

研究TOPICS

磁気ディスクの挙動解明及び防振対策

長南 征二、江 鐘偉 (東北大学)

1 はじめに

近年、情報処理システムや計算機システムの外部記憶装置としてフロッピーディスクやハードディスク装置の利用が急速に拡大している。

フロッピーディスク装置はランダムアクセス可能なコンピュータの外部記憶装置としてその利用が急速に拡大しており、今後さらに画像処理機器の記録再生用媒体としても活用されつつある。現在のフロッピーディスク装置では、媒体としてのディスクに対するヘッドの走行速度は最大 3 m/s 程度と遅く両者が密着に近い状態で運転される、いわゆる接触記録方式がとられている。しかしながらヘッドとディスクの設定条件によってはディスク面に振動が発生し、情報の受け渡しが正常に行われないことがある。一方ディスク装置のアクセス時間の短縮やデータ転送速度を向上させるためにはディスク回転速度は高いほど好ましいが、回転速度が高くなるにしたがいディスクに不安定振動が発生しやすくなる。したがって、高速・高信頼性かつ大容量・小形のディスク記録装置を開発するためには、回転ディスク・ヘッド連成系の動特性および安定性を解明する必要がある。

さて、容量が大きくアクセス時間の短いハードディスク装置は広く普及しており、更にノート型パソコン等、携帯用機器にもハードディスクの内蔵が一般的になっている。また着脱可能なカートリッジタイプのハードディスクも商品化され始めている。ところでハードディスク装置においては動圧効果を用いた空気膜潤滑による非接触記録方式が取られており、磁気ヘッドはディスク面上に微小な空気膜を介して浮上している。高密度化のためには浮上すきまをできるだけ小さくする必要があり、反面ヘッドとディスクが接触し易くな

り傷つきやアクセスエラー等の危険性が高まる。携帯用機器に搭載されたハードディスクが直面する一番の問題は、それらが振動や衝撃を受け易い環境で使用されることである。このためヘッド浮上量の安定化を含めた機器の耐振設計は情報機器の分野における重要課題である。

本稿は回転ディスク・ヘッド連成系の動特性と安定性、および外乱を受ける場合の系の振動特性について説明し、系を安定化するための防振対策を示す。さらに衝撃を受けるハードディスク・ヘッド連成系を取り上げ、ディスクおよびヘッドの衝撃応答特性を明らかにするとともに、衝撃に対するヘッド浮上量の変動を求め浮上量を安定化させる耐衝撃ヘッドの設計法について紹介する。

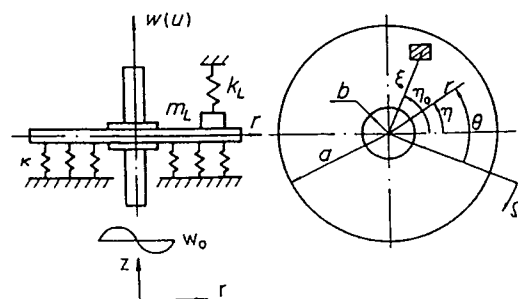


Fig.1: Geometry of rotating disk and R/W head

2 回転ディスク・ヘッドの振動特性

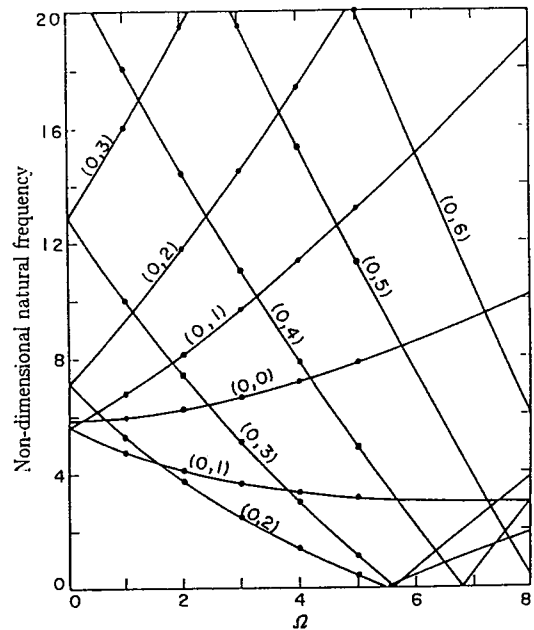
図1は一定の角速度 Ω で回転しているディスク・ヘッド連成系を示す。記録再生ヘッドはばね (k_L) と質量 (m_L) でモデル化し、さらにフロッピーディスクケース内で上下を空気膜で支持され

たディスクを弾性係数 (κ) のばね床で全面支持されたディスクにモデル化している。以下、図1の回転ディスク・ヘッド連成系の自由振動特性及び外乱を受けた場合の強制振動特性について説明する。

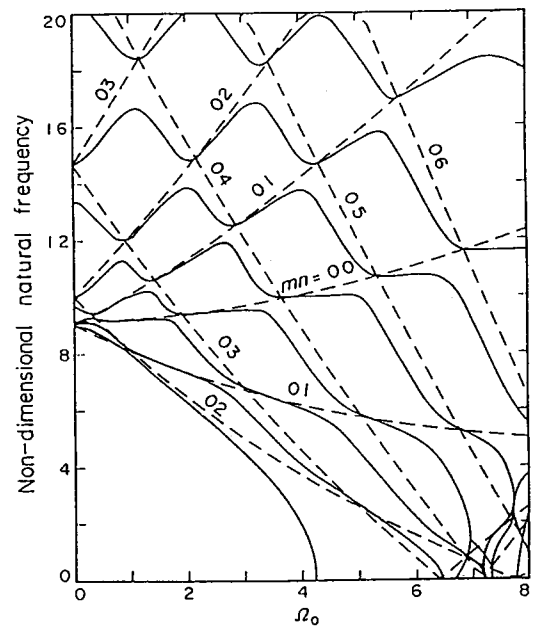
2.1 自由回転ディスク

一般に外力等が作用しない状態で回転するディスクの特性を把握することで、それらの影響を考慮した回転ディスクの特性についても多くの知見が得られる。従って回転ディスクの自由振動応答の解明は最も基礎的で重要な課題である。

