

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の精度向上を目的とした伝熱パラメータの取得)

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の精度向上を目的とした伝熱パラメータの取得結果について報告する。

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。

本報告は①に関連し、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結果について報告する。

航空宇宙機器にはチタン合金やニッケル基合金といった耐熱合金が材料として用いられる。耐熱合金切削の高能率化を阻む要因として、被削材の熱伝導率が小さいことに起因する切削工具の過熱があり、切削中の工具の正確な刃先温度を把握することは耐熱合金切削の高能率化を実現する上で重要となる。しかし、エンドミル加工の場合、工具は高速で回転しているとともに多量の水溶性切削油剤が供給されているため、切削中の工具刃先温度を測定することは困難である。そのため、切削中の工具温度を予測する方法として有限要素法による切削シミュレーションが用いられる^[1]。

有限要素法による切削シミュレーションを活用することで切削条件の改善を円滑に進めることができる

が、シミュレーションに用いる各種のパラメータは、ソフトウェアメカが提供するライブラリ情報だけでは不十分なケースが多く、ユーザが独自のノウハウとして蓄積していく必要がある^[2]。

令和元年度は、高能率加工技術の開発の第一段階として、チタン合金およびニッケル基合金の切削シミュレーションに用いる下記の伝熱パラメータの取得に取り組んだ。

- ・超硬合金と水溶性切削油剤間の熱伝達率
- ・チタン合金と水溶性切削油剤間の熱伝達率
- ・ニッケル基合金と水溶性切削油剤間の熱伝達率
- ・超硬合金とチタン合金間の熱抵抗
- ・超硬合金とニッケル基合金間の熱抵抗

なお、切削シミュレーションには汎用有限要素解析ソフトウェア DEFORM を使用した。

2. 熱伝達率の取得

2.1 実験方法

図1に実験装置を、図2に伝熱面の詳細を示す。伝熱槽は水溶性切削油剤を流す矩形流路となっている(11 mm×10 mm)。流路壁面には直径 10.5 mm の穴を一か所設けており、直径 10.4 mm の伝熱体を挿入することで水溶性切削油剤と伝熱体との伝熱面を構成する。伝熱体の流路側端面から 10 mm、15 mm、および 20 mm の位置には直径 1.0 mm のシース熱電対を挿入し、伝熱体中心の温度を測定する。伝熱体は一様断面であるため、2点の温度と位置、そして熱伝導率が分かれば、伝熱体中の熱流束および伝熱面の温度

を計算によって導くことができる。また、流路中の水溶性切削油剤の温度を同時に測定することで、伝熱体と水溶性切削油剤間の熱伝達率を導くことができる。

水溶性切削油剤は(株)MORESCO製の「ツールメイトAL」を10倍に希釈して使用した。評価した伝熱体の材種および熱伝導率を表1に示す。

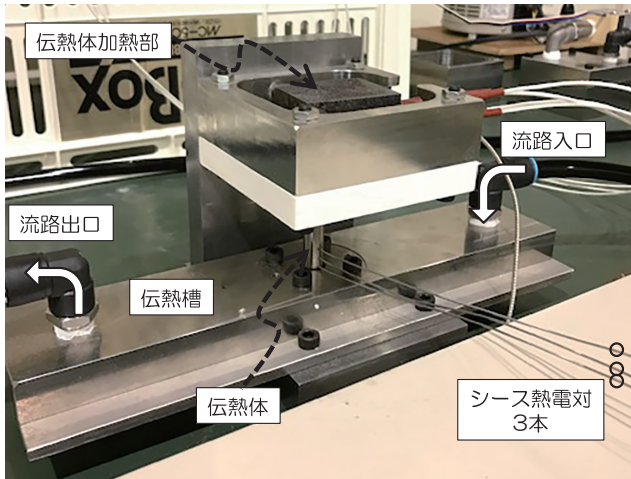


図1 熱伝達率取得用実験装置

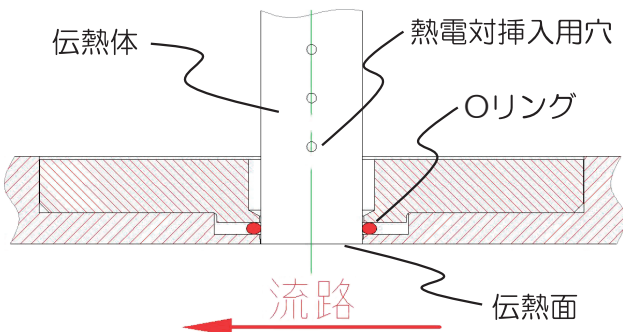


図2 伝熱面の詳細

表1 伝熱体の熱伝導率

伝熱体	材種	熱伝導率 (W/mK)
超硬合金	15TF 三菱マテリアル	71 メーカーカタログ値
チタン合金	Ti-6Al-4V	7.5 日本チタン協会 技術資料
ニッケル基合金	インコネル718	10.3 DEFORMライブラリ
ステンレス鋼 (参考)	SUS304	16 ステンレス協会技術資料

