非動作時におけるヘッド/ディスクインタフェースの 耐衝撃性能に関する実験的研究*

石丸 直彦^{*1}, 松下 恵造^{*2}

Experimental Studies on Shock-Proof Performance of Head/Disk Interface During Nonoperation

Naohiko ISHIMARU and Keizo MATSUSHITA

Experimental studies on shock-proof performance of head/disk interface (HDI) subjected to half-sine shock acceleration during nonoperation have been carried out. Damages to the disk surface due to the collision between the head and disk have been assessed by measuring the degradation of the recorded signals. The results are as follows. When the inertia acting on the head suspension assembly (HSA) exceeds loading force of the head under shock acceleration, the HSA jumps away from the disk surface and springs back. Its movement is the most essential phenomenon. Higher loading force and less equivalent mass of HSA reduce surface damage. The effect of duration of acceleration on damage is not related to the resonance frequency of the disk but to that of HSA in the axial direction. Thin disks contribute to reduce the damage because of energy loss due to their lower rigidity. In order to improve shock-proof performance, it was demonstrated that a glass disk is much more superior to an aluminum disk in terms of shock resistance because of its high hardness. A stopper mechanism has been newly developed to prevent HSA from jumping away. Finally, much higher shock-proof performance has been realized by means of combining the glass disk and stopper mechanism.

Key Words: Shock, Head Medium, Measurement, Jumping Away, Spring Back, Missing Pulse, Glass Disk, Stopper

1. はじめに

近年磁気ディスク装置の小型化携帯化に伴い装置の耐衝撃性能の向上がますます要求されている。特にヘッドディスクインタフェース（以後HDIと略す）での挙動が重要で、この問題を解決しなければ装置全体の耐衝撃性能は向上しない。これまでの耐衝撃性能の研究は、江ら⁽¹⁾が動作時でのHDIに関して数値計算を行い、ヘッドのディスクに対する追従性と衝撃作用時間の関係を明らかにした。しかし、現在ほとんどのメーカー、ユーザーでは、独自の基準で耐衝撃性能を評価しているようであり、基本的かつ普遍的な研究はあまり見られない⁽²⁾。そこで筆者らは、非動作時における装置の耐衝撃性能について実験的に検討した。具体的には、ディスク軸方向かつ半正弦波の衝撃加速度を受けたときのHDIの損傷、特にディスク表面の損傷について、ヘッド押し付け力、ヘッドサスペンションアセンブリ（以後HSAと略す）の質量、衝撃作用時間、衝撃力大きさ、ディスク基板サイズ等の基本的なパラメータの影響を調べた。また衝撃中のHDIの

挙動に関するさまざまな物理量を実測することにより耐衝撃性能との関係付けを行い、そのメカニズムを解明しようと試みた。さらにそれらの結果をもとに、耐衝撃性能を向上させるため、ガラスディスクと新しく開発したHSA運動拘束機構を試みて、その有効性をそれぞれ確認した。本研究は、耐衝撃性能に関する研究の初期段階としてまず非動作時について行ったが、得られた知見は動作時における挙動を解明する上でも有益であり、今後の耐衝撃設計に関しての開発指針として寄与するものと思われる。

2. 実験装置及び実験方法

図1に示すような自由落下方式の実験装置を用いた。ダミードライブの中にHSAとディスクが格納され、またその中に接着固定された加速度センサによって衝撃加速度を測定した。実際の磁気ディスク装置では、HDI以外にさまざまな部品から構成されているが、本研究ではHDIの挙動のみに着目するため、ダミードライブはHDIを構成するHSAとディスクのみを内蔵し、構造体はこれらに比べて高剛性かつ高共振周波数となるように設計した。本報告では、非動作時においてディスク軸方向でかつ半正弦波の衝撃加速度が作用したときのHDIの挙動を検討した。衝撃作用時

