

凝 縮 を 伴 う 超 音 速 噴 流*

塩 崎 孝 寿**, 川 橋 正 昭**, 鈴 木 允**
Kouju SHIOZAKI, Masaaki KAWAHASHI, Makoto SUZUKI

Key Words: Flow Measurement, Compressible Flow, Supersaturation, Supercooling, Condensation, Supersonic Nozzle Flow

1. ま え が き

過熱度の少ない過熱蒸気や飽和蒸気が急激に膨張するとき、凝縮核となりうる微小粒子が多数存在していないかぎり、過飽和状態から急激な状態変化を伴って凝縮することが知られている。この凝縮過程は蒸気分子自身の衝突合体によって凝縮核を生成するいわゆる均一凝縮で、過去、超音速ノズルや衝撃波管を用いて実験的にも理論的にも多くの研究がなされている^{(1)~(9)}。しかしながら現象が分子レベルのミクロな領域から連続流のマクロな領域にまでおよぶために、凝縮係数や表面張力など確定していない因子が多く、研究の余地が残されている。特に、最近ウランの同位体をレーザによって分離する方法が注目されているが、この場合凝縮開始点付近の流れを用いるのが有利なために、凝縮を伴う超音速流を正確に知ることが要求されている。そこで、UF₆と性質の似ているSF₆を凝縮成分とし、搬送気体として比熱比の大きいArまたはHeを用いた超音速ノズル内流れの研究が行われ、すでにいくつかの報告がある^{(10)~(12)}。しかしながら、これらの報告はSF₆の凝縮開始点までのものが多く、凝縮開始後まで行った研究は少ない。さらにノズル内流れの重要な要素である流速は計測されていない。このため、SF₆の凝縮を伴う超音速ノズル内流れに関する情報はまだ不足している。

本研究では凝縮成分にSF₆、搬送気体にArおよびHeを選んで、ノズル形状、貯気そう圧力および混合比を変えた場合のノズル内圧力と流速を測定し、さらに圧力と流速の測定値から計測が困難な静温度を見積もった。一方、凝縮に伴うノズル内気体の物性値変化を考慮した理論解析を行い、実験値との比較検討を行った。これらの実験と理論解析から、ノズル形状、搬送気体の種類、貯気そう圧力および混合比がノズル内

SF₆の凝縮現象に与える効果について明らかにした。

記 号

p : 圧力 Pa
 T : 温度 K
 u : 流速 m/s
 M_n : マッハ数
 \dot{m} : 質量流量 kg/s
 t : 時間 s
 N : 凝縮成分のモル比
 a : 音速 m/s
 μ_m : 凝縮成分の質量比
 L_n : ノズルの超音速部長さ mm
 x : ノズルののど部からの距離 mm
 A^* : ノズルののど部断面積 m²
 A_e : ノズルの有効断面積 m²
 ρ : 密度 kg/m³
 c_p : 定圧比熱 J/kg
 L : 潜熱 J/kg
 R_u : 一般気体定数 J/(kmol·K)
 R : 気体定数 J/(kg·K)
 μ_v : 粘性係数 Pa·s
 σ : 表面張力 N/m
 γ : 比熱比
 M : 分子量 kg/kmol
 m : 分子1個の質量 kg
 v : 分子1個の体積 m³
 r : クラスタ半径 m
 k : ボルツマン定数 J/K
 I : 核生成率 個/m³·s
 ξ : 凝縮係数
 α : 表面張力のパラメータ
 μ : 質量流量に対するクラスタ流量の比

添 字

0: 貯気そう状態
 1: 凝縮成分

* 昭和56年9月2日 北陸信越支部北陸地方講演会および昭和56年10月1日 北陸信越支部北陸信越地方講演会において講演、原稿受付 昭和57年3月10日。

** 正員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255)。

- 2: 搬送気体
 ∞ : 平面における値
 L : 凝縮相
 c : 臨界状態
 a : 平均値
 s : 飽和状態

i : 等エントロピー変化

2. 実 験

2.1 実験装置および実験方法 実験装置のブロックダイアグラムを図1に示す。圧力を調整された気体は貯気そうからノズルに入り、ここで断熱的に膨張し、圧力および温度が低下する。ノズルを出た気体は真空ポンプによって循環される。貯気そうの圧力および温度はそれぞれダイヤフラム圧力計および銅・コンスタンタン熱電対によって測定される。貯気そうにおける混合比は凝縮成分と搬送気体の流量から決定される。また、循環中の気体を抽出し、ガスクロマトグラフィにより混合比の検証を行った。その結果流量計による値と一致することが確認された。

