

【研究論文】

【令和3年度～令和4年度 地域競争力強化支援事業】

多相流シミュレーション技術の高度化研究

吉川 穰、荒木 武、齋藤 佳史、家口 心
自動車産業支援部

近年件数の多い多相流関連の相談に対応可能とするため、3つの気液二相流問題を設定して数値計算を行った。「液滴振動問題」では、初期に配置した楕円形水滴の振動周期が線形理論と一致する定量的な計算ができた。「ノズル濡れ問題」の計算では、気流による水流の壁面付着について検証実験にて再現できた。「液滴飛散問題」の計算では、気流と衝突した位置に対して非対称に水柱が変形する点で実験結果と定性的に一致し、液滴の径や速度からその飛行挙動が得られた。

キーワード：気液混相流、液滴振動、ノズル濡れ、液滴飛散、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、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、固体が混ざりながら流れる多相流(混相流)問題については、当センターにおいても知見がなく、現状においては対応が難しい。このような場合には、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、場合によっては対応不可とせざるを得ないケースもある。

本研究は、このような状況を打開し、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年間にわたって数値計算技術を培うものである。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に対して、できるだけ一般的な物理モデルを対象を選んで取り組むことで、多分野の県内企業から寄せられる相談への柔軟な対応を可能とする。もって、高度電子機械産業や自動車関連産業に関連した県内企業の競争力強化につなげる。

令和4年度は研究終了の年度に当たり、本研究報告では2年間の研究で取り組んだ内容について総括して述べる。令和3年度(1年目)は、気液間の表面張力が支配的となる現象として「液滴振動問題」を、液体の慣性が支配的となる現象として「ノズル濡れ問題」を取り上げて数値計算を行い、理論や実験と比較することで、その計算の妥当性検証を行うところまでを目標とした。令和4年度(2年目)は、液滴の飛行挙動を予測可能とすることを目標とし、水柱が気流によって微粒化する「液滴飛散問題」を数値計算にて取り扱い、実験との比較を行った。

2 計算方法と実験方法

2.1 液滴振動問題における計算方法

本節における計算では、表面張力が支配的となる現象として、重力場の影響が無視できる浮遊液滴の表面張力振動を取り上げる。本計算には、商用の流体計算ソフトウェアAnsys Fluent 2021 R2を用いて、VOF法により気液二相流を扱うこととし、表面張力モデルにはCSFモデルを採用した。気液二相流を構成する液体は水、

気体は空気として、物性値を与えている。図1に計算の初期条件と境界条件を示す。ここで、 a : 楕円の長軸径、 b : 楕円の短軸径、 L : 計算領域の長さを表す。2次元問題とするために、奥行き方向には対象条件とし、その他の2次元平面方向の境界条件は全て開放として圧力0 Paを指定した。VOF法において、計算の対象となる水の体積分率 VF_w は式(1)にて与えた。

$$VF_w = \text{step}\left(1 - \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)\right), \quad \text{step}(c) = \begin{cases} 1(c \geq 0) \\ 0(c < 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで c は任意の実数である。水を楕円形の初期配置とすることで、気液界面に働く表面張力に差が生じ、液滴の運動が開始される。表1に計算条件を示す。ここで R は楕円の長軸径と短軸径の相乗平均から得られる代表液滴径を表す。表中の条件1, 2に対して、表面張力の値を水と空気の間にはたらく $\sigma = 0.073$ N/mを中心に、0.292, 0.01825と変えて計算を行った。計算に使用するメッシュは、 x 方向、 y 方向に $\Delta x = \Delta y = 0.0125$ mmの分解能を持つ直交等間隔格子とした。これは計算領域の1辺を80分割したことに相当する。また時間刻みは0.008 msとした。本計算におけるレイノルズ数はBasaran²⁾と同様に表面張力を用いた速度スケールで定義し、 $\sigma = 0.073$ N/mにおいて $Re \equiv (\sigma R / \rho)^{1/2} / \mu = 110$ とした。ここで水の密度 $\rho = 1000$ kg/m³、粘性係数 $\mu = 0.001$ Pa・sである。

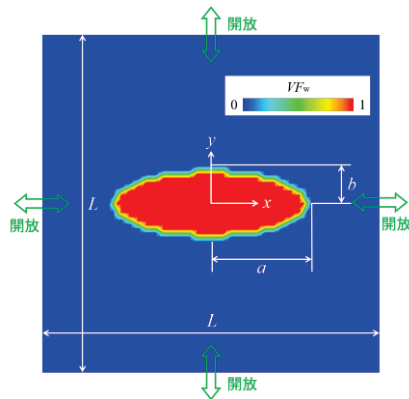


図1 液滴振動問題の初期条件と境界条件

表1 液滴振動問題の計算条件

単位: [mm]	L	a	b	$R \equiv \sqrt{ab}$
条件1	1	0.285	0.0951	0.165
条件2	10	2.85	0.951	1.65

