

NACHI-BUSINESS

Materials **news**

Vol. **10**A1
June/2006

マテリアル事業

マシニング
機能部品

■ 寄稿・論文・報文・解説

「微粒子の高速衝突を利用した 表面創製の動向」

Trends of Surface Creation Using
High Velocity Impact Phenomena
of Fine Particles

〈キーワード〉 表面創製・微粒子衝突・真空浸炭材・耐疲労特性・
合金工具鋼・クレーター・摺動特性・珪酸ガラス・
表面粗さ・形状・位置精度

中部大学工学部

加賀谷 忠治 Chuji Kagaya



要 旨

機械要素や構造物部品は、力学的な表面損傷や化学的な表面損傷によって、表面層の材質劣化や有効断面積の減少が起こり、これが破壊の原因となることが少なくない。したがって、これらの部品や要素の表面を改質して、耐疲労性、耐摩耗性などの機能性を付与するために、様々な表面処理法が実用化されている。

近年、省エネルギー、省資源、低コストおよび高品質化などに対する要求が強まるにつれ、微粒子の高速衝突を利用した表面創製法 (FPB) が注目されてきた。

本稿では、微粒子衝突法の概要とその適用事例について紹介する。

Abstract

Commonly due to mechanical and chemical surface damage on the machine elements and structural parts, the surface layer quality of those can deteriorate and decrease the effective cross sectional area, resulting in fracture. Therefore, these parts and elements have been improved on the surface to achieve high performance such as wear and fatigue resistance a variety of surface treatment strategies to practical use.

Due to increased demand for improvements in energy conservation, resource conservation, cost reduction and surface quality in recent years, the surface creation technology using high velocity impact phenomena of fine particles (FPB) has attracted the attention of many engineers.

In this paper, the outline of FPB process is described, and some applied results are reported.

1. 微粒子衝突法の方法と特徴

微粒子衝突法 (Fine Particle Bombarding Process: FPB) は、きわめて利便性の高い特異な国産技術である¹⁾。これは表1に示すように、従来のショットピーニングに比べて、格段に小さい金属・非金属微粒子を用いること、微粒子の投射速度が著しく高いこと、およびアークハイト (加工度) がきわめて小さいことを特徴としている。

その方法はエアノズル式噴射装置により、微粒子を圧縮空気で加速し、150m/s以上の速度で、材料の表面に衝突させることにより、高機能化を図るものである。通常使用される微粒子を主な用途に大別したものを図1に示す。高硬度微粒子はクレーター・表面形状とひずみ硬化、変態、圧縮残留応力層など、また、軟質微粒子は被膜形成による機能性表面の創製に用いられる。

