

微小重力実験から導かれた新しい微粒化概念

名古屋大学大学院工学研究科 梅村 章

A new concept of liquid atomization derived from microgravity experiments

Akira Umemura

Department of aerospace Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464-8603

(Email:akira@nuae.nagoya-u.ac.jp)

Abstract: Our microgravity experiments on the disintegration of a near-critical mixing surface SF₆ liquid jet in a pressurized N₂ gas disclosed serious difficulties in the conventional atomization theories in that they can not tell anything about the origin of the initial disturbances responsible to the disintegration. A new atomization concept was derived to resolve this difficulty, which proposes that propagative capillary waves play a main role in all atomization processes..

1. 研究の背景と経緯

航空宇宙機の推進剤には液体を用いるのが普通であり、噴霧燃焼がエンジンの重要な技術になっている。そのため噴霧燃焼に関する多くの研究が行われてきているが、未だに理解は十分でない。特に、噴霧燃焼のキーテクノロジーである微粒化に対しては、基本的な概念もよく把握されていないのが現状である。しかし、環境適合性と経済性を満たすエンジンの開発には、従来の「わからないものは束にして処理する」考え方では成り行かず、微視過程の把握と制御に立脚した新しい噴霧燃焼技術の開発が必要になってきている。また、数値シミュレータの導入は、上記の要請にこたえる強力なツールになりえるが、現行のシミュレータでは不十分であり、噴射液の流体力学構造の数理的理解と、それに基づいた新しい計算スキームの開発が不可欠である。我々の微粒化研究は、このような背景において微粒化研究の革新的進歩をもたらすことを目指して実施されている。

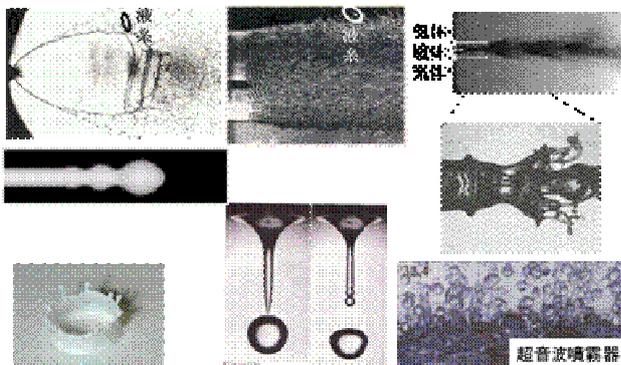


図1 液体の微粒化過程

噴射方式によって噴射液の変形の様子は異なるが、いずれの場合にも 細い液系ができ、それが切れて液滴が作られる点が共通である

著名なレーリ-卿による解析以降も今日に至るまで液体の微粒化機構の真相は謎に包まれたままできたのは、微粒化現象が微細且つ高速であるために詳細観察が困難であり、乱流微粒化機構を解明するのに有力な概念の創出が難しかったことにある。我々は、従来の研究

になかった新しい実験手段「微小重力環境」を利用し、近臨界混合表面液ジェット（高压の窒素ガス中にSF₆液を噴射して実現。気液密度比を大きくすると同時に表面張力を零に近づけることで、低速噴射でも気体ウェーバー数をO(1)の値にできる）において、乱流微粒化における液系の分断と同じ現象を拡大した空間スケールでもってゆっくりと生起させる独創的な実験手法を開発し、液系の分断過程の詳細観察を行ってきた(図2, 4)。その結果、新しく観察された現象では従来の理論で説明できないものが多いことが判明し、実験結果を合理的に説明するための理論的探求を行った。

