

平成21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22年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 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21年度 研究成果報告書

目 次

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的	1
1.2 研究開発の目標	1
1.3 研究体制	3
1.4 成果概要	6
1.5 当該プロジェクトの連絡窓口	7

第2章 タービンブレード用の保持具の開発

2.1 樹脂など固定媒体の研究	7
2.2 樹脂など固定型の設計・製作	9
2.3 樹脂などによる固定法の評価	11

第3章 タービンブレード用の新加工工法の開発

3.1 樹脂固定による押し出し加工法の開発	13
3.2 両端固定治具の設計・製作・検証	16

第4章 タービンブレード用の新工具の研究開発及び新加工技術の研究開発

4.1 ジェットクーラントブレイク対応工具による高能率加工技術の確立	17
4.2 重研削砥石による次世代ブレード研削工法の研究開発	19
4.3 重研削砥石による加工技術の開発	20

第5章 全体総括

21

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・目的

ガスタービンエンジンは航空機に搭載される軽量型と、主に地上に設置して発電などに使用される重量のある重構造型とに大別できる。船舶や車両といった移動体や地上固定式でも小型のものでは、航空機用のジェットエンジンの設計に基づく軽量のものが製造されており、軽量型に分類される。また、これらとは別にかなり小型のガスタービンエンジンも存在する。

現在、航空機産業においては、地球環境問題が深刻となる中、窒素酸化物や二酸化炭素の削減が可能な環境に配慮した低燃費でクリーンなジェットエンジンの開発が求められている。燃焼機に入る空気の圧力を上げるとエンジンの性能がアップするが、高温高压のガスをタービン翼に送るためにタービンプレードの耐熱性の向上が必要となる。このためにタービンプレードの材料にはニッケル基合金、高融点合金等の超耐熱鋼の難削材の採用が大幅に増加している。これらの材料は被削性が非常に悪く、安定した切削が難しい。

一方発電用ガスタービン、蒸気タービンにおいても低NO_x、二酸化炭素(CO₂)削減の目標を達成する為に、クリーンな地球環境にやさしい高効率の発電設備が必要になってきている。先進国では、旧タイプのガスタービンから最新の高効率タイプのガスタービン発電への更新需要が起こっており、新興国においては電力需要の急激な増加に対応する為に新規需要が大幅に増加している。これらの高効率タイプのガスタービンは大型化の傾向にありタービンプレードも大型化して且つ難削材となっている。

また、タービンプレードの生産量は2026年には、現在の3倍に増加すると言われている。特に航空機用のジェットエンジンは2015年以降に新型航空機の新産が急激に増加することが予想されており、タービンプレードの生産量も大幅に増加すると思われる。

このような背景があり、航空機用ガスタービンエンジン及び発電用ガスタービンエンジンに使用されている複雑形状のタービンプレード切削加工における、新保持具、新工具、新設備を研究開発し加工の高効率化を進め、国際競争力を確保する。さらにタービンプレードの材料には難削材が使用されているために工具費が非常に高くなっているため、次世代加工方法、新工具の研究を行い、工具費を低減する。これにより、次ステップである連続無人加工につなげ加工コスト 1/2 を実現する技術を確立する。

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 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。

前記、目的を達成するために、

- (1) タービンブレード用の保持具の開発
- (2) タービンブレード用の新加工工法の研究開発
- (3) タービンブレード用の新工具の研究開発及び新加工技術の研究開発を行う。

(1) のタービンブレード用の保持具の開発については、円筒パイプ内にブレードを位置決めした後に、樹脂を充填してブレードを固定し、加工時は円筒パイプの外形を保持して押し出し工法にて加工する樹脂固定法を確立する。

(2) のタービンブレード用の新加工工法の研究開発については、樹脂固定による押し出し加工工法((1)にて研究開発する「樹脂固定法」にて保持したタービンブレードの外形をチャッキングして新複合加工機において、翼部を連続的に加工する工法)を確立する。

両端固定治具の開発(ピラニア治具固定法)(ピラニア治具とは、タービンブレード両端の予め加工された根部、シュラウド部をワンタッチで保持するチャックで、複合加工機の主軸と第二主軸にチャッキングできるよう外形が円筒形となる保持具である。これにより、複合加工機のブレード加工を自動化で行う。)を行う。

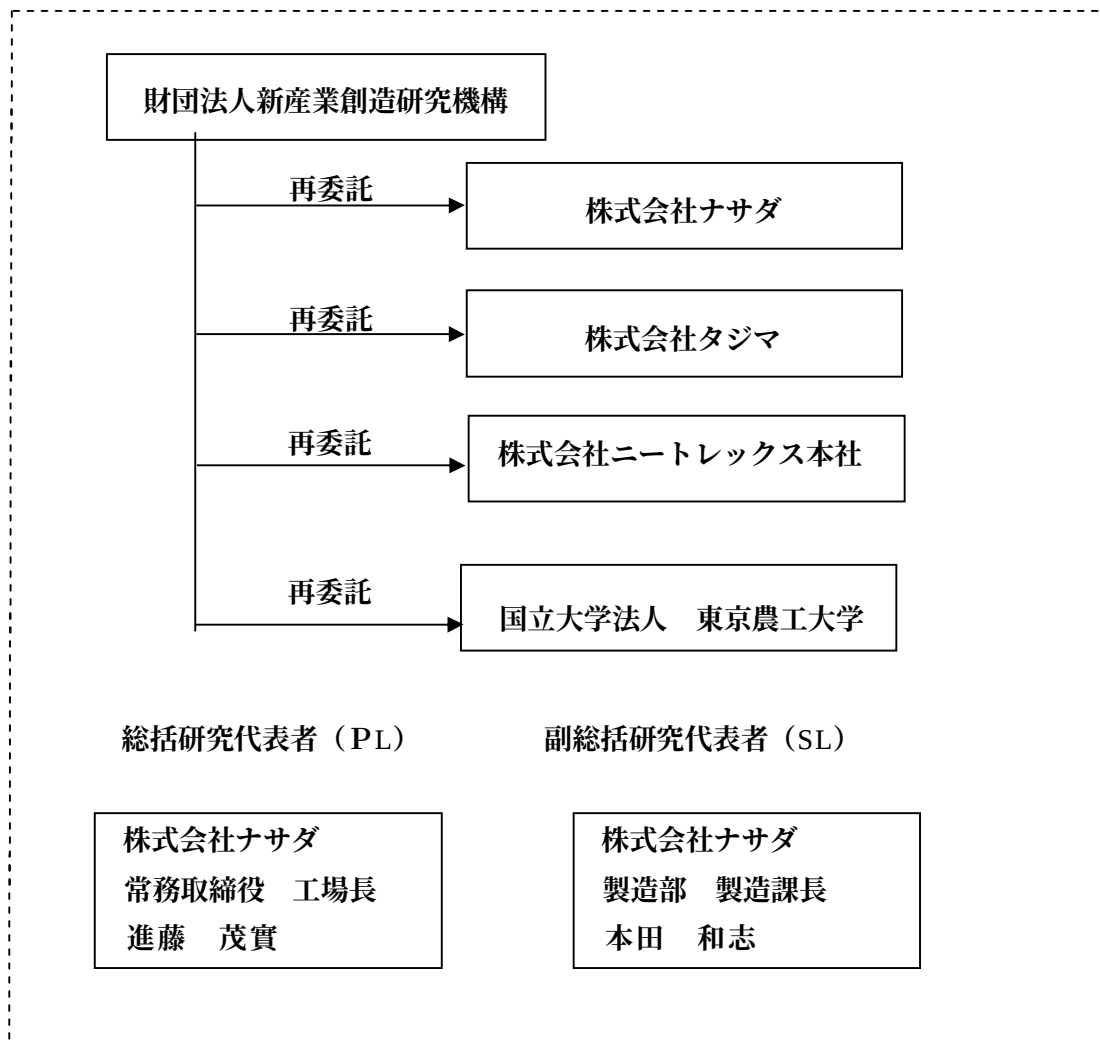
(3) のタービンブレード用の新工具の研究開発及び新加工技術の研究開発については、

