

研究の課題名

分子気体効果を利用した気体流の制御に関する研究

京都大学 工学研究科 講師

報告者 杉元 宏

報告日 2007 年（平成 19 年）4 月 1 日

1. 本研究の意義・特色

気体の圧力が低い、系の大きさが小さい等の理由のために気体分子の平均自由行程の大きさが無視できない気体は、希薄気体とよばれる。希薄気体と通常の気体の大きな違いの一つは、希薄気体ではその温度場と運動の間に深い関連があり、定常で外力が無い場合でも、温度場によって様々な流れが誘起されることである。本研究は、温度場によって生じるこれらの流れ現象を気体の輸送の駆動力として応用する研究を行う。

2. 実施した研究の具体的内容、結果

温度場によって生じる流れを利用した「熱駆動ポンプ」の開発をすすめ、また、そのポンプの持つ混合気体分離効果について研究を行った。

A: 熱駆動ポンプの開発

熱駆動ポンプは、流れを誘起する多数のユニットを直列に接続した多段構成を採る。これは、熱駆動流は通常低マッハ数流れであり、単一のユニットでは大きな圧縮比が得にくいためである。それぞれのユニット内部では、一方向の気体流が誘起されるように、壁面の温度を適当に設定する。ユニット内部には、運動する部品が全く不必要であるが、多段接続が可能のように、ユニット両端の温度は一致するように考えなければならない。

代表者が以前の研究で提案した熱尖端ポンプの模式図が図 1 である。流路内部に高温平板列と低温平板列が近接して置かれている。2 種の平板列の近接部分では、気体中に図の下部に示す矢印方向の温度勾配が生じ、この温度勾配によって矢印方向の熱尖端流が誘起される。各平板の別の尖端部付近では、同一温度の平板が縦方向に列を成しているために周囲の気体の温度変化が小さく、また、各平板の中央部では気体の温度もほぼ一様である。これらの場所では流れの駆動力は生じない。結局、ユニット全体では、図中の矢印方向の流れが誘起される。代表者はこのポンプを試作し、平板列の板間隔が気体分子の自由行程の数十分の1～数十倍の範囲にあれば、装置が実際に流れを誘起し、ポンプ両端で圧力差が得られることを示した。具体的には、試作機の平板列の板間隔は 2mm、装置が動作する気体の圧力範囲は 1～100Pa 程度の高真空領域であった。より高圧で動作するポンプを作成するには、気体分子の自由行程に比例して平板間隔を縮小する必要がある。しかし、図 1 の流路形状のままでは、實際上、流路の縮小は容易ではない。

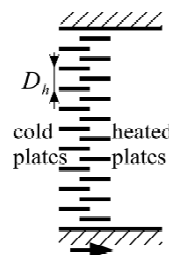


図 1 熱尖端ポンプ。

本研究ではポンプの新しいデザインを考案し、この問題を解決する。

まず、熱尖端流の駆動原理に着目する。図 2 を用いてその原理を説明しよう。高温の尖った物体が気体中に置かれている。気体分子はほぼ音速で運動し、その速度は温度と関連がある：右側の高温部分では高速、左側の低温部分では低速になる。速度の異なる分子が尖端部 S に入射することによって、S は左方向の力を受け、気体はその反作用で右方向の力を受ける。（なお、S から反射される分子は等方的な速度分布を持つため、これらの力に寄与しない。）これが熱尖端

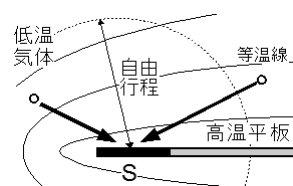


図 2 熱尖端流の模式図。尖端 S に、自由行程の距離から分子が入射する。飛来する分子の速度は右からは高速、左からは低速であるため、S は力を受ける。

流の駆動力である。この原理から見て、熱尖端流を誘起するために必要な物体の尖り具合あるいは曲率半径は、分子の自由運動を阻害しない程度まで許容できると思われる。一方、熱尖端ポンプは、先に述べたように、流路のサイズが、もともと、気体分子の平均自由行程の程度である。両者を考え合わせると、熱尖端ポンプの流路形状に大きな自由度があることが予想される。

本研究では、まず数値シミュレーションによって上記のアイデアを検証した。図 3 は、Boltzmann 方程式に基づく DSMC(直接シミュレーション・モンテカルロ)法による一方向流の解析結果であり、流路の一区画分の温度場と流速場を示すものである。今回提案する流路[図 3(b)]においても、流

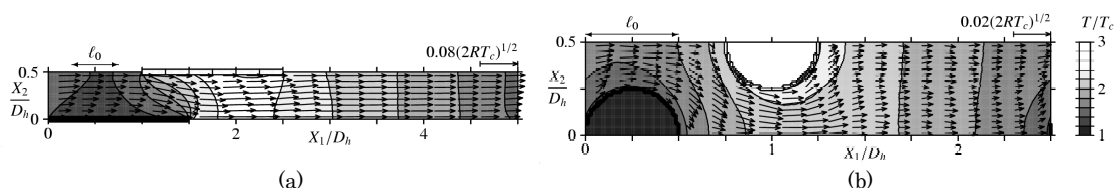


図 3 熱尖端ポンプ内部の一方向流。温度比 3 のケース。図中の■は低温壁、□は高温壁を表す。気体中の温度場をグレーの濃さで色分けし、矢印で各点の流速ベクトルを表示している。気体の平均密度に対応する平均自由行程の長さが各図の左上に示してある。各図の右上の矢印は流速の大きさで、 $(2RT_c)^{1/2}$ は分子の平均速度(音速程度の量)である。(a): 図 1 の熱尖端ポンプ; (b) 今回提案する熱尖端ポンプ。

