

# レーザー誘起衝撃波による薄膜被覆合金の 表面・界面強化技術開発

公益財団法人 J K A

2025年度 機械振興補助事業（研究補助）

成果報告概要

福井大学 学術研究院 工学系部門

機械工学講座 精密加工研究室

教授 岡田 将人

本研究では、水中に浸漬した対象物に対してレーザ光を照射することで、対象面上で高圧プラズマを発生させ、これを衝撃波として対象物に伝播させて、対象面表層部の特性を制御する表面処理法であるレーザピーニング(以後、LP)技術を活用して、硬質薄膜被覆合金の薄膜の耐摩耗性ならびに、薄膜と基材界面の耐剥離性を同時に強化すること、ならびにその強化メカニズムを包括的に評価することを目的とした。主に以下のことに取り組んだ。

1. LP処理による効果検証の対象として、精密加工のために生産現場で広く用いられている切削加工のためのコーテッド超硬工具に焦点を当て、コーテッド超硬工具にLP処理を種々の条件で適用した場合の分析的評価から、その作用メカニズムを明らかにする。
2. 上記に加えて、スクラッチ試験、実切削加工試験等の直接的評価試験により、実用に供した場合の効果について明らかにする。

切削加工は様々な機械要素の精密な形状創成技術として適用されており、その加工精度を担保する切削工具の長寿命化は継続的な課題である。切削工具の長寿命化のために、工具材質として、基材に超硬合金を用い、その表面に硬質薄膜を成膜するコーテッド超硬合金を採用することが多い。しかし、基材に異材を被覆する成膜技術には、基材界面との密着強度を高める必要がある。この密着強度を決定する要因として、界面付近の硬質薄膜と基材両者の残留応力がある。切削工具への成膜技術として広く用いられる物理蒸着(以後、PVD)法の場合、硬質薄膜には高い圧縮残留応力が発現し、相対的に基材界面付近は、成膜前よりも残留応力が引張側に遷移する。そのため、PVD法によるコーテッド超硬工具には、界面付近の基材の残留応力を、硬質薄膜同様に圧縮側に遷移させる必要がある。対象面表層に圧縮残留応力を付与する方法としてLP処理が挙げられる。LP処理は、処理領域の制御性が高く、切削工具の微細な切れ刃部のみに限定した処理に対して親和性が高いと考える。加えて、固体間の接触を伴わない非接触処理法であるため、コーテッド超硬合金などの硬脆材に対する欠陥導入を抑制できるとの着想に至り、本研究を実施した。

