

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

西村 明* 小泉 宣夫**

いくつかの種類の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メディアの製造メーカの違い、信号のビットパターン、デジタル信号伝送系、DAC, ADCそしてプレーヤのクロック発振器など、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、2nsを下回った。従来の周波数変動検知実験の結果と比較すると、この程度のジッターが音質に与える影響を聴取者が検知することは困難であると予想される。

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

Various Aspects and Factors of Sampling Jitter Observed in Digital Audio Products

Akira NISHIMURA, Nobuo KOIZUMI

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, manufactures of 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 measurement, maximum amplitude of a jitter component was less than 2 ns above jitter frequency of 2 Hz. According to the previous experiments on frequency modulation detection, the effect of jitter obtained from the audio products tested here on sound quality is supposed to be undetectable for a human listener.

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。デジタルインタフェース（AES/EBU規格信号）上のジッタ

ーが再生音の音質に影響を与えること [1]、音質の違いが検知できる音楽再生音の間には、時間ゆらぎの量に違いが見られる [2]、等の指摘はあるが、それらの研究においては、DA変換後のアナログ信号に含まれるジッターの影響を精密に測定および評価しているとは言いがたい。ジッターと音質との関係を調べる

*東京情報大学総合情報学部情報文化学科

Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Media and Cultural Studies

**東京情報大学総合情報学部情報システム学科

Tokyo University of Information Sciences, Faculty of Informatics, Department of Information Systems

には、再生音あるいはデジタル記録後のデータに、ジッターによるどのような影響がどれだけ物理的に含まれているかを、定量的に測定することが重要である。

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[3, 4]、測定誤差の要因について検討をした[5, 6]。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[7, 8]。

本稿は、それらの測定法を用いて実測された種々のデジタルオーディオ機器のジッター特性を比較検討し、ジッターの生じる要因とその特性を明らかにする。

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。この測定系において、DA変換される信号を測定信号、AD変換後の信号を観測信号とする。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。

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

この信号 $x(t)$ に対する解析信号 $y(t)$ は、 $x(t)$ をヒルベルト変換して得られる信号を $H[x(t)]$ として、

$$y(t) = x(t) + jH[x(t)] \quad (2)$$

と表される。 $y(t)$ は複素信号であるから、各時刻の振幅絶対値（振幅変動波） $a(t) = \sqrt{x(t)^2 + H[x(t)]^2}$ と瞬時位相角 $\phi(t) = \arctan(H[x(t)]/x(t))$ を用いて、

$$y(t) = a(t) \exp(j\phi(t)) \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、式(2)に式(1)を代入し、ヒルベルト変換が90度位相変換であること $H[\sin(\theta)] = -\cos(\theta)$, $H[\cos(\theta)] = \sin(\theta)$ を利用してこれを解くと、

$$y(t) = a(t) \exp(j(\omega_c(t + J \sin(\omega_m t)) - \pi/2)) \quad (4)$$

となる[9]。よって、ジッター波形は、

$$J \sin(\omega_m t) = (\phi(t) + \pi/2)/\omega_c - t \quad (5)$$

で得られる。実際の測定では、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 $\phi(t)$ と、それを時間微分して得られる搬送周波数を時間平均した ω_c 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[4]。ここでは単純化の為にジッター波形を正弦波で表したが、理論的には、搬送波周波数と、AD変換におけるナイキスト周波数あるいはゼロ周波数との差を最高周波数とするジッター波形を抽出することが可能である。

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[5]。

ここまでは純音信号を測定信号として用いる測定方法について述べたが、オーディオCDプレーヤのように回転系と電子系が混在するオーディオ機器では、CD盤からの信号読取とその制御、さらに音響信号の復元や再生の過程において、CD盤に記録されている音楽信号と何らかの相関をもったジッターが生じており、そのようなジッターは純音のような単純な測定信号を用いる限り測定できないのではないかと、いう懸念も存在する。そして、実際にジッターが音質に悪影響を及ぼすことが問題になるのは、一般的に音楽信号の録音あるいは再生時である。ここでの音楽信号とは、音楽をデジタル記録した信号のことであり、複雑なスペクトルが時間的に変化する特徴を持ったものと見なしている。

