

平滑化ダイヤモンドコーティング膜の 切削工具への適用

Application of Smooth CVD Diamond films to Cutting Tools

キーワード

ダイヤモンド、気相合成、CVD、平滑化、切削工具、面粗さ、ドライ切削、耐溶着性、小径工具、アルミニウム合金

機械工具事業部 工具技術部

高野 茂人

河上 登

■ 摘要

ダイヤモンドコーティング工具が世に出てから久しいが、その間、切削加工分野における流れは環境や経済性を考慮したドライ切削へとシフトしてきている。従来のダイヤモンドコーティング切削工具を用いてドライ切削を行った場合、耐摩耗性については申し分ないのであるが、膜が結晶質で表面が粗いことから切り屑排出性に問題があった。そこで、切り屑排出性を改善するため、従来のダイヤモンド膜に比べ面粗さを重視し結晶粒を小さくした平滑化膜を開発した。この CVD ダイヤモンド膜をコーティングしたドリル及びエンドミルを用いてドライ切削を行ったところ、いずれも従来のものより優れた性能を示した。

■ Abstract

Many years have been passed since CVD diamond-coated cutting tools were commercialized. Meanwhile dry cutting has been spread for ecological and economical reasons in machining fields. The conventional diamond-coated cutting tools shows excellent wear resistance, however chip removal speed is not sufficient due to surface roughness of diamond film. In this study, fine grained CVD diamond film with smooth surface was developed to improve chip flow. Twisted drills and square end mills coated with this smooth CVD diamond film showed excellent performance in dry cutting compared with conventional CVD diamond-coated tools.

1. はじめに

ダイヤモンドは現存する物質の中で最高の硬度を持つことから、理想的な非鉄材料加工用の薄膜材料として切削工具への適用が図られてきた。当社でもかなり早い時期から研究を積み重ね、その結果、他社に先がけてダイヤモンドコーティング工具の商品化を実現させている。現在では、高シリコンアルミニウム合金やガラス繊維強化プラスチック (GFRP) のようにマトリックス中に硬質材料を含む難削新素材の加工、あるいは C/C コンポジット、セラミックスの成形体及び仮焼結体、黒鉛などのように工具摩耗の速い材料の加工にその威力を発揮し、幅広く浸透してきている。⁽¹⁾

一方、切削加工の分野に目を向けると、近年の環境対応や加工コスト低減のため、切削油剤を全く用いないかあるいはミストとしてわずかに用いるドライ切削の流れが進行しつつある。被削材がアルミニウム合金や GFRP の場合、そのドライ加工にはダイヤモンドコーティング工具が最も適していると考えられる。しかし、耐摩耗性の高い良質なダイヤモンド膜の表面は結晶質であり、面粗さが悪いことから被削物の溶着とそれに伴う切り屑排出性の低下が生じ、加工初期において折損寿命に至るケースもある。

そこで、従来のダイヤモンド膜に改良を加え、面粗さを向上させた平滑化ダイヤモンドコーティング膜を開発した。本稿では、その特性ならびに切削工具へ適用した結果について述べる。

2. ダイヤモンド膜の合成と平滑化技術

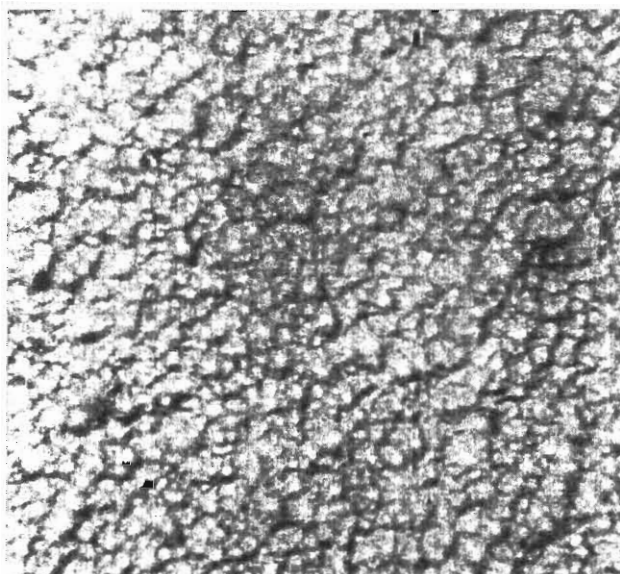
2.1 ダイヤモンド膜の合成⁽²⁾

現在まで、多くのダイヤモンドの気相合成 (CVD) 方法が開発されているが、切削工具へのコーティングは主に熱フィラメント CVD 法とマイクロ波 CVD 法で行われている。本開発でのダイヤモンドコーティングは、熱フィラメント法で行って

