

# JFE スチールの鉄粉製品概要

## Outline of Iron and Steel Powder Products of JFE Steel

前谷 敏夫 MAETANI Toshio JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) 商品技術部鉄粉室 主任部員 (副部長)  
太田 純一 OHTA Jun-ichi JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) 商品技術部鉄粉室 主任部員 (副部長)  
藤長 政志 FUJINAGA Masashi JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) 商品技術部鉄粉室長

### 要旨

JFE スチールは、還元鉄粉とアトマイズ鉄粉の 2 種類の鉄粉を製造する国内唯一の総合鉄粉メーカーとして多様な鉄粉製品を製造し、粉末冶金産業の発展に貢献している。製品ラインアップである純鉄粉、合金鋼粉とそれらの偏析防止処理粉 (JIP<sup>®</sup> クリーンミックス<sup>®</sup>) の開発に取組み、焼結機械部品の小型軽量化、寸法精度の向上を可能とする製品を市場に展開してきた。近年では、Ni フリーの高強度合金鋼粉「JIP<sup>®</sup> FM シリーズ」、焼結部品の被削性を向上させる「JIP<sup>®</sup> JFM<sup>®</sup> シリーズ」などを開発するとともに、粉末冶金分野以外においても、かいろ用、農業用など多岐にわたる新規分野に用途を展開している。本報では、鉄粉利用分野の技術動向とそれに対応する JFE スチールの鉄粉製品について概説する。

### Abstract:

JFE Steel has contributed to the advancement of powder metallurgy industry, as an only diversified iron powder manufacturer in Japan that can produce both reduced iron powder and atomized steel powder. JFE Steel has a lineup of the product named JIP<sup>®</sup> such as pure iron powder, alloyed steel powder and segregation-free powder (JIP<sup>®</sup> Cleanmix). These various products have achieved downsizing or dimensional accuracy of the sintered machine parts. Recently, JFE Steel developed products not only for sintered parts, such as “JIP<sup>®</sup> JFM<sup>®</sup> series” improving machinability of sintered parts and “Ni-free high-strength alloyed powder JIP<sup>®</sup> FM series” providing high performance equivalent to 4% Ni partially alloyed powder, but also for other usages including pocket warmers and soil cleanup materials. This report will review the technology trends of iron powder application, and introduce the current products developed by JFE Steel.

## 1. はじめに

JFE スチールは、還元鉄粉とアトマイズ鉄粉の 2 種類の鉄粉を製造する国内唯一の総合鉄粉メーカーとして粉末冶金分野をはじめ、さまざまな分野の産業の発展に貢献している<sup>1)</sup>。

還元鉄粉は、酸化鉄 (ミルスケールなど) と炭材 (コークスなど) を容器内に層状に配置し、加熱することにより発生する一酸化炭素ガスで酸化鉄を還元した後、粉砕し、水素雰囲気中で熱処理する工程で製造される。一方、アトマイズ鉄粉は、転炉で精錬された溶鋼をノズルから一定量で落下させてできる溶鋼流に高圧水を噴射することで粉化 (アトマイズ) し、脱水・乾燥後に表面酸化膜を水素還元する工程で製造される。さらに、上記アトマイズ工程において、溶鋼に各種の合金成分を添加することにより、粉末中の合金成分分布が均一な完全合金鋼粉が製造される。この他、鉄

粉と合金成分粉末を混合し、水素雰囲気中で熱処理することで、純鉄粉表面に合金成分粒子が拡散付着した部分合金化鋼粉が製造される。

還元鉄粉は、多孔質で比表面積が大きく、反応性に優れるため、化学反応用途に利用されている。焼結部品成形時においては金型に均一に充填されるため、焼結部品内の密度むらが小さく、部品の寸法精度が高いといった特長がある。一方、アトマイズ鉄粉は、粒子が中実で高密度の圧粉体が得られるため、高密度・高強度焼結部品に多く適用されている。完全合金鋼粉は粒子内の合金成分が均一に分布するため、均質な組織の焼結体が得られる。部分合金化鋼粉は、純鉄粉がベースであるため圧縮性に優れ、高密度の圧粉体が得られ、焼結体の機械的強度も高い。

