

アルミニウム溶接時の溶融金属中における気泡の挙動に関する数値解析

Numerical Simulation of Bubble Behavior in Molten Metal of Aluminum during Laser Welding Process

大阪大学
大阪大学
大阪大学
大阪大学

周 嶠楓
小山 和晃
宮坂 史和
森 裕章

Qiaofeng ZHOU
Kazuaki KOYAMA
Humikazu MIYASAKA
Hiroaki MORI

Member

Abstract

Laser welding is one of useful methods in manufacturing processes. However, in welding processes, porosities sometimes occur in weld metal. Therefore, it is demanded to establish the method to predict and suppress porosities to make sound joints. Numerical simulation has been developing and become one of available techniques to make it realized. Even so it's still very difficult to predict its formation with complete accuracy. In this study, numerical analysis to simulate the behavior of bubbles moving in molten metal of aluminum alloy was conducted, in order to predict porosities formed in weld metal. As compared between the calculation results for behavior of the bubbles formed in static molten metal and its in-situ observation by X-ray transmission, the calculation results were in accordance with the experimental ones.

Keywords: Numerical simulation, Laser welding, Porosity, Bubble, Aluminum

1. 緒言

アルミニウム合金は、加工性・耐食性に優れ、軽量で比強度が高いことから、主に軽量化へのニーズが高い自動車や航空機などの輸送機械へ利用されている。

一方、近年、構造物および製品の高品質化、高信頼化などへの社会的要請から、溶接、表面処理などを含む幅広い範囲で、高性能、高品質な加工技術の開発が求められている。このようなニーズに応える一つの方法として、レーザや電子ビームなどの高パワー密度熱源を用いた加工法が研究されている。特にレーザは、コヒーレントな光熱源であることから、溶接などの加工に応用しやすく、適用範囲が広い。レーザ溶接はキーホール溶接の一種であり、熱影響部・熱ひずみが小さく、深溶け込み・高速度溶接が可能である。また、大気中での溶接が可能で、ビームの照射位置を精密に制御できるため、複雑な構造物の溶接や精密溶接に適用可能である。

一般に、アルミニウム合金は降伏応力が小さく、熱膨張係数が大きいことから溶接変形が大きく、それを小さ

くできるレーザ溶接の適用は有効であると考えられる。しかしながら、アルミニウム合金はレーザ光の反射率が高く、さらに熱伝導率・熱拡散率が大きいことから、アルミニウム合金のレーザ溶接では、溶融池の形成自体が比較的困難である。加えて、溶融アルミニウムは動粘性係数が小さく、表面張力が大きいことから、溶接部にポロシティと呼ばれる気孔が発生しやすいことも問題となっている。ポロシティは溶接継手の外観を損なうばかりでなく、機械的特性に悪影響を及ぼすため、その低減あるいは防止は重要な課題である。

アルミニウム合金のレーザ溶接時に、欠陥を抑制するようパラメータを決定する際、実験的に決定しており、設計・開発が非効率となっているのが現状である。これに対して、数値シミュレーションを用いてポロシティをはじめとする各種溶接欠陥の発生予測を行うことができれば、開発までに要する期間を大幅に短縮できるものと期待され、工業的にも極めて有意義であると考えられる。

そこで本研究では、アルミニウム合金のレーザ溶接時における各種欠陥の中でもとくにポロシティに着目し、その発生を数値シミュレーションにより予測することを目的とした。本稿では、その第一段階として、溶融アル

ミニウム中での気泡の運動に関する比較的簡易なモデルを用いて計算した結果得られたその挙動に関する基礎的知見について報告する。

2. レーザ溶接時の気泡の挙動に関するモデル

レーザ溶接時においては、キーホール形成、ブルームと呼ばれるプラズマの発生、溶融池内における対流等々がある統合的なモデル化は極めて複雑である。とくに、溶融池の形状に影響を与える因子として、ブルームによるレーザビームの吸収、溶融池内の対流などが考えられるが、これら全てを同時に考慮することは問題を著しく複雑化することになる。

