

大同大学大学院
修士論文

論文題目 湯流れと凝固に起因する鑄造欠陥の推定手法

指導教員 前田 安郭 教授

提出年月日 2020年 1月 24日

専攻 工学研究科 機械工学専攻

学籍番号 MM1816

氏名 新井田 篤

修士論文要旨		提出 年月日	2020年1月24日
論文 題目	湯流れと凝固に起因する鋳造欠陥の推定手法		
提出者	新井田 篤	指導 教員	前田 安郭

【背景と目的】

鋳造において発生する各種の欠陥を製品開発の初期段階で予測することのできるツールである鋳造 CAE だが、欠陥予測精度の問題から満足いく仕様になっているとはいえない。本研究では湯流れと凝固に起因する鋳造欠陥に対する欠陥予測精度向上のための知見を得ることや現状のソフトウェアに必要な機能等を提案することを目的として以下の様々な取り組みを行った。

【湯流れに起因する欠陥に対する取り組み】

水モデルダイカスト実験装置を用いてダイカスト湯流れとともに移動する気泡の挙動を直接観察するとともに、鋳造 CAE ソフト TopCAST の介在物の追跡を目的とする既存のマーカ機能を用いて気泡挙動のシミュレートを試みた。その結果、実験値を精度良く推定することができず、気泡の運動を支配している要因の解明および解析可能な解析手法の考案が必要であった。

気泡運動における支配要因の究明のため回流水槽を用いた気泡追跡実験を行った。x、y 方向における気泡速度の測定をしたところ、流れ方向への気泡速度は上昇するが流速と気泡速度は等しくなるわけではなく、また y 方向の流速には浮力が作用する条件と作用しない条件があることが明らかになった。

気泡の運動を精度良く予測できるモデルの構築を目的とした数値解析を行った。抗力係数に関して流体と気泡の界面における汚れ度を考慮できる富山らの構成方程式を用いた場合、回流水槽を用いた本実験における気泡の挙動を精度よく再現することができなかった。そこで相対速度の上昇に伴って指数関数的に増加する抗力係数および減少する仮想質量係数を用いてダイカスト湯流れにおける気泡追跡を再度試みたところ比較的良好に気泡の挙動を推定することができた。

【凝固に起因する欠陥に対する取り組み】

ある鋳物に発生する欠陥に対して、鋳造 CAE による欠陥予測と、鋳造 CAE による欠陥対策を実施した。鋳造 CAE による欠陥予測では、実験データを活用した比較的精度の良い予測手法を示すことができた。また鋳造 CAE による欠陥対策では、候補の対策に対してシミュレーションを実施し良否を判断するとともに、実鋳造における制約条件の中での対策を実施することができた。一連の工程、本研究で示した作業チャートは、鋳造 CAE 従事者が日々取り組まなければならない内容の一助になると考えられる。

目次

第1章	緒言	
1-1	背景	01
1-2	目的	02
第2章	ダイカスト湯流れにおける気泡追跡	03
2-1	はじめに	03
2-2	実験装置と実験手順	03
2-3	キャビティ内流速と気泡速度との関係	06
2-4	マーカー機能を用いた気泡追跡シミュレーション	10
2-4-1	はじめに	10
2-4-2	解析モデルと解析条件	10
2-4-3	計算結果および実験値との比較	13
2-5	まとめ	17
第3章	回流水槽を用いた気泡移動に関する基礎調査実験	18
3-1	はじめに	18
3-2	実験装置	18
3-3	実験条件と実験手順	19
3-4	各流速における気泡移動経路と気泡速度	21
3-5	まとめ	27
第4章	気体粒子の挙動に関する数値シミュレーション	28
4-1	はじめに	28
4-2	単一気泡に働く力と気泡の運動方程式	28
4-3	微分方程式の数値解法	30
4-4	気泡の移動に関する数値解析	33
4-5	ダイカスト湯流れにおける気泡追跡への適用	43
4-6	まとめ	46
第5章	鋳造 CAE を用いた欠陥発生の原因究明と対策方法	47
5-1	はじめに	47
5-2	欠陥発生原因の究明	47
5-2-1	対象とする鋳造および鋳物形状	47
5-2-2	温度測定実験結果を用いた溶湯パラメータおよび鋳造条件の確認	50
5-2-3	湯流れ・伝熱凝固シミュレーション	57
5-3	鋳造 CAE を用いた欠陥対策	67
5-4	まとめ	79
第6章	結言	80
	参考文献	
	謝辞	

研究発表業績
付録

第1章 緒言

1-1 背景

鋳造 CAE(Computer Aided Engineering)¹⁾は、鋳造の分野におけるコンピュータを使ったシミュレーション、あるいはシミュレーションシステムを指し、その種類は多岐にわたる。実際にもものを作る前の設計段階において、コンピュータ上に様々な観点から試作品を繰り返し作ることで、製品に要求される仕様や品質を設計開発の初期段階から作りこむことのできるツールである。

従来、CAE は発生したトラブルに対して、現象や原因を確認するツールとして製品開発の後工程で利用されることが多かった。しかし、近年のコンピュータの計算能力の飛躍的な発展とともに CAE の能力と解析精度が向上したことによって仮想空間内における高精度な試作や設計後の様々な検証といった鋳造の前工程にて活用される²⁾ようになっている。鋳造 CAE において、数ある機能の中でも湯流れ、凝固のシミュレーションはその中枢をなすもので、ベンダー各社から専用のソフトウェアが販売されており、適切に使用さえすればある程度有用に活用できる状況になっている。しかしながら、現状では解析精度および欠陥予測精度と計算時間の問題からユーザーが満足するような仕様になっているとは言い難い側面がある³⁾。また、鋳造 CAE ソフトを使用し、鋳造方案設計および鋳造条件設定に役立てるには基本となる鋳造および CAE の知識や設計者の経験と勘に頼らざるを得ないことがあるという問題もある。

さて、数ある鋳造欠陥の中でも湯流れに起因する欠陥のひとつに空気や酸化膜の巻き込みがある。この欠陥は鋳型を溶湯が充填していく過程において、湯の流れに乱れが生じることによって発生する。溶湯に巻き込まれた空気やガスが溶湯内に滞留した状態で凝固すると、鋳物内に空孔が残留してガス欠陥となる。またポロシティといわれる熔融金属から生成されるガス欠陥もある⁴⁾。この巻き込み欠陥およびガス欠陥をシミュレーションで精度良く予測するためには、空気の巻き込みやガスの発生といった欠陥の発生メカニズムの解明が重要であるとともに、巻き込まれた空気や発生したガスがどのような軌跡で移動し、最終的にどこにたどり着くのか軌跡を正確に予測することが必要である。液体中を移動する気体粒子および固体粒子に働く力のモデル化についてはいくつかの研究がある。例えば、富山ら⁵⁾は無限静止液中を終端速度で運動する単一気泡・単一個体粒子に働く抗力に着目し、気液界面の汚れの影響を考慮した抗力係数の提案を行っており、Clift ら⁶⁾は高レイノルズ数にまで適用できる抗力係数に関する予測精度の高いモデルを提案している。また、Kamp ら⁷⁾は壁面摩擦損失にともなう圧力勾配が壁面近傍に存在する粒子に影響をおよぼし、気液間の相対速度を引き起こす要因であるとしている。しかし、これらの研究の多くは静止液体中の気泡および固体粒子の移動現象を対象としている。鋳造現場では重力鋳造や低圧鋳造などの比較的遅い流れ場から、高速ダイカストのような高速流れ場まで、色々な鋳造法が採用されていることから、鋳造分野で対象となる非定常で幅広い流動場に対応できる気体粒子に働く力に関する適切なモデルが必要である。

また、湯流れに起因する欠陥以外にも鋳造では様々な欠陥が発生し⁸⁾、代表的なものにひけ巣欠陥がある。熔融金属は、温度の低下とともに液体収縮を起こし、冷却が進んで凝固が始まると凝固収縮が起きる。液相および凝固収縮分だけ体積は減少することになるため、凝固過程において凝固収縮する体積を近くに位置する液体から補給できないと空間が生じることになる。これがひけ巣である。従って、ひけ巣欠陥の抑制には、凝固の順序を適切に実施する補給を切らさない凝固、すなわち指向性凝固が必要⁹⁾といわれている、指向性凝固を実現するためにはひけ巣を精度よく予測し、そのひけ巣生成に関与する因子（パラメータ）を明確化する必要がある。

1.2 目的

前述したように、鋳造 CAE における湯流れ、伝熱凝固シミュレーションはほぼ実用化されてきているが、今もなお欠陥発生予測の精度向上が図られている。精度の良い湯流れ・伝熱凝固シミュレーションおよび欠陥予測を実施するためには、実現象との照合および検証が必要である。そこで本研究では、

まずアルミニウム合金ダイカストで注目されている空気巻き込み欠陥に着目した研究を行う。水モデルダイカスト装置を用いた気泡追跡実験を行い、ダイカストのような高速の流れ場における気泡上昇挙動を直接観察するとともに、鋳造 CAE ソフト TopCAST の流れマーカー機能を用いてダイカスト湯流れにおける気泡上昇挙動のシミュレートを試みる。さらに、小型の回流水槽を用いて流体中に存在する粒子の直接観察を行い、粒子にどのような力が働いているかを考察する。以上によりダイカストの射出工程において巻き込まれた空気や中子から発生するガスといった気体粒子がどのような要因によって移動していくのか調査する。実験と気体粒子の移動に関する数値解析結果を比較検証し、気体粒子に働く各種の力のモデル化と気体粒子の運動を適確に記述できる支配方程式の立式を目的とする。

次に、現場からの凝固時におけるひけ巣欠陥の発生が推定される鋳物に対して鋳造 CAE の湯流れ・伝熱凝固シミュレーションを駆使して欠陥の発生原因を究明する手段、またその改善・対策方法について検討する。

上記 2 つの欠陥に対する取り組みから、鋳造 CAE による解析精度向上のための知見を得ること、および現状の鋳造 CAE ソフトウェアに必要な機能等を提案することを目的とした。

第2章 ダイカスト湯流れにおける気泡追跡

2-1 はじめに

数ある鑄造法の中でもダイカストプロセスは溶湯を高速・高圧で金型へと押し込む手法であるため生産性に富んでいて、現在のアルミニウム合金鑄物の主な製造プロセスとなっている。一方で、高速・高圧で金型へと押し込む手法であるため、鑄込み時の空気巻き込みに起因する鑄巣欠陥が生じやすい欠点がある。

本研究ではコールドチャンバー式ダイカストを模擬した水モデル装置を用いて湯流れとともに移動する気泡の挙動を直接観察する。得られた映像から気泡の動きを追跡し気泡の移動経路および気泡速度についての検証を行うとともに鑄造 CAE ソフトのマーカー機能を用いてキャビティ内を流れる気泡挙動のシミュレーションを試みる。

2-2 実験装置と実験手順

本研究で使用している水モデル実験装置の外観を Fig.2-1 に示し、装置の寸法を Fig.2-2 に示す。実験装置のスリーブおよび鑄型部分はアクリル製となっており、鑄型内の充填挙動およびスリーブ内の流動挙動を直接観察できる仕様である。鑄型は固定鑄型と可動鑄型に分かれ、固定鑄型にはキャビティに凸形状を付与できるような入子が上下 2 つ取り付け可能となっているが本実験では凸形状を付与しないタイプの入子を上下ともに取り付けている。ゲート部分はスリーブとキャビティが直結した形状となっているがバスケット部に溜まり部があることで流れの方向転換に伴う空気巻き込みを低減させる仕組みとなっている。プランジャーの移動については正確に位置制御するためにサーボモニター機構を採用し、PC により射出をコントロールしている。

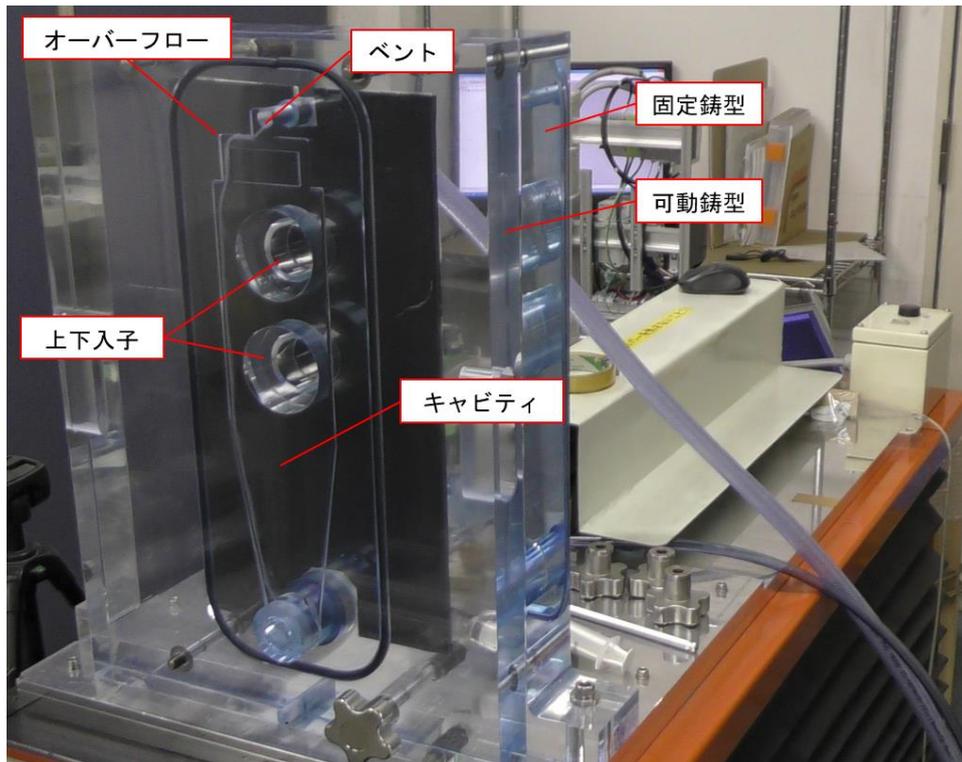


Fig.2-1 水モデル実験装置の外観（可動鋳型側）

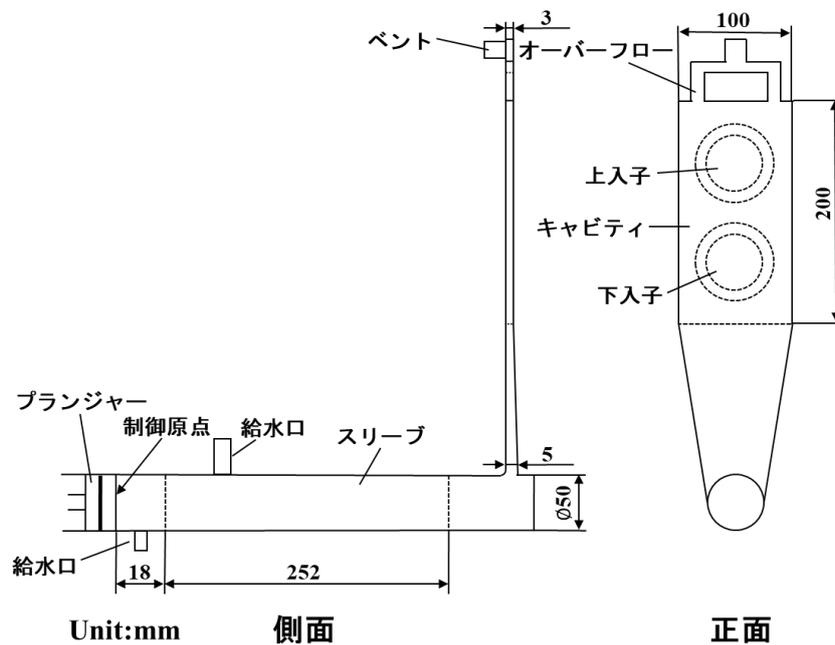


Fig.2-2 水モデル実験装置の寸法

Fig.2-3 は鋳型部分を固定型側（左側）可動型側（右側）から写したものである。本研究では流動する液体の中の空気を追跡するため、射出途中で人為的に空気巻き込みを生成させる。キャビティ流入口に内径 1mm、外径 2mm のシリコンチューブを固定し、ここから空気を介入させる。チューブによるキャビティ内の流れへの影響を極力少なくするためにチュ

ーブをキャビティの側面に沿うようにして固定し、ベントからキャビティ外部へ通している。その後チューブをベントに接続されている水排出用ホースの中を通し、チューブ先端に空気注入用の注射器を取り付けた。

実験はまず初めに 300cm^3 の蒸留水をスリーブに注ぎ、スリーブ内における空気巻き込みを無くすためにキャビティをスリーブ上部より 100mm の地点まで充填させた状態を実験ごとに作りだした。そこからプランジャーの移動を開始するタイミングで注射器から一定の大きさの気泡を発生させ、キャビティ内の流れとともに移動していく気泡の様子を 60fps のビデオカメラ (Panasonic 製 HC-VX980M) にて撮影した。透明なアクリルに対して透明な水では水および気泡の挙動が見づらいことが懸念されたため着色水を用いた予備実験を行った。着色することで湯流れは見やすくなる一方、気泡の動きは捕捉しにくいことが判明した。ゆえに着色なしの蒸留水を使用することとし、固定型側に黒いプラ板を設置したうえで撮影を行った。実験はプランジャー移動速度 $V_{plunger}[\text{m/s}]$ を 0.1 、 0.2 、 $0.3[\text{m/s}]$ の 3 つに変更した条件で行った。実験条件を Table2-1 に示す。

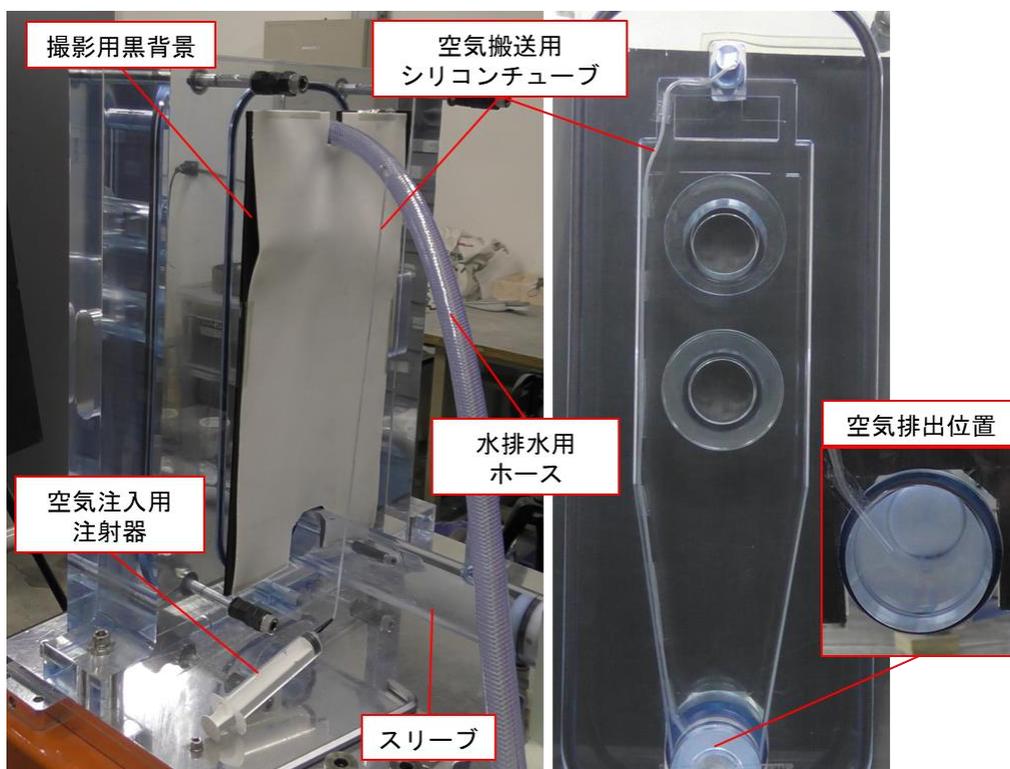


Fig.2-3 水モデル実験装置の外観（固定型側）と気泡発生機構の外観

Table2-1 実験条件

	0.1
プランジャー移動速度[m/s]	0.2
	0.3
水量[cm^3]	300
スリーブ充填率[%]	100

2-3 キャビティ内流速と気泡速度との関係

Fig.2-4 はプランジャー移動速度 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ 、気泡直径 $d_b=0.004\text{m}$ の条件における実験の撮影によって得られたキャビティ内の湯流れ挙動および気泡の上昇挙動の映像を $1/60\text{s}$ ずつのコマ画像にし、取得した各画像を時間経過ごとに左から並べたものである。測定する気泡が発生した瞬間を時刻 0s とし、各時刻における気泡の位置を赤色の円でプロットしていくことで気泡の追跡を行った。加えてキャビティ内の流速を把握するために湯先がキャビティ上部に到達するまでの平均上昇速度 $V_{ff} [\text{m/s}]$ (Velocity of Flow Front) を測定した。なお、液面上昇時に液面付近に存在する気泡は湯流れの影響で非常に乱れているため液面の影響を受けない程度に離れた気泡を測定対象とし、測定間隔 $1/60\text{s}$ におけるそれぞれの値の時間変化率を各実験で算出した。Table2-2 にプランジャーの移動速度に対する湯先の平均上昇速度を示す。プランジャーの移動速度は $0.1, 0.2, 0.3[\text{m/s}]$ の3条件とし、気泡の大きさについては注射器による手動制御であることから非常に困難であるため繰り返し実験を行うことでN数の確保を行った。

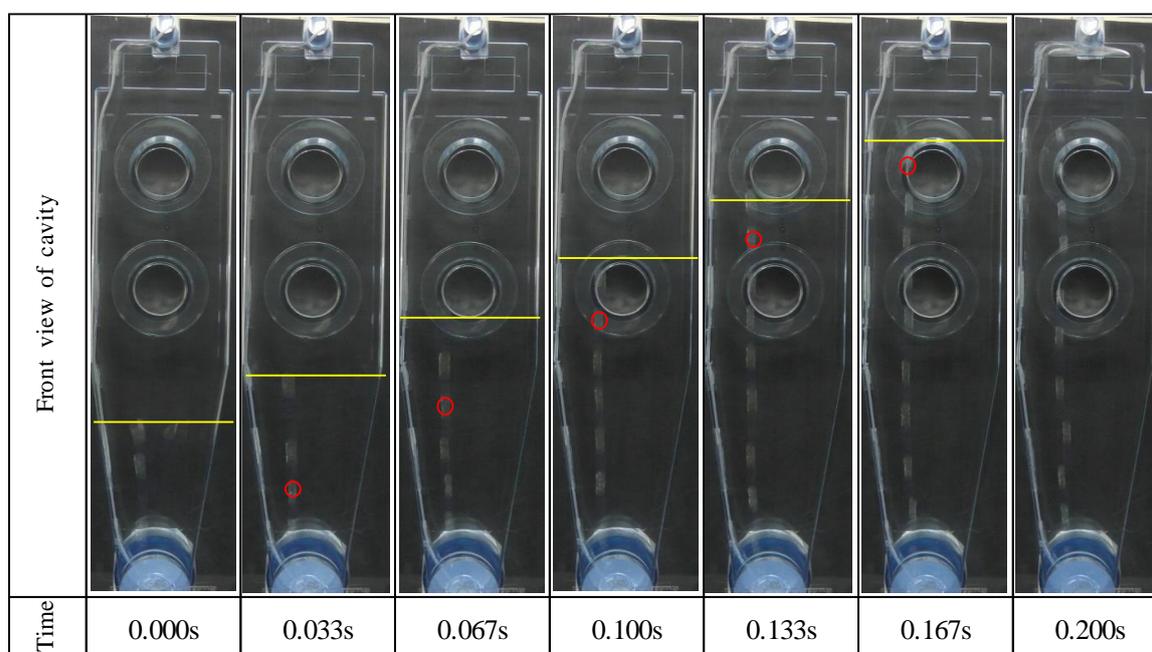


Fig.2-4 キャビティ充填挙動および気泡上昇挙動と湯先および気泡の座標測定イメージ

Table2-2 プランジャー移動速度に対する湯先の平均上昇速度

	N1	N2	N3	average
$V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ における $V_{ff}[\text{m/s}]$	0.63	0.73	0.66	0.67
$V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ における $V_{ff}[\text{m/s}]$	1.39	1.39	1.25	1.34
$V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ における $V_{ff}[\text{m/s}]$	1.74	1.73	1.97	1.82

Fig.2-5~Fig.2-7 に $V_{plunger}=0.1, 0.2, 0.3\text{m/s}$ における気泡速度の時間変化および湯先の平均上昇速度を示し、気泡速度の算出に使用した全ての条件におけるキャビティ充填挙動および気泡の上昇挙動は付録に示す。

Fig.2-5~Fig.2-7 を見るとプランジャーの移動速度すなわちキャビティ内の流速が上昇するに伴って気泡の速度も上昇している。いずれの条件においても気泡の速度は充填前半部分では流速よりも若干高い値を示しているのに対し、充填後半においてはどの条件においても流速以下の値を示している。これはキャビティからオーバーフローに流入する際に流入口がキャビティ中心から左右にズレた位置にあり充填後半において流れ方向とともに気泡も左右に移動することから速度が分散するためと考えられる。また湯先および気泡の上昇挙動を示した Fig.2-4 を見ると、湯先と気泡との差が時間経過とともに縮まっているように見える。

