

計算科学技術分野におけるモンテカルロ（MC）法の活用 ～現状と将来展望～
 Applications of Monte Carlo method in computational science and engineering field
 -challenge and foresight-

(3) 気体温度勾配により物体に誘起されるクヌッセン力の
 DSMC 法による研究

(3) A study on Knudsen force exerted on solid body due to gas temperature gradient by DSMC method

*米村 茂¹

¹ 東北大学流体科学研究所

1. クヌッセン力とは

物体まわりの気体に、気体分子の平均自由行程程度の空間スケールで温度分布がある場合には、気体は局所的な熱平衡状態ではなく、物体表面に入射し散乱する気体分子によって物体表面にもたらされる運動量にアンバランスが生じる。このアンバランスによって物体に働く力をクヌッセン力と呼ぶ。最も良く知られているクヌッセン力⁽¹⁾は Crookes のラジオメーターの羽根車⁽²⁾を回転させる力であり、この場合には Radiometric force と呼ばれている⁽³⁾。

クヌッセン力を考える上で、そのメカニズムがもっとも分かりやすいのは熱ほふく流⁽⁴⁾におけるものである。静止した気体中にある物体の表面に定常な温度分布があり、重力などの外力が働かない場合を考える。我々の身の回りで見られるような物体表面の温度分布では、その空間スケールは気体分子の平均自由行程よりもずっと大きいので、物体周りの気体には物体表面の温度分布に応じた温度分布が生じるのみであり流動は生じない。しかし、この物体表面の温度分布の空間スケールが分子の平均自由行程程度まで小さい場合には現象は大きく異なってくる。その状況を図1に示す。

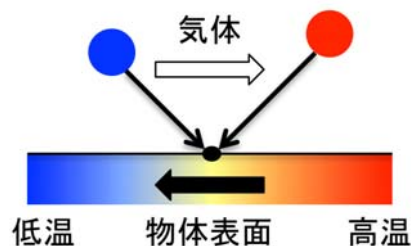


図1 熱ほふく流と物体表面に働く力

まず、高温表面近傍の気体は高温になり、低温表面近傍の気体は低温になるだろう。物体表面に微小な面要素を考えると、この面要素には高温側の気体からも低温側の気体からも分子が入射してくる。静止している気体では気体の流動はないので、分子の正味の流束はゼロとなり、高温側から入射する気体分子の数と低温側から入射する気体分子の数は同じとある。高温側の気体分子の運動量は低温側の気体分子の運動量より大きいので、この面要素には高温側から低温側に向かって力が働くことになる。物体表面が気体から力を受けるということは、作用反作用の関係から、気体はその反対向きの力を物体から受けることになる。結果として、気体は静止した状態を維持できなくなり、低温側から高温側に向かって流れが発生することになる。この流れを熱ほふく流という。このとき物体表面に働く力はクヌッセン力と考えることができる。本研究では温度勾配によるクヌッセン力を利用してマイクロスケールの物体を駆動することを研究する。このクヌッセン力を用いれば、モーターなどの運動する部品なしに、温度差を与えるだけでマイクロスケールの機械を駆動することが可能になるだろう。

*Shigeru Yonemura¹

¹Institute of Fluid Science, Tohoku Univ.

2. DSMC 法によるクヌッセン力の数値解析

上述したように熱ほふく流もクヌッセン力も、温度変化の空間スケール L が気体分子の平均自由行程 λ の程度まで小さくならないと現れない。つまりクヌッセン数 $Kn(=\lambda/L)$ が大きい場合にのみ見られる希薄気体流れ（分子気体流れ）特有の現象であると言える。クヌッセン数 Kn が 0.001 より大きくなると速度すべりなどの希薄気体効果が現れ始め、0.1 より大きくなると、もはやナビエ・ストークス方程式は適用できない。そのような希薄気体流れの支配方程式はボルツマン方程式であり、その確率解法としてモンテカルロ直接法(direct simulation Monte Carlo method, DSMC method)^(5,6)が広く用いられて来た。本研究では DSMC 法を用いて、微小スケールの温度分布により物体周りに生成される気体流れを数値シミュレーションにより再現し、物体に誘起されるクヌッセン力を調べる。得られた結果は講演当日紹介する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K06141 の助成を受けたものである。本研究の計算結果は東北大学流体科学研究所未来流体情報創造センターのスーパーコンピュータ SGI UV2000 を利用して得られた。

参考文献

- (1) J. Nabeth et al., Phys. Rev. E, 83, (2011), 066306.
- (2) W. Crookes, Phil. Trans. R. Soc. Lond., 164, (1874), 501.
- (3) A. Ketsdever et al., Vacuum, 86, (2012), 1644.
- (4) 曾根良夫・青木一生, 分子気体力学(朝倉書店, 1994).
- (5) G. A. Bird, Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Clarendon Press, Oxford, (1994).
- (6) 南部健一, ボルツマン方程式の確率解法 I, 東北大学流体科学研究所報告, 第 3 巻, (1992), 47-93.