

焼結部品の被削性を改善できる JIP®クリーンミックス® JFM® シリーズ

“JIP® Cleanmix JFM® Series”

for Sintered Parts with Excellent Machinability

主代 晃一 NUSHIRO Kouichi JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員 (課長)
尾野 友重 ONO Tomoshige JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員 (課長)
尾崎由紀子 OZAKI Yukiko JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部長・理博

要旨

粉末冶金部品は、しばしば高精度化や多機能化の要求に対応するための切削加工が施され、部品製造コストの低減を実現する上で、被削性の改善が求められている。この要求に対し、JFE スチールは独自の製造プロセスを用いてお客様のさらなる使いやすさを追及した偏析防止処理鉄粉である JIP® クリーンミックス® のラインアップにおいて、鉄系焼結部品の切削コスト低減を実現する快削性クリーンミックス® JFM® (JFE Free Machining) シリーズを商品化してきた。JFM® シリーズはお客様より高い評価を得ており、今後もさらなる焼結部品適用範囲の拡大や部品製造コストの低減に貢献できると期待される。

Abstract:

Machining is often applied to powder metallurgical parts to fulfill the requirement of tighter tolerances and multifunction performances, and the sintered steels are required to improve machinability for the reduction of the manufacturing cost. In the lineup of the JIP® Cleanmix that is the segregation-free iron mixed powder by the original manufacturing process with pursuing more convenience for customer, JFE Steel has commercialized the JIP® Cleanmix JFM® (JFE Free Machining) series to meet the demand of excellent machinability that achieves the manufacturing cost reduction of powder metallurgical parts as using the iron based sintered steels. The JIP® Cleanmix JFM® series have been widely applied to automotive parts, and are expected to serve further expansion of the sintering parts application and the reduction of the manufacturing cost in future.

1. はじめに

粉末冶金技術の進歩によって、高寸法精度で複雑な形状の部品を、ニアネット形状に製造することができるようになったため、粉末冶金技術を利用した製品が各種分野で利用されており、自動車部品の分野でも鉄系焼結体（以下焼結鋼）が広く適用されている。しかしながら、プレス成形では対応できないアンダーカットなどの複雑形状や、需要家からの高精度化ニーズのために、焼結鋼に機械加工が施される場合がある。

ところで、焼結鋼には気孔が存在するため、その切削加工での工具寿命は、溶鋼から製造した溶製材や鋳造材に比べて短いことが知られている。これは、焼結鋼の熱伝導性が悪く、被削物と工具が加工時に高温化すること、また断続的な応力が工具に加わることによると言われている¹⁾。このようなことから、機械加工が施される鉄系焼結部品では

製造コストに占める切削加工費の比率が高く、その被削性の改善が望まれている。

従来、焼結鋼の被削性改善に関しては、さまざまな添加剤が報告されており、中でも MnS 粉はコストパフォーマンスの観点から、最も普及している材料である²⁾。また近年、新規切削性改善剤に関する報告もなされている^{3,4)}。

JFE スチールでは、鉄粉を含む混合粉中の副原料粉末の偏析や発塵の問題に対応するため、1989年に「JIP® クリーンミックス®」を商品化し⁵⁾発展させてきた。このラインアップにおいて、独自製造プロセスを活用し粉末冶金技術を駆使することにより被削性を改善した快削性クリーンミックス JFM® シリーズとして、ドリル加工時の断続衝撃を抑制する「JFM3」⁶⁾、高速旋削時の工具磨耗を減らす「JFM4」⁷⁾、旋削性およびドリル切削性に優れた「JFMX」⁸⁾を開発してきた。

