

氏名(本籍)	し 清 水 優 史 (群馬県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 4 2 0 号
学位授与年月日	昭和 4 9 年 3 月 2 6 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)精密工学専攻
学位論文題目	矩形スリットによる三次元膜冷却に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 武山 斌郎 教授 大塚 芳郎 教授 戸部 俊美 教授 永井 伸樹

論 文 内 容 要 旨

[記号] L ;スリット長さ S ;スリット高さ M ; ρ_{inj} u_{inj} / $\rho_{\infty} u_{\infty}$ T ;温度
 u ;速度 η ; $(T_{aw} - T_{\infty}) / (T_{inj} - T_{\infty})$ [添字] inj ;吹き出し二次空気 aw ;断
熱壁 ∞ ;主流

第 1 章 ま え が き

近年大型航空機およびV/STOL機の開発にともない、タービンノズルおよびブレードなどの冷却が重要な問題となってきた。本論文では、有効な冷却法の1つである膜冷却のうち、実用上重要な三次元膜冷却に関し、その1つの基本として30°の吹き出し角を持った矩形スリットを使用したときの、冷却効率および冷却機構を明らかにすることを目的とした。

第2章 膜冷却に関するこれまでの研究

二次元乱流境界層における膜冷却に関しては、数多くの研究がなされ、二次元膜冷却は基本的に、 $M < 1$ の場合は通常の乱流境界層の中での熱拡散として、また $M > 1$ においては壁噴流として取扱うことができることが明らかになった。しかし、穴や矩形スリットを使用した三次元膜冷却に関しては、2.3の研究により二次元のときと比べ冷却効率が低下することが知られているだけでくわしい冷却効率や機構は明らかにされていない。

第3章 実験装置および方法

実験には、下面を断熱壁としたすい込み風洞を使用し、そこに矩形スリットをとりつけた。スリットからは壁面に対し 30° の角度で二次空気を主流の乱流境界層中に吹き出した。二次空気温度は主流より 50°C 高く保ち膜加熱の条件で実験を行った。使用した座標は、スリット下流辺の左端を原点にし、主流方向を X 、壁面垂直方向を Y 、他の一軸を Z とした。原点をスリット下流辺の中央にとったときには Z の代りに Z' を用いる。実験では二次空気と主流の質量流量比 M と、スリットの形状を変え、これらの膜冷却効果率に及ぼす影響を調べた。

第4章 30° の吹き出し角を持つ二次元膜冷却

三次元膜冷却の基礎として、 30° の吹き出し角を持つスリットによる二次元膜冷却効率を測定した。スリットは高さ S 、 5 mm のものを使用した。 M が 0.4 以下では 30° の吹き出し角の影響はみられなかった。 M が $0.5 \sim 1.2$ では平行吹き出しに比べ冷却効率は 10% 近く低下した。特にスリットに近い所での効率減少が顕著であった。 M が 1.5 以上では、再び吹き出し角の影響は小さかった。

第5章 両端の干渉のない場合の三次元膜冷却

長いスリットによる膜冷却は、スリット中央部の二次元膜冷却のおこなわれている領域と、その外側のスリット端部の影響を受ける領域とに分けられる。後者を三次元膜冷却領域と名付ける。高さ $S = 5\text{ mm}$ 、長さ $L = 160\text{ mm}$ の矩形スリットを使用した、両端の干渉のないときの三次元膜冷却領域における冷却効率を測定した。

M が 1.2 以下の場合 温度場はスリット端より外側にはほとんど広がらない。三次元膜冷却領域は下流に行くにしたがいスリットの中心にむかって広がってゆくがこの広がり方は、 M の大きいほど広い。三次元膜冷却領域での冷却効率は、 $M < 0.4$ では M の大きいほど効率が良いが、 $0.4 < M < 1.2$ では M によりほとんど変化しない。このときの冷却効率は $X^{-0.8}$ に比例して減少する。 M に依存しないときの冷却効率に関し次の実験式を得た。

$$\eta = 0.0125 (x/S)^{-0.8} (Z+20/S)^{2.5} Re_s^{0.2} \quad (1)$$

Mが1.2以上の場合 二次空気の壁噴流としての性格が強まるため、スリットの近くをのぞき温度場はスリットの外側にも広がってゆく。この広がりがたはMの大きいほど広い。スリット近くでは、温度場の外への広がりはみられず、三次元膜冷却領域はスリット内側に深く達している。三次元領域での冷却効率の減少率はMにより異なり、Mの大きいほどゆるやかである。三次元膜冷却の機構を知るため、境界層内温度分布、速度分布を測定し、壁面上の流れを油膜法により観察した。壁面流れの観察では、三次元膜冷却領域において、流れがスリット中心に向う成分を持つのが見られた。また壁面に垂直方向の温度分布から、三次元領域において、Mが0.5以上になると最高温度が壁面からはなれた所に存在し、Mの増加と共にその位置が高くなることが知られた。これらのことから三次元膜冷却領域では周囲流体を二次空気と壁面の間にまき込んで冷却効率を低下させるようなうず状二次流れが生じていることがわかった。この二次流れはMの大きいほど強くなるため、冷却効率がMに依存しないところがあらわれる。