2.2 ノズル濡れ問題における計算方法と実験方法

本節における計算では、液体の慣性が支配的となる現象として、気流による圧力低下が液体の流れの向きを変えることで、ノズル壁面を濡れる否かの状態が変化するノズル濡れ流れを取り上げる。

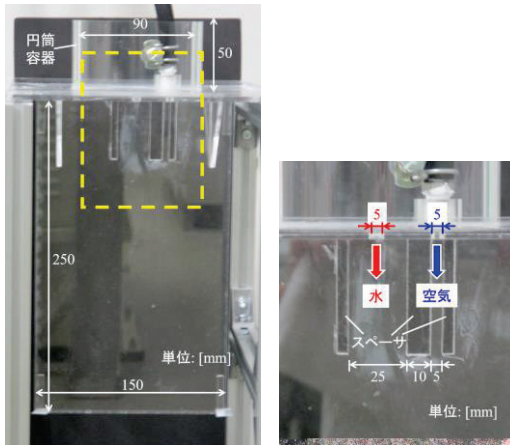
図2に計算との比較対象とする実験装置を示す。ノズル壁に見立てた3 mm厚のスペーサを挟むようにアクリル板を貼り合わせることで、テストセクションにおける水流の二次元性を確保した。また、テストセクション上部には円筒容器を設置し、水をオーバーフローさせることで水の流入流量を一定とした。水の平均流速は、30秒間流した水の質量を測定し流入孔の断面積で除すことで算出し、1.08 m/sであった。また空気の体積流量はKEYENCE社製FD-A100を用いて測定し、流速に換算して $V_0 = 0, V_1 = 16.6, V_2 = 28.3, V_3 = 39.4$ m/sの4条件で実験を行った。この値は、空気の流速と流入境界の奥行き方向幅を代表長さとしたレイノルズ数において $Re_1 = 3.32 \times 10^3, Re_2 = 5.66 \times 10^3, Re_3 = 7.88 \times 10^3$ に相当する。また、水の流速と流入境界の奥行き方向幅を代表長さとしたレイノルズ数は $Re_w = 3.24 \times 10^3$ である。またウェーバー数は $We_w = 48$ である。

次に、以上の実験を対象とした数値計算の条件を示す。本計算には、商用の流体計算ソフトウェアAnsys CFX ver.19.2を用い、Homogeneous Modelにより気液二相流を扱った。「液滴振動問題」と同様に、気液二相流を構成する液体は水、気体は空気として、物性値を与えている。図3に計算領域と境界条件を示す。水の流入境界では実験と同様に速度を1.08 m/sで固定し、ハッチング領域の境界においては速度を0 m/sとした。また、空気の流入境界においては、式(2) (及び図4)に示すように速度 $V_{in,air}$ m/sを時間的に変化させ、実験条件と同じ速度 $V_n (n: 0 \sim 3)$ となるように段階的に加速させた。

$$V_{in,air} = \sum_{n=0}^2 (V_{n+1} - V_n) \left\{ \tanh\left(\frac{5(t-t_n)}{t_a}\right) + 1 \right\} / 2 \quad (2)$$

ここで、 t は時刻、 t_n は加速の中心時刻、 t_a は加速時間を表し、 $t_1 = 0.25$ s、 $t_2 = 0.5$ s、 $t_3 = 0.75$ s、 $t_a = 0.1$ sである。なお「液滴振動問題」と同様に2次元問題とするため、奥行き方向には対象条件とし、その他の平面方向の境界条件は開放として圧力0 Paを指定した。図5に使用したメッシュを示す。Mechanicalメッシュャーにおいて構造格子に類するメッシュを生成するべく、計算領域を領域1~7に分割して共有トポロジー機能にて領域間で隣接するメッシュを共有させた。また分解能は $\Delta x = 0.5$ mm、 $\Delta y = 2$ mmとし、領域1と7にのみ x 方向

