

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **23** B1
Oct/2011

マシニング事業

■ 新商品・適用事例紹介

CFRPの穴明けに最適
「**クリスタルダイヤコート[®]ドリル**」
Ideal for Drilling of CFRP
"Crystal Diamond-coated[®] Drill"

〈キーワード〉 CFRP・デラミネーション・切り残し・先端角90°・
低切削抵抗・耐摩耗性・クリスタルダイヤコート[®]

ラウンドツール製造所／技術部

北森 一範 Kazunori KITAMORI

野城 淳一 Junichi NOSHIRO

要 旨

近年、日本における航空機産業の伸張が著しく、この分野を狙った切削工具に注目が集まっている。その多くは難削材用の工具であり、航空機部品に使用される耐熱合金や航空機の機体に使用される炭素繊維強化プラスチック(CFRP)が難削材の代表例である。CFRPは、金属材料と比較して、軽量かつ高強度であり、耐摩耗性、耐腐食性、耐伸縮性に優れており、航空機機体の主要強度材として近年広く使用されている。一方、アルミニウム合金も比強度が高く軽量で耐腐食性があるため、機体の内部にはCFRPとアルミニウム合金とを結合させる部位も存在する。今後、航空機産業の需要増に伴い、それらの加工には、益々高精度かつ高能率化が求められる。

NACHIは、CFRPの穴あけ加工に適応したドリルとして「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」を開発した。「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」は、切削抵抗の低減を追求した刃先形状を採用し、結晶性が高く耐摩耗性に優れたダイヤモンドコーティングを施して、高品位で長寿命な穴あけ加工を実現する。

Abstract

The recent progress of an aviation industry in Japan is conspicuous and the cutting tools aiming for this field has been drawing attention. Many of such cutting tools are the tools for difficult-to-cut materials. Heat-resistant alloy used for aircraft components and carbon fiber reinforced plastic (CFRP) used in an airframe are typical of the difficult-to-cut materials.

CFRP is a lightweight, high-strength material that has been widely used in the airframe as a main high-strength material in the recent years as it excels metallic material in wear resistance, corrosion resistance, anti-elasticity in comparison with metallic material. On the other hand, aluminum alloy is also a high specific-strength, light weight material with corrosion resistance. So there are some areas inside the airframe where CFRP and aluminum alloy are joined. The future increase of the demand in the aviation industry calls for even higher precision and higher efficiency in the machining of these materials.

NACHI has developed Crystal Diamond-coated® Drill for drilling of CFRP. In Crystal Diamond-coated® Drill, the form of the drill edge (tip) is designed to reduce the cutting resistance. Diamond coating with high crystallization and excellent wear resistance is applied to the drill in order to realize the drilling of high quality with a longer drill life.

1. CFRP加工の問題点¹⁾

CFRPは、炭素繊維と高靱性の樹脂で構成されているが、樹脂強度が低いために^{※2}デラミネーションが発生しやすい問題がある。樹脂の耐熱温度は約200°Cであり、切削温度が上がるにつれ軟化し、デラミネーションが発生しやすい。一方、切削抵抗が高い場合でもデラミネーションが発生しやすい。さらに、CFRPは一般的な超硬ドリルでは早期に摩耗を開始し、その後著しく摩耗が進行する。²⁾以上より、CFRP加工用ドリルとしては、切削抵抗が低いこと、熱伝導率(放熱性)が高いこと、そして耐摩耗性が高いことが求められる。

今回、開発した「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」は、
 ・切削抵抗の低減を追求した刃先および溝形状の採用
 ・耐摩耗性に優れたクリスタルダイヤモンド®の採用
 により、CFRPに適応した高精度・高能率の穴あけ加工が可能な超硬ドリルである。図1に「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」の外観写真を示す。

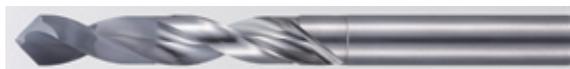
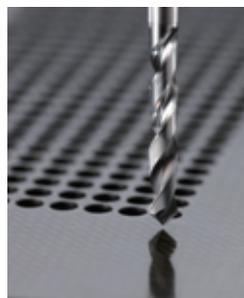


