

精密仕上げ加工用総形工具の TiB₂インプラント処理

宇野義幸*, 植村賢介**, 田中修吾***

近年、切削加工は高速切削加工への進展が著しいが、これには工作機械主軸の高速化および高剛性化、切削工具の高速化対応、工具保持方法の改善などが大きく寄与している。さらに、最近は環境問題への対策もクローズアップされてドライカットやMQL切削などの適用が拡大してきており、それらが併行して加工コストの削減と生産性向上が進行している。しかし、ホブなどの歯切り加工や発電用タービン、ジェットエンジンのブレード植え込み部の加工（ダブテール加工）のように高い形状精度が必要な加工においては高速切削の適用が困難であり、刃先の幾何学的形状の改善で加工工程数の削減を図ったり、コーティングなどの表面改質の適用で高精度、高面粗度の確保をするための取り組みが行なわれている。切削性能向上や長寿命化への取り組みとして行なわれてきたコーティングによる表面改質技術の発展は著しいものがあるが、高精度を要求される総形工具の精密仕上げ加工では2~3 μ mのコーティング層が工具表面に形成され成形刃形の精度を劣化させるために、荒加工には適用されてきたが、精密仕上げ加工では適用することができなかった。

われわれは、高エネルギーの荷電粒子を母材に打ち込むという新しい表面改質方法によって、高精度の刃形形状を維持したままで、耐摩耗性、耐熱性、潤滑性を有するTiB₂インプラント処理工

具を作成することに成功したので、その特徴と適用事例を報告する。

1. 工具特性と改善要素

1.1 工具の改善要素

切削工具の性能を決定付ける要素としては、①母材の特性、②コーティング材とその適用技術、③刃形、すくい角、ねじれ角などの刃先の幾何学的形状、などが考えられる。今回報告する高精度総形工具においては形状が複雑であるために全面的に超硬化することは難しく、母材としては高速度鋼が使用されるが、高速度鋼の弱点を補うために、②の表面改質や、③の工具形状の改善が重要な効果を発揮する。

最近のコーティング技術の発展は、工具の切削性能を向上させ、加工面粗度、加工精度の向上、さらに工具寿命の長寿化にも大きく寄与をしている。高精度総形工具においても切削性能の向上は緊急の重要課題であり、コーティング技術の発展にあわせ、刃形の改良も行なわれてきた。

図1に示すようなタービンプレード溝を加工する工具（ダブテールカッタ）による標準的な工程



図1 タービンプレード溝加工用総形工具

* UNO, Yoshiyuki / 岡山大学 工学部 機械工学科
(〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)
Tel. (086) 251-8037

** UEMURA, Kensuke / 永田精機(株) 技術研究所
(〒959-0121 新潟県西蒲原郡分水町地蔵堂)
Tel. (0256) 91-3315

*** TANAKA, Shugo / (株) 恵美須屋工具製作所
(〒555-0012 大阪市西淀川区御幣島3-1-32)
Tel. (06) 6472-0246

表1 総形工具によるロータ溝の各加工工程と工具特性改善項目機械加工工程

機械加工工程	要求切削性能	摩耗とコーティング	要求精度, 面粗度他
エンドミルによる溝荒加工	① 単位時間当たり除去量の向上。 ② 切削抵抗を低減する刃形への改善。	① コーティングによる長寿命化。 ② 耐熱, 対摩耗性。	① 中仕上げ加工の切削性能向上で荒加工工程削除。
総形工具による溝中仕上げ加工	① 単位時間当たり除去量の向上。 ② リード刃と切削抵抗低減する刃形への改善。	① コーティングによる長寿命化。 ② 耐熱, 耐摩耗性。	① 強靱な切削性能と刃先形状の改善。
総形工具による溝仕上げ加工	① リード刃への改善で断続切削の低減。	① コーティングによる長寿命化。 ② 精度劣化防止。	① 潤滑性による面粗度の改善。
その他	① 荒加工を省略した重切削性能(中, 仕上げ加工のみで完成)。 ② チタン, インコネルなどの合金鋼の切削性能向上と長寿命化。		