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[7]。

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[4]。

- ・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

3.1 測定方法

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に記録した測定信号を読み取り、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で変換した後のデジタル信号である観測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ものを観測信号とした。プレーヤ測定時の接続は、Fig.1に示した。

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、部所を経るごとに積算されていく。そして、ジッターを測定する元となる観測信号は一旦アナログ信号となったものをAD変換した後に得られるため、特定の部所だけで生じるジッターを直接測定することは不可能である。よって、注目したい部所のメディアあるいは機器を複数入れ換えて測定を行い、結果を比較することによって、その部所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。

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。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。

測定の結果得られるジッター波形について、1秒間のHanning窓掛け後にFFTを行い、これを0.5秒ずつずらして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10ps程度である。測定用音楽信号は過去の測定〔7〕と同じくRWC-MDB-

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

label	specification	notes
CDP1		built-in DAC
CDP2	Digital Servo Ratio Locked Loop	
CDP3	1bit $\Delta\Sigma$	
CDP4	1bit MASH	portable
DVDA1		
DAC1	22-Bit D.R.I.V.E. 32 $\times$ oversampling	built-in DAC of CDP1
DAC2	20-Bit $\times$ 16/ch MMB 8 $\times$ oversampling	
DAC3	24-Bit 64 $\times$ oversampling	PCI Audio Card
ADC1	24-Bit 64 $\times$ oversampling	PCI Audio Card
ADC2	16-Bit, $\Delta\Sigma$ 64 $\times$ oversampling	SCSI-BOX
PCA1	AC97 Codec	PCI Sound Card

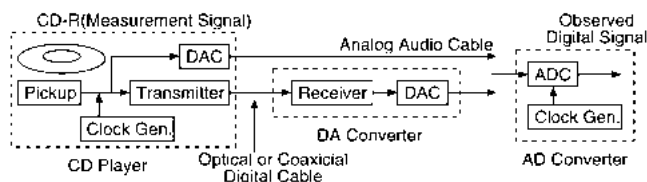


Fig. 1 Block diagram of measurement.

2001No.2 [10] を用いた。この場合のジッター振幅検知限は 3 ns [7] 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。

3.2 CDプレーヤとDAコンバータ

Fig.2にはCDP 1 内蔵DAC再生時のジッタースペクトルを示した。CDP1 内蔵DAC (DAC 1) は外部デジタル入力の再生も可能であり、Fig.3には、CDP 2 の読み取ったデジタル信号をDAC 1 にて再生時のジッタースペクトルを示した。Fig.4はCDP 3 の読み取ったデジタル信号をDAC 1 に入力して再生した結果である。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。

内蔵DACと外部DACを比較するため、Fig.5にはDVD-Audioプレーヤ (DVDA 1) にて内蔵DACから再生した結果を、Fig.6にはDVDA 1 のデジタル出力を、DAC 2 にて再生した結果を示した。これらの比較より、DAC 2 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。

また、Fig.7にはCDP 2 内蔵DACを使用して、直接ADC 1 で記録した場合のジッタースペクトルを示した。これとFig.3を比較すると、CDP 2 については、直接アナログ出力する場合 (Fig.7) より、外部のDAC 1 にデジタル接続を行った方 (Fig.3) が、ジッター

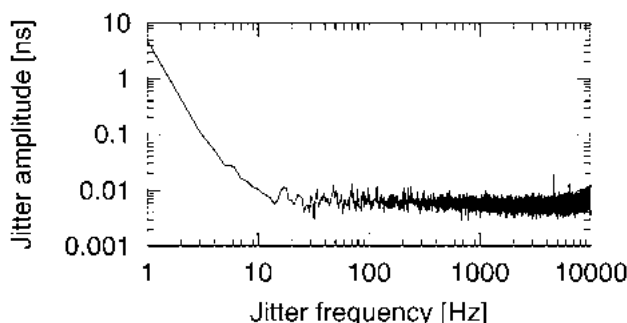


Fig. 2 Jitter spectrum of CDP1 (DAC1) .

