スパン方向に吹き出す膜冷却における冷却空気の挙動*

(第1報, 時間平均速度場と温度場)

内 山 篤^{*1}, 山 本 雅 洋^{*2}
志 沢 高 朗^{*3}, 本阿弥 眞 治^{*3}

Behavior of Cooling Jet in the Lateral Injection in Film Cooling

(1st Report, Time-Averaged Velocity and Temperature Field)

Atsushi UCHIYAMA, Masahiro YAMAMOTO,
Takaaki SHIZAWA and Shinji HONAMI

The present paper describes the behavior of the cooling jet on the flat surface in the lateral injection in film-cooling. Simultaneous velocity and temperature measurements were made by the double-wire probe. The test surface was also covered with an encapsulated temperature-sensitive liquid crystal. The surface temperature distributions were obtained by the image-processing system of the liquid crystal. The tests were conducted at three mass flux ratios. The laterally injected jet has an asymmetric structure with a large scale of vortex motion on one side caused by the interaction with the primary stream. Asymmetry is promoted with increase of the mass flux ratio, resulting in low film-cooling effectiveness.

Key Words: Gas Turbine, Film Cooling, Lateral Injection, Wall Jet

1. 結 言

ガスタービンエンジンの熱効率を向上させるため、タービン入口温度は上昇傾向にある。そこで、ガスタービン翼の効果的な冷却方法の採用が近年ますます重要な課題となっている。

ガスタービン翼の有効な冷却方法の一つに膜冷却(Film Cooling)がある。従来、冷却空気を主流と同じ方向に吹き出す方法が行われてきたが、近年、主流に対して90°スパン方向に傾けた方法が採用されている。

膜冷却技術のよりいっそうの向上を図るには、冷却空気の挙動と、壁面と冷却空気との熱伝達との相互関係を明らかにする必要がある。従来の研究においては、壁面の冷却効率を計測した研究が多く見られ、冷却効率に及ぼす乱流値⁽¹⁾や流線曲率⁽²⁾等の影響が明らかにされている。また、深川ら⁽³⁾によりスパン方向吹出しの冷却空気の挙動が報告されているが、温度場と速度場を応答性の高いセンサで計測することが困難

であるため速度場の測定は、主流と冷却空気の温度差がない状態で行われている。このように、冷却空気の温度場と速度場の両方を同時に明らかにした研究例は少ない状況にある。したがって、壁面の熱伝達と冷却空気の挙動の両者に重点を置き、それらの相互関係を詳細に検討した研究は極めて少ない。また近年、数値計算によりタービン翼の熱伝達を予測し、設計に利用する場合が多い。しかし、計算スキームの検証に必要なデータが非常に少ない状況にあり、膜冷却に関する基礎データの蓄積が重要である。

本研究では、定電流形抵抗温度計と定温度形熱線流速計を組合せたプローブを使用し、熱線流速計の温度補償に抵抗温度計の出力を用いることにより温度と速度の同時測定を可能にした。この計測システムを用いて、吹出し比を三とおり変化させ、スパン方向(Z方向)に吹き出した二次空気の流れ場と温度場を明らかにするとともに、壁面に接着した液晶温度センサシートの色相を画像処理により温度に換算して壁面の温度分布を求め、両者の結果を統合し、膜冷却における冷却空気の挙動を明らかにすることを目的とする。

2. 記 号

D : 二次空気吹出し孔直径(=10 mm)

* 原稿受付 平成5年7月29日。

^{*1} 正員, 三菱重工業(株)原動機事業本部 (〒108 東京都港区芝5-34-6)。

^{*2} 正員, トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市トヨタ町1)。

^{*3} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

M : 吹出し比 $= \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty$

T : 局所時間平均温度

U : 局所時間平均速度

U_{pw} : 壁面ポテンシャル速度

X, Y, Z : 座標系 (図1参照)

θ : 無次元温度 $= (T - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$

添字

∞ : 一次空気

2: 二次空気

w : 壁面

3. 実験装置および実験方法

本研究で使用した風洞は吸込み形で、二次元ノズルの縮流比は10:1、試験流路部のアスペクト比は6である。主流速は13.5 m/s、測定部の運動量厚さを代表長さとするレイノルズ数 Re は約1100である。

測定部の詳細を図1に示す。二次空気の吹出し方向は、壁面に対し30°、一次空気に対し90°(スパン方向)に設定した。本研究では、二次空気を加熱し、一次空気と二次空気との間に温度差を与えた。なお、実際の膜冷却と逆に温度差を設定したが、本研究の密度比0.85では、浮力の影響は極めて少ない⁽⁴⁾。

図2に速度場と温度場を同時に測定するために使用した2線プローブの構造を示す。上流側に定電流形抵抗温度計(CW)、下流側に定温度形熱線流速計(HW)を配置し、HWの温度補償にはCWの出力電圧を用いる。抵抗温度計の線径は5 μ mのタングステン線を用いたので、高い周波数応答は得られず、本研究では、時間平均量の結果を報告する。2線プローブをX軸方向に正対させ、二次空気が存在する領域に依じて、Y方向に15~16点、Z方向に0.5Dあるいは1Dおきに9~15点のトラバースを行った。測定断面は、吹出し孔下流 $X/D=2, 7, 12, 17$ の4断面とし、一次空気と二次空気の温度差を55°Cに設定した。なお、下流断面の $Z=\pm 100$ mmの範囲で風洞側壁の影響は無視できることを速度測定により確認した。

