

気流中に放出する水膜の分裂形態に関する研究

A Study on Disruption Patterns of Water Film Splashed into Air Flow

松崎 悠^{*1}
MATSUZAKI Yu

中野 晋^{*1}
NAKANO Susumu

鳥山 温美^{*1}
TORIYAMA Harumi

竹田 陽一^{*1}
TAKEDA Youichi

佐藤 公仁弘^{*2}
SATOU Kunihiro

ABSTRACT

As a fundamental study on disruption of a water film formed on a blade surface of low pressure stages of steam turbines, disruption patterns splashed from a plate edge which is set in parallel air flow are observed by a high speed camera. The experiments were done using air flow with maximum velocity of 127 m/s and water supplied by city water. Disruption patterns of the water film change by Mach number of air flow and relative Weber number which is expressed by the water film depth taken as the reference length. Disruption patterns of the water film on the plate edge are quite different from those observed in a single water droplet.

Key words : Water film, Droplet, Low pressure turbine, Steam turbine, High-speed camera

1. はじめに

蒸気タービンの高出力・高効率化のためには長翼化が有効である。排出蒸気の運動エネルギーを低減でき、また供給蒸気量の増加によりタービン車室数の低減が可能になる等の利点がある。一方、低圧段の蒸気は湿り領域に入るため、非平衡凝縮によって発生する微細水滴を伴う流れになる。これらの水滴の一部は、翼表面に付着して水膜流となって翼面上を流れ、静翼後縁端において再び蒸気流中に飛散する。翼後縁端から飛散する水膜は、再び水滴を形成するが、非平衡凝縮によって発生した水滴径よりも大きく、飛散速度は蒸気流に比べて著しく低速になる。微細水滴がほぼ蒸気流速に乗って流動するのに比べて、翼後縁端の水膜分裂によって発生する水滴は蒸気流速まで加速することはできず、周速に近い速度で動翼に衝突しエロージョン損傷を引き起こす⁽¹⁾。

液体の空気中での分裂形態に関する研究は、燃料微粒化を目的に古くは棚澤ら⁽²⁾によって実験的に、また近年ではShinjoら⁽³⁾によって数値解析によって調べられている。これらの研究では低速気流中または静止気流中にノズルから放出される液体の分裂状態を対象としており、蒸気タービン低圧段に見られる静翼後縁からの膜状の液体が気流によって放出されるものとは条件が異

なる。気流中を運動する水滴は臨界ウェーバ数を超えると分裂し微細化する。蒸気タービンでは臨界ウェーバ数は約20と言われている⁽⁴⁾。水滴の分裂形態に関しては、単独水滴の分裂観察からBag-type, Club-type, そしてDisc-typeと3種類の分裂形態⁽⁴⁾があり、蒸気タービンで観察される分裂形態はBag-typeが多い⁽⁴⁾と言われている。Hammit⁽⁵⁾らは、このような分裂形態を想定して水滴の微細化メカニズムをまとめている。また、Flock⁽⁶⁾らは単独水滴の分裂形態を高速度カメラで捕らえ、分裂形態とウェーバ数の関係を明らかにしている。Bag-typeの分裂はウェーバ数が9～15の範囲で発生することを明らかにしている。しかし、これらの分裂メカニズムは単独水滴の分裂メカニズムである。一方、航空用ガスタービンの燃料噴射器等に用いられるプレフィルミングエアブラストアトマイザー⁽⁷⁾では、燃料をプレフィルマー上に流し、気流によって燃料の微粒化を促進している。特に、2次元流に対する微粒化特性の研究^{(8),(9)}では、液膜の分裂周期や水膜分裂後の水滴径に関して、蒸気タービン低圧段での静翼後縁からの水膜分裂現象の解明に示唆を与える知見が得られている。

本研究では、水膜分裂から粗大水滴発生メカニズムを調べる前段階の基礎試験として、並行気流中に平板を設置し、その平板上を流れる水膜流の平板端からの分裂状態を観察する。気流速度及び水膜流動状態が分裂形態に及ぼす影響を把握することを目的とする。

原稿受付 2014年9月26日

校閲完了 2015年10月14日

*1 東北大学大学院 工学研究科

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-720

*2 東北電力株式会社 火力原子力本部 原子力部

2. 記号の説明

C_f : 摩擦係数 (-)

g : 重力加速度 (m/s^2)

L : 水膜幅 (m)

M : マッハ数 (-)

Q : 流量 (m^3/s)

s : スリット幅 (mm)

t : 時間 (s)

U_0 : 流路高さ方向中央の空気流速 (m/s)

u : 流速 (m/s)

We_{cr} : 臨界ウェーバ数 (-)

We_{rel} : 相対ウェーバ数 (-)

x : テストセクション流路スパン方向座標 (m)