超音速ノズルを図2(a), (b)に示す。ノズルの超音速部は直線で壁面上に直径0.1 mmまたは0.3 mmの静圧測定孔がある。静圧は、その大きさに応じてダイヤフラム真空計または水銀柱によって測定された。

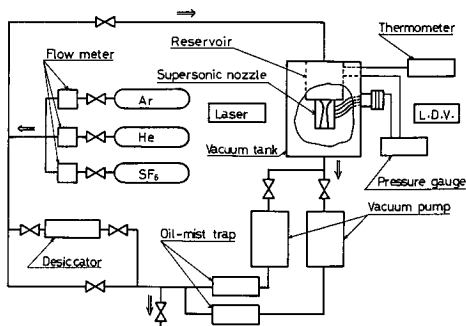
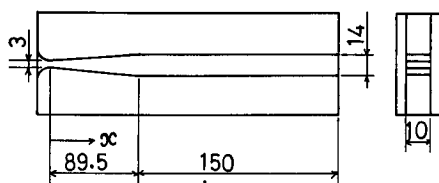
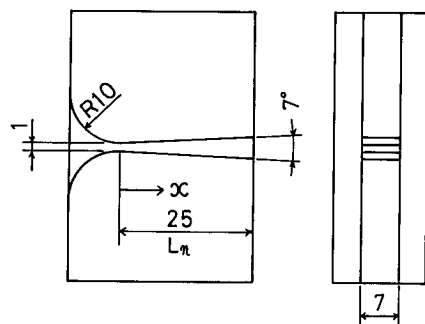


図1 実験装置ブロックダイアグラム



(a) ノズル A



(b) ノズル B

図2 超音速ノズル

表1 実験条件

NO.	P_0 kPa	T_0 K	N	μm	Carrier	Nozzle
A1	101.6	290.4	0.0080	0.029	Ar	A
A2	100.5	291.4	0.0155	0.054	Ar	A
A3	101.4	292.3	0.0234	0.081	Ar	A
A4	102.0	288.0	0.0310	0.105	Ar	A
A5	101.7	291.8	0.0400	0.132	Ar	A
A6	101.3	293.1	0.0520	0.167	Ar	A
A7	102.1	294.5	0.0590	0.186	Ar	A
A8	101.4	295.0	0.0820	0.246	Ar	A
A9	101.6	295.0	0.154	0.400	Ar	A
A101	100.5	291.4	0	0	Ar	A
A102	100.2	291.5	0	0	Ar	A
B1	101.7	292.2	0.0059	0.178	He	A
B2	101.1	289.4	0.0155	0.365	He	A
B3	101.3	292.3	0.0229	0.461	He	A
C1	55.23	290.7	0.0087	0.031	Ar	A
C2	54.29	291.8	0.0229	0.079	Ar	A
C3	56.07	289.2	0.0310	0.105	Ar	A
C4	60.06	292.8	0.0403	0.133	Ar	A
D1	54.66	292.7	0.0058	0.176	He	A
D2	54.02	290.5	0.0160	0.372	He	A
D3	54.90	293.4	0.0234	0.466	He	A
A201	101.7	287.1	0.0026	0.0094	Ar	B
A202	102.1	291.0	0.0035	0.013	Ar	B
A203	101.1	288.4	0.0057	0.021	Ar	B
A204	101.6	288.4	0.0100	0.035	Ar	B
A205	102.3	290.0	0.0201	0.069	Ar	B
A206	101.1	288.6	0.0353	0.118	Ar	B
A207	102.5	289.7	0.0503	0.163	Ar	B
C201	53.60	287.2	0.0202	0.070	Ar	B
C202	60.60	288.8	0.0350	0.117	Ar	B
C203	55.70	289.2	0.0501	0.162	Ar	B

表2 Ar, He および SF₆ の物性値

		Ar	He	SF ₆
γ		1.67	1.660	1.18
C_p	J/(kg·K)	5.1877×10^2	5.2246×10^3	3.7317×10^2
M	kg/kmol	39.948	4.0026	146.06
L	J/kg	1.632×10^5	2.1×10^4	1.616×10^5
m	kg	6.9538×10^{-26}	6.9674×10^{-27}	2.4254×10^{-25}
μ_v	Pa·S	2.22×10^{-5}	1.96×10^{-5}	1.51×10^{-5}

