

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02481

研究課題名（和文）振動エネルギー援用マイクロ塑性加工における素材変形促進機構とモデル化

研究課題名（英文）Mechanism investigation and modeling of material deformation enhancement in micro forming with vibration energy assistance

研究代表者

楊 明（Yang, Ming）

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：90240142

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,180,000円

研究成果の概要（和文）：高周波数応答力センサーを導入し、超音波援用加工時におけるパンチと素材との接触状態のリアルタイム測定による超音波援用の応力重畳、音響軟化、衝撃など各種効果の分離を可能にした。また、変形後の組織の電子顕微鏡EBSD分析を行い、音響軟化によって転位密度の減少や転位分布のランダム化などから、転位移動度を高め、動的回復と転位消滅につながった可能性を示した。これらの結果に基づいて超音波援用の音響軟化効果による結晶性材料の転位移動促進を組み入れた材料変形モデルを提案し、AlとCuの実験結果と比較した結果、提案モデルによる推定結果が異なる材料および振幅に対して良い一致が得られ、モデルの有効性が実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来研究で、ブラッハ効果として評価解釈されてきた応力重畳と音響軟化を分離し、個々の変形メカニズムに適した理論モデルを構築した。素材の動的な変形挙動をオンラインモニタリングし、現象の解析、および各種効果の定量的な評価に基づいた理論モデル構築は、超音波振動援用技術における複雑性を解決する点で大きく貢献する。

従来から超音波振動の効果を塑性加工に応用することが試みられてきた。超音波振動援用マイクロ塑性加工プロセスの確立は加工精度の向上や素材の成形性向上効果が大きく、実用化が期待されている。超音波振動の各種効果と素材の変形に結び付ける理論式の提案により、その実用化が促進され、波及効果が大きい。

研究成果の概要（英文）：A high-frequency response force sensor was introduced to enable the separation of various effects such as stress superposition, acoustic softening and impact by real-time measurement of the contact state between the punch and the material during ultrasonically assisted forming. In addition, SEM-EBSD analysis was applied to investigate structure of the deformed specimens. It is found that the acoustic softening can reduce the dislocation density and randomize the dislocation distribution, and it increases dislocation mobility, leads to dynamic recovery and dislocation annihilation. A constitutive model for prediction of the flow stress incorporating the dislocation transfer promotion of crystalline materials was proposed based on the experimental results. The prediction results was compared with the experimental results of Al and Cu. The estimation results by the constitutive model showed good agreement for different materials and amplitudes.

研究分野：マイクロ金属加工

キーワード：マイクロ金属加工 超音波振動 素材変形促進 SEM-EBSD分析 モデル化

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

超音波振動による素材変形抵抗の低減などの効果（ブラッハ効果）や摩擦の低減効果（表面効果）が古くから知られている。一般に、金属成形に対する超音波効果は、摩擦低減などの表面効果と変形抵抗の低減などの体積効果の2つの主な効果からなる。しかし、これらの効果が、素材の物性、形状などに依存しており、応力重畳や音響軟化などによる効果が先行研究によって提案されているが、統一した解釈がなく、また、それを表現できる妥当な素材変形モデルや構成式もないため、ケースバイケースで実験結果に関する議論がなされている。さらに、素材寸法のスケールダウンによって、超音波振動の振幅が素材寸法に対して、相対的に大きくなり、振動時工具が素材表面から離脱と再接触を繰り返すことにより、表面に衝撃が加えられ、素材変形に与える影響がさらに大きくなり、特に素材表面の変形の促進が顕著であり、表面精密転写などにおいて、その効果が大きいことが本申請者らの研究で報告された。ただし、そのメカニズムの解明が十分とは言えず、また材料変形モデルの提案には至っていないのが現状である。

