

Recent Trends in Iron Powder for Powder Metallurgy



森岡 恭昭
Yasuaki Morioka
鉄鋼技術本部 鋼材技術部 主査(部長)・工博

1 はじめに

当社は、1966年に還元鉄粉の一貫製造工程を千葉製鉄所内に設置し、鉄粉の製造および市販を開始した。以後、品質の優れた鉄粉の製造と安定供給を目指し、各種鉄粉製造技術の開発および製造設備の新設、拡張を行ってきた。1978年にアトマイズ鉄粉製造設備を新設し、還元鉄粉とアトマイズ鉄粉2本立てによる鉄粉総合メーカーとしての地位を確立した。今回、鉄粉小特集号の発刊にあたり、当社の鉄粉製品の紹介も含め日本および世界における粉末冶金用鉄粉の市場動向を概説する。

2 粉末冶金用鉄粉の市場

2.1 鉄粉の需要

最近の国内鉄粉出荷量を Fig. 1 に示す¹⁾。過去10年以上平均伸び率が約10%の伸びを示してきた。1982年のオイルショック、1985年の円高不況のため一時停滞したが、とくに1986年からふたたび大きく伸びた。1990年には粉末冶金用だけでその出荷量が年間10万tを超えたが、1991年度においては自動車産業の停滞によってその伸びがとまっている。

鉄粉総需要に占める粉末冶金用鉄粉の比率は高く、そのなかでも機械部品が約90%で圧倒的に多い。需要の多い機械部品のなかでもさらにその80%強が自動車など輸送機械用で占められている。

つぎに、低合金鋼粉、高合金粉の伸びを鉄粉と一緒に Fig. 1 に示す。低合金鋼粉の数量は、当社の推定値であるが、10年近く前から市販され、現在月1000t近くの使用量に達している。その内訳は、約80%がNi-Cu-Mo系部分合金化粉で、残りはNi-Mo系予合金鋼粉とCr系真空還元粉などからなる。一方、高合金粉はおもにステンレス鋼粉、高速度鋼粉からなる。このなかには一部超合

要旨

粉末冶金用鉄粉の動向、とくに日本における鉄粉の需要、世界の主要鉄粉メーカーの鉄粉製造設備と能力、過去40年における粉末冶金技術および鉄粉製造技術の進歩などを概説した。また、当社が最近開発した“KIP”鉄粉製品、とくに高圧縮性アトマイズ鉄粉、成形性を改善したアトマイズ鉄粉、黒鉛の偏析を防止した無偏析鉄粉、高強度焼結部品用低合金鋼粉を紹介した。さらに、最近の高強度焼結材料の強度レベル、アトマイズ鉄粉の製造技術、アトマイゼーションのメカニズムを述べた。

Synopsis:

Recent trends in iron powder for powder metallurgy, especially the consumption of iron powder in Japan, manufacturing equipment and capacity of iron powder manufacturers in the world, and progress in powder metallurgy technology and iron powder manufacturing techniques in the past forty years, are outlined.

The newly developed “KIP” (Kawasaki Steel iron powder) products, particularly high compressibility atomized iron powder, good compactibility atomized iron powder, no-segregation iron powder which prevents the segregation of graphite powder, and low alloy steel powders for high strength sintered parts, are introduced. The recent level of strength obtainable with high strength sintered materials, and atomization techniques and mechanisms, are also described herein.

金粉なども含まれているがその伸びも大きい^{2),3)}。なお、鉄粉の出荷量には、低合金鋼粉は含むが、これら高合金粉系は含まれていない。

一般に、鉄粉から作られる粉末冶金製品は、他の加工法に比較して、経済的な有利性のほかに耐熱・耐摩耗性に優れ、摺動時のノイズが少ない、軽量化が可能など粉末冶金独自の性質を兼ねそなえていると言われている。このような特徴を生かして今まで大きな伸びを示してきたが、今後は、焼結機械部品の高強度化および高品質化への要求に応えるため、各種の合金鋼粉の需要が高まっていくと考えられる。

2.2 鉄粉メーカーの最近の動向

Table 1 に粉末冶金および鉄粉に関するここ約40年の歴史と最近の動向を示す。表中に当社での鉄粉製造設備の建設状況を同時に示した。粉末冶金は1950年あたりから本格的に始まり、1950年代はショックアブソーバなどの小形部品が中心で、鉄粉は成形性に優れた還元鉄粉がほとんどであった。1960~1970年に大形部品の製造が始まり、これにともなってアトマイズ鉄粉が台頭してきた。最近では、高強度部品、高機能性材料への展開へ移行してきており、これにともなって各種の合金鋼粉および偏析を防止した無偏析鉄粉な

* 平成4年6月8日原稿受付

Table 1 History of powder metallurgy and Kawasaki Steel iron powder (KIP)

Year	1950~	1960~	1970~	1980~	1990~
The trend of PM parts	Small size (Compactibility)	Large size (Compressibility)	Composite Joining For exhaust gas	High strength High density	Functional High precision
Strength level	Cast iron	High strength cast iron	---	Carbon steel	Carbon steel Special steel
Example of PM parts	Shock absorber Ball joint Door striking Bearing	Timing belt pulley Synchronized hub Sprocket Clutch plate	Valve guide Valve seat Rocker arm Tappet	Power steering pump (cam ring, rotor) Connecting rod Clutch race	Planetary gear carrier Camshaft cam Cylinder High strength gear
The trend of iron powder	Reduced (sponge) iron powder		Atomized iron powder, Alloy steel powder Partially alloyed powder, No segregation powder		
Kawasaki Steel iron powder (equipment)	---	1966 Reduced Iron Powder Plant (500 t/month)	1972 No. 2 tunnel kiln (1300 t/month) 1978 Atomized Iron Powder Plant (2000 t/month)	1984 Vac. de-oxidation furnace 1986 No. 7 finish-reduction furnace (3750 t/month) 1989 No segregation iron powder (1000 t/month)	1991 No. 2 Vacuum de-oxidation (200 t/month)

