

金属セラミックス複合材料への レーザピーニングの適用と工具材料への応用

東京工業大学 工学院機械系
准教授 青野 祐子
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016224)

キーワード：レーザピーニング，金属セラミックス複合材料，切削工具

1. 研究の目的と背景

金属セラミックス複合材料は、金属をバインダーとして硬質なセラミックスを焼結した材料であり、その代表例は超硬合金である。超硬合金は、炭化タングステン (WC) 粉末を、コバルト (Co) などの金属を数%混合して焼結した硬質焼結材料であり、切削工具や、金型材料として広く産業界で用いられている。このような材料の組織は、セラミックス相と金属相に明確に分離している。材料特性は当然この組織に大きく依存し、超硬合金の場合、WC 相が硬さを担う一方で、Co 相を増やすことでじん性が得られる。したがって、硬さとじん性はトレードオフの関係にあり、用途に応じた組成調整や粒径制御が必要である。

切削工具として利用する場合、工具寿命を決めるのは主に耐摩耗性と耐欠損性であるが、前者は硬度に、後者はじん性に由来することから、その両立は難しい。そこで、現在は被削材にあわせて設計されたより硬質なセラミック薄膜を表面にコーティングした、コーティング工具の需要が高くなっている。

本研究では、じん性の高い、つまり Co 含有量の比較的高い超硬合金を母材として、レーザピーニング (laser peening: LP) によりその表面を改質し硬度を上げることで耐摩耗性を改善する手法を提案する。本手法は、超硬合金を母材としてより高硬度の表面を構成するという点で、上述の気相合成によるセラミックコーティングと類似する。しかし、メリットとして超硬合金自身を表面改質することにより達成するため、界面での不整合が起りにくい。即ち、物理的、化学的連続性を保持するために、表面改質された高硬度層の剥離の抑制が期待される。また、真空環境や、材料ガス、ターゲット材料が不要であるため、産業応用におけるコストメリットも大きい。

LP 技術のこれまでの主な適用先は、原子炉屋航空機部品などの大型の機械構造材料であり、主にステンレス鋼やアルミニウム合金などの金属材料であった¹⁾。そこで、本研究では、金属セラミックス複合材料への LP の効果の基礎的な検証を行った。さらに切削工具への応用可能性についても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要²⁾

LP の光源として、Nd⁺:YAG レーザ (PrecisionII9100, Continuum) の第二高調波を用いた。本装置は、Q スイッチによりパルス幅約 9ns、繰返周波数 10Hz のパルス発振を実現している。レーザ光は、ミラー、平凸レンズを介して、ガラス水槽内に設置された試料の表面に照射される。試料は精密自動ステージに接続しており、ステージ走査により改質面を創成した。照射間隔は 200 μ m となるように調整した。また、アブレーションによる飛散物により水の透過率が低下することで、LP の効率が低減することを防ぐため、処理中はチューブポンプにより水を循環し、メンブレンフィルターによりろ過した。

本研究では耐摩耗性の向上を目的としているため、マイクロビッカース試験による硬さ試験を評価指標とした。LP 後、表面の熱影響層をダイヤモンドペーストによって研磨し、マイクロビッカース硬さ試験機 (HM-124S, AKASHI) により測定を行った。また、メカニズム考察のため、X 線回折法による応力評価、ナノインデンテーション法による硬さ評価等も行った。さらに、本研究の結果を切削工具先端に適用し、切削試験時の耐摩耗性を外径旋削により評価した。

