

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「難削材（耐熱合金インコネル材）の

加工技術高度化の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人あいち産業振興機構

# 目 次

## 第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者実施者、協力者、実施体制）	4
1-3	成果概要	6
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	8

## 第2章 工作機械周辺速度課題への対応

2-1	研究目的及び目標	9
2-2	インコネル 625 鍛造品における従来機での加工技術高度化	10
2-2-1	旋削加工	10
2-2-2	ドリル・エンドミル・面取り加工	10
2-3	インコネル 718 に関わる導入機での加工技術高度化	11
2-3-1	中物部品： $\phi 140\sim 300$	11
2-3-2	小物部品： $\phi 15\sim 100$	11
2-3-3	複合機導入のメリット	12
2-4	加工現場での工程ごとの品質評価	12
2-4-1	真円度円筒形状測定機	12
2-4-2	輪郭形状測定機	12
2-5	まとめ	14

## 第3章 適合工具課題への対応

3-1	研究目的及び目標	15
3-2	インコネル 625 鍛造品	15
3-2-1	第1工程（内径荒加工）	15
3-2-2	第2工程（外周溝入荒加工）	16
3-2-3	ランニングテスト（第1・第2工程の荒加工 R3.2）	16
3-2-4	第2-1工程（外周横方向溝仕上げ加工）	17

3-2-5	第2-2工程（外周縦方向溝仕上げ加工）	17
3-2-6	第3-1工程（外径仕上げ加工）	17
3-2-7	第3-2工程（内径仕上げ加工）	18
3-2-8	ランニングテスト（第2・第工程の仕上げ加工 R1.6）	18
3-2-9	まとめ	18
3-3	インコネル718 棒材	19
3-3-1	中物部品（ロケットエンジン部品用シリンダー）	19
3-3-2	小物部品（ロケットエンジン部品用ピストンロッド）	19
3-3-3	小物部品（ロケットエンジン部品用ボペット）	19
3-3-4	小物部品（外周溝入加工）	19
3-3-5	まとめ	19
3-4	高噴射高圧クーラントとツールホルダー（ジェットノズル式）	20
3-4-1	クーラント吐出力による刃先摩耗量の比較	20
3-4-2	刃先摩耗の進行速度の比較	21
3-4-3	まとめ	22
<b>第4章 切削油課題への対応</b>		
4-1	研究目的及び目標	23
4-2	切削試験対象品種の選定	23
4-3	切削液劣化の問題点	24
4-4	高圧クーラントによる油分の分離・破壊（7MPa/70kgf/cm <sup>2</sup> ）	24
4-5	まとめ	25
<b>第5章 被加工物の微構造変化、特性変化に関する研究</b>		
5-1	研究目的及び目標	26
5-2	シリンダーの特性変化	26
5-3	シリンダーの断面曲線特性	27
5-4	まとめ	28

## 第6章 全体総括

6-1	成果の総括	29
6-2	当研究開発後の課題	29
6-3	事業化への展望及び目標	29
6-4	まとめ	31

## 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

難削材（耐熱合金インコネル材）〔以下、「インコネル材」という。〕の加工技術高度化の研究開発は、航空宇宙産業分野における川下製造業者等の抱える課題の一つである。

この分野の研究開発においては、工作機械特性・工具選定・切削油等の夫々の長所を活かした最適な組合せ条件を見つけ出すことは至難であり、航空機用ジェットエンジン部品・宇宙開発用ロケットタービン部品向けの加工に取り組んで40余年の歴史をもつ参加企業においても、未だに適正な諸条件が確立されていない状態であった。

国内の航空宇宙産業の現状としては、国産ロケットについては、民間の川下製造業者に完全移行されH-II Bに能力アップし、宇宙ステーションへの生活物資や研究資材の無人補給機（HTV）へと展開した。また国産ジェット旅客機（MRJ）についても、民間の川下製造業者において、今年末には組立てが開始される予定である。

こうした民間の川下製造業者の事業活動を推進していくためには、国際競争が激化する中にあって競争力を向上させ、ロケットの打ち上げ衛星やMRJの海外からの受注を増加させていくことが必要となっており、このために設備投資と切削工具の消耗費用及び切削油による工具・被加工物の発熱吸収効果など、経済的妥協点を調整しての加工時間の短縮によるコストダウンを図っていくことが不可欠となっている。

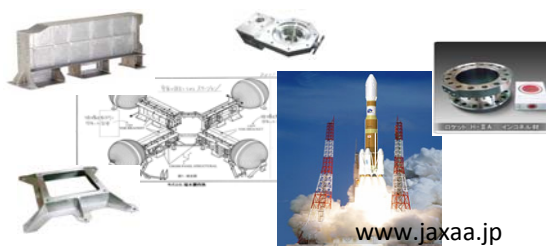
本研究開発においては、切削諸条件と工具との各種組合せにより切削条件の適合化を図り、それに見合った工具の長寿命化と加工時間の短縮によりコストダウンを図り、国際競争力強化の為の新たな加工技術の開発を実施する。

#### 〔研究開発の現状と課題〕

##### (1) 我が国の航空宇宙産業

国際宇宙ステーション（ISS: International Space Station）への無人補給機（HTV: H II Transfer Vehicle）が大型ロケット（H-II B）により2009年9月11日に打ち上げられ同18日にISSにドッキングした。

MRJ（三菱リージョナルジェット）については、ボーイング787の2年遅れの教訓を活かして、設計変更するも初飛行の計画は半年遅れの2012年6月の予定である。昨年の航空宇宙業界は他業界の落ち込みが急激であった為に大きく注目されたが、先々に明るさはあるものの未だ暫くは経営環境の厳しさは続くと予想される。ボーイング787の2年に及ぶ生産遅れが直接影響したが、MRJの部品加工は今年の夏から秋には着手で



きる状況にある。開発にあたって、品質向上と新工法で大幅なコストダウンが必要である。オンリーワン企業として責任ある分端が求められ、基盤技術を構築した独自の固有技術を保持し、引続き製品供給の国際的責務を担うことになる。

## (2) インコネル材の材料特性と被削性の関係

インコネル材は①高温下でもせん断強度が高く 刃先に大きな応力が作用し、チッピングなどが発生しやすい。②熱伝導率が低く刃先が高温となり、異常摩耗が発生する。③工具材料との親和性が高く、溶着を起こし凝着欠損が発生する。④加工硬化を起こすため、境界摩耗が発生しやすい という特性がある。

## (3) インコネル材の加工技術高度化の研究開発

インコネル材の切削は、難削材であるため刃物寿命が著しく短い上に加工時間が長く、切削条件も確立されていない。そのため、品質の安定性を確保することが難しく、コストも多くかかる。

本研究開発では、工作機械特性・工具選定・切削方法切削油及び切削条件等におけるそれぞれの課題を克服するために、それぞれの設定条件を組合せ、そこで確立された最適組合せ条件により、工具の長寿命化と加工時間の短縮によりコストダウンを図るとともに、欧米企業との国際競争力強化に向けた加工技術の開発を実現する。

## (4) インコネル 625 と 718

### インコネル 625

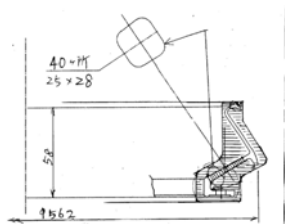
固溶強化ニッケルクロム合金

AMS<sup>※</sup> : 5666

耐熱温度 :  $-150^{\circ}\text{C} \sim 1,300^{\circ}\text{C}$

用途 : 航空機ジェットエンジンの燃焼室関連等  
化学成分 :

Ni:56~62% Cr:20~23% Mo : 8~10%、  
Fe:~5% Nb:3.15~4.15% Si : ~0.5%  
Mn:~0.5% Ti:~0.4%



**航空機エンジンは 10,000RPM  
連続運転 15~20 時間**

### インコネル 718

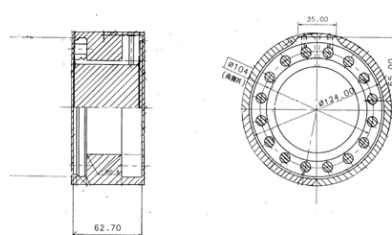
析出硬化ニッケルクロム合金

AMS<sup>※</sup> : 5663

耐熱温度 :  $-150^{\circ}\text{C} \sim 1,300^{\circ}\text{C}$

用途 : 宇宙開発機器・原子力関連機器のタービン等  
化学成分 :

Ni:50~55% Cr : 17~21% Nb:4.75~5.50%  
Mo:2.8~3.3% Ti:0.65~1.15%  
Co:1.0% Al:0.2~0.8% Cu:0.3%



**宇宙ロケットタービンは 50,000RPM  
運転 400 秒**

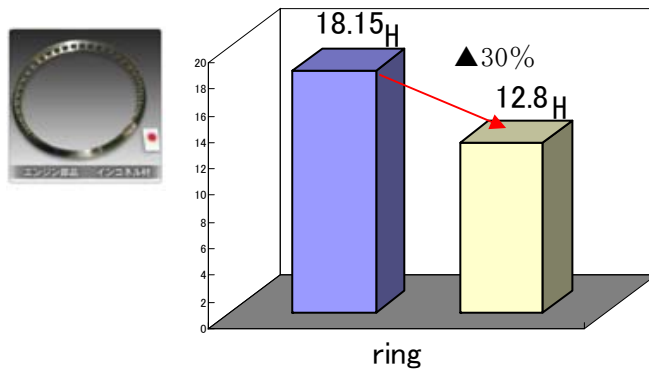
※AMS : 米国航空宇宙用材料の規格

### 〔研究開発における目標（加工時間の短縮目標）〕

国際情勢の変化に伴い、民間の川下製造業者の事業活動のニーズに応え国際競争力の向上の為に、品質保証を維持し加工時間の30%以上の短縮によるコストダウンを目標とする。個々の対象品ごとに工程分析を行い、アドバイザーの指導と協力を得て加工技術の高度化を図る事により達成目標を設定し、段階的に研究開発を推進するものである。

