55 キャビティ付多孔壁による凝縮衝撃波の制御

佐賀大 瀬戸口俊明^{*}, 富永隆, 中野智弘, 金子賢二

Control of Condensation Shock Wave Using Porous Wall with Cavity

Toshiaki SETOGUCHI^{*}, Takashi TOMINAGA^{*}, Toshihiro NAKANO^{*} and Kenji KANEKO^{*}

Since the concept of passive control of shock-boundary layer interaction was published in 1983, many papers have been reported on the application of this technique to transonic airfoil flows. In the present paper, this technique is applied to condensation shock wave which is caused by rapid expansion of moist air in a supersonic nozzle. The effects of passive control on condensation shock wave have been experimentally investigated by a schlieren optical method and by pressure measurements. As a result, it is found that passive control is the useful technique to suppress the periodic oscillation of condensation shock wave.

1. まえがき

比較的潜熱量の大きい凝縮性気体、特に、水蒸気や湿り空気などが、ラバルノズルで急激に加速膨張する場合、飽和状態に達しても凝縮せず過飽和状態となりノズル内で非平衡凝縮が起こる⁽¹⁾。この凝縮により流れは気液二相の噴霧流となり、潜熱放出の影響で流れの状態が変化し、ノズル内に凝縮衝撃波が形成される⁽¹⁾。更に、ノズル入口における流れの飽和度が比較的高い場合には、凝縮衝撃波は上流に伝ばし、ノズル内の流れが周期的に振動する⁽²⁾。このような現象は蒸気タービン内の膨張流れなどに関連して従来多くの研究が報告されている。しかし、凝縮衝撃波による流れ場への影響を少なくするための制御法に関する研究はほとんど行われておらず、特に自励振動する凝縮衝撃波に対する対策は重要な課題となっている。

ところで、最近、衝撃波と境界層の干渉を受動的に制御する方法(パッシブコントロール)が注目されている。これは、衝撃波が発生する位置の壁面をキャビティ付多孔壁として、衝撃波自体の特性により境界層制御を行うことで、衝撃波による流れ場への影響を小さくしようとするものである⁽³⁾⁽⁴⁾。

本研究は、キャビティ付多孔壁を用いるパッシブコントロールをラバルノズル内で発生する凝縮衝撃波に適用し、その有用性を実験的に調べたものである。

2. 実験装置と方法

本研究で使用した超音速風洞の概要を図1に示す。風洞は、大気圧状態の湿り空気を真空タンクに吸い込む形式で、貯気槽(15m³)、測定部および真空タンク(1.8m³)から構成されている。測定部は高さが60mm、幅が38mmのく形断面で、上壁に先細末広円弧ノズル(ハーフノズ

^{*} Faculty of Science and Engineering, Saga University, 1, Honjo, Saga-shi, Saga, 840, Japan.

ル曲率半径 R^* が 155mm と 400mm、スロート高さ $h^*/2=24\text{mm}$ が装着されている。またハーフノズルには、図 2 に示すようにノズルスロートよりキャビティ付多孔壁が設けられている。キャビティ長さは 20mm、深さ D は 3mm ($R^*=400\text{mm}$) と 5mm ($R^*=155\text{mm}$) で、多孔壁は図 2 (b) に示すように $\phi 2\text{mm}$ の孔がピッチ 5mm の間隔で 4 列に配され、孔数を変化させることで空隙率 P (孔の総面積と多孔壁領域面積の比) を 0.05、0.10、0.13、0.18 の 4 種類とした。

実験に際し、貯気槽の圧力 p_0 は大気圧に保ち、温度 T_0 と相対湿度 ϕ_0 を熱電対と相対湿度計で測定し、それぞれ電熱器と超音波加湿器を用いて所定の値に設定する。本装置では、測定部下流のバルブを開放すると貯気槽内の湿り空気が真空タンクに流れ込み、測定部において持続時間が約 3 秒の定常な超音速流れが得られ、その間に下壁に接して配されたスルーチューブ⁽⁵⁾により流れ方向の圧力計測 (KULITE 社製、タイプ XCQ-62)、シュリーレン法により流れ場の可視化を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 凝縮衝撃波の可視化 凝縮衝撃波形状に及ぼすパッシブコントロールの影響を図 3 に示す。図 3 (a) は固体壁の場合で、相対湿度 ϕ_0 の増加とともに凝縮衝撃波は明確になり、その発生位置がスロートに近づく。一方、図 3 (b) は、 $P=0.18$ の多孔壁を有する場合である。図 3 (a) と (b) の比較より、 $\phi_0=57\%$ までは多孔壁の有無による差異はさほど明確でない。これは、多孔壁と凝縮衝撃波の相対位置が適切でないためである。しかし ϕ_0 が 64% 以上では、凝縮衝撃波の分枝が観察され、凝縮衝撃波の強さが弱くなっている。これは多孔壁面上に凝縮衝撃波が位置するため、凝縮衝撃波自体の特性により流れ場の調整が行われるためである⁽³⁾。

以上の結果は、ラバルノズル内に凝縮衝撃波が定在する場合であるが、 ϕ_0 がさらに増加すると凝縮衝撃波は流れ場に定在できず、自励振動⁽²⁾を起こす。図 4 はその代表写真 ($R^*=155\text{mm}$) で、(a)→(d) は時間の経過を示す。図より明らかなように、(a) で発生した凝縮衝撃波は、(b)、(c) と時間が経過すると明確になるとともにノズルスロートに近づき、やがてスロートを通過 (d) して上流に伝ばする。その後、再び (a) の状態に至る。また、 $R^*=400\text{mm}$ の場合も図 4 と同様な現象が観察された (図略)。凝縮衝撃波の自励振動に及ぼすパッシブコントロールの効果であるが、 $P=0.05$ の場合は図 4 とほぼ同じパターンの写真が得られたが

