

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機難削材加工における競争力強化のための、
加工技術の高度化及び加工システム開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局	九州経済産業局
補助事業者	一般財団法人 九州産業技術センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	4
(1) 研究体制図	4
(2) 管理員及び研究者氏名	4
1-3 成果概要	5
【1. エンドミル切削工具の長寿命化の課題への対応】	5
【2. 加工時間短縮の課題への対応】	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論（具体的研究内容）	7
2-1 【1. エンドミル切削工具の長寿命化の課題への対応】	7
【1-1】エンドミル切削工具の開発	7
【1-1-1】エンドミル切削工具の設計	8
【1-1-2】エンドミル切削工具の製作	14
【1-2】工具刃先の冷却技術の開発	20
【1-2-1】高圧クーラント及びエアークーラーとの組み合わせによる冷却技術	20
【1-2-2】クーラント液中の冷却技術の開発	25
2-2 【2. 加工時間短縮の課題への対応】	27
【2-1】難削材の切削加工ビッグデータ収集	27
【2-2】難削材の切削加工ビッグデータ解析	28
【2-3】ビッグデータ解析に基づく加工システムの開発	31
最終章 全体総括	34

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

《研究開発の背景》

【チタン合金材のニーズ拡大】

ボーイング 787 型機を皮切りに、航空機の軽量化、省エネ化開発が進む中、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が標準的に多用され始めており、エアバス A350XWB 型機、現在開発中のボーイング 777X 型機においても採用されている。CFRP の採用により、航空機に使用される材質、またその割合にも大きな変化をもたらした。軽量化の観点のみならず、アルミニウム合金と CFRP の結合部での電解腐食を回避するためにも、世界的なチタン合金の使用が図 1 のように 2013 年から 2019 年の 6 年間で 4 万トンから 6 万トンに増大すると予測されている。このように、航空機に使用される金属材料、加工工程に顕著な変革と進展をもたらした。

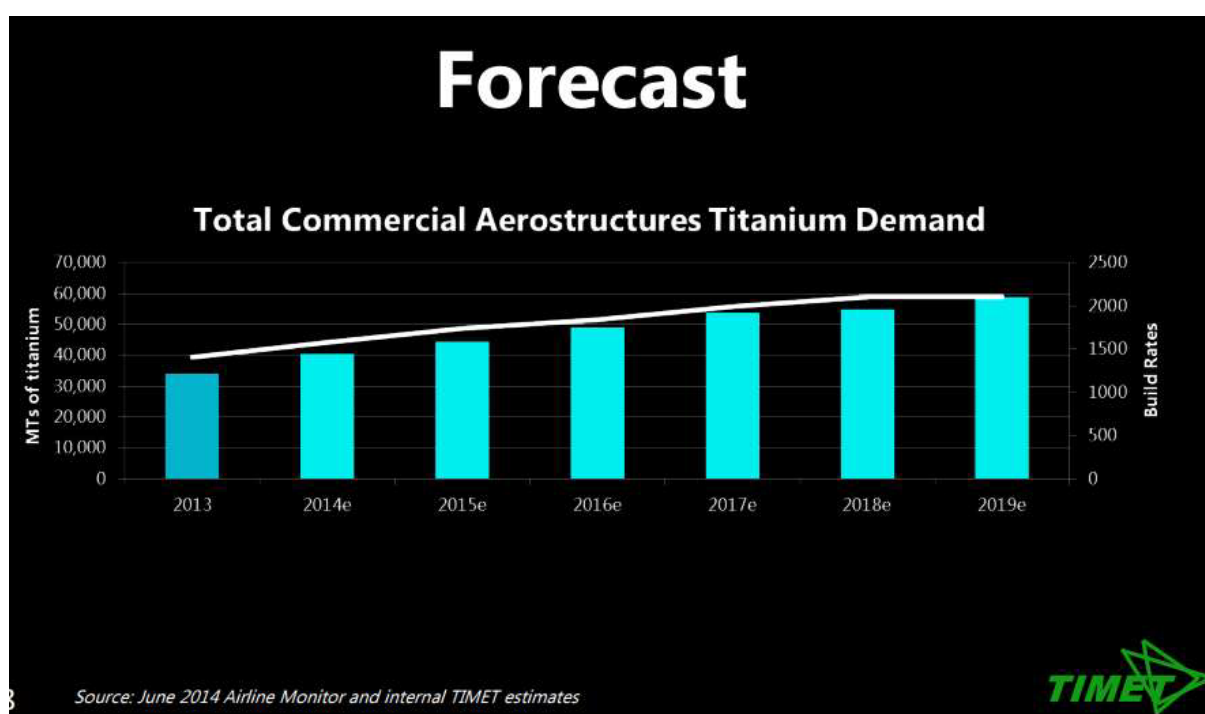


図1 民間航空機機体におけるチタン需要推移予測
出所 June 2014 Airline Monitor and internal TIMET estimates
注釈：左縦 チタンの量、横軸 年度、右縦 機体数

【チタン合金等難削材加工の現状】

しかしながら、Ti-6Al4V を始めとするチタン合金は、難削材と呼ばれ、熱伝導率が非常に低く、加工で発生する熱は切削工具刃先に溜まるため、刃先の摩耗が早く、加工物の大きさ等によっては、加工途中であっても工具を交換する必要がある。そのため、作業効率が非常に悪く、稼働率を低減させる要因となっている。欧米と比較し日本では大物チタン材の加工経験が乏しく、複雑な形状を有する多種少量部品専用にカスタマイズした切削工具の開発技術が確立していない。そのため、加工コストの低減が進んでいない。

今後も世界的な航空機需要拡大と低燃費新機種の開発により、市場拡大が期待できるが、その一方で、価格重視による度重なるコストダウン要請が、日本の製造業を下支えしている中小企業

を直撃している。付加価値が高いはずである、加工時間の長い大型チタン部品（3m 以上）においても、低価格化が進行し、価格に見合った技術の構築が追い付かず、日本国内での加工は原価が売上を上回るというリスクを伴っている。

コストダウン要請に対応するために様々な改善を行ってきたが、従来の加工技術や切削工具の延長での改善では、生産の 25%におよぶ難削材の工具費用の削減は限界に達しており、国内での加工を維持することは非常に厳しい。

一方、難削材加工の経験豊富な欧米企業のトレンドとして、自社工法に最適な切削工具を開発し、コスト低減及び加工技術の向上を行っている。また設備導入支援体制も進んでいるため、1 台 10 億円する多頭式マシニングセンター設備を導入し、3メートル以上の大物チタン部品であっても、1 台の機械で 8 個同時に加工するなど、画期的な方法でコスト低減を進めている。

【国内航空機産業と(株)ウラノの使命】

自動車産業等、我が国のものづくりは、長年世界をリードしてきたが、旅客機の生産においてはまだ初歩的段階にあり、航空機産業においては、より一層日本の技術の利点、高品質を生かした技術開発の必要がある。加工技術とコストの両面での国際競争力を強化できたなら、航空機産業における日本の現状の世界シェア4%を、国で掲げている目標値 20%に少しでも近づけることができる考える。(株)ウラノは、ボーイング 787 型機 1 機に使用されているチタン素材 100 トンの内 6.6%となる6.6トンの素材を扱っている。2018 年 5 月現在月産 14 機分のチタン素材を加工しているため、チタン素材の年間取扱量は 1100 トンを越え、その切削加工による切粉の排出量は、半分の 550 トンに上る。そのような現状を鑑みても、(株)ウラノの加工技術は国際的に高い水準にあると理解しているが、さらなる技術の向上とコスト対応力が要請されている。これに應えるためには、科学的な視点で、大型の航空機用チタン部品の加工技術を、特にチタン切削用工具の切削性能と、クーラントによる冷却方法の点から評価し直し、革新的技術を開発する必要がある。その成果が我が国の大型チタン部品の加工技術開発に及ぼす効果は大きいと考える。そのため、市販されている汎用的な切削工具の使用から、難削材加工に適した切削工具の開発に移行することによる工具の長寿命化、及び工具刃先の温度低減に向けた、新たなクーラントによる冷却方法の技術開発等、包括的な加工システムの構築が急務である。

《研究目的および目標》

（三）精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

（三）川下分野横断的な共通の事項

- ①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ
力、生産性、効率化の向上、低コスト化

前述の社会的背景を受け、難削材加工に適したエンドミル切削工具開発及び新たなクーラント技術を開発し、工具の長寿命化を図るとともに、加工実績データをビッグデータとして解析・活用する加工システムを開発することで難削材加工を高能率化して、包括的な難削材加工の高度化を目指した。

(三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

②高度化目標

オ. 生産性・効率化の向上、低コスト化

本事業における実施項目は大きく以下の3つとした。

1) 難削材加工に適した長寿命のエンドミル切削工具の開発

2) 切削工具の寿命に影響を与える工具刃先の冷却効果を高めるためのクーラント開発

3) 加工実績データをビッグデータとして解析・活用する加工システムを開発

その上で、1) および2) の達成によりエンドミル切削工具の寿命を3倍以上、3) の達成により難削材加工時間を30%以上短縮することを目標とした。

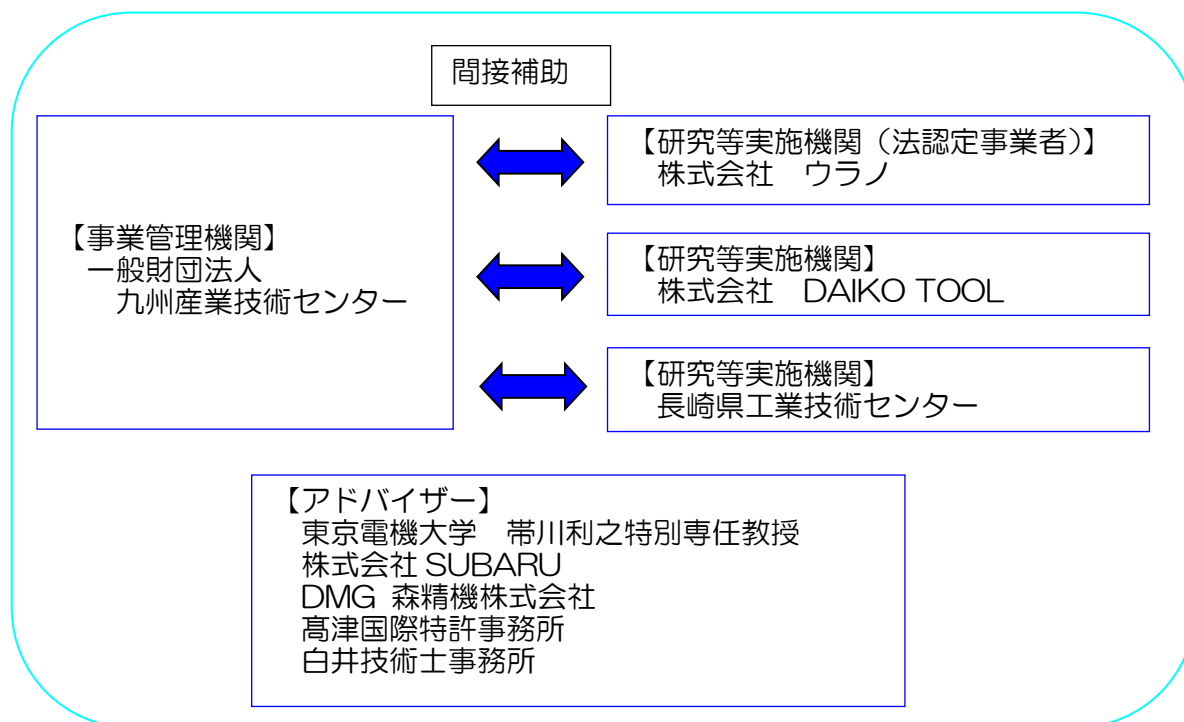
研究テーマと目標値は表1のとおり。

表1 研究テーマと目標値

研究テーマ	目標値
【1. エンドミル切削工具の長寿命化の課題への対応】	工具寿命3倍以上
【1-1】エンドミル切削工具の開発	基準のエンドミルと比較して工具寿命2倍以上
【1-1-1】エンドミル切削工具の設計 工具刃先形状(すくい角・ホーニング)、逆刃エンドミル、R刃エンドミル	
【1-1-2】エンドミル切削工具の製作 工具刃先形状(すくい角・ホーニング)、逆刃エンドミル、R刃エンドミル	
【1-2】工具刃先の冷却技術の開発	【1-1】で開発したエンドミル切削工具を用い、基準のエンドミルと比較して工具寿命3倍以上
【1-2-1】高圧クーラント及びエアークーラーとの組み合わせによる冷却技術	
【1-2-2】クーラント液中の冷却技術の開発	
【2. 加工時間短縮の課題への対応】	加工時間を30%以上短縮
【2-1】難削材の切削加工ビッグデータ収集	難削材加工実績データを500 ケース以上収集・整理
【2-2】難削材の切削加工ビッグデータ解析	【2-1】で収集・整理した難削材加工実績データから、加工システムに必要で最適なパラメータの解析を行い、ビッグデータ解析ソフトを開発し最適化
【2-3】ビッグデータ解析に基づく加工システムの開発	【2-2】で最適化した加工システム(ビッグデータ解析ソフト)について、実証試験(テスト加工)を行い、加工時間が30%以上に短縮できる加工システムを開発