図2は回転速度の変化による 5.25in フロッピーディスクの固有振動数の変化を示したものである。図2(a)は記録再生ヘッドを持たない回転ディスク単体の固有振動数、図2(b)は記録再生ヘッドさらにディスクケース中の空気膜の弾性こわさをも考慮した回転ディスクの固有振動数を示している。図中の記号 (m, n) , $m = 0, n = 0, 1, 2, \dots$, はその振動数曲線が節円 m , 節直径 n を有する振動モードに対するものであることを示す。図2(a)では各モードの振動数曲線は互いに干渉せずに交差していくことが分かる。また、 $(0, 0)$ モード以外の振動数曲線は二本があり、高いほうの振動数はディスク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。すなわち、基本的に回転ディスクの振動はこの進行波と後退波によって励起されるものである。一方、ヘッドを有する回転ディスクの固有振動数(図2(b)の実線)を見ると、各振動モード曲線は互いに干渉し他の振動モード曲線に乗り移ることがわかる。これは、ディスク表面の進行波と後退波はヘッドという障害物によって進行が妨げられ、進行波の一部が障害物で反射され後退波となったり、後退波の一部も同様に進行波になったりする等に起因するものと考えられる。従って、回転ディスクにヘッドのような付加物があるとディスクの振動応答がかなり複雑になってしまう。また、図2(b)の破線はヘッドを無視した場合の回転ディスクの固有振動数曲線を示す。図より、破線から実線の振動モードを予測することも可能であり、したがって回転ディスク単体の自由振動特性を把握することはこの点からも重要である。



(a) Frequency of disk without head



(b) Frequency of disk with head

Fig.2: Natural frequencies as functions of the revolution speed of disk Ω_0 .

2.2 外乱を受ける回転ディスク

上記の回転ディスクに周期的な外乱を与え、その振動様子を見てみよう。ディスク装置に加わる強制変位の入力方法は2種類が考えられる。すなわち、軸方向の強制変位、及びディスク上のある

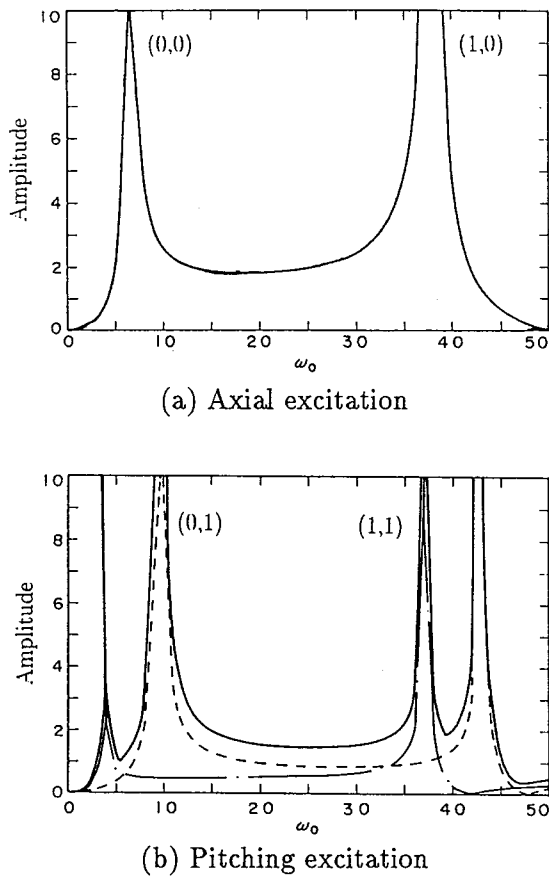


Fig.3: Amplitude response of disk without head.

直径を中心として回転するピッチング強制変位である。以下に軸方向及びピッチング方向で加振される回転ディスクの周波数応答を示す。

図3は加振周波数 ω_0 の変化によるヘッドを持たないディスクの外周での変位応答を示す。図3(a)は軸方向加振、図3(b)はピッチング方向加振された場合の結果である。図より、軸方向加振された場合はディスクに節直径の数がゼロの振動モードしか励起されなく、ピッチング方向加振の場合は節直径の数が1の振動モードだけが励起されることが分かる。図3(a)の最大振幅における加振周波数はそれぞれ回転ディスクの(0,0)次モードと(1,0)次モードの固有振動数に対応し、図3(b)ではそれぞれディスクの(0,1)次モードと(1,1)次モードの固有振動数に対応している。また、図3(b)では一点鎖線は後退波により励起された振幅応答、破線は進行波によるもので、実

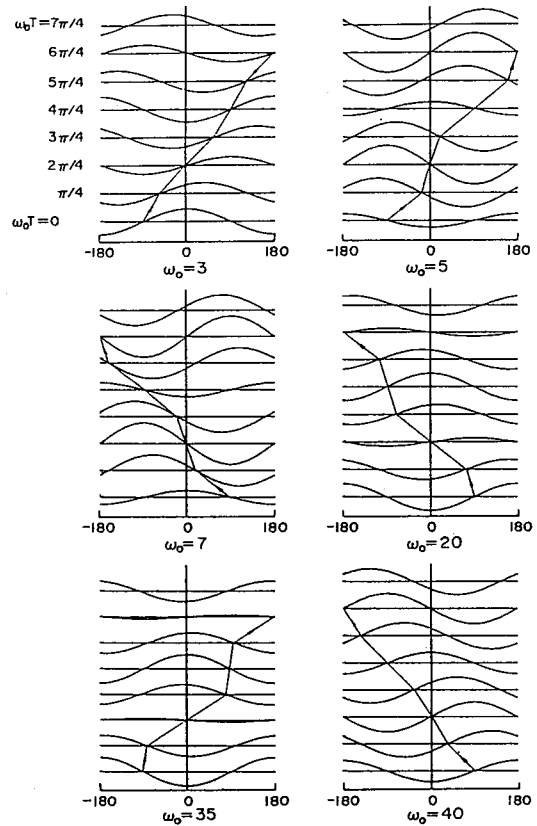


Fig.4: Deformation pattern of disk without a head subjected to pitching excitation.

