

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業
「加工歪を生じない航空機タービンディスクのハイブリッド
加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人新産業創造研究機構

平成 23 年度第 3 次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業
「加工歪を生じない航空機タービンディスクのハイブリッド加工技術の開発」
研究開発等成果報告書

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・目的	2
1.2 研究開発の目標	2
1.3 研究実施内容	2
1.4 研究実施場所	4
1.5 研究体制	5
1.6 成果概要	10
1.7 当該プロジェクトの連絡窓口	13

第 2 章 外径両側面の連続加工工法の開発（ジャイロ工法の開発）

2.1 マンドレル治具の開発	14
2.2 高速回転によるジャイロ効果を用いた切削加工の開発	15
2.3 サンプル加工と評価	18

第 3 章 新複合加工技術開発

3.1 複合加工プログラムの開発	22
3.2 連続加工技術と評価	23

第 4 章 工具寿命延長技術の開発

4.1 セラミック工具及び最新コーティング工具の加工条件の確立	28
4.2 クーラント技術の向上	31
4.3 表面品質の測定・評価技術	34

第 5 章 全体総括

5.1 複数年の研究成果	35
5.2 研究開発後の課題・事業展開	40

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・目的

航空機用エンジンは、信頼性向上、燃費向上、軽量化、低公害性が求められている。タービンディスクは中でも最重要保安部品に属しており、使用時は高速回転体で過酷な条件下での耐久性が求められる一方、部品の大型化、信頼性向上、コスト低減、増産化、国際競争力強化等様々な市場要求の中で、難削材複雑形状薄肉部品の新技術による加工方法の開発の必要性が高まっている。

本事業では、「加工歪を生じない航空機タービンディスクのハイブリッド加工技術」に至る課題を抽出し、その解決を図ることにより川下企業のニーズに応えることを目的とする。

1.2 研究開発の目標

航空機エンジン用タービンディスク等難削材複雑形状薄肉部品の加工において、発生する歪等に対して要求品質の確保のため、多工程、多機種、多段取り替え等課題があり、対応技術が確立されていない。本研究では、これらの課題解決のため、ハイブリッド複合加工法等を開発し、1機種で連続加工につなげ、精度、表面品質を確保して、信頼性向上、コスト低減、増産化、国際競争力に対応したエンジン部品の新加工技術の確立を目指す。

①外径両側面の連続加工工法の開発（ジャイロ工法の開発）

②新複合加工技術開発

③工具寿命延長技術の開発の3項目において、本年度は8つのサブテーマを設定して開発を進め、川下企業のニーズに適合した技術の確立を目指す。

1.3 研究実施内容

【1】 外径両側面の連続加工工法の開発（ジャイロ工法の開発）

タービンディスクは薄肉の複雑形状であるため、加工中のひずみが発生しやすい構造であり、且つ難削材使用のため、切削に長時間を要す。

本研究開発では、横型複合加工機を用いて、両端面及び外径の3連続加工の工程統合により、従来工程5工程を2工程に集約し、加工時間を短縮すると共に、加工精度、表面品質を向上させ、最終目標として、トータルコストの50%低減を目指す。

【1-1】 マンドレル治具の開発

1-1-1 正規スケールマンドレル治具に対して実スケールディスクを使用し、前年度の着脱テストの問題点を生かし、平成24年度は取り付け台を考案し、安全かつ容易な取り付け及び取り外し方法を確立する。（千代田金属工業株式会社）

1-1-2 現在製作済みのマンドレル治具は3分割パーツの組合せ構造で、治具中央部で僅かながらたわみがあることが平成23年度の研究の中で判明した。第3次補正予算事業ではこのマンドレル治具に発生するたわみを最小限に抑え、最適条件でタービンディスクの切削加工が可能な取付方法等を確立する。（千代田金属工業株式会社）

【1-2】 高速回転によるジャイロ効果を用いた切削加工の開発

1-2-1 【1-1】での研究により治具精度を改善したマンドレル治具を使用し、実スケールディスクを用いての回転テストにより、高速回転によるジャイロ効果を確認する。（千代田金属工業株式会社）

1-2-2 実スケール難削材（sus304）及びチタン材料を用いたテスト加工により、ワークの回転数と切込み（切削力）の関係を調査し、ワーク締め付けによる歪がなく、加工中のビビりのない最適切削加工条件を探る。（千代田金属工業株式会社）

【1-3】 サンプル加工と評価

第3次補正予算事業研究課題のテスト計画を策定し、評価方法を確立する。
(千代田金属工業株式会社・国立大学法人東京農工大学)

【2】 新複合加工技術開発

複合5軸加工機にワイヤー放電加工ユニットを搭載し、基本的動作確認が前年度の研究にて立証された。本年度はハイブリッド機能を追加した複合機を使用し、外径・両側面の連続同時加工を完了したタービンディスクにブレード取付溝加工を行うハイブリッド工法の研究開発を行う。

【2-1】 複合加工プログラムの開発

2-1-1 外径・両側面の連続同時加工完了したタービンディスクにブレード取り付け溝をワイヤー放電にて行うハイブリッド加工プログラムの開発をする。(千代田金属工業株式会社)

【2-2】 連続加工技術と評価

2-2-1 平成23年度は実スケールディスクに単純なコ形状の溝加工をワイヤー放電加工ユニットにて行った。第3次補正予算事業では複雑形状のタービンブレード溝加工の連続加工を行い、実用化への足がかりとする。(千代田金属工業株式会社)

2-2-2 第3次補正予算事業では、2-3-1のワイヤー放電加工ユニットによるディスクの実加工テストで得られた加工サンプルについて、設定条件に対する表面品質及び寸法精度の比較評価を行う。(千代田金属工業株式会社・国立大学法人東京農工大学)

【3】 工具寿命延長技術の開発

工具寿命向上のためにセラミック材質工具、加工条件の確立、クーラント技術、工具寿命の低下原因解析、表面品質の測定・評価技術を開発する。工具寿命の延長、切屑による傷を防止し、工具費の低減と品質の安定を目指す。

テストピースによる加工条件設定後に、複雑形状のインコネル材のタービンディスク加工を行い加工能率の向上を図る研究を行う。

【3-1】 セラミック工具及び最新コーティング工具の加工条件の確立

3-1-1 ニッケル基合金タービンディスクによる高速加工を行い、工具の加工条件を確立させる。一般的にはウイスカタイプセラミックを使用するが、コストダウンのために新型セラミックチップ及び最新コーティング工具のテストも行い比較検討する。加工中の工具摩耗の変化を分析し、最短加工時間を目指した切削条件を研究し、最新コーティング工具の適用を図り、加工時間の大幅短縮に繋げる。

3-1-2 セラミック工具の特性でドライ加工しないと工具の破損が起こる。ドライ加工による製品の加工熱の上昇による歪み抑えるために、加工個所を分散しながら、全体の温度変化を均一化することにより、歪みを抑える事が出来る。加工中の温度を測定しながら歪みを起こさないプログラムの開発を行う。

3-1-3 切削加工中の機械の固有振動数と工具の切削条件が共振を起こし著しく工具寿命を低下させる現象が起こる。振動解析を進め加工条件の向上、工具寿命の向上を図り、加工時間短縮及び工具費の低減を行う。

(株式会社ナサダ)

【3-2】 クーラント技術の向上

高圧クーラント加工による切屑処理による加工表面の品質確保の研究開発を行う。

第3次補正予算事業ではセラミック工具で高圧クーラントによる切屑の処理の状態確認を行い、表面品質への影響を確認する。複雑形状のタービンディスクの高効率加工と品質確保を目指す。(株式会社ナサダ)

【3-3】 表面品質の測定・評価技術

セラミック高速加工においてはセラミックチップの金属表面への付着等が発生し、加工面のザラツキが発生しやすく、工具寿命が低下する。加工表面の金属組織の変化、チップの溶けこみが考えられる。金属組織の分析等原因解析と表面品質の測定、評価を行い工具寿命の延長、品質向上を図る。

(千代田金属工業株式会社・株式会社ナサダ・国立大学法人東京農工大学)

【4】 研究全体の統括、プロジェクトの管理運営（公益財団法人新産業創造研究機構）

研究を円滑に推進するため、研究推進会議を行うと共に必要に応じ検討会を開催し、プロジェクト運営を効率的、かつ着実に推進し、年度末に成果報告書のとりまとめを行う。

【4-1】 進捗管理（公益財団法人新産業創造研究機構）

各研究について、進捗の状況を把握し、分担課題間を横断する問題について検討すると共に、それぞれの課題間の調整を行い、円滑な研究の進捗を図る。（含む再委託先の経理指導）

【4-2】 研究推進会議の開催（公益財団法人新産業創造研究機構）

研究推進のため、研究推進会議を開催すると共に、必要に応じ実務者による検討会を開催し、プロジェクト運営を効率的、かつ着実に推進する。

【4-3】 報告書のとりまとめ（公益財団法人新産業創造研究機構）

1.4 研究実施場所

① 事業管理機関

公益財団法人新産業創造研究機構（最寄り駅：ポートライナー先端医療センター前駅）

〒650-0047 神戸市中央区港島南町1丁目5-2

(神戸キメックセンタービル6F)

