

令和元年6月13日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06069

研究課題名(和文) 熱先端流れを応用した気流システムのマイクロ領域の流れ場への適用に関する研究

研究課題名(英文) Study on application of pump system by thermal induce flow to the micro flow field

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱誘導流れによって作動する希薄気体輸送システム(Knudsen pump)の性能を実験と数値解析により検討した。本研究のシステムは、2つのチャンバーに接続されたガラス管中に、スリットを設置した円板を複数枚配置することにより構成されている。2つの容器の圧力の比はスリットの形状と表面材料に影響されることが確認され、スリットの等価直径が小さいと、ポンプ効率は高くなる傾向にあることが確認された。DSMC法による数値解析では、ディスクの前後で圧力が急速に増加することが確認され、円板がスリット周りに発生する熱誘導流れによりポンプの役割を果たしていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱誘導流れを利用したポンプシステムが、熱容量の異なる表面からなる薄板を用いるといった単純な構造で作成できることが確認され、その性能を実験と計算により検討し、ポンプ効率と薄板に設置した熱誘導流れの発生源であるスリット形状の最適な形状を実験的に予測した他、数値解析により、薄板にポンプ作用のあることを明らかにした。また、本システムが効率よく稼働するには、クヌッセン数が  $Kn=0.1$  のオーダーであることも確認された。現時点では装置の大きさから真空中での稼働であるが、スケール効果から今後マイクロ流れの領域に適用できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, the performance of a rarefied gas transport system which works by thermal induced flow was studied experimentally and numerically. The system was constructed by arranging a series of some plates with slits in a glass pipe which was connected to two chambers. The ratio of the pressure of two chambers was affected by the plate slit shape and surface materials. The pumping efficiency tended to be high when the one fourth of the hydraulic diameter of the slit was small.

In addition to the experiment, thermal induced flow around a set of thin discs with slits in a straight pipe was investigated using the DSMC method. The simulation showed that the pressure rapidly increases before and after the disc, suggesting that the thin disc plays the role of a pump by generating thermal induced flow around the slits in each thin disc.

研究分野：流体工学

キーワード：希薄気体 熱誘導流れ Knudsen pump DSMC法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

機能材料の開発・製造等のマイクロスケールの技術を用いる分野において、マイ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。このようなマイクロな流れ場では、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)、熱先端流(Thermal Edge 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。また、熱先端流は、片側の面ともう片側の面で温度の異なる薄板の先端部発生する流れである。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、マイ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、熱ほふく流や熱応力滑り流れでは、大きな温度勾配を与える必要があり、特にマイ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(S. McNamara, Y. B. Gianchandani, J. Microelectro mechanical system, 14, 4 (2005))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、マイクロスケール領域に適用できるシステムは未だに十分構築されていない。マイクロスケール領域で作動するシステムを構築するためには、より単純な機構や小さな温度勾配や温度差で作動するシステムが望まれる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、熱ほふく流れの一種である熱先端流を利用した、単純な構造で、小さな

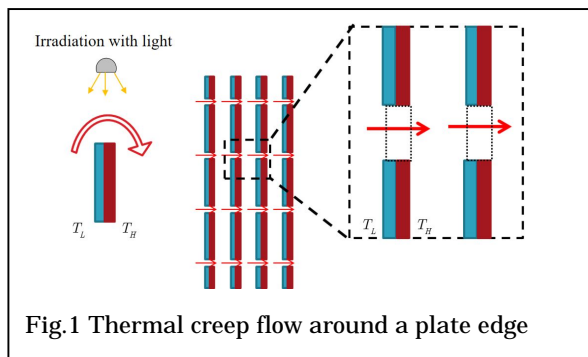


Fig.1 Thermal creep flow around a plate edge

温度差(温度比)で駆動する気体の輸送システムを構築し、その性能と最適化を実験的に行う他、数値解析により、内部流れを明確にして、マイクロスケールへの適用性を検討することを目的とする。本研究で構築するシステムは、図1に示すように片側の面ともう片側の面で熱吸収の異なる薄板を積層させた単純な形状をしている。板に赤外線ランプを照射させると板の各面に温度差が生じ、薄板の先端に生じる熱ほふく流の一種である熱先端流れを積層構造により、一方向に整流する仕組みになって

いる。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、図2の概略図に示すような実験装置を作成した。実験装置

