

衝撃を受ける回転磁気ディスクの応答ならびに その耐振性評価について*

長南 征二^{*1}, 江 鐘 偉^{*2}, 高 島 和^{*3}

Dynamic Characteristics of Hard Disks Subjected to Impulsive Excitation

Seiji CHONAN, Zhong-wei JIANG and Kazu TAKASHIMA

This paper is a study on the response of rotating hard disks subjected to a half-sine acceleration in the axial or pitching direction. The solution is obtained by using the multimodal expansion approximation and applying the Galerkin method to the resulting equations. Numerical results are obtained by using the Newmark β method for 5.25", 3.5" and 2.5" hard disks spinning at 3 600 rpm. It is found that the disk holds its maximum displacement and acceleration when the input duration τ is about 1.5 times the natural half period of the $(m, n)=(0, 0)$ mode. Here, m and n are the numbers of nodal circles and diameters, respectively. Results also show that the acceleration with 11 ms, which is nowadays widely used as a standard input on the shock test of the disk drive units, leads to only 60-70% of the maximum displacement and acceleration.

Key Words: Transient Response, Hard Disk, Impulsive Acceleration, Newmark β Method, Shock Test

1. 緒 言

近年, 情報通信分野の発展に伴い, コンピュータや関連機器に対する高性能化の要求が高まっている。特に最近ハードディスクやフロッピディスク等の外部記憶装置が振動や衝撃を受ける状況下で使用される機会が増えてきており, それらの耐振性向上は情報機器分野における重要な課題である。

回転ディスクに関する研究はこれまでいくつかなされている。Benson-Bogy⁽¹⁾ は内周をハブに固定された回転ディスクの静止横荷重に対する応答を求めた。小野・前野・海老原⁽²⁾ はディスクケース中に納められたディスクを一樣な減衰および弾性床で支持されたディスクにモデル化し集中荷重に対する応答を有限要素法によって解析した。Hutton-Chonan-Lehmann⁽³⁾ は静的横荷重を受ける内周固定, 外周自由の回転のこぎりにガイドを当て, のこぎりの振動を防止するために有効なガイドの位置および個数を求めた。Chonan-

Hayase⁽⁴⁾ は外周に面内方向の分布荷重を受け, 内周を固定された回転円板内の応力分布を導いた。また長南・江⁽⁵⁾ は軸方向およびピッチング方向に加振される回転ディスクの定常振動特性を解析した。さらにJiang-Chonan-Abé⁽⁶⁾ は軸方向に加振される回転ディスク・ヘッド連成系の定常振動特性を解析している。Sinha⁽⁷⁾ は外周に質量を有する回転ディスクの固有振動数をレーリーリッツ法を用いて求めた。本田・松久・佐藤⁽⁸⁾ は集中調和外力を受ける回転円板の定常振動特性を固有関数展開法を用いて解析した。またYano-Kotera⁽⁹⁾ は外周の1点をばね支持された内周固定回転ディスクの安定性について解析している。これらの研究を見る限り, 衝撃を受ける回転ディスクの研究はいまだなされていない。現在, 車載・携帯用の情報機器が普及する中で装置の耐振性向上は重要な課題であり, メーカーでも製品に対する種々の衝撃試験を行っている。その際, 衝撃入力としては作用時間 11 ms の正弦半波加速度入力一般在用いられている。しかしながらその根拠は現在明確でなく他社製品との対応をもたせる意味で使用されているのが現状である⁽¹⁰⁾。これらの点に鑑み, 本研究は軸方向およびピッチング方向に正弦半波の加速度入力を受ける回転ハードディスクの応答を解析し, 作用時間 11 ms の根拠について検討

