

平成２３年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機主翼等ＣＦＲＰ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２４年　３月

委託者　関東経済産業局

委託先　財団法人浜松地域テクノポリス推進機構

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	1
1-3. 成果概要	4
【1】工具の開発	
【1-1】曲線切り丸鋸の開発	
【1-2】切刃・切刃形状研究	
【1-3】曲線切削用一枚物丸鋸の開発	
【1-4】両端支持エンドミルの開発	
【1-5】保持具の設計・製作	
【2】加工装置の開発	
【2-1】CFRP製主翼の外周曲面を切断可能な加工丸鋸曲線切断装置の開発	
【2-2】丸鋸曲線切断装置旋回機構ベース装置の開発	
【2-3】曲線切り丸鋸を左右何れかに曲げ制御する曲線加工制御部の開発	
【2-4】丸鋸曲線切断装置による加工用運転ソフトウェアの開発	
【2-5】曲線切り丸鋸の不等速回転運動「揺らぎ効果」の研究	
【2-6】曲率半径の小さな領域の曲線切断運転ソフトウェアの開発	
【2-7】タンデムトリムヘッド旋回傾斜機構ベース装置の開発	
【2-8】CFRP端面仕上げ加工用タンデムトリムヘッド(2軸エンドミル)の開発	
【2-9】タンデムトリムヘッドによる切削装置の開発	
【2-10】タンデムトリムヘッドによる加工用運転ソフトウェアの開発	
【2-11】タンデムトリムヘッドについて	
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	6

第2章 本論

【1】工具の開発	
【1-1】曲線切り丸鋸の開発	7
【1-2】切刃・切刃形状研究	8
【1-3】曲線切削用一枚物丸鋸の開発	8
【1-4】両端支持エンドミルの開発	10
【1-5】保持具の設計・製作	11
【2】加工装置の開発	
【2-A】丸鋸曲線切断装置の開発	13
【2-B】タンデムトリムヘッドの開発	16
【2-C】試作加工機の製作	17
【2-D】ソフトウェアの開発	18
【2-E】加工機による切削試験	19
最終章 全体総括	22

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

航空機産業では、航空機の軽量化・燃費向上のためにCFRPの利用が急増している。現在、主翼等に使用されるCFRP部材は、成型品のトリミング工程が必須である。加工方法は、エンドミルやウォータージェットが主流であるが、いずれも生産性が極めて低い。その上、ウォータージェットの設備は高価であり、エンドミル加工は、工具寿命に伴う加工品質の劣化などがあり、生産能率、生産コストが大きな課題である。

本研究開発は、航空機主翼等に使用されるCFRPの切削加工において、ウォータージェットに替わる次世代の生産性の極めて高い革新的な加工技術を確立することを目的とする。

第1工程は、切削速度の高速化を目的に丸鋸を採用して粗切断を行う。ただし、形状が曲線群連続のため、その曲線に沿って切断が可能な丸鋸及び装置を開発する必要がある。

第2工程では、CFRPの丸鋸切断端面をエンドミルにより仕上を行う。既存技術の片側固持によるミーリング加工では、CFRPの難削性ためエンドミルの摩耗及び片側固持によるビバリによる工具チッピング現象により高精度で高速、良質な切削肌を妨げている。

これらの課題を解決し、CFRPの加工速度の高速化による加工時間の短縮と加工精度・加工能率の改善で加工コストの低減化を図ることができるCFRP切削加工技術の確立を目指す。

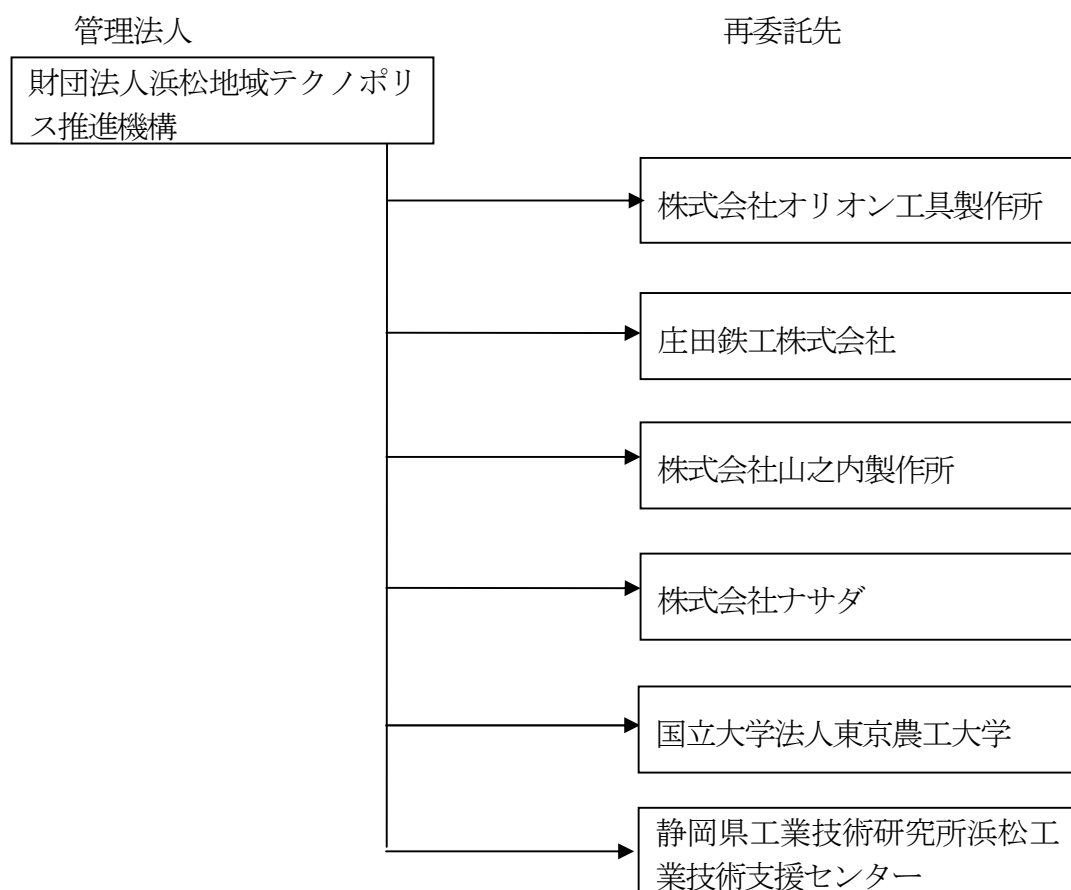
【技術的目標】

1. 丸鋸による曲線切削加工技術の確立
2. タンデムエンドミルによる端面切削技術の確立
3. 加工速度
丸鋸曲線切削 現行の6倍
タンデムエンドミルによる曲線切削 現行の2倍
4. 加工コスト
丸鋸曲線切削 現行の20%
タンデムエンドミルによる端面切削 現行の60%
5. 加工精度向上
CFRPの端面仕上げ精度改善