壁面温度を測定するため、過去に液晶温度センサ

図1 測定部

(以下液晶)を用いた方法が報告され⁽⁵⁾、本研究でもコレステリック液晶をカプセル化し、シート状に加工した液晶シート(厚さ0.2 mm)を用いた(図1)。このシートは温度に感応して色の変化し、その色相から温度を求めることができる⁽⁶⁾。本実験では事前に伝熱風洞で検定した液晶のカラー画像をCCDカメラからビデオ画像処理ボードを通してパーソナルコンピュータに取り込み、その画像を解析することにより壁面温度分布を求めた⁽⁷⁾。一次空気と二次空気の温度差は液晶の測温範囲の制約から18°Cとした。

4. 実験結果および考察

4.1 2線プローブの実験結果 以下に、2線プローブによる実験結果および考察を述べる。著者らは、0.35から1.2までの吹出し比について実験を実施した結果、吹出し孔から孔径の17倍下流の範囲では、吹出し比0.5が各吹出し比の中で最高の冷却効率を与えたので、この吹出し比を最適吹出し比とした⁽⁷⁾。そこで、 $M=0.5$ の最適吹出し比について詳しく検討し、併せて、 $M=0.85$ と1.20の結果も報告する。なお、図3, 4の等高線は、三次補間(Cubic Spline 補間)法を用いてデータを補間して、プロットに出力した。

4.1.1 時間平均温度場 図3(a)に $M=0.5$ の無次元時間平均温度 θ の分布を示す。図3中の矢印は、 $X/D=0$ の吹出し孔における二次空気のスパン方向吹出し位置とその方向を示す。以後、測定断面内の二次空気を上流から下流方向に見て、二次空気の左右を区別する。 θ は二次空気の左右で非対称な分布を示し、 $X/D=2$ においては二次空気の左側の壁面近くで θ の小さい等温度線が二次空気の下側に入り込んでいるのがわかる。下流に進むに従いこの傾向は弱まるが、左右での非対称性は維持される。二次空気は、 θ が最大値を示す位置(以後最大温度点)を中心として存在すると考えられるが、最大温度点の位置は、どの測定断面

図2 2線プローブ

面でもほぼ一定の $Y/D=0.25$ 付近である。また最大温度点は、下流に進むに従い、吹出し方向(Z の正の方向)に移動し、二次空気が吹出し方向へ移動することがわかる。二次空気の Z 方向への移動量は、 $X/D=2$ から $X/D=7$ の間では $1D$ 以上と大きい、 $X/D=7$ より下流では、比較的小さい。 θ の最大値は、吹出し直後 $X/D=2$ から $X/D=7$ で、約 0.7 から 0.3 近くまで大幅に減少し、 $X/D=7$ より下流では、その減少の割合は小さくなり、 $X/D=17$ まで進んでも、 θ の最大値は 0.2 以上となる。

図3(b), (c)に $M=0.85$ と 1.20 の二次空気の時間平均温度分布を示す。測定断面 $X/D=12$ の結果は顕著な変化が認められないので割愛した。等温度線は左右非対称な分布を示し、吹出し比の増加とともに二

(a) $M=0.50$ (b) $M=0.85$ (c) $M=1.20$ 図3 時間平均温度 θ 分布

二次空気の非対称性が促進される。この非対称性は、二次空気の左側で一次空気が下部に入り込むことにより引き起こされる。その結果、左側で二次空気は壁面から離れ、右側では壁面に付着する傾向を示す。

4.1.2 時間平均速度場 図4(a)に $M=0.5$ の無次元時間平均速度 U/U_{pw} の分布を示す。最大速度点が存在したのとほぼ同じ位置に速度の小さな領域が存在し、この付近に二次空気の中心が存在するものと考えられる。無次元速度も無次元温度と同様に二次空気の左右で非対称な分布を示し、二次空気左側壁面近くでは、速度の速い流体が流れ込んでいる。

図4(b), (c)に $M=0.85$ と 1.20 の時間平均速度分布を示す。吹き出し比を増加させると、二次空気は吹

図4 時間平均速度 U/U_{pw} 分布

出し方向の運動量が大きくなるので一次空気を遮る働きがある。そこで、一次空気は、二次空気を乗り越え、その際に大きい流線曲率をもつ。その結果、局所的に加速流れが発生する⁽³⁾。

温度分布の結果、ならびに本研究と同様な流れ場を構成する渦発生ジェットにおいて前述した巻込みを確認した研究結果⁽⁶⁾とを併せ考えると、二次空気の左側の領域では、二次空気の下部に一次空気が巻き込まれ

るような渦運動が存在することは明らかである。一方、二次空気右側では一次空気の巻込みは見られず、単にZ方向に広がる傾向にあり、二次空気の壁面への付着性がよい。下流に進むに従い、一次空気の巻込みによる渦運動は弱まるが、同様な傾向を示す。

