

クラスタノードの高密度実装における振動等の問題について

清水 敏行[†]

建部修見^{††}

工藤知宏^{††}

最近のクラスタ向け計算機、とりわけラックマウント型では、限られた容積に多くの機器が実装されているため、それを冷却するファンの振動によって HDD 等のデータ転送性能が低下する問題が生じていることがわかった。2800～5000rpm の範囲の特定の回転数によって生じる振動で、20～90%の転送速度の低下が見られ、時には HDD が回復不能なダメージをこうむる場合がある。本稿ではこの問題について紹介すると共に、解決の一手法について述べる。

Mechanical Vibration of Cooling Fan makes some problems in High Density Cluster Nodes

TOSHIYUKI SHIMIZU[†] OSAMU TATEBE^{††} TOMOHIRO KUDOH^{††}

Since the recent computers, especially rack-mounted type, have number of components in its limited capacity of the enclosure, the performance of HDD is affected by the mechanical vibration of the fan for cooling it. By vibration of the range of 2800-5000rpm, a transfer rate falls 20 to 90%. And sometimes it causes an unrecoverable damage. This paper introduces such problems, and a way method of solution for them.

1. はじめに

近年のマイクロプロセッサの性能と機能の向上には目覚ましいものがあるが、消費電力の増大と高密度な実装に伴ってより強力な冷却ファンを、場合によっては複数個実装する必要が生じている。その結果、ファンの発する機械的振動がハードディスクドライブ(以下 HDD と略記する)に対して悪影響を与えることが判明した。具体的には転送速度の低下や、場合によっては回復しないダメージを与える等の障害を起こす。

そこで本稿では、上記の現象の発見の経緯と詳細な解析、及び障害を回避する手法について述べる。まず 2 節において本現象の発見の経緯について紹介し、次いで 3 節で定量的な測定のための装置について述べる。更に 4 節では測定の結果とそれに対する考察を行い、併せて障害を回避するための手法とその結果を紹介する。最後に 5 節で結論と今後の課題について述べる。

2. 現象発見の経緯

2.1 2.5" HDD での現象の発見と対策

産業技術総合研究所 グリッド研究センターでは、大規模データ応用技術開発の一環として Gfarm クラスタと呼ぶクラスタを構築している。この Gfarm クラスタは Appro 社製 1224Xi をベースにしたノードを計 80 台有する。個々のノードは、CPU として SMP 構成の Xeon 2.8GHz、1GB DDR-SDRAM、3ware 社

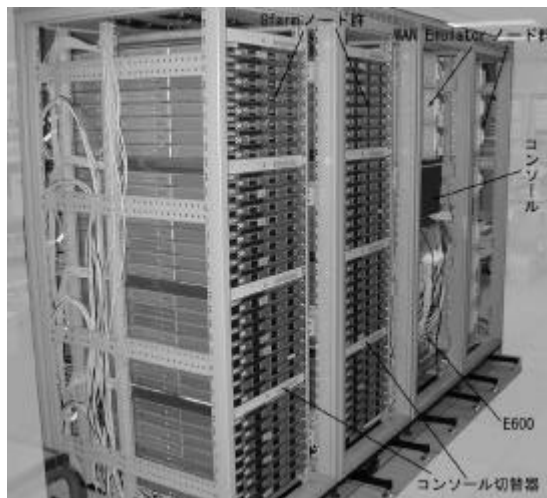


図 1 Gfarm クラスタ外観

[†] (株) シナジェテック SynergeTech, Inc.

^{††} 産総研 AIST

製 7500-4RAID コントローラ、4 台の 3.5" HDD(IDE)(データを格納するための RAID を構成する)、1 台の 2.5" HDD (IDE)(OS 等のシステムを格納する) を 1U サイズの筐体 に実装する。またこれらのコンポーネントを冷却するため、約 4000rpm で回転するシロッコ・ファンを 4 台実装している(図 2 参照)。

これらのノードの OS (RedHat8.0) のインストール作業中に、いくつかのノードでインストールに要する時間が異常に長くかかる現象が見られた。そこで HDD の交換等を行ったところ、以下のような結果となった：

- この現象が見られるのは 80 台中 10 数台である。
- この現象が現れるノードで、HDD を同一モデルの別の HDD と交換しても現象は現れたままである。
- 同様に別のモデルの HDD に交換しても、現象は現れたままである。
- HDD を筐体に固定すると現象が現れ、機械的に浮かせると現象が現れなくなる。また HDD と筐体間の電気的な接触とは無関係である。