に格子伸長を施した。



(a)テストセクション全体図 (b)黄色破線部拡大図

図2 ノズル濡れ問題における実験装置

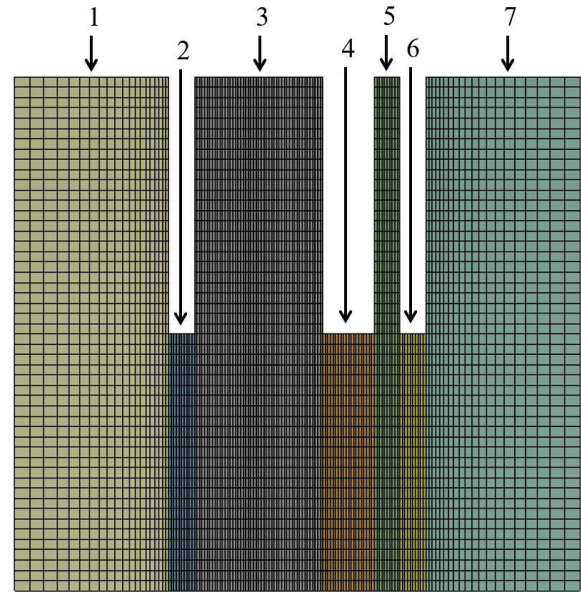


図5 ノズル濡れ問題における計算メッシュ

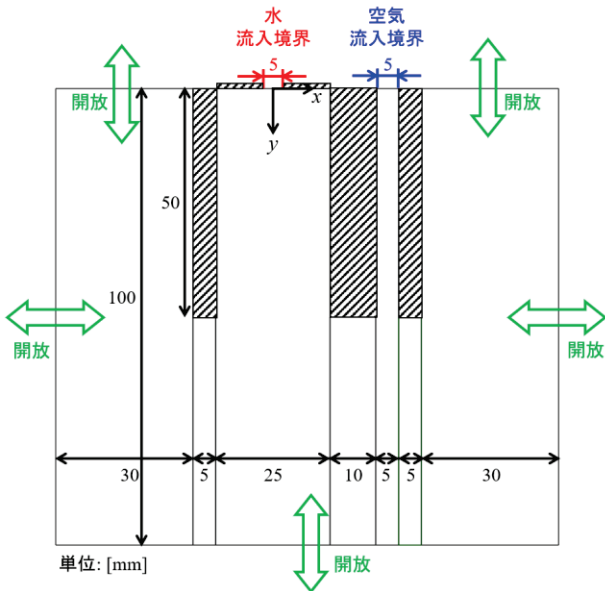


図3 ノズル濡れ問題における計算領域と境界条件

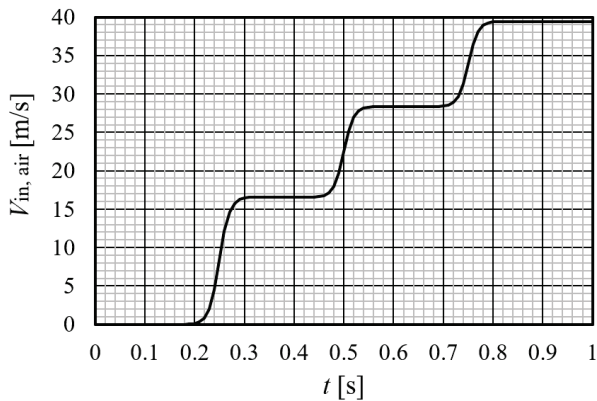


図4 空気流入流速の時間変化

2.3 液滴飛散問題における計算方法と実験方法

本節における計算では、液滴の飛行挙動を扱う現象として、水柱に気流が垂直に噴きつけられる流れを取り上げる。

図6に実験装置を示す。円筒容器の底面に空けた5 mm角の孔から流出した水流に、70 mm下に位置する内径3 mmのエアノズルから圧縮空気を垂直に噴射させた。この時、水流の軸とエアノズル孔間の距離を $d = 100$ mmとして実験を行った。水は円筒容器からオーバーフローさせることで、「ノズル濡れ問題」と同様に流量を一定とした。水の流入体積流量は、20秒間流した水の質量を測定し、 2.26×10^{-5} m³/sであった。また空気の体積流量はKEYENCE社製FD-A100を用いて測定し、 7.10×10^{-4} m³/sであった。実験においては、高速な液滴の飛散挙動を確認するべく、フォトロン社製FASTCAM Mini AX200を用いて、図6中の黄破線内の領域を1000 fpsにて撮影した。