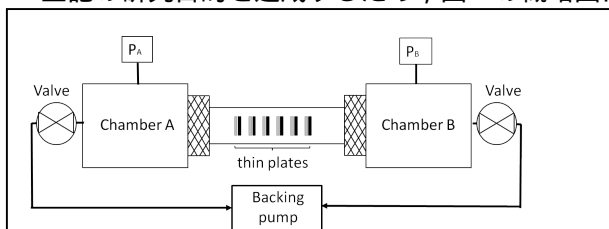


Fig.2 experimental system

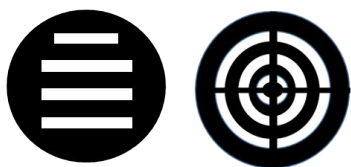


Fig.3 sample of the shape of slits and plate.

は、二つの真空容器とそれをつなぐガラス管、真空ポンプ、容器の圧力を測定する真空計と容器内温度を測定する熱電対、真空ポンプから構成される。ガラス管の中に、片側の面を黒色、もう片側の面を白色に塗布し、スリットを開けた薄板を層状に重ね合わせた多層構造体を設置する。薄板の形状の例を図3に示す。

真空層およびガラス管内の初期圧を、薄板形を代表長さにとった Knudsen 数が 0.01 ~ 1 となるように設定する。多層構造体に、赤外線ランプを照射すると熱先端流が発生し2つの容器に圧力差(圧力比)が生じるので、薄板の両面の温度分布を放射温度計により測定し、それぞれの真空容器の圧力と温度を測定する。

また、薄板の材質、薄板に開けるスリットの形状および大きさ並びに数、薄板の積層数や薄板の両方の面の温度差が2つの真空容器のある、圧力差(圧力比)に及ぼす影

響を調べ、システムの効率を高める方法を検討する。また数値解析も同時に行い、薄板に空けるスリットの形状や大きさ等の最適な形状の推定を行う他、薄板周りに生じる熱誘導流れの速度分布、圧力分布、温度分布や、薄板に作用する流体力等を詳細に検討し、熱先端流れのメカニズムの解明を行うと共に、効率の良いシステムと希薄気体流れの関係を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 実験結果

図4にスリット形状が圧力比（ポンプ性能）に及ぼす影響を示す。円板間の間隔は、 $s = 12.5$  mm ( $s/D = 25/72$ ) である。また、薄板の黒面と白面の温度はそれぞれ、 $100$  ,  $140$  である。絶対温度による温度比は、 $1 : 1.1$  となり、比較的小さな温度比が保たれていることを確認している。左図に示すようにスリット形状によりポンプ性能が変化することが確認できる。また、右図に示すように、容器 A と容器 B の圧力比の最小値は、スリットの等価直径に比例することがわかる。すなわちスリットの等価直径が小さい方が高いポンプ性能を有することがわかる。