## 実験① LP処理による表面・界面の作用メカニズム

成膜後のコーテッド超硬合金表面にLP処理を施した場合の表面形状ならびに界面付近の基材残留応力状態を評価

### 【評価項目】

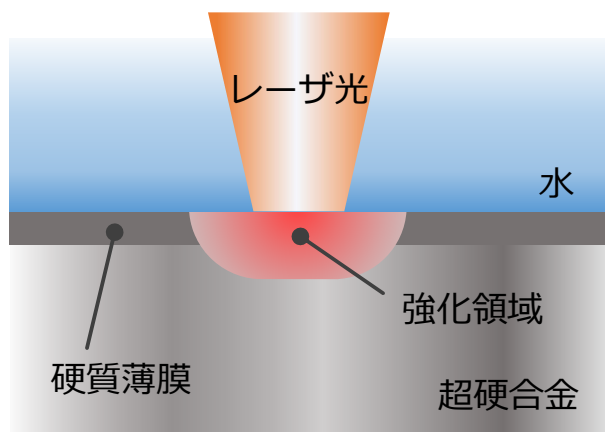
硬質薄膜表面観察・粗さパラメータ, 基材の残留応力状態など

## 実験② 破壊試験に基づくLP処理工具の直接的評価

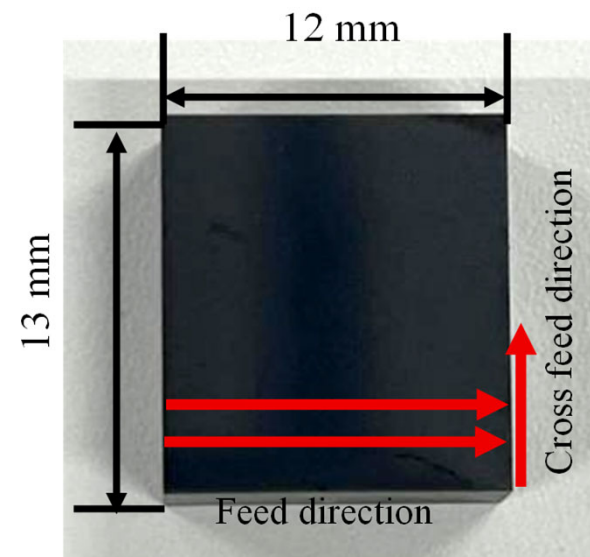
切削加工用のコーテッド超硬工具に対するLP処理有無によるスクラッチ試験, 実切削加工試験によるLP処理の実用的な効果検証

### 【評価項目】

硬質薄膜の破壊・剥離形態, 工具摩耗形態など



<LP処理模式図>



<試験片外観とレーザー照射経路>

## コーテッド超硬合金に対するLP処理の概要

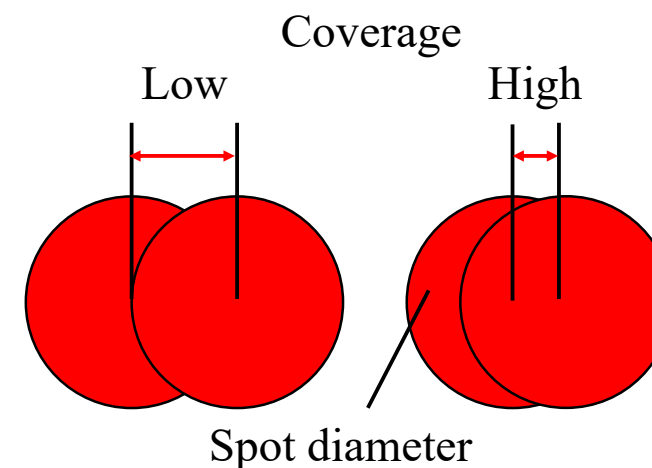
- 硬質薄膜を成膜後のコーテッド超硬合金に対してLP処理を実施
- レーザ照射スポットは直線的に走査し、一定量ごとにクロスフィードを付与して対象面全面を処理
- 既定のカバレッジが得られるまで反復

## LP処理条件

Pulse energy	mJ	80
Coverage	%	250
Spot diameter	mm	0.5
Power density	GW/cm <sup>2</sup>	6.6
Laser fluence	J/cm <sup>2</sup>	10.2
Irradiation energy per unit area	mJ/mm <sup>2</sup>	255

本概要では代表的な処理条件のみを示す

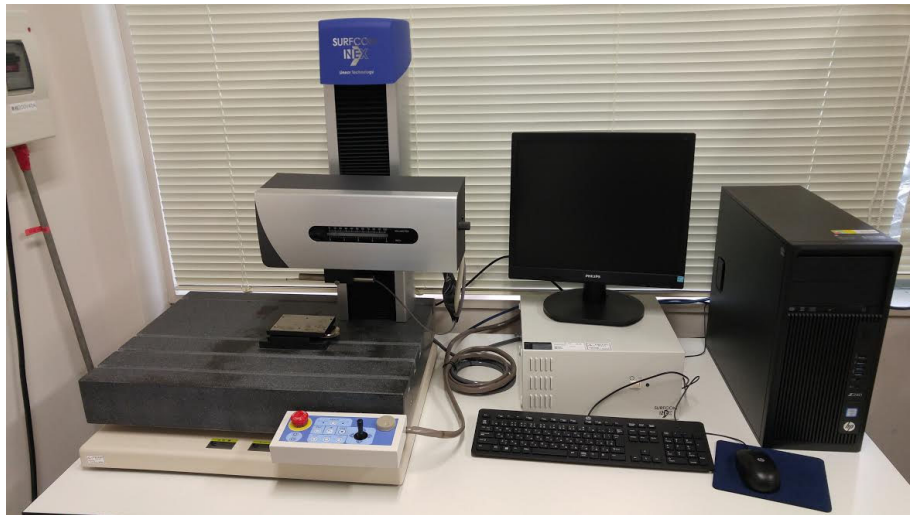
## カバレッジ概要



$$Coverage = (\pi D^2 / 4) N_p$$

$D$ : Spot diameter,  $N_p$ : Number of irradiations

- パルスエネルギーとカバレッジにより複数のレーザー照射条件を設定
- 硬質薄膜には切削工具に多用されるPVD(AIP)法によるCrAINを適用
- 超硬合金基材には, JIS K10相当の超硬合金を適用

