円筒孔を通過する希薄気体の穴板温度上昇 による流量抑制効果* (非定常実験と直接シミュレーション)

藤本 哲夫**, 宇佐美 勝***, 加藤 征三***

A Suppressive Effect of Rarefied Gas Flow through a Circular Orifice Caused by Temperature Increase of the Orifice Plate (The Unsteady Approach and the Direct Monte-Carlo Simulation)

by Tetsuo FUJIMOTO, Masaru USAMI, and Seizo KATO

A suppressive effect of rarefied gas flow through a circular orifice caused by temperature increase of the orifice plate has been investigated experimentally using the unsteady approach. Also numerical analysis has been carried out using the direct simulation Monte-Carlo method. Flow rate decreases as the temperature of the orifice plate increases, in proportion to a square root of the ratio between gas temperature and the plate temperature. In spite of the finiteness of the simulation space due to the three dimensional extent of the space, the simulation results are in good agreement with the experimental results. The suppressive effect of gas flow is found appreciably even in the small plate of which high temperature area is several times as large as a cross-sectional area of its aperture.

Key Words: Compressible Flow, Rarefied Gas Flow, Orifice, Direct Simulation Monte-Carlo Method, Suppressive Effect of Flow

1. 緒 言

宇宙技術がスペースシャトルのような実用の時代を迎えたと同時に、真空技術の工業面への応用も活発になりつつある。それに伴い、希薄気体流に対する微小流量制御の方法が、今後、重要な課題になるものと思われる。著者らは、非定常測定法による実験とモンテカルロ直接シミュレーションとによって、小さな穴を通過する希薄気体流の研究を行ってきたが⁽¹⁾⁽²⁾、今回、穴板の温度上昇によって生じる流量抑制効果について、実験と数値シミュレーションの両面から調べてみた。

真空技術で取り扱う流量 $\dot{Q}$ は、一般に、(体積流量×圧力)の形で表されることが多く、温度一定のもとでは、質量流量 $\dot{m}$ に比例する。

$$\dot{Q} = P_1 \dot{V} = \dot{m} R T_1 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P_1 、 T_1 はそれぞれ、穴の上流側の圧力および絶対温度、 $\dot{V}$ は上流側でみたときの体積流量である。一方、流れやすさを示す量として、コンダクタンス F が、式(2)で定義される。

$$F = \dot{Q} / (P_1 - P_2) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P_2 は穴の下流側の圧力である。著者らの、いままでの実験によれば、コンダクタンスは気体の絶対温度の平方根に比例して増加する傾向にあり、したがって、式(1)、(2)より、質量流量 $\dot{m}$ は、絶対温度の平方根 $\sqrt{T}$ に反比例することになる。すなわち、気体の温度が上昇すれば、実質的な流量は減少する。これは、完全な自由分子流状態において、厚みのない穴の単位面積を通過する分子数 N が、式(3)で表され、やはり $\sqrt{T}$ に反比例することと一致する。

$$N = (1/4) n \bar{C} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 n ($\propto 1/T$) は分子数密度、 $\bar{C}$ ($\propto \sqrt{T}$) は分子の熱運動速度の平均である。

さて、穴板の温度 T_w を上昇させた場合、穴の近傍の気体は壁面でのエネルギー交換によって温度上昇を起こし、完全に板の温度にならないまでも、流量減少の効果が生じるものと考えられる。本研究は、このような考えに基づいて、非定常測定法による実験を行い、さらには、直接シミュレーション法により、その流量抑制効果に対する考察を行ったものである。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置を図1に示す。真空槽は隔

