

デジタル・オーディオ機器におけるサンプリング・ジッターの諸特性と その要因

西村 明[†] 小泉 宣夫^{††}

[†] 東京情報大学 総合情報学部 情報文化学科

〒 265-8501 千葉県若葉区谷当町 1200-2

TEL 043-236-4658, akira@rsch.tuis.ac.jp

^{††} 東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科

nkoizumi@rsch.tuis.ac.jp

あらまし いくつかの種類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測定の結果を示した。解析信号を用いたジッター測定は、CD-R メディア、信号のビットパターン、デジタル信号伝送系、DAC、ADC そしてクロック発振器といった複数の要因が、オーディオ機器の微細なジッター特性に影響を与えていることを示した。ジッター測定を通じて得られた最大のジッター成分振幅は、ジッター周波数 2 Hz 以上において、2 ns を下回った。

キーワード 解析信号、時間領域、CD プレーヤ、DA コンバータ、DVD プレーヤ

Characteristics and factors of sampling jitter observed in digital audio products

Akira NISHIMURA[†] and Nobuo KOIZUMI^{††}

[†] Department of Media and Cultural Studies, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

1200-1, Yatoh-cho, Wakaba-ku, Chiba-city, Chiba 265-8501, Japan

TEL +81-43-236-4658, akira@rsch.tuis.ac.jp

^{††} Department of Information systems, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

nkoizumi@rsch.tuis.ac.jp

Abstract Results of sampling jitter measurement for several kinds of digital audio products are introduced. Jitter measurement using analytic signals revealed that several factors, that is, bit patterns of a signal, CD-R media, a system of digital signal transmission, DAC, ADC and a clock generator, affect minute jitter characteristics of digital audio products. Throughout the jitter measurement, maximum amplitude of a jitter component was less than 2 ns above jitter frequency of 2 Hz.

Key words analytic signal, time-domain, CD player, DA converter, DVD player

1. はじめに

DA/AD 変換時のサンプリングクロックに生じる時間ゆらぎ(サンプリング・ジッター)は、録音や再生時にひずみをもたらす原因のひとつである。これまで我々は、解析信号を用いて、DA/AD 変換器に生じている周波数変動波(ジッター波)および振幅変動波を時間領域において測定する方法を提案し [1]、測定誤差の要因について検討をした [2]。さらにこれを、従来は困難であった音楽信号の録音再生時に生じるかもしれないジッターの測定法に拡張した [3]。

本稿は、それらの測定法を用いて実測されたデジタルオーディオ機器のジッター特性を紹介し、その要因を調べることを目的とする。

2. 解析信号を用いるジッター測定法

角周波数 ω_c の正弦波を DA 変換し、すぐさま AD 変換する測定系を考える。このとき測定系において、任意の振幅変動 $a(t)$ と、角周波数 ω_m 、振幅 J である正弦波のジッターが付加されたときの観測信号の時間波形 $x(t)$ を示す。

$$x(t) = a(t) \sin(\omega_c(t + J \sin(\omega_m t))) \quad (1)$$

$x(t)$ の解析信号 $y(t)$ は、

$$y(t) = a(t) \exp(j(\omega_c(t + J \sin(\omega_m t)) - \pi/2)) \quad (2)$$

となる [4]。解析信号は DFT によって求めることができるので、その瞬時位相角と搬送周波数より、測定系において生じるジッター波形と、振幅変動波形を同時に求めることができる [1]。

実際には、観測信号の ω_c は、DA および AD 変換器間のサンプリング周波数の僅かな差のため、測定用信号の ω_c とは僅かに異なる。このため観測信号の ω_c は、観測信号の瞬時周波数を平均して求める。

この測定手法は、測定系に存在する歪みや雑音成分の影響を受ける。そこで、測定信号をサンプリング周波数の 1/4 である純音を用いた測定と、それに近い他の信号周波数を用いた測定を行い、得られたジッタースペクトルを比較し、共通するスペクトル成分を抽出することによって、歪みやノイズの影響を少なくすることもできる [2]。

音楽信号を測定信号とする場合には、音楽信号の前後に挿入した短音の位相情報を用いて、観測信号と測定信号とのサンプリング周波数ずれおよび位相ずれを高精度に補正し、分析時に双方の信号に帯域制限を行なった後で、それらの瞬時位相の比較を行う [3]。

解析信号を用いるジッター測定法の特徴は、以下の通りである [1]。

- 一般的なデジタルオーディオ機器のみを用いて測定が可能で、特殊な測定機器を必要としない
- ジッター波形を得ることができ、時間分解能が高い
- 最大でナイキスト周波数の半分までのジッター周波数成分を測定可能
- 観測信号に含まれる振幅変動成分とジッター成分を分離して測定可能
- 測定結果には、DAC と ADC の双方のジッター特性が重畳されたものが得られるが、複数の測定対象機器のジッタースペクトルを比較することによって、DAC, ADC いずれか一方のジッタースペクトルを推定することが可能

