

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「新素材（炭素繊維）に対応した切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成21年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	4
1-3	成果概要	6
1-4	当該プロジェクトの連絡窓口	6

第2章 本論

I.	適正工具に係る課題への対応	7
II.	加工方法課題への対応	12
III.	工作機械課題への対応	15

第3章 全体総括

I.	適正工具に係る課題への対応	18
II.	加工方法課題への対応	18
III.	工作機械課題への対応	18
IV.	今後の事業化に向けた取り組み	19

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

航空機分野では、軽量化、精度向上による接合工数の削減等への対応から近年機体材料として炭素繊維強化複合材料（CFRP：以下炭素繊維という。）の導入が急速に進んでいるが、炭素繊維材料の切削加工技術については、工作機械及び工具を含め、未だ確立されていないのが実態である。

本研究開発では、切削過程で生ずる積層炭素繊維の剥離、仕上げ面のケバ立ちの防止及び加工中に生ずる炭素屑の飛散防止・除去等に関する各種の課題を解決するために、切削過程における加工速度、送り速度、回転数等の加工条件の検討はもとより、切削に用いる工具並びに集塵・防塵等のに関する研究開発を行った。

そして、これらの知見・ノウハウの蓄積をベースに、炭素繊維の高精度・高効率の条件下で安定的に生産を可能とする切削加工技術の確立を図り、川下製造業者のニーズに対応するとともに、工作機械、工具といった産業も含めた切削加工に関連する一連の産業の競争力向上に寄与した。

① 加工方法課題への対応

加工条件における最終目標値と達成値は以下のとおりである。

区分		加工条件	研究開発開始時	目標値	達成値
切削速度	外周加工	外周(トリム)加工 カッター径 Φ12mm 径方向 6~14mm	100m/min	150m/min	150.8m/min
	孔加工		30m/min	150m/min	153.9m/min
加工精度	外周加工		形状公差 ±0.30mm	形状公差 ±0.25mm	形状公差 ±0.20mm
	孔加工		孔加工 直径 Φ3.26mm 深さ (切り込み) 3mm	位置精度 平面上 ±0.10mm	位置精度 平面上 ±0.05mm
			位置精度 曲面上 ±0.25mm	位置精度 曲面上 ±0.10mm	位置精度 曲面上 ±0.10mm
工具寿命	外周加工	0.06mm : 1刃	加工長 5m	加工長 30m	加工長 35m
	孔加工	0.03mm : 1回転	100箇所	150箇所	550箇所

上記加工目標値を達成するための切削速度、送り速度、穴あけ角度等の加工条件の開発と要求精度の維持確立に向けて、工作機械及び工具を含めてトータルの観点から、コストを意識した研究により解決を図った。

② 適正工具課題への対応

エンドミル等の切削工具に関しても、それぞれにおいて技術目標値を設定して対応した。現在市販されている繊維強化プラスチック、繊維強化金属の孔加工、トリム（外周）加工用のドリル及びエンドミルの推奨条件は以下のとおりである。

材質：被削材 FRP

ドリル $\phi 3 \sim 5$ 切削速度：20~60m/min 送り速度：0.04~0.08mm/rev

エンドミル $\phi 3 \sim 5$ 切削速度：20~60m/min 送り速度：0.04~0.08mm/rev

上記の「加工条件における目標値」を実現するためには、市販の工具では達成が困難であることから、新たに、ドリル及びエンドミルに係る刃形、すくい角度等の形状の研究及びコーティング方法の研究（Tiコーティング、ダイヤモンドコーティング等）を行って、解決を図った。

③ 工作機械課題への対応

工作機械に係る目標値は以下のとおりである。

吸塵装置：炭素繊維の切削加工において発生する切り粉の80%以上を吸入できる装置を開発して解決を図った。

工作機械精度：航空機用炭素繊維の切削加工に必要な機械精度の把握とその精度を達成するための手法を確立した。 目標値—刃先精度で $\pm 30 \mu m$

④ その他

加工方法及び工作機械等の諸課題に対する設定目標値に関しては、本研究開発により達成する計画であるが、目標値の達成に比類して重要なことは炭素繊維をハンドルータやハンドドリルによる加工ではなく、工作機械により機械加工作業を可能とした。

併せて、本開発成果の機械加工システムとしての事業化、量産化により、他の川下製造業者のニーズに応えることにあることから、これらの実現を図るための研究開発を実施した。

2) 研究の概要

航空機部材の炭素繊維にかかる切削加工技術の確立に向けて、工作機械及び適正工具、切削における加工速度、送り速度等を含む切削の課題に対する研究の概要は以下のとおりである。

① 加工方法に係る課題への対応

ア 加工技術について

炭素繊維のトリム加工（外周加工）や孔加工等の切削に際し、適切な工具の選択を行いながら切削速度、工具寿命、穴あけ角度等様々な実験を行い、データの収集・分析を行った。

また、旋削機構の解析実験とともに、エンドミル・ドリル加工における被削性の評価、最適加工条件の構築も行った。

イ 治具・あて板（バックアップ）による影響について

孔加工における裏面の保持、外周の保持（浮き上がり防止）に関するデータ収集と分析を行った。

② 適正工具に係る課題への対応

ア 工具材質について

切削に用いる工具の寿命が短い現状を踏まえ、コストとの関連を検討しながら

らハイス・超硬・サーメット・ダイヤモンド等の材質を考慮・選定しながら、工具寿命を延ばすためのデータ収集と分析を行った。

イ 工具のコーティングについて

切削工具の長寿命化のための表面コーティング技術の研究開発を行った。

ウ 工具の刃形、すくい角度の切削速度に与える影響について

市販の工具では適切な切削加工ができないことから、研削加工時の工具の剛性、精度等を維持するための研削盤の研究開発を行うとともに、刃形、すくい角度や切削速度による工具寿命に与える影響について、工具材料別に様々な実験を行い、データの収集と分析を進めながら、炭素繊維の切削加工に適した工具形状の研究開発を実施した。

③ 工作機械課題への対応

ア 集塵機能の付加等の検討

炭素繊維の切削加工において発生する粉塵の除去について、工作機械に集塵の機能を付加した。(切粉対策用の吸塵装置、駆動部のカバー等)

