

凝 縮 を 伴 う 超 音 速 噴 流*

(第 2 報, ノズル開き角の影響)

塩 崎 孝 壽**, 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

超音速ノズル内の気体凝縮は古くから研究されているが, 最近ではウラン同位体のレーザによる分離への応用が考えられ, 凝縮成分として, UF_6 と性質の似ている SF_6 を用い, 搬送気体としては, 比熱比の大きい Ar または He を用いた研究が行われており, いくつかの報告がある^{(1)~(3)}. しかし, これらの研究では吸収線や散乱光を利用した光学的なものが多く, ノズル内の流体力学的特性, すなわち, 圧力・流速・温度などについては詳しく述べられていない. 最近では Abraham⁽⁴⁾ らがノズル出口付近の静圧と全圧の詳細な測定を行っているが, ノズル内部の測定はなされていない.

前報⁽⁵⁾では, Ar または He に搬送された SF_6 の超音速ノズル内凝縮について, 凝縮に伴う物性値変化を考慮した解析とノズル内静温度の見積もり方法を示し, 実験値と計算値との比較から, ノズルののど部の大きさ, 搬送気体の種類などが SF_6 の凝縮現象に与える効果について述べた.

本報では, Ar に搬送された SF_6 の凝縮について, ノズルののど部の大きさと, ノズル出口の設計マッハ数を一定とし, 超音速部の開き角を変化させた場合, その開き角, 貯気そう圧力, および混合比が凝縮現象に与える効果について述べる.

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前報⁽⁵⁾と同様である. 本研究に使用したノズルを図 1 に示す. ノズル出口における設計マッハ数は混合比によって多少変化

するが, いずれのノズルでも約 4 である. ノズル超音速部の側壁には直径 0.3 mm の静圧測定孔がある. 静圧はスキヤニングバルブによって測定点を切換え, ダイアフラム真空計によって測定された. ノズル内の流速測定にはレーザドップラ流速計を用いたが, ノズルが小さく, その壁面を通して測定することが困難なため, ノズル側壁を必要な長さに切断して, その直後の噴流の流速を測定し, ノズル内の流速とした. このため, 境界層の厚さが変化することと, 測定位置が多少ずれることの問題が生じるが, 真空タンク内圧力を流速測定位置のノズル切断前の圧力と一致させることによって, かなり長く一定流速の噴流状態が続くことが確認されたことから, 測定の誤差は少ないものと推定した.

本報ではノズル超音速部の開き角が 3.5, 7, 14° の 3 種類のノズルについて, 貯気そう圧力約 20~100 kPa, 貯気そう温度約 300 K, モル混合比 0.01~0.09 の範囲で実験を行った. 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前報⁽⁵⁾と同じである.

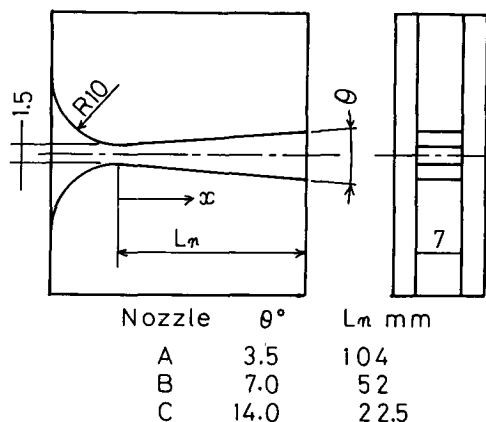


図 1 超音速ノズル

* 昭和 58 年 10 月 1 日 北陸信越支部信越地方 (長野) 講演会において講演, 原稿受付 昭和 58 年 12 月 27 日.

