

稼働部のない熱分子ポンプ

名古屋大学 工学部 機械航空工学科 中野真吾

1. 目的

現在様々なポンプが普及しているが、多くの場合稼働部があることポンプや稼働部がなくても油を使用したものである。

稼働部があるということは同時に壊れやすいということである。また、油を使用していると油の蒸発によって蒸気圧が生じ真空を作ることができなくなり、それによって効率が悪くなるデメリットがある。

例えば、宇宙船で火星やそれより遠い惑星に行く時、効率が悪いのは当然大きな損失を生むし、壊れやすいものは替えのポンプあるいは修理する道具を必要とし、遠くに運ぶのに荷重量が多くなるのもまた多大な損失になる。よって稼働部なく壊れない熱ポンプを製作することは科学の発展に大きなつながることである。

今回は自分が製作を試みる2つの熱ポンプの原理を説明し、最後に調査を試みての感想を述べる。

2. Thermal Transpiration Pumps

Thermal Transpiration Pumps は分子の熱運動を利用して圧力差をつけるポンプである。

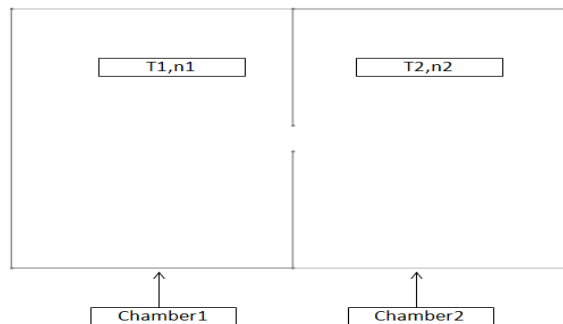


図1 Thermal Transpiration Pumps

まず図1にあるように2つの箱を用意する。この2つの箱はオリフィスと呼ばれる非常に小さい穴でつながっている。最初、この2つの箱の中の圧力 P_1 と P_2 は同じ圧力であり、温度 $T_1 > T_2$ である。 $T_1 > T_2$ でありながら $P_1 = P_2 = P$ が成り立つためには気体の状態方程式 $P = nkT$ (n : 分子数密度、 k : ボルツマン定数) より $n_1 < n_2$ となる必要がある。

上に述べたような2つの箱が十分小さいオリフィスでつながっているとき、

オリフィスを通る分子は分子数密度が平衡になるような向きに流れる。つまり分子は箱 2 から箱 1 へ向かう。

これは分子レベルでポンプ効果が起きていることを示しており、**Thermal Transpiration Pumps** の動作原理となる。

次に **Thermal Transpiration Pumps** の問題点を述べる。実際にポンプを製作するときには一つのポンプだけでは大きな圧力差をつけることは出来ない。高出力を出すためにこのポンプを連続させなければならない。さらに箱を連続させたときには温度差をつけるために図 2 にあるようなオリフィスがたくさんある管路の出口部分をエレメントで熱する必要がある。しかし、このエレメントによって箱内の全体が高温となってしまう温度差が生まれにくい。また、先ほど十分小さくと述べたオリフィスだがどの程度の穴の大きさにするのがよいかということも正確にはわかっていない。

