

# 噴射液の不思議を解く

梅村章・鈴木創介・大坂淳（名大）・新城淳史（JAXA）・  
 姫野武洋（東大）・菊池政雄・村上敬司・柴崎浩一（JAXA）・  
 市川智洋（JSF）

ABSTRACT: We have revisited the conventional laboratory experiments to validate our new atomization concept derived from microgravity experiments. Our laboratory experiments disclosed the existence of two-valued breakup length on the contrary to the conventional understanding. The new atomization theory satisfactorily explains all breakup phenomena appearing in the water jet issued from a nozzle with various nozzle radius-to-length ratio, which was impossible in the conventional understanding. It is found that both gravitational acceleration and velocity profile relaxation play an important role to create an certain unstable wave responsible for each steady breakup

## 1. はじめに

噴霧は高速噴射液に形成される無数の微細な液糸が分断して作られる。ランダムに発生し、速い速度で動いている微細な液糸を追跡し、分断過程を詳細に観察することは困難である。従って、液糸の位置を固定し、且つ、半径を大きくして観察しやすくした模擬液糸を用いて、液糸の分断機構を調べようとするのは自然な考え方であり、従来より円形ノズルから低速噴射された液体を模擬液糸として、その分断現象を調べる研究が数多く行なわれてきている。し

かし、そこで観察される液柱の分断特性は、液糸の分断特性を正しく表わしているのであろうか？実験室で行われる鉛直下向噴射液実験の結果から乱流液糸の分断機構を引き出すには、この実験方法が生み出す重力の効果とノズルの効果が同定されていなければいけない。しかし、従来の研究において、これらの点が強く意識されることはなかったように見える。それのみか、ノズルや重力の存在と実験で観察された分断特性との関係はよくわかっていないのが現状である。

例えば、蛇口から垂れる水が滑らかに長く伸びた後、急に表面が凸凹し出して切れる様は馴染み深い。しかし、この現象を従来の考え（レーリーの理論）に基づいて合理的に説明することはできない。図1の写真と黒線グラフは従来の実験室実験の結果と解釈を示す。従来の理論では、分断を引き起こす不安定波は、噴射液が内蔵するランダムな擾乱の中から最も不安定な波が選択的に発展すると考えられている。すなわち、不安定波の初期振幅の大きさは定まらず、理論的に分断長さを予測することができない。そこで、レーリーの式を用い、従来の考えに従って、測定した分断距離  $L_B$  から、不安定波の初期振幅を求めると、その大きさは噴射液の分子のサイズより小さな値になる。これは信じがたい事柄である。また、ランダムな擾乱から作られる不