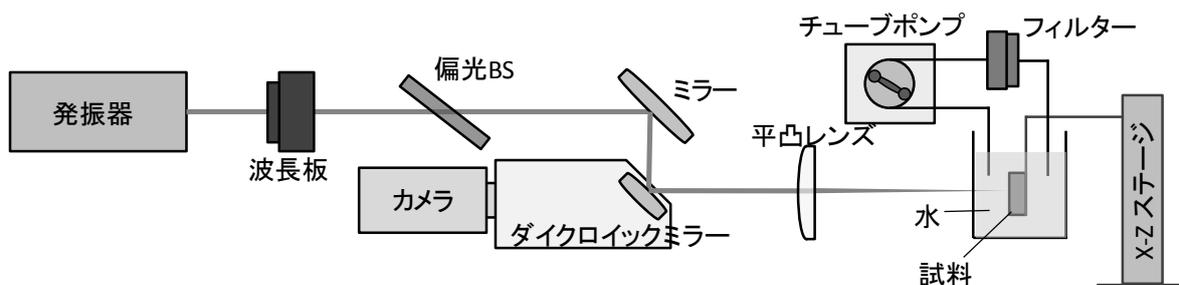


図1 レーザピーニング光学系

2・2 試料

じん性の高い超硬合金を母材とするため、試料として、Coを10wt%含有したWC/Co超硬合金を使用した。この材料の電子顕微鏡像を図2に示す。WC相(明部)とCo相(暗部)が明確に分離しており、複合的な材料であることがわかる。Co含有量は10wt%を基本とし、金属含有量がLPの効果へ及ぼす影響を検討するため、Co量の異なるWC/Co超硬合金も用意した。全ての試料について、厚さ5mmの板を使用し、初期の表面状態は研削面とした。ただし、LP前の試料の硬さの評価は、研削時の加工変質層を除去し、LP後のものと同等に比較を行うため、ダイヤモンドペーストによる研磨を施した。

切削試験用の工具には、同じくCo含有量10wt%の外径旋削用チップを使用した。チップの頂角は 55° 、逃げ角 7° で、LPによる形状変化の影響を抑えるために、チップブレードのない単純な形状を採用した。

3. 実験結果

3・1 硬さ向上効果²⁾

レーザーの出力とスポット径、および走査回数を変化させてLPを実施し、マイクロビッカース硬さを測定した結果を図3に示す。いずれも6点を測定した平均値と標準誤差を示している。LPにより硬さは最大約50HV向上しており、LPによる硬さ向上効果があることが示された。

図3(a)より、100mJまで出力の増加とともに硬さも向上しているが、100mJと150mJでは効果はほぼ変わらなかった。また、走査回数についても同様に、50回までは回数を重ねることによる効果向上が見られるがそれ以降は同程度か減少に転じている。これは、本実験では超硬合金の試料表面に直接レーザー光を照射してプラズマを発生させているため、改質した層を次の照射で除去しながらプロセスが進行していることが原因と考えられる。さらに、

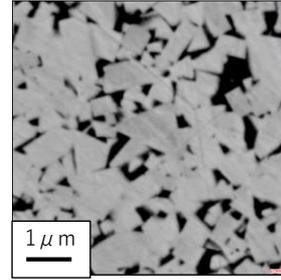
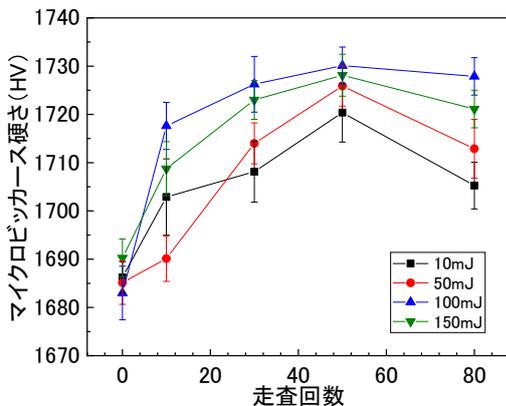


