

# 1417 回転移動加熱を受ける被覆円板の熱応力解析 Thermal Stress Analysis of Coating Disk with Moving Heat

○学 山下雄一 (富山大)      正 五嶋孝仁 (富山大)  
正 清水理能 (富山大)      正 石原外美 (富山大)

Yuichi YAMASHITA, TOYAMA University Gofuku 3190 Toyama-shi Toyama  
Takahito GOSHIMA, TOYAMA University      Masayoshi SIMIZU, TOYAMA University  
Sotomi ISHIHARA, TOYAMA University

In this study, friction coefficient and temperature were measured by pin-on-disk system. Coating disk were used Al with Cu, Ti and SiO<sub>2</sub> coating. Temperature and thermal stress analysis were calculated using experimental result. Effect of coating material and thickness on the result were considered.

Key Words: Thermal Stress, Stress analysis, contact problem, Coating

## 1. 緒言

磁気ディスク装置では起動時にはディスクとスライダが接触状態になり、ディスクが高速回転するとスライダが浮上するCSS方式が採用されている。CSS方式の障害として接触時における摺動磨耗が問題となっている。さらにパーソナルコンピュータの性能向上、高記録密度化に伴いスライダの低浮上の要求から、常時接触方式ヘッドの研究開発が進められている。常時接触方式においては、摺動による磨耗や損傷が特に解決すべき大きな問題になっている。

そこで本研究では、アルミ基板の上にCu等の薄膜を被覆した回転ディスクにステンレス製のピンを押し付ける実験から、摩擦係数、接触温度履歴を測定した。また、実験結果より、熱伝導解析、熱応力解析を行い、被覆材料の種類や被覆厚さの影響を検討した。

## 2. 実験装置

図1に本研究で使用したPin-On-Disk方式の摩擦磨耗試験機の概略図を示す。アルミ基板上にCu等を被覆したディスクにピンを接触させ、ピンの上から荷重を加え、ディスクを回転させる。この時、ピンの上に取り付けたロードセルで荷重を測定し、ピンに垂直に設置したAl合金製の丸棒に摩擦力による曲げがかかるとし、丸棒に設置した上下二枚のひずみゲージによりひずみを測定し、(1)式を用い摩擦係数を算出する。また、ピンとディスクの接点より5mm上部に熱電対温度計を設置し、温度履歴を測定する。被覆層が磨耗により剥がれ、基板が目視できた時点で試験終了とした。

$$f = \frac{F}{P} = \frac{\pi d^3 E \varepsilon}{32 Pl} \quad (1)$$

ここで、 $f$ : 摩擦係数、 $F$ : 摩擦力、 $P$ : 荷重、 $d$ : 丸棒の直径、 $E$ : 縦弾性率、 $\varepsilon$ : ひずみ、 $l$ : ピンとディスクの接触点から丸棒の断面の中心までの距離とする。

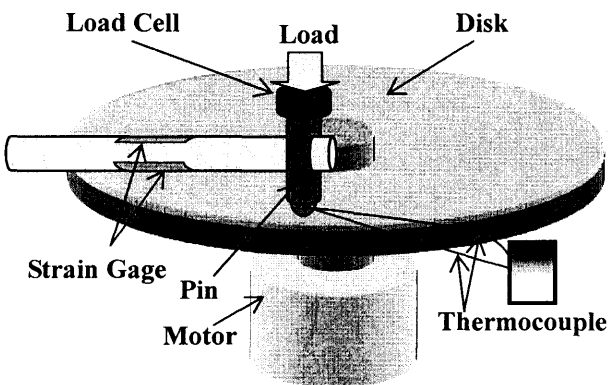


Fig. 1 Experimental model of pin on disk

## 3. ピンの熱伝導解析

ある初期温度  $T_i$  で一定に保たれた半無限体モデルとし、表面の熱流束を、突然一定の値  $q_0/A$  にした場合を考える。物性値一定と仮定すると、温度分布  $T(x, \tau)$  の微分方程式は

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2)$$

初期条件、境界条件は

$$T(x, 0) = T_i \quad (3)$$

$$\frac{q_0}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (x = 0, \tau > 0) \quad (4)$$

式(3)(4)を考慮し式(2)を解くと、次式が与えられる。

$$T - T_i = \frac{2q_0 \sqrt{\alpha t / \pi}}{kA} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0 x}{kA} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (5)$$

ここで  $t$  は時間、 $\alpha$  は熱拡散率、 $k$  は熱伝導率、 $x$  は距離である。また、与える熱量は、接触による仕事すべて熱に変換されたと仮定し、その熱量をディスクピンの断面積で割り、さらにピンとコーティングの熱伝導率の比でそれぞれに分配されるものとして熱量を算出した。