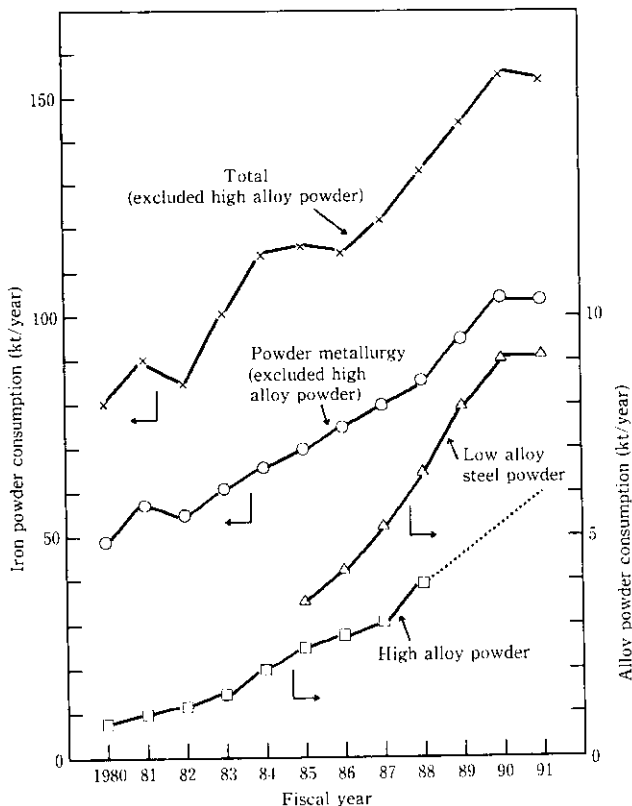


Fig. 1 Consumption of iron and alloy steel powder in Japan^{1,2,3)}

どが開発され始めた。

当社では、前述したように1966年に粗還元炉（トンネル炉）一仕上還元による一貫製造工程ラインを建設し、鉄粉の製造および市販を開始した。1978年に当社独自の開発によるアトマイズ鉄粉の製

造、以後各設備の増強を繰り返したのち、1986年にNo. 7仕上還元炉（3000 t/月）の建設が行われた。また、最近の高強度化、高品質化傾向に対応して、真空還元鋼粉製造ラインおよび無偏析鉄粉KIPクリーンミックスの製造ラインが建設された。

Table 2に、世界のおもな鉄粉メーカーの最近の動向を示す⁴⁾。表中に製造法、設備能力、最近発表された新製品などを示す。とくに目立った動向としては、スウェーデンヘガネス社における水アトマイズ法による新鉄粉工場の稼働（1992年、能力20万t/年）、国内では川崎製鉄での製造設備増強、⁵⁾神戸製鋼所の水アトマイズ法による新鉄粉工場の稼働（1992年、能力7.2万t/年）などであろう。

このほか、表に示したように黒鉛、潤滑剤の偏析を防止した無偏析鉄粉および高強度部品用部分合金化粉の製造ラインをここ数年各社で新設しているのが目立つ。表中の鉄粉メーカーの製造能力を製造法別に集計すると、アトマイズ鉄粉が75.1万t/年、還元鉄粉が33.3万t/年になる。従来、実際の出荷量は還元鉄粉のほうが圧倒的に多かったが、最近ではアトマイズ鉄粉の伸びが大きく、国内でもアトマイズ鉄粉の使用比率が50%に達している。

3 粉末冶金用鉄粉の製造技術

3.1 アトマイズ鉄粉製造法

粉末冶金用鉄粉の製造法は著者⁵⁾ほかによって紹介されているので参照されたい。ここでは、最近とくに話題の多いアトマイズ鉄粉の製造法について、ここ数年間に発表された文献を中心に紹介する。

Table 3に最近発表された各種のアトマイズ鉄粉製造法を示す。引用した文献⁶⁻³⁵⁾を表中に示した。一般に水アトマイズ法が工業的にも広く採用されている。水アトマイズ法は、溶解した金属をタンデッシュの下部にある小孔より流出させ、この溶湯流に対して水を吹きつけて粉末を作る方法である。使用する高圧ポンプの圧力がとくに50 MPa以上の場合を高圧水アトマイズ法とよび、約10 μm

Table 2 Iron powder manufacturers in the world¹⁾

Country	Manufacturers	Process ^{a)}	Capacity (t/year)	Equipment (start-up)	New products	
U.S.A.	Hoeganaes Corp. (Riverton) (Gallatin) (Milton)	OR	70 000	—	High strength: Distaloy 4600A, 4800A High strength: Ancorsteel 85 HP High hardness: ASTALOY Mo No segregation: Ancor Bond	
		WA	70 000	EF 30, 45 t		
		WA	48 000	EF 60 t (1981)		
	Pyron (Niagara Falls)	Pre-mix	36 000	(1988, 11)	—	Compactibility: Pyron D-63 Compressibility: Pyronized 2067
		MR	20 000	—		
		WA	22 000	—		
	Kobelco Metal Powders (Seymour)	WA	24 000	EF 20 t (1989, 7)	Low inclusions: 300ME Compressibility: 300MC	
Canada	Quebec Metal Powders Ltd. (Tracy, Sorel)	WA	37 000	—	Powder forging: 1001 PF Compressibility: 1001 HP	
		WA	56 000	56MT Converter (1987, 12)		
	Domfer Metal Powders Ltd. (Montreal)	WA	25 000	H.F.F. 14 t	Machinability: MP37 & 36S	
Sweden	Höganäs (Höganäs) (Bohus) (Halmstad)	OR	160 000	Tunnel kiln×3	High strength: Distaloy AE & AG Compressibility: ABC100-30 No segregation: STAR-MIX	
		WA	36 000	For Distaloy (1990)		
		WA	200 000	(1992)		
		Pre-mix	48 000	—		
CIS	Krasnij-Sulin	WA	80 000	EF 25 t×2 (1986)	—	
Germany	Mannesmann Demag (Möchengladbach)	WA	35 000	—	Compactibility: WPL-X 200	
China	Wuhan Iron & Steel (Hubei) Anshan Iron & Steel (Liaoning)	MR	10 000	—	—	
		WA	12 000	(1986)	—	
Japan	Kawasaki Steel Corp. (Chiba)	MR	30 000	No. 2 Vac. R.F. 2400 t/year	No segregation: KIP Clean Mix	
		WA	54 000	No. 7 F.R.F. 45000 t/year	High strength: KIP SIGMALOY	
	Kobe Steel, Ltd. (Takasago)	WA	72 000	EF 30 t (1992)	Compressibility: Atomel 300 NH No segregation: Atomel Seguresu	
	Dowa Mining Co. Ltd. (Okayama)	OR	31 000	Tunnel kiln×2	Compactibility: DNC	
	Powdertech Co. Ltd. (Chiba)	OR	12 000	Tunnel kiln×1	Compactibility: TNC	

