レーザ孔明け加工の熱影響層に関する研究

小石川　勝男*　菊池　誠*
鴨志田　武*　江田　弘**

1. 緒 言

レーザビームを用いた加工分野では孔あけ，トリミング，溶接，表面硬化などが行われている。一般にレーザビーム加工は，高密度エネルギーが加工箇所の局部に瞬間的に照射されるためにその周辺に対する熱影響は少ないといわれている。また，レーザビームのパワー密度や照射時間による溶融層の厚さや除去深さの変化などについて報告1）されているが，孔加工された孔内側の極薄い層の変化についてその金属組織の変化を熱伝導および熱応力解析を通じて吟味検討した報告は見あたらない。

本研究の最終的な目的はレーザビームによる微細孔加工精度の向上である。著者らはレーザビームによる加工孔の内側に生じる極薄い熱影響層（レーザ加工によって硬さ変化が生じた領域）が精度誤差の大きな成因となっているであろうと考え，研究の第一歩としてレーザ孔明け加工の熱影響層の生成メカニズムとその除去方法について検討した。特に，実用上困っているオーステナイト系ステンレス鋼（JI3 SUS304）をとり上げ，現場で使用しているライン用実機（矩形波パルス発生）YAG レーザビーム加工機を用いて，熱影響層について考察を加えた。その結果，熱影響層の組織成因が明らかになったので以下に報告する。

2. 熱影響層の生成モデルと解析

レーザビームによって生成する熱影響層について検討するために，レーザ加工による孔内側の熱影響層生成モデルを図1 に示すように考えた。

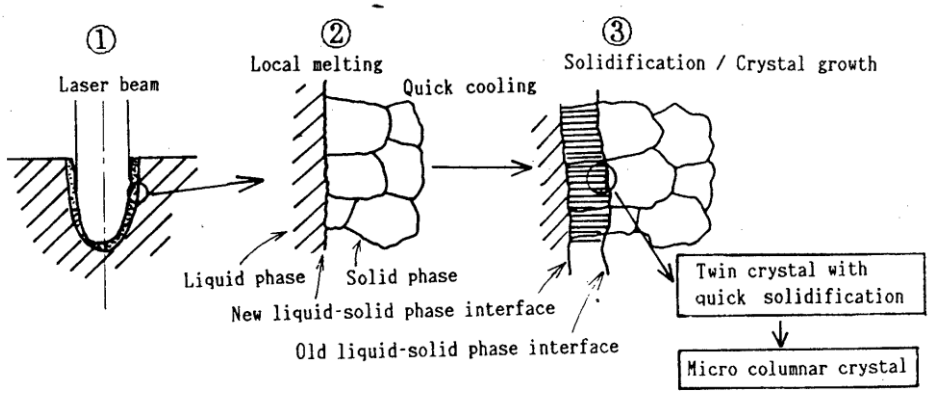


図1 The grow process of micro columnar crystal

*機械金属部　**茨城大学工学部

このモデルは今回のレーザ加工された孔について，EPMA 付SEM で観察した結果を整理して考えた例である。図1①はレーザビームによる孔加工の断面を示す。この図のように，金属にレーザビームを照射すると吸収されるエネルギーのほとんどが熱に変換され，溶融・蒸発・穿孔といった現象が同時に連続して起きる。②は①の○マークの中の状態を示し，孔断面の拡大状態を示したもので，孔の表層部分のみが局部的に溶け，液相状態になる。（3）は，②の状態が急冷された状況を示す。

ここでは，凝固／結晶成長が瞬時にすすみ，旧固液界面と新固液界面の間が柱状晶として生成される。この柱状晶は，急速凝固により微小な柱状晶の相になると考えられる。また，この柱状晶は顕微鏡観察からすると，溶融境界から成長を始め成長方向は熱冷却方向に一致している。以上示した①，②，⑧のような過程をへて孔内側に熱影響層が生成すると推察される。

