

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04190

研究課題名（和文）熱ほふく流を用いたKnudsenポンプの相似則の解明と流動解析に関する研究

研究課題名（英文）Study on similarity law and flow analysis of Knudsen pump driven by thermal creep flow.

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱ほふく流によって作動するKnudsen pumpの性能を10Paの低圧条件で実験的に調べ、数値解析により熱ほふく流とポンプ性能の関係を調べた。またシステムをマイクロスケール領域に適用するための相似則について検討した。実験よりポンプ効率は $Kn=0.1$ の時に最大になり、最大効率を与える最適な素子間隔のあることが確認された。また数値計算により素子にポンプ作用のあることが確認された。Al-Ga-AsとGa-As-Siからなる半導体を常圧で作動するポンプに適用することを想定しマイクロとミリスケールのシステムの数値解析を行い、Knudsen数と温度勾配を一致させると相似則が成り立つことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱ほふく流れを利用したポンプシステムが、ペルチェ素子を複数枚並べるといった単純な構造で作成できることを確認し、その性能を実験と計算により検討した。ポンプ効率と希薄度、最適な素子間隔などを実験と数値解析により明らかにした。近年提案された、Al-Ga-AsとGa-As-Siからなるマイクロスケールの半導体を常圧下で稼働するKnudsenポンプに適用するために、常圧下と低圧下でのシミュレーションを行い、Knudsen数と駆動部の温度勾配を一致させると流れ場が相似になることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the efficiency of a Knudsen pump system was investigated experimentally under low pressure condition of 10 Pa. In addition to the experiment, the relation between the efficiency of Knudsen pump and thermal creep flow was examined numerically and the similarity law was investigated by comparing of the simulation between the micrometer and millimeter size pump system. It was confirmed that the maximum efficiency was obtained for $Kn=0.1$ and that there is an optimum device distance giving maximum efficiency. Simulation results suggest that the device has the role of a pump. Furthermore, with the aim of applying the micro-scale semiconductors composed of Al-Ga-As and Ga-As-Si to pump system operating at normal pressure, the micrometer size and millimeter size pump systems were simulated numerically. It was confirmed that the law of similarity holds when the Knudsen number of the system and the temperature gradient of the driving part are matched.

