

レーザー焼結によるホウ化チタン砥石の開発\*  
(ホウ化チタン成膜と研削性能の基礎研究)中本 剛\*<sup>1</sup>, 社本 英二\*<sup>2</sup>  
山崎 義丈\*<sup>3</sup>, 白形 洋一\*<sup>4</sup>Development of Titanium Boride Grinding Wheel by Laser Sintering  
(Synthesis of Titanium Boride and Grinding Experiment)Takeshi NAKAMOTO\*<sup>5</sup>, Eiji SHAMOTO,  
Yoshitake YAMAZAKI and Youichi SHIRAKATA\*<sup>5</sup> Faculty of Engineering, Department of Electronics and Mechanical Engineering, Chiba University,  
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

This paper deals with development of a new method for producing profile grinding wheel. At first, the desired shape is made of metal that is machined easily. Next, powder material is spread on a surface of the metal. And the surface is scanned by a laser beam and then a ceramic layer is produced on the surface of the metal by the chemical reaction between the powder material and metal material. The produced ceramic layer is used as grinding wheel. The powder material is boron and the metal material is titanium in this experiment. The components of the layer are examined by X-ray diffraction and titanium boride is detected in the layer. Grinding experiment is performed using this grinding wheel. The results shows that the ceramic layer can be used to grind hardened die steel.

**Key Words:** Grinding Wheel, Surface Treatment, Wear, Grinding Force, Laser Sintering, Titanium Boride, Profile Grinding, X-ray Diffraction

## 1. 結 論

研削加工は製作の最終工程で行われ、円筒面や平面などの単純な形状では、円筒研削、平面研削が行われている。製品形状が複雑になると、研削工程が増加し、加工時間が増加してしまう。ここで、製品の表面形状にしたがった、いわゆる総形研削砥石（成形研削砥石とも呼ぶ）によって研削加工を行うと、加工工程の短縮につながることになる。一般に総形研削砥石の成形は削装置、R取装置、角度成形装置により行われている。最近ではMAGIC砥石などのように相手形状に合わせて砥石を製作する方法も報告されている<sup>①, ②</sup>。

本研究では、総形研削砥石を製作するための新しい方法を開発することを目的としている。切削加工などの方法で加工可能な金属を用いて砥石の全体形状を製作する。次に、この金属でできた形状を研削砥石としたときに、研削を行うことになる表面に粉末を塗布し、

この表面をレーザービームで走査する。このレーザービーム走査によって、金属と粉末を反応させてセラミックスを合成する。この硬化させた表面を砥石として使用し、研削加工を行う。この方法によれば、目的とする砥石形状は、硬化させる前の金属によって精度良く製作することが可能である。さらに、レーザー焼結によって硬化させるため、炉中で砥石全体を焼成する方法に比べると、硬化させたい部分以外への熱影響を少なくすることができるため、砥石の形状を精度よく保つことも可能である。本論文では、レーザー焼結による硬化膜の製作および、研削の基礎実験について報告する。

## 2. 砥石製作方法

本研究の手法による砥石の製作方法を図1に示す。まず、図1(a)に示すように、加工可能な金属で砥石の全体形状を製作する。次に、図1(b)のように、砥石表面のうち、研削加工に使用したい面に粉末を塗布した後、レーザービームで走査を行う。この走査により、金属と粉末が反応し、硬質膜を合成することができる。このようにして砥石を製作した後、図1(c)のように、総形研削を行う。研削後、硬質膜が摩耗した場合には、

\* 原稿受付 2005年8月30日。

\*<sup>1</sup> 正員, 千葉大学工学部(☎263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。\*<sup>2</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。\*<sup>3</sup> 千葉大学工学部。\*<sup>4</sup> 名古屋大学大学院工学研究科。

