

# レーザピーニング技術の生産性向上を目指した

## 各種金属の動的降伏応力評価の研究

大阪産業大学 工学部 電子情報通信工学科

准教授 部谷 学

(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010210)

キーワード：動的降伏応力，衝撃波圧力，VISAR，画像計測，光電計測，LAPCO

### 1. 本研究の目的と背景

レーザピーニング (LP: Laser Peening) とは、金属塑性加工を用いたレーザ表面処理技術の 1 つである。レーザ誘起衝撃波によって金属を塑性変形させ、加工硬化や圧縮残留応力を付与し、金属部品の高強度化、長寿命化を実現できる (図 1)。LP の類似技術に、産業界で幅広く利用されているショットピーニング (SP: Shot Peening) がある (図 1)。LP は、宇宙航空産業、原子力産業に実用化されている。更に、レーザ光の集光性を活かすことにより、精密部品 (複雑形状、小型、薄板) への応用が期待されている。しかしながら、量産品である精密部品へ普及させるためには、生産性が低い (処理速度が遅い) というデメリットを克服する必要がある。

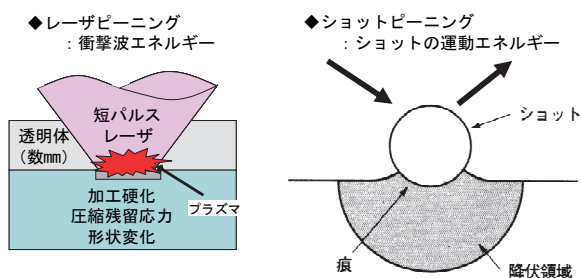


図 1 LP と SP の原理の概要。

生産性向上のためには、各種材料にあったレーザ条件で処理する必要がある。ピーニングに支配的なレーザ条件として、パワー密度 (パルスエネルギー、スポット径)、カバレッジ (ビームのオーバーラップ率、走査速度) がある。

その中でも、パワー密度 ( $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) は発生する衝撃波圧力を決める重要なパラメータである。パワー密度の最適化によって、適切な衝撃波圧力を発生させ、金属材料の降伏応力を超えた領域で塑性変形を起こさせる。この時、降伏応力は、時間によって変化し、また、材料に固有の値を取ることが知られている。つまり、レーザ条件の最適化のためには、材料ごとの動的降伏応力を評価する必要がある。

本助成事業では、①光干渉計を用いた塑性波 (動的降伏応力) の測定環境の立上、②シミュレーション開発に取り組んだ。①塑性波を計測することで、各種金属の動的降伏応力を実測できる。塑性波とは塑性変形が起こった際に生じる音波であり、塑性波の発生は、動的降伏応力を超える衝撃波圧力の発生を意味している (図 2b)。つまり、塑性波計測によって、塑性変形を効果的に発生できるパワー密度を実験的に求めることができる。本助成事業では、VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) と呼ばれる速度干渉計を LP 試験装置の周辺に構築し、塑性波の測定環境の立ち上げに取り組んだ (図 2, 図 3)。

②金属材料中を伝搬する音波の挙動をシミュレーションできるソフト開発を行った。塑性波計測における実験結果と計算結果を比較し、実験結果を再現できるシミュレーションコードの開発に取り組んだ。

### 2. 実験方法

#### 2.1 VISAR を用いた衝撃波計測

図 3 に示したように、VISAR (速度干渉計) を用いて衝撃波計測を試みた。金属サンプル表面で発生した衝撃波は、サンプル中を伝搬し、その裏面を振動させる。その振動の