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・管理体制

本研究開発事業は、1大学、2民間企業、1公設試、1管理法人（公益法人）の5機関からなる。管理法人である財団法人浜松地域テクノポリス推進機構が関東経済産業局と締結した業務委託の原契約の延長として実際の研究開発に携わる構成機関と再委託契約を締結する形で管理した。研究全体を総括的に管理するプロジェクトリーダー（PL）とそのフォローをするサブプロジェクトリーダー（SL）を設け、アドバイザーを含めた全体で行う合同開発会議を年2回、効率的に事業を進めるため研究者及び一部のアドバイザーによる研究実務者会議を年8回、PL・SL・委員での事業検討会を年5回開催した。



(2) 研究者氏名

株式会社オリオン工具製作所

代表取締役	大澄 信行 (プロジェクトリーダー (PL))
製造部顧問	倉田 耕治
技術部技術課長	野嶋 政宏
製造部長	古橋 浩
製造部製造2課長	松本 卓
生産本部管理課長	大澄 博之
生産本部管理課設計係長	中山 健一
技術部技術課技術係長	鈴木 務
技術部技術課研究開発	寺田 宏明
技術部技術課研究開発	畠山 和也
技術部技術課研究開発	上田 幸司

庄田鉄工株式会社

技術部部長	加藤 証造
技術部電気設計課長	堤 達幸
技術部機械設計担当	大石 憲弘
製造部組立担当係長	大橋 庄司
製造部電気担当係長	水野 晃一
営業部企画担当課長	高杉 晃男 (サブプロジェクトリーダー (SL))
CS部サービス担当課長	鈴木 重広

株式会社山之内製作所

株式会社ナサダ

国立大学法人東京農工大学
大学院工学研究院 教授

笹原 弘之

静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター

材料科上席研究員

伊藤 芳典

材料科主任研究員

植松 俊明

材料科研究員

是永 宗祐

(3) 協力者（アドバイザー）

国立大学法人静岡大学

工学部機械工学科 教授

鈴木 康夫

三菱重工株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所

組立工作部生産技術課 主任

足立 豊

川崎重工株式会社 航空宇宙カンパニー

生産技術部生産技術課長

田村 純一

富士重工業株式会社 航空宇宙カンパニー

生産技術部次長

滝沢 尚哉

浜松地域新産業創出会議

地域連携マネージャー

鈴木 秀治

静岡県工業技術研究所

機械科 上席研究員

長津 義之

居藤特許事務所

所長 弁理士

居藤 洋之

1-3 成果概要

【1】工具の開発

【1-1】曲線切り丸鋸の開発

- ・合金に適した材質の選定

SK5（炭素工具鋼）、SKS5（合金工具鋼）、SUP10（ばね鋼）について引張試験と曲げ試験を行なった。結果、SKS5 が最も合金に適した材料だということが判明した。

- ・セパレートタイプ鋸開発

フランジで抑えて直線切削を行なったが、刃先が振れて危険であったため、途中で切削を中止した。

- ・曲線切り丸鋸耐久テスト

R-02 タイプ鋸を製作し、試作加工機にて耐久試験を行った。

切削距離とともに切削騒音・抵抗・表面粗さは上昇するが、5mR で当初目標を上回る100m の切削が可能であった。

【1-2】切刃・切刃形状研究

- ・不等ピッチ鋸

一般的に不等ピッチ鋸はビビリを抑制すると言われている。実際に加工したアルミには効果が得られたが、ビビリが少ないためかCFRPでは効果が見られないため不等ピッチ鋸開発を中止した。

【1-3】曲線切削用一枚物丸鋸の開発

- ・一枚物丸鋸合金開発

鋸が湾曲しやすいスリット形状を検討する為、3 種類のスリット形状の鋸を試作した。切削試験の結果、R-02 タイプの切削肌が綺麗であったため R-02 タイプ鋸で研究を行うこととした。

- ・より撓み易い合金素材の検討

平成 21 年度の研究では、合金素材として一般に利用される SK5、SKS5、SUP10 について強度試験を行い、SKS5 を選定、平成 22 年度の研究では、低弾性かつ高強度化が可能な β 型チタン合金を、平成 23 年度は、さらに高強度であるマルエージング鋼の機械的特性の評価を行った。SKS5 と比較して、チタン合金は撓みやすく、マルエージング鋼は高強度であるが、大幅な材料コストの増加になることが分かった。

【1-4】両端支持エンドミルの開発

- ・刃部ダイヤモンド材種の検討

CFRP の端面切削に適したダイヤモンド材種を選定するため、J・N・S の三種の検討を行い、耐チップング性・耐摩耗性共に良好な S を使用することにした。

- ・両端支持エンドミルの設計及び製作

交互リードエンドミルを製作、耐久テストを行った。CFRP の積層構造が確認できるほど良好な切削面が得られている。切削距離 70m では表面粗さが粗くなった。試作加工機あるいはタンデムトリムヘッドの剛性不足による振動や、エンドミルの太さに対して先行刃の切込量が大きいことなどが考えられる。

【1－5】保持具の設計・製作

3次元測定機を用いて湾曲状態の鋸の正確な形状・曲率求め、CAE解析との誤差を調べるために使用する丸鋸保持具の設計・製作を行なった。実際に鋸を湾曲させ測定を行い、CAE解析結果と比較することができるようになった。

【2】加工装置の開発

【2－1】CFRP製主翼の外周曲面を切断可能な加工丸鋸曲線切断装置の開発

丸鋸台金の撓み試験、有限要素解析の基礎研究を行った。次に多点押し湾曲丸鋸の切削試験を行い、丸鋸曲線切断装置を製作した。また、本装置を搭載した試作加工機を製作した。

【2－2】丸鋸曲線切断装置旋回機構ベース装置の開発

形状加工に必要な丸鋸曲線切断装置を旋回させるための機構ベースを製作した。また、本装置に丸鋸曲線切断装置を搭載した。

【2－3】曲線切り丸鋸を左右何れかに曲げ制御する曲線加工制御部の開発

試作加工機で複雑な形状の加工試験を行い、丸鋸曲線切断装置での切削条件、切削肌、切粉の状態を確認した。さらに耐久試験で発生した問題点を解決し、装置の完成度を高めることができた。また、加工時に発生する有害とされるCFRPの切粉を効率良く集塵できる改造を行った。

【2－4】丸鋸曲線切断装置による加工用運転ソフトウェアの開発

試験加工機に搭載された丸鋸曲線切断装置の運転プログラムを作成するソフトウェアが完成した。これにより切削条件を変えて複雑な形状の加工試験が可能になり、試験加工時に発生した問題点も解決した。

