

# 10 トン溝構造燃焼器用噴射器面多孔質板の試作 研究

橋本 保成・秋葉鏖二郎・倉谷 健治・小竹 進\*・藤田 重実\*\*

(1983年2月7日受理)

## Development of Porous Face Plate and Investigation of Its Gas Dynamical Aspects for Transpiration Cooling

By

Y. Hashimoto, R. Akiba, K. Kuratani,  
S. Kotake and S. Fujita

**Abstract :** A porous injector face plate for hydrogen transpiration cooling of 10-ton thrust rocket thrust chamber using LH<sub>2</sub>-LOX as propellant has been developed and its gas dynamical aspects have been investigated with experiments. The wire mesh laminate fabricated, consist of 12-layers of 12-64 Dutch weave SUS 316 mesh bonded each other by diffusion bonding process under vacuum condition. Characteristics of these face plates are investigated in special reference to the flow rate and the temperature profile under the conditions of transpiration cooling. Data obtained by experiments are compared with the values predicted by existing theories with some extension needed to match the present range of parameters.

### 1. 序

宇宙研では昭和 55 年度から推進剤に液体水素と液体酸素を使用した推力 10 トン級の溝構造燃焼器 TC-1002 の試作を開始した。それに伴って噴射器面の燃焼ガスによる熱応力を緩和するため水素ガス発汗冷却用多孔質板が必要になった。当時国内ではこの仕様に合う様な多孔質板を容易に製品化できる状況になかったので TC-1002 では米国製多孔質板を使用した。一方、国内でもその技術を確立すべく開発を行ってきたが、昭和 55 年度中に試作品を完成することができた。TC-1002 燃焼器用多孔質板の場合には圧力約 40~45 kgf/cm<sup>2</sup>a, 温度約 100 K 前後の水素ガスが流れる。メーカーでは常温・低圧の空気流し試験を実

---

\* 東大工学部

\*\* ニチダイ K.K

施する程度であるので、多孔質板を発注するに際して及び完成した多孔質板が TC-1002 の仕様に合うかどうか評価するために低温・高圧水素ガスと常温・低圧空気との流量特性を相関づけておくことが必要になった。ここではまず TC-1002 用多孔質板の発汗冷却条件を明確にした後、試作完成した多孔質板の概略を紹介し、次にガスの種類、圧力及び温度等の条件によらず簡便に適用できる流量特性式を常温の空気、窒素、水素ガスを使ったフロー試験結果に基づいて定義する。[1]では TC-1002 用多孔質板について数値実験を行っているが、その結果はこの多孔質板差圧の関数を導入した実験式から求めた値とよく一致することを示している。

## 2. TC-1002 噴射器面発汗冷却

10 トン溝構造燃焼器 TC-1002 の噴射器面(図1)は直径約 220 mm で面中心に点火器噴射口を有し、144 個のコアキシャル型噴射要素を均等に分配したものである。この発汗冷却面多孔質板は SUS316 製でその有効表面積は約 299 cm<sup>2</sup> である。また図2に TC-1002 噴射器の発汗冷却モデルを示した。このモデルで示した発汗冷却系の定格設計点における諸元値は次の様な値になるよう計画した。

TC-1002 全水素流量	$W_f = 3.6 \text{ kg/sec}$
ノズルよどみ圧力	$P_c = 35.6 \text{ kgf/cm}^2\text{a}$
燃焼ガス側噴射器面圧力 ( $P_c$ ) <sub>inj</sub>	$= 37 \text{ kgf/cm}^2\text{a}$
水素噴射器内圧	$P_{fi} = 43 \text{ (45.6) kgf/cm}^2\text{a}$
噴射器内水素温度	$T_{fi} = 95 \text{ (109) K}$
発汗冷却率	$= 5.6 \text{ (6.5) \%}$

