24 超音速ノズルにおける凝縮衝撃波

九大総理工 松尾 一泰[○] 川越 茂敏 園田 圭介

Condensation Shocks in a Supersonic Nozzle

Kazuyasu MATSUO*, Shigetoshi KAWAGOE*, and Keisuke SONODA*

Condensation shocks caused by nonequilibrium condensation of moist air in a supersonic nozzle have been visualized by schlieren method and static pressure distributions along the nozzle center line have been measured. As the result, the effects of the relative humidity of moist air and the configuration of the nozzle on the shape of the condensation shock have been clarified.

The flow field has been also calculated numerically by the method of characteristics. Based on the experimental and calculated results, the mechanism of the formation of the condensation shock has been discussed in detail.

1. まえがき

他の蒸気に対して潜熱量が比較的大きい水蒸気や湿り空気などの凝縮性気体が超音速ノズルで急激に加速され膨張する場合、これらは飽和状態に達しても凝縮せず、過飽和状態となり非平衡凝縮が起こる。凝縮が起こると、微小な液滴が生成され、まわりの流体は凝縮に伴って発生する潜熱の影響を受けるが、放出される潜熱量がある程度以上大きい場合には、凝縮衝撃波が形成される⁽¹⁾。この現象は、蒸気タービンの翼列内の膨張流れなどに関連し、工学上重要な問題であるが、凝縮衝撃波の発生原因やその特性などについて不明な点が多い。

本研究では、大気吸込み式超音速風洞の測定部に取り付けた先細末広円弧ノズル内を、湿り空気が急激に膨張し、凝縮する場合の流れについて、シュリーレン法による流れの可視化と圧力計測を行った。更に本実験結果と、特性曲線法によって流れを数値的に可視化した結果⁽²⁾及び従来の光学観察の結果⁽³⁾とを合せて検討し、凝縮衝撃波の発生原因や特性及び凝縮衝撃波の形状へ及ぼす諸因子の影響を明らかにした。

2. 実験装置と方法

本研究で使用した大気吸込み式超音速風洞の概要を図1に示す。風洞は、貯気槽(15m³)、測定部(540mm)、真空タンク(2m³)から構成されている。測定部は、高さ60mm、幅38mmの矩形断面で、上壁には先細末広円弧ノズル(ハーフノズル)

* Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka, 816, Japan.

ル)が装着され、下壁には40mm間隔で半導体小形圧力変換器(PMS-5形, 1H, 豊田工機)が取り付けられている。

実験に際し、貯気槽内の圧力を大気圧に保ち、温度 T_0 と相対湿度 ϕ を、それぞれ電熱器と超音波加湿器を用いて、所定の値に設定し、真空タンクは670Pa(約5Torr)程度まで排気する。バルブ開放後の測定部における定常な超音速流れの持続時間は約5秒で、流れが定常になると、測定部下壁は、ステップモータにより、40mmを2秒間で駆動させられ、静圧が測定される。また同時に、シュリーレン法による流れの光学観察が行われる。

実験に使用した先端円弧ノズルは表1に示す種類で、ノズルのスロート高さ h^* はいずれのノズルも48mm(本実験ではハーフノズルを用いたので、ハーフノズルのスロート高さは24mm)であるが、ノズルの曲率半径 R^* はノズルN1, N2, N3の順に大きい。なお表中の $(1/T_0)(dT/dx)$ は、ノズルスロートにおける流れ方向の温度降下割合⁽⁴⁾で、ノズル内の流れを一次元流れと仮定して得られる計算値である。

3. 実験結果と考察

表1に示す種類のノズルについて、貯気槽内の圧力 p_0 と温度 T_0 を一定に保ち、相対湿度 ϕ を変化させた場合に、ノズル内の流れをシュリーレン法で可視化した結果を図2に示す。

まずノズルN1の流れについて説明しよう。相対湿度 ϕ がかなり小さい図(1a)では、流れ場に何のじょう乱も観察されないが、図(1b)では、スロートの少し下流に左上から右下に走る弱いじょう乱が観察される。これが湿り空気中の水蒸気の凝縮によって生じたじょう乱で、 ϕ が大きくなると、図(1c)に示すように、流れ場に衝撃波が形成される。この衝撃波が凝縮衝撃波である。相対湿度 ϕ が更に大きい流れでは、凝縮衝撃波は、図(1d)~(1f)に示すように、下壁の部分に垂直部分をもつ形状になるとともに、その発生位置が上流へ