JFE スチールの鉄粉製品は、上述したさまざまな特長を持つ各種鉄粉について、用途に適した商品開発が積み重ねられ、JIP<sup>®</sup> の商品名で粉末冶金をはじめとする幅広い分野で利用されてきた。本報では、鉄粉の利用分野のトレンドと、これに向けた JIP 製品の概要、および適用事例を紹介する。

2015 年 2 月 6 日受付  
「JIP」、「シグマロイ」、「クリーンミックス」、「HDX」、「JFM」、「粉美人」は JFE スチール株式会社の登録商標である。

## 2. 鉄粉の利用産業分野

### 2.1 粉末冶金の技術動向

粉末冶金（PM）製品の主要用途である焼結機械部品の国内生産量の推移を図1に示す。2001年以降、生産量は増加傾向だったが、2008年に発生した世界的金融危機の影響で2009年は大きく落ち込み、2010年以降、回復はしたものの、元の水準までは戻っていない。国内の自動車1台当たりを使用される焼結機械部品の重量（原単位）の推移を図2に示す。2001年の7.3 kgから上昇傾向にあり、2010年には9.7 kgまで増加したものの、2011年以降は低下傾向に転じている。これは、近年の軽自動車を中心とする乗用車の小型化とハイブリッド車の増加、ならびに焼結機械部品の高強度化による小型軽量化などの影響によるものと推定される。

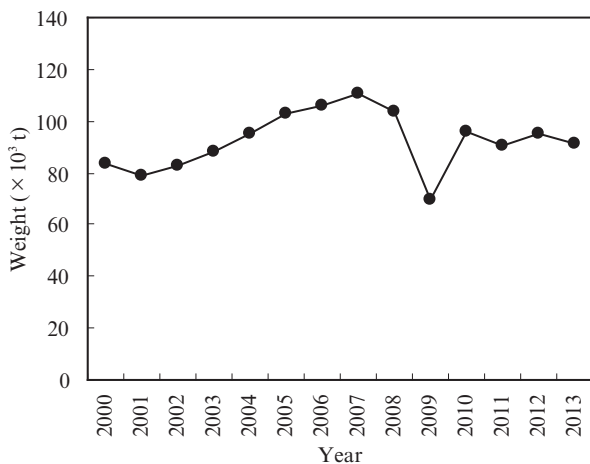


図1 焼結機械部品の国内生産量推移

Fig. 1 Domestic production volume trend of powder metallurgy machine parts (Source: Japan Powder Metallurgy Association (JPMA))

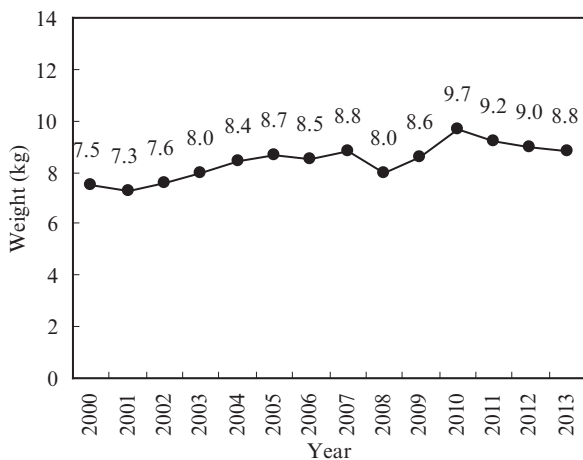


図2 国内自動車用焼結機械部品の原単位推移

Fig. 2 Trend of total weight of powder metallurgy parts used for one car in Japan (Source: Japan Powder Metallurgy Association (JPMA))

国内の自動車部位別の焼結機械部品の構成比率を図3に示す。エンジンの比率が50%を上回っており、適用部品としてカムプロケット、バルブガイド、バルブシート、オイルポンプなどが挙げられる。次に駆動系の比率が高く、シンクロナイザーハブ、プラネタリキャリアなどが採用されている。近年のハイブリッド車の増加やエンジンのダウンサイジングにより、焼結機械部品の使用量は、減少する傾向にあると考えられ、今後、モーターをはじめとする機械部品以外への粉末冶金技術の適用拡大が強く望まれている。

世界の自動車生産台数予測を図4に示す。今後も中国、インドなどアジアを中心に自動車生産台数の増加が見込まれており、世界的規模での自動車焼結機械部品向けの鉄粉需要の増加が期待される。