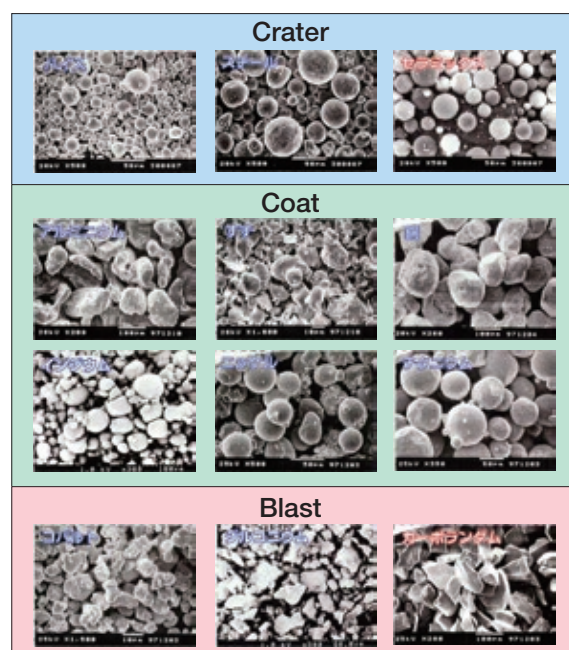

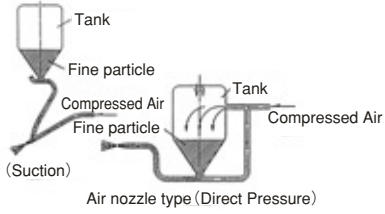


図1 金属・非金属微細粒子

表1 微粒子衝突法と従来法との比較

		Conventional shot peening	Hard shot peening	Fine Particle Bombarding
Ejection Type		 <p>Shot Impeller type</p>	 <p>Tank Fine particle Compressed Air Fine particle (Suction) Air nozzle type (Direct Pressure)</p>	
Shot or Fine particle	Material	Steel (Cut wire), Cast iron, Cast steel, Glass		Steel, High speed steel, Ceramics
	Diameter	0.3~2.8mm		0.01~0.1mm
	Hardness	430~480HV	560~700HV	750~1000HV
	Velocity	30~70m/s	90~100m/s	150~200m/s
Archeight		under 0.5mmA	0.6~1.0mmA	0.003~0.1mmA
Surface hardening		Work hardening	Work hardening・Transformation	
Peak point of compressive residual stress		Surface from inside		Surface or its neighborhood
Surface roughness		large~medium		small

2. 微粒子衝突による真空浸炭処理鋼の疲労特性の向上²⁾

真空浸炭法は、一般的なガス浸炭法に比べて、短時間で高品質の浸炭層が得られること、CO₂排出量がきわめて少ないことなど、環境にやさしい次世代の浸炭法として注目されている³⁾。

ここでは、真空浸炭処理した鋼の疲労特性におよぼす微粒子衝突処理の影響について述べる。

使用した材料は機械構造用鋼SCM415の丸棒材(φ16mm)である。これを、図2に示す形状・寸法の平滑および切欠き試験片に加工した後、真空浸炭処理を施した。ヒートサイクルを図3に示す。

疲労試験には真空浸炭のままのもの(VC)と、これに微粒子衝突を施したもの(VCF)の2種類を用いた。微粒子の投射条件は表2に示したが、スチールとセラミックスによる2段処理である。

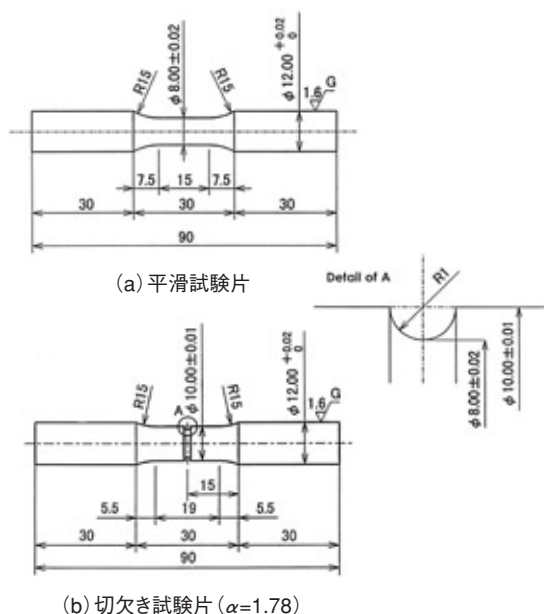


図2 疲労試験片の形状・寸法 (mm)

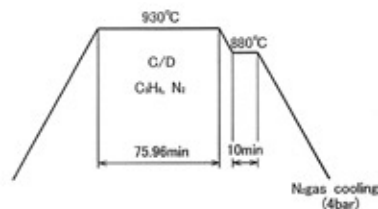


図3 真空浸炭処理のヒートサイクル

表2 微粒子の投射条件

Material of Particle	Primary	Secondary
	Steel	Ceramic
Particle diameter	55 μ m	52 μ m
Particle hardness	750HV	1000HV
Ejection velocity	200m/s	200m/s
Bombarding time	15rpm-20s	15rpm-20s
Coverage	500%	500%
Archeight	0.17mmN	0.10mmN

