

# 航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化

(切削加工シミュレーションによる工具温度の見える化)

工業材料科 主任研究員 福田 洋平  
工業材料科 科 長 瀧内 直祐  
食品・環境科 主任研究員 三木 伸一

本研究は、切削加工に取り組んでいる県内企業の航空宇宙関連産業への新規参入および取引拡大を技術面から後押しすることを目的としており、①切削加工シミュレーションによる高能率加工技術の開発、②加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグの開発、および③切削加工後の脱脂技術（洗浄技術）の三つの技術開発に取り組むことで、航空宇宙機器用材料の切削加工に関する県内企業の技術力向上を目指している。

本報告は①に関連し、切削加工シミュレーションによる工具温度の見える化について報告する。

## 1. 緒言

航空宇宙関連産業は大きな成長産業として注目されており、長崎県では重点政策として、県内企業の航空宇宙関連産業への新規参入支援および取引拡大支援に取り組んでいる。本研究は切削加工に取り組んでいる県内企業の航空宇宙関連産業への新規参入および取引拡大を技術面から後押しするものであり、航空宇宙機器用材料の切削加工に関する技術開発として、①切削加工シミュレーションによる高能率加工技術の開発、②加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグの開発、および③切削加工後の脱脂技術（洗浄技術）の開発に取り組むものである。

①切削加工シミュレーションによる高能率加工技術の開発に関連し、令和元年度は、切削加工シミュレーションの精度向上を目的とした伝熱パラメータの取得について報告した<sup>[1]</sup>。本報では、取得した伝熱パラメータを用いて、航空宇宙機器用材料切削時の工具温度の見える化に取り組んだ結果について報告する。

## 2. シミュレーションによる工具温度の見える化

### 2.1 工具温度解析の概要

専用ソフトウェアを用いた切削加工のシミュレーションを実施することで、切削加工時の工具温度を計算することができる。しかし、のこ刃状切りくずが生成される非定常な切削シミュレーションにおいて、数秒間におよぼ切れ刃近傍の詳細な温度分布を計算した場合、計算量が膨大となり、シミュレーションに多大な時間を要する。

そこで、図1に示すように微小時間の詳細な切削加工シミュレーションを実施し、被削材の最高温度およ

び工具との平均接触領域の情報をあらかじめ取得することによって、工具温度の解析を単純な伝熱解析に置き換える。詳細な切削加工シミュレーションにより取得した被削材の最高温度を表1、工具との平均接触領域を表2に示す。

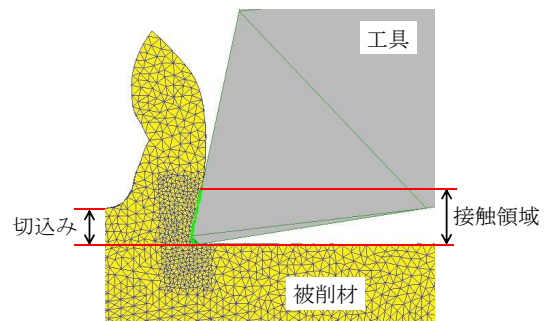


図1 切削加工シミュレーション

表1 工具温度解析に用いる被削材の最高温度

切削速度 m/min	被削材の最高温度 (°C)	
	チタン合金	ニッケル合金
20	390	414
40	480	502
80	590	612
160	690	720

表2 工具温度解析に用いる接触領域

切込み mm	工具と被削材の接触領域 (mm)	
	チタン合金	ニッケル合金
0.050	0.050	0.100
0.075	0.075	0.125
0.100	0.100	0.150
0.125	0.125	0.175

## 2. 2 解析条件

解析対象の工具は、φ12 mm およびφ20 mmの4枚刃超硬エンドミルとし、計算に用いるモデルは1/4軸対称の簡易モデルとした。図2に工具モデルと境界条件の設定を示す。

工具すくい面は切削油剤（20℃）により冷却されるとし、熱伝達率を切削速度の関数  $hr=1350V^{0.5}$  とした。被削材との熱伝達率は、チタン合金で 300 kW/m<sup>2</sup>K、ニッケル合金で 200 kW/m<sup>2</sup>Kとした。なお、工具逃げ面は切削油剤による冷却効果が限定的<sup>[2]</sup>とし、断熱面とした。

解析する切削条件を表3に示す。回転工具による切削のため、送り量が表2に示す切込みに相当するとし、切れ刃が被削材に食い込んでから抜けるまでの間の接触領域は一定であると仮定した。また、接触面の被削材温度は表1に示す被削材の最高温度とした。なお、すくい面における工具と被削材との摩擦による発熱は考慮していない。

