三次元粒子法シミュレーションによる埋もれアーク溶接の 埋もれ空間形成に及ぼす影響因子の解明

Investigation of Factors Influencing Buried Space Formation in Buried Arc Welding by Three-Dimensional Particle Simulation

古 免 久 弥^{*1}・馬 場 勇 人^{*2}・門 田 圭 二^{*3}・恵 良 哲 生^{*3}・田 中 学^{*4}・寺 崎 秀 紀^{*5}

Hisaya KOMEN, Hayato BABA, Keiji KADOTA, Tetsuo ERA, Manabu TANAKA and Hidenori TERASAKI

(Received 11 December 2020, Accepted 3 March 2021)

Three-dimensional particle simulation of a molten metal behavior in the buried arc welding was conducted by a computational model in which drop transfer and rotating transfer modes, that were observed during actual buried arc welding using a low-frequency modulated voltage control scheme, were modeled to investigate the effect of a frequency of the control scheme on the buried space formation during this welding process. As a result, the diameter of a buried space was largely changed with collapses of the space when a switching frequency of those transfer modes which was equivalent to the frequency of the control scheme was set to be 50 Hz. On the other hand, a buried space whose diameter was much larger than a wire diameter was always maintained when the switching frequency was set to be over 100 Hz. This was because the metal transfer mode changed from the drop transfer to the rotating transfer before the collapse of the buried space started.

Key Words: Buried Space, Gas Metal Arc Welding, Low-Frequency Modulated Voltage Control, Particle Method, Simulation

1. 緒 言

船舶や橋梁などの大型構造物には厚鋼板が使用されており、それらの組立てには強度や気密性に優れた溶接が用いられる。その中でもレーザー溶接は、厚鋼板の代表的な溶接法として広く用いられている。例えば申と中田は板厚 12 mm の軟鋼板の I 形突合せ継手に対して 10 kW 級のファイバーレーザーとマグアークによるハイブリッド溶接を行った¹⁾。その結果、アーク先行、レーザー後行とした条件で滑らかで安定な裏波ビードが得られる条件範囲が存在することを明らかにした¹⁾。大西らは板厚 12 mm の高張力鋼板の突合せ継手に対し、ホットワイヤを用いたレーザー溶接を行ったところ、突合せ部にギャップが有る場合は溶落ちが発生せず、アンダーフィルが抑制された貫通溶接継手の作製が可能だったと報告した²⁾。このようにレーザー溶接は厚鋼板の溶接に適しているが、高精度の開先加工や組立てが必要であったり、レーザー光に対する安全対策が必要であったりするなどの課

題がある³⁾。

これに対し Baba らは溶融池表面よりも深い位置でアークが維持される埋もれアークを安定化し、埋もれアーク溶接法として実用化した⁴⁾。この溶接プロセスは従来のガスメタルアーク溶接に基づいており、埋もれ空間と呼ばれる溶融池内の空間でアークが維持される。そしてこのアークや溶滴からの入熱によって母材奥深くが加熱されることにより、深い溶込みが得られる。Baba らは一般的な定電圧特性の溶接電源を用いた埋もれアーク溶接では、埋もれ空間の揺動およびワイヤと溶融池の短絡が生じ、埋もれアークが不安定化することを示した。そして、アーク電圧を繰り返し増減させる電圧振幅制御を用いると、埋もれ空間の開口径の縮小および短絡を抑制することで埋もれアークを安定化し、板厚 19 mm の鋼板を用いたレ型開先を有する継手を 1 パスで溶接できたことを示した⁴⁾。著者らは粒子法を用いた数値シミュレーションによって、電圧振幅制御を用いた埋もれアーク溶接中に生じるドロップ移行やローテー

*1 熊本大学先進マグネシウム国際研究センター (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

Magnesium Research Center, Kumamoto University (2-39-1, Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto, Kumamoto 860-8555, Japan)

