

108 自由分子流領域の分子気体潤滑方程式とその基本性質 (適応係数の影響)

Molecular gas film lubrication theory in free molecular region
(Effects of accommodation coefficients)

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

Hidekazu SHIMADA, Tottori University, Koyama, Tottori, 680-0945 Japan

Daigo YAMAGISHI, *ibid.*

Kiyomi YAMANE, *ibid.*

Hiroshige MATSUOKA, *ibid.*

Shigehisa FUKUI, *ibid.*

For examining molecular gas film lubrication (MGL) characteristics in several nanometers, free molecular MGL equation, which employs Poiseuille flow rate and shear stress coefficient for free molecular flow region, is established considering surface accommodation effects and calculated the characteristics of plane inclined slider and step slider with accommodation coefficients of disk and slider, α_0 and α_1 , as parameters. As the minimum spacing decreases, pressures and shear stresses by the use of conventional MGL equation and the free molecular MGL equation become close each other, which means free molecular MGL equation is applicable for the 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, Shear stress

1. はじめに

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 $Kn \equiv \lambda/h_0 \gg 1$)、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^{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、自由分子流を仮定した「自由分子流 MGL 方程式」を示し、これによる発生圧力およびせん断力の解析結果と自由分子流を仮定しない MGL 解析による結果を比較した。比較は、2種のスライダ形状について、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。また、モンテカルロ直接シミュレーション(DSMC)法とも比較を行った。

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。また、 Q_C はクエット流れの流量係数である。

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 、クエット流れの流量係数 Q_C は、それぞれ次の自由分子流の流量係数 Q_{Pfm}, Q_{Cfm} で近似できる。

$$Q_P \rightarrow Q_{Pfm}(D) = -\frac{1}{\sqrt{\pi}} A_{Q_P} \log(D) \quad (2)$$

$$Q_C \rightarrow Q_{Cfm}(D) = A_{Q_C} \quad (3)$$

ここで、 A_{Q_P}, A_{Q_C} は次式である。

$$A_{Q_P} = \frac{(2-\alpha_0)(2-\alpha_1)}{1-(1-\alpha_0)(1-\alpha_1)} \quad (4)$$

$$A_{Q_C} = \frac{\alpha_0(2-\alpha_1)}{1-(1-\alpha_0)(1-\alpha_1)} \quad (5)$$

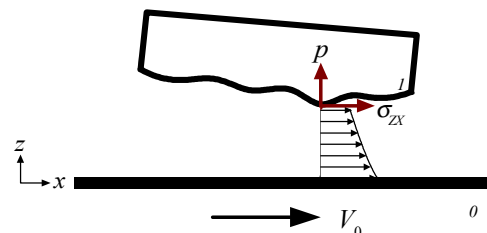


Fig. 1 Slider air bearing with surface accommodation coefficients, α_0, α_1

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(図1 参照)。

特に、上下面の適応係数が等しいとき、すなわち

$$\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha \quad (6)$$

のとき、クエット流れの流量係数は1で、

$$Q_{cfm} = A_{Qc} = 1$$

となる。さらに $\alpha=1$ の場合には、

$$A_{Qp} = 1 \quad (7)$$

である。このため

$$Q_{pfm}(D) = -\log(D)/\sqrt{\pi} \quad (8)$$

となる^{4,5)}。

式(2)～(5)を用いて整理すると、式(1)は次式となる。

$$\frac{d}{dX} \left(\log(D) H^2 \frac{dP}{dX} \right) = -\frac{\sqrt{\pi} D_0}{6} \left(\frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0} \right) \Lambda \frac{d(PH)}{dX} \quad (9)$$

式(9)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。また、式(9)より、自由分子流のMGL方程式において、静特性を考える場合の適応係数による影響は、上面(静止面)の適応係数には左右されず、下面(走行面)のみを考慮すればよいことがわかる。

3. 自由分子流領域におけるせん断応力

境界面の適応係数 α を考慮したせん断応力 σ_{zx} は、次式で表される。

$$\sigma_{zx} = \frac{H}{2} \varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \left(1 - \frac{2Z}{H} \right) W_p(D, \alpha_0, \alpha_1) - \frac{1}{D_0} \frac{V_0}{H} W_c(D, \alpha_0, \alpha_1) \quad (10)$$

