曲率壁の全面膜冷却に関する研究* (第3報, 凹, 凸面壁上の冷却効率)

笠木 伸英*¹, 平田 賢*¹, 池山 正隆*²
牧野 雅樹*³, 熊田 雅弥*⁴

Full-Coverage Film Cooling on the Curved Walls (3rd Report, Cooling Effectiveness on Concavely and Convexly Curved Walls)

Nobuhide KASAGI, Masaru HIRATA, Masataka IKEYAMA,
Masaki MAKINO, and Masaya KUMADA

The effect of wall curvature on the full-coverage film cooling performance has been studied experimentally by using concave, flat and convex walls. The effect of coolant mass flux has also been investigated. A preliminary consideration, based on the balance of the centrifugal force associated with an injected fluid element and the pressure gradient normal to the wall, leads to the understanding that the trajectory of the injected fluid tends to move away from the concave wall and attach to the convex wall, respectively, under the present experimental conditions. This has been experimentally confirmed by both the boundary layer measurements and the smoke-wire flow-visualization. In accordance with the flow structure observed, the cooling effectiveness measured on the convex and concave walls is higher and lower than that on the flat wall. In addition, the mass flux ratio has little effect on the cooling effectiveness on the concave wall, while it is optimum in the range of 0.4-0.5 on the convex wall.

Key Words: Gas Turbine, Full-coverage Film Cooling, Wall Curvature, Cooling Effectiveness, Concave Wall, Convex Wall

1. ま え が き

ガスタービンの入口温度を高めることは、ガスタービン自身の高効率化のみならず熱エネルギーの総合的有効利用の立場からも極めて有益である。そのためには、タービン翼用耐熱材料の改良あるいは新材料の開発とともに、その冷却方法に関して、従来以上の冷却性能を実現することが急務である。近年、固体壁上に多数の小孔を一樣に配備してそれらから冷却用二次空気を吹出す全面膜冷却 (Full-Coverage Film Cooling, 以下 FCFC) について⁽¹⁾⁻⁽³⁾, またその冷却性能に深い関連を有すると考えられる三次元的流れ場の詳細に関する測定⁽⁴⁾⁽⁵⁾などの研究が行われ、全面膜冷却の実用化への努力が続けられている。著者らは既報において、平板 FCFC に対する固体壁の熱的物性値の影響⁽⁶⁾, 等温壁上の熱伝達率⁽⁷⁾, さらに等温壁上熱伝達率データの非等温壁への拡張性⁽⁸⁾について検討した。また、本

研究の第1報⁽⁹⁾, 第2報⁽¹⁰⁾において、凹凸面壁上 FCFC での局所物質伝達率測定結果について報告した。本報では凹凸曲率壁 FCFC について冷却効率, 三次元的温度・速度分布の測定結果, およびスモークワイヤによる流れの可視化について報告する。

2. 記 号

d : 吹出し孔内径
 I : 吹出し運動量比 $= \rho_2 u_2^2 / \rho_\infty u_\infty^2$
 M : 吹出し (質量速度) 比 $= \rho_2 u_2 / \rho_\infty u_\infty$
 p : 吹出し孔流れ方向ピッチ
 s : 吹出し孔スパン方向ピッチ
 T : 温度
 t : FCFC 板厚さ
 u : 速度
 x : 第1列吹出し孔中心よりの流れ方向距離
 y : FCFC 板表面よりの垂直方向距離
 z : スパン方向距離
 α : 接線に対する吹出し角度
 η_w : 局所冷却効率 $= (T_w - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$
 θ : 無次元温度 $= (T - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$

添 字

p : ポテンシャル流れにおける値

* 昭和60年6月7日 第13回ガスタービン定期講演会において講演, 原稿受付 昭和62年5月19日。

*¹ 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

*² 正員, 石川島播磨重工業 (〒190-12 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷 229)。

