

# ファンの振動が計算機内のハードディスクに与える影響について

清水 敏行<sup>†</sup> 建部 修見<sup>††</sup> 工藤 知宏<sup>††</sup>

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分かった．従来より外部からの振動によって HDD の転送性能が影響を受けることは知られていたが，我々の実験により HDD の仕様以下の強さの振動であっても特定の周波数の振動が連続的に加わると 20～90%の転送速度の低下が見られ，ときには HDD が回復不能なダメージを被る場合があることが明らかとなった．本稿ではこの問題について紹介し，HDD の転送速度の周波数特性を詳細に調べることで原因の推定を試みる．またその結果をふまえて，解決の一手法について述べる．

## The Effects of Cooling Fan Vibration on Hard Disk Drives

TOSHIYUKI SHIMIZU,<sup>†</sup> OSAMU TATEBE<sup>††</sup> and TOMOHIRO KUDOH<sup>††</sup>

Performance of latest HDDs can be affected by the mechanical vibration of the cooling fan. This phenomenon is often observed in recent low height rack-mounted type computers, which have number of components in its limited capacity of the enclosure. The head positioning servo of latest HDD's are designed considering the effect of vibration. However, we found that the transfer rate of HDD is sometimes degraded by the continuous vibration even when the magnitude of the vibration is smaller than the specified allowance. Moreover, such vibration cause an unrecoverable damage in some cases. This paper introduces such phenomena, and tries to investigate the cause of the phenomena by analyzing frequency response characteristics of the HDD transfer rate in detail. This paper also discusses ways to avoid these problems.

### 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，同時に主として CPU によって消費される電力も急速に増大している．たとえば最新の Intel 製サーバ向けプロセッサの 1 つである Intel® Xeon™ 3.2 GHz では，1 CPU あたり熱設計電力で 92 W，最大消費電力は 110 W に達する<sup>1)</sup>．サーバ用途では通常この種のプロセッサを 2 個以上搭載した SMP 構成をとることが多いので，筐体から排出しなければならない熱は，他のコンポーネントの消費する電力も合わせると 250 W～300 W になる．

これに対してサーバの実装方法は，ラックマウント型やブレード型に見られるように個々の筐体がより小型化・高密度化され，さらに多数の筐体をラックに密

着して取り付け，単位床面積あたりの実装密度を向上させる方向にある．そのため個々の筐体の排熱方法は，空冷による限り前面から吸気して後面に内部の熱とともに排気するしかない．ところがこれら筐体の前・後面の面積は最も小さい場合 1U サイズ であり，また開口部が限られ流路抵抗も増大することから，より静圧が大きく吐出量の多い冷却ファンを多くの場合複数個実装する必要が生じている．これにともない，ファンが発生する機械的振動や騒音が増加している．

このようなサーバ型計算機には一般に 1 台以上のハードディスクドライブ（以下 HDD と略記する）が搭載される．これら HDD は年率 60<sup>2)</sup>～100%<sup>4)</sup> で記録密度が向上し，ディスク上で 1 ビットの情報を記憶するのに使われる面積は，すでに 256 M ビット DRAM のセルサイズよりも小さい<sup>2)</sup>．これは HDD 内部のヘッド位置決め制御に DRAM の製造ルールに匹敵する精度が要求されることを意味<sup>2)</sup> しており，磁気ヘッドの機械的共振や高速で回転するディスクによって引き起

<sup>†</sup> 株式会社シナジェテック  
Synergetech, Inc.

<sup>††</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所グリッド研究センター  
Grid Technology Research Center, National Institute of  
Advanced Industrial Science and Technology

こされる風乱、軸受け部の振動等の影響を抑えつつ高速なシーク動作を達成するために様々な制御技術が開発されている<sup>5)~8)</sup>。これらは主として HDD 内部で発生してトラッキング制御に影響を与える振動や、磁気ヘッド・アセンブリが本質的に持つ機械的共振等の振動特性を解明し、フィードバックあるいはフィードフォワード制御によってその影響を抑制しようとするものである。また、文献 9)~11) では RAID 構成における隣接 HDD からの振動の影響について加速度センサを取り付けた HDD を用いて詳細な解析を行うとともに、磁気ヘッドが動作する平面内での回転方向の外乱を加速度センサを用いて検出し、フィードフォワード制御によってその影響を抑制する対策が述べられている。また、文献 12) では、車載用の HDD の耐振性能の向上のための加速度センサによるフィードバック技術とその効果が紹介されている。

このように従来より外部からの振動が HDD に対して悪影響を与えることはよく知られており、対策も施されてきた。また HDD メーカーが公表する仕様書<sup>13)</sup>には、動作時および保存時に許容される振動や衝撃の上限値が試験方法とともに詳細に規定されている。ところが我々の実験では、特定の周波数成分を持つ連続的な振動を与えると、振動の強さが仕様値以内であってもデータ転送速度の低下等の悪影響があり、場合によっては Bad-Block の増加等の恒久的なダメージを被ることが明らかとなった。しかもデータ転送速度の低下の度合いは 90% (本来の 1/10 の速度) にもなることがあり、Bad-Block の増加とともにシステムの性能や機能に対して深刻な影響を及ぼす。そのため本稿では上記実験の詳細について述べ、サーバ型計算機の高密度実装においてはファンの振動を考慮しなくてはならないことを示す。

## 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 クラスタと呼ぶ計算機システムを構築している (図 1)。この Gfarm クラスタは、WAN Emulator Node と呼ぶ 4U サイズのノード 10 台と、Appro 社製 1224Xi をベースにした 1U サイズのノード 80 台からなる。このうち、本稿で述べる問題の発見の発端となった後者のノードの仕様は、下記のとおりである：

- Intel®Xeon™ 2.8 GHz × 2 (SMP 構成)
- 1 GB DDR-SDRAM
- 3ware 社製 7500-4 RAID コントローラ

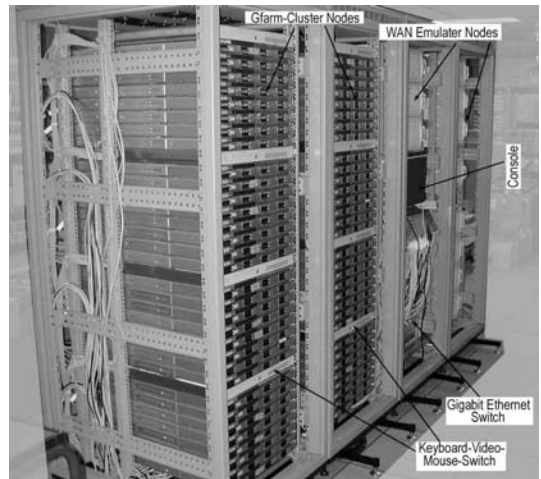


図 1 Gfarm クラスタ外観

Fig. 1 Outside view of Gfarm-Cluster.

