

(解説)

アトマイズ鉄粉の開発と発展

河合健治*・関 義和*・高田 稔*・佐久間均*・村上政博*・河合信也**

*鉄鋼部門・鉄粉本部・鉄粉工場 **KOMPA

Developments Related to Atomized Steel Powders

Kenji Kawai・Yoshikazu Seki・Minoru Takada・Hitoshi Sakuma・Masahiro Murakami・Shinya Kawai

Kobe Steel has been producing atomized steel powder since 1970, and has made great efforts to increase overall production capacity and develop new type of steel powders to meet the ever increasing demand for P/M parts related to recent developments in the automobile industry. In 1989, Kobe Steel successfully began operating an advanced steel powder plant in Seymour, Indiana (USA) to meet American automobile industry demand for steel powder products. This paper describes developments in Kobe Steel's related production technologies and R&D, as well introducing specifics concerning the properties of atomized steel powders.

まえがき = 当社は、1970 年からアトマイズ鉄粉の生産および販売を開始し、今日に至っている。わが国の産業、とくに自動車産業の発展にともない焼結機械部品の生産量も飛躍的に増大し、これに対応して、当社は数次の設備増強、さらには新鉄粉工場の建設をおこない、アトマイズ鉄粉の生産量の増大を図るとともに、各種用途に適した新鋼種開発をおこなってきた。

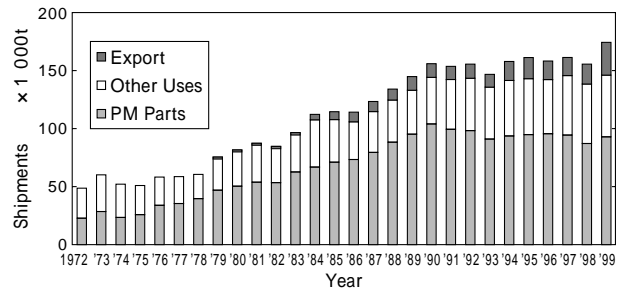
また、海外需要家のニーズに迅速に対応し、販売量を拡大するために、世界最大の鉄粉市場である米国のインディアナ州シーモア市に米国鉄粉工場 KOMPA (Kobelco Metal Powder of America, Inc.) を建設し、1989 年 7 月から生産・出荷を開始した。

本稿では、当社アトマイズ鉄粉の製造・開発の歩みおよび代表的なアトマイズ鉄粉品質特性について紹介する。

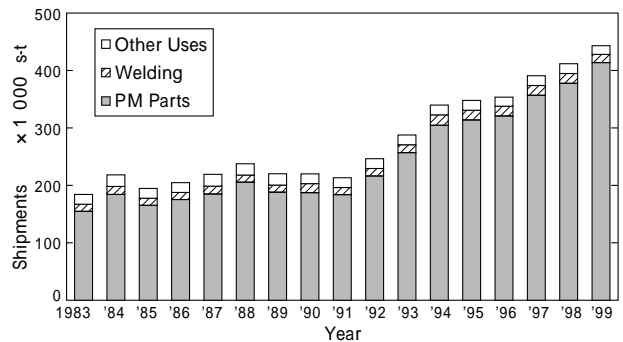
1. 鉄粉需要動向

わが国の 1972 年以降 1999 年までの鉄粉年間使用量の推移を第 1 図に示す¹⁾。鉄粉の約 70% は、自動車を中心とする焼結機械部品、軸受合金などの粉末冶金用として使用され、残りが溶接棒、カイロ、化学反応用あるいは脱酸素剤などの原料として使用されている。粉末冶金用の出荷量の伸張がいちじるしいが、これは自動車用の適用部品の拡大に負うところが大きく、自動車 1 台あたりに使用される焼結部品量が 1960 年代には 1.0kg/台であったが、1987 年には 4.4kg/台、1999 年には 7.2kg/台となっている。このように適用部品が拡大してきたのは、粉末冶金の特徴であるニアネット成形による高歩留・低生産コストと鉄粉の品質向上が大きく貢献しているといえる。