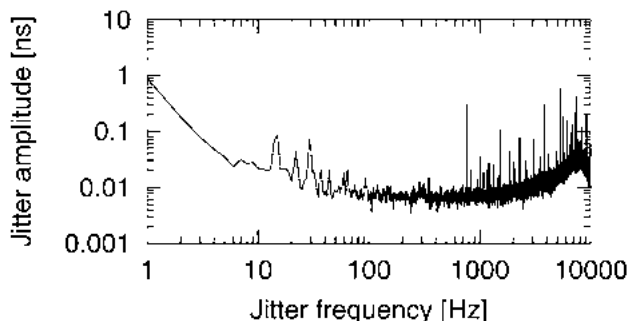


Fig. 3 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2.

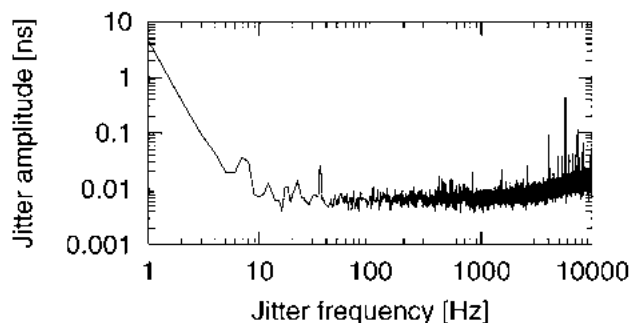


Fig. 4 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP3.

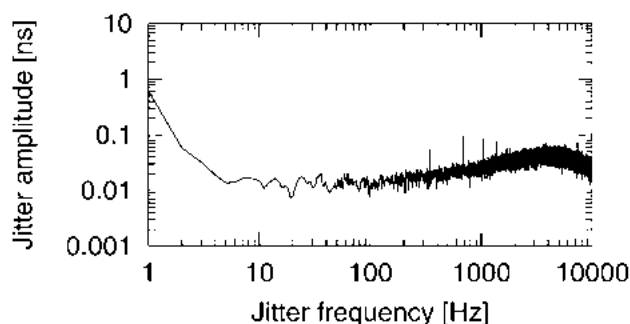


Fig. 5 Jitter spectrum of DVDA1.

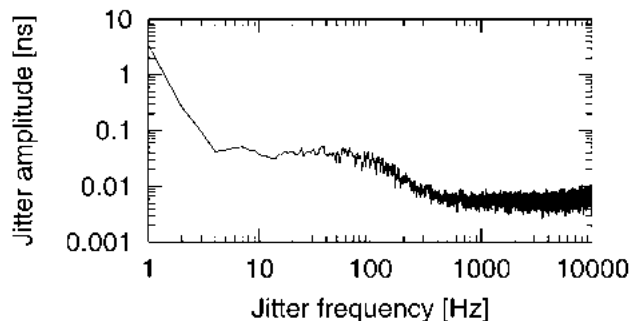


Fig. 6 Jitter spectrum of DAC2 connected to DVDA1.

量は多いことが分かる。

また、Fig.8には、CDP 3 内蔵DACを使用して、直接ADC 1 で記録した場合のジッタースペクトルを示した。こちらの場合は、さきほどの例とは逆で、外部のDAC 1 にデジタル接続を行った場合 (Fig.4) の方が、全体的なジッターノイズフロアが低いことが分かる。

これらの結果をまとめると、もともと内蔵DACを使用したときのジッター量が少ないプレーヤ (CDP 2, Fig.7) に関しては、外部DACにデジタル出力を行

うと、ジッター量が増す (CDP 2 →DAC 1, Fig.3) 場合がある、ということである。一方、内蔵DACのジッター量がある程度大きいプレーヤ (CDP3 Fig.8) に関しては、外部DACを用いることによって、ジッター量を低減できる (CDP 3 →DAC 1 Fig.4) 場合もある。さらに、同じDACを用いても接続するプレーヤが異なるとジッタースペクトルも異なること (Fig.2~4) から、プレーヤのクロックジッター特性とDACのジッター特性は重畳される関係にあることが確認できる。