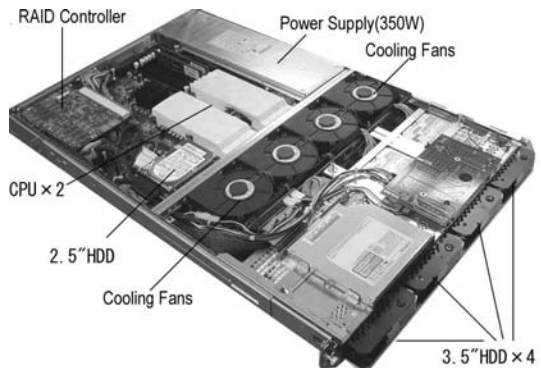


図 2 Gfarm クラスタノード内部

Fig. 2 Inside view of a Gfarm-Cluster node.

- 4 台の 200 GB, 3.5" HDD (IDE) (データを格納するための RAID を構成する)
- 1 台の 40 GB, 2.5" HDD (IDE) (OS 等のシステムを格納する)

以上を 1U サイズの筐体を実装する。またこれらのコンポーネントを冷却するため、4000 ~ 4500 rpm で回転するシロッコ・ファンを 4 台実装している (図 2)。

これらのノードの OS (RedHat 8.0) 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なる現象 (以下、2.5" HDD での現象と呼ぶ) 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：

- 2.5" HDD での現象が見られるのは 80 台中 14 台である。

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 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。

- HDD を同一モデルの別の HDD と交換しても同様の現象が現れる。
- HDD を他のモデルに交換しても同様の現象が現れる。
- HDD を筐体に固定すると現象が現れ、機械的に分離す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。

以上より、2.5" HDD での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。すなわち HDD に伝わる振動の振幅を低減させることで、この現象を抑えることができた。

### 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、同様に転送速度が低下する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 120 MB/s に対して 15 MB/s ~ 100 MB/s とばらつきがあった。この 3.5" HDD でのデータ転送速度の低下現象（以下、本現象と呼ぶ）も、ファンを機械的に分離する等の実験で、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ほとんどなく、緩衝材等を用いて振動を低減させることができない。そこで 2.5" HDD の場合とは異なる方法での解決の可能性を探るため、本現象をより詳細に調べることにした。

まず予備的な実験として、振動の強さを低下させるために振動の発生源であるファンに与える電圧を 0.7 ~ 1.4 V 低下させる実験を行ったところ、本現象が現れなくな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、電圧を下げると振動の強さだけではなく周波数も低下するためと考えられ、本現象の周波数特性が平坦ではなく、周波数軸上で山や谷がある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<sup>14)</sup>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本現象の原因を推定できると考え、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

本現象を詳しく調べるためには、与える振動の強さを一定に保ったままその周波数を変化させる必要がある。また現象が振動の方向に依存するかどうかを調べ



図 3 HDD 振動特性計測システム全景

Fig. 3 Entire view of HDD vibration characteristics measurement system.

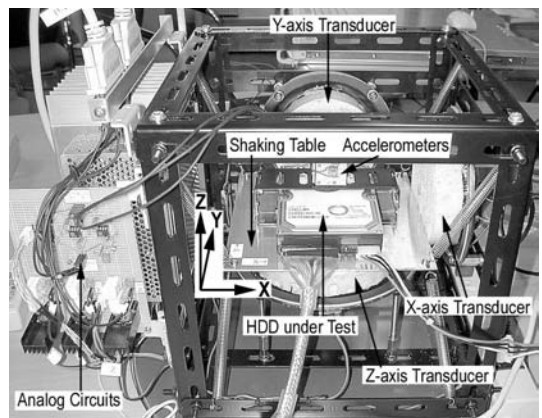


図 4 HDD 振動特性計測システム（振動台）

Fig. 4 HDD vibration characteristics measurement system (shaking table).

ることも重要である。そこで上記のような要求仕様を満たすものとして図 3、図 4 のような装置を製作し「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）と名づけた。

本計測システムの性能は、一般的な冷却用ファンの回転数が 1,500 ~ 6,000 rpm（問題となっているファンの回転数は 4,000 rpm 前後）であることを考慮して、20 ~ 150 Hz の範囲で 0.1 ~ 1 g 程度の加速度を与えられるように設計した。本計測システムは、加速度センサ<sup>16)</sup>を含むフィードバック・ループを形成することで、つねに一定の加速度を被測定 HDD に与える（図 5 参照）。そのため HDD の重心直上に 3 軸にあわせて半導

HDD メーカーの公表する仕様において、振動に関する項目の単位が加速度  $g$  であることから、ここでは振動の大きさの単位として用いる。

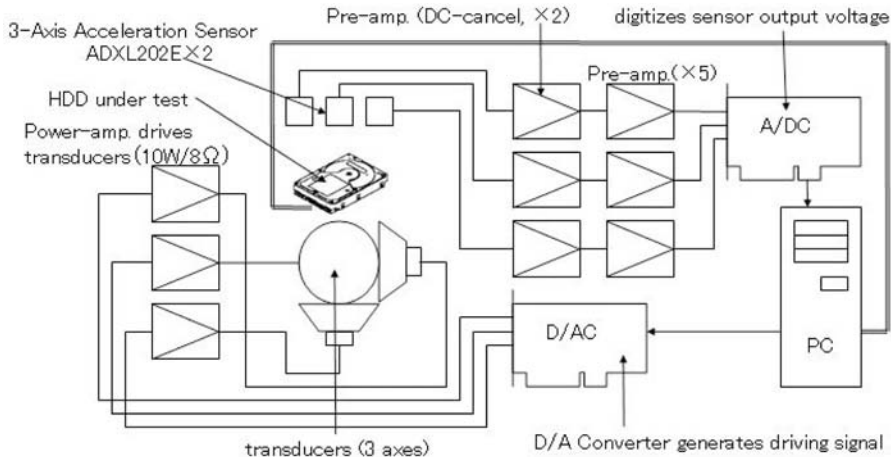


図 5 HDD 振動特性計測システム (ブロック図)

Fig. 5 HDD vibration characteristics measurement system (Block diagram).