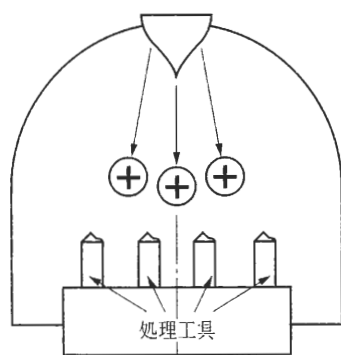


図2 TiB₂インプラント処理装置の概略

は、エンドミルによる溝荒加工，総形工具による溝中仕上げ加工，総形工具による仕上げ加工の3工程に分かれているが，それぞれの工程において要求される工具特性は若干の相違がある。また，被削材の面から考えると一般的には12Cr鋼が圧倒的に多いが，6Al-4Vのチタン合金やインコネル738などの難削材が適用されることも考慮しておかなければならない。

以上の観点から，総形工具による各機械加工工程と工具特性改善項目は表1のようにまとめられる。

1.2 TiB₂インプラント処理

従来のコーティング工具は，耐摩耗性，被加工面の面粗度の向上などの優れた特性を持っているが，高精度の形状仕上げ加工を要する総形工具には適用されなかった。それは2~3μmのコーティング層による，いわゆる「形崩れ」が生じ，要求される精度を満たすことができなかったためである。

今回開発したTiB₂(二硼化チタン)インプラン

表2 TiB₂の物性値

融点	[K]	3,253
密度	[g/cm ³]	4.52
破壊靱性値	[MPa · m ^{1/2}]	130
引張り強度	[MPa]	127 (1,273K)
硬度	[HV]	3,400 (荷重50g)
熱伝導率	[W/mK]	26
熱膨張率	[10 ⁻⁶ /K]	4.6

ト処理工具は，イオンスパッタとイオンアシスト法を併用したもので真空チャンバの中に設置された工具にTiB₂の荷電粒子が高エネルギーで衝突侵入する方式を取っている。このために，従来のコーティング法のように工具の表面に蒸着膜が形成されることがないので，工具の精度を維持できるという特徴を有している。本方式の模式図を図2に示す。

1.3 TiB₂の物性

TiB₂(二硼化チタン)は鉄の母相中で安定して存在する硼化物で，ヤング率が高く密度が小さいという特徴を持っている。主たる物性値を表2に示す¹⁾。

1.4 表面処理後の寸法精度評価

表3は蒸気タービンプレードの植え込み部を加工するダブルカッタにおいてTiB₂インプラント処理を施した総形工具刃形のインプラント処理前後における主要寸法を比較したものである。測定誤差範囲の増減はあるが，インプラント処理による形状変化はほとんど見られないことがわかる。

表3 TiB₂インプラント処理前後における
ダブルテールカッタの寸法変化

	外径			谷径			ピッチ		
インプラント前	+3	+1	+1	+3	-3	0	+4	+1	+5
インプラント後	+4	+2	+1	+4	-2	-1	+3	+1	+4

(単位 μm)

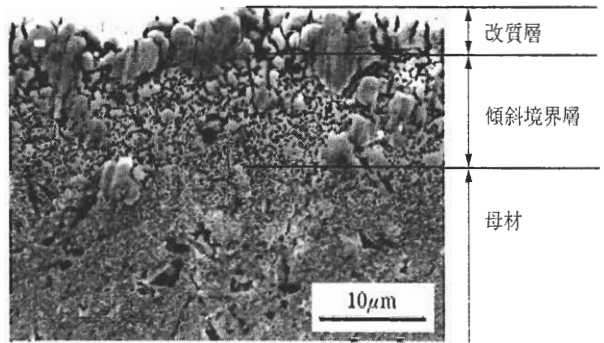
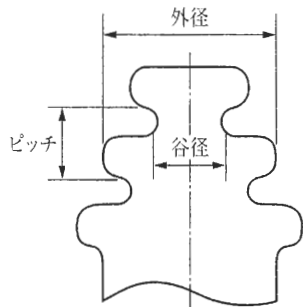


図3 TiB₂インプラント処理による表面改質・傾斜境界層
(CrO₃ + H₃PO₄エッチング)

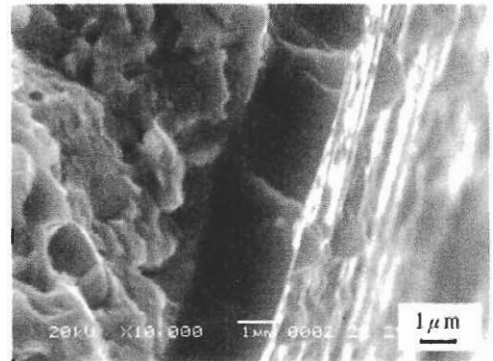


図4 従来法によるコーティング層 (TiCN)