X_h : テストセクション流路幅 (m)

y : テストセクション流路高さ方向座標 (m)

Y_h : テストセクション流路高さ (m)

Δy : 水膜厚さ (m)

μ : 粘性係数 ($Pa \cdot s$)

ρ : 密度 (kg/m^3)

σ : 表面張力 (N/m)

添え字

a: 空気

w: 水

3. 実験装置及び実験方法

3.1 対象とする流れ場と無次元パラメータ

対象とする流れ場は、実機低圧蒸気タービンの下流段の条件であり、圧力20kPa程度の湿り蒸気流である。実験は、気流条件と水膜条件の設定の容易さから、空気流と水の供給によって実施するが、実験条件が実機と同等となるよう、無次元パラメータとしてレイノルズ数と、水滴の臨界ウェーバ数が同等になるようにした。レイノルズ数に関しては、翼のコード長を代表長さにとると、実機では約 $10^5 \sim 10^6$ の範囲にあるため、実験装置では、水膜の平板上の流動長さを代表長さにとったレイノルズ数が 10^5 の後半域まで到達できるように空気の流速を決めた。また、気流速度は臨界ウェーバ数にも影響を及ぼす。本実験では、臨界ウェーバ数20を実現できるように気流速度を選定した。ここで気流速度は流路中央の最大流速を代表速度とした。Hammit⁽⁵⁾らは、既存データを整理して臨界ウェーバ数と気流マッハ数との関係を示した。本研究では、式(1)に示すように、Hammit⁽⁵⁾らのデータを用いてマッハ数0.15～1.28までの範囲の近似式を作成し、マッハ数に対する臨界ウェーバ数を算出した。

$$W_{e,cr} = -25.8M^5 + 132.2M^4 - 234.5M^3 + 118.8M^2 + 45.4M + 4.1 \quad (1)$$

図1に、式(1)を用いて、大気圧中での空気流と、20℃の水を用いて変換した場合の空気流速に対する臨界ウェーバ数と最大水滴径を示す。ただし、最大水滴径の算出では水膜流速 u_w は零と仮定した。Moore⁽⁴⁾らが提

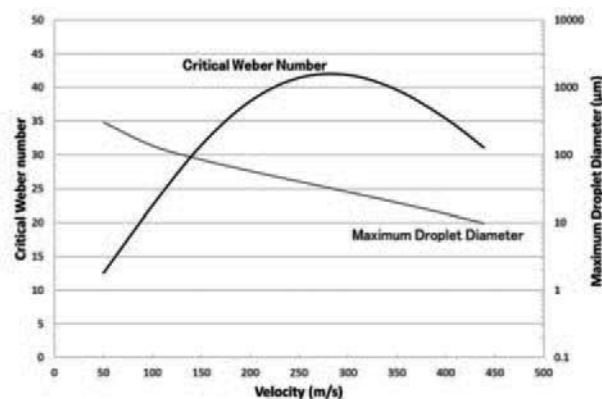


Fig. 1 Critical weber number and maximum droplet diameter

唱する蒸気タービン低圧段での液滴の臨界ウェーバ数20を実現するためには気流速度90m/sが必要になる。レイノルズ数と臨界ウェーバ数を考慮して、気流速度は130m/sまで供給できるようにした。

3.2 実験装置

水膜分離実験に用いた実験装置の概略を図2⁽⁶⁾に示す。本装置は、テストセクションに空気を送風するブロワ（日立ボルテックスブロワVB-080-E2）、ブロワからの空気を一部大気排出してテストセクションへの空気流量を調節するバイパス流路、その空気量を調整するための流量調整バルブ、テストセクションへの空気流量を計測する流量計（東京計装ミニサーマルフローメータTF-2251N-351-4F80）、及びテストセクションで構成されている。

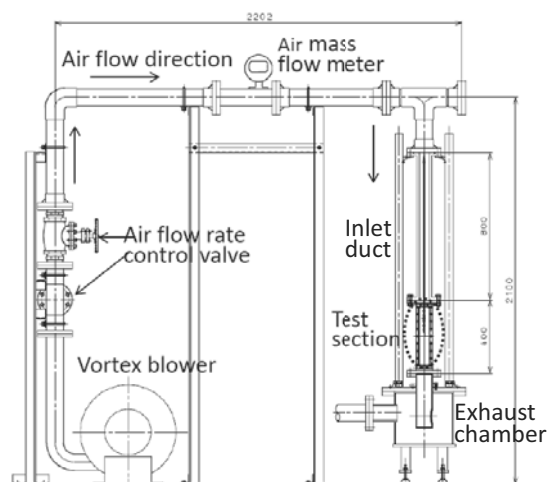


Fig. 2 Experimental apparatus

助走ダクトとテストセクションは流量計下流に設けたT字管から鉛直方向に設置されている。助走ダクト上流までは、圧力損失を低減するため直径80mmの配管を用いた。テストセクション下流には水を分離する排気室を設置した。助走ダクトとテストセクション部のカット図を図3に示す。助走ダクトからテストセクションにかけて、流路は厚さ10mmの中央分離壁によって2分割されている。テストセクションでの流速分布の推定を容