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Nozzle	h^* mm	R^* mm	$1/T_0 \cdot dT/dx$ m ⁻¹
N1	48	80	-0.491
N2	48	160	-0.347
N3	48	400	-0.220

Table 1 Dimensions of nozzle and temperature gradient at nozzle throat

移動する。このような相対湿度の変化による凝縮衝撃波の形状の変化は、*pouring*の実験結果⁽⁵⁾と一致する。

図2(1C)の凝縮衝撃波は、その形状から、X形衝撃波と呼ばれているが、このようなX形の凝縮衝撃波は、図のノズルN1~N3の結果を比較して明らかのように、曲率半径が小さいノズルほど現れやすく、一般に、表1に示す温度降下割合が大きいノズルほど現れやすいといえる。逆に、断面積の変化が緩やかなノズルN3の場合には、図2(3C)~(3f)から明らかのように、凝縮衝撃波の形状は流れにほぼ垂直となる。

凝縮衝撃波の発生原因やその構造、及び相対湿度やノズル形状によって凝縮衝撃波の形状が変化する理由は後に述べる。

次に、測定部の下壁で測定した流れ方向の静圧分布の一例をノズルN2について、図3に示す。図の縦軸は局所静圧 p を貯気槽の圧力 p_0 で無次元化した値、横軸はノズルのスロートから下流方向への距離 x をスロート高さ d^* で除した値である。また図の曲線(a)~(f)の各圧力分布はそれぞれ、図2のノズルN2のシュリーレン写真[図(2a)~(2f)]に対応しており、左上から右下へ単調に減少している曲線

Fig.2 Schlieren photographs showing nozzle flow with condensation of moist air

は、流れの中に凝縮が起こらない等エントロピ膨張の場合の圧力分布を表す。

図3の曲線(a)~(f)のいずれにおいても静圧の値が、等エントロピ膨張の線より離れ始める点が非平衡凝縮の開始点で、凝縮が始まると、潜熱放出による加熱の影響で、静圧は急激に上昇し、最大値に達した後再び減少する。図から明らかなように、曲線(a), (b), ..., (f)の順に、すなわち相対湿度 ϕ が大きいほど、凝縮開始点はノズルのスロートに近づく。図2で説明したように、 ϕ が大きいほど凝縮衝撃波の発生位置がノズルのスロートに近づくのはこのためである。

また曲線(c), (d), (e), 及び(f)上の*印は、凝縮衝撃波の垂直部分の位置を示す。図から明らかなように、曲線(c)~(f)のいずれの場合にも凝縮衝撃波は凝縮開始点より下流にあり、各圧力分布において圧力が極大となる点より上流にある。流れの中に凝縮核が生成される領域の下流端は圧力の極大点の位置とほぼ等しく、それより下流では凝縮は進行するが、新たな凝縮核は生成されない^(b)。従って凝縮開始点から圧力の最大点までの領域を凝縮領域と呼ぶことができる。図3の曲線(c)~(f)の場合、凝縮衝撃波は凝縮領域の内部に位置するといえる。

次に、ノズル内の流れが超音速であるか亜音速であるかを調べるため、ノズルの上壁と下壁に薄いテープをはり、流れの状態をシュリーレン法で観察した。その結果の一例を図4に示す。これはノズルN2の場合で、図(a)の作動気体が乾燥空気($\phi=0\%$)の場合、上壁と下壁から発生したマッハ波がノズルのスロートより下流において観察される。すなわちノズルのスロートより上流は亜音速、下流は超音速である。図(b)の場合、スロートの少し下流に左上から右下に向けて走る極めて弱いような乱が凝縮により発生しているのが観察されるが、マッハ波の発生状態は図(a)と同じである。

次に図(c)や(d)では、凝縮衝撃波の下壁に近い部分は流れに垂直で、そのすぐ下流の領域ではマッハ波が観察されず、更に下流では再びマッハ波が発生し

Fig.3 Static pressure distributions at lower wall (Nozzle N2)

Fig.4 Observation of nozzle flow by Mach waves
 $P_0 = 101 \text{ kPa}$, $T_0 = 300 \text{ K}$
 Nozzle N2

ているのが観察される。このことは凝縮衝撃波の流れに垂直な部分を通過した流れは、そのすぐ下流では局所的に亜音速となるが、更に下流では再び超音速に加速されることを意味する。このように亜音速の流れが超音速に加速されるのは、凝縮衝撃波が凝縮領域内にあるため、流れが凝縮の効果を受けるためである。

