レーザーオリジナル

レーザー加工形状の数値解析 (第6報)

—各種金属の数値解析結果—

渡部 武弘*・吉田嘉太郎*・志茂 主税**

(1988年6月20日 受理)

Numerical Calculation of the Shapes Machined with
a Pulsed YAG Laser (6th Report)

—Calculated Results for Several Kinds of Metals—

Takehiro WATANABE*, Yoshitaro YOSHIDA* and Chikara SHIMO**

The present paper reports the study on the machined shapes of metals whose thermal constants are clarified only in room temperature. The calculation is carried out under the following conditions. ① In the solid phase, the thermal conductivities λ and the thermal diffusivities α in room temperature are used; ② In the liquid phase of pure metals, the half values of λ and α at room temperature are used; and ③ In the liquid phase of alloys, the double values of λ and α at room temperature are used. The results are summarized as follows;

(1) In the area of drilling without residual melt of metals whose thermal conductivities are less than about $0.4\text{J}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$, the calculation precisions are within 10% of the experimental values. Even though machining of metals whose thermal conductivities are more than $0.4\text{J}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$ and machining in area including residual melt, sufficient precision is obtained by introducing the temperature-dependencies of thermal constants. (2) Actual machining processes are simulated by the calculating method shown in this paper. (3) Diameters calculated at the surface of workpieces are in good agreement with those obtained by experiments in the region of removal machining independently of thermal constants. (4) Machining conditions are decided easily by the computer simulation described above.

Key Words: Laser machining, Numerical calculation, Machined shape, Deference method, Thermal property, YAG laser.

1. 緒 言

前報¹⁾では熱伝導率が大きく、溶融層が多く

形成されるAlを対象に、各種照射条件でレーザー一穴あけ加工した場合の形状を数値解析により求めた。このように、熱伝導率が大きく、溶融

* 千葉大学工学部機械工学科 (〒260 千葉市弥生町1-33)

** 千葉工業大学経営工学科 (〒275 習志野市津田沼2-17-1)

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University (1-33, Yayoi-cho, Chiba, 260)

** Department of Management Engineering, Chiba Institute of Technology (2-17-1, Tsudanuma, Narashino, 275)

層が多く残留する材料の加工形状を数値計算により求める場合には、温度依存の熱定数を用いる必要のあることが明らかになった。しかし、温度依存の熱定数は低融点を持つ限られた材料について求められているにすぎない。

そこで本報では、本解析法を温度依存の熱定数が求められていない各種金属材料へ拡張するためにまず、熱定数の温度変化と加工穴中でのレーザー光の減衰について検討する。次いで、前報¹⁾と同様の方法により加工形状を数値解析により求め、解析精度と適用範囲を検討する。

2. 数値解析方法の概要

方法の詳細な点については前報¹⁾で述べられているが、ここではその概要を示すことにする。温度場を微小円環要素に分割し、explicit型の差分式により熱伝導解析を行っている。この場合、試料表面では空気中への熱放射や熱伝達などの熱移動はないものとした。半径 r 、深さ z 、時刻 t における試料温度 $T(r, z, t)$ の基礎方程式、初期条件及び境界条件は次式で示される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\kappa}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$T(r, z, t) = 0 \quad ; t = 0 \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = F(r) \quad ; z = 0 \quad (3)$$

ここで、 κ 、 λ は各々、熱拡散率、熱伝導率で、 $F(r)$ はレーザー光のパワー密度分布である。試料表面の中心部、試料中心の内部、試料表面、試料内部に分割し、各要素の差分式を導出し、温度計算を行う。要素 (m, n) の時刻 t での温度 $T(r, z, t)$ を次式で示すことにする。

$$T(r, z, t) = T_{m,n}^p, \quad r = m \cdot \Delta r, z = n \cdot \Delta z \\ t = p \cdot \Delta t \quad (4)$$

