

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560135

研究課題名(和文)超微細組織材によるマイクロ部品製造のための被切削特性評価に基づく切削技術開発

研究課題名(英文)Development of cutting technology based on evaluation of cutting behavior with ultra-fine grained materials for fabrication of micro component parts

研究代表者

青木 孝史朗(Aoki, Koshiro)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：70262409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：金属を高強度化する方法の一種であるECAP(Equal Channel Angular Pressing)により加工された素材は、その大きさから被削性が重要となる。本研究は突っ切りによる二次元切削によって被切削性等を調査した。

ECAPによるせん断変形帯と切削のせん断角がほぼ一致する条件では切削抵抗の低下が確認されたが、他の面や方向においては一般的な切削現象が見られた。異方性の影響を低減させたECAP材では異方性は確認できなかった。FEM解析による特定の面および方向における切削抵抗減少の解明には至らなかったが、超微細組織材のマイクロ部品へ適用する際の切削性については大きな問題はないと判断できた。

研究成果の概要(英文)：ECAP(Equal Channel Angular Pressing) is one of the severe plastic deformation processes for obtaining ultra-fine grained materials. This study investigated the cutting behaviors by the orthogonal cutting for the materials deformed by ECAP.

On the conformable conditions between the shear angle on cutting and the angle of shear deformation zone introduced by ECAP, the cutting resistance was decreased. In the other cutting conditions on other the cutting directions and cutting surfaces, a general cutting behavior was confirmed. The anisotropy on cutting was not able to be confirmed for the materials deformed by ECAP with the decreasing an influence of anisotropic. To examine the reason why the cutting resistance decreases, FEM analysis was also carried out. But the reason was not able to be clarified. However, it was able to be judged that there was no big problem in cutting process when the micro parts are made from the material deformed by ECAP.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削特性 せん断変形 大ひずみ加工 結晶粒微細化

### 1. 研究開始当初の背景

結晶粒径が  $1 \mu\text{m}$  以下の超微細粒組織を有する材料は、ホール・ペッチの関係に従い強度が通常の2から3倍に向上することが報告されている。そのため各種添加元素を添加して高強度化を行う通常の金属冶金的手法よりもリサイクル性に富む材料創製が可能となり、構造物材料への適応を目指して、製造方法・機械的性質の他、低温高速超塑性材料としての可能性などについて全世界的に研究が進められている。

研究代表者はこれまで、超微細組織材料の創製方法の一つである大ひずみ加工、特にその一種である、くり返しせん断変形加工について研究を行ってきた。これら研究の過程の中で、焼き入れ後に充分焼鈍した高速度鋼にせん断変形加工を施した後に、旋盤を用いて切削したところ、連続的につながった流れ型の切りくずが得られた。この事実により、せん断変形加工により加工された材料の新たな展開を着想した。

今後、情報通信分野・医療分野などでは製品の更なる小型化・高性能化が必要とされ、これらの製品・部品の製造にはナノ・マイクロオーダーの加工により製造されたマイクロ部品が必要となる事が予想されている。このようなマイクロ部品を製造するマイクロレベルの加工では、被加工物もマイクロオーダーとなるため、結晶粒径が大きな金属材料を用いた場合、対象物内の結晶の数が1個または数個の状態となり、ほぼ単結晶材の加工と同様になる事が予想に難くない。変形の異方性など、加工や材料特性に影響を与える様々な結晶方位依存性を避けるため、多結晶体の使用が望まれるところだが、現在では粉末冶金的手法に頼るしかない状況である。ここに高強度化された超微細組織材の適応ができないだろうかと思いついた。

### 2. 研究の目的

超微細組織材の被削性は優れているのか、マイクロ部品用材料としての適用性を調査する事を目的としている。以下、具体的な方針を説明する。

(1) ECAP 加工 (ルート A) で加工された素材の切削特性評価: ECAP 加工では、せん断加工毎に試験片の挿入方向によって、素材内に導入できるせん断変形帯の形態が変えられる。代表的な加工手順であるルート A では、挿入方向を変えずに ECAP 加工を行う。この場合、同じ方向にせん断変形が生じ、せん断変形帯の向きが徐々に長手方向と平行、つまり変形組織を長手方向に揃ってくるような変化を示す。

まず、せん断変形帯の角度と切削により生じるせん断変形帯との相関に注目し、2つのせん断変形帯の向きが揃う素材面での切削性を評価し、合わせて他の面での切削特性を評価した。