3. 実測結果

サンプリング・ジッターの測定は、CD あるいは DVD プレーヤにて CD-R に記録した信号音を読み取り、プレーヤ内蔵 DAC あるいはデジタル接続した DAC から再生したアナログ信号を、ADC で変換したデジタル信号に対して行った。パソコン用サウンドカードの場合は、測定用デジタル信号を再生用ソフトウェアを用いて再生したものを ADC でデジタル信号に変換した。プレーヤ測定時の接続を Fig.1 に示した。本稿では、合計二十余りのデジタルオーディオ機器を組み合わせて行った測定の結果得られたジッタースペクトルの中から、特徴的な結果が得られたもののみを示す。ここで取り上げた機器については、Table 1 に特徴と略号を示した。

測定の結果得られるジッター波形について、1 秒間の Hanning

Table 1 Specification and labeling of digital audio products for measurement.

label	specification	notes
CDP1	—	built-in DAC1
CDP2	Digital Servo Ratio Locked Loop	—
CDP3	1bit $\Delta\Sigma$	—
DVDA1	—	—
DAC1	22-Bit D.R.I.V.E. 32 × oversampling	built-in DAC of CDP1
DAC2	20-Bit × 16/ch MMB 8 × oversampling	—
DAC3	24-Bit 64 × oversampling	PCI Audio Card
ADC1	24-Bit 64 × oversampling	PCI Audio Card
ADC2	16-Bit, $\Delta\Sigma$, 64 × oversampling	SCSI-BOX
PCA1	AC97 Codec	PCI Sound Card

窓掛け後に FFT を行い、これを 0.5 秒づつずらして 5 秒間の平均スペクトルを求めた。測定系のノイズレベルが高品位なデジタル機器において典型的な -130dBFS/Hz 以下である場合、純音信号を用いたジッター振幅検知限は数 ps ~ 数 10 ps 程度である。測定用音楽信号は [3] と同じく RWC-MDB-2001 No.2 を使い、この場合のジッター振幅検知限は 3 ns [3] であるが、それを越えるジッターは、音楽、純音いずれでも観測されなかったため、純音による測定結果のみを示す。全ての測定結果の再現性は高かった。

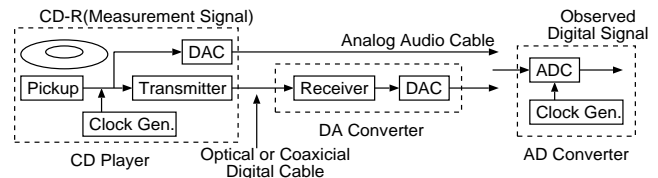


Fig. 1 Block diagram of measurement.

測定系において想定されるジッターの発生部所は、Fig.1 内においては、メディア読み取り部、クロック発振回路、デジタル信号伝送経路、ADC、DAC であり、それぞれの部所で発生するジッターは積算されていく。よって、注目したい箇所のメディア/機器を入れ換えた測定を行い、結果を比較することによって、そこで生成されているであろうジッターの様相を調べることが可能となる。ここでは特に触れない限り、プレーヤと DAC の接続は、光ケーブルを用いた結果である。

3.1 CD プレーヤと DA コンバータ

Fig.2 には CDP1 内蔵 DAC 再生時のジッタースペクトルを示した。CDP1 内蔵 DAC(DAC1) は外部デジタル入力の再生も可能であり、Fig.3 には、CDP2 の読み取ったデジタル信号を DAC1 にて再生時のジッタースペクトルを示した。Fig.4 は CDP3 の読み取ったデジタル信号を DAC1 に入力して再

生じた結果である。これらを比較すると、同じ DAC を用いてもクロック源が異なるとジッター特性に明らかな違いが存在することが分かる。

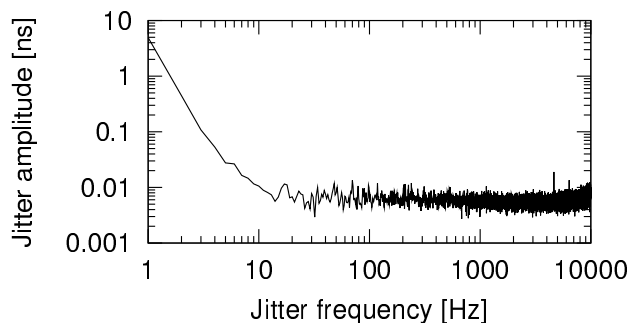


Fig. 2 Jitter spectrum of CDP1(DAC1).