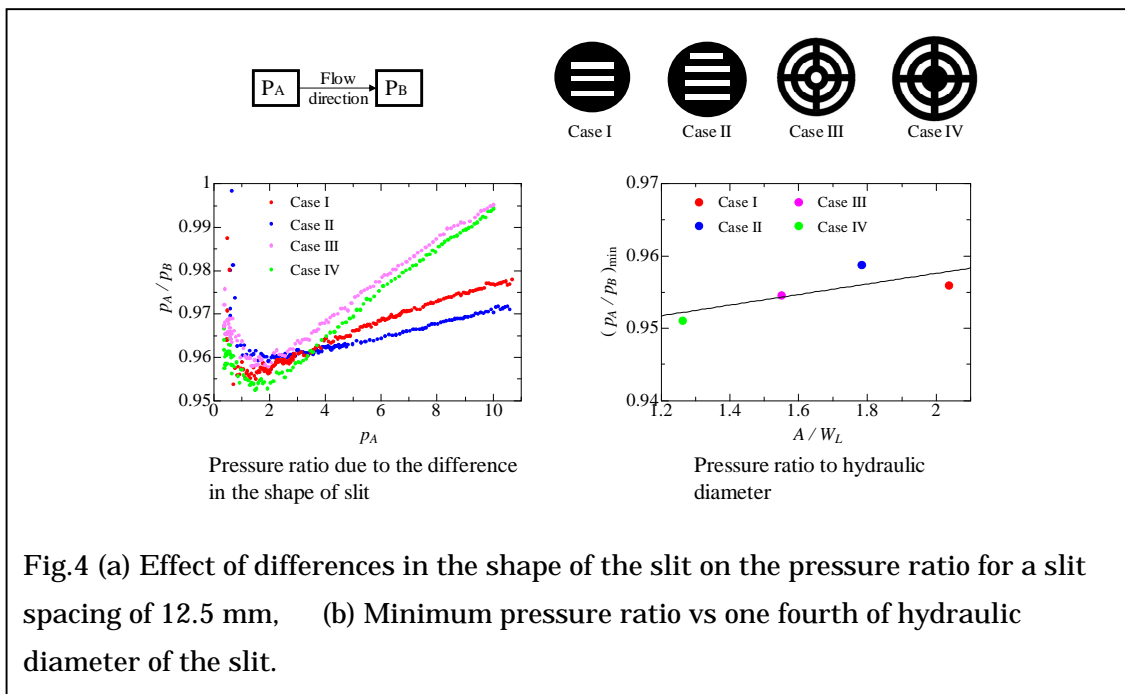


Fig.4 (a) Effect of differences in the shape of the slit on the pressure ratio for a slit spacing of 12.5 mm, (b) Minimum pressure ratio vs one fourth of hydraulic diameter of the slit.

次に、円板の素材がポンプ効率に与える影響を調べた。円板は3種の金属（アルミニウム、鉄、ステンレス）で作成したスリットを有する薄い円板を貼り合わせ、スリット形状は、図4の case IV とした。表面温度は、円管の中央に設置された円板の両表面に熱電対を設置して測定した。

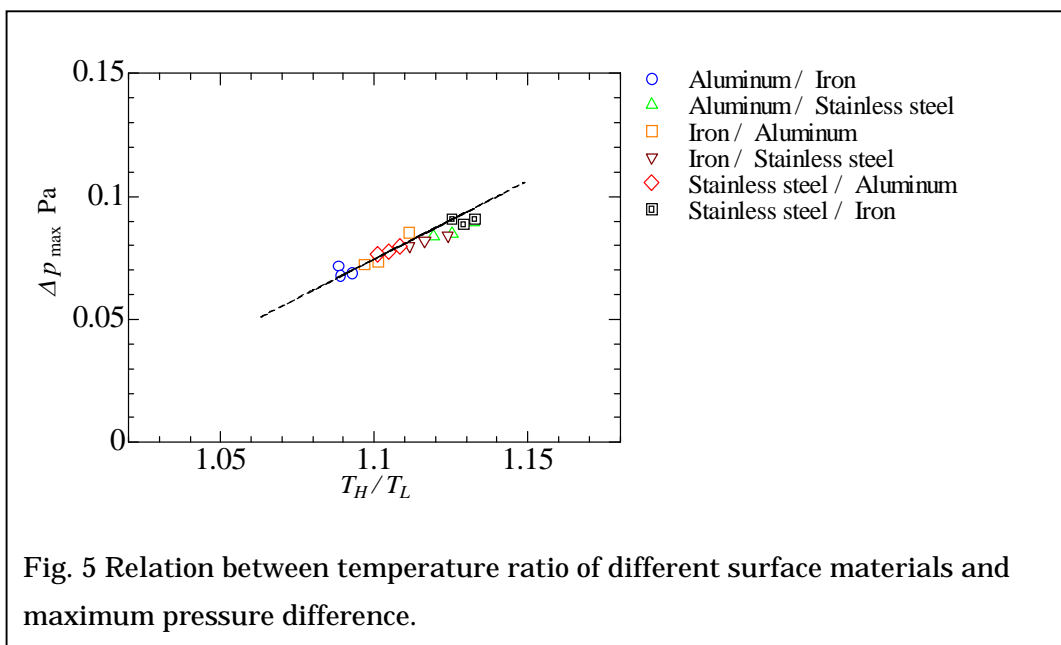


Fig. 5 Relation between temperature ratio of different surface materials and maximum pressure difference.