② 研究実施場所（主たる研究実施場所については、下線表記）

千代田金属工業株式会社（最寄り駅：J R 姫路駅）

〒670-0944 兵庫県姫路市阿保甲 403 の 3

株式会社ナサダ（最寄り駅：J R 姫路駅）

〒670-0944 兵庫県姫路市阿保甲 1-1

国立大学法人東京農工大学

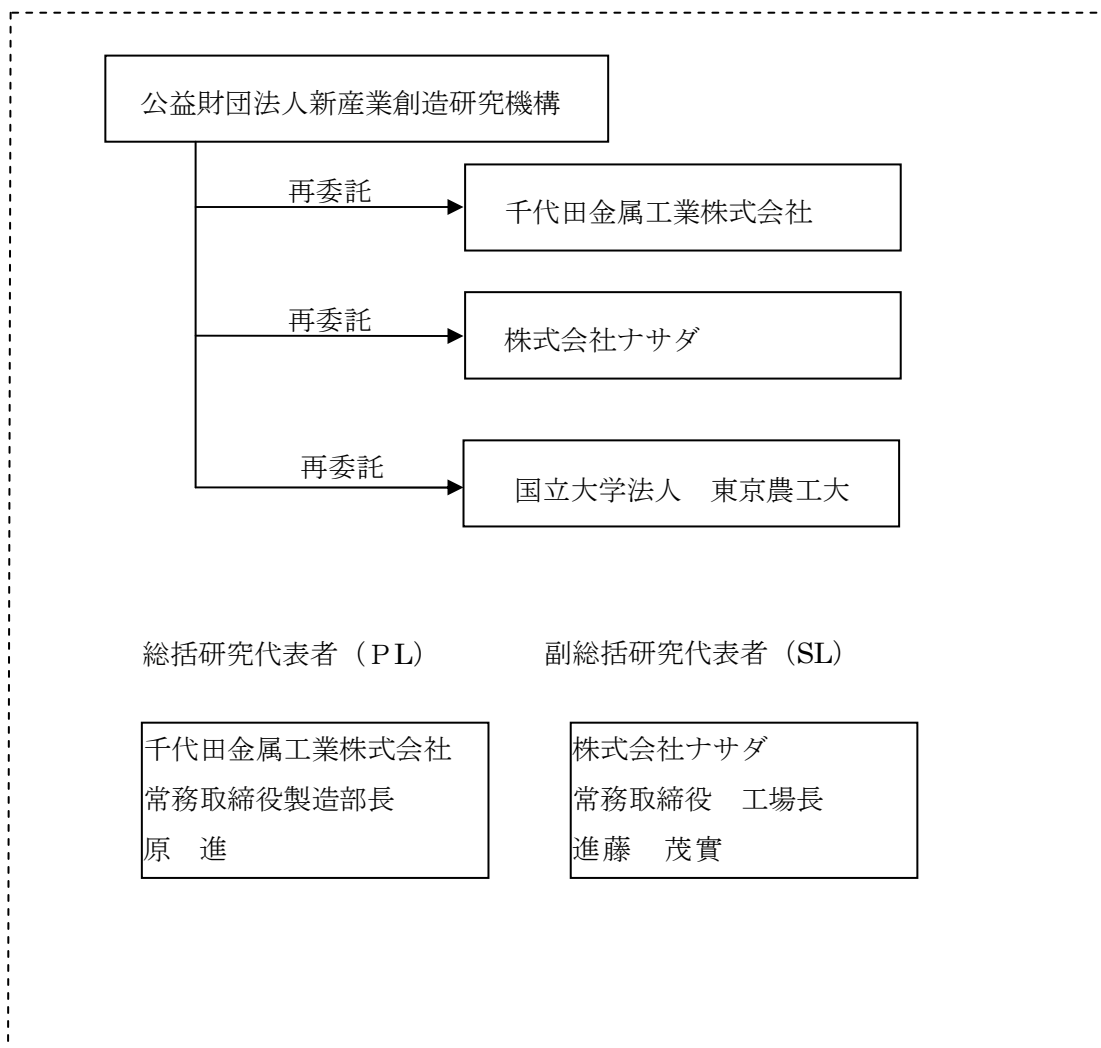
〒183-0057 東京都府中市晴見町 3-8-1

〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16（最寄り駅：J R 中央線 東小金井駅）

1.5 研究体制

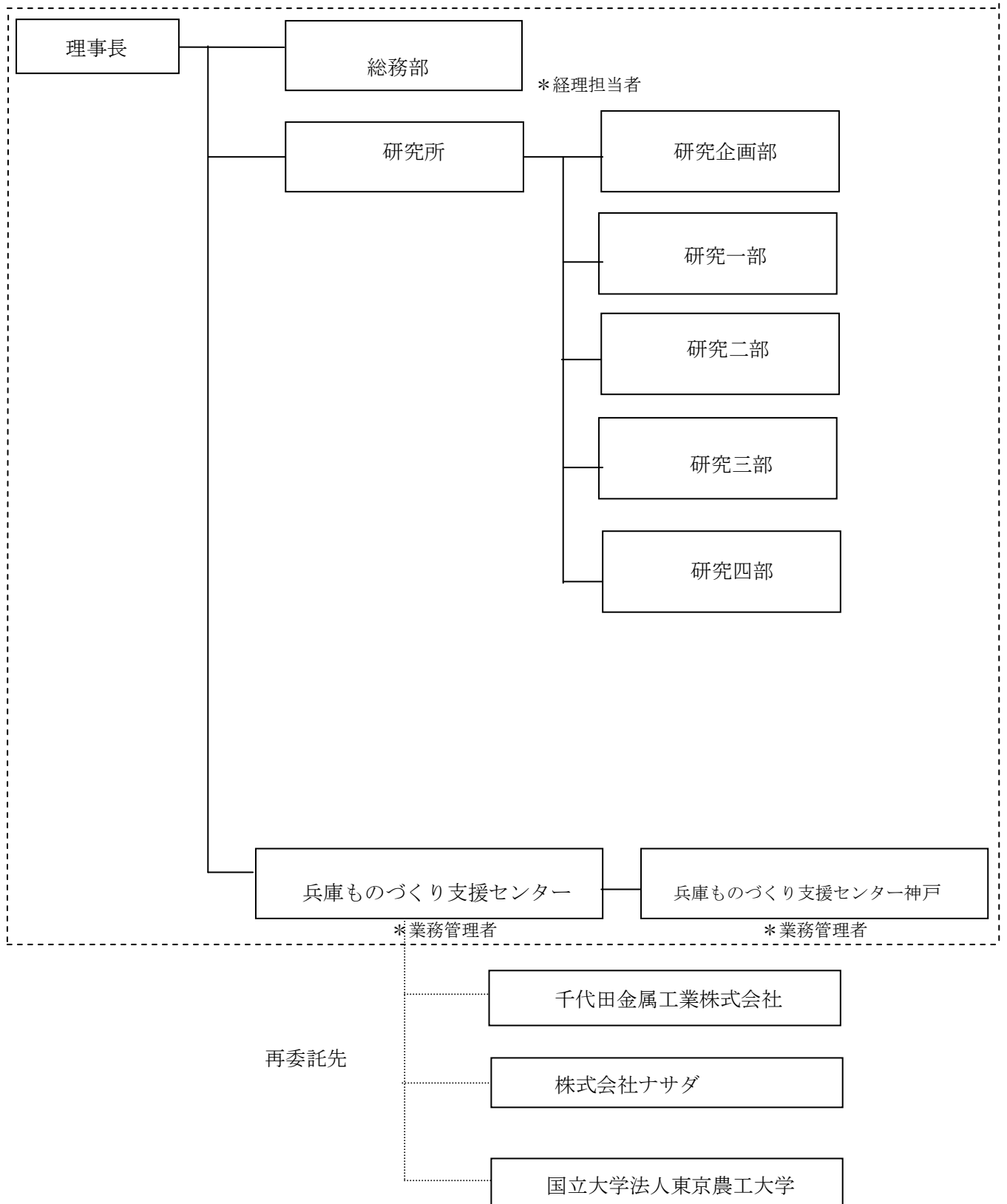
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



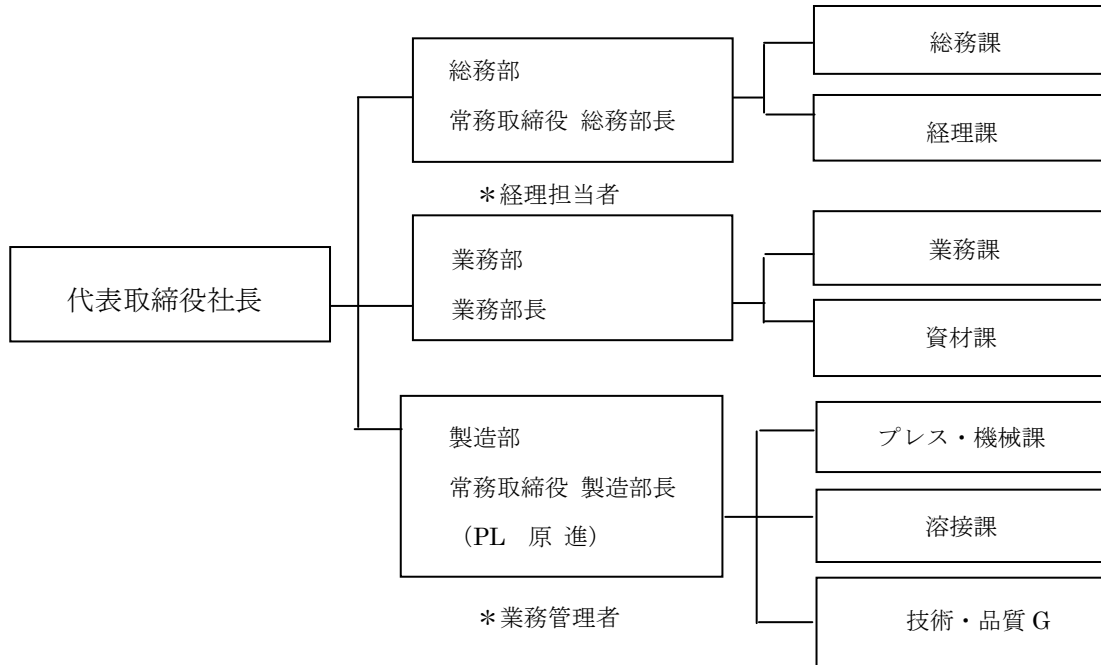
2) 管理体制

① 事業管理機関 [公益財団法人新産業創造研究機構]

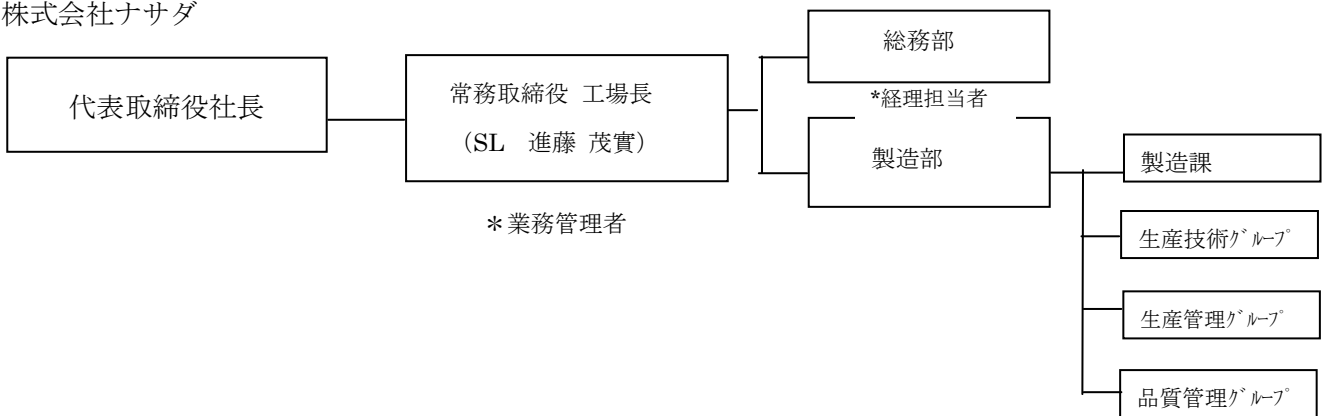


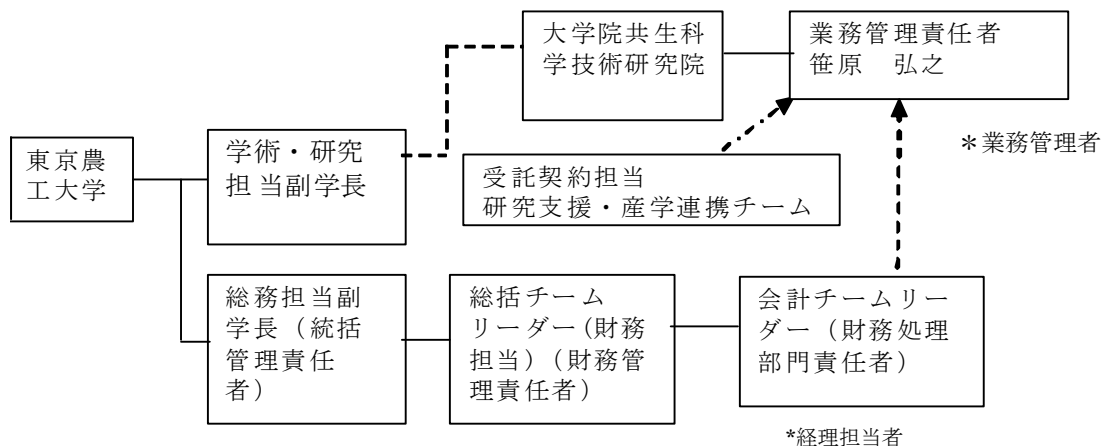
② (再委託先)

千代田金属工業株式会社



株式会社ナサダ





(2) 研究員及びプロジェクト管理員 (役職・実施内容別担当)

【総括研究代表者 (PL)】 (プロジェクト管理員)

氏名	所属・役職
原 進	常務取締役 製造部長

【管理法人】 公益財団法人新産業創造研究機構

①管理員 (プロジェクト管理員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
山中 啓市	兵庫ものづくり支援センター神戸所長兼研究コーディネーター	④-1、④-2、④-3
山口 寿一	兵庫ものづくり支援センター産学官連携総括ディレクター兼研究コーディネート部長	④-1、④-2、④-3

【再委託先 (研究員)】

千代田金属工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
原 進 <再>	常務取締役 製造部長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、②-3、③-3
小林 好彦	常務取締役 総務部長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、②-3、③-3
櫛橋 謙雄	製造部 技術課長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、②-3、③-3

石見 悠	製造部 技術課係長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、②-3、③-3
桂 和文	製造部 工作班班長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、②-3、③-3

株式会社ナサダ

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
進藤 茂實	常務取締役 工場長	③-1、③-2、③-3
本田 和志	製造部 製造課長	③-1、③-2、③-3
千葉 豪一	製造部 生産管理グループ長	③-1、③-2、③-3
田中 志征	製造部 生産技術主任	③-1、③-2、③-3
中務 慎也	製造部 生産技術主任	③-1、③-2、③-3
長久 宗徳	製造部 生産技術係員	③-1、③-2、③-3

国立大学法人東京農工大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
笹原 弘之	大学院共生科学技術研究院 教授	①-3、②-3、③-3

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】

公益財団法人新産業創造研究機構

(経理担当者)	総務部長	大田 篤義
(業務管理者)	兵庫ものづくり支援センター副センター長	柏木 茂
	兵庫ものづくり支援センター神戸所長兼	
	研究コーディネーター	山中 啓市

【再委託先】

千代田金属工業株式会社

(経理担当者)	常務取締役 総務部長	小林 好彦
(業務管理者)	常務取締役 製造部長	原 進

株式会社ナサダ

(経理担当者)	総務部長	山口 一彦
(業務管理者)	常務取締役 工場長	進藤 茂實

国立大学法人東京農工大学

(経理担当者) 小金井地区会計チームリーダー 横井 敏勝

(業務管理者) 大学院共生科学技術研究院 教授 笹原 弘之

(4) その他

研究推進会議の委員

①研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
原 進	千代田金属工業株式会社 常務取締役 製造部長	PL
小林 好彦	千代田金属工業株式会社 常務取締役 総務部長	
榎橋 謙雄	千代田金属工業株式会社 製造部 技術課長	
石見 悠	千代田金属工業株式会社 製造部 技術課係長	
桂 和文	千代田金属工業株式会社 製造部 工作班班長	
進藤 茂實	株式会社ナサダ 常務取締役 工場長	SL
本田 和志	株式会社ナサダ 製造部 製造課長	
千葉 豪一	株式会社ナサダ 製造部 生産管理グループ長	
田中 志征	株式会社ナサダ 製造部 生産技術主任	
中務 慎也	株式会社ナサダ 製造部 生産技術主任	
長久 宗徳	株式会社ナサダ 製造部 生産技術係員	
笹原 弘之	国立大学法人東京農工大学 大学院共生科学技術研究院 教授	

1.6 成果概要

タービンディスクは薄肉複雑形状のために歪みやすく、加工工程も細かく分割されているが、本研究においては複合加工機にハイブリッド機能を搭載した設備を開発し、工程集約を行い、ワンチャックで歪みを起こさない高能率加工を実現させて、コスト 1/2 を目指している。

マンドレル治具の開発、ジャイロ効果を用いた歪みを生じない切削加工技術の開発、ワイヤー放電加工機能を搭載したハイブリッド複合加工機により横型のワイヤー放電加工技術の研究開発を進め、航空機エンジン、ガスタービンエンジンに使用されている耐熱合金のチタン材料やインコネル718材料にブレード取り付け溝の加工技術等の新加工技術の開発を進め、現在飛行機に搭載されているエンジンのタービンディスクの加工を実現した。

旋削加工、穴明け、ワイヤー放電溝荒加工、仕上げ溝加工と連続的に行い、工程集約による無人化加工を目指し、且つ歪みを起こさない安定した加工技術を確立させ、さらに高能率加工の実現のためにセラミック加工技術、高圧クーラント加工技術の開発を進め、工程集約による無人化加工技術と合わせて、タービンディスクの加工コストの 50%低減を可能にした。

1.6.1 外径両側面の連続加工工法の開発(ジャイロ工法の開発)

