

補助事業番号 2023M-261
補助事業名 2023年度 マイクロ・ナノ粒子の極超音速飛翔の実現と
材料高機能化ピーニング 補助事業
補助事業者名 中央大学 米津明生

1 研究の概要

輸送機 の材料軽量化や強靱化は必須の課題であり、金属材料の表面改質技術が貢献する。これまでに熱処理や塑性加工（表面加工）、またそのハイブリッド加工など様々な提案がされており、き裂発生 の端緒となる表面の補修や改質の実績は数多い。本研究ではレーザーアブレーションを駆動力とした粒子射出装置を開発した。この射出装置はマイクロサイズ粒子を1000m/s近い速度で射出することができ、従来ピーニング技術よりも微小かつ高速な粒子衝突を可能にした。本申請では、金属の転位速度を超えた高速塑性変形に伴って金属の結晶粒が微細化することを明らかにした。そして、本技術は金属材料の表面改質技術としての応用可能性を検討した。最終的には、材料表面の強靱化と耐摩耗性向上のハイブリッド加工技術としての展開を目指す。

2 研究の目的と背景

レーザーアブレーションを用いてマイクロ・ナノ粒子を極超音速レベルで飛翔させ、材料表面への衝突現象がもたらす材料高機能化ピーニング技術の開発が目的である。すなわち、ナノ結晶化による強靱化およびテクスチャリング加工による耐摩耗性向上のハイブリッド加工を目指す。

金属材料の表面改質処理には、熱処理、表面研削、ピーニングやハイブリッド加工による塑性加工など、さまざまな方法が開発されてきた。局所的な塑性変形による加工硬化は、表面改質の一般的な実際の技術における重要な現象である。例えば、実用されている一例にショットピーニング(SP)がある。これは、サブミリサイズの粒子が100 m/sほどで無数に衝突することで対象材料表面に加工効果層を導入する。加工硬化を引き起こす転位の動きは、ひずみ速度に依存するため、表面処理としてのSPでは粒子の発射速度と衝撃速度が重要である。さらにひずみ速度の他にも、塑性変形中の金属微細構造の発達も、温度、ひずみ量に大きく依存する。高ひずみと高ひずみ速度を伴う極端な塑性変形プロセスは、金属の粒子構造を（結晶粒微細化として）ナノ結晶領域に変化させるのに効果的であり、その機械的特性が大幅に改善されることが報告された。

本研究ではレーザーアブレーションを駆動力とした粒子射出装置を開発し、金属材料へ衝突試験を実施する。既往研究では銅粒子を超音速で銅基材に射出し、ナノ結晶、ナノ双晶、動的再結晶化(DRX)などの結晶構造の導入に成功した。このようなユニークな構造は、機械的特性を大幅に改善する可能性がある。したがって、衝突試験によって生成される微視組織がマクロ的な強度上昇を引き起こすか検討する必要がある。

3 研究内容

(1) マイクロ・ナノ粒子の極超音速飛翔技術と応力発光体を用いた速度計測手法の開発
(<https://mater.mech.chuo-u.ac.jp/research/>)

パルスレーザーを用いた粒子射出法を開発した。本装置の評価として、高速度カメラによる粒子速度計測を実施した。さらに、応力発光体を用いた粒子速度計測手法を開発した。



図1 開発した粒子射出法と高速度カメラによる粒子速度計測の様子

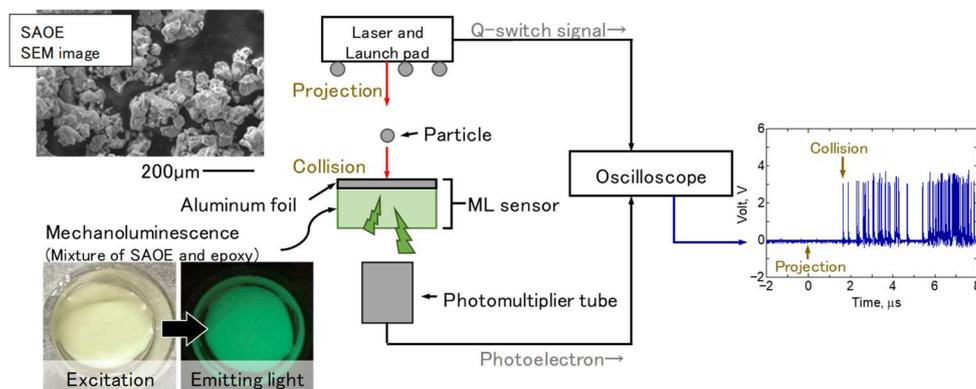


図2 応力発光体を用いた粒子速度計測手法の概略図

(2) マイクロ粒子の高速衝突による材料高機能化ピーニング効果の調査

① 粒子衝突による結晶粒微細化と疲労強度特性の調査研究(<https://mater.mech.chuo-u.ac.jp/research/>)

② 粒子衝突によるテクスチャリング加工と耐摩耗性の向上に関する研究
(<https://mater.mech.chuo-u.ac.jp/research/>)

衝突痕断面を切り出して結晶組織の観察したところ、図3を得た。衝突痕付近の極表面に微細な

結晶構造を導入できた。LIPITを用いて引張試験片の表面に複数の衝突痕を生成したところ、降伏応力がわずかに上昇した。また、引張疲労試験においても寿命が延びた。テクスチャリングについては、LIPITで生成されるアスペクト比の高いディンプルによって油保持性を向上し、耐摩擦、摩耗に優れていることを明らかにした(図4)。