^{a)} OR: Ore reduced MR: Millscale reduced WA: Water atomization

以下の微粉の製造に適している。

噴霧媒として水の代りにガスを用いるのがガスアトマイズ法である。水アトマイズ法に比較して酸素量の低い粉末が得られるが、冷却速度が遅いため粒子形状は球状になりやすい。ガスジェットの速度によって、亜音速域と超音速域（マッハ2～3）に分けられ、またノズルによって溶湯を自由落下させる free fall type と溶湯の落下をコントロールした confined type に区別されている。後者の confined type では、溶湯管の内圧をガスジェットの周囲雰囲気に対して負圧にし、溶湯を吸引して強制落下させ粒径の細かい粉末を得ている¹⁴⁾。

また、アルゴンや窒素などの液化ガスを利用する方法は液化ガスアトマイズ法と言われている。本法の目的は、高純度鉄粉の製造、冷却速度の向上にあり、生成粉末は液化ガスを蒸発させて回収する^{20,21)}。

さらに、噴霧媒として油を使用するのが油アトマイズ法である。水とガスアトマイズの両法の欠点を解消でき、成形性の良い不規則

形状と酸素量の低い粉末が同時に得られる^{22,23)}。

低酸素の粉末を得る目的としては、真空中で溶解後真空タンク中へ直接アトマイズする真空アトマイズ法がある²⁴⁾。過飽和に固溶したガスが真空中で膨張し、粒化が促進される。また、溶湯ノズル先端からジェットの粉化域直上までの長さのさや（吸引管）を取付けて、減圧化とジェットの安定化をはかっている²⁵⁾。粉末粒子形状は、冷却速度が遅いため球状になりやすい。

アトマイズ時の粉化効率を増大させる種々の手段がとられている。噴霧時に超音波を作用させ溶融金属の微粒化を促進するのが超音波アトマイズ法である。縞モード振動板から放射される音波を反射板を用いて集束させアトマイズする方法も発表されている。液面にウエーブができ、キャビテーションが圧壊されて粉末化する^{26,27)}。また、電磁力を利用して粉末化を促進する電磁アトマイズ法がある。電極間で発生するアーク電流に対して垂直に磁場を印加し、溶融金属に電磁力を発生させ液滴の飛散を促進させる²⁸⁻³⁰⁾。固定電極（カソード）に対し被粉砕体の回転消耗電極（アノード）を置

Table 3 Manufacturing processes for atomized powders (by recently published literature)

Process	Content	Powder	Reference
Water atomization	Pressure \div 5~20 MPa	Relatively irregular in shape High surface oxygen contents	5~7)
High pressure water atomization	Pressure: 50~100 MPa	Fine particle size $< 10 \mu\text{m}$	8~10)
Gas atomization (N_2 , Ar or air) (liquid inert gas)	Pressure \div 1~5 MPa Free-fall type, confined type	Spherical Low surface oxygen contents High purity	11~19) 20, 21)
Oil atomization	Using of oil in place of water or gas	Relatively irregular	22, 23)
Vacuum atomization	Molten metal supersaturated with gas under pressure is suddenly exposed to vacuum	Spherical High purity, clean	24, 25)
Ultrasonic atomization	Impinging of wave ($6\sim 12 \times 10^4$ cps) on the liquid metal stream	Spherical Narrow size range	26, 27)
Electromagnetic atomization	Impinging of magnetic field on molten metal in using plasma arc discharge	For high melting point metals High purity	28~30)
Rotating electrode process (REP or PREP)	The end of a metal bar is rotated about its longitudinal axis, melted and centrifugally ejected	Spherical High purity, ultra clean	31~33)
Rotating disk atomization (centrifugal atomization)	Impinging of a molten metal stream onto the surface of a rapidly spinning disk	Spherical, flake High purity	34, 35)

き、高速で回転して粉末化する方法は回転電極アトマイズ法 (REP 法, PREP 法) と呼ばれている。

以上のほかに、溶湯を機械的に粉碎する方法がテストされている。アトマイズされた溶湯を高速で回転 (3000~10000 rpm) する円板あるいは円板に取付けたブレードにあてる衝撃アトマイズ法である³⁴⁾。この方法によれば、溶湯の凝固過程と粉碎化の過程がはっきり区別できると言われている³⁵⁾。

3.2 アトマイズ鉄粉製造因子の影響

Fig. 2 に水アトマイズの簡略化したモデル図を、Fig. 3 にアトマイズ鉄粉の粉体特性などにおよぼす製造因子をそれぞれ示す。また、製造因子の影響について発表されている文献を図中に示した^{36~37)}。ガスアトマイズの例も含めて記述してある。各因子の影響についての詳細は省略するが、微粒化に対しては、噴霧媒の圧力、噴霧角度、溶鋼成分、アトマイズ温度などが、粒子形状に対しては、圧力、流量、噴霧媒と溶鋼との比が大きな影響をおよぼすが、ノズル形式すなわちスプレーフォームも大切な一因である。工業的に広く採用されている Cone タイプ (環帯式) と V タイプ (V 型ジェット) との比較が詳細に行われている³⁾。また、ガスアトマイズ法において、ガスジェットを回転させ、ジェット内部での大きな吸引力を発生させ微粒化を促進している例などがある¹³⁾。溶湯側の条件としては、流量、成分 (粘性、表面張力)、温度などの影響が大きい。溶湯物性の影響も大きく、スーパーヒート (160~470°C) によって粒子径は小さく、また、球状化に効果がある^{52~54)}。

