



M. Heya



H. Iida



H. Nakano



M. Tsuyama



H. Furukawa

研究開発が進むレーザーピーニング技術

部谷 学*・飯田裕之（大阪産業大学工学部）

中野人志・津山美穂（近畿大学理工学部）

古河裕之（レーザー技術総合研究所）

1. はじめに

レーザーピーニング（Laser peening, LP）は、機械的な金属表面処理技術の1つであり、類似技術にショットピーニングがある。LPでは、レーザー誘起衝撃波によって金属の塑性変形を引き起こし、ピーニング効果として表層に圧縮残留応力や加工硬化を付与する。現在、原子力・宇宙航空産業を中心に実用化されている[1]。

図1に、LPの原理図を示す。透明体（多くの場合は水）を介した短パルスのレーザー照射によって（同図①）、金属表面がプラズマ化し、それが急激に膨張しようとするが（同図②）、水の慣性によってプラズマは閉じ込められ、大きな圧力が金属表面に加わることとなる。その圧力が金属の降伏応力を超えると、塑性変形が起こり、表層部が伸展し（同図③）、未変形部の拘束によって圧縮残留応力が付与される（同図④）。この圧縮残留応力が、疲労特性の改善、耐応力腐食割れ特性の向上に寄与するとされている。

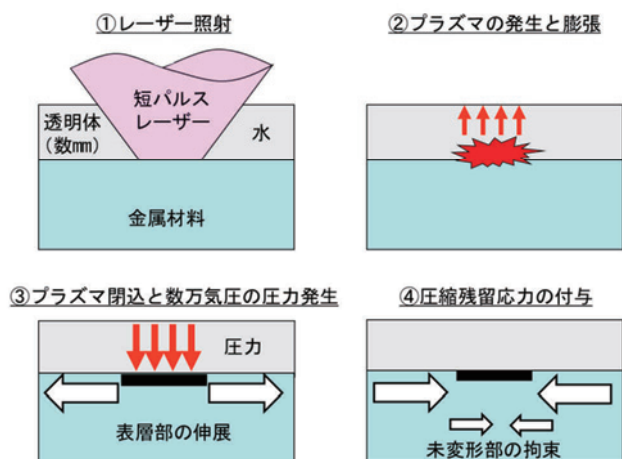


図1 LPの原理

本稿では、天田財団からの一般研究開発助成で実施した研究

*大阪産業大学工学部電子情報通信工学科 教授

成果を中心に紹介する。2節では、レーザー技術総合研究所との共同研究成果について紹介する。LP条件の最適化を目的とし、レーザー光の吸収から、プラズマ発生、プラズマ膨張の閉じ込めによる圧力波の発生、圧力波の材料内の伝搬と塑性応力の生成までを計算できるシミュレーションコードについて述べる。3節では、近畿大学との共同研究成果について紹介する。LP条件は多くあるが、その中で閉じ込め層及び照射光学系の開口数がLP効果に及ぼす影響について紹介する。4節では、大阪産業大学が取り組んでいる、新規のLP技術である吸収体に液体黒色インクを用いた、表面溶融が無いLPに関する研究成果を紹介する。

2. シミュレーションコードの開発

固体から液体、液体から中性気体、中性気体から部分電離プラズマへの相変化の効果を取り入れたレーザーピーニング統合シミュレーションコード「ISLAP: Integrated Simulation code for Laser Ablation Peening」の開発に取り組んできた[2]。ISLAPでは、まず、原子モデルコードを用いて、原子のエネルギー準位、ポピュレーション、電離度等のデータを様々な温度及び密度で求める。そのデータを状態方程式コードに入力し、圧力、比熱等を求める。原子のエネルギー準位、ポピュレーション、電離度等のデータをスペクトルコードに入力し、X線の放射係数、吸収係数等を求める。そして、圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数等のデータをテーブル化する。

ISLAPで求めた「電離度、圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数等」のデータを、レーザー、固体金属、ブルームの相互作用、流体運動等を計算する「LAPCO: Laser Ablation Peening Code」に取り込む。そして、レーザーのパラメーター、金属の厚み、初期温度、閉じ込め物質の種類・厚み、初期温度等を入力し、流体シミュレーションを開始する。入力可能な主なレーザーパラメーターは、ピーク強度（パワー密度）、パルス幅、

