

帯電した車載HDD内絶縁体部品に誘起された Disk電圧と放電メカニズム

宮竹 政実^{*,1}, 橘 敏彰^{*}, 釘屋 文雄^{*}, 兒玉 直樹^{**}

(2014年2月7日受付; 2014年12月8日受理)

Disk Voltage Induced by Triboelectrical Insulator Parts and Discharge Mechanism in Auto Motive HDD

Masami MIYATAKE^{*,1}, Toshiaki TACHIBANA^{*}, Fumio KUGIYA^{*} and Naoki KODAMA^{**}

(Received February 7, 2014; Accepted December 8, 2014)

This paper describes the accurate measurement result of the triboelectrical charge on insulator parts and disk voltage induced by insulator parts in the prototype automotive HDD. Mechanism for static discharge between disk and head is also analyzed. When static discharge occurs, disk defect and head element breakdown can be observed.

1. はじめに

ハードディスクドライブ (HDD: Hard Disk Drive) はデータ記録装置で, Disk と Head によってデータの記録及び再生が行われている. Disk はデータを磁気的に保存するもので, Head は Disk にデータを磁気的に記録, または Disk のデータを検出するものである. データの記録または再生時には, Head は Disk 面上に位置するが 1 nm ~ 10 nm 程度の隙間をもって非接触である.

この Disk と Head の隙間が狭くなり問題となったのが, Head と Disk 間の放電で, Head と Disk 間の電位差が大きくなると放電の発生確率は増加する. この放電が起こると, Head 及び Disk はダメージを受ける. Head 側がダメージを受けると Head の電気的特性の劣化や破壊が発生し, 正常にデータの記録, 再生ができなくなる. Disk 側にダメージを受けると Disk 表面に放電痕ができ, この放電痕部分は磁化されないため, Head の場合と同様に正常にデータの記録, 再生ができなくなる. この様に放電が起こると HDD は大幅な信頼性低下となってしまう¹⁻⁵⁾.

Head と Disk 間の間隔と電位差がある条件になると放電が発生するメカニズムは報告した⁶⁾. この放電を防ぐ

には Head と Disk 間の間隔が 10 nm の場合 Head と Disk 間の電圧を -1 V ~ +1 V にする必要がある事, 放電発生の事例として Motor の不具合によりモータ及び Disk が帯電し, Head と Disk 間で放電した事例については既に報告した⁷⁾.

一般に HDD 内には Disk と Head の他に, Disk を回転させるモータ, Disk の半径方向に Head を移動させる VCM (Voice Coil Motor), Head を Disk 面に Load または Unload の際に Head をスムーズに移動させる Ramp, カバーの裏側に HDD 内外の気圧調整をする Breathing Filter などの部品がある.

本論文では車載 HDD に注目した. 車載 HDD の特徴の一つは, 前述の Breathing Filter が大きいことで, PC (Personal Computer) に使用されているモバイル HDD の Breathing Filter の 20 倍以上の大きさである. これは車載 HDD の環境仕様に適応するためにこの様な設計になっている⁸⁾.

記録容量 30 GB 車載 HDD の開発時に試作した HDD でデータの記録や再生の試験の実施中に突然, 正常にデータの再生ができなくなった. この HDD から Head をとり

キーワード: 放電, 静電誘導, ハードディスクドライブ, 磁気抵抗効果ヘッド, 磁気ディスク

* HGST Japan

(〒252-8588 神奈川県藤沢市桐原町 1 番地)

HGST Japan, Ltd. 1, Kiriara, Fujisawa, Kanagawa 252-0888, Japan

** 山形大学大学院理工学研究科

(〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Yamagata University, 4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

¹ masami.miyataka@hgst.com

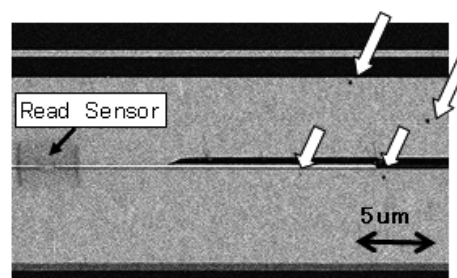


図1 放電痕の SEM 写真 (白抜き矢印)

Fig. 1 SEM image of head after electric discharge. Electric discharge marks were observed at the white arrows.