図5に高温側（赤外線ランプの照射面）と低温側で、アルミニウム/鉄、アルミニウム/ステンレス、鉄/アルミニウム、鉄/ステンレス、ステンレス/アルミニウム、ステンレス/鉄の6種類について、各表面温度比  $T_H / T_L$  と二つの容器の圧力差の最大値の関係を示す。今回の実験では、高温側にステンレス、低温側に鉄を用いた円盤の効率が最も良いことがわかる。また、材質の違いによらず、温度比と最大圧力差は線形の関係にあることも確認できた。

#### 4.2 計算結果

計算対象流れ場は、図2の実験装置において、ポンプの駆動部をモデル化し、図6に示すようなスリットを有する円板が同心円状に等間隔で無限枚数並べられた円管内の希薄流れとし、ている。流れ場の対称性と周期性を考慮して、図7のようにデカルト座標系を取り、計算領域を  $0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq 0.5D, 0 \leq z \leq 0.5D$  (ただし、 $y^2 + z^2 \leq (0.5D)^2$ ) として、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = D / 100$  の等間隔格子（セル）に分割して、DSMC法により計算を行った。境界条件として、対称面（ $y$ 軸に垂直な面と $z$ 軸に垂直な面）に鏡面反射を適用し、スリット部には周期境界条件を適用した。これら以外の境界には、完全拡散反射を適用する。また、低温側の面と高温側の面の温度比は、1:1.05に設定した。

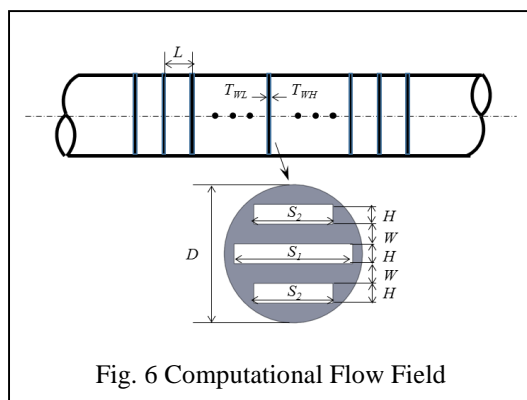


Fig. 6 Computational Flow Field

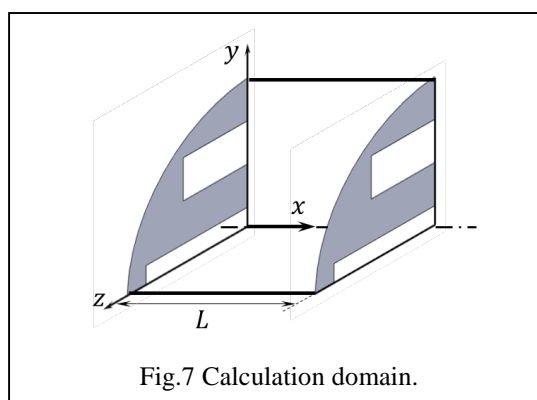


Fig. 7 Calculation domain.

図8に円板の直径を代表長さにとったクヌッセン数  $Kn=0.01, 0.1$ 、円板間隔と円板の直径比  $L/D=0.5$  の条件に対して、 $x=0$ の高温面の円板近傍の速度ベクトル図と、 $x=0, z=0.25D$ の断面上のスリットの角部から求めた流線を示す。計算は $x$ 軸方向に周期境界条件を課しているため、 $x=0$ の高温面の裏側が低温面に設定されているので、熱ほふく流が、スリットを介して低温面から高温面に回り込むように発生し、下流に流れて行くことが確認できる。