表 1 測定対象 HDD

Table 1 HDD as the object of measurement.

No.	Maker	Model	Capacity	TPI	Scope
(1)	MAXTOR	6Y200P0	200 GB	?	problem is found in this model
(2)	Western Digital	WD2000JB	200 GB	?	competitive
(3)	IBM	IC35L120AVVA07-0	120 GB	56700	lower density
(4)	Seagate	ST380021A	80 GB	58000	
(5)	MAXTOR	7Y250P0	250 GB	?	latest model
(6)	HGST	IC35L180AVV207-1	180 GB	72000	
(7)	Seagate	ST3160023A	160 GB	94600	

体加速度センサを設置し、その出力を A/D コンバータを介して制御用 PC に入力する。加速度センサによる測定とフィードバックは周波数や加速度を変えるたびに行う。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かかわらずつねに一定の加速度を与えることができる。なお、加振側の駆動波形は正弦波である。一方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およ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。さらに、たとえば周波数について 20~150 Hz の範囲を 1 Hz 刻みで、加速度について 0.3~0.5 g の範囲を 0.1 g ステップで走査して測定する一連の操作を

すべて自動で行うことができるようにした。なお、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<sup>17)</sup> を利用した。

## 4. 測定結果

### 4.1 測定条件

測定は周波数および加速度を以下の範囲および分解能で変化させて行った：

- 周波数：20~150 Hz, 1 Hz ステップ
- 加速度：0.3~0.5 g, 0.1 g 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十分上回る値にした。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 0.5 g であることからこれを上限としたが、状況に応じてより低い範囲 (0.1~0.3 g) にした。

CONTEC 社製 AD16-16U(PCI)EH を用いた。  
CONTEC 社製 DA12-4(PCI) を用いた。

所要時間は HDD の転送速度にもよるが、現状最速で約 2 時間程度かかる。

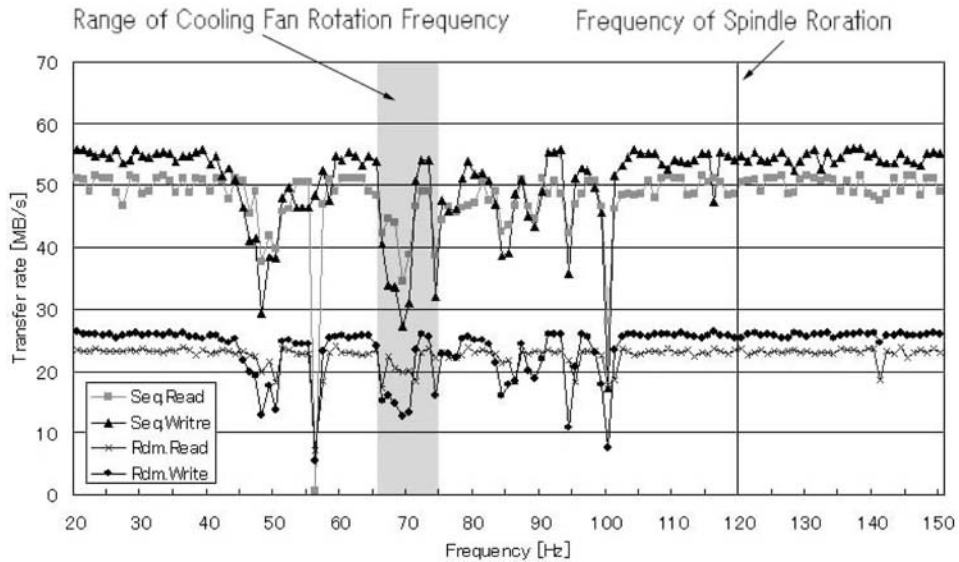


図 6 MAXTOR 6Y200P0 の測定結果 (Z 軸)  
Fig. 6 Characteristics of MAXTOR 6Y200P0 (Z-axis).

測定対象とした HDD はいずれも IDE インタフェースを持ち、スピンドルの回転数が 7,200 rpm のものである。その一覧を表 1 に示す。

なお、以下の説明では振動を印加する 3 つの軸を識別するために、各軸を次のように定める (図 4 参照)：

- X 軸：ディスク平面と平行な面内で外装短軸と平行な方向
- Y 軸：ディスク平面内で X 軸と直交する方向
- Z 軸：ディスク平面に垂直な方向

#### 4.2 200 GB クラスの測定結果

最初に MAXTOR 社製 6Y200P0(1)<sup>1</sup> の Z 軸に 0.3 g の加速度を与えた場合の周波数特性を図 6 に示す。この図において横軸は振動の周波数、縦軸は転送速度である。またグラフは HDBENCH の出力する 4 種類の測定値<sup>2</sup>をプロットする。この測定から、以下のことが分かる：

- いくつかの周波数において急峻な負のピークが見られ、転送速度が 1/2 ~ 1/3 に低下する。
- 転送速度が負のピークに達する周波数と、その近傍の正常に動作する周波数との差は数 Hz と小さい。
- 冷却ファンの回転数の帯域 (66 ~ 75 Hz) に転送速度の低下する周波数が含まれる。

次に、同一の条件で印加する加速度を 0.3 g (下段) ~ 0.5 g (上段) と変化させたときの転送速度の変化を図 7 に示す。ここでは Sequential Read の特性のみを示したが、他の 3 つの測定結果も同様の傾向を示す。印加する加速度が大きくなるほど転送速度の低下の割合が大きくなり、また負のピークの幅が大きくなる。

