キーホール溶接のモデル解析*

—レーザ溶接現象のモデル化 (第 1 報)—

松廣 克之**, 稲葉 洋次**, 黄地 尚義***

Mathematical Modeling of Laser Welding with Keyhole*

—Study on Modeling of Laser Welding (Part 1)—

by Yoshiyuki Matsuihiro**, Yoji Inaba** and Takayoshi Ohji***

A numerical model for a deep penetration laser welding is developed. It consists of the quasi-steady-state three dimensional heat flow model and the three dimensional keyhole surface model. In the model analysis, the recoil pressure due to vaporization is taken into account for the keyhole process and a line heat source of finite depth is proposed to estimate the heat input from the keyhole.

Numerical results show that the vaporization of base metal affects the keyhole surface geometry and the depth of it affects molten pool profile remarkably.

The calculated molten pool profiles are also compared with the experimental profiles and it is confirmed that this model is useful for the prediction of laser welded pool profile qualitatively.

Key Words: laser welding, keyhole, recoil pressure, heat transfer, quasi-steady state, finite difference method

1. 緒 言

一般に溶接部の性能は、溶接部およびその近傍の熱サイクル、最高到達温度、冷却速度等に大きな影響を受ける。従って、これらの情報は溶接施工上重要なデータである。アーク溶接では、これらのデータを計算で予測する手法がかなり検討されており、移動表面分布熱源モデル等が提案されている¹⁾。しかしながらレーザ溶接は、溶接時にキーホールを形成し、母材への入熱はこのキーホールからの入熱が支配的となるため、通常のアーク溶接の伝熱計算に用いられている移動表面分布熱源モデルは適用できない。従って、レーザ溶接に関しては、キーホールを形成するときの溶接のモデル化を検討する必要がある。これに関しては、既に種々の検討がなされているものの²⁻⁵⁾未だに発展段階であり、今後とも十分な検討が必要である。

本研究は、このようなキーホールを形成するレーザ溶接のモデル化を目的として検討を行ったものである。

2. レーザ溶接のモデル化

レーザ溶接における母材への入熱は、プラズマの存在、キーホールの形成等があるため複雑である。また、溶融池の形状に影響を与える因子として、プラズマによるレーザビームの吸収、溶融池内対流等も考えられるが、これら全てを同時に考察することは問題を複雑化する。従ってここでは、これらの中で、レーザ溶接の特徴であるアスペクト比の大きい溶融池の形成に大きな影響を与えていると考えられている、キーホールの形成と、キーホールからの熱伝導の 2 点に着目した。すなわち簡単のため、プラズマに関連する現象、溶融池内対流は無視して議論を進めることにする。

レーザ溶接では、入熱はビーム照射点直下に形成されるキーホールから行われるため、溶融池形状はキーホールの形状に大きな影響を受けることになる。従って、レーザ溶接のシミュレーションを行う際には、以下の 2 点のモデル化が重要となる。

- ・キーホール形状の決定方法
- ・キーホール壁面から母材への入熱方法

そこで本研究では、まずキーホール形成に関する物理的考察を行いキーホール形状を決定するモデルを提案し、次にキーホール壁面から母材への入熱モデルを提案・検討することとした。

3. 計算モデルと計算方法

3.1 キーホール表面形状の方程式

キーホールの形状は、溶融池の表面に働く種々の圧力のバランスによって決定されると考えられる。溶融池の表面に加わる圧力には、レーザ自身による光圧 P_l 、金属が蒸発して溶融池から飛び出すときに、運動量の差として蒸発原子が溶融池表面を押し下げるように働く反跳圧 P_r (recoil pressure⁽²⁾)、溶融池の表面張力に起因する圧力 P_σ 、キーホールの深さに比例する静水圧 P_g 等が考えられる。これらの中でキーホール形状を支配する力が反跳圧 P_r 、表面張力による圧力 P_σ および静水圧 P_g であり、また、レーザの入射エネルギーのある一定の割合 β % が母材金属の蒸発に消費されると仮定すると、キーホール形状の支配方程式は、①式のように書ける¹⁾。

$$\sigma \left\{ \frac{(1+Z_x^2)Z_{xx} - 2Z_xZ_yZ_{xy} + (1+Z_y^2)Z_{yy}}{(1+Z_x^2+Z_y^2)} \right\} = \rho g z - P_r + \lambda \quad (1)$$