図1 クリスタルダイヤモンドコート®ドリルの外観写真



2. 「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」のラインナップ

「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」は、直径φ2.0からφ13.0まで0.1mm飛びの寸法を揃えており、さらにインチサイズを6寸法加え、全117寸法をラインナップ

している。寸法揃えが多く、広範囲の穴径に適應できる。

3. 「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」の形状

「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」には、次のような形状に特長がある。

1) デラミネーションの発生を抑制する最適な先端角

図2にドリル先端角によるスラストおよびトルクの比較を示す。先端角が120°の場合、スラストが高く、デラミネーションが発生しやすい。また、先端角を60°にすると、トルクが変動し、さらにはバリが発生しやすくなる。「クリスタルダイヤモンドコート®ドリル」は、先端角が90°であり、スラストを低減し、トルク変動を抑えることで、デラミネーションおよびバリの発生を抑制できる。

寸法	φ6.0
被削材	CFRP
コーティング	クリスタルダイヤモンドコート®
切削条件	Vc=50m/min, f=0.05mm/rev
加工深さ	10.0mm
切削油剤	無し

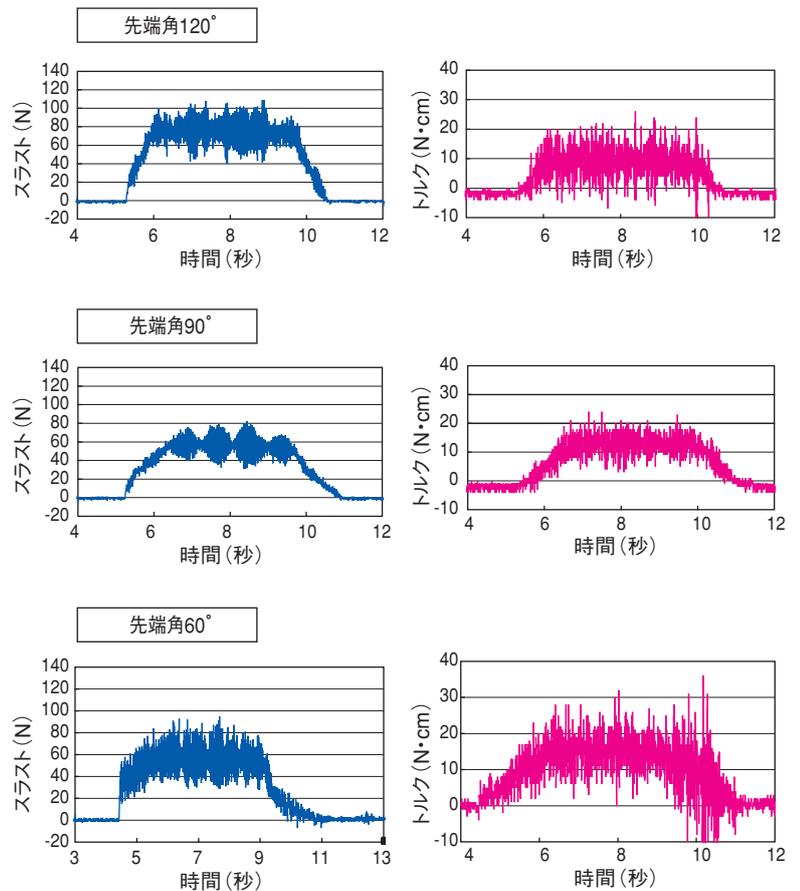


図2 先端角の違いによる切削抵抗の比較

2) 切れ味を重視したねじれ角と刃先形状

「クリスタルダイヤコート®ドリル」の溝は、強ねじれとし、さらに切れ味を高めるために、ドリルのコーナ部には、逃げ角が強い第3逃げ面(図3)を設けている。切れ味を重視した形状とすることにより、CFRPの出口側のデラミネーションを抑制する。

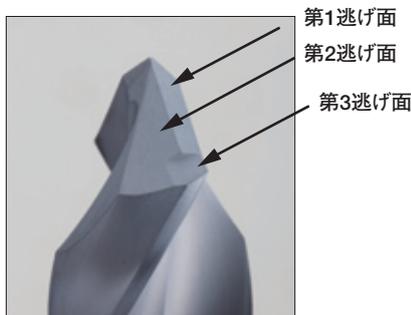


図3 クリスタルダイヤコート®ドリルの第3逃げ面

3) 切りくず排出性および耐欠損性の向上

「クリスタルダイヤコート®ドリル」の溝形状および刃先形状は、CFRP+アルミニウム合金の穴あけ加工が可能な設計になっている。

溝形状は、心厚を小さくすることで、ポケットを広くし、スムーズに切りくずを排出できる(図4-1)。刃先形状は、^{※5}シンニングすくい角を負角(図4-2)とし、ドリル中心部の耐欠損性を向上させた。

