

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02051

研究課題名（和文）切削シミュレーションと多層型ニューラルネットワークを併用した残留応力評価システム

研究課題名（英文）Residual stress analysis by neural network incorporating cutting simulation

研究代表者

松村 隆（Takashi, Matsumura）

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20199855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,900,000円

研究成果の概要（和文）：アルミニウム合金とチタン合金のドリルによる穴加工について、切削シミュレーションとニューラルネットワークを併用した残留応力評価システムを開発した。まず、切削条件と工具形状が切削力および残留応力に及ぼす影響を調べた。また、穴の深さ方向に対して軸方向および円周方向の残留応力が変化することを明らかにした。シミュレーションではリップの最外周部の切削分力を解析する。一方、バックテーパ角度とマージン幅が残留応力に及ぼす影響パラメータをニューラルネットワークによって推定する。これらを入力情報とするニューラルネットワークによって、残留応力を精度よく推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

切削加工の残留応力に関する学術的研究は古くから進められているが、それらの多くは切削試験に基づいた定性的な議論にとどまっている。本研究課題では、ドリル切削に対するシミュレーションによって、穴の内周面に対して切れ刃の最外周部による負荷を解析し、これに基づいて定量的に残留応力を推定することが可能となった。また、開発した推定システムは単に平均的な残留応力を推定するのではなく、穴の深さ方向に対して残留応力分布を推定できる。このことは、これまでの研究では試みられていなかった成果である。この推定システムにより、所定の残留応力に対して、ドリル形状と適用できる切削条件を明示することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：An estimation model of residual stress in drilling is proposed with a hybrid system that consists of analytical prediction and multilayered neural network. The cutting tests were conducted to investigate the effects of cutting conditions and tool geometry on residual stress in drilling of aluminum alloys and titanium alloys. Because the circumferential and axial residual stresses change with the cutting force in the depth of hole, the developed system analyzes the force components at the end of lip, which apply the load on a surface of the hole. Meanwhile, the effect of the back taper angle and the margin width of the drill on the residual stress are characterized in a neural network. Then, another neural network associates the residual stresses with the force components and the effect parameters of the back taper angle and the margin width. The developed system successfully estimates the residual stress in terms of mechanical effect.

研究分野：生産工学

キーワード：切削 残留応力 シミュレーション 機械学習 ニューラルネットワーク 切削力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機産業では、近年の燃料価格の高騰や環境負荷の低減に対する要求により、燃費の観点から機体の構造用部材の軽量化が図られている。2011 年から運行を開始しているボーイング 787 では、軽量で耐腐食性の優れた複合材料である CFRP と比強度が優れているチタン合金の使用割合が増えている。このように胴体や主翼の部材は複合材料に置き換わっているが、主翼内部の補強部品には強度の観点からアルミニウム合金が使用されている。

航空機の組立てにはドリルによる穿孔作業が多いが、疲労寿命の観点から穴内周面には圧縮の残留応力を付与することが要求されている。このような残留応力は、切削条件や工具形状、さらには、摩耗による工具形状の変化に依存するため、これらを制御すること課題となっている。

一方、切削加工における残留応力の学術的研究は古くから進められているが、それらの多くは切削試験に基づいた定性的な議論にとどまっている。いくつかの試みとして、有限要素法によって切削過程の残留応力を解析した例もあるが、その対象は二次元切削のような簡単な様式に対するものであり、上記のような穿孔作業に対する試みはない。これは、ドリルの切削状態を精度良く解析できるシミュレーションがなかったためである。そのため、シミュレーションに基づき、ドリルによる切削に対して残留応力を定量的に推定することが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、航空機 B777-X の主要母材であるアルミニウム合金、B787 で使用率の高いチタン合金のドリルによる穴加工を対象とし、切削シミュレーションと多層型ニューラルネットワークを併用して、穴の内周面の残留応力分布を定量的に推定できるシステムを開発する。研究は以下の 3 つの課題について推進する。

【課題 1】ドリルの切削に対してシミュレーションを開発し、切削状態を解析する。実測の切削力から、モデリングフィルタによって特徴量を抽出し、解析に必要な切削データを取得する。

【課題 2】シミュレーションで得られた解析結果を多層型ニューラルネットワークの入力情報とし、残留応力を推定する。

【課題 3】ニューラルネットワークの機械学習において、切削現象の観点から物理的に妥当な参照データを抽出するモデリングフィルタを開発し、システムの信頼性を向上させる。

