23 レーザホログラフィ干渉法による凝縮衝撃波の可視化

九大総理工

松尾一泰

川越茂敏

権 純範

滝谷俊夫

Visualization of a Condensation Shock Wave

by Laser Holographic Interferometry

Kazuyasu MATSUO*, Sigetoshi KAWAGOE*, Soon Bum KWON*, and Toshio TAKIYA*

A condensation shock wave caused by rapid expansion of moist air in a supersonic nozzle has been visualized by schlieren method and laser holographic interferometry. The flow field has been also calculated numerically by the method of characteristics and the distributions of static pressure along the nozzle axis have been measured. Based on these experimental and calculated results, the flow field in which a condensation shock wave has been clarified.

1. まえがき

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、過飽和の状態となり、やがて凝縮核が生成され、非平衡凝縮が起こる。凝縮が起こると、まわりの気体は凝縮に伴って発生する潜熱の影響を受けるが、水蒸気や湿り空気など潜熱量が大きい凝縮性気体の凝縮では、凝縮衝撃波が発生する¹⁾。このような凝縮現象は蒸気タービン翼列内の膨張流れなどに関連し、工学的に興味ある問題であるが、凝縮衝撃波と凝縮開始点及び音速線の位置関係や、凝縮による損失など、まだ不明な点が多い。

本研究では超音速ノズル内で湿り空気が膨張し凝縮する流れについて、シュリーレン法とレーザホログラフィ干渉法により、流れの定量的な可視化を行った。さらに圧力計測と特性曲線法による流れの数値解析結果とを合せて考察し、流れの状態量の変化、凝縮開始線、凝縮衝撃波、及び音速線の位置関係を求め、凝縮衝撃波を伴う流れの機構を明らかにした。

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は図1に示すように、貯気槽(15m³)、測定部(流路断面60mm×38mm)、及び真空タンク(2m³)より構成され、測定部の上壁には先細末広円弧ノズル(ハーフノズル)が、下壁には半導体小形圧力変換器(PMS-5形、1H、豊田工機製)が取り付けられている。

実験に際し、貯気槽の圧力 p_0 及び温度 T_0 はそれぞれ大気圧及び大気温度に保ち、相対湿度 ϕ は蒸気発生器を用いて所定の値に設定し、真空タンクは670Pa(約5 Torr)程度に排気する。測定部下流のバルブ開放後に測定部において得られる定常な超音速流れの持続時間は約5秒で、この間に測定部の下壁はステップモータにより駆動され、軸方向の壁面静圧が測定される。これらの値はコンピュータで記憶処理される。

レーザホログラフィ干渉法による計測システムを図2に示す。レーザ光源(He-Neレーザ、20mW、6328Å、東芝製)はビームスプリッタで測定部を通る信号光と通らない参照光に分けられ、両光はほぼ等距離を伝ばした後、ホログラム乾板に達する。撮影には二重露光法を使用した。すなわち測定部に流れがない場合の信号光と参照光の干渉波面をホログラムに撮影しておき、そのままの状態に流れがある場合

* Graduate School of Engineering Science, Kyushu University, Kasuga, 816, Japan

の両光の干渉波面を重ねて撮影する。このホログラムを現像後、参照光と同じ光で再生すると、流れがある場合とない場合の波面が再生されて干渉し、縞模様を得ることができる。本実験では流れの全体的な様相を知るため、シュリーレン法も使用した。

実験に用いた先細末広円弧ノズルはノズルスロット高さ $h^*=48\text{mm}$ で、曲率半径 $R^*=80\text{mm}$ のノズルN1と $h^*=48\text{mm}$ で $R^*=160\text{mm}$ のノズルN2の2種類である。

3. 実験結果と考察

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_0 を変化させた場合に得られるノズル内流れのシュリーレン写真、等密度干渉縞写真、及び干渉縞写真のスケッチに基づく等密度線図をノズルN1とN2の場合に対してそれぞれ図3と4に示す。等密度線図に示す ρ/ρ_0 (ρ は局所密度、 ρ_0 は貯気槽内の密度)の値は壁面静圧の実験値から得られる値を基準値として求めた。なお縞間の密度差 $\Delta\rho$ は、レーザの波長 λ ($=6328\text{\AA}$)、風洞の幅 L ($=38\text{mm}$)、グランドストンディル定数 K ($=2.255 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$)より $\Delta\rho = \lambda / LK = 0.0739 \text{ kg/cm}^2$ である。等密度線図の $\uparrow$ 印は凝縮衝撃波の位置を、破線A及びBはそれぞれ壁面静圧分布より求めた壁面における凝縮の開始点及び非平衡凝縮の終了点²⁾から予測した凝縮の開始線及び終了線を示す。

