

(論文)

新しい鉄系焼結部品用被削性改善添加剤「KSX-II」

New Free-machining Additive “KSX-II” for Iron Based Sintered Parts



古田智之*
Satoshi FURUTA



谷口祐司*
Yuji TANIGUCHI

Kobe Steel has developed a new free-machining additive “KSX-II” for iron based sintered parts. KSX-II is complex oxide powder that has a viscosity of $10^{5.5}$ Pa · s at the temperature of 773K and mean diameter of 23 microns as a typical value. A sintering mixture containing 0.3mass% of KSX-II has at least doubled the life of a K grade carbide tool used for cutting the sintered products compared with a conventional mixture containing 0.5mass% of manganese sulfide powder. The improvement is attributable to the optimum viscosity of KSX-II which generates a stable built-up edge (BUE).

まえがき = 粉末冶金法 (Powder Metallurgy, 以下 PM という) は複雑形状部品を高精度で安価に製造できる有力な製法であり、その適用は自動車用を主として年々増加している。しかし、部品の高精度化、複雑形状の要求拡大や工法上の制約から切削加工が必要な場合もあり、被削性、とくに工具寿命の改善が要求されている。また、環境面においても工具摩耗量を抑制することで、あるいは切削抵抗を低減することでエネルギー・ロスを減らす取組みが必要である。

当社は、これまで鉄系焼結部品用被削性改善添加剤として KSX^{(1)~(10)}を開発し、その混合粉を販売してきた。KSX は、CBN (立方晶窒化ホウ素) などの高級工具での高速切削時に溶融あるいは軟化しベラーク (belag) として工具表面に付着する。これが熱拡散による工具元素の切りくず中への移行を防止することにより、工具摩耗抑制効果を発揮する。しかしながら、鉄系焼結部品にもっぱら用いられる K 種超硬工具での切削には適していない。その理由は、K 種超硬工具がその耐熱性から 200m/min 以下の低速領域で使用されるため⁽¹¹⁾、切削温度が KSX の軟化あるいは溶融温度に達しないためである。

このような背景から当社は、K 種超硬工具での切削に有効な新しい被削性改善添加剤 KSX⁽¹²⁾を開発した。KSX に加えて KSX⁽¹²⁾を開発したことにより全ての加工条件での被削性改善を可能とすることができた。これは、鉄系粉末冶金の被削性分野で当社がナンバーワンの座を確立するものである。

本稿では、K 種超硬工具の摩耗メカニズムを解明するとともに、新たに開発した複合酸化物である被削性改善添加剤 KSX⁽¹²⁾の特性を報告する。従来、被削性改善のための酸化物制御は融点のみに着目されていたが、KSX⁽¹²⁾はその粘性を制御することにより、構成刃先 (BUE) を工

具保護としてより有効に作用させる特長を有するものである。

1. 工具摩耗メカニズム解明のための基礎評価

K 種超硬工具を用いた切削における工具摩耗メカニズム解明のために PM 材とそれと同じ化学成分を持つ溶製材の切削試験を実施した。

1.1 試験方法

PM 材の原料粉として Fe - 2mass%Cu (Copper) - 0.8mass%Gr (Graphite) + 0.75mass%Lub (Lubricant) を準備した。鉄粉は当社製 300M を使用し、その他は市販品を使用した。銅粉はアトマイズ品、黒鉛粉は天然品、潤滑剤はエチレンビスステアリン酸アミドを選定した。それらを V 型混合機で 30 分混合し、外径、内径がそれぞれ 64mm, 24mm の金型を用い、高さ 10mm, 密度 6.90g/cm³ となるよう成形した。その後、N₂-10vol%H₂ 雰囲気中で温度 1,393K にて 30 分焼結した。

一方、溶製材は焼結後の PM 材と組成を合わせるため、C は 0.75mass%, Cu は 2mass% となるよう真空溶解した。つづいて、大気中で 1,323K, 5 時間焼なましした後、1,473K で鍛造し、切削試験のために PM 材と同じ寸法に機械加工した。

切削試験は住友電工ハードメタル製 K 種超硬工具 (型番: SNMN12 0408, 材質: G10E) を用い、切削速度 150m/min, 切込み 0.5mm, 送り速度 0.1mm/rev で乾式の旋削を実施した。被削性評価として、100m, および 500m の距離を旋削した後で PM 材、溶製材それぞれの逃げ面摩耗量、および切削抵抗を測定した。また、被削材の金属組織を観察した。