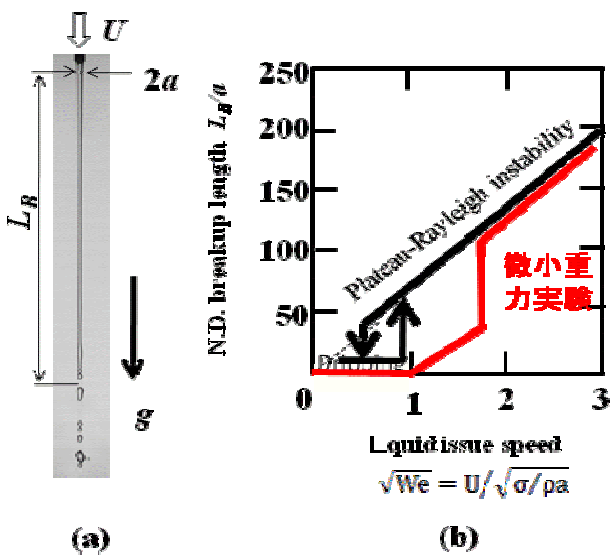


図1 従来の実験室実験

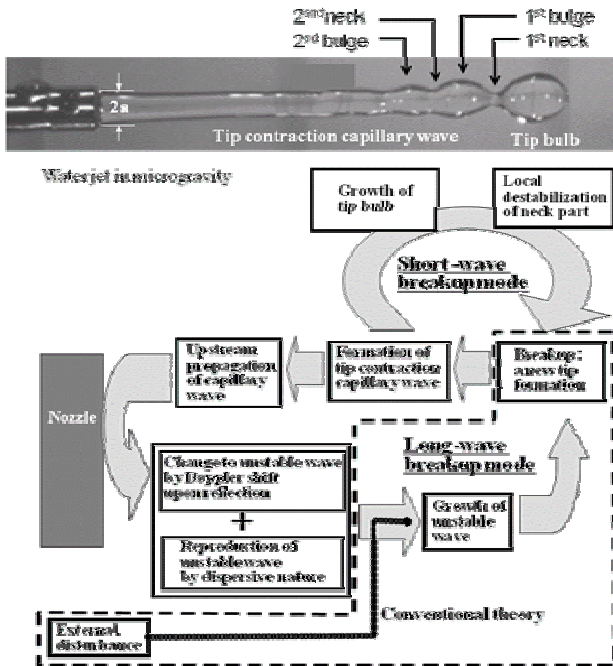


図2 自己不安定化機構

安定波は、振幅がランダム変数であり、従って、分断距離もランダムに変化してしかるべきであるが、実際には、誰が実験を行っても同じ平均分断距離が得られ、分断現象が決定論的な不安定化機構によって起きていることを示唆している。さらに、図1に赤線で示した微小重力実験の分断距離が噴射速度の大きなところで実験室実験と一致するのも奇妙である。地上の重力加速度値1gは、物理法則を考えたときには偶然的な数値でしかないからである。

本研究では、微小重力実験から導かれた新しい微粒化概念(図2:不安定波の起源ならびに自己不安定化機構を明らかにする)の有効性を実証する一例として、従来の実験室実験結果の

合理的な説明を試みた。

## 2. 実験室実験結果の解釈

当研究室で実施した鉛直下方向水噴射実験結果を詳しく調べた結果、通説と異なった描像が見えてきた。

図5に平成22年度に実施した実験室実験の結果を示す。無次元噴射速度 $\sqrt{We}$ (液体ウェーバー数 $We = \rho_* U^2 a / \sigma$ , 液体密度 $\rho_*$ )とノズル半径 $a_0$ で無次元化した定常分断長 $L_B$ の関係が示してある。使用したノズルはステンレス製の平頭ノズルである。ノズルの長さを30mmに固定し、半径を変化させている。同じ半径を持ったオリフィスからの水の噴射も行っている。注意しなければいけないのは、本実験では各実験ごとに短い立ち上がり時間を経て一定速度でピストンを押し、目標噴射速度を実現しているので、実験点はどれも互いに独立な実験になっている点である。これに対して従来の実験ではオーバーフロータンクから管を通して流下する水流量をバルブで調節して定常噴射速度を定めており、低速から高速、あるいは、高速から低速に噴射速度を段階的に変化させて一連の実験データを取得している。比較のため、従来の実験室実験で得られている結果も実線で記入してある。

重力の効果は、噴射速度が小さいとき、従って、高速噴射ではノズルの近くでより強く現れる。噴射速度が大きくなると、噴射液が持つ速度分布が分断長に影響するようになる。2つの極限的な場合が考えられる。噴射液の速度が一樣とみなしてよい場合と放物型速度分布になっている場合である。前者はノズルの長さを零にしたオリフィスジェットにおいて近似的に実現し、長いノズルでは後者になり、噴射液は長い速度分布緩和域を持つ。この2つのジェットの違いより、速度分布の効果がわかる。

図3に示すように、本実験によりノズルの近くで分断が起きる場合(SDB)とノズルから遠く離れた位置で分断が起きる場合(LDB)の2種類があることが明らかになった。LDBは長いノズルから噴射された噴射液で発生し、SDBはノズルが短い、あるいはノズル流れの乱流化によって噴射液が一樣化した条件で発生する。