また、北米における鉄粉出荷量の推移を第 2 図に示す²⁾。1991 年以降の米国経済の好況により、鉄粉総出荷量は年率約 10% の急激な伸びを示しており、粉末冶金 (PM) 関連業界全体が活況を呈している。とくに自動車産業の競争力回復により自動車の総生産台数が伸びたこと、米国製自動車 1 台あたりに使用される焼結部品量が、1991 年の 10.7kg/台であったのが、1999 年には 15.9kg/台に増えたことによって鉄粉出荷総量を伸ばしてき



第 1 図 国内鉄粉出荷量の推移
Fig. 1 Trends in annual iron powder shipments in Japan



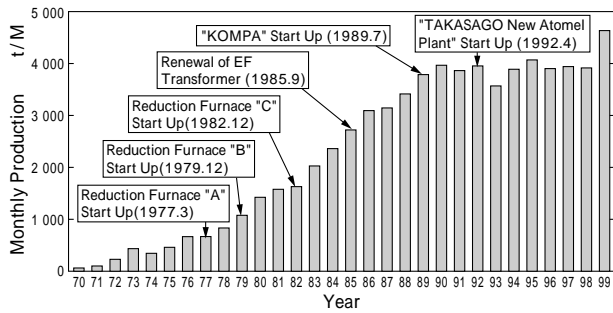
第 2 図 北米鉄粉出荷量の推移
Fig. 2 Trends in annual iron powder shipments in North America

た。適用が拡大された代表的な部品としては、P/F (粉末鍛造) コンロッド、メインベアリングキャップなどであるが、今後もエンジン、トランスミッション部品を中心に鉄粉全体の使用量を伸ばすものと期待されている。

2. 当社の鉄粉製造の変遷と特徴

2.1 新鉄粉工場の建設と製造技術変遷

第 3 図は、当社のアトマイズ鉄粉の生産量の推移を示したものである。1970 年から神戸製鉄所岩屋工場で生産を開始し、鉄粉の需要の拡大に対応し還元炉を順次増設するとともに、電気炉では高電力操業をおこなうことにより、溶製時間を大幅に短縮して生産性を向上させるなど鉄粉生産量を増加させてきた。また、さらなる需要量の増加と品質特性の向上要求に対応するため、高砂製作所に新鉄粉工場を建設し、1992 年 4 月より生産を



第3図 当社鉄粉生産量の推移
Fig. 3 Trends in atomized steel powder production at Kobe Steel

開始した。新鉄粉工場は、多様化する要求品質に対応し多品種小ロット生産を可能とするとともに、黒鉛偏析防止鉄粉（商品名セグレス[®]）を生産する工場として建設された³⁾。第4図に新鉄粉工場の製造工程を示す。以下に製造技術と品質特性について紹介する。

1) 原料粉品質ばらつきの低減

還元炉挿入原料粉の品質ばらつきの低減

鉄粉の品質は、アトマイズ粉の粒度変動に左右される。旧工場では、アトマイズ装置の下に設置したバケットで鉄粉を回収していたため粒度偏析があったが、連続回収により粒度偏析を防止した。またアトマイズされた鉄粉を特定のサイズで分級後、篩上粉と篩下粉を一定の比率で混合することにより原料のばらつきを低減した。第5図に原料粉粒度のばらつき低減効果を示す。

製品品質ばらつきの低減

さらに、最終工程においては、3.3t コンテナを使用し、3個のコンテナを統合ブレンドすることにより、ロット内品質ばらつきを低減した。第6図にブレンド方法、第7図にブレンド方法改善による効果を示す。

2) 鉄粉の清浄化

電気炉工程において、出鋼方式を偏芯炉底出鋼方式（Eccentric Bottom Tapping）に変更して鋼の清浄化を図った。また、脱水機の設置により乾燥機内鉄粉付着の防止、自動搬送クローズラインの採用により、異鋼種コンタミネーションや異物混入防止を図った。