2.2 実験結果

熱伝達率の測定結果を図3に示す。図中には、まっすぐな円管の強制対流状態における理論値である

Dittus-Boelter 値を併せて示す。超硬合金の測定結果は、Dittus-Boelter 値と同様に流速の増加に伴い熱伝達率は飽和していく傾向を示した。それに対し、その他の測定結果は、流速の増加に伴い指数関数的に熱伝達率が増加する傾向を示した。また、この傾向は熱伝導率が低い材料ほど顕著であった。

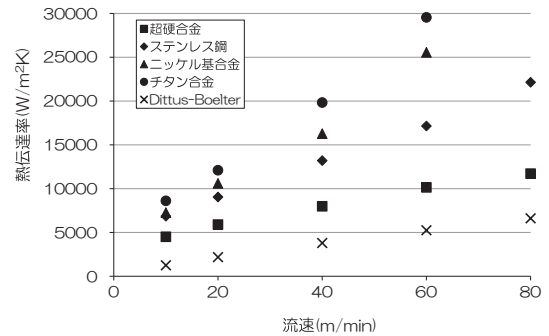


図3 熱伝達率

2.3 考察

図4に液温と端面温度の差と流速の関係を示す。液温と端面温度の差は、熱伝導率の低い材料ほど小さい結果であった。熱伝達率は、伝熱体中の熱流速を液温と端面温度の差で除算することにより導かれる値であるため、温度差が小さくなると熱伝達率の計算結果は大きくなる。

熱伝導率の低い材料ほど液温と端面温度の差が小さくなる理由は、伝熱体の熱伝導率に対してシース熱電対の被覆の熱伝導率が高いこと、また、シース熱電対の断面積に対して伝熱体の断面積が十分に大きくないためと考えられる。伝熱体がチタン合金の場合、最大2%の熱がシース熱電対側に逃げるため、端面の温度を実際より低く見積もることとなる。

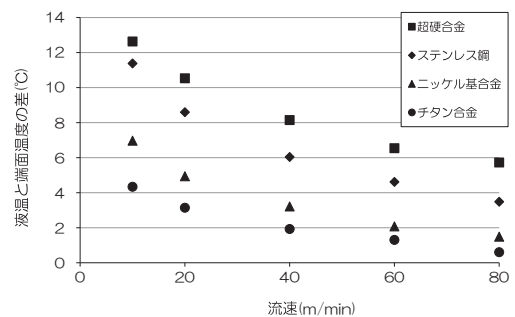


図4 液温と端面温度の差

2.4 熱伝達率の決定

シース熱電対に対して熱伝導率が十分に高い超硬合

金の実験結果を、切削シミュレーションにおける工具・被削材と水溶性切削油剤との熱伝達率とする。

熱伝達率 h を流速 V の関数として取扱い、累乗近似曲線をフィッティングした結果を図5に示す。

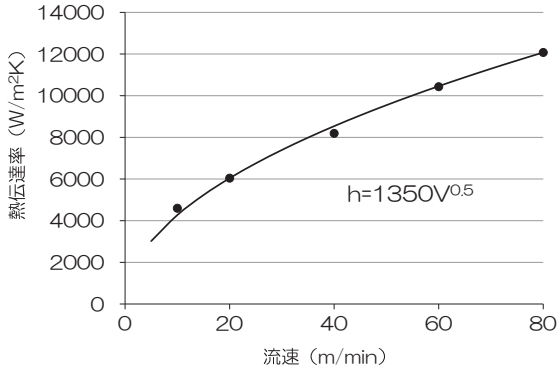


図5 流速と熱伝達率の関係

3. 熱抵抗の取得

3.1 熱伝達率の取得手順

熱抵抗を取得する目的は、切削時に生じる被削材の発熱が工具にどの程度流入するのか、また、切削中の工具温度が何度になるのかをシミュレーションによって予測するためである。しかし、切削シミュレーションによって、被削材から工具への熱の流入に関する接触面積、接触面温度、および接触圧力等の全ての状態を厳密に再現することはできない。

