

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「ガスタービンエンジンの難削材複雑形状部品の加工技術
の高度化の研究」

研究開発成果等報告書

平成24年3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

戦略的基盤技術高度化支援事業
「ガスタービンエンジンの難削材複雑形状部品の加工技術の高度化の研究」
平成23年度成果報告書

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 研究実施場所	3
1.4 研究体制	4
1.5 成果概要	8
1.6 当該プロジェクトの連絡窓口	10

第2章 タービンプレード用の円筒治具固定法の開発

2.1 円筒治具固定法(又は角型治具固定法)による治具の開発	11
2.1.1 治具の製作及び検証	11
2.2 円筒治具固定法又は角型治具固定法の評価	17
2.2.1 連続研削及び高効率研削技術の開発	17
2.2.2 高効率研削工法の実証	19

第3章 ブレード両端固定とサポート工法の研究開発

3.1 両端加工の翼面サポート平面治具の開発	21
3.1.1 平面治具の製作及び検証	22
3.2 タービンプレード両端(ルート部、シュラウド部)と翼面サポート加工工法の研究	25
3.2.1 セラミックチップ及び多刃カッターによる高効率加工の研究	25
3.2.2 両端固定とサポート工法の研究	26
3.2.3 自動サポート工法の研究	27
3.3 高能率研削アタッチメントの研究開発	28
3.4 次世代ブレード研削工法のプログラムの開発	29
3.4.1 高能率研削アタッチメント研削加工	29

第4章 全体総括

4-12年間の成果とりまとめ	31
----------------	----

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・目的

タービンプレードは複雑形状で安定した加工が難しい、また品質確認に時間が掛かるため新技術の採用が進まず、コスト低減が進んでいないために我が国の競争力が低下している。今後、大幅な増加が見込まれている航空機エンジン市場において競争力を強化するために、本研究で新加工技術を研究開発し、安定した品質を確保し、コスト1/2を実現して、国際競争力の強化につなげる。

1.2 研究開発の目標

航空機用ガスタービン及び発電用ガスタービンのタービンプレードは、重要部品であるために従来工法からの変更が難しくコスト低減が進みにくい。また形状が3次元の複雑形状で難削材が使われており加工方法の変更はネックになっている。このタービンプレードを次世代工法、新保持具、新工具、新設備等を研究開発し無人化の連続加工を可能にして、コストを1/2にする事により、圧倒的競争力を付けて、川下企業ニーズに答える。

航空機用タービンプレードは基準ピン方式の治具に固定し、平面研削盤でルート部及びシュラウド部を加工しているが、保持力が弱いため高効率加工を行うと、精度にバラツキが出る。

発電用のタービンプレードは加工方法の改善が進まず国内メーカーの競争力が低下して新規受注が伸びていない。このためコスト低減のための新加工法の開発が待たれている。

上記の課題を解決するために下記の研究開発を行う

(ア) 航空機用タービンプレード

現在、航空機エンジン用のタービンプレードは精密鋳造されたブレード素材を基準ピン方式の治具にセットして6～8工程に分けて、平面研削盤でルート部及びシュラウド部の研削加工がおこなわれている。

川下企業の課題として、基準ピン治具では素材のバラツキ等によりクランプ時に歪みが発生しやすく、品質確保のために正確な位置決め及び固定が出来る治具の開発が必要となっている。また多工程にわたり取付け取外しを行うために精度のバラツキも発生しやすいために改善が必要になっている。

本研究ではブレード加工時間内（サイクルタイム内）にタービンプレードを歪みなく正確に固定出来る治具、固定媒体及び装置を開発する。さらに開発した固定治具を使用して、高能率な研削加工技術を研究開発して、加工時間を30%短縮する。

高効率研削技術としてハイパー研削技術の開発を行い、研削焼けを起こさない研削技術を開発する。新規開発の平面研削盤の砥石フランジより高圧クーラント、冷却空気等の供給技術の研究開発により、高効率で安定した研削を実現させる。

(イ) 発電用大型タービンプレード

発電用の大型タービンプレードの加工時間短縮のために、横型マシニングセンターと複合加

工機による高能率加工及びブレード保持具を研究開発する。さらに翼面サポート工法による翼面切削加工、翼面研削加工、研削アタッチメント及び NC プログラムの研究開発により翼面切削加工から研削加工までを連続して行い、翼面磨き工程の機械化を実現させる。この技術により、手仕上げによる磨き加工の無人化が可能となり、連続無人加工が可能になる。

研削アタッチメント設計データ(CADデータ)に基づいた研削プログラムの開発を行い、シミュレーションによりプログラムの検証を行う。さらに、研削砥石カバーの開閉の連動化を検討し、プログラマブル砥石カバーの研究を行う。