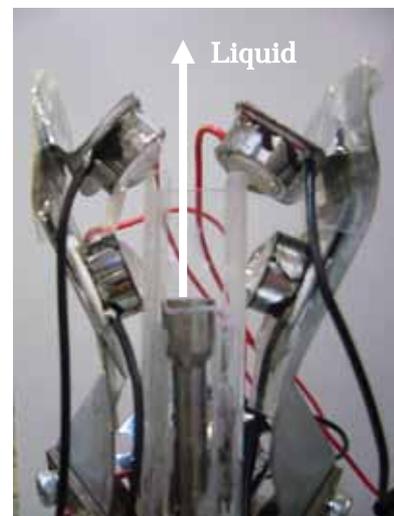


図2 LED 照射による近臨界混合表面液ジェットの変形の観察

2. 過去の微粒化理論の問題点

噴霧は微細化した液柱（液系）が表面張力の作用によって分断されて作られる（図1）ので、液体の

微粒化機構の理解は表面張力による液柱の変形特性を知ることから始まる。古くより、無限長の液柱に対して線形安定性解析が進展させられてきている。それによれば、正弦表面変形波は、波長と気液速度差（ウェーバー数）によって安定な波と不安定な波に二分される（図3）。安定波は、波長に依存する位相速度を持つ波（分散波）として伝播し、ここでは表面張力波と呼ぶ。この分類は、液柱の括れ部に働く二種類の表面張力の効き方を考えればすぐわかる。母線方向に働く表面張力が復元力を生むのに対して、円周方向に働く二種類の表面張力は液柱を絞り切ろうとする。そのため、波長の短い波では、母線表面張力の効きが円周表面張力の効きに勝り、表面張力波の特性が出現する。逆に、円周表面張力の効きが母線表面張力の効きに勝る長波長波では、括れ部が不安定化して液柱の分断が起きる。そのため、従来の微粒化理論では、不安定波だけが取り上げられ、不安定性を持たない表面張力波に目が向けられることはなかった。その結果、これまで誰も気づかなかったが、深刻な問題点を孕む結果になった。

すなわち、不安定波には伝播性がないので、不安定波の成長だけを考えたのでは、下流で発生する微粒化の原因は上流に存在すると考えるほかなく、しかも、どのようにしてその初期不安定波が作られるかについては何も答えることができない状態に陥る。

3. 新しい微粒化概念

しかし、実際の液系には必ず端があり、伝統的な無限長液柱に対する理論をそのまま受け入れて液系の分断を考えたのでは危険であり、全体像が見えない。一度わかっただけで極めて単純な事柄ながら、噴射液柱において最初に変化が起きる場所はど

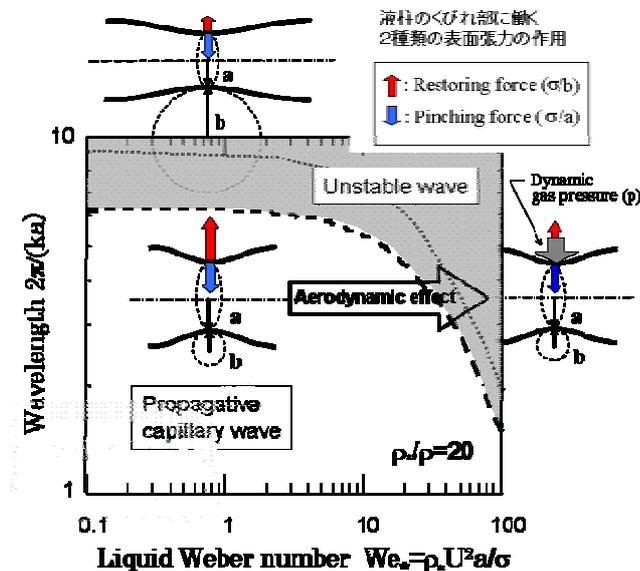


図3 線形安定性解析結果（非粘性近似）

こかと言えば、雰囲気と衝突する噴射液先端部であり、ノズル内の液体ではない。ノズル出口における液体の状態の変化は、下流（過去に噴出した液体）で起きている現象の影響を受けて生じるから、従来の微粒化理論に則って考えたのでは、将来に起きる事柄が初期の状態を決定する（因果律が逆）ことになり。うまくいかないのは当然であった。実際の現象は図3に示した2種類の解の間を行き来する形で起き、表面張力波にこそ微粒化現象の本質があることがあきらかになった。すなわち、端を持つ液柱では、母線表面張力の作用が生む先端収縮により上流伝播表面張力波が作られ、それが途中の周囲ガスと干渉するか、あるいは、ノズル出口まで遡って反射しドップラーシフトを起こすことにより、レーリーの不安定波に化けること^{[1]~[3]}。一度ノズル反射不安定波が作られると、流下不安定波が作る表面張力波によりノズル出口で最大増幅率不安定波が複製され続けること^[4]。また、先端部で自ら不安定化し分断し続ける短波長分断^[5]の存在を解明し、液系の分断の元になる不安定波の生成過程（従来の微粒化理論に欠落している）まで含めて液系の分断過程を記述する閉じた理論体系の構築に成功し^[6]、さまざまな条件での液系の分断特性を統一的に記述することが可能になってきた。