出し、Head 表面を SEM（Scanning Electron Microscope）で観測したところ図 1 の白抜き矢印に示す部分で黒点の放電痕を確認した。ここは Head の再生素子がある部分である。放電により再生素子に過電流が流れ破壊したと考えられる⁷⁾。放電は Disk と Head 間の電位差が、ある電圧値より大きくなると発生する。図 1 の放電の原因として、絶縁体部品の帯電による静電誘導で Disk の電荷が誘起し、その結果、Disk 電圧が変化し Disk と Head 間の電位差が大きくなったと考えた。本研究では、この静電誘導による Disk 電圧の変化について報告する。

2. 実験方法と結果

2.1 試作HDD内部品の帯電電圧測定

図 2 に、図 1 に示した試作 HDD の内部写真と各部品の帯電電圧を示した。この電圧は、湿度 5%，温度 50℃ の環境下で 2 時間連続してデータの記録や再生を実施した後、表面電圧計（Trek-model 344）を用いて測定した結果である。Ramp は -127 V，Breathing Filter は -150 ～ -208 V，Disk は -0.8 V の電圧が観測された。

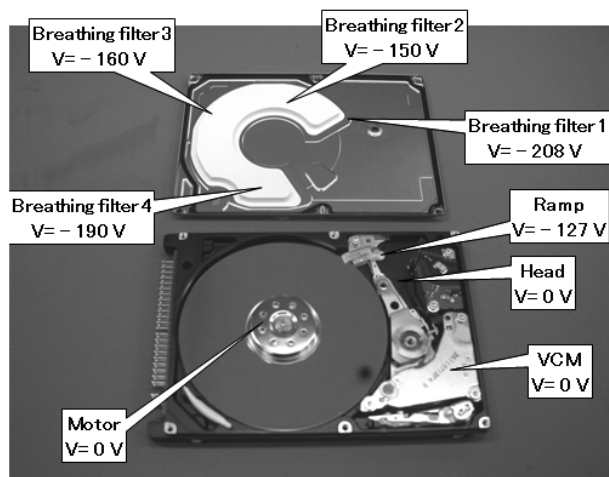


図 2 試作 HDD の部品構成と帯電電圧
Fig. 2 Internal image and electrification voltage of trial production HDD sample.

絶縁体部品の Ramp と Breathing Filter の電圧結果より、これらは帯電していると考えられる。Ramp は Head が Disk 面に Load または Unload をする際に Head と擦る。その結果、Ramp は帯電したと考えた。Ramp の帯電箇所を調査したところ Ramp 表面全体が帯電していることを確認した。HDD 内にはイオン化した Fe や Steel などの塵埃がある。Disk は 4200 rpm で回転をしている事によって Breathing Filter に、これらの塵埃は付着する。その結果 Breathing Filter は帯電したと考えた。Breathing Filter の帯電電圧の測定箇所は、図 2 に示す Breathing

Filter 1, Breathing Filter 2, Breathing Filter 3, Breathing Filter 4 の 4 箇所で行った。

2.2 絶縁体部品のRampとBreathing Filterの帯電電圧

絶縁体部品の Breathing Filter と Ramp の帯電電圧の湿度による影響を測定した。図 3 に Breathing Filter と 2 種類の Ramp の帯電電圧を示す。横軸は湿度、縦軸は帯電電圧である。サンプル数は各 4 個で最大値を示した。測定方法は図 2 と同じ条件であるが、車載 HDD の湿度仕様は 5 ～ 95% より今回の測定では設備の制限より 5%，14%，27%，50%，80% とした。

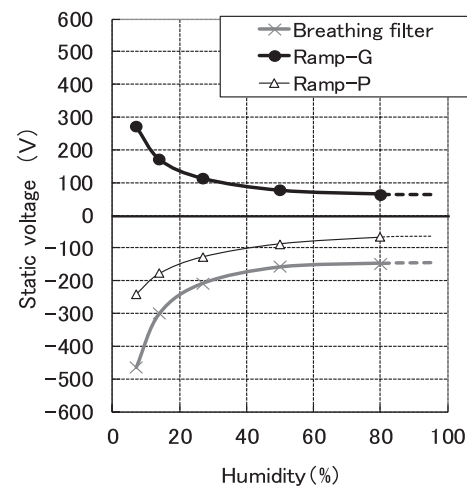


図 3 試作 HDD の Breathing Filter と Ramp の帯電電圧
Fig. 3 Static voltage vs humidity graph of trial production HDD breathing filter and ramps.