### 2・1 短距離分断

噴射液の加速により、表面張力波が伸長されるので、一樣流でも伝播性の波要素から不安定波ができるようになる。SDBはノズル出口で不安定波が作られる場合に起き、新しい微粒化

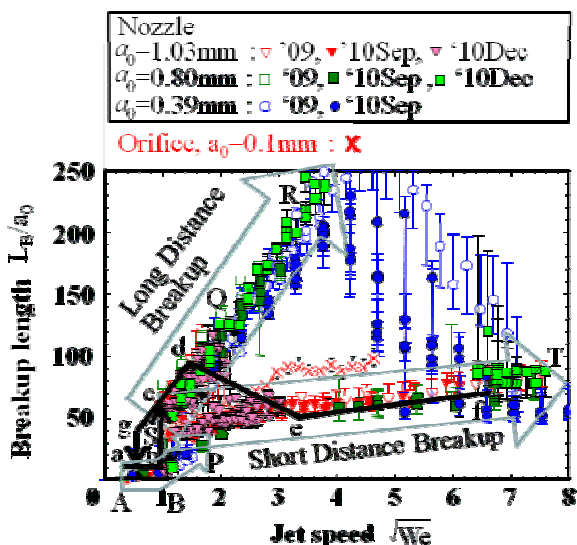


図3 実験室実験結果

理論に基づいて、重力の作用下の一様流ジェット  
トの解析から求めた分断長の予測式

$$\frac{L_B}{a_0} = 2.9\sqrt{We_c} \frac{1}{C} \ln \frac{a_B}{\varepsilon} + Bo \frac{1}{C} \left( \ln \frac{a_B}{\varepsilon} \right)^2 \quad (1)$$

は、実験結果をよく特性づけることが確かめられた。 $C$ は、重力による波の伸長に関係したパラメータであり、噴射速度の増大に伴って値が大きくなる。比 $\varepsilon/a_B$ は0.01程度の値を取ることが理論的に分かっている。

ノズルの流れが乱流化したときに現れる短距離分断も噴射液が一様化するために起きるものである。従来、噴流の乱流成分が分断長を短くすると説明されてきたが、乱流ノズル流れで噴射速度を一様化する乱れのサイズはレーリーの不安定波波長に比べて十分小さいから、噴流に残った乱流成分が分断を引き起こす不安定波の起源になるとは考えづらい。図3に見るように、短距離分断の分断距離は、ノズル流れが層流であるか、乱流であるかにかかわらず同じ線上に乗っており、式(1)によって分断長は記述できる。

## 2・2 長距離分断

ノズルの長さが助走長より長ければ層流噴射速度分布は放物型になり、下流にいくに従って一様分布に近づく速度分布緩和が起きる。このような速度分布を持ったジェットの安定性を調べると、中心速度と表面速度の差がある値より大きいところでは、不安定波が存在できないことがわかる。そのため、ノズル出口でこの条件を満たす噴射液では、先端収縮表面張力波のノズル反射によって不安定波に転化することができない。そのため、速度分布緩和が終わり強い不安定波ができるまで長く噴射液が伸びる。すると、そこで起きた分断によって作られる表面張力は上流に伝わるに従って波長が伸び、あるところで中立化し、噴射液に流されると不安定波に転化し、次第に増幅率を増しながら振幅を増大させ一様領域に至って噴射液を分断する。速度分布緩和域にある不安定波は増幅率が小さいので、その間の振幅の増大を無視すれば、丁度一様流ジェットのノズル出口が速度分布緩和域の末端にあると同じような状態になる。従って、LDBの分断長は、速度分布緩和域の長さ $L_R$ に一様流領域での短い分断長を $L'_B$ を足した値になる。

$$L_B = L_R + L'_B \quad (2)$$

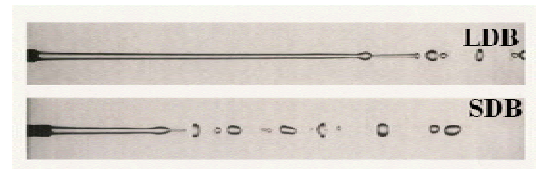
非粘性的な水ジェットでは、 $L_R$ は $L'_B$ に比べて非常に長くなる。従来、この分断長が噴射速度に比例した形になっていることより、レーリーの理論に従う分断と考えられてきた

