

# 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

(航空宇宙機器用材料の切削加工における加工時間の短縮、加工トラブルの予測および脱脂技術の確立)

機械加工科	主任研究員	福 田 洋 平
応用技術部	部 長	瀧 内 直 祐
機械加工科	主任研究員	三 木 伸 一
長崎大学	情報データ科学部 教 授	小 林 透
長崎大学	情報データ科学部 准 教 授	荒 井 研 一
システムファイブ株式会社	代表取締役	佐 藤 康 彦
システムファイブ株式会社	システム技術部 マネージャー	水 野 勇 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②に関連し、AI技術を活用して加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグについて報告する。

## 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。本研究は切削加工の高度化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る。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。

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<sup>[1]</sup>、令和二年度は、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した<sup>[2]</sup>。

本報では、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について報告する。航空宇宙機器用材料は難削材であるために加工トラブルが生じやすく、さらに、チタン合金材料等の価格が高価であるために誤作の発生は多大な損失となる。

航空宇宙機器用材料の切削加工は切りくずの噛み込み等による突発的な工具トラブルが生じやすく、刃先の状態に注意しながら慎重に切削加工を行っている。

加工中の工具は切りくずやクーラントの飛散により目視で確認することができないため、加工現場のオペレータは主に切削音の変化から工具の状態を感じ取る必要があり、その結果、非効率的な作業となっている。

また、航空機機体部品に使用されるチタン合金材料は鍛造によるニアネットシェイプ材として支給されるものもあり、材料内部の残留応力が切削加工後に許容できないワークひずみを生じさせる場合がある。ワークひずみが生じた場合は機械的な矯正が余儀なくされるとともに、その対策としては加工途中に工作機械を停止してワークの固定状態を確認し、必要に応じてボルトの再締付等の調整をしなければならない。

本研究は、上記2つの加工トラブル予測を目的とし、工具異常の見える化とワークひずみの見える化に取り組んだ。

## 2. 実験方法

### 2.1 工具異常の見える化

加工現場のオペレータが工具状態を把握するために用いる情報は、主に切削音の変化と CNC 装置のモニタに表示される主軸ロードメータの値である。そのため、今回のシステムには切削音を集音するためのマイクロホン、音との関係が深い振動を計測するための加速度計を用いた。さらに、主軸ロードメータ信号をサーボアンプから取得することとした。

使用したマイクロホンの仕様を表1に、加速度計の

仕様を表2に示す。

サーボアンプ（ファナック株製スピンドルアンプ aiSP30）からの主軸ロードメータ信号を電圧信号として取得するために、ファナック株製スピンドルチェックボード（A06B-6078-H001）を使用した。

スピンドルチェックボードを用いることにより、各種信号波形や内部データ等を観測することが可能となる。

表1 マイクロホンの仕様

メーカー	PCB社
型式	378B02
音場	自由音場型
感度	50mV/Pa
ダイナミックレンジ	10dB ~ 135dB

表2 加速度計の仕様

メーカー	PCB社
型式	M608A11
測定範囲	±490 m/s <sup>2</sup>
感度	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )
周波数範囲	0.5 Hz ~ 10000 Hz

## 2.2 ワークひずみの見える化

ワークひずみを見る化する手段として、加工中のワークの変形を直接的に測定する方法と、クランプ力（ボルトの締付力等）の変化を測定する方法について検討した。

加工中のワーク近傍は切りくずの堆積と高圧クーラントの噴射を受けるため、ワークの変形を直接的に測定する変位センサには高い耐環境性が求められる。表3に各種変位センサの検討結果を示す。

耐クーラント環境性は渦電流式変位計が優れ、耐切りくず堆積環境性は接触式のリニアゲージが優れる。今回は図1に示すとおり、渦電流式変位計にプランジャ機構を組み合わせることで両者の優位性を併せ持った変位測定方法を採用した。使用した渦電流式変位センサは株電子応用製のアンプ内蔵型センサ（ML-06）である。

クランプ力の変化を測定する手法として、クランプ力の作用する場所に圧縮形のロードセルを組み込む手法が考えられる。しかし、ロードセルが介在することでワークのクランプ剛性が低下する懸念が生じるため、加工治具への組み込みは不向きである。そこで今回は

図2に示すとおり、スタッドボルトに穴をあけ、ボルトの軸力用箔ひずみゲージ（共和電業製 KFB-1.5-120-C20-11）を埋め込むことでクランプ力を測定することとした。この方法は、ゲージが接着剤により完全に被覆されるため、耐クーラント環境および耐切りくず堆積環境の面でも有利となる。