(2) ECAP 加工 (ルート C) で加工された素材の切削特性評価: ECAP 加工毎に  $180^\circ$  回転させて加工する手法はルート C と呼ばれる。この場合 ECAP 加工を偶数回行うと加工組織が初期状態に似ることが知られている。ルート A の様に加工組織に一定方向の配向が確認される場合ではなく、どの面・方向においても、ほぼ均一となる微細組織における切削性を、様々な面において評価した。

(3) 有限要素法による切削状態解析: ECAP 加工された素材の切削性は、一般的な材料のそれと異なる可能性がある。この原因解明のため FEM 解析によるシミュレーションを用いた。具体的には、実験値と解析による理論値の比較を行い、特性評価を試みた。

### 3. 研究の方法

(1) ECAP 材の製作: 供試材は断面形状が  $10 \times 10\text{mm}$  の A6063-T5 を用いた。ECAP には当研究室にて開発した半連続型せん断変形加工機 (図1) を用いた。コーナー角は  $90^\circ$

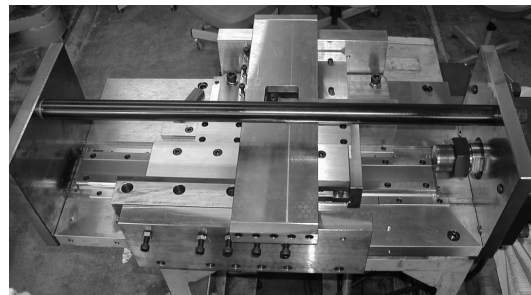


図1 半連続型せん断変形加工機

であり1回当たり、素材に導入される相当ひずみは約1である。以後、ECAP 加工を1回施したものを1pass 材と呼称する。ルート A の場合、最大4Pass まで、ルート C では2pass, 4pass までの素材を室温で作製した。図2に ECAP 加工後素材における切削面および切削方向を示す。加工後、切削用の治具に装着す

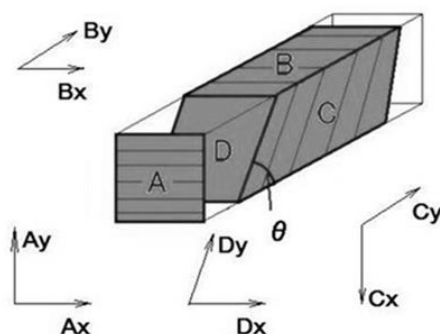


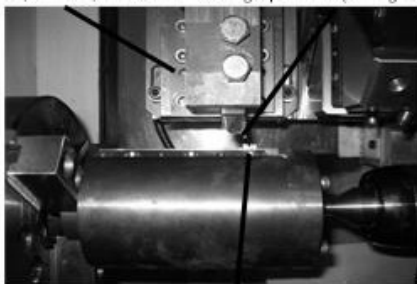
図2 ECAP 加工後の切削面および切削方向

るため、素材加工部から切削対象面がバイトに対して正面になるように寸法  $10 \times 10 \times 10\text{mm}$  の切削用試験片を切り出した。

(2) 切削実験および評価方法: 突っ切りによる二次元切削を行うため、チップ(住友電

気工業(株) TGA R3-T18 H1)を用いた。すくい角は  $0^{\circ}$  ,  $5^{\circ}$  ,  $10^{\circ}$  ,  $13^{\circ}$  ,  $15^{\circ}$  ,  $18^{\circ}$  ,  $20^{\circ}$  ,  $25^{\circ}$  の 8 種類, 刃幅は 1.85mm とした。切削には NC 旋盤を用い, 三分力計, チャージアンプ, 高速データロガーで切削抵抗を測定した。切削速度は 15mm/min, 切り込み量は  $20\mu\text{m}$  とした。切削は試験片の形状から断続切削となり, 1 回あたりの切削長さは 10mm であるため, 切削時間は 0.04 秒となる。そのため, 高速データロガーのサンプリングレートを 2ms とし, 1 回の切削で約 19 点のデータを得るようにした。図 3 に NC 旋盤内の装置写真を示す。また, 切りくずを採取し走査

三分力計 突っ切りバイト



試料

図 3 NC 旋盤内での二次元切削 (突っ切り)

