

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05716

研究課題名(和文) 切削過程の過酷な変形場に着目した材料の極限環境下の動的変形特性推定システムの構築

研究課題名(英文) Development of a prediction system of material dynamic behavior under severe deformation condition by considering the deformation state of the cutting

研究代表者

篠塚 淳 (SHINOZUKA, JUN)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30282841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：切削過程のせん断域の過酷な変形場を推定することで、高ひずみ、高ひずみ速度、高温の変形場における材料の流動応力特性を把握するシステムを提案した。これは被削材材料の加工硬化係数を未知数として切削過程のFEM解析を行い、FEM結果が、設定した境界条件(切りくず形状、切削力、切りくず自由表面側の温度分布、工具-切りくず接触域の温度分布)を満足するよう、流線に沿った加工硬化係数を見出すことで、せん断域の変形場を推定するものである。本研究では、提案する流動応力推定システム構築において最も重要な切りくずの工具との擦過面を含めた表面全域の温度分布を把握する手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：This research has proposed a prediction system of the flow stress property of metals by analyzing cutting phenomena. In the system, the shape of chip, cutting forces and the temperature distributions on the chip back face and the chip free surface are prepared as the boundary conditions. Then, a FEA of metal cutting is conducted considering that the work hardened coefficient is unknown. By adjusting the work hardened coefficient to agree the result of the FEA with the boundary conditions, the flow stress property will be obtained. This study developed the most important system to work the system proposed, which is to establish a system of grasping the temperature distributions on the chip back surface and the chip free surface.

研究分野：工学(機械工学・生産工学・加工学)

キーワード：切削 温度 切削力 切りくず 計測 流動応力 FEM

1. 研究開始当初の背景

材料の高温、高ひずみ、高ひずみ速度の変形場での動的変形特性を詳細に把握することは、高速飛行体、ジェットエンジンやガスタービンなど極限環境下で使用する機械部品の設計をするためのほか、これら部品を高性能かつ高効率に切削加工する条件を CAE 技術で探索するため、さらには、極限環境下での動的変形特性に優れた新素材を開発するために、極めて重要である。

高温、高ひずみ、高ひずみ速度下の動的変形特性(流動応力特性)を把握する試験方法として、Hopkinson 棒型衝撃試験法がある。Hopkinson 試験では、温度とひずみ速度を一定にした条件下で、ひずみに対する流動応力の変化を把握するために、ストップリングにより 1 回の試験でのひずみ量を微小に制限し、ひずみ増分を積算する形式の繰り返し衝撃試験をする必要がある。Hopkinson 試験では、試験片の大きさにもよるが、通常は、最速でひずみ速度  $10^3$  1/s 台までの流動応力特性しか把握できない。さらに、高温領域での試験では、毎回、試験前に急速加熱し、試験後に急冷する必要がある。急速加熱や急冷中、また繰り返し試験の間の時間経過により、材料が回復や再結晶を起こし機械的特性が変化する場合があり、求めたい流動応力特性を把握できていないという問題が発生し得る。このことより、高温、高ひずみ、高ひずみ速度下の動的変形特性(流動応力特性)を詳細に把握できる別の試験法の確立が求められている。

そこで本研究では、切削過程の被削材のせん断領域の過酷な変形場に注目する。切削は、大規模なせん断塑性変形により材料の一部を除去する。二次元切削モデルを適用すれば、せん断ひずみ速度は、切削速度に比例し、切り取り厚さに反比例する。せん断角は、切りくず厚さを計測することで算出できる。切削速度 100 m/min、切込み深さ 2.5 mm、送り量 0.25 mm/rev の通常の切削条件で丸棒を外周旋削した場合でも、せん断域のせん断ひずみ速度は

最速で  $10^4 \sim 10^5$  1/s 程度と、Hopkinson 試験より 1 桁から 2 桁高いひずみ速度の変形場が実現することになる。

切削過程のせん断域の変形場を申請者が開発した切削 FEA で解析した例を図 1 に示す。FEA に導入する流動応力特性式は、解析の予測精度に大きな影響を与える。この例では、膨大な実験により得られた青熱脆性特性をも考慮した流動応力式を採用している。同図のように、せん断域は切削開始後数秒で、複雑な分布形状となるが、高温、高ひずみ、高ひずみ速度の変形場となる。このような極限環境下の変形場を切削以外の材料試験で再現することは極めて難しい。なお、すくい角、切削速度や切り取り厚さを変えれば、温度やひずみ速度は変化する。つまり、変形場を、容易に多様に変化させることができるのも切削の特徴である。