まず図3の $\phi_0=40\%$ の場合、シュリーレン写真におけるノズルの上壁及び下壁にはったテープからのマッハ波の発生状態より、流れはスロット下流で超音速で、このことは等密度線図の密度の値 ($\rho/\rho_0=0.634$ の時 $M=1$)からも確認される。 $\phi_0=40\%$ の場合は等密度線図に示しているように凝縮が起こるが、シュリーレン写真及び干渉縞写真にはその影響は見られない。

$\phi_0=60\%$ の場合、シュリーレン写真からスロットの少し下流に左上から右下に走る弱いじょう乱(衝撃波)が観察され、この部分の干渉縞にも変化が見られるが、流れはスロットの下流全域で超音速である。 $\phi_0=91\%$ の場合、シュリーレン写真からノズルの下壁の部分に垂直部分を持った凝縮衝撃波が観察される。この垂直部分のすぐ下流ではマッハ波は消滅しており、さらに下流で再びマッハ波が現れている。これは垂直部分の下流で一たん亜音速となった流れが再び超音速に加速されることを示している。このことは図(C)の領域⑦の超音速流中に領域⑥で示す亜音速領域が存在することからも言える。領域⑥が亜音速領域となる理由は後述する。また図(C)において非平衡凝縮領域は ϕ_0 の値が大きいくほどスロットに近づき、 $\phi_0=60\%$ と 91% のいずれの場合も凝縮衝撃波は、非平衡凝縮領域の中に位置する。

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Laser holography system

Fig. 3 Optical observation of flow (Nozzle N1 ($R^*=80\text{mm}$, $h^*=48\text{mm}$), $T_0=280.4\text{K}$, $p_0=102.3\text{kPa}$)

Fig. 4 Optical observation of flow (Nozzle N2 ($R^*=160\text{mm}$, $h^*=48\text{mm}$), $T_0=280.4\text{K}$, $p_0=102.3\text{kPa}$)

図4においても $\phi_0=40\%$ の場合、シュリーレン写真ではマッハ波以外に特に何も観察されないが、 $\phi_0=60\%$ ではスロートの下流に凝縮による弱い衝撃波が発生している。この衝撃波は $\phi_0=91\%$ ではスロート近くに位置し、下壁部分に垂直部分をもつ形状となる。この場合の等密度線図には亜音速領域Cが現れる。

図3と4を比較すると、同じ相対湿度では非平衡凝縮領域はノズルN2の方が広く、凝縮衝撃波の垂直部分の長さも長い。従って図4の $\phi_0=91\%$ の等密度線図における領域Cは図3のそれより広い。これはノズルN1の方が流れの温度低下割合が大きく、従って凝縮量の増加割合も大きいのである³⁾。

図3と4の $\phi_0=91\%$ における等密度線図の領域Cが亜音速域であることを確認するため、図2の参照光の光路中に光路長が1/4波長だけ変化するように加工された波長板^{4,5)}をそう入し、干渉縞写真を撮影した。この結果をノズルN1の $\phi_0=91\%$ の場合に対して図5(a)に示す。図(b)は波長板をそう入しない場合、図(c)は図(a)と(b)の等密度線を重ねたもので、図の破線及び実線はそれぞれ、図(a)と(b)のスケッチである。図(c)より、破線の方が対応する実線より密度が高い方にずれていることがわかる。従って領域Aの密度は領域④の密度より1縞分高く、領域③の密度と同じで、領域Aは亜音速域であると言える。

次に圧力計測と等密度干渉縞写真より得られる測定部下壁における流れ方向の壁面静圧および壁面近傍でかつ境界層の外側の密度の分布をノズルN1についてそれぞれ図6(a)と(b)に示す。これらの図の縦軸はそれぞれ貯気槽の圧力 p_0 及び密度 ρ_0 で無次元化してあり、横軸はスロートからの距離 x をスロート高さ h^* で除した値である。図(b)の破線は図(a)の静圧分布を用い、流れは定常次元非粘

