

課題名 (タイトル) :

移動境界流れの数値シミュレーションに関する研究開発
Research and Development for Moving Boundary Flows

利用者氏名 :

○杉山 和靖*
堀口 祐憲*
米澤 宏一*
大久保 秀彦*
平山 裕*
岩坪 史弥*
中 亮介*
鍋島 清悟*
小山 幹*
菅尾 志信*

所属 :

*情報基盤センター 計算工学応用開発ユニット

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

混相流体や回転体などの移動境界流れは、通常、スケールの多重性を内包し、挙動が複雑であることから、現象の本質を理解するには数値シミュレーションが有用である。シミュレーションの活用には、個別の現象を包括的に、正確に捉える計算手法が必要である。本課題では、移動境界をシャープに捕捉し、界面での境界条件を精度良く記述する手法の開発を進めている。また、マイクロバブルの生成機構解明や、回転機械の性能予測など、工学分野、医療分野での応用を見据えた数値解析を行っている。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究での HOKUSAI の利用内容は、(i) 薄型マイクロチャンネルにおけるマイクロバブル生成シミュレーション、(ii) 回転体によって駆動される気液二相流のシミュレーション、(iii) 分散相存在下における摩擦抵抗変調のシミュレーションである。

(i)では、では、流れ場を Hele-Shaw 近似に従うポテンシャル流れとみなし、流路壁と気液界面に離散点を配置し、境界要素法により速度ポテンシャルの Laplace 方程式を数値的に解く。本研究では、Darcy 則に時間微

分項と対流項を加えた Euler-Darcy の式を運動方程式に用いる。そして、界面での Laplace 則が成り立つように、気液界面上の要素点位置を更新する。

(ii)では、二相流のシミュレーションで、一方程式の定式にならない、立方メッシュを用いて固気液の移動境界問題を扱う。Volume-Of-Fluid (VOF)法、Boundary Data Immersion (BDI)法を用いて、それぞれ、気・液、流体・剛体の界面を扱う。VOF 関数の移流には MTHINC 法を用いることで、界面をシャープに捕捉する。基礎式は有限差分法で離散化する。計算コードは、OpenMP・MPI ハイブリッド並列化し、領域分割に関わる処理にはミドルウェア V-Sphere を用いている。

(iii)では、変形、移動を伴う分散相が存在するチャネル乱流を対象としている。密度、粘度は、とも分散相、連続相で同一とし、界面の影響としては表面張力による垂直応力の跳躍のみを Continuum Surface Force (CSF)モデルを用いて考慮している。(ii)と同様に、有限差分法で基礎方程式を離散化し、MTHINC 法を用いて VOF 関数の移流を扱っている。

3. 結果

(i)では、慣性の効果に内包される対流の効果と非定常の効果のそれぞれに注目し、微小気泡生成に対する各効果の影響を、以下の式を扱うことで評価した。

$$\alpha \{ 9 (q^2 + w^2 - q_{out}^2) / 14 \} + \beta (d\phi / dt - q^2) + 10\mu (\phi - \phi_{out}) / \rho H^2 - 5 (-4\Delta P + \pi\gamma\kappa) / 24\rho = 0,$$

ここで、 q , w , q_{out} , ϕ , ϕ_{out} はそれぞれ法線方向速度、接線方向速度、液相流出口での法線方向速度、速度ポテンシャル、液相流出口での速度ポテンシャルであり、式中 α , β は対流項と非定常項の影響係数であり、これらを変化させることで対流項と非定常項の影響を調査した。

数値解析により得られた界面形状の時間変化を図 1 に示す。計算初期 ($t = 0$ [s]) では図中において気液界面は平坦である。時間経過と共に界面が上方へ盛り上がり、図右側へ押し流されることで気泡が発生する。気相液相間に設定された圧力差の減少と共に気泡の大きさは小さくなるが、ある圧力差以下では気泡は発生しなくなる。この圧力を気泡生成限界と称す。