* 昭和60年4月1日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年11月2日。

** 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市中区千種不老町)。

*** 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

壁により、上流側の貯気室（直径 600 mm、長さ 400 mm）と下流側の膨張室（直径 600 mm、長さ 1600 mm）に分けられている。試験される円筒孔は、真ちゅう板にドリルで穴あけしサンドペーパーで仕上げたものであり、隔壁の中心に取付けられる。その穴板は、図 2 に示すように、板の両端に取付けられた 10 W のセラミックヒータ 4 個によって加熱されるようになっている。穴の直径 d は 2.001 mm で、板の厚みは 1.0 mm のものを用いた。板の下流側面に、穴の中心から直角な 2 方向に約 5 mm 間隔で C-C 熱電対を 7 個張り付け、板の温度を測定した。穴板温度 T_w は、上流側の貯気室内の気体温度 T_1 に対して、 $T_w/T_1=1.06, 1.12, 1.18, 1.24$ の四とおりに設定し実験を行った。設定温度に対する各測定点の温度変動は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内であることが確認されている。非定常測定法は、貯気室から穴を通して膨張室へ気体が流れ出たときの貯気室に生じる圧力降下率を測定し、流量を算出するものである。穴板を加熱した場合、特に圧力の低い状態で、板あるいは板の取付け部分から、ガス放出を生じて測定に悪影響を及ぼす可能性がある。それに対する補正法あるいは詳しい実験方法は前報⁽¹⁾で述べたとおりであるのでここでは省略する。

3. モンテカルロ直接シミュレーション

希薄気体問題の解法において、特に中間流領域では、有効な理論解析が確立されていない。一方、Bird を中心にして発展してきたモンテカルロ直接シミュレ

ーション法 (DS 法)⁽³⁾⁻⁽⁵⁾は、計算機の進歩とあいまって、最近、実用的な問題に適用されつつある。著者らは、先に、スリットを通過する流れ（二次元問題）に DS 法を適用し、満足できる結果を得た⁽²⁾。今回は、これを短い円筒孔通過の問題（軸対称三次元問題）に発展させ、さらには、穴板温度変化による影響もシミュレーションした。基礎となる考え方は、前報⁽²⁾に示されているのでここでは省略する。

円筒孔流れの問題が、スリット流れ問題に対して困難である点は、その三次元性のために、対象となる空間が大きくなることである。初期の Bird⁽³⁾は、このような軸対称問題に対しては、空間を分割するセルごとに分子に重みを与え、計算機上で取扱う分子数の低減を行うのがよいと提案していたが、著者らは、この方法では、重みの大きいセルから小さいセルへ分子が移動するとき、全く同じ速度成分の分子が数多く生じてしまう恐れがあるために必ずしも有効ではないとの結論を得ている。また、Bird も最近の文献⁽⁴⁾では、この方法は避けたほうがよいとの報告をしている。さて、先のスリット流れ問題のシミュレーションにおいて、上流側境界から流入させる分子に巨視的速度を与えることにより、計算の対象となる上流空間を小さくとり得ることが示された。図 3 は、 $1/K_n=8$ の場合における厚みなしスリットの流れにおいて、穴の入口中心から上流境界までの距離を変化させた場合に、無次元コンダクタンス $F/F_{f,0}$ （上流境界の温度における自由分子流コンダクタンス $F_{f,0}$ で無次元化されたコンダクタンス、 $P_1 \gg P_2$ の状態では質量流量の無次元表示に比例する）の計算結果がどのように影響を受けるかを調べたものである。図 3 より、穴入口中心から上流境界までの距離 $(x_0+y_0)/2$ をスリット幅 a と同程度にとっても、統計的誤差範囲内でほぼ一致した結果が得

図 1 実験装置概要図

図 2 穴板へのヒータ取付け図

られることがわかる。そこで、今回の円筒孔流れシミュレーションにおいては、穴入口中心から上流境界までの距離を穴直径と同じ長さにとって計算を行い（この場合、上流境界全体の面積は穴の断面積の12倍となる）、シミュレーション領域は小さくなるけれども、セルごとに分子に重みを与えることは避けて計算することを試みた。ただし、 $1/K_n$ が小さい領域では、セル一辺の長さを大きくとることよりシミュレーション空間を拡大して計算することを行った。

