

凝縮を伴う超音速噴流\*  
(第3報, SF<sub>6</sub>の転移温度の影響)

塩崎孝壽\*\*, 川橋正昭\*\*, 鈴木允\*\*

Supersonic Nozzle Flow with Condensation  
(3rd Report, The Effect of Transition Temperature of SF<sub>6</sub>)

by Kouju SHIOZAKI, Masaaki KAWAHASHI, and Makoto SUZUKI

The condensation of SF<sub>6</sub> carried in Ar has been studied experimentally in supersonic nozzle flow, and also experimental data was compared with numerical calculation based on nucleation and drop-growth theory. It was found that the static pressure and static temperature distribution in the nozzle and the onset point of SF<sub>6</sub> condensation were affected by differences of the physical properties at temperatures above and below the transition point of SF<sub>6</sub>. When the stagnation pressure was lower than or equal to 50 KPa, the onset point of SF<sub>6</sub> condensation was found to be distributed in the region far distant from the saturation line of SF<sub>6</sub> or below the transition temperature of SF<sub>6</sub>.

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

## 1. ま え が き

超音速ノズル内の気体凝縮は、分子レベルのマイクロ領域から、連続流のマクロな領域におよぶ現象であるため、複雑で十分に解明されていない。特に最近ではウランの同位体をレーザーによって分離する方法が注目されているが、この場合低温過飽和状態の気体を使用するために、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、UF<sub>6</sub>と性質の似ているSF<sub>6</sub>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<sup>(1)~(3)</sup>。しかし、これらの報告ではノズル内部の流体力学的特性すなわち、圧力・温度・流速などについては詳しく述べられていない。最近の研究ではAbrahamら<sup>(4)</sup>がノズル出口付近の全圧と静圧の詳細な測定を行った例があるが、内部の測定はなされていない。

著者らは以前から凝縮を伴う超音速流れについての研究を行ってきたが、装置の制約から、ノズル内に発達する境界層の影響を除いた実際の圧力比0.03、マ

ッハ数3.0が一応実験上の限界となっていた。本報では超音速ノズルに続けて直管状の超音速ディフューザを取付けることにより実際の圧力比0.006、マッハ数4.5程度まで実験可能となり、前報まで<sup>(5)~(7)</sup>の結果や他の研究<sup>(1)</sup>に比べて、よりSF<sub>6</sub>の飽和線から離れた領域、あるいは低温領域での凝縮が明らかにされた。既報<sup>(5)</sup>においてSF<sub>6</sub>の転移点の存在は、その凝縮開始点に影響を与えることを報告したが、より低圧まで膨張させた場合、ノズル内の、圧力・温度の分布にも影響を与える場合があることが明らかにされた。

一方、ノズルののど部断面積、超音速部の長さ、および超音速部の開き角などが変化すると、ノズル内気体の膨張速度が異なるために凝縮現象に影響を与えるが<sup>(5)(7)</sup>、本報では各部の寸法の異なった二次元形状のノズル相互間において、凝縮開始温度を定量的に比較するために、膨張速度パラメータ $\psi$ を定義し、 $\psi$ と凝縮開始点温度との関係について検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置全体の構成と実験方法は既報<sup>(5)</sup>と同様である。本報において使用したノズルを図1に示す。本報ではより低圧・高マッハ数での実験を目的とし、設計マッハ数を従来の3.5から6へ増加させたノズルを製

\* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年10月12日。

\*\* 正員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。

作した。これに伴って排気装置の容量が不足したため、ノズルの超音速部に続けて、直管状のディフューザを取付けた。低圧気体の場合、十分な圧力比が得られても、必ずしも超音速状態が達成されているとは言えず、何らかの方法で確認する必要がある。著者らは、従来は流速を測定することにより、ノズル内部の静温度を見積もるとともに超音速状態の確認を行ってきた。本報ではディフューザの存在のために流速の測定は困難となり、現在のところ測定されていない。しかし、ディフューザ内での圧力は、ほぼ予想どおり回復することから超音速状態が達成されていると言える。個々の実験条件を表1に示す。なお、使用した物質の物性値は既報<sup>(5)</sup>と同じである。