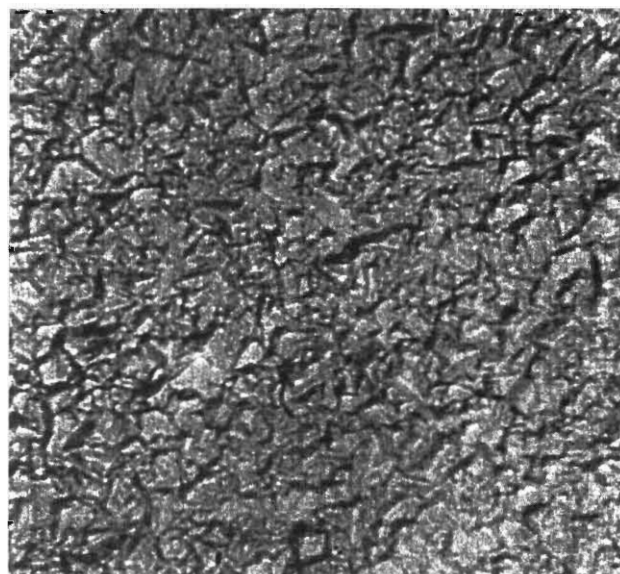
おり、原料ガスにはメタン/水素系をベースとして用いている。基材としては、切削工具材料として汎用性の高い超硬合金を用い、合成時の基板温度をおよそ 600~900°C の範囲に保ち、成膜した。

2.2 ダイヤモンド膜の平滑化技術

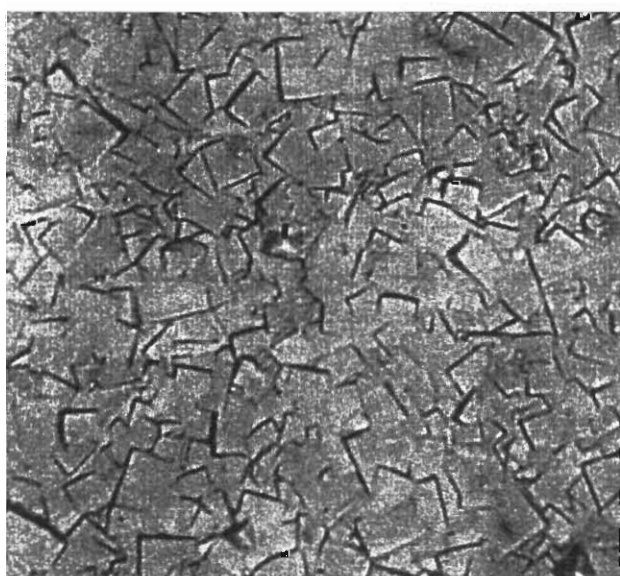
原料ガス中の炭素原子数比を変化させることにより、ダイヤモンド膜の膜質及び配向性が変化する。その例を図 1 に示す。例えば、メタン濃度を増加



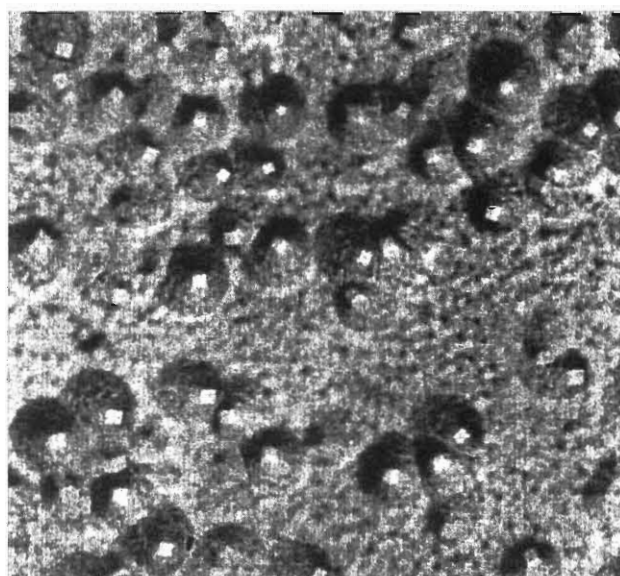
CH₄ 0%



CH₄ 0.7%



CH₄ 1.4%



CH₄ 2.1%

合成条件；CO 濃度：30%，CH₄ 濃度：0~2.1%，残部：H₂
基板温度：850°C，合成時間：20h

図 1 マイクロ波法により合成した CVD ダイヤモンド膜のモルフォロジーの変化 (光学顕微鏡写真)