このほか、噴霧部近傍での雰囲気圧力の実測定³⁸⁾ やアトマイズ時のオンラインでのセンサーの紹介や開発が行われており³⁹⁾、品質の向上のためにこれらの試みが今後寄与してくるであろう。

3.3 微粒化メカニズム

アトマイズ法による微粒化機構については、いままで多数論じられてきているので最近の動向を紹介する。代表的な例をモデル図で

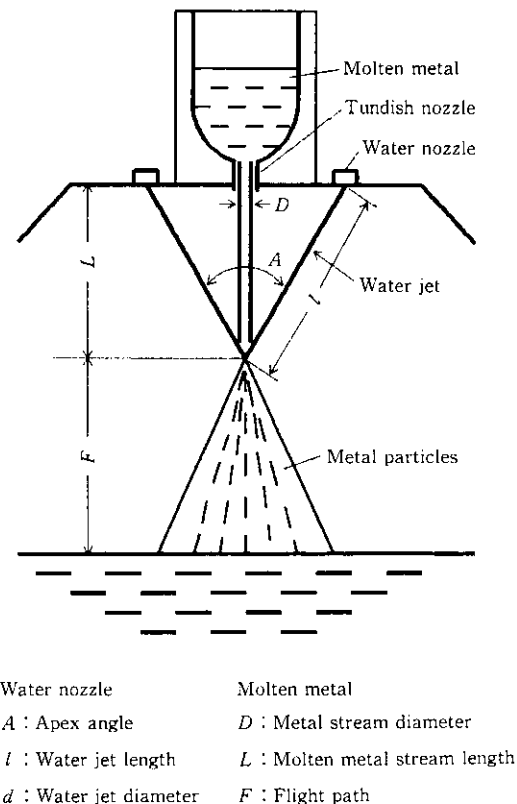


Fig. 2 Configuration of water atomization⁷⁾

Fig. 4 に示す^{6, 69)}。前述したように溶湯ノズルには confined type と free fall type がある。溶湯はまず帯状などの破片 (ligament, fragment) に分散される。溶湯が噴霧媒に接触する前にアクチュエーターで変位を積極的に与え単一の分散粒子にする考え方もある⁷⁰⁾。