型電子顕微鏡 (SEM) を用いて, 切りくず厚さを測定し, せん断角, せん断応力値などを算出した。

(3) FEM シミュレーション方法: 切削は大変形, 高速, 高温を伴う非常に複雑な加工現象であるため, シミュレーションする場合には通常の構造解析だけでなく, 熱伝導解析との連成や要素再分割などが必要であり, 本研究ではこれらの点が考慮されている AdvantEdge FEM を使用した。実験結果と比較するため, 被削材は断面寸法  $10\times 10\text{mm}$  の A6063-T5 の ECAP 材 (ルート A) の 1pass 材から 4pass 材まで素材を想定し, 実験と同じ条件で二次元切削による解析を行なった。材料モデルについては, ソフトウェア内にデータベースがあり, 主要な材料についてはデータが登録されていたが, ECAP により高強度化されたものは当然データベースに存在しないため, 材料データを作成する方向に進めた。基本的な物性値と, 熱軟化特性やひずみ速度依存性などの非線形データを入力することにより, 材料モデルは作成できるが, 異方性材料については全く対応できないことが判明したため, 等方性の材料とする事にした。切削工具の材質・すくい角・切削速度・切り込み量は全て実際の実験条件と同一とした。

#### 4. 研究成果

(1) ECAP 材 (ルート A) の切削特性

①導入されたせん断変形帯の傾き: せん断変形加工によって導入されたせん断変形帯の傾きをレーザー顕微鏡による組織観察によ

って確認した。観察面は各 ECAP 回数における供試材の C 面である。組織観察の結果, 各 ECAP 回数におけるせん断変形帯の角度は加工された試験片長手方向に対して 1pass で  $25^{\circ}$  , 2pass で  $17^{\circ}$  , 3pass で  $13^{\circ}$  であった。

②切削抵抗の測定結果: 1~4pass の By 方向における切削抵抗値とせん断角の関係を図 4 に示す。いずれの pass 数の材料において

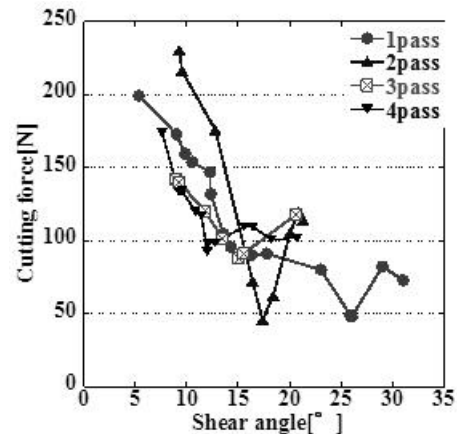


図 4 ルート A で ECAP 加工した素材において By 方向で切削した際のせん断角と切削抵抗値との関係

も, せん断角の増加に伴い切削抵抗が減少している。また, 1pass のせん断角  $25^{\circ}$  付近, 2pass のせん断角  $17^{\circ}$  付近で切削抵抗値が減少していることがわかる。この角度はそれぞれ各 pass におけるせん断変形帯の角度とほぼ一致しており, ECAP により導入されたせん断変形帯が切削抵抗に対して影響することが確認された。

同様に, 1~4pass 材の Ax, Ay, Cx, Cy 方向における切削抵抗値を求めた。結果の一例として Ax 方向における切削抵抗値とせん断角の関係を図 5 に示す。図より ECAP 加工回

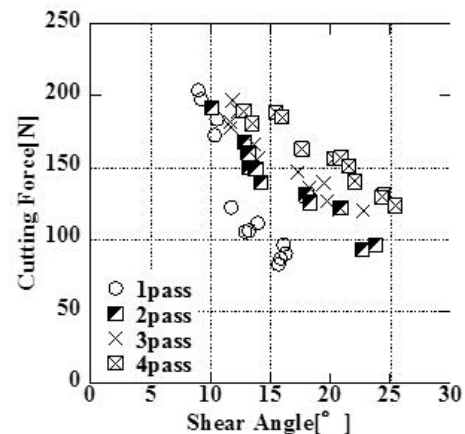


図 5 ルート A で ECAP 加工した素材において Ax, Ay, Cx, Cy 方向で切削した際のせん断角と切削抵抗値との関係

数の増加に伴い切削抵抗値も増加する傾向が確認できた。また, 他の面方向における切削抵抗値とせん断角の関係も同じ傾向を示した。これらから By 方向の切削においても