させると (111) 配向から (100) 配向へと変化するが (100) 配向膜の方が平面が表に出ることから、このような条件を設定することでも膜表面粗さの向上が期待できる。表 1 に超硬合金製スローアウェイチップ上にメタン濃度を変化させて合成したダイヤモンド膜の面粗さデータを示す。メタン濃度を通常の 1% から 3% まで増加させることにより、面粗さは約 60% 改善された。しかし、更に濃度を増加させ、6% の条件で成膜しても、面粗さの更なる向上はみられなかった。ダイヤモンド膜の平滑化にあたっては、耐摩耗性と膜質 (∞ 結晶性) との関連をみながら適切なメタン濃度の選定とその安定な制御を行うことが肝要である。

表 1 メタン濃度と面粗さの関係

メタン濃度	面粗さ(Rz)
1%	1.47 μ m
3%	0.81 μ m
6%	0.96 μ m

<合成条件>

CH₄濃度：1~6%，残部：H₂

基板温度：850°C，合成時間：20h

3. 平滑化ダイヤモンド膜の特性

3.1 面粗さ

従来のダイヤモンドコーティング膜（以下従来膜）と今回開発した平滑化膜の代表的な表面写真を図 2 に示す。従来膜が結晶質であるのに対し、平滑化膜はやや結晶性を下げたボール状膜へと変化している。結晶サイズは双方ともに約 2 μ m と変わりはないが、面粗さは従来品の約 60% 程度まで改善された。

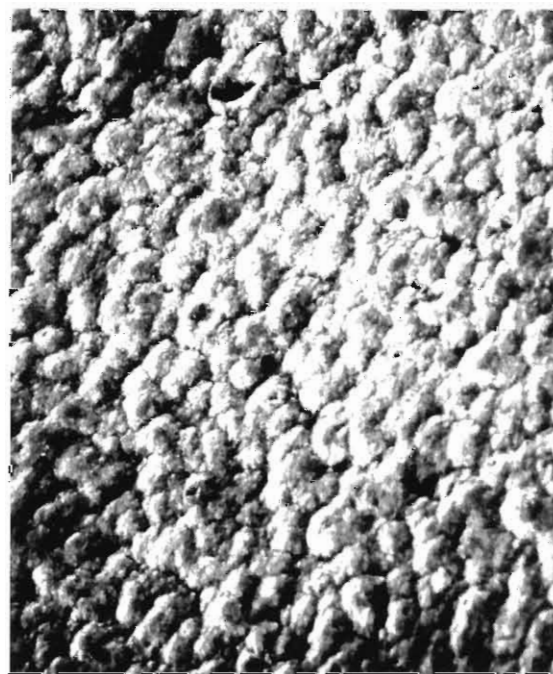
3.2 膜質

ダイヤモンド膜の膜質評価には、一般的にラマン分光分析が使われる。ラマン分光では、1333cm⁻¹ 付近に現れるピーク (SP³ 結合成分) はダイヤモンド結合に由来し、1550cm⁻¹ 近傍のブロードなピークはダイヤモンド構造をとれていない非晶質ダイヤモンド (SP² 結合成分が多い) に由来すると考えられている。

図 3 に従来膜と平滑化膜のラマン分光分析結果を示す。平滑化膜にも、従来膜同様、1333cm⁻¹ 付近



従来膜
(Rz=1.47 μ m)



平滑化膜
(Rz=0.75 μ m)