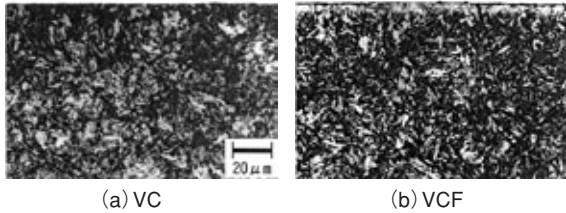


図4 断面組織

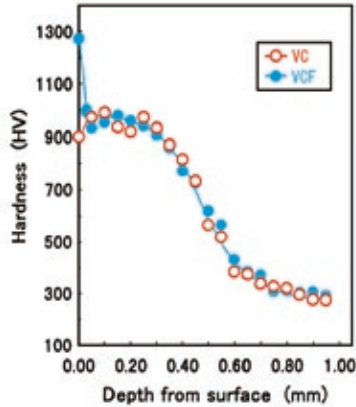


図5 マイクロビッカース硬度分布

図4は、平滑試験片の断面組織を示したものである。VC材にはガス浸炭処理で生成される粒界酸化や浸炭異常層⁴⁾などはみられない。一方、VCF材では表面から約10 μm の深さにわたって、エッチングされにくい組織が現われ、微粒子衝突による組織変化が認められる。マイクロビッカースによる硬度分布を図5に示す。

図5で示す通り、表面硬度はVC材が約900HVであるが、VCF材ではそれより約40%上昇した。X線法により表面の残留オーステナイト量を測定したところ、VC材の γ R量は約15vol/%であったが、VCF材では約1vol/%に減少していることがわかった。したがって、微粒子衝突により、ひずみ誘起マルテンサイト変態を生じて、高硬度を呈したものと考えられる。

図6には、試験片を局部的に順次電解研磨して、X線法により求めた表面から深さ方向における、残留応力分布を示した。表面の残留応力はVC材が-300MPa程度であるのに対して、VCF材は約-1600MPaの大きな圧縮残留応力を生じ、その分布状態は表面で最大となるC形である⁵⁾。

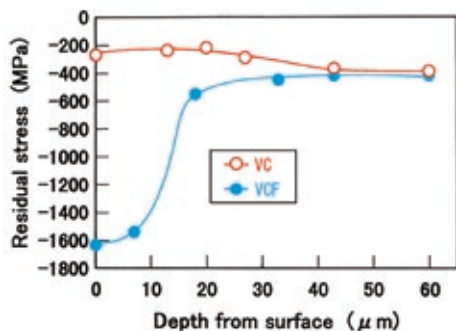


図6 残留応力分布

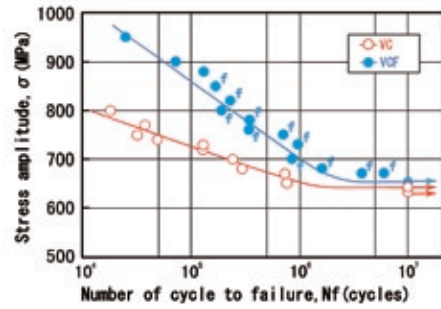


図7 平滑試験片のS-N線図

平滑試験片の回転曲げに対する疲労試験結果を図7に示す。VC材のS-N関係は負荷応力の低下につれて繰返し数が増加し、 $N=10^6$ 付近で水平になる。破壊形態はすべて表面起点形であった。これには表面の残留オーステナイトや表面付近の欠陥の影響が考えられる。一方、VCF材の場合は負荷応力に依存して破壊起点が表面から内部(f記号)に遷移し、疲労寿命は延伸したが、疲労限度の向上はほとんど認められない。

