二次元ノズルから静止気体中に噴出する水膜流の振動と崩壊

Oscillation and breakup of planar liquid sheet ejected into an ambient gas

○ 薩摩林真 (信州大) 戸崎正道 (信州大院) 正 佐々木篤史 (信州大)

Shin SATSUMABAYASHI, Shinshu University, Wakasato4-17-1, Nagano, 380-8553
 Masamichi TOSAKI, Shinshu University
 Atsushi SASAKI, Shinshu University

Key Words: Liquid sheet, Growth rate, Wave number, Oscillation

1. はじめに

ノズルから気体中に噴出された液体噴流は、噴流自身の不安定性と気液界面での相互作用によって振動し、液滴に分裂する。静止気体中に噴出された二次元液体噴流の不安定性について、不安定なモードは5つ存在することが線形安定性理論から明らかにされ、実験結果と比較されている⁽¹⁾。また、気液界面での相対速度を考慮した二次元液体噴流についても、線形安定性理論による解析結果が示されている⁽²⁾。一方で二次元液体噴流に関する実験的な研究は少なく、攪乱の成長を測定する方法は確立されていない。そのため、流速と振動振幅の増幅率との関係⁽³⁾は調べられているものの、攪乱の成長を系統的に測定できていない。本研究では、二次元ノズルから静止気体中に噴出する水膜流において、攪乱の波数の違いによる成長率の変化を調べた。水膜流に周期的な圧力変動を与えることで流れの状態を制御し、振動振幅および波面の傾斜角の増幅率を測定することで攪乱の成長率を定量的に評価した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。幅 1.0mm、スパン方向長さ 50mm の噴出口形状を持つノズルから静止気体中に水膜流を噴出させた。ノズル出口における平均流速 U を 4.0 ~ 8.2m/s の範囲で変化させ、水膜流の振動状態と崩壊過程を観察した。なお座標系はノズルの噴出口中心を原点とし、流れ方向に x 軸、流れと直角な方向に y 軸を考慮することとする。

水膜流の振動状態は初期乱れの強さに大きく依存している。水膜流の初期乱れを、実験時に与える圧力変動よりも小さくするため、上流からの流れは開口比が 73% の金網と

Fig.1 Schematic sketch of liquid sheet ejected from two dimensional nozzle.

絞り比が 50 のノズルによって整流されている。また、ノズルの表面は直径 50 μ m のコンパウンド粒子を用いて研磨されている。

水膜流に周期的な圧力変動を与えるため、噴出口より 20mm 上流の位置に、スパン方向に一樣な幅 0.8mm の攪乱挿入口を設けた。攪乱挿入口には厚さ 0.3mm の隔壁を介して定格出力が 30W のスピーカーが接続されており、圧力変動を与えることで振動を励起させた。この実験装置では、励起周波数 f を 50 ~ 500Hz の範囲で変化させることができる。

振幅 A と波面の傾斜角 θ を測定し、それらの増幅率を求めることで攪乱の成長率を評価した。位置分解能が 10 μ m の精密移動ステージに取り付けられたニードルが水膜流に接触する位置を測定することで、振幅 A を求めた。ニードルの先端が水膜流の水面に接触すると通電するようニードル部を陽極、金属性ノズルの表面を陰極とすることで、接触状態を電気信号から判定できるよう工夫した。また、水膜流の水面にレーザー光を照射し、反射光の振れ幅の最大値を照射点から 230mm 離れたスクリーン上で測定することによって波面の傾斜角 θ を求めた。

3. 実験結果と考察

ノズル出口における平均流速が $U=8.2$ m/s の条件において、 $f=140$ Hz の周期的な圧力変動を与え、水膜流の振動を撮影した。450 $\leq x \leq 980$ mm の範囲における振動の様子を Fig.2 に示す。水膜流は y 方向に振動し、 x の増加に伴い振幅は大きくなるのがわかる。この振動はスパン方向にほぼ一様であり、流れ方向に波数を持っている。画像から波長 λ を測定した結果、 $x \leq 800$ mm の範囲では、およそ $\lambda=60$ mm 程度であり、 x の変化にかかわらずほぼ一定であった。また、これよりも下流の位置では水膜流が崩壊し、液滴が飛散する様子が観察された。

流れ方向の波数の違いによる攪乱の成長を評価するために、励起周波数を 50 $\leq f \leq 300$ Hz の範囲で変化させ、 $x=400$ mm の位置で振幅 A を測定した。波数 α に対する振幅 A の変化を、ノズル出口での平均流速 U の違いにわけ

Fig.2 Oscillation and breakup of planar liquid sheet. $U=8.2$ m/s.