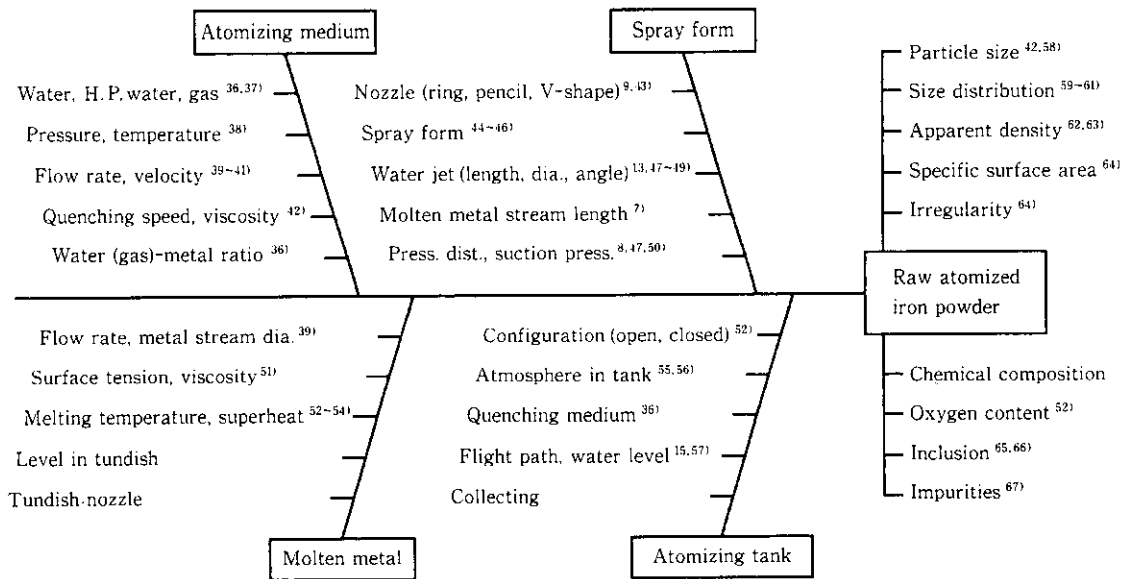


Fig. 3 Effect of water atomization parameters on powder properties

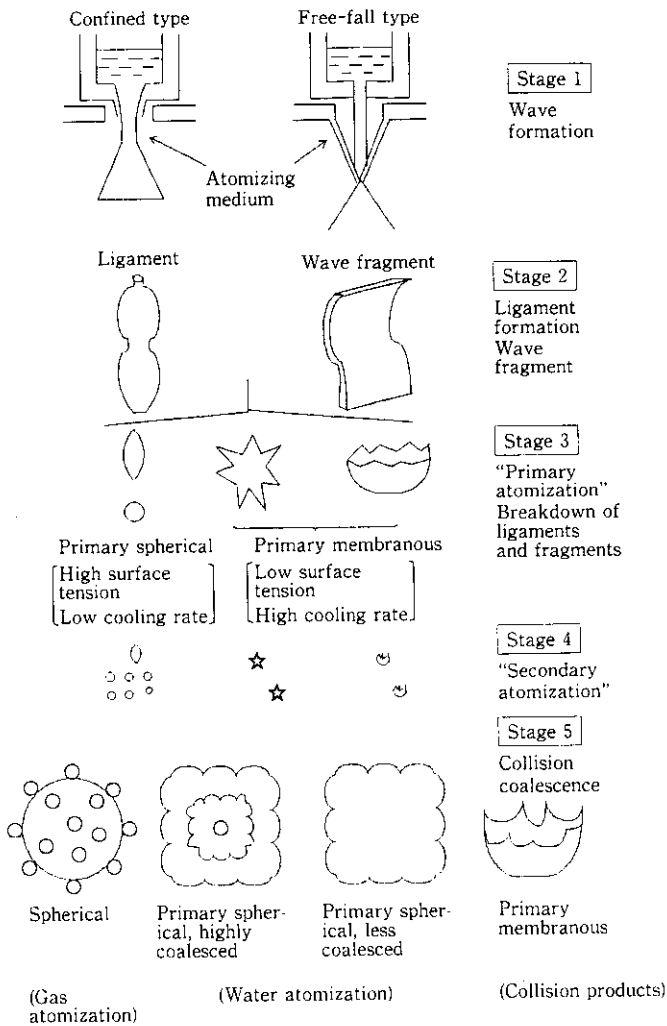


Fig. 4 Schematic illustration of particle formation stages during atomization⁹⁾

分断された溶湯は、アトマイズ条件によって異なるが、球状、不規則状、球状粒子の割れた形状などに粒化される。この過程は、第1

次のアトマイゼーション過程である。さらに第2次のアトマイゼーション過程で微粒化され、最終段階として粒子と回収容器壁との衝突、粒子同志の衝突、凝集などが起こり、粉末粒子の最終形状が決定される。以前は、アトマイズ時前半での条件のみによって、粒度および粒子形状のコントロールが行われていたが、最近では後半の過程で行われる粒子同志の凝集程度をコントロールするようになってきた。アトマイズ条件によっても異なるが、1次粒子が衝突して2次粒子を形成する割合は全体の約1/3とも言われておりかなり大きな割合を示す。なお、Fig. 4ではアトマイズの過程を5段階で示してあるが、第2と第3(第4)、第5の3段階で示されている例もある。

最近、生成したアトマイズ粒子の3次元での形状解析が行われている。粒子形状および形状分布、分散状態などの定量化²²⁾、統計処理による粒度-形状の分散図の作成などが行われている⁷¹⁾。また、走査型電顕および高速画像処理装置による画像の濃度レベルからアトマイズ鉄粉の3次元画像の構築を行っている⁷¹⁾。微粒化メカニズムの解明と生成粒子の形状解析は、今後の高品質、高精度の鉄粉製造のためにぜひ必要なことであろう。

4 粉末冶金用鉄粉および合金鋼粉

4.1 純鉄粉

4.1.1 高圧縮性鉄粉

Fig. 5に、ヘガネス社⁷²⁾および当社で市販している各種鉄粉の圧縮性と歴史的な推移を示す。還元鉄粉 MH 100・24、NC 100・24 および高密度用鉄粉 SC 100・26において、介在物と不純物の除去によって圧縮性が大幅に改善されてきているのがわかる。一方、アトマイズ鉄粉においても低介在物、高純度化、粉体特性のコントロールによって圧縮性は向上し、ヘガネス社の ABC 100・30 および当社の KIP 304 AS は世界で最高の圧縮性を示している。

Table 4に、当社高圧縮性鉄粉 304 AS およびケベック社高圧縮性鉄粉 ATOMET 1001 HP の化学成分例を示す^{73,74)}。通常の当社製品 300A に比較し、Mn, P, S, O, N 量の低減がはかられ、また粒子形状、粒度分布の調整を行って高い圧縮性を得ている。成形圧力

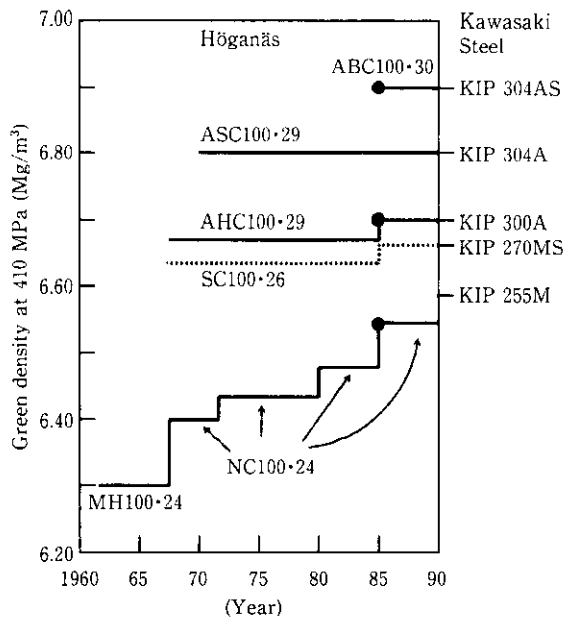


Fig. 5 Progress in compressibility⁷⁴⁾

Table 4 Chemical composition of high compressibility iron powder^{73,74)}

Chemical composition	(wt %)		
	High compressibility iron powder		Conventional
	KIP 304AS	ATOMET 1001 HP	KIP 300A
C	0.001	0.004	0.002
Si	0.01	0.003	0.02
Mn	0.03	0.015	0.08
P	0.003	0.01	0.017
S	0.003	0.004	0.015
O	0.08	0.06	0.133
N	0.0008	—	0.0021

690 MPaにおいて圧粉密度は7.24 Mg/m³の値が得られ、従来品300Aのそれより約0.1 Mg/m³以上高い⁷³⁾。なお、鉄粉中に含まれる各種不純物元素の圧縮性におよぼす影響が確認されている^{87,75)}。

4.1.2 中・低見掛密度鉄粉

アトマイズ鉄粉は噴霧媒に水を用いても粒子の形状が球状になりやすく、その見掛密度は3.0 Mg/m³程度の高見掛密度の製品が多い。最近、鉄粉製造技術の進歩によって成形性を改良した中および低見掛密度のアトマイズ鉄粉が作られるようになってきた。

Fig. 6に、川鉄アトマイズ鉄粉および市販鉄粉の成形性を示す。ラトラー試験は先端安定性とも呼ばれる一種の摩擦テストで、この値が低いほど成形性は良好である。とくに目安として1%以下であれば粉末成形時に割れが発生しないとされている。当社のアトマイズ鉄粉は従来品に比較し成形性が優れており、中見掛密度の鉄粉280A (2.8 Mg/m³) および260A (2.6 Mg/m³) においては還元鉄粉のそれに匹敵する値を示す。さらに、見掛密度2.4 Mg/m³レベルの低見掛密度のアトマイズ粉が今後出現してくることが期待される。