これらの技術により熟練作業を汎用型の複合加工機により加工し、大幅なコスト削減、工期の短縮を図りながら、品質を向上させて高効率化につなげる。

1.3 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

株式会社ナサダ（最寄り駅：JR姫路駅）

〒670-0944 兵庫県姫路市阿保甲1-1

株式会社ニートレックス本社（最寄り駅：JR武豊駅）

〒470-2343 愛知県知多郡武豊町字小迎184番地

国立大学法人東京農工大学

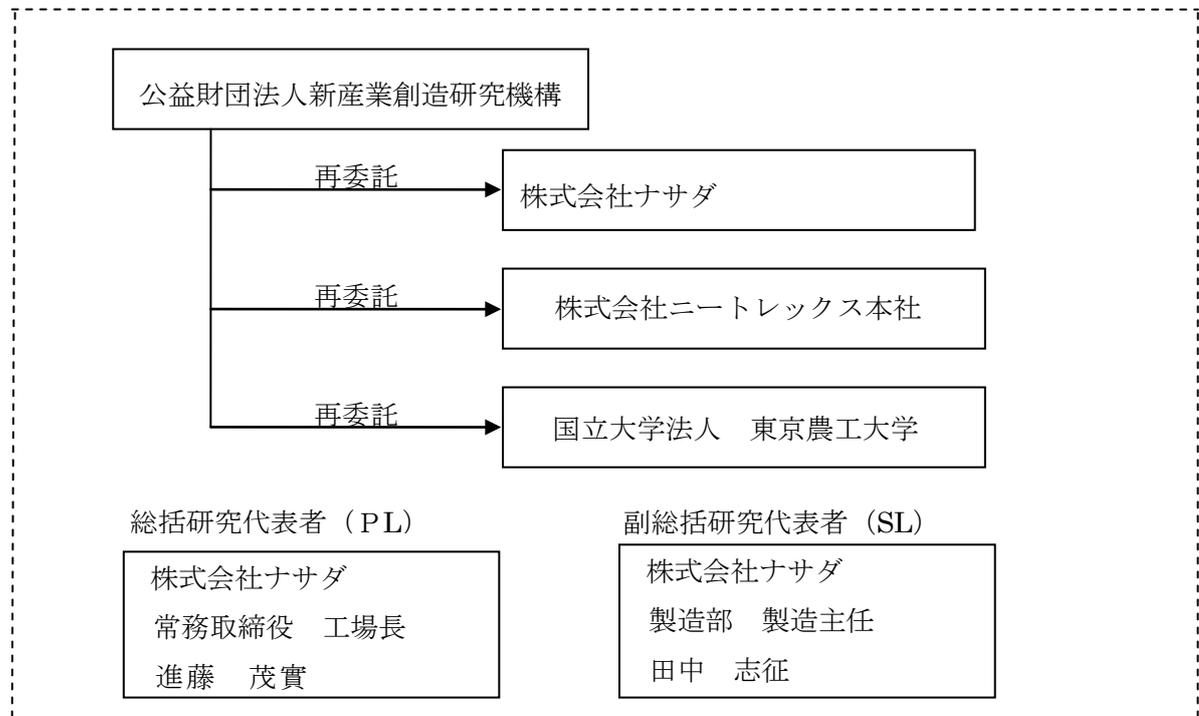
〒183-0057 東京都府中市晴見町3-8-1

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

1.4 研究体制

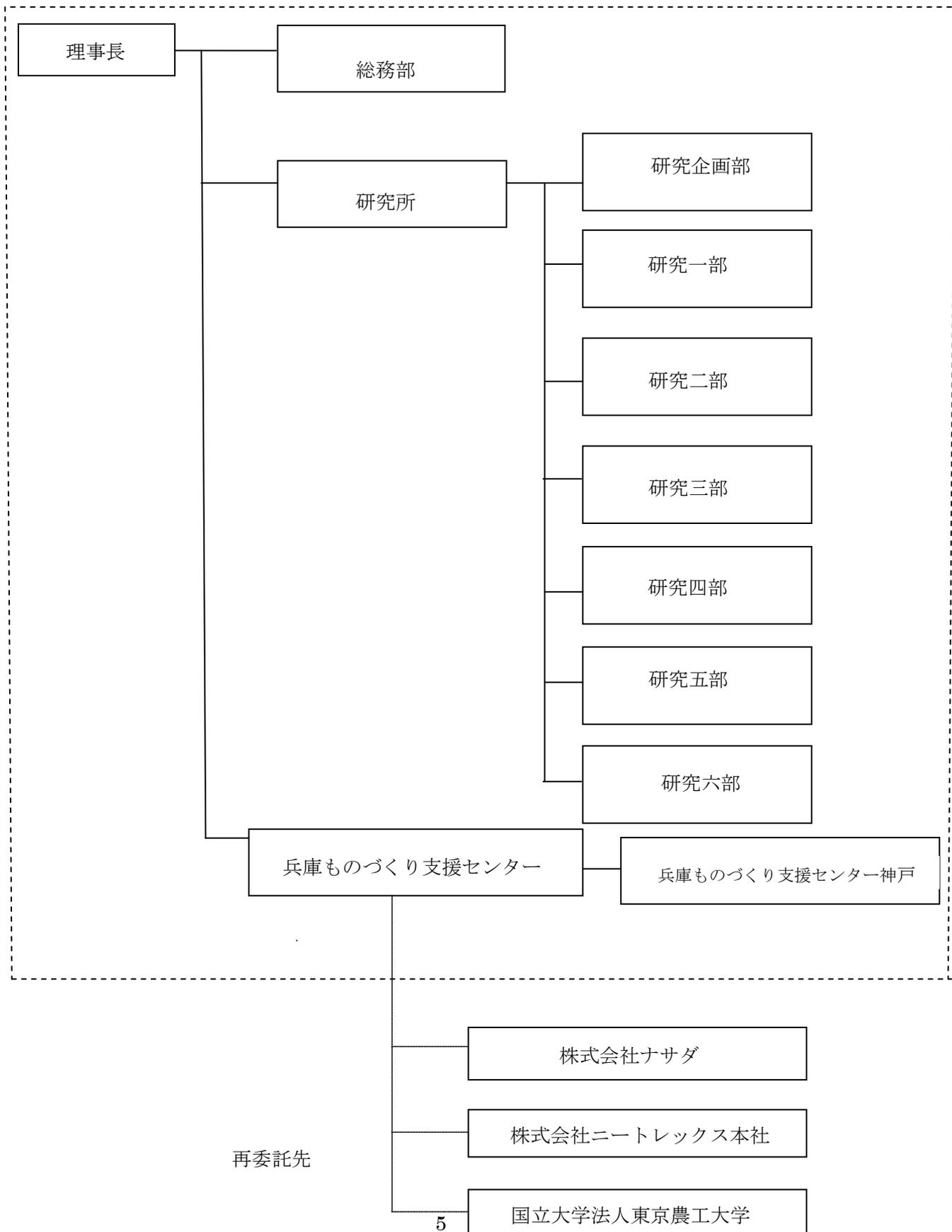
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



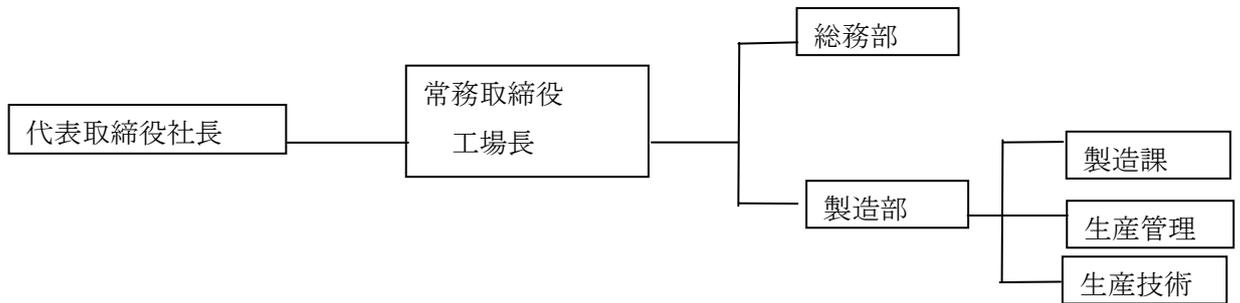
2) 管理体制

① 事業管理者 [公益財団法人新産業創造研究機構]



②（再委託先）

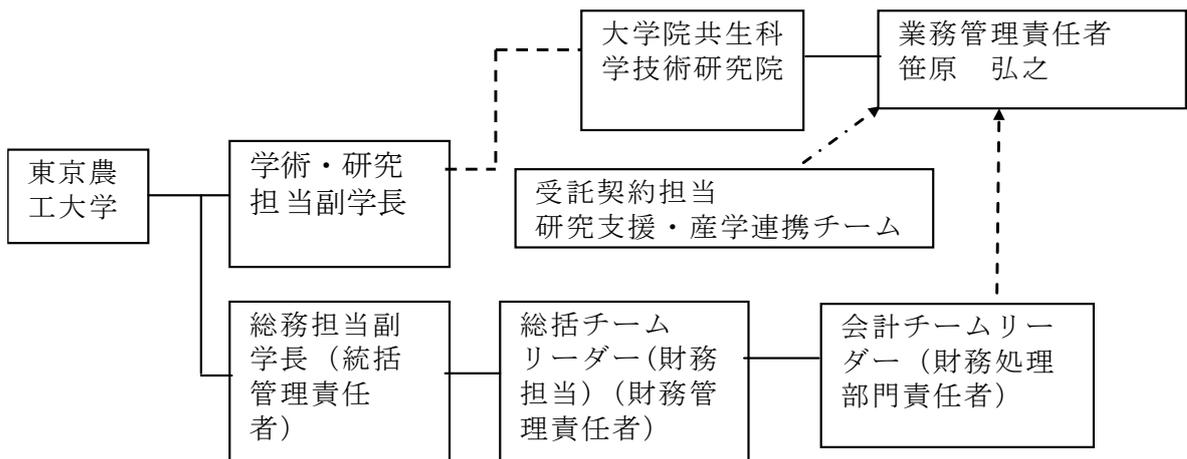
株式会社ナサダ



株式会社ニートレックス本社



国立大学法人東京農工大学



(2) 研究員及びプロジェクト管理員

【総括研究代表者（PL）】（プロジェクト管理員）

氏名	所属・役職
進藤 茂實	株式会社 ナサダ 常務取締役 工場長

【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
山中 啓市	研究所 研究五部担当部長兼兵庫ものづくり支援センター神戸研究 コーディネーター
山口 寿一	兵庫ものづくり支援センターコーディネート部長兼連携グループ長

【再委託先（研究員）】

株式会社ナサダ

氏名	所属・役職
進藤 茂實 <再>	常務取締役 工場長
本田 和志	製造部 製造課長
千葉 豪一	製造部 生産管理グループ長
田中 志征	製造部 生産技術主任
中務 信也	製造部 生産技術主任
長久 宗徳	製造部 生産技術

株式会社ニートレックス本社

氏名	所属・役職
成田 潔	技術研究部長

国立大学法人東京農工大学

氏名	所属・役職
笹原 弘之	大学院共生科学技術研究院 教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【管理法人】

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
 研究五部担当部長 兼 兵庫ものづくり支援センター神戸
 研究コーディネーター 山中 啓市

【再委託先】

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

株式会社ニートレックス本社

(経理担当者) 経理部 経理部長 太田 勝
 (業務管理者) 取締役 武田幸久

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

①研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
進藤 茂實	株式会社ナサダ 常務取締役 工場長	PL
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	SL
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	
成田 潔	株式会社ニートレックス本社 技術研究部長	
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	

1.5 成果概要

本研究は、「ガスタービン用タービンプレード」及び「ジェットエンジン用タービンプレード」の製造コストを 1/2 にするために「円筒治具固定法による治具の開発」「円筒治具固定法又は角

型治具固定法の評価」「翼面サポート治具の開発」「翼面サポート治具による新加工工法の研究」「高効率ハイパー研削技術の確立」を進め、川下企業に提案できるブレード保持具及び新加工技術の開発を進めてきました。

研究においては非常に高度な加工技術、加工治具、研削アタッチメント等の研究開発が出来る、さらに東京農工大学による評価が進み、効果の確認出来て大きな成果が得られ事が実証できて、当初の目標を達成出来た。さらに川下企業へのアピールが出来たことにより、事業化の可能性が非常に高まってきた。

1.5.1 タービンプレード用の円筒治具固定法の開発

タービンプレードの保持具の開発と開発した保持具でタービンプレードを固定し、高能率高精度加工を行う技術の開発を行った。

① タービンプレードの固定に水崩壊樹脂による固定技術の開発を進めて、加工応力に対し十分な保持力の確保及び、加工後の剥離方法の研究開発を行い、樹脂固定によるブレード保持技術の確立が出来た。

② 保持力の評価方法の検証を行い、樹脂使用量をできるだけ抑えるための実験を行い、切削加工に対応出来る、水崩壊性樹脂の接着面積を決定できる条件を確立した。

③ 航空機用のタービンプレードの研削保持具の開発において、翼面を歪みなく樹脂で固定して研削できる治具を開発し、高精度の保持が可能になった。

④ 高効率ハイパー研削技術の研究開発を進め、大型タービンプレード翼面研削加工法を確立した。

⑤ 研削加工における切込、送り等のパラメータ毎の研削テストの評価を行い、従来の切削加工法を研削加工で行うことを実現し、研削加工による翼面粗度の向上が出来て、手仕上げの廃止可能となった。