3) 多品種生産への対応

コンテナをもちいた粉体の貯蔵、搬送、加工をおこなうことで効率よく多品種小ロットの生産が可能となった。

4) 作業環境面の改善

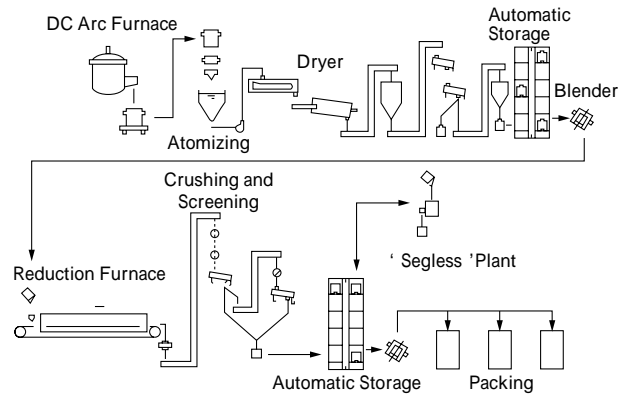
新鉄粉工場は、環境面においても以下に示す種々の対策を実施している。

- ・電気炉ドッグハウス設置による騒音の防止
- ・大型集塵機による発塵の防止
- ・鉄粉コンテナ自動搬送システムによる発塵の防止

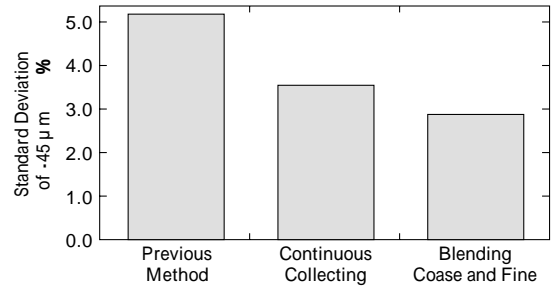
以上のように、新鉄粉工場は品質ばらつき低減のための品質制御機能と環境改善機能を充実した。さらに品質管理、環境管理のレベルアップを図るべく、品質管理システムとして1998年1月にISO9001を、環境管理システムとして1999年3月にISO14001を認証取得した。

2.2 北米鉄粉市場への展開

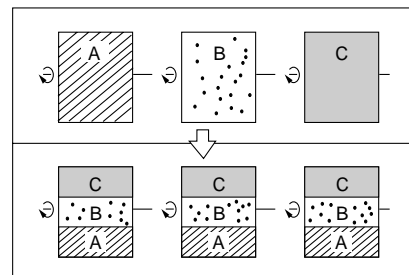
当社は1980年代初頭より米国向け輸出をおこなってきた。米国鉄粉市場の伸びに対応するため、前述のとおり



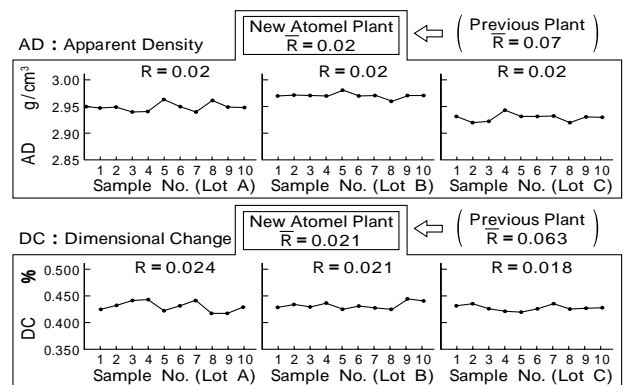
第4図 ニューアトメルプラントの製造工程
Fig. 4 Flow chart of New Atomel Plant (NAP)



第5図 原料粉粒度ばらつき低減効果
Fig. 5 Effects of dispersion improvement after atomizing



第6図 新ブレンド方法
Fig. 6 New blending method



第7図 コンテナブレンドの効果
Fig. 7 Effects of container blending

り米国における鉄粉製造を目的としてKOMPAを日本の鉄粉メーカーとしては初めて設立し、1989年7月より製品の出荷を開始した。主力製品は300MA 500MAおよび焼結体の寸法変化率を制御した300MD 粉末鍛造用300MEの純鉄粉系4鋼種であったが、還元技術改善により超高压縮性・高成形性鉄粉300MCを開発した。また、合金鋼粉は高砂新鉄粉工場で作成された中間製品を生産し、