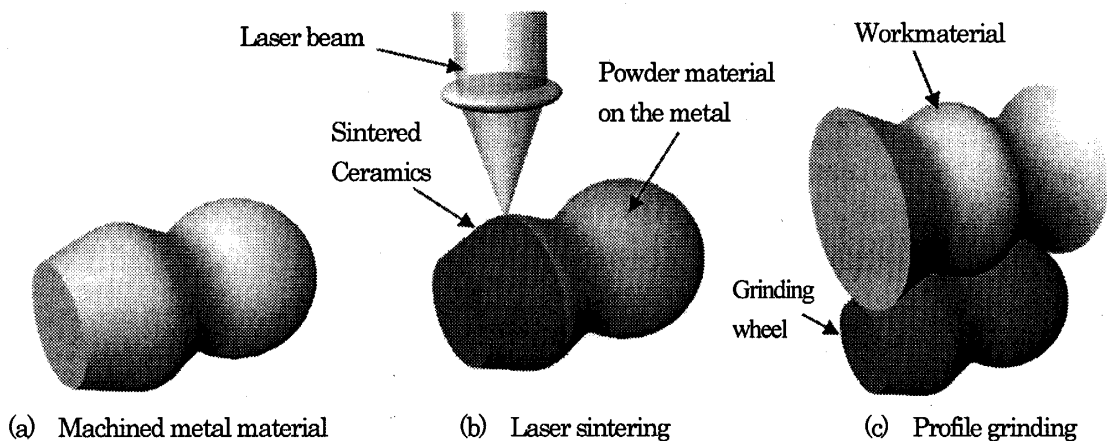


Fig. 1 Schematic diagram of present manufacturing method for grinding wheel

研削盤上で金属表面に粉末を塗布し、ファイバー等で伝送されたレーザービームによって硬質膜を再生することも原理的に可能である。

本論文では、図2に示すように、砥石全体形状を製作するための金属としてチタンを、塗布する粉末としてホウ素を選択した。この組合せでレーザー走査を行うと、式(1)の反応により、二ホウ化チタン ( $TiB_2$ 、以降、本論文では、単にホウ化チタンと表記する)を合成することが期待できる<sup>(3)</sup>。



チタンのピッカース硬度は 130 程度であり、切削加工などの機械加工を施すことが可能である。一方、ホウ化チタンのピッカース硬度は、理論密度においては 3400 と報告されており<sup>(4)</sup>、実際に焼結された例でも、2600 に達している<sup>(5)</sup>。このため、砥石として使用するためには十分な硬度を有していることになる。

ホウ化チタンは高融点、高硬度、高電気伝導性、化学的安定性など優れた特長を有するため、切削工具、耐摩耗材料、電極材料などへの応用が期待されている。しかし、共有結合性が強く、理論密度に近い焼結体を得ることが困難な物質であるためにその利用が進んでいないのが現状である<sup>(5)</sup>。緻密化するための方法として、ホットプレスや HIP 等の加圧焼結が一般的であり<sup>(6)</sup>、他のセラミックスと混合して焼結する方法も報告されている<sup>(7)-(11)</sup>。

このように、緻密化して焼結することが必要とされているので、レーザー焼結のような緻密化できない方法によって合成した報告は見当たらない。本研究では、合成したホウ化チタン膜を砥石として使用することを目的としている。砥石はその3要素の一つとして気孔が必要であることはよく知られている。このため、レ

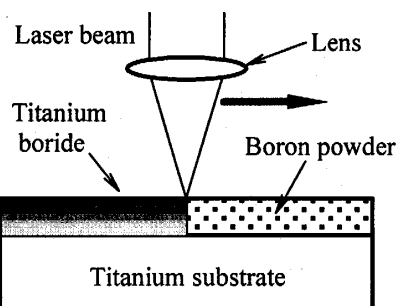


Fig. 2 Reaction synthesis of titanium boride by Laser sintering

ザー焼結によって合成したホウ化チタン膜が緻密でなくても、これを砥石として利用できることが期待される。

### 3. 成膜実験

**3・1 成膜方法** 本節では、硬質膜を合成できることを示す。そのため、複雑な形状の表面に成膜することは行わず、平板上で成膜を行った。1000 番の研磨紙で磨いた  $12\text{mm} \times 12\text{mm}$  のチタン基板の上にホウ素粉末を塗布する。粉末は液体に混合せず、乾燥した粉末の状態でも  $0.5 \sim 1\text{mm}$  程度の厚さを基板上に塗布した。本実験は、ホウ化チタンを合成するための基礎実験であるため、ホウ素とチタン以外の物質は混合しないこととした。前節で述べたように、将来は研削盤上で硬質膜を再生することも考えている。このため、ファイバーでビーム伝送できるレーザー光源として YAG レーザーを使用した。さらに、特別な雰囲気でもホウ化チタン膜の合成が可能であるほうがよい。このため、大気中で成膜を行った。図3は、基板を上方から見たビーム走査経路の概略図である。本実験で使用した YAG レーザーは連続発振のマルチモードのビ