ここで、 P, H は無次元圧力、無次元すきま量であり、 V_0 は下面の速度、 ε は潤滑領域の全長とすきま量の比($=h_0/l$)を表す。また、 W_p, W_c は、ポアズイユ流れのせん断応力係数、クエット流れのせん断応力係数である。

自由分子流領域では壁面の適応係数 α が任意の場合、ポアズイユ流れのせん断応力係数 W_p 、クエット流れのせん断応力係数 W_c は、次の自由分子流のせん断応力係数 W_{pfm}, W_{cfm} で近似できる。

$$W_p \rightarrow W_{pfm} = 1 - \frac{1 - A_{wp}}{1 - (2\beta/D)} \quad (11)$$

$$W_c \rightarrow W_{cfm} = \frac{D}{\sqrt{\pi}} A_{wc} \quad (12)$$

ここで、 P, H は無次元圧力、無次元すきま量であり、 D は逆クヌッセン数($= ph/\mu\sqrt{2RT}$)で、 β は基準すきま h_0 での逆クヌッセン数 D_0 と等価な変数($\beta = D_0 Z$)で、 Z は無次元座標である。また、 A_{wp}, A_{wc} は次式である。

$$A_{wp} = \frac{\alpha_0(2 - \alpha_1)}{1 - (1 - \alpha_0)(1 - \alpha_1)} \quad (13)$$

$$A_{wc} = \frac{\alpha_0 \alpha_1}{1 - (1 - \alpha_0)(1 - \alpha_1)} \quad (14)$$

式(11)～(14)を用いると、式(10)は次式となる。

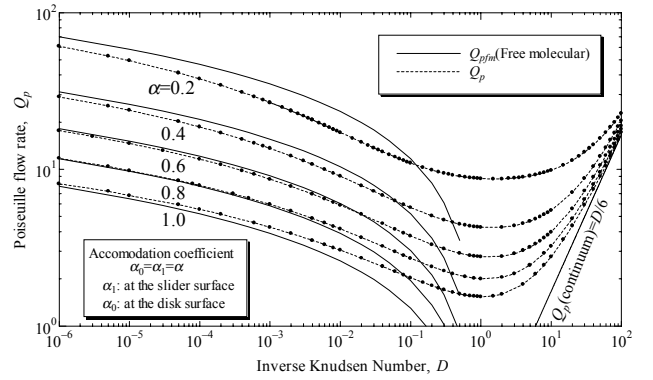


Fig. 2 Poiseuille flow rates

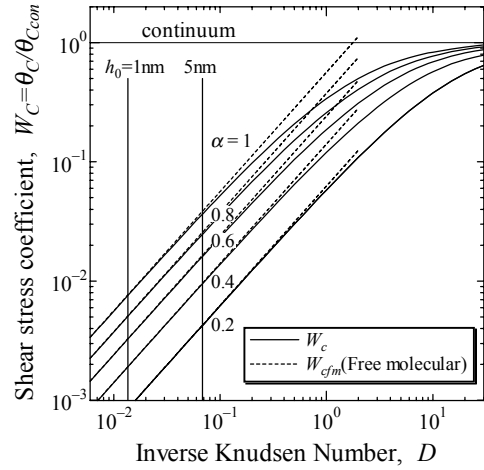
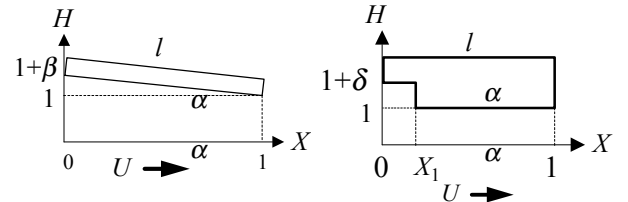


Fig. 3 Shear stress coefficients



(a) Plane inclined slider (b) Step slider

Fig. 4 Slider configurations

$$\sigma_{zx} = -\frac{H}{2} \varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \left(A_{wp} - \frac{2Z}{H} \right) - \frac{V_0 P}{\sqrt{\pi}} A_{wc} \quad (15)$$