4・2 壁面温度 画像処理によって求めた時間平均壁面温度分布を等温度線の形で表示し、その結果および考察を以下に述べる。

図5に各吹出し比における吹出し孔近傍の壁面無次元温度 θ_w の分布を示す。 θ_w の大きい領域つまり冷却効率の高い領域は、下流に進むに従い、スパン方向に移動する。その移動量は吹出し直後で大きい、下流に進むと徐々に小さくなり、2線プローブにより得られた最大温度点のスパン方向への移動と同様な傾向を示す。

吹出し孔直後の $Z/D = -1$ 付近に θ_w が小さい領域が存在する。この領域が流れ場と温度場の測定におい

(a) $M=0.50$ (b) $M=0.85$ (c) $M=1.20$

図5 壁面温度分布

(a) $M=0.50$ (b) $M=0.85$ (c) $M=1.20$

図6 壁面と二次空気の温度分布

て、二次空気の左側で一次空気の巻き込み現象が存在する領域と一致することから、この領域に温度の低い一次空気が回り込み、壁面温度が低下し、その結果、冷却効率が低くなるものと考えられる。

図6(a)に吹出し比0.5における感温液晶を画像処理して求めた壁面温度分布を示す。併せて、2線プローブにより測定した $X/D=2$ と7における二次空気の温度分布を示す。 $X/D=2$ における流れ場と壁面の無次元温度は、よく対応するが、 $X/D=7$ では、流れ場の温度のほうが若干高い。二次空気の最大温度点は壁面から離れており、この Z 方向位置と、壁面温度が最大値をもつ Z 方向位置は一致しない。したがって、スパン方向吹出しの場合、壁面温度分布だけで二次空気の挙動を類推することは困難であることがわかる。

図6(b), (c)に吹出し比0.85と1.2の場合の壁面と二次空気内の温度分布を示す。壁面温度の高い領域は吹出し孔から下流に進むに従い、スパン方向に移動する。壁面温度が高い領域と二次空気の最高温度点のスパン方向位置の相違は、吹出し比の増大とともに顕著となり、一次空気の巻き込みにより二次空気が壁面から離れる左側の領域は壁面温度が低く、逆に二次空気の壁面への付着性がよい右側領域では壁面温度が高く、明らかに温度中心位置に関して二次空気は非対称な分布を示す。このことが壁面の冷却効率と密接な関係にあることがわかる。また、吹出し比を増加させると、二次空気は壁面に垂直方向の拡散も顕著となり、 $M=1.2$ の場合、二次空気が壁面から離れる傾向が強まり、結果として冷却効率の低下を来す。

さらに、図5で述べたように $Z/D=-1$, $X/D=1$ 付近に等温度線が大きく湾曲する様子が観察され、二次空気の挙動を併せて示すことにより、一次空気の回り込みによる吹出し孔近傍の様子がよく理解できる。

5. 結 言

スパン方向に吹き出す膜冷却における冷却空気の挙動に関して、以下の結論を得た。

(1) 液晶による温度計測システムから得られた壁面温度分布は2線プローブにより得られた壁面近傍の温度分布と比較的よい対応を示す。

(2) スパン方向吹出しの膜冷却では、二次空気の吹出し方向側では、二次空気の壁面への付着性がよいが、吹出し方向の反対側においては、一次空気の巻き込みによる渦運動が存在するため、壁面への付着性が悪い。さらに、吹出し比の増加とともに、二次空気が壁面から離れる傾向を示し、その結果、冷却効率の低下を来す。

(3) 二次空気の温度が最大値を示す Z 方向位置と壁面冷却効率がピークをもつ Z 方向位置は異なり、吹出し比の増加とともにその相違は顕著となる。

(4) 吹出し孔近傍に一次空気の巻き込みによる冷却効率の低い領域が存在し、吹出し比の増加とともに、一次空気の回り込みが顕著に認められる。

最後に実験装置の製作に尽力いただいた本学工作場の矢尾板友三、平野孝、内田元喜、木村貞男の各氏そして本研究に対して協力いただいた元本学卒業研究生 間世田宏、浪江敦志の両氏に感謝の意を表する。また、画像取込みシステムおよび画像処理システムの作成に当たり多大なる協力をしていただいた元本学大学院生 田中靖幸氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Kadotani, K. and Goldstein, R. J., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, **101**(1979), 459.
- (2) Ito, S. and Goldstein, R. J., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, **100**(1978), 476.
- (3) 深川・本阿弥, 機論, **53**-492, B(1987), 2554.
- (4) Shiha, A. K., ほか2名, *Trans. ASME, J. Turbo-mach.*, **113**(1991), 442.
- (5) 笠木・ほか2名, 機論, **48**-430, B(1982), 1146.
- (6) Toy, N., ほか2名, *ASME FED*, **112**(1991), 39.
- (7) Honami, S., ほか3名, *Proc. 1991 Yokohama Int. Gas Turbine Congr.*, **2**(1991), 207.
- (8) Compton, D. A. and Johnston, J. P., *AIAA J.*, **30**(1992), 640.