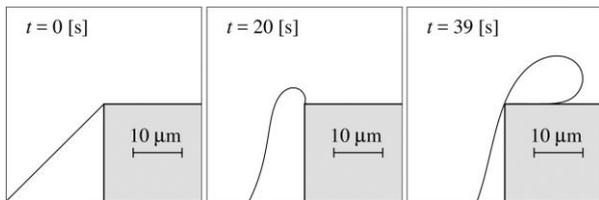


図 1 T 字型マイクロチャネル内の気泡生成過程

気泡生成限界において生成された気泡の等価直径を流路厚さ H で無次元化した無次元気泡径 D_b/H を図 2 に示す。図中の記号は影響係数の値を変化させた際の結果を表す。図より、慣性項のない条件 ($\alpha = 0, \beta = 0$) では Re の変化に伴う気泡径の変化が見られないが、慣性項を付加した条件の全てにおいて Re の増加に従い気泡径が減少している。高 Re のとき、非定常のみの条件 ($\alpha = 0, \beta = 1$) を見ると慣性項ありの条件 ($\alpha = 1, \beta = 1$) に比べて気泡径が大きい。また、非定常 50% の条件 ($\alpha = 1, \beta = 0.5$) は慣性項ありの条件 ($\alpha = 1, \beta = 1$) と比べ気泡径がわずかに小さい。また、 β のみを変化させる計算で β が大きくなると、気泡径はわずかに小さくなる。よって非定常項の影響は小さく、対流項が支配的と言えることがわかった。

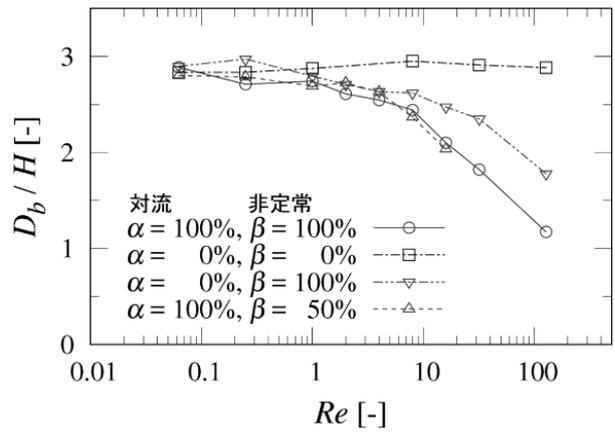


図 2 無次元生成気泡径とレイノルズ数の関係

(ii)では、円筒容器内においてディスクが駆動するオイル・空気二相流れを対象として、数値計算を行なった。解析モデルを図 3 に示す。静止容器内にディスクを配置した形状となっており、ディスクは任意の回転速度 Ω に制御が可能である。また、容器とディスク間の軸方向隙間が 10mm と比較的小さい隙間を有するため、ディスクの回転により変形する気液界面の観察が行いやすくなっている。作動流体は、温度 22°C において、密度 $0.89 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、動粘度 $300 \text{mm}^2/\text{s}$ 、表面張力 $3.0 \times 10^{-3} \text{N/m}$ の褐色の機械油を用い、中心より 12mm 下方まで充填する。

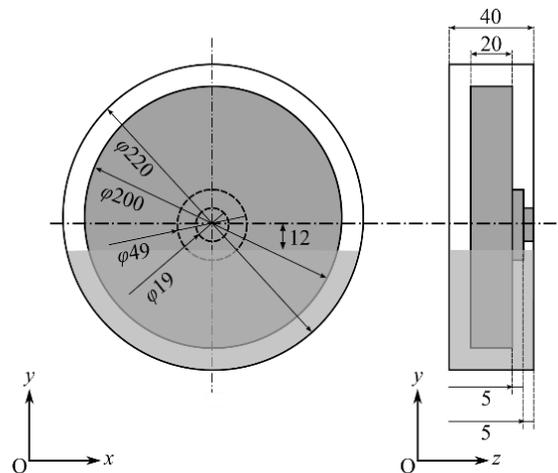


図 3 ディスク駆動二相流れの幾何形状

図 4 は、オイル界面分布の時間発展を表し、図中上側が実験結果、下側が数値解析より得られた結果をそれぞれ示している。ここでは、ディスクの初速度がゼロの状態から、半時計回りに 2.1rad/s^2 の角加速度で加速させている。図より、回転速度 Ω の増加に従い、ディスクの右側で持ち上げられるオイルの高さが増加することが分かる。特に、 $\Omega = 30, 100 \text{rpm}$ においては、実験と数値計算間で得られたオイル分布は一致した。一方で、