*2 株式会社ダイヘン (〒 658-0033 兵庫県神戸市東灘区向洋町西 4-1)

DAIHEN Corporation (4-1, Koyochonishi, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-0033, Japan)

*3 大阪大学接合科学研究所 ダイヘン溶接・接合協働研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

DAIHEN Welding and Joining Research Alliance Laboratories, Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan)

*4 大阪大学接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan)

*5 熊本大学大学院先端科学研究部 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University (2-39-1, Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto, Kumamoto 860-8555, Japan)

ティング移行をモデル化し、各溶滴移行形態が埋もれ空間形成に与える影響を明らかにした⁵⁾。

以上の電圧振幅制御の検討では、周波数条件として 100 Hz が用いられているが、他の周波数条件については検討されていない。電圧振幅制御の周波数が埋もれ空間の挙動に与える影響を明らかにすることで、この溶接現象を正しく理解できるだけでなく、制御手法の最適化や溶接部のさらなる高品質化の実現が期待できる。しかしながら、母材表面よりも深い位置で生じる埋もれアーク溶接現象を実験観察によって明らかにすることは難しい。

そこで本研究では粒子法を用いた三次元の数値シミュレーションにより、電圧振幅制御における周波数が埋もれ空間挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 支配方程式

本研究では、粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた計算モデル⁵⁾を使用する。ある点 $\vec{x}_a = (x_a, y_a, z_a)$ に位置し、溶融池を構成する粒子 a の運動は、Navier-Stokes 方程式を SPH 法の離散化手法で離散化した次式で表される⁵⁾。

$$\begin{aligned} \frac{D\vec{u}_a}{Dt} = & -\sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab} \\ & + \frac{2\delta}{\lambda_a n_a \rho_a} \sum_b \frac{\mu_a + \mu_b}{2} (\vec{u}_b - \vec{u}_a) W_{ab} \\ & - (T_a - T_0) \beta \vec{g} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{S(\vec{\eta}_a \times \nabla T_a \times \vec{\eta}_a)}{m_a} \\ & + \frac{P_a^{\text{arc}} S}{m_a} \vec{\eta}_a + \frac{1.2\gamma d}{m_a} \sum_b f_{ab}^{\text{at}} \frac{\vec{x}_{ab}}{|\vec{x}_{ab}|} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで u は速度、 t は時間、 b は粒子 a の近傍粒子、 m は質量、 p は圧力、 ρ は密度、 W はカーネル関数⁶⁾、 δ は次元数、 λ は粒子法の一つである MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法のパラメータ⁷⁾、 n は数密度、 μ は粘性係数である。 T は温度、 T_0 は基準温度、 β は体積膨張率、 g は重力加速度、 γ は表面張力係数、 S は粒子の断面積、 $\vec{\eta}$ は単位法線ベクトル、 P_a^{arc} はアーク圧力、 d は粒子直径、 f_{ab}^{at} は粒子間凝集力モデル⁸⁾において、粒子 a と b との相対距離 $|\vec{x}_{ab}|$ によって決まる関数である。式 (1) の右辺の各項は圧力勾配、粘性力、Boussinesq 近似による浮力、Marangoni 効果、アーク圧力、法線方向の表面張力を表している。体積膨張率は 5.54×10^{-5} 1/K、表面張力は 1.0 N/m、表面張力の温度勾配 $\partial\gamma/\partial T$ は -1.0×10^{-4} N/m/K と設定する⁵⁾。本研究では非圧縮性流体である溶融金属を、元来圧縮性流体の数値計算手法である SPH 法を用いて大きな時間刻みでシミュレートするため、福西グループが開発した非圧縮性近似手法を採用している^{6), 9)}。

次に溶融池表面の粒子 a に働くアーク圧力 P_a^{arc} のモデル化について述べる。先行研究が示した実験観察結果では、ドロップ移行中はワイヤが埋もれ空間内部に入り込み、埋もれ空間の底部でアークプラズマが維持されていたことが明らかとなっている⁴⁾。したがって本計算においても、アーク圧力は埋もれ空間底部で強く、埋もれ空間上部やそれ以

