

108 自由分子流領域における気体潤滑特性の解析

Molecular gas film lubrication in free molecular region

○正 山根 清美 (鳥取大 院) 正 嶋田 英和 (鳥取大 学)
正 松岡 広成 (鳥取大 工) 正 福井 茂寿 (鳥取大 工)

Kiyomi YAMANE, Tottori University, Koyama-cho, Tottori city, 680-0945
Hidekazu SHIMADA, Tottori University
Hiroshige MATSUOKA, Tottori University
Shigehisa FUKUI, Tottori University

For examining molecular gas film lubrication (MGL) characteristics in several nanometers, free molecular MGL equation, which employs Poiseuille flow rate for free molecular flow region, is utilized to calculate the characteristics of plane inclined slider and step slider. As the minimum spacing decreases, results of conventional MGL equation and the free molecular MGL equation become close each other, which means free molecular MGL equation is applicable for several nanometer region. Moreover, differences among any flow rates in Poiseuille flows become diminished, as the minimum spacings decreases and bearing number increases.

Key Words : Molecular gas-film lubrication, Tribology, Flying head slider, free molecular flow, Accommodation coefficient, Poiseuille flow

1. まえがき

超微小すきまの気体潤滑解析では、線形化ボルツマン方程式に基づいたレイノルズ形の潤滑方程式による解析 (分子気体潤滑(MGL))[1]に加え、直接シミュレーションモンテカルロ法(DSMC 法)による解析もほぼ確立されている[2]~[4]。超微小すきまの気体潤滑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 $Kn \equiv \lambda / h_0 \gg 1$)、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[5][6]。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、超微小すきま領域を対象にした MGL 解析と自由分子流領域を対象にした「自由分子流 MGL 方程式」による解析の比較を、2 種の基本形状、境界面の適応係数に対して行った。なお、簡単化のため形状パラメータによる線形解を用いた比較も行った。

2. 自由分子流領域における分子気体潤滑方程式

超微小すきまに適用しうる分子気体潤滑方程式(MGL)式は、次式で表される。

$$\frac{d}{dX} \left\{ \tilde{Q}_p(D, \alpha) PH^3 \frac{dP}{dX} \right\} = \Lambda \frac{d(PH)}{dX} \quad (1)$$

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、 Q_p はポアズイユ流れの流量係数であり、図1に示す Q_p を連続流の値 $D/6$ で割った値($Q_p/(D/6)$)である。自由分子流領域で壁面の適応係数 α が1、すなわち拡散反射の場合には、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 $Q_{p_{fm}}$ となる (図1参照)[7][8]。

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

この自由分子流領域の流量係数 $Q_{p_{fm}}$ を、式(1)の Q_p として用いると次式となる。

$$\frac{d}{dX} \left(\log(D) H^2 \frac{dP}{dX} \right) = -\frac{\sqrt{\pi} D_0}{6} \Lambda \frac{d(PH)}{dX} \quad (3)$$

この方程式を自由分子流 MGL 方程式 (Free molecular MGL eq.) と呼ぶ。

3. 数値解析と線形解析

式(1)の MGL 方程式あるいは式(3)の自由分子流 MGL 方程式は、いずれも圧力に関する非線形方程式であるので、通常は数値解析手法で圧力分布が求められる。図2に、対象とし

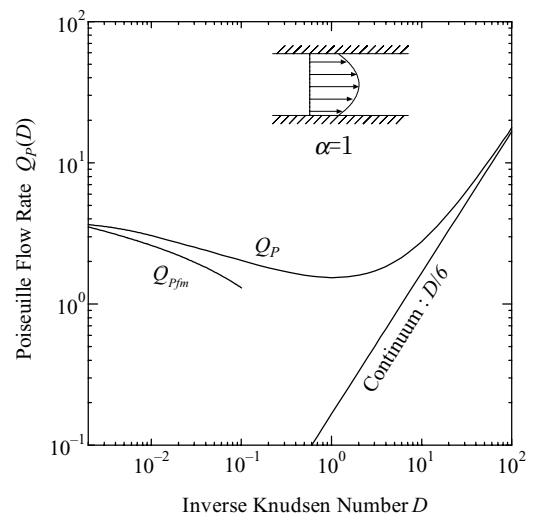
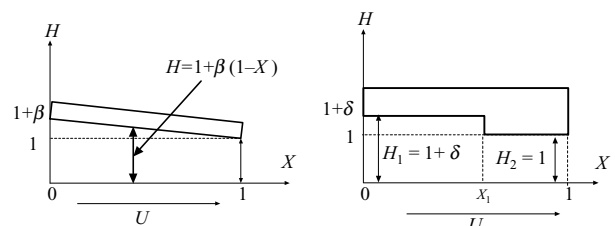