そのため、ここで取得する熱抵抗の値は物理的に厳密なものではなく、切削中の工具温度を適切にシミュレーションするうえで必要となる伝熱パラメータのこととする。なお、DEFORMにおいては固体間の伝熱パラメータも熱伝達率として設定する。

本研究において、熱抵抗の取得は下記の流れで行う。

- ①切削実験を実施し、切削中の切削抵抗および工具温度を測定する。
- ②切削実験と切削シミュレーションの切削抵抗が一致するように、シミュレーションの解析条件を調整する。
- ③切削実験と切削シミュレーションの工具温度が一致するように、シミュレーションの熱抵抗を調整する。

3.2 切削実験による切削抵抗と工具温度の測定

図6に実験図を、表2に実験条件を示す。切削実験は汎用旋盤を用いた二次元切削モデルとした。工具温度は熱電対(山里産業：セラサーモφ0.1)を工具逃げ面にカプトンテープで貼り付けることにより測定し

た。

使用したカプトンテープの耐熱温度は250℃であるため、チタン合金切削においては刃先から2.0mmの位置に、ニッケル基合金切削においては刃先から3.0mmの位置に熱電対を貼り付けた。チタン合金切削の実験結果を図7に、ニッケル基合金の実験結果を図8に示す。ニッケル基合金切削後の工具すくい面には被削材が堆積しており、この堆積物は切削中に構成刃先として作用していると考えられる。

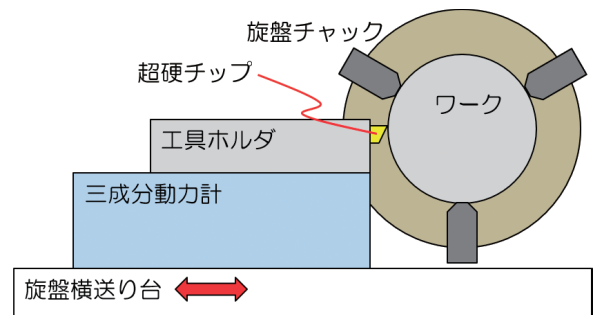


図6 切削実験

表2 実験条件

	チタン合金 Ti-6Al-4V	ニッケル基合金 インコネル718
切削開始外径(mm)	80	90
主軸回転数(min ⁻¹)	145	70
開始切削速度(m/min)	36	19.5
送り量(mm/rev)	0.106	0.071
工具材種	15TF (三菱マテリアル)	
切削幅(mm)	4.0	3.0
工具幅(mm)	4.2	
工具すくい角(deg)	14	

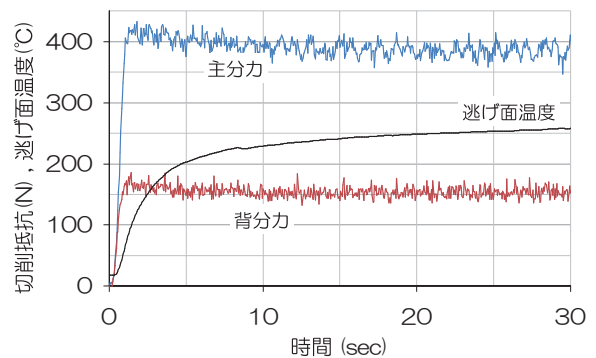


図7 切削実験結果(チタン合金)