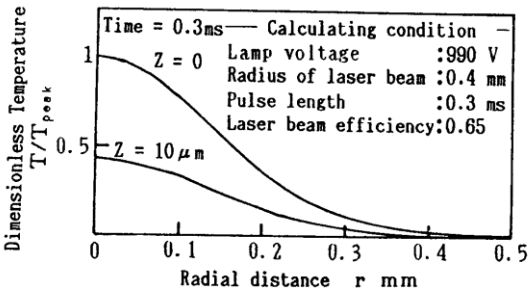


図2 Radial variation of temperature at various Z

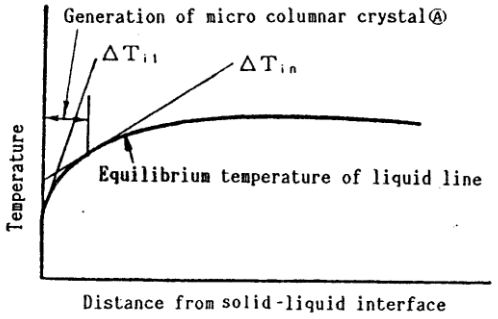


図3 Solidification condition

表1 Chemical compositions of test piece

at%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.06	0.44	0.83	0.017	0.006	8.81	18.16	0.10	0.20

図2 は， レーザビームによる温度変化を， ガウス型分布形をもつ熱源としてモデル化（後述式（1）～（3））し，半無限体表面に発生する温度分布を無次元化表示した計算例を示す。ただし，レーザ加工条件は実験の代表例である。Z＝0 の曲線は表面における温度分布を， Z＝10μm は表面下10μm の位置の温度分布状態を表している。図1 との比較から，図1（3）の○マークの境界は図2 に示すレーザビーム中心半径から0．2mm の位置に相当する領域であった。つまり， この辺まで溶融蒸発する熱量とT／TPeak （任意温度／最高温度）が与えられているとみなされる。また，図からわかるようにレーザビームによる温度はレーザビームの中心から距離が遠ざかると急激に下がるため，母材側の熱影響は小さくなるとみなされる。

図3 は，図1（2），（3）の固液相界の凝固条件を考察するための模式図2）を示す。図3 の矢印の範囲で急冷凝固の樹枝状晶の柱状成長が起こると仮定する。この領域の温度勾配ΔTi1 からΔTin までの範囲，つまり r＝0．2mm の溶融凝固組織形成（原子拡散領域）のΔT によって起こることとなる。例えば， SUS304 材の場合， レーザビームによって集光照射された箇所は溶融蒸発の状態であるから，3000℃ 以上になっていると仮定できる。そして， T／TPeak は r ＝0．2mm においてZ＝0 の時ほぼ1500℃ であるから，＋分溶融することが想像できる。

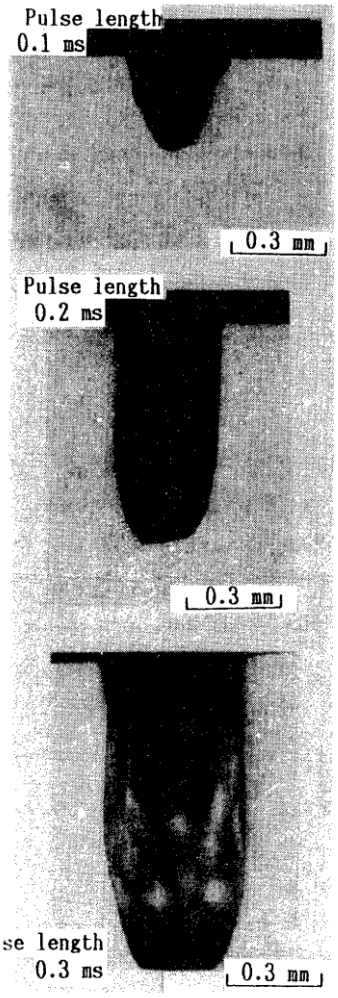


図4 Cross sectional view of the laser beam drilled holes Test piece; SUS 304, Lamp voltage;990 V