ただし、 $Z_x = \frac{\partial z}{\partial x}$, $Z_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$, $Z_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ 等。

$$P_r = \frac{(\beta/100 \cdot Q)^2}{\rho_g H_g^2}$$

σ : 表面張力, z : キーホール表面変位, ρ : 溶融金属の密度, ρ_g : 金属蒸気の密度, g : 重力加速度, H_g : 蒸発の潜熱, Q : 入熱密度, β : 入熱のうち母材の蒸発に消費されるエネルギーの割合 (%), λ : 定数

*原稿受付 平成 5 年 2 月 9 日 平成 3 年 11 月 アーク物理研究委員会が発表

**正 員 住友金属工業株式会社 Member, Sumitomo Metal Industries, LTD.

***正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka University

Table 1 Physical properties in the keyhole profile calculation.

σ (N/m)	ρ (kg/m ³)	ρ_v (kg/m ³)	g (m/s ²)	H_v (J/kg)
1.0	8000	0.25	9.8	7360000

σ : surface tension ρ : density of molten metal
 ρ_v : density of metal vapor g : gravitational acceleration
 H_v : latent heat of vaporization

Fig. 1 Calculation model of keyhole surface geometry.

ここで実際の計算では、収束性および計算時間の問題等から、①式を線形化した②式を下に示した仮定の下に差分法により計算した。②式の各種物性値は Table 1 に示したものをを用いた。差分計算における境界条件を Fig. 1 に示す。キーホール表面形状の計算においては、Fig. 1 に示したように、溶融池の表面を自由表面とし、境界条件を次のように与えている。すなわち、溶融池の後方では溶接線方向に対して液面の傾きがないようにし、それ以外の領域では液面の変位を 0 に固定した。また、蒸発反力は、溶融池内のレーザー照射部内に均一に作用させた。

$$\sigma \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = \rho g z - P_r + \lambda \quad (2)$$

ただし、 $P_r = \frac{(\beta/100 \cdot Q)^2}{\rho_g H_g^2}$

キーホール形状の計算に用いた主な仮定を整理して示すと次のようになる。

- (1) レーザによる入熱はその一定の割合(β %)が金属の蒸発に消費される。
- (2) 溶融池に作用する力は重力、表面張力及び反跳圧のみであり、キーホールは反跳圧によって掘り下げられる。
- (3) 反跳圧は熱源半径内に均一に作用する。

3.2 熱輸送の方程式

レーザー溶接の入熱は、基本的にキーホール壁面から母材への入熱である。レーザー溶接のキーホール形状は細くて深いことが知られているので、入熱のモデルとしては、キーホールと同じ深さの線状の熱源を用いた近似方法が有効であると考えられる。従って、ここではキーホールから母材への入熱として Fig. 2 に示したようなキーホールと同じ深さの線状の熱源から入熱させることにした。

溶融池形状を求めるための熱伝導計算は、以下に示す

Fig. 2 Line heat source of finite depth. **Fig. 3** Calculation model of heat transfer.

仮定のもとに、エンタルピ法による非線形準定常熱伝導方程式③を用いて、差分法で求めた。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + \rho v \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

T : 温度, K : 熱伝導率, v : 溶接速度, H : エンタルピ
 熱伝導計算に用いた主な仮定を整理して示すと次のようになる。

- (1) 熱の流れおよび溶融池は準定常状態にある。
- (2) 溶融池内においても熱の流れは熱伝導方程式に従う。ただし溶融池内では、対流などの影響による熱輸送の高速化を考慮して、熱伝導率として、液体の熱伝導率より大きな値(換算熱伝導率)を用いる。
- (3) 溶融・凝固にともなう潜熱の授受を考慮する。
- (4) キーホールをキーホールと同じ深さの線状の熱源とみなし、レーザービームの持つ全エネルギーの $(100-\beta)\%$ をこの線状熱源から入熱させる。