その際ノズル内部の流速はノズル側壁を必要な長さに切断して測定された。

2・2 実験条件および物性値 本研究では貯気そう温度約 300 K, 貯気そう圧力約 100 kPa および約 55 kPa, 混合比 0.26 % ~ 15.4 % ($N=0.026 \sim 0.154$) の範囲で実験を行った。個々の実験条件は表 1 に示す。また、使用した気体の物性値を式 (1) ~ (3) および表 2 に示す。

$$\begin{aligned} p_{18\infty} &= 133.32 \exp(6.41853 - 1.4375/T \\ &\quad - 0.0033919T) \dots\dots\dots (1)^{*1} \\ \rho_{1L} &= (2.740 - 9.417 \times 10^{-4} T) \times 10^3 \dots\dots\dots (2)^{*1} \\ \sigma_{18\infty} &= (\rho_{1L} \times 10^{-3} / M_1)^{2/3} \times 2.12 \times (312.79 - T) \\ &\dots\dots\dots (3)^{(13)} \end{aligned}$$

2・3 ノズルの検定 本研究で用いたノズルは A, B とも超音速部の中間で SF₆ の凝縮が開始するように設計された。設計マッハ数は混合比によって変化するが、拡大部の終わりの位置で約 3.5 である。

本研究の場合のように凝縮成分の潜熱が小さく、搬送気体の比熱が大きい場合は、凝縮に伴う、流れの等エントロピ変化からの偏差は小さくなり、それを検出するためには、ノズル内の境界層について考慮する必要がある。本研究では境界層がノズルののど部から発達すると仮定して式 (4) のようにノズルの有効断面積を見積もった。

$$A_e/A^* = A_1 + a \left(\frac{x}{L_n} \right) + b \left(\frac{x}{L_n} \right)^2, \quad \left(\frac{x}{L_n} > 0.024 \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで A_1 はノズル別に定まる定数で、ノズル A に対しては 1, ノズル B に対しては 0.9253 である。係数 a, b はノズル A の場合は貯気そう圧力と搬送気体の種類によって定まる定数で、これを表 3 に示す。ノズル B の場合は、ノズルが小さくて境界層の影響が大きいために、式 (5・a) ~ 式 (5・f) のように貯気そう圧力および混合比の関数とした。

表 3 式 (4) の係数

No	a	b
A 1-7	3.285	-0.3857
B 1-3	3.207	-0.6763
C 1-4	3.194	-0.6923
D 1-3	3.167	-0.9047

表 4 式 (5・b) および (5・d) の係数

θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
0.38423	1.4322×10^{-6}	0.019943	-1.4926×10^{-7}

*1 Montecatini Edison (Italy) のカタログ

$$a = 25K_B \dots\dots\dots (5 \cdot a)$$

$$b = -(\theta_1 + \theta_2 p_0) K_A K_B / 0.07 \dots\dots\dots (5 \cdot b)$$

$$K_A = \frac{\mu_{va}}{\mu_{v2}} \left(\frac{M_2}{M_a} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (5 \cdot c)$$

$$K_B = 0.1223 - (\theta_3 + \theta_4 p_0) K_A \dots\dots\dots (5 \cdot d)$$

$$M_a = N M_1 + (1 - N) M_2 \dots\dots\dots (5 \cdot e)$$

$$\mu_{va} = N \mu_{v1} + (1 - N) \mu_{v2} \dots\dots\dots (5 \cdot f)$$

ここで K_A, K_B は単なる変数である。係数 $\theta_1 \sim \theta_4$ を表 4 に示す。これらの係数はノズル内に純 Ar または純 He を流したノズル内圧力分布の実験から決定した。

圧力分布の測定値と式 (4) から求めた有効断面積にもとづく等エントロピ線を比較した例は図 3 に示すように非常によく一致している。他の場合についてもほぼ同様な結果となり、本研究の範囲では式 (4) で有効断面積を表示できることが確認された。

2・4 実験結果および考察 ノズル A の場合は搬送気体に Ar および He を選んでノズル内の圧力分布のみ測定を行った。等エントロピ変化からの偏差は図 4 (a), (b), 図 5 (a), (b) に示すように混合比の増加とともに一度大きくなり、さらに混合比が大きくなると図 4 (c) のように小さくなる。凝縮開始点は図 4 (a) ~ (c) のように混合比の増加とともに一度上流へ移動した後下流へ移動する。これらの現象は SF₆ の比熱比が小さいために混合比が大きくなると、混合気