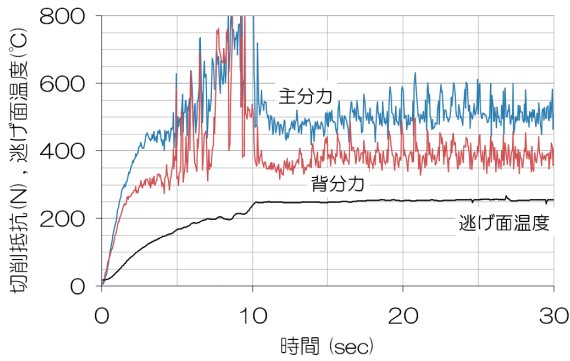


図8 切削実験結果（ニッケル基合金）

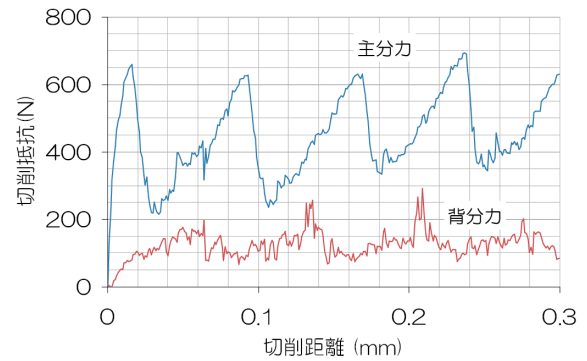


図9 シミュレーション結果（チタン合金）

3.3 切削シミュレーションの条件調整

切削実験と切削シミュレーションの切削抵抗が一致するように、シミュレーション設定の摩擦条件と限界ダメージを調整した。摩擦係数を大きくすると主分力が増大し、限界ダメージを大きくするとせん断変形の生じる間隔が長くなる。ダメージとは延性破壊方程式によって求められる値であり、ある要素でダメージが限界値を超えた場合、要素の破断が近似的に再現される。可能な限り切削抵抗値が一致するように調整したシミュレーション条件を表3に、シミュレーション結果を図9および図10に示す。なお、シミュレーションの切削幅は0.01 mmであるが、図中の切削抵抗は実験時の切削幅に換算した値である。

表3 シミュレーション条件

	チタン合金 Ti-6Al-4V	ニッケル基合金 インコネル718
ワーク		
モデル	剛塑性体	
DEFORM ライブラリ材質	Ti-6Al-4V- machiningSFTC	IN718- machiningAMTG
限界ダメージ	60	600
幅×厚さ×長さ(mm)	0.01×0.2×0.6	0.01×0.2×1.2
要素数	27684	60152
境界条件	底面完全固定、側面対称条件	
工具		
モデル	剛体	
刃先半径(mm)	0.01	
シミュレーション設定		
ソルバー	スパース	
反復法	ニュートンラプソン	
工具移動ステップ(mm)	0.001	
オブジェクト間関係		
摩擦条件	せん断摩擦 0.6	

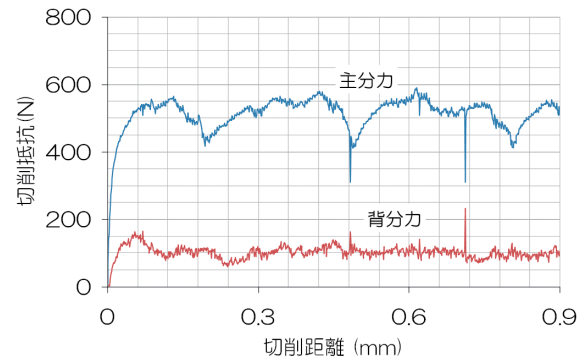


図10 シミュレーション結果（ニッケル基合金）

チタン合金の切削シミュレーションにおいては、この歯状切りくずが生成される際の切削抵抗の変動が実験よりも顕著に表れた。ニッケル基合金の切削シミュレーションにおいては、背分力の値が実験値よりも小さくなる傾向となった。これは、構成刃先による実すくい角の変化が一つの要因ではないかと考える。

3.4 熱抵抗の推定

熱抵抗の調整によって切削実験と切削シミュレーションの工具温度を一致させるにあたり、数秒間にわたる切削現象をシミュレーションしては膨大な計算時間が必要となってしまう。そのため、前節のシミュレーション結果から工具と被削材の平均接触面温度と平均接触面面積を取得し、別途、伝熱解析を実施することで熱抵抗の推定を行うこととした。取得した平均接触面温度と平均接触面面積を表4に、工具の熱的物性値を表5に示す。

伝熱解析に用いた工具のモデルを図11に示す。モデルの形状は実験に使用した超硬合金チップの1/2対称モデルである。切削中に被削材と接触する面を熱の流入面とし、工具ホルダに銀ろう付けされた面を熱の流出面とした。温度の評価点は熱電対を貼り付けた位

置である。熱の流入面は平均接触面温度の物体と接触している状態と設定し、熱の流出面は 20℃の物体と接触している状態と設定した。熱の流入面の熱抵抗を H_{in} 、流出面の熱抵抗を H_{out} とし、温度評価点の温度変化が切削実験と一致するように熱抵抗の値を調整した。

