

217 管内流れの非均一凝縮に関する数値的研究

Numerical Study of Heterogeneous Condensation in the Internal Flow Fields

○正 松尾 繁 (佐賀大) 正 田中 征将 (佐賀大院)
正 瀬戸口俊明 (佐賀大)

Shigeru MATSUO, Saga University, 1 Honjyo-machi, Saga-shi, Saga 840-8502, Japan
Masanori TANAKA, Toshiaki SETOGUCHI, Saga University

Key Words : Compressible Flow, Internal Flow, Heterogeneous Condensation, Simulation

1. 緒言

水蒸気や湿り空気などの凝縮性気体が、超音速ノズルなどで急激に加速膨張する際の凝縮現象については、従来多くの解析と実験が行われている⁽¹⁾⁻⁽²⁾。一方、非定膨張波内で発生する凝縮現象については、衝撃波管を利用した研究が行われている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

著者らは、衝撃波管を用いた均一凝縮現象の数値的研究において、圧力の過渡的変化と凝縮開始点の関係を明らかにした。また、衝撃波管で凝縮が生ずると膨張波背後の圧力と衝撃波マッハ数に影響を及ぼすことを示した⁽⁶⁾。しかし、非均一凝縮⁽⁶⁾が生ずる際の衝撃波管内流れ場に関する情報は少なく、特に凝縮核や液滴量の分布についてはほとんど論じられていないのが現状である。

本研究では、湿り空気が非定常膨張波で加速膨張される際に生ずる非均一凝縮現象を考慮した衝撃波管内流れの数値計算を行った。また、管内で生ずる凝縮核や液相の質量比などの変化を調べることで流れ場の様相を明らかにするとともに、衝撃波マッハ数に及ぼす高圧室における固体微粒子の初期数密度の影響を示した。

2. 数値計算法

図1は計算の対象としている衝撃波管の詳細図を示す。本計算で使用した衝撃波管の全長 L と高さ h^* は、それぞれ1000 mmと38 mmであり、低圧室側管端より300 mmの位置に隔膜がある。なお、原点($x=0$ mm)を隔膜の位置とし、高圧室を添字4で、低圧室を添字1で示す。高圧室の初期圧力 p_4 (=101.3 kPa)と低圧室の初期圧力 p_1 との比 p_4/p_1 は、6の一定とした。また、高圧室初期温度 T_4 は293 Kとし、初期相対湿度 ϕ_4 は、20%~80%とした。空気中に含まれる固体微粒子の初期数密度 $n_{het,4}$ は $1.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ と $1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ とした。固体微粒子の半径は $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$ とした。

本解析においては、問題を簡単化するため、凝縮粒子、固体微粒子と混合気体との間には、速度スリップは存在せず、相間のエネルギー緩和過程は考慮しない。凝縮粒子と固体微粒子の圧力に対する寄与は無視する。すべての固体

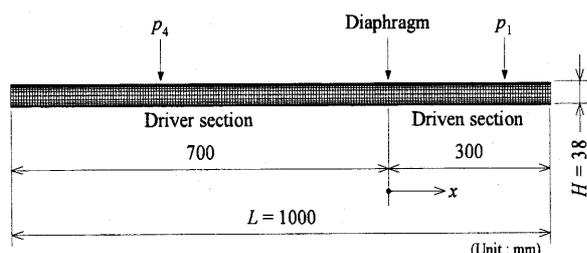


Fig. 1 Computational grid

微粒子の表面は滑らかでその形状は球とする。また、すべての固体微粒子は熱的、化学的、および電氣的に不活性である。このような仮定をもとに、本解析において用いた基礎方程式は、連続の式、二次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式、エネルギー式、および液相の質量比の増加割合を示す式⁽³⁾の無次元保存形表示式である。なお、均一凝縮と非均一凝縮による液相の質量比はそれぞれ g_{hom} と g_{het} で与えられ、流れ場における液相の質量比の総量 g_{total} は、これらの和で与えられる⁽⁷⁾。

計算は、一般曲線座標系表示された支配方程式を用いるとともに、Roe の近似 Riemann 解法を応用した空間三次精度 MUSCL 型有限差分 TVD スキーム⁽⁸⁾を適用して行った。また、粘性項は二次精度中心差分で評価した。時間積分には、二次精度の時間分割法を用いた。また、乱流モデルには、Baldwin-Lomax モデルを使用した。衝撃波管の計算格子点数は 1001×61 である。なお、本計算手法の有効性については、文献(5)で示している。

