翼列後流中の水滴粒径分布*

坪内邦良*¹, 吉田正平*¹, 佐藤 武*²

Atomized Droplet Size Distribution in Wake of Fixed Blade

Kuniyoshi TSUBOUCHI, Shohei YOSHIDA and Takeshi SATOH

The presence of water droplets in the flow of a steam turbine leads to erosion of moving blades because of the large blade tip speed and higher local wetness. Since erosion resistance is strongly influenced by the impact droplet velocity and size as well as the hardness of the blade material, estimating the distributions of droplet size and frequency is important for establishing erosion criteria. In this paper we describe an estimation method for droplet size of dispersed water flow in the wake of a fixed blade, which can be extended to a moving blade. The LDV system was applied to measure velocity and size of droplets in the wake near the trailing edge of a fixed blade, under conditions simulating those found in the last stage of a low-pressure steam turbine. Test results show that droplet sizes in the wake of a fixed blade can be approximately evaluated by a normal distribution function depending on the mean droplet diameter. It is concluded that the size and frequency distributions of the droplets which impact on a moving blade can be calculated using these characteristics.

Key Words: Steam Turbine, Cascade, Wake, Atomization, LDV, Wet Steam, Flow Measurements, Erosion

1. 緒 言

高速回転中の蒸気タービン動翼に粗大水滴が衝突すると、エロージョン作用によって翼面が損傷され、しかも水滴の制動作用などによる各種のエネルギー損失が発生する。このようなエロージョン問題を評価するには、翼後流中の水滴の発生状況とその挙動、特に水滴の粒径分布を考慮した定量的な評価法が必要である。

湿り蒸気流動の解析方法については、静翼翼面への水滴の付着率や翼後縁端から噴霧する水滴の解析法^{(1)~(3)}が開発されているが、大部分は水滴径としては平均値を用いて評価している。実際の水滴は粒径分布を有しているので、これらを水滴群として統計的に評価する必要がある。

本研究では、空気-水の二相流中に配置された静翼翼列から流出する水滴の粒径分布を光ファイバLDV(レーザドップラー流速計)⁽⁴⁾⁽⁵⁾によって測定するとともに、この測定結果を統計処理することによって水滴の粒径分布関数を求め、翼列後流中に噴霧する水滴の

粒径分布予測方法を検討した。

2. 記 号

A_d : 水滴の断面積 $= \frac{\pi d^2}{4}$
 C, C_x : 翼弦長, その X 方向長さ
 C_D : 抵抗係数
 d, d_1, d_2 : 水滴径
 L : 翼面に沿う長さ
 $\dot{m}_f$: 単位翼長当たりの水量
 Re : レイノルズ数
 t : 翼列ピッチ
 V_s, V_d : 蒸気および水滴の速度
 $V(\eta, \xi)$: 翼後流中の蒸気速度
 We : ウェーバ数
 X, Y : 座標軸(図2参照)
 ξ, η : 翼後流の座標軸(図2参照)
 δ : 後流の幅
 ρ_s, ρ_L : 蒸気および水の密度
 μ_s, μ_L : 蒸気および水の粘性係数
 σ_L : 水滴の表面張力
 ϵ_{N-P} : 翼面水滴捕集効率

* 原稿受付 平成5年6月29日。

*¹ 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒317 日立市幸町3-1-1)。*² 正員, (株)日立製作所日立工場 (〒317 日立市幸町3-1-1)。

3. 翼列後流中の水滴分布

3.1 実験装置および実験方法 静翼後流中の水滴の流動特性を把握するため、二次元翼列風洞による湿り蒸気実験を実施した。図1に実験装置の系統を、図2にモデル翼列構成を、表1に実験条件を示す。本装置では過熱蒸気または圧縮空気中に加圧水を噴霧して湿り蒸気または湿り空気を作り、この流体を翼列に供給して翼面に水膜流を形成させ、翼後流中に実機と同等の水滴噴霧流動状況を実現できるように構成してある。測定部の翼列は実機⁽⁶⁾の2/5モデルを模擬したものである。本装置では、所定の湿り度の作動流体が翼列に流入すると、作動流体中に随伴する水滴が翼面に捕集されて水膜流が形成される。この水膜流が翼面を沿って流下し、後縁端から再び気流中に噴出することにより、翼後流中に水滴噴霧流を発生する。