超音波振動による素材の塑性変形促進効果をより定量的に評価し、それらに基づいた理論モデルの提案が求められる。応力重畳や音響軟化、衝撃の効果のそれぞれのメカニズムに適した理論モデルを構築し、超音波振動援用プロセスにおける素材変形予測に適用されることは学術的かつ工業的に極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、超音波振動効果をメカニズム毎に分離する方法の提案とそれぞれの効果に応じた理論式（素材変形モデル）を提案することを目的とする。具体的には、高周波数振動における素材変形特性を測定可能な材料試験装置を用いて、超音波振動付与による変形素材変形時での動的塑性変形特性をモニタリングし、素材変形の動的特性から、応力重畳や音響軟化、衝撃のそれぞれの効果を分離していく。また、異なる材質や結晶構造の素材に対して、それぞれの効果の違いや塑性変形に伴う素材の結晶構造の変化及び転位密度の変化について電子顕微鏡 EBSD（SEM-EBSD）分析を行い、各種効果に伴うメカニズムを確認し、振動エネルギーとの関連を定量的に評価し、各種効果に対応した素材変形モデルの構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 超音波振動の各種効果の分離

金属材料を用いたマイクロ圧縮試験を行い、素材の変形特性を従来の準静的な応力ひずみ及び動的な応力変動特性をそれぞれ計測評価する。超音波振動付与の有無、および振動条件によって、それぞれの変形特性を分析し、個々の現象に応じて、その効果を応力重畳と音響軟化と衝撃効果の3つに分ける。

(2) 各種効果が素材変形に及ぼす影響、およびそのメカニズムの解明

各条件での素材変形形態に関して SEM-EBSD 分析を行い、素材の結晶構造の変化、転位密度の変化などを評価する。異なる材質、結晶構造の材料に対して、振動エネルギーが変形に及ぼす影響を評価する。

(3) 各種効果に応じた素材変形モデルを作成し、新しい構成式の構築とその妥当性評価

振動エネルギーと素材変形促進効果をその各種メカニズムに応じて、応力重畳と音響軟化と衝撃効果の3つに分離し、素材の結晶構造、転位ポテンシャルエネルギー、転位密度などのパラメータ及びスケール効果を考慮した素材変形理論モデルに反映していく。これらを統合した理論モデルを構築し、塑性加工プロセスシミュレーションによって、その妥当性を評価する。

4. 研究成果

上述のアプローチに従って、研究を行い、得られた主な研究成果を以下に示す。

(1) 超音波振動の各種効果の分離

高周波数応答力センサーを導入し、超音波援用加工時におけるパンチと素材との接触状態のリアルタイム測定による超音波援用の各種効果の分離を行った。図1に示す卓上型サーボプレス機械に超音波援用成形金型を導入した。超音波振動には60KHzの振動子を用い、ホーンで振幅を最大3.21 μ mに増幅をした。加工時のパンチ荷重を通常のロードセルで測定すると同時に、振動による素材への動的負荷評価のために高周波数応答力センサーを導入した。マイクロ圧縮試験には、直径2mm高さ2mmの純銅（C1100-0）と純アルミ（A1100-0）試験片を用いた。各条件での圧縮試験時の測定結果を図2に示す。振動援用なし（青線）に対して、振動援用あり（赤実線）の場合における変形抵抗の低減が図2(a)より確認できる。また、その場合の動的振動付加の幅を赤点線で表示しており、応力重畳を定量的に評価でき、それを差引いた応力の低下量が音響軟化によるものと考えられる。振幅の増大に伴い、音響軟化による応力の低減が大きくなる。さらに荷重初期において、大きい振幅の場合、応力が著しく低下している領域があり、この場合の動的負荷の変動が入力振動波形（サイン波）に対して、波形がサイン波から崩れていることが分かる。これはパンチが素材との接触と離脱を繰り返し、接触時に衝撃効果が素材に付与されていると考える。その結果、荷重初期において、素材の変形抵抗が大幅に低減した。これは衝撃効果が大きく寄与したものと考えられる。このように振動による素材への動的負荷と素材の変形抵抗を測定することにより、その効果を応力重畳と音響軟化と衝撃効果の3つに分けることが可能である。

