

気体分子流の基礎理論と数値解析

Basic Theory and Numerical Methods of Molecular Flow

○ 松田七美男¹ (1. 東京電機大工)

○ Namio Matuda¹, (1. Tokyo Denki Univ.)

E-mail: matuda@film.s.dendai.ac.jp

1. 背景

分子流領域における気体の流れの解析は、真空装置及びそれを利用する産業領域において最も重要な課題である。今日需要が見込まれつつある比較的圧力の高いところでの中間流・粘性流領域の流れの解析は流体力学に負うところが大きく、手法は複雑・多岐に渡る。対して、分子流領域における流れの解析は図1に示す非常に単純な条件を仮定して、気体分子運動論に基づき理論構築及び数値解析がなされる。

分子条件 気体は容器壁だけで散乱され、空間における気体分子相互の散乱は無視する。

余弦則 熱平衡時には散乱強度分布は、壁の法線から測った散乱角度の余弦に比例する。

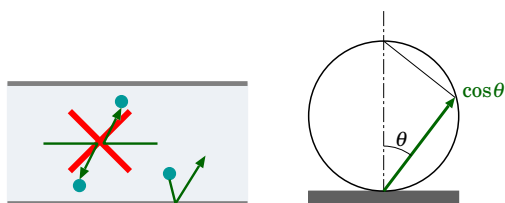


図 1: 分子流領域の流れの理論における仮定条件：分子条件（左図），余弦則（右図）。

2. 解析手法

上記の仮定に基づく、分子流領域の流れの解析手法は大きく三通りある。

Clausing の積分方程式 定常状態では、容器の全壁面において気体分子の入射頻度と壁からの放出速度とが等しくなることを積分方程式で定式化したもの。1932年にClausingが提唱した[1]。高い理論性があり得られる結果は最も信頼できるが[2]、適用範囲は広くない。なぜなら、解析解が求まらず最終的には数値積分せざるを得ず、現在高

精度計算可能なものが1次元に限られているからである。

モンテカルロ法 適用範囲が広く、現在主流の数値シミュレーション手法である[3]。一般に、精度が試行回数の平方根に比例するため、実行時間が膨大になる場合がある。

拡散現象数値モデル 容器の構造が比較的単純な場合には、マクロには一様な拡散定数を有する拡散現象としてモデル化できる。モンテカルロ法ほど汎用ではないが、Clausing積分方程式よりは適用範囲が広く、精度も高く取れるので理論との対比が可能である。また、モンテカルロ法は、拡散方程式のどのような境界条件の解に相当するかが明らかとなる[4]。

3. 数値解析の例

最も基本的な、半径 a 、長さ L の一様な円形断面導管について、通過確率 K および圧力分布 $p(x)$ を各手法で解析した例を示し、それぞれの特徴を明らかにする。モンテカルロ法についてはこのシンポジウムにおいて他に詳細な講演があるので、Clausing積分方程式によるテーパー管の解析、拡散現象モデルによる狭い空間での解析の例等を補足的に紹介する。

【参考文献】

- [1] P. Clausing: Ann. Physik, **12** (1932) 961: republished in J. Vac. Sci. Technol., **8** (1971) 636.
- [2] N. Matuda: J. Vac. Soc. Jpn., **58** (2015) 311 (Japanese).
- [3] P. J. Lobo, F. Becheri and J. Gomés-Goñi: Vacuum, **76** (2004) 83.
- [4] N. Matuda, Y. Sato and Y. Saito: J. Vac. Soc. Jpn., **53** (2010) 151 (Japanese).