

平成27年度中小企業経営支援等対策費補助金

戦略的基盤技術高度化支援事業

高強度チタン合金の精密加工の研究

## 研究開発成果等報告書

平成28年11月

担 当 局	近 畿 経 済 産 業 局
補 助 事 業 者	公益財団法人 新産業創造研究機構
間接補助事業者	株式会社 きしろ

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
「高強度チタン合金の精密加工の研究」

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 補助事業の概要・目標及び効果	1
(1) 概要	1
(2) 研究開発の目標	4
(3) 研究開発の具体的内容	5
(4) 期待される効果	6
1-2 研究体制	7
1-3 研究成果概要	8
第2章 高強度チタン合金の切削条件の確立と低コスト化	9
2-1 高強度チタン合金の切削条件の調査分析	9
(1) 調査分析概要	9
(2) 結果と考察	9
第3章 高強度チタン合金の加工方法の開発	12
3-1 高強度チタン合金の深孔加工技術の開発	12
(1) 開発概要	12
(2) 開発成果	13
(3) 結果と考察	15
3-2 高強度チタン合金のフライス加工技術の開発	17
(1) 開発概要	17
(2) 開発成果	17
(3) 結果と考察	20
3-3 高強度チタン合金の旋削加工技術の開発	21
(1) 開発概要	21
(2) 開発成果	21
(3) 結果と考察	23
第4章 総括	24
4-1 総括	24
4-2 今後に向けて	25
参考文献	26

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 補助事業の概要・目標及び効果

#### (1) 概要

川下製造者は、航空機用大形チタン製鍛造品の受注活動を行っており、高強度チタン合金(Ti-10V-2Fe-3Al)を使用した大形航空機 A350XWB の着陸装置部品を今回受注した。本部品は高強度チタン合金製であると共に加工難易度の非常に高い中空で複雑な形状を持っている。本研究開発は、国内で経験のない中空で複雑な形状の高強度チタン合金の加工に関するものである。川下製造者は機械加工技術を持たないため、当社が機械加工を担当し、川下製造者の開発日程に合わせて、加工方法等の研究開発を行う。

研究開発の対象は、エアバス A350XWB の着陸装置用部品である。国内メーカーが製造する航空機用チタン鍛造品では最大のものである。国産化は米ボーイング社の部品が主体であったが、これを機にエアバス社も含めた今後の航空機部品の国産化が大きく前進すると考えられている。

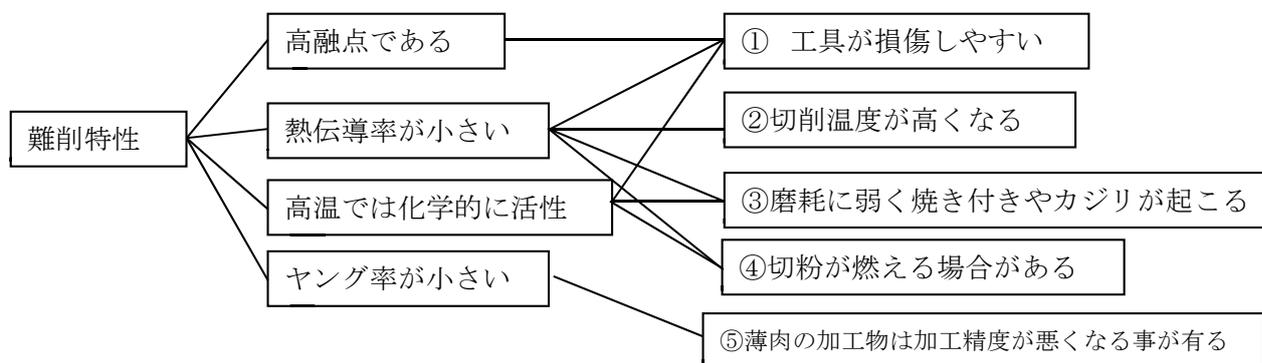
従来このクラスの航空機の着陸装置は高強度鋼(4340)であったが、燃費向上の為に、更なる機体の軽量化の要求により高強度チタン合金(Ti-10V-2Fe-3Al)に変更されようとしている。A350XWB は、標準座席数 270~350 席の大型機で、従来機より燃費を 25%削減出来、既に 40 の航空会社から 800 機以上を受注している。その着陸装置に高強度チタン合金(Ti-10V-2Fe-3Al)が採用され、国内川下製造者が受注し、今後 10 数年フランスに直接供給することになった。

着陸装置の製造は国内でも行われているが、100 席クラスの航空機用のもので小さく、材質はチタンでは無く高強度鋼(4340)である。A350XWB の着陸装置の大きさは国内で生産しているクラスの 2 倍以上もある。このように材質、部品の大きさが大きく異なるため、加工方法も全て新しく研究開発を行う必要がある。以下に着陸装置全体と今回の研究開発対象の部品の形状及び使用材料の特性について示す。

	従来の使用材料 (AISI4340)	従来のチタン材料 (Ti-6Al-4V)	新しいチタン材料 (Ti-10V-2Fe-3Al)
材料	高強度鋼	チタン合金	高強度チタン合金
強度	1000MPa	920 MPa	<b>1300MPa</b>
比重	約 7.9	約 4.5	約 4.5
被削性指数(普通鋼を 100)	57	22	<b>15</b>
結晶構造	—	αβ	<b>β</b>

従来材料に対する加工技術は長年にわたって培われた技術である。新しい材料は比強度が非常に高く航空機に対して軽量化に資するものであるが、切削性が非常に悪く、加工に時間がかかる点に特徴がある。また、その加工性に対する情報は、一般に公開されたものが非常に少ないとい

った点にも特徴がある。我々が加工の経験を有する難削材である最も一般的であるチタン合金 (Ti-6Al-4V) から考えた特性を要約すると



上記の要約図はチタン合金 (Ti-6Al-4V) の経験からくる特性であるが、今回の A350XWB の着陸装置の材質である高強度チタン合金(Ti-10V-2Fe-3Al)の場合は、それぞれの難削要因が悪い側に振れることが予想され、とりわけ上記① (工具が損傷しやすい) と② (切削温度が高くなる) ③ (磨耗に弱く焼き付きやカジリが起こる) に大きく影響が出てくると言われている。

## ○新技術を実現するための解決すべき課題

### 【1】 高強度チタン合金の切削条件の確立と低コスト化

一般公開された情報がほとんどないが、工作機械メーカー、工具メーカー、切削油メーカー等の加工に関連する資材を提供する側及び川下製造者等の情報を調査分析し、我々として基礎実験の切削テストを行い、基本的な切削条件を確立する。