2. 研究の目的

本研究では、切削の過酷な変形場に注目し、これを切削 FEA 技術を用いて詳細に抽出することで、従来の材料試験法では得られない、高温 ( $\sim 1200$  K)、高ひずみ ( $\sim 2$ )、高ひずみ速度 ( $10^4 \sim 10^5$  1/s) の変形場での動的変形特性を推定するシステムを構築することを目的とする。提案するシステムは、旋削試験で得られる諸データを境界条件とし、被削材の加工硬化特性を未知数として切削 FEA を実施し、切削 FEA の結果が境界条件を満足するまで、未知数の最適解を探索することにより、切削中のせん断域の変形場を推定するものである。推定した変形場より、変形条件と変形履歴に対する相当応力のデータを流線に沿って収集し、人工知能技術で統合して知識データベースを作成する。流線に沿った変形履歴の蓄積の際に、相変態等の影響も導入できる利点もある。この知識データベースを用いて、各種変形条件に対する動的変形特性を検討する。本システムは Johnson-Cook 式等の既存の流動応力特性式の各変数の値を同定するものではなく、切削を材料試験と捉える新しい手法であり、切削で実現する過酷な変形場を切削 FEA をうまく利用して抽出し、人工知能技術で知識データベースを構築し、モデル化された数式に当てはめることなく、材料の動的変形特性を把握するものである。

3. 研究の方法

本研究では以下の 3 フェーズで実施することを予定した。第 1 に、アルミニウム合金 A5056 を被削材とし、流れ型切りくずを生成する切削条件(切削速度 380 m/min、切込み深さ 2.5mm、送り量 0.20 mm/rev) で外周旋削を実施し、切りくず形状、切削力、切削温度を計測し、流動応力推定システムに必要な境界条件(切りくず形状、切削力、切りくずの工具との擦過面と自由表面の温度分布)を収集する。ここで、切りくず形状は切りくず厚さを計測し、また工具-切りくず接触痕を計測するこ

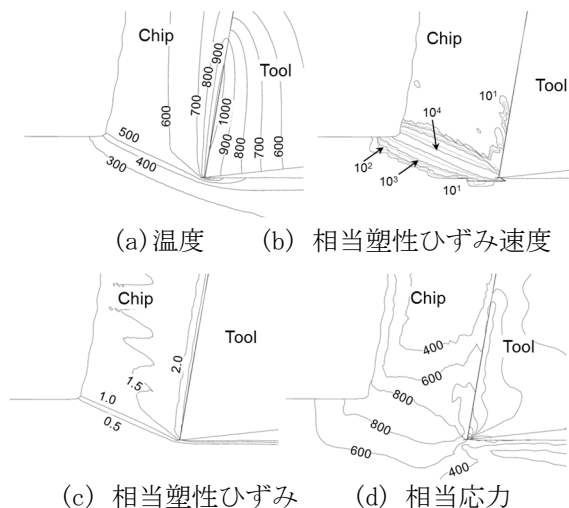


図 1 FEA 解析の例

とで収集できる。切削力は、市販のキスラー社製の3成分力センサーを2個組み込んだ自作の汎用旋盤用の動力計で計測できる。ここで、切りくずの工具-切りくず接触域の温度分布と、切りくずのせん断域を含む自由表面側の温度分布を詳細に計測する手法は確立されていない。そこで、本研究では、この温度分布収集システムに注力し研究を実施した。