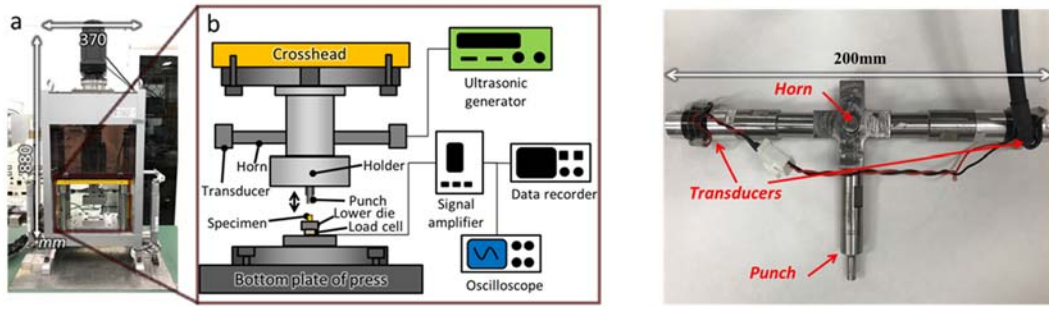
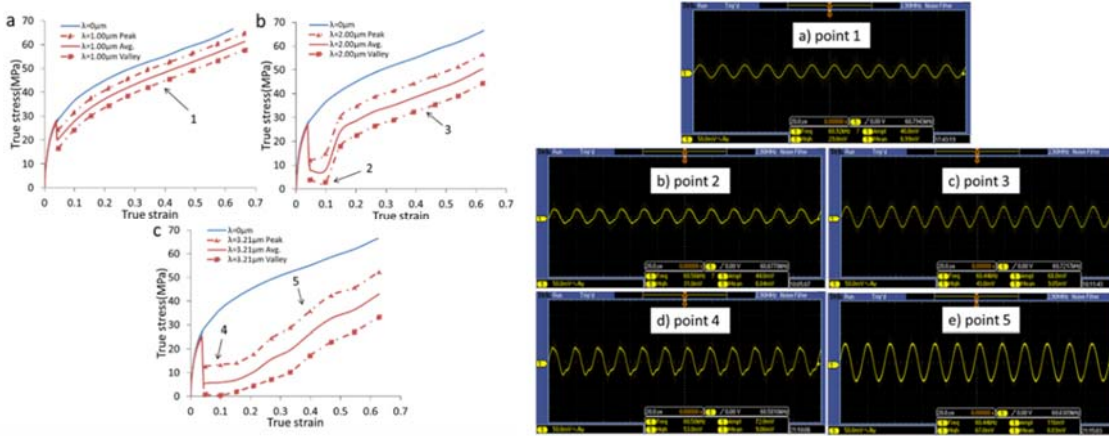


図1 超音波援用マイクロプレス加工システム概要



(a) 各条件における応力-ひずみ曲線 (b) 素材が受ける負荷の動的応答
図2 圧縮試験における応力-ひずみ曲線及び負荷の動的応答

素材表面付近での変形への衝撃効果を調べるために、厚さ 0.4mm の薄板を用いた表面鍛造試験を行った。材料は純銅を用いた。この場合の動的負荷の変動を図 3 に示す。両振幅 (2λ) が素材の弾性変形量より小さい場合はパンチの素材からの離脱がなく、入力と同様なサイン波形を示すが、両振幅 (2λ) が弾性変形量より大きい場合、負荷曲線がサイン波から大きく離れ、最小応力が 0MPa となっていることが分かる。表面鍛造による素材表面粗さの低減を図 4 に示す。比較のため、以前 10kHz の振動子を用いた実験の結果もプロットした。いずれの場合も振幅が大きくなるにつれて、表面粗さの低減率が增加する。また、振幅が $1.0\mu\text{m}$ 未満の場合、 $1.0\mu\text{m}$ ~ $2.0\mu\text{m}$ 場合、 $2.0\mu\text{m}$ 以上の場合では表面粗さの低減率の勾配が異なる。特に振幅が $2.0\mu\text{m}$ 以上において、振動時のパンチが明確に素材から離脱し、衝撃による表面変形促進効果が大きいことが分かった。

