



HDD用サスペンション(以降サスペンション)は、HDD の磁気記録再生ヘッド(以降スライダー)を支え、且つ、荷 重を与える役割を担っている板ばねである。ところが、サス ペンションは低剛性なばねであるがゆえに、スライダーの浮 上・位置決め特性やショック特性を劣化させうる部品である。



図1 代表的なHDD構造¹⁾

そのため、その設計において最適化が重要であり、製造にお いても非常に高精度な加工が必要となる。

図1に代表的なHDDの構造を示す。スライダーはデータ の記録される円盤状の磁気ディスクの回転する気流によっ て約10nmの高さで浮上している。また、スライダーが接着 固定されたサスペンションは、アームにかしめられており、 VCM (Voice Coil Motor) と後述するDSAによってスライ ダーが磁気ディスクの幅100nm以下のデータトラックの中 心に対して±4~5%の精度で位置決めされる。この浮上特性 と位置決め特性が、HDDでは最も重要であり、温湿度、気圧、 磁気ディスク内のスライダー位置にかかわらず、常に一定で 行われることが要求される。そのため、そのスライダーを支 えるサスペンションは、これら浮上特性、位置決め特性を左 右するキーパーツとして、スライダーに荷重を与えるだけで なく様々な特性が要求される。

2 サスペンション基本構造

一般的なサスペンションは図2のようにベースプレート(以降BP)、ロードビーム(以降LB)、フレキシャー(以降



FX)で構成される。材料は一般的にSUS304H材が使用され、 各部材はレーザースポット溶接にてアセンブリされる。ま た、近年主に採用されている板厚はBPが0.125~0.15mm、 LBが0.025~0.035mm、FXが0.015~0.02mmである。FXに ついては、スライダーの記録再生端子と接続される配線部を 有しており、導体部は銅、絶縁・カバー層はポリイミドで構 成されている。

LBはスライダーに荷重を与えるばねとして機能する部材 で、Z方向剛性の高い部分と低い部分に分かれており、前者 がフランジ部、後者がヒンジ部と呼ばれる。フランジ部はZ 方向剛性を得るための箱曲げ加工が施されていることが多 く、ヒンジ部はばね荷重を得るための荷重曲げが施される。 また、LB先端部には、HDD非動作時にスライダーを磁気 ディスク外に退避させるロードアンロード機構用のタブが成 型される。

FXはスライダーが接着固定される部材で、LBに成型され たディンプルを介してスライダーに荷重を付加する。この スライダーをうねりを持つ磁気ディスクに追従させるべく、 FXのスライダー周りは低剛性に設計される。

このようにサスペンションはLBとFXの二つの板ばねで 構成されている。BPはボスと呼ばれる加工部を有し、かし めボールを通すことでアームにかしめられ、複数のサスペン ションが一つのアームに取り付けられる(図3)。

3 スライダー浮上特性に影響する サスペンションの特性

スライダーの磁気ディスク面側にはABS (Air Bearing Surface) と呼ばれる加工が施されており、磁気ディスクの 回転する気流を受けてスライダーが浮上する。この浮上量が 高ければ、データの記録再生が困難となり、逆に浮上量が低 ければ、スライダーと磁気ディスクが容易に接触しやすくな り、ヘッドの破損や磁気ディスク上のデータ破損の原因とな る。この浮上特性のパラメータは、スライダーに働く荷重、 スライダーに働くトルクの2つであり、これらのコントロー ルをサスペンションが担っている。

まず、スライダーに働く荷重はサスペンションのLBに施 された荷重曲げによってコントロールされている。近年は2 ~2.5gf程度の荷重を与える設定が多いが、その荷重公差は ±0.125gf以下の精度で管理されている。この荷重コントロー ルは加工時の加工精度だけでなく、加工後の修正工程も重要 となっている。この荷重修正はレーザー照射の熱によって行 われる。

一方、スライダーに働くトルクは、図4に示すように、(FX の剛性)×(FXの角度)、(ディンプル位置ずれ)×(荷重)、で 算出される。FX剛性はその設計によって決定され、ピッチ方 向とロール方向で表される。特にピッチ方向の剛性がスライ ダー浮上特性に大きく影響する。FXの角度は、FXのアウト リガー部に施された曲げによってコントロールされ、±0.35 度以下の精度で管理されている。この角度コントロールも荷 重コントロールと同様に、レーザー照射の熱によって調整が 行われる。ディンプル位置ずれは、スライダー中心に荷重が 加わるようゼロとなることが望ましい。当然LBに加工され るディンプルの位置精度が重要であるが、前述したように、 サスペンションはLBとスライダーが接着固定されるFXが アセンブリされる構造であり、その部材同士のアライメント 精度も大きなパラメータとなる。そのため、このアライメント