研究分野：流体力学

キーワード：希薄気体流れ 熱誘導流れ 熱ほふく流 Knudsen ポンプ 流れの相似則 DSMC 速度すべりと温度ジャンプの条件

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分子の平均自由行程と流れ場の代表長さの比である **Knudsen** 数が、0.1 ~ 1 程度の比較的希薄度の弱い領域では希薄気体効果が顕著となり、熱ほふく流れ、熱応力すべり流れ、熱先端流れなどの熱誘導流れが生じることが知られている。これらの熱誘導流れは、希薄気体領域におけるポンプ、コンプレッサー、ガスセパレーターなどに応用されており、駆動部に機械的要素を持たないため、マイクロエンジニアリングへの応用が期待されている。**Knudsen** ポンプの性能すなわち流量は、熱誘導流れの一つである熱ほふく流れを発生させるための温度勾配の大きさに比例するが、マイクロサイズの領域に適用する場合、微小な区間に大きな温度勾配を付けるような制御は難しいと考えられる。一方、マイクロエンジニアリングでは、マクロな領域で必要とされるような大きな流量を必ずしも必要としない場合が想定され、小さな温度勾配で駆動するポンプシステムで十分機能することが予想される。しかしこれまで、小さな温度勾配で得られる熱ほふく流れの性質やポンプシステムに適用した際の性能は十分に調べられていない。著者等はこれまで小さな温度差で生じる熱ほふく流れを駆動源とするポンプシステムについて研究を行ってきた。このポンプシステムは、2 個の真空チャンバーとそれらを繋ぐガラス管、赤外線ランプ、真空計から構成されている。またガラス管には、片側の面が黒色、もう片側の面が白色に塗られた薄い厚さの円板が同心円状に 10~20 枚程度、等間隔で並べられ、円板には複数のスリットが開けられている。装置全体を 0.1~10Pa 程度の真空状態にして、円板群に赤外線ランプを照射することでスリット近傍に熱ほふく流れが発生するために、2 つの容器に 0.01~0.1Pa 程度の圧力差が生じた。また駆動部について **Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)** 法により解析を行い、スリット周りに 0.1~1m/s 程度の熱ほふく流れが発生することを確認した。また円板前後で圧力が上昇し、円板にポンプ作用のあることも確認した。円板間の圧力差と流量は、**Knudsen** 数や円板間の距離に影響されることが確認されたが、熱ほふく流れの速度の大きさが分子の熱運動による速度よりも小さいため、**DSMC** 法で得られる解の統計誤差の影響を受け、その関係は十分に解明されていない。本システムを高性能化するためには、統計誤差を更に小さくするような計算を行い、実験結果と比較することで、システム内で生じている流動現象を詳しく把握する必要がある。また、システムの小型化のためには、更に小さな温度差で安定に作動するための駆動源を開発・改良し、流れ場の相似則を明らかにして、小型化の設計指針を明確にする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、熱ほふく流れを駆動源とする **Knudsen** ポンプの高効率化と小型化を目的とし、小さな領域で安定的に温度を制御するシステムを構築する他、**Knudsen** ポンプ内の流動現象を数値解析により明らかにして、実験と詳細に比較・検討することで、流れの相似則を明確にすることにある。本研究で用いる、**Knudsen** ポンプの駆動部は、薄板の各面の温度を変えることで熱ほふく流れを発生させ、薄板を積層させることで、効率を高めようとしており、独特の形状をしている。そのため、薄板の温度を精度よく制御できれば、積層する際の薄板の間隔を狭めることで小型化が容易にできる可能性があるという特徴がある。これまで、申請者は赤外線ランプで薄板の温度を変化させてきたが、薄板の枚数が多くなり、薄板間隔を狭めると光の当たり方が不均一になるといった問題があった。これを解消する方法としてペルチェ素子を用いることが考えられる。また、近年、異方性磁気ペルチェ効果を利用した素子やペルチェ効果を示す小型半導体などが開発され、本システムに応用することでシステムをマイクロオーダに小型化することの可能性について検討する。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、図 1 の概略図に示すような実験装置を作成した。実験装置は、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、6 枚のペルチェ素子を設置する。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。ペルチェ素子に電流を流すと熱ほふく流れが発生し 2 つの容器に圧

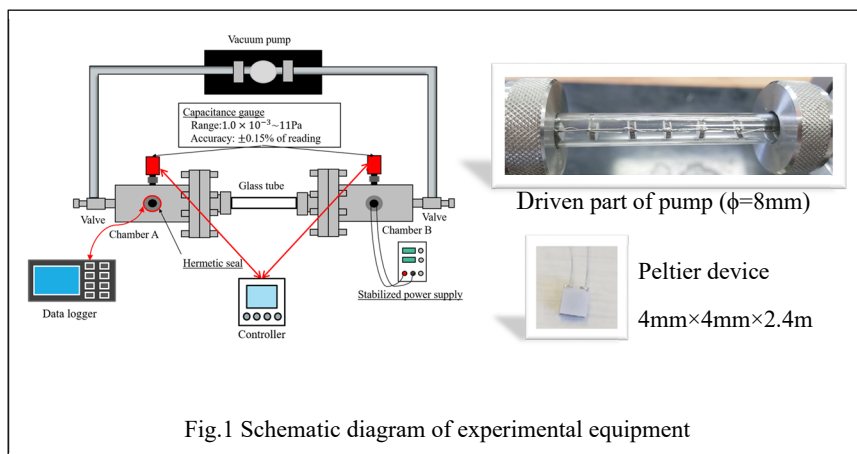


Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

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、6 枚のペルチェ素子を設置する。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。ペルチェ素子に電流を流すと熱ほふく流れが発生し 2 つの容器に圧

