

ヘッド/ディスク間に働く表面力に関する研究 (ファンデルワールス力の影響)

3 E 2

鳥取大・工(正) *松岡 広成 山根 清美 福井 茂寿

1. はじめに

磁気ディスク装置のさらなる高記録密度化のためには、磁気ヘッドとディスク表面間の浮上すきまを小さくすることが要求される。現状では十数 nm である浮上すきまを 10 nm 以下にする場合、従来の空気膜による浮上力に加え、表面間相互作用による力、特にファンデルワールス力(通常引力)を考慮した設計を行わなければならないと考えられる¹⁻⁴⁾。

本研究では、固体表面吸着膜を考慮したファンデルワールス圧力の一般的表式から、傾斜平面スライダに働くファンデルワールス力を定式化し、これらの基本特性を明らかにした。また、気体による浮上力との合力、つまりファンデルワールス力を考慮した傾斜平面スライダの負荷容量を求めた。

2. 固体表面吸着膜を考慮したファンデルワールス圧力

Fig. 1 に示すように、平行な媒質 1, 1' (磁気ヘッド, 磁気ディスクなどの固体を想定) の表面に、薄い吸着膜 2, 2' (厚さはそれぞれ T, T' , PFPE などの液体を想定) があり、媒質 3 (空気を想定) を介して相互作用する場合を考える。この場合、媒質 2, 2' 間に働くファンデルワールス圧力(単位面積当たりのファンデルワールス力) p_{vdW} は、

$$p_{vdW} = \frac{1}{6\pi} \left\{ \frac{A_{TF1}}{D^3} + \frac{A_{TF2}}{(D+T)^3} + \frac{A_{TF3}}{(D+T')^3} + \frac{A_{TF4}}{(D+T+T')^3} \right\} \quad (1)$$

あるいは、固体間(媒質 1, 1' 間)すきま h を用いて、

$$p_{vdW} = \frac{1}{6\pi} \left\{ \frac{A_{TF1}}{(h-T-T')^3} + \frac{A_{TF2}}{(h-T)^3} + \frac{A_{TF3}}{(h-T')^3} + \frac{A_{TF4}}{h^3} \right\} \quad (2)$$

と表される⁵⁾。ここで、 $A_{TF1} \sim A_{TF4}$ は Hamaker 定数であり、それぞれ以下ようになる。

$$A_{TF1} = k_A I_{232'3'}, A_{TF2} = k_A I_{2'312}, A_{TF3} = k_A I_{231'2'}, A_{TF4} = k_A I_{121'2'}, \quad (3)$$

$$k_A = \frac{3\hbar\omega_0}{8\sqrt{2}}, \quad (4)$$

$$I_{ijkl} = \frac{(n_i^2 - n_j^2)(n_k^2 - n_l^2)}{(n_i^2 + n_j^2)^{1/2} (n_k^2 + n_l^2)^{1/2} \{ (n_i^2 + n_j^2)^{1/2} + (n_k^2 + n_l^2)^{1/2} \}} \quad (5)$$

ここで、 $\hbar$ はプランク定数($= 1.05457 \times 10^{-34}$ Js), ω_0 は主電子吸収振動数($= 1.88 \times 10^{16}$ rad/s)⁵⁾, n_i は媒質 i の屈折率である。なお、式(1)および(2)は文献 5) の厳密式(32)を近似して得られたものであり、文献 6) p. 199 の式(11.37)をより一般化したものである。これらの式は、 $D \rightarrow 0$ の場合、媒質 1, 1' の作用が小さく、媒質 2, 2' が媒質 3 を介して相互作用する状態を表す。また、 $T, T' \rightarrow 0$ の場合、媒質 1, 1' が媒質 3 を介して相互作用する状態を表すことを、近似的に示すことができる。さらに、 $A_{TF1} = A_{TF2}$ であり、対称的な系($1' = 1, 2' = 2, T' = T$)の場合、