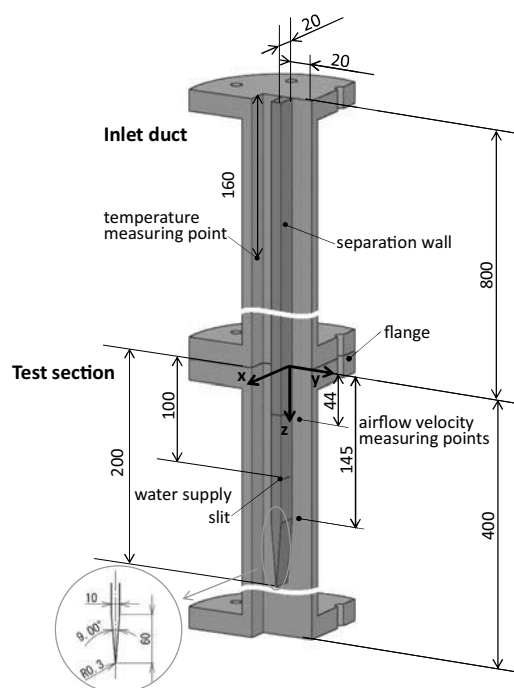


Fig. 3 Cut model of inlet duct and test section (unit: mm)

易にするため、テストセクションで流路断面全域が発達した乱流境界層になるよう、助走ダクトは流路断面(20×20mm)高さの40倍の距離を有する。図3に示すようにテストセクション部は軸方向に400mmの長さを有し、助走ダクトとはフランジで結合される。フランジ接合面から200mmの長さで中央分離壁が設置され、分割された流路を流れてきた空気は中央分離壁の端部で合流する。水はフランジ接合面から鉛直方向100mmの位置にスリットを設け、ここから中央分離壁面の片側に供給される。図3に示すようにスリットは流路幅方向の中心部に流路幅方向長さ10mmを有する。供給水は、空気の流れ方向に沿い、重力加速度方向に流れる。なお、中央分離壁の端部の断面はくさび形状とし、その傾きはHammitrらの実験に用いられた分離板と同等のくさび角9.00°とし、端部の厚みは実機蒸気タービン翼後縁厚みと同等の0.3 mmとした。

3.3 実験方法

3.3.1 空気流速分布及び供給水量の測定

空気流速の計測は、外径φ3mmの標準ピトー管を用いて行った。また、ピトー管の全圧と静圧の計測にはデジタル圧力センサー(キーエンス製AP-C30, 31)を用いた。空気の温度は、助走ダクト入口から160mmに設置したK型熱電対を用いて計測した。

テストセクションの基準位置はテストセクションフランジ面とし(以後フランジ面位置をZ=0)、流れ方向距離をZ座標、流路高さ方向をY座標、流路幅方向をX座標とする。給水口上流位置のテストセクションフランジ面(Z=0)から44mm位置と、給水口下流位置のZ=145mmの空気流速をY方向1mm間隔でトラバースした。

給水量は、コリオリ型微小流量計(オパール製 CoriMate II CR003)を用いて計測した。

3.3.2 液膜分裂の観察

液膜分裂の観察は高速度カメラ(Photoron製 FASTCAM-SA/MC2.1)を用いて撮影した。今回の撮影では、照明をカメラと対向する方向から照射するバックライト方式と、中央分離壁面上の水膜の流動状態も同時に観察するためフロントライト方式を併用した。なお、撮影方向は中央分離壁面正面(XZ面)を撮影面とし、撮影速度は1/5000 fpsである。

3.4 実験条件

実験条件は、空気流量を $16.7 \times 10^{-3} \sim 33.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ までを $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 間隔で、 $33.3 \times 10^{-3} \sim 55.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ までを $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 間隔で、 $55.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 以上では $11.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 間隔で $77.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ まで供給した。

水膜の供給水流量は、 $0.29 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ とした。ここで、供給口スリットのX方向長さは10 mmで同一にし、またスリット幅は0.1, 0.2, 0.4 mmの3パターンとして給水条件を変えた。

4. 空気流速と水膜流の計算

4.1 空気流速

テストセクション部は完全に発達した乱流境界層に埋没していると仮定すると、流速分布は $1/n$ 乗則が成立する。つまり境界層外縁の流速との比は、境界層厚さとの比の $1/n$ 乗に等しくなる。 $1/n$ 乗則の流速分布を用いるとダクト内の流量は以下の式で表わされる。

$$Q_a = 4 \int_0^{X_h} \int_0^{Y_h} U_0 \left(\frac{2x}{X_h} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{2y}{Y_h} \right)^{\frac{1}{n}} dx dy = U_0 \left(\frac{n}{n+1} \right)^2 X_h \cdot Y_h \quad (2)$$