さらに別の被試験 HDD(2) を用いて<sup>3</sup>、X、Y、Z、の各軸に対して振動を与えたときの特性を図 8 に掲げる、いずれも 0.3 g の大きさの振動を与えたが、Z 軸よりも Y 軸の方がより広い周波数範囲にわたって、より大きな割合で転送速度の低下が見られる。そして特に X 軸については、測定したすべての周波数範囲にわたってきわめて低い転送速度を示す<sup>4</sup>。また上記図 8 は、他メーカーの同一容量のモデルを用いた測定であるが、負のピークの現れる周波数や転送速度低下の程度は異なるものの、特定の周波数で転送速度が低下する、という現象自体は同様に生じている。実際表 1 に掲げたすべての測定対象 HDD で同様の傾向が観測される。したがって、本現象は特定のメーカーやモデルに特有なものではない。

#### 4.3 面密度の低いモデルの場合

前節で本現象の一般性について述べたが、比較的面密度の低い“一世代前の”モデル(3)の場合は軸によ

<sup>1</sup> 括弧内の番号は表 1 中の No. を表す。以下同様。なお、実験に際して回復不能なダメージを受けたため交換した HDD があり、同一型番であっても必ずしも同一個体とは限らない。

<sup>2</sup> sequential read/write, random read/write

<sup>3</sup> 前述の測定に用いた HDD は、X 軸への加振試験の際に破損したため、別の HDD を使わざるをえなかった。

<sup>4</sup> 転送動作自体は完了し、アプリケーション側でエラーは検出されない。

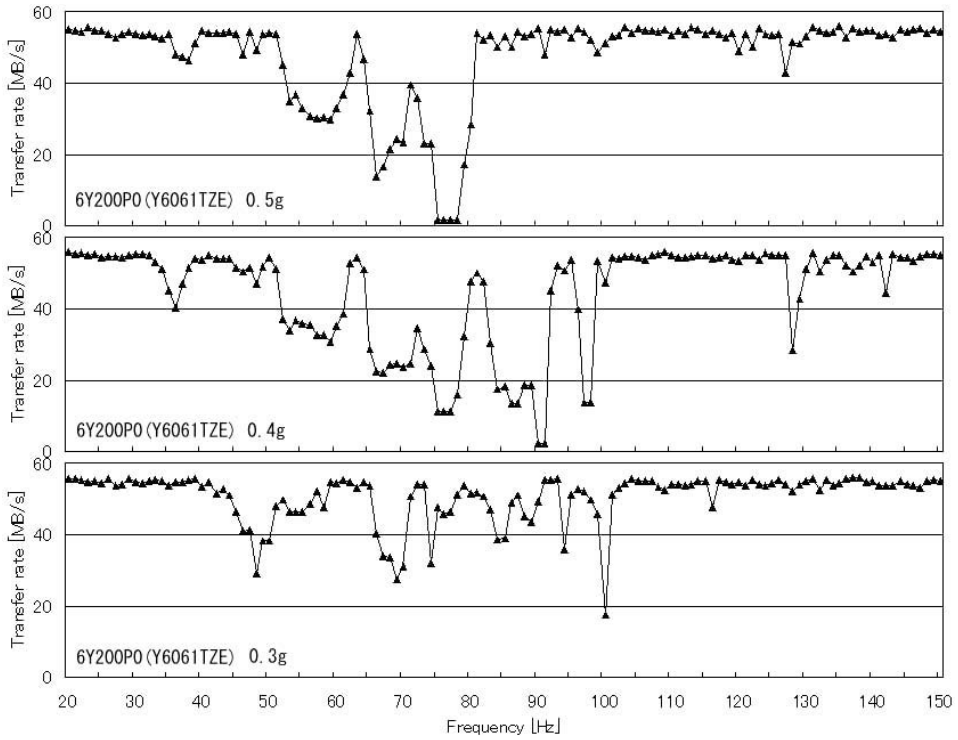


図 7 加速度を変化させた場合の測定結果 (6Y200P0)  
 Fig. 7 Variation of acceleration (6Y200P0).

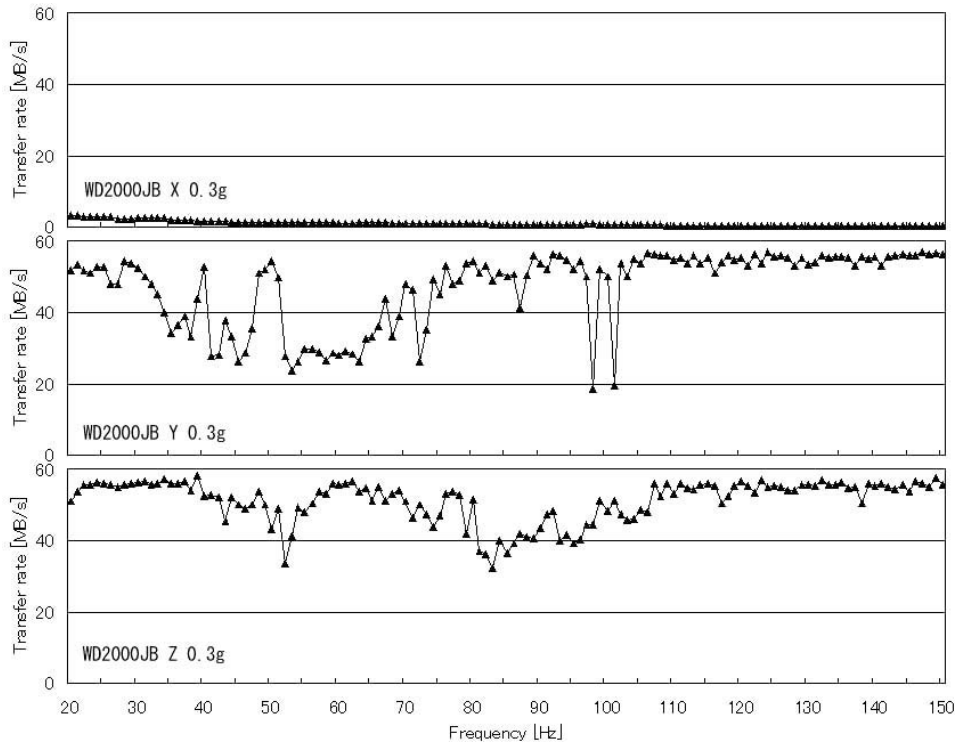


図 8 軸を変化させた場合の測定結果 (WD2000JB)  
 Fig. 8 Variation of axes (WD2000JB).