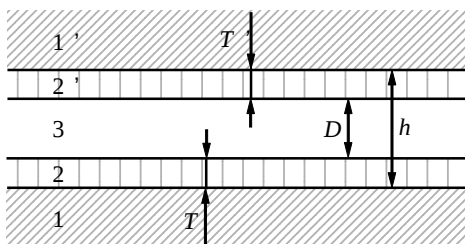


Fig. 1 Interaction between plane surfaces

合は、文献 6) p. 199 の式(11.38)に一致する。

媒質 1, 1' を DLC, 媒質 2 を PFPE, 媒質 3 を空気、媒質 2' はないとして求めたファンデルワールス圧力を Fig. 2 に示す(つまり、ディスク表面のみに PFPE 膜がある場合、 $T' = 0$)。DLC の屈折率 $n_1, n_1' = 1.9$ ⁴⁾, PFPE の屈折率 $n_2 = 1.3$, 空気の屈折率 $n_3 = 1.0$ とした($n_2' = 1.0$)。この組み合わせでのファンデルワールス力は引力となり、Fig. 2 は引力を正にとっている。図中の点線(Solid-Solid)は、表面膜を考えない場合の DLC 間のファンデルワールス圧力⁶⁾であり、破線($T = 0.0$ nm)は、式(2)で $T = T' = 0$ として求めたものである。式(2)が近似式であるため、ごくわずかな差が見られるが、ほぼ一致すると考えてよい。また、有限の PFPE 薄膜がある場合、それぞれの膜厚と同じ固体間すきままで圧力が無限大になっている。これは、式(2)の右辺第 1 項と 3 項の分母がそれぞれ 0 に近づくためで、実際には有限の値で液体に接触し、メニスカスを形成すると考えられる。上面にも薄膜がある場合($T' > 0$ の場合)は、 $h_0 = T + T'$ で無限大になることを確認している。なお、Fig. 2 の場合のそれぞれの Hamaker 定数の値は、 $A_{TF1} = A_{TF2} = 0, A_{TF3} = 7.03 \times 10^{-20}$ J, $A_{TF4} = 1.21 \times 10^{-19}$ J, 上面にも PFPE 膜がある場合は、 $A_{TF1} = 2.78 \times 10^{-20}$ J, $A_{TF2} = A_{TF3} = 4.67 \times 10^{-20}$ J, $A_{TF4} = 8.07 \times 10^{-20}$ J である。

3. 傾斜平面スライダに作用するファンデルワールス力

次に、Fig. 3 に示す傾斜平面スライダに働く正味のファンデルワールス力を求める。ファンデルワールス圧力は紙面に垂直方向(y 方向)に一定であるとし、スライダ幅を b とすると、ファンデルワールス力 F_{vdW} は次式で求められる。

$$F_{vdW} = \int_0^b dy \int_0^l p_{vdW} dx \\ = \frac{bl}{12\pi} \left\{ A_{TF1} \frac{h_0 + h_1 - 2(T+T')}{(h_0 - T - T')^2 (h_1 - T - T')^2} + A_{TF2} \frac{h_0 + h_1 - 2T'}{(h_0 - T')^2 (h_1 - T')^2} \right. \\ \left. + A_{TF3} \frac{h_0 + h_1 - 2T}{(h_0 - T)^2 (h_1 - T)^2} + A_{TF4} \frac{h_0 + h_1}{h_0^2 h_1^2} \right\} \quad (6)$$