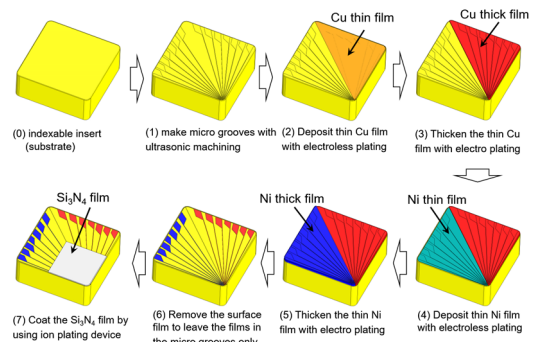
第2として、被削材の加工硬化特性を未知数として切削FEAを実施し、切削FEAの結果が境界条件を満足するよう、未知数を探索するシステムを検討する。第3として、境界条件を満足する切削FEAの結果を用いて、変形条件と変形履歴に対する相当応力の関係のデータを流線に沿って収集し、これらを人工知能技術で統合して知識データベースを構築するシステムを作成する。以上より、構築した知識データベースを用いて各種の変形条件下での流動応力特性を再現し、既存の流動応力特性のモデル式と比較することで提案するシステムの優位性を検証する。また、極限変形下での変形履歴や相変態等による物性の変化が動的変形特性に及ぼす影響を明らかにすることを試みる。

#### 4. 研究成果

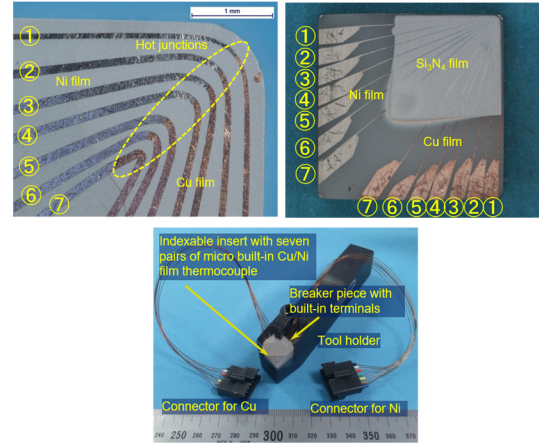
提案する流動応力推定システムの構築にあたり、確立すべき最も重要なことは、切りくずの工具との擦過面を含めた表面全域の温度分布の把握である。工具-切りくず接触域の温度は、これまでの研究(科学研究費補助金基盤研究(B)研究課題番号 22360059)で開発した、図2に示す工具すくい面上の刃先付近に7対のCu/Ni微細熱電対群を内蔵した工具を応用して把握した。

本微細温度センサ内蔵工具は、熱電対素子である銅とニッケル被膜を、工具すくい面上に形成した熱電対回路に合致した微細溝群の中に、無電解メッキと電気メッキで成膜する。両金属皮膜を成膜する際、高温接点部の位置は、マスクの形状により制御できるが、基本的には図2(b)に示すように、ある直線状に一次元的に位置することになる。このため1回の試験では、工具すくい面上のある直線上、例えば、切りくずの流出方向に沿った直線上、の温度分布は計測できるが、微細温度センサがすくい面上に二次元配置されていないので、すくい面の全域の温度を計測できない。そこで本研究では、マスクの位置を種々に変え、高温接点部の位置が異なる8種の微細熱電対内蔵工具を作成し、同一切削条件の下で、旋削試験を実施し、工具すくい面上の各所の温度を計測した。

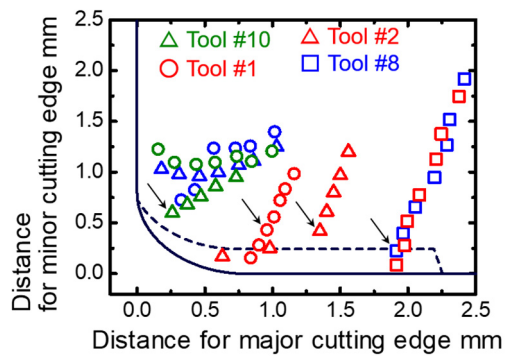
図3は、高温接点部の位置と、計測した温度の時間変化の例である。計測した温度は工具-切りくず接触域内を含めて全部で53箇所である。計測した温度は位置において離散的であるので、これらを統合し、すくい面全域の温度分布を計測する必要がある。そこで、本研究のフェーズ3の人工知能関連の研究の



