

【研究論文】

【令和5～7年度 地域企業競争力強化支援事業】

固化流れシミュレーション技術の開発

吉川 穰、野口 暁人、内海 宏和*

自動車産業支援部、材料開発・分析技術部*

アルミ合金の鋳造特性を評価する流動性評価試験と、溶射など熔融液滴が固体表面に衝突する現象を対象として、凝固流れシミュレーションに取り組んだ。流動性評価試験においては、管内を流動する合金が凝固により運動を停止する距離が、熔融金属温度の増加に対して長くなる傾向が実験とシミュレーションで一致した。また固体表面へのろう溶滴衝突現象においては、凝固後のろうの直径が溶滴の衝突直前速度の増加に伴い大きくなる傾向をシミュレーションで再現できた。シミュレーションでは、管内部の速度分布や衝突溶滴の変形の様子、固体との接触により急激に熔融物の温度が降下し凝固が進展する様子など、実験では観測困難な現象を可視化することができた。

キーワード：固液相変化、凝固流れモデル、多相流、鋳造、溶射、数値計算

1 緒言

宮城県では、平成20年度からみやぎ発展税を有効に活用し、「富県宮城の実現」に向けた施策を行っている。中でも、県内総生産10兆円達成を目標とした産業振興パッケージでは、高度電子機械産業や自動車関連産業に関連した県内の中小企業の競争力強化を目的としており、当センターもその下に県内企業の技術の高度化を目指して日々の支援を行っている。

さて、上述の産業分野においては、デジタルエンジニアリング技術を活用した設計開発が世界的に普及しており、当センターでも平成9年度からコンピュータシミュレーションを導入して、県内企業向けに構造・伝熱を中心とした先導的な技術支援を行ってきた。ところが近年ではその分野を超え、特に流体力学分野に関して、シミュレーション(数値計算)技術を用いた設計の事前検討についての技術相談が年々増加している。例えばファンによる気流の到達距離や水冷による発熱体の温度を求めたいといった相談や、スプレーによる液滴の飛散挙動や熔融金属が流れながら冷えて固まる位置を知りたいといった相談が実際に寄せられている。前者の相談のように、気体や液体それぞれ単独の流れ(単相流)を扱う問題に関しては大方対応が可能で、数値計算利用の有無に関わらず数多くの支援を行っている。一方で、後者のように気体や液体、固体が混在した流れ(多相流または混相流)の問題については、当センターでは知見が乏しく、多相流現象を単相流現象と見立てた簡略モデルによる部分的な支援を行い、内容によっては対応不

可なる場合もあった。

このような背景から、当センターでは、県内企業が抱える多相流問題の設計開発に資するべく、令和3年度から2年間にわたって「多相流シミュレーション技術の高度化研究」を実施し、シミュレーション技術を培った²⁾。その中では、これまで当センターで対応できなかった多相流関連の問題の中から、「液滴振動」「ノズル濡れ」「液滴飛散」の3つのテーマに取り組んだ。また、各テーマに対するシミュレーションを実施するだけでなく、対応する線形理論及び実験と比較することで、シミュレーション結果の妥当性を確認した。一方で、ガスアトマイズや溶射に見られるような、溶滴が流れの中で凝固するような問題や、塗装やペースト塗布に見られるような、溶媒が流れの中で蒸発するような問題については、シミュレーション技術の開発に至らなかった。

そこで、本研究は「多相流シミュレーション技術の高度化研究」で残された課題として、凝固や乾燥によって固化が生じる流れについて、シミュレーション技術の開発を目的とする。凝固現象については、鋳造シミュレータの中で既に取り扱われているが、本研究では鋳造に限らず、より広範な技術分野への適用を見据えているため、汎用の流体シミュレータを用いて簡易的な取り扱いを可能とする。3年間の研究期間の前半では、鋳造プロセスに見立てた熔融金属の流動性評価試験を、後半では落下溶滴の凝固をテーマとして、それぞれシミュレーションで取り扱う。一方、乾燥現象についてはチャレンジ課題とし、研究開発のステップには位置付けない。令和7年度は研究期間3年の最終年度にあたり、本研究論文

では研究期間で得られた成果を総括する。

2 問題設定と計算・実験方法

2.1 流動性評価試験シミュレーション

流動性評価試験では、型下部を熔融金属の液面に付着させた後、ある瞬間に型上部を減圧させることで、型内部へ突発的に流入させる。対照実験³⁾では、型を外径6 mm、内径4 mm、高さ250 mmのSUS304製の中空円筒とし、大気圧から圧力を20 kPa減圧することで、熔融させた鋳造用アルミ合金(AC4C)を吸い上げ、凝固後の流動長を測定している。本計算もその諸元に則り、凝固流れモデルを導入した熱流体シミュレーションにて現象の再現を試みた。