図 2 従来膜及び平滑化膜の表面 SEM 観察写真

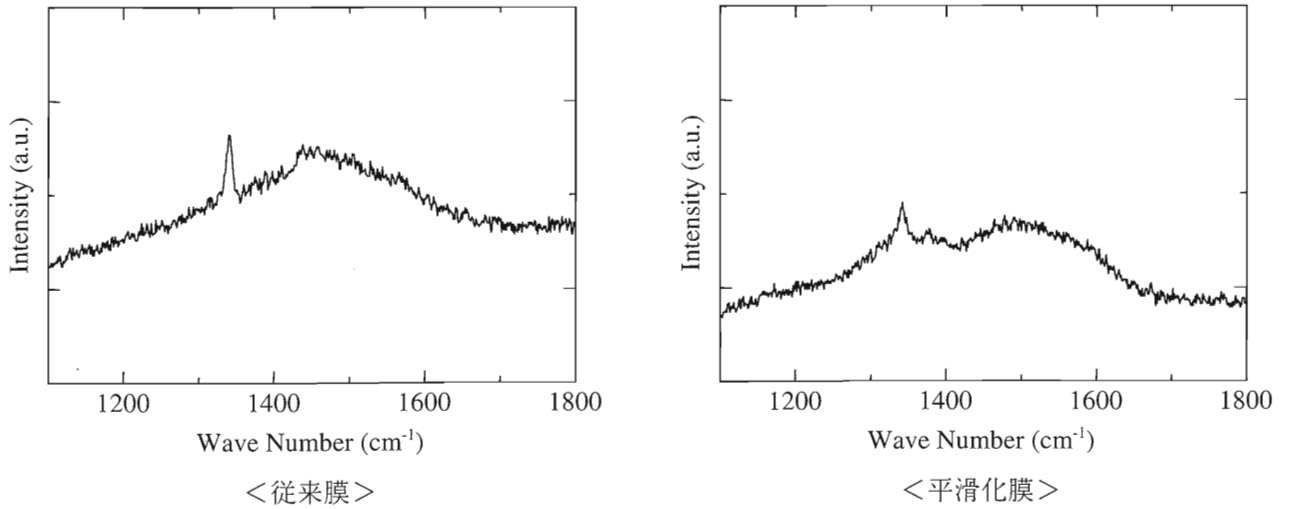
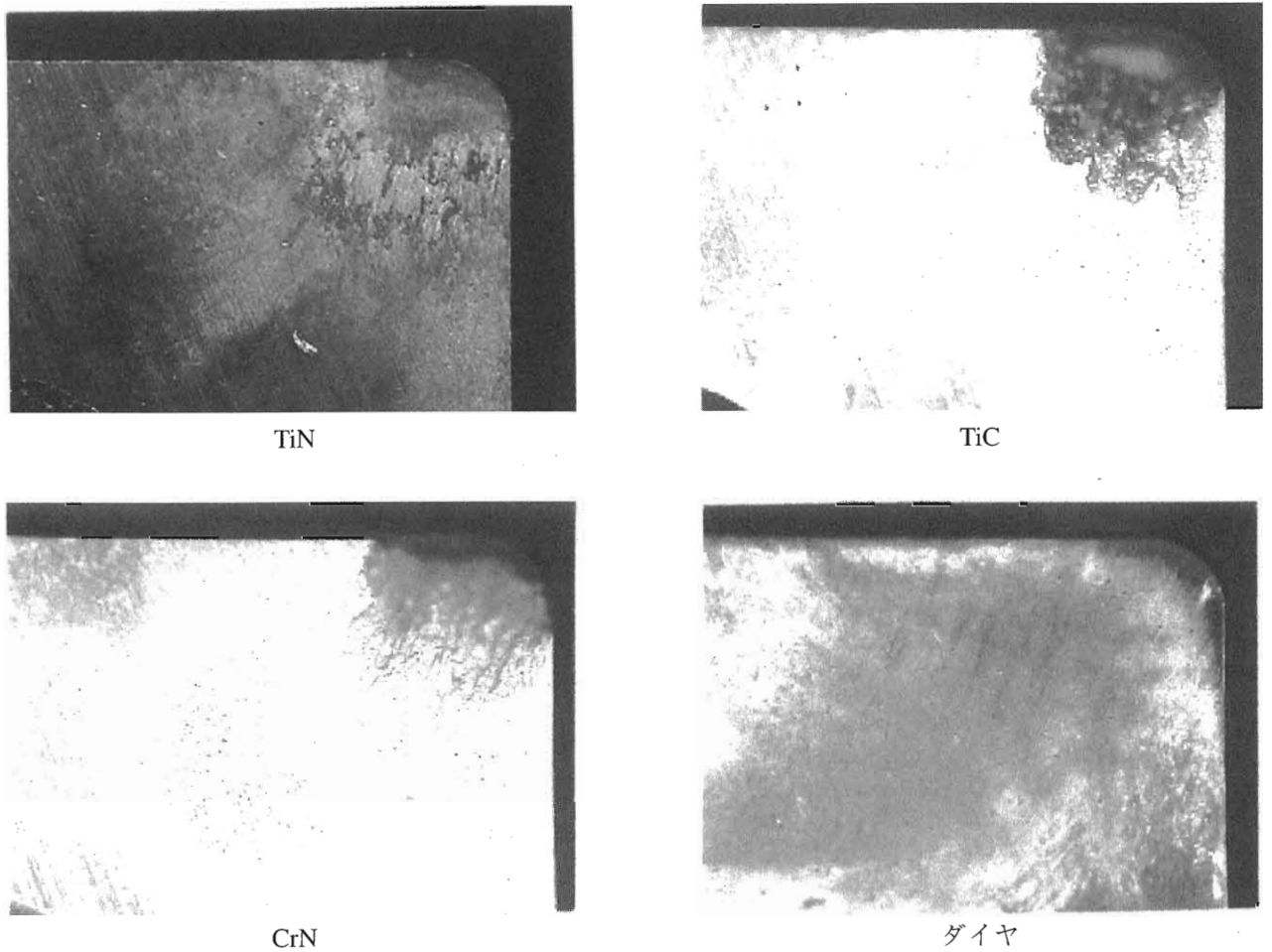