1.2 試験結果

溶製材サンプルの化学成分は 2mass%Cu - 0.75mass% C の狙いに対し、1.85mass%Cu - 0.74mass% とほぼ狙

* 鉄鋼部門 鉄粉本部 鉄粉工場

いどおりであった。被削材のミクロ組織を図1に示す。いずれもフェライト、パーライトの混在組織であるが、PM材と比べ溶製材は粗大な組織であった。工具摩耗量、切削抵抗を図2に示す。いずれもPM材は溶製材に比べ小さい値を示した。

1.3 考察

図3に100m切削後の工具逃げ面を示す。摩耗が少ないPM材は凝着物が逃げ面に付着している。エネルギー分散型蛍光X線分析の結果、この付着物は鉄が主成分であることから構成刃先と考えられる。摩耗が大きい溶製材は凝着物の付着が見られない。これらから、構成刃先が摩耗を抑制するものと考えられる。

図4に100m切削後の切りくず断面ミクロ組織を示す。PM材はポアが連なって亀裂が発生しており、そのために十分にせん断変形していない粗大なフェライトが観察される。また、構成刃先の脱落痕も確認される。一方、

溶製材では切削前は粗大な組織であった(図1)が、切削時には抵抗が大きい組織が変形していることがわかる。さらに、切りくずの工具との接触表面に明確に単一化したような加工硬化層が見られる。

以上のことから、鉄系焼結材のK種超硬工具による切削では構成刃先が工具摩耗抑制に寄与していることがわかった。

構成刃先の生成メカニズムについては多くの議論がなされている。代表的なものとして被削材性状と切削条件の影響がある。一方、構成刃先が成長するための被削材ミクロ組織の条件として、

- ・変形能の異なる2相以上の相から構成される
- ・2相からなる層を形成するに十分な変形能を有する
- ・相自体または相間に亀裂が発生伝播する

ことが挙げられている¹³⁾。構成刃先が生成しているPM材はこれらの要件を満たしているが、溶製材は満たしていない。

また、構成刃先の生成は切削条件に依存し、切削速度が低速から高速になるにつれて、構成刃先不安定生成域から展伸された構成刃先生成域を経て最後には消失する。構成刃先の消失温度は約873Kとされている。さらに工具摩耗メカニズムとして、切削温度が低い場合は凝着摩耗やアブレッシブ摩耗が主体であるが、高温になるにつれて拡散などのトライボケミカル摩耗が促進するとされている¹⁴⁾。

今回の試験では工具に熱電対を装入し、切削中の温度を測定した。一方、切削抵抗から熱流速を求め、伝熱解析によりフィッティングを行い、切削温度を求めた。その結果、PM材の切削温度は約773K、溶製材の切削温度は約973Kであった¹⁵⁾。このことから、PM材は構成刃先が生成し得る切削温度域であり、溶製材は構成刃先が消失する温度域であることがわかる。

切削温度の面においてもPMは構成刃先生成要件を満たし、鋼材は満たしていない。

以上のことから、以下のメカニズムが考えられる。PM材ではポアがせん断面で連結して亀裂が発生し、材料の拘束力を緩和する。そのため、十分に変形していない2相が構成刃先として工具刃先へ凝着する。その凝着物により摩耗を抑制する。一方、溶製材は十分にせん断変形した切りくずが発生するが、切りくずと工具に十分な付着力がないため、トライボケミカル摩耗が進行していると考えられる(図5)。

K種超硬工具での切削において、PM材が溶製材と比べて少ない工具摩耗を示すのはこのようなメカニズムによるものであるが、P種超硬工具での切削では、PM材は溶製材より大きな工具摩耗を示す。これは、PM材では鉄粉(銅が表面に濃化拡散した硬質粒子)により、すきとり摩耗が促進されているためであると考えられる。P種はK種と比べて被削材が凝着しにくく、構成刃先の生成による工具摩耗抑制効果がない¹⁶⁾。一般に、PM材は溶製材と比べてポアの影響で被削性が劣る¹⁷⁾とされるが、反対に優れる可能性があることがわかった。

