

**Simulation of Compressible Gas-Liquid Flows in
Physical Cleaning Applications:
High-Speed Droplet Impact and Bubble Collapse**

February 2019

Tomoki Kondo

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	近藤 智貴
主 論 文 題 名 : Simulation of Compressible Gas-Liquid Flows in Physical Cleaning Applications: High-Speed Droplet Impact and Bubble Collapse (物理洗浄工程における圧縮性気液二相流れに関する数値解析 —高速液滴衝突ならびに気泡崩壊現象について—)				
(内容の要旨) 本論文では、液体ジェット洗浄および超音波洗浄に代表される流体物理洗浄技術の洗浄メカニズム解明を目的として、高速液滴衝突および気泡崩壊に関する直接数値解析を実行する。それらに付随する音響現象（キャビテーション、衝撃波伝播）と粘性現象（壁面せん断流の形成）を定量評価し、エロージョン(表面壊食)と付着粒子除去性能の観点から考察する。 第一に、高速液滴衝突に付随するキャビテーションによるエロージョンの影響を評価するための圧縮性・非粘性解析を行う。理論上、液滴内部を伝播する水撃衝撃波は液滴界面（音響インピーダンス不連続面）との干渉により負圧領域を生じるためキャビテーションを発生し得るが、この現象を数値的に再現した研究例はない。キャビテーションの評価には相変化を考慮しない液滴衝突の数値解析から液相圧力履歴を取得し、それをRayleigh-Plesset 型方程式に入力することで、ある初期気泡核の運動を解析する。すなわち、one-way-coupling に基づく数値解析を行う。解析の結果キャビテーションの発生は数値的に確認され、そのキャビテーション気泡崩壊に伴う音響放射は、衝突に伴う水撃圧を上回る可能性が示された。 第二に、高速液滴衝突が壁面上にもたらす水撃圧および壁面せん断流の形成を評価する圧縮性・粘性解析を行う。ここでは乾き壁面並びに液膜で覆われた壁面への衝突を考慮し、乾き壁面への衝突では壁面せん断流の形成を再現するため、三相が接触する移動界面を正確に捉えるための滑り壁モデルを適用する。せん断流による粒子はく離を評価するためには、粒子がせん断流から受ける表面応力トルクとファンデルワールス力のトルクの比較に基づき、壁面せん断応力分布を粒子はく離の可能性を予測する無次元パラメータ分布へ写像する手法を提案する。本研究は液滴衝突による壁面せん断流形成が物理洗浄メカニズムに大きく寄与することを確認した。加えて壁面上の液膜厚さに依存する水撃圧・壁面せん断応力の減衰率をモデル化した。 最後に、壁面近傍気泡の非球形崩壊に伴うマイクロジェットの形成および壁面せん断流の形成を評価する圧縮性・粘性解析を行う。対象として、単一気泡および気泡間相互干渉を含む二気泡の崩壊を議論する。気泡崩壊では液滴衝突と異なり大幅な気相体積変化が数値的な界面鈍りを助長するため、界面捕獲の移流方程式にこれを修正するソース項を導入する。単一気泡崩壊の結果から、気泡壁面間距離の増加に伴ってマイクロジェットは増速するが、壁面せん断応力はべき乗則に従って減衰することを確認した。壁面に対して水平に位置する二気泡崩壊の結果では、気泡間相互干渉によってマイクロジェットの衝突角が他方の気泡方向へ傾斜する作用が観察され、その結果として壁面せん断応力の上昇は約 1/10 以下に著しく抑制されることを確認した。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Tomoki Kondo
Thesis Title Simulation of Compressible Gas-Liquid Flows in Physical Cleaning Applications: High-Speed Droplet Impact and Bubble Collapse			
Thesis Summary Spurred by the demand for cleaning techniques of low environmental impact, one favors physical cleaning that does not rely on any chemicals (e.g., liquid jet cleaning and ultrasonic cleaning). In the present work, the cavitation accompanied by droplet impact and wall shear flow generated by droplet impact and cavitation bubble collapse near a rigid wall are simulated to understand their roles for surface erosion and cleaning contributions. Problems are modeled by solving compressible multicomponent Navier–Stokes (or Euler) equations and we solve a high-order accurate finite volume method that can capture both shocks and material interface. Cavitation accompanied by high-speed droplet impact against a deformable wall is simulated to see whether the collapse is violent enough to occur surface erosion. The evolution of pressure waves in a single droplet to collide with a deformable wall at speed up to 110 m/s is simulated and the preexisting bubble nuclei (micron or submicron in radii) show large growth to submillimeters based on a one-way coupling evaluation. It is also found, the radiated pressure from the cavitation bubble collapse can overwhelm the water-hammer pressure directly created by the impact. Radially spreading wall shear flow generated by high-speed droplet impact is believed to achieve particle removal in liquid jet cleaning, but its mechanism is not well understood. We simulate high-speed droplet impact on a dry/wet rigid wall to investigate wall shear flow as well as water hammer after the impact. The impact of a spherical water droplet (200 μm in diameter) at velocity from 30 to 50 m/s against a dry/wet rigid wall are considered. In the dry wall case, the strong wall shear appears near the moving contact line at the wetted surface. Once the wall is covered with the liquid film, the wall shear stress gets weaker as the film thickness increases; the similar trend holds for the water-hammer shock loading at the wall. Thereafter, we compute hydrodynamic force acting on small adherent particles in a one-way-coupling manner. The hydrodynamic force is estimated under Stokes' assumption and compared to particle adhesion of van der Waals type, enabling us to derive a simple criterion of the particle removal. Collapse of cavitation bubbles near a rigid wall leads to the formation of a high-speed reentrant micro-jet toward the surface which plays an important role in ultrasonic cleaning. The jet impact accompanies radially spreading wall shear flow capable of removing particles from the surface, but the particle removal mechanism is not well understood due to the experimental challenges. We simulate the so-called Rayleigh bubble collapse (100 μm in radius) near a no-slip, rigid wall to quantify the wall shear flow. Collapse of both single bubble and two bubbles are considered and the driving pressure ranges from 2 to 10 MPa. Our simulations show that generation of wall shear flow particularly after the jet impact. Lastly, the suppression effects on the wall shear stress due to the bubble-bubble interaction is clarified.			