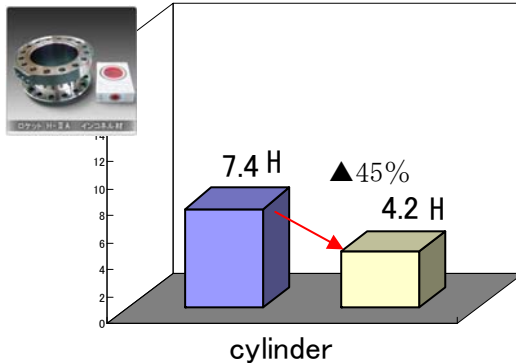
#### (1) インコネル625 加工時間の短縮目標

ジェットエンジン部品用リング

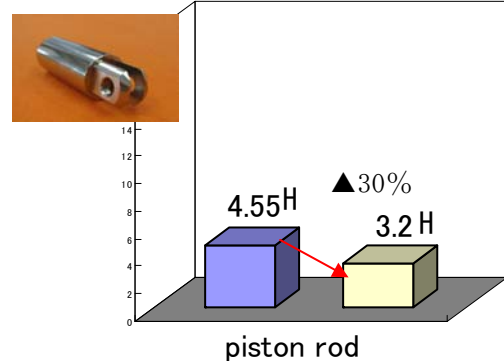


#### (2) インコネル718 加工時間の短縮目標

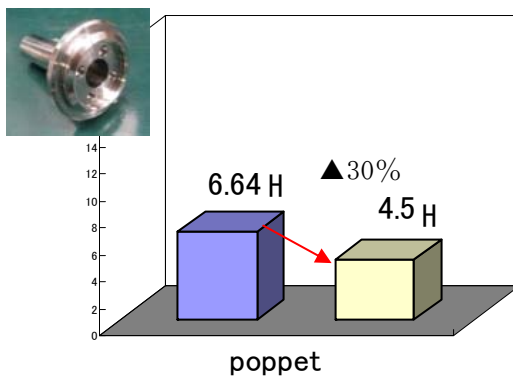
ロケットエンジン部品用シリンダー



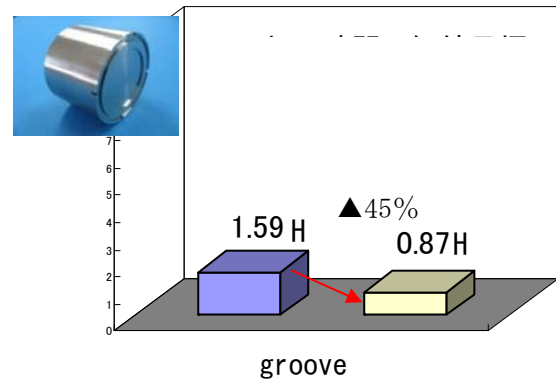
ロケットエンジン用部品ピストンロッド



ロケットエンジン部品用ポペット

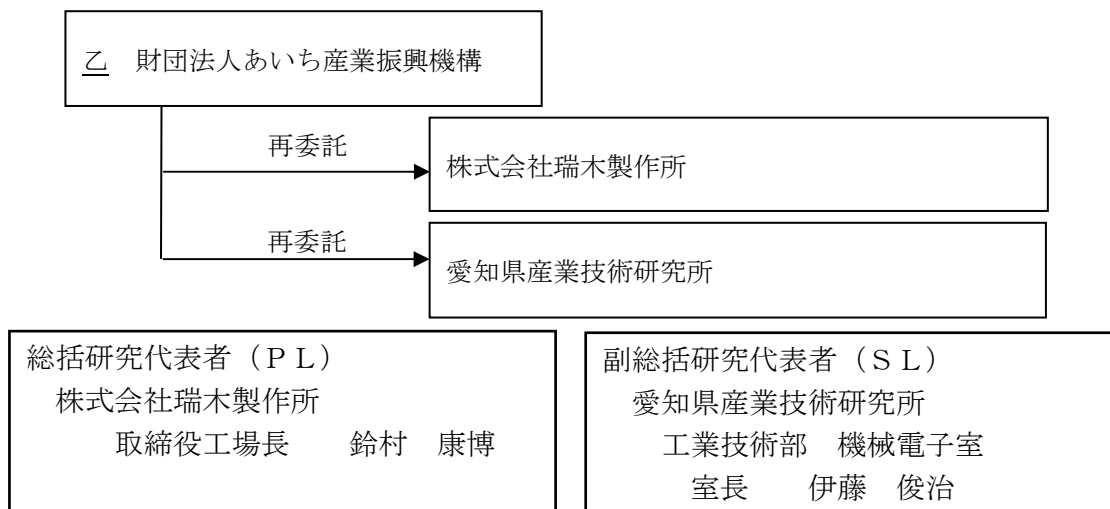


ロケットエンジン部品用溝加工



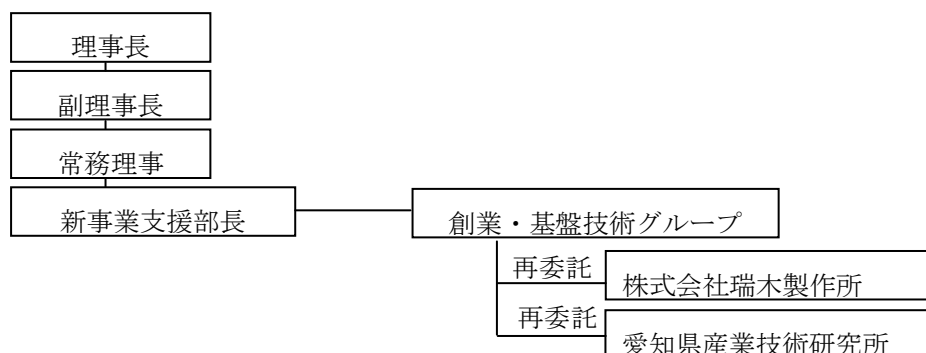
## 1-2 研究体制

(研究組織)



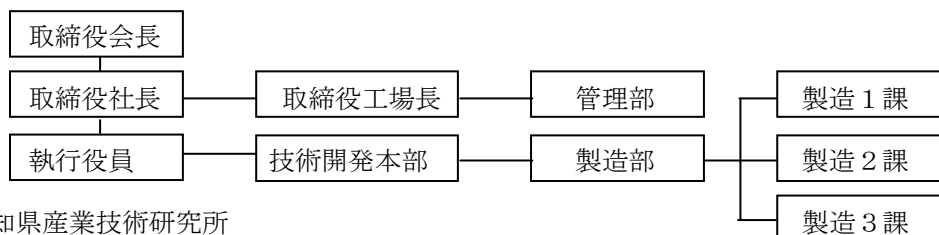
(管理体制)

事業管理者：財団法人あいち産業振興機構

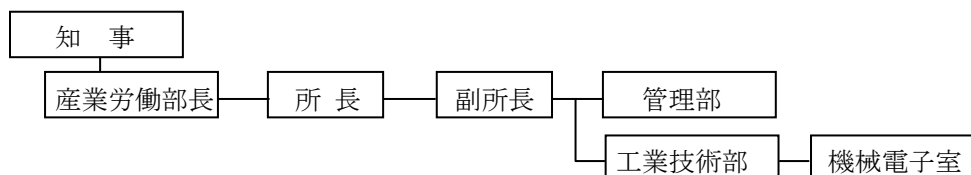


再委託先

株式会社瑞木製作所



愛知県産業技術研究所





(研究実施者)

株式会社瑞木製作所

愛知県産業技術研究所

(協力者)

三菱重工業株式会社 名古屋誘導推進システム製作所 工作部生産技術課

京セラ株式会社 機械工具事業本部 技術開発部応用技術開発部

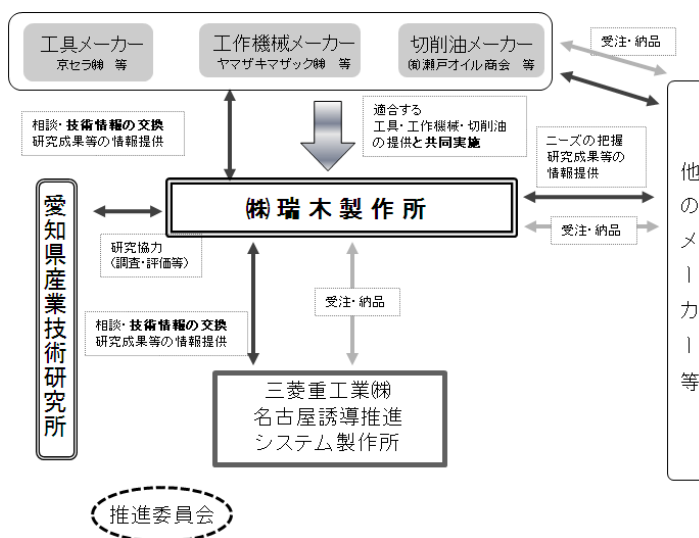
ヤマザキマザックシステムセールス株式会社 名古屋セクニカルセンター

有限会社 瀬戸オイル商会

社団法人中部航空宇宙技術センター

国立大学法人 名古屋工業大学大学院

(実施体制)



## 1-3 成果概要

### (1) 工作機械周辺速度課題への対応

- (a) インコネル 625 鍛造品については、切削加工における基礎データの収集・分析を進めると同時に、従来機で可能な範囲内において、品質の安定性を確保しつつ、工具の長寿命化と加工時間の短縮を図るための研究開発を実施した。  
各工程及びステップごとの切削速度を 30m/min から 72m/min へ 2.4 倍にアップできた。
- (b) インコネル 718 棒材は難削材の特性から応用範囲が制限され、中物部品（ $\phi$ 140~100）と小物部品（ $\phi$ 15~100）に区分して研究開発を実施した。
- ・中物部品では 30~50m/min を 50~70m/min へと 1.4~1.6 倍にアップした。
  - ・小物部品では、10~40m/min から 50~100m/min に 2.5~5 倍にアップできた。
  - ・セラミック工具による高速切削試験では、高圧クーラント、ジェットノズル式ホルダーによる冷却効果もあり、切削速度を 800m/min まで実証することができた。
- (c) 真円度円筒形状及び輪郭形状測定機を加工現場に導入し、工程ごとの切削試験～プログラムの改訂～再試削を実施しその場で測定検証を行い、改善へのフィードバックの迅速化により高品質・高精度の保証が可能となった。

### (2) 適合工具課題への対応

インコネル材の材料特性と被削性の関係を念頭に工具寿命を延ばし、摩耗が最小限となるような工具材種を選定し、切削試験と費用対効果の適合性を図るべく実用化試験を行った。

- (a) インコネル 625 (AMS5666) リング（ジェットエンジン部品）の鍛造品については、各工程及びステップごとに適合した切削工具を従来品と比較しながら選定し、切削諸条件の向上と工具の長寿命化を図りつつ、加工時間を 25.5%まで短縮できた。

ドッグボーンの事業化へのランニングテストでは、刃先摩耗量も 0.75 mm から 0.35 mm と 0.80mm から 0.27mm に改善され、刃物寿命も 4 コーナー使用から 1 コーナー使用、3 コーナー使用から 1 コーナー使用とチップの交換時間も 1/4~1/3 に短縮できた。

- (b) インコネル 718 棒材

中物部品（ $\phi$ 140~300）ロケットエンジン部品用シリンダーを対象に、切削諸条件の実用化試験を実施し適合した工具の選択や工具の変更、工法の変更による改善で刃先寿命の向上を図り、切削時間を 38%短縮できた。

「切削液の吐出圧力の変化による切削性の比較」「切削条件の変化による切削性」「刃先形状の変化による切削性」等、変化に対応した切削工具の事業化への基礎試験を行った。

小物部品（ $\phi$ 15~100）においても部品ごと、工程ごとに適合した切削工具を従来品と比較しながら実施し、工程それぞれにおいて概ね 30%程度の時間短縮が図れた。

### (3) 切削油課題への対応

切削速度の高速化により、工具の発熱に対する対策がこれまで以上に重要となるため、適合した油種の選択、データについて測定、実態の観察と検証、考察を行うことができた。

### (4) 被加工物の微構造変化、特性変化に関する研究

本分担研究においては、計画に則り評価分析、計測評価を行いその内容は計画を満足するものであった。

### (5) 加工時間の短縮

下記の通りである。

#### ○インコネル 625 (ジェットエンジン部品用リング)

工 程	従 来			成 果			目 標		
	時間 (H)	主軸回転数 (RPM)	切削速度 (m/min)	時間 (H)	主軸回転数 (RPM)	切削速度 (m/min)	時間 (H)	主軸回転数 (RPM)	切削速度 (m/min)
1. 内外径荒削	3.12	10~17	45~55	2.91	~34	~72	2.00	30~50	50~85
2. 内外径フランジ仕上	4.18	17~20	30~35	2.35	34~50	72~90	3.50	25~28	40~45
3. 内外径端仕上	3.25	~17	~30	2.57	~25	~40	2.00	20~30	35~50
4. 基準穴、フランジ穴(69ヶ所)	2.00		8~15	2.00		8~15	1.00		20~30
5. 角穴(40ヶ所)	3.60	~220	5~10	2.38	~1.061	30~40	2.50		10~15
6. 手仕上	2.00			1.31			1.80		
計	18.15			13.52	(▲25.5%)		12.80	(▲30%)	