3. ノズル有効断面積の見積もり

本報ではノズル内に発達する境界層を考慮して有効断面積  $A_e$  を

$$\frac{A_e}{A^*} = 1.2087 + C_1 \frac{x}{L_n} + C_2 \left(\frac{x}{L_n}\right)^2 \dots\dots\dots (1\cdot a)$$

$$C_1 = 14.73 - (5.690 - 0.03403/P_0)W \dots\dots (1\cdot b)$$

表1 実験条件

NO.	$P_0$ kPa	$T_0$ K	N
A01	100.7	290.0	0.005
A02	100.9	291.1	0.01
A03	100.8	290.6	0.02
A04	100.7	287.6	0.03
A05	101.0	290.0	0.05
A06	101.6	292.2	0.07
A07	101.5	292.1	0.09
A11	49.6	287.2	0.005
A12	51.7	292.1	0.01
A13	49.8	289.9	0.02
A14	50.1	286.9	0.03
A15	50.1	289.8	0.05
A16	50.6	290.0	0.07
A17	50.4	290.6	0.09
A22	21.4	292.2	0.01
A23	21.1	289.1	0.02
A24	22.1	286.1	0.03
A25	22.1	289.0	0.05
A26	21.5	288.3	0.07
A27	21.3	289.0	0.09

$p_0$ : 貯気そう圧力  $T_0$ : 貯気そう温度  
N: モル混合比

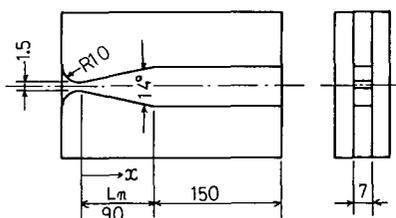


図1 超音速ノズル

$$C_2 = (-1.750 - 0.7959/P_0)W \dots\dots\dots (1\cdot c)$$

$$P_0 = p_0/p_{a0} \dots\dots\dots (1\cdot d)$$

$$W = \frac{\mu_{v2} \cdot M_2}{\mu_{v1} \cdot M_1} \dots\dots\dots (1\cdot e)$$

$$M_2 = NM_1 + (1-N)M_2 \dots\dots\dots (1\cdot f)$$

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

と表した。ここで  $A^*$  はノズルののど部断面積、 $x$  はノズルののど部からの距離、 $L_n$  は超音速部の長さ、 $p_0$  は貯気そう圧力、 $p_{a0}$  は標準大気圧、 $N$  はモル混合比、 $M_1$ 、 $M_2$  はそれぞれ  $SF_6$ 、 $Ar$  の分子量、 $\mu_{v1}$ 、 $\mu_{v2}$  はそれぞれ  $SF_6$ 、 $Ar$  の粘性係数である。式(1・a)~(1・c)の係数はノズル内圧力分布の実験から決定した。

式(1・a)~(1・g)にもとづく等エントピ線と実験値を比較すると図2(a)~(c)のモル混合比  $N=0$  で示すように、両者はほぼ一致することから、超音速流れの主流部については有効断面積の表示式が適用できることが確認された。 $SF_6$  の凝縮を伴う流れについても、境界層内では凝縮は発生しないので主流部については、この有効断面積の考えを適用することが可能である。

4. 実験結果および考察

ノズル内静圧の実験値と既報<sup>(5)</sup>の方法による静圧と静温度の計算結果を図2(a)~(c)に示す。貯気そう圧力が100 kPaの場合、約94.3 Kに存在する  $SF_6$  の転移点は、その凝縮開始に影響を与えており転移温度より高温と低温で表面張力のパラメータ<sup>(5)</sup>をそれぞれ  $\alpha_I$ 、 $\alpha_{II}$  と別の値とすることにより実験値と計算値の一致が良くなる。 $\alpha_I$  は  $\alpha_{II}$  より大きな値をもち計算上は