外の溶融池表面では小さくなるように与える必要がある。一方でローテーティング移行では、アークプラズマは埋もれ空間上部で維持され、埋もれ空間側面に向かって偏向していた。また、このアークプラズマはワイヤ先端に形成された溶融金属液柱と共にワイヤを中心に回転していた⁴⁾。本研究では、これら埋もれアーク溶接中のドロップ移行およびローテーティング移行時の特徴的なアーク圧力を次式によって模擬する⁵⁾。

$$P_a^{\text{arc}} = \begin{cases} R^p Pe \left[\frac{-3(r'_a - r'^{\text{shift}})^2}{r_p^2} \right] & (\text{Drop transfer}) \\ R^p Pe \left[\frac{-3(r_a - r^{\text{shift}})^2}{r_p^2} \right] & (\text{Rotating transfer}) \end{cases} \quad (2)$$

$$r'_a = \sqrt{(x_a - x^{\text{arc}})^2 + (y_a - y^{\text{arc}})^2 + (z_a - z^{\text{arc}})^2} \quad (3)$$

$$r_a = \sqrt{(x_a - x^{\text{arc}})^2 + (y_a - y^{\text{arc}})^2} \quad (4)$$

R^p は溶融池表面に働く圧力にその表面積を掛けたアーク力の総量を常に一定にするための補正係数であり、本研究ではこのアーク力を 0.175 N と設定する。 P は設定圧力、 r_p は圧力半径である。 r'^{shift} 、 r^{shift} は各分布における熱源中心と圧力のピーク地点の距離である。実際の埋もれアーク溶接ではドロップ移行中の埋もれ空間の直径よりもローテーティング移行中の埋もれ空間の直径のほうが平均的に大きかった⁴⁾。本計算においてもこれを考慮し、 $r'^{\text{shift}} = 2$ mm、 $r^{\text{shift}} = 3$ mm と設定する。 r 、 r' は粒子と熱源中心 $(x^{\text{arc}}, y^{\text{arc}}, z^{\text{arc}})$ との距離を表しており、 z^{arc} は $(x^{\text{arc}}, y^{\text{arc}})$ において溶融池表面から鉛直方向に r^{shift} 上方に位置するものとする。これによりドロップ移行では球状の圧力分布の中心が埋もれ空間底部付近に維持され、埋もれ空間の成長に伴うアークの埋もれを再現している。またローテーティング移行における圧力分布は二次元軸対称の分布であり、これはローテーティング移行中に回転するアークの圧力が埋もれ空間側面に平均的に作用すると仮定している。

粒子 a の温度は次式のエネルギー輸送方程式から求まる⁵⁾。

$$\begin{aligned} \frac{DT_a}{Dt} = & \frac{2\delta}{\lambda_a n_a \rho_a C_a} \sum_b \frac{\kappa_a + \kappa_b}{2} (T_b - T_a) W_{ab} \\ & + \frac{S}{m_a C_a} [q_a^{\text{heat}} - \varepsilon \alpha (T_a^4 - T^{\text{R}4})] \end{aligned} \quad (5)$$

C は比熱、 κ は熱伝導率、 α は Stefan-Boltzmann 係数、 T^{R} は室温 (300 K) である。 ε は放射係数であり、0.4 と設定する¹⁰⁾。 q_a^{heat} は溶融池表面の粒子 a に働くアークからの入熱であり、正規分布の次式で与える¹¹⁾。

$$q_a^{\text{heat}} = R^Q \frac{3Q^{\text{arc}}}{\pi r_q^2} e^{\left(\frac{-3r_a^2}{r_q^2}\right)} \quad (6)$$