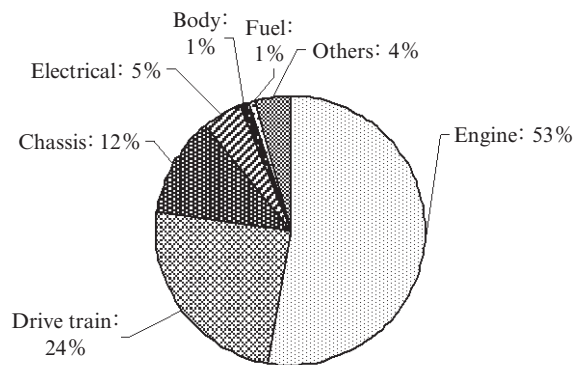


図3 国内自動車用機械部品の構成比率 (2013年)

Fig. 3 Component percentages of powder metallurgy parts for vehicle in Japan (2013) (Source: Japan Powder Metallurgy Association (JPMA))

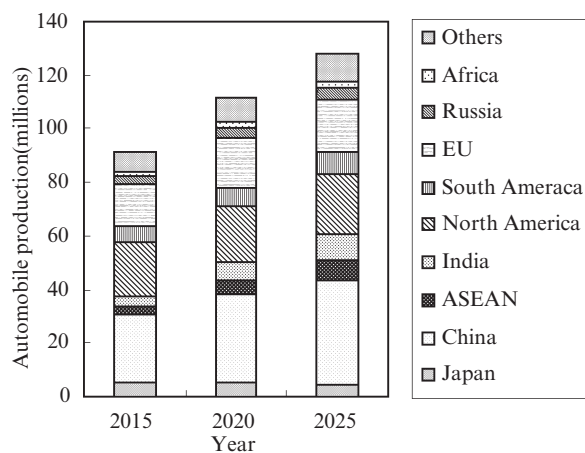


図4 世界の自動車生産台数予測

Fig. 4 Global vehicle production over the next ten years (Source: Processing the data in FOURIN, Inc. homepage)

## 2.2 粉末冶金以外の利用分野

粉末冶金以外の鉄粉の利用分野として、鉄粉の反応性に着目した製品がある。鉄粉の酸化時の発熱特性を利用したカイロや、酸素吸収特性を利用した脱酸素剤は、代表的な利用例として挙げられる。

鉄粉は、鉄スクラップと同様に化学反应用途において、鉄源として使用されている。鉄スクラップに比べて、鉄粉は微細であるため反応性に優れ、さらに流動性が優れることから、容器への充填・排出などの設備の自動化が可能であるなどの利点がある。このような利点を生かし、さまざまな鉄系化合物の原料として使用されるほか、エッチング廃液からの有用金属回収にも利用されている。

一方で、溶接作業の能率化、コスト低減のために鉄粉が利用されている。溶接棒被覆剤に溶着金属補給源として鉄粉を配合する、あるいはフラックスに鉄粉を含有させることで溶接速度を高めて溶接効率を向上させ、単位溶着金属当たりのワイヤ消費量低減にも寄与している。この他、鉄粉の酸化熱を利用したガス切断の熱量向上にも、鉄粉は用いられている。

鉄粉の軟磁気特性に着目し、鉄粉の表面に絶縁被覆を施し、圧縮成形した圧粉磁心や、あるいは焼結磁心といった磁性部品にも利用されている。

その他にも、鉄粉の化学反応性を利用して、土壤に含まれる有害物質の重金属の吸着<sup>2)</sup>や揮発性有機化合物(VOC)分解による土壤浄化<sup>3)</sup>などの用途にも利用されている。また、農業分野においても、農地への鉄分補給、直播き用の水稻種粒に錘として被覆する<sup>4)</sup>などの利用が増加しつつあり、今後の市場拡大が期待されている。

## 3. JIP® 製品概要

### 3.1 粉末冶金向け JIP® 製品の概要

JFE スチールは焼結機械部品用原料として、純鉄粉、合金鋼粉およびその偏析防止処理粉(JIP® クリーンミックス®)の開発を継続的に進め、焼結機械部品の高強度化による自動車の小型軽量化に貢献してきた。

