

レーザー照射を受ける薄板の熱弾塑性解析

- 2点目の照射後に生じる残留内力と残留変形について -

Thermo-elasto-plastic Analysis for a Thin Plate subjected the Laser Irradiation

- Residual internal forces and residual deformation generated after the second irradiation -

1. 研究概要

近年、レーザー加工は様々な工業分野で広く採用されている。その加工法としては、溶接、溶断、穿孔といったものがあり、それらの加工法は材料を溶融させることで行われている。一方で裏面を冷却することで表裏に温度差を与え、材料をあえて溶融させずに行う部材の局部塑性曲げ加工についてはほとんど知られていない。そこで本研究ではこのテーマに着目し、曲げ変形のメカニズムを解明することで実際の加工への応用を目指している。

この研究の最終的な課題はレーザーの連続照射下での塑性変形挙動を明らかにすることであるが、連続照射下では温度分布が非対称の分布となるため、そのメカニズムは複雑なものとなる。そこで、本研究ではこれまでFig.1に示すような最初に単一照射(1点目)を行った後に常温まで完全に冷却を行い、その後、1点目に隣接する位置に次の照射(2点目)を行う断続的な場合を考え、熱弾塑性解析を進めてきた。その解析では、1点目の照射で生成される残留内力の分布を塑性領域の内部と外部で比較し、その特徴を明らかにした。また、2点目の照射に関しては1点目との照射間隔を種々に変化させ、2点目の照射で再降伏する温度や時間などの条件について検討した。

本研究では、更に2点目の再降伏後の塑性解析を実行し、照射終了後に常温まで冷却する際に生成される内力や変形の挙動を調べる。そして、2点間の照射距離と残留曲率の関係を明らかにする。

2. 理論

本解析では薄板を弾完全塑性体と仮定し、降伏曲面の内側は全て弾性と考える極限解析を採用する。熱弾塑性解析を行う際の平板表裏の温度関数は、Fig.2に示す高密度のYAGレーザーを薄板に照射した時の各半径位置における表裏の温度の計測結果を基にして対数関数で近似したものを使い、その分布は軸対称であるとする。

また、降伏後の塑性変形挙動を規定する塑性流动則には一般的に用いられている法線則ではなく、放射則を用いる。降伏曲面を超える任意の変形増分が生じる時、現在の内力の方向に発生する塑性変形増分と擬似降伏曲面に沿う弹性変形増分とに斜交分解して刻々の変形状態を表す。1点目の照射時の内力は擬似降伏曲面内の対角線上に存在するが、2点目の再降伏時の内力は、Fig.3(c),(d)の様に1点目の残留応力の影響を受けるため対角線上には存在しない。

再降伏後の塑性解析ではこれらの内力のうち、半径方向及び周方向の曲げモーメントが先に漸近して同一値となり、その後、膜力も同様に同一値となって擬似降伏曲面内の対角線上を変化する。したがって、1点目の塑性解析に比べより複雑になる。

2点目の塑性解析を行うにあたり、Fig.3(a)から(d)に、変形増分の弾塑性分解を擬似降伏曲面のそれぞれの切り口断面ごとに示す。

ここで、温度増加に伴って発生する変形増分の各成分(一般化膜変形 ξ と一般化曲げ変形 η の半径方向成分と周方向成分)は、放射則に基づいて弾性成分と塑性成分に分解できる。そして、それらの成分(Fig.3中の下線部が同一色のもの)が互いに同一値となる様に塑性解析を行い、擬似降伏曲面内上の内力や変形を求める。

3. 解析結果

Fig.4は1点目の照射位置から $r_i=0.5[\text{mm}]$ 離れた点に2点目を照射した時の2点目の照射位置における一般化内力及び一般化変形の解析結果である(但し、解析の条件は板厚0.3[mm]、レーザーの照射半径 $d=0.05[\text{mm}]$ 、薄板の照射部での定常状態における表裏の温度をそれぞれ625[°C], 100[°C]とする)。ここで、Fig.4の(a)～(d)はそれぞれ、(a)半径方向と周方向の膜力及び膜変形の関係

(b)半径方向と周方向のモーメント及び曲げ変形

(c)半径方向のモーメント及び膜力の関係と、

曲げ変形及び膜変形の関係

(d)周方向のモーメント及び膜力の関係と、

を示す。曲げ変形及び膜変形の関係の A_1 は1点目の照射時の内力が降伏に達した点、 A_2, B_2 は1点目の照射時の加熱行程終了後の内力と変形、 A_3, B_3 は1点目の照射時の冷却行程終了後の内力と変形を表している。この A_3, B_3 が元の無変形状態に戻っていないことから1点目の冷却行程終了後には残留内力及び残留変形が生じていることが分かる。 A_4, B_4 は2点目の照射の再降伏時の内力と変形、 A_5, B_5 は2点目の照射終了時の内力と変形、 A_6, B_6 は2点目の冷却行程終了後の残留内力と残留変形を表している。