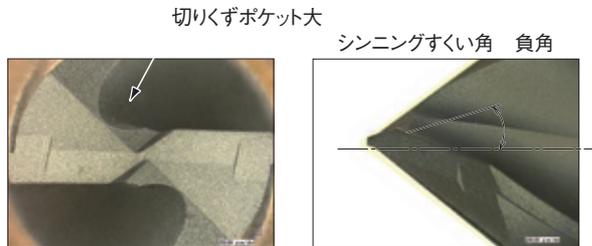


図4-1 溝形状

図4-2 シンニングすくい角

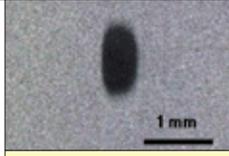
図4 クリスタルダイヤコート®ドリルの形状

4. クリスタルダイヤコート®の採用

CFRPを構成する炭素繊維は非常に高強度であり、切削時に工具は著しい損傷を受ける。この炭素繊維切削時のダメージに耐え得る被膜としては、現状ダイヤモンドコーティングが最適であるが、そのダイヤモンドコーティングをもってしてもCFRP加工において、耐摩耗性は十分とは言えない。

そこで、新たにCFRP穴あけ加工用ドリルを開発するにあたって、従来ダイヤコートに比較して結晶性、耐摩耗性に優れたクリスタルダイヤコート®を開発した。

表1 各種分析評価結果

	クリスタルダイヤコート®	従来ダイヤコート
不対電子密度	8.51×10^{15}	2.12×10^{16}
ヤング率[GPa]	1173.5	1070.4
摩耗体積 [mm ³]		
	1.015×10^{-3}	1.640×10^{-3}

1) 優れた結晶性

ダイヤモンドコーティング膜には、通常グラファイトを含む不純物相が含まれており、これが耐摩耗性を低下させる要因となる。耐摩耗性を高めるためには、不純物相を減少させ、結晶性を高めることが不可欠である。新開発したクリスタルダイヤコート®は、図5の顕微鏡写真からわかるように、従来品に対し結晶粒径が大きくなっている。さらに、^{※6}ラマン分光分析の結果からも(図6)従来品と比較して、 $1,332\text{cm}^{-1}$ に鋭いダイヤモンドピークが認められることから、結晶性の高い膜構造になっていることを確認できる。さらに、^{※7}電子スピン共鳴法(ESR)により測定したクリスタルダイヤコート®膜中の不対電子密度は、従来品と比較して60%減少した値を示したことから、単位体積あたりの結晶欠陥が少なく、優れた結晶性であることを示している。表1に各種測定データを示す。