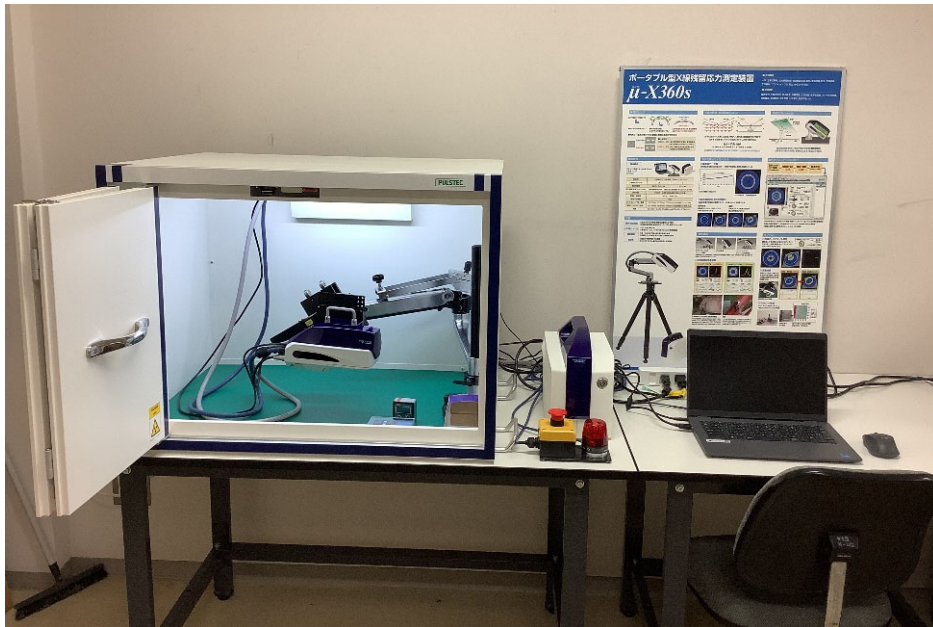


触針式粗さ計



走査型電子顕微鏡

- LP処理前後の硬質薄膜の表面形状，表面粗さパラメータは，触針式粗さ計（SURFCOM NEX SD-12，(株)東京精密）により測定
- 硬質薄膜の表面形態は，走査型電子顕微鏡（JSM-7000Plus，日本電子(株)）により観察