本報では、これら開発材の特長ならびにその切削性能について紹介する。

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

2. 被削性改善技術

2.1 鋼材における被削性改善技術

溶鋼から製造した溶製材や鋳造材を素材とした機械構造用快削鋼として S, Pb, Se, Te, Bi, Ca などの添加鋼が知られている⁹⁾。

硫黄快削鋼では、生成した硫化物系介在物が、応力集中源となり切屑生成時の亀裂の発生あるいは伝播に役立つことと、工具と切屑の凝着防止あるいは原子拡散防止効果を持つと考えられている。なかでも、硫黄快削鋼中の MnS の作用機構に関しては詳細な調査がなされており、(1) 減摩擦作用¹⁰⁾、(2) 内部応力集中源としての脆化作用^{11, 12)}、(3) 内部潤滑作用¹³⁾、(4) 工具面保護層の形成作用¹⁴⁾などが提唱されている。また、鉛快削鋼では、Pb が低融点(600 K)であるために、切削加工によって発生する熱で溶融し、応力集中源として作用すると同時に、工具と切屑あるいは加工物との潤滑に役立っていると言われている¹⁵⁾。一方、カルシウム快削鋼では、鋼中の酸化物を被削性に適したものに变化させており、その酸化物は CaO, SiO₂, Al₂O₃ の複合化合物となっている。カルシウム快削鋼の切削時には、工具にこれらの酸化物とほぼ同一の組成のベラークと呼ばれる付着物が生成し、このベラークは高速切削時の工具磨耗の主たる原因である工具と切屑または加工物間の元素の拡散(拡散磨耗)を防止し、工具磨耗の進行を抑制する効果があると考えられている¹⁶⁾。このようなことから、切削性改善に用いられる添加剤に求められる機能としては、応力集中、切屑の凝着防止、工具と切屑間の潤滑、拡散磨耗の抑制などが考えられる。

2.2 クリーンミックス®JFM® シリーズの被削性改善の考え方

粉体を原料とする粉末冶金法により製造された焼結鋼は、気孔が多く存在するという特長を有し、この気孔が切削性へ悪影響を及ぼすことが知られている。すなわち、気孔の存在により熱伝導率が低いため、切削時の発熱により切削温度が高くなり、工具の高温損傷が起こりやすい、また、気孔の存在により工具は断続的な衝撃を受けるため、磨耗が増大すると言われている¹⁾。

そこで、クリーンミックス®JFM® シリーズでは、焼結鋼の特性に対応すべく、下記の観点の機能を有する添加剤を、クリーンミックス処理で鉄粉粒子表面に付着させ、焼結鋼中に均一に分散させることにより、被削性改善を図った。そのコンセプトを図 1 に示す。

- (1) 添加剤が応力集中点となり、切屑中に多数の亀裂(クラック)を生成させることにより、切屑が微細化し、工具への接触時間を短くする。
- (2) 添加剤が焼結鋼中の気孔を充填することにより、工具の負荷変動を低減し、断続切削での衝撃を緩和する。

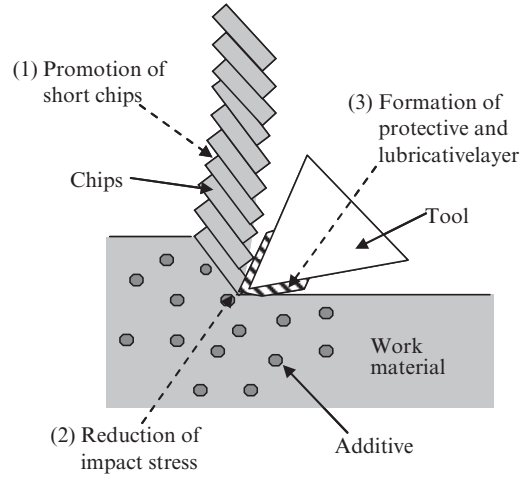


図 1 開発した被削性改善剤のコンセプト

Fig. 1 Concept of the developed additives for machinability improvement

- (3) 添加剤成分が切削加工時に溶融・軟化することにより工具摺動部に付着し、潤滑保護皮膜を形成し、工具磨耗を低減する。

3. クリーンミックス®JFM® シリーズの特長

3.1 クリーンミックス®JFM®3 の切削特性

焼結部品のなかでも、ショックアブソーバ部品のように複数の穴あけ加工が必要な部品では、特にドリル切削性が重要となる。そこで、当社ではドリル加工時の工具磨耗、トルク変動を抑制する被削性に優れた焼結鋼を実現する切削改善剤を添加したクリーンミックス®JFM®3 を開発した。

