

クヌーセンポンプを用いた高速希薄気体流れの 空気抵抗制御に関する数値解析

学生証番号 47-096078 氏名 濱崎 勝俊
(指導教員 鈴木 宏二郎 教授)

Key Words : Knudsen Pump, Rarefied Gas Flow, DSMC method, Spacecraft, Atmospheric Drag

近年、高度200km以下で運用される低軌道衛星の研究開発が盛んに行われている。宇宙空間には非常に希薄ながらも空気が存在するため、空気密度が比較的大きい低軌道で運用される人工衛星においては、空気抵抗による高度低下問題の対策が求められる。本研究では、人工衛星の隙間における空気抵抗に着目し、この隙間に対してクヌーセンポンプ¹⁾を適用することを考える。クヌーセンポンプはその壁面上の温度勾配によって低速な希薄気体流れを発生させる熱駆動型ポンプであり、この流れを記述する解析解はStruchtrup²⁾によって示された。人工衛星は高速希薄流れに晒されているため、構造上の隙間をクヌーセンポンプとして扱う場合は、高速希薄流れ中のクヌーセンポンプについて検討する必要がある。しかしこのような問題に対する解析解はまだ提案されておらず、またこれに関連する研究は充分になされていない。そこで本研究では、高速希薄流れ中のクヌーセンポンプについて、希薄気体流れの数値解析において有用とされる直接シミュレーションモンテカルロ(DSMC)法³⁾を用いて、2次元解析を行った。また本論文においては、一様流の速度、希薄度およびポンプの壁面温度分布をパラメータとしてポンプ内部流れ、ポンプ壁面の空気抵抗低減のメカニズムについて考察した。更に、クヌーセンポンプによる高速希薄流れの空気抵抗制御の実現可能性を検討した。

本研究では、クヌーセンポンプの2次元モデルとして、10 cm間隔でおかれた長さ1.0 mの平行2平板を設定した。壁面温度分布として、上流側300 K、下流側600 Kとなるような線形変化する温度分布と、全域で300 K一定となる温度分布の2通りを与えた。一様流として、流入速度1000, 8000 m/s, 温度195 K(固定とする)、希薄度 $Kn = 0.05, 0.5, 5.0$ の希薄流れを与えた。このような一様流条件に対して、壁面温度勾配の付加による空気抵抗の低減率を推算した。またここでは簡単のため、分子は単原子分子の剛体球、分子間は弾性衝突をするものと仮定した。その結果どの一様流条件においても、クヌーセンポンプが受ける空気抵抗は、壁面温度勾配を与えることによって数%低減することが分かった。また一様流の流速が小さく、希薄度が大きいほど、抵抗低減率が大きくなることが明らかとなった。しかし流入速度1000 m/sのとき、本研究において与えた希薄度において中程度にあたる $Kn = 0.5$ の場合は、 $Kn = 0.05$ の場合と比較して、抵抗低減率が小さくなることが分かった。本論文ではこれらの結果を元に、高速希薄流れに対するクヌーセンポンプの動作特性が、熱ふく流、壁面で拡散反射した分子の運動及び一様流の慣性の釣り合いによって決定される可能性があるかと考察した。

本研究においては、一様流速度および希薄度に対するクヌーセンポンプの基礎特性を得るために簡単なモデルを採用した。実用化を踏まえた実現可能性の検討や現象の解明にあたっては、各高度における大気のパラメータ、より正確な分子モデルの採用、温度分布およびポンプ形状の最適化、クヌーセンポンプによる空気抵抗低減システム的设计など、更に多くの視点から解析する必要がある。

[1] M. Knudsen. Eine revision der gleichgewichtsbedingung der gase - thermische molekularstromung. *Annals Der Physik*, Vol. 31, pp. 205–229, 1910.

[2] H. Struchtrup. *Macroscopic Transport Equations for Rarefied Gas Flows: Approximatioin Methods in Kinetic Theory*. Springer, 2005

[3] G.A.Bird. *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flow*. Clarendon press, 1994.