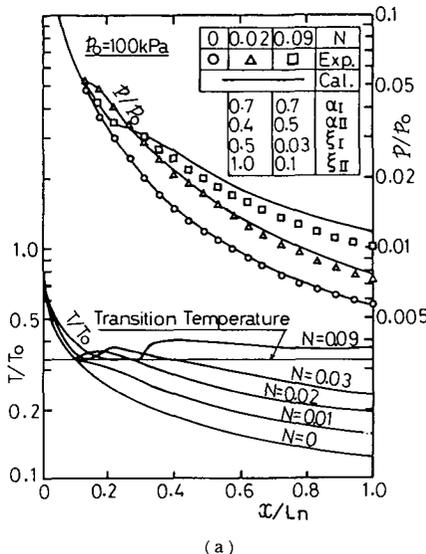
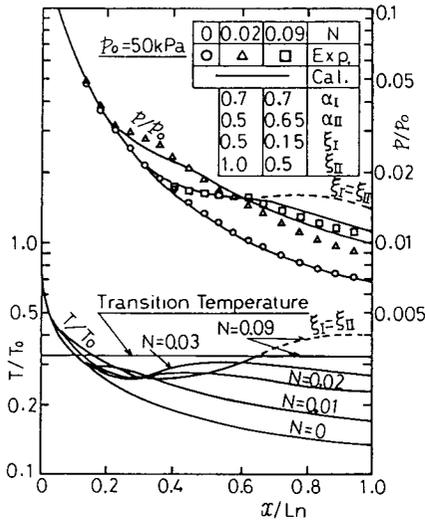


図2 ノズル内の静圧・静温度分布

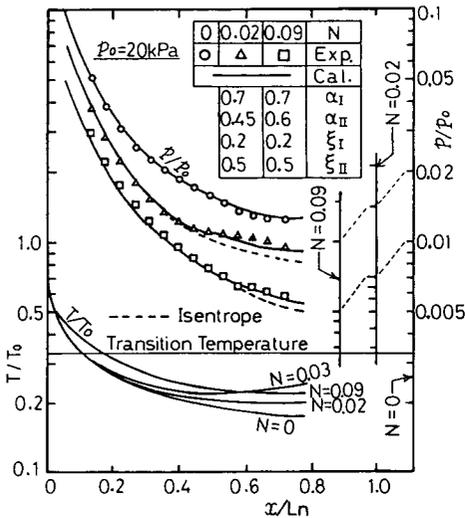
0.7とした、 $\alpha_{II}$ は $N=0.005$ のとき0.35、 $N=0.09$ のとき0.5となり、この間連続的な変化をする。この場合の凝縮開始点<sup>(5)</sup>の分布は図3に示すように、混合比が小さい場合を除いて約95 Kとなっている。この特異な凝縮開始点の分布は既報<sup>(5)</sup>で述べた。本報の場合のほうが膨張速度は急速であるにもかかわらずこのような現象が起こるので、凝縮開始温度は転移温度より下がりにくい傾向があると言える。凝縮開始後は放出される潜熱によって混合比が小さい場合以外は温度が

上昇する。その後は再度温度が下がり図2(a)の $N=0.02, 0.03$ のように転移温度を通過する場合がある。凝縮を伴う流れの計算において、凝縮開始後の流れに影響を与えるパラメータは凝縮係数 $\xi$ であり本報では転移温度より高温と低温でそれぞれ $\xi_I, \xi_{II}$ とした。凝縮開始後転移温度を通過するような条件では、その上下で圧力や温度の分布に変化が現れると考えられるが、実際は図2(a)に示したように計算結果にも実験結果にもそのような傾向はみられない。これはノズル内SF<sub>6</sub>の凝縮量が図4に示したように $p_0=100$  kPa,  $N=0.02$ の場合には凝縮の初期の段階で大部分凝縮して $\xi$ が実質的に意味をもたなくなるためである。 $N=0.09$ の場合 $x/L_n \approx 0.3$ で凝縮量変化の曲線が折れ曲がった傾向を示すのはこの点で転移温度より高温となり、 $\xi$ が変化するためである。その後は転移温度を通過することはないのでノズル内圧力・温度・凝縮量のいずれもなめらかな変化となる。

貯気そう圧力が50 kPaになるとノズル内SF<sub>6</sub>は転移温度まで下がっても凝縮は開始せず(もちろん全く凝縮がないわけではなく、著者が凝縮開始点と定義<sup>(5)</sup>している貯気そう状態の1%の凝縮量に達しないという意味である)、それよりも低温になって開始するようになり、混合比を変化させたときの開始点の分布は図3に示したようになる。凝縮開始後は温度の上昇があり、 $N=0.09$ の場合には図2(b)に示したように $x/L \approx 0.65$ で転移温度まで上昇する。このときは明らかに $\xi$ の影響があり、 $\xi_I$ を $\xi_{II}$ と等しくすると、圧力分布の計算値は破線で示したようになり、実験値とは一致せず、温度は上昇を続ける。 $\xi_I=0.15, \xi_{II}=0.5$ とすると図2(b)に実線で示したようになり、ほぼ実験値と一致する。このときのノズル内SF<sub>6</sub>の凝縮量は図4に示すように、 $N_c/N \approx 0.3$ となり、かなりのSF<sub>6</sub>



