

# 平成21年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機器関連部品製造における製作プロセスの高度化による

製作部品の高付加価値・高精度化の実現」

## 研究開発成果等報告書

平成22年6月

委託者 北海道経済産業局

委託先 株式会社キメラ

## 目 次

### 第 1 章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標 . . . . . 1 頁
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者） . . . . . 2 頁
- 1-3 成果概要 . . . . . 3 頁
- 1-4 当該プロジェクト連絡窓口 . . . . . 3 頁

### 第 2 章 本論-1：難削材加工

- 2-1 研究目的 . . . . . 4 頁
- 2-2 解析方法及び解析条件 . . . . . 4 頁
- 2-3 分析結果及び考察 . . . . . 9 頁
- 2-4 まとめ . . . . . 11 頁

### 第 3 章 本論-2：一体化加工

- 3-1 研究目的 . . . . . 12 頁
- 3-2 進捗、計画 . . . . . 12 頁
- 3-3 まとめ . . . . . 14 頁

### 第 4 章 本論-3：高精度化

- 4-1 研究目的 . . . . . 15 頁
- 4-2 進捗、計画 . . . . . 15 頁
- 4-3 まとめ . . . . . 19 頁

### 最終章 全体統括 . . . . . 20 頁

# 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

航空機関連部品において、航空機エンジン・排気部分用等に装着されるブレード形状の部品は、従来の加工方法では、本体加工、またその本体を組み込む軸受け(シャフト)加工に分けて、各々の加工を容易にし、かつ各々の加工精度を確保している。ブレードとシャフトを分離して加工するのは、各々が持つ形状の特性や材料の難削性、コストや加工効率等を勘案しての製造過程であるが、一方で、ブレードとシャフトを結合するものとして、溶接やネジ止め等での接続、組付け作業が発生し、部品の強度や耐久性の劣化を誘発する要因にもなっており、生産における歩留まりの悪さにも結実している。

本研究開発は、新たな加工方法の確立や最適な工具の選定とその加工条件の確立等を通じて「一体での部品加工」を可能にし、かつ複雑形状部の一体加工を前提に、「形状部0.005mm以下、軸受け部は0.002mm以下の加工精度を実現」することを目標とし、同部品の性能向上を目指すものである。また、ブレードやシャフトの加工にとどまらず、その他航空機関連部品における難加工(薄肉加工、分割加工の一体化加工化等)についても研究開発対象とし、航空機関連部品全般の高精度化、一体化、難削材の加工を網羅出来るよう開発を推し進める。当該部品は使用用途から難削材(インコネル材)を使用することがほとんどであり、上述した精度実現に相応する特異な加工技術開発、工法開発が併せて必須であるため、上記目標を、5軸加工機を用いて実現していく。

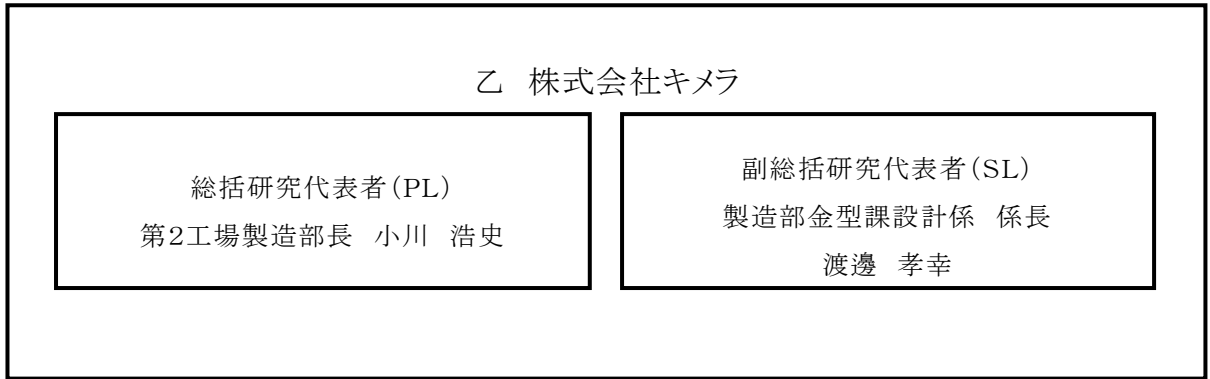
なお、開発の最終目標は、研究開発により収集したデータをデータベース化し、各部品の加工条件を即座に導き出せるシステムの作成を想定しているが、本研究開発では、上記目標値をクリアする加工条件の確立を当面の目標としている。