KOMPA で製品化する日米協力生産体制により効率よく生産をおこない販売量を増加させている。品質管理に関しては、多くの管理項目を設け品質管理のレベルアップを図り、1997年6月には品質管理システム ISO9002/QS 9000 を認証取得した。

販売開始以来の出荷量の推移を第8図に示す。販売量は着実に増加し、1995年に還元炉1基を増設し能力4400s-t/月とした。1995年以降も自動車での焼結部品採用の拡大にともない鉄粉の使用量は一層増加し、現在フル生産を続けている。今後、鉄粉需要量はさらに増加するものと見込まれており、2000年9月に電気炉能力の増強、アトマイズ工程でのスリ連続搬送による生産効率化、および2号還元炉の能力増強をおこない能力を5000s-t/月とした

3. 当社の鉄粉製品開発の変遷と代表製品の品質特性

3.1 鉄粉製品開発の変遷

溶鋼から出発するアトマイズ法は、成分の自由度が大きく、またアトマイズ圧力・還元温度を制御することにより、粉体形状・粒度分布を調整することが可能な大量生産に適した製造法である。

近年、自動車部品の小型軽量化・高出力化にともない焼結部品も薄肉・高強度化が要求されており、そのための原料鉄粉も高密度がえられるものが要求されてきた。これに対しアトマイズ鉄粉はその粉体特性からも明らかのように高密度・高強度焼結部品の原料として適しているため、需要家に幅ひろく受け入れられ使用量を伸ばしてきた。第1表に当社の鉄粉製品開発の変遷を示す。

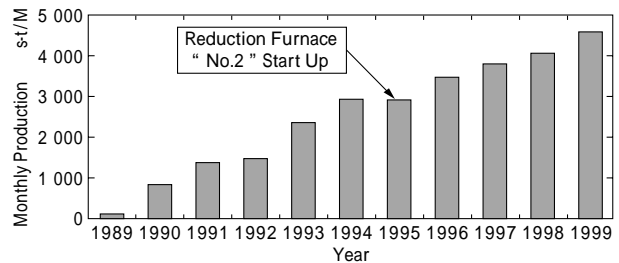
1) 純鉄粉開発の変遷

アトマイズ純鉄粉300Mは高密度焼結部品に適した鉄粉であるが、焼結部品の強度を高めるためには、同じ成形圧力でさらに高密度がえられる純鉄粉が望ましい。また、磁気特性が必要になる焼結部品においても高い密度をえられ、不純物元素が少ない純鉄粉が必要とされた。この要求に対し、製鋼工程：溶解原料の厳選、不純物元素(Mn, P, S, O, N)の低減、還元工程：C, O, Nの低減、軟化焼もどし、解粒工程：解粒条件の適正化による粒度分布の最適化、などの製造技術開発により、高純度高圧縮性純鉄粉(300MH, 300NH)を開発した⁴⁾。一例として300NHの化学組成を第2表に圧縮特性を第9図に示す。300NHは成形圧力490MPaで7.08g/cm³の高密度がえられる。

第1表 鉄粉新製品開発の変遷

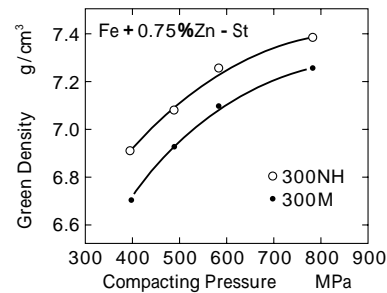
Table 1 History in the development of atomized powder at Kobe Steel

