

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420107

研究課題名(和文)希薄気体効果を利用したマイクロ流れシステムの構築に関する研究

研究課題名(英文)Study on micro flow system based on thermal induced flow in rarefied gas region

研究代表者

松本 裕昭 (MATSUMOTO, Hiroaki)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10251753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：熱誘導流れを利用して作動するKnudsen ポンプの性能を実験的に検討した。本研究で利用した熱誘導流れは、熱吸収の異なる表面を持つ薄板周りに生じる Thermal creep flowで、薄板に赤外線ランプを照射することで、薄板の片側の面と、もう一つの面に生じる温度差を利用する。この板を二つの真空容器をつなぐガラス管内に10枚程度並べ、赤外線ランプを照射させたところ、二つの容器内圧力に差が生じ、圧力低い側の圧力が、1 Pa、薄板の温度差が40°の時、高圧側と低圧側の圧力比が0.96となり、本システムにポンプ作用のあることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, the performance of Knudsen pump which works by the use of thermal induced flow was studied experimentally. The driven force of the pump system presented in this study is thermal creep flow around laminated plates which one surface is black and the other is white. The thermal induced flow is generated by irradiating the infrared lamp to the laminated plates. The system was placed in a glass pipe which was connected to two vessels and irradiated by infrared. It was observed that the pressure ratio of the high pressure vessel and low pressure vessel was about 96% when the temperature difference between the black and white surfaces of the plates were about 40 degrees in the centigrade scale.

研究分野：流体工学

キーワード：希薄気体 熱誘導流れ ポンプシステム

1 . 研究開始当初の背景

機能材料の開発・製造等のミクロスケールの技術を用いる分野において、ミクロな領域での安定した流れの供給、制御が重要な課題になっており、作動機構が単純で小型化（マイクロ化）が可能な流れの輸送システムの構築が望まれている。このようなミクロな流れ場では、装置や流路等の代表長さが分子の平均自由行程と同程度のオーダーの希薄気体流れとなり、熱ほふく流（Thermal creep flow）や熱応力滑り流（Thermal stress slip flow）などの通常経験される連続体としての流れとは異なる特異な現象が生じることが知られている。熱ほふく流は壁面の温度勾配により温度の低い方から高い方に誘発される壁面に沿った流れで、熱応力滑り流は温度の異なる境界に挟まれた空間内に生じる非一様な温度分布により誘発される流れである。これらの流れは、壁面や空間の温度分布の非一様性により発生するため、境界面の温度をコントロールするだけで流れが生じ、ミクロスケール場における流れの供給源として積極的に利用することが試みられている。しかし、工学的に有用な流れを発生させるためには、大きな温度勾配を与える必要があり、ミクロな流れ場への適用には工夫が必要となる。これまで、温度勾配を高めるために必要となる長い流路をスパイラル状にしてコンパクト化する方法や、温度の高い容器と低い容器と太さの異なるパイプを周期的に配置し、細いパイプで生じる希薄気体効果と、太いパイプで生じる連続流を組み合わせることで多段ポンプと同等の作用をさせる工夫等が研究されてきている。しかし、いずれも装置が複雑になり、また断熱機構等の温度制御が難しく、より単純な機構の構築が望まれている。

2 . 研究の目的

本研究では、希薄気体効果の一つである、温度の異なる平板の先端に発生する thermal creep flow を利用し、従来のシステムよりも低温度比で駆動する新たな気体の輸送システムを構築するために、片側の面ともう一方の面とで熱吸収率の異なる薄板を層状に配置した多層構造体を、スケール効果を考慮して Knudsen 数が $Kn=10^{-2} \sim 1$ となるように真空容器内に配置し、赤外線ランプを照射することで、薄板の先端周りに thermal creep flow を発生させ、薄板の配置や寸法等を変えて、システムの性能を検証することを目的とする。また、数値解析も合わせて行い、システム内で生じている流動現象のメカニズムを解明することも目的とする。