1-2 研究体制

(1) 研究体制図



(2) 管理員及び研究者氏名

【事業管理機関】一般財団法人 九州産業技術センター

氏 名	所属・役職
田中 和光	技術振興部 部長
富澤 達也	技術振興部 課長代理

【研究等実施機関（法認定事業者）】株式会社ウラノ

氏 名	所属・役職	実施項目	備 考
井田 博	利益創出グループ リーダー	【1-1】、【1-2】、【2-1】、 【2-2】、【2-3】	PL
泉谷 雄平	利益創出グループ	【1-1】、【1-2】、【2-1】、 【2-2】、【2-3】	
小林 美香	総務グループ サブリーダー	【1-1】、【1-2】、【2-1】、 【2-2】、【2-3】	
浦 春樹	利益創出グループ サブリーダー	【1-1】、【1-2】、【2-1】、 【2-2】、【2-3】	

【研究等実施機関】株式会社 DAIKO TOOL（旧社名：株式会社 大光研磨）

氏 名	所属・役職	実施項目	備 考
坂井 要輝	TCS事業部長	【1-1】	
木場 信行	代表取締役	【1-1】	

【研究等実施機関】長崎県工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施項目	備 考
瀧内 直祐	工業材料科長	【1-1】、【1-2】	SL
福田 洋平	工業材料科 主任研究員	【1-1】、【1-2】	
馬場 恒明	所長	【1-1】、【1-2】	H30.3月末退職

【アドバイザー】

氏 名	所属・役職
帯川 利之	東京電機大学 学長室 特別専任教授
大曲 康輔	株式会社 SUBARU 生産技術部 機械生技課
竹之内 秀紀	DMG 森精機セールスアンドサービス株式会社 エリアセールスマネージャー
高津 一也	高津国際特許事務所 代表弁理士
白井 堯	白井技術士事務所 所長

1-3 成果概要

【1. エンドミル切削工具の長寿命化の課題への対応】

- (1) チタン合金の切削加工に使用する、長寿命エンドミル切削工具を設計・製作した。切削加工の用途別に、3種類の形状のエンドミル切削工具を設計・製作した結果、基準のエンドミルと比較して、それぞれの工具寿命で3倍以上を達成した。
- (2) チタン合金切削加工時の工具寿命延伸のため、新規冷却技術を開発した。エアークーラーとの組み合わせ、およびクーラント液中での切削加工の2つのアプローチで実施したところ、エアークーラーとの組み合わせによる冷却方法においては、検討を重ねたものの工具寿命延伸の効果が得られなかった。しかしながら、クーラント液中での切削加工においては基準のエンドミルと比較して、工具寿命が約3倍となった。

【2. 加工時間短縮の課題への対応】

チタン合金の切削加工時間を短縮するため、データベースに格納した加工実績データ（ビッグデータと呼ぶ）を活用して、最適な加工条件を自動的に出力するシステムを開発した。過去の加工実績データ（1, 200ケース）を入力した後、モデルケースを対象として最適な加工条件を開発したシステムで出力し、実際に切削加工したところ、59%の加工能率アップ（時間短縮）を達成した。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

一般財団法人 九州産業技術センター 技術振興部

〒812-013 福岡市博多区博多駅東二丁目13番24号

TEL：092-411-7394 FAX：092-472-6688

E-mail：info@kitec.or.jp

第2章 本論（具体的研究内容）

2-1 【1. エンドミル切削工具の長寿命化の課題への対応】

【1-1】エンドミル切削工具の開発

切削加工の用途別（下記①～③）に、工具刃先形状（すくい角・ホーニング）を変化させたエンドミル切削工具、逆刃エンドミル切削工具、R 刃エンドミル切削工具の3種類を設計・製作し、基準のエンドミルと比較して3倍以上の工具寿命を得ることに成功した。

エンドミルの各部の名称

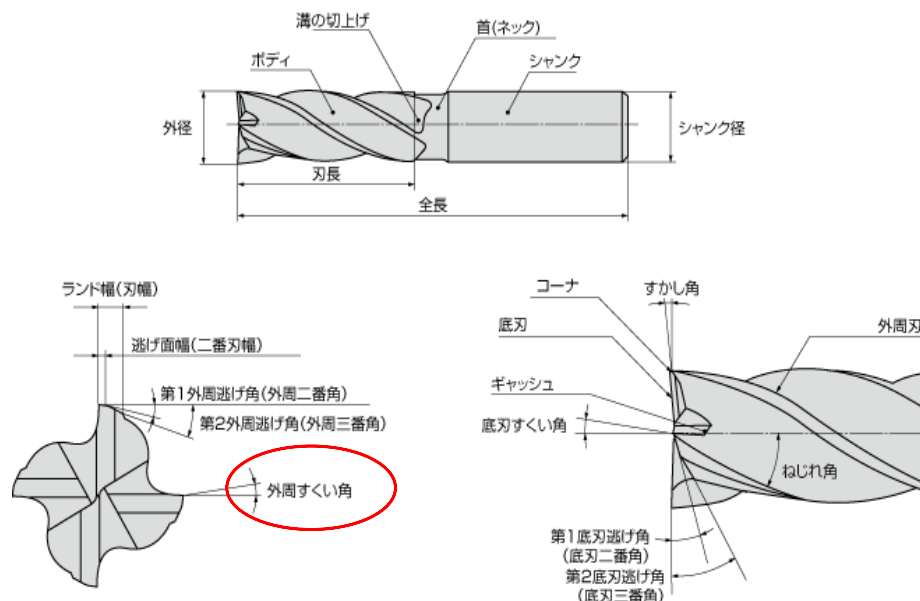


図2 エンドミル切削工具の各部の名称

①側面加工

厚板（4.5mm より大）の側面加工において、従来のエンドミル切削工具では工具寿命が短く、交換頻度が高い。最適なすくい角の検討及び切削工具の刃先をホーニング（刃先を丸くする処理）することによって、エンドミル切削工具の長寿命化を図る。



図3 側面加工への対応

②底面加工

薄板（4.5mm 以下）の底面加工において、加工中にエンドミル切削工具が振動しやすく、加工が安定しないため加工面粗さが悪い。そのためゼロカット（削り直し）を行っているが、

良好な加工面粗さを得ることは困難である。この課題を解決するため、加工面を押さえつけ切削工具の振動を抑制する構造の、逆刃エンドミル切削工具の開発を行うことによって、エンドミル切削工具の長寿命化を図る。

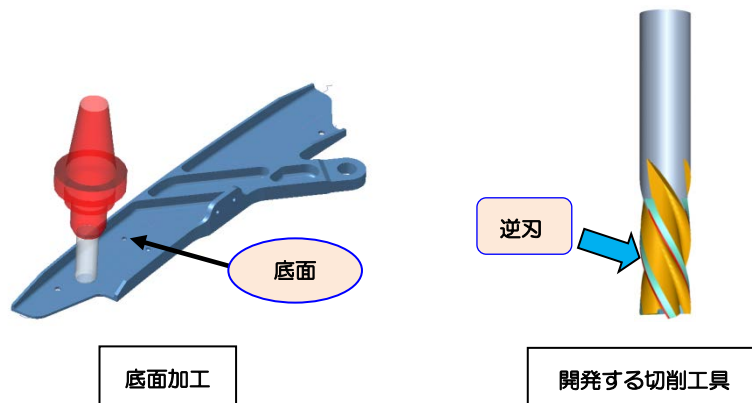


図4 底面加工への対応

③立壁加工

薄板（4.5mm 以下）の立壁加工においては、加工中にエンドミル切削工具が振動しやすく加工が安定しないため、底面加工同様に良好な加工面粗さを得ることが困難である。この課題を解決するため、加工負荷が分散される構造である R 刃エンドミル切削工具の開発を行うことによって、エンドミル切削工具の長寿命化を図る。

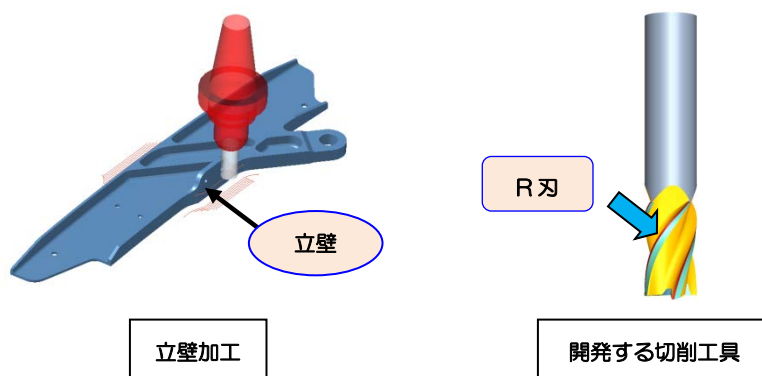


図5 立壁加工への対応

【1-1-1】エンドミル切削工具の設計

（1）切削工具の素材の検討

1）目的

基礎的な検討として、切削工具の素材（コバルト含有量の異なる材種 A～C）の切削加工実験を行い、切削工具の逃げ面摩耗幅を調べて素材の耐摩耗性を評価する。

2）実験方法及び実験条件

Ti-6Al-4V ブロック材（高さ 167mm x 幅 103mm x 長さ 433mm）をサイドクランプにてマシニングセンタのテーブルに固定し、切削加工実験を行い、切削工具の逃げ面摩耗幅の変化を調べた。切削加工面は、他の切削工具で黒皮を除去した状態から加工を行った。実験用のブロック材を一定の条件下で加工を行い、削りしろがなくなるまでの切削時間は、

104min であった。加工実験条件は表2のとおり。

表2 素材検討の加工実験条件

工具の形状	すくい角：6° ホーニング：なし コーティング：なし
ツーリング	NIKKEN BT50-C32-105 工具突き出し：60mm
切削加工条件	切削速度：100m/min 1 刃当たり送り量：0.1mm/tooth 切込み深さ：30mm 切削幅：2mm
クーラント	外部給油、コレットスルー及び天井クーラント