従来のコーティングは母材の表面上に2~3 μm の硬化層を積層するメカニズムであるのに対して、今回のインプラント法は表面形状を変化させずに母材表面下15 μm 程度までに改質・傾斜境界層を形成するという決定的な相違がある。また、硬度、耐熱性などの物性は従来のコーティング処理と同等もしくはそれ以上である。図3、図4にインプラント処理を行なった工具の断面と従来のコーティング処理 (TiCN) を行なった断面のSEM写真を示す。

このように、形状精度を保ったままで表面改質を行なうことができるようになったので、TiB₂インプラント工具は仕上げ用高精度総形工具への適用も可能になった。

2. TiB₂インプラント処理工具の切削性能評価

TiB₂インプラント処理工具の切削性能を評価するために、SCM420とSKD61に対する切削試験を実施した。実験は、すべての被削材に対して直径16mm、SKH56エンドミルを使用し、軸方向切り込みは1.0D (16mm一定)とした。加工条件を表4に示す。性能比較は、主として逃げ面摩耗幅 V_B で評価し、刃先損耗状態を観察比較した。

2.1 各種コーティングの摩耗曲線

図5に被削材SCM420について、TiNコーティングエンドミル (TiNと図示)、TiCNコーティングエンドミル (同上TiCN)、無コートエンドミル (同上NC) とTiB₂インプラント処理エンドミル

(同上TiB₂)の逃げ面摩耗幅 V_B を比較した (図中、刃中は切り込み深さの midpoint、すなわち刃先端より8mmの位置を意味する)。切削距離20mの時点での摩耗量を比較してみるとTiB₂インプラントエンドミルの摩耗量は従来のコーティングエンドミル (TiN, TiCN) の約1/3~1/4倍である。また、TiB₂インプラントエンドミルは、安定した定常摩耗形態を示していることがわかる。

図6は被削材SKD61に対するTiB₂工具の逃げ面摩耗幅 V_B を示す。図中には、比較評価のため前図のSCM420の摩耗挙動を併記した。図よりわかるように、SKD61に対する摩耗量はSCM420の1.5~2倍程度である。図7は最終切削点 ($L=20\text{m}$)における逃げ面摩耗を観察比較したもので、TiN, TiCN, TiB₂の順に摩耗量は少なくなっていることがわかる。

2.2 刃先の幾何学的形状の変更とTiB₂インプラント処理による切削性能の改善

溝中仕上げ加工では、エンドミルによる階段状の溝荒加工後、目的形状より-0.2~0.3mm程度オフセットした形状の総形工具によって行なわれている。この種の従来工具は直線溝の工具が主流であり、切削性能が悪く能率改善が求められてい

表4 加工条件

高速度鋼工具	工具径 D [mm]	刃数 Z	送り速度 V_f [mm/min]	送り量 f [mm/刃]	切削速度 V [m/min]	切り込み t [mm]	軸方向切り込み a [mm]	切削剤
SKH56	16	4	104	0.07	20	2	16	油性

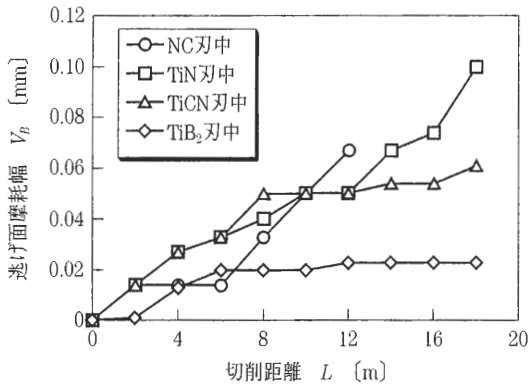


図5 各種コーティング工具の摩耗量 (エンドミル)