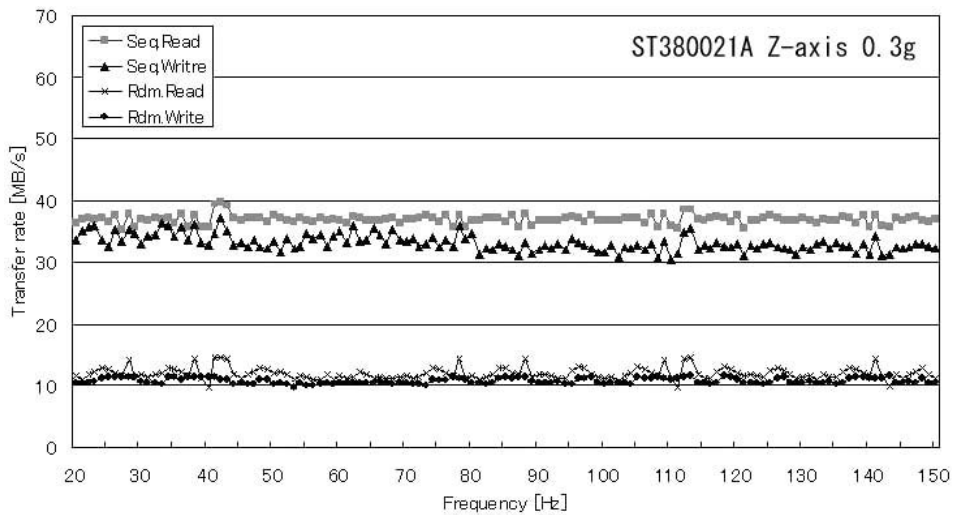


図 9 比較的面密度の低いモデルの測定結果 (ST380021A : Z 軸)  
Fig. 9 Characteristics of lower density model (ST380021A: Z-axis).

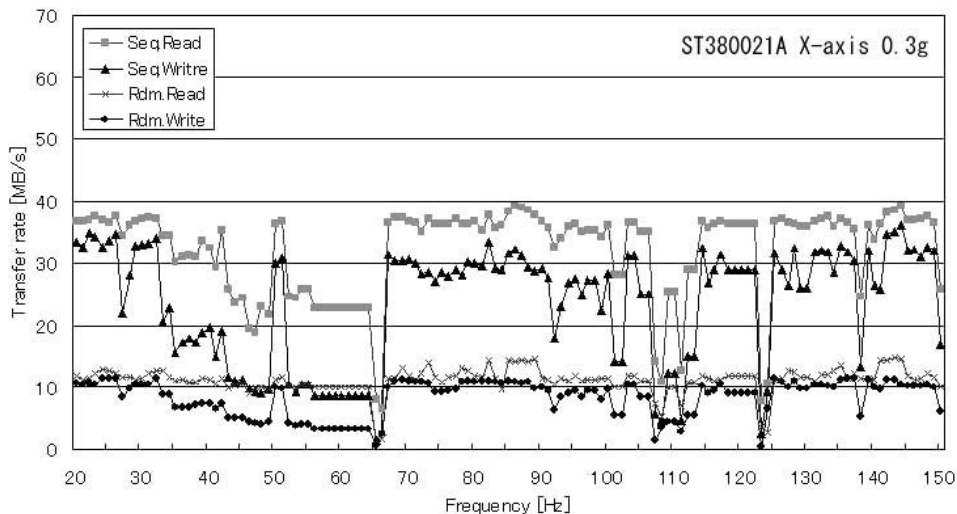


図 10 比較的面密度の低いモデルの測定結果 (ST380021A : X 軸)  
Fig. 10 Characteristics of lower density model (ST380021A: X-axis).

ては現象が見られない場合がある (図 9)。しかしこの場合も X 軸や Y 軸に対して振動を与えると、これまで述べたものと同様、特定の周波数で転送速度の著しい低下を来す (図 10)。

#### 4.4 高面密度のモデルの場合

図 11 は、最新のモデルの 1 つである HGST 製 IC35L180AVV207-1(6) の X 軸の周波数特性である。今までの例より小さな 0.1g の加速度を与えているにもかかわらず、顕著な転送速度の低下が広範囲にわたって生じている。

また測定実施時点で市販品中最大容量である MAXTOR 社製 7Y250P0(5) については、測定中に

Random-Read のみについて転送速度が間欠的に著しく低下する現象が現れるとともに HDD 振動特性計測システムの制御プログラムでも I/O エラーが検出されたため、測定を中止した。この現象は測定に用いた同一番の 2 個の個体で同様に生じ、いずれの場合も最初のうちいったん電源を切ってから再度起動して測定すると正常に復旧したが、これを何度か繰り返すと再起動後も間欠的な転送速度の低下とエラーが見られるようになり、回復しなくなった。

これに対して Seagate 社製 ST3160023A(7) では、X 軸、Y 軸に関しては他と同様転送速度の低下が見られるが、Z 軸に関しては、0.3g ~ 0.5g の範囲で影響

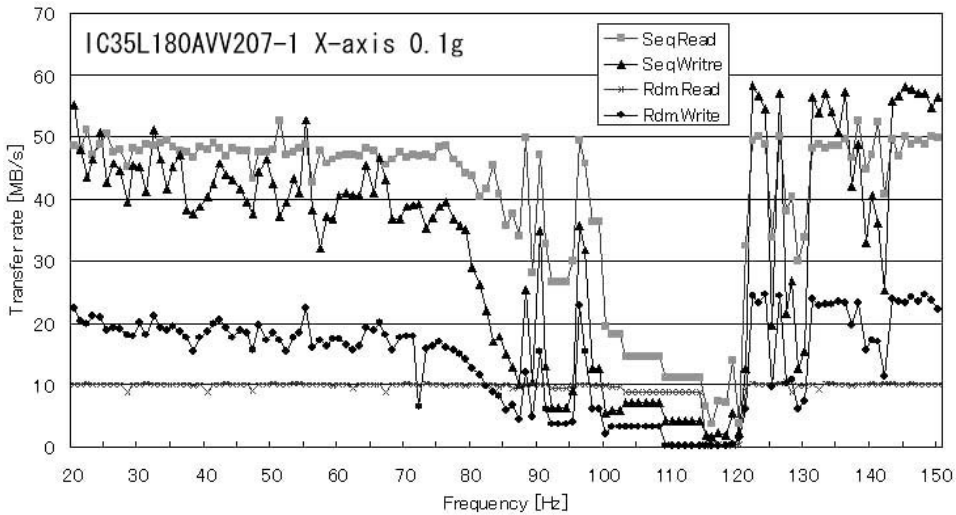


図 11 高密度のモデルの測定結果 (IC35L180AVV207-1: X 軸)

Fig. 11 Characteristics of higher density model (IC35L180AVV207-1: X-axis).