が、実際には、レーリーの理論の式に則るのは、これまで存在が知られていなかった短距離分断の分断長であり、LDBの分断長は速度分布緩和長を代表していると考えた方がよい。

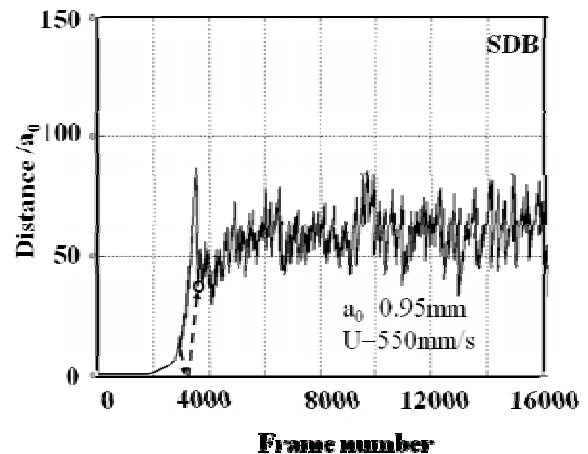
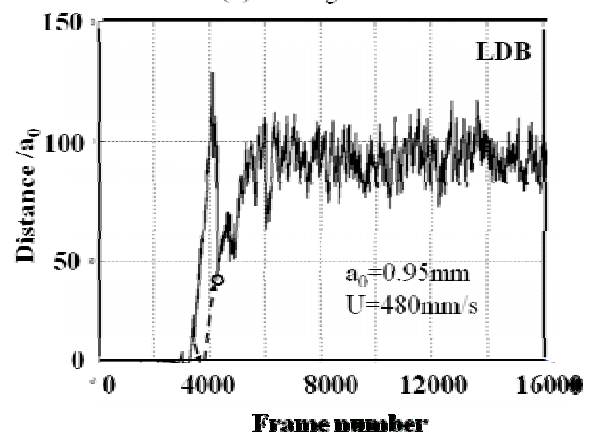
重力による噴射液の加速は、速度分布緩和を促進する。実際、実験室実験で得られる長距離分断データを見ると、ノズルの半径を変化させても、分断距離に目立った変化が見えない。これは、ノズル半径を大きくすると、重力の効きが強くなり、緩和距離の増大が起きないからである。これが、微小重力実験と実験室実験が同じような分断長を与えている理由である。

## 2・3 分断長の2価性

特に興味深いのは、比較的半径の大きなノズルを用いたときに現れる分断長の2価性である。実験に用いたノズルは、先に述べた2極



(a) Image



(b) Jet tip location

図4 2価性



限の中間的な特性をもった噴射液を作る．そのため，ある噴射条件で，LDB と SDB のどちらの分断機構も有効になる可能性がある．図3のノズル半径が1.03mmと0.80mmのデータを見ると，LDB と SDB の2つがプロットされているところがある．実験では，同じ噴射速度の実験を5回以上実施した．すると，ある実験では従来観察されてきた分断長に一致するLDBが現れるが，別の実験では同じ噴射速度においてSDBが現れた．すなわち，分断長が2価になっている．それぞれの実験は噴射開始から始めているので互いに独立である．実験の途中で，分断長が変わることはないが，どちらが起きるかは偶発的であり，噴射開始時にどちらになるか決まっている．従来の考え方とは異なり，この実験は，噴射液の分断が決定論的に起きていることをよく実証している．