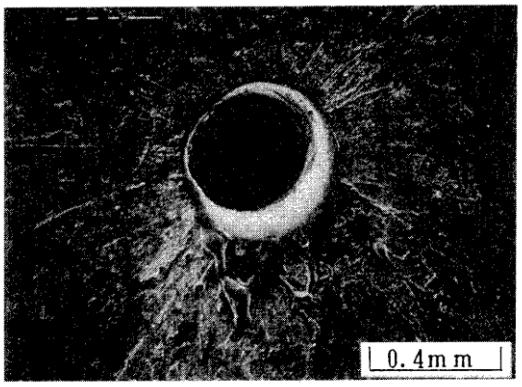


図5 Top view of the laser beam drilled hole Test piece;SUS 304, Lamp voltage;990 V

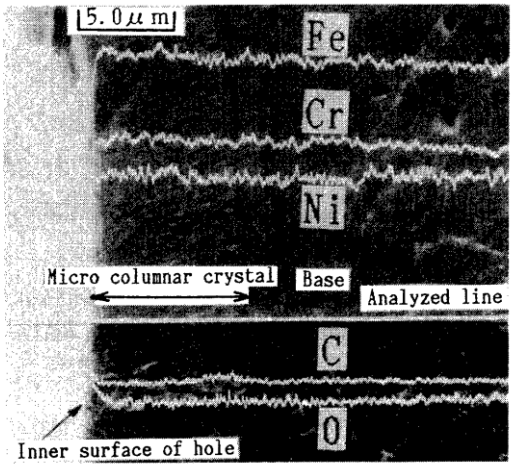


図6 SEM photomicrograph of sample and analysis results of chemical compositions by EPMA
Test piece;SUS 304, Lamp voltage; 990 V

3. 実験装置及び方法

実験は，矩形パルス波形を発生するYAG レーザ加工機（東芝製LAY－601 形）を使用して，ランプ印加電圧990Vー｛定として，パルス幅を0．1，0．2，0．3ms と変え，集光レンズ（焦点距離50mm）により集光照射した。試料は，板厚1mm のオーステナイト系ステンレス鋼（JIS SUS304），面粗さ0．8μmRmax のものを用いた。レーザ加工された孔を上面及び孔断面で切断，研磨，電解腐（10%しゅう酸液）し， X 線マイクロアナライザ（EPMA）付走査電子顕微鏡及び光学顕微鏡で析，観察した。さらに，超微小硬度計（島津製DUH－50，最小荷重10mg）によって孔断面の硬さ分布を測定した。表1 は，試料SUS304 の組成を示す。