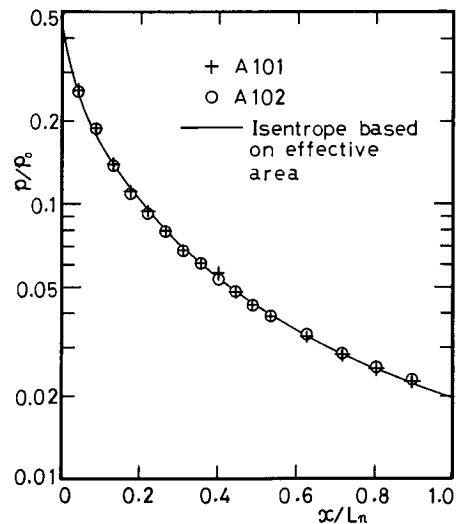


図 3 ノズルの検定

体の平均比熱比が小さくなり、ノズル内の同位置における温度は混合比が小さい場合より高くなる。このた

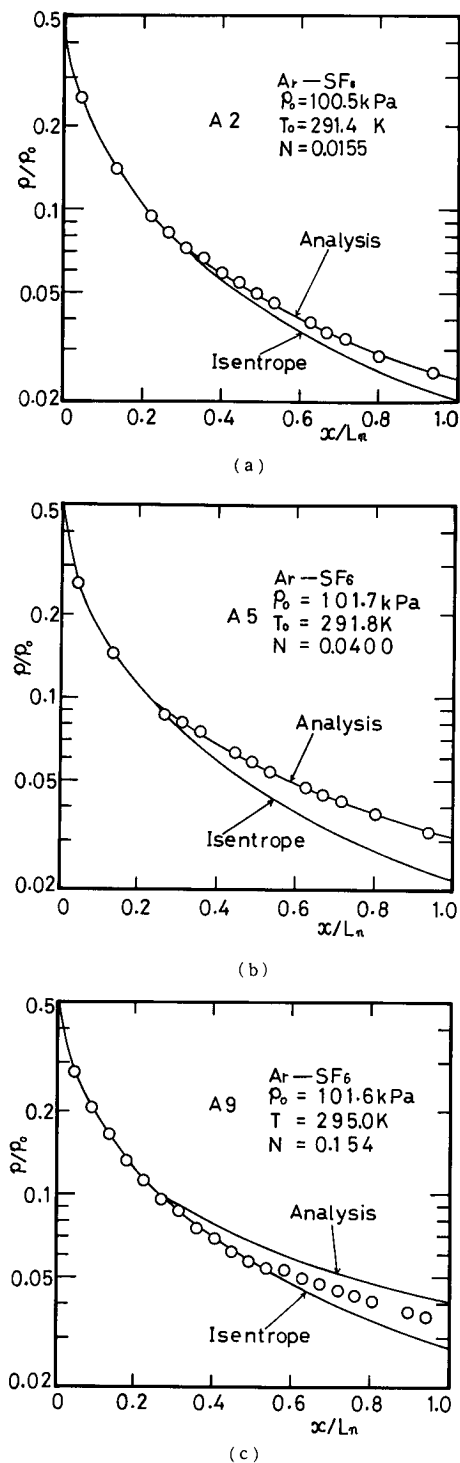


図 4 ノズル A 内圧力分布

めに SF_6 の分圧の上昇にもかかわらず凝縮が起こりにくくなり、等エントロピ変化に近づいてゆく。したがって凝縮の影響が最大となる混合比が存在することになり、搬送気体が Ar の場合は約 5% ($N=0.05$) となった。貯気そう圧力を変えた場合は図 5 (c) に示すように貯気そう圧力を下げると等エントロピ変化からの偏差が小さくなり、凝縮開始点は下流へ移動する。これは搬送気体が He の場合も同様になった。搬送気体を変えた場合は図 5 (a), (b) に示す実験 A 2 と B 2 の比較から、He を搬送気体とした場合のほうが偏圧が小さくなることがわかる。これは He の比熱が大きいためである。

