

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760118
 研究課題名 (和文) 多孔質を利用した気体の熱駆動型輸送-圧縮装置の気体論に基づく理論的性能評価
 研究課題名 (英文) Performance analysis of a device for gas transport and compression by making use of porous media on the basis of kinetic theory
 研究代表者
 田口 智清 (TAGUCHI SATOSHI)
 神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点研究部・助教
 研究者番号：90448168

研究成果の概要 (和文) : 気体分子の平均自由行程が系の代表長に対して無視できない微小な系では、気体内の温度場によって定常な流れが誘起される。本研究では、微細な孔径を持つ多孔質内に誘起されるこの種の流れを利用した気体の輸送・圧縮装置 (ポンプ) の性能を検証した。より具体的には、多数の正方配列円柱群により構成されるポンプ内の気体の振る舞いを、分子気体力学に基づいて構築した拡散モデルにより調べた。その結果、例えば両端で 1.5 倍の温度比を持つ円柱群を 100 個連結した場合、隣接する円柱の中心間距離に基づくクヌッセン数が 6 のときポンプが約 50 倍の圧力差を維持できることが分かった。

研究成果の概要 (英文) : In a small system where the mean free path of the gas molecules is not negligibly small compared to the system characteristic length, a steady flow is induced by the temperature field in a gas. In this study, the performance of a pumping device composed of porous media with very small pores driven by a thermally induced flow is examined. More precisely, a rarefied gas flow in a device composed of many square arrays of circular cylinders is investigated by making use of a diffusion model derived on the basis of kinetic theory. It is shown, for example, that the device can maintain the pressure ratio of 50 by using 100 arrays, when the temperature ratio between heated and unheated sides in each array is 1.5 and when the Knudsen number based on the distance between the centers of adjacent cylinders is 6.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	390,000	2790,000

研究分野：分子気体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：分子流体力学，希薄気体，クヌッセンポンプ

1. 研究開始当初の背景

| 気体分子の平均自由行程が系の代表長に対

して無視できない微小な系では、気体内の温度場によって気体の流れ（例えば熱ふく流や熱遷移流など）が誘起されることが知られている。そこでこの流れを利用したマイクロポンプの研究が近年行われるようになった。例えば、直径の異なるパイプを交互に直列につないだ構造を持つヌッセンポンプと呼ばれる気体の輸送・圧縮装置の性質が、分子気体力学を基に様々に調べられている。一方で、微細孔を持つ多孔質媒体を非一様に加熱すると、媒質中に気体の流れが誘起されることは古くから知られている現象であり、パイプの代わりに多孔質を用いたクヌッセンポンプに類似のポンプも提案されている（栢島光敏，特許，昭59-130519）。しかし、幾何学的に複雑な多孔質内の流れを分子気体力学の基礎式であるボルツマン方程式あるいはそのモデルに基づいて解析するのは困難であり、この方のデバイスに関する研究はこれまで全くなされていない。実用上重要となるのは、ポンプ内の気体の圧力分布や、ポンプによって得られる流量に関する情報であるが、これらを比較的簡単な方法で見積もることのできる数理モデルがあれば役に立つと考えられる。

一方、周期的構造を持つ多孔質（あるいは物体群）を過ぎる希薄気体の振る舞いを解析する有力な解析手法（均質化法）が最近ボルドー大学の Charrier と Dubroca により提案された。この手法によれば、ボルツマン方程式とその境界条件とからなる系から、気体の拡散モデルを系統的に導出することができ、既存の Dusty Gas モデルよりはるかに精密な解析ができる利点がある。そこで、この手法を用いて多孔質を用いたポンプの解析ができないかと考えたのが、本研究の出発点である。

2. 研究の目的

本研究では、多孔質として正方配列円柱群を用いた気体ポンプを考える。このとき、ポンプ内の流れを記述する流体力学的モデル（拡散モデル）を分子気体力学に基づいて系統的に構築することにより、ポンプ内の気体の振る舞いを調べ、ポンプの性能を定量的に評価する。また、流体モデルの導出の際には、無数の円柱群を過ぎる希薄気体流の振る舞いを別途解析する必要がある。この問題は今まで全く解析されたことのない新しい希薄流の問題である。本研究を通して、この基礎的流れに関する基本的な知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、解析を簡単化するために、ボルツマン方程式の標準的モデルとして希薄気体流の解析に広く使われている BGK モデルを採用した。また円柱表面における分子の反射則としては拡散反射を仮定した。

