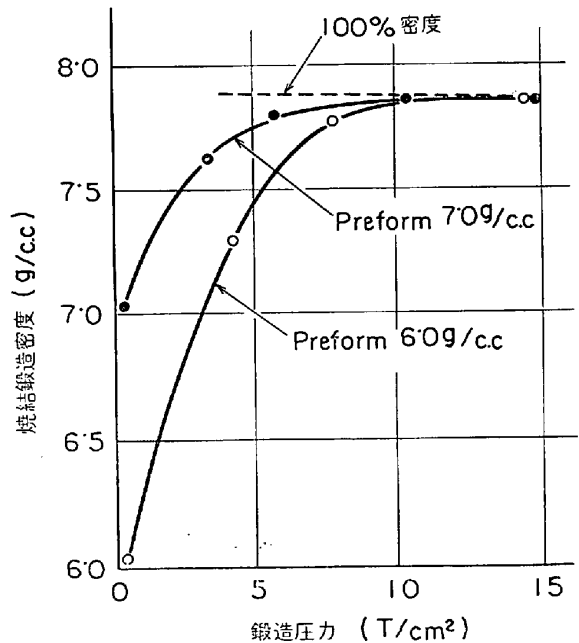


図8 焼結鍛造密度に及ぼす鍛造圧力と preform 密度の関係

素材の形状が製品に近いとき、簡単な形状のときといずれがよいかは今後なお研究を要するが、鍛造比と材料の流れの両面よりみれば、簡単な形状がすぐれているといえる。

素材密度は低いほど鍛造性は良好であるが、気孔による内部酸化の恐れがあるので注意を要する。

鍛造圧は密度が95%~98%で急激に増加する。図8に鍛造圧と密度上昇の関係を示した。鍛造によつて真比重に近くなつたとき、しかも金型をちょうど充てんする程度の圧力で加圧することが好ましく、バリの出ないようにすることが必要である。なおバリの生ずるときはできるだけ簡単な切削加工によつて製品となるような金型設計を行なうことが肝要であると共に金型材は熱クラックの生じないような材料を要する。

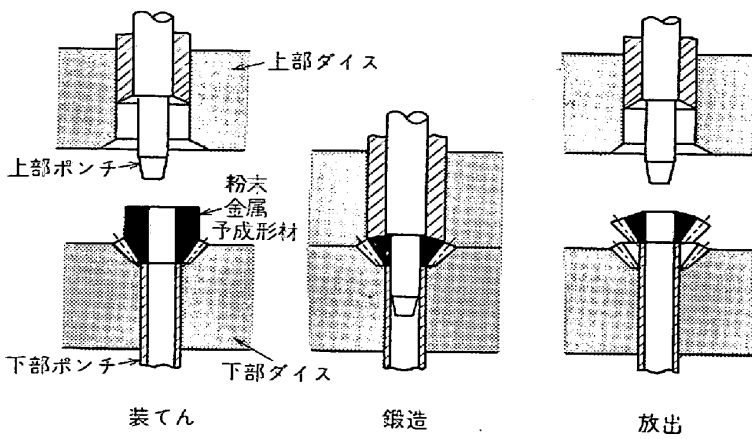


図9 ピニオン歯車鍛造工程

表6. 焼結鍛造と溶解材の比較

材 質	抗張力 kg/mm ²	伸 %	断面収縮 %
Mn-Mo 鋼	39	27	60
焼結鍛造	41	10	—
2Ni-Mo 鋼	33	20	8
焼結鍛造	34	23	38

焼結鍛造の事要点の1つは、素材重量をコントロールすることで、±0.5%の重量管理が望まれる。このことが鍛造によるバリの発生をなくすること、寸法精度を得る条件でもあるが、自動プレスでいかに粉末を精度よく金型に充てんするかは製造工程においては大きな問題である。従来の鍛造に見られる Dead Metal Zone は焼結鍛造の場合低密度 Zone となる。鍛造方法としてはハンマー、プレス共に使用されているが、最初に急激に圧力を加え、以後はゆつくりと高圧で押し込んでゆく方式がよいといわれる。図9に Ni-Mo 合金鋼よりピニオン歯車を得ときの鍛造工程の一例を示した。表6に焼結鍛造と一般鍛造との性質比較例を示した。