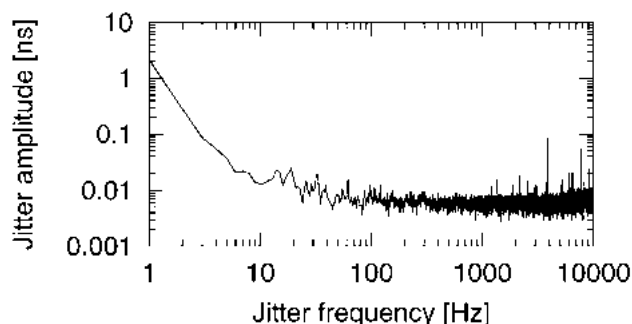


Fig. 7 Jitter spectrum of CDP2.

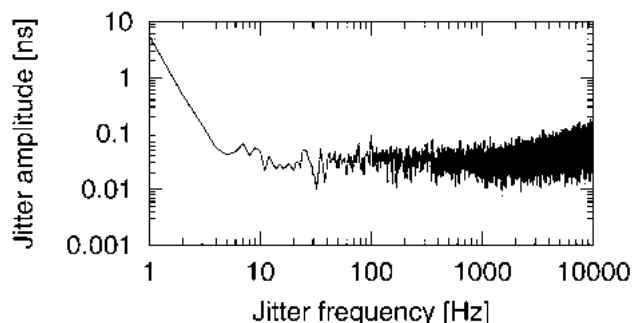


Fig. 8 Jitter spectrum of CDP3.

3.3 携帯CDプレーヤ

いわゆるオーディオマニアの一部には、AC電源の質に拘る傾向が見られる。ただし、その科学的根拠は乏しく、プラグやケーブルを高品質なものに交換したことによる計測可能な電氣的影響や音響的影響は、いまだ明らかになっていない。また、AC電源からの悪影響を逃れるために、DC電源（直流バッテリー駆動）を、特にCDプレーヤに求めるマニアも存在する。携帯CDプレーヤは、充電電池による駆動と、AC-DC変換器を使用したAC電源駆動の両方が可能なため、電源

によるジッターへの影響を調べるために、双方の電源状態において測定を行った。Table 1のCDP 4が、その携帯プレーヤである。

結果としては、電池駆動と、AC-DC変換器を通したAC電源駆動では、内蔵DAC、外部DACを使用した場合のいずれも、得られたジッタースペクトルにほとんど差異は無かった。このため、それらの結果はここには示していない。内蔵DACと外部DACの違いを見るために、Fig.9にCDP 4のアナログライン出力をADC 1で記録したときのジッタースペクトルを、Fig.10に

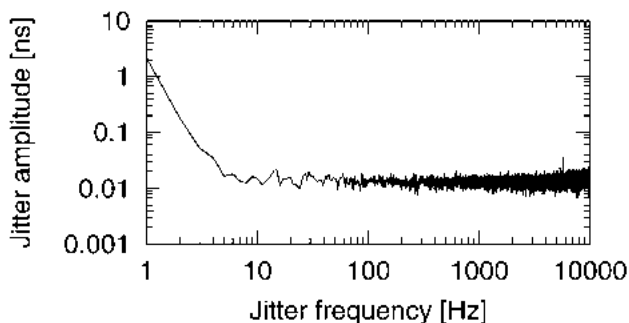


Fig. 9 Jitter spectrum of CDP4.

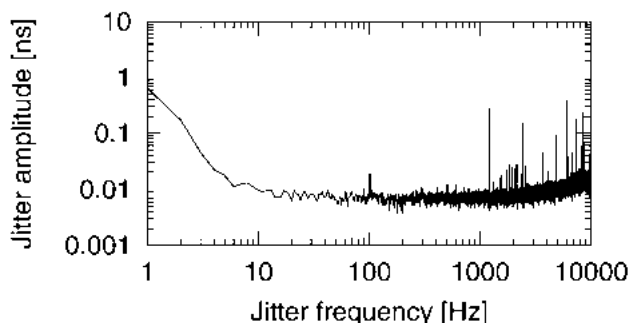


Fig. 10 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP4.