⑥ 従来の研削加工条件に比べ、ハイパー研削による研削焼けの防止、砥石目詰まり防止効果が大きく、研削条件の送り速度、最大 8000mm/min が可能であることを実証した。

1.5.2 ブレード両端固定とサポート治具工法の研究開発

翼面サポート平面治具の開発を行い、歪みなく保持し、加工応力に十分耐えられる治具構造を確立させ、高能率加工を行い、さらに翼面と治具の接着に水崩壊性樹脂を使用し、固定して加工後の治具からブレードの取外しが、水につけるだけで出来る技術の開発を行った。

① 大型タービンプレード及び航空機タービンプレードの翼面を水崩壊性樹脂で治具に固定し、両端部(ルート部、シュラウド部)の切削加工及び研削加工を行う治具の構造を確立させた。

② 平面治具に基準ピンを設け基準ピンの周りに樹脂を流し込む構造にすることで、点でサポートする構造から、翼面全体でサポートする構造にし、ブレードの固定で歪みが起きない構造の治具が開発できた。

③ 平面治具にタービンプレードを樹脂で取付け、両端と翼面腹側の加工が同時に出来る治具を開発した。加工による切削力と樹脂接着面積の関連を実験で求め、必要最低限の樹脂の量

を決定出来るようにした。

④ 翼面加工中のブレードの撓み及び加工中のビビリ防止のためのサポート工法の開発を行い、サポート工法による歪み削減の効果を確認した。サポートのポイントを増やすと重研削に対応が出来、精度も向上できる。

⑤ 翼面の高効率研削のためのアングルアタッチメントの開発および、高効率研削加工を実施し、複雑な形状の翼面研削を可能にした。

⑥ 研削アタッチメントにハイパー研削を可能にする、内部クーラント供給構造を開発し、重研削加工を実現し、高能率研削技術を確立した。

本研究成果により、タービンブレード加工技術を高度化し、高能率且つ高精度加工を無人で連続的に行うこと出来る事が実証できた。この技術を製品加工に適用することで、コスト 1/2 が可能になる。

1.6 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

産学官連携推進員 山口 寿一

TEL 078-306-6800 FAX 078-306-6812

E-mail:yamaguti@niro.or.jp

第2章 タービンブレード用の円筒治具固定法の開発

2.1 円筒治具固定法（又は角型治具固定法）による治具の開発

2.1.1 治具の製作及び検証

2.1.1.1 目的

現状、ブレードを固定する方法は四角の枠に鉛系の低融合合金を鋳込で固定していた。低融合合金による固定方法は、鉛が人体に有害であり、後処理（酸洗い）に時間が掛かる。また基準ピン方式は拘束力が弱いために不安定であり、作業者の取り付け時の締付け力のバラツキで歪が出やすいのが欠点である。さらに高効率加工を行うと精度が出ない、保持具は複雑で高価である等の問題点がある。

本研究においてタービンブレードの翼部を保持してルート部及びシュラウド部の加工を行うときにタービンブレードを安定して固定させる治具の研究を行い、治具は安価で且つ保持力が高く、加工時間短縮、高精度加工を可能にする。

2.1.1.2 目標

現状の低融合合金鋼による固定法に比べ、治具コストが30%以上低減出来て、取付け取外し時間は同等で歪みを低減させる

2.1.1.3 内容

昨年度までに研究した円筒保持具においては、パテ状樹脂（室温硬化型エポキシ樹脂接着剤）による固定で切削に対応出来る事が実証する事が出来た。特に大型タービンブレードの樹脂固定はコストを抑えるために樹脂の使用量を抑える必要がありパテ状樹脂の使用と、治具構造の研究開発により、溝状のポケットに必要な量の樹脂を流し込み、タービンブレードを固定する事が出来る事が実証出来た。

川下企業からの課題として、固定媒体の硬化時間、剥離時間が加工時間内であるという条件が新たに出てきた。加工サイクルタイム内での固定（硬化）、剥離が出来れば、治具個数が最小限で押さえる事が出来る。

現状の川下企業における治具構造は「Fig. 2.1.1.3.1 鋳込み治具」又は「Fig. 2.1.1.3.2 基準ピン治具」が一般的に使用されている。鋳込み方式は鉛入りの低融合合金鋼のために使用制限されており鉛が含まれていることから人体へも有害である。その為、新規の航空用タービンブレードは基準ピン方式の治具が使用されている。

現状の基準ピン方式治具の課題は、製品を点（6点）で受けているためにクランプ力が強くなると、製品に歪みが発生しやすく製品精度に影響が出やすい。

この基準ピン治具は非常に高価で、作業中のクランプ力の変化で保持力が変化する事により、歪みが発生しやすく、クランプ力のバラツキも起こりやすく、精度維持に課題がある。

1) 現状の治具構造



Fig. 2.1.1.3.1 鑄込み治具

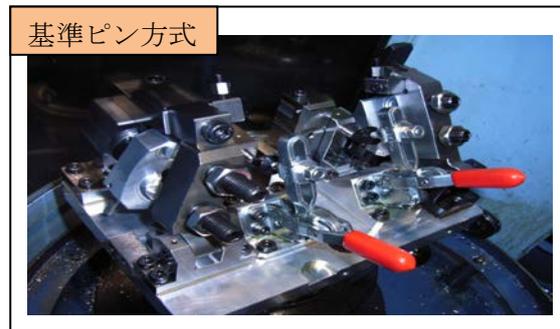


Fig. 2.1.1.3.2 基準ピン治具

本研究においては無公害で、再生可能な樹脂(リサイクル品を含めた樹脂)などによる固定法を実用化し高効率加工を目指す。特に、タービンプレード固定に使用する樹脂についての選定、試験、評価を行った。さらに切削加工の精度安定のための強度と加工後の製品と樹脂などとの分離について研究する。

2.1.1.4 樹脂選定

樹脂の選定については作業性の向上、固定媒体の硬化時間、剥離時間がサイクルタイム時間内であることを条件とし探求した結果、水崩壊性樹脂が本研究で最適であると判断し選定した。

2.1.1.5 樹脂試験

本研究では樹脂の硬化、剥離、強度、水崩壊について評価を行った。本樹脂は開発用であるため樹脂の基本スペックは存在するが、本研究の様な新規使用方法は初めてであり樹脂の評価試験が重要な課題となった。研究内容について以下に記す。

2.1.1.5.1 樹脂の接着強度の測定 (せん断強さ)

本研究では、樹脂のスペックである硬化条件 25°C/16h、70°C/3h の条件下で硬化時間を変えて樹脂を硬化させ、引っ張り試験機にてせん断強さを測定した。70°Cの条件においては加熱に電気炉を使用した。

2枚の板を樹脂で接着し、引っ張ることでせん断力を測定した。単位面積あたりの接着力を知るために接着面積が一定である必要がある。その為、接着時に片方の板にはアルミ箔に一定面積の穴を開けたマスクをかけ、片面では接着面積が一定になるようになっている。マスクをかけていない面の接着面積は不定になるが、マスクをかけた面の接着面積が狭く接着力が弱くなるため、マスク面から破断し単位面積あたりの接着力を測定出来ると判断した。治具には SUS303 板を使用。表面粗さは Ra=3.27μm、表面仕上げは酸洗いである。せん断強さの測定においては、オートグラフを用いた。

2.1.1.5.2 結果

室温の硬化においては 24 時間硬化させて最大で 7.5MPa 程度のせん断強さが得られた。また、16 時間硬化させた場合は 7MPa 程度であり、硬化の速度は非常に緩やかであることが分かった。

70 度で硬化させた場合、25MPa 程度のせん断強さが得られた。これは、接着面積 100mm²(1cm²) あたり約 250kgf のせん断力に耐えられる値である。5 時間の硬化で 25MPa に達するが、その後硬化時間を延ばしても値にほとんど変化はないことから 5 時間以上硬化させてもこれ以上強度は上がらないと推測される。接着面積を一定にするためのマスクは正常に機能し、剥離面は Fig2.1.1.5.2.3 のようにマスク部分で剥離した。



Fig.2.1.1.5.2.3 剥離面

2.1.1.5.3 樹脂の接着時間の短縮と強度の関係

本研究では硬化時間短縮を目的とし、硬化温度をスペック値の 70°C から 100°C、130°C へと硬化温度を上げた場合と硬化剤の混合比をスペック値の 100 : 5 から 100 : 10、100 : 20 と混合比を変更した場合の硬化時間と強度の関係の試験を行った。混合比を変化させる際の硬化温度は 70°C とした。試験材は及び治具は前項と同様である。

2.1.1.5.4 結果

硬化温度を変化させた場合は温度を上げる毎に硬化時間の短縮が可能になることが分かった。また、せん断強さは 25MPa 前後と 70°C 硬化と大きな差が出なかった。これは、本樹脂の上限を示していると考えられる。これ以上、硬化温度を上げて硬化時間短縮には結びつくが強度への変化は見られないと考えられる。続いて硬化剤の混合比を変化させた場合は最大接着力の低下、硬化時間を長くしても接着力の低下が見られた。