## 1-2 研究体制

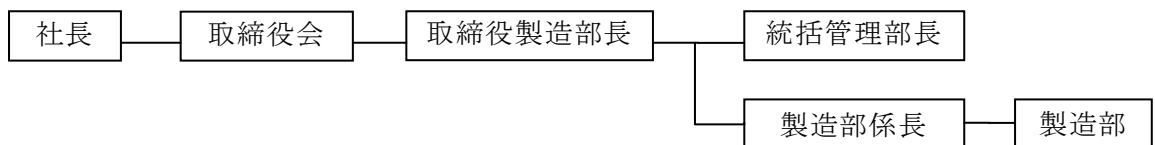
### 1. 研究体制

#### (1) 研究組織及び管理体制

##### 1) 研究組織（全体）



#### ①事業管理者・研究者（株式会社キメラ）



#### (2) 管理員及び研究員

##### 【事業管理者・研究者】株式会社キメラ

##### ① <事業管理者>

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
駿河 正哉	取締役製造部長	④
東谷 進	統括管理部長	④

##### ② <研究者>

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小川 浩史	第2工場製造部長	①②③
渡邊 孝幸	製造部金型課設計係係長	②③
赤塚 利和	製造部製造課マシニング係係長	②③
田中 勝	製造部製造課工程管理係係長	① ③
佐藤 俊	製造部第2工場マシニング係係長	①②③
小坂 亮	製造部第2工場マシニング係	②③

### (3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

株式会社キメラ

(経理担当者) 統括管理部部長 東谷 進

(業務管理者) 取締役製造部長 駿河 正哉

## 1-3 成果概要

### 1. 難削材加工

各部品における材質 (INCONEL、SUS 系材) や形状によって、工具の材質の選定や、加工条件が分類されることがわかった。また工具においては、超硬材、セラミック材と大きく2つに分類され、各々被削材、形状に選択が依存されることになる。加工条件 (切削量) も、難削材の加工において精度や面粗度を確保、向上させるためには一定の削り量が定められることがわかった。

### 2. 一体化加工

分離型の部品加工、その一体型の部品加工双方の試作加工を実施し、加工条件や工具の選定等の条件が整備された上では、明確に面粗度や精度の向上が成し得るということがわかった。とりわけ同軸度、同芯度の差は歴然としており使用用途や寿命の観点からも一体化加工のほうが優位性があることがわかった。また加工時間 (コスト) においても従来比の 2/3 は、ほぼ容易に実現できることも試作の時間の対比からわかり、一体化のメリットを見出すことができた。

### 2. 高精度化

上記 1,2 項での研究とその成果を通じて、加工条件の設定等、各種条件が整備されると、従来の精度を明らかに上回る成果が容易に得られ、またそれを定量化 (DATABASE 化) することで、研究開発での試作品以外の部品においても集積した DATABASE を用いることにより高精度の加工とその維持、向上ができるということが成果である。

## 1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

株式会社キメラ (担当: 駿河)

連絡先 電話 0143-55-5293

F A X 0143-55-5295

## 第2章 本論—1：難削材加工

### 2-1 研究目的

主に使用する難削材(インコネル)は、使用目的としては高い機能を果たすが、切削性、硬度等、加工の観点からみると非常に加工しにくい材料であり、形状保持、要求形状との忠実性の確保に困難をきたすものである。ここでは、平成21年度中に、実証試験の繰り返しを通じて、この難削材に対応した加工条件を確立し、全体の加工時間を従来比の2/3以下、出来上がり面粗度を形状部  $R_{max}0.8\mu m$  以下、軸受け部  $R_{max}0.4\mu m$  以下となることを目標とする。

### 2-2 解析方法及び解析条件

#### 2-2-1 実施事項概要

新たに調達した5軸制御加工機を用い、従来の分離型ブレードでの部品製作を複数回、形状に応じ当初実施する。複数の加工プログラムの作成と実加工を通じ、異なる形状はもとより、同一形状の加工においても「加工の方法、アプローチの方法の違いによる、形状の生成具合の違い、加工時間の相違」等のデータを収集し、最適な加工条件を確立する。

また、上記目的を達成するべく、工具選定の観点からも、複数回、形状に応じ分離型、一体型両方の製作を通じ、適正な工具の選定を確立していく。加工部位に呼応した使用本数、使用工具の特定、交換頻度等を数値化し、定量化を図り、平成21年度中にこの目標を達成、顕在化する。具体的には加工条件の確立の実証試験を行う過程の中で、難削材対応の工具の選定を、同一径での工具の材質違いや、工具先端形状の違い、工具突出し長さの違い、工具の表面コーティングの種類の違いなど多岐にわたる工具の適正の実証試験を行い、工具メーカーと工具の種類の特長、工具材質の特定、使用本数の適正化、交換頻度(加工時間、摩耗量での評価)のデータを収集し、適正な工具の選定を確立する。

