

鳥取大・院 (学) *嶋田 英和
鳥取大・工 (正) 松岡 広成

鳥取大・工 (正) 山根 清美
鳥取大・工 (正) 福井 茂寿

1. まえがき

超微小すきまの気体潤滑 (分子気体潤滑(MGL)¹⁾) の適用例である磁気ディスク装置の浮動ヘッドでは、すきま量の更なる微小化に伴って 10 nm 程度以下の超微小すきま領域の潤滑特性、面粗さを考慮した場合に局所的に生じる数nm のすきまにおける特性の把握が望まれている。この場合の潤滑領域の流れは、着目する領域の代表長 h_0 が気体の分子平均自由行程 λ よりも小さいことから ($h_0 \ll \lambda$, したがってクヌッセン数 $Kn = \lambda/h_0 \gg 1$) 分子相互の衝突よりも分子と境界壁との衝突が主となる "自由分子流 (Free Molecular Flow)" に近い状態となっている^{2,3)}。この自由分子流は、分子気体の性質がわずかな "スリップ流れ" の近似の反対の極限として、扱いが簡単になる。

本報告では、MGL 解析と自由分子流を仮定した「自由分子流 MGL 方程式」による解析の結果を比較した。比較は境界面の特性を変化させて行い、具体的には、3種の基本形状について、境界面における気体分子の反射の形態を表す適応係数 α をパラメータとして、その影響を定量的に調べた。

2. 自由分子流領域における分子気体潤滑方程式

境界面の適応係数 α を考慮した分子気体潤滑 (MGL)方程式は、次式で表される。

$$\frac{d}{dX} \left\{ \tilde{Q}_p(D, \alpha_0, \alpha_1) PH^3 \frac{dP}{dX} \right\} = A \frac{d \{ Q_C(D, \alpha_0, \alpha_1) PH \}}{dX} \quad (1)$$

ここで、 P, H は無次元圧力、無次元すきまであり、 D は逆クヌッセン数(= $ph/\mu\sqrt{2RT}$)である。また、 \tilde{Q}_p はポアズイユ流れの流量係数比であり、ポアズイユ流れの流量係数 Q_p を連続流の値 $D/6$ で割った値($Q_p/(D/6)$)である。

自由分子流領域では壁面の適応係数 α が任意の場合、ポアズイユ流れの流量係数 Q_p は、次の自由分子流の流量係数 Q_{pfm} で近似できる。

$$Q_{pfm}(D) = -\frac{1}{\sqrt{\pi}} \alpha_p \log(D) \quad (2)$$

ここで、 α_p は次式である。

$$\alpha_p = \frac{(2-\alpha_0)(2-\alpha_1)}{1-(1-\alpha_0)(1-\alpha_1)} \quad (3)$$

また、 α_0 は走行面 (ディスク) の適応係数、 α_1 は静止面 (スライダ) の適応係数である。

以下では、上下面の適応係数が等しい場合($\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha$)

を取り扱う。この場合には $\alpha_p = (2-\alpha)/\alpha$ となり、これを用いると式(1)は次式となる。

$$\frac{d}{dX} \left(\log(D) H^2 \frac{dP}{dX} \right) = -\frac{\sqrt{\pi} D_0}{6} \frac{\Lambda}{\alpha_p} \frac{d(PH)}{dX} \quad (4)$$

特に、 $\alpha=1$ の場合には $\alpha_p=1$, すなわち $Q_{pfm}(D) = -\log(D)/\sqrt{\pi}$ となる^{4,5)}。