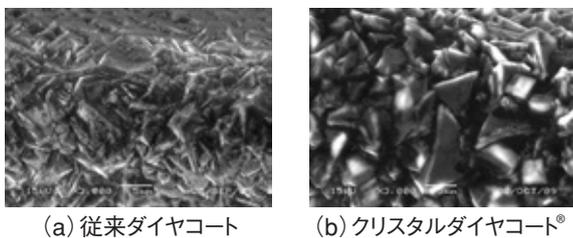


図5 ダイヤコート表面の顕微鏡写真

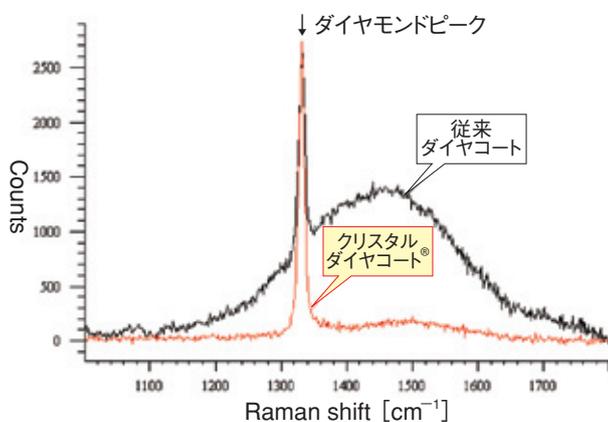


図6 ラマン分光分析結果によるクリスタルコート®と従来ダイヤコーティングの比較

2) 長寿命化を実現する耐摩耗性の向上

工具用被膜に求められる特性のひとつとして耐摩耗性があげられるが、CFRP加工において最も重要な特性である。実際の切削における工具摩耗は、形状、温度、潤滑状態など外乱が多く、単純に耐摩耗性を比較することは難しい。そこでダイヤモンドホイール式摩耗試験機を用いて(図7)ダイヤモンド膜の純粋な摩耗特性の調査を行なった。摩耗体積は実体顕微鏡により摩耗痕の幅(b)と長さ(l)を測定し評価した。その結果、クリスタルダイヤコート®は従来品に対し、1.6倍の耐摩耗性を示した。

耐摩耗性は硬さに強く依存するが、ダイヤモンドの硬さを測定することは困難であるため、硬さと相関が強いとされるヤング率を^{※8}レーザーアコースティック法を用いて測定した。その結果、クリスタルダイヤコート®は従来品に対して100GPa程度高いヤング率を示しており、優れた耐摩耗性を裏付けている。

以上のことから、新開発したクリスタルダイヤコート®は結晶性を高め、耐摩耗性を向上させることにより、CFRP穴あけ加工において長寿命加工を実現している。

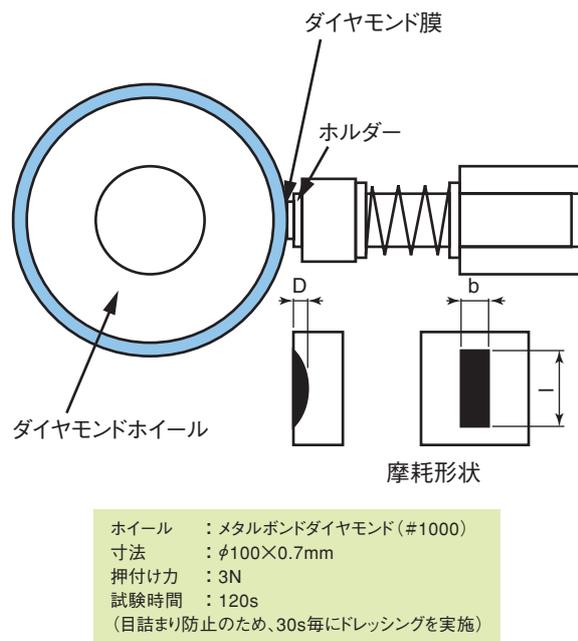


図7 ダイヤモンドホイール式摩耗試験機概略図³⁾

5. 「クリスタルダイヤコート®ドリル」の加工事例

1) CFRPの加工事例

「クリスタルダイヤコート®ドリル」と他社ダイヤモンドコーティングドリルの寿命比較を行なった結果を図8に示す。ドリル直径φ6.0mm、穴深さ20mm（貫通）を切削速度95m/min、送り量0.05mm/revの切削条件で比較した。他社品は、350穴で寿命に至ったのに対し、「クリスタルダイヤコート®ドリル」は、1,120穴以上の加工が可能であり、3.2倍以上の寿命差を示した。

図9は、350穴加工時点のCFRP出口側の穴写真であるが、他社品はデラミネーションが大きく、切り残しが発生している。また、同一条件で摩耗量を比較した結果を図10に示す。「クリスタルダイヤコート®ドリル」の摩耗量は、他社品と比較すると、同一加工穴数（加工穴数350穴時点）での摩耗量が60%以下である。

次に、「クリスタルダイヤコート®ドリル」の加工数と穴拡大量の結果（XY2方向）を図11に示す。1,120穴加工での穴拡大量は、-12~2μmであり、十分な穴精度を有している。