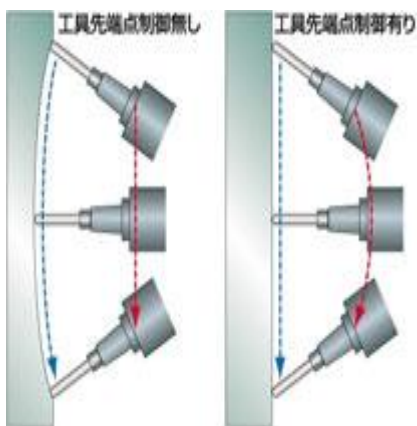
## 2-2-2 加工方法

以下に使用機械、導入特別仕様を記す。

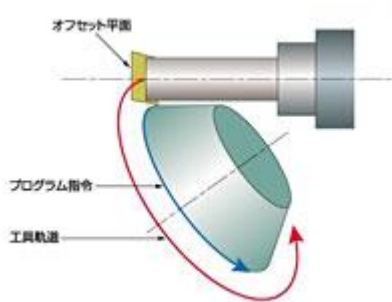
### ① 縦型5軸制御マシニングセンター加工機

メーカーでは5軸加工機における高精度加工用としての加工機。以下に導入仕様とその特徴を記す。

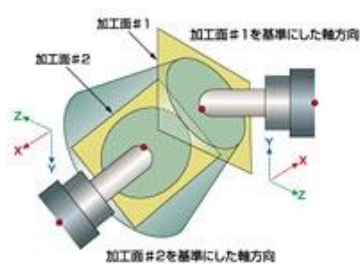
- ・ 傾斜軸・回転軸に超高トルクDD(ダイレクトドライブ)モータ駆動、トラニオンタイプの作業テーブルを採用し重量ワークの高精度な位置決めや高加減速性を実現
- ・ 工具の姿勢が変化しても、工具先端位置がプログラム指令経路および指令速度となるように自動的に制御(工具先端点制御機能)



- ・ 工具の側面で加工する場合、設定された工具径補正量に応じて自動的に工具径補正する機能を付帯(3次元工具補正)



- ・ 第4軸と第5軸を使用して、同時3軸のプログラムを傾斜面加工に使用可能にした



・機械本体



【標準機】

■ 移動量 (X×Y×Z)	550×1000×500 mm
■ 移動量 A 軸・C 軸	150° (+30° ~ -120°)・連続回転(360°)
■ 最大ワークサイズ	Φ 650×500 mm(条件付)
■ 主軸回転速度	50~14000 min <sup>-1</sup>
■ 早送り速度	X/Y/Z: 48/50/50 m/min、 A/C: 18000° /min(50 min <sup>-1</sup> )
■ 切削送り速度	X/Y/Z: 32/40/40 m/min、 A/C: 18000° /min(50 min <sup>-1</sup> )

【キメラ特別仕様機】

■ 移動量 (X×Y×Z)	550×1000×500 mm
■ 移動量 A 軸・C 軸	150° (+30° ~ -120°)・連続回転(360°)
■ 最大ワークサイズ	Φ 650×500 mm(条件付)
■ 主軸回転速度	50~30,000 min <sup>-1</sup>
■ 早送り速度	X/Y/Z: 48/50/50 m/min、 A/C: 18000° /min(50 min <sup>-1</sup> )
■ 切削送り速度	X/Y/Z: 32/40/40 m/min、 A/C: 18000° /min(50 min <sup>-1</sup> )

牧野フライス製作所製

縦型 5 軸制御マシニングセンター

HSK-A63 工具ホルダー及び MST 製焼きバメホルダー仕様



③被削材材質

・大同スペシャルメタル(株)社製

INCONEL 718

<特徴>

高温強度と耐食性を兼ね備えた析出硬化型 Ni 合金で、700℃までのクリープ強度に 優れている超合金。固溶化状態での溶接性は良好で割れを起こし難い材料である。一方、被削性、加工性には他の合金鋼に劣る側面を持つ。

・ JIS 規格 SUS316・304・403 等 (ステンレス鋼)