本シミュレーションは、商用の流体計算ソフトウェア Ansys Fluent 2024 R1を用いて実施した。流れは非圧縮性を仮定し、熔融AC4Cと空気の気液二相流問題として扱った。気液二相流モデルには昨年度「突発的な吸引による流れ」問題で採用したVolume of Fluid法を、凝固流れモデルには昨年度「潜熱を考慮した伝熱」問題で採用したエンタルピー・空隙率法⁴⁾を使用した。エンタルピー・空隙率法においては、式(1)に示す速度 u に比例する運動量のシンク項 S を導入することで凝固現象を表現する。

$$S = k \frac{(1-\beta)^2}{\beta^2 + 0.001} u \quad (1)$$

ここで、 β は液体分率、 k は半熔融領域パラメータを表し、本計算においては $k = 1 \times 10^5$ とした。

熔融AC4Cの物性値⁵⁾は、密度を2640 kg/m³、比熱を963 J/(kg・K)、熱伝導率を159 W/(m・K)で一定とし、固相線温度を545 °C、液相線温度を612 °C、潜熱を390 kJ/kgと与えた。なお温度に対する液体分率 β の変化は、図1に示す区分線形分布とした。また、表面張力係数 σ と粘性係数 μ については熔融AC4Cの値を参照できなかったため、700 °Cのアルミの物性値^{6), 7)}を参照し、その効果を検証した。計算に用いた値は次章の計算結果とともに示す。

図2に計算領域の全体図(a)と原点近傍の拡大図(b)を示す。本計算は、 x 軸を中空円筒型の対称軸とする軸対称2次元計算とし、 y 方向を半径方向とした。また型への等方的な熔融AC4Cの流入を表現するために、流入境界を円形とし、ゲージ圧を0 Paとした。一方で流出境界には、ゲージ圧-20 kPaを与えた。初期条件は、図2の緑色領域のうち $x \leq 0$ mmまたは $x \leq 10$ mmの領域

をAC4Cの体積分率および液体分率 β を1として、その他の緑色領域を0(空気)とした。なお、原点近傍の拡大図に灰色で示す領域は、SUS304の固体領域を表す。SUS304と空気の初期温度は26.85 °Cとし、熔融AC4Cの初期温度は637 °C、677 °C、717 °Cと変えてその傾向を調べた。また、場全体の初速度と初期圧力は0とし、 $-x$ 方向に重力を与えた。

計算に使用したメッシュは、円筒型内部で0.25 mmの直交等間隔格子、 $x < 0$ における原点から半径6 mm以内の領域で0.25 mmの非構造格子となるように設定し、小さな速度で流入されると予想される流入境界に近づくにつれてメッシュを5 mmまで粗大化させた。また時間刻みを $\Delta t = 0.01$ msとして、時刻 $t = 100$ msまで計算を行った。

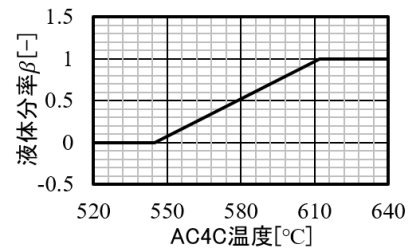


図1 AC4Cの温度と液体分率の関係

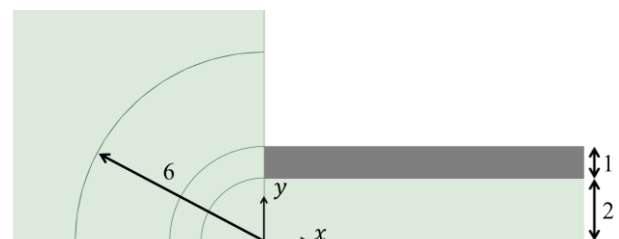
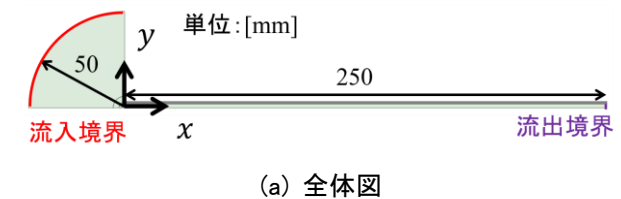


図2 流動性評価試験シミュレーションの計算領域

2.2 落下溶滴の凝固シミュレーション

溶射や塗装のような表面処理プロセスによって得られる表面性状の良否は、スプレー状に飛散した液滴の、固体表面への衝突後変形や固化過程に依存する。したがってその性状改善のためには、液滴の衝突から変形、

固化までを一貫したシミュレーションでの取り扱いが求められる。本研究では、汎用の流体計算ソフトウェアにて凝固を考慮することでその実現を試みた。シミュレーションでは、パラフィンワックス溶滴が落下し、壁面衝突後に凝固するまで計算し、結果の検証のため対照実験を行った。

本シミュレーションは、商用の流体計算ソフトウェア Ansys Fluent 2025 R2を用いて実施した。流れは非圧縮性を仮定し、パラフィンワックスと空気の気液二相流問題として扱った。その他は、流動性評価試験シミュレーションと同様のモデルを用いた。

溶融パラフィンワックスの物性値^{8), 9), 10), 11)}は、密度を 800 kg/m^3 、比熱を $2140 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、熱伝導率を $0.25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、粘性係数を $0.005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面張力係数を 0.003 N/m で一定とし、固相線温度を 48°C 、液相線温度を 50°C 、潜熱を 200 kJ/kg とし、半溶融領域パラメータ k は流動性評価試験シミュレーションと同様に 1×10^5 とした。なお温度に対する液体分率の変化は、図3に示す区分線形分布とし、壁面とパラフィンワックスとの接触角を 170° とした。