Fig.2-8 に平均的な気泡の速度 $V_{Paverage}[\text{m/s}]$ と湯先の平均上昇速度を示す。なお各 $V_{plunger}$ ごとの $V_{Paverage}$ の値は左から N1、N2、N3 のときの値を示している。それぞれの値を比較してみると $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ では繰り返し数 3 回全ての実験で気泡の平均速度が湯先の平均上昇速度を上回っているのに対し、他の条件においては 3 回中 2 回で気泡の平均速度は湯先の平均上昇速度を下回っている。このことから気泡の速度は流速に近い速度ではあるが同じ速度ではなく、他の要因によって流速と異なる速度で移動していると考えていいだろう。

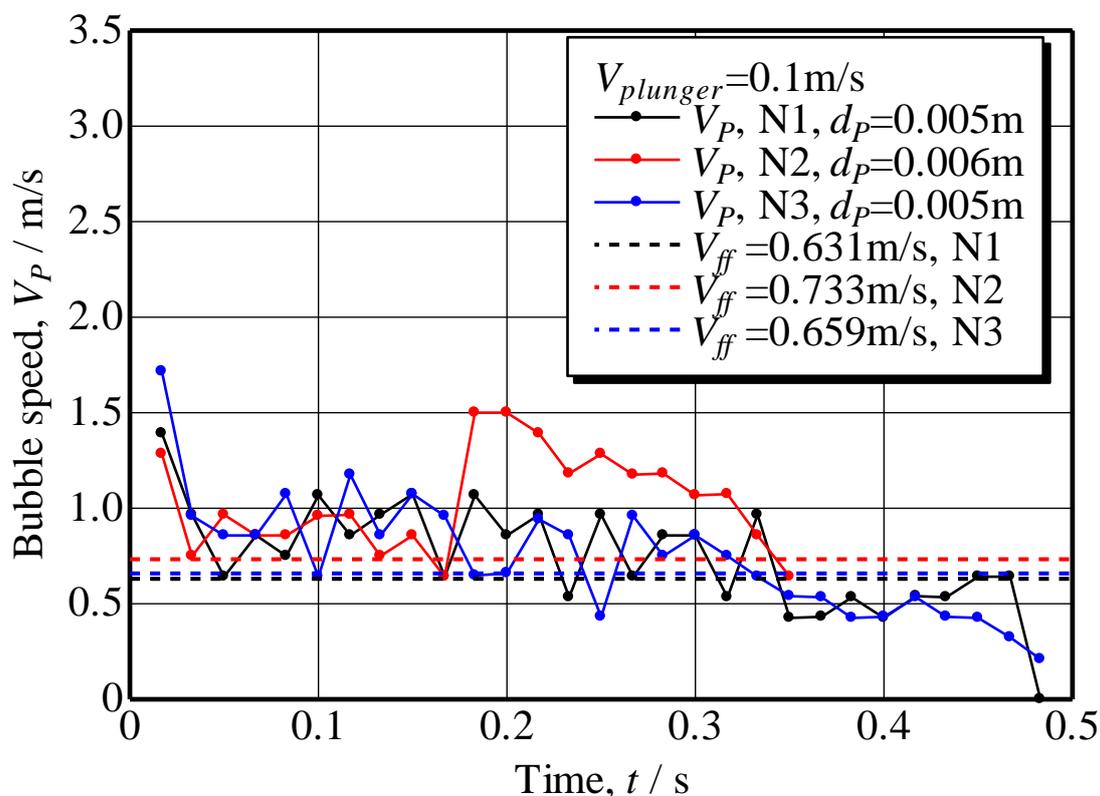


Fig.2-5 プランジャー移動速度 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ における気泡の速度変化

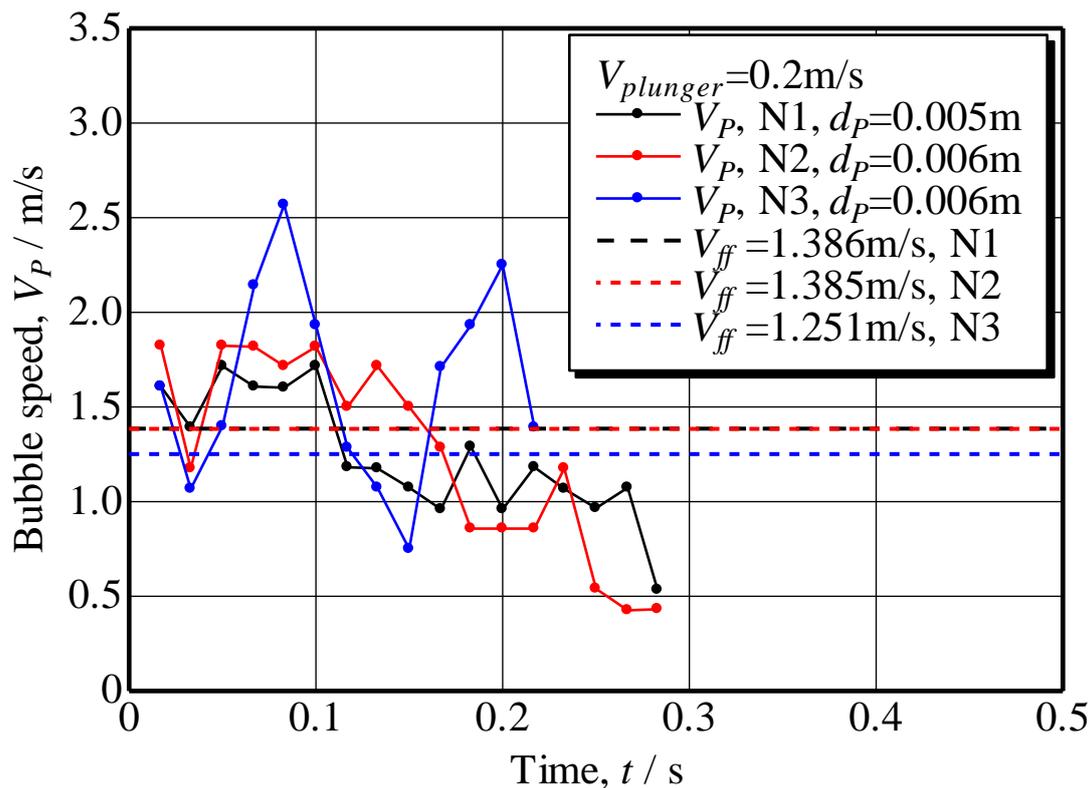


Fig.2-6 プランジャー移動速度 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ における気泡の速度変化

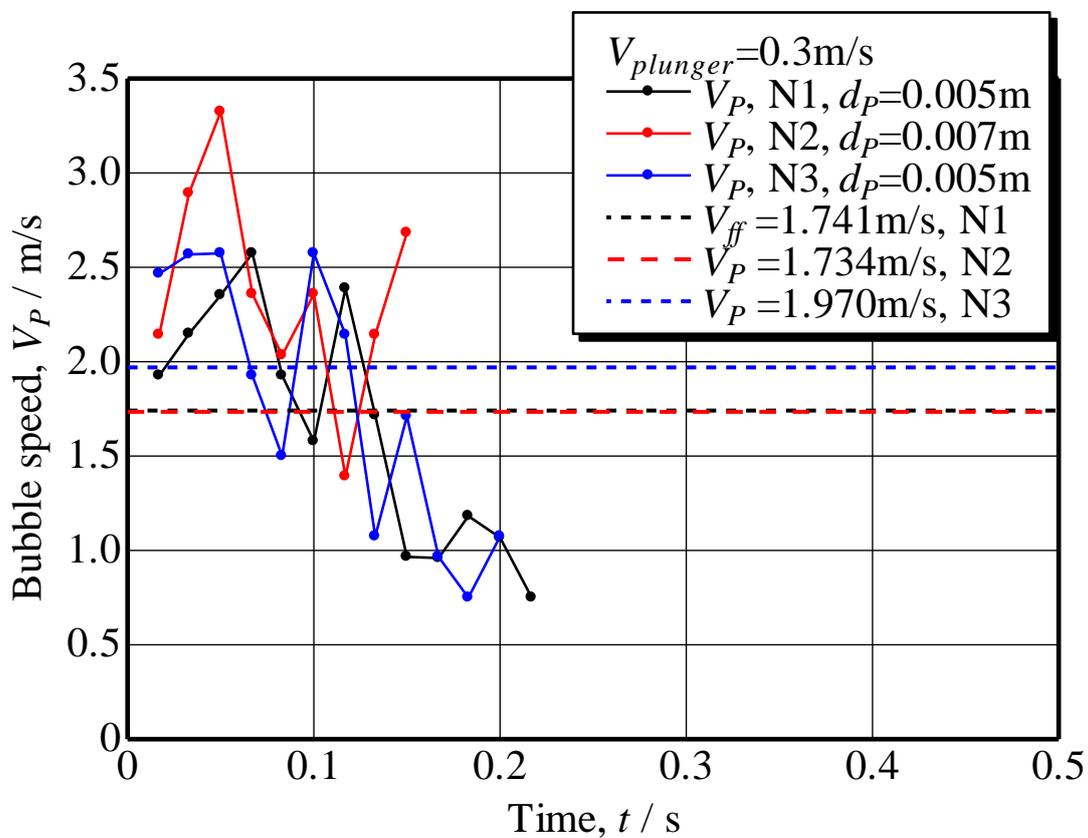


Fig.2-7 プランジャー移動速度 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ における気泡の速度変化

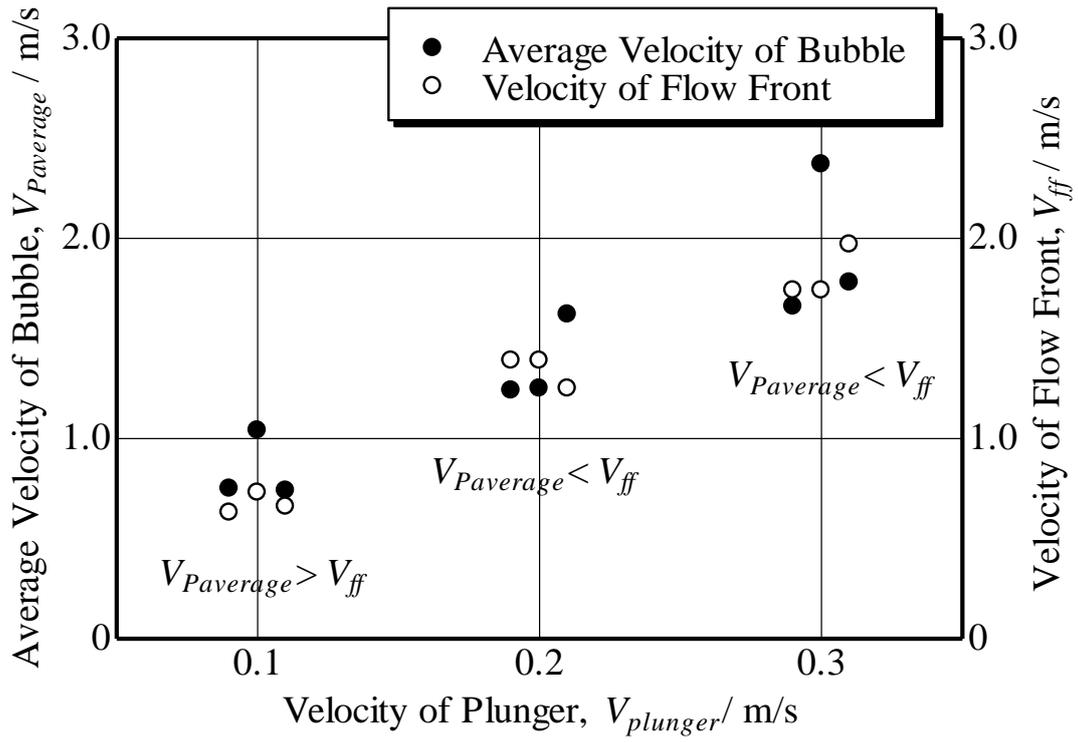


Fig.2-8 気泡平均速度と湯先の平均速度の比較

2-4 マーカー機能を用いた気泡追跡シミュレーション

2-4-1 はじめに

前項で示した実験結果を元に、既存の鋳造 CAE ソフト TopCAST¹⁰⁾のマーカー機能を用いて気泡の追跡シミュレーションを試みた。TopCAST はダイカストを模擬してプランジャーの移動によるスリーブ内の溶湯の流動挙動、引き続きキャビティへ流入する流れを継続して計算することができるが、今回の実験条件に合致させて、マーカー機能で気泡の追跡を行うためキャビティ充填挙動のみを対象とした。

2-4-2 解析モデルと解析条件

本研究で用いた解析モデルを Fig.2-9 に示す。寸法は実験装置のキャビティおよびスリーブ等と同様であるが、実験装置を模擬するためにオーバーフローの端にはホースとバケツを想定した CAD モデル接続した。従って、オーバーフローを満たした後も水の勢いがある場合はそのままバケツまで流動が停止することはない。流入口であるインジェクションは実験における気泡発生高さと同様の位置に配置した。

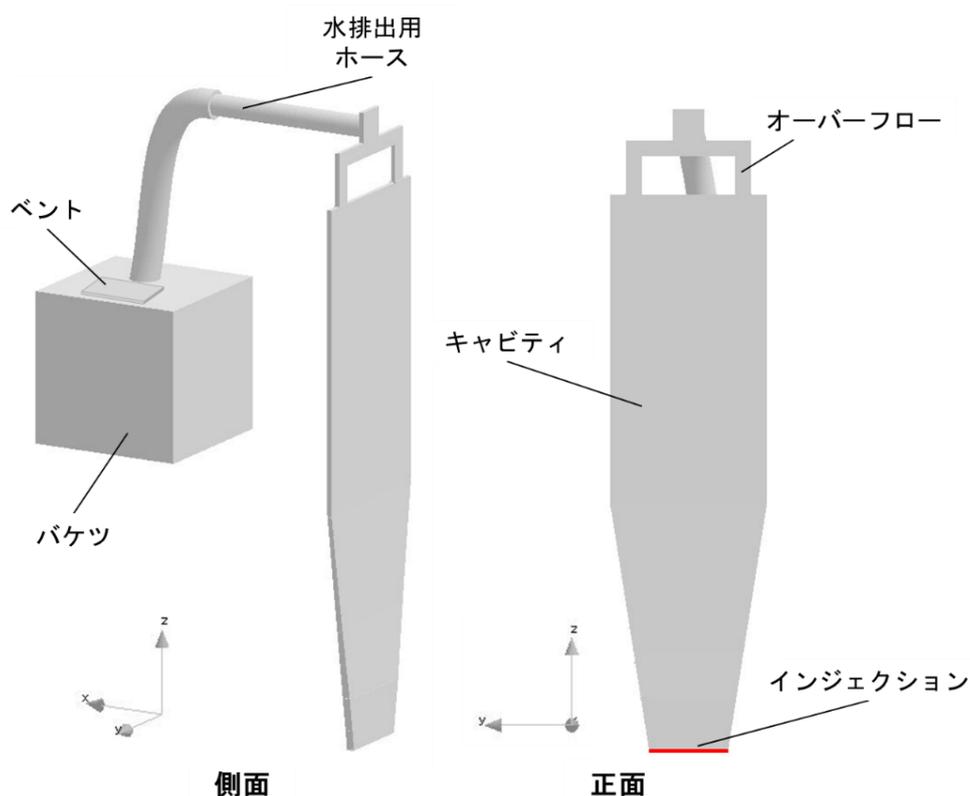


Fig.2-9 解析モデル

次に、解析に使用した計算条件と使用した物性値を Table2-3、Table2-4 に示す。メッシュ作成においては鋳造 CAE ソフト TopCAST のポーラスメディア法を用い、メッシュサイズはキャビティの厚さ方向に 0.5mm、その他の方向には 0.75mm を使用した。ポーラスメディア法における分割数は一般的に精度が良いとされている 12 を使用¹¹⁾し、体積多孔率は 0.01

とした。壁面境界条件にはスリップ条件とノンスリップ条件の間のメニスカス条件を使用し¹²⁾、壁面乱流境界を想定した 1/7 乗則に相当する値を設定した。自由表面解析手法としてはポーラスメディア法に加え、界面形状捕捉が従来の VOF 法よりも優れているとされる MARS 法を適用した。溶湯の流入条件設定は湯先の平均速度が実験と一致するように前項で示した湯先の平均速度と湯先がキャビティ上部に到達する時間および流入断面積から算出した。

マーカーとする粒子の密度および直径を与える必要があるため Table2-5 に示す実験と同様の空気の値を与えた。本章で使用する鋳造 CAE ソフト TopCAST のマーカー機能ではマーカー粒子の運動を重力、浮力、流体抗力を考慮した以下の運動方程式によって表している。¹³⁾

$$M_p \frac{d^2 x_{p,i}}{dt^2} = \frac{1}{2} C_D \rho_f \omega^2 A_i \frac{u_i - \frac{dx_{p,i}}{dt}}{\|\omega\|} + (M_p - \rho_f V_p) g_i \quad (2.1)$$

ここで、 u_i [m/s]は湯流れ解析で得られる溶湯速度の $i(=x,y,z)$ 方向成分、 ρ_f [kg/m³]は溶湯密度、 g_i [m/s²]は i 方向に働く重力加速度である。また、 $x_{p,i}$ [m]は i 方向のマーカー粒子の位置、 M_p [kg]はマーカー粒子の質量、 C_D [-]は抗力係数、 A_i [m²]は i 方向に垂直なマーカー粒子の投影面積、 V_p [m³]はマーカー粒子体積、 ω [m/s]はマーカー粒子と溶湯の相対速度であり、 ω は次式で表される。

$$\omega = \sqrt{\left(u_x - \frac{dx_{p,x}}{dt}\right)^2 + \left(u_y - \frac{dx_{p,y}}{dt}\right)^2 + \left(u_z - \frac{dx_{p,z}}{dt}\right)^2} \quad (2.2)$$

また、抗力係数 C_D は粒子レイノルズ数に応じた次式を使用している。

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (Re_p < 1) \text{ Stokesの式} \quad (2.3)$$

$$C_D = \left(\frac{5}{4}\pi\right) / \sqrt{Re_p} \quad (1 \leq Re_p \leq 500) \text{ Allenの式} \quad (2.4)$$

$$C_D = 0.44 \quad (Re_p \geq 500) \text{ Newtonの式} \quad (2.5)$$

なお、粒子レイノルズ数 Re_p は溶湯の動粘性係数 ν [Pa·s]を用いた次式である。

$$Re_p = \frac{\rho_f \omega d_p}{\mu} = \frac{\omega d_p}{\nu} \quad (2.6)$$

Table2-3 解析条件

鋳造 CAE ソフト	TopCAST ver180831 開発版
解析内容	湯流れ計算
要素サイズ[mm]	(dx 、 dy 、 dz)=(0.75、0.75、0.5)
総要素数、鋳物要素数	117,590,363、3,631,410
ポーラスメディア情報	分割数:12、体積多孔率:0.01
自由表面解析手法	MARS 法
壁面境界条件	メニスカス(0.86)
背圧	考慮なし
溶湯流入速度[cm/s]	82.75、164.67、224.36※
クーラン数	0.3

※左から $V_{plunger} = 0.1$ 、 0.2 、 0.3m/s のときの値

Table2-4 物性値

物質	水	アクリル
密度[kg/m^3]	998.2	1,190
動粘性係数[$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	1,002	-
表面張力 (CSF モデル)	接触角[$^\circ$]	90
	表面張力係数	0.9

Table2-5 マーカー粒子の物性値

物質	空気
密度[kg/m^3]	1.206
直径[mm]	5

2-4-3 計算結果および実験値との比較

Fig.2-10~Fig.2-12 に湯流れ解析によって得られたキャビティ充填挙動およびマーカー粒子の流動挙動を示す。キャビティ内の色はセルの充填率を示しており、充填率 50%以上の領域を赤色で、50%未満の値は非表示である灰色となっている。またソフトの仕様上、キャビティ充填挙動と同時にマーカー粒子の表示ができないため、時間ごとのマーカー粒子の位置を黄色の点でプロットした。マーカー発生時刻から湯先とマーカー粒子の位置を追跡していくと、いずれの条件においても湯先の上昇速度よりもマーカー粒子の上昇速度の方が速いことがおおよそ確認できる。

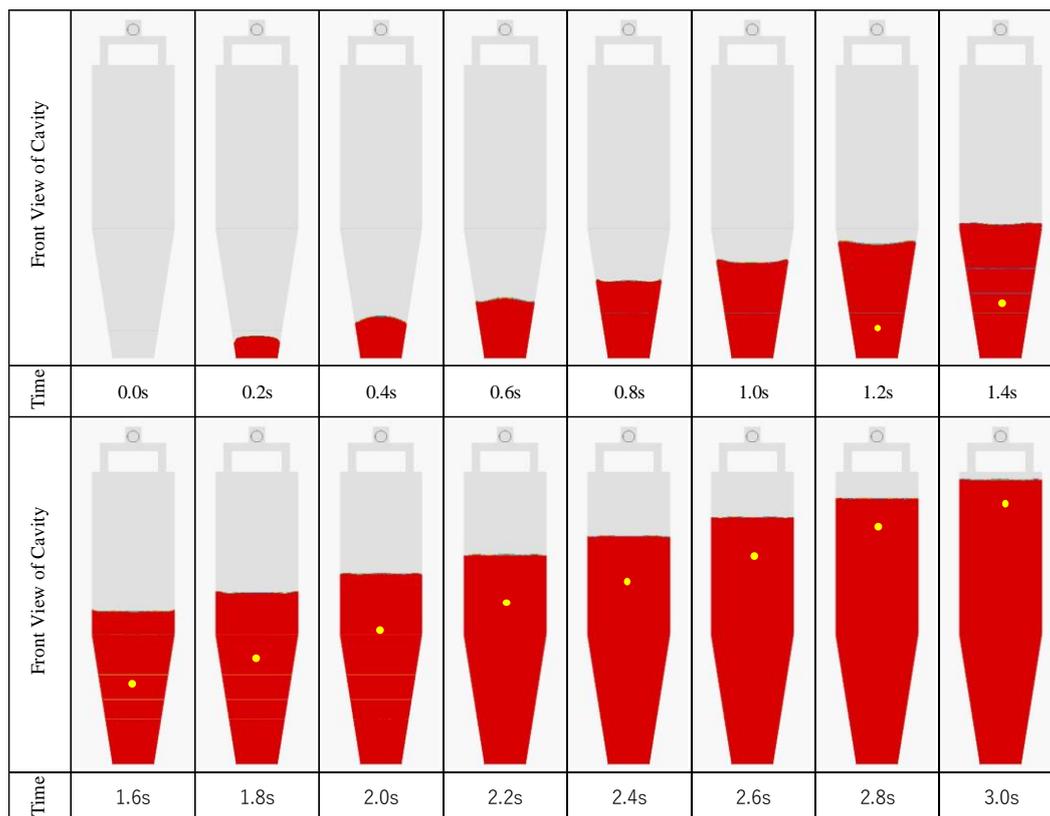


Fig.2-10 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ における湯流れ解析により得られたキャビティ充填挙動およびマーカー粒子上昇挙動

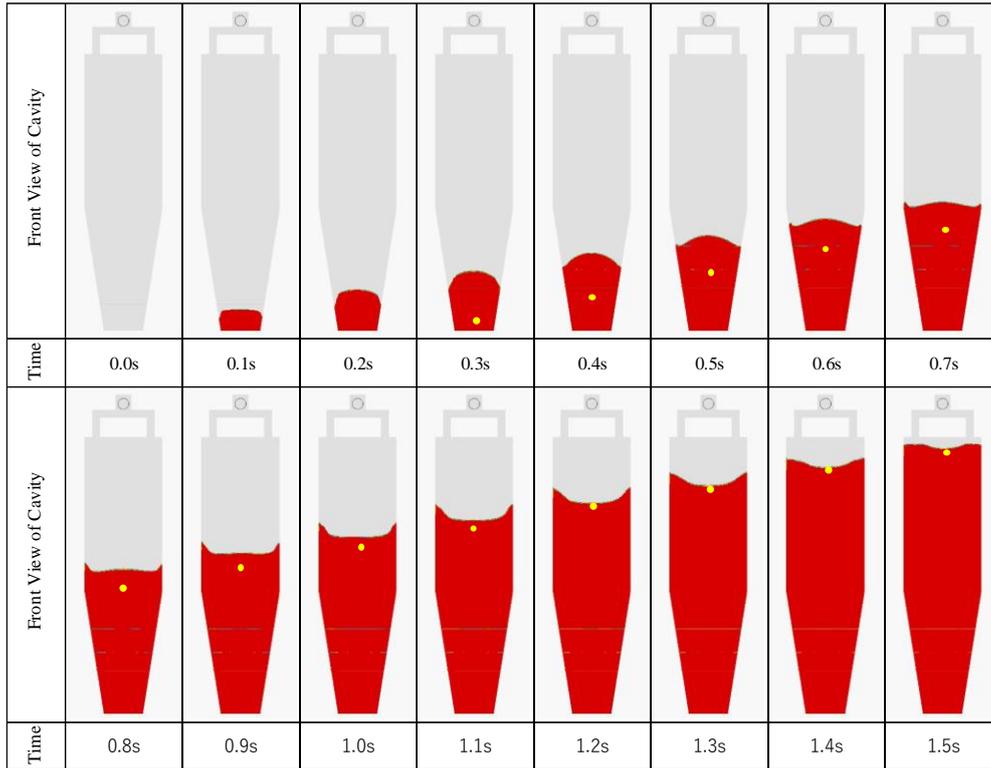


Fig.2-11 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ における湯流れ解析により得られたキャビティ充填挙動およびマーカー粒子上昇挙動