3. 結果と考察

図2は、 $n_{het,4} = 0 \text{ m}^{-3}$ ($\phi_4 = 80\%$ 、均一凝縮に対応)における管軸方向の圧力 p 、液相の質量比 g 、核生成率 I_{hom} 、および過飽和度 S の分布の時間変化を示す。なお、 $x/H = 0$ より左側が高圧室側を示しており、図中の矢印で示す方向は時間進行方向である。

図より、破膜直後から隔膜近傍には凝縮核が発生し、膨張波の伝ばとともに I_{hom} の極大値は上流側へ移動する。これと同時に g の増加開始点(点c)と S の極大値の位置も上流側へ移動しているのがわかる。さらに、時間の経過とともに圧力が等エントロピー膨張線(図中の破線)より離れ始める点(点a)と g の増加開始点(点c)との距離が離れていくことがわかる。なお、点aが点cより上流側に位置するのは、流れ場が亜音速であることから、 g の発生による潜熱の影響(圧力波)が点cより上流側へ伝わることを意味している。ところで、凝縮が生ずる場合の衝撃波背後の圧力は、凝縮が生じない場合($\phi_4 = 0\%$)の衝撃波背後の圧力 p_2 と比較し僅かに増加(Δp)しているのがわかる。これは、凝縮によって発生する放出潜熱の影響によるものと考えられる。

図3は、 $n_{het,4} = 1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ ($\phi_4 = 80\%$)における管軸方向の圧力 p 、液相の質量比 g 、過飽和度 S 、および核生成率 I_{hom} の分布の時間変化を示す。図より、時間の経過とともに g の増加開始点(点c)は上流側へ移動しており、この点は圧力が等エントロピー膨張線より離れ始める点とほぼ一致しているのがわかる。また、過飽和度 S は、時間の経過とともに1.0に近づくことがわかる。これは、凝縮が飽和蒸気線近傍で起こることを意味している。さらに、点cより下流側に圧力が増加する位置(点b)が確認でき、時間の経過とともにその増加量は減少することがわかる。

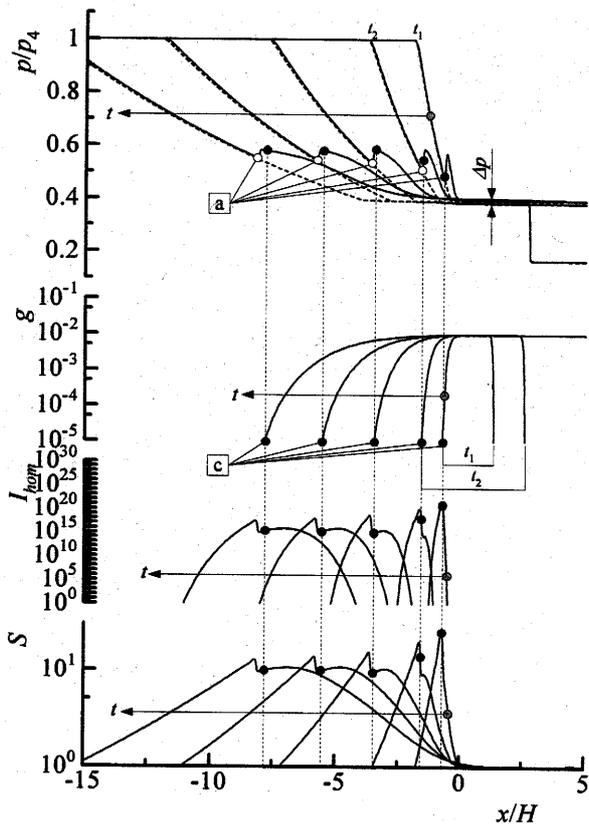


Fig. 2 Distributions of static pressure, condensate mass fraction, nucleation rate and the degree of supersaturation ($\phi_4 = 80\%$, $n_{het,4} = 0\text{ m}^{-3}$)