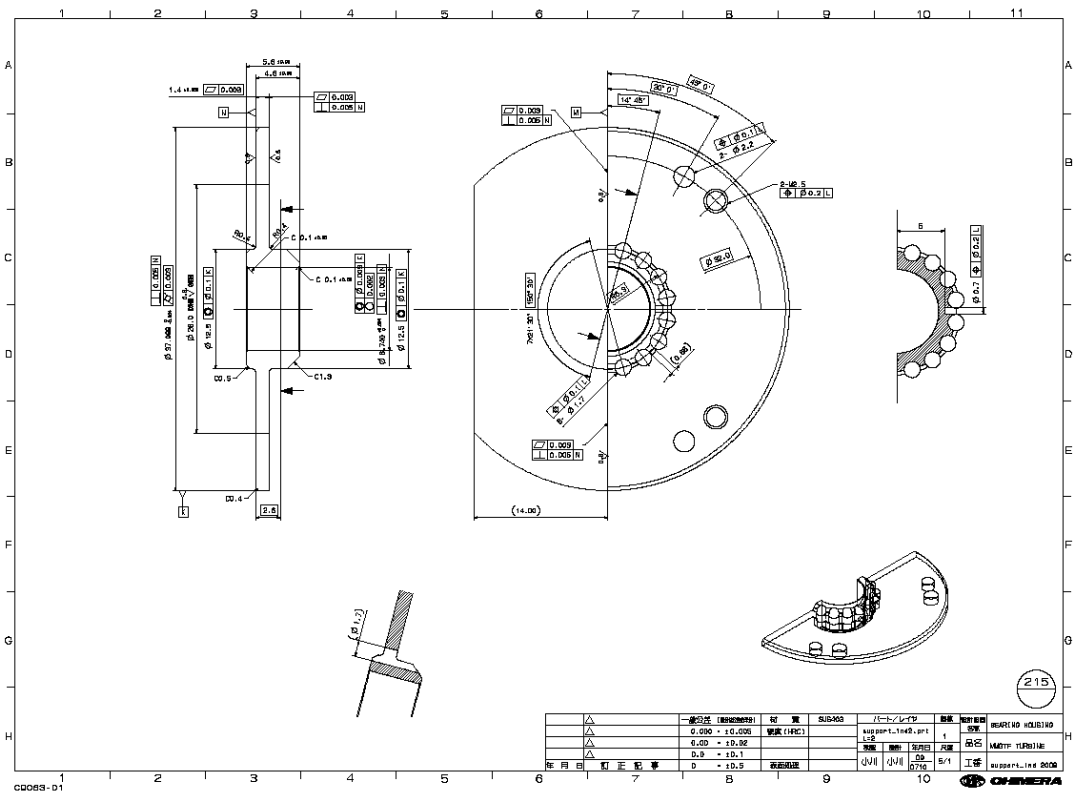
<特徴>

ステンレス材、オーステナイト系、非磁性一般的鋼種。

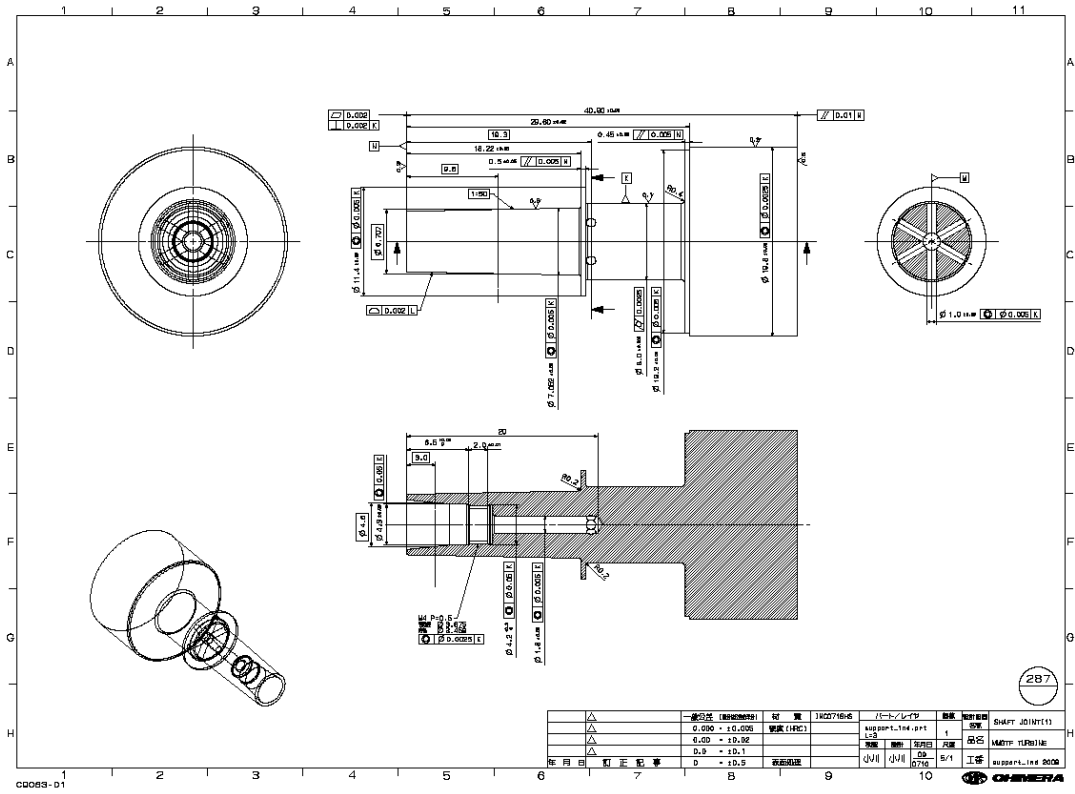
SUS316 は SUS304 と比較して耐食性に優れ、航空機器部品、薬品タンク等で利用されている素材。