Fig.5 Interferogram using wave length plate

Fig.6 Variation of flow properties
(Nozzle N1, $T_0=280.3\text{K}$, $p_0=102.0\text{kPa}$)

Fig.7 Comparisons of the results of numerical analyses and experiments ($\phi_0=45\%$)

性で、湿り空気各成分は熱的に完全な気体であると仮定して求めた局所密度 ρ の計算値である。静圧は $\phi_0=0\%$ の場合図 (a) の黒丸印で示すように単調に減少するが、 $\phi_0=60\%$ と 91% のいずれの場合もある点で $\phi_0=0\%$ の曲線からずれははじめ、極大値をとる変化をする。このずれははじめの点が凝縮開始点、極大値の点が非平衡凝縮の終了点で²³⁾、 ϕ_0 が大きいほど、開始点はスロートに近い。この傾向は図 (b) の密度分布についても同様である。密度の計算値は $\phi_0=60\%$ の場合実験値と比較的良好に一致しているが、 $\phi_0=91\%$ の場合は一致していない。これは ϕ が大きい場合、凝縮衝撃波が強く、従って壁面境界層との干渉の程度も強くなり、壁面静圧から求めた計算値はこの影響を受けるためと思われる。

4. 数値計算による流れの可視化

湿り空気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⁶⁾と実験結果との比較を図7 (a)~(d) に示す。図の横軸と縦軸はそれぞれスロートからの距離 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。図 (a) は凍結マッハ線の計算結果で、スロートの少し下流に左上から右下に走るような乱とその中心線からの反射波が観察される。これが凝縮衝撃波で、その形状は図 (b) のシュリーレン写真の形状とよく一致している。また図 (c) の等密度線の計算結果は図 (d) の実験結果とかなり良く一致している。

5. 流れの機構

以上の結果から得られる非平衡凝縮領域と凝縮衝撃波、及び音速点のノズルの中心軸における位置関係をノズル N1 の場合についてまとめると、図8 になる。図

の横軸はスロートからの距離 x 、縦軸は相対湿度 ϕ で、 $\times$ 印が凝縮衝撃波、 $\triangle$ 印が音速点

Fig.8 Results of condensation region and shock wave

の位置を示す。非平衡凝縮領域は ϕ_0 の増加とともにスロートへ近づき、その幅が次第に小さくなる。凝縮衝撃波は本実験範囲では非平衡凝縮領域内に位置する。 $\phi_0 \geq 80\%$ では音速点が発生するが、その点は非平衡凝縮領域の終了点とほぼ一致する。

凝縮によって衝撃波が発生しない場合は、図3及び4で示したように凝縮領域を通して流れは超音速である。凝縮衝撃波が発生する場合の流れを図9に示す。図(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれノズルN2で $\phi_0 = 91\%$ の場合のシュリーレン写真、干渉縞写真、壁面静圧分布及びノズル内の流れの模式図である。図(c)の圧力分布からわかるように、凝縮が起こると圧力は $\phi_0 = 0\%$ の曲線よりはずれ極大値をもつ変化をし、流れは図(d)に示すように凝縮衝撃波の垂直部分の直後では一たん亜音速となるが、凝縮による加熱効果で加速されて $M=1$ に達し、その後は断面積拡大の効果で加速され、超音速となる。

文献

- (1) Wegener, P.P., "Nonequilibrium Flow with Condensation", Acta Mechanica 21(1975), 65.
- (2) 松尾・ほか5名, "凝縮衝撃波に関する研究(第2報凝縮領域との関連)", 機講論, No.848-2 (1984), 124.
- (3) Wegener, P.P. and Pouring, A.A., "Experiment on Condensation of Water Vapour by Homogeneous Nucleation in Nozzles", Phys. Fluids, 7-3(1964), 352.
- (4) Sommargren, G.E., "Double-exposure holographic Interferometry using commonpath reference waves", Appl. Optics, 16-6(1977), 1736.
- (5) Hariharan, P., "A Digital Phase-measurement System for Real Holographic Interferometry", Optics Communication, 42-6 (1982), 25.
- (6) 松尾・ほか2名, "超音速ノズルにおける凝縮衝撃波", 流れの可視化, 3-10 (1983), 233.

Fig.9 Flow mechanism of condensation with shock wave (Nozzle N2, $\phi_0 = 91\%$)