【2－5】曲線切り丸鋸の不等速回転運動「揺らぎ効果」の研究

試作加工機の切断試験において、切断形状が5mR以下では曲率の変化部で切削速度及び丸鋸の回転数をコントロールする必要性がないことが検証された。

【2－6】曲率半径の小さな領域の曲線切断運転ソフトウェアの開発

丸鋸曲線切断装置で加工ができない曲率半径が小さい形状は通常の1軸BTホルダーで加工するソフトウェアとした。

【2－7】タンデムトリムヘッド旋回傾斜機構ベース装置の開発

形状加工に必要なタンデムトリムヘッドを旋回させるための機構ベースを製作した。また、本装置にタンデムトリムヘッドを搭載した。

【2－8】CFRP端面仕上げ加工用タンデムトリムヘッド（2軸エンドミル）の開発

両端支持の平行2軸エンドミルで構成されるタンデムトリムヘッドを製作した。また、本装置を搭載した試作加工機を製作した。

【2－9】タンデムトリムヘッドによる切削装置の開発

試作加工機で複雑な形状の加工試験を行い、タンデムトリムヘッドでの切削条件、切

削肌、切粉の状態を確認した。さらに耐久試験で発生した問題点を解決し装置の完成度を高めることができた。また、加工時に発生する有害とされるCFRPの切粉を効率良く集塵できる改造を行った。

【2－10】タンデムトリムヘッドによる加工用運転ソフトウェアの開発

試験加工機に搭載されたタンデムトリムヘッドの運転プログラムを作成するソフトウェアが完成した。これにより切削条件を変えて複雑な形状の加工試験が可能になり、試験加工時に発生した問題点も解決した。

【2－11】タンデムトリムヘッドについて

両端支持タンデムトリムヘッドは製品の外周加工だけに言及されてしまう。そのため直接加工材に切り込むことができる装置を検討した。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人 浜松地域テクノポリス推進機構
事業推進部次長 砂川 扶美子
〒432-8036 静岡県浜松市中区東伊場二丁目7番1号
TEL:053-489-8111 FAX:053-450-2100
E-mail:sunagawa@hamatech.or.jp

第2章 本論

【1】工具の開発

【1-1】曲線切り丸鋸の開発

1-1-1 目的

CFRPを曲線切削するためには、丸鋸を任意の形状に湾曲させて切削することにより実現することが可能である。これを実現するための鋸を開発する。

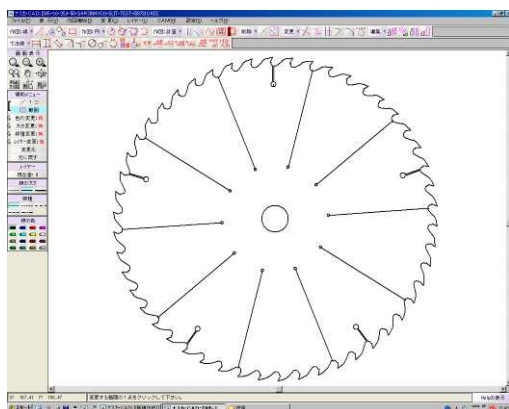
1-1-2 合金に適した材質の選定

合金に適した材質を選定するために、SK5（炭素工具鋼）、SKS5（合金工具鋼）、SUP10（ばね鋼）について引張試験と曲げ試験を行なった。結果、SKS5が最も合金に適した材料だということが判明した。

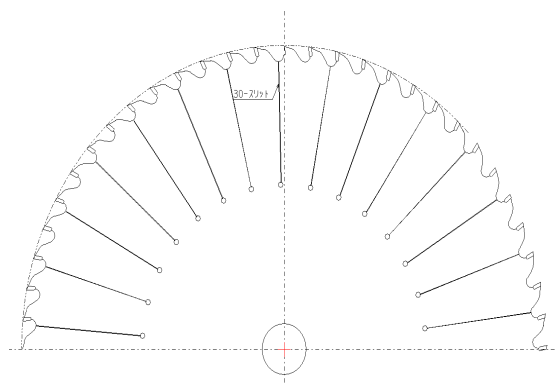
1-1-3 セパレートタイプ鋸開発

フランジで抑えて直線切削を行なったが、刃先が振れて危険であったため、途中で切削を中止した。これはフランジ部分では固定されているが、外周部は分割されていて各ブロックがフリーのため、切削抵抗により刃先が振れているものと考えられる。

結果、セパレートタイプ鋸での切削は不可能と判断し、平成23年度より一枚物の鋸の開発【1-3】に移行した。



平成21年度セパレートタイプ鋸



平成22年度セパレートタイプ鋸

図 1-1-1 セパレートタイプ鋸

1-1-4 曲線切り丸鋸耐久テスト

平成22年度一枚物丸鋸開発【1-3】により、より撓みやすい形状にすることに成功。合金にR状にスリットを入れたR-02タイプを使用することとした。

R-02タイプ鋸を用いて耐久テストを行った。R切削耐久試験は試作加工機を用い以下の条件で行った。試作加工機を図1-1-2に示す。

回転数：3000min⁻¹

送り速度：3m/min

切削方向：Down Cut

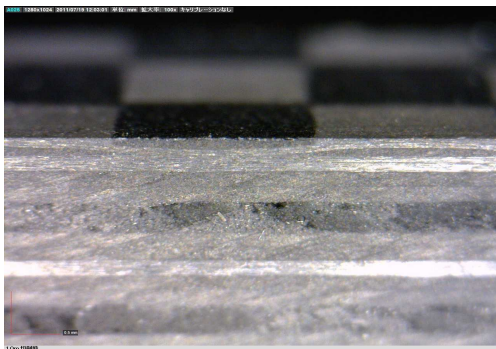


図 1-1-2 試作加工機

100m 加工後の切断面に多少の引っかかりを感じたが、川下企業のアドバイザーから十分実用に耐えうるとの評価を得た。切断写真を図 1-1-3 に示す。

刃先の摩耗量は通常摩耗範囲内であり、さらなる切削・刃先の再研磨ともに可能であった。

R-02 タイプ鋸を用いて 5mR の耐久試験により、当初目標であった 80m を上回る、100m まで切削が可能であった。



10m 加工時切断面



100m 加工時切断面

図 1-1-3 C F R P 切断面比較

【 1 - 2 】 切刃・切刃形状研究

1-2-1 目的

鋸の切れ刃形状を検討し、C F R P 切削に最も適した切れ刃形状を決定する。

1-2-2 不等ピッチ鋸

一般的に不等ピッチ鋸はビブりを抑制されていると言われている。チップソーにおいて不等ピッチ鋸を使用することでビブりは抑制されるのか検証を行なった。アルミの切削においてはビブり抑制の効果が得られたが、C F R P の切削では効果が見られないため不等ピッチ鋸開発を中止した。

