

論文 Article

PC オーディオシステムにおける 動作環境とデジタル信号上の jitter との関係

原稿受付 2013 年 4 月 2 日

ものづくり大学紀要 第 4 号 (2013) 22~28

三井 実^{*1}, 金子 大介^{*2}, 赤堀 肇^{*3}, 石川 智治^{*4}, 宮原 誠^{*5}^{*1}ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科^{*2}ものづくり大学 大学院ものづくり研究科^{*3}愛知工業大学 大学院工学研究科^{*4}宇都宮大学 大学院工学研究科^{*5}東京工業大学 世界文明センター

The Relationship between Hardware Requirements of PC and Digital Signal Jitter on PC Audio Systems

Minoru MITSUI^{*1}, Dasuke KANEKO^{*2}, Hajime AKAHORI^{*3},
Tomoharu ISHIKAWA^{*4} and Makoto MIYAHARA^{*5}^{*1} Dept. of Manufacturing, Institute of Technologists^{*2} Graduate School, Institute of Technologists^{*3} Graduate School, Aichi Institute of Technology^{*4} Faculty of Engineering, Utsunomiya University^{*5} Center for the Study of World Civilizations, Tokyo Institute of Technology

Abstract

In this paper, relationship between the hardware requirements of PC, the value of digital signal jitter was clarified. Recently, PC audio systems as sound reproduction equipment are popular. The sound quality deterioration would be affected by D/A conversion are performed inside PC. The other hand, it is said that the sound quality are deteriorated with the hardware requirements of PC. These causes might be digital signal jitter in clock signal of D/A conversion. Jitter is fluctuation of the time interval upon digital pulse waveform. If jitter is contained in digital signal, the analog output signal which should not change theoretically will change, and sound quality will be deteriorated. To clarify cause of these deteriorations of sound quality, we devised D/A Converter and PC audio system and measurement experiment was proposed. The significant difference in value of jitter in D/A conversion clock was measured when CPU and memory equipment of PC were changed.

Key Words : Digital signal jitter, PC audio systems, Hardware requirements of PC,

1. はじめに

1.1 本研究の背景と目的

1990 年代以降, 「PC (Personal Computer) が持つ高い計算処理能力をオーディオに向けたらどうなるか?」という発想の元, 新しい切り口で PC

オーディオシステムを構築しようという動きが始まる¹⁾. 2000 年以降, Apple 製の iPod や SONY 製 WALKMAN など, 記録媒体にフラッシュメモリや小型 HDD (Hard Disk Drive) を使用した DAP (Digital Audio Player) の登場により, 音楽データの管理・再生を PC で行うことが一般化してきて

いる。従来の CD プレイヤではデータの読み取り・再生を限られた時間の中で同時に行う必要があったが、PC はそれらを別々に処理することが出来るため理論上は音質が良いと考えられてきた²⁾。

しかし、PC 自体が様々なノイズの塊と言っても過言ではないため、D/A (Digital/Analogue) 変換を PC 内部で行うと、最終的に音質に直接的に影響するアナログ音声信号を劣化させてしまう。その方策として、現在の PC オーディオシステムでは外部 DAC (Digital to Analogue Converter) により D/A 変換部を PC 内部と切り離すことで、ノイズの影響を低減させる意図の製品が多い。デジタル信号しか扱わなくなった PC から出力される信号は理論的には劣化しないはずであるが、実際には外部 DAC で D/A 変換を行っても PC の動作環境により音質が劣化すると言われている。その原因として、デジタル信号に乗る jitter の影響が考えられる³⁾。

jitter とはパルス信号波形の時間軸方向の揺らぎである。PC 内部で何かしらのノイズが発生した場合、サンプリング Clock に jitter が乗る。すると、D/A 変換時のサンプリング間隔が変動する。サンプリング間隔が変動するとアナログ音声信号の時間軸方向に変調 (周波数変調もしくは位相変調) されてしまい、本来の音声信号を歪ませ音質劣化へと繋がる。

そこで本報告では、オーディオ用 PC の動作環境とサンプリング Clock の jitter との関係性に着目し、高品位音楽再生を目的とした PC オーディオシステムの構築を目指す。