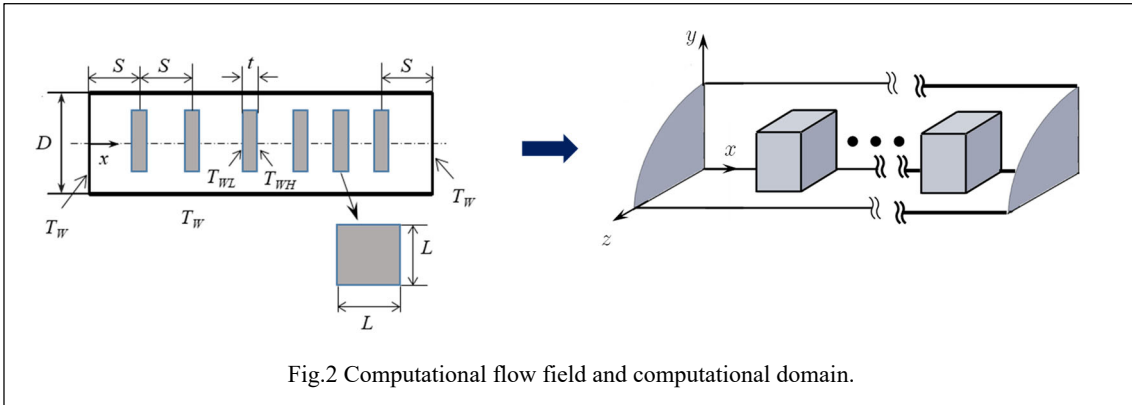


Fig.2 Computational flow field and computational domain.

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する．2つの真空容器の圧力と温度を、それぞれキャパシタンスゲージ圧力計と熱電対を用いて測定する．また、ペルチェ素子間隔、ペルチェ素子の温度差が2つの真空容器の圧力差（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．

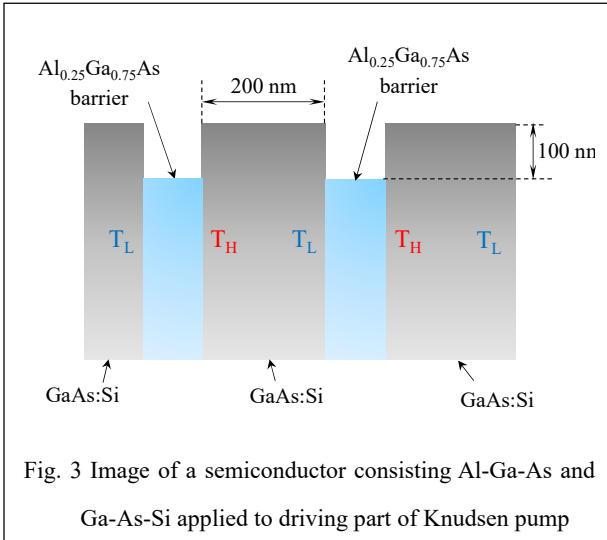


Fig. 3 Image of a semiconductor consisting Al-Ga-As and Ga-As-Si applied to driving part of Knudsen pump

次にポンプの駆動部を図2の様にモデル化し、数値解析を行い、ペルチェ素子周りに生じる熱ほふく流れの速度分布、圧力分布、温度分布等を詳細に検討し、熱先端流れのメカニズムの解明を行う．
更に、本システムをマイクロスケール領域に適用することを考え、近年開発された、アルミニウム-ガリウム-ヒ素 (Al-Ga-As) とガリウム-ヒ素-シリコン (Ga-As-Si) からなる半導体を駆動源として適用する可能性について検討する．この半導体は電圧を加えることで Al-Ga-As に挟まれた Ga-As-Si に 2 mm K 程度の温度差が生じる点に特徴がある．そこで、図3に示すような数百ナノスケールの凹凸をつけた半導体を幅 1 μm 流路に導入し、常圧で使用することを想定して主に数値計算による2次元解析によりポンプとしての性能を検討する．常圧における Knudsen 数は、流路の幅を代表長さにとると $Kn = 0.067$ となり希薄気体流れにおけるすべり流れ領域ではあるが、温度差が非常に小さいため、DSMC による解析は困難である．そこで本研究では、Navier-Stokes 式の壁面境界に速度すべりと温度ジャンプの条件を適用して解析を行う．速度すべりと温度ジャンプは次式で与えられる．

$$u_s = u_w + \left(\frac{m\pi}{2kT} \right)^{1/2} \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{5} \frac{\lambda m}{\rho k T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad T_j = T_w + \left(\frac{2\pi m}{2kT} \right)^{1/2} \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \frac{m\lambda}{\rho k} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