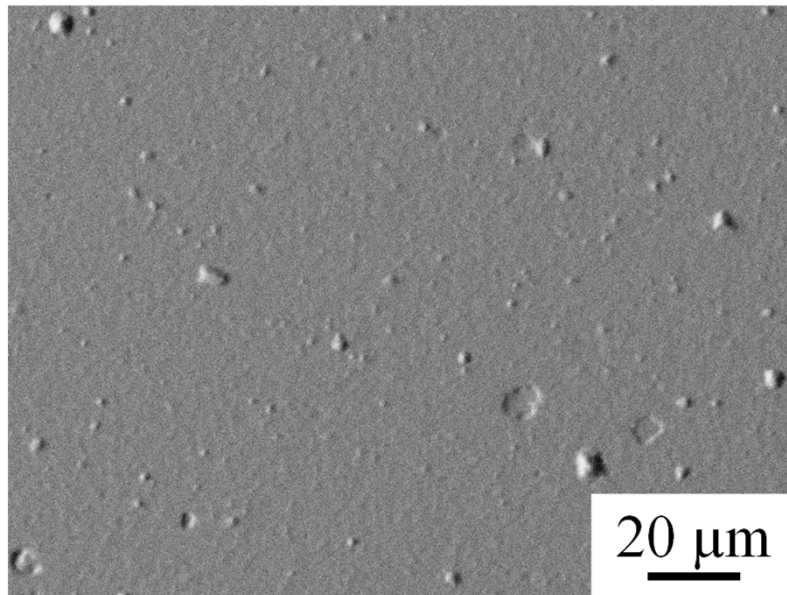


X線残留応力測定器

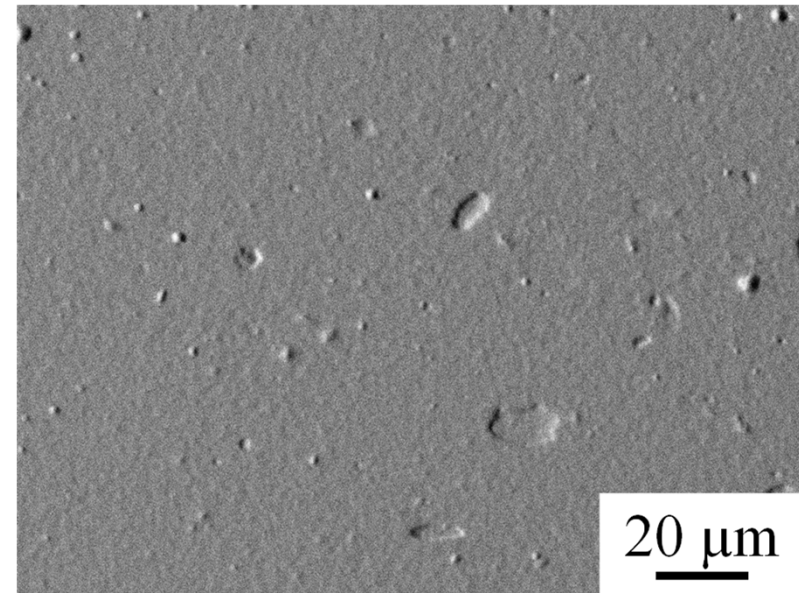


スクラッチ試験機

- 基材である超硬合金の界面付近の残留応力は、X線残留応力測定機 ( $\mu$ -X360s, パルステック工業(株)) により測定
- 硬質薄膜の耐スクラッチ性ならびに基材との耐剥離性は、スクラッチ試験機 (REVETEST, CSM Instruments) により測定



