YAG レーザによるアルミニウムの溶接特性と
数値解析による溶接強度の推定*渡 部 武 弘^{*1}, 吉 田 嘉太郎^{*1}Weldability of Aluminum with YAG Laser and a Presumption
of Weld Strength by Numerical Analysis

Takehiro WATANABE and Yoshitaro YOSHIDA

The strength of lapped spot welding of Aluminum is investigated in relation to irradiating conditions of pulsed YAG lasers and an empirical formula of weld strength is presented. Heat conduction is analyzed by a difference method in which the dependency of the thermal constants of a workpiece on temperature and the characteristics of used laser beams are considered. Molten configurations in various conditions of laser irradiation are obtained by the numerical analysis. The weld strength is decided by using the molten configuration and the empirical formula.

Key Words: Nontraditional Processing, Numerical Analysis, Pulsed YAG Laser, Laser Spot Welding, Welding of Aluminum, Weld Strength

1. 結 言

レーザ光は切断、穴あけ、溶接、熱処理などの分野で広く用いられている⁽¹⁾。特に、溶接の分野ではレーザ光の特長を活用して、微小部分の自動溶接⁽²⁾や難溶接材と言われている Ti 合金⁽³⁾や Al 合金⁽⁴⁾の溶接も行われている。Al の比熱は鉄の約 2 倍で、溶融潜熱も他の金属に比べ大きいため、融点の低い割には溶融するのに多くの熱量を必要とする。また、熱伝導率が大きいため局所加熱が困難になっている⁽⁵⁾。そのため、高パワー密度熱源が容易に得られる電子ビーム溶接⁽⁶⁾やレーザ溶接が有効となっている。このうちレーザ溶接は電子ビーム溶接に比べ、大気中や任意の雰囲気中で行えるという大きな利点を持っている。

そこで本報では、まず、パルス YAG レーザによる Al の重ねスポット溶接を行い、照射エネルギー、パルス幅、焦点はずし量(本報では、すべて試料の上側に焦点はずしを行った)などのレーザ照射条件や組合せ板厚と溶接強度との関係を検討する。次いで、実験に用いたレーザ発振波形やパワー密度分布と Al の熱定数

の温度依存性を考慮して、溶融形状を数値解析により求める。この解析結果と実験結果をもとにして溶接強度を推定する方法について検討する。

2. 実験装置および方法

実験には照射エネルギー E 、パルス幅 τ 、焦点はずし量 D_{ef} を任意に変えられる YAG レーザ加工機(東芝製 LAY-603 特形)を用い、焦点距離 $f=50$ mm のレンズにより集光、照射した。試料は Al 板(A 1050 P-H 14)を用い、表面を化学研磨し、その後アセトンにより超音波洗浄を行った。この試料を図 1 に示すように上板試料と下板試料を重ね、スプリングにより密着させる。レーザ溶接は同図のように重ね合わされた 20 mm 幅の中心に 3 点のスポット溶接を行い、せん断試験によりその溶接強度を測定する。溶接強度は、この試料を 3 個作製し、合計 9 点の溶接部の強度を平均し、1 点当たりの強度で示すことにする。

3. 実験結果および考察

3.1 パワー密度と溶接強度との関係 試料表面でのパワー密度 W と溶接強度との関係を図 2 に示す。 f と D_{ef} が一定であるからパワー密度は E と τ によって決まり、それらの関係を各図の上部に示した。

* 平成元年 1 月 25 日 第 955 回講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 5 月 26 日。

*¹ 正員、千葉大学工学部 (〒260 千葉市弥生町 1-33)。

つまり、 E を 6~10 J とし、各 E で τ を 1.7~7.0 ms に変化した場合の E と τ との組合せによって決まるパワー密度が下の横軸に示されている。図 2 (a), (b), (c) は板厚を 0.2 mm 一定とし、下板厚を 0.2, 1.0, 1.5 mm に変化した場合を比較したものである。

同図より、 E と τ との組合せに関係なく、パワー密度 0.7 MW/cm² 付近から溶接が始まり、1.0~2.0 MW/cm² で、せん断力が最大となる。それ以上になると上板表面に除去部を生ずるようになるため、せん断力は低下する。その低下の割合は下板厚が大きいほど急激である。

