

AD/DA 変換器における時間ゆらぎを考慮に入れた波形比較による 音質差測定法

— CD 媒体個体差による音質差測定の試み —

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 CD 媒体個体差によって生じるかも知れないような、微小な音質差を測定するために、二つの測定を行った。ひとつは、CD プレーヤの DA 変換器のクロックと AD 変換器のクロックを同期させて録音された波形同士の差分の実効値を比較する手法であり、サンプリングクロックのゆらぎ以外の要因による音質差の存在を調べるためである。もうひとつは、クロックを同期せずに録音した波形と、原信号の波形の位相をフレーム毎に比較し、遅れ時間の時間変化を測定する手法である。これらの測定によって、今回測定対象とした CD プレーヤには、CD メディアに依存するような音質差は存在しないことが分かった。

キーワード FFT, 位相角, サンプリング・ジッタ, クロック同期

Measurement of differences in sound quality by waveform comparison
which takes account of temporal fluctuations in DA/AD converters

— Some trials to measure sound quality differences induced by individual
differences in CD media —

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 In order to measure minute differences of sound quality which might exist between different CD media, two measurements were conducted. One is the measurement of comparing residual of the two different digital waveforms obtained from the different CD media under the clock synchronization condition between DA and AD converters. This method clarifies existence of the differences of sound quality except for sampling clock fluctuation. The other is the measurement for deriving temporal variations of the time difference between the original signal and the recorded signal by comparing phase angle of each short frame under the non clock synchronization condition. As a result of these measurements, no sound quality difference which depends on CD media was found in the CD players.

Key words FFT, phase angle, sampling jitter, clock synchronization

1. はじめに

オーディオマニアの世界では、CD プレーヤから再生される音楽の音質は、同じ機器を使用しても、メディア条件によって聴感上異なると言われている。例えば、商用音楽 CD に記録されているデジタルデータをパソコンなどを使って読み取り、CD-R に記録すると、同じデジタルデータを記録したメディアができる訳であるが、これらのメディアを比較再生すると、明らかに音質が異なる、といった具合である。また音楽制作業界でも、データとしては全く同じである音楽 CD が、その製造工程(マスタデータに何のメディアを使用するか)によって、音質が異なると言われている [1]。さらに、CD-R 録音機の記録媒体に用いる CD-R メディアの銘柄による音質差異についてオーディオ評論家が評価することも珍しくない。もちろん、このような“聴感上の”音質差は、科学的に厳密なものではなく、ブラシーボ効果などによって左右されやすい現象であり、実験者と聴取者に、いずれのメディアが再生されるか知らずに行う二重盲検法によって、有意な主観的音質差が検出されるかどうかは疑わしい。

実際、製造工程(メディア、EFM 符号器、レーザビーム記録機、マスタリング速度)を変えて制作した音楽 CD の音質を、聴取者に対してメディアの素性を隠してランク付けさせた実験 [2] では、平均的な順位では、評価の高いディスクとそうでないディスクに分かれたが、個人間の評価の一致性は低かった。

主観評価実験による音質差の測定結果に一般性を持たせるのは非常に難しい。その理由としては、音質差を検知できる能力をもった聴取者を対象とする必要があり、その選定が困難であること、使用する機器によっては、その音質差が存在しない可能性があること、が挙げられる。例えば、仮に主観評価実験で音質差が検知できなかった、という結果が得られたとしても、もっと音質変化に敏感な聴取者(オーディオ評論家がそれに該当するだろうか?)を対象とすれば検知できるのではないかと、とか、実験に使用した機器以外の機器では音質差が生じているのではないかと、といった意見を否定することはできず、音質差が無いことを証明するには至らない。また、仮に主観評価実験で音質差が検知できたとして、主観的にどういった音質因子が変化を受けるかが明らかになったとしても、物理的にどういった音質変化が生じているかまで明らかにしている訳でなく、別の機器を用いた時にも同様な音質変化が生じるかどうかについては、また別の主観評価実験を行わねば答えを出すことができない。つまり、ここで挙げているような音質変化の問題に対して、主観評価実験は、現象の一部しか捉えることはできないと言える。

このような論を待たず、音質差は物理的な測定によって検出されるべきことは当然である。しかし、従来の CD プレーヤの測定法(JEITA CP-307)は、測定用信号の記録された CD と測定器を用いた、S/N 比、周波数特性、歪み率、クロストークといった測定項目を対象としている。これは、機器毎の性能や特性の違いを明らかにすることを目的としており、同一機器においてメディア条件によって上記項目の測定結果が変化すると

は物理的に考えられないためであるとも言える。さらに、当然ながら音楽を記録した音楽 CD を使った測定項目は無く、従来の測定方法では、音楽が記録されたメディア条件による音質の違いを測定することはできない。