## 4. 熱応力解析

熱源の回転移動速度が十分に速いことから、図2に示すようなディスク上に幅  $2a$  のリング状の熱源があるものと仮定して、ディスクの熱応力解析を行った。 $h_0$  はディスク厚さ、 $h_1$  はコーティング厚さである。式(6)、式(7)の熱伝導方程式をラプラス変換、ハンケル変換し、解を求めると式(8)の温度解が求まる。

$$\frac{\partial^2 T_s^{(1)}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_s^{(1)}}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 T_s^{(1)}}{\partial \zeta^2} = \frac{\partial T_s^{(1)}}{\partial \tau} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 T_s^{(2)}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_s^{(2)}}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 T_s^{(2)}}{\partial \zeta^2} = \kappa \frac{\partial T_s^{(2)}}{\partial \tau} \quad (7)$$

ここで、 $\rho = r/h_0$ 、 $\xi = z/h_0$ 、 $\tau = th_0^2/\kappa_1$  であり、 $\kappa_1$  は温度伝導率、 $\kappa = \kappa_1/\kappa_2$  を示す。

$$T_s^{(j)}(\tau) = f \cdot T^* \int_0^\infty \{ \rho_b J_1(\rho_b \xi) - \rho_a J_1(\rho_a \xi) \} J_0(\rho \xi)$$

$$\left[ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Gamma_m^{(j)}(\zeta)}{J_0(x_m)} \left\{ 1 - e^{-\left(\zeta^2 + x_m^2\right)\tau} \right\} \right] + \kappa \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\Lambda_l^{(j)}(\zeta)}{g_0(y_l)} \left\{ 1 - e^{-\frac{\left(\zeta^2 + y_l^2\right)\tau}{\kappa}} \right\} \right] d\xi \quad (8)$$

また、熱応力解の一つとして  $\sigma_r$  の解を式(9)に示す。

$$\frac{r\sigma_r^{(j)}}{2G_j} = \frac{\partial^2\Omega^{(j)}}{\partial\rho^2} + \frac{\partial^2\varphi_0^{(j)}}{\partial\rho^2} + \zeta\frac{\partial^2\varphi_3^{(j)}}{\partial\rho^2} - 2\nu_j\frac{\partial\varphi_3^{(j)}}{\partial\zeta} - \frac{1+\nu_j}{1-\nu_j}\alpha_j T_s^{(j)} \quad (9)$$

ここで熱弾性ポテンシャル  $\Omega$  および応力関数  $\varphi_0, \varphi_3$  は次式を満足する。

$$\begin{aligned} \nabla^2\Omega^{(j)} &= \frac{1+\nu_j}{1-\nu_j}\alpha_j T_s^{(j)} \\ \nabla^2\varphi_0^{(j)} &= \nabla^2\varphi_3^{(j)} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

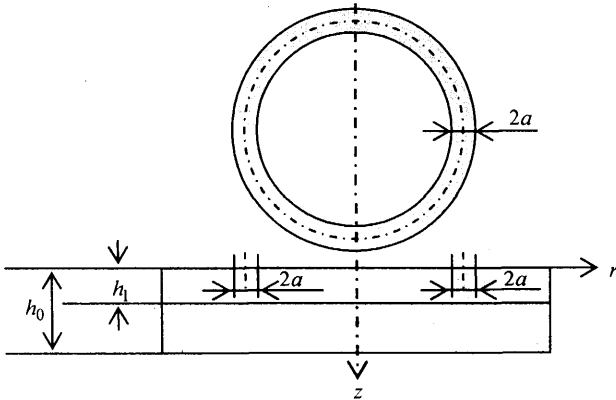


Fig. 2 Analysis model of disk

### 5. 実験結果及び熱伝導解析結果

摩擦磨耗試験によって得られた温度履歴の実験結果と熱伝導解析の結果を図 3 に示す。これは被覆層に Cu を 50 $\mu\text{m}$  スパッタしたディスクに回転速度 434rpm, 回転半径  $r=17.5\text{mm}$ , 荷重  $P=470\text{g}$  の条件で摩擦磨耗試験を行った結果である。時間の経過とともに温度の上昇が確認できる。実験結果と熱伝導解析結果に良い一致が見られ、接触による仕事すべて熱に変換され、ピンとコーティングの熱伝導率の比で分配されるという仮定が正しいことがわかる。図 4 には(1)式で算出した摩擦係数を示す。被覆層が Cu の場合は、摩擦係数  $f=0.2\sim 0.4$  という実験結果が得られた。