CDP 4 の光デジタル出力をDAC 1 に入力し、ADC 1 で記録した時のジッタースペクトルを示した。これらの結果を比較すると、プレーヤ内蔵DACを使用した方が、外部DACを経由した場合に比べて、明らかにジッターが少ないことが分かる。これは前節において、CDP 2 の内蔵DACを用いた場合 (Fig.7) と CDP 2 のデジタル出力をDAC 1 に入力した場合 (Fig.3) の比較において、前者のジッター量が少なかったことと、同じ傾向である。

3.4 DVDプレーヤ

DVDA 1 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.11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.12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

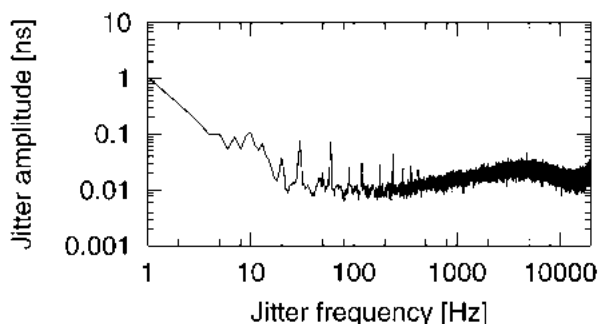


Fig. 11 Jitter spectrum of DVDA1 reproducing a DVD-Video (24bit, 96kHz) medium.

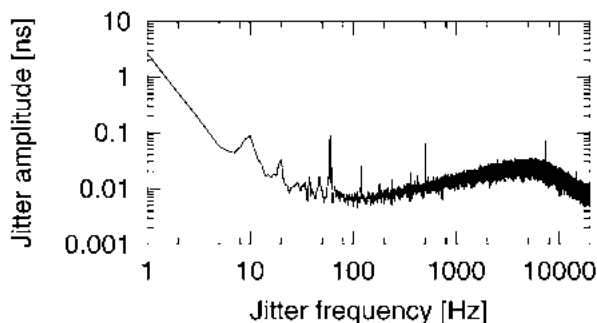


Fig. 12 Jitter spectrum of DVDA1 reproducing a DVD-R medium of DVD-Audio (24bit, 96kHz) format.

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。

3.5 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.13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ADC 1は、ア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DAC 3とラベリングした。Fig.14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DAC 3出力をもう一方のADC 1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なかった。Fig.14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、ADC 1を使用した測定結果（Fig.2～12, 16～21）には、そのようなピークは見られないことから、これはDAC 3におけるジッター特性であることが分かる。

3.6 信号に依存するジッター：J-test signal

Dunnら [11, 12] 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、AES 3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-1 LSBを繰り返す信号（変調波）を足し合わせた信号である。AES 3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

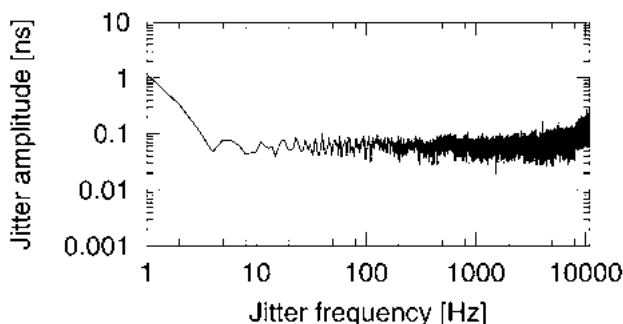


Fig. 13 Jitter spectrum of PCA1. Sampling frequency is 48 kHz.