波長、パルス時間波形である。計算結果として、固体金属及びプラズマ中の温度・密度・圧力、固体中の応力分布、相変化、流体運動、放射輸送等を計算できる。

図2に、計算結果の一例として、(a) プルーム圧力の時間発展及び (b) 圧力最大値における ISLAP 及び簡易モデル (Fabbro モデル[3]) を用いた計算結果の比較を示す。パワー密度 10 GW/cm²、波長 1064 nm、パルス幅 10 ns、時間波形は矩形波とし、シミュレーションを行った。図2 (a) より、シミュレーションによって得られた圧力の最大値は、Fabbro モデルで求められる約 4.0 GPa と良く一致を示した。レーザー照射終了後のプラズマ中の圧力の空間平均値の時間変化も、Fabbro モデルで得られる圧力変化とよく一致した。また、図2 (b) より、パワー密度を変えた時のプラズマ圧力の最大値の計算結果についても良く一致した。なお、Fabbro モデルは、LP 時のプラズマ圧力を簡易的に見積る方法として広く知られており、開発した ISLAP の計算の妥当性が確認できた。

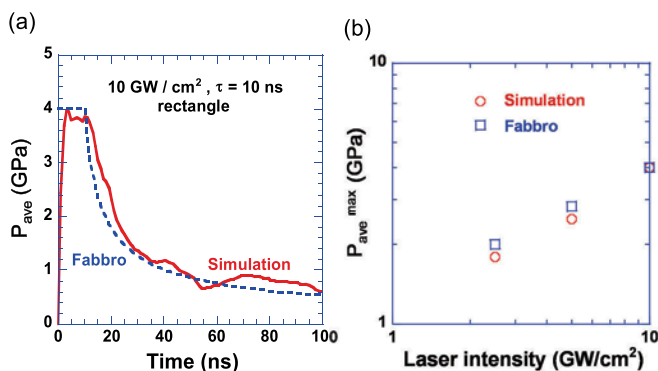


図2 ISLAP 及び簡易モデル (Fabbro モデル) による計算結果の比較。(a) プルーム圧力の時間発展の比較、(b) プルーム圧力の最大値の比較

図3に、ISLAP によって計算したアルミニウム内部の (a) 塑性応力分布及び (b) 圧力分布の計算結果を示す。図3 (a) に、レーザー照射後 10–80 μ s の固体内部の塑性応力分布を示す。1 mm 以上深部での塑性応力は時間的に変化しないが、0.5 mm 以下の表層部では時間が経つにつれて引張り応力側に移行している。この時間変化の傾向は、固体内部の熱による圧力分布の時間発展と比較することによって説明できる。固体表面に吸収されたレーザーエネルギーが熱となり固体内部に伝搬する。また、水によって閉じ込められたプラズマも固体表面を加熱する熱源となる。固体内部の温度上昇が引き起こされ、圧力分布が生成される。この圧力分布が時間と共にだらかになっていき、崩れていく様子が見取れる (図3 (b) 参照)。圧力が高い箇所は、歪が正となるところなので引張塑性応力が生成される。つまり、圧力値が高い表層部では引張塑性応力が生成される。

以上のように、水中 LP のシミュレーションを行い、Fabbro モデルによって得られた結果とシミュレーション結果を比較すると、両者は比較的良い一致を示した。また、塑性応力の計算のモデリングを行い、レーザー照射から塑性応力生成までの統合シミュレーションを行った。その結果、塑性応力の空間分布の時間発展が、固体内部の圧力分布の時間発展に大きく影響されることを見出した。