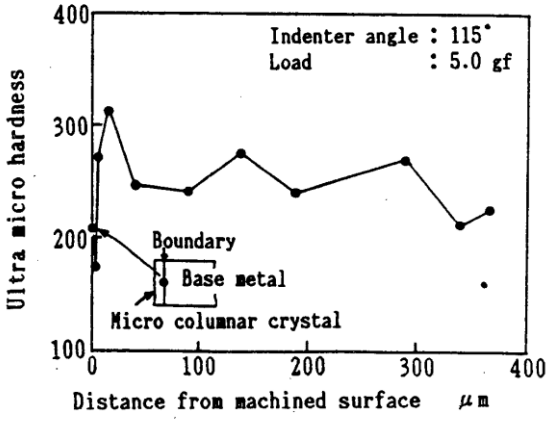


図7 Variaton of ultra micro hardness form laser machined surface

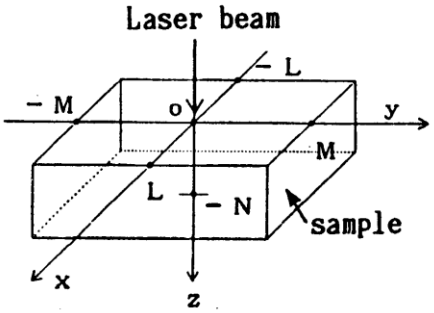


図8 Schematic diagram of x-y-z coordinate in the laser beam drilling

4. 実験結果及び考察

4.1 レーザ孔明は加工の熱影響層の組織

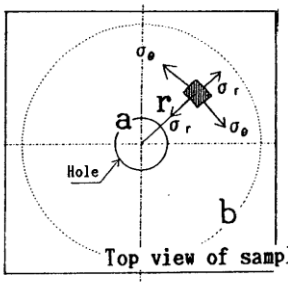
ランプ印加電圧990V 一定，パルス幅0．1，0．2，0．3ms の条件のもとでSUS304 を孔明け加工した結果を図4 を示す。この図は， レーザビームによって孔明けされた孔を切断，研磨したあと電解腐食（10%しゅう酸液）後の断面状態を示す。図からわかるようにレーザビームのパルス幅が大きくなるにつれ孔が深くなり，パルス幅0.3ms では，板厚1mm を貫通している。この3 条件とも，図1のモデルで示したような熱影響層の生成が見られた。図5 はパルス幅0.3ms の条件で孔明けした後の溶融金属の孔上面における飛散状態を示す。

さらに，熱影響層を詳細に調べるためにランプ印加電圧990V，パルス幅0．3m s の条件で孔加工したものについて， EPMA 付SEM で観察，分析した例を図6 に示す。この写真から母材（オーステナイトγ組織）と約9μm 幅の柱状晶の相が明瞭にみられる。また， この柱状晶は孔周辺全緑に5～10μm の幅で生成する。この柱状晶の柱状の間隔は，0．4μm 前後と一定の幅になっている。この間隔は凝固するときの原子の拡散速度に影響されるものと考えられる。この樹枝の柱状晶はいずれもレーザ熱源中心に向けて成長しているので，普通の凝固組織と同様に拡散方向に生成したとみなされる。熱影響層近傍をEPMA で分析するとNi，Cr，Fe，C，0 の各元素濃度は母材と熱影響層において何ら変化がみられない。以上の結果をまとめると，熱影響層には，炭化物の析出や酸化物の生成はみられなかった。また，柱状晶は結晶成長のみによる層生成であるとみなされる。

4.2 硬さ分布

図7 は，超微小硬度計で孔周辺部の硬さ分布を測定した例を示す。この分布をみると，柱状晶の硬さは母材よりも低くなっている。また， それより内部に入ると一旦硬さが増大し， さらに内部に入ると生地硬さに戻る変化を示す。この硬さの増大は既報[3)] で明らかなように白層の生成機構において，γ→α変態による相変態によって生じたと同様の成因によるものと解釈できる。熱影響層の硬さの増大は，計算から求めた熱応力分布が圧縮応力をとる領域とほぼ一致する。この領域ではγ→α相変態が生じている。

この最も高い部分の硬さは，柱状晶の層と母材の境界から約20μm 母材側へ入ったところで生ずる。つぎに，この硬さ分布が変化した理由について，レーザによって発生した温度分布[4]を用いて，熱応力[5]を算出して考察を加える。計算は孔中心から0.2mm で表面下0.1mm の例について考える。図8 は，熱応力計算をするための座標系を示す。平板の x ， y ， z 方向の長さをそれぞれ L ， M ， N ， また，その各表面を断熱状態とすると，熱伝導方程式から温度は式（1）で表される。つまり，任意時間 t 後の x ， y ， z における温度T （x ， y ， z ， t）は以下の通りである。



σr:Radial-component of thermal stress
σθ:Tangential-component of thermal stress
r :Distance from center
a :Inner radius
b :Imaginary outer radius

