

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18758

研究課題名（和文）In-situ観察に基づく超音波振動付加下における塑性変形挙動の理解とその応用

研究課題名（英文）Investigating the role of ultrasonic vibration on plastic deformation process based on in-situ observation

研究代表者

杉原 達哉（Sugihara, Tatsuya）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90637539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：金属の塑性変形時に材料に超音波振動を付与することによって変形抵抗が低減する現象は、「Blaha効果」として広く知られ、金属加工への積極的な展開が進められる一方で、依然として不明な点が多い。そこで本研究では、「超音波振動を付与した材料の塑性流動現象のin-situ観察」を実現することにより、同効果のメカニズムや発現条件の解明に取り組んだ。その結果、構築したその場観察手法によって、超音波振動が金属材料の塑性変形挙動に及ぼす影響を可視化することが可能となり、「体積効果」は材料のひずみ・加工硬化挙動に大きな影響を受けること、「表面効果」は潤滑剤の接触界面への供給効果に影響することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はコア技術である「超音波振動を付与した材料の塑性流動現象のin-situ観察」を駆使することによって、これまで見落とされてきた変形過程における重要な事象・現象の獲得を図るとともに、定量化した指標から超音波振動の「体積効果」と「表面効果」を抽出することによって、「超音波振動がもたらす金属材料の塑性変形挙動の変化」についてより深い理解をもたらすものである。これによって得られた成果は、超音波振動を援用した加工技術の発展に大きく寄与するだけでなく、トライボロジーや塑性力学といった他分野との学際的な発展が期待でき、極めて大きな工学的意義を有していると考えている。

研究成果の概要（英文）：The phenomenon of reduced deformation resistance in metals when ultrasonic vibrations are applied during plastic deformation, widely known as the "Blaha effect," has been actively explored for its potential applications in metal processing. However, many aspects of this phenomenon remain unclear. In this study, we aimed to elucidate the mechanisms and conditions under which this effect manifests by achieving in-situ observation of the plastic flow phenomena in materials subjected to ultrasonic vibrations. Our findings indicate that the developed in-situ observation method allows for the visualization of the impact of ultrasonic vibrations on the plastic deformation behavior of metallic materials. Specifically, we discovered that the "volume effect" is significantly influenced by the material's strain and work-hardening behavior, while the "surface effect" impacts the supply of lubricants to the contact interface.

研究分野：加工学

キーワード：超音波振動 Blaha効果 塑性学 その場観察 トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

(1) 金属の塑性変形時に材料に超音波振動を付与することによって変形抵抗が低減する現象は、1950年代の F. Blaha と B. Langenecker らの一連の研究から端を発し、「Blaha 効果」として広く知られている^[1]。

(2) この現象に着目し、超音波振動を金属加工に応用するという研究が数多く行われ、実際に切削加工、深絞り、圧延、鍛造といった様々な分野への応用が進められている。ここで、超音波振動の付与による変形抵抗の低減は、主に超音波重畳効果や転位への作用をはじめとする「体積効果 (Volume effect)」, 界面摩擦への作用である「表面効果 (Surface effect)」が組み合わさることで発現するが^[2], 変形の結果のみからこれらの効果を切り分けて議論することは極めて困難であることから、そのメカニズムや発現条件には依然として不明な点が多く、各研究によって異なる結論が導かれている状況にある^[3,4]。

(3) つまり、超音波振動を援用した加工は古くから期待されている技術である一方で、その基本原理や作用機序については未だに不明な点が多く、開拓・発展の余地の大きい分野であると言える。

2. 研究の目的

(1) 研究課題で述べた課題の解決にあたり不可欠となるのが、体積効果、表面効果を明確に区別し、かつ定量的な指標によって評価することである。本研究ではその実現のため、「粒子画像流速測定法(PIV)とインデンテーションを援用した超音波振動下における材料の塑性流動現象の in-situ 観察」による評価手法の確立を図る。

(2) 本手法の実現により、様々な変形場における材料の塑性変形挙動が直接的に観察可能となるだけでなく、「体積効果」の帰結として現れる“すべり線場、ひずみ・ひずみ速度分布などのバルクな材料の変形挙動”, そして「表面効果」の帰結として現れる“インデンタ-材料間のすべり量などの摩擦界面における変形挙動”についての評価が可能となり、それぞれを定量的な指標に基づき独立して議論することが期待できる。