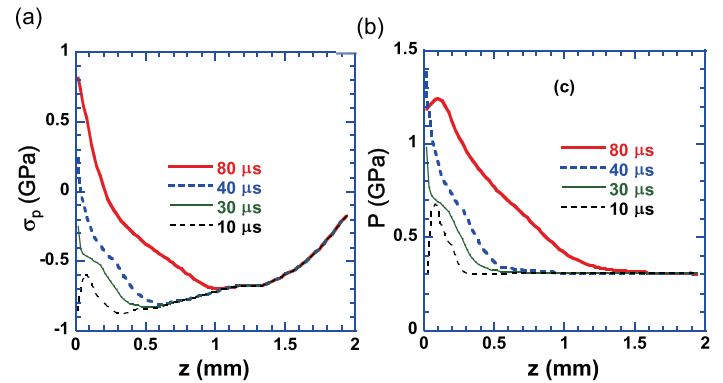


図3 ISLAP による固体内部の (a) 塑性応力分布及び (b) 圧力分布の計算結果

3. ピーニング条件の最適化

(1) 照射光学系の開口数の影響[4]

これまでに金属材料の初期状態や各種レーザーパラメータを変化させた際の LP 効果を明らかにしてきた[5-9]。例えば、パワー密度、カバレッジ及びスポット径について LP に望ましい条件が存在することを示してきた。ここでは、塑性変形に対するレーザーパラメータの効果について明らかにすることを目的とし、レーザー光の試料への入射角度、すなわち照射光学系の開口数 (Numerical Aperture, NA) 変化の効果について調べた[4]。

レーザー誘起衝撃圧力は、主にパワー密度によって決定される[1]。しかしながら、パワー密度が同じでも試料への入射角度が異なれば、プラズマによるレーザー光の吸収、追加熱の効果に変化が生じるため[10]、LP 処理の結果にも影響を与える可能性があると考えた。ここでは金属の塑性変形に起因した加工硬化に着目し、ピーニング処理試料の硬度と照射光学系の NA 値との関係について調べた。金属試料としてオーステナイト系ステンレス鋼の SUS316L を用いた。

図4に、LP 処理した試料の表面硬度と NA 値との関係を示す。パワー密度を 1.0 GW/cm² として LP 処理を行った場合、硬度上昇量に NA 値依存性は見られなかった。しかしながら、パワー密度 2.5 及び 5.0 GW/cm² の場合では、NA 値 0.015 付近で硬度が最も上昇する傾向が見られた。

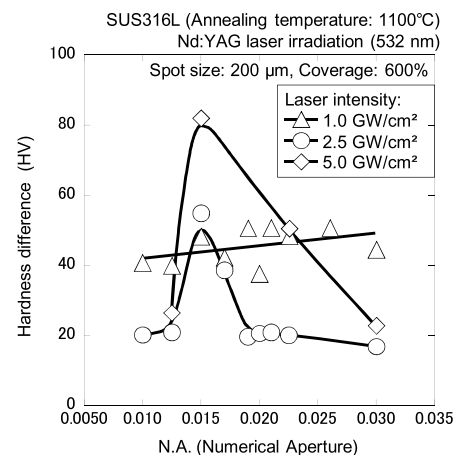


図4 パワー密度を変えた時の開口数と表面硬度の関係

(2) 閉じ込め層の影響

図5に、水温を変えた時の硬度上昇の変化量の関係を示す(硬

度上昇の変化量とは、照射後と照射前の表面硬度の差である) [11]. パワー密度は 0.8 GW/cm², カバレッジ 600%であり, プラズマ閉じ込め層として使用した水の温度を 30-70°Cまで変化させた. その他の条件は, 図 4 の実験条件とほぼ同じであった. 図 5 より, 水温が 60°C近傍で硬度上昇の変化量が最大になるこ

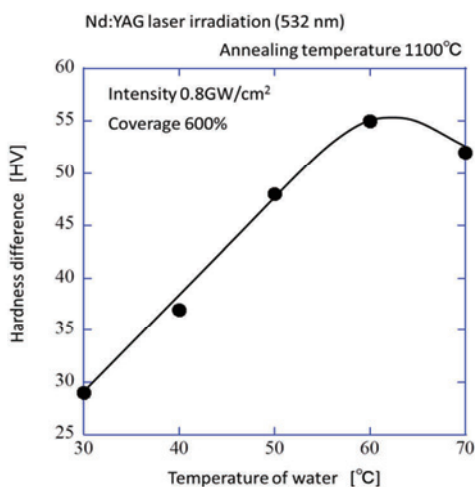


図 5 水温を変えた時の硬度上昇の変化量の関係

とが分かった. 60°C近傍で水の音響インピーダンスが最大になることが知られており, 水温上昇に伴うプラズマ閉じ込め効果の増強によって, 硬度が上昇したと推測される.