カッコ内の数値は昭和 57 年 9 月に実施した TC-1002 燃焼器大気燃焼試験結果 [2] か

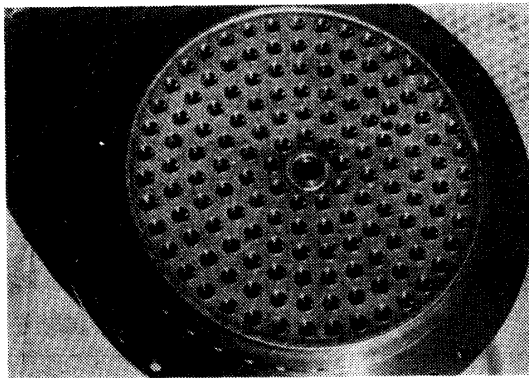


図1 TC-1002 噴射器面

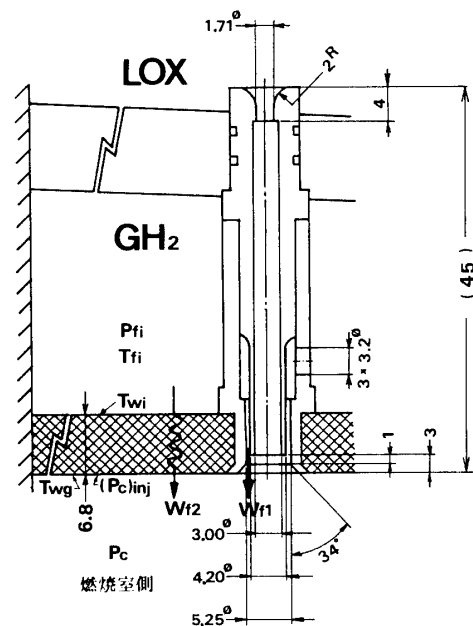


図2 TC-1002 噴射器面発汗冷却モデル

ら推定したものである。ここではコアキシャル要素からの流量を  $W_{f1}$ 、多孔質板を通る流量を  $W_{f2}$  として噴射器の全水素流量を  $W_f = W_{f1} + W_{f2}$  で表わし、発汗冷却 (Transpiration Cooling) 率は  $W_{f2}/W_f$  と定義している。多孔質板内の温度分布は発汗冷却水素流量の増減により変化するが、水素流量の減少方向に対しては座屈、寿命及び熱損傷等による限界があり、逆に発汗冷却流量が増大すれば特性排気速度が低下する[3]ことが分っている。この発汗冷却率に関して諸外国の液水/液酸エンジンの例をあげれば、米国の RL-10 の場合は約 9.4%，J-2 では約 3%，仏の HM-7 は約 10% 等である。このような発汗冷却率の値は噴射器面の大きさ、噴射要素数及びチャンバー内圧等により相対的に決めるものである。

TC-1002 では燃焼ガス側噴射器面温度が約 400~500 K 程度になるように発汗冷却水素流量を設定したが、これについては[1]において別途 TC-1002 設計点における発汗冷却水素流量を広い範囲で変化させて諸条件を評価しているので参照されたい。

### 3. 噴射器面多孔質板

#### 3-1. 多孔質板の基本要素

TC-1002 用多孔質板を試作するにあたり次の様な基本要素を設定した。

- 1) 平畳織り 12×64 メッシュのステンレス製の金網を使用する。
- 2) 製品の寸法は 300 mm×300 mm、肉厚 7±0.5 mm とする。
- 3) 空気流量特性は多孔質板差圧 (下流側大気解放) が 2 kgf/cm<sup>2</sup> (28.9 psi) のとき空気流量が 0.33±0.033 gr/sec/cm<sup>2</sup> (500±50 ft<sup>3</sup>/ft<sup>2</sup>/min) とする。

これに対して完成した多孔質板の基本諸元を実際に TC-1002 噴射器面に使用した米国製多孔質板と共に表 1 に示した。これらの多孔質板の空気流量特性については後述する。

#### 3-2. 多孔質板の試作

試作多孔質板 (表 1 の N-1) の製作工程を簡単に説明する。

表 1 多孔質板諸元

諸元名 (□位)	U-1	N-1
	TC-1002 に使用	予備
	米国製	日本製
メーカー	Pall Trinity Micro Corp	ニチダイ K. K
金網材質	SUS 347	SUS 316
種類	平たたみ織	平たたみ織
メッシュ	12 × 64	12 × 64
線径 (mm)	0.58 × 0.42	0.58 × 0.42
枚数	(13)	12
多孔質板肉厚 (mm)	6.8	6.5
密度 (kg / cm <sup>3</sup> )	6.904	6.27
空間率 (%)	12.6	17.7