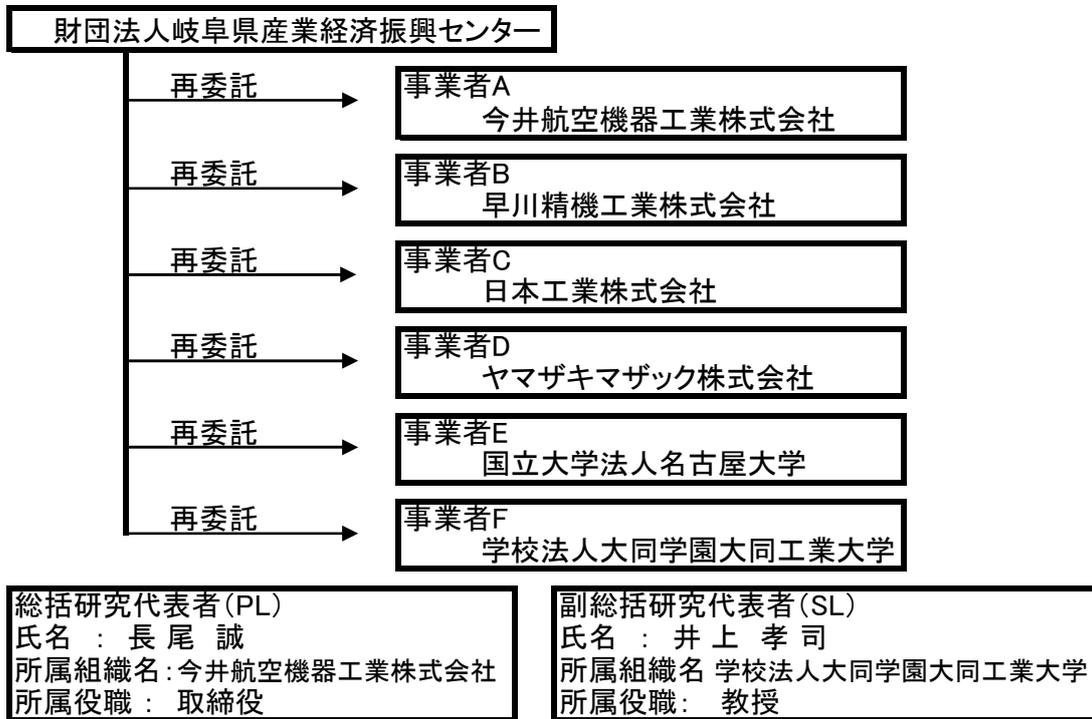
イ 工作機械の精度について

炭素繊維の切削加工において必要とされる精度を確保するため、工作機械の精度に関するデータ収集と分析を実施した。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

