日本溶接協会 2025年度「次世代を担う研究者助成事業」成果報告

気孔欠陥抑制に向けた溶融池内への気泡侵入および気泡の輸送・排出プロセスの数値解析的研究

杉本　真
東北大学 大学院 工学研究科

1　はじめに

ブローホールやピットといった気孔欠陥は，レーザ溶接やガスメタルアーク溶接においてしばしば発生し，継手の引張強度低下ならびに応力集中による疲労強度低下を招くことが知られている。気孔欠陥は溶融池外から侵入した気泡や，溶融池内で発生した気泡が凝固までに溶融池外に排出されずに残留することで形成される。そのため，気孔欠陥の抑制には，溶融池内への気泡侵入の抑制ならびに侵入した気泡の効率的な排出が重要となる。そのためには，気泡および周囲の流れ場への力学的作用を明らかにし，溶融池における気泡の侵入および輸送・排出プロセスを解明する必要がある。

近年，X線イメージングを用いた観察により，溶融池内における気泡挙動や気孔形成過程の可視化が進められている[1)]。しかし，溶融池内部の流れ場および気泡への力学的作用を実験的に評価することは依然として容易ではない。そのため，これらの情報を時空間的に取得し，気泡挙動の支配要因を解析可能な数値シミュレーションは有効な研究手段である。多様な気液混相流シミュレーション手法が提案されているが，とりわけフェーズフィールド格子ボルツマン法（PFLBM）は気液界面の大変形，分離および合体を伴う気液混相流のシミュレーションに適した手法であることが知られている。

本研究では基礎検討として，PFLBMを用いてミグ溶接における溶滴移行時の気泡侵入過程を対象とした数値シミュレーションを実施し，その解析基盤を構築することを目的とした。

2　研究方法

PFLBMは，フェーズフィールドモデルと格子ボルツマン法を組み合わせた気液混相流シミュレーション手法である。本手法において，気液は液相の局所体積分率で定義される秩序変数を用いて区別される。すなわち，秩序変数は気相で0，液相で1となり，0から1の範囲は有限の厚みを持つ拡散界面として表される。界面張力は拡散界面領域に作用する体積力として扱われるため，気液界面の大変形を伴う流れ場においても容易に界面張力を計算することができる。また，Navier–Stokes方程式に加えて，保存型Allen–Cahn方程式を解くことで，拡散界面の厚みを一定に保ちつつ気液混相流をシミュレートできる。PFLBMではNavier–Stokes方程式と保存型Allen–Cahn方程式をそれぞれ格子ボルツマン方程式（LBE）に変換し，時間発展計算を行う。LBEは一般に次式で表される。

$$f_i^*(\boldsymbol{x},t) = f_i(\boldsymbol{x},t) + \Omega_i(\boldsymbol{x},t) + F_i(\boldsymbol{x},t) \quad \cdots\cdots (1)$$

$$f_i(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{e}_i\delta_t, t+\delta_t) = f_i^*(\boldsymbol{x},t) \quad \cdots\cdots (2)$$

