第I部門

大阪大学 接合科学研究所	学生員	○植田 一史
	正会員	堤 成一郎
大阪大学大学院工学研究科	正会員	佐野 智一
近畿大学工学部	正会員	崎野良比呂

### 1. 諸 言

鋼構造物の長寿命化対策の一つとして,疲労き裂発生が懸念される箇所へのピーニング処理技術が注目を 集めている <sup>1-3)</sup>. 本手法の一つとして, 高強度かつ短波長のレーザーを部材表面に照射し, プラズマ発生時の 衝撃波を利用するレーザーピーニング (LP) が存在する.これは光ファイバー等を用いて狭窄部への施工が可 能であることやレーザーによる施工条件のコントロールが容易であることなどがメリットとして挙げられる.

しかし、数ナノ秒 ns 幅のパルスを用いるナノ秒 LP の場合、プ ラズマの封じ込めのために水中での施工が必要である.一方, よりパルス幅の狭いフェムト秒(fs)LP は低エネルギーでありな がら瞬間のレーザー強度が高いため、プラズマ閉じ込めの媒質 を必要としない特徴を有する.しかし何れのプロセスも超高ひ ずみ速度下の現象を活用する手法であり、プロセス中に生じる 諸現象の計測が困難なことなどから、残留応力導入メカニズム や最適条件等について、必ずしも明らかになっていないのが現 状であろう.

そこで本研究ではレーザーピーニング処理に関する数値シミ ュレーションを行い,フェムト秒およびナノ秒 LP に関するピー ニング効果について比較・検討を行った.

# 2. FE モデルと解析条件

アルミニウム合金 2050-T8 の平板中央へのナノ秒 LP および フェムト秒 LP の解析を行った. 本解析では汎用有限要素法プロ グラム(ABAQUS Explicit)を使用した. Fig.1 に示すような軸対称 モデルを作成し、外周部および 4 mm 以深の領域には衝撃波の 反射を低減する無限要素を配置した.総要素数は 59,492 (うち 無限要素数 492),総節点数 59.984 であり、最小要素サイズは 5×0.4 µm (平板中央)とした.荷重条件は既往の研究<sup>2),3)</sup>を元に Table 1 のレーザー条件を模擬し、荷重分布を次の式で定義した.

$$P(x,t) = P_{max} \cdot P_0(t) \sqrt{1 - x^2/r^2}$$

ナノ秒 LP を模擬したケース:NSLP とフェムト秒 LP を模擬した ケース:FSLP の 2 ケースの検討を行う. Po(t)は Fig.2 に示す波形 で与え, 波長は NSLP で tpeak が 11 ns, FSLP では 0.04 ns になる よう定義した.また材料構成モデルとして高ひずみ速度の現象



Table 1 レーサー条件							
	パルスエネルギーEp	スポット径 φ	レーザー強度 I	パルス幅 τ	ピーク荷重 Pmax		
NSLP	1.5 J	1.5 mm	3.5 GW/cm <sup>2</sup>	9 ns	3.0 GPa		
FSLP	0.06 J	0.5 mm	2,500 GW/cm <sup>2</sup>	130 fs	22 GPa		

Kazushi UEDA, Seiichiro TSUTSUMI, Tomokazu SANO, Yoshihiro SAKINO tsutsumi@jwri.osaka-u.ac.jp

を表現するのに適しているとされる Johnson-Cook モデ ルを採用した.

$$\sigma = (\sigma_y + K\varepsilon_p^n) \left[ 1 + Cln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \right] \left[ 1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}\right)^m \right]$$

ここで遷移温度 T<sub>0</sub>とは,材料が降伏応力の低下を開始する温度である.なお本研究ではレーザー誘起の発熱は考慮せず, 塑性変形による散逸エネルギーの 90%が熱に変換されると仮定した.

#### 3. 解析結果

特定時間におけるピーニング直下・深さ方向の応力波形 を Figs.3,4 に示す. NSLP において深さ方向応力が-1,400 MPa 程度で塑性ひずみが発生し,応答が変化していることがわか る.また FSLP では t=0.8 ns の時点で深さ方向圧縮応力のピ ークは-7,100 MPa に達したが,応力波の減衰は NSLP よりも 早い.なお本解析では塑性変形による温度上昇は NSLP で 9 K,FSLP で 63 K 程度であり,熱による降伏応力の低下は発 生しなかった.

続いてピーニング部周辺の表面形状について Fig.5 に示 す.FSLP の変形量は NSLP の 1/10 以下となっている.また, 表面方向残留応力(σx)の表面分布について Fig.6 に示す. NSLP においてスポット中心が引張応力状態になった一方 で,FSLP はスポット径の内側ですべて圧縮となり,最大で-680 MPa 程度となった.さらにσx の深さ分布を Fig.7 に示す. NSLP では深さ数百µm 程度まで圧縮領域となった一方で, FSLP では深さ 40 µm 程度まで圧縮領域となり, 圧縮方向に 最大で 500 MPa 程度となった.

## 4. 結 言

本研究ではナノ秒 LP およびフェムト秒 LP を模擬した FEM 解析を行い,以下の知見を得ることができた.1. 従来の ナノ秒 LP により数百µm 程度まで-400 MPa 程度の圧縮残留 応力場が形成される.2. フェムト秒 LP により 40µm 程度の 領域に-500 MPa 程度の大きな圧縮残留応力が導入される.

今後は、レーザーによる入熱を考慮した解析や複数回施工 するケースについての検証を予定している.

## 参考文献

- 崎野良比呂,佐野雄二,金裕哲 (2008),レーザピーニン グによる突合せ溶接継手の疲労強度向上効果,溶接学会 全国大会講演概要,82,206-207.
- Neila Hfaiedh (2013), Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum, Int. J. of Fatigue 70, 480–489
- 3) 辻野雅之,佐野智一ほか (2012),フェムト秒レーザ駆動 衝撃波によるシリコン高圧構造の常圧下における残存. レーザ加工学会誌,19(1),54-59.