【 1 - 3 】 曲線切削用一枚物丸鋸の開発

1-3-1 目的

【1－1】の目的を達成する鋸を開発するために撓みやすい台金素材を選定し、みやすいスリットの形状等を決定する。

1-3-2 一枚物丸鋸台金開発

C F R P 曲線切削用丸鋸として、セパレートタイプとは別に、丸鋸台金が分割されていない一枚物丸鋸を開発した。鋸が湾曲しやすいスリット形状を検討する為、3 種類のスリット形状の鋸を試作した。切削試験の結果、R-02 タイプの切削肌が綺麗であった。R-02 タイプの鋸はスリットが多いので綺麗に湾曲したと考えられる。

R-02 タイプ鋸を図 1-3-1 に示す。

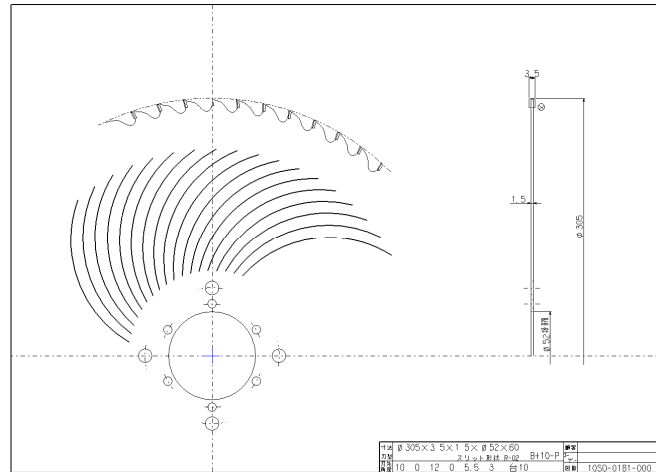


図 1-3-1 R-02 タイプ鋸

1-3-3 より撓み易い台金素材の検討

平成 21 年度の研究では、台金素材として一般に利用される SK5、SKS5、SUP10 について強度試験を行い、強度が高く撓み易い素材として SKS5 を選定した。

平成 22 年度の研究では開発中の加工機の変形機構負荷を低減するために、低弾性かつ高強度化が可能な β 型チタン合金を台金素材として選択し、物性値の評価を行った。平成 23 年度は他の β 型チタン合金について機械的特性の異方性の評価を行い、 β 型チタン合金の台金素材への適用について再検討した。

また、開発中の丸鋸を薄くすることができれば切削抵抗の低減、被削材の歩留りの向上が期待できるため、これまでに検討した SK5・SKS5・SUP10 や β 型チタン合金よりも高強度であるマルエージング鋼の機械的特性の評価も行った。

引張試験には JIS Z 2201 13B 号引張試験片を用いた。曲げ試験には JIS Z 2204 3 号試験片を用いた。

測定結果を図 1-3-2、図 1-3-3 に示す。Ti-15333 合金は平成 22 年度に検討した β 型チタン合金よりも機械的特性の異方性は弱く、開発中の丸鋸に使用しても台金を均一に撓ませることが期待できる。また、マルエージング鋼はこれまで検討した鉄鋼材料 (SKS5)、チタン合金と比較して破断点伸びは低いものの、引張強さは SKS5 よりも 1.5 倍、チタン合金よりも 1.4 倍以上向上することから、台金の厚さを薄くすることが可能である。しかし、 β 型チタン合金とマルエージング鋼は SKS5 よりも高価であり、大幅な材料コストの増加になるため、台金への適用に際しては十分なコスト計算が必要である。

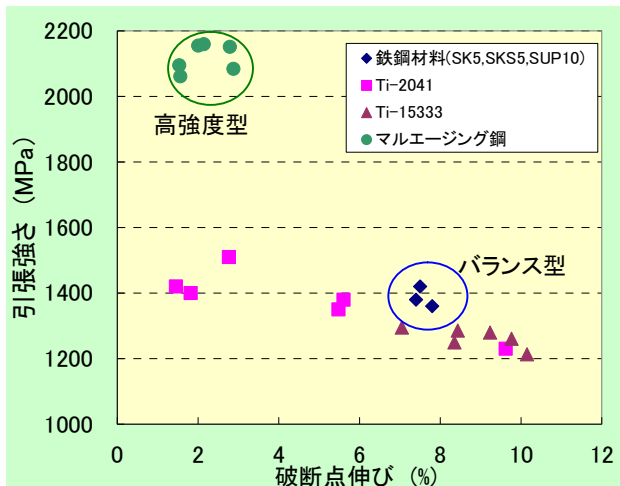


図 1-3-2 各種材料の引張強さと破断伸び

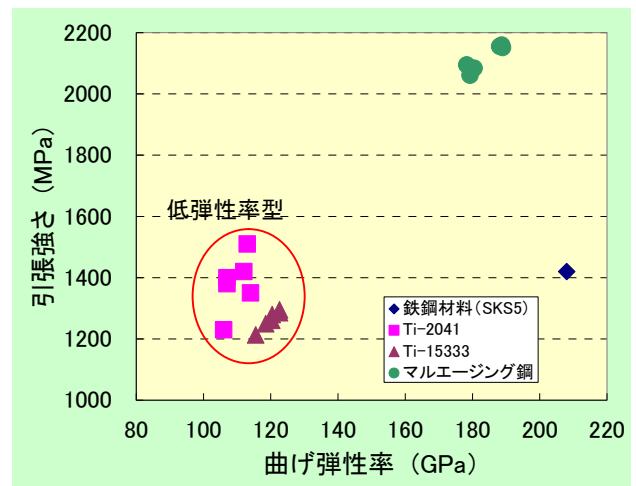


図 1-3-3 各種材料の引張強さと曲げ弾性率の関係

【 1－4】両端支持エンドミルの開発

1-4-1 目的

C F R P 端面の高精度かつ高効率化加工を目指したエンドミルを開発する。

1-4-2 刃部ダイヤモンド材種の検討

C F R P の端面切削に適したダイヤモンド材種を選定するため、耐初期チッピング試験及び耐久性・耐摩耗性評価試験用ルータの設計・製作・検証を行った。J・N・S の三種の検討を行い、耐チッピング・耐摩耗性共に良好な S を使用することにした。

1-4-3 両端支持エンドミルの設計及び製作

スチールボディでは剛性が不足し超硬ボディとし、C F R P の加工時に表面・裏面を持ち上げない様に内側に押さえ込む交互リードエンドミルを製作した。仕様はルータ外径 ϕ 12・ダイヤ 4 枚刃とした。両端支持エンドミルを図 1-4-1 に示す。



図 1-4-1 両端支持エンドミル

1-4-4 両端支持エンドミルの耐久試験

両端支持エンドミルの耐久試験を行なった。

試験条件は以下の通りとした。

- ・ 回転数 : 6000min
- ・ 送り速度 : 1m/min
- ・ 切削距離 : 70m

CFRPの積層構造が確認できるほど良好な切削面が得られていた。切削距離 70m では表面粗さが粗くなった。これは試作加工機あるいはタンデムトリムヘッドの剛性不足による振動や、エンドミルの太さに対して先行刃の切込量が大きくなることにより、正常な切削が出来なかったと考えられる。試作加工機あるいはタンデムトリムヘッドの剛性を上げる・エンドミルを太くする等の対策が必要であると考ええる。