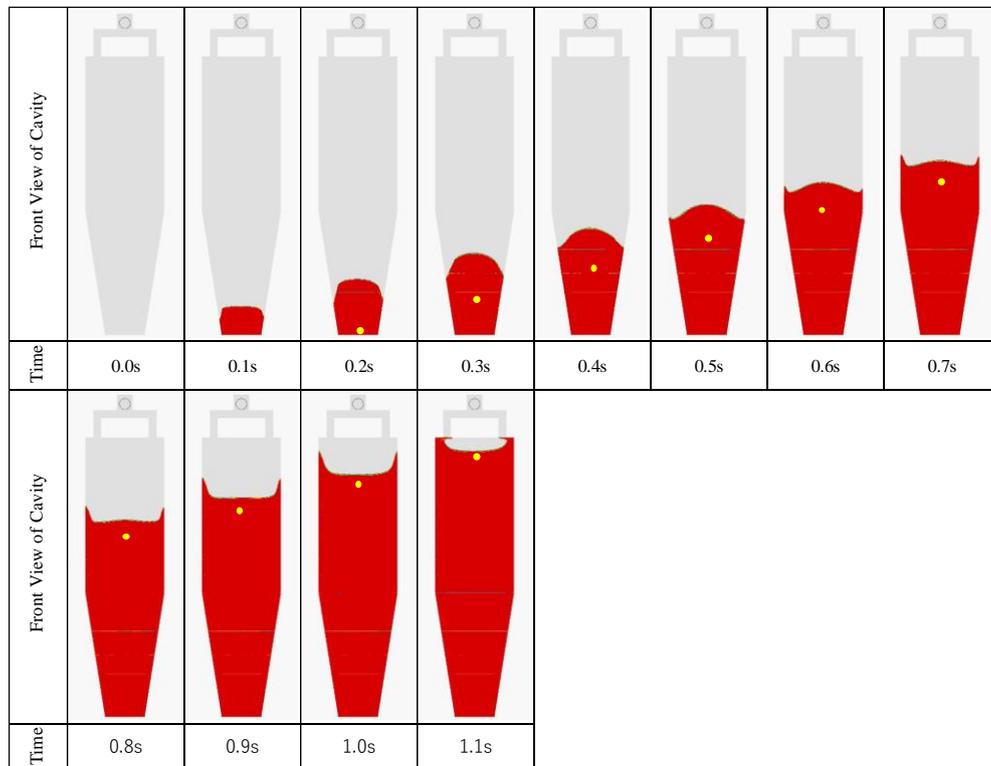


Fig.2-12 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ における湯流れ解析により得られたキャビティ充填挙動およびマーカー粒子上昇挙動

Fig.2-13～Fig.2-15 は湯流れ解析によって得られたマーカー粒子の挙動から算出した速度の時間変化を実験値と比較したものである。また、溶湯が流入開始してからキャビティ上部へと到達するまでの湯先の平均速度も算出し記載した。実験値との比較を行ったところ湯先の平均速度は実験値である 3 つの値の誤差範囲内に収まっていることからキャビティ内の流動条件は実験と一致していると判断した。しかし、気泡の速度変化について実験値と比較してみると、いずれの条件においても気泡がキャビティ上部まで到達するまでの時間が早いことがわかる。キャビティ内の流速が実験と解析でほぼ一致しているのに対し、気泡がキャビティ上部へ到達する時刻が実験よりも早くなる理由としては、流体と気泡との密度差の影響で、常に流体速度より早い結果になっていると考えられる。

気泡の速度が流速上昇とともに上昇し比較的近い値をとることから、気泡の速度が浮力や重力よりも流体抗力に依存していることは明らかである。そのため、気泡に働く流体抗力を精度良く記述することが重要である。また、粒子および流体の特徴を表すパラメータは多数存在することから、その流体物性によって気泡に働く力は大きく変化すると予想される。一方で、マーカー粒子機能は通常は巻き込まれた介在物や破断チルの追跡に使用される機能であり、(2.1)式から明らかなように、既存の計算では気泡を模擬したマーカー粒子に対して密度と直径しか与えていないため、気泡の追跡に向いていないかもしれない。また実铸造においては、気泡は凝集したり、分離したりすると考えられるが、本機能では対応出来ないと考えられる。気泡巻き込み欠陥を精度良く追跡するには、気体粒子に働く力を正確に記述できる力のモデル化も同様に必要である。

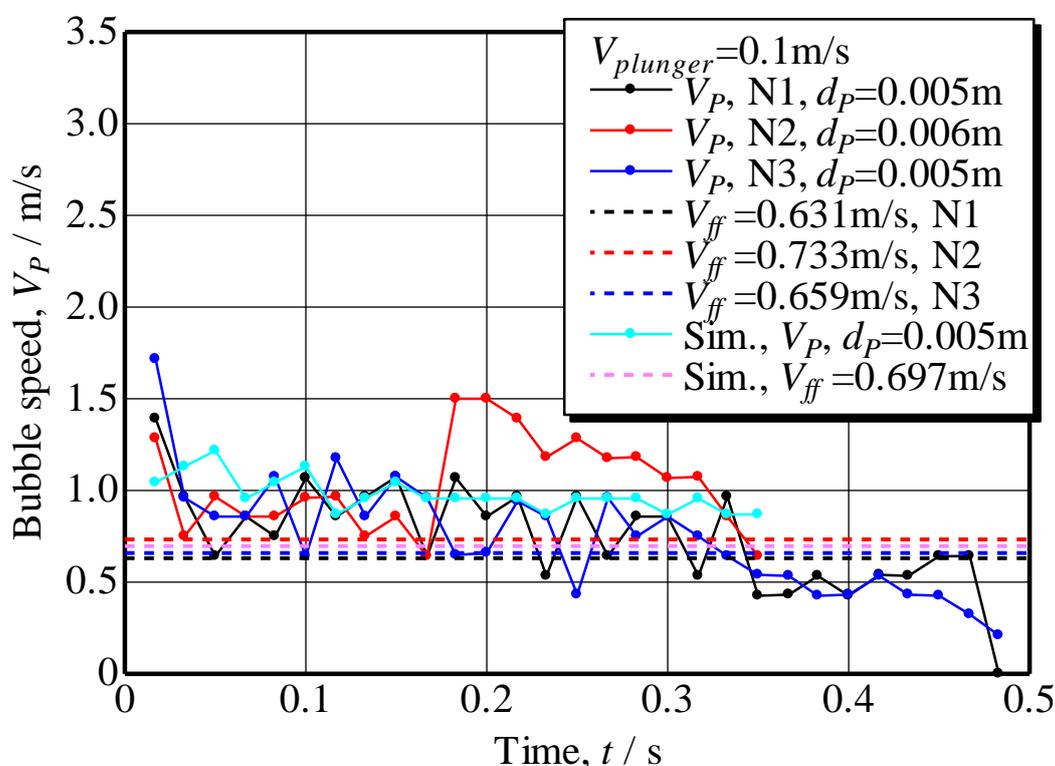


Fig.2-13 プランジャー速度 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ における気泡速度変化の実験と解析との比較

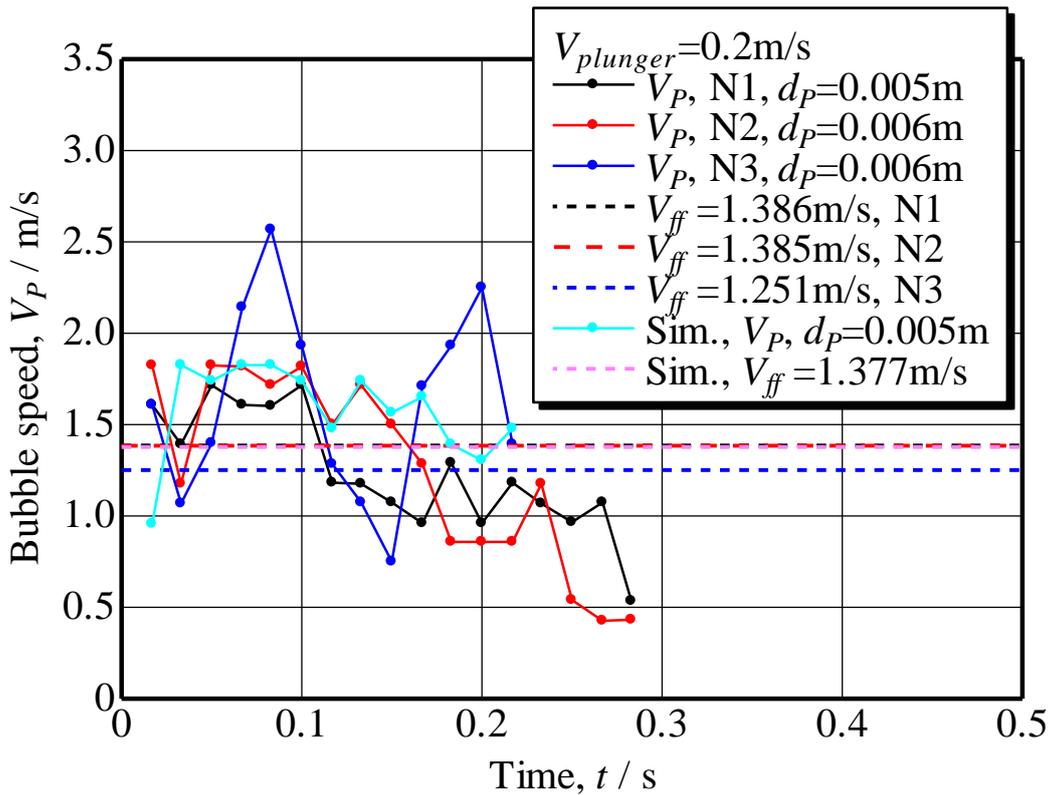


Fig.2-14 プランジャー速度 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ における気泡速度変化の実験と解析との比較

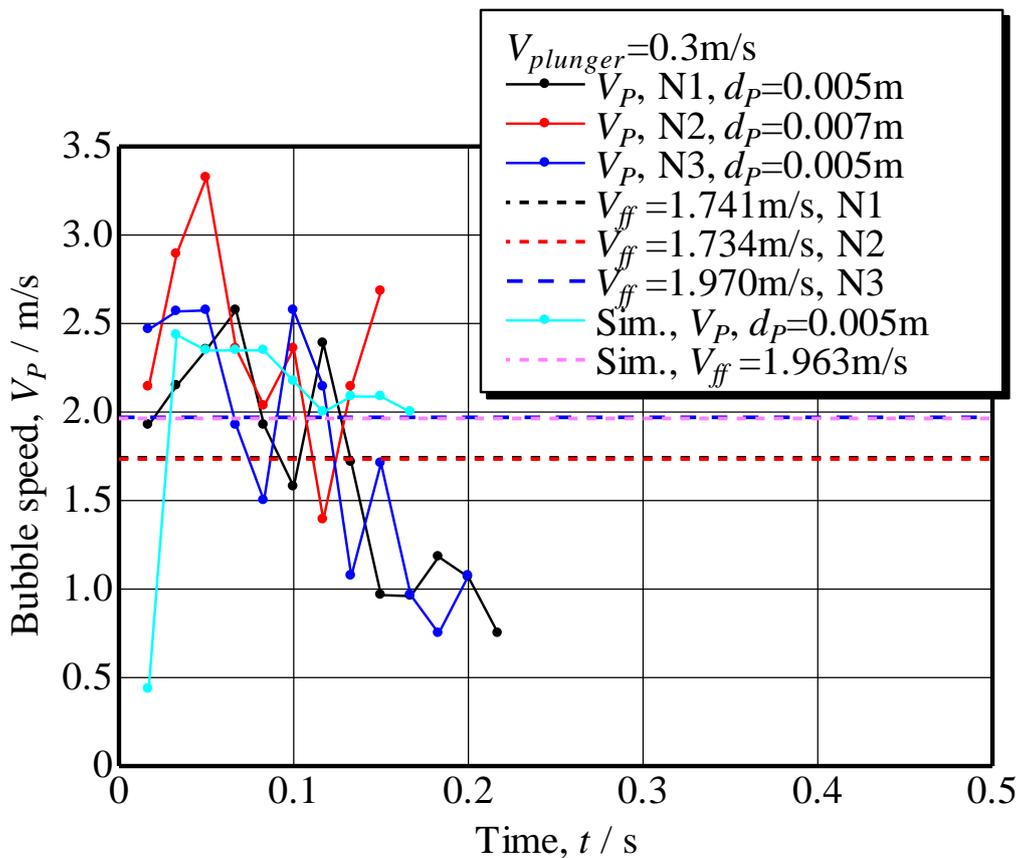


Fig.2-15 プランジャー速度 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ における気泡速度変化の実験と解析との比較

2-5 まとめ

コールドチャンバー式ダイカストを模擬した水モデルダイカスト実験装置を用いてダイカスト湯流れとともに移動する気泡の挙動を直接観察した。撮影した映像から気泡および湯先の位置の時間変化を読み取り速度を算出した。気泡速度と流体の湯先移動速度（キャビティ内流速）との比較により、双方の速度は一致するものではないことがわかった。気泡は、流体の速度や浮力の影響を受けて移動していると確認できたが、その度合いを定量的に把握するには至らなかった。

また鋳造 CAE ソフト TopCAST のマーカー機能を用いて気泡挙動のシミュレートを試みたところ、介在物の追跡を目的とする既存のマーカー機能の流用ではマーカー粒子の物性として密度と直径しか与えられず、常に流体より早い速度を示して実験値を適確に推定することができなかった。そのため、気泡速度を支配している要因の究明および解析ソフトで解析可能な解析手法の考案が必要である。

第3章 回流水槽を用いた気泡移動に関する基礎調査実験

3-1 はじめに

空気巻き込み欠陥やガス欠陥を予測するためには、まず気泡の生成位置（空気巻き込み欠陥ならば空気巻き込み位置）を予測し、その後の移動を追跡して、最終的に固相に捕捉されて停止する位置を予測する必要がある。気泡移動に関しては、流体と同じと仮定して質量の無いマーカ粒子で追跡する方法が採用されているケース¹³⁾がある。一方で、第2章の実験結果が示すように、流体と異なる動きであることもわかっている。

本章では、次章で気泡移動の方程式を立案するための基礎となる気泡移動の基礎実験を実施する。そのため一定速度の流れ場に外部から気泡を導入させた実験を行い、気泡の追跡を試みる。鋳造の注湯工程で発生する巻き込み空気や中子から発生するガスの溶湯内の移動を想定し、気体粒子の挙動を精度よく記述できる支配方程式の立式を目的としている。

3-2 実験装置

実験のしやすさを考慮し、研究の初段階の実験として小型の回流水槽を用いた気泡追跡実験を行う。一定流速場を作る装置として回流水槽を用いることで、容器内は気泡直径に対して十分に大きく壁面の影響を無視できると考えた。Fig.3-1 に本研究で使用した小型回流水槽（株式会社西日本流体技研製、PT-70S）の外観を示し、Fig.3-2 に実験装置の概要を示す。実験装置は垂直設置型回流水槽、ハイスピードカメラ（株式会社フォトロン製、FASTCAM Mini AX50）、レーザー発振器、気泡発生装置で構成されている。回流水槽はインペラで水路に流速を発生させることのできる水槽であり、比較的近くで観察が可能であるため、物体周辺の流れの観察や流速分布、圧力分布などの詳細な計測を行うのに適した水槽である。本研究では実験室の大きさを考慮して、設置スペースが比較的小さい垂直循環タイプ（循環する水路方向が垂直の回流水槽）の回流水槽を使用する。Fig.3-1 に示す観測部は幅 770mm、奥行き 300mm、水深 200mm である。気泡を発生させる機構としては Fig.3-2 のように塩化ビニール製のチューブを外部から水槽内に固定させ、気泡発生側とは反対側に注射器を装着することで、空気の供給量を手動で調整できるようになっている。

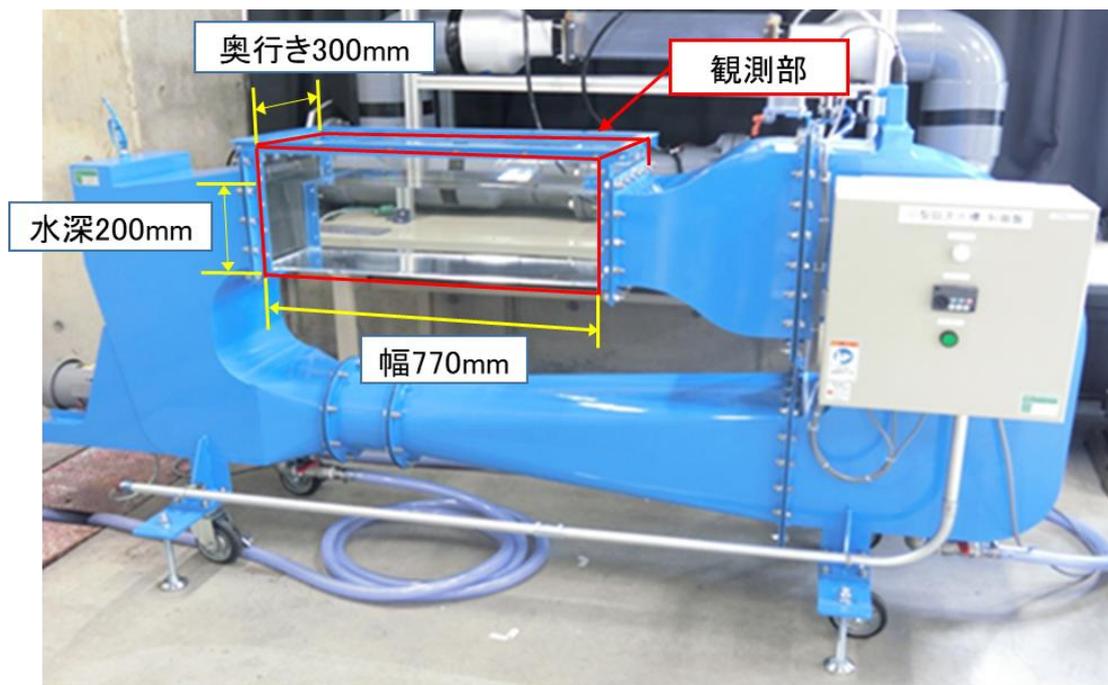


Fig.3-1 本研究で使用した回流水槽（株式会社西日本流体技研：PT-70S）

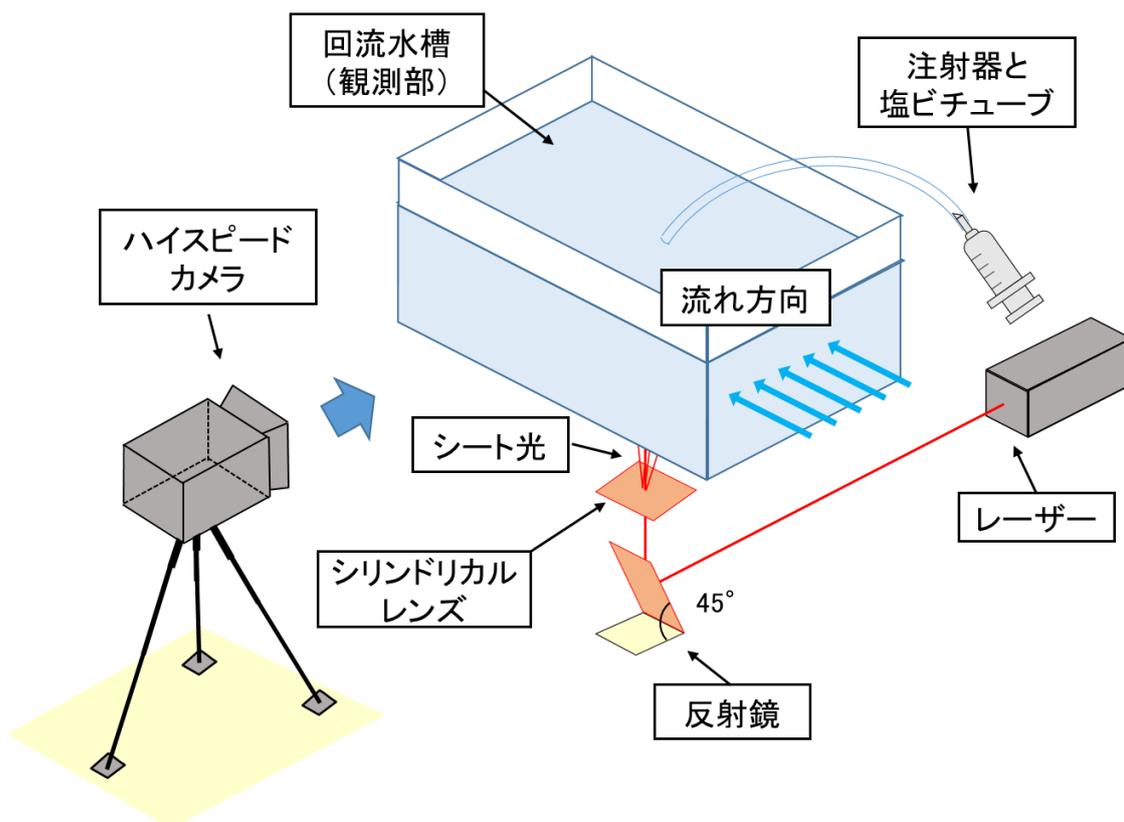


Fig.3-2 実験装置の概略

3-3 実験条件と実験手順

実験ではあらかじめ回流水槽に任意の流速を設定し、所定の流動場を形成させておく。その後、外部から水槽内につながっている塩化ビニルチューブを通して実験者の操作による手動制御によって水槽内に空気を注入させる。水槽内のチューブ先端部で形成される気泡のその後の挙動を観察するために観測部をハイスピードカメラによって撮影する。このときカメラのシャッタースピードと実験室の蛍光灯の関係上上手く撮影することができないため蛍光灯は消灯させ、Fig.3-2 のようにレーザー光を光源とした。撮影範囲に光を照射するため、レーザーの射出部分にシリンダリカルレンズを取り付けることでレーザー光をシート状に射出できるようになっている。回流水槽内の設定流速 V_L [m/s]は 0.2m/s、0.4m/s、0.6m/s、0.8m/s、1.0m/s の5つとし、気泡の動きの再現性に関しては一度の実験中で複数の気泡を観察対象にすることでサンプル数を5つとした。第2章のダイカスト水モデル実験での流速は0.6~2.0m/sであり、装置の都合上完全に合致させることはできなかった。

Fig.3-3 に示すように撮影された映像から各時刻における静止画像を取得する。Fig.3-3 は取得したサンプル画像であり気泡位置測定における原点および座標系を示す。気泡発生位置である水槽中のチューブを原点とし、各時刻における気泡の x 方向、 y 方向それぞれの原点からの距離を Windows 用汎用画像処理パッケージ WinROOF (三谷商事株式会社製) にて測定したのち、縮尺を考慮し実寸スケールへと変換することで実際の気泡の各時刻における原点からの位置情報を取得する。Fig.3-3 からわかるように、気泡は球形であるとは限らず、また大きさを合わせることも困難であったため、5回の平均値を求めた。回流水槽の流速条件と各流速の実験において計測された気泡の直径をまとめたものを Table3-1 に示す。気泡の平均直径は 1.3~1.7mm と第2章の気泡と比べると小さくなっている。

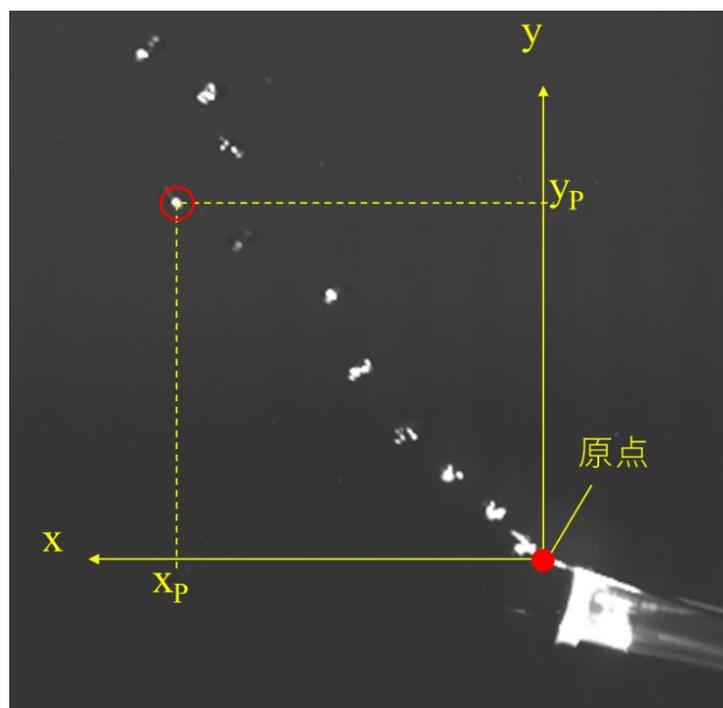


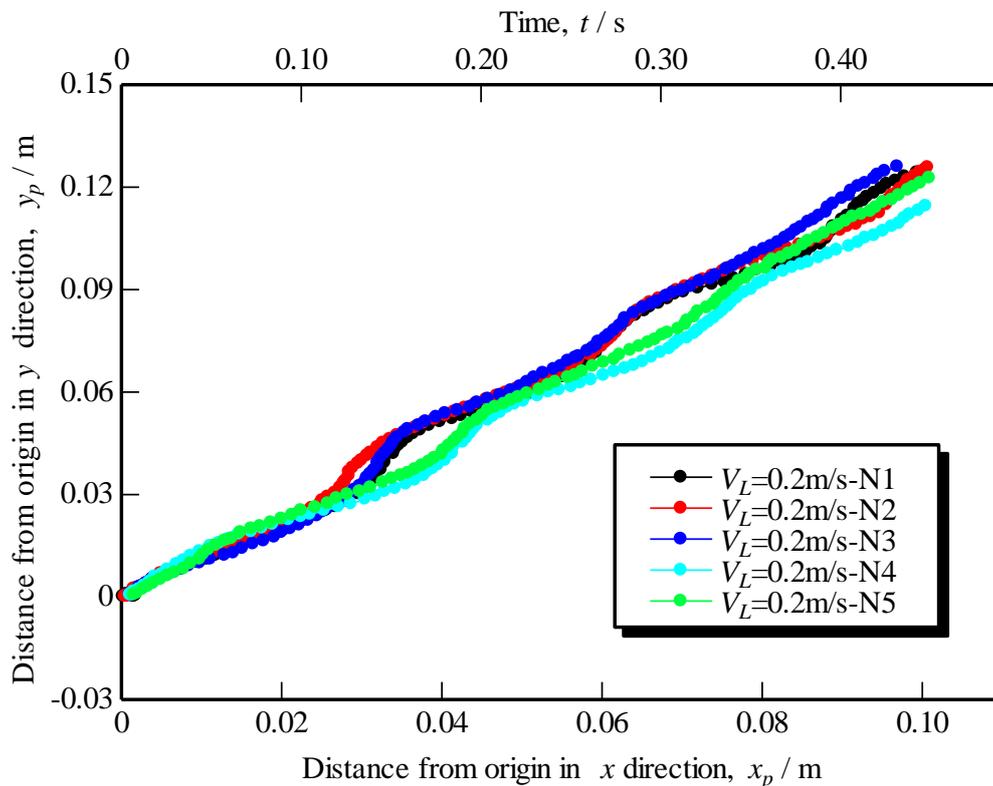
Fig.3-3 気泡位置測定における原点および座標設定

Table3-1 回流水槽の設定流速と気泡直径

設定流速[m/s]	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
N1における気泡直径[mm]	1.52	1.60	1.41	1.41	1.26
N2における気泡直径[mm]	1.86	1.41	1.83	1.41	1.41
N3における気泡直径[mm]	2.07	1.26	1.60	1.41	1.26
N4における気泡直径[mm]	1.55	1.41	1.60	1.60	1.26
N5における気泡直径[mm]	1.50	1.41	1.60	1.60	1.41
気泡直径の平均値[mm]	1.7	1.4	1.6	1.5	1.3