焼結鍛造と従来の製鋼—圧延、鍛造—貫方式（以下一般鍛造という）といずれが経済的に有利であるかは、焼結鍛造法は原料の粉末が高価であるが、製造工程は簡単

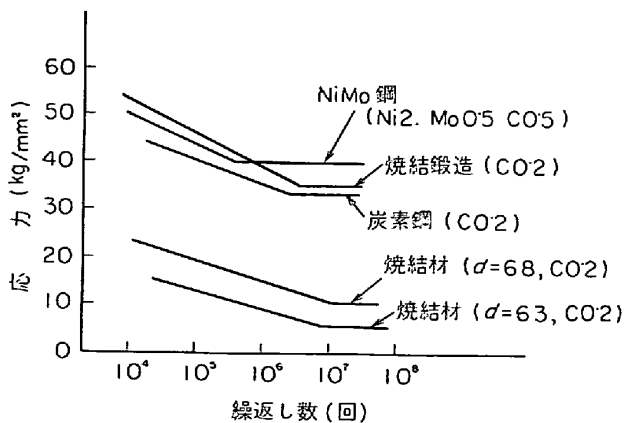


図10 焼結部品の疲労特性

で、材料歩留りが高いなどの有利な条件を基にして比較される。焼結鍛造法ではとくに金型設計および金型寿命、鍛造方法によって大きく左右されるであろう。

焼結鍛造材の適用としては自動車のミッション部門への試みが多く、将来も今までの粉末冶金法では得られなかった動力伝達部品への発展が大きく期待されている。

図10³⁾、11⁴⁾に焼結鍛造材の機械的性質を示した。

図12に成形形状を変えたときに生ずる組織の流れの状況を示した。シリンダー単純形のとときに組織の流れは大きい、ダイは最も摩耗する。一方製品の形状に近い成形体のときは組織の流れは少ないが真密度にすることは困難なようである。図12に示した鍛造の例で G.M. は一部分ベベルの preform を選んでいる。

焼結鍛造の場合でも、経済性よりすれば一般粉末冶金法で部品を製作するときと同じ考え方に立ちうる。現在は鍛造を目的とした高能率プレスの開発が要望される。

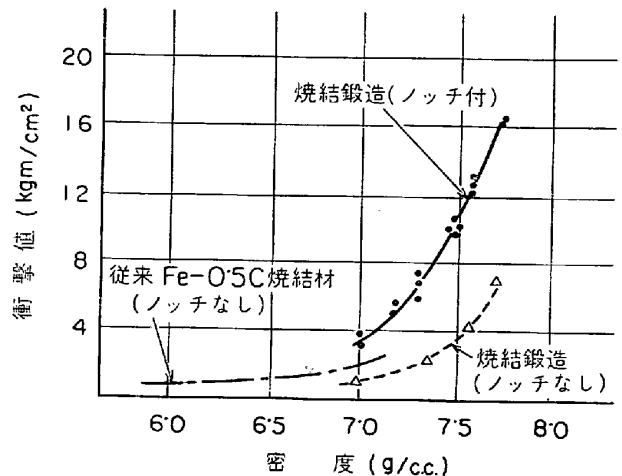


図11 焼結鍛造材の衝撃値と密度の関係 (Fe-0.5C)

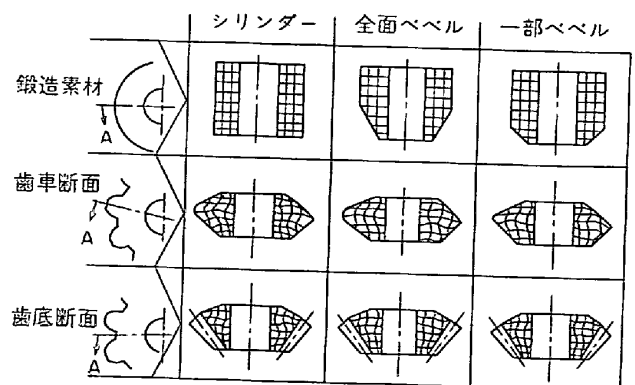


図12 粉末鍛造によりベベルギヤを製造したときの鍛造素材の形状とフローの関係(G.M)

2.4 アルミニウム焼結部品¹⁰⁾¹¹⁾

アルミ粉末から焼結部品を得る試みは、すでに数年前からなされている。含油軸受、あるいは軽量を目標として計算機部品、電気機器部品など電気伝導度、熱伝導度の高い性質を利用した部品に現在使用されているもの、日本においては大量の生産はまだ見られない。米国においては Al 材料メーカーが Al 粉末からかなりの品種の部品を生産しており、その生産量も増加しつつあるといわれている。

ミシン部品に使用された例では、従来部品として使用されていた黒鉄鋳物よりも対摩耗性にすぐれており、振動、騒音の少ないこと、また耐食性の良好など利点がある。軸受材として 3.0~4.0 Cu, 0.5~0.8 Mn, 2.5~2.8 Sn, 1.75~2.25 Pb, <0.15 Fe, <0.3 Al₂O₃ の Al 焼結軸受は青銅焼結軸受よりすぐれており PV 値 50 000 が得られている。

前に述べた焼結鍛造が Al 焼結部品にも適用できる。しかも陽極酸化法によつて耐食性を与えることができる。また、Al 合金焼結材は、熱処理によつて 10 kg/mm²~35 kg/mm² の抗張力が得られる。焼結に当たつては Al 粉末の表面酸化物が焼結を妨げるといわれ、確かに一般の焼結雰囲気では還元不可能である。しかし現在は、解決の鍵は、粉末表面を被覆している潤滑剤にあるといわれている。焼結に際しては炉の露点を -40~-60°F にすることが必要である。

以上のごとく焼結 Al の性質は原料粉末の表面性質、焼結雰囲気中の水分、酸素量によつて支配される。Al 焼結材が伸び悩んでいる原因は粉末製造、焼結技術の複雑さにあるのであろう。

3. 粉末冶金の新しい技術

ここ 2~3 年の間に粉末冶金技術の一つの大きな進歩として取り上げられた焼結鍛造も今日ではすでに一般常識にまで発展している。新しい技術と、これを経済的に実現するための装置の開発が常に伴いながら新しい材料が得られているので、今日の新しい技術が明日は古いものになつていくかもしれないが、現在開発段階にあると思われるもののいくつかを取り上げて見た。

