J054041

非金属表面に対するエネルギー適応係数の計測に関する研究

白崎 信宏^{*1}, 山口 浩樹^{*2}, 今井 崇雅^{*3},
松田 佑^{*2}, 新美 智秀^{*4}Experimental Study on Measurement of Energy Accommodation Coefficient
on Nonmetal SurfaceNobuhiro SHIRASAKI^{*1}, Hiroki YAMAGUCHI^{*2}, Takamasa IMAI^{*3},
Yu MATSUDA^{*2} and Tomohide NIIMI^{*4}^{*}Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi, 464-8603, Japan

The flow around micro-systems is so-called the high-Knudsen number flow. The flow field cannot be treated as a continuum and the thermal conduction should not be treated by ordinary Fourier's law. In high-Knudsen number flows, the gas-surface interaction becomes important and the energy accommodation coefficient is often employed to analyze heat transport phenomena. The energy accommodation coefficient varies depending on combination of surface materials and gas species. Thus, it is important to use the appropriate energy accommodation coefficient for each pair of surface and gas for accurate thermal management. In this report, we obtained the energy accommodation coefficients for argon in contact with platinum surface in accordance with the Low-Pressure method, using the theoretical heat flux equation expanded to transition regime. The experimental result was compared with previous result in literature, which reported a relation between the energy accommodation coefficient and the surface temperature, and they are in good agreement.

Key Words : *Energy accommodation coefficient, Heat flux, Heat conduction, High Knudsen number Flow*

1. 緒 言

MEMS (Micro Electro Mechanical System) などに代表されるマイクロ・ナノデバイス周りの流れは、系の代表長さ L が気体の平均自由行程 λ と同程度まで小さくなるため、気体の希薄度を表す無次元数であるクヌッセン数 ($Kn=\lambda/L$) が大きくなる。このような高クヌッセン数流れでは、気体を連続体として扱うことが出来ず、気体分子同士の衝突よりも気体分子と固体表面との衝突が支配的となるため、熱設計等においては気体分子の固体表面との相互作用の理解が必要となる。気体分子の固体表面との相互作用は気体分子と固体表面の組み合わせ、表面温度、表面の清浄度など様々な因子に依存し、気体分子と固体表面との間でのエネルギーや運動量などの交換量が増える。このエネルギー交換や運動量交換の度合いを表す経験的パラメータとして適応係数があり、エネルギー適応係数は式(1)で定義される。

^{*1} 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

^{*2} 正員, 名古屋大学 工学研究科

^{*3} 名古屋大学大学院 工学研究科

^{*4} フェロー, 正員, 名古屋大学 工学研究科

E-mail: shirasaki.nobuhiro@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i - E_s} \quad (1)$$

ここで、 E_i は固体表面に入射する気体分子のエネルギー、 E_r は固体表面で反射した気体分子のエネルギー、 E_s は固体表面の温度に相当するエネルギーである。

近年の MEMS などの発達に伴い、高クヌッセン数流れにおける熱輸送現象を正確に予測することが必要となり、エネルギー適応係数の知見が重要となってきた。そこで、本研究ではマイクロ・ナノデバイスなどに用いられ、知見が少ない非金属材料のエネルギー適応係数の知見を得ることを目標とする。その準備段階として、金属表面に対するエネルギー適応係数を取得し、実験手法および実験装置の妥当性の評価を行った。本研究では固体試料として白金 (Pt)、気体分子としてアルゴン (Ar) を用い、それぞれエネルギー適応係数の温度依存性を過去の文献と比較した。

2. 適応計数の測定原理

本研究では、エネルギー適応係数を取得するため、Low-Pressure (LP) 法⁽¹⁾を用いて実験を行った。LP 法とは、系の圧力が自由分子流となる領域において、温度の異なる表面間で発生する熱流束の圧力依存性からエネルギー適応係数を決定する方法である。本研究の実験装置は表面として、球状のガラス容器とガラス容器の中心に配置した固体試料を用い、表面間に温度差をつけることにより熱流束を発生させた。LP 法で実現するような自由分子流領域において発生する熱流束は一般的なフーリエの熱伝導の法則とは異なり、自由分子熱伝導現象にも基づいて系の圧力に比例し、以下の式で表される。

$$q_{FM} = \frac{1}{2} \alpha \left(1 + \frac{\zeta}{4} \right) \frac{c}{T} p (T_H - T_C) \quad (2)$$