は見られず、正常に動作した。

#### 4.5 S.M.A.R.T. アトリビュートの観測

従来からの文献<sup>(9),12),15)</sup>によれば、HDD に対する外部からの機械的振動の影響によってヘッドが目的のトラックを捕捉するのに要する時間が増加する現象が報告されている。また実験で得られた鋭いピークを持つ周波数特性から、HDD 内部の、おそらく磁気ヘッド・アセンブリに機械的共振が起きていることが推測される。

しかし HDD が動作している最中にどのような現象が起きているかを、外部から直接、しかも詳細な設計情報なしに測定するのはきわめて困難である。そこで現象のより詳しい理解のために、S.M.A.R.T. 機能を利用した。同機能は、本来 HDD 内部の様々なパラメータ (アトリビュートと呼ぶ)、たとえば稼働時間や温度、各種エラー率といった情報を HDD 自体が測定し、あらかじめ定められた閾値を超えると自動的に警告を発生して故障を予報するための機能である (ATA/ATAPI 仕様書<sup>19)</sup>の一部として規定されている)。この機能の中に含まれるアトリビュートの 1 つである ECC corrected count を、転送速度の周波数特性とともに観測した。その様子を図 12 に示す。

本実験には MAXTOR 社製 6Y200P0(1) を用い、X 軸に 0.1 g の振動を加えた。他の実験と同様 HDBENCH による転送速度の計測を行った直後に、ECC によるデータ補正の回数を読み出した。その結果、転送速度の低下と ECC による補正の回数の増加

が非常によく対応していることが分かる。そしてこのことから、少なくとも ECC による補正を必要とするような読み出し時のエラーの増加をともなう現象が生じ、その結果がデータ転送速度の低下となって現れていると考える。

なお、S.M.A.R.T. アトリビュートの中には “Raw Read Error Rate” や “Seek Time Performance” といったより直接的な測定項目がある。しかしこれらの項目の実装の有無は一般にメーカーに一任されており、実際には利用できない場合が多い。今回測定に使用した HDD 群においても、これらの直接的なアトリビュートは実装されていないか、されていてもつねに一定の値しか読み出せず、唯一 MAXTOR の製品において “ECC corrected count” が有意な値を観測できた。また S.M.A.R.T. アトリビュートの読み出しには、フリーウェア “SMART and Simple”<sup>18)</sup> を利用した。

#### 4.6 測定結果のまとめ

HDD 振動特性計測システムを用いて本現象 (3.5" HDD でのデータ転送速度の低下現象) を詳しく調べた結果、以下のような特徴が明らかとなった：

- データ転送速度の低下は、周波数軸上のいくつかの点または範囲にのみ生じる。
- 振動の加速度が大きくなるほど転送速度の低下の割合が大きく、また負のピークの幅が広がる。
- 同一加速度の振動を X, Y, Z 各軸それぞれに与えた場合、速度低下の割合は X 軸が最も大きく、Z 軸が最も小さい。
- 多少の程度の差はあるが、特定のメーカーや型式に



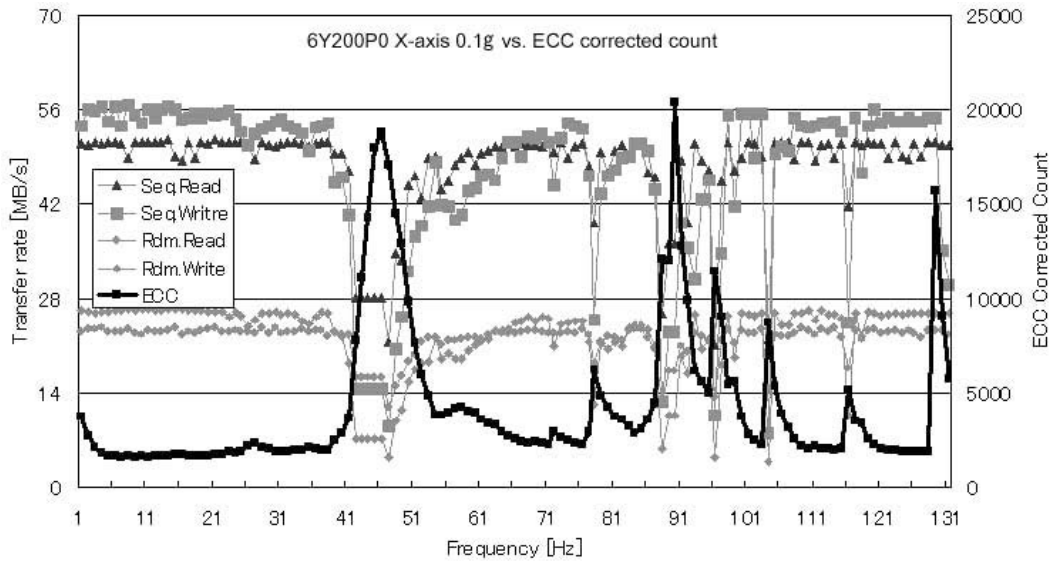


図 12 転送速度と S.M.A.R.T. アトリビュート (ECC corrected count) の対応  
 Fig. 12 Transfer speed vs. S.M.A.R.T. attribute (ECC corrected count).

表 2 測定結果一覧  
 Table 2 Affects of vibration.