*³ 正員, 三菱総合研究所 (〒100 東京都千代田区大手町 2-3-6)。

*⁴ 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)。

- w : FCFC 板表面における値
 ∞ : 主流における値
 2 : 吹出し流の値
 $(-)$: スパン方向平均値

3. 実験装置および実験方法

テストプレートは、凹面、凸面、平面壁各々についてアクリル、黄銅の2種類の材料で製作し、各実験に応じて風洞出口に取付けた。図1に例として凹面壁実験装置を示す。また表1には主要な実験条件を示す。凹、凸面壁の曲率半径は各々 $R = \pm 500 \text{ mm}$ とした。二次空気吹出し孔は千鳥配列で、孔径は $d = 12 \text{ mm}$ 、孔ピッチは $p = s = 60 \text{ mm}$ 、吹出し角度は接続方向に対して $\alpha = 30^\circ$ とした。実験を通じて助走区間での主流速度は 20 m/s で一定とした。吹出し比 $M (= \rho_2 u_2 / \rho_\infty u_\infty)$ は、アクリル壁で $0.3, 0.4, 0.5, 0.65$ (ただし平板では $M = 0.3, 0.5, 0.7$)、また黄銅壁では $M = 0.5$ とした。各実験条件下で FCFC 壁に向かい合う対向壁のプロファイルを調整して主流方向の圧力こう配を小さくし、テスト部での壁面静圧の流れ方向の変化は主流動圧の $\pm 2\%$ 以内に保っている。さらに、主流は常に一定温度に保たれ、吹出し空気供給温度 T_2 (プレナムチャンバ内の温度) は上流の電気加熱により所定の温度に設定して実験を行った。壁温 T_w は、FCFC 壁表面に感温液晶⁽¹¹⁾を薄く均一に塗布しその発色線により測定した。また冷却効率 $\eta_w = (T_w - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$ の分布は、吹出し空気温度 T_2 を種々に設定することにより液晶の発色線を移動させ、各実験条件下での FCFC 壁面上での等温線(等冷却効率線)を得る方法によった。本実験で得られた冷却効率 η_w の不確かさ⁽¹²⁾は、実験を通じてアクリル壁で $\pm 10\%$ (20:1) 以下、黄銅で $\pm 6\%$ (20:1) 以下であった。また、FCFC 壁面上での流れの可視化にはスモークワイヤ法を用い、第7孔列直後に線径 $100 \mu\text{m}$ のニクロム線を壁面と平行に壁から 5 mm の距離に張り、2台のカメラで Plane

図1 凹面実験装置概略図

View と End View を同時に撮影した。境界層内の温度分布の測定には $70 \mu\text{m}$ Cu-Co 熱電対プローブを使用した。その不確かさは無次元温度 θ に対して $\pm 13.6\%$ (20:1) 以下である。速度分布の測定には外径 1.2 mm の全圧管を使用した。その不確かさは u/u_{pw} に対して $\pm 5.7\%$ (20:1) 以下である。

4. 吹出し流の軌跡に関する考察

図2に示すような簡単な吹出し流の軌跡に関するモデル⁽¹³⁾を考える。ここで流れ方向の静圧こう配はないものと仮定する。壁面に沿う流れには遠心力と釣り合う半径方向の静圧こう配が存在するが、境界層内の速度分布が $1/n$ 乗則に従うとすれば、吹出し流の軌跡の局所的曲率半径 r_2 と固体壁の曲率半径 R との間には、近似的に以下の関係が成立する。

$$r_2/R = k \cdot (n+2)/n \cdot I \cdot \cos^2 \alpha$$

$$= k \cdot (n+2)/n \cdot \rho_\infty / \rho_2 \cdot M^2 \cdot \cos^2 \alpha \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 k は吹出し孔出口での速度分布に影響される定数で、測定結果⁽⁶⁾から定められた値は $k = 2.3$ である。近似的に $n = 7$ と仮定すると、本報の吹出し比 M の実験条件に対する運動量比 I の値では常に $r_2/R < 1$ となる。したがって、吹出された二次空気は凸面では壁面に付着し、凹面では壁面から離れる傾向があり、またこれらの傾向は I が小さくなるほど、すなわち M が小さくなるほど顕著になる。

