スリット付き中空静翼の水膜分離性能*

坪内 邦良^{*1}, 吉田 正平^{*1}
佐藤 武^{*2}, 金子 了市^{*2}

A Study of Separation of Water Film on a Hollow Blade with Suction Slits

Kuniyoshi TSUBOUCHI, Shohei YOSHIDA,
Takeshi SATO and Ryouichi KANEKO

The presence of water droplets in the low-pressure stage of a steam turbine leads to erosion of moving blade, especially of an advanced long blade, because of the larger blade tip speed and higher wetness. This paper describes the effect of the separation of water film through suction slits on the blade pressure surface. By assuming a linear velocity distribution with water film, the mass flow and film thickness of water moving on the blade pressure surface were calculated in order to determine the location of slits. Water flow separated through suction slits was measured in a wet steam tunnel under the same conditions of a low-pressure steam turbine. Droplet size and velocity were also measured for dispersed water droplets in the wake of the blade with and without suction slits by means of a fiber laser Doppler velocimeter (LDV). Test results indicated that the water separation coefficient is strongly affected by the location of slits and pressure difference between cascade inlet and drain separator. Finally, the flow rates of dispersed water droplets in the wake of the blade with suction slits are 30~40% lower than those in the wake of the blade without suction slits.

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

1. 緒 言

湿り蒸気中で作動するタービンでは、静翼後流中に発生する数10 μm 以上の水滴が高速回転中の動翼に衝突するので、翼前縁部がエロージョン損傷を受けやすい。特に、最新の長翼では翼先端周速が700 m/sに達するものもあり⁽¹⁾、エロージョンに対して従来よりもいっそう厳しい条件になっている。

このエロージョン損傷の原因となる粗大水滴は、主として静翼翼面上に形成される水膜流れが後縁端から後流中に噴霧されてできるので、この水膜流れをできるだけ除去することが望ましい。このため、静翼を中空構造とし、翼面にスリットを設けて水膜流れを内部に吸引して分離除去する方法が一部実機に採用されている。このスリット付き中空静翼については、すでにモデルタービン実験⁽²⁾や翼列実験⁽³⁾が行われ、その水膜分離特性が明らかになっているが、翼形状や水膜流れとスリットの関連が必ずしも明確になっていない。

本研究は、このスリット付き中空静翼による水膜分離効果の把握を目的に、翼面上に捕集される水滴によって生ずる水膜流の解析によってスリット位置を求めるとともに、その水膜分離効果を実験的に把握した。さらに、LDVを用いてスリット付き静翼の後流中に発生する水滴を計測し、その流動特性を明らかにした。

2. 記 号

 C_f : 摩擦係数 C_x, C_y : 翼の x および y 方向長さ (図1参照) G_H, G_N : 水滴の慣性パラメータ Kn : クヌッセン数 l : 翼面に沿う長さ $\dot{m}_f$: 水膜流量 r : 水滴の半径 R_N : 翼前縁部半径 (図1参照) t : 翼ピッチ u : 水膜速度 U, V : 速度 y : 湿り度 δ : 水膜厚さ ϵ : 水滴捕集効率

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年6月19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)。

ρ : 密度
 ξ, η : 翼面に添う座標軸
 μ : 粘性係数
 添字
 d : 水滴 L : 水膜 S : 蒸気

3. 翼面上の水膜流れとスリット位置

中空静翼の翼形状に合せて最適なスリット位置を求めるには、翼面上に集積する水膜流れを解析する必要がある。実際のタービン段落内の流れは、複雑な三次元流れとなるので、翼表面に形成される水膜流れも極めて複雑な様相を示す⁽⁴⁾。しかし、水膜は一般に蒸気のせん断力や遠心力の影響を強く受けるので、ここでは静翼翼面に捕集された水滴が蒸気のせん断力によって薄い水膜となって一様に流れると仮定する。すなわち、図1に示すように蒸気中に発生した微小水滴が翼間流路に入ると、大部分の水滴は蒸气流に乗って流路内を通過するが、一部の水滴はその慣性力の効果で静翼前縁部や腹面部に衝突して水膜流を形成する。この場合、その水膜厚さが極めて薄いので、運動量方程式と連続の式は次式で表すことができる⁽⁵⁾。