①マンドレル治具の開発

H24年度は現在航空機に搭載されているエンジンのタービンディスク材を高精度に加工することを目標にし、治具の構造の見直しを行い、治具の把握力のアップ、振れ防止等について再検討を行い、実用化に繋げるための構造を研究し、治具の製作を行った。

振れの防止のためにマンドレル治具の中心部の構造を変更した。構造の変更による取付け精度は同軸度が0.04から0.02以下で安定して把握できる構造に出来た。また従来の組立構造の治具で発生していた回転中に振れ止めを受けている部分の振れが増幅される現象についても、同軸度0.01以下になり、振れ止めの効果が発揮でき、加工精度の大幅な精度向上に繋がった。

また、製品の取付け取外しの簡素化についても研究開発を進み、マンドレル治具の受け台等の改良により、マンドレル治具へのディスク取付け、及び複合機への治具取付け、芯出しを短時間で可能にする構造に出来て、量産時の段取り、取付け取外し時間の短縮を可能にした。

②高速回転によるジャイロ効果を用いた切削加工の開発

H23年度は高速回転中のジャイロ効果確認のためにミニチュアの検証治具を製作し、ジャイロ効果の確認実験を行った。この実験により、高速回転中に切削力を軸方向に掛けると、回転中のプレートに力が加わり回転中のプレートに振れが発生するが、高速回転により発生するジャイロ効果により円板の振れが収まることが実証できた。H24年度は大型航空機に搭載されているエンジンのディスク加工の開発による、歪みを起こさないマンドレル治具による連続加工の研究開発を進めていった。大型のタービンディスク加工においては、材料が耐熱鋼でありジャイロ効果が十分に発揮できる回転数まで切削スピード(回転数)を上げることが出来なかった。高能率加工を行うためには重切削が必要であり、切削力に対応したワークの把握力に設定が必要となりジャイロ効果が少なくなる。またジャイロ効果のみでのディスク加工では切込量が上げられないので、加工時間が大幅に増加しコスト低減に繋がらないため、実ワーク加工においては、マンドレル治具による保持力で加工中の製品に歪みが起きないように切削する技術の確立を優先し、歪みの起きないタービンディスクの高能率加工を実現させた。

マンドレル治具方式においても内径の把握力が大きすぎると、加工後に治具から取り外すと歪みが起き、切削力と把握力のバランスが最適になる条件設定が必要な事が実験でわかり、歪みのない把握力の設定等、歪みを起こさない高能率な切削加工技術を確立した。

③サンプル加工と評価

チタン製のディスクにおいては、十分にクランプ歪みを低減することができた。インコネル製ディスクにおいては、目標にわずかに及ばなかった物の、高い精度を得ることができた。チタンに比べて、加工力がきわめて大きいことに加え、ワークのサイズも大きく、また、左右非対称形状でコレットとの接触幅も半分以下とチタンと比較して格段に難しい条件だ

ったと考えられる。

1.6.2 新複合加工技術の開発

①複合加工プログラムの開発

本年度の実ワーク(タービンディスク)による連続加工技術の開発のために、重要な要素である複合機に搭載したワイヤー放電加工による、複雑なクリスマスツリー形状の放電加工プログラムを開発し、耐熱鋼のワイヤー放電加工条件の設定を進めていった。

ワイヤー放電加工中は切削液の温度上昇が起りやすく、連続加工においては切削液対策が切削条件のアップに非常に重要であることが分かり、今後のハイブリッド複合加工機の開発の重要な要素が明確にできた。

②連続加工技術と評価

本年度は川下企業より、航空機エンジンに使用されているタービンディスク材を購入し、加工工程の設計、工具の選定、切削条件の設定等を行い、加工プログラムの開発を進めた。

被削材はコンプレッサー側ディスクがチタン(Ti-6Al-4V)材、タービン側ディスクがインコネル 718 材で其々の加工プログラムを開発し加工を行った。

加工手順はマンドレル治具取り付け部の内径加工後は、治具に取り付けた状態で、内径の基準面以外のすべての加工を行い完成させることを目指した。

第 1 工程旋削荒加工で、ディスクの左右及び外径を連続加工し、その後に旋削仕上げ加工し次に穴開け加工を行い、最後に取付溝加工を行う手順で加工を進めた。荒の旋削加工において、高能率加工のセラミック高速加工技術を取り入れた。

本研究において研究したニッケル基合金のインコネル 718 材においては、工具の消耗が激しいため、クリスマスツリー形状の荒加工をワイヤー放電加工で行い仕上げ加工を成型カッターで連続して加工出来る技術は小ロットの加工品、試作開発品においては、高価なブローチカッター無しで安定した溝加工が出来ることが証明出来て、非常に有効な加工技術となる事が証明できた。

1.6.3 工具寿命延長技術の開発

①セラミック工具及び最新コーティング工具の加工条件の確立

ニッケル基耐熱合金の高速セラミック加工における切削テストによりウイスカタイプセラミックによる加工とサイアロンタイプのセラミック加工の比較テストを実施した。特にワスパロイに加工において有効であったサイアロンセラミックをインコネル 718 材の加工で評価を進め、同時にウイスカタイプのテスト加工を行ない工具の摩耗状況を比較して評価を行った。コストで優位なサイアロンタイプのセラミック加工によるコスト低減が実現可能かをテスト加工において見極める。刃先の形状による摩耗量の変化、材質の違いによる摩耗量の変化についてテスト加工により評価した。また加工面の表面品質についても評価を進めていった。

ポジティブとネガティブの刃先による摩耗量の変化は、低速加工では違いが少ないが高速

になればネガタイプの方が安定した加工になっている。またサイアロンタイプは高速加工になると急速に摩耗が進んでいくがウイスカタイプは境界摩耗が大きい、切削面、逃げ面の摩耗は安定している。インコネル材の加工においてはコストは高いがウイスキー工具が安定しており、ワスパロイにおいてはサイアロン工具が有効となり、材種毎に細かく比較テストを行い切削条件の設定が必要になる。

耐熱合金の高速加工においてはセラミック加工では 200m/min~300m/min での加工が十分可能であり、最新のコーティングチップでも 50m/min~100m/min 程度が安定切削の限界である。高能率加工においてはいかにセラミック加工を取入れるかが重要となるが、工具寿命は 3 分前後での交換が必要となり無人化加工には、多くの交換工具を機械にセットできることが必要になるため、設備コストが高額となる。

②クーラント技術の向上

セラミックによる高速切削中に、切粉が工具に巻き付き切削液が刃先に届かなくなり、刃先の摩耗が早くなることが分かっている。この切粉巻き付きを防止するために高圧クーラントを切削点に高圧で吹き付けることにより、切粉を細かく切断することが出来て切粉の巻付きを防止し、出来ると、工具寿命が大幅に伸びる。本研究においてはセラミックチップの材種による違いについてもテストを行った結果、境界摩耗が起きやすいウイスキーセラミックの方が切粉の切断がされやすくなった。摩耗した部分で切粉が折れやすくなっていると考えられ、超鋼チップの様なブレーカーを付けることが出来れば切粉が細かくなり、高圧クーラントと同じ効果があるが、セラミックチップにチップブレーカーを付けられないのが現状である。また切削液の噴射角度も切粉の切断に大きな違いが起こる。

③表面品質の測定・評価技術

セラミック加工後の表面のザラツキを調べると、工具摩耗が進むほどに、加工面の表面に付着物が月加工後の表面がざらついている。ざらついた面をペーパー加工すると、きれいに取れるため金属組織の変化ではない。結果から推定すると、加工中に逃げ面が摩耗して行くときにセラミックが脱落して、高速加工中に加工面に付着していると推定される。工具寿命の延長のためには、セラミック加工の連続加工を行う時に切れ刃の後ろに、加工面を磨く事が出来るペーパーのようなものを取り付けて、セラミック加工後に磨いて表面の付着物を除去することで、チップ交換までの加工回数を増やすことが出来ると推定する。

1.7 当該プロジェクトの連絡窓口

公益財団法人新産業創造研究機構 兵庫ものづくり支援センター
産学官連携総括ディレクター兼研究コーディネーター部長 山口 寿一
TEL 078-306-6800 FAX 078-306-6812
E-mail : yamaguti@niro.or.jp

第2章 外径両側側面の連続加工法の開発(ジャイロ工法の開発)

2.1 マンドレル治具の開発

2.1.1 目的

内径加工されたタービンディスクを内張り方式で固定し、難削材の切削抵抗に耐えうる安定した保持力を持つマンドレル治具を開発する。

2.1.2 目標

- 1) 正規スケールマンドレル治具に対して実スケールディスクを使用し、H23年度の着脱テストの問題点を生かした取り付け台を考案し、安全かつ容易な取り付け・取り外し方法を確立する。
- 2) マンドレル治具に発生するたわみを最小限に抑え、最適条件でタービンディスクの切削加工が可能な取り付け方法等を確立する。

2.1.3.1 改良型マンドレル治具の開発

前年度に製作した治具(以下旧型治具と呼ぶ)を使用して模擬ディスク加工した際、旋削加工により加工しているにもかかわらず、加工面に振れが発生していた。本来なら、旋削加工による加工の後には、振れは発生しないはずである。また、加工直後は振れが出ていなかったのに、ほかの測定等を行った後に再び測定を行うと、振れが生じている場合もあった。振れの大きさは、最大 5/100mm 程度と、目標とする加工精度に対して許容できない大きさであった。治具自体をダイヤルゲージを使用して測定した際にも、図 2.1.3.1.1 に示すように力が加わることにより治具が変形する現象が観察された。この治具は、両側のシャフト部分、中央のディスク取り付け部分の 3 分割で製作され、これらをボルトを用いて結合する構造になっているが、特に、治具の継ぎ目部分で変形が観察された。このことより、加工中に治具の継ぎ目でずれが生じて治具が変形、ディスクの精度にも影響を及ぼしていたと考えられた。高精度にディスクを加工するため、この治具に大幅な改修を行うこととした。

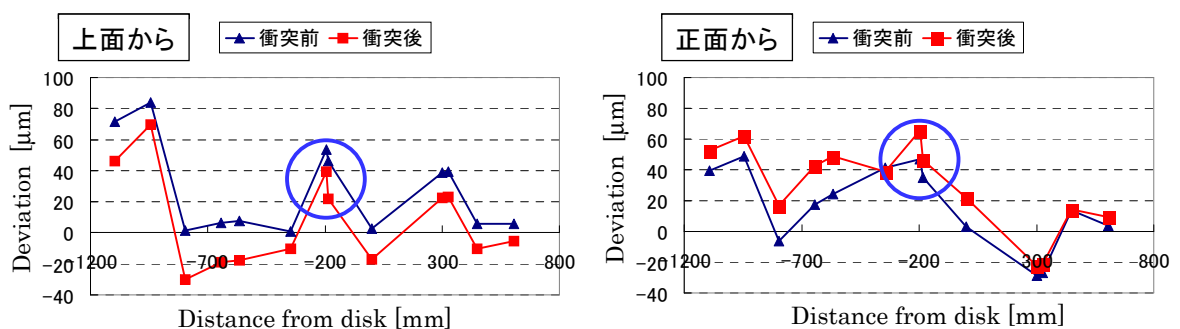


Fig.2.1.3.1.1 治具の変形

旧型の治具が 3 つの部品を継ぎ合わせるような構造になっていたのは、総削り出しでは、ディスク取り付けの中央部分の径にあわせて非常に大きな材料から削らなければならないことを避けるため、また、内径の異なるディスクを加工する際にディスクを取り付ける中央部分のみを製作すればいいようにするためであった。しかし、長いシャフトを中心でつなぎ合わせるような構造

では、最も力がかかる部分に最も弱い部分がくることになり、ずれの発生につながったと考えられる。

対策としては、治具を一体削りだしにより製作することが最も簡単な解決法であるが、前述のように非常に大きな材料を削らねばならないため、材料費および加工コストが非常に大きくなる。また、内径の違うディスクを加工する際には治具全体を作り直さなくてはならない。そのため、容易に製作でき、内径の異なるディスクにも対応し易い構造として、設計を行った

2.1.3.2 取り付け台の製作

現状の治具へのディスク着脱ではマンドレル治具にディスク及び取り付け具をセットするのに、毎回ワイヤーで吊り上げる必要があるため、作業に時間がかかり安全面にも問題があった。この課題を解消するため、マンドレル治具を片持ち保持出来る取り付け治具を製作した。また作業時間も約10分と依然の方法に比べ半分近くになった。

2.2 高速回転によるジャイロ効果を用いた切削加工の開発

2.2.1 目的

薄肉タービンディスクの加工にジャイロ効果を取り入れた切削を行う。

2.2.2 目標

薄肉タービンディスクをマンドレル治具に取り付け、高速度回転で旋削加工を行い、ジャイロ効果を生かした高精度加工ができること。

2.2.3 内容

ジャイロ効果とは、回転している物体はその姿勢を乱されにくいという性質で、ジャイロスコープや人工衛星の姿勢制御などに用いられている。この性質を利用し、薄肉のタービンディスクを高精度に加工することが出来るか、検証を行った。

ジャイロ効果は外力モーメントにより物体に発生する角運動量の変化に対して働くため、完全な剛体には作用しない。そこで、前年度はディスク部をピローブロックにより自由に傾けることが出来るようにした試験装置で切削実験を行ったが、ディスクが簡単に移動し、切削が出来なかった。ジャイロ効果は発生していたはずであるが、切削力の方が大幅に大きかったためである。回転数を高くしていけばどこまででもジャイロ効果は高まるが、機械的、工具的な限界があるため、ディスクをフリーにしてジャイロ効果のみで加工する手法は断念した。しかし、ディスク全体が傾かなくても、図 2.2.3.1 のようにディスクに変形があれば微小質点単位で見れば自転軸を振り、角運動量が増えるはずである。このことから、ディスクが完全に自由に動ける状態でも、変形によりジャイロ効果を発生させることが出来るのではないかと考えられる。