線はそれらを足し合わせた実際のディスクの振幅を表している。

図4は $\omega = 300\text{rpm}$ で回転しているディスク外周上の変位の時間変化を示す。時間 T を0から $2\pi/\omega_0$ の範囲で換え、6つの加振振動数に対して変位の変化を求めている。ディスクは $\eta = 180^\circ$ から -180° の方向に回転している。すでに説明したように、ディスクの振動応答は進行波と後退波に分解でき、それらの波は加振振動数 ω_0 と同じ値の角速度で各々逆方向にディスク上を伝播する。一方この2つの波の足し合わせで生じる波はディスク上でディスクと同じ回転方向へ伝播したり、逆方向に回転したりする。例えば、加振振動数が $\omega_0 = 3.0, 5.0, 35.0$ の時、ディスクと共に加振される座標から見た波はディスクの回転と逆方向に回転し、 $\omega_0 = 7.0, 20.0, 40.0$ の場合は回転方向と同方向に回転することが分かる。この現象は図3(b)を用いて以下のように説明される。すなわち、 $\omega_0 = 3.0, 5.0, 35.0$ の場合、後退波の振幅は進行

波の振幅より大きく、逆に $\omega_0 = 7.0, 20.0, 40.0$ の時は進行波の振幅が後退波より大きくなっている。実際の応答は両波の足し合わせで与えられることより進行波の振幅が後退波の振幅より大きければ、ディスク上の波は結果として進行波として現れることになる。

また、ディスクの回転速度が零あるいは軸方向加振された場合は、進行波による共振振動数は後退波によるものと一致し、これらの波は同振幅、同速度で逆方向に伝播し、この二つ波を足し合わせた実際の応答は静止座標から見た場合は回転せず定在波となってしまう。

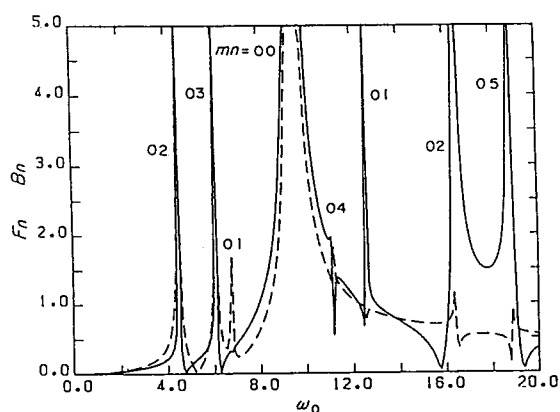


Fig.5: Amplitude response of disk with a head subjected to axial excitation.

以上はヘッドのないディスクの振動応答を示したが、それらと比較するため、図5にヘッドを有する回転ディスクが軸方向加振を受けた場合の振動応答を示す。図中の実線は前進波の振幅、破線は後退波の振幅を表す。図より、ヘッドがあるとディスクにすべてのモードが励振されることがわかる。これは、同じ外乱を受けるヘッドのないディスクには節直径の数がゼロのモードしか励振されないことと明らかに異なる。さらに、前進波と後退波はほぼ同じ共振周波数を持ち、しかも、低周波数領域において後退波の共振振幅が前進波の振幅より大きく、高周波数領域においては逆であることが図からわかる。

図6は四つの連続時間 $\omega_0 T = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ におけるヘッドを有するディスクの三次元振動モードを示す。ここでディスクは時計回りに $\Omega = 300$ rpmで回転し、同時に周波数 $\omega_0 = 33$ の外乱で

軸方向に加振されている。図中の垂直矢印はヘッドの接触位置を示す。図6(a)は前進波によるディスクの変位応答、図6(b)は後退波による応答、図6(c)は実際のディスクの応答、すなわち図6(a)と図6(b)の和を表す。図より、前進波(図6a)がディスクの回転方向へ伝播し、後退波(図6b)が逆方向へ伝播する様子がはっきり見られる。一方、両波を足し合わせたディスクの実際の応答(図6c)がどちらの方向へ伝播するかは、前進波と後退波の振幅の大きさによる。一般に、前進波の振幅が後退波の振幅より大きければ、両波の足し合わせである実際の応答は前進波の方向へ伝播する。あるいは、両波の振幅の大きさが逆であるときは伝播方向は逆となる。図6cでは、前進波の振幅が大きいので、ディスクの回転方向へ伝播する波が見られる。

3 2吋フロッピーディスク用スタビライザーの設計

現在広く使用されているフロッピーディスク装置は主に5インチと3インチ型であるが、これらのディスク装置では、ディスクの最大回転速度が360 rpm程度と低い領域で使用されている。一方、フロッピーディスク装置を画像処理機器、例えばビデオカメラなどの記録再生媒体として使用する場合は、テレビの走査線の掃引速度に合わせるためにディスクの回転速度は3600 rpmに上げる方が都合が良い。この要求を満たすべく最近、2インチフロッピーディスク装置の開発が盛んに行われている。それらの装置では主に二種類のディスクとヘッドの接触方式が採用されている。ひとつは、磁気ヘッドをディスク下方から押しつけさらにスタビライザーを上から押えつける方式であり、他はヘッド単体を下方から押し込む方式である。しかしながら、これらの接触方式を採用した場合、ディスクとヘッドとの設定条件によっては高速回転するディスクに不安定振動が生じ、ディスクに対するデータ記録再生の信頼性を低下させさらにはディスクの傷つきの原因となる。以下、3600 rpmで高速回転する2インチフロッピーディスク装置を取り上げ、高速回転するディスクの振動特性ならびに安定性に対しヘッド及びスタビライ