### 【2】 高強度チタン合金の加工方法の開発

#### 【2-1】 高強度チタン合金の深孔加工技術の開発

中空形状を形成するための中実 (無垢) 材からの深孔加工 ( $\phi 280\text{mm}$  長さ 2.2m) は、BTA方式による加工しか選択枝がない。文献による高強度チタン合金の切削条件は、一般的なチタン合金(Ti-6Al-4V)の 2/3 程度であり、周速 25~30m/min、送り 0.10~0.15mm/rev である。ここから言える事は、この高強度材に対し、2.2mの深さを加工するのに 9.5 時間、切削長にして 20km もの連続加工になるという過酷な条件である。しかも、加工中に加工状況の確認が出来ないのが深孔加工の難しさである。一方で、その要求精度の「孔の振れ」や「内径の粗度」が厳しいことから、我々の経験の領域を超え、従来技術では成し得ないと考える。チタン合金の特徴である③ (磨耗に弱く焼き付きやカジリが起こる) が、ガイドパッド (安定的に精度良く加工するためのガイド部) に損傷を与えその結果工具刃先にも悪影響を与えることは、純チタン材の深孔加工の経験(粗度は 50S 以下に成らない)から容易に推定できる。工具刃先の磨耗とガイドパッドの損傷は、どちらも孔の曲がりや内径の焼き付きやカジリ(粗度不良)へと進展する。これらの改善には、ガイドパッドの構造を大きく改善した「ガイドパッド回転フリー方式」を実用化し、焼き付きやカジリを防止する必要がある。また、素材は 1.5ton、加工後は数百 kg の軽量のワークに対し、孔径が大きく、このアンバランスな力関係と高強度

チタン合金である事から、ビビリ振動が発生する可能性が高い。一般的な製品回転で工具固定方式では、このビビリの抑制が出来ないと考える。加工時に製品と工具が同時に逆回転する「2軸リバース回転方式」を実用化する事により、共振のビビリ振動を回避の微調整を可能とし、更には製品に対する工具の求芯性を高め、孔の曲がり防止を図る。

### 【2-2】高強度チタン合金のフライス加工技術の開発

大形で複雑形状の加工は、工作機械に大きな負荷がかかることから、切削負荷が機械の剛性を最大限生かす方向に作用させる必要がある。また、加工の高率化面から、単位時間の切削量の最大化も課題である。そのため、特殊な形状を持つ主軸の軸方向での切削を行う工具「推力カッター」の新規開発を行うと共に工具の長寿命化を図る。また、負荷量を制御するため、モーター動力の監視を行い、工具摩耗を増加させない範囲で切削条件を自動調整する機構を設け、加工の高速化を図る。

### 【2-3】高強度チタン合金の旋削加工技術の開発

BTAによる中心孔加工と同じく、スライダの軸部の外径加工は、長時間におよぶことが想定され、加工時間が連続7時間にもおよぶ。現実的には工具の摩耗の進行で加工精度は確保できない。従って、工具摩耗の許容範囲で加工が完了するように、加工工具の刃先形状を熱が籠らない薄い切粉が出るもの「薄切粉加工法」を開発し、工具の長寿命化を図ると共に加工速度の高速化を行うことで、加工時間の短縮を図り、加工精度の高精度化を実現する。その際、工具の摩耗を防止する目的で、一般的なチタン合金(Ti-6Al-4V)の加工の文献に記載されている「刃先冷却の有効性」をこの高強度チタン合金にも適用すべく、大量の冷却油の供給を工具刃先に近い所から放出させる「刃先の冷却」を積極的に行う。

対策と特性の関連性	ガイドパッド 回転方式	2軸リバース 回転方式	推力カッター	薄切粉 加工法	刃先冷却
① 工具が損傷しやすい	○	◎	◎	○	○
② 切削温度が高くなる			○	◎	◎
③ 磨耗に弱く焼き付きや カジリが起こる	◎		○		○
④ 切粉が燃える場合がある					○
⑤ 薄肉の加工物は加工精度が 悪くなる事がある	○	○	○	○	○

## (2) 研究開発の目標

本研究開発における川下製造者の高度化目標は、高強度チタン合金製で中空形状を中心とした、中・大形部品で複雑形状を持つ加工対象部品に対する加工技術を開発して、世界に伍する安定した品質とコスト競争力の確保に資することである。

### ○技術的目標値

対象となる高強度チタン合金は一般的な Ti-6Al-4V 合金に対して、加工性は 2/3 程度と難削性が非常に高い。現在設定している加工時間は、加工性の難易度を加味しているが、加工技術が確立されていないため、その実現性には不安要素がある。今回の研究開発の技術的な目標は、高強度チタン合金の加工技術を確立することにより、現状の加工時間の設定値を研究開発期間内に満足させることである。

個々の技術課題に対しては、以下を技術的目標とする。

#### 【1】高強度チタン合金の切削条件の確立と低コスト化

Ti-10V-2Fe-3Al 合金の切削加工条件等のデータ収集及び分析に加え、基礎実験による切削テストで切削条件を確立し、加工時間短縮によるコストの削減を必達する。

#### 【2】高強度チタン合金の加工方法の開発

##### 【2-1】高強度チタン合金の深孔加工技術の開発

中空形状を形成するための深孔加工において、一般的には孔加工長さ 1m に付き曲がり は 1mm 以内である。本研究では、製品回転、工具回転の併用の「2軸リバース回転方式」で、曲がり は 1/2 の加工長さ 2m で 1mm 以下を、ガイドパッドの改善「ガイドパッド回転フリー方式」で加工孔内部の表面粗さ Ra 12.8 ミクロン以下の要求精度を満足する高精度の加工を達成する。

##### 【2-2】高強度チタン合金のフライス加工技術の開発

加工対象の加工中の振動を軽減するための工具形状「推力カッター」の開発と軸芯給油の高圧化に加え、負荷動力監視による加工条件の適正化により、計画工具寿命の 30% 以上の高寿命化とフライス加工の対象加工部分の加工時間を計画比 15% の短縮を実現しコストの削減を図る。

##### 【2-3】高強度チタン合金の旋削加工技術の開発

工具の刃先形状の変更で高送りを実現すると共に、加工中の切削熱を抑える加工方法「薄切粉加工法」と効果的に冷却する「刃先の冷却」により、7 時間を 6 時間以下にし、加工の高速化と工具の長寿命化により、工具交換を行う事無く加工を完了させる事を目標とする。

### (3) 研究開発の具体的内容

個々のサブテーマ毎の具体的内容は以下の通りである。

#### 【1】高強度チタン合金の切削条件の確立と低コスト化

研究機関、文献等の調査と共に、欧米での加工事例、工作機械メーカー、工具メーカー、切削油メーカーからの情報等でデータ収集した上で、基礎実験による切削テストを行い、低コスト化が図れる切削条件を確立する。

#### 【2】高強度チタン合金の加工方法の開発

##### 【2-1】高強度チタン合金の深孔加工技術の開発

難削材であり、かつ大径の深孔加工であることから、既存設備を改造し、製品の回転、固定、工具の回転、固定を自由に組合せ可能な「2軸リバース回転方式」構造にし、各種の加工方法が選択できるようにする。また、チタン合金であることから回転数の範囲が低速にならざるを得ないため、所要の切削トルクを満足出来ないことが考えられる。モーター馬力を増強し、加工時に必要な低速域での加工トルクを得るようにする。製品・工具の双方の回転を行わせることで、ビビリ振動である共振域を容易にずらす事が出来る。また、製品、工具間の求芯性が飛躍的に高まり、加工の曲がりやを防止し高精度化を実現する。また、孔内部の表面粗度を向上させるため、工具とガイドパッドを切り離し構造とし、ガイドパッドの材質を変更することで、ガイドパッドは、製品に追従した回転となるような改善を行い、製品の内面とガイドパッドは滑らない構造「ガイドパッド回転フリー方式」とする。これにより、摩擦によるガイドパッドの損傷を防止することで加工内径面の悪化を防止し、厳しい面粗さ 12.5S の精度確保をおこなう。深孔加工は、加工終了まで加工性状が確認できないため、加工中の振動や、動力系（主軸、工具回転、送り）の電流値など、センシング技術を駆使し、監視しながら最適条件を見極めて行く。本研究も他と同じく実部品と同一形状を持つ供試品で評価を行う。