** 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255).

3. ノズル有効断面積の見積もり

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、有効断面積 A_e を

$$A_e/A^* = C_0 + C_1(x/L_n) + C_2(x/L_n)^2 \quad \dots\dots(1)$$

と表した。ここで A^* はノズルののど部断面積、 x はのど部からの距離、 L_n は超音速部の長さである。 C_0 はノズルごとに定まる定数であり、 C_1 、 C_2 は以下の

ように表される、

$$C_1 = C_{10} + (C_{11} + C_{12}p_0)W \quad \dots\dots(2\cdot a)$$

$$C_2 = (C_{21} + C_{22}p_0)W \quad \dots\dots(2\cdot b)$$

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

$$M_a = NM_1 + (1-N)M_2 \quad \dots\dots(2\cdot d)$$

$$\mu_{va} = N\mu_{v1} + (1-N)\mu_{v2} \quad \dots\dots(2\cdot e)$$

ここで p_0 は kPa で表した貯気そう圧力、 N はモル混合比、 M_1 、 M_2 はそれぞれ SF₆、Ar の分子量、 μ_{v1} 、 μ_{v2} はそれぞれ SF₆、Ar の粘性係数である。 C_{10} は式(1)の C_0 とともにノズルの幾何学的形状を表す。一方、 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{21} 、 C_{22} はノズル内に発達する境界層の厚さを表す係数であり、ノズル内に純 Ar を流した場合の静圧分布の実験値と式(1)にもとづく等エントロピ線が一致するように最小二乗法を用いて決定した。これらの係数を表2に示す。この結果、実験値と計算値はほぼ一致し、超音速流の主流部については式(1)が適用できることが確認された。SF₆の凝縮を伴う超音速流れについて考察する場合、ノズルの壁面付近では高温(おおむね貯気そう温度)となり、凝縮は発生しないので、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

ノズル内静圧分布と流速の実験結果、および静圧と流速から求めた静温度⁽⁵⁾をモル混合比 $N=0.02$ 、貯気そう圧力約 100 kPa の場合について図2(a)~(c)に示す。この図でノズル A、B、C の順に超音速部の開き角が 3.5、7、14° と大きくなる。また、前報⁽⁵⁾で報告した方法による解析結果も合わせて示す。凝縮の開始⁽⁵⁾する位置のノズルののど部からの無次元距離 $X(=x/L_n)$ はノズルの開き角が大きくなるにしたがって、0.26、0.30、0.39 と下流へ移動する。これは開き角が大きくなると単位時間当たりの温度の低下が大きいために、凝縮核が生成し、それが成長して凝縮の影響が現れるまでに、ノズル内気体はより多く膨張するためである。

貯気そう圧力が低くなると図2(d)~(f)に 30 kPa の場合について示したように、ノズル内流れに対

表1 実験条件

NO.	p_0 kPa	T_0 K	N	Nozzle
A01	103.7	286.7	0.010	A
A02	101.1	286.5	0.020	A
A03	101.9	287.8	0.030	A
A05	100.9	286.3	0.050	A
A07	102.1	291.2	0.070	A
A09	101.7	289.3	0.090	A
A12	53.0	287.2	0.020	A
A13	53.7	288.0	0.030	A
A15	52.9	287.1	0.050	A
A17	53.2	291.4	0.070	A
A21	30.9	286.7	0.010	A
A22	32.1	287.7	0.020	A
A23	32.9	288.1	0.030	A
A25	32.7	287.8	0.050	A
A27	32.2	291.0	0.070	A
A31	20.0	286.7	0.010	A
A32	19.8	288.1	0.020	A
A33	20.0	288.3	0.030	A
A35	19.5	288.8	0.050	A
B01	99.6	297.2	0.010	B
B02	102.0	296.7	0.020	B
B03	102.1	298.8	0.030	B
B05	104.2	296.7	0.050	B
B07	103.6	289.6	0.070	B
B09	101.9	296.6	0.090	B
B11	51.1	296.3	0.010	B
B12	52.4	296.7	0.020	B
B13	52.5	299.5	0.030	B
B15	52.7	297.9	0.050	B
B17	52.0	295.1	0.070	B
B19	52.8	296.8	0.090	B
B21	30.1	296.0	0.010	B
B22	31.8	296.5	0.020	B
B23	31.4	299.1	0.030	B
B31	19.6	297.2	0.010	B
C01	105.1	292.5	0.010	C
C02	104.2	291.5	0.020	C
C03	104.3	294.0	0.030	C
C05	102.3	291.5	0.050	C
C07	102.5	291.4	0.070	C
C09	102.2	291.9	0.090	C
C12	51.6	292.1	0.020	C
C15	50.8	291.9	0.050	C
C22	29.6	292.3	0.020	C