1.2 関連研究と本研究の位置づけ

jitter と音質との関係を調査した研究は多数行われてきた⁴⁻¹⁵⁾。

その中で、蘆原らは DAC のサンプリング Clock jitter が、D/A 変換時に周波数・位相変調を引き起こすであろうと想定して、予め音楽データをデジタル信号処理により変調させ、その再生音を被験者に聴かせることで、数百 ns オーダの周波数・位相変調が人間の検知限であると示している⁹⁾。

また、赤堀らによる CD トランスポートの出力に jitter を付加した主観評価実験⁶⁾や、筆者らによる jitter 量の異なる再生機器を用いた測定および主観評価実験⁷⁾の結果から、数 ps オーダの jitter 特性の違いにより、被験者が D/A 変換後のアナログ音声信号の変化を知覚することが分かった。

更に、筆者らはデジタルオーディオ機器の様々な部位を測定し、jitter の音質への影響は、信号経路だけでなく、電源経路など、電気回路全般から伝搬する可能性を示唆した¹⁴⁾。

すなわち、本研究が目指す高品位な PC オーディオシステムの構築のためには、低 jitter なデジタルオーディオシステムが必要であり、構築に当たり PC 内部の動作環境や用いるパーツを熟考する必要がある。本報告では、まず、測定が容易であることと、改造が容易であることから、PC オーディオシステム全体を自作し、それらのパーツや動作環境を変化させ、jitter 量の測定を行った。

2. オーディオ機器の製作

2.1 実験用オーディオ専用 PC の構築

PC オーディオでは市販のデスクトップ PC やノート PC が使用されることが多いが、本研究では PC パーツの交換 (実験条件の変更) を容易にするためオーディオ専用 PC を自作した。各パーツには安定性を重視した部品を選定した。なお、ノイズ、振動などの外乱発生を極力抑えるための改造を PC 各部に施した。PC の構成を表 1 に示す。

Table.1 Component of PC

OS	Windows7 Home Premium 32bit
CPU	Intel Pentium G630T
CPU cooler	SCYTHE KABUTO CKBT-1000
Mother board	ASUS P8Z77-M PRO
Memory	Corsair CML8GX3M2A1600C9W
SSD	Intel 520 Series SSDSC2CW120A3K5
Power unit	Seasonic X series SS-400FL
Case	LIAN LIPC-C50B

Sound card	ONKYO SE-300PCIE
------------	------------------

2.2 外部 DAC の製作

市販の外部 DAC のほとんどは水晶振動子、同期回路を搭載し、DAC 内部で Clock を生成し PLL (Phase Locked Loop) により、前段の機器からの clock 信号に対して安定的に同期している。しかし、PC 内部で発生した jitter はケーブルを通して DAC の Clock 信号に影響を及ぼす¹⁴⁾ため、PC 側

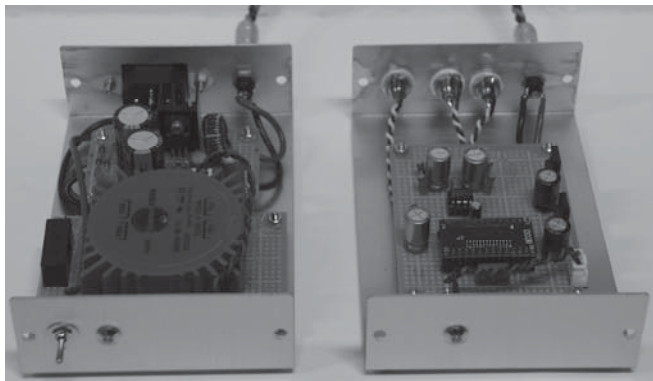
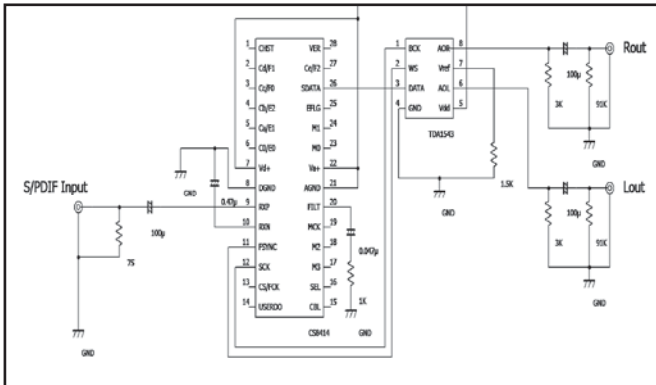