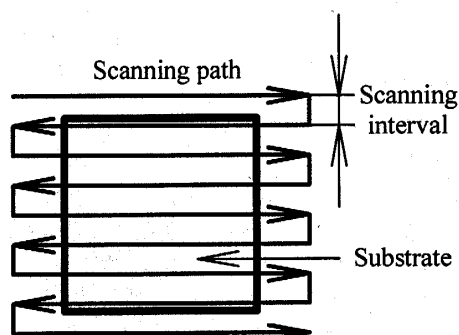


Fig. 3 Scanning path on surface of a substrate

Table 1 Laser sintering conditions

Substrate	Material	Titanium
	Purity (%)	95
	Size (mm)	12×12×5
Powder	Material	Boron
	Purity (%)	99
	Size (μm)	< 44
Laser	Wave length (μm)	1.06
	Oscillation type	CW
	TEM mode	Multi mode
	Beam power (W)	30
	Scanning speed (μm/s)	20~80
	Scanning interval (μm)	500~1000

ームであり、焦点距離 50mm のレンズで集光した。スポット直径は、計算上、50μm 程度である。基板に粉末を塗布した表面が焦点となるようにして、走査速度、走査線間隔を一定にしてビーム走査を行った。使用した材料および成膜時のビーム走査条件を表 1 に示す。

**3・2 成膜結果** 図 4 に成膜前のチタン基板の X 線回折結果を示す。チタンは酸化されやすい物質であるが、研磨直後に分析した結果なので、酸化物は検出されなかった。

レーザービーム走査によって成膜した基板表面の写真を図 5(a)に示す。表面にはレーザービーム走査により、溝が形成されている。この溝の電子顕微鏡写真を図 5(b)に示す。溝深さはレーザービーム走査条件によって異なるが、表 1 の条件で成膜すると、300μm 程度である。この表面の X 線回折結果を図 6 に示す。図 6 より、ホウ化チタンが合成できていることがわかる。しかし、酸化ホウ素のような酸化物も合成されてしまっている。この膜は研削砥石として使用することを目的としている。このため、硬質のホウ化チタン

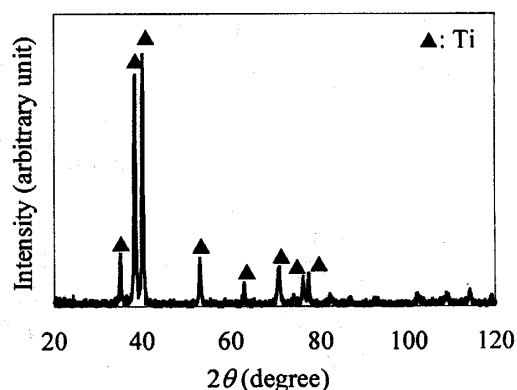
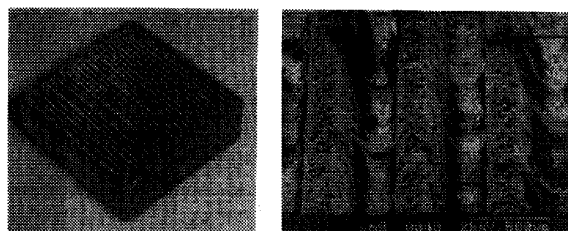


Fig. 4 X-ray diffraction pattern obtained from titanium substrate (Scanning speed: 40μm/s, Scanning interval: 1000μm)