p_0 : 貯気そう圧力、 T_0 : 貯気そう温度
N: モル混合比

表2 式(1)、(2・a)および式(2・b)の係数

Nozzle	C_0	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}
A	0.9938	4.237	-1.786	5.320×10^{-3}	-0.7915	1.304×10^{-3}
B	0.9751	4.241	-1.233	4.899×10^{-3}	-1.108	1.881×10^{-3}
C	0.8999	3.684	-0.5308	2.522×10^{-3}	-1.025	5.496×10^{-4}

するノズル開き角の影響が大きく現れて、凝縮開始位置がノズルAで $X=0.50$ 、ノズルBで $X=0.62$ となり、ノズルCでは凝縮が見られなくなる。これは凝縮核の生成率⁽⁶⁾が圧力の低下とともに小さくなり、ノズル内の凝縮核の数が減少し、単位時間当たりの凝縮量が減少するために、膨張速度の差、すなわちノズル開き角の影響が大きく現れてくるためである。凝縮核の生成率は図3に示すように SF_6 の圧力がわずかに変化すると大きく変化するので、ノズル内の凝縮現象に与える凝縮成分の圧力の影響が大きくなることがわかる。

凝縮開始点⁽⁵⁾の分布をノズルA, B, Cごとに図4に p - T 面上で示す。貯気そう圧力および混合比が一定の場合、ノズル開き角がA, B, Cの順に大きくなるにしたがって、膨張速度が大きくなるために、凝縮の開始がおくれ、開始点の温度は10 K程度ずつ低くなる。また、ノズルCは前報⁽⁵⁾のノズルBと膨張速度が同程度のため、開始点の分布は似た傾向を示している。