* 平成3年8月22日 情報・精密機器におけるメカトロニクス(IIP '91)講演会において講演, 原稿受付 平成3年9月19日。

^{*1} 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

^{*2} 准員, 東北大学工学部。

^{*3} 東北大学大学院。

し、かつ作用時間の広範な値について系の応答を求め、その耐振性を検討するものである。

2. 記 号

- a : ディスクの外半径 m
- b : ディスクの内半径 m
- h : ディスクの厚さ m
- E : ディスクのヤング率 N/m²
- D : ディスクの曲げこわさ $Eh^3/12(1-\nu^2)$ N·m
- ρ : ディスクの質量密度 kg/m³
- ν : ディスクのポアソン比
- c : ディスクの粘性減衰係数 s
- Ω : ディスクの回転速度 rad/s
- (u, r, η) : ディスクケースに固定された変位ならびに座標系
- (z, r, η) : 空間に固定された変位ならびに座標系
- σ_r, σ_η : 回転により生じるディスク内の半径方向および周方向面内応力 N/m²
- G_a, G_p : 軸方向およびピッチング方向衝撃加速度 G
- ω : 衝撃加速度の変化率 rad/s
- τ : π/ω 衝撃の作用時間 s
- t : 時間 s

3. 理論解析

図1は衝撃加速度を受ける回転ハードディスクを示したものである。ディスクは外径 $2a$ で自由、内径 $2b$ でハブに固定されており、シャフトを中心に一定角速度 Ω で回転している。ディスクは z 方向に同時に加速度 \ddot{z}_{case} を受け作動している。以下二つの座標系を導入し、ケースに対するディスクの相対変位およびディスクの加速度応答を観察する。すなわちケースに固定された座標系 (u, r, η) からディスクの相対変位を、また空間に固定された座標系 (z, r, η) からディスクの加速度を観察する。両座標系において半径 r および

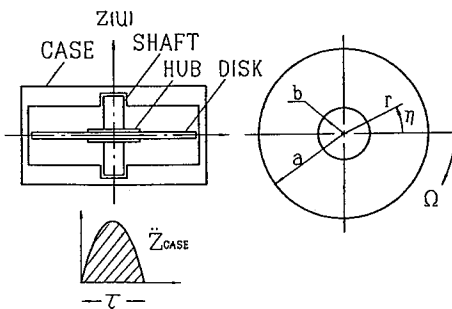


図1 回転ディスクの解析モデル

角度 η は共通であり軸方向座標 u と z は次の関係を有する。

$$z = u + z_{case} \dots\dots\dots (1)$$

さてケースに固定された座標系 (u, r, η) から見た回転ディスクの横変位 u に対する運動方程式は次のようになる。

$$D \left[1 + c \left(\frac{\partial}{\partial t} - \Omega \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \right] \nabla^4 u + \rho h \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - 2\Omega \frac{\partial^2}{\partial \eta \partial t} + \Omega^2 \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \right) u - h \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma_r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\sigma_\eta \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \right] = -\rho h \frac{\partial^2 z_{case}}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここでケースに加わる加速度を、メーカの衝撃試験で使用されている正弦半波形で仮定すると次のように表される。

$$\frac{\partial^2 z_{case}}{\partial t^2} = \begin{cases} G_a \sin \omega t + G_p \left(\frac{r}{a} \right) \cos \eta \sin \omega t & \text{for } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{for } t < \tau \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\tau = \pi/\omega$ は衝撃の作用時間である。また G_a, G_p はそれぞれ軸方向およびピッチング方向の加速度を表す。さて式(2)を解くに当たり解を次のようにおく。

$$u(r, \eta, t) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N [C_{mn}(t) \cos(n\eta) + S_{mn}(t) \sin(n\eta)] R_{mn}(r) \dots\dots\dots (4)$$

ここに $C_{mn}(t), S_{mn}(t)$ は時間の未知関数、 $R_{mn}(r)$ は境界条件を満足する変位モード関数、 m は節円の数、 n は節直径の数を表す。 M, N は解析で考慮される級数解の項数である。 $R_{mn}(r)$ として静止円板のモード関数を用いると、それはベッセル関数を用いて次式のよう表される。

$$R_{mn} = J_n \left(K_{mn} \frac{r}{a} \right) + F_{mn} Y_n \left(K_{mn} \frac{r}{a} \right) + G_{mn} I_n \left(K_{mn} \frac{r}{a} \right) + H_{mn} K_n \left(K_{mn} \frac{r}{a} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここで J_n, Y_n はそれぞれ第1種、第2種ベッセル関数、 I_n, K_n は第1種と第2種変形ベッセル関数である。また F_{mn}, G_{mn}, H_{mn} および K_{mn} は境界条件によって決定される未定係数である。さて式(2)を解くに当たりガレルキン法を適用する。始めに式(4)を式(2)に代入し、さらに $r R_{qn}(r) \cos(\eta) d\eta dr$ を掛け r に関して b から a まで、 η に関して零から 2π まで積分すると次式を得る。