次に、以上の実験を対象とした数値計算の条件を示す。本計算には、商用の流体計算ソフトウェアAnsys Fluent 2022 R2を用い、VOF法およびDPM法により気液二相流を扱うこととした。本モデルでは、VOF法によって表現された空気と水の相のうち、水の相が一定の基準を満たしたときに、パーセルと呼ばれる代表粒子に変換される。本研究では、5 mm以下の粒子と等価体積とみなされる水の体積を持つ領域を、時間ステップ50回ごとにそれぞれパーセルへと変換が行われるよう設定した。この際、変換後の粒子は球形であることが仮定されるが、

水の体積分率によって表現された等価体積を持つ領域の非球面度は問わない。また、パーセルへの変換直前までVOF法にて水の変形を精度よく追跡するべく、0.113 mmを下限として自動メッシュアダプション機能を採用した。メッシュの精細化は水の体積分率 $VF_w > 0.55$ かつその曲率が 10^{-12} m^{-1} よりも大きい領域に適用される。また表面張力モデルにはCSFモデルを採用し、 $\sigma = 0.0708 \text{ N/m}$ とした。気液二相流を構成する液体は水、気体は空気として物性値を与え、乱流モデルとしてShielded Blended Eddy Simulation (SBES) モデルを用いている。図7に計算領域を、図8に生成した初期メッシュを示す。「ノズル濡れ問題」と同様に計算領域を領域1~3に分割し、着目する領域である領域1に最も細かいメッシュを生成するべく、Fluentメッシュャーを用いてそれぞれ1 mm、4 mm、8 mmのポリヘドラルメッシュを生成した。座標系の原点は水の噴出孔に設け、 $y > 0 \text{ mm}$ の領域に初期条件で $VF_w = 1$ を与えた。境界条件は、実験と流量が等しくなるように、水の流入孔で0.9 m/s、空気の流入孔で100 m/sの一様流速とした。またz方向は対称境界、+x方向の流出境界では流量の重みを1とし、それ以外の境界は壁面とした。初期の時間刻みは1 μs として、時間刻み幅はアダプティブに変更することとした。

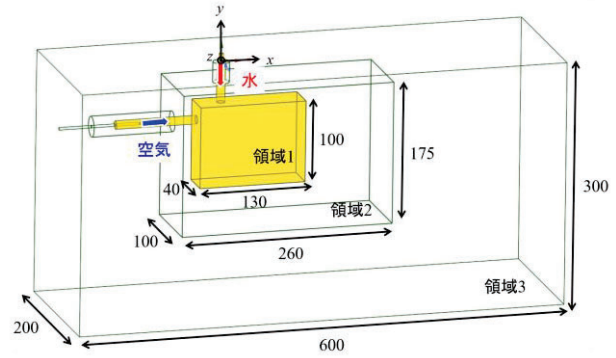


図7 液滴飛散問題における計算領域

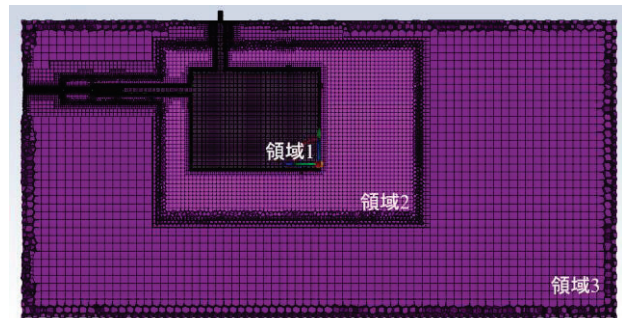


図8 液滴飛散問題における初期メッシュ

3 結果と考察

3.1 液滴振動問題

図9に条件1で $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$ とした場合の計算結果を示す。 $t = 0 \text{ ms}$ で横長の楕円形状であった液滴は、気液界面にて発生する表面張力差によって、横長→縦長→横長→...と変形を繰り返す。今回の計算条件で得られた振動周期は $T = 0.672 \text{ ms}$ で、図9は半周期ごとの水滴の様子を表している。同条件にて分解能を4倍に上げた計算も行ったが、水滴の振動周期は $T = 0.688 \text{ ms}$ で挙動に定性的な差は見られず、解の解像度依存性は低い。図10に条件1、2において、表面張力を変化させた場合の振動周期の違いを示す。液滴の表面張力振動は、円形からの無限小振幅を仮定した線形理論にて解析的に扱われており³⁾、周期は式(3)で与えられる。

$$T = 2\pi\sqrt{\rho R^3/6\sigma} \quad (3)$$

今回の計算結果(点)は線形理論の予測(線)とほぼ一致している。また、Basaran²⁾は有限要素法を用いて、レイノルズ数100における非線形領域の振幅条件($a/b = 3$)で計算を行い、無次元時間で1周期2.8程度の振動現象となることを報告している。本計算はその振幅条件と近く、同様の時間スケールで無次元した周期は2.7となり、線形理論との比較と同様に良い一致を示したこと