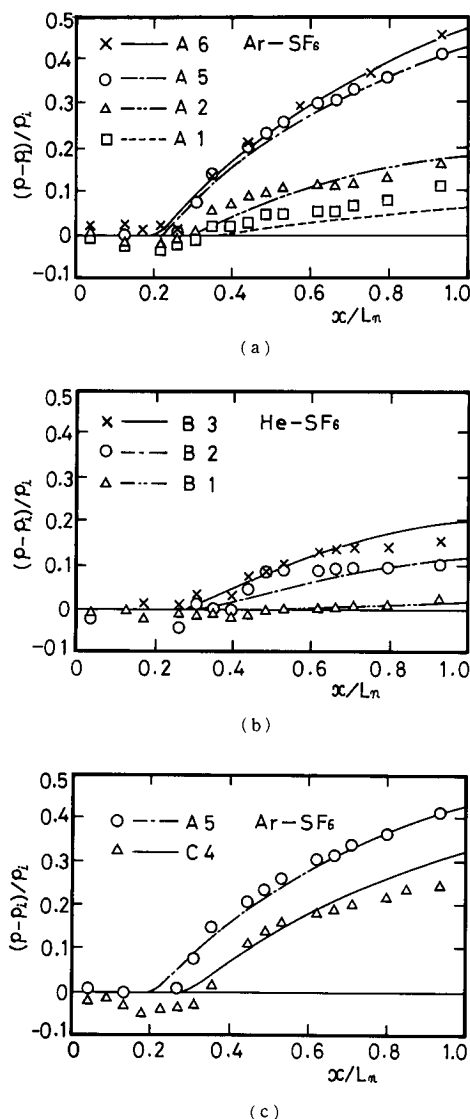


図 5 ノズル A 内圧力の等エントロピ変化からの偏差

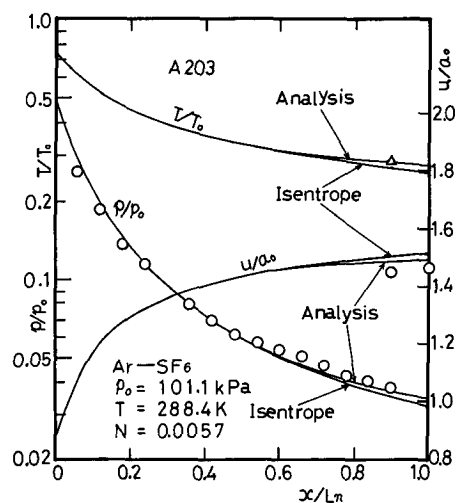
ノズル B の場合の圧力分布および流速の測定結果を図 6 (a)~(d) に示す。モル混合比 2.0~3.5 % で偏差が大きくなり、この傾向は定性的にはノズル A の場合と同様である。一方、凝縮開始点は混合比の増加とともに下流へ移動し、凝縮開始温度は図 7 に示すように混合比および貯気圧と無関係に約 95 K となって、ノズル A の場合や従来⁽¹⁰⁾の実験とは全く異なった傾向となった。この特異な現象は SF₆ の転移に伴う表面張力の変化であると仮定した理論解析を行うと実験結果をよく説明できる。

ノズル内流れの状態を決定するのに圧力だけの測定では情報が不足する。そこでノズル B については流速

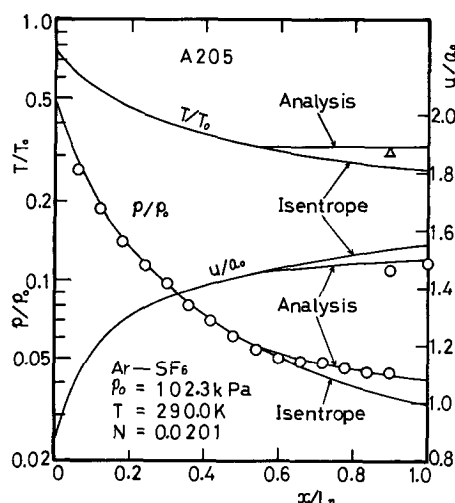
の測定も行った。ノズルが小さく、流速が大きいため測定はきわめて困難で、わずかなデータしか得られなかったが、実験結果と解析結果はほぼ一致している。さらに流速が測定されれば計測が困難な静温度を見積もることができる。

2.5 ノズル内静温度の見積もり

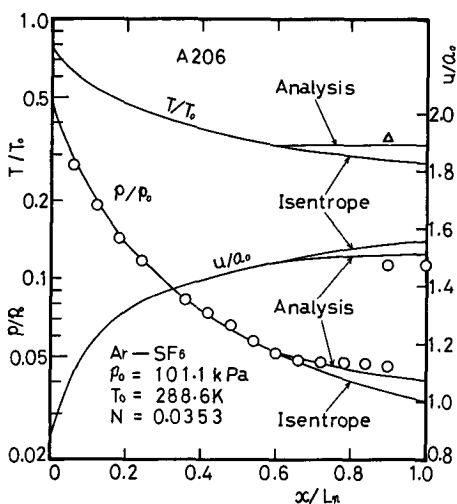
ノズル内流れを一次元、非粘性と仮定し、さらに流れ中に生成されるクラスタの体積を無視すれば、流れの基礎方程式は連続式： $\rho u A_e / (1 - \mu) = \dot{m} = \text{一定}$ (6)
運動量式： $A_e dp + \dot{m} du = 0$ (7)
エネルギー式： $u du + c_p dT = L d\mu$ (8)
となる。ここで c_p は搬送気体と凝縮成分およびクラ



