

Micro-Gravity Research on the Atomization Mechanism of Near-Critical Mixing Surface Jet

TSUKIJI Hiroyuki, UMEMURA Akira and HISIDA Manabu
Department of Aerospace Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan
tsukiji@prop.nuae.nagoya-u.ac.jp

Keywords: Micro-Gravity Experiment, Liquid Atomization, Near Critical Mixing State

Abstract

The atomization process of a circular SF₆ liquid jet issued into an otherwise quiescent, high-pressure N₂ gas was observed to explore the breakup mechanism of liquid ligaments involved in turbulent atomization. Both liquid and gas temperatures were fixed at a room temperature but the gas pressure was elevated to more than twice the critical pressure of SF₆. Therefore, the liquid surface was in a thermodynamic state close to a critical mixing condition with suppressed vaporization. Since the surface tension and the surface gas density approach zero and the surface liquid density, respectively, phenomena equivalent to those which would appear when a very high speed laminar flow of water were injected into the atmospheric-pressure air can be observed by issuing SF₆ liquid at low speeds in micro-gravity environment which avoid disturbances due to gravity forces. The instability of near-critical mixing surface jet was quantitatively characterized using a newly developed device, which could issue a very small amount of SF₆ liquid at small constant velocity into a very high-pressure N₂ gas.

1.はじめに

液体を多数の細かな液滴に分断し、噴霧を作ること、液体の微粒化と呼ぶ。ジェットエンジンや液体燃料ロケットエンジンをはじめとする内燃機関においては、噴霧、蒸発、燃焼という一連の過程を経る、噴霧燃焼を利用している。そのため、微粒化の技術はエンジンの性能を左右する重要な技術の一つである。また単に能力面での性能向上だけでなく、近年とくに重要視されている排出ガス中の汚染物質削減など、環境面での大きな問題を解決するための要素でもある。しかしこの微粒化の技術は、とかく試行錯誤の積み重ねにより開発されてきた経緯を持ち、その過程が物理的に理解されているわけではない。そこで当研究室ではこれまで、高圧環境下での液体燃料の微粒化について、理論、数値、及び実験的に研究を行ってきた^{1),2),3)}。

長い間、微粒化の素過程の解明が阻まれている原因として、それが非常に高速度の現象であるということが大きい。噴霧の生成には、空気力学的な作用が噴射液に不安定波を励起し、微粒化に至ると考えられている。しかし低圧(大気圧)下では表面張力が大きく、かつ、気相と液相の密度比が小さいため、相対速度が大きくなると前述の不安定波が現れない。そしてこの高速噴射液に現れる空力的不安定波は、小さな波長を持っており、その観測には非常に高度の時間分解能が要求される。加えて、流れの乱流化がとれない、低圧下での観察は大変困難である。

この問題点を解消するために、高温高圧雰囲気下で、噴射液体表面を近臨界状態にすることは非常に有効である。この条件下では、液体は表面張力が小さく、気液の密度比は大きくなっている。よって相対速度が比較的小さくとも、ウェーバー数が同程度になるために、低圧高速噴射時と物理的な相似現象を起こすことが出来るからである。

この実験において、微小重力環境を用いること理由は以下の通りである。実際の微粒化においては現象のスケールが極めて小さいために、体積力である重力の影響は小さく、フルード数は大きくなっていると考えられる。また、液柱が分断し液滴が形成される過程では、面積力である表面張力作用と空力作用のみにより行われていると考えられる。しかし、地上での実験において、観測のしやすさを実現するために、液柱の径を大きくしたり、噴射速度を小さくしたりすると、フルード数が小さくなるため、重力の影響が大きくなってしまふ。つまり、空力作用、表面張力作用に加え、重力作用が影響し、これらの3つの要素を分離することは困難であることから、実際の噴霧での液柱の分断過程を模擬することができないからである。