ワーク図面例

<SUS 材>



< INCONEL 材 >



< 工具例 >



## 2-3 加工分析結果及び考察

### 2-3-1 加工実施・分析

インコネルは、Ni超耐熱合金でこの合金は①Fe基②Ni基③Co基に分類される。

①Fe基超耐熱合金 A286やインコロイ901

②Ni基超耐熱合金 インコネル718、ワスパロイ、プラストハードB-2、それと高耐食Ni基合金に分類されるインコネル600、インコネル625、ハステロイB-2

③Co基超耐熱合金 ステライト

#### 被削性

##### 1.高温強度が大きい

工具寿命が短くなる、切削抵抗が高くなる

##### 2.加工硬化が生じやすい(加工された表面がいま以上に固くなる現象)

工具寿命が短くなる、切削温度が高い、仕上げ面が悪くなる

##### 3.工具材料との親和性が高い(切れ刃への溶着現象)

仕上げ面が悪くなる、切りくず処理性が悪い

##### 4.熱伝導性が悪い(加工中の刃先の温度が下がらない現象)

工具寿命が短くなる、仕上げ面が悪い

被削性から工具材種を選定する時は、上記内容を含めて考える必要が有ることがわかった。

工具材種は超硬合金のP・M種やサーメット・セラミックスなどの靱性の低い工具材料では切り込み境界部の摩耗が激しくなるので使いづらい。

従って、K種の超硬合金が選ばれる。コーティング工具の使用は、切削条件などの選定が上手くいけば使用は可能であり、また寿命も長くなる。但し、切削条件などが不一致の場合は加工を困難にすることになる。K種の超硬合金の使用が当面妥当であると想定される。

#### 加工について

##### 旋削

K10、K20の超硬合金、ネガ・ポジチップ共にプレーカは切削抵抗の低減と放熱の意味をあわせて、すくい角の大きいものが望まれる。(角度は15°20°位が目安。)

切削速度は1040m/min、送りはあまりに大きいと振動等が発生するので0.050.15mm/revが目安。切り込みは粗加工は黒皮を1回で取れるように設定する。仕上げは基本的に0.3mm位が目安。

##### 切削

K10、K20の超硬合金、フライスの真のすくい角を11°23°位が目安、チップサイズはなるべく大きいものが良い、フライスの刃数は多い方が良い。

切削速度は1030m/min、送りは1刃当り0.050.15mm/刃、切り込みは粗加工は黒皮を1回で取れるように設定する。仕上げは基本的に0.3mm位が目安。

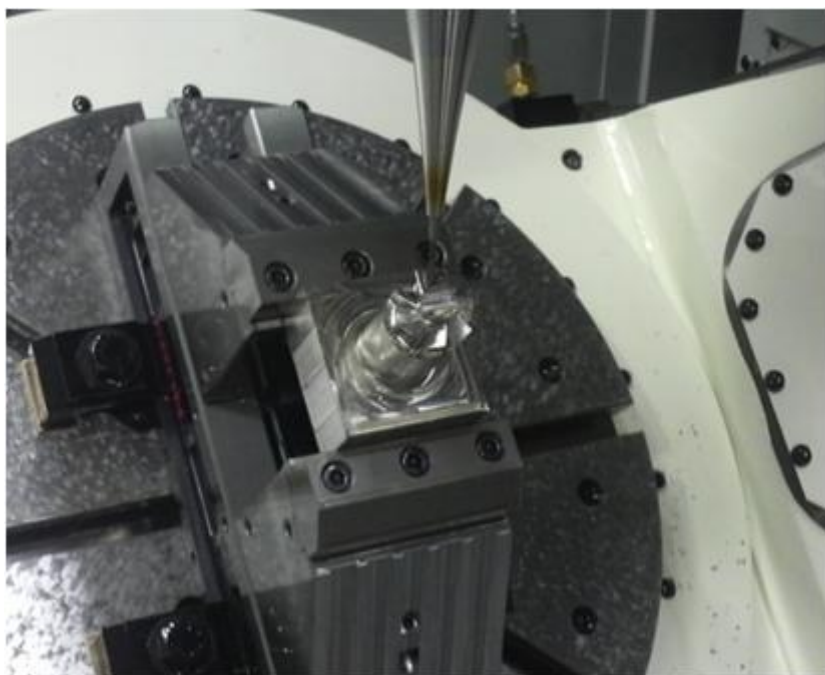
難削材の切削は基本に忠実にすれば、できるが条件の選定を間違えれば、加工さえ出来ないと

言う状態になることが試作により判明。

インコネルを代表としてその他ハステロイ、ステライト、何れもSUSの様に粘っこく、それでいて硬度はより高いという面倒な材料である。粘っこい材料にはすくい角をポジとし、高い硬度の被削材には高い硬度の切削材料、とすることで、必然的に推奨がBNかセラミックということになる。