- ① ジェットクーラントブレイク対応工具による高能率加工技術を確立する。
- ② 重研削砥石による次世代ブレード研削工法の研究を行う。

1.3 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

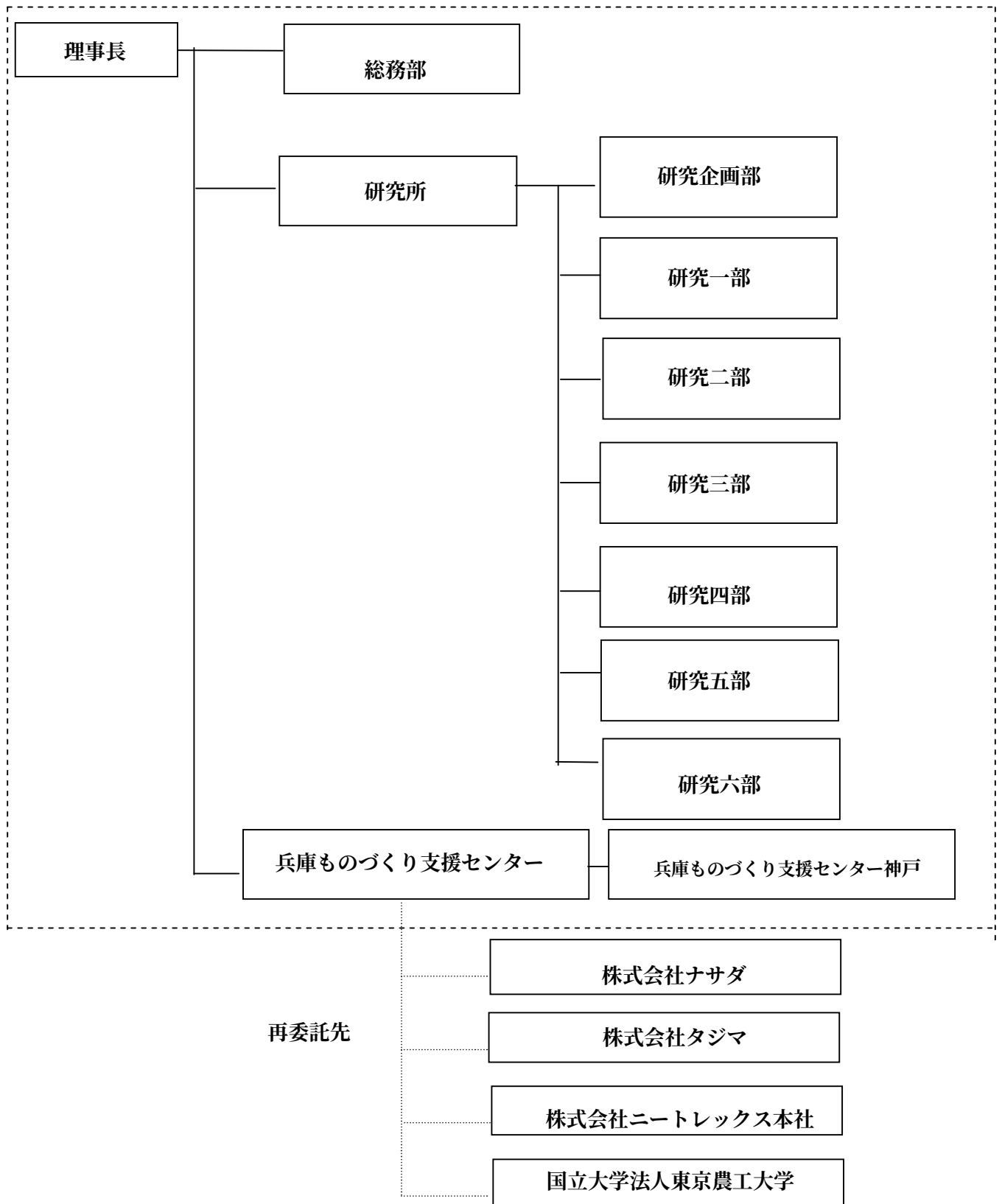
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

①事業管理者

[財団法人新産業創造研究機構]



(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
進藤 茂實	株式会社 ナサダ 常務取締役 工場長

【事業管理法人】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	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	④-1、④-2、④-3
山口 寿一	研究企画部担当部長兼兵庫ものづくり支援センター産学官連携推進員	④-1、④-2、④-3

【再委託先（研究員）】

株式会社ナサダ

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
進藤 茂實 <再>	常務取締役 工場長	①-1、①-2、②-1、②-2 ③-1、③-3
本田 和志	製造部 製造課長	①-3、②-1
千葉 豪一	製造部 生産管理グループ長	①-1、①-2、②-1、③-1
田中 志征	製造部 生産技術主任	①-1、①-3、②-1、②-2、③-1、③-3

株式会社タジマ

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
高島 進一	製造部 部長代理	②-2

株式会社ニートレックス本社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
成田 潔	技術研究部長	③-2

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、②-2

1.4 成果概要

H21 年度に研究を行った「ガスタービンエンジンのタービンブレードの加工技術高度化の研究」の研究成果の概要について報告します。

本研究においてタービンブレードのコストを 1/2 にするために『保持具の開発』『新加工工法の開発』『新工具及び新加工技術の開発』を進めて、項目ごとに設計製作、実験、試作品の製作等を行い、当初の目標を達成できました。

1.4.1 タービンブレードの保持具の開発

タービンブレードの加工のための保持方法について研究を行い、円筒樹脂固定法を開発した。

- ① ブレードの翼面を保持して両端（根部及びシュラウド部）を効率よく加工するために、固定媒体としてペースト状の樹脂（室温硬化型エポキシ樹脂接着剤）を選定する。
- ② 選定した樹脂の使用量を最小に抑える工夫をした治具を設計製作した。さらに大型タービンブレードの保持具の開発に繋げる研究が出来た。この保持具の採用により作業環境の改善が見込まれる。
- ③ 開発した保持具と選定した樹脂の組合せによる、保持具の評価を行い、ブレード加工に十分に耐えられることが証明出来た。

1.4.2 タービンブレード用の新加工法の開発

樹脂で固定したブレードの樹脂ごと連続的に加工する技術の研究を進めたが、大型ブレードには樹脂の使用量が多くなりコストが掛かるために適用が難しく、小型および中型のタービンブレードの角材からの削り出し工法を工程統合して 1 工程で完成する工法の研究を進めた。