##### 【2-2】高強度チタン合金のフライス加工技術の開発

大形で複雑形状の加工は、工作機械に大きな負荷がかかることから、工作機械（フライス加工機）は、非常に剛性のある設備を選択している。加工時は主軸に大きな負荷がかかるが、負荷を主軸方向で受けることができれば、曲げによる振動は発生も押さええることができる。そのため、特殊な形状を持つ主軸の軸方向切削を行う大径のプランジ加工工具「推力カッター」の新規開発を行い、主軸の振動の発生を減らす事により、送り及び工具回転数などの切削条件の高速化を図る。

また、加工の高効率化の面から、単位時間の切削量の最大化を行うため、主軸モーターの動力監視を行い、工具の摩耗が異常に進行しない範囲での切削条件を自動的に調整する機構を設け、更には工具の寿命に最も影響がある冷却を積極的に行うため、軸芯給油ケラントの高圧化（0.7MPa⇒3.0MPa）も行い、加工の高速化を図る。これらの研究は、実部品と同一形状を持つ供試品（鍛造試作、鍛造評価用）にて、実施する。合わせて他の原因による振動を防止するため、工具、取付治具を専用のものを開発する。

### 【2-3】高強度チタン合金の旋削加工技術の開発

仕上げ加工において、7時間を越える長時間加工が想定されるなか、加工時間内で加工精度維持するために工具刃先の専用形状を開発する。具体的には同一の送りに対しては切粉厚みを薄くするように刃先の切刃角度に変更し、高送りを行うこと「薄切粉加工法」で、加工時間の短縮（6時間以下目標）による加工コストの削減を図る。また同時に、工具の刃先摩耗からくる加工精度の悪化を防止出来ることで、高精度化を実現する。上記と同時に、工具の長寿命化を図るため、大量の冷却油の供給を工具刃先に近い所から放出させる「刃先の冷却」を積極的に行う。

いずれも、実部品と同一形状を持つ供試品にて、効果についての評価を行うと共に、仕上がりの面粗さの評価を行い、最適切削条件を導く。さらに上記研究とあわせて、工具、取付治具等の形状の最適化を行う。

#### （4）期待される効果

##### 【研究開発成果の効果(波及効果も含む。)】

本研究開発で得られた成果により、川下製造者の航空機用の着陸装置部品の納入スケジュールの確保が可能となる。品質、スケジュールの確保は顧客の信用を得ることと、今回の機体メーカーに日本の技術の確かさを示すこととなり、今後の国内メーカーの受注活動に大きな弾みと成ると考える。取り分け、エアバス及びボーイング社の機体メーカーからの今後の引き合いは航空機業界の成長以上に日本のシェア増に繋がると考えられる。

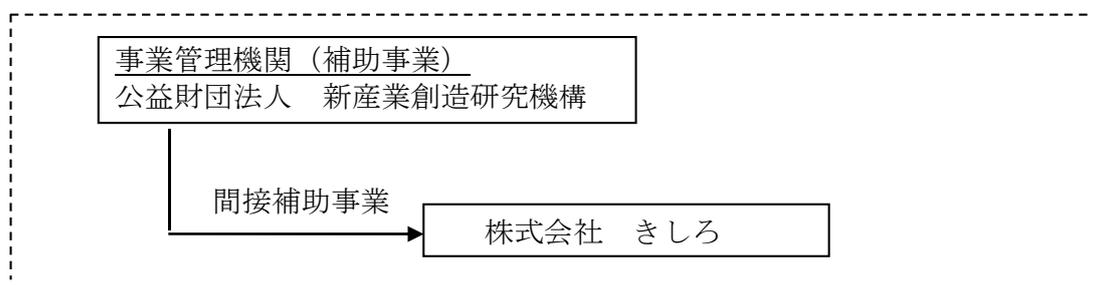
更に、川下製造者にとっては、航空機業界のニーズでもある「チタン合金の鍛造材料供給から1次機械加工までに受注範囲だけでなく、部品の完成形状での供給」へと波及効果が見込まれる。それにより川下製造者のチタン合金の供給市場のグローバル化が期待できる。

この高合金チタンの加工技術は、油送管事業や、プラント関係にも共通する技術であり、今後、更に広がりのある技術として成長していくと考える。

##### 【新たな事業展開の可能性】

本研究開発成果により、川下製造者の機械加工の中核を担当することになり、今後の事業展開の拡大の可能性が飛躍的に大きくなる。また、川下製造者の鍛造能力にはまだ余力があり、その余力を充足できれば、当社には更なる受注機会が生まれる。航空機分野のみならず、油送管事業や、プラント関係への事業展開も行っていきたい。

1-2 研究体制  
研究組織（全体）



総括研究代表者（P L）  
株式会社 きしろ  
生産技術本部長  
藤田 義信

副総括研究代表者（S L）  
株式会社きしろ  
播磨精機工場長  
住元 義則

(1) 管理者および研究員

(1-1) 事業管理機関 公益財団法人新産業創造研究機構

管理員（プロジェクト管理）

氏 名	所属・役職
小坂 宣之	研究所研究一部担当部長
森本 啓之	研究所研究二部部長
川口 雅弘	研究所所長
山口 寿一	産学連携推進部 産学官連携総括ディレクター

(1-2) 間接補助事業機関

株式会社きしろ

氏 名	所属・役職
藤田 義信	生産技術本部長
住元 義則	播磨精機工場長
寺尾 卓也	生産技術部部長
山崎 剛	生産技術部課長
宮永 繁幸	生産技術部主任
大西 一実	高砂工場長
高畑 健	総務部部長

### (1-3) アドバイザー委嘱委員

氏名	所属・役職
奥田 孝一	兵庫県立大学工学研究科 教授
前田 恭志	株式会社神戸製鋼所技術開発本部 研究首席
尾崎 勝彦	株式会社神戸製鋼所技術開発本部 担当部長

### 1-3 研究成果概要

#### ① 高強度チタン合金の切削条件の確立と低コスト化（平成26年度）

文献調査、アドバイザーからの情報提供及びディスカッション、供試材における基礎データ収集のための切削テストを実施した結果、Ti-10V-2Fe-3Al合金の基本的な切削条件を知ることが出来た。平成27年度は、②の工程毎の加工方法の開発に蓄積した基礎データを展開した。

#### ② 高強度チタン合金の加工方法の開発（平成26，27年度）

##### ②-1 高強度チタン合金の深孔加工技術の開発

1. 主軸回転と工具回転の両機能を有する「2軸リバース回転方式」加工装置による加工穴の曲り抑制技術
2. 「ガイドパッド回転フリー方式」工具による穴加工表面粗さの改善技術を開発し、曲り、表面粗さ等の要求精度を満足することができ、加工時間についても予想以上の成果を得ることができた。