図3 ラマン分光分析結果



<切削条件>

切削速度：100m/min 切り込み：0.1mm

送り：0.1mm 被削材：ADC12 (φ120)

図4 各種コーティング膜を施したチップ刃先へのアルミニウム溶着状況

に SP³ 結合を示すピークが認められ、ダイヤモンド主体の膜であることが確認された。従来膜と比べると、1550cm⁻¹ 付近の SP² 結合を示すブロードなピークが若干大きく現れており、ダイヤモンドの結晶性がやや低下しているが、機械的にはほぼ同等の硬度を持つ膜であると判断される。

3.3 摩擦係数

ダイヤモンドの摩擦係数はかなり小さく、とりわけ研磨面では抜群の性能を示すことが知られている。CVD ダイヤモンドについて実際に測定した例は少ないが、坂本らの報告⁽³⁾によれば、CVD ダイヤモンドの摩擦係数に影響を及ぼすのは粒径サイズよりはむしろマクロ的にみた表面平滑性の方であるとしている。

今回開発した平滑化膜は、上述のとおり結晶サイズは従来膜と変化はないが、面粗さは向上していることからマクロにみた摩擦係数は低下しているものと考えている。

3.4 溶着性評価

元来、ダイヤモンドはアルミニウムとの反応性が低いことからアルミニウムは溶着しにくいはずであるが、CVD ダイヤモンドについては、その面粗さがゆえに本来備えている性質を生かしきることができずにいた。

各種コーティング膜を施した超硬合金製スローアウェイチップを用いてアルミニウムに対する耐溶着性評価を旋盤試験にて行った。その結果を図 4 に示す。ただし、ダイヤモンドについては、コーティング後すくい面をラップ研磨したものを用いている。定量的な比較はできないが、他のコーティング膜に比べてダイヤモンドが群を抜いてアルミニウムに対する溶着性に優れていることが図 4 の写真から判断できる。TiN の写真には溶着物が少なく写っているが、これは溶着物が大きくなりすぎて脱落した後の写真である。膜表面が平滑なダイヤモンドを用いることによりアルミニウム合金のドライ切削が可能となることが示唆された。

4. 平滑化ダイヤモンド膜の工具への応用

4.1 PC ドリル

近年の情報産業の伸長に伴い、プリント基板穴

け用ドリル（以下 PC ドリル）も小径化が急速に進み、現在ではφ1mm 以下、とりわけφ0.5mm 以下のものが主流となってきている。PC ドリルに従来のダイヤモンド膜を適用した場合、特に小径品で折損により早期に寿命となっていた。我々は、この原因を膜表面粗さによる切削抵抗の増加によるものと考えて、今回開発した平滑化膜の適用を試みた。