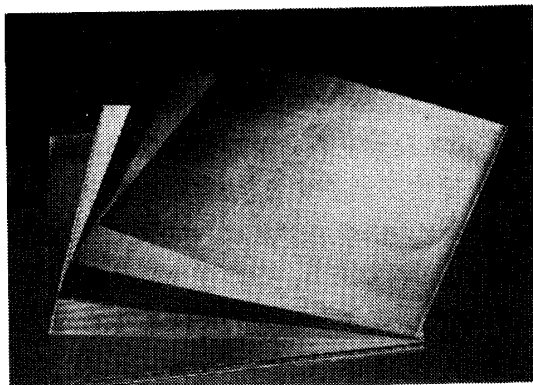


図 3-1 金網の重ね

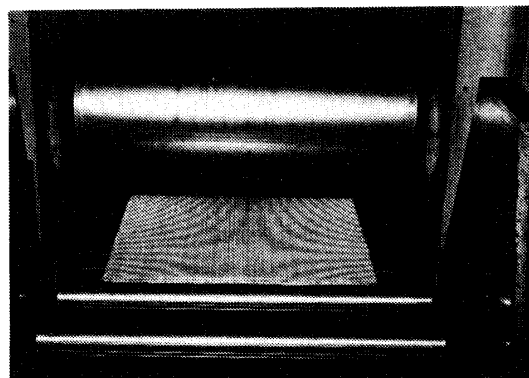


図 3-2 加圧ロール

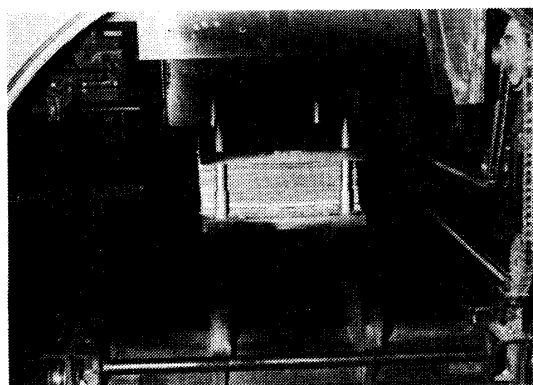


図 3-3 焼結

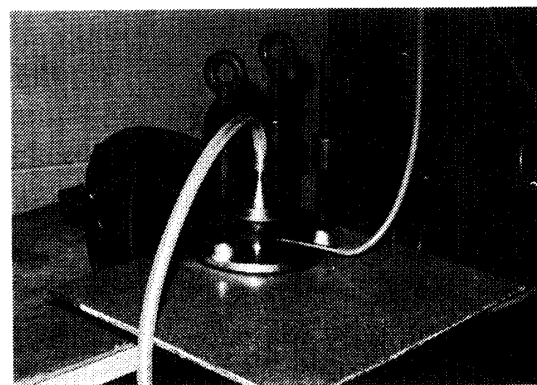


図 3-4 空気流し試験

- 1) 12×64 メッシュ, 線径 0.58×0.42 mm, 材質 SUS 316 平畳織り金網を 12 枚使用する。
- 2) GN<sub>2</sub> でコントロールした真空炉を使用し, 温度約 1050°C, 真空度約 0.1 torr (Cr の蒸発を防止するため) で金網の焼ナマシを行う。
- 3) 焼ナマシした金網を一枚ずつ表裏 4 回の予備加圧ロールを行う (図 3-2)。
- 4) 予備加圧ロールした金網を 370 mm×450 mm に切断し, 12 メッシュと 64 メッシュを直角にずらして交互に重ねる (図 3-1)。
- 5) 温度約 1390°C, 真空度約 0.1 torr で予備焼結を行う (図 3-3)。
- 6) その後加圧ロール (図 3-2), 焼結 (図 3-3), 空気流し試験 (図 3-4) の順で行い, 仕様条件を満足するまで段階的にこのサイクルを繰り返す。

### 3-3. 多孔質板の流路形状

加圧ロール前の多孔質板表面の様子を図 4 に示したが, 完成後の多孔質板内の流路は図 5 に示した様に軸に対して約 45 度傾斜したおしつぶした三角形の断面を持つ。

第 4 章で定義するレイノルズ数に使用している TC-1002 用多孔質板 (U-1) の流路等価直径  $d_e$  は次の様に定義している。

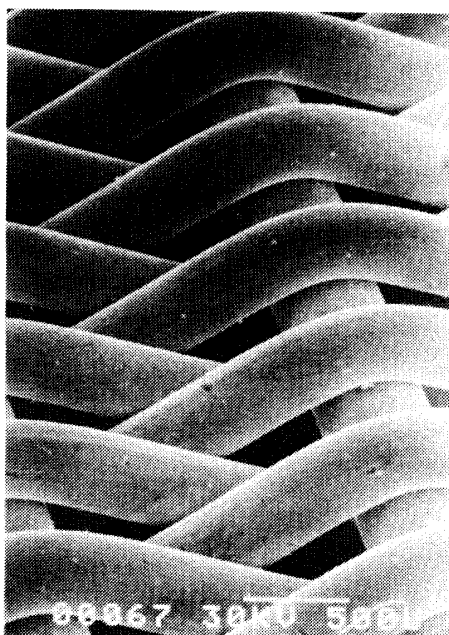


図4 12×64メッシュ金網表面

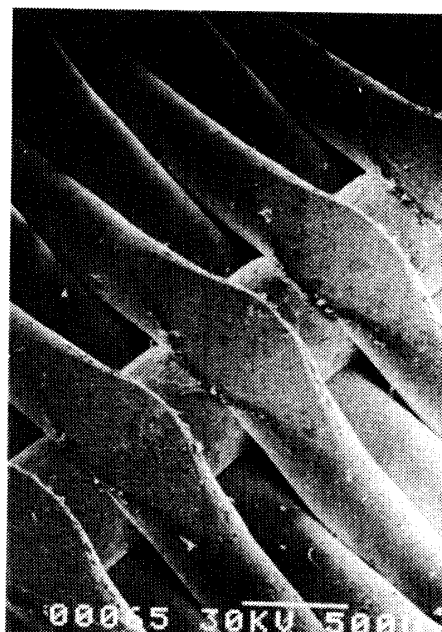


図5 多孔質板表面 (N-1)