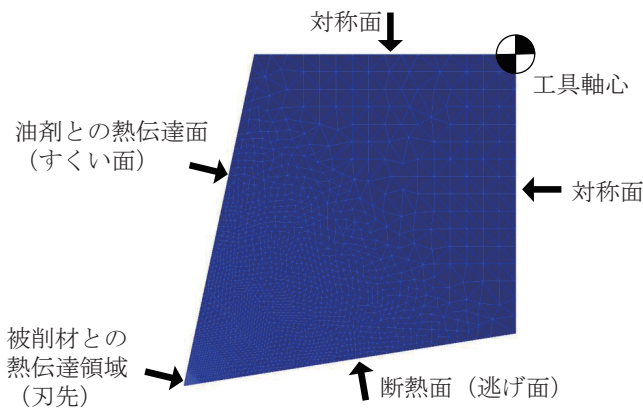


図2 工具モデル

表3 解析条件 (計 256 条件)

被削材	チタン合金、ニッケル合金
工具径(mm)	12、20
切削速度(m/min)	20、40、80、160
送り量(mm/tooth)	0.050、0.075、0.100、0.125
径方向切込み(mm)	0.1D、0.2D、0.3D、0.5D ※Dは工具径
解析対象時間(sec)	2

## 2. 3 解析結果

解析結果の一例を図3に示す。解析結果より切削時に上昇した工具温度は空転時に切削油剤により十分冷却されると考えられる。工具温度が工具摩耗および損

傷に最も影響を及ぼすと考えられ、解析対象時間内における最後のピーク温度を工具温度として評価する。

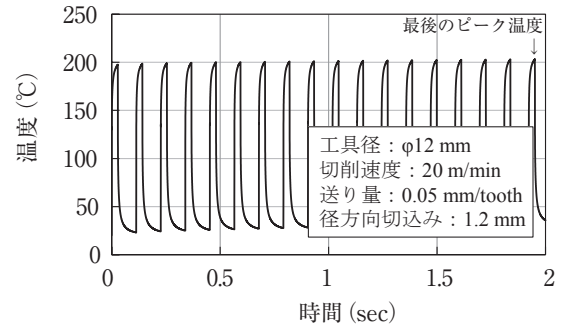


図3 解析結果 (工具温度)

## 2. 4 被削材の比較

チタン合金およびニッケル合金の解析結果、各 128 条件の工具温度の分布を図4に示す。各材料における工具温度の平均値は、チタン合金で 298℃、ニッケル合金で 310℃であった。

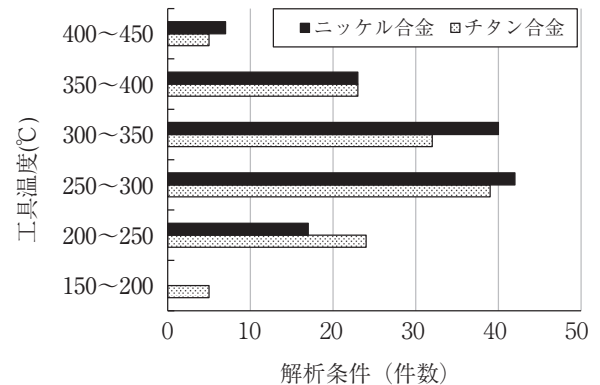


図4 被削材による工具温度の分布

## 2. 5 切削条件の比較

チタン合金の解析結果 128 条件について、図5に切削速度、図6に送り量、図7に径方向切込みのそれぞれが、工具温度に与える影響を示す。

切削速度 20 m/min の平均値は 236℃であり、能率 8 倍となる切削速度 160 m/min における平均値は 354℃であった。送り量 0.050 mm/tooth の平均値は 249℃であり、能率 2.5 倍となる送り量 0.125 mm/tooth における平均値は 339℃であった。径方向切込み 0.1D の平均値は 286℃であり、能率 5 倍となる径方向切込み 0.5D における平均値は 309℃であった。