図 6 に, NaCl 濃度を変えた時の硬度上昇の変化量の関係を示す[11]. パワー密度は 5.0 GW/cm², カバレッジ 900%であり, プラズマ閉じ込め層として使用した NaCl 水溶液の重量濃度を 0-24%まで変化させた. その他の条件は, 図 5 の実験条件とほぼ同じであった. 図 6 より, 重量濃度 5%近傍において, 硬度上昇の変化量が最大となった. 水中の NaCl 濃度が増加するにつれて, 音響インピーダンスも増大することが知られている. 濃度 5%近傍までの硬度上昇については音響インピーダンスの増大効果として説明できる. 濃度 5%以上の硬度の低下については, 高濃度の NaCl 水溶液によるレーザー光の吸収が原因の 1 つとして考えられる.

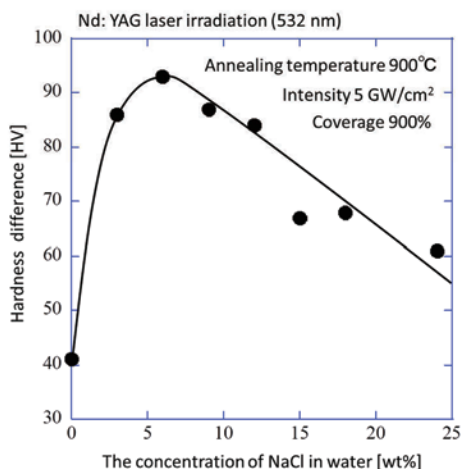


図 6 NaCl 濃度を変えた時の硬度上昇の変化量の関係

4. 新規レーザーピーニングの原理実証

従来の LP 処理では, 保護層を用いず処理金属表面を直接照射する機会が多い. この場合, 金属表面の溶融が起こるため, 処理表面には引張応力が残留しやすい. ここでは, 吸収体に黒色液体インクを用いた LP (Ink-LP) 処理と保護層を用いない従来型の LP (C-LP: Conventional LP) 処理の比較実験を行った[12]. シングルショットのレーザー照射実験 (レーザー波長 532 nm, パルス幅約 5 ns) を行い, 照射後の表面変形及び表面溶融の有無について調べ, Ink-LP 処理の特徴及び優位性について実験的に明らかにした.

図 7 に, (a) Ink-LP 及び (b) C-LP 処理後の光学顕微鏡写真と表面粗さプロファイルを示す. Ink-LP 処理後の表面には, 中央部に凹んだ領域が観測された (図 7 (a) 参照). その周辺の未変形領域及び凹んだ領域では, 照射前の状態である機械研磨による縦方向の研磨傷が確認できた. また, 凹んだ領域の中央部が最も深くお椀状の表面変形が観測された. 凹んだ領域の底部の平均的な高さから金属表面までの距離を凹み深さと定義した. この場合は約 20 μm の凹み深さであった. 表面粗さプロファイル上で凹んだ領域を凹み幅と定義し, この場合は約 0.9 mm であった. 一方, C-LP 処理後では, 凹んだ領域の底部には研磨傷はなく細かな凹凸が観測されたこと, Ink-LP 処理と比べて処理表面はあれるものの比較的一様に凹むこと, が観測された (図 7 (b) 参照). そして, C-LP 処理での凹み幅は約 0.8 mm, 凹み深さは約 30 μm であり, Ink-LP 処理の方が広い領域が浅く凹む傾向があることが分かった. 表層の凹みは塑性変形が起こったことを意味している.

以上の実験結果から, Ink-LP 処理は C-LP 処理に比べて凹む領域が広がることから, 処理速度を高速化できる可能性があることを示唆している. 現在, Ink-LP 処理による圧縮残留応力付与の実証, 適用可能な金属材料の調査, ピーニング条件の最適化, に取り組んでいる.