ノズル開き角と混合比が一定の場合は貯気そう圧力が低いほど、核生成率が小さくなるために、凝縮開始点は低温低圧側によった分布となり、貯気そう圧力が

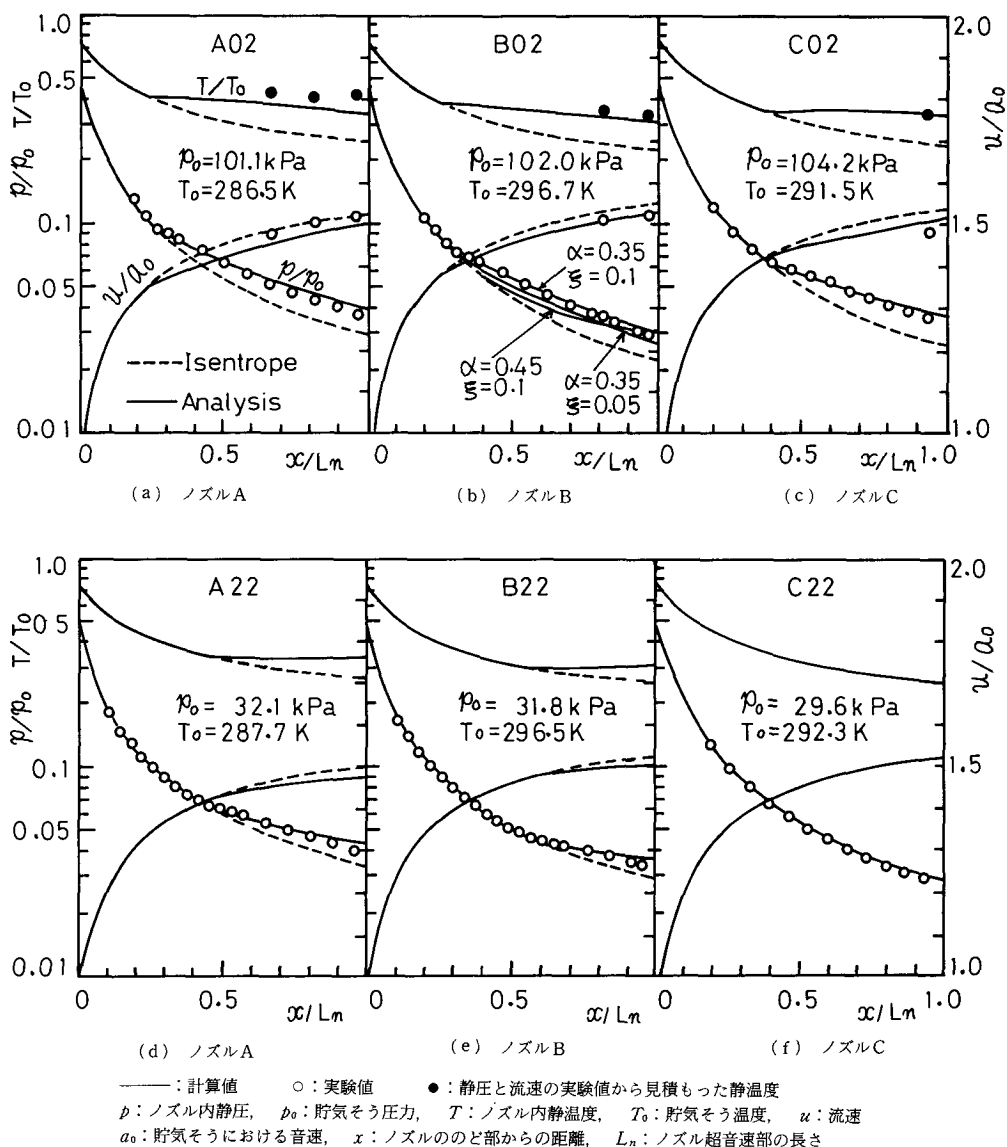


図2 ノズル内の静圧、流速および静温度分布

1/2 になると凝縮開始温度は 10 K 程度低下する。一方、核生成率に対する SF_6 の圧力の影響が図 3 に示すように大きいので、凝縮開始点圧力の変化の比は貯気そう圧力変化の比より大きくなり、貯気そう圧力が 2 倍の変化をすると、凝縮開始点圧力は 2.4~3.0 倍程度変化する。このように貯気そう圧力は凝縮開始点の温度・圧力に影響を与えるが、混合比一定の場合は貯気そう圧力の変化に伴って SF_6 の分圧も変化している。これに対して貯気そうにおける SF_6 の分圧を一定としたまま貯気そう圧力(全圧)を低くした場合(たとえば実験 A 01, A 12, A 23, A 35 の SF_6 の分圧はほ

ぼ等しい)でも凝縮開始点の温度・圧力は低くなる。これは以下のようにして説明できる。まず、分圧一定で貯気そう圧力を低くするにしたがって混合比は大きくなり(A 01 では $N=0.01$, A 35 では $N=0.05$)、 SF_6 の比熱比が小さいために、混合気体の比熱比も小さくなる。つぎに、比熱比が小さくなるために混合気体が SF_6 の飽和線近くまで膨張すると、ノズル内の圧力比(ノズル内圧力/貯気そう圧力)は小さくなり、 SF_6 の分圧も図 5 に示したように小さくなる。したがって凝縮核の生成率が小さくなるためである。この場合の SF_6 の分圧の差は大きいものではないが、凝縮核の生成率に対する圧力の影響が図 3 に示したように大きいので、 SF_6 の飽和線付近で生じる分圧の差がノズル内の凝縮現象に大きな影響を与える。以上のことから、低温過飽和の気体を得る目的のためには、ノズル開き角を大きくし、貯気そう圧力を低くするのがよい。さらに、貯気そうにおける SF_6 の分圧が一定の場合でも貯気そう圧力(全圧)を低くするのがよい。この場合凝縮開始後は貯気そう圧力が低いほうが SF_6 の分圧は高く保たれている。なお、図 5 の SF_6 分圧は、混合比から求めた貯気そうにおける分圧をもとに理論計算されたものである。