- ① 角材の片側をセンターで保持し、反対側を円筒治具で保持して、根部、翼面、シュラウド部を連続して加工できる加工法を、丸棒からの削り出し加工で実証した。
- ② ピラニア治具の開発を行い、根部及びシュラウド部をワンタッチで掴める治具を開発し、設計・製作し、テスト加工で治具の実証を行った。複合加工機でのブレード加工には非常に有効な治具となった。

1.4.3 タービンブレード用の新工具の研究開発及び新加工技術の研究開発

難削材タービンブレードの高効率加工のために、高圧クーラント対応工具の開発及び加工技術の研究を進めた。またブレードの翼面磨き加工の機械化のために、重研削砥石の開発、ハイパー研削技術の研究を行い実証し、複合加工機による連続加工を実証し、工程統合による工期短縮し、さらに機械化による無人化の実証が出来た。

- ① 高圧クーラント対応の多刃カッターはブレード加工に非常に有効なプランジング加工技術を可能にした。またボールエンドミルに代わる高能率加工にも適用できることを、テスト加工で証明できた。
- ② 内部給油型の高能率な重研削技術の実証ができた。今後のブレード翼面磨き加工の機械化に非常に有効な研削技術が実証できた。

1.5 当該プロジェクトの連絡窓口

財団法人新産業創造研究機構 兵庫県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 タービンプレード用の保持具の開発

2.1 樹脂など固定媒体の研究

2.1.1 目的

ブレード部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。また次工程の加工が複雑となっている。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。さらに保持具は複雑で高価である。

本研究においてタービン部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のブレードの固定方法の研究し、安定した保持具による連続加工の研究を行ない、加工工程の大幅な削減により段取り回数・加工時間を低減させる。

2.1.2 目標

下記の項目を満足する固定媒体を研究開発する。

- 1) 特別な設備を使用せずに樹脂の溶解、固定、剥離が出来る樹脂。
- 2) 加工中の切削力、切削熱で変化がなく固定強度が維持出来る。
- 3) 樹脂硬化によってワークに歪が発生しない。

2.1.3 内容

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連続無人化加工を目指す。

2.1.3.1 現状調査

- 1) 現在川下企業においてタービンプレードの保持のために低融合合金が使用されている。
- 2) 70℃～150℃で溶解し、その溶解した治具メタルを治具に流し込んで固定している。
- 3) 航空機用の小型のタービンプレードも発電用の中・大型タービンプレードも同じである。
- 4) 治具は多数個必要で尚且つ治具の費用も高い。

2.1.3.2 現状の課題

- 1) 作業者は高温に溶融した金属を扱うので、作業環境が悪い。
- 2) 治具メタルのコストを抑えるには鉛入りのために、作業者への影響もあるため鉛の含まないものを使用しているがコストが高い。
- 3) タービンプレードの冷却穴に溶解した治具メタルが流れ込む危険性があり、内部に残ると重大な品質トラブルが発生する可能性がある。
- 4) 加工後に再度溶解して再利用するが、持ち出しも多く補充費用が掛かる。

タービンプレード全体を樹脂で固めて先端又は根部から連続的に根部を加工する方法について検討し、航空機用タービンプレードを円筒パイプ（紙製）にセット、樹脂を流し込んで固定する実験を行った。

樹脂は、円筒パイプ内に線材をセットし、樹脂で固めたのちに円筒パイプをスライスして小径で、短い長さのピンを効率よく生産する方法で使用実績がある２液混合のエポキシ樹脂を使用。

メーカー：アルテコ（工業用エポキシ系接着剤）

透明・耐黄変性に優れます。接着、注型、ポッティング、コーティングに使用できます。



Fig.2.1.3.1.2 航空機ブレードの樹脂固定



Fig.2.1.3.1.3 使用樹脂 R-2007/H-1010

2.1.4 結果

- 1) ブレード全体を樹脂で固めると、樹脂の使用量が多く、コストが掛かる。

またブレード全体を樹脂で固める工法は、樹脂の使用量が多くなり、樹脂の硬化時の変形が大きくなる。さらに樹脂自体に割れが出来やすくなり、外形精度の確保が出来ない。

- 2) 樹脂でブレードの全体を固定する方法は、小型のタービンプレードには適用可能と考える。但し小型の航空用ブレードは翼面加工しないので全体を樹脂で固めて押し出しで加工するような市場は非常に少ない。
- 3) 樹脂の外径精度を確保するのは難しいため、本研究においては樹脂を充填する治具の精度を高め、治具の中に精度よく固定する方法を採用する事とした。
- 4) パイプ内(治具)にブレードをセットし、パイプ内(治具)に樹脂を充填して固定する方法であれば、外径の精度を確保出来る。但しパイプと樹脂は一体のため、削り取る必要がある。このためパイプ(治具)が消耗品となればコストもかかり量産品の加工には適用が難しい。
- 5) パイプ(治具)の再利用の方法を検討した結果、パイプ(治具)内の樹脂を充填する部分に離型材を塗布すると容易に取り外せる。但しパイプ（治具）が分割できる構造であることが必要である。また、パイプ（治具）に離型材を塗布すると、加工中の切削力でブレードが動く可能性が高くなり品質に影響が出る。離型材を塗布して治具から容易に取り外せる構造で且つ切削中の保持力が確保できる治具構造が必要である
- 6) 固定媒体を樹脂にすることにより、作業環境は向上する。特に取り扱いの条件も常温で出来るために、作業への負担は大幅に改善できる。

- 7) 硬化時間の違う樹脂は色々あるが、早いものは硬化時に変形が起こる可能性が高い。再利用可能な樹脂を探すのが適当なものが無い。再利用可能なものは固定強度が足りないことが予想される。
- 8) 注油型の樹脂はブレードの冷却穴等のブレード内部へ流れ込む危険性があるが、高温ではないのでマスキングは簡単にできる。さらにもしブレード内に樹脂が流れ込んでも、溶剤等で取出しできる。また高温部に使用されるブレードでは残留しても燃焼してしまう。
但し、樹脂が燃焼して影響が無いかの検証は必要である。
- 9) ペースト状の樹脂を使用すれば流れ込みは防げる。樹脂の使用量を減らし、かつ固定強度を確保出来る樹脂が最適で、ペースト状樹脂が本研究に最適である。
- 10) 使用量を減らすには、治具の構造の検討を進める必要がある。治具形状については 2-2 項の樹脂など固定型の設計製作で報告する。

2.1.5 研究成果

計画時は研究において円筒パイプの外径を精度良く加工し、そのパイプ内にタービンブレードを樹脂等の固定媒体で固定する予定であったが、事業化を考えた場合のコスト低減を考慮して、樹脂の使用量を出来るだけ少量に、且つパイプ等の治具費のコストを抑えるために、再利用を考えた治具構造にするのがよいと判断した。

この方針に基づいた、最適な固定媒体として樹脂を選定した。

選定の理由

- ペースト状で使用量のコントロールがしやすく、コストが下げられる。
- 樹脂硬化時の膨張収縮が少なく、硬化時にタービンブレードに対する応力がほとんどかからない。
- 充填時の漏れ出しが無く、充填用ガンを使用すると非常に作業性がよい。