3.1.1 ドリル切削性

クリーンミックス®JFM®3 の被削性を評価するために、焼結鋼へ切削改善剤を添加しない材料、切削改善剤として MnS または JFM3 用添加剤(以下 JFM3)を添加した材料で比較を行なった。原料鉄粉には、水アトマイズ鉄粉(JIP® 260 A)を使用し、鉄粉に対して 0.7mass% 黒鉛粉、潤滑剤として 0.8mass% のステアリン酸亜鉛を添加し、さらに切削改善剤を添加する場合はこれを添加し、偏析防止処理を行ないクリーンミックスとした。切削改善剤の添加量は MnS では 0.3~1.5mass%、JFM3 では 0.75mass% とした。得られた混合粉末を、外径 60 mm、厚さ 10 mm のタブレット状に成形密度が 6.6 Mg/m³ となるように加圧成形し、この成形体を 5vol% 水素 -95vol% 窒素ガス雰囲気中で 1423 K (1150°C) にて 15 min 保持し焼結し被削材とした。ドリルテストとして、2.4 mmφ の超硬ドリルを用いて、乾式で、回転数 10 000 rpm、送り速度 0.02 mm/rev. の条件で 100 穴の貫通加工した後、ドリル外周磨耗量を測定した。

ドリル外周磨耗に及ぼす切削改善剤添加量の影響を図 2 に示す。切削改善剤として MnS を添加した場合、ドリル外

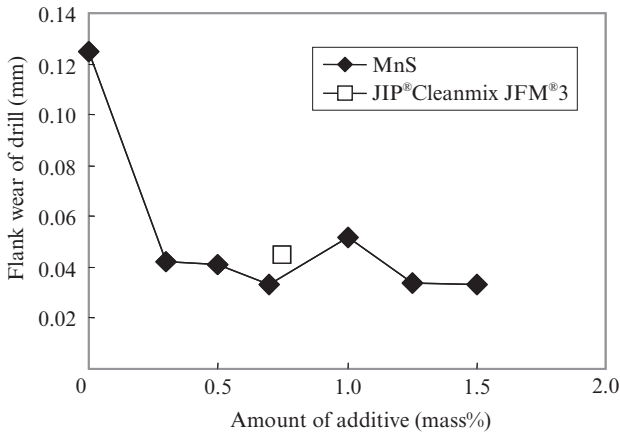


図2 ドリル外周磨耗に及ぼす切削改善剤量の影響

Fig. 2 Effect of the amount of additives to the flank wear of drill

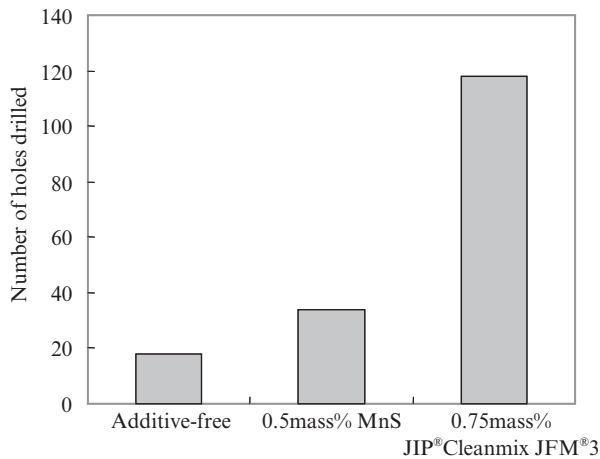


図3 添加剤有無でのドリル寿命比較

Fig. 3 Machinability of materials with and without additives in drilling tests

周磨耗は 0.3mass% 以上の添加で無添加時の 1/3 程度の磨耗量に低減した。一方、0.75mass% の JFM3 を添加した場合も MnS 添加時と同等の磨耗量となった。

次に、ドリル寿命の調査結果を図3に示す。ドリル加工での工具寿命は、1.2 mmφの超硬ドリルを用いて、回転数 10 000 rpm、送り速度 0.03 mm/rev. の条件で、ドリルが折損するまでの穴数を調査することにより求めた。JFM3 添加により、切削改善剤無添加材の 6.5 倍、MnS 添加材の 3.5 倍と大幅にドリル折損までの穴数が増加した。以上の結果より、JFM3 は MnS と比較しドリル外周磨耗に対しては同等の改善効果があり、ドリル寿命の大幅な延長に貢献できることがわかった。