$r$  を間隙流路の動水半径, 間隙率(間隙の体積/総体積)  $E \approx 0.12$ , 単位体積あたりのぬれ面積  $S \approx 34.3 \text{ cm}^{-1}$  とすれば

$$d_e = 4 \cdot r = 4 \cdot \frac{E}{S} \approx 0.014 \text{ cm} \quad \textcircled{1}$$

又, 多孔質板の軸(厚さ)方向の切断面は図6に示した様に軸と直角(層と平行)方向に大きな流路面積を有するのが分かる。この様な特徴に基づくガス流量特性については第4章で述べる。

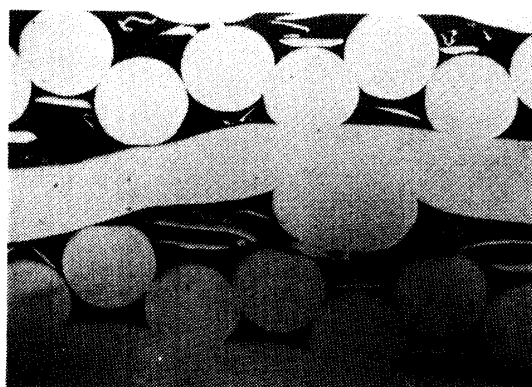


図6 多孔質板断面 (N-1)

## 4. 多孔質板の流量特性

## 4-1. 空気流量特性

## (1) 空気流し試験結果

図7に米国製多孔質板 (U-1) と試作多孔質板 (N-1) の空気流し試験結果を示した。図7に示したフロー試験結果 1~5 のうち添字 UP は多孔質板上流で Down は下流で流量測定を行っていることを示している。また UP は下流側が大気開放状態である。このうち 1, 3, 5 は図3-4に示す様に完成品に対して行ったものであり, 2, 4 の U-S, N-S は U-1, N-1 から直径約 37 mm のサンプル (図8右上) をカットしたものを図3-4の装置を使って試験したものである。

## (2) 場所による流れの不均一性

多孔質板の製品 (U-1, N-1) とサンプル (U-S, N-S) では流体力学的な境界条件が違っている。図7の右下に示した様にサンプル (a) ではカット面は完全にシールされている。実際の噴射器ではモデル (a) の様に流路方向流量  $\dot{W}_1$  のみである。しかし製品では  $\dot{W}_1$  と水平方向流量  $\dot{W}_2$  が存在する。メーカーでのフロー試験はモデル (b) の様になる。製品のフロー試験では  $\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$  とすれば,  $\dot{W}_1/\dot{W}$  は U-1 では約 0.46, N-1 では約 0.55 となっている。[1]ではこうした流体力学的境界条件の違いによる流量特性の違いについての理論的検討を行っているが, このフロー試験の結果に近い値である 0.54 が得られている。又, 図7の中で5は多孔質板下流で流量を測定したものである。