2.1.1.5.6 樹脂の接着強度の測定（剥離強さ）

剥離強さの実験を行った。治具の材質はせん断強さの実験と同じ、酸洗いの SUS303 板を同様にアルミ箔のマスクを使用して接着面積を一定にしている。

硬化は 70°C で 3 時間とした。また、接着部の中心と引っ張り力を加える点の距離は 55mm とした。治具をバイスに固定し、バネばかりを介して引っ張り力を負荷し、剥離する際の力を測定

した。硬化後、熱いまま引っ張り(条件①)、冷やした後引っ張り(条件②)、硬化後、冷やした後に1時間70度で再加熱(条件③)、同じく3時間再加熱(条件④)、硬化後、15分間水につける(条件⑤)、硬化後3時間水につける(条件⑥)、同じく5時間水につける(条件⑦)、以上の7条件において剥離に必要な力を測定した。

2.1.1.5.6 結果

実験結果を次の Fig.2.1.1.5.7.1 に示す。

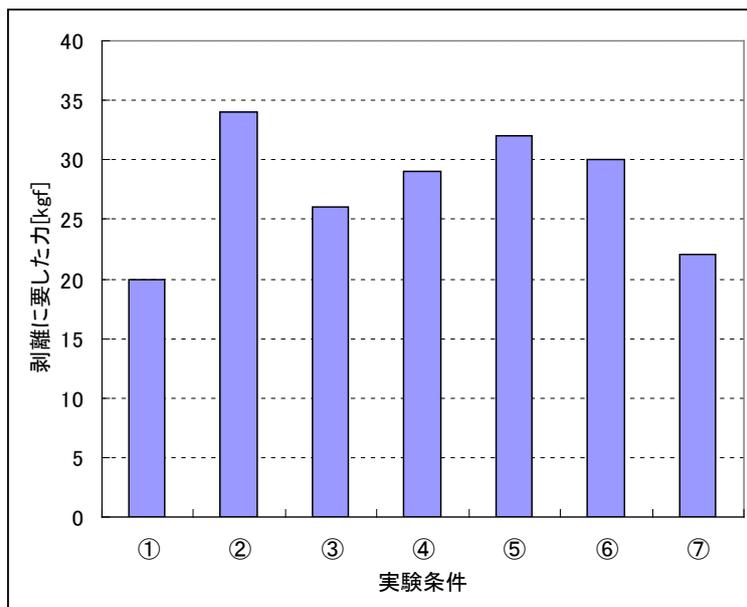
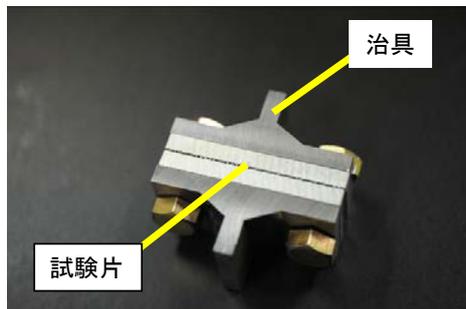


Fig.2.1.1.5.7.1 剥離試験の結果

硬化後、冷やしてから剥離させた場合(条件②)は、剥離に必要な力は **35kgf** であった。また、冷やさずに熱いまま剥離させた場合(条件①)は **20kgf** で剥離した。硬化後、水につけてから剥離させた場合、1時間では **32kgf**、3時間では **30kgf**、6時間では **22kgf** となった(条件⑤、⑥、⑦)。熱いまま剥離させた場合は、冷やした場合と比べて大きく剥離に必要な力が減少し、有意に差が出ているとみることができ、熱いまま剥離させるというのはある程度有効な手段であると考えられる。しかし、硬化後に再び熱を加えても崩壊はしなかった。これは、加熱温度が低かった可能性も考えられる。また、再加熱した場合は若干剥離に必要な力が減少した。しかし、再加熱時間を1時間から3時間と長くしても剥離に必要な力は減少してはいないため、再加熱によって、剥離に必要な力が若干小さくなる可能性はあるが、大きく減少させることはできないと考える。この差はバネばかりによる測定誤差の可能性も考えられるため、必ずしも有意な差とはいえない。

2.1.1.5.7 樹脂の垂直剥離力試験

オートグラフを使用し、樹脂の垂直方向の剥離力を測定。



試験片材料	SUS303
表面あらさ	Ra=3.27μm
表面処理	酸洗
接着面積	400mm ² (20x20mm)
硬化温度	70度
硬化時間	3時間

結果、0.965Kn で剥離。2.4MPa の値となる。せん断剥離に比べて、約 1/10 と、かなり小さな値となった。樹脂による保持での切削加工及び研削加工時の比較データとする。

2.1.1.6 治具の製作及び検証

2.1.1.6.1 目的

精密鋳造品又は鍛造品のタービンプレード翼面基準で位置決めし、固定してタービンプレードのルート部、シュラウド部を加工出来る治具を製作する。現状使用されている低融合金鋼に代わる樹脂を使用する事により加工時間の短縮、コストダウン、品質向上を狙う。

2.1.1.6.2 目標

現状工法の低融合金鋼による固定法に対して、樹脂を使用して治具製作コスト、ランニングコストを 30%以上低減させる。さらに基準ピン方式の課題であるタービンプレードのひずみを低減させ品質を向上させる。

2.1.1.6.3 内容

本研究用として川下企業より入手した航空機用タービンプレード素材を、複合加工機で研削加工するための、固定治具の開発を進めた。

素材は川下企業より購入したが、素材に関する詳細データは海外企業が持つ機密情報のため入手できないので、計測等により素材形状を決定しそのデータを基に、治具形状の詳細を決める方法で治具の製作を進める事とした。

本研究の対象とするタービンプレードの詳細データを三次元測定機により翼面の断面形状を測定し、測定データを基に CAD/CAM で角型固定治具の翼面形状を決定する。

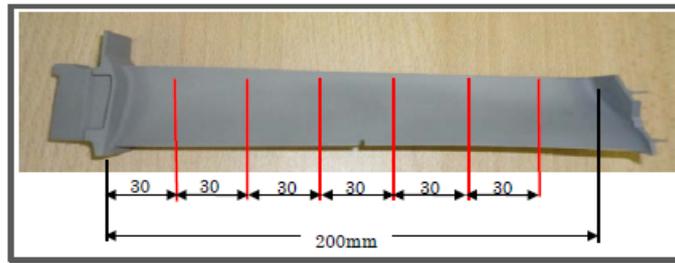


Fig2.1.1.6.3 航空機用タービンブレード素材

Fig2.1.1.6.3 に示す赤線の断面にて素材形状の形状を三次元測定機により測定を行う。ルート側の内側より各 30mm ピッチにて 6 断面の計測を行い素材形状とする事に決め各断面形状のデータをポイント計測ではなくスキャニング計測した Fig.2.1.1.6.5。計測データを基に 3D モデルの作成 Fig.2.1.1.6.6。治具設計にあたり樹脂固定での研削抵抗についての検証を行い 3D モデルより治具の作成をした Fig2.1.1.6.7。



Fig.2.1.1.6.4 タービンブレードの三次元計測

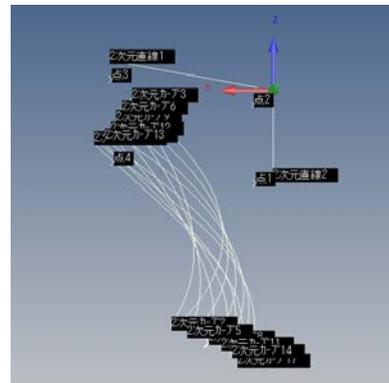


Fig.2.1.1.6.5 断面計測結果

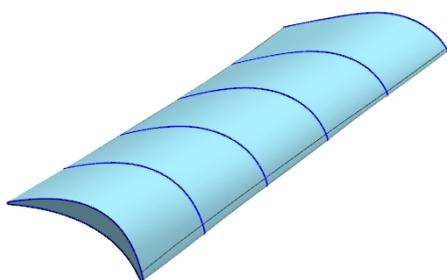


Fig.2.1.1.6.6. 断面からの三次元形状

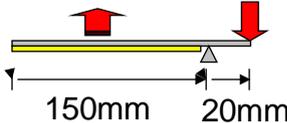


Fig.2.1.1.6.7 治具形状の決定

2.1.1.6.4 治具の検証

ブレードの研削から考えられる重切削試条件（送り速度 500mm/min、研削速度 1200m/min、切込み 0.4mm、砥石幅 18mm）より求められた砥石接線方向 300N、法線方向 700N の値を基に

切削試験時に求められた樹脂のせん断接着力 0.7MPa、垂直接着力 0.07MPa を用い考える。
タービンブレードの接着面積を 3D モデルより求めると 4500mm² である為、得られる接着力は 3150N。接線方向に対しては 300N である為、十分に安全値であると言える。次に剥離力について求める。



$$\int_0^{150} 2x dx = \frac{1}{2} \times 2 \times 22500 = 2.25 \times 10^4 \text{ N/mm} > 1.4 \times 10^4 \text{ N/mm}$$