3.1.2 ドリル損傷状況の解析

JFM3 はドリル寿命の延長に顕著な効果が認められたので、その特性を解析するため切削状況と工具損傷状況をさらに詳しく調査した。図4に、0.7mass% MnS 添加材と

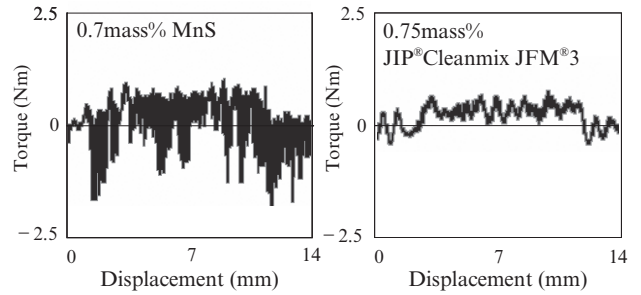


図4 ドリル加工時のトルク変動

Fig. 4 Torque fluctuation in drilling

0.75mass% JFM3 添加材の 100 穴目の加工時にドリルに作用する切削抵抗としてのトルクの測定結果を示す。ここで、ドリルに作用するトルクは切削動力計を用いて測定した。

0.7mass% MnS 添加材に比べ、0.75mass% JFM3 添加材ではトルクの変動が大幅に抑制されており、これは切削時に刃先へ掛かる断続的な衝撃が低下したことを示すと考えられる。

以上のことから、ドリル加工時のトルク変動が大きいほど、ドリルが受ける損傷は大きくなり、工具寿命が短くなると考えられる。そこでトルク変動と工具損傷との関係を調査し、本現象の傍証を得ることを試みた。ところで、超硬合金は WC を Co バインダーで結合した組織であるため、切削によりドリルに断続的な外力が作用した場合、Co バインダー相が損傷することが考えられる。一般に、Co のような軟磁性材料では欠陥の存在により磁壁がピン止めされ保磁力が大きくなるので、この測定により工具中の Co の損傷を評価できる可能性がある。そこで、ドリル先端部における Co バインダー相の損傷を評価する試みとして、この部分の保磁力を

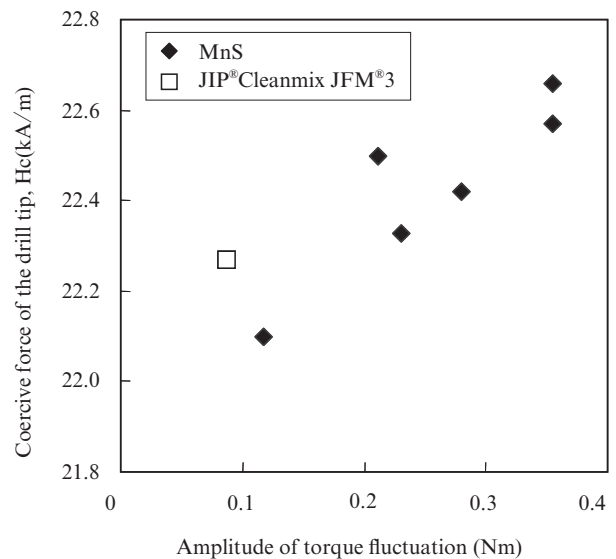


図5 トルク変動振幅とドリル先端部の保磁力の関係

Fig. 5 Relation between amplitude of the torque fluctuation with coercive force of the drill tip

試料振動型磁力計 (VSM: Vibrating sample magnetometer) を用いて測定した。トルク変動の振幅とドリル先端部の保磁力の関係を図5に示す。トルク変動が大きくなるほどドリル先端部の保磁力は大きくなる傾向が認められた。すなわち、トルク変動の原因と考えられる断続的な衝撃により Co バインダー相が損傷している可能性を示唆している。工具損傷度に関する評価法は今後更に詳細に検討する必要があるが、ドリル加工時のトルク変動の抑制によりドリルの損傷が抑制され、ドリル寿命の延長に寄与すると推定された。