2 種類の Ramp を Ramp-G と Ramp-P と称する。Ramp-G は製品の車載 HDD に適用している Ramp である。Ramp-P は試作 HDD に使用した Ramp である。Ramp-G はガラスが含まれおり、Ramp-P はポリエステルが含まれている。帯電の極性は、Breathing Filter と Ramp-P はマイナス極性で Ramp-G はプラス極性である。また Breathing Filter も Ramp-G も Ramp-P も湿度が約 20% 以下になると帯電電圧は急激に大きく変化している事がわかった。

2.3 Disk電圧測定方法

図 4 は車載 HDD の断面図であり、Disk や Head などの部品名称を示した。Disk と Ramp の間隔は 0.2 mm，Disk と Breathing Filter の間隔は 4 mm である。Head は回転している Disk 面上を数 nm で浮上している。

絶縁体部品の帯電による Disk への誘導帯電について調査をした。Disk はモータのハブ部分で固定されている。モータは 2000 年頃から FDB（Fluid Dynamic Bearing）モータが使用されており、これはベアリングを潤滑油による流体軸受けにした構造で回転中の機械的振動を小さくするために適用された。この流体軸受けの潤滑油は図 4

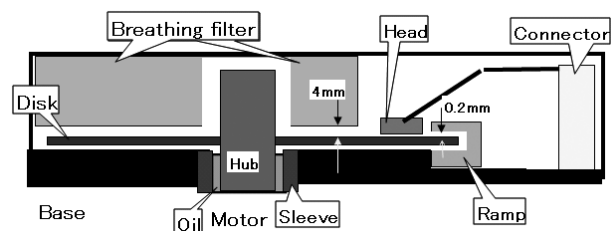


図4 車載HDDの断面図
Fig. 4 Automotive HDD cross section.

に示すようにモータのハブとスリーブ間にある。HDDベースとスリーブは金属接続されているため、ハブとHDDベース間の抵抗は、この潤滑油の抵抗となる。この抵抗をモータ抵抗 R_m と称する。抵抗 R_m は温度によって変化し、常温の 30°C から高温の 85°C では $1\text{ M}\sim 20\text{ M}\Omega$ 、低温の -30°C では $160\text{ M}\Omega$ となる⁷⁾。この抵抗 R_m による Disk 電圧の影響を調査するため、常温で抵抗が約 $1\text{ M}\Omega$ 、 $20\text{ M}\Omega$ 、 $200\text{ M}\Omega$ となっているモータを準備した。これらのモータは異なる潤滑油を使用している。準備した3台のモータの抵抗 R_m を $1\text{ M}\Omega$ 、 $20\text{ M}\Omega$ 、 $200\text{ M}\Omega$ と称する。下記にそれぞれのモータのモータ抵抗と潤滑油の電気的容量の実測した結果を示す。これは 25°C で測定した結果である。3種類の潤滑油の容量を比較するとほとんど同じである事がわかった。

モータ抵抗 $R_m 1\text{ M}\Omega$: 抵抗 = $1.2\text{ M}\Omega$ 、容量 = 450PF

モータ抵抗 $R_m 20\text{ M}\Omega$: 抵抗 = $24\text{ M}\Omega$ 、容量 = 620PF

モータ抵抗 $R_m 200\text{ M}\Omega$: 抵抗 = $190\text{ M}\Omega$ 、容量 = 510PF

緑体部品の帯電電圧と、この帯電による静電誘導で変化する Disk 電圧の測定手順を下記に示す。

- 1) Ramp と Breathing Filter が実装された状態の Disk 電圧を測定した。
- 2) Ramp と Breathing Filter に電圧を印加し Disk 電圧を測定することで放電防止仕様を決めた。
- 3) 放電防止仕様を満足する具体的な対策案を求めた。