図2 WC/Co10wt%の反射電子像。白色部がWC粒、黒色部がCoバインダー

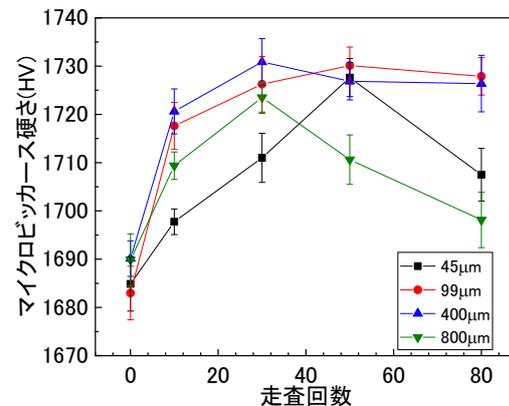
硬さが増加することで表面のじん性は低下しており、LPの衝撃による除去、脱落も発生していると予想される。この結果より、改質と除去のバランスによって表面の硬さを向上する最適な照射条件が存在する。

一方で、図3(b)のスポット径を変化させた実験結果については、99 μm と400 μm で硬さは最大となる。単発で照射時の表面除去量は800 μm のときが最大であったことから、このスポット径による違いは、フルエンスの低下による効果の減少ではなく、照射範囲が大きくなったことによる疑似的な走査回数の向上の影響が大きい。これは、45 μm や99 μm と比べて、400 μm 、800 μm では硬さが最大となるまでの走査回数が少ないことも整合性がある。つまり、スポット径800 μm では、1ショットあたりの照射範囲が広く、より大面積に改質部を生成するために、同じ照射間隔で処理を行った場合、ある地点での影響をうける照射回数が多くなる。さらにスポット径を拡大した場合、フルエンスが低下することにより、硬さの向上が見られなくなると予想される。

LPの深さ方向への効果を検証するため、ダイヤモンドペーストによる研磨とマイクロビッカース硬さ試験を繰り返した。なお、マイクロビッカース硬さ試験機における



(a)照射エネルギーによる違い



(b)スポット径による違い

図3 WC/Co10wt%表面のマイクロビッカース硬さへのLP効果

圧痕の深さは約 30 μm である。LP 条件は、上述の LP 効果の検討において、硬さ向上の効果が大きかった照射エネルギー 100mJ、スポット径 99 μm 、走査回数 50 回の条件とした。図 4 に得られた結果を示す。深さ 100 μm 程度まで、母材からの硬さの向上効果が見られ、さらに圧痕の深さが 30 μm 程度であることを考慮すると、実際には 100 μm 以上が改質されていると推察される。

3・2 金属セラミックス複合材料の LP メカニズム³⁾

金属セラミックス複合材料における、LP の効果発現メカニズムを解明するため、LP 前後での試料の断面の反射電子像を撮影した。その結果、レーザが照射される最表面にはサブミクロンの厚さで熔融層が見られることがわかった。しかし、マイクロビッカース試験機による硬さ試験は、ダイヤモンドペーストで最表面を研磨したのち、約 30 μm の押し込み深さで実施していることから、この熔融層による影響はほぼ無いとみなせる。一方で、この熔融層よりも深い層については、粒径や WC と Co の量的な比率に明らかな変化は認められなかった。この結果より、金属セラミックス複合材料は、融点の大きく異なるセラミックス (WC) と金属 (Co) の二相材料ではあるが、金属相の優先的な蒸発による組成比変化や、LP の衝撃波によるセラミックス粒子の微細化が硬さ向上の原因ではないと考えられる。

また、大気中において、水中と同条件でレーザを照射し、その硬さの変化を比較した。水中では、45HV の向上があったが、大気中では逆に 5HV 程度硬さは減少した。プラズマが自由に拡散し衝撃波が発生しない大気中でのレーザ照射では、衝撃波によるピーニング効果はなく、アブレーションによる表面の除去と熱の影響のみを取り出せる。つまり、本結果は、水中でのレーザ照射により超硬合金の硬さが向上した原因が、衝撃波によるピーニング効果であることを示唆している。

次に、複合材料の各相への LP の影響を検討した。Co の含有量が異なる超硬合金に LP を実施した結果を図 5 に示す。Co 含有量が増加するに従い、硬さの増加量が増加していく傾向にあった。この結果から、金属相である Co の LP による硬化が、全体の硬さ向上の主要要因であると推察した。また、各相について、X 線回折装置により、2D 法による残留応力測定を実施した。その結果、わずかであるが Co 相は圧縮に、WC 相は引張りに変化していた。以上の結果より、硬質で脆性を有する WC 相は LP によりほとんど変化を受けず、Co 相の加工硬化により全体として硬さ向上の効果が発現したと考えられる。