$\Omega=200, 300\text{rpm}$ では、細かいオイル分布に差異が生じる。ただし、 $\Omega=300\text{rpm}$ に達する過程において、持ち上げられたオイル界面が容器前面の左側壁面に沿って流れ、全領域にオイルが広がっていく過渡的な流れは実験と数値計算双方で同様の挙動を示している。

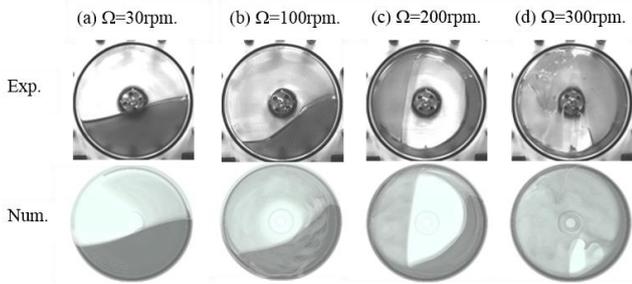


図 4 オイル分布の比較. 上, 下のパネルは, それぞれ, 実験結果, 数値計算結果に対応.

Ω に対するトルクの変化を図 5 に示す. 実験から得たトルクは, 流れが定常状態に達した時点におけるトルクの算術平均値であり, エラーバーは標準偏差を表す. 数値解析も同様に, 定常状態における, トルクの算術平均値をプロットしている. 図中の四角い記号は, 容器内をすべてオイルで満たした場合の单相流の計測結果を示す. 流れの駆動は, ディスクに引きずられる粘性力と, 遠心力による半径方向外側へのオイルの輸送されるエクマンポンピングと呼ばれる二次流れによって決まる. 前者の力は Ω , 後者の力は Ω^2 に比例する. そのため, トルクが Ω に対して線形に増加していることから, 流れの駆動には粘性力が影響的であると推測される.

一方で, 図 5 の丸い記号は, 二相流の場合の計測結果を示す. この場合は, 单相流のような増加はせず, Ω を増加させてもトルクの値がある一定値で飽和した. この原因は回転ディスクに接するオイルの量に関係すると思われる. 回転するディスクにより駆動されるオイルは, 遠心力により半径方向外側に輸送される. 容器壁面に到達したオイル粒子は行き場をなくし, ディスクから遠ざかる軸方向に流れを変え, さらに図 4(c)(d) に示すように容器表面に沿って流れる. この一連の過程により, ディスク表面に存在するオイルが減少し, トルクが飽和しているのだと推測される.

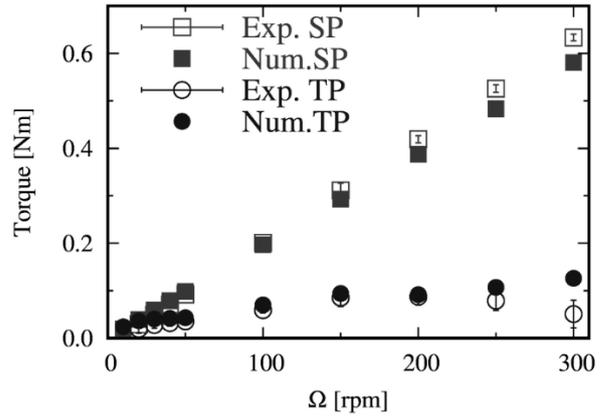


図 5 ディスクに作用するトルクと回転速度の関係. 凡例中の SP, TP は, それぞれ, 单相流, 二相流に対応. Exp., Num. は, それぞれ, 実験結果, 数値計算結果に対応.

