

氏 名	鈴 木 孝 司
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	液体薄膜噴流の波動特性
指 導 教 官	東北大学教授 橋本 弘之
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 橋本 弘之      東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二      東北大学教授 永井 伸樹

## 論 文 内 容 要 旨

気相中での液体噴流の崩壊減少は噴霧機器や各種流体機械でしばしばみられ、これらの性能を支配する最も重要な要因は噴流界面の波動現象であることから、液体噴流の波動現象に関する基礎知識の拡充とその流動機構の本質的な解明とが切望されている。しかし、噴流界面の波動については、その解明に有効な計測技術が確立されていないことなども手伝って、未だ基本的な普遍性のある資料が不足している。たとえば、波動発生の原因となる攪乱の本質やそれに影響を及ぼす諸因子、界面のさまざまな波動の基本的挙動と流れ場の条件との具体的な関係、あるいはこのような波動をともなう噴流の分裂機構などについては未だ十分に解明されていない。したがって、液体噴流界面の波動についてのより基礎的な系統的な研究と波動特性の定量的な評価が可能な計測機器の開発が必要である。

本研究は、噴流界面のさまざまな変動の観察が可能な 2 次元的な液膜噴流を研究対象とし、界面の微細な変動が正確に計測できる光学的計測装置の開発とそれにもとづく実験観察や理論解析によって、その基本的な波動特性を詳細に明らかにして、変動の初期成長に関与する液体力学的因子を解明することを試みたものである。さらに、各種の液体噴流の応用技術に有益な基礎資料を提供して、これらに関連した工業技術の発展に寄与することを目的とした。

以下に各章の内容を概説する。

### 第 1 章 緒 論

本章では、本研究の背景を示すとともに、本論文の全内容を概説している。

## 第2章 液体噴流の研究の動向と液膜噴流の流動様式

液体噴流に関しては、従来から個々の噴流応用機器の性能向上や分裂後の液滴の大きさや速度の計測に主眼を置いた研究が多く行われてきた。近年になって、噴流界面の波動が噴流全体の挙動に強く作用していることが実験観察や理論解析によって具体的に示され、液体噴流の流動機構の解明には、その界面の波動について詳細に吟味する必要があることが判明してきた。しかしながら、液体噴流界面の変動については未だ基本的な普遍性のある資料が不足している。したがって、液体噴流の崩壊過程を詳細に理解するためには、噴流界面の変動が噴流全体の挙動を支配する薄い液膜噴流の気液界面流動現象を詳細に吟味する必要がある。

かかる観点から、並行気流中での液体薄膜噴流発生装置を製作し、瞬間写真や高速連続写真により液膜の挙動を詳細に観察した。実験装置ならびに液膜の挙動の模式図を図1に示す。この装置では、液膜は気液間の相対速度にもとづいておおむね2次元的に激しく変動することから、液体噴流の流動機構を解明する上でかなり有効であると考えられる。実験観察によれば、このような液膜自身の大振幅変動の波動特性は液体噴流速度の変化にもなって特徴的な変化を示し、それにもない液膜の分裂形態も大きく変化する。また、液膜噴流の界面には、このような大振幅の変動のほかに、噴流内部の乱れに起因すると考えられる微細な初期攪乱波が発生する。この波が発生しない場合には、液膜は図2(a)に示すように大振幅の変動によって周期的に崩壊するが、初期攪乱波が発生すると液膜は図2(b)に示すようにその振幅が大きくなった位置で気流に引きちぎられるように破断する。以上のように、液膜噴流の崩壊過程には気液間の相対速度にもとづく界面の不安定性に起因する大振幅の液膜変動と液膜内部の乱れに起因すると考えられる微細な初期攪乱波が密接に関連していることや液膜変動の波動特性が液膜の分裂形態と相互に密接に関連していることを明らかにし、液膜噴流の基本的流動様式の形成過程をより明確にした。

## 第3章 液膜変動の光学的計測法

本章では、波動特性の正確な評価に有効な計測技術の確立とそれにもとづく液膜の流動機構の解明を目的として、液膜変動の非接触の計測装置の開発とその有用性の評価を行った。まず、従来からの比較的精度が低く煩雑なデータ処理を必要とする写真観察のほかに、レーザー光源と位置検出素子による傾角計測装置、非接触電子変位計と波形処理回路による振幅計測装置、ならびに半導体レーザーと光ファイバプローブによる速度計測装置三つの液膜変動に対する光学的な計測装置を開発し、それらの特徴を解説した。つぎに、これらの計測装置を前述の気流中での大振幅の液膜変動の計測に具体的に適用し、得られた個々の結果を比較検討して、これらの有用性を総合的に評価するとともに、これらの装置と既存の計測機器とを有機的に組み合わせたシステム化を試み、液膜変動の波動特性の正確な評価と得られた個々の結果の流体力学的な吟味とを可能にした。さらに、この計測システムによって変動振幅や波速などの液膜変動の具体的な波動特性に及ぼす流れ場の条件の影響を定量的に調べ、得られた結果を第2章の実験観察結果をも考慮して総合的に吟味して、気流中の液膜の崩壊過程は激しく変動する液膜界面に作用する気流の衝撃圧に強く依存することを再確認した。以上のように、液膜変動の光学的計測法を確立するとともに、激しく変動しながら崩