##### ②-2 高強度チタン合金のフライス加工技術の開発

1. 主軸方向切削を行うための特殊形状をもつ「推力カッター」の開発
2. 加工工具の「刃先冷却」を積極的に行うための高圧クーラントの刃先への供給技術
3. 主軸モータ動力監視等による加工条件自動調整及び加工の高速化技術を実施し、15%程度の加工能率向上の目途を得た。

##### ②-3 高強度チタン合金の旋削加工技術の開発

1. 切刃角度の最適化による「薄切粉加工法」による加工時間の短縮技術
2. 旋削加工における「刃先冷却」のための切削油供給方法により、当初目標の加工時間の確保と工具の飛躍的な長寿命化に結び付けた。

## 第2章 高強度チタン合金の切削条件の確立と低コスト化

### 2-1 高強度チタン合金の切削条件の調査分析

#### (1) 調査分析概要

今回の研究対象である高強度チタン合金 (Ti-10-2-3) の加工に対する公開された情報がほとんどなく、平成 26 年度は工作機械メーカー、工具メーカー、切削油メーカー等の加工に関連する資材を提供する側及び川下製造者等の情報を収集調査分析し、基礎実験の切削テストにより基本的な切削条件の確立を試みた。さらに平成 27 年度は、テスト材、実態に近い供試材の試験加工を通じて、より実用的な切削条件の確立を試みた。

#### (2) 結果と考察

特殊材料を含めた現存する材料の切削条件について系統的にまとめられている資料として、切削加工に携わる技術者によく知られている *Machining Data Handbook 3rd Edition* があるが、同様の切削条件が系統的にまとめられた文献を見つけることができなかった。今回の対象研究対象である高強度チタン合金に関する文献は材料特性等に関するものが多く、我々の研究に必要とする切削条件についての情報を得ることはできなかった。加工の難しさを示すデータとして、チタン合金の加工時の工具寿命は、Ti-6-4 を 1 とした場合、 $\beta$  Alloy である Ti-10-2-3 は 0.5、更に Ti-5-5-5-3 は 0.25 程度であることが示されていたが、その根拠になるデータは発見できなかった。

以下に、*Machining Data Handbook 3rd Edition* より、今回の調査対象である加工方法、B T A、ミーリング、旋削加工について切削条件を引用する。引用に際して、一般的なチタン合金である Ti-6Al-4V と高強度チタン合金 Ti-10-2-3 の切削条件が対比できるように双方の切削条件をあげた。

#### ① オイルホールドリル、ガンドリル加工

表 2-2-1 Oil-Hole OR Pressurized-Coolant Drilling

MATERIAL	HEAD - NESS Bhn	CONDITION	SPEED	FEED mm/rev							TOOL MATL GRADE
				NOMINAL HOLE DIAMETER							
				m/min	3mm	6mm	12mm	18mm	25mm	35mm	
Alpha AND Alpha- Bate alloys Ti-6Al-4V	310 to 350	Annealed	12	0.025	0.075	0.130	0.180	0.200	0.250	0.300	S9,S11
			46	0.013	0.050	0.102	0.150	0.200	0.250	0.300	K10
	320 to 380	Solution Treated and Aged	11	0.013	0.075	0.130	0.180	0.200	0.250	0.300	S9,S11
			30	0.013	0.025	0.050	0.102	0.150	0.200	0.250	K10
Beta Alloys Ti-10v-2Fe-3Al	275 to 350	Annealed or Solusion Treated	9	0.013	0.025	0.050	0.102	0.150	0.180	0.200	S9,S11
			24	0.013	0.025	0.050	0.102	0.150	0.180	0.200	K10
	350 to 440	Solution Treated and Aged	9	0.013	0.025	0.050	0.075	0.130	0.150	0.180	S9,S11
			24	0.013	0.025	0.050	0.075	0.130	0.150	0.180	K10

表 2-2-2 Gun Drilling

MATERIAL	HEAD - NESS Bhn	CONDITION	SPEED	FEED						TOOL MATL GRAD
				NOMINAL HOLE DIAMETER						
			m/min	2-4mm	4-6mm	6-12mm	12-18mm	18-25mm	25-50mm	ISO
Alpha AND Alpha-Bate alloys Ti-6Al-4V	310 to 350	Annealed	30	0.004 to 0.006	0.008 to 0.013	0.013 to 0.018	0.018 to 0.023	0.02 to 0.025	0.025 to 0.038	K20
	320 to 380	Solution Treated and Aged	30	0.004 to 0.006	0.008 to 0.013	0.013 to 0.018	0.018 to 0.023	0.02 to 0.025	0.025 to 0.038	K20
Beta Alloys Ti-10v-2Fe-3Al	275 to 350	Annealed or Solusion Treated	30	0.004 to 0.006	0.008 to 0.013	0.013 to 0.018	0.018 to 0.023	0.02 to 0.025	0.025 to 0.038	K20
	350 to 440	Solution Treated and Aged	20	0.004 to 0.006	0.008 to 0.013	0.013 to 0.018	0.018 to 0.023	0.02 to 0.025	0.025 to 0.038	K20

② ミーリング加工（主としてエンドミル加工）

表 2-2-3 End Milling Peripheral

MATERIAL	HEAD - NESS Bhn	CONDITION	RADIAL DEPTH OF CUT	SPEED	FEED mm/tooth				TOOL MATL GRADE
					CUTTER DIAMETER				
			mm	m/min	10mm	12mm	18mm	25-50mm	ISO
Alpha AND Alpha-Bate alloys Ti-6Al-4V	310 to 350	Annealed	0.5	88	0.025	0.05	0.13	0.18	K20 M20
			1.5	79	0.5	0.075	0.15	0.2	
			dia/4	49	0.038	0.05	0.13	0.15	
			dia/2	38	0.25	0.025	0.102	0.13	
	320 to 380	Solution Treated and Aged	0.5	69	0.025	0.05	0.102	0.15	K20 M20
			1.5	60	0.5	0.075	0.13	0.18	
dia/4			38	0.038	0.05	0.13	0.15		
Beta Alloys Ti-10v-2Fe-3Al	275 to 350	Annealed or Solusion Treated	0.5	46	0.025	0.05	0.13	0.18	K20 M20
			1.5	40	0.038	0.075	0.15	0.2	
			dia/4	23	0.025	0.05	0.13	0.15	
			dia/3	15	0.018	0.025	0.102	0.13	
	350 to 440	Solution Treated and Aged	0.5	38	0.018	0.038	0.075	0.13	K20 M20
			1.5	34	0.025	0.05	0.102	0.15	
			dia/4	18	0.018	0.038	0.075	0.13	
			dia/3	14	0.013	0.025	0.05	0.102	