しかし、高強度鋼⁶⁾や浸炭処理した鋼⁷⁾においては、 $10^7 \sim 10^8$ 以上の超寿命域でも水平部が現れず、疲労限度が定まらない場合がある。

破壊起点域の疲労破面の例を図8に示す。VC材の場合は試験片表面のすべり(a)に起因した破壊がほとんどであるが、中には表面付近の欠陥によるもの(b)もみられた。また、VCF材では高応力側の3点が表面付近の介在物によると思われるもの(c)、それ以外は内部の非金属介在物を起点としたFish-eye破壊(d)であり、Fish-eyeが試験片表面に接する前に破断に至っている。なお、これらの介在物の試験片表面からの距離は0.7~0.9mmであった。したがって、微粒子衝突により表面が強化されたため、応力勾配に起因して全硬化層深さ付近の硬度や残留応力の低い内部にある介在物が起点になる場合には、疲労強度はあまり向上しないことがわかった。そこで、図2(b)に示す半円形の円周溝をもつ切欠き試験片を用いて両者の疲労強度を比較した。

切欠き試験片に対するS-N曲線を図9に示す。図から疲労限度を求めると、VC材が470MPaとなるのに対して、VCF材の場合は710MPaとなり、VC材に比較して約1.5倍と著しく向上した。また、時間強度も同様に向上し、破壊形態は両者ともすべて表面起点形であった。これは、切欠き底では応力が著しく狭い領域に集中するので、その領域に表面欠陥などの存在する確率が小さくなり、微粒子衝突の効果が発現されたためと考えられる⁸⁾。

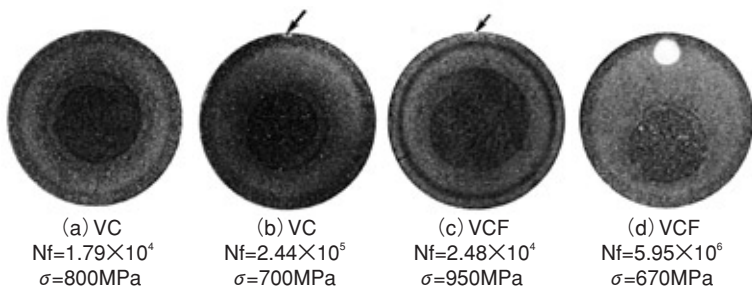


図8 疲労破面

以上のことから、微粒子衝突処理による疲労強度の向上が切欠き試験片において顕著になるのは、破壊起点が高硬度、高圧縮残留応力を有する表面になるためである。

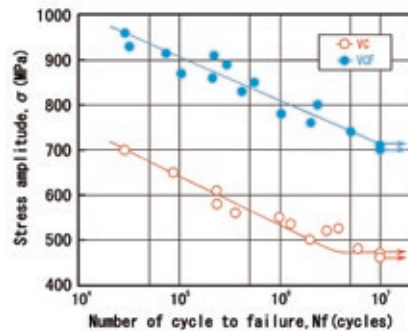


図9 切欠き試験片のS-N曲線 ($\alpha=1.78$)

3. クレーター創製による摺動特性の改善⁹⁾

機械の高効率化、高性能化を図るため、表面形状と表面層の創製による摺動特性の改善について検討した。供試材は、調質した合金工具鋼SKD11 (700HV) で、試験片の直径は6.35mmである。表面は、心無し研削によって $0.7\mu\text{mRy}$ に仕上げた。その後、表面には高速度鋼#300とセラミックス#300 (F300)、および高速度鋼#150とセラミックス#300 (F150)の微粒子衝突を施し、クレーターを創製した。相手材のVブロックにはSKD11 (750HV)を用いた。

実験は、ファレックス型摩擦摩耗試験機 (図10)により潤滑下 (M-3 TURBO) で行なった。

図11には、微粒子衝突によって創製した表面形状を示す。表面粗さは、(a)のF300材が $3.64\mu\text{mRy}$ 、(b)のF150材が $9.23\mu\text{mRy}$ となり、後者において大きなクレーターが形成されている。また、これらの断面組織には約 $10\mu\text{m}$ (F300) および約 $20\mu\text{m}$ (F150)の組織変化層が観察され、表面硬度はそれぞれ約800HV、約850HVであった。