図9 A model for thermal stress analysis in the laser beam drilling

$$T(x,y,z,t)=\frac{1}{4\rho c\sqrt{\pi\kappa^3}}\int_0^t\int_{-M}^{M}\int_{-L}^{L}\frac{\phi(x',y',t')}{\sqrt{(t-t')^3}}\times e^{-\frac{(x-x')^2+(y-y')^2+z^2}{4\kappa(t-t')}}dx'dy'dt' \quad (1)$$

ただし， ρ：密度8030kg/m^3， c ：比熱502．3J/kg℃， κ：熱拡散率5．189×10^{-6}m^2/s φ （x，y， t） ：供給される熱の割合（j/m^3 s ）。また， ガウス型分布熱源は次式（2）， （3）により求めた。

$$\phi(x,y,t)=\begin{cases}\dfrac{W}{\pi a_0^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{a_0^2}} & (t\leqq t_s)\\ 0 & (t>t_s)\end{cases} \quad (2)$$

ただし， $W=P\varepsilon_0$ (3)

ここで， P：レーザ光の出力990W， ε_0：材料の熱吸収率0．65， a_0：熱源幅3．3×10^{-5} m ， t_s：照射時間0．3×10^{-3}s である。

また，熱応力を調べるために図9 に示すような円板形状のモデルを仮定し，式（4）[5]， （5）から熱応力による半径方向，接線方向の応力変化を計算した。

半径方向応力 r （MPa）

$$\sigma_r(r,t)=\frac{1}{r^2}\left\{\left(\frac{r^2-a^2}{b^2-a^2}\right)I(a,b)-I(a,r)\right\}$$

接線方向応力σ_0（MPa）

$$\sigma_\theta(r,t)=\frac{1}{r^2}\left\{\left(\frac{r^2+a^2}{b^2-a^2}\right)I(a,b)+I(a,r)\right\}-\delta(r,z,t)$$

ただし (4)

$$\left.\begin{aligned}&\delta(r,z,t)=E(T)\alpha(T)T\\&I(a,b)=\int_a^b E(T)\alpha(T)Tr\,dr\\&\alpha(T)=(0.05T+14.3)\times10^5\\&E(T)=(-8T+20\,000)\times10.13\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

ただし， α：材料の線熱膨張係数（$℃^{-1}$）， E：ヤング率（MPa）， α及びE は溶融状態では0，それ以外では温度に関する一次式で表現されるとし材料 IX18H9T[6] の特性を採用した。r ：中心からの距離（m）． z ：表面からの深さ0.1×10^{-3}m， a：内周半径0.2×10^{-3}m， b：仮想した外周半径0.6×10^{-3}m，T：任意位置，時刻の温度（℃）。図10（a）は式（1）から求めた温度分布， （b），（c）．は（a）の温度分布から求めた熱応力σ_r σ_0 を示す。図11(a)，(b)，（c）は，図10 の中でレーザ中心位置から0.2mm の箇所を抽出した結果を示す。図10（a）に示す温度はレーザビームが照射されると，急激に温度上昇が起こる。また温度はピーク後急激に降下し始める。さらに0.1～0.2 秒時間経過すると温度は常温に戻っている。また， レーザビーム中心から十分遠い0.6mm の位置の温度は極めて緩やかな勾配と小さな上昇となっている。