見られた切削抵抗値の減少は、ECAPにより導入されたせん断変形帯の存在により大きく影響されていることが裏付けされた。

③単軸圧縮による追加実験：このようにECAP加工により導入されたせん断変形帯は材料の変化に対して大きな影響を与えている可能性があるため、切削における最大せん断応力説において提唱されるような状況が、再現できるのか圧縮試験によって試みることにした。クリストフが提唱した最大せん断応力説は、切削時における切削力の合力とせん断面とのなす角は $45^\circ$ となるという説である。これを再現するため、単軸圧縮においてのすべり方向も $45^\circ$ 方向となることから、同じ関係を示すという最大せん断応力説に基づいてである。各pass材から寸法 $3 \times 3 \times 5\text{mm}$ の試験片を切り出した。また、このとき、試験片の長手方向がECAPにより導入されたせん断変形帯に対して $45^\circ$ 方向になるよう配慮した。比較のため、長手方向がせん断変形帯と平行( $90^\circ$ )になるよう切り出したものも用意した。室温下で圧縮速度は $0.5\text{mm/min}$ とした。

図6に圧縮試験によって求められた各ECAP加工回数における降伏応力の結果を示す。図より、ECAP加工回数が増すごとに降伏

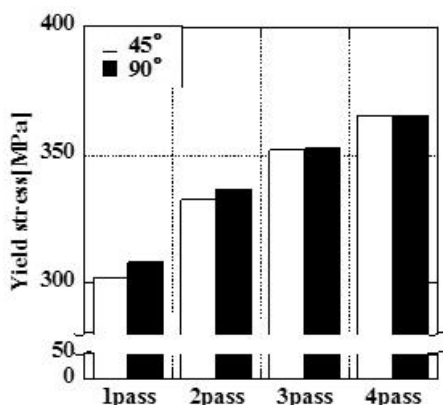


図6 ECAP材よりせん断変形帯の向きを揃えて圧縮した際の降伏応力の変化

応力も増加していることより、ECAP加工回数が増すごとに材料強度が高くなっているということがわかる。しかし、 $45^\circ$ 方向と $90^\circ$ 方向で比較したところ、1, 2passでは降伏応力に差があるが、3passより徐々に差がなくなっていることがわかる。これは、1, 2passでは十分に結晶粒が微細化されていないため、せん断変形帯に沿ってすべりを起こしてしまい、 $45^\circ$ 方向における降伏応力が低い値となってしまったためである。しかし、3passより徐々に結晶粒微細化が進み、せん断変形帯の影響を余り受けなくなり、 $90^\circ$ 方向と近い値が得られたのではないかと考えられる。

## (2) ECAP材(ルートC)の切削特性

①切削抵抗の測定結果：ルートCでECAP加工した2Pass, 4Pass材に対しAx, Ay, Bx, By, Cx, Cy方向に切削を行い、切削抵抗を求

めた。結果の一例としてBx, Byの結果を図7に示す。これらの図よりルートCで加工し

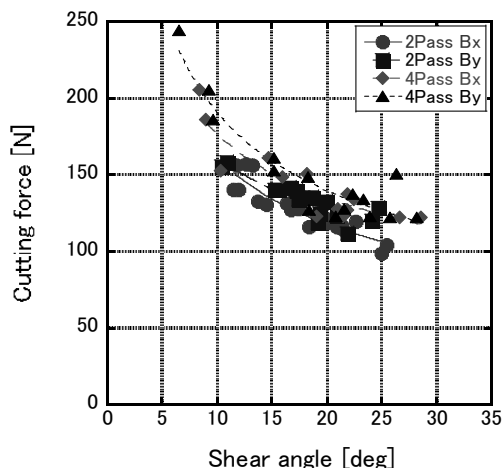


図7 ルートCでECAP加工した素材においてBy, Bx方向で切削した際のせん断角と切削抵抗値との関係

た2Pass, 4Pass材ではB面のx, y方向において、ルートAのBy方向のような急激に切削抵抗値が下がる現象は起きず、せん断角が大きくなるにつれ徐々に切削抵抗値が低くなるという通常の切削現象が確認できた。加工回数を重ねた4Passでは上記の図を見て分かるように2Passよりも切削抵抗値が高くなっており、強度が上がっている事が分かる。Ax, Ay, Cx, Cy方向についても同様に切削実験を行ったが、こちらでも通常の切削現象が確認できた。また、測定値が同じ範囲内で収まっていることから、ルートCで加工した供試材においては切削に対する異方性が確認されなかった。