計算における境界条件は、Fig. 3 に示したように、溶融池から十分離れた前方、後方、側方および母材の表裏面を断熱とした。また、計算は、温度場の対称性を考慮して、溶接線に対して片側だけで行った。

計算に必要な各種物性値は、Fig. 4 および Table 2 に示した SUS304 の値を用いた。また、温度とエンタルピの換算は Fig. 5 のように行った。

3.3 計算アルゴリズム

ここでは前述のモデルと基本式を用いてレーザー溶接の溶融池形状を求める計算方法について説明する。

Fig. 6 は本研究で用いた計算領域を示す。熱伝導計算は、図のように、溶融池に対して十分大きい領域を $120 \times 20 \times 17$ の正方格子に分割して行った。また、キーホール形状の計算は、母材表面を 240×40 に分割して行った。

Fig. 4 Thermal conductivity of SUS304.

Table 2 Physical properties in the heat flow calculation.

Ts(K)	Tl(K)	Hl(J/kg)	Cp(J/kg·m)	ρ (kg/m ³)
1672	1727	290000	645	8000

Ts:solidus Tl:liquidus Hl:latent heat of fusion
Cp:specific heat ρ :density of molten metal

Fig. 5 Relationship between temperature and enthalpy.

溶融池形状は、Fig. 6 に示した座標系のもとで、熱伝導方程式とキーホール表面形状の方程式を連立させて解くことにより求めた。その際の計算の流れを Fig. 7 に示したフローチャートに沿って説明する。

計算の第 1 段階では、表面分布熱源による初期溶融池形状を計算した。ここでは、レーザーの入熱は母材表面の熱源半径 Rh 内に均一に分布すると仮定して計算した。第 2 段階では、第 1 段階で求めた溶融池形状を境界条件に用いてキーホール表面形状を計算し、そこからキーホール深さを求めた。ここで、キーホール形状からキーホール深さを求める方法を Fig. 8 を用いて説明する。Fig. 8 において、実線は溶融境界を示し、破線はこの溶融池に対して計算されたキーホール形状を示す。Fig. 8(a)は、キーホールが溶融池の中におさまっている場合で、この場合はキーホールの最大深さをキーホール深さとした。Fig. 8(b)のようにキー

Fig. 6 Schematic illustration of laser welding model.

Fig. 7 Basic flow of calculation.

Fig. 8 Definition of keyhole depth.

ホール深さが溶融池深さより大きく計算された場合は、キーホールが溶融池を超える範囲内における溶融池の最大深さをキーホール深さとした。なお、Fig. 8(b)のようになるのは反復計算の初期段階のみであり、収束段階ではキーホールはすべて溶融池の中に収まった。第 3 段階では、第 2 段階で求めたキーホール深さと同じ深さの線状熱源を入熱させて溶融池形状を再び計算した。以後は、第 2 段階と第 3 段階を交互に計算し、溶融池形状が変化しなくなった時点で計算が収束したと見なし最終的な溶融池形状とキーホール形状を出力させた。

なお、以下の計算では、特に断らない限り、 $Rh=0.5$ mm としている。

4. 計算結果および考察

Fig. 9 は、計算結果の代表的な例として、レーザ出力 5 kW、溶接速度 3 m/min、入熱のうち蒸発に消費される割合 β を 12% をおいて計算した場合の収束過程を示す。図中上段は第 1 段階の表面分布熱源による初期解、中段は線状熱源による 2 次近似解、下段は収束解 (7 次近似解) である。ここで収束解縦断面図の TL 、 TS は、それぞれ液相線温度、固相線温度を示しており、 TL 線と TS 線に挟まれた領域は、固液混合領域に対応している。溶融池は、上段、中段、下段と計算の繰り返しのしたがつて幅が広く浅い形状から、実際のレーザ溶接にみられるような幅が狭く深い形状へと変化しており、表面分布熱源に