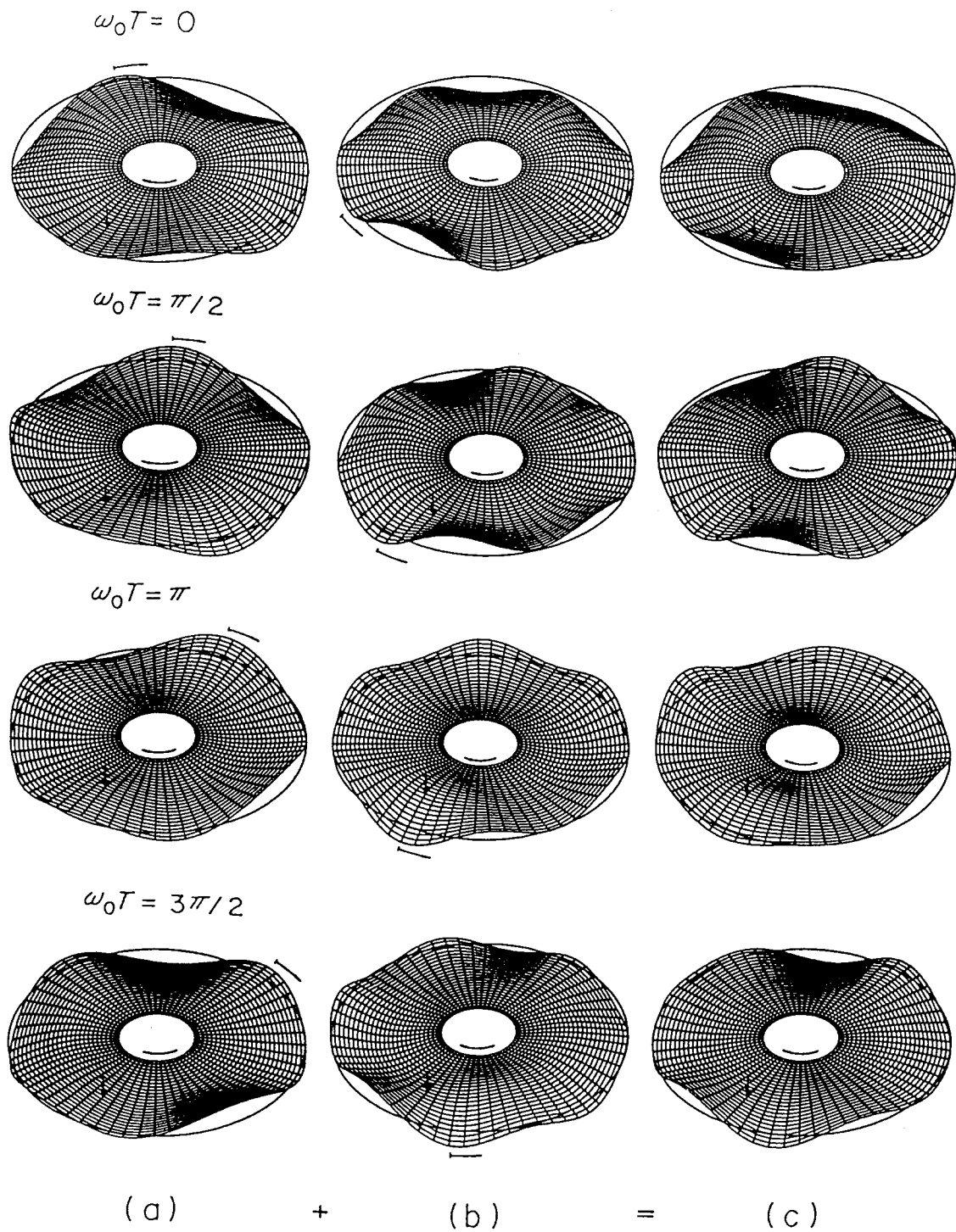


Fig.6: Deformation pattern of disk with head subjected to axial excitation. (a) progressive wave; (b) regressive wave; (c) sum of the two waves.

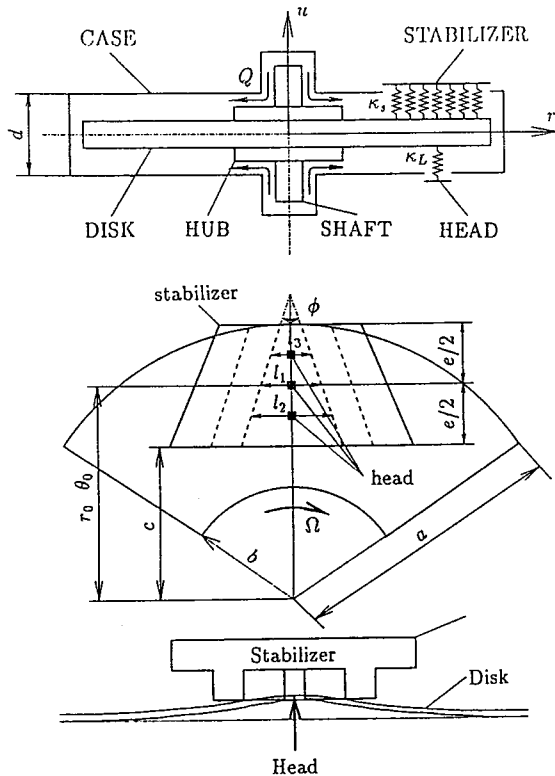


Fig.7: Geometry of 2 inch disk and its stabilizer.

