研究論文

CFRP用高性能ドリルの開発

須藤　貴裕*　相田　収平*　渡邉　英人**

Development of High-performance drill for CFRP

SUTOH Takahiro*,　AIDA Shuhei* and WATANABE Hidehito**

抄　　録

CFRP用の高性能なドリルを開発することを目的とし，ドリルに施すコーティングや形状の検討・試作および試作したドリルを用いて加工試験を実施した。その結果，コーティングの違いにより工具の摩耗状態に大きな差異があることがわかった。また，ドリルの先端角を段階的に変化させ，ドリル外周面付近の先端角を小さくすることで被削材の剥離を抑制できることを明らかにした。加えて，市販の他社製ドリルと比較し，同等以上の性能を有することを確認した。

1.　緒　　言

ボーイング787などに代表される最新型の航空機では，炭素繊維複合材（CFRP）などの複合材の使用割合が増加している。ボーイング787においては，主翼のほか，胴体など大半の部分がCFRPなどの複合材となっており，機体重量の約50%を占める。CFRPの使用割合の増加に伴い，CFRPを切削加工する量も増加している。CFRPの切削加工はおもにドリル加工とトリミング加工であるが，どちらの加工においても被削材の剥離（デラミネーション）や工具の著しい摩耗が課題であり，それらを解決する工具の開発が求められている。

本研究では，工具摩耗や被削材のデラミネーションを抑制した高性能なCFRP用ドリルを開発することを目的とし，ドリルに施すコーティングや形状の検討および試作したドリルを用いて加工試験を実施した。加えて市販の他社製ドリルとの性能比較も行った。

*　研究開発センター

**　ユニオンツール株式会社

2.　ドリルの検討・試作

2.1　コーティングおよび形状の検討

まず，CFRPのドリル加工に適したコーティングを検討した。CFRP加工においては著しい摩耗が生じるため，加工用ドリルはダイヤモンドコーティングされることが一般的である。本研究でも熱CVD法によるダイヤモンドコーティングを対象に，硬さ，靭性，潤滑性を変えた3種類のコーティングを施したドリルを試作した。それらの特徴を表1に示す。Nコートは耐摩耗性を重視し，硬さを大きくした仕様とした。それに対し，Bコートは耐欠損性を重視し，靭性を大きくした仕様とした。Aコートは耐摩耗性および耐欠損性のバランスを重視し，硬さおよび靭性とも中程度の仕様とした。

つぎに，ドリルの形状について検討した。こ

表1　試作したコーティングの特徴

	硬さ	靭性	潤滑性
Nコート	大	小	低
Aコート	中	中	中
Bコート	小	大	高

れはドリルの先端角と被削材のデラミネーションには密接な関係があるためである。図1にドリル先端角と切削抵抗分力の関係を示す。先端角が大きい場合，切削抵抗Fのスラスト方向分力Fzが増加し，回転方向分力Frが低下する。一方，先端角が小さい場合，スラスト方向分力Fzが低下し，回転方向分力Frが増加する。デラミネーションの発生はスラスト方向分力の大きさが支配的であり，CFRPのドリル加工でデラミネーションを抑制するためには，先端角を小さくすることが望ましい。ところが，ドリルの先端角を小さくした場合には加工開始から終了までのストロークが長くなるという問題がある。図2にドリル先端角の違いによる加工ストロークの比較を示す。先端角を小さくした場合には，加工に要するストロークが長くなり，加工能率の低下を生じる。このことから，試作したドリルでは先端角を段階的に変え，加工能率を確保