表3 変位センサの比較

変位測定原理	クーラント環境	切りくず堆積環境	センサヘッドサイズ
光学式	測定不可	測定不可	30mm×70mm×70mm程度 (三角測量式)
渦電流式	測定可	測定不可	直径10mm×長さ20mm程度
超音波式	測定不可	測定不可	直径20mm×長さ70mm程度
リニアゲージ	仕様による	測定可	直径10mm×長さ100mm程度 (ペンシルタイプ)

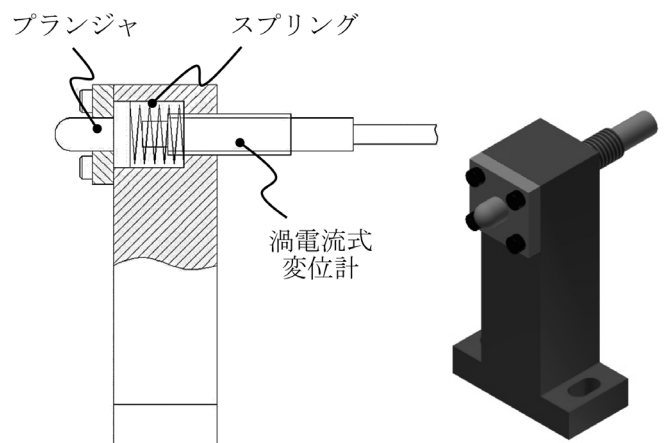


図1 変位測定ユニット

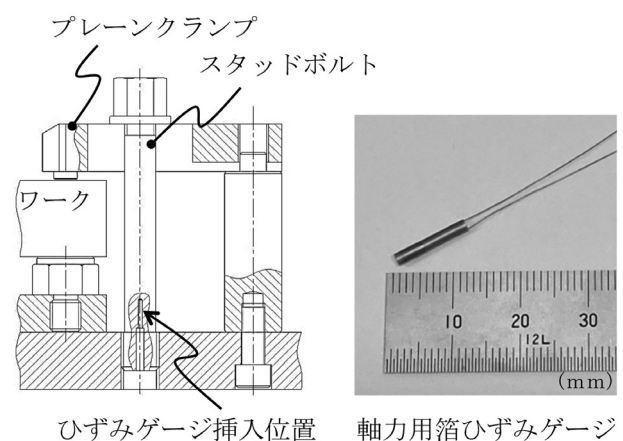


図2 クランプ力の測定

### 2.3 切削実験

切削実験に用いるワークは幅 200 mm、長さ 200 mm、厚さ 40 mm のステンレス鋼板 (SUS304) とした。SUS304 はチタン合金と同様に熱伝導率が低いことに起因する難削性をもった材料であるとともに、残留応力開放によるひずみの問題も生じやすい材料である。図3にワークの加工形状を示す。加工形状は切りくずの噛み込みトラブルが生じやすい掘り込み形状とし、壁面および底面はひずみが顕著に表れるように板厚 3.0 mm の薄肉形状とした。

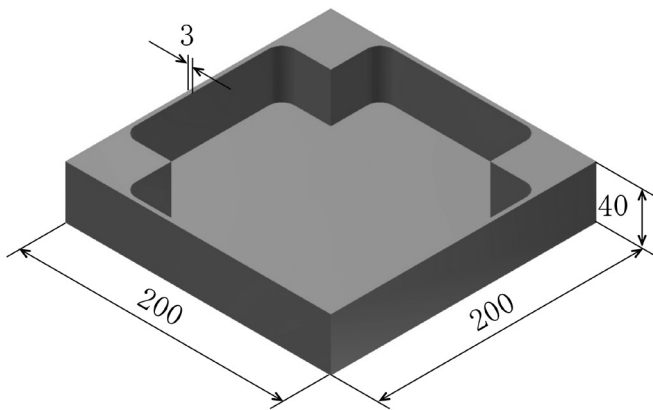


図3 ワーク加工形状

変位測定ユニットおよび軸力用箔ひずみゲージを組み込んだワーク固定ジグを図4に示す。変位測定ユニットはワーク側面の4か所とワーク底面の1か所の計5か所に配置した。軸力用箔ひずみゲージを挿入したスタッドボルトはワーク角部の4か所に配置した。