一例として、微小重力実験結果を高利的に説明し、分断特性の定量的予測を可能にした低速噴射液に関

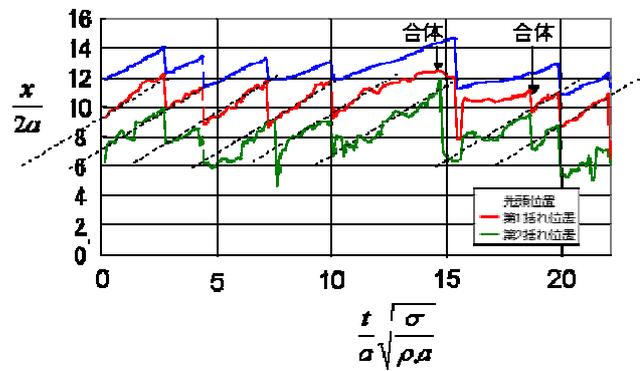


図4 先端位置と括れ位置の時間

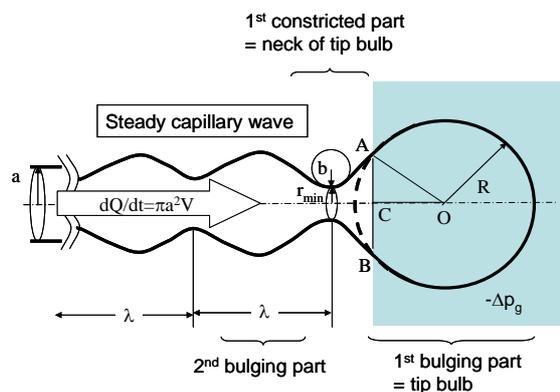


図5 短波長分断モデル

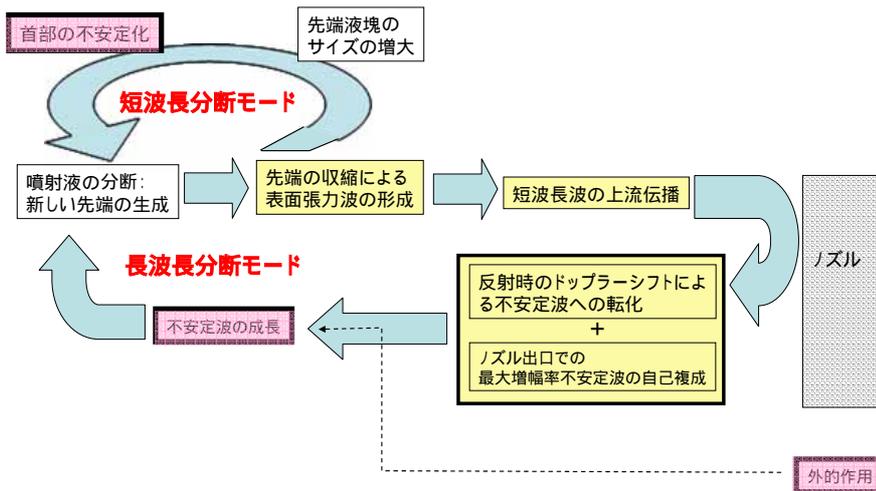


図6 低速噴射液の自己完結分断サイクル

従来の微粒化理論では桃色の枠で囲まれた事柄しか記述できない。

液柱の分断には、短波長分断モードと長波長分断モードの二つが存在する。いずれも液柱端の収縮に伴う表面張力波の発生によって自然に励起される不安定現象である。いずれのモードが出現するかは、噴射条件に依り、分断距離が短くなる方が出現する。分断毎に作られる表面張力波が噴射液には重畳しているため、波の重畳によってランダムな分断も発生し、分断距離は統計的な性格を帯びるが、ノズル出口で連続性を満たすために作られる最大増幅率不安定波の複製が流体時計の役割を果たし平均分断距離を定める。