3-4 各流速における気泡移動経路と気泡速度

Fig.3-4~Fig.3-8 に回流水槽の各設定流速下における気泡移動経路を示す。横軸は原点からの y 方向への移動距離を示し、縦軸は x 方向への移動距離を示す。回流水槽内の流速 V_L が速くなるにつれて撮影速度を変更しているため、測定間隔（コマ画像間隔）は $V_L=0.2$ m/s、0.4 m/s、0.6 m/s、0.8 m/s、1.0m/s に対してそれぞれ 1/250s、1/500s、1/750s、1/1000s、1/1000s となっている。また、気泡位置の測定範囲はすべての条件に共通で気泡が発生した時刻から x 方向に 0.1m 地点に到達する時刻までとし、気泡発生時を時刻 0s とした。

Fig.3-4 $V_L=0.2$ m/s における平均気泡直径 1.7mm の気泡挙動（測定終了時刻平均 0.446s）

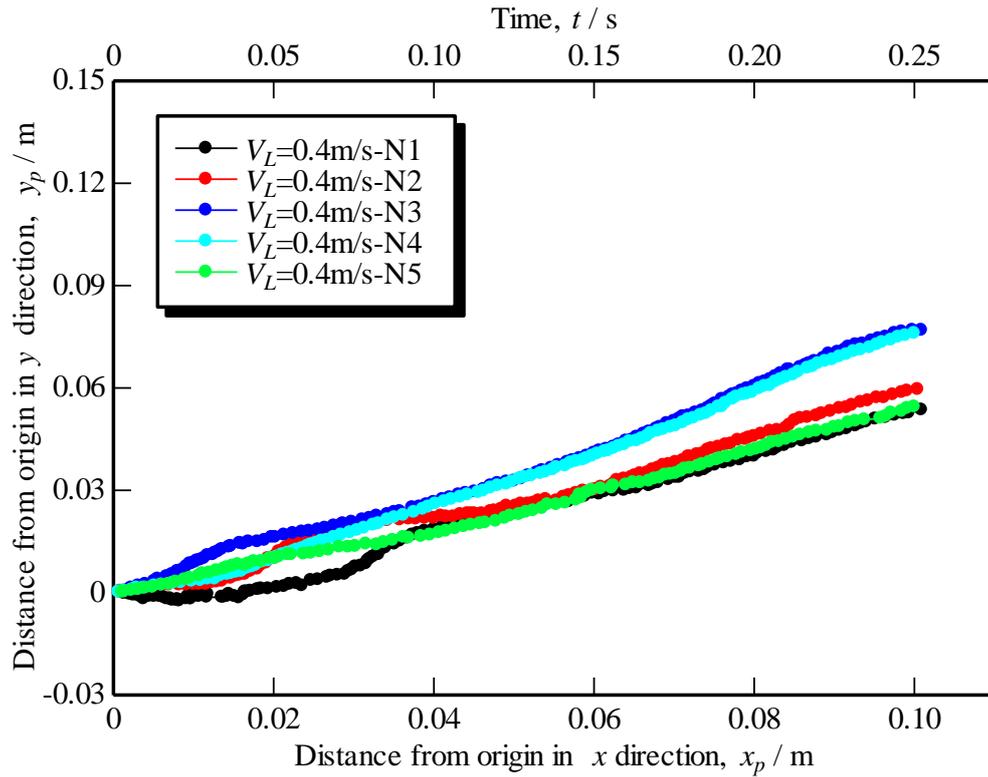


Fig.3-5 $V_L=0.4\text{m/s}$ における平均気泡直径 1.4mm の気泡挙動 (測定終了時刻平均 0.252s)

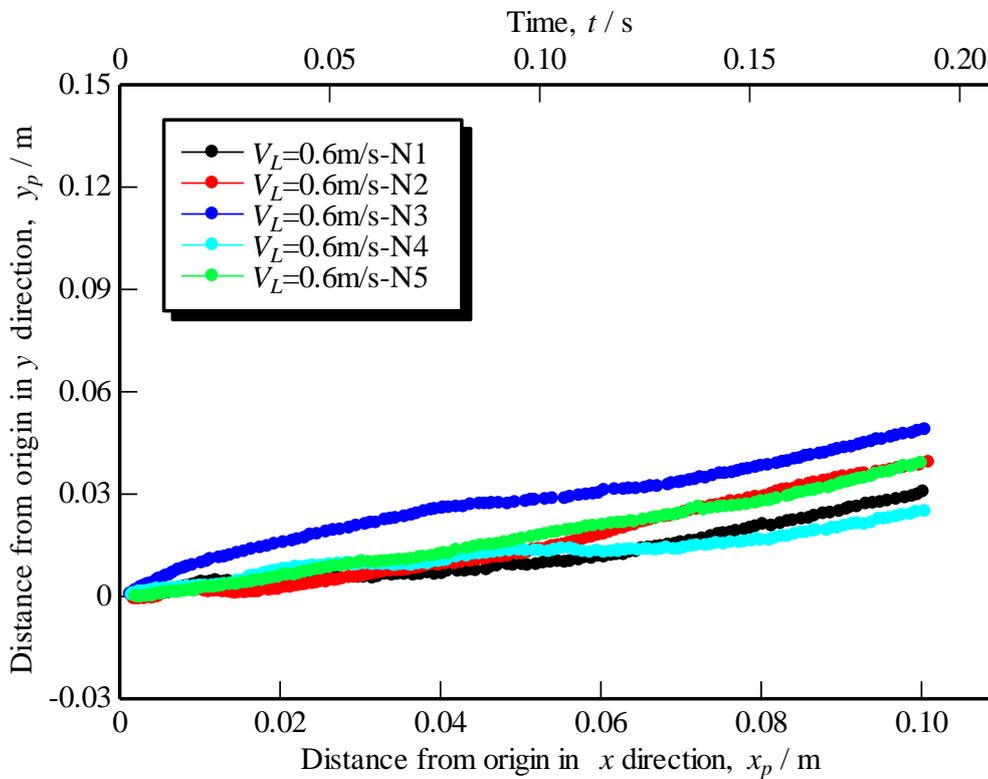


Fig.3-6 $V_L=0.6\text{m/s}$ における平均気泡直径 1.6mm の気泡挙動 (測定終了時刻平均 0.193s)

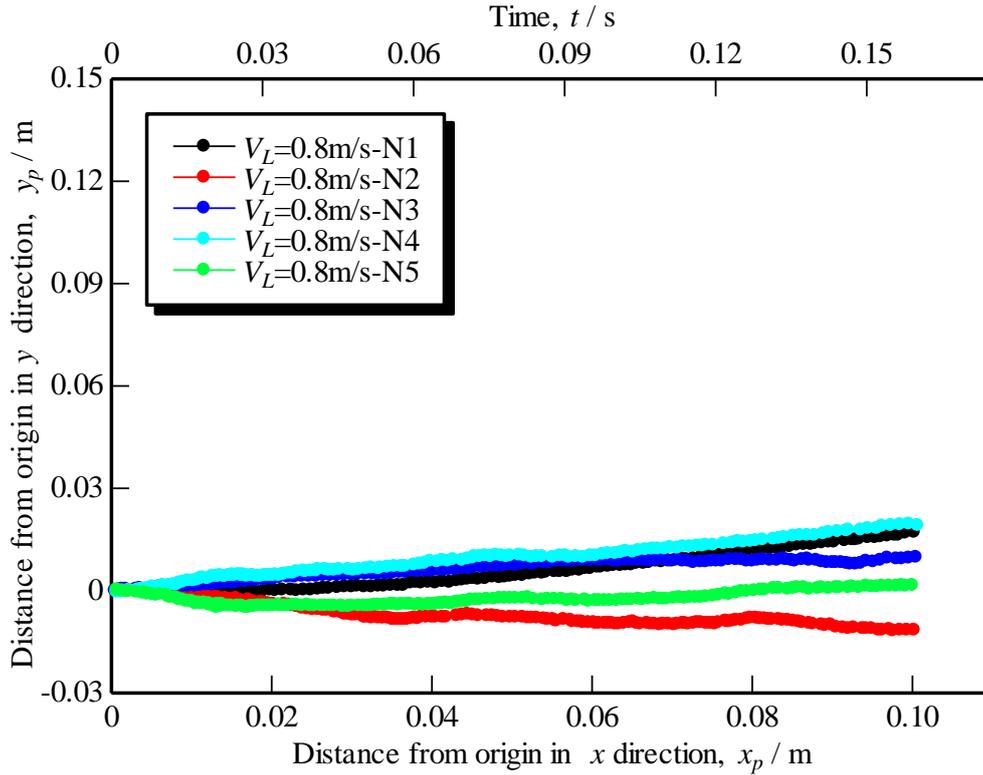


Fig.3-7 $V_L=0.8\text{m/s}$ における平均気泡直径 1.5mm の気泡挙動 (測定終了時刻平均 0.159s)

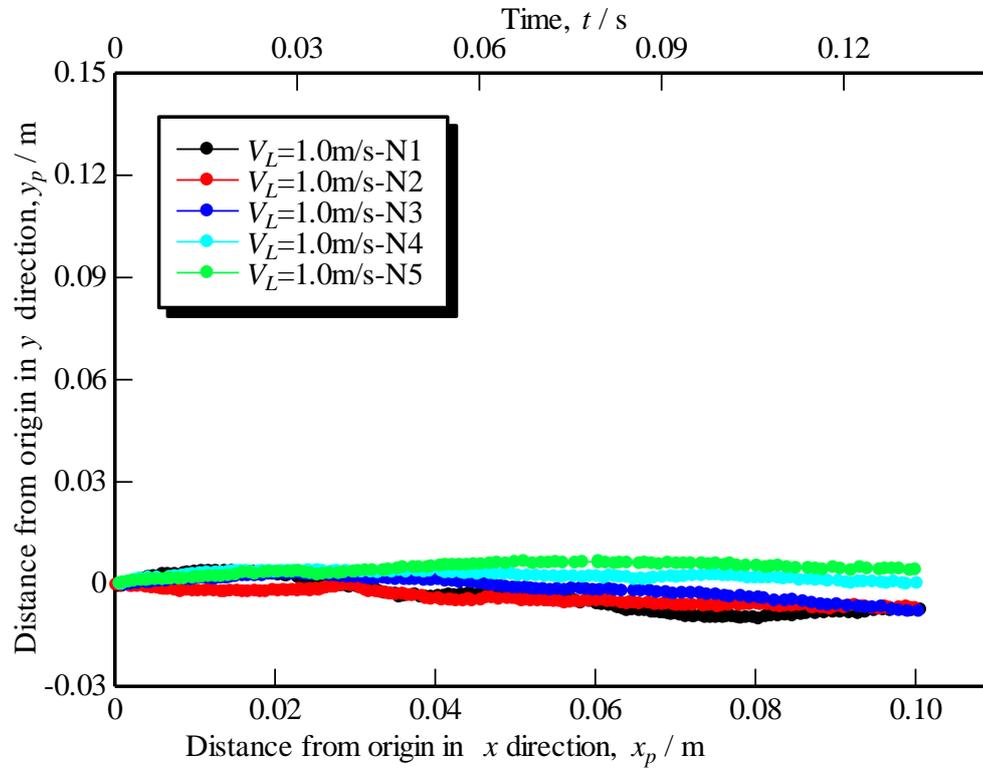


Fig.3-8 $V_L=1.0\text{m/s}$ における平均気泡直径 1.3mm の気泡挙動 (測定終了時刻平均 0.129s)

回流水槽内の流速 V_L [m/s]が比較的遅い $V_L=0.2$ m/s の条件下においては、気泡は乱れることなく水槽内の流れの進行方向である x 方向に進むと同時に、浮力の影響を受けることで上昇しながら移動していき、若干の蛇行はあるものの気泡の移動経路はほぼ一定の上昇角度を保っていることが確認できる。しかし、水槽内の流速が速くなるにつれて気泡の上昇挙動は弱まり、 V_L が比較的速い $V_L=1.0$ m/s の条件下においては測定終了時の y 方向への動きはほとんどなくなっている。すべての実験における測定範囲は気泡の発生時から気泡が x 方向に 0.1m 移動した時刻までとしているため、概算すると流速 $V_L=0.2$ m/s で 0.1m 移動するためには 0.5s を要するが、 $V_L=1.0$ m/s では 0.10s しかかからない。ゆえに、測定時間が短くなり、浮力の作用する時間が短くなった結果と考えることができるが、 y 方向の移動距離がゼロになることが説明できない。流れの流速が 5 倍になって測定時間が 1/5 になるならば、 y 方向の移動距離も 1/5 程度であっていいはずである。そのため、気泡の速度 V_P および x 、 y 方向における気泡の速度 V_{Px} 、 V_{Py} に関して、測定した時刻毎の座標情報を基に算出し測定終了までの平均速度をすべての条件で比較した。Fig.3-9 にすべての条件における気泡の平均速度を示し、Fig.3-10、Fig.3-11 にすべての条件における x 、 y 方向の気泡の平均速度をそれぞれ示す。なお、グラフ中のエラーバーは上下の端値を示している。

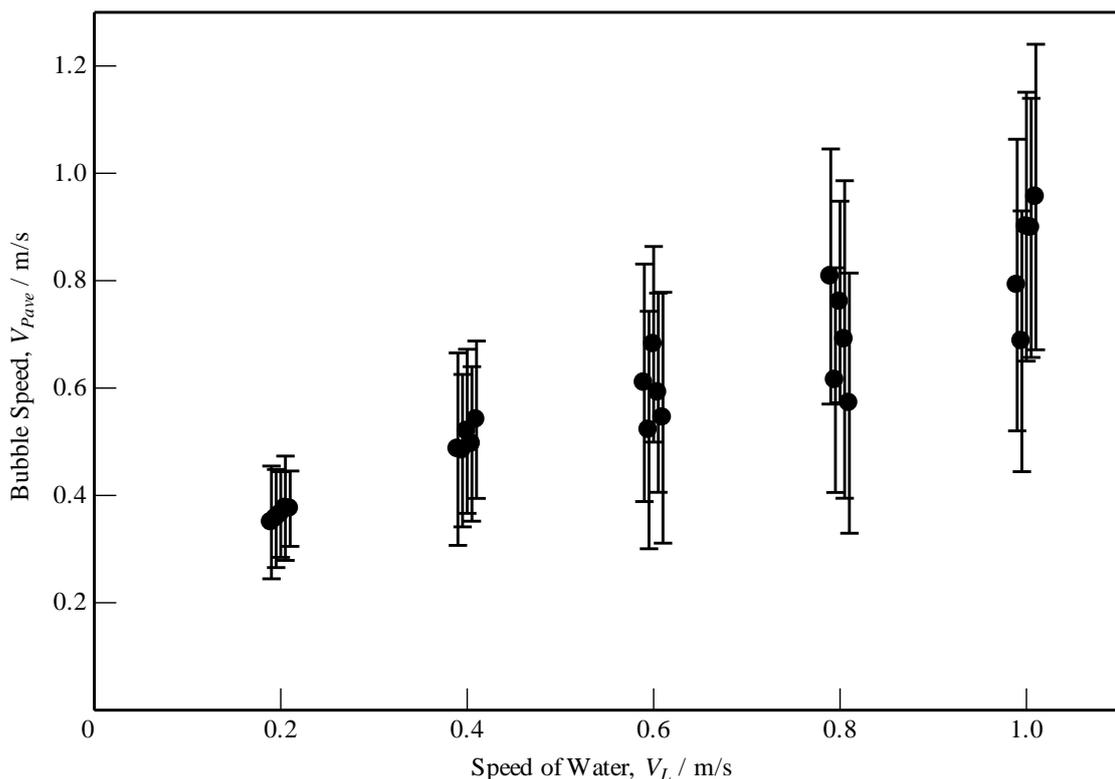


Fig.3-9 全条件における気泡の平均速度

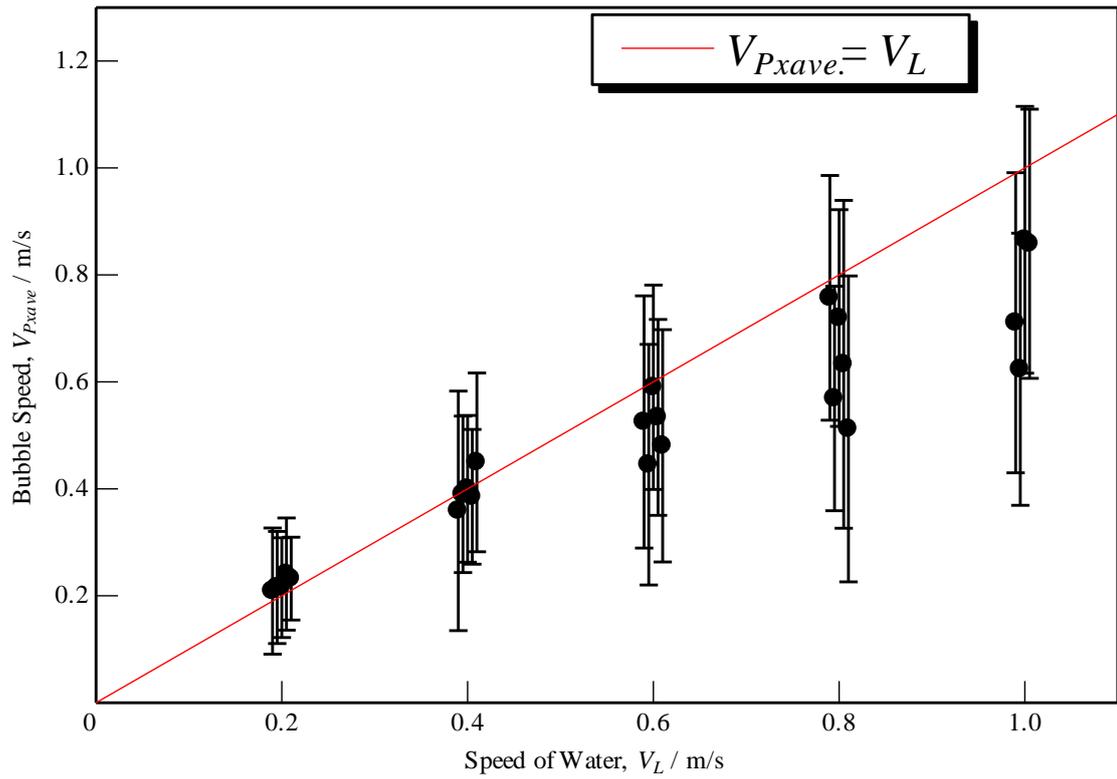


Fig.3-10 全条件における気泡の x 方向の平均速度

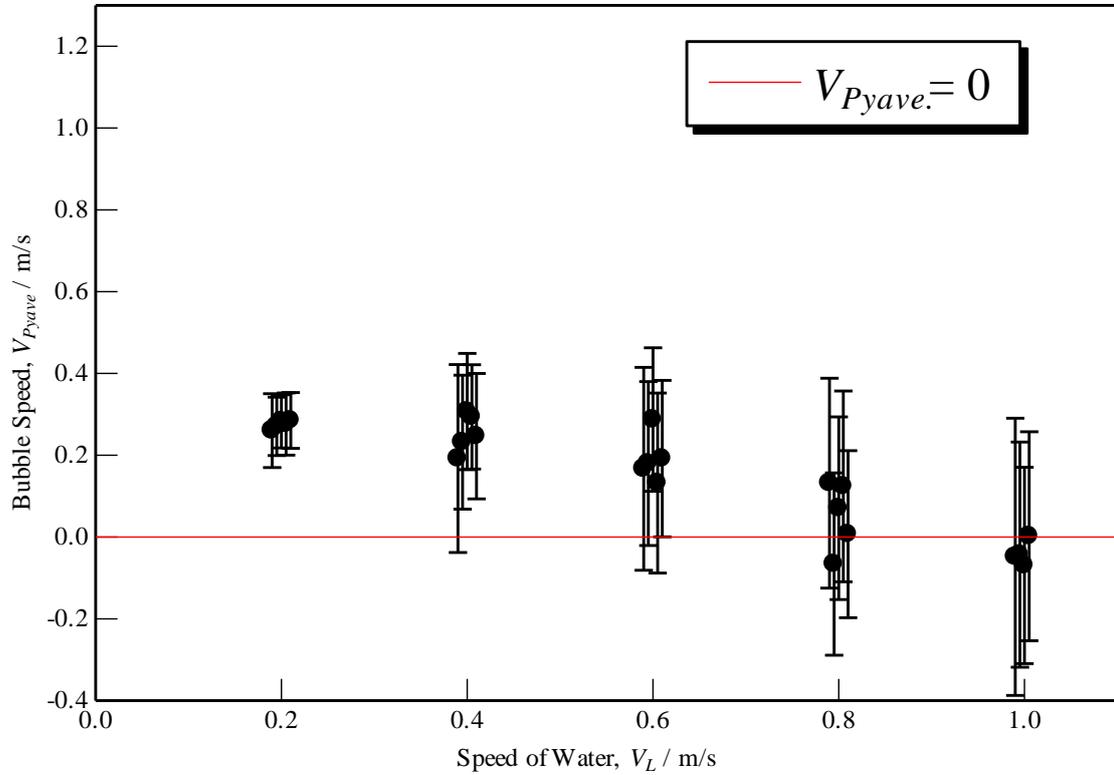


Fig.3-11 全条件における気泡の y 方向の平均速度

Fig.3-9 を見ると流速 V_L の上昇に伴って気泡の速度も上昇していくことがわかる。しかし、回流水槽の設定値と気泡の速度は一致するわけではなく、 $V_L=0.2\text{m/s}$ 、 $V_L=0.4\text{m/s}$ では流速よりも速い速度となり、 $V_L=0.6\text{m/s}$ ではほぼ同じ速度となる。 $V_L=0.8\text{m/s}$ 、 $V_L=1.0\text{m/s}$ では逆に流速よりも低い値となる。これは流体と気泡の相対速度が正から負に変わることを意味し、流体中の物体のように流体抗力が相対速度に対して作用すると考えるならば¹⁴⁾、流体流れと同じ方向から逆方向に作用方向が変化することになる。

Fig.3-10 の気泡の x 方向の速度は、Fig.3-9 の速度と同傾向である。よって、基本的に流れの主方向に対しては流体抗力のような力が作用して気泡の流速を変えたと考えていいだろう。一方、Fig.3-11 の気泡の y 方向の速度を見てみると、前述したが、流速が $V_L=0.2\text{m/s}$ から 1.0m/s へ 5 倍になると測定時間が $1/5$ になるので、もし浮力の作用した時間が比例計算できるならば y 方向の移動距離も $1/5$ 程度のはずである。具体的には、Fig.3-4 流速 $V_L=0.2\text{m/s}$ のグラフで見ると、 0.1m 移動する時間の $1/5$ の時間 (0.02m 位置で) y 方向に 0.02m 移動している。同じ時間だけ浮力が作用したならば同じ移動距離と考えるのが妥当であろうが、この結果は違ふと判断すべきだろう。これは流体中におかれた物体に作用する浮力の考え方には注意が必要と判断する。

3-5 まとめ

小型の回流水槽に流れ場を形成させ、その中を流れる気泡の動きの直接観察を行った。時間毎の気泡の座標の測定と、測定間における気泡の速度を算出し、回流水槽の全設定流速と比較した。流速が速くなるにつれて、流れ方向への気泡速度は上昇するが流速と気泡速度は等しくなるわけではないことがわかった。気泡速度を x, y 方向成分に分けて表したところ、流れと同方向へは流体抗力のように加速するものの、 y 方向の流速には浮力が作用する条件と、作用しない条件があることが明らかになった。