そのうえで重要なことは、刃先処理であり刃先を保護するために、ランド(場合によってはチャンファとかホーニングなどと言われる)を付けるが、試験的に切削して、その状況によってランドの角度、幅、刃先のホーニング等を変えた。これについては、ある程度の経験的要素で決めるしかなく、状況説明が困難。しかし、基本的には、ポジ(すくい角05°程度)、出来れば切削液使用、出来るだけ硬い材質の切削工具、と言ったことが基本と考え、事実それでこれまで殆ど解決していくことが判明した。この原則さえ守れば、超硬工具でも加工可能であるが、寿命、面粗度、周速等で、BN、セラミックに劣ることも試作にて判明。BNとセラミックの差については、セラミックはBNより硬度が低く、ついでに欠けやすい、BNと超硬の中間的存在と言ってよい(厳密には適切な表現ではないが性能からそうなる)。

#### <試作加工風景>



## 2-4 まとめ

難削材の5軸加工においては、冒頭に述べている形状要素、品質要素の各組合せで、最も加工が困難とされる場所での切削加工条件の確立と分析ができた。工具材種においても加工分析から超硬合金系・セラミック系に計上によって選択が分類されることがわかった。このような、加工事例を数十回繰り返し、適正な工具材種、加工条件の収集を実施することができた。

## 第3章 本論—2：一体化加工

### 3-1 研究目的

第1章にて掲げた目標達成を図るとの並行し、その目標値を、当初は形状部、軸受け部の分離型での達成を図り、そののち形状部、軸受け部を一体化した部品としたうえで①項の目標値を達成することを目標とする。その際、加工プログラム、加工条件、工具選定において、分離型と一体型に相違があることが想定できるが、各々の特性を見極め、数値や帳票データとして顕在化し、運用可能とするまでを平成21年度の目標とする。

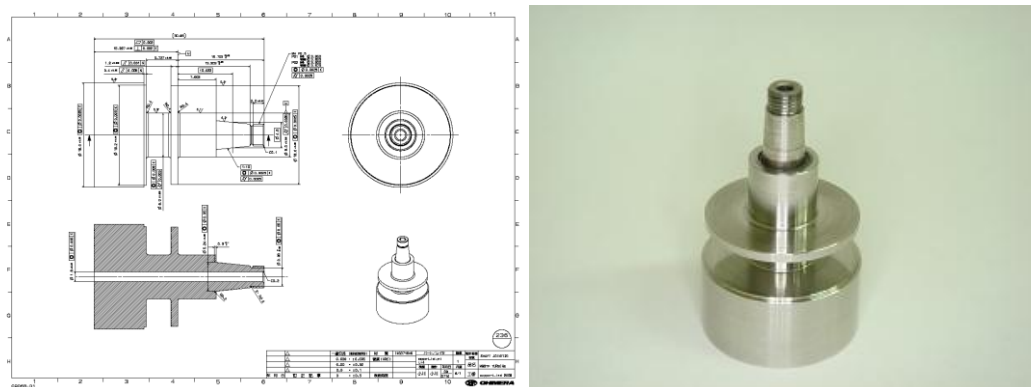
### 3-2 研究実施概要

具体的には①項と同じ5軸加工機を用い、一体型ブレードの製作を実施し、①項と同様にその評価実施とデータの収集を行い、その製作過程の中で、分離型でのそれぞれ加工プログラム、加工条件、工具選定との比較評価を実施する。その上で、精度及び面粗度と、加工時間の両側面から一体型での適正な加工プログラム、加工条件、工具選定の適正な条件を確立していく。

#### 3-2-1 実施事項

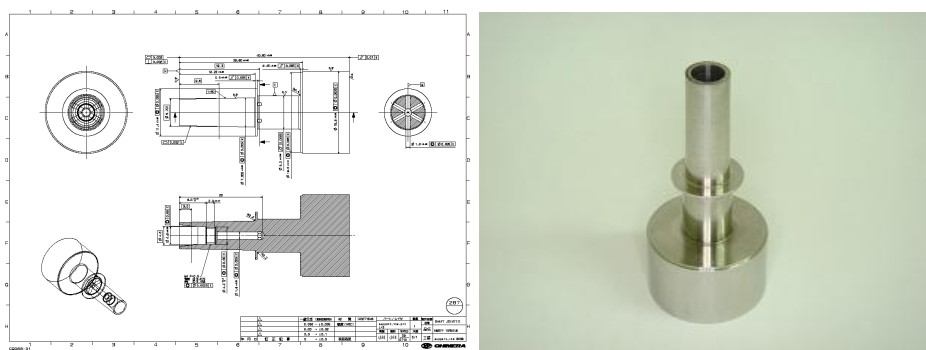
以下に表す分離型のブレードシャフトについて、分離型と一体型双方の加工を実施し、その精度や面粗度の差異を掌握し、一体型での加工精度及び面粗度等の向上を検証し、実現していく。