#### ○インコネル 718 (ロケットエンジン部品用シリンダー)

工 程	従 来			成 果			目 標		
	時間 (h)	主軸回転数 (RPM)	切削速度 (m/min)	時間 (h)	主軸回転数 (RPM)	切削速度 (m/min)	時間 (h)	主軸回転数 (RPM)	切削速度 (m/min)
1. 旋削	3.80	80~140	30~50	3.27	140~170	50~60	2.50	140~250	50~90
2. フライス	1.10			0.93			0.50		
3. 穴明け	2.50			0.83			1.20		
計	7.40			5.03	(▲32%)		4.20	(▲45%)	

#### ○インコネル 718 (ロケットエンジン部品用ピストンロッド)

工 程	従 来			成 果			目 標		
	時間 (h)	主軸回転数 (rpm)	切削速度 (m/min)	時間 (h)	主軸回転数 (rpm)	切削速度 (m/min)	時間 (h)	主軸回転数 (rpm)	切削速度 (m/min)
1. 旋削(1)	1.59	~600	10~40	1.17		15~100	1.24	~1,200	75~85
2. 旋削(2)	1.15		---	0.80		---	0.61		---
3. フライス・穴明け	0.96			0.68		12~45	0.60		~30
4. ワイヤークット	0.60	---	---	0.60	---	---	0.50	---	---
5. 旋削、磨き	0.25			0.25			0.25		
計	4.55			3.50	(▲23%)		3.20	(▲30%)	

#### ○インコネル 718 (ロケットエンジン部品用ポペット)

工 程	従 来		成 果		目 標	
	時間 (h)	切削速度 (m/min)	時間 (h)	切削速度 (m/min)	時間 (h)	切削速度 (m/min)
1. 旋削(1)	1.16	30~40	0.92	20~50	0.75	50~60
2. 旋削(2)	2.47	30~40	1.61	20~60	1.75	50~60
2. 旋削(3)	1.20	20~40	0.96	50~60	0.80	30~60
3. 穴明け	1.11	10~15	0.89		0.75	~20
4. ねじ立	0.52		0.45		0.35	
5. パニング	0.15		0.12		0.10	
計	6.61		4.95	▲25.1%	4.50	▲30%

○インコネル 718 (溝加工)

工 程	従 来			成 果			目 標		
	時間 (min)	主軸回転数 (rpm)	切削速度 (m/min)	時間 (min)	主軸回転数 (rpm)	切削速度 (m/min)	時間 (min)	主軸回転数 (rpm)	切削速度 (m/min)
2-1 旋削	5.90		30~35	3.28		40~50	3.25		40~50
2-2 端面溝入	5.95			4.26			3.27		
3 外周溝入	84.00		20	46.4		30	46.20		30
計	95.85 (1.59H)			53.94 (0.90H)	(▲43.7%)		52.72 (0.87H)	(▲45%)	

(6) 薄肉把握試験と適正工具の基礎資料

軽量化の為の「薄肉把握試験」を実施し、加工現場で工程ごとの品質評価をフィードバック改善、迅速化を図ることができた。

事業化を促進するための基礎資料として「工具メーカー推奨工具による切削比較試験」「切削液の吐出圧力別 刃先摩耗進行速度の相違」「工具形状による摩耗進行速度の違い」等の研究開発を実施した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人あいち産業振興機構  
新事業支援部 創業・基盤技術グループ

住 所：〒450-0002  
愛知県名古屋市中村区名駅四丁目4番38号  
愛知県産業労働センター（ウインクあいち）内  
電 話：052-715-3075（ダイヤルイン）  
FAX：052-563-1438

## 第2章 工作機械周辺速度課題への対応

### 2-1 研究目的及び目標

航空宇宙向け部品のインコネル材はニッケル基合金で、耐熱温度が $-150^{\circ}\text{C} \sim +1,300^{\circ}\text{C}$ ・ニッケルが50～60%・クロームが17～23%と言う超耐熱高硬度な難削材である。

工作機械周辺速度・切削条件等を検討する上で、ニッケル基合金なかでもインコネル材が、いかに難削であるかが図1で確認できる。この図は難削性を、工具寿命と適用できる加工条件の

関連において示したものである。(出典：難削材&難形状加工のテクニック 大河出版)

インコネル材は、高温でも高剪断力・熱伝導率が低く、刃先が高温となって刃物に溶着して加工硬化を起こすため、切削速度を上げて加工することができない。

しかし、現在の一般的な工作機械は常に高速化を目指して開発されており、その点ではインコネル材をはじめとする難削材加工には適合しておらず、難削材加工の機械仕様及び切削諸条件は確立されていない。本研究開発を進めるに際し、基礎となる工作機械の性能が最も重要な要素となるため、難削材加工に適した工作機械の仕様を設定しこれに適した工作機械を導入・配備し研究開発を実施した。

インコネル625の鍛造品については、各工程ごとに切削速度の高速化について従来機により改善に関わる研究開発を推進した。

インコネル718棒材についての切削条件の選択は、図2が示すように一般鋼材（硫黄快削鋼）の被削指数を100とした場合、その適用範囲が10～12%と適用しうる加工条件が狭く、工具寿命が短いため、被加工物の大きさにより設定条件が異なる。そのため、中物部品（φ140～300）を対象とした複合工作機（チャック細部12インチ）と小物部品（φ15～100）対応の小型複合工作機（チャックサイズ8インチ）に区別して、工作機械周辺速度課題の解決に向けた取り組みを実施した。

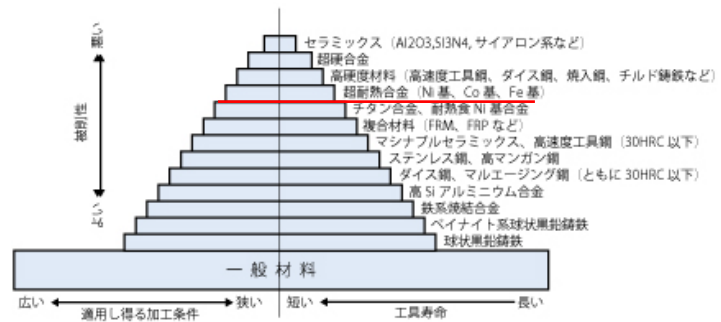


図1 難削材のピラミッド

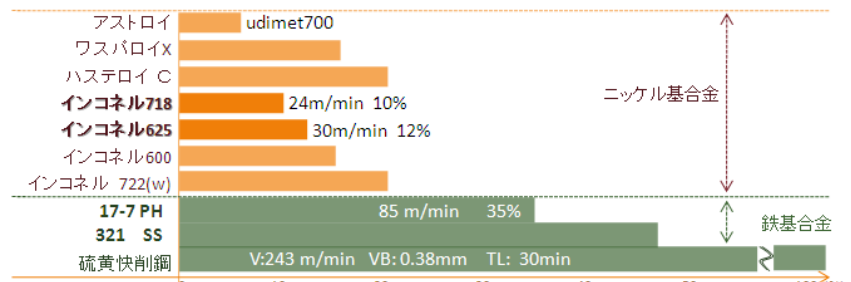


図2 被削性指数

## 2-2 インコネル 625 鍛造品における従来機での加工技術高度化

これまで実施してきた切削加工における基礎データの収集・分析を進め、従来機で可能な品質を確保し、工具の長寿命化と加工時間の短縮を図る研究開発を実施した。

### 2-2-1 旋削加工

旋削加工において最も切削時間と工具寿命が課題となっていた工程から順次、切削速度の高度化の研究開発を実施し、事業化へのランニングテストも推進した。



NC 立旋盤 TM2-10N オーエム製作所製  
主軸電動機：37 k w (50 H P)  
主軸回転数：400 rpm、  
主軸トルク：570 kg-m、  
テーブル径：1,000 m/m  
クーラント：0.5 MPa (5 kgf/c m<sup>2</sup>)

#### 〔研究成果〕

- 各工程及びステップごとの切削速度の高速化と加工時間の短縮の成果は[第1章 成果概要]の通り、所期の目標にほぼ近い成果が図れた。
- 第2工程では、従来「4.18時間」に対し「2.35時間」で43.7%の時間短縮が図れた。

### 2-2-2 ドリル・エンドミル・面取り加工

旋削加工において成果が認められる中、ドリル・エンドミル及び面取り加工の工具の長寿命化と高速化による加工時間の短縮をはかるべく研究開発を実施した。



立型マシニングセンタ (M-V60C) 三菱重工業製  
主軸電動機：11 k w (15 H P)  
主軸回転数：4,000 rpm  
主軸トルク：250 kg-m、  
テーブル：600×1400 mm  
クーラント：0.5 MPa (5kgf/m<sup>2</sup>)  
割出台：津田駒製 RNCM-510R

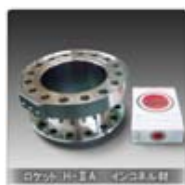
#### 〔研究成果〕

- それぞれの工程及びステップごとの切削諸条件の改善・高度化と加工時間の短縮は[第1章 成果概要]の通りであった。
- 第5工程では、従来「3.60時間」の目標「2.50時間」に対し「2.04時間」が達成でき、時間短縮30%の目標を超える43.3%まで短縮することもできた。

## 2-3 インコネル 718 棒材に関わる導入機での加工技術高度化

### 2-3-1 中物部品：φ140~300

中物部品の切削試験と「切削液の吐出圧力の変化による切削性の比較」「切削条件の変化による切削性」「刃先形状の変化による切削性」の夫々の比較は、複合作業機（ヤマザキマザック製 INTEGREGX 300IV）を使用して切削試験を実施した。



INTE-300IV ヤマザキマザック製  
主軸電動機：30kw（40HP）  
主軸トルク：724 N-m  
主軸貫通穴径：88mm  
工具最大重量：10kg  
Y軸移動量：230mm、  
高出力クーラント：7 MPa（70kgf/cm<sup>2</sup>）

#### 〔研究成果〕

- 各部品及び工程ごとの切削速度等の加工技術高度化の成果は〔第1章 成果概要〕の通り 所期の目標値に近付けることができた。
- 「切削条件の変化による切削性」、「切削液の吐出圧力の変化による切削性」、「刃先形状の変化による切削性」の比較等、事業化に活用できる基礎資料を得ることができた。

### 2-3-2 小物部品：φ15~100

- 小物部品の「ロケットエンジン部品用ポペット」「外周溝入れ加工」「薄肉把握試験」を実施するにあたっては、小型複合作業機（ヤマザキマザック製 QUICK TURN NEXUS-200II MY）を使用して切削試験を実施した。



QTN-200II MY  
ヤマザキマザック製  
主軸モーター：25HP（18.5kw）  
主軸モータートルク：358N-m  
主軸貫通穴径：76mm  
回転工具主軸モーター：7.5HP（5.5kw）  
回転工具回転数：4,500rpm  
Y軸移動量：100mm  
クーラント：1.1MPa（11kgf/cm<sup>2</sup>）

#### 〔研究成果〕

- 各部品及び工程ごとの切削諸条件の改善、高度化と加工時間の短縮は〔第1章 研究の成果〕の通りの成果があった。
- 肉厚が薄く変形し易く、真円度・同軸度の加工精度が難しい「薄肉把握試験」においては、チャックの把握力を0.3 MPa（3kgf/cm<sup>2</sup>）まで降圧できる薄肉把握試験装置（エアチャック）により、従来では0.020 mm（2μm）程度のものが0.001~0.002 mm（1~2μm）と1/10~1/20の加工精度を実現することができた。