図3 サスペンション取り付け状態



フレキシャーの剛性と角度

ディンプル位置ずれ

4 スライダー位置決め特性に 影響するサスペンションの特性と 共振コントロール

高容量記録がHDDの強みであり、その記録密度を増やす ことが非常に重要であるが、それはすなわち1bitの大きさを 小さくすることである。例えば、3.5インチHDDの磁気ディ スク1枚で1.5 [TB] (テラバイト)の製品では、その記録密度 は約832 [Gbit/in²]、1bit長は約11nm、1bit幅は約60nm程 度である。HDDの磁気記録再生では、この1bit幅60nmに対 して±3nm程度の精度でスライダーを位置決めすることが求 められる。ところが、スライダーの位置決めには様々な外乱 が入力される。それは、磁気ディスク回転の気流による、ディ スク、アーム、サスペンションの振動、PC向けにおいてはス ピーカの振動や冷却ファンの振動などである。前述したよう に、サスペンションは薄板ばねであり、比較的低剛性である ため、これらの振動がスライダー位置決め精度を悪化させる 要因となる。そこでサスペンションではスライダーの周波数 応答特性の測定及び、ゲインコントロールを行っている。

スライダーの周波数応答特性の測定は図5のように行っ

ている。BP部を加振し、その加振部とスライダーの変位を LDVで測定し周波数に対するゲインを出力する。その例を 図6に示す。また、加振機による加振はせず、磁気ディスク 回転の風乱によるスライダーの振動測定結果の例が図7であ る。また、図8に共振モード形状とBP部を加振したスライ ダーの周波数応答特性のFEM結果を示す。サスペンション の主な共振モードは、1次曲げモード、1次ねじれモード(以 降T1)、2次ねじれモード(以降T2)、Swayモードである。こ のうちねじれモードとSwayモードで大きなゲインが出やす い。Swayモードはサスペンションのメインモードであるた めゲインコントロールはできないが、ねじれモードに関して はゲインコントロールが可能である。

図9にサスペンションセット状態でのLBのFEMモデルの 断面形状を示す。ここには荷重曲げ位置を変えた3種類の断 面形状がプロットされている。図10に図9で示した各モデル のスライダー周波数応答特性のFEM結果を示す。サスペン ションの荷重曲げ位置が異なることによって、T1/T2のゲイ ンが変化していることがわかる。また、図11に別のLB断面 形状を示す。こちらはサグ曲げと呼ばれるLB断面形状を調



図7 磁気ディスク回転の風乱によるスライダーの振動測定結果例



図8 共振モード形状とスライダーの周波数応答特性 FEM 結果



図5 スライダーの周波数応答特性測定原理







図9 荷重曲げ位置を変えたサスペンションLBのFEMモデル断面形状



図10 荷重曲げ位置を変えたスライダーの周波数応答特性FEM結果

整するための曲げ角度を変えている。この場合のスライダー 周波数応答特性のFEM結果を図12に示す。図10同様にT1/ T2ゲインが変化していることがわかる。

このようにスライダーの周波数応答特性のゲインコント ロールはLBの断面形状を調整することによって行うことが でき、実際の製品生産時にもこの断面形状の管理、及びスラ イダーの周波数応答特性のモニタリングを行っている。

<ち、HDD製品動向とHDD容量

近年、フラッシュメモリの高容量化、低価格化が進んでお り、PC向けや高速性を重視したサーバー向けのHDDの出荷 台数は減少傾向にあるが、データセンター等で使用される高 容量タイプのHDDは増加しており、今後も需要は伸びる予 測となっている。現在市場に出ている高容量HDDは、7~9 枚の磁気ディスクで10~14TBの製品であるが、世界で生成 され続けるデータの総量は増える一方であり、HDDの高容 量化の要求は尽きることがない。

HDDの更なる高容量化には記録密度の向上及び磁気ディ



図11 サグ曲げ位置を変えたサスペンションLBのFEMモデル断面

スク枚数増加の二通りの方法が考えられる。記録密度の上昇 は磁気ディスクのデータトラック幅を狭くしデータ密度を上 昇させることとなる。また、磁気ディスク枚数を増やす場合、 限られたスペースに収めるため、磁気ディスク自体の厚み、 あるいはアームの厚みなどの薄型化が必要となるが、これら はHDDの内部、外部振動によるスライダー位置決め特性劣 化を引き起こす。いずれの場合でもより高精度なスライダー 位置決め特性が必要になる。

6 Milli Dual Stage Actuator (以降Milli-DSA)

現在多くのHDDでは、より高精度なスライダー位置決めを 可能とするためにMilli-DSAが採用されている。Milli-DSAと はBP部に圧電セラミック([Pb (Zr・Tr) O₃] 以降PZT)を持 ち、自ら駆動する機構を持ったサスペンションである。図13 にMilli-DSAの一例を示す。このPZTに電圧をかけることに より左右のPZTが伸び縮みし、サスペンション先端のスライ ダーをデータトラックの幅方向に駆動させることができる。 HDDのスライダー位置決めはフィードバック制御によっ