<分離型シャフト（左）>



分離型シャフト（左）の加工においては、加工誤差目標値 0.02mm 以下に対して加工精度の最大誤差が 0.023mm であった。また面粗度は、目標値  $0.8\mu\text{m}$  以下に対して  $R_{\text{max. D0.7}}$  を示した。シャフト左右と組み合わせた際の同心度、同軸度は 0.013mm のズレが生じた。

<分離型シャフト（右）>



分離型シャフト（右）の加工においては、加工誤差目標値 0.003mm 以下に対して加工精度の最大誤差が 0.003mm であった。また面粗度は、目標値  $0.8\mu\text{m}$  以下に対して  $R_{\text{max. D0.66}}$  を示した。

<一体型シャフト写真>



初回加工時の一体型シャフトの試作加工においては、加工誤差目標値 0.005mm 以下に対して加工精度の最大誤差が 0.038mm であった。また面粗度は、目標値  $0.4\mu\text{m}$  以下に対して  $R_{\text{max. D1.22}}$  を示した。その後継続的に加工を進めていき、最終的には加工寸法誤差 0.007mm となっている。また面粗度は目標値  $R_{\text{max}0.4\mu\text{m}}$  以下に対して  $0.62\mu\text{m}$  となっている。同芯度、同軸度は 0.004mm となり、これは分離型に比較し飛躍的に精度の向上が伺える結果となった。

### 3-3 まとめ

第2章にて明記した工具や加工条件の選定を行い工具情報などのデータ収集を行ったうえで一体化加工を並行し進め、本章での目標と合わせてそれぞれの最適と想定される選定についての結論付けに至った。

航空機器部品の一体化加工においては、その分離型に比較し、形状の凹凸が著しい部品も多岐にわたり存在することや、部分的には一体化が切削加工のみでは不可能な部位も有する部品も存在するが、可能な限りの一体化は精度、面粗度ともに実現可能であり、その製作時間についても分離型と比較し2/3程度にて加工が完了できること、また、同軸度や道震度が飛躍的に向上することから、目標値の到達には至らなかったが、コスト、精度の両面から有意義な研究開発であるということが言える。



## 第4章 本論—3：高精度化

### 4-1 研究目的

現在の形状加工精度 0.02mm(分離型)を 0.005mm 以下(一体型)に、1章、2章での実証試験を通じて形状部の高精度化を確立していく。

具体的には2章、3章での実証試験で製作した部品の精度の評価を三次元測定機にて実施し、各々の実証結果から、加エプログラムの改善、工具の見直し、加工条件の検討を繰り返し、精度評価を行い、高精度化の確立を図っていく。また軸受け加工の高精度化についても、現在の形状加工精度 0.005mm(分離型)を 0.002mm 以下(一体型)に、1, 2章での実証試験を通じて形状部の高精度化を確立していく。

### 4-2 研究実施概要

1, 2章での実証試験で製作した部品の精度の評価を三次元測定機にて実施し、各々の実証結果から、加エプログラムの改善、工具の見直し、加工条件の検討を繰り返し、精度評価を行い、高精度化の確立を図っていく。

#### 4-2-1 実施事項

概要にて記述したように、1, 2章での研究実施事項にて、精度等について記載しているため、ここでの章では、いくつかの研究事例を掲げて、その精度について内容を記載することとする。

##### 事例①

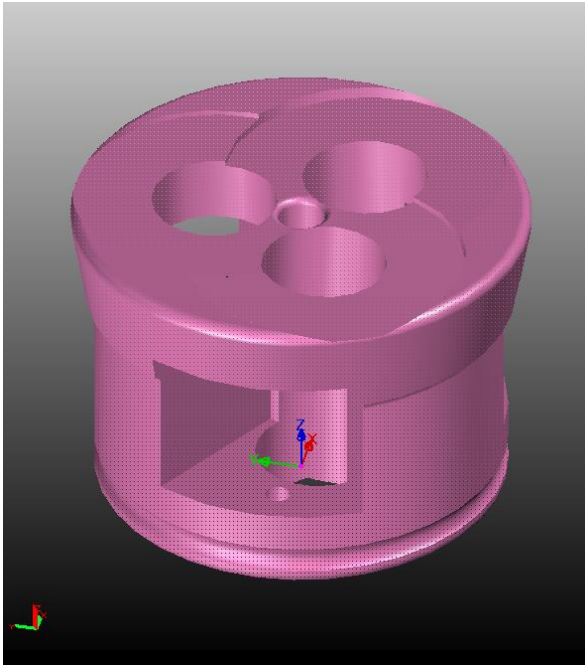


- ・中心からの半円分割タイプの疑似一体化加工(ネジ止め後に加工)
- ・材質:SUS316
- ・加工時間:39時間  
(分割時 14時間、一体化後 25時間)
- ・最大加工精度誤差 0.009mm  
(同軸度等幾何公差部含む)
- ・加工面粗度:最良 Rmax.D 0.33 $\mu$ m  
最悪 Rmax.D 0.85 $\mu$ m