第4章 気体粒子の移動に関する数値シミュレーション

4-1 はじめに

液相中に存在する気泡や固体粒子の運動は多種多様な要因が複雑に相互作用しているため、非常に複雑である。気泡や固体粒子の運動を精度よく予測するためには粒子に働く力を解明し、運動を精度よく予測できるモデルの構築が必要である。気泡に働く力に関する多くの研究では無限静止液中の単一気泡を対象にしていること¹⁵⁾⁻¹⁹⁾が多い。本研究で対象としている空気巻き込み欠陥における気泡の流れは非定常である。気泡の移動に関して、富山ら^{20),21)}は流体中に存在する物体に作用する流体抗力の考え方が気泡にも適用できるとして、気泡の流体抗力を試算している。この考え方を、本研究の鋳造分野に適用し、巻き込んだ空気の追跡を試みる。

4-2 単一気泡に働く力と気泡の運動方程式

ニュートン液体の流動場に存在する気泡や固体粒子が速度 $\mathbf{V}_P=(v_{Px}, v_{Py})$ で運動するとき、ニュートンの運動の第2法則に従って粒子の運動は次式で表すことができる。

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{V}_P}{dt} \quad (4.1)$$

ここで、 $\mathbf{F}[\text{N}]$ は粒子に働く力の総和、 $m[\text{kg}]$ は粒子の質量である。粒子の質量測定が困難であることを考慮し、(4.1)式を単位体積あたりの粒子に働く力の式に置き換えると次式になる。

$$\mathbf{f} = \frac{m}{V} \frac{d\mathbf{V}_P}{dt} = \rho_P \frac{d\mathbf{V}_P}{dt} \quad (4.2)$$

ここで、 $\mathbf{f}[\text{N}/\text{m}^3]$ は単位体積あたりの粒子に働く力の総和、 $\rho_P[\text{kg}/\text{m}^3]$ は粒子の密度である。流動している流体中に存在する単位体積あたりの気泡に働く力として考えられるのは、仮想質量力 \mathbf{f}_{VM} 、重力 \mathbf{f}_g 、浮力 \mathbf{f}_b 、揚力 \mathbf{f}_L 、抗力 \mathbf{f}_D であり、単位体積あたりに働く力の総和 \mathbf{f} は各力を足し合わせて次のようになる。

$$\mathbf{f} = \rho_P \frac{d\mathbf{V}_P}{dt} = \mathbf{f}_{VM} + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_D \quad (4.3)$$

ここで、 \mathbf{f}_{VM} は仮想質量力である。流体中を移動する粒子が運動をするとき、粒子近傍の流体も同時に運動を行う。その結果、見かけ上物体の質量が増大したのと同じ効果が現れ、慣性が大きくなる。見かけ上増大した質量に比例した力を流体は受け、その反作用として粒子も力を受けるため、その力のことを仮想質量力 (Virtual Mass Force) と呼び、次式で表される。

$$\mathbf{f}_{VM} = -C_{VM}\rho_L \frac{d\mathbf{V}_P}{dt} \quad (4.4)$$

ここで、 $C_{VM}[-]$ は仮想質量係数、 $\rho_L[\text{kg/m}^3]$ は流体の密度である。揚力 \mathbf{f}_L は流体中を進行する物体が、進行方向と垂直な方向に受ける力のことであり、流れ方向に対して物体が迎え角を持つことで発生する。本研究では簡単のため気泡を球形であると仮定しているため揚力は発生しないものとする。重力および浮力に関してはモデル化の必要がないほど単純であり、重力と浮力をまとめて次式によって表される。

$$\mathbf{f}_H = (\rho_L - \rho_P)\mathbf{g} \quad (4.5)$$

ここで、 \mathbf{f}_H は単位体積あたりの粒子に働く重力と浮力の合力、 $\mathbf{g}[\text{m/s}^2]$ は重力加速度である。

抗力 \mathbf{f}_D について、流れのある流体中に静止している物体には流れの方向と同様の方向に抗力を受ける。また、流体中を運動する物体には物体の運動方向とは逆の物体の運動を妨げる方向にも抗力は作用する。厳密に言えば流体中に存在する物体と流体との間に相対速度があるときに抗力は作用し、相対速度の正負を考慮した次式で表すことができる。

$$\mathbf{f}_D = -\frac{3}{4d}C_D\rho_L|\mathbf{V}_P - \mathbf{V}_L|(\mathbf{V}_P - \mathbf{V}_L) \quad (4.6)$$

ここで、 $d_P[\text{m}]$ は粒子直径、 $C_D[-]$ は抗力係数、 $\mathbf{V}_L[\text{m/s}]$ は流体の速度である。流体中を移動する粒子に働く力の中でも流体抗力は、流体物性や粒子径および粒子レイノルズ数に応じて大きく変化する抗力係数 C_D を正確に表すことが重要であり、抗力係数に関する研究は非常に多く行われている^{22),23)}。

4-3 微分方程式の数値解法

前項では、流体中を移動する単位体積あたりの粒子に働く力についてまとめた。本項では粒子の運動方程式の数値解法について述べる。まず、本研究で使用する粒子に働く力の模式図を Fig.4-1 のように二元系座標上に示す。

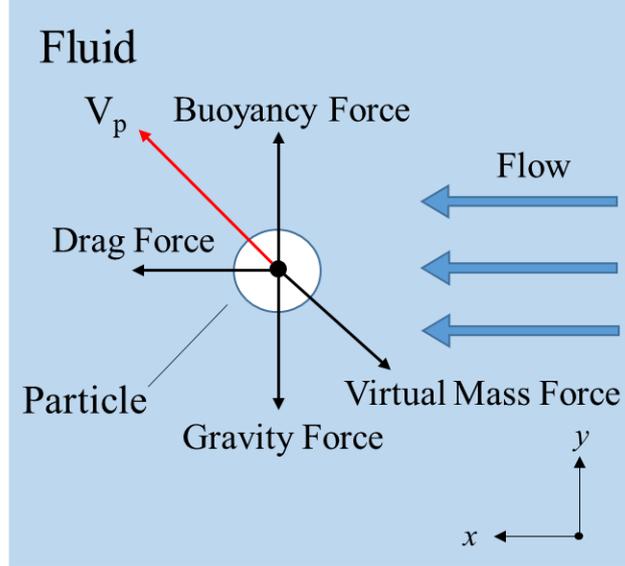


Fig.4-1 流体中を移動する粒子に働く力の模式図

Fig.4-1 から x 方向、 y 方向に働く力を抽出し、それぞれの方向における粒子の運動方程式を立式すると

$$\rho_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} = -C_{VM} \rho_L \frac{d^2 x_p}{dt^2} - \frac{3}{4d} C_D \rho_L \left| \frac{dx_p}{dt} - V_{Lx} \right| \left(\frac{dx_p}{dt} - V_{Lx} \right) \quad (4.7)$$

$$\rho_p \frac{d^2 y_p}{dt^2} = -C_{VM} \rho_L \frac{d^2 y_p}{dt^2} + (\rho_L - \rho_p)g - \frac{3}{4d} C_D \rho_L \left| \frac{dy_p}{dt} - V_{Ly} \right| \left(\frac{dy_p}{dt} - V_{Ly} \right) \quad (4.8)$$

となり、式 (4.7)、式 (4.8) を整理すると

$$\frac{d^2 x_p}{dt^2} = - \frac{3C_D \rho_L \left| \frac{dx_p}{dt} - V_{Lx} \right| \left(\frac{dx_p}{dt} - V_{Lx} \right)}{4d(\rho_p + C_{VM} \rho_L)} \quad (4.9)$$

$$\frac{d^2 y_p}{dt^2} = - \frac{3C_D \rho_L \left| \frac{dy_p}{dt} - V_{Ly} \right| \left(\frac{dy_p}{dt} - V_{Ly} \right)}{4d(\rho_p + C_{VM} \rho_L)} + \frac{(\rho_L - \rho_p)g}{\rho_p + C_{VM} \rho_L} \quad (4.10)$$

となる。ここで $x_p[m]$ 、 $y_p[m]$ はそれぞれ粒子の x 方向、 y 方向の位置を示し、 $V_{Lx}[m/s]$ 、 $V_{Ly}[m/s]$ はそれぞれ x 方向、 y 方向に流れる流体の速度を意味する。なお、対象とする流れは最大設定流速 1.0m/s であり圧縮性の影響がほとんど無いと言えるため非圧縮性と仮定しても問題

はなく、 ρ_P 、 ρ_L はともに一定とする。また、回流水槽で作り出した一様流は流体中に存在する物体によって物体まわりの流れに乱れを生じ速度ベクトルが一定方向以外にも存在するように変化する。しかし、本研究では計算の簡単のため流体の速度は位置および時間に対して一定の値と仮定する。よって V_{Lx} は回流水槽の設定流速値、 V_{Ly} は 0m/s となる。

一階の常微分方程式の数値解法にはルンゲクッタ法を用いることが一般的とされているが、式 (4.9)、式 (4.10) はそれぞれ二階の常微分方程式であり、ルンゲクッタ法では直接解くことができない。しかし、このような高次階の常微分方程式であったとしても一階の連立常微分方程式に変換することで、ルンゲクッタ法により間接的に解くことが可能となる。ここで

$$\frac{dx_p}{dt} = z \quad \frac{d^2x_p}{dt^2} = \frac{dz}{dt} \quad \frac{dx_p}{dt} = w \quad \frac{d^2y_p}{dt^2} = \frac{dw}{dt} \quad (4.11)$$

とおけば、粒子の運動方程式は次式のように一階の連立常微分方程式で表すことが出来る。

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = -\frac{3C_D\rho_L|z - V_{Lx}|(z - V_{Lx})}{4d(\rho_P + C_{VM}\rho_L)} = f_1(t, x, z) \\ \frac{dx_p}{dt} = z = g_1(t, x, z) \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = -\frac{3C_D\rho_L|z - V_{Ly}|(z - V_{Ly})}{4d(\rho_P + C_{VM}\rho_L)} + \frac{(\rho_L - \rho_P)g}{\rho_P + C_{VM}\rho_L} = f_2(t, x, z) \\ \frac{dy_p}{dt} = w = g_2(t, x, z) \end{cases} \quad (4.13)$$

また、ある時刻 t_i からの時間の増分 h に対する x_p 、 y_p の増分を k 、 m 、同様に z 、 w の増分を l 、 n とすると時刻 t_{i+1} における $x_{p_{i+1}}$ 、 $y_{p_{i+1}}$ 、 z_{i+1} 、 w_{i+1} の値は

$$\begin{aligned} t_{i+1} &= t_i + h & x_{p_{i+1}} &= x_{p_i} + k & z_{i+1} &= z_i + l \\ y_{p_{i+1}} &= y_{p_i} + m & w_{i+1} &= w_i + n \end{aligned} \quad (4.14)$$

で表され、次の関係式から k 、 l 、 m 、 n を求めることで次のタイムステップにおける x_p 、 y_p を求めることが出来る。

$$\begin{cases} k = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ l = \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \end{cases} \quad \begin{cases} m = \frac{1}{6}(m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4) \\ n = \frac{1}{6}(n_1 + 2n_2 + 2n_3 + n_4) \end{cases} \quad (4.15)$$

これらの関係式に初期値である t_0 、 x_{p0} 、 z_0 、 y_{p0} 、 w_0 を用いてタイムステップを進めながら計算を陽的に繰り返すことで解である x_p 、 y_p を求めることが出来る。計算のフローチャートを Fig.4-2 に示す。

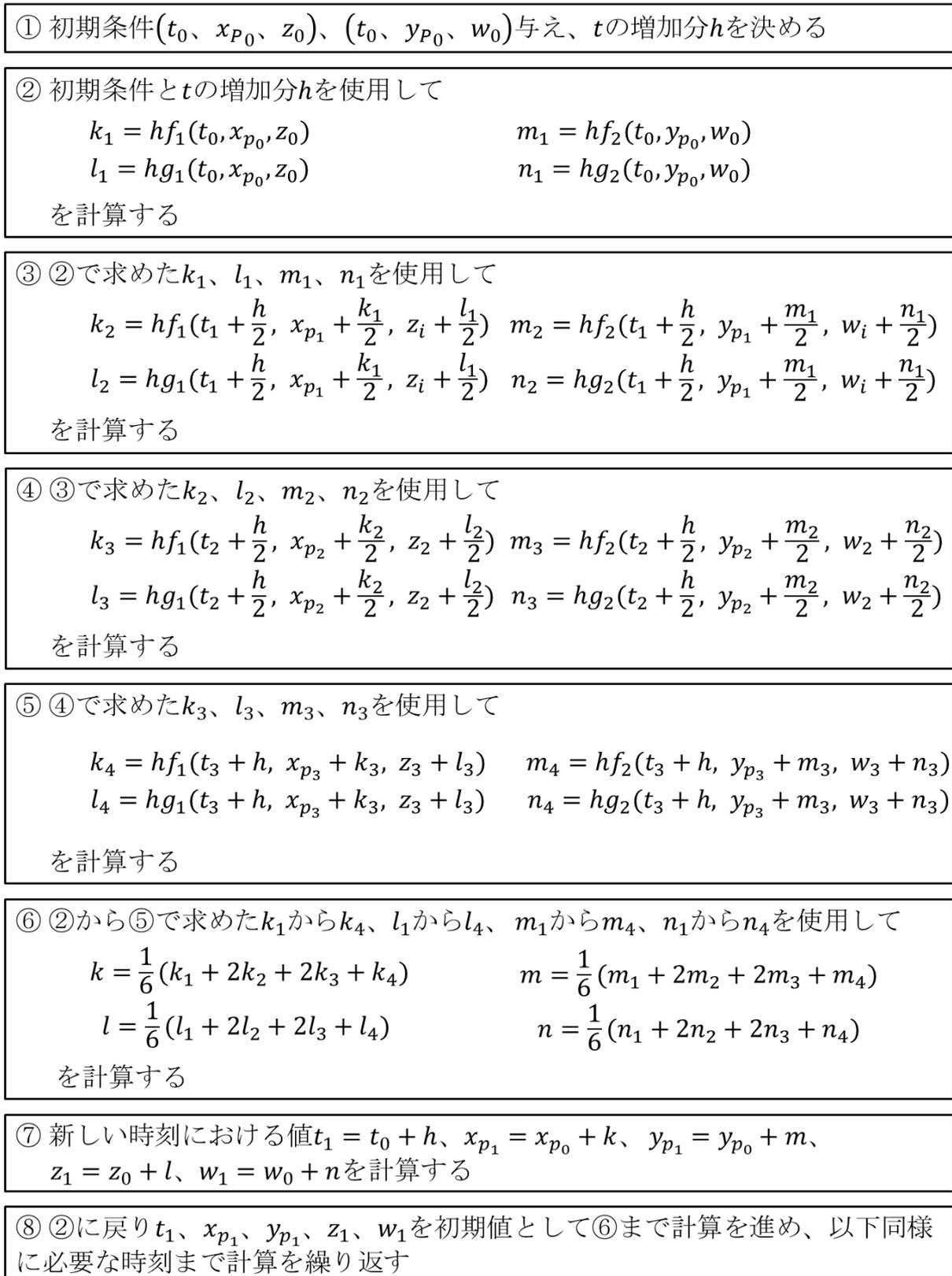


Fig.4-2 4次精度のルンゲクッタ法を用いた数値解法の計算フロー

4-4 気泡の移動に関する数値解析

数値解析に使用した各種数値を Table4-1 に示す。流体物性値には 20°Cの水、粒子には 20°Cの空気の値²⁴⁾をそれぞれ使用した。粒子に働く仮想質量力の係数は変形のない単一気泡の場合の値^{25),26)} $C_{VM}=0.5$ を使用し、抗力係数 C_D に関しては富山らの提唱している抗力係数モデルを用いた。このモデルは粒子レイノルズ数とエトベス数の関数である以下の式で表され、広範囲の流体物性において適用でき体系の汚れ具合を考慮できるものである。系の汚れ具合については厳密に定義されていないが、富山らは水の場合だと水道水を 2 回程度蒸留したとしても汚れの影響を完全に排除することはできないため中程度から十分に汚れた系に相当し、3 回以上蒸留した場合は高純度と考えて良いとしている。したがって、本研究で使用する水道水を 1 回蒸留した蒸留水は中程度の汚れた系に当てはまることから抗力係数の算出には式を使用した。また、抗力係数に関しては富山らの提唱する支配方程式で算出した値に対して、実験における x 方向の気泡移動距離 0.1m に計算結果が合致するように調整した抗力係数の値も Table4-1 に示す。

粒子レイノルズ数は式(4.19)で定義され、使用する粒子直径 d_p [m]は測定に使用した 5 つの粒子の平均直径とし、相対速度に必要な粒子速度 V_p [m/s]は実験で得られた平均粒子速度 V_{pave} [m/s]を用いた。粒子の初期位置 x_{p0} [m]、 y_{p0} [m]を 0m、初期速度 z_0 [m/s]、 w_0 [m/s]は 0m/s とした。

高純度の系：

$$C_D = \max \left[\min \left[\frac{16}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}), \frac{48}{Re} \right], \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (4.16)$$

中程度の汚れた系：

$$C_D = \max \left[\min \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right], \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (4.17)$$

十分汚れた系：

$$C_D = \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \quad (4.18)$$

$$Re_p = \frac{|V_p - V_L|d_p}{\nu_L} \quad (4.19)$$

Table4-1(1) 物性値

粒子密度 ρ_P [kg/m ³]	1.206
流体密度 ρ_L [kg/m ³]	998.2
流体の動粘性係数 ν_L [m ² /s]	1.004×10^{-6}
表面張力 σ [N/m]	0.072

Table4-2(2) 計算条件

重力加速度 g [m/s ²]	9.81
仮想質量係数 C_{VM} [-]	0.5
抗力係数 C_D [-] (Tomiyama's equation)	0.258、0.491、4.438、0.435、0.270※
抗力係数 C_D [-] (Fitted value in x direction)	0.0064、0.0024、0.0016、0.0010、0.0007※
粒子直径 d_P [m]	0.0017、0.0014、0.0016、0.0015、0.0013※
平均粒子速度 V_{Pave} [m/s]	0.365、0.505、0.590、0.689、0.794※
粒子レイノルズ数 Re_P [-]	279、147、16.2、166、266※
エトベス数 Eo [-]	0.393、0.266、0.348、0.306、0.230※
流体速度 V_L [m/s]	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0
時間刻み h [s]	0.01
計算終了時刻 t [s]	0.446、0.252、0.193、0.159、0.129※

※ $V_L=0.2、0.4、0.6、0.8、1.0$ m/sにおける繰り返し数5回の平均値を左から順に示している

これらの計算条件を用いて前項で示した数値解法にて得られた気泡の移動経路を表したグラフを Fig.4-3～Fig.4-7 に示す。縦軸は気泡の x 方向における原点からの位置を示し、横軸は気泡の y 方向における原点からの距離を示す。なお x 方向における気泡移動に関する実験結果と解析結果の値に大きな違いがあったため片対数グラフで示す。