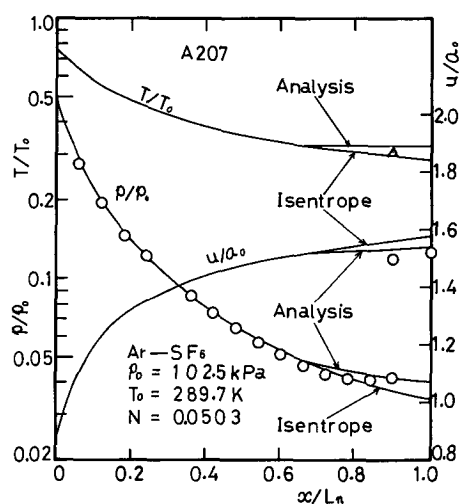
— 計算値, ○ 実験値,
△ 静圧および流速から見積もった静温度
(a)



— 計算値, ○ 実験値,
△ 静圧および流速から見積もった静温度
(b)



— 計算値, ○ 実験値,
△ 静圧および流速から見積もった静温度
(c)



— 計算値, ○ 実験値,
△ 静圧および流速から見積もった静温度
(d)

図 6 ノズル B 内の圧力, 流速および温度分布

スタとの混合物の平均定圧比熱である。状態式は

$$p = \rho R T \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。式(6)はノズルののど部までは凝縮がないので ($\mu=0$)

$$\dot{m} = \rho^* u^* A_e^* \quad \dots\dots\dots (10)$$

であり、のど部の状態は、貯気そう状態から等エントロピ変化をすると仮定して求められる。 c_p および L を一定と仮定して式(7)および(8)から式(9)、(10)を用いて μ を消去すれば

$$c_p T^2 + T \left(\frac{1}{2} u^2 - c_p T_0 - L \right) + \frac{p u A_e}{\rho^* u^* A_e^*} T^* L = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

が得られ、静温度 T を凝縮核の生成率や成長速度とは無関係に求めることができる。この方法によって求めた静温度は図6(a)～(d)に示すように解析結果とほぼ一致している。

3. 理 論 解 析

凝縮を伴う超音速流を、凝縮に伴うノズル内気体の物性値変化を無視して解析を行うと、He-SF₆ 混合気体のように分子量が非常に異なり、さらに搬送気体の比熱が大きく凝縮成分の潜熱が小さい場合、凝縮を伴う流れに対するノズル内圧力分布は等エントロピ変化に対するそれよりも小さくなり、定性的にも実験と一致しない。そこで本研究では気体定数 R 、比熱比 γ および気相の定圧比熱 c_p を式(12)～(14)のように、質量流量に対するクラスタ流量の比 μ の関数として解析を行った。

$$R(\mu) = R_0(1 - \mu M_0/M_1)/(1 - \mu) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$c_p(\mu) = (c_{p0} - \mu c_{p1})/(1 - \mu) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\gamma(\mu) = c_p(\mu)/\{c_p(\mu) - R(\mu)\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで

$$M_0 = M_1 N + (1 - N) M_2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$R_0 = R_u/M_0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$c_{p0} = \mu_m c_{p1} + (1 - \mu_m) c_{p2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

である。また、状態式は

$$p = \rho R(\mu) T \quad \dots\dots\dots (18)$$

である。

凝縮核の生成率は Frenkel⁽¹⁵⁾の式

$$I = \left(\frac{p_1}{kT} \right)^2 v \sqrt{\frac{2\sigma_{ic}}{\pi m}} \exp \left(- \frac{4\pi\sigma_{ic}r_{ic}^2}{3kT} \right) \dots\dots (19 \cdot a)$$

$$r_{ic} = 2\sigma_{ic}/\{\rho_{ic}R_1T \ln(p_1/p_{1\infty})\} \quad \dots\dots (19 \cdot b)$$

を用いた。臨界クラスタ半径に対する表面張力 σ_{ic} はその値が知られていないため、平面に対する値 $\sigma_{1\infty}$ を基準にして、転移温度 94.3 K⁽¹⁶⁾より高温では $\sigma_{ic} = \alpha_1\sigma_{1\infty}$ 、それより低温では $\sigma_{ic} = \alpha_{11}\sigma_{1\infty}$ と表した。