様子を光干渉計測によって時間分解計測することで、衝撃圧力の時間発展を計測できる。検出器にICCD

(Intensified Charge-Coupled Device) を用いた画像計測とPIN photodiodeを用いた光電計測の2通りの実験を行った。

VISARを用いた表面振動計測により、音波(弾性波・塑性波)を計測できる

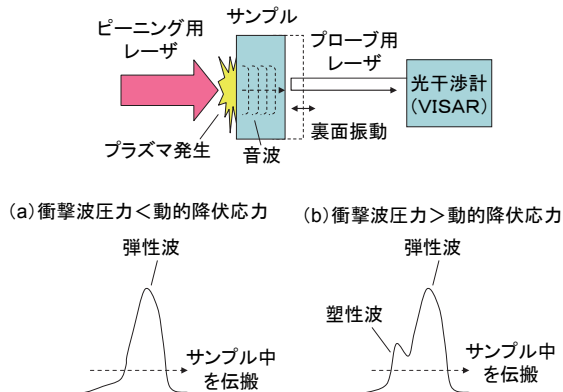


図2 塑性波を計測することにより、パワー密度と金属の動的降伏応力の関係を知ることができる。

ポピュレーション、電離度などのデータをスペクトルロードに入力し、X線の放射係数、吸収係数等を求める。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し、Laser Ablation Peening Code (LAPCO)に入力し、固体金属の温度上昇、固体中の応力の分布、相変化、流体運動、放射輸送等の計算を行う。

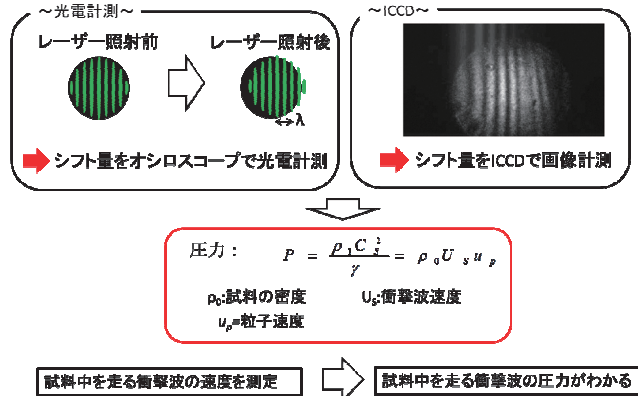


図4 フリンジシフトからの衝撃圧力測定原理の概要。

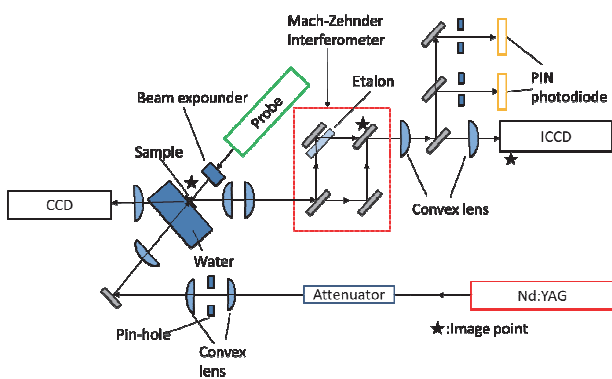
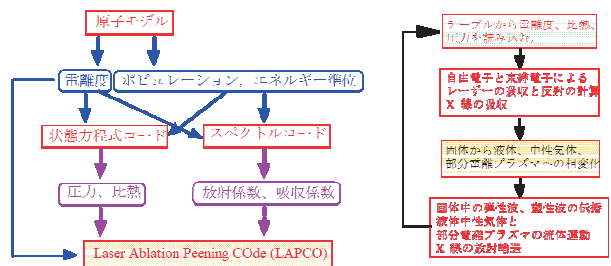


図3 VISARを用いた衝撃波圧力測定の実験配置図。

図4にそれぞれの測定原理を示す。画像計測では干渉縞のフリンジシフトを画像として取得し、光電計測ではオシロスコープで光干渉信号の時間分解計測を行った。

## 2.2 シミュレーション開発

図5は、開発したシミュレーションコードのフローチャートである。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、電離度などのデータを様々な温度密度範囲で求める。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、



- 潜熱を考慮すること等により、相変化を取り入れている。
- 原子モデルにより、電子の励起、電離に必要なエネルギーを求め、それを用いて求めた比熱、圧力等を用いることにより、励起、電離によるエネルギー損失を含んだプラズマの運動を求めている。
- X線(含む可視光)の放射輸送を解いている。