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left[\alpha_{mn} \frac{\partial^2 C_{mn}}{\partial T^2} + \lambda_{mn} \frac{\partial C_{mn}}{\partial T} + \mu_{mn} \frac{\partial S_{mn}}{\partial T} \right]$$

$$+ \phi_{mn} C_{mn} + \tau_{mn} S_{mn} \Big]_{qt} = f_{qt} \dots\dots\dots (6)$$

$$q=0, 1, 2, \dots, M; l=0, 1, 2, \dots, N$$

同様に $rR_{ql}(r) \sin(l\eta) d\eta dr$ を掛けて積分すると次式を得る。

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left[\alpha_{mn} \frac{\partial^2 S_{mn}}{\partial T^2} - \mu_{mn} \frac{\partial C_{mn}}{\partial T} + \lambda_{mn} \frac{\partial S_{mn}}{\partial T} - \tau_{mn} C_{mn} + \phi_{mn} S_{mn} \right]_{qt} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$q=0, 1, 2, \dots, M; l=1, 2, \dots, N$$

ここに

$$\begin{aligned} \alpha_{mn} &= \langle R_{mn}^2 \rangle \delta_{mq} \delta_{nl} \\ \lambda_{mn} &= c_0 K_{mn}^4 \langle R_{mn}^2 \rangle \delta_{mq} \delta_{nl} \\ \mu_{mn} &= -2n\Omega_0 \langle R_{mn}^2 \rangle \delta_{mq} \delta_{nl} \\ \phi_{mn} &= (K_{mn}^4 + x_0 - n^2 \Omega_0^2) \langle R_{mn}^2 \rangle \delta_{mq} \delta_{nl} \\ &\quad + \langle \sigma R_{mn}^{qt} \rangle \delta_{nl} \\ \tau_{mn} &= -n\Omega_0 c_0 K_{mn}^4 \langle R_{mn}^2 \rangle \delta_{mq} \delta_{nl} \\ f_{qt} &= [G_a \langle rR_{ql} \rangle \delta_{l0} + G_p \langle r^2 R_{ql} \rangle \delta_{l1}] \sin \omega_0 T \\ \langle R_{mn}^2 \rangle &= \int_{b/a}^1 \left(\frac{r}{a} \right) R_{mn}^2 d \left(\frac{r}{a} \right) \\ \langle \sigma R_{mn}^{qt} \rangle &= \int_{b/a}^1 - \left\{ \frac{\partial}{\partial(r/a)} \left[\left(\frac{r}{a} \right) \sigma_{r0} \frac{\partial R_{mn}}{\partial(r/a)} \right] - \frac{l^2}{r/a} \sigma_{r0} R_{mn} \right\} R_{ql} d \left(\frac{r}{a} \right) \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{for } i=j \\ 0 & \text{for } i \neq j \end{cases} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

上式において無次元化パラメータは次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \left(\frac{D}{\rho h a^4} \right)^{1/2} t, \Omega_0 = \left(\frac{\rho h a^4}{D} \right)^{1/2} \Omega \\ \sigma_{r0} &= \left(\frac{h a^2}{D} \right) \sigma_r, \sigma_{\eta 0} = \left(\frac{h a^2}{D} \right) \sigma_\eta \\ c_0 &= \left(\frac{D}{\rho h a^4} \right)^{1/2} c, \omega_0 = \left(\frac{\rho h a^4}{D} \right)^{1/2} \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式(6)と式(7)をまとめてマトリックスで表すと

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left[\begin{array}{cc} \alpha_{mn} & 0 \\ 0 & \alpha_{mn} \end{array} \right]_{qt} \left\{ \begin{array}{c} \ddot{C}_{mn} \\ S_{mn} \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{cc} \lambda_{mn} & \mu_{mn} \\ -\mu_{mn} & \lambda_{mn} \end{array} \right]_{qt} \left\{ \begin{array}{c} C_{mn} \\ S_{mn} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} f_{qt} \\ 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)を m, n について展開し、すべての q, l に対して連結すると次のような $(M+1)(2N+1) \times (M+1)(2N+1)$ のマトリックス方程式が得られる。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \dots\dots\dots (11)$$