ここでは、Fig. 1 中の四角枠で囲った部分に示すように、これらの中で、レーザ溶接の特徴であるポロシティの形成に大きな影響を与えると考えられている、溶融金属中における気泡の動きにのみ着目した解析を試みた。

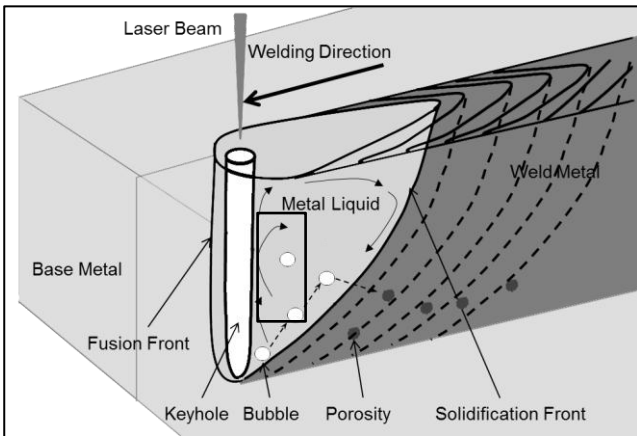


Fig.1 Analysis domain of Laser welding

実際のレーザ溶接時には、高パワー密度でレーザを照射した場合、材料が瞬時に溶融・蒸発してキーホールが形成され、その内部では激しい対流が生じるため、気泡の挙動はその溶融池内の対流に大きな影響を受けることになる。したがって、レーザ溶接のシミュレーションを行う際には、以下の点について考慮することが重要となる。

- ・気泡の追跡手法
- ・気泡の運動に作用する外力

そこで本研究では、溶融アルミニウム中における気泡の運動に関する数値シミュレーションを行い、その挙動や凝固後の停止位置について計算を試みるとともに、直接観察によりその計算結果の妥当性の検証を試みた。

3. 計算モデルと計算方法

3.1 計算モデル

気泡の追跡手法では、個々の気泡の運動に Newton の運動方程式を適用して計算される。一般に、球形の粒子に関しては、Basset-Boussinesq-Ossen formulation (BBO 方程式) を基礎とし、以下に詳述する効果を表す項の総和として質点モデル^{[1][2]}が提案されており、流体—気泡の混相流の数値計算においても有用なモデルとして広く利用されている。気泡の運動の方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} d_b^3 \rho_b \frac{dv_b}{dt} &= 3\pi\mu d_b (v_f - v_b) + \frac{\pi}{6} d_b^3 \rho_f \frac{dv_f}{dt} \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} d_b^3 \rho_f \left(\frac{dv_f}{dt} - \frac{dv_b}{dt} \right) \\ &+ \frac{3}{2} d_b^2 \sqrt{\pi \rho_f \mu} \int_{t_0}^t \left(\frac{dv_f}{dt'} - \frac{dv_b}{dt'} \right) \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで d_b は気泡径(m)、 ρ_f 、 ρ_b はそれぞれ流体の密度 (kg m^{-3}) および気泡、 μ は粘性係数(Pa s)である。 $\mathbf{v}_f = (u_f, v_f, w_f)$ 、 $\mathbf{v}_b = (u_b, v_b, w_b)$ はそれぞれ流体および気泡の速度 (m s^{-1})、 \mathbf{F} は外力(N)である。

左辺は気泡が運動する際の加速に要する力である。右辺第 1 項は Stokes 則に対応した粘性抵抗力の項である。第 2 項は気泡の周囲の流体が加速されることによって発生する圧力勾配である。第 3 項は付加質量項で、気泡が周囲の流体を付随して運動することによって発生する付加的な質量を表している。第 4 項は Basset 項と呼ばれており、定常状態の流れパターンからの逸脱の効果を表す項である。最後の項はポテンシャル場による外力である。