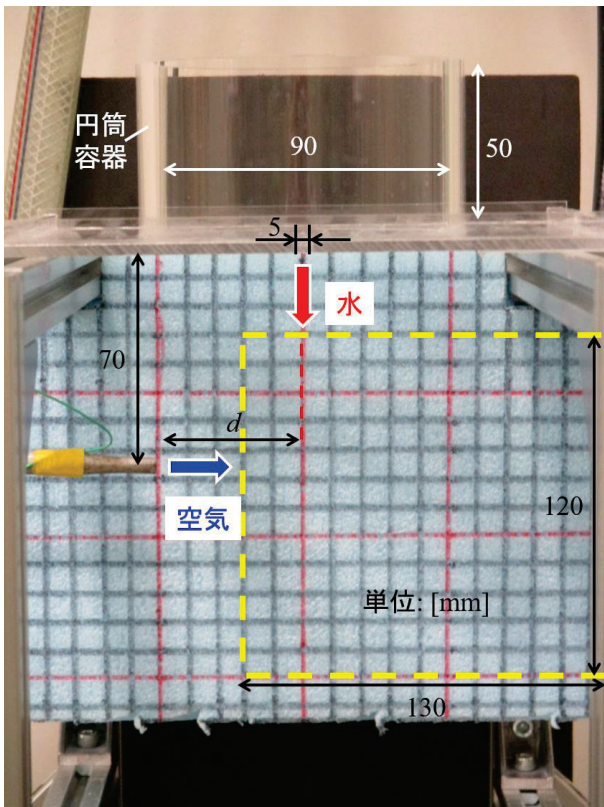


図6 液滴飛散問題における実験装置

から、設定した問題を定量的に解くことができたと考えられる。

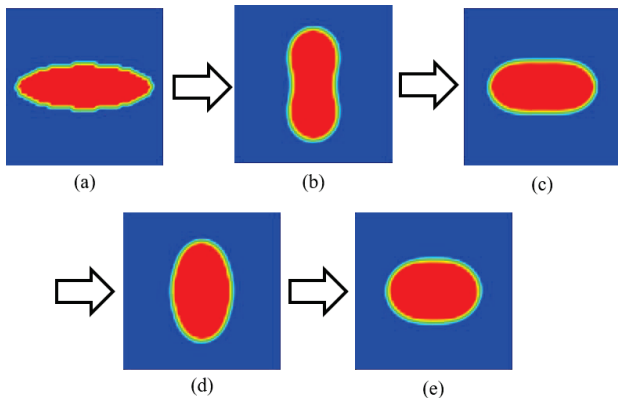


図9 液滴形状の時間変化(条件1、 $\sigma = 0.073$ N/m)
 (a) $t = 0$ ms、(b) $t = 0.336$ ms、(c) $t = 0.672$ ms、
 (d) $t = 1.008$ ms、(e) $t = 1.344$ ms

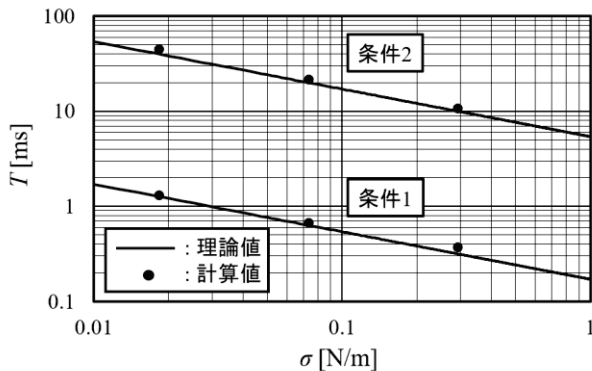


図10 表面張力に対する振動周期の違い

3.2 ノズル濡れ問題

図11に空気の流入速度 $V_{in,air}$ を変化させた場合の水の挙動について、計算結果と実験結果を併せて示す。空気を流さない場合、水は上から下に流れ落ちるだけであるが、気流が発生することで水流が気流側に吸い寄せられることが分かる。これは、Bernoulliの定理により高速領域が低圧となることで水流の左右で圧力差が生じ、その力のバランスによって水流の軌道が曲げられるためである。圧力差の大きさは空気の流速に対して単調増加となるため、水流が吸い寄せられる程度も流速の増加とともに大きくなっており、その様子は計算と実験で一致している。また本条件においては、 $V_{in,air} = 39.4$ m/sにおいて初めて、水流はノズル壁面に付着した。数値計算におけるこの水流の動きを定量的に扱うべく、 $y = 50$ mmにおける水流位置の x 座標 X_r を式(4)で

