

報告番号 ※ 第 3047 号  
之 中

## 主論文の要旨

題名 オリフィスおよび短い管路を通る  
希薄気体流に関する研究

氏名 宇佐美 勝

# 主論文の要旨

報告番号

※ 第 乙

号

氏名

宇佐美 勝

真空技術が工業のさまざまな分野で用いられるようになり、薄膜製造技術等において真空の質が問題になってきたのに伴い、いままで十分解明されていなかった中間流領域における管内流れの詳細な解析が要求されるようになってきた。希薄気体の管内流れに関する研究は真空技術の基本となるものであり、いままでも数多くの研究者によってさまざまな報告がなされているが、たとえば、質量流に関する実験結果においては研究者によってかなりの相違が見られるし、また、理論的にも、中間流領域においてボルツマン方程式に基づく気体運動論的理論解析が見いだされていないなど、最近の技術的要求を満たすまでの十分な解明はなされていない。管内流れの中でも特に解析が困難なのは、管の端の影響が大きく現われる短い管路および薄刃オリフィスであり、早急な解明が求められているのである。本論文は、このような背景の下に、オリフィスおよび短い管路を通る希薄気体の質量流の解析を実験と数値シミュレーションの両面から試みたものである。実験に関しては、いままでほとんど試みられなかった非定常測定法を用いることにより、さまざまな形状の管路のコンダクタンスに関するデータを得ることができた。また、この種の問題には適用されたことのないモンテカルロ直接法を用いてシミュレーション計算を行い、実験値によく一致する計算結果を得ることができた。以下に、本論文の概要を記す。

第1章では、まず本論文の目的と意義を明らかにし、希薄気体流に関する一般的な領域区分を述べた後、希薄気体の管内流れに関する過去の研究を概観し、解析の最も困難な中間流領域に対する理論的解析法の現状を述べた。

# 主 論 文 の 要 旨

報 告 番 号

※ 第 乙

号

氏 名

宇 佐 美 勝

第2章では、まず、オリフィスおよび短い管路を通る希薄気体の質量流に関する実験装置と非定常測定法の説明を行った。希薄気体の流れにおける微小流量測定法には、原理的に二つの方法がある。その一つは定常測定法と呼ばれるもので、穴の上流側と下流側とで流れの定常状態を作っておき、その際、外部から上流側(貯気室)へ供給する気体の量を大気圧状態で測定する方法である。この方法では容積的に非常に微量な量を計測することになるので、貯気室圧力が低くなるほど長時間にわたる計測が必要となり、圧力および温度の変動等によって大きな誤差を生じる可能性がある。他の一つは、非定常測定法と呼ばれるものである。外部から貯気室への連続的な気体の供給は行わず、貯気室から穴を通して膨張室(下流)へ気体の流れ出たときの貯気室に生じる圧力低下率を測定し、流量に換算する方法である。非定常法は、広い圧力範囲にわたる一連のデータを短時間に測定できるという特徴を持つが、反面、圧力の時間的変化割合を正確に測定しなければならず、このためには、連続的に使用できて安定な性能を持つ圧力計が不可欠である。また、高い圧力状態で貯気室容器壁面に吸着された気体分子が、低い圧力状態で再放出(ガス放出)された場合、大きな誤差を生じるという欠点がある。非定常法に伴うこのような困難さのために、いままでの多くの報告はほとんど定常法で実験されてきた。本研究では、微小流量測定に限界のある定常測定法を避け、非定常測定法を採用した。容器壁面からのガス放出効果に対しては、ガス放出率を一連のデータ取得時間内では一定であるとみなし、自由分子流領域における実験データからガス放出量を算出してコンダクタンスの補正を行うという方法を考

# 主 論 文 の 要 旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏 名	宇 佐 美 勝
<p>えた。また、マイクロコンピュータを利用した自動計測により、正確な時間間隔で圧力測定することを試みた。これにより、穴の上・下流の圧力比が大きい状態において、形状の異なるさまざまな管路のコンダクタンスに関し十分信頼できる結果を得ることができた。得られた一連のデータから、異なる圧力範囲 (<math>1/Kn &lt; 25</math>, <math>1/Kn &lt; 4000</math>) で有効に利用できる二つの実験式を提案した。また、従来得られている結果との比較も行った。さらに以下の結論を得た。(1)コンダクタンスは、自由分子流領域におけるNawyn-Meyerの理論に基づく値から、連続流領域におけるPerryの公式に基づく値まで、なめらかに変化する傾向にある。(2)中間流領域で有限長の円筒管に適用されるべきHanksの半実験式は、本実験で用いたような短い管路の流れには適用できない。(3)細長い矩形断面形状を持つ穴のコンダクタンスは、<math>l/L</math> (短管の長さとして代表長さの比) が小さければ、円筒孔のコンダクタンスとほぼ同じ値となり、円筒孔の実験に基づいて作成された実験式が利用できる。(4)本実験の温度範囲内では、コンダクタンスは絶対温度の平方根に比例する。</p> <p>第3章では、穴の下流側圧力<math>P_0</math>が上流側圧力<math>P_s</math>に対して無視できないような圧力比の下で、短い管路を通る希薄気体質量流に関する実験を行った。実験は、外部に対して閉じられた貯気室(上流)と膨張室(下流)において、上流から下流へ気体を流出させ、上流側の圧力減少と下流側の圧力上昇とから圧力比の異なる条件での質量流を測定するという方法で行った。このような非定常測定法により、以下の結論が得られた。(1)圧力比 <math>P_r = (P_s - P_0) / P_s = 0.5 \sim 1.0</math> において求められたコンダクタンスおよび流出係数は、<math>1 &lt; 1/Kn &lt; 1000</math> の領域で いずれもなめらかに</p>				

