

Knudsen compressor による気体分離：分離効率と時間効率

Gas Separation by the Knudsen compressor: separation efficiency and time performance

高田 滋, 京大工, 京都市左京区吉田本町, E-mail: takata@aero.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

○梅津 宏紀, 京大工, 京都市左京区吉田本町, E-mail: hiroki@t04.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

Shigeru TAKATA, Dept. of Mech. Eng. and Sci., Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

Hiroki UMETSU, Dept. of Mech. Eng. and Sci., Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

Gas separation by the Knudsen compressor is studied on the basis of the fluid-dynamic system for arbitrary Knudsen numbers. The system has been derived by a systematic asymptotic analysis of the Boltzmann equation with the narrow channel approximation. Time evolution of the concentration and pressure fields are obtained numerically for various configurations of the compressor. The results are discussed with a special interest in the optimal designing of the compressor for meeting the conflicting demands of good degree and time efficiency of separation.

1. はじめに

Knudsen compressor とは分子気体効果を利用した熱駆動型ポンプで, 広い流路と狭い流路を交互に繋いだ周期構造に同じ周期の温度分布を与えたものである^(1,2,3). 気体の圧縮あるいは排気は流路に与えた温度分布が誘導する熱遷移流により行われる. 最近, 高田らは, Knudsen compressor を混合気体に適用すると気体分離器として機能することを示した⁽⁴⁾. 気体の分離は, 流路壁の温度が誘導する熱遷移流とそれが形成する圧力・濃度場による 2 次流れの強さが分子の種類によって異なるために起こる. これまでは最終定常状態での気体分離の起否が主に調べられてきたが, 実用上は分離器としての時間的な効率も重要になる. 本研究では, 狭流路近似により Boltzmann 方程式から導いた流体力学方程式系を用いて数値シミュレーションを行い, 分離能力と時間効率の両面にすぐれた Knudsen compressor の流路形状を模索した.

2. 問題設定と基礎方程式

Fig. 1 に示すような, 狭い間隔 D_I の平行平板とそれよりも広い間隔 D_{II} の平行平板をつないだ流路を一組 (以下, 基本ユニットと呼ぶ) とし, それを多数 (N 個) つないで構成した Knudsen compressor の 2 次元モデルを考える. 基本ユニットは長さ L_I , 幅 D_I のサブユニット I と長さ L_{II} , 幅 D_{II} のサブユニット II で構成され, その全長を L とする: $L = L_I + L_{II}$. サブユニット I は, さらに仕切り板で N 個の流路に分けられており, i 番目の流路の幅を D_i ($D_I = D_1 + \dots + D_N$) とする. 仕切り板も含め, 流路の温度 T_w は時間的に一定で, X_1 方向にのみ周期 L で変化する: $T_w(X_1) = T_w(X_1 + L)$ [$0 \leq X_1 \leq (N-1)L$]. この Knudsen compressor を二成分混合気体に作用させたときの気体の振舞いを, Boltzmann 方程式に基づき壁面で拡散反射を仮定して調べる. 各サブユニットの長さが流路幅よりも十分に長ければ ($D_I \ll L_I$, $D_{II} \ll L_{II}$), 微小パラメータ $\epsilon = \max(D_I/L_I, D_{II}/L_{II})$ による Boltzmann 方程式の系統的な漸近解析を行うことができ, 任意の希薄度に対して有効な流体力学方程式系が導ける. この方程式系を用いて様々な形状のポンプの特性を調べた.

3. 数値計算結果

計算は $L_I/L = 0.5$, $D_i/D_I = 1/N$, $D_{II}/D_I = 1$ で決まる形状の基本ユニットで構成した装置に対して行った. 壁面温度は Fig. 1 のようにノコギリ歯状の分布を与え, 装置の左端は気体種 A, B が各々数密度 $n_*/2$, 温度 T_* に保たれた無限に広いタンクにつながっており, 右端は閉じられそこでの流れがないとした. 気体の希薄度を表す基準 Knudsen 数は $K_* \equiv l_0/D_I = 1$

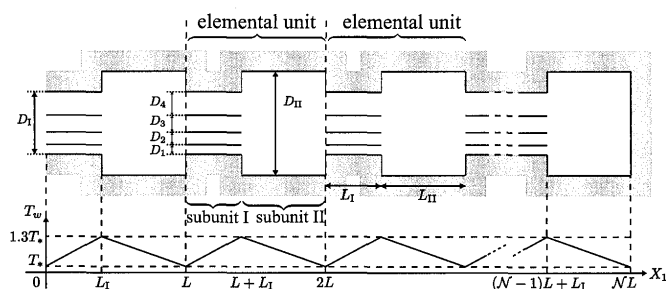


Fig. 1 Knudsen compressor.

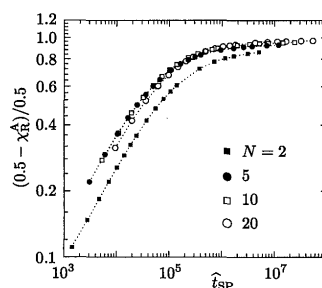


Fig. 2 Separation performance vs time consumption. Along each dotted line, symbols indicate from left to right the results for $N = 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 400$ and 500 .

とする. ここで l_0 は数密度 n_* , 温度 T_* の基準静止平衡状態にある気体種 A の平均自由行程である. 気体種 A をヘリウム (He), 気体種 B をアルゴン (Ar) とし, 初期に装置内の気体は左端につながれたタンク内部と同じ状態であるとして, その後の気体の振舞いを様々な N , N' の組合せについて調べた. その結果を Fig. 2 に示す. ここで X_R^A は最終定常状態における装置右端での気体種 A の濃度, t_{SP} は装置右端での濃縮 (分離) が最終状態の 99% に達するまでに要した無次元時間である [基準時間は $L^2 D_I^{-1} (2kT_*/m^A)^{-1/2}$ である. ここで k は Boltzmann 定数, m^A は気体種 A の分子質量]. 図の縦軸は装置の分離性能の, 横軸は時間効率の指標であり, 図中の左上部を占める N , N' の組合せを選ぶと分離性能と時間効率の両面で優れた装置となる. この図から, 高い分離性能を効率よく得るには, むやみに流路数やユニット数を増やすのではなく, 各々を適切に選ぶ必要があることがわかる.

参考文献

- (1) M. Knudsen, Ann. Phys. (Leipzig) 31 (1910) 205-229.
- (2) G. Pham-Van-Diep *et al.*, in *Rarefied Gas Dynamics*, J. Harvey & G. Lord (eds.), Vol. I, Oxford, London, 1995, pp. 715-721.
- (3) Y. Sone *et al.*, Phys. Fluids 8 (1996) 2227-2235.
- (4) S. Takata *et al.*, Eur. J. Mech. B/Fluids 26 (2007) 155-181.