## (4) 間隙率と流量

図7から分かる様に N-1 は U-1 より 1.4~1.5 倍程度流れやすいが, これは多孔質板の間隙率の比 1.475 に近い値である。

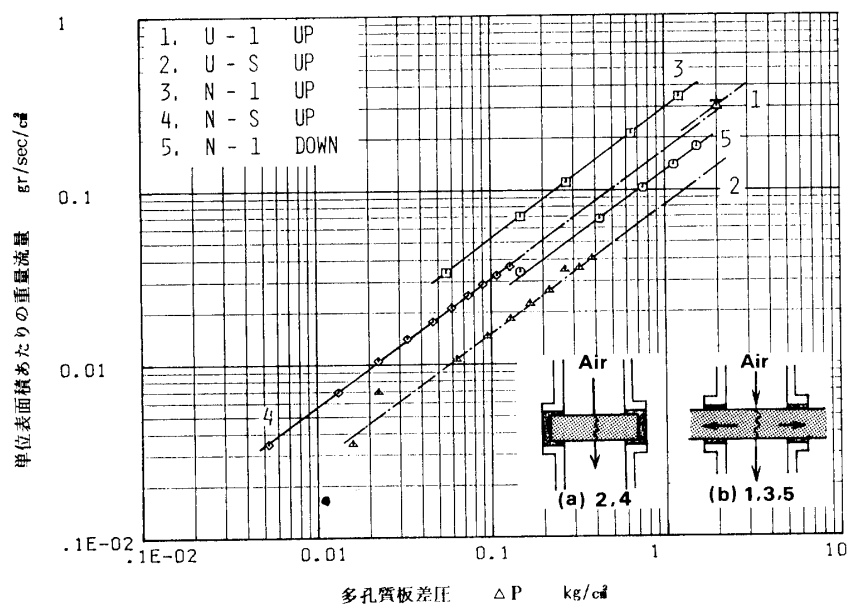


図7 多孔質板空気流量特性

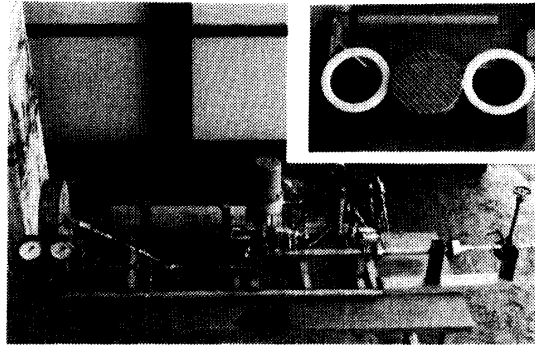


図8 多孔質板サンプル高圧ガスフロー試験装置

#### 4-2. TC-1002 設計点付近での多孔質板流量特性

##### (1) 流量特性の表示方法

昭和56年9月にNTCで図8に示した装置を使ってTC-1002設計点付近の圧力条件で常温水素ガスフロー試験を行った。この高圧フロー試験と空気流し試験結果を次の2種類の方法でまとめた。

- 1) 多孔質板流量をその差圧の関数として相関づける。
- 2) 多孔質板固有の摩擦係数を求める。

多孔質板流量特性を議論する上で第一の方法は流量特性の要求値計算及び製作した多孔質板の評価に便利であり、第2の多孔質板固有値は[1]で発汗冷却熱計算に使用している。

##### (2) 差圧の関数としての流量特性表示

多孔質板は流路の粘性摩擦抗力が極めて大きくかつ上流側と下流側の圧力  $P_1$ ,  $P_2$  の差が大であることから気体の圧縮性も考慮しなければならない。流れのレイノルズ数としてはおよそ  $10^2 \sim 10^3$  の桁であると推定される。抗力係数が一定であるとみなせるレイノルズ数範囲では水素の噴射器要素と同じく  $\dot{W}/(\dot{W})_{\max}$  を  $1 - P_2/P_1$  に対してプロットすれば一本の曲線となるはずである。これをしらべる目的で前述の試験データを整理したのが図9, 図10である。これらの図から見る限り圧力範囲や気体の種類によるレイノルズ数変化による影響はかなり顕著にあらわれているが、TC-1002の実用点付近の高圧領域ではこの影響はそれ程大きくはあらわれていない。この図から圧力比  $P_2/P_1$  が0に近づくと流れがチョークする傾向を持つことが分かる。図9, 図10はこの様に流れの特性を大局的に見極めるのに適しているが、レイノルズ数の影響が大きくあらわれるため特に低圧領域での空気を用いたフロー試験から実用域の特性を把握することが困難である。そこでDarcyの法則を圧力差の大きい場合に拡張するため粘性のみによる圧力降下を仮定し

$$-\frac{dp}{dx} = \Lambda \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho u^2 \quad \text{②}$$

を等温のもとで積分すれば

$$P_1^2 - P_2^2 = \Lambda \cdot R \cdot T \cdot \dot{W}^2 \quad \text{③}$$

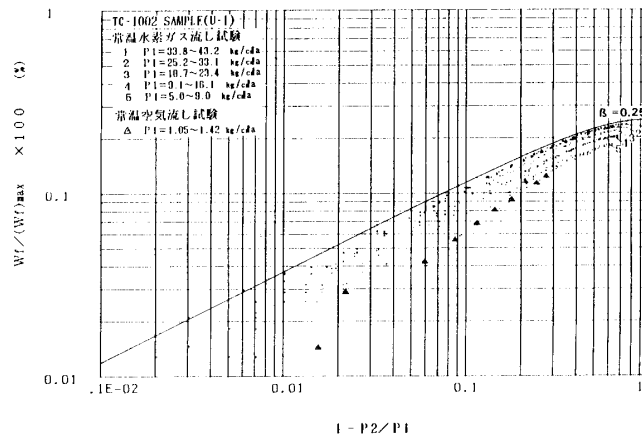


図9 多孔質板酸素ガス流量特性 (U-1)