### 2-3-3 複合機導入のメリット

複合作業機は海外での普及に歴史があり、マルチタスキングマシン、ダウン イン ワンとも言われている。すなわち素材から完成品までの全加工を一台の工作機械で完成させる生産思想で、設備費用の削減・設置スペース・取り付け具製作費・人件費等の削減が図られる。高精度・高機能化・生産リードタイムの短縮や省エネなどの効果も期待できる。



従来の生産プロセスの生産性比較において主に上記のような相違点があり、今回の研究開発における目標値に掲げた正味切削時間の短縮以外に間接時間（日程管理・納期）の短縮に大きな効果があり、更なるコストダウンを図ることが可能となる。

但し、プログラミング・切削加工ノウハウを被加工物（インコネル材）に適合したものにすする為には、データの蓄積と分析、長年に亘り培って蓄積した固有の加工技術を反映させ、技能の伝承がなければメリットを発揮させることはできない。

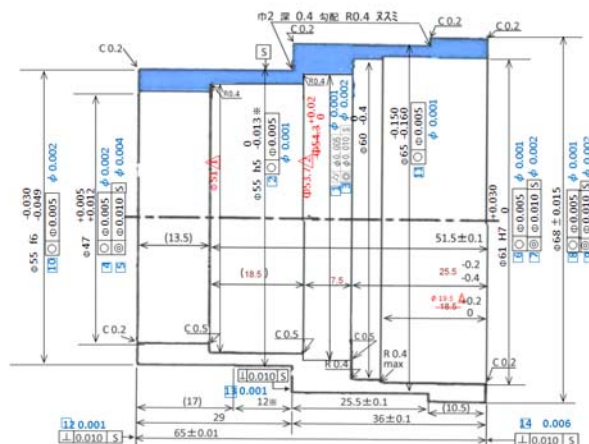
### 2-4 加工現場での工程ごとの品質評価

初年度と2年度に研究の基礎となる工作機械の導入により研究開発を進め、3年目には被加工物の品質評価の迅速化を図った。機械加工において切削試験～プログラムの改訂～再切削を繰り返し実施するために、加工現場で測定検証を行いその結果に基づく改善へのフィードバックの迅速化による高品質・高精度を保証することが可能となる。

#### 2-4-1 真円度円筒形状測定機

東京精密製 マニュアル式真円度測定機 ロンコム 47B  
ハイコラム仕様

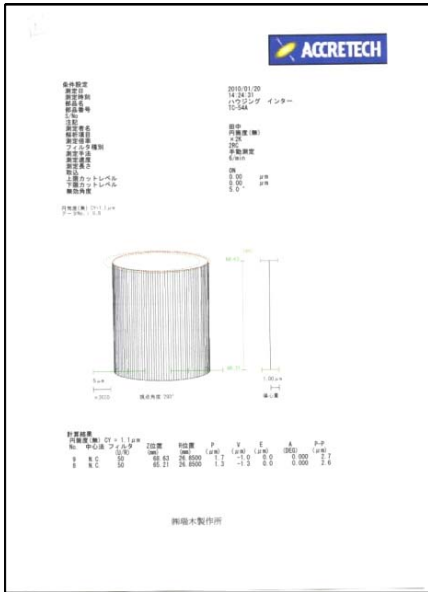
本機は、電気マイクロメーターと空気軸受を用いて、半径法により測定物の真円度・同軸度を測定するテーブル回転式の真円度測定機である。自動偏芯補正機能付き及び傾斜補正機能付きのため、測定物中心と回転軸心との傾きを補正演算して測定することができる。



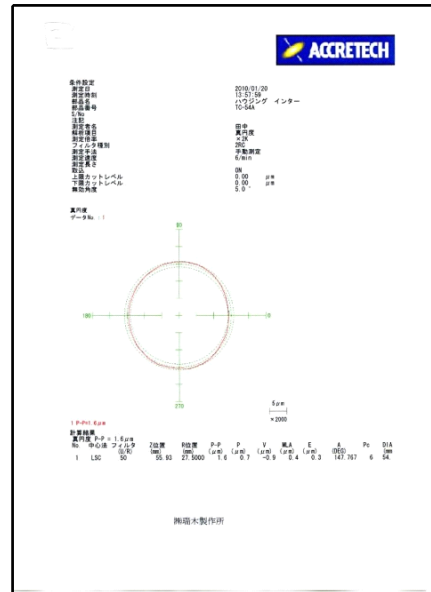


[測定結果]

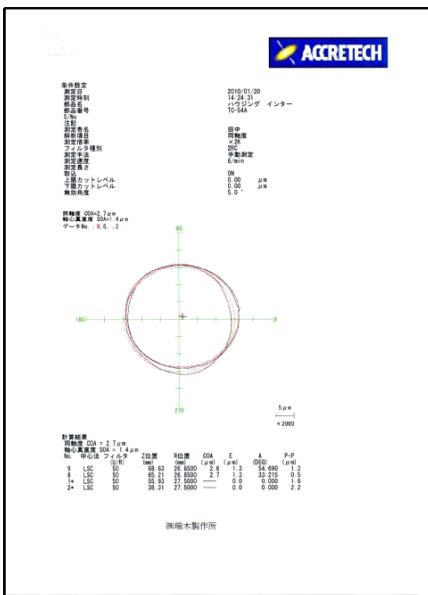
円筒度 計画  $\phi 0.005$   
実績  $\phi 0.001$



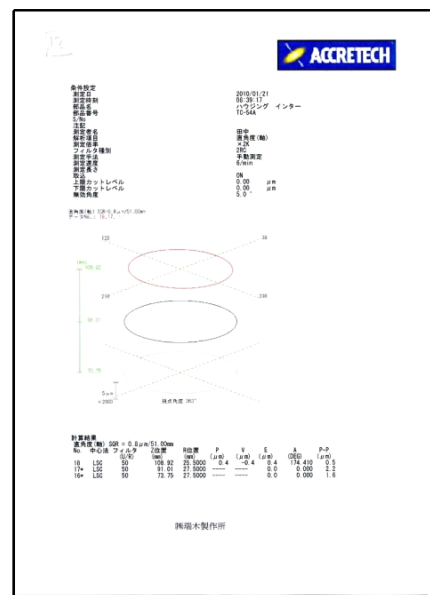
真円度 計画  $\phi 0.005$   
実績  $\phi 0.001$



同軸度 計画  $\phi 0.010$   
実績  $\phi 0.002$



直角度 計画 0.010  
実績 0.001



## 2-4-2 輪郭形状測定機

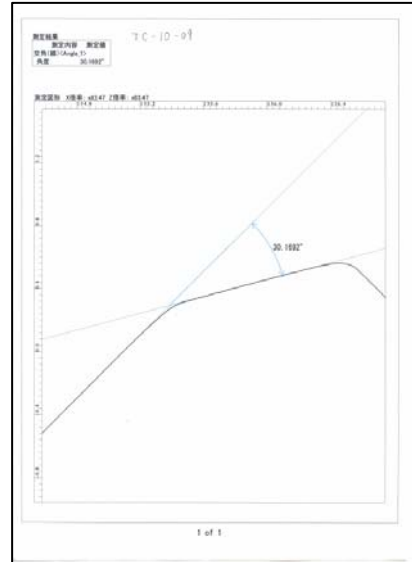
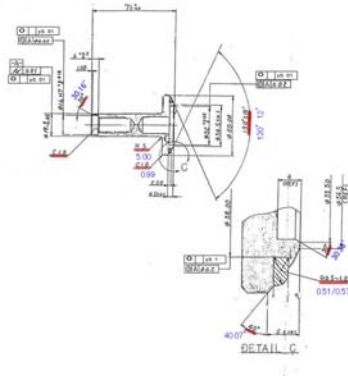
ミットヨ製 輪郭形状測定機

CV-3100S8

本機は、輪郭形状測定を行なう高精度測定機であり、スタイラスでサンプルを触り、得られた輪郭形状はデータ処理装置で解析する。



測定事例



## 2-5 まとめ

- ・インコネル 625 においては、切削諸条件・加工技術の高度化を図り、加工時間を目標の 30% に対し 25.5% まで近付ける事ができた。
- ・インコネル 718 においても同様に、中物部品の「シリンダー」の加工時間が 32% 削減でき、小物部品の「ピストンロッド」では 23%、「ポペット」は 25.1% まで削減を達成し、「溝加工」では 43.7% の時間短縮ができた。
- ・薄肉把握試験では、把握力を 0.3MPa (3Kgf/cm<sup>2</sup>) に降圧したことにより、従来の精度 0.02mm のところを 0.001mm (1μm) ~ 0.002mm (2μm) と 1/10~1/20 に精度の向上を図ることが出来た。
- ・加工現場での工程ごとの品質評価を実施することができ、切削試験~測定検証~プログラムの改訂~再切削 の迅速化が図れた。

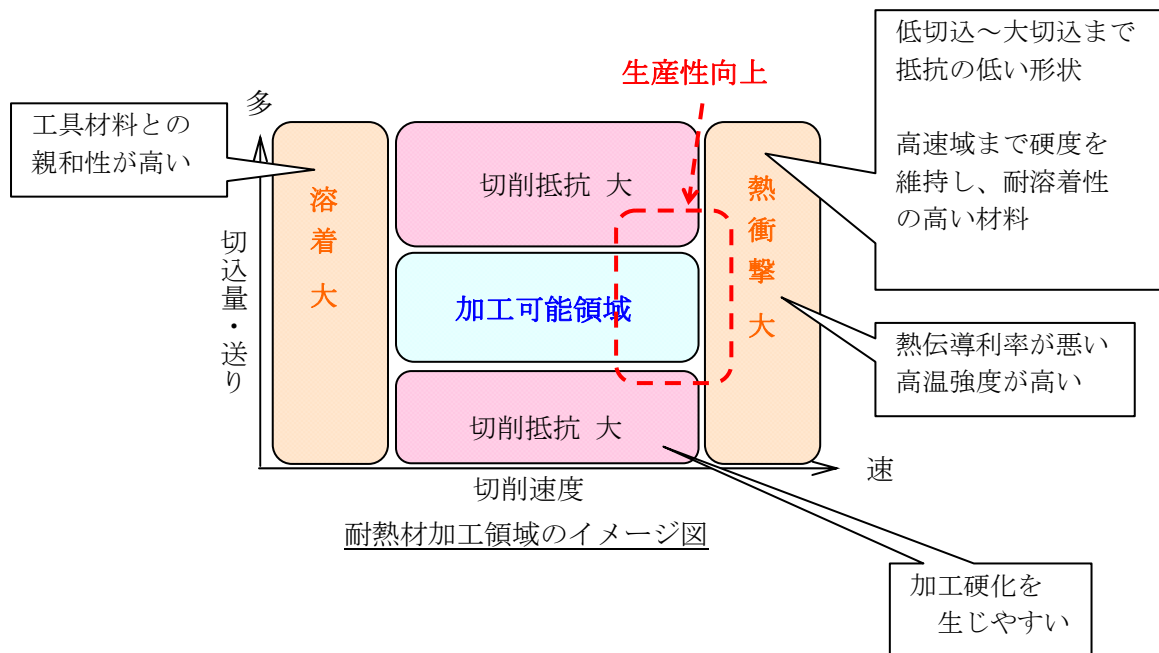
### 第3章 適合工具課題への対応

#### 3-1 研究目的及び目標

難削材（耐熱合金インコネル材）は、高温でも高剪断力・熱伝導率が低く、刃物が高温となり溶着して加工硬化を起こすため、切削による発熱が工具刃先に集中する。

そのため、工具寿命を延ばし、摩耗を最小限になるような工具材種を、国内の工具メーカーの夫々がもつ特長ある材種からそれぞれ用途にあった工具材種を選定し、切削試験と費用対効果の適合性を図るべく実用化試験を行った。