③ 旋削加工

表 2-2-4 Turning ,Single Point Indexable

MATERIAL	HEAD- NESS Bhn	CONDITION	DEPTH OF CUT	SPEED	FEED	TOOL MATL GRADE
			mm	m/min	mm/rev	ISO
Alpha AND Alpha-Bate alloys Ti-6Al-4V	310 to 350	Annealed	1	69	0.130	K01,M10
			4	59	0.200	K10,M10
			8	44	0.250	K20,M20
			16	21	0.400	K20,M20
	320 to 380	Solution Treated and Aged	1	58	0.130	K01,M10
			4	50	0.200	K10,M10
			8	37	0.250	K20,M20
			16	18	0.400	K20,M20
Beta Alloys Ti-10v-2Fe-3Al	275 to 350	Annealed or Solusion Treated	1	49	0.130	K01,M10
			4	41	0.200	K10,M10
			8	26	0.250	K20,M20
			16	15	0.400	K20,M20
	350 to 440	Solution Treated and Aged	1	38	0.130	K01,M10
			4	32	0.200	K10,M10
			8	24	0.250	K20,M20
			16	12	0.400	K20,M20

これらの表についての条件としては、工具の寿命が30分から60分の寿命とされている。

また、Machining Data Handbook 3rd Edition の発行は1980年であり、当時の工具最良から多くの新しい工具材料が開発されており、それらを考慮の上、本データを参考としていく必要がある。

さらに、近年、工具材料の開発、難削材料の一般化等により、ISOでも超硬チップのグレードが細分化され、前出の表内の工具材質と異なる材種が出現している。それらを考慮して各工具メーカーのデータを解析していく必要がある。

ISOの分類によれば、M=ステンレス用、K=鋳鉄用、S=耐熱合金用等が使用対象の工具材種となり、それらの群の中にはコーティング材種も含まれるが、チタン合金加工に於けるコーティングの効果については、十分な検証ができていないと推定される。

切削テストの結果から Ti-10-2-3 の材料の切削加工に対しては、Annealed or Solusion terated といった熱処理条件での加工の困難さはあまり高くないといった感触であり、研究のなかでは、Ti-6Al-4V 合金に近い切削性能を得られた例も多い。

### 第3章 高強度チタン合金の加工方法の開発

#### 3-1 高強度チタン合金の深孔加工技術の開発

##### (1) 開発概要

中空形状を形成するための鍛造無垢材からの $\phi 269\text{mm}$ 長さ2.2mの深孔加工を行うには、BTA方式による加工しか選択枝がない。文献による高強度チタン合金の切削条件は、一般的なチタン合金(Ti-6Al-4V)の2/3程度であり、直径50mmの穴加工で、周速25~30m/min、送り0.10~0.15mm/revである。ここから類推すれば、この高強度材に対し、2.2mの深さを加工するのに9.5時間、切削長にして20kmもの連続加工になるという過酷な条件である。しかも、加工中に加工状況の確認が出来ないのが深孔加工の難しさである。

一方で、要求精度上の「孔の振れ」や「内径の粗度」の要求が厳しいことから、我々の経験の領域を超え、従来技術では成し得ないと考えた。

チタン合金の特徴である超硬工具との親和性が、BTA工具のガイドパッドに損傷を与え、その結果工具刃先にも悪影響を与えることは、純チタン材の深孔加工での加工粗さ不良(粗度は50S以下にならない)から容易に推定できる。工具刃先の磨耗とガイドパッドの損傷は、どちらも孔の曲がりや内径の焼き付きやカジリへと進展する。これらの改善のため、ガイドパッドの構造を大きく改善し、焼き付きやカジリを防止する構造のBTA工具の開発を目指した。

また、素材は1.5ton、加工後は数百kgの軽量のワークに対し、孔径が $\phi 269\text{mm}$ と大きく、BTA加工の特性から切削力が中心軸対象とならない力関係と高強度チタン合金である事から、ビビリ振動が発生する可能性が予想され、一般的な製品回転で工具固定方式では、このビビリの効果的な抑制が出来ない可能性があると考えられた。そのため、特別な機構を設け、共振によるビビリ振動を回避を可能とし、更には製品に対する工具の求芯性を高め、孔の曲がり防止を図る方策の研究を行った。

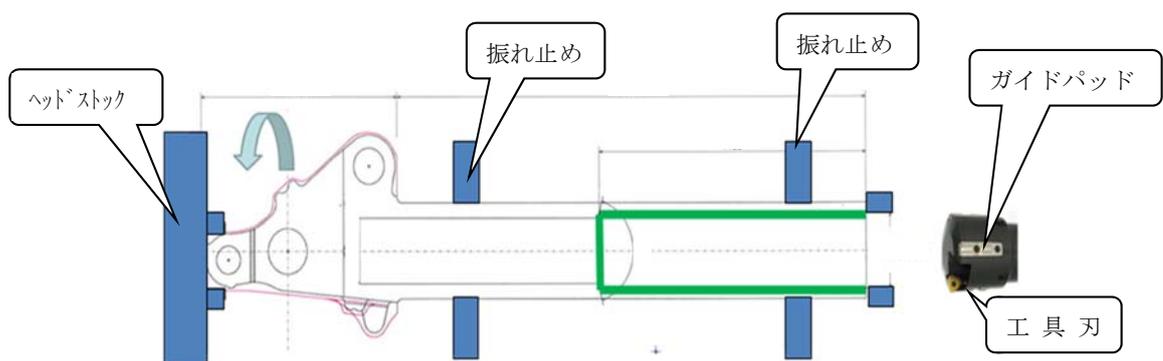


図 3-1-1 B T A加工の全体のイメージ図

## (2) 開発成果

### ① 2軸リバース回転方式の実用化

既設 BTA 設備の改造を実施し、ワーク回転方式からワーク回転・工具回転併用方式に改造を行い、「振れ精度向上」のために種々の条件に対応できよるにようにすると共に、低速域の主軸トルクの増強を行うべく、モーター出力向上を図った。

主軸側回転数 5-100RPM

主軸モーター 100KW

工具回転数 5-100RPM

工具モーター 100KW

参考までに図 3-1-2 に工具回転用ヘッド、図 3-1-3 に改造後の全体図を示す。



図 3-1-2 工具回転用ヘッド (改造部分)

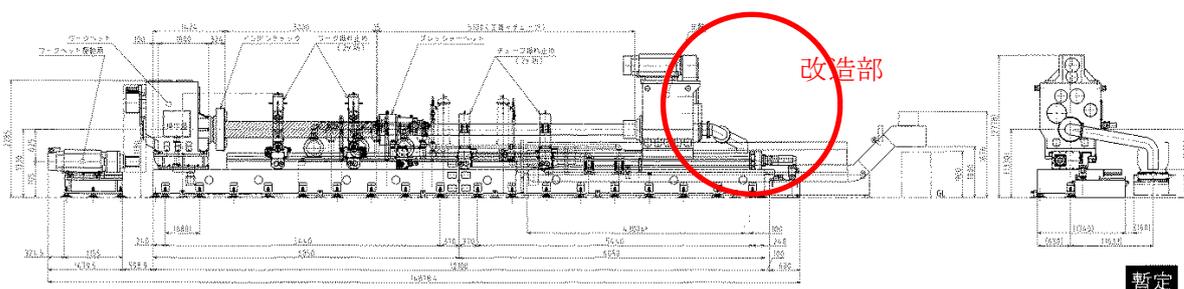


図 3-1-3 改造後の全体図

### ② ガイドパット回転フリー方式の BTA 工具の開発

「孔の振れ」や「内径の粗度」向上のため、ガイドパット回転フリー方式の BTA 工具の開発設計と製作を行った。(図 3-1-4)