切削後に刃先が波状に摩耗していることが確認された。CFRPの積層構造に対してほぼ同間隔の摩耗が確認され、炭素繊維の切断方向により磨耗量が異なると考えられる。

【1－5】保持具の設計・製作

1-5-1 目的

曲線切り丸鋸の研究開発の中で、CAE による曲率解析と、測定モデルの測定機上での実測データとの検証データにより、複雑な三次元制御のプログラム開発が可能となる。3次元測定機を用いて湾曲状態の鋸の正確な形状・曲率求め、CAE 解析との誤差を調べるために使用する丸鋸保持具の設計・製作を行なう。

1-5-2 鋸保持具の製作

湾曲条件を元に保持具を設計し、製作を行なった。

2点押し構造と外周押し構造の2種類の保持具を作製した。

2点押し構造の保持具を図 1-5-1 に、外周押し構造の保持具を図 1-5-2 に示す。

実際に鋸を湾曲させ測定を行い、CAE 解析結果と比較することができるようになった。



図 1-5-1 2点押し構造保持具



図 1-5-2 外周押し構造保持具

【2】加工装置の開発

新しい切削加工技術とは、第 1 工程で丸鋸曲線切断装置により高速に粗加工を行い、第 2 工程で両端支持 2 軸エンドミル（以降タンデムトリムヘッドと表記する）により高速で仕上げ加工を行うことである。丸鋸曲線切断装置及びタンデムトリムヘッドを搭載した試験加工機を製作し切削試験を実施する。また切削試験をもとに運転プログラム作成用のソフトウェアの開発をする。

第 1 工程 C F R P 端面粗加工

図 2-1 に示す第 1 工程姿図のように、丸鋸曲線切断装置により高速に粗加工を行う。切断の進行方向に曲率を制御できる装置を開発する。また、曲線切り丸鋸を回転ヘッドの回転軸に取付け、切断の進行方向に曲線切り丸鋸が旋回制御する装置を開発する。また、曲線切断運転ソフトウェアの開発、丸鋸の不等速回転運動（揺らぎ効果）の研究を行う。

第 2 工程 C F R P 端面仕上げ加工

図 2-2 に示す第 2 工程姿図のように、曲線切り丸鋸で粗切断後、タンデムトリムヘッドにより高速で仕上げ加工を行う。タンデムトリムヘッドの開発と、タンデムトリムにより C F R P の曲線仕上げを高精度に連続加工する旋回制御装置を開発することが研究目標になる。また、タンデムトリムヘッドを制御するためのソフトウェアの開発を行う。

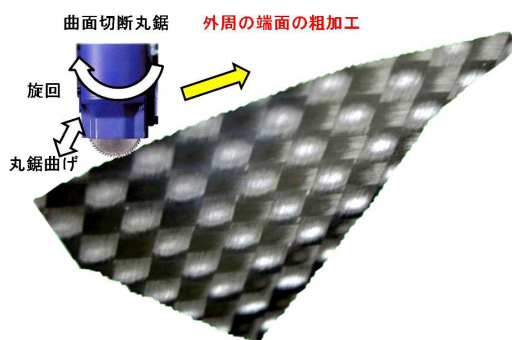


図 2-1 丸鋸曲線切断装置による第 1 工程

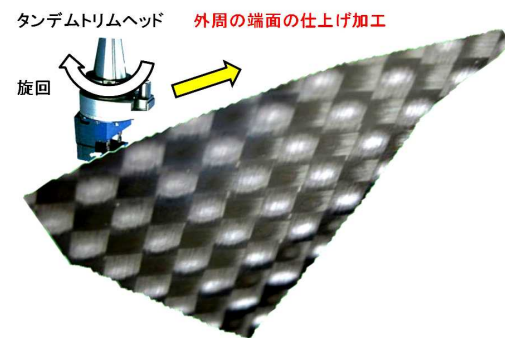


図 2-2 タンデムトリムヘッドによる第 2 工程

本研究開発は表 2-3 に示す実施計画書テーマより構成されているが、テーマの関連性を考え表 2-4 に示す項目で報告する。

表 2-3 実施計画書テーマ一覧

【2-1】CFRP製主翼の外周曲面を切断可能な加工丸鋸曲線切断装置を開発
【2-2】丸鋸曲線切断装置旋回機構ベースの開発
【2-3】曲線切り丸鋸を左右何れかに曲げ制御する曲線加工制御部を開発
【2-4】丸鋸曲線切断装置による加工用運転ソフトウェアの開発
【2-5】曲線切り丸鋸の不等速回転運動「揺らぎ効果」の研究
【2-6】曲率半径の小さな領域の曲線切断運転ソフトウェアの開発
【2-7】タンデムトリムヘッド旋回傾斜機構ベース装置の開発
【2-8】CFRP端面仕上げ加工用タンデムトリムヘッド（2軸エンドミル）の開発
【2-9】タンデムトリムヘッドによる切削装置の開発
【2-10】タンデムトリムヘッドによる加工用運転ソフトウェアの開発
【2-11】タンデムトリムヘッドについて

表 2-4 実施計画書テーマ一覧

項 目	実施計画書テーマ
【2-A】丸鋸曲線切断装置の開発	【2-1】 【2-2】 【2-3】
【2-B】タンデムトリムヘッドの開発	【2-7】 【2-8】 【2-9】 【2-11】
【2-C】試験加工機の製作	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【2-7】 【2-8】 【2-9】 【2-11】
【2-D】ソフトウェアの開発	【2-4】 【2-5】 【2-6】 【2-10】
【2-E】加工機による切削試験	【2-1】 【2-2】 【2-3】 【2-7】 【2-8】 【2-9】 【2-11】

【2-A】丸鋸曲線切断装置の開発

2-A-1 目的

航空機用CFRPの形状は曲線の連続である。そこで曲線切断が可能なチップソー（以後丸鋸と表記する）を装填しCFRPを曲線切断する装置を開発する。

丸鋸は直線を切断するための工具であり、曲線を切断するには丸鋸の台金に力を加えて曲げる必要がある。曲げるための手法は、台金の曲げ荷重と撓み形状との関係を明確にし、その結果を丸鋸曲線切断装置の機構部開発に反映させる。

2-A-2 丸鋸台金の撓み試験

台金として、3タイプで厚みの異なるもの5種類を用意した。台金の撓み量測定には図 2-6 に示すようにデジタル式ダイヤルゲージをスライドして10mm間隔で撓みを測定した。（丸鋸の地金を台金と表記する。）