図 5 は、直径 0.3mm の PC ドリルにおいて従来膜と平滑化膜のコーティングを行ったときの性能比較を行ったものである。

従来膜では、5,000 ショットで膜の剥離が生じ工具寿命となっていたが、平滑化膜の採用により 100,000 ショットまで穴あけを行い、なおも継続可能という結果が得られた。超硬無処理品が 2,000 ショット程度の寿命であることから、再研削を考慮してもなお 10 倍以上の寿命が得られたことになる。

4.2 ドライ加工用ドリル

アルミニウム合金（ADC12）ドライ加工時での平滑化膜の効果をみるため、切り屑排出性の良い溝形状を持つドライ加工用ドリルに平滑化膜を施し、性能評価を行った。その結果を図 6 に示す。

従来膜では 4,000 穴加工時で既に溝部分にアルミニウムの溶着と切り粉詰まりがみられ、最終的には 4,538 穴で折損寿命となった。これに対し、平滑化膜は 15,000 穴加工後も溝部へのアルミニウムの溶着は軽微なままであり、依然として穴あけ可能な状態であった。

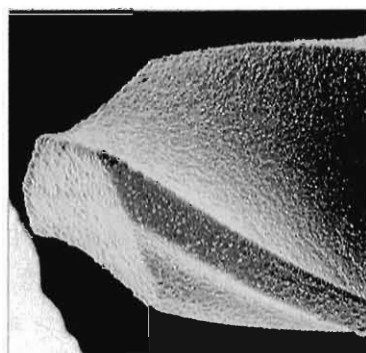
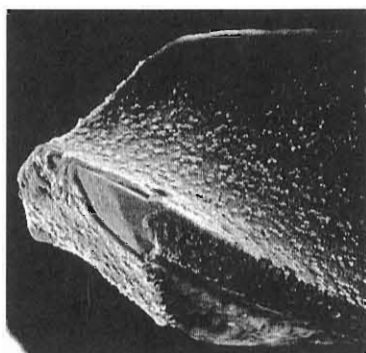
結晶質の膜からボール状膜へと変更し、面粗さが良くなったことにより、従来よりも飛躍的に工具寿命が向上したアルミニウム合金ドライ加工用ドリルを開発することができた。

4.3 エンドミル

PC ドリルやドライ加工用ドリルでの平滑化膜の効果は、エンドミルの加工においても同様に期待される。図 7 は、直径 7mm のエンドミルに平滑化膜を適用した場合の切削抵抗を従来膜の場合と共に示したものである。切削油剤を用いないドライ条件下でのアルミニウム合金（ADC12）の加工において、平滑化膜の切削抵抗は従来膜の約 80%までに軽減されており、膜の平滑化により切れ味が向上したことが示された。

また、図 8 は直径 1.7mm のエンドミルに双方の膜を適用し、高速溝加工した後の外観写真である。

従来膜では溝部に白いアルミニウムの溶着がうっすらとみられるが、平滑化膜ではほとんど認められなかった。このことから、耐溶着性の面でも平滑化膜の優位性が明らかとなった。



切削速度：113 m/min (120,000 min⁻¹)
 送り速度：1.8m/min (0.015 mm/rev)
 ワーク：BT レジン 0.8t 3 枚重ね
 あて板：0.20t アルミ