式(4)を、任意の適応係数に対する自由分子流 MGL 方程式 (Free molecular MGL eq.) と呼び、以下の解析で用いる。

3. 解析結果

i) 流量係数 Q_p と自由分子流の流量係数 Q_{pfm} の比較

図1は、適応係数 α が 0.2 ~ 1 の場合について、ポアズイユ流れの流量係数 Q_p と自由分子流の流量係数 Q_{pfm} を比較したものである。

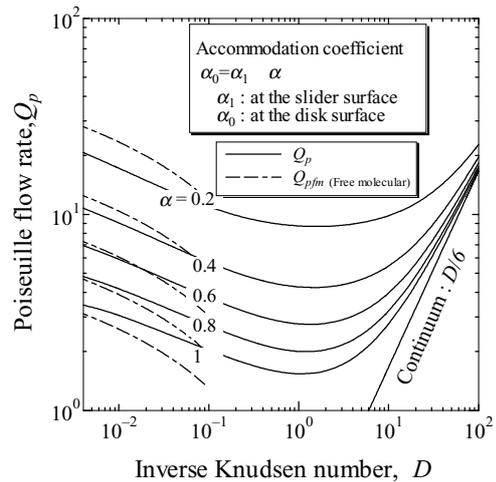
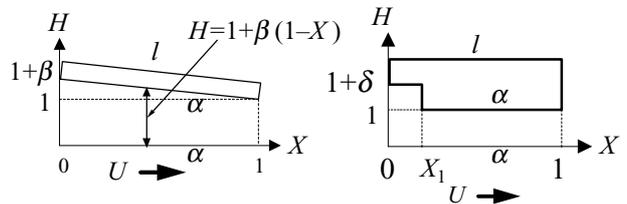


Fig. 1 Poiseuille flow rate



(a) Plane inclined slider (b) Step slider

Fig. 2 Slider configurations

ii) 解析対象

図2は、解析対象とした傾斜平面形スライダ(a)およびステップ形スライダ(b)で、形状パラメータとしてそれぞれ傾き β , ステップ量 δ をとる。以下では、(a)傾斜平面形($\beta=1$), (b-1)正ステップ形($\delta=1$), (b-2)逆ステップ形($\delta=-0.5$)の3つの形状を対象とした解析結果を述べる。