(3) 以上のように、本研究は「超音波振動を付与した材料の塑性流動現象の in-situ 観察」というコア技術を軸として研究を展開することによって、“超音波振動がもたらす金属材料の塑性変形挙動の変化”そのものに対して深い理解をもたらすとともに、それらに基づいた新たな金属加工技術を構築することを目的とする、挑戦的な研究課題である。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、「超音波振動下における材料の塑性流動現象の in-situ 観察」を実現するための具体的な手法として、くさび状圧子(インデンタ)による押し込み試験を活用した装置を開発した。開発装置の概要を図1に示す。同図に示すように、超音波振動ステージ上でガラス面に沿って平面ひずみ状態の変形を実現し、押し込み試験中のインデンタ近傍の材料の変形挙動を高速カメラで撮影するとともに、撮影した画像に対して PIV 解析を行うことで、インデンタ近傍における材料内部の変位分布、ひずみ/ひずみ速度分布、すべり線場の獲得を目指した^[5]。

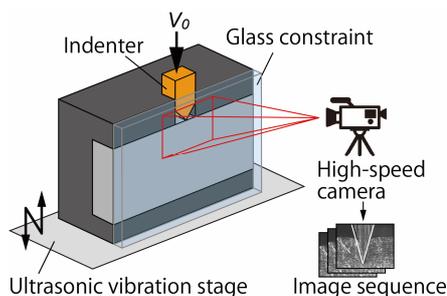


図1：塑性流動現象の In-situ 観察装置

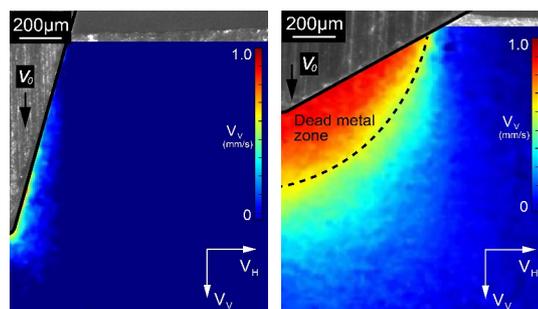


図2：鉛直下向き方向速度分布

(左：30°，右：120°)

(2) 図2に、 30° および 120° のインデンタを使用した場合について、材料内部における鉛直方向下向きの変形速度分布を求めた結果を示す（超音波振動無し）。同図に示すように、鋭角のインデンタを用いた場合、インデンタ側面に変形が集中しているのに対し、鈍角のインデンタを用いた場合では、インデンタ直下に加工硬化によって生じたデッドメタルが生成し、変形場が広範囲に広がっていることがわかる。これらの結果は、開発した装置では、インデンタの先端角を変えることによって、せん断・切断、圧縮といった様々な変形場を再現できることを示している。

(3) 超音波振動の材料塑性変形への影響を評価するため、インデンタに動力計を設置し、押し込み試験中の変形抵抗を評価した。図3に、変形抵抗の測定結果の例を示す。同図に示すように、本研究ではインデンタを所定の深さまで一定速度（ 0.1 mm/s ）で押し込み、一秒钟静止した後、鉛直上向き方向に引き抜きを行った。そして、「体積効果」への影響を評価するために、押し込み過程における圧入抵抗を、「表面効果」への影響を評価するために、引き抜き時の引き抜き抵抗（離形抵抗）をインデンタ-材料界面における凝着力とみなし、それぞれ評価した。

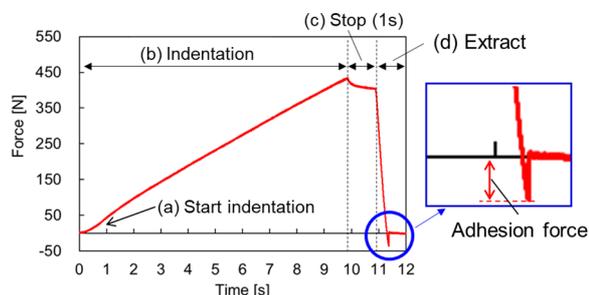


図3：変形抵抗の測定結果例

4. 研究成果

(1) 超音波振動（Ultrasonic vibration: USV）の体積効果への影響を評価するために、図4ならびに図5に、 30° および 120° のインデンタを用いた場合の圧入抵抗（各図(a)）、ならびに、それらを微分することによって得た増加率（各図(b)）をそれぞれ示す。図4に示すように、 30° のインデンタを使用した場合では、超音波振動の付与によって変形抵抗が低減しており、圧入距離の増加にともないその低減効果が徐々に増加している。その一方で、図5に示すように、 120° のインデンタを使用した場合では、圧入開始後は変形抵抗の低減効果が得られている一方で、圧入距離の増加にともない変形抵抗の増加率が逆に増大に転じていることがわかる。ここで、先行研究において、ひずみの小さい領域では超音波振動の「音響軟化」効果によって変形抵抗が低減し、ひずみの大きい領域では逆に「音響硬化」効果によって変形抵抗が増大することが示されている[4]。以上を踏まえると、超音波振動の付与によって、ひずみの小さい領域では音響軟化が優位となることで応力が低減する一方で、ひずみの大きい領域では音響硬化が優位になり応力が増大することで、応力-ひずみ特性がひずみ量に応じて大きく変化することが予想される。