速の大きさは小さくなるが、従来の流路 [図 3(a)]と同様に一方向流が生じていることが分かる。

このアイデアを用いると、熱尖端ポンプの作成が著しく容易になる。2 つの多孔膜や網を並べ、片側を加熱すればよい(図 4)。このポンプの駆動力は、高温・低温の多孔質ペアを通して低温側から高温側へ方向に誘起される希薄気流である。温度場によって誘起される希薄気流は、従来から様々な流れが報告されているが、ここで述べた、異温度の多孔質のペアを通り抜ける流れについては報告例が無い。そこで、試験装置を作成し、流れの可視化を試みた。

試験装置の例を図 5 に示す。装置は低温側ユニットと高温側ユニットから成る。低温側ユニットは、厚さ 1mm の銅板の穴(100×80mm)に網状に直径 1mm の銅線を取り付けたもの(線の間隔 1mm)である。高温側ユニットはアルミニウムフレーム内に網状にヒーター線(直径および間隔 1mm)を張ったものである。真空ベルジャー内に 2 つの網を

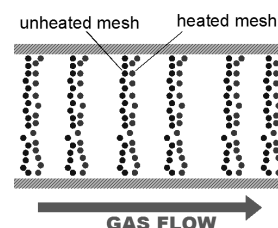


図 4 新しい熱尖端ポンプの案。

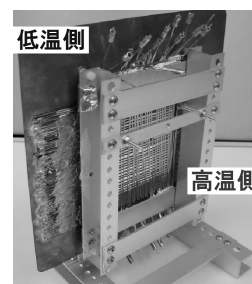


図 5 異温度多孔質ペアを通過する流れの実証装置。

1mm 程度離して並べ、ヒーター線を電力で加熱する。流路を塞ぐ形でアルミニウム箔(厚さ $4\mu\text{m}$)を懸垂させると、気体の平均自由行程が約 1mm となる 10Pa 近辺の圧力で、ヒーターを加熱した場合にのみ、箔が傾く様子が見られた(図 6)。また、流路にダクトを設けて羽根車(図 7)を設置すると、前述の箔と同様の条件の下でのみ羽根車が回転し、低温側から高温側に気体が流れていることが確認された。羽根車の回転数は、ヒーター電力 18W、圧力 5Pa の場合に 660rpm であった。

B: 熱駆動ポンプの気体分離効果

熱駆動ポンプ内部の気体の流れとして、温度場で誘起される流れが重要であることは当然であるが、その流れによって生じる圧力場、また、圧力場によって生じる流れも重要である。さて、熱で誘起される気体流と、圧力で誘起される気体流は、分子の重さに対する依存性が異なる。この場合、混合気体中の異なる成分の分子は、異なる大きさの駆動力を受けることになる。高圧や大きな系の気体であれば、成分独自の運動は分子同士の頻繁な衝突によって妨げられてしまうが、熱駆動ポンプ内部は分子が自由運動する比率が高い希薄気体状態であり、それぞれの気体成分が別々の流速を持ち得る。つまり、熱駆動ポンプは混合気体を分離する可能性を持つはずである。本研究では、このアイデアを基に、数値シミュレーションによって混合気体の分離効果を検証した。

数値解析は、A 項と同様の DSMC 法によって行った。分子間力のモデルとしては、古典的な剛体球分子・Maxwell 分子モデルだけではなく、実験との一致に優れるレナード・ジョーンズ分子モデルも用いて解析を行った。結果の一部を図 8 に示す。この図は、図 1 の熱尖端ポンプユニットを 10 個直列に接続して両端を塞ぎ、内部に二成分混合気体(分子の質量比 1:10)を封入した場合の、定常状態における重い気体成分の濃度を示している。(a)は剛体球分子モデル、(b)はレナード・ジョーンズ分子モデル、(c)は Maxwell 分子モデルに対する結果である。分子間力のモデルによって結果は劇的に異なる: 剛体球分子、レナード・ジョーンズ分子に対しては、ポンプ両端で 20%程度の濃度差が生じ、熱尖端ポンプに気体分離効果があることを示しているが、Maxwell 分子の場合、濃度分布はほぼ一様で、明確な気体分離効果が見られない。レナ