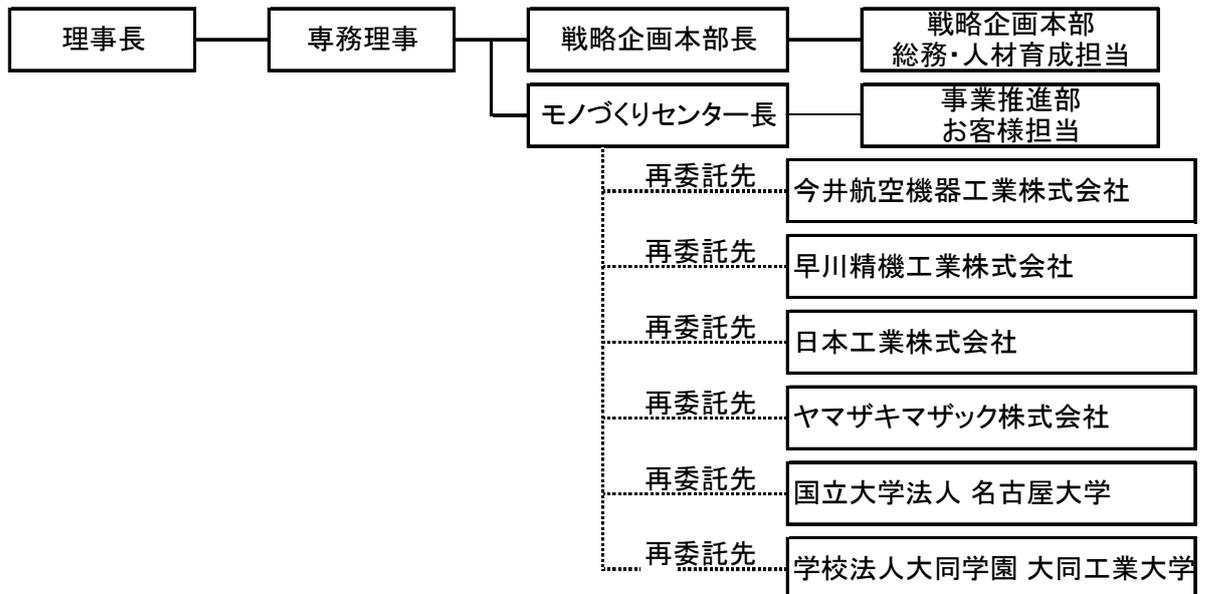
1. 研究組織及び管理体制

(1) 研究組織（全体）



(2) 管理体制

1) 事業管理者 財団法人岐阜県産業経済振興センター

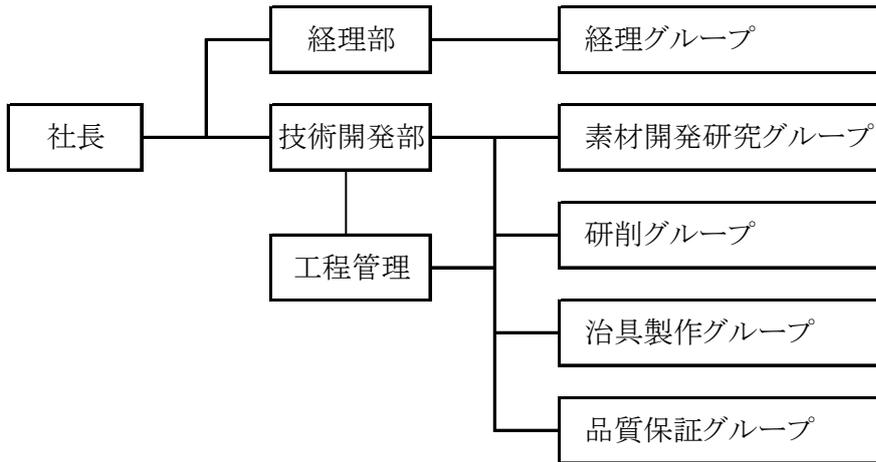


2) 再委託先

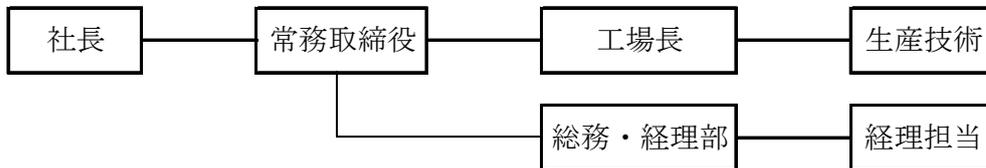
①今井航空機器工業株式会社



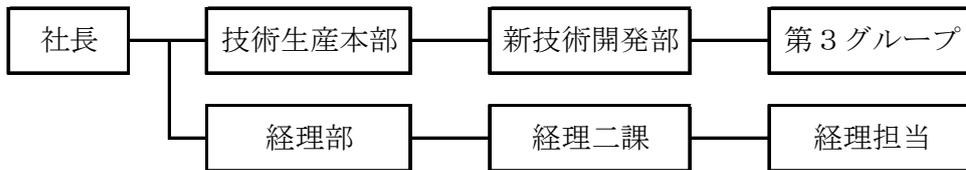
②早川精機工業株式会社



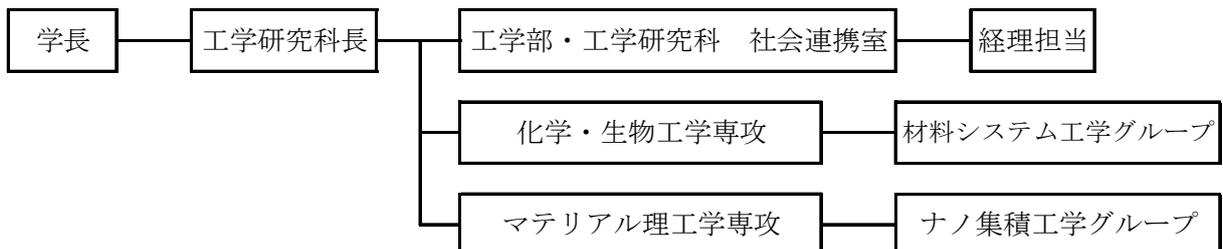
③日本工業株式会社



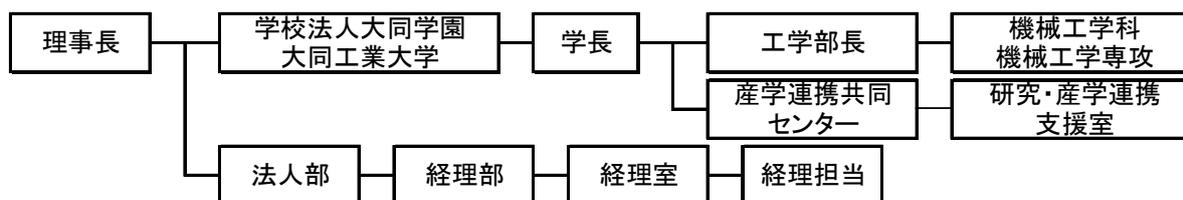
④ヤマザキマザック株式会社



⑤国立大学法人 名古屋大学



⑥学校法人 大同学園 大同工業大学



(3) 管理員及び研究員

- 1) 事業管理者 財団法人岐阜県産業経済振興センター
- 2) 再委託先
 - ①今井航空機器工業株式会社
 - ②早川精機工業株式会社
 - ③日本工業株式会社
 - ④ヤマザキマザック株式会社
 - ⑤国立大学法人 名古屋大学
 - ⑥学校法人 大同学園 大同工業大学

1-3 成果概要

従来の航空機用 CFRP 切削加工技術では、CFRP 加工時の粉塵が電気、機械摩耗等、加工機械に与える影響が著しい為、ハンド作業を行い工具の寿命も短命であった。本事業の成果として機械の防塵対策と集塵装置写真を備えた加工機械を開発した。さらに、従来の切削工具に対し工具寿命と切削条件を向上した工具の開発に成功した。これにより、加工コスト低減と人体への影響を抑え航空機用 CFRP 加工の円滑な導入が見込める。

なお、本研究開発の実現により、CFRP の 2 次加工技術として切削加工を採用することが可能となり、工具の消耗品費削減率も約 60% の実現が見込まれる。また、同技術は自動車産業、IT 産業分野への転用が可能であり、具体的には自動車部品の 2 次加工への活用を研究中である。

1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

財団法人岐阜県産業経済振興センター 事業推進部 小川 誠

所在地：岐阜県岐阜市藪田南 5 丁目 14 番 53 号

電話：058-277-1093 FAX：058-273-5961

第2章 本論

I. 適正工具に係る課題への対応

1. 外周加工用工具（エンドミル）の開発研究及び製作

A. 市販工具メーカーの超硬工具では、工具寿命が3mも加工できない状態であった。そこでPCD工具の開発を行った。また、開発したPCD工具の工具寿命が最長となった刃先形状で超硬母材工具（エンドミル）を2本製作する。その後それぞれにCFRP加工で効果があり、安価な2種類のコーティングを施して製作された工具と工具寿命が最長となった刃先形状のPCD工具を製作する。また、PCD工具については加工後に再研磨を行い同様の加工試験を行うことで再現性も実証する。

試験手順及び条件：

- (1) 被削材：成型製作した平板CFRP：航空機仕様
T：4mm x L：950mm x W：450mm
を10mm幅で全面溝切断切削加工を行う。
- (2) クランプピッチ：約203mm、工具径：φ12、
切削速度：150.8m/min.
- (3) 加工前と加工後の工具径を測定
- (4) 試験片の毛羽立ち状態、剥離を確認する。
- (5) 剥離が発生した時点で加工を終了する。

本章以降の剥離許容寸法等の品質要求については、下表により判定する。

(注：工具寿命の判定については、製品の安定した品質要求確保のため、下表の許容値に対し、1/2にて判定する)

品質要求：外周加工(トリム)加工			品質要求：穴明け加工		
項目		CFRP(一方向材)	項目		CFRP(一方向材)
欠損・剥離	最大高さ	0.4mm	欠損・剥離	最大高さ	0.4mm
	最大幅	2.5mm		欠損・剥離	最大幅
表面粗さ		Ra=12.5	表面粗さ		Ra=3.2
形状		±0.50mm	穴径		+0.076/-0mm (.003in)
			穴位置公差		±0.2mm(曲面) / ±0.05mm(平面)

表3-1 品質要求（許容値）

B. 実機部品を想定して、工具寿命が最長となった刃先形状のPCD工具を製作し、曲面CFRPの比較加工試験を実施する。また、再研磨を行い同様な加工試験を行う。

試験要領：

- (1) 本研究開発用に設計製作した成型用治具により、CFRP成型加工業者にて曲面CFRPの成型製作する。
- (2) 成型されたCFRPを曲面加工用治具に真空装置を使用したバキュームで吸引及びロケーターピンで取付け後、外周を工具径方向の切込量4mm、UP-CUTで加工する。
- (3) 加工後、試験片の加工面状態（毛羽立ち・剥離）を比較する。

2. 穴明け加工用工具（ドリル）の開発研究及び製作

工具メーカーから市販されているドリルについて加工試験を行い、有効なコーティング種類を調査すると共に知見よりダイヤモンドコーティングが良い結果となったことを踏まえ、開発した工具寿命が最長となった形状で工具を製作し、ダイヤモンドコーティングによる加工試験を実施する。