合金鋼粉は、焼結機械部品に求められる強度、靱性、耐摩耗性などを満たすために、合金組成と量産製造条件の最適化によって完成された製品である。完全合金鋼粉および部分合金化鋼粉の他、完全合金鋼粉の表面に合金成分粒子を拡散付着させたハイブリッド合金鋼粉を商品化している。

JIP クリーンミックスは、純鉄粉(還元鉄粉、アトマイズ鉄粉、およびこれらの混合粉)、上記の合金鋼粉を主原料に、お客様のご要望に合わせて、副原料粉末(銅粉、黒鉛粉など)、および潤滑剤を混合し、独自の偏析防止処理により黒鉛粉などの比重が異なる副原料を鉄粉表面に接着した混合粉である。副原料の飛散が抑制され、お客様の製造ラインでの

発塵低減による作業環境の改善を実現した。また、成分偏析が少ないため焼結部品の品質安定化や流動性改善による生産性向上に寄与するとともに、必要に応じて特殊な添加剤を添加することで新機能を付加することも可能な高付加価値製品である。現在、JIP クリーンミックスは、粉末冶金用鉄粉出荷量の半数を超える JIP 製品の主力商品の一つとなっている。

#### 3.1.1 合金鋼粉

鉄系焼結材料の主要用途である自動車部品の高性能化、および小型化に対応するために、JFE スチールは種々の高強度焼結材用合金鋼粉を開発してきた。

Cr 系完全合金鋼粉は、真空還元法で製造した低酸素、低炭素で圧縮性に優れた Cr-Mo 鋼粉であり、焼結のままでも高強度、高硬度が得られ、耐熱・耐摩耗部品に適しており<sup>5)</sup>、Cr の含有量により、「JIP® 4100V」(1%Cr-0.8%Mn-0.3%Mo)、「JIP 20CRV」(2%Cr-0.8%Mn-0.2%Mo-0.2%S)、「JIP 30CRV」(3%Cr-0.3%Mo-0.3%V)の3種類をラインアップしている。

「JIP シグマロイ® 2010」は、2%Ni-1%Mo 部分合金化鋼粉であり、高圧縮性で焼結体の被削性に優れ<sup>6)</sup>、焼結後に熱処理することで4%Ni 合金鋼粉を上回る高強度、耐摩耗性が得られる<sup>7)</sup>。

「JIP 21SX」は、2%Ni-1%Mo 完全合金鋼粉に微細なニッケル粉、銅粉、黒鉛粉をバインダで接着した合金鋼粉であり、焼結後に急冷却を行なうシンターハードニングプロセスにより、焼結体に熱処理を施すことなしに熱処理材並みの高強度、高硬度が得られるため<sup>8,9)</sup>、浸炭などの付加的な熱処理工程の省略が可能になり、焼結部品の製造コスト低減に貢献する。

「JIP AH4515」は、0.45%Mo 完全合金鋼粉に0.15%相当の Mo を拡散付着させたハイブリッド Mo 合金鋼粉<sup>10)</sup>であり、部分合金化させた鋼粉表面の Mo 高濃度部が焼結温度で拡散係数の大きい  $\alpha$  相を形成するため、比較的焼結温度の低いメッシュベルト式焼結炉の焼結条件においても焼結が進行し、気孔が球状微細化するため、高合金の4%Ni 合金鋼粉と同等の引張強さが得られる。また、従来の0.6%Mo 完全合金鋼粉と比較して、Mo 含有量は同等ながら、焼結温度を20℃低下し、焼結時間を半減しても、**図5**に示すように、従来材を上回る回転曲げ疲労強度が得られる<sup>11)</sup>。

#### 3.1.2 偏析防止処理粉「JIP® クリーンミックス®」

(1) 成形時の課題解決に寄与する「JIP® クリーンミックス®」

鉄粉を主原料とする混合粉における黒鉛粉などの副原料の偏析防止ならびに発塵対策として、「JIP® クリーンミックス®」を開発した<sup>12)</sup>。焼結部品の高密度化は、機械的特性の向上に繋がるため、成形時の高密度化のニーズが高い。一方で、成形時の高密度化は、圧粉体抜出力の増加をもたらす、金型と圧粉体との摩擦に起因した側面の外観不良を生じやすくなる。金型との摺