ここで、 α はエネルギー適応係数、 ζ は気体分子の内部自由度数、 c は気体分子の平均速度、 T は気体の平均温度、 p は圧力、 T_H と T_C はそれぞれ固体試料およびガラス容器表面の温度である。

本研究で用いる簡便な実験装置では、実験系のサイズや真空計の測定可能下限圧力の制限から自由分子流を実現できる圧力範囲が狭く、式(2)のみからエネルギー適応係数を求めることが困難である。そこで、自由分子流領域で用いられる式(2)と、フーリエの法則に従う連続領域の熱流束 q_C から導かれる、遷移流領域にも適用可能な経験的に導かれた以下の式(3)⁽²⁾を用いてより多くのデータから適応係数を求めることとした。

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{FM}} + \frac{1}{q_C} \quad (3)$$

また、本研究では装置内圧力は低圧であるため、熱対流は無視できるものとし、装置内の熱輸送現象は熱伝導と熱放射のみを考える。

3. 実験方法

金属表面として Pt を、試料気体として Ar を用いた。Pt 薄膜から作成したヒータに直接電流を流すことでヒータをジュール加熱し、表面に貼り付けた固体試料を加熱した。ピラニ真空計の温度補償回路を参考にヒータの温度制御を行った。ガラス容器内の気体はターボ分子ポンプおよび油回転真空ポンプで排気し、圧力は恒温型キャパシタンスマノメータで測定した。実験は自由分子流領域から遷移流領域の範囲(～約 3Pa 以下)で圧力を徐々に上昇させて測定を行った。熱流束はヒータを流れる電流と電圧から算出し、それらのデータに式(3)をフィッティングすることで適応係数を求めた。また、Pt 平板の表面温度は、あらかじめ測定したヒータの抵抗値と温度の較正式から算出した。

4. 結果と考察

図1はヒータ温度を419Kとして実験を行ったときの熱流束と圧力との関係である。図中の実線は式(3)で実験値に対してフィッティングを行った結果である。両者が非常に良く一致していることから、実験を行った圧力域において式(3)の適用が十分可能であるといえる。また、実験値は明らかに直線から逸脱しており、式(2)ではなく式(3)による圧力範囲の拡張が不可欠であることも明らかである。

エネルギー適応係数の温度依存性を調査した実験結果を図2に示す。また、実験系の妥当性を確認するための比較対象として、エネルギー適応係数と温度との関係を調べた Thomas and Olmer⁽³⁾の実験結果を載せた。図3から、概ね同程度のエネルギー適応係数の値が測定できていることが分かる。ただ、試料温度の上昇に伴いエネルギー適応係数が減少する傾向に関しては異なった結果となっている。この原因として、大気中からガラス容器内へ混入した Ar 以外のガス等の不純物の影響が考えられる。

Fig.1 Pressure dependence of heat flux between surfaces for argon at $T_H=419K$

Fig.2 Surface temperature dependences of energy accommodation coefficients

5. まとめ

本研究では、Low-Pressure 法によるエネルギー適応係数を取得できる実験系の構築を目標とし、Pt を金属表面として、Ar を試料気体としてエネルギー適応係数の測定を行った。その実験の結果、熱流束の圧力依存性を捉え、エネルギー適応係数を測定することが出来た。なお、従来の実験結果と概ね同程度の値であることが確認できたが、一方でエネルギー適応係数の温度に対する変化としては異なった傾向であり、更に検証が必要である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金の援助を受けて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) F. O. Goodman and H. Y. Wachman, "Dynamics of Gas-Surface Scattering," Academic Press, New York (1976), p. 260.
- (2) G. S. Springer, "Heat transfer in rarefied gases," Advances in Heat Transfer, ed. by T.F.Irvine, J.P.Hartnet, Academic Press, New York, (1971).
- (3) L.B. Thomas, F. Olmer, "The Accommodation Coefficients of He, Ne, Ar, H₂, D₂, O₂, CO₂, and Hg on Platinum as a Function of Temperature" *Journal of American Chemical Society*, Vol. 65(1943), pp. 1036-1043.