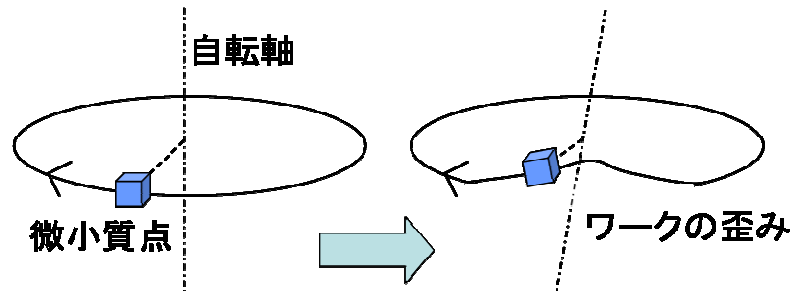


Fig2.2.3.1 歪みによるジャイロ効果

これを確認するため、模擬的なディスクを製作して実験を行った。製作したディスクを図2.2.3.2に示す。このディスクは、薄い鋼板の外周部両側におもりを取り付けられる構造になっており、変形しやすいが、慣性モーメントは大きい構造となっている。このおもりは、鋼板と比較して十分に高い剛性を持っているため、片方のおもりを外すことで剛性を変えずに慣性モーメントを変化させることが出来るようになっている。おもりを両側に付けた状態と片側に付けた状態でディスク外径部を旋盤で加工し、そのときの切削力を切削動力計で測定をした。加工の様子を図2.2.3.3に示す。回転数は 1800min^{-1} 、切り込み量は 0.1mm である。測定結果を図2.2.3.4に示す。

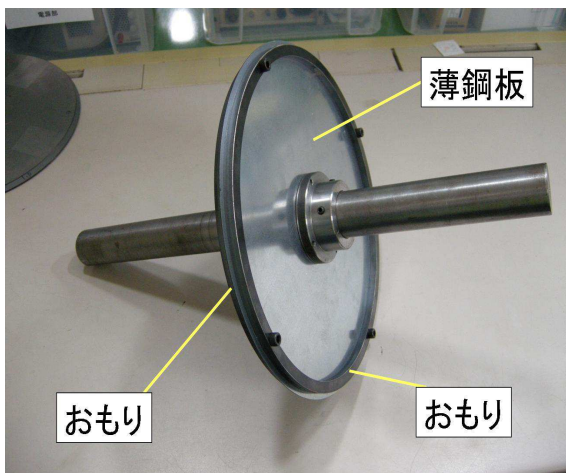


Fig. 2.2.3.2 模擬ディスク

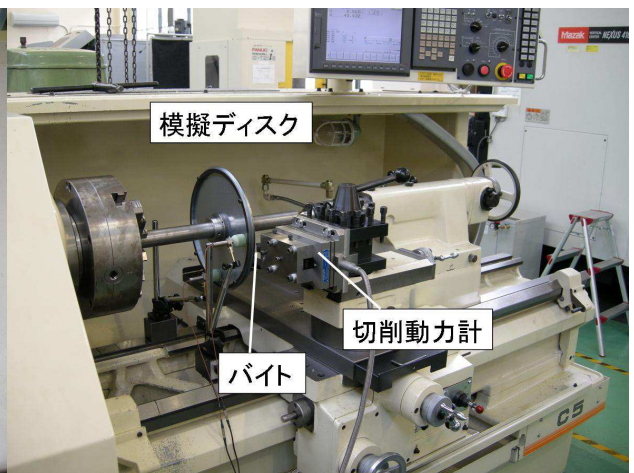


Fig. 2.2.3.3 実験装置

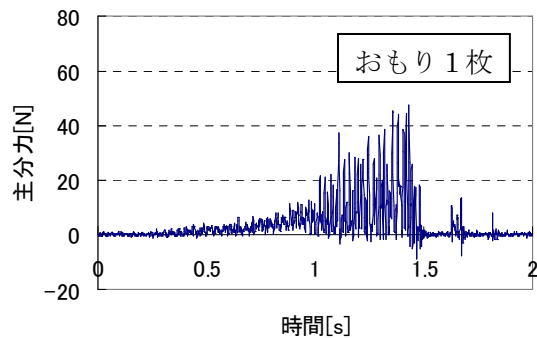
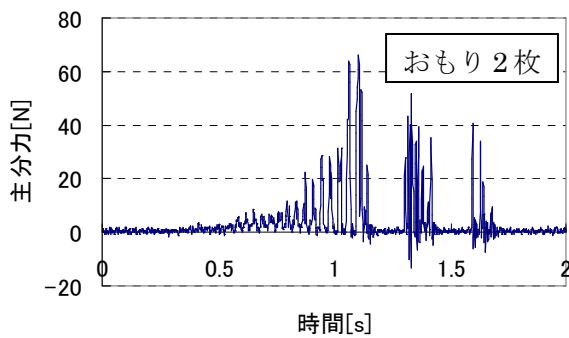


Fig. 2.2.3.4 ディスク加工

どちらも加工中、切削力によってディスクが逃げ、切り込み量の 0.1mm を削り取ることは出来な

かった。また、加工中にディスクがたわんだことにより加工面がテーパーになっていたため、径の比較はしにくかった。しかし、おもり1つの時の主分力が最大45N程度だったのに対して、おもり2つの方が主分力は最大65N程度と大きくなっていることから、慣性モーメントの大きいおもり2つの条件の方が加工中のディスクの逃げが小さくなっていたのではないかと考えられる。慣性モーメントが異なる以外は同条件であるため、この違いはジャイロ効果による物だと考えられ、薄物のワークを高速回転させて削る際にはジャイロの効果が出ると言える。

しかし、この実験の模擬ディスクは、最大限ジャイロ効果が確認できるような性質を持たせたワークであったが、実際のディスクとは異なるところが多い。

まず、今回の実験では、慣性モーメントを大きくするために、回転数を 1800min^{-1} として加工を行っている。これは、瞬間的に削れば良かったため、切削速度は 1700m/min 程度と極めて高速になっており、実際に長時間加工するとなると刃物が持たない。実際のディスク加工では刃物の性能に限界があるため、切削速度をチタン製ディスクでは 60m/min 、インコネル製ディスクの荒加工では 216m/min 、仕上げ加工では 60m/min として加工を行っているため、回転数は最大でも 100min^{-1} 程度までしか上げることができない。また、ディスクの剛性も実際のワークの方では遙かに高いため、ほとんど変形が発生せず、ジャイロ効果が生じにくい。また、模擬ディスクでは一瞬で加工が終わるような薄いワークだったため、効果が生じやすかったが、ジャイロ効果が発生していても、角運動量の変化は時間に比例して大きくなっていくため、時間とともに切削力に抗する力は弱まっていってしまう。そのため、連続的に加工力が負荷される旋削加工に於いては、すぐに効果が失われてしまうと考えられる。

実際のディスクに加工を行っている際も、現象を観測することが出来なかった。ジャイロ効果の原理上は微小にでも変形が起きれば瞬間的には効果が発生しているはずではあるが、その力は実際に加工力を受け止めるディスクの剛性と比較して圧倒的に小さい物であると考えられ、発生していても観測することが出来なかったのだと思われる。

2.2.4 評価・考察

ジャイロ効果を発生しやすくした模擬ディスク、加工条件で加工を行ったところ、ジャイロ効果によりディスクが変形しづらくなったと思われる現象が確認できた。しかし、実際のタービンディスクのようなワークでは、ジャイロ効果を確認することが出来なかった。工具の限界から、回転数を上げて慣性モーメントを大きくすることが出来ないことも原因であるが、特に、ジャイロ効果は加工力を加えた瞬間しか発生せず、すぐに効果がなくなってしまう性質が、連続的に加工力が発生する旋削加工には向かないことがこの加工法における最大の問題点だと考えられる。

しかし、薄物の変形しやすいワークに対して、連続的ではなく断続的に、つまり、力を瞬間的に何度も加えるような加工法に於いては効果があるのではないかと考えられる。工具性能の向上によって切削速度を大きくすることが出来るようになれば、難削材ディスクに対しても適応できるようになる可能性もあると思われる。

2.3 サンプル加工と評価

2.3.1 目的

本研究で開発した加工法を用いて実スケールディスクのサンプル加工を行い、その出来栄を評価する。

2.3.2 目標

実スケールディスクのサンプル加工により、タービンディスクと同等の加工精度が確保出来ることを検証する。

2.3.3 内容

本年度はサンプル加工の材料としてチタン材とインコネル材を用い、それぞれ異なる形状を設定し、ディスク加工の後その評価を行う。

以下にその詳細を記述する。

2.3.4.1 加工材料、および形状

サンプル加工には、航空機エンジン用タービンディスクに使用される材料である Ti-6Al-4V と、INCONEL718 を使用し、形状も実際のエンジンの物を模擬した形状とした。使用した素材、および、加工形状を図 2.3.4.1.1 および図 2.3.4.1.2 に示す。内径、および片面の一部は治具にあわせて予め立形旋盤で加工を行っており、ここを基準面として用いる。



Fig2.3.4.1.1 サンプル加工用素材

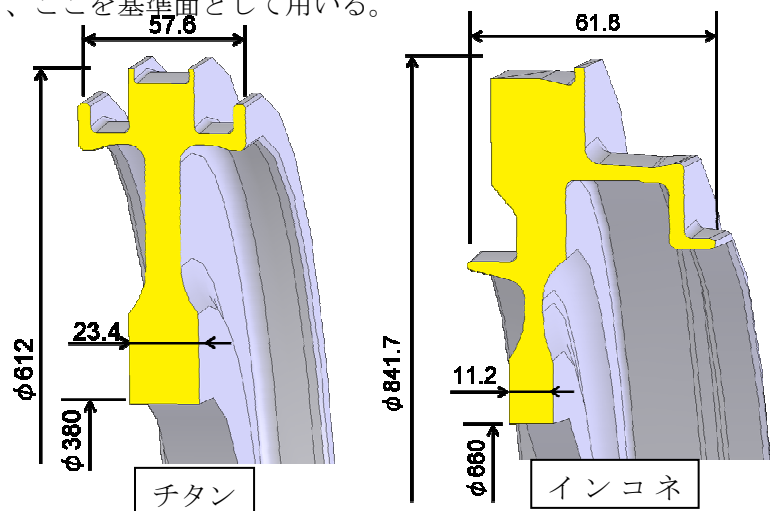


Fig.2.3.4.1.2 加工形状

2.3.4.2 サンプル加工

本加工法により、難削材のディスクに対して高精度に複雑形状を加工できることを実証するため、マンドレル治具を用いてディスクにサンプル加工を行った。歪みのない加工の精度の目標として、寸法を $\pm 0.1\text{mm}$ 、高い精度が要求される継ぎ手部の平面度を 0.025mm とした。

2.3.4.2.4 チタンディスク再加工

クランプによる歪みを小さくするためには、加工に必要な最小限の力でワークをクランプする必要がある。そのためには、実際に生じる加工力、治具の把持力を明らかにする必要がある。

1) 加工力の測定

加工力を明らかにするため、3成分切削動力計(KISTLER 9257B)を使用して測定を行った。実験装置を図 2.3.4.2.4.1 に、測定結果を示す。

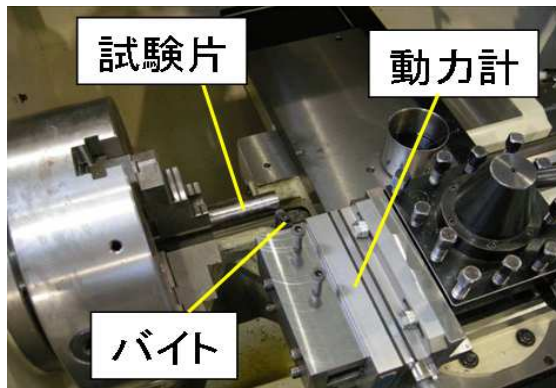


Fig. 2.3.4.2.4.1 実験装置

ディスク接線方向の力は主分力、ディスク側面に垂直な力は側面加工時は背分力、端面加工時は送り分力に相当する。そのため、測定結果より接線方向には 300N、側面に垂直な方向には 350N の力に耐えればよいことになる。法線方向にはディスクは完全に拘束されているため、考慮する必要がない。

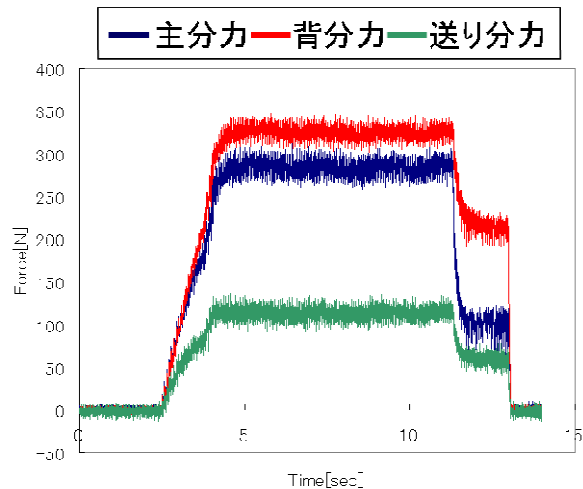


Fig. 2.3.4.2.4.2 加工力

2) 治具の把持力の測定

今回加工するディスクは内径に対し、非常に厚みが薄い形状であるため、側面一点に力がかかり傾くようなずれが生じた場合やディスクの一部が歪んでずれが生じる場合などを考えると、把持力は単純な計算では求められない可能性がある。今回は、ディスクを側面から加工する場合に生じる背分力がこの力にあたる。そのため、ディスク側面に負荷を与え、ずれが生じる加重を測定により求めた。測定結果を図 2.3.4.2.4.4 に示す。