* 原稿受付 平成5年11月29日。

^{*1} 正員、旭硝子(株)中央研究所 (〒992-11 米沢市八幡原4-2837-10)。

^{*2} 旭硝子(株)中央研究所。

図1 衝撃試験装置の概略図

図2 ダミードライブの概略図

図3 反発係数測定装置の概略図

間はアンピルのクッションの厚みや材質を変えて、また衝撃の大きさは落下高さを変えて調節した。衝撃性能の評価としては、主にヘッドとディスクの衝突によって生じるディスク表面の永久傷の程度を評価した。具体的には、まずディスク表面を光学式顕微鏡で観察し、その後別のテスターを用いて記録再生信号の出力不良であるミッシングパルス数を測定することにより、ディスク表面の損傷を定量的に評価した。直径9.5 mmディスクの場合は、半径2.3 mmで浮上量0.076 μm (3 μinch)、また5 MHzで記録を行い、再生時に通常出力の67%以下の出力が連続して10ビット以上続いた場合に、ミッシングパルスを1としてカウントした。また衝撃中のHDIの挙動を把握するために、図2に示すダミードライブを用いて以

表1 供試ヘッドサスペンションアセンブリ

Head-Suspension ID No.	Head Size	Suspension	Remarks
1	Mini	Type A	Conventional
2	Nano	Type B	Conventional
3	Nano	Type B	With hole
4	Nano	Type B	With mass

下に記す物理量を測定した。ディスク自身の変形は、ディスク表面に接着された歪ゲージで、またサスペンションのディスク軸方向（鉛直方向）変形も同様に歪ゲージで測定した。接着場所に関しては、サスペンションの剛性に極力影響を与えないように考慮した。その質量もHSAに比べてはるかに小さく無視できる。さらにヘッドとディスクの接触状態をヘッドディスク間の電気抵抗で、ヘッドとディスクの直接の衝突大きさをヘッドに接着された圧電素子でそれぞれ測定した。ここでヘッドディスク間の電気抵抗はその接触面積が大きいほど小さいと仮定し、特に抵抗が無限大の時はヘッドディスク間で全く接触が生じていないとした。図2に示す衝撃加速度の方向に対して、ヘッドがディスクより下側に位置する場合、アップヘッドと、上側に位置する場合、ダウンヘッドと呼ぶことにする。また、ディスクの反発係数を測定するために図3に示すように直径1 mmの硬球をさまざまな高さから落下させその時にディスクに発生する振動をAEセンサで検出した。硬球が跳ね返って複数回衝突するときのインターバル時間をもとに自由落下を仮定して反発係数を算出した。サンプルディスクとしては、主にアルミ基板のスプッターディスク（直径9.5 mm、厚み1.27 mm）を使用した。これは下地膜、白金系磁性膜、カーボン系保護膜という膜構成のものである。以後ディスクの直径（mm）、厚さ（mm）を（9.5 ϕ , 1.27 ϕ ）のように表す。ヘッドは薄膜ヘッド（アルミナチタンカーバイド製）を使用した。実験に使用したHSAを表1に示す。以後グラフには、そのIDナンバーを使用する。

3. HDIにおける耐衝撃性能を支配するメカニズムの解明

3.1 ヘッドの押し付け力の影響

図4に典型的なヘッドの衝撃によるディスク表面の

図4 ディスク表面の損傷

図5 損傷に与える押し付け力の影響

損傷を示す。硬いセラミックスであるヘッドのエッジによってディスク表面がへこみ、またその周辺が盛り上がっていることがわかる。このような永久傷が記録再生時においてミッシングパルス等の不良を生じさせる。図5に示すようにアップヘッドの場合は、ある加速度までは、ミッシングパルスの増加はほとんどなく、光学式顕微鏡によってもディスク表面に損傷はほとんど観測されなかった。しかし、ある加速度（以後エラー開始加速度と呼ぶ）からその大きさに従ってほぼ一定の割合でエラーの数が増え、損傷が大きくなることわかる。また押し付け力（図中ではL/Fと略す）の大きさに従ってエラー開始加速度は増加する、つまり耐衝撃性能が増すことがわかる。一方、ダウンヘッドの場合はエラーがほとんどなく、ディスク表面にも損傷はほとんど検知されなかった。図6に衝突中のHDIの挙動を実測した結果を示す。また、衝撃作用時間を図中に示すように定義する。ディスク、サスペンション上の歪ゲージ出力は、図2に示す矢印の方向を負の値とする無次元値とする。また図7にその結果から推定されるHDIの運動モデルを示す。アップヘッドで500Gの場合のメカニズムは以下のように説明できる。