Fig. 1 Poiseuille flow rate for $\alpha=1$



(a) Plane inclined slider

(b) Step slider

Fig. 2 Slider configurations

た形状を示す。ここでは、方程式の特徴などを理解するために、微小な形状パラメータ β 、 δ をもつスライダを対象に、 β 、 δ で線形化を施した解析解も一部用いることにする。その線形解について述べる。

i) 傾斜平面形スライダの線形解

傾き β が微小な場合の傾斜平面形スライダの線形解は、次式で示される。

$$P = 1 + \beta \left\{ X - \frac{e^{-\Lambda'(1-X)} - e^{-\Lambda'}}{1 - e^{-\Lambda'}} \right\} \quad (4)$$

ここで、

$$\Lambda' = \frac{\Lambda}{Q_p(D_0)} \quad (5)$$

であり、 D_0 は最小すきま量 h_0 、周囲圧力 p_a を代表値とした特徴的逆クヌッセン数である。

ii) ステップ形スライダの線形解

ステップ量 δ が微小な場合のステップ形スライダの線形解

は、無次元ステップ位置 X_1 の流入側を添字1、流出側を添字2で表すと、それぞれ次式である。

$$P_1 = 1 + \delta \left\{ \frac{e^{\Lambda'} - e^{\Lambda'X_1}}{e^{\Lambda'X_1}(e^{\Lambda'} - 1)} (e^{\Lambda'X} - 1) \right\}, (0 \leq X \leq X_1) \quad (6)$$

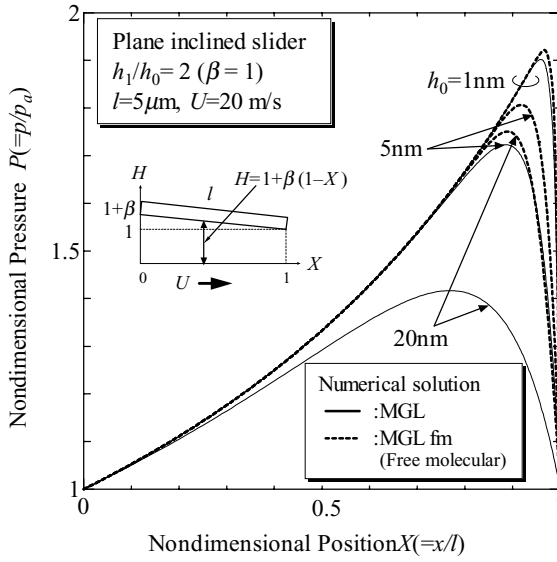
$$P_2 = 1 + \delta \left\{ \frac{1 - e^{\Lambda'X_1}}{e^{\Lambda'X_1}(e^{\Lambda'} - 1)} (e^{\Lambda'X} - e^{\Lambda'}) \right\}, (X_1 \leq X \leq 1) \quad (7)$$

4. 解析結果

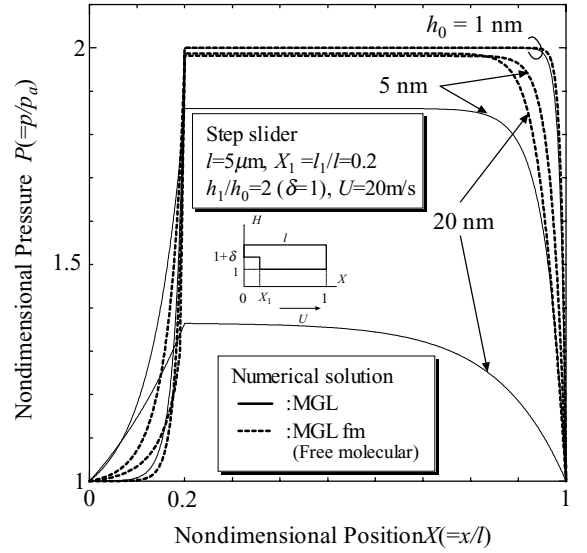
i) MGL 方程式と自由分子流 MGL 方程式の結果の比較

図3は、傾斜平面形スライダおよびステップ形スライダの数値解析結果で、形状パラメータ β 、 δ をそれぞれ1とした。最小すきま量 h_0 は、20nm, 5nm, 1nmである。MGL 解析と自由分子流 MGL 解析の結果を比較すると、いずれの形状についてもすきまが微小である程、両者がよく一致することが解る。