クラスタの成長速度および μ の x 方向変化率は Hill らの式⁽¹⁷⁾

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\xi}{\rho_{1L}} \frac{p_{1\infty}}{\sqrt{2\pi R_1 T}} \left(\frac{p_1}{p_{1\infty}} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{d\mu}{dx} = \frac{4\pi\rho_{1L}}{\dot{m}} \left\{ \int_0^x \left(r_{ic} + \int_0^x \frac{1}{u} \frac{dr}{dt} dx \right)^2 I(x) A_e(x) \times \frac{1}{u} \frac{dr}{dt} dx + \frac{1}{3} r_{ic}^3 I(x) A_e(x) \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

を用いた。式(6)～(8)、(19・a)、(19・b)、(20)および(21)を式(12)～(18)を用いて連立微分方程式に変換し、未知数 α_1 、 α_{11} および ξ をパラメータとして数値計算を行った。ノズル A に対しては $\alpha_1=0.4$ 、 $\xi=0.005$ とすると図4(a)、(b)、図5(a)～(c)に示すようによく一致していて、 α_1 と ξ は搬送気体の種類と貯気そう圧力に無関係である。搬送気体が Ar の場合モル混合比が約 10 % より大きくなると図4(c)に示すように実験値結果と解析結果は差を生じてくる。搬送気体が He の場合も同様な傾向となり、モル混合比が約 4 % 以上で差を生じてくる。混合比が大きいきとき実験結果と解析結果に差が生じるのは、混合気体の場合の境界層を純 Ar または純 He と同じと見積もったためである。

ノズル B に対しては $\alpha_1=0.5\sim 0.6$ 、 $\alpha_{11}=0.3$ 、 $\xi=0.005$ とすると図6(a)～(d)に示すように圧力および流速の測定値とほぼ一致している。また、圧力と流速から求めた静温度ともほぼ一致している。なお 2・5 節において物性値を一定と仮定して、静温度を見積もったが、Ar-SF₆ 混合気体の場合は物性値一定として解析を行っても、ほとんど同じ結果となり、ここでの静温度と比較することは問題ない。

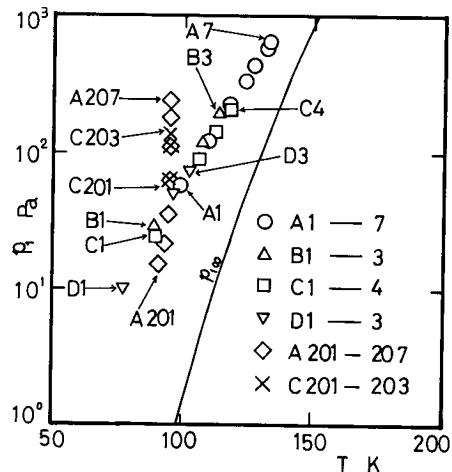
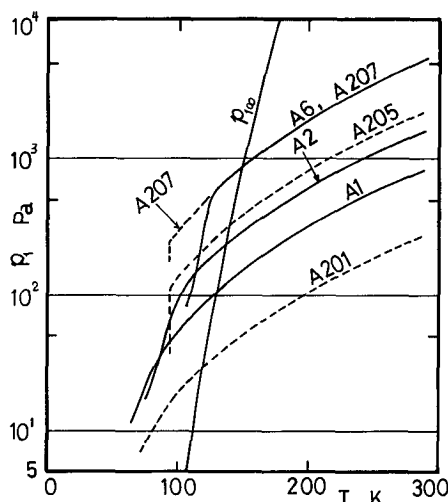


図 7 凝縮開始点

図8 ノズル内SF₆蒸気の状態変化

貯気そう状態のSF₆が1%凝縮する点を凝縮開始点と定義し、その点の圧力および温度を、実験と同一貯気そう状態とした解析から求めて p - T 面に表すと図7に示すようになる。ノズルAの場合は、搬送気体には無関係に、貯気そう圧力を上げることと混合比を増加させることは等価で、SF₆の分圧のみに依存する形で飽和線とほぼ平行な一つの線上に分布している。ノズルBの場合は、Aの場合とくらべて単位時間当たりの温度降下が約4倍程度大きいために、より過飽和状態が進行して、凝縮開始点の温度が低下する。しかし、SF₆の転移温度(94.3 K)に達すると表面張力の減少のために急に凝縮が開始する。したがって、凝縮開始温度は貯気そう圧力と混合比には無関係に約95 Kとなっている。