式(2)で $n=7$ として算出される空気流量と空気流量計による計測結果を比較して、 $n=7$ の妥当性を判断する。

4.2 水膜流速と水膜厚さ

水膜流速と水膜厚さの計測は本研究の課題として今後実施する予定であるが、ここでは簡易的な計算による推定を行った。壁面を落下する水膜の運動は、水膜の平均流速を u_w として、水膜の微小体積に作用する力の釣り合いから以下の式(3)で表される。

$$\frac{du_w}{dt} = g + \frac{\mu_a}{\rho_w \Delta y} \frac{du_a}{dy} - \frac{1}{2} c_f \frac{u_w^2}{\Delta y} \quad (3)$$

$$\Delta y = \frac{Q_w}{u_w L} \quad (4)$$

ここで、式(3)の粘性係数 μ_a は、水膜に働く気流のせん断力として壁面近傍におけるせん断力が作用すると仮定して分子粘性係数を与えた。また、摩擦係数 c_f は、水膜の流れた距離を代表長さとするレイノルズ数が 5×10^5 未満では平板上層流境界層に対するブラジウスの厳密解⁽¹⁾を用い、 5×10^5 以上では乱流境界層の摩擦係数⁽¹⁾を用いた。水膜厚さ、水膜流量、流速、水膜幅の関係式(4)から、水膜幅の計測値を用いれば水膜厚さを推定できる。

5. 実験結果

5.1 空気流量と空気流速

テストセクション $Z=44\text{mm}$, $Y=10\text{mm}$ (流路高さ方向中央位置)位置のピトー管計測による速度と、式(2)に計測空気流量を代入して算出した流路断面の最大速度の比較を図4に示す。両者は良く一致しており、テストセクションにおける流れが全域乱流で、しかも流速分布は1/7乗則に従っていることが分かる。

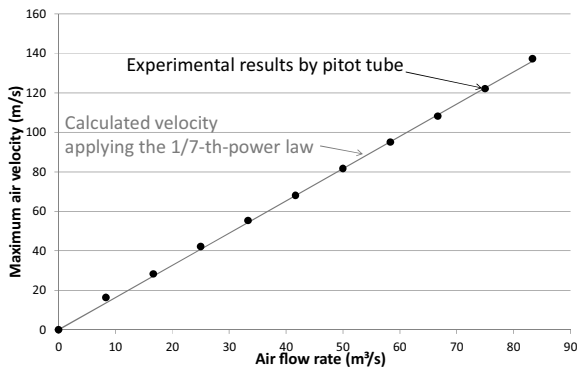


Fig. 4 Comparison of calculated velocity with experimental results for maximum flow velocity in the test section

図5に、テストセクション $Z=145\text{mm}$ 位置の流路高さ(Y方向)の流速分布の計測結果を示す。図にはピトー管計測による流速を記号■で示し、流路中央の最高速度と流路断面高さを用いて1/7乗則から算出した流速分布を実線で示した。空気流量の増加に伴い、1/7乗則との差異が現れるが、流路全域及び各空気流に渡り計測値と計算値は概ね一致している。これらの結果から、式(5)の相対ウェーバ数の算出に用いる水膜上の空気流速は、水膜厚さを仮定して1/7乗則から算出する。

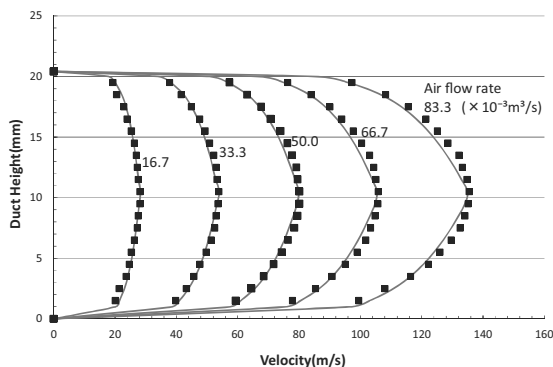


Fig. 5 Distributions of flow velocity

5.2 水膜流

水膜分裂に及ぼす水膜流の条件は、水膜流量、水膜流速、及び水膜厚さが考えられる。本実験の場合、上記パラメータをそれぞれ単独に変化させることはできないため、式(5)に示す相対ウェーバ数¹²⁾を水膜流の指標とした。

$$W_{e,rel} = \frac{\Delta y \rho_a (u_a - u_w)^2}{2\sigma} \quad (5)$$

相対ウェーバ数は、水膜厚さと気流と水膜流速の相対速度で変わる。水膜流速に比べて、気流速度の方が一桁大きいため、水膜流速の影響は、相対ウェーバ数には反映しにくい。一方、水膜厚さは、相対ウェーバ数に比例する。図6に水膜流の幅の計測値を用いて式(3)及び(4)から算出した水膜流速と水膜厚さを、また図7に相対ウェーバ数を示す。図7において、低速領域でスリット幅0.1mm, 水膜流量 $0.29 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ の相対ウェーバ数が、スリット幅0.2mm, 水膜流量 $0.58 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ の相対ウェーバ数よりも大きくなっているが、これは水膜幅 L の計測誤差によるものと考えられる。