図4は、同じく傾斜平面形スライダおよびステップ形スラ

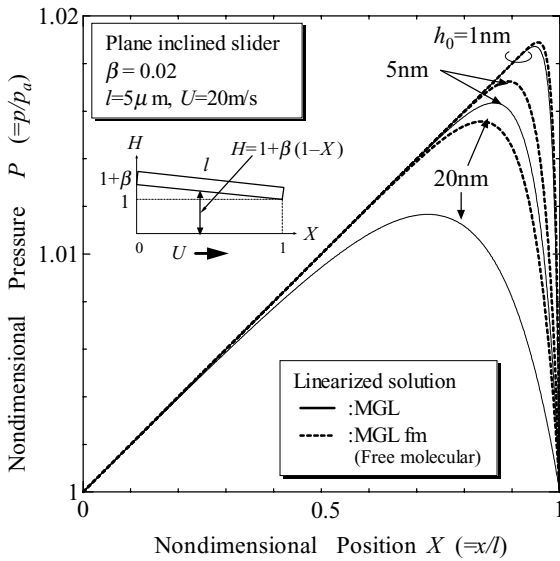


(a) Plane inclined slider

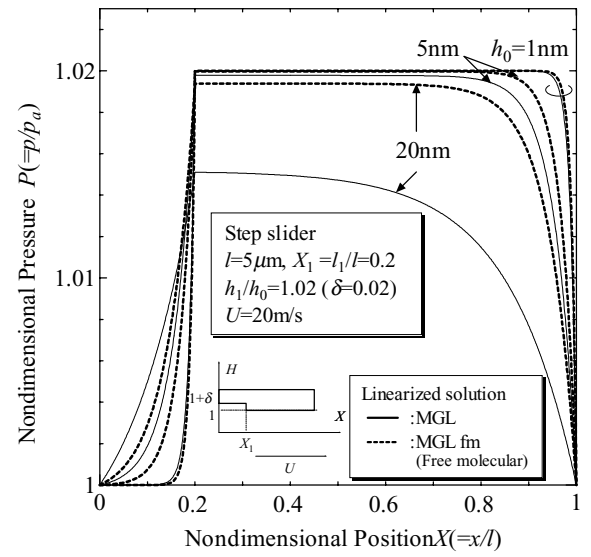


(b) Step slider

Fig. 3 Pressure distributions by numerical calculation



(a) Plane inclined slider



(b) Step slider

Fig. 4 Pressure distributions by linearized solution

イダに対する線形解で、形状パラメータ β 、 δ はそれぞれ0.02とした。最小すきま量 h_0 は図3と同じく20nm, 5nm, 1nmである。この線形解析でも、MGL解析と自由分子流MGL解析の結果を比較すると、いずれの形状についてもすきまが微小である程、両者がよく一致することが解る。

ii) 適応係数の影響

境界面における気体分子の反射の形態を表すパラメータである適応係数 α は、流量係数に影響を及ぼす。適応係数 α は鏡面反射と拡散反射の割合を表し、適応係数が1の場合にはすべてが拡散反射である。図5に、適応係数 α をパラメータとしたポアズイユ流れの流量係数 Q_p を示す。

図6に、傾斜平面形スライダ($\beta=1$)で最小すきま量 h_0 が5nm, 1nmの時に、適応係数 $\alpha=1, 0.9, 0.8$ の場合の発生圧力の数値解析結果を示す。最小すきま量 $h_0=5$ nmでは、圧力のピーク値付近で適応係数による違いが認められるが、 $h_0=1$ nmでは、適応係数がいずれの場合も殆ど差異が認められない。

iii) DSMC 法による結果との比較

モンテカルロ直接シミュレーション(DSMC)法の分子気体潤滑問題への適用が詳細に調べられつつあるが[2]~[4]、そのDSMC法による逆ステップ形スライダの解析結果と、MGL解析および自由分子流MGL解析の結果を比較した。図7に、無次元ステップ位置 $X_1=0.2$ 、流入端のすきま量 $h_1=10$ nm、流出端のすきま量 $h_0=20$ nmの場合の圧力分布を示す。DSMC解析とMGL解析は互いによく一致すること、自由分子流MGL解析結果も比較的よく一致することが解る。

5. 考察とまとめ

本報告で示した解析結果では、すきま量が数nm程度になると式(1)で示したMGL方程式の結果と式(3)の自由分子流MGL方程式の結果がよく一致することが解る。これは、両者の流量係数が互いに近づくことによるものであるが、これに付随して、すきま量 h_0 が数nm程度の超微小すきままではベアリング数 Λ の値が非常に大きくせん断流れが主となることがその傾向を著しくしている。このため、ポアズイユ流れの流量に多少の差異があっても計算結果ではその影響が顕著でなくなる。たとえば、図6に示した適応係数の影響では、適応係数 α の差異による流量係数の違いが必ずしも無視できないが発生圧力ではその差異が減じられている。