台金への荷重負荷は24個の鋼球を円状に配置した多点押し（図 2-5 参照）と2個の鋼球による2点押し（図 2-6 参照）の2種類の押し金具を用いた。

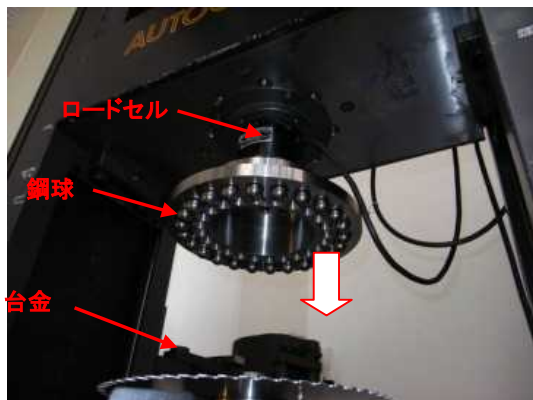


図 2-5 多点押し測定

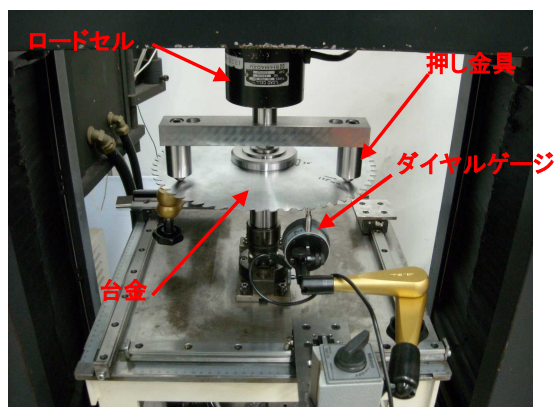


図 2-6 2点押し測定

以上の試験からから撓みの傾向をまとめると①フランジ径が小さい ②台金の板厚が薄い ③台金にスリット加工を施したもの ④セパレータの台金が撓み易いことが示された。方式では2点押しの方が多点押しよりも撓み易いことが分った。

2-A-3 有限要素解析

コンピュータの有限要素解析を利用し、各種試験条件で、台金形状の変化をシミュレーションした。

図 2-7 に 250N を加えて変形させた解析モデルを示す。撓み試験、解析データから丸鋸を曲げるための方法を検討した。撓み測定を表 2-8 に撓み試験の結果を荷重方法の観点からまとめる。

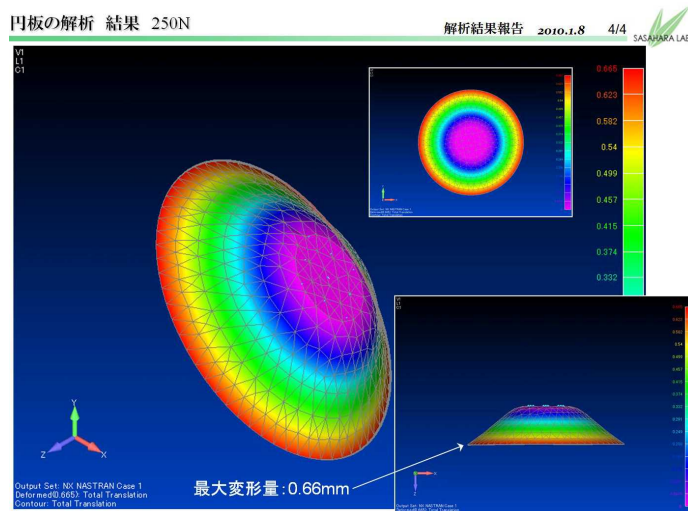


図 2-7 加重 250N の解析結果

表 2-8 荷重付加方法の比較

荷重方法	撓み易さ	曲率半径	切削点からの距離
2点押し	撓み易い	小	遠い
多点押し	撓みにくい	大	近い

表記は2点押しの方が曲げ易いことがわかるが、実用化においては、鋼球の摩耗及び合金の強度、チップの取付け面積が少ない等、解決すべき問題が多点押しよりも多く存在する。以上を加味して丸鋸曲線切断装置の機械仕様を決定した。

2-A-4 多点押し湾曲丸鋸の切削試験

図2-9に示す丸鋸盤に押さえフランジを装着して多点押しで丸鋸を曲げ、切削試験を行った。丸鋸盤の天板には5mRのガイドを設置し、ガイドに沿わせてワーク（合板、亚克力板、ベーク板）を手動送りで切断した（図2-10）。このときの丸鋸回転数は1,800rpmとした。



図 2-9 丸鋸盤



図 2-10 切断風景

CFRPよりは柔らかい材質であったが、良好に切断することができた。丸鋸は多点で曲げられて円錐状になり、切断面が傾斜されることが顕著に現れた。試験では押しフランジに接触回転子としてカムフロアを使用したが高回転音が大きく接触部に摩耗が発生した。

2-A-5 フランジ押し湾曲丸鋸の切削試験

回転子を使用しないで丸鋸を湾曲させるため、丸鋸を押すフランジを設計製作した。このフランジの特徴は、丸鋸との接触部が面当たりではなく、線あたりにする点である。フランジ押しで丸鋸を曲げて切削試験を行った様子を図2-11に示す。



図 2-11 切断試験風景

切断は何れも良好であった。前年度の多点押し同様、切断時の電流値は最大で8Aであり、モータの定格電流は10Aであることから曲げた状態でも切削に影響が無い。

2-A-6 丸鋸曲線切断装置の設計製作

2-A-5の試験でフランジ押しによる湾曲切断で問題がないことが検証できた。そこで、フランジ押しを発展させて湾曲機構を考案した。

構想からデザインレビューを実施、構造的な問題解決を経て丸鋸曲線切断装置の図面を完成した。

二次元の図面を経て三次元図面を作成し、図 2-12 に製作した丸鋸曲線切断装置を示す。

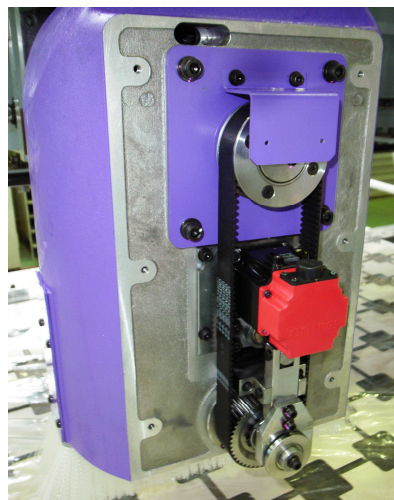


図 2-12 丸鋸曲線切断装置

2-A-7 丸鋸曲線切断装置の製作

曲線切り丸鋸を回転させる旋回制御装置について、二次元の図面を経て三次元図面を作成し、旋回制御装置を作製した。図 2-13 に製作した丸鋸曲線切断装置及び旋回制御装置を組み合わせ丸鋸湾曲ヘッドとなった状態を示す。