最近、粉末冶金技術の進歩をもたらしたと思われる技術の幾つかはアトマイズ法による合金粉末の得られたことが要因となつている。アトマイズ粉末を使用して高速度鋼、耐熱耐摩耗合金などの開発研究が進められている。将来はアトマイズ粉末と、成形技術、焼結技術がともなつて新しい材料が得られるものと思う。

3.1 焼結高速度鋼

従来の高速度鋼製造方法では、溶解、鍛造、

圧延の工程を経て総合歩留り 50% 位といわれ、その組織も粒界に炭化物の析出、偏析などがあり、その製造にはかなりの熟練が必要とされている。

切削性能から見るといわゆる超硬工具といわれる炭化物工具と、高速度鋼の間に一つの間隙が認められる。焼結高速度鋼はこの間隙を埋める工具材料を得る目的をもつて、粉末冶金の特徴を利用し、歩留りの向上、品質の向上を期待して開発されたものである。

品質の向上については、一般鍛造法に比べて切削寿命が 2~5 倍あり、刃先研磨に際しては研磨砥石の消費も少なくさらに一般鍛造法による高速度鋼では得難い多量の炭化物、たとえば WC, Cr₃C₂, VC などの添加が可能であるという点にあり、その切削特性の向上は炭化物が均一にかつ微細に分布しうることによる。