直接的に各相の硬さの変化を評価するため、ナノインデンテーションを使用し、Co 含有量 20wt% の超硬合金に対し、LP 前後のインデンテーション硬さの分布を計測した。この押し込み荷重は 10mN、押し込み深さは 150-300 μm である。結果を図 6 に示す。30GPa 付近に見られるピークは WC 由来であり、LP の前後では大きな変化はみられない。一

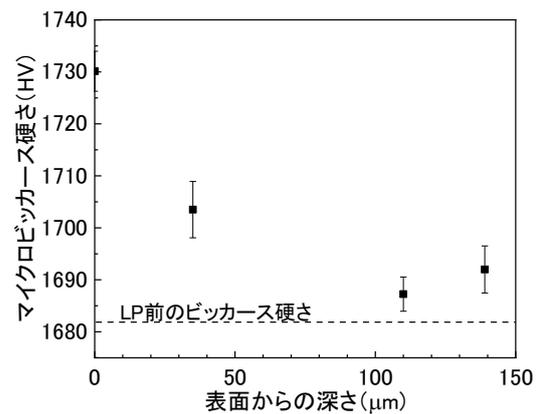


図 4 深さ方向の硬さ分布

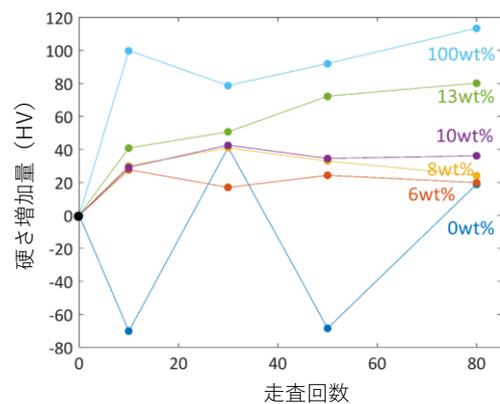


図 5 Co 含有量による LP 効果の違い

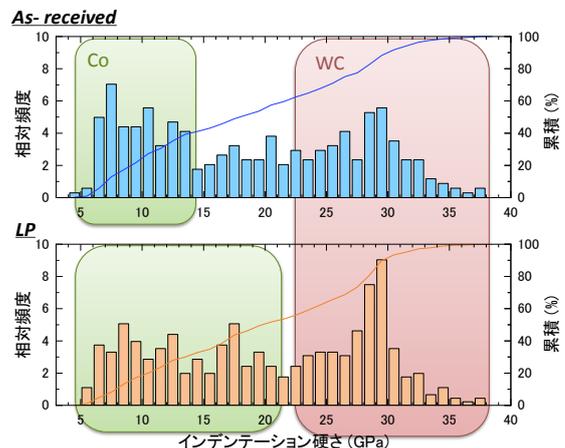
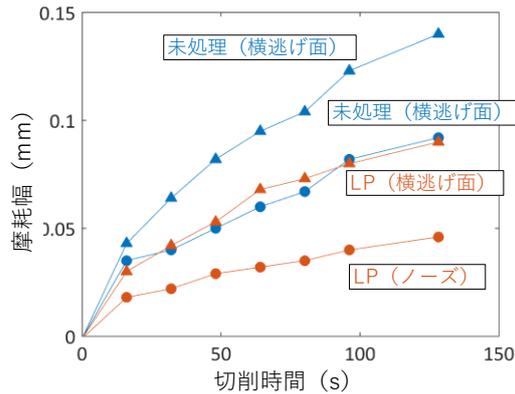
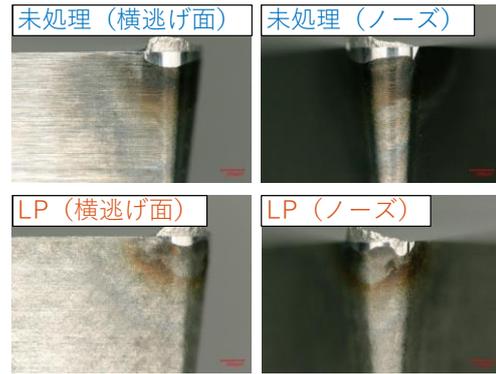