以上の所見から、本現象は近傍にある冷却ファンの発する機械的な振動が原因であると考えた。そこで HDD を筐体に固定せず、かつ防振用の網状プラスチック・シートで包んでケーブルの隙間に置いたところ、すべてのノードで HDD の動作は正常となった。即ち HDD に伝わる振動の振幅を減衰させることで、この現象を抑えることができた。

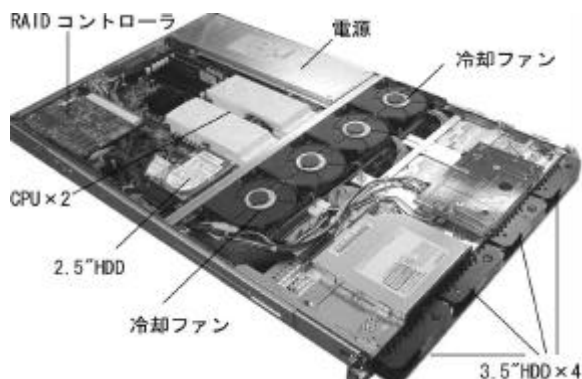


図 2 Gfarm クラスタノード内部

¹ 構成によって所要時間は異なるが、本クラスタの構成では通常は 20 分程度で終わるところを、最長で 5 時間あまりかかった。

2.2 3.5" HDD での現象

3.5" HDD についても全ノードについて検査を行ったところ、同様に転送速度の低下を示すノードが複数現れた。また測定される転送速度は、正常値約 120MB/s に対して 15MB/s ~ 100MB/s とばらつきがあった。

この 3.5" HDD での障害もファンを一時的に浮かす等の実験で振動が原因であることを確認した。ところが 1U 筐体への 3.5" HDD 実装には機械的な余裕が殆どなく、緩衝材等を用いて振動の振幅を制御することができない。

一方、振動の発生源であるファンは DC ブラシレス・モータで駆動されているため、印加する電圧によって回転数を制御することができる²。そのため、ファンの電源回路に直列にダイオードを挿入して印加電圧を下げ、ファンの回転数を抑制する実験を行った。

その結果、現象が消えるノードがある一方、新たに発生するノードが見られた。これは単純に電圧を下げれば回転数が抑制されて HDD への影響を軽減できるとは限らない、即ち振動の HDD への影響が線形ではないことを示唆している。

また磁気ディスク装置のヘッド位置決め系のモデル[2]によれば、HDD 内部のヘッド・アセンブリの周波数特性は数十 Hz 程度の帯域に複数のピークを持つ複雑な周波数特性を示すので、同様の特性が観測できればこの現象の原因を推定できると考えた。

そこで予備的な実験でファンの回転数と転送速度の関係を調べると、特定の回転数の時に転送速度が著しく低下し、その前後では正常に動作することが判明した。ただこの実験ではファンに印加する電圧で回転数を制御したため、電圧の上昇によって回転数と共に振幅も増大してしまい、正確な測定が期待できなかった。そこで次章に述べる測定用の装置を製作してさらに詳しい調査を行うことにした。

3. HDD 振動特性計測システムについて

問題となっているファンの回転数は 4000rpm 前後であるが、一般的な冷却用ファンの回転数が 1500rpm ~ 6000rpm であることを考慮して、20Hz ~ 120Hz の範囲で 0.1 ~ 1G 程度の加速度を与えられる図 4、図 5 のよう

² HDD 等に比べるとはるかに個体差が大きく、同一電圧を印加しても回転数は異なる。

な装置を製作した。

この HDD 振動特性計測システム（以下“本計測システム”と略記する）は、加速度センサを含むフィードバック・ループを形成することで、常に一定の加速度を被測定 HDD に与える（図 3 参照）。そのため HDD の重心直上に 3 軸にあわせて半導体加速度センサ³を設置し、その出力を A/D コンバータ⁴を介して制御用 PC に入力する。これにより印加する加速度をリアルタイムにモニタしつつ、加振側の駆動電圧を調整する。加振側では D/A コンバータ⁵の出力を電力増幅器を通して駆動用スピーカに印加する。そのため周波数等の条件を変更しても、系内の機械的な周波数特性に関わらず常に一定の加速度を与えることができる。