剥離力に切削と同等の値を用いた場合、垂直力に対しては十分な安全値であるとは言えなかった。安全値の基準としては突発的な負荷を考慮すると最低 5 倍以上は必要と考えていた。今回は研磨条件を厳しい値で検証した為、通常の研磨条件には耐えうることが出来ると考えられる。

角型固定治具を用い、平面研削盤による研磨試験を行う。前項にて設計製作を行った治具を用い樹脂にてブレードを固定する。固定時は熱を加え、100°C/3h での硬化とした。本研究設備はクーラント供給方法を外部及び内部と切り替えを行う事が出来る為、本試験は内部クーラントを使用したハイパー研削とした。

上記、検証に基づき研磨試験を行った結果、サポートを行わず、樹脂による固定のみでの研削が全く問題なく行えた。切込みは安全値内の 0.1mm までであるが、砥石がブレードに接する際の瞬間的な負荷を考慮すると、ほぼ、限界であると判断した。しかし、研磨中はビビリなど全く発生せず通常の研磨を行う事ができた。水を掛け切削する為、樹脂の剥離時間との兼ね合いが今後の課題と言える。

2.2 円筒治具固定法又は角型治具固定法の評価

2.2.1 連続研磨及び高効率研削技術の開発

2.2.1.1 目的

両端固定治具（ピラニア治具）を使用しタービンブレード両端の予め加工された根部、シュラウド部を複合加工機の第一主軸、第二主軸にワンタッチで保持しチャッキング出来るよう外径が円筒形となる保持具を用いる。これにより連続加工を実現すると共に機械加工、研磨荒・仕上げ加工を行い、手仕上げ工程を機械化とし加工品質の安定化へ繋げコスト競争力を付ける。

2.2.1.2 目標

- 1) 機械加工、研磨、手仕上げ（最終はなくす）の連続加工の実現
- 2) 従来工法と比較して、精度は同等で加工時間は 1/2 以下を目指す
- 3) 連続加工にてワンチャッキングで完成させる為、加工精度、品質が安定

2.2.1.3 内容

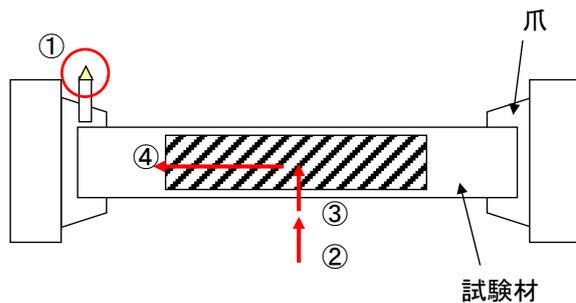
本研究では昨年度に製作を行った大型タービンブレード全長 1150mm 翼長 1000mm を用い、

両端を固定するピラニア治具を模擬し丸材両端を第一主軸、第二主軸にてチャッキングし、エンドミル加工、多刃カッター等による高効率切削加工、研磨加工、高能率研削アタッチメントによる研磨加工の研究を行った。

初めに、ブレード形状は非常に薄肉であり研磨条件が不安定になる事が想定された為、同材のテストピースを用い、研磨条件の確立を行った。試験内容は下記の通りとなる。

試験方法

研磨面：ツールマーク有(高さ0.3mm)



研磨サイクル

- ①砥石ドレッシング
- ②ワークヘアプローチ
- ③ワークに対し垂直方向へ移動
- ④ワークに対し平行に研磨
- ⑤逃げ

上記サイクルの繰り返しとなる
※砥石ドレッシング後の径補正は自動

試験結果

使用砥石：φ100×25.4×20 組織10

焼けを抑えて加工能率を上げる条件出しを行った。

結果、低送り・高切込みより、高送り・低切込みの方が砥石ダメージ、焼け共に少なく能率を上げられる事を確認。

焼けの程度は、仕上研磨で除去出来る程度と判断。

使用砥石：φ100×25.4×20 組織14

組織を10から14へ変更する事で、クーラントの内部供給量向上による仕上がり面の改善及び高寿命を期待。

組織10と同様の条件で比較した結果、研磨面の焼けは殆ど見られなくなった。

しかし、ドレス回数も増えたことから大きくなった気孔への目詰まりの量が多くなったと考えられる。

砥石寿命については組織が大きくなった事により送り速度を上げていくと砥石の欠落が早いことが確認出来た。

研磨時間と寿命のバランスを考え、送り速度を決める必要がある。

試験結果

砥石： $\phi 200 \times 38.1 \times 20$ 組織14

$\phi 100$ から $\phi 200$ へ砥石を変更。組織は14となる。
加工条件は $\phi 100$ と同じである為、径が大きくなった事により高寿命を予想し行った。

しかし、結果は径が大きくなった事により同じ切込み量でも研磨面積が増え、砥石の負担が大きくなり良い結果は得られなかった。

加工条件は同じであるが研磨面積が増えていることから $\phi 100$ より高能率であると判断出来る。

焼けは $\phi 100$ より若干であるが目立って見えたが、仕上研磨へ影響を与えるレベルではなかった。

寿命は $\phi 100$ と比較しても大きな差は見られなかったが、大径の方が有利であると考えられる。

2.2.1.4 結果

本研究結果より砥石径、組織、研磨条件毎による砥石焼けの関係が明確となり安定した連続研磨が可能となった。 $\phi 100$ 組織 10 より $\phi 100$ 組織 14 が高能率であり、さらに $\phi 200$ 組織 14 が研磨面積及び寿命から高能率であると考えられる。組織を 10 から 14 へ変更する事により気孔が大きくなり、より確実に研削点へのクーラント流量が増え焼けへの軽減に繋がる結果となった。気孔が大きくなった事により砥石への目詰まりが見られたが、本試験では焼けへの影響は確認できなかった。ハイパー研削の効果が実証されたと断言できる。

焼けの発生については砥石の切込みが 0.2 以内であれば極端に早い送りであっても焼けはなく、0.2 以上の切込みになると、うっすらした焼けが確認できたが荒研削では全く問題はなく、また、仕上げ研削に影響を与える状態ではなかった。

以上の事から、 $\phi 200$ 組織 14 で、低切込み・高送り研磨において研削条件及び、寿命を確立すれば高能率な研磨が実現できる。

2.2.2 高効率研削工法の実証

2.2.2.1 目的

両端固定治具（ピラニア治具）を使用しタービンプレード両端の予め加工された根部、シュラウド部を複合加工機の第一主軸、第二主軸にワンタッチで保持しチャッキング出来るよう外径が円筒形となる保持具を用いる。これにより連続加工を実現すると共に機械加工、研磨荒・仕上げ加工を行い、手仕上げ工程を機械化とし加工品質の安定化へ繋げコスト競争力を付ける。

2.2.2.2 目標

- 1) 機械加工、研磨、手仕上げ（最終はなくす）の連続加工の実現
- 2) 従来工法と比較して、精度は同等で加工時間は 1/2 以下を目指す
- 3) 連続加工にてワンチャッキングで完成させる為、加工精度、品質が安定

2.2.2.3 内容

本研究では昨年度に製作を行った大型タービンブレード全長 1150mm 翼長 1000mm(3D モデル Fig.2.2.2.3.1)を用い、2.2.1 項(前述)にて得られた研磨条件から大型タービンブレードを、両端固定によるピラニア治具(図面 Fig.2.2.2.3.2)を模擬し、丸材両端を第一主軸、第二主軸にてチャッキングし、高能率研削アタッチメントを用いた高効率研磨工法の研究を行った。

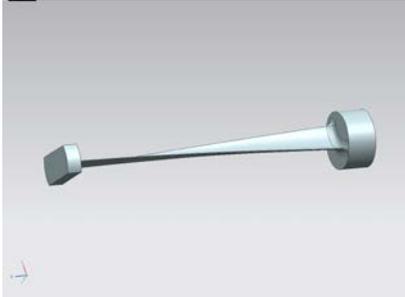


Fig.2.2.2.3.1 ブレード 3D モデル

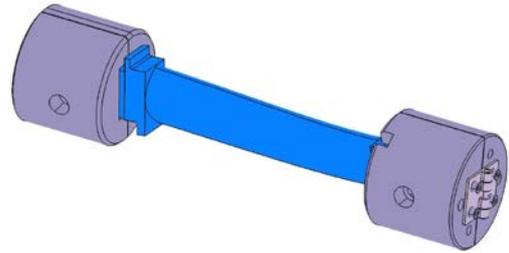


Fig.2.2.2.3.2 両端固定治具(ピラニア治具)

2.2.2.4 結果

本研究結果より両端保持状態からの切削によるブレード翼面加工及び研磨荒、仕上げまでをワンチャッキングにて行う事が出来た。また、昨年度の課題でもあった砥石の焼け、砥石寿命の延命についても CBN 砥石からビトリファイドへ変更することにより、焼けについては砥石気孔からの内部クーラント(ハイパー研削)の効果により改善され、低切込みの高送り研削を実現することが出来た。砥石寿命については CBN では行えなかったドレス機構を設けることにより砥石の再生を自動プログラムにて行うことにより連続運転が可能となり、高効率な研磨が実現できた。背側では大径の砥石が有効となり、本研究では荒研削においては翼面に対し縦方向、横方向、共に検証を行った。結果は、同じ荒研削においても概観から大きな差が確認出来る。要因としては、砥石 R 形状での研削となるが、砥石径の R 形状も影響している為、同じ送りピッチであっても概観による差が大きくなったと思われる。研磨時間については研磨面積の関係から縦方向のパスが短時間であった。さらに時間短縮を狙うには砥石の成型形状を変更すれば、より効率的な研磨が実現できると考えられる。