Year	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	1999
Pure Steel Powder	High Compressibility Steel Powder 300M		High Compressibility Steel Powder 500M			High Compressibility Steel Powder 270M			High Compressibility Steel Powder 250M			High Compressibility Steel Powder 270MA			High Purity and High Compressibility Steel Powder 300MH			High Purity and High Compressibility Steel Powder 300NH			High Compressibility Steel Powder 275MRD・270MA-35									
Free Cutting Steel Powder	Resulfurized Steel Powder 400MS (0.2Mn-0.1S)			Resulfurized Steel Powder 600MS (0.2Mn-0.3S)			Resulfurized Steel Powder 400MSA (0.65Mn-0.3S)			High Compaction Resulfurized Steel Powder 250MSA (0.65Mn-0.3S)																				
Low Alloy Steel Powder	Pre-alloyed Steel Powder 4600 (2Ni-0.5Mo)		Pre-alloyed Steel Powder 9400 (0.3Ni-0.3Cr-0.3Mo)			Low Oxygen Cr Steel Powder 4100H			Diffusion Bonded Steel Powder 4800DF 4800DFB (4Ni-1.5Cu-0.5Mo)			Pre-alloyed Steel Powder 46F2H (0.5Ni-0.5Mo)			Pre-alloyed Steel Powder 46F3H(1.5Ni-1.0Mo) 46F4H(0.5Ni-1.0Mo)			Diffusion Bonded Steel Powder 4800DFC(4Ni-1.5Cu-0.5Mo)			Diffusion Bonded Steel Powder 2800DFC (2Ni-1.5Cu-0.5Mo)									
Others	For Welding Electrode 300W		For Soft Magnetic 300PC			For Oxygen Absorption 55KF			For Soft Magnetic 290PC 290PC-2			For Oxygen Absorption 71KF			Segregation Free Premix SEGLESS			For Chemical Reactor 61NF 62MF			For Chemical Reactor 63AJ			For Chemical Reactor 80KB			For Chemical Reactor 80AF			



第8図 KOMPAのアトマイズ鉄粉出荷量推移

Fig. 8 Trends in atomized steel powder production at KOMPA



第9図 成形圧と成形体密度との関係

Fig. 9 Relationship between compacting pressure and green density

また、焼結部品は、ますます複雑形状・薄肉化の傾向にある。金型精度・ダイセット設計技術の向上、NC制御プレスなどによる成形技術の向上により、多段の複雑形状部品も比較的容易に製造可能になってきているが、原料粉についても高密度領域で成形割れの発生しにくい高成形性鉄粉が求められている。この要求に対し、アトマイズ工程：噴霧水圧を高圧力化し、粒子形状の不規則化、微粉化する；還元工程：高温還元により微粉を焼結固着し、不規則化を増す；解粒工程：不規則度を保持し粒形状変化を起こさない解粒条件に制御する；などの製造技術開発をおこない高成形性鉄粉(250M, 270MA)を開発した⁵⁾。写真1に粒子形状を示すが250M, 270MAは不規則度が大きく高密度と高成形性を兼ね備えた鉄粉である。

2) 快削鋼粉開発の変遷

焼結部品はニアネット形状に成形されるため、比較的切削加工が少なくすむが、金型成形方向に直角な溝やドリル穴加工や寸法精度の厳しい部品に対しては、切削

第2表 純鉄粉の化学組成

Table 2 Chemical composition of powders

Powder	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	O	N
300NH	0.001	0.01	0.07	0.006	0.006	0.01	0.01	0.06	0.0008
300M	0.003	0.01	0.19	0.012	0.015	0.01	0.01	0.18	0.0036

第3表 快削鋼粉の化学組成

Table 3 Chemical composition of resulfurized steel powders

Grade	Mn	S
400MS	0.2	0.2
600MS	0.2	0.33
400MSA	0.65	0.33
250MSA	0.65	0.33

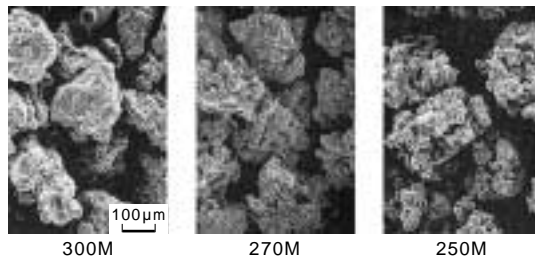


写真1 鉄粉粒子形状
Photo 1 Micrograph of powders

第4表 低合金鋼粉の化学組成

Table 4 Chemical composition of low alloy steel powders

Grade	Ni	Mo	Cu	Type
46F4H	0.5	1.0	—	Pre-alloyed
46F3H	1.5	1.0	—	
4800DFC	4.0	0.5	1.5	Diffusion Bonded