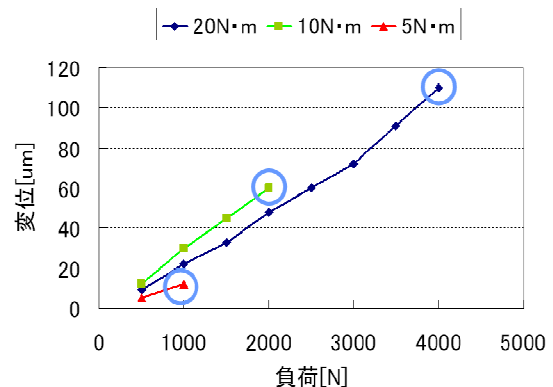


Fig. 2.3.4.2.4.4 測定結果

3) 加工・および測定

加工条件は前回と同様だが、追加鋼による検証が可能のように完成形状に対して 1.2mm 残して加工を行った。今回は、一工程ごとにディスクの振れを測定しながら加工を行ったが、その際の振れは最大で 0.02mm 程度であった。また、この振れも切り込み量を 0.05mm として仕上げ加工を行ったところ、0.001mm 程度になった。

前回と同様に、治具にディスクを取り付けた状態で測定を行ったところ、精度が問題となる継ぎ手部の平面度は0.018mm程度であった。これは、図2.3.4.2.4.5のような変形が見られたためである。調整を行い、再加工を行ったところ、継ぎ手部の平面度は0.007mmとなった。1.2mm残して加工を行っているため、前回よりも変形しにくくはなっている物の、それを考えても十分小さな値となり、高い精度を得ることができたといえる。

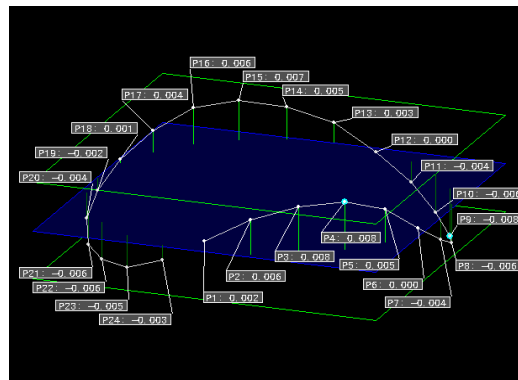


Fig. 2.3.4.2.4.5 ディスク歪み

2.3.4.2.5 インコネルディスク加工

チタンディスクでは、歪みの少ない高精度な加工が可能であることが実証できた。インコネルディスクでも同様に歪みの少ない高精度な加工が可能であると考えられる。

1) 加工中のずれ

チタンディスクの時と同様、加工力と側面からの力に対する耐荷重を測定し、加工を行った。また、加工中のずれを監視するため、渦電流式変位計を使用し、NR-600でずれを監視、記録しながら加工を行った。

しかし、側面を加工中、ディスクがコレットから抜ける方向にずれたため、加工を中断した。そこで、調整して再加工を行ったが、再び側面を加工中にディスクにずれが生じた。変位計の記録より、側面を加工中、徐々にずれていったことが分かった。これにより、何らかの要因によって瞬間的に加工力が大きくなるなどが原因でずれが発生したわけではなく、通常の加工力によってずれが生じたことが分かる。ずれが生じた原因としては、加工力が動力計で事前に測定した加工力よりも大きかった可能性、静止状態で測定した側面からの耐荷重が回転状態ではより小さくなる可能性が考えられた。

2) ずれへの対策

側面への力に対する耐荷重の再測定、加工力の再測定より、このままの状態では必ずずれが発生し、加工が行えないことが分かった。加工条件を大幅に落として加工すればずれの生じない条件もあると考えられるが、生産性に大きく影響を及ぼすことが考えられ、また、突発的なチップング等が発生すれば大きな力が発生してディスクがずれる可能性がある。このため、強制的にずれを抑える方法として、あて板を製作し、加工を行うこととした。

このあて板とコレットの段差と板の間でディスクを挟み込んで拘束し、ずれを防ぐようになっている。左側面を加工する際にはこのあて板が邪魔になるが、左側を加工しているときはコレットの段差に押し当てられる方向に力が働くため、無くてはずれが生じないと考えられるため、取り外しておく。

3) 対策後の加工・測定

あて板を使用した状態で加工を行った。変位計を使用してずれを監視しながら加工を進めたが、前回のようになぜか大きなずれは生じなかった。

加工後、治具に取り付けたまま測定を行ったところ、平面度は 0.011mm となっており、治具から取り外すと 0.028mm となった。目標としていた 0.025mm に対してはわずかに及ばなかったものの、以前の加工より大幅に歪みを抑えることができ、高い精度を得ることができた。

2.3.4 評価

チタン製のディスクにおいては、十分にクランプ歪みを低減することができた。治具から取り外す前でも寸法に若干の誤差は残っている。しかし、治具から取り外したときのクランプによる歪み、寸法変化が十分に小さいため、取り外す前にタッチプローブを用いた機上測定を用いて追い込み加工を行えば高い寸法精度を得ることができると考えられる。

インコネル製ディスクにおいては、目標にわずかに及ばなかった物の、高い精度を得ることができた。チタンに比べて、加工力がきわめて大きいことに加え、ワークのサイズも大きく。また、左右非対称形状でコレットとの接触幅も半分以下とチタンと比較して格段に難しい条件だったと考えられる。

ずれを防止するあて板を追加したことにより、より小さな内張力で加工することも可能であると考えられ、その場合はさらにクランプによる歪みが小さくなるため、目標の平面度 0.025mm を達成することも可能であると考えられる。

あて板を追加したため、完全に無人運転とはいかず、途中で一度あて板を外す行程が必要なる。しかし、大きな力を発生する切り込み方を避けるような加工パスの設定や、適切なチップの寿命管理を行えば、あて板なしでの加工が可能な可能性もある。

第3章 新複合加工技術開発

3.1 複合加工プログラムの開発

3.1.1 目的

複合加工機にワイヤー放電加工ユニットを搭載し、機内でタービンディスクのブレード溝を加工するハイブリッド工法のためのプログラムを開発する。

3.1.2 目標

外径・両側面の加工完了したタービンディスクに複合加工機のミル主軸に取り付けた放電ユニットを駆動させ、ブレード溝をワイヤー放電にて加工する加工プログラムを作成する。

3.1.3 内容

本手法に於いて、ツリー形状をワイヤー放電加工にて行う際に使用するのが複合加工プログラムである。放電加工においては、複合加工機のミル主軸に取り付けた放電ユニット全体を XY 平面上で動かし、ワイヤー加工を行う構造になっているため、複合プログラムを作成するには特殊な知識は必要としない。また、通常の放電加工では放電の条件等もプログラムに含まれるが、今回、本手法で用いる装置に於いては、複合加工機と放電加工の電源は独立しているため、複合加工機側のプログラムには記述しない。放電加工の条件などは、放電の電源側に直接入力して設定するようになっている。加工する目標の形状を図 3.1.3.1 に示す。

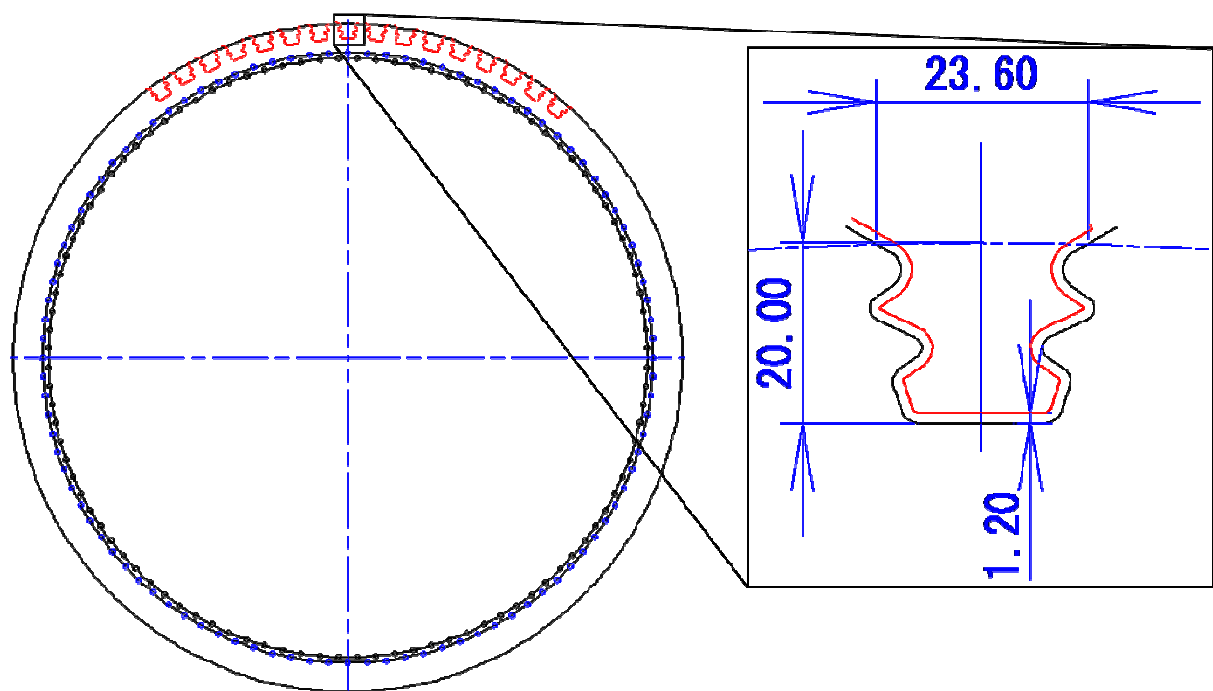


Fig. 3.1.3.1 ツリー溝加工図面

実際に同条件でディスクにテスト加工を行って測定を行い、放電加工時の加工溝幅を測定した。測定より、目標形状より、総形カッターの仕上げしろと加工溝幅を考慮し、1.2mm 内側にオフセットした形状を加工軌跡とし、この図面を放電加工用の CAM を使用して G コードに変換した。

3.1.4 まとめ

複合加工プログラムの開発においては、既存の機械の送り装置を用いるため、特別な方法等を用いること無しに、ワイヤー放電加工を行うプログラムを開発することが出来た。

3.2 連続加工技術と評価

3.2.1 目的

複合加工機で旋削されたディスクを最終工程まで一連の加工を行い、連続複合加工が可能であることをテストにて確認する。

3.2.2 目標

連続加工したワークの加工精度、表面品質が確保されていることを確認し、連続加工技術に目処を立てること。

3.2.3 内容

複合加工技術は、旋削加工を終えた後のワイヤー放電加工によるツリー溝の荒加工、側面への穴加工、総形カッターによるツリー溝の仕上げ加工の3つの要素技術から成っている。それぞれの技術を開発、検証し、連続加工が可能な複合加工への道筋を立てた。

3.2.3.1 ワイヤー放電加工によるツリー溝加工

従来、タービンディスクのツリー溝はブローチ盤とブローチを使用して加工していた。しかし、ブローチは専用設備であり、保有できる企業は限られている。また、ブローチも消耗品でありながら非常に高価である。そこで、通常の複合加工機に放電加工機を組み合わせることでツリー溝を加工することができれば専用設備を持ってない企業でも加工が可能になり、コストの削減も期待できる。

機内、および機外にワイヤー放電加工用の放電加工ユニット、加工液槽、放電電源、加工液の供給タンク、ワイヤユニットを設置し、インコネル製ディスクに放電加工を行った。

1) 加工準備

ワークとワイヤー電極の間にアーク放電を飛ばして加工を行う放電加工では、ワークと機械を絶縁しておく必要がある。これにより、治具の振れを4/100mm程度に抑えることが出来、絶縁も確認できた。更に高い精度が必要な場合はより高精度、高剛性な絶縁材料を使用して絶縁材を製作するか、振れからツリー溝加工の位置に補正を掛ける等の方法が考えられる。

前回加工時は、放電ユニットの先端に接続された放電の給電線が加工槽に干渉するなどしてユニットの動きを妨げ、ワイヤーが切断される原因となったり、加工の形状精度が悪くなったりといった現象が見られた。そのため、今回は、給電線を最も剛性の高いユニットの根本に接続し、通電駒まで引き回した。このことにより、給電線の干渉や張力によって放電ユニットの動きが妨げられることを避けられるようになった。

2) 加工

放電加工ユニットを使用して、インコネル製ディスクに放電加工を行った。加工条件を以下の表 3.2.3.1.1 に示す。総形カッターで仕上げるための取りしりを 1mm、ワイヤー径および放電ギャップの幅を考慮して 0.2mm、合計 1.2mm オフセットした状態でプログラムを作成、加工を行った。

Table 3.2.3.1.1 ワイヤー加工条件

Workpiece material		INCONEL718
Workpiece thickness	mm	23.6
Feed speed	mm/min	1.35
Wire diameter	mm	0.3
Wire material		Zn Coated Brass

単純な長方形形状を加工して精度を確認した後、ツリー形状の加工を行った。ワイヤーは断線することなくツリー形状の加工に成功し、その後ディスクを 5 度ずつ割り出しながら計 16 箇所につきツリー形状を加工した。ツリー溝 1 箇所あたりの加工時間は 55 分であった。

3.2.3.2 側面への穴加工

マンドレル治具と複合加工機を使用し、ディスク側面に穴加工を行う。複合機による穴開け自体には特段新しい技術というわけではないが、旋削による形状加工後、そのままワンチャックで穴加工を行うことが出来るため、高精度な穴開けが期待できる。また、ディスクの左右両面の穴開けを同行程で行うことも出来るため、穴同士の位置度も高い精度で実現することが期待できる。

穴は 6.2mm のリーマー穴で、3.6 度ごとに 100 個、表裏で計 200 個を加工した。それぞれの穴は、φ 5.5mm の超硬ドリルで下穴加工を行った後、φ 6mmR1 のラジラスエンドミルで中仕上げを行い、φ 6.2mm のリーマーで仕上げを行った。加工条件を表 3.2.3.2.1 に示す。