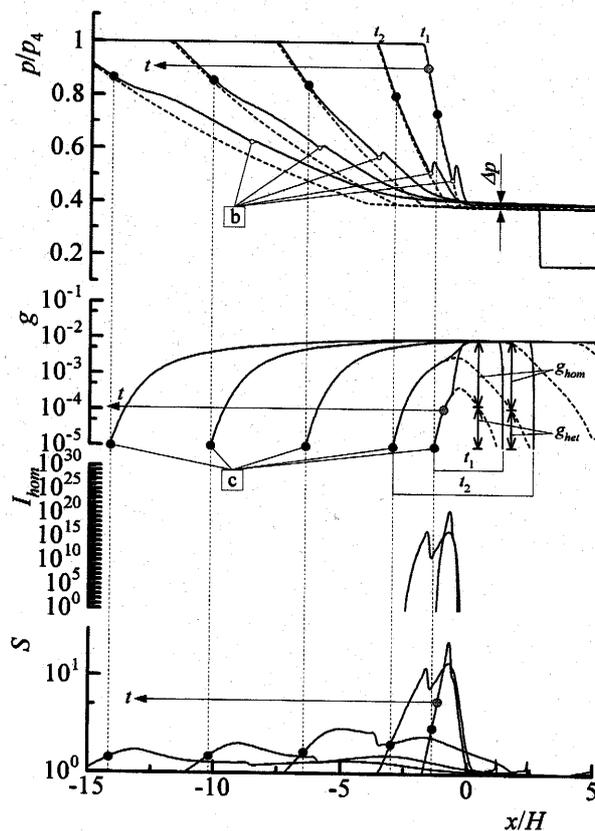


Fig. 3 Distributions of static pressure, condensate mass fraction, nucleation rate and the degree of supersaturation ($\phi_4 = 80\%$, $n_{het,4} = 1.0 \times 10^{14}\text{ m}^{-3}$)

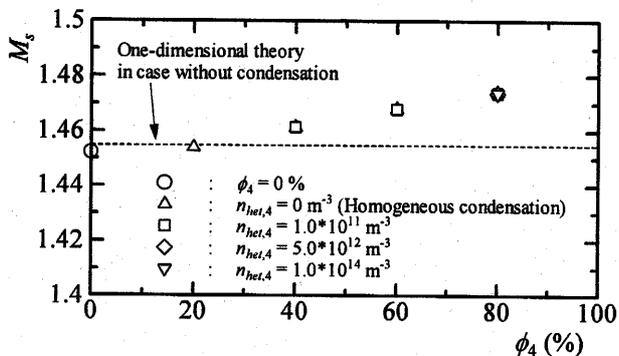


Fig. 4 Effect of ϕ_4 on shock Mach number M_s

凝縮核は、図2の場合と異なり、破膜直後($t = t_1, t_2$)に隔膜の凝縮核は、図2の場合と異なり、破膜直後($t = t_1, t_2$)に隔膜の近傍でのみで発生しており、上流側では全く見られないことがわかる。また、隔膜近傍ではこの影響(均一凝縮)で g が増加(g_{hom})し、圧力が急激に増加することが確認できる。なお、時間の経過とともに圧力増加量が小さくなるのは、非均一凝縮の影響が支配的となるためと考えられる。

図4は低圧室側へ伝ばする衝撃波マッハ数 M_s と相対湿度 ϕ_4 の関係を示した図である。図より、衝撃波マッハ数は、相対湿度の増加とともに、凝縮が生じない場合に比べて増加していくことがわかる。これは、相対湿度が大きくなるにつれて放出される潜熱放出の効果(圧力波の発生)が強くなる

なり、衝撃波を強めるためであると考えられる。また、図中には $n_{het,4}$ の影響も示している。図より明らかなように、 ϕ_4 が同じ場合、 $n_{het,4}$ による M_s の変化はほとんど見られないことがわかる。

4. まとめ

本研究では、湿り空気が衝撃波管内の非定常膨張波で加速膨張される際に生ずる非均一凝縮現象の数値計算を行った。その結果、圧力の過渡的变化と液相の発生との関係を明らかにした。また、衝撃波管で凝縮が生ずると衝撃波マッハ数に影響を及ぼすが、相対湿度が同じ場合には $n_{het,4}$ による M_s の変化はほとんど見られないことがわかった。

文献

- (1) Wegener, P. P. and Mach, L. M., Adv. in Appl. Mech., 5(1958), 307-447, Academic Press.
- (2) 松尾・他3名, 機論, 50-459, B(1984), 2577-2582.
- (3) Sislian, J. P., UTIAS Report No.201(1975).
- (4) 松尾・他3名, 機論, 47-421(1981), 1691-1697.
- (5) Matsuo, S., et al., Proc. of the 13 Int. Symp. on Transport Phenomena, (2002), 157-162.
- (6) Kotake, S., Glass, I.I., UTIAS Report, no. 207, 1976.
- (7) Heiler, M., Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe(TH), Germany, 1999.
- (8) Yee, H. C., A class of high-resolution explicit and implicit shock-capturing methods, NASA TM-89464, 1989.