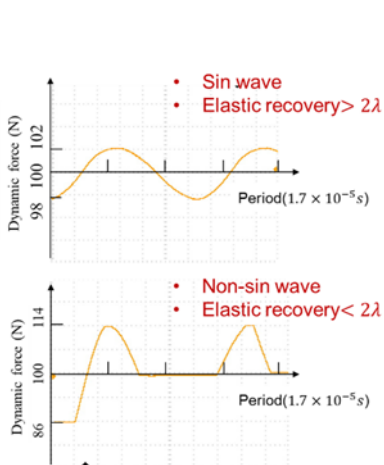


図3 表面変形における荷重の動的変化

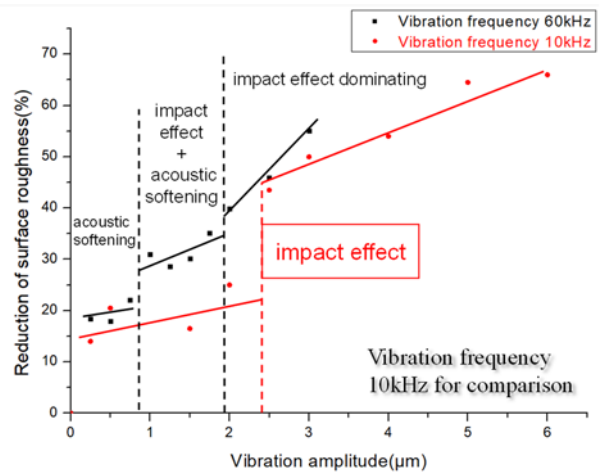


図4 超音波振動援用効果による表面粗さの低減

表面の変形に注目した場合、荷重の動的変動特性がより顕著になる。両振幅が大きくなるにつれて、荷重の変化が入力波形のサイン波から崩れていくことが分かる。したがって、荷重がサイン波形の場合は、加工中のパンチが表面と接触し、音響軟化が支配的である。サイン波形から崩れた場合は、パンチは表面との接触と離脱を繰り返し、インパクト効果が支配的であると考えられる。

(2) 各種効果が素材変形に及ぼす影響、およびそのメカニズムの解明

超音波援用による素材変形抵抗低減効果を評価するために、変形後の組織の SEM-EBSD 分析を行った。図 5 に振幅 $3.21\mu\text{m}$ の場合の結果を示す。振動援用なしの場合と比較すると、試験片表面付近において、中心部と比較して音響軟化下での転位密度は、著しく減少した。低角度の粒界または転位の分布は、音響軟化下でランダムになり、転位移動度を高めた動的回復と転位消滅の可能性を示唆した。

KAM 値の分布に注目し、振動援用なしの場合と比較した結果を図 6 に示す。振動援用なしの場合、表面付近及び中央部における KAM の平均値が比較的大きく、大きな局所ひずみを有することを示す。それに対して、振幅 $3.21\mu\text{m}$ のサンプルでは、KAM のピーク分率が左にシフトして低い値になり、平均値も減少した。これは音響軟化による転位密度が低下し、局所ひずみが減少したことと考えられる。