4.2 無偏析鉄粉

通常、鉄粉に黒鉛粉、潤滑剤、合金元素粉などが混合されるが、鉄よりも比重の軽い黒鉛と潤滑剤が偏析しやすいので、最近、黒鉛

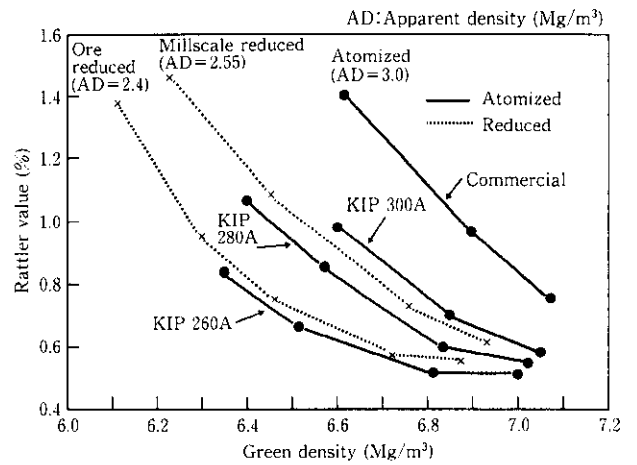


Fig. 6 Compactibility of KIP atomized iron powder by Rattler testing

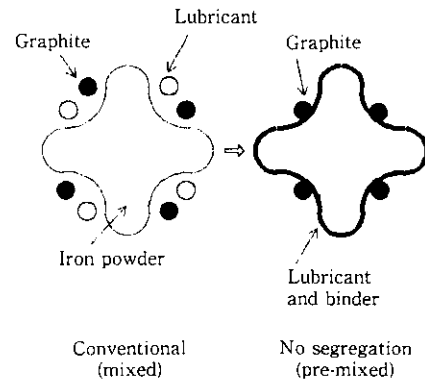


Fig. 7 Schematic illustration of no segregation powder

と潤滑剤を鉄粉粒子表面に付着させた無偏析鉄粉が開発されている⁷⁶⁻⁷⁸⁾。Fig. 7に原理図を示す。各社で市販している無偏析鉄粉は、すでにTable 1に示してある。この粉末は、流動性に優れる(従来品の33 s/50 gに比較し23 s/50 g)ほか、粉塵発生量が少ない(従来品の1/10)うえ、黒鉛の偏析が少ないなど優れた特徴を持っている。したがって、焼結体でのCのばらつきが大幅に減少し、寸法変化のばらつきなども従来の1/2程度に減少している。実際の焼結部品製造でのデータが発表されており、これによると従来混合粉に見られるホッパー排出時のCのばらつきが、大幅に減少することが確認されている⁷⁹⁾。

4.3 低合金鋼粉

4.3.1 Ni-Mo系低合金鋼粉(水素還元)

現在、低合金鋼粉を製造法別に大別すると、粉末粒子1個1個が完全に合金化されている水素還元による完全合金化鋼粉、真空還元による完全合金化鋼粉、さらに、鉄粉粒子表面に微粉の合金元素を拡散合金化させた部分合金化鋼粉の3種類に大別される⁸⁰⁾。Table 5に当社で市販している代表的な低合金鋼粉とその化学成分の例を示す。

はじめに、水素還元による低合金鋼粉について述べる。古くからAISI 4600系の2Ni-0.5Mo鋼粉が有名である。当社の4600Aは、1.5Ni-0.5Cu-0.5Mo鋼粉であり、また、再圧縮性に優れる4600Eは、1Ni-0.5Cu-0.3Mo鋼粉である⁸¹⁾。アトマイズした生粉を水素

Table 5 Chemical compositions of KIP alloy steel powders

(wt %)

Process	Powder	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Mo	Cr	N	O
Pre-alloyed	4600E	0.001	0.01	0.08	0.017	0.007	1.12	0.42	0.23	—	0.001	0.09
Pre-alloyed	4600A	0.003	0.01	0.08	0.009	0.004	1.45	0.53	0.47	—	0.001	0.12
Vacuum reduced	4100V	0.02	0.04	0.83	0.021	0.015	—	—	0.29	1.05	0.001	0.10
Partially alloyed	SIGMALOY 415S	0.004	0.01	0.05	0.005	0.005	4.31	1.50	0.48	—	0.001	0.11
Partially alloyed	SIGMALOY 2010	0.001	0.01	0.05	0.005	0.003	1.93	—	1.03	—	0.001	0.07

中で還元処理するため、酸化物が水素中で還元されやすい Ni, Cu, Mo などの合金元素を含む粉末に限定されている。

4.3.2 Cr-Mn 系低合金鋼粉 (真空還元)

Cr と Mn の酸化物は水素中で還元しにくいいため、Cr および Mn を含む低合金鋼粉は水アトマイズ後の生粉を真空中で還元して製造される⁸²⁻⁸⁴⁾。Table 5 に示す 4100V は、真空還元法による 1Cr-1Mn(0.3Mo) 鋼粉である。アトマイズ時にあらかじめ酸素量に見合った C 量を合金化させておき、生成した粉末を真空中で加熱することによって脱炭と脱酸を同時に行なって低酸素の Cr-Mn 系低合金鋼粉を得ている。Cr-Mn 系低合金鋼粉は焼入性に優れるので高硬度材として利用されるほか、耐熱・耐摩耗部品用原料として使用されている。

4.3.3 Ni-Cu-Mo 系部分合金化鋼粉

鉄粉の粒子表面に Ni, Cu および Mo の微粉を熱処理によって拡散合金化させた粉末である。金属微粉だけでなくこれら合金の微粉を利用している例もある⁸⁵⁾。鉄粉は表面のみ合金化されているので、鉄自体のやわらかさが保たれており、金型内での粉末成形時に高密度が得られやすく、高密度・高強度焼結材用原料粉として広く利用されている。Table 5 に示す 4Ni-1.5Cu-0.5Mo 鋼粉 SIGMALOY 415S⁸⁶⁾ および最近開発された 2Ni-1Mo 鋼粉 SIGMALOY 2010⁸⁷⁻⁸⁹⁾ がある。Fig. 1 に示したように、これら部分合金化鋼粉の需要が急激に伸びている。