図4に計算領域を示す。本計算は、 x 軸を対称軸とする軸対称2次元計算とし、 y 方向を半径方向とした。初期条件は、図4に黒色領域で示すように $x = 3.75 \text{ mm}$ 、 $y = 0 \text{ mm}$ を中心とする半径 1.75 mm の領域において、 80°C のパラフィンワックスの体積分率および液体分率 β を1、その他の白色領域において体積分率および液体分率を0(20°C の空気)とした。また、パラフィンワックス領域に与える初速度は $-x$ 方向に一樣として、その速度を 1.0 m/s 、 1.3 m/s 、 1.5 m/s 、 1.7 m/s と変えて傾向を調べた。なお、 $-x$ 方向に重力を課した。

計算に使用したメッシュは直交不等間隔格子で、壁面境界における格子幅 0.005 mm から x 方向に伸長させ、60層のレイヤーメッシュを成長率1.05で格子幅 0.1 mm まで発達させた。また時間刻みを $\Delta t = 0.002 \text{ ms}$ として、時刻 $t = 20 \text{ ms}$ まで、その後は $\Delta t = 0.01 \text{ ms}$ として、時刻 $t = 520 \text{ ms}$ まで計算を行った。

図5に対照実験のセットアップを示す。まず、予熱されたパラフィンワックスを $1/8 \text{ inch}$ パイプに満たし、巻き付けたラバーヒーターにより管中央部で 80°C になるように保温した。その後、シリンジをゆっくりと押し込むことで、パイプ先端に装着された内径 3.4 mm のノズルから、 $W150 \text{ mm} \times D100 \text{ mm} \times t 30 \text{ mm}$ のアルミブロックへ向けてパラフィンワックス溶滴を滴下した。溶滴の落下から凝固の様子はハイスピードカメラで観察し、衝突速度は撮影画像から計算した。ノズル先端とアルミブロックとの

距離を 50 mm 、 100 mm 、 150 mm 、 200 mm と変えることで、溶滴の衝突速度をそれぞれ 0.97 m/s 、 1.31 m/s 、 1.52 m/s 、 1.70 m/s と変化させた。実験は距離ごとに4回ずつ実施し、凝固後のパラフィンワックスの形状はキーエンス社製VR-3000で観察した。

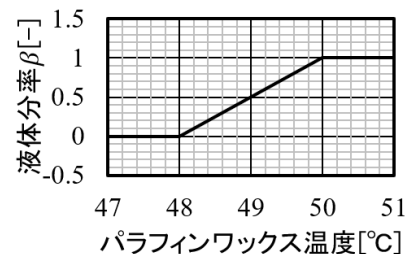


図3 パラフィンワックスの温度と液体分率の関係

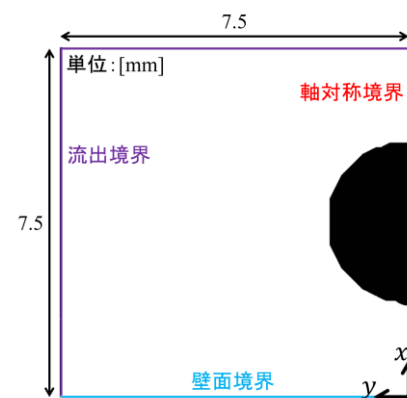


図4 落下溶滴の凝固シミュレーションの計算領域

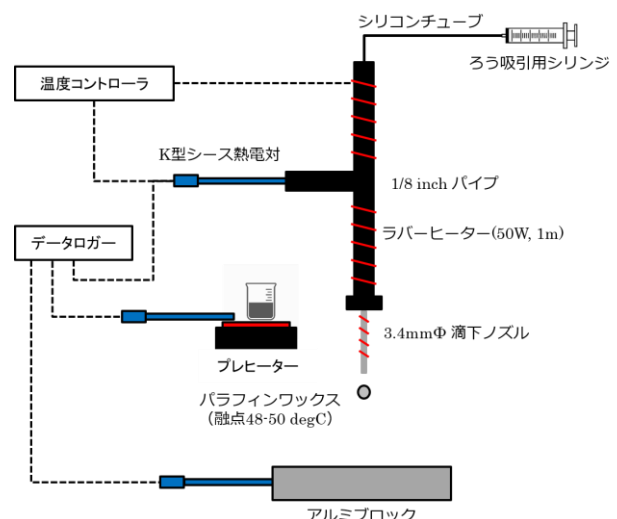


図5 対照実験のセットアップ

3 計算結果

3.1 流動性評価試験シミュレーション

図6に対照実験で得られた凝固AC4Cの一例を示す。半径方向にはほぼ一様な一本の円筒形状となっていることがわかる。本シミュレーションでは、まず流動性評価試験で得られたこの形状を再現する上で必要な計算条件を探った。図7に、初期温度を637℃として、表面張力係数 σ 、粘性係数 μ 、初期の溶融AC4C位置 x_{ini} の条件を変えた計算で得られた、 $t = 100 \text{ ms}$ の溶融AC4Cの体積分率分布を示す。黒色領域は溶融AC4Cの体積分率が1の位置を、白色領域は体積分率が0の位置を表す。図7(a)は、溶融AC4Cの表面張力を考慮せず($\sigma = 0 \text{ N/m}$)、粘性係数を700℃のアルミの粘性係数 $\mu = 3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ とし、溶融AC4Cの初期位置を $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$ とした計算結果である。溶融AC4Cは流出境界に到達し、中心軸周辺のAC4Cのみが軸方向に大きく伸びた形状となっており、本計算結果はこの点で対照実験の結果と異なる。そこで、溶融AC4Cの表面張力として700℃のアルミの表面張力係数 $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ を与えた計算結果を図7(b)に示す。表面張力がはたらくことで、溶融AC4Cの流出境界への到達は防ぐことができたものの、溶融AC4Cの分裂や液滴の発生が観察され、この点で対照実験の結果と異なる。このような分裂現象は、溶融AC4C内部の局所的な速度差に起因すると考えられるため、粘性係数を10倍大きくした($\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)。その計算結果を図7(c)に示す。細かい液滴の分裂は減少したものの、 $x = 160 \sim 170 \text{ mm}$ の位置に液滴が残存することがわかる。この液滴は、吸引開始直後に溶融AC4Cの先端部が分裂することで生成されたもので、型内部に急激に吸引された溶融AC4C先端の局所的な加速に起因するものと考えられる。そのため、溶融AC4Cの初期位置を $x_{ini} \leq 10 \text{ mm}$ まで拡張した計算を行った。その