これらの結果から、工具温度の上昇を抑えながら加工能率を高めるには、径方向切込みを大きく設定することが有効と考えられる。

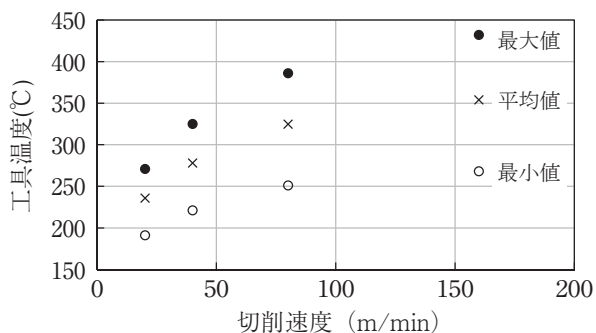


図5 切削速度の影響

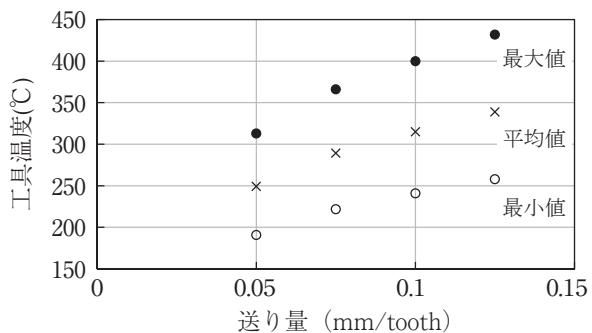


図6 送り量の影響

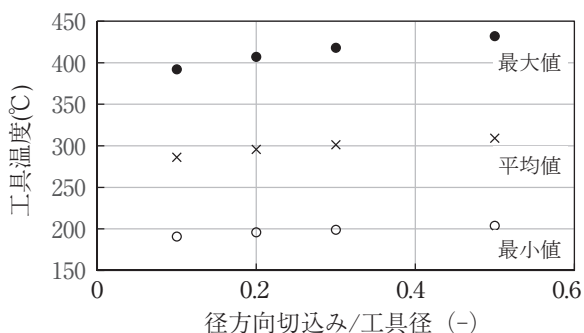


図7 径方向切込みの影響

### 3. 切削実験

#### 3.1 実験条件

工具温度の上昇を抑えながら加工能率を高めるために径方向切込みを大きく設定することが有効であることを検証するため、切削実験を実施した。

切削実験の概要を図8に示す。肩削りの走査線加工により、ワークを上層から除去していく。切削条件は表4に示す条件を基準とし、①基準条件、②切削速度4倍の条件、および③径方向切込み4倍の条件で切削実験を実施し、工具の刃先状態を比較した。なお、切削実験に使用する工具は、突発的な損傷を抑制するため、切削速度20 m/minの条件で約30分の予備加工を実施した。

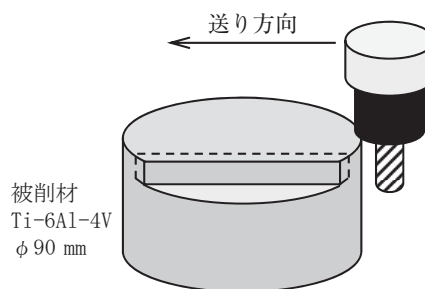


図8 切削実験概要

表4 基準となる切削条件

使用工具	ヘッド交換式エンドミル (三菱) ヘッド: IMX12C4HV120R05012 ホルダ: IMX12-U12N017L080C
工具径	φ12 mm
工具突出し	36 mm
切削速度	40 m/min
送り量	0.050 mm/tooth
軸方向切込み	4.0 mm
径方向切込み	1.2 mm (0.1D)
冷却方法	ノズルクーラント

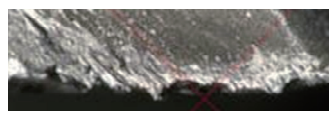
#### 3.2 実験結果

図9に、ワークを15層除去した後の工具刃先の状態を示す。切削速度を4倍にした場合は刃先が激しく損傷しているのに対し、同じ加工能率となる径方向切込みを4倍にした場合は安定した摩耗の進行となった。

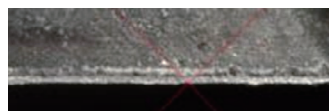
①基準条件



②切削速度  
4倍



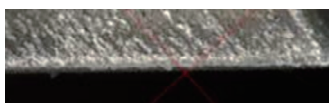
③切込み  
4倍



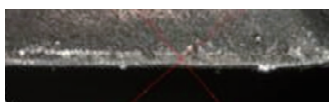
0.2 mm  
↔

図9 刃先状態 (15層加工後)

①基準条件



③切込み  
4倍



0.2 mm  
↔

図10 刃先状態 (51層加工後)

切削実験を継続し、ワークを 51 層除去した後の工具刃先状態を図 10 に示す。基準条件に対し、径方向切込みを 4 倍にした条件では刃こぼれが生じているが、切削加工を継続するには十分な状態を保っている。