3.2 クリーンミックス®JFM®4 および JFM®X の切削特性

焼結部品のなかでも、可変バルブタイミング機構に使用されるような内外径や端面などで高寸法精度が要求される部品では、焼結後に切削加工が行なわれ、特に旋削性が重要となる。また、これら部品においては、必要に応じて穴あけドリル加工も実施される。そこで、当社では高速旋削時の被削性に優れた切削改善剤を添加したクリーンミックス® JFM®4、旋削性およびドリル切削性の両方に優れた焼結鋼を実現する切削改善剤を添加したクリーンミックス JFMX を開発した。

3.2.1 クリーンミックス®JFM®4 の旋削性

クリーンミックス®JFM®4 の被削性を評価するために、ここでも焼結鋼へ切削改善剤を添加しない材料、改善剤として MnS または JFM4 用添加剤 (以下 JFM4) を添加した材料で比較を行なった。原料鉄粉には、水アトマイズ鉄粉 (JIP®301 A) を使用した。鉄粉に対して 0.8mass% 黒鉛粉、0.8mass% 潤滑剤を添加し、さらに切削改善剤を添加する場合はこれを添加し、偏析防止処理を行ないクリーンミックスとした。切削改善剤量は MnS 添加では 0.5mass%、JFM4 添加では 0.2mass% とした。得られた混合粉末を、外径

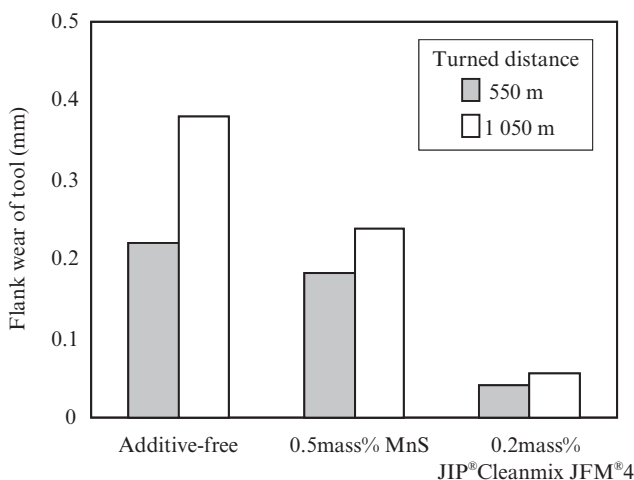


図6 旋削テストにおける工具磨耗量に及ぼす切削改善剤の影響 (旋削速度: 200 m/min)

Fig. 6 Machinability of materials with and without additives in turning tests (Turning speed: 200 m/min)

60 mm, 内径 20 mm, 厚さ 20 mm のリング形状および同外径で厚さ 10 mm のタブレット形状に成形密度が 6.9 Mg/m³ となるように加圧成形し、この成形体を吸熱型プロパン変成ガス雰囲気中で 1 403 K (1 130°C) にて 20 min 保持し焼結した。リング焼結体は 3 枚重ねて長さ 60 mm の円筒状とし旋削テストの供試材とした。旋削テストは、超硬 P10 種工具を用い、切削速度は仕上げ加工などで用いられる 200 m/min とし、切込み深さ 0.5 mm, 送り 0.1 mm/rev. 乾式旋削で実施した。図6に、旋削テストでの工具逃げ面摩耗幅を示す。JFM4 添加材での工具磨耗量は、無添加材の約 1/4, MnS 添加材の約 1/3 以下に大幅に低減した。

3.2.2 クリーンミックス®JFM®X の旋削性、ドリル切削性

次いで、クリーンミックス®JFM®X の切削性を示す。被削材は JFM4 の場合と同様に準備した。JFMX 添加剤 (以下 JFMX) の添加量は 0.3mass% とした。旋削テストは、サーメット工具を用い、切削速度は粗加工などで用いられる 100 m/min とし、切込み深さ 0.5 mm, 送り 0.1 mm/rev. 湿式旋削で実施した。またドリルテストは、2.6 mmφ のコーテッドハイスドリルを用い、湿式、回転数 5 000 rpm, 送り速度 0.02 mm/rev. の条件で貫通加工を行なった。この際 1, 752, 1 503 穴目の加工時にドリルに作用する切削抵抗としてのスラストを切削動力計により測定した。