定義する。

$$X_r = [\maxVal\{X \times \text{step}(VF_w - c_1)\} - c_2]/c_3 \quad (4)$$

ここで、 $X \equiv x + c_2$ 、 $c_1 = 0.9$ 、 $c_2 = 12.5$ mm、 $c_3 = 0.0125$ mmであり、 \maxVal 関数は引数の最大値を返す関数を表す。式(4)は $y = 50$ mmにおいて水の体積分率が90%となる x 座標の最大値に対応し、水の流入境界中心を0、ノズル壁面である12.5 mm位置を1として、1に近いほど壁面に近づいていることを意味する。図12に X_r の変化を示す。本計算では、乱流モデルとしてSmagorinskyモデルを採用しており、図中の(a)に相当する。気流が速度を持つ0.25 s近傍から水流位置は気流側へと移動し、 $V_{in,air} = 28.3$ m/s以上ではその位置が振れることが分かる。また、最終的に $V_{in,air} = 39.4$ m/sでは壁面に付着し、この挙動は図11に示したように実験と一致する。ここで、乱流モデルをSSTモデルに変更した場合(図12(b))、水流の挙動は安定し $V_{in,air} = 28.3$ m/sにおいて既に壁面に付着してしまう。一方、乱流モデルを用いない場合(図12(c))については、 $V_{in,air} = 39.4$ m/sにおいても壁面に付着することはなく、実験結果と定性的に一致しない。以上より、本件で扱った「ノズル濡れ問題」においては、乱流モデルの選択が現象の定性的な再現に大きく影響を及ぼすことが分かった。

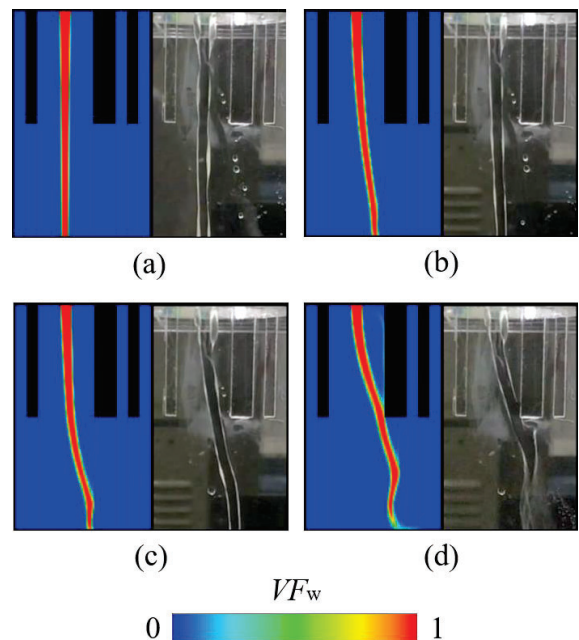


図11 計算結果(左)と実験結果(右)の比較
 (a) $V_{in,air} = 0$ m/s、(b) $V_{in,air} = 16.6$ m/s、
 (c) $V_{in,air} = 28.3$ m/s、(d) $V_{in,air} = 39.4$ m/s

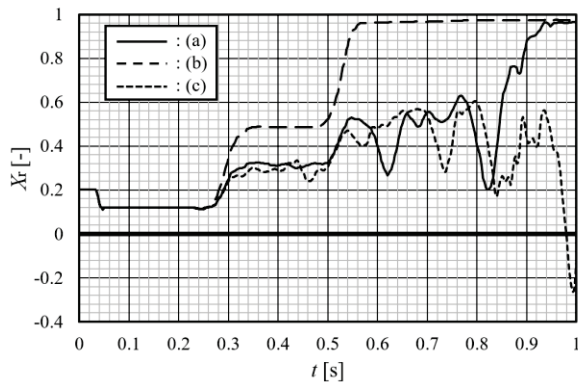


図12 $y = 50$ mmにおける水流位置の時間変化
(a) Smagorinskyモデル使用、(b) SSTモデル使用、
(c) 乱流モデル不使用

3.3 液滴飛散問題

図13に実験結果を示す。上方から定常状態で流れる水柱に、エアノズルから噴射した気流が到達した時刻を $t = t_0$ msとし、その時刻から3 msごとの水流の様子を観察した。図中の黄破線は気流が噴射された高さを示している。図13(a)、図13(b)を見ると、気流が水柱に到達した直後、気流の噴射高さと同じ高さにおいて水柱が+x方向へと変形する。その後徐々に変形は大きくなり(図13(c)、図13(d))、到達から12 ms以降は変形した水流から液滴が飛散している様子がわかる(図13(e)、図13(f))。また、到達から9 msまでは水流の変形はほぼ上下対称である一方で、その後は時間の経過に伴って、水流の変形領域は噴射位置よりも下の領域に位置するようになる。