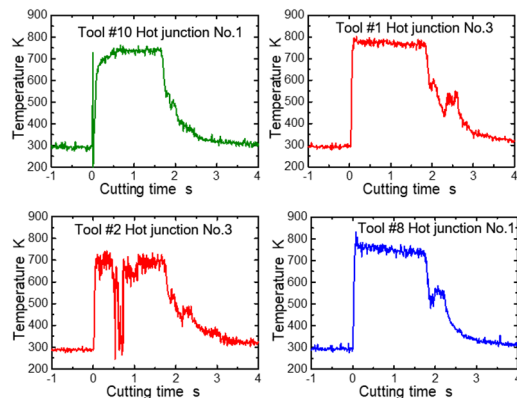
(a) 7対のCu/Ni微細熱電対群内蔵工具の作成方法



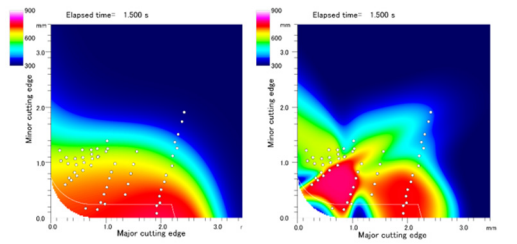
(b) 作成したCu/Ni微細熱電対群内蔵工具  
図2 7対のCu/Ni微細熱電対群内蔵工具



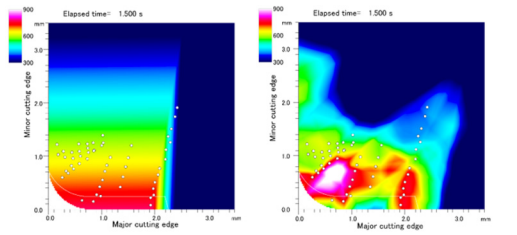
(a) 検討した高温接点の位置



(b) 計測した各位置の温度変化の例  
図3 計測した温度



3-3-3-1 3-50-50-50-50-50-1  
(a) sigmoid関数を適用した場合



3-4-3-1 3-50-50-50-50-50-1  
(b) ReLU関数を適用した場合

図4 切削時間1秒後の温度分布

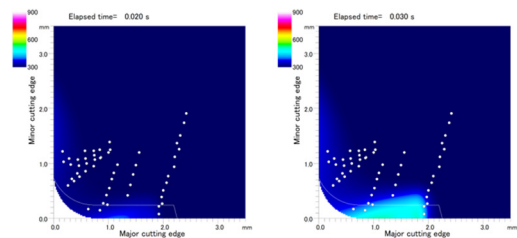
予備検討を含めてニューラルネットワークシステムの利用を検討した。まずは、従来からある教師データをバックプロパゲーションで学習させるニューラルネットワークを検討した。教師データセットは、53箇所の計測データの、すくい面上の位置と、切削時間(0.0s, 0.00 s, 0.05 s, 0.10 s, 0.50 s, 1.00 s, 1.50 s)における温度であり、全部で456セットである。なお、工具-切りくず接触域から十分に遠い位置の温度は、切削時間によらず室温(291.2 K)に固定した。ニューラルネットワークシステムでは、隠れ層の層数と、各隠れ層のニューロンの数、さらに、活性化関数が、その統合・予測精度に大きな影響を及ぼす。活性化関数は従来sigmoid関数が適用されてきているが、微係数が1.0でないため、層数が多くなると誤差の消失の問題が起こると言われている。そこで、微係数が1.0となるReLU関数が提案されている。本研究では、この活性化関数の影響も含めて学習精度について検討した。検討した隠れ層の数は、2~5層、各層のニューロンの数は3~50である。

図4は、検討した結果の例である。温度分布は、切削時間1秒後のものである。活性化関数がsigmoid関数でもReLU関数でも、隠れ層が増え、さらに各層のニューロンの数が増えると、過学習の影響が大きくなることが分かった。一方、隠れ層が少なく、各層のニューロンの数が少ない場合には、ReLU関数では、妥当な温度分布を予測できず、従来からのsigmoid関数の利用の方が、良い結果を得ることが分かった。そこで、本研究では、入力層の

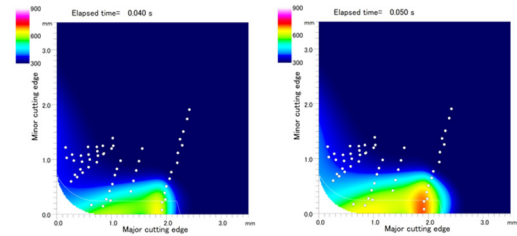
ノード数を3、隠れ層の層数を2、各層のニューロン数を4と3、出力層のノード数を1とし、活性化関数にsigmoid関数を用いたニューラルネットワークシステムを用いることにした。