2.4 絶縁体部品のRampとBreathing Filter実装によるDisk電圧測定

絶縁体部品の Ramp と Breathing Filter の帯電による静電誘導で Disk 電圧が変化したと考え、Disk 電圧の変化を測定する方法を考案した。図5に測定方法を示す。表面電圧計を用いて測定した。左図は測定時の写真で、右図は測定状態のイメージ図である。

- I 図5(a)は Ramp-G または Ramp-P が実装された状態で Disk 電圧を測定した図である。この状態を mode (I) とする。
- II 図5(b)は Ramp-G または Ramp-P と Breathing Filter が実装された状態で Disk 電圧を測定した図である。

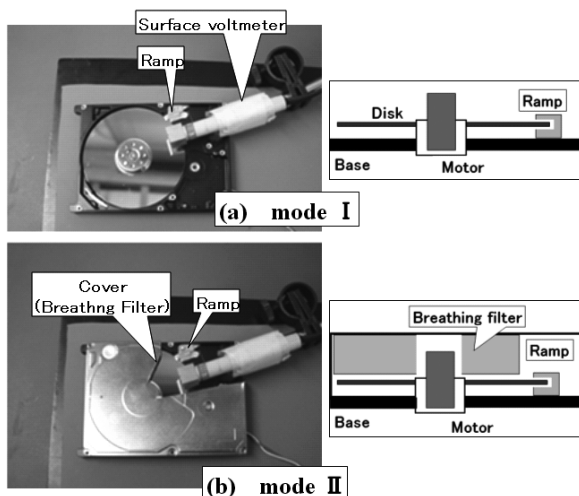


図5 Disk 電圧の測定 (a) Ramp だけ実装された状態。 (b) Ramp と Breathing Filter どちらも実装された状態。

Fig. 5 Disk voltage measuring method. (a) Only Ramp was assembled. (b) Ramp and Breathing filter were assembled.

この状態を mode(II)とする。カバーには測定のため穴を開けている。

2.5 Ramp-P搭載の試作HDDのDisk電圧

図6は試作 HDD に搭載された Ramp-P と Breathing Filter を図5の mode(I), mode(II)の順に変更した場合の Disk の電圧を測定した結果である。湿度 5% 、温度 50°C で測定した。モータ抵抗 R_m は $1\text{ M}\Omega$ 、 $20\text{ M}\Omega$ 、 $200\text{ M}\Omega$ の3種類で行った。横軸は時間である。

0秒～6秒までの6秒間は mode(I)

6秒～22秒までは mode(I) から mode(II) へ変更

22秒～32秒までの10秒間は mode(II)

Mode 変更に要した6秒～22秒までの各16秒間は測定を中断している。各 mode の Disk 電圧の結果を示す。

① mode(I) の Disk 電圧は、Ramp-P がマイナス極性に帯電したため電気分極によりマイナス極性の電位と

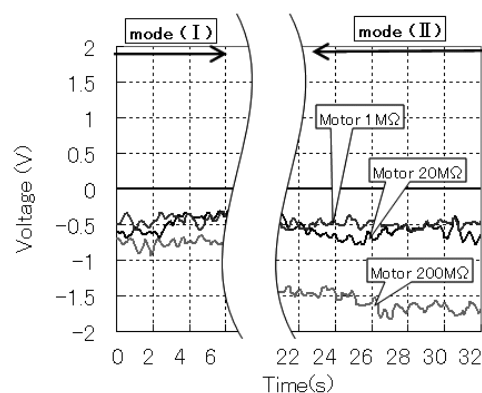


図6 Ramp-P と Breathing Filter 搭載した HDD の Disk 電圧
Fig. 6 Disk voltage in the HDD assembled with Ramp-P and Breathing Filter.