5. 実験結果

5.1 壁面冷却効率の測定

図3は、液晶の発色

表1 実験条件

Material of Test Plate	Acrylic Resin ($\lambda = 0.15 \text{ W/mK}$) Brass ($\lambda = 122 \text{ W/mK}$)
Radius of Wall Curvature	$R = \pm 500 \text{ mm}$
Test Plate Thickness	$t = 25 \text{ mm}$
Injection Hole Diameter	$d = 12 \text{ mm}$
Injection Hole Arrangement	Staggered Array Streamwise 11 Rows
Injection Hole Pitch	$p/d = s/d = 5$
Injection Angle	$\alpha = 30^\circ$
Main Stream Velocity	$u_\infty = 20 \text{ m/s}$
Blowing Mass Flux Ratio	$M = \rho_2 u_2 / \rho_\infty u_\infty$ $= 0.3, 0.4, 0.5, 0.65$ (Concave, Convex) $= 0.3, 0.5, 0.7$ (Flat)
Boundary Layer Parameter(*)	
Displacement Thickness	$\delta = 2.11 \text{ mm}$
Momentum Thickness	$\theta = 1.64 \text{ mm}$
Shape Factor	$H = 1.28$

(*; at $x/d = -7.5$ on the flat wall)

線を Na ランプによって単色化して得られたアクリル FCFC 壁上の等冷却効率線図である。 $M=0.3, 0.65$ の曲率壁, $M=0.3, 0.7$ の平面壁について示してある。凹面壁においては, 等冷却効率線がスパン方向に広がらず下流においても吹出し孔間に冷却効率の低い細長い領域が形成されている。また, 吹出し比が大きい $M=0.65$ のほうが $M=0.3$ に比べて各吹出し孔直後の冷却効率の高い等値線がより下流方向に長く伸びている。一方, 凸面壁の等冷却効率線は z 方向に広がり示し, 冷却効率のごく低い領域は上流域に限られている。さらに, $M=0.65$ に比べて $M=0.3$ のほうが各吹出し孔直後で冷却効率の高い領域が下流まで伸びてい

る。これらの傾向は 4 章で述べた吹出し流の軌跡に関する考察と定性的に一致する。

図 4 に, アクリル製の凹凸平面壁上のスパン方向平均冷却効率の流れ方向の分布を示す。まず各吹出し比の条件下で平均冷却効率は, 凹面壁では平面壁に比べて低く, 一方凸面壁では平面壁に比べて高い値を示す傾向にあることがわかる。さらに凹面壁では平均冷却効率の流れ方向の変化は $x/d=10$ 以降ほとんどなく, その値は $\eta_w=0.35$ で分布は平坦である。これは図 3 の等冷却効率線図からもわかるように, 凹面壁では各吹出し孔周囲の等冷却効率線の分布は $x/d=10$ 以降ほぼ相似となり, 流れ方向の各孔列で変化が小さいことによると考えられる。凸面壁においては繰返される吹出しの影響が重畳して冷却効率は下流に向かって増加する傾向にあり, 吹出し比 $M=0.4\sim 0.5$ の付近で平均冷却効率が最も高くなることがわかる。また $M=0.65$ の場合, 上流域で他の吹出し比に比べ冷却効率は低い値を示すが, 下流域では境界層内の吹出し流量の蓄積により他の吹出し比と同程度の冷却効率に達している。これらの傾向は, 既報⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾で報告した物質伝達率の測定から考察した冷却効率の傾向や M の最適値と定性的, 定量的によく一致している。

図 2 二次空気流の流動モデル

図 3 アクリル壁上の等冷却効率線

図5に、吹出し比 $M=0.5$ における黄銅壁での冷却効率とアクリル壁での冷却効率を比較して示す。黄銅壁の冷却効率は全体的にアクリル壁より良好な値が得られている。また、壁面の曲率による冷却効率の変化は小さいがアクリル壁の場合と同様に、凹面、平面、凸面の順に大きくなる傾向を示している。簡単な熱収支モデル⁽⁶⁾によれば、黄銅のような熱伝導率の大きい材料の場合、固体壁曲率の熱伝導率への影響が著しくとも熱伝導率の値自体は膜冷却効果で相当小さな値となっているため、FCFC 壁裏面や吹出し孔内面での熱伝達と壁内部の熱伝導が支配的で、冷却効率の変化がごく小さいことがわかる。このため、黄銅壁の場合には、アクリル壁の場合とは対照的に冷却効率の曲率による変化は小さくなっていると考えられる。

5.2 境界層内温度および速度分布 図6にアクリル壁上の温度分布の測定結果の一例を示す。ここで $\theta = (T - T_\infty) / (T_2 - T_\infty)$ である。各吹出し孔からの吹出し流に対応して三次元壁面噴流に類似の温度場が形成されている。このような測定結果をもとに得られた流れに直交する断面内の温度分布を図7に示す。ここで、吹出し比は $M=0.5$ 、流れ方向の位置は $x/d=18$ 、