図7に、旋削テストでの工具逃げ面摩耗幅を示す。JFMX 添加材での工具磨耗量は、比較材のそれより少ない結果となり、100 m/min 程度の比較的低速での切削において JFM4 を上回る被削性改善効果が得られた。

また、図8にドリル加工時の穿孔数の増加に伴うスラストの変化を示す。穿孔数の増加に伴い、スラストは増加する傾向であり、スラストは 0.5mass% MnS 添加材が最も低く、次いで 0.3mass% JFMX 添加材、無添加材の順となった。ド

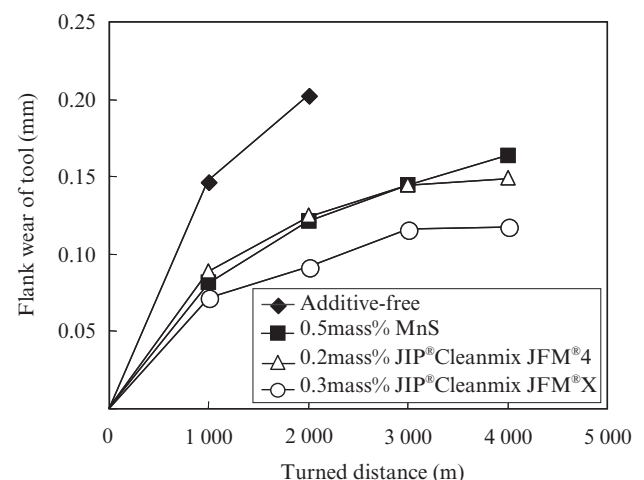


図7 旋削テストにおける添加剤有無での工具磨耗量比較 (旋削速度: 100 m/min)

Fig. 7 Machinability of materials with and without additives in turning tests (Turning speed: 100 m/min)

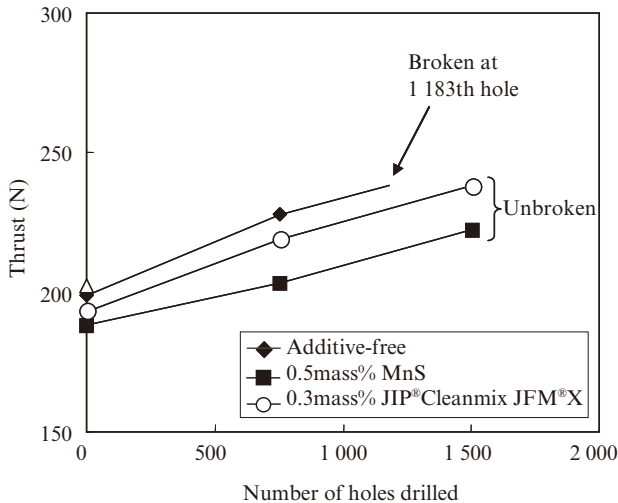


図8 添加剤有無でのドリル切削抵抗とドリル寿命

Fig. 8 Drilling machinability of materials with and without additives

リルの寿命に関しては、無添加材の場合1183穴目で破損したが、0.5mass% MnS添加材と0.3mass% JFMX添加材の場合には、1503穴加工してもドリル破損はなかった。

3.2.3 旋削状況の解析

JFM[®]4添加材は良好な被削性を示したので、その特性を解析するため、リング焼結体の切削後の切削加工面ならびに切屑断面の微細組織を観察するとともに硬さを測定した。硬さの測定はマイクロピッカース硬度計を用い、荷重0.245Nで行なった。切削加工面の塑性変形が進行した表層と塑性変形していない内部ならびに切屑の工具接触面表層で硬さを10点測定し平均値を用いた。写真1に被削材加工面表層での硬度測定後の顕微鏡写真を示す。