する理論の成果を図6と7に示す。液柱の分断には、短波長分断モードと長波長分断モードの二種類が存在することが判明した。液柱の端では、母線方向に働く表面張力によって端が丸まって収縮し、液柱部に表面張力波（表面の凸凹）が作られる。端が小球

状になると液圧が上昇し、液柱部の液体を押し、この力が、表面張力波を生み出す源になっている。先端の液塊には、隣の括れ部(首)を通して絶えず液体が流れ込んで溜まるため、時間の経過と共に液体塊のサイズが増大し液圧が低くなる。先端液塊の半径が液柱の半径の倍近くになると、液柱部の圧力より先端液塊の圧力が下がるため、今度は、首の液体を吸引して先端液塊自身が球形(首をどんどん絞る)に変形しようとする(不安定化)。首部の分断によって新たな液柱の端ができると、同じことが繰り返される。これが短波長分断モードであり、分断波長は元の液柱半径の4倍程度の値を取る。これに対して、長波長分断モードは、先端収縮によって作られた表面張力波の一部がノズル出口に到達し、反射して先端に戻ってくる過程において波長がドップラーシフトによって伸び、不安定波に転化することによって発生する。しかし、短波長分断モードが液柱の端の条件だけで起きるのに対して、長波長分断モードは、ノズル反射で作られた不安定波が流下しながら振幅を増大するに十分な液柱の長さが必要である。そのため、噴射液が短いときには、長波長分断が顕現することはない。

4. 今後の発展

新しい微粒化概念に基いて乱流微粒化機構を解明し、液体ロケットエンジン開発に実用化できる微粒化シミュレータの開発を目指す。

文献

1. 梅村章、噴射液の自己不安定化機構の理論的研究 (第1報: 噴射液の不安定化に関連する表面張力波), 航空論, 55 (2007) pp.216-223.
2. 同 (第2報: 分断フィードバックループ), 航空論, 55 (2007) pp.224-231
3. 同 (第3報: 短距離分断過程の次元計算), 航空論, 55 (2007) pp.359-366.
4. 同 (第4報: ノズル出口での継続的な不安定波生成), 航空論, 56 (2008) pp.433-441.
1. 梅村章、液系の短波長分断機構の理論的研究, 航空論, 56 (2008) pp.228-238.
5. 梅村章、乱流微粒化研究における微小重力実験の意義、日本マイクロ重力応用学会誌, 25, (2008) p.50-57.

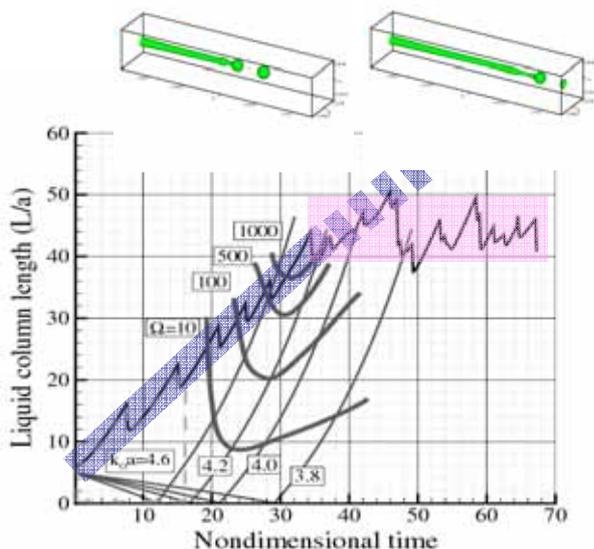


図7 分断モードの2個性の検証

速く流れる高圧窒素ガス流の中に平行に低速で SF₆ 液を噴射したときの数値シミュレーションをおこなった。ガス流によって噴射液柱が伸張させる。グラフは噴射液柱先端位置の履歴と初期噴射液先端から放射される表面張力波の軌跡および振幅の増幅率を示す。はじめ短波長分断を繰り返して噴射液柱が長くなる。初回の先端収縮によって作られる表面張力波がノズル出口で反射し不安定波に転化し、波流下しながら振幅が1000倍近く増幅する条件になるとレーリーの不安定性による分断(長波長分断モード)に移行して分断距離が落ち着く。