3) 実験結果及び考察

切削工具の逃げ面摩耗幅と切削時間との関係を図6に、切削時間 104min における逃げ面摩耗幅を表3に示す。

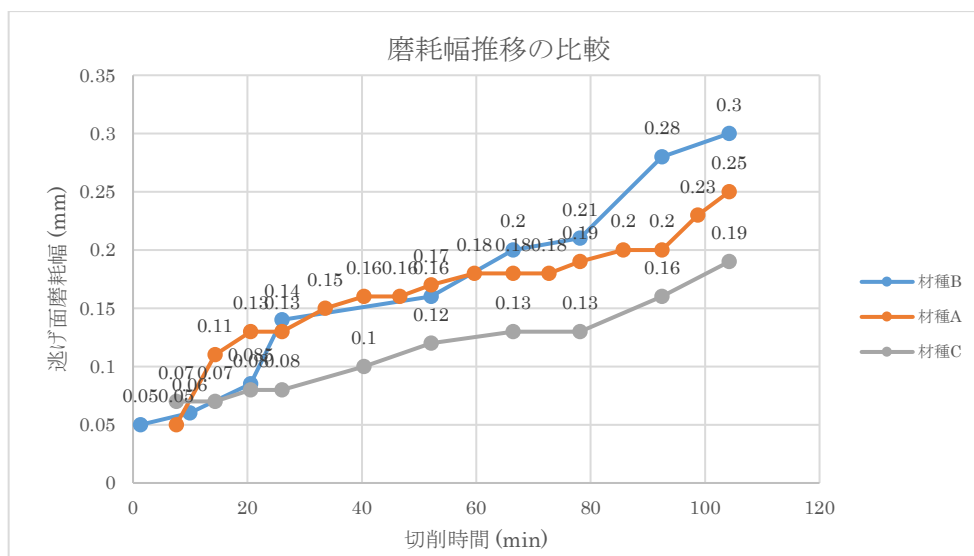


図6 切削工具の逃げ面摩耗幅と切削時間との関係

表3 切削時間 104min における逃げ面摩耗幅

切削工具素材	コバルト含有量	逃げ面摩耗幅
材種 A	9%	0.25mm
材種 B	10%	0.30mm
材種 C	12.5%	0.19mm

材種 A～C の違いはコバルト含有量であるが、材種 C の逃げ面摩耗幅が最も小さい結果となった。コバルトの含有量が多いほど耐摩耗性を向上させ、逃げ面摩耗幅が小さい良好な結果が得られたが、価格もコバルトの含有量に比例するため、コストを考慮して研究用の工

具素材としては材種 B 使用する事とした。

(2) 切削加工シミュレーションによる検討

1) 目的

基礎的な検討として、切削加工シミュレーションによりチタン合金の2次元切削解析を行い、切削条件と工具すくい角がワークおよび工具温度に及ぼす影響を調べる。

2) 解析方法及び解析条件

解析の基本設定を表4のとおり定め、「切込み深さ」や「すくい角」などを変数とした解析条件を表5に示す5種類とし、1～5の解析条件ごとに、切削速度が 10、50、100 および 200m/min の場合について切削解析を実施した（合計20通り）。解析の基礎となるモデル図を図7に示す。

表4 解析設定

収束法	スパース・ニュートンラプソン法
解析モデル	ワーク：剛塑性体 工具：剛体
オブジェクト間関係	せん断摩擦：0.6 熱伝達率：45kW/(m ² ・℃)
材料情報	ワーク：Ti-6Al-4V 超硬工具：熱伝導率 79W/(m・℃) 超硬工具：密度 15800 (1.58 x 10 ⁴) kg/m ³)
ワーク寸法	高さ 0.3 mm x 幅 0.5mmx 長さ 3.0mm
ワークメッシュ	20000 要素（最大要素サイズ：約 0.089mm）
境界条件	ワーク底面は完全固定、ワーク及び工具の側面は対称設定
解析時間	1 条件あたり約 3 時間
停止設定	2.5mm（切削工具がワークを 2.5mm切削したとき）

表5 解析条件

解析条件	切込み	すくい角	初期ワーク温度	初期工具温度
1	0.1mm	5°	20℃	20℃
2	0.05mm	5°	20℃	20℃
3	0.1mm	10°	20℃	20℃
4	0.1mm	5°	200℃	20℃
5	0.1mm	5°	20℃	200℃

※1～5の条件ごとに、切削速度が 10、50、100 および 200m/min の場合について切削解析を実施（合計20通り）

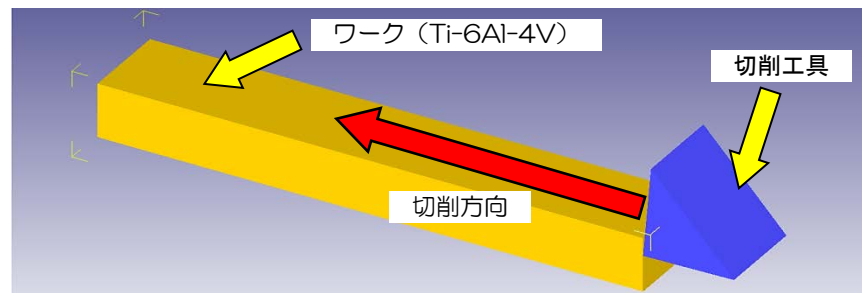


図7 解析のモデル図

3) 解析結果及び考察

<温度分布についての検討>

切削加工シミュレーションによる温度分布の結果として、表5の解析条件 1 における、切削速度 10m/min と 100m/min のチタン合金切削加工時のワーク及び切削工具の温度の解析が挙げられる。図8は切削速度 10m/min と 100m/min におけるワークの温度分布の結果を、図9は切削速度 10m/min と 100m/min における切削工具の温度分布の結果を示す。いずれの結果も、切削工具がワークを 2.5mm切削したときの温度状態。

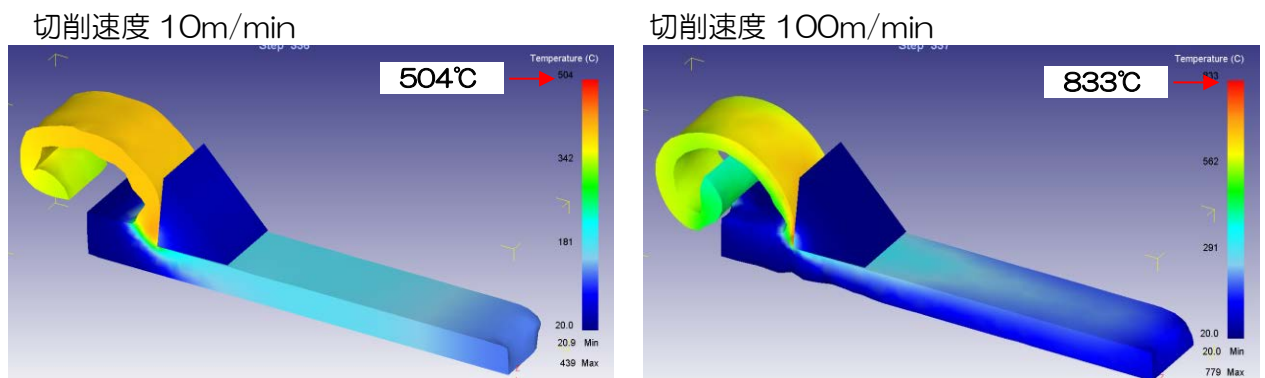


図8 切削速度 10m/min と 100m/min におけるワークの温度分布

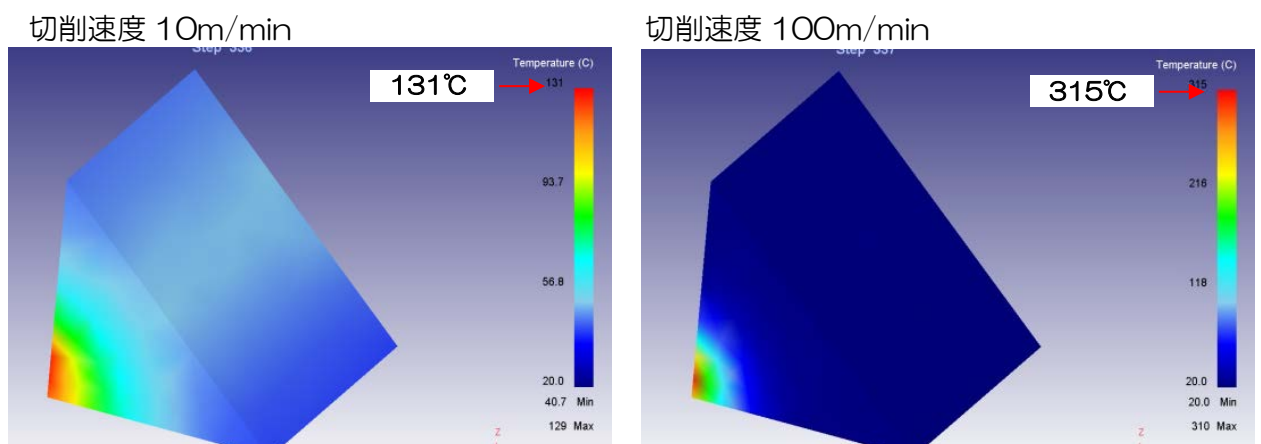


図9 切削速度 10m/min と 100m/min における切削工具の温度分布

上記の解析結果からの次の事柄が推察できる。

- ・エンドミル切削加工（断続切削）のように、一回の切り込みにおける切削距離が短い場合、

工具温度はワーク温度より低い結果となった。

- 切削速度 10m/min の場合、切削速度 100m/min に比べて工具内の伝熱により工具の最高温度は低い結果となった。
- 切削速度 100m/min の場合、工具刃先付近において、局所的に工具の温度が高い結果となったので、局所的な刃先の温度上昇によって、工具の異常摩耗等が生じる可能性が高いと考えられる。

<すくい角等についての検討>

図 10 は表 5 の解析条件 1 ～ 5 において、ワークの温度と切削速度との関係を解析した結果である。解析条件 1 を基準として、項目を変更した場合の結果を表している。

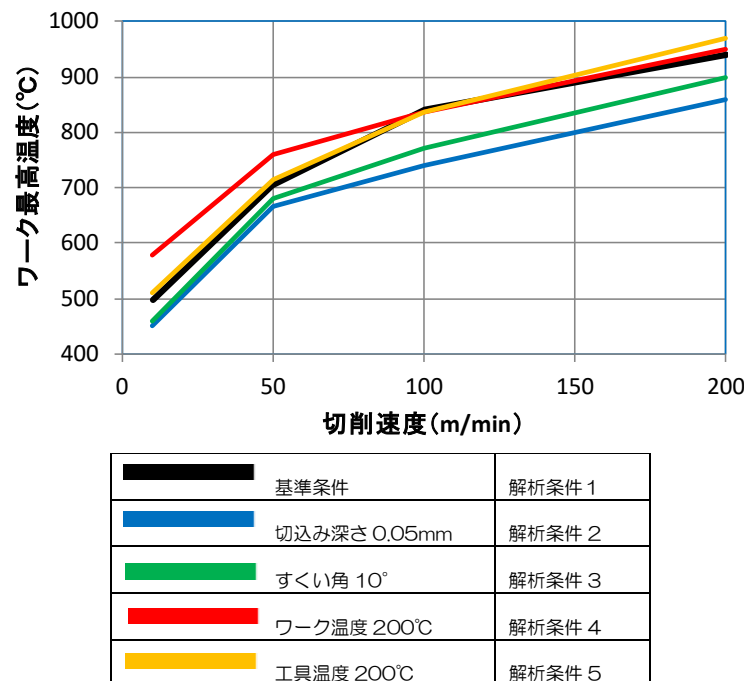


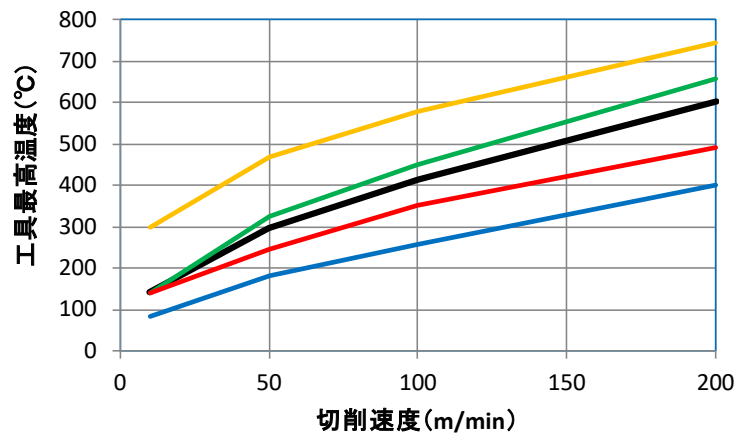
図 10 ワークの温度と切削速度との関係

図 10 から、切削速度 100m/min の場合における、すくい角の変化がワーク最高温度に与える影響（解析条件 1 と解析条件 3 との比較）が読み取れる（表 10）。