なお、図(e)と(f)では、凝縮衝撃波は断面にわたって流れにほぼ垂直で、そのすぐ下流では亜音速であるが、更に下流では再び超音速に加速されているのがマッハ波の発生状態からよくわかる。

4. 数値解析による流れの可視化

上述の湿り空気の凝縮を伴う二次元定常超音速ノズル流れを特性曲線法で解き、ノズル内の流れを数値的に可視化した結果⁽²⁾を図5に示す。図は、ノズルの曲率半径 R が60mm、スロート高さ h が20mmの先細末広円弧ノズルに対し、ノズル入口の全圧 P_0 と全温度 T_0 をそれぞれ、101.3kPa、300Kとし、更に凝縮係数 $\alpha=0.05$ 、表面張力係数 $\sigma=1.0$ として、相対湿度 ϕ_0 を変化させた場合のノズル内の凍結マッハ線の状態である。図の横軸と縦軸は、それぞれノズルの中心線に沿うスロートから下流方向への距離 x と、それに垂直方向の距離 y をスロート高さ h で除した値である。なおゲージラインの位置 x はスロート下流0.2mmである。

図(1)より $\phi_0=30\%$ の場合、凝縮は起こるが、特に流れの変化は見られない。 $\phi_0=40\%$ の図(2)では、弱いじょう乱が斜めに現れているのが観察される。左上から中心線までのじょう乱は、凝縮領域内において潜熱放出による加熱の影響で発生した圧縮波で、中心線から右上までのじょう乱は、先の圧縮波で偏向された流れを調整するために生じた圧縮波である。このようにじょう乱が斜めに現れる理由は、ノズルの二次元性の影響で、ノズルの中心線に比べ、壁面上での凝縮がより早く起こるためと考えられる。 $\phi_0=45\%$ の図(3)では、圧縮波が強くなり、更に相対湿度が増加し、 $\phi_0=50\%$ の図4の場合には、発生した圧縮波の合体

(1) $\phi_0=30\%$

(2) $\phi_0=40\%$

(3) $\phi_0=45\%$

(4) $\phi_0=50\%$

Fig.5 Numerical visualization of nozzle flow with condensation

で斜め衝撃波が形成されており、これが凝縮衝撃波である。

5. まとめ

上述の結果から明らかなように、ノズル入口の相対湿度が比較的低い場合、凝縮衝撃波は、凝縮領域内において潜熱放出に伴う加熱の影響で発生した圧縮波の合体で形成され、流線に対し斜めの衝撃波となる。相対湿度が増加すると、凝縮開始点の上流への移動に加え、潜熱放出量が増加するため、サーマルブローキングが起こる。このために発生する凝縮衝撃波は流れにほぼ垂直の衝撃波となる。この垂直衝撃波のすぐ下流では、流れは局所的に亜音速となる。

ところで、図2から明らかなように、ノズルの流れ方向への断面積の増加割合が大きいほど、すなわち温度降下割合が大きいほど、凝縮衝撃波は斜め衝撃波となって現れる。逆に温度降下割合が小さいノズルでは、サーマルブローキングが起こりやすく、凝縮衝撃波の形状は流れに垂直となる。

以上、湿り空気が超音速ノズルで凝縮する際に発生する凝縮衝撃波について述べたが、水蒸気が超音速ノズルで膨張し凝縮する場合にも、同様に凝縮衝撃波が発生する。この一例⁽³⁾を図6に示す。図の4は湿り度を示し、図(b)と(c)は、それぞれ図2の(2d)と(2f)に対応する。このときの凝縮衝撃波の発生原因や特性なども、湿り空気の場合と同じである。

文 献

- (1) Wegener, P.P., Acta Machanica 21(1975), 65.
- (2) 松尾・ほか3名, 機講論, No. 838-2(1983), 123.
- (3) Ikeda, T. and Suzuki, A., Instn. Mech. Engrs. Conference Publication 3(1973).
- (4) 松尾・ほか3名, 機論, B, 49-437(1983), 108.
- (5) Pouring, A.A., Phys. Fluids, 8-10(1965), 1802.
- (6) 松尾・ほか3名, 機械の研究 投稿中

Fig.6 Schlieren photographs showing Laval nozzle flow with condensation of steam⁽³⁾