て Fig.3 に示す。ただし、ここに示す波数 α の値は、励起周波数 f と平均流速 U から求めている。

初期攪乱を与えない場合、水膜流の振幅 A は $U=4\text{m/s}$ の場合 $A=0.01\text{mm}$ 、 $U=8\text{m/s}$ の場合 $A=0.03\text{mm}$ であった。これに対し、初期攪乱を与えることによっていずれの波数 α でも振幅 A は大きくなるのがわかる。ただし、その値は波数 α によって異なる。波数 α の増加に伴い振幅 A の値は大きくなり $U=8\text{m/s}$ の場合 $\alpha=100\text{m}^{-1}$ 程度、 $U=4\text{m/s}$ の場合 $\alpha=140\text{m}^{-1}$ 程度で極大値をとる。このことから U の増加に伴い、振幅が極大値をとる波数は減少することがわかる。また、 U が大きいほど振幅 A の値は大きくなる。波数 α が大きくなると、振幅 A の値は小さくなり、 α が 300m^{-1} よりも大きくなる範囲では初期攪乱を与えない場合の振幅値に漸近する。流速の違いによって振幅が成長しやすい攪乱の波数が異なること、平均流速 U が大きいほど振幅が大きくなることは、気相および液相の粘性を考慮した線形安定性解析の結果⁽²⁾と定性的に一致する。

波数 α の違いによる初期攪乱の成長率を定量的に評価するため、 x の変化に対する振幅 A および波面の傾斜角 θ を測定し、それらの増幅率を求めた。 $U=8\text{m/s}$ における x に対する A と θ の変化を、波数 α の違いにわけて Fig.4 に示す。代表的な波数として、Fig.3 の結果より振幅の変化が最も大きい $\alpha=133\text{m}^{-1}$ と最も小さくなる $\alpha=196\text{m}^{-1}$ を選択した。

初期攪乱を与えない場合、 x の増加に対して振幅 A と波面の傾斜角 θ はどちらも指数関数で増加することがわかる。このことから、水膜流に与えた攪乱は線形成長していると考えられる。測定結果を指数関数で近似し、 A と θ の増幅率 σ をそれぞれ求めると、両者はほぼ等しく、 $\sigma=6.3 \times 10^{-3}$ 程度であった。一方、初期攪乱を与えて振動を励起した場合に注目すると、 A と θ の増幅率は波数 α によって異なることがわかる。 A の増幅率について、初期攪乱を与えない場合と比較すると、 $\alpha=133\text{m}^{-1}$ の場合は 13% 程度高くなるのに対して、 $\alpha=196\text{m}^{-1}$ の場合は 5% 程度低くなる。波数 α の違いによって攪乱の成長率は異なることが示された。

同様に、 $U=4\text{m/s}$ における x に対する A と θ の変化を、 $\alpha=141\text{m}^{-1}$ と $\alpha=392\text{m}^{-1}$ の場合にわけて Fig.5 に示す。ただしこの条件では、下流の位置ほどノズル端部からの影響が強くなるため、 $x=500\text{mm}$ よりも上流の位置で測定を行った。初期攪乱を与えない場合、 x の増加に対し A 、 θ とともに指数関数で増加することは $U=8\text{m/s}$ のときと同様である。次に、流速の違いによる攪乱の成長率を評価する。 $U=4\text{m/s}$ の条件では振幅 A の変化が非常に小さく、測定される振幅 A の増幅率には計測誤差が含まれている。そのため、比較的誤差が少ない波面の傾斜角 θ の増幅率を用いて攪乱の成長率を評価する。 $U=4\text{m/s}$ における $\alpha=141\text{m}^{-1}$ の θ の増幅率は $U=8\text{m/s}$ における $\alpha=133\text{m}^{-1}$ の θ の増幅率よりも 16% 減少している。また、初期攪乱を与えない場合と比較しても、 θ の増幅率は $U=8\text{m/s}$ よりも $U=4\text{m/s}$ の方が 26% 減少している。このことから初期攪乱の有無によらず流速が低いほど攪乱の成長率は低くなることがわかる。

4. おわりに

静止気体中に噴出する水膜流に周期的な圧力変動を与えることで水膜流の振動を制御し、水膜流の振幅および波面の傾斜角の増幅率を測定した。水膜流に与えた初期攪乱は、波数や平均流速の違いに関わらず線形成長することを明らかにした。また、攪乱の成長率は波数に依存し、ノズル出口における平均流速の違いによって成長率の高い波数が異なることを示した。

参考文献

- (1) L. Daniel Sorderberg, J. Fluid Mech. 493 (2003), 89-119.
- (2) Guillermo Hauke et al, Flow Turbulent and Combustion, Vol.67 (2001) 235-265.
- (3) Janewan Park et al, Phys. Fluids, 16 No.3, March (2004).

Fig.3 Oscillation amplitude against wave number of initial disturbance at voltage $E=9\text{V}$. $\circ$: $U=4\text{m/s}$, $\bullet$: $U=8\text{m/s}$, Solid line: without disturbance.

Fig.4 Comparison between oscillation amplitude and slope angle on growth rate in the case of $U=8\text{m/s}$. $\bullet$: without disturbance, $\circ$: $\alpha=133\text{m}^{-1}$, $E=3.5\text{V}$, $\square$: $\alpha=196\text{m}^{-1}$, $E=3\text{V}$.

Fig.5 Comparison between oscillation amplitude and slope angle on growth rate in the case of $U=4\text{m/s}$. $\bullet$: without disturbance, $\circ$: $\alpha=141\text{m}^{-1}$, $E=2\text{V}$, $\square$: $\alpha=392\text{m}^{-1}$, $E=1.5\text{V}$.