(a) Sintered substrate (b) Groove on a surface

Fig. 5 Photograph of a substrate after Laser sintering

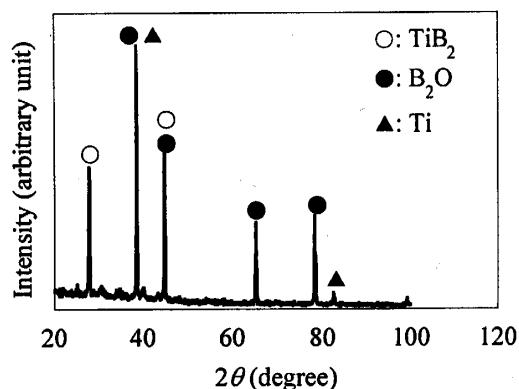


Fig. 6 X-ray diffraction pattern obtained from sintered layer surface (Scanning speed: 40μm/s, Scanning interval: 1000μm)

ができるだけ多く合成され、酸化物は合成されることが好ましい。本実験は大気中で成膜を行った。このため、膜表面に近い部分ほど、酸化物が多いと思われる。そこで、膜表面を研磨紙で除去し、除去後の表面を X 線回折によって調べた。研磨紙による除去量は、光学顕微鏡によって測定した。

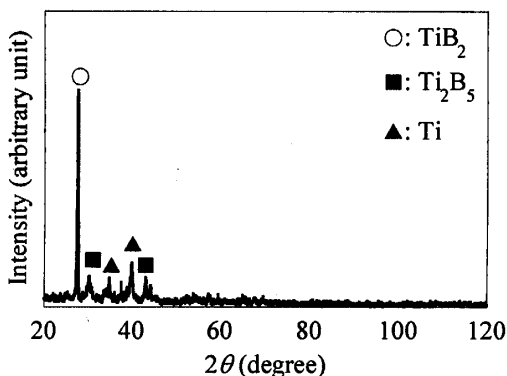


Fig. 7 X-ray diffraction pattern obtained from sintered layer at a depth of 70  $\mu\text{m}$  (Scanning speed: 40  $\mu\text{m/s}$ , Scanning interval: 1000  $\mu\text{m}$ )

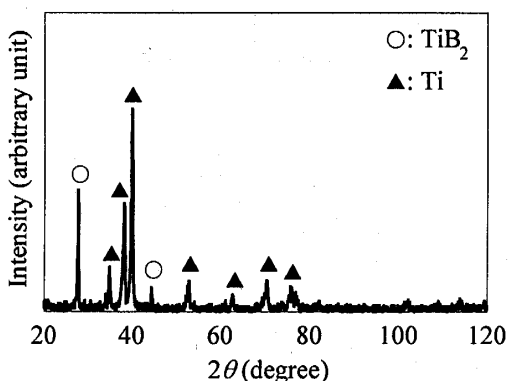


Fig. 8 X-ray diffraction pattern obtained from the bottom of sintered layer surface (Scanning speed: 40  $\mu\text{m/s}$ , Scanning interval: 1000  $\mu\text{m}$ )

表面から 70  $\mu\text{m}$  の深さにおける結果を図 7 に示す。膜表面は凹凸が激しく、均一に 70  $\mu\text{m}$  を除去することはできない。除去された膜厚の平均値が 70  $\mu\text{m}$  であった。図 7 より、この深さにおいても、ホウ化チタンは合成されていることがわかる。さらに、酸化物はほとんど検出されていない。

基板表面まで膜を除去した結果を図 8 に示す。この部分では、基板を構成しているチタンが検出されている。しかし、ホウ化チタンも検出されており、酸化物は検出されていない。

以上のようにホウ化チタンは膜表面から基板表面までの広い範囲にわたって合成されていることがわかる。さらに、表面から数十  $\mu\text{m}$  以上の深さから基板表面の範囲では酸化物が検出されておらず、砥石として使用するためには、膜表面よりも適していると考えられる。

以上の結果は、レーザービームパワー 30W、走査速

度 40  $\mu\text{m/s}$ 、走査間隔 1000  $\mu\text{m}$  で得られた結果である。走査速度、走査間隔を表 1 の範囲で変更しても、図 6 ~ 図 8 と同様な結果が得られた。レーザービームパワーを表 1 の範囲外の 10W まで減少させると、図 5 のような膜を基板表面に形成することはできなかった。