Fig. 1 Experimental apparatus

(a) Test section

(b) Porous wall

Fig. 2 Test section and porous wall

Fig.3 Schlieren photographs showing condensation shock wave
($p_0=101.3\text{kPa}$, $T_0=303\text{K}$, $R^*=155$)

Fig.4 Schlieren photographs of periodic flow caused
by condensation ($p_0=101.3\text{kPa}$, $T_0=303\text{K}$, $\phi_0=79\%$, $R^*=155$)

$P \geq 0.10$ では図5に示すように凝縮衝撃波は観察されなかった。これは、伝ばする凝縮衝撃波の強さが、その伝ば過程において多孔壁からの吸込みにより弱められるためと思われ、同様な現象は、多孔壁面内を伝ばする衝撃波の研究においても観察されている⁽⁸⁾。

3. 2 定在する凝縮衝撃波に及ぼす影響

図6は、静圧分布に及ぼすパッシブコントロールの影響を $\phi_0=64$ と70%に対して示す。図の横軸はノズルスロットからの距離 x を h^* で無次元化した x/h^* 、縦軸は局所静圧 p とよどみ圧力 p_0 の比 p/p_0 である。図より凝縮領域における圧力上昇は、パッシブコントロールにより低くなることがわかる。また等エンロピ線から圧力分布がずれ始める位置が、パッシブコントロールにより上流側に移動することもある。これは、凝縮衝撃波が分枝するためである。

図7は、凝縮領域の最大圧力値 p_2 と等エンロピ線から圧力がずれ始める位置の圧力値 p_1 の比 p_2/p_1 を ϕ_0 に対して示す。図の ϕ_0 の範囲では、 p_2/p_1 は ϕ_0 が増加すると小さくなる。これは、凝縮の開始点が ϕ_0 とともにノズルスロットに近づくためである。また P が大きいほど p_2/p_1 は小さくなるが、その効果は ϕ_0 が小さいほど大きい。これは、 P が大きいほど凝縮衝撃波下流における吸込み作用が大きくなるためである。

3. 3 自励振動する凝縮衝撃波に及ぼす影響 凝縮衝撃波の自励振動に及ぼすパッシブコントロールの影響を図8に示す。図は、固体壁と多孔壁の場合($R^*=155\text{mm}$)の x/h^*

Fig.5 Schlieren photographs showing effect
of passive control on periodic flow
caused by condensation ($p_0=101.3\text{kPa}$,
 $T_0=303\text{K}$, $\phi_0=79\%$, $P=0.13$, $R^*=155$)

Fig.6 Comparison of static pressure
distributions between solid wall
and porous wall ($p_0=101.3\text{kPa}$,
 $T_0=303\text{K}$)

$=0, 0.25, 0.50$ における圧力の時間的変化を示す。
 図(a)の固体壁の場合には、図4で示したようにスロートを通過して上流に伝ばする凝縮衝撃波のために周期的な振動現象がみられる。振動の周波数は、 x/h^* に関係なく同じであるが、振幅は x/h^*
 ≈ 0.25 で最大となる。一方、多孔壁の場合には、 $P=0.05$ では振動現象は存在するものの振幅はかなり弱くなっており、 $P=0.10$ では振動現象は生じていない。これらは前述のように、多孔壁による吸込み作用のため凝縮衝撃波が弱くなるためと思われる。

図9は、ノズルスロートにおける凝縮衝撃波の自励振動の無次元周波数 $\bar{f}(=f h^* 0.795 R^* 0.205 / u^*, u^*$: ノズルスロートにおける流速)⁽²⁾と相対湿度 ϕ_0 の関係を示す。図より、 $R^*=155\text{mm}$ の場合、本実験範囲では $P \geq 0.10$ で凝縮衝撃波の自励振動が起こらず、 $P=0.05$ では固体壁の場合より高い $\bar{f}$ 値となることがわかる。 $P=0.05$ の場合に振動の周波数が高くなるのは、固体壁では凝縮衝撃波がスロートを通過して上流に伝ばした後に新たな凝縮衝撃波の発生が開始されるのに対し、多孔壁ではその吸込み効果のために凝縮衝撃波の生滅が短時間に行われるためと思われる。なお $R^*=400\text{mm}$ の場合にも $R^*=155\text{mm}$ の場合と同じ結論が得られたが、図中には $P=0.13$ の多孔壁の効果のみを示している。

4. まとめ

凝縮衝撃波の制御にキャビティ付多孔壁によるパッシブコントロールを適用し、本コントロールが特に凝縮衝撃波の自励振動の抑制に有効であることを示した。

Fig.7 Relation between pressure ratio p_2/p_1 and relative humidity ϕ_0 ($p_0=101.3\text{kPa}$, $T_0=303\text{K}$)

Fig.8 Typical examples of pressure change with time ($p_0=101.4\text{kPa}$, $T_0=300\text{K}$, $\phi_0=83\%$, $R^*=155$)

Fig.9 Relation between non-dimensional frequency and relative humidity ($p_0=101.4\text{kPa}$, $T_0=300\text{K}$)

文献 (1)松尾・ほか3名, 機械の研究, 36-1(1984), 73. (2)松尾・ほか3名, 機械の研究, 36-5(1984), 642. (3)瀬戸口, S. Raghunathan, 機械の研究, 43-4(1991), 463. (4)瀬戸口, S. Raghunathan, 機械の研究, 43-5(1991), 566. (5)Matsuo, K., et al., Proc. 2nd KSME-JSME Fluids Eng. Conf., (1990), 64. (6)Deckker, B. E. L., et al., Proc. 14th Int. Symp. on Shock Tubes & Waves, (1983), 239.