残留応力分布は、図12に示したように、表面では両者とも約 -1200MPa であるが、深さ方向ではF150材の方が深い分布を呈した。したがって、表面性状は微粒子の投射条件に依存してかなり相違している。

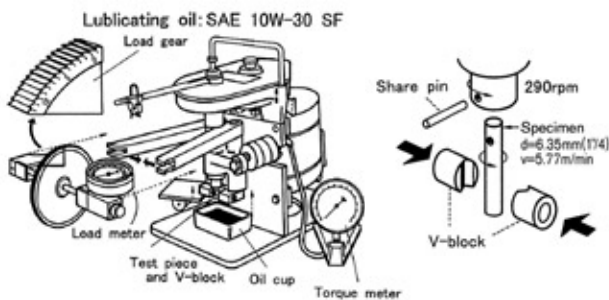


図10 ファレックス型摩擦摩耗試験機の概要

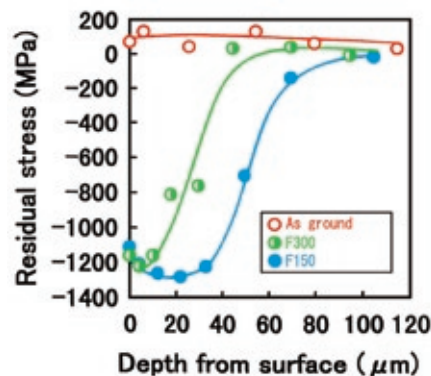


図12 残留応力分布

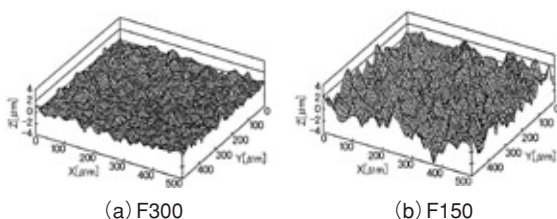


図11 創製表面の形状

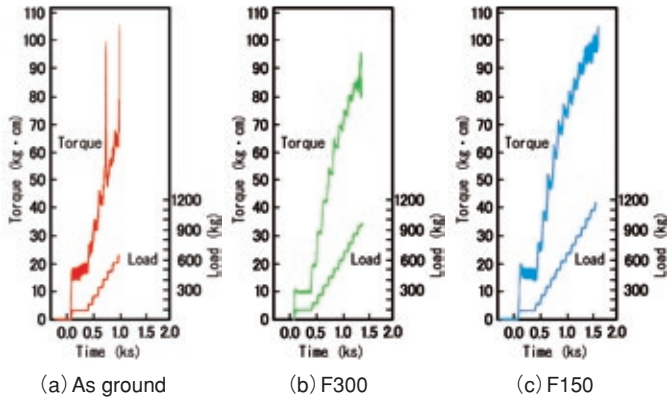


図13 耐焼付き性評価

表面性状による耐焼付き性を図13に示す。図示のように、荷重を段階的に増加させると、摩擦トルクもそれにつれて増加するが、(a)の研削材に対する増加の度合は(b)、(c)のFPB材において大きく、特にクレーターの大きい(c)のF150材が顕著である。したがって、F150材の荷重とトルクはF300材に比較していずれも20%以上増加し、耐焼付き性が向上した。これには表面のクレーターとその大きさ、表面層の硬度や圧縮残留応力が寄与したことを示している。

次に、研削材およびF150材を対象に、定荷重下での試験を行ない、得られた摩擦トルク線図を図14に示す。研削材の摩擦トルクは、定荷重454kgに達した直後(約1ks)に急激に上昇し、焼付きの様相を呈した。これに対して、F150材では454kgに到達しても上昇がみられず、ほぼ一定の摩擦トルクを保った後、3.6ks付近から次第に減少して低値に収束した。

これらの関係を、摩擦係数で示すと図15のようになる。研削材の摩擦係数は、定荷重下で約0.15を呈した後急増したのに対して、F150材の場合は約3.6ksまでは約0.15であるが、それ以後は摩擦時間につれて低下し、0.1以下の低い摩擦係数を維持した。