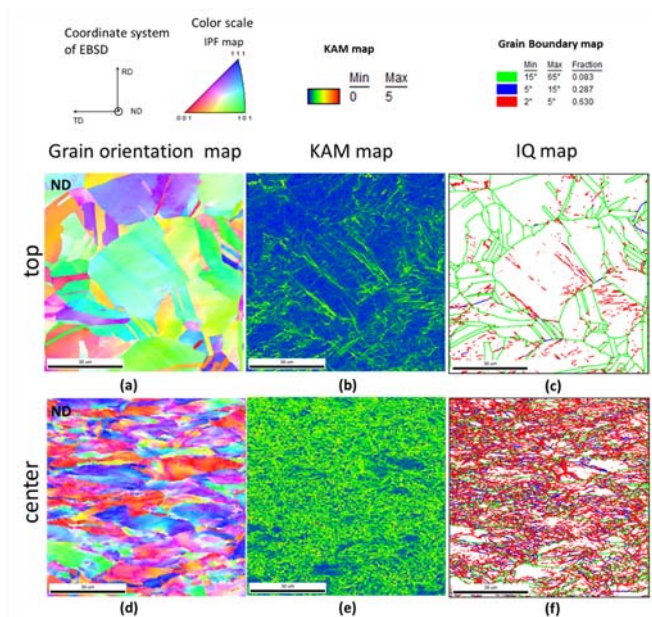


図 5 素材変形後の組織の SEM-EBSD 分析

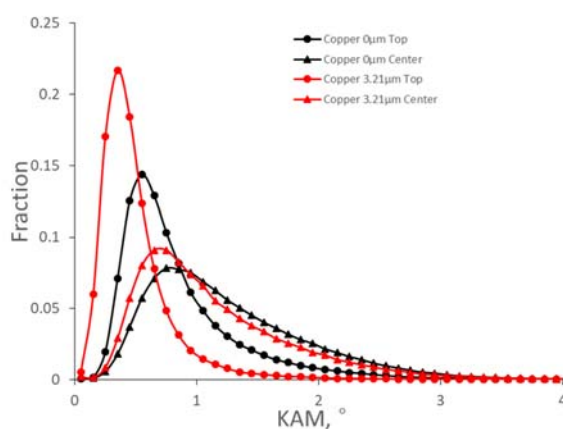


図 6 KAM 値分布の比較

素材表面付近での変形への衝撃効果が発現しやすい厚さ 0.4mm の薄板を用いた表面鍛造試験後の組織の SEM-EBSD 分析を行った。表面より約 $5\mu\text{m}$ 深さまでの組織マップを図 7 に示す。加工前は、表面は明らかに異なる粒径によって 3 つの層に分類することができ、両振幅が $1.5\mu\text{m}$ で鍛造した後、層 2 の厚さはより薄くなり、層 2 のほとんどの結晶粒は層 1 と同じサイズに微細化され、少数の残留粒子のみがサイズ変化を保たず、振動中に音響軟化が現れたことを示唆した。さらに両振幅を $6\mu\text{m}$ に増加させると、層 1 がほとんど消えただけでなく、層 2 の結晶粒の大きさも長くなっている。さらに、同じ色のグレインは、結晶粒方位が一方向に揃うことが分かった。これは先ほどの 2mm 厚試験片の圧縮結果と同一傾向を示す。

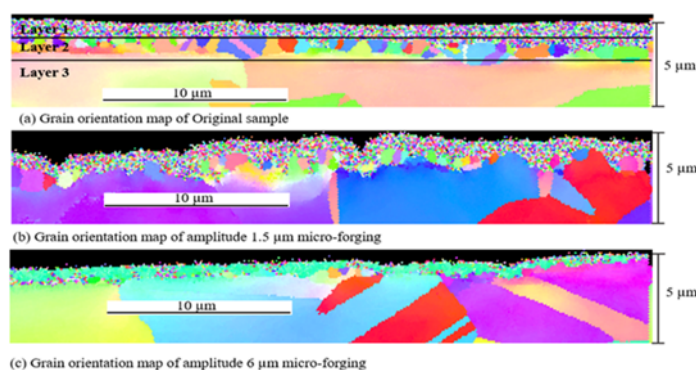


図 7 素材表面組織の SEM-EBSD 分析

(3) 各種効果に応じた素材変形モデルを作成し、新しい構成式の構築とその妥当性評価

応力重畳効果については、申請者の先行研究で、プレス機械の剛性を考慮した理論モデルを提案し、変形抵抗の低減を材料特性や振幅の関数とした理論式を用いた。検証実験の結果、提案モデルによる推定が実験結果