壊する気流中の液膜の流動機構を実験観察技術の立場から明らかにした。

#### 第4章 気流中における二つの平行な液膜噴流

本章では、気流中での液膜の激しい変動を気流により励起される液膜の振動の問題としてとらえ、液膜変動の基本的性質や成長機構の解明を目的として実験的に研究した。まず、気流中の液膜に特定の周波数成分の音波を加え、それによる液膜の挙動の変化を吟味した。その結果、液膜の変動周波数と変動振幅との関係は、非線形のハードスプリング系のそれに類似していることが判明した。つぎに、気流中における二つの平行な液膜噴流の挙動を詳細に観察した。その結果、二つの液膜噴流は、それぞれの噴流の単独噴流状態での変動周波数の差が比較的小さければ、図3に示すように噴流相互の変動の干渉により同期してより大きな振幅でより規則的に変動する。また、二つの液膜の変動波の位相関係は同位相か逆位相となり、無次元ノズル間隔 $W/D$ が2に近づくほど逆位相がより現れやすくなる。このような二つの液膜噴流の相互干渉特性は流れと直角方向に並列に配置された二つの円柱の後流の二対の渦列の干渉特性と類似している。以上の結果を流体力学的に吟味して、液膜変動の成長には周囲気流中での渦列の形成が関与していると考えられることを示すとともに、液膜変動の成長機構をより明確にした。

#### 第5章 静止気体中の液膜噴流界面における初期攪乱波

本章では、液膜噴流界面における変動の初期発生原因の究明を目的として、従来の研究よりさらに微視的視野に立った研究を行った。すなわち、第2章で観察された液膜の崩壊過程に強く関与する微細な縞模様の初期攪乱波の発生・成長機構を明らかにするため、まず、この波がより明瞭に観察できる静止気体中の液膜噴流界面を詳細に観察した。液膜噴流界面の流動様式は図4に示す五つの代表的なパターンに大別される。これらが発生するレイノルズ数 $Re$ と無次元表面張力 $S$ の範囲を示すとともに、第3章で開発した光学的計測装置によって噴流界面の波動特性を具体的に調べ、この波は液膜の両界面が同位相で変動する周期的な波であることが判明した。つぎに、これらの実験観察結果をふまえて、液膜噴流の不安定性を線形安定性理論により具体的に数値解析した。この結果と実験観察結果とを対比して理論の妥当性を論ずるとともに、この波は液膜の内在的不安定性により液膜内部の攪乱が成長して界面で観察されたものであることを理論的に裏付けた。以上のように、液膜噴流の崩壊過程には、気液間の相対速度にもとづく界面の不安定性のみならず、液膜の内在的不安定性が密接に関与していることを明らかにした。

#### 第6章 結 論

本章では、第2章から第5章までの結果をまとめるとともに、今後の研究課題について述べ、本論文を総括している。

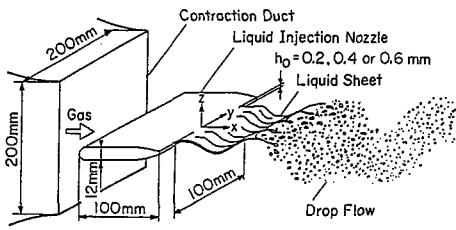
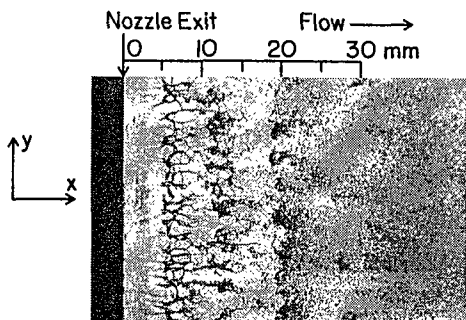
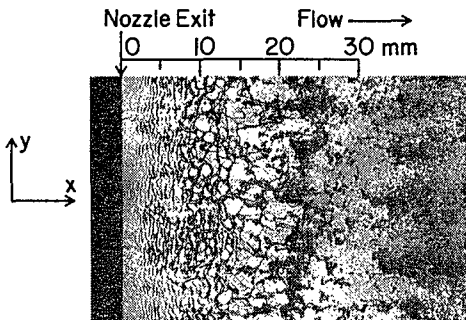


