

HDD フレームへの伝達振動に着目した 伝達力感度に基づく I/O 性能の向上

Improvement of I/O Performance Based on Sensitivity of Transfer Force Focused on Vibration Transmission to HDD Frame

精密工学専攻 5 号 内田 公一
Koichi Uchida

1. はじめに

近年、データの長期保存やビッグデータの運用に伴い、多数の HDD (Hard Disk Drive) を搭載するストレージサーバの需要が高まっている。振動は HDD の性能に影響を与えることがよく知られており⁽¹⁾、記録密度の向上が進む近年ではトラック幅が狭くなることで、振動の影響性はより強いものになっている。また、ストレージサーバや搭載するラックは小型、薄型化傾向にあり、剛性の低下に伴う予期せぬガタ振動⁽²⁾が生じることで、HDD への伝達振動が増加し、読み書き性能である I/O (Input/Output) 性能の低下が懸念されている⁽³⁾⁽⁴⁾。そのため、HDD に制振化を施す必要があるが、従来手法は読み書きを行うヘッドやアームへの対策⁽⁵⁾が多く、設計後では予期せぬ振動問題に対応できない場合がある。

本研究では、HDD 設計後を想定し、ヘッドやアームの設計変更ではなく HDD を支持するフレーム (以下、HDD フレーム) の伝達振動に着目し、制振化を施すことで 1 秒間当たりの I/O 性能である IOPS (Input Output Per Second) の向上を図る。まず、HDD への振動の伝達条件と IOPS 低下の関係性を加振実験により把握し、制振化すべき振動方向を決定する。また、HDD のアームとディスクの振動モードを計測することで IOPS が低下する周波数を予測し、加振周波数と IOPS 低下の関係性を把握することで問題となる周波数を明らかにする。次に、ストレージサーバ本体、HDD フレーム、HDD を一つの振動伝達系として捉え、実稼働伝達経路解析⁽⁶⁾ (以下、OPA (Operational transfer Path Analysis)) により HDD フレームの振動伝達経路の寄与率を算出し、問題となる伝達振動を明らかにする。さらに、動吸振器に着目し設置位置を伝達力感度⁽⁷⁾に基づいて定める手法を提案し、その有効性を数値解析により把握する。そして、HDD フレームを対象として伝達力感度に基づき動吸振器の設置位置を定めることで、HDD への伝達振動を低減し IOPS の向上を図る。

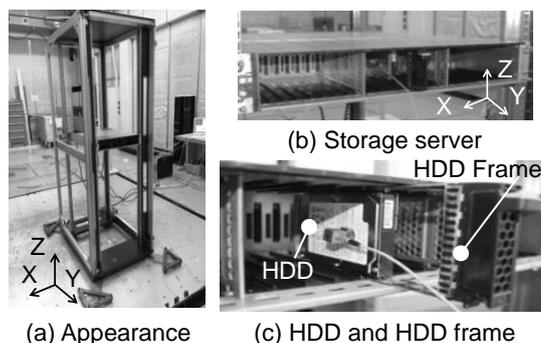
2. I/O 性能低下の要因把握

本章では、IOPS が低下する振動伝達条件を明らかにし、低下する要因を HDD への伝達振動により考察する。さらに、HDD のアームおよびディスクの振動モードにより IOPS 低下が生じる周波数を予測し、加振周波数を変化させた場合における IOPS を計測することで問題となる周波数を特定する。

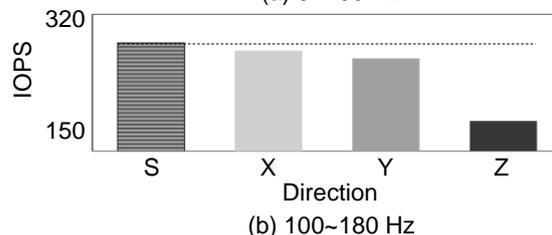
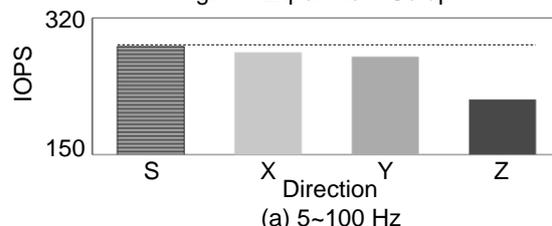
2.1 外来振動と I/O 性能低下