図6 衝撃作用中のHDIの挙動

図7 衝撃中のHDI運動モデル

区間1：衝撃加速度が作用し始めそれに対応してディスクがそれ自身の慣性力によって変形を始める。電気抵抗の出力により、HSAはディスクに追従して相対運動を起こしていないことがわかる。

区間2：衝撃加速度が作用してから少し遅れて約200GからHSAがその慣性力によって鉛直方向に変形しはじめ、それと同時に電気抵抗の値から推定されるように、ヘッドがディスクから跳躍する現象が起こる。

区間3：跳躍したHSAは、サスペンションの反力によって跳ね返り運動を起こしディスクに衝突する。これは圧電素子の出力とも対応している。

区間4：ヘッド着地後はディスクの(0,0)モード

図8 跳ね返り速度に与える衝撃加速度の影響

図9 圧電素子出力に与える衝撃加速度の影響

の固有振動数に従って（この場合約 900 Hz）ヘッドディスク間で振動が持続している。ここで、(0, 0) モードとは、周辺自由中央固定円板における最低固有振動数のモード、すなわち、節直径数、節円数ともに 0 のモードである。ここでは示さないがディスク表面に 90 度おきかつ同一半径に接着された歪みゲージの出力の大きさ、及び位相がほぼ同じでかつディスクを約 30 度ほどずらしても同様の結果を得たので、(0, 0) モードであると判断した。圧電素子の出力の大きさから判断すると、ディスクに最も大きな損傷を与えるのは、区間 4 の振動中ではなく区間 3 の H S A の跳ね返り時の衝撃であると推定される。損傷がない 150 G では跳躍現象は見られない。またダウンヘッドの場合も同様である。これらより H S A の跳躍現象が、H D I での衝撃現象を支配することがわかる。ダウンヘッドの場合は、H S A 自身の慣性力による変形の方に剛性の高いディスクが存在するため、その運動が拘束され大きな衝突は起こらないと考えられる。このようにアップヘッドとダウンヘッドはその挙動が大きく異なるため、耐衝撃性能を論じるときはアップヘッドに着目すべきであると思われる。そこで以後の実験ではアップヘッドを使用した。サスペンションの

跳ね返り速度（ディスクへの衝撃速度）を図 8 に、圧電素子のピーク出力を図 9 に示す。ここではすべて同一のヘッドを使用した。エラー開始加速度・跳ね返り開始（跳躍開始）加速度と、圧電素子出力が上昇し始める加速度はほぼ一致していることがわかる。その加速度以上の挙動においては、加速度の大きさに従って慣性力が大きくなるとともに、H S A の跳躍が大きくなり、それだけディスクに対する跳ね返り速度も大きい。よってヘッドがディスクに与える衝撃力も大きくなる。H S A に作用する慣性力がその押し付け力を越えたときに始めて跳躍するため、押し付け力が大きい方がエラー開始加速度が大きいものと推定される。

3・2 ヘッドサスペンション系の質量の影響

図 10 にさまざまな等価質量を持つ H S A の衝撃試験結果を示す。ここで等価質量とは、図 2 に示すようにサスペンション根元を軸とする H S A の慣性モーメントに等価なヘッド位置での集中質量のことである。同じ押し付け力においては、より大きな慣性力が作用する、つまり等価質量が大きいほどエラー開始加速度は小さいことがわかる。次に以下に記す 2 つの仮定に基づいて、押し付け力と等価質量から計算推定した跳躍開始加速度を表 2 に示す。仮定としては、まず第 1 に H S A の跳躍現象は作用する慣性力が押し付け力を越えたときに起こる、第 2 に作用する慣性力は、H S