なった。Disk 電圧は、モータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ の場合は -0.8 V 、モータ抵抗 R_m が $1\text{ M}\Omega$ と $20\text{ M}\Omega$ の場合は -0.4 V であった。図 2 で示した Disk 電圧の測定は、モータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ のモータを使用して測定した結果である。

- ② mode(II) の Disk 電圧は、Ramp-P がマイナス極性に帯電し電気分極によりマイナス極性となった状態に Breathing Filter のマイナス極性の帯電による電気分極が加わった状態である。Disk 電圧は、モータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ の場合は -1.7 V となり、 $20\text{ M}\Omega$ の場合は -0.7 V 、 $1\text{ M}\Omega$ の場合は -0.6 V となった。

2.6 Ramp-P搭載の試作HDDのDisk電圧湿度依存性

図 7 は Ramp-P と Breathing Filter が実装された試作 HDD の Disk 電圧を、湿度を変化させて測定した結果である。温度 50°C 、湿度は 5% 、 14% 、 27% 、 50% 、 80% の条件で測定した。横軸は湿度で縦軸は Disk 電圧である。サンプル数は 4 で最大値を示した。図 7(a) は mode (I)、図 7(b) は mode(II) である。各 mode の結果をまとめると下記となる。

- ① 図 7(a) mode(I) の Disk 電圧は、湿度 5% の場合が最も大きな電圧で -0.8 V となった。湿度 14% 以上になると Disk 電圧はほとんど変化していない事がわかった。

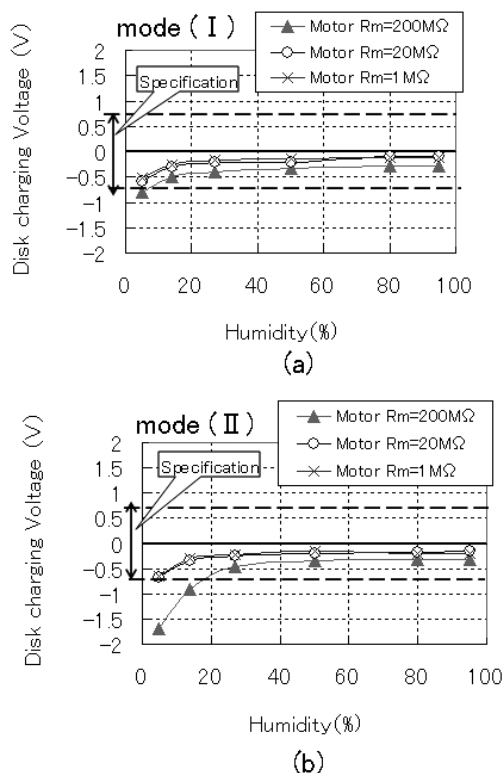


図 7 Ramp-P と Breathing Filter 搭載した HDD の Disk 電圧。(a) mode (I) の状態。(b) mode (II) の状態。

Fig. 7 Disk voltage in the HDD assembled with Ramp-P and Breathing Filter. (a) mode (I). (b) mode (II).

- ② 図 7(b) mode(II) の Disk 電圧は、mode(I) と同様に、湿度 5% の場合が最も大きな電圧で -1.7 V となった。湿度 27% 以上になると Disk 電圧はほとんど変化していない事がわかった。

マイナス極性に帯電した Ramp-P からの静電誘導で Disk 電圧はマイナス極性の電位となった。この状態からマイナス極性に帯電している Breathing Filter からの静電誘導分が Disk に加わることによって、更に Disk 電圧はマイナス極性に大きな電圧になったと考えた。

3. 放電防止のDisk電圧仕様検討

3.1 静電誘導によるDisk電圧仕様値

放電を防止するために静電誘導による Disk 電圧の仕様を下記の方法で求めた。

- 条件 1 Head と Disk 間の放電を防止するには Head と Disk 間の電圧を $-1\text{ V} \sim +1\text{ V}$ にする必要がある⁶⁾。
条件 2 モータの発電電圧や Head と Disk の保護膜間で発生する電位差分を条件 1 の仕様に考慮することで、静電誘導による Disk 電圧の変化分の仕様を求める事ができる^{6,7)}。

以上の方法より放電防止の Disk 電圧の仕様を $-0.7\text{ V} \sim +0.7\text{ V}$ とした。この仕様値を図 7 中に示した。

図 7(b) mode(II) の結果より、モータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ 、湿度 20% 以下の場合、この仕様を満足していない事がわかった。

