

分子気体潤滑方程式の線形解析  
(走行面上の無限幅スライダ動特性の一般化理論)

Linearized Analyses of Molecular Gas Film Lubrication Equation

(Generalized theory for dynamic characteristics of Infinite width slider on running disk)

正 福井 茂寿 (鳥取大・工) 正 松岡 広成 (鳥取大・工)  
学 松井 秀敏 (鳥取大・院)

Shigehisa FUKUI, Tottori University, Minami 4-101, Koyama, Tottori

Hiroshige MATSUOKA, Tottori University, Minami 4-101, Koyama, Tottori

Hidetoshi MATSUI, Graduate School, Tottori University, Minami 4-101, Koyama, Tottori

This paper describes linearized analyses of dynamic characteristics of slider gas bearings with nanometer spacings by using MGL (Molecular Gas-film Lubrication) equation. The linearized solution consists of static pressures caused by slider inclinations and dynamic pressures caused by squeeze motions. The latter behaves like progressive waves whose wave numbers depend on the ratio of bearing number  $\Lambda$  to squeeze number  $\sigma$ .

*Key Words* : Tribology, Molecular Gas Film Lubrication, Magnetic Disk Storage, Flying Head Slider, Squeeze Force, Linearized Solution

1. はじめに

磁気ディスク装置(HDD)の大容量化、高記録密度化が進められ、スライダとディスク面間のすきま量は10nmに達しつつある。その際ディスク面振動や微小突起などによる外乱を受けた場合のスライダの動的挙動の精緻な解析がますます望まれている。その解析手法の基礎方程式には、気体分子の挙動を統計的に記述するボルツマン方程式に基づいて導出された分子気体潤滑(MGL)方程式がある<sup>(1)</sup>。このMGL方程式による動特性解析には、大別して周波数領域の線形解析法と時間領域の非線形解析法の2つがある。また、MGL方程式が移流拡散方程式であることを利用した、数値的拡散を少なく解析する手法として、CIP(Cubic Interpolated Propagation)法<sup>(2)</sup>の適用も試みられている<sup>(3)(4)</sup>。

本研究では、ディスク面上での無限幅スライダを対象に、微小な傾きおよび微小な振動振幅を仮定した線形解析<sup>(5)(6)</sup>により、発生圧力の時間変化を表わす解析式を求め、その基本特性を調べるとともに、CIP法による結果との比較を行い、良好な結果を得たので報告する。

2. 分子気体潤滑(MGL)方程式とその線形解析手法<sup>(1)</sup>

ボルツマン方程式に基づいて一般化された分子気体潤滑方程式は、動的特性を表わす時間項を含め、次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial X}(\widetilde{Q}_p PH^3 \frac{\partial P}{\partial X}) = \Lambda \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial \tau} \quad (1)$$

ここで、

$P=p/p_a$ :無次元圧力,  $H=h/h_0$ :無次元すきま

$X=x/l$ :無次元位置,  $\Lambda=6\mu Ul/p_a h_0^2$ :ベアリング数

$\sigma=12\mu\omega l^2/p_a h_0^2$ :スクイズ数

であり、また左辺の流量係数 $\widetilde{Q}_p$ は、圧力流れの流量係数であり、従来の気体潤滑方程式との差異がこの係数で集約されている。

ディスク面が走行し、更にスライダが傾斜している時(図1参照)のスライダ運動に対して、無次元すきま $H$ 、圧力 $P$ を次式で表現する。

$$H = 1 + \beta(1 - X) + \varepsilon \cdot \cos \tau \quad (2)$$

$$P = 1 + \beta \cdot P_{10} + \varepsilon \cdot P_{01} \quad (3)$$

ここで、 $\beta$ は傾き、 $\varepsilon$ は振幅であり、いずれも $\beta, \varepsilon \ll 1$ とする。また、 $P_{10}$ はディスク面走行により発生する圧力、 $P_{01}$ はスクイズ運動により発生する圧力である。式(2)、(3)を分子気体潤滑方程式(1)に代入し、 $\beta, \varepsilon$ のオーダーでそれぞれ抽出した式および境界条件は、以下となる。

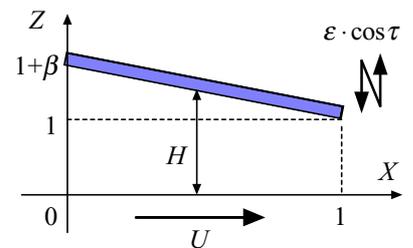


Fig. 1 Slider configuration

$$O(\beta): \frac{\partial^2 P_{10}}{\partial X^2} = -\Lambda' + \Lambda' \frac{\partial P_{10}}{\partial X} \quad (4)$$

$$O(\varepsilon): \frac{\partial^2 P_{01}}{\partial X^2} = \Lambda' \frac{\partial P_{01}}{\partial X} + \sigma' \frac{\partial P_{01}}{\partial \tau} - \sigma' \sin \tau \quad (5)$$

$$\text{境界条件: } X=0, X=1 \text{ のとき } P_{10} = P_{01} = 0 \quad (6)$$

ただし、

$$\Lambda' = \Lambda / \widetilde{Q}_{p0}, \Lambda' = \Lambda / \widetilde{Q}_{p0}$$