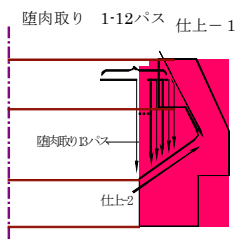
インコネル材の材料特性に対処する為の切削加工領域のイメージは下図の通りで「右寄りの点線の枠」内に近付けるために実用化試験を実施する。



#### 3-2 インコネル 625 鍛造品

##### 3-2-1 第1工程（内径荒加工）

この加工工程では、工具摩耗を最小限に抑えるために従来の加工手順に仕上げ2パスを追加して、摩耗量の比較試験を行った。結果として、追加をしても切削工具の高速化と工具摩耗の減少がみられ、従来 38.2 分かかっていた加工が、25.5 分に短縮することができた。



使用工具		切削速度 (m/min)	切込量 (mm)	送り (mm/rev)	加工時間 (min)	チップ <sup>2</sup> 使用 コーナー数	摩耗量 (mm)
従来	ハレナイト VC2 1~7パス	48	2	0.1~0.15	23.5	1	0.771
	ハレナイト VC2 8~13パス	48	2	0.1~0.15	14.7	1	0.771
テスト加工	京セラ PR905 1~7パス	72	2	0.1~0.15	15.7	1	平均 0.394
	京セラ PR905 8~13パス+仕上2ハ <sup>2</sup>	72	2	0.1~0.15	9.8	1	平均 0.394

### 3-2-2 第2工程（外周溝入荒加工）

この加工工程でも工具摩耗を最小限に抑えるために、切込量を減らし切込回数を増やすという新しい加工手順による比較試験を実施した。結果、加工時間を、当初の45分から20分に短縮することができ、使用チップコーナー数が4ヶ所から1ヶ所に削減することができた。



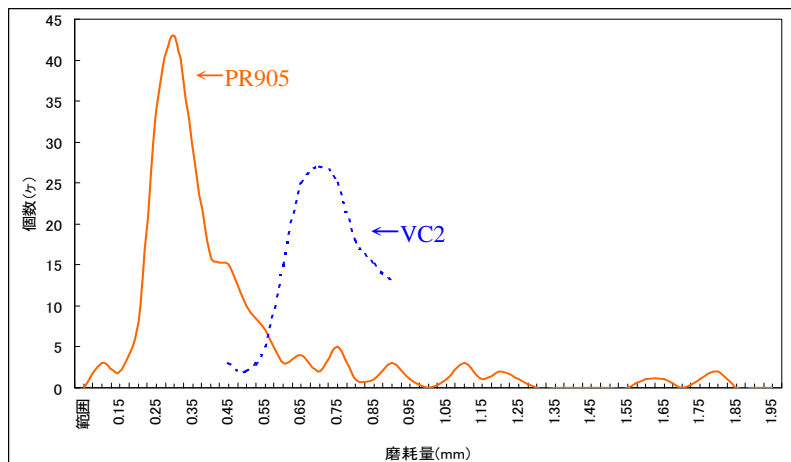
### 3-2-3 ランニングテスト（第1・第2工程の荒加工 R3.2）



・荒加工用として刃先摩耗量の200コーナー（100ヶ分）全個所を計測した結果、摩耗量の最大は1mm近くあったが、平均で0.44mmだった。集中する中央値は0.75mmから0.35mmとなり、前項で述べた条件の変更等の結果で摩耗量が削減できていることが実証された。

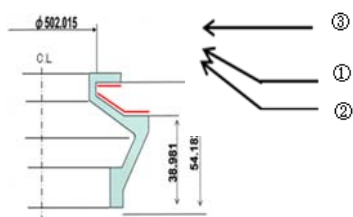
材種：P R 905

- ・削速度は30~40m/minから72m/minに上がり、切削加工時間も大幅に短縮した。特に2工程では、4コーナー使用から1コーナー使用に伸ばすことができ、チップの交換時間も1/4に短縮できた。
- ・このことを基礎資料として加工技術の高度化を維持し、事業化へ結び付ける見通しを立てることができた。



### 3-2-4 第2-1工程（外周横方向溝仕上げ加工）

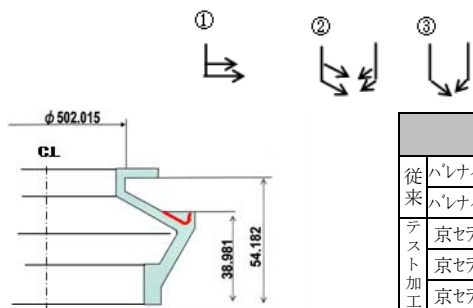
切削速度を上げた結果テストチップの方が摩耗が少ないことが確認できた。加工時間を当初の70分から25分に短縮することができた。



		切削速度 (m/min)	切込量 (mm)	切込回数 (回)	送り (mm/rev)	加工時間 (min)	チップ使用 コーナー数	工具摩耗
従来	ハレナイトvpuk20	30	0.25	3	0.08	70	2	多
	ハレナイトvpuk20	36	0.25	3	0.08	58	2	多
テスト加工	京セラ PR905	36	0.25	3	0.08	58	2	少
	京セラ PR905	60	0.25	3	0.08	35	2	少
	京セラ PR905	72	0.25	3	0.08	25	2	少

### 3-2-5 第2-2工程（外周縦方向溝仕上げ加工）

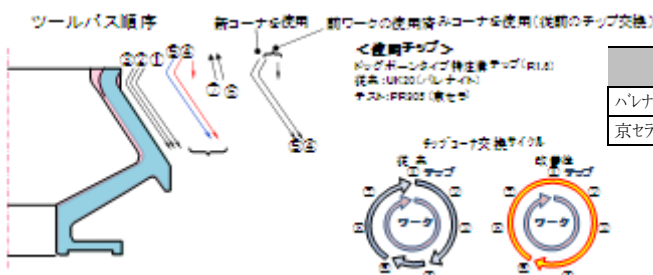
切削速度を上げた結果テストチップの方が摩耗が少ないことが確認できた。加工時間を当初の47分から20分に短縮することができた。



		切削速度 (m/min)	切込量 (mm)	送り (mm/rev)	加工時間 (min)	チップ使用 コーナー数	工具摩耗
従来	ハレナイトvpuk20	30	0.25~1.5	0.08	47	2	多
	ハレナイトvpuk20	36	0.25~1.5	0.08	39	2	多
テスト加工	京セラ PR905	36	0.25~1.5	0.08	39	2	少
	京セラ PR905	60	0.25~1.5	0.08	24	2	少
	京セラ PR905	72	0.25~1.5	0.08	20	2	少

### 3-2-6 第3-1工程（外径仕上げ加工）

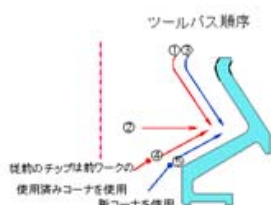
工法上、被加工箇所から離れた箇所で被加工物の取付・締付けをするしかなく、切削速度を上げすぎるとビビリが出ていたが、これを吸収して安定する領域 41m/min を適正な切削速度として定めた。またテストチップの工具摩耗の優位性の効用によりコーナー交換サイクルを変更し、使用コーナー数が3ヶ所から1ヶ所に削減可能となった。結果、加工時間を当初の52.8分から35.2分に短縮することができた。



	切削速度 (m/min)	切込量 (mm)	送り (mm/rev)	加工時間 (min)	チップ使用 コーナー数	工具摩耗 (mm)
ハレナイト uk20	28~36	0.1~0.25	0.1~0.15	52.8	3	0.151
京セラ PR905	41	0.1~0.25	0.1~0.15	35.2	1	0.129

### 3-2-7 第3-2工程（内径仕上げ加工）

外径仕上げ加工と同じく 41m/min を適正な切削速度と定め、切削試験を行った結果 使用コーナー数が5ヶ所から1ヶ所に減らすことができた。このため加工時間が当初の 69.2 分から 46.1 分に短縮することができた。



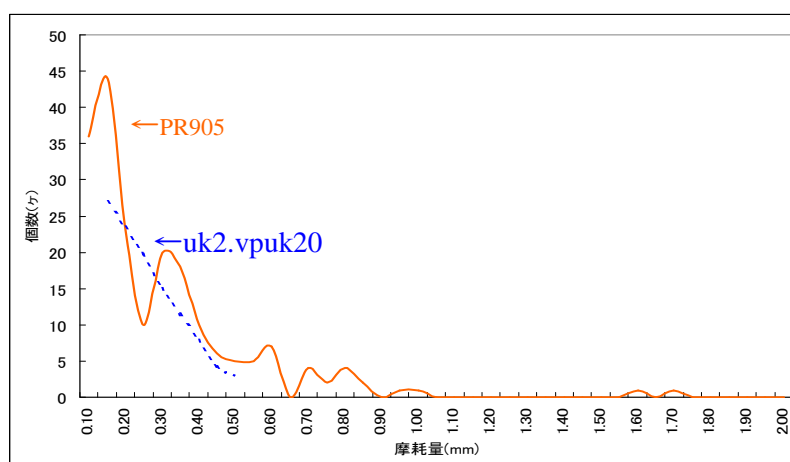
	切削速度 (m/min)	切込量 (mm)	送り (mm/rev)	加工時間 (min)	チップ使用 コーナー数	工具摩耗 (mm)
パレナ仆 uk20	28	0.1~0.25	0.1~0.15	69.2	5	0.148
京セラ PR905	41	0.1~0.25	0.1~0.15	46.1	1	0.136

### 3-2-8 ランニングテスト（第2、第3工程の仕上加工 R1.6）



材種：P R 905

- ・ 摩耗量の最大は 0.80mm 近くで、平均値が 0.27mm、集中する中央値が 0.19mm で、切削速度は 28~30m/min から 41~72m/min に上がり、加工時間も 47 分→20 分、52 分→35 分、69 分→46 分、70 分→25 分に短縮することができた。
- ・ 刃先寿命も 3-1 工程の外径仕上げ加工では、3 コーナー使用から 1 コーナー使用に刃先摩耗を伸ばすことができたことで刃物の交換時間も 1/3 に短縮できた。
- ・ この事を基礎資料として加工技術の高度化を維持し、事業化へ結び付ける見通しを立てることができた。



### 3-2-9 まとめ

- ・ インコネル 625（ジェットエンジン部品用リング）では、一応の成果をみることができ、時間短縮の目標値 30% に対し、25.5% まで切削試験を推進することができた。
- ・ 工具寿命も 4 コーナー、3 コーナー、5 コーナー使用がそれぞれ 1 コーナーで可能となることで 1/3~1/5 に削減でき、3~5 倍の長寿命化も図れた。

### 3-3 インコネル 718 棒材

#### 3-3-1 中物部品（ロケットエンジン部品用シリンダー）



- ・ 各工程に適合した切削工具を従来品と比較しながら選定し、切削諸条件の向上と切屑の状況を見定めながら工具の長寿命化の実用化試験を実施した。
- ・ 切削速度は 30～50m/min から 50～60m/min、時間短縮は従来の「7.40 時間」から「5.03 時間」に 32%の短縮を図ることができた。

#### 3-3-2 小物部品（ロケットエンジン部品用ピストンロッド）



- ・ 各工程に適合した切削工具を従来品と比較しながら選定し、切削諸条件の向上と切屑の状況を見定めながら工具の長寿命化の実用化試験を実施した。
- ・ 切削速度は 10～40m/min から 15～100m/min、時間短縮は従来の「4.55 時間」から「3.50 時間」に 23%の短縮を図ることができた。