図14に図13の実験を対象とした計算結果を示す。図13と同様に気流が水柱に到達した時刻 $t = 4$ msから同じコマ数だけ描画しているが、描画の時間間隔を1 msに変えている。図において、気液界面として $VF_w = 0.5$ の等値面を緑色で、水柱と気流の中心が位置する $z = 0$ の xy 平面における速度ベクトル場を、カラーバーに示す速度の絶対値で色付けした。また、VOFからパーセルに変換された粒子を球で表示し、その色付けは青色～赤色を0～1 mmに対応させた(図15(a)のカラーバーに同じ)。計算結果でも時間の経過とともに水流が変形して液滴が飛散しており、その変形領域が気流の噴射位置よりも下の領域に位置している点で定性的に一致している。しかし、計算結果ではその現象が実験結果よりも3倍程度速く進んでいる。これは微粒化領域近傍における気流の速度が実験よりも大きいことが原因として考えら

れる。そこで計算で得られた気流の速度を見ると、流入条件で与えられた100 m/sから大きく変化していない。本実験では微粒化位置にて流速を測定していないため、現時点ではこれ以上の考察はできないが、定量的な一致が得られない理由として、計算側では乱流拡散の影響が過小評価されていた可能性が、実験側では気流の中心位置が水柱に対してオフセットがあった可能性が考えられる。

液滴の飛散挙動について調べるため、図15に $t = 10$ msにおける液滴の分布を示す。図15では、液滴の配色を(a)液滴径、(b)x方向速度、(c)y方向速度、(d)z方向速度とした。0.1 mmを超える大きな液滴は主に気流の流れ方向を軸として半径方向に遠い位置に存在するのに対して、0.1 mm未満の小さな液滴はその中心付近に分布する。また図15(b)(c)(d)を見ると、水柱と気流の衝突位置を原点として、半径方向外側に液滴が飛散している様子がわかる。以上のような液滴の飛散挙動は、ハイスピードカメラを用いても時空間解像度が原因で実験的な追跡が難しいが、数値計算では液滴径や瞬時の物理量が全場に対して得られるのが利点である。

以上の「液滴飛散問題」の計算は4コアの並列計算にて実施し、 $t = 0 \sim 10$ msの結果を得るまでに8日ほど要した。

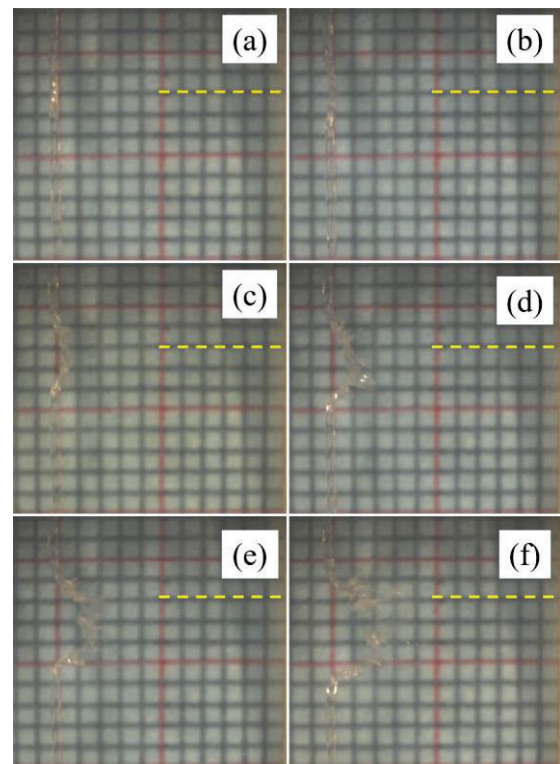


図13 実験結果

(a) $t = t_0$ ms、(b) $t = t_0 + 3$ ms、(c) $t = t_0 + 6$ ms、
(d) $t = t_0 + 9$ ms、(e) $t = t_0 + 12$ ms、(f) $t = t_0 + 15$ ms