動翼のエロージョン現象が発生する蒸気タービンの低圧段の流動状態は、蒸気中に水滴が混在する湿り蒸気状態であるが、本実験では作動流体に空気を用い、空気中に水を噴霧して空気-水の二相流状態で実験を行った。なお、レイノルズ数およびウェーバ数は次式で定義した(ただし、 $d_{\max}$:最大水滴径)。

$$Re = \rho_s V_s C / \mu_s$$

$$We = \rho_s (V_s - V_d)^2 d_{\max} / \sigma_L$$

図3に本実験の測定に用いた光ファイバLDVの光学系を、図4に信号処理系の構成を示す。光学系はアルゴンガスレーザを光源とし、その2色4光束のレーザビームを光ファイバを通してプローブ部に導き、収束レンズの焦点位置に4ビームを交差させて測定体積を構成する。測定は測定体積を通過した個々の水滴からの後方散乱光のパルス強度と、2方向のドップラー信号を信号処理して水滴の粒径と速度ベクトルを求める。なお、本システムは流体機械内部計測用に開発したもので、その詳細については文献(4)、(5)を参照願いたい。

3.2 水滴粒径分布の整理方法 一般に、破碎過程を経て生成される水滴の粒径分布は正規分布関数や対数正規分布関数になることが多い⁽⁷⁾。本研究では、水滴の粒径分布を計算する関数として正規分布関数を用いることにした。以下に測定結果から水滴の粒径分布関数を求める方法について簡単に説明する。正規分

表 1 翼列実験の流動条件

	wet steam	wet air
Inlet pressure	0.029 MPa	0.11 MPa
Exit pressure	0.022 MPa	0.10 MPa
Inlet wetness	4.0 %	0.45 %
Exit velocity, U	329.0 m/s	120.7 m/s
Reynolds number	1.4×10^6	1.1×10^6
Weber number	84	91

図 1 湿り蒸気・湿り空気翼列風洞実験装置系統図

図 2 翼列構成

図 3 4 ビームファイバ LDV システムの光学系

図 4 信号処理システム

布関数 $f(d)$ は、一般に次式で与えられる。

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(d-\bar{d})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\bar{d}$ ：水滴径の平均値 $= \frac{\sum d}{n}$

σ ：標準偏差

正規分布関数を用いて水滴の粒径分布を近似する場合、式(1)を次式に置き換える。

$$f(d) = a \cdot \exp\{-b(d-\bar{d})^2\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a, b ：係数

両辺の対数をとって整理すると、

$$Y = AX^2 + BX + C \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$Y = \log\{f(d)\}, X = d, A = -b,$$

$$B = -2b\bar{d}, C = \log a - b\bar{d}^2$$

したがって、実験値を二次の最小二乗法で近似すると、係数 A, B, C が求められる。これを式(2)に代入すると正規分布関数が求められる。

3.3 実験結果ならびに結果の検討 蒸気タービン動翼のエロージョンを定量的に評価するには、上流側の静翼後流中に発生する水滴の粒径分布形状を把握することが重要である。

図5および図6は、その静翼後流中の水滴挙動を光ファイバLDVシステムによって測定した結果をまとめたもので、翼列入口の湿り度は0.45%である。エロージョンが発生する蒸気タービン低圧段の湿り度は、

定格運転状態でほぼ4%であるが、前述したように本実験では作動気体に空気をういているので、作動気体の密度の差を考慮した体積流量換算の湿り度が蒸気の湿り度と同水準になるように設定した。図5には翼後流中の水滴径の測定結果と分布関数を用いて整理した計算結果を比較して示した。各図の(a)は軸方向の測定位置 X/C_x におけるウェークの背側の位置、(b)はウェークの中央部の位置、(c)はウェークの最も腹側の位置の結果を示す。なお、分布関数による近似計算では、測定値の $\pm 2\sigma$ の範囲のデータを用いて整理すると、全体的に測定値と近似値がよく一致する。

図5は、測定位置の中で最も翼後縁端に近い $X/C_x = 0.01$ の位置における結果である。実験値はウェークの両端位置で粒径が小さく、分散も小さくなっているのに対して、ウェークの中央部では粒径が大きく、分散も大きくなる。本図には正規分布関数によって整理した計算結果を示しているが、その分布形状は各位置で測定結果と比較的よく一致している。

図6に $X/C_x = 0.39$ における測定結果を示すが、全体的に水滴径が小さくなり、分散も少ない。特に、図5と比較すると、ウェークの中央部で二次噴霧現象により水滴径が著しく小さくなっているのが注目される。いずれの図においても粒径分布の測定値に多少ばらつきがあるものの、正規分布関数によって整理すると、測定された粒径分布の傾向を近似することができる。しかし、この分布関数、例えば式(2)を用いて翼後流

図5 翼後流中の水滴粒径分布 ($X/C_x = 0.01$)

図6 翼後流中の水滴粒径分布 ($X/C_x = 0.39$)