摩擦面の状態を示したのが図16である。(a)の研削材には摩耗条痕が観察され、著しい損傷が認められる。表面状態を表面の粗さでみると約 $12\mu\text{mRy}$ に増加していた。しかし、F150材の場合には表面の突起部が摩耗しているものの、クレーターが残存し、表面状態はかなり平滑(約 $2\mu\text{mRy}$)である。そして、摩擦時間が増加しても摩耗がほとんど進行しないことが分かった。

このことは、クレーターの創製により表面層がひずみ硬化するとともに、微細なクレーターが油溜りとなり、油膜の形成を容易にするため、摺動特性が著しく向上したものと考えられる。

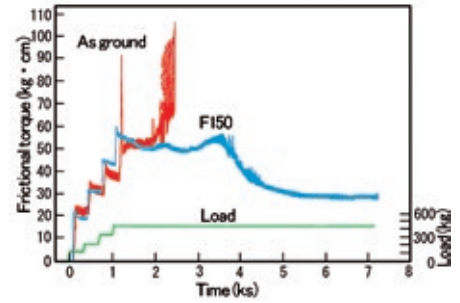


図14 摩擦トルクと摩擦時間の関係

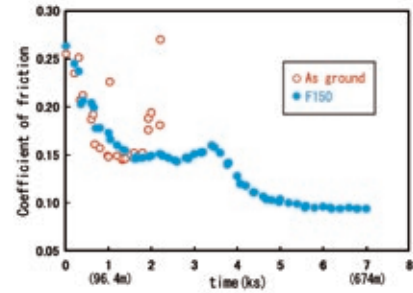


図15 摩擦係数と摩擦時間の関係

事実、このような現象を利用して、ピストンスカート部の摺動抵抗の低減を図った例¹⁰⁾が図17である。セラミックス微粒子の衝突 ($40\mu\text{m}, 0.44\text{MPa}$) によるクレーターにより、2~2.6%の大きな摩擦低減率が達成され、注目されている。

したがって、微細なクレーターは摺動部品の低摩擦化および耐摩耗性の改善に対してきわめて効果的であり、幅広い展開が期待される。

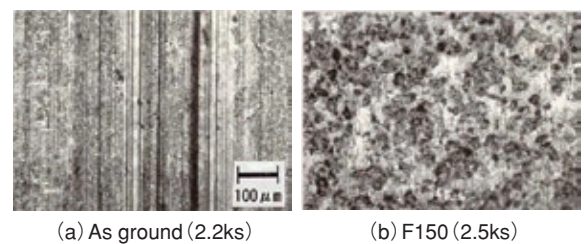


図16 摩擦面の状態

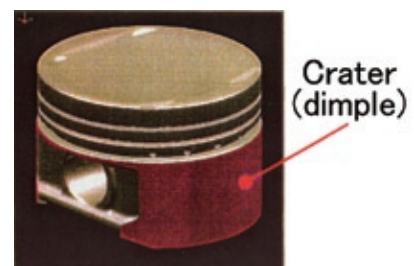


図17 ピストンの摩擦低減例

4. 微粒子衝突による表面粗さ、形状および位置精度¹¹⁾

微粒子衝突処理は一般に加工の最終段階で施されることが多いので、処理による表面粗さや形状・位置精度について調査した。ここでは、市販の硼珪酸ガラス製注射筒を用い、その外観を図18に示した。これの内筒(φ12mm, ℓ70mm)の表面にはセラミックス微粒子による衝突処理を施した。アークハイトは0.03mmNである。



図18 注射筒の外観

微粒子衝突の前後における内筒の表面状態と表面粗さの一例を図19に示す。購入品には円周方向に沿った線状あるいはむしれ状の条痕が観察され、表面粗さは約6μmRyである。一方、これに微粒子衝突を施した表面は無数のクレーターで覆われ、条痕などが消失している。粗さ曲線では表面が掘り起こされ、購入のものに比較して若干増加する傾向があるが、それは2μm以内に収まっている。

