九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Dynamics of a full-cone atomizing liquid jet

フェルミン, フランコ メドラノ

https://doi.org/10.15017/1785354

出版情報：九州大学, 2016, 博士（数理学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

（様式６－２）

氏　　名	フランコ　メドラノ　フェルミン
論　文　名	Dynamics of a full-cone atomizing liquid jet (完全円錐状アトマイズ液体ジェットの力学)
論文調査委員	主　　査 九州大学　教授　福本康秀 副　　査 日本大学　教授　清水誠二 副　　査 九州大学　教授　隠居良行 副　　査 九州大学　准教授　田上大助

論　文　審　査　の　結　果　の　要　旨

円形ノズルから噴き出した液体ジェットは、速度が遅い場合は、表面張力効果によって Rayleigh の不安定性が起こって、ジェットはきれぎれになって球状のドロップ列になる。ジェットの噴出速度が大きくレイノルズ数が高い場合、取り囲む気体も巻き込まれて運動し、界面を通してジェットに取り込まれながら、界面での不安定性によって、ミクロンオーダーの粒径の細かなミストがジェットから離脱する。これをアトマイズという。ジェットは、進行するにつれて、気体を取り込んで膨らみ、内部は気体と粒状の液体が混在する二相流の乱流状態になる。これは極めて複雑な流れで、粘性も考慮してそれぞれ乱流状態にある液相と気相の運動、そして、2 相間の相互作用を計算しなければならず、理論的に取り扱えるとは考えにくい。通常は、大規模数値シミュレーションなどの手法がとられるが、個々の現象ごとに複数のパラメータ値を変えながら計算を繰り返さなければならず、見通しが得られない。アトマイズジェットは産業応用も多く、全体像を掴めてかつ予言能力がある簡単な数理モデルが得られれば、それは極めて有用である。

本論文は、円形ノズルから静止気体中に噴き出した液体ジェットの境界形状を円錐と仮定して、その中の流れ場に対する 1 次元数学モデルを流体力学の第一原理によって打ち立てた。ジェットが周囲の気体を巻き込みながら発達する過程を理論的に説明し、平均密度や平均速度のノズルからの距離依存性など関心の高い物理量を直接導いた。このモデルは単相流ジェットにも特化することが可能で、比較のために実施した単相流ジェットの実験データと定量的に合わせることに成功した。
本モデルの基本的な仮定は、(i)ジェットが統計的に定常である、(ii)液相と気相が十分に混ざり合って平衡状態にある、の 2 点である。これらの仮定によって、二相流を塗りつぶしたモデルを考えた。円錐状の領域に、質量保存、そして、運動量保存かエネルギー保存の片方を課す。さらに、円錐領域からのミストの逃散の有無やエネルギーの散逸の有無を考慮することによって、合計 4 つのモデルを提示している。

質量保存と運動量保存を大域的に課すモデルが一番単純である。このモデルでは、平均密度や円錐軸方向の平均速度がノズルからの距離の関数として陽に書き下せる。平均圧力、すなわち衝撃力も然りである。ジェットへの周囲の気体の平均取り込み率も円錐頂角を用いてコンパクトに書き下すことに成功した。この量は、Ricou and Spalding (1961)よって導入されて以来、実験結果に合わせるためのパラーメータフィッティングが様々に試みられ、非現実的な仮定や実験で測定しないパラメータにもとづく理論がいくつか提案されてきた。質量と運動量の保存という第一原理にもとづき、かつ、実験と無関係なパラメータを用いることなく、実験データに含まれるパラメータ間の関係にまで落とし込んだことは特筆すべきである。本二相モデルは単相ジェットにも特化できる。単相ジェットの実験と比較し、遠方場において、各物理量が定量的によく一致していることを確かめた。本論文では、逆に、このことから、円錐状ジェット領域の頂角の定義の仕方を提案している。平均速度や平均圧力のノズルからの距離についてのべき的減衰則である-2/3 乗則、-3/4 乗則も見通しよく導いた。このことは、遠方場では、液相と気相が平衡状態に達して、相対的な運動が小さい一体運動を行っていることを示唆している。ノズル近傍での振る舞いは、モデルと実験では一致しない。これは、系が平衡に達しておらず、二相間の相対運動が大きいことによると考えられる。本

モデルは近傍場には適用できず、異なるアイデアにもとづくモデル化が必要である。

質量保存則とエネルギー保存則を組み合わせた 1 次元モデルも構築した。二相間の相対運動によって液相と気相は互いに力を及ぼしあい、内部摩擦を生んで、エネルギー散逸が無視できない。これを考慮することよって、新たなパラメータが加わり、そのパラメータを調整することによって、実験データを忠実に再現するより精密なモデル構築が可能になる。さらに、ミストとの逃散を考慮して、質量損失を組み入れることも可能である。円錐を軸に垂直な面で輪切りにして、薄い円盤状の領域に分割する。各円盤状領域が保有するエネルギーや質量が、ノズルから遠ざかるにつれて一定の割合で減少することを要請する。エネルギーや質量が半減する距離が新たなパラメータとして加わる。この場合、各円盤ごとに、平均速度と平均密度の間の関係が陰関数で与えられ、これらはノズルからの距離の関数として数値的に得られる。エネルギーおよび質量の半減距離を適切に選ぶことによって、実験データによりよく合わせることに成功した。また、平均密度と平均速度が距離とともに減衰するという要請から、エネルギーや質量の半減距離が満たすべき関係を厳密に導いた。

二相流乱流という複雑な状態にあるアトマイズ液体ジェットが単純な 1 次元数学モデルで定量的にもよく記述できることを示した。基本原理にもとづいて導いたので、モデルは、普遍性に富みロバストであり、適用範囲が広いことが十分期待できる。少数の測定可能なパラメータしか含まれていないので、操作性が高く、応用においても有用で、流体力学の分野において価値ある業績と認められる。よって、本研究者は博士（数理学）の学位を受ける資格があるものと認める。