腹部については翼面の R 形状及びねじれによる複雑な R が混在しており砥石径の選定で小径を使わざるをえなかった。その為に、砥石の寿命が悪くドレス回数が多くなる結果となった。問題点としては、本研究設備では移動方向のストロークが問題となり行えなかったが、腹側の荒研削方法を工夫し、仕上げ砥石への影響も減り問題点を解決できると考えられる。

今後の課題として、今回は大型タービンブレード研削時の翼面の撓みを考慮して翼中央部の研究を重点的に行ったが、両端の根部、シュラウド側の研究が十分行えていない。両端については設備干渉の対策として高能率アタッチメントが有効となるが翼部と両端を繋ぐ隅 R が非常に小さいため新たな課題が生まれると考えられる。今後も本研究を引続き進めることで解決して行きたい。

第3章 ブレード両端固定とサポート工法の研究開発

3.1 両端加工の翼面サポート平面治具の開発

3.1.1 目的

平面形状の治具に位置決めピンにて大型鍛造品ブレードをセットし、樹脂で固定した後、治具をマシニングセンターに固定して、両端（ルート部及びシュラウド部）及び翼面を加工する保持具を開発し、翼面片側と両端を同時に加工する事により高能率な加工を可能にさせる。

3.1.2 目標

大型発電用タービンブレードの背側を平面治具に固定し、たわみが起きない状態での保持による腹側の高効率加工と同時に両端を同時に加工する。

この加工法により加工時間の短縮、治具費の30%以上の低減、製品品質の向上を図る。

3.1.3 内容

対象とするタービンブレードは発電用大型タービンブレードとして、本研究開発にて製作するタービンブレードを保持する平面治具の開発を行う。

現状の両端保持による加工法の課題を確認した結果 Fig.3.1.3.1 のようにエンドミルによって翼面を加工する大型タービンブレードの加工法、中央部に撓みが生じやすく加工条件が上げられないために、加工時間の短縮が進んでいない。さらにビビリが発生しやすく粗度も悪くなり、加工後の手仕上げが必要となり加工にも時間が掛かっている。



Fig.3.1.3.1 現状企業の加工法

現状加工法の課題を解決するために Fig.3.1.3.2 のように翼面の片面全体を治具で保

持し横型マシニングセンターで、翼面腹側及び両端のルート部、シュラウド部の加工を同時に行う治具の開発を進める。高剛性の保持が可能になれば、高効率加工法として研究開発中の、多刃カッターによる加工法、重研削法等を活用して加工時間の短縮を目指す。

治具開発の手順は下記のように進めた。

1) 治具構造の検討及び設計

- ① 平面治具プレートにブレード翼面素材形状の溝を加工し、溝に樹脂を流し込んで上からブレードをセットし加工時間内に樹脂を硬化させて固定する。
- ② ブレードの仮固定のために1～2箇所クランプを設ける。
- ③ ブレードを固定した治具をマシニングセンターへ固定する取付け穴を設ける
- ④ 加工時間内に樹脂の剥離が出来て簡単に取外しが出来る構造であること。
- ⑤ 基準ピン及び基準面を設け取付けが容易であること。

2) 保持力（拘束力）の検証

- ① 加工中の切削抵抗にたいして十分対抗できる拘束力があること検証
- ② ワーク形状に対応して、保持力の強化が出来る構造で、樹脂の充填量により接着強度の変更が出来る構造を開発する。

3.1.1 平面治具の製作及び検証

3.1.1.1 目的

平面形状の治具に位置決めピン及び基準面にて大型タービンプレードをセットし、樹脂で固定した後に、治具をマシニングセンターに固定して、両端（ルート部及びシュラウド部）及び翼面を加工する保持具を開発し、翼面片側と両端を同時に加工する事により高能率な加工を可能にさせる。

3.1.1.2 目標

- ① 基準ピン及び基準面によりブレードが位置決め出来る構造に設計・製作
- ② 位置決めは簡単で捻じれ、ズレが発生しないこと
- ③ 締め付けによってワークに歪が発生しないこと
- ④ 樹脂の流し込み方法が容易であること

3.1.1.3 内容

昨年度研究開発している大型タービンプレードの翼面片側を保持して両端部及びタービンプレード翼面腹側の高効率加工を行うための治具の製作を進めた。

治具の構造は、翼面を基準ピン及び基準面で保持した状態で樹脂充填溝部にパテ状樹脂を充填

して、タービンブレードを上から載せる方法で固定する。樹脂が硬化した状態で平面治具をマシニングセンターへ取付け切削加工を行う。

樹脂固定による切削加工は例がないことから樹脂保持力の検証を行い、研究を進める事とした。

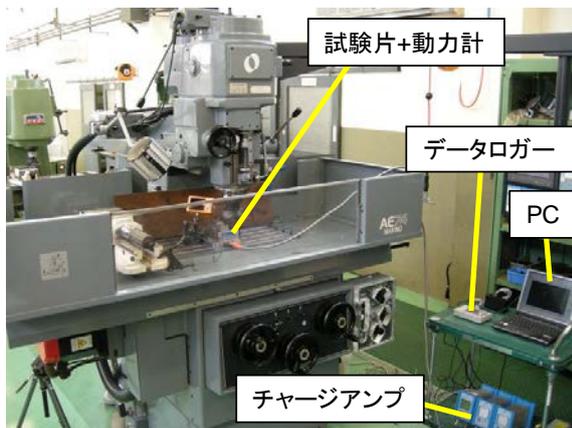
3.1.1.3.1 平面固定治具の製作

製作はブロック材からの削り出しで加工を行った。

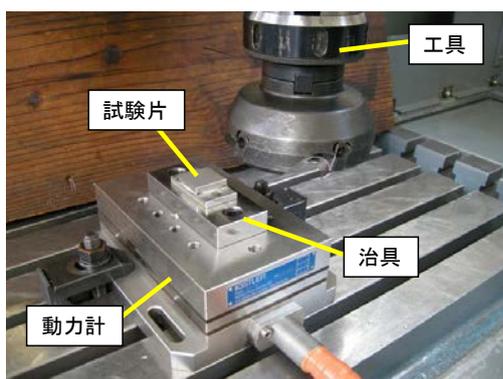
ブレード翼基準面を翼両端部、中央部と三カ所設けた。その他はすべて樹脂充填溝する。樹脂研究結果より樹脂の厚みは強度に影響されにくく樹脂の厚みが0.2~0.3でも十分に保持力がある事を確認している。その為、翼基準面より0.2~0.3mm下げる設計とした。結果、ブレード翼面と治具面との間に樹脂が充填される。

3.1.1.3.2 樹脂保持力の検証

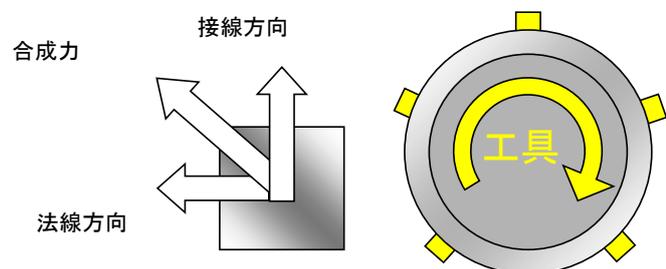
樹脂の保持力を検証する為、動力計を用い樹脂の剥離時の切削力の測定を行った。



試験片材料	SUS303
試験片寸法	25x25 t5
表面あらさ	Ra=3.27μm
表面処理	酸洗
接着面積	625mm ² (25x25mm)
硬化温度	室温/70度
硬化時間	18時間/3時間
主軸回転数	490min ⁻¹
工具	5枚刃Φ100フェイスミル45度



接線方向と法線方向の合成力で評価



3.1.1.3.2.1 樹脂保持力の検証（結果）

上記より常温硬化で0.7MPa、70℃硬化では1MPaで剥離する結果となった。前述におけるせん断剥離の強度は常温硬化で7.5MPa、70℃硬化で25MPaとなった為、衝撃的な力が加わると限りなく強度が低下する事が分かった。しかし、せん断剥離での常温硬化と70℃硬化の差はおよ

そ 3.3 倍に対し衝撃力では 1.4 倍と差が小さい結果が得られた。これらの結果より剥離方向の力を求め平面固定治具における樹脂面積を決定する事とした。検証方法については下記に記す。

平面固定治具に必要な接着力（せん断力）

工具メーカーシステムにより加工条件から切削力を得る事ができ、本試験結果（樹脂切削）を比較するといずれの条件でも約 4 倍程度、実験データの値が大きくなった。その為、本内容を参考値とし平面固定治具に必要な保持力を求める事とした。平面固定治具に必要なせん断力としては、 $\phi 100$ 、5 枚刃、45 度フェイスミル、回転数 (S) 500min⁻¹、送り (F) 100mm/min、切削幅 (ae) 50mm、切込み (ap) 3mm、被削材 SUS303 の場合では 2.8kN 平面固定治具の接着面積 58000mm²×樹脂の保持力（常温硬化・衝撃荷重）0.7MPa から 40.6Kn となる。結果、安全率は 14.5 となった。