中の水滴の粒径分布を予測するには、各位置の平均水滴径 $\bar{d}$ と係数 a , b を与える必要がある。

図7は、湿り度 0.25, 0.45, 1.0% の実験において $X/C_x = 0.01, 0.04, 0.17, 0.39$ の各測定位置から得られたすべての平均水滴径 $\bar{d}$ とその標準偏差 σ をまとめたものである。なお、上記湿り度は、作動流体の密度差を考慮すると蒸気の湿り度 2, 4, 8% に相当する。図7から明らかなように、翼後流位置や湿り度が異なっても標準偏差 σ は平均水滴径 $\bar{d}$ の約 20% 程度の値となった。図7中の直線は一次の最小二乗法によって求めた関係式で、

$$\sigma = 0.1882 \bar{d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、翼後流中の各位置の平均水滴径 $\bar{d}$ をなんらかの方法で与えられるならば、式(4)を利用することによってその標準偏差 σ を求めることができる。

一方、式(2)の係数 a , b は式(1)から標準偏差 σ の関数となるので、正規分布関数は次式で与えられる。

$$f(d) = \frac{1}{a'(\sigma)} \exp \left\{ -\frac{(d - \bar{d})^2}{b'(\sigma)} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $d, \bar{d}$ の単位: μm

図5, 6の実験結果から正規分布関数の係数 $a'(\sigma)$, $b'(\sigma)$ を求め、標準偏差 σ に対して整理した結果を図8および図9に示す。係数 $a'(\sigma)$, $b'(\sigma)$ についても、図8, 9から明らかなように翼後流位置や湿り度が異なっても標準偏差 σ の一つの関数として表すことができる。ここで、図8の直線は最小二乗法によって求めた関係式で、

$$a'(\sigma) = 0.6088 \sigma^{0.9625} \quad \dots\dots\dots (6)$$

係数 $b'(\sigma)$ については、図9に示すように

$$b'(\sigma) = 2.0 \sigma^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

にはほぼ合致し、式(1)の正規分布関数の係数と一致する。したがって、翼列後縁端から噴霧される水滴の粒径分布は次式で近似することができる。

図7 平均水滴径と標準偏差

$$f(d) = \frac{1}{0.6088 \sigma^{0.9625}} \exp \left\{ -\frac{(d - \bar{d})^2}{2 \sigma^2} \right\} \quad \dots (8)$$

4. 翼後流中の水滴流動解析

4・1 水滴の運動方程式 水滴粒径分布の実験式を用いて湿り蒸気中に置かれた静翼の後流に噴霧される水滴の流動解析を試みた。翼後流中の水滴は複雑な後流の粘性拡散に強い影響を受けるが、ここでは簡単に静翼後縁端の境界層厚さを初期値として後流拡散を予測し、その速度変化を考慮して水滴の一次元運動方程式を解くことにした。

翼後縁端から噴出した水滴に働く流体力 F_d は、後流速度を $V(\eta, \xi)$ とし、水滴が完全な球形を保って運動すると仮定すると次式で表される⁽⁸⁾。

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho_s \{ V(\eta, \xi) - V_d \}^2 A_d \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、水滴の抵抗係数 C_D は

$$\left. \begin{aligned} 0 < Re_d \leq 80 & : C_D = 27 / Re_d^{0.84} \\ 80 < Re_d \leq 10^4 & : C_D = 0.271 Re_d^{0.217} \\ 10^4 < Re_d & : C_D = 2.0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

図8 粒径分布関数の係数 a' と標準偏差

図9 粒径分布関数の係数 b' と標準偏差

ただし, $Re_d = \frac{\rho_s \{V(\eta, \xi) - V_d\} d}{\mu_s}$

一方, 球の運動方程式により

$$F_d = m\alpha = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_L \frac{dV_d}{dt} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし, m : 水滴質量, α : 加速度

したがって, 式(9), (11)より後流中の水滴の運動方程式は

$$\begin{aligned} \frac{dV_d}{dt} &= V_d \frac{dV_d}{d\xi} \\ &= \frac{3}{4} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right) \frac{C_D}{d} \{V(\eta, \xi) - V_d\}^2 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

静翼後流は翼後縁端の境界層の粘性拡散に支配されるので, この後流拡散モデルとして本研究では Leiblein-Roudebush らの輸送モデル⁽⁹⁾を採用した。すなわち, 後流の形状を half-sin 曲線で近似すると,

$$\begin{aligned} \frac{V(\eta, \xi)}{V(\delta/2, \xi)} &= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V(0, \xi)}{V(\delta/2, \xi)} \right] \\ &\quad - \left\{ 1 - \frac{V(0, \xi)}{V(\delta/2, \xi)} \right\} \cos \left(\frac{\pi \eta}{\delta/2} \right) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