上式にニューマークβ法を適用すると、 $X(C_{mn}, S_{mn})$ あるいは $\dot{X}(\dot{C}_{mn}, \dot{S}_{mn})$ が数値的に求まる。すなわち X は変位表示式

$$\begin{aligned} & \left[M + \frac{1}{2} (\Delta t) C + \beta (\Delta t)^2 K \right] X_{s+1} \\ & = (\Delta t)^2 [\beta F_{s+1} + (1-2\beta) F_s + \beta F_{s-1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + [2M - (1-2\beta)(\Delta t)^2 K] X_s \\ & - \left[M - \frac{1}{2} (\Delta t) C + \beta (\Delta t)^2 K \right] X_{s-1} \dots\dots (12) \end{aligned}$$

を、また \dot{X} は加速度表示式

$$\begin{aligned} & \left[M + \frac{1}{2} (\Delta t) C + \beta (\Delta t)^2 K \right] \dot{X}_{s+1} \\ & = (F_{s+1} - 2F_s + F_{s-1}) \\ & + [2M - (1-2\beta)(\Delta t)^2 K] \dot{X}_s \\ & - \left[M - \frac{1}{2} (\Delta t) C + \beta (\Delta t)^2 K \right] \dot{X}_{s-1} \dots\dots (13) \end{aligned}$$

を用いて計算される。得られた C_{mn}, S_{mn} を式(4)に代入するとディスクの相対変位 u が計算される。また式(1), (4)より次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 z_{\text{case}}}{\partial t^2} \\ &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left[\frac{\partial^2 C_{mn}(t)}{\partial t^2} \cos(n\eta) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial^2 S_{mn}(t)}{\partial t^2} \sin(n\eta) \right] R_{mn}(r) + \frac{\partial^2 z_{\text{case}}}{\partial t^2} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$\ddot{C}_{mn}, \dot{S}_{mn}$ を上式に代入することでディスクの加速度 z が計算される。

4. 結果および考察

計算で使用するハードディスクの物理量を表1に示す。級数解の切取項数は $M=3, N=1$ とした。以下、節円数 m および節直径数 n を有するディスクの振動モードを (m, n) で表すこととする。表1において $(0, 0)$ モードの固有振動数 f_{00} は回転数 $\Omega=0$ に対する計算値である。振動数は $3.5''$ ディスクの場合 Ω の増加により図2のように変化する。 f_{00} は Ω の増加とともに大きくなるがそのオーダは 3600 rpm で $+1\%$ 未満である。一方 $(0, 1)$ モードの振動数 f_{01} は二つあり、高いほうの振動数は円板の回転方向に進行する前進波の固有振動数、低いほうは回転方向と逆に進行する後退波の固有振動数を表している。

図3および図4は軸方向衝撃によって $3.5''$ ハードディスクに生ずる変位および加速度の変化を示したも

表1 ハードディスクの物性値

		5.25"	3.5"	2.5"
Outer radius	a ($\times 10^{-3} \text{m}$)	65.0	47.5	32.5
Inner radius	b ($\times 10^{-3} \text{m}$)	24.0	15.5	11.4
Thickness	h ($\times 10^{-3} \text{m}$)	1.88	1.25	0.80
Young's modulus	E (N/m ²)	7.06×10^{10}		
Density	ρ (kg/m ³)	2.66×10^3		
Poisson's ratio	ν	0.33		
Revolution speed	Ω (rad/s)	377.0 (3600 rpm)		
(0, 0) mode				
Natural frequency	f_{00} (Hz)	916	1002	1473
Natural half period	τ_{00} (ms)	0.546	0.499	0.339

のである。入力加速度の大きさは 5 G, 変位および加速度の観測地点は $(r/a, \eta) = (0.7, 0)$ としている。図 3 の縦軸はディスクの変位を, 図 4 の縦軸はディスク加速度の入力加速度に対する比を取っている。図中の一点