試験要領：

- (1) 被削材：成型製作した平板CFRP：航空機仕様
- (2) 切削速度：市販工具（49m/min）、開発工具（154m/min.）
- (3) 穴加工時、裏面にバックアップとして加工ピッチに合わせφ8mm穴を加工しておいた6mm厚のライザーを入れる。
- (4) 10mmピッチで穴加工を行う。
- (5) 加工前と加工後の工具径を測定
- (6) 試験片の毛羽立ち状態、剥離を確認する。
- (7) 剥離が発生した時点で加工を終了する。

研究成果：

1. 外周加工用工具の開発研究及び製作

A. 外周加工用工具の工具寿命

試験NO.	工具種類	コーティングメーカー	特徴	磨耗量mm/m	新製工具寿命	再研後寿命(試験NO.4)
3、4	PCD工具	—	多結晶ダイヤモンド(付刃)	.0003	35m	38m
1	AC-Xコーティング	A社	表面硬度HV7000(平滑)	0.090	1.8m	再研不可
2	OS-Tコーティング	A社	表面硬度HV3500 (TiAlNをはるかに上回る切削寿命)	0.107	1.7m	再研不可

表3-2 PCDとコーティングの工具寿命比較

結果は、上記表3-2のとおりであった。

本研究開発において使用してきた航空機仕様のCFRP材質について加工試験を実施した結果として、PCD工具が他のコーティングを施した工具より優位であることが判明した。また、この被削材質に於けるPCD工具は、一般のコーティング工具と比較しても1m当りの耐磨耗性が約30倍あり、加工後再研磨しても約35m加工する事が可能であった。

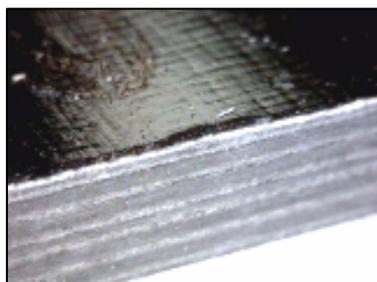


写真1 PCD工具（新製）35m付近
(許容範囲の剥離発生)



写真2 PCD工具（再研磨）38m付近

この結果より、再研磨による加工においても再現性があることが実証ができた。
 以上の結果より、工具径摩耗を考慮しても1回の再研磨で3.5m x 2回 = 7.0mまでの加工が可能であることが確認できた。

B. 実機部品を想定した加工試験

今回は、新規製作した工具で（1周：5.2m）3回、再研磨した工具で2回（合計5回）の加工試験を行ったが加工した時点での剥離は確認されなかった。

この結果の一部を以下に示す。

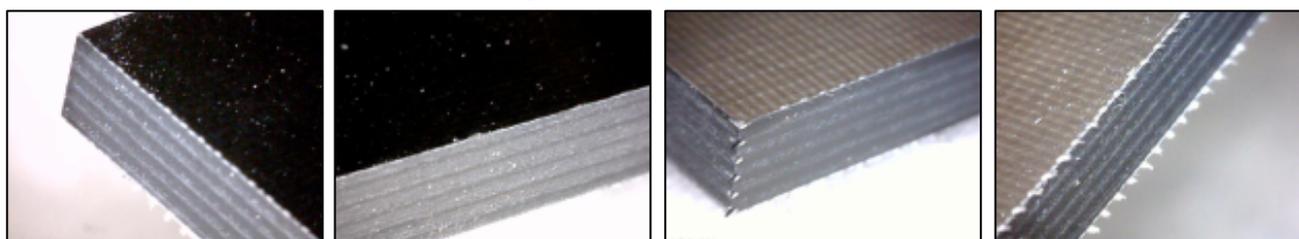


写真3 左側面

写真4 正面

写真5 左側面

写真6 向う面

2. 各種穴明け加工用工具の工具寿命

A. 市販ドリルと開発品の工具寿命について

試験 NO.	工具種類	工具 メーカー	特徴	工具寿命
1	HSS		一般ハイス工具	5穴
2	HSS+窒化処理		窒化処理による表面硬化	3穴
3	超硬	開発品	先端追加工	250穴
4	超硬+窒化処理	開発品	先端追加工+窒化処理による表面硬化	230穴
5	ZH483-VCD	B社	VCD:表面硬度 HV3000~4500(摩擦係数:小)	12穴
6	ZH342-VIO	B社	VIO:表面硬度 HV2700~4000(耐摩耗性:良) (AIRBUS で採用されている形状)	4穴

表3-3 市販ドリルと開発品の工具寿命比較

表3-3より、超硬材質で開発したドリル形状が工具寿命として最大の結果となった。
 また、超硬材質のドリルに表面硬化を図るため窒化処理を加えた工具は、逆に表面改質され硬化した分、脆性が弱くなったとも考えられる。

この結果を踏まえ、長寿命で再研磨が可能で工具費低減を配慮したドリルの開発は超硬で行うこととした。

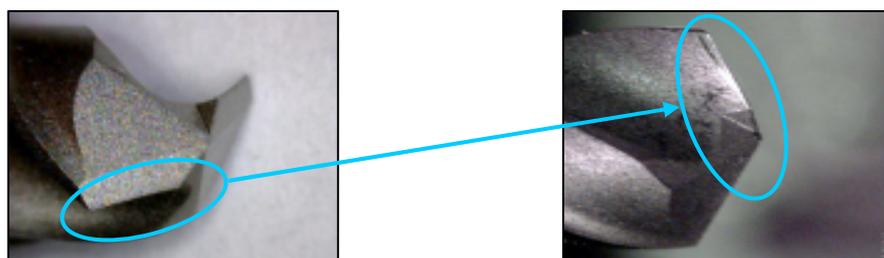
B. 超硬ドリル形状による長寿命化について

試験 NO.	工具形状種類	先端角度	特徴	工具材種	工具寿命
7	タイプ A	130	追加工	K10	229穴
8	タイプ B	130	追加工	K10	214穴
9	タイプ C	130	(DIA 電着)全コーティング	K10	135穴
10	タイプ D	130	(DIA 電着)先端から 3mm コーティング無し	K10	114穴
11	タイプ E	130	追加工	K10	505穴
12	タイプ F	130	追加工	K10	589穴
13	タイプ G	130	追加工	K10	434穴
14	タイプ H	130	追加工	K10	443穴