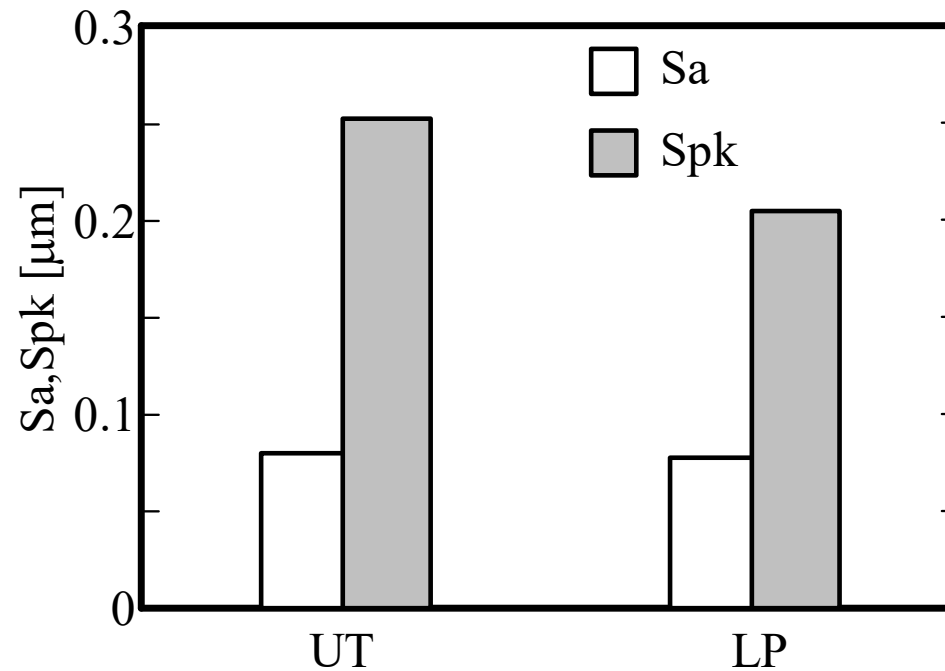
<未処理>



<LP処理>

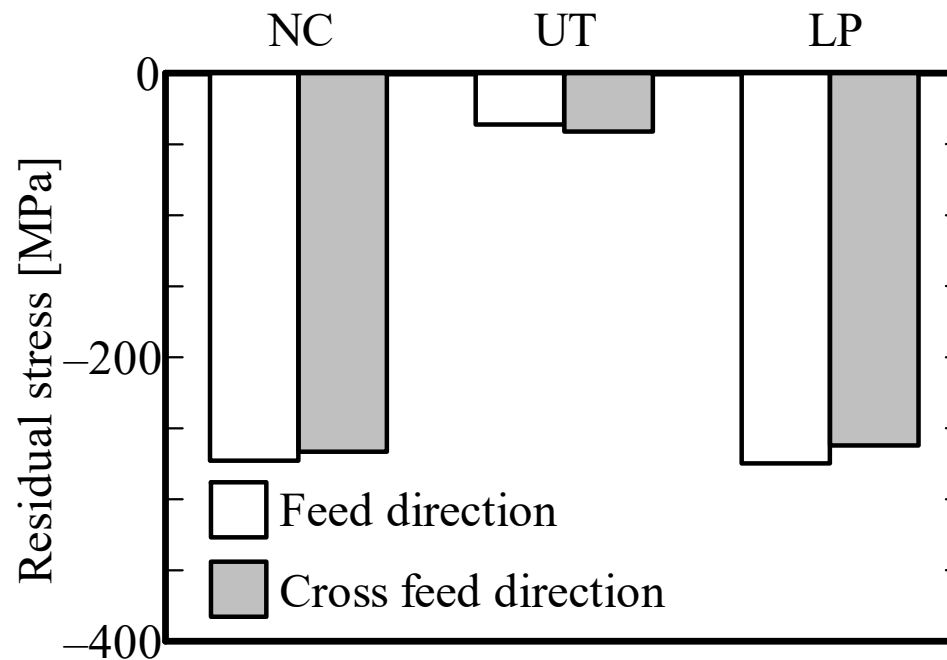
### LP処理有無による表面形態の比較

- 未処理（以後，UT）の場合，成膜工程（PVD法）に由来するドロップレット（凸部）が複数認められた
- LP処理を施すことで，わずかにドロップレットが抑制された
- 定量評価のために表面粗さパラメータにより評価（次ページ）



処理前後の硬質薄膜の表面粗さ

- 平均面からの表面凹凸の高さと深さの絶対平均偏差であるSaは、処理前後でほとんど変化が認められず
- 対象面上に存在する突出山部の平均高さを示すSpkは、LP処理を施すことで明確に減少傾向

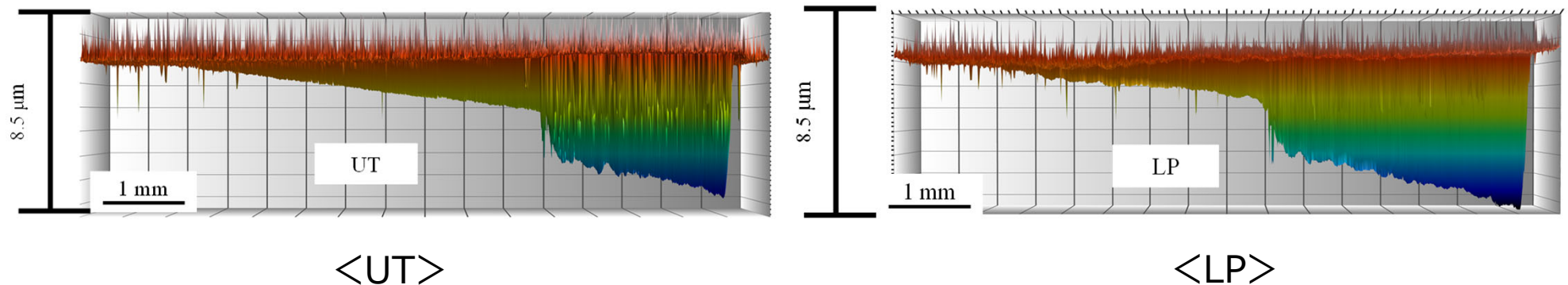


成膜前後・LP処理前後の界面付近の基材残留応力

- いずれの状態においても、残留応力に異方性は認められず
- 成膜前（以後、NC）に対して、成膜を施すことで顕著に残留応力が引張側に遷移
- LP処理を施すことにより、成膜前と同程度の圧縮残留応力が発現