図1 実験装置ならびに液膜挙動の模式図



(a)  $U_{L0} = 3 \text{ m/s}$  ( $Re = 270$ ,  $We = 8.15$ )



(b)  $U_{L0} = 6 \text{ m/s}$  ( $Re = 540$ ,  $We = 7.47$ )

$U_{G0} = 73 \text{ m/s}$ ,  $h_0 = 0.2 \text{ mm}$

図2 気流中の液膜噴流の分裂形態

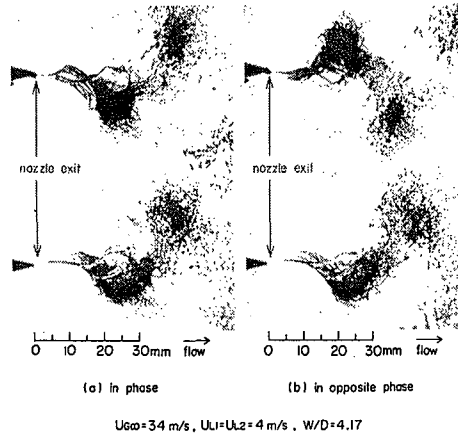
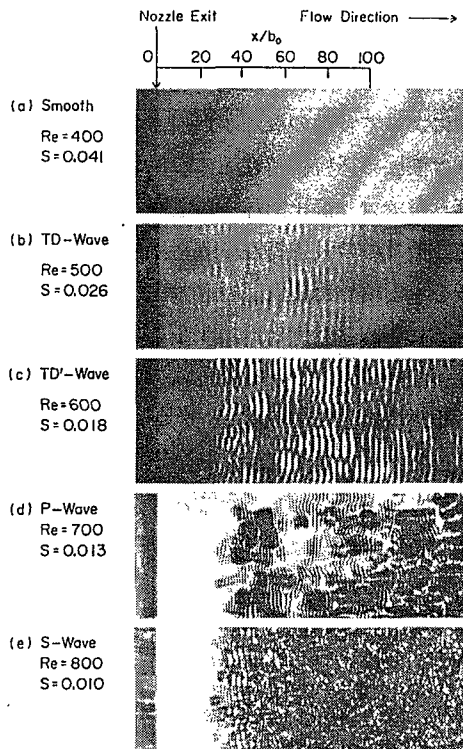


図3 気流中の二つの液膜噴流の相互干渉



$b_0 = 0.21 \text{ mm}$ , Reflected Light (Strobe 1)

図4 静止気体中の液膜界面の流動様式

## 審査結果の要旨

液体噴流の挙動は各種の噴霧機器や噴流を伴う流体機械の性能に大きな影響を及ぼすことから、その詳細な解明が切望されている。本論文は、液膜噴流界面の微細な変動を正確に計測できる光学的計測装置を開発し、薄い液膜の変動に関与する流体力学的諸因子を明らかにするとともに、液膜噴流の基本的な波動特性を解明したもので、全編6章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、噴流に関する従来の主要な研究成果を流体力学的に考察して、薄い液膜噴流の観測によって噴流界面の変動が効果的に解明できることを提示している。さらに、噴流の崩壊過程には、気液界面の相対速度に起因する振幅の大きな液膜変動と液膜内部の乱れに起因する微細な初期攪乱波が密接に関連していることを実験から確認している。これは新しい知見である。

第3章では、界面変動の振幅、位相および波速の正確な計測が可能な光学的計測装置を考案し、それらの有用性を実際の液膜変動の計測結果に基づいて評価している。これらの装置と既存の計測装置との効果的な組み合わせによって、液膜界面上の微細な変動の波動特性を有機的に計測する手法を確立している。これは波動計測技術の発展に寄与している。

第4章では、液膜の波動特性に及ぼす音響的圧力加振の影響を実験的に吟味するとともに、液膜崩壊によって多数の液滴が形成される平行な二つの液膜噴流間の相互干渉特性を明らかにしている。これは液膜の微粒化特性を本質的に解明する上で重要な知見である。

第5章では、静止気体中の液膜噴流を詳細に観測して、液膜噴流の崩壊過程に大きな影響を及ぼす初期攪乱波の波動特性や遷移過程を実験的に明らかにしている。また、2次元平行流近似解析モデルをもとにした不安定性理論を展開して、液膜噴流の内在的不安定性を具体的に数値計算している。これを実験結果と対比することによって、初期攪乱波の成長機構を明らかにしている。これらは液膜噴流の変動を支配する流体力学的諸因子を具体的に示したもので、特に重要な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、液体噴流の流動機構についていくつかの重要な知見を加えたもので、流体力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。