DS法を行ううえで、もう一つの重要な点は、空間をどの程度細かなセルに分割するかの問題である。図4も、スリット流れ問題に対して行った結果であり、セル一辺の大きさ C を代表長さ L (スリット幅 a の2倍) に対していろいろ変化させて調べたものである。セル一辺が、上流境界における平均自由行程 λ の2倍以下ならば、実験値に対してほぼ満足できる結果の得られることが示されている。今回の円筒孔流れのシミュレーションでは、セル一辺の大きさを穴直径 d (代表長さ) の $1/14$ まで分割して計算を行うので、 $1/K_n = 28$ ($K_n \equiv \lambda/d$) 程度までは信頼できる結果が得られるものと考えられる。また、最中心セルの体積とそのすぐ外側のセルの体積との間には、3倍もの差が生じるため、最中心セル内の分子数に限って、基準となる分子数20よりかなり少なく分子を配置し、全体の総分子数を低く抑えることを試みた。空間のセル分割の様子を図5に示す。

4. 結果および考察

4.1 実験結果 図6に、実験で得られた無次元コンダクタンスが、クヌッセン数の逆数 $1/K_n$ に対して変化する様子を示す。穴板壁面温度が上昇するにつれて、無次元コンダクタンスは減少することが示されている。先に述べたように、穴の付近の気体が、完全に穴板壁面温度まで上昇した場合、分子の熱運動速度

増加による流れの増加よりも、密度減少による流量減少効果がより大きく働いて、実質的な流量は元の値の $\sqrt{T_1/T_w}$ 倍に減少すると考えられる。図6中、各々の実線は、 $T_w = T_1$ の場合の実験結果を $\sqrt{T_1/T_w}$ 倍 (T_w は、実験で採用した4種類の穴板温度) して描いたものであるが、中間流領域において、それぞれの T_w における実験値とほぼ一致した結果になっているのがわかる。すなわち、穴板温度の上昇は、穴の付近の気体をその壁面温度まで上昇させたのとはほぼ同じ効果を有する。

自由分子流領域において、実線と実験値にずれが生じているのは、もはや分子は、高温の穴板の影響の及ばない空間から穴に突入してくるためである。また、連続流領域では、穴を通過する分子数が多くなるために、相対的に分子が壁から受ける影響は小さくなり、理想的ノズルを通過する断熱流に近い状態となって、やはり、上流境界の温度のみに支配される結果となる。

なお、図6に示したものは、シリカゲルの乾燥筒を

図4 シミュレーションの結果に及ぼすセル一辺の大きさの影響

図3 穴入口中心から上流境界までの距離の変化がシミュレーションの結果に及ぼす影響

図5 シミュレーションにおける空間のセル分割

図 6 無次元コンダクタンスに及ぼす穴板壁面温度の影響

通過させた空気を用いて得た結果であるが、窒素あるいはアルゴンを用いた実験も一部行い、同様な結果を得ている。

4・2 シミュレーション結果 図 7 に、穴板壁面温度と気体の温度との比 T_w/T_1 が 1.0 および 1.24 の場合のシミュレーションによる計算値と、それに相当する実験結果を示す。前報のスリット流れの計算の場合には、分子の壁面における反射過程が問題となったので、 $T_w/T_1=1.0$ に関しては、完全な拡散反射（散乱反射）の場合（●印）と、一部鏡面反射的性質を含む衝突の場合（○印）の二とおりについて計算を行った。ここにおいて、拡散反射の割合 α とは、シミュレーションにおいて 1 個の分子が壁面に衝突した場合、その分子の入射時にもっていた運動量のうち $(1-\alpha)$ だけの割合が反射後に保存され、残りの α の割合だけは新たに乱数によって計算された値が与えられるという意味をもつ。 $\alpha=1.0$ における結果は、実験値よりわずかに低い値であるものの十分よい一致を示している。よって、今回の円筒孔流れのシミュレーションにおいては、完全な拡散反射 $\alpha=1.0$ として計算してもさしつかえないと考えることができる。