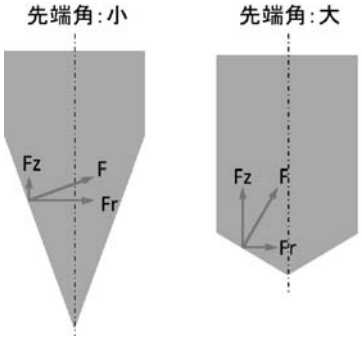


図 1　ドリル先端角と切削抵抗分力

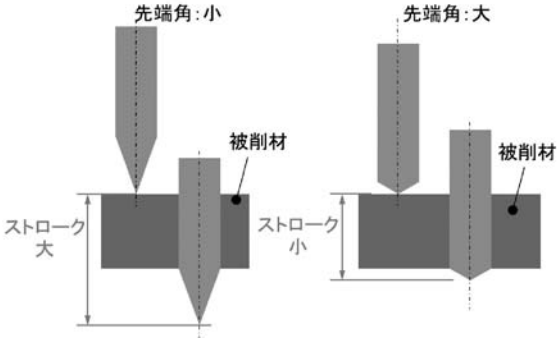


図 2　ドリル先端角と加工ストローク

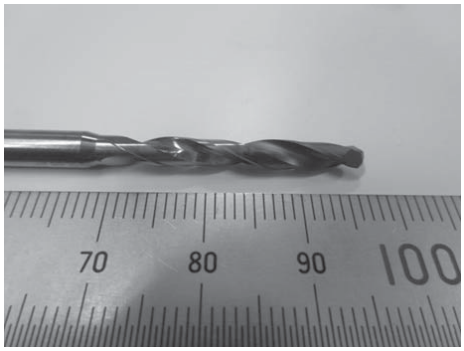


図 3　試作したドリルの外観

するとともに，デラミネーションの発生を抑制する効果を狙った。試作したドリルの外観を図3に示す。ドリルの直径は3.3mm，刃数は2枚である。

2.2　コーティングの性能比較

試験対象としたダイヤモンドコーティングを施したドリルを用いて，コーティングの性能評価を実施した。評価に用いた加工機を表2に示す。また，加工条件を表3に示す。コーティングの性能評価は100穴加工後の工具の摩耗状態により判断した。

図4に3種類のコーティングを施したドリルでそれぞれ100穴加工した後にドリルを電子顕微鏡観察した写真を示す。図から明らかなよう

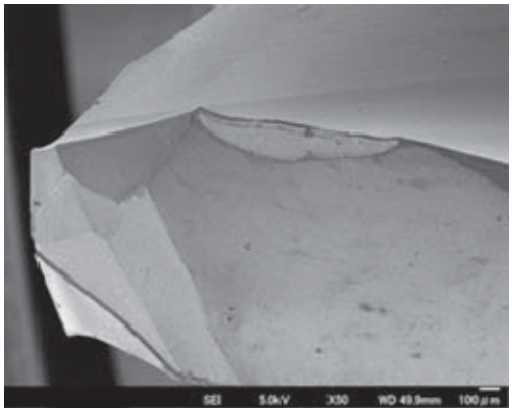
表 2　試験に使用した加工機

加工機	東芝機械製ASV40
主軸	空気静圧軸受主軸
主軸回転速度	3,000～30,000min^{-1}
ホルダ	BIG大昭和製
	MEGA13N
	コレットNBC13-4AA