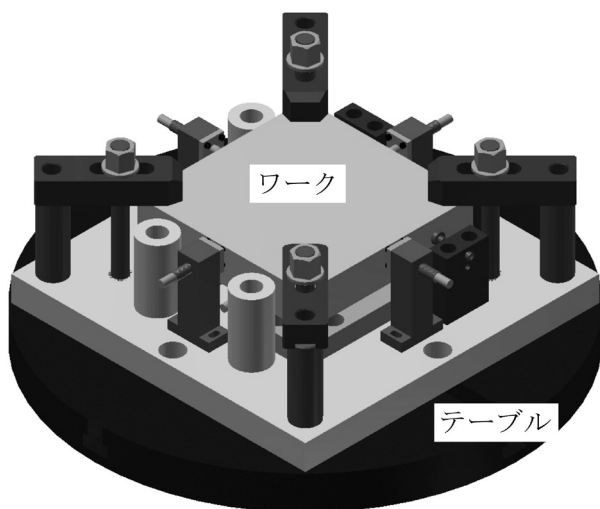


図4 ワーク固定ジグ

切削音を集音するためのマイクロホンは、マシニングセンタ機内のクーラントのしぶきが当たらない位置

に配置し、マシニングセンタの振動が伝わらないように緩衝材を介して取り付けした。加速度計は主軸頭にマグネットで取り付けした。マイクロホンと加速度計の設置状況を図5に示す。

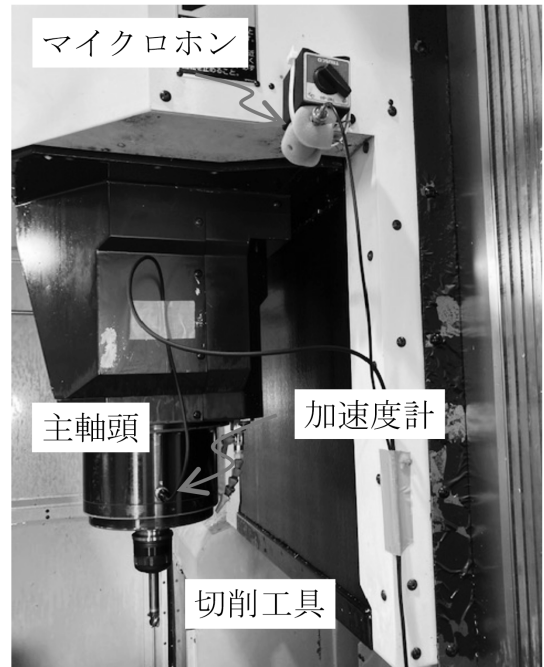


図5 マイクロホンおよび加速度計の設置状況

切削実験の条件を表4に示す。使用工具は直径 16 mm の4枚刃エンドミルでヘッド交換式を採用した。軸方向切込みは 9.25 mm とし、1個のワークを4層に分けて掘り込み加工していく。1層の加工時間は約60分である。1層加工するごとに工具の刃先状態をマイクロスコープで観察した。

マイクロホンおよび加速度計のサンプリング速度は 10kHz とした。

表4 実験条件

被削材	SUS304(未焼鈍材、焼鈍材)
使用工具	三菱マテリアル ヘッド交換式エンドミル IMXC4HV160R05016
工具径	φ 16 mm
刃数	4
工具突出し	80 mm
工具回転数	1200 min <sup>-1</sup>
送り速度	345 mm/min
軸方向切込み	9.25 mm
径方向切込み	1.3 mm

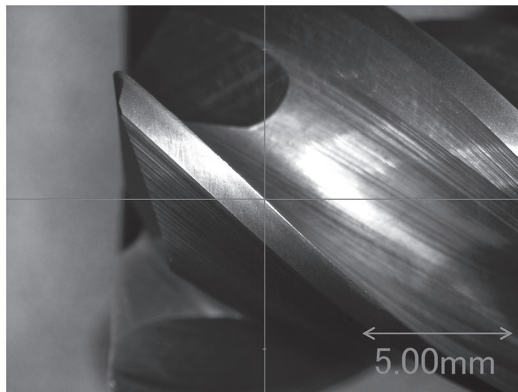


### 3. 結果と考察

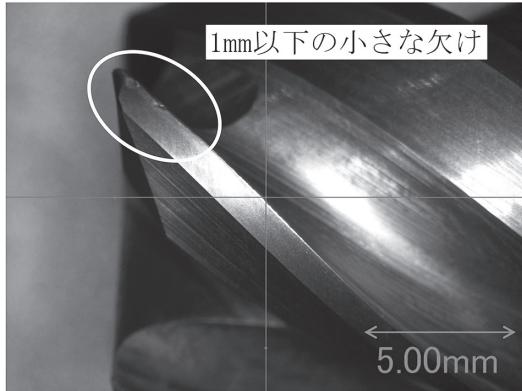
#### 3.1 工具状態のラベル付け

AI 技術を活用した解析によって、マイクロホン等の信号から工具異常を見える化する。解析においては教示データとして、工具にチップング等がない正常状態の信号情報と、チップング等がある異常状態の信号情報を与え、AI に学習させる必要がある。