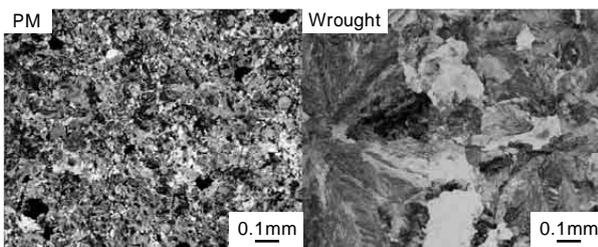


図1 PM材と溶製材のミクロ組織
Fig. 1 Microstructure of PM and wrought material

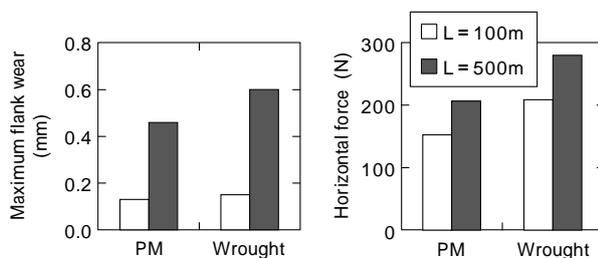


図2 PM材と溶製材の工具摩耗量と切削抵抗の比較
Fig. 2 Comparison between PM and wrought material on tool wear and cutting force

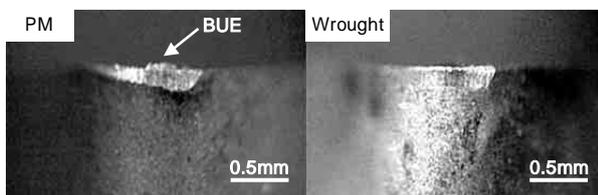


図3 100m切削後の工具逃げ面写真
Fig. 3 Macrophoto of tool relief face after machined distance to 100m

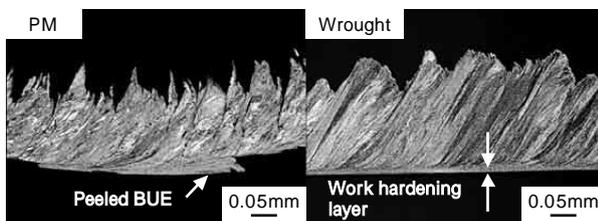


図4 100m切削後の切りくず断面ミクロ組織
Fig. 4 Microstructure of chip cross section after machined distance to 100m

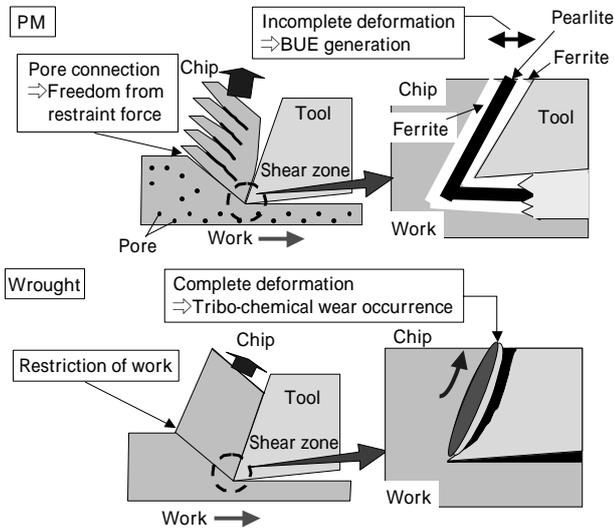


図5 工具摩耗メカニズム
Fig. 5 Mechanism of tool wear

2. 新被削性改善添加剤の調査と特性

2.1 新被削性改善添加剤の調査

基礎評価の結果から、K種超硬工具での工具摩耗抑制のためには被削材の変形を抑制し、構成刃先を生成することが有効であることがわかった。さらに構成刃先安定化のために、構成刃先と被削材間の潤滑性が必要と考えた。筆者らは、適切な特性を持つ酸化物を探索すべく、粘性の異なるいくつかの複合酸化物を試作・評価した。基礎評価試験と同じ配合で各酸化物を0.3mass%混合した。成形、焼結条件、および評価条件も1.1節と同じとした。

図6に各酸化物混合材の100m切削後の工具逃げ面摩耗量と圧環強さを調べた結果を示す。切削温度における粘性率が $10^2 \sim 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ のものが少ない工具摩耗量を示し