ザーの設定条件がいかに影響するかを説明し、ディスク装置を安定化するスタビライザーの最適な形状を示す。

図7はフロッピーディスク・ヘッド・スタビライザーの概略図を示す。ディスクは上側からスタビライザー、下側からヘッドが当てられている。磁気ヘッドとスタビライザーはディスク面と常に接触している。解析ではヘッドおよびスタビライザーを剛さ無限大の連続ばねで近似し、さらにディスクカバー内で空気膜 Q により支持されたディスクを弾性係数 κ の一様なばね床で支持されたディスクにモデル化している。

図8はスタビライザーを持たないヘッドのみを押しつけた場合のディスクの複素固有振動数と回転速度 Ω の関係を示したものである。図8(a)は固有振動数の虚数部分、図8(b)はその実数部を表す。図よりディスクの回転速度 Ω の増加とともに低次の振動数が減少し、横軸と交差する点でダイバージェンス型不安定現象が生じる。回転速度が更に増加すると、固有振動数は共役の複素数を

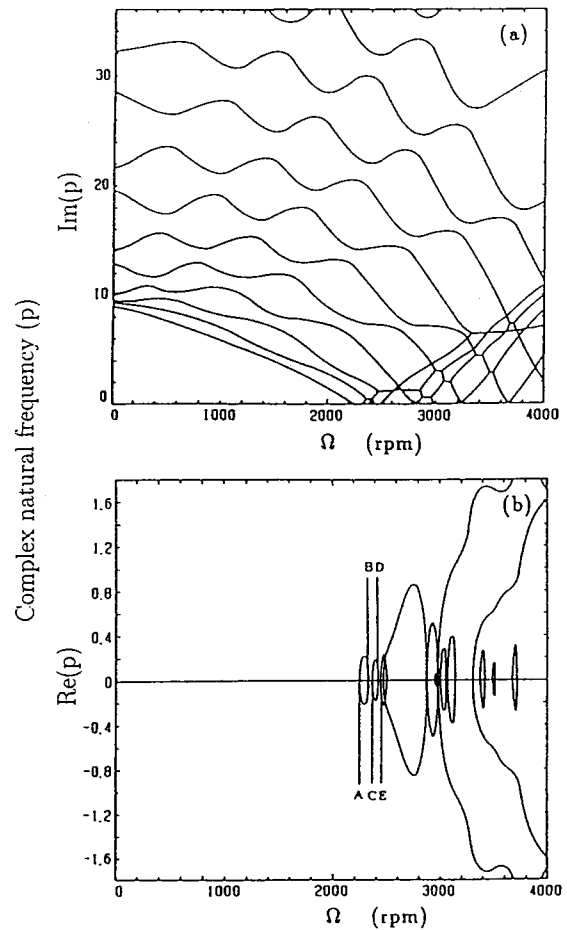


Fig.8: Variation of complex frequencies as functions of rotation speed Ω for the disk having a head but no stabilizer.

とるようになり、ディスクの振幅は時間とともに正弦波状に振動しながら増大していくフラッタ不安定が起こる。図8(b)において、AB領域はダイバージェンス型不安定領域、CD領域はフラッタ型不安定領域を表す。A点に対する回転速度は最小危険速度と呼ばれる。図よりヘッドだけの場合は、ディスクの回転速度が最小危険速度を越えるとさらに二つ小さな安定域 BC($2330 < \Omega < 2370$)と DE($2420 < \Omega < 2440$)が現れるが、2460 rpm (E点)を越えると全て不安定域になることが分かる。

次にディスクに対しヘッドの反対側から、既存のスタビライザーを当てた場合の複素固有振動数とディスク回転速度の関係を図9に示す。スタビライザーはハ形状で、 $e = 8.00$ mm, $l_1 = 5.00$

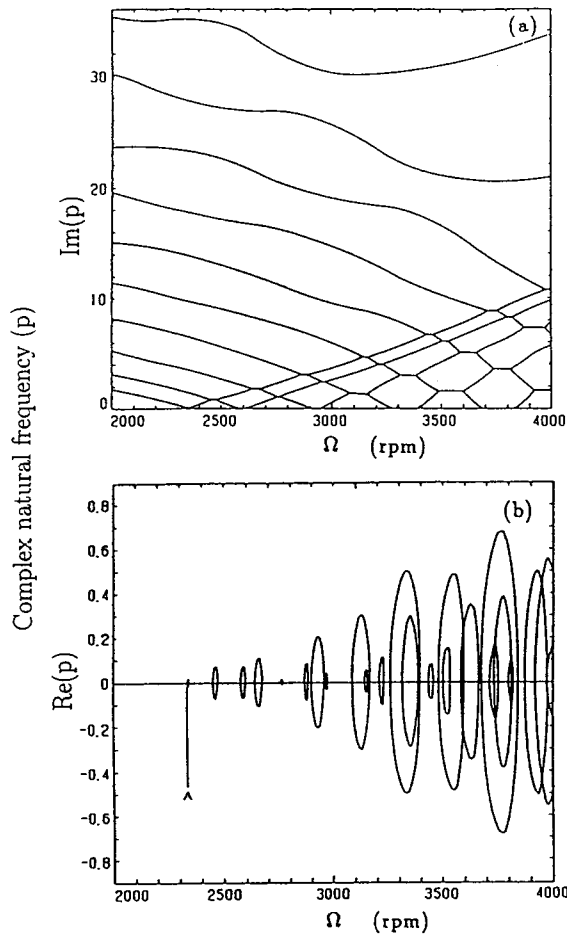


Fig.9: Variation of complex frequencies as functions of rotation speed Ω for the disk having both a head and a trapezoidal-shape stabilizer; $c = 13.5\text{mm}$, $e = 8.0\text{mm}$, $l_1 = 5.0\text{mm}$, $\phi = 20^\circ$.

mm, $\phi = 20^\circ$ (図 7 参照) と与えられる。振動数ダイヤグラムを見やすくするため、回転速度 $\Omega = 2000 \sim 4000$ rpm の範囲だけについて結果を示している。図 9(b) を図 8(b) と比較して見ると、ディスクの回転速度が最小危険速度 (A 点) より大きい領域においては、スタビライザーのある場合ではスタビライザーの無い場合より安定域の数および幅が増大し、かつ不安定域の高さが減少している。またディスクの最小危険速度は図 8 より図 9 のほうがほぼ 100 rpm 上がっている。これより、スタビライザーは高速回転フロッピーディスクの安定化に大きな役割を果たすことが分かる。