SF_6 の凝縮開始点を Wu⁽¹⁾ らは散乱光の実験から求めている。本研究とは凝縮開始点の定義⁽⁵⁾の差もあり、正確な比較はできないが、両者はオーダ的には一致している。しかし、Wu らの実験では実験条件によらず、ほぼ一つの曲線上に分布するのに対して、本報では前

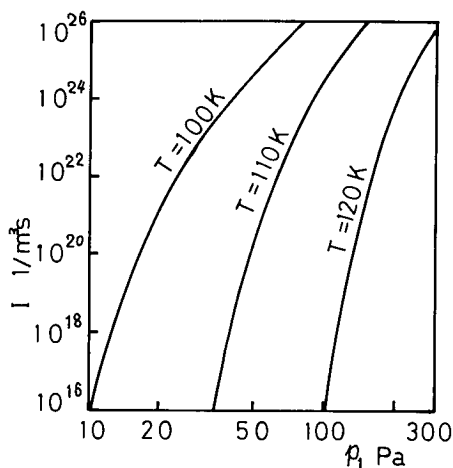
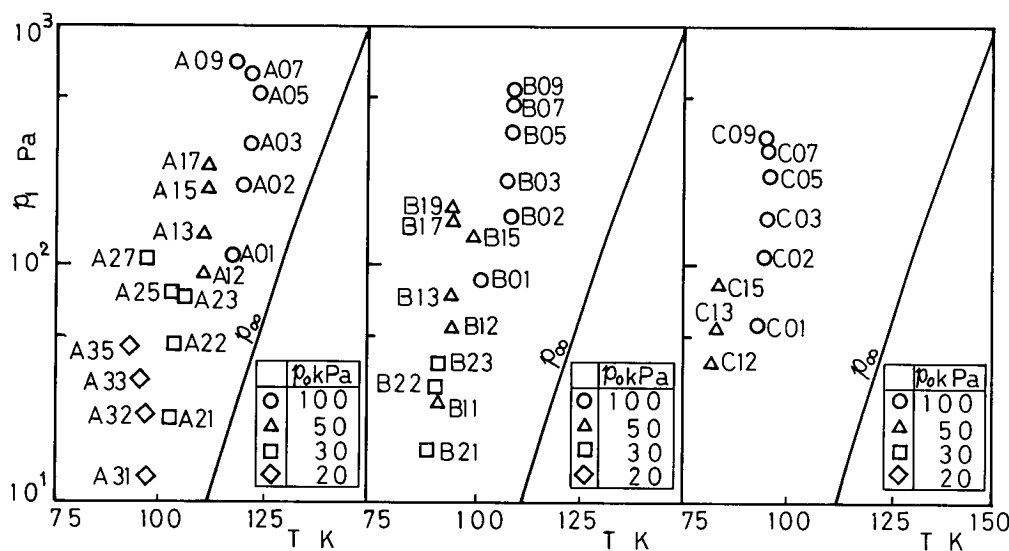