平面固定治具に必要な接着力（剥離力）

せん断力における静荷重に対する衝撃荷重の樹脂保持力は約 1/25、室温硬化で約 7 割となった。剥離力に適応可能と仮定すると衝撃に対する剥離力は約 0.07MPa となる。

切削試験より、Z方向の力は送り方向、接線方向の合力と同程度であったので、Z方向の力を 2.8kNとすると、支点まわりのモーメントは、 $2800 \times 100 = 2.8 \times 10^5 \text{N/mm}$

接着面の幅を58mmとすると、単位長さあたりの接着力は4N

得られる最大接着力は
$$\int_0^{1000} 4x dx = \frac{1}{2} \times 4 \times 1000000 = 2.0 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

$$2.8 \times 10^5 \text{N/mm} \ll 2.0 \times 10^6 \text{N/mm}$$

上記結果より、衝撃荷重の場合の垂直方向の剥離力を、せん断力の場合から推定した上では切削に対し、十分な剥離方向の保持強度が得られた。しかし、衝撃荷重における垂直方向の剥離力は仮定での結果であり、剥離方向への保持力は樹脂だけではデータ量が足りないと考えられる為、補助としてクランプを行う設計とした。

3.1.1.3.3 平面固定治具による切削加工

3.1.1.3.2.1 樹脂保持力の検証結果を元に治具製作を行い、切削加工を行った。

樹脂検証結果からは $\phi 100$ 、5 枚刃、45 度フェイスミル、回転数 (S) 500min⁻¹、送り (F) 100mm/min、切削幅 (ae) 50mm、切込み (ap) 3mm で加工を行っても場合、せん断力・垂直力共に安全値となる結果であったが、切込み量 (ap) を 0.5mm・1.0mm・1.5mm・2.0mm・2.5mm・3.0mm と条件を変更し検証を行った

3.1.1.4 結果

切込み量 1.5mm までは安定した加工で全く問題は見られなかったが、切込み量が 2.0mm になった際から振動が起き、微かなビビリ音が発生した。さらに 2.5mm、3.0mm と樹脂評価条件ま

で加工を上げ試験を行った結果、予想通りビビリ音が増大する事となった。原因としては薄肉形状の翼面を強固な治具にて固定しているが切削抵抗の増大によりルート部及びシュラウド部が保持されていない為、弱い赤丸部へ負荷が掛かりビビリが発生したと考えられる。対策としては、平面固定治具の見直しを行い、ルート部及びシュラウド部を支え振動を抑制させる必要がある。

樹脂固定による保持検証の結果としては、万が一を考え、クレーンによる補助をしながらクランプの取り外しを行ったが全く問題はなかった。

3.2 タービンブレード両端（ルート部、シュラウド部）と翼面サポート加工工法の研究

3.2.1 セラミックチップ及び多刃カッターによる高効率加工の研究

3.2.1.1 目的

多刃での切削速度 UP と高圧クーラント（7MPs 相当）によるジェットブレイク加工により刃具寿命を延ばしタービンブレード翼面の大荒加工を高効率に行う事での時間短縮を目的とする。

3.2.1.2 目標

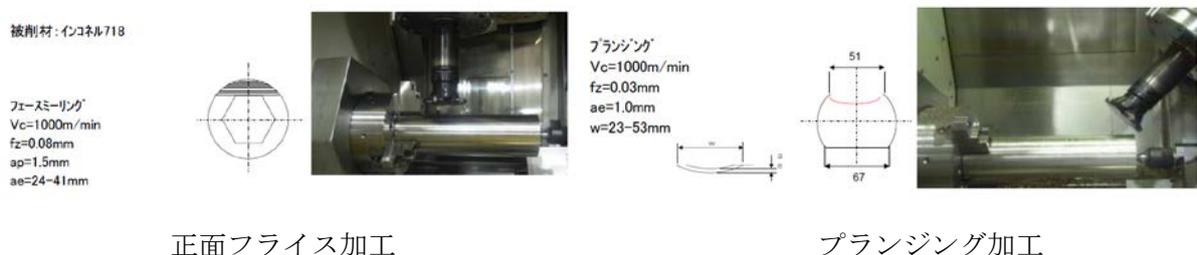
- 1) 切粉を超高圧クーラント（7MP s 相当）で粉砕飛散させる。
- 2) チップ上面を切粉が流れ滑る時に発生するクレイター摩耗を激減させる。
- 3) チップと切粉の間に超高圧クーラントが噴射され摩擦熱を激減させる。
- 4) 溶着し構成刃先が剥離する時にチップ母材を一緒に剥ぎとる致命的損傷を激減させる。

3.2.1.3 内容

本研究では超硬用多刃工具を使用し大型タービンブレードの大荒切削加工を行い多刃カッターの高効率化加工の効果を検証する。加工内容は正面フライス加工、プランジ加工行った。

3.2.1.4 多刃工具（ジェットクーラント対応工具）による加工実験

被削材はインコネル 718 の加工であり,SUS420J 材でも同様の加工を実施した。



正面フライス加工

プランジング加工

3.2.1.5 多刃工具（ジェットクーラント対応工具）による加工試験結果

- 正面フライス加工

切削条件 Vc=1000m/min. fz=0.08mm ae=1.0mm で安定して加工できる

但しワーク保持に注意が必要センター推力不足により喰い付き時にびびりが発生。トップスライスはびびりに起因すると推測される。

- プランジング加工

first、second 共に機械主軸動力への影響は非常に少なく、実加工に適用は十分に可能である。6 パス目 (w=53mm) でも軸負荷は 23-27%で正面フライス加工に比べ非常に少なく、新しい加工技術として適用を広げていきたい。

3.2.2 両端固定とサポート工法の研究

3.2.2.1 目的

大型タービンプレードを平面固定治具にて翼面片側（腹側）と両端部を加工した後で、両端部をピラニア治具で固定して、ピラニア治具の両端を複合加工機のチャックで両側を保持し、翼面背側の加工及び、翼面の研削仕上げする工法を研究する。

この工法により高能率な加工法による加工時間短縮、翼面手仕上げの機械化進め、大幅なコスト低減を図る。

3.2.2.2 目標

現状加工条件の 30%アップを目指し、さらに手仕上げの機械化によりコストを 30%低減するとともに、品質を向上させる

3.2.2.3 内容

- 1) 両端部（ルート部、シュラウド部）を加工したタービンプレードの両端をピラニア治具にてチャックしその治具の外径を複合機の油圧チャックで挿んで翼面加工を行う工法である。
- 2) 大型のタービンプレードの翼の腹側は平面治具にて加工している状態なので、その翼面腹側に樹脂のサポートリブを接着し翼面背側の高効率加工を行う。
- 3) サポートリブは翼面の撓みを防止し且つ剛性を上げる事により、高能率な多刃カッター等による加工を行えるようにする。
- 4) さらに取代が少ない鍛造品では、研究開発中の研削加工技術を適用し、エンドミル及びカッターの加工を省略して研削加工による翼面加工を行う。

3.2.2.4 今後の課題

大型タービンプレードで、サポートリブの最適な大きさ、厚さについて研究を行う必要がある。また、すべて樹脂を使用するとコストアップも考えられる為、振動を抑制させる様に振動周期を分散させる材料を樹脂にて翼面へ張付け補強及び防振効果を狙う。

さらにリブの再利用を含めた、剥離方法についての研究も必要である。

3.2.3 自動サポート工法の研究

3.2.3.1 目的

大型タービンブレードの翼面をレストにてサポートし、ブレードの振動を抑制させる事により、従来では品質確保の為、加工条件を上げることが不可能であった翼面の荒仕上げ加工の加工条件アップ目的とする。このレスト工法により高能率な加工法による加工時間短縮、翼面手仕上げの機械化を進め、大幅なコスト低減を図る。

3.2.3.2 目標

現状加工条件の 30%アップを目指し、さらに手仕上げの機械化によりコストを 30%低減するとともに、品質を向上させる。

3.2.3.3 内容

両端部（ルート部、シュラウド部）を加工したタービンブレードの両端をピラニア治具にてチャックした状態を模擬し、昨年度に作成した大型タービンブレードの翼面レスト加工を行う。大型タービンブレードの翼面腹側にレストを固定しサポートする事で翼面背側の高効率加工を行う。

3.2.3.4 検証結果

結果、支点上及び曲率の小さい右側部（反動側）で大きな撓みの低減効果が見られた。曲率の大きい左側部（衝動側）では大きな効果は見られなかった。これは、曲率が大きい方が、剛性が高いためと考えられる。

結果、支点上では大きな撓み低減の効果が見られた。一本の場合と同様に曲率の大きい左側部（衝動側）では大きな効果は見られなかった。一本の場合は曲率の小さい側では大きな効果が見られたが、二本では大きな効果が見られなかった。支点三本の場合も二本と同様の傾向が見られた。曲率の小さい側で効果が低い理由として、同じ条件下にて解析を行っても結果が異なる事があり、また、僅かに負荷点をずらしただけでも大きく結果が変わることが確認された。