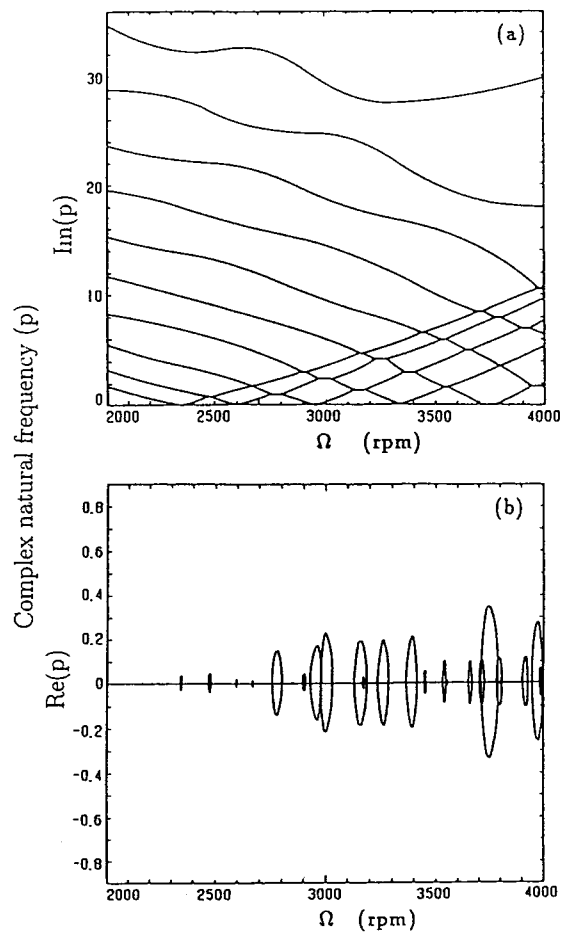


Fig.10: Complex frequencies of disk with optimal configuration of stabilizer; $c = 13.5\text{mm}$, $e = 8.0\text{mm}$, $l_2 = 12.1\text{mm}$, $l_3 = 0.9\text{mm}$.

上述のように、テレビ画像の走査速度に対応するため 2 インチフロッピーディスクの回転速度は 3600 rpm に決められている。しかしながら図 9 に示した既存のハ形スタビライザーを用いた場合、3600 rpm の回転速度ではディスクに不安定現象が生じる。この不安定現象を回避するためのスタビライザーの形状につき計算を行い、スタビライザーとディスクの接触点 (すなわち接触面積) を減らすことが有効であることが分かった。このように求められた最も広い安定域を有するスタビライザーはディスクと四点で接触するもので、その形状パラメータは $e = 8.00$ mm, $l_2 = 12.10$ mm, $l_3 = 0.90$ mm で与えられる。図 10 はこの最適なスタビライザーを用いた場合の複素固有振動数とディスク回転速度の関係を示す。図 9(b) と比

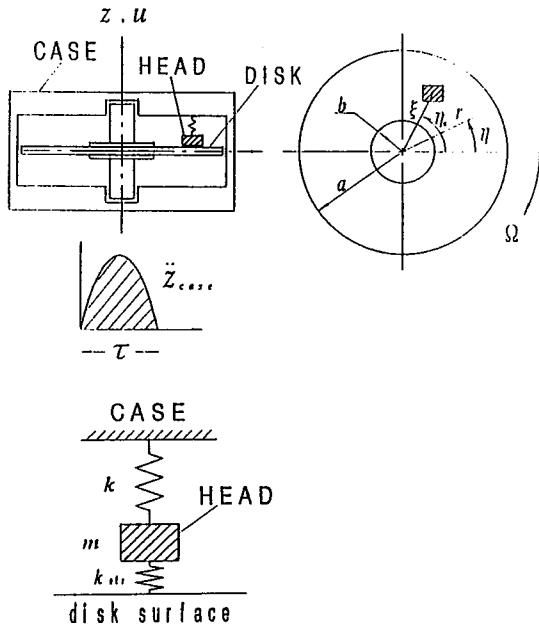


Fig.11: Geometry of hard disk and head slider.

較して見ると、図 10(b) にある不安定域は全体として図 9(b) より小さく、かつ狭くなっていることが分かる。図 10 に示されたスタビライザーを用いれば、磁気ヘッドがディスクの記録帯域のいずれに移動しても 2 インチフロッピーディスクは 3600 rpm で安定に回転する。

4 磁気ディスクの衝撃応答・耐振性評価ならびにヘッドの耐衝撃設計

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 11msec 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。

ここで、図 11 に示した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・ヘッド連成系を取り上げ、ディスクおよびヘッドの衝撃応答特性を明らかにするとともに、ディスクの耐振性評価について検討し、更に衝撃に対するヘッド浮上量の変動を求め、浮上

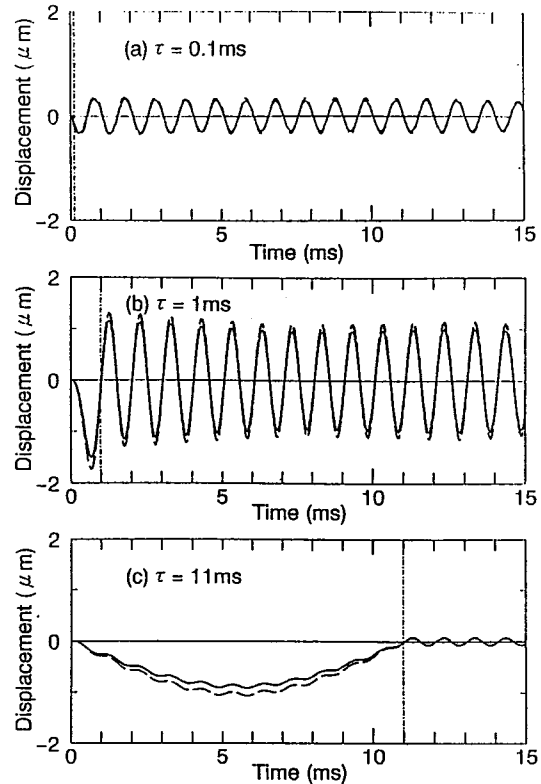


Fig.12: Displacement response of hard disk and head.