表 6 すくい角とワーク最高温度との結果（切削速度 100m/min）

すくい角	ワーク最高温度
すくい角 5° （解析条件 1）	850°C
すくい角 10° （解析条件 3）	750°C

図 11 は表 5 の解析条件 1 ～ 5 において、工具の最高温度と切削速度との関係を解析した結果である。解析条件 1 を基準として、項目を変更した場合の結果を表している。



基準条件	解析条件 1
切込み深さ 0.05mm	解析条件 2
すくい角 10°	解析条件 3
ワーク温度 200°C	解析条件 4
工具温度 200°C	解析条件 5

図 1 1 工具の最高温度と切削速度との関係

図 1 1 から、切削速度 100m/min の場合における、すくい角の変化が工具最高温度に与える影響（解析条件 1 と解析条件 3 との比較）が読み取れる（表 7）。

表 7 すくい角と工具最高温度との結果（切削速度 100m/min）

すくい角	工具最高温度
すくい角 5°（解析条件 1）	410°C
すくい角 10°（解析条件 3）	450°C

チタン合金の 2 次元切削解析の結果は以下のとおりである。

- ・すくい角：大きいほどワーク温度は低く、小さいほど工具温度は高い
- ・切込み：小さいほど工具温度は低い
- ・ワーク温度：高いほど工具温度は低い

（3）側面加工、底面加工、立壁加工における切削工具（工具刃先形状（すくい角・ホーニング）、逆刃、R 刃）の設計

1) 目的

側面加工、底面加工、立壁加工における切削工具において、工具寿命が従来 2 倍以上のエンドミル切削工具の設計を行うことを目的とする。

2) 結果

厚板（4.5mm より大）の側面加工、薄板（4.5mm 以下）の底面加工、薄板（4.5mm 以下）の立壁加工に対応する工具の形状（基準）及び工具寿命の評価方法は表 1 2 のとおりとした。

表8 側面加工、底面加工、立壁加工における切削工具の形状及び工具寿命の評価方法

切削加工	刃形状	刃数	すくい角	シャンク径	板厚	工具寿命の評価方法
側面加工	右ねじれ	4	6°	16mm	厚板	逃げ面摩耗幅 0.2 mm までの加工時間
					4.5mm より大	
底面加工	左ねじれ (逆刃)	4	6°	16mm	薄板	Ra1.6 μ m を超えるまでの加工時間
					4.5mm 以下	
立壁加工	可変ねじれ (R 刃)	3	5°	16mm	薄板	Ra1.6 μ m を超えるまでの加工時間
					4.5mm 以下	

【1-1-2】エンドミル切削工具の製作

<前提条件>

側面加工、底面加工、立壁加工において、櫛ウラノで従来チタン合金の切削加工として使用している「ノンコート、すくい角 6°、ホーニング幅なし、刃数 4」のエンドミル切削工具を『基準のエンドミル切削工具』とする。工具材料は、材種 B である。

試作した各種エンドミル切削工具で実際にチタン材を切削加工し、表 1 2 に示した評価方法により基準のエンドミル切削工具との工具寿命を比較、改良を加えていく手法によりエンドミル切削工具の長寿命化を目指した。

表 9 は側面加工、底面加工、立壁加工における切削加工条件を示す。ここに示した条件は、単位時間を短くし、繰り返し回数を増やすために、実際の製品加工の切削加工条件に比べてエンドミル切削工具に負荷が大きくなる、厳しい条件とした。

表9 側面加工、底面加工、立壁加工における切削加工条件

切削加工	切削速度	1 刃当たりの送り量	軸方向の切込み深さ	半径方向の切込み深さ
側面加工	100m/min	0.1mm/ tooth	30mm	2mm
底面加工	75m/min	0.1mm/ tooth	0.5mm	8mm
立壁加工	100m/min	0.1mm/ tooth	30mm	0.5mm
実際の製品加工	40~75m/min	0.05~0.15mm/ tooth	様々	0.05~4mm

(1) エンドミル切削工具の製作（工具刃先形状（すくい角・ホーニング））

1) 目的

切削工具の刃先をホーニング（刃先を丸くする処理）及びすくい角を変化することによって、工具寿命が従来技術に比べて2倍以上となるエンドミル切削工具を開発する。

2) 実験方法及び実験条件

(株)ウラノで従来チタン合金の切削加工として使用している「ノンコート、すくい角 6° 、ホーニング幅なし」の工具を『基準のエンドミル切削工具』として、すくい角、ホーニング幅を変化させた切削工具で、切削加工（側面加工）実験を行い、工具摩耗（逃げ面摩耗幅）を調べた。工具材料は、材種 B である。図 12 は実験前の基準のエンドミル切削工具である。基準のエンドミル切削工具については、市販品ではなく、高精度 CNC 工具研削盤を使用して製作した。また、刃先のホーニング処理は図 13 に示すホーニングマシンを使用した。

切削工具の形状及び工具寿命の評価方法は表 8 の側面加工のとおりである。切削加工条件は表 9 の側面加工における切削加工条件である。



図 12 基準のエンドミル切削工具（実験前）

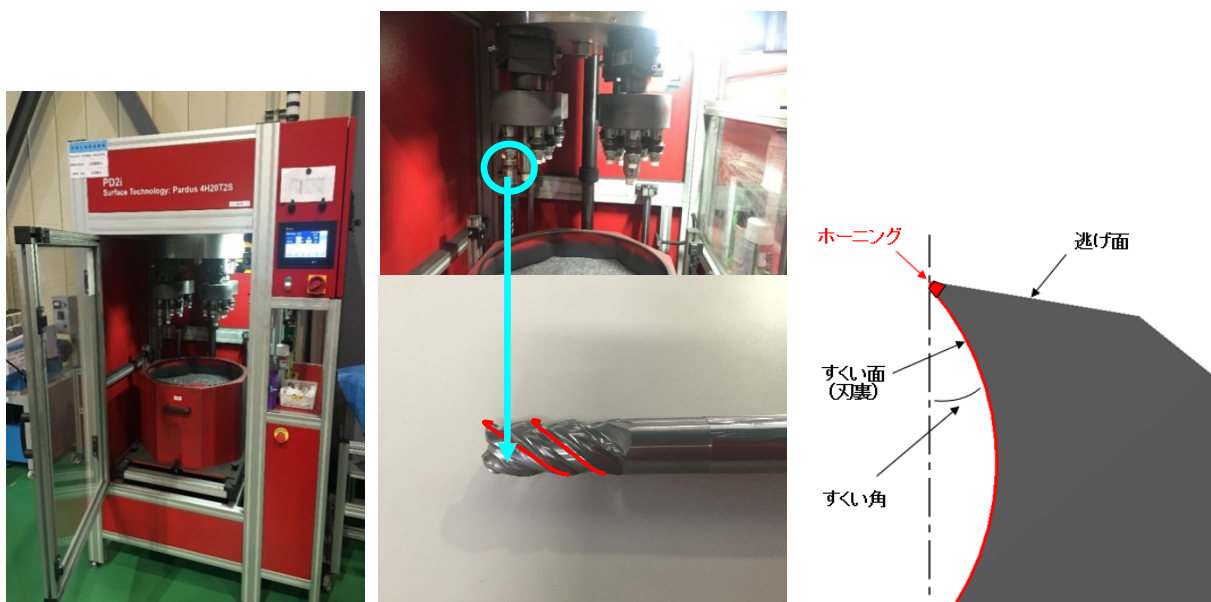


図 13 ホーニングマシンとホーニングマシンによる研磨箇所

また、ホーニング処理前の切削工具の刃先及びホーニング処理を行った切削工具の刃先の写真を図 14 に示す。

表 10 基準のエンドミル切削工具及び最適化したエンドミル切削工具の寿命時間

工具の形状	寿命時間	工具寿命
すくい角 6° 、ホーニング幅（基準のエンドミル切削工具）	26min	-
すくい角 θ_3° 、ホーニング幅 w_1 mm	78min	3 倍

表 10に示すとおり、従来チタン合金で使用されてきたすくい角 6° 、ホーニング幅なしの『基準のエンドミル切削工具』に比べてすくい角 θ_3° 、ホーニング幅 w_1 mm のエンドミル切削工具は、厚板（4.5mm より大）の側面加工において工具寿命が3倍となった。開発したすくい角 θ_3° 、ホーニング幅 w_1 mm のエンドミル切削工具は工具寿命が2倍以上の目標値を達成し、工具寿命が3倍となった。

ここで、研究成果である、すくい角とホーニング幅の具体的数値については、競合他社に対する強みであり、秘匿情報であるためすくい角 θ_3° 、ホーニング幅 w_1 mm の表記としている。

（2）エンドミル切削工具の製作（逆刃）

1）目的

薄板（4.5mm 以下）の底面加工は、工具が加工中振動しやすく、加工が安定しないため、加工面粗さが悪い。そのためゼロカット（削り直し）を行っているが、良好な加工面粗さを得ることは困難である。上記の課題を解決するため、加工面を押さえつけ、切削工具の振動を抑制し、工具寿命が従来技術に比べて2倍以上となる逆刃エンドミル切削工具の開発を行う。

2）実験方法及び実験条件

（株）ウラノで従来チタン合金の切削加工として使用している「ノンコート、すくい角 6° 、ホーニング幅なし」の工具を『基準のエンドミル切削工具』として、逆刃エンドミル切削工具で、切削加工（底面加工）実験を行い、工具寿命を調べた。工具材料は、材種 B である。切削工具の形状及び工具寿命の評価方法は前記の表 12 の底面加工のとおりである。切削加工条件は前記の表 13 の底面加工における切削加工条件である。

底面加工の実験方法は以下のとおりである。

- ・チタン合金を軸方向 0.5mm 切り込んだ状態で、径方向に 4 パス切削する。
- ・板厚 4.5mm～2.5mm まで、軸方向は 5 回切削する。
- ・1 パスの切削長は 260.5mm
- ・テスト 1 回の総切削長は 5210mm
- ・表面粗さを測定し、Ra1.6 μ m を超えるまでの加工時間を工具寿命として評価する。

図 16 は逆刃エンドミル切削工具による切削加工実験のイメージ図である。図 17 は、逆刃エンドミル切削工具による切削加工実験の写真である。

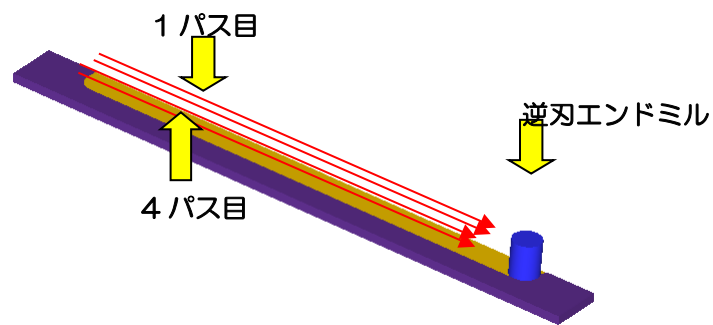


図 16 逆刃エンドミル切削工具による切削加工実験のイメージ図

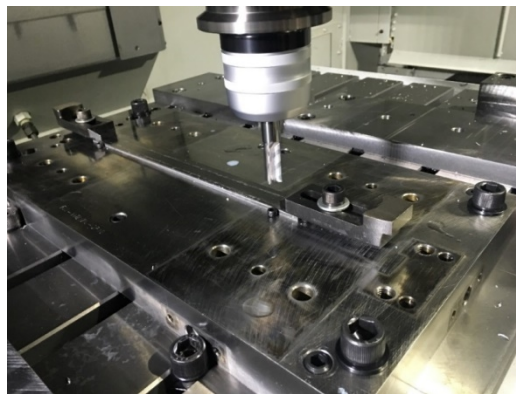


図 17 逆刃エンドミル切削工具による切削加工実験の写真

3) 実験結果及び考察

表 15はすくい角 6° 、ホーニング幅なしの『基準のエンドミル切削工具』及び逆刃エンドミル切削工具の寿命時間を示した表である。単位時間当たりの加工量は同一である。逆刃エンドミル切削工具による切削加工実験において、チタン材を削り終えてしまうため、10min 以上は実験不可能であった。