図10 損傷に与える H S A の等価質量の影響

表2 跳躍開始加速度の計算値と実験値の比較

Head-Sus ID No.	Mass(g)	L/F mN (gf)	Jump(G) Cal.	Jump(G) Exp.	Error(G) Exp.
1	0.08	147 (15)	188	200	200
1	0.08	98 (10)	125	140	140
1	0.08	34.3 (3.5)	44	60	70
2	0.03	34.3 (3.5)	118	130	150
3	0.022	34.3 (3.5)	161	180	200
4	0.055	34.3 (3.5)	64	80	100

Aの等価慣性質量とその瞬間に作用している加速度の積に等しい、すなわち静的モデルが成立するというものである。実測された跳躍開始加速度やエラー開始加速度とはおおよそ一致していることがわかる。このことは仮定したモデルが妥当であることを意味している。慣性質量の小さい系で跳躍開始加速度とエラー開始加速度で少しずれがあるが、これは質量が小さいため損傷も小さい効果によると思われる。図10における衝撃加速度の増加に対するミッシングパルスの増加の傾きが小さいことも質量が小さい効果によると思われる。このように本実験の範囲においては、押し付け力とHSAの等価質量がわかれば、エラー開始加速度をおおよそ推定できることが明らかになった。

3・3 ディスクサイズ（剛性）の影響

図11にさまざまなサイズのディスクで、衝撃試験を行った結果を示す。ディスクのおおよその剛性は厚みの3乗に比例し半径の2乗に反比例するものと考えられる⁽³⁾。その考えに基づいて各々のディスク剛性を算出し、(95^φ, 1.27^寸)ディスクのそれを1として規格化した。直径95mmのディスクでは、測定半径を23mmに、直径48mmのディスクでは、それを10mmとした。半径の異なるディスクに対しては記録密度が同じになるようにしてミッシングパルスを測定した。エラー開始加速度は大きな差はみられないが、その後の傷の大きさ（エラーの数）は、剛性のより低いディスクの方が小さいことがわかる。さらにそれらのディスクに対して反発係数と硬球によるディスク表面の圧痕の大きさを調べた。測定半径は、衝撃試験のときと同じである。反発係数は、エネルギーの保存度合を表す。エネルギー損失の原因としてはディスク表面の塑性変形によるものと、ディスク自身の振動によるものの主に2つあると思われる。その結果をそ

図11 耐衝撃性能に与えるディスクサイズの影響

図12 反発係数に与えるディスクサイズの影響

図13 硬球によるディスク表面の圧痕大きさ

れぞれ図12, 13に示す。低剛性のディスクほど反発係数が小さく圧痕の大きさも小さいことがわかる。このことは低剛性のディスクほどエネルギー損失が大きい、塑性変形による損失は小さい、つまりディスク振動によるエネルギー損失が大きいと推定される。さらにこの結果から、低剛性のディスクほどヘッドとの衝突時に柔軟に変形するようになり、衝突エネルギーが振動エネルギーとして散逸されるため、耐衝撃性能が高いものと考えられる。

3・4 衝撃作用時間の影響

図14に衝撃作用時間と跳ね返り速度の関係を示す。本実験ではすべて同一のヘッドを使用した。衝撃現象を支配するHSAの跳躍、跳ね返り運動の程度を表す指標として跳ね返り速度（ディスクとの衝突速度）を採用した。跳躍開始（跳ね返り開始）加速度は衝撃作用時間に依らずに対象とするHSAによって一義的に決まることがわかる。この事実は前述した慣性力算出の仮定が妥当であることを支持しているものと思われる。しかし、いったん跳躍してしまうと同じ最大衝撃加速度でもその作用時間が異なると跳ね返り速度が異なることがわかる。図15に単位加速度当たりの跳ね返り速度の増加、すなわち図14における傾きに相当する量を示す。各々の振動系すなわちHSA、ディスクで最大になるところで規格化した。衝撃作用時間は各々の振動系の半固有周期で無次元化した。ここでデ