図5は、このニューラルネットワークシステムで53箇所の計測データを統合した、切削開始からの工具すくい面全域の温度分布の変化である。切削開始から0.1秒後には、工具すくい面の温度はほぼ準定常状態に達していることが分かった。またこの温度分布により、切りくずの工具との擦過面の任意の位置の温度が把握できるようになった。

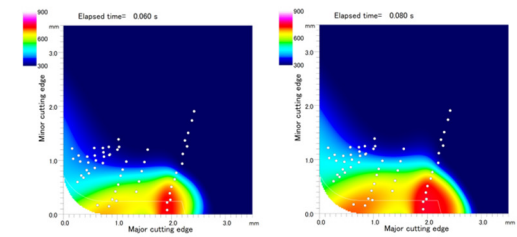
切りくず自由表面側の温度分布は、市販の赤外線放射型サーモグラフィカメラで計測できるが、測定したい計測エリアは刃先点近傍であり、2 mm×2 mm四方程度の領域である。市販のカメラで撮影する場合、計測点とカメラを近づけないと、この領域の温度分布は計測できない。一方、切削点付近では、切りくずが飛散するので、カメラを近づけると切りくずがカメラに衝突しカメラの損傷を招きかね



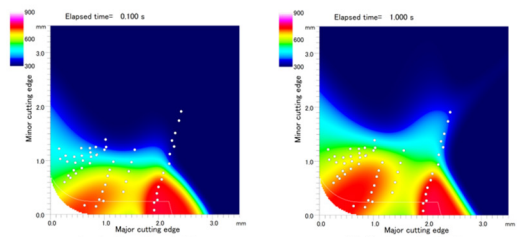
(a) t=0.02 s (b) t=0.03 s



(c) t=0.04 s (d) t=0.05 s



(e) t=0.06 s (f) t=0.08 s



(g) t=0.10 s (h) t=1.00 s

図5 ニューラルネットワークで53箇所の計測データを統合した結果

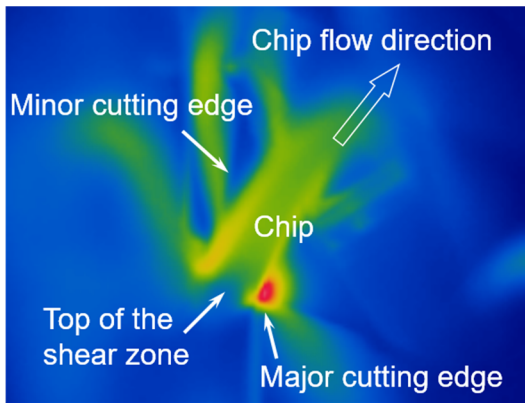
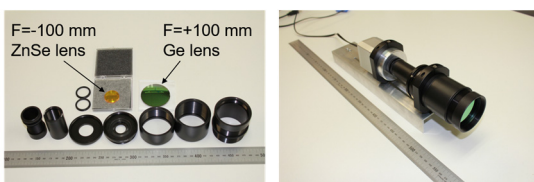
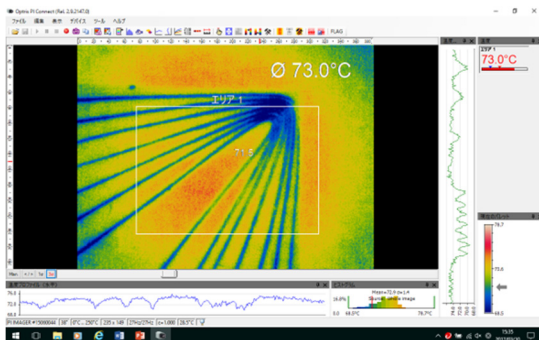