3.2 絶縁体部品に電圧印加した場合のDisk電圧の評価

3.2.1 絶縁体部品に電圧印加によるDisk電圧測定

Disk 電圧仕様 $-0.7\text{ V} \sim +0.7\text{ V}$ となる Ramp と Breathing Filter の電圧範囲を実測で求めた。測定方法は Ramp を導電性にし、Breathing Filter の表面に銅膜を貼り付け、それぞれに電圧を印加し Disk 電圧が $0.7\text{ V} \sim +0.7\text{ V}$ となる Ramp と Breathing Filter の電圧範囲を実測で求めた。モータはモータ抵抗 R_m の $20\text{ M}\Omega$ と $200\text{ M}\Omega$ の 2 種類で調査をした。調査結果を図 8 に示す。モータ抵抗 R_m が $20\text{ M}\Omega$ の場合は ∇ 印で示し、モータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ の場合は $\times$ 印で示した。Ramp と Breathing Filter の電圧範囲はモータ抵抗 R_m が $20\text{ M}\Omega$ の場合と比べ、モータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ の場合の電圧範囲は狭い事がわかった。

3.2.2 試作HDDのRamp-PとBreathing Filter電圧

図 9 は、図 8 と同じ縦軸と横軸のグラフに、記録容量 30 GB 装置の開発時の試作 HDD に搭載された Breathing Filter と Ramp-P の帯電電圧の測定結果を示した。湿度 5% で測定し、サンプル数は 20 個である。図中に $\triangle$ と $\blacktriangle$ 印で示した。また、図中にモータ抵抗 R_m が $200\text{ M}\Omega$ で

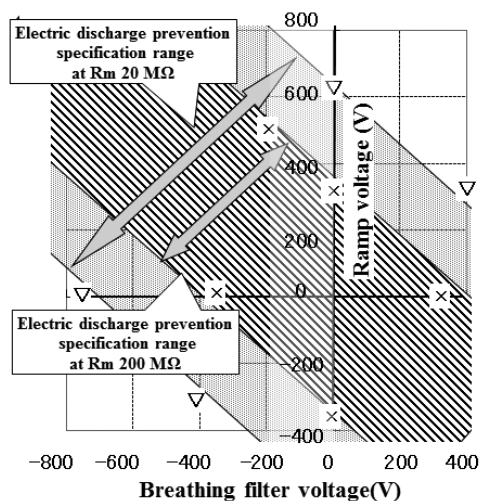


図8 Breathing Filter と Ramp の帯電電圧. ▽と×は電圧印加試験結果.

Fig. 8 Charging voltage results of Ramp and Breathing filter. ▽ & × were measured in voltage charge examination.

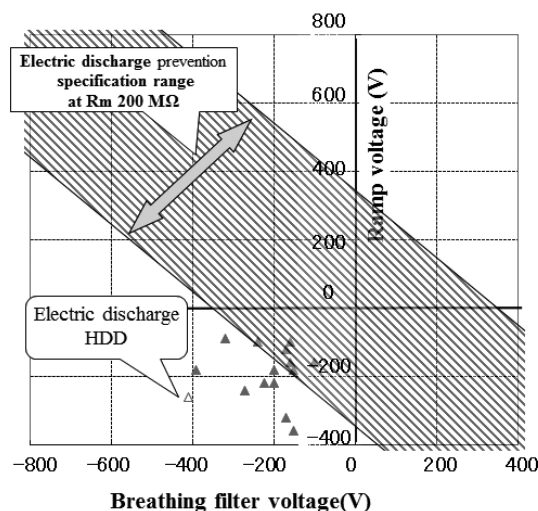


図9 Breathing Filter と Ramp の帯電電圧. △と▲は Ramp-P の電圧印加試験結果.

Fig. 9 Charging voltage results of Ramp and Breathing filter. △ & ▲ were measured in Ramp-P.

Disk 電圧仕様 - 0.7 V ~ + 0.7 V となる Ramp と Breathing Filter の電圧範囲を示した.

測定したサンプルの 50% が放電防止の Breathing Filter と Ramp の電圧範囲を満たしていない事がわかった. また△印は図1の放電痕を確認した HDD のデータである.

3.3 放電対策の検証

マイナス極性に帯電する Ramp-P と、同じマイナス極性に帯電する Breathing Filter からの静電誘導により Disk 電圧はマイナス極性に大きく帯電した. この結果 Head と Disk 間で放電が発生したと考えた. この対策として Ramp を図3に示す様にマイナス極性に帯電する Ramp-P からプラス極性に帯電する Ramp-G に変更する事を検討

した. これより Disk 電圧は, Breathing Filter のマイナス極性と Ramp-G のプラス極性で互いに打ち消す事で Disk 電圧を小さくする事ができないかと考えた.