以上の結果から、ルートCでECAP加工した場合、同一の切削現象が得られ、面や方向に配慮をする必要はないと判断できる。

②加工組織観察：図8に0Pass, 1Pass, ルートCの2Pass, 4Pass材のC面の組織状態を示す。図8(b)では、せん断変形されたことによりメタルフローが見える。しかし、ルートCの偶数回加工(図8(c), (d))では、組織状態が0Pass(図8(a))に似ており、明らかなメタルフローは確認されなかった。このような組織状態が切削特性に影響したと判断できる。

## (3) FEMによる切削現象シミュレーション

①解析と文献値の比較：FEM解析結果の信頼性を確認するため、切削時のせん断応力の文献値(A5056F, Hv:73)と解析から得たせん断応力(A6061, Hv:105)の比較を行った。解析したA6061-T6のせん断応力値は $334\text{MPa}$ 、A5056Fの文献値は $250\text{MPa}$ であった。材質や硬さの差を考慮すれば、解析で得られたせん断応力値は妥当であるとし、このソフトによる計算は可能であると判断した。

②被削材データの作成：各種文献の物性値を用いて、FEMのデータベースのA6061-T6と同

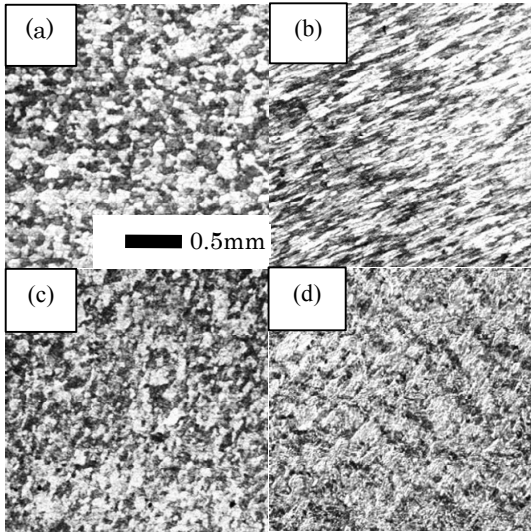


図8 ルートCで加工したECAP材の光学顕微鏡写真, (a)加工前, (b)1Pass後, (c)2Pass後, (d)4Pass後

じ解析結果を得られる被削材データの作成を試みた。入力時に使用したものは、引張強さや0.2%耐力、ヤング率などである。作成したデータでの解析結果から得られたせん断応力は357MPaであり、データベース材と近い解析結果が得られる材料データを作成することができた。次に実際にA6063-T5を切削して切削データを得た。同時にA6061-T6のデータ作成と同じ方法で、A6063-T5の被削材データを作成した。

③引張試験: ECAP材の材料データを作成するために、A6063-T5をECAP加工(ルートA)した素材を用いて引張試験を行った。その結果を図9に示す。図より引張強さは1passで

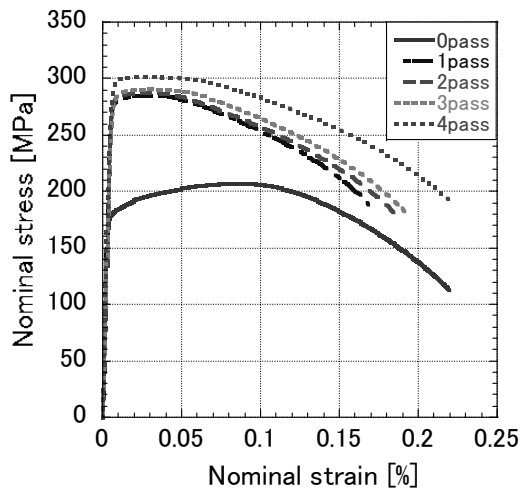


図9 ルートAでECAP加工した素材の公称応力-公称ひずみ線図

は285MPa, 2passでは287MPa, 3passでは290MPa, 4passでは302MPaとなった。ECAP加工をくり返すことにより引張強さが増していくことが確認できた。