すなわち各々第4、第8列めの吹出し孔列下流の位置である。また、例えば $x/d=18$ では、 $z/d=0$ は第3列吹出し孔、 $z/d=2.5$ は第4列吹出し孔の下流に各々位置している。 $x/d=18$ においては、 $z/d=0, 2.5$ での境界層内温度分布の y 方向の広がり、凹面壁のほうが凸面壁に比べて大きく、 z 方向の温度分布の非一様性も凹面壁のほうが強い。このことから凸面壁に比べて、凹面壁では吹出し流の y 方向への拡散がより大きく、 z 方向への拡散が小さいことがわかる。なお、壁面上 ($y/d=0$) での θ の値は η_w に等しく、その z 方向の分布は前述のスパン方向平均冷却効率と一貫した傾向がある。 $x/d=18$ および $x/d=38$ での等温線を比較すると、凸面壁の場合には等温線の y 方向の広がりが増加し、また z 方向への拡散によりスパン方向に一樣な温度分布に近づき、壁近くでは θ がより大きい値となっている。このことは、凸面壁においてスパン方向平均冷却効率が下流に向かって増加する原因と考えられる。一方凹面壁の場合には、 $x/d=38$ での温度分布の y 方向の全般的広がり観察されるものの、境界層内での広い領域での温度上昇は見られず $x/d=18$ と同様に低い値にとどまっている。また、 z 方向の温度分布の非均一が依然として大きく、凹面壁上のスパン方向平均冷却効率が流れ方向に大きく変化しないことに対応している。

次に吹出し比 M の境界層内温度分布に対する影響を示す。図8は、凸面、凹面各々 $x/d=18, z/d=0$ での y 方向温度分布を各 M について示したものである。すべての M に対して、凹面壁上の温度分布の y 方向の広がり、凸面壁のそれよりも大きいことがわかる。また、凹面壁上で M が大きい場合には、凸面壁と対照的に境界層内の温度分布に第2のピークが顕著に現れており、これは前述のように凹面壁においては、吹出し流が壁面より離れる傾向にあることに起因していると考えられる。また凹面、凸面ともに、 M が大きくなるほど温度場の y 方向の広がりも単調に大きくな

図4 アクリル壁上のスパン方向平均冷却効率

図5 黄銅壁、およびアクリル壁上のスパン方向平均冷却効率

図6 境界層内温度分布の測定結果例

図7 境界層内温度分布

ることから、壁面曲率にかかわらず M の増加に伴って吹出し流の乱流拡散が増加することがわかる。

図9は凹面壁、凸面壁の $x/d=18$ の断面での $\theta=0.3$ の等温線を各 M について示したものである。凸面壁では凹面壁に比べて等温線の吹出し孔位置からの z 方向の広がりが大きく、これはスパン方向平均冷却効率が凸面壁でより高いことと一致している。また、等温線の z 方向の広がりは凸面壁では $M=0.4\sim 0.5$ の場合が最も大きく、これは凸面壁のスパン方向平均冷却効率が $M=0.4\sim 0.5$ で最大であることと対応している。凹面壁では等温線の z 方向の広がりは、 M によってほとんど変わらず、スパン方向平均冷却効率が M によって変わらないことと対応している。

図10に $M=0.5$, $x/d=38$ での境界層内の速度分布を示す。凹凸平面とも、 $z/d=0, 2.5$, すなわち吹出し孔の下流で流速の遅い領域が存在し、吹出し流が境界層内の速度分布に著しい影響を与えていることがわかる。凸面壁の場合には、この流速の遅い領域が吹出し孔列間の中央領域にも存在し、吹出し流がスパン方向にかなり拡散していると考えられる。一方、凹面壁の場合、流速の遅い領域は吹出し孔の下流の狭い領域部分に限られており、吹出し流のスパン方向への拡散が