加工がおこなわれる。切削性を向上させる手段としては、副添加物としてSやMnSを粉末で混合する方法が一般的である。これに対し、アトマイズ鉄粉の特徴である溶製段階でMnおよびSを添加し鉄粉粒子中に被削性を向上させる融点の高いMnSを均質に分散させた快削鋼粉400MSAと250MSAを開発した⁶⁾。第3表に化学組成を第10図に切削加工時の工具寿命を示す。副添加物として従来のMnSを加えた300M-0.5MnSより、溶製段階で鉄粉中にMnSが多く均質に分散する400MSAおよび250MSAのほうが工具寿命が良好である。

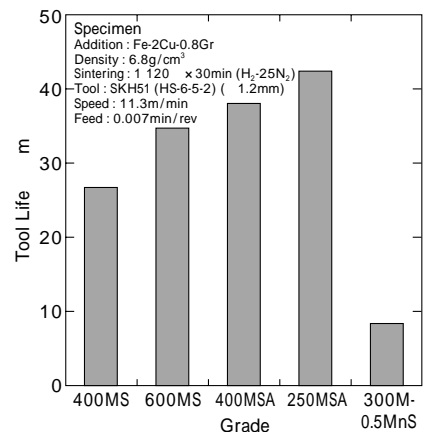
3) 低合金鋼粉開発の変遷

溶製段階でNiやMoなどの合金元素を含むプレアロイ型低合金鋼粉(4600)は主に粉末鍛造(P/F)用として使用されているが、高強度焼結部品の製造に対し、製品機能のみならず製造プロセス・条件、加工費を含め総合的に評価する動きがある。すなわち、熱処理の省略化、焼結材の高疲労強度化、切削加工性の向上によってトータルコストを低減しようとする動きが挙げられ、これに寄与する焼結用原料鋼粉が要望されてきた。これらの要求に対応し、圧縮性、焼結性に優れた拡散型低合金鋼粉(4800系, 2800系)およびプレアロイ型低合金鋼粉(46F2H, 46F3H, 46F4H)を開発した⁴⁾。第4表に46F3H, 46F4Hの化学組成を、第11図にこれらの焼結材の熱処理後の特性を示す。プレアロイ型合金鋼粉は優れた疲労強度特性を示している。

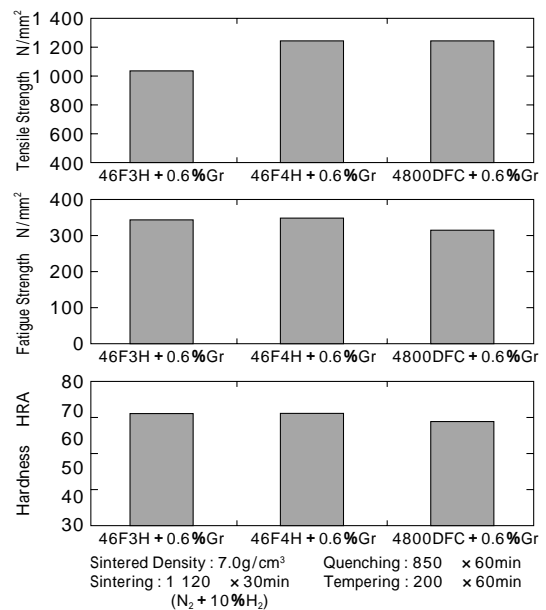
第12図は焼結に引き続き急冷処理をおこなった焼結材の特性を示す。46F4HはCu粉を添加および急冷処理することで熱処理材に匹敵するレベルの疲労強度(290 N/mm²)となり、熱処理省略が可能となる。第5表に被削性を示す。複合組織(マルテンサイト, 残留オーステナイト, バイナイト, パーライト)が析出する拡散型鋼粉にくらべ、プレアロイ型鋼粉は均質な組織であるため被削性が良好である。