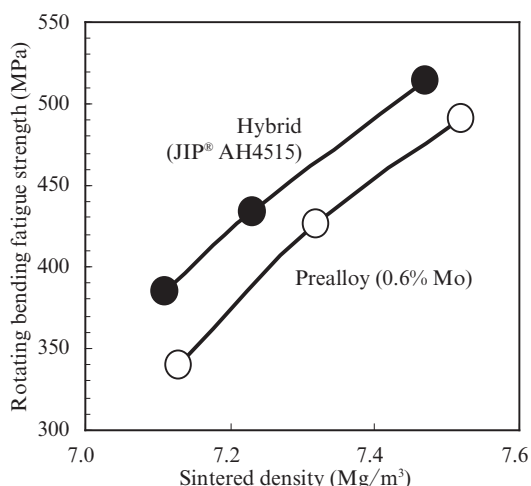


図5 焼結・熱処理材の回転曲げ疲労強度

Fig. 5 Rotating bending fatigue strength of the sintered and heat-treated parts

動性を改善する潤滑剤として使用されてきた金属石鹸は、焼結炉内の汚染の原因となるため、使用量の低減が望まれている。

そこで、金属石鹸の使用量を低減したワックス系潤滑剤を使用し、流動性に優れた偏析防止処理粉「JIP クリーンミックス JWAX」<sup>13)</sup>を開発した。高密度化への要望に対しては、常温成形において高密度化を可能とする「JIP クリーンミックス HDX」<sup>14,15)</sup>を開発し、低抜出力の要望に対しては、成形時に特殊潤滑剤が成形体側面に選択的に濃化することにより、潤滑効果を高め、抜出力を低減する「JIP クリーンミックス LX」<sup>15)</sup>を開発した。さらに、粉末の充填性を高めることで成形時の重量ばらつきを低減する「JIP クリーンミックス ZERO」を開発した。「JIP クリーンミックス ZERO」は、流動性改善により成形金型中に粉末が均一に再現性良く充填されるため<sup>16)</sup>、連続成形時の成形体重量の変動を低減することができる。さらに、一時的な成形操作停止後の再開時に見られる不連続な重量増加を図6に示すように、従来のクリーンミックスよりも30%低減することができ、成形時の材料歩留り向上、焼結部品の品質安定化に寄与できる。成形金型中への均一充填性は、狭い空間への粉末充填を容易にし、従来困難であった複雑形状の難成形部品の成形を可能とする。

## (2) Niフリー高強度合金鋼粉クリーンミックス®「JIP® FM シリーズ」

4%Ni合金鋼粉は、圧縮性に優れ、高密度化が可能であるため焼結のまま、あるいは焼結後に浸炭などの熱処理を施した場合も、他材料に比較して機械的特性に優れることから、高強度焼結部品に汎用的に用いられてきた<sup>17)</sup>。

しかしながら、Ni原料は、近年価格高騰が続き、焼

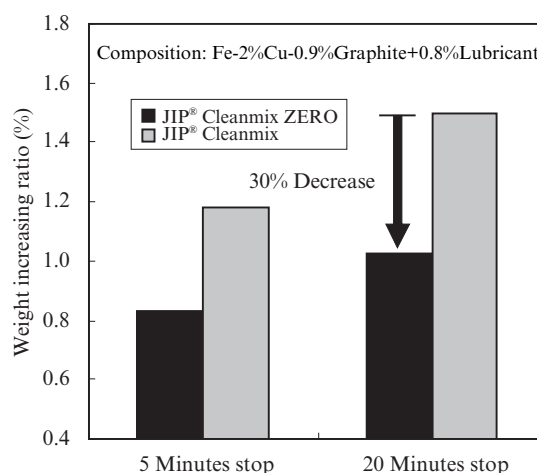


図6 成形停止、再開後の成形部品重量増加率

Fig. 6 Weight increasing ratio of green compacts after 5 or 20 min interruption of press machine

結部品においてNi使用量の低減が望まれている。このような要望に対して、JFE スチールは、焼結部品の被削性に優れるNiフリー高強度合金鋼粉クリーンミックス®「JIP® FM シリーズ」を開発し、商品化した。「JIP FM シリーズ」は、焼結部品の製造条件に合わせて、合金組成、混合粉の配合の調整により、焼結組織を制御することで、焼結部品の合金量の低減と高強度化を両立した製品である。本シリーズは、4%Ni合金鋼粉に比べ、合金元素の分布の濃淡が少なく焼結組織が均一なため、断続切削が抑制され被削性にも優れている。