よって本研究では、メディアの差異のような、従来の測定法では考慮されていなかった要因によって生じるかもしれない、僅かな音質差を測定する科学的手法を提案することを目的とする。さらにその測定法は、市販の音楽 CD を用いて測定を行うことができ、実際に再生されているアナログ信号を経由したデジタル信号を対象とするのが特徴である。この測定法を用いて、音楽 CD メディアの違いによる音質差の測定を行った結果を報告する。

2. これまでのデジタルオーディオ測定

2.1 測定用信号を用いた測定法

JEITA(社団法人電子技術産業協会: 旧 EIAJ)規格において、CD プレーヤ測定法(CP-307)と測定用 CD(CP-308)、デジタルオーディオ機器の測定法(CPR-2101)が定められている。

それらで規定されていない測定指標としては、DA/AD 変換時のサンプリングクロックのゆらぎ現象(サンプリング・ジッタ)がある。サンプリング・ジッタは通常、正確なサンプリング間隔に対する偏差として表現される。サンプリング・ジッタによって生じる歪みは周波数変調による側帯波として現れ、ジッタ振幅が J_s の時、 f Hz の信号音に対する側帯波の相対振幅は、 $\pi J f$ である [3]。CPR-2101 では、その制定時においてジッタの測定/評価方法が確立していなかったこと、ジッタによる影響は S/N 比や高調波歪率などの指標に現れることなどから、ジッタに関する指標は測定項目に含んでいない。

一方、オーディオマニアの世界では、サンプリング・ジッタに限らず、CD プレーヤにおけるデータ読み取り時のアイパターンに現れるジッタや、デジタルケーブル伝送時のクロックの揺らぎ現象であるインタフェース・ジッタなど、あらゆるデジタル信号のジッタが、音質に影響のあるものとして考えられている [4], [5]。しかし結局のところ、サンプリング・ジッタが実際に人間が音響信号として聴取するアナログ信号の再生/記録に歪みをもたらす要因であるため、その測定と評価が最も重要であると我々は考える。そのため、解析信号によるサンプリング・ジッタ測定法 [6], [7] を提唱し、その有効性および実際の機器の測定結果をこれまで示してきた。

純音を測定信号として記録した CD-R メディアを再生し、解析信号を用いたサンプリング・ジッタ測定法によって、CD-R メディアの違いによるサンプリング・ジッタ特性の違いを検出することが可能であった [8]。しかし、そのジッタ特性の違いは、ジッタ振幅においてわずか 100ps 以下であることから、それが原因で実際の音楽 CD の再生時に生じるアナログ信号の差異は、可聴帯域で信号音に対して -104dB 以下の領域の差異であることが分かる。

しかし、純音のような単純な信号によって生じるジッタと、音楽のような複雑な信号の再生時に生じるジッタには違いがある、という主張も、その根拠はさておき、存在する。そこで、

音楽信号を再生する際に AD/DA 変換器において生じるサンプリング・ジッタ測定法を、解析信号を用いた測定法を進展させることによって導き、振幅 3ns 程度以上のサンプリング・ジッタを検出可能であることが示されている [7]。そして、測定対象とした複数のデジタルオーディオ機器においては、検知限以上のジッタは含まれていないことも示した [8]。

この測定方法では、音楽信号とその前後に AD/DA 変換器のサンプリング・クロック間の定常的偏差を測定するための信号音を記録した CD-R メディアを、測定用に制作する必要がある。よって、市販音楽 CD と、そのオーディオデータを記録した CD-R の間に音質差があるかも知れない、という現象を確認できる測定方法とは言えない。

2.2 音楽 CD と音楽信号を使った測定の試み

市販音楽 CD 再生時の音質が、さまざまな要因によって主観的に変化する原因を探るために、実際の市販音楽 CD を用いて、宮原らの研究グループは一連の測定を試みている。

三井ら [9] は、電源極性の違いによる DA 出力波形の違いをゼロクロス時間を測定して比較している。しかし、振幅の歪み(高調波歪みなど)特性変化によっても、ゼロクロス時間は変化するため、彼らの測定が、時間伸び縮みのみを測定しているかどうかは疑問である。また、冬木ら [10] は、電源極性の異なる条件で得られた再生音を AD 変換した後のデジタル波形の差分より、主観的に音質が劣化する条件では振幅歪みが起きていると推測しているが、この測定では、サンプリング間隔ゆらぎであるジッタだけでなく、再生用 DA 変換器と録音用 AD 変換器とのサンプリング周波数の定常的な偏差や、AD/DA 変換器双方のサンプリング位相のずれによっても、差信号の振幅は影響を受けるため、正確にサンプリング・ジッタや振幅歪みを測定しているとはいえない。