図 1 2 および図 1 3 に伝熱解析と切削実験の比較を示す。比較の結果、チタン合金切削における熱抵抗は 300 kW/m²K、ニッケル基合金切削における熱抵抗は 200 kW/m²K で実験結果との良好な一致が見られた。

表 4 接触面の平均温度と平均面積

	チタン合金 Ti-6Al-4V	ニッケル基合金 インコネル718
評価切削距離(mm)	0.07	0.29
平均接触面温度(℃)	494	438
平均接触面面積(mm ²)	0.00119	0.00155

表 5 工具の熱的物性

熱伝導率 (W/mK)	71
熱容量 (MJ/m ³ ℃)	2.51
密度 (g/cm ³)	14.5

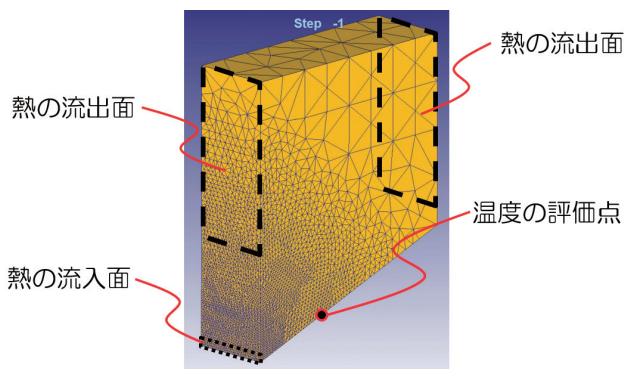


図 1 1 伝熱解析用工具モデル

4. 結 言

チタン合金およびニッケル基合金の切削シミュレーションに用いる伝熱パラメータの取得に取り組み、下記の結果を得た。

1) 工具・被削材と水溶性切削油剤との熱伝達率を取得するため伝熱実験を実施し、熱伝達率 h を流速 V の関数として $h=1350V^{0.5}$ の関係を得た。

2) 工具と被削材間の熱抵抗を取得するため、伝熱解析と切削実験を実施し、チタン合金切削における熱抵抗は 300 kW/m²K、ニッケル基合金切削における熱抵抗は 200 kW/m²K で実験結果と解析結果の良好な一致が見られた。

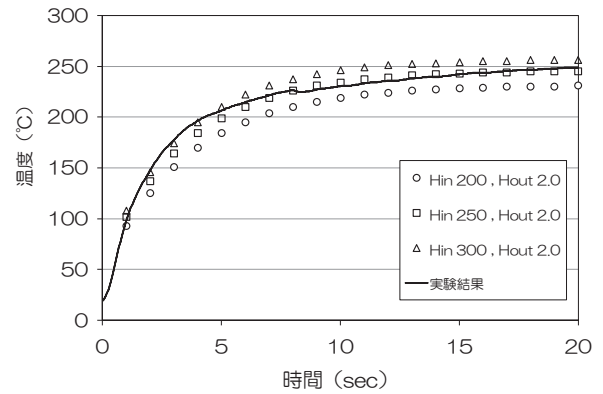


図 1 2 伝熱解析と切削実験の比較 (チタン合金)

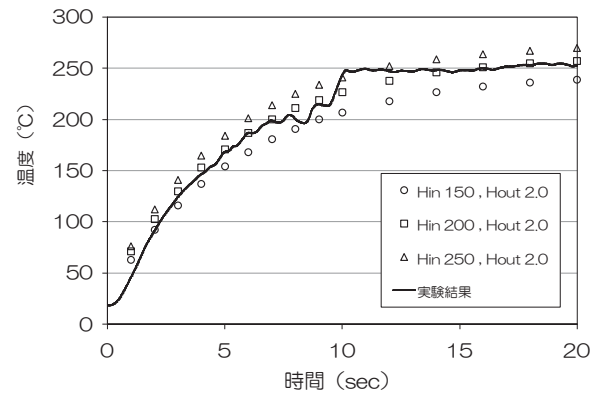


図 1 3 伝熱解析と切削実験の比較 (ニッケル基合金)

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桃木悟教授、小林透教授、荒井研一准教授、栗山孔臣氏、システムファイブ株式会社の佐藤康彦社長と水野勇一部長に多大なるご協力のご支援を頂いた。

参考文献

- [1] 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。
- [2] 福田 ほか：チタン合金切削の切削シミュレーションにおける摩擦条件の検討，精密工学会九州支部佐世保地方講演会講演論文集，pp.83-84，2019。