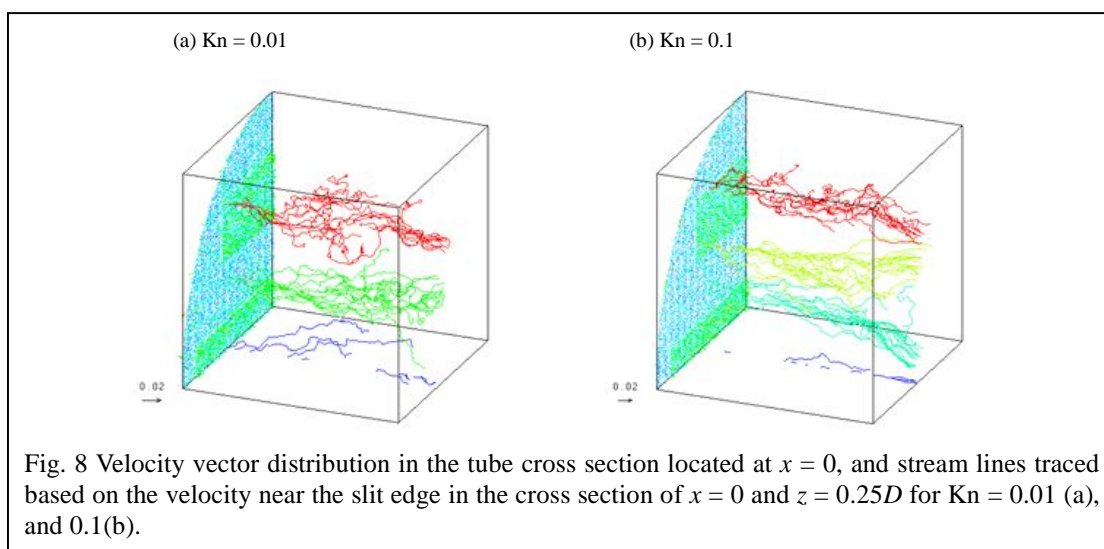


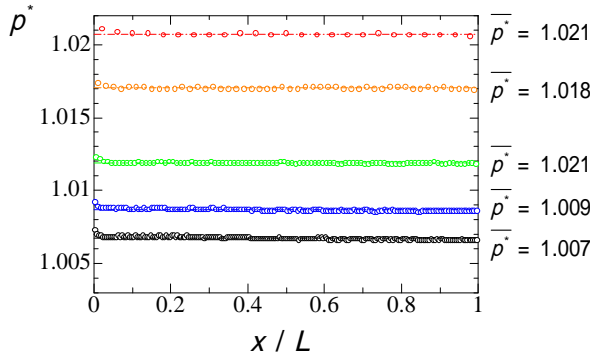
Fig. 8 Velocity vector distribution in the tube cross section located at  $x=0$ , and stream lines traced based on the velocity near the slit edge in the cross section of  $x=0$  and  $z=0.25D$  for  $Kn=0.01$  (a), and  $0.1$ (b).

表1に  $Kn$  と  $L/D$  をパラメータとして得られる、管内平均流速の値を示す。流速は基準温度における最大確率熱速度で無次元化されており、気体を窒素、基準温度を  $300K$  とすると、最大確率熱速度は、約  $420 \text{ m/s}$  となり、 $0.2 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$  の流速が得られていることがわかる。

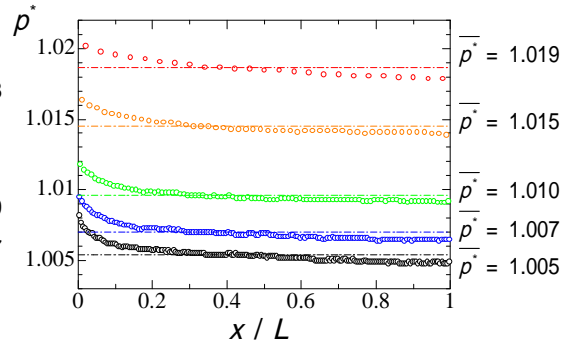
TABLE I. Non-dimensional averaged velocity  $\bar{u} / c_m$  across slits.

Kn \ L/D	0.125	0.25	0.5	0.75	1.0
0.01	$0.247 \times 10^{-2}$	$0.224 \times 10^{-2}$	$0.225 \times 10^{-2}$	$0.220 \times 10^{-2}$	$0.220 \times 10^{-2}$
0.1	$0.272 \times 10^{-2}$	$0.276 \times 10^{-2}$	$0.268 \times 10^{-2}$	$0.269 \times 10^{-2}$	$0.245 \times 10^{-2}$
1.0	$0.653 \times 10^{-3}$	$0.679 \times 10^{-3}$	$0.701 \times 10^{-3}$	$0.649 \times 10^{-3}$	$0.631 \times 10^{-3}$