(2) 本研究では、円柱群を過ぎる希薄気体の大域的な振る舞い（圧力分布および流量）を

記述する拡散モデルの構築が鍵となる。本研究では Charrier らのグループで開発された均質化法を用いてこれを行った。

(3) 拡散モデルの輸送係数を求めるためには、無数の円柱群を過ぎる定常希薄流の問題（より詳細には圧力勾配による流れと温度勾配による流れの問題）を解析し、その流量と希薄度との関係を数値的に求める必要が生じる。この問題は線形化 BGK 方程式の境界値問題として定式化される。本研究ではこれを巨視量に対する積分方程式系に変換した上で解析した。この方法によると、積分方程式に変換する段階で速度分布関数に含まれる不連続を処理することができ、数値解析の段階で不連続に対する個別の処理を必要とする差分法に比べ精度のよい結果を出すことができる。

(4) 円柱群と円柱群の間隙部分（図2のポンプ全体図における II の部分）では、間隙の大きさが気体分子の平均自由行程より十分大きいとして BGK 方程式の漸近解析を行い、気体の振る舞いを記述する流体力学的方程式系を導出した。

(5) 円柱群と間隙の境界における巨視的な接合条件を、境界近傍における速度分布関数の補正を考えることにより系統的に導出した。

(6) 上記(2), (4), (5)で導出した拡散モデル、流体力学的方程式、接合条件を図1, 2のようなポンプに適用し、ポンプ内の気体の振る舞いを解析した。解析は差分法を用い、拡散モデルの差分化には Scharfetter-Gummel 離散化法を用いた。ポンプが保つことができる圧力差および与えられた圧力差に逆らって気体を流す場合に得られる流量を調べた。

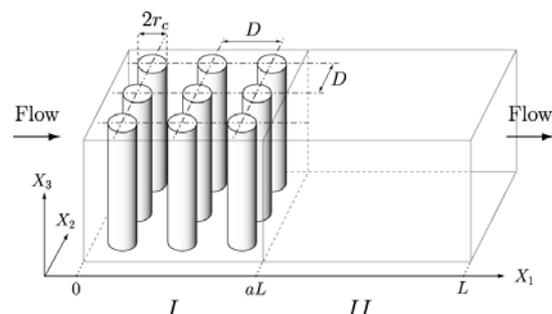


図1. ポンプを構成するユニット。気体中の温度勾配によって流れが生じる。

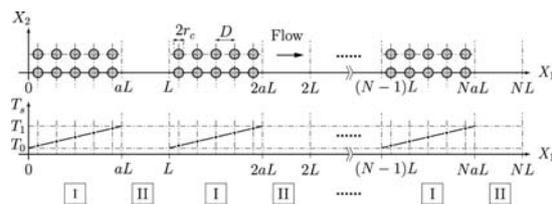


図2. ユニートを N 個直列に並べて構成したポンプ全体。 T_s は円柱群に与えた大域的な温度分布を表す。

4. 研究成果

(1) 無数の円柱群を過ぎる希薄気体の基本問題 (圧力勾配によって駆動される流れと温度勾配によって駆動される流れ) を解析し, 流量と希薄度との関係を明らかにした. 圧力勾配および温度勾配に起因する流れを調べた類似の問題としては, パイプや流路内の流れを扱ったポワズイユ流および熱遷移流の問題が有名であるが, 本ケースのように周期的に配列した無数の物体を過ぎる希薄流について調べた研究は過去に存在しない. 本研究によって円柱群を過ぎる流れに関する基礎的知見が得られたと同時に, 希薄気体流に関する新しい基礎的問題を開拓することができた. また, 圧力勾配による流れでは, 「クヌッセンの最小」と呼ばれる現象が確認できたことも成果の一つである.