図 3 SF_6 の凝縮核生成率 I と SF_6 の分圧 p_1 の関係



(a) ノズル A

(b) ノズル B

(c) ノズル C

p_1 : SF_6 の分圧, p_0 : SF_6 の飽和蒸気圧, T : 温度, p_0 : 貯気そう圧力

図 4 凝縮開始点

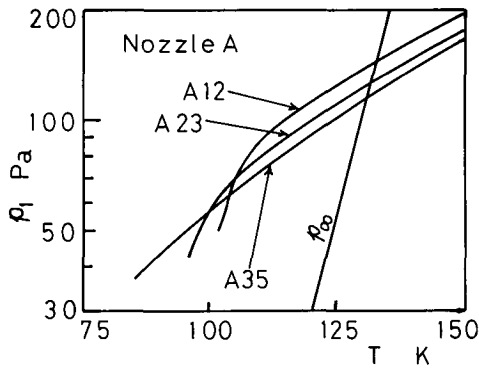
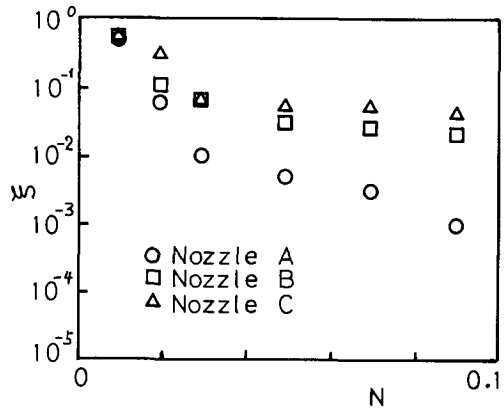
図5 ノズル内 SF₆ の分圧変化

図7 凝縮係数

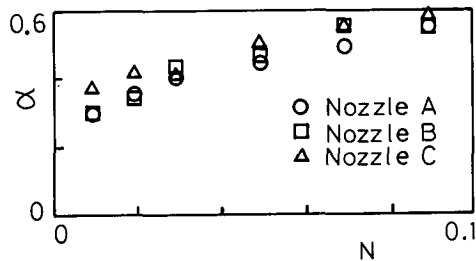


図6 表面張力パラメータ

述のようにノズルの開き角および貯気そう圧力の影響が現れている。

表面張力パラメータ $\alpha^{(5)}$ と凝縮係数 $\xi^{(5)}$ を変えた場合の静圧分布の変化例を図2(b)に示す。 α を大きくすると凝縮開始点は下流へ移行する。凝縮核の生成率に対する表面張力の影響が大きい⁽⁶⁾ ので α の0.1程度の変化で、凝縮開始点とその後の静圧分布に明らかな変化が見られる。 ξ を変えた場合は、ノズル内に凝縮核が存在して、はじめてその効果が現れるので、凝縮開始点の少し下流での静圧分布が変化する。 ξ を小さくすると図2(b)に示したように等エントロピ線に近づく方向に変化するが、その影響は大きくはなく、静圧分布に明らかな変化が現れるのは ξ を2倍(または1/2倍)程度変化させた場合である。以上のことから凝縮開始点近くの実験値から α が、それより少し下流の実験値から ξ が決定される。ノズルCにおいては凝縮開始後のノズル内静圧は SF₆ の転移温度⁽⁷⁾ である 96・26 K 前後であるため、前報⁽⁵⁾ で示したように、その温度で α が、さらには ξ が変化して、ノズル内の流れに影響を与えることが考えられるが、本報の実験範囲では、はっきりしない。 α と ξ の最適値をそれぞれ図6, 7に示す。 α はおもに混合比によって変化する、ノズル開き角の影響は少ない。一方 ξ はノズル

開き角と混合比によって変化する。 α , ξ を最適に選ぶとノズル内の静圧・流速・静温度の実験値と計算値は大体一致するが、 α および ξ は一定の値とはならない。

5. ま と め

超音速ノズル内で Ar に搬送された SF₆ の凝縮を伴う超音速流について、ノズル出口の設計マッハ数一定の条件のもとに、ノズル超音速部の開き角、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) 貯気そう圧力および混合比一定の場合、ノズル超音速部の開き角が 3.5, 7, 14° と大きくなるにしたがって、凝縮開始点の温度が約 10 K ずつ下がる。