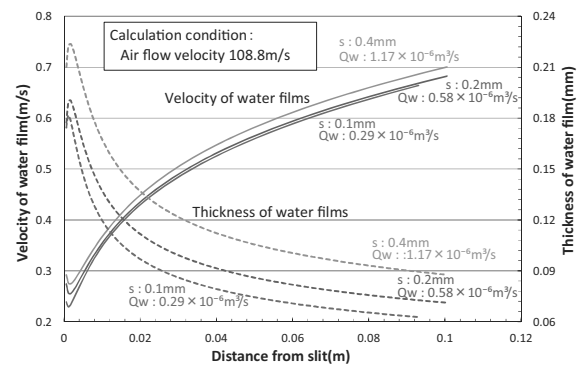


Fig. 6 Calculation results of velocity and thickness of water films

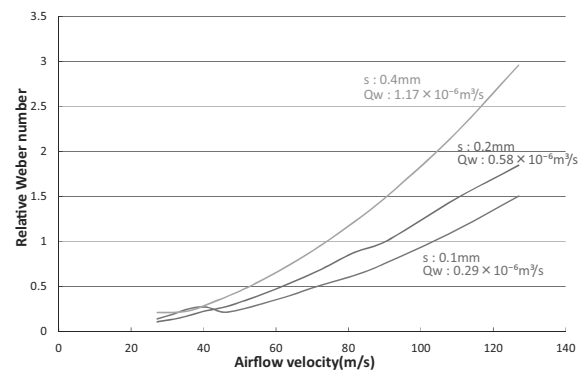


Fig. 7 Calculation results of relative weber number of water films

5.3 水膜の分裂形態

以下に、給水口スリット幅0.4mm, 給水流量 $1.17 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ の撮影結果を示す。

5.3.1 主流空気流速27.2m/s (滴状分裂)

図8に撮影結果を示す。分離壁端より垂下した液柱先端より水滴が引き千切られている。ただし、本撮影範囲では千切れた水滴の微細化は確認できなかった。また、これよりも低速域では無風状態の分裂も含め、図8と同様な適状分裂を示す。この領域では水滴に作用する表面張力の影響が大きく、水塊は球形を保ち流下していく。

5.3.2 主流空気流速31.7m/s (遷移分裂)

図9に撮影結果を示す。滴状分裂に加えて、図9(1)に示すような紐状分裂が発生している。紐状分裂の先端では、図9(3), (4)に示すような投げ網状に分裂し微細化する

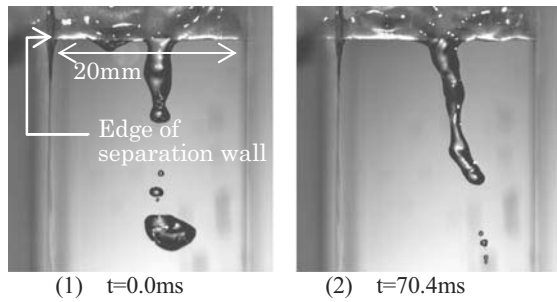


Fig. 8 Photographs of water film disraption ($U_0=27.2\text{m/s}$)

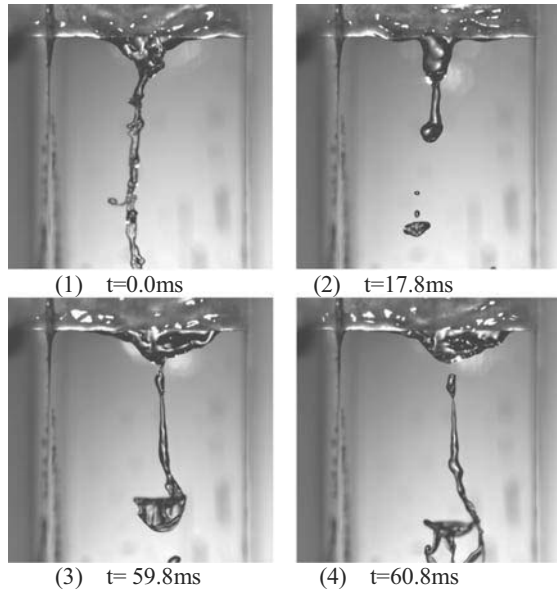


Fig. 9 Photographs of water film disruption ($U_0=31.7\text{m/s}$)