表 3-4 開発した超硬ドリルと各形状の工具寿命比較

表 3-4 より、タイプ F の工具寿命が最大となった。

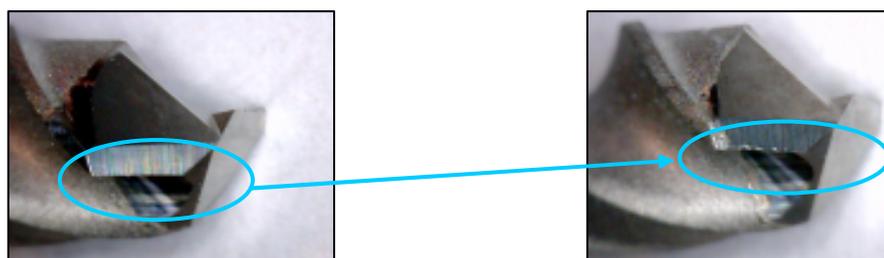
また、コーティング（ダイヤモンド電着）の有無による影響については、ダイヤモンド電着が最良のコーティングとは言えないため、これ以外のコーティング技術も反映したドリルについて検討して行く。



加工前

135穴加工後

写真 7 NO.9 (タイプ C) の加工前・後の工具状態



加工前

114穴加工後

写真 8 NO.10 (タイプ D) の加工前・後の工具状態

3. 工具材質、形状による加工時の影響について

A. 外周加工用工具（エンドミル）について

試験要領：

下記条件により市販工具（HSS：ハイス）とPCD工具による切削抵抗の比較試験を

行った。

切削条件：

F：送り速度 260(mm/min)、 N：主軸回転数 2185 (rpm)、 工具突き出し長さ 40 (mm)

Rd：切り込み切削幅 3.0(mm)、 被削材：航空機仕様 (4mm、8mm)

(補足：下記条件は、工具開発時点における条件で工具寿命を考慮した条件ではない)

試験結果：以下のとおり。

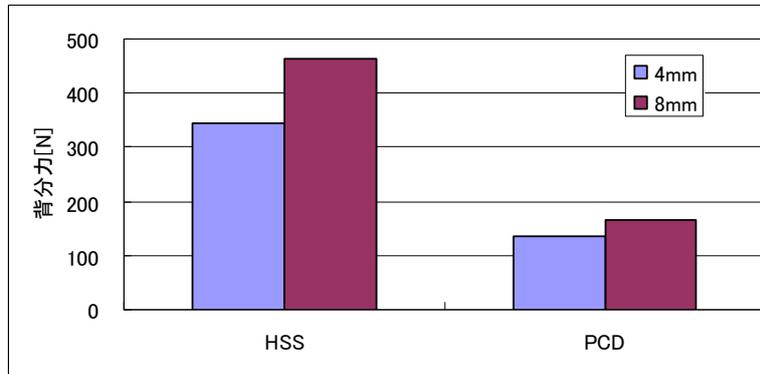


図1 工具種類と切削抵抗比較

B. 穴明け加工用工具 (ドリル) について

試験要領：

下記条件により市販ドリル (ダイヤモンドコーティング) と開発したドリルによる切削抵抗の比較試験を行った。

切削条件：

F：送り速度 360(mm/min)、 N：主軸回転数 3600 (rpm)、 被削材：航空機仕様 (4mm)

(補足：下記条件は、工具開発時点における条件で工具寿命を考慮した条件ではない)

試験結果：以下のとおり。

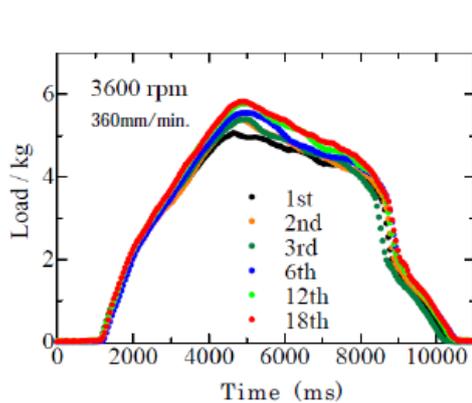


図2：市販ドリル(ダイヤモンドコーティング)

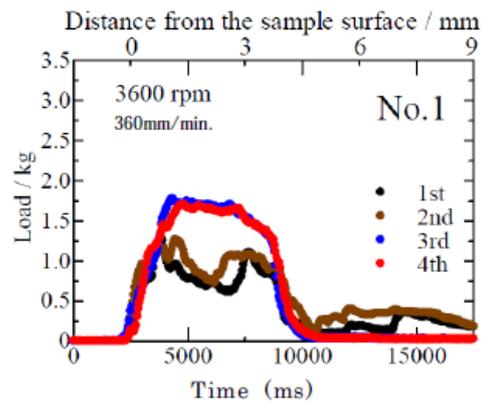


図3：開発したドリル(超硬)

II. 加工方法課題への対応

1. 加工技術について (外周加工用工具 (エンドミル) の適正切削条件を検討)

試験要領:

- (1) 被削材: 成型製作した平板CFRP: 航空機仕様
T: 4 mm x L: 950 mm x W: 450 mm
を10 mm幅で全面溝切断切削加工を行う。
- (2) クランプピッチ: 約203 mm、工具径: $\phi 12$ 、切削速度: 150.8 m/min.
1刃当たりの送り速度: 工具開発時の速度の(1倍&1.5倍)
- (3) 加工前と加工後の工具径を測定
- (4) 試験片の毛羽立ち状態、剥離を確認する。
- (5) 剥離が発生した時点で加工を終了する。

研究成果:

第3章 研究成果1. A. 表3-2にて再研磨後の加工試験(試験NO.4)において、今迄の工具開発で使用していた1刃当たりの送り速度に対し1.5倍で加工試験を行っていたが、30m加工時点で許容範囲内の剥離部が増加したため、これ以降、1刃当たりの送り速度を従来から加工している条件に変更した後、剥離が発生しなくなった。
よって、工具開発で使用していた送り速度で切削速度: 150.8 m/min. (従来から加工している送り速度) が最適と判明した。

2. 加工技術について (穴明け加工用工具 (ドリル) の適正切削条件を検討)

試験要領:

工具開発中に予備試験を行い切削条件を検討しながら加工中の発熱状態等のデータの収集・分析を行った。
加工時の条件等は、切削条件を除き第3章 2. の穴明け加工用工具 (ドリル) の開発研究及び製作と同様。

研究成果:

第3章研究成果2. により、工具開発で使用していた送り速度(工具寿命が最大となった送り速度) で切削速度: 154 m/min. が最適と判明した。

3. 治具・あて板 (バックアップ) による影響について

目的:

外周加工におけるクランプ間隔と供試体の突出寸法の影響を比較するため、振動測定装置を使用して振動試験を実施する。

試験要領:

図4・表1のクランプ状態条件表と試験片サイズにより、試験片(供試体)を切断加工し、クランプ間の距離(4 in, 6 in, 8 in, 12 in)とクランプ先端からの突出量(15 mm, 30 mm, 45 mm)と各条件設定を行い、条件毎にエンドミルを左から右方向へ(UP-CUT)加工する。