2.2 樹脂など固定型の設計・製作

2.2.1 目的

タービンブレードを保持する固定型の拘束力を高め、高速加工、研削加工等の新工法による連続無人加工にも対応出来るように円筒保持具による固定方法（円筒固定法）を開発する。

2.2.2 目標

- 1) タービンブレードの拘束力は、根部及びルート部の高速加工、研削加工に対応出来る強度があること。
- 2) 締付力によりタービンブレードに応力がかからない事。加工後に根部とシュラウド部の捻じれが円周方向で $\pm 0^{\circ} 15'$ 以内である事。（歪ゼロが目標）

2.2.3 内容

2-1 項で研究した固定媒体（樹脂）を出来るだけ少量使用して、切削力に対して十分な強度を持つ固定型（治具）の研究を行い、設計・製作を行う。また、固定後にタービンブレードに応力がかからない構造を研究し、加工後にタービンブレードにクランプ力

による歪みを残さない構造とする。

固定型は円筒形状で複合加工機のスクロールチャックで把握できる構造で、繰返し把握した時に保持精度(位置決め誤差)が 0.0.1 以内のバラツキに抑える治具精度とする。さらに取付け、取外し時間の短縮のために 2 分割タイプで設計を行う。

治具設計を行うために、タービンブレード素材形状の設計を行った。Fig.2.2.3.2 は素材図を示しており、この素材のタービンブレードを固定する設計・製作を進める

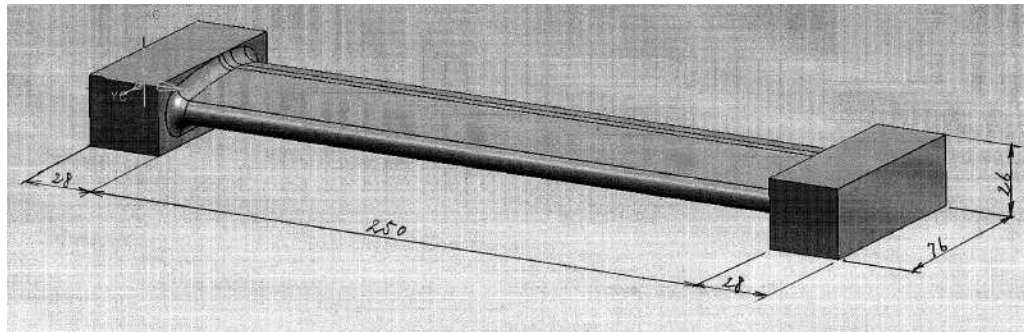


Fig.2.2.3.2 研究用タービンブレード素材寸法図

さらに研究用のタービンブレードの完成形状を決定した。

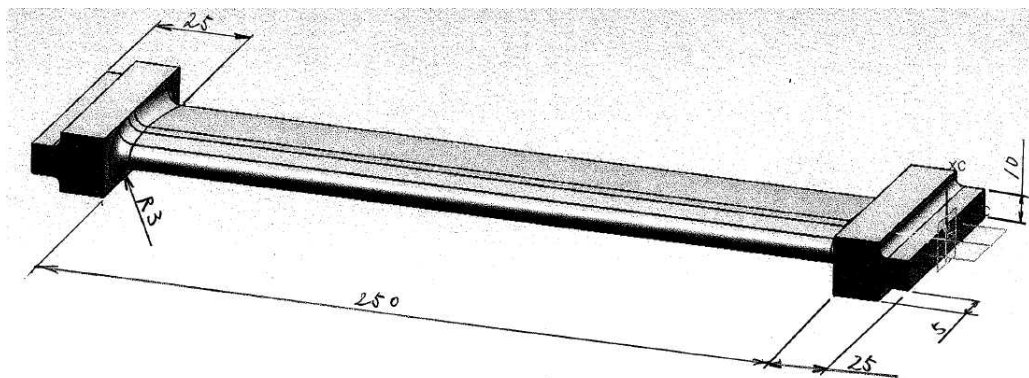


Fig.2.2.3.4 研究用タービンブレード完成寸法図

治具の仕様については下記事項を満足する構造、精度で設計・製作を行った。

- 1) 円筒治具①の外形精度つかみ変えによる加工を行うために真円度 0.01mm 及び円筒度 0.01mm を確保する。
- 2) ②と③の隙間をできる限り少なくすれば、樹脂の使用量を最小に出来る。但し切削力に垂れられる強度を持ち素材のバラツキに対して十分余裕があることが必要である。
- 3) Fig.2.2.3.5 の赤線で示された部分が、ブレードの位置決め基準である。本研究では下型に 2 か所の位置決め用のリブを設け、上型に 1 か所のリブを設ける構造で設計を行った。
- 4) ブレードを固定するための樹脂を最小限にするため、且つ切削力に対する固定力を確保するために溝を設けて溝にペースト状の樹脂を充填する構造とした。溝は下型に 1 か所と上型に 2 か所とした。溝の数、溝の深さにより接着強度が変えられ、且つ樹脂使用量を抑えられる構造にした。

上記の仕様に基づいて、ブレード固定型（円筒保持具）の設計を行う。

2.2.4 結果

2.2.3 項で研究し設計した治具を株式会社タジマにて製作した。特に上下 2 分割の治具の真円度及び円筒度の精度を確保するために最終組立後に外形寸法仕上げ加工して精度を確保した。

2.2.5 成果

本研究開発において設計製作された治具は、タービンプレードの保持精度は非常によく、計画していた仕様を満足するものとなっている。また樹脂の使用量も最小限に抑えられる構造である。素材バラツキを考慮した位置決め方法を検討すれば量産品に適用できる治具である。但し上型の位置決め方法には工夫が必要であることが分かった。

大型タービンプレード用では円筒ではなく現状の治具形状の四角型 2 個による翼面保持が最適であり、固定媒体を樹脂にすることで、作業環境の改善が見込まれる。

2.3 樹脂等による固定法の評価

2.3.1 目的

タービンプレードを樹脂で固める工法による樹脂の強度、接着力が切削力に対して十分かどうかを見極め、樹脂の使用量、接着面積等を定める。

2.3.2 目標

樹脂は固定によりタービンプレードの切削に耐えられ、樹脂固定によるひずみが出ない。さらに現状使用媒体（低融合金）より扱いやすく、コストが上がらない。

2.3.3 内容

基準面 3 点でタービンプレードを固定するが、3 点に力を加えるとたわみが生じる。これを避けてナチュラルに保持するため、基準面と反対側を接着樹脂で保持する方法を考案した。この保持力を測定する。また、加工後には樹脂をはがして治具を再利用するため、樹脂が治具から容易に剥離できるか否かを評価した。

2.3.4 結果

2.3.4.1 剥離強度の測定

固定に使用した樹脂を、使用後に特別な設備を使用せずに樹脂の固定、剥離ができる必要があり、樹脂の剥離強度を測定した。

まず、タービンプレード固定治具に離型材を塗布し、その後でペースト状の接着樹脂を溝と表面に充填する。15 時間以上の硬化後に万能材料試験機で接着樹脂を治具の鉛直方向に 1.5 mm/min の速度で引っ張り、その変位と荷重を測定した。