R^Q は溶融池の表面積の変化によらず常に一定の入熱を与えるために導入する入熱の補正係数であり、 Q^{arc} は設定入熱量、 r_q は熱源半径である。

3. 計算条件

Fig. 1 に本研究の計算領域を示す。この図は計算領域を上から見た図である。計算領域は $60 \times 100 \times 20$ mm の直方体の母材であり、軟鋼の物性値を与えた直径 0.4 mm の粒子 1,875,000 個によって構成されている。図中の赤の点は熱源中心 ($x^{\text{arc}}, y^{\text{arc}}, z^{\text{arc}}$) を示しており、 x^{arc} は板幅の半分の位置に相当する。この熱源中心は黒の一点鎖線で示す溶接線に沿って溶接速度 30 cm/min で移動する。

本計算の母材の板厚は先行研究⁴⁾と変わらないことから、母材底面の境界では断熱条件を適用する。一方、板幅および板長は実際の母材よりも短い。したがって母材は水平方向に連続的に広がっているものと仮定し、母材側面の境界では計算領域の内外へと抜ける熱流束を考慮する¹²⁾。

1 個の溶滴は粒子 64 個で構成され、その生成周波数は 327 Hz と設定する。またこれらの粒子の初期温度は 3,000 K、初期速度は鉛直方向に -2.0 m/s と設定する。この溶滴の生成位置および式 (2) で用いる圧力分布は、想定する溶滴移行形態によって変える。ドロップ移行期間では式 (2) 上段に示した球状の圧力分布を使用し、溶滴を熱源中心軸上に生成することでドロップ移行を再現する。一方、ローテーティング移行期間では式 (2) 下段に示した二次元軸対称の圧力分布を使用し、溶滴を熱源中心から水平方向に r^{shd} 離れた位置で生成する。この生成位置が 65π rad/s で熱源中心周囲を回転することで、ローテーティング移行を再現している。本研究ではドロップ移行とローテーティング移行を一定の切替え周波数で繰り返すことで電圧振幅制御を模擬する。その一周期におけるローテーティング移行とドロップ移行の比率は 1 : 1 であり、溶滴移行形態の切替えは一周期につき 1 回生じる。

本計算の計算条件を Table 1 に示す。設定入熱量 Q^{arc} は投入入熱に熱効率 0.8 を乗じたものから、溶滴による入熱を差し引いた値である⁵⁾。この溶滴による入熱は先行研究¹³⁾より、熱効率を乗じた後の入熱の 30% と仮定する。実際の埋もれアーク溶接ではドロップ移行とローテーティング移行が生じる溶接条件は異なるため、入熱量やその分布形状もそれぞれの溶滴移行形態で異なる。したがって、厳密には溶滴移行形態毎に熱源を用意する必要がある。しかしながら、これらの入熱分布は異なる母材の溶融状況を引き起

Fig. 1 Computational domain.

こし、本研究の目的である電圧振幅における周波数が埋もれ空間形成におよぼす影響を正しく評価する妨げとなる。そこで本計算では溶滴移行形態によらず、入熱量やその分布形状は一定としている。

本計算では潜熱を考慮しており、相変化は潜熱期間の中間で生じるものとしている^{8), 12), 14)}。また計算時間短縮のため、各計算は Fig. 2 に示す、溶融池を予め形成した状態から開始する。この初期形状は熱源を 5 秒間溶接方向に移動しながら、溶滴を熱源中心軸に沿って輸送することで形成している。図は溶接線に沿ったスライス面であり、黒の一点鎖線は熱源の中心位置を示している。

4. 結果と考察

ドロップ移行とローテーティング移行の切替え周波数を、実際の埋もれアーク溶接に用いられている電圧振幅制御の周波数である 100 Hz と設定し、3 秒間計算した。Fig. 3 に計算結果を示す。各図の左は埋もれ空間近傍の温度分布を、右は粒子の状態分布を示しており、図中の一点鎖線は熱源の中心位置を示している。図より、埋もれ空間が熱源中心軸近傍に維持されたまま溶接が進行していることがわかる。

Fig. 4 に各時刻における埋もれ空間近傍の速度分布を示す。図は溶接線から x 方向に ± 0.5 mm 以内に存在する粒子を描画しており、各粒子の矢印は溶融金属表面の速度ベク

Table 1 Computational conditions.