3. 研究の方法

3.1 切削試験

図 1 のようにマシニングセンタ(牧野フライス製作所・V33i)で、直径 10 mm、先端角 120°、ねじれ角 30°のツイストドリルにより、アルミニウム合金(A7075)とチタン合金(Ti6Al4V)を表 1 の条件で切削した。ただし、切削速度については切れ刃の最外周部の速度を示している。

ドリルの切れ刃は、図 2 のようにチゼル、シンニング、リップで構成される。チゼルとシンニングはドリルの進行方向を制御し、リップは材料を除去して切りくずを生成する。また、フルート部は切りくずの流れを制御する。一方、切れ刃の側面にはマージンがあり、穴の内周面との接触によりドリルの振れを抑制する。この接触する領域をドリルの軸の上方に向かって傾斜させて制御しているのがバックテーパである。したがって、内周面の仕上げは、リップの最外周部の切削特性、ドリル側面との接触に關与するマージンの幅とバックテーパの角度によって制御される。本研究では、穴の内周面の残留応力に対する工具形状の影響を評価するため、バックテーパ角度 0.02、1.00°、マージン幅 0.1、1.0 mm の 4 つ形状のドリルを用いた。

また、切削力は図 1 の 4 成分圧電型動力計(Kistler・9272)をテーブルに固定し、治具を介して被削材を保持してスラストとトルクを測定した。

3.2 切削シミュレーション

ドリルによる穿孔過程に対して、最小切削エネルギーに基づいて切りくず生成をモデル化するエネルギー解析法を適用し、切削力を解析した。図 3 はドリルの切削過程における切りくず生成モデルである。工具の高さに対する切れ刃の形状の変化を考慮するため、解析では切れ刃を微小分割する。そして、それぞれの微小切れ刃に対して切削方向と切りくず流出方向を含む面内で二次元切削を重ね合わせ、三次元的に流出する切りくず生成過程をモデル化する。そこで解

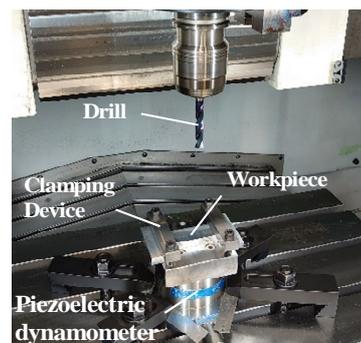


図 1 切削試験

表 1 切削条件

Material	A7075	Ti-6Al-4V
Thickness	10 mm	
Cutting speed	50, 100 m/min	10, 20 m/min
Feed rate	0.01, 0.05, 0.10 mm/tooth	
Cutting fluid	None	

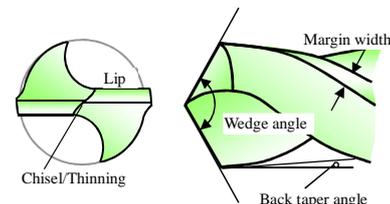


図 2 ドリル形状

析には、次式の二次元切削データが必要となる。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= f(V, t_1, \alpha) \\ \tau_s &= g(V, t_1, \alpha) \\ \beta &= h(V, t_1, \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 ϕ 、 τ_s 、 β はせん断角、せん断面せん断応力、摩擦角であり、 V 、 t_1 、 α は切削速度、切削厚さ、工具のすくい角である。切りくず流出方向を仮定すると、式(1)から切削方向と切りくず流出方向を含む面内で消費されるせん断仕事とすくい面の摩擦仕事に基づき、その流出方向での切りくず生成に対する切削エネルギーが得られる。そして、実際に生成する切りくずは切削エネルギーが最小となる方向に流出するとして、切りくず生成モデルを決定する。式(1)は二次元切削試験により得られるが、本研究ではドリル切削による二、三の試験で測定された切削力を参照して、逆解法によって式(1)を得る。このように実際の切削事例から、一度、シミュレーションに必要な基礎データを得られれば、他の切れ刃形状や切削条件についても切削力を予測できる。