(a) Kn = 0.01



(b) Kn = 0.1,



○ : L/D = 0.125, ○ : L/D = 0.25,

○ : L/D = 0.125, ○ : L/D = 0.25,

○ : L/D = 0.5, ○ : L/D = 0.75, and ○ : L/D = 1.0

○ : L/D = 0.5, ○ : L/D = 0.75, and ○ : L/D = 1.0

(c) Kn = 1

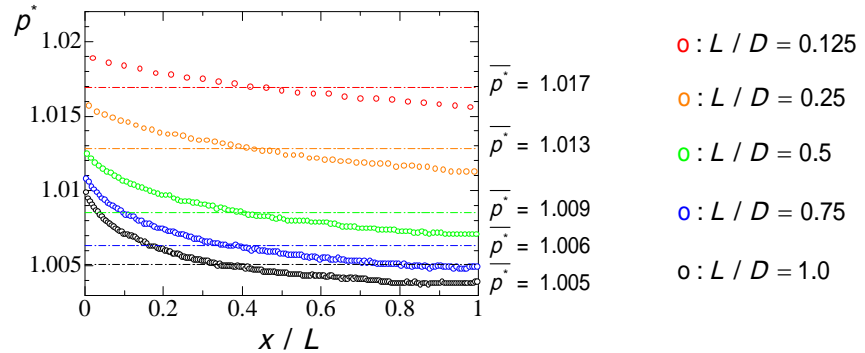


Fig.9 Cross sectional averaged non-dimensional pressure distribution in the x direction and non-dimensional mean pressure in the pipe for Kn = 0.01 (a), 0.1 (b), and 1 (c).

図 9 に流路内の無次元断面平均圧力分布を示す。図より、円板の高温側の面から低温側の面に向かって、管壁の摩擦抵抗により圧力が減少していくことが確認できる、x 方向に周期境界条件を設定しているため、円板を通過すると低温側の面から高温側の面に移る際に、圧力が急激に上昇していることがわかり、円板にポンプ作用のあることが確認できる。

#### 4.2 まとめ

熱誘導流れを利用したポンプシステムをマイクロ領域に適用するために、片側の面ともう片側の面で温度が異なる薄板周りに発生する熱誘導流れを利用したシステムを作成し、低真空下で実験を行い、薄板に設置したスリット形状や薄板の素材がポンプ作用に及ぼす影響について実験的に調べた。スリット形状については、スリットの等価直径が小さいものほど、ポンプ効率が高くなること、素材については、表面温度差が大きいほどポンプ効率が高くなることを確認

した。また実験で用いたシステムをモデル化した数値解析を行い、温度の異なる板に設置したスリット部に熱誘導流れが発生することや板にポンプ作用が生じることなどを明らかにした。数値解析の結果から、希薄度を表すクヌッセン数によりポンプ効率が変わり、 $Kn=0.1$  のオーダーが高い効率となることが確認され、本システムがマイクロ領域で駆動する可能性のあることが示された。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hiroaki Matsumoto, Kai Mihara, Daigo Yamagishi, and Takayuki Morokuma, Study on a Gas Transport System based on Thermal Induced Flow, Rarefied Gas Dynamics, AIP, Vol.1786, pp.200002-2-7 (2016). 査読有

### 〔学会発表〕(計 8 件)

Hiroaki Matsumoto, Hiroki Tanaka, Kento Koga, and Takayuki Morokuma, Monte Carlo Simulation of a Gas Transport System Based on Thermal Induced Flow, International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, (2018).

松本 裕昭, 古賀 健人, 田中 大貴, 諸隈 崇幸, 熱ほふく流を利用したクヌッセンポンプの解析, 日本流体力学会年会(2018).

松本 裕昭, 田中 大貴, 古賀 健人, 諸隈 崇幸, スリットを有する円板周りに生じる熱ほふく流れのモンテカルロシミュレーション, 日本機械学会 2018 年度年次大会(2018).

S. Okano, H. Matsumoto, and T. Morokuma, Numerical Analysis of thermal induced flow in the free molecular flow, JSSUME2018(2018).

K. Koga, H. Matsumoto, and T. Morokuma, Study on the flow system based on Thermal induced flow, JSSUME2018(2018).

H. Tanaka, H. Matsumoto, and T. Morokuma, Study on numerical analysis of Thermal creep flow on the edge of thin plates, JSSUME2018(2018).

松本 裕昭, 岡野 翔平, 自由分子流中の熱誘導流れのモンテカルロシミュレーション, 日本機械学会 2017 年度年次大会(2017).

松本 裕昭, 熱誘導流れの希薄気体ポンプシステムへの適用, 日本機械学会 2016 年度年次大会(2016).

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

### 〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

### (2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。