図 2-13 丸鋸湾曲ヘッド全体図

【2-B】タンデムトリムヘッドの開発

2-B-1 目的

エンドミルは切削抵抗の上昇と振動によるチッピング、切削の発生する熱による寿命低下があるため、両端支持の平行 2 軸エンドミルを考案して、既存エンドミルの問題点を解消し、生産性の向上を図る。この装置をタンデムトリムヘッドと称する。タンデムトリムヘッドを回転ベースに取付け、切断の進行方向に刻々と変化する曲線を旋回制御する装置を開発する。

2-B-2 タンデムトリムヘッドの設計製作

2 軸駆動方法はギヤにより駆動伝達構造とする。ベアリングは剛性、防塵性、寿命、回転数 10,000rpm に耐え得ることを条件に基本駆動部、エンドミル駆動側受部と 3 箇所ベアリングを採用した。

二次元の図面を経て、三次元図面を作成し、図 2-14 に製作したタンデムトリムヘッドを示す。

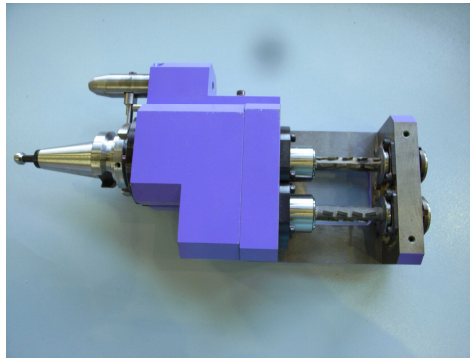


図 2-14 タンデムトリムヘッド

2-B-2 タンデムトリムヘッドの旋回機構の設計製作

BT テーパーヘッドの軸端を NC 制御にて旋回できる構造を設計し、二次元の図面を経て三次元図面を作成し、図 2-15 にタンデムトリムヘッド及び旋回制御装置を組み合わせ、タンデムヘッドとなった状態を示す。



図 2-15 タンデムヘッド全体図

【2-C】試験加工機の製作

2-C-1 目的

丸鋸の湾曲特性・切断試験、エンドミル切削試験などの基礎的な研究を実施し、その試験結果を踏まえ、装置を製作した。新加工技術での切削試験を行うため、丸鋸湾曲ヘッド及びタンデムヘッドを搭載した試作加工機を製作し、CFRPの切削試験を実施する。

2-C-2 試作加工機の設計製作

航空機CFRP加工を想定した加工機（以降、試作加工機と表記）は自動加工を可能とした NC 装置を採用する。また、試験加工機の形態は丸鋸湾曲ヘッド及びタンデムヘッド

を搭載できるよう門型構造とする。設計変更を重ね、部品の製作し、ユニット、機械の組立を経て、丸鋸湾曲ヘッド及びのタンデムヘッドを搭載した図 2-16 に示す試験加工機を製作した。



図 2-16 試作加工機

【2-D】ソフトウェアの開発

2-D-1 目的

丸鋸湾曲切断装置及びタンデムトリムヘッドは NC 装置により 6 軸制御される。そのため複雑な形状の運転プログラムを手計算で作成することは困難である。そこで運転プログラム（以下 G 言語プログラムと称す）を簡単作業で自動的に作成可能な専用ソフトウェアを開発する。図 2-17 の新加工技術で掲げている加工方法は第 1 工程で丸鋸湾曲切断装置にて粗加工を行い、第 2 工程はタンデムトリムヘッドで仕上げ加工を行う。

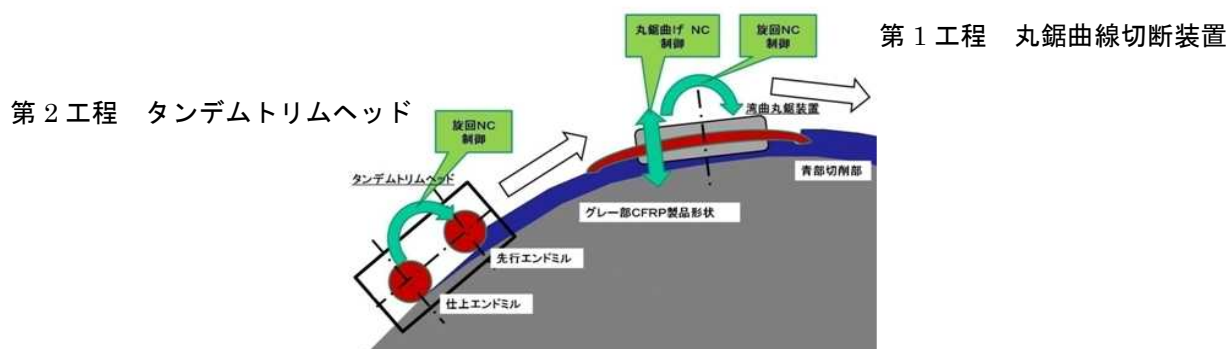


図 2-17 新加工技術の工程

2-D-2 ソフトウェアの製作

完成されたソフトウェアは 2 次元 CAD により加工形状を作成し、CAM で機械情報、加工条件等のパラメータを入力し試作加工機用 G 言語プログラムを作成する。

CAD はマウス操作で簡単に作業可能で、他の CAD フォーマットのコンバートも可能である。専用画面にて加工材の大きさ、切削条件等を入力し、CAD データ貼り付け、加工経路を選択して G 言語プログラムを作成する。

これで作成された G 言語プログラムで試作加工機が工程通りできることを確認した。図 2-18 が第 1 工程で丸鋸湾曲切断装置にて粗加工、図 2-19 が第 2 工程はタンデムトリムヘッドで仕上げ加工を検証したものである。



図 2-18 丸鋸曲線切断装置での加工



図 2-19 タンデムトリムヘッドでの加工

【2-E】加工機による切削試験

2-E-1 丸鋸曲線切断装置とタンデムトリムヘッドの耐久試験

2-E-1-1 目的

試作加工機で航空機用 C F R P の切削試験を行う。先ず航空機用平織り積層材 C F R P を試作加工機で曲線の耐久試験を行う。丸鋸曲線切断装置の切断加工では丸鋸の寿命を調べる。次にタンデムトリムヘッドではエンドミルの寿命及び切削肌の変化を調べる。同時に装置の耐久性と長時間稼働における機械的問題を検証する。

2-E-1-2 曲線切断丸鋸装置の耐久試験

曲線切断丸鋸装置の耐久試験は開発した丸鋸を使用し、表 2-20 の切削条件で、曲率を 5mR として図 2-21 のように連続加工を行う。このときの加工材は航空機用平織り積層 C F R P 板厚 10mm である。