図 3 に一例として、板厚組み合わせ 0.2+1.0 mm, $E=10$ J 一定の場合の溶融形状を示す。パルス幅が大きく、パワー密度の小さい場合には、溶接部での溶融面積が小さいため、せん断力は小さくなっている。そして、パルス幅が小さくなり、パワー密度が大きくなるほど、溶接部の面積が大きくなり、せん断力は増加することがわかる。さらにパルス幅が小さくなり、パワー密度が大きくなると、上板表面に生ずる除去部が増加し、せん断力低下の原因となっている。

なお、Si フォトダイオードを用いた通過レーザー光の

図 1 溶接された試料とせん断方向

観察結果からも認められているが⁽⁷⁾、同図の $\tau=3.9$ ms 以下で見られるように、照射中に溶融層が両板を貫通するとその後は照射レーザー光の一部が溶融部を通過するため、実際に試料に与えられるエネルギーは減少する。そのため、図 2 (a) (0.2+0.2 mm) のように上板厚と下板厚の合計が小さい場合には、パワー密度が高くなってもせん断力の低下があまり起こらないものと思われる。

以上のように、Al 板の溶接には、溶接部に健全な溶融層を生ずることが重要である。そのためには、パワー密度の適当な範囲を選ぶ必要のあることが明らかとなった。さらに代表的な試料について実験を行い、各種因子の溶接部に及ぼす影響を検討する。

3・2 溶接面積とせん断応力

3・2・1 パルス幅 τ と焦点はずし量 D_{ef} の影響

E を 10 J 一定とし、 τ または D_{ef} を変えてパワー密度を変化させた場合のせん断力、せん断後に測定した溶接面積および、同面積でせん断力を割ったせん断応力を図 4 に示す。 $\tau=2.8$ ms, $D_{ef}=2$ mm を基準とし、これより高いパワー密度でのせん断力や溶接面積に対する τ と D_{ef} の影響はほぼ同じである。これに対し、低パワー密度側では D_{ef} を大きくした場合のほうがせん断力と溶接面積の低下は急激である。これは、 D_{ef} を大きくするとスポット径が大きくなるため、Al 表面での反射による損失と半径方向への熱伝導による損失が大きくなり、溶融深さと溶接面積が減少するためである。一方、 τ を大きくした場合は全体的にパワー密度は低下するが、レーザー光が長時間照射されるため、 D_{ef} を大きくしてパワー密度を下げた場合より、溶接面積が大きくなるためと考えられる。

3・2・2 板厚組合せの影響 図 5 は上板厚を 0.2

図 2 パワー密度による溶接特性

図3 パルス幅の断面形状への影響

図4 パルス幅と焦点はずし量の溶接特性への影響

図5 下板厚さの溶接特性への影響

mm一定とし、下板厚を0.2, 0.6, 1.0 mmと変化させた場合のせん断力、溶接面積および、せん断応力をパワー密度によりまとめたものである。溶接を開始するパワー密度の小さい範囲では、下板厚の影響はあまり認められないが、溶接強度が最大値を示すパワー密度付近では下板厚の小さいほど、溶接面積とせん断力はやや小さくなる傾向が認められる。さらにパワー密度が大きい範囲では、図3に示したように表面に生ずる除去部のため、下板厚の大きいほどせん断力は減少する。

図6(a), (b), (c)は、上板厚を変え、照射条件を10 J, 2.8 ms ($W=1.9 \text{ MW/cm}^2$)とした場合の溶融部断面形状を示したものである。同図(a)は板厚組合せ1.0+1.0 mmの場合で、深さ1.7 mm付近まで生じた溶融部の形状が見られる。これに対し、同図(b)は0.2+1.0 mmの場合で溶融層が両板厚を貫通しているが、表面から0.8 mm位までの溶融層の形状は、同図(a)の形とほぼ同じである。これ以下の0.4 mm位は、下板裏面において熱伝導が阻止されたため熱の蓄積が起こり、溶融幅がやや大きくなっている。同図(c)は、下板厚を1.0 mm一定とし、上板厚を0.2~1.0 mmに変化した場合のすべての溶融形状をまとめて示したものである。破線で示した下板裏面における溶融幅の増大部を除けば、完全に実線のような形状にまとめられることがわかる。この実線で示された形状を標準溶融形状と呼ぶことにする。

図7は $E=10 \text{ J}$ 一定とし、 τ を2.8~7.0 msに変化した場合の標準溶融形状を、同様の方法によって求めたものである。このように、標準溶融形状はパルス幅によって大きく異なることがわかる。