図1 翼面における水滴捕集と水膜流れ

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial \xi}\right) + \mu_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{m}_f = \rho_L \int_0^s u d\eta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{境界条件は, } \eta=0: u=0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta=\delta: \left(\frac{\partial u}{\partial \eta}\right) = \tau_s + \tau_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし, } \tau_s: \text{蒸気のせん断力} = C_f \cdot \frac{\rho_s V_s^2}{2}$$

$$\tau_n: \text{水滴の衝突力} = \dot{m}_f \cdot V_s / l$$

なお、摩擦係数 C_f は翼面に沿う蒸気の流れの変化を与え、Truckenbrodt の境界層積分方程式⁽⁶⁾ を用いて運動量厚さを求めることにより計算した。

式(1)の圧力項は積分すると水膜厚さ δ の二乗のオーダーとなるので、この項を無視すると、式(1)~(4)から水膜厚さ δ は次式で近似できる。

$$\delta \approx \left[\frac{2\mu_L}{\rho_L} \cdot \frac{\dot{m}_f}{\tau_s + \frac{\dot{m}_f}{l} \cdot V_s} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

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、この水滴捕集効率を ε とすると、

$$\dot{m}_f = \varepsilon \cdot \rho_s \cdot \frac{y}{1-y} \cdot V_s \cdot t \quad \dots\dots\dots (6)$$

水滴捕集効率 ε も Gyarmathy の理論⁽⁵⁾ に基づいて次式を用いた。すなわち、図1に示すように水滴が翼腹面に衝突する領域を η_P 、翼前縁部に衝突する領域を η_N とすると

$$\varepsilon = (\eta_P + \eta_N) / t \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta_P = 2C_v \cdot (G_H + e^{-G_H} - 1) / G_H^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta_N = 2R_N \cdot (G_N + e^{-G_N} - 1) / G_N^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 G_H, G_N は水滴の慣性パラメータを表し、

$$G_H \equiv \frac{(9\mu_s/2\rho_L)}{(1+2.53Kn)} \cdot \frac{C_v}{(V_s \cdot r^2)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

図2 翼腹面上の水膜流れの計算結果

$$G_N \equiv \frac{(9\mu_s/2\rho_L)}{(1+2.53Kn)} \cdot \frac{2.5R_N}{(V_d \cdot r^2)} \dots\dots\dots (11)$$

図2(a)～(c)に、低圧タービン最終段の典型的な静翼の腹側壁面上の解析結果の一例を示す。翼先端部から水滴が衝突するにしたがって水膜厚さおよび流量が徐々に増加するが、流れが転向する翼面中央部から下流側で、水膜流量が増加するものの、水膜の速度も急増するので水膜厚さは減少する傾向を示す。翼面のスリット位置については、Deichらのモデルタービン実験結果など⁽²⁾を参考に以下の観点から選定した。すなわち、翼面の水膜厚さが最も厚くなる翼面位置 $l/L=0.4$ および 0.5 、構造上の制約からスリット位置として最も下流側の $l/L=0.8$ さらに $l/L=0.8$ のスリット位置の流量のほぼ $1/2$ となるスリット位置 $l/L=0.65$ を選んだ。

4. 実験装置

スリット付き中空静翼の水膜分離特性および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3に実験装置の系統を、図4にモデル翼形状を、表1に実験条件を示す。

図3 湿り蒸気・湿り空気翼列風洞実験装置系統図

図4 供試翼形モデル

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構成してある。測定部の翼列は実機の $2/5$ モデルで、その中央部にスリット付き静翼を配置した。また、スリット付き静翼の中空部を復水器に接続してあるので、バルブを開閉することにより水膜の吸込みの有無を調節することが可能である。

5. スリット付き中空静翼の水膜分離実験

5.1 実験方法 実験では、所定の湿り度を有する湿り蒸気を翼列に供給して翼の腹面上に水膜流を形成させた後、測定を開始した。スリット部に吸い込まれた水膜の量は、ドレンセパレータで随伴蒸気を分離させた後、タンクレベルで測定した。なお、翼列入口の湿り度は、各部の圧力、温度、噴霧水量、乾き蒸気量を測定して、熱バランスから求めた。

5.2 スリット付き中空静翼の水膜分離性能 図5に翼列に流入する蒸気の入口湿り度 y_0 を変えて行った各スリットの水膜分離実験結果を示す。水膜分離効率 ψ は、次式で定義した。

$$\psi = \frac{(\text{スリットからの水膜分離量})}{(\text{翼間流路当たりの流入水滴量})} \dots\dots\dots (12)$$

表1 水膜分離実験の蒸気条件

	Unit	Cascade inlet	Cascade exit
Pressure	MPa	0.029	0.022
Temperature	°C	67.9	60.6
Wetness	%	4.0	5.3
Velocity	m/s	56.5	329.0
Flow angle	deg.	0.0	13.25

図5 スリット位置と水膜分離効率

各スリットともに、湿度 y_0 の小さい領域で分離効率が高く、 y_0 が増加すると効率 ψ が減少する。これは、翼間流路内では膨張仕事により湿度が変化するが、その変化割合は入口湿度が大きくなるほど、小さくなることによると考えられる。また、 l/L が大きくなると、前述の解析結果から予測されるように水膜分離効率 ψ も大きく改善できる。