ディスク表面のみに PFPE 膜がある場合のファンデルワールス力を Fig. 4 に示す。ここで、スライダ長さ $l = 1$ mm, ス

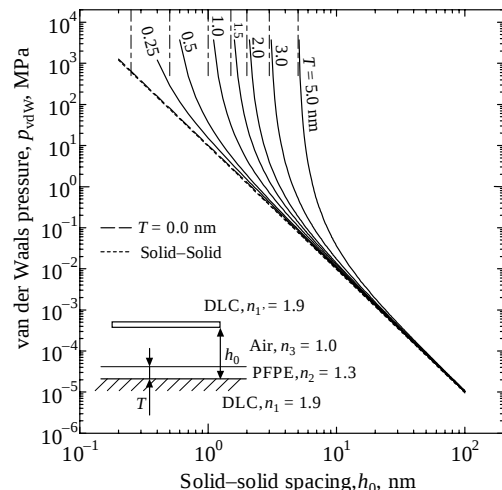


Fig. 2 van der Waals pressure

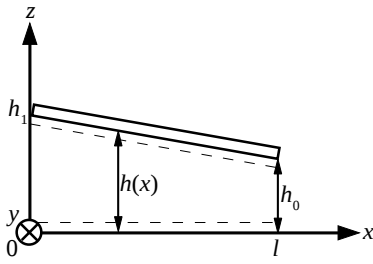


Fig. 3 Inclined head slider

ライダ幅 $b = 1 \text{ mm}$, 流入端固体間すきま h_1 は常に流出端固体間すきま $h_0 + 10 \text{ nm}$ (姿勢一定) とし, 引力を正にとっている. ここでも, Fig. 2 と同様の傾向が見られることがわかる. また, ファンデルワールス圧力と同様, 上面にも薄膜がある場合は, $h_0 = T + T'$ で無限大になることを確認している.

4. 気体発生圧力による浮上力とファンデルワールス力

気体発生圧力による浮上力 F_{air} (斥力) とファンデルワールス力 F_{vdW} (引力) を考慮し, 傾斜平面スライダの負荷容量を求める. 本研究で特に注目したい浮上すきまは, 10 nm 程度以下である. 浮上すきま 5 nm でのベアリング数 Λ は 10^6 のオーダーであり, 修正ベアリング数 $\Lambda/\tilde{q}_0$ は 10^4 のオーダーであるので, 分子気体潤滑(MGL)方程式⁷⁾におけるポアズイコ流の項を近似的に無視することができ, 気体発生圧力は次式で求められる.

$$\frac{d(PH)}{dX} = 0 \quad (7)$$

ここで $P = p/p_0$, $H = h_{\text{air}}/h_{\text{out}}$, $X = x/l$, p_0 は大気圧 $h_{\text{air}} = h(x) - T - T'$, $h_{\text{out}} = h_0 - T - T'$ である. これを解けば,

$$\frac{F_{\text{air}}}{blp_0} = \frac{H_1}{H_1 - 1} \ln H_1 - 1 \quad (8)$$

となる. ここで, $H_1 = h_{\text{in}}/h_{\text{out}}$, $h_{\text{in}} = h_1 - T - T'$ である.

式(6), (8)より, 傾斜平面スライダの負荷容量 W_{total} は,

$$W_{\text{total}} = F_{\text{air}} - F_{\text{vdW}} \quad (9)$$

で求められる. ここでは斥力を正にとった.

ディスク表面のみに PFPE 膜がある場合の負荷容量 W_{total} を Fig. 5 に示す. 固体間すきま h_0 が小さくなるとともに負荷容量は大きくなるが, あるところで極大値をとり, さらに h_0 が小さくなると負荷容量は急激に減少し, 負の値をとる. これは, ファンデルワールス力 F_{vdW} (引力) が気体による浮上力 F_{air} (斥力) よりも大きくなるためである.

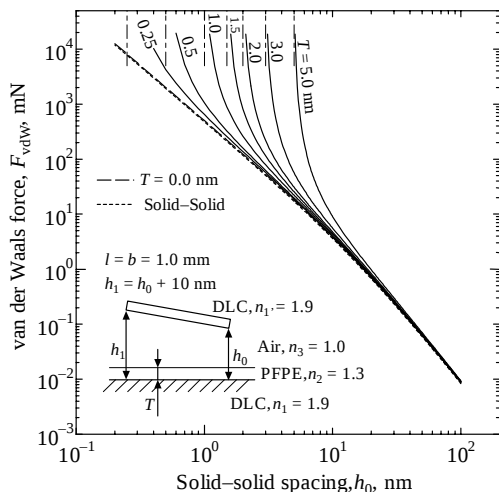


Fig. 4 van der Waals force acting on inclined head slider

また, 負荷容量が極大値をとる固体間すきま h_{olim} (限界すきま) 以下では, 系のばね定数

$$k_{\text{total}} = -\frac{\partial W_{\text{total}}}{\partial h_0} = -\frac{\partial F_{\text{air}}}{\partial h_0} + \frac{\partial F_{\text{vdW}}}{\partial h_0} = k_{\text{air}} - k_{\text{vdW}} \quad (10)$$