3.3.1 Ramp-G搭載の製品HDDのDisk電圧

図10は現在製品 HDD に搭載されている Ramp-G と Breathing Filter を図5の mode(I), mode(II)の順に変更した場合の Disk 電圧を測定した結果である. 測定条件は図6と同じである. 各 mode の結果を以下にまとめて記述する.

- ① mode(I)の Disk 電圧は, Ramp-G がプラス極性の帯電したため電気分極によりプラス極性の電位となった. Disk 電圧はモータ抵抗 R_m が 200 M Ω の場合は + 0.8 V, モータ抵抗 R_m が 20 M と 1 M Ω の場合は + 0.4 V であった.
- ② mode(II)の Disk 電圧は, Ramp-G がプラス極性に帯電し電気分極によりプラス極性となった状態に, Breathing Filter のマイナス極性の帯電による電気分極が加わった状態である. モータ抵抗 R_m が 200 M Ω の場合 - 0.6 V, モータ抵抗 R_m が 20 M と 1 M Ω では - 0.18 V となった.

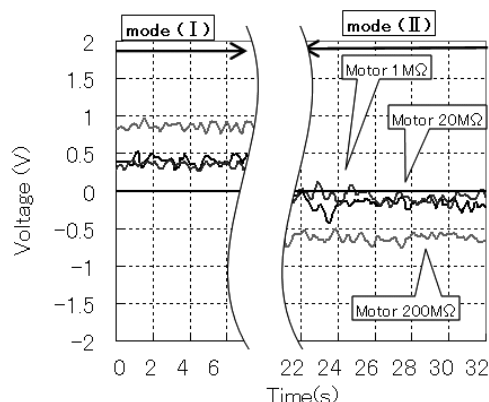


図10 Ramp-G と Breathing Filter 搭載 HDD の Disk 電圧
Fig. 10 Disk voltage in the HDD assembled with Ramp-G and Breathing Filter.

3.3.2 Ramp-G搭載の製品HDDのDisk電圧湿度依存性

図11は Ramp-G と Breathing Filter が実装された状態で Disk 電圧の湿度依存性を測定した結果である. 温度, 湿度, サンプル数, グラフ条件は, 図7と同じで mode(II)の結果を示した. 湿度5%の場合の Disk 電圧が最も大きな電圧で - 0.6 V となった. 湿度依存性から湿度14%以上になる Disk 電圧はほとんど変化していない事がわかった. Disk 電圧仕様 - 0.7 V ~ + 0.7 V を満足している事を確認した.

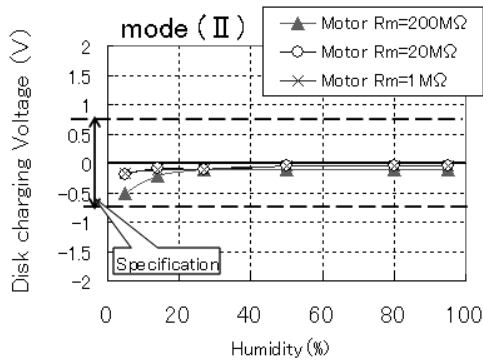


図 11 mode (II) の状態の Ramp-G と Breathing Filter 搭載 HDD の Disk 電圧

Fig. 11 Disk voltage in the HDD assembled with Ramp-G and Breathing Filter at mode (II).

4. 製品HDDのRamp-GとBreathing Filter電圧検証

図 12 は、図 8 と同じ縦軸と横軸のグラフに、製品 HDD の Breathing Filter と Ramp-G の帯電電圧の測定結果を示した。湿度 5% で測定し、サンプル数は 20 個である。図中に●印で示した。また、図中にモータ抵抗 R_m が $200M\Omega$ で Disk 電圧仕様 $-0.7V \sim +0.7V$ となる Ramp と Breathing Filter の電圧範囲を示した。測定したサンプルの全てが放電防止範囲内であることを確認した。