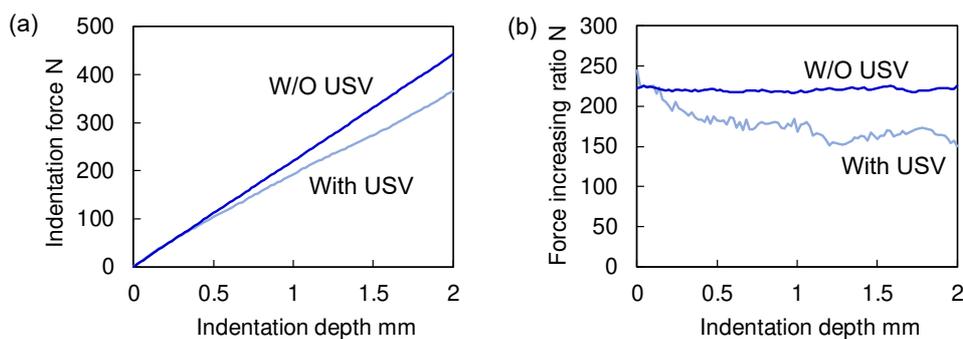


図4： 30° インデンタにおける(a) 圧入抵抗と(b) 増加率

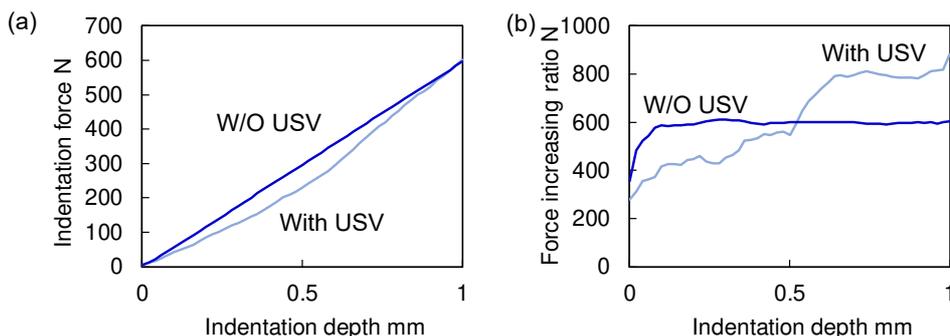


図5： 120° インデンタにおける(a) 圧入抵抗と(b) 増加率

(2) ここで、図 6 に、PIV 解析によって獲得した 30° インデンタにおけるひずみ、および水平方向速度分布を示す。なお、これらの図においては、インデンタを超音波振動ステージ上に鉛直上向き方向に固定し、材料をインデンタに対して鉛直下向きに押し込んでいる。同図左に示すように、 30° インデンタではひずみはインデンタ近傍に集中して発生していることから、インデンタ近傍でのみ音響硬化、それ以外の位置では音響軟化が優位になっていると考えられる。そして、同図右に示すように、 30° ではインデンタに押し広げられるような変形場が広く分布していることから、変形場の大部分では音響軟化が優位となっていると予想され、この横方向の変形場が圧入にともない増加することで、図 4 のように抵抗の低減率が増加したと考えられる。一方で、図 7 に、 120° インデンタを用いた場合の鉛直下向き方向の速度分布の推移を示す。同図から、同インデンタでは圧入距離の増加にともなって、インデンタに対して材料が静止しているエリアが増加していく様子が確認できるが、これはインデンタ近傍で圧縮ひずみが蓄積することで、加工硬化領域が広がっていくことを意味している。この結果から、 120° インデンタでは音響硬化が優位となる高ひずみ領域が加工の進行にともなって広がっていくことで、図 5 に示したように、圧入抵抗が徐々に増加に転じたと言える。以上の結果から、超音波振動がもたらす体積効果は、材料のひずみ・加工硬化の挙動が大きく影響することが明らかとなった。

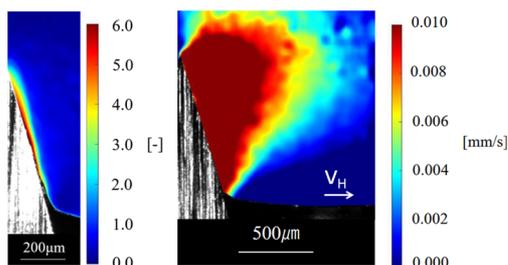


図 6：ひずみ分布 (左) と水平方向速度分布 (右)