式(15)が、任意の適応係数に対する自由分子流領域でのせん断応力 σ_{zx} である。本研究ではディスク面のせん断応力について解析を行う。

以下では、上下面の適応係数が等しい、つまり

$$\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha$$

として、解析を行う。

4. 解析結果

4.1 流量係数 Q_p と自由分子流の流量係数 Q_{pfm} 、せん断応力係数 W_c と自由分子流のせん断応力係数 W_{cfm} の比較

図2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、図3は、

せん断応力係数 W_c と自由分子流のせん断応力係数 $W_{c_{fm}}$ を比較したものである。これより、超微小すきまに対応する $D \rightarrow 0$ で、両者がよく一致することがわかる。

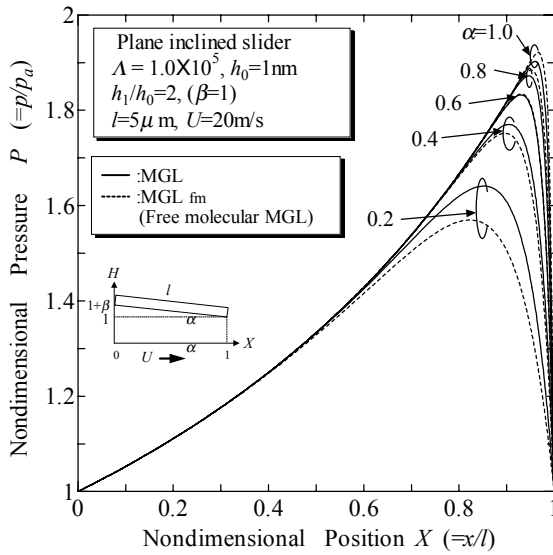
4.2 MGL解析と自由分子流MGL解析の結果の比較

図4は、解析対象とした傾斜平面形スライダ、およびステップ形スライダで、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)正ステップ形($\delta=1$)の2つの形状を対象とした解析結果を述べる。

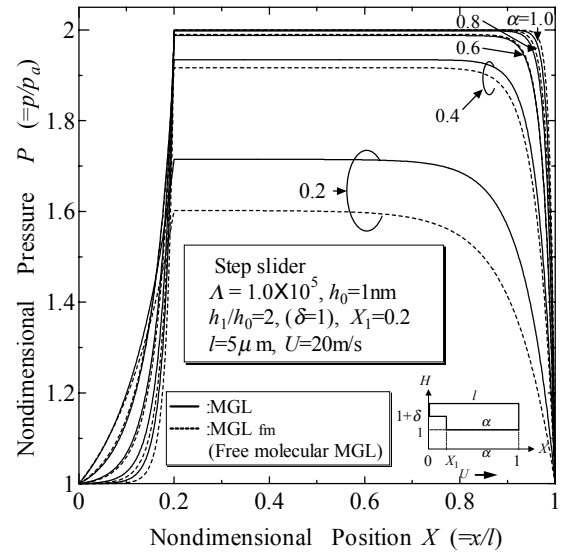
図5は、傾斜平面形スライダおよびステップ形スライダの発生圧力の解析結果で、最小すきま量 h_0 は1nmで、適応係数 α は0.2～1まで変化させた。MGL解析と自由分子流MGL解析の結果を比較すると、いずれの形状についても、適応係数が減少するに従って、すなわち分子の反射において鏡面反射の割合が増加するに伴って、圧力が低下していくことがわかる⁶⁾。また、適応係数 α が0.4や0.2の場合には、数値解の流

量係数を用いた圧力の方が、自由分子流の流量係数を用いた圧力より、大きくなっていることが分かる。これは自由分子流の流量係数の、数値解に対しての漸近が、適応係数が変化した場合に、上から漸近するのか下から漸近するのかの違いによるものである。

