凝縮衝撃波に関する研究*

(第2報, 凝縮領域との関連)

松尾一泰**, 川越茂敏**, 園田圭介***
権純範**, 山本秀樹†, 杉山英一††

Studies of Condensation Shocks

(2nd Report, Relation between Condensation Shock and Condensation Zone)

by Kazuyasu MATSUO, Shigetoshi KAWAGOE, Keisuke SONODA
Soon Bum KWON, Hideki YAMAMOTO, and Eiichi SUGIYAMA

A rapid expansion of moist air or steam in a supersonic nozzle gives rise to condensation phenomena and a condensation shock wave appears in the supersonic section of the nozzle. In the first paper, the mechanism of the formation of a condensation shock wave was studied. In the condensing process, nonequilibrium process of condensation by homogeneous nucleation is followed by equilibrium process of condensation where saturated expansion takes place. In the present study, the nonequilibrium condensation zone has been experimentally investigated, and the relation between the position of the condensation shock wave and the nonequilibrium condensation zone has been clarified. Furthermore, the flow fields of condensation zone with and without a condensation shock wave have been well explained by the results of optical observations and pressure measurements.

Key Words: Compressible Flow, Homogeneous Condensation, Condensation Shock, Condensation Zone, Moist Air, Experimental Study

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膨張し, ある程度過飽和状態に達すると, 流れの中に微小な凝縮核が多数生成される。その後凝縮核のまわりに蒸気分子がつぎつぎに付着し凝結することによって凝縮核が成長し, 凝縮が進行する⁽¹⁾。凝縮核が生成される過程は非平衡の凝縮過程であり, それに続く凝縮核の成長過程は平衡な凝縮過程である⁽¹⁾。

従来, 凝縮核の生成や成長に関して多数の研究がなされているが^{(1)~(5)}, 工学的には非平衡凝縮や平衡凝縮が起こる領域の長さや, その内部における流れの状態量の変化に関する定量的資料が重要である。しかるに現在のところこれらの資料にとぼしく⁽⁶⁾⁽⁷⁾, また凝縮による潜熱の放出量がある限界値を超える場合に発生する凝縮衝撃波と凝縮領域との関連についても, 現在よくわかっていない。

前報⁽⁸⁾では, 凝縮衝撃波の発生機構を実験と数値計算によって明らかにした。本報では, 非平衡凝縮が起こる領域を明確にするとともに, 凝縮衝撃波の発生位置と非平衡凝縮領域との相対的位置関係や, 凝縮衝撃波が発生する場合の凝縮領域内の流れの機構などを明らかにした。

2. 実験装置と方法

本研究で用いた実験装置と方法は, 前報⁽⁸⁾と同じである。前報で行った光学観察に加えて, 本報では圧力計測も行った。測定部は図1に示すように, 紙面に垂直方向の幅が38mmで, 高さ60mmのく形断面の上壁に, 曲率半径 R^* の先細末広円弧ノズル(ハーフノズル)を取りつけた構造で, ノズル中心線に相当する下壁には, 半導体小形圧力変換器が取り付けられている。

図1 測定部の詳細

* 昭和59年5月9日 九州支部北九州地方講演会において講演, 原稿受付 昭和59年9月6日。

** 正員, 九州大学総合理工学研究科 (〒816 春日市春日公園6-1)。

*** 正員, 三菱重工業(株) (〒850-91 長崎市飽の浦町1-1)。

† 日本アイ・ビー・エム(株) (〒892 鹿児島市大黒町1-3)。

†† 准員, (株)東芝 (〒230 横浜市鶴見区末広町2-4)。

下壁は約5sの定常な超音速流れの持続時間中に、流れ方向にステップ状に移動可能で、下壁の静圧が2mmの間隔で測定できるようになっている。本研究に用いたノズルは4種類で、ノズルのスロート高さ h^* と曲率半径 R^* を、表1に示す。

実験は貯気槽の湿り空気的全圧 p_0 を大気圧とし、全温度 $T_0=282\pm1$ K の一定に保って行った。なお凝縮に及ぼす温度 T_0 の影響を調べるためノズル N3 については、 T_0 が 302 ± 1 K の場合についても実験を行った。