る場合が観察された。この投げ網状分裂は、単独水滴の分裂では見られない独特の分裂形態で、紐状の水膜が空間的に膜状に広がった後に極めて短時間で破裂して、多数の比較的大きな径の水滴を発生する。空気流速の増加に伴い、分離壁上の水膜流にはRayleigh-Taylor不安定性による波が形成される。この波によってもたらされる擾乱は紐状に伸びた水膜の先端部に伝達し、投げ網状分裂の発生に影響を及ぼしているものと考えられる。

5.3.3 主流空気流速40.8m/s (遷移分裂)

空気流速31.7m/sと同様にいくつかのパターンによって分裂が発生する。図10 (1),(4)に示すように、滴状分裂または紐状分裂が発生するが、図9 (4)で見られた投げ網状分裂がより明確に連続して出現するようになる。空気流速31.7m/sの時と同様に、滴状分裂、紐状分裂、投げ網状分裂の3種類の分裂形態が観察され、加えて、図10 (3)に示すような中央分離壁端下流域に水膜がせり出す形で流路空間に広がり、膜の状態から2本の紐状に分岐しその先で分裂を開始する膜状分裂が発生する。

5.3.4 主流空気流速54.4m/s (遷移分裂)

図11に観察結果を示す。図10 (3)で見られた膜状分裂が周期的に発生するようになり、その分裂周期の間に図11 (2),(6)に示すような紐状分裂と滴状分裂が現れる。膜

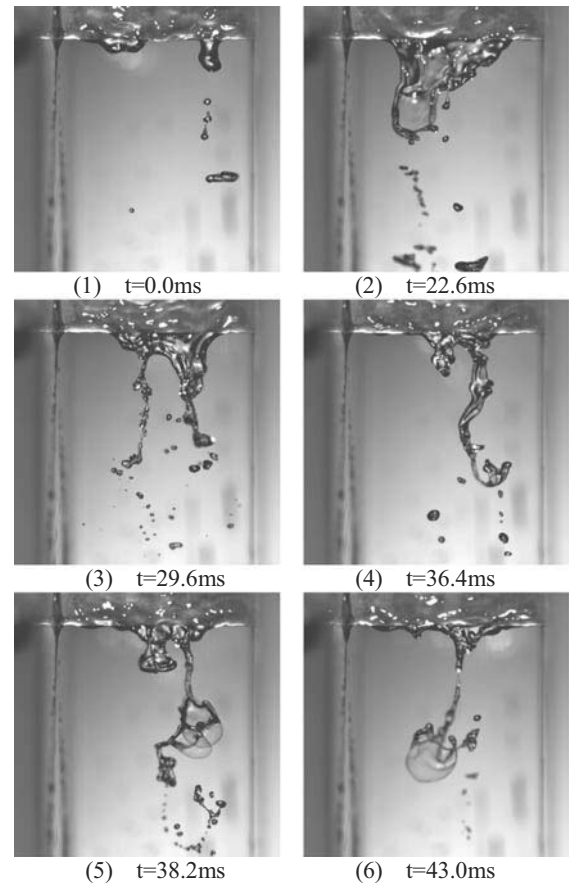


Fig.10 Photographs of water film disraption ($U_0=40.8\text{m/s}$)

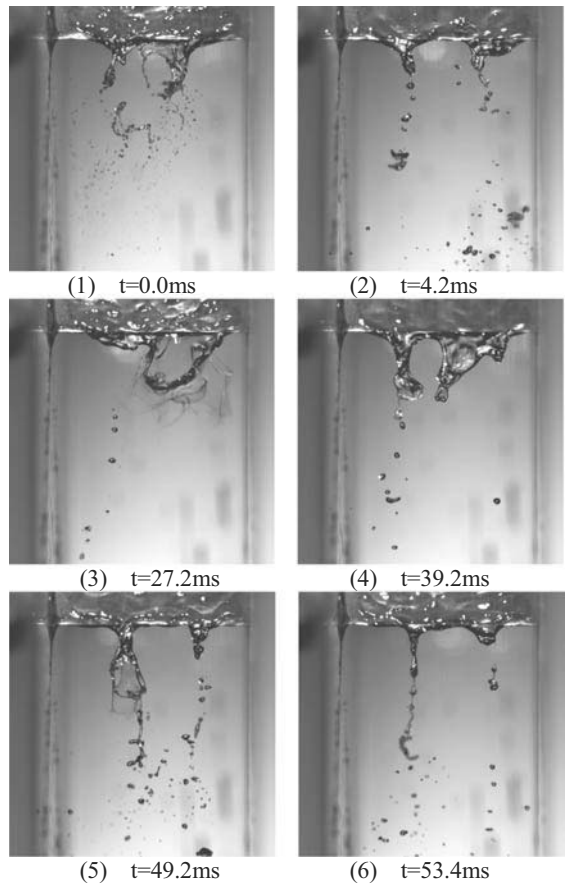


Fig.11 Photographs of water film disraption ($U_0=54.4\text{m/s}$)