Time step	0.1 ms
Setting power Q^{arc}	15,322 W
Switching frequency of metal transfer modes	50, 100, 150, 200 Hz
Density ρ	7,850 kg/m ³
Viscosity μ	$1.50 \times 10^{-3} \sim 1.15 \times 10^{-2}$ Pa·s
Thermal conductivity κ	30 ~ 73 W/m/K
Specific heat C	$4.40 \times 10^2 \sim 1.04 \times 10^3$ J/kg/K
Latent heat	250 kJ/kg
Melting point	1,750 K
Setting pressure P	2,400 Pa
Pressure radius r_p	2.0 mm
Heat source radius r_q	7.5 mm
Acceleration of gravity g	-9.8 m/s ²

Fig. 2 Initial distribution.

Fig. 3 Temperature (left) and particle state (right) distributions with time evolution (switching frequency = 100 Hz).

トルを表している。また黒の一点鎖線は熱源の中心位置を示している。Fig. 4 (a) から Fig. 4 (c) はローテーティング移行期間の速度分布であり、その他はドロップ移行期間の速度分布である。ローテーティング移行期間に切り替わった直後では、熱源中心より後方の埋もれ空間側面は慣性に従って溶接方向に流れる。しかしながら、埋もれ空間側面に働く高いアーク圧力によって熱源中心より後方の埋もれ空間側面はやがてその流動方向を変え、埋もれ空間を水平方向に広げる (Fig. 4 (a) - Fig. 4 (c))。その後ドロップ移行期間に変わり、溶滴が熱源中心軸上に輸送されることで埋もれ空間底部は押し下げられる。また埋もれ空間上方に働くアーク圧力が低くなり、埋もれ空間上方の溶融池表面は溶滴移行に伴う慣性力や溶融池表面に働く Marangoni 効

Fig. 4 Velocity distribution of yz cross-section on weld line (switching frequency = 100 Hz).

果によって溶融池後方に向かって流れようとする (Fig. 4 (d) - Fig. 4 (f))。このように溶滴移行形態の切替え周波数を実施工で用いられる 100 Hz に設定した場合では、ローテーティング移行期間にアーク圧力によって埋もれ空間が水平方向に押し広げられ、ドロップ移行期間にアーク圧力や溶滴移行によって埋もれ空間が鉛直方向に成長しながら溶接が進行する。Fig. 5 に示すのは計算終盤の $t = 2.9$ s から $t = 3.0$ s における埋もれ空間直径の変動である。この埋もれ空間直径は、母材表面と熱源中心軸上の溶融池表面との中間点より上方に位置する溶融池表面の粒子の中から、最も熱源中心に近い粒子を含む埋もれ空間の直径と定義する⁵⁾。これは実施工における埋もれ空間の変動が埋もれ空間上部で観察されるためである。図より、埋もれ空間直径は常に 4 mm 以上であることがわかる。実際の埋もれ空間には直径 1.2 ~ 1.6 mm のワイヤが存在することを考慮すると、この結果は埋もれ空間上部は常に開口していることを示しており、埋もれ空間の崩壊は生じていないといえる。

次にこの溶滴移行の切替え周波数を 50 Hz に設定した場合の計算結果を示す。Fig. 6 は Fig. 4 と同様に、各時刻における速度分布であり、各粒子の矢印は溶融金属表面の速度ベクトルを表している。Fig. 6 (a) から Fig. 6 (c) はローテーティング移行期間の速度分布であり、その他はドロップ移行期間の速度分布である。ローテーティング移行期間に切り替わると熱源中心より後方の埋もれ空間側面は、熱

Fig. 5 Time evolution of buried space diameter (switching frequency = 100 Hz).

