

論文の内容の要旨

論文題目 液体微粒化機構の解明と噴霧特性の制御に関する研究

氏名 井上 智博

液体表面積の飛躍的増加をもたらす微粒化は、気液界面を通じた熱や物質の移動を格段に促進できる。こうした優れた特徴を生かして、噴霧燃焼における燃料微粒化をはじめ、液体原料から顆粒体を作る噴霧造粒や噴霧冷却など、微粒化は工業、製薬、農業など広範な分野で重要な役割を果たしている。しかしながら、本質的に多重の時間・空間スケールを内包する微粒化の機構には未解明な点が多いため、噴霧特性を予測することは困難であり、また、現象を自在に制御し、望ましい噴霧を得ることは今なお容易ではない。今後、さらなる応用分野の拡大が見込まれる微粒化技術を向上するにあたって、現象の基礎的知見を蓄積するとともに、噴霧特性を精度良くかつ速やかに予測することがますます重要になると考えられる。

打上げロケットあるいは人工衛星用エンジンにおいては、定格作動はもちろん部分負荷作動においても良好な推進薬微粒化を達成することで、エンジンの安定作動領域を拡大し、ひいてはより自在性の高い宇宙輸送システムを構築することが期待されている。具体的に、推進薬噴射装置として頻繁に利用される二液衝突微粒化方式において、エンジンの定格作動時には、良好な微粒化が達成され速やかな燃焼を実現できるのに対して、始動過渡やパルス作動開始・停止等の部分負荷作動時には微粒化の悪化を避けられず、比推力が極端に低下する場合がある。

以上の背景を鑑みるに、微粒化の基礎的理解、そして噴霧特性の予測および制御技術に関して、それぞれに課題を見つけることができる。そこで本論文では、広く液体微粒化を対象とし、工学的応用事例として宇宙機エンジンにおける二液衝突微粒化を念頭に置きながら、以下の3つの課題に取り組んだ。

- ①現象理解の深化：微粒化機構に関する基礎的かつ普遍的知見を獲得するために、液膜内部流れを分析し、液膜不安定化機構を明らかにする。
- ②噴霧特性の予測：流れの理解に基づき、実験定数を必要としない、新しい理論的な噴霧粒径予測手法を定式化する。
- ③微粒化の促進：低速噴射時に微粒化特性が悪化する、衝突微粒化の本質的欠点を克服すべく、二液衝突点に微量の高速気流を吹付ける新規的な微

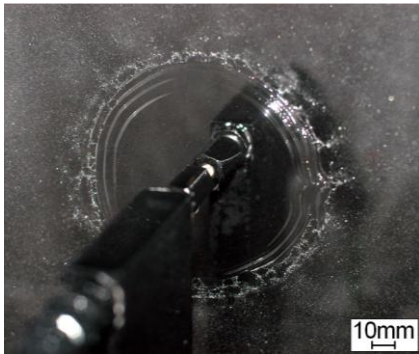
粒化促進方法を提示する。

まず、課題①について、対向する二液の衝突によって、図1(a)に示す円盤状自由液膜を形成することで、複雑な微粒化を軸対称二次元の現象に帰結した。流体数値解析を実施し、液面形状と液膜内部流れを同時に把握することにより(図1(b))、ノズル内部で発達した噴射速度分布に起因して液膜内部に形成された速度変曲点の存在が、液膜安定性に強く影響することを明示した。

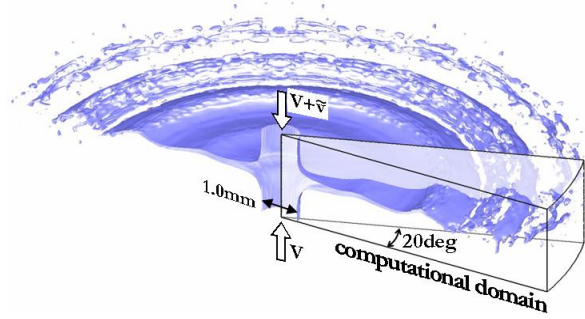
次に、課題②について、巨視的観点から現象を捉えることで、微粒化のエネルギー保存則を定式化した。微粒化とは、表面張力を介した、系の全エンタルピーから液体の表面自由エネルギーおよびラプラス圧へのエネルギー変換過程であるという認識に立つことで、系内の全エンタルピー減少量が分かれば粒径を計算できることを示し、実験定数を用いることなく、体表面積平均粒径のオーダーを瞬時に予測可能な理論式を初めて導出するに至った。対応する粒径計測実験との比較を通じて、提案した粒径推算法の妥当性を検証した。