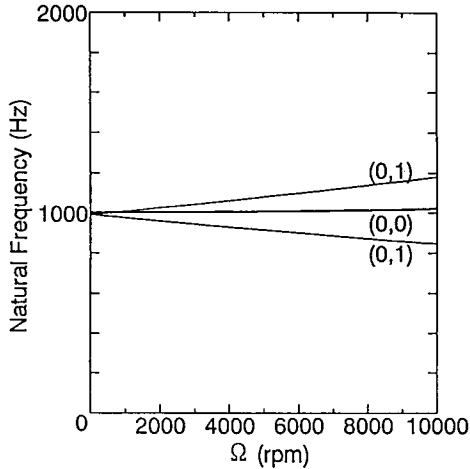


図 2 回転速度 Ω の変化による 3.5"ハードディスクの自由振動数

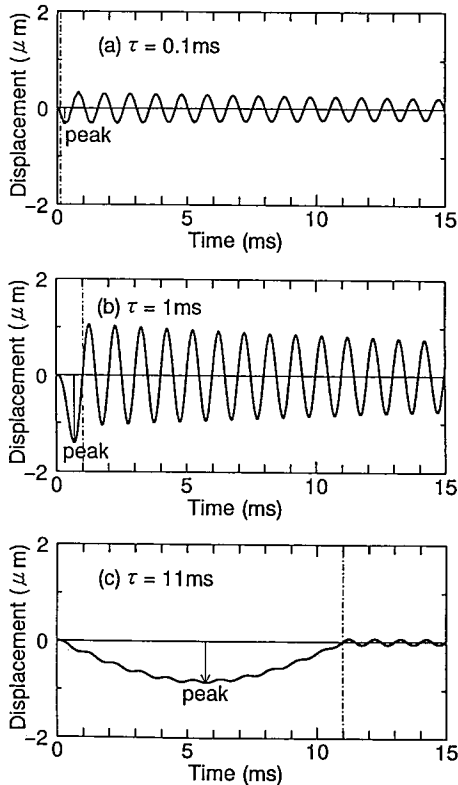


図 3 軸方向衝撃によるディスクの変位過渡応答, $G_a = 5g$, $G_p = 0$, $(r/a, \eta) = (0.7, 0)$.

鎖線は衝撃の作用時間 τ を表しており, 各図において (a) $\tau = 0.1$ ms, (b) $\tau = 1$ ms, (c) $\tau = 11$ ms である。材料のもつ粘性減衰係数 c は実験により測定された値 $c = 1.406 \times 10^{-6}$ (s) を用いている。図よりディスクに最大変位や最大加速度が生じるのは, 衝撃の作用時間内あるいは作用後数周期内であることがわかる。また (a) $\tau = 0.1$ ms の場合, 加速度応答 [図 4 (a)] には高次モードの振動が現れているが, 変位応答 [図 3 (a)] では高次モードの振動がほとんど出ていない。これは次のような理由によると思われる。3.5"ハードディスクの $(m, n) = (1, 0)$ モードの固有振動数は $f_{10} = 6424$ Hz であり, 固有半周期に換算すると $\tau_{10} = 0.0778$ ms となる。この固有半周期が入力加速度の作用時間 (0.1 ms) に近いため (1, 0) モードは比較的大きく励振される。しかしながら変位応答では (1, 0) モードを含む高次モードの変位成分は (0, 0) モードの成分に比べて十分小さいため観察され難い。一方加速度応答では各モードの加速度成分はそのモードの変位成分と固有振動数の 2 乗との積で与えられるため高次モード成分が現れやすくなると思われる。また, 図より入力加速

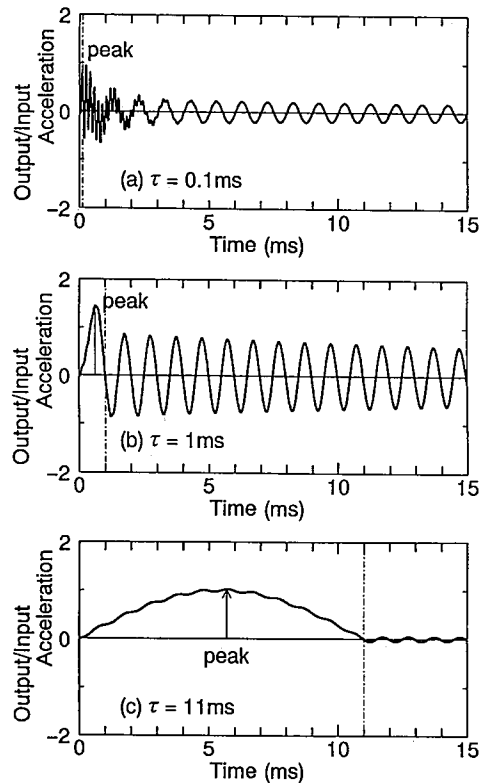


図 4 軸方向衝撃によるディスクの加速度過渡応答, $G_a = 5g$, $G_p = 0$, $(r/a, \eta) = (0.7, 0)$.