本実験で合成された膜は多孔質であり、その表面は凹凸が激しい。このため、ピッカース硬度試験のような、通常の圧痕を付ける方法による硬度測定を行うことはできなかった。本研究の方法では、目的とする砥石形状は金属で製作する。しかし、砥石表面の凹凸が激しいと、目的とする砥石形状とは異なってしまふ恐れが生じる。このような砥石形状そのものの製作精度については、今後、検討したい。

ところで、本方法で砥石として使用する膜を合成すると、図 5 の写真で示すように、レーザービーム走査による溝が生じる。図 6 ~ 8 は、溝部と溝と溝の部分をあわせた平均的な結果である。ホウ化チタンが多く合成される部分を調べることは、砥石製作条件の最適化のために必要な事柄である。これについても今後、検討したいと考えている。

#### 4. 研削実験

4.1 研削方法 前節で述べた方法で製作したホウ化チタン膜を用いて研削実験を行った。その概略を図 9 に示す。前節で使用した 12  $\times$  12  $\times$  5mm のチタン基板の 12  $\times$  5mm の面に、ホウ化チタンを成膜し、この成膜した面を砥石として使用した。前節の実験に比べて、小面積上で成膜して砥石とするため、走査速度を減少させて 25  $\mu\text{m/s}$ 、走査間隔を小さくして 500  $\mu\text{m}$  とした。前節で述べたように、この条件においてもホウ化チタンが合成できることは、X線回折によって確認している。このようにして成膜した面がホルダーの端面側となるように、基板をホルダーに取り付ける。このホルダーを旋盤の工具台に設置する。工作物は、SKD11 焼入れ鋼を使用した。図 5 の写真では、膜の溝部と溝部の間の凸部で研削を行うことに相当する。

本節では、製作したホウ化チタン膜によって研削加工を行う可能性を調べることを目的としている。このため、ホウ化チタン膜への負荷が小さくなるように、工作物の加工面積を小さくした。工作物の形状は図 9 に示すように矩形からその一部を切り欠いた板形状とし、ホウ化チタン膜砥石が研削する面積を小さくした。この工作物を旋盤チャックに取り付け、主軸を回転させて、ホウ化チタン膜砥石によって研削加工を行った。工作物が砥石と接触して研削を始めるときの衝撃を小さくするために、通常の研削加工よりも遅い研削速度

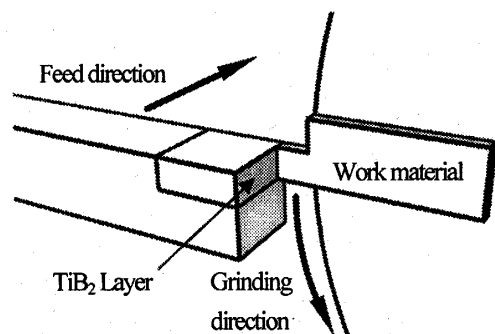


Fig. 9 Schematic diagram of grinding experiment

Table 2 Workmaterial

Material	SKD11
Vicker's hardness	710
Ground area (mm)	2.1×4.6

Table 3 Grinding conditions

Grinding speed (m/min)	267
Depth of Grinding ( $\mu\text{m}$ )	12.5
Feed rate (mm/rev)	28
Grinding fluid	Soluble type

で加工を行った。工作物について表2に示し、研削条件を表3に示す。研削中は水溶性研削油剤を供給した。

本実験では、図9のように旋盤主軸が回転するにしたがい、一定の切込み量のもとで工作物を研削し、それと同時に砥石が一定の速度で軸方向に送られる。砥石の一方の端が研削を始めてから、砥石の他方の端が研削し終えるまでを研削回数1回と数えた。

砥石の摩耗量はノギスで測定した。工作物の加工量はレーザーフォーカス変位計で測定した。レーザーフォーカス変位計は旋盤チャックに工作物を取り付けたまま測定できるように設置した。ノギスとレーザーフォーカス変位計の分解能は異なるが、砥石摩耗量と工作物加工量を比較するうえでは支障は生じなかった。加工中は圧電式力センサーによって、研削抵抗の測定も行った。必要な場合には、工作物表面の粗さも測定した。