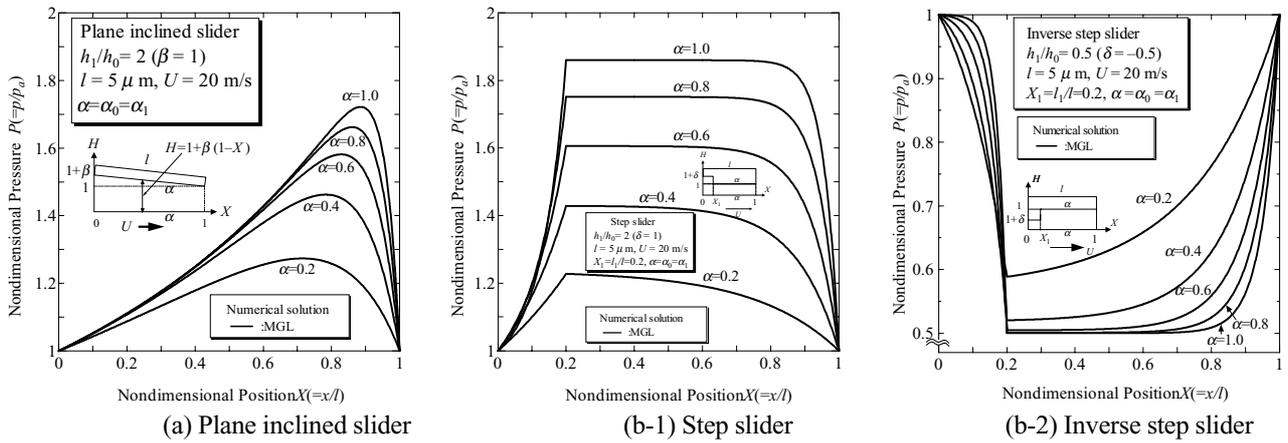


Fig. 3 Pressure distributions for various α

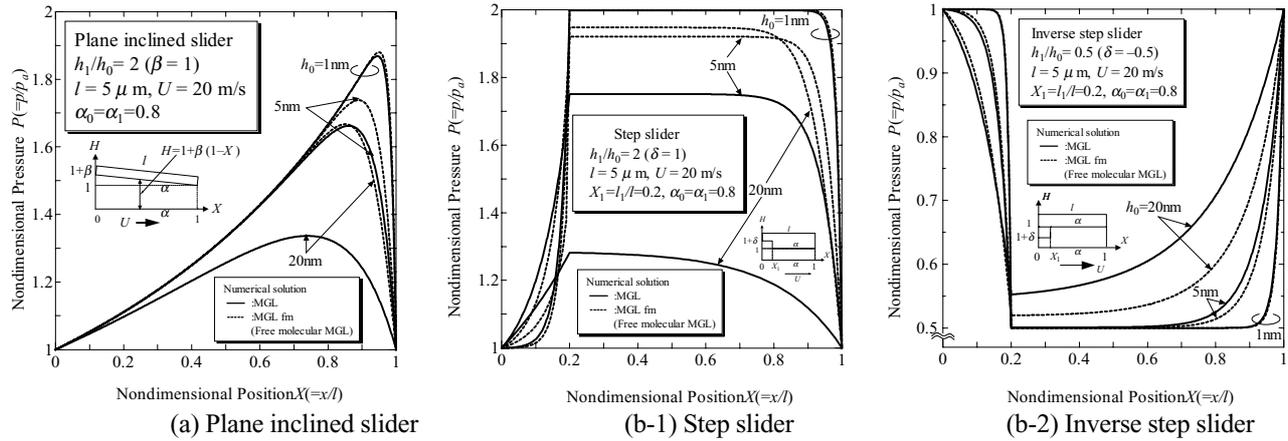


Fig. 4 Comparisons of MGL and free molecular MGL results for $\alpha = 0.8$

iii) 適応係数の影響

図3は、いずれも基準すきま量 $h_0 = 5\text{nm}$ とし適応係数 α を変化させた場合の圧力分布である。いずれの形状においても、 α の減少に伴い発生圧力が減少する。

iv) MGL 解析と自由分子流 MGL 解析の結果の比較

図4は、 $\alpha = 0.8$ 、基準すきま量 h_0 が 20nm 、 5nm 、 1nm の場合について、MGL 解析と自由分子流 MGL 解析の結果を比較した。 $\alpha = 1$ の場合と同様に、いずれの形状もすきまが微小である程、両者がよく一致する⁶⁾。

v) 負荷容量と圧力中心の解析結果

図5は、図3(a)の発生圧力から負荷容量を算出し、適応係数を横軸として表したものである。 α が1に近づくにつれて、負荷容量も増加する。なお、圧力中心 \bar{x} についても、 α が1に近づくにつれて、 \bar{x} が出口すきまの方に移動することを確認した。

4. まとめ

本研究では、分子気体潤滑(MGL)理論に基づき、適応係数 α を考慮した自由分子流領域の圧力の解析手法を確立した。また、この手法を用いて、種々の形状のスライダの圧力をいくつかの適応係数について求め、MGL 解析と比較を行った。

また解析結果から、適応係数 $\alpha = 1 \sim 0.8$ 程度ですきま量が数 nm 程度以下では、式(1)のMGL 方程式

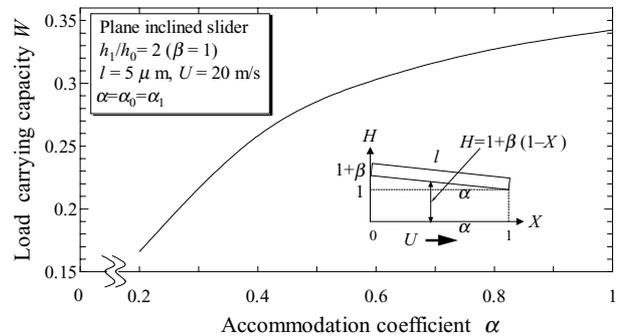


Fig. 5 Load carrying capacity W versus α

の結果と式(4)の自由分子流MGL方程式の結果がよく一致することを確認した。

参考文献

- 1) Fukui, S. and Kaneko, R., *Handbook of Micro/Nano tribology*, ed. Bhushan, B., CRC Press (1995), Chap. 13
- 2) 丹生, *流体物理学*, 共立全書 219, 共立出版 (1978)
- 3) 曽根・青木, *分子気体力学*, 朝倉書店 (1994), 2章
- 4) Cercignani, C. and Daneri, A., *J. Appl. Phys.*, Vol. 34 (1963), pp. 3509-3513
- 5) Fukui, S. & Kaneko, R., *ASME J. Tribology*, Vol. 118 (1996), pp. 364-369
- 6) 山根清美, 嶋田英和, 松岡広成, 福井茂寿, *自由分子流領域における気体潤滑特性の解析*, 日本機械学会 IIP2001 講演論文集 (2001), pp. 40-42