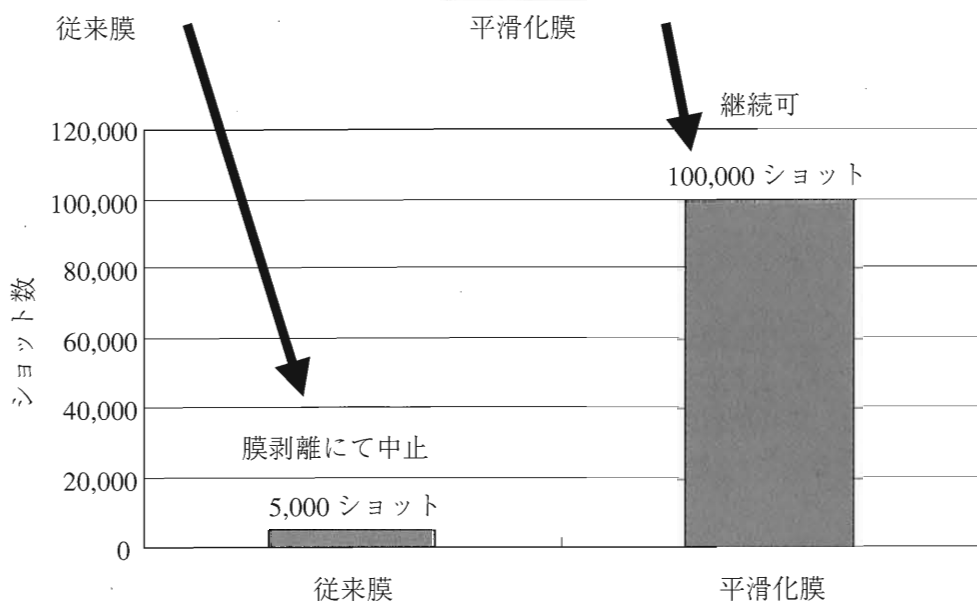
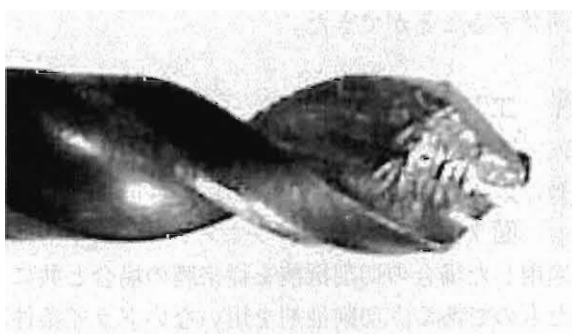
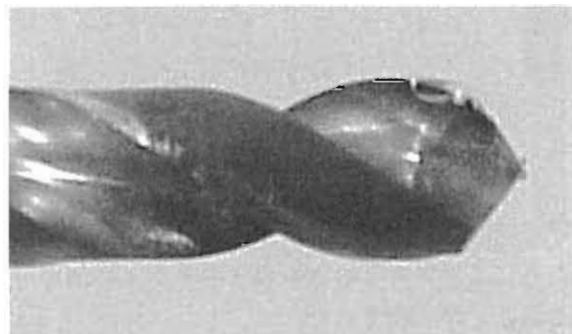