ている¹⁸⁾。

粘性率の最適値がある理由は、粘性率が高いと硬化するために潤滑機能が低下し、また粘性率が低いと粘り気がなくなり潤滑性が低下するためであると考えられる。

2.2 新被削性改善添加剤の MnS との比較

2.2.1 試験方法

2.1節の調査結果に基づき、工具摩耗量が少なく、十分な焼結体強度が確保できる複合酸化物を KXS- と名付けた。KXS- の773Kでの粘性率は $10^{5.5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。

試験材として KXS- を0.3mass%添加したものと MnS 粉 (MnS) を0.5mass%添加したものの2種類の材料を準備した。MnS は従来から被削性改善添加剤として一般的に使用されるものでこれをベンチマークとした。KXS- と MnS の平均粒径はレーザ回折法でそれぞれ23 μm 、9 μm であった。なお、KXS- は浸炭量が若干少ない傾向にあり、浸炭量を合わせるために黒鉛粉添加量を0.1mass%増加して0.9mass%とした。使用原料、混合、成形、焼結は1.1節と同様な方法で行った。

切削試験はK種超硬工具を用い、切削速度は一般に使用される速度域である100、150、200m/minの3水準で、2,000mの切削距離まで乾式旋削を実施した。切削速度および距離以外の切削条件は1.1節と同じとした。被削性評価として任意の距離を切削したときの工具逃げ面摩耗量および切削抵抗を測定した。また、被削材特性として見掛け硬さと圧環強さを測定した。

2.2.2 試験結果

切削距離と逃げ面摩耗量との関係を図7に示す。工具寿命を仕上げ切削での基準である逃げ面摩耗量0.2mm (JIS B 4011:1971) としたとき、MnS の工具寿命は切削速度100m/minで1,000m、150m/minおよび200m/minで400mであった。KXS- の工具寿命は切削速度

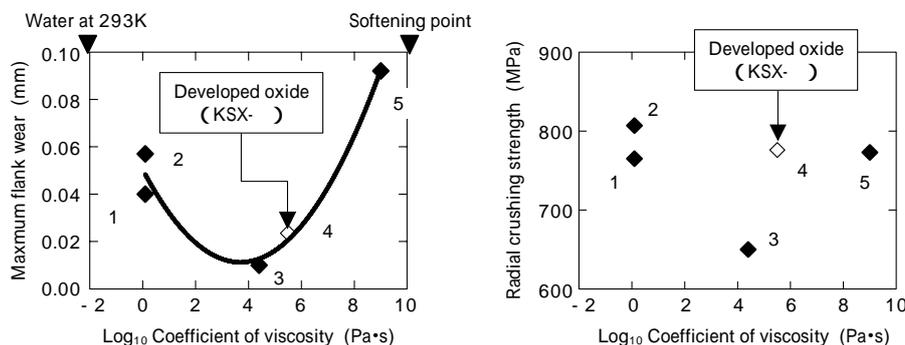


図6 添加した各種酸化物の773Kでの粘性率と逃げ面摩耗量、圧環強さとの関係
Fig. 6 Relationship between coefficient of viscosity of added oxide at 773K and flank wear / radial crushing strength

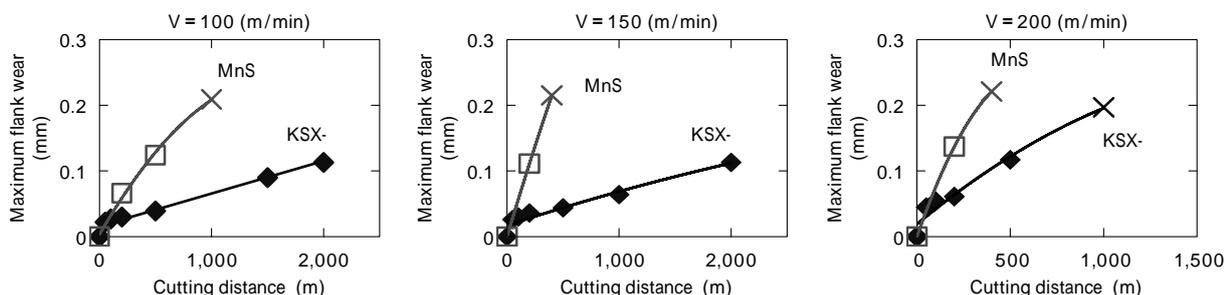


図7 種々の切削速度での切削距離と逃げ面摩耗量との関係
Fig. 7 Relationship between cutting distance and maximum flank wear at different cutting speeds