Fig. 1(a) に実験セットアップの外観、Fig. 1(b) にストレージサーバ、Fig. 1(c) に HDD と HDD フレームを示す。ラックを加振台に固定し、日常に発生する環境振動を考慮して、加振周波数 5~100 Hz、100~180 Hz、加速度実効値 0.2 Grms のランダム波を入力する。

Fig. 2(a) に 5~100 Hz、Fig. 2(b) に 100~180 Hz で加振した場合の加振方向と IOPS の関係を示し、振動が無い状態で計測した IOPS を基準値 S とする。メーカーが定める IOPS 低下の許容率 10% 以内の保障に対し、X、Y 方向加振時では IOPS



(a) Appearance (b) Storage server (c) HDD and HDD frame
Fig. 1 Experiment Setup



(a) 5~100 Hz (b) 100~180 Hz
Fig. 2 Relationship between excitation direction and I/O performance

は 4% 前後の低下で影響がないことがわかる。しかし、Z 方向加振時では、IOPS が著しく低下し許容率を超え、大きな影響を与える。したがって、Z 方向振動を制振化することで I/O 性能の向上が図れると考え、以降では Z 方向振動が筐体に加わる場合に注目する。

Fig. 3(a) に 5~100 Hz、Fig. 3(b) に 100~180 Hz で X、Y、Z 方向を加振した場合の HDD の Z 方向加速度応答を示す。Z 方向加振時に各加振周波数より高い周波数が励起されており、この要因としてラックのガタ振動により衝撃的な 2 次加振が起こり、高周波振動を励起したと考えられる。特に、100~180 Hz で加振した場合に高周波振動の励起が顕著であり、IOPS 低下も 5~100 Hz の場合よりも大きい。近年、高周波振動が HDD の性能に影響することが示唆され、従来では問題とされなかった 1000 Hz 以上の振動が性能に影響を与えることが確認されている⁽⁸⁾。そのため、ラックのガタ振動により励起された高周波振動が I/O 性能低下の要因であり、ラックの剛性を向上させることで改善できると考えられる。しかし、ユーザによって使用するラックが異なり、根本的な解決にはならないことから、HDD フレームを介して HDD へ伝達する高

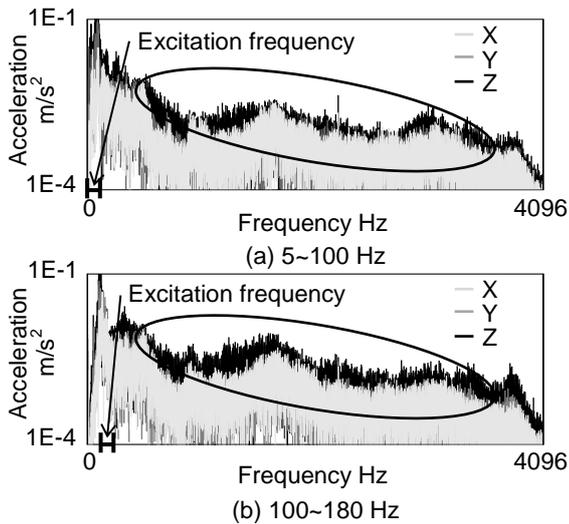


Fig. 3 Relationship between excitation direction and output of Z direction

周波振動の制振化を図る。

2.2 HDD の内部部品の振動モード計測

HDD のアーム、ディスクに設けた計 11 点の評価点より伝達関数を計測し、振動モードを求める。アームやディスクは質量が非常に軽量なため、非接触のレーザ振動計を用いて計測する。しかし、実稼働中のアームやディスクは高速で動作し、レーザでの伝達関数の計測が困難なため、非稼働中でも大きな固有振動数の変化はないと仮定し、非稼働中に計測する。