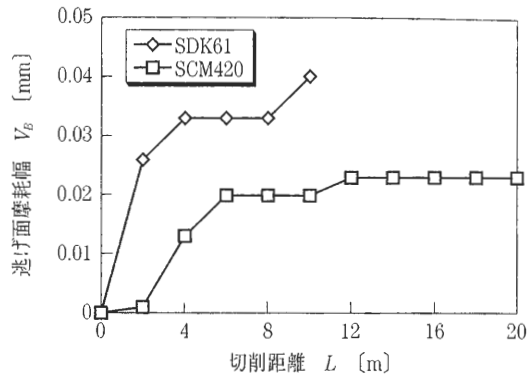
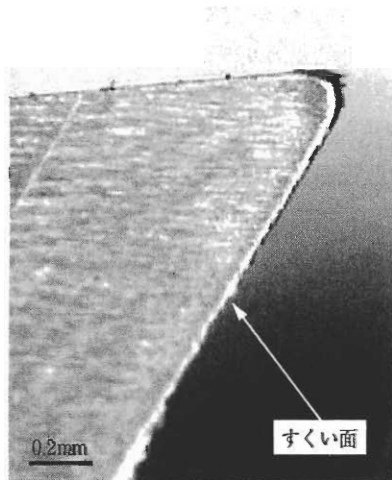


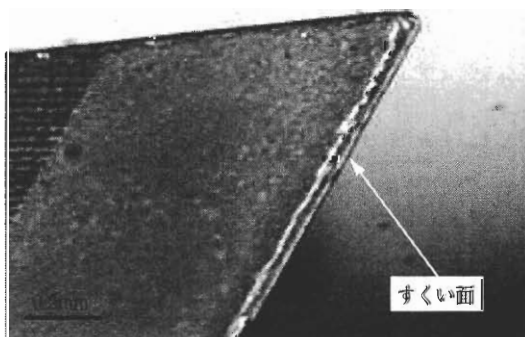
図6 TiB₂インプラント処理エンドミルの摩耗

た。これらの要求に応えるための改善案として、一部で「斜刃」と呼ばれる刃形の工具が使用されてきたが、能率の大幅改善までにはならなかった。この「斜刃」と呼ばれる工具は、カッタ中心線

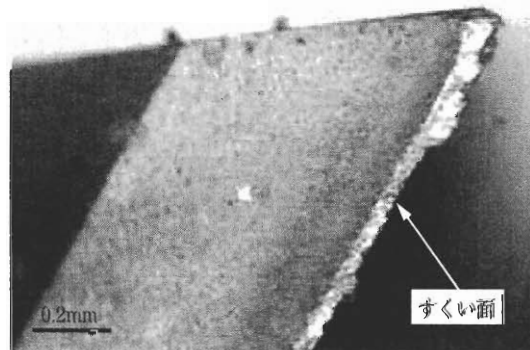
(アキシャル) に対して角度 θ で直線状に刃溝を構成したもので、アキシャル軸との交点より右にいくにつれて、すくい角は鈍角に、また左側へ行くにつれて鋭角になる傾向があり、均等なすくい角を得るのが難しく、逆に切削性能を落としてしまうこともあった²⁾。この欠点を補うために、ねじれ刃を採用する検討を進めた。平フライスやエンドミルのねじれ刃と同様の刃付けを施せば各点で均一なすくい角が得られるので、ねじれ刃付きのダブルカッタを製作した。今回は、上述のねじれ刃に加えて、位相を考慮した小ピッチ波形を付加することで切削抵抗をさらに減少させ、より切削性能の優れているねじれ刃総形工具を作成した。これらの幾何学的形状の改善に加えて、表面処理としてのTiB₂インプラント処理は寿命改善の重大な要素である。表5に改善要素とその効果についてまとめた。



TiB₂インプラント処理
工具刃先摩耗状況
($L=20m$ で
 $V_B=0.02mm$)



TiCNコーティング工具刃先摩耗状況
($L=20m$ で $V_B=0.07mm$)



TiNコーティング工具刃先摩耗状況
($L=20m$ で $V_B=0.10mm$)

図7 各種コーティング処理エンドミルの刃先摩耗状況

表5 改善要素と効果

改善要素	具体的緒言	効果
刃先の幾何形状	ねじれ刃	断続切削衝撃の軽減
	小ピッチ波形	切削抵抗の軽減
表面改質処理	TiB ₂ インプラント処理	長寿命と面粗度