図8 M による境界層内温度分布の変化

図9 M による等温線の変化

図 10 境界層内速度分布

図 11 排除厚さの分布

相対的に小さいことがわかる。

図 11 に

$$\delta^*(z) = \int_0^\infty [1 - u(y, z)/u_p] dy$$

で定義される局所的排除厚さのスパン方向への分布を示す。凸面壁では、曲率効果により境界層厚さはかなり厚くなるが、平面壁、凹面壁よりも δ^* のスパン方向の分布が平坦であり、吹出し流の z 方向の拡散が顕著であることがわかる。以上の境界層内の速度分布の測定結果は、冷却効率の測定結果および、温度分布の測定結果と定性的によく一致していると考えられる。

5・3 スモークワイヤによる流れの可視化 図 12 にスモークワイヤ法による FCFC 壁上の流れの可視化写真を示す。Plane View では、第 7, 8 列めの吹出し孔が写真上に見える。凸面壁上の流れでは吹出し流が下流に移動するに従い壁に再付着し、壁面に沿って

図 12 スモークワイヤによる流れの可視化 ($M=0.5$)

流れるようすが観察される。一方、凹面壁では吹出し孔を含む細長い領域に煙が集中し、吹出し流は凸面壁の場合と対照的に、スパン方向に広がらないようすが観察される。煙の濃い部分は、相対的に流速の遅い部分に対応すると考えると、凸面では吹出し流がスパン方向に広がり、凹面では吹出し流が吹出し孔の下流部分に集中して流れる傾向にあることになり、前述の境界層内速度分布の測定結果などとよく対応している。

6. 結 論

曲率壁 FCFC の冷却効率について行った実験的検討により、以下の知見を得た。

(1) 本報の実験条件下においては、アクリル FCFC 壁に対して、凸面では冷却効率が平面より良好な値を示すのに対し、凹面では低い値にとどまることが明らかになった。スパン方向平均冷却効率の流れ方向の変化に関しては、凸面壁では単調に増加する傾向があるのに対し、凹面壁ではほぼ一定の値を示す。また、黄銅 FCFC 壁では固体壁内熱伝導の効果、すなわち裏面および吹出し孔内面での熱伝達効果が著しく、壁面曲率による表面側熱伝達率の変化は冷却効率に大きな影響を与えない。

(2) アクリル凹面壁 FCFC においては、吹出し比 M による平均冷却効率の差はほとんどなく、一方凸面壁 FCFC では $M=0.4\sim0.5$ の条件で最も良好な冷却効率を得られた。

(3) 境界層内の曲率半径方向の静圧こう配と吹出し流に作用する遠心力との釣合いに基づく比較的単純な物理モデルから、本実験の吹出し比条件下では、凸

面では吹出し流が壁面に付着し、逆に凹面では壁面から離れる傾向があることが予測されたが、これらが冷却効率分布、温度場、速度場の測定結果および流れの可視化結果とよく対応することがわかった。また、吹出し流の温度場の発達に対しては、曲率壁上での吹出し比 M による吹出し流の軌跡の変化に加えて、 M による乱流拡散の変化の影響が存在することがわかった。

本研究の遂行にあたっては、昭和 57~59 年度文部省科学研究費エネルギー特別研究の助成を受けた。また実験装置の製作にあたっては、石川島播磨重工業(株)のご援助を受けた。ここに記して関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Eckert, E. R. G., *Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power*, **106** (1984), 206.
- (2) Crawford, M., ほか 3 名, *Rep. Thermosciences Division, Mech. Eng. Dept., Stanford University*, HMT-19, (1975).
- (3) Bergeles, G., ほか 2 名, *J. Heat Transf.*, **103** (1981), 141.
- (4) Yavuzkurt, S., ほか 2 名, *J. fluid Mech.*, **101** (1980), 129.
- (5) Yavuzkurt, S., ほか 2 名, *J. fluid Mech.*, **101** (1980), 159.
- (6) 笠木・ほか 2 名, 機論, 48-430 B (昭 57), 1146.
- (7) 熊田・ほか 2 名, 機論, 48-430, B (昭 57), 1156.
- (8) 笠木・ほか 3 名, 機論, 49-447, B (昭 58), 2455.
- (9) 熊田・ほか 3 名, 機論, 51-469, B (昭 60), 3041.
- (10) 熊田・ほか 4 名, 機論, 52-479, B (昭 61), 2663.
- (11) 笠木, 機誌 87-783 (昭 59), 145.
- (12) Kline, S. J. and McClintock, F. A., *Mech. Eng.*, **75-1** (1983), 3.
- (13) Ito, S., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Eng. Power*, **100** (1978), 476.