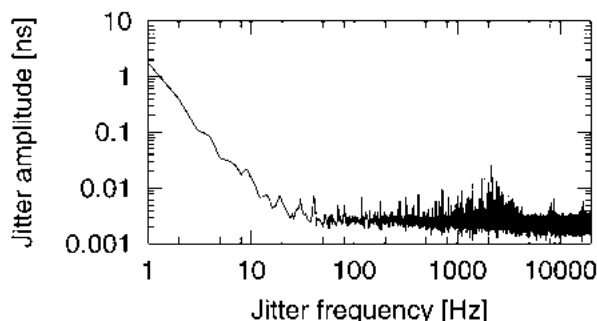


Fig. 14 Jitter spectrum of PCI audio cards. Sampling frequency is 96 kHz.

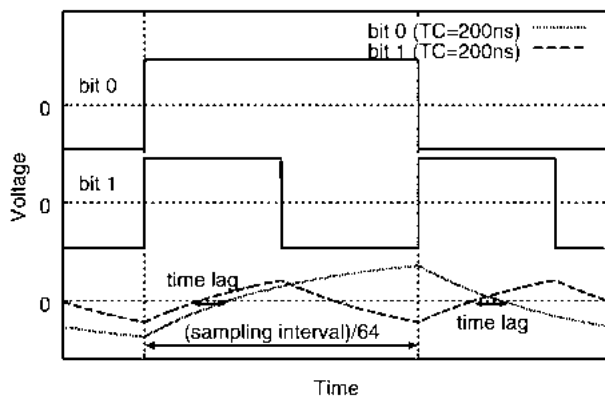


Fig. 15 AES3 intersymbol interference.

を行う。AES 3 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)
0xBFFFFFF 0xBFFFFFF 0x3FFFFFF 0x3FFFFFF (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、AES 3 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。

AES 3 規格において 1 サブフレーム 32bit のうち、最初のプリアンプル部 (4 bit) 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.15 上と中の実線によってその電位変化が表される。

一般に、DAC に外部から入力された AES 3 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 = サンプル周期の 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い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.15 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

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 AES 3 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、AES 3 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、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 [5] ため、搬送波をサンプリング周波数の $1/6$ とした 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なかった。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、441Hz (周期 100 サンプル) にノイズフロアのジッター成分より

強いジッター成分を検出できたのはCDP1 だけであり、CDP1 において、J-test信号を再生したときのジッタースペクトルをFig.16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。

3.7 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.17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3 m）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7 m）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

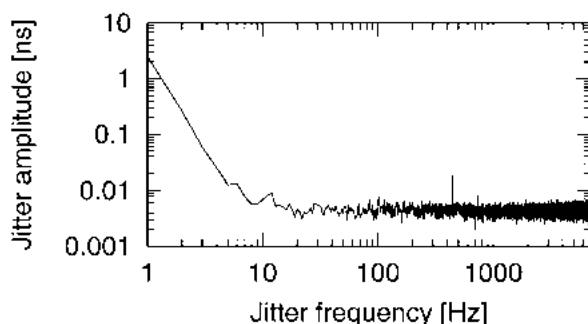


Fig. 16 Jitter spectrum of CDP1 induced by J-test signal.

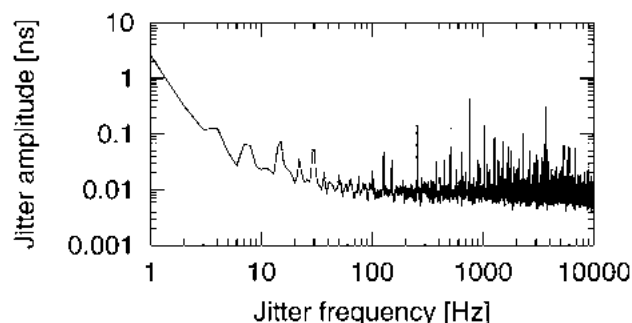


Fig. 17 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial digital cable.

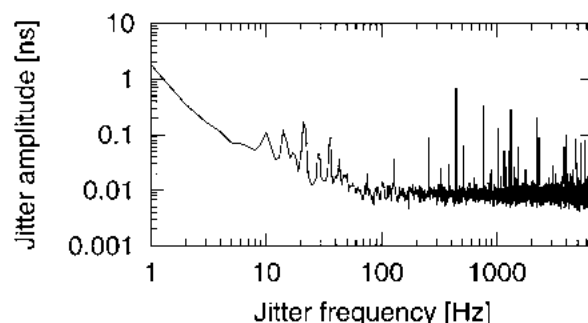


Fig. 18 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial digital cable. Measurement signal is a J-test signal modulated by 441-Hz rectangular wave.