無添加材、0.5mass% MnS添加材ならびに0.2mass% JFM4添加材それぞれの被削材内部、被削材加工面表層および切屑の工具接触面表層の硬さを表1に示す。無添加材と比較して、切削改善剤を添加した焼結鋼では加工変形層の硬さが低く、加工硬化が抑制されていた。一方、加工変形

層の微細組織の観察では、添加剤の有無に係わらず気孔は変形方向に伸長し閉塞しており、組織が緻密化している様子が認められた。これらのことから、被削材および切りくずは、工具からのせん断・圧縮応力による塑性変形にともない気孔閉塞するが、添加された切削改善材が変形領域での転位蓄積を緩和したため加工硬化を抑制したことが推定される。

また、JFMX添加材は旋削において更に良好な被削性を示したので、その特性を解析するため、切りくずの断面を顕微鏡観察した結果を写真2に示す。0.3mass% JFMX添加材では無添加材および0.5mass% MnS添加材に比べ、せん断変形方向に沿って多くの微細なポイドが観察された。ここではJFMXが切屑のせん断変形においてポイドの生成および亀裂の伸展に寄与していることが推定される。この多数の微細な

表1 切削加工後の被削材及び切屑の硬さ

Table 1 Vickers hardness of the work and chip after turning

Material	Vickers hardness, Hv		
	Work inside	Work turned surface	Chip turned surface
Additive-free	210	378	372
0.5mass% MnS	207	283	332
0.2mass% JIP [®] Cleanmix JFM [®] 4	212	291	302

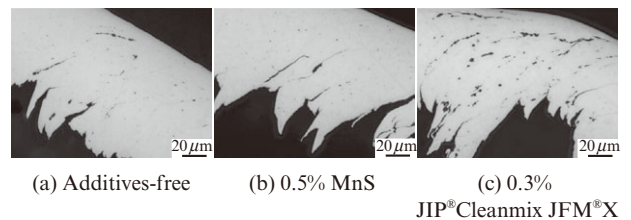


写真2 旋削テストで発生した切りくず断面の光学顕微鏡写真

Photo 2 Cross sectional microstructures of the chips in turning test

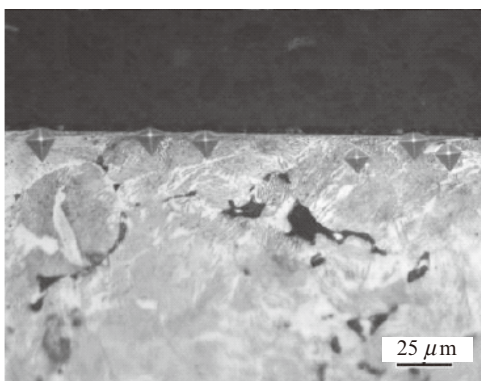


写真1 JFM[®]4添加材切削加工表層での硬さ測定状況

Photo 1 Hardness measurement situation at the turned surface of the work with JIP[®] Cleanmix JFM[®] 4

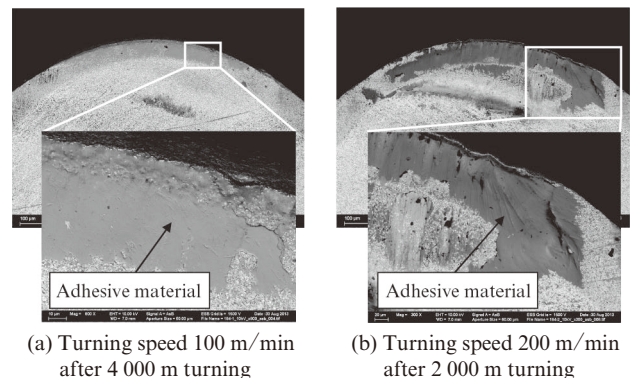


写真3 JFM[®]X添加材旋削後の工具すくい面の電子顕微鏡像

Photo 3 Scanning electron micrograph images of the tools after machining material with JIP[®] Cleanmix JFM[®] X

ボイドの生成により切屑が容易に破断し、切屑と工具間の接触面積を低減したことが、工具磨耗減少の理由の一つと考えられる。また、ボイドの生成および亀裂の伸展により加工時の塑性変形が容易になったと考えられたため、変形領域の加工硬化が抑制された結果に繋がると類推される。