4.4 高合金粉

合金元素を数%以上含む高合金粉は、Fig. 1 に示すように低合金

鋼粉と同様に大きな伸びを示している。内訳では、ステンレス鋼粉と高速度鋼粉が主体であるが、一部、超合金粉、硬化肉盛り粉末など鋼粉以外の粉末が含まれているものと思われる²⁾。高合金鋼粉の製造方法は、厳選された原料を高周波炉で溶解し、水またはガスアトマイズ後、脱水・乾燥され、真空中で焼なましされる。低合金鋼粉の場合のような仕上還元は通常行われない。

低合金鋼粉系では、他の製造加工法に比較して経済的に有利となる場合が多いのに対し、高合金粉系においては溶製法では製造困難かまたは十分特性が得られない材料を対象とする場合が多く、粉末冶金の特徴がより生かされていると言えよう。一般に、高合金粉末での還元処理は困難であり、アトマイズ生粉のまま使用されることが多いので、アトマイズ条件の選択と正確なコントロールが重要な意味を持つてくる⁹⁰⁻⁹²⁾。

5 高強度焼結材の特性

以上、各種の粉末冶金用原料粉の紹介を行った。これら原料粉、とくに Table 5 に示した当社の低合金鋼粉から作成された焼結体および焼結鍛造材の引張強さと硬さの例を Fig. 8 および 9 に示す。成形、焼結条件あるいは熱処理 (図中 HT) 条件によって各特性が異なるので一括して示すのは問題があるが、それぞれの条件でのほぼ最大値と考えてよいであろう。

焼結体と熱処理体製造の標準条件を次に示す。

成形; 490, 590, 690 MPa (ステアリン酸亜鉛 0.75, 1.0 %)

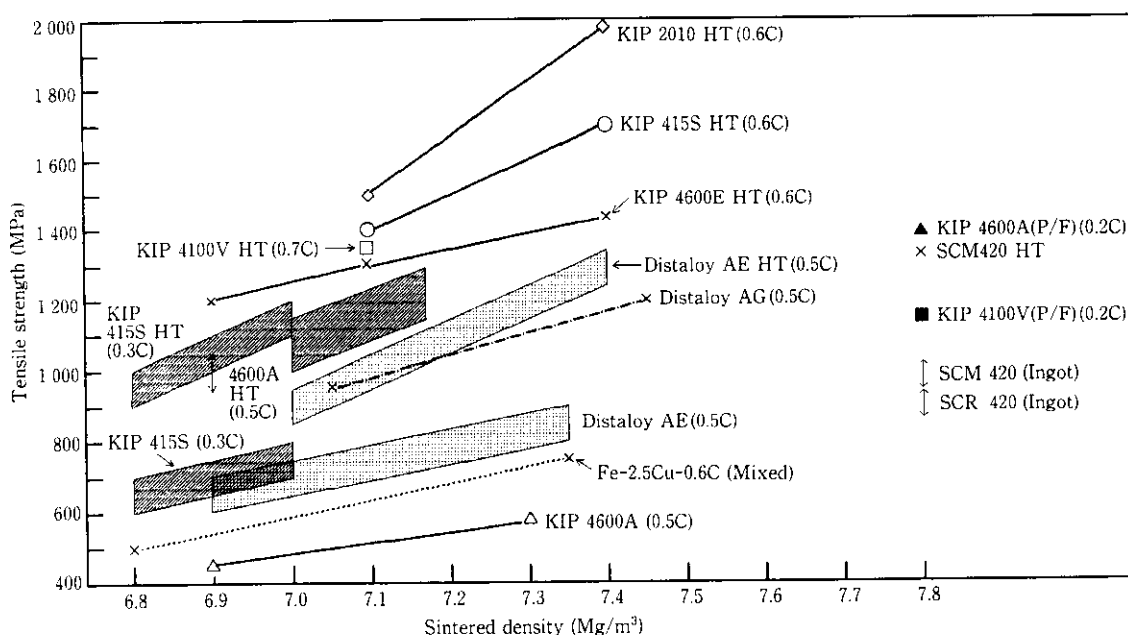


Fig. 8 Tensile strength of high strength sintered materials from Kawasaki Steel's KIP and Höganäs's Distalloy alloy steel powders (HT: heat treatment)