Table 3.1.3.2.1 穴開け加工条件

Tool		Drill	Radius Endmill	Reamer
Workpiece material		INCONEL718		
Tool material		Cemented Carbide		
Tool diameter	mm	φ5.5	φ6 R1	φ6.2
Cuttin Speed	m/min	18	15	15
Feed rate	mm/rev	0.12	0.1	0.1

右側面の穴は深さ 12.5mm で、100 箇所を開けるのにかった時間は約 2 時間、工具の交換なしに加工を終えることが出来た。裏側の穴は深さ 3.8mm で、100 箇所を開けるのにかった時間は約 40 分で、同様に工具の交換なしに加工を完了した。穴の表裏にカエリが生じたが、後工程で行った面取りによって除去することができ、面取りによる 2 次カエリもなかった。ピンゲージにて穴の確認を行い、精度に問題がないことが確認できた。加工が完了したディスクを図 3.2.3.2.1 に示す。

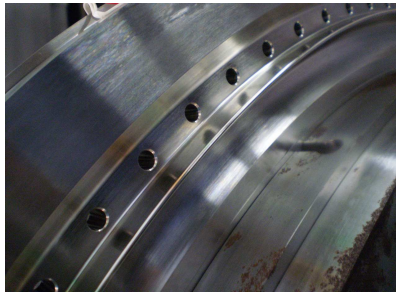


Fig. 3.2.3.2.1 側面穴開け加工

3.2.3.3 総形カッターによるツリー溝仕上げ

ブレードを保持するツリー溝には高温下で非常に大きな遠心力がかかるため、高い形状精度に加え、加工変質層が少ないことが要求される。本手法ではワイヤー放電加工によりツリー溝の荒加工を行うが、これらの要求を満たすため、

仕上げ加工として総形カッターによる仕上げ加工を行う。放電加工の後、ミル主轴に総形カッターを取り付け、ディスクを割り出しながら連続的に加工を行う。

今回は、放電加工で残した取りしろを荒取り用、仕上げ用の2本の工具を用いて加工した。加工条件を表 3.2.3.3.1 に示す。

Table 3.2.3.3.1 総形カッター加工条件

		Rough	Process
Number of flutes		2	4
Cutting Speed	m/min	15	
Feed speed	mm/min	5	
Cutting width	mm	1	0.3

中仕上げ、仕上げと加工を行い、本手法を用いてツリー溝の仕上げ加工を行うことが出来ることが確認できた。加工中の様子を図 3.2.3.3.1 に示す。しかし、加工を進めていったところ、3回目の加工を行っている頃からワーク全体に大きなびびりが発生しはじめた。工具を観察したところ、逃げ面に非常に大きな摩耗が見られたため、工具を交換して加工を継続した。

加工終了後の加工面の様子を図 3.2.3.3.2 に示す。エッジ部にバリが発生しており、特にアップカット方向で加工される面に大きなバリが発生していることが分かる。逆に、ダウンカット方向で加工される面では表面が荒れているが、アップカットで加工される面には光沢がある。これは一般的なエンドミル

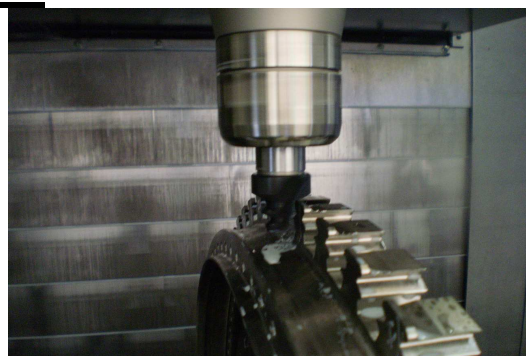


Fig3.2.3.3.1 総形カッターによる加工



Fig3.2.3.3.2 バリの発生

にも見られる傾向である。

今回は発生したバリをダイヤモンドヤスリを使用して取り除いた。

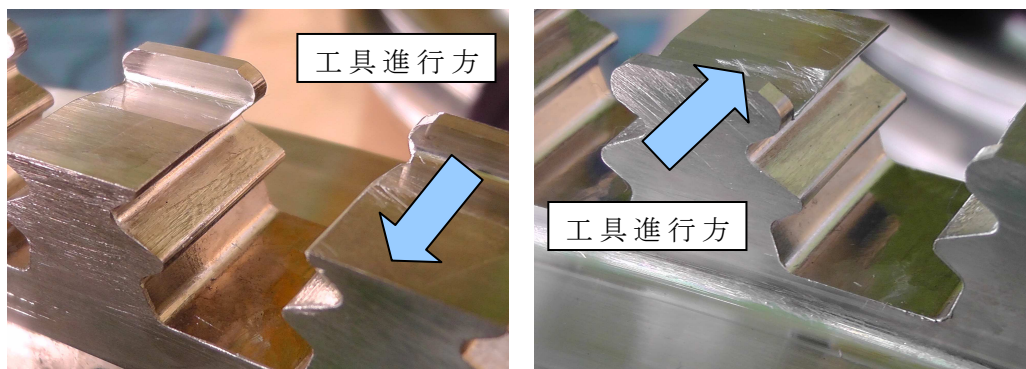


Fig. 3.2.3.3.3 加工面品

3.2.4 評価・考察

連続加工を行う上で必要な要素技術である、放電ユニットによるワイヤー放電加工、側面への穴開け加工、総形カッターによる加工が可能であることを実証でき、連続加工への道筋を立てることが出来た。

1)放電加工

ワイヤーの断線無しに連続してツリー形状の加工を行うことが出来ることができ、総形カッターによる仕上げ加工の前加工としては必要十分な精度を得ることのできる、連続加工に使用可能な手法を開発することが出来た。実用化という観点から見ると次のようにいくつか課題も残っているが、いずれも解決可能な物であると思われる。

加工速度が 1.35mm/min と遅いことに関しては、試作主体で使用する場合には問題ないと考えられるが、加工速度が求められる場合はより適切な加工条件を探し、放電電源と複合加工機が連動して送り速度のフィードバック制御できるようにすることなどが必要になると考えられる。

現在は放電加工を行う前の加工水槽の設置や放電ユニットの取り付けに人手と時間がかかっており、実際に連続加工を行う段階では能率の悪化や無人運転への障害につながる。しかし、例えば水槽の壁を容易に倒せるような構造にしておけば、水槽本体を乗せたままでも加工が可能になり、放電加工を行う度に水槽の取り付け取り外しをしなくても良くなる。また、放電ユニットに関しても、ATCによるツールマガジンへの収納は無理でも、機内にラックのような構造を設けておけば自動交換が可能になり、無人運転も可能になると考えられる。また、現在は水槽を設置して浸漬式での放電加工を行っているが、吹き掛け式の放電加工を用いることでより小型の放電ユニットを開発することも出来るのではないかと考えられる。

実際のディスクでは、ツリー溝はディスクに対して傾いて設けられていることも多い。複合加工機のミル主軸には細かく角度を割り出す機能はないため、放電加工ユニット自体に角度を調整する目盛等を設けることにより、このような形状にも対応できると考えられる。

2)穴加工

マンドレル治具を使用しての側面への穴加工については、今回のディスクでは問題なく目的を達することが出来、連続加工に十分使用可能であると考えられる。

しかし、今回のディスクの直径では問題がなかったが、より小さな径のディスクの加工やより内径近くに加工をすると、主軸頭とマンドレル治具のシャフトが干渉し、加工が出来ない。この問題は、アングルヘッドを導入すれば解決可能である。また、今回は芯間が 4m ある複合加工機を使用し、マンドレル治具も全長 2.6m ある物を使用していた。この目的は主に側面への穴開け時に主軸頭が入るスペースを確保するための物であったが、アングルヘッドを使用すればこのような干渉の問題はなくなり、より小さな機械、より小さなジグでの加工も可能になると考えられるため、加工機の設置スペースの削減や、ジグの小型化による精度の向上、段取りの負担削減等の効果も期待できる。

3)総形カッターによる加工

マンドレル治具を使用して総形工具により、ディスク外周部ツリー溝の仕上げ加工を行えることが確認でき、連続加工にも使用可能であると考えられるが、いくつか課題も残っている。

今回の加工では、数パス加工ただけで工具の逃げ面に大きな摩耗が発生し、ワーク全体に大きなビビリが発生した。特に逃げ面は強くこすれたような擦過痕が残っていた。このような摩耗の原因としては、ジグの固定方法を含めた全体の剛性が影響しているのではないかと考えられる。今回、放電加工の後に総形工具による加工を行ったが、両端のチャッキング部に絶縁のためのガムテープを貼り付けたままであった。そのため、工具に対するディスクの固定の剛性が低下し、切り込みに対してワークが逃げて逃げ面と摩擦し、急速に摩耗が進行した可能性が考えられる。また、このような加工状態になっていた場合、インコネルが大きく加工硬化を引き起こして工具の摩耗につながった可能性も考えられる。そのため、工具の摩耗を防ぎ、安定した加工を行うためには系の剛性が高い状態で加工する、また、加工硬化を引き起こしにくい状態で加工を行うことが必要であると考えられる。また、今回は総形工具による削りしろを 1mm(片側 0.5mm)として加工を行ったが、放電加工による加工変質層は通常数十 μm であるため、削りしろをより小さくすることで、工具の摩耗を防ぐことが出来ると考えられる。

総形工具による溝加工では、工具の両側で切削が行われ、片方はアップカット、もう片方はダウンカットとなる。今回は、加工面はアップカットになる面の方が良好な粗度が得られていたが、反面、バリの発生は大きく、ダウンカットではその逆の現象が発生していた。ツリー溝には良好な面が要求されるため、バリの発生はあるものの、アップカットの方が向いているのではないかと考えられる。そのため、総形工具での加工に於いては、一度で両面を加工するのではなく、溝の片面ずつを加工すれば良好な仕上げ面が得られると考えられる。また、ダウンカットで面が荒れた原因としては、工具の摩耗が大きかった可能性も考えられるため、摩耗が発生しにくい状態で加工を行えばバリの発生が少ないダウンカットで加工を行うことが出来る可能性もある。

第4章 工具寿命延長技術の開発

4.1 セラミック工具及び最新コーティング工具の加工条件の確立

4.1.1 目的

耐熱合金の加工において、被削性と加工条件の悪さから全体の加工コストの約30%を工具費が占めている。さらに加工時間も一般的な加工に比べかなり長いことから、トータルコスト増大の大きな要因となっている。

昨年度までの研究では、被削材はワスパロイ、使用インサートをSiALONに限定してテストを行い、良い結果が得られていたが、本研究では同じニッケル基合金で航空機部品に多用されているインコネル718について、ターニング加工における被削性やセラミック材質の相性などについて研究を行い、適切な加工条件を見出していく。

4.1.2 目標

セラミック工具での加工によるコスト削減

4.1.3 内容

本研究においては、インコネル718を被削材として、ターニングでのセラミック工具を使用した加工を行い、①インコネル718を使用したSiALONでの検証、②セラミック材種の違いによる検証、③刃先処理の違いによる検証の3つについて、試験を行うこととした。

4.1.3.1 インコネル718を使用したSiALONでの検証

航空機部品に使用されるニッケル基合金として、代表的なのがワスパロイとインコネル718である。昨年度までの研究として、被削材をワスパロイに限定してテストを行い、比較的良い結果が得られていたが、インコネルでも以下の条件でテストを行い、ワスパロイを切削した時との比較検証を行った。(Fig.4.1.3.1.1, Fig.4.1.3.1.2 参照)

	SiALON 材種
使用チップ	RNGN120700T01020:CC6060 (ネガタイプ)
クーラント	通常クーラント (1.0MPa) +外部給油
周速	150~400m/min (50m 毎)
送り	0.18mm/rev
切込	1.0mm

Fig.4.1.3.1.1 加工条件



Fig.4.1.3.1.2 加工方法

上記の条件で1パス（約3分～4分）加工した其々の材種の摩耗状態が下図である。（Fig.4.1.3.1.3 参照）

Fig.4.1.3.1.3は被削材（インコネル 718）を SiALON セラミックチップで切削したときの、チップの摩耗状況は拡大写真を見る限り大きな欠損は見られず、条件アップと共に摩耗量も増えていくという良好な摩耗のように見える。しかし加工中の切削音は 300m/min から擦れた音になり、切屑が切れず巻き付きも発生した。さらに切削面のテーパ量（切削スタート地点と切削終了地点の直径寸法差）が 0.2mm 近くと非常に大きくなっており、ワスパロイでの切削試験のような良好な結果は得られなかった。

4.1.3.2 セラミック材種の違いによる検証

インコネル 718 の切削性の相性を確認するため、以下の条件を設定し、同条件下での Whisker と SiALON の切削性の検証を行った。（Fig.4.1.3.2.1 参照）

	Whisker	SiALON
使用チップ	RCGX090700T01020:C670	RCGX090700E:C6060
クーラント	通常クーラント（1.0MPa）+外部給油	
周速	300m/min	
送り	0.18mm/rev	
切込	1.0mm	

Fig.4.1.3.2.1 加工条件

加工方法は 4.1.3.1 と同様で、上記の条件で 1 パス（約 3 分～4 分）加工した其々の材種の摩耗状態が下図である。（Fig.4.1.3.2.2 参照）

Fig4.1.3.2.2 より、摩耗具合を見る限り、SiALON の方が磨耗が平均的で、境界磨耗が大きい Whisker に比べると良好のように見える。しかし加工中の切削音については、前述したとおり擦り音の大きい SiALON に対し、Whisker に関しては擦り音は確認できなかった。また切削面のテーパ量も SiALON の 0.18mm に対し、Whisker は 0.12mm と少なかった。