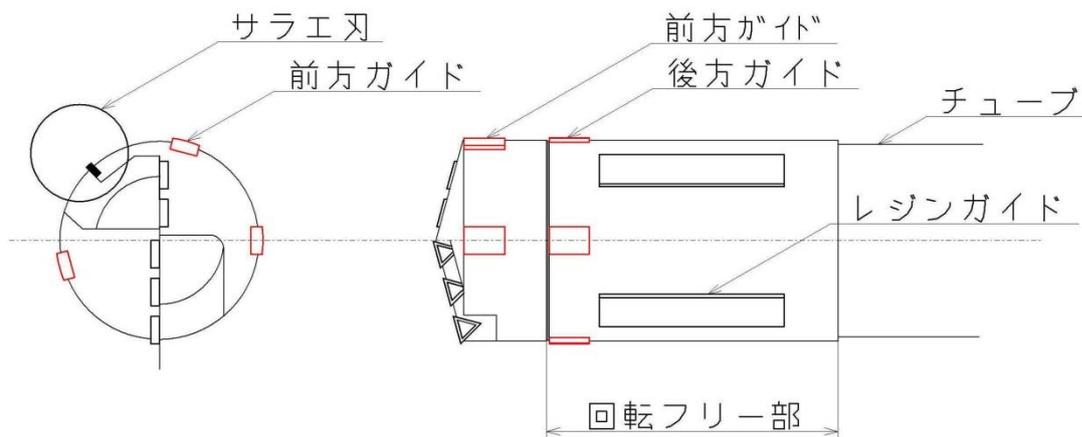


図 3-1-4 回転フリー方式の BTA 工具

開発設計した BTA 工具は、以下の特徴を持ち、それぞれの評価結果を示す。

- a. サラエ刃：加工径の安定を図るために、前方ガイドパッドとほぼ同径にセットしたもの。  
 前方ガイドパッドがある場合は、特に加工性能に影響を与えなかった。また、b項の前方ガイドパッドを取り外すことにより、本サラエ刃が有効となり、結果として切れ刃として働き、加工径を拡大させることになった。(図 3-1-5)

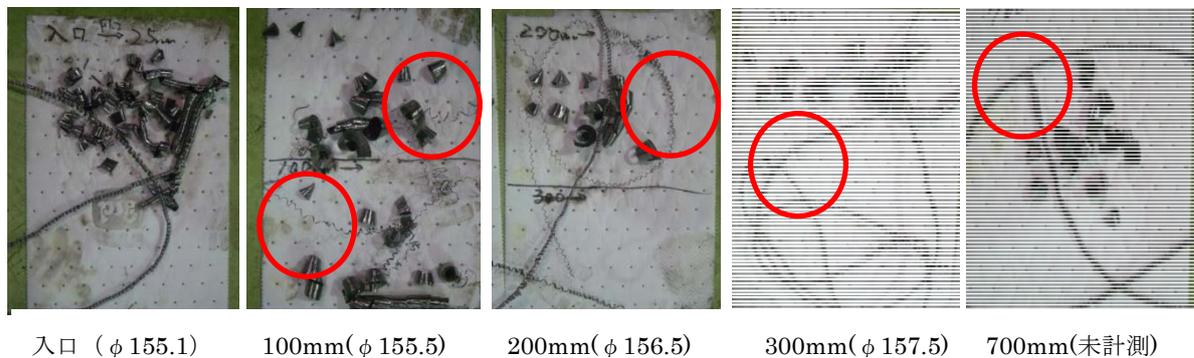


図 3-1-5 ガイドパッド取外し時の寸法変化

- b. 前方ガイドパッド：通常の BTA 工具には設置されるもので、切削力のアンバランスをサポートすると共に、工具自身の進行のガイドの役割を持つもの。

高強度チタン合金加工に於いては、本ガイドが切削面と接触することで、溶着が起り、表面粗さを悪化させることとなった。

- c. 後方ガイドパッド：レジンガイド部（回転部）のガイドとなるもの。

回転部分のガイドとなり、正常に機能した。

- d. レジンガイド：樹脂製ガイドであり、加工部分に沿うことで、振動の抑制効果をもつ。

当初の目的を達成し、正常に機能した。

- e. 回転フリー機構：超硬ガイドによる被削材とガイド材料の溶着を防ぐため、回転接触を避

けるための構造。

図 3-1-6 に示すようにガイドが直進していることが実証でき、初期の目標通りの結果が得られた。



図 3-1-6 回転方式の BTA 工具のガイド部の擦り跡

最終評価結果、後方ガイドパッドとレジングガイドのみを使用することで、加工長さ 2.7m で曲りが 0.5mm、表面粗さ Ra3~Ra7 程度と、初期の目的が達成できることが判明した。

③ 加工用治具の開発

供試材の試験用の治具の開発を行い、試験目標を達成できた。

④ 刃先冷却

最大 999L/min という大量の切削油を供給することにより刃先の冷却を行い工具寿命の延長の確認ができた。

⑤ 加工テストによる加工条件の確立。

加工テストを基に加工条件の確立を図った。その結果、約 2.7m の穴加工の加工実績が得られた。

**(3) 結果と考察**

テストに於いては、種々の問題の発生を見たが、結果として、当初も目標を達成することができた。加工条件としては、周速はやや低めであるが、送り速度は高く、将来の実用条件としては、ほぼ満足できる結果となっている。今後は、工具寿命を勘案し、加工コストが最低となるような条件を見出す必要がある。

図 3-1-7 は加工面の写真であるが、通常の加工とは違って、周期的な筋がみられる。これは、2 軸リバース方式の BTA 加工を行ったときに発生する特有な現象である。



図 3-1-7 2 軸リバース方式特有の加工面

本現象は、ワークヘッドに取り付けられる被削物と工具中心軸のずれから発生するものである。今回研究対象の被削物は、加工精度向上を目的とし、加工中の製品と工具のずれを防止するため、被削物にテーパ面を作り、そのテーパ面を工具側（圧力頭）で押し付けることで、求心性を高める構造としている。被削物と工具中心軸、テーパ面の同軸度の誤差が軸ずれとなるため、それらの同軸度が重要となる。

これらの軸ずれの影響は、被削物に対する工具刃先位置の変化によるものであり、

$$\begin{aligned} & \text{軸づれ量} = A、\text{加工工具半径} = R \text{とした場合、実質の加工半径は} \\ & \text{実質加工半径} = ((A + R \sin \theta)^2 + (R \cos \theta)^2)^{1/2} \end{aligned}$$

となり、加工径は工具径に対して $\pm A$ の増減が生じることとなる。図 3-1-6 に表れる筋目は回転工具 1 回転に進む送り量であり、この間に加工径の変化が生じていることになる。この増減値が後方ガイドパッド径を下回れば、内径に図 3-1-6、図 3-1-7 の写真に表れているような軸方向の傷が付くことになる。さらにその量が大きければ、ガイドパッドが穴に侵入できなくなり、加工不能の状態となる。また、結果として動力系の負荷オーバーで機械停止等のトラブルを誘発することとなる。