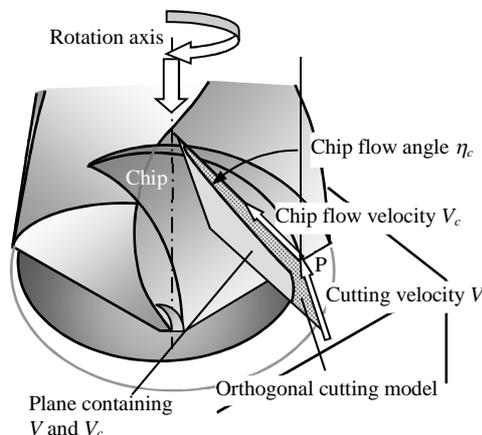


図3 切りくず生成モデル

3.3 残留応力特性試験

残留応力は測定対象とする試験片に二次加工をすると、その影響を受けることがある。したがって、穿孔後に二次加工をせずに残留応力を測定することが望ましい。しかし、本研究で適用している $\cos \alpha$ 法による X 線応力測定では、そのままでは穴の内部に X 線を照射できない。また、穴の入口と出口部でも、照射した X 線に対して円錐状に放射される回折 X 線が内周面や縁部と干渉する。この測定法は回折 X 線によるデバイ・シェラー環のずれによって残留応力を推定する方法であるため、放射 X 線の情報が得られないと精度の高い測定ができない。そこで、本研究では、図 4(a)のように穴を直径の 3/4 まで切断し、X 線残留応力測定機(パルステック工業・μ-360)によって、同図(b)のようにドリルの送り方向の穴の入口、中央、出口部の残留応力を測定した。

ここで穴の切断が残留応力の測定値に及ぼす影響を調べるために、チタン合金を切削速度 10 m/min、送りを 0.01 から 0.1 mm/tooth まで変化させて直径 10 mm の穴を穿孔し、試験片を作成した。図 5 は穴を切断せずに軸方向の残留応力を測定した場合と、穴の直径の 3/4 を切断した試験片の測定値を比較したものであるが、両者には大きな違いがない。また、切断した試験片の方がばらつきは小さく、測定精度が高い。なお、穴を切断しない試験片では、穴の入口や出口部における円周方向の残留応力が測定できなかった。

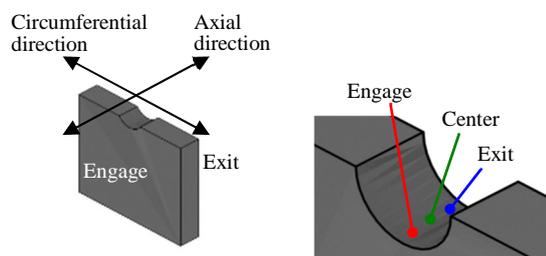


図4 試験片の切断と観察方向

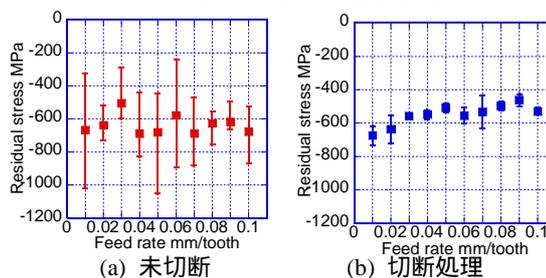


図5 試験片切断が残留応力に及ぼす影響

4. 研究成果

本研究課題ではアルミニウム合金とチタン合金を対象としているが、以下では、アルミニウム合金の切削を例として、開発した残留応力予測システムについて述べる。

4.1 切削シミュレーションによる切削力解析

図 6 はバックテーパ角度 1.0° 、マージン幅 0.1 mm のツイストドリルを使用し、アルミニウム合金に対して、回転数 1592 rpm、ドリルの外周の切削速度 50 m/min、工具 1 回転あたりの送り 0.2 mm/rev、一切れ刃あたりの送り 0.1 mm/tooth で穿孔した時の切削力の測定値とシミュレーションの結果である。同図は、横軸は送りと切削時間によって換算した穴の深さで表示している。

ドリルによる穿孔過程では、O でチゼル部が材料に食いつき、O-A でシンニング部が材料に侵入し切削力が増加する。その後 A-B で工具の送りとともにリップ部が侵入し、切削領域が切れ刃上部まで広がる。リップ部のすくい角はシンニング部のそれより大きいので、切削領域の変化に対する切削力の増加率は O-A より低い。次に、B-C でチゼル、シンニング、リップ部の全切れ刃が材料

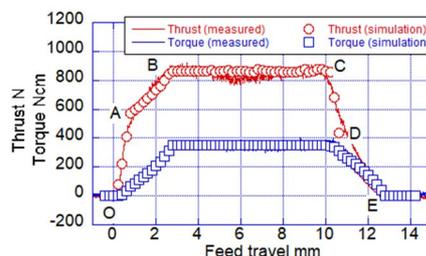


図6 切削シミュレーション

を除去する。この過程では切削領域が変化しないため、切削力が一定となる。C-D ではチゼル・シンニング部が材料の裏面から抜けて切削力が急激に下がる。その後、D-E でリップ部が抜けて、徐々に切削力が下がる。