度の作用時間が短いあるいは長い場合はディスクに生ずる変位や加速度の最大値は小さく、ある作用時間に対してそれらの値が最も大きくなることがわかる。

図5および図6はピッチング衝撃によりディスクに生ずる変位および加速度の変化を示したものである。図よりピッチング入力の場合は応答にうなりの生ずることがわかる。既に文献(5)で示されているように、ディスクケースが軸方向に加振される場合励振される振動モードは $(m, 0)$ モードのみであり、一方ピッチング加振される場合は $(m, 1)$ モードのみである。図2から明らかなようにピッチング加振によって励振される $(0, 1)$ モードは 3600 rpm において二つ存在し、かつ両者の振動数は近い。このため応答にうなりを生ずるのである。また、図よりピッチング入力の場合も衝撃の作用時間によってディスクに生ずる最大変位や最大加速度は異なることがわかる。

図7~10はディスクに生ずる最大変位および最大加速度を衝撃作用時間の関数として示したものである。図7、図8は軸方向衝撃に対しディスクに生ずる最大変位、最大加速度の変化である。図9、図10は同

様にピッチング衝撃に対する最大変位、最大加速度の変化である。横軸はいずれも衝撃の作用時間 τ をディスクの $(0, 0)$ モード固有半周期 τ_0 で無次元化した値を取っている。これらの図より、いずれのディスクについても $\tau \approx 1.5\tau_0$ なる作用時間を有する衝撃に対し最も大きな変位および加速度がディスクに生ずることがわかる。この傾向は軸方向、ピッチング方向いずれ

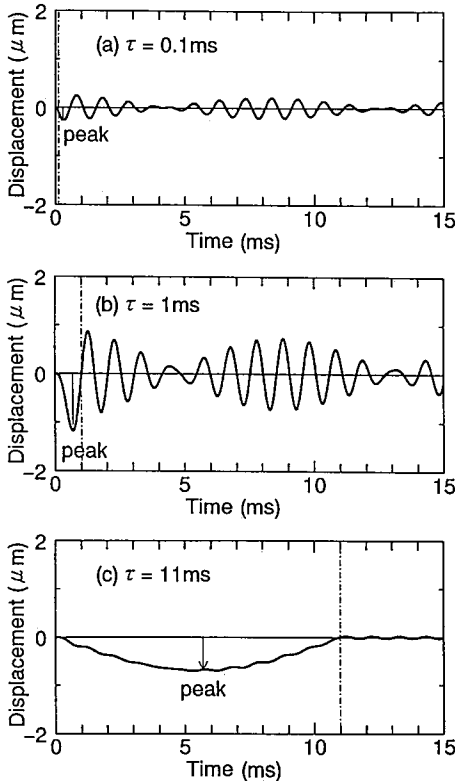


図5 ピッチング衝撃によるディスクの変位過渡応答, $G_a = 0, G_p = 5g, (\tau/a, \eta) = (0.7, 0)$.