Fig. 4 に 2123 Hz の振動モードを示す。この振動モードはアームとディスクが面外方向に大きく振動しており、読み書きに大きな影響を与えると考えられ、2123 Hz 付近で顕著に IOPS が低下すると推察できる。

2.3 実稼働中における I/O 性能低下周波数の特定

Fig. 5 にストレージサーバ底面に設けた加振点を示し、実稼働中に加振器により、Fig. 6 に示す 1500~4000 Hz のチャープ波を入力した。なお、以降のストレージサーバの加振点

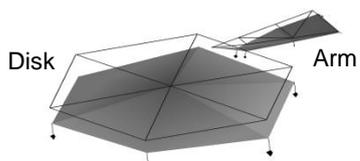


Fig. 4 Mode shape of 2123 Hz



(a) Appearance (b) Input point
Fig. 5 Input point

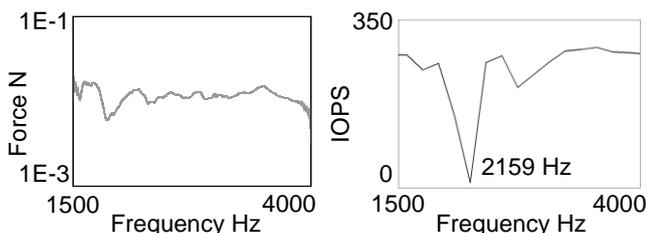


Fig. 6 Input wave of 1500~4000 Hz

Fig. 7 Variation of IOPS

も Fig. 5 と同様である。

Fig. 7 に IOPS の周波数変動を示す。IOPS は 2159 Hz で大きく低下し、2.2 節で得た固有振動数付近のため、この振動が IOPS 低下に起因すると考えられる。したがって、以降では 2159 Hz に着目し制振化を行う。

3. HDD フレームの制振箇所の特定

本章では、OPA を用いて HDD フレームと HDD 間の振動伝達経路の寄与率を算出し、制振化を行う伝達経路を特定する。

3.1 実稼働伝達経路解析の概要

OPA は振動伝達経路の振動エネルギー寄与を求める手法の一つであり、振動源からターゲット点に伝わる振動を伝達経路の寄与率として分離し分析できる。OPA は短時間で寄与率が算出できるメリットがある一方で、経路を見逃して計算すると誤った結果になるデメリットがある。本研究で用いる HDD フレームの振動伝達経路は明確なため、OPA を用いる。

3.2 HDD フレームの伝達経路

Fig. 8 に HDD フレームと HDD 間の伝達経路およびターゲット点を示す。伝達経路は HDD フレームの突起と HDD のねじ穴が接する経路 A, B, D, E およびコネクタが接続する経路 C である。ターゲット点はアームやディスクに設けるのが困難なため、アーム直上の HDD 本体表面に設け、外来振動として加振器より Fig. 9 に示す 0~4000 Hz のチャープ波を入力し、I/O 性能低下に起因する Z 方向振動における各経路の X, Y, Z 方向振動の寄与率を算出する。

3.3 伝達振動の経路寄与の算出

Fig. 10 に OPA により算出した経路寄与を示す。2159 Hz の経路寄与が高いのは経路 B の Z 方向振動であるため、これを対策することで HDD への伝達振動が低減し、I/O 性能が向上すると考えられる。したがって、以降では経路 B の Z 方向振動に着目し、制振化を行う。