一例として、試料内部での温度の差分式を以下に示す。

$$T_{m,n}^{p+1} = (1 - 2\zeta_r - 2\zeta_z) \cdot T_{m,n}^p + \zeta_r \left(1 + \frac{1}{2m} \right) \cdot T_{m+1,n}^p + \zeta_r \left(1 - \frac{1}{2m} \right) \cdot T_{m-1,n}^p$$

$$+ \zeta_z (T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) \quad (5)$$

ここで、 ζ_r と ζ_z は次式で示される。

$$\zeta_r = \frac{\kappa \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2}, \quad \zeta_z = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (6)$$

使用したレーザー光のパワー密度分布や発振波形を定量化して計算に導入している。又、相変化によるレーザー光の反射率変化やビーム孔も考慮している。

3. 熱定数の仮定

熱解析に大きな影響を与える比熱、熱伝導率、熱拡散率などの熱物性値はレーザーフラッシュ法²⁾や高速通電法³⁾などにより測定可能である。そして、低融点材料については溶融状態までの熱物性値の温度依存性が求められている⁴⁾。しかし、その他の多くの材料や高融点材料についても室温での値は得られているが、高温領域までの温度依存性は求められていない。そこで本項では、解析に導入する熱定数の仮定方法について述べる。

自由電子の平均自由行程は温度の上昇とともに減少する。したがって、純金属の熱伝導の主体は自由電子であるため、固相範囲での熱伝導率は温度の上昇とともに低下し、融点において最小値を示す。ところが、合金の場合は自由電子の平均自由行程は非常に短いため、熱伝導の主体は格子振動により行われる。この格子振動は温度上昇とともに活発となるため、固相における熱伝導率は温度とともに上昇する⁵⁾。熱定数に関するこのような考え方と低融点金属に見られる熱伝導率の温度依存性の一般的傾向を参考にして、次のような仮定を設定する。

熱伝導率が小さく、除去主体の加工範囲では、固相面でレーザー光は吸収され、局部的にその部分の温度は上昇し、除去される。そのため、温度による熱定数変化の数値解析への影響は小さいと考えられる。そこで、

(1) 純金属の場合、固相範囲では室温の熱伝導率と熱拡散率を用い、液相範囲では室温での値の1/2として導入する。

Fig.1 Relations of thermal diffusivities to thermal conductivities of several kinds of pure metals and alloys at room temperature.

- (2) 合金の場合、固相範囲では室温での熱伝導率と熱拡散率を用い、液相範囲では室温での値の2倍として導入する。

各種金属のレーザー加工形状の数値解析を行い、上記の仮定がどこまで可能かを検討する。

Fig.1は各種金属の室温での熱伝導率と熱拡散率を示したものである^{6,7)}。オーステナイト系ステンレス鋼SUS304は熱伝導率や熱拡散率の最も小さい金属の部類に属する。一般に用いられる各種鋼材はSUS304とほぼ同じオーダーの熱定数を示しているのがわかる。ここでは、熱伝導率の小さいSUS304や合金工具鋼SKD11、熱伝導率の大きいタングステンW (99.6%) やアルミニウムAl (99.5%)、及び中間の値を持つ鉄Fe (99.98%) について検討する。

4. 各種金属の加工穴中でのレーザー光の減衰率

加工穴深さの増加とともにレーザー光は減衰するため、加工点でのパワー密度は減少する。そのため、加工穴深さの増加割合は減少する。この事は、同一パワー密度で、レーザー照射時間を変化させて行った加工穴深さの実験結果より明らかになった⁸⁾。ここでは、実際に穴あけさ

れた加工深さから減衰率を算定することにする。

試料表面でのレーザービーム径、照射エネルギー、パルス幅から求めた試料表面でのパワー密度 W_0 は加工穴深さ h の増加とともに指数関数的に減少し、加工穴底部でのパワー密度が除去限界パワー密度 W に達した時に、加工深さは一定となる。この時の減衰割合を減衰率 α とすると、次式が成立する。

$$W = W_0 \cdot \exp(-\alpha h) \quad (7)$$

まず、SUS304の減衰率を求める。加工特性の実験結果より除去限界パワー密度は $W = 18 \text{ kW/mm}^2$ となっているので、各照射パワー密度と加工深さとの関係による減衰率を求めると次のようになる。

W_0	h	α
25.6	0.8	0.44
33.5	1.17	0.53
38.1	1.39	0.54
44.4	1.64	0.55
55.0	2.28	0.49