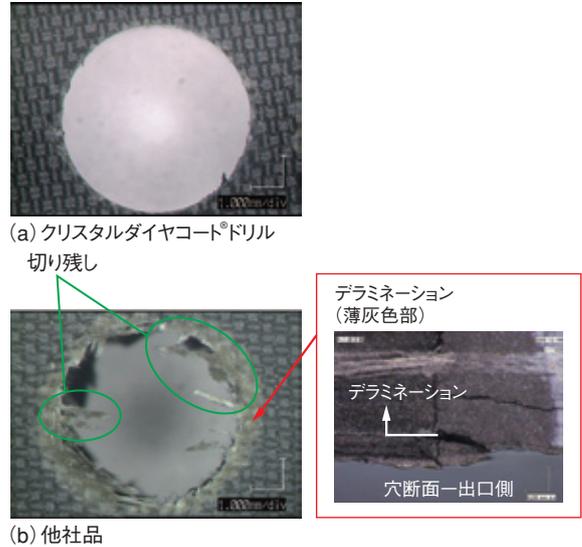
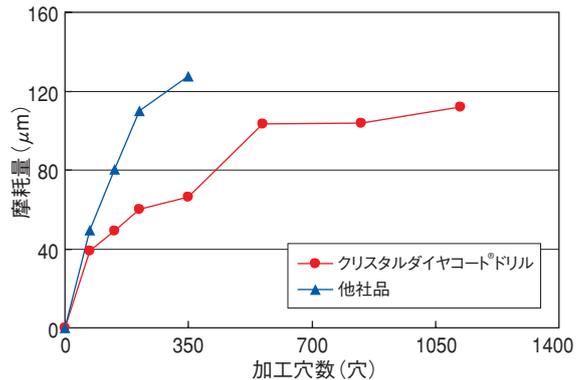


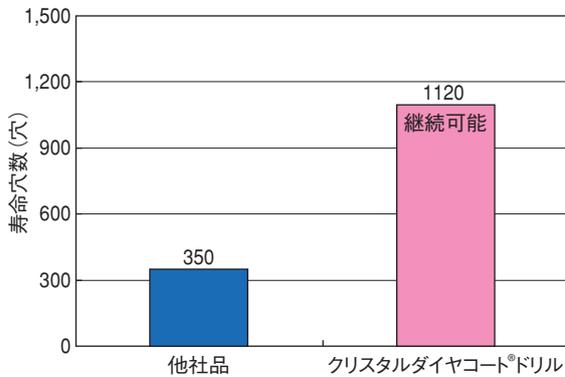
図9 CFRP出口側の穴写真



工具 : クリスタルダイヤコート®ドリル
 寸法 : φ6.0
 被削材 : CFRP
 切削条件 : $V_c=95\text{m}/\text{min}$, $f=0.05\text{mm}/\text{rev}$
 加工深さ : 20.0mm
 切削油剤 : 無し (他社内部エア)

図10 摩耗量比較 (CFRP)

	寿命穴数	寿命
他社品	350	3.2
クリスタルダイヤコート®ドリル	1120	



工具 : クリスタルダイヤコート®ドリル
 寸法 : φ6.0
 被削材 : CFRP
 切削条件 : $V_c=95\text{m}/\text{min}$, $f=0.05\text{mm}/\text{rev}$
 加工深さ : 20.0mm
 切削油剤 : 無し (他社内部エア)

図8 寿命比較 (CFRP)

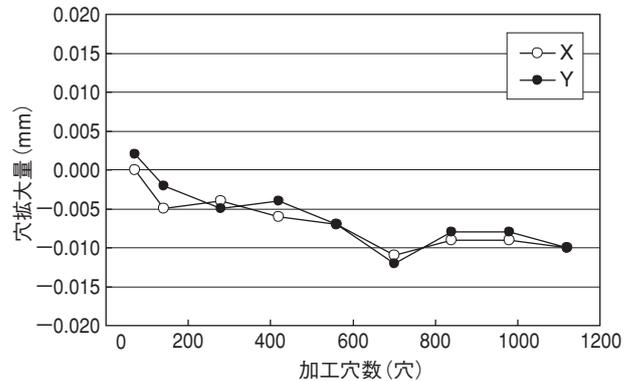


図11 クリスタルダイヤコート®ドリルの穴拡大量 (CFRP)