Fig. 7 Time evolution of buried space diameter (switching frequency = 50 Hz).

Fig. 6 Velocity distribution of yz cross-section on weld line (switching frequency = 50Hz).

源中心軸に向かって流れようとする自身の流動方向とは逆の、埋もれ空間側面を水平方向に押し広げる方向にアーク圧力による力を受ける。しかしながら熱源中心よりも後方の埋もれ空間側面では、この力よりも溶融金属が持つ慣性力の方が大きいので、溶融金属は埋もれ空間に向かって流れ込もうとする (Fig. 6 (a), Fig. 6 (b))。ローテティング移行期間後半にはアーク圧力による力が慣性力を上回るため、埋もれ空間上方では空間を押し広げる方向に溶融金属が流れるが、押し戻された溶融金属の一部が図中の黒の矢

印で示すように埋もれ空間底部に流れ込むことで、埋もれ空間が崩壊する (Fig. 6 (b), Fig. 6 (c))。ドロップ移行期間に切り替わった後は埋もれ空間底部に高いアーク圧力が作用し、溶滴も埋もれ空間底部に輸送されることで埋もれ空間底部の溶融金属は押し下げられ、埋もれ空間は鉛直方向に成長する (Fig. 6 (d) - Fig. 6 (f))。

Fig. 7 に計算終盤の $t = 2.9$ s から $t = 3.0$ s における埋もれ空間直径の変動を示す。100 Hz の場合とは異なり、埋もれ空間直径は時間経過と共に大きく変動していることがわかる。その最小値はワイヤ径程度であり、埋もれ空間内のワイヤの存在を考慮すると、埋もれ空間は開口していないことがわかる。また、埋もれ空間直径がこの最小値付近を示す期間は前述のような埋もれ空間の崩壊に対応している。図からは、この埋もれ空間の崩壊が繰り返し生じていることがわかり、その周期は約 20 ms である。このような埋もれ空間の大きな変動は、電圧振幅制御を用いない埋もれアーク溶接を模擬したシミュレーションでも確認されている⁵⁾。また実験観察では、電圧振幅制御を用いない埋もれアーク溶接中は埋もれ空間形状の変化が大きくなり、ビード幅が不均一になることが報告されている⁴⁾。これらのことから、電圧振幅制御の周波数を下げると埋もれ空間の崩壊と成長を繰り返し引き起こす可能性が示唆される。

続いて、溶滴移行形態の切替え周波数を 150 Hz に設定した場合の、埋もれ空間近傍の速度分布を Fig. 8 に示す。この図も Fig. 4 と同様に、各粒子の矢印は溶融金属表面の速度ベクトルを表している。また黒の一点鎖線は熱源の中心位置を示している。Fig. 8 (a) から Fig. 8 (c) がローテティング移行期間の速度分布であり、その他がドロップ移行期間の速度分布である。

ローテティング移行期間では埋もれ空間側面がアーク圧力によって水平方向に押し広げられる (Fig. 8 (a) - Fig. 8 (c))。そしてドロップ移行期間では熱源の中心軸上に溶滴が輸送され、アーク圧力が埋もれ空間底部に作用することで、ローテティング移行期間よりも埋もれ空間が鉛直方

Fig. 8 Velocity distribution of yz cross-section on weld line (switching frequency = 150 Hz).

向に成長する (Fig. 8 (d) - Fig. 8 (f))。Fig. 9 に計算終盤の $t = 2.9$ s から $t = 3.0$ s における埋もれ空間直径の変動を示す。溶滴移行形態の切替え周波数を増加させた場合、時間経過と共に埋もれ空間直径は変動するものの、常に直径 3 mm 以上の埋もれ空間を維持したまま溶接が進行しており、50 Hz の場合のように埋もれ空間の崩壊は生じていないことがわかる。これは切替え周波数の増加によって一周あたりでのドロップ移行期間が短くなることで、埋もれ空間が鉛直方向に大きく成長して埋もれ空間の崩壊が生じる前にローテティング移行期間に切り替わり、埋もれ空間側面の流動方向が埋もれ空間を水平方向に広げる向きに変わるためであると考えられる。