このように、ほぼ一定の値が得られたので、SUS304の減衰率 α を 0.5 mm^{-1} とする。

同様に、各種材料の減衰率を実験結果より求め、次に示す。

合金工具鋼 (SKD11)	$\alpha = 0.4 \text{ mm}^{-1}$
鉄 (99.98%以上)	$\alpha = 0.5 \text{ mm}^{-1}$
タングステン	$\alpha = 0.4 \text{ mm}^{-1}$
アルミニウム (99.5%以上)	$\alpha = 0.4 \text{ mm}^{-1}$

これらの値を用い、次項以降では加工穴形状の数値解析を行う。

5. 加工形状の数値解析結果と実験結果の比較

5.1 ステンレス鋼の加工穴形状の数値解析結果

Fig.1でも明らかなようにオーステナイト系ステンレス鋼のSUS304は非常に小さい熱伝導

Fig. 2 Sectional features of stainless steel (SUS304) in calculated and experimental results at each irradiated energy.

率と熱拡散率を示している。したがって、温度による熱定数変化の数値解析への影響は小さく、前述の仮定が成立するものと考えられる。

そこで本項では、SUS304の加工穴形状の数値解析を行う。Fig. 2は解析結果を実線で、実験結果を破線で示したものである。図中のSUSIA1A.FORTは解析に使用したプログラム名を示す。Vは要素除去の温度を示し、2700はSUS304の沸点である。1870は実験結果より得られた除去エネルギーを基に気化率⁹⁾を求め、それに相当する蒸発潜熱を温度に換算したものである。つまり、沸点に達した要素は更に1870℃上昇し、除去される。 d は試料表面でのビーム径を、 α は減衰率を示す。照射エネルギーが小さい場合には溶融層の割合が大きいため、実験結果と解析結果の差は大きくなっている。しかし、除去が主体の高エネルギー側では解析結果は実験結果と良く一致している。

この理由として次のことが考えられる。つまり、溶融層が残留するような低エネルギー範囲では、温度変化は徐々に起こるため、熱物性値の温度依存性の影響を大きく受ける。しかし、除去が主体の高エネルギー範囲では、温度上昇が急激であるため、熱物性値の変化の影響を受ける前に、材料は溶融・除去される。

Fig. 3は加工深さと入口直径の照射エネルギー

Fig. 3 Influence of irradiation energy on the machined depth and diameter at the surface of a workpiece (SUS304).

ーによる変化を示したものである。●と○印が実験結果で、実線と破線が解析結果を示している。加工深さは照射エネルギーとともに増加している。入口直径は照射エネルギーの増加により、急激に増加する。しかし、除去が始まり、熱源が材料内部へ移動すると、入口直径はほぼ一定の約0.36mmとなっている。

Fig. 4は実験値に対する解析値の割合を入口直径と加工深さについて示したものである。前述のように、照射エネルギーが小さい場合には、

Fig. 4 Precisions in calculating the machined depth and diameter at each irradiation energy (SUS304).

解析値と実験値との差は大きくなっている。しかし、照射エネルギーが大きい除去加工の範囲では、実験値に対し $\pm 10\%$ の範囲内に入っている。したがって、前述のような仮定の下でも十分な解析精度が得られていることがわかる。

Fig. 5 は照射エネルギーをパラメータとし、

Fig. 5 Growing processes of the machined depth at each irradiation energy (SUS304).

加工深さの解析結果を経過時間により示したものである。照射エネルギーが増加すると各曲線の傾きで示される加工速度は増加する。しかし、熱拡散率、沸点、減衰率などにより支配される時刻 0.8ms 以降ではほぼ限界に達し、その後は一定の深さとなっている。

Fig. 6 は照射エネルギーをパラメータとし、入口直径の解析結果を経過時間により示したものである。熱伝導率が小さいため、局部的に加熱され、除去される。そのため、熱源点は、試料内部へ移り、入口付近の加工直径はレーザー照射初期の段階ではほぼ一定となる。

5.2 各種金属の加工形状の数値解析結果

以上のように、熱伝導率と熱拡散率の小さい SUS304 の場合には、次のような単純な仮定の下で行った解析結果にも十分な解析精度のあることがわかった。つまり、固相範囲では室温で

Fig. 6 Growing processes of the diameter at the surface of a workpiece at each irradiation energy (SUS304).