溶融部の断面組織の一例を図8に示す。母材は圧延による集合組織となっているが、溶融部では柱状組織が周辺より中央上部に向かって成長しているのが認められる。

図4や図5においてパワー密度が小さくなると、せん断力も溶接面積も小さくなるが、せん断力を溶接面

図 6 合計板厚と溶融形状との関係

図 7 パルス幅による標準溶融形状の変化

図 8 溶融部の断面組織の一例

積で割ったせん断応力は次第に大きくなる傾向が見られた。そこで、各せん断応力を上板厚さと標準溶融層深さとの比 R で示したものが図 9 である。 R に比例して、せん断応力は増大していることがわかる。つまり、せん断面が標準溶融層の下方にくるほど、せん断応力が大きくなっていることを示している。このことは図 8 の組織写真より容易に認められる。すなわち、標準溶融層の上部では結晶粒界に沿ったすべり応力が主となり、下部では結晶粒を横切るせん断応力が主となっている。

図 9 の R とせん断応力 σ との関係より次のような実験式が得られた。

$$\sigma = 50 + 72.7R \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、図 7 の標準溶融形状を、表面での溶融径を $2a$ 、中心での溶融深さを b とする回転楕円体（母線： $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ ）として近似すると、表面からの深さ $y(y/b = R)$ における横断面の面積 A は、

$$A = \pi x^2 = \pi a^2(1 - R^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。したがって、上板厚を y とした場合の溶接面でのせん断力 F を式(1)と式(2)より求めると、

$$F = A \cdot \sigma = \pi a^2(1 - R^2) \cdot (50 + 72.7R) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。表面の溶融径 $2a$ を一定とした場合、せん断力 F は R のみの関数となる。なお、式(3)は $R = 0.39$ で F の最大値を示している。つまり、溶接面が標準溶融層深さの約 40 % の位置でせん断力は最大になることを示している。このことは、Al 板の溶接に際し、照射条件を決める場合の目安になるものと考えられる。

4. 標準溶融形状の数値解析

4.1 数値解析方法 前節で示されたように、YAG レーザによる Al の溶接強度は標準溶融形状と溶接面の位置により決定される。つまり、標準溶融形状を数値解析により求めることができれば、式(3)により各溶接面での強度を求めることができる。そこで

図 9 せん断位置とせん断応力との関係

本節では、標準溶融形状を数値解析により求めることとする。

レーザ加工においてはパワー密度により加工現象は大きく異なる。相変化は伴わない低パワー密度でのレーザ熱処理においては、材料熱物性値の温度依存性を考慮し、差分法により温度分布の解析が行われている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、パワー密度が増加し、相変化が発生すると加工形状の解析は複雑になる。吉岡ら⁽¹⁰⁾は溶融体除去温度を修正融点とし、熱定数を一定として、電子ビーム穴あけ加工における加工穴形状の推定を電子計算機により行っている。示唆に富んだ内容を含んでいるが、溶融形状の推定は不可能と思われる。

そこで、本節では Explicit 形の差分式により熱伝導解析を行い、溶融形状を求めることにする。図 10 に示すような微小円環要素において、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。4 変数の円柱座標 $r-\theta-z-t$ 系において、熱源はガウスモードに近い軸対称であるから、 θ 方向の温度こう配を無視すると、熱伝導の基礎方程式は $r-z-t$ 系

の3変数の式となる。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, 初期条件および境界条件は次式で示される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = x \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$T(r, z, t) = 0 \quad : t = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = F(r), \quad : z = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, x, λ は各々, 熱拡散率, 熱伝導率で, $F(r)$ は4.3節で示されるレーザー光のパワー密度分布である。

要素 (m, n) の時刻 t での温度 $T(r, z, t)$ は次のように示される。

$$\begin{aligned} T(r, z, t) &= T_{m,n}^p & r &= m \cdot \Delta r, z = n \cdot \Delta z \\ & & t &= p \cdot \Delta t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