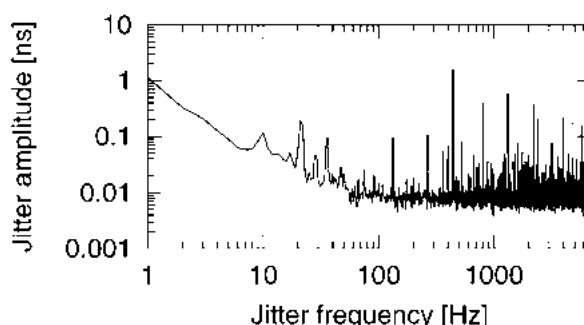


Fig. 19 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial audio cable. Measurement signal is a J-test signal modulated by 441-Hz rectangular wave.

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倍ほど大きくなることが分かった。Fig.18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.19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。

3.8 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、メディア上のピットを読んだ際の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、アイパターンの読み取りを制御するクロックとは別の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、アナログ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、それ以外のデジタル回路の動作にも電気的な影響を与え、サンプリング・クロックにジッターを生じさせるという考えもある。

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度に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。

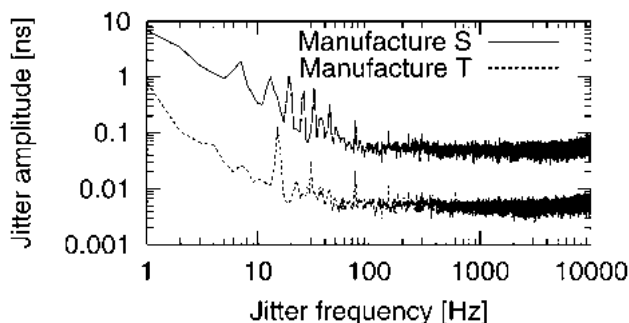


Fig. 20 Jitter spectrum of DAC2 connected to CDP2 via an optical digital cable. Upper : The result of manufacture S. Jitter amplitude is multiplied by 10. Lower : The result of manufacture T.

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.20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.20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。

3.9 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、測定時間間隔が長い場合、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可能性がある。Fig.21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ヵ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ヵ月後には、当初なかった15Hzに113ps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。

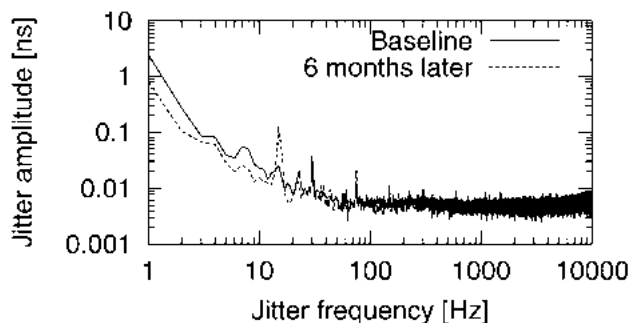


Fig. 21 Changes in jitter spectrum of DAC2 connected to CDP2.

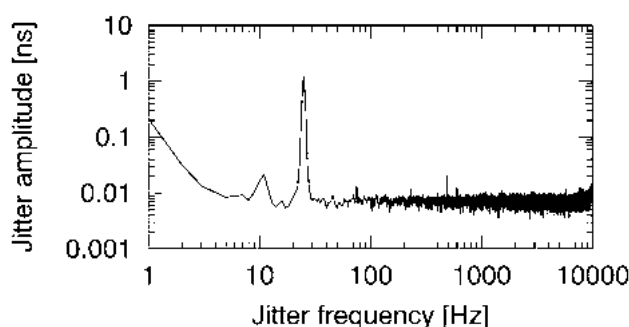


Fig. 22 Jitter spectrum of CDP1 recorded by ADC2.

