

磁気ディスクヘッドスライダのタッチダウン特性の理論的解明

Analytical study of touchdown characteristics of head slider for quasi-contact recording

東工大OB（正）小野京右

Kyosuke Ono

Emeritus Professor of Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

磁気ディスク装置では記録ヘッドを空気軸受スライダの後端に形成し、またヘッド材料内部に埋設した Thermal fly-height Control (TFC) heater を加熱してヘッド面の熱膨張によりヘッドをディスク面に 1 nm 程度まで接近させて高密度記録を行っている。記録再生時のヘッド浮上量をヘッド面の摩耗信頼性を確保しつつ極力小さくするには TFC Power (TFCP)を高めていったときの接触 (Touch down: TD) 現象のメカニズムを理解する必要がある。またスライダによっては、TD 後もしばらくの TFCP の増加期間はヘッド振動と接触力がほとんど検出されない surfing 状態がある。これはディスク面の潤滑剤分子がヘッド・ディスク間の流入部に凝集し潤滑膜圧力を発生し、表面力を低減しているためと推測される。筆者は従来より、ヘッド・ディスク間の表面力を理論的に解明してきたが¹⁾、これを用いて Canti & Bogy ら²⁾が実験的に見出した TD 後の loss of contact 現象のメカニズムを明らかにした³⁾。しかしその後ヘッド面近傍に微小な温度センサ(ECS)を埋設し、その出力の平均値(ECS/DC)と変動量の RMS 値(ECS/AC)および Acoustic emission (AE) 出力から、TD 過程におけるヘッドスライダの挙動が明らかになってきた。そこで特に興味深い surfing 現象について、従来の表面力理論を用いて、TD 直後に潤滑膜力により表面力が減少すると仮定すると surfing 現象を模擬できることを明らかにした⁴⁾。本報告はその続報として surfing がない TFC スライダの TD 特性が生じる条件を示す。また surfing 状態を極力大きな分離量から発生させヘッド摩耗のない接触記録を実現する方法について考察する。

2. 解析モデルと解析法

図 1(a)に μ waviness と面振れ (Disk flatness: DF) をもつディスク面に空気軸受剛性で追従浮上するヘッドスライダの 1 自由度解析モデルを示す。TFCP を高めて spacing h (ヘッド面とディスク面粗さ高さの平均高さ面との距離)を低下させていくときの面振れ励振応答を数値シミュレーションする。空気膜剛性とスライダ等価質量による固有振動数を 350 kHz, 等価減衰比を 0.06 とする。ヘッド・ディスク面間の表面力は突起接触力と分子間引力の和である。図 2(a)に本計算で用いた基本周波数 200 Hz の面振れ ($A_1 = 4 \mu\text{m}$, $A_2 = 2 \mu\text{m}$, $A_3 = 1 \mu\text{m}$, $A_4 = 0.5 \mu\text{m}$) 波形を、また図(b)にその周波数スペクトルを示す。青線は hanning window を用いて leakage 誤差を除去した結果である。