なお、光学撮影を行う際は、ノズルの表面と下壁に薄いテープをはり、マッハ波の有無により流れが亜音速か超音速かを判断できるようにした。

3. 実験結果と考察

3.1 圧力計測と光学観察 貯気槽の湿り空気的全圧 p_0 を 99.8 kPa, 全温度 T_0 を 302 K の一定値に保ち、相対湿度 ϕ_0 を 32% と 60% とした場合のノズル

表 1 供試ノズルの寸法

Nozzle	h^* mm	R^* mm
N1	28.0	80
N2	48.0	80
N3	48.0	160
N4	48.0	400

(a) シュリーレン写真

ル N3 における流れのシュリーレン写真と壁面静圧を、それぞれ図2(a)と(b)に示す。図2(b)の横軸はノズルスロートからの距離 x , 縦軸は局所静圧 p と全圧 p_0 の比で、図には乾燥空気 ($\phi_0=0\%$) の場合の静圧分布も示してある。また図の静圧分布を用い、流れは定常一次元非粘性で、湿り空気の各成分は熱的に完全な気体であると仮定して、連続、運動量、およびエネルギーの各保存則を用いて計算⁽⁹⁾した、気流マッハ数 M , 過飽和度 S , および液相の質量比 g の値も図に示してある。

図2(b)より静圧 p は $\phi_0=32\%$ と 60% のいずれの場合も、乾燥空気の曲線に沿って減少するが、↑印で示す点から離れ始め、いったん増加して、↓印で示す点でピーク値に達した後、再び減少する。↑印の点の x の値は過飽和度 S が最大となる点、および凝縮量 g が増加し始める点の x の値とほぼ一致している。一般に過飽和度 S が最大となる点が凝縮開始点と定義されるが⁽³⁾、上述の結果より↑印の点を凝縮の開始点と考えてもよいことがわかる。過飽和度 S は凝縮開始点より急激に減少し、最小値に漸近するが、↓印の点はその最小値の点とほぼ一致している。したがってこの点を核の生成を伴う凝縮すなわち非平衡凝縮が終了する点と考えることができる。

以上により、図2(b)の↑印と↓印で示す間の領域を非平衡凝縮領域とみなすことができ、このように考えれば壁面静圧分布からその長さを決定できる。なお図2(b)から明らかなように非平衡凝縮領域の下流においても g は増加し続ける。これは、非平衡凝縮領域

(b) 流れの状態量の変化

図2 シュリーレン写真と流れの状態量の変化 ($p_0=99.8$ kPa, $T_0=302$ K, ノズル N3)

において生成された凝縮核のまわりに蒸気分子が凝結して、平衡凝縮が進行していることを示しており、平衡凝縮は流れの中に含まれる凝縮成分がすべて凝縮し、 g の増加が終わるまで続く。

上述のように、凝縮領域を非平衡凝縮領域とそれに続く平衡凝縮領域の二つに分けて考えると、非平衡凝縮領域の圧力分布は、凝縮が起こらない等エントロピ流れの場合の圧力分布よりずれ、ピーク値に達する変化をし、平衡凝縮領域では、圧力は単調に減少する。したがって凝縮によって流れの圧力分布が受ける影響は、その大部分が非平衡凝縮領域において現れる。

次に、 $\phi_0=32\%$ の場合、図2(b)の静圧分布から凝縮が起こっているのは明らかであるが、図2(a)のシュリーレン写真では、凝縮による影響は特に何も観察されない。またこの場合の流れは、マッハ波の発生状態から明らかにスロート下流の全域で超音速である。

$\phi_0=60\%$ の場合、図2(a)の写真に垂直状の凝縮衝撃波が観察される。これは図2(b)に示すように非平衡凝縮領域の中に位置する。このように垂直状の凝縮衝撃波が発生すると、図2(a)の写真からわかるように、衝撃波の直後ではマッハ波は消滅し、少し下流で再びマッハ波が観察される。このことは、衝撃波の直後では流れはいったん亜音速となり、その下流で再び超音速に加速されることを示しており、図2(b)のマッハ数分布においてもこのことが確認される。この亜音速から超音速への加速機構については後述する。

3.2 凝縮開始点 凝縮開始点における壁面静圧 p の実験値と初期状態量から、開始点における温度 T と蒸気圧力 p_0 を求めた。その結果を他の湿り空気および水蒸気に対する実験結果^{(9)~(15)}とともに図3に示