4. 伝達力感度に基づく制振化

本章では、伝達力感度に基づいた制振化手法を検討する。また、重量やコストを考慮し、軽量で制振効果が高い動吸振

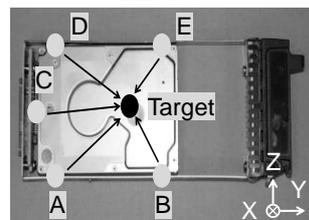


Fig. 8 Transfer path and target point

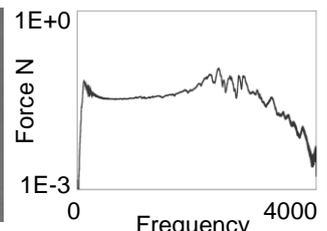


Fig. 9 Input wave of 0~4000 Hz

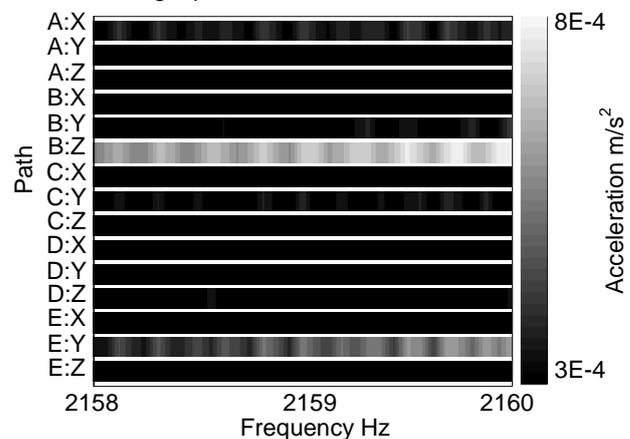


Fig. 10 Result of OPA

器に着目し、伝達力感度と組み合わせ、HDD フレームを介して HDD に伝達する振動を低減し、I/O 性能の向上を図る。

4.1 伝達力感度の概要

伝達力感度とは、部分構造合成法の一つであるビルディングブロック法⁽⁹⁾を用い、部品間の入出力の関係を求め、伝達力の感度を導出する手法である。従来では、対象物の質量や剛性を変化させた場合の制振効果を予測するために伝達力感度が用いられてきたが、本研究では、動吸振器の効果的な設置位置を予測する手法として用い、その有効性を検討する。動吸振器は一般的に設置位置の振動を対策するものであり、設置位置以外の振動は考慮されないため、適切な位置に動吸振器を設置しなければかえって振動を増加させ、悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、振動を対策する箇所以外に動吸振器を設置することはほぼ無く、設置位置に関する議論は少ない。そこで、動吸振器の適切な設置位置を求めるために、伝達力感度を用いて検討する。

Fig. 11 に HDD フレーム、ストレージサーバ、HDD を一つの伝達系とする理論モデルを示す。1 番点を経路 B、2、3 番点をストレージサーバと HDD フレームとの接点、4 番点を HDD フレーム上に設けた動吸振器(D. D.)の設置位置とする。また、HDD フレーム、ストレージサーバ、動吸振器をそれぞれ部品 1、2、3、それぞれに関わる伝達関数を H^1 、 H^2 、 H^3 とする。

Fig. 12 に HDD フレームの評価点を示す。4 番点を F、C、B 点に分割し、それぞれに設置した場合の伝達力感度を求め、HDD フレームから HDD への伝達力が小さくなる設置位置を予測する。そのために、各部品間の入出力関係を立式する。

部品 1 の入出力関係は式(1)になる。

$$\begin{aligned} a_1 &= H_{11}^1 F_1 + H_{12}^1 F_2 + H_{13}^1 F_3 + H_{14}^1 F_4 \\ a_2 &= H_{21}^1 F_1 + H_{22}^1 F_2 + H_{23}^1 F_3 + H_{24}^1 F_4 \\ a_3 &= H_{31}^1 F_1 + H_{32}^1 F_2 + H_{33}^1 F_3 + H_{34}^1 F_4 \\ a_4 &= H_{41}^1 F_1 + H_{42}^1 F_2 + H_{43}^1 F_3 + H_{44}^1 F_4 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 H_{ij} は入力 j 点、応答が i 点の伝達関数、 F_i は i 番点の伝達力、 a_i は i 番点の加速度を示す。

部品 2 の入出力関係は式(2)になる。

$$\begin{aligned} a_2 &= H_{22}^2 F_2 + H_{23}^2 F_3 \\ a_3 &= H_{32}^2 F_2 + H_{33}^2 F_3 \end{aligned} \quad (2)$$