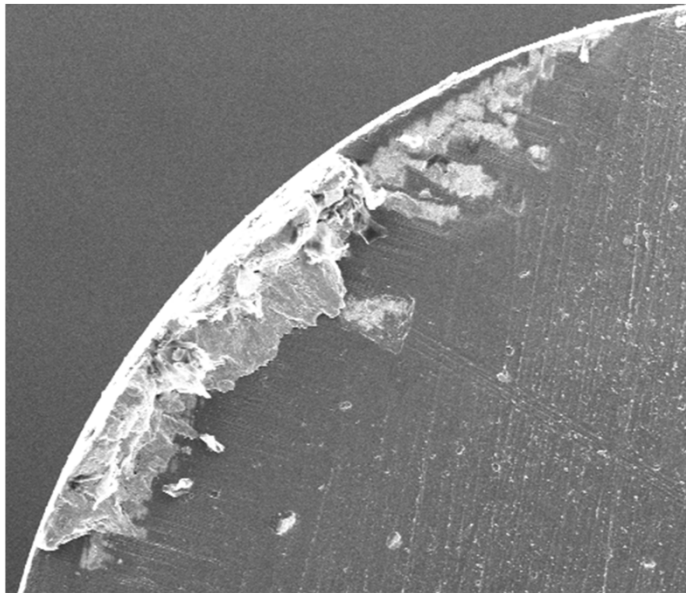
## スクラッチ試験条件

- ・最大荷重：140 N
- ・スクラッチ長さ：7.0 mm



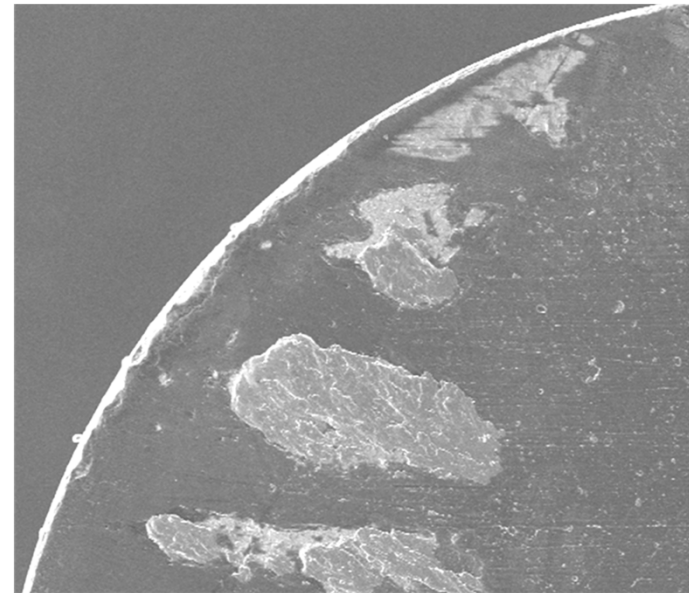
スクラッチ痕中央部断面形状

- スクラッチ深さが、硬質薄膜厚さである $3.0\mu\text{m}$ 程度に達した時点で急激に増加する傾向
- 急激にスクラッチ深さが増加した位置までの長さはLP処理を施した場合が短く、この傾向については、如何なる特性に起因するものか要検証



<UT>

※本試験のLP処理におけるパルスエネルギーは40mJ



<LP>

実切削加工試験後の工具切れ刃先端すくい面のSEM画像

- UTの場合、切れ刃稜線付近のコーティングが剥離し、被削材の凝着が発生
- LPの場合、すくい面上に凝着領域は認められたものの、稜線付近の明確な変化は認められず