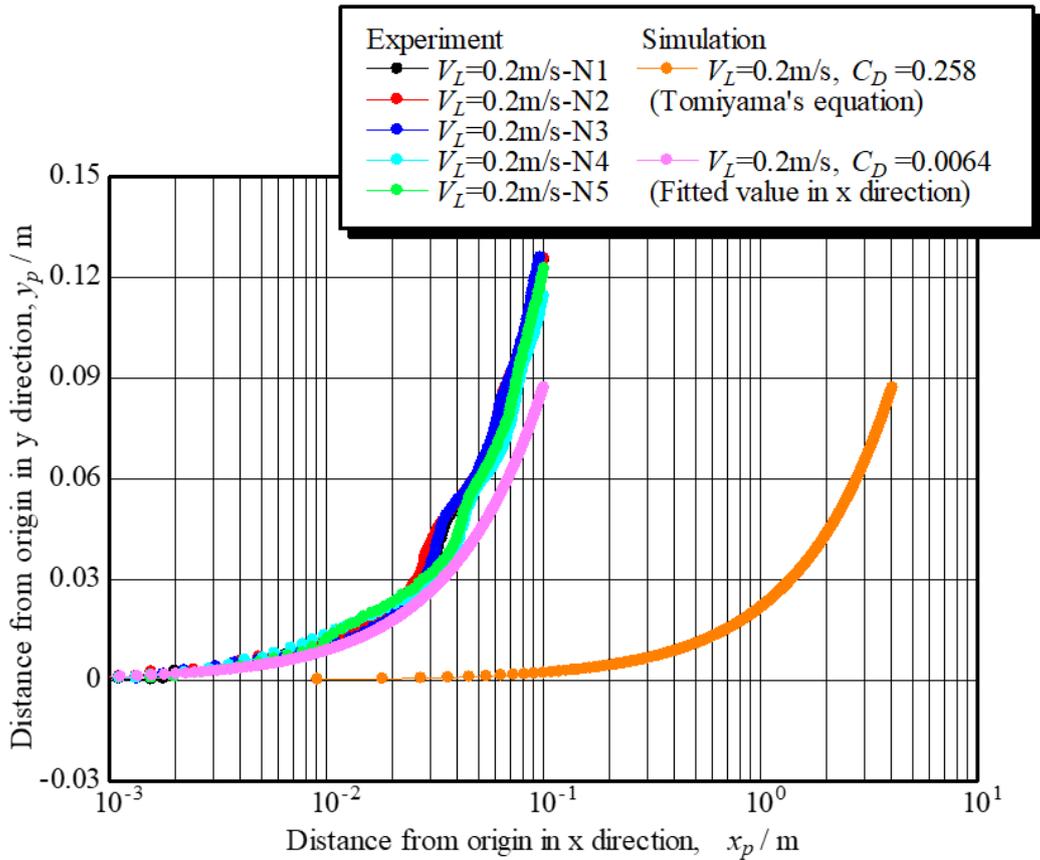


Fig.4-3 $V_L=0.2\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較

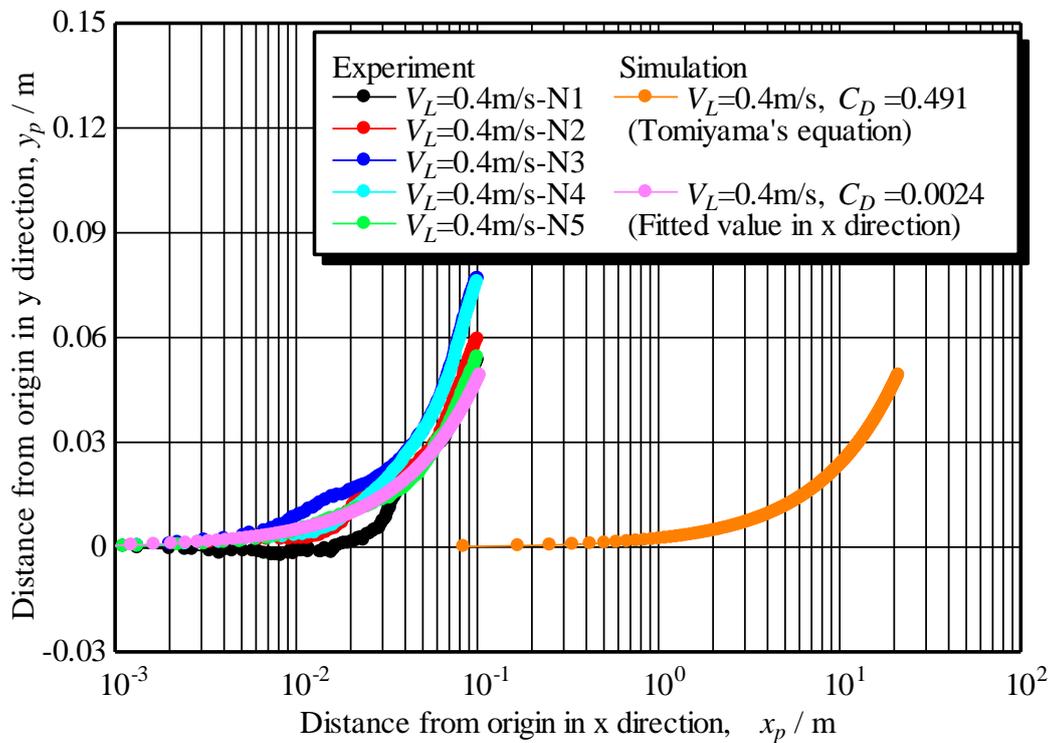


Fig.4-4 $V_L=0.4\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較

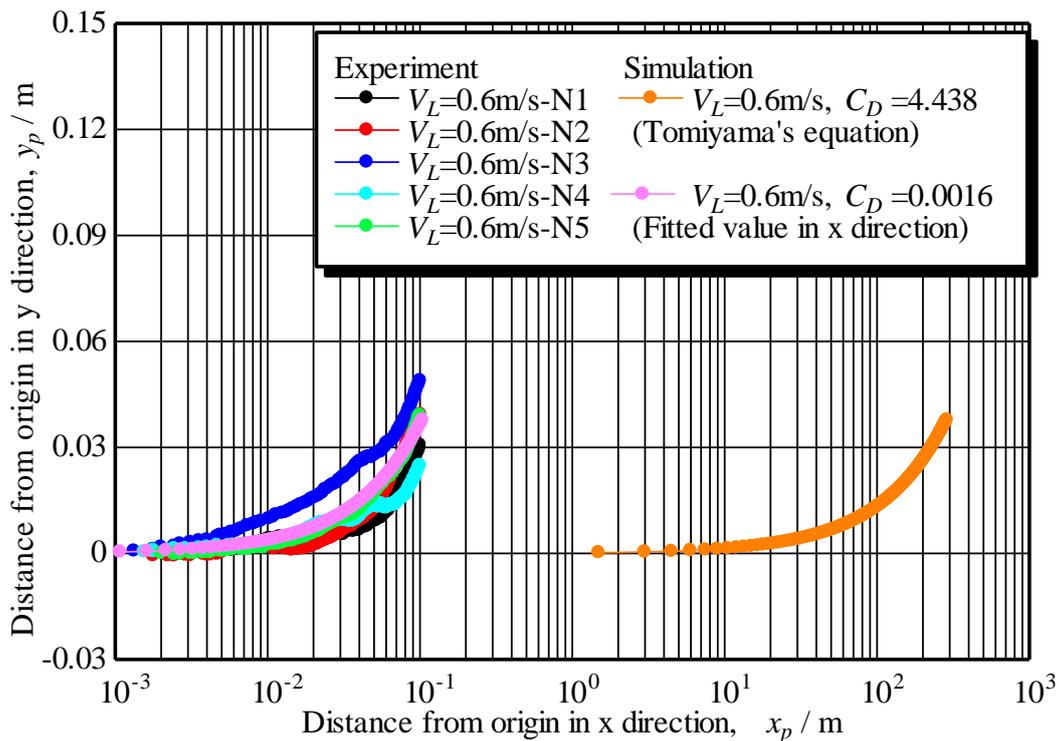


Fig.4-5 $V_L=0.6\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較

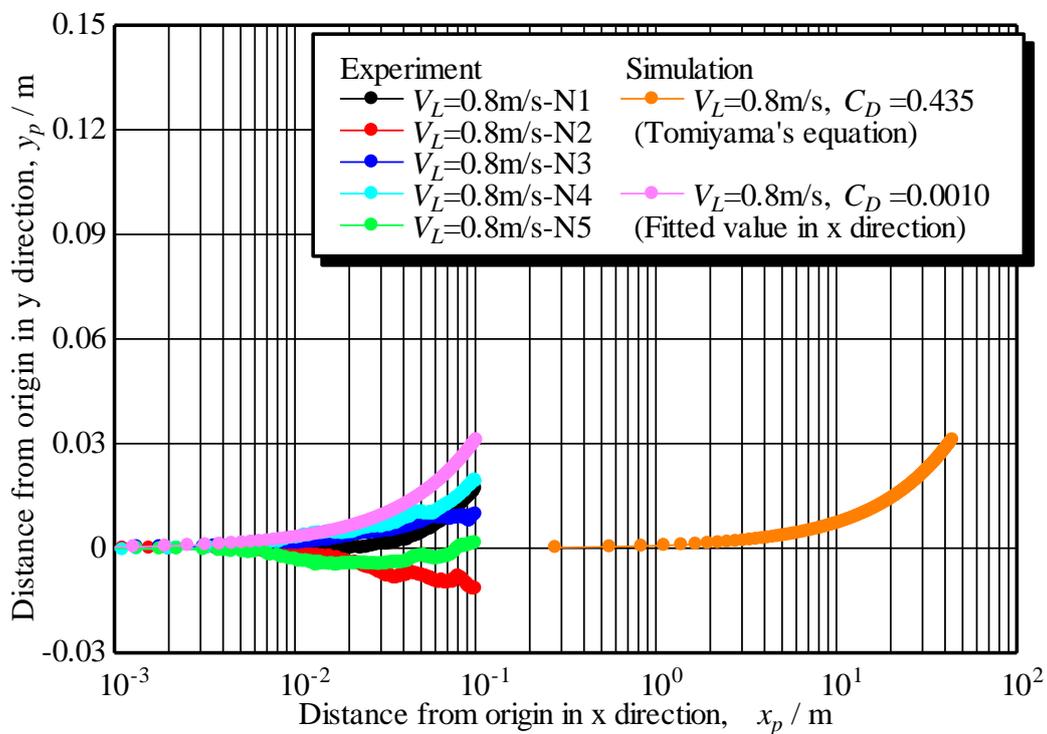


Fig.4-6 $V_L=0.8\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較

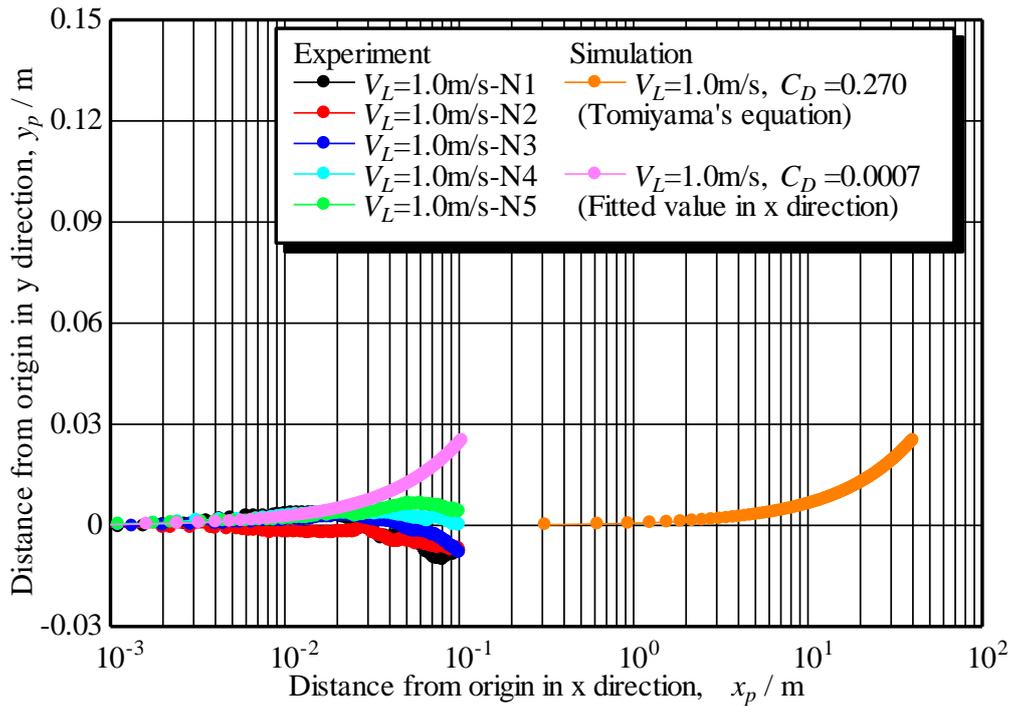


Fig.4-7 $V_L=1.0\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較

富山らの抗力係数モデルを用いた場合における気泡運動の数値解析結果は実験で得られたものとは大きく異なり、気泡の x 方向の最終到達位置に関して言えば 2 オーダーもの相違が見られ、 y 方向では浮力によって上昇していく挙動が見られる。また、浮力が作用する時間の短縮（流速の上昇）に従って上昇挙動は抑えられたが、実験とは異なり気泡の上昇がほとんどなくなることはなかった。 x 方向の移動距離の実験値との相違は富山らが提唱している抗力係数が静止液中における気泡の終端上昇速度（定常状態）を基に導出されていることが主な原因であると思われる。理論的には非定常の流動現象にこの抗力係数は適用できないが、富山らによるとこれらの抗力係数式を非定常流へ適用する場合、気泡が終端状態（定常状態）となるまでに必要な時間（時定数）が対象とする非定常流よりも十分に小さいことで適用可能としている。本実験のように常に流体が激しく流動している状態では気泡が定常状態にはならないことからこれらの抗力係数式をそのまま適用するのは困難であると思われる。

次に x 方向への移動距離を基準に調整した抗力係数を用いた場合の解析結果を見ると計算終了時刻における気泡の x 方向の距離は当然一致するのに対し、 y 方向への移動距離は実験値と解析値で若干の相違が発生した。また、富山らの抗力係数モデルを用いた場合と同様に流速の上昇に伴って気泡が上昇しなくなる挙動は得られなかった。気泡が各方向に異なる速度を持ち、速度に依存する抗力が働く流れ場において各方向に対して共通の抗力係数を与えることが実験値と解析値の相違に繋がっていると考えられるが、2つの解析における

抗力係数が 2 オーダー以上異なるにも関わらず y 方向への気泡到達位置がほぼ変わらないことから y 方向への気泡の運動は抗力ではなく浮力が支配的であると考えられる。ここで、富山らの抗力係数式で算出した抗力係数の値と x 方向への移動距離の合わせ込みによって得られた値を比較したものを Fig.4-8 に示す。横軸は流体からみた気泡の相対速度を示し縦軸に抗力係数を示す。

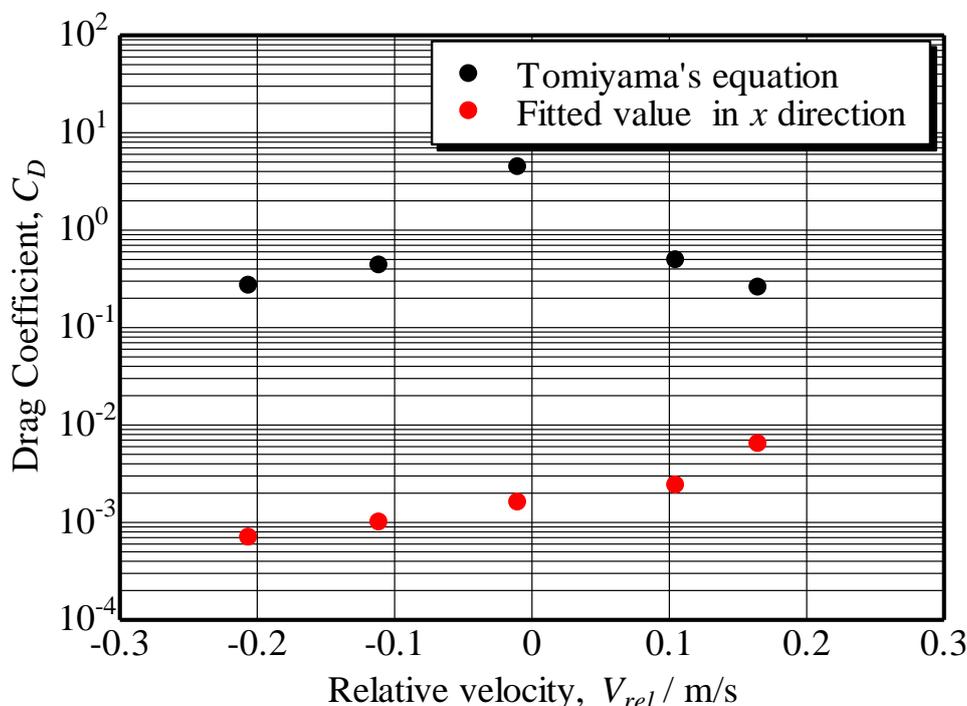


Fig.4-8 流体からみた気泡の相対速度に対する抗力係数

流体から見た気泡の相対速度による抗力係数の変化について富山らの提唱した抗力係数と本実験に合わせた抗力係数を比較すると。富山らの抗力係数式で算出した抗力係数は相対速度 0 付近にて最大値をとり相対速度が 0 から離れるにつれて小さくなる傾向を示すのに対し、実験に合わせた抗力係数は相対速度が上昇するに従い直線的に上昇していく傾向を示した。つまり、相対速度の上昇に伴い抗力係数は指数関数的に増加していくことになる。これらの傾向の違いから、前章と同様に流体中におかれた物体に作用する流体抗力の考え方を、水と気泡に適用することに無理があると考えられる。

前述したとおり抗力係数を大きく変更しても気泡の y 方向への移動距離が変化しないことから抗力よりも浮力の影響が大きいと考えられる。しかし、通常一定値で与えられる浮力では実験値を正確に推定することができなかった。つまり y 方向への気泡の運動には浮力に影響のある仮想質量係数が相対速度や粒子レイノルズ数によって変化すると考えるのが妥当であろう。そのため y 方向への移動を仮想質量係数で、 x 方向への移動を抗力係数にて再度合わせ込みを行い、気泡の相対速度に対する仮想質量係数および抗力係数の相関について検討した。Fig.4-9~Fig.4-13 に実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数を用いたとき

の数値解析結果を示す。また Fig.4-14 に流体から見た気泡の相対速度と実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数との関係を示し、それぞれのグラフに対して一次関数をモデルとした最小二乗法によって求めた近似線を示す。

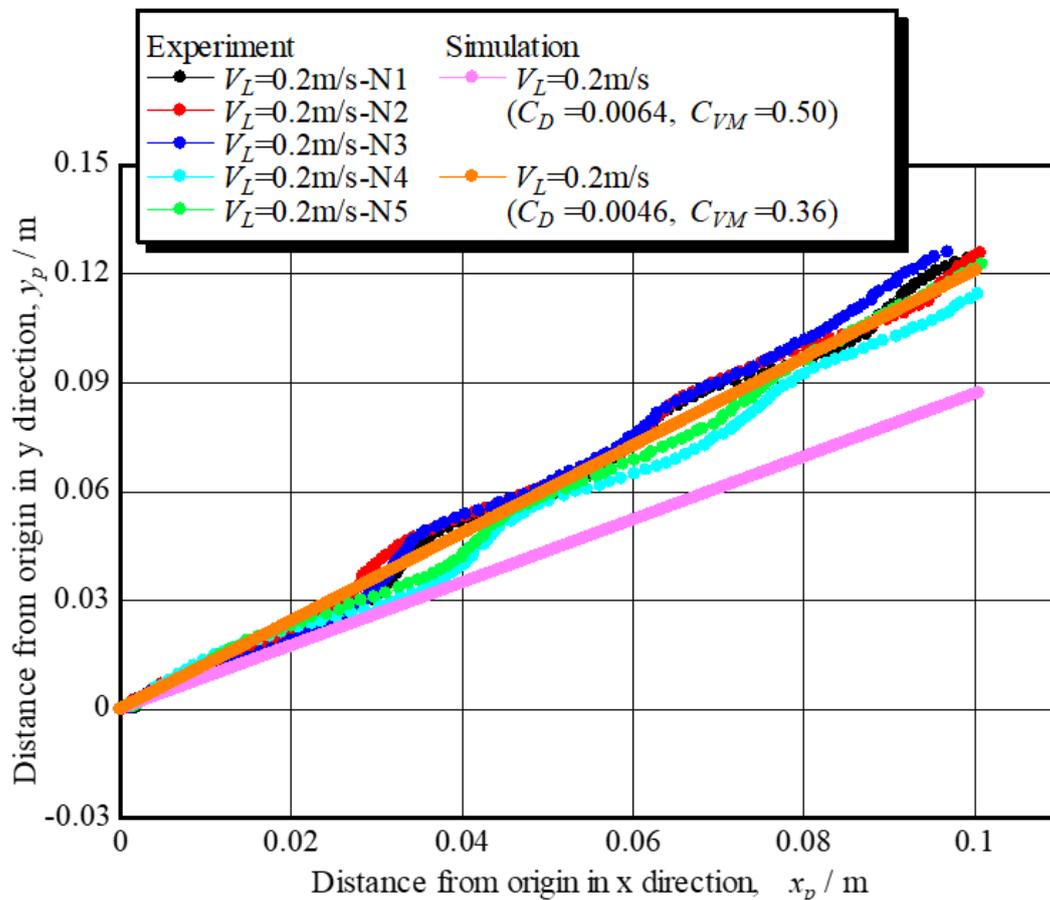


Fig.4-9 $V_L=0.2\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較
(実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数を使用した場合)

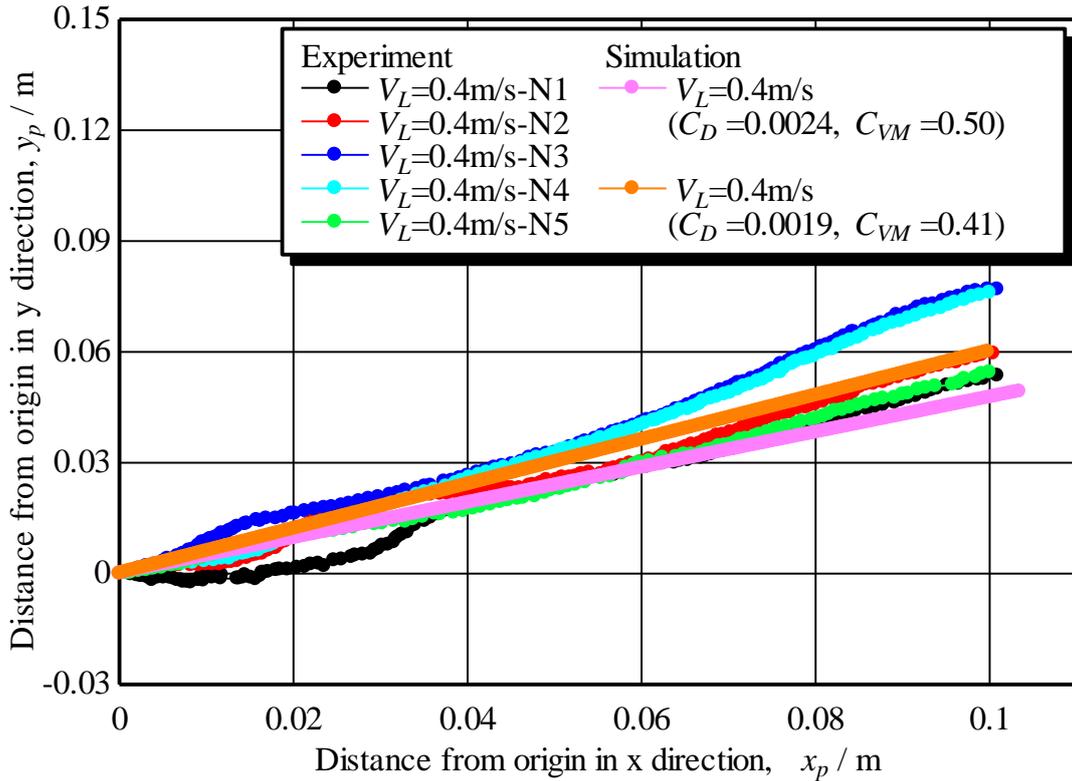


Fig.4-10 $V_L=0.4\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較
(実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数を使用した場合)

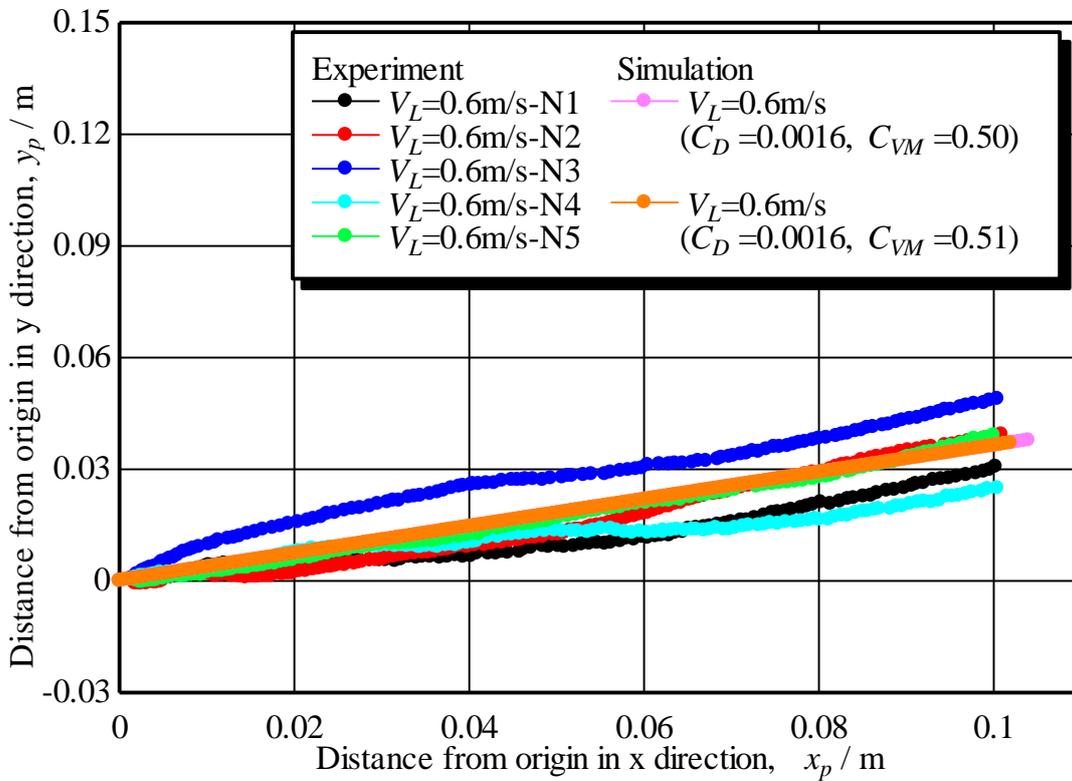


Fig.4-11 $V_L=0.6\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較
(実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数を使用した場合)

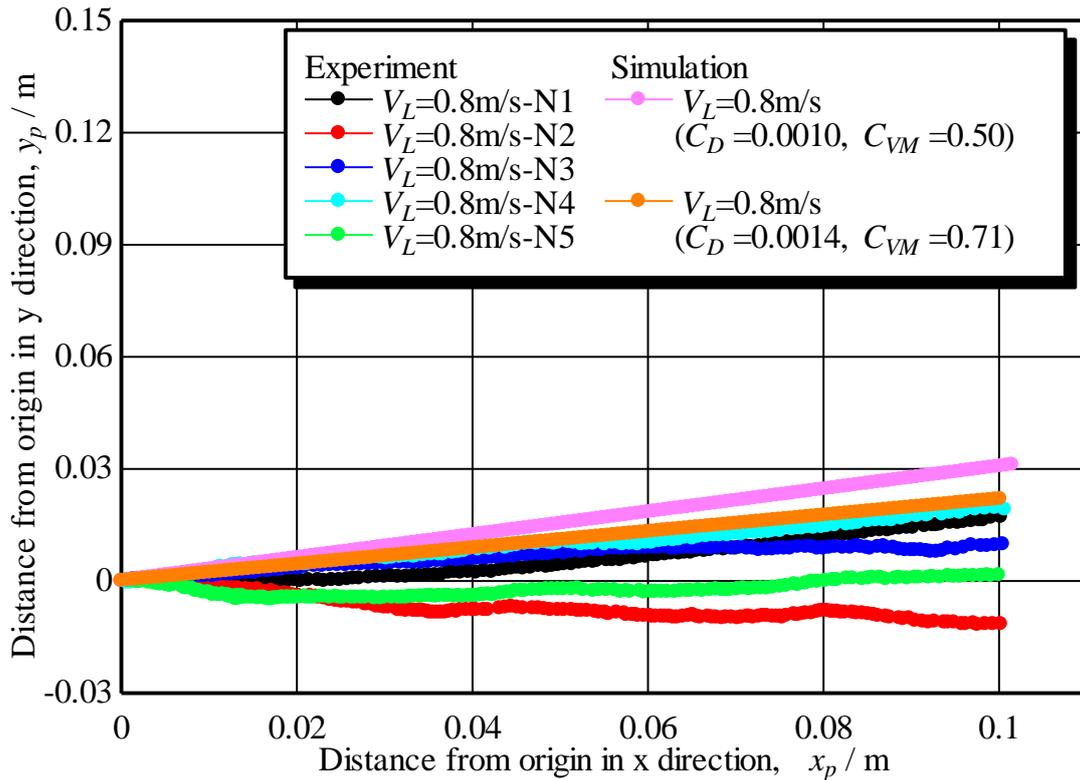


Fig.4-12 $V_L=0.8\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較
(実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数を使用した場合)

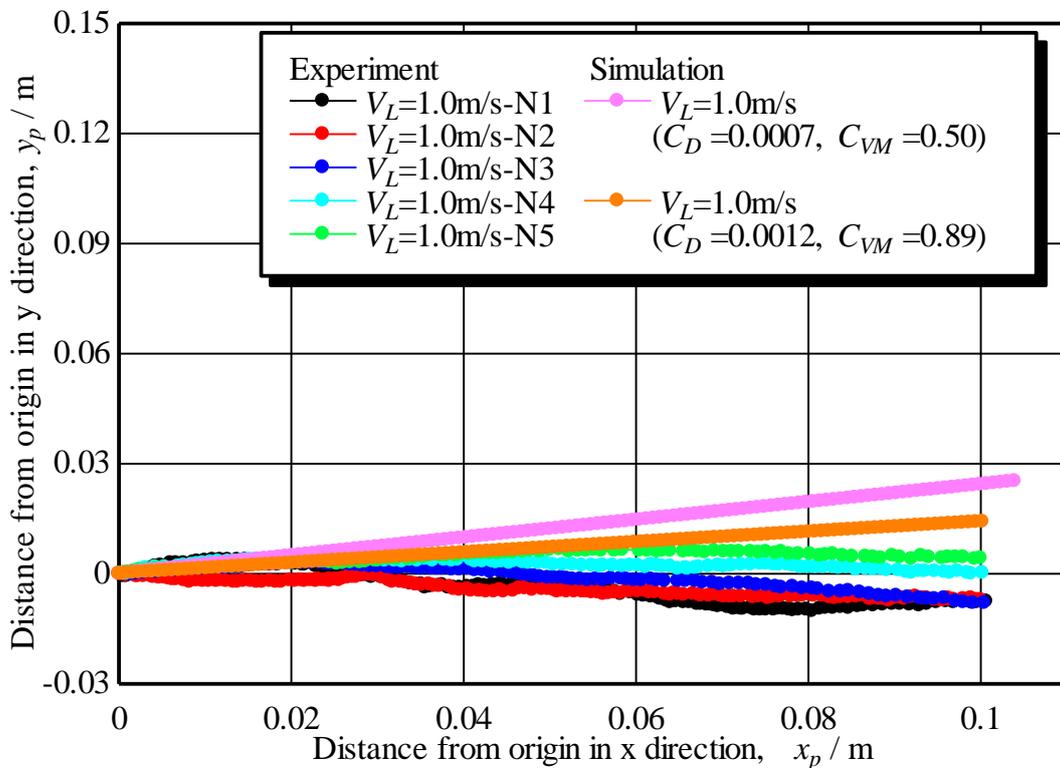


Fig.4-13 $V_L=1.0\text{m/s}$ の条件下における気泡移動経路の実験と解析との比較
(実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数を使用した場合)