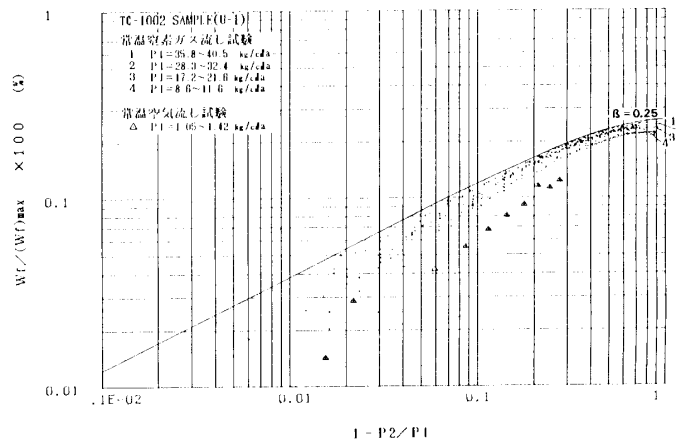


図10 多孔質板窒素ガス流量特性 (U-1)

の関係を得る.ここで $\Lambda$ はレイノルズ数 $R_e \propto W/\mu$ の関数であるから $\mu$ が一定の気体に対しては $\dot{W}$ と $(P_1^2 - P_2^2)/(RT)$ との関係は1つの曲線となることが予想される.前に得られたデータをこの形で整理したのが図11である.ここで差圧の関数 $f(\Delta P)$ は差圧を $\Delta P$ ,  $P_1$ と $P_2$ の相加平均を $\bar{P}$ , 平均流体温度 $T$ , 任意のガス流体と空気との分子量比を $m$  (gas)/ $m$  (air)としたもので次の様に定義している.

$$f(\Delta P) = \Delta P \cdot \bar{P} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{m(\text{gas})}{m(\text{air})} \quad (4)$$

図11ではほぼ予想通り一本の相関線の上に実験点がついているが,流量が大きくなるにつれ圧力が低い場合ほど小さい流量で流れが飽和する傾向がみられる.すなわち図9, 図10のチョーク現象があらわれている点ではこの相関線からのずれが見られる.しかしこの相関



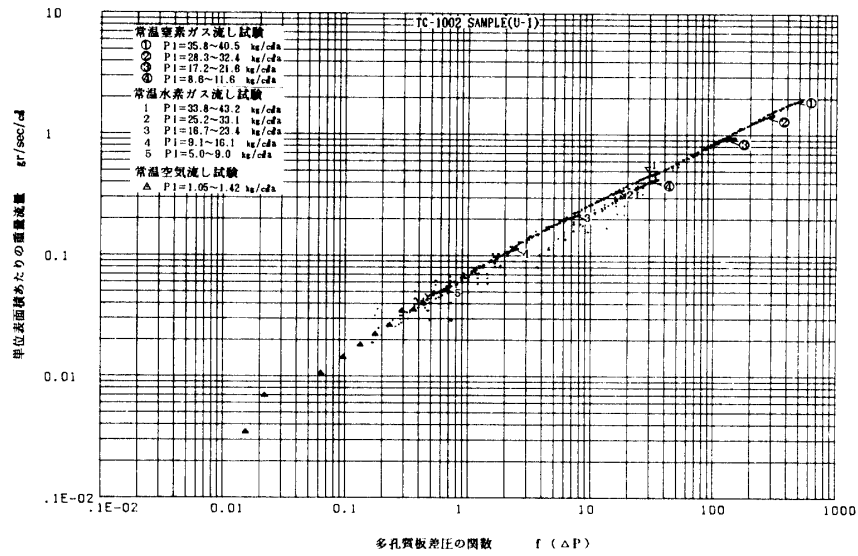


図 11 多孔質板ガス流量特性 (U-1)

線を延長することでチョークしない流れの大まかな予想を行うことは可能であり、その実用的な外挿法も検討された[4]。

いずれにしてもこの差圧関数から  $\bar{P} \cdot \Delta P > 2$  の範囲ではこの相関線は

$$\dot{W} \approx 0.079 \cdot \{f(\Delta P)\}^{0.543} \tag{5}$$

の様に表わされる。

図9, 図10, 図11等より TC-1002 の設計点では  $W = 0.64 \text{ gr/sec/cm}^2$  となる。また TC-1002 の多孔質板表面積は約  $299 \text{ cm}^2$  であるので設計点での発汗冷却流量は  $0.191 \text{ kg/sec}$  でこれは全水素流量に対して約 5.3% の値である。試作多孔質板(N-1)ではこの値は約 7.4% と推定される。