つぎに、せん断応力を求める。必要な圧力勾配、および逆クヌッセン数 D は、図5で求めた圧力分布から求め、せん断応力を式(15)から求める。せん断応力は流入端から流出端に向かう方向を正として表した。図6より適応係数が減少するにつれて、すなわち境界面での分子の反射において鏡面反射の割合が増加するにつれて、せん断応力の絶対値も減少していることが分かる。また、せん断応力の分布は圧力分布と類似の形状をしていることが分かる。この理由としては、せん断応力の式に圧力勾配の項が掛かっているためであると考えられる。

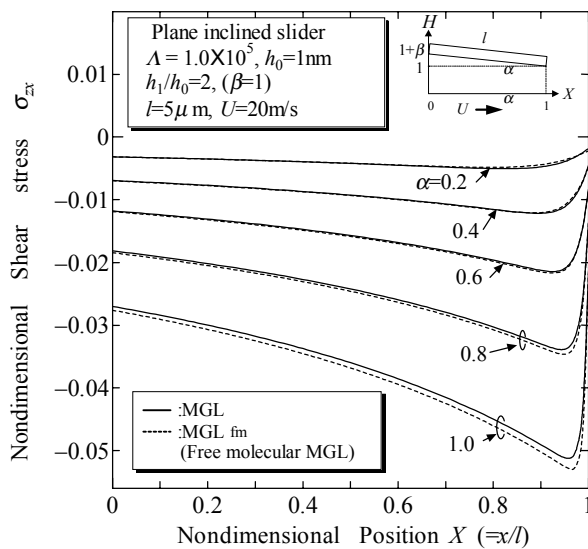


(a)Plane inclined slider

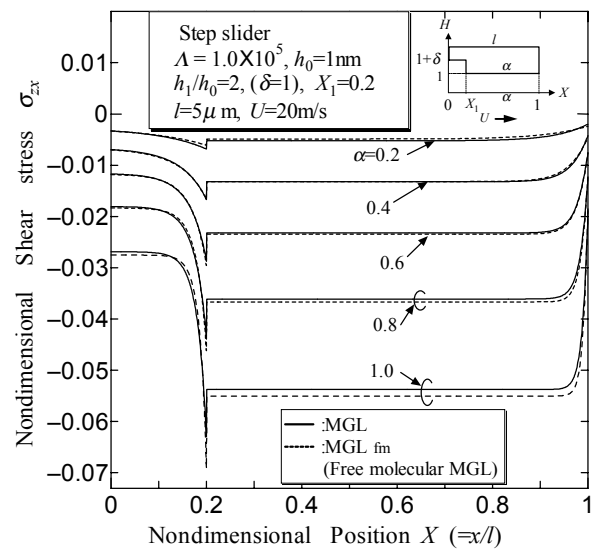


(b)Step slider

Fig. 5 Pressure distributions for various α



(a)Plane inclined slider



(b)Step slider

Fig. 6 Shear stress distributions for various α

4.3 MGL解析とDSMC法の結果の比較

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⁷⁻⁹⁾、傾斜平面形スライダにおいて、そのDSMC法による解析結果、およびDSMC法で分子間の衝突を無視した解析結果と、MGL解析および自由分子流MGL解析の4者の結果を比較した。図7に、無次元ステップ位置 $X_1=0.2$ 、流入端のすきま量 $h_1=2\text{ nm}$ 、流出端のすきま量 $h_0=1\text{ nm}$ の場合の圧力分布、および図8にせん断応力を示す。圧力分布は α を0.2, 0.6, 1.0と変化させ、せん断応力は0.2 ~ 1まで変化させた。結果よりMGL解析とDSMC解析および、自由分子流MGL解析と分子間の衝突を無視したDSMC解析の結果が、比較的良好に一致することを確認した。

5. まとめ

本研究は、適応係数を変化させた場合での、自由分子流領域の分子気体潤滑(MGL)静特性解析を研究対象にした。以下に得られた研究結果をまとめる。

1)まず、自由分子流領域での流量係数、せん断応力係数について漸近解を導出し、数値解との比較を行ない、その妥当性を確かめた。その結果、自由分子流領域での流量係数 Q_{pjm} およびせん断応力係数 W_{cfm} は、逆Knudsen数 D を減少させていくことにより、数値解の Q_p およびせん断応力係数 W_c に漸近していくことが確認できた。