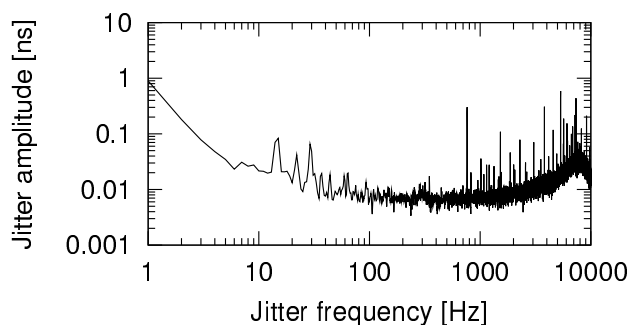


Fig. 3 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2.

内蔵 DAC と外部 DAC を比較するため、Fig.5 には DVD-Audio プレーヤ (DVDA1) にて内蔵 DAC から再生した結果を、Fig.6 には DVDA1 のデジタル出力を、DAC2 にて再生した結果を示した。これらの比較より、DAC2 とデジタル伝送系は、約 200Hz 以下のジッター成分を増幅し、それ以上のジッター成分を抑圧しているものと考えられる。

3.2 DVD プレーヤ

DVDA1 において、音声トラック (24bit,96kHz,2-ch) に純音信号が記録された DVD-Video ディスクを再生して得られた測定結果を Fig.7 に示した。また、同じプレーヤにおいて、DVD-Audio フォーマット (24bit,96kHz,2-ch) にて記録を行った DVD-R ディスクを再生して得られた測定結果を Fig.8 に示した。これらと、Fig.5 に示した CD-R 再生時の測定結果を比較すると、3者で明らかにジッタースペクトルが異なることが分かる。この違いの原因が、メディア、記録フォーマット、プレーヤの DAC を駆動するサンプリングクロックのいずれであるか現時点では明らかでない。

3.3 パソコン用オーディオ機器

パソコン用サウンドカードには、ジッター以外にもノイズや歪みが聴感上明らかに目立つ製品も多い。一方で、安価ながら高品質な製品も存在し、一般オーディオ機器と同程度かやや多いジッター量のものもあった。Fig.9 には、市販価格 4000 円程度の PCI サウンドカード (サンプリング周波数 48kHz) で得ら

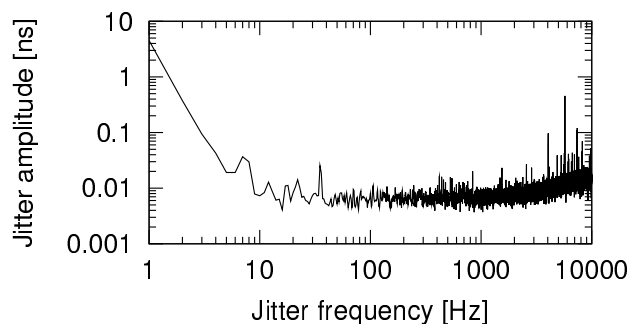


Fig. 4 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP3.

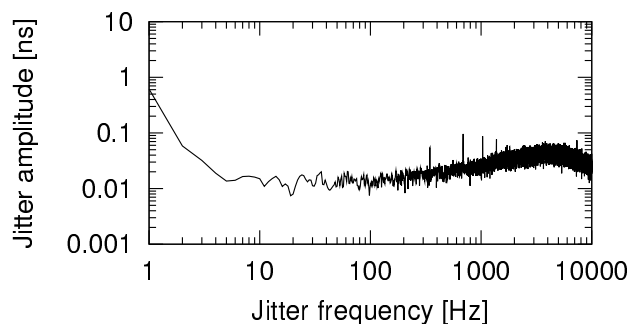


Fig. 5 Jitter spectrum of DVDA1.

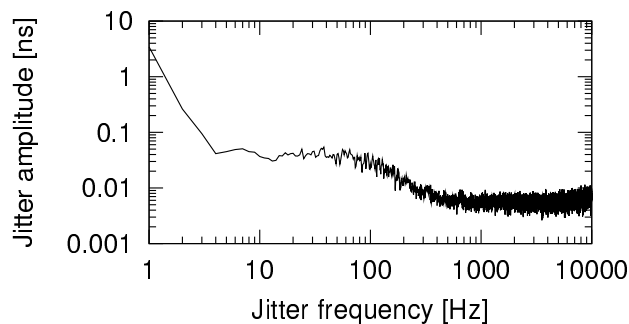


Fig. 6 Jitter spectrum of DAC2 connected to DVDA1.

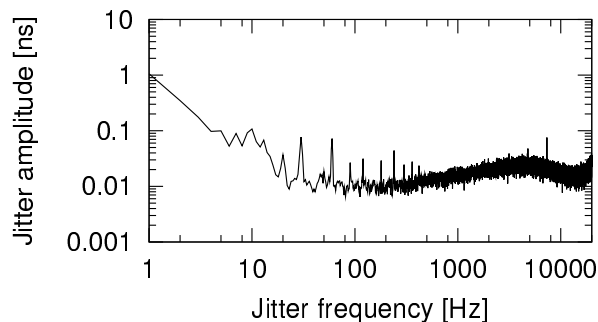


Fig. 7 Jitter spectrum of DVDA1 reproducing a DVD-Video (24bit, 96kHz) medium.