部品 3 の入出力関係は式(3)になる。

$$a_4 = H_{44}^3 F_4 \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)より部品 1 についての関係式を立式すると、式(4)になる。

$$\{H_1^1\} F_1 = [Q]\{X\} \quad (4)$$

ただし、

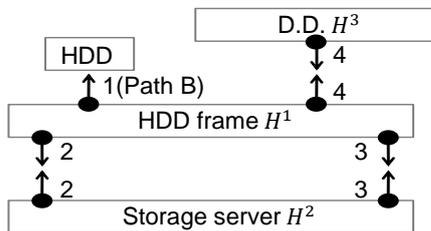


Fig. 11 Theoretical model

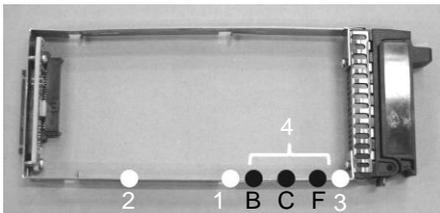


Fig. 12 Evaluation point of HDD frame

$$\{H_1^1\} = \{H_{11}^1, H_{21}^1, H_{31}^1, H_{41}^1, 0, 0, 0\}^T \quad (5)$$

$$\{X\} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, F_2, F_3, F_4\}^T \quad (6)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -H_{12}^1 & -H_{13}^1 & -H_{14}^1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -H_{22}^1 & -H_{23}^1 & -H_{24}^1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -H_{32}^1 & -H_{33}^1 & -H_{34}^1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -H_{42}^1 & -H_{43}^1 & -H_{44}^1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -H_{22}^2 & -H_{23}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -H_{32}^2 & -H_{33}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -H_{44}^3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(4)を変形すると、

$$\{X\}/F_1 = [Q]^{-1}\{H_1^1\} \quad (8)$$

式(8)より、 F_1/F_2 、 F_1/F_3 を求め、伝達力感度とする。伝達力感度は伝達関数のみで導出できる利点がある。

4.2 数値解析における伝達力感度の検討

伝達力感度に基づいて動吸振器の設置位置を定めるため、Fig. 11 と同様な伝達系をもつ Fig. 13 に示す解析モデルを対象に検討を行う。解析モデルは HDD フレーム、ストレージサーバ、HDD に相当する Com1、Com2、Target で構成し、HDD のヘッドとアームに相当する Target のはりは 3552 Hz に 1 次曲げのローカルモードをもつ。部品の材料はアルミニウムとする。動吸振器の設置位置候補は 4A~4L 点の計 12 点とし、それぞれに動吸振器を設置した場合と設置しない場合の伝達力感度を比較し、HDD フレームから HDD への伝達力が低下する位置を予測する。なお、本手法は多数の動吸振器の設置

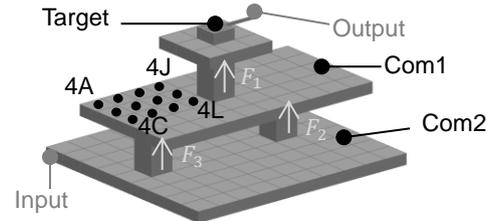
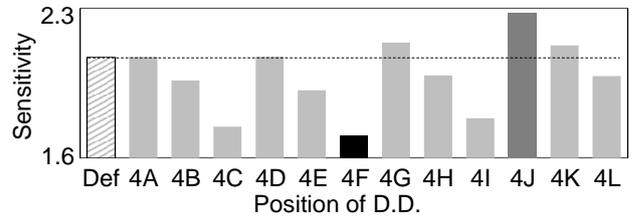
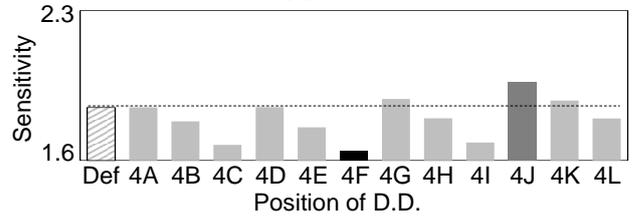