4) 黒鉛偏析防止鉄粉(セグレス)の開発

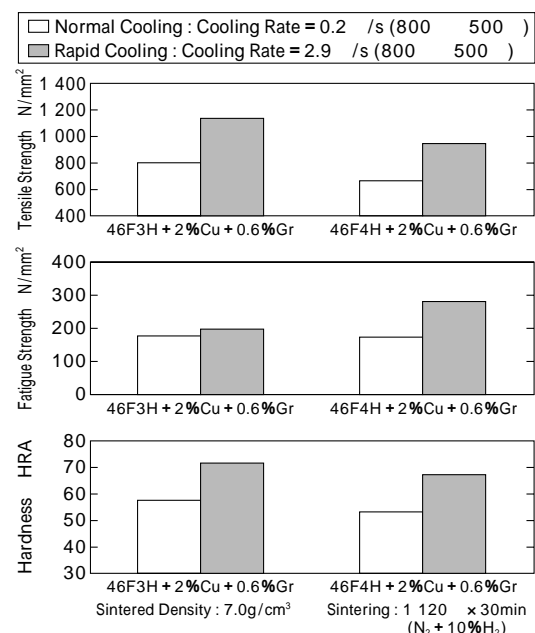
原料粉の混合に関しては、従来、需要家にて鉄粉と副原料である黒鉛、潤滑剤などを混合・使用されていた。この混合粉は比重、粒度の異なった集合体で、とくに黒



第10図 快削鋼粉の工具寿命
Fig. 10 Tool life for machinability of resulfurized steel powder and MnS mixed powder



第11図 熱処理後の焼結体特性
Fig. 11 Mechanical properties after heat treatment



第12図 急冷処理後の焼結体特性
Fig. 12 Mechanical properties after normal cooling and rapid cooling

第5表 切削加工試験結果

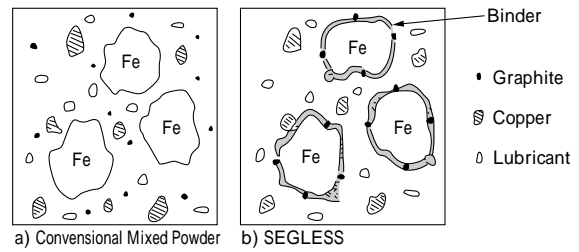
Table 5 Results of machinability test

Powder	Sintered Density g/cm ³	Tool Life cm	C wt%
46F4H	7.01	140	0.75
46F3H	6.96	20	0.75
4800DFC	6.94	4	0.57

* Sintered at 1393K for 30min in D.A.

Testing Condition

Drill : SKH51 5mm Oil : Dry/Cutting
 Feed Speed : 0.1mm/rev. Hole : 20mm(Penetration)
 Cutting Speed : 30m/min



第13図 セグレスの模式図(黒鉛粉が鉄粉に付着)

Fig. 13 Schematic diagram of SEGLESS where graphite has been bonded by an organic binder

鉛粉は鉄粉にくらべ粒度が細かく、また比重も軽いためハンドリング時や成形時に分離・偏析しやすく、焼結部品の品質のばらつきや製品歩留低下の原因となっていた。また、黒鉛粉は飛散や発塵による環境悪化も問題であった。