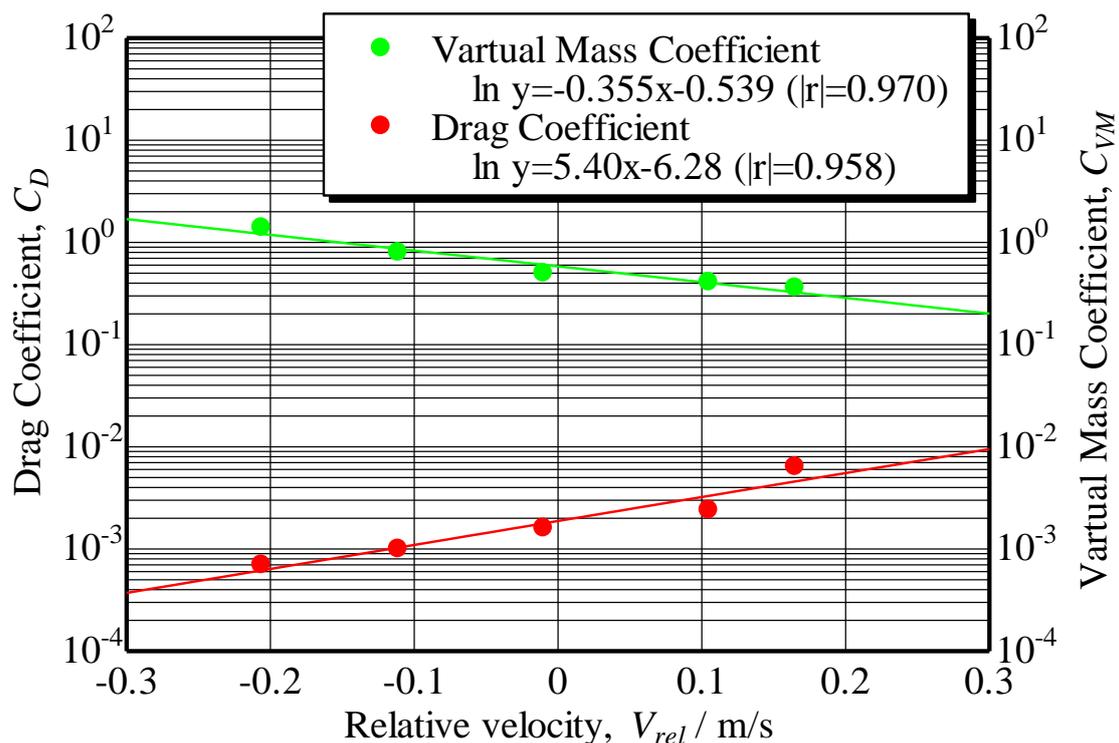


Fig.4-14 相対速度に対する実験に合わせた仮想質量係数および抗力係数

Fig.4-14 を見ると流体から見た気泡の相対速度に対する仮想質量係数は相対速度の上昇に伴い減少する傾向を示した。つまり抗力係数とは異なり指数関数的に減少していく傾向である。

流体中を運動する気泡は固体粒子とは異なり相対速度の上昇に伴い力を受け、気泡の形状が変化することが予想される。ここで鳥野ら²⁷⁾は流体中に存在する物体に働く仮想質量力に関して、流体の流れ方向に対して垂直な物体の面のアスペクト比が測定される仮想質量係数に及ぼす影響について検討しており、アスペクト比の上昇に伴い仮想質量係数が減少傾向にあることを示している。そのため、本実験においては相対速度の上昇に伴って気泡に形状変化が生じ、 y 方向に垂直な面のアスペクト比が変化するとともに仮想質量係数が変化したと考えられる。また、形状の変化については仮想質量係数の変化から流速方向に球形気泡が伸びるように変化したと考える。

4-5 ダイカスト湯流れにおける気泡追跡への適用

本章では流体中に存在する粒子に働く力に関する既存の知見を整理し、気泡の移動に関する数値解析を実施した。第3章「回流水槽を用いた気泡移動に関する基礎調査実験」の結果をもとに抗力係数および仮想質量係数の合わせ込みを実施したところ流体から見た気泡の相対速度に応じてそれぞれの係数が指数関数的に増減する傾向を得た。これらの結果をもとに、第2章で実施したダイカスト湯流れにおける気泡追跡実験における気泡挙動の数値解析を試みる。

Fig.4-15 に数値解析対象の概要を示す。第2章で実施したダイカスト湯流れにおける気泡の上昇挙動を計算対象とし、計算時刻を気泡発生の時刻 $0s$ から $0.36m$ 離れたキャビティ上部に到達するまでとした。気泡の上昇方向に働く重力、浮力、抗力、仮想質量力を考慮した運動方程式を以下に示す。なお、 y 方向の正の向きを気泡の上昇方向とした。計算に使用した物性値は第2章第3章で使用したものと基本的には同じだが、抗力係数および仮想質量係数に関しては富山らの抗力係数式から算出した値に仮想質量係数を一定とした場合と、もう一つは前項で示したように、流体から見た気泡の相対速度に対して変化させた場合の値をそれぞれの近似線から算出し計算に用いた。

$$\rho_p \frac{d^2 y_p}{dt^2} = -C_{VM} \rho_L \frac{d^2 y_p}{dt^2} + (\rho_L - \rho_p)g - \frac{4}{3d} C_D \rho_L \left| \frac{dy_p}{dt} - V_{Ly} \right| \left(\frac{dy_p}{dt} - V_{Ly} \right) \quad (4.20)$$

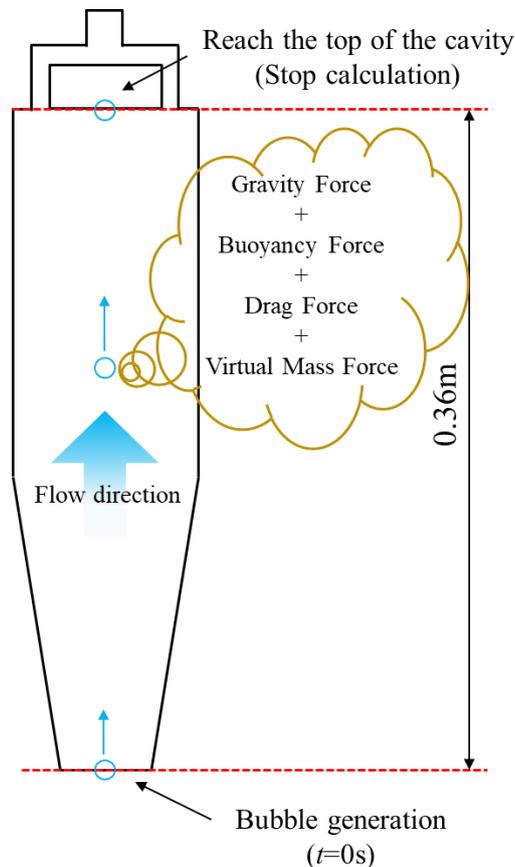


Fig.4-15 数値解析対象の概要

解析によって得られた気泡の速度変化を第 2 章で得られた実験結果と比較したものを Fig.4-16~Fig.4-18 に示す。

$V_{plunger}=0.1、0.2\text{m/s}$ では富山らの抗力係数式および一定の仮想質量係数を与えた場合は第 3 章でも見られたように気泡の移動速度に大きな差が発生したのに対し、前項で提示した抗力係数および仮想質量係数の近似式によって得られた値を用いた場合は実験で得られた気泡の速度ならびにキャビティ上部へ到達する時刻に関してもおおよそ推定できている。

しかし、 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ の条件では $V_{plunger}=0.1、0.2\text{m/s}$ に比べて実験における気泡速度および測定終了時刻をうまく推定できておらず、推定可能なものとそうでないものがあることがわかり、これらの結果から以下のことが明らかとなった。

- 富山らの抗力係数式では本研究で対象とする非定常の流動場における気泡の挙動を精度良く再現することは困難である
- 相対速度の上昇に伴い指数関数的に上昇する抗力係数および減少する仮想質量力の方程式は富山らの抗力係数式を用いた場合に比べて気泡の挙動を精度良く推定できる

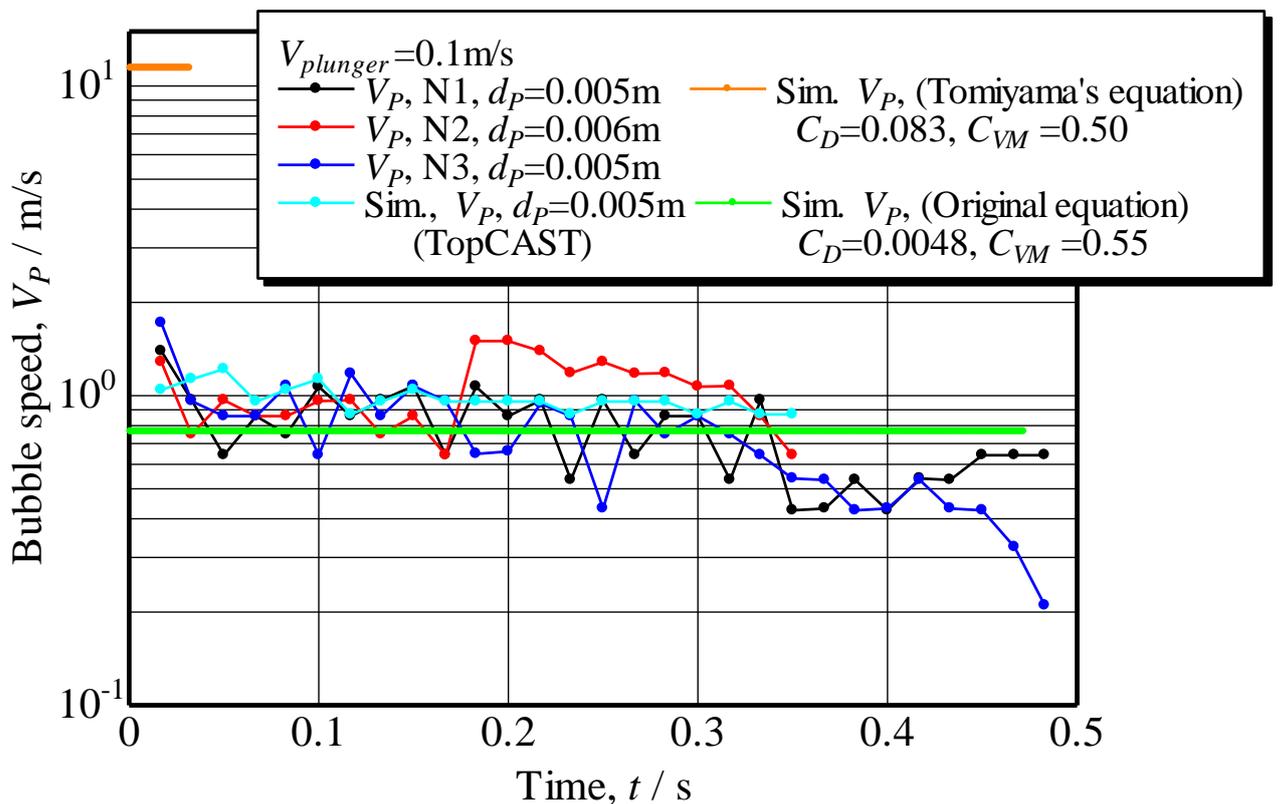


Fig.4-16 プランジャー速度 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ における気泡速度変化の実験と解析との比較

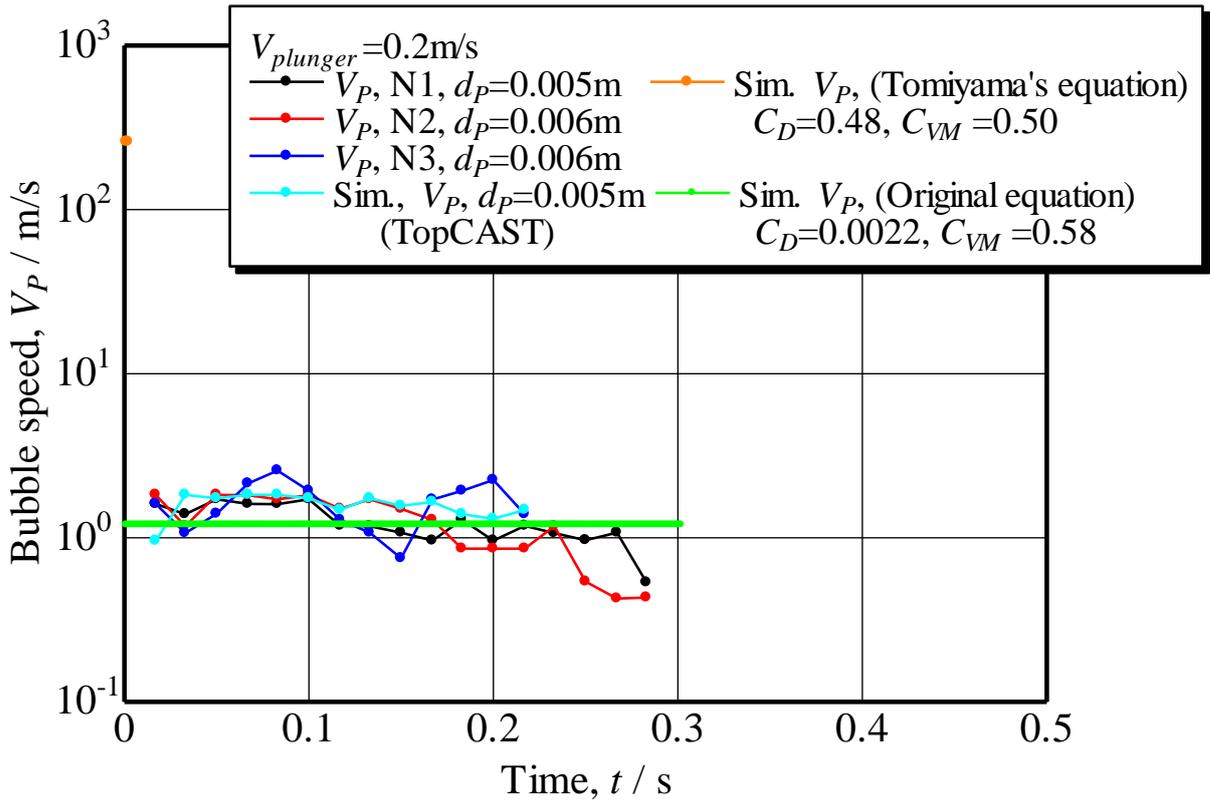


Fig.4-17 プランジャー速度 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ における気泡速度変化の実験と解析との比較

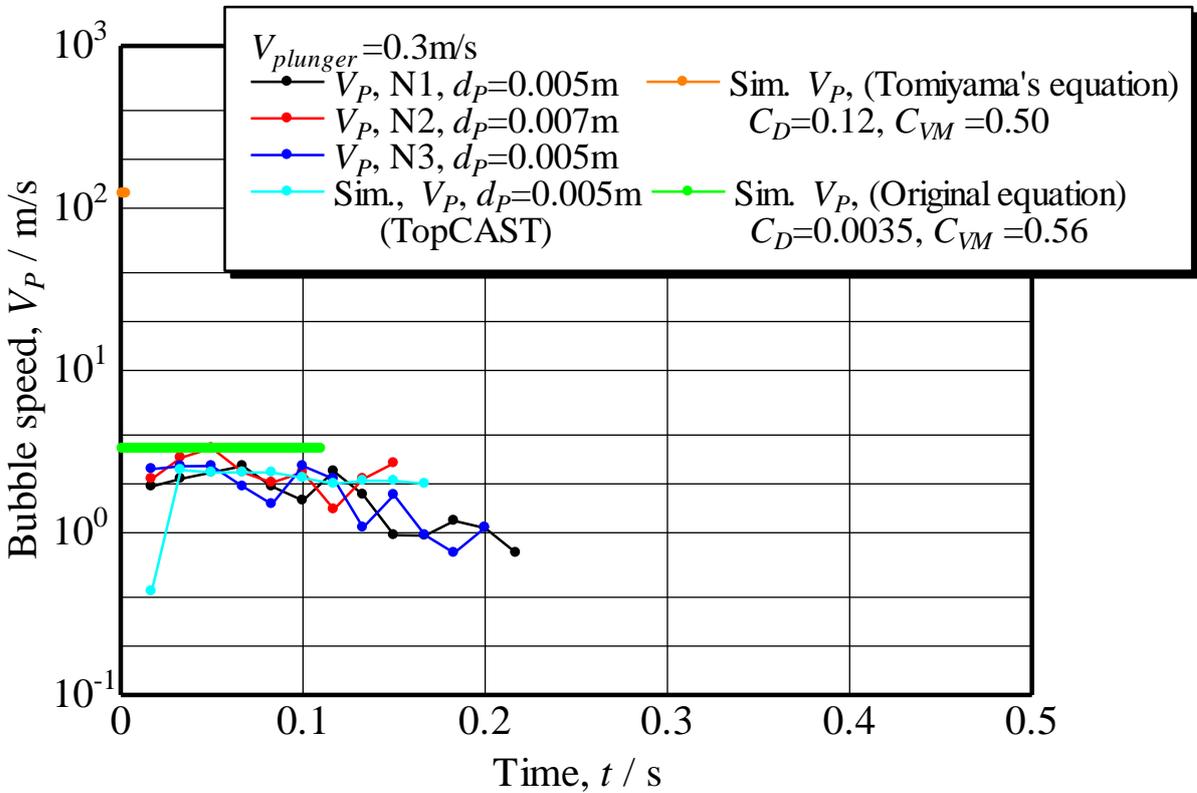


Fig.4-18 プランジャー速度 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ における気泡速度変化の実験と解析との比較

4-6 まとめ

流動中の流体中を流れる気体粒子の運動を精度よく予測できるモデルの構築を目的とした数値シミュレーションを行った。前章の回流水槽を用いた実験を対象として抗力に着目した気泡の運動方程式をルンゲクッタ法により解き解を求めた。

抗力係数に関して流体と気泡の界面における汚れ度を考慮できる富山らの構成方程式を用いた場合、本実験における気泡の挙動を精度よく再現することができなかった。そこで実験との合わせ込みの結果得られた相対速度の上昇に伴って指数関数的に増加する抗力係数および減少する仮想質量係数を用いたところ比較的良好に気泡の挙動を推定することができた。

第6章 結言

鑄造において発生する各種の欠陥を製品開発の初期段階で予測することのできるツールである鑄造 CAE だが、欠陥予測精度の問題から満足いく仕様になっているとはいえない。本研究では湯流れと凝固に起因する鑄造欠陥に対する欠陥予測精度向上のための知見を得ることや現状のソフトウェアに必要な機能等を提案することを目的として様々な取り組みを行った。

【湯流れに起因する欠陥について】

鑄造 CAE ソフトの介在物の追跡を目的とする既存のマーカー機能を用いて気泡挙動のシミュレーションを試みたところ実験値を精度良く推定することができなかった。そのため気泡の運動を支配している要因の解明および解析可能な解析手法の考案が必要であった。

気泡運動における支配要因の究明のため回流水槽を用いた気泡追跡実験を行った。 x 、 y 方向における気泡速度の測定をしたところ、流れ方向への気泡速度は上昇するが流速と気泡速度は等しくなるわけではなく、また y 方向の流速には浮力が作用する条件と作用しない条件があることが明らかになった。

気泡の運動を精度良く予測できるモデルの構築を目的とした数値解析を行った。抗力係数に関して流体と気泡の界面における汚れ度を考慮できる富山らの構成方程式を用いた場合、本実験における気泡の挙動を精度よく再現することができなかった。そこで相対速度の上昇に伴って指数関数的に増加する抗力係数および減少する仮想質量係数を用いてダイカスト湯流れにおける気泡追跡を再度試みたところ比較的良好に気泡の挙動を推定することができた。

【凝固に起因する欠陥について】

ある鑄物に発生する欠陥に対して、鑄造 CAE による欠陥予測と、鑄造 CAE による欠陥対策を実施した。

鑄造 CAE による欠陥予測では、実験データを活用した比較的精度の良い予測手法を示すことができた。また鑄造 CAE による欠陥対策では、候補の対策に対してシミュレーションを実施し良否を判断するとともに、実鑄造における制約条件の中での対策を実施することができた。一連の工程、本研究で示した作業チャートは、鑄造 CAE 従事者が日々取り組まなければならない内容の一助になると考えられる。

参考文献

- 1) 大塚幸男 “鋳造 CAE の実用化動向と今後の課題” 鋳造工学第 78 巻, (2006), pp.609-614
- 2) 公共社団法人日本鋳造工学会, 基礎から学ぶ鋳造工学, 公益社団法人日本鋳造工学会, (2015), p.185
- 3) 前田安郭 “鋳造 CAE の技術動向と粒子法” 型技術 Vol.34 No.5, (2019), pp.32-35
- 4) 西村信司, 佐藤健二 “AD12 合金鋳物の衝撃特性に及ぼすポロシティの影響”, 東京都立産業技術センター研究報告第 10 号 (2015), pp.10-13
- 5) Tomiyama, A., Kataoka, I., Zun, I. and Sakaguchi, T., “Drag Coefficients of Single Bubbles under Normal and Micro Gravity Conditions”, JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, (1998), pp.472-479.
- 6) Clift, R. and Gauvin, W. H., “The Motion of Particles in Turbulent Gas Streams”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, (1971), pp.425-552.
- 7) Kamp, A., Colin, C. and Fabre, J., “Bubbly Flow in a Pipe: Influence of Gravity upon Void and Velocity Distributions”, Fluid Mechanics and Thermodynamics, (1993), pp.1418-1425.
- 8) 堤信久 “鋳造欠陥とその考え方” 鋳物第 61 巻, (1989), pp.852-860
- 9) 公共社団法人日本鋳造工学会, 基礎から学ぶ鋳造工学, 公益社団法人日本鋳造工学会, (2015), pp.67-70
- 10) 安藤彰祐, 羽座健二 “鋳造シミュレーションソフト TopCAST”, 鋳造工学第 86 巻, (2014), pp.946-950
- 11) Y. Tsuiki and Y. Maeda “Mold Filling Behavior Varying with Porous Media Information”, Proc. of The 6th Korea-Japan Conference for Young Foundry Engineers, (2016), pp.43-46
- 12) 伊藤弘哲, 前田安郭 “薄肉鋳物を対象にした湯流れシミュレーションにおける計算条件”, 日本鋳造工学会 第 167 回全国公演大会概要集, (2015), p.3
- 13) 前田安郭, 野村宏之 “アルミニウム合金ダイカストにおける破断チル層の生成と移動の数値実験”, 鋳造工学第 78 巻, (2006), pp.654-660
- 14) 日本機械学会, JSME テキストシリーズ流体力学, 丸善出版, (2005), pp.113-114
- 15) Peebles, F. K. and Garber, H. J., Chemical engineering progress, 49 (1953), p.2
- 16) Ishii, M. and Chawla, T. C., Argonne National Laboratory Report ANL-79-105 (1979)
- 17) Grace, J. R., Trans. Inst. Chemical engineering progress, 51 (1973), p.116
- 18) Levich, V., Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki, 19 (1949), p.18
- 19) Grace, J. R., Wairegi, T. and Nguyen, T. H., Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 54 (1976), p.167
- 20) 富山明男, 片岡勲, 坂口忠司 “気泡の抗力係数に関する研究 (第 1 報, 静止液中単一気泡の抗力係数)”, 日本機械学会論文集 (B 編) 61 巻 587 号, (1995), pp.2357-2364
- 21) 富山明男, 片岡勲, 福田匠, 坂口忠司 “気泡の抗力係数に関する研究 (第 2 報, 気泡群の抗力係数と非定常流への適用性)”, 日本機械学会論文集 (B 編) 61 巻 588 号, (1995), pp.2810-2817
- 22) Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., “Bubbles, Drops, and Particles”, Academic Press, (1978)

- 23) Aybers, N/ M. and Tapucu, A., “Studies on the Drag and Shape of Gas Bubbles Rising through a Stagnant Liquid”, *Warme-und Stoffubertragung*, 2-3, (1969), pp.171-177.
- 24) 日本機械学会, “JSME テキストシリーズ流体力学”, 丸善出版, (2005), pp.3-5
- 25) Milne-Thomson, L. M., “Theoretical Hydrodynamics”, Macmillan Press, 5th Edition, (1968).
- 26) Drew, D., Cheng, L. and Lahey Jr., R. T., “The Analysis of Virtual Mass Effects in Two-Phase Flow”, *Int. J. Multiphase Flow*, 5-4, (1979), pp.233-242.
- 27) 烏野慶一, 野中晃二, 前川和義, 秋元研一 “箱型浮体構造物の付加質量チャート”, 関西造船協会誌第 229 号, (1998)
- 28) Frans Mampaey and Zhi An Xu “Simulation and Experimental Validation of Mould Filling”, *WELDING AND ADVANCED SOLIDIFICATION PROCESSES VII*, (1995), pp.3-14
- 29) 馬場周平, 宮本義弘, 三橋正博, 松原学 “溶湯による金型の過熱量を用いた冷却管形状及び配置の最適化”, *鑄造工学*第 83 卷, (2011), pp.13-19
- 30) 郡司好喜 “知っておきたい金属凝固の基礎(II)”, *鉄と鋼* Vol.80, No.5, (1994), pp.208-221
- 31) 柏井茂雄, 呉田博司, 江川勝一, 朱金東, 大中逸雄 “重力鑄造の湯流れシミュレーションにおける湯口境界条件の設定”, *日本鑄造工学会 第 139 回全国公演大会概要集*, (2001), p.139
- 32) J.Campbell, “Complete Casting Handbook”, Butterworth-Heinemann, (2011), p.663
- 33) 大中逸雄, *コンピュータ伝熱凝固解析入門*, 丸善株式会社, (1985), p.331