ここに、 m は分子質量、 T は温度、 ρ は密度、 η は粘性係数、 λ は熱伝導係数、 γ は比熱比、 k は Boltzmann 定数を表す．また u_w, T_w は壁面速度と壁面温度をそれぞれ表す．またミリメートルサイズのシステムを用いた低圧力環境での解析を Knudsen 数と壁面の温度勾配を一致させた解析を DSMC により流れの相似則について検討する．

4. 研究成果

4-1 ペルチェ素子を利用した Knudsen ポンプの制作と性能評価

図4 $S/D=1.25$, $T_H/T_L=1.07$ の条件についてペルチェ素子に流す電流の向きと、二つの容器の正規化した圧力差を示す．ここに S はペルチェ素子間隔、 D はガラス管の直径を表し、 T_H, T_L は、それぞれペルチェ素子の高温面の温度と低温面の温度を示している．①に示すように、ペルチェ素子の右側の面が高温になるように電流を流すと、素子周りに生じる熱ほふく流れにより図1に示す右側の容器 B の圧力が上昇することがわかる．また、一度電流を止めると圧力差は無くなり、その後再び同方向に電流を流すと容器 B の圧力が上昇していることがわかる．更に②に示すように①と同様の方向に電流を流し、停止・逆方向の通電を行うと、電流の向きにより圧力の大小関係が変わることが確認できる．これにより本システムがポンプ作用のあることが確認できる．ただし真空装置内にガスが漏れ入り時間ともに装置全体の圧力が上昇している．しかし、熱ほふく流れによるポンプ作用は機能していると考えられる．

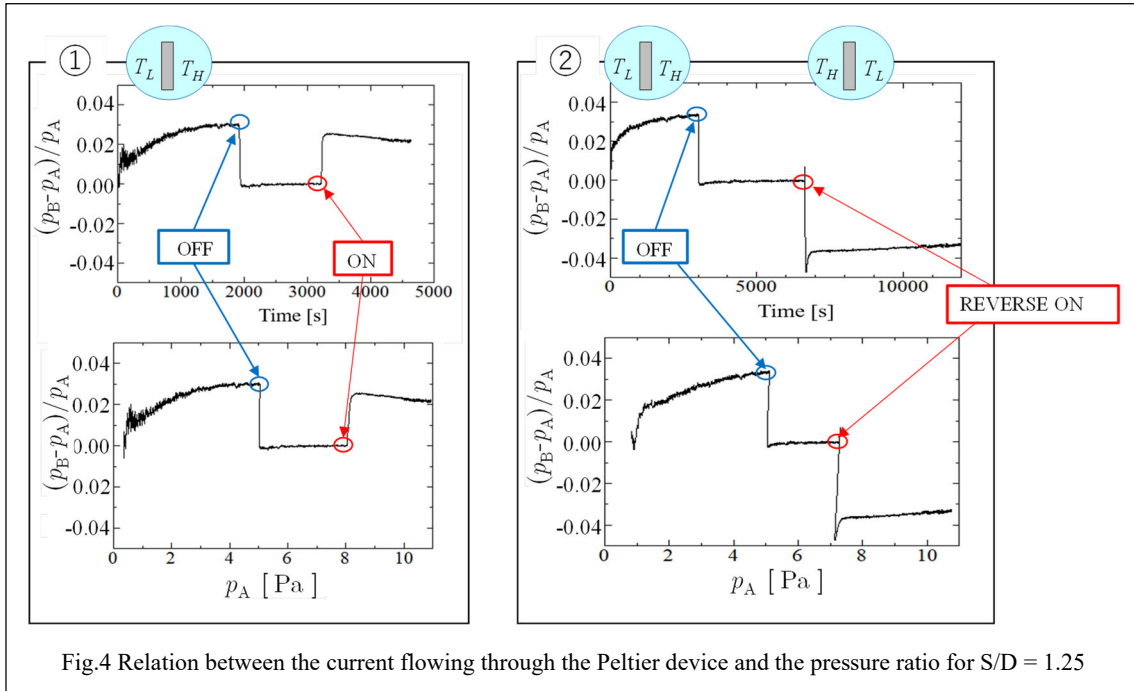


Fig.4 Relation between the current flowing through the Peltier device and the pressure ratio for $S/D = 1.25$