結果を図7(d)に示す。液体の分裂は生じず、図6のように半径方向に一様で軸方向に伸びたAC4C形状となったことから、対照実験で得られたAC4C形状の特徴と一致する。したがって、以下の計算では条件を $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 10 \text{ mm}$ に固定して計算を進めた。

次に、その条件において図7(d)の状態($t = 100 \text{ ms}$)に至る過程を調べる。図8に液体の体積分率分布と速度分布の時間変化を、図9に温度の時間変化を示す。なお図8では、溶融AC4Cの体積分率については図7と同様に色付け、軸方向速度で色付けした速度ベクトルと合わせて表示した。型内部では、 $y = 0 \text{ mm}$ 近傍で速度が大きく、SUS304壁面近傍で軸方向速度が低下していることがわかる。図9の温度分布と見比べると、初期温度の低い壁面と接する溶融AC4Cが、温度低下によって壁面近傍で急速に凝固して減速する。一方で、 $y = 0 \text{ mm}$ 近傍では温度低下が遅く、 $x = 60 \text{ mm}$ 周辺のAC4Cが固相線温度に達して運動が止まった $t = 100 \text{ ms}$ においても、流動性を有することがわかった。図10に、AC4Cの初期温度に対する流動長の違いを示す。黒点は対照実験の結果を、赤点は計算結果を表す。実験・計算ともに、初期温度の増加に伴って流動長が増加しており、その長さのスケールが一致することから、定性的な一致を確認することができた。一方で、初期温度に対する流動性の変化率は、計算に比べて実験の方が大きい。この理由は未解明であるが、AC4Cの密度や粘性係数の温度変化を考慮していない点や、半溶融領域パラメータが未調整である点、固相線温度と液相線温度間における液体分率の非線形性の考慮の必要性などが原因として考えられる。



図6 流動性評価試験で得られた凝固AC4Cの一例

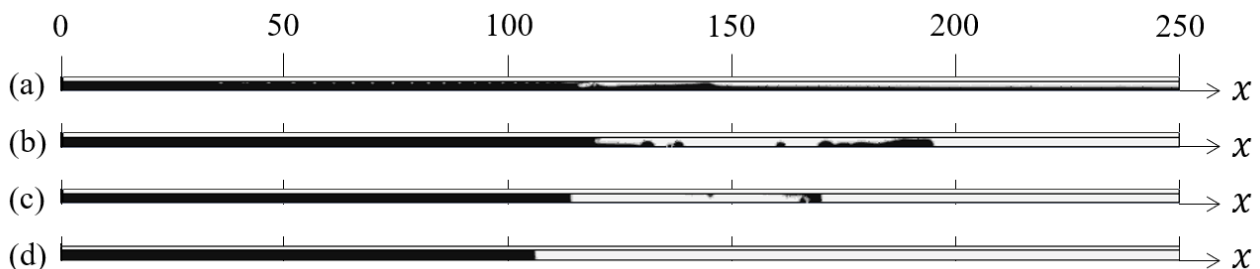


図7 $t = 100 \text{ ms}$ における溶融AC4Cの体積分率分布

- (a) $\sigma = 0 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$
- (b) $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$
- (c) $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 0 \text{ mm}$
- (d) $\sigma = 0.9 \text{ N/m}$ 、 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $x_{ini} \leq 10 \text{ mm}$