ドリルによる切削力の変化に基づき、シミュレーションに必要な基礎データを実測と解析結果との誤差が最小となるように、反復最適化手法によって同定した。なお、解析モデルではバックテーパ角度とマージン幅に依存する逃げ面と材料との接触を考慮できないため、それらの影響が最も小さい工具として、バックテーパ角度 1.0°、マージン幅 0.1 mm の工具による切削力を参照した。ここで、実際の切削では必ずしも安定した切りくずが生成されているわけではない。そのため、切削力の一連の変化を参照データとすると、切りくず生成における外乱も含めた状態で基礎データを同定することになる。そこで、切削力の変化に対する特徴量を抽出するモデリングフィルタとして、同図の A 点、A-B の増加率、B-C の平均値を参照し、基礎データを同定した。

図 6 の記号で示したものがシミュレーションにおける切削力の変化であり、それらは実測のそれとほぼ一致していることから、モデリングフィルタと同定された基礎データの妥当性が確認できる。

4.2 ドリル切削の残留応力

アルミニウム合金の穿孔過程において、穴の深さ方向に対する残留応力分布を測定した。図 7 は、一例として、バックテーパ角度 0.02°、マージン幅 1.0 mm のドリルで、回転数 1592 rpm、送り 0.2 mm/rev で穿孔した穴の深さ方向の残留応力である。なお、同図には後述の切削力と関係づけるために、切削力の変化も記している。ドリルの先端が材料に食いついてから裏面に到達するまでは残留応力に大きな変化はないが、先端が材料から抜け出した後から残留応力が圧縮の傾向になる。

残留応力に対する力学的な寄与を考えると、ドリルによる穿孔ではリップの最外周部が穴の内周面を仕上げるため、残留応力をこの部分の切れ刃が仕上げ面に作用する力とその方向に基づいて推定する。切削試験ではドリル全体に負荷するスラストとトルクを測定するが、穴の内周面に対して最外周部の切れ刃の負荷を推定することは困難である。これは、ドリルは切れ刃の各位置で半径方向すくい角および切削速度が異なり、単純な応力分布にはならないためである。一方、シミュレーションでは、切れ刃を分割し微小切れ刃に負荷する力を積分して切削力を得ている。そこでリップの最外周部の切れ刃要素に負荷する力と残留応力の関係を調べた。

図 8 はリップの最外周部の切れ刃要素に関して、切れ刃に対して図 9 の方向に負荷する分力を示したものである。また、同図に工具軸方向に対する切りくず流出方向の傾き角度を示す。切れ刃が材料に食いついてから、チゼル・シンニング部が材料から抜ける直前までは切りくず流出角度が小さく、切りくずが上方に流れている。しかし、チゼル・シンニング部が材料から抜けると、すくい角の大きいリップ部では切りくず流出角度が大きくなり、半径方向に傾く。図 9(b) は切れ刃に負荷する反力として穴の内周面に負荷する力である。なお、 F_T は図 8 より負値である。穴の出口部では切りくず流出方向の変化とともに、穴の半径方向に負荷する力が増加し、図 7 のように残留応力は圧縮側に移行する。

図 10 は穴の内周面に負荷する力とその方向に対して、ドリルの侵入部、中央部、出口部での軸方向の残留応力を示したものである。負荷する力とその方向は次式で得る。

$$\left. \begin{aligned} R_{axial} &= \sqrt{F_V^2 + F_T^2} \\ \theta_{axial} &= \tan^{-1}(F_V/F_T) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