Asea-Stora 法により製作された焼結高速度鋼と従来の一般鍛造法、高速度鋼のドリル切削のときの性能比較を図 13¹²⁾ に示した。

焼結高速度鋼の Asea Stora 社の製法を図 14 に示した。

高速度鋼溶解→Ar ガスアトマイズ→高速度鋼粉末→カプセルに粉末充てん→真空ガス抜き→冷間静水圧成形→熱間静水圧成形→高速度鋼鋼塊→鍛造、圧延→機械加工→工具

の工程を経ている。熱間静水圧成形には高圧ガスを使

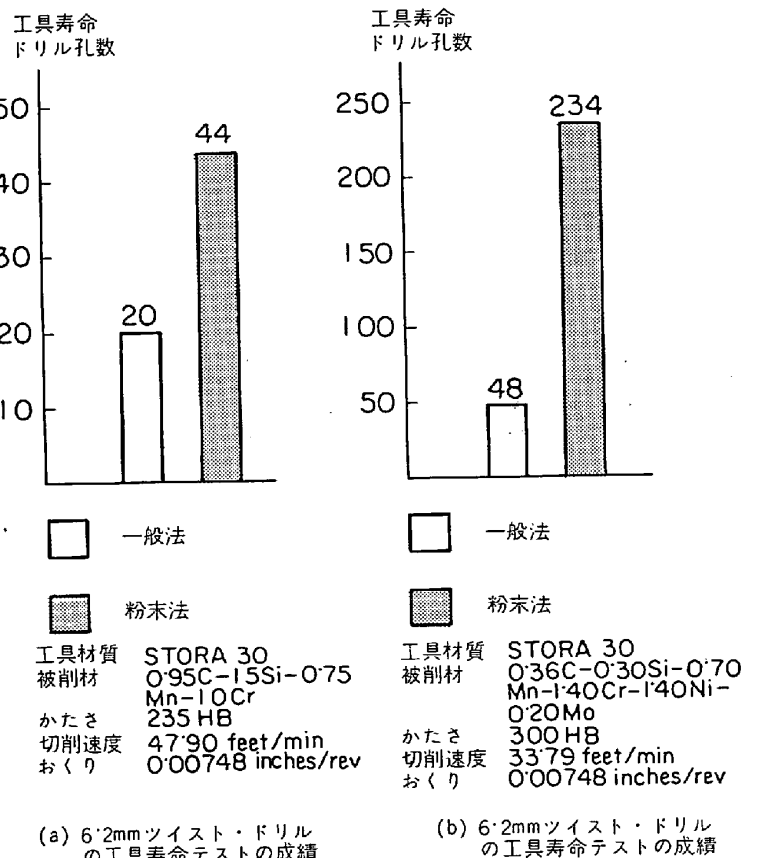


図13 焼結高速度鋼と溶解法による高速度鋼の切削性能比較

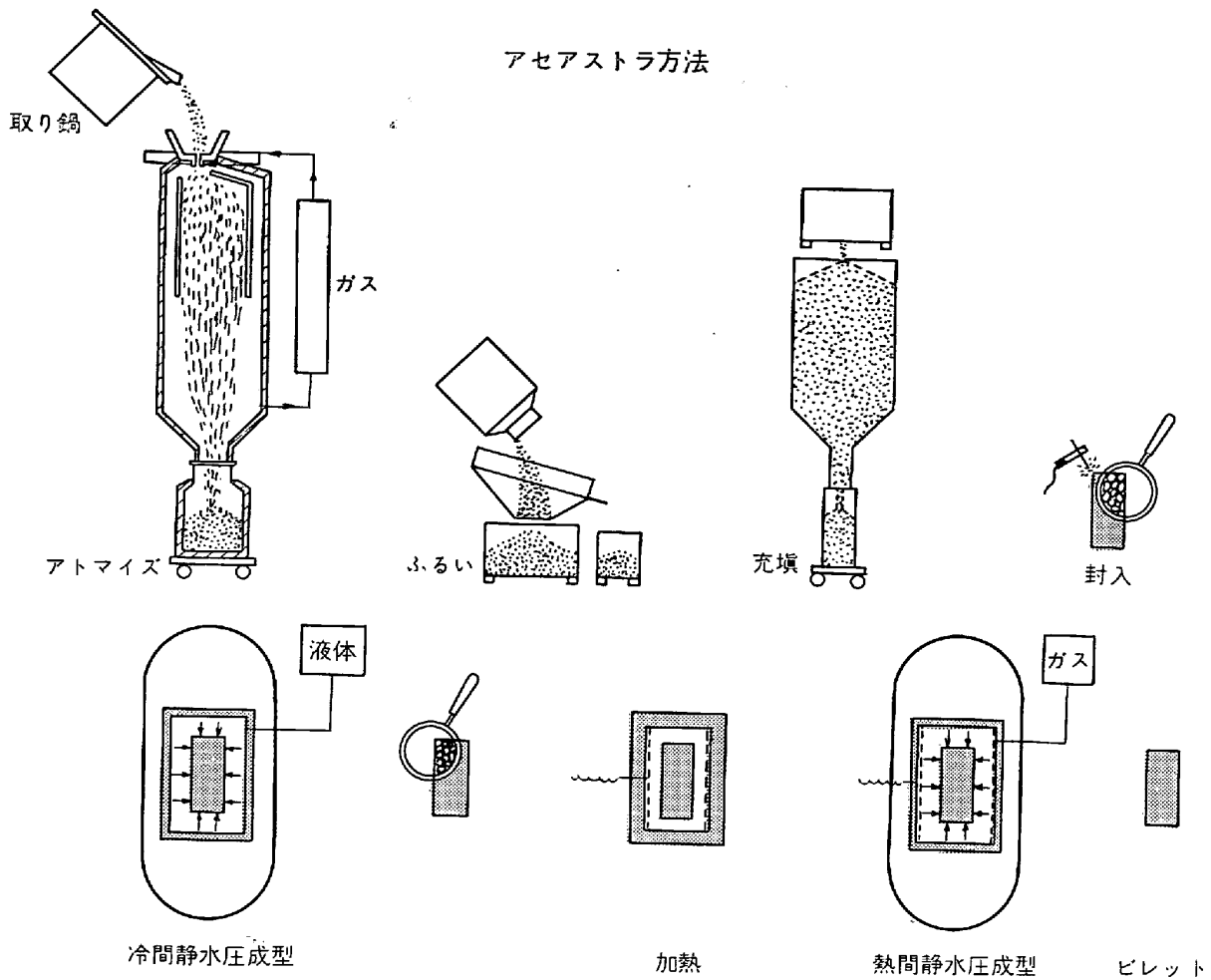


図14 粉末冶金法による高速度鋼の製造工程図

用している。なお高品質の材料を得るときは粉末の持つガスがなくなるまで真空炉中でガス抜きを行なう。

3.2 耐熱合金部品

一般に耐熱合金は偏析、不均一の組織を作りやすい。合金粉末から製作された耐熱合金はこれらの欠点なくなる。高速度鋼と同じように preform を熱間鍛造することによつてタービンエンジンのデスク、ハブ、スパーサーなどが製作できる。高温で使用される Ni 基耐熱合金はエンジン部品として多く利用されつつあるが、多成分であり、その製造工程も複雑で上記のごとく偏析、結晶粒の不均一など生じ易いために、製作歩留りはかなり低い。また組織感受性の範囲が広いために、安心して設計者により使用されにくい面がある。これら耐熱材料を粉末冶金法で製作すると偏析がなく、結晶粒も 1/2 位に小さく、加工性においても、再現性においても安心が持てる材料を得ることができる。米国において耐熱合金粉末は 1971 年に 25 t ~ 50 t になることが予想されている。Inconel 625, Inconel 718, Udimet 700, René 41, IN-100 などが粉末冶金法¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾によつて試作された。

一例として図15¹³⁾に耐熱合金粉末よりジェットエンジ

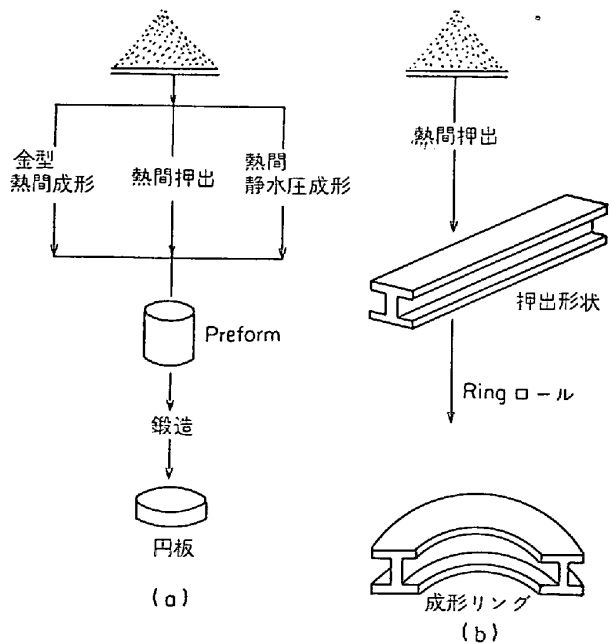
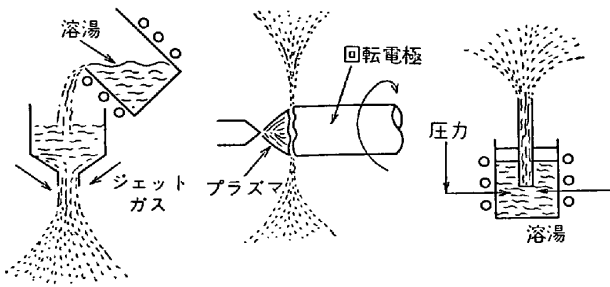