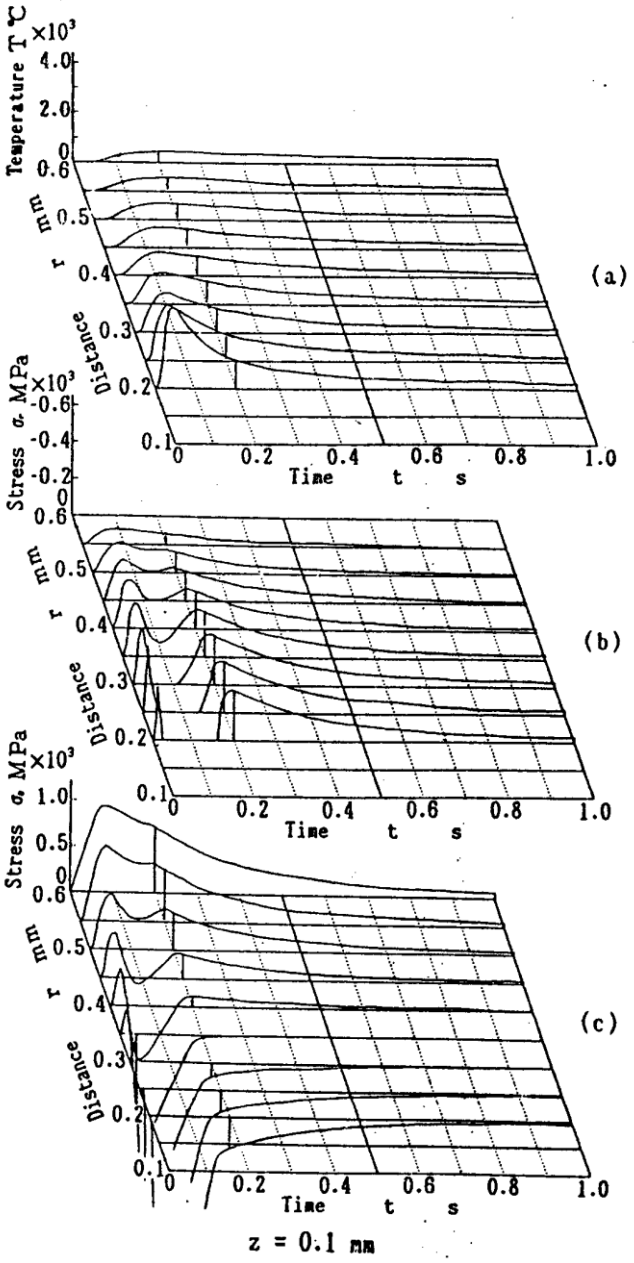


図10 Variation of temperature and thermal stress calulated from Eq.(1) and (4)

図11（a）の接線方向の応力は，初期に衝撃的な圧縮応力となる。これは半径方向の圧縮応力より約 5 倍も大きな応力を示している。これ以後は半径方向の応力と同じ傾向を示している。 しかし，図10（c）に示すように接線方向の応力変化は，レーザビーム中心から0.35mm 離れた付近において引張りの応力に転じている。

図11（b）に示す半径方向の応力は，やはり初期において衝撃的に圧縮応力となり， この圧縮応力は温度が下がりはじめると，瞬時に減少する。さらに温度が緩やかに下がるにしたがって圧縮応力の変化も小さくなる。また，図10（b）の半径方向の応力は図からもわかるようにほとんど圧縮側に分布する。

以上の計算結果から推定して，このような急激な温度及び応力変化の影響が，図7 に示した母材硬さの変化に大きく影響を及ぼしていると考えられる。特にレーザ加工表面下10～20 μm に発生する硬さ上昇は，前述のγ→α相変態に加えてσ_r σ_0の圧縮応力によるものと推定される。

4.3 熱影響層の除去

レーザビームによって孔内側に生成された極薄い熱影響層を除去するために熱処理による母材組織への回復を検討した。

図12（a）は，770℃で30ｍｉｎ 熱処理を施した例で，結晶粒界に炭化物析出が見られる。この段階では，熱影響層の組織変化は認められない。

図12（b）は，固溶化熱処理（熱処理条件，雰囲気：水素，保持温度：1020℃，保持時間：6min，冷却方法：水素ガスにて急冷）を行った例を示す。

この写真からわかるように母材と熱影響層とも固溶化して，元のオーステナイト組織になっており，図12（a）に認められた熱影響層は完全に消滅し，酸化膜や汚染層等を含有しない元の生地組織に回復していることがわかる。よって，柱状晶は単なる急冷凝固によって生成したことがわかる。なお，図12（a），（b）の四角の痕跡は熱影響層位置を確認するために付けたものである。