表 11 基準のエンドミル切削工具及び逆刃エンドミル切削工具の寿命時間

工具の形状	寿命時間	工具寿命
基準のエンドミル切削工具	2min	-
逆刃エンドミル切削工具	10min 以上	5 倍以上

表 11 より逆刃エンドミル切削工具は薄板（4.5mm 以下）の底面加工において工具寿命が基準のエンドミル切削工具に比べて 5 倍以上の結果となった。加工面を押さえつけ、切削工具の振動を抑制し、工具寿命が従来技術に比べて 2 倍以上となる逆刃エンドミル切削工具の開発を行うことができた。

(3) エンドミル切削工具の製作（R刃）

1) 目的

薄板（4.5mm 以下）の立壁加工は、加工が安定しないため、底面加工同様に良好な加工面粗さを得ることが困難である。工具寿命が従来技術に比べて2倍以上となり、加工負荷が分散される構造である R 刃エンドミル切削工具の開発を行う。

2) 実験方法及び実験条件

（株）ウラノで従来チタン合金の切削加工として使用している「ノンコート、すくい角 6° 、ホーニング幅なし」の工具を『基準のエンドミル切削工具』として、R 刃エンドミル切削工具で、切削加工（立壁加工）実験を行い、工具摩耗（逃げ面摩耗幅）を調べた。工具材料は、材種 B である。切削工具の形状及び工具寿命の評価方法は前記の表 1 2 の立壁加工のとおりである。切削加工条件は前記の表 1 3 の立壁加工における切削加工条件である。立壁加工の実験方法は以下のとおりである。

- ・チタン合金の薄板立壁部分を軸方向切込み深さ 30mm、径方向切込み深さ 0.5mm で左右から削る。
- ・数パス切削後、加工面の表面粗さを測定し、 $Ra1.6\mu m$ を超えるまでの加工時間を工具寿命として評価する。



図 1 8 R 刃エンドミル切削工具による切削加工実験の加工面の写真

3) 実験結果及び考察

表 1 6 はすくい角 6° 、ホーニング幅なしの『基準のエンドミル切削工具』及び R 刃エンドミル切削工具の寿命時間を示した表である。単位時間当たりの加工量は同一である。R 刃エンドミル切削工具による切削加工実験において、チタン材を削り終えてしまうため、12min 以上は実験不可能であった。

表 1 2 基準のエンドミル切削工具及び逆刃エンドミル切削工具の寿命時間

工具の形状	寿命時間	工具寿命
基準のエンドミル切削工具	4min	-
R 刃エンドミル切削工具	12min 以上	3 倍以上

表 1 2 より R 刃エンドミル切削工具は薄板（4.5mm 以下）の立壁加工において工具寿命が基準のエンドミル切削工具に比べて 3 倍以上の結果となった。工具寿命が従来技術に比べ

て2倍以上となり、加工負荷が分散される構造である R 刃エンドミル切削工具の開発を行うことができた。

【1-2】工具刃先の冷却技術の開発

【1-1】で開発したエンドミル切削工具を用いて、高圧クーラント及びエアークーラーとの組み合わせによる冷却技術の開発、またはクーラント液中の冷却技術の開発により、工具寿命が従来技術に比べて 3 倍以上となる冷却技術の開発を目指し、クーラント液中の冷却技術では、【1-1】で開発した工具刃先形状（すくい角・ホーニング）を変化させたエンドミル切削工具を用いて工具寿命が3倍以上となる可能性を見出す結果となった。

【1-2-1】高圧クーラント及びエアークーラーとの組み合わせによる冷却技術

（1）セラミックス被覆された熱電対素線の埋め込みによるチタン合金の切削温度測定

1）目的

被削材にセラミックス被覆された熱電対素線を並べて埋め込み、熱電対の素線ごと被削材を切削することによって切削温度（切削点極近傍のワーク温度）の測定を行い、クーラントによる被削材の冷却効果に関する基礎的な知見を得ることを目的とする。

2）実験方法及び実験条件

被削材であるチタン合金にセラミックス被覆された熱電対素線を並べて埋め込み、熱電対素線ごとチタン合金を切削することによって切削温度を測定する実験を行った。図19は、セラミックス被覆された熱電対素線を並べて埋め込んだチタン合金（被削材）を表した図である。熱電対は、K 種熱電対（アルメル・クロメル素線、素線径：0.105mm）を使用した。冷却は、センタスルークーラントの場合、エアブローの場合の 2 種類の切削加工実験を行った。

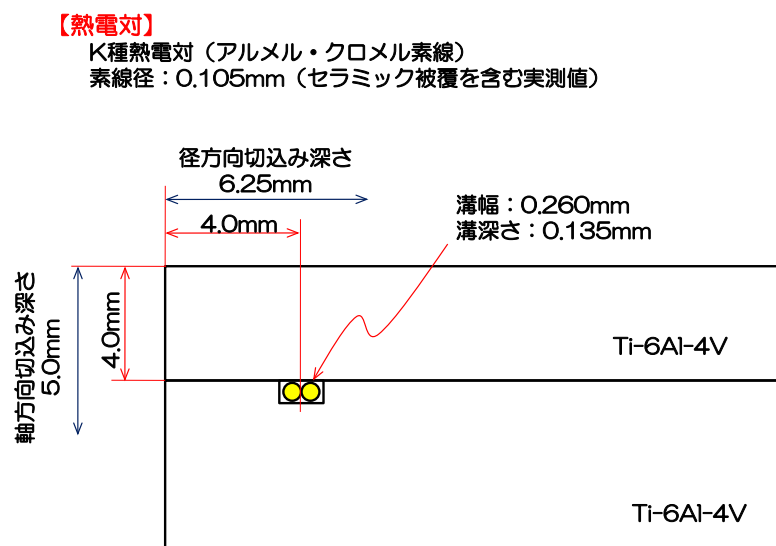


図19 セラミックス被覆された熱電対素線を並べて埋め込んだチタン合金（被削材）

切削温度測定における、切削工具、切削加工条件は表17のとおりである。図20は使用した切削工具の写真である。

表 1 3 実験条件

切削工具	三菱マテリアルツールズ カッタボディ：AXD 工具径：25mm 刃数：2 枚刃 突出し：50mm
切削加工条件	切削速度：60m/min (764rpm) 送り速度：0.1mm/tooth (153mm/min) 軸方向切込み深さ：5.0mm 径方向切込み深さ：6.25mm (D/4)
クーラント	センタスルー（ノズル）クーラント、エアブロー



図 2 0 使用した切削工具（三菱マテリアルツールズ）の写真

3) 実験結果及び考察

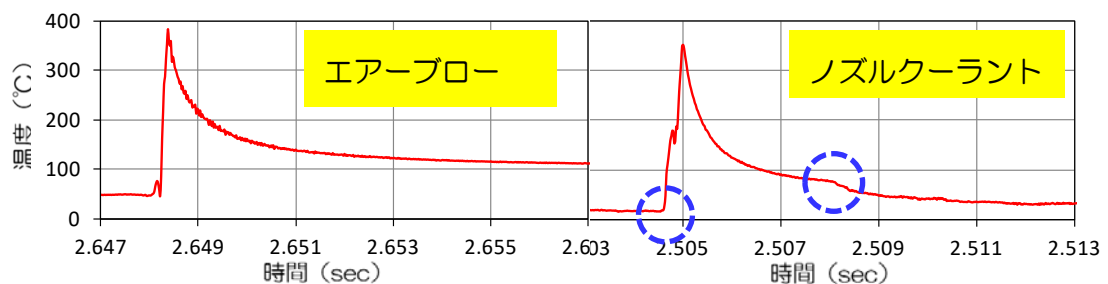


図 2 1 エアブロー、ノズルクーラントの温度と時間との関係

図 2 1 はエアブロー、ノズルクーラントの温度と時間との関係を示した結果である。切削時のワーク最高温度は 350℃以上であった。クーラントを供給せずエアブローのみで切削を行った場合、ワーク（チタン合金）の温度は 50℃以下に下がることはなかった。

一方、工具刃先からクーラントを供給した場合、ワークの温度は工具切れ刃の切り込み毎にクーラントの温度まで冷却された結果となった。クーラントの冷却効果は、刃先通過の0.003sec 後から確認され、チタン合金の切削加工における被削材（ワーク）および切削工具の冷却にクーラントは重要であることがわかった。

（２）クーラントの設定温度を下げた場合による切削加工実験

１）目的

マシニングセンタ（工作機械）のオイルコンの設定によって、クーラント液の温度変化を調べる。さらに、オイルコンの設定による工具寿命の影響について検討する。

２）実験方法及び実験条件

マシニングセンタ（工作機械）に設置されているオイルコンのパワーを高め、クーラントの設定温度を下げて切削（側面）加工を行い、工具寿命を調べた。工具寿命は【1-1-1】エンドミル切削工具の開発（工具刃先形状（すくい角・ホーニング））の評価方法と同様に逃げ面摩耗幅 0.2mm までの加工時間である。実験条件は、基準のエンドミル切削工具を使用した。

さらに切削加工時のクーラントの温度も測定した。図 22 はオイルコンのイメージ図であり、オイルコンは主軸頭ギヤ部の潤滑と同時に発熱を取り去ることで、機械精度の向上の役割をする。

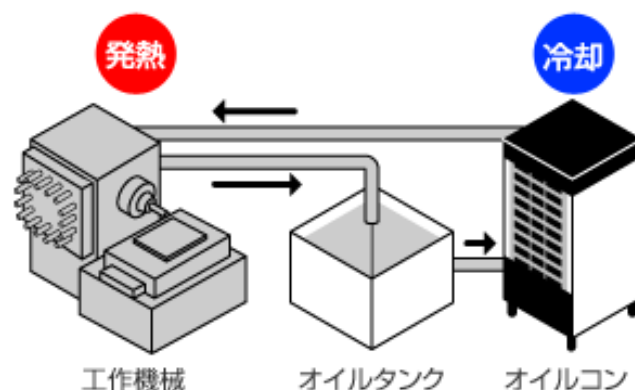


図 22 オイルコンのイメージ図

３）実験結果及び考察

表 1 4 オイルコンの設定値とクーラント温度の実測値

オイルコンの設定値	クーラント温度 (実測値)
常温	20℃
7℃	15℃

表 1 4 はオイルコンの温度設定値とクーラント温度の実測値を示した表である。表 20 よりオイルコンの設定温度を変えた場合、クーラント温度は 5℃の差が生じた。しかし、クー

ラント温度が 5℃下がった場合、切削（側面）加工における工具寿命への効果はなかった。オイルコンによる冷却効果は期待できない結果となった。

（３）エアークーラーから噴射される圧縮空気の温度測定

１）目的

エアークーラーから噴射される圧縮空気の温度測定を行い、エアークーラーの冷却効果を検討する。

２）実験方法及び実験条件

エアークーラーから圧縮空気を噴射し、エアークーラーの噴射出口から 50mm の距離で圧縮空気の温度測定を行った。図 23 は圧縮空気の温度測定のイメージ図である。

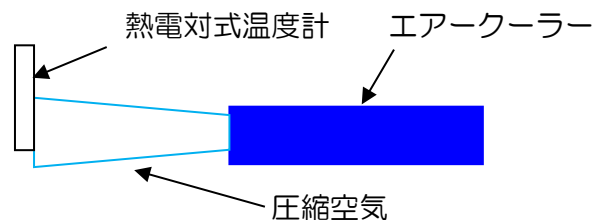


図 23 圧縮空気の温度測定のイメージ図

３）実験結果及び考察

エアークーラーから圧縮空気を噴射し、エアークーラーの噴射出口から 50mm の距離における圧縮空気の温度は 8℃であった。その結果、エアークーラーによる冷却効果は期待できないと判断した。