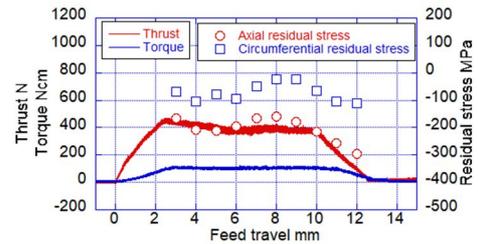


図 7 残留応力分布と切削力

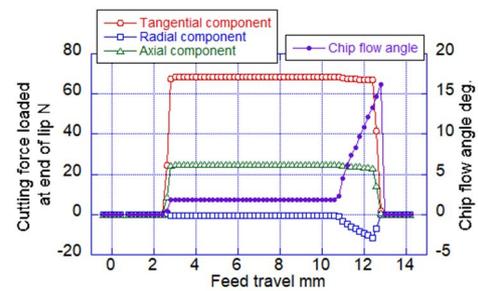
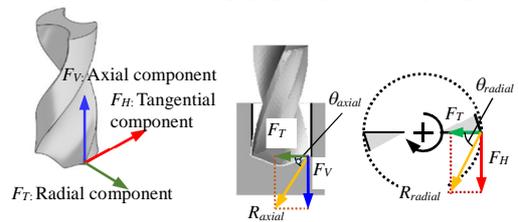
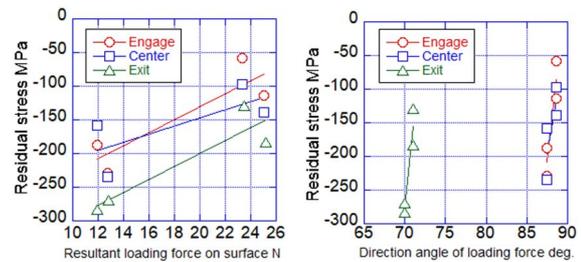


図 8 リップ端部の切削力と切りくず流出角



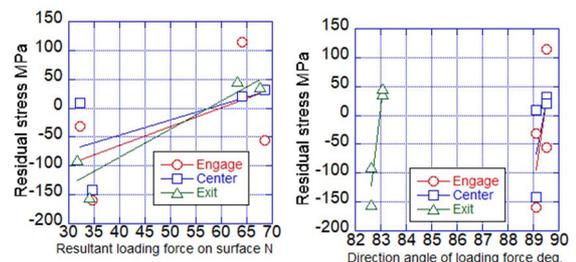
(a) 切れ刃の負荷力 (b) 内周面の負荷力

図 9 リップ端部の切削分力



(a) 切削合力 (b) 切削力方向角度

図 10 軸方向の残留応力と負荷力の関係



(a) 切削合力 (b) 切削力方向角度

図 11 円周方向の残留応力と負荷力の関係

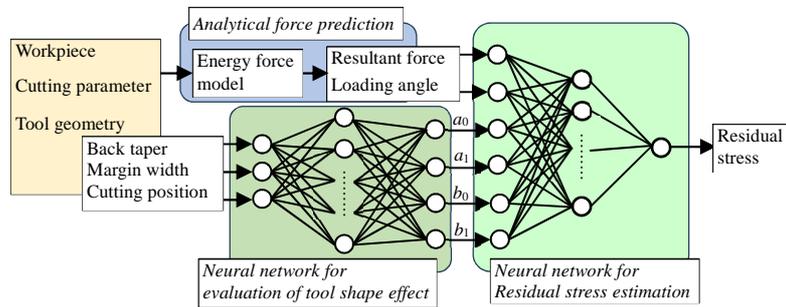


図 12 残留応力推定システム

図 11 は円周方向の残留応力に対する結果であり、負荷する力とその方向は次式で得る。

$$\left. \begin{aligned} R_{radial} &= \sqrt{F_H^2 + F_T^2} \\ \theta_{radial} &= \tan^{-1}(F_H/F_T) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これらはバックテーパ 1° 、マージン幅 0.1 mm の結果であり、同様の結果を切削試験で用いたそれぞれの工具のバックテーパ角度とマージン幅に対しても得られる。

切りくず流出方向は図 8 のように変化するため、材料に負荷する力とその方向に対して、穴の入口、中央、出口部の残留応力特性を整理する。測定される残留応力からはある程度の傾向があるものの、ばらつきを有しているため、同図を次式のように線形回帰分析する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{res,axial} &= a_0 + a_1 R_{axial} \\ \sigma_{res,axial} &= b_0 + b_1 \theta_{axial} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{res, circumferencial} &= c_0 + c_1 R_{radial} \\ \sigma_{res, circumferencial} &= d_0 + d_1 \theta_{radial} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

a_i, b_i, c_i, d_i ($i=0, 1$) は回帰分析によって得られる係数であり、これらの 8 つパラメータによって、バックテーパ角度とマージン幅が軸方向と円周方向の残留応力に及ぼす影響を定量化した。