Fig.2 Digital to Analog Converter

以上の理由から、PC から伝送される Clock 信号を直接的に DAC の Clock 信号として利用できる DAC を設計・製作した¹⁶⁻¹⁷⁾。回路図を図 1 に、制作した DAC を図 2 に示す。

3. 実験概要

実験では市販のサウンドカード(ONKYO 製 SE300-PCIE) より出力したデジタル信号 (S/PDIF) を D/A Converter 内の Receiver で分離し、10,000 個分の Clock 信号パルス間隔の揺れ(標準偏差 σ) を jitter 量として測定する。測定には、横河電機社製の Time Interval Analyzer TA520 (時間分解能:25ps)を用いた。使用機器を表 2 に、実験に用いたシステムを図 3 に示す。

Table.2 Equipment list

PC	PC for Audio(self-produced)
DAC	DAC(self-produced) <ul style="list-style-type: none"> Digital audio receiver IC : CIRRUS LOGIC CS8414 DAC IC : PHILIPS TDA1543
Amplifier	AB-class Amplifier(self-produced) <ul style="list-style-type: none"> Amp IC : Texas Instruments TPA1517
Speaker	6.5cm full-range(self-produced) Content : 2.1[L]
Measurement equipment	YOKOGAWA Time Interval Analyzer TA520

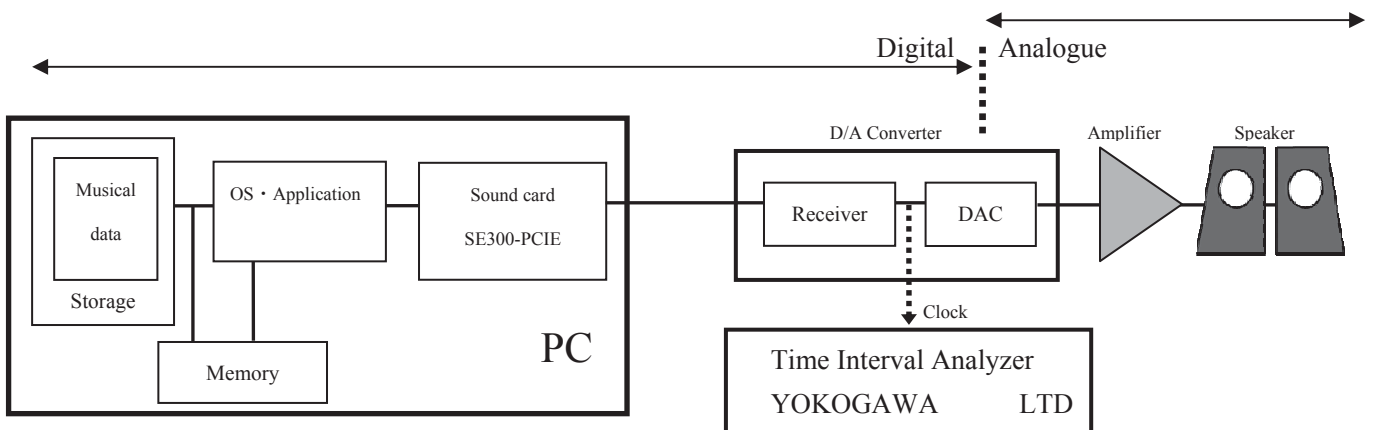


Fig.3 Equipment diagram

4. jitter 量測定実験

4.1 実験 1: 再生アプリの違いによる jitter 測定実験

市販のメーカー製 PC の内部は特殊な構造のため、パーツの交換は制限されている。そのため、一般的な PC オーディオでは再生アプリケーションによる音質改善を試みている場合が多い。このことから、PC の動作環境として、まず再生アプリケーションと jitter の特性に関係があるかを調べるため Clock jitter 量の測定実験を行った。

4.1.1 実験 1 の測定条件

実験に使用する再生アプリは、一般的に音質に定評のある KMPlayer, PlayPcmWin¹⁸⁾とする。各再生アプリには音質改善を目的とした機能が組み込まれているので、それらも条件に加える。ReClock とはサンプリング Clock を調整するフィルター、WASAPI 排他モードとはカーネルミキサーをバイパスするプログラムである。以上の条件で図 3 に示したシステムにおいて測定実験を行った。