れたジッタースペクトルを示した。

さらに、高級な製品は DAC/ADC チップに高級オーディオ用と同じものを採用したものもあり、そのような機器のジッター量は一般に低かった。今回の測定で主に使用した ADC1 は、ア

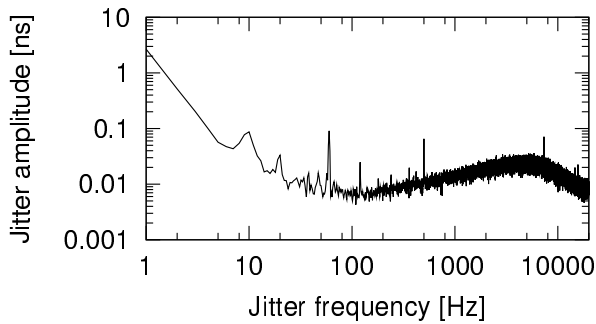


Fig. 8 Jitter spectrum of DVDA1 reproducing a DVD-R medium of DVD-Audio (24bit, 96kHz) format.

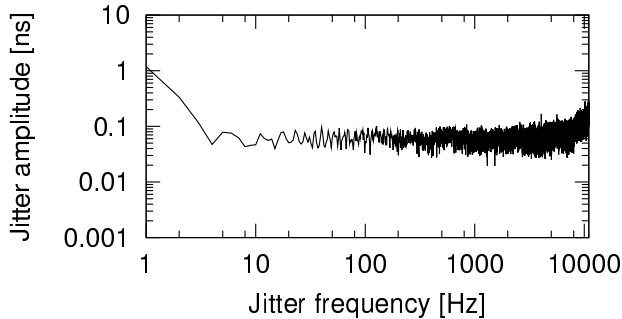


Fig. 9 Jitter spectrum of PCA1. Sampling frequency is 48 kHz.

ナログ信号入出力部を PCI カード外に持つパソコン用オーディオカードであり、その DAC 部には DAC3 とラベリングした。Fig.10 には、2 台のパソコンにそれぞれ 1 枚づつこのオーディオカードをインストールし、一方の DAC3 出力をもう一方の ADC1 で録音したときのジッタースペクトルを示した。なお、測定はサンプリング周波数 48kHz と 96kHz で行ったが、結果に大きな違いは無かった。Fig.10 には 2kHz 付近に 30ps 程度のピークが見られるが、他の測定において、ADC1 を使用した測定結果 (Fig.2~8, 12~17) には、そのようなピークは見られないことから、これは DAC3 におけるジッター特性であることが分かる。

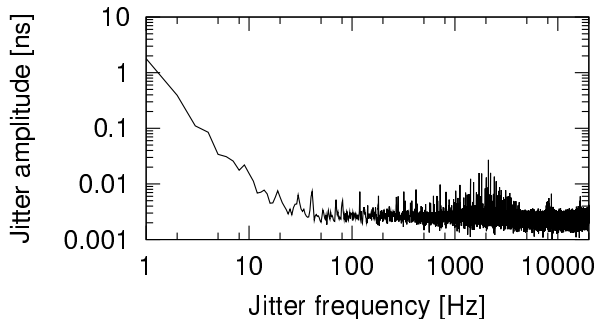


Fig. 10 Jitter spectrum of PCI audio cards. Sampling frequency is 96 kHz.

3.4 信号に依存するジッター: J-test signal

Dunn ら [5], [6] は信号のビットパターンに周期性のある特殊な信号 (J-test signal) を再生する際にサンプリング・ジッター

が生じることを指摘している。それは主としてデジタル信号伝送経路のローパス特性によって、信号になまりが生じ、ビットクロックに偏差が生じることが原因である。

Dunn らが示した J-test signal は、AES3 規格のデジタル信号において、24bit 精度の最大振幅の半分と最小振幅の半分の 4 サンプル周期で繰り返す信号 (搬送波) に、192 サンプル周期で振幅ゼロと-1LSB を繰り返す信号 (変調波) を足し合わせた信号である。AES3 規格は EIAJ CP-1201 と同じであり、付加ビット情報以外は、コンシューマ用の S/PDIF と同じビット表現を行う。AES3 規格ではデジタル信号は 2 の補数で表現されるため、この信号を 16 進数表現すると、

0xC00000 0xC00000 0x400000 0x400000 (X 24)

0xBF0000 0xBF0000 0x300000 0x300000 (X 24)

の繰り返しとなる。左右チャンネルにこの同じ信号が用いられる場合、AES3 規格において、192 サブフレーム (=1 ブロック) は、ほとんど 0 ビット値のみ、次の 1 ブロックはほとんど 1 ビット値のみ、の信号が繰り返されることになる。