ノズル内SF₆蒸気の状態変化を図8に示す。ノズルAの場合は凝縮がゆっくりと進行し、開始後の状態変化はゆるやかである。これに対してノズルBの場合は、凝縮開始後、急に凝縮量が増加して、放出される潜熱のために温度は低下しなくなり、圧力のみ低下する。なお、混合比が小さい場合には凝縮量が少ないために温度も低下する。

4. ま と め

超音速ノズル内でArまたはHeに搬送されたSF₆。

の凝縮を伴う流れについて、ノズル形状、貯気そう圧力および混合比を変化させた場合の実験と理論解析を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 表面張力のパラメータ α は凝縮が転移温度より高温で開始する場合は、搬送気体、貯気そう圧力および混合比に無関係に一定値になる。しかし、転移温度まで凝縮しない場合には、表面張力にどのような値をとっても実験値とは一致せず、転移温度において表面張力が変化すると仮定すると実験結果をよく説明できる。この場合には、貯気そうの圧力および混合比と無関係に約95 Kで凝縮が開始する特異な現象となる。

(2) α と ξ の値は搬送気体の種類と貯気そう圧力に無関係である。

(3) He-SF₆混合気体のように、両者の分子量が非常に異なり、さらに搬送気体の比熱が大きく凝縮成分の潜熱が小さい場合、物性値を μ の関数としてノズル内流れを解析する必要がある。

(4) 圧力と流速の測定値から見積もった静温度はほぼ解析結果と一致する。

文 献

- (1) Wegener, P.P. and Pouring, A.A., *Phys. Fluids*, 7-3 (1964), 352.
- (2) Stein, G.D., *J. Chem. Phys.*, 51-3 (1969), 938.
- (3) 河田・森, 機論, 38-315 (昭47), 2843.
- (4) Wegener, P.P., ほか2名, *Phys. Fluid*, 15-11 (1972), 1869.
- (5) 矢野, 理化学研究所報告, 51-5 (昭50), 139.
- (6) Philippe, M., *Int. J. Multiphase Flow*, 3 (1976), 181.
- (7) Sislian, J.P. and Glass, I.I., *AIAA J.*, 14-12 (1976), 1731.
- (8) Glass, I.I., ほか2名, *AIAA J.*, 15-5 (1977), 686.
- (9) Moses, C.A., *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 100-3 (1978), 311.
- (10) Wu, B.J.C., ほか2名, *J. Chem. Phys.*, 68-1 (1978), 308.
- (11) Fisher, S.S., *Phys. Fluids*, 22-7 (1979), 1261.
- (12) Wu, B.J.C. and Laguna, G.A., *J. Chem. Phys.*, 71-1 (1979), 2991.
- (13) 玉虫・ほか7名, 理化学辞典, 3 (昭52), 146, 岩波書店.
- (14) 佐々木, 化学便覧, (昭41), 丸善.
- (15) Frenkel, J., *Kinetic Theory of Liquids*, (1955), 366, Dover.
- (16) Walter, C.S., *Ind. Eng. Chemistry*, 39-3 (1947), 421.
- (17) Hill, P.G., *J. Fluid Mech.*, 25-3 (1966), 593.

討 論

〔質問〕 松尾一泰・川越茂敏

〔九州大学総合理工学研究科〕

一般にノズル内で凝縮が起こり、潜熱放出量が大き

い場合には、凝縮衝撃波が発生する。本論文では凝縮衝撃波について全く触れられていないが、本実験では凝縮衝撃波は認められなかったか。この点についての

お考えをお伺いしたい。

〔回答〕 ご指摘のとおり、ノズル内で凝縮が起こり、潜熱の放出量が多い場合には、凝縮衝撃波が発生する。しかしながら本研究における実験では図4(a)～(c)、図6(a)～(d)に示すように、ノズル内静圧は等エントロピ変化に対するものよりは上昇するものの急激な上昇はみられず、凝縮衝撃波は発生していないものとする。この主な原因は SF_6 の潜熱が小

さい(たとえば水の潜熱は約 $2.3 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 、 SF_6 のそれは約 $1.6 \times 10^5 \text{ J/kg}$ である)ためである。また、図4(c)に示すように混合気体中の SF_6 が多い場合には、 SF_6 の比熱比が小さいために、混合気体の平均比熱比も小さくなり、ノズル内気体の温度はあまり下がらなくなる。このため、 SF_6 の凝縮量(すなわち放出される潜熱)は減少し、したがって、凝縮衝撃波は発生しない。