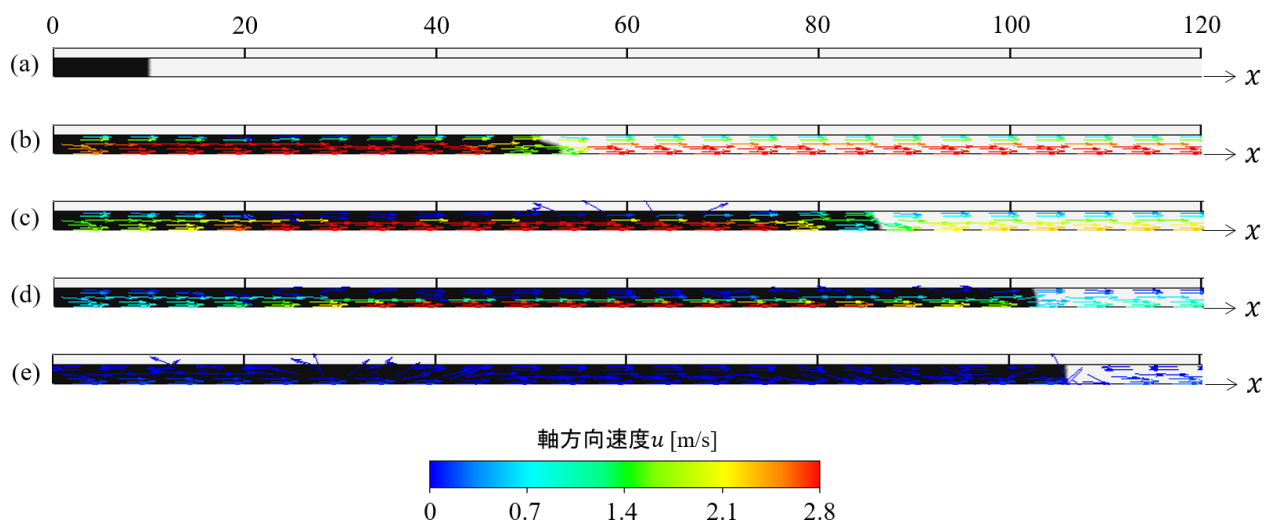


図8 溶融AC4Cの体積分率分布と速度分布の時間変化

(a) $t = 0$ ms, (b) $t = 25$ ms, (c) $t = 50$ ms, (d) $t = 75$ ms, (e) $t = 100$ ms

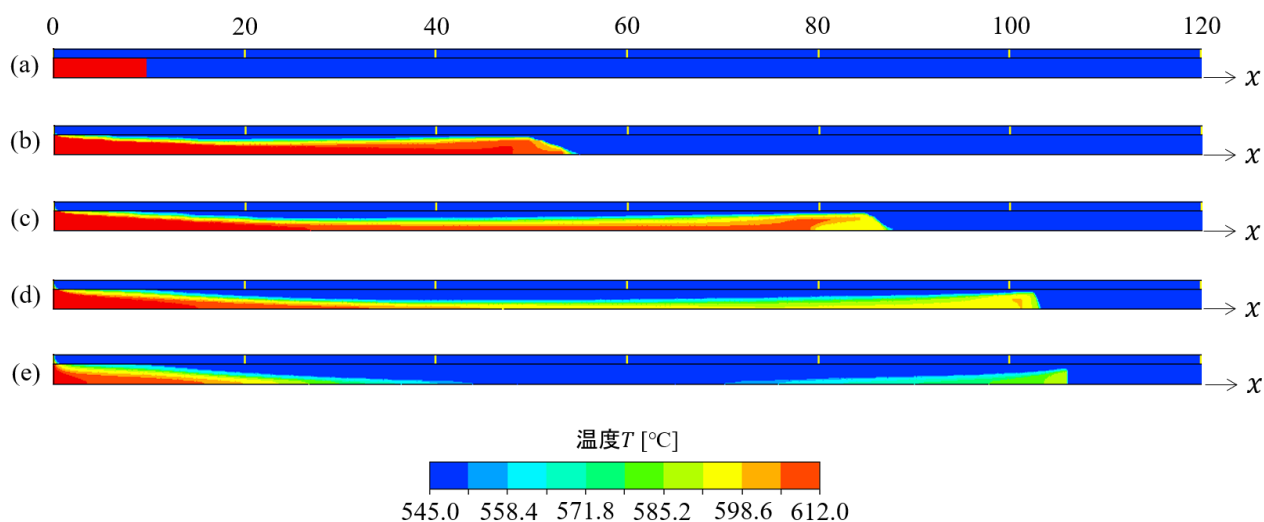


図9 温度分布の時間変化

(a) $t = 0$ ms, (b) $t = 25$ ms, (c) $t = 50$ ms, (d) $t = 75$ ms, (e) $t = 100$ ms

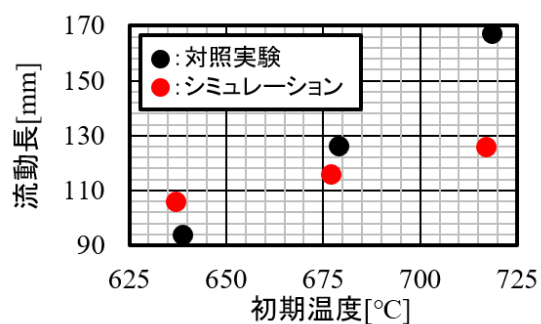


図10 AC4Cの初期温度に対する流動長の違い
(黒点: 実験結果、赤点: 計算結果)

3.2 落下溶滴の凝固シミュレーション

図11に、溶滴初速度を1.7 m/sとしたシミュレーションから得られた、パラフィンワックスの体積分率分布と速度ベクトルの時間変化を示す。図中の黒色領域はパラフィンワックスの体積分率が1の領域を、白色領域は0の領域を示しており、速度ベクトルの色と長さは速さに対応している。溶滴は壁面へ衝突後、半径方向に濡れ拡がり液膜を形成した。まず時刻 $t = 4.0$ msにおいては、半径方向位置 y が大きいほど液膜は薄く傾斜を有するものの、時刻 $t = 8.0$ msにおいては半径方向にほぼ一様な厚さとなった。またパラフィンワックスの内部流動は、時刻 $t = 4.0$ msにおいて半径方向位置 y が大きいほど半径方向速度が大きく、 $t = 12.0$ msにかけて一様に大きく減速された。