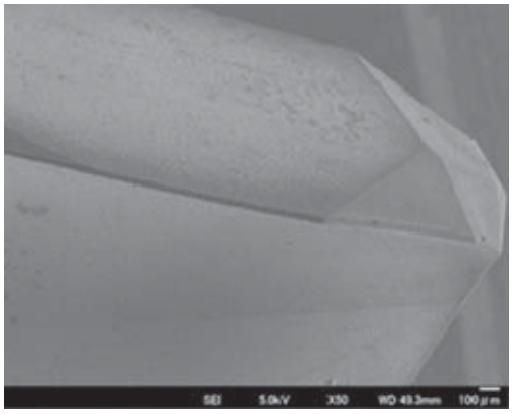
表 3　加工条件

工具突出量	30mm
主軸回転速度	12,000min^{-1}
送り	0.022mm/rev
切削油	ドライ（エアブロー）
被削材	CFRP　t5mm

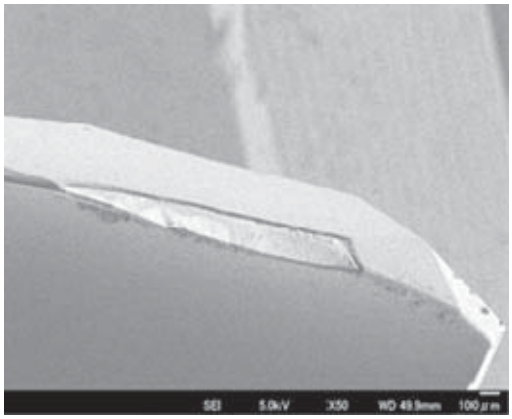
にコーティングの違いにより，工具の摩耗状態に大きな差異があることがわかる。Nコートでは，外周に近い切れ刃部で摩耗が著しいほか，先端部でもコーティングの剥離が認められる。Nコートは硬さが大きいものの，靭性が小さく，加工による衝撃に耐えられなかったものと考えられる。Bコートについては，先端部の剥離はないものの，外周に近い切れ刃部ではNコートと同様に著しい摩耗が生じている。これは，硬さが小さいことによるものと考えられる。それに対し，硬さおよび靭性が中程度のAコートでは100穴加工後も良好な状態が保たれている。このことから，CFRP加工用ドリルのダイヤモンドコーティングでは硬さと靭性のバランスがとれた性質が適していると考えられる。



(a)　N コートドリル



(b)　A コートドリル



(c)　B コートドリル

図 4　100 穴加工後のドリル刃先

3.　他社製ドリルとの比較

3.1　切削抵抗測定

コーティングの性能比較において良好な結果を示した A コートドリルと市販の他社製ドリルの切削抵抗のスラスト方向分力を測定した。比較に用いた他社製ドリルを表 4 に示す。また，スラスト方向分力の測定に用いた装置構成を図 5 に示す。スラスト方向分力の測定には水晶圧電型工具動力計（Kistler 9257B）を用いた。ドリル加工による力を受けて工具動力計で計測さ

表 4　比較した他社製ドリル

メーカー名	N社
工具径	3.3㎜
刃数	2枚
先端角	90度
ねじれ角	35度
コーティング	ダイヤモンドコーティング

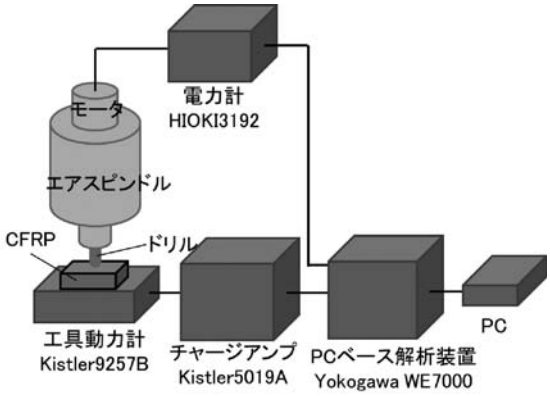
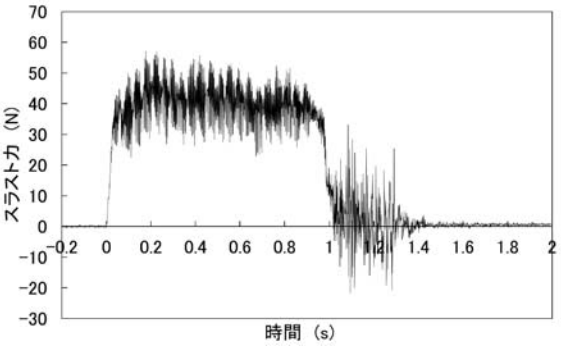
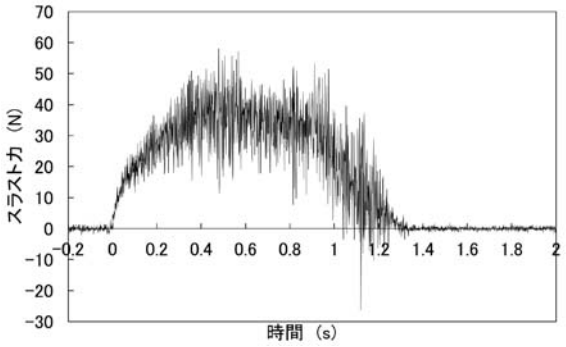