図4にLDBとSDBが起きたときの噴射液先端の軌跡を示す．噴射開始時の噴射速度は小さいので，最初の分断によって生じる先端収縮表面張力波は容易にノズル出口に達する．ノズル反射によってできた不安定波が伸びた噴射液を短く分断している．その位置はどちらも同じである点に注意しよう．その後の展開によってLDBとSDBに分かれている．これは次のように考えれば合理的に理解できる．

中央が平坦になった速度分布を持ってノズルから噴射された液体では，どの噴射速度でもノズル出口で不安定波が存在できるようになることはないが，許される不安定波の波数は $\sqrt{We} > \sqrt{2}$ の条件では小さくなる．SDBはノズル出口反射不安定波の波数がレーリーの最大増幅波数より小さくなることによってノズル

出口での不安定波の生成を維持する場合はSDBであるのに対し，LDBは逆にノズル出口での反射波の波数をレーリーの最大増幅波数より大きくし，速度緩和領域中に中立化する位置を求め，自己不安定化ループがノズルから離れて出来上がる場合である(図5)．

### 3. 結論

実験室実験で観察される全ての分断現象が新しい微粒化概念に基づいて合理的に説明できることが確かめられた．重要な点は以下の通りである．

(1) 先端だけの特性でおきる短波長分断と異なり，長波長分断による定常分断はいずれもノズルの存在があって初めて起きるものであるから，分断距離が空間的に固定できる．

(2) ある噴射速度での定常噴射液の分断特性を考えるには，それまでの履歴も考慮しなければならない．噴射開始時におけるノズル反射が重要な役割をする．ひとたび自己不安定化ループが完成すれば，それからの変形として噴射速度に対応した定常分断状態の移り変わりが記述できる．これが従来の実験方法で噴射速度に応じた定常分断が実現する理由である．一度SDBあるいはLDBになると，その状態が続くことより，従来の実験方法で観察できなかった分断長の2価性が見出された．

### 参考文献

- [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)」,日本航空宇宙学会論文集, 55, (2007), pp. 216-232.
- [2] 梅村章「噴射液の自己不安定化機構の理論的研究(第2報:分断フィードバックループ)」,日本航空宇宙学会論文集, 55, (2007), pp. 224-231.
- [3] 梅村章「噴射液の自己不安定化機構の理論的研究(第3報:短距離分断過程の1次元計算)」,日本航空宇宙学会論文集 55, (2007), pp. 359-366.
- [4] 梅村章, 噴射液の自己不安定化機構の理論的研究(第4報:ノズル出口での継続的な不安定波生成)日本航空宇宙学会論文集, 56, (2008) pp. 433-441.
- [5] A. Umemura, Self-stabilizing mechanism of a laminar inviscid liquid jet issuing from a circular nozzle, Physical Review E (to appear).

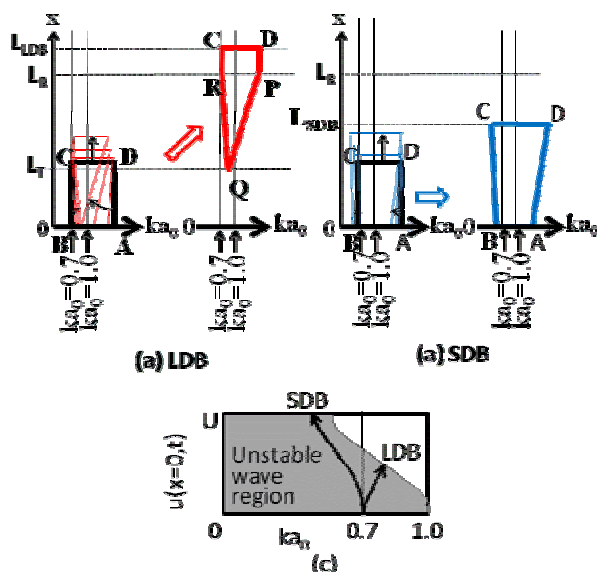


図5 2つの自己不安定化ループ