第6章 両端の干渉のあるときの三次元膜冷却

6.1 二次元膜冷却の残る場合

スリットが短くなりスリットの両端で生じる二次流れが互いに干渉をするときの膜冷却についてのべる。S = 5 mm, L = 50 mmのスリットにより、スリットの近くで中央に二次元膜冷却領域の残る場合の冷却効率を測定した。

M < 1.2の場合。両端の干渉が生じるとスリットの端に近い下流域で、冷却効率減少の割合が、干渉のない場合に比べ小さくなる。これはスリット端で生じるうず状二次流れのうずの中心が下流に行くにしたがい壁の影響を受けてスリットの中心に寄り、互いに干渉しあって壁面から離れる結果、壁面近くの二次流れが弱まるためである。中央付近では両端の干渉により効率は低下する。全域にわたり5～6%の誤差を許せば前述の実験式(1)で冷却効率を表わすことができる。

M > 1.2の場合。両端の干渉が生じると中央付近冷却効率は干渉のない場合より数%下るが、他の領域ではほとんど変らない。

6.2 短いスリットによる三次元膜冷却

6.2.1 冷却効率に及ぼすスリット長さの影響

高さ5 mmのスリットで長さを50 mmより短くすると、静止空气中に吹き出した二次空気噴流は本実験範囲内の吹き出し速度では壁面に付着せず自由噴流となることがわかった。Lを20 mmにしたときのスリット中心線上膜冷却効率は、Mが0.35以下ではMの増加とともによくなる。0.35 < M < 1.0においてはMによる影響は小さく、7～8%の中におさまる。正確にはMが小さいほど効率減少の勾配が急であるため、X/Sの40～50を境にしてここより上流ではM

の小さいほど効率が高く下流では逆である。Mが1を越すと効率はXの全域で低くなる。Z'方向効率分布は $0.36 < M < 1$ でXの全域にわたり相似であった。 $\eta/\eta_{\max} = 1/2$ となる $Z'_{1/2}$ はMの小さいほど大きい、その差はわずかである。

以上のことから20mmのスリットによる三次元膜冷却は、 $0.36 < M < 1$ において全壁面上でMによる差がほとんどないことがわかった。Lが10, 5mmの場合にもスリット近くをのぞいて同様の傾向が見られた。スリットに近い所では、Mが大きくなると X/S の10近くに中心線上効率最大の点があられる。以上のSを一定にしLを5~50mm変化させた結果のうち、Mにより差の生じないときの比較的下流におけるZ'方向効率分布を積分した値はLに比例しており、有効膜冷却効率はおおよそLに比例することが知られた。

6.2.2 スリット高さの影響

三次元膜冷却効率に及ぼすスリット高さの影響を知るためにLを20mmに保ちSを2, 5, 10, 20と変えて冷却効率を測定した。S=2mmアスペクト比 $L/S=10$ のスリットによる中心線上冷却効率は $0.36 < M < 2$ の広い範囲でMによる差が小さく、Xの増加につれ単調に減少する。Sが10, 20の場合にはスリットに近い所をのぞいて、 $0.36 < M < 0.7$ の範囲でMによる影響はほとんど見られないが、これ以上のMではXの全域で効率が減少する。このようにSが大きくなると効率に影響しないMの範囲の上限が下がる。スリットの近くではMの大きいほど効率は低く、Mが上述の範囲をこすと、 X/S の10あたりに効率極小の点があられる。Mの影響を受けないときの中心線上冷却効率は、アスペクト比に無関係に $X/S > 30$ において、おおよそ $X^{-0.9}$ に比例して減少し、 $S^{0.35}$ に比例して増加した。これより大きなMでは、スリット近くでSの大きいほど効率は低く、下流域においてもSによる差は小さい。Mが1.9ではXの全域でSの大きいほど効率は低い。Z'方向効率分布は、アスペクト比 < 2 、 $X/S < 20$ をのぞいて相似であった。Z' $1/2$ は小さなMでは、Sの大きいほど大きい、Mの増加につれSによる差は小さくなる。すなわち、二次空気噴流のY方向運動量はSに比例して増加するため、二次空気が主流中に貫通しやすくなり上述のごとき現象が生じる。境界層内の温度分布から、アスペクト比が2以下のスリットでは、二次空気はMの増加とともに主流に自由噴流に近い形で貫通するようになることが見られた。

6.2.3 断面積一定のスリットによる膜冷却

二次空気吹き出し量を一定にしたときのアスペクト比の影響を調べた。スリットの断面積は 100mm^2 、アスペクト比は1, 2, 4, 11.3である。それぞれのスリットにおけるMの影響は、前述したアスペクトの対応するものとほとんど同じであった。アスペクト比の影響は、Mが0.36以下ではほとんどあられない。Mが大きくなるとアスペクト比の小さなものほど全体の冷却効率が低くなり、その差はMが大きくなるにしたがい増す。Z'方向効率分布は、アスペクト比