今回、微小重力環境下における一定低速の液体SF₆ジェットの分断過程を撮影し、画像解析を試みた。その結果について報告する。

2.実験装置と方法

実験に用いた装置及び観測方法について説明する。

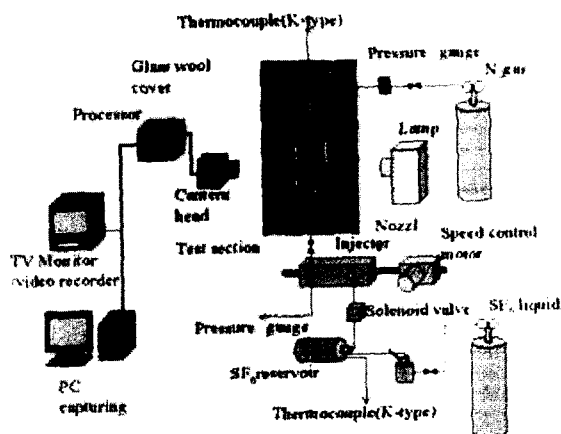


Fig.1 Experimental apparatus

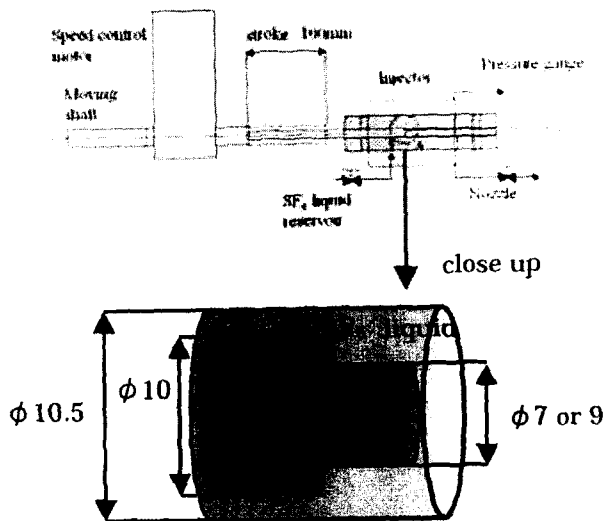


Fig.2 Injector

図1に実験装置の構成を示す。主要要素は以下の通りである。高圧試験容器は内径 100mm, 高さ 230mmの内容積を持つステンレス容器で, 常用最高圧力は 10MPaである。光源装置は 100Wの超高圧水銀灯で, バックライトとして使用する。撮影装置は高速度カメラを使用し, シャッタースピード $16000s^{-1}$, 条件に応じて 4000fps(記録画素数 1024×128) 或いは 10000fps(同 512×128) で撮影する。

実験で液化 SF_6 (液化六フッ化硫黄) を, N_2 雰囲気中に上向きに噴射して, 噴射液に生じる不安定性を観察した。雰囲気圧力が高いので, 噴射液の表面は臨界混合条件に近い状態となっており, 表面張力は小さな値をとる。 SF_6 を使用する理由は, 分子量が炭化水素系燃料と同程度であり, 臨界温度と臨界圧力がともに常温常圧に近いことから, 近臨界状態が比較的容易に作る事が出来

るからである。(分子量: 146.05, 臨界圧力: 3.7MPa, 臨界温度: 126.2K)。

当研究室で行った過去の研究では液体の噴射に, 試験容器より高い圧力を持つ液体リザーバーを使用し, その間に入れた電磁弁の開閉により SF_6 の噴射を行っていた。この方法では, 実験中にリザーバーと試験容器の圧力差が小さくなるため, 噴射速度が徐々に小さくなる。これは一回で幅広い速度条件の実験を行える一方, 一定の噴射速度を作ることは困難であった。そこでこの欠点を解消し, 任意の一定噴射速度を出すための装置として, 微小定速噴射装置を開発した。