AES3 規格において 1 サブフレーム 32bit のうち、最初のプリアンブル部 (4bit) を除くビット値は、ビット境界で必ず電位が切り替わるバイフェーズ方式でエンコードされるため、理想的な 0 ビットデータ値の連続と理想的な 1 ビットデータ値の連続は、それぞれ Fig.11 上と中の実線によってその電位変化は表される。

一般に、DAC に外部から入力された AES3 信号からクロック信号を抽出する際には、ビット境界の電位ゼロクロス時刻 (ビットクロック=サンプリング周期の 64 分の 1) を利用し、これを時間平均するような仕組み (PLL 回路) によって、ビットクロックの細かなジッターを抑圧したサンプリングクロックを生成する。デジタル伝送系にアナログローパス特性が加わったとすると、伝送されてくるデジタル信号波形は Fig.11 下の点線のようにそれぞれ変化し、0 ビット値信号の方が 1 ビット値信号よりゼロクロス時刻が遅れてしまう。よって、変調波の周波数と等しい矩形ジッター波が生じる。なお、ここではその効果を分かりやすく示すため、極端な例としてローパスフィルタとして時定数 200 ns の RC 積分器を用いている。

J-test 信号の周期は 192 サンプル以外でも、変調周波数が異なるだけで、大きな違いはない。そして、このようなビットパターンを持つ信号は AES3 規格信号のうち最もサンプリング・ジッターが発生しやすい極端な例である。

今回の測定では、AES3 規格での 24bit 信号を伝送し受信するオーディオ機器が無かったため、16bit 信号により生成した J-test 信号を測定用信号として用いた。1 周期を 200 サンプルとしたとき、データ領域に Auxiliary 領域を含めた 24bit 分の 16 進数表現は、

0x00C000 0x00C000 0x004000 0x004000 (X 25)

0x00BFFF 0x00BFFF 0x003FFF 0x003FFF (X 25)

となるが、依然としてビットパターンのアンバランスは保たれる。また、搬送波がサンプリング周波数の 1/4 のみの場合は、ジッター測定結果には、測定系に存在するノイズ成分の影響を受ける [2] ため、搬送波をサンプリング周波数の 1/6 とし

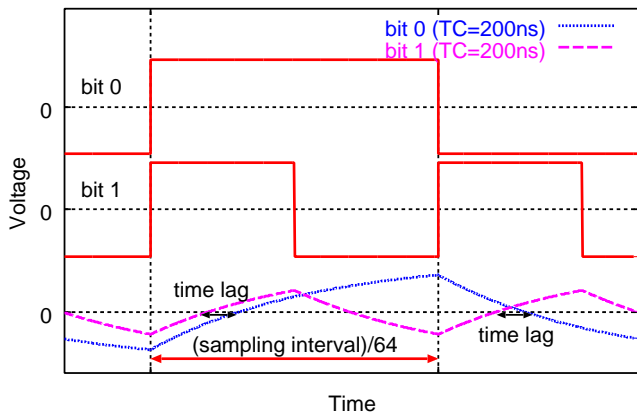


Fig. 11 AES3 intersymbol interference.

た J-test 信号も用いて測定を行い、それらに共通するジッタースペクトル成分を得た。変調波の周期は 100 サンプルと 200 サンプルの 2 種類で測定を行ったが、周期の逆数となる周波数に現れるジッター成分振幅に大きな違いは無かった。そこで、以降は 100 サンプル周期の結果のみを示す。

プレーヤとその内蔵 DAC を用いるとき、J-test 信号によってジッターが発生したプレーヤは CDP1 だけであり、J-test 信号を再生したときのジッタースペクトルを Fig.12 に示した。デジタル伝送系を含んだ測定系において、J-test 信号を用いた測定結果は次節に示した。

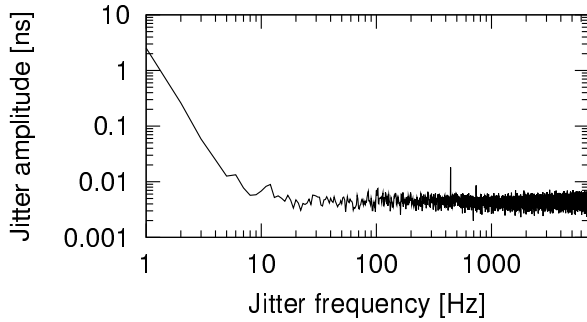


Fig. 12 Jitter spectrum of CDP1 induced by J-test signal.

