

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04764

研究課題名(和文) 容器口から流れる液垂れ解消のための数値シミュレーション

研究課題名(英文) Numerical simulation of water drip on a wall of cup

研究代表者

横山 真男 (Yokoyama, Masao)

明星大学・情報学部・准教授

研究者番号：30633044

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：液だれ現象を改善する方法を検討するために数値シミュレーションと実験観察を行った。実験より、容器口の外側の縁に細かな溝を刻むことで、丸や角といった鋭利でない鈍い形状の縁でも液だれが大きく改善できることが確認できた。大規模数値シミュレーションにおいては、ナビエ-ストークス式の外力としてポテンシャル力による濡れ性モデルを加えた陽解法のMPS法(Explicit Moving Particle Simulation Method)を行い、実験映像との比較を行った。濡れ性モデルを導入後、容器から流れ落ちる水の数値シミュレーションを行ったところ、実験で観察した液だれに合致した表現ができた。

研究成果の概要(英文)：From our experimental observation of liquid dripping, a method to prevent liquid adhesion at the wall of cup was invented. To clarify this annoying problem, the edge figured with thin channels was observed, and we found the water adhesion on cup's wall reduced when the channels were located at the outside of edge of the cup. The numerical simulation of dripping water from the edge of the cup was carried out using the Explicit Moving Particle Simulation (MPS) method. Introducing the wetness model on the wall, the simulation result was good agreement with that of experiment in expressing water adhesion on the wall of cup.

研究分野：数値シミュレーション

キーワード：液だれ 粒子法 界面張力 数値シミュレーション 大規模計算

1. 研究開始当初の背景

コップや鍋などの容器から液体を注ぐ際に生じる液だれは日常生活でもよく見られる現象であるが、時に容器やテーブル、床、手や衣服などを汚してしまう煩わしい現象である。この液だれが起きる原因は、容器の注ぎ口の形状と流体の粘性、表面張力などが関係している。食品容器の製品開発においては、液だれ防止のために経験的な試行錯誤で設計が行われている状況である。そこで、実験と数値シミュレーションにて注ぎ口の形状と流体の運動の関連が解明されることが期待されている。最適な容器口の解明が進むことで、製品開発のコストが抑えられるメリットが生じ、また我々の生活環境も清潔で心地よく改善される。また、応用として食品以外にも、薬品を扱う医療器具や鉄鋼、ガラス、セメントといった製造業への利用も期待できる。

ここで、液だれの数値シミュレーションにあたって流体と固体の界面張力をどうモデル化するかという問題が発生する。これまでの手法として液体と固体の接触角を規定してその角度になるように粒子に外力を与えていた。また、液体の表面張力のモデルにおいても、他研究ではラプラスの曲率を用いたり、幾つかのポテンシャルを用いた開放が提案されてきたりしたが、結果が十分とは言えないため、本研究では、レナード=ジョーンズのポテンシャルモデルのように、より分子動力学的なモデルを組み合わせた方法が有効と思われる。このモデルの検証のためには、流体や個体の界面の様子をハイスピードカメラなどを用いて詳細に観察し、そこから得られた実験結果を数値計算にフィードバックするといったエンジニアリング的な手法を取ることが現実的であると考えている。そこで、本研究では従来とは異なったアプローチをとり流体-個体間の分子間の物理的な力を与えることで液体の付着や疎水性・親水性を計算しようとしている。すなわち、ナビエ-ストークスによる流体の支配方程式において、アクリル樹脂やガラスのように界面の電気的な引力/斥力が働く物体壁面の表現については、壁面粒子と水粒子間にクーロン力に類似した距離と電荷の関数で表したモデルを、上式の外力として導入する方法を検討する。