- (1990), 1-1
- 37) 平賀由多可, 八島幸雄, 村上義弘, 中島義夫: 材料とプロセス, 4 (1991) 2, 680
- 38) 岡本晋也, 滝川 博, 松下富春, 関 義和: 材料とプロセス, 5(1992) 2, 732
- 39) 平賀由多可, 村上義弘, 八島幸雄, 中島義夫: 材料とプロセス, 3 (1990) 5, 1698
- 40) A. Unal: "Gas Flow in Automization Nozzles, Physical Chemistry of Powder Metals," The MMMS, (1989), 201
- 41) I. E. Anderson, H. Morton and R. S. Figliola: "Physical Chemistry of Powder Metallurgy," The MMMS, (1989) 229
- 42) 福田 匡, 池田浩之: 材料とプロセス, 3 (1990) 2, 294
- 43) 関野昌蔵, 山宮昌夫, 西田卓彦: 鉄と鋼, 67 (1981) 3, 541
- 44) 藤木弘文, 古田誠矢: R&D 神戸製鋼技報, 24 (1974) 2, 33
- 45) 原 茂太, 池宮範人, 萩野和己: 鉄と鋼, 75 (1989) 11, 2038
- 46) 佐藤義智, 井手英暉, 古田誠矢, 松下富春: 材料とプロセス, 4(1991) 5, 1713
- 47) 新田 稔, 小倉邦明: 材料とプロセス, 5 (1992) 2, 733
- 48) 岡本晋也, 滝川 博, 関 義和, 松下富春: 材料とプロセス, 3(1990) 5, 1697
- 49) 新田 稔, 小倉邦明: 粉協講演概要集, 秋季 (1991), 2-32
- 50) T. Ando, C-Y Tsao, J. Wahlrous, and N. J. Grant: *The Int. J of PM*, 26 (1990) 4, 311
- 51) 原田幸明, K. D. Rzesnitzeck, W. A. Kaysser, and G. Petzow: 日本金属学会講演概要集, 秋季 (1988), 286
- 52) 岡山 昭, 泰野 浩, 安藤 寿: 粉体および粉末冶金, 24 (1977) 7, 205
- 53) 岡本晋也, 滝川 博, 岡 義和, 松下富春: 粉協講演概要集, 春季 (1990), 1-2
- 54) K. Harada, K. D. Rzesnitzeck, W. A. Kaysser, and G. Petzow: *P.M. Int.*, 21 (1989) 1, 17
- 55) 武田 徹, 皆川和己: 粉協講演概要集, 秋季 (1979), 28
- 56) 岡本晋也, 沢山哲也, 滝川 博, 松下富春, 岡田雅年: 材料とプロセス, 4 (1991) 5, 1711
- 57) 福田 匡, 中西陸夫: 粉協講演概要集, 春季 (1989), 1-10
- 58) 中村 泰, 西田卓彦, 溝口庄三, 山宮昌夫: 粉協講演概要集, 春季 (1974), 10
- 59) 原田幸明: 鉄と鋼, 5 (1992) 2, 741
- 60) 原田幸明, 菅 広雄: 粉協講演概要集, 秋季 (1990), 1-1
- 61) A. J. Aller and A. Losada: *pmi*, 21 (1989) 5, 15
- 62) 伊藤考至, 鯉部吉基: 日本金属学会講演概要集, 秋季 (1989), 152
- 63) 伊藤考至, 鯉部吉基, 長 隆郎: 日本金属学会講演概要集, 秋季 (1988), 287
- 64) 河合伸泰, 本間克彦, 平野 稔: 粉協講演概要集, 秋季 (1974), 12
- 65) H. Gagne: "Manufacturing of Clean Steel Powders for P/F Application," *Int. P/M Conf., Orland (U.S.A.)*, (1988), 1
- 66) 福田 匡: 鉄と鋼, 4 (1991) 5, 1712
- 67) M. Gagne, C. Ciloglu, Y. Trudel, and J. H. Capus: "Progress in Powder Metallurgy," *MPIF*, 43 (1987)
- 68) G. Jiang, H. Henein, and M. W. Siegel: *The Int. J of PM*, 26 (1990) 3, 253
- 69) M. Bürgev, E. V. Berg, S. H. Cho, and A. Schatz: *PM Int.*, 21 (1989) 6, 10
- 70) 黒木泰徳, 川崎 亮, 渡辺龍三: 粉協講演概要集, 春季 (1990), 1-6
- 71) 古君 修, 高城重彰, 齊藤文夫: 日本金属学会講演概要集, 春季 (1991), 733
- 72) P. Lindskog and P. Arbstedt: *Powder Metallurgy*, 29 (1986) 1, 14
- 73) 斎藤滋之, 園部秋夫, 小倉邦明, 前田義昭: 粉協講演概要集, 秋季 (1990), 1-3
- 74) Quebec Metal Powders Ltd.: カタログ「ATOMET 1001 HP」, (1988)
- 75) 高田仁輔, 本間克彦, 河合伸泰, 阪本 績: 粉協講演概要集, 春季 (1988), 2-32
- 76) 早見威彦, 佐久間均: 粉協講演概要集, 春季 (1988), 2-29
- 77) 桜田一男, 高城重彰, 牧野来世志, 峰岸俊幸: 粉協講演概要集, 秋季 (1988), 3-6
- 78) 桜田一男, 岡部律男, 槇石幸雄, 高城重彰, 牧野来世志, 峰岸俊幸: 鉄と鋼, 2 (1989) 2, 382
- 79) 杉原 裕, 前田義昭, 香月淳一, 平尾隆行, 羽室 憲: 粉協講演概要集, 春季 (1990), 1-4
- 80) Y. Morioka and S. Takajo: "Recent Developments in Low-Alloy Steel Powders," *Int. P/M Conference, Orland (U.S.A.)*, (1988)
- 81) 太田純一, 桜田一男, 小倉邦明, 古君 修, 高城重彰: 材料とプロセス, 1 (1988) 5, 373
- 82) 赤岡和夫, 矢埜浩史, 田村 望, 駒村宏一: 粉協講演概要集, 秋季 (1990), 1-5
- 83) N. Yamato, K. Ogura, E. Hatsugai, and Y. Maeda: *Kawasaki Steel Technical Report*, 16 (1987), 81
- 84) K. Ogura, R. Okabe, S. Takajo, N. Yamato, and Y. Maeda: "Progress in Powder Metallurgy," *MPIF*, 43 (1987), 619
- 85) 花岡宏卓, 佐久間均, 井路 弘, 宮下隆夫: 鉄と鋼, 2 (1989) 2, 383
- 86) K. Ogura, T. Abe, Y. Makiishi, S. Takajo, T. Minegishi, and E. Hatsugai: *Kawasaki Steel Technical Report*, 18 (1988), 66
- 87) O. Furukimi, K. Maruta, T. Abe, S. Takajo and Y. Habu: "Composite-Type Alloyed Steel Powder Containing Ni and Mo for Ultra High Strength Sintered Materials," *P/M Conference, London (U.K.)*, (1990)
- 88) 古君 修, 垣生泰弘, 丸田慶一, 阿部輝宜, 高城重彰: 粉協講演概要集, 秋季 (1989), 1-34
- 89) O. Furukimi, K. Yano and S. Takajo: "Advances in Powder Metallurgy Vol. 5." (1991), 59
- 90) 草加勝司: 粉体および粉末冶金, 33 (1986) 8, 387
- 91) 加藤哲男, 草加勝司: 鉄と鋼, 70 (1984) 3, 305
- 92) 加藤哲男, 草加勝司: 鉄と鋼, 70 (1984) 6, 486