事例③

< 3次元 MODEL >



< 現物加工品 >



<測定値 DATA>

コメント	指定寸法	上限 交差	下限交差	測定寸法
	182.562	0.040	-0.040	182.578
	177.863	0.060	-0.060	177.887
	88.925	0.025	-0.025	88.942
	R6.35	0.05	-0.05	6.388
	R5	0.05	-0.05	5.01
	139.7	0.2	-0.2	139.75
	44.45	0.15	-0.15	44.467
	127	0	-0.127	126.904
	10:00:00	±0:05:00		10:00:56
	R3.18	0.05	-0.05	3.188
CAD 値 94.925 で測定	117.361	0.010	-0.010	94.942
CAD 値 189.85 で測定	234.709	0.038	-0.038	189.885
3箇所共通	φ 19.05	0.1	-0.1	19.07
3箇所共通	φ 13.5	0.1	-0.1	13.44
3箇所共通	深 34.925	0.15	-0.15	35.04
3箇所共通	φ 11	0.1	-0.1	10.98
3箇所共通	深 127	0.2	-0.2	127.16
	71①	0.15	-0.15	70.99
	71②	0.15	-0.15	70.99
	71③	0.15	-0.15	71
	33①	0.15	-0.15	33
	33②	0.15	-0.15	32.98
	33③	0.15	-0.15	32.99
	4.064①	0.05	-0.05	4.084
	4.064②	0.05	-0.05	4.094
	4.064③	0.05	-0.05	4.081
上側	φ 55.563①	0.013	0	55.56
上側	φ 55.563②	0.013	0	55.566
上側	φ 55.563③	0.013	0	55.569
中間	φ 55.563①	0.013	0	55.571
中間	φ 55.563②	0.013	0	55.565
中間	φ 55.563③	0.013	0	55.561
下側	φ 55.563①	0.013	0	55.57
下側	φ 55.563②	0.013	0	55.571
下側	φ 55.563③	0.013	0	55.563
	26.924	0.127	0	27.011
T=	20.64	0.1	-0.1	1.724
X=	1.724①	0.010	-0.010	1.721
	1.724②	0.010	-0.010	1.733
	1.724③	0.010	-0.010	37.57
Y=	37.567①	0.010	-0.010	37.572
	37.567②	0.010	-0.010	37.569
	37.567③	0.010	-0.010	37.569
3等分角度	120°	±0:20:00		120:00:00

### 4-3 まとめ

本研究開発における航空機器部品の製作において、 $\phi 10$  程度の大きさのものから、 $\phi 200$  程度の大きさのものまでの範疇で、1 から 3 章までの研究開発を継続的に実施し、DATA の集約を行った上で加工を行った成果として、精度の確保は工具、加工条件等の条件を整えば、従来の公差概念 ( $0.02\text{mm}$ ) を、下回る公差の実現 ( $0.005\text{mm}$  “程度”) ができうことがわかった。またその実現に対しての所要する加工時間を短縮 (従来比  $2/3$  程度) することも可能であることがわかった。

これらを取りまとめ、今後において DATABASE 化していくことにより、定量的かつ安定的に部品製作ができるということになると想定している。

## 最終章 全体統括

1年弱の期間での短期といえる本研究開発において、機材の導入時期が押し下がったことから始まり、現実的な研究開発の期間もタイトな中での進行であった。

また、5軸制御マシニングセンター自体の導入が当社においては初の導入であり、その操作や加工手段の構想も手探り状態の中から始まり、研究期間が短いことも手伝い、先行きに不安を抱えながらの滑り出しとなった。その中でも、実務で培った3軸制御での切削加工の手法や、高精度を実現する加工構想を持ち得ていたことが功を奏し、短期間の中においても、精度、加工時間（コスト）、難削材への対応ともに一定の成果を上げることができたと考える。今後このレベルを上げ、5軸制御マシニングセンターでの、実際には一層多岐に渡る航空機器部品の製作においても、当該研究開発での成果を基に、諸々の加工条件 DATA の集積を進め、高精度実現に暗に限界をを定めていた節のある業界全体に向けて、一層の高精度、高品質、高品位の航空機器用部品の製造に寄与することを念頭に置き、その探求に勤しんでいきたい。

本研究開発が終了したのちにも、一層の探求と DATABASE の蓄積をこよなく進め、当社の技術の向上、業界全体の技術向上への情報提供や、航空機器部品以外においても複合軸加工技術の拡充に向け、これらに関係する企業に向けて当社の技術を大いに広報し、生産活動におけるひとつの大きな核となるような事業形態にするべく、研究開発で培った技術をひろく世に知らしめていく所存である。