この装置の基本的な概念を説明すると, 試験容器と同じ圧力に設定した SF_6 液を, スピードコントロールモーターに接続したピストンを押し出すことにより, 導管を通してノズルに送るというものである。本実験では常用最高圧力 10MPa という高圧条件下で, 直径が 0.2 及び 0.4mm のノズルから噴射速度 100~300mm/s で液体を噴射することを計画した。このときの液体の流量は, $3.14 \sim 37.7mm^3/s$ という極めて小さいものである。噴射速度を決定するのは, ピストンの断面積とその速度, つまりモーターの速度である。モーター速度を低くすると, 速度レンジが小さくなり, 広い実験条件を満たせなくなる。また, 上に述べた圧力条件下では座屈の問題から, ピストンの径を小さくすることには限界がある。そこで考案したものが, 図2に示す模式図の, 段差付きピストンである。これは径の異なる2種類のシャフトを組み合わせ, その断面積の差を利用し, 液体を押し出すものである。この構造の採用により, 高圧液体を押し出すため, 座屈対策の太いピストン径と, 低流量のための小さい断面積という, 相反する要求を実現することが出来る。さらに利点として, シャフトBを交換可能とすることにより, 幅広い噴射条件への対応が可能で, ギアを使いモーターの速度を変えるよりも, はるかに操作が容易である。

Table 1 Experiment condition

Run	Nozzle diameter d (mm)	Pressure p (MPa)	Jet speed v (mm/s)	Weber No. We
1	0.2	59	300	23.922
2	0.2	70	100	6.645
3	0.2	70	200	26.580
4	0.2	70	300	59.805
5	0.2	80	300	239.220
6	0.4	70	100	13.290
7	0.4	70	200	53.160
8	0.4	70	300	119.610
9	0.4	80	100	53.160
10	0.4	90	100	265.800