次に、0.3mass% JFMX 添加材を旋削したサーメット工具のすくい面を電子顕微鏡で観察した結果を写真3に示す。100 m/min, 200 m/min のいずれの旋削速度においても、すくい面に付着層が観察され、後者の場合に付着層は顕著であった。この付着層は、JFMX 中に含まれる旋削時の摩擦熱で容易に軟化・溶融する成分に起因し、この付着層が工具表面の保護・潤滑層として作用し、工具と被削材あるいは切屑間の接触面での摩擦を低減するとともに、表面酸化を抑制し、工具磨耗を抑制したと推定される。

4. おわりに

本報では、これまでに開発した鉄系焼結部品の製造コスト低減を実現する快削性クリーンミックス® JFM® シリーズについて、特性発現の基本的な考え方、各商品の切削特性を紹介した。その要点を以下に記す。

- (1) クリーンミックス JFM3: ドリル加工性に非常に優れている。気孔の存在による断続的な衝撃を抑制し、切屑の破断を促進する。ドリル穿孔数は無添加材の6倍、MnS 添加剤の3倍以上となる。
- (2) クリーンミックス JFM4: 200 m/min 以上の高速旋削性に優れる。添加剤による切屑破断促進に加えて、加工時の摩擦熱で軟化して工具表面に保護層を形成する。工具磨耗量は無添加材の4分の1以下、MnS 添加材の3分の1以下となる。
- (3) クリーンミックス JFMX: JFM 4 の優れた高速旋削性を保持しながら、低速旋削性を改善し、更にドリル加工性にも優れる。

JFE スチールは、今後ともお客様との協力関係を深めつつさらなる技術開発を進め、お客様の使いやすさを徹底的に追及し、自動車分野での焼結部品適用範囲の拡大や切削加工費低減による部品製造コストの削減に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) Salack, A.; Secka, M.; Danninger, H. "Machinability of powder metallurgy steels." Cambridge International Science Publishing. 2005, p. 175.
- 2) Causton, R. J.; Cimon, T. "Machinability of P/M Steels." ASM Handbook. 2002, vol. 7. p. 673-676.
- 3) Hu, B.; Warzel, R.; Hennen, R. R. "Advances in Powder metallurgy & Particulate Materials." 2009, part 6, p. 1-12.
- 4) 古田智之, 谷口祐司. R&D 神戸製鋼技報. 2009, vol. 59, no. 1, p. 76.
- 5) 峰岸俊幸, 牧野来世志, 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.
- 6) Maetani, T.; Unami, S.; Ozaki, Y. Advances in Powder metallurgy & Particulate Materials. 2011, part 6, p. 1-6.
- 7) Unami, S.; Maetani, T.; Ozaki, Y. Advances in Powder metallurgy & Particulate Materials. 2012, part 6, p. 62-70.
- 8) 主代晃一, 前谷敏夫, 尾野友重, 尾崎由紀子. 粉体粉末冶金協会秋季大会講演概要集. 2014, p. 29.
- 9) 日本鉄鋼協会. 鉄鋼便覧. 第3版. no. 3, p. 134.
- 10) Merchan, M. E.; ZLatin, N. Trans. ASM. 1949, vol. 41, p. 647.
- 11) Tipnis, V. A.; Cook, N. H. Trans. ASME. 1967, vol. 89, no. 3, p. 533.
- 12) 岩田一明, 上田完次, 柴坂敏郎. 精密機械. 1977, vol. 43, no. 3, p. 311.
- 13) Stevenson, M. G.; Dunkan, K. R. JISI. 1973, vol. 211, no. 10, p. 710.
- 14) Chisholm, A. W. J.; Wilber, W. J.; Pattinson, E. J. Annals of the CIRP. 1972, vol. 21, no. 1, p. 7.
- 15) 荒木透, 山本重男. 鉄と鋼. 1971, vol. 13, p. 1912.
- 16) 伊藤哲郎, 高橋徹夫, 木村篤良, 山野清市. 電気製鋼. 1973, vol. 44, p. 29.



主代 晃一



尾野 友重



尾崎由紀子