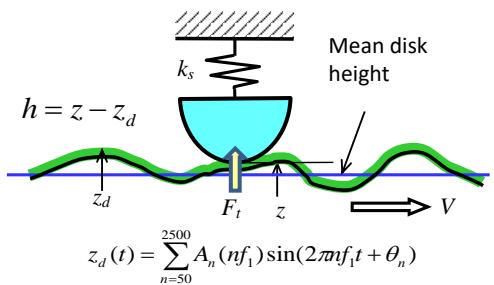


Fig. 1 Model of head slider and disk surface

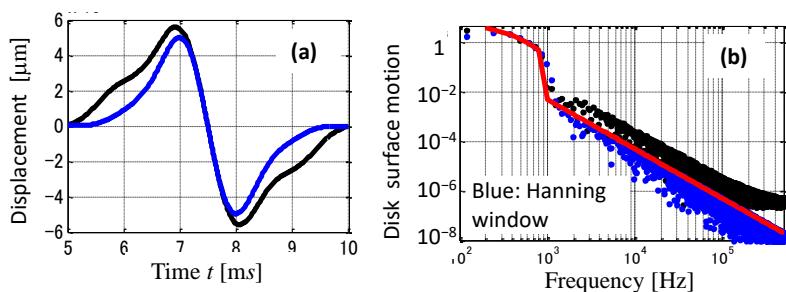


Fig. 2 (a) Disk surface motion and (b) Frequency spectrum of disk motion

3. TD 後に大きな spacing 変動と接触力変動が生じるスライダのシミュレーション解析

前報⁴⁾で示したスライダ B は、図 3(e)に示すように、TD 後に大きな ECS/AC と AE 信号の山が生じ、これと共に ECS/DC が急激に低下し、ECS/AC と AE 信号の山が消えると共に ECS/DC も最小になり、その後ほぼ一定の微小な ESC/AC と AE が生じる surfing に近い状態を示している。スライダ B は surfing が生じるスライダ A に比べて、TD が開始する TD Power (TDP)が約 40 mW 大きい。TDP が大きいことは TFC heater 加熱による突出ヘッド面の等価半径が小さいはずなので、表面力が小さくなっていると予想される。そこでヘッド面の分離量 (ディスク突起平均高さからの距離) を $\Delta d = -0.05\sigma$ (σ は突起高さの rms 値で 0.2 nm) だけ小さくしていくときの TD 過程のシミュレーションにおいて、スライダ A に用いた表面力 F_{s0} に対して、TD 開始時の表面力を αF_{s0} ($\alpha < 1$) と小さくしたときの TD 特性を調べた。図 3 は $\alpha = 0.85$ の場合で、TD (平均 spacing h_m が 0.15 nm 以上跳躍的に低下したとき TD と判定) 後に $n=1, 2$ ステップでは表面力を $F_s = (0.85 - 0.025n) F_{s0}$ で低下させ、その後、 $n = 1 \sim 4$ ステップで $F_s = (0.8 - 0.2n) F_{s0}$ で低下し $F_s = 0$ になるとした場合の計算結果である。図(b)の Δh_{rms} , (c)の ΔF_{crms} の理論値は、図(e)の実験値のそれぞれ ECS/AC, AE に相当し、かなり良く似た波形をしている。なお、図 3(c), (d)における *印は潤滑力により減少した表面力を用いて接触力を計算した結果で、○印は相殺されない表面力を用いた場合で、最悪条件の接触力と見なすことができる。

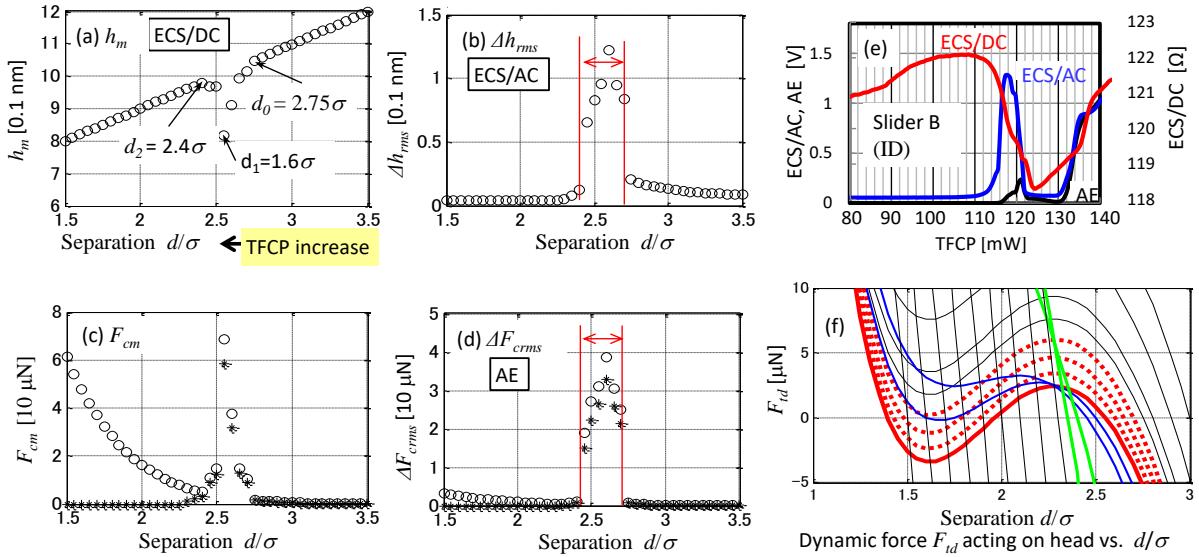


Fig. 3 Calculated results for the case where the surface force is $0.85F_{s0}$. After TD, F_s decreases as $F_s = (0.85 - 0.025n) F_{s0}$ at $n=1$ to 2 steps of decrement $\Delta d = -0.05\sigma$. Then, F_s decreases as $F_s = (0.8 - 0.2n) F_{s0}$ ($n=1 \sim 4$) and eventually $F_s = 0$. (a) Mean spacing, (b) Rms spacing variation, (c) Mean contact force, (d) Rms contact force variation, (e) Experimental TD behaviors of slider B, and (f) Chang of dynamic total force F_{td} acting on head slider as a function separation d/σ .