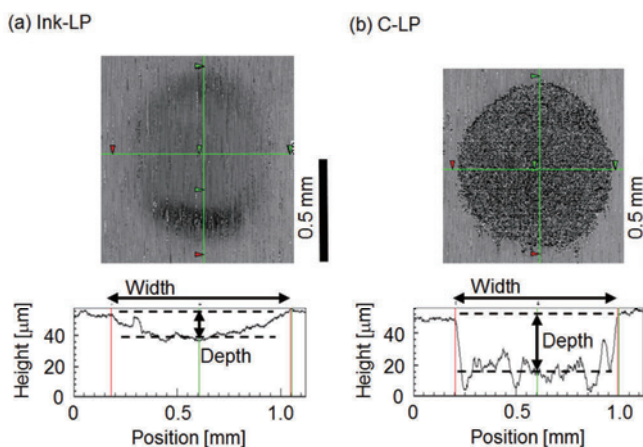


図 7 (a) Ink-LP 及び (b) C-LP 処理後の光学顕微鏡写真と表面粗さプロファイル. スポット径は 608 μm, パワー密度は 5.5 GW/cm², 用いた金属サンプルはアルミニウム合金 (A2017) であった

5. 結論

本稿では, 我々が取り組んでいる最近の 3 つの研究成果 (シミュレーションコード開発, 閉じ込め層の影響の調査,

液体吸収体を用いた表面溶融が無い新 LP の開発) について紹介した。天田財団からの一般研究開発助成で実施した研究テーマは、シミュレーションコード開発と LP 時の衝撃波計測であった。衝撃波計測については、現在もその測定系の立ち上げを継続しており、材料中を伝搬した衝撃波の計測にも成功をしている。これらの研究成果を統合することによって、レーザー条件と発生する衝撃波の関係について、実験結果と計算結果を用いて比較・考察できる。これによって、LP 条件の最適化やメカニズムの理解がより一層進むことが期待できる。

謝 辞

本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団（現公益財団法人天田財団）の助成により研究開発を実施できました。同財団に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Ding and L. Ye, "Laser shock peening", Woodhead Publishing Limited, 1-44 (2006).
- 2) 古河裕之, 部谷学, 中野人志, レーザー研究 **42**, 784 (2014).
- 3) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, P. Peyre, D. Devaux, and J. Virmont, J. Appl. Phys. **68**, 775 (1990).
- 4) 水田浩平, 津山美穂, 部谷学, 塚本雅裕, 柴柳敏哉, 中野人志, レーザー研究 **41**, 942 (2013).
- 5) H. Nakano, S. Miyauti, N. Butani, T. Shibayanagi, M. Tsukamoto, and N. Abe: J. Laser Micro/Nanoeng. **4**, 35 (2009).
- 6) 津山美穂, 柴柳敏哉, 塚本雅裕, 阿部信行, 中野人志, レーザー研究 **37**, 825 (2009).
- 7) M. Tsuyama, T. Shibayanagi, M. Tsukamoto, N. Abe, and H. Nakano, Rev. Laser Eng. **41**, 134 (2013).
- 8) K. Mizuta, M. Tsuyama, M. Takahashi, T. Shibayanagi, and H. Nakano: Proc. ICALEO, 2012 (Laser Institute of America, Anaheim, 2012) p.1192.
- 9) 水田浩平, 津山美穂, 高橋誠, 部谷学, 古河裕之, 柴柳敏哉, 塚本雅裕, 柴柳敏哉, 中野人志, レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会予稿集 (2013).
- 10) K. Mori, K. Komurasaki, and Y. Arakawa, J. Appl. Phys. **92**, 5663 (2002).
- 11) 北脇一平, 小玉康輝, 宮本幸大, 部谷学, 塚本雅裕, 津山美穂, 中野人志, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 (2014).
- 12) 飯田 裕之, 丹羽勝之, 王明炎, 古河裕之, 津山美穂, 中野人志, 草場光博, 部谷 学, 電気学会論文誌 A **135**, 581 (2015).