(b)



(c)

$p_0$ : 貯気そう圧力  
 $p$ : ノズル内圧力  
 $N$ : モル混合比  
 $\xi$ : 凝縮係数  
 $O_0$ : 貯気そう温度  
 $T$ : ノズル内温度  
 $\alpha$ : 表面張力パラメータ

図2 ノズル内の静圧・静温度分布

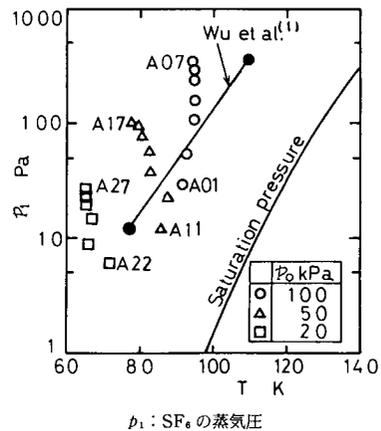


図3 ノズル内SF<sub>6</sub>の凝縮開始点

が凝縮せずに残っている。このため $\xi$ の影響が現われる。この点でノズル内の圧力・温度・凝縮量とも折れ曲がった変化を示し、温度は一定となる。本報では、このような現象は  $N=0.05\sim 0.09$  の範囲で現れた。 $\xi_1$  は  $\xi_{11}$  の  $1/2\sim 1/3$  程度とすると、ノズル内静圧の実験値と計算値はほぼ一致し、両者とも混合比の増加とともに小さくなる。

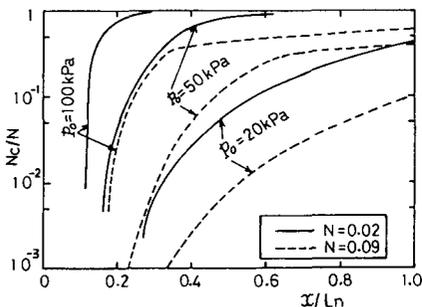
貯気そう圧力が 20 kPa になると、さらに凝縮は開始しにくくなり、その分布は図 3 に示したように低温低圧となる。凝縮開始後は図 2 (c) に示したように温度の上昇する場合もあるが大きな量ではなく、転移温度までは達しない。この場合のノズル内  $SF_6$  の凝縮量の変化は図 4 に示したように、いずれの混合比においてもゆるやかとなり温度上昇の少ないことと関連している。この場合、凝縮開始後の流れ計算に影響を与えるパラメータは  $\xi_{11}$  であり、 $\xi_1$  は無関係となる。なお、貯気そう圧力 20 kPa では、混合比の変化による圧力分布の変化が少なく、ほぼ重なって見にくくなるので、縦座標をそれぞれの混合比に対して示した。

本報による  $SF_6$  の凝縮開始点と、Wu ら<sup>(1)</sup> が散乱光の実験から求めた  $SF_6$  の凝縮開始点分布を図 3 に同時に示す。開始点の定義の差もあり、正確に比較することはできないが、本報の場合のほうが  $SF_6$  の飽和線から離れた領域、あるいは低温の領域に分布している。これは本報の場合のほうが膨張が急であり、さらに低圧まで膨張させたためである。

ノズルののど部断面積、超音速部の開き角、超音速部の長さなどの変化に対応してノズル内気体の膨張速度が変化するとノズル内気体の凝縮現象に影響を与える<sup>(6)(7)</sup>。局所的な膨張速度を表すパラメータとしては

$$p = -(u/p)(dp/dx) \dots \dots \dots (2)$$

で示されるような圧力の降下割合などを使用することが適当と考えられるが、局所の値をもって、ノズル内の膨張速度とすることは、この場合適当とは言いがた



$N_c$ : 全流量に対する凝縮相流量のモル比

図 4 ノズル内  $SF_6$  の凝縮量

い<sup>(7)</sup>。そこで本報では膨張速度パラメータとして以下の式を定義した。

$$\psi = \frac{A_{out} - A^*}{L_n \cdot A^*} a^* \dots \dots \dots (3)$$

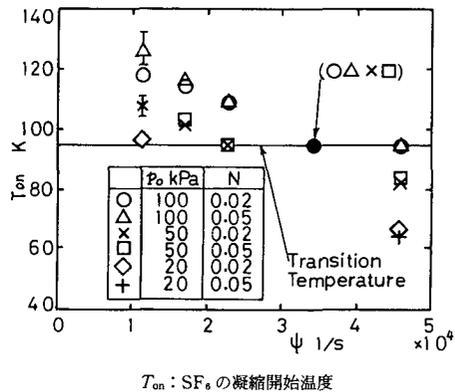
ここで  $A_{out}$  はノズル超音速部出口の断面積、 $a^*$  はノズルののど部の音速であり、 $\psi$  は時間の逆数の次元をもつ。