ディスクの跳ね返り速度は、図6に示すようにディスク歪が0に戻る時の速度である。またHSAの鉛直方向運動とディスクの(0,0)モードの固有振動数をそれぞれ記す。実験時のHSA、ディスクの組合せに依らず、各々の振動系によってほぼ一義的な結果が得られたので各々代表させて結果を記す。HSA、ディスクとも固有振動数、慣性質量によらず定性的にはほぼ一致している。半周期の約1.5倍ぐらいの作用時間でピークをもつという江ら⁽¹⁾の結果とも定性的には一

図14 跳ね返り速度に与える衝撃作用時間の影響

図15 跳ね返り速度に与える衝撃作用時間の影響

図16 損傷に与える衝撃作用時間の影響

致している。また半固有周期の10倍以上の作用時間ではほぼ一定の値に漸近する。実際の衝撃試験結果すなわち損傷の程度を表す指標として飛び跳ねてからの単位加速度当たりのミッシングパルスの増加を図16に示す。これは図5における傾きに相当するものである。横軸は、対象とするHSAの半固有周期で無次元化した作用時間である。その結果、衝撃時間の影響は、ディスクの固有振動数でなく、HSAの固有振動数に依存することがわかる。これは、HSAに比べてディスクはその剛性が高いため、本実験の範囲ではディスクはほとんど空中に固定されて、HSAだけが変形しているという単純モデルで現象が説明できることを意味している。よって同一衝撃加速度での最大の損傷を評価するためには、使用するHSAの鉛直方向半固有周期の約1.5倍の作用時間で試験を行うことが重要であると思われる。しかしながら共通性のある基準としての作用時間を選ぶ場合は、作用時間の影響をあまり受けない半固有周期の10倍以上の時間が妥当であると思われる。

4. HDIにおける耐衝撃性能向上のための試み

4.1 ガラスディスクによる耐衝撃性能の向上

前節までの結果で、衝撃現象はHSAの鉛直方向への跳躍現象が本質的であることが明らかになった。そこでフェールセーフ機能として硬度が高いディスクが有効であると考え、ガラスディスクの使用を試みた。ガラスとアルミの代表的な物性値を表3に示す。密度、ヤング率とも両者は近いことがわかる。図17に示すようにアルミディスクでは、約200Gから目視で損傷が観測され、またエラーも発生し始める。一方ガラスディスクでは、約450Gから目視で損傷が観測されるが、その大きさが非常に小さいためエラーとなるのは約600Gからである。図18にそれぞれの損傷の様子を示す。ガラスディスクの場合にはエラーが発生しない時は軽い傷状または塑性変形を起こしている。一方エラーが発生する場合にはハマ欠け（ガラス特有の具殻状の破壊モード）等を生じるようになる。前述したアルミディスクの場合と比べてその大きさや形態が大きく異なることがわかる。次にビッカース硬度（マイクロビッカース）の結果を図19に示す。ガラスディスクはアルミディスクに比べて硬度が高い。アル

表3 ガラスとアルミの代表的な物性値

	Density Kg/m ³	Young's modulus N/m	Poisson's ratio
Glass	$\times 10^3$ 2.5	$\times 10^{10}$ 7.5	0.22
Aluminum	2.7	7.2	0.33

ミディスクに関しては、ピッカース深さが浅いときは、表面の硬いNiPメッキの影響でその値は大きいですが、深くなるにつれて徐々に下地のアルミの値に近づいてくる。上記までの結果でスパッター膜の影響はみられなかった。このようにガラスディスクは、アルミディスクに比べて基板の硬度がはるかに高く、そのことが耐衝撃性能に影響を及ぼしているものと思われる。また反発係数の結果を図20に示す。両者の物性値から判断すると、ディスク自身の振動によるエネルギー損失はほぼ同じであると思われる。よってガラスディスクの反発係数が高いのは、塑性変形によるエネルギー損失が少ないためと思われる。またアルミディスクの場合でも、NiPメッキを施すことにより硬度が増し、反発係数が上昇するという結果もその推定を支持している。以上のようにガラスディスクを使用することによってアルミディスクに比べて3倍以上耐衝撃性能が向上することが明らかになった。図17に示すように本報告の範囲内では、アルミ基板の最も剛性の低い場