図 5　切削抵抗の測定に用いた装置構成

れたスラスト方向分力はチャージアンプ（Kistler 5019A）を介して電圧信号として PC ベース解析装置（Yokogawa WE7000）に取り込まれる。また，スラスト方向分力と併せて，加工により発生する回転方向分力を測定するため，主軸モーターの動力も測定した。加工条件は表 3 に示したとおりである。図 6 にそれぞれのドリルを用いて測定したスラスト方向分力を示す。横軸は加工開始からの時間，縦軸はスラスト方向分力を表す。スラスト方向分力の最大値は他社製ドリルの方が A コートドリルよりも若干低めの値を示した。しかし，他社製ドリルでは，ドリル先端が被削材の下面に到達する 1 秒付近から直線的にスラスト方向分力が小さくなるのに対し，A コートドリルでは，ドリル先端が被削材の下面に到達する 1 秒付近を境にして急激にスラスト方向分力が小さくなる。これは，A コートドリルが先端角を段階的に変化させた形状となっているため，先端角が大きな



(a)　A コートドリル



(b)　他社製ドリル

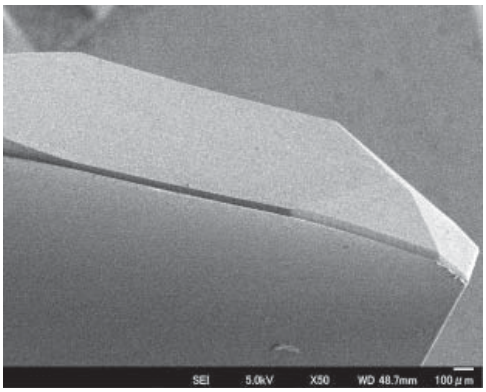
図 6　各ドリルのスラスト方向分力

ドリル先端が被削材の下面を通過した後はドリル外周面付近の先端角の小さな部分でのみ切削しており，前述したドリル先端角と切削抵抗分力の関係に従ってスラスト方向分力が小さくなったものと考えられる。デラミネーションの発生要因としてはスラスト方向分力の大きさが支配的であると考えられることから，A コートドリルの方がデラミネーション抑制に対して良好な結果が期待できる。なお，同時に測定した主軸モーターの動力については明確な違いは確認できなかった。これは，発生する回転方向分力に対して，モーターを介しての間接的な測定であったため，正確な測定結果が得られなかったと考える。

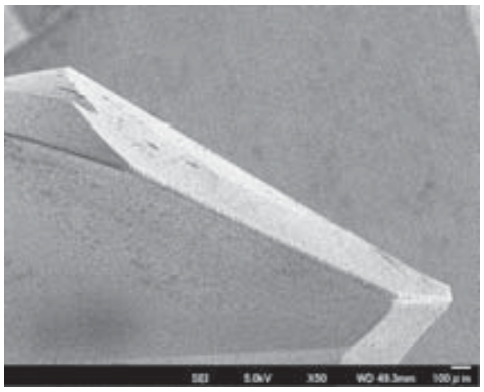
3.2　加工試験と被削材の観察

A コートドリルと他社製ドリルを用いて加工試験と被削材の観察を行った。加工条件は表 3 に示したとおりである。まず，図 7 に 500 穴加工後のドリルの電子顕微鏡写真を示す。両工具とも逃げ面に均一な摩耗は見受けられるものの，工具寿命には至っておらず，摩耗の程度も同程度である。このことから，コーティングの性能については，市販の他社製ドリルと明確な差異はないものと考えられる。