メッシュベルト式焼結炉の焼結条件で引張強さ600 MPaが得られる「JIP FM600」、メッシュベルト式焼結炉の焼結後に浸炭熱処理を行なうことで引張強さ1000 MPaが得られる「JIP FM1000」は、いずれも0.45% Mo完全合金鋼粉に銅粉、黒鉛粉を混合したクリーンミックスであり、焼入れ性倍数の大きいMoと、焼結中に融解するCuによる粒子接触部(ネック部)の強化により、4%Ni合金鋼粉と同等の引張強さを実現した<sup>18)</sup>。

高温焼結後に浸炭熱処理を行なうことで引張強さ1300 MPaが得られる「JIP FM1300」は、ハイブリッドMo合金鋼粉「JIP AH4515」に黒鉛粉を混合したクリーンミックスであり、焼結時に高Mo領域が物質拡散速度の速いα相を形成するため、ネック部が成長・強化されると同時に気孔の球状化と微細化が促進され、高強度かつ高疲労強度の焼結部品となる。

高温焼結後に光輝焼入れ、焼戻しを行なうことで引張強さ1500 MPaが得られる「JIP FM1500」は、0.5% Cr-0.2%Mn-0.2%Mo完全合金鋼粉の「JIP 5CRA」<sup>19-21)</sup>に黒鉛粉を混合したクリーンミックスで焼入れ性倍数の大きいCr, Mn, Moを配合し、酸化を抑制する還元性雰囲気での高温焼結後に光輝焼入れの組み合わせに

より、引張強さ 1500 MPa を実現する<sup>22)</sup>。

(3) 焼結部品の被削性を改善する「JIP<sup>®</sup> クリーンミックス<sup>®</sup> JFM<sup>®</sup> シリーズ」

粉末冶金製品は、ニアネットシェイプで製造されるが、近年の焼結部品の複雑形状化、寸法精度の向上に伴い、焼結後の切削加工が増加し、被削性の改善が求められている。従来、焼結部品の被削性を向上させる添加剤として、MnS 粉などが使用されてきたが、焼結部品表面の汚れ、および焼結炉内の汚染などの問題があった。これらの問題に対応するために、JFE スチールは、焼結部品の被削性を改善する「JIP<sup>®</sup> クリーンミックス<sup>®</sup> JFM<sup>®</sup> シリーズ」を開発し、商品化している。

「JIP クリーンミックス JFM 3」は、複数の油抜け孔がドリル加工されるショックアブソーバーのピストンのような部品の被削性改善を目的に開発された。本製品中の特殊な添加剤が焼結体気孔中に充填され、断続切削の衝撃を緩和し、ドリル加工時のトルク変動を抑制する他、切りくずが微細化し、系外排出性が向上するため、ドリルの高寿命化に寄与している<sup>23,24)</sup>。

「JIP クリーンミックス JFM 4」は、旋盤加工などの高速切削時の被削性改善を目的に開発された。複合酸化物粉末の微量添加により、焼結体切りくずの剪断変形を促進し微細化するとともに、複合酸化物が加工時の摩擦熱で軟化して切りくずを介して工具表面に付着・伸展することにより保護膜を形成し、磨耗や酸化による工具の材質劣化を抑制する<sup>25-27)</sup>。図 7 に示すように工具磨耗量は無添加材の 4 分の 1 以下、0.5%MnS 添加材の 3 分の 1 以下に抑制される。通常、工具磨耗が増加する高速切削において、工具磨耗の抑制効果が大きい。そのため、工具費の抑制、切削加工の生産性向上に寄与することができる。

「JIP クリーンミックス JFM X」は、幅広い切削速度

域において被削性改善効果が得られる。旋盤加工による精度向上やドリル加工による孔開けなど異なる加工方法や切削速度で加工される焼結部品の被削性改善に適している。伸展性の添加剤が切削加工に伴う塑性変形時に生成される空孔を残存させることで切りくずの剪断変形を促進して微細化し、また複合酸化物が工具保護膜を形成することで工具磨耗を抑制する<sup>28,29)</sup>。これらの相乗効果により、加工条件によらず優れた被削性を実現する。