試料表面での要素 $(m, 0)$ における温度の差分式は次式で示される。

$$\begin{aligned} T_{m,0}^{p+1} &= \frac{2\Delta t \cdot x}{\Delta z \cdot \lambda} F(m\Delta r) + (1 - 2\zeta_z - 2\zeta_r) \cdot T_{m,0}^p \\ &+ 2\zeta_z \cdot T_{m,1}^p + \zeta_r \left(1 - \frac{1}{2m} \right) \cdot T_{m-1,0}^p \\ &+ \zeta_r \left(1 + \frac{1}{2m} \right) \cdot T_{m+1,0}^p \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

同様に, 内部の要素 (m, n) の温度は次式で示される。

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= (1 - 2\zeta_r - 2\zeta_z) \cdot T_{m,n}^p + \zeta_r \left(1 + \frac{1}{2m} \right) \cdot T_{m+1,n}^p \\ &+ \zeta_r \left(1 - \frac{1}{2m} \right) \cdot T_{m-1,n}^p + \zeta_z (T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで, ζ_r, ζ_z は次式より求められたものである。

$$\zeta_r = \frac{x \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2}, \quad \zeta_z = \frac{x \cdot \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

x と λ は時刻 $t = p \cdot \Delta t$ において各要素が持っている温度から次節で示す温度依存性をもとに求められ, それらが各式に導入される。

4.2 熱定数の温度依存性 温度解析あるいは加工形状のシミュレーションを行う場合には正確な材料物性値を入力する必要がある。しかし, 材料の物性値は温度により変化するため, その対応は複雑である。また, それらの材料物性値の温度依存性のデータは, わずかの純金属, しかも低融点金属に対して求められているだけである。熱伝導解析に重要な熱拡散率 x と熱伝導率 λ を Al について示したのが図 11 である。●や○印が文献⁽¹¹⁾に示された値で, 計算ではこれらを実線や破線のように直線で近似し, 入力した。

4.3 レーザ発振波形とパワー密度分布の定量化 一般に, ノーマルパルス発振するレーザー加工装置の発

振波形は複雑な変化を示している。そして, それらの波形はレーザー発振器により異なるため, 現実的な熱伝導解析を行う場合には, 実際に使用した発振波形を定量化して導入する必要がある。

そこで本研究では, 実験に用いた発振波形を時々刻々のパワー密度変化として, 定量化を行った。図 12 は実際の発振波形の一例を示したものである。このように複雑な波形を $5 \mu s$ ごとのく形波の連続として近似している。

同様に, レーザ光の強度分布も熱伝導解析結果に大きな影響を与えるため, これを定量化して導入する必

図 10 三次元温度場の分割方法

図 11 熱伝導率と熱拡散率の温度依存性

図 12 YAG レーザの発振波形の一例

要がある。図 13 は本研究に用いたレーザ光の強度分布の測定結果を破線で、その近似結果を実線で示したものである⁽¹²⁾。φ50 μm のピンホールを移動して求めた測定結果は多くのホットスポットを持った固体レーザ特有のマルチモードとなっている。これを、強度の高い部分をガウス分布とし、周辺の裾部分を切り落とし、実線のように近似する。図 14 はこの実線の定量化方法を示したものである。中心軸のまわりに回転した回転体の体積がパルス幅 τ の間に照射されたエネルギー E に等しいとして式を展開すると式(11)のようになる。

$$\begin{cases} F(r) = \frac{n \cdot E}{\pi r_0^2 (1 - e^{-n}) \cdot \tau} \exp\left(-\frac{n \cdot r^2}{r_0^2}\right) & r \leq r_0 \\ F(r) = 0 & r > r_0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

パワー密度分布をこの式により計算に導入している。

4.4 ビーム孔の数値解析への導入方式 レーザ加工においては蒸発圧力により、溶融物が押し広げられ、レーザ光の通るビーム孔が形成される。レーザ加工における溶融形状を数値解析により求める場合には、このビーム孔の概念を数値解析に導入する必要がある。ビーム孔の形成には蒸発圧力と溶融層が存在しなければならない。そこで、下記の条件のもとでビーム孔が形成されるものとする⁽⁷⁾。

- (1) ビーム孔形成に関与する要素は中心部とその両側一列の要素を含めた合計 3 列の要素とする。
- (2) 深さ方向に 5 要素以上の溶融層が存在する。
- (3) 中心付近 3 列の要素の一部が一定量の気化潜熱を吸収し終え、除去される際には蒸発圧力を発生する。その蒸発圧力により、中心下部の固液界面より 3 要素上部までビーム孔が達する。