④ECAP材データ作成及び解析: ②で作成したA6063-T5データのひずみ硬化特性を、各pass

の引張試験から得られた結果に変更し、1pass材から4pass材までのECAP材データを作成した。使用した解析ソフトではせん断変形帯を模擬することができなかったため、せん断変形帯の影響が少ないと考えられるBx方向の切削実験結果と比較することにした。実験でのせん断面上のせん断応力の結果を図10に、解析での結果を図11に示す。

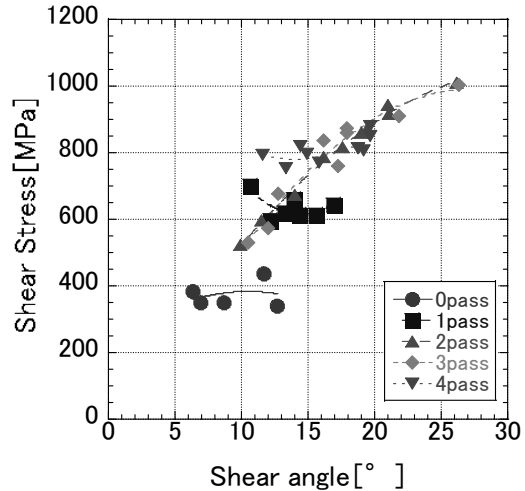


図10 実験で求めたせん断面上のせん断応力とせん断角の関係

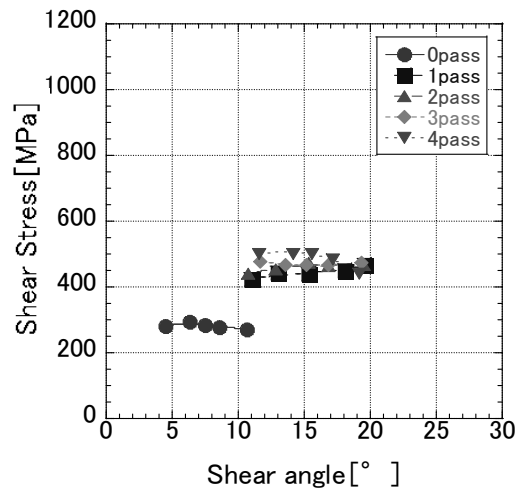


図11 FEM解析で求めたせん断面上のせん断応力とせん断角の関係

実験結果と解析結果では、共に得られたせん断応力値はpass数が増加するにつれて上昇した。これより、Bx方向においては引張強さが増すと切削抵抗が増すという、一般的な切削特性を確認できた。また、これら図において、実験結果から得られたせん断応力値は、全体的に解析結果の1.3~1.4倍ほどの値となっていた。これは実験における切削が断続切削であるため、バイトと材料が触れた際に衝撃荷重が生じ、実験データに影響して切削抵抗値を上げたと考えられる。2, 3passの実験結果は、切削実験の方に何らかの原因があり、安定したデータが得られなかったと考えられる。

#### (4) 成果のまとめ

以上のように、ルート A で加工された ECAP 材においては異方性が発現し、特定の面および方向において切削抵抗が減少した。この事象に対しては、各種の切削実験・圧縮試験・FEM 解析などを用いて調査したが、解明には至らなかった。加工組織の状況に応じた切削条件を行なうためにもマイクロ切削の必要性が確認された。

しかしながら、ルート C によって加工された場合、超微細組織材をマイクロ部品へ適用する際の切削性については、異方性も見られず通常の切削現象が生じる事が判明し、今回行なった範囲での切削加工については、問題はないと判断できた。

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

- ①永野高彬, 平野大夢, 池田将真, 青木孝史朗, ECAP 加工したアルミニウム合金の切削特性, 日本機械学会関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月 14 日, 東京農工大学

- ②杉木優斗, 小林遼, 青木孝史朗, 工業用金属材料における切削特性の二次元切削による評価, 日本機械学会関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月 14 日, 東京農工大学

- ③小林遼, 青木孝史朗, 西口雅司, 材料強度評価方法開発のための工業用金属材料の二次元切削, 軽金属学会第 124 回春期大会, 2013 年 5 月 18 日, 富山大学

- ④青木孝史朗, 池田将真, 尾崎一道, せん断変形加工によって導入された微細加工組織における切削特性, 軽金属学会第 123 回秋期大会, 2012 年 11 月 11 日, 千葉工業大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

青木 孝史朗 (AOKI, Koshiro)  
芝浦工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 70262409