Fig. 7 Precisions in calculating the machined depth and diameter at each irradiation energy (Alloy tool steel: SKD11).

の熱伝導率と熱拡散率を用い、液相範囲では室温の値の2倍として導入すれば良い。

それでは、上記の仮定がどこまで適用可能かについて、以下により検討する。Fig. 7は熱伝導率と熱拡散率がSUS304の約2倍の値を持つ合金工具鋼SKD11についての結果である。SUS304に比べ、低エネルギー側ではより多くの溶融層が形成されることから、解析精度は低下している。しかし、除去層のみが形成される高エネルギー側では、SUS304の場合と同様、実験結果と解析結果とは良い対応を示している。

Fig. 8は熱伝導率と熱拡散率がSUS304の約6倍の値を示す鉄の結果である。残留溶融層の有無にかかわらず、実験結果と解析結果の間には大きな隔たりがある。したがって、これ以上の熱定数を持つ材料の加工形状を数値解析により求める場合には、温度依存の熱定数を用いる必要があると考えられる。

Fig. 9は熱伝導率と熱拡散率がSUS304の12倍以上の値を示し、高融点、高沸点材料であるタングステンの結果である。鉄の場合と同様に、低エネルギー側では実験結果と解析結果には大きな隔たりがある。高エネルギーになると、

Fig. 8 Precisions in calculating the machined depth and diameter at each irradiation energy (Iron).

Fig. 9 Precisions in calculating the machined depth and diameter at each irradiation energy (Tungsten).

加工特性の実験結果からも明らかなように⁸⁾、タングステンの気化率は大きく、多くの部分が気体として除去されている。

Fig. 10は高熱伝導率と高熱拡散率を示すアルミニウムの結果である。低エネルギー側では両結果に大きな隔たりが認められる。しかし、高

Fig. 10* Precisions in calculating the machined depth and diameter at each irradiation energy (Aluminum).

エネルギー側ではほとんどが除去属のみの断面形状となり、比較的類似の形状を示している。

一方、入口直径は熱定数の大小にかかわらず、実験結果と解析結果は近い値を示している。この理由の第1として、入口直径はビーム径に左右される。第2に、除去加工範囲では、熱源が試料表面に留まる時間が短く、熱定数の温度依存の影響を余り受けないためと考えられる。

5.3 温度依存の熱定数を考慮した鉄の加工形状の数値解析

前項において、残留溶融層の少ない除去加工領域では十分な解析精度の得られることがわかった。しかし、鉄については除去加工領域でも実験結果と解析結果には大きな隔りがある。この原因について種々検討した結果、熱定数に原因があるものと推察された。そこで、多くの文献を調査した結果、W. W. Duley の著書¹⁰⁾に温度依存の熱定数の一部が示されていた。この値と文献^{6, 11)}に示された値とを総合して熱伝導率と熱拡散率の温度変化を図示したものがFig. 11である。この図を見ると、室温では大きな値を示す鉄の熱伝導率や熱拡散率も高温の固

Fig. 11 Temperature-dependence of the thermal conductivity and thermal diffusivity of iron.

体では半分以下の小さな値となっている。この事が実験結果と解析結果に大きな隔りを作っている原因と考えられる。

そこで、Fig. 11を基に熱伝導率と熱拡散率を次式で近似し、加工形状の数値解析を行うことにした。

$$\begin{aligned} \lambda &= 7.65 \times 10^{-5} \cdot \exp(-1.16 \times 10^{-3} T) & \text{J/mm} \cdot \text{ms} \cdot \text{deg} & T < 770 \\ \lambda &= 2.90 \times 10^{-5} & & 770 \leq T \leq 1536 \\ \lambda &= 3.79 \times 10^{-5} + 3.00 \times 10^{-9} T & & T > 1536 \\ \alpha &= 2.18 \times 10^{-2} \cdot \exp(-1.85 \times 10^{-3} T) & \text{mm}^2/\text{ms} & T < 770 \\ \alpha &= 5.00 \times 10^{-3} & & 770 \leq T \leq 1536 \\ \alpha &= 8.31 \times 10^{-3} + 6.58 \times 10^{-7} T & & T > 1536 \end{aligned} \quad (8)$$