本研究では、超微小すきま領域における自由分子流MGL方程式の有用性を、傾斜平面形あるいはステップ形スライダを対象とした数値解析および線形解析により確認した。また、超微小すきままではベアリング数が著しい増加すること、発生圧力に及ぼすポアズイユ流れの流量係数の差異が顕著でなくなることも定量的に示した。

参考文献

- [1] Fukui, S. and Kaneko, R., *Handbook of Micro/Nano tribology*, ed. Bhushan, B., CRC Press, 1995, Chap. 13
- [2] Fukui, S. and Kaneko, R., *Proce. of ITC*, Vol. 9 (1996) pp. 1943-1946
- [3] Fukui, S. and Yamane, K., *AISS* (1998) pp. 109-119
- [4] 山根・福井, 機論 67-653, C (2001) pp. 246-253
- [5] 丹生, 流体物理学, 共立全書 219, 共立出版
- [6] 曾根・青木, 分子気体力学, 朝倉書店, 1994, 2章
- [7] Cercignani, C. and Daneri, A., *J. Appl. Phys.*, Vol. 34 (1963), pp. 3509-3513
- [8] Fukui, S. & Kaneko, R., *ASME J. Tribology*, Vol. 118 (1996) pp. 364-369

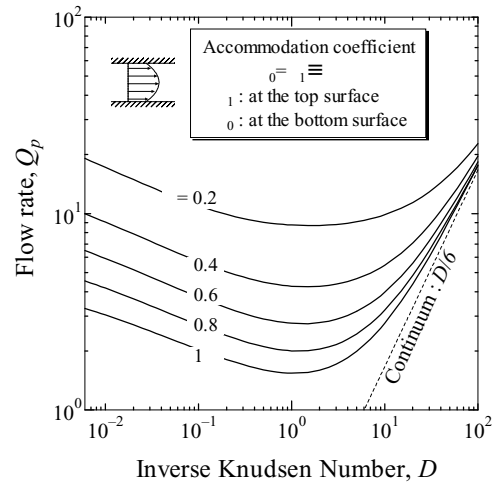


Fig. 5 Poiseuille flow rate for various α

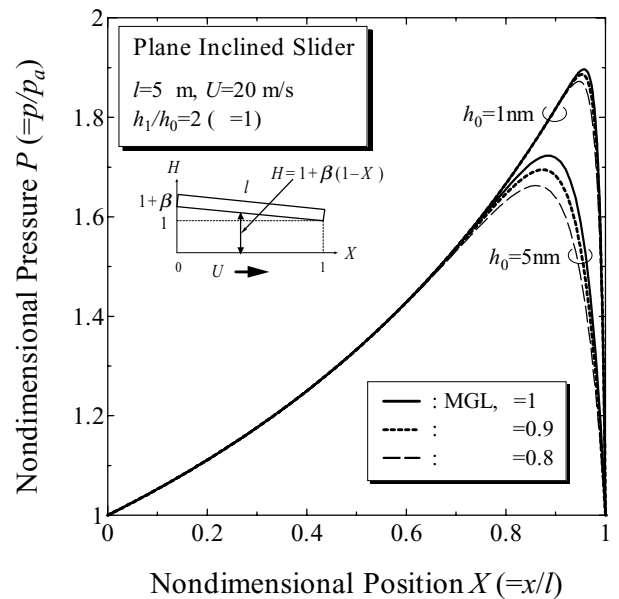


Fig. 6 Pressure differences by the accommodation coefficient α

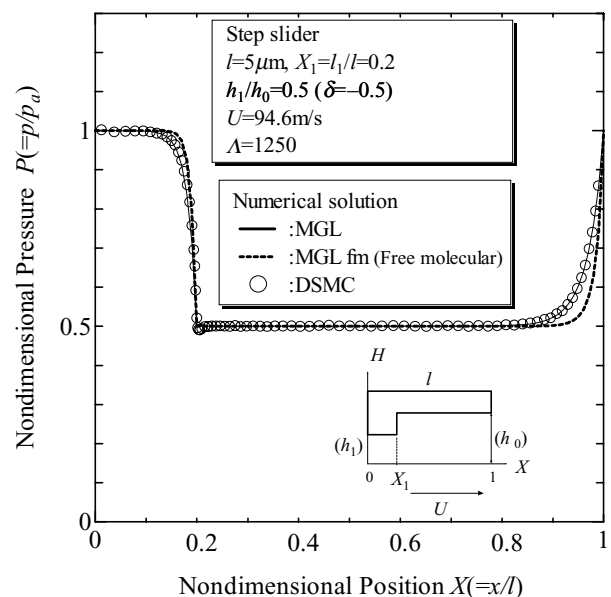


Fig. 7 Comparisons among MGL, free molecular MGL and DSMC results