最後に溶滴移行の切替え周波数に対する溶込み深さや埋もれ空間直径を示し、電圧振幅制御の周波数が埋もれアーク溶接現象に与える影響について考察する。Fig. 10 に溶滴移行の切替え周波数に対する溶込み深さを、Fig. 11 に溶滴移行の切替え周波数に対する埋もれ空間直径を示す。Fig. 10 は $t = 3.0$ s における溶接線上の溶込み深さであり、エラーバーは測定した 10 点中の最小値と最大値を示している。Fig. 11 は $t = 2.9$ s から $t = 3.0$ s における埋もれ空間直径の平均値を示しており、エラーバーはこの期間における最小値と最大値である。また Fig. 10 および Fig. 11 にはこれまでの結果に加え、切替え周波数を 200 Hz と設定した場合の溶込み深さと埋もれ空間直径を示している。

Fig. 9 Time evolution of buried space diameter (switching frequency = 150 Hz).

Fig. 10 Penetration depth for each switching frequency.

Fig. 11 Buried space diameter for each switching frequency.

Fig. 10 より、切替え周波数の増加に伴って溶込み深さは減少傾向を示していることがわかる。これは周波数の増加に伴い一周あたりのドロップ移行期間が短くなり、鉛直方向の埋もれ空間の成長が抑えられているためである。切替え周波数が 50 Hz の場合に溶込みがやや深くなるのは、溶滴が熱源中心軸に沿って埋もれ空間底部へと輸送されるドロップ移行期間が長くなることで、最も押し下げられる熱源中心軸上の溶融池底部が加熱されるためである。

その一方で、Fig. 11 に示すようにドロップ移行期間が比

較的長い 50 Hz では埋もれ空間直径の最小値はワイヤ径程度となる。これは前述の通り埋もれ空間の成長と崩壊を引き起こしていることを意味している。そして切替え周波数が 100 Hz 以上になると、埋もれ空間直径の最小値はワイヤ径よりも大きくなり、常に十分な大きさの埋もれ空間直径を維持したまま溶接が進行する。したがって実際の埋もれアーク溶接においても、電圧振幅制御の周波数を 200 Hz まで増加させても安定な埋もれアーク溶接を維持できることが予測される。またこれらの結果から、埋もれアーク溶接中の電圧振幅制御の周波数はドロップ移行期間の長さを決めるパラメータの 1 つであり、一周周期あたりのドロップ移行期間を 5 ms 以下に抑えることができれば埋もれ空間の崩壊は生じず、安定した溶接が可能であることが示された。

以上より、切替え周波数の増加と共に溶込み深さが減少するが、切替え周波数が 100 Hz 以上になると埋もれ空間の崩壊を防止できることが示唆された。したがって、埋もれ空間の崩壊を防ぎ、かつ深い溶込み深さが得られる 100 Hz が最適な周波数条件であると考えられる。

5. 結 言

本研究では電圧振幅制御における周波数が埋もれアーク溶接中の埋もれ空間挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、粒子法を用いた数値シミュレーションを行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ドロップ移行とローテーティング移行の切替え周波数を 100 Hz と設定した場合、ローテーティング移行期間に埋もれ空間がアーク圧力によって水平方向に押し広げられ、ドロップ移行期間にアーク圧力や溶滴移行によって埋もれ空間が鉛直方向に成長しながら溶接が進行した。
- (2) 切替え周波数を 50 Hz と設定した場合、埋もれ空間が鉛直方向に成長した後、埋もれ空間底部に熔融金属が流れ込むことで埋もれ空間が崩壊した。この崩壊は約 20 ms 周期で生じており、電圧振幅制御の周波数を下げることによって埋もれ空間の崩壊と成長を繰り返し引き起こす可能性が示唆された。
- (3) 切替え周波数を 200 Hz まで増加させても埋もれ空間の崩壊は生じず、常に埋もれ空間は開口していた。これは埋もれ空間が鉛直方向に成長して埋もれ空間の崩壊が始まる前にローテーティング移行期間に切り替わり、埋もれ空間側面がアーク圧力によって水平方向に押し広げられるためであると考えられた。
- (4) 切替え周波数が 100 Hz 以上になると、埋もれ空間の崩壊を防止できるが、周波数が大きくなるにつれて溶込み深さは減少する傾向があることが明らかとなった。したがって、埋もれ空間の崩壊を防ぎ、かつ深い溶込みが得られる 100 Hz が最適な周波数条件であると考えられた。