状分裂の出現周期は図10の主流空気速度40.8m/sよりも早くなる。また、中央分離壁上の水膜の流動状態を見ると、これよりも低速の条件の時と比べ、水膜面の波立ちが明確になり水膜流動が不安定化していることが分かる。

5.3.5 主流空気流速81.6m/s (膜状分裂)

図12に主流空気流速81.6 m/sの場合の水膜の分裂状況を示す。分裂の形態は、膜状分裂だけが現れるようになる。主流空気流速54.4m/sで見られた膜状分裂と比較して、膜状分裂の周期が短くなり、膜から樹枝状に分裂する本数が増加する。中央分離壁上の水膜の幅方向に複数の波立ちがみられるようになる。

5.3.6 主流空気流速127m/s (膜状分裂)

図13に、撮影結果を示す。主流空気流速81.6m/sの場合と比較して、膜状分裂の周期が、本高速カメラではとらえきれない位に短くなっている。また、中央分離壁上の水膜は81.6m/sの場合よりも更に多くの微細な波立ちが生じている。この波立ちと分裂形態の間には、水膜の波立ちが多くなると、膜状分裂の樹枝数が多くなり発生周期が早くなる等の相関がある。

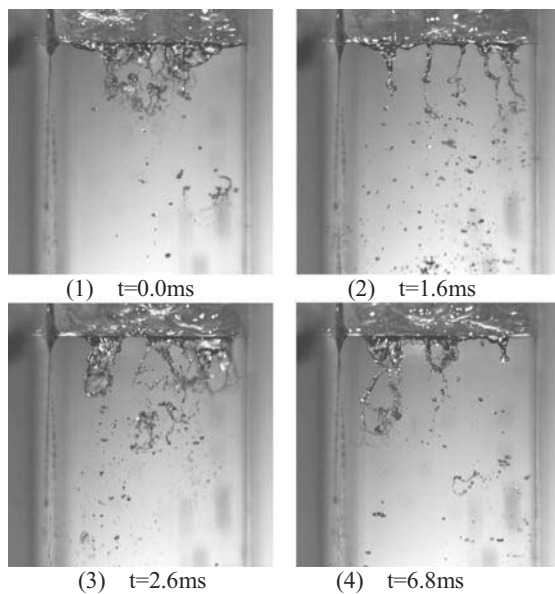


Fig.12 Photographs of water film disraption ($U_0=81.6\text{m/s}$)

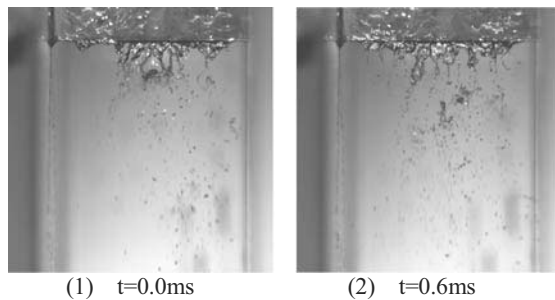


Fig.13 Photographs of water film disraption ($U_0=127\text{m/s}$)

5.4 分裂形態マップ

以上の観察結果から水膜の分裂形態は気流速度に影響を受けることが示された。そこで、気流速度の指標としてマッハ数を用い分裂形態を整理する。また、平板端からの放出された水膜は、水滴の変形分裂と同様に空気流による抗力と水膜に作用する表面張力の比であるウェーバ数の影響を受けるものと考えられる。しかし、ウェーバ数は代表長さとして水滴径を用いるため、単独水滴の分裂等、観察対象の代表寸法が明確な場合は適用できるが、水膜分裂の場合は、水滴に変形する以前の現象のため、水滴直径を代表長さとするウェーバ数を直接適用することはできない。また、水膜の分裂形態自体が、分裂前の分離壁上の水膜の流動状態の影響を受けるものと考え、ここでは、式(5)に示す相対ウェーバ数を現象を支配するもう一つの無次元数と考え、本実験結果を整理する。前節の結果はスリット幅0.4mm、給水流量 $1.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の結果であるが、スリット幅を変えた場合の分裂形態の結果も含め、分裂形態を、本実験の範囲内で、マッハ数と相対ウェーバ数を指標とする領域にマッピングすると図14のようになる。水膜分裂は、気流のマッハ数の増加に伴い、滴状分裂から紐状分裂に変わり、その後は、滴状分裂、紐状分裂、投げ網状分裂、そして膜状分裂が混在する遷移分裂状態になる。この遷移分裂状態は、マッハ数が更に増加すると、滴状分裂、紐状分裂、投げ網状分裂の順に出現機会が少なくなり、膜状分裂のみの領域に入る。高速気流域では膜状分裂のみが観察されるようになる。また、相対ウェーバ数が増加すると、膜状分裂への移行が、低マッハ数領域で発生するようになる。