本研究ではボルツマン方程式のBGKモデルを基礎式として用いたが, このモデルではプラントル数が1となる問題点が指摘されている. 本問題に対する過去の研究結果が皆無である点を考慮すると, 最も単純なBGKモデルの選択は妥当であるが, 正しいプラントル数を与えるように改良された他のモデルボルツマン方程式を用いた解析も重要であり, これは今後の課題として残された.

(2) 正方配列円柱群を過ぎる希薄気体の圧力分布および流量を記述する拡散モデルを構築した. このモデルは, 気体の流量を圧力勾配に比例する項と温度勾配に比例する項の重ね合わせで表現し, それを質量保存則と併せて用いるものである. 類似のモデルは, 半導体中のキャリアの振る舞いを記述するドリフト拡散モデルであるが, 本モデルは非線形の移流拡散方程式となっている. また, この種のモデルは, パイプを過ぎる流れの場合にも導出されている. しかし, 本研究のような物体群を過ぎる流れの場合に構築に成功した例は過去になく, 国内外で初の成果である. なお, その基本構造が直感的に理解できるため, このモデルを既存モデルと同一視する向きもあるかもしれない. しかし, 今回の拡散モデルは, 新しい解析手法である均質化法を用いることによって, BGKモデルと拡散反射境界条件とから構成される系より系統的に導出したものであり, 経験的に求めたものではないことは強調するに値する. また, その輸送係数の構築には(1)の結果を使うが, これには多くの数値計算が必要であり, そう簡単なことではない (1 ケースの解を求めるのに1~3週間かかる計算を100ケース以上行っている).

(3) 円柱群を用いたポンプの性能の定量的な評価を行った. 多孔質を用いたポンプの性能評価としては国内外で初めての結果である. まず, ポンプにより維持できる最大の圧力差

を調べるために, ポンプの左端 ($X_1 = 0$) を圧力 p_0 を持つ外気に解放し, 右端 ($X_1 = NL$) を一様温度 T_0 を持つ壁面で閉じた状況におけるポンプ内の圧力分布を調べた. 図3に, 結果の一例を示す. 円柱群の温度分布としては, 図2の T_s に示すような T_0 と T_1 を結ぶ直線的な分布を与えている (温度比 $T_1/T_0 = 1.5$). また, 円柱の半径は $r_c/D = 0.25$, ポンプを構成するユニット数は $N = 100$, $a = 0.5$ であり, 図中の $K_*(=l_0/D)$ は, 圧力 p_0 , 温度 T_0 の基準静止平衡状態における気体分子の平均自由行程 l_0 と隣り合う円柱の中心間距離 D とで決まるクヌッセン数 (希薄度) を表す. クヌッセン数が大きくなるにつれて, ポンプ両端の圧力差が増大し, $K_* = 6$ の場合には, ポンプ右端の圧力が左端の圧力の50倍程度にまで上昇している. 一方で, クヌッセン数が小さい場合には, あまり効果的な圧力上昇は得られなかった. これは, 希薄度が小さいときに円柱のまわりに誘起される熱応力滑り流が影響している.

表1にポンプの両端を外気に解放したとき (左端の気体圧力を p_0 , 右端の気体圧力を p_1 とする), ポンプ内を流れる気体の X_1 方向の (無次元) 質量流量 M を載せる ($r_c/D = 0.25$, $a = 0.5$). 円柱群の温度分布は再び T_0 と T_1 を結ぶ直線とした. また, 無次元質量流量 M は, X_2 方向に単位長さ, X_3 方向に長さ D を持つ X_1 軸に垂直な平面を単位時間に過ぎる気体の質量が $2p_0(2RT_0)^{-1/2}(D/L)DM$ となるように定義している (R は単位質量当たりの気体定数). 円柱の温度が一様であるとき ($T_1/T_0 = 1$), 圧力差によって X_1 軸の負の方向へ向かう流れが誘起される. 一方, 円柱に温度勾配を与えたときには ($T_1/T_0 = 1.5$), 温度場によって X_1 軸の正の方向へ向かう流れが誘起される. ユニットの数 N を増やすにつれ, 右向きの流れが強まり, 最終的には圧力差による流れに打ち勝つ.