2)次に、得られた自由分子流領域での流量係数、せん断応力係数を用いることにより、自由分子流領域において、任意の適応係数に対応したMGL方程式を構築した。構築された方程式より、自由分子流領域でのMGL静特性解析における適応係数の影響は、走行面の適応係数のみにしか依存しないことが確認できた。

3)最後に、構築されたMGL方程式を用いて、傾斜平面形、ステップ型の両スライダについての圧力分布、せん断力分布を求め、数値解との比較、さらには適応係数を変化させた場合の比較を行った。結果として以下のことが得られた。

自由分子流領域において、傾斜平面型、ステップ型の両スライダに発生する圧力は適応係数が減少するにつれて、すなわち境界面での分子の反射について鏡面反射の割合が大きくなるに伴って、減少していく。せん断応力についても適応係数が減少するにつれて、絶対値としての圧力は減少していく。

本研究で構築された自由分子流領域の分子気体潤滑方程式は、微小化の著しい磁気ディスク装置の浮動ヘッドスライダのみならず、高真空環境下の軸受要素の解析、設計に有用であると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、DSMC法による、貴重なデータを提供していただいた、福井研究室学生、末田哲司氏に感謝いたします。

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) 曾根・青木、分子気体力学、朝倉書店(1994)、2章

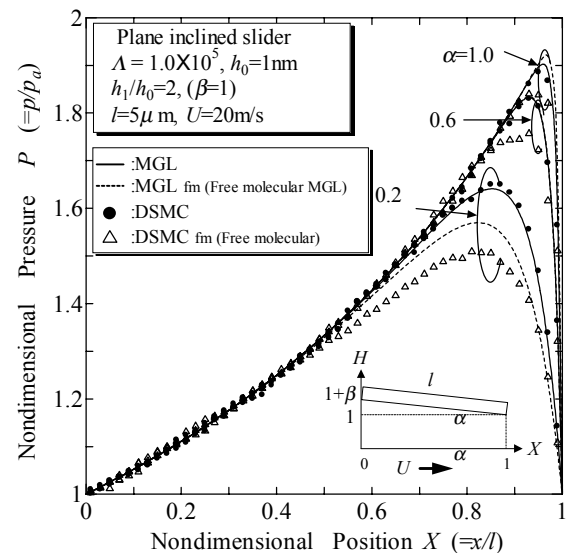


Fig. 7 Comparisons of pressure distributions among MGL, free molecular MGL, DSMC and free molecular DSMC results

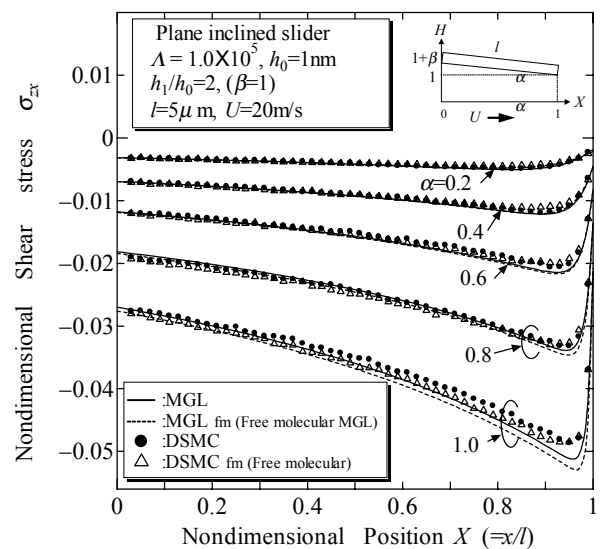


Fig. 8 Comparisons of shear stress distributions among MGL, free molecular MGL, DSMC and free molecular DSMC results

- 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
- 7) Fukui, S. and Kaneko, R., *Proc. of ITC*, Vol. 9 (1996), pp. 1943-1946
- 8) Fukui, S. and Yamane, K., *Advance in Information Storage Systems* (1998), pp. 109-119
- 9) 山根・福井, 機論 67-653, C (2001), pp. 246-253