**4・2 加工量と摩耗量** 図10に工作物の加工量と砥石の摩耗量を示す。図10の横軸は加工回数であり、例えば横軸の50回目の値は、41回目から50回目にかけての10回の研削による加工量と摩耗量を示している。最初の40回ほどは砥石摩耗量が非常に大きく、工作物加工量は小さい値となっている。しかし、それ

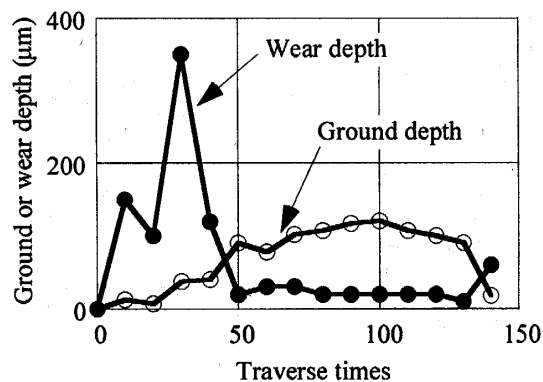


Fig. 10 Ground depth and wear depth

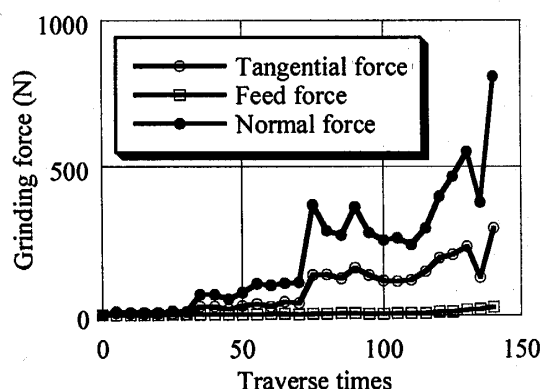


Fig. 11 Grinding force

以降では、工作物加工量のほうが大きい値となり、継続してその関係が保たれている。

前節の成膜結果から、膜表面では酸化物が多く合成され、膜表面から深くなるにつれて酸化物が減少し、ホウ化チタンが多く合成されていることを示した。膜表面では硬質なホウ化チタンが少なく、十分に研削加工を行うことができず、酸化物などの膜を構成する物質が脱落したと考えられる。膜がある程度、脱落すると、膜の中の酸化物が減少し、ホウ化チタンの含有率が多くなるために膜は脱落しにくくなり、研削加工が行われるようになったと判断できる。このように、本方法で製作した膜を砥石として使用する際には、表面からある程度の深さの酸化物が少ない部分を使用すると良いことになる。

**4・3 研削抵抗** 図11に研削抵抗を示す。法線方向の研削抵抗の値が最も大きく、これは通常の研削加工と同様である。研削回数が30回目までは研削抵抗の値は、ほとんど0である。この段階では、前述のように研削加工が行われず、膜表面が脱落しているだけである。

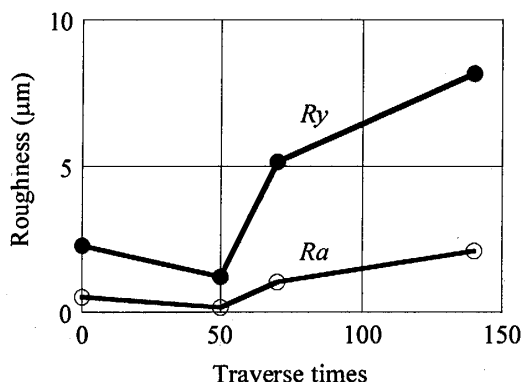


Fig. 12 Surface roughness

その後、ホウ化チタン膜によって研削加工が行われるようになると、研削抵抗の値は増加する。70回目までは、ほぼ一定の値であるが、その後、研削抵抗の値は増加する。これは、ホウ化チタンで研削する一方、ホウ化チタン膜が剥がれた基板表面と工作物が接触を始めることによる。加工回数が増加すると、ホウ化チタン膜はさらに脱落する。図 11 の 140 回目において研削抵抗の値が著しく増加しているのは、ホウ化チタン膜が完全に脱落したからである。このため、前述の図 10 においても、140 回目においては、砥石摩耗量が増加し、工作物の加工量が減少している。