図12 サグ曲げ位置を変えたスライダーの周波数応答特性 FEM 結果



図13 Milli-DSA デザイン例

てサーボコントロールされている。以前のVCMだけでの サーボでは制御帯域は800Hz程度だったのに対し、Milli-DSA使用によって2kHz程度まで改善され、HDDの記録容 量拡大が飛躍的に進んだ。また、このMilli-DSAは2010年か ら量産がスタートしているが、Milli-DSAの登場によってサ スペンションはこれまでの単なるバネという位置づけから 機能部品としてより大きな役割を担うこととなった。この Milli-DSA開発において、新たにPZTという部材を扱うにあ たり、その搭載技術、接着技術、電気的接合技術の開発、信頼 性の確保や不具合の検出方法の確立など、様々な技術開発を 行った結果、次に紹介するMicro-DSAの生産技術開発がス ムーズに行われることとなった。

Micro-DSA

Milli-DSAによって改善されたサーボの制御帯域でも最新のHDDにとっては性能不十分である。近年のHe (ヘリウム) を内部に充填したHDDでは、Heの質量が小さいため、磁気 ディスク回転の気流に起因するスライダー位置決め精度の 悪化はほぼなくなっているものの、ますます進む高容量化で データトラックの幅はより狭くなる一方であり、また、多く の高容量HDDを使用しているデータセンター等では毎分2



図14 Milli-DSAのPZT加振によるスライダーの周波数応答特性FEM 結果(HGAとHSA状態)



図15 Micro-DSA デザイン例

万回転クラスのCPU冷却ファンの振動が10kHz近辺まで観 測され、スライダー位置決め精度を劣化させるからである。

サーボの性能改善にはスライダーの周波数応答特性におい てなるベくゲインのないフラットな波形が求められるが、サ スペンション単体(以降HGA)ではなく、HDDのアームに 組み付けられた状態(以降HSA)での特性が重要になる。

図14にMilli-DSAのHGAとHSA状態での、PZT加振によるスライダーの周波数応答特性のFEM結果を示す。HGAの結果では見えていない大きなゲインが、HSAでは10kHzと 18kHzに観察される。これはアームの共振モードがPZT加振 によって励起されているということである。またこれはPZT により駆動される部分の質量の反力によって発生する。

そこで、図15にデザイン例を示すようなMicro-DSAが開発されている。このMicro-DSAはスライダー搭載部にヒンジ部を有しており、そのヒンジ部とLBのディンプルが接触するようにアセンブリされる。スライダーは図15に示されるように、その一部分が接着固定され、ヒンジ部を支点に駆動できる構造になっている。そしてPZTはスライダーの両脇



図16 PZTによる駆動部質量比較



図 17 Milli-DSA と Micro-DSA の PZT 加振によるスライダー周波数応 答特性 FEM 結果比較(HGA 状態)

に配置される。ただしMilli-DSAと比較してスライダーの駆動変位を得ることが困難となるので、PZTの厚みを薄くし電 圧あたりのPZT変位を大きく、また、PZTのロバスト性を考 慮して全体厚みを確保した、積層タイプのPZTが使用される 場合が多い。

このMicro-DSAは図16で比較するように、PZTによって 質量の大きいLB全体をトラックの幅方向に駆動させるMilli-DSAとは違い、質量の小さいスライダーのみを駆動させるこ とで、アームの共振モードを励起させる加振力を与えないこ とが大きな特徴である。図17にHGA状態、図18にHSA状態 でのMilli-DSAとMicro-DSAのPZT加振によるスライダー の周波数応答特性のFEM結果比較を示す。図17でMilli-DSAは主モードがLBのSwayモードになっているのに対 し、Micro-DSAはスライダーが回転するYawモードが主モー ドになっていること、同じLBが使われているにもかかわら ず、Micro-DSAではLBのSwayモードでゲインが小さいこ とが特徴的である。このMilli-DSAとMicro-DSAの差によっ てHSA状態でのスライダーの周波数応答特性が大きく変化 する。その結果、図18に示すようにMilli-DSAで見えてい た10kHzと18kHzのピークがMicro-DSAでは非常に小さく



図18 Milli-DSAとMicro-DSAのPZT加振によるスライダー周波数応 答特性 FEM 結果比較 (HSA 状態)

なっている。このようにMicro-DSAによってHDDに組み込 んだ状態でのスライダーの周波数応答特性が改善され、サー ボの制御帯域はさらに大きく上昇した。

8 今後のサスペンション開発

HDDのさらなる高容量化に向けて、今後も共振特性の最適 化や高モード化を進めていく必要がある。また、現在はMilli-DSAとMicro-DSAを合わせたTSA (Triple Stage Actuator) や、HDD各社で開発中の熱やMicro Waveによるアシスト記 録に対応したサスペンションの開発も進められている。

ステンレス材料に関しては、絞り加工が難しくデザインが 制約されるため、加工性の良い材料開発が期待される。

参考文献

- 1) 富士通ホームページ, http://www.fujitsu.com/jp/products/ computing/storage/lib-f/tech/beginner/disk/
- 2)日本ばね学会編:ばね(第4版),丸善,(2008),286.

(2018年7月3日受付)