図5 レーザアブレーションピーニングコード (LAPCO) の概要。

## 3. 実験成果

### 3.1 VISARを用いた衝撃波計測

まずは、光干渉計測が適切に行えているかどうか確かめるために、画像計測実験を行った。実験条件を表1に示す。集光レンズのNAを変えて実験を行った。実験結果を図6、図7に示す。衝撃波速度にして1-2km/s、圧力換算で10-15GPaの結果が得られた。このパワー密度においては、数GPa程度の圧力が発生することが分かっており、過大評価となっていることが分かる。この差については現在調査

中である。なお、絶対値評価の妥当性については今後引き続き確認する必要があるものの、NAを変化させると発生圧力が変化することが明らかとなったことは興味深い。今まで発生圧力とNAは相関が無いものとして、レーザピーニング処理が行われてきたが、ピーニング条件の中に集光特性であるNAも考慮する必要があることを示すことができた。

図6、図7の結果は図2での弾性波を計測していることになる。塑性波を計測するには、時間応答が速い光電計測を行う必要がある。本助成事業で目標とした塑性波計測のために、光電計測を行ったものの、光干渉計測で用いたプローブ光の出力が足りず、光干渉信号を検出することができなかった。今後は、高出力のプローブレザを用いて光電計測を引き続き行っていく計画である。

### 3.2 シミュレーション開発

図8にLAPCOでシミュレーションした結果を示す。レーザ波長は532nm、パワー密度2.5GW/cm<sup>2</sup>、パルス幅7.5ns、サンプルは水中に設置したアルミニウム合金であった。Fabbroと書かれている曲線は、レーザピーニングで良く知られている衝撃圧力を見積もるためのモデル式[1]を用いた結果である。そのモデル式には、プラズマ長やレーザエネルギーから衝撃波への変換効率などが含まれており、これらについてはシミュレーションコードを用いて実際に計算し、衝撃圧力を見積もった。図8左から、衝撃圧力の時間発展において、両者は極めてよく一致しており、シミュレーション結果の妥当性が確認できた。

図8右にパワー密度を変化させた場合の衝撃圧力の最大値のシミュレーション結果を示す。図8左と同様に、パワー密度2.5-20GW/cm<sup>2</sup>の領域でシミュレーション結果とFabbroモデルがよく一致していることが分かる。なお、Simple Formulaと書かれた曲線は、Fabbroらが提唱している簡易モデルで求めた計算結果であり、これと比べてもその差は2倍程度であり、LAPCOを用いたシミュレーション結果の妥当性を確認することができた。

表1 衝撃波計測実験条件.

Laser	Nd:YAG laser
Wavelength	532 nm
Pulse width	4 ns
Repetition rate	10 Hz
Focal length of the lens	100 mm
Focal spot size	500 μm
Laser intensity	1.0 GW/cm <sup>2</sup>
Materials	SUS316L
Confinement layer	Air
N.A.	0.005~0.035

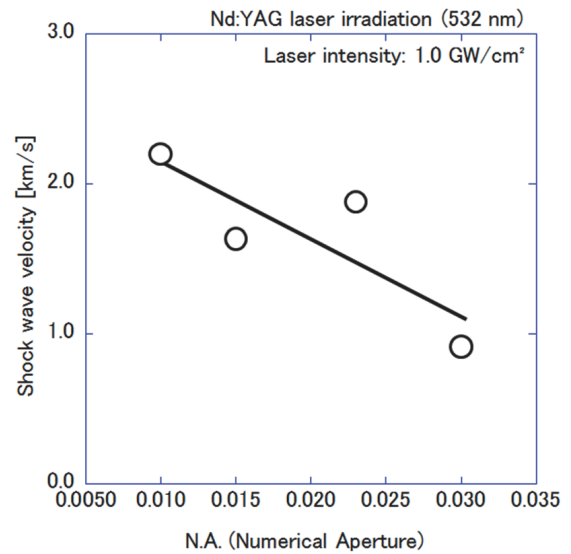


図6 NAを変えた時の衝撃波速度の変化.