この減速の原因を考察するにあたり、液膜端部近傍に着目する。時刻 $t = 4.0$ msにおいて、液膜端部は薄く鋭利であるものの、時間の経過とともに急激に鈍化し、膜厚が増大していることがわかる。これは、液膜流で観察されるリム状の構造であり、その形成は表面張力の作用に起因する¹²⁾。半径方向に凸を持つ液膜端部では、表面張力が半径方向と逆向きに作用して液膜端部の流れを減速させるが、液膜は原点近傍まで連続しているため、質量保存の条件から結果的に液膜流全体が減速したものと考えられる。減速の先で $t = 12.0$ ms以降は、液膜端部で中心軸側に逆流する様子が観察され、この時点では液膜流動において、慣性や粘性力に比べて表面張力が卓越していると考えられる。

一方で本研究では、シミュレーションに凝固流れモデルを導入し、固化により流動を減速(停止)させる取り扱いを施しているため、液膜内部流動の減速は凝固に起因する可能性も考えられる。減速の主因を調べるため、図12に同条件における $t = 16.0$ msの温度分布を示す。図中の黒線はパラフィンワックスの体積分率0.5の等高線であり、気液界面を表す。図12より $t = 16.0$ msにおいてもパラフィンワックスは全体で液相線温度(50 °C)を上

回っていることがわかる。本計算で凝固流れモデルとして使用したエンタルピー・空隙率法では、液体分率 β が1を下回ることによって流体を減速させる体積力が発生するが、 $t = 16.0$ msにおいて凝固はまだ開始しておらず、内部流動減速の原因とは言えない。したがって、液膜の拡がりを減速させる主因は、端部の凸形状に発生する表面張力であると考えられる。

次に、パラフィンワックス溶滴の凝固形状を図13に示す。図13(a)は、ノズル-アルミブロック間距離を200 mmとした実験結果の一例で、観察された3次元の形状データから上面図に示す l 軸上の断面プロファイルを抜き出したものである。一方で図13(b)は溶滴初速度を1.7 m/sとした場合のシミュレーション結果で、時刻 $t = 520$ msにおけるパラフィンワックスの体積分率分布を示している。なお計算は軸対称を仮定したため、対称軸 $y = 0$ にて折り返して表示した。両者を比較すると、半径方向の拡がりにはほぼ一致している。一方で断面プロファイルは、対照実験では軸近傍で厚く半径方向に薄くなるのに対して、シミュレーション結果は最も厚い位置が $y = 3.0 \sim 5.0$ mmに存在し、その分布に違いが見られた。この原因の追究と差異の改善については今後の課題である。

また図14に、溶滴の衝突速度に対する凝固後直径の違いを示す。実験結果は、衝突速度が小さい順に、ノズル先端とアルミブロック間距離が50 mm、100 mm、150 mm、200 mmの場合に対応しており、プロットされた結果はそれぞれ4回ずつの試行結果を平均したものである。ノズル-ブロック間距離50 mmの実験結果と衝突速度1.0 m/sの計算結果には差があるものの、シミュレーション結果の直径はおおむね実験結果に一致しており、衝突速度の増加に対して凝固後の直径が大きくなる傾向も捉えることができた。以上より、本シミュレーションでは半径方向の広がりについて実験結果との一致を示しており、シミュレーションの結果得られた内部流動の観察により、その挙動を考察することができた。