謝辞

本研究の遂行並びに本論文をまとめるにあたり、終始適切な御指導、御鞭撻を賜りました大同大学工学部機械工学科 前田安郭教授に深甚なる謝意を申し上げます。また、本論文をご精読いただきました神崎隆男教授、坪井涼准教授に心より感謝致します。

第2章の「ダイカスト湯流れにおける気泡追跡」における実験装置は一昨年からの共同研究としてトヨタ自動車株式会社様より拝借しました。実験装置およびシミュレーションソフトの改善をしてくださったトヨタ自動車株式会社様に感謝いたします。

第3章の「回流水槽を用いた気泡移動に関する基礎調査実験」は坪井研究室の皆様のご協力のもと実施しました。坪井涼准教授ならびに坪井研究室の皆様に心より感謝申し上げます。

第5章の「鋳造 CAE を用いた欠陥発生の原因究明と対策方法」は委託研究として日本ニューマチック工業株式会社と実施しました。日本ニューマチック工業株式会社 空機技術課 若林美歩様に感謝いたします。

最後に、日々の研究並びに生活面においてお世話になりました機械工学科 前田研究室の皆様方と大学院生の親愛なる皆様方に心よりお礼申し上げます。

研究業績

口頭発表

1. 日本鑄造工学会 第 172 回全国講演大会

発表題目：「水モデルダイカスト装置を用いた湯流れ時の空気巻き込み」

著者：○新井田篤，前田安郭

開催日：2018 年 10 月 13 日～14 日

開催場所：石川県地場産業振興センター

2. 東海 YFE フォーラム 2018 (ポスター発表)

発表題目：「ダイカスト湯流れにおける射出条件と空気巻き込みの関係」

著者：○新井田篤，前田安郭

開催日：2018 年 11 月 30 日

開催場所：ウイנקあいち

3. 日本鑄造工学会 第 131 回非鉄鑄物研究部会

発表題目：「鑄造 CAE 研究部会の共通解析モデルに対する欠陥精度予測向上」

著者：○新井田篤，築城佑果，前田安郭

開催日：2019 年 3 月 1 日

開催場所：ウイנקあいち

4. 日本鑄造工学会 第 173 回全国講演大会

発表題目：「水モデルダイカスト装置を用いたボス・リブを有する薄肉平板キャビティの湯流れ解析」

著者：○尾崎太一，新井田篤，前田安郭

開催日：2019 年 5 月 18 日～19 日

開催場所：千葉工業大学

5. 東海 YFE フォーラム 2019 (ポスター発表)

発表題目：「ダイカストの水モデル装置を用いた凸形状を有するキャビティの湯流れと空気巻き込み」

著者：○尾崎太一，新井田篤，前田安郭

開催日：2019 年 11 月 29 日

開催場所：ウイנקあいち

6. The World Foundry Organization Technical Forum and 59th IFC Portoroz 2019

発表題目：「Observation of Air Entrapment during Mold Filling of Die Casting Using Water Model Experiment」

著者：○Atsushi Niida, Yasuhiro Maeda

開催日：2019年9月19日～20日

開催場所：Congress Centre in Mind Hotel Slovenia

投稿論文

1. 日本金属学会 Materials Transactions へ論文投稿中

論文題目：「Observation of Air Entrapment during Mold Filling of Die Casting Using Water Model Experiment」

著者：新井田篤，前田安郭

付録 A 第 2 章「ダイカスト湯流れにおける気泡追跡」におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動



Fig.A-1 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N1)



Fig. A-2 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N2)

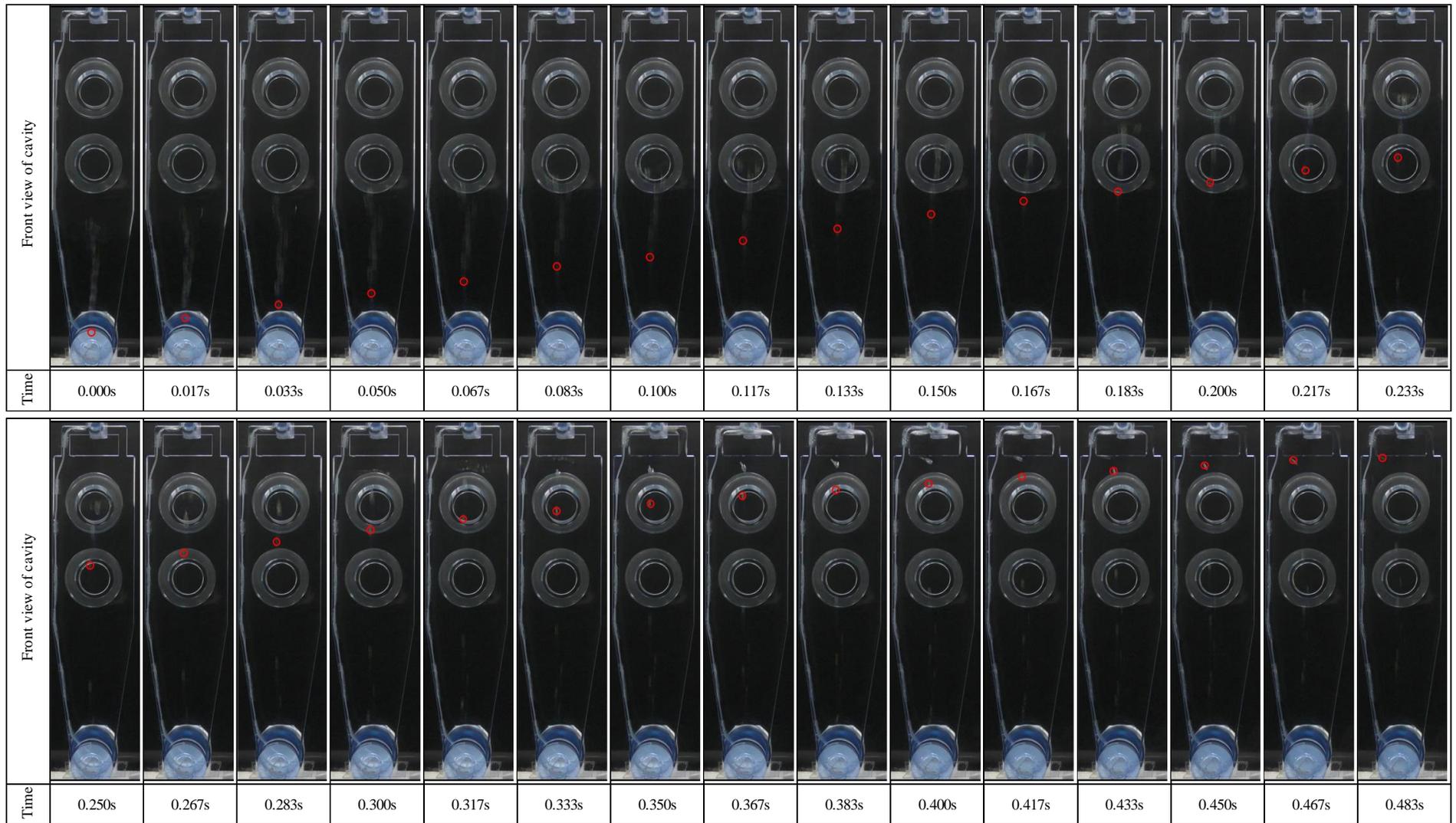


Fig. A-3 $V_{plunger}=0.1\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N3)

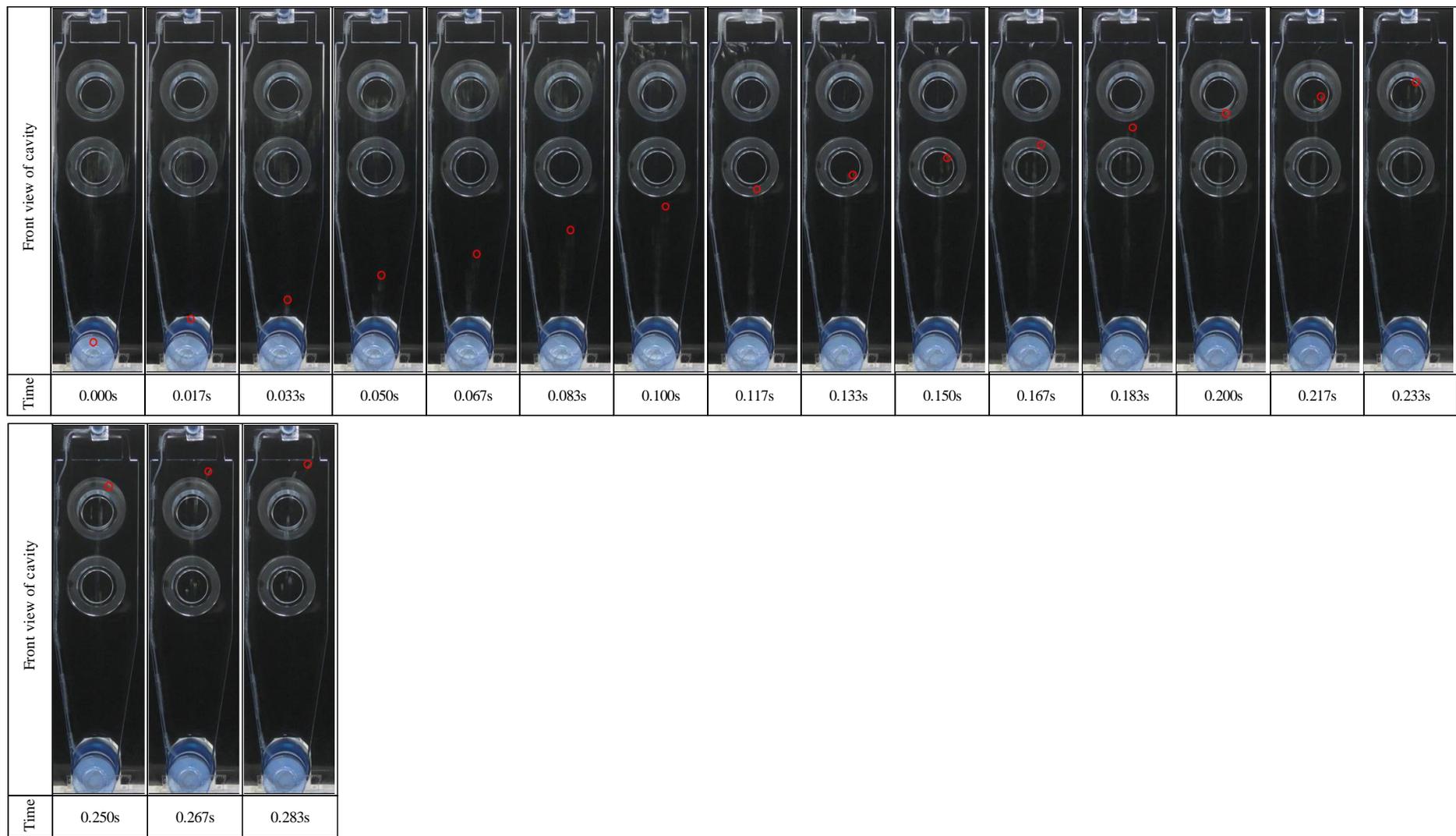


Fig. A-4 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N1)

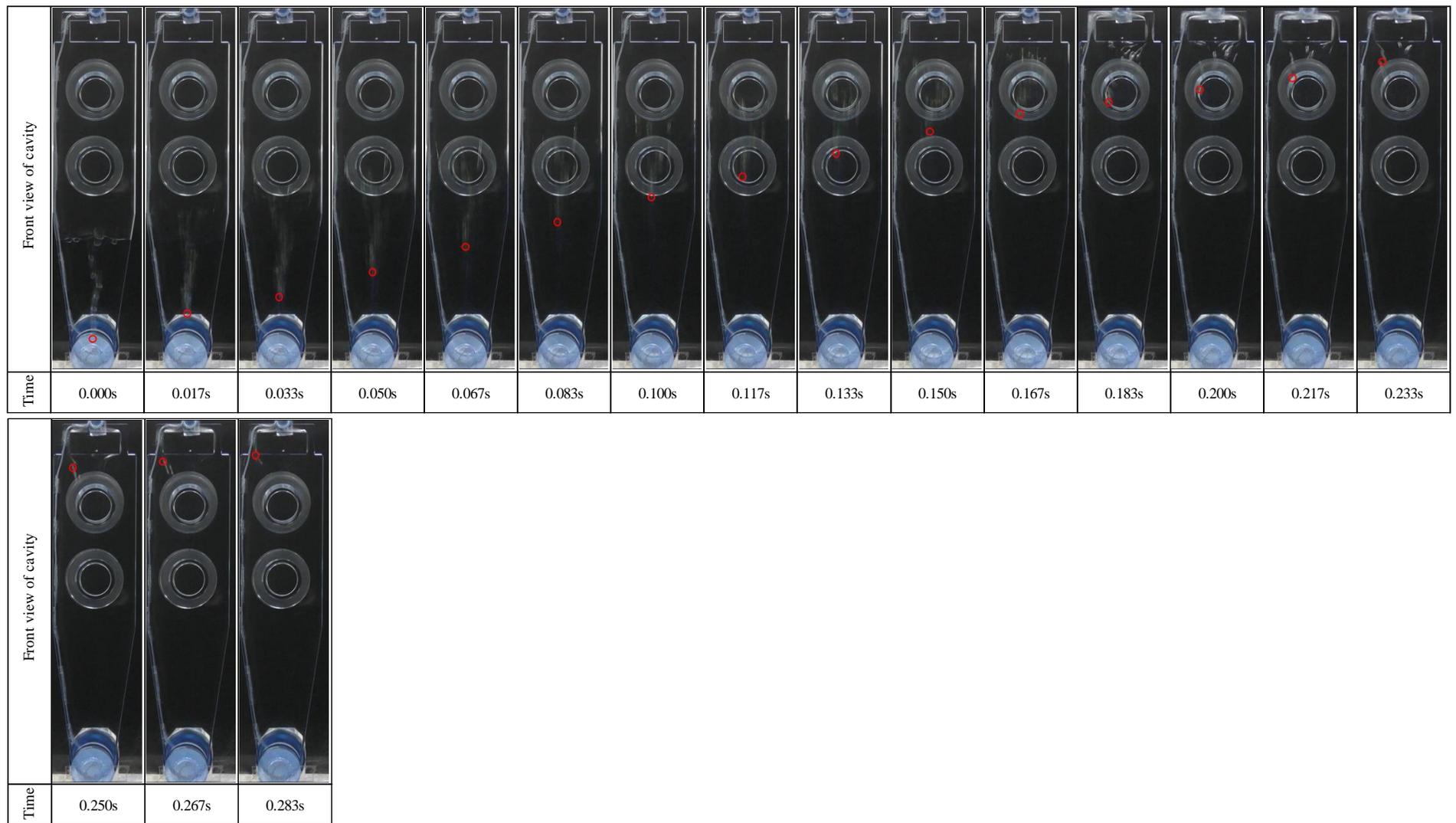


Fig. A-5 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N2)

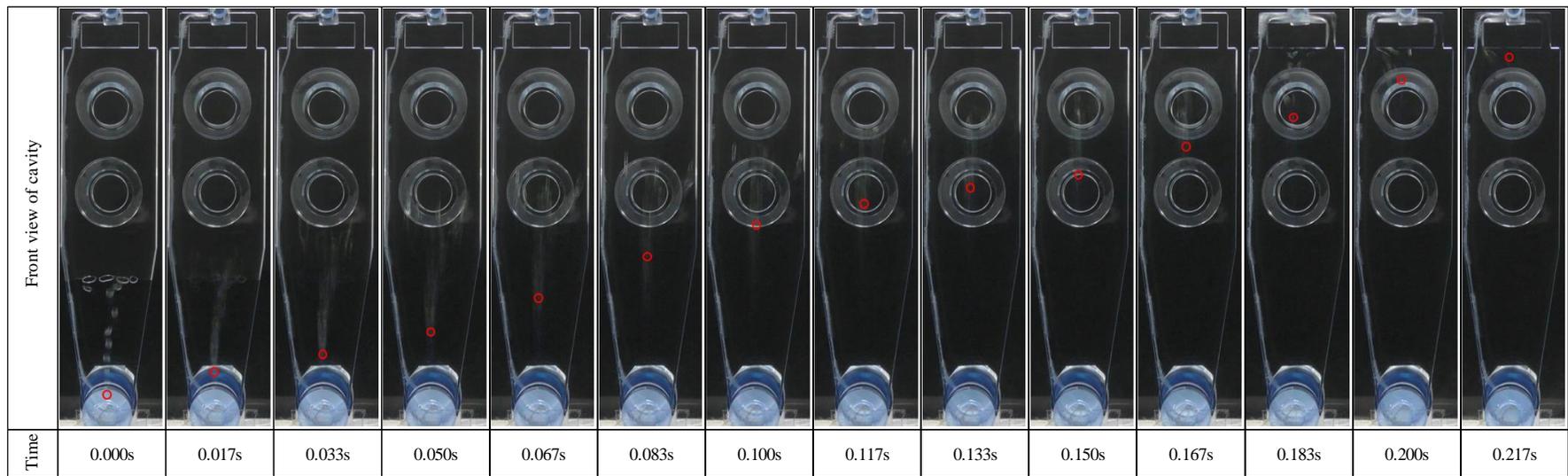


Fig. A-6 $V_{plunger}=0.2\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N3)

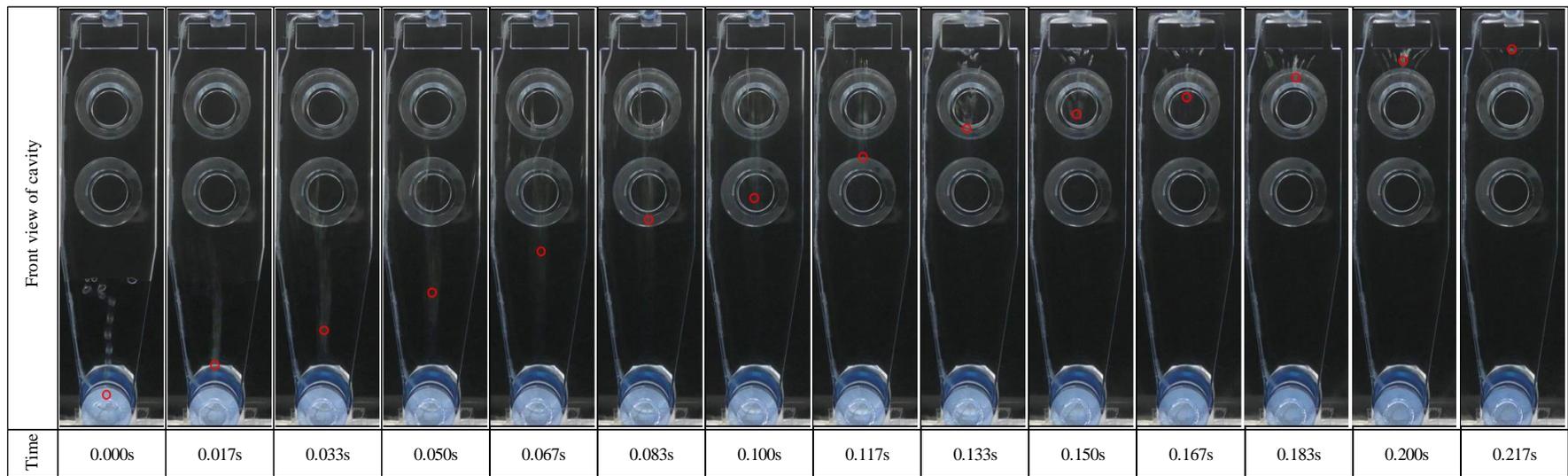


Fig. A-7 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N1)

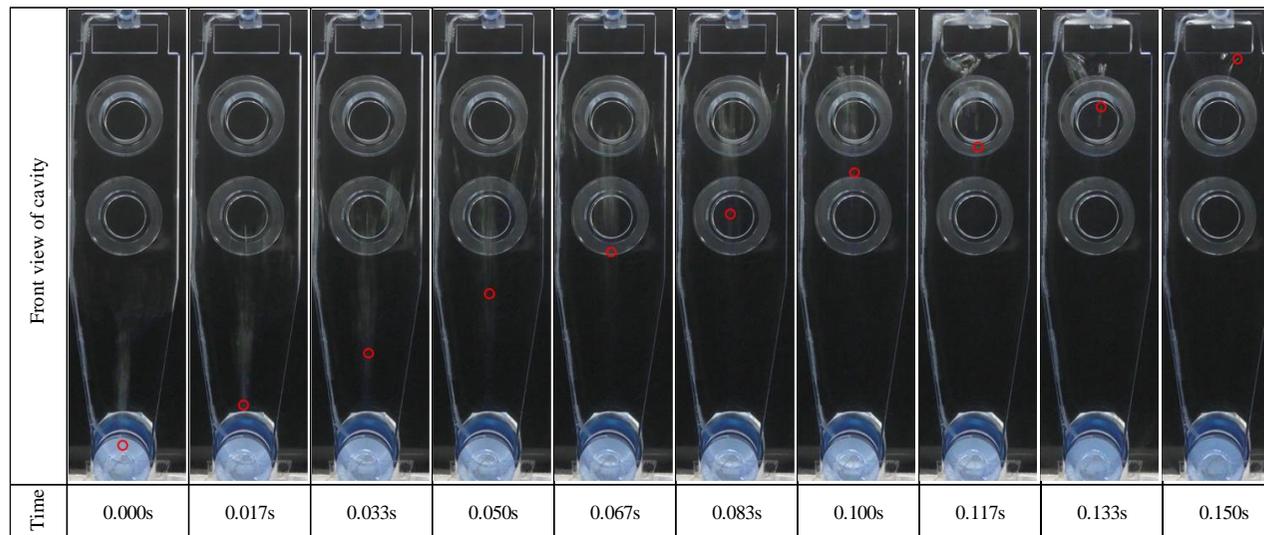


Fig. A-8 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N2)

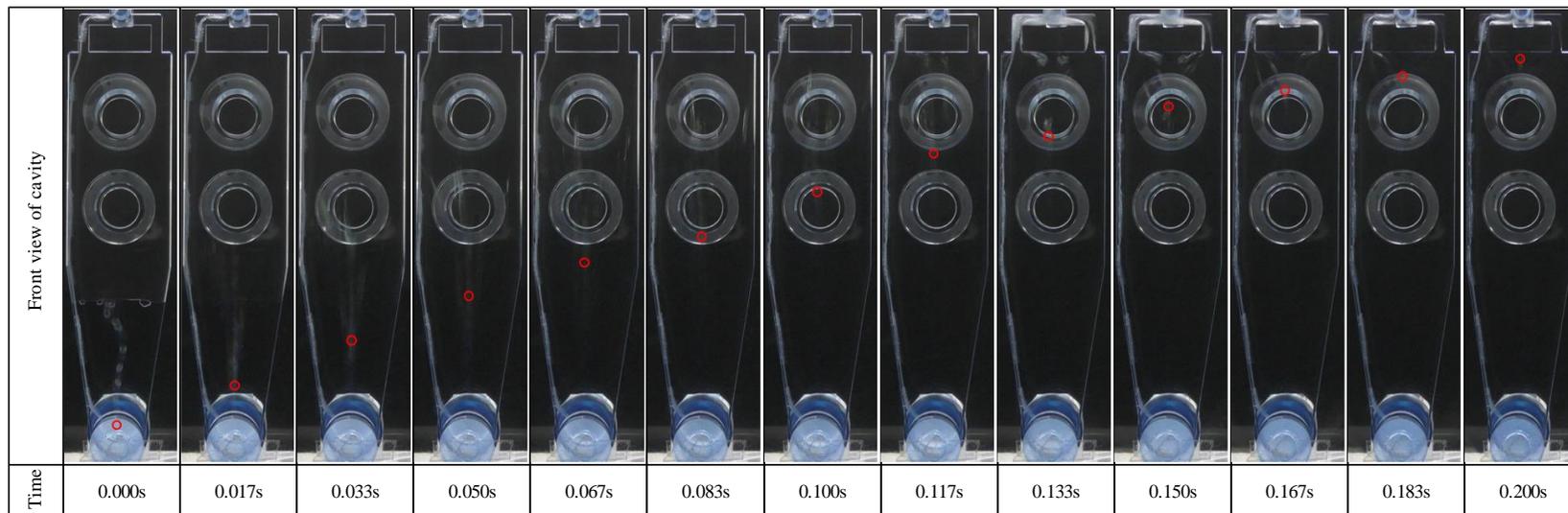


Fig. A-9 $V_{plunger}=0.3\text{m/s}$ におけるキャビティ充填挙動および気泡上昇挙動 (N3)