(iii)では, 異なる初期形状を有する変形可能な人工分散体が乱流摩擦抵抗に与える過渡的な影響を調べた. チャネル流れにおいて, 座標系は主流方向を x , 壁面垂直方向を y , スパン方向を z とした. x, y, z 方向にそれぞれ $2\pi, 2, \pi$ であり, ウォールユニット距離換算するとそれぞれは 1885, 600, 943 である. 格子点数はそれぞれの方向に 256, 300, 256 としている. 境界条件として, x, z 方向には周期境界条件, y 方向には壁面でのすべりなし条件を課した. 基礎方程式に現れる無次元数は壁面レイノルズ数 $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu$, 壁面ウェーバー数 $We_\tau = \rho \delta u_\tau^2 / \gamma$ (ここで, u_τ は壁面摩擦速度, δ はチャネル半幅, ν は動粘性係数, ρ は密度, γ は表面張力係数) である. 本研究では, 壁面レイノルズ数 $Re_\tau = 300$ と分散相の体積率は約 3% と固定し, 壁面ウェーバー数を $0.5 < We_\tau < 5.0$ の条件変化させた.

計算に用いたチャネル形状と初期分散相配置例を図 6 に示す. 図中の数字はウォールユニット距離換算したチャネル寸法である. 計算の初期条件として, 十分に発達した单相乱流場を与える. そして, 二相流の計算では, 時刻 $t=0$ において, 空間的に VOF 関数を与えることで分散相を配置する. そのため, 初期の速度場はいずれの計算条件においても等しい. 分散相の初期形状は, 図に示すような (左) 球状, (中央) 円柱状と (右) 層状の 3 つを与え, 片方の壁面から分散相の中心距離が $40 < y_c < 80$ になるように配置した.

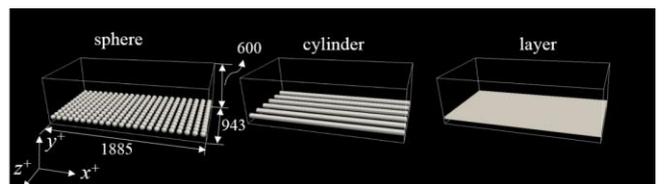


図 6 二相チャネル流れにおける初期界面形状. 左, 中, 右パネルは, それぞれ, 球, 円筒, 平面層に対応.

摩擦係数 $C_f = \tau_w / \rho \langle u \rangle^2$ の時間変化を図 7 に示す. ここで, τ_w は壁面せん断応力, $\langle u \rangle$ は体積平均流速であ

る。図より、単相流と比べると層状の分散相を与えた条件では計算初期において摩擦抵抗が低減しているが、時刻 $t = 0.15$ の時に C_f が極小値を示し、その後徐々に増加することが分かる。一方で、円柱状と球状の分散相を与えた条件では、摩擦抵抗は単相流よりも常に大きな値を示すこと分かる。層状分散相を配置した条件において、 $t > 0.2$ では摩擦抵抗が増加するが、このとき分散相が初期形状を維持できなくなり分裂が生じている。つまり、分散相のトポロジー形状は摩擦抵抗の増減を大きく左右すると言える。