2) CFRP+アルミニウム合金の加工事例

CFRP+アルミニウム合金を加工した場合の「クリスタルダイヤモンド®ドリル」と他社ダイヤモンドコーティングドリルの寿命比較を行なった結果を図12に示す。ドリル直径φ6.0mm、穴深さ25mm（貫通）をNACHIおよび他社それぞれの推奨切削条件で比較した。他社品は、161穴で寿命に至ったのに対し、「クリスタルダイヤモンド®ドリル」は、360穴まで加工可能であり、2.2倍の寿命差を示した。

また、各推奨条件での摩耗量を比較した結果を図13に示す。「クリスタルダイヤモンド®ドリル」の摩耗量は、他社品と比較すると、寿命加工穴数時点での摩耗量が50%以下である。

次に、「クリスタルダイヤモンド®ドリル」において、推奨条件での穴拡大量の結果（XY2方向）を図14に示す。穴拡大量は、CFRP側で-21~5μm、アルミニウム合金側で-26~4μmであり、十分な穴精度を有している。

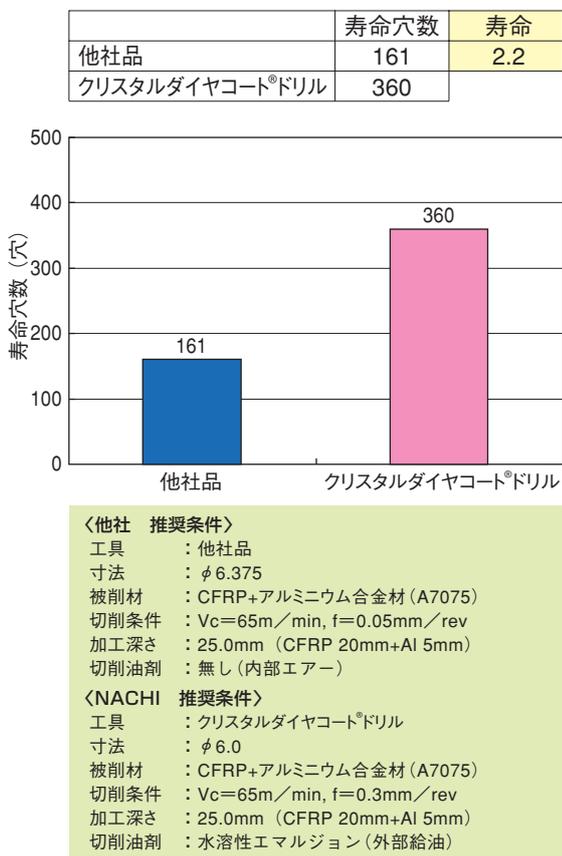
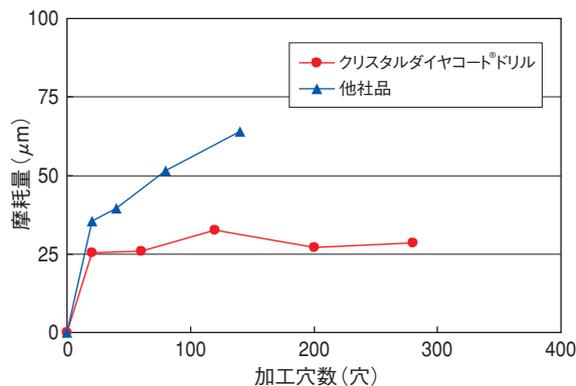


図12 寿命比較 (CFRP+アルミニウム合金)



<他社 推奨条件>
 工具 : 他社品
 寸法 : φ 6.375
 被削材 : CFRP+アルミニウム合金材 (A7075)
 切削条件 : Vc=65m/min, f=0.05mm/rev
 加工深さ : 25.0mm (CFRP 20mm+Al 5mm)
 切削油剤 : 無し (内部エア)

<NACHI 推奨条件>
 工具 : クリスタルダイヤモンド®ドリル
 寸法 : φ 6.0
 被削材 : CFRP+アルミニウム合金材 (A7075)
 切削条件 : Vc=65m/min, f=0.3mm/rev
 加工深さ : 25.0mm (CFRP 20mm+Al 5mm)
 切削油剤 : 水溶性エマルジョン (外部給油)

図13 摩耗量比較 (CFRP+アルミニウム合金)