4.1.3.3 刃先処理の違いによる検証

セラミックインサートの刃先処理には、E：ホーニング処理 と T01020：面取処理 の 2 種類ある。4.1.3.2 の切削テストでは、Whisker は T01020、SiALON は E を使用していたため、今回のテストでは以下の条件を設定し、Whisker・SiALON 各々について、刃先処理の違いによる検証を行った。（Fig.4.1.3.3.1 参照）

使用チップ	Whisker	RCGX090700E: 670	RCGX090700T01020: 670
	SiALON	RCGX090700E: 6060	RCGX090700T01020: 6060
クーラント	通常クーラント（1.0MPa）+外部給油		
周速	300m/min		
送り	0.18mm/rev		
切込	1.0mm		

Fig.4.1.3.3.1 加工条件

加工方法は 4.1.3.1 と同様で、上記の条件で 1 パス（約 3 分～4 分）加工した其々の材種の摩耗状態と加工結果が下図である。（Fig.4.1.3.3.2, Fig.4.1.3.3.3, Fig4.1.3.3.4 参照）

インサート	①	②	③	切削面テーパ量	備考
RCGX090700T01020: 6060	0.78mm	1.14mm	0.12mm	0.43mm	
RCGX090700E: 6060	0.38mm	0.37mm	0.16mm	0.18mm	
RCGX090700T01020: 670	0.65mm	0.20mm	0.19mm	0.12mm	幅0.65mm
RCGX090700E: 670	0.53mm	0.22mm	0.19mm	0.07mm	幅0.66mm

Fig.4.1.3.3.4 逃げ面磨耗と切削面テーパ量

Fig.4.1.3.3.2 及び Fig.4.1.3.3.3 からわかるように、刃先処理に関係なく、磨耗量は Whisker より SiALON の方が大きくなっている。Fig.4.1.3.3.4 に逃げ面磨耗と加工後の切削面テーパ量を示

しているが、Whisker 及び SiALON 共に、E（ホーニング処理）の方が T01020（面取処理）に比べテーパ量が少なかった。テーパ量の大きさはセラミック材種の違いだけではなく、刃先処理の違いによっても差が出る事がわかる。

4.1.4 結果

被削材をインコネル 718 に限定して試験を行った結果、SiALON に関してはワスパロイで試験を行った昨年度までとは、大幅に異なった結果となった。これは同じニッケル基合金ではあるが、インコネルの方がワスパロイに比べ硬く粘いために、切削性が悪くなったと考えられる。材種を Whisker に変えてテストした結果、境界摩耗は発生するものの、逃げ面摩耗量は安定しており、SiALON より良好な結果が得られたことから、被削材の違いにより相性があることがわかった。一方、刃先処理の違いについては、T01020（面取処理）より E（ホーニング処理）は磨耗量は少なく、切削面テーパ量も抑えられていた。

4.1.5 成果

インコネル 718 では、SiALON よりも Whisker の方が、切削性に関しては良好な結果が得られている。但し、SiALON の方は靱性が無く硬いため、耐摩耗性に関しては有効である。SiALON は Whisker に比べコストパフォーマンスに優れている為、荒加工は SiALON、中仕上げは Whisker というように、使用条件等によって使い分けることで加工を安定させ、更にトータルコストを抑えていくことができる。使用工具の逃げ面の摩耗が進んでいくと切削径の寸法変化（テーパ形状に取り残しができる）が起きるため、仕上げ加工の削り代を一定にするにはあらかじめ摩耗量による寸法変化を考慮して切込量を変化させて行く様な加工プログラムの検討が必要になる。更に、使用箇所・使用方法によって仕上げ加工への検討も可能と思われるが、実際の部品を加工する際は、設備選定・治工具等の剛性などに注意する必要がある。

4.2 クーラント技術の向上

4.2.1 目的

旋削加工において、一般的に外部給油といわれているクーラント圧は約 1MPa、高圧クーラントといわれているクーラント圧は約 7MPa である。高圧クーラントによるメリットは以下のような点が期待できる。

- 1) 切削熱の低減
- 2) 切削抵抗の軽減
- 3) 切屑処理の改善

昨年度の研究では高圧クーラント下での旋盤加工時のセラミック工具について検証を行ったが、被削材をワスパロイに限定して行っていた。ワスパロイでは SiALON による検証で良好な結果を

得ていたが、今回 4.1 項での検証でもわかるように、被削材とセラミック材種の相性があることがわかっていることから、被削材にインコネル 718 を使用し、高圧クーラント下での工具寿命について検証する。

4.2.2 目標

高圧クーラント下でのセラミック工具の寿命安定化（旋盤加工）

4.2.3 内容

被削材をインコネル 718 に限定し、旋盤加工で高圧クーラントを使用した場合の、①SiALON と Whisker の違いの検証、②切屑厚みの違いによる検証、の 2 つについて行う。

4.2.3.1 SiALON と Whisker の違いの検証

被削材：インコネル 718

使用インサート：RCGX090700E: 6060 及び RCGX090700E: 670

Vc（周速）：300m/min

Fn（送り）：0.18mm/rev

Ap（切込）：1.0mm

上記の加工条件での、加工後のインサートの状態と切屑の状態を下図に示す。

(Fig.4.2.3.1.1, Fig.4.2.3.1.2 参照)

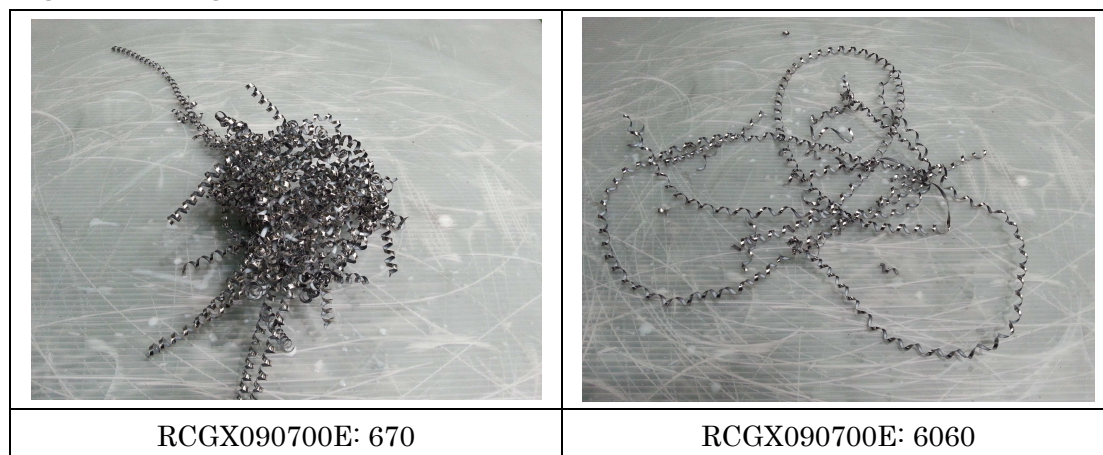


Fig.4.2.3.1.1 切屑の状態

Fig.4.2.3.1.1 から、切屑については Whisker、SiALON の両方とも分断されず、伸びた状態になってしまった。ワスパロイと異なる結果が出たことから、インコネル 718 の材質特性（硬く粘い）が起因しているものと思われる。但し、Fig.4.2.3.1.2 から摩耗状態は、高圧クーラントにすることにより、どちらも安定しており、特に Whisker の方が安定していることがわかる。

4.2.3.2 切屑厚みの違いによる検証

使用インサート： RCGX090700T01020: 670

Vc (周速)： 250m/min, 350m/min

Fn (送り)： 0.10mm/rev

Ap (切込)： 1.0mm

上記の条件にて加工を行い、加工後のインサートの状態と切屑の状態を下図に示す。

(Fig.4.2.3.2.1, Fig.4.2.3.2.2 参照)

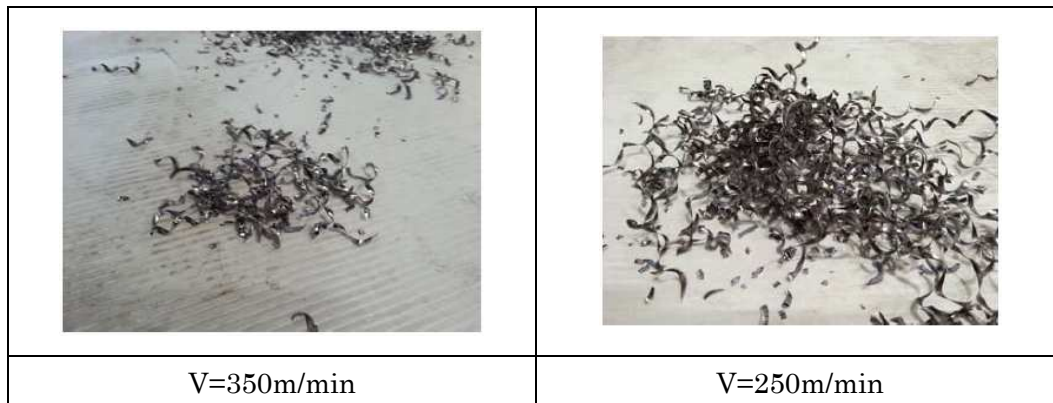


Fig.4.2.3.2.1 切屑の状態

Fig.4.2.3.2.1 から、周速をあげて送りを遅くし、切屑厚みを薄くすることで、インコネル 718 は 7MPa でも十分切屑は分断できている。Fig.4.2.3.2.2 から、境界摩耗はかなり大きくなっているが、逃げ面摩耗は周速に関係なく、ほとんど変わらなかった。

4.2.4 結果

インコネル 718 では、ワスパロイと違い材質特性 (硬く粘い) から、同条件でもインサートの材質に関係なく、7MPa では切屑は分断されなかった。そこで周速を上げて送りを遅くし、切屑厚みを薄くしたことによって、7MPa でも十分に分断できることを確認した。但し、Fig.4.2.3.2.2 でもわかるように、条件によって著しく境界摩耗が大きい状態になる為、切削距離等を考慮する必要がある。

4.2.5 成果

高圧クーラントの使用により、切屑は分断されインサートの摩耗も軽減されることがわかった。但し、ニッケル基合金の中でも被削材との相性、特に切屑処理については、被削材にあった加工条件・使用するインサートを決定する必要がある。

4.3 表面品質の測定・評価技術

4.3.1 目的

旋削加工において、一般的にセラミックインサートは荒加工に使用される場合が殆どであるが、4.1 項や 4.2 項の加工結果を基に表面品質を検証し、安定した加工を実現する。

4.3.2 目標

セラミック加工後の表面品質の検証と、仕上加工への多様化による加工時間の削減

4.3.3 内容

被削材：インコネル 718

使用インサート：RNGN120700E: 670

Vc (周速)：400m/min

Fn (送り)：0.18mm/rev

Ap (切込)：1.0mm

切削範囲：φ400 → φ50

切削長が増えるに従いインサートの摩耗具合は増加、表面もむしろ等（○部）の発生度合いが大きくなっている。面粗さも切削長とともに増加しているが、φ75 付近でも Ra=0.99μm と非常によい結果がでた。

4.3.5 成果

表面粗さに関しては、一般粗さであればセラミックインサートでも十分に使用可能と判断する。但し、ワークや治具の剛性、設備等の選定によりかなり左右されると思われる。使用条件・使用箇所・安定化を十分に検討する必要があるが、切削長を限定して使用することにより、仕上での使用も可能であり、加工時間の短縮も見込めると考える。

切削長を限定して仕上げ加工にセラミックを使用することで、その後に荒加工用として使用することもできるので、1 個のチップでの切削長を大幅に増やすことも可能であり、トータル工具費の低減が可能となる。

第5章 全体総括

5.1 複数年の研究成果

本研究では『加工歪を生じない航空機タービンディスクのハイブリッド加工技術の開発』をテーマとし、複合加工機にハイブリッド機能を搭載した設備を開発、工程集約により内張りワンチャック加工で難削材複雑形状薄のタービンディスクを全加工するため、3つの開発テーマを掲げテストを重ねて来た。

以下にその初年度から最終年度に渡る、各開発テーマに対する研究成果を記述する。

5.1.1 外径両側面の連続加工工法の開発（ジャイロ工法の開発）

横型5軸複合加工機を用い、3連続加工で両端面及び外周の連続加工工法の研究開発を目指し、加工精度、表面品質の向上とともに、トータルコストの50%低減を目標とする。

5.1.1.1 マンドレル治具の開発

- ・目標：内径加工されたタービンディスクの内径にマンドレル式のシャフト治具を開発すること。

初年度はタービンディスク用治具開発の第1段階として、想定される原寸の1/4スケールの縮小版ワークを用いて治具の開発に着手し、SUS304の被削材（t40×Φ260）のディスクを試作し、基本機能テストではマンドレル治具内での焼きつきが発生したが、改造再試作を重ね、マンドレル治具の有効性を確認した。

次に原寸大ディスク用マンドレル治具を設計・製作し、研究設備（Mazak INTEGREX e-650H-S II）使用しての高速回転予備確認を実施。マンドレル治具の性能として、タービンディスクと同等の形状及び重量のワークをマンドレル治具に串刺しセットし、内張りで高速回転に耐えうる十分な保持力があることを確認した。またCADによるミル主軸の加工シミュレーションを行い、側面からの加工も可能であることを確認し、マンドレル治具に対する基本技術に目途がついた。

次年度より製作したマンドレル治具を使用し、高速加工による加工精度の確保について研究を進めた。加工中の治具の変形によるタービンディスクに振れが起こり、治具で固定している部分と加工部の同軸精度が一定しない現象が起こった。

マンドレル治具は中央部でボルトによる3部品組立構造になっており、インロー部を作り一体構造にしているが、組立後の治具の同軸度が0.02~0.04あり、回転中に振れ止めを受けている部分の振れが増幅される現象が起きたため、以降に行う実ワークの加工ではマンドレル治具精度の向上の必要性が生じた。