3.2.3.5 測定結果

レスト有の方が僅かに撓みが小さくなっている事がわかり、レストの効果が確認出来た。ただし、解析では数十倍の差が出ていたことに比べると小さな差であった。

解析の結果と大きな差が出た理由は、解析で使用したレストが 50×100 であったのに対し、実験で使用したレストでは 15×32 であった点と、本試験材が研磨用に余肉を残していた為、解析時に用いたモデルと形状が異なっていた為と考えられる。

本試験結果では、ブレードの剛性がレストより強かったことから、解析ソフトでの結果は得られなかったが、ブレードは今後、より薄肉形状が求められることからレスト工法を確立することにより加工条件アップ、手仕上げ工程を省くことによるコストダウンと品質安定、そして何より

も現工法でコストアップから実現出来ない更なる薄肉ブレードに対して最適な工法であると言える。今後は自動化も含め、研究を継続して行う。

3.3 高能率研削アタッチメントの研究開発

3.3.1 目的

従来工法での研磨ではワーク又は設備へ干渉が発生し研磨が行えないことから高能率研削アタッチメントを用い、干渉が発生し行えなかった両端部の細かい範囲までの研磨を可能とする。また、加工範囲に自由度が増える事から高能率な研磨が行へ、時間短縮に繋げる。

3.3.2 目標

- 1) 機械 ATC（自動工具交換）が使用出来る重量と大きさでの設計
- 2) 砥石が使用できる回転数に対応
- 3) 砥石内部からクーラントが出る内部給油に対応する（7MPa 相当）
- 4) 研究設備に対応するキャプト使用によるアングルヘッド型研削アタッチメントの開発
- 5) 高能率研磨による加工時間の短縮

本研究では上記に挙げられる目標達成の為、製造メーカーと打合せを行い高能率研削アタッチメントの開発に取り組んだ。本年度はアタッチメントの位置決めブロックよりクーラントを供給する事により干渉への対策を行った。研削主軸回転部は 360 度旋回の為、さまざまな方向での研削に対応可能となっている。重量、回転数については設計上、ギアを使用することから対応は不可となった。

3.3.3 内容

本研究では高能率研削アタッチメントを使用し研磨を行った。詳細については 2.2.2 へ記述しているが、高能率研削アタッチメントで専用保持具にて砥石をチャッキングし大型タービンブレードの背側、腹側の荒仕上げ研削を行った。本研究ではビビリ等の問題、また、撓みが生じ易く加工が困難な翼中央部を中心に研磨を行った。本来、クーラントが研削アタッチメント内を通り砥石主軸へと内通する予定であったがクーラント圧が足りず、他のクーラント穴へ逃げてしまっている様子が分かる。問題の応急的な対策として主軸フランジ穴へ O リングを用いキャップを取り付けた。その結果、主軸端面クーラント 14L/min すべてを内通クーラントへ使用することができ、砥石焼けに対して有効策がとれた。

3.3.4 結果

構造上、ギアを使用している為、ギアによる振動からビビリが発生すると懸念していたが全く見受けられなかった。今後の課題として挙げると重量による問題から工具交換が出来ない（※本研究設備）。アタッチメントの最高回転数が 3000rpm と、砥石を使用するには非常に低い。また、アタッチメント本体も 7MPa に未対応である。さまざまな課題は挙げられるが、高能率研削

アタッチメントを使用することにより根部からシュラウド間の翼面全体の連続研磨が可能となり、目標とする無人による連続加工が期待される。

3.4 次世代ブレード研削工法のプログラムの開発

3.4.1 高能率研削アタッチメント研削加工

3.4.1.1 目的

連続研磨及び高効率研削での翼及び翼両端部研磨において、高能率研削アタッチメントを用い研磨を行う事から細部までの研磨が行へ加工の幅が広がった。その為により複雑な研磨プログラムが必要となる。

3.4.1.2 目標

今まで干渉の問題から行えなかった翼両端部分の研磨加工を行い、タービンブレードの切削荒仕上げ加工から研削荒仕上げ加工までワンチャッキングで連続的に行う。

3.4.1.3 内容

4種類の成型砥石で荒仕上げを行い研磨方向の検証も含め、腹側と背側のプログラムを分け作成する事とした。プログラム条件は砥石径、砥石成型によるR形状、送りピッチ、切削方向などをそれぞれに設定し研磨条件による差を検証した。また、加工箇所は翼中央部で加工する事でビビリ、撓みが生じやすく加工条件が悪い為、課題も出やすいと考え行った。各プログラムは研削アタッチメントが特殊で大きい事からベリカットによるシミュレーションにて検証を行い、プログラム不適と設備及びワークへの干渉の確認を行った。

3.4.1.3 結果

荒研磨の背側については切削方向を変更することによる研磨面と加工時間の差を比較し、腹側についてはブレード翼面形状から使用砥石径が決まってしまう為、砥石寿命の関係から限りなく大径を選択した。仕上げ研磨については、ブレード翼面に倣った仕上げ方法が望ましい為、ジグザグ動きにて行った。背側、腹側共に研磨条件を設定していたがパスピッチが1mm、3mmでは仕上がり面に荒さが目立つ結果となり追加プログラムにて0.2mmまで細かいプログラムへの変更を行い仕上げ研磨を実施した。パスピッチが細くなることにより加工時間が長くなり対策が必要となるが、本研究では一般砥石（ビトリファイド）を使用している為、砥石外周部を大きなR形状へドレッシングをすればパスピッチ間を広くとる事ができ加工時間の短縮へと繋がると考えられる。

本研究結果より翼面部についてはプログラムの動作及び、切削方法について条件を確立出来たと考えられるが両端（根部、シュラウド部）についての検証至らなかった。本試験材は両端部のRも大きく複雑な形状でないが実ブレードではRも小さく形状も複雑になると考えられる。その為、より小さな砥石で複雑な研磨条件が要求されることが想定される。また、荒仕上げ研削時の

ドレッシング後の補正も重要な課題となる。砥石が円型であることからプログラムの先端制御点が複数点となる為、ドレッシング後の工具径補正に対応出来ない。その為、本研究ではドレッシング後の砥石径に合わせ、都度にプログラムの作成を余儀なくされた。さまざまな課題が残っている事から、今後も引き続き研究を進め両端部研磨条件及び連続研削の確立を目指す。

第4章 全体総括

4.1 2年間の成果とりまとめ

研究総括者：株式会社ナサダ進藤茂實

「ガスタービンエンジンの難削材複雑形状部品の加工技術の高度化の研究」に取り組んで2年間の経過し、当初の計画していたすべての研究課題に取り組み大きな成果が出たと思っております。

本事業の研究開発の目的は「難削材の複雑形状部品であるタービンプレードの加工技術を高度化させ、安定した品質を確保し、コスト 1/2 を実現して国際競争力の強化に繋げる」事です。タービンプレードは圧縮機側及びタービン側を合わせると1台のガスタービン又はジェットエンジンで3,000枚以上が使用されており、定期的に交換される最重要部品です。この重要な部品の加工技術を飛躍的に向上させる研究で、補用品を含め40年以上にわたって生産されるタービンプレードの加工事業に参入を目指した研究開発でした。

本研究においてはタービンプレードの加工のための「保持具の研究開発」、「新切削加工技術の研究開発」、「研削加工技術の研究開発」及び「工具及びアタッチメント等の開発」を行ってきました。現在川下企業が保有しているタービンプレード加工技術にはない独創的な技術のために研究を始めた段階では、興味を持って頂いていたが、安定した技術になっていないために採用は難しいとの意見が多く、事業化のために実績を積み上げ、信頼できる技術であることを実証することが大きな課題になっておりました。

研究開発した加工治具、加工技術、工具等の評価を確実に進めて頂き、性能の実証が進んだことで、川下企業からの要求を満足できる技術として評価されるようになってきました。このハイパー研削技術による大型タービンプレードの仕上げ加工技術は非常に有効な加工法であることが実証出来、さらにこのハイパー研削技術を有効に活用するためのタービンプレード保持具においても、有効な技術として活用できることが証明できました。

本研究においては、切削加工メーカー、砥石メーカー、大学、アドバイザーの研究メンバーに、事業管理者として、グループの取りまとめ役として公益財団法人新産業創造研究機構殿加わって頂き、的確に指導して頂き、研究開発が計画通り進行して行ったことで、大きな成果につながっていったことを実感しています。研究開発の進め方、メンバーの構成がいかに重要であるかを実感しており、今後の研究開発において最適なメンバー構成を考えるかが研究成果を上げるために重要な要素である事を学びました。

本研究開発においては、いろいろな研究成果を上げることが出来、且つその成果を生かした事業化への取り組みも始めており、今後の補完研究においては川下企業のニーズに対応した加工技術の確立を行い、円高が進む厳しい経済環境に負けない企業になる事を目標にチャレンジして行きます。本研究開発に参加頂いたメンバーに感謝するとともに、今後更なる技術向上、事業化にご協力をお願いして、研究成果のまとめとさせていただきます。