であり、修正ベアリング数、修正スクイズ数と呼ばれる。

3. 線形解析解とその基本性質

下面が走行し、更にプレートが傾斜している場合の圧力 $P$ は、式(4)で表される「走行するディスク面上に傾斜するスライダがある場合の発生圧力 $P_{10}$ 」と、式(5)で表される「走行するディスク面上に平行なスライダが並進運動する場合の発生圧力 $P_{01}$ 」の線形和で表され、次式となる。

$$P = 1 + \beta \cdot P_{10} + \varepsilon \cdot P_{01} \quad (7)$$

ここで、

$$P_{10} = X - \frac{e^{-\Lambda(1-X)} - e^{-\Lambda}}{1 - e^{-\Lambda}} \quad (8)$$

$$P_{01} = [\text{Re}(S)] \cdot \cos \tau - [\text{Im}(S)] \cdot \sin \tau \quad (9)$$

$$S = \frac{e^{\xi X - \xi} - e^{\xi X} + e^{\xi(1-X)} - e^{-\xi(1-X)}}{e^{\xi} - 1} - 1$$

$$\zeta = \frac{\Lambda' - \sqrt{\Lambda'^2 + 4i\sigma'}}{2}, \quad \xi = \frac{\Lambda' + \sqrt{\Lambda'^2 + 4i\sigma'}}{2}$$

である。

時間推移による圧力分布

図2は、走行するディスク面上の傾斜平面スライダに生ずる変動圧力 $P$ の時間推移を示したものである。表示では、ディスク振動と等価なスライダ面が並進振動する場合を示した。ディスク面が走行し、更にスライダが傾斜している場合の時間推移による圧力(式(7))分布には進行波状の波動現象がみられる。特に、 $\Lambda'/\sigma'$ すなわち $\Lambda/\sigma$ が小さい場合に顕著である。これは、超微小すきま( $h_0 \rightarrow 0$ )になり、 $\Lambda$ および $\sigma$ の値が非常に大きくなると、MGL方程式が波動方程式の一部の形をとり、波数が $\Lambda/\sigma$ に対応することに起因している。また、これらの結果はCIP法による結果ともよく一致している。

スクイズ膜による反力

スクイズ圧力がスライダ全体に及ぼすスクイズ反力は、スクイズ圧力を積分することにより得られる。

$$W = \{W_1/\varepsilon\} \cos \tau + \{W_2/\varepsilon\} \sin \tau \quad (10)$$

今、スライダが $\cos \tau$ でスクイズ運動しているとすると、 $\{W_1/\varepsilon\}$ は変位に比例して戻す力であり、 $\{W_2/\varepsilon\}$ は速度に比例して戻す力であり、それぞれバネ(剛性)とダンピング(減衰能)に対応する。図3は、走行するディスク面の速さをパラメータにした場合のスクイズ反力を示したものである。スクイズ反力の波動的性質に対応して、スクイズ反力もスクイズ数に対して波動的となる。

4. おわりに

本研究では、走行するディスク面上の傾斜平面スライダがスクイズ運動をする場合に発生する変動反力を求めた。スクイズ運動の圧力分布には、進行波状の波動の現象が現れる。特に、 $\Lambda'/\sigma'$ つまり $\Lambda/\sigma$ が小さい場合に顕著であることがわかる。

参考文献

- (1) Fukui, S. and Kaneko, R., "Molecular Gas Film Lubrication" in *Handbook of Micro/Nanotribology*, Chap.13, ed. Bhushan, B., CRC Press, (1995), pp. 559-604
- (2) 矢部孝他: 固体・液体・気体の統一解法とCIP法(1)~(3), *数値流体力学*, 第7巻, (1999), pp.70-81, pp.103-114, pp.133-141
- (3) 小西範和, 山根清美, 福井茂寿, 鈴木允: ニアコンタクト領域のMGLダイナミクス解析(CIP法に基づく数値計算スキームの検討), *機械学会2000年度年次大会講演論文集* ( ), No.00-1, (2000), pp.171-172
- (4) 小西範和, 中野頼人, 山根清美, 松岡広成, 福井茂寿, 鈴木允: ニアコンタクト領域のMGLダイナミクス解析(CIP法による2自由度挙動解析), *日本機械学会 情報・知能・精密機械部門講演会講演論文集*, No.01-8, (2001. 3, 東京), pp. 34-39
- (5) R.C.Diprima : Asymptotic Methods for an Infinitely Long Slider Squeeze-Film Bearing, *ASME J. Tribology*, (1968), pp.173-182
- (6) S. Fukui, R. Matsuda and R. Kaneko : On the Physical Meanings of  $\Lambda/\tilde{Q}_{p0}$  and  $\sigma/\tilde{Q}_{p0}$  in Molecular Gas Film Lubrication Problems, *ASME J. Tribology*, Vol.118, (1996), pp. 364 -369