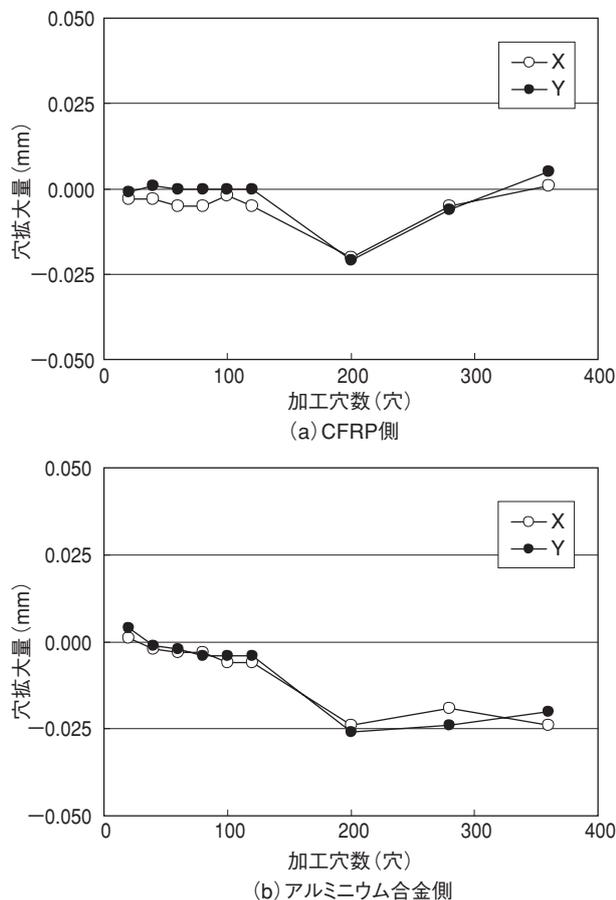


図14 クリスタルダイヤモンド®ドリルの穴拡大量 (CFRP+アルミニウム合金)

6. 加工コスト削減と汎用性

「クリスタルダイヤモンド®ドリル」は、高品位で長寿命な穴あけ加工が可能であるため、加工に伴うコストを大きく削減できる付加価値の高い工具である。

また、CFRP+アルミニウム合金の重ね材の加工も可能であり、汎用性に優れている。是非、一度「クリスタルダイヤモンド®ドリル」を使用し、その効果を実感していただきたい。

7. 謝辞

ドイツ フラウンホーファー研究所にてヤング率測定を取り計らって頂いた株式会社 東陽テクニカ 江川正利氏、またESR分析、ダイヤモンドホイール式摩耗試験などの評価にご協力頂いた日本工業大学 渡部修一教授、竹内貞雄教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 滝川義博:機械と工具、55(6)、P.52~58(2011)
- 2) 佐久間敬三・横尾嘉道・瀬戸雅文:強化プラスチック(GFRP・CFRP)の穴あけに関する研究—工具材種と摩耗挙動—、日本機械学会論文集、49(446)、P.1799~1807(1983)
- 3) 竹内貞雄:ニューダイヤモンド、25(4)、P.2~8(2009)

用語解説

- ※1 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)
炭素繊維をプラスチックで浸透硬化させて成形した複合材料。
- ※2 デラミネーション
積層された炭素繊維層が切断されずに層間がはく離する現象。
- ※3 スラスト
ドリル加工時にドリル軸方向にかかる切削抵抗。
- ※4 トルク
ドリル加工時にドリル回転方向にかかる切削抵抗。
- ※5 シンニング
先端の心厚をとくに薄くした部分。切削抵抗を小さくするためのもの。
- ※6 ラマン分光分析
物質に単色光(レーザー)を照射し、入射光と分子との相互作用の結果、入射光の振動数が変化するという光散乱現象(ラマン効果)を利用し、分子中の構造についての情報を得る手法。
- ※7 電子スピン共鳴法
磁場の影響下に置かれた物質中の不対電子(対をなしていない電子、すなわち結合に伴わない電子、結晶欠陥に起因する)は、そのスピンの磁気モーメントによって特定の周波数の電磁波、主にマイクロ波を吸収する。この現象を利用した不対電子を検出する分光法の一つ。
- ※8 レーザーアコースティック法
試料表面へのレーザー照射により、励起された音波が試料表面を伝播する現象を用いた方法。ヤング率測定では、この音波を検出した信号をフーリエ変換により、周波数一位相速度の曲線を求め、解析により算出する。