使用する丸鋸及び切削条件は今までの研究で最良なもので耐久試験を行い、図 2-21 が試験風景を、図 2-22 に加工した C F R P 材を示す。

航空機用平織り積層 C F R P は想像以上に難削で工具が新しい状態では切削に支障をきたさないが、刃の摩耗が進むと切削抵抗が増大することが判った。

この試験で本研究の技術目標を達成することができた。

表 2-201 曲線切断丸鋸装置耐久試験の切削条件

ヘッド	切削方向	回転数 min^{-1}	切削速度 m/min
曲線切断丸鋸装置	ダウンカット	3,000	3

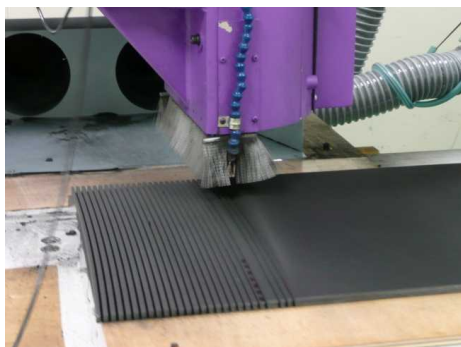


図 2-21 耐久試験風景



図 2-22 加工後試験片

2-E-1-3 タンデムトリムヘッドの耐久試験

タンデムトリムヘッドの耐久試験は表 2-23 に記載された切削条件で先行刃取代 5mm 後行刃 1mm 仕上げ加工を行う。このときの加工材は航空機用平織り積層 C F R P 板厚 10mm である。

使用エンドミル及び切削条件は今までの研究で最良なもので耐久試験を行う。

丸鋸同様にエンドミルが新しい状態では切削に支障をきたさないが、刃の摩耗が進むと切削抵抗が増大することが判った。

この試験で本研究の技術目標を達成することができた。

タンデムヘッドは 2 軸の軸間が先行刃物は粗加工で後刃物が仕上げるというルールを守ると形状によっては一定の残り代で軌跡を作成するのは難しいことも分かった。

表 2-23 タンデムトリムヘッド耐久試験の切削条件

ヘッド	刃物	回転数 min^{-1}	切削速度 m/min
タンデムトリムヘッド	エンドミル	6,000	1

2-E-2 装置の集塵対策

2-E-2-1 目的

C F R P の粉塵は人体に有害であるといわれている。そのため丸鋸曲線切断装置及びタンデムトリムヘッドで発生する切粉を回収することが事業化のための必須課題となる。本試験装置は回転工具による乾式加工のためテーブルに切粉が飛散する状況にある。

2-E-2-2 切粉の飛散状況

丸鋸で切断すると切粉は、図 2-24 のように一方向に飛散するため、その部分に集塵用シューターを設けることによって回収できる。シューターから外れた切断に関しては図 2-25 のように切粉が機械後部に飛散する。また、タンデムトリムヘッドのエンドミルに関しても集塵がないとテーブル上に切粉が飛散する。

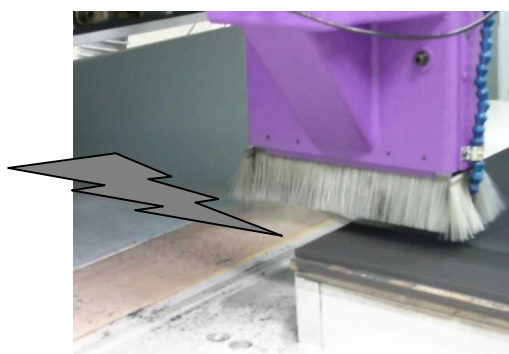


図 2-24 丸鋸の切粉の飛散



図 2-25 丸鋸の切断切粉

2-E-2-3 集塵対策

改造設計を行い図 2-26 の状態からにて図 2-27 のように改造を実施した。丸鋸は刃数が多くまた周速が速いため微細で高速の粉塵が発生するが、今回のシューター及びテーブル廻りの改造で大幅に改善された。



図 2-26 改善前のテーブル



図 2-27 改善後のテーブル

図 2-28 に示すタンデムトリムヘッドの後部開口部に図 2-29 に示すダクトホースを装着して加工中に発生する切粉を吸引するようにした。集塵は工具のできるだけ近くで吸引することでタンデムトリムヘッドの場合、ほとんどの切粉を回収できた。

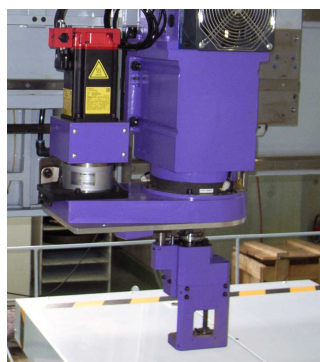


図 2-28 タンデムトリムヘッド



図 2-29 集塵対策後

最終章 全体総括

最近の航空機業界は燃料費の高騰により、採算が悪化し経営環境への負担が大きくなっている。その為、軽量で高強度のある炭素繊維（CFRP）を積極的に採用しようという傾向が顕著になってきている。しかしながら、この加工には大きな難関が存在した。つまり、工具寿命が著しく短く、また繊維質の加工でバリが出やすく困難である、という点である。我々はこれらの課題に挑戦すべく以下の研究テーマを設定した。

現在の加工方法を基準として、以下の通りの目標設定をした。

1. 加工スピードは、ウォータージェット加工の6倍、エンドミル加工の2倍
2. 加工コストは40%削減
3. 機械装置の価格は1/4

本事業における研究開発は、Ⅰ. 工具開発 Ⅱ. 機械装置及びプログラム開発に分けられ担当を分担しつつ、同時並行的に進められた。

主な項目は以下の通りである。

Ⅰ. 工具開発について

1. 曲線（湾曲）切削を可能とし、且つ高耐久性を有する丸鋸の開発
 - ・目標値：最小5mRまで可能、送り速度3m/分、耐久力80m/1回研磨
2. 粗・仕上げ加工を2軸で分担し、高速且つ高耐久性エンドミルの開発
 - ・目標値：最小5mR内で、送り速度1m/分、耐久性70m/1回研磨

Ⅱ. 機械装置及びプログラム開発について

1. 丸鋸湾曲制御装置及び丸鋸旋回装置の開発及び制御プログラムの開発
 - ・目標値：最小5mR内で湾曲を正確に制御する装置とプログラムの開発、湾曲した丸鋸を指示された曲線に沿って正確に制御する装置とプログラムの開発
2. 2軸タンデムエンドミル装置の開発及び制御プログラムの開発
 - ・目標値：最小5mR内で、2軸を別々に制御し、送り速度1m/分を実現する2軸タンデムエンドミル装置の開発及び制御プログラムの開発

本研究開発の結果は、10mm厚の航空機用CFRPに於いて次の通り目標を達成した。

曲線（湾曲）切削丸鋸による曲線切削加工：

●5mRで、送り速度3m/分にて、耐久力100mを達成、再研磨使用7回程度可

2軸タンデムエンドミルによる曲線切削加工：

●5mRで、送り速度1m/分にて、耐久力70mを達成、再研磨使用4回程度可

この通り目標は達成されたが、航空機産業では生まれたての技術は実証認証されねば使用されないの、広く産業界に機会を求め、実績を積み、やがて愛用される日を信じている。