3 . 研究の方法

本研究で想定しているポンプシステムは、図 1 に示すように、片側の面（表面）ともう片側の面（裏面）で熱吸収が異なるように色分けされた薄板に赤外線等を照射すること

で生じる表面と裏面の温度差によって誘起される物体先端周りの流れ（Thermal creep flow）を利用する。

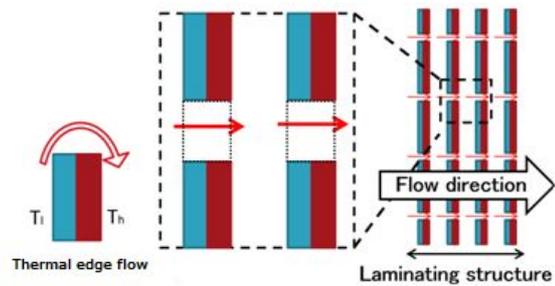


Fig.1 pump system

この板を多数並べることで一方向の流れが生じ、上流側と下流側で圧力差が生じてポンプ作用が発生すると考えられる。この原理を利用して本研究で作成した実験装置は、図 2 に示すように、二つの真空容器と二つの容器をつなぐ円管、Thermal creep flow が生じる希薄度を達成するための補助真空ポンプ、真空計、放射温度計から構成される。

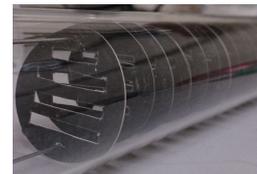
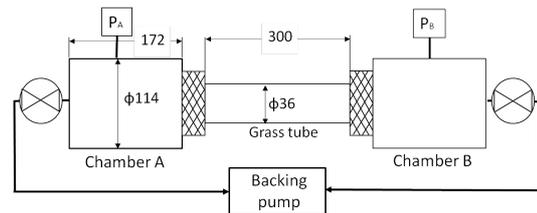


Fig.2 experimental equipment

二つの容器をつなぐ円管には、上記のような表面（黒色）と裏面（白色）で色分けされた薄板を 10 ~ 15 枚程度等間隔に並べてある。また、薄板には、スリットが設けられている。真空ポンプによりシステム内の圧力を 0.5 ~ 5 Pa 程度にし、赤外線ランプを照射する

と、薄板の表面と裏面で温度差が生じて容器 A から B に向かう流れが発生し、圧力差が生じるので、薄板の各面の温度と、2 つの容器の圧力を測定する。

なお、薄板の表面温度は、放射温度計で測定したが、ガラス管越しに測定するため、あらかじめ熱電対による測定結果とガラス管越しに測定した結果から、校正線を求めている。

4. 研究成果

4.1 数値解析結果

図 1 で示したポンプシステムの一部から、図 3 のような計算領域取り、システム内で生じる流れ場と温度場を DSMC 法により 2 次元の数値解析を行った。

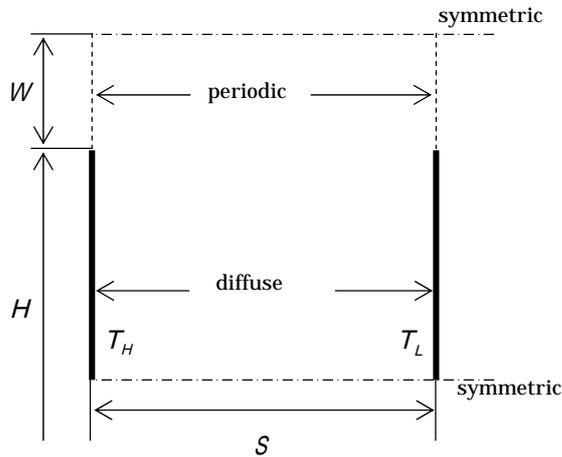


Fig.3 Calculation domain and boundary condition

図 4 に $W/H = 0.5$, $S/H = 1.5$, $T_H/T_L = 1.05$, $Kn = 1/H = 0.1$ の条件に対する流れ場の温度分布を示す。ただし計算に使用した格子幅は、 $\Delta x/H = \Delta y/H = 0.01$ 、計算に使用した分子数は $N = 2 \times 10^6$ 個、分子間衝突モデルは、剛体球である。