Model	X-axis			Y-axis			Z-axis		
	0.1 g	0.2 g	0.3 g	0.3 g	0.4 g	0.5 g	0.3 g	0.4 g	0.5 g
6Y200P0b WD2000JB	x	x	x						
IC35L120AVVA07-0 ST380021A									
7Y250P0 IC35L180AVV207-1 ST3160023A	x	x	x		x	x			

: not affected, : transfer rate is down, : very low transfer rate, x : malfunction

特有の問題ではない。

- 最近のより面密度の高い HDD ほど顕著に現れる傾向がある。
- 単に転送速度が低下するだけでなく、回復しないダメージを被る場合がある。

測定対象としたすべての HDD について、軸と加速度ごとにまとめた影響の有無を表 2 に示す。この表から分かるように、測定したすべての HDD で、1 つ以上の軸に影響が現れている。すなわちここで述べた現象は、程度の多少はあるにせよ、特定のメーカーや型式の HDD に固有の問題ではなく、調べた範囲のすべての HDD において現れることを確認した。

### 5. 考 察

HDD の振動に関する仕様は、たとえば HGST 製品の場合、動作中の振動に関して 5 ~ 500 Hz の範囲の周

波数成分を含み RMS 値で 0.56 ~ 0.67 g の大きさのランダムな振動を与えた場合に回復不能なエラーを生じないこと、また 5 ~ 300 Hz の範囲を 0.5 g の大きさの正弦波で掃引 (0.5 oct/min) した場合にエラーを生じないこと、といった試験方法と値が規定されている。

HDD 内部で磁気ヘッドを所望のトラックに移動しデータを読み出す間その位置を維持するために、ヘッド位置決めサーボ系はヘッドを駆動する VCM (Voice Coil Motor) とヘッドから読み出したトラック位置信号をもとに VCM を制御する回路からなるフィードバック・ループを構成する。そして HDD に外部から外乱振動が加わった場合、目標とするトラックと現在位置との差をなくすように VCM が制御される。このとき、サーボ系によって抑圧可能な外乱振動の周波数は、制御回路および VCM を含めたループ全体の帯域幅によって決定される<sup>21)</sup>。現在のヘッド位置決め系に

おけるサーボの帯域幅は 1.6 kHz 程度はあり<sup>2)</sup>、追従誤差の周波数特性は帯域幅の範囲では周波数の 2 乗に逆比例して誤差が抑圧される<sup>2)</sup>。これらの規定やサーボ系の構造から、本稿で観測した 150 Hz までの帯域の外乱であれば十分に抑圧されるはずである。しかし前章までに述べたように、実際には特定の周波数の振動によってデータ転送速度の低下等の現象が生じている。これは：

- 同一周波数の振動が一定時間継続して加わることに問題がある、
  - 与えた振動の高調波成分が影響している、
- 等の可能性が考えられる。

従来の HDD の振動に関する試験方法では、同一周波数の振動が継続して加わることを想定していない。HDD 振動特性計測システムによる測定では、データ転送速度にもよるが 1 周波数あたり約 1 分の測定時間を要し、その間振動は印加され続けるので、HDD のヘッド位置決めサーボ系に負荷がかかり制御しきれなくなっている可能性がある。

一方、高調波成分については、前述したようにヘッド位置決め系はサーボ帯域幅以下の振動であれば効果的に抑圧できるが、サーボ帯域の上限(クロスオーバー周波数)付近およびそれを越える周波数の外乱振動については効果がない。そのため、HDD 振動特性計測システムが発生する振動に含まれる高調波成分が影響を与えた可能性が考えられる。またそもそもの原因となった冷却用ファンの振動を観測した結果では、少なくとも 1.2 kHz 付近までの帯域にわたって、基本波と同じレベルの高調波成分が含まれていることを確認しているので、ファンに由来する振動によって生じる現象も同様にサーボ帯域を超えた周波数成分が原因である可能性がある(1.2 kHz 以上の周波数については、観測に用いた FFT アナライザの帯域不足のため未確認である)。

HDD 振動特性計測システムの設計にあたっては、磁気ヘッド位置決め系の周波数特性が 100 Hz を超える領域ではほぼ  $-40 \text{ dB/dec}$  でゲインが低下する<sup>14)</sup>ことから十分な帯域があると考えた。しかし得られた結果をふまれば、より高い周波数領域までの駆動・制御能力とともに、周波数スペクトラムもあわせて考慮する必要があり、今後の課題としたい。

## 6. 対 策

以上に述べたように特に高密度に実装されるクラスター用計算機では、単に高性能な HDD を実装するだけでは期待する性能を得られない場合があり、HDD に

伝わる機械的振動を低減させ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。本稿で明らかにした範囲では、HDD に与える加速度を 0.3 g 未満(X 軸については 0.1 g 未満)に抑えることで、振動の影響をある程度抑制することができる。また特に周波数がヘッド位置決め系のサーボ帯域を超える部分については、より厳重な対策が必要である。そのためにはまず第 1 に緩衝材等によって HDD に伝わる振動を低減させることが必要である。

しかし冒頭にも述べたようにサーバ等の実装密度はより高くなる方向にあり、Gfarm クラスタのように緩衝材を取り付ける機械的余裕がない例も見受けられる。その一方、1 世代前の HDD との特性の比較から分かるように、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、振動の低減が十分ではない場合の対策の一案として、本稿で明らかにした転送速度の低下現象の周波数特性を利用したファンの制御方式の一案(以下、本方式と呼ぶ)を図 13 に掲げる。本方式は、HDD がファンの振動の影響を受けていると判断される場合に、ファンに与える電流を調整して振動の周波数を変化させ、影響を軽減することを特徴とする。HDD が振動の影響を受けているかどうかの判断は、S.M.A.R.T. アトリビュートを読み出すことで行う。これはベンチマーク・テストを行って転送速度の低下を検出するよりも高速に判断でき、システム性能に与える影響も小さい。ファンに与える電流の調整には直列に挿入したトランジスタを用い、Main board の SMBus を経由して設定する D/A コンバータによって制御する。一方、制御用のソフトウェアは一定時間ごとに S.M.A.R.T. アト

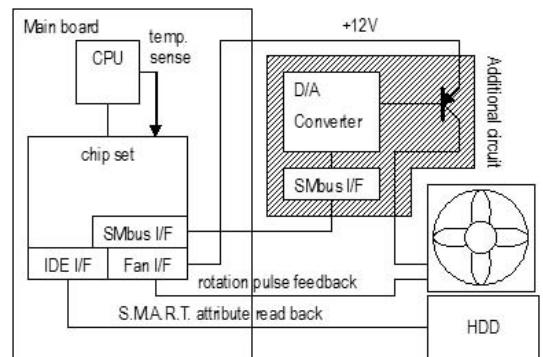


図 13 HDD に与える振動の影響を軽減するファン制御装置の一案  
Fig. 13 A fan controller with less vibration affects to HDD.