図15 (a)耐熱合金エンジンデスクの製法 (b)耐熱合金タービンリングの製法



(a) ガスアトマイズ (b) 回転電極法 (c) 溶解ガスアトマイズ法
図16 耐熱合金粉末を得る方法

ンデスクを製作する工程を図示した。

耐熱合金粉末より preform を得るには熱間静水圧縮、熱間金型圧縮、熱間押し出し法が用いられる。粉末より長手形状のものを得る方法として熱間押し出し法の発達が望まれる。

なおこれら耐熱合金粉末はできるだけ酸素量の少ないことが大切である。現在開発されつつある粉末製造法としては、前出の不活性ガスによる溶湯噴射法のほか、R.E.P. 法といわれる回転電極法 (Rotating Electrode Process), soluble gas atomization といわれる溶湯に多量溶解するガス、たとえば H_2 で加圧する法、またはプラズマアークによる球状合金粉末の製法などあり、特殊合金粉末を得るのに幾つかの方法が試みられている。図16に耐熱合金粉末を得る方法の概要を示した。

3.3 Ti 焼結部品

Ti 粉末冶金はごく最近に発達したもので、航空機用材料として Ti-6 Al-4V 合金の 6 角ナットが粉末冶金法で製作された。現在鑄造材と比較すると抗張力、伸、靱性においてまだ劣っているが、構造物以外には満足されている。焼結部品では製造工程が簡単だけに広く実用化されると考える。たとえば 1" の Ti 6 角ナットは溶解 Monel, 高 CrNi ステンレスと同じ位の価格で製作できるといわれる。

Ti 合金は耐食性、軽重量、耐荷重などすぐれた性質を持つているので、将来はオーステナイト銹鋼と対抗するようになるであろう。

成形法は金型成形に問題があり、静水圧成形が適している。Ti 焼結部品はこれからの問題である。

3.4 静水圧成形¹⁹⁾

圧力を均一に全面から与える方法として静水圧成形法がある。一般の成形法では不均一となりやすい複雑な成形体、直径に比べて高さの高い製品の成形に、また圧縮性の悪い粉末の成形、たとえば Al 部品、耐熱合金、Ti 管 Ti 鍛造の preform などの成形に有利である。

本成形法はセラミック、超硬工具などには広く使用されており、別に目新しいものでもないが、焼結鍛造が開発されるにつれて preform 成形法として使用されるよ

うになった。

静水圧成形法の欠点は、成形に当たってポンプ圧を上げるのに時間を要することである。したがって製造工程においては如何に早く静水圧が上げられるか、また自動化が可能であるかが問題点である。型式としては Wet bag 型と Dry bag 型があり、Wet bag は粉末を充てんしたラバー型を油中水中に浸して圧力を加え、Dry bag はそのラバー型をその周囲をとり囲む別のラバーを介して静水圧圧縮する方法である。図17¹⁸⁾に両方法を図示した。

成形圧は、普通金属粉を成形するときは 700 kg/cm^2 位で十分で、金型成形法に比して金型壁との摩擦がないために圧粉体の密度は均一となるが成形寸法精度は劣る。最近高速度鋼粉の成形に当たって高温にて行なうホットアイソスタテック法が理まれ、ラバーの代わりにガラス質、金属を用い、水の代わりに高温高压ガスを使用する。前記の Asea-Stora 方式はこれを応用している。

3.5 スリップ鑄造法²⁰⁾

スリップ鑄造法はセラミック工業ですでに一般的な成形法として用いられているが、粉末冶金では成形できない粉末部品を製造するときに用いられている。

中空かめ状のもの、管状のもの、またポンプブレード形状のように一般のプレス成形では得難いときに適当である。

スリップキャスト用の道具は安価なプラスターでよく、プレス機械、静水圧成形のような高価な設備は不要であるが、セラミックに見られるごとく、スリップされた金属粉末の充てん密度が低いので、焼結後かなりの収縮を起こす、また多量生産には不向きである。したがって数があまり多くなく、さらに複雑な形状のものには有利なときがある。

スリップキャストでは、収縮が大きいため、均一の収縮を得るためには、粉末粒度、形状、粒度分布、スリップ粘度、スリップ液の PH、などスリップキャストするときの条件、焼結時間、温度などかなり経験的な技術が必要である。

一例として EDWARD によると $33 \text{ mm}\phi$ の高さ 150 mm のスリップキャスト寸法のカーボニール鉄を H_2 中で $4 \text{ hr } 850^\circ\text{C}$ 焼結したときに、長さ 25 cm について 0.1 mm の寸法バラツキで焼結材が得られ、また同じ材料を 850°C , 16 hr 焼結したときの機械強度は、ほぼ鑄造鉄材に近い値が得られたという。

しかしスリップキャストは通常の粉末冶金技術に取って代わるものでないことは明らかである。

3.6 放電焼結²¹⁾²²⁾

Be, Ti 合金のように通常の粉末冶金法による焼結では得にくい材料に対し放電焼結法がある。本来は航空機用部品として Be の部品の焼結法として開発されたものであるが、現在は表面酸化をきらう材料の焼結法として