量を安定化させる耐衝撃ヘッドの設計について説明を行う。

4.1 衝撃応答及び耐振性評価

図 12 は軸方向衝撃によって 3.5" ハードディスクおよびヘッドに生じた変位の時間変化を示したものである。入力衝撃加速度の大きさは $5g(49m/s^2)$ 、衝撃の作用時間 τ は、各図において (a) $\tau = 0.1 \text{ ms}$, (b) $\tau = 1 \text{ ms}$, (c) $\tau = 11 \text{ ms}$ である。図中の実線はディスク、破線はヘッドの変位応答であり両者の初期変位は 0 としている。またヘッドの各パラメータは質量を $m = 3 \times 10^{-4} \text{ kg}$ 、取り付けこわさを $k = 10 \text{ N/m}$ 、ヘッドとディスクの間の微小空気膜の等価ばねこわさを $k_{air} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}$ としている。図よりヘッドはディスクと同位相でディスクの (0,0) モードの固有振動数で振動していることがわかる。またヘッドに生ずる振幅はディスクの振幅に比べ大きく、更にヘッドおよびディスク両者のピーク変位

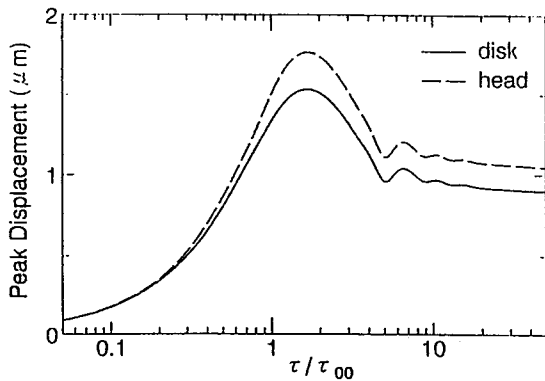


Fig.13: Variation of peak displacements of disk and head versus excitation duration.

はいずれもある衝撃作用時間に対して最も大きくなる事がわかる。

図 13 はディスクおよびヘッドに生ずる変位のピーク値を衝撃作用時間の関数として示したものである。横軸には衝撃の作用時間 τ をディスクの (0,0) モード固有半周期 τ_{00} で無次元化した値を取っている。この計算例では $\tau_{00}=0.5$ ms である。図より、ディスク、ヘッドいずれも衝撃の作用時間がディスクの (0,0) モード固有半周期 τ_{00} の約 1.5 倍の場合に最も変位が大きくなる事がわかる。ヘッドを無視した場合についても同様な解析結果が得られる。現在メーカーで一般に使用されている作用時間 11 ms の衝撃入力に対してはディスク、ヘッドに現れるピーク値は最大値の高々 60-70% 程度に過ぎない。従って、衝撃入力の規範値としては $\tau = 11$ ms の入力は不十分であるといえる。

4.2 ヘッドの耐衝撃設計

磁気ディスク装置が振動や衝撃を受け易い環境で使用される場合、磁気ディスク自身の振動問題以外に、ディスクとヘッドの相互干渉の問題がある。ここで、ヘッドがディスクと衝突せず、ディスクに対してヘッド浮上量を安定化させる耐衝撃ヘッドの設計について紹介する。

ヘッドに関する基本的なパラメータが三つある。すなわち、ヘッドの質量 m 、取付剛性 k 及びディスク・ヘッド間の浮上空気膜剛性 k_{air} である。そのうち、ヘッドの質量と取付剛性が実際の設計に

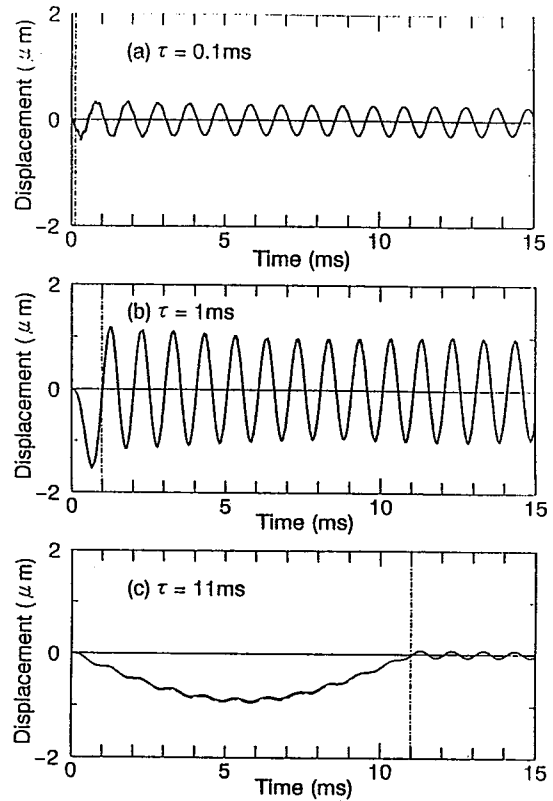


Fig.14: Displacement response of disk and head.

おいて最も自由度があるが、ディスク・ヘッド間の浮上空気膜剛性はヘッドの浮上量、ディスクの回転速度、ヘッドスライダの形状や形などに依存するため、パラメータとしては比較的扱いにくい量である。

始めに、ヘッドとディスクの間の空気浮上膜の剛性の影響を考える。図 14 は空気膜剛性 k_{air} を図 12 と比較するため、 $k_{air} = 5 \times 10^5$ N/m と大きくした場合の結果を示す。図より k_{air} が小さい場合 (図 12) に比べ、ディスク変動に対するヘッドの追従性が向上している、すなわち、ヘッドとディスク間の浮上量の変動が小さくなっていることがわかる。このことから、空気膜の剛性はヘッド浮上量の安定化に大きく寄与しておりヘッドを設計する際には空気膜の剛性が高くなるような形状の方が望ましいことがいえる。

次にヘッドの取付剛性 k の影響を図 15 に示す。これはディスクの変位ピーク値からヘッドの変位ピーク値を差し引いた相対変位のマイナス方向ピーク値をヘッドの取付剛性 k の関数として示

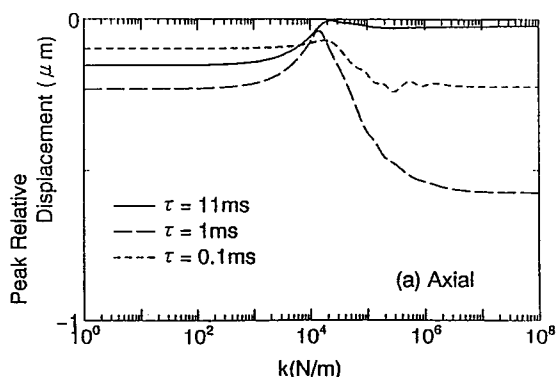


Fig.15: Variation of peak relative negative displacement between disk and head versus head mounting stiffness.