元々の BBOT 式には揚力 F_L は入っていないが、本研究では流れ場の勾配によって発生する揚力 F_L を考慮に入れている。また、右辺第 1 項の抵抗力に関しては Stokes 域を超える場合があるために、抵抗力の一般形式を用いる。さらに、運動の非定常性の影響はないとして Basset 項は無視し、外力として浮力を考慮する。以上の仮定により、式(1) は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{dv_b}{dt} &= F_D + F_L + \frac{\pi}{6} d_b^3 \rho_f \frac{dV_f}{dt} \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} d_b^3 \rho_f \left(\frac{dV_f}{dt} - \frac{dV_b}{dt} \right) + \frac{\pi}{6} d_b^3 (\rho_b - \rho_f) g \end{aligned} \quad (2)$$

係数を整理し、さらに流体速度の微分として流体力学で使われる実質微分を用いると、最終的に気泡の運動方程式は以下のように表される。

$$\frac{dV_b}{dt} = C_1(F_D + F_Z) + C_2 \frac{DV_f}{Dt} + C_3 g \quad (3)$$

ここで C_1 と $\frac{DV_f}{Dt}$ は、それぞれ次式で表される。

$$C_1 = \frac{6}{\pi} \frac{1}{d_b^3} \frac{1}{\rho_b + \frac{\rho_f}{2}}, C_2 = \frac{3}{2} \frac{\rho_f}{\rho_b + \frac{\rho_f}{2}}, C_3 = \frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_b + \frac{\rho_f}{2}} \quad (4)$$

$$\frac{DV_f}{Dt} = \frac{\partial v_f}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(v_f \cdot v_f) - v_f \times (\nabla \times v_f) \quad (5)$$

本研究では、抗力の適用範囲を広げるために以下の式で表される一般形式を用いた。

$$F_D = \begin{pmatrix} F_{D,x} \\ F_{D,y} \\ F_{D,z} \end{pmatrix} = C_D \frac{\pi}{4} d_b^2 \frac{1}{2} \rho_f |V_f - V_b| (V_f - V_b) \quad (6)$$

ここで C_D は抗力係数である。

本研究では広範囲に適用可能な気泡の抗力係数として、次式で表される Tomiyama の相関式³⁾を用いた。

$$C_D = \max \left[\min \left[\frac{24}{Re_b} (1 + 0.15 Re_b^{0.685}), \frac{72}{Re_b} \right], \frac{8}{3} \frac{E_o}{E_o + 4} \right] \quad (7)$$

ここで、 Re_b は気泡レイノルズ数、 E_o はエトベス数である。

3.2 計算方法

気泡の運動方程式は粒子位置 (x, y, z) に対する二階の三元連立常微分方程式である。これを一階の六元連立常微分方程式と見なして、Runge-Kutta 法に対応する適応刻み幅制御⁴⁾を用いて計算した。これは時間 1 ステップ毎に数値誤差を監視して、精度を保証する最大の時間刻みで計算を行うものである。気泡の軌道がそれほど変化しない部分では時間刻みを大きくし、急激に軌道が曲げられる部分では時間刻みが自動的に小さくなるように調整されることになる。

4. 結果と考察

Fig.2 は、計算結果と実験結果を比較したものの代表的な例を示す。実験用キャビティの大きさは、 $12^W \times 100^H \times 10^D$ mm であり、熔融金属は純アルミニウムであり、湯流れ可視化実験装置を利用することで 150mm 径程度の視野を確保した。また、高速度ビデオが利用可能であり毎秒 1000 コマでの高時間分解能撮影が可能となったことから、気泡の発生を確認した。観察領域内でのその上昇運動を in-situ で捉えた。なお、撮影条件は露光時間：1/1000 秒 記録時間：0.1 秒とした。(a)に見られる白い球状のものが気泡を示している。いずれの時点においても、気泡の停止位置が、計算結果と実際の実験結果を良く一致している。