3.5 デジタルケーブル

CD プレーヤと DAC との接続において、コンシューマ市場では同軸ケーブル (S/PDIF) と光ケーブル接続 (TOSLINK) が一般的である。先に示した Fig.3 は CDP2 と DAC1 を光ケーブルで接続した場合の測定結果であり、それらを同軸ケーブルで接続した場合の測定結果である Fig.13 と比較すると、ジッタースペクトルにはかなり違いが見られる。これは測定結果の中でも極端な例ではあるが、接続方式によってジッタースペクトルはしばしば変化した。

デジタル同軸接続用ケーブルとして、中級品 (長さ 3m) のデジタルオーディオ用ケーブル、アナログ音声信号用オーディオケーブル (長さ 7m) を比較したところ、純音信号を用いた測定結果に違いはほとんど見られなかったが、J-test 信号を用いた測定では、変調波の周波数に現れるジッター振幅がアナログ音声信号用オーディオケーブルを用いた場合に 2 倍ほど大き

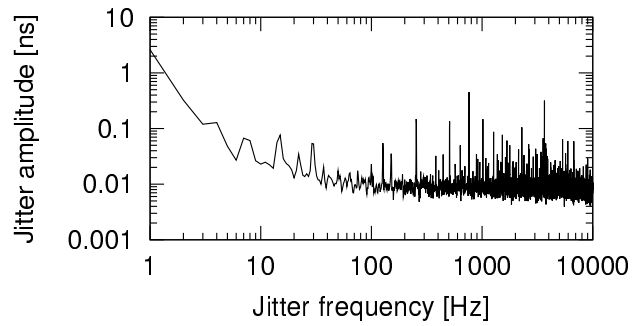


Fig. 13 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial digital cable.

くなることが分かった。Fig.14 にデジタルオーディオ用ケーブルを用いたときの測定結果を、Fig.15 にアナログオーディオケーブルを用いたときの測定結果を示した。

これはアナログ音声信号用オーディオケーブルの特性インピーダンスが 110Ω 程度であり、デジタルインタフェース間のインピーダンス不整合がおきてデジタル信号波形が変形し、サンプリング・ジッターの原因になっていると考えられる。J-test 信号は、そのような伝送経路の状態を、測定結果に反映しやすい信号だといえる。

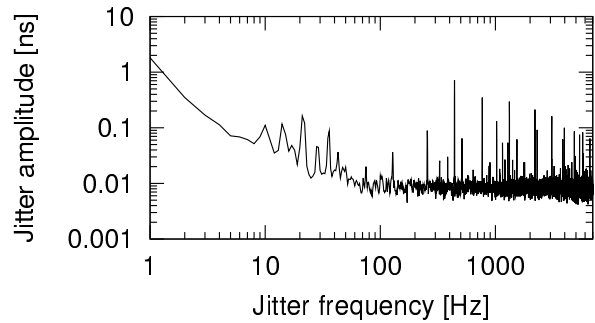


Fig. 14 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial digital cable. Measurement signal is a J-test signal modulated by 441-Hz rectangular wave.

3.6 CD-R メディアによる影響

CD プレーヤの場合、メディア要因およびデータ読み取り部においてジッターが生じやすいと通説的には唱えられている。そして、インターネット上では、メディア上のビットを読んだ際の RF 信号におけるアイパターンに含まれるジッターの様相が、メディアによって変化するデータ^(注1)も公開されている。もっとも実際には、読み取られたデータは CIRC デコード後にバッファメモリに蓄えられ、水晶精度のクロックを分周したサンプリング・クロックを用いてアナログ波形に変換されるため、原理的にはデータ読み取り時のジッターは、再生音に影響を与えないと考えられる。しかし、データ読み取り時の制御回路やエラー訂正回路の働きが、それ以降のデジタル回路のアナログ的動作に電気的な影響を与えるという考えもある。

(注1) : <http://www.ne.jp/asahi/fa/efu/media/media.html>

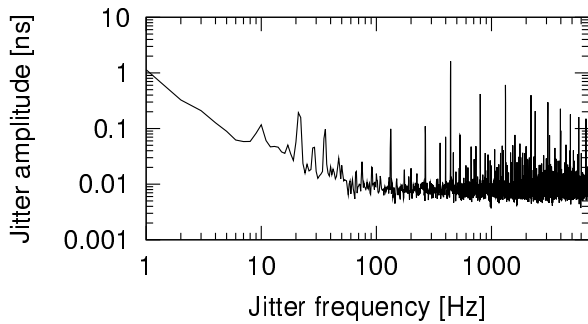


Fig. 15 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial audio cable. Measurement signal is a J-test signal modulated by 441-Hz rectangular wave.

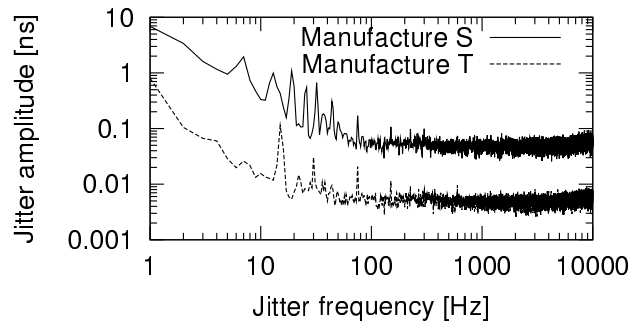


Fig. 16 Jitter spectrum of DAC2 connected to CDP2 via an optical digital cable. Upper: The result of manufacture S. Jitter amplitude is multiplied by 10. Lower: The result of manufacture T.