3.2 粉末冶金向け以外の JIP<sup>®</sup> 製品の概要

3.2.1 種子コーティング用プレミックス鉄粉「粉美人<sup>®</sup>」<sup>4)</sup>

近年、稲作の低コスト・省力化を目的とした鉄コーティング水稲直播技術が注目されている。鉄コーティング水稲直播とは、鉄粉でコーティングした稲種子(粃)を水田に直接播き、水田中で発芽、苗立ち、生育させる栽培方法で、育苗作業・苗運搬・移植(田植え)が不要となるため、現在、日本で一般的に行なわれている水稲移植栽培と比べ、大幅な省力化が可能となる。

種子コーティング用鉄粉「JIP<sup>®</sup> S91」は、当社従来品よりも粒度を細かくすることで、乾燥後も種粃への高い付着性を維持することが可能となり、鉄粉脱落による粉塵の発生を抑え、作業環境改善にも寄与する。「粉美人<sup>®</sup>」は、水田に播いたとき、鍬の役目を果たす JIP S91 と接着剤の役割をする焼石膏を所定の比率で均一混合した種子コーティング用プレミックス鉄粉である。鉄粉と焼石膏があらかじめ混合されているため、農家における計量・混合作業を簡略化でき、省力化に一層貢献している。

3.2.2 発熱体(かいろ)用鉄粉

純鉄粉のうち、還元鉄粉は、比表面積が大きい特長を有し、酸化発熱に適した素材であることから、かいろ用鉄粉として広く使用されている。JIP<sup>®</sup> 製品では、ミルスケールを原料とした JIP K-100T、鉄鉱石を原料とした JIP KB-90 をベースにしたかいろ用鉄粉をお客様の要望に応じて展開している。

3.2.3 環境(土壌浄化)用鉄粉

環境問題への関心の高まり、法規制(土壌汚染対策法)の強化などにより、土壌汚染への対応の必要性が一層高まっている。土壌に含まれる有害物質の重金属の吸着や揮発性有機化合物(VOC)分解による土壌浄化などの用途に使用される鉄粉の需要に対応し、有害不純物を低減した、処理に適した粒度、種類(還元鉄粉、アトマイズ鉄粉)の環境用ベース鉄粉を取り揃え、お客様の要望に応じて展開している。

4. おわりに

鉄粉の利用分野は多岐に渡り、JFE スチールは幅広い用途の鉄粉製品を開発し、市場に展開している。JIP<sup>®</sup> 製品は ISO 9001 と ISO 14001 の認証を取得し、環境に優しい安定

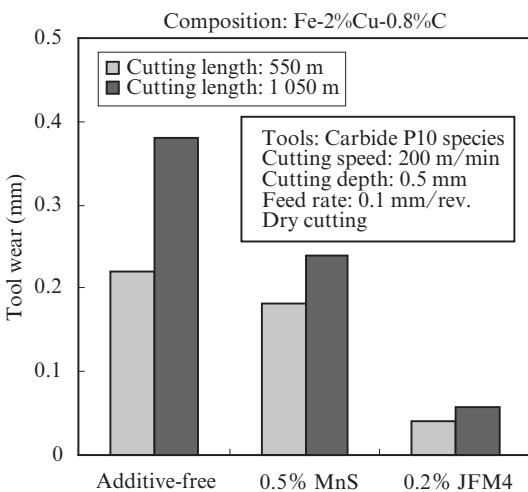


図 7 工具磨耗に及ぼす切削性改善剤の影響

Fig. 7 Effect of the machinability aid on the tool wear

した品質の製品を供給できる体制が整備されている。JFE スチールは、今後も各分野の技術動向や社会的ニーズに沿った製品開発を進め、市場に投入していくことで省エネルギーや環境対策などの面で産業の発展に貢献していく。