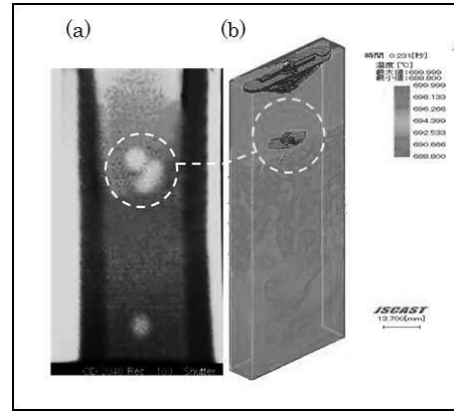


Fig.2 Comparison of porosity formation in molten aluminum between (a) Experimental results and (b) Calculated result

Fig.3 は、気泡の上昇速度における本モデルでの計算閣下と実験結果を比較した結果である。図から明らかなように、熔融池の底部から生じた気泡の停止位置までの上昇速度の解析結果は実験結果と良く一致している。

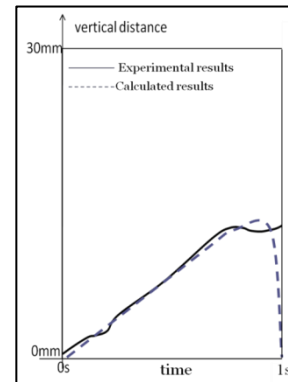


Fig.3 Comparison of bubble rising velocities in molten aluminum

5. 結言

本研究では、アルミニウム合金のレーザー溶接を対象に、ポロシティの原因となる気泡の挙動をシミュレートするモデルを提案した。実験結果と解析結果は良く一致していることより、熔融金属中に気泡の停止位置および挙動を求める上で、有効なモデルであることが明らかとなった。しかしながら今回のモデルでは、気泡の形成及び動きに影響を与えるとされているキーホールの影響、熔融池形状の影響、気泡表面張力などが考慮されておらず、これらを考慮しモデルを改良していくことが今後の課題と言える。

参考文献

- [1] Maxey, M. R., Riley, J. J., “Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow”, *Phys. Fluids*, 26, 4(1983), pp.883-889.
- [2] Michaelides, E. E., “Review – The transient equation of motion for particles, bubbles and droplets, *Trans*”, *ASME J. Fluids Engineering*, 119(1997), pp. 233-247
- [3] A. Tomiyama, H. Tamai, L.Zun and S. Hosokawa, “Transverse migration of single bubbles in simple shear flows”, *Chem. Eng. Sci.*, 57 (2002), 1849-1858.
- [4] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling, 丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠 (訳), “Numerical Recipes in C - C 言語による数値計算のレシピ”, 技術評論社, (1993).
- [5] Kamemoto, K, “Engineering application of the vortex methods developed in Yokohama National University Proc. Of the 2nd Int. Conf. on Vortex Methods”, September 26-28, Istanbul, Turkey(2001.9),pp.197-20
- [6] Walther, J. H., Koumoutsakos, P., “Three-dimensional vortex methods for particle-laden flows with two-way coupling”, *J. of Comp. Phys.*, 167(2001), pp.39-7
- [7] Wang, X. L, Chan, H. Y., Wang, H. Y., Zhang, H. Q., “Quantitative simulation of gas-particle two phase plane mixing layer using discrete vortex method” *Comp. Mech.* 27 (2001), pp.418-425. 1

- [8] Perkins, R. J., Joia, I. A., “A discrete vortex model for the dispersion of bubbles and particles in a plane jet”, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow*, April 3-7, Kyoto, Japan, PT-3(1995), pp.17-24.
- [9] 湯晋一, 河野浩幸, 梅景俊彦, “高レイノルズ数スリットノズル固気混相噴流の流れに与える粒子の影響”, *日本機械学会論文集, B 編*, 66,641(2000),pp.57-66.

“