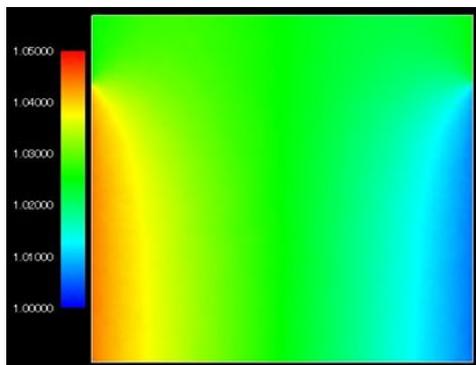


Fig.4 Temperature distribution in the flow field

図より、流れ場の温度は高温壁から低温壁に向かい、線形的に変化していることがわかる。ただし、気体が行れる部分は、高温壁と低温壁のほぼ平均温度で一定となっており、このシステムで輸送される気体の温度は、高

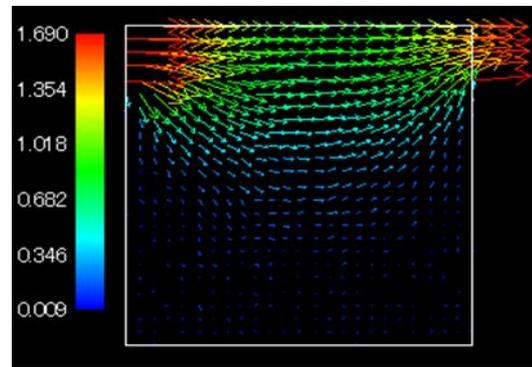


Fig.5 velocity vector distribution in the flow field

温壁と低温壁の平均温度になることが予想される。

図 5 に、流れ場の速度ベクトル図を示す。図より、壁面の片側の面と、もう片側の面の温度の違いにより、平板の先端周りに thermal creep flow が生じ、図の右側から左側に流れが誘発されていることが確認できる。この時、流速の最大値は、1.69 m/s であった。数値計算は流れ場を単純化しているが、高温側と低温側の温度比が、1.05 : 1 と比較的小さくとも、平板の先端に生じる thermal creep flow により気流を発生することが確かめられ、また、薄板を重ね合わせることで、一方向の流れに整流できることが確かめられた。この結果から、本研究で提案する、熱誘導流れを利用したシステムは、気流の輸送システムの駆動源になる可能性を示すことが出来た。

4.2 実験結果

図 6 に、図 2 で示した実験装置において、スリット幅 $W = 5$ mm、スリット間隔 $H = 5$ mm の薄板について、薄板間隔を $S = 2.5$ mm, 7.5 mm, 12.5 mm に変えた際に生じる容器 A と容器 B の圧力の比 p_A/p_B の p_A に関する依存性を示す。

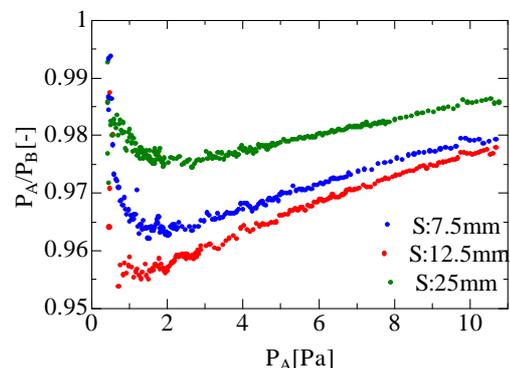


Fig.6 Pressure ratio P_A/P_B vs. P_A for the different slit interval S

薄板の黒面と白面の温度はそれぞれ、100, 140, 絶対温度による温度比が、1 : 1.1 となるように赤外線ランプを照射した。

図より、いずれの薄板間隔でも thermal creep flow により、気体が容器 A から B に流れ、容器 B の圧力が上昇していることがわかる。また、容器 A の圧力上昇と共に、圧力比 p_A/p_B は低下し、 $p_A = 1 \sim 1.5$ pa 付近で最小値となり、その後再び上昇していることが確認できる。 p_A/p_B が最小となる点で、ポンプ作用が最も大きくなっている。今回の条件では、薄板間隔 $S = 12.5$ mm の時が最もポンプ作用が大きく、圧力比 p_A/p_B は約 0.96 であった。