2. 研究の目的

液だれが起こる要因は、容器口の形状や液体の粘性、表面張力などが挙げられる。数値シミュレーションにおいては、これらの条件を様々に変えて液だれの発生を防ぐメカニズムを探る。また、実際の減少とかけ離れた計算結果になっては問題であるので、現象を映像に録画し流体の運動を観察したうえで比較して問題がないことを検証することも必要である。実験観察と数値シミュレーションによって容器の口から流出する流れを解析

し、液だれの発生原因を解明しその発生をなくすことを目的としている。

本研究の特色は、数値シミュレーションにおいては、これまであまり考慮されてこなかった流体と固体の境界条件である物体表面の物性を数値シミュレーションに取り込む手法を開発することであり、疎水性であるアクリル樹脂やガラスなどの表面に存在する界面張力について、実験観察をベースにした物理的かつ化学的な基礎理論によりその界面の関係を粒子法(MPS法)に取り入れる手法を提案し、液垂れしない容器の形状を提案することである。

壁面と水の界面張力は何らかの引力が影響しているはずであるのでナビエ-ストークス式のクーロン力を模した外力の追加とその影響度のパラメータ調整を行うことで、容器壁面に付着して垂れる流れを表現できるとみている。この時の壁面に付着した液滴の形状が実際の形状に近いかどうかは、水分子間の表面張力のモデルの選別とそのパラメータ調整で達成可能と考えている。

本研究の意義として、シミュレーションから得られた手法は、容器の注ぎ口の設計といった食器以外にも、薬品を扱う医療器具や鉄鋼、ガラス、セメントといった製造業への適用も期待できる。

3. 研究の方法

数値シミュレーションの手法として、陽解法粒子法による並列処理プログラムを開発し億規模の粒子数への大規模並列化を行った。また、実験との比較であるが光学的に流れをトレースする方法とハイスピードカメラで全体的な流動をとらえる方法を検討した。録画より容器の縁から零れ落ちる液垂れの現象を分析し、数値シミュレーションに必要な物理モデルを検討し、また計算結果を評価するのに用いた。

我々が過去に行った実験観察では、材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況があることが分かっている。そこで実験では様々な容器と液体を用意し、容器の縁の特性や形状を変えて液だれのしにくい条件を探った。また、大規模並列3次元の数値シミュレーションでは、界面張力や表面張力の新モデルの考案とコード開発および数値シミュレーションを行った。計算手法としては、自由表面を伴う流れの計算に適したメッシュ作成が不要な粒子法(MPS)を用い、界面の扱いには静電気力や分子間力といった物理的なモデルをナビエ-ストークスの式に導入した。