溝幅 8 mm、深さ 2 mm、長さ 36 mm、溝部分はエンドミルにより加工されたもので、溝底面の表面粗さは Ra 0.95 μm となっている。この溝に樹脂を充填し 15 時間以上硬化させた後、引張試験を行った。

試験は 2 回行った。図.2.3.4.1.3、図.2.3.4.1.4 に変位と荷重の関係を示す。

図.2.3.4.1.3 に示す結果では、変位 0.7mm 程度で最大荷重を示し、この時点で接着樹脂と治具は剥離した。剥離荷重は 31N であった。

また、図.2.3.4.1.4 に示す結果でも、0.7mm 程度で最大荷重を示し、この時点で接着樹脂と治具は剥離した。剥離荷重は 28.2N であった。

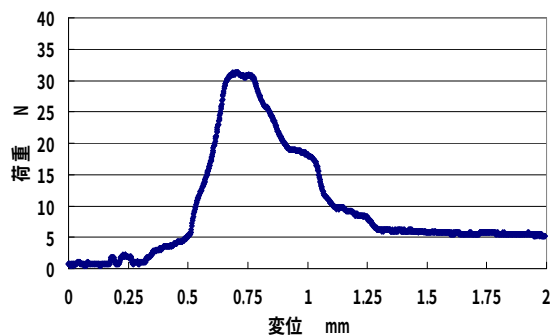


Fig. 2.3.4.1.3 剥離試験①

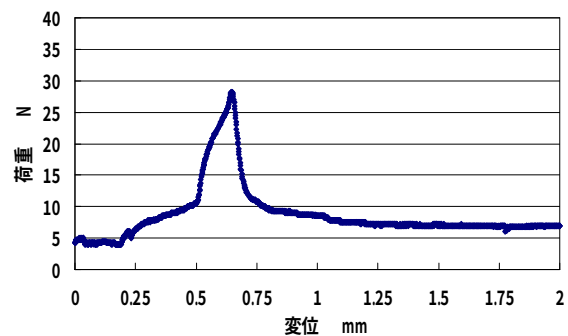


Fig. 2.3.4.1.4 剥離試験②

いずれの場合も、剥離荷重は 30N 程度であり、大きな力を必要とせず、剥離できることが分かる。試験では、接着部分中央を鉛直に引っ張っているが、実際には端部からはがせばより小さい力で剥離することが可能である。試験結果は剥離に必要な最大力を示すと考えてよい。

2.3.4.2 接着面接線方向の固定力の測定

試験片の接線方向の接着剤による固定力を測定した。接着面積が一定となるよう、離型剤が塗られていない部分が一定の 19mm x 21mm の矩形となるようにした。また、離型剤が塗られていない部分の表面粗さは Ra3.50 μm であった。試験は万能材料試験機を用い、1.5mm/min の速度で図の方向に引っ張り、変位と荷重を測定した。

試験結果を図 2-3-4-2-2 に示す。変位 0.8mm で 2 面の接着面のうち片面が剥離して荷重が低下し、反対側の片面で荷重を支える状態となり、さらに変位させると 0.93mm 程度でもう一面も剥離した。2 面で接着した場合、2 面が同時に剥離するまで耐えれば 1 面の接着強度の 2 倍の強度が得られるが、2 面の接着強度に差がある場合は、弱い方が先に剥離することになる。また、1 面ごとの最大接着強度は明確にはわからない。

そこで、片面のみ接着し、反対側は金属部分と接触した状態として試験した。図 2-3-4-2-3 に結果を示す。変位 0.8mm で最大荷重 813N を示した時点で剥離した。図.2.3.4.2.2 と図.2.3.4.2.3 とで接着力に差が見られるが、図.2.3.4.2.3 の場合では、21mm x 19mm の接着面 1 面で 813N の接線力に耐えることが示された。これは、単位面積当たり 2.03 N/mm^2 (=2.03 MPa)である。接着面の粗さが大きくなれば、この固定力も増すと考えられる。ブレードをエンドミルで切削する際の切削条件にもよるが、大きめに見積もって 1000N の接線力に耐えるには 500mm² 以上の接着面積があればよい。

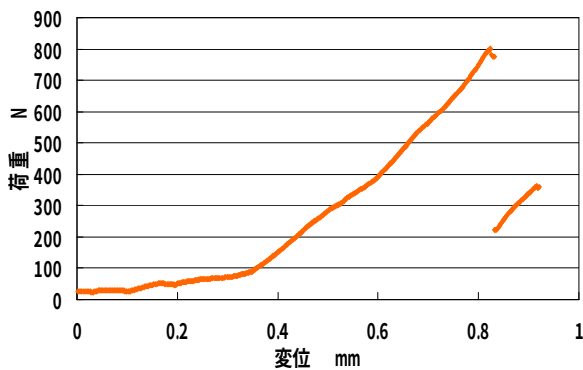


Fig. 2.3.4.2.2 接線方向の固定力試験（2面）

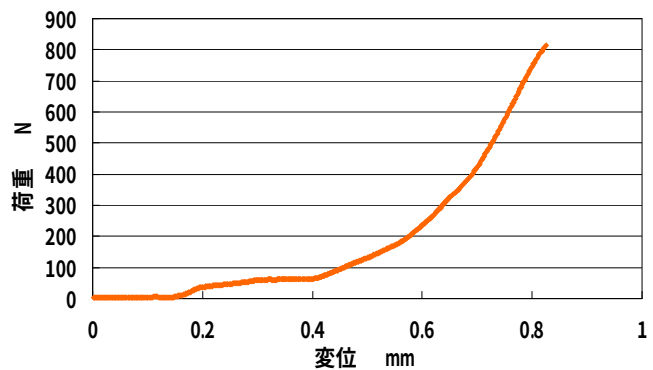


Fig. 2.3.4.2.3 接線方向の固定力試験（1面）

2.3.5 成果

従来の低融合金の場合は再度高温に温める設備が必要であったが、治具に離型材を塗布すれば、特別な設備なしで剥離出来る。また離型材を塗らない場合は非常に高い接着力があり、高能率の重切削・重研削に耐えられることが確認できた。選定した樹脂は本研究の固定媒体として使用でき、従来の固定媒体より作業性が向上できることが確認できた。

第3章 タービンブレード用の新加工方法の開発

3.1 樹脂固定による押し出し加工法の開発

3.1.1 目的

タービンブレードの翼部加工において、高速加工を行なうために翼部を樹脂にて固定して剛性を上げて高能率加工を行ない、さらに加工後の人による手仕上げ工程を機械化し、加工精度の安定を図るとともにコスト競争力を付ける。

3.1.2 目標

- 1) 樹脂は 2.1 項で研究した物を使用し、連続的に加工できる事
- 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) タービンブレードがビビリ無く切削可能である。また固定した樹脂部が連続的な把握の連続に耐えられ、加工精度が安定している。

3.1.3 内容

従来工法は両端を治具により保持して翼部は保持しないで加工している。新工法は加工部及びチャッキング部すべてを樹脂等で包み込み、樹脂等の固定している媒体ごと切削する。加工箇所の根元を保持しているので拘束力も安定していて、加工中の負荷に対しても強い。