Fig. 13 Analysis model



(a) F_1/F_2



(b) F_1/F_3

Fig. 14 Sensitivity of transfer force of 3552 Hz

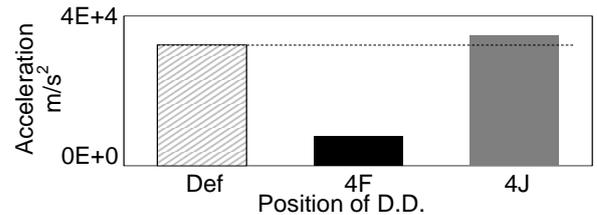


Fig. 15 Output of 3552 Hz

位置の候補から効果的な位置を特定するが、設置位置毎に固有振動数の調整をしないバネ、マスの単純な動吸振器とする。

Fig. 14(a)に F_1/F_2 , Fig. 14(b)に F_1/F_3 の3552 Hzの伝達力感度を示す。2つの伝達力感度において、動吸振器を設置することで動吸振器無付加時のDefより4F点では伝達力が小さく、4J点では伝達力が大きくなると予測される。

そこで、1 Nの力を入力した場合の3552 Hzの加速度応答の大きさを算出する。Fig. 15に3552 Hzの加速度応答を示し、動吸振器の設置により、4F点では加速度応答が小さくなり、4J点では大きくなる。したがって、伝達力感度の予測結果は正しく有効性が確認できたため、本手法をHDDフレームに適用した場合の検討を行う。

4.3 HDD フレームにおける伝達力感度の検討

IOPSの低下が顕著な2159 Hzの動吸振器を製作し、HDDフレームに適用した伝達力感度を算出する。Fig. 16(a)に F_1/F_2 , Fig. 16(b)に F_1/F_3 の2159 Hzの伝達力感度を示す。動吸振器の設置により、Fig. 12のC点では伝達力が大きく、B点では小さくなると予測でき、IOPSも対応すると推察される。

Fig. 17(a)製作した動吸振器、Fig. 17(b)に動吸振器を用いた実験セットアップの外観を示す。入力に加振器を用いて加振周波数2159 Hz、振幅5 Nのsin波を入力し、加速度応答はFig. 8のターゲット点と同様の位置で計測を行う。

Fig. 18に加速度応答を示し、動吸振器を設置することで伝達力感度の予測通り、C点では加速度が大きくなり、B点では小さくなる。また、Fig. 19にIOPSの測定結果を示す。IOPSは加速度応答と同様の大小関係を示し、動吸振器の設置により、C点は75.3%悪化し、B点は64.7%向上した。

以上より、伝達力感度に基づきHDDフレーム上における動吸振器の設置位置を適切に定めることで、HDDフレームからHDDへの伝達振動を低減でき、IOPSが向上できることを示した。また、本手法を用いることで直接問題となる部品が対策できない他の対象物でも、伝達振動を低減し、性能が向上すると期待できる。

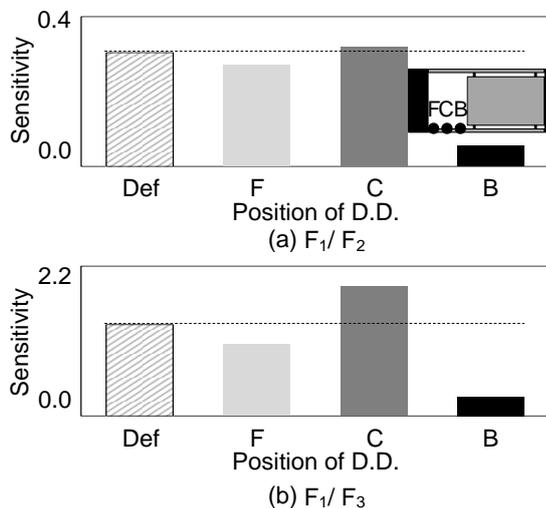
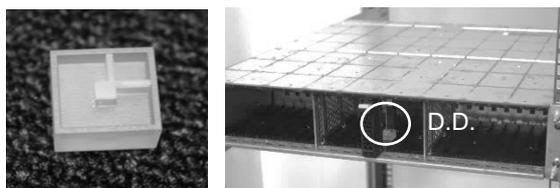


Fig. 16 Sensitivity of transfer force of 2159 Hz



(a) Created D.D. (b) Appearance

Fig. 17 Experiment setup of using D.D.