200m/min では1,000m であったが, 100m/min および 150m/min では切削距離 2,000m では寿命に達しなかった。したがって, KXS- の MnS 比工具寿命は切削速度 100m/min で少なくとも 2 倍, 150m/min で少なくとも 5 倍, 200m/min で 2.5 倍であった。

試験材の焼結体特性を図 8 に示す。KXS- は MnS と同等の焼結体特性を示した。

2.2.3 考察

切削速度 150m/min での MnS の工具寿命に達したとき(400m 切削後)と KXS- のほぼ同じ切削距離(500m)の工具逃げ面と切りくず断面マイクロ組織を図 9 に示す。KXS- は工具刃先に構成刃先が観察された。MnS は工具に構成刃先が確認できなかったが, 切りくずに構成刃先が確認されているため, 構成刃先は生成しているが不安定であると考えられる。工具摩耗量から構成刃先は KXS-, MnS, 無添加の順に安定しているといえる。図 9 と同時期と初期の 100m 切削後の切削抵抗を図 10 に示

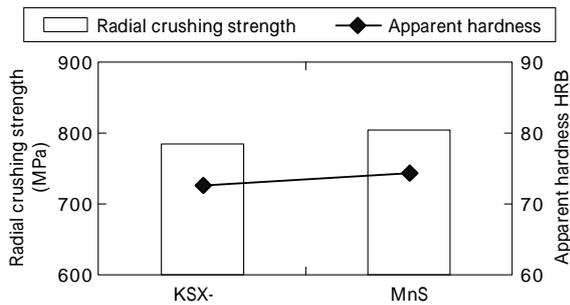


図 8 KXS- と MnS 混合材の圧環強さ, 見掛け硬さの比較
Fig. 8 Comparison between material with KXS- and MnS on radial crushing strength and apparent hardness

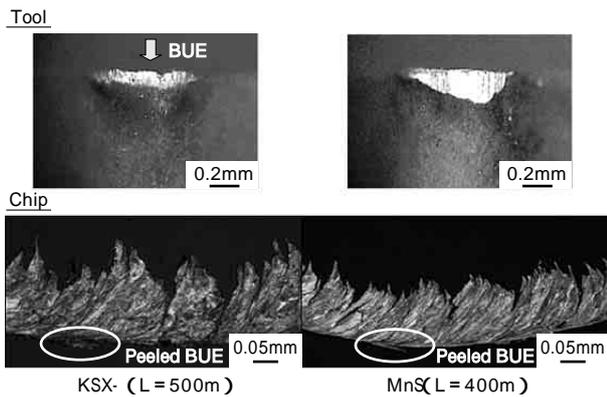


図 9 切削速度 150m/min での工具逃げ面写真および切りくず断面マイクロ組織
Fig. 9 Macrophoto of tool relief face and microstructure of chip cross section after machining at cutting speed of 150m/min

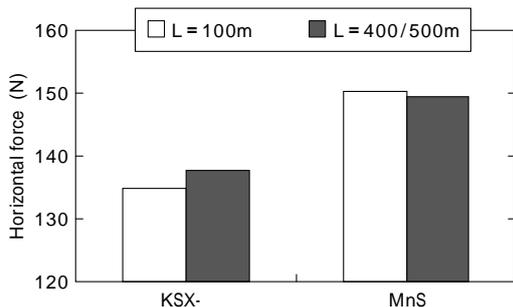


図 10 切削速度 150m/min での切削抵抗の比較
Fig.10 Comparison of cutting force at cutting speed of 150m/min

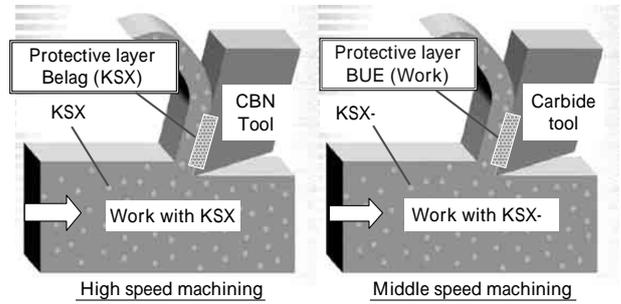


図 11 KXS と KXS- の工具摩耗抑制作用
Fig.11 KXS's behavior for restraint of tool wear

す。いずれも図 2 に示す無添加材より切削抵抗が低下しており, さらに MnS と比べ KXS- は切削抵抗が低減している。図 9 で切りくずの工具接触面を比較すると MnS より KXS- の加工硬化層が不鮮明であるが, これは KXS- が持つ潤滑性により切削抵抗が低下したためと考えられる。これらは基礎評価で得られた仮説に基づき KXS- が作用し, 工具摩耗を抑制していることを示す。