(3) TC-1002 用多孔質板 (U-1) の摩擦係数

[1]では TC-1002 噴射器面多孔質板(U-1)の発汗冷却熱計算を行っている。ここではその熱計算に対応させる U-1 の設計点近傍での摩擦係数を求める。

多孔質板内流れのレイノルズ数を  $Re$  として

$$Re = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{u} \cdot d_e}{\varepsilon \cdot \mu} \tag{6}$$

また摩擦係数を  $\lambda$  として

$$\lambda = \Delta P / \left( \frac{\bar{\rho} \cdot u^2}{2g} \right) \cdot \left( \frac{d_e}{t} \right) \tag{7}$$

と定義する。 $\bar{\rho}$ ,  $\bar{u}$  は気流の平均密度, 平均流入速であり,  $d_e$  は気流流路の等価直径であ

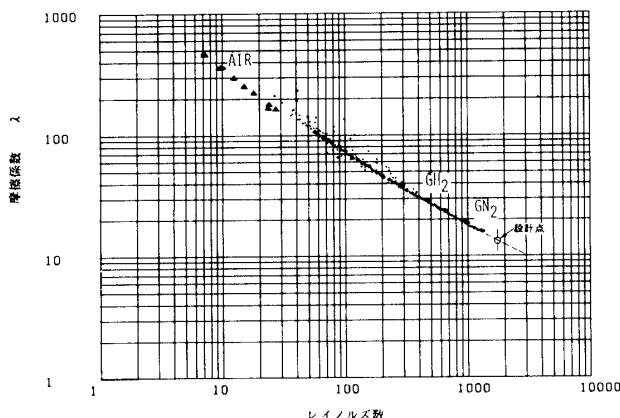


図12 TC-1002 多孔質板摩擦係数 (U-1)

る。図12にはU-1の $\lambda$ と $Re$ の関係を示したが、ここでは間隙率 $\varepsilon=0.12$ 、平均密度 $\bar{\rho}$ は多孔質板上流、下流の密度を $\rho_1$ 、 $\rho_2$ とすれば $\bar{\rho}=(\rho_1+\rho_2)/2$ である。

### 5. あとがき

多孔質板の試作にあたっては金網層間のはくり及び平面度の問題が発生したが加圧ロール方法、熱処理方法を改善することにより完成させることができた。今後この様な需要には容易に対応できよう。多孔質板メーカーでの空気特性試験は一般には下流側大気開放状態で行っている。しかしこれまでに議論した製品とサンプルの様に多孔質板の流体力学的な境界条件が違えば流量特性は違ってくる。このため製作過程での空気流し試験結果を利用する場合にはその流体力学的境界条件を常に考慮しなければならない。TC-1002 燃焼器大気燃焼試験結果にこれまでに議論した様な多孔質板差圧の関数を導入した流量特性式を使ってTC-1002 設計点での発汗冷却率を求めたが、その値は約6.5%程度となっており燃焼試験後の噴射器面の目視検査でも特に変色や熱損傷の痕跡は認められず、発汗冷却機能は十分に発揮されたものと推定される。

### 謝 辞

多孔質板断面カット試料は石川島播磨重工業 K.K に、その顕微鏡写真は宇宙研の斎藤敏氏にお願いしたものである。又、NTC での水素ガスフロー試験の計測は宇宙研の加勇田清勇、小田欣司両氏の助力を得た。末筆ながらここに感謝する次第である。

### 参 考 文 献

- [1] 小竹 進他, 「10 トン溝構造燃焼器噴射器面の発汗冷却熱計算」, 本宇宙研報告
- [2] 秋葉鏝二郎他, 「液水/液酸 10 トン溝構造燃焼器の試作と燃焼試験」, 本宇宙研報告
- [3] Walter F. Danko, "M-1 Injector Development Philosophy and Implementation", NASA TND-4730, 1968
- [4] 橋本保成他, 「10 トンチャンネル構造燃焼器の試作研究(その1) 液水燃焼器インジェクタ面多孔質板の試作研究」, 昭和56年度 宇宙輸送シンポジウム

## 付 録

## 摩擦抗力係数を一定とした一次元圧縮性流の計算法

液水エンジンの水素側噴射器や多孔質板を通しての流れについては粘性と圧縮性を共に考慮せねばならない。この様な流れを摩擦抗力係数一定の定断面一次元圧縮性流で且つ断熱であると仮定すれば、流量・圧力特性を比較的簡単な形で与えることができる。

文献[1]にしたがえば、この仮定のもとで運動量の関係は次式となる。

$$\frac{1-M^2}{1+\frac{\gamma-1}{2}M^2} \frac{1}{M} \frac{dM}{dx} = \lambda \frac{\gamma}{2} M^2 \frac{U}{4f} \quad (1)$$