図 5 HDD 振動特性計測システム全景

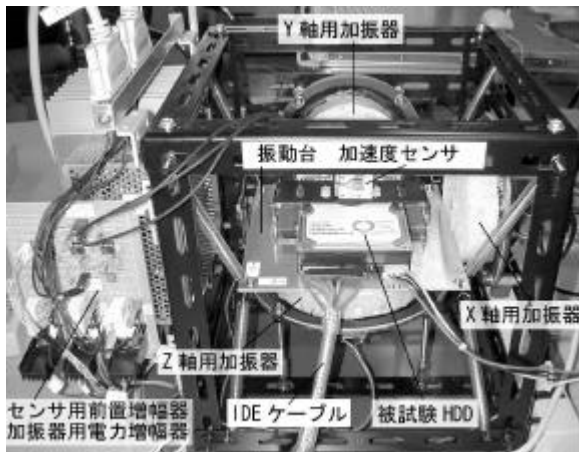


図 4 HDD 振動特性計測システム（振動台）

また本計測システムを制御するソフトウェアは、VisualBasic.NET を用いて開発した。このソフトウェアは、周波数と加速度を任意の範囲及びステップで走査しつつ、被測定 HDD に対してベンチマークを行って転送速度を測定する。また、例えば周波数について 20 ~ 125Hz の範囲を 1Hz 刻みで、また加速度について 0.3 ~ 0.5G の範囲を 0.1G ステップで走査して測定する一連の走査を全て自動で行うことができるようにした⁶。尚、被測定 HDD に対するベンチマークには、Windows 用として一般的な HDBENCH[5]を利用した。

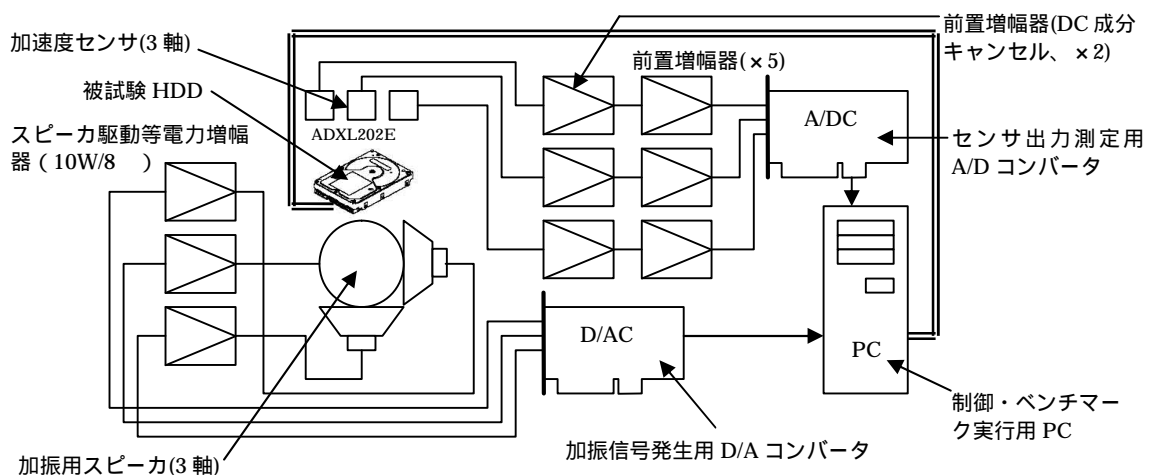


図 3 HDD 振動特性計測システム ブロック図

³ ANALOG DEVICES 社製 ADXL202AE を使用した。

⁴ CONTEC 社製 AD16-16U(PCI)EH を使用した。

⁵ CONTEC 社製 DA12-4(PCI)を使用した。

⁶ 全 318 ポイントの測定に約 4.5 時間を要する。

4. 測定結果

4.1 測定条件

測定は周波数及び加速度を以下の範囲及び分解能で変化させて行った：

- 周波数：20～125Hz、1Hz ステップ
- 加速度：0.3～0.5G、0.1G ステップ
- 測定対象 HDD：表 1 参照

周波数については下限を一般的な冷却用ファンの回転数に、また上限を HDD のスピンドルモータの回転数を少し上回る値にした。また加速度については、通常の HDD の動作時の加速度の許容値が 0.5G であることからこれを上限とした。

また測定対象 HDD は、Gfarm クラスタに搭載した、及びと同様の仕様である、更に比較対照用に一代前の低い面密度の製品、を選んだ。

4.2 測定結果

HDD についての測定結果を図 7 に示す。49Hz、53～57Hz、85Hz 付近、98Hz と 106Hz において、最大で正常値の 10% まで転送速度が低下している。これらの観測値は、先に挙げたヘッド位置決め系のモデルの周波数特性と同様の傾向を示しており、この現象が HDD 内部の機械的な共振によってヘッドの位置決め動作が影響を受けた結果であることを示唆している。振動の影響によってヘッドが目的のトラックを補足するのに要する時間が増加する