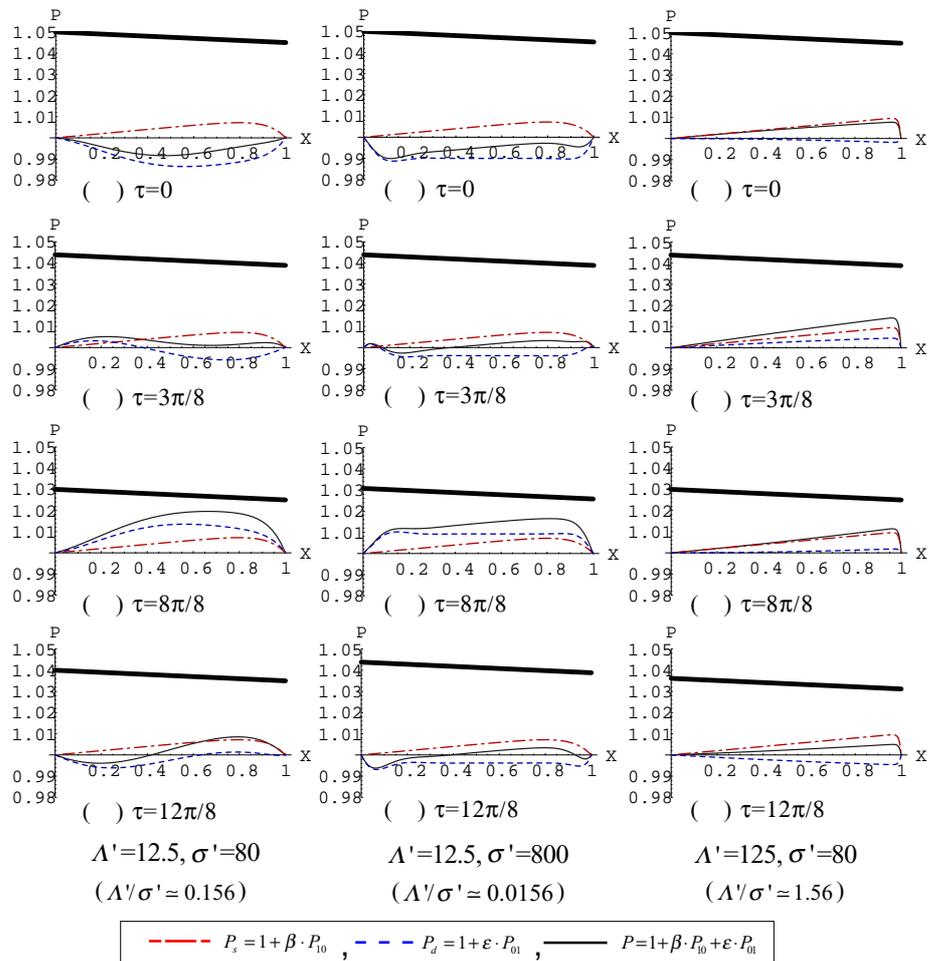


Fig.2 Slider motions and dynamic pressure distributions ( $\beta = \varepsilon = 0.01$ )

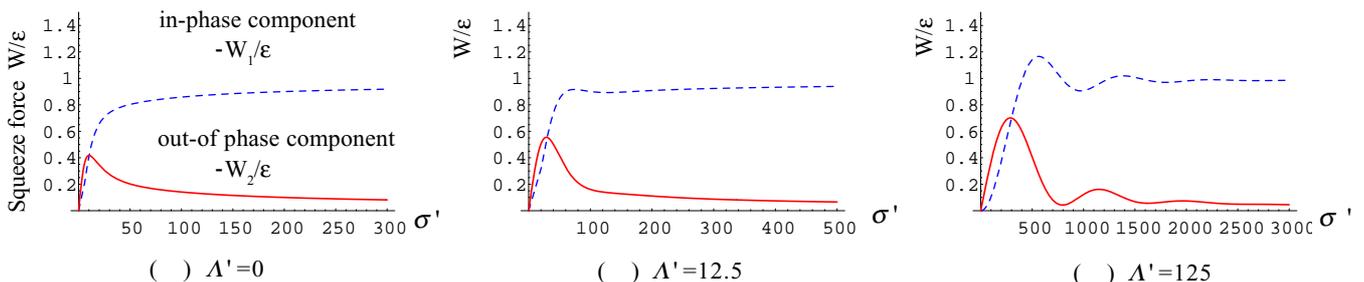


Fig. 3 Squeeze force v.s. modified squeeze number  $\sigma'$  ( $\beta = \varepsilon = 0.01$ )