ここで、 $M$ ：マッハ数

$x$ ：流れに沿う長さ

$\gamma$ ：比熱比

$f$ ：管路断面積

$U$ ：管路面周長

$\lambda$ ：定数

(1)式を  $x=0$  で  $M=1$  の条件で積分すると

$$\frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{1}{M^2}\right) + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[1 - \frac{2}{\gamma+1} \left(1 - \frac{1}{M^2}\right)\right] = \frac{\lambda U}{4f} X \quad (2)$$

の関係を得る。

同じ文献により任意の2点  $X_1, X_2$  での淀み点圧力  $P_{01}, P_{02}$  の比は次の積分で与えられる。

$$\ln \frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{\gamma}{2} \int_{x_1}^{x_2} \lambda M^2 \frac{U}{4f} dx$$

(1)式の関係を用いて積分を実行すれば  $X_1, X_2$  でのマッハ数を  $M_1, M_2$  として

$$\ln \frac{P_{01}}{P_{02}} = F(M_2) - F(M_1) \quad (3)$$

ただし、

$$F(M) = \frac{1}{2} \left[ \ln(M^2) - \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \ln \left\{ \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right) / \left(\frac{\gamma+1}{2}\right) \right\} \right]$$

となる。

さて、ある点のマッハ数  $M$  と圧力  $P$ 、流量  $G$  との間には次の関係がある。

$$\frac{P}{P_0} \frac{G_{\max}}{G} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} / \left\{ M \sqrt{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M^2 - 1)} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $P_0$ はその点での淀み点圧力、 $G_{\max}$ はその淀み点圧力においてこの断面の管路断面積から流出し得る最大流量である。一方、

$$\frac{G}{G_{\max}} = M \sqrt{\left( \frac{(\gamma+1)/2}{1+(\gamma-1)M^2/2} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (5)$$

これらの関係を用いて淀み点圧力  $P_0^*$  の容器から、細長い管路を通じ圧力  $P_2$  の出口に向つて気体を流出させる場合を考える。

入口、出口に対してそれぞれ 1, 2 の添字を用いる。いま圧力  $P_0^* = P_{01}$  から摩擦抗力がない場合に流出する最大流量を  $G_{\max}^*$  とすれば、 $G_{\max 2}/G_{\max}^* = P_{02}/P_0^*$  であるから、

$$\frac{G}{G_{\max}^*} = \frac{P_{02}}{P_0^*} \frac{G_2}{G_{\max 2}} \quad (6)$$

で右辺は(3)、(5)より  $M_1, M_2$  から計算できる。また(4)の左辺は  $(P/P_0^*) \cdot (G_{\max}^*/G)$  とかけるから  $P_2/P_0^*$  も  $M_1$  と  $M_2$  で与えられる。

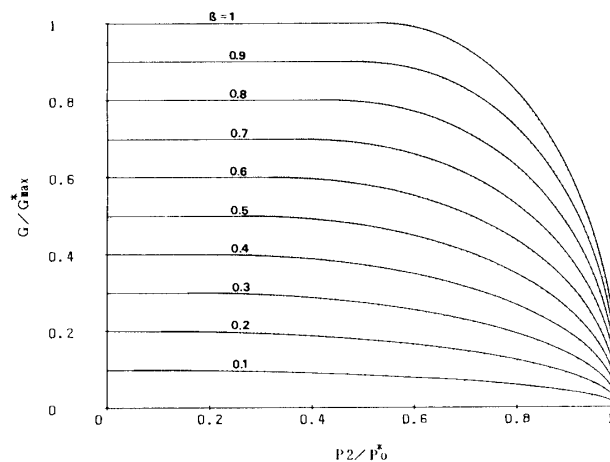
実用上実験値を整理する場合、管路の構造寸法を直接問題としないで相関線を計算する目的には流れがチョークした条件での流量比すなわち  $G_{\max 2}/G_{\max}^* = P_{02}/P_0^*$  を与えて  $G/G_{\max}^*$  と  $P_2/P_0^*$  の関係を求めることが望ましい。

この場合まず  $M_2=1$  とし(3)の関係から  $M_1$  を求め(2)よりこれに対応する  $\lambda \cdot U/4 \cdot f) \cdot x = L$  をきめる。

次に所望の関係を求めるためには任意の  $M_2$  に対応する  $M_1$  を求める必要がある。そのためには(2)の左辺関数を  $X(M)$  として

$$X(M_1) - X(M_2) = L \quad (7)$$

の関係を満たす  $M_1$  を見出してやればよい。本特集号ではこの種の相関線のパラメータとして  $\beta = G_{\max 2}/G_{\max}^*$  の記号を用いている。



### 参考文献

- [1] K. Oswatitsch, "GAS DYNAMICS", ACADEMIC PRESS, NEW YORK, 1956.