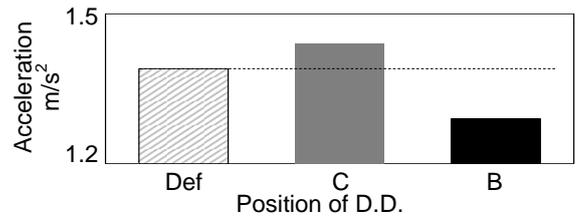


Fig. 18 Output of 2159 Hz

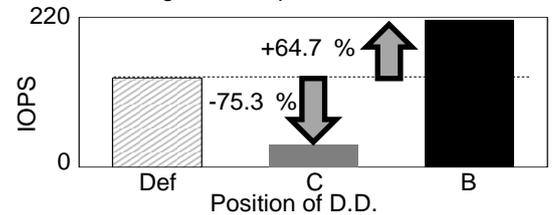


Fig. 19 Comparison of IOPS of 2159 Hz

5. 研究成果

- (1) 低周波振動がラックに加わった場合でもガタ振動により、HDDに高周波振動が伝達することを明らかにし、HDD面内方向の振動がIOPS低下に起因することを把握した。
- (2) 加振実験より内部部品の固有振動がIOPS低下に起因することを明らかにし、2159 Hzで実稼働中のIOPS低下することを把握した。
- (3) 実稼働伝達経路解析よりHDDフレーム搭載時底面からの面内方向振動は、2159 Hzで最も経路寄与が高いことを把握した。
- (4) 直接動吸振器を設置できない場合でも、伝達力感度に基づき、動吸振器の設置位置を適切定めることで、HDDへの伝達振動を低減でき、IOPSが向上できた。

参考文献

- (1) 清水敏行, 建部修見, 工藤知宏, 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, 情報処理学会論文誌, **45**-SIG6 (2004) pp. 23-34.
- (2) 金田慎治, 戸井武司, 大久保信行, 機構ガタによる振動を考慮した車載AV機器の耐振設計, 日本機械学会論文集C編, **68**-676 (2002) pp. 3465-3470.
- (3) 内田公一, 有光哲彦, 戸井武司, HDDフレームの伝達振動に着目した伝達力感度に基づくI/O性能の向上, 日本音響学会講演論文集(春), (2017) 2-2-12.
- (4) 内田公一, 有光哲彦, 戸井武司, 磁気ディスク装置の相互振動が性能に及ぼす影響把握, 日本音響学会講演論文集(春), (2016) pp. 979-980.
- (5) 品田博隆, 小野京右, EVANS Robert, 山浦弘, 動吸振器付きヘッドサスペンションに関する研究, 日本機械学会論文集C編, **73**-725 (2007) pp. 80-89.
- (6) Peter Akos GAJDASTY, 大久保信行, Advanced Transfer Path Analysis Methods, 大成社, 神奈川(2011).
- (7) 戸井武司, 青山和正, 大久保信行, 実稼働中における部品間伝達力の予測と振動・騒音の低減, 精密工学会誌, **61**-2 (1995) pp. 213-217.
- (8) 近藤玲子, 杉本利夫, 三吉貴史, 中島善康, 田中淳, 堀江健志, 高周波Z方向振動と磁気ヘッド位置のHDDパフォーマンスへの影響, 電子情報通信学会技術報告.MR, 磁気記録, **114**-505 (2015) pp. 59-64.
- (9) 大久保信行, 機械のモーダル・アナリシス, 中央大学出版部, (1982).