（４）ドライアイスガスの噴射による冷却効果の検討

１）目的

（２）クーラントの設定温度を下げた場合による切削加工実験と、（３）エアークーラーから噴射される圧縮空気の温度測定の結果を受けて、エアークーラーより冷却効果が期待できるドライアイスガスを活用し、冷却効果の検討を行う。

２）実験方法及び実験条件

図 24 はドライアイスガスの噴射における実験のイメージ図である。ドライアイスを入れた容器から圧縮空気を噴射させ、噴射された圧縮空気の温度を測定した。

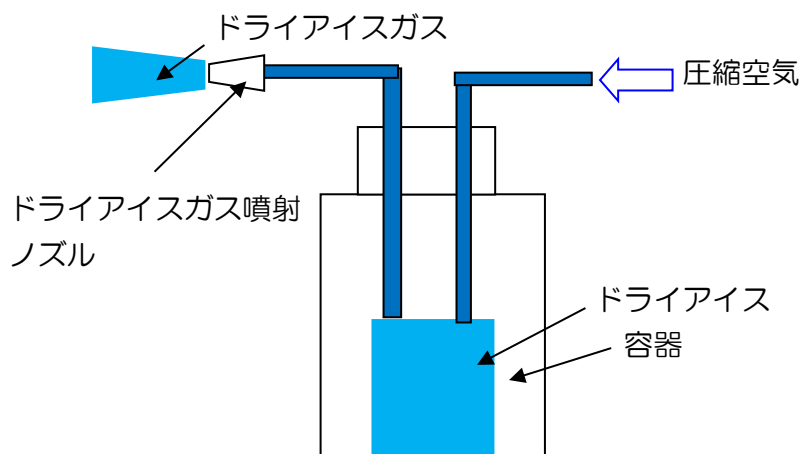


図 24 ドライアイスガスの噴射における実験イメージ図

3) 実験結果及び考察



図 25 ドライアイスを入れた容器内の温度

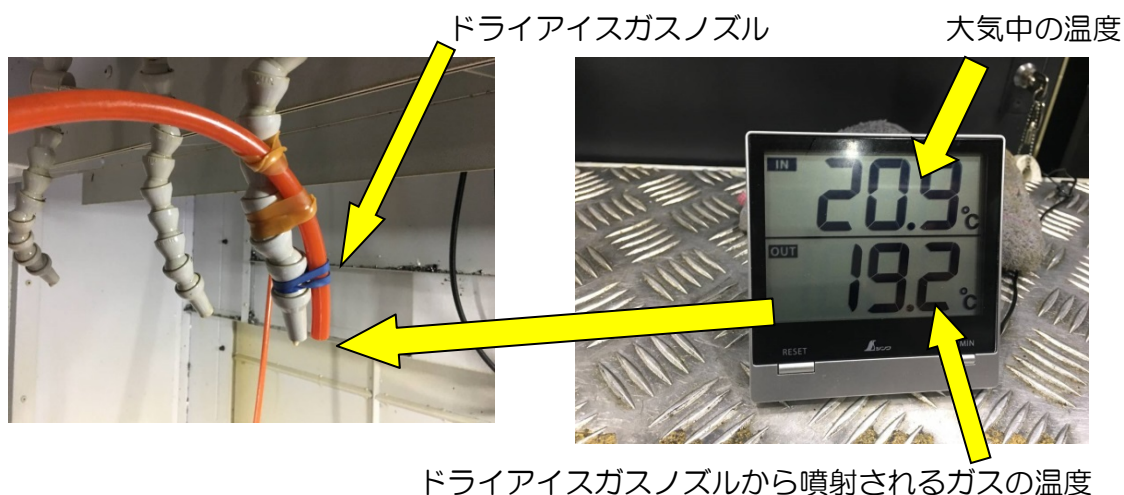


図 26 ドライアイスガスノズルから噴射されるガスの温度

図 25に示すとおり、ドライアイス付近の温度は -3°C であった。また、図 26示すとおり、ドライアイスガスと大気中との差は 1.7°C であり、噴射されたドライアイスガスの温

度に期待した 0°C 以下の結果が得られなかった。ドライアイスガスの噴射ノズル出口の温度を低下させるためには、ドライアイスガスの量を増加し、噴射ノズルの改良を含め、抜本的なドライアイスガスの噴射装置の開発が必要である。

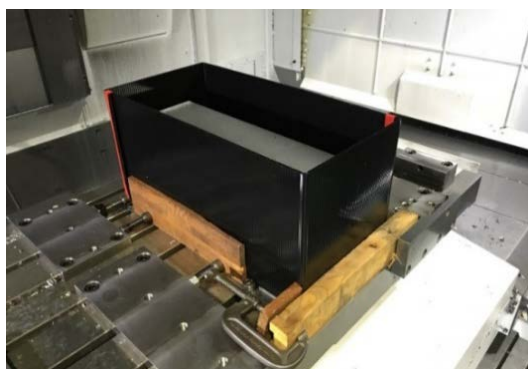
【1-2-2】クーラント液中の冷却技術の開発

1) 目的

クーラント液中の切削加工における工具寿命を調べ、クーラント液中における最適な冷却技術の開発を行う。

2) 実験方法及び実験条件

クーラント液中に被削材（チタン合金）を浸漬し、切削（側面）加工を行い、工具寿命を調べた。工具寿命は【1-1-1】エンドミル切削工具の開発（工具刃先形状（すくい角・ホーニング））の評価方法と同様に逃げ面摩耗幅 0.2mm までの加工時間である。実験条件は、基準のエンドミル切削工具を使用し、切削加工条件は、切削速度 100m/min 、1 刃当たりの送り量 0.1mm/tooth 、軸方向の切込み深さ 30mm 、半径方向の切込み深さ 2mm である。図 29 は切削加工前、クーラント液中の切削加工の写真である。



切削加工前



クーラント液中の切削加工

図 27 切削加工前、クーラント液中の切削加工の写真

3) 実験結果及び考察

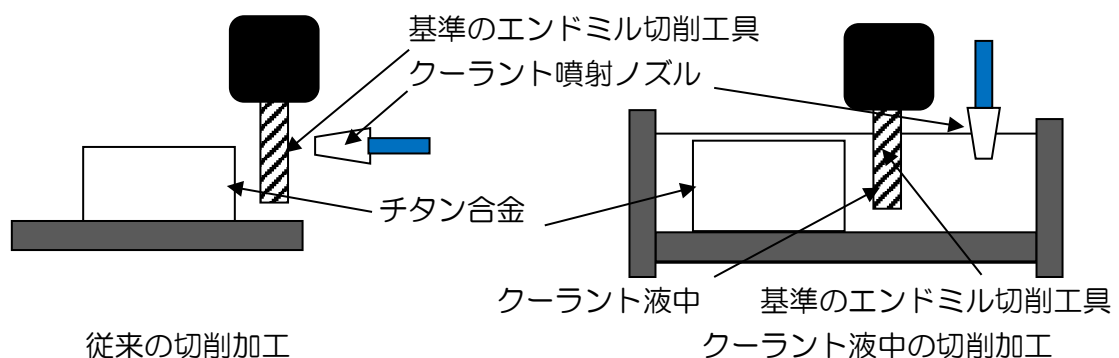


図 28 従来のクーラント液の噴射による切削加工及びクーラント液中の切削加工の模式図

図28は従来のクーラント液の噴射による切削加工及びクーラント液中の切削加工の模式図である。基準のエンドミル切削工具を使用し、同一の切削加工条件で切削加工実験の結果、従来の切削加工に比べてクーラント液中の切削加工は、工具寿命が 1.7 倍であった。クーラント液中の冷却方法は工具寿命を延ばし、有効な冷却方法であることを示唆する結果となったが、図29に示すように大量に切りくずが堆積し、目標達成のためには切りくずの除去が課題となった。

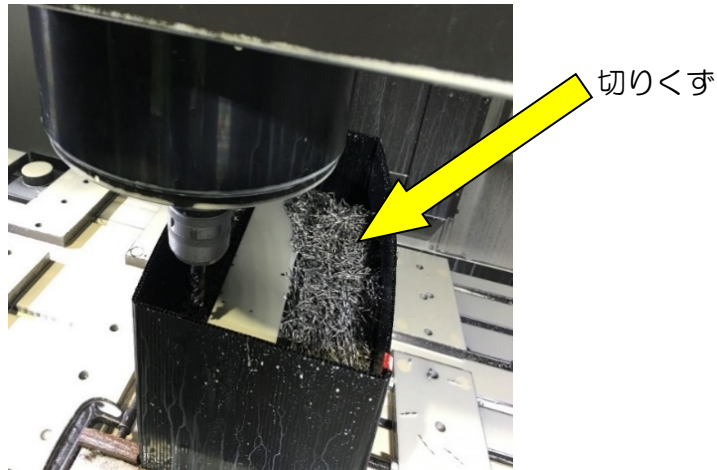


図29 切削加工後の切りくずの写真

そこで、切りくずの除去を容易にするため、図30に示すようにクーラント液中に圧縮空気噴射用ノズルを浸漬させ、圧縮空気を噴射しながら切削加工実験を考案し、噴射用ノズルの本数を変えて実験を行った。

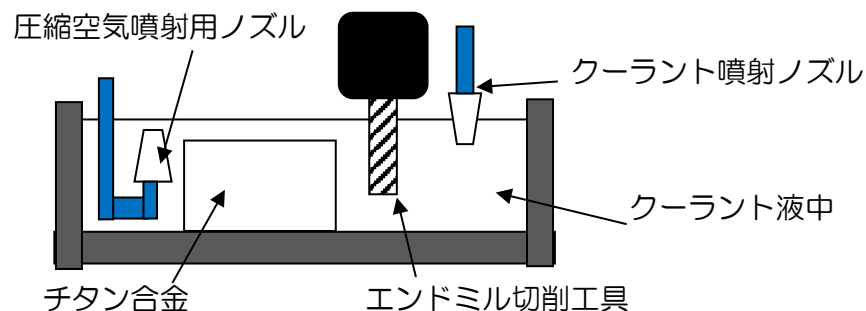
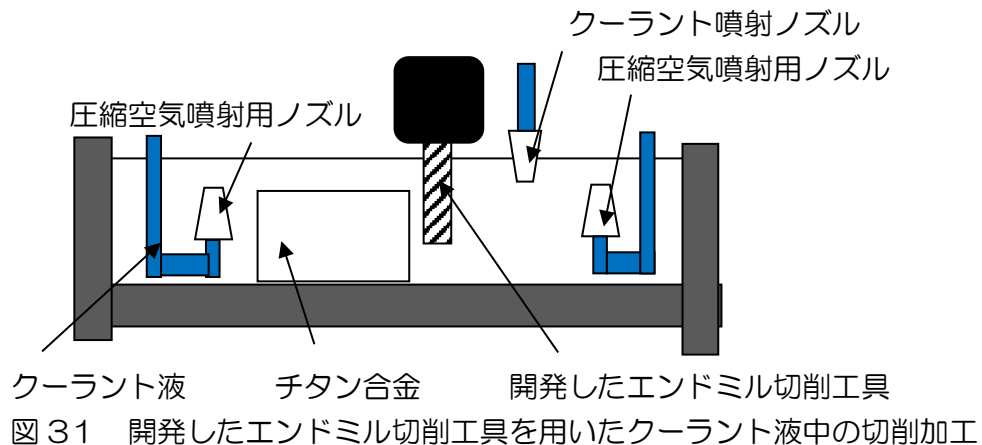


図30 圧縮空気噴射用ノズルを浸漬した、クーラント液中の切削加工

基準のエンドミル切削工具を使用し、浸漬した圧縮空気噴射用ノズルの本数を変化した場合における工具寿命の結果を表15に示す。切削加工条件は同一である。浸漬した圧縮空気噴射用ノズルは 2 本の場合、工具寿命が最も良好な結果となった。そこで、浸漬した圧縮空気噴射用ノズル2本の場合、【1-1】エンドミル切削工具の開発（工具刃先形状（すくい角・ホーニング））において、最も良好な結果であったすくい角 θ_3° 、ホーニング幅 w_1 mm のエンドミル切削工具を使用し、図31の模式図に示すクーラント液中の切削加工実験を行った。その結果、工具寿命が 2.9 倍となった。