表 1 測定対象 HDD 型式

No.	メーカー名	型式	容量	バッファ	回転数
	MAXTOR	6Y200P0	200GB	8MB	7200rpm
	WesternDigital	WD2000JB	200GB	8MB	7200rpm
	Seagate	ST380021A	80GB	2MB	7200rpm
	HGST	IC35L080AVVA07-0	80GB	2MB	7200rpm

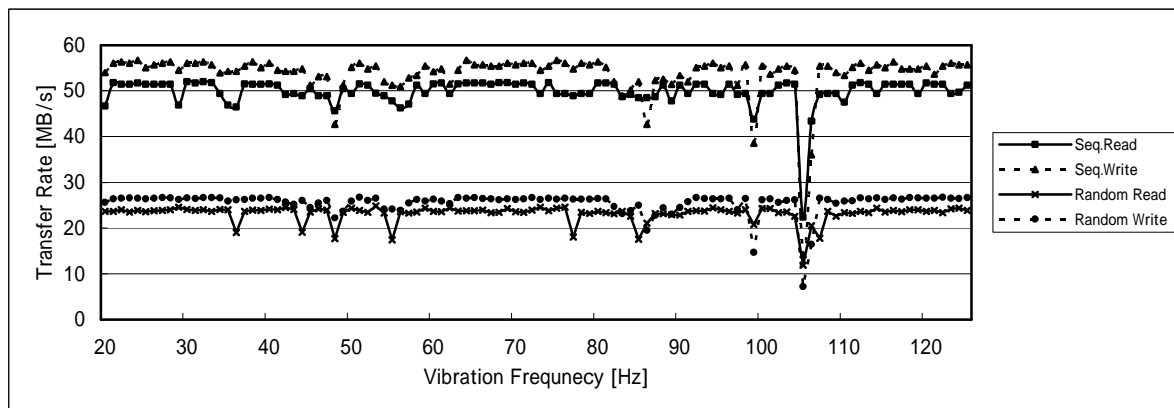


図 7 6Y200P0 に 0.4G の振動を与えた場合の転送速度の周波数特性

現象は[3]でも報告されている。ヘッドの位置決めに要する時間の増加が、転送速度の低下となって現れていると考えられる。

尚、85Hz 近傍の速度低下は、他の部分に比べて負のピークがなだらかであり、別の部分の共振が原因である可能性が考えられる。

図 6 は同じ HDD に対し、加速度の大きさを 0.3～0.5G と変化させた場合の特性 (Sequential Read のみ) を示す。与える加速度が大きくなるにつれ、負のピークが現れる。ただし 105Hz 付近のピークは 0.3G と 0.5G の時のみ現れ、0.4G の時には観測されない。この現象は再現性があり、引き続き調査中である。

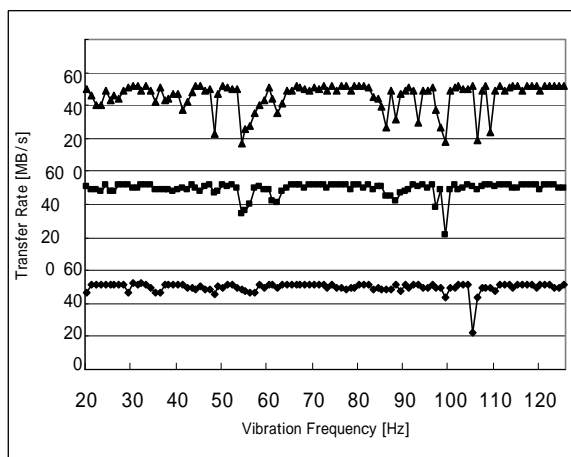


図 6 6Y200P の振動特性(上から 0.5G、0.4G、0.3G)