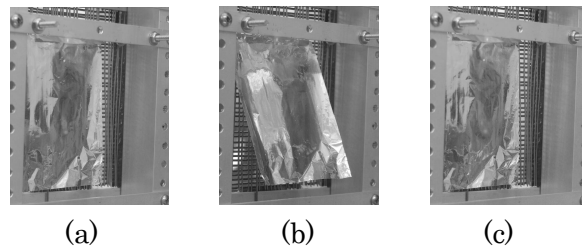


図 6 実験結果。希薄気流により、流路を塞ぐアルミニウム箔が持ち上げられる様子。(a) 圧力 1Pa, ヒーター電力 0W。低温部、高温部の温度差は 0°C ; (b) 圧力 1Pa, 電力 21W、温度差 44°C ; (c) 圧力 600Pa, 電力 21W。

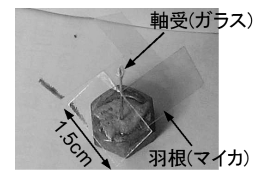


図 7 流れの検出に用いた羽根車。

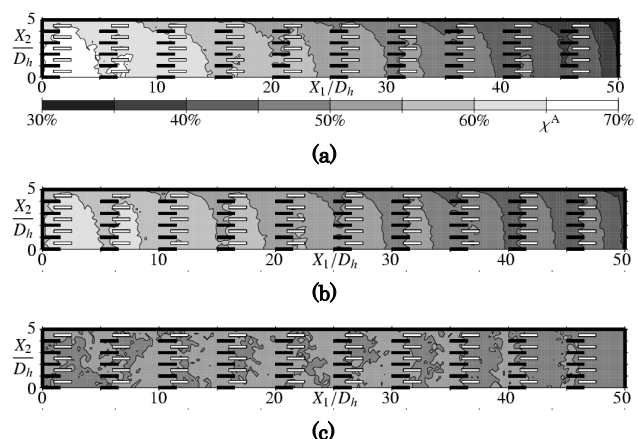


図 8 熱尖端ポンプの気体分離効果。温度比 3、混合気体の分子の質量比 10、分子数比 1 のケース。軽い気体分子の平均自由行程が平板間隔の $1/2$ となる場合の定常状態に対する結果。重い気体の濃度を色分けして示してある。(a) 剛体球分子、(b) レナード・ジョーンズ分子(具体的には、He-Ar 混合気体)、(c) Maxwell 分子。

ード・ジョーンズ分子モデルが(計算量は大きい)粘性・拡散などの各種現象を高い精度で表現できることを考えると、①熱尖端ポンプには気体分離効果がある。②Maxwell 分子モデルは、熱尖端ポンプの気体分離効果を表現できない、の二点が結論として得られる。

Maxwell 分子モデルやその亜種は、取り扱いの容易さから、希薄気体の分野では広く用いられている。一方で、それらが希薄度(あるいは平均自由行程)が 0 の極限で、混合気体の熱拡散を記述できない欠陥を持つことも知られていた。本研究の結果は、Maxwell 分子モデルの欠陥が、希薄度 0 の極限に限らず、広い範囲の希薄度で生じることを示している。

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

杉元 宏・京都大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻 講師

4. 研究実施時期

2005 年(平成 17 年)3 月 31 日から 2007 年(平成 19 年)3 月 30 日

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

1. 杉元 宏:“熱尖端流によって駆動される真空ポンプ内の希薄気流の数値解析”、真空 **49** (2006) 481-487.
2. 杉元 宏、高田 滋、小菅 真吾、竿田 武則:“混合気体の分離方法、及び気体分離装置”、特許公開 2006-218421 (2006).
3. H. Sugimoto, S. Takata, and S. Kosuge:“Gas separation effect of the pump driven by the thermal edge flow”, in *Rarefied Gas Dynamics*, eds. A. K. Rebrov and M. S. Ivanov (submitted).
4. S. Takata, H. Sugimoto, and S. Kosuge:“Gas separation by means of the Knudsen compressor”, *Eur. J. Mech. B/Fluids*, **26** (2007) 155-181.
5. 杉元 宏、山田 崇恭:“異温度の網のペアを通して誘起される希薄気体の流れ”、2007 年春季応用物理学関係連合講演会、3 月 27 日～3 月 30 日、ポスター発表 28a-P3-23 (2007).

6. 内外における関連研究の状況

熱駆動型ポンプの一種、Knudsen Compressor については、米国などのいくつかの研究グループでも開発が進められている。その代表的な実施例は、一枚の薄い多孔膜の片面を加熱、もう片面を冷却して熱遷移流を誘起するものである。一方、本研究で提案するポンプ(図 4)は、別個の多孔膜を加熱・冷却するため、温度差を与えることが容易であり、熱応力に対する耐久性もある。また、熱駆動型ポンプの気体分離効果は、本研究が初めて明らかにしたもので、独創的なものである。

7. 今後の発展に対する希望

ここで提案する新しい熱尖端ポンプは、構成が簡単で製作が容易であり、研究を進めれば、大気圧程度の高圧における動作も比較的容易に実現できるだろう。また、このポンプのエネルギー源は数十度程度の温度差でも十分である。これに第二の成果である混合気体分離効果を組み合わせ、他原子分子に対する性質などの理論や、粉塵に対する防護策等の具体的問題について研究を進めれば、廃熱などの安価なエネルギーを利用して給排気中の特定の成分を分離・濃縮する、かなり独特な装置が実現できると予想される。