最後に, KXS と KXS- の工具摩耗抑制作用について考察すると, 図 11 に示したように, KXS はそれ自身が溶融あるいは軟化してベラーク(belag)として工具表面に付着し, 工具摩耗を抑制する。一方 KXS- は, 被削材を構成刃先として工具表面に有効に付着させることによって工具摩耗を抑制することがわかった。

むすび = 鉄系粉末冶金用被削性改善添加剤 KXS- の開発にあたり以下の結論を得た。

- 1) K 種超硬工具での切削において溶製材と比べ PM 材は工具摩耗量が小さい。これは構成刃先による工具保護とせん断抵抗低減による切削抵抗低下によるものと考えられる。
- 2) 溶製材の場合, 構成刃先の生成は刃先近傍において被削材がマイクロ組織, 強度・延性の点で不均一であることが有効とされるが, この考えは PM 材にも適用できる。
- 3) 被削性改善添加物を使う場合, その粘性率は切削温度において $10^2 \sim 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ を持つものが工具摩耗量に対して最適値を示した。
- 4) 切削温度 773K で粘性率 $10^{5.5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 平均粒径 $23 \mu\text{m}$ を持つ複合酸化物 KXS- を 0.3mass % 添加したとき, K 種超硬工具の一般的に使用される切削速度域 (100 ~ 200m/min) で 0.5mass% MnS 添加比少なくとも 2 倍以上の工具寿命を示した。
- 5) KXS- の工具摩耗量低減効果もまた, 構成刃先による保護作用とせん断抵抗抑制による切削抵抗低減によるものと考えられる。

参考文献

- 1) S. Furuta et al. : PM2004 World Congress Proceedings, Vol.2, p.339.
- 2) 古田智之ほか : R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.3 (2005) pp.72-75.
- 3) H. Suzuki et al. : PM2TEC 2005 Proceedings of the 2005 International Conference on Powder Metallurgy & Particle Materials, Part 10, pp.272-280.

- 4) 古田智之ほか：粉体粉末冶金協会講演概要集平成 18 年度春季大会，p.99.
- 5) S. Furuta et al. : Extended Abstracts of PM2006 Powder Metallurgy World Congress, pp.297-298.
- 6) H. Suzuki et al. : Extended Abstracts of PM2006 Powder Metallurgy World Congress, pp.776-777.
- 7) H. Suzuki et al. : 2006 SAE World Congress, Vol.1, pp.87-93.
- 8) 谷口裕司ほか：粉体粉末冶金協会概要集平成 19 年度春季大会，p.169.
- 9) 古田智之：素形材，Vol.48, No.11 (2007) pp.6-9.
- 10) H. Suzuki et al. : Proceedings of the 2008 World Congress on Powder Metallurgy & Particle Materials, Part 6, pp.76-86.
- 11) 仁平宣弘ほか：機械材料と加工技術，技術評論社，(2003) p.260.
- 12) S. Furuta et al. : Proceeding of the 2008 World Congress on Powder Metallurgy & Particle Materials, Part 6, pp.87-99.
- 13) 片山 昌：機械技術，日刊工業新聞社，Vol.45, No.1 (1997) p.111.
- 14) 家口 浩：第 188・189 回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2006) pp.189-209.
- 15) 工藤高裕ほか：日本鉄鋼協会講演論文集 材料とプロセス 第 152 回秋季講演大会，(2006) Vol.19, No.5, p.1016.
- 16) 工藤高裕ほか：粉体粉末冶金講演概要集平成 18 年秋季大会，(2006) p.250.
- 17) H. Danninger et al. : Int. J. Materials and Product Technology, Vol.28, Nos.3/4, (2007) p.356.
- 18) 工藤高裕ほか：粉体粉末冶金講演概要集平成 19 年秋季大会，(2007) p.116.