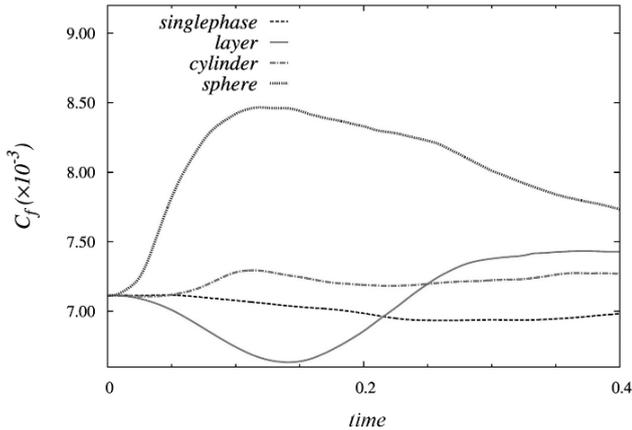


図 7 各分散相初期形状に対する摩擦係数 C_f の時間変化。

摩擦抵抗低減の詳細について理解するために、摩擦抵抗が低減している層状の条件において自己相関係数 R_{uu} により調査した。図 8 は (a) 層状における摩擦係数の時間発展、 $y^+ = 15$ 断面における主流方向速度変動の (b) x 方向の自己相関係数、(c) z 方向における自己相関係数時間発展を表す。それぞれ横軸は時間を表し、縦軸は (a) 摩擦係数 C_f 、(b) (c) は変位量 Δx^+ 、 Δz^+ を表す。自己相関係数の等高線の幅は統計的なストリーク間隔の大小に対応するため、壁近傍で発生する壁乱流の縦渦の空間スケールを間接的に確認できる。図より、摩擦抵抗が低減している $t = 0.15$ において、 z 方向における自己相関係数の等高線の幅が広がっていることが分かる。これは層状の分散相によって縦渦がスパン方向に引き伸ばされていることを示している。そして、 $t > 0.25$ において摩擦抵抗が増加する際には、 x 、 z 方向における自己相関係数の等高線の幅が $t = 0$ の時の値と比較すると、それぞれ 0.7 倍と 0.9 倍になり縦渦が主流方向とスパン方向に小さくなっていることが分かる。

以上より、層状分散相の巨大な界面が存在する条件において、壁乱流で運動量輸送を活発に行う縦渦運動とその強度を抑制し、摩擦抵抗低減をもたらすことが示唆された。

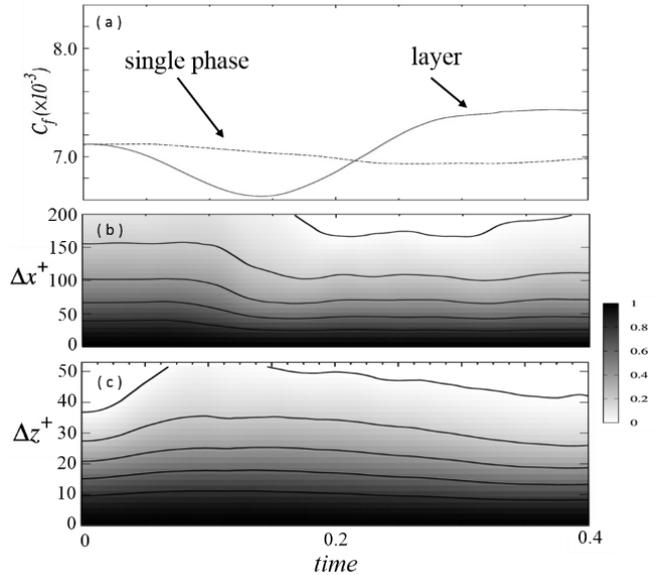


図 8 初期分散相形状が平面層の場合における (a) 摩擦係数 C_f の時間変化、(b) 主流方向に対する速度の自己相関係数の時間変化、(c) スパン方向に対する速度の自己相関係数の時間変化。

4. 今後の計画・展望

来年度は、研究を継続・発展させるために、HOKUSAI を用いて今年度と同様の計算を進めていく予定である。さらに、空気潤滑法による摩擦抵抗低減の機構解明や、二相状態における熱移動の詳細解析を目指し、気液二相乱流の大規模数値シミュレーションを実施する予定である。

平成 28 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

Sugiyama, K., Okubo, H., Imahoko, R., Sakakibara, J. and Takagi, S.. A fixed-mesh approach for gas-liquid-rigid interaction problems, IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science (28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems) (2016) Vol. 49, 062020.

大久保 秀彦, 杉山 和靖, 渡村 友昭, 今鉢 峻貴, 榊原 潤, 仁保 隆嘉, 福井 類, 高木 周, 円筒容器内において回転体が駆動する気液二相流れの数値解析, 混相流, (2017) Vol. 31 (掲載予定).

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Sugiyama, K., Okubo, H., Nabeshima, S. and Watamura, T., Inertia effects on bubble generation in thin T-junction microchannel, 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Portland, Oregon, USA (2016.11), G25.00009.

【その他 (プレスリリース、学術会議以外の一般向けの講演など)】

鍋島 清悟, 大久保 秀彦, 杉山 和靖, 薄型マイクロチャネルにおける気泡生成に対する慣性影響, 混相流シンポジウム 2016 (2016.8), C121.

平山 裕, 杉山 和靖, 層状分散相存在下での摩擦抵抗変調の直接数値解析, 混相流シンポジウム 2016 (2016.8), C111.