図3 凝縮の開始点

す。図3のTは三重点で、各曲線の意味は図に示すとおりである。本実験結果は従来の実験結果と良く一致し、飽和蒸気線の左側に位置している。凝縮開始点における状態量は、ノズルにおける流れの温度降下割合⁽⁹⁾に依存するが、本実験に用いた四つのノズルでは、その違いは現れなかった。

3.3 非平衡凝縮領域 前述の結果に基づき、圧力分布から非平衡凝縮領域の長さ δ_{nc} を求めた。その結果を相対湿度 ϕ_0 に対して図4に示す。図の白印はノズル上流の湿り空気的全温度 $T_0=282\text{ K}$ 、黒印は $T_0=302\text{ K}$ の実験結果で、全圧 p_0 はいずれも 101 kPa である。図4よりいずれのノズルについても、 δ_{nc} は ϕ_0 の増加とともに減少する。これは ϕ_0 が大きいほど、非平衡凝縮領域における液相の質量比 g の増加割合が大きく⁽⁹⁾、圧力の立ち上がりが急激になるためと思われる。また白印で示すノズルN1~N4の実験結果について考えると、同じ h^* のノズルN2~N4に対しては、 R^* が小さいほど、また同じ R^* のノズルN1とN2に対しては h^* が小さいほど、 δ_{nc} は小さい。これは R^* と h^* が小さいほど、ノズルにおける流れの温

図4 凝縮領域の長さ相対湿度との関係

図5 非平衡凝縮領域の長さの無次元化 ($p_0=101.6\sim102.3\text{ kPa}$, $T_0=282\text{ K}$)

度降下割合⁽⁹⁾が大きく、この値が大きいくほど g の増加割合が大きいためと思われる。図4のノズル N3 の黒印の実験値は、白印の実験値に比べ約 30% ほど小さい。これは同じ相対湿度でも温度が高いほうが同一体積中に含まれる水蒸気の量が多いため、凝縮に及ぼす温度 T_0 の影響はかなり大きい。

図4の同一温度、すなわち白印の実験値 δ_{nc} を、先細末広円弧ノズルの代表長さ $l = R^{0.205} \cdot h^{0.795(16)}$ で無次元化すると、図5のようにほぼ一つの曲線上にプロットされる。図5の黒印は、本実験で得られた凝縮開始点から凝縮衝撃波までの距離 δ_s と l の比で、この δ_s/l もほぼ一つの曲線上にプロットされる。

従来、非平衡凝縮領域の長さについて議論した研究は見当たらない。非平衡と平衡を含む全体の凝縮領域

については文献(6)で述べられており、同文献では凝縮の開始点は本論文の定義と同じで、終了点は凝縮によって生成される液相の質量比 g の分布を、図2で述べた計算法により求め、 g の値がほぼ一定に落ちつく点としている。このようにして得られた凝縮領域の長さは、絶対湿度とともに増加する。本実験結果および上述の文献(6)の結果を総合すると、非平衡凝縮領域の長さは、 ϕ_0 の増加とともに小さくなるが、凝縮領域全体の長さは、 ϕ_0 の増加とともに増加するといえる。

3・4 凝縮衝撃波と非平衡凝縮領域との関連 非平衡凝縮領域と凝縮衝撃波の位置関係の代表例を、ノズル N2 の場合に対して図6に示す。図6の横軸はスロートからの距離 x 、縦軸は相対湿度 ϕ_0 で、斜線を施した部分が非平衡凝縮領域、黒丸印が凝縮衝撃波を示す。 ϕ_0 が増加すると、ある相対湿度 ϕ_0 で凝縮が起こり、 ϕ_0 の増加とともに非平衡凝縮領域はスロートへ近づき、その長さも短くなる。また $\phi_0 > 45\%$ では凝縮衝撃波が発生し、その位置は ϕ_0 が小さい場合、非平衡凝縮領域内の後方に位置するが、 ϕ_0 の増加とともに前方に位置するようになる。これは ϕ_0 の増加によって、凝縮衝撃波の強さが増加するためと思われる。 $\phi_0 > 90\%$ では衝撃波は凝縮領域内に定在できず、スロートを通して上流へ伝ばし、ノズル内に凝縮による流れの振動が生ずる⁽¹⁶⁾。