最後に、課題③について、低速噴射時に噴霧特性が悪化するという衝突微粒化の本質的欠点を克服すべく、二液衝突点に微量の高速気流を吹付ける方法を提案した。その結果、図2に示すように、質量流量比1%(気体/液体)の微量の気体噴射を付加することで、気体噴射を行わない場合に比べて、体表面積平均粒径が約1/10に小さくなるなど、著しい微粒化促進効果を実証した。あわせて、流れ場の分析を行い、気体噴射時の衝突微粒化現象は、衝突点における気液動圧比によって整理できることを示した上で、気液動圧比が約2のときに、最も効率的に微粒化を促進できることを明らかにした。

以上のように、本論文では微粒化機構に関する基礎的知見を蓄積するとともに、工学的に有用な噴霧粒径推算法を新規に提示している。また、衝突微粒化促進方法を独自に提案し、その顕著な効果を実証している。これら微粒化の理解と予測、制御に関して獲得された知見は、宇宙工学をはじめ、広く産業界に貢献するところが大きいと考えられる。



(a) Experiment



(b) Computational analysis

Fig.1 Atomization of axisymmetric liquid sheet(Weber number: $We_L=3000$)

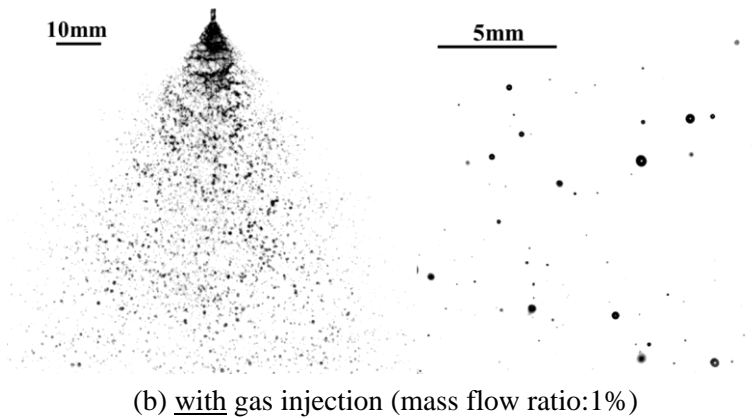
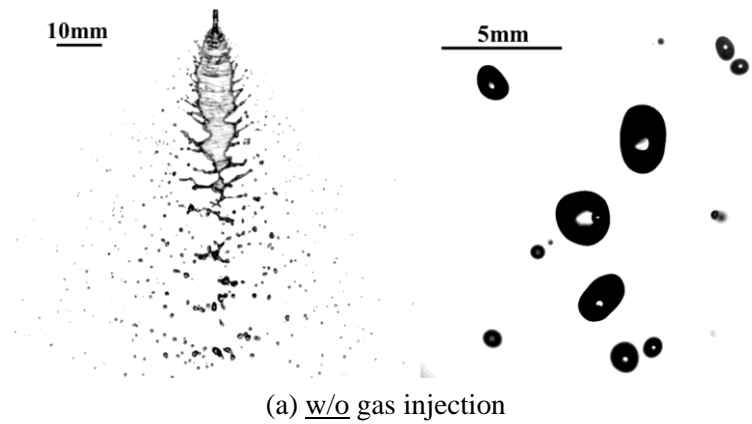


Fig.2 Enhancement of liquid sheet atomization by gas injection
($We_L=500$, Liquid injection velocity: $V_L \sim 6\text{m/s}$)