この時発生する振動(X, Y, Z 方向)を試験片(供試体)の中央部に固定した振動センサー(PV-97C)をとおして、4ch小型データレコーダ(DA-20)で測定した。測定したデータを基に解析ソフトウェア(CAT-78WR)で振動変位と加速度についてデータ分析を行う。

試験条件：

- (1) 被削材：成型製作した平板CFRP：航空機仕様
 T：4mmx L x W (L、Wは、図4・表1による)
 切削速度：150.8m/min。
 切込量：径方向12mmで側面切削加工を行う。

詳細は、図4のとおり

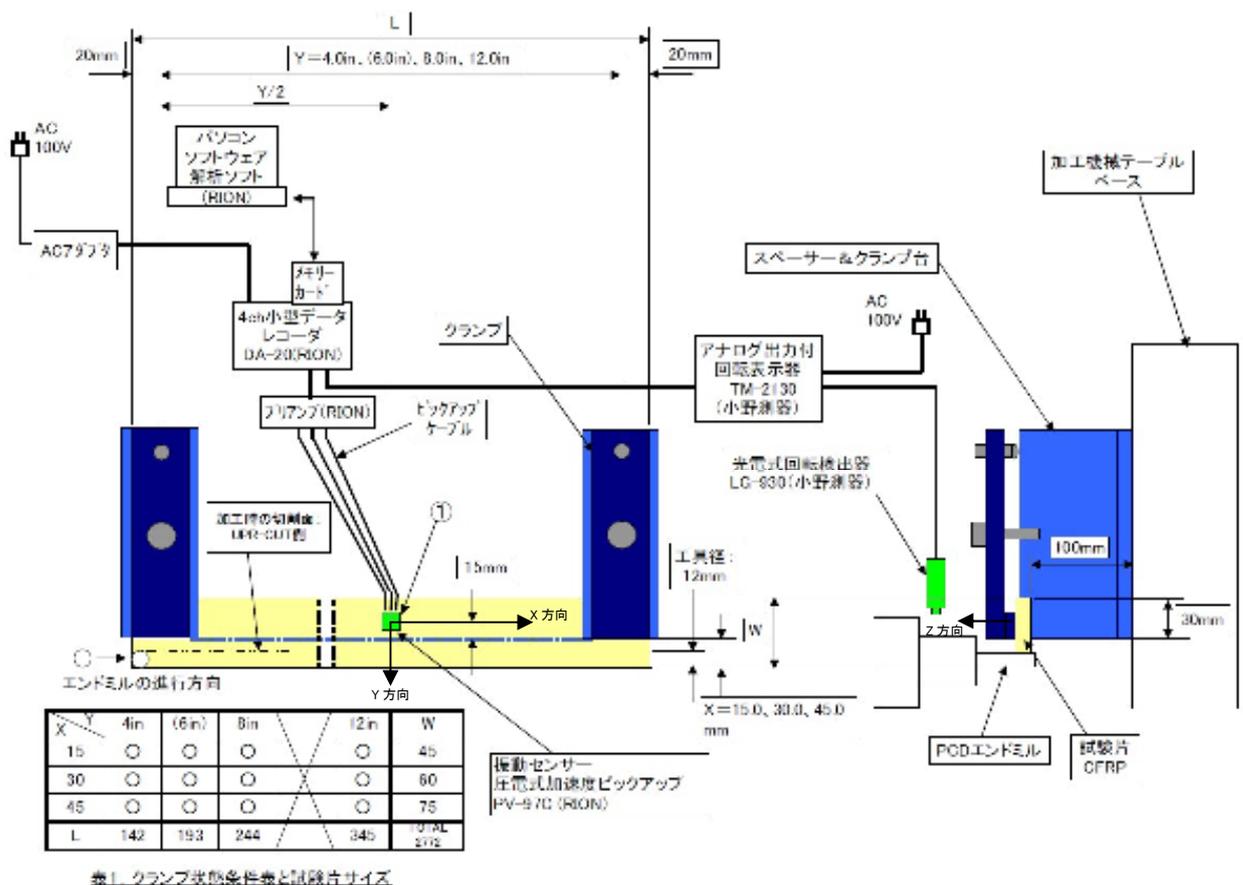


図4 振動試験要領(概略図)

研究成果：

クランプ間隔と供試体の突出寸法の影響

各条件で加工した結果、図5(試験片サイズ：X=45, Y=4in)に示すグラフと同様の結果となった。加工開始時・終了時が、両端クランプ近傍にも関わらずいずれも、加工開始時と加工終了間際の振動変位と加速度が著しく高い結果となった。このことより、CFRP加工時におけるマシニングセンタのプログラムでは、加工開始時と加工終了前の切削条件(送り速度)を通常の切削速度より下げて加工する事により工具への負担も小さく、工具寿命へも影響を及ぼすことが判明した。