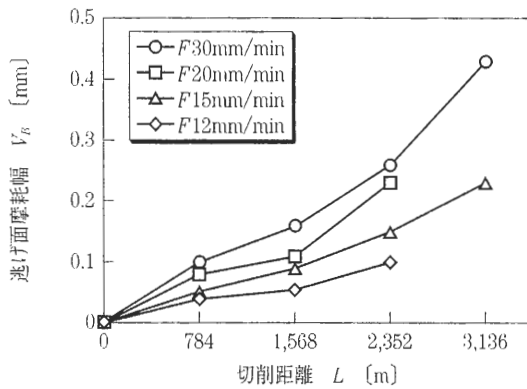


図9 中仕上げ加工用総形工具による摩耗

2.3 中仕上げ加工用総形工具によるタービンロータ溝の一括加工

タービンロータの溝加工は、その形状の大小にかかわらず4～5工程で所定の形状を得るのが一般的であるが、加工工数の大幅短縮の要求も強いので、今回は前工程である荒加工工程2～3工程分を完全に省略し、いきなり溝中仕上げ加工から開始する総形工具を開発した。図8に今回開発したTiB₂インプラント処理総形工具を使用した溝中止仕上げ加工の状況を示す。

図9は中仕上げ総形工具を用いてSCM420を切削した場合の摩耗曲線を示したものである。V_f = 15mm/min, 切削距離L = 2,000mmで摩耗量0.15mm, L = 3,000mmにおいても摩耗量は0.2mm程度である。さらに、V_f = 20, 30mm/minにおいても、L = 2,000mm前後の摩耗量は0.2～0.25mmであり、従来の工具に比較して摩耗が1/2程度となっている。

2.4 TiB₂インプラント処理をした仕上げ用総形工具によるロータ溝の加工

仕上げ工程においては、同一形状の溝加工を連続して100～200溝加工する必要があるため、工具交換などの段取り時間をできるだけ省略し、高価な工具コストを削減するために「工具寿命の改善」が最重要課題である。仕上げ加工用総形工具によってSCM420をV_f = 15mm/minとV_f = 30mm/min

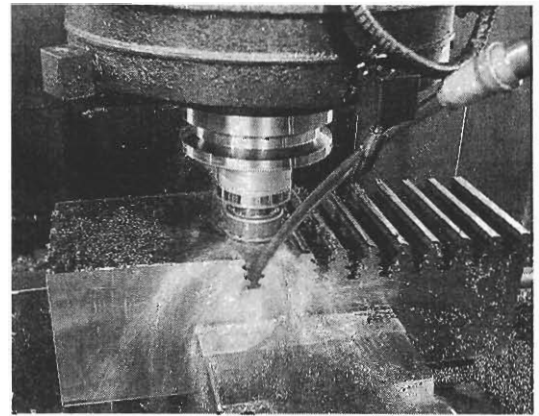


図8 タービンロータ溝一括中仕上げ加工（ダブルテール加工）

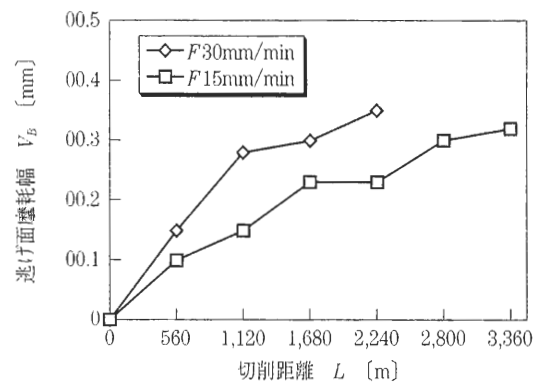


図10 仕上げ加工用総形工具による摩耗

で切削した場合の工具摩耗量を図10に示す。図より明らかなように、仕上げ用総形工具における摩耗量はL = 3,000mで0.03mm程度ときわめて良好である。

以上のように、TiB₂インプラント処理工具は高エネルギーでイオンを打ち込むことによって、刃形状精度を維持したままで深い改質、傾斜境界層を形成することができるので、タービンロータ溝を加工するダブルテールカッタのように高精度が要求される総形工具への表面処理にはきわめて有効であることがわかった。今後、歯切り工具などへの適用についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) P.T.B.Shaffer: Handbook of Advanced Ceramic Materials, Advanced Refractory Technologies Inc., Buffalo, NY, USA, pp.4-6, (1995)
- 2) 益子正己: フライス削りとフライスの設計, 大河出版, pp.140-141, pp.195-202, (1972)