# 主論文の要旨

報告番号

※ 第  
乙

号

氏名

宇佐美 勝

変化する。(2)  $l/d=1.3$ の円筒孔を通る連続流に近い流れでは、 $Pr \geq 0.6$ において、圧力比の相違による流出係数の違いはほとんど見られない。(3)  $l/d$  が小さい円筒孔ほど、連続流領域においても圧力比の影響が大きく現われ、特に  $l/d=0.025$  の場合、それぞれの圧力比における流出係数は、連続流の極限でPerryの値に近づく傾向にある。

第4章では、計算機の飛躍的な進歩により可能となったモンテカルロ直接シミュレーション法に関し、まずその手法の概要を説明した。モンテカルロ直接法は、何万あるいは何十万もの分子の位置座標及び速度成分を計算機内に記憶し、時間の経過とともに、それらを合理的に変更していくことによって、気体の流れを計算機上で再現しようとするものである。分子は、まず、乱数により初期座標と初期速度成分とを与えられて、対象となる物理空間に配置される。その物理空間は、セルと呼ばれる微小空間に分割されている。分子の物理空間内での移動（固定壁との干渉および境界での分子の流入流出を含む）の計算と、分子間衝突の計算は、それぞれ、微少時間  $\Delta t_m$  ごとに独立して計算される。すなわち、次の三段階の過程により計算が行われる。(a)各々の分子は、その速度に応じて  $\Delta t_m$  時間だけ、他の分子と無関係に移動させられ、その際、固定壁における反射あるいは境界からの流出が生ずれば、運動量およびエネルギーの流入・流出量が計算される。(b)分子の移動によって、各々の分子の位置座標が変化するので、各セルに属する分子が調査され、分子間衝突の計算を容易にするために、前後参照用の配列 (Cross-Referencing Array) において分子の並べ替えが行われる。(c)分子間の衝突は、

# 主論文の要旨

報告番号

※ 第  
2

号

氏名

宇佐美 勝

衝突の法則に基づき、セル単位で計算が行われる。衝突分子ペアの選択、あるいは、衝突パラメータの決定（衝突後の速度成分の決定）に乱数が用いられるが、セル内の分子位置に関する考慮は行われない。上記(a),(b),(c)の過程が繰り返され、非定常問題にあってはアンサンブル平均が、定常問題にあっては定常状態達成後の時間平均が計算される。また第4章では、さらに具体的に、二体弾性衝突の力学と分子モデル、境界壁面での分子の反射に関する計算法、分子間衝突に関する計算法等を詳細に論じた。

第5章では、穴の上流と下流との間で大きな圧力比を持つ場合の二次元スリットを通過する希薄気体流をモンテカルロ直接法でシミュレーションし、実験値によく一致する計算結果を得ることができた。また、以下のことが判明した。(1)上流側空間の有限性から生じる計算誤差の補正に関しては、上流側境界から流入する分子に、平衡状態の速度分布を与えるのではなく、境界面に垂直な方向に巨視的速度を加えた速度分布を与えることが有効である。(2)希薄気体の質量流を詳細にシミュレーションする場合、分子の境界壁面における反射法則（たとえば拡散反射と鏡面反射の割合）を考慮して計算を行う必要がある。この反射過程の相違は、自由分子流領域よりも、中間流領域における流動抵抗により大きな効果を及ぼす。なお、 $1/Kn > 16$ の状態（連続流に近い状態）においては、空間を分割するセル一辺の大きさを、上流側境界における平均自由行程よりも大きくとったが、質量流に関して、シミュレーションの結果と実験値との間に大きな差異は現われなかった。

# 主論文の要旨

報告番号

※ 甲 第

号

氏名

宇佐美 勝

第6章では、円筒孔を通過する希薄気体流に関して、穴板の温度上昇によって生じる質量流の減少を、非定常測定法による実験とモンテカルロ直接法によるシミュレーションの両面から調べ、以下のような結論を得た。(1)中間流領域における流量は、気体の温度と穴板温度との比の平方根  $\sqrt{T_i/T_w}$  にほぼ比例して減少する。(2)モンテカルロ直接法による円筒孔通過の希薄気体シミュレーションは、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ついて、実験結果に一致する結果を導くことができる。(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、穴の周囲のわずかな板面積の温度変化に対しても顕著に現われるものであり、これは希薄気体の微小流量制御に有効な手段になると考えられる。

第7章では、第2章から第6章において記述された研究の大要を概観し、得られた結果を総括した。