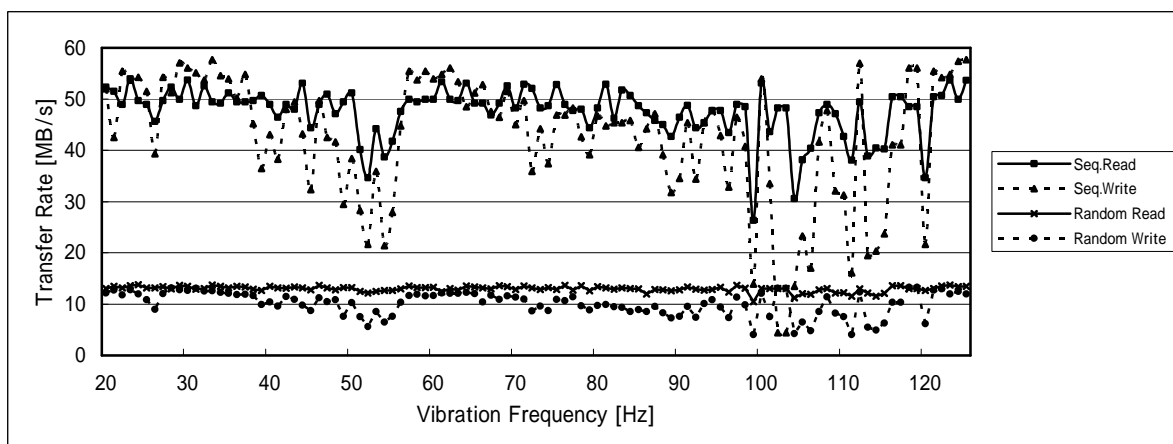


図 8 WD2000JB の周波数特性(0.4G)

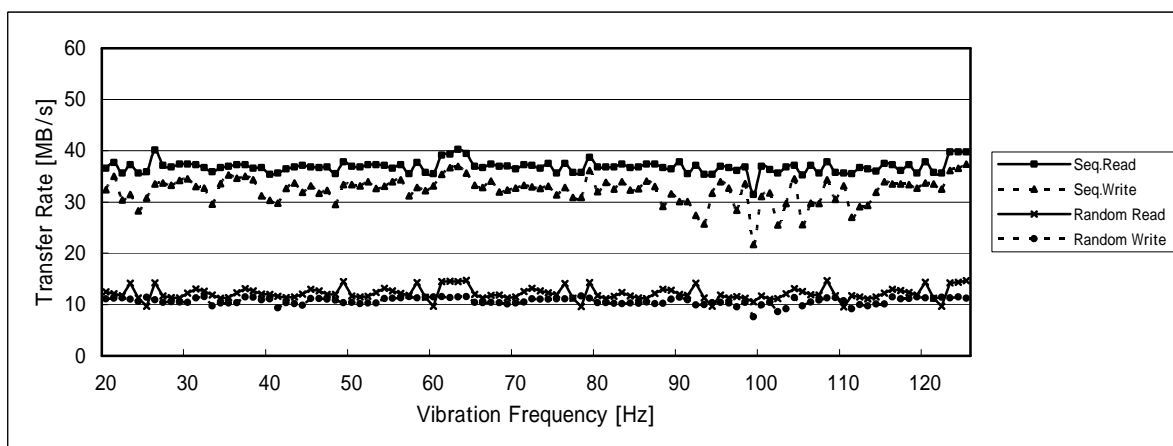


図 9 ST380021A の周波数特性(0.4G)

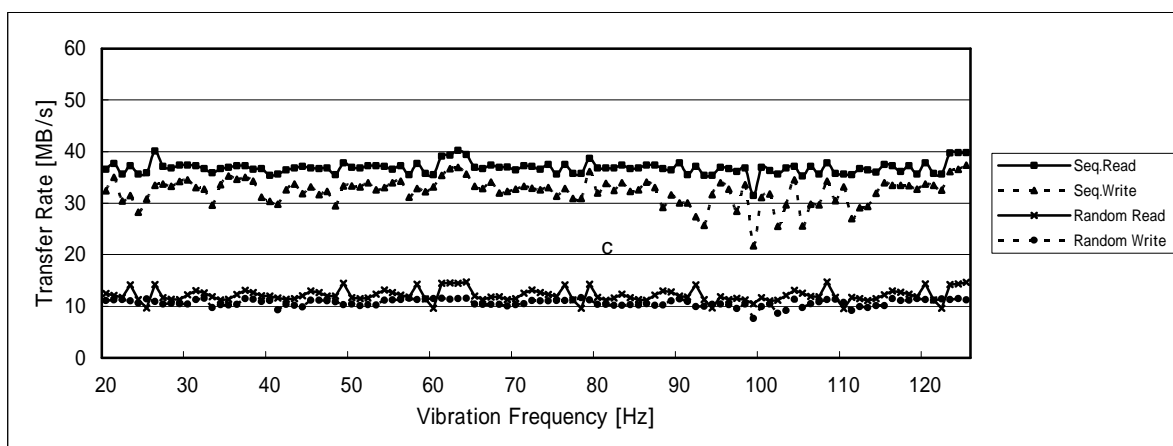


図 10 IC35L080AVVA07-0 の周波数特性(0.4G)