参 考 文 献

- 1) 申政考, 中田一博: “10 kW 級ファイバーレーザ・マグアークハイブリッド溶接による I 形開先突合せ溶接継手形成に関する検討”, 溶接学会論文集, **29-3** (2011), 181-186.
- 2) 大西輝政, 川人洋介, 水谷正海, 片山聖二: “高出力・高輝度レーザによる高張力鋼厚板のホットワイヤ併用突合せ溶接法”, 溶接学会論文集, **29-1** (2011), 41-47.
- 3) 溶接学会・日本溶接協会編: “溶接・接合技術総論”, 産報出版, (2016).
- 4) H. Baba, T. Era, T. Ueyama and M. Tanaka: “Single pass full penetration joining for heavy plate steel using high current GMA process”, *Welding in the World*, **61** (2017), 963-969.
- 5) H. Komen, H. Baba, K. Kadota, T. Era, M. Tanaka and H. Terasaki: “Three-dimensional particle simulation of buried space formation process during high current gas metal arc welding”, *Journal of Advanced Joining Processes*, **1** (2020), 100019.
- 6) M. Shigeta, T. Watanabe, S. Izawa and Y. Fukunishi: “Incompressible SPH Simulation of Double-Diffusive Convection Phenomena”, *International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences*, **1-1** (2009), 1-18.
- 7) S. Koshizuka and Y. Oka: “Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid”, *Nuclear Science and Engineering*, **123-3** (1996), 421-434.
- 8) 伊藤真澄, 伊澤精一郎, 福西祐, 茂田正哉: “非圧縮性 SPH 法を用いた TIG 溶接における溶融池形成シミュレーション”, 溶接学会論文集, **32-4** (2014), 213-222.
- 9) N. Okachi, A. Hirota, S. Izawa, Y. Fukunishi and H. Higuchi: “SPH Simulation of Pulsating Pipe Flow at a Junction”, *Proceedings of the 1st International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2001), 388-391.
- 10) Z. H. Rao, J. Hu, S. M. Liao and H. L. Tsai: “Modeling of the transport phenomena in GMAW using argon-helium mixtures. Part I—the arc”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53-25-26** (2010), 5707-5721.
- 11) 荻野陽輔, 高部義浩, 平田好則, 浅井知: “継手形状・溶接姿勢を考慮した 3 次元溶融池モデル”, 溶接学会論文集, **35-1** (2017), 13-20.
- 12) H. Komen, M. Shigeta and M. Tanaka: “Numerical simulation of molten metal droplet transfer and weld pool convection during gas metal arc welding using incompressible smoothed particle hydrodynamics method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **121** (2018), 978-985.
- 13) 辻村吉寛: “ガスメタルアーク溶接における金属蒸気を伴うアーク現象とその熱源特性に関する研究”, 大阪大学大学院工学研究科博士学位論文, (2012).
- 14) 古免久弥, 茂田正哉, 田中学: “GMA 溶接における溶滴輸送を伴う溶融池対流の非圧縮性 SPH シミュレーション”, 溶接学会論文集, **33-4** (2015), 332-340.

代表者メールアドレス

komen@mech.kumamoto-u.ac.jp