4. Surfing 状態を生じるスライダの TD 特性に及ぼすディスク面振れ量と表面力の影響

TD 直前のヘッド面の等価半径が大きく表面力が大きくて、TD 直後に lube の潤滑力により表面力が低下し、広い TFCP の領域で surfing 状態が得られるスライダにおいて、TD 時の spacing 変動 Δh_{rms} と接触力変動 ΔF_{crms} に及ぼすディスク振れ (DF) の大きさと初期表面力 αF_{s0} の大きさの影響を、それぞれ図 4(a), (b) および図 5(a), (b) に示す。図 4 において、○印は図 2 の DF 値を用いたとき、+印は図 2(a) の DF 値を 2 倍にした場合、*印は 1/2 にした場合である。DF が大きいと TD 時の spacing 変動 (しばしば bouncing と呼ばれている) は少し大きくなるがピーク値は 0.03nm 以下であり、TD する spacing の分離量を 3σ より大きくでき、突起接触しない surfing 状態を得ることができる。また図 5 は図 2 の標準の DF 値を用いて、 F_{s0} の倍率 α を $1.05(+)$, $1(\circ)$, $0.95(*)$ 倍にしたときの TD 特性である。これから表面力を大きくしても TD する spacing を 3σ より大きくすることができると予想される。

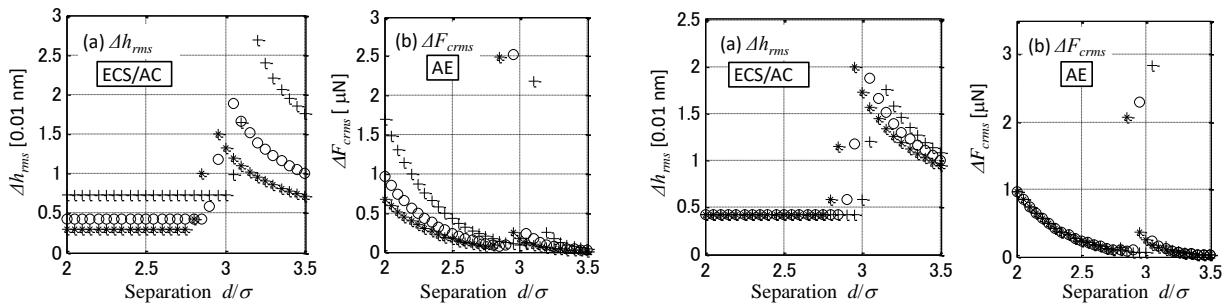


Fig. 4 Flatness effect on TD ($A_1 = 8 [+]$, $4 [o]$, $2 [*]$ μm)

Fig. 5 Surface force effect on TD ($\alpha = 1.05[+]$, $1[\circ]$, $0.95[*]$)

5. 結論

ヘッドスライダにおける surfing 現象は、表面引力と突起接触力からなる表面力が TD 後にヘッド・ディスク面間に生じる潤滑膜力により相殺するために生じるという仮説に基づき、surfing 状態をもつスライダ A とほとんど持たないスライダ B の異なる TD 特性を表面力の違いに基づき理論的に理解できることを示した。またヘッド面の表面力を大きくし、面振れをある程度大きくすることにより TD するときの分離量を 3σ (σ は粗さ突起の rms 値) 以上にでき、その後に得られる surfing 状態の spacing を 3σ 以上にできることを示した。Surfing 状態では潤滑膜力により突起接触力がゼロに近くなっていると予想されるが、更に 3σ 以上の spacing 領域で surfing させることにより、摩耗信頼性の高い接触記録の可能性が期待できる。最後に TD 特性実験データを提供いただいた NHK 社に謝意を表します。

文献

- 1) 小野：単分子潤滑膜で被覆された DLC 面の表面力の理論的解明、トライボロジスト、62, 12(2017), 787.
- 2) Canchi and Bogy: Slider dynamics in the lubricant-contact regime, IEEE Trans on Magnetics, 46, 3 (2010), 764.
- 3) Ono, Numerical analysis of microwaviness-excited vibrations of a flying head slider at touchdown, Microsyst. Technol. 24 (2018), 4689.
- 4) 小野：磁気ディスクヘッドスライダのタッチダウン特性の解明, IIP2022 講演論文集, A-1-1 (2022).