## 3-2 高強度チタン合金のフライス加工技術の開発

### (1) 開発概要

大型で複雑形状の加工は、工作機械に大きな負荷がかかることから、工作機械（フライス加工機）は、剛性のある設備を選択している。加工時は主軸に大きな負荷がかかるが、負荷を主軸方向で受けることができれば、曲げによる振動の発生も押さえることができる。そのため、特殊な形状を持つ主軸の軸方向切削を行う大径のプランジ加工工具「推力カッター」の新規開発を行い、主軸の振動の発生を減らす事により、送り及び工具回転数などの切削条件の高速化を図る。

また、加工の効率化の面から、単位時間の切削量の最大化を行うため、主軸モーターの動力監視を行い、工具の摩耗が異常に進行しない範囲での切削条件を自動的に調整する機構を設け、更には工具の寿命に最も影響がある刃先冷却を積極的に行うため、軸芯給油クーラントの高圧化も行い、加工の高速化を図る。これらの研究は、実部品と同一形状を持つ供試品（鍛造試作、鍛造評価用）にて、実施する。合わせて他の原因による振動を防止するため、工具、取付治具等を開発する。

### (2) 開発成果

#### ① フライス加工用治具の開発

開発概要で述べた、高剛性の工作機で推力カッターを使用する際に、加工物の固定方法に問題が生じる。そのためA部品、B部品用の固定、保持用の治具を計6点、設計研究開発し作成した。以下に各治具を示す。

- ・ A部品テータムポイント保持具  
45-3575052-00-MF1 供試材取付具 (1) (図 3-2-1)
- ・ A部品保持具  
45-3575052-00-MF2 供試材取付具 (2) (図 3-2-2)
- ・ B部品データムポイント保持具  
45-3567064-00-MF1 供試材取付具 (3) (図 3-2-3)
- ・ B部品フォーク部加工用治具  
45-3567064-00-MF 4 供試材取付具 (4) (図 3-2-4)
- ・ B部品フォーク部加工用大口径固定具  
45-3567064-00-MF2 供試材取付具 (5) (図 3-2-5)
- ・ B部品フォーク部加工用大口径固定具アダプター  
45-3567064-00-MF3 供試材取付具 (6) (図 3-2-6)



図 3-2-1 供試材取付具 (1)



図 3-2-2 供試材取付具 (2)



図 3-2-3 供試材取付具 (3)



図 3-2-4 供試材取付具 (4)



図 3-2-5 供試材取付具 (5)



図 3-2-6 供試材取付具 (6)

## ② フライス加工用工具の開発

川下企業からの要請により当初計画からの追加の加工に対して、新たな加工の開発要求があり、それに対応するため、当初計画から追加したフライス加工工具の開発を行った、当初の推力カッター等については、継続研究中である。

新たな加工の開発要求として Ti-10-2-3 材でのテストピースの採取が 2 種類で 1) □140mm の切断代 10mm 以内の切断加工、2)  $\phi 96\text{mm} \times L 280$  の芯抜き（トレパニング）加工である。開発工具を以下に示す。

### 1) COROMILL SIDE & FACE MILL $\phi 430$ （サイドカッター）（図 3-2-7）

最大外径： $\phi 430\text{mm}$ 、刃厚：10mm、最大切込み：145mm

刃数：20 枚（有効刃数 10 枚）

### 2) T-MAX U TREPANNING $\phi 120-96$ （トレパン工具）（図 3-2-8）

最大外径： $\phi 120\text{mm}$ 、刃厚：12mm、内径：96mm、最大加工深さ：150mm

刃数：2 枚（有効刃数 1 枚）



図 3-2-7 サイドカッター外観



図 3-2-8 トレパン工具外観

### ③ フライス加工テストによる加工条件の確認

上記②項で述べた新たな加工の追加要求用工具（サイドカッター及びトレパン工具）の加工テストを行った。

主軸モーターの動力監視については、テストを行ったものの最適加工条件が定まっていないため、実用化には至っていない。そのため既存の工具により最適加工条件を設定するためのテスト加工を繰り返し行った。また、突き出しが長い部位の加工を効率的に行う推力カッターの開発のため、プランジカッターによる加工テストを実施した。

#### ・テスト加工機

加工機種 : 5 軸加工機 (三井精機製 HU100-TS)  
 スピンドル回転数 : 50~8000min<sup>-1</sup>  
 スピンドルモータ : 120/85Kw (5 秒/連続)  
 X、Y、Z ストローク : 1300mm、1500mm、1400mm  
 工具ホルダー型式 : BBT50

加工機種 : 横中繰り盤 (倉敷機械 KBT-13A)  
 スピンドル回転数 : 5~3000min<sup>-1</sup>  
 スピンドルモータ : AC22kW(30 分)/18.5kw (連続)  
 X、Y、Z ストローク : 3000mm、2000mm、1300mm  
 工具ホルダー型式 : BBT50

### (3) 結果と考察

今回対象とするA部品、B部品に対して使用する際の固定、保持用の治具6点を設計から製作までの開発は完了した。それにより加工負荷を主軸方向で受けることができ、曲げによる振動の発生も押さえることができる推力カッターのテストを行った。結果、他の加工方法に比べ突き出しの長い箇所加工に有効であることが確認できたので、今後さらにテストを重ねて推力カッターの開発に注力していく。

又、川下企業からの要請で、当初計画から追加された新たな開発要素があり、それに対応するために必要なフライス加工工具の開発についても完了した。今後は、より高い条件で加工が行えるよう開発と、テストを進めていく。

主軸動力の監視による切削条件の自動調整については、現段階では加工のデータ量が十分でないことから、今後も加工条件を追及するためのテストを行っていく必要があると考える。テスト加工においては、高圧軸芯給油クーラントを用いて切削熱を抑制することが有効であることを確認できた。

### 3-3 強高度チタン合金の旋削加工技術の開発

#### (1) 開発概要

BTAによる中心孔加工と同じく、B部品の軸部の外径加工は、長時間におよぶことが想定され、加工時間が連続7時間にもおよぶ。現実的には工具の摩耗の進行で加工精度は確保できない。従って、工具摩耗の許容範囲で加工が完了するように、加工工具の刃先形状を熱が籠らない薄い切粉が出るもの「薄切粉加工法」を開発し、工具の長寿命化を図ると共に加工速度の高速化を行うことで、加工時間の短縮を図り、加工精度の高精度化を実現する。その際、工具の摩耗を防止する目的で、一般的なチタン合金(Ti-6-4)の加工の文献に記載されている「刃先冷却の有効性」をこの高強度チタン合金にも適用すべく、大量の冷却油の供給を工具刃先に近い所から放出し、「刃先の冷却」を積極的に行う。

#### (2) 開発成果

##### ①旋削加工用治具の開発及びテスト加工準備

開発概要で述べた、加工時間の短縮を図り、加工精度の高精度化を実現するためには、高剛性の工作機を用い、更に加工物（B部品）の固定方法を考慮する必要がある。そのため固定、保持用の治具を開発した。又、加工テスト用に加工方案（工程図）を作成し加工テストを実施した。

##### ・ B部品フォーク部加工保持用治具

45-3567064-00-LF1 供試材取付具 (8) (図 3-3-1)



図 3-3-1 供試材取付具(8)