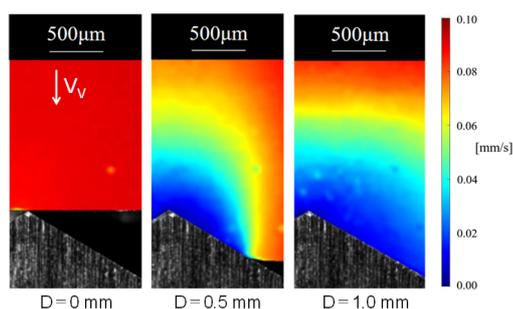


図 7：鉛直下向き方向速度分布

(3) 表面効果における潤滑剤の影響を評価するために、潤滑剤としてイソプロピルアルコールを用い、 30° インデンタにおける凝着力の評価を行った。その結果を図 8 に示す。同図に示すように、超音波振動を付与することによって、潤滑剤の有無に関わらず凝着力が大きく低減しており、なかでも潤滑剤供給下で超音波振動を付与した場合が最も小さい凝着力を示している。

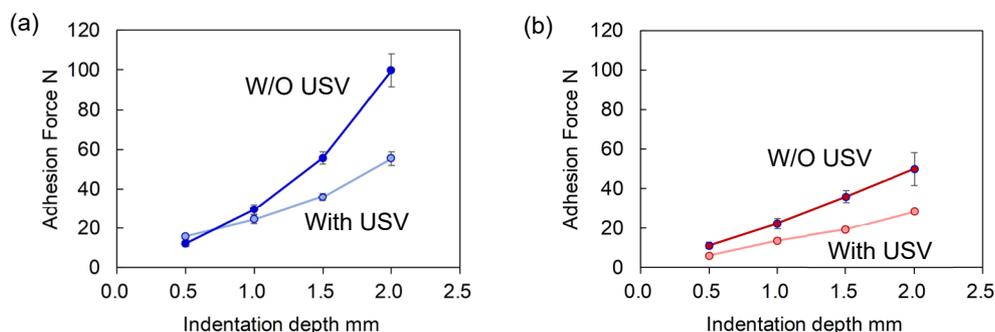


図 8： 30° インデンタにおける凝着力 (a) 潤滑剤なし、(b) 潤滑剤あり

(4) 本研究では特に、この超音波振動の潤滑剤の作用に着目し、表面積拡大率分布に基づく評価を行った。界面の凝着摩擦現象は、新生面の露出、つまりは材料の表面積の拡大に大きな影響を受けることが知られており、さらにその分布によって凝着力の分布が推定できることが先行研究によって明らかとなっている[5]。そこで本研究では、図 9 に示すように、材料表面に等間隔

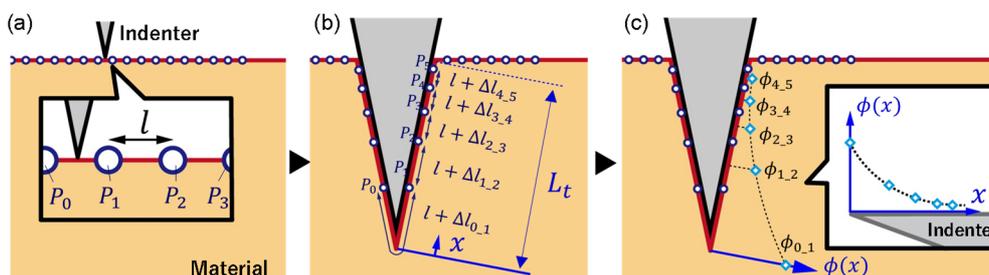


図 9：表面積拡大率分布の獲得方法^[5]

で設置した仮想的な追跡点の変位を PIV 解析によって求め、圧入後の追跡点の間隔 $l + \Delta l$ から各追跡点位置における表面積拡大率 $l/\Delta l$ を求めることで、インデント側面におけるインデント先端からの表面積拡大率分布を獲得した。