翼面を加工するタイプのタービンブレードは、発電用のコンプレッサー部のタービンブレードが対象となる。大型及び中型タービンブレードの素材は鍛造されており鍛造後の加工は、ブレードの両端の根部及びシュラウド部の加工を行い、次工程で両端を保持して、翼面加工を行っている。このブレードを樹脂で固めて押し出し加工するには非常に大きな主軸貫通穴を持つ複合加工機による加工となり、実用化するには設備費が非常に高くなり困難である。

現状削り出しをしている、小型のタービンブレードは角材から削り出しており、角材の両側（根部及びシュラウド部）を削り、その部分を保持して翼面を加工している。工程は荒工程と、高速仕上げ工程に分かれている。高速仕上工程は翼面磨き工程を機械加工するために行われている。

本研究では、丸棒からの送り出しによる連続加工について研究し、エンドミル加工又は高能率カッターによる加工後、研削砥石による磨き加工を想定した加工工程を研究した。

素材の丸棒の外形は精度良く加工されており、送り出しによる加工において、加工のつなぎ面の段差は 0.03mm 以内になるような保持が出来る条件で研究を進める。

本研究では左側をチャックすると、ミル主軸と右側チャックの干渉が起こるためにセンター保持による加工で研究を進めた。

第一工程：Fig. 3.1.4.2 は加工前の段取り完了状態を表している。ミル主軸に取付けられたカッターにて荒加工を行う。



Fig.3.1.4.2 素材チャッキング（加工前状態）

第二工程：Fig.3.1.4.4 はフライスカッターによる荒加工完了状態である。

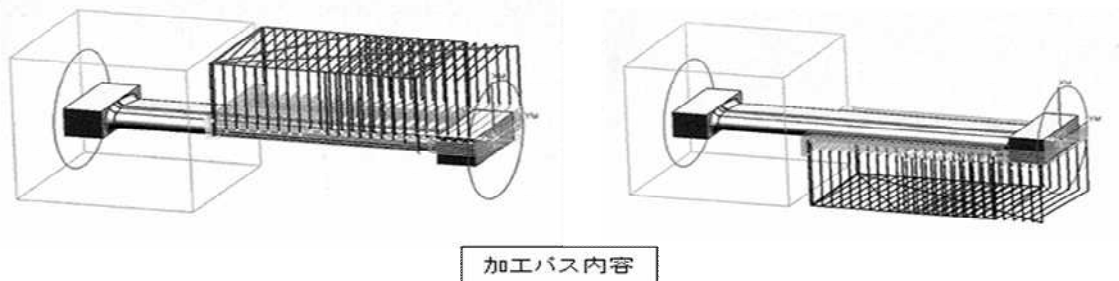


Fig.3.1.4.4 第2工程加工パス

第三工程：Fig.3.1.4.6 はラジアスエンドミルによる荒加工完了状態である。

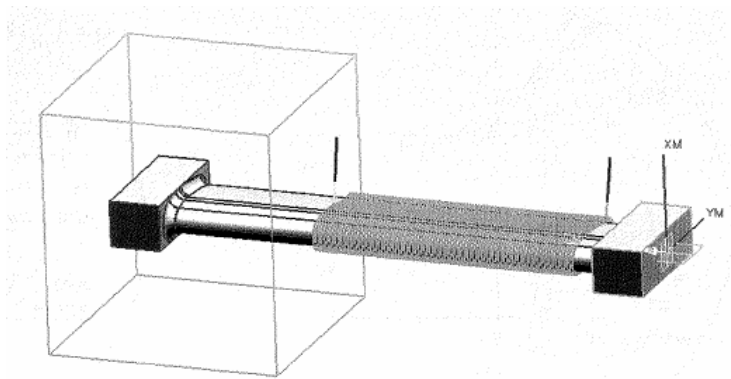


Fig.3.1.4.6 第3工程加工パス

第四工程：Fig. 3.1.4.8 はボールエンドミルによるによる中仕上げ加工完了状態である。
この後、研削加工による翼面仕上げ加工が行う予定である。研削加工については第4章で報告する。

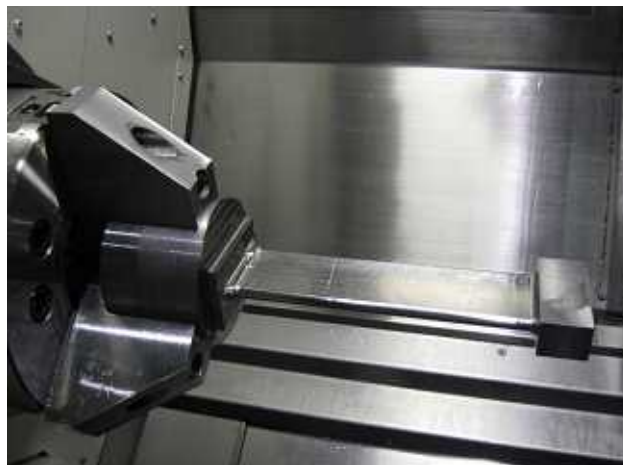


Fig.3.1.4.8 タービンプレード中仕上げ加工

第五工程：翼面仕上げ加工完了後に、本研究では開発した円筒治具にタービンプレードを取付けて未加工のシュラウド側の加工を行った。

3.1.4 結果

本研究設備はチャック側の押し出し機能が無いために、最初から突き出してセンター保持の状態で加工を行った。本研究では右側主軸にバネ式のセンターをチャックして保持していたために、センターの保持力が弱くビビリが発生し上切削加工出来なかった。但し油圧センターにて保持すればツキ出しが長くても加工可能と思われる。

素材径 $\phi 110\text{mm}$ 片側チャックで高能率の重切削加工を行うには突き出し長さが $120\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 程度までと推定される。今後、量産品加工にこの工法を適用するには設備の仕様及び素材形状についてさらに研究を行っていく必要がある。

タービンプレードの翼面の表面粗度向上は本加工方法では非常に時間が掛かり、効率が悪いいため、中仕上げ加工後に連続して複合加工機で研削加工を行いにより表面粗度の向上を図る。

3.1.5 成果

小型のコンプレッサータービンプレードは現在角材からの削り出し加工である。角材の片側をセンターで保持し、反対側を治具で保持する加工法でブレード加工を行い、本研究開発で開発した翼面研削加工法が実用化出来れば、現状の 1 工程（根部及びシュラウド部加工）、2 工程（翼面機械加工）、3 工程（翼面仕上げ加工又は磨き加工）を 2 工程に集約できる。

3.2 両端固定治具の設計・製作・検証

3.2.1 目的

両端固定治具（ピラニア治具）とは、タービンプレード両端の予め加工された根部、シュラウド部をワンタッチで保持する治具で、複合加工機の主軸と第二主軸にチャッキングできるよう外形が円筒形となる保持具である。これにより、複合加工機でブレード加工を自動化する技術に繋げる。

3.2.2 目標

3.2.2.1 治具設計、製作及び検証

- 1) 2 分割の構造でワンタッチの取付けが可能であること。
- 2) ブレード端部を把持した状態で外形は円になり、複合加工機のスクロールチャックにて繰返し精度良くチャッキングが出来ること。
- 3) 切削力に対して十分な拘束力が有ること。