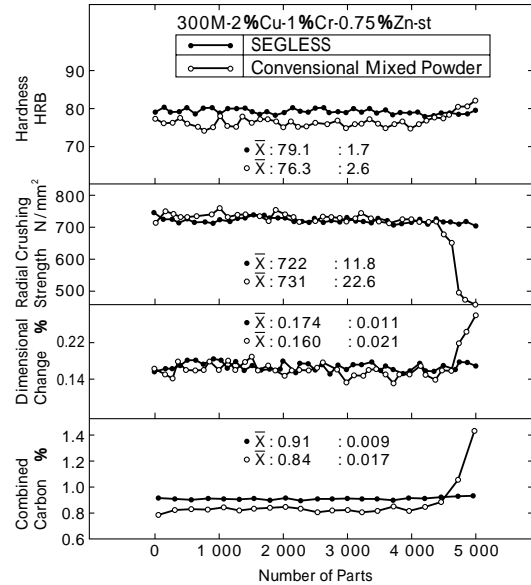
これに対し、当社は、1990年より黒鉛粉などを高分子バイндаで鉄粉表面に付着させた偏析防止鉄粉を開発し供給するようになった⁷⁾。製造プロセスの概要は、鉄粉、黒鉛粉、銅粉などの合金粉をハイスピード型ミキサへ投入し、混合しながら溶剤に溶かしたバイндаを添加し、その後溶剤を気化させて除去し製造する。第13図にセグレスの模式図を示す。第14図にセグレスと単純混合粉の焼結体の硬度、圧環強度、寸法変化率、焼結体炭素量の比較結果を示す。単純混合の場合、連続成形の末期には黒鉛が偏析・濃化するために硬度の上昇、強度の低下、寸法変化率の異常膨張上昇をひきおこしている。これに対し、セグレスは硬度、圧環強度、寸法変化、焼結体炭素量ともそのばらつきが小さく偏析防止効果が認められる。このように、偏析防止鉄粉は品質・歩留り向上、環境改善効果が大きく、これからも採用が増加していくものと考えられる。

4. 今後の展望

高密度がえられるアトマイズ鉄粉の出現とともに、高速成形プレス・高温連続焼結炉といった焼結部品生産設備の高性能化、および精密金型設計技術などの生産技術の向上により、自動車用を中心として鋼材に匹敵する高強度を有する焼結部品が拡大してきた。

今後、焼結部品の競争力向上のために、原料鉄粉には焼結部品そのものの高性能化に加えて、焼結部品の生産性向上にも寄与する鉄粉としての機能が必要と考えられる。そのため、高密度化に適したアトマイズ鉄粉および加工プロセス全体も視野に入れた鉄粉の開発が課題である。具体的には、焼結部品の高強度化には密度向上が不可欠であるが、密度向上の新しい加工方法と考えられている温間成形・金型潤滑技術や焼結部品の品質向上・生産性向上を目的とした金型充填技術に対応した鉄粉の要求が増大すると考えられる。

したがって今後は、焼結部品の高密度化、高強度化、高精度化、高流動化・高被削性といった機能を有する鉄粉の開発に加え、加工プロセスでの密度向上・密度偏析



第14図 セグレスと単純混合粉の焼結体特性比較結果

Fig. 14 Comparison of sintered properties of SEGLESS and conventional mixed powder

防止・生産効率向上に対応し、バイнда、銅粉、ニッケル粉、潤滑剤も含めてコストパフォーマンスが可能な原料粉の開発が必要となる。

むすび = 水アトマイズ鉄粉は、高密度・高強度焼結部品の原料として適しているため、需要家に幅広く受け入れられ、焼結部品業界の発展とともに歩んできた。今後も自動車産業を中心として、鉄粉市場は拡大していくものと思われるが、当社は、鉄粉製造メーカーとして引き続き高性能な鉄粉の開発・生産に注力するとともに、国内および米国鉄粉工場との連携によるグローバルな活動により粉末冶金産業の発展に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 日本粉末冶金工業会統計(1972~1999)
- 2) MPIF(Metal Powder Producers Association)統計(1983~1999)
- 3) 猪飼善弘ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.44, No.2(1994) p.2
- 4) 佐久間均ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.44, No.2(1994) p.18
- 5) 昭和57年度粉体粉末冶金協会春季大会講演概要集, p.152
- 6) 昭和54年度粉体粉末冶金協会秋季大会講演概要集, p.46
- 7) 高井伝栄ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.44, No.2(1994) p.10