が2以下と，1.1.3のスリット近くをのぞいて相似であった。 $Z'_{1/2}$ もスリットの近くをのぞいてアスペクト比によりそれほど影響されないが，スリット近くでは，アスペクト比の大きいほど大きい。有効に冷却される面積は，アスペクト比の増加とともに急激に増す。

6.3 速度の影響

冷却効率に及ぼす速度の影響を見るため，いくつかのスリットにつきMを一定にして速度を変えた実験結果から，スリット中心線上効率は平均して $u_{inj}^{0.3}$ に比例することが知られた。

6.4 実験式

以上の結果全てを総合して，Mの影響の小さなときのスリット中心線上冷却効率に対し次の実験式を得た。

$$\eta = 2.46 \times 10^{-4} \text{Re}_s^{0.3} (X/S)^{-0.05} (X/L)^{-0.85} \quad (2)$$

本実験式はGoldsteinらの実験結果ともよくあった。

第7章 隣接するスリット間の干渉

最後に高さ5mm，長さ60mmと90mmのスリットを5mmの間隔でならべたときのスリット間の干渉を調べた。 $X/S < 20$ ではスリット間の干渉はほとんど見られない。下流に行くにしたがい干渉の影響があらわれ，効率は単一スリットの効率をたしあわせたものより10%ほど良くなりだいに二次元の値に近づく。このときにも三次元膜冷却領域においては $0.36 < M < 1.14$ でMによる差は見られない。

第8章 まとめ

30°の吹き出し角を持つ矩形スリットによる三次元膜冷却効率に対し次のことが明らかになった。

(1) スリット端の干渉の生じないときの冷却効率は， $0.4 < M < 1.2$ において次式で表わされる。

$$\eta = 0.0125 (X/S)^{-0.8} (Z+20/S)^{2.5} \text{Re}_s^{0.2}$$

(2) アスペクト比が1.0以下のスリットによる，スリット中心線上冷却効率はMに依存しない範囲で，スリット近くをのぞき次式で表わされる。

$$\eta = 2.46 \times 10^{-4} \text{Re}_s^{0.3} (S/X)^{0.05} (L/X)^{0.85}$$

(3) 近接して並べられたスリット間の干渉により効率は良くなるがこの場合にもMによる差はほとんど見られない。

審査結果の要旨

近年、大型高性能のエンジン開発が要求されるにつれて、高温に暴露されるタービンノズルあるいはブレードの冷却特性が直接その性能を支配するところから、それらの冷却問題が緊急に解決されなければならない重要な課題となってきている。本論文は、有効な冷却法の一つである膜冷却のなかで、もっとも実用的であるにもかかわらず、現象の複雑性のために、研究の遅れている三次元膜冷却の機構を解明することを目的として行われたもので、全編 8 章よりなる。

第 1 章は緒言であり、第 2 章は乱流境界層内の熱拡散あるいは壁噴流としてとり扱われる二次元膜冷却の性能に比較して、単純に性能の劣下のみを指摘するに過ぎなかった従来の三次元膜冷却の研究状況を概説し、本論文の意義と目的を明らかにしている。

第 3 章では、綿密に製作された実験装置ならびに実験方法について述べている。第 4 章はとくに膜冷却の研究において一般的に採用される 30° の吹き出し角をもつ二次元膜冷却の実験を行い、従来の結果と比較しながら本装置の性能をしらべ、本論文の目的である三次元膜冷却の解析の指針を与える基礎的測定値を得ている。

第 5 章は、両端の干渉のない場合の三次元膜冷却に関する研究である。とくに、吹き出しスリット端部の影響をうける三次元領域の冷却機構を境界層内温度分布の測定と油膜法による壁面上の流れの観察とから考察し、新たな知見をえている。さらに、冷却効率に関する実験式を求めている。

第 6 章は、両端の干渉のあるときの三次元膜冷却の実験で本研究の中心をなすものである。すなわち、(1)スリットが短い場合に両端で発生する二次流れが互いに干渉する様相、(2)冷却効率に及ぼすスリット長さおよびスリット高さの影響、(3)断面積一定のスリットによるアスペクト比の影響、(4)冷却効率に及ぼす速度の影響などについて、多くの実験を行い、以上のすべてを総合する実験式の作成に成功していることは本研究の大きな成果であり、とくにアスペクト比の大きいスリットの冷却効率が優れていると結論できることは設計上有用な知見である。

最後に第 7 章において、隣接するスリット間の干渉について実験を行い、干渉は冷却効率を良くすることを指摘している。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、三次元膜冷却に及ぼす数多くの因子の影響を実験的手法により解析し、いくつかの有効な知見を得たものであり、精密工学とくに熱工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格とみとめる。