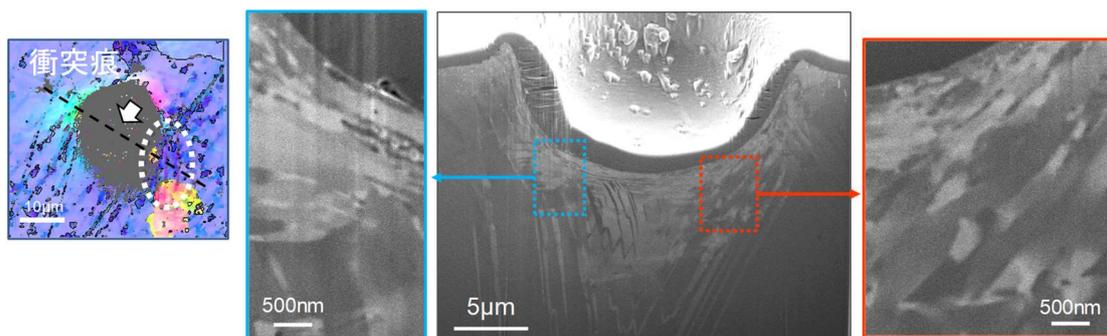


図3 純金属材料に対するLIPIT衝突痕の断面観察 ※コントラストは結晶方位差を示す

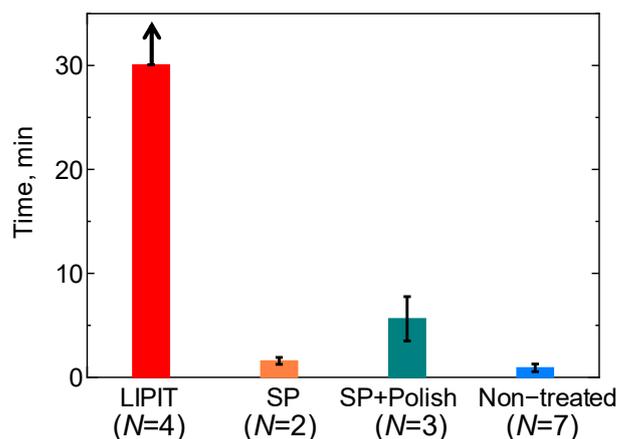


図4 摺動試験結果. 各試験片(LIPIT加工, 従来法ショットピーニング(SP), SPの後研磨あり, 未処理)において, 焼き付くまでの時間. ※最大試験時間30分

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究で開発した粒子射出法は、複数粒子の衝突はもちろん、単一粒子の衝突も実現可能である。したがって、単一粒子を制御して高速飛翔できるようになれば、粒子衝突現象の詳細な検討が期待できる。例えば、コールドスプレー(CS)やエアロゾルデポジション(AD)法の原理解明に貢献すると考えられる。CSは粒子が衝突したとき、基材に粒子もしくはその一部が溶融して付着することを利用したコーティング技術であり、ADはセラミック粉末が基材衝突時に破壊して付着することを利用した成膜法である。これらは実用技術でありながらも融着(移着)原理、もしくは成膜原理が解明されていないのが現状である。そこで、本研究で開発した粒子射出法を用いれば、単一粒子に着目して衝突現象を追っていくことができると考えられる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者は材料力学分野に所属し、固体の変形と破壊の力学に関する研究に従事してきた。これまで、パルスレーザー（レーザーアブレーション現象）を用いた界面の剥離強度試験（LaSAT）の開発や、接着剤やコーティング膜の高速負荷に対する強度に関する研究を行っており、研究成果を挙げてきた。その検討過程で、同様にパルスレーザー（レーザーアブレーション現象）を利用して微小粒子を高速で射出するという本事業課題を着想した。補助事業者は、超音波による材料健全性診断による研究も従事しており、そのノウハウも流用することで本課題に取り組んでいる。つまり、補助事業者の研究背景を発展させた内容となっており、高速粒子射出技術および粒子の飛翔速度計測手法の開発に成功した。この技術により、純金属材料の微視組織を微細化することができ、実社会で役立つ表面改質技術になりうると予想され、補助事業者の研究がさらに発展できると期待している。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

特許

- 梶原美紀，米津明生，粒子移動速度計測装置及び粒子移動速度計測方法，特願2022-171734（2022）
- 梶原美紀，市川諒，米津明生，表面加工，特願2023-103507（2023）

発表論文

- Miki Kajihara, Shunsuke Sakuma, Ryo Ichikawa, Akio Yonezu, Penetration failure behavior of monolayer Graphen Oxide via AFM and Laser Induced Particle Impact Test (LIPIT), Proceedings of the ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2024. プロシーディングスIMECE2024-144026.pdf(投稿中) 2024
- Miki Kajihara, Kanari Nagaami, Takeru Miyagawa, Akio Yonezu, Development of Laser Induced Particle Impact Test (LIPIT) as High-Speed Micro Impact Testing, Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2023, プロシーディングスIMECE2023-111508.pdf, 7ページ, 2023
- 梶原美紀，市川諒，鈴木熙透，米津明生，レーザー誘起粒子衝突試験を用いた表面改質の検討，日本機械学会，M&M2023材料力学カンファレンス，番号CL0213，茨城，2023/9/27 若手優秀講演フェロー賞 受賞
- 市川諒，梶原美紀，長網奏里，鈴木熙透，米津明生，レーザー誘起による超音速微粒子衝突を利用した表面形状と摩擦特性評価，日本機械学会，2023年度年次大会，番号J133p-09，神奈川，2023/9/3

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 中央大学 理工学部(チュウオウダイガク リコウガクブ)

住 所： 〒112-8551

東京都文京区春日1-13-27

担 当 者： 米津明生(ヨネヅアキオ) 役職名 教授(キョウジュ)

担 当 部 署： 理工学部 精密機械工学科(リコウガクブ セイミツキカイコウガツカ)

E - m a i l: yonezu@mech.chuo-u.ac.jp

U R L: <https://mater.mech.chuo-u.ac.jp/>