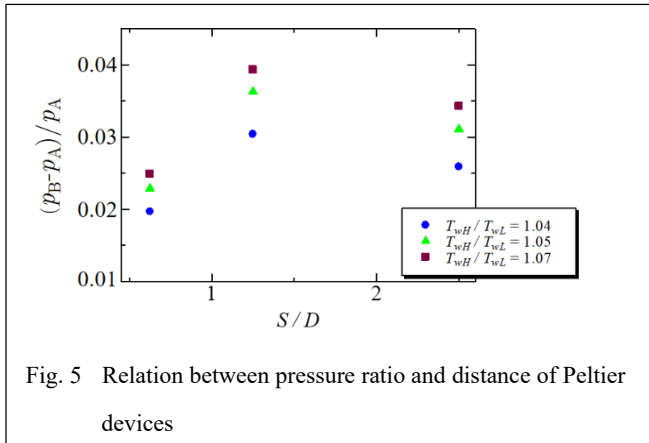


Fig. 5 Relation between pressure ratio and distance of Peltier devices

図5に Knudsen 数 $Kn = \lambda / D = 0.1$ に対するペルチェ素子間隔と圧力差、素子の温度比と圧力差について示す。ここに λ はガラス管内の分子の平均自由行程を表す。

図よりペルチェ素子の表面温度の比が大きいほど圧力差が大きいことがわかる。また圧力差は、 $1 \leq S/D \leq 2$ の範囲で最大となることも確認できる。以上より、熱ほふく流れは Knudsen ポンプ駆動源として利用できる可能性のあることが確認された。

4-2 数値解析による Knudsen ポンプ内流れの解析

図6に、 $Kn=0.1, S/D=0.5, T_H/T_L=1.07$ の条件について、DSMC法により解析した $z/D=0.005$ の xy 断面内の無次元圧力分布 p/p_0 と断面平均圧力差 $(p-p_L)/p_L$ の分布図を示す。ここに p_0 は基準圧力、 p_L は $x=0$ の壁面の平均圧力を表す。ただし、ペルチェ素子をモデル化した板の x 軸に垂直な面で正の方向を向いている面の温度を高温壁としており、熱ほふく流れは x 軸の正の方法に誘発される。図より、圧力は右側 ($x>0$) に向かうにつれて上昇していることがわかる。また断面平均圧力は板まわりに発生する熱ほふく流れにより板を通過するたびに上昇していることも確認できる。これより、ペルチェ素子をモデル化した板にポンプ作用のあることがわかる。