最終年度では、治具の振れ対策を行い、剛性と利便性を向上させた。

このマンドレル治具を用いて、実スケールのチタン材とインコネル材のディスク加工により、最適切削条件、寸法精度の確認とともにマンドレル治具の有効性、利便性を確認した。

本研究におけるマンドレル治具の開発としては未だ若干の改善すべき所はあるが、横型串刺し方式によるディスク加工治具としてはほぼ完成したと判断する。

5.1.1.2 高速回転によるジャイロ効果を用いた切削加工の開発

- ・目標：高速回転でワークを内張り保持し、外径及び両端面の3ジョブを同時、連続加工を行いチャッキングによる歪み、加工中のビビりのない切削を目指す。

高速回転中のジャイロ効果確認のためにミニチュアの検証治具を製作し確認実験を行った。この実験により、高速回転中に切削力を軸方向に掛けると、回転中のプレートに力が加わり回転中のプレートにたわみが発生するが、高速回転で発生するジャイロ効果により円板のたわみが抑制されていることが確認できた。

H24年度は大型航空機用のタービンディスクを想定して、歪みを起こさない連続加工の研究開発を進めていった。大型タービンディスクの加工においては、材料が耐熱合金でありジャイロ効果が十分に発揮できる回転数まで切削スピード(回転数)を上げることが出来なかった。高能率加工を行うためには重切削が必要であり、切削力に対応したワークの把握力に設定が必要となりジャイロ効果が少なくなる。またジャイロ効果のみでのディスク加工では切込量が上げられないので、加工時間が大幅に増加しコスト低減に繋がらないため、実ワーク加工においては、マンドレル治具による保持力で加工中の製品に歪みが起きないように切削する技術の確立を優先し、歪みの起きないタービンディスクの高能率加工を実現させた。

5.1.2 新複合加工技術開発

複合5軸加工機にワイヤー放電加工機能を追加したハイブリッド複合機を開発し、タービンディスクにブレード取付溝をワイヤー放電加工にて行うハイブリッド加工工法の研究開発を行う。さらに、成形されたカッターで溝仕上げ加工を行い、タービンディスクの全工程をワンチャックで行う。

5.1.2.1 ワイヤー放電加工機能搭載の複合加工機の開発

- ・目標：複合5軸加工機にワイヤー放電加工機能を追加したハイブリッド複合機の開発
- 複合加工機の主軸にワイヤー放電のユニットを取付け、ワイヤーの送り装置を複合加工機の外に設置し、さらにワイヤー加工用の加工液タンクを製作し、複合加工機にタンクを取り付けることにより、ワイヤー放電加工ユニット搭載のハイブリッド複合機を実現させた。旋削加工、フライス加工、穴あけ加工等の切削加工用の複合加工機にワイヤー放電機能を付加した、ハイブリッド複合加工機が出来上がった。

5.1.2.2 複合加工プログラムの開発

- ・目標：タービンディスクにブレード取付溝のハイブリッド加工プログラムの開発

複合加工機にマンドレル治具に取り付けたタービンディスクを複合加工機にセットしワイヤー放電加工機を使った溝加工テストを行い、溝の加工を実現した。大きなワイヤーユニットを主軸で保持して、X軸及びY軸をNC制御して溝の加工を行ったため、溝のつなぎ部分では少しのミスマッチがあったが荒加工レベルでは全く問題ない精度に加工出来た。NCプログラムは切削加工プログラムと同様なプログラムで有り、ワイヤー放電加工条件を事前に

ワイヤー放電加工機で検証した。本研究においてワイヤー放電による荒加工後の溝仕上げ加工は成形カッターにて行う予定であり、ワイヤー放電加工による変質層の除去も出来るため、品質の確保も出来る。

H24年度は実ワークを複合加工機にワイヤー放電加工機能を持たせ、複雑なクリスマスツリー形状の放電加工プログラムを開発し、耐熱合金のワイヤー放電加工に於ける適正条件の設定を進めていった。

ワイヤー放電加工中の加工液の温度上昇が起りやすく、連続加工においては加工液対策が切削条件のアップに非常に重要であることが分かり、今後のハイブリッド複合加工機の開発の重要な要素が明確にできた。

5.1.2.3 連続加工技術と評価

- ・ 目標：タービンディスクにブレード取付け溝をワイヤー放電加工にて行うハイブリッド加工のサンプル加工を実施する。ハイブリッド加工のサンプルの加工精度、表面品質の確保、加工コストの評価を行う。

本年度は川下企業より、航空機エンジンに使用されているタービンディスク材を購入し、加工工程の設計、工具の選定、切削条件の設定等を行い、加工プログラムの開発を進めた。被削材はコンプレッサー側ディスクがチタン(Ti-6Al-4V)材、タービン側ディスクがインコネル 718 材で其々の加工プログラムを開発し加工を行った。

加工手順はマンドレル治具取付け部の内径加工後は、治具に取り付けた状態で、内径基準面以外のすべての加工を行い完成させることを目指した。

第 1 工程旋削荒加工で、ディスクの左右及び外径を連続加工し、その後に旋削仕上げ加工し次に穴開け加工を行い、最後に取付け溝加工を行う手順で加工を進めた。荒の旋削加工において、高能率加工のセラミック高速加工技術を取り入れた。

本研究において研究したインコネル材においては、工具の消耗が激しいため、クリスマスツリー形状の荒加工をワイヤー放電加工で行い、仕上げ加工を成形カッターで連続して加工出来る技術は小ロットの加工品、試作開発品においては、高価なブローチカッター無しで安定した溝加工が出来ることが証明出来て、非常に有効な加工技術となる事が証明できた。

5.1.3 工具寿命延長技術の開発

一般的に難削材の切削加工における工具寿命は大きな課題である。

セラミック材質工具、加工条件の確立、クーラント技術、工具寿命の低下原因解析、表面品質の測定・評価技術を開発する。工具寿命を 2 倍に延長を目標とする。

5.1.3.1 セラミック素材工具、加工条件の確立

- ・ 目標：ニッケル基合金テストピースの加工により工具寿命が最大となる最適切削条件を見つめる。ウイスカタイプセラミックを使用。コストダウンのため新型セラミックチップのテストも行い比較検討。

初年度の研究でセラミック素材工具の使用と、高圧クーラント下での超硬工具の使用による適切な加工条件を見出して、加工時間を低減させる分析、実験を行った結果、以下の成果が得られた。

- 1) セラミック素材工具を用い、ニッケル基合金テストピースの加工を実施し、工具寿命に影響する要素について基礎データが得られた。セラミック素材工具を使用した場合、工具の磨耗・欠損の発生原因を切削条件、工具の選定方法、加工パスの3方向から分析した結果、切削条件と加工パスを改善することで安定した切削時間が得られ、境界磨耗も安定することが確認された。工具寿命が最大となる最適切削条件を検証できた。
- 2) 外部給油（1 MPa）と高圧クーラント（7 MPa）の比較実験では高圧クーラントの使用により、加工条件を2倍にしても支障なく加工出来ることが確認された。

次年度では、耐熱合金のセラミック加工における切削テストによりウイスカタイプセラミックによる加工とサイアロンタイプのセラミック加工の比較テストを実施した。ウイスカタイプは欠けに対しての強度があると言われているが、コストが高いため本テスト加工において加工比較した結果、ニッケル基耐熱合金のワスパロイ加工において、サイアロンタイプセラミックの寿命が優れている結果が出た。

5.1.3.2 クーラント技術

・目標：クーラント加工による切屑処理の表面品質の確保の研究開発を行う。

セラミックによる高速切削中に、切粉が工具に巻き付き切削液が刃先に届かなくなり、刃先の摩耗が早くなることが分かっている。この切粉巻き付きを防止するために高圧クーラントを、刃先の切削点に高圧で吹き付けることにより、切粉を細かく切断することが出来、切粉の巻き付き防止が出来ると、工具寿命が大幅に伸びる。本研究においてはセラミックチップの材種による違いについてもテストを行った結果、境界磨耗が起きやすいウイスカーセラミックの方が切粉の切断がされやすくなった。摩耗した部分で切粉が折れやすくなっていると考えられ、超鋼チップの様なブレーカーを付けることが出来れば切粉が細かくなり、高圧クーラントと同じ効果があるが、セラミックチップにチップブレーカーを付けられないのが現状である。また切削液の噴射角度も切粉の切断に大きな違いが起こる。

5.1.3.3 表面品質の測定・評価技術

セラミック高速加工においてはセラミックチップの金属表面への付着等が発生し、加工面のザラツキが発生しやすく、工具寿命が低下する。加工表面の金属組織の変化、チップの溶け込みが考えられる。金属組織の分析等原因解析と表面品質の測定、評価を行い工具寿命の延長、品質向上を図る。目標値：工具寿命を2倍に延長できること。

セラミック加工後の表面のザラツキを調べると、工具摩耗が進むほどに、加工面の表面に付着物が付き加工後の表面がざらついている。ざらついた面をペーパー加工すると、きれいになれるため金属組織の変化ではない。結果から推定すると、加工中に逃げ面が摩耗して行くときにセラミックが脱落して、高速加工中に加工面に付着していると推定される。工具寿

命の延長のためには、セラミック加工の連続加工を行う時に切れ刃の後ろに、加工面を磨く事が出来るペーパーのようなものを取り付けて、セラミック加工後に磨いて表面の付着物を除去することで、チップ交換までの加工回数を増やすことが出来ると推定する。

5.1.4 研究成果のまとめ

本研究では「加工歪を生じない航空機用タービンディスクのハイブリッド加工技術の開発」をテーマとし、要求品質確保や低コスト化等、現状市場で抱えている多くの課題に対して、新しい加工方法の研究に2年半の間取り組んで来た。

主要テーマとしては、1台の複合加工機で、タービンディスクの様な薄肉複雑形状のワークをワンチャックで全周加工からブレード溝のワイヤー放電加工及び総形加工、側面の穴あけまで総ての工程を行うというものであるが、串刺し状態にして加工する方法は従来に無い画期的な方法と言える。

先ず本加工方法の中心となる治具については、外周チャックによる歪の発生問題を解消し、タービンディスクの要求品質を満たす寸法精度が確保出来ることが証明できた。

また実用性に向け、シャフト部の共用化と共に取付けユニットのモジュール化を図り、治具脱着の簡便化、治具費の削減に道筋を立てることもできた。

若干の改造の余地はあるが、今後も研究を重ねワークに見合った治具を追及することにより要求品質に答え得る汎用機治具の実用化が期待される。

次に開発したマンドレル治具を用いてのタービンディスクの加工テストではチタン材とインコネル材の2種類のサンプルで実際にはほぼ等しい複雑形状で行うことで、より実践的なデータが得られた。残念ながら工具の制約条件からジャイロ効果が十分に発揮できる回転数まで切削スピード(回転数)を上げることが出来なかつたため、今回の研究ではジャイロ効果を見込んだ加工方法は見出せなかつた。

しかしマンドレル治具にセットしたままワンチャックで全工程の加工を行うことにより、工程間の段取り替えの省略で無人化が現実的なものとなり、また外径チャックによる加工に見られる歪変形の課題も内張り方式では適正な内張り力(切削に耐えうる最小の力)で加工することにより寸法精度の確保が可能であることが証明できた。

複雑形状で加工時の応力が大きい場合はワークのズレの可能性があるため、治具にウレアテの補強を施す等の対策が必要なことも分かり、実用化のための問題点とその対応方法がより明確になった。

一方、ワイヤー放電加工機能搭載の複合加工機の開発に於いては本研究用複合加工機にワイヤー放電加工機能を搭載し、タービンディスクの外周にツリー溝を加工すると言う、これも従来に無い画期的な加工方法と言える。

実際の加工テストではインコネル材のディスクに対しツリー溝の加工を連続で行い、加工速度は通常のワイヤー加工に比べ劣るものの、面粗度及び寸法精度については後工程の総形加工を行うことを考慮すると実用的には十分条件を満たしている。

加工テストでは1つの溝加工に約50分を要し、全箇所加工では2～3日かかることになるが、今回は加工出来る最小条件下でのテストであり、装置の改善により少なくとも1.5倍の加工スピードは望める。特に試作品などの1品物の加工に対しては、無人化で連続加工が出来、ブローチ加工を必要としない当加工方法は有効であると言える。

工具寿命延長技術の開発ではセラミック素材工具、加工条件、クーラント加工による切屑処理の表面品質確保の研究により有効なデータが得られた。

これらの一連の研究結果により、当初のテーマである「加工歪を生じない航空機用タービンディスクのハイブリッド加工技術」の開発に一応の目処が立ったと言える。

5.2 研究開発後の課題・事業展開

前述の通り、本研究テーマに対しての道筋は出来たが、実際の実用性と言う面ではまだまだ多くの課題も残されている。

今回の研究では精度面ではほぼクリアできたが、航空機用タービンディスクでは最高レベルの安全性が要求されるため、内部残留応力の問題やマイクロ組織に至るまで現状加工法との同等性が求められる。

本加工法の実用化までには未だ多くの検証のためのテストと加工実績が必要であり、JIS-Q-9100を初めとする認証取得や体制づくりにあと2～3年は必要と思われるが、開発された加工法は航空機用タービンディスクに限らず一般のディスク加工に対しても有効なものであるため幅広い分野での活用が見込まれる。

従ってその間、本研究用の複合加工機を有効活用しながら残された課題について継続研究を進めると共にセミナーや展示会の出展参加での情報収集及び関連川下企業への積極的訪問を通じて、本研究及び事業内容を広くPRし事業化の糸口を探る。

幸い本研究を通じ協同研究機関である東京農工大との太い繋がりが出来たことで、今後も情報交換や人事交流など協力体制について多いに大いに期待できる。

事業の展望について、道のりは未だ遠い感はあるが研究期間中と同様、毎年度の目標・計画を立て地道な取り組みと共に、進捗フォローを繰り返すことで事業化の実現を目指す。