4.1.2 実験 1 の結果

実験 1 の結果を表 3 に示す。本研究では PC から伝送される Clock 信号を直接的に Clock 信号として利用できる DAC を用いることから、jitter 量が揺れてしまうため、測定時の最低値と最高値の範囲を示す。表 3 より、ReClock 機能を使用した KMPlayer において、jitter 量が 100[ps]以上増加した。jitter 量の最小値と最大値の揺れ幅以上で全体的に jitter 量が増加していることが観測できた。測定器の時間分解能が 25[ps]であり、他の実験条件における jitter 量に比して、明らかに変動がみられるため、有意な差と考える。この jitter 量の増加は、ReClock によるフィルター処理のため CPU(Central Processing Unit)演算量が増加したことに起因すると考えられる。演算量増加による CPU ノイズの影響か、それとも PC ケース内のファンが回ることによるファンノイズの影響かを調べるため、実験 2, 実験 3 を行った。

Table.3 Result of experimental 1

Applications	KM Player		PlayPcmWin	
	Non-Reclock	Reclock	WASAPI	WASAPI exclusion
CPU utilization	2~7%		0~6%	
Memory usage	724MB		994MB	
Jitter value σ (ps)	260~287	433~459	252~281	265~287

4.2 実験 2: 負荷の有無による jitter 測定実験

PC 内で情報処理を行う CPU は高速処理のために非常に高い周波数(1~3GHz)で動作している。GHz オーダの動作では CPU 自体が外部にノイズを放出し、動作周波数が高くなるほどノイズ量も多くなる。したがって、高周波数で動作する CPU に負荷がかかることに起因したノイズが Clock に影響を及ぼし、jitter 量が増加する可能性が考えられる。実験 1 での結果を踏まえて、CPU 起源のノイズの影響の有無を調べるため、無負荷時と、CPU に対して演算負荷をかけるソフトウェアを動作させたとき、DAC Clock jitter 量の測定実験を行った。

4.2.1 実験 2 の測定条件

無負荷時は再生アプリケーションのみを起動して測定を行う。高負荷時はストレスツール Prime95 を起動し強制的に CPU 負荷を 100%にして測定を行う。用いた再生アプリケーションは、KMPlayer で、ReClock 無しのモードを用いた。

4.2.2 実験 2 の結果

実験 2 の結果を表 4 にまとめる。表 4 より、CPU に演算負荷を掛けた場合でも jitter 量の最小値と最大値の存在域に、変化はほとんど見られないことが分かる。したがって、CPU の演算負荷と jitter 量の増加の関係性は認められなかった。再生アプリケーションによっては最小値と最大値の変化の幅に多少の違いが見られるが、いずれも測定器の時間分解能 25[ps]以内であるため、測定

器の誤差範囲と考えられる。

Table.4 Result of experiment 2

Computing load	non-loaded		high-loaded	
	KMPlayer	PlayPcmWin	KMPlayer	PlayPcmWin
Temperature of CPU	51°C		61°C	
Temperature of Motherboard	31°C		31°C	
Rotation number of CPU fan	1900rpm		2250rpm	
Rotation number of case fan	1150rpm		1350rpm	
Jitter value σ (ps)	260~287	252~281	259~289	255~306

4.3 実験3：ファンの有無による jitter 測定実験

PC 内部には冷却用のファンが複数搭載されている。ファンが回転する際には必ずノイズや機械的振動が発生するため、Clock の jitter に影響を及ぼしている可能性がある。実験1での結果を受け、実験2では原因を探ることができなかったため、ファンノイズの影響を疑った。これを確認するため、通常通りケースファンを取り付け動作させた場合と、取り除いた状態で Clock の jitter 量の測定実験を行った。

4.3.1 実験3の測定条件

CPU クーラーのファンを外した場合 CPU の冷却が追い付かず、熱暴走さらには、CPU 破壊の恐れがあるため、CPU ファンは外せない。そこで実験3ではケースファンのみ取り外す。なお、ケースファンは低ノイズタイプのもの (ENERMAX EVEREST UCEV12) に換装して実験を行った。用いた再生アプリケーションは、KMPlayer で、ReClock 無しのモードを用いた。

4.3.2 実験3の結果

表5に実験3の結果を示す。表5より、ファンの有無に関わらず jitter 量はほとんど変化が観測出来なかった。したがって、CPU 演算量の増加に伴ったファン動作によるノイズ、機械的振動と、jitter 量との関係性は認められなかった。高負荷、ファンなしの場合 CPU 温度が 70°C、MB 温度が 41°C となり、PC の動作環境としてはやや高い温度であることが観察できる。