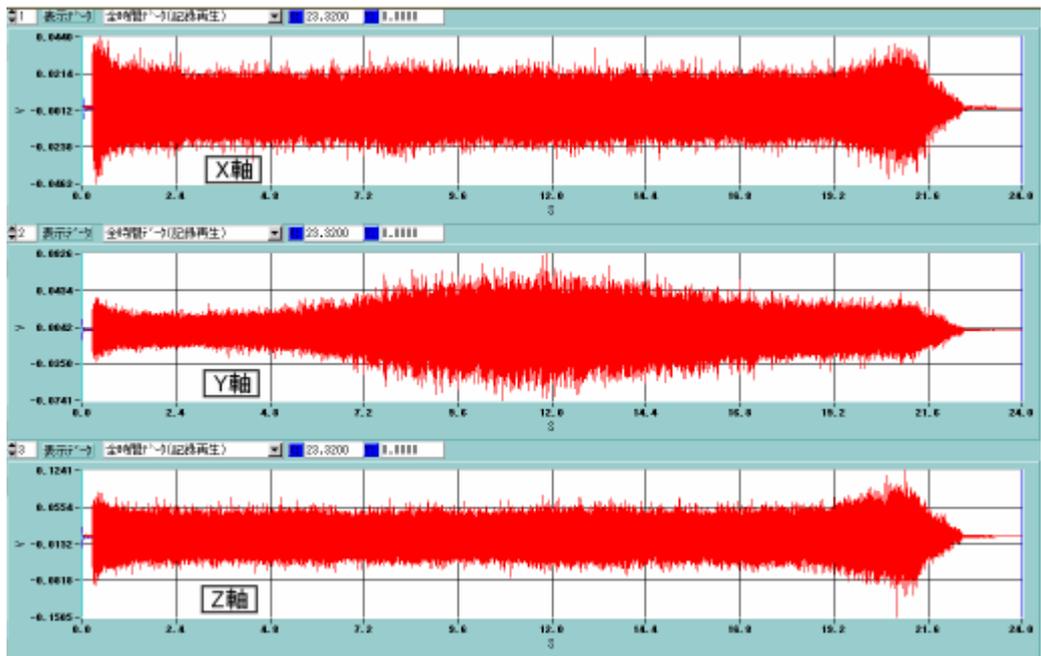


図5 振動試験結果（振動変位）

Ⅲ. 工作機械課題への対応

1. 集塵機能の付加等の検討

目的：

粉塵飛散を防止するため、ヤマザキマザックにより開発された主軸周りの集塵装置の効果を検証するための加工試験を実施する。

試験要領：

集塵装置は、今回の研究開発でCFRP加工用に開発された加工機械（VORTEX815-II：写真9）のフード内部の集塵を行う炭素繊維（CFRP）集塵装置（PPC-3043-TFP）にアシストブローを追加し、加工機械主軸に開発した主軸周り吸塵装置（写真10）を取付けて行う構造である。

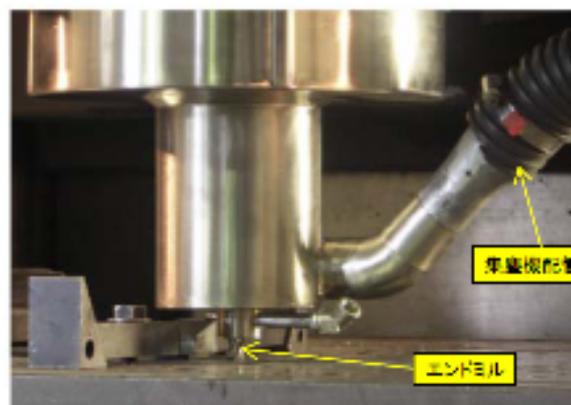


写真9 CFRP加工機械：VORTEX815-II（FANUC 31i-A5）

写真10 開発した主軸周り集塵装置

試験条件は、過去に加工試験を行った時と同一条件で行う。

試験条件：

被削材：成型製作した平板CFRP：航空機仕様

切削速度： $V = 150.8 \text{ m/min}$

工具径 = $\phi 12$ 、側面切削、径方向切込量：4 mm

加工試験の評価は、集塵装置のON状態とOFF状態を比較して集塵状況を確認する。

研究成果：

粉塵の吸引効果としては、殆どの粉塵が回収された結果となった。（写真12参照）。

人体への影響として考えられる肺疾患と皮膚への影響（刺激・痒み）と粉塵蔓延時間による段取り替え時間への影響は無いに等しいと思われる。

また、主軸周りで加工中の粉塵を根本的に吸引してしまうので機械に対するリスクも非常に低減される結果となった。

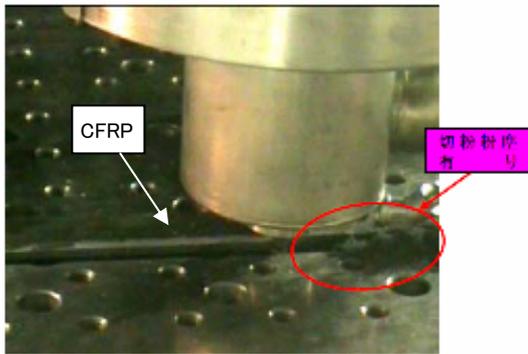


写真 1 1 集塵装置OFF状態

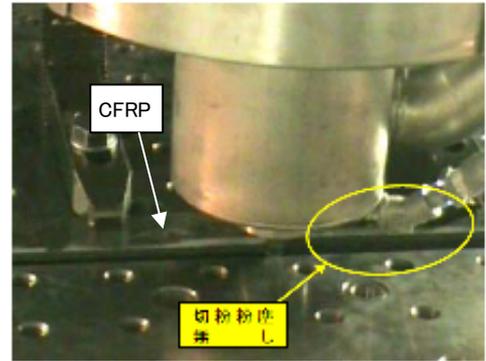


写真 1 2 集塵装置ON状態

2. 工作機械の精度について

目的：

DBB 測定を行い、主軸頭旋回形 5 軸 MC の精度に関する実力値を把握する。

さらに、同測定結果をもとに、精度を向上させるための調整箇所・調整量を特定し、パラメータ調整を行う。

試験要領（測定方法）：

ISO で規定されている、直線 2 軸による円弧補間運動を DBB 測定し、直線軸のパラメータ調整を行った。加えて、回転軸 2 軸のみの円弧補間運動を DBB 測定し、回転軸のパラメータ調整を行った。（写真 1 3 & 図 6）

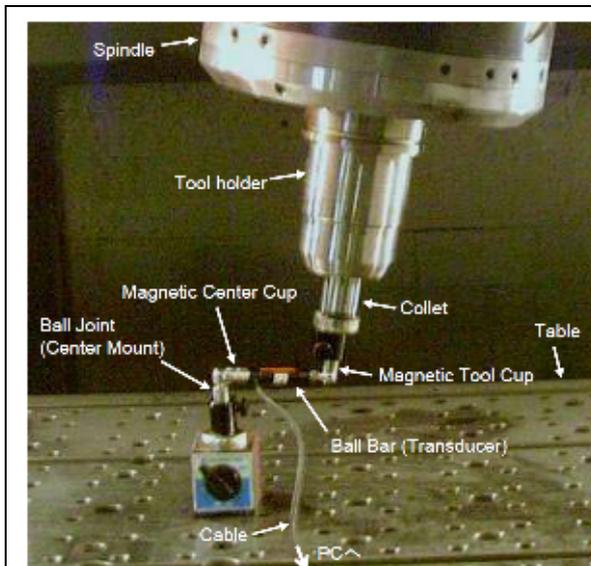


写真 1 3 測定機器： Double Ball Bar ; QC10
(RENISHAW 製)

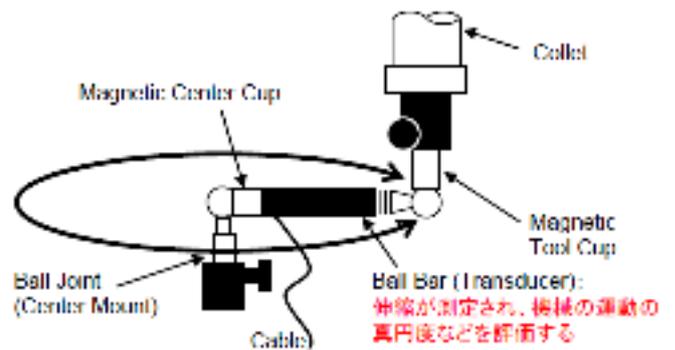


図 6 DBB 測定の方法例
(直線 2 軸による円弧補間運動)