表15 浸漬した圧縮空気噴射用ノズルの本数と工具寿命

圧縮空気噴射用ノズル	工具寿命
1 本	2 倍
2 本	2.8 倍
3 本	2.5 倍



上記の結果から、クーラント液中の切削（側面）加工は、目標値をほぼ達成し、良好な工具寿命の結果が得られた。しかし、切りくずの除去方法に課題残っており、今後切りくずの除去技術の開発が必要である。

2-2【2. 加工時間短縮の課題への対応】

【2-1】難削材の切削加工ビッグデータ収集

1) 目的

ウラノ社内加工実績データを継続的且つ自動的に収集し機械学習によって解析。最適な加工条件を算出し、加工時間の短縮及び工具費削減に寄与するデータを収集・整理を行う。

（ビッグデータとは）

随時蓄積している工場内の加工に関する切削条件などの集合データをビッグデータと定義する。ただし、振動や主軸動力などのリアルタイムの機械情報は含まない。

2) ビッグデータ収集結果

各年度におけるビッグデータ収集の実績は、表16のとおりである。

表16 各年度におけるビッグデータ収集の実績

年度	実績
H27 年度	ビッグデータ解析用のパラメーター11 項目（刃径、刃数、ノーズR、工具寿命値、突き出し、刃長、切込み深さ、幅、回転、送り量、時間）を設定し、(株)ウラノにてこれまで行った難削材加工の条件及び工具寿命等の 500 データを収集し、ビッグデータ化した。

H28 年度	【1】の結果から得られた切削工具、クーラント、その他ビッグデータ用に再設定したデータ分析用パラメーター（刃径、刃数、ノーズ R、工具寿命値、突き出し、刃長、切込み深さ、幅、回転、送り量、時間）、及び加工部位形状との関連性と合わせて、ビッグデータとして 500 ケースを目標に、実績として累計 700 ケースからの加工パターンを抽出し、データを収集、整理を行った。
H29 年度	H28 年度の実施結果を元に、改善の必要性を検証しつつ、データ分析用パラメーターに数値化した治具剛性及びワーク剛性を加え、累計 1200 ケース収集・整理を行った。

【2-2】難削材の切削加工ビッグデータ解析

1) 目的

ビッグデータ解析に基づくビッグデータ解析ソフトを開発する。そのコンセプトは次のとおり。

- ・加工実績データの蓄積及び解析を実施し、誰がプログラムを作成しても、高能率で信頼性の高い切削条件が設定できるようにする。
- ・過去に実績がない加工条件でも、加工実績データの解析によって、高能率で信頼性の高い切削条件が設定できるようにする。
- ・継続的なデータの蓄積によって解析精度が向上していくシステムにする。
- ・将来的には、全工場におけるマシニングセンタ加工の情報についてネットワークを介して自動収集する。

2) 解析方法及び解析条件

ビッグデータ解析ソフトのシステム図を図 32 に、図 32 中の③検索/解析処理について、機械学習の流れを図 33 に示す。また、解析パラメータを図 34 の項目に定めた。

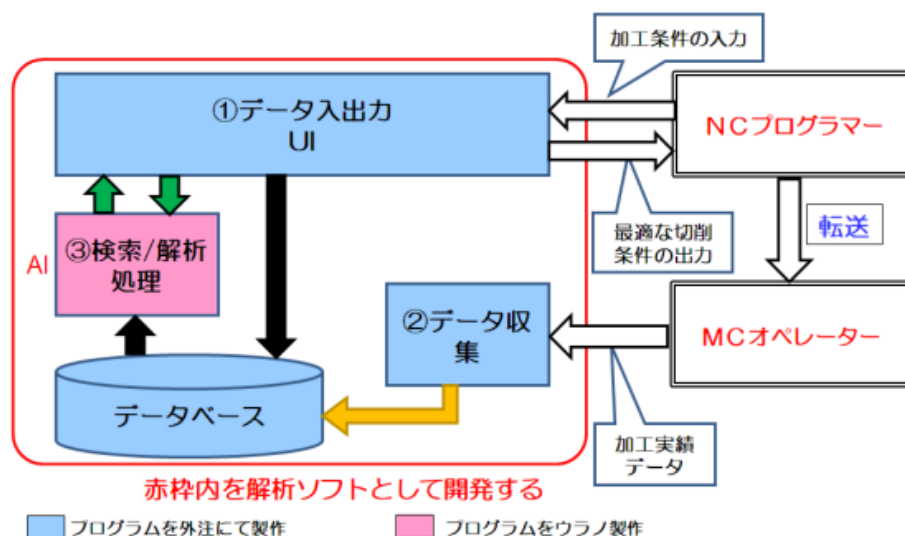


図 32 ビッグデータ解析ソフトのシステム図

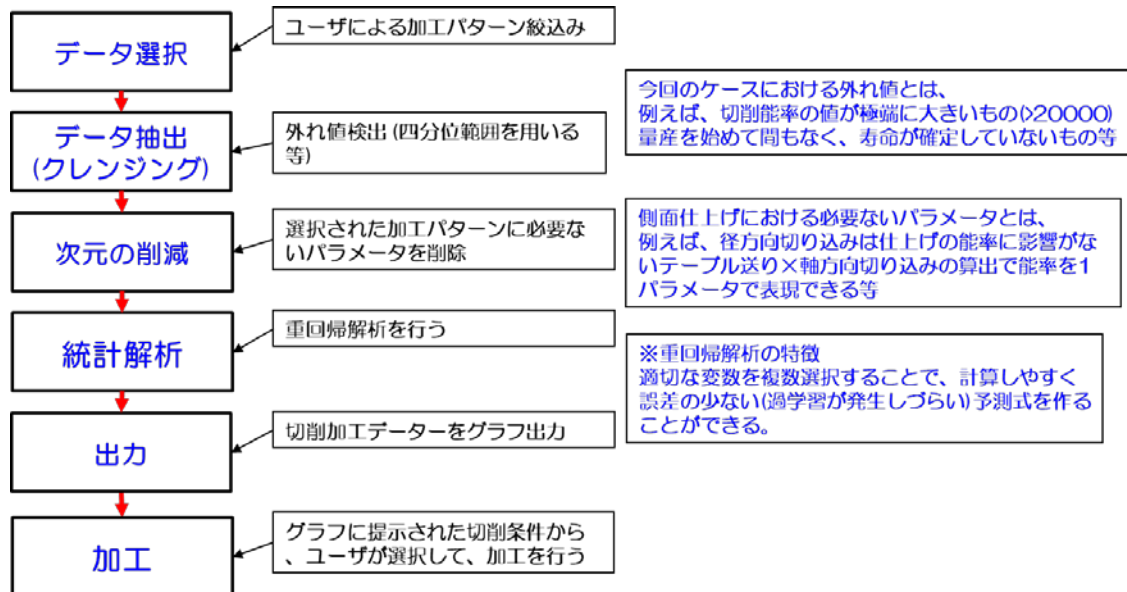


図 33 ③検索/解析処理の本システムにおける機械学習の流れ

解析パラメーター一覧
切削速度、1 刃あたりの送り量、工具寿命時間、工具径、ノーズ R/C サイズ、テーパ角、工具材種、コーティング材種、ホーニング幅、刃長、刃数、ねじれ角 1、ねじれ角 2、ピッチ 1、ピッチ 2、ツーリングメーカ名 1、ツーリング型式名 1、ツーリングメーカ名 2、ツーリング型式名 2、ツーリングメーカ名 3、ツーリング型式名 3、ツーリングメーカ名 4、ツーリング型式名 4、突き出し、逃がし量、ツール長、軸方向切込み深さ、径方向切込み深さ、加工パターン、固有振動数（治具剛性）、動剛性値（治具剛性）、減衰比（治具剛性）、被削材種、クーラント供給法

図 34 解析処理における解析パラメーター一覧

3) 解析結果及び考察

以下のような加工条件を設定した場合の解析結果を一覧表示する（図 35）とともに、解析結果を 3 次元プロット（図 36）する機能を実装し検証した。3 次元プロットの軸は切削条件を検討する上で重要な「加工能率（ mm^2/min ）」、「（工具の）アスペクト比（ L/D ）」、「工具寿命（min）」とした。

- 加工パターン選択(リストボックス)：側面仕上げ
- 工具径(数値)：20
- 突き出し(数値)：100（100mm 以下）
- 加工材質(リストボックス)：Ti-6Al-4V
- 治具剛性(数値)：任意（未実装のため）
- 切削領域(数値)：任意(たとえば軸方向切込み深さを 30 と指定したとき、軸方向切込み深さが 30 未満の実績データを除外する)

図 35 解析結果の一覧

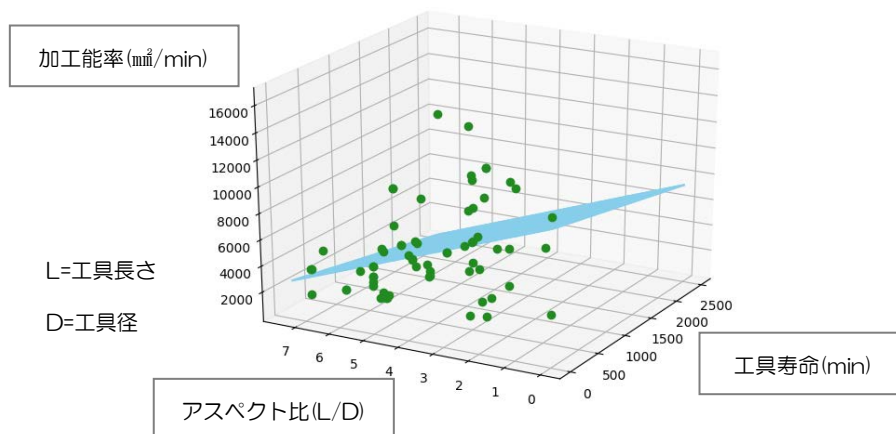


図 36 解析結果の3次元プロット

ここで、

加工能率：仕上げ加工の場合、テーブル送り量×軸方向切込み深さ、荒加工の場合、テーブル送り量×軸方向切込み深さ×径方向切込み深さ
 アスペクト比 (L/D)：加工能率、コスト、被削材の振動有無に大きな影響を与えるパラメータ、L=工具長さ、D=工具径である。
 工具寿命：コストをあらわすパラメータ