この解析の条件では1点目の照射時に生じる塑性領域の広がりは $dL=0.78[\text{mm}]$ となる。2点目の照射位置をこの塑性領域の内側と外側に照射する場合では解析結果にどのような違いがあるかを明らかにするために、ここでは図中の(c)を例に挙げて比較する。Fig.5は2点目の照射位置をそれぞれ $r_i=0.07[\text{mm}]$ と $r_i=1.0[\text{mm}]$ とした時の解析結果である。これらの特徴としては、1点目の照射部近傍に照射する(c')では1点目の照射で生成される塑性変形が2点目の照射で生成される塑性変形に比べてかなり大きく、 $r_i=0.5[\text{mm}]$ の(c)の場合ではそれらの割合が逆転し、2点目で生成される塑性変形が大きくなる。これは1点目に生成された残留応力の影響により、1点目の照射部付近では新たに生成される塑性変形の割合が小さくなるためである。一方で、外側に照射する(c'')では、1点目の照射時には塑性変形が生成されず、全て2点目の照射時に生成される。

次に、Fig.6は2点間の照射距離と2点目の照射の冷却後に生成される残留曲率の関係を示したものである。図中の破線は1点目の照射の過程で生成された残留曲率を意味し、一方で図中の実線は2点目の照射の過程で生成された残留曲率である。そして一点鎖線はそれらの合計であり、全曲率を意味する。ここで、実線から明らかな様に、2点目の照射で得られる残留曲率は1点目の照射点($d=0.05[\text{mm}]$)の近傍では殆ど発生していないが、塑性領域 dL に近づくにつれて増加し、 dL の外側ではほぼ一定値に停留することが分かる。従つて、2点目の照射で新たに生成される残留曲率だけを考えると dL の近傍に照射を行う場合が効果的であることが分かる。これに対し、一点鎖線で表された全曲率の結果からは、 dL の近傍よりもむしろ1点目の照射点からわずかに離れた位置($r_i=0.1[\text{mm}]$ 程度)で残留曲率が最も大きくなる。

4. 結言

放射則に基づく弾塑性分解を用いて2点目の照射時の塑性変形挙動を調べ、照射位置と冷却後の残留曲率の関係を明らかにした。今後は、多点間の断続照射や、連続照射を更に検討する予定である。

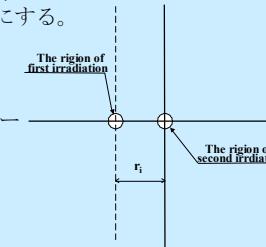


Fig.1 Irradiated position



Fig.2 Experimental equipment

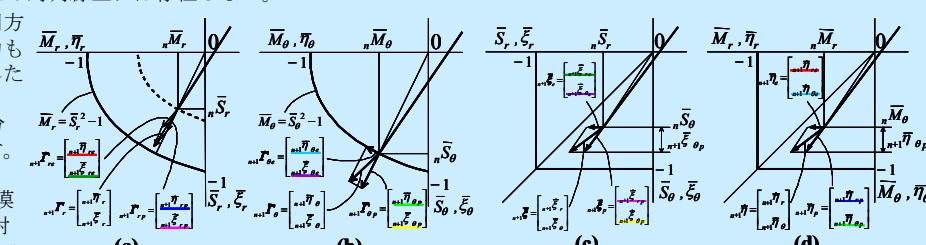


Fig.3 Oblique decomposing of internal force and deformation

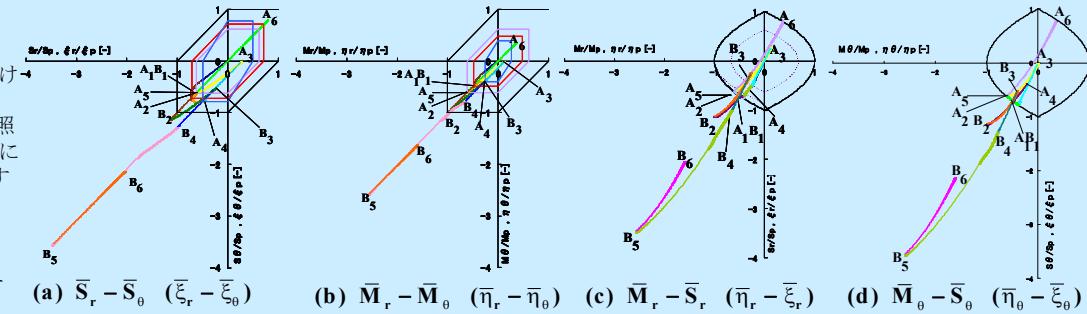
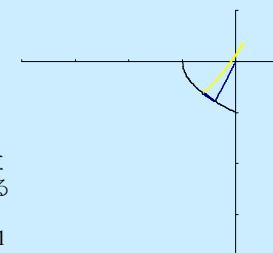


Fig.4 Behaviors of internal forces and deformations for the second irradiation ($r_i=0.5[\text{mm}]$)



(c') $M_r - S_r$ ($\eta_r - \xi_r$) (c'') $M_r - S_r$ ($\eta_r - \xi_r$)

($r_i=0.07[\text{mm}]$) ($r_i=1.0[\text{mm}]$)

Behaviors of internal forces and deformations for the second irradiation

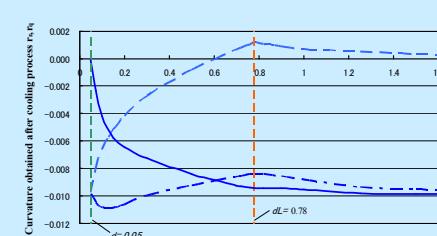


Fig.6 Relation between curvature obtained after cooling process and position of the second irradiation