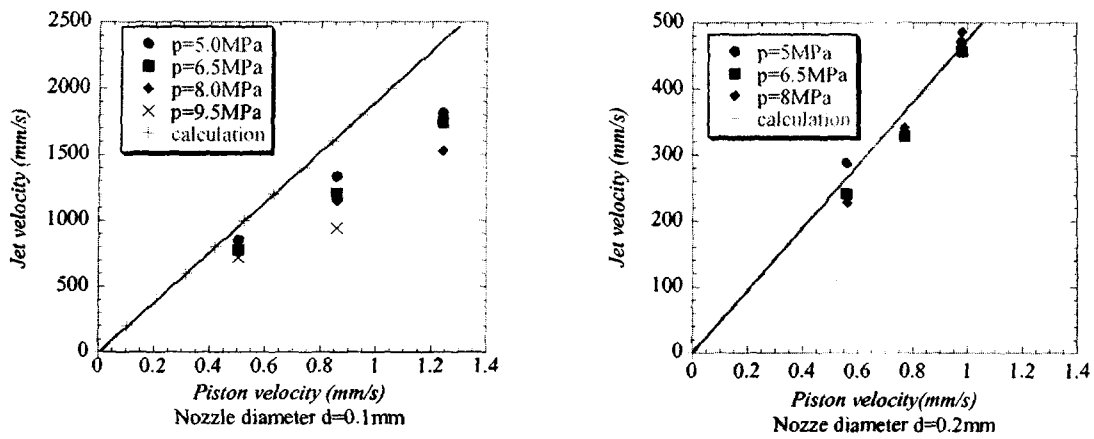


Fig.3 SF₆ jet velocity

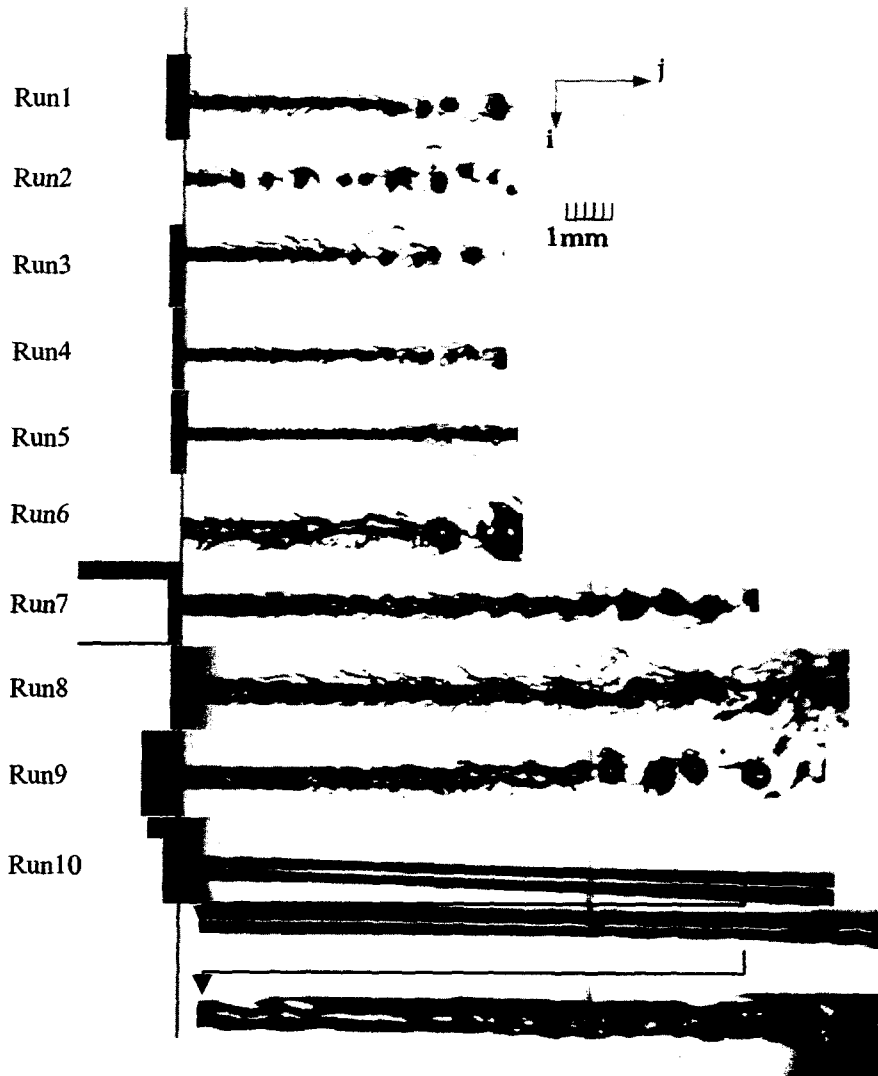


Fig.4 Representative image

落下実験では実験装置のセッティング終了から、実験開始まで、約20分ほどの準備時間が必要である。しかし、この時間で噴射装置内の液化SF₆の一部が、気化してしまう。よってピストンを動かした時に、最初は気化SF₆が噴射される。これを回避するために、噴射装置にはSF₆のリザーバーが、電磁弁を通してつながれている。このリザーバーは試験容器よりやや圧力を高く設定しており、弁を開くことでピストン内の液化SF₆を補充し、気化したSF₆を試験容器へ押し流す役割を持つ。

なお、微小重力実験は岐阜県土岐市にある(株)日本無重量総合研究所(MGLAB)の落下施設(重力レベル10⁻⁵g、持続時間4.5秒)を利用して行った。

3. 実験結果

3.1 地上試験 落下実験にあたり、新しく製作した微小定速噴射装置の特性を調べるための地上実験を行った。ノズル径0.1, 0.2mmを使用し、圧力を変化させた時のシャフトの速度と噴射速度の関係を調べたものが図3である。地上では重力の影響を受けるために、液体の正確な噴射速度を画像から求めるのは難しいが、ノズル付近での液柱の表面波の移動を観測することで、推定速度を算出した。ノズル径0.2mmのとき、噴射速度は計算値とほぼ合致した。しかしノズル径0.1mmの場合には圧力が大きくなるほど、噴射速度が理論値より下回った。これは液柱の径が小さいために慣性力が弱く、噴射直後で大きく減速しているためと考えられる。ノズル径0.4mmを使用すると、重力の影響を強く受けるために速度の算出は出来なかった。しかしノズル径0.2mmで理論値通りの値が出ていることから、微小重力環境下においては使用に問題が無いと推察される。