4. 研究成果

容器口から吐出する流れについて、実験および数値シミュレーションによる分析を行った。

実験に関しては、容器口付近に細い溝を付けるのみというこれまでにない方法で、液だれ

現象を改善する方法を発見した。特に、容器口の外側の縁に細かな溝を刻むことで、丸や角といった鋭利でない鈍い形状の縁でも液だれが大きく改善できることを確認した。3D プリントを用いて内径 60mm で 4mm の厚さのコップを作成した。ここで、コップの材料としてプラスチック素材の PLA 樹脂(ポリ乳酸)を使用、容器口の溝の幅は 0.4mm、深さ 0.4mm 間隔で、液だれの見られる容器の縁から約 1cm の間に矩形の溝を掘って実験を行った。溝を刻んだ方向は円周方向にしている。溝の位置は、外側(outside)または内側(inside)と、上部(top)と外側もしくは内側の組み合わせ、内外の組み合わせの計 5 種類とした。なお、刻んだ溝以外の面はやすりや研磨剤等で滑らかに仕上げている。液だれ発生を検証のために、スタンドにコップ容器を固定し、スポイトを用いて一定量水道水を注いだ。縁形状は角縁、丸縁、傾斜縁の三種を用意したが、いずれの形状においても外側および外側 + 上部の溝によって効果が見られた。内側と外側の両面に溝のある容器でも効果が見られたが、丸縁の設置角度 30 度にした場合は液だれが発生する場合は 20%ほどあり完全ではない。内面の溝による液だれの発生を防ぐ効果は期待できない。内側と上側に溝を付けた場合でも液だれが多く発生した。よって、容器口の内面に凹凸や不連続面がある場合、液だれを助長する悪影響になると思われるので、内面はストレートないしスムーズにする必要がある。また、先端が尖っている 45 度傾斜角縁についても、設置角度が 30 度の場合で液だれが生じていたが、外側の溝を加えることで改善がみられることがわかった。以上により、本研究の手法によりいずれの容器口の形状および容器の角度においても液だれ防止の効果が得られることが明らかになった。以上により、これまで液だれを防ぐには注ぎ口の形状は鋭利で特殊な曲線である必要があったが、溝を加えることで形状によらず液だれが解消できるということが分かった。このことは今後の製品開発におけるデザイン性や加工コスト削減などのメリットにつながると思われる。一方、液だれを含む自由界面を伴う流体の数値シミュレーションするにあたっては、流れが表面張力の影響を強く受けるため、運動方程式の外力に表面張力を加えて計算を行う。本研究においては、粒子間ポテンシャルモデルを表面張力モデルとして用いた。既存の計算手法を用いた数値シミュレーションでは液だれ挙動を確認できなかった。液だれ挙動を発生させるために、流体粒子と容器壁面を構成する粒子との間に引力を生じる計算モデルの導入することで液だれ挙動を表現可能であると考え、本研究では液だれ挙動の表現のためクーロン力を模擬した疑似的な静電気モデルの導入を行った。また、比較とし

て壁面と流体の接触に関しては、ナビエ-ストークス式の外力としてポテンシャル力による濡れ性モデルも用いた。クーロン力モデルまた濡れ性モデルのいずれも導入前の計算結果では、実験時に見られた流れの容器壁面方向への湾曲は見られず、容器外壁の壁面粒子への付着は発生しなかった。クーロン力モデル導入後の数値シミュレーション結果では容器外へ向かう流体粒子の主な流れから壁面へ湾曲する流れが僅かに分かれる様子を確認し、また流体粒子が容器外壁を伝い落ちる様子を確認した。濡れ性モデルを導入後の角縁容器から流れ落ちる水の数値シミュレーションでは、鉛直よりやや容器寄りの引き寄せられる流れが起き最終的な液だれがうまく表現できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

横山 真男, 瀬田 陽平, 矢川 元基, 容器口に刻んだ溝による液だれ防止の効果, 日本機械学会論文集, 査読有, 83.856, 2017, 17-00287

[学会発表](計 件)

M. Yokoyama, Y. Seta, G. Yagawa, Explicit moving particle simulation method for milk crown and water drip, V th Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2017), Hanover, German, 2017.

Youhei SETA, Masao YOKOYAMA, Mitsunori MAKINO, Genki YAGAWA, Application of Particle Method to Liquid Dripping, WCCM XII, Seoul, Korea, 2016.

M. Yokoyama, K. Murotani, O. Mochizuki, G. Yagawa, Numerical and experimental study on splash formation with consideration of the surface condition of solid wall, IV th Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2015), Barcelona, Spain, 2015.

横山真男, 瀬田陽平, 矢川元基, 容器口の形状に着目した液だれ防止方法の提案, 日本流体力学会年会, 2016.

瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, 界面張力を考慮した粒子法による容器口から流れる液垂れの数値シミュレーション, 日本機械学会第 29 回計算力学講演, 2016.

[図書](計 件)

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 流体吐出要素

発明者：横山 真男
権利者：瀬田 陽平
種類：特許
番号：特願 2016-015977
出願年月日：平成 28 年 1 月 29 日
国内外の別： 国内

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 真男 (YOKOYAMA Masao)
明星大学情報学部准教授
研究者番号：30633044

(2) 研究分担者

矢川 元基 (YAGAWA Genki)
東洋大学計算力学センター客員研究員
研究者番号：40011100

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()