HDD の場合も、図 8 に示すように同様の特性を示す。特に 100Hz 以降では著しく安定度を欠く。

これに対して一世代前の HDD では、90Hz 以上の領域で転送速度の低下は見られるものの、先の 2 機種ほど著しくはない。また 85Hz 以下の領域では、速度の低下は見られない(図 9、図 10 参照)。

尚、この実験に使用した 3 台の 6Y200P0 のうち 2 台が回復不能な障害を起こして使用できなくなった。1 台はいわゆる Bad Block が多発した状態に陥り、もう 1 台は起動後 1~2 時間程度でインターフェイスが反応しなくなった(一旦電源を切って再起動すると再び反応するが、1~2 時間で同様の症状を呈する)。Gfarm クラスタ・ノード内で稼働中の同型の HDD は過去 4 ヶ月間で 2/256 台の故障率であるのに対し、上記の故障率は明らかに異常である。詳しい故障の原因の解析は今後メーカーに依頼する予定である。

5. 結論と今後の課題

本稿では最近の高面密度の HDD が外部から受ける機械的振動に対する脆弱性について明らかにすると共に、独自に開発した測定システムを用いて転送速度の低下の程度を定量的に示した。実測の範囲で HDD によっては、38~57Hz と 80Hz 以上の範囲で、20~90%の転送速度の低下が観測された。またこの問題は、特に振動の周波数が HDD 固有の共振周波数に一致する時顕著に現れ、また単に転送速度の低下だけではなく、HDD 自体に回復不能なダメージを与える恐れがある点で極めて有害である。

従って特に高密度に実装されるクラスタ用計算機では、単に高性能な HDD を実装するだけでは実際の性能を得られない場合があり、HDD を機械的振動から絶縁することが重要である。この場合、振動の発生源は冷却用ファンだけではなく、他の HDD や CD-ROM ドライブ等多数考えられる。もっともそのような振動を完全に遮断することは限られた容積の中では困難で、ある程度の妥協は必要である。本稿で明らかにした範囲では、HDD に与える加速度を 0.3G 未満に抑えることで、振動の影響を抑制することが出来る。ただし 1 世代前の HDD との特性の比較からわかるように、今後期待される面密度の向上は、同時に振動に対す

る脆弱性を増すと考えられる。そのため HDD を実装する上での振動対策は、今後とも重要である。

また振動を抑制するための手法についても工夫の余地がある。従来の対策法は、本稿で述べた 2.5" HDD の場合と同様、ダンパその他の減衰装置によって HDD に到達する振動の振幅を制御しようとするものである。この方針は有害な周波数の振動を全域にわたって抑制できるので極めて有効であるが、物理的な余裕がない場合には実施することが難しい。その場合、振動の発生原因について、回転数等を HDD が影響を受け難い(共振周波数から離れた)帯域に制御することで、振幅の減衰が不十分な場合でも振動の影響を抑制することができると思われる。現在この方針に沿った冷却用ファンの制御機構を開発中である。

謝辞

本稿で述べた内容に関連する作業において、以下の方々の協力を得ました。この場所を借りてお礼申し上げます(順不同): (株)東清システムインテグレーションズ 土屋 尚久 氏、東京リース(株)レンタル事業本部 野村 有助 氏、毛利 朋靖 氏、長谷部 徹 氏、(株)テンアート 二 都築 仁史 氏

参考文献

- [1] 大川良太、寺田和弘、伊藤憲一郎、渡辺茂、今井隆之、谷平一男: HDD 用アクチュエータの振動モード解析、フジクラ技報第 99 号、2000 年 10 月
- [2] 山口高司: 磁気ディスク装置ヘッド位置決め系のモデル、東大モデルデータベース No.tmd00015 (Feb.1999)
- [3] Matthew T. White: Using Rotational Vibration Safeguard (RVS) Control to Minimize Disturbance Effects in Hard Disk Drive, Hitachi Global Storage Technologies White Paper July 2002
- [4] Low Cost $\pm 2g/\pm 10g$ Dual Axis iMEMs Accelerometers with Digital Output, Analog Device
- [5] URL:<http://www.hdbench.net/>