3.2 微小重力実験 図4に微小重力実験で撮

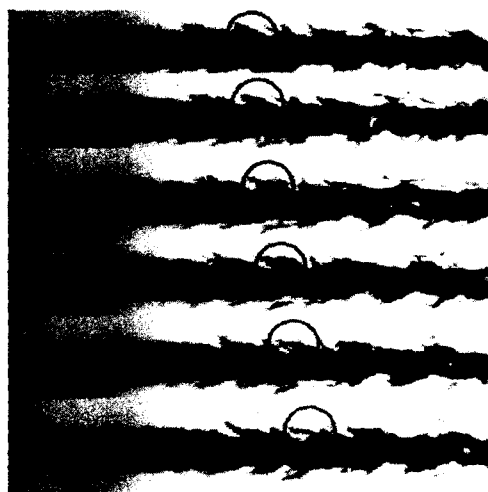


Fig.5 Close up of Run7

影した画像のうち、実験条件ごとの代表的な画像を示し、表1に実験条件を記してある。いずれも雰囲気温度は30°Cである。Run10については下流側3画面分の画像を載せてある。噴射速度は噴射装置のシャフトの速度から決定した。噴射された液柱はノズル近傍では層流的な状態であるが、少し離れた位置で表面に不安定波が発生し、それが下流に行くにつれ発達し、液柱の分断、液滴形成へと至っている。噴射速度一定で圧力を変化させると、圧力が大きくなるにつれ不安定波の発生位置及び液柱の分断位置が下流側へ移っていく。圧力一定の下に噴射速度を速くした場合にも同様の変化が見られるため、液柱の分断位置がウェーバー数に依存していることが予想される。高圧になるほど液体表面の輪郭が不鮮明になっているのは、拡散係数および、気化したガスのj方向噴出速度が小さくなり、蒸発したSF₆が液体表面にとどまるためである。Run10は他の条件と様相がまったく異なっている。すなわち、ノズル付近では層流状態で不安定波が見られず、はるか下流で不安定性が現れている。これは、近臨界混合表

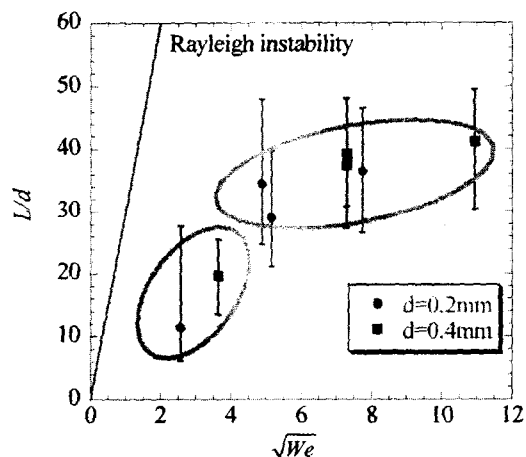


Fig.6 Break up length

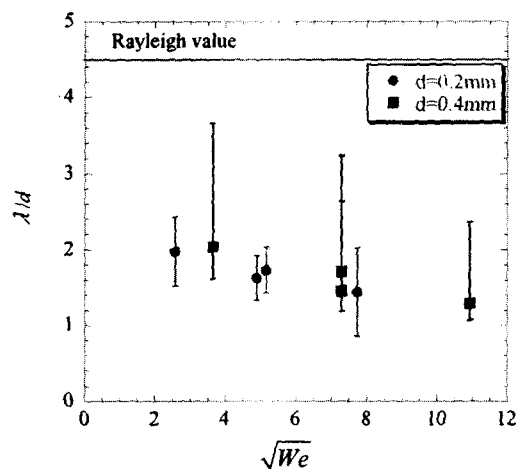


Fig.7 Wavelength at breakup stage

面液ジェットに特徴的な現象であり、表面張力の低下によってノズル出口に表面張力に関係した不安定波が励起されなくなったためである。その機構の詳細は文献 5), 6) に論じられている。図 5 は Run7 のノズル出口近傍の拡大図を時系列に沿って並べたものである。不安定波の発達過程を○で囲んで示してある。剪断層の作る渦によって形成されている液柱表面の髭状の影は、下流に進むにつれ、剪断層厚みの増加と共により大きな渦となり、分断にいたる液柱表面の凹凸を発達させている。