プレーヤにおいて、C1/C2 エラー (訂正可能な読み取りエラー) が生じる条件で、ジッター特性が変化するかを調べるために、CD-R メディアの記録面に、中心で 90 度交わるカッターナイフによる 4 本の傷を与えたものを用いて測定を行った。再生音には、傷によって原データに回復不能であったときに生じるパルス状のノイズが部分的に混入する。よって、そのようなノイズが混入していない部分では、エラー訂正が成功裏に行われていることは明らかである。ノイズが混入しなかった 5 秒間の観測信号について測定を行ったが、いずれの機器条件でも傷のないメディアで得られた測定結果と同じ結果が得られた。今回の測定対象機器では、エラー訂正によってジッターは生じなかったといえる。

CD-R メディア要因としては、記録面材質、記録速度、記録位置、メディア製造メーカーなど様々な要因が挙げられ、それらが測定対象機器の組み合わせに依存することも考えられるため、測定条件の組み合わせは膨大な数にのぼる。ここでは、同じパソコン用 CD-R ドライブを用いて記録したシアニン色素 CD-R について、等倍と 6 倍速の記録速度の違いと、メディア銘柄の違い (製品を供給している OEM 元のメーカーは同じであるが、ディスク銘柄と販売メーカーは S 社、T 社と異なる) を比較した。

記録速度の違いによってジッター特性は影響を受けなかった。しかし、販売メーカーが異なる 2 種のメディアについては、CDP2 を DAC1 あるいは DAC2 に対して同軸あるいは光接続した場合のみ、ジッタースペクトルに明らかな違いが生じた。Fig.16 の上に、CDP2 を DAC2 に光接続した測定系において、等倍速で記録した S 社メディアを用いた測定結果を、了解性のためにジッター振幅を 10 倍して示した。Fig.16 の下には、同じ測定系において、T 社メディアを用いた測定結果を示した。約 50Hz 以下の帯域で、双方のジッタースペクトルは異なり、全体的に S 社メディアの方がジッター成分が多い。

その他のメディア要因としては、CD-R のラベル面へのガムテープ添付による偏重量や、中心穴をカッターで 1 方向のみ削って広げる偏心、信号の記録位置 (メディアの外周と内周) といった要因をテストしたが、明らかなジッター特性の変化は得られなかった。

3.7 経年変化

同じ測定機器について、同じメディアを再生して測定を行った場合、測定の時間間隔が 1 時間以内程度であれば、測定の再現性は非常に高い。しかし、それ以上の時間スケールで、測定時間間隔があいた場合、ジッター振幅はほとんど変化しないがジッター周波数がわずかに異なってくることもある。さらに、それ以上、測定時間間隔が開いた場合、振幅、周波数いずれも変化する場合がある。Fig.17 には、CDP2 を DAC2 に光接続した測定系において、前述の T 社の同じメディアを使用して、6 ヶ月後にどのようにジッタースペクトルが変化したかを示した。6 ヶ月後には、当初なかった 15 Hz に 113 ps のジッター成分が現れている。このジッター成分は DAC や ADC、CD-R メディア固有のものではないことが、同時期に行った他機器の測定結果より明らかなため、CDP2 とそのデジタル伝送系の経年変化と考えられる。このような明らかな経年変化は、他の測定対象機器には見られなかった。

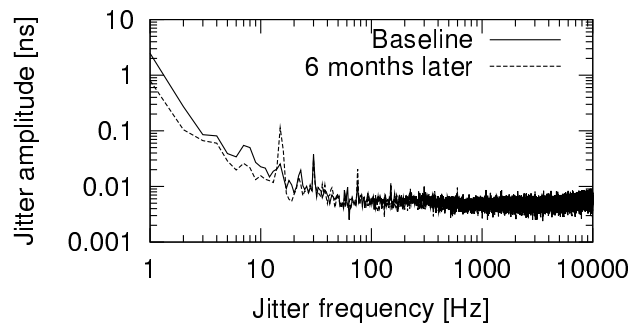


Fig. 17 Changes in jitter spectrum of DAC2 connected to CDP2.

3.8 機器への外的要因

CDP1 を内蔵 DAC を用いて再生した場合、ADC2 にて測定を行った場合のみ、26Hz のジッター成分が現れた (Fig.18)。同じ ADC2 を用いて測定した他の CDP および DAC には、このジッター成分は認められなかったため、電源あるいはアナログ信号線を通じた ADC2 と CDP1 との相互干渉などの外的要因による影響と考えられる。

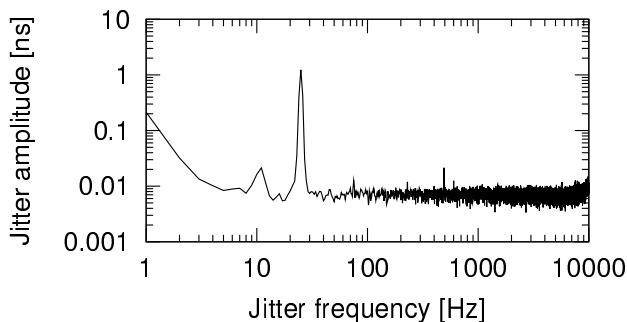


Fig. 18 Jitter spectrum of CDP1 recorded by ADC2.