図6 市販のサーモグラフィーカメラで切削点から 200 mm 離れた位置から撮影した画像



(a) 作成した赤外線望遠レンズシステム



(b) 250 mm 離れた位置から撮影した画像

図7 赤外線望遠レンズシステム

ない。カメラを保護するためには、カメラを切削点から 200 mm 程度以上は離さなければならない。

図6は、市販のサーモグラフィーカメラで切削点から 200 mm 離れた位置から撮影した刃先点の様子である。切りくず流出付近の温度を認識はできるが、解像度が低い。そこで本研究では、市販のサーモグラフィーカメラのレンズ部分を、自作のレンズ系に置き換えることにした。レンズは2枚構成で、直径 50 mm で焦点距離  $F=+100$  mm のゲルマニウム製の凸レンズと、直径 25mm で焦点距離  $F=-100$  mm の ZeSe 製の凹レンズを組み合わせたものである。倍率は 1.4 倍である。

図7は、刃先点から 250 mm 離れた位置から刃先を撮影したものであり、工具ノーズ付近と主切れ刃部分が十分な解像度で撮影できたことが分かる。

図8は、上記の温度分布計測システムで把握した、切りくずの自由表面側の温度分布と、工具一切りくず接触領域の温度分布である。

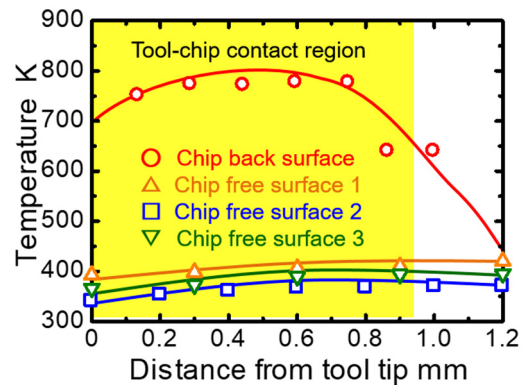
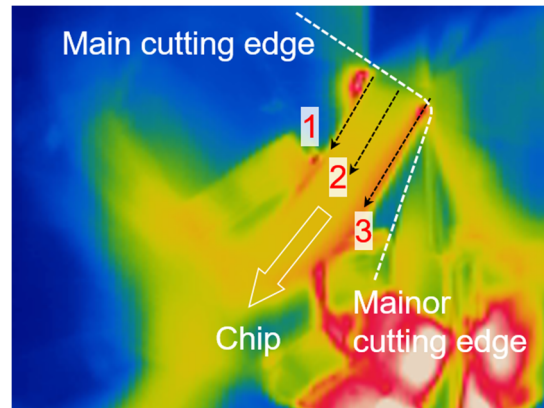


図8 切りくず表面の温度分布

切りくず自由表面の温度は、せん断域上方から急激に上昇するが 350~400 K 程度であり、切りくず幅に対して両端付近と中央部分とで 50 K 程度の温度差がある。一方、切りくず幅中央付近の工具一切りくず接触領域では、温度は 700~800 K と高い。切りくず厚さは 0.54 mm であったが、きりくず自由表面側と、工具との擦過面側とで約 400 K の温度差があることが定量的に把握できた。

以上より、提案する流動応力推定システム構築において最も重要な切りくずの工具との擦過面を含めた表面全域の温度分布を把握する手法を確立した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

① Jun Shinozuka and Daiki Kidoura, Experimental Investigation of Heat Partition Ratio for the Cutting Tool at a Cutting Speed Ranging from 38 to 6500 m/min, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 874 (2016) pp 450-456.

DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.874.450>

② Jun Shinozuka, Habibah Binti JAHARADAK, Measurement of the temperature distribution at the tool-chip interface by using a cutting tool with seven pairs of built-in micro Cu/Ni thermocouples, Advanced Materials Research, 査読有,

Vol.1136 (2016) pp.586-591.  
DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.586>

[学会発表] (計 3 件)

① 篠塚 淳, 次世代切削加工システムの創造のための加工現象の解明, 精密工学会 第386回講習会 (2017)

② Jun Shinozuka, Investigation of ultra-high speed cutting mechanism by considering tool-chip friction property and inertia force derived from chip formation, the 17th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology (2017)

③ 篠塚 淳, 島 悠太郎, 微細熱電対群内蔵工具を用いた工具すくい面の温度場の切削開始からの過渡的変化の検討, 2016年度精密工学会秋季大会 (2016)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.shinozuka.me.ynu.ac.jp/jshinozu/TCtemperature/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

篠塚 淳 (SHINOZUKA, Jun)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 30282841

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

無し

### (4) 研究協力者

無し