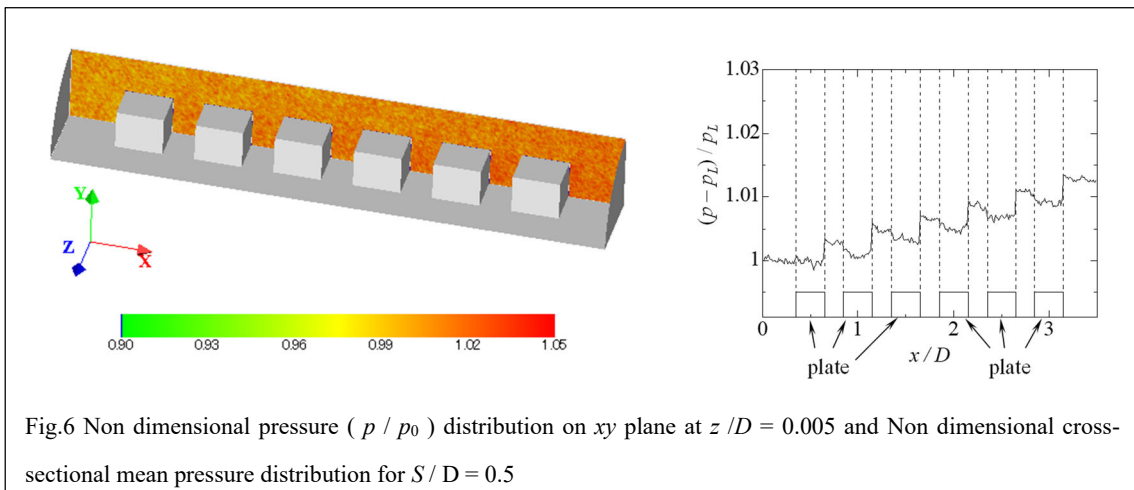


Fig.6 Non dimensional pressure (p / p_0) distribution on xy plane at $z/D = 0.005$ and Non dimensional cross-sectional mean pressure distribution for $S/D = 0.5$

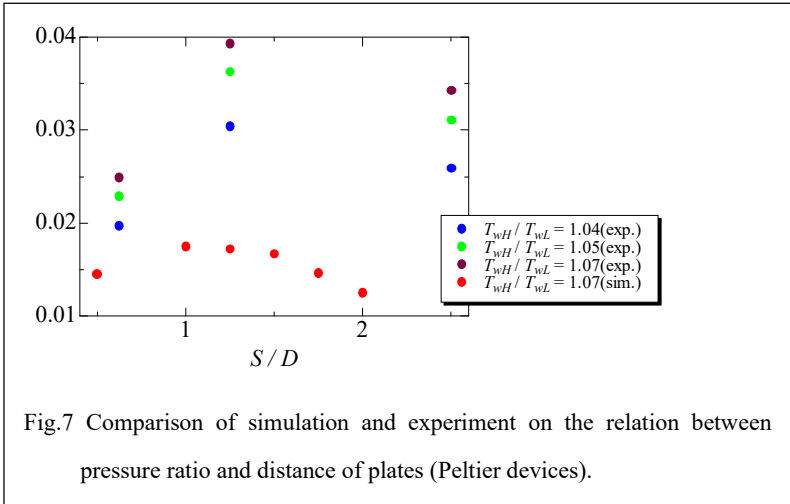


図7にペルチェ素子間隔と圧力差に関して、実験と計算との比較を示す。図より、計算結果の圧力差は、素子間隔に影響され、最大となる素子間隔があることなど、実験と似た傾向を示すことが確認できるが、値の絶対値が実験よりも小さく、圧力差が最大になる素子間隔も異なっている。この原因については、今後説明を進める必要がある。

4-3 Al-Ga-As+Ga-As-Si 半導体のマイクロサイズシステムへの適用の可能性と相似則の検討

図8に、 $S/H = 0.5$ 、および $S/H = 0.6$ に関する流路内圧力断面平均圧力分布について、NS解析と DSMC 解析の比較を示す。ここに S は図3における凸部間隔、 H は流路幅を表す。また圧力は、 $x = 0$ の位置の壁面圧力 p_L との差圧を示しており、流路内には5個の凸部があるとしている。図より、NS、DSMC 共に、凸部を超える毎に圧力が上昇しており、ポンプ作用のあることが確認できる。また、凸部前後の圧力変化は DSMC の方が大きく、 $x = 0$ と $x = L$ (計算領域の右端) との圧力差も DSMC の方が大きい。しかし、流れ場全体の圧力上昇率はかなり近いことがわかる。NS と DSMC の違いは、NS の壁面のすべり速度と温度ジャンプの条件に一因があると予想され、更に高精度な条件の適用を考える必要があると思われる。ただし、圧力差は 10^{-3} Pa と非常に小さいが、Al-Ga-As と Ga-As-Si から構成される半導体は、マイクロ領域で作動するポンプの駆動源としての可能性が示されたと考えられる。また、NS 解析と DSMC 解析の比較から、流れ場の Knudsen 数と熱ほふく流れを発生させる部材の温度勾配を一致させると流れ場が相似になることが考えられる。