つぎに，加工した CFRP の状態（表面：ドリル入口側）の写真を図 8 に示す。A コートドリルおよび他社製ドリルとも目立ったデラミネーションや切り残しなどは見受けられず，良好な加工が行われている。図 9 には加工した CFRP の状態（裏面：ドリル出口側）の写真を示す。A コートドリルおよび他社製ドリルとも若干の切り残しが見受けられる。また，他社製ドリルにおいては，加工初期から若干のデラミネーションが見受けられる。これは，先ほどのスラスト方向分力の影響と考えられる。この点から，デラミネーションの抑制という点では，先端角を段階的に変化させ，ドリル外周付近の先端角を小さくした A コートドリルの方が優れていると考えられる。



(a)　A コートドリル



(b)　他社製ドリル

図 7　500 穴加工後のドリル刃先

4. 結　　言

CFRP 用の高性能なドリルを開発することを目的とし，コーティングおよび形状の検討と加工試験を実施し，以下の結論を得た。

(1)　3 種類のコーティングを検討・試作し，比較試験を実施した結果，コーティングの違いにより，工具の摩耗状態に大きな違いがある。また，CFRP 用ドリルのダイヤモンドコーティングでは，硬さまたは靭性に特化した性質よりも硬さと靭性のバランスがとれた性質が適している。

(2) 市販の他社製ドリルとの性能比較試験を実施した結果，加工数 500 穴では工具摩耗において明確な差異は見受けられず，工具摩耗は同等であった。このことから，コーティングの性能については他社製ドリルと明確な差異はないと考えられる。しかし，被削材の剥離については，他社製ドリルに対して良好な結果が得られた。これは，ドリル先端角を段階的に変化させ，ドリル外周面での先端角を小さくしたことによる効果と考えられる。

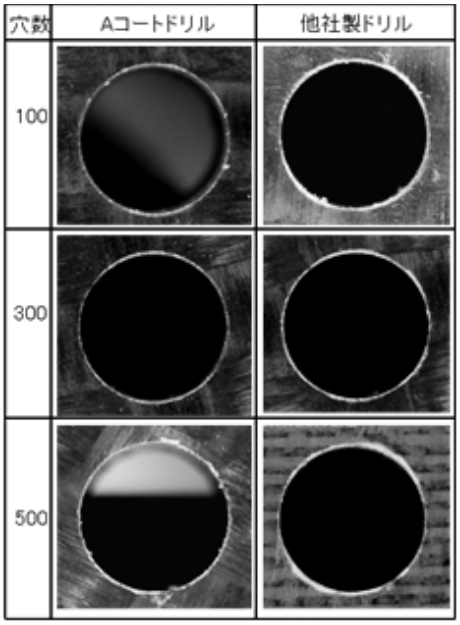


図 8　加工した被削材の表面（表側）

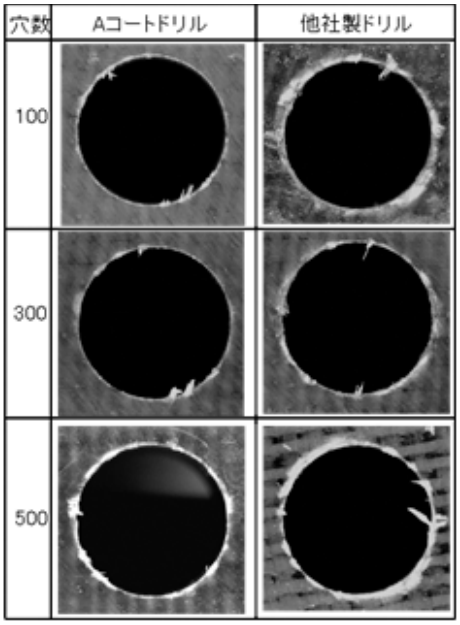


図 9　加工した被削材の状態（裏面）