図6は、翼面にスリットを2本設けた場合の水膜分離効率の実験結果を示す。上流側のスリット以降の水膜が下流側のスリットで分離できるので、水膜分離効率は同等となると予想されたが、 $l/L=0.65$ と 0.8 の分離性能のほうが高くなった。この結果より、各スリットの水膜吸込負荷配分が等しくなるようスリット位置を選ぶのが妥当であると言える。

図7は、 $l/L=0.65$ および 0.8 のスリット付き中空静翼について、水膜分離効率 ψ に対するスリット部の差圧 ΔP の影響を示す。ここで、スリット部の差圧 ΔP として（翼列入口部圧カードレンタンク内部圧力）を

図6 スリット2本の場合の水膜分離効率比較

図7 水膜分離効率に対するスリット部差圧の影響

採用した。差圧 ΔP を大きくすると、水膜分離効率 ψ も大きくなることからわかる。なお、 $\Delta P=0.11 \times 10^5$ Pa は、スリット前後の圧力比がほぼ臨界圧力比になり、スリット部の流れがチョークする状態である。

6. 翼後流中の水滴流動実験

6.1 実験方法および計測装置 スリット付き静翼の後流中の水滴の流動特性を把握するため、二次元翼列実験を実施した。実験装置および供試翼形は水膜分離実験に用いたものと同じものである。ただし、本実験では計測上の問題から作動流体として蒸気の代わりに湿り空気を用いた。すなわち、図3に示すように圧縮機で加圧した空気中に加圧水を噴霧することにより所定の湿度を有する湿り空気を翼列に供給し、翼面に水膜流を形成させるとともに、翼後流中に実機と同様の水滴噴霧二相流を実現させた。実験は、表2の実験条件で $l/L=0.65$ および 0.8 のスリット付き静翼の後流中に光ファイバLDVのプロープを挿入し、水滴の速度、粒径および数密度を測定した。なお、レイノルズ数およびウェーバ数は翼弦長 C 、翼出口部の主流速度 U_∞ および水滴速度 V_d 、最大水滴径 d_{pmax} 、表面張力 σ とすると、

$$Re = \rho_s U_\infty C / \mu_s$$

$$We = \rho_s (U_\infty - V_d)^2 d_{pmax} / \sigma$$

図8に本実験の測定に用いた光ファイバLDVの光学系を、図9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プ部に導き、収

表2 翼後流中の水滴の流動条件

	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	1.4×10^5	1.1×10^5
Weber number	84	91

図8 4ビームファイバLDVシステムの光学系

束レンズの焦点位置に4ビームを交差させ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、詳細は文献(7)(8)を参照願いたい。

6・2 スリット付き静翼後流中の水滴挙動 静翼翼面に形成した水膜を吸い込んだとき(スリット前後の圧力比 $P_s/P_0=0.55$) と、吸い込まないときの翼後流中の平均水滴速度 $\bar{V}$ と平均水滴径 $\bar{d}_p$ の測定結果を図10, 11に示す。なお、水滴速度 $\bar{V}$ は空気主流の速度 U_∞ で無次元化し、図10, 11の X/C_x は測定位置で軸方向測定位置 X を翼幅 C_x で無次元化して示した。図10および図11より翼後流中心部に比較的速度が遅く、大きな水滴が集中するとともに、ピッチ方向に離れるにしたがって速度が速く、粒径の小さな水滴が存在していることがわかる。これらの水滴は、軸方向に離れるにしたがって加速され、 $X/C_x=0.39$ では後流拡散の影響でほぼ一樣な速度および粒径となっている。図10, 11では、水膜の吸込みの有無による実験結果を比較しているが、水滴速度および水滴径に大きな差異は生じていない。これは5章の水膜分離結果からわかるように、水膜の吸込みによる分離効果が10%前