とよく適合しており、振動応力による応力減少の定量的予測を可能にした。

音響軟化について、SEM-EBSD 分析結果から材料変形モデルを構成する主な理論式を以下に示す。

SEM-EBSD 分析結果より、音響軟化による転位密度の低下及びランダム分布は転位移動度を高めた動的回復の可能性のあることから、転位移動に必要な活性化エネルギーに着目し、振動エネルギーによる音響軟化効果を素材変形機構への追加を試みた。まず、Kocks-Mecking モデル (KM model) に基づき、素材のせん断変形抵抗が転位密度の関数として、以下のように表す。

$$\tau = \mu ab \sqrt{\rho} \quad (1)$$

μ はせん断弾性率、 α は定数 (先行研究より、1/3 の値を有す)、 b はバーガースベクトル長さ、 ρ は転位密度を表す。また、塑性変形中の転位密度 ρ とひずみ γ との関係は次式により表すことができる。

$$d\rho/d\gamma = k_1 \sqrt{\rho} - k_2 \rho \quad (2)$$

k_1 は加工硬化を表す定数であり、 k_2 は転位の回復を表す軟化係数である。素材組織の SEM-EBSD 分析結果から、音響軟化によって、素材の動的回復が促進されると仮定し、転位の回復を表す軟化係数 k_2 は超音波振動エネルギーによって増加するが、加工硬化を表す定数 k_1 は影響を受けないと仮定する。

超音波振動エネルギー E による k_2 の増加に関して、以下の式で表現することができる。

$$k_2 = k_{20} (\gamma_p / \gamma_{p0})^{-1/n} \quad (3)$$

ここで、 γ_0 は自己拡散または転位移動のための活性化エネルギーに関連するパラメータであり、以下の式を用いて、超音波振動エネルギー E に関連付ける。

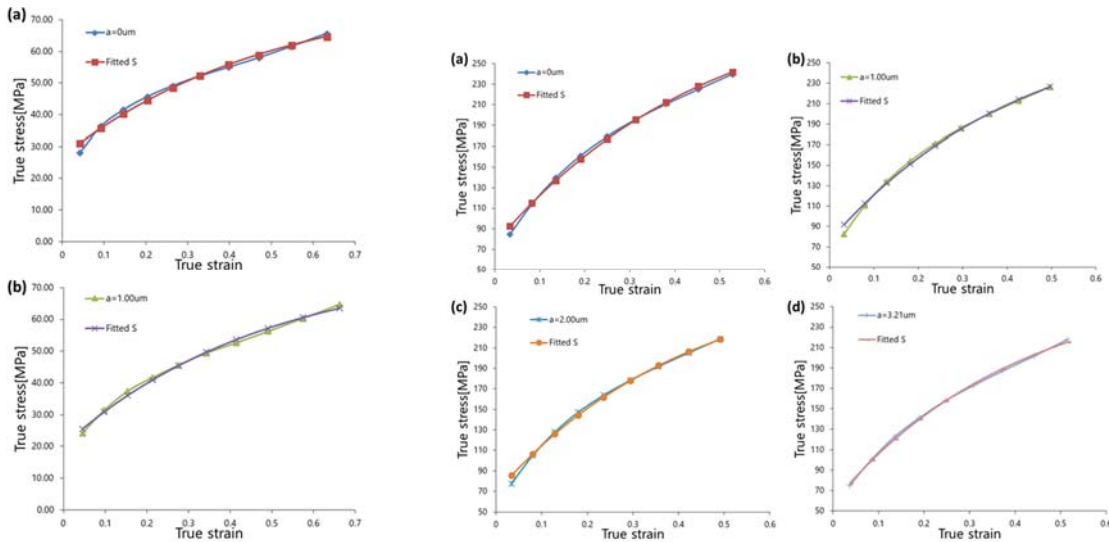
$$\dot{\gamma}_0 = \dot{\gamma}_{00} \left(1 + \xi \left(\frac{E}{Q_d}\right)^m\right) \quad (4)$$