Table.5 Result of experimental 3

Computing load	non-loaded		high-loaded	
	Fan		Fan	
Temperature of CPU	○	×	○	×
Temperature of Motherboard	50°C	56°C	60°C	70°C
Temperature of Motherboard	27°C	37°C	27°C	41°C
Rotation number of CPU fan	1900rpm	2250rpm	2170rpm	3139rpm
Rotation number of case fan	1150rpm	non	1205rpm	non
Jitter value σ (ps)	283~362	289~364	293~367	282~362

4.4 実験4：メモリの違いによる jitter 測定実験

実験1において、PC 上で実行する音楽再生アプリケーションの違いにより、jitter 量に差異が観測出来た。このことから、原因を探るべく、CPU に演算負荷の影響を調べる実験2、ファンの影響を調べる実験3を行った。しかしこれら2実験では jitter 量にほとんど変化が認められなかった。その他の可能性として、再生アプリケーションの違いにより、作業領域や、データの一時格納領域が異なることから、メモリの品質が原因の一つではないかと考えた。そのため、メモリを他社製品のものに交換し Clock jitter 量の測定実験を行

った。

4.4.1 実験4の測定条件

メモリを Corsair 製(動作電圧 1.35V, ヒートシンクあり)から CFD 製(動作電圧 1.5V, ヒートシンクなし)に交換し測定を行った。用いた再生アプリケーションは, KMPlayer で, ReClock 有りのモードを用いた。また, PC ケースファンは, 実験3において jitter 量との関係性が示せなかったため, 実験4では動作させた状態で測定した。

4.4.2 実験4の結果

表6に実験4の結果をまとめる。表6から, Corsair 社製に比べ CFD 社製のメモリの方が jitter 量の最小値から最大値の幅が全体的に約 30[ps]増加していることが分かる。実験1において得られた約 100[ps]以上の違いから比べると, 測定器の分解能(25ps)ぎりぎりの少ない差異ではあるが, 両条件における, jitter 量の最小値と最大値の幅が重なっていないため, 差異が充分観測できていると考える。すなわち, メモリの違いにより, DAC clock の jitter 量が増加することが分かった。jitter 量が増加した原因として, メモリの構造の違いによる振動の影響が考えられる。またメモリを変えることにより, 動作周波数などの条件も関係してくるため, 次項では, BIOS レベルで動作周波数を変化させ, その時の jitter 量を測定する実験5を行った。

Table.6 Result of experimental 4

Application	KMPlayer	
ReClock	on	
memory	CFD W3U1333Q-2G	Corsair CML8GX3M2A16009W
Frequency of memory clock	1066MHz	
Jitter value σ (ps)	465~483	435~456

4.5 実験5: メモリの動作周波数の違いによる jitter 測定実験

4.5.1 実験5の測定条件

実験1により得た jitter 量増加にはメモリの動作周波数も影響している可能性を考慮し, 実験を行った。実験1の結果より jitter 量が少なかった Corsair 製メモリに絞り実験を行う。動作周波数は BIOS にて 800MHz, 1600MHz に変更する。用いた再生アプリケーションは, KMPlayer で, ReClock 有りのモードを用いた。PC ケースファンを動作させている状態で測定を行った。

4.5.2 実験5の結果

表7に実験5の結果をまとめる。表7から, 動作周波数が高いほど, jitter 量の最小値と最大値の幅は, 若干ではあるが全体的に低い値となることが観察できる。これらの差は測定器の時間分解能(25[ps])ぎりぎりの差分ではあるが, 両条件における, jitter 量の最小値と最大値の幅が重なっている領域が少ないため, 差異が観測できていると考える。すなわち, BIOS 上でソフト的に変更したメモリの動作周波数が jitter に影響していることが考えられる。

Table.7 Result of experimental 5

Application	KMPlayer	
Reclock	on	
Memory	Corsair	
Frequency of memory clock	800MHz	1600MHz
Jitter value σ (ps)	423~451	397~428

5. まとめと考察

本報告では, 高品位な PC オーディオシステムの構築を目指し, PC の動作環境を変化させたときの jitter 量を測定した。その結果, まず, 再生アプリケーションの違いで jitter 量が増加するこ