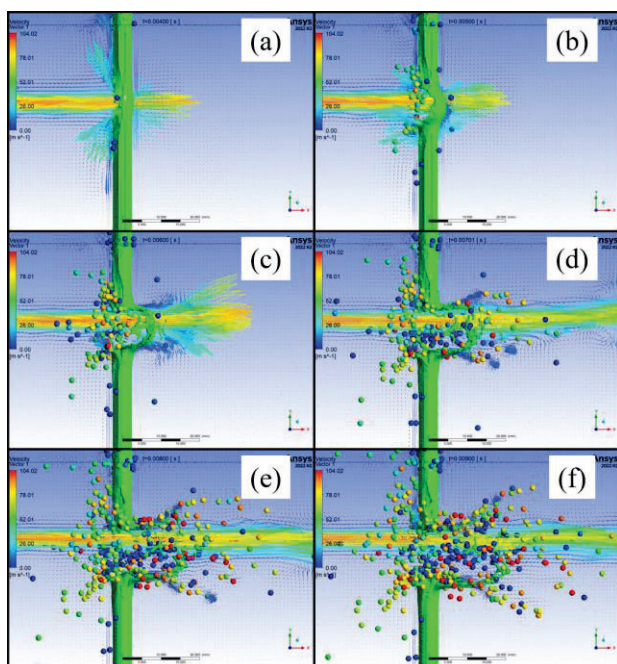
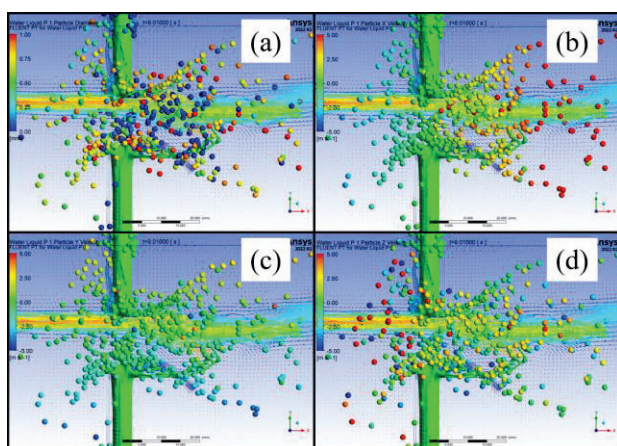


図14 計算結果

(a) $t = 4$ ms、(b) $t = 5$ ms、(c) $t = 6$ ms(d) $t = 7$ ms、(e) $t = 8$ ms、(f) $t = 9$ ms図15 $t = 10$ msにおける飛散液滴

(a) 液滴径、

(b) x 方向速度、(c) y 方向速度、(d) z 方向速度

4 結言

県内企業からのニーズが多い多相流関連の問題に広く対応可能とするべく、3つの具体的な現象を対象として数値計算を行った。

まず、気液間の表面張力が支配的となる現象として選択した「液滴振動問題」では、楕円形の初期配置とした水滴の表面張力振動が観察され、その周期は線形理論から予測されるそれによく一致した。解の解像度依存性も低く、定量的な計算を行うことができたと考えられる。

次に、液体の慣性が支配的となる現象として選択した「ノズル濡れ問題」では、気流によって水流が吸い寄せられる様子やノズル壁面に付着する様子が、数値計算と検証実験とで一致した。乱流モデルを変更して同様の計算を行ったところ、SSTモデルを用いた場合、乱流モデルを用いなかった場合には、ノズル壁面に付着する現象を再現することができなかったが、Smagorinskyモデルを採用した場合には実験結果を再現できた。

最後に、液滴の飛行挙動を予測可能とすることを目標とした「液滴飛散問題」では、気流によって水柱の変形が引き起こされ、その変形が気流の中心位置よりも下方で非対称に生じる様子が数値計算と検証実験で一致した。また、実験からは解像度の問題で得難い液滴径や飛行速度の分布が数値計算から得られ、飛行挙動を確認できた。しかし、これらの現象の時間スケールは数値計算の方が3倍程度短く、定量的な一致のためには流速の測定を含め数値計算・検証実験ともに改善が必要である。

本研究期間中も数値計算技術を用いた企業支援を並行して行ったが、今後本技術のさらなる活用と普及、および進展に努める所存である。

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 2023-7-7)
- 2) O., A., Basaran. Nonlinear oscillations of viscous liquid drops. J. Fluid. Mech. 1992, 241, p. 169-198.
- 3) NEW YORK DOVER PUBLICATIONS. HYDRODYNAMICS. Sixth Edition, 1932.