だが理論上は実現可能であり、現在最も考えられている熱ポンプである。

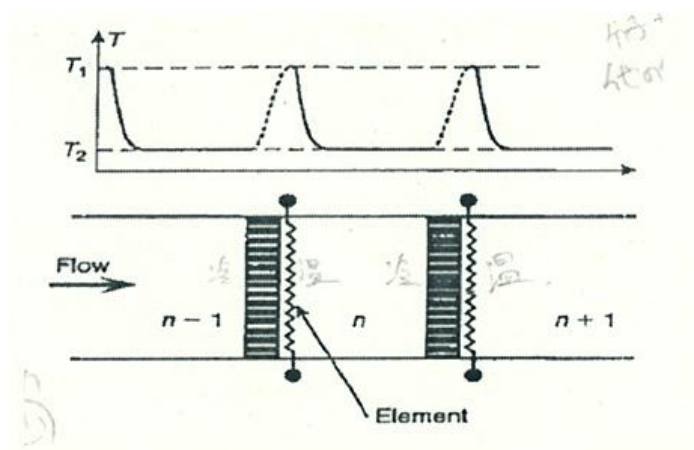


図 2 加熱システム

3. Accommodation Pumps

次に **Accommodation Pumps** と呼ばれるポンプを説明する。このポンプも前述のポンプと同様に分子の熱運動を利用したポンプである。

この **Accommodation Pumps** の原理を以下の図 3 を用いて説明する。

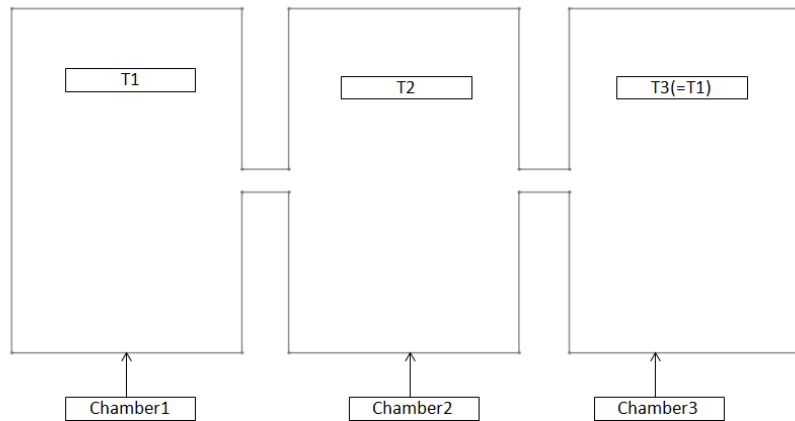


図 3 Accommodation Pumps

まず 3 つの箱を用意する。ここで圧力は全ての箱で等しく ($P_1=P_2=P_3$) かつ温度は $T_1=T_3$ であり $T_1(=T_2)>T_3$ である。ここで箱 1・箱 2 間の微小管路は鏡面であり、つまり摩擦などが一切ない壁面であるとする。また、箱 2・箱 3 間は凸凹の粗い拡散面である。

ポンプが動く原理を述べる前に鏡面と拡散面での分子の衝突に対する反射特性を述べる。鏡面では、分子の温度が壁の温度よりも高い場合、衝突時の入射に対して反射はより正接（壁に沿う）方向へ変化する。また逆に分子の温度が壁よりも低かった場合には、壁の垂直方向よりに反射する。（ただしこれらは確率分布で表した時の話であり、壁に衝突した全ての分子がこのような反射するわけではない）

また、拡散面では分子が壁に衝突すると衝突前の分子の入射角度・温度に依存しないランダムな反射をする。

これらの特性より箱 2 から箱 3 への分子の移動量と箱 3 から箱 2 への分子の移動量が等しくなり、全体として考えると箱 2 と箱 3 との間は分子移動が起きていないと考えることができる。

また、鏡面での分子の反射特性より全体として見ると、分子は高温側から低温側へ移動する。これによって図 3 を見ると分子は箱 1 から箱 2 へと移動していることがわかり（箱 2 から箱 3 への分子移動はなし）これによって、箱 2 の分子数密度が高くなることがわかる。

ここで先ほど用いた気体の状態方程式 $P=nRT$ より、最初箱 1 と箱 2 の圧力が等しくなっているということは $T_1>T_2$ より $n_1<n_2$ であることがわかる。しかし、上述した分子の移動によって分子数密度が箱 1 では減り、箱 2 では増えるということは圧力の平衡状態が崩れ圧力差が生じるということがわかる。これは微小なレベルでポンプが働いていることを証明しており、これ

が Accommodation Pumps の動作原理となる。

このポンプのデメリットは、実際に製作するときに鏡面を製作するコストが非常に大きいこと、また単純に鏡面と示したがその粗さの許容範囲もわからないことがある。また微小管路の断面積や管長の設定も容易ではない。また、このポンプで高出力を出すためには多段式にする必要があり、その数は Thermal Transpiration Pumps に比べてもさらに多くなってしまう。

4. 現状

今、この稼働部のない熱分子ポンプは世界的にも大きな注目を浴びているが、現在までに完全に成功をした成果はなく科学にとってこれからの大きな課題になっている。

しかし、理論通りの成果を収めた例こそないが、それにかかなり近いレベルで実験に成功したものは世界の学会や論文で発表されている。

私たちは現在この発表された論文の成功例を参考にすることで知見を広めている最中であり、来期に設計・製作に取り掛かる予定である。

5. 感想

このような、世界的に注目を集めている稼働部のない熱分子ポンプについて研究していくにつれて高等教育で培ったことの応用力を得た。

さらに世界最先端レベルでの研究競争に自分も参加しているということを非常に実感できた。

まだ、設計もしていないため現在のところ理論的な話しか出来ないが、これからモノを作るにあたって様々な課題にぶつかることで、技術者としてさらに成長したいと思います。