液噴射の分断距離 L (ノズル出口から分断位置までの距離)とウェーバー数 We との関係を体系的に調べるために、画像処理により複数の画像から分断位置を算出した。その結果を図 6 に示す。なお Run8 は分断位置が画面外のため、Run10 は分断の様相が異なるため除外した。縦軸は分断距離をノズルの直径で割ったものである。横軸はウェーバー数の平方根であり、噴射速度に比例している。ウェーバー数の計算に用いた SF_6 液の表面張力値は、若嶋¹⁾らの研究を参考とした。図中の直線はレイリーの不安定性による分断距離を示している。実験値はレイリーの値に比べ低い値をとっていることから、実験では強い不安定性が発生していることがわかる。

分断距離の算出方法は次の通りである。画像の左上方のノズル壁面を始点とし、半径(i)方向に走査し輝度を抽出する。輝度がある閾値を下回ると液柱と判断し、始点を軸(j)方向に移動し、同様の走査を繰り返す。始めて液柱が確認されなかった時の j を分断位置とし、ノズルからの距離を求めた。図 6 に対応して、各条件での液柱から液滴が分断するときの分断間隔 λ を求め、それを図 7 に示した。

図 6 を見ると、ウェーバー数が 1 のオーダーである時はウェーバー数の平方根と L は比例関係にある。しかし、ウェーバー数のオーダーが 10 すなわち、液体の代わりに気体の密度を用いて算出したウェーバー数がオーダー1になると、 L の増加は極端に小さくなっている。このことから液柱にできる不安定波の増幅率は噴射速度に比例しているということが知れる。図 7 からはウェーバー数の増加と共に、分断間隔が小さくなっているうえ、レイリーの不安定性による波長 $\lambda/d=4.51$ よりかなり小さいことが分かる。これらの現象は

本実験によって初めて定量的に明らかになったものであり、短波長分断機構については文献 2), 3), 6) に論じられている。

4.おわりに

微小重力環境を利用し、近臨界混合表面状態にある液体の低定速噴流の速微粒化過程を、バックライト法と高速度カメラで撮影し、画像解析から液柱の分断過程を明らかにしようとした。この実験より得られた主な知見は次の通りである。

表面張力と気液剪断層内の渦により作られる噴射液表面の不安定波は、剪断層と共に発達し、液柱表面の凹凸を拡大し液滴へと分断させる。気体ウェーバー数がオーダー1 になる条件での分断距離は噴射速度に比例し、分断波長はレイリーの値に比べかなり小さい値をとる。

本研究は日本宇宙フォーラム地上公募研究と文部科学省科学研究費の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 若嶋勇一郎・菱田学・梅村章：微小重力場での近臨界表面ジェットの不安定性(第1報)、日本機械学会論文集(B編), 2002-3, pp.249-255.
- 2) 梅村章・若嶋勇一郎：微小重力場での近臨界表面ジェットの不安定性(第2報)、日本機械学会論文集(B編), 2002-3, pp.256-262.
- 3) Umemura, A., and Wakasima, Y.: Atomization regimes of a round liquid jet with near-critical mixing surface at high pressure, Proc. Combust. Inst., 29 pp633-640 (2002).
- 4) 蒔田董, 西原正夫編著:高圧流体技術, 丸善, 1992.2
- 5) 梅村章: 近臨界混合表面液ジェットのテラー型不安定性の研究~乱流微粒化機構を探るための基礎的な考察~, 日本燃焼学会誌, 45, pp49~61 (2003)
- 6) Umemura, A.: Exploration of Taylor Instability Excitation and Hydrodynamic-Assisted Breakup Mechanisms through Micro-Gravity Experiments Using Near-Critical Mixing Surface Jets, Nature (submitted)