本研究では, 多孔質として正方配列円柱群を仮定した. その他の幾何学的形状の場合, 構造が周期的であれば, 本研究と同じ均質化法が適用できる. しかしその場合でも, 拡散モデルの輸送係数は構築しなおす必要があり, そのために多くの計算が必要になる. 輸送係数を簡単に構築する方法があれば役に立つと考えられるが, この方は今後の検討課題とする.

(5) 本研究では, ポンプ内の気体の流れを拡散モデルを用いて近似的に求めている. このモデルは D/L (=隣り合う円柱の中心間距離/ユニットの大きさ) が小さいという仮定の下で導かれている. 一方, D/L がどれくらい小さければ, 実際の気体の振る舞いを妥当な精度で記述できているかという問いに対

する答えは、拡散モデルによる結果をボルツマン方程式の直接シミュレーションによる結果、あるいは実験による結果と比較してみても初めて分かるものである。このようなモデルの検証は今後の重要な課題である。

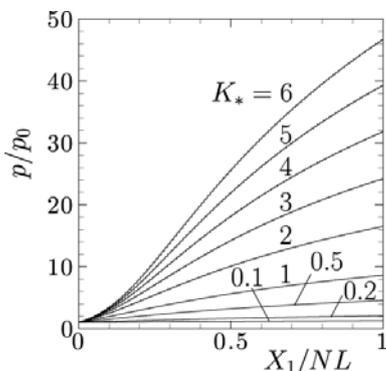


図3. ポンプ内の圧力分布
($T_1/T_0 = 1.5$, $r_c/D = 0.25$, $N = 100$, $a = 0.5$).

ユニット数 N	$T_1/T_0 = 1$	$T_1/T_0 = 1.5$
5	-5.343×10^{-2}	-5.685×10^{-3}
50	-5.344×10^{-3}	3.665×10^{-2}
200	-1.336×10^{-3}	3.863×10^{-2}

表1. ポンプ内の無次元質量流量 M
($K_* = 1$, $p_1/p_0 = 1.5$, $r_c/D = 0.25$, $a = 0.5$)

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3件)

[1] S. Taguchi, Rarefied gas flows over in-line arrangement of circular cylinders, Rarefied Gas Dynamics: Proceedings of the 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP, pp.447-452 (2009) (査読有)

[2] S. Taguchi, Rarefied gas flows through an in-line array of circular cylinders, 数理解析研究所講究録1631, 流体と気体の数理解析pp.160-178 (2009) (査読なし)

[3] S. Taguchi and P. Charrier, Rarefied gas flow over an in-line array of circular cylinders, Phys. Fluids 20, pp.067103-16 (2008) (査読有)

神戸大学各術成果リポジトリ
(http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kernel_90000747)

[学会発表] (計7件)

[1] S. Taguchi, A Knudsen compressor using rarefied gas flow past square array of circular cylinders, Russia-Japan Symposium on 'Numerical Experiment in Hydrodynamical Instability and Turbulence with High-Performance Computing', モスクワ, 2009年11月13日

[2] 田口智清, 「多孔質を用いたクヌッセンポンプ」, 日本流体力学会年会 2009, 東京, 2009年9月2日

[3] S. Taguchi, Rarefied gas flow over in-line array of circular cylinders: Case of nonisothermal medium, Japan-Russia Workshop on Study of Hydrodynamical Instability, Turbulence and Complex Flows by Using Advanced Technologies of Modeling on Supercomputers, 神戸, 2008年11月20日

[4] 田口智清, 「正方配列円柱群を過ぎる希薄気体流の数値解析」, 日本流体力学会年会 2008, 神戸, 2008年9月4日

[5] S. Taguchi, Rarefied gas flows over in-line arrangement of circular cylinders, 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 京都, 2008年7月24日

[6] S. Taguchi, Rarefied gas flows through an in-line array of circular cylinders, 10th RIMS Workshop on Mathematical Analysis in Fluid and Gas Dynamics, 京都, 2008年7月11日

[7] 田口智清, P. Charrier, 「正方配列円柱群を過ぎる希薄気体流に関する研究」, 日本流体力学会年会 2007, 東京, 2007年8月6日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田口 智清 (TAGUCHI SATOSHI)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点
研究部・助教
研究者番号: 90448168