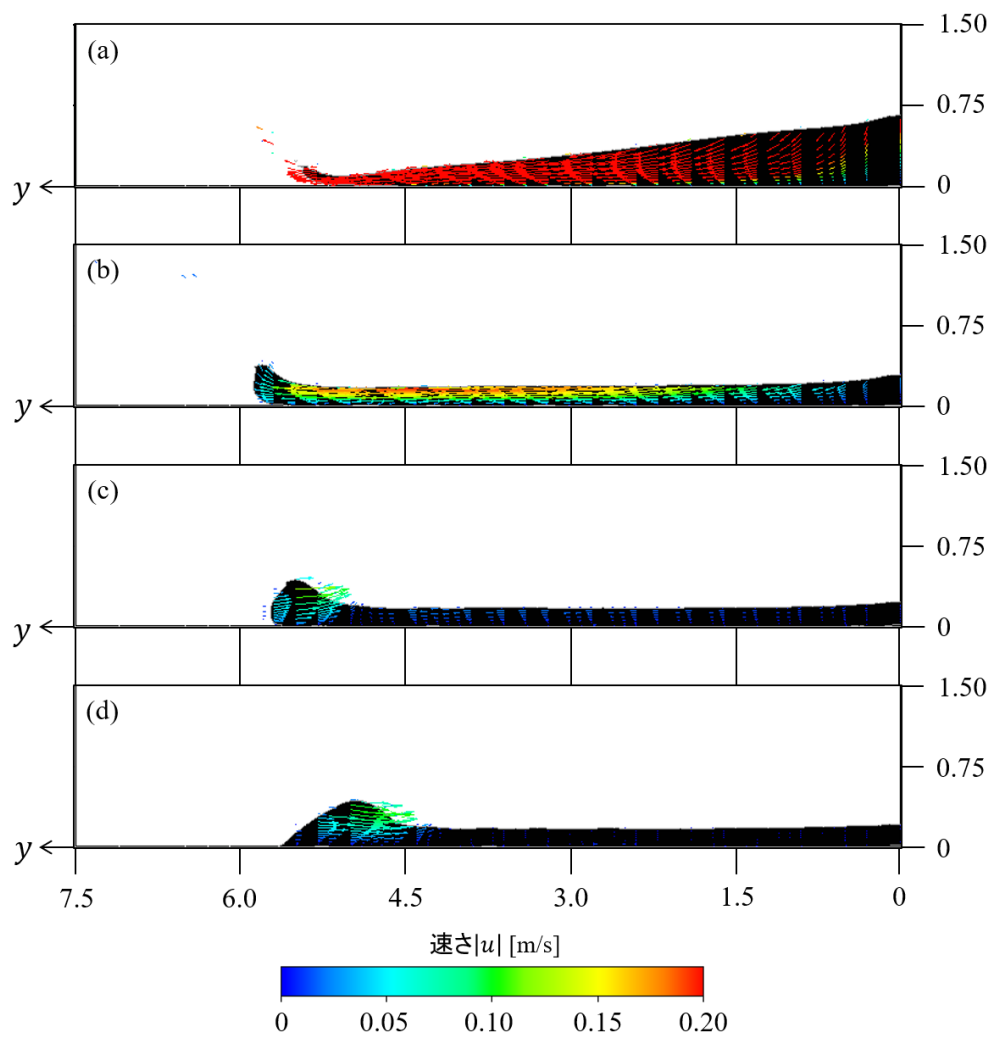


図11 パラフィンワックスの体積分率分布(黒色領域)と速度ベクトルの時間変化(溶滴衝突速度1.7 m/s)
(a) $t = 4.0$ ms, (b) $t = 8.0$ ms, (c) $t = 12.0$ ms, (d) $t = 16.0$ ms

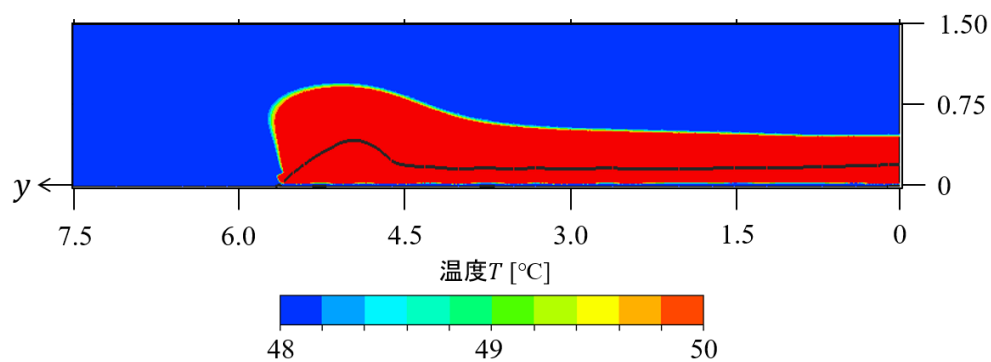


図12 $t = 16.0$ msにおける温度分布(溶滴衝突速度1.7 m/s)