また, 後流の中心速度は次式で与えられる。

$$V(0, \xi) = V_s \left(1 - \frac{0.13}{\sqrt{\xi/C} + 0.025} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし, V_s : 主流速度 $[=V(\delta, \xi)]$

4・2 翼後縁端からの一次噴霧 静翼表面を流下し翼後縁端に到達した水膜は, 慣性力により蒸気中に噴霧されて粗大水滴となる。この粗大水滴の噴出は, 連続的に生ずるのではなく, 水の表面張力と気流の慣性力との平衡関係によって間欠的に起こる。このような一次噴霧により形成された粗大水滴は短時間のうちに二次噴霧により微細化されるので, 一次噴霧後の水滴の粒径を実験的に把握するのは極めて困難である。翼後縁端部の厚さが数百 μm 程度と比較的薄い場合, 表面張力によって翼後縁端部に水膜が付着し, その後気流方向に膜状に伸びて水塊が離脱すると考えると, 一次噴霧後の最大水滴はほぼ翼後縁端厚さに等しいと仮定できる⁽¹⁰⁾。一方, Pouchot らは, これらのメカニズムから水膜流の離脱をモデル化し, 一次噴霧の平均水滴径 $\bar{d}_1$ として以下の式を導いている⁽⁸⁾。

$$\bar{d}_1 = 17.0 \left(\frac{\mu_L}{\rho_L} \frac{\dot{m}_f}{\tau_s + \dot{m}_f V_s / L} \right)^{1/4} \left(\frac{\mu_L}{\tau_s} \sqrt{\frac{\sigma_L}{\rho_L}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで, $\dot{m}_f$ は単位翼長当たり翼面に捕集される水滴量なので, 翼面捕集効率 ε_{N-P} とすると

$$\dot{m}_f = \varepsilon_{N-P} \rho_s \frac{y}{1-y} V_s t \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし, y : 湿度, t : 翼ピッチ

水滴捕集効率 ε_{N-P} は Gyarmathy の理論⁽¹⁾に基づい

て求めた。

式(15)で算出される粒径の値は, 数百 μm のオーダーとなり, 翼後縁端厚みや後述する二次噴霧現象から類推してほぼ妥当な値となる。このため, 本報では一時噴霧後の粗大水滴の粒径として翼後縁端厚みと Pouchot らの式を採用した。

4・3 翼後流中の二次噴霧 翼後縁端から噴霧された粗大水滴が翼後流中で次第に加速されるが, 水滴と後流の速度差が大きくなると, この粗大水滴がさらに細分化される。この二次噴霧現象は, 水滴の表面張力が気流のせん断力に抗しきれなくなるために生ずるもので, ウェーバ数がある限界値⁽¹⁾を超えると発生する。

$$We \equiv \frac{\rho_s (V_s - V_d)^2 d_1}{\sigma_L} > 21 \sim 24 \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここでは, この限界値として $(We)_{cr} = 22$ を採用した⁽³⁾。したがって, この臨界ウェーバ数から二次噴霧後の最大水滴径 $(d_2)_{\max}$ を求めることができる。

一方, 二次噴霧後の平均水滴径 $\bar{d}_2$ については, Wolf-Anderson によって提案されてた次の半経験式⁽¹¹⁾を採用した。

$$\bar{d}_2 = \left\{ \frac{136 \mu_L \sigma_L^{3/2} d_1^{1/2}}{\rho_s^2 (V_s - V_d) \sqrt{\rho_L C_D}} \right\}^{1/3} \quad \dots\dots\dots (18)$$

4・4 解析結果ならびに結果の検討 解析の妥当性を検討するため, 典型的な蒸気タービン長翼⁽⁷⁾の先端部を対象に水滴の流動解析を実施した。表2にこの長翼に使用された静翼の先端部の蒸気条件を示す。

表 2 翼列出入口の蒸気条件

	Unit	Cascade inlet	Cascade exit
Pressure	MPa	0.029	0.022
Temperature	℃	67.9	60.6
Wetness	%	4.0	5.3
Velocity	m/s	56.5	329.0
Flow angle	deg.	0.0	76.75