4. 考 察

解析信号を用いたジッター測定は、その振幅においてわずか 1 ns ~ 数 10 ps 程度の違いを明らかにしてきた。今回測定したデジタルオーディオ機器のジッターは、ジッター成分周波数 2 Hz 以上において振幅 2 ns 未満という、従来の聴覚特性の知見からは検知限（もっとも感度の高い変調周波数 3Hz において振幅に換算し約 4~10ns [7]）以下であり、音質的には全く問題のない量であった。

蘆原ら [8], [9] は、デジタル領域において音楽信号に人工的な広帯域時間ゆらぎを加えて、その検知限を測定している。その結果、最も感度の高い被験者およびサンプル曲の場合でも、実効値で表した検知限は 500ns 程度であった。しかし、広帯域のジッターよりは、同じ振幅でも歪み成分エネルギーが特定の周波数に集中しやすい純音性ジッターのほうが、検知限は低くなることが予想される。実際のオーディオ機器の測定結果も、純音性ジッターの方が目立った。

アナログ機器を用いた周波数変調音に対する検知実験が行われたのが、30~40 年前であったことから、当時の実験精度および測定精度を、現代の機器を用いて再確認する必要性はあるかも知れない。また、より現実のオーディオ機器に近いジッター条件で、かつよりシビアな刺激音条件下において、ジッター特性の変化によって音質差が生じるのかについても興味を持たれる。

今回の測定結果の目新しい点は、CD-R メディアによるサンプリング・ジッター特性の違いを、デジタル・インタフェース信号上のジッターではなく、一旦アナログ領域に変換された音響信号を用いて定量的に測定できた事例が、学会および産業界を含めておそらく初めてであろう、という点である。ただし、その違い自体は明確であったが、絶対量としては 100ps 以下という極微量であった。よって巷で流布しているような、CD-R メディアによる音質の変化が、本当にサンプリング・ジッターによるものなのかについては、疑問が大いに残る。もっとも、今回使用したメディア以外に、より大きくジッター特性が異なるメディアがあるのかも知れない。

5. ま と め

解析信号を用いたジッター測定法は、一般のデジタルオーディオ機器を用いて、直接我々の耳に届く元となるアナログ信

号に現れるジッターの影響を高精度に測定できることが特徴である。そして本報告では、機器やその他の要因による微細なジッター特性の違いの一例を明らかにした。機器の音質とジッター特性との関係を論ずる場合には、このようジッター測定は欠かせないであろう。

謝 辞

本研究の一部には東京情報大学学術フロンティアプロジェクト研究費の補助を受けた。

文 献

- [1] Akira Nishimura and Nobuo Koizumi, "Measurement of sampling jitter in analog-to-digital and digital-to-analog converters using analytic signals," Proceedings of the 112th Audio Engineering Society Convention, No. 5558, 1-6 (2002).
- [2] 西村明, 小泉宣夫, "解析信号を用いたサンプリング・ジッター測定における誤差の検討," 日本音響学会講演論文集, 秋, No. 3-P-25, 629-630 (2002).
- [3] 西村明, 小泉宣夫, "音楽信号を用いたサンプリング・ジッターの測定手法," 電子情報通信学会技術研究報告, **HDA2002-1**, 1-7 (2002).
- [4] 加藤充美, 西村明, 安藤由典, "解析信号を用いたフルート音の倍音の周波数分析," 電子情報通信学会技術研究報告, **SP2000-136**, 43-50 (2001).
- [5] Julian Dunn and Ian Dennis, "The Diagnosis and Solution of Jitter-related Problems in Digital Audio Systems," Proceedings of the 96th AES Convention, No. 3868, 1-16 (1994).
- [6] Julian Dunn, "Jitter Theory," Audio Precision TECHNICAL NOTE, **23**, 1-23 (2000).
- [7] Hisao Sakai, "Perceptibility of Wow and Flutter," Journal of Audio Engineering Society, **18**, 290-298 (1970).
- [8] 蘆原郁, 桐生昭吾, "デジタルオーディオにおける時間ゆらぎ許容値及び検知閾," 日本音響学会誌, **59**, 241-249 (2003).
- [9] 桐生昭吾, 蘆原郁, 吉川昭吉郎, 沢口真生, 大賀寿朗, "多様な被験者を対象とした時間ゆらぎによる歪みの検知限に関する実験," 電子情報通信学会技術研究報告, **EA2002-36**, 1-8 (2002).