#### 3-3-3 小物部品（ロケットエンジン部品用ポペット）



- ・ 各工程に適合した切削工具を従来品と比較しながら選定し、切削諸条件の向上と切屑の状況を見定めながら工具の長寿命化の実用化試験を実施した。
- ・ 切削速度は 20～40m/min から 20～60m/min、時間短縮は従来の「6.61 時間」から「4.95 時間」に 25.1%の短縮を図ることができた。

#### 3-3-4 小物部品（外周溝入加工）



- ・ 各工程に適合した切削工具を従来品と比較しながら選定し、切削諸条件の向上と切屑の状況を見定めながら工具の長寿命化の実用化試験を実施した。
- ・ 切削速度は 20～30m/min から 30～50m/min、時間短縮は従来の「95.85 分(1.59 時間)」から「53.95 分(0.90 時間)」に 43.7%の短縮を図ることができた。

#### 3-3-5 まとめ

- ・ 工具課題については、被加工物の材種・形状・加工工程・切削諸条件ごと複雑多岐にわたりそれぞれに対処する工具も多種多様であることが改めて検証された。
- ・ 加工技術高度化の研究開発におけるそれぞれの方向性が見いだせたので、未達成課題を補完研究したうえで整理して実用化に対応できるようにする。

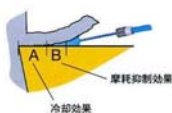


### 3-4 高噴射高圧クーラントとツールホルダー（ジェットノズル式）

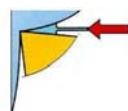
難削材（耐熱合金インコネル材）の加工技術高度化の研究開発において、高噴射高圧切削油装置－高圧クーラント（7MPa(70kgf/cm<sup>2</sup>））を装備した複合作業機 INTE-300IVの設置とジェットノズル式のツールホルダー（SV社）の採用により切削試験を重ねて 切削条件と適正な工具の組合せなどにより、インコネル材でも切屑が分断できることが確認できた。



通常のノズルと噴射位置



ジェットノズルノズル式



高圧クーラントによるクサビ効果



クーラントの条件による切屑状況  
 (左) 通常クーラント (7 kgf/cm<sup>2</sup>)  
 (右) 高圧クーラント (70 kgf/cm<sup>2</sup>)  
 切削条件：切削速度 50 m/min  
 切込量 1.0 mm  
 送り量 0.1 mm/rev

被切削物や工具に絡む切屑を取り除く為の人的ロスタイムの減少や刃先摩耗の減少は確認できたが、インコネル材の切削に於いて工具の刃先摩耗の点でどのような変化が起きているかメカニズムの分析を試みた。

#### 3-4-1 クーラント吐出力による刃先摩耗量の比較

超硬工具：CNMG120412(中荒) プレーカー：MS 材種：CA6515

被削材：INCONEL718 (AMS5663/HRC46~48)

実施機：INTE-300IV 切削速度：50m/min

切屑の写真は、刃先形状の変化前

クーラント圧		7MPa(70kgf/cm <sup>2</sup> )			1MPa(10kgf/cm <sup>2</sup> )		
切込 mm	送り mm/rev	切削長 m	MS CA6515		切削長 m	MS CA6515	
			刃先写真 摩耗量	切屑		刃先写真	切屑 磨耗量(100%換)
1	0.25	0.07	φ198 ~ 0.62m 50mm ÷ 0.07 = 714回 0.62 × 714 = 442m 3回 = 1.326m	0.267	φ161 ~ 0.50m 167mm ÷ 0.07 = 2385回 0.50 × 2385 = 1.192m 89%	0.242(0.272)	
2	0.5	0.10	φ196 ~ 0.61m 49mm ÷ 0.10 = 490回 0.61 × 490 = 298m 3回 = 894m	0.170	φ160.5 ~ 0.50m 167mm ÷ 0.10 = 1670回 0.50 × 1670 = 835m 93%	0.369(0.397)	
3	0.75	0.15	φ193 ~ 0.61m 48mm ÷ 0.15 = 320回 0.61 × 320 = 195m 5回 = 975m	0.257	φ159.5 ~ 0.50m 250mm ÷ 0.15 = 1666回 0.50 × 1666 = 833m 85%	0.431(0.507)	
4	1.0	0.20	φ185 ~ 0.58m 47mm ÷ 0.20 = 235回 0.58 × 235 = 136m 7回 = 952m	0.364	φ158 ~ 0.49m 250mm ÷ 0.20 = 1250回 0.49 × 1250 = 612m 64%	0.307(0.480)	
5	1.5	0.20	φ171 ~ 0.53m 46mm ÷ 0.20 = 230回 0.53 × 230 = 121m 4回 = 484m(中断)	0.141	φ156 ~ 0.49m 250mm ÷ 0.20 = 1250回 0.49 × 1250 = 612m 126%	0.355(0.282)	



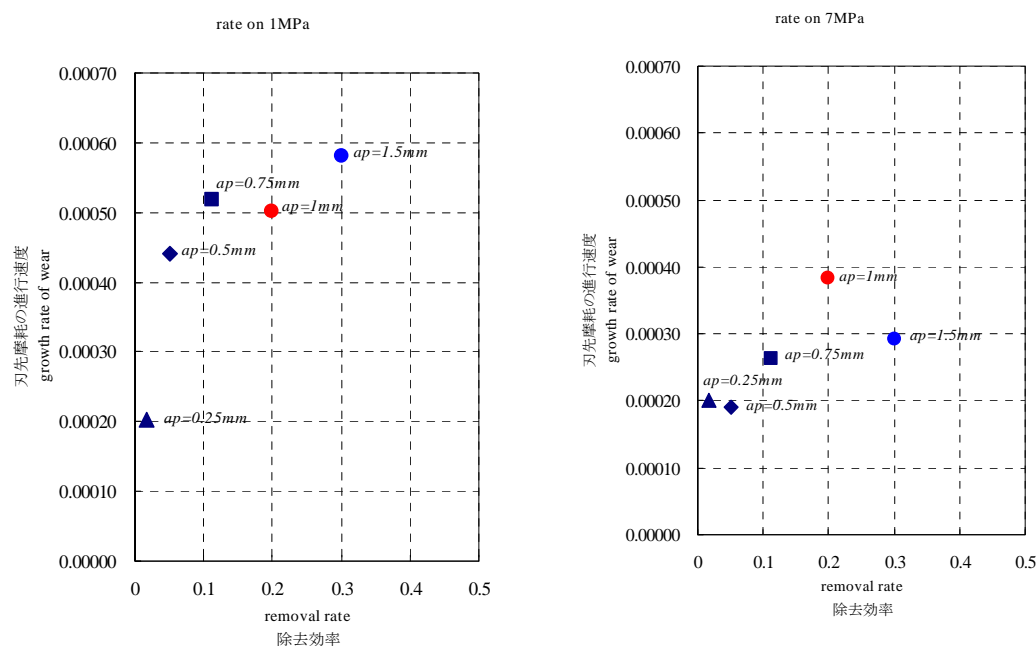
切削諸条件の適合化を図り 工具の長寿命化と加工時間短縮のテストカットでは、ツールパスの区切りで刃先の摩耗状態を確認し、0.3~0.5mm の時点で切削の続行に不適であると判断した。これを光学式顕微鏡で刃先を撮影すると共に摩耗量を測定した。

7MPa と 1MPa を比較した場合、明らかに 7MPa は刃先の負担が軽い。データとして見ると 1MPa は 7MPa に比して 9 割程度の切削長（負荷量）で中断したり、テストNo.4 のように 6 割の切削長（負荷量）で中断することもあった。ただしテストNo.5 では 7MPa で刃先にカケが生じた為に 484m で中断している。

### 3-4-2 刃先摩耗の進行速度の比較

7MPa(70kgf/c m<sup>2</sup>)と 1MPa(10kgf/c m<sup>2</sup>)での切削試験の結果、両者の関係性は下グラフ（高圧クーラントと摩耗抑制効果）の通りであり、高圧クーラントによる工具の長寿命化が実証された。

横軸に除去効率（切込量×送り）を取り、縦軸に刃先摩耗を切削長で除した数字を刃先摩耗の進行速度として示している。

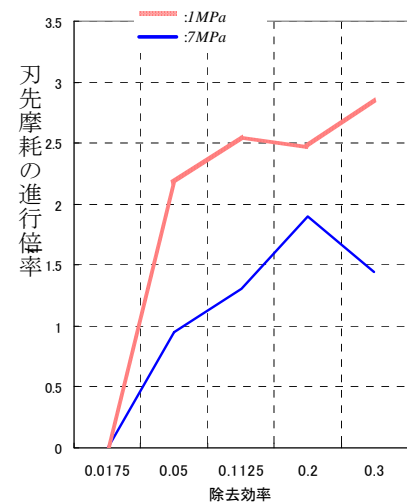


高圧クーラントと摩耗抑制効果

除去効率を上げるに従い摩耗は早く進行するのはいずれも同じであり、除去効率が低い時には摩耗の進行速度に両者の間に大きな違いは見られない。しかし除去効率を上げると摩耗の速さは1MPaでは2.1倍から2.8倍にも上がるのに反して、7MPaは0.9倍から1.9倍に留まる。特にテストNo.3（切込0.75mm 送り0.15mm/rev）で比べると、7MPaは1MPa(10kgf/cm<sup>2</sup>)の2倍程度、工具寿命が長いことが確認できた。（右図）

一般的に除去効率が低い時に発生する刃先の温度やすくい面の温度は低いが、上げるに従い温度も上がり工具の摩耗に影響を与える。しかし当切削比較試験においては工具の摩耗速度は進行が抑えられていることから、高圧クーラントの冷却効果を確認した。

ちなみに、このグラフがなだらかな線を描かない理由は「素材と機械とチップのムラ」と表現するが、インコネル材の規格範囲の中での硬度の上限と下限の差、機械の振動周期等をあげられる。



### 3-4-3 まとめ

難削材（耐熱合金インコネル材）の切削加工には、下記の事項が確認できた。

- ・高圧クーラント(7MPa)とジェットノズル式ツールホルダーによる切屑の切断、刃先摩耗の減少による工具の長寿命化、切削諸条件の高度化が図れた。
- ・工具課題については、被加工部の材種・形状・加工工程・切削諸条件ごと複雑多岐にわたりそれぞれに対処する工具も多種多様であることが改めて検証された。

## 第4章 切削油課題への対応

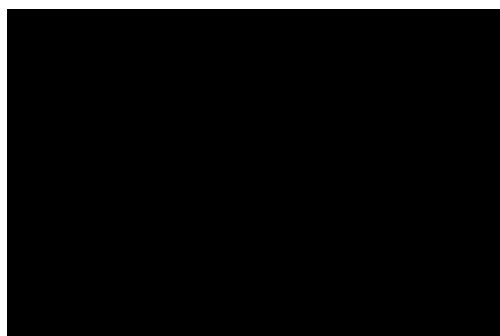
### 4-1 研究目的及び目標

インコネル材の切削においては、「被削材の熱伝導率が低く刃先が高温となり異常摩耗が発生する」、「工具材料との親和性が高く溶着を起こし凝着欠損が発生する」、「加工硬化を起こすため境界摩耗が発生する」等の課題にて、これらの課題を解決していくためには「被加工物の材料の種類」、「切削条件の適正化が図れる工作機械」、「切削諸条件に対処できる切削工具」、「切削油」の4つの要素による相関関係によるところが大きく、加工技術高度化の研究開発による切削時間の短縮、切削工具の長寿命化などの推進に切削油の介在は不可欠である。