## 実験① LP処理による表面・界面の作用メカニズム

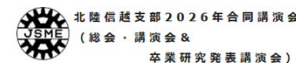
- 成膜工程で生じたドロップレット数はLPを施すことによって、わずかに減少する傾向が認められた。
- LP処理前後で突出部高さを示すSpkが明確に減少傾向を示し、ドロップレットの形状に変化が生じていることを示唆している。
- LP処理を施すことで、顕著に界面付近の基材残留応力が圧縮側に遷移し、成膜工程前の残留応力状態に復元した。

## 実験② 破壊試験に基づくLP処理工具の直接的評価

- スクラッチ試験により、基材に到達するまでのスクラッチ長さはLP処理を施すことで減少した。一方で、硬質薄膜内のスクラッチ深さの増加傾向はLP処理を施した場合が緩慢であった。
- 実切削加工試験により、同一切削条件・切削距離により得られた切れ刃摩耗形態を確認したところ、LP処理を施した場合は、明確に切れ刃稜線部のコーティング剥離、被削材凝着が軽減された。

- LP処理を活用することで、コーテッド超硬工具の寿命伸長が期待できることを明らかにした。本概要で紹介した成果以外にも、複数のレーザー照射条件において評価結果に傾向が認められており、レーザー照射条件の設計指針を構築することで、より高い効果の獲得が期待できる。
- 硬質薄膜を被覆したコーテッド超硬合金は、切削工具のみならず、プレスや樹脂成形用金型、ベアリング部材などの摺動部品、半導体・電子部品製造装置などの様々な産業分野で用いられている。LP処理は汎用性の高い表面改質技術であり、これらの産業分野で用いられる工業製品の高付加価値化に寄与できる。
- 超硬合金はタングステンやコバルトなどの希少金属より構成されており、本事業の成果は、希少金属の有効活用に寄与することが期待できる。

2026年3月に開催された日本機械学会北陸信越支部2026年合同講演会において、精密加工に係る外部有識者が参加するオーガナイズドセッションにおいて本事業の研究成果をまとめた講演発表を行った。外部有識者ならびに学内評価者より以下のような意見が挙げられた。



一般社団法人日本機械学会 北陸信越支部

主催： (一社) 日本機械学会 北陸信越支部

日本機械学会北陸信越支部

## 2026年合同講演会

(総会・講演会&卒業研究発表講演会)

2026年3月6日(金)~7日(土) 対面開催  
信州大学 長野(工学)キャンパス

ホーム

スケジュール

プログラム

会場・アクセス

重要なお知らせ

<学術講演会Webサイト>

<https://jsme-hs.jp/>より引用

- 今回の処理対象とした硬質薄膜は、切削工具としては比較的に厚いものであると考える。薄膜厚さと、LP処理による効果の相関関係についても明らかにされると、より有意な結果になる。
- LP処理を施すことで、硬質薄膜の内部破壊は起こっていないかについて確認を要する。
- LP処理の処理条件によっては、硬質薄膜表面に対する熱的な悪影響が発生することが懸念される。生産現場への提案においては、そのような懸念が生じるレーザ照射条件の閾値も踏まえると、より実用性が向上すると考える。
- LP処理した切削工具を適用する場合、被削材としては特にどのような材料を対象とした場合に有意であるかの指針についても提案されるとよい。
- LP処理がドロップ形状をどのように変化させているのかについて、詳細な説明が望まれる。

## 【成果公開実績】 2026年5月11日時点

1. (国内学術講演会) 岡田将人, 埜下友希, 鬼頭亮太, 小林祐次, 木村優太, コーテッド超硬合金の表面・界面特性制御のためのレーザピーニング技術の適用性評価, 日本機械学会北陸信越支部2026年合同講演会講演論文集, D211, 4 pages, 2026.
2. (国際会議) Masato Okada, Yuki Nonoshita, Ryota Kito, Yuji Kobayashi, Yuta Kimura, Proceedings of 6th International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (IC3MT2026), Submitted.

※上記のほかに2026年度中に1件以上の学会発表を予定している。



本研究は、

**公益財団法人 J K A 2025年度**

**機械工業振興補助事業 研究補助**

を受けて実施いたしました。関係各位に深謝致します。