3.2.2.2 治具精度検証

- 1) チャッキング後の治具外形の真円度 0.03 mm 以下の検証
- 2) チャッキング後のワークの位置決め精度は取代の $1/10$ 以下の検証
- 3) 繰返し位置決め精度は加工精度の $1/10$ 以下を検証

3.2.3 内容

円筒固定治具は複合加工機のスクロールチャックで把握できるように、円形で真円度が確保出来ていることが必要である。また治具の取付け時間が最小になるようにワンタッチでセットできる構造を研究する。さらに精度確保のための加工工程を検討し治具精度の目標値を満足させる。

締め付けは左右それぞれボルト締めで固定する構造とし位置決めは、2 か所のノックピンで行う構造とする。治具の取り扱いを楽にするために治具がワンタッチで開閉できる構造を目指す。

3.2.4 結果

研究用のブレードの根部及びシュラウド部は同一形状で設計しており治具は左右共通とする。タービンプレードの下半側を基準面とし治具にはめ込み、上側はクランプ用のボルトで押さえる構造とする。

上記の仕様に基づいて、円筒固定治具（ピラニア治具）の設計を行う。

特に上下 2 分割の治具の真円度及び円筒度の精度を確保するために最終組立後に外形寸法仕上げ加工して精度を確保した。

3.2.5 成果

治具をセットした状態での真円度は0.02mmで非常に精度がよい。但しブレード固定ボルトを締めすぎると真円度が0.06mmまで変化するため、複合加工機のチャックで把握してからセットボルトを締める必要がある。

実験結果はチャッキング後の位置決め精度を測定すると0.06mmであり、非常に精度が高いことが確認でき、この治具形状が実用化についても有効であることが証明出来た。

第4章 タービンプレード用の新工具の研究開発及び新加工技術の研究開発

4.1 ジェットブレードクーラント対応による高能率加工技術の確立

4.1.1 目的

タービンプレードの加工は大きく分けて、両端部（ルート部とシュラウド部）と翼部加工に分けられる。精密鋳造品はルート部とシュラウド部のみを研削加工し翼部は加工しない。

本研究において超高压クーラントを使用した超鋼エンドミル加工、新高压クーラント対応工具により加工時間1/2を達成する加工技術を確立させる。

4.1.2 目標

仕上げ加工において、工具刃先と製品が接触している箇所に高压クーラントを供給する事により切屑と工具のすくい面の接触長さを短くして、切削中の発熱を抑える事により工具寿命の改善が出来る。この超高压クーラントに適したタービンプレード加工用工具を開発し、高压クーラントを使用したブレード加工により加工時間を大幅に短縮し、工具寿命を飛躍的に向上させる。

4.1.3 内容

4.1.3.1 旋削加工における高压クーラント加工工具の加工寿命、加工時間の評価

耐熱合金の旋削加工における通常圧力の切削油による加工と7MPaの高压切削油による冷却及び切粉処理の違いを研究し、高压クーラント加工技術の評価を行う。

切削油のノズルから吐出される状況を比較すると、通常圧クーラントでは刃先の冷却は十分であるが切粉の切断までは出来ない。

一方高压クーラントによると切削部の冷却に加えて刃先への切粉溶着防止、切粉の切断等の効果がみられる。特に切削部に直接、高压の切削油が吐出されることにより工具に切粉の巻付き等の減少が防止でき工具の破損が防止できる。このために工具寿命が安定し長寿命化が図れる。

4.1.3.2 多刃工具のジェットクーラント対応工具の設計製作

多刃工具の設計・製作の狙いを明確にし、高能率の高压クーラント対応多刃工具を開発する。

設計の狙い・目標

- 切粉を超高压クーラント（7MPa相当）で粉碎飛散する。
- 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。
- チップと切粉の間に超高压クーラントが噴射され摩擦熱を激減させる。
- 構成刃先が溶着し剥離する時にチップ母材と一緒に剥ぎとる致命的損傷を激減させる。

4.1.3.3 多刃工具（ジェットクーラント対応工具）による加工実験

加工実験の切削条件設定

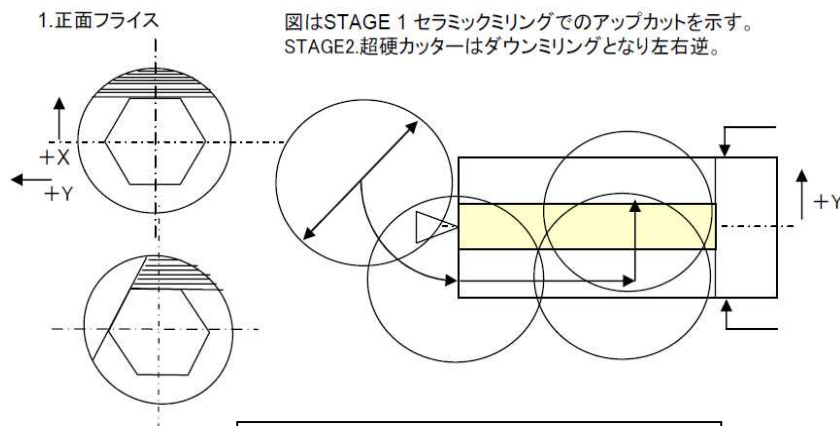


Fig.4.1.3.2.4 正面フライス加工

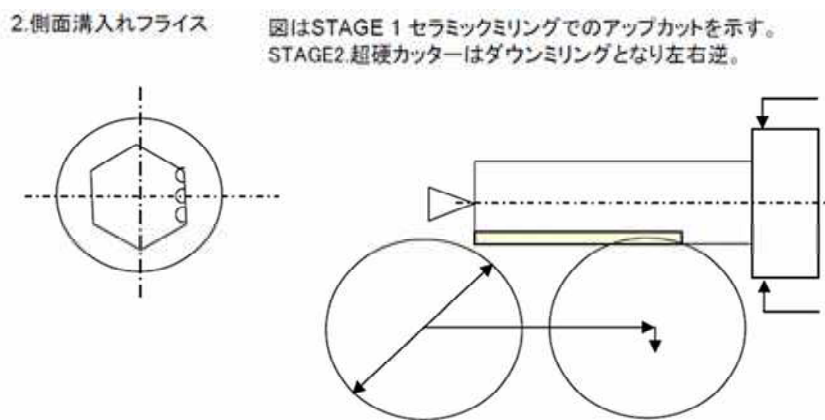


Fig.4.1.3.2.5 溝入れフライス加工

4.1.4 結果

4.1.4.1 旋削加工における高圧クーラント加工工具の研究結果

旋削工具において高圧クーラント対応工具の加工研究を行った結果、切削中の刃先に直接高圧クーラントが到達し、切粉を粉砕するために工具及び製品に切粉の巻き付きは起らない。さらに刃先の掬い面に切粉の付着も起きないために工具寿命が延びた。また切粉巻き付きによる、チップ破損の危険が無くなり、作業者が監視していたが、監視無しの無人加工が可能となる。

4.1.4.2 多刃工具のジェットクーラント対応工具の設計製作

多刃工具は正面フライス加工、溝加工の2種類の加工が可能な設計とし、尚且つ高圧クーラント対応の構造であり、1個のカッターにおいて色々な加工個所に使用出来る。これにより2タイプの加工に使用出来れば大幅な工具費の低減が実現できる。