リビュートの振動の影響に関する項目と温度を読み出し、ファンに与える電流の制御を行う。また条件が制御可能範囲を超える場合はその旨を表示してオペレータの注意を促す。本方式は他にも以下のような特長を持つ：

- ファンに対しては、最低でも定格の 50～70%の電流が流れるようにし、制御用のソフトウェアが誤動作した場合にもファンが停止して HDD や CPU 等のコンポーネントが過熱することを防ぐ。
- Main board 上のファン制御回路はそのまま使用するので、BIOS によるファンの回転監視、CPU その他の温度監視機能は維持される。
- 制御用ソフトウェアが振動の影響を検出する頻度にもよるが、常時 HDD を監視するため、HDD やファンの特性に経時変化があっても対応可能である。

なお、複数のファンを持つ筐体では同じ電圧を与えてもファンごとに回転数がばらつく可能性があり、本制御方式では十分な対策ができない場合も考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、高密度実装のサーバ機において明らかになった HDD の外部からの機械的振動に対する脆弱性について述べ、独自に開発した測定システムを用いてその周波数特性等を示した。その結果、振動が特定の周波数成分を含む場合に、振動の加速度が HDD の仕様上の制限値以下であってもデータ転送速度が低下したり、場合によっては回復不能なダメージを被ることが分かった。振動による HDD への影響はこれまでも知られており、現在の HDD ではヘッド位置決めサーボ系等で振動の影響を排除する設計がされているが、本稿で示した結果は、一般的なサーバ機で使用する際にも、HDD 内部の振動対策だけでは十分でなく、筐体の実装やファンの制御等で対策を行う必要があることを示している。HDD と振動源との距離を確保する、振動を低減させる緩衝材等を取り付けるといった対策が重要であると考えられる。

謝辞 本研究の実施にあたり、関口智嗣センター長をはじめとする産業技術総合研究所グリッド研究センターの皆様には物心両面で多大なご支援、ご指導をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。また本稿で述べた内容に関連する作業において、以下の方々のご協力を得ました(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、渡邊大輔氏、(株)テナート二都築仁史氏。同

じくこの場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) URL:ftp://download.intel.co.jp/design/xeon/datashts/25213505.pdf
- 2) 小野京右：マストレージのヘッド・媒体位置決め技術，計測自動制御学会学会誌，Vol.41, No.6 (Jun. 2002).
- 3) 山口高司：ハードディスク装置のナノメカトロニクス技術，日本機械学会 IIP2001 情報・知能・精密機械部門講演会講演論文集 (2001.3.26).
- 4) 小林正人：磁気ディスク装置の適応制御，計測自動制御学会学会誌，Vol.41, No.6 (Jun. 2002).
- 5) 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，No.99 (Oct. 2000).
- 6) 熱海武憲，有坂寿洋，清水利彦，山口高司：ハードディスク装置の機構共振制御サーボ技術，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.68, No.675 (Nov. 2002).
- 7) 熱海武憲，中川真介，山口高司，濱田洋介：共振特性を考慮したハードディスク装置の広帯域化サーボ技術，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.67, No.664 (Dec. 2001).
- 8) 山浦 弘：制振サーボ制御，計測自動制御学会学会誌，Vol.41, No.6 (Jun. 2002).
- 9) 有賀敬治：加速度センサを用いた外乱フィードフォワード制御，計測自動制御学会学会誌，Vol.41, No.6 (Jun. 2002).
- 10) Jinzenji, A., Sasamoto, T., Aikawa, K., Yoshida, S. and Aruga, K.: Acceleration Feedforward Control against Rotational Disturbance in Hard Disk Drives, *2000 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference* (2000).
- 11) 石川 寛ほか：HDD 用指向・無指向性加速度センサ，日本機械学会 IIP2002 情報・知能・精密機械部門講演会講演論文集 (2002.3.25).
- 12) 鈴木 博，荒川 豊，高見博道：新市場対応小型磁気ディスク装置技術，東芝レビュー，Vol.57, No.7 (2002).
- 13) Hard disk drive specifications Deskstar 180 GXP, Hitachi Global Storage Technologies (Apr. 2003).
- 14) 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).
- 15) White, M.T.: Using Rotational Vibration Safeguard (RVS) Control to Minimize Disturbance Effects in Hard Disk Drive, *Hitachi Global Storage Technologies White Paper* (July 2002).
- 16) Low Cost  $\pm 2g/\pm 10g$  Dual Axis iMEMs Accelerometers with Digital Output, Analog Devices

- 17) URL:<http://www.hdbench.net/>  
 18) URL:<http://www.beyondlogic.org/solutions/smart/smart.htm>  
 19) URL:<http://www.t13.org>  
 20) 沼里英彦：ヘッド位置決め誤差の解析と精度予測，計測自動制御学会学会誌，Vol.41, No.6 (Jun. 2002).  
 21) 山口高司：磁気ディスク装置の位置決め技術の動向，計測自動制御学会学会誌，Vol.41, No.6 (Jun. 2002).

(平成 15 年 10 月 10 日受付)

(平成 16 年 2 月 1 日採録)



清水 敏行

昭和 33 年生。昭和 56 年大阪電気通信大学工学部電子工学科卒業。同年タケダ理研工業(株)(現(株)アドバンテスト)入社。アナログ・デジタル混載 LSI のテスト装置の開発等に従事。平成元年同社を退職して(株)シナジェテック設立に参加，高速 LSI テスタの開発等に従事。平成 14 年より産業技術総合研究所グリッド研究センターにおいてクラスタ・システムの開発・保守等に従事。電子情報通信学会会員。



建部 修見(正会員)

昭和 44 年生。平成 4 年東京大学理学部情報科学科卒業。平成 9 年同大学大学院理学系研究科情報科学専攻博士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。理学博士。独立行政法人産業技術総合研究所グリッド研究センター。グリッドコンピューティング，並列数値アルゴリズム，並列計算機システムの研究に従事。日本応用数理学会，ACM 各会員。



工藤 知宏(正会員)

1991 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学。東京工科大学講師。助教授を経て，1997 年より新情報処理開発機構並列分散システムアーキテクチャつくば研究室長，2002 年より産業技術総合研究所グリッド研究センター。工学博士。並列処理，通信アーキテクチャに関する研究に従事。