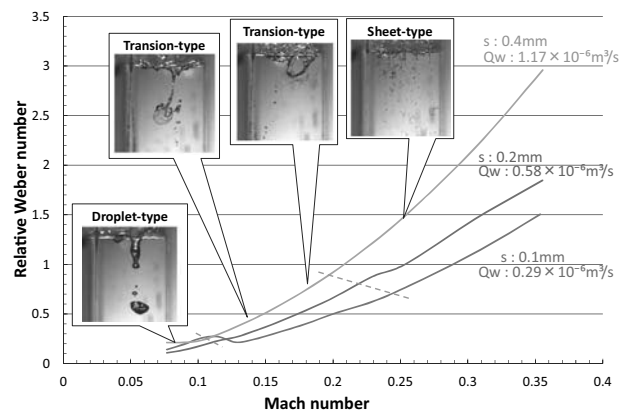


Fig.14 Disruption pattern map of water film

6. 結論

並行気流中に設置された平板端部から飛散する水膜の分裂形態を高速カメラで撮影して以下の知見を得た。(1) 水膜の分裂形態は気流のマッハ数に影響され、低マッハ数領域では滴状分裂に、また高マッハ数領域では膜状状態から放射状に分裂を開始する膜状分裂形態を示し、その中間域は、滴状分裂、紐状分裂、投げ網状分裂、及び

膜状分裂が混在する分裂を示す。

- (2) 中間的なマッハ数領域は、水膜の分裂形態が多様に変化する領域である。滴状分裂、紐状分裂、投げ網状分裂、及び膜状分裂の形態を示す。投げ網状分裂は、単独水滴の分裂には見られない水膜分裂特有の分裂形態で、紐状の水膜が空間的に膜状に広がった後に極めて短時間で破裂して、多数の比較的大きな径の水滴に分裂する。
- (3) 高マッハ数域で見られる膜状分裂形態は、相対ウェーバ数が増すと、より低マッハ数域で現れるようになる。
- (4) 中央分離壁上の水膜の波立ちが多くなると、飛散水膜の膜状分裂の樹枝数が多くなり発生周期が早くなる。水膜の波立ちと分裂形態には相関が見られる。
- (5) 水膜分裂は、本実験条件の範囲内では、マッハ数と相対ウェーバ数を座標軸にとる領域によって、その分裂形態を表すことができた。

参考文献

- (1) 坪内邦良, 蒸気タービンにおける二相流計測, ターボ機械, Vol.28, No. 5, (2000), pp281-288.
- (2) 棚澤泰, 液体微粒化法の概略, 衛生工業協会誌, 第16巻, 第9号, (1941).
- (3) Shinjo, J., Umemura, A., Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation, *International Journal of Multiphase Flow*, 36 (2010) 513-532.
- (4) Moore, M.J., and Sieverding, C.H., Two-phase steam flow in turbines and separators, Hemisphere Pub. Corp., (1976).
- (5) Hammitt, F. G., Kreczkowski, S., and Krzyzanowski, J., Liquid film and droplet stability consideration as applied to wet steam flow, *Forschung. Ing.-Wes.*, 47 (1981).
- (6) Flock, A.K., Guildenbecher, D.R., Chen, J., Sojka, P.E. and Bauer, H.J., Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops, *International Journal of Multiphase Flow*, 47 (2012) 37-49.
- (7) Lefebvre, A., H., *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis, (1983).
- (8) S. Gepperth, D. Guildenbecher, R. Koch, and H.-J. Bauer, Pre-filming primary atomization: Experiments and modeling, *Proceedings of 23th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Brno, Czech Republic, ILASS-Europe 2010, (2010).
- (9) 越智雅規, 浜島真二郎, 稲村隆夫, 麓耕二, プレフィルミングエアークラスタトマイザーにおける液膜分裂モデル, 第23回微粒化シンポジウム講演論文集, 123-128, (2014).
- (10) 鳥山温美, 竹田陽一, 中野晋, 佐藤公仁弘, 高速気流中でエッジから飛散する水膜挙動に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, (2013).
- (11) Schlichting, H., *Boundary-layer theory*, McGraw-hill Book Company, 1979.
- (12) Friedrich, M. A., Lan, H., Wegener, J. L., Drallmeier, J. A., Armaly, B. F., A Separation Criterion With Experimental Validation for Shear-Driven Films in Separated Flows, *Journal of Fluids Engineering*, 130 (2008), 051301.