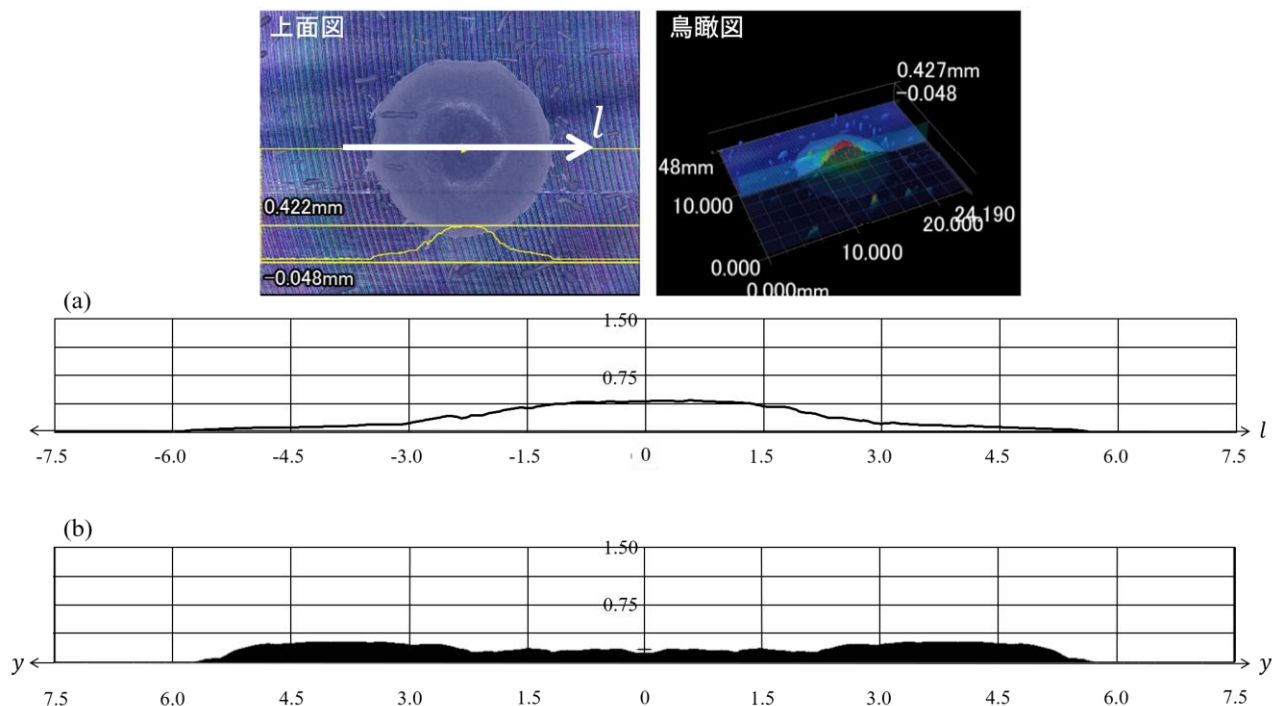


図13 パラフィンワックス凝固形状の比較(溶滴衝突速度1.7 m/s)

(a) 対照実験, (b) シミュレーション

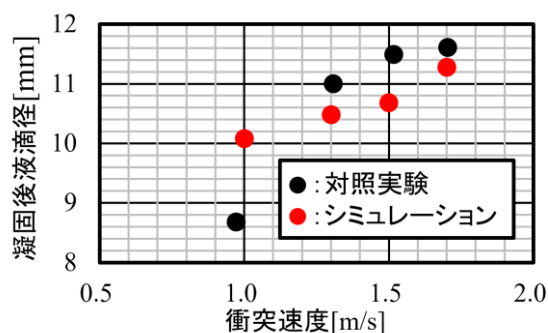


図14 パラフィンワックス溶滴衝突速度に対する凝固後直径の違い

4 結言

本研究では、凝固や乾燥によって固化が生じる流れについて、汎用の流体シミュレータを用いて簡易的な取り扱いを可能とするために、熔融金属の流動性評価試験と、落下するパラフィンワックス溶滴の凝固を対象としたシミュレーションを実施した。

まず熔融金属の流動性評価試験のシミュレーションでは、表面張力係数と粘性係数、熔融AC4Cの初期位置を変えて、適切な計算条件を探った。その結果、実験で確認された半径方向に一樣で軸方向に延びた円

筒形状の凝固AC4Cを得るためには、表面張力の効果を考慮し、初期状態として型内部に一部熔融AC4Cが入り込んだ状態を仮定することが重要であることがわかった。また、熔融AC4Cの流れ場と温度場の時系列を追うことで、熔融AC4Cが初期に低温の壁面によって冷却されて凝固に至り、全体の流動が停止した状態においても先端部は流動性を有することがわかった。最後に、初期温度の上昇に伴って流動長が増加するという観点で、計算結果は流動性評価試験の実験結果と定性的な一致を確認することができた。

次に落下するパラフィンワックス溶滴の凝固シミュレ

ーションでは、溶滴が壁面に衝突することで液膜が形成され、液膜厚さが均一となりつつ液膜流が一様に減速された。その減速の要因を調査したところ、液膜端部において半径方向逆向きにはたらく表面張力によって端部が減速し、結果的に連続した液膜全体の流れも減速したと考えられた。なお、この時点で液膜流は液相線温度には達しておらず、凝固により減速が生じてはいなかった。また凝固後形状を対照実験と比較したところ、軸方向の厚み分布には差異があるものの、半径方向の拡がりについては、そのスケールや衝突速度に対する傾向の一致を確認することができた。

以上より本研究では、凝固によって固化が生じる流れについて、汎用の流体シミュレータにより、実験と定性的な一致を示すシミュレーションを実施することができた。チャレンジ課題としていた乾燥現象については課題として残されたものの、本研究で得られた知見を活かし、次年度以降に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 「みやぎ発展税」の活用について
<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/fukensui/hatenzei.html> (参照 2024-6-6)
- 2) 吉川穰ほか.多相流シミュレーション技術の高度化研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2023, p. 9-15.
- 3) 内海宏和ほか.アルミニウム合金の流動性評価に関する研究. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2015, p. 24-26.
- 4) Ansys, Inc.. "Ansys Fluent 理論ガイド", 2022, p. 683-685.
- 5) 財団法人 素形材センター. "軽合金鋳物ダイカストの生産技術 改訂版", 2011, p. 47.
- 6) 表面張力とは
<https://www.contact-angle.jp/contact-angle/surface-tension> (参照 2025-5-23)
- 7) 【初級編】溶湯の流れ方|鋳造の基礎知識
<https://yoshidacast.com/>【初級編】溶湯の流れ方|鋳造の基礎知識/ (参照 2025-5-23)
- 8) 物理的特性とメイン分類のパラフィン
<https://ja.khonorwax.com/physical-properties-and-main-classification-of-paraffin.html> (参照 2026-5-11)
- 9) WIKITECH エンジニアリング・化学技術情報
<https://wikitech.info/1165> (参照 2026-5-11)
- 10) Christopher Chi Wai Tse et al., Utilising inkjet printed paraffin wax for cell patterning applications, International Journal of Bioprinting, 2016, 2(1), p. 35-44.
- 11) Nurulazirah MdSalih et al., Surface Tension Analysis of Cost-Effective Paraffin Wax and Water Flow Simulation for Microfluidic Device, Advanced Materials Research, 2014, 832, p. 773-777.
- 12) Nasser Ashgriz, Handbook of Atomization and Sprays, Springer, 2011, 935p.