ここで、 Q_d は自己拡散または転位移動に必要な活性化エネルギー、 $\dot{\gamma}_{00}$ 、 ξ 及び m は実験結果により決定されるパラメータである。 E は超音波エネルギー密度であり、以下の式で表すことができる。

$$E = a^2 \omega^2 \rho \quad (5)$$

a は振幅、 ρ は素材の密度、 ω は円周波数であり、 $\omega = 2\pi f$ で表すことができる。

これらの式を組み合わせることで、超音波音響軟化効果を含む流れ応力 σ と塑性ひずみ ε との間の相対性関係を支配する構成式を構築することができる。実験結果により決定するパラメータを圧縮の実験及び先行研究を参考に決定した。提案モデルを用いて、振動援用圧縮試験における素材の応力ひずみ特性を計算し、実験結果の比較を図 8 に示す。異なる材料と振幅条件に対して、いずれも良い一致が得られた。



(a) 素材：純アルミ

(b) 素材：純銅

図 8 超音波援用効果を考慮したモデルによる応力ひずみ曲線の推定結果及び実験値との比較

超音波援用の音響軟化効果による結晶性材料の転位移動促進を組み入れた素材変形モデルを提案し、Al と Cu の実験結果と比較した結果、提案モデルによる推定結果が異なる材料および振幅に対して良い一致を示した。EBSD 結果にも対応し、音響軟化のメカニズムは塑性変形の動的回復と転位の消滅が進んだことが検証された。自己拡散のための活性化エネルギーに対する超音波エネルギー密度の相対比、 E/Q_d が異なる材料に対する音響軟化の効果を決定するための重要なパラメータであり、 E は振幅と周波数の関数であることから、振幅と周波数の両方が音響軟化の効果に影響を与える。また、インパクト効果はより複雑であり、素材表面との摺動による摩擦熱も関係するため、今後、温度測定も含めて、衝撃効果の定式化を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Hu Jun、Shimizu Tetsuhide、Yang Ming | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Investigation on Material Deformation Characteristics of Ultrasound-assisted Microcompression with Dynamic Force Sensing Technology | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Sensors and Materials | 6. 最初と最後の頁 3111～3119 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2019.2359 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Yang Ming | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Sensing Technologies for Metal Forming | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Sensors and Materials | 6. 最初と最後の頁 3121～3128 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2019.2399 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Hu Jun、Shimizu Tetsuhide、Yoshino Tomoaki、Shiratori Tomomi、Yang Ming | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Evolution of acoustic softening effect on ultrasonic-assisted micro/meso-compression behavior and microstructure | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Ultrasonics | 6. 最初と最後の頁 106107～106117 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ultras.2020.106107 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yin Zidong |
| 2. 発表標題 Investigation on Deformation Behavior in the Surface of Metal Foil with Ultrasonic Vibration-assisted Micro-forging |
| 3. 学会等名 The 3rd Asian Pacific Symposium on Technology of Plasticity (AWMFT & APSTP 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 尹 子東 |
| 2. 発表標題 超音波援用マイクロ精密鍛造における金属箔材表面層の変形挙動 |
| 3. 学会等名 2022年度塑性加工学会春季講演会 |
| 4. 発表年 2022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 |
|-------|--|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 清水 徹英 (Shimizu Tetsuhide) (70614543) | 東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604) | |

| | 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 |
|-------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| 研究協力者 | フー ジュン (Hu Jun) | | 首都大学東京 大学院生 |
| 研究協力者 | 尹 子東 (Yin Zidong) | | 東京都立大学 大学院生 |

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 |
|---------|---------|