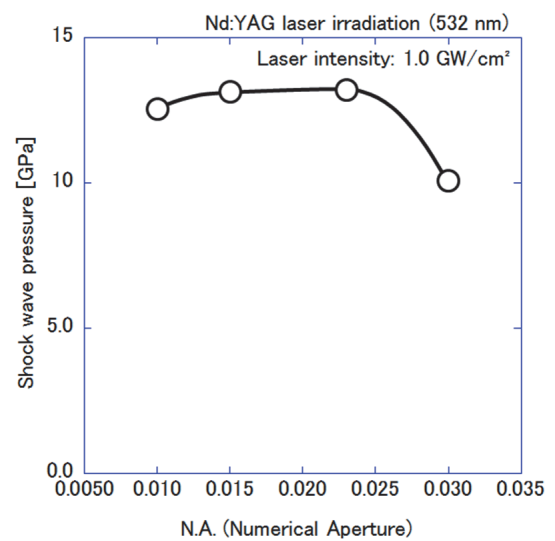


図7 NAを変えた時の衝撃波圧力の変化.

アルミニウム 水中

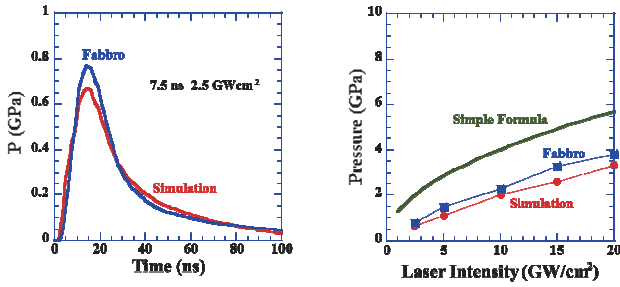


図8 水中に設置したアルミニウムにおけるプラズマ圧力の計算結果.

図9に、材料内部を伝搬する応力の空間プロファイルの計算結果を示す。まだ、実験結果との比較まで行えていないが、X線応力測定結果と比較することで、今後、衝撃圧力だけでなく、圧縮残留応力の見積もりが期待できる。

アルミニウム 水中 7.5 ns, 2.5GW/cm²  
スポット径400µm

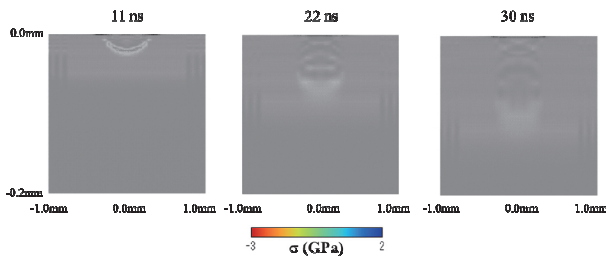


図9 水中に設置したアルミニウム中を伝搬する応力の空間プロファイルの計算結果.

#### 4. 結言

本助成事業では、①光干渉計を用いた塑性波（動的降伏応力）の測定環境の立上、②シミュレーション開発に取り組んだ。①VISARを用いた画像計測によって、弾性波の衝撃速度（衝撃圧力）を導出できる環境が整った。しかしながら、得られた結果は従来の結果よりも過大評価であり、今後、計測結果の検証が必要である。また、光電計測による塑性波計測を試みたが、プローブレーザーの出力不足で計測することができなかった。プローブレーザーの高出力化、あるいは高感度検出器などを使用し、引き続き、研究に取り組んで行く予定である。

②シミュレーションコード（LAPCO）を開発し、金属表面で発生する衝撃圧力の計算についてはその妥当性を確認することができた。また、材料中を伝搬する応力波を計算する環境を整備できたが、その妥当性の確認については、

今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団（一般研究開発助成）からの助成を受けて実施されたものであり、謝意を表す。また、本助成事業は、大阪産業大学、公益財団法人レーザー技術総合研究所、近畿大学の共同研究の成果であり、共同研究者である古河裕之博士、中野人志博士に心から感謝する。

#### 参考文献

- 1) P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, and H. P. Lieurade, "Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour": Materials Science and Engineering, **A210**, 102-113, 1996.