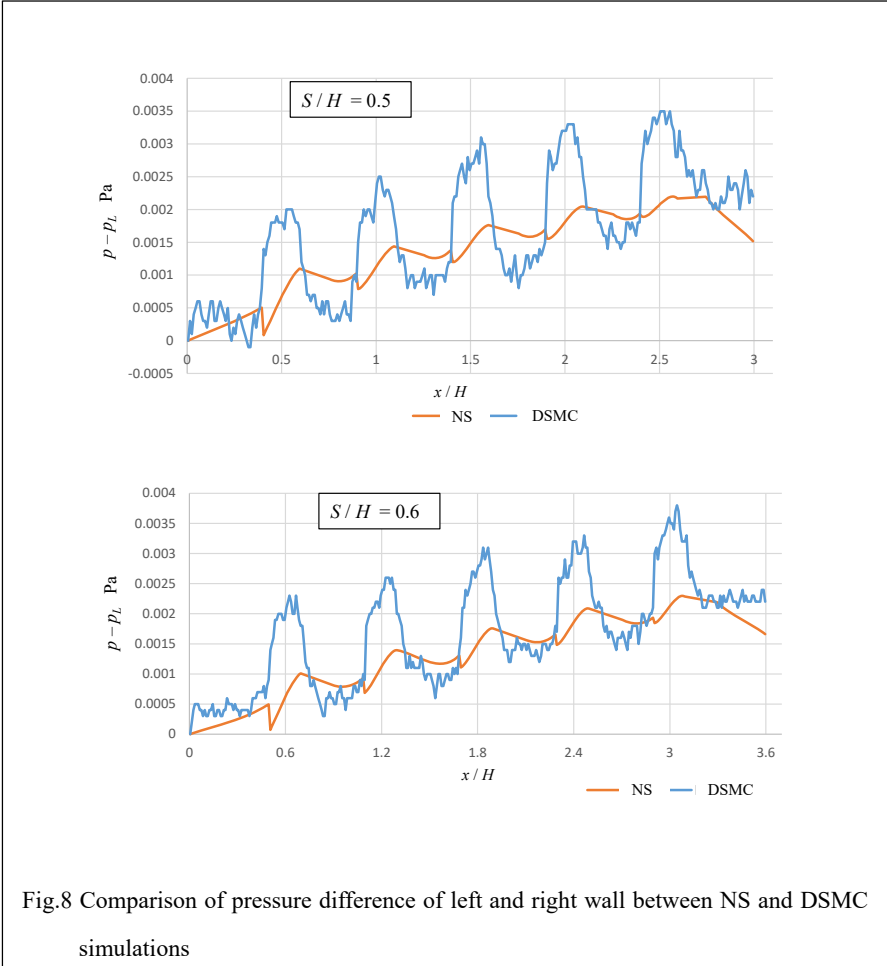


Fig.8 Comparison of pressure difference of left and right wall between NS and DSMC simulations

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 松本裕昭, 岡野翔平, 諸隈崇幸
2. 発表標題 すべり流れ領域における熱誘導流れの数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2019年年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本裕昭, 岡野翔平, 諸隈崇幸
2. 発表標題 低クヌッセン数における熱ほふく流の挙動の数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本裕昭, 栗田純樹
2. 発表標題 ペルチェ素子周りに生じる熱ほふく流れを利用したクヌッセンポンプ
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本裕昭, 小久保元貴
2. 発表標題 簡易散乱モデルを用いた平行平板間の希薄気体流れのモンテカルロシミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keiichi Kato, Hiroaki Matsumoto
2. 発表標題 Study on numerical analysis of rarefied gas flow in Knudsen pump using DSMC method
3. 学会等名 JSSUME2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Matsumoto
2. 発表標題 MONTE CARLO SIMULATION OF THERMAL CREEP FLOW IN A KNUDSEN PUMP
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Matsumoto, Junki Kurita, Keiich Kato
2. 発表標題 Monte Carlo simulation of thermal creep flow around a set of plates with different surface temperatures in a pipe
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本裕昭, 栗田純樹, 加藤慶一
2. 発表標題 円管内に設置された表面温度の異なる複数の平板まわりに生じる熱ほふく流のモンテカルロシミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本裕昭, 二宮一充
2. 発表標題 マイクロチャネル内の熱誘起流れの数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hiroaki Matsumoto, Junki Kurita, Keiich Kato	4. 発行年 2023年
2. 出版社 American Institute of Physics	5. 総ページ数 7
3. 書名 Rarefied Gas Dynamics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------