4.3 残留応力推定システム

図 12 は開発したドリル切削における残留応力推定システムであり、軸方向と円周方向の残留応力のそれぞれに対して構成する。同図のシステムは、解析とニューラルネットワークを併用したハイブリッド多層型ニューラルネットワークである。まず、切削条件と工具形状に基づいて切削力解析をして、リップ端部に切削分力を求める。次に、工具形状としてバックテーパとマージン幅が残留応力に及ぼす影響を定量化するために、軸方向に対しては式(4)、円周方向に対しては式(5)の係数をニューラルネットワークによって推定する。これによって、リップ端部の力学的特性と工具形状の影響を得る。これを入力として、ニューラルネットワークによって残留応力を推定する。

図 13 は開発したシステムによって推定した残留応力と実測とを比較したものである。同図では横軸が測定値、縦軸がシステムの推定値である。 45° の直線上にデータが分布していることから、開発システムが実際の残留応力特性を推定できていることがわかる。

4.4 結論

- (1) 開発したシステムにより、ドリルによる穿孔過程のスラストとトルクを解析できる。実際の切削作業で測定された切削力から解析に必要な基礎データが取得できる。
- (2) 穴の内周面の軸方向および円周方向の残留応力は深さ方向に分布を有し、ドリルの中心が材料裏面を貫通した後、切りくず流出が半径方向に傾き、出口部において圧縮側に変化する。
- (3) ドリルのバックテーパ角度とマージン幅が残留応力に及ぼす影響は、リップの最外周部に負荷する切削力とその方向に対する残留応力の線形回帰分析により定量化できる。
- (4) 切削力解析で得られるリップの最外周部の切削分力、バックテーパ角度とマージン幅が残留応力に及ぼす特性を入力とするニューラルネットワークによって、残留応力を精度良く推定できる。

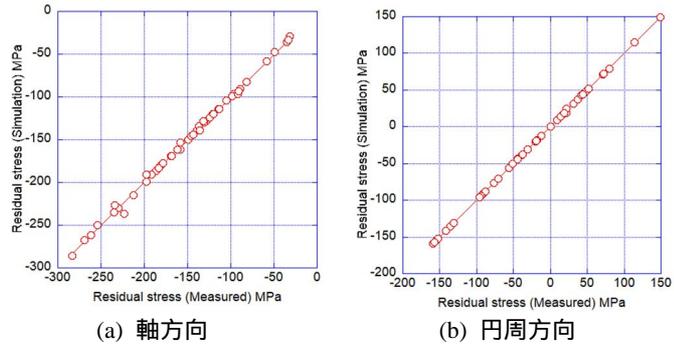


図 13 残留応力の推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoichi Tamura, Takashi Matsumura	4. 巻 926
2. 論文標題 Cutting Force in Drilling with Flat Bottom Drill	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 1636-1642
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/p-0dz21w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 松村 隆	4. 巻 124
2. 論文標題 加工におけるCAEとAIの使いこなし	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 10-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 松村 隆	4. 巻 65
2. 論文標題 加工の知能化技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 171-174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shoichi Tamura, Kodai Sekigawa, Takashi Matsumura	4. 巻 15
2. 論文標題 Monitoring of Tool Wear Distribution With Cutting Force Measurement in Drilling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2021jamdsm0047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Matsumura, Satoshi Arakawa, Shoichi Tamura	4. 巻 ISFA2020-9633
2. 論文標題 Study on Adhesion With Stress and Temperature in Drilling of Aluminum Alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2020 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2020)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isfa.2018.258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 難削材加工のための切削の基礎と応用
3. 学会等名 精密工学会 第426回講習会「難削材とその加工技術 - 加工の基礎から知能化まで」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 ドリル切削のシミュレーション
3. 学会等名 切削加工基礎講座(実践編), 精密工学会切削加工専門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Matsumura
2. 発表標題 Complementary hybrid CAE with AI in machining process simulation
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 シミュレーションとAIを応用した切削過程の予測と評価
3. 学会等名 精密加工研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Matsumura
2. 発表標題 Advanced Machining for Difficult-to-cut Materials
3. 学会等名 International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing (PRESM2022), Korean Society for Precision Engineering（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 ドリル切削のシミュレーション
3. 学会等名 切削加工基礎講座(実践編), 精密工学会切削加工専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 切削加工のデジタル化に向けた基礎から応用
3. 学会等名 日本キスラー・切削加工技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 シミュレーションを活用したものづくりのプロセスアナリシス シミュレーションや経験と仲良くなる方法
3. 学会等名 日本機械学会No. 20-58 講習会「デジタルツインを活用したものづくりの今とこれから」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松村 隆
2. 発表標題 難削材加工の切削シミュレーション ドリル切削のシミュレーションとその応用
3. 学会等名 日本機械学会RC288・第1回研究分科会(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関