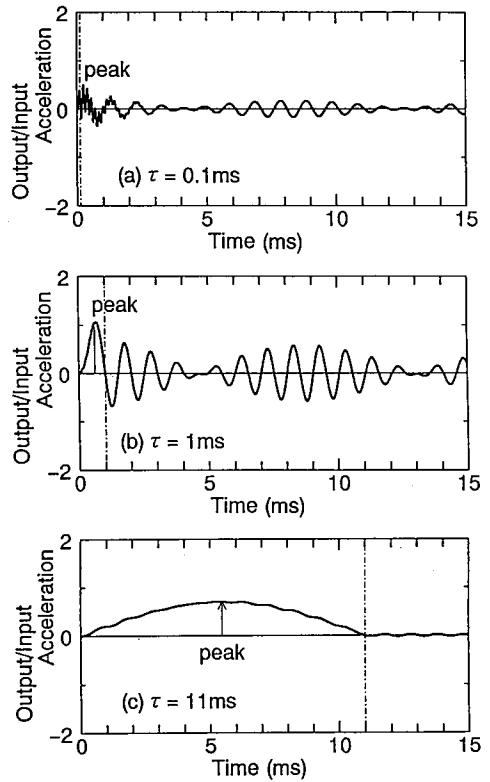


図6 ピッチング衝撃によるディスクの加速度過渡応答, $G_a = 0, G_p = 5g, (\tau/a, \eta) = (0.7, 0)$.

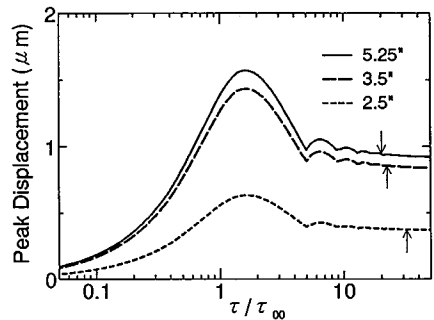


図7 軸方向衝撃の作用時間に対するディスクの最大変位の変化, $G_a = 5g, G_p = 0, (\tau/a, \eta) = (0.7, 0)$.

の入力についても言える。また結果をハードディスクごとに見てみると、衝撃変位は5.25°ディスクが最も大きく2.5°ディスクが小さいこと、また加速度はいずれのディスクもほぼ同じ値となるのがわかる。ところで現在メーカの衝撃試験では衝撃の作用時間として一般に $\tau=11\text{ ms}$ が用いられている⁽¹⁰⁾。しかしながら図7~10から明らかのように、いずれのディスクについても $\tau=11\text{ ms}$ で生ずる変位および加速度(図中の

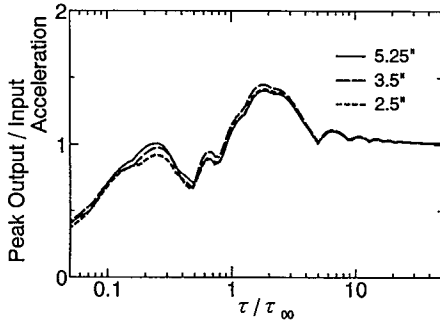


図8 軸方向衝撃の作用時間に対するディスクの最大加速度の変化, $G_a=5\text{ g}$, $G_p=0$, $(r/a, \eta)=(0.7, 0)$.

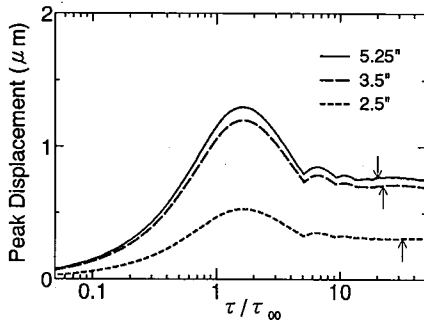


図9 ピッチング衝撃の作用時間に対するディスクの最大変位の変化, $G_a=0$, $G_p=5\text{ g}$, $(r/a, \eta)=(0.7, 0)$.

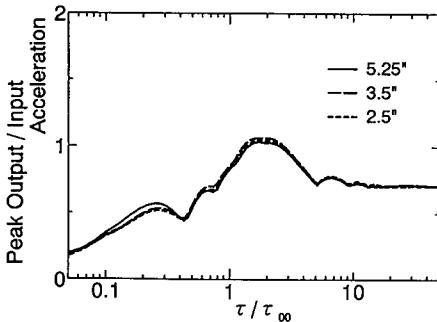


図10 ピッチング衝撃の作用時間に対するディスクの最大加速度の変化, $G_a=0$, $G_p=5\text{ g}$, $(r/a, \eta)=(0.7, 0)$.