これらの温度解析、摩擦係数の結果をもとに、図 5 にディスクにおける熱応力解析結果を示す。解析条件は、実験条件と同様であり、コーティング厚さ 50 $\mu\text{m}$  の条件での解析結果である。また、 $z$  はディスクの厚さ方向、 $r$  はディスクの半径方向、 $\theta$  は回転方向であり、 $z=1.05\text{mm}$  の実線がディスク裏表面、 $z=0.05\text{mm}$  破線がコーティングと基板の境界となっている。図 5 より、摩擦熱による熱応力によって、ディスク表面には圧縮、裏表面には引張が生じていることが分かる。また、 $\sigma_z, \tau$  は  $\sigma_r, \sigma_\theta$  に比べて非常に小さい結果となったので省略した。図 6 には、解析により得られたディスク表面における時間的溫度変化を示す。摩擦により約 5 $^\circ\text{C}$  の温度上昇が生じ、その後は定常状態となっていることがわかる。

### 5. 結言

- (1) 被覆膜が Cu の場合、摩擦係数  $f=0.2\sim 0.4$  という結果が得られた。
- (2) 実験結果及び熱伝導解析の結果、ピンとディスクの接触による仕事すべて熱に変換され、その熱はコーティングとピンの熱伝導率の比でそれぞれに分配される。
- (3) 摩擦による熱応力  $\sigma_r, \sigma_\theta$  によって、ディスク表面には圧縮、裏表面には引張が生じる。また  $\sigma_r, \sigma_\theta$  に比べて  $\sigma_z, \tau$  は非常に小さい。

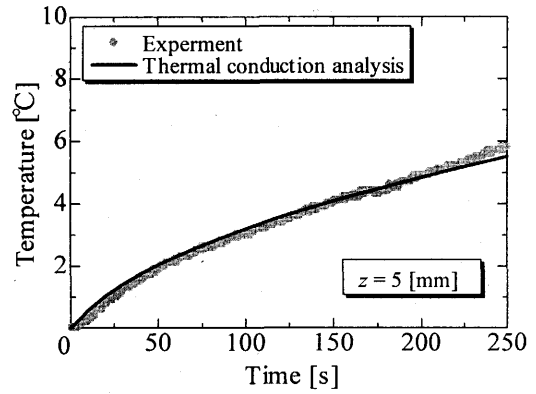


Fig. 3 Temperature Difference of Pin ( $z=5\text{mm}$ )

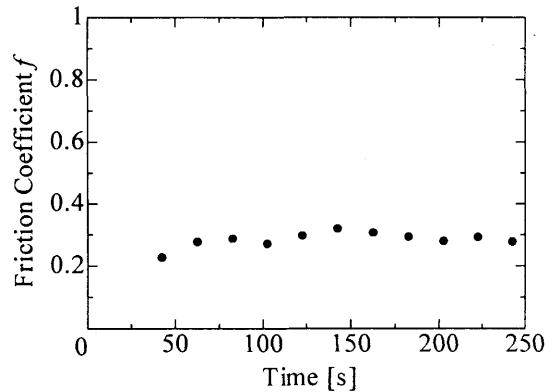


Fig. 4 Friction Coefficient Variation with Sliding Time

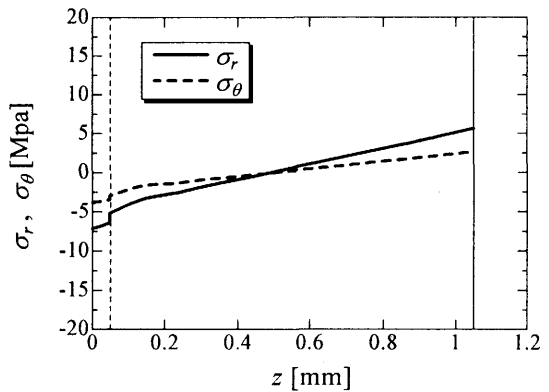


Fig. 5 Thermal Stress of  $\sigma_r$  and  $\sigma_\theta$

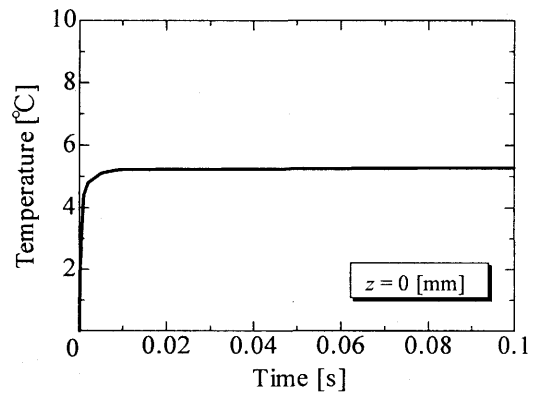


Fig. 6 Disk Surface Temperature with Sliding Time

### 参考文献

- J.R. ホールマン著 平田 賢 監訳  
「熱伝導工学 (上)」 PP.93-95.