(2) 混合比一定の場合、ノズル開き角が大きくなるにしたがって、凝縮の開始するノズル上の位置の無次元距離は下流へ移動し、この傾向は貯気そう圧力が低い場合ほど強くなる。

(3) 貯気そう圧力を下げると凝縮開始点の温度・圧力ともに低下し、貯気そう圧力が2倍の変化をすると、凝縮開始点温度は約 10 K、開始点の SF₆ 分圧は 2.4~3.0 倍程度変化する。

(4) 貯気そうにおける SF₆ の分圧が一定で、貯気そう圧力(全圧)が異なる場合は、貯気そう圧力を低くしたほうが SF₆ はより強く過冷却され、凝縮開始後は高い分圧が保たれる。

(5) 表面張力パラメータと凝縮係数は一定値とはならず混合比とノズル開き角によって変化する。

終わりに実験に協力してくれた、当時卒論学生の正木 昇、吉澤敦朋の両君に感謝します。

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2名, *J. Phys. Fluids*, 24-6 (1981), 1017.
- (5) 塩崎・ほか2名, 機論, 49-443, B (昭58), 1373.
- (6) Frenkel, J., *Kinetic Theory of Liquids*, (1955), 366, Dover.
- (7) 江田・ほか10名, 化学便覧, 基礎編II, (昭46), 780, 日本化学会.

討 論

〔質問〕 松尾 一 泰

〔九州大学総合理工学研究科〕

ノズルにおける流れの膨張速度を表すパラメータとして、本論文では、ノズルの開き角 θ が用いてあるが、たとえばスロート断面積を変化させると、 θ が同じでも膨張速度は異なってくる。一般的に議論するためには、膨張速度を表すパラメータとして、温度あるいは圧力の降下割合(付1) $[\dot{P} = -(u/p)(dp/dx)]$ のほうが適当と思われるが、この点についてご意見をお伺いしたい。

〔回答〕 ご指摘のようにノズル内流れの膨張速度を表すパラメータとして θ を用いることは一般的に議論する場合適当とは言いがたいと考える。しかし、ノズル内流れが等エントロピ変化であるとした場合でも、 \dot{p} は x の関数となり一定値とはならないので、形状の異なったノズル間で膨張速度を比較することは困難となる。さらに、実際の \dot{p} は凝縮の開始によって大きく変化するため、直接にノズル形状を表すパラメータとはならない。

このため本論文においては、ノズルののど部断面積

(付1) Moore, M. J. and Sieverding, C. H. 編, *Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators*, (1976), 130, Hemisphere Pub. Co.

を一定としたうえで、 θ を膨張速度を表すパラメータとしたが、膨張速度の適切な表現方法は今後の課題であるので、広くご検討、ご教示をいただければ幸いと考えている。

〔質問〕 山根 隆一郎〔東京工業大学工学部〕

膨張速度を変えるために出口マッハ数を固定してノズル開き角を変化させて実験されているが、図2に示されているように凝縮の発生はノズル内部であって、しかも位置が変化しており、したがって凝縮開始点の圧力、温度、マッハ数など流れの状態が一定とはなっていない。単に角度の影響だけでなく、これらの効果も含めた形で膨張速度を表現し、統一的に結果を整理することはできないか。

〔回答〕 貯気そう状態が一定でも、凝縮開始点の圧力、温度、マッハ数などが、ノズル超音速部の開き角とともに変化することが本論文の結論の一つである。膨張速度については松尾氏への回答で述べたとおり、現在のところ適切な方法が見当たらず、ノズルの開き角をパラメータとした整理のしかたとなった。いずれにしても今後の課題であるので、広くご検討、ご教示をいただければ幸いと考えている。