図 10 翼後縁端部からの一次噴霧後の水滴径

図 11 後流軸中心部の水滴速度

図 12 二次噴霧後の水滴粒径分布

静翼表面上を流下し翼後縁端に到達した水膜は、蒸気流のせん断流によって破碎され、粗大水滴となって翼後流中に噴霧される。この一次噴霧後の水滴径の解析結果として式(15)による平均水滴径および翼後縁端厚みに相当する噴霧水滴径を図10に示す。本図によると、一次噴霧後の粗大水滴の平均径 d_1 の計算値は、翼面の水滴捕集効率 ε_{N-P} の増加に応じて約 200 μm 弱から 300 μm 強に変化する。図10には後流中心部において臨界ウェーバ数(=22)に相当する水滴径(最大水滴径=247 μm)を表示しているが、捕集効率が3%以上になると、一次噴霧後の粗大水滴の大部分は二次噴霧により微粒化されることになる。捕集効率が3%以下では一次噴霧後の水滴が臨界ウェーバ数に相当する水滴径より小さくなるので、二次噴霧現象の生ずる割合が少なくなり、その結果 200 μm 前後の粗大水滴が多数存在する可能性がある。

図11は、翼後縁端から噴霧された水滴が翼後流の中心部で加速される状況を示す。図11は、翼の後縁端近傍における二次噴霧現象の解析結果を示しているが、後縁端厚み相当の水滴径 $d_1=380 \mu\text{m}$ と一次噴霧の平均水滴径 $\bar{d}_1=272 \mu\text{m}$ の粗大水滴は、翼後縁端近傍で二次噴霧現象で微粒化され、その後急激に加速されて $X/C=0.3$ の位置で主流の70%まで達するのに

対し、二次噴霧されない粗大水滴($\bar{d}_1=247 \mu\text{m}$)は主流の40%程度の速度となる。図10中、実線および一点鎖線で示した計算値は、式(18)に $\bar{d}_1=272, 380 \mu\text{m}$ を代入して求めた水滴が後流中で加速されるとして計算したものである。求められた二次噴霧後の平均水滴径 $\bar{d}_2$ は、それぞれ 26.2 μm および 35.2 μm である。図11に湿り蒸気中で測定した翼後流中の水滴の平均速度とその分散を比較しているが、計算値は実験値の傾向をよく表すことがわかる。特に、水滴の平均速度は、 $\bar{d}_1=380 \mu\text{m}$ と仮定して計算した結果によく一致している。図12に式(8)から求めた二次噴霧後の水滴の粒径分布と実測値とを比較しているが、本図からも $\bar{d}_1=380 \mu\text{m}$ を採用すると実測値の粒径分布をかなりよく予測できることが明らかである。

5. 結 言

翼列出入口部の水滴挙動を光ファイバLDV方式の湿り蒸気流動計測システムにより測定するとともに、その粒径分布および翼後流中の粒径分布に関する近似計算方法の検討を行った。その結論をまとめると、

- (1) 翼後流中の水滴粒径分布を正規分布関数で近似すると、その標準偏差 σ は翼後流位置や湿り度が異なっても平均水滴径 $\bar{d}$ の約20%程度の値となる。
- (2) 翼後縁端の噴霧水滴の粒径分布は次式で示される正規分布関数で近似することができる。

$$f(d) \doteq \frac{1}{0.6088\sigma^{0.9625}} \exp\left\{-\frac{(d-\bar{d})^2}{2\sigma^2}\right\}$$

ただし、 $\sigma=0.1882\bar{d}$

- (3) これによって、微少水滴の翼面捕集、水膜流の形成、後縁端からの粗大水滴の噴出とその微細化、特に二次噴霧後の平均水滴径とその粒径分布までを一貫して解析できることになる。

文 献

- (1) Gyarmathy, G., *Dissertation ETH*, Zurich, Juris-Verlag, (1962).
- (2) Moore, M. J., ほか3名, *Inst. Mech. Eng.*, Wet Steam, 4 (1973), 41.
- (3) Laari, A. R., ほか2名, *PWR*, 13(1991), 133.
- (4) 坪内・ほか3名, *機論*, 55-512, B(1989), 1022.
- (5) Tsubouchi, K., ほか3名, *JSME Int. J.*, Ser. II, 32-2(1990), 511.
- (6) Kaneko, R., ほか5名, *Proc. EPRI Workshop Titanium Steam Turbine Blading*, Palo Alto, CA, (1988-11).
- (7) 高橋, 基礎エアロゾル工学, (1978), 132, 養賢堂.
- (8) Pouchot, W. D., ほか9名, *NASA CR*, 1830(1971).
- (9) Leiblein, S., ほか1名, *NACA Tech. Note*, 3771(1956).
- (10) Somme, E., *Brown Boveri Rev.*, 10-71(1971), 458-472.
- (11) Wolf, H. E., ほか1名, *Aerojet General Co. Rep.*, 6395-04-185P(1964).