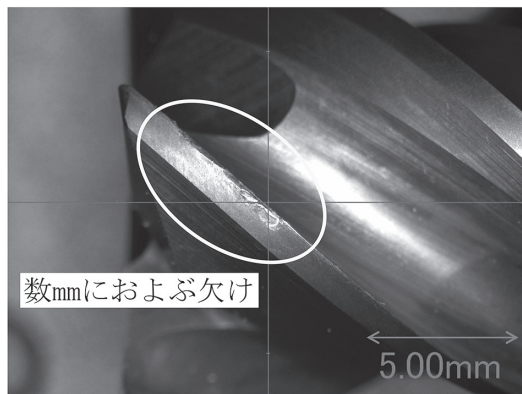
マイクロスコープを用いて工具の刃先状態を観察し、正常状態、遷移状態、および異常状態の3つにラベル付けした。各状態の刃先観察画像の一例を図6に示す。



(a) 正常状態



(b) 遷移状態



(c) 異常状態

図6 工具状態のラベル付け

#### 3.2 オートエンコーダによる工具異常の見える化

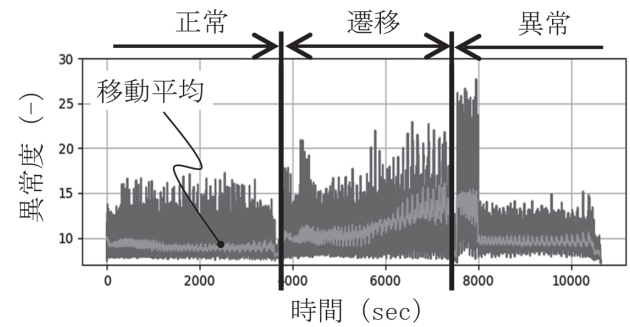
正常状態の各種信号情報を教示データとするオートエンコーダによる異常検知を用いて、工具異常の見える化の検討を行った。

具体的には、マイクロホン信号と加速度計信号をそれぞれ単独データとして学習させた場合と、同時に学習させた場合の異常度とどのような変化がみられるかの実験を行った。

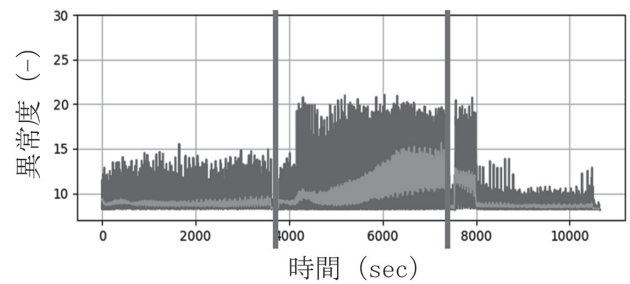
解析に用いた実験データは、観察した刃先状態を基に表5のとおりラベル付けした。解析結果を図7に示す。

表5 実験データのラベル付け

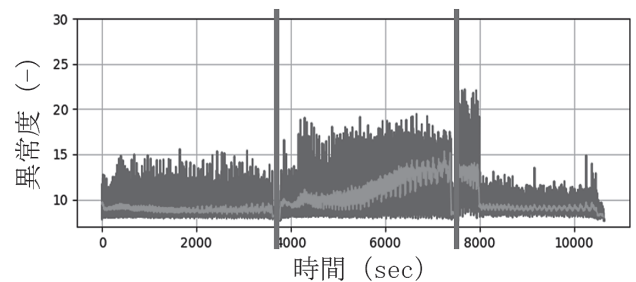
ラベル	正常	遷移	異常
層	1~3	4	5



(a) マイクロホン信号のみの解析結果



(b) 加速度計信号のみの解析結果



(c) マイクロホンと加速度計を併用した解析結果  
図7 オートエンコーダの解析結果

図中の異常度は1秒毎のデータを解析して得られた結果である。また、移動平均は25秒の単純移動平均の値である。

マイクロホン信号および主軸頭に取り付けた加速度計信号に対して、オートエンコーダによる異常検知を用いた結果、いずれの信号においても遷移状態とラベル付けした4層目の加工時において異常度の増加が確認できた。また、マイクロホン信号と加速度計信号を併用した解析においても同様の結果を得ることができた。しかし、異常状態とラベル付けした5層目の加工時においては、加工途中から異常度の低下が確認された。これは切削音の特徴が急激に変化したことを意味しており、このタイミングで工具のチップングが大きく進行したと考えられる。