研究目的の工具への発熱を抑えて工具寿命を延ばし、表面粗さも確保でき、経済的で環境にも配慮された効果のある品種を選定して実用化試験を行った。

### 4-2 切削試験対象品種の選定

切削試験において使用する切削油としては、これまで使用してきた切削油の基礎データ及びアドバイザーである三菱重工業(株)名古屋誘導推進システム製作所、(有)瀬戸オイル商会から提供を受けたデータを基に、インコネル 718 材 (AMS5663) 及びインコネル 625 材 (AMS5666) の切削に対応できる水溶性切削油として切削油メーカーが推奨する切削油の中から下記の3種類を選定し、比較検討を実施した。

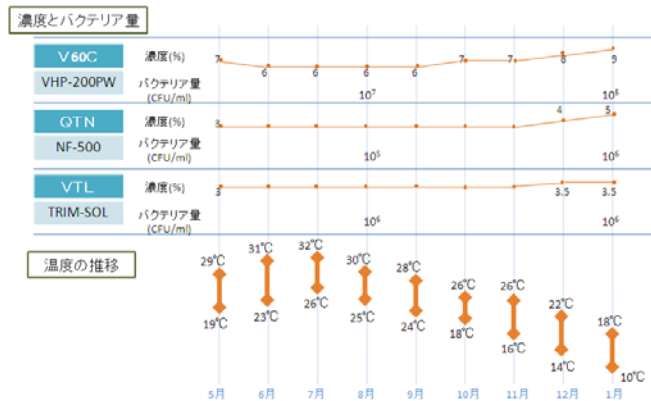


- ・ 「TRIM VHP E200PW」は難削材加工に多くの実績を持っており、VHPの特徴である早い消泡力が特に高速切削に効果的で、切削速度を超硬チップの 50~100m/min からセラミック工具による 300~400m/min への挑戦にも適合すると思われる。
- ・ 「TRIM SOL」は、強い極圧添加剤を多く含有しているので、延性のある被削材の塑性変形の高い工具すくい面に著しい高熱のかかる加工に効果的で、冷却性よりも潤滑性が重視されるインコネル 625 の鍛造品切削に適していた。
- ・ 「マイティゴールド NF500」は、インコネル用に選択された 3 種類のうち、比重・粘度とも他に比べて低いものであるが、小物部品に対しては十分に対応できるものであり、コスト的な観点からもインコネル 718 小物棒材の切削には適した。

### 4-3 切削液劣化の問題点

切削液による被切削物と切削工具の冷却効果を発揮し、切屑の排出を促進した上で指定通りの表面あらさを確保し、それに見合う切削条件で刃先摩耗を最小限に維持する為に、まず切削液の濃度管理を実施している。(下グラフ) 水溶切削液の場合、水溶液の劣化の具体的症状として①腐敗臭②液の汚れとベタツキ現象③発泡④発錆 が上げられる。腐敗によって生じる問題点は、液の分離、有効成分の消耗等による濃度低下で、それによって切削液のpHも変化し機械や被切削材の錆に通じる。またスライム、ヘドロ状の物質の生成による機械内部の目詰まり・液の寿命低下は液交換などの直接的経済ロスにつながる。

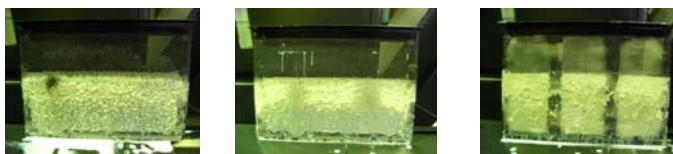
この要因のひとつと考えられる細菌の量を夏期と冬期で切削液の油類別に調査し、効果的かつ経済的な解決のポイントを探り、下記のような状況が現れた。



現在、多く使用されている防腐剤はトリアジン系化合物、モルホリン系化合物、チアゾリン系化合物、イソチアゾリン系化合物等があげられる。しかしこれらの防腐剤は細菌と糸状菌の両方に同時に効果があるものは少なく、効果の期間も永続しない。定期的に添加するならば、化合物の異なるものに変えながら添加するのも1つの方法である。しかしながら防腐剤は一時的な腐敗対策に過ぎず、永続的に頼ることはできない。よって、現場に即応した方法として a) 液の交換時にはタンク周り、配管内などの殺菌を充分に行う b) 希釈水は軟水が望ましい c) 腐敗しにくい水溶性切削油を選定する d) 定期的な保守点検による異油種の混合防止 e) 切屑の早期除去 f) 切削液の日常的な濃度、pHの管理 g) 防腐剤の添加 h) 長期停止時の対策などがあげられる。

### 4-4 高圧クーラントによる油分の分離・破壊 (7MPa/70kgf/c m<sup>2</sup>)

今回の研究で、切削油種類 マイティゴールド NF-500 を吐出力 1MPa(10kgf/c m<sup>2</sup>)の条件下でインコネル材の加工を試したが、刃先摩耗が激しかった。7MPa(70kgf/c m<sup>2</sup>)に切換えると、フィルターが目詰まりして切削液が循環せず機械は自動停止した(下写真)。1MPa(10kgf/c m<sup>2</sup>)と7MPa(70kgf/c m<sup>2</sup>)のどちらの条件下でも被加工物のデータを取るまでに至らなかった。

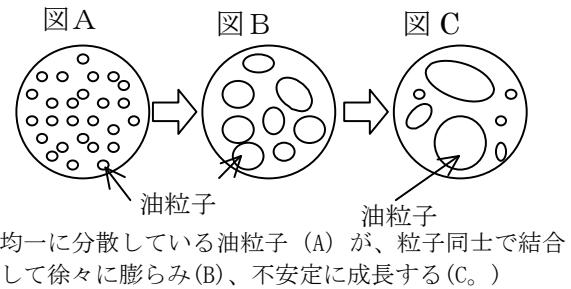


フィルター写真

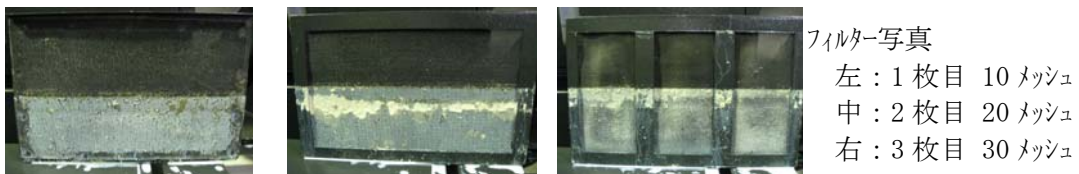
左: 1枚目 10メッシュ  
 中: 2枚目 20メッシュ  
 右: 3枚目 30メッシュ

原因として切削条件に合致しなかったことと、油分と水分を繋ぐ界面活性剤が高吐出力 7MPa (70kgf/c m<sup>2</sup>) により分離・破壊されたことによると考えられる。つまり、均一に分散していた油粒子が切削加工をしているうちにミキシングされ、複数の粒子同士と結合して徐々に膨らみ粒径がミクロン単位であったものが、ミリ単位まで成長し、液がベタッとしたクリーム状になり、今回のようなフィルターに目詰まりを起こした。

この原因となる界面活性剤の破壊現象は、界面活性剤の分子構造が加工熱の影響を受けたり、材料金属のイオン化により破壊されることによつて起きる。



切削油種 TRIM VHP-E-200PW では、7MPa (70kgf/c m<sup>2</sup>) の高圧でも、フィルターの目詰まりなどのトラブルは発生していない。難削材加工の為の高圧クーラントに必要なのは、水の中で分散している油粒子の大きさ (浸透・冷却)、強さ (潤滑・酸化安定)、形のバラツキ (洗浄) が分離・破壊されない成分配合である。高温・高圧で破壊されることなく乳液を維持するのは10数種類の界面活性剤をバランスよく配合していることが必要である。



#### 4-5 まとめ

切削加工での水溶液は 平均的に水溶液は 90%以上が水である。この液の中でいかに多くの油粒子を存在させるかが重要で、切削加工時には刃先へ微細な油粒子を多彩に送り込むことにより、極圧と過酷な高温の条件下での刃先の摩耗を和らげる事となる。この為に最適な油種の選択が重要である。

加工技術高度化の研究開発による加工時間の短縮、切削工具の長寿命化には、切削油の介在が不可欠で、数々の品種の中から適切な油の選択が必要である。インコネル材の切削に於いて、超硬工具による 50~70m/min、セラミック工具による 300~400m/min の切削条件で切削液の吐出圧力 7MPa (70kgf/c m<sup>2</sup>) においては、TRIM VHP-E-200W 及び相当品種が実用化の推奨切削液と判定できた。

## 第5章 被加工物の微構造変化、特性変化に関する研究

### 5-1 研究目的及び目標

インコネル材の加工コストを低減する目的で、切削速度を従来より 5 割程度高速化することによって、加工コストを 3 割程度低減することを図っている。さらに製品品質を維持、向上させることを目標としている。

インコネル材は、硬質の粒子あるいは相を含む、高温強度が高い、加工硬化しやすい等の物理的機械的性質を持つ他に、工具に溶着しやすいあるいは工具との反応性が高い等の化学的性質もあり、難削材として知られている。特に高速切削では、切削温度が高くなるので、インコネル材の化学的性質が主な原因になり、難削性を示す。

本節では、インコネル材から加工されたロケットエンジン部品、ジェットエンジン部品において、表面粗さ等の特性変化を評価し、製品品質の維持向上を図った結果について述べる。

### 5-2 シリンダーの特性変化

耐熱合金 (Ni 基合金、インコネル 718 析出硬化) 製のロケットエンジン部品 (図 5-1) について特性を調査した。これは、平成 20 年 2 月に(株)瑞木製作所に導入の複合加工機で製作されたシリンダーの試作品である。すべての箇所において同一の加工条件ではないが、メカニカルシール面の仕上げ加工として切削速度 55m/min が選択されている。



#### ①三次元測定機による測定結果

図 5-2 は製品図であり、赤字で記入したものは三次元測定機で測定した寸法、平行度、及び同心度である。試削品であるが、全ての箇所が公差内に収まっていた。

図 5-1 ロケットエンジン部品 (シリンダー)

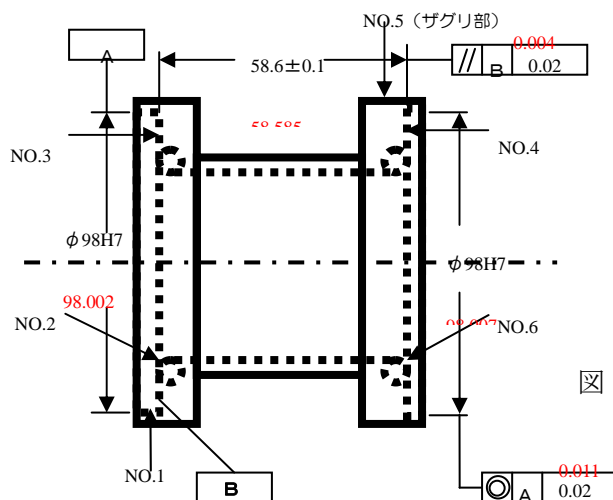


図 5-2 三次元測定機による結果

### 5-3 シリンダーの断面曲線特性

ロケットエンジン部品として用いられるシリンダーの端面には、ドーナツ状に加工された平面が存在し、メカニカルシール面として機能する。気体をシールする目的から、この面のツールマークは同心円状に加工されることが要求される。通常のバイトによる端面切削では、ツールマークが渦巻き状になるが、ロー付けバイトの押し付けによって同心円状を実現することを図っている。

図 5-2 において、メカニカルシール面は NO. 3、NO. 4 の 2 箇所加工されている。また基準は両端面の薄肉部内径であり、ツールマークは基準に対して渦巻き状か同心円状に切削されている。そこで、メカニカルシール面の断面曲線を 45 度とびで測定し、断面曲線の位相を評価することにより、渦巻き状か同心円状かを評価した。