とが明らかになった。この原因を探るため、PC パーツを変更して、同条件で jitter 量を測定したところ、メモリの違いや、メモリの動作周波数の違いにより、若干ではあるが、jitter 量の違いが観測された。すなわち、PC の動作環境、特に再生アプリケーションと、メモリ関連の条件は jitter の変化を介して、音質に影響することを示唆できた。以上より高品位な音質再生が可能な PC オーディオシステムの構築のためには、最適な再生アプリケーションとメモリを選択する必要があると考える。現存する一般的なハイエンドオーディオにも回路の中にメモリが使われていることが多いため、これらの成果は、PC オーディオシステムに限った話ではなく、一般的なオーディオシステムにも応用が可能である。

6. 今後の展望

今後は OS, CPU, メモリ, 電源など PC の動作環境を多種に変更して実験を行い、デジタル信号の Clock jitter への影響を検証する。更に、主観評価実験を行い jitter 量と実際の再生音質との関係性を明らかにする。これが明らかになると、jitter の影響を取り除けるオーディオシステムが開発可能であり、今後、高品位再生が可能な PC の構築を目指していく。

参考文献

- 1) 麻倉 怜土, “高音質保障! 麻倉式 PC オーディオ”, pp.3-11, アスキー新書(2011).
- 2) “これ1冊で完全理解 PC オーディオ”, pp.6-9, 日経 BP 社(2012).
- 3) 島 幸太郎, “新版 PC オーディオガイドブック”, インプレスジャパン(2011).
- 4) 冬木 真吾, 小林 幸夫, 石川 智治, 宮原 誠, “デジタル音声信号の jitter に起因する高度感情情報の欠落-“雰囲気”, “空気感(深々さ)”の激減衰比-”, 信学技報, EA97-104, pp.9-16(1998).
- 5) 小林 幸夫, 赤堀 肇, 宮原 誠, “高度感性情報を損なうデジタル信号ジッタの影響”, 信学技報, CQ99-48, pp.7-13(1999)ものだい太郎:教育用機器, 特開平 22-12345678 (2010).
- 6) 赤堀 肇, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “デジタル・オーディオ・インターフェイス(AES/EBU)の jitter と音質の関係”, 信学技報, EA99-40, pp.1-18(1999).
- 7) 三井 実, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “空気感再現とデジタルビットストリーム上の jitter との関係”, 信学技報, EA2001-60, pp.73-80(2001).
- 8) 蘆原 郁, 桐生 昭吾, “デジタルオーディオの時間ゆらぎによる音質劣化のシミュレーション”, 日本音響学会誌, 58 巻 4 号, pp.232-238(2002).
- 9) 蘆原 郁, 桐生 昭吾, 佐藤 宗純, “デジタルオーディオの時間ゆらぎ許容値及び検知閾”, 日本音響学会誌, 59 巻 5 号, pp.241-249(2003).
- 10) 三井 実, 石川 智治, 小林 幸夫, 宮原 誠, “デジタル信号の jitter と高度感性情報の伝達損失との関係”, AES 東京コンベンション予行集, pp.80-83(2003).
- 11) 三井 実, 米山 耕太, 石川 智治, 宮原 誠, “デジタルオーディオ機器における音質劣化と物理要因との関係の考察”, 映像情報メディア学会技報, Vol.30, No.68, pp.67-79(2006).
- 12) 西村 明, 小泉 宣夫, “AD/DA 変換器におけるサンプリング・ジッターの測定”, 日本音響学会講演論文集, 秋, pp.659-660(2001).
- 13) 西村 明, 小泉 宣夫, “デジタル・オーディオ機器におけるサンプリング・ジッターの諸様相とその要因”, 東京情報大学研究論集, Vol.7, No.2, pp.79-92(2004).
- 14) 三井 実, 石川 智治, 党 建武, 宮原 誠, “デジタルオーディオにおける深い感性に関連した音質劣化の原因究明”, 日本感性工学会研究論文集, Vol.7, No.4, pp.759-764(2008).
- 15) 小山 裕貴, 畑 淳, 吉田 孝博, 増井 典明, “電源環境がデジタルオーディオインターフェイスのジッタに及ぼす影響”, 信学技報, EA2010-118, pp.77-82(2011).
- 16) <http://ta2020.huuryuu.com/nosDAC.html>
- 17) http://nontropo2010.web.fc2.com/dac_hitobashira.htm
- 18) PC オーディオ fan No.4, pp.31-42, 共同通信社(2011)