よる解を初期値としてキーホール表面形状と線状熱源による溶融池形状を交互に解いていく反復解法が有効であることを示している。

Fig. 10 は、溶融池形状の計算結果の代表例を 3 例示したものである。ここでも TL 、 TS は、それぞれ液相線温度、固相線温度を示す。いずれの条件においても、溶融池形状は、幅が狭く溶け込みの深い形状となっており、実際のレーザ溶接のビード断面形状の特徴を良く表現している。

Fig. 11 は、レーザ出力 5 kW、溶接速度 2 m/min の条件で、実際に 6 mm 厚の SUS304 にビードオンプレート溶接したときのビード断面形状と計算結果 (ここでも $\beta=12\%$ としている) を比較したものである。この条件で

Fig. 9 Typical example of iterative process (laser power: 5 kW, welding speed: 3 m/min, $\beta=12\%$).

Fig. 10 Examples of calculated molten pool profiles.

Fig. 11 Comparison between measured and calculated bead cross section.

Fig. 12 Effect of β on pool depth (laser power: 4 kW).

は、溶融池の深さに関してはかなり良い近似が得られている。

Fig. 12 は、本モデルにおける β が溶融池形状に与える影響を検討した結果である。図から明らかなように、溶融池の深さは β の値により大きく変化している。ここで β は、レーザの入射エネルギーのうち蒸発に消費される割合を示すものであるから、本モデルにおいて β を変化させるとは、入熱量の変化、および反跳圧の変化を意味する。従って、Fig. 12 の計算結果が意味することは、キーホール溶接においては、母材の蒸発が溶融池形状そのものに大きな影響を与えるということであり、今後のレーザ溶接の蒸発現象に関する研究の必要性を示唆している。

Fig. 13 は、例えば β の値を12%に固定して、溶融池深さの実験結果と計算結果を比較したものである。 β を一律に12%に固定していることもあり、現状では両者の対応性はあまり良くない。しかしながら、両者の全体的な傾向は対応しており、定性的にはほぼ満足できる。

以上のように、本研究で提案した、キーホールからの

Fig. 13 Comparison between measured and calculated pool depth under various condition ($\beta=12\%$).

入熱をキーホールと同じ深さの線状熱源からの入熱で近似し、溶融池形状とキーホール形状を交互に収束するまで計算して、溶融池形状を求めるモデルは、レーザ溶接の溶融池形状を推定するのに有効なモデルであることが明らかとなった。しかしながら本研究では、溶融池形状に大きな影響を与える β の値を予め与えて計算している。溶融池形状に関してより定量的な論議をするには、蒸発現象に関しても十分検討して計算で β を求める方法を見出すことが必要である。このような観点から、蒸発量を推定できるモデルについても検討しているが、ここでは誌面の都合上省略する。また、今回のモデルでは、溶融池形状に影響を与えるとされているレーザプラズマの影響、ビームモードの影響、溶融金属の対流の影響等も考慮されておらず、これらを順次モデルに加えていくことが今後の課題といえる。

5. 結 言

本研究では、キーホールを形成するレーザ溶接を対象に、溶融池形状を推定するモデルを提案した。2, 3 の重要な物理現象を無視しているため、今後課題に残しているが、本研究で提案したモデルは定性的な意味での溶接結果の予測に対して有効であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 黄地尚義: “溶接ビードの表面形状と溶融池の保持形態に関する界面張力論的解析”, 大阪大学学位請求論文 (1978).
- 2) J.G. Andrews and D.R. Atthey: “Hydrodynamic limit to penetration of material by a high-power beam”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9 (1976), pp. 2181-2194.
- 3) P.G. Klemens: “Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding”, J. Appl. Phys., Vol. 47 (1976), pp. 2165-2174.
- 4) J. Mazumder and W.M. Steen: “Heat transfer model for cw laser material processing”, J. Appl. Phys., Vol. 51 (1980), pp. 941-947.
- 5) P.S. Wei, T.H. Wu and Y.T. Chow: “Investigation of high-intensity beam characteristics on welding cavity shape and temperature distribution”, Transactions of ASME: Journal of Heat Transfer, Vol. 112 (1990), pp. 163-169.