図 7 にポンプ作用が最も大きくなる薄板間隔 $S = 2.5$ mm について、スリット幅を $W = 5$ mm, 2 mm とした際に生じる容器 A と容器 B の圧力の比 p_A/p_B の p_A に関する依存性を示す。ただしスリット間隔は $H = 5$ mm に保っている。また薄板の黒面と白面の温度はそれぞれ 100, 140 である。図より、 $W = 5$ mm, 2 mm のいずれも、容器 A の圧力上昇と共に、圧力比 p_A/p_B は低下し、 $p_A = 1 \sim 1.5$ pa 付近で最小値となり、その後再び上昇することが確認できる。ポンプ作用は、 $W = 5$ mm, すなわちスリット幅とスリット間隔が等しい場合の方が、 $W = 2$ mm の場合よりもポンプ作用多少が大きいことがわかる。

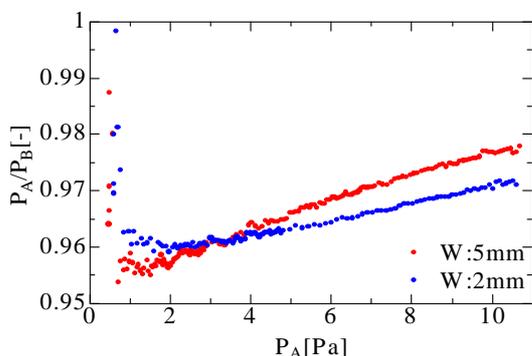


Fig.7 Pressure ratio P_A/P_B vs. P_A for the different slit width W

しかし $p_A > 3$ pa の領域では $W = 2$ mm の方がポンプ作用が大きく、 $W = 5$ mm の場合よりも圧力比の上昇率が小さくなっている。これより、 $W = 2$ mm の方が、 $W = 5$ mm よりも、広い圧力領域で、効率良く駆動することが予想される。

4.3 まとめと今後の展望

本研究で提案した、熱誘導流れを利用した希薄気体領域における気体の輸送システムは、従来のシステムよりも小さな温度比で稼働することが数値解析ならびに実験で確認され、希薄気体中の有効な気体輸送システムの1つになる可能性を示すことが出来た。

システムのポンプ作用は、駆動力となる薄板に開けたスリットの大きさや、薄板の間隔に依存することが確認され、今後、更なる最適化を行う必要があると考えられる。

また、スケール効果を考えると、システム

の小型化により、マイクロスケールの駆動源としての性能も検討する必要があると考えられる。

<引用文献>

- Sone, Y., Sugimoto, H., “Knudsen compressor”, Shinku, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol.45, No.3 (2001), pp.138-141.
 McNamara, S., Gianchandani, Y., B., “On-Chip Vacuum Generated by a Micromachined Knudsen Pump”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.14, No.4 (2005), pp.741-746.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計6件)

Hiroaki Matsumoto, Daigo Yamagishi, Takayuki Morokuma, and Kai Mihara, Study on Transport system based on thermal induced flow, 30th International symposium on rarefied gas dynamics, University of Victoria, 2016.

松本裕昭, 熱誘導流れを利用したポンプシステム, 日本機械学会 2015 年次大会, 北海道大学, 2015.

三原 嘉以, 松本裕昭, 熱誘導流れを応用したポンプシステムに関する研究, 2014 年度日本機械学会関東支部講演会, 横浜国立大学, 2015.

松本裕昭, 修正 Maxwell 型反射モデルを用いた平行平板間流れのモンテカルロシミュレーション, 2014 年度日本機械学会年次大会, 東京農工大学, 2014.

松本裕昭, 複数の適応係数を持つ Maxwell 型反射モデルを用いた希薄気体流れの Monte Carlo 解析, 日本流体力学解 2013 年会, 東京農工大学, 2013.

松本裕昭, 希薄気体流れの解析における複数の適応係数を有する Maxwell 型反射モデルの性能, 2013 年度日本機械学会年次大会, 岡山大学, 2013

6. 研究組織

(1)研究代表者

松本裕昭 (MATSUMOTO, Hiroaki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 10251753