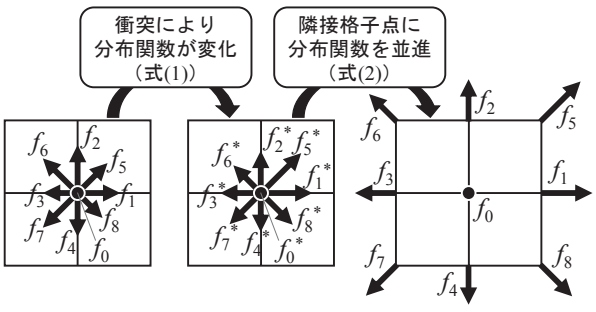

図1　PFLBMにおける衝突および並進過程のイメージ図

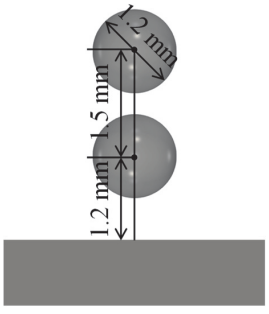

図2　溶滴と溶融池の初期配置

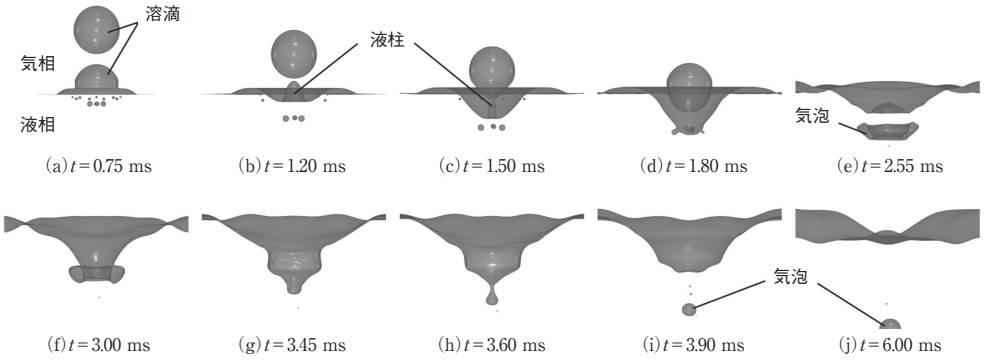

図３　溶滴移行過程における気液界面のスナップショット

ここで，f_iは衝突前の分布関数，f_i^*は衝突後かつ並進前の分布関数，$\boldsymbol{x}$は位置ベクトル，tは時間，$\boldsymbol{e}_i$は離散速度ベクトル，δ_tは時間刻み幅，Ω_iは衝突項，F_iは外力項であり，下付き文字のiは離散速度方向の番号を表す。式（1）および式（2）は**図１**に示すような仮想的な粒子の衝突および並進による分布関数の変化を記述している。分布関数のモーメントを計算することで，速度分布および秩序変数分布を得ることができるため，LBEを反復計算することで巨視的な流れ場の時間発展をシミュレートできる。衝突項Ω_iには様々なモデルが提案されており，本研究では保存型Allen–Cahn方程式に対応するLBEには実装が単純な単一緩和時間モデルを適用する一方，Navier–Stokes方程式に対応するLBEには重み付き多緩和時間モデル[2]を適用することで，シミュレーションにおける数値安定性を高めた。

図２に初期条件における溶滴と溶融池の配置を示す。本シミュレーションでは，直径1.2 mmの２つの液滴を，溶融池を模した液膜に衝突させた。２液滴の中心位置は液膜表面から高さ1.2 mmおよび2.5 mmの位置とし，液滴の初速は下向きに1.5 m/sとした。液相の密度と粘性係数および表面張力係数にはSUS304の値[3]を使用した。実際のミグ溶接プロセスではシールドガスとしてアルゴンやヘリウムが使用される。このときの気液間の密度比は10^5を超えるため，シミュレーションにおける数値安定性が著しく低下する。そこで，本研究では気相密度を10000 Kのアルゴンプラズマの145倍に設定することでこの問題を回避した。また，粘性係数についても，アルゴンプラズマの10倍の値を与えることで，数値安定性を高めた。計算に用いる格子幅は15 μm，時間刻み幅は0.1 μsと設定した。

3　主な研究成果

図３に溶滴移行過程における気液界面形状の時間変化を示す。ここでは秩序変数が0.5の等値面を気液界面として可視化した。

１個目の溶滴の着弾により溶融池表面は大きく変形し，液柱を形成した（図３(a)，(b)）。その後，２個目の液滴が液柱に接触・分離した後（図３(c)，(d)），１個目の溶滴によって形成された窪みに着弾することで，気泡が溶融池内へ侵入した（図３(e)）。さらに，２個目の液滴による下向きの運動量によって液面が再び陥没し，侵入した気泡と合体した（図３(f)）。その後，変形した溶融池表面の最下部から気相領域が伸長し（図３(g)，(h)），溶融池表面から分離することで気泡が形成された（図３(i)）。形成された気泡は溶融池底面に付着し，本計算条件では溶融池外へ排出されなかった（図３(j)）。

以上より，溶滴移行に伴う気泡侵入過程が発現し，その一連の挙動を可視化できることを確認した。

本研究では，気液界面の大変形を伴う気液混相流のシミュレーションに適したフェーズフィールド格子ボルツマン法を用いて，ミグ溶接プロセスにおける溶滴移行過程をシミュレートした。その結果，溶滴衝突に伴う液面変形から溶融池内部に気泡が取り込まれる一連の過程を数値的に捉えることができた。

今後は，溶滴の滴下間隔，滴下速度および液相物性を変化させ，Weber数やReynolds数といった各種無次元数に基づいて気泡侵入条件を整理することで，気孔欠陥の抑制に資する知見を得る予定である。また，エネルギー輸送方程式を合わせて解くことで，溶融池内部の温度場を予測するとともに，物性値の温度依存性を考慮することで，マランゴニ対流などが溶融池内の気泡挙動へ及ぼす影響を明らかにする予定である。

参考文献

1）X. Zhang et al., Review of Scientific Instruments, 93（2022）, 071501.
2）A. Fakhari et al., Journal of Computational Physics, 341（2017）, 22–43.
3）R. Wang et al., Optics and Laser Technology, 43, 4（2011）, 870–8703.