後と少なく、翼後縁端近傍の水滴噴霧現象を大きく変えるほど影響を与えていないことを意味する。

6・3 噴霧水滴の流量の測定 図12に翼後流中の水滴径の頻度分布を測定した結果の一例を示す。図12より明かなように、水膜の吸込みの有無によって粒径分布の形状に大きな変化は認められないものの、その頻度の絶対値が異なることになる。すなわち、スリットから翼面上の水膜を吸い込むことにより、翼後流中に再噴霧される水滴の流量を低減できることが本図からも明らかである。この効果を定量的に把握するため、測定された粒径分布を積分し、各測定位置における噴霧水滴流量の比較を行った。図13に水膜の吸込みの有無による噴霧水滴流量の軸方向変化を示す。図13の各図の横軸はピッチ方向の測定位置を、縦軸は測定した噴霧水滴の流量を示したもので、各測定点の測定流量 $G_s(Y)$, $G_0(Y)$ を水膜を吸い込まない場合の最大の測定水滴流量 G_{0max} で無次元化して示した。圧力比は $P_s/P_0=0.55$ とほぼ臨界圧力比に近い条件である。図13中(a)の測定位置 $X/C_x=0.01$ では、翼後流中心近傍に水滴流れが集中し、翼間流路の中央部では水滴はほとんど流れない。また、 $(Y-Y_0)/t < -0.025$ の静翼背側には実験点がないが、これは静翼の背側では水膜

図9 信号処理システム

図10 翼後流中の平均水滴速度

図11 翼後流中の平均水滴径

図12 翼後流中の水滴粒径の頻度分布

図 13 翼後流中の局所水滴流量分布

流れがほとんど形成されず水滴が噴霧される頻度が極めて少なくなったことに起因している。

一方、図 13(d)の測定位置 $X/C_x=0.39$ では、ほぼ翼間流路全体に噴霧された水滴が流れている。図 13 より、いずれの位置においても水膜を吸い込むと、後縁端から噴霧される水滴流量がかなり減少する結果を示している。すなわち、翼後縁端から噴霧する水滴は、粒径や速度は変化しないものの、その噴出頻度が水膜の吸込みによって大きく低減できる。このため、下流側を回転する動翼へ衝突する水滴の数が少なくなり、エロージョン発生をかなり抑制することが可能となる。

水膜分離の実験結果でも述べたが、スリット前後の差圧を変えると、水膜の分離効率が大きく変化する。このような条件における翼後流中の水滴流量を測定した結果を図 14 に示す。図 14 は横軸にスリット圧力比を、縦軸には水膜を吸い込んだ場合の噴霧水滴の流量と水膜を吸い込まなかった場合の噴霧水滴の流量との比を示す。なお、本図の流量はピッチ方向に積分した水滴流量を示す。図 14 中の●印は測定位置 $X/C_x=0.04$ で圧力比を変化させた場合の測定結果である。圧力比を小さくする、すなわちスリット差圧を大きくすると水膜の吸込量が多くなり、その結果、噴霧水滴の流量が減少することがわかる。しかし、圧力比が $0.5 \sim 0.6$ 以下になると、噴霧水滴の流量はそれ以上変化しない。これは、圧力比が 0.53 で臨界圧力比となり、臨界圧力比以下にしてもスリット部でチョークするので、水膜を吸い込む流量が一定となるためである。図 14 には、スリット前後の圧力比 $P_s/P_0=0.55$ において軸方向の各位置で測定した結果 (○印) も示している

図 14 翼後流中の全水滴流量に対するスリット部差圧の影響

が、測定流量にばらつきがあるものの、スリット付き静翼によって噴霧水滴の流量を $30 \sim 40\%$ 削減できることが明らかである。

7. 結 言

蒸気タービンのエロージョン防止策の一つとしてのスリット付き中空静翼について、その水膜分離性能と翼面スリット位置との関係および分離性能に対するスリット部の差圧の影響を明らかにした。特に、翼面に 2 本以上のスリットを設ける場合、それぞれのスリット部の水膜吸込量をほぼ等しくなるよう設定すること、また少なくともスリット部がチョーク流れになるよう吸込圧力を調整すると分離効率が向上する。

一方、翼後流中の水滴挙動を光ファイバ LDV システムにより測定した結果をまとめると、スリット付き静翼の翼後流中の水滴噴霧流動現象は、水膜の吸込み有無の影響を受けないものの、翼後流中に噴霧する水滴の流量は圧力比を小さくするほど減少し、水滴流量が水膜を吸い込まない場合に対して $20 \sim 40\%$ 減少する。

文 献

- (1) 坪内・ほか 4 名, 日立評論, 70-2 (1988), 53.
- (2) Deich, N. E., ほか 3 名, *Teploenergetika*, 15-11 (1968), 104.
- (3) Ryley, D. J., ほか 1 名, *PIME*, 182-3H (1967-68), 94.
- (4) Moore, M. J., ほか 1 名, *PIME*, 184-3G (1969-70), 45.
- (5) Gyarmathy, G., *Dissertation ETH*, Zurich, Juris-Verlag, (1962).
- (6) Trockenbrodt, E., *NACA TM*, 1379 (1955).
- (7) 坪内・ほか 3 名, 機論, 55-512, B (1989), 1022.
- (8) Tsubouchi, K., ほか 3 名, *JSME Int. J., Ser. II*, 32-2 (1990), 511.