したものである。これは、相対変位のピーク値がゼロに近づくほどディスクに対するヘッド浮上量の変動が小さくなることを意味する。また、図は3種類の衝撃作用時間に対して結果を示している。図より、相対変位のマイナス方向ピーク値を最小にする k の値、すなわちディスク、ヘッドを等間隔に保つための最適な k の値が存在することがわかる。衝撃の作用時間によってその値はわずかに異なっているが大体 $(1 \sim 2) \times 10^4$ N/m となっている。これは空気膜の剛性 k_{air} の10分の1程度の大きさであり、図12で用いた $k = 10$ N/m に比べかなり大きな値である。

図16はヘッドの取付剛性 k を最適値 (1.3×10^4 N/m) にした場合のヘッド・ディスク間相対変位のマイナス方向ピーク値(実線)を衝撃作用時間 τ の関数として示したものであり、図中の破線は図13のディスク変位ピーク値からヘッド変位ピーク値を差し引いた相対変位ピーク値である。両曲線を比較すると、実線で示した曲線は全体的に減少している。すなわち最適な k の値を用いることは衝撃入力に対してヘッドとディスクを等間隔に保つこと、両者の接触の危険性を減らすために有効であることがわかる。

さらに、このような k の最適値がヘッド質量 m によってどう影響されるかを調べてみた結果は図17に示す。ここで、質量 m は図15の場合より十倍大きくしている。図15と比較して最適な k の値は m の変化に対して上下し、ヘッドとディスクを等間隔に保てる k の値の幅がかなり小さく

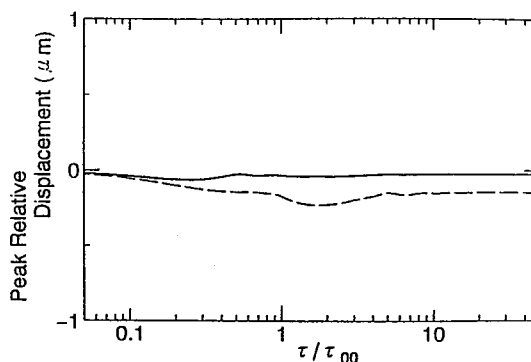


Fig.16: Variation of peak negative relative displacement between disk and head versus excitation duration.

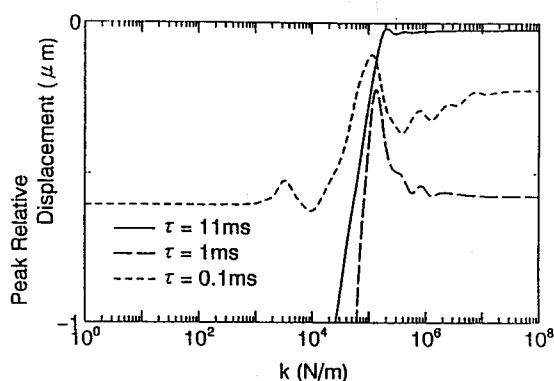


Fig.17: Variation of peak negative relative displacement between disk and head versus head arm stiffness.

なっている。この場合最適なヘッドの取付剛性 k の選択は十分に注意して行う必要がある。

以上の結果を総合して、ディスクに対するヘッドの浮上量を安定化させるにはヘッドの質量を小さくし、浮上空気膜の剛性を高めるようなヘッドの形状を設計することなどの工夫が必要であるといえる。

5 むすび

近年、フロッピーディスクやハードディスク装置はコンピュータの外部記憶装置として主に利用されているが、今後はさらに画像処理機器の記録、再生の媒体としてもその利用が拡大されると予想される。従って、今後さらに磁気ディスク装置の大容量化、高密度化、小形化、高速化が要求され

近い将来には大容量、高密度記録可能な薄膜媒体および薄膜ヘッドが開発されることになろう。その実用化に際しては記録再生技術、ヘッド技術、アクチュエータ技術、位置決め技術などの先端技術の総合的な研究開発が必要である。今回紹介した磁気ディスクの振動特性や耐振性設計法に関する解説が、本分野について読者の理解を得る上で一助となれば幸いである。

文 献

- [1] 長南征二, 江 鐘偉, “軸方向およびピッチング加振される回転ディスクの動特性に関する研究”, 日本機械学会論文集C編, 54 巻 502 号, pp.1181-1188, 1988.
- [2] 江 鐘偉, 長南征二, “磁気ヘッドと接触する回転フロッピーディスクの自由振動特性並びにその解析法について”, 日本機械学会論文集C編, 54 巻 507 号, pp.2669-2674, 1988.
- [3] Z.W.Jiang, S.Chonan and H.Abé, “Dynamic Response of a Read/Write Head Floppy Disk System Subjected to Axial Excitation”, Trans.ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.112, No.1, pp.53-58, 1990.
- [4] S.Chonan, Z.W.Jiang and Y.J.Shyu, “Stability Analysis of a 2" Floppy Disk Drive System and the Optimum Design of the Disk Stabilizer”, Trans. ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.114, No.2, pp.283-286, 1992.
- [5] 長南征二, 江 鐘偉, 高島 和, “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”, 日本機械学会論文集C編, 58 巻 548 号, pp.1105-1111, 1992.
- [6] 江 鐘偉, 高島 和, 長南征二, “回転磁気ディスク・ヘッド連成系の衝撃応答ならびにヘッドの耐衝撃設計について”, 日本機械学会論文集C編, 58 巻 556 号, pp.3681-3688, 1992.