上記の判断をプログラム中で行うことにより、ビーム孔の概念を導入する。

4.5 標準溶融形状の実験結果と数値解析結果との比較 図 15 は照射エネルギー E を 10 J、焦点はず

し量 D_{ef} を 2 mm 一定とした場合の標準溶融形状をパルス幅ごとに示したものである。破線が実験結果を、実線が計算結果を示している。各パルス幅において、実験結果と計算結果とはほぼ類似の溶融形状を示している。しかし、試料表面部分や溶融層下部で両結果にはわずかの差が認められる。そのため、溶接面が標準溶融層の上端付近や底部付近といった極端な部分にあ

図 13 実験に用いたレーザ光の強度分布の実測例とその近似

図 14 ガウス分布の裾部分がカットされた強度分布の算定法

図 15 標準溶融形状の実験結果と計算結果との比較

図 16 溶接強度の実験結果と計算結果との比較

る場合には、計算結果の誤差要因となる。しかし、その他の部分では計算結果と実験結果とはほぼ一致する。

このようにして得られた計算結果をもとに、式(3)より溶接強度を求めることができる。すなわち、標準溶融形状における最大溶融深さと上板厚との比 R より溶接強度を求めることができる。例えば、パルス幅を 2.8 ms、照射エネルギーを 10 J、焦点はずし量を 2 mm として、上板厚 0.4 mm の Al 板を重ねスポット溶接した場合の溶接強度は次のようにして求められる。つまり、表面での溶融径 $2a=0.8$ 、 $R=0.4/1.7$ として式(3)に代入すると溶接強度 F は 31.8 N として求められる。この値は実験結果より得られた溶接強度 32.3 N とほぼ一致している。

上記の方法で求めた溶接強度の計算結果と実験結果との関係を示したものが図 16 である。実験結果に対する計算結果の差がプラス 25 % の場合とマイナス 25 % の場合の直線も図中に示した。全体的に、計算値は実験値より大きな値を示しているが、 $\pm 25\%$ の範囲内に入っていることがわかる。このように、数値解析によって得られた溶融形状より溶接強度を推定することが可能となった。逆に、所望の溶接強度を得るためのレーザ照射条件も設定することが可能である。

5. 結 言

まず、熱拡散率が大きく、表面での反射率も大きい
ため、レーザ光による溶接が困難と思われる Al につ

いて溶接実験を行い、溶接条件と溶接強度との関係を検討した。次いで、溶融形状を数値解析により求め、これより溶接強度を検討した。得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) 溶接強度が最大値を示すパワー密度 (P_0) が存在する。そのパワー密度以下では十分な溶接面積が得られず、溶接強度は低下する。 P_0 以上のパワー密度では溶融層上部に除去層が形成され、それが溶接面に達すると溶接強度は低下する。

(2) Al の重ねスポット溶接における溶接強度を実験式により示すことができた。それによると、溶接面が標準溶融層深さの約 40 % 位置で溶接強度が最大になることが明らかになった。

(3) 温度依存の熱定数を用いた数値解析により、溶融形状を求めることができた。得られた溶融形状と上記(2)の実験式より溶接強度を求めた結果、実験結果とほぼ一致することが明らかになった。

以上のことより、溶接強度の推定や、所望の溶接強度を得るためのレーザ照射条件を設定することが可能となった。

本研究を遂行するに当たり、貴重なご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、(株)ソルテック、池田正幸研究所長に厚くお礼申し上げます。最後に、実験や解析に協力いただいた千葉大学卒業生・小野寺義則、村上照幸、伊藤弘、大和田実、山内章裕の各氏に感謝する。

文 献

- (1) 池田、機学誌、91-832 (昭 63)、246。
- (2) Shimoi Y., ほか 4 名、*Annals of the CIRP*, 32-1 (1983), 135。
- (3) Ricciardi, G. and Cantello, M., 文献(2)の 129 ページ。
- (4) Weissmantel, H. and Jung, R., *Feinwerktech. Messtech.*, 88-8 (1980), 403。
- (5) 軽金属協会編、アルミニウム技術便覧、(昭 60)、1042、軽金属出版。
- (6) 平本・山根・大峯、溶接学会全国大会講演会概要第 34 集、(昭 59)、92。
- (7) 渡部・吉田・志茂、レーザ研究、16-5 (昭 63)。
- (8) 牧之内・難波・大村、機論、49-437, C (昭 58)、98。
- (9) 宮崎・吉岡・金釜、精密工学会誌、53-4 (昭 62)、565。
- (10) Yoshioka, S. and Miyazaki, T., *Precision Engineering*, 6-4 (1984), 181。
- (11) 日本金属学会編、金属データブック、(昭 49)、13、丸善。
- (12) 渡部・吉田・志茂、レーザ研究、14-11 (昭 61)、965。