図 7 において、 $T_w/T_1=1.24$ の場合のシミュレーションでは、上流境界における境界条件として二通りの条件を考えてみた。まず最初に、穴板温度にかかわらず、上流境界から流入する分子は気体の初期温度で完全に平衡状態に達しており、単に、境界に垂直方向の速度成分に巨視的速度だけの補正を加えるという条件によって計算を行った。図 7 中、▽印がそれを表しているが、実験値とは明らかに異なっていることがわかる。この理由は、実験における高温穴板の壁面

図 7 シミュレーションによる計算値と実験結果との比較 ($T_w/T_1=1.0, 1.24$)

面積は、穴面積より十分大きいにもかかわらず、シミュレーションでは、穴の数倍の壁面面積によってしか計算を行っていないことと、シミュレーション空間から上流境界の外へ逆流していく分子が穴板温度の影響を十分受けているにもかかわらず、その効果を無視しているところにある。そこで、別の境界条件として、穴板の位置から穴直径の 3 倍だけ離れた範囲の空間において、気体の温度が T_w から T_1 まで直線的に変化しているものと仮定し、シミュレーション空間に流入する分子の流入数および速度成分に補正を加えて計算を試みた。上流境界を通過して流入してくる分子は、境界外の点で発生させられるが、その発生位置における気体温度によって流入分子の情報を補正したものである。図 7 中の▽印は、その結果を表しているが、実験結果と非常に一致を示している。さて、実験では穴

図8 シミュレーション計算と実験結果との比較
($1/K_n=15$)

より十分大きな面積をもつ板壁面の温度を上昇させて測定を行っているが、シミュレーションにおける前者の境界条件というのは、実は、穴の数倍だけの面積しかもたない板の温度を上げて流量抑制効果を調べたものとも考えることができる。結果から明らかなように、そのようなわずかの面積の穴板温度上昇によっても流量の明らかな減少を生じており、穴板温度制御が、中間流領域における微量流量コントロールのための有効な手段になり得ることを示している。図8は、 $1/K_n=15$ において、 $T_w/T_1=1.06, 1.12, 1.18, 1.24, 1.30$ に対して後者の境界条件で計算を行い、実験と比較したものである。それらの結果が直線で結ばれ、その傾きがほぼ1であることは、やはり、流量が $\sqrt{T_1/T_w}$ で

変化することを示すものである。

5. 結 論

(1) 円筒孔を通過する希薄気体流に対して、穴板温度を上昇させることによって生ずる流量抑制効果を明らかにした。その流量は、気体の温度と穴板温度との比の平方根 $\sqrt{T_1/T_w}$ にほぼ比例して減少する。

(2) モンテカルロ直接法により、円筒孔を通る希薄気体のシミュレーションを行い、穴板温度が気体の温度と等しい場合あるいは異なる場合に対して実験結果とよく一致することが確かめられた。

(3) シミュレーション計算によると、穴板温度上昇の効果は、穴の周りのわずかな板面積の温度変化に対しても顕著に現れるものであり、これは希薄気体の微量流量制御に有効な手段になると考えられる。

本研究は、希薄気体が1枚の穴板だけを通る場合の効果調べたが、これを複数枚にすることにより、さらに複雑な効果を期待できると思われる。

本研究の一部計算には、岡崎国立共同研究機構分子科学研究所・電子計算機センターを利用した。

文 献

- (1) 藤本・宇佐美, 機論, 49-438, B (昭58), 359.
- (2) 藤本・宇佐美, 機論, 50-459, B (昭59), 2717.
- (3) Bird, G. A., *Molecular Gas Dynamics*, (1976), 118, Oxford Univ. Press.
- (4) Bird, G. A., *Proc. 12th Int. Symp. Rarefied Gas Dyn.*, 1 (1980), 239.
- (5) 南部, 機誌, 87-786 (昭59), 488.