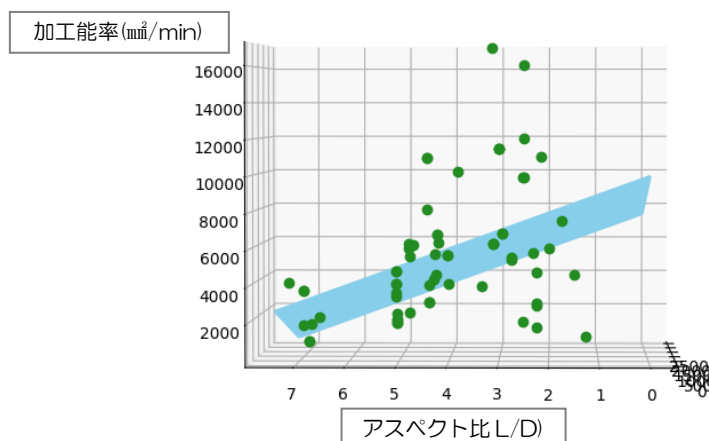


図 37 加工能率とアスペクト比の関係

加工能率とアスペクト比の関係（図37）に注目すると、アスペクト比が低い（工具の剛性が高い）と加工能率が高くなっている傾向が分かる。

また、最小二乗法による近似平面より下の加工例は、切削条件を上げて加工能率を高めることが可能である事が分かる。

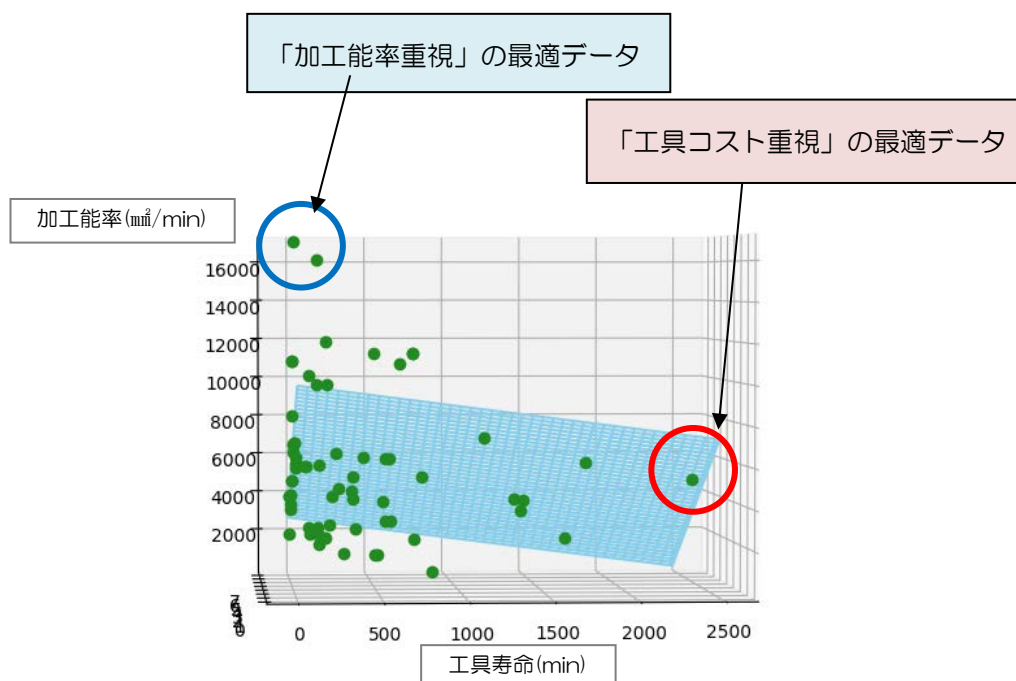


図 38 加工能率と工具寿命の関係

一方、加工能率と工具寿命の関係（図38）に注目すると、加工能率最重視もしくは、工具コスト最重視のデータを判断できる。

本解析ソフトで出力した加工能率重視もしくは工具コスト重視の切削条件をユーザ（NCプログラマー）に転送することにより、本プロジェクトの目的である「誰がプログラムを作成しても最適な切削条件を選択できる」事が可能になった。

【2-3】ビッグデータ解析に基づく加工システムの開発

1) 目的

ビッグデータ解析に基づく加工システムにおける開発したビッグデータ解析ソフトの有効性を検討するために、実証試験（テスト加工）を行った。

2) 実験方法及び実験条件

テスト加工の手順は以下のとおりである。

- 航空機機体部品を加工した実績のビッグデータから、最適と考えられる切削条件を算出する。

- ビッグデータから算出された切削条件の有効性を確認するため、航空機機体部品に類似した形状の部品についてテスト加工を行う。テスト加工を行う部品にはエンドミルで加工する箇所が 4 つあるため、4 パターンの加工の検証を行う。
- 従来の加工時間とビッグデータから算出された切削条件による加工時間との比較検討を行う。
- 上記手順でテスト加工を 2 度行い、テスト加工後の加工面粗さの測定を行う。

3) 実験結果及び考察

テスト加工の実験結果の 1 回目は実績データ約 700 ケースの場合、2 回目は実績データ約 1200 ケースの場合で実施した。

表 1 7 は 1 回目の実績データ約 700 ケースの場合のテスト加工の結果を示す表である。表中の④アップ率は①と③を加工時間で比較し、加工能率の向上度を示すパラメータである。

表 1 7 1 回目の実績データ約 700 ケースの場合のテスト加工の結果

	加工内容	①航空機の実績条件		①の加工時間	②ビッグデータ解析条件		③テスト加工実績		③の加工時間	④アップ率
		切削速度	1 刃当たり送り量		切削速度	1 刃当たり送り量	切削速度	1 刃当たり送り量		
加工パターン 1	側面	60m/min	0.0375 mm/tooth	2.16min	55m/min	0.18 mm/tooth	55m/min	0.18 mm/tooth	0.49min	341%
加工パターン 2	溝	27.6m/min	0.0375 mm/tooth	6.46min	40m/min	0.13 mm/tooth	40m/min	0.052 mm/tooth	3.21min	101%
加工パターン 3	側面	44m/min	0.1 mm/tooth	1.62min	34m/min	0.52 mm/tooth	34m/min	0.32 mm/tooth	0.69min	135%
加工パターン 4	側面	40m/min	0.09 mm/tooth	5.61min	48m/min	0.38 mm/tooth	48m/min	0.152 mm/tooth	2.76min	103%
加工時間合計				15.85min					7.15min	122%

$$\text{④アップ率} = ((\text{①}/\text{③}) - 1.0) \times 100\%$$

1 回目テスト加工後、加工時間は短縮ができたが、テスト加工後の加工面粗さが $Ra1.65\mu m \sim 1.69\mu m$ であったため、製品の加工面粗さ $Ra1.6\mu m$ の基準を満たすことができない結果となった。表 2 2 に示すとおり従来の①航空機の実績条件（切削速度、1 刃当たり送り量）に比べて③テスト加工実績における切削速度あるいは 1 刃当たり送り量の値が大きく、過酷な切削加工条件であったため、良好な加工面粗さを得ることができなかったと考えられる。過酷な切削加工条件を算出してしまった原因は、データ不足による精度の低さであると想定された。そこで、実績データを増やし、再度テスト加工を実施した。

表 1 8 は 2 回目の実績データ 1200 ケースの場合のテスト加工の結果を示す表である。

『④アップ率』が 59%となり、目標である加工能率 30%アップを達成した。さらにテスト加工後の加工面粗さが $Ra0.31\mu m \sim 0.62\mu m$ であり、製品の加工面粗さ $Ra1.6\mu m$ の基準を満足する結果となった。

テスト加工の結果より、開発したビッグデータ解析に基づく加工システムが難削材の切削加工における高能率化に有効であることが確認できた。

表18 2回目の実績データ 1200 ケースの場合のテスト加工の結果

	加工内容	①航空機の実績条件		①の加工時間	②ビッグデータ解析条件		③テスト加工実績		③の加工時間	④アップ率
		切削速度	1 刃当たり送り量		切削速度	1 刃当たり送り量	切削速度	1 刃当たり送り量		
加工パターン 1	側面	60m/min	0.0375 mm/tooth	2.16min	47m/min	0.07 mm/tooth	47m/min	0.07 mm/tooth	1.48min	46%
加工パターン 2	溝	27.6m/min	0.0375 mm/tooth	6.46min	46m/min	0.06 mm/tooth	46m/min	0.048 mm/tooth	3.03min	113%
加工パターン 3	側面	44m/min	0.1 mm/tooth	1.62min	44m/min	0.18 mm/tooth	44m/min	0.153 mm/tooth	1.06min	53%
加工パターン 4	側面	40m/min	0.09 mm/tooth	5.61min	46m/min	0.1 mm/tooth	46m/min	0.1 mm/tooth	4.39min	28%
加工時間合計				15.85min					9.96min	59%

$$\text{④アップ率} = ((\text{①}/\text{③}) - 1.0) \times 100\%$$

最終章 全体総括

(1) 本事業における研究開発成果

平成27年度から平成29年度にかけて実施した、本事業における研究開発の目標と成果は表19のとおり。

表19 本事業における研究開発の目標と成果

研究テーマおよびサブテーマ	研究テーマ目標とサブテーマ実績
【1.エンドミル切削工具の長寿命化の課題への対応】	【目標】 工具寿命が3倍以上となる技術開発
【1-1】 エンドミル切削工具の開発	・厚板側面加工用のすくい角θ_3°、ホーニング幅w_1 mmのエンドミル切削工具を開発し、工具寿命3倍を達成した。 ・薄板底面加工用の逆刃エンドミル切削工具を開発し、工具寿命5倍以上を達成した。 ・薄板立壁加工用のR刃エンドミル切削工具を開発し、工具寿命3倍以上を達成した。
【1-1-1】 エンドミル切削工具の設計	以下のエンドミル切削工具の基本設計を完了した。 ・厚板側面加工用のすくい角とホーニング幅を最適化したエンドミル切削工具 ・薄板底面加工用の逆刃エンドミル切削工具 ・薄板立壁加工用のR刃エンドミル切削工具
【1-1-2】 エンドミル切削工具の製作	【1-1-1】で設計したエンドミル切削工具を製作し、テスト加工と改良を繰り返し、長寿命エンドミル切削工具を完成した。
【1-2】 工具刃先の冷却技術の開発	【1-1】で開発したエンドミル切削工具を用いて工具寿命が3倍以上となる冷却技術の開発を概ね達成した。
【1-2-1】 高圧クーラント及びエアークーラーとの組み合わせによる冷却技術	・セラミックス被覆された熱電対素線の埋め込みによるチタン合金の切削温度測定の実施 ・クーラントの設定温度を下げた場合による切削加工実験を実施 ・エアークーラーから噴射される圧縮空気の温度測定を実施 ・ドライアイスガスの噴射による冷却効果の検討（未達成）
【1-2-2】 クーラント液中の冷却技術の開発	・厚板側面加工において基準の冷却技術に比べて工具寿命1.7倍を確認。 ・厚板側面加工において、【1-1】で開発した厚板側面加工用のすくい角θ_3°、ホーニング幅w_1 mmのエンドミル切削工具を使用し、クーラント噴射ノズルを液中に2本設置した場合に、基準の冷却技術に比べて工具寿命2.9倍を達成した。
【2.加工時間短縮の課題への対応】	【目標】 加工時間を30%以上短縮できる加工システム開発
【2-1】 難削材の切削加工ビッグデータ収集	1200 ケース以上の加工実績データを収集し、ビッグデータとして整理した。
【2-2】 難削材の切削加工ビッグデータ解析	ビッグデータを機械学習で解析し、目的の加工に最適な切削条件を自動的に算出するソフトを完成した。
【2-3】 ビッグデータ解析に基づく加工システムの開発	実際に算出した切削条件でテスト加工を実施し、加工時間の59%短縮を達成した。

※すくい角とホーニング幅の具体的な数値については、競合他社に対する強みであり、秘密情報であるためすくい角 θ_3° と、ホーニング幅 w_1 mmの表記としている。

本事業によって、長寿命のエンドミル切削工具を開発することができたと考えているが、実製品の加工条件で工具寿命を計測できていない。しかしながら、計測した工具寿命については実製品の加工よりも摩耗しやすい過酷な条件下（切削速度 100m/min など）で得られた結果

であるため、実製品の加工条件では、テスト加工で得られた結果よりも長寿命であることは、容易に想像できる。

新しい冷却技術の開発については、研究を進める中で想定していなかった課題が浮上するなど、完全な目標達成には至らなかった。しかし、新たな研究課題が判明した事で、新たな開発プロジェクトの可能性を見出した。

また、加工時間短縮のために開発した、ビッグデータ解析に基づく加工システムについては目標以上の成果が得られ、チタン材以外の材料にも適用可能な仕様であるため、応用範囲が広いと認識している。参画いただいたアドバイザーからも高評価を得た。

(2) 研究開発後の課題・事業化展開

研究開発後の課題としては、航空機機体部品のコストダウン要求が激化しており、更なる加工賃の低減のための改善を行う必要がある。また、より付加価値の高い製品取り込みに向け事業化展開を加速させる意向である。

【新たな企業展開の可能性】

■航空機エンジン部品

難削材が多用されているエンジンの部品には、当事業における研究成果を反映させることが可能であり、工具費用の削減を進め、価格競争力を高めていくことにより国内顧客からの受注増加を狙うと共に、エンジンメーカーから直接受注のため営業活動を強化する。

■半導体製造装置部品

現在非常に好調な半導体製造装置部品の受注が増加しており、加工実績データの収集を進めることで、当事業のビッグデータ解析に基づく加工システムの開発を適用し、加工時間削減により更なる受注増が見込めるものである。