##### ②薄肉加工方法の研究（同質材）

B部品同形状加工テスト品、加工テスト前に加工条件等の情報を入手するため、同材質（Ti10-2-3）丸棒材（φ430×1800mm）でテスト加工を実施した。

加工テスト方法、状況、結果を以下に示す。

テスト材形状：φ430×1800

材質：Ti-10-2-3（硬度 HS 57～62）

テスト加工機

加工機種：DMG 森精機 SL603B/2000

スピンドル回転数：MAX 1500min<sup>-1</sup>

スピンドルモータ：37/30Kw

ベッド上の振り：944mm

使用工具

ホルダー型式：PSDNN3232P19 切込角 45 度

加工チップ形状：SNMG190616 H13A

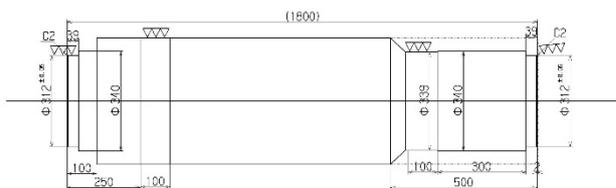


図 3-3-2 加工方案工程図



図 3-3-3 加工テスト

Ti-10-2-3 加工テストでは、切込み量が 1mm で、切削速度が 49m/min の場合、加工時間 63 分でも、チップ磨耗が少なく、良好な結果を得ることができた。

### ③薄肉加工方法の研究（B 部品）

B 部品テスト加工材で上記項目で述べた、加工方案、治具及び加工データを使用し薄肉加工テストを実施した。

テスト部形状：約φ370×1900

材質：Ti-10-2-3

テスト加工機

加工機種：オークマ LH50-N C6000

スピンドル回転数：MAX 1200min<sup>-1</sup>

スピンドルモータ：37/45Kw

ベッド上の振り：675mm

## 使用工具

ホルダー型式 : PSDNN3232P19 切込角 45 度

加工チップ形状 : SNMG190616 H13A



図 3-3-4 加工テスト（刃先）

B 部品加工テストでは、①で Ti-10-2-3 加工テスト条件を使用し行ったが、チップの磨耗状況が大きく良い結果は、得られなかった。②では、切り込みを多くし送りを下げた条件（薄肉加工）で良好な結果が得られた。又最大で 704min（11hr 以上）と工具寿命を大幅延ばす結果が得られた。

### （3）結果と考察

旋削加工治具は、当初の予定通り開発が完了し、高剛性でのテスト加工の準備が出来た。

それにより薄切粉加工法の研究では、十分な加工条件が事前に準備出来、また生産性を高めるための薄肉加工（切込み量を 7mm に増やし、送りを下げる）が有効である結果を導くことが出来た。又、大量の冷却油の供給を工具刃先に近い所から放出させる刃先の冷却効果で工具寿命を格段に延ばすことにも成功した。これは、当初目標のおよそ 2 倍の効果である。

Ti-10-2-3 加工テストでは、切込み量が 1mm で、切削速度が 49m/min の場合、加工時間 63 分でも、チップ磨耗が少なく、良好な結果を得ることができた。これは、当初の想定切削速度よりも 30%高い条件である。

今後の生産活動にとっても優位な結果の得られる研究となった。

## 第4章 総括

### 4-1 総括

本研究は川下企業が、航空機用大型チタン製鍛造品の受注活動を行い、高強度チタン合金を使用した大型航空機の着陸装置部品を受注したことに始まる。(株)きしろでは、従来からチタン合金の旋削加工の経験はあったが、川下企業からの要請は、国内で経験のない高強度チタン合金の加工に関するものであり、さらに、対象部品は加工難度の高い中空で複雑な形状を持ち、加工経験が皆無の製品であった。また、日本国内でも同様の部品の加工例がなかったものであるが、当社は、川下企業の開発日程に合わせて、加工方法等の開発をすることになり、本研究を実施することとなった。

本研究のスタートは平成26年10月からであり、昨年度は、主として基礎的な調査と本格的な切削試験を実施するための準備期間であったが、本年度は、川下企業から提供を受けた供試材により、本格的に高強度チタン合金の加工技術の開発研究を行った。その結果、それぞれの章で詳細が述べられているように、多くの成果を得ることができた。

具体的には、深孔加工技術では、「ガイドパッド回転フリー方式」工具の実用化、「2軸リバース回転方式」への設備改造を行い、川下企業からの曲り、表面粗さ等の要求精度を満足し、加工時間についても予想以上の成果を得ることができている。フライス加工技術では、供試材加工用の高剛性治具の開発、多くの種類の工具に対する切削条件の確立を行うと共に、「推力カッター」の実用化、「軸心高圧給油方式」により有効な刃先冷却等を技術の開発により、15%程度の加工能率向上の目途づけが行えた。さらに旋削加工技術では、「薄切粉加工法」技術により、加工能率の向上により、当初目標の加工時間の確保と工具寿命の飛躍的な長寿命化に目途をつけることができた。

一部の研究領域では、供試材の量的な問題で、十分検証ができていない部分もあるが、当初予定していた項目に対して、ほぼ、期待通りの成果を得たものとする。

今後、本研究成果を活用することにより、川下企業における航空機用の着陸装置部品の納入スケジュールの確保が可能となり、川下企業の顧客からの信用につながり、その結果として、さらなる航空機用チタン製品の新規引合、受注が期待できると考えられる。

#### 4-2 今後に向けて

川下企業では、鍛造材に対して開発が進み、近く生産が開始される計画である。

本研究の成果をもって、川下企業の要請に従い、次のステップとして生産体制の構築を開始する必要がある。

従って、本研究も現時点でもって一旦終了とし、今後は製品の生産の中で、本研究成果の更なるシェイプアップを図り、低コスト化の研究を進めていくことになる。

今後、行うべきこととしては、

- (1) 生産体制の早期構築
- (2) 計画コストの早期達成
- (3) 安定した品質での生産
- (4) 新たな製品への本研究成果の応用、活用

等であり、当面は、川下企業の要請である(1)～(3)項について、注力して行くこととなる。

最後に、本研究の終了にあたり、ご指導頂いた近畿経済産業局及びアドバイザーの兵庫県立大学 奥田幸一教授、神戸製鋼所技術開発本部 前田恭志氏、尾崎勝彦氏にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] MACHINING DATA HAND BOOK 3rd Edition MACHINABILITY DATA CENTER
- [2] Challenges of Machining Beta Titanium Alloy Dr.triber and Dr.E.Ng
- [3] Experimental study of coated carbide tools behaviour:application for Ti-5-5-5-3 turning  
Vincent Wagner, Maher Baile, Gilles Dessein, Daniel Lallement
- [4] Mecanizado de aleaciones de titanio empleadas en aeronautica P.J.Amazola, Ainhara  
garay, Irantsu Sacristan, L.M.MIriarle, Dani soler
- [5] Titanium machinability in turning AMRC Process Technology Group
- [6] Machining of Titanium Alloys J.Paulo Davim
- [7] TITANIUM MACHINING SANNDVIK
- [8] TITANIUM ALLOY GUID RMI TITANIUM Company
- [9] Milling developments for titanium machining SADVIK
- [10] チタンの基礎と加工 日本塑性加工学会編
- [11] チタンの加工技術 日本チタン協会編
- [12] 難削材の上手な削り方 チタン合金 狩野勝吉