(5) 図 10 に、超音波振動を付与していない場合、ならびに、超音波振動を付与した場合について、各潤滑環境における表面積拡大率分布を示す。同図(a)に示すように、超音波振動を付与していない場合、潤滑剤供給時の表面積拡大率分布は、ドライ時から変化していることがわかる。これは、潤滑剤による供給効果が偏って発現していることを意味しており、超音波振動が無い場合は、潤滑剤はインデント近傍まで到達しておらず、その効果は先端から離れた位置でのみ発現していることを示している[5]。一方で、同図(b)に示すように、超音波振動付与時においては、潤滑剤供給時に凝着力が大きく低減しているのにも関わらず、表面積拡大率分布はドライ加工時と変化していない。これは、潤滑剤による凝着力低減効果がインデント側面で一様に発現していることを意味しており、超音波振動の付与によって、潤滑剤がインデント先端部近傍まで供給されたと考えられる。特に、超音波振動の付与によって、加工中の材料-金型界面の接触が断続的になることが示されていることから[6]、非接触時に潤滑剤の界面への供給が促され、接触面全域において偏りなく一様に凝着力が低減したと言える。以上の結果から、超音波振動の表面効果のひとつとして、潤滑剤の接触界面への供給が促されることで、界面の摩擦状態が改善するという効果が得られることが明らかとなった。

(6) 上記に示す通り、本研究では“超音波振動がもたらす金属材料の塑性変形挙動の変化”について、主に「体積効果」と「表面効果」に着目した検討を行った。そして、「超音波振動下における材料の塑性流動現象の in-situ 観察」を援用することによって、これらの効果の影響を定量的に議論可能であることを示した。今後、さらに押し込み速度、温度、材料特性などの影響などを検討することによって、超音波振動を援用した新たな加工技術に繋がる知見の獲得を図っていく。

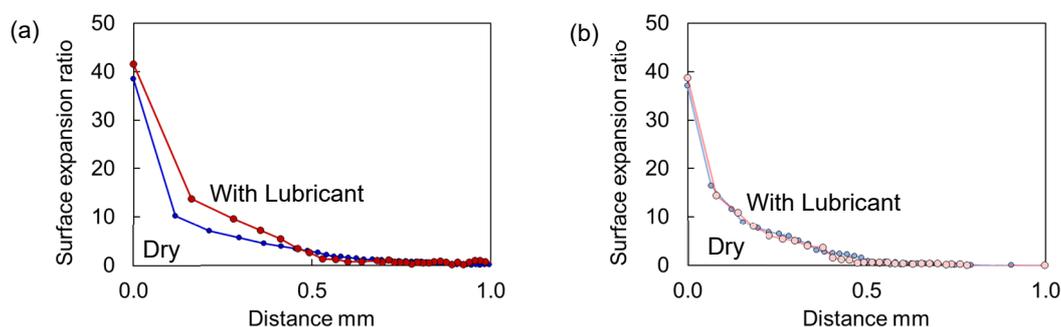


図 10 : インデント側面における表面積拡大率分布 (a) 超音波振動なし, (b) 超音波振動あり

<引用文献>

- [1] F. Blaha and B. Langenecker, Elongation of zinc monocrystals under ultrasonic action, Die Naturwiss., 42, p. 556, 1955
- [2] A Siddiq, T El Sayed, Ultrasonic-assisted manufacturing processes: Variational model and numerical simulations, Ultrasonics, 52, 4, pp. 521-529, 2012
- [3] H Zhou, H Cui, QH Qin, Influence of ultrasonic vibration on the plasticity of metals during compression process, Journal of Materials Processing Technology, 251, pp. 146-159, 2018
- [4] J Hu, T Shimizu, T Yoshino, T Shiratori, M Yang, Ultrasonic dynamic impact effect on deformation of aluminum during micro-compression tests, Journal of Materials Processing Technology, 258, pp. 144-454, 2018
- [5] X Lin, S Kinoshita, T Sugihara, T Enomoto, Exploring the role of the interface adhesion phenomena focusing on surface expansion distribution, Tribology International, 179, 108160, 2023
- [6] W Presz, Dynamic effect in ultrasonic assisted micro-upsetting, AIP Conference Proceedings, 1960, 100012, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Lin Xiaoke, Kinoshita Seiji, Sugihara Tatsuya, Enomoto Toshiyuki	4. 巻 179
2. 論文標題 Exploring the role of the interface adhesion phenomena focusing on surface expansion distribution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 108160 ~ 108160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2022.108160	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 Lin Xiaoke, Sugihara Tatsuya, Enomoto Toshiyuki	4. 巻 196
2. 論文標題 Effects of interface friction states on plastic deformation in metal surface and bulk	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 109668 ~ 109668
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2024.109668	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tatsuya Sugihara, Xiaoke Lin, Seiji Kinoshita, Toshiyuki Enomoto
2. 発表標題 Direct Observation of Large-Strain Deformation at Contact Interface in Wedge Indentation of Aluminum
3. 学会等名 NanoSPD 8 (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------