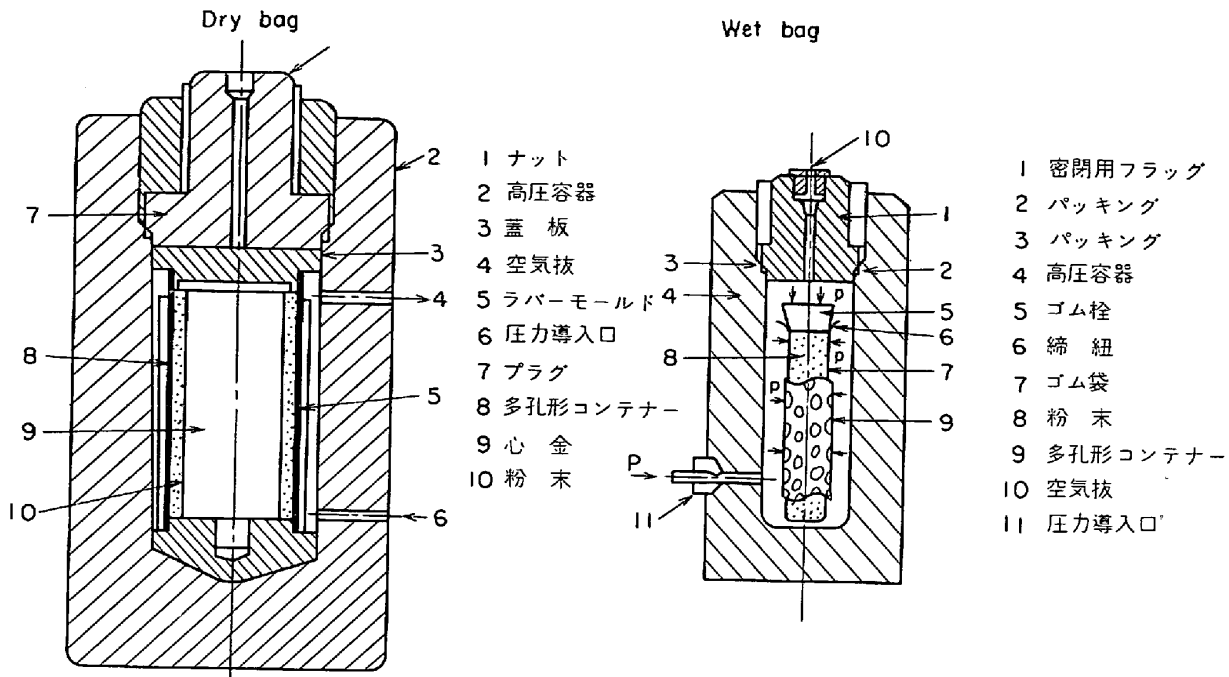


図17 ラバンプレス

開発がなされている。

放電焼結は熱間焼結の特殊な技術であり、交流と直流電流を焼結粉末に直接通し、また電気導体型であるときは金型も通電加熱して焼結を行なう方法である。加熱と同時に焼結材を回りから静水圧的に圧縮する。その際金属粉粒子間に放電が起こり、そのエネルギーによつて粒子表面が加熱され、拡散や焼結が起こる。加えられるACおよびDCの電圧、電流は焼結材料、大きさによつて異なるが焼結は数minで完了する。一般には25%ACと75%DCの割合で負荷される。

本法を工業的に成功したのはLockheedがミサイル用のBe部品を製作したのが最初である。その後TiN合金、AlN合金、CoおよびNi基耐熱合金、W、Mo、WCまたBe-Ti複合材料などの開発がなされた。

本法もスリップキャスト、静水圧焼結などと同じように普通の粉末冶金法による部品の製造法に比してとくにすぐれているものでもない。一般の焼結部品に本法を応用することは期待もできない。が普通の方法で得られるより高密度の部品を得たいときまたはpreformを得る方法としての応用は考えられる。

本法に使用される型は黒鉛が主体であるが、熱伝導の悪い外型に、薄い黒鉛を内側にはめ込むことによつて加熱効果を高くすることができる。

現在はFeで60kg、Beで15kgのものが30~45minで製作できる。表7²³⁾に代表的な放電焼結部品の性質を示した。

焼結鍛造の発達によつて、放電焼結にて得られたpreformの鍛造がTi合金で試みられた。Ti-6Al-4V材について鍛造による性質の向上を図18²⁴⁾に示した。

表7. 放電焼結部品の代表例

材 料	処理条件	抗張力 kg/mm ²	降伏点 kg/mm ²	伸 %
Be	雰囲気焼結	32	28	1.4
Ti	焼結	45	32	20
Ti-6Al-40	焼結、鍛造	120	110	15
Al	焼結	10	7	9
Inconel718	〃	80	70	7
Astroloy	焼結、鍛造	125	105	8