図5 φ0.3PCドリル切削性能データ比較

従来膜（4000 穴加工後）



平滑化膜（15000 穴加工後）

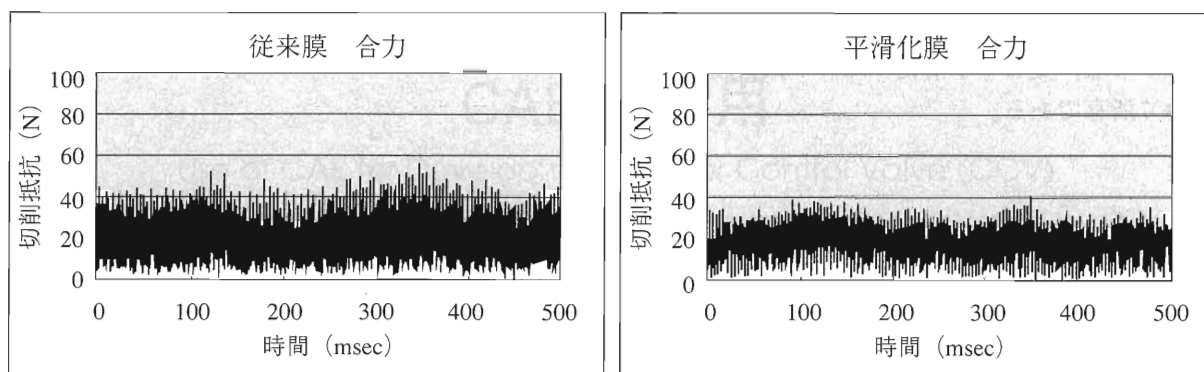


・加工条件

切削速度 100m/min
 送り量 0.083mm/rev
 穴深さ 16.5mm 止まり穴

切削油剤 ドライ（エアブロー）
 使用機械 NFS-200
 被削材 ADC12

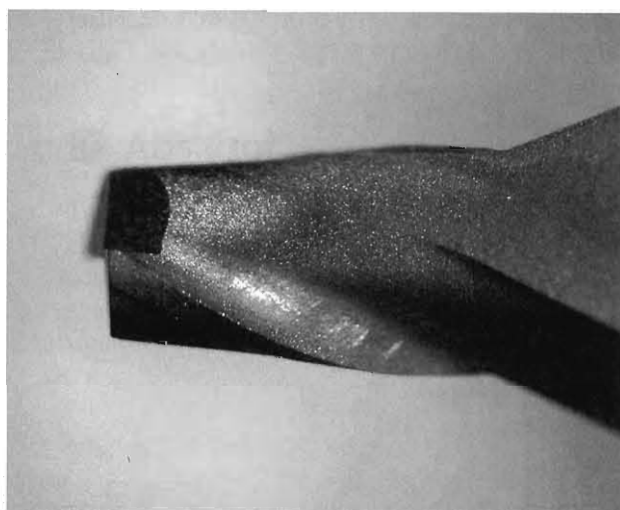
図6 アルミニウム合金（ADC12）加工後のφ5.5ドリル外観写真



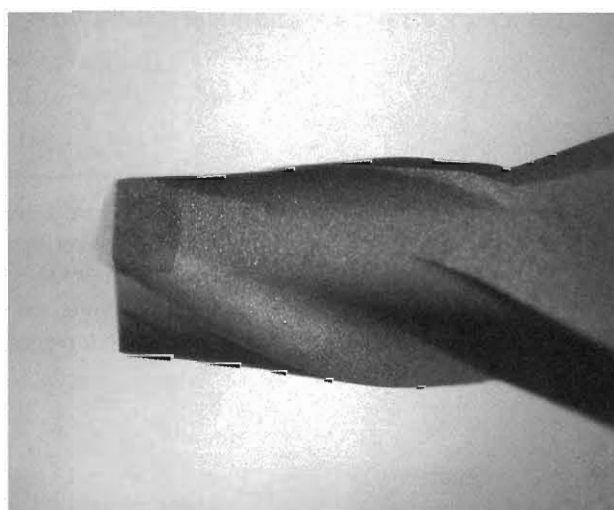
- ・加工条件
 - 切削速度 350m/min
 - (回転数 16000 min⁻¹)
 - 送り量 0.035 mm/tooth
 - 切り込み Aa 12.5 mm
 - Ar 0.10 mm
- ・試料
 - エンドミル φ7S2 従来膜
 - 平滑化膜
- ・測定条件
 - センサー 3成分力センサー
 - 型式 9251A (キスラー)
 - サンプリングタイム 100μsec

図7 従来膜及び平滑化膜を施したエンドミルの切削抵抗比較

<従来膜>



<平滑化膜>



- ・加工条件
 - 切削速度 80m/min
 - (回転数 15000min⁻¹)
 - 送り量 0.038mm/tooth
- 切り込み Aa 1.5mm
- 切削油剤 水溶性
- 使用機械 MX-45VA
- 被削材 ADC12

図8 溝加工後のφ1.7mm エンドミル外観写真比較

5. おわりに

従来よりも面粗さを向上させた平滑化ダイヤモンドコーティングを開発し、主に小径工具を対象として適用を図った。膜の平滑化により切削抵抗が低減された結果、従来不安定だった直径 1mm 以下の工

具を用いた加工において優れた性能を得ることができた。

当面、平滑化膜は小径工具を中心として適用を図るが、将来的には順次適用径を拡大していく予定である。今後は、プリント基板、アルミニウム合金以外の被削材を対象とした場合の平滑膜の有効性を調

査し、従来膜との住み分けを明確にする必要がある。これからも、更なる平滑化のための技術開発を進めていく所存である。

文 献

- (1) 神田一隆；表面技術，51 (3)，p.14 (2000)
- (2) 神田一隆，高野茂人，渡辺良一，米島弘栄；不二越技報，52 (1)，p.22 (1996)
- (3) 坂本幸弘，高谷松文，牛久保浩司；表面技術協会第 96 回講演大会要旨集，p.73 (1997)



高野 茂人

1992 年 入社
技術開発部にてダイヤモンド気相合成技術の開発に従事し、コーティング部を経て現在に至る



河上 登

1985 年 入社
1988 年 工具技術部にてダイヤモンド工具の開発に従事し、現在に至る