### 3.3 ワークひずみの見える化

ひずみが大きいとされる未焼鈍材とひずみが小さいとされる焼鈍材のワークを4層加工した際のスタッドボルトに加わる軸力、および変位計により測定した壁面と底面の変位を図8および図9に示す。未焼鈍材においては、各センサの信号が大きく変化しているが、焼鈍材においては各センサ信号の変化が抑えられており、加工中のワークひずみを定量的に捉えることができた。また、いずれのセンサもクーラント環境および切りくず堆積環境で使用できることが確認できた。

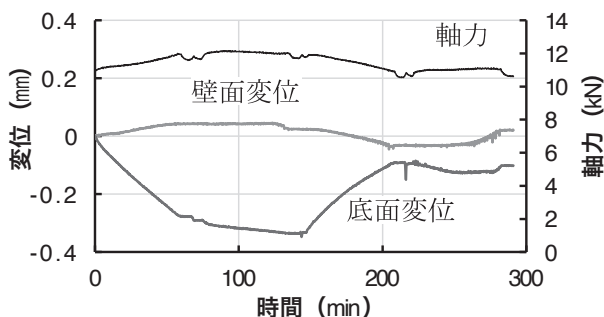


図8 軸力および変位の変化 (未焼鈍材)

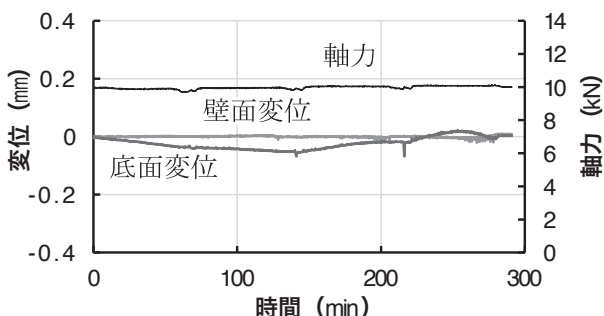


図9 軸力および変位の変化 (焼鈍材)

## 4. 工具異常のリアルタイム表示システム

工具異常の見える化に用いる信号は、ナショナルインスツルメンツ社製の計測システム (cDAQ-9185) とプログラミングシステム (LabVIEW) を用いて計測した。計測データは LAN ケーブルを通じて PC に送られ、任意のサンプリング周波数と計測時間で csv ファイルとして同 PC のフォルダ内に保存される。この保存された csv ファイルを用いて Python がオートエンコーダによる異常検知を行い、異常検知の結果は Global Common と呼ばれる共有メモリを通して LabVIEW 内で表示する。図 10 に示すように異常度の値を折れ線グラフで常に確認できるとともに、取得した異常度の値が予め設定した閾値より大きい場合にはアラームメッセージを出力することができる。

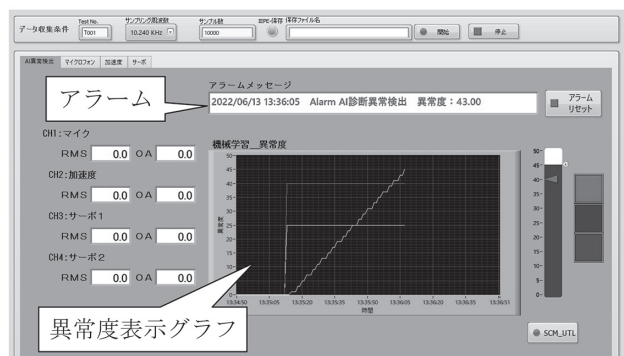


図10 リアルタイム表示システム

## 5. 結言

加工トラブルを予測する智能化ワーク固定ジグの開発に取り組み、以下の結果を得た。

- 1) マイクロホン信号と加速度計信号を教示データとしたオートエンコーダによる異常検知を用いて、加工に伴う工具異常の進行を見える化することができた。
- 2) 軸力用箔ひずみゲージを挿入したスタッドボルト、および渦電流式変位センサを用いた変位測定ユニットにより、加工中のワークひずみを見える化することができた。
- 3) オートエンコーダによる異常検知を用いた工具異常のリアルタイム表示システムを開発した。

## 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, 瀧内, 三木: 長崎県工業技術センター研究報告, No.50, pp.1-4, 2021.