討 論

〔質問〕 松 山 欽 一〔大阪大学工学部〕

貴論文では詳細な計算が行われており、しかも結果は計算とかなりよく一致していることに敬服している。しかし以下の事項については多少お聞きしたい点があるのでご回答願いたい。

(1) 式(11)で示される強度分布は板表面位置のものであり、ビーム孔中溶融表面ではその分布はかなり異なっていると思われる。まだビーム孔中での光の散乱、吸収も熱源分布に影響するはずである。このビーム孔中での熱源分布モデルについて具体的にお示しいただきたい。

またこのときのビーム孔形状を図 15 中にお書き加えいただきたい。

(2) なお、貴論文では材料定数に温度依存性を考慮されているようだが、これの基礎式として式(4)が採用されている。この式(4)は温度依存性のない材料定数の場合にのみ使用可能な偏微分方程式と思われるが、あえてこの式(4)を使用された理由をお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) ご指摘のように、多くの除去を伴う穴あけ加工においては、加工穴中での強度分布の変化や溶融壁面での反射は重要となる。しかし、付図 1 に示すように、実験結果を基に考慮している本ビーム孔の場合には、その直径は小さくなっている。さらに、用いている集光レンズの焦点距離は 50 mm と比較的

大きいため、試料表面付近ではレーザー光はほぼ平行に入射している。

以上を考慮して、ビーム孔中でのレーザー光の強度分布は試料表面での強度分布と同一のものとして取扱っている。ただし、ご指摘のように、ビーム孔中では金属蒸気によるレーザー光の吸収、散乱が考えられるので、深さ方向でのレーザー光の減衰割合を減衰率 α として次の式により定義し、導入している。

$$F(h) = F_0 \exp(-\alpha h)$$

$F(h)$: 深さ h でのレーザー光の強度, F_0 : 試料表面

付図 1 試料表面でのレーザー光の強度分布と溶融層中のビーム孔形状

付図 2 数値解析へのビーム孔の導入モデル

でのレーザ光の強度、各種板厚と試料裏面からの通過レーザ光との関係より、本論文では $\alpha=0.4 \text{ mm}^{-1}$ を採用している。

(2) 式(4)を基に式(8)と式(9)の差分式を導出している。計算では式(8)から式(10)までの x や λ に図 11 で示された温度依存の値を採用している。つまり、時間 Δt 前に計算されたその要素の温度での熱定数を数値データとして記憶し、その値を計算に採用している。

したがって、ご指摘のように、偏微分方程式としては温度依存性を考慮した次式により表現すべきと考える。

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

〔質問〕 川 澄 博 通〔中央大学理工学部〕

レーザ溶接を行うに当たって非常に正確な条件設定を可能としたダイヤグラムを発表された労に対して賛意を表するものだが、以下の点につき、より詳しくご説明いただきたい。

(1) 温度計算の基本となった式(4)は被加工材の

中心部に空洞のない場合に用いられる式だと思われるが、この実験の場合、深溶込溶接となっていて、式(4)の適用にはなんらかの配慮が必要だと思われるがどのように対応されたか。

(2) 素材が溶融し相の変化がある場合、潜熱の問題が生じるが温度計算ではどのように取扱われたか。

〔回答〕 (1) 4・4 節で示したようなビーム孔を本計算に導入している。これを図示すると付図 2 のようになる。これについては文献(7)に詳細に示してあるので、本論文では概略のみを示した。

(2) 一般には、溶融潜熱を修正融点に対応させて考慮されている。この場合は、潜熱を吸収している間に温度上昇があるため、異常な熱伝導となる。本論文では、溶融潜熱を吸収している間、その要素の温度は一定とし、溶融潜熱の吸収が終了すると吸収されたエネルギーに対応して、その要素の温度は上昇する。

一方、冷却過程においても、溶融潜熱に相当するエネルギーが熱伝導により失われるまでは、その要素の温度を一定に保持している。