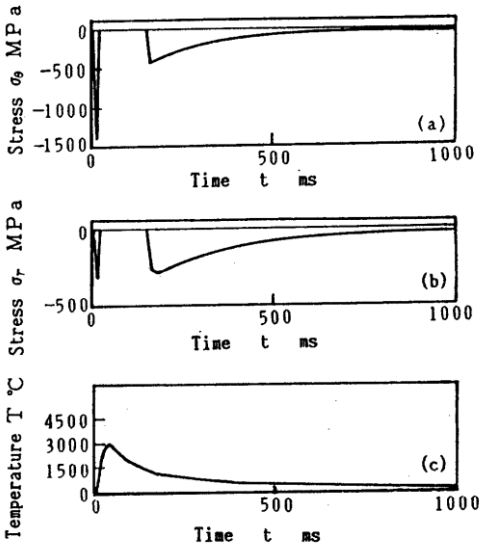
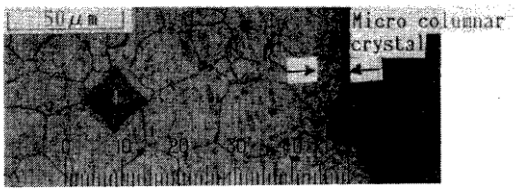
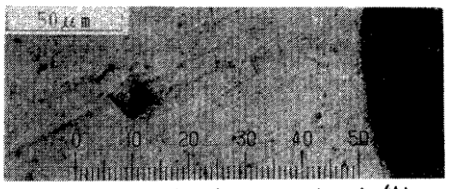


図11 Variation of thermal stress and temperature distribution calculated from Eq.(1) and (4)



(a) Heat treatment condition (Temperature: 770℃, Time:30 min)



(b) Solid soluting heat treatment (Atmosphere: Hydrogen, Temperature: 1020℃, Keeping time: 6 min, Cooling fluid: Hydrogen)

図12 Effect of heat treatment on disappearance of heat affected layer

5.結 言

レーザ孔あけ加工によってSUS304 の孔内面に極めて薄く生成された熱影響層を詳細に検討し，本実験条件において次の結果が得られた。

（1） 熱影響層は，レーザビームの出力に関係なく生成する。

（2） 熱影響層には，炭化物の析出や酸化物の生成はみられない。

（3） 柱状晶は，急速凝固による結晶成長によって厚さ約5～10μm に生成される。

（4） 柱状晶の実測硬さは，母材よりも低くなっている。また，それより内部に入ると一たん硬さ

が増大し， さらに内部に入ると生地硬さに戻る変化を示す。この硬さの増大は既報ハで明らかなように白層の生成機構において， γ←→α変態による相変態によって生じたと同様の成因によるものと解釈できる。

（5）熱影響層の硬さの増大は，計算から求めた熱応力分布が圧縮応力をとる領域とほぼ一致する。この領域ではγーα相変態が生じている。

（6） 熱影響層は，固溶化熱処理を施すことにより消滅させることが出来る。

本研究の遂行に当たり，オーステナイト相の変態等について御教示頂いた茨城大学工学部友田陽助教授， レーザ加工にご協力して頂いた協和時計工業（株）に厚くお礼申し上げます。

参考文献

1） 渡部武弘，志茂主税： YAG レーザによるステンレス綱の溶融除去過程，精密機械，51，5（1985）1007．

2） 溶接学会編：溶接便覧，改訂3 版（1977）814，または，江田 弘ほか：溶融形研削切りくず（1），（2），機械の研究，36，6（1984）199，7（1984）807．

3） 江田 弘ほか：研削白層の生成機構， 日本機械学会論文集，46，408（1980）970．

4） H．S．Cars1wandJ．C．Jaeger：Conduction of Heat in Solids，2nd ed．，Oxford Univs．Press，（1959），266．

5） 日本機械学会編：新版機械工学便覧， （1986）A4－74．

6） 長谷川正義監修：ステンレス鋼便覧， （1974）111．