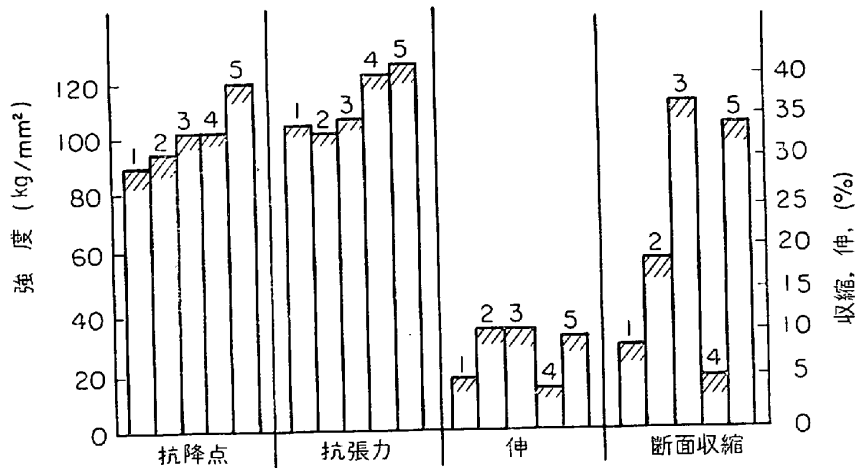
Beのごとき高価な材料では切削で見出された気孔の修理法として気孔に粉末をつめ放電焼結を行ない気孔を埋めたり、あるいは切削屑の再生に放電焼結法が利用できることは非常に興味のあるところであろう。

3.7 高エネルギー加工、静水圧押出

焼結部品の高密度化の手段として、粉末冶金技術と塑性加工技術のむすびつきが一層発達するものと思われる。塑性加工の方式として、注目されているものに高エネルギー鍛造と静水圧押し出し法がある。

高エネルギー鍛造として高圧ガスの膨張エネルギーによつて高速鍛造を行なうダイナパックといわれる方法がある。粉末鍛造に際して密度の低い焼結preformをダイナパック法によつて製品形状に鍛造する研究開発もなされているが、製造工程としてはまだ現われてはいないようである。

静水圧押し出しは溶解材の静水圧高圧押し出しとして発達したものであるが、本法を粉末冶金製品を得るのに応用する試みがなされつつある。長手の材料、異形状の押し出しへの利用が予想される。図19に静水圧押し出しの概略を示した。



- 1.....放電焼結のみ
- 2.....放電焼結, 550°C-2 hr 焼鈍, 空冷
- 3.....放電焼結, 75% に鍛造, 550°C-2 hr 焼鈍, 空冷
- 4.....放電焼結, 1070°C-1 hr 溶体化処理, 水冷, 450°C-8 hr-空冷
- 5.....放電焼結, 75% に鍛造, 1070°C, 1 hr 溶体化, 処理, 水冷, 450°C-8 hr 空冷

図18 放電焼結 Ti-6Al-4V の鍛造性質

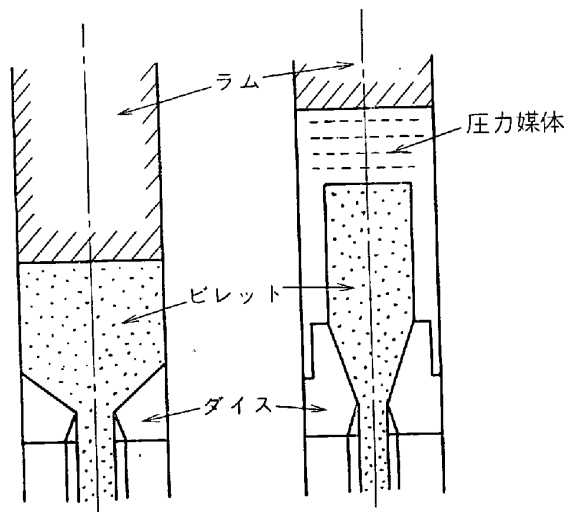


図19 静水圧押出

3.8 粉末圧延, 分散系焼結その他

金属粉末より直接圧延を行ない薄板を得る粉末圧延法がある。一般の溶解法により薄板を得る方法に比べて、粉末圧延法は設備投資も非常に少なく、設備の占める面積も少ない利点を持っている。しかし原料粉末の価格の高いこと、常に幅の一定の板しか得難い点に問題がある。

現在の加工設備能力が不足となり、さらに用途のきまつた薄板を必要とするときには有利な方法といえる。本文の初めに自動車の 50% は粉末冶金法でできると述べたのも、粉末圧延法により車体用鉄板の製作が安価にできるとすればの条件がある。原料鉄粉末が現在の価格の半以下になれば粉末圧延による鉄板が経済的に成立するともいわれている。原料鉄粉で焼結鍛造に適しているのがアトマイズ粉末であるので、溶湯を持つ

ている製鉄工場で、溶湯より直接噴射法粉末製で鉄を造ることが最も経済的であろう。

最近アトマイズ法によつて Al 粉末を製造する報告がある。鉄板の表面に Al 粉を被覆させ、耐食性のすぐれた Al 被覆鉄板の出現も近いことであろうといわれている。粉末圧延と粉末による表面被覆とのコンビネーションが現われないとはいえない。

粉末圧延法によつて高純度 Ni 板, Cu 板, バイメタル板, などは古くから製作されているが, 高融点金属 W, Mo 板なども本法で製造可能である。しかし現在では未だ工業的スケールで製作されるものはないようである。

S.A.P. という名で一時間問題となつた Al_2O_3 分散系焼結 Al はその後用途を開発しえないで現在にいたつている。Ni に ThO_2 を分散した T.D ニッケル, さらに高温における強度を目的として T.D ニッケルクロームも現われたが S.A.P. にしろ, T.D ニッケルにしろ押し出し加工を必要とする。大容量の押し出し装置の開発を待つて再び用途が開けてくるであろう。しかし高価な材料であるだけに航空機関係への分野が主体になるであろう。