図 6 ナノインデンテーション硬さの分布

方、LP 前に 7GPa 付近に見られた Co のピークは、LP 後は 7 から 20GPa にかけて分散している。これは LP により Co 相の硬さが変化したためと考えられる。しかしながら、マイクロビッカースでの変化量ほどの明確な硬さ向上を示す結果は得られなかった。この原因として、LP は照



(a) 摩耗量



(b)逃げ面の光学顕微鏡像

図 7 外径旋削による摩耗試験結果

射点の集合であるため、ナノインデンテーションのような微視的な評価では一様な硬さ変化は見られず、分布が大きくなったこと、Co相が深さ方向に薄くしか分布しておらず、その下層に存在するはずのWCの影響が大きいためにCo相の硬さ変化の検出の感度が低いこと、あるいはLPがWCとCoの粒界に何らかの作用を与えていることが考えられ、今後、より詳細な分析を実施する予定である。

3・3 切削工具への応用⁴⁾

前節の結果を踏まえ、チップ先端にLPを施した。処理条件は出力100mJ、スポット径400 μ m、走査回数30回である。すくい面および逃げ面を処理しており、逃げ面については横逃げ面に垂直に入射するよう処理しているため、先端ノーズ部に対しては大きい入射角となる。なお、反対側の逃げ面も同様に処理したため、先端部については両側からLPされていることとなる。

改質前後のチップを用い、切削試験を実施した。被削材としてクロムモリブデン鋼(SCM435)を使用し、送り速度0.1mm/rev、切込量0.5mm、切削速度110m/minとした。チップの横逃げ面およびノーズの摩耗量を図7(a)に示す。また、130sの切削試験後の最終の逃げ面の光学顕微鏡写真を図7(b)に示す。ノーズ先端、横切刃ともに、LPを実施することで摩耗量は半分程度となった。これは、ピーニングにより、表面の硬度改善により耐摩耗性が向上したためと考えられる。

4. 結論

本研究では、工具材料への展開を見据えた金属セラミックス複合材料へのLPの検証を実施した。その結果、WC/Co10wt%の超硬合金において、最大50HV程度の表

面の硬さ向上が見られた。この効果発現は、主に金属相であるCoへのピーニング作用と考えられる。さらに、本手法を超硬合金切削工具の逃げ面およびすくい面に適用し、外径旋削による耐摩耗試験を実施した。LPによる表面処理を施した場合、未処理の工具と比較して、横逃げ面およびノーズ摩耗量がともに約半分となり、耐摩耗性向上に効果があることを明らかにした。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団 一般研究開発助成(AF-2016224)の助成により実施した。また、X線回折、電子顕微鏡観察は東京工業大学大岡山分析部門に協力いただいた。

参考文献

- 1) Sano, Y., Akita, K., Masaki, K., Ochi, Y., Altenberger, I., Scholes, B., "Laser peening without coating as a surface enhancement technology", JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 1, No. 3 (2006)
- 2) 馬場 夏樹, 青野 祐子, 平田 敦. 無被覆レーザーピーニングによる超硬合金の表面硬度向上, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 783-784 (2017)
- 3) 馬場夏樹, 青野祐子, 平田敦. レーザピーニングによる超硬合金硬さ向上のメカニズムの考察, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 643-644 (2018)
- 4) 青野祐子, 馬場夏樹, 平田敦. 切削工具応用に向けた超硬合金のレーザーピーニング処理, 日本機械学会 2018年度年次大会講演論文集, S0420201 (2018)