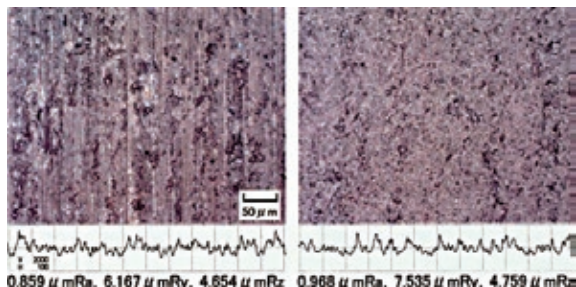


図19 表面状態と表面粗さ

真円度の測定結果を図20に示す。図示のように、購入品の場合は測定位置の間で最大0.6μmのばらつきがみられる。これに対して、微粒子衝突を施した場合には約1.5μmと大きくなるが、FPB前後の比較では最大1μm以内の増加に留まっている。また、円筒度および同軸度の場合には表3に示したように、高い精度が維持されることがわかった。

これに関連して、プラズマディスプレイパネルの溝加工の例¹²⁾を図21に示す。この場合は、ブラスト用の微細なカーボランダムによるぜい性材料の高精度、高効率加工を実現させたものであり、微細・精密加工分野への展開が期待される。

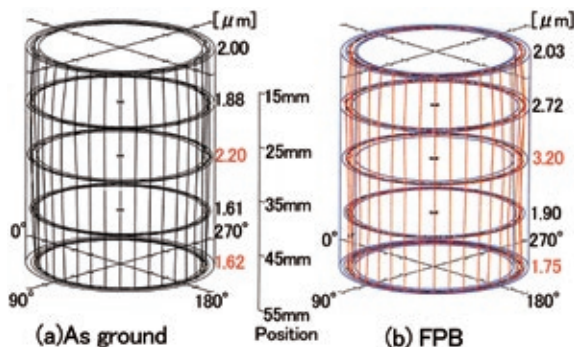


図20 真円度の測定結果

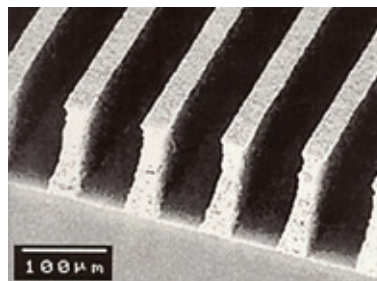


図21 プラズマディスプレイパネルの加工例

表3 円筒度および同軸度の変化

(μm)

Machinig accuracy	Internal cylinder (No.1)			Internal cylinder (No.2)		
	As rec.	FPB	Diff.	As rec.	FPB	Diff.
Cylindricity	2.95	3.55	0.60	4.46	4.27	-0.19
Coaxiality	0.18	0.34	0.16	0.26	0.37	0.11

5.窒素ガスおよび軟質微細粒子を用いた微粒子衝突

微粒子衝突法は、従来の技術ではみられない優れた特性を最も簡単に付与することができるので、種々の分野でその応用が試みられている。

図22はアルミニウム合金板に窒素ガスでセラミックス微粒子を投射した例である。(a)の断面におけるビッカース圧痕からも明らかなように、表面から約15 μ mにわたって硬化層が形成され、硬度分布(b)では、表面付近の硬度は空気で投射した場合に比較して約50%高い。EPMA線分析(c)によれば、表面ではAlの減少とNの増加が認められる。これは、セラミックス微粒子の衝突によりアルミニウムの表面温度が上昇¹³⁾、窒素が内部に拡散したものと推察される。したがって、微粒子衝突法は通常のひずみ硬化による特性の改善に加えて、窒素ガスなどの使用によるさらなる特性向上の可能性を示唆するものである。