以上の圧力計測と光学観察の実験結果に基づき、凝縮衝撃波が発生しない場合と、発生する場合の凝縮を伴う流れの機構を模式的に示すと、それぞれ図7(a)、(b)のようになる。図7(a)では静圧は凝縮に

図6 凝縮領域と凝縮衝撃波
(ノズル N2, $p_0 = 101.6$ kPa, $T_0 = 282$ K)

図7 凝縮を伴う流れの機構

より増加し、非平衡凝縮領域において凝縮による加熱効果により流れの減速が起こるが、スロートより下流のすべての領域で流れは超音速である。

図7(b)は凝縮衝撃波が発生する場合で、図には境界層の効果のない主流の流線に沿う圧力分布の予想線も示してある。図7(b)の衝撃波直後の亜音速流れは、凝縮による強い加熱効果を受けて加速され、 $M=1$ に達し、その後断面積の拡大による加速効果で超音速となる。図7(b)の $M=1$ となる点は、図2からもわかるように、圧力のピーク点の少し下流にある。

4. 結 論

湿り空気が超音速ノズルで急激に加速膨張する際に生ずる凝縮現象について、先細末広円弧ノズルを用いて実験的に研究し、非平衡凝縮領域の長さや、凝縮衝撃波の発生位置、および凝縮衝撃波が発生する場合の流れの機構などを明らかにした。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) ノズル内で凝縮が起こると、壁面における軸方向の静圧分布は、ある点から凝縮が起こらない場合の静圧分布よりずれ始め、ピーク値に達した後、単調に減少する。凝縮核が生成される非平衡凝縮領域は、このずれ始めの点からピーク値までの領域と考えても大きな誤差は生じない。

(2) 上記のように考え、圧力分布から求めた非平衡凝縮領域の長さ δ_{nc} は、温度降下割合が大きいノズルの場合ほど、また相対湿度 ϕ_0 が大きいほど短い。またノズル上流の全温度 T_0 が高いほど長さは短くなる。同一の T_0 に対する長さ δ_{nc} の実験値をノズルの代表長さ l で無次元化すると、ノズルの種類によらず、 δ_{nc}/l は ϕ_0 に対して一つの曲線上にプロットされ

る。

(3) 凝縮衝撃波は、本実験範囲では非平衡凝縮領域内に発生し、相対湿度が小さい場合には非平衡凝縮領域内の後半部に位置するが、相対湿度の増加とともに領域内の前方に位置するようになる。

(4) 垂直状の凝縮衝撃波が発生する場合、その直後は流れは亜音速であるが、さらに下流では超音速に加速されることをマッハ波の有無によって示し、その流れの機構を定性的に説明した。

文 献

- (1) Wegener, P. P., *Nonequilibrium Flow*, Part 1(1969), 163, Marcel Dekker.
- (2) Hill, P., *J. Fluid Mech.*, 25-3 (1966), 593.
- (3) 森・河田, 機誌, 72-602(昭44), 374.
- (4) Wegener, P. P. and Parlange, J. Y., *Naturwissenschaften*, 57-11(1970), 525.
- (5) Blythe, P. A. and Shih, C. J., *J. Fluid Mech.*, 76-3 (1976), 593.
- (6) Stepchikov, A. A., *ARS J. Suppl.*, (1960), 695.
- (7) Yablounik, R. M. and Kachuriner, Yu. Ya., *Heat Transf. Sov. Res.*, 6-1 (1974), 98.
- (8) 松尾・ほか3名, 機論, 50-459, B (昭59), 2577.
- (9) Wegener, P. P. and Pouring, A. A., *Phys. Fluids*, 7-3(1964), 352.
- (10) Jaeger, H. L., ほか3名, *J. Chem. Phys.*, 51-12(1969), 5380.
- (11) Gyarmathy, G. and Meyer, H., *VDI Forschungsheft*, 508 (1965).
- (12) Yellot, J. I. and Rochester, N. Y., *Trans. ASME*, 56 (1934), 411.
- (13) Rettaliata, J. T., *Trans. ASME*, 58 (1936), 599.
- (14) Binnie, A. M. and Woods, N. W., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 138 (1939), 229.
- (15) Moses, C. A. and Stein, G. D., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 100-3 (1978), 311.
- (16) 松尾・ほか3名, 機論, 49-437, B(1983), 108.