#### 参考文献

- 1) 川崎製鉄社史編纂委員会編纂. 川崎製鉄五十年史. 2000.
- 2) 木村利宗. 鉄粉法による排水中の重金属などの有害物質の処理. PPM. 1982, no. 9, p. 47.
- 3) 尾野友重, 中丸裕樹, 加藤嘉英. JFE 技報. 2005, no. 7, p. 29-33.
- 4) JFE 技報. 2015, no. 36, p. 82-84.
- 5) Ogura, K.; Okabe, R.; Takajo, S.; Maeda, Y. Prog. in Powder Metallurgy. Dallas, USA, 1987-05, MPIF vol. 43, p. 619.
- 6) 宇波繁, 上ノ蘭聡, 藤長政志. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 4, p. 175-179.
- 7) 古君修, 丸田慶一, 前田義昭. 川崎製鉄技報. 1992, vol. 24, no. 4, p. 273-278.
- 8) 宇波繁, 上ノ蘭聡, 杉原裕. JFE 技報. 2005, no. 7, p. 14-18.
- 9) Unami, S. et al. Metal and Materials International. 2004, vol. 10, no. 3, p. 289.
- 10) 宇波繁, 尾崎由紀子. JFE 技報, 2010, no. 26, p. 48-53.
- 11) 宇波繁, 尾崎由紀子, 後迫勉, 谷野仁. 粉体粉末冶金協会誌. 2010, vol. 57, no. 5, p. 341.
- 12) 峰岸俊幸, 牧野来与志, 杉原裕, 前田義昭, 高城重彰, 桜田一男. 川崎製鉄技報. 1992, vol. 24, no. 4, p. 262-267.
- 13) 上ノ蘭聡, 杉原裕, 小倉邦明. 川崎製鉄技報. 1999, vol. 31, no. 2, p. 139-143.
- 14) 尾崎由紀子, 尾野友重, 宇波繁. JFE 技報. 2005, no. 7, p. 1-5.
- 15) 尾野友重, 尾崎由紀子. JFE 技報. 2010, no. 26, p. 60-64.
- 16) 尾野友重, 尾崎由紀子. 粉体粉末冶金協会 平成 26 年度秋季講演大会 概要集. 2013, p. 30.
- 17) 小倉邦明, 阿部輝宣, 横石幸雄, 高城重彰, 峰岸俊幸, 初谷栄治. 川崎製鉄技報. 1987, vol. 19, no. 3, p. 202-207.
- 18) 宇波繁, 尾崎由紀子, 尾野友重. JFE 技報. 2010, no. 26, p. 54-59.
- 19) 前谷敏夫, 宇波繁, 尾野友重, 尾崎由紀子, 小倉邦明. 粉体粉末冶金協会 平成 25 年度秋季講演大会概要集. 2013, p. 69.
- 20) 前谷敏夫, 宇波繁, 尾野友重, 尾崎由紀子, 山西祐司, 小倉邦明. 粉体粉末冶金協会 平成 26 年度春季講演大会概要集. 2014, p. 87.
- 21) 前谷敏夫, 宇波繁, 尾野友重, 尾崎由紀子, 小倉邦明. 粉体粉末冶金協会誌. 2014, vol. 61, no. 6, p. 313-317.
- 22) Maetani, T.; Unami, S.; Ozaki, Y.; Yamanish, Y. Euro PM2013 Congress & Exhibition. Gothenburg, Sweden, 2013-09-15-18. 32F\_EP13149.
- 23) 前谷敏夫, 宇波繁, 尾崎由紀子. 粉体粉末冶金協会 平成 22 年度秋季講演大会概要集. 2010, p. 110.
- 24) Maetani, T.; Unami, S.; Ozaki, Y. Adv. Powder Metall. Mater. 2011, vol. 1, p. 06.1-06.6.
- 25) 尾崎由紀子, 佐藤孝則, 宇波繁, 尾野友重. 粉体粉末冶金協会 平成 21 年度春季講演大会概要集. 2009, p. 133.
- 26) Unami, S.; Maetani, T.; Ozaki, Y. Adv. Powder Metall. Mater. 2012, vol. 1, p. 06.62-06.70.
- 27) Maetani, T.; Unami, S.; Ozaki, Y. Powder Metallurgy World Congress & Exhibition. Yokohama, Japan, 2012-10-14-18. P-T7-74.
- 28) 主代晃一, 前谷敏夫, 尾野友重, 尾崎由紀子. 粉体粉末冶金協会 平成 26 年度秋季講演大会概要集. 2014, p. 29.
- 29) Nushiro, K.; Maetani, T.; Ono, T.; Ozaki, Y. Euro PM2014 Congress & Exhibition. Salzburg, Austria, 2014-09-21-24. 17\_O4\_EP14059.



前谷 敏夫



太田 純一



藤長 政志