また、図23には軟質微粒子の衝突による被膜形成例を示した。銅、すず、インジウム、チタニウム等の軟質微粒子を150m/sで投射すると、微粒子が材料表面と容易に合体するので、これらの金属被膜の耐食性や潤滑性などの特性の利用が考えられる。

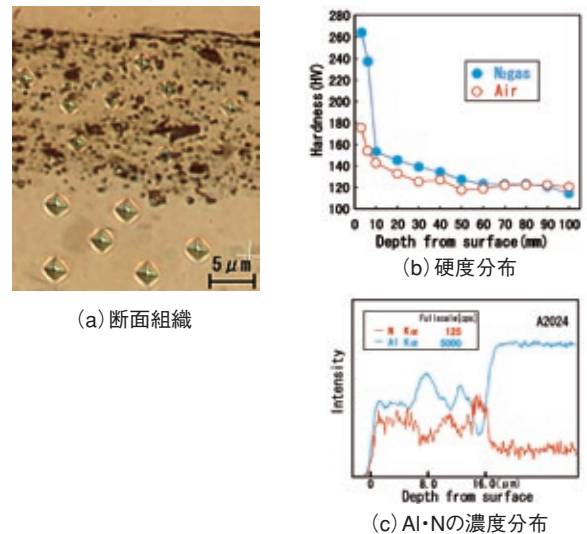


図22 窒素ガスによる微粒子投射の例

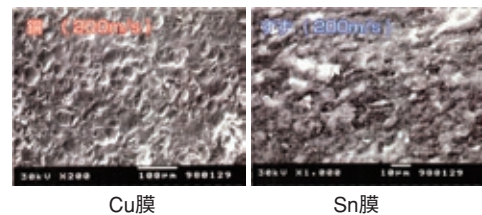


図23 被膜形成例

6. まとめ

微粒子の衝突による表面創製の方法や特徴、工業的に重要な応用事例について概説した。本技術は、ものづくりにおける多様なニーズの高度化に不可欠なものであり、幅広く活用されることが期待される。

本稿が、表面創製による材料の高機能化あるいは高付加価値製品の開発をめざしている方々、これから表面創製問題を取り扱おうとする方々にいささかなりともお役に立てれば幸いです。

最後に、本稿をまとめるに当たり、原稿や図表の整理に熱心な協力を得た、中部大学大学院工学研究科博士前期課程1年 佐越一将君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 間瀬恵一・宮坂四志男：特許第1594395号(1986)。
- 2) 加賀谷忠治・小笠原幸治・片岡泰弘・宮坂四志男：日本機械学会2000年度年次大会講演論文集, Vol.Ⅲ(2000), 29-30。
- 3) 加賀谷忠治・森田辰郎：材料, 52-5(2003), 546-551。
- 4) 久保田普雄：表面技術, 52-2(2001), 188-190
- 5) ショットピーニング技術協会：ショットピーニングの方法と効果, (1997), 6, 日刊工業新聞社。
- 6) 高行男・井藤賀久岳・長谷川達也・加賀谷忠治・戸根恵郎・中島正貴：日本機械学会論文集, 68-667, A(2002), 484-490。
- 7) 加賀谷忠治：微粒子衝突表面改質研究会 共同研究成果報告書, 1(2005), 8-14。
- 8) 北篠浩・山田明・猿木勝司：材料, 52-10(2003), 1204-1210。
- 9) 加賀谷忠治・中村真也・浜崎幸一・中村一輝：ショットピーニング技術, 10-2(1998), 6-7。
- 10) 荻原秀実・城戸智之・山田裕・村田雅史・小林重美：HONDA R&D Technical Review, 12-2(2000), 93-98。
- 11) 加賀谷忠治・藤田寛人・村田祐一郎・片岡泰弘・宮坂四志男：ショットピーニング技術, 14-2(2002), 6-7。
- 12) 不二製作所カタログ
- 13) 前田集・江上登・加賀谷忠治・井上宣之・竹下弘秋・伊藤健一：日本機械学会論文集, 67-660, C(2001), 2700-2706。