加工形状の実験結果と解析結果をFig. 12に示す。残留溶融層割合の大きい低エネルギー側でも解析結果と実験結果とは良く一致している。Fig. 13は実験結果に対する計算結果の比率を示したものである。計算結果は実験結果の約±10%以内に入っていることがわかる。このように、熱伝導率の大きい材料や温度により著しく変化する材料の加工形状を数値解析により求める場

Fig.12 Sectional features of iron calculated from the temperature dependence of thermal constants and experimental results at each irradiation energy.

Fig.13 Precisions in calculating the machined depth and diameter at each irradiation energy (Iron: by use of temperature-dependence).

合には、熱定数の温度依存性が解析結果に大きな影響を与えることが明らかとなった。

6. 結 言

温度依存の熱定数が求められていない金属材料に本解析法を適用する場合の条件について種々検討した。その結果、熱伝導率が小さい材料を加工する場合や、除去主体の加工範囲では、固相面でレーザー光は吸収され、局部的にその部分の温度は上昇し、除去される。そのため、

温度による熱定数変化の数値解析への影響は小さいと考えられる。そこで、

- ① 固相範囲では室温での熱伝導率と熱拡散率を用いる。
- ② 純金属の液相範囲では室温での値の1/2として導入する。
- ③ 合金の液相範囲では室温での値の2倍として導入する。

といったラフな仮定の下に数値解析を行い、次の結果を得た。

- (1) 熱伝導率が約 $0.4 \text{ J/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg}$ 以下の金属の除去加工領域では、実験値に対し $\pm 10\%$ 以内の解析精度が得られた。それ以上の熱伝導率を持つ金属や残留溶融層のある領域でも、温度依存の熱定数を導入することにより、十分な解析精度が得られるようになった。
- (2) 実際の加工状態の時間による変化やエネルギーによる変化が本解析法により再現された
- (3) 除去加工領域での入口直径は、熱定数の大小にかかわらず実験結果と解析結果とは良く一致している。
- (4) 温度による熱定数変化の加工形状への影響が大きいことが明らかになった。温度依存の熱定数を導入することにより、解析で得られた形状は実験で得られた加工形状と良く一致する。

このように、本報で示されたレーザー加工形状の数値解析により、加工穴形状が容易に求ま

ることから、従来、試行錯誤的に行われてきた加工条件の設定が容易になる。つまり、各種照射条件を入力し、加工穴形状を求め、得られた結果と所望の加工穴形状を比較することにより、容易に加工条件が求められる。従来、試行錯誤的にレーザー照射し、試料断面形状を求め、これにより加工条件を設定してきたが、本方法によれば、これらの手順を大幅に短縮することができる。

本研究を遂行するに当り、貴重な御助言をいただいた東京大学生産技術研究所第2部教授佐藤壽芳博士と(株)ソルテック、池田正幸研究所長に厚く御礼申し上げます。最後に、プログラム作製や解析に協力いただいた千葉大学卒業生伊井俊一氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **16** (1988) 654.
- 2) 高橋洋一: 熱物性, **1** (1987) 3.
- 3) 小林清志: 溶接学会誌, **56** (1987) 38.
- 4) E. A. Brandes: *Smithells Metals Reference Book 6th Ed.* (1983) Butterworths & Co., 14-3.
- 5) 甲藤好郎: 伝熱概論, 養賢堂 (1977) 14.
- 6) 日本金属学会: 金属データブック, 丸善 (1974) 13.
- 7) 小林清志: 日本機械学会誌 **80-714** (1978) 44.
- 8) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **15** (1987) 1073.
- 9) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **16** (1988) 391.
- 10) W. W. Duly: *Laser Processing and Analysis of Materials*, Plenum Press (1983) 86.
- 11) Y. S. Touloukian: *Handbook of Thermophysical Properties of High Temperature Solid Material*, Vol. 1, Macmillan & Collier-Macmillan (1967) 583.