図 5-3 は、榊原製作所で、平成 20 年度にテストカットされた NO. 3 (図 5-2) のツールマークを表す。割り出し角度は 45 度とびとし、表面粗さ計の開始点復帰機能を利用した。また、走査長さは 0.3mm である。

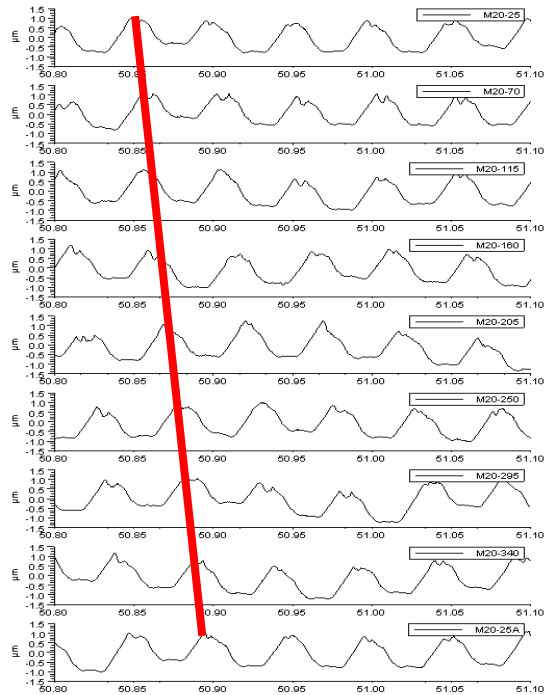


図 5-3 旧 A 部ツールマーク

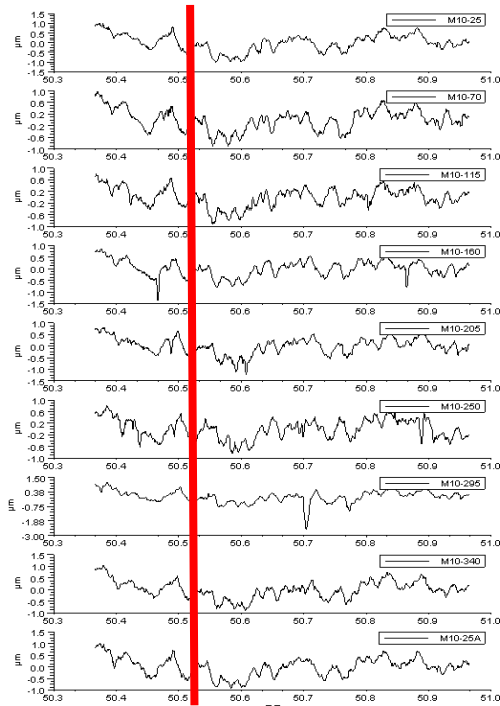


図 5-4 新 A 部

同図では、角度割りだしステージが 1 回転するとツールマークの位相が 1 ピッチずれることが分かり、渦巻き状になっていることが分かる。ちなみに加工条件は、主軸回転数 160rpm、送り 0.05mm/rev、使用工具 CMMG120408-33 AHi10 (超硬) である。図 5-4 は平成 21 年度のツールマークであり、断面曲線に揺らぎが認められるが、割り出し角度が変わっても位相が揃っており、同心円状であると見受けられる。加工条件は、主軸回転数 35rpm、手送り、ロー付けバイト幅 3.2mm、4 回送りである。

#### 5-4 まとめ

平成 19～21 年度の本分担研究においては、計画に則り以下を実施した。その内容は、計画を満足するものであった。

- ① 従来機と複合加工機により加工されたロケットエンジン部品のシリンダーにおける表面粗さ、三次元表面性状、直角度、寸法、及び平面度を評価分析し、それぞれの特性を比較した。その結果、これらの特性は維持、あるいは向上していることが分かった。
- ② 被加工物が大きく、異形状であることにより、通常の表面粗さ計では評価できない箇所を樹脂製のレプリカを使用することによって計測評価した。その結果、新加工法で切削されたジェットエンジン部品のリングにおいて、表面粗さは図面指示を満足していることが分かった。
- ③ 組立ステージの構成と適用によって、切削加工におけるツールマークの状態を判別可能にした。その結果、平成 20 年度にテストカットされたメカニカルシール面（ロケットエンジン部品のシリンダー）のツールマークは渦巻き状であり、平成 21 年度にロー付けバイトで加工されたものは同心円状であることが推測された。ただし、ロー付けバイトで加工されたメカニカルシール面の断面曲線には揺らんが認められた。



## 第6章 全体総括

### 6-1 成果の総括

難削材（耐熱合金インコネル）の切削加工技術高度化の研究開発を推進するにあたり、適合した工作機械の仕様設定・適合工具の選択と開発・夫々に適合した切削油種の選択等、アドバイザーの特異性を協調し、使用する立場からの経験・蓄積されたノウハウ・意見を反映してデータの調査・分析を実施した。

製作供給する立場で、より効果的な技術情報を融合して研究開発を推進することができ、より具体的に川下製造業者の社会的ニーズにも応えて研究開発を推進し総括的には所期の目標をほぼ達成することができた。

#### 〔インコネル 625 鍛造品〕

インコネル 625（ジェットエンジン部品）においては、加工工程ごとの適正工具による切削諸条件の高速化と時間短縮を図れた。事業化へのランニングテストによる実用化切削試験も実施した結果、事業化への研究成果をみる事ができた。

#### 〔インコネル 718 棒材〕

インコネル 718 の棒材については、川下製造業者において小物部品に対するニーズも受けとめ、中物部品（φ140～300）とともに小物部品（φ15～100）に対する研究開発についても併せて実施し、夫々に対応した課題の解決に向けた取組み、加工技術の高度化による加工時間の短縮を実現した。

研究開発を推進するにつれて、切削諸条件の明確化・工具の刃先摩耗管理と長寿命化・切削油の濃度と温度管理などより具体的なテーマと各種基礎資料の切削試験が実施でき、事業化につないでゆくことができた。

### 6-2 当研究開発後の課題

インコネル 625 鍛造品においては、セラミック工具による黒皮削り加工の高速化・ドリル工具による穴加工などの未達成課題を補完研究する。

インコネル 718 棒材では、工作機械特性と夫々の材種・形状など適正工具の刃先摩耗管理と長寿命化の未達成部分の切削試験と測定検証を行い 加工現場での評価の迅速化を図る

### 6-3 事業化への展望及び目標

3年間の研究成果を踏まえ、この加工技術高度化の研究で得た技術を活用できる市場開拓に向けて働きかけている。

#### 1) 航空宇宙分野

(1) MASTT（MHI 名誘 協力会社の海外受注組織）

昨年6月のパリ航空ショーに出展。同12月に SNECMA (GE, PW, RR に次ぐフランスのエンジンメーカー) の

来日時にプレゼンを行い、今年2月には守秘契約を結び具体的内容の検討中。



- (2) ボーイング 787 向けロールスロイス社のトレント 1000 及びエアバス A350 のトレント XWB の部品には、インコネル材よりさらに被削性が高い（削りにくい）ニッケル基合金が使われており、この研究開発で蓄積された加工技術を活用できる。
- (3) MR J（三菱リージョナルジェット）向けのエンジンは、プラット アンド ホイトニー（P & W）社と三菱重工業(株)とで共同開発された PW1217G(GTF)が搭載され、それに先駆けて機体部品の加工を当社で分担し 20～30 アイテムの準備を進めている。
- (4) メッセなごやへの出展を通して、五常マテリアル経由で川重（岐阜）のインコネル、チタン系の加工にも取り組んだ。
- (5) 国内でインコネル材加工を扱うエンジンメーカーとして I H I（瑞穂）、川重（明石）、富士重（宇都宮）への働きかけを検討している。
- (6) インコネル材の入手経路も広がり、大同特殊鋼と INCO 社との合弁による大同スペシャルメタル(株)及び(株)不二越からの国産供給ルートも確立しつつある。

## 2) 原子力発電設備分野

炉心の支持格子等の他に、小型高炉の開発に伴う高温強度の高いインコネル材利用は拡大する。温暖化ガスの削減が主張され、低開発国を中心に膨大な電力需要が発生する中で、原子力発電の重要性は高まる。例えば報道発表によると日本政府は 3 月 8 日、今国会に提出する地球温暖化対策基本法案に、原子力発電の推進を明記する方向で最終調整に入ったとし、オバマ米大統領も米国での原子力発電を積極的に活用する姿勢を鮮明にしている。

<http://www.businessweek.com/ap/financialnews/D9DTH54G1.htm>

## 3) 核融合、放射線（電子、核子）応用機器分野

この分野での技術開発は各国で競っているが、高温化での安定した強度、耐食性を持った機器の確実な作動が必要で、それにはインコネル材の利用が必要とされる。

## 4) 自動車部品

- (1) 守谷商店経由で自動車部品のステンレスからインコネルへの切換えに参画している。安全・快適・省エネ性を追求する特性が似通った航空機と自動車は、技術面で共通するところも多い。自動車には多くの航空機技術が導入されている。
- (2) 自動車産業への波及効果として、電気自動車が注目されると同時に課題もありエンジン需要も欠かせない。エンジン部品は、耐熱性の高い合金が好ましく、軽量化と量産化の観点から「チタン合金」「セラミック」がターボチャージャー等に利用されている。インコネル材の加工技術が、チタン合金、セラミック等への加工にも応用できる。ディーゼルエンジンにおいては、環境にやさしく、排ガス規制を高め、燃焼温度を上げるために、耐熱合金が検討され同エンジンの高度化・高効率化に難削材加工技術が寄与できる。

## 5) 地上発電用ガスタービン

発電効率の向上及び電力需要の急激な変動に対応すると共に、小型で高効率なガスタービンの開発導入は拡大している。海外市場では、日本の高い技術力で開発された高信頼性、高性能なガスタービンは、販路が拡大している。技術的には航空機エンジンと同様に性能向上の為に

燃焼温度は高温化の方向にあり、インコネル材の採用は増えている。

## 6) 化学工業分野

化学工業分野では常に新しい素材の開発競争が展開されているが、より高温化での反応を伴う分野での新製品開発も進んでいる。現在のステンレス材ではカバーできない高温強度及び耐食性が必要とされる分野をインコネル材で補う必要性も出ている。

## 7) 知の拠点

愛知県の新産業育成中核事業として「次世代ナノ・マイクロ加工技術」が重点研究プロジェクトに決定し、チームの一員としてこのプロジェクトに参画する。「難加工性材料の超精密・高能率加工技術の開発」に今回の研究開発での成果が寄与でき、航空機産業は無論のこと自動車産業への効果の波及が可能である。

航空宇宙産業における先進材料の製造コストが大幅に削減できるならば、同じく軽量化を目標とする自動車産業にも導入可能であり、設計方針を変えるほどの大きな技術革新が期待される。ここでも先進材料の活用を推進する航空宇宙産業先端技術の自動車産業への移転を常に念頭におき研究開発を行う。



知の拠点重点研究プロジェクト研究実施計画書より

## 6-4 まとめ

- ・インコネル材の切削加工技術高度化の研究開発を推進し、具体的にそれぞれの課題について年次を追って実施することができた。
- ・難削材に対する切削諸条件は奥が深く、次々と現れる新しい課題にも対処しつつ、川下製造業者の社会的ニーズに応じて基盤技術の高度化を確立してきた。
- ・部分的な未達成事項についての補完研究を次年度に継続推進することとする。
- ・事業化への展望については、航空宇宙分野での拡大を中心に 本研究で開発した加工技術を活かして関連する他分野への市場開拓に向けても働きかけている。