#### 4. 高速仕上げ切削実験

##### 4. 1 実験条件

今回実施した解析では、切削速度 160 m/min においても、送り量と径方向切込みを小さく設定することで、工具温度を 300℃以下に抑えることができる結果となった。これは、送り量と径方向切込みを小さく設定する仕上げ加工時において、従来よりも高い切削速度を適用することができる可能性を示唆するものであるため、高速仕上げ切削実験を実施した。

表 5 に実験条件を示す。切削距離が 220 m (実加工時間：約 4 時間 20 分) になるまで実験を実施した。

##### 4. 2 実験結果

図 11 に仕上げ面の表面粗さを示す。評価面は壁面、測定方向は送り方向とし、評価長さは 8.0 mm、カットオフ値は 0.8 mm とした。高速切削加工条件での長時間加工であるが、表面粗さは良好な数値となった。

図 12 に実験後の刃先状態を示す。刃先の一部には刃こぼれが生じているが、切削加工を継続するには十分な状態を保っている。

#### 5. 結 言

航空宇宙機器用材料切削時の工具温度の見える化に取り組み、下記の結果を得た。

- 1) 詳細な切削加工シミュレーションにより取得したデータを基に、工具温度の解析を単純な伝熱解析に置き換える手法を提案した。
- 2) 工具温度の解析結果より、工具温度の上昇を抑えながら加工能率を高めるためには径方向切込みを大きく設定することが有効であることを示した。
- 3) 送り量と径方向切込みを小さく設定する高速仕上げ切削加工を提案し、有効性を検証した。

#### 謝 辞

本研究事業を推進するにあたり、長崎大学大学院工学研究科の矢澤孝哲教授、桃木悟教授、大坪樹助教、長崎大学情報データ科学部の小林透教授、荒井研一准教授、白濱謙弥氏、システムファイブ株式会社の佐藤康彦代表取締役、水野勇一部長と株式会社新田鉄工所

の松尾章弘専務に多大なるご協力とご支援をいただいた。

表 5 高速仕上げ切削加工条件

使用工具	ヘッド交換式エンドミル (三菱) ヘッド：IMX12C4HV120R05012 ホルダ：IMX12-U12N017L080C
工具径	φ12 mm
工具突出し	36 mm
切削速度	160 m/min
送り量	0.050 mm/tooth
軸方向切込み	4.0 mm
径方向切込み	0.4 mm
冷却方法	ノズルクーラント

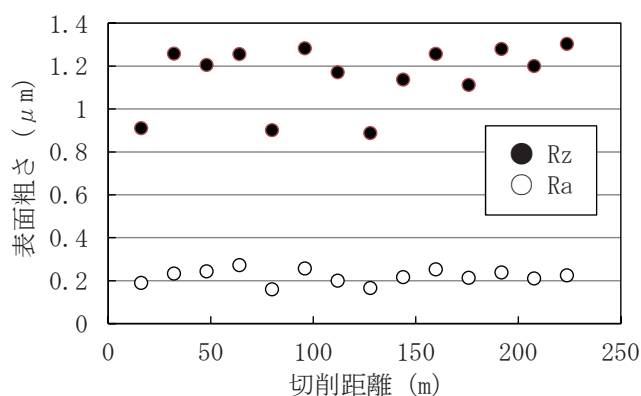


図 11 高速仕上げ切削加工による表面粗さ

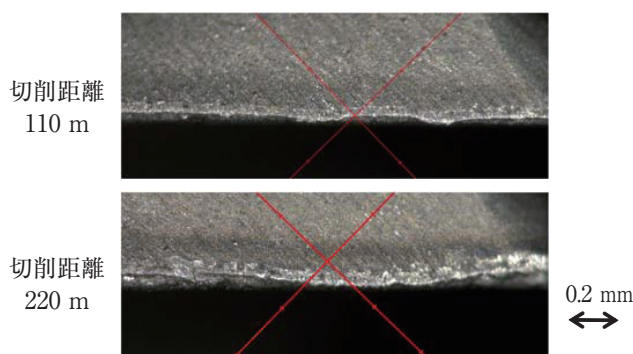


図 12 刃先状態 (切削距離 220 m 加工後)

#### 参考文献

- [1] 福田, 瀧内, 三木: 長崎県工業技術センター研究報告, No. 49, pp. 1-5, 2020.
- [2] 福田 ほか: エンドミル逃げ面における水溶性切削油剤の冷却効果の検討、精密工学会九州支部佐世保地方講演会講演論文集, pp. 81-82, 2019.