製品車載 HDD には Ramp-G を搭載した。800 万台以上が出荷している HDD において Disk の静電誘導による放電はユーザー使用において発生していない。

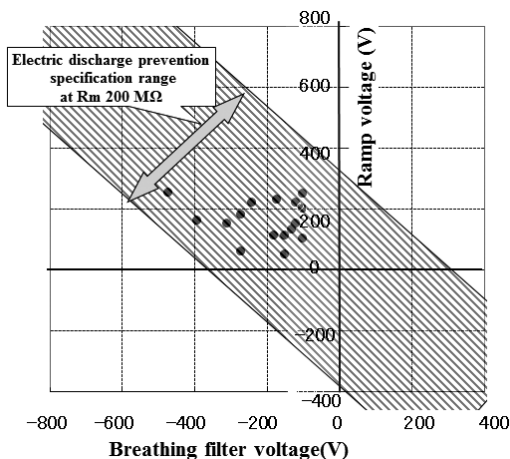


図 12 Breathing Filter と Ramp の帯電電圧。●は Ramp-G の電圧印加試験結果。

Fig. 12 Charging voltage results of Ramp and Breathing filter. ● were measured in Ramp-G.

5. 結論

Head と Disk 間で放電が発生する現象に関して、発生メカニズムを解析して、以下のことを明らかにした。

1. 車載 HDD において摩擦などで帯電した絶縁体部品の静電誘導により Disk に電荷が誘起され、Disk 電圧

が変化した。Disk の近くに実装されている絶縁体部品の Breathing Filter と Ramp の帯電が Disk 電圧の変化に大きく依存する事がわかった。

2. Breathing Filter と Ramp の帯電と Disk の静電誘導の電圧を測定する方法を考案した。
3. Disk 帯電は、モータのハブとスリーブ間にある潤滑油の抵抗に大きく依存する事がわかった。
4. 車載 HDD の試作機で放電が発生した。発生原因を調査すると Ramp の帯電極性がマイナス極性であった。Breathing Filter もマイナス極性に帯電することにより Disk 電圧はマイナス極性で大きく増加し、放電防止仕様を超えた $-1.7V$ の電圧になっている事がわかった。試作 HDD の Head を調査すると放電痕を確認した。
5. 放電対策として Ramp をプラス極性に帯電する Ramp に変更した。Breathing Filter の帯電はマイナス極性よりプラス極性に帯電する Ramp を搭載する事で Disk 電圧の増加を抑える事ができた。これより Disk 電圧は小さくなり、その結果、放電防止仕様を満足する事を検証した。

参考文献

- 1) O. Nakamaru: Houden Hando Book ISBN: 4-88686-308-6 (1999)
- 2) Y. Hiroyasu, Y. Kobayashi, T. Shinomiya and M. Yoshinaga: 1.6Gbps R/W Pre-Amplifier for 3.5 Hard Disk Drives. IEICE Technical Report, **M-102** [645] (2003) 23-27
- 3) S. Hu, Z. Yuan, S. Leong, B. Santoso, C. Ong and B. Liu: Tribo-Charge of Diamond-Like Carbon (DLC) Contact at Slider Disk Interface and Tribo Current Flow Through Disk DLC. IEEE Trans. Magn., **45** (2009) 5073-5076
- 4) N. Li, L. Zheng, Y. Meng and D. B. Bogy: Experimental Study of Head-Disk Interface Flyability and Durability at Sub-1-nm Clearance. IEEE Trans. Magn., **45** (2009) 3624-3627
- 5) S. Moseley and D. B. Bogy: Experimental Evidence of Lubricant Droplet Transfer from Slider to Disk. IEEE Trans., **45** (2009) 867-871
- 6) M. Miyatake and N. Kodama: Discharge Mechanism in HDD. J. Magn, Soc. Jpn, **34** (2010) 39-44
- 7) M. Miyatake, F.Kugiya and N. Kodama: Analysis of discharge mechanism in HDD. IEEE Trans. Device Mater., **10** (2011) 323-327
- 8) N. Kodama, H. Yoshida, N. Kitamura, M. Miyatake, A. Tobari, Y. Nishimura and F. Kugiya: Design concepts and verified performances in automotive HDD. J.Magn, Soc.Jpn, **34** (2010) 474-478