3.10 機器への外的要因

CDP 1 を内蔵DACを用いて再生した場合、ADC 2 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.22)。同じADC 2 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ADC 2 とCDP 1 との相互干渉などの外的要因による影響と考えられる。

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未満であった。また、音楽信号を測定信号とした場合には、検出限である3 ns以上のジッターは測定できなかった。そして、今回測定されたジッターは、従来の研究で得られた周波数変調に対する検知限（もっとも感度の高い変調周波数3 Hzにおいて、ジッター振幅に換算すると約4～10ns [13]）以下であった。よって従来の聴覚的知見からは、今回測定されたジッターは、音質的には問題のない量であると考えられる。しかし、そのような研究が行われた当時はアナログ機器を制御して刺激音を合成しており、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し、それに対する聴覚の検知限も再確認する必要性はあるかも知れない。

近年では、蘆原ら [14, 15] が、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

表したジッターの検知限は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。今回行った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。よって、より現実のオーディオ機器に近いジッター条件で、かつ音楽信号よりも音の違いを検知しやすいシビアナ刺激音条件下において、よりジッターの検知限が低くなるかどうか、あるいはジッター特性の変化によって音質差が生じられるかどうかについて、興味は依然として持たれる。

今回の測定結果において特筆すべき点は、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、絶対量としては振幅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。

一方で、赤堀ら [1] は、デジタルインタフェース上のビットストリームにジッターを加えて、聴感上の音質の変化を調べているが、実験結果について統計的検定を行った結果、振幅80psのジッターの有無を、被験者は有意差ありで聞き分けたことが示されている。しかし彼らの実験では、実際に再生されるアナログ音響信号にどの程度のジッターが含まれていたのか

が正確に検証されておらず、実験にはいくつかの改造を施したオーディオ機器が使用されているため、一般性のある結果であるかどうかについて疑問が持たれる。そのような機器の音質とジッター特性との関係を論ずる場合には、本稿で示したようなアナログ音響信号に含まれるジッターの測定は欠かせないであろう。

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に違いが生じることを明らかにした。また、過去に行われた周波数変動検知のための聴取実験の結果と比較することによって、今回測定対象とした機器が含んでいるジッター量は、聴感上検知できない程度であると予想された。一方で、ジッターが音質に影響を与えているという主張や実験結果も存在するため、そういった条件下において本当にジッター特性に違いが生じているのかを明らかにするには、今回用いた測定手法の活用が望ましいと言えよう。

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、および平成14,15年度東京情報大学共同研究研究費の補助を受けた。

参考文献

- [1] 赤堀肇, 石川智治, 小林幸夫, 宮原誠, “デジタル・オーディオ・インタフェース (AES/EBU) の jitter と音質の関係,” 電子情報通信学会技術研究報告, **EA99-40**, 1-8 (1999).
- [2] 三井実, 石川智治, 小林幸夫, 宮原誠, “音のゆらぎ情報と時間伸び縮み歪について,” 電子情報通信学会技術研究報告, **EA99-41**, 9-16 (1999).
- [3] 西村明, 小泉宣夫, “AD/DA変換器における振幅および周波数変動の測定,” 電子情報通信学会技術研究報告, **HDA01-6**, 6-16 (2001).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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測定精度の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, **EA2002-65**, 41-45 (2002).
- [7] 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).
- [8] Akira Nishimura and Nobuo Koizumi, “Measurement of Sampling Jitter using a Musical Signal,” Proceedings of the 114th Audio Engineering Society Convention, No. 5797, 1-9 (2003).
- [9] 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).
- [10] 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一, “RWC研究用音楽データベース: ポピュラー音楽データベースと著作権切れ音楽データベース,” 日本音響学会講演論文集, **March**, 705-706 (2002).
- [11] 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).
- [12] Julian Dunn, “Jitter Theory,” Audio Precision TECHNOTE, **23**, 1-23 (2000).
- [13] Hisao Sakai, “Perceptibility of Wow and Flutter,” Journal of Audio Engineering Society, **18**, 290-298 (1970).
- [14] 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).
- [15] 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).