4.1.5 成果

4.1.5.1 正面フライス加工

切削条件 $V_c=1000\text{m/min}$. $f_z=0.08\text{mm}$ $a_e=1.0\text{mm}$ 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。

4.1.5.2 溝入れフライス加工

切削条件 $V_c=1000\text{m/min}$. $f_z=0.15\text{mm}$ $a_e=3\text{mm}/a_p=11\text{mm}$ で加工できる。但し安定加工による切削の限界はテスト材の長さが1m以上必要である。想定以上の加工が可能と思われる。

4.2 重研削砥石による次世代ブレード研削工法の研究開発

4.2.1 目的

小型のブレードにおいては機械加工により最終仕上げを行なっているが、ボールエンドミルによる加工のために、非常に時間が掛かりコスト低減には至っていない。ブレード翼面切削加工後に、複合加工機で連続して研削加工が行える砥石の研究開発を行い加工時間の低減と自動化を行う。

4.2.2 目標

1. 一般的なアルミナ系の砥石と超砥石を研究しブレード研削に最適な砥石を開発する。
2. ハイパー研削の有効性を研究するために、研削点での焼けが防止できるかについて実験する。
また超砥石の研究開発を行う。
3. 複合機における研削方法を考慮した最適砥石形状を開発する。

本研究開発で1～3項の研究開発を進め、下記の目標を実現する。

- 複合加工機でエンドミル、カッターによる加工後に連続して研削加工する。
- 研削加工時のワークの表面に研磨焼けを防ぐ。
- 翼面研削時間は従来工法の1/2以下を目指す。

4.2.3 内容

難削材であるタービンブレードを重研削するためには、切味、耐久性に優れた研削工具の開発及び、高効率に研削点を冷却する研削液供給方法の開発並びに、高能率除去加工とブレード翼面の平滑性を両立することのできる研削システムの開発が不可欠である。

4.2.3.1 現状調査

従来、タービンブレード翼面の加工には、研削工具として、研削ベルトが多く用いられている。しかしながら、研削ベルトには次の様な問題点がある。

- ① 一般砥粒であるアラシダム系の砥粒が多く用いられている。アラシダム系砥粒は、超砥粒に比べ硬度が低いため、摩耗が速く、工具寿命に達する時間が短い。
- ② 研削ベルト研削は、構造上翼面形状に対する追従性に優れているが、弾性に富んだコンタクトホイールを介して、研削ベルトがブレード翼面に押し付けられるため、深切込みができない。

- ③ 研削ベルトは、基材である布紙に砥粒が一層だけ結合剤で固定されているため、表層の砥粒が摩滅して寿命に達すると、工具としての研削ベルトも寿命に達する。このため頻繁に工具交換が必要となる。

4.2.3.2 課題と研究内容

現状の問題を解決する為には、超砥粒を多層に結合した研削砥石を用いて、高切込み・高速度加工を行うことが考えられてきた。しかしながら、超砥粒砥石を用いてタービンプレード翼面を高能率に加工するためには、以下の解決すべき課題がある。

- 翼面を高能率な条件で加工すると大量の研削熱が発生し、翼面に研削焼けが生じ、翼面が加工硬化し加工能率を上げられない。
- 高能率加工を行った場合、翼面に加工変質層が深く残留する。
- 複雑な翼面形状を創製するのに時間がかかる。

以上の問題点を解決する砥石を研究開発することとした。

4.2.3.3 研削砥石及び研削アーバーの研究開発

一般的なアルミナ系の砥石による研削を行うために砥石の選定、及び複合加工機により自動交換できる、砥石アーバーの開発を行う。さらに高圧の切削液で使用を検討し、研削テストを行う。

φ100*φ25.4*20t 砥石の製作は株式会社ニートレックスが担当し、研削アーバーは株式会社ナサダが担当した。

4.2.3.4 ブレード翼面重研削用 CBN 研削砥石の研究開発

タービンプレードの翼面重研削加工のために CBN 研削砥石を開発した。現状は加工後の翼面仕上げは、ベルトグラインダで手仕上げ（磨き）が行われており、人の手作業になっている。さらに大型のタービンプレードは重量も重く作業への負担も大きい。この CBN 砥石は仕上げ面粗度の向上及び翼面の寸法精度の確保のために開発したものである。

4.2.4 結果

複合加工機による研削加工は砥石径、ワーク長さ等で制限が出る。すべてのワークに対応するためには研削アタッチメントの開発が必要となる。

4.2.5 成果

本研究で開発したタービンプレード研削システムは、新技術を取り入れることにより翼面研削が可能になる。超砥石の研削は研削焼けが無く高効率の重研削加工が可能であることが証明できた。

4.3 重研削砥石による加工技術の研究

4.3.1 目的

タービンプレードの翼面のベルトグラインダによる研削加工を、複合加工機による研削加工へ変更し、無人化加工に繋げる。

4.3.2 目標

- 1) エンドミル、カッターによる加工後に連続して、複合加工機で研削加工が出来る

- 2) 研削加工後にワークの表面に研磨焼けがなく、安定した品質を確保する。
- 3) 翼面研削時間は従来工法の 1/2 以下を目指す。

4.3.3 内容

新加工法

- 複合加工機により両端を治具で保持した状態で保持する。
- ワーク(タービンプレード)の中央から右と左にミル軸を右又は左旋回させて傾斜させ翼面転削加工のイメージで主軸を回転させながらピッチで送りながら研削加工を行う。
- 送りピッチと仕上げ面粗度を評価して送りピッチを決める。

4.3.4 成果

4.3.4.1 一般砥石の研削条件と研削結果

タービンプレードに対して砥石研磨を行い粗度を測定し荒、仕上げ加工条件の割り出しを行う。0.1~0.5mm の切込ではほとんど主軸負荷はない。さらに 1mm の大きな切込でも主軸に対する負荷は非常に少ない。

4.3.4.2 CBN 砥石の研削条件

研削送りを非常に高くして研削したが負荷は小さいので、さらに切込を大きくすることが可能と考える。

4.3.5 成果

重研削工法が複合加工機により可能となる目処がつき、従来専用設備又は手仕上げとなっていた磨き工程を汎用の複合加工機で加工可能となり、設備投資の負担が大幅に軽減される。マシニングセンターと研削盤の複合化が進めばいろいろな製品の加工において工程統合が可能となり、飛躍的にコスト低減が進む。

第6章 全体総括

本研究開発において研究開発した、樹脂固定法及び治具、高能率研削技術及び研削アーバー、高能率多刃カッター等を用いたブレード加工技術を、川下企業において成果報告させていただく機会を得て、たくさんのご意見、課題を頂けた。

航空用エンジンタービンプレードについては、新規開発中エンジンのタービンプレードへ、新技術を提案していきたい。また、発電用の大型タービンプレードにおいては、実用化に向けての技術開発、試作品の製作を進めて行く計画である。

今後の事業化のためには、川下企業と更なる意見交換を進め、課題解決にチャレンジし、新技術確立させて、品質向上とコスト低減を実現し、3~5 年後に予想される大幅な航空機エンジン及び発電用ガスタービンのタービンプレード需要の増加に対応出来るようにしていきたい。