よって、市販音楽 CD を用いた音質差測定法ははまだ確立されておらず、デジタルデータは同一であっても、メディアの違いによって生じるかもしれない音質変化を、精度よく測定することは困難であると言える。

3. AD/DA 変換器における時間ゆらぎを考慮に入れた新しい測定法

二つの信号が同一か、どれくらい異なっているかを調べる単純な方法は、二つの信号の残差信号を調べることである。しかし、市販音楽 CD に記録されている音楽信号を用いて、DA 変換後のアナログ信号を AD 変換して得られるデジタル信号を対象に測定を行うには、前節で指摘したように、DA 変換器と AD 変換器のサンプリングクロックの定常的偏差と時間的ゆらぎ、位相ずれがあるため、複数の再生メディア条件で得られた信号の残差を単純に計算することはできない。

そこで今回は、再生するデジタル信号波形と、DA/AD 変換器間のサンプリングクロックを同期させた条件で AD 変換されたデジタル信号の波形との差分を観測することによって、それらクロック間のゆらぎ/ずれの影響を極力小さくし、複数の再生メディア条件で得られた残差信号の比較を行うこととした。つまりこの手法では、メディア条件が DA 変換器のサンプ

リングクロック以外の音質変化要因に与える影響を調べることができる。

また、再生メディアが DA 変換器のサンプリングクロックに影響を与えて生じる音質変化を捉えるために、音楽 CD 再生時の DA/AD 変換器のサンプリングクロックのずれの時間変化を、音楽信号そのものから測定することとした。測定された信号間の時間ずれから、定常的なサンプリング周波数差を差し引くと、時間ゆらぎ波形、つまり音楽信号再生時に測定系に生じているサンプリング・ジッタ波形が得られる。

3.1 音質比較測定対象 CD メディア

同一のデジタルデータが記録されている複数のメディアを 4 枚用意した。さらにそのうち市販音楽 CD に、CD リングプロテクタ (audio-technica AT6079) を装着した条件でも測定を行った。このリングプロテクタは、メーカーホームページによると、「グリーン色採用でレーザー光の乱反射を抑制し、音質向上。回転時のゆれを抑制。防振効果を高め、音質向上を実現。」という効能が唱われている。

表 1 に、使用した音楽 CD 素材を示した。最初に Orig を CD プレーヤで再生し、その S/PDIF 出力を次節で説明するシステムを用いてパソコンにデジタルデータとして取り込み、そのデジタルデータを、Orig と同じ曲順で、CD-R に記録した。記録は全て同一のドライブ (PHILIPS 241240) において、Disk at Once で行った。次節で説明する方法により、全てのメディア再生条件で CD プレーヤが読み取ったデジタルデータの比較を行ったが、全く相違は無かった。

Table 1 測定対象音楽 CD

略号	記録速度	その他条件
Orig	—	“えりあし・aiko” PCCA-01969 (Copy Controlled CD)
RCD	—	Orig にリングプロテクタを装着
X4	4 倍	S 社製 CD-R
X24	24 倍	S 社製 CD-R
TX4	4 倍	T 社製 CD-R

測定対象とした CD プレーヤを表 2 に示した。

Table 2 測定対象 CD プレーヤ

略号	プレーヤメカニズム	DA 変換器
CDP1	—	22-Bit D.R.I.V.E.
CDP2	VRDS	Digital Servo Ratio Locked Loop

3.2 DA/AD クロック同期条件での波形残差比較

パソコン用 DA/AD 変換器のやや高級なものには、4 チャンネル以上同時 DA/AD 機能や、ワードシンク入力あるいは S/PDIF 入力からのクロック信号に同期して、DA/AD 動作可能であるものが多い。ここでは、それら両方の条件を満たしている、S/PDIF 入出力を含めた 6-in, 6-out 仕様の M-Audio 社製 Delta66 を使い、CD プレーヤの S/PDIF 出力のクロックに同期して、同時に CD プレーヤのアナログステレオ出力に対して AD 変換を行った。また、CD プレーヤの S/PDIF 出力に現れるデジタルステレオ信号も同時に記録し、再生メディア

3.3 サンプリングクロックずれ測定

3.3.1 位相角比較による時間ゆらぎ測定

異なるメディアを CD プレーヤにおいて再生し、AD 変換器で録音された二つのデジタル信号を想定する。この二つのデジタルデータ系列は、DA/AD 変換器両方のサンプリング・ジッタの影響が含まれていることになる。前節の測定によって、DA/AD 変換器のサンプリングクロックが同期した条件では、時間変化に伴う機器特性の変化以上の、メディアに依存した波形の相違は認められなかった。よって、もしメディアに依存する音質の変化が存在するとすれば、それはサンプリング・ジッタによるものと推測される。そこで、サンプリング・ジッタによって生じる、二つの信号の相対的時間差を測定する方法を示す。