が負となり, 復元力を発生しないため, 系が不安定になる. この h_{olim} と潤滑剤膜厚さの関係を Fig. 6 に示す. 本研究の例 (実線) では, 潤滑膜がない場合は, h_{olim} が 4.5 nm であり, 潤滑膜が厚くなるにつれて大きくなる. また, スライダとディスク両方に潤滑剤がある場合 (破線) は, さらに h_{olim} が大きくなることがわかる. さらに, 2つの場合ともに, 潤滑膜厚さが 1 nm 以下であれば, h_{olim} の変化は小さく, 潤滑膜がない場合の結果から限界すきま h_{olim} が予測できることがわかる. Fig. 6 の点線は, 潤滑剤の全膜厚さ $T + T'$ を示している. 限界すきまを示す実線および破線は, 必ず対応する点線の上側にくる. また, 実線および破線とそれぞれ対応する点線との差が, それぞれの場合のファンデルワールス力の寄与を示している.

5. おわりに

固体表面吸着膜を考慮したファンデルワールス圧力 および 傾斜平面スライダに働くファンデルワールス力を定式化し, これらの基本特性を明らかにした. また, ファンデルワールス力を考慮した傾斜平面スライダの負荷容量を求めた. さらに, 限界すきま (負荷容量が極大値をとる固体間すきま) に対する潤滑膜厚さの影響を明らかにした.

文 献

- 1) L. Wu and D. B. Bogy, 2002, ASME JOT, 124, 562-567.
- 2) 張・中島, 2000, トライボロジー会議予稿集, 2000-5, 215-216.
- 3) 張・中島, 2001, トライボロジー会議予稿集, 2001-5, 27-28.
- 4) 張・中島, 2002, トライボロジー会議予稿集, 2002-5, 167-168.
- 5) J. N. Israelachvili, 1972, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 331, 39-55.
- 6) J. N. イスラエルアチヴィリ, 1996, 分子間力と表面力, 第2版, 朝倉書店.
- 7) S. Fukui and R. Kaneko, 1988, ASME JOT, 110, 253-262.

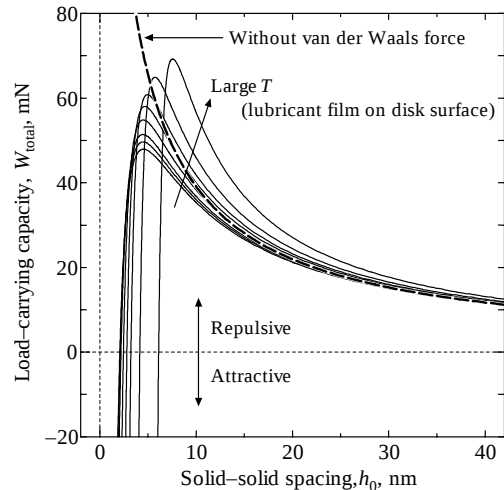


Fig. 5 Load-carrying capacity considering van der Waals force

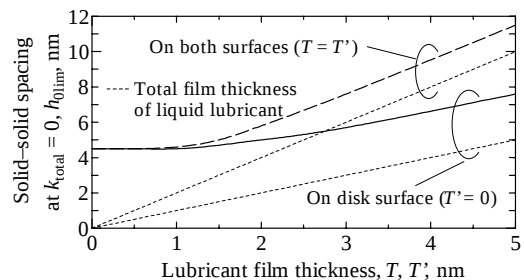


Fig. 6 Solid-solid spacing at spring constant = 0