粉末圧延にしても, 分散系焼結材にしても, 溶解法では得られない特徴を持ちうるので, 耐熱材料, 高温で強度を必要とする材料の開発と共に装置開発が望まれる。

F.R.M. で呼ばれる繊維強化金属材料も, 粉末冶金技術とし強化繊維の組み合わせによつて可能となるであろうが, まだ研究段階にあり, 一般化するにはまだしの感がある。

粉末冶金の現状を, 最大の需要を示す鉄を中心に述べたが, 粉末冶金分野のなかで磁性材料, 超硬工具材料は従来から大きな分野である。

磁性材料のなかで粉末冶金技術による材料としては磁

気特性のすぐれた焼結磁石、酸化物磁石がすでに開発されている。磁気特性の非常にすぐれた高価な材料が現われる一方、非常に大衆化されたバリウム磁石にしても磁気特性の高いものが多量に製造されるようになった。とくに超微粉末稀元素磁石の世界が今後に残された問題であろう。

超硬工具にしても、現在の切削特性の幅を広くする努力が常になされている。近頃話題となった超微細炭化物による切削特性の向上、また WC 切削工具表面に TiC を被覆するなど地道な努力が重ねられている。数年前話題となった TiC 基工具も、添加物の種類、TiC 粉末の検討などによつて、切削工具の一分野としての役割を持ちつつある。

4. 終わりに

粉末冶金技術は何であれ粉末を基とした冶金技術である。“氏より育ち”と昔からいわれているが、粉末冶金に関しては“育ちより氏”である。よい原料粉末を得る努力が、よい製品をいかに容易に得る道であるかという点を粉末冶金製造に従っている人達は身にしみている。

焼結鍛造技術の開発と共に、原料粉末として成形性のよい粉末がアトマイズ法によつて得られたことが、鍛造品の開発を大きく進めた。焼結鍛造法が粉末冶金技術のなかで、最近のヒットであるといわれており、今しばらくは鍛造法により製品が増加すると思われる。

焼結鍛造材が工業的スケールで増加するには、経済的な鍛造装置の開発が必要であるが、プレスメーカーによつて試作がなされているので、その解決は近いものと思う。

成形または鍛造に高エネルギーによる加工方法が見出されてはいるものの、特殊材料以外にはまだ使用されない。材料に応じて加工方法が選ばれている現状である。

輸送部門への焼結機械部品の応用は、焼結鍛造により普通溶解法よりの材料と同程度の機械的性質が得られるようになったので、動力伝導部へ広がっていくであろうし、この分野への進出がまた粉末冶金製品の使用量増大への道でもある。

今一つの面は鑄造法では偏析、不均一組織などのために良品の材料を得るに苦心してきた耐熱合金に粉末冶金法が適用されつつあることである。耐熱合金粉末製造技術の開発が、また耐熱合金材へ粉末冶金技術の進出を可能にした。

粉末冶金製品が精密鑄造、精密鍛造製品の分野と競合するものが出てきている今日では、いずれが経済的に有

利に製作できるかが評価される時代がくるであろう。

将来の材料として複合材料が大きく発展するであろうといわれている。金属とセラミック、金属とプラスチック、のごとき異種材料の複合も粉末冶金技術により得られるものが多い。

自動車用焼結部品のごとく、多量をできるだけ安価に製作する技術の発達と、特殊な性質が要求される高価な粉末冶金製品との2つの大きな流れに分かれて粉末冶金の分野を広めていくであろう。前者の場合にとくに注意すべきことは、製品使用者側と製作者側とが十分な連繋を持つことである。このことが製作側、使用側双方にとつて利益となる。よく了解していながらなかなか実行し難いことである。

文 献

- 1) 4) 武谷, 早坂: 粉体および粉末冶金, 16(1969) p. 90
- 2) Machinery production Eng., 117(1970), p. 668
- 3) 三菱金属カタログ, ダイヤメット F.S.
- 5) Staff Report, Application Outlook for Forging P/M Preforms, Metal Progress, April (1971), p. 58
- 6) 同 上 " " p. 54
- 7) 中野, 湯河: 鑄鍛造, 46年3月別刷
- 8) 浅村, 田中: 金属, (1961)1, p. 15
- 9) R. KHOL: Machine Design, April (1969), p. 142
- 10) Alcoa カタログ Improved Sintering, Procedures for Al P/M Parts.
- 11) P. E. MAFFHEWS: International J. of Powder Metallurgy, 4(4) (1968), p. 39
- 12) Per HELIMAN: The Chemical Journal, Feb-march (1971), p. 6
- 13) A. BUFFERD: Metal Progress, April (1971), p. 70
- 14) N. M. PARIKH: Plansee Seminer, 6, p. 500
- 15) J. F. STRACHAN: " " p. 539
- 16) S. H. REIHMAN: S.A.E. No. 700/40
- 17) G. FRIELMAN: Proceeding, Powder Metallurgy, 25(1969), p. 3
- 18) 浜田, 福田: 神戸製鋼技報, (1969年), 1月
- 19) E. D. WEISERT: Metal Progress, April (1971), p. 71
- 20) E. L. THELLMANN: Precision Metal, May, (1971), p. 4
- 21) 斎藤, 沢岡: 金属学会: 10(1971) 4, p. 241
- 22) R. W. BAESEL: Metal Progress, April (1971), p. 74,
- 23) " " p. 75