矢印)は最大値の60~70%程度であり、衝撃入力の規定値としては $\tau=11\text{ ms}$ の入力は不十分であると言える。

次に変位の結果(図7, 9)と加速度の結果(図8, 10)を比較すると、変位の場合は作用時間の短い領域($\tau/\tau_0 < 0.7$)で曲線は τ の増加とともになだらかに単調増加しているが、加速度の場合は急激な増減が見られる。図7, 8の場合について級数解の項数 M の影響を調べるため、 M を変えて求めた結果を図11, 12に示す。図中の M の値は、ディスクに生ずる振動モードを節円数が M まで考えたことを意味する。図より変位の場合(図11)は M を減らしても曲線の形状は変わらないが、加速度の場合(図12)は考慮した M の値で曲線が大きく変化することがわかる。特に $M=0$ の曲線に比して $M=1$ の曲線は大きく変化しているが、これは加速度についてはディスクに(1, 0)モードが大きく励振されていることを意味する。

5. 結 論

本研究は軸方向およびピッチング方向に加速度衝撃

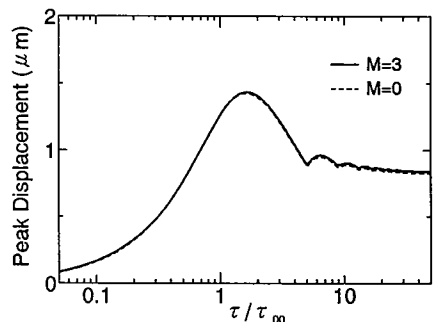


図11 ディスクの最大変位に対する級数解の近次項数 M の影響。

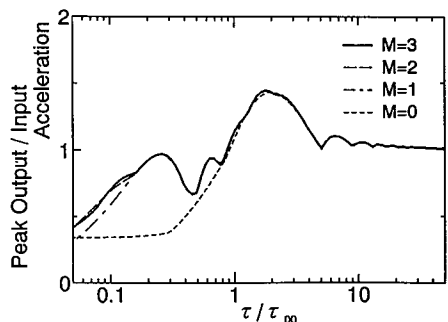


図12 ディスクの最大加速度に対する級数解の近次項数 M の影響。

を受ける回転ハードディスクの応答を理論により解析したものである。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 衝撃によって磁気ディスク装置に生ずる変位や加速度の最大値は衝撃入力作用時間によって異なり、特に系の(0,0)モードの固有半周期の1.5倍程度の作用時間を持つ衝撃が入力された場合それらの値は最大となる。現在メーカで一般に使用されている衝撃入力値(作用時間11ms)は、2.5", 3.5", 5.25"のハードディスクに対し最大値の60~70%の変位や加速度しか生じさせない。

(2) 磁気ディスク装置の衝撃特性に関して、ディスクに生ずる変位を評価する場合、軸方向衝撃に対しては(0,0)モードのみ、ピッチング衝撃に対しては(0,1)モードのみを考慮すれば十分である。一方ディスクに生ずる加速度を評価する場合、高次モードの影響が大きくなりそれらを考慮する必要がある。また2.5", 3.5", 5.25"ディスクについて比較した場合、衝撃によって生ずる変位はディスクにより大きく異なるが、加

速度はほぼ同じ大きさとなる。

最後に、本研究を遂行するに際しハードディスクに関するデータを提供していただいた(株)神戸製鋼機械研究所 井上喜雄氏に厚く感謝の意を表する。

文 献

- (1) Benson, B. C. and Bogy, D. B., *Trans. ASME. J. Appl. Mech.*, 45, (1978), 636.
- (2) 小野・前野・海老原, 機論, 52-437, C(1986), 326.
- (3) Hutton, S. G., Chonan, S. and Lehmann, B. F., *J. Sound Vib.*, 112-3(1987), 527.
- (4) Chonan, S. and Hayase, T., *Trans. ASME., J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des.*, 109(1987), 277.
- (5) 長南・江, 機論, 87-815, C(1988), 1181.
- (6) Jiang, Z. W., Chonan, S. and Abé, H. *Trans. ASME. J. Vib. Acoust.*, 112, (1990), 53.
- (7) Sinha, S. K., *J. Sound Vib.*, 122-2(1988), 217.
- (8) 本田・松久・佐藤, 機論, 54-507, C(1988), 2610.
- (9) Yano, S. and Kotera, T., *Arch. Appl. Mech.*, 61(1991), 110.
- (10) 日本機械学会, P-SC 174 「光ディスク・磁気ディスク装置の耐振評価基準と信頼性向上に関する研究分科会」資料, 1991.