図19 さまざまな基板のピッカース硬度

図20 さまざまな基板の反発係数

図17 アルミディスクとガラスディスクの耐衝撃性能比較

合(48°, 0.508°)よりもガラス基板の最も剛性の高い場合(95°, 1.27°)の方が耐衝撃性能が高く、基板の剛性よりも基板の硬度の方が支配的であることが明らかになった。しかしガラスディスクの場合のみ、硬度が高いため700G以上の加速度では約3分の1の確率で、ヘッドのテール部分にあるトランスデューサ(アルミナ製)が欠落することがわかった。HDI全体の耐衝撃性能を向上させるという点ではディスク硬度を向上するだけでは不十分である。すなわちHSAの跳躍運動自体を低減し、ヘッドディスク間の衝突そのものを小さくすることが重要である。

図18 アルミディスクとガラスディスクの損傷の比較

4・2 HSA運動拘束機構の開発

HSAの跳躍運動を低減すべくHSAの近傍に新たに機構を設置した。その構造を図21に示す。この機構はSUS304材を使用し、3角状の段差を設けることにより薄くて剛性の高い構造を実現した。HSA側には、粘弾性体としてフッソゴムを接着した。これによって衝撃加速度が作用したとき、HSAがフッソゴムに直接衝突することにより、その衝撃を吸収しHSAにダメージを与えずその運動を拘束することができる。耐衝撃性能に与える効果を図22に示す。明らかに損傷の大きさが低減され耐衝撃性能が向上していることがわかる。本機構の構造や材質については、まだ初期段階なので改善の余地があると思われるが、本報告ではその機能の有効性を確認したことに意義をおくことにする。

5. 結論

耐衝撃性能に関して実験的に検討し、また衝突中のHDIに関する挙動を実測することにより以下に示すことが明らかになった。

(1) HDIでの衝撃現象は、跳躍したHSAのディ

図21 HSA運動拘束機構
(新型ストッパー)の概略図

図22 HSA運動拘束機構の効果

スクに対する衝突が支配的な現象である。すなわち跳躍現象が起こって初めて損傷が発生する。

(2) 跳躍現象がダウンヘッドより容易に発生するアップヘッドの方が損傷を与え易い。

(3) 押し付け力とHSAの等価質量によって一義的にエラー開始加速度(跳躍開始加速度)は決定される。

(4) 押し付け力が大きいほどエラー開始加速度が上昇する。

(5) HSAの慣性質量が小さいほど、エラー開始加速度は上昇し、ディスクに対する損傷も小さい。

(6) より剛性が低いディスクほど耐衝撃性能は高い。ヘッドから衝撃を受けるとき、ヘッドとの衝突エネルギーをディスク自身の振動として散逸するためと思われる。

(7) 衝撃作用時間の影響は、HSAに比べて剛性が高く変形の小さいディスクの固有振動には依存せず、HSAの鉛直方向変形の固有振動数と関係がある。

上記の結果を受け耐衝撃性能を向上させる手段を試み以下ことが明らかになった。

(1) フェールセーフ機構としてガラスディスクを試み、アルミディスクに比べて3倍以上の耐衝撃性能をもつことを確認した。その原因は表面硬度が高いことによる。

(2) ディスクだけでなくヘッド等の損傷も考慮しHSAの鉛直方向の運動を拘束、吸収することが本質と考えその機能を実現するため新型運動拘束機構を開発しその有効性を確認した。

ディスクに対する永久傷に関しては、動作時においても上記の結果が定性的に適用できるものと思われる。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたりさまざまな助言を頂いた旭硝子中央研究所の山内英男氏、旭硝子アメリカの鈴木昇二氏に感謝の意を表します。また、論文作成にあたり大阪市立大学土木工学科博士過程の石丸和宏氏、(株)旭コマグの大槻百紀さんに御援助頂いた。ここに感謝の意を表します。

文献

- (1) 江・ほか2名 機講論No920-67(1992), 75
- (2) 光ディスク、磁気ディスク装置の耐震評価基準と信頼性向上に関する研究分科会成果報告書
- (3) 機械工学便覧 A4 材料力学 第5章 平板の曲げ