以上のように、本砥石は図 10、図 11 の 50 回目～130 回目において、通常の研削加工が行われていることがわかる。この砥石の寿命を長くするためにはホウ化チタン膜の脱落を防ぎ、良好に研削できる時間を長くすることが必要となる。砥石の寿命は合成したホウ化チタン膜の緻密化の程度や合成されたホウ化チタンの含有率などに影響されると考えられる。このような砥石製作条件の最適化については、今後、検討したい。

**4・4 仕上げ面粗さ** 図 12 に仕上げ面粗さを示す。研削加工が行われ始めた 50 回目では、粗さは改善されている。しかし、その後、粗さの値はかえって悪化している。前述の図 10 や図 11 より、40 回目までは膜が脱落し、それ以降、研削が行われることがわかった。図 12 において、50 回目の粗さが改善されているのは、脱落した遊離砥粒によって研磨された結果と考えられる。50 回目以降はホウ化チタン膜によって研削が行われているが、仕上げ面粗さはかえって悪化している。本論文で行った研削実験は普通旋盤を利用しており、工作物への切込み量は  $12.5\mu\text{m}$  と比較的大きい。今後、成膜条件や研削条件を検討することにより、仕上げ面粗さの向上をはかりたいと考えている。

## 5. 結言

本研究では、総型研削砥石を目的として、チタン基板上にホウ素粉末を塗布し、レーザー焼結によってホウ化チタン膜を合成した。このホウ化チタン膜によって研削実験も行った。本研究によって得られた結言を以下に述べる。

- (1) 本方法により、ホウ化チタン膜を合成することが可能である。
- (2) ホウ化チタン膜によって焼入れ鋼を研削加工することが可能であった。
- (3) 今後、研削砥石として使用するためには、砥石製作条件の最適化が必要である。

## 参考文献

- (1) Hagiwara, S., Application of MAGIC tool for polishing die (in Japanese), *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, **48**-6 (2004), 303-306.
- (2) Hagiwara, S. et al, Proposal for Die Polishing Using a New Bonding Abrasive Type Grinding Stone, *Machining Science and Technology*, **7**-2 (2003), 267-279.
- (3) Matsumoto, C., *New Ceramics Synthesis Process* (in Japanese), (1980), 138, Asakura-Shoten.
- (4) Hashiguchi, R., *Metallurgy Handbook* (in Japanese), (1958), 832, Asakura-Shoten.
- (5) Sugai, A., Titanium Boride ( $\text{TiB}_2$ ) Ceramics (in Japanese), *FC Report*, **17**-7 (1999), 170-172.
- (6) Degui, Z., et al, In-situ HIP synthesis of  $\text{TiB}_2/\text{SiC}$  ceramic composites, *Materials Processing Technology*, **89**-90 (1999), 457-461.
- (7) Tee, K. L. et al, In situ processing of  $\text{Al-TiB}_2$  composite by the stir-casting technique, *Materials Processing Technology*, **89**-90 (1999), 513-519.
- (8) Deng, J., Ai, X. and Zhang, J., Effect of whisker orientation on the friction and wear behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2/\text{SiC}_w$  composites in sliding wear tests and in machining process, *Wear*, **201** (1996), 178-185.
- (9) Deng, J. and Ai, X., Friction and wear behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$  composite against cemented carbide in various atmospheres at elevated temperature, *Wear*, **195** (1996), 128-132.
- (10) Kim, J., Park, S., Solid particle erosion of  $\text{SiC-TiB}_2$  composites hot-pressed with  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , *Wear*, **222** (1998), 114-119.
- (11) Zupanic, F., Spacic, S. and Krizman, A. Contribution to ternary system  $\text{Al-Ti-B}$  Part 2 - Study of alloys in  $\text{Al-AlB}_2-\text{TiB}_2$  triangle, *Materials Science and Technology*, **14**-December (1998), 1203-1212.