$\psi$  に対する  $SF_6$  の凝縮開始点温度分布を図 5 に示す。貯気そう圧力が低いほど凝縮開始温度は低くなり、 $\psi$  の増加とともにほぼ直線的に低下する。ただし、転移温度の影響で貯気そう圧力 100, 50 kPa の場合は、それぞれ  $\psi = 3.4\sim 4.6 \times 10^4, 2.3\sim 3.4 \times 10^4$  の範囲で凝縮開始温度が一定となる部分がある。このように  $\psi$  と凝縮開始点温度との間には転移温度の影響を別にすれば、簡単な関係があり、ノズル内気体の膨張速度を表すパラメータとして  $\psi$  は適当であると考えられる。ただし、実際の膨張速度は境界層の発達のため式(3)では正確には表せないので、この点は考慮する必要がある。なお、図 5 において  $\psi = 4.6 \times 10^4/s$  は本報の、それ以外は既報<sup>(5)-(7)</sup>のデータを使用した。

本報では転移温度の上下で表面張力および凝縮係数が変化すると仮定した解析を行うと実験値をうまく説明できることを示した。しかし、凝縮現象を本質的に解明するためには核生成や成長に必要なエネルギーなどを正確に見積もり、表面張力パラメータや凝縮係数を使用しない方向に進むべきであると考え、これは今後の課題である。

5. まとめ

超音速ノズル内で Ar に搬送された  $SF_6$  の凝縮を伴う流れについて、超音速ディフューザを取付けることにより、前報まで<sup>(5)-(7)</sup>の圧力比の限界 0.03 よりも小



$T_{on}$ :  $SF_6$  の凝縮開始温度

図 5 凝縮開始温度と膨張速度パラメータの関係

さい0.06までの実験を行い、あわせて数値計算を行った。さらに膨張速度パラメータ $\psi$ を定義し、 $\psi$ と凝縮開始温度との関係について検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 貯気そう圧力が100 kPaの場合SF<sub>6</sub>の転移点の存在は凝縮開始点に影響を与え約95 Kに分布する。この現象は転移温度で表面張力が変化すると仮定した解析を行うとよく説明できる。

(2) 貯気そう圧力が50 kPaになると凝縮開始点はSF<sub>6</sub>の転移温度より低くなるが、開始後は潜熱の放出によって温度が上昇し、転移温度まで達する場合がある。このときは凝縮係数が転移温度の上下で変化し、 $\xi_1$ は $\xi_n$ の1/2~1/3程度として解析を行うとよく説明できる。

(3) 貯気そう圧力が20 kPaになると凝縮開始温度はさらに低下し、 $\xi_1$ の影響はなくなる。

(4) 凝縮開始点温度は膨張速度パラメータ $\psi$ の増加とともにほぼ直線的に低下するが、SF<sub>6</sub>の転移の影響でそれが一定値となる $\psi$ の範囲が存在する。

(5) ノズル内の圧力比をより小さくすることによって、前報までの結果や他の研究にくらべてSF<sub>6</sub>の飽和線から離れた領域、あるいは低温の領域における凝縮が確認された。

## 文 献

- (1) Wu, B. J. C., ほか2名, J. Chem. Phys., 68-1 (1978), 308.
- (2) Fisher, S. S., Phys. Fluids, 22-7 (1979), 1261.
- (3) Wu, B. J. C. and Laguna, G. A., J. Chem. Phys., 71-1 (1979), 2991.
- (4) Abraham, O., ほか3名, J. Phys. Fluids. 24-6 (1981), 1017.
- (5) 塩崎・ほか2名, 機論, 49-443, B (昭58), 1373.
- (6) 塩崎・ほか2名, 機講論, No.820-14 (昭57), 208.
- (7) 塩崎・ほか2名, 機論, 51-468, B (昭60), 2591.