回転軸のパラメータ調整には、新たに考案されたパラメータ調整方法を適用した。直線軸と回転軸を組合せて、NAS979 円錐台切削試験をモデルにした DBB 測定を行い、パラメータ調整後の機械の精度を評価した。

研究成果：

- ① 直線軸のパラメータ調整後、直線軸のバックラッシが低減され、XY 円弧補間運動の真円度が向上した。
- ② 回転軸のパラメータ調整後、回転軸反転直後の挙動も安定し、AB 円弧補間運動の真円度が向上した。
- ③ 以上の 2 つの効果から、NAS979 円錐台切削試験をモデルにした円弧の真円度が、調整後に 26%向上した。

上記結果より、その運動精度向上に伴い、軸反転時に発生する象限突起が低減されたことで、切削時の加工面品位の向上が期待できる。

結果の詳細については、図 7 のとおり。

測定方法：トランスデューサが常に円弧の半径方向を向くような、同時多軸制御

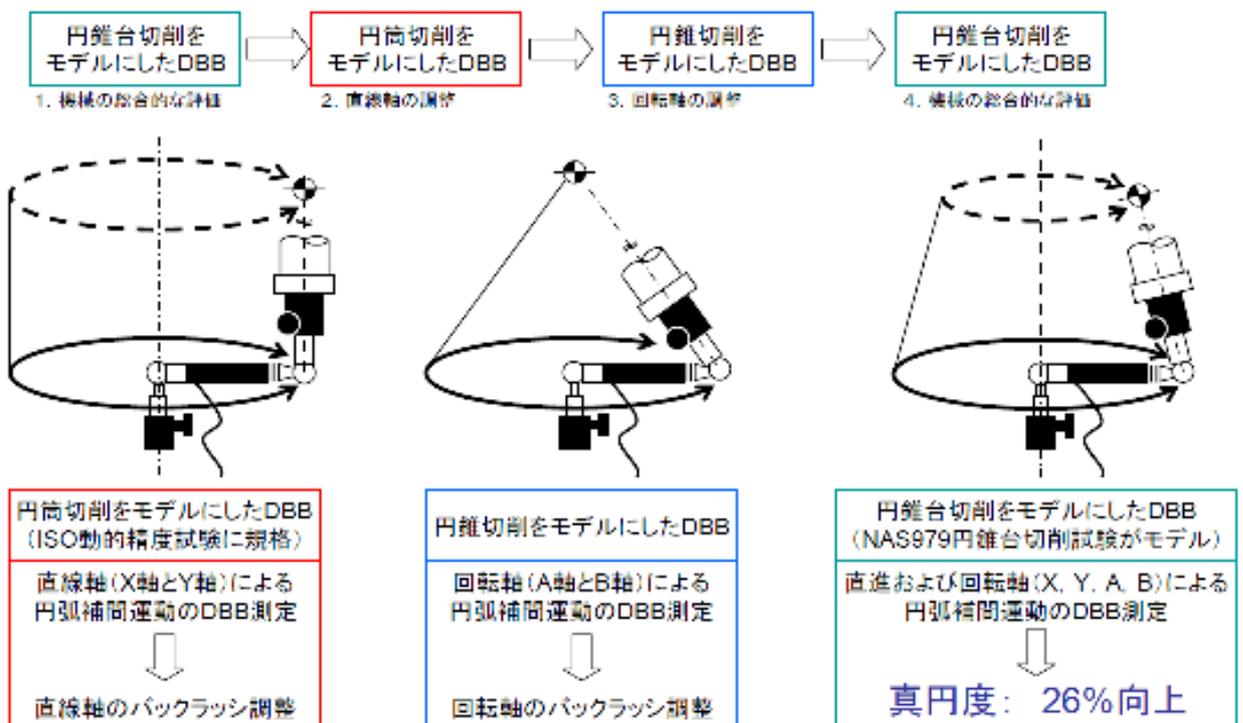


図 7. DBB 法による円錐台切削試験を想定した円弧運動の評価

第3章 全体総括

I. 適正工具に係る課題への対応

1. 外周加工用工具（エンドミル）の工具寿命
外周加工用工具（エンドミル）の工具材質は、PCDが最適と判断された。
この材質については、市販されている一般のコーティング工具に比較して、
摩耗量が少ない分加工後再研磨が可能であり、再研磨後も同等の工具寿命を得る
ことが可能であった。
2. 穴明け加工用工具（ドリル）の工具寿命
穴明け加工用工具（ドリル）の工具材質は、超硬が最適と判断された。
但し、先端形状を特殊加工した工具であり、コーティング加工したドリルに対し、
再研磨が可能となり工具の消耗品費削減にも大きな効果が見込まれる。
3. 実機部品を想定した曲面成型材の加工試験
バキュームクランプのみで加工試験を5回行ったが、表面剥離もなく良好な結果
を得ることができた。これは、上記外周加工用工具の切れ味が良く、工具寿命も
期待どおりの結果が得られ、バキュームの吸引力とのバランスが取れたことによる
相乗効果であることが窺われる。

II. 加工方法課題への対応

1. 外周加工用工具（エンドミル）の適正切削条件
工具開発で使用していた送り速度で切削速度：150.8 m/min. が最適と判明
した。
2. 穴明け加工用工具（ドリル）の適正切削条件
工具開発で使用していた送り速度で切削速度：154 m/min. が最適と判明した。
3. 治具・あて板（バックアップ）による影響
CFRP加工時におけるマシニングセンタのプログラムでは、加工開始時と加工終了前
の切削条件（送り速度）を通常の切削速度より下げて加工する事により、工具への負担
が小さく、工具の寿命にも影響を及ぼすことが判明した。但し、この実証試験について
は、未確認であるため今後の継続的な試験研究が必要である。

III. 工作機械課題への対応

1. 集塵機能の付加等
粉塵の吸引効果としては、殆どの粉塵が回収された結果となった。人体への影響として
考えられる肺疾患と皮膚への影響（刺激・痒み）、粉塵蔓延時間による段取り替え時間へ
の影響は無くなった。また、主軸周りで加工中の粉塵を吸引して機械に対するリスクも
非常に低減される結果となった。
2. 工作機械の精度
各軸のパラメータ調整後、その運動精度向上に伴い、軸反転時に発生する象限突起が
低減されたことで、切削時の加工面品位の向上が期待できる。

IV. 今後の事業化に向けた取り組み

CFRP加工の2次加工技術は、航空機産業以外の自動車産業、IT産業他への転用が可能である。航空機仕様のCFRP特性は、他の産業分野で使用されている材質より特異的に難削材とされているため、各産業で使用されている材質に即した工具をより安価に製作していくためPCD材質、製作方法等について継続的に研究していく必要がある。