サンプリング間隔以下の相対的な時間差が存在する二つのデジタル時系列信号対において、二つの信号がほぼ同じ波形となるフレーム毎に離散フーリエ変換を行い、その位相角の差に着目することによって、その時間差を求めることができる。具体的には、 n サンプル ($n = 2^k$, k は自然数) のフレームに含まれる信号に Hanning 窓掛けを行い、FFT を行って得られる一方の信号の複素スペクトルを $S_1(i)$ 、もう一方の信号の複素スペクトルを $S_2(i)$ ($i = 1, 2, \dots, n/2$) とおくと、その位相角の差 $\phi(i)$ は、

$$\phi(i) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[S_1(i)]}{\text{Re}[S_1(i)]} - \tan^{-1} \frac{\text{Im}[S_2(i)]}{\text{Re}[S_2(i)]} \quad (1)$$

と表される。ここで Re は実部を、Im は虚部を計算する演算子とする。この位相角の差を、離散周波数 i の関数となる二つの信号の相対的な遅れ時間 $\tau(i)$, ($i = 2, 3, \dots, n/2$) (単位はサンプリング周期) に変換するには、

$$\tau(i) = \frac{2n\pi\phi(i)}{i-1} \quad (2)$$

となる。 $\tau(i)$ は、原理的にはどの離散周波数でも等しく二つの信号の遅れ時間を示すことになるが、実際の測定では測定系に存在するノイズや量子化誤差のため、遅れ時間はある程度のばらつきを持つ。パワーの小さい離散周波数での位相角計算には誤差が大きく現れるため、フルスケール純音のパワーに対して -120dB 以下の離散周波数を除いた他の離散周波数での遅れ時間の算術平均値を、対象とするフレーム間の遅れ時間とする。

この計算をフレームをずらしながら (ここではフレーム長の半分 $n/2$ づつ) 行うことによって、二つのデジタル信号の相対的遅れ時間の時間変化を捉えることができる。フレーム長を短くすると、より測定の時間分解能は向上するが、測定精度の劣化につながる恐れもある。フレーム長と測定精度との関係は、次節のシミュレーションで検討する。

3.3.2 測定精度検討のためのシミュレーション

先に指摘したように、この測定では、アナログ系を経由するゆえの測定系ノイズと、DA/AD 変換時の量子化誤差によって、測定誤差が生じる。よって、この測定誤差の程度を見積もるために、次式で表される 1 サンプル周期以下の遅延を実現する FIR フィルタを利用することによって得られた遅延信号に対し

て、16bit 量子化を行った信号に対して、原信号からの遅れ時間を測定するシミュレーション実験を行った。

遅れ時間 D サンプル (D は実数) の直線位相遅延 FIR フィルタ係数 $h(t)$ は、 k を整数、 T をサンプリング周期として、 $t = kT$ とおき、以下のように表される [11]。

$$h(t) = \frac{\sin(\pi(k - D/T))}{\pi(k - D/T)} \cdot w(t) \quad (3)$$

$w(t)$ は、窓関数である。 $h(t)$ は $t = 0$ 以前にも値をもち、 D の値が小さい場合には $t = 0$ 以前の切捨て誤差が大きくなる。このため、 D に固定遅延量 D_0 (係数長の半分) を付加して $D = D_0 + d$, ($0 < d < 1$) という形にする。固定遅延分は、別途補正する。係数長は 1024 タップとして、無限のインパルス応答を打ちきることによる誤差を防ぐための窓関数には、位相歪みの小さくなる Hanning 窓を用いた。この遅延フィルタを正負 2 度適用して得られる遅延ゼロ信号に 16bit 量子化を行うと原信号と同一になるので、遅延フィルタ演算での誤差は無視できると言える。

測定シミュレーションの手順としては、対象の音楽信号に対して、

- (1) 0.1~0.5 サンプル範囲の遅延付加
- (2) DA/AD 変換系で生じるノイズを模擬する -130dBFS/Hz のガウシアンノイズ加算
- (3) 16bit 量子化

の順に処理を行い、得られた信号との時間差を測定した。時間差はフレーム毎の時系列データとなるので、その平均値と遅延時間とのずれと標準偏差を測定精度の指標とした。また、測定精度は音楽信号のスペクトル分布にも影響を受けるので、表 1 に示した市販 CD の 1 曲目の冒頭 60 秒、および RWC-MDB-P-2001 No.7 [12] の冒頭 60 秒、の 2 種類いずれも左チャンネルのみの音楽信号を対象とした。

図 3 に市販 CD の平均値と標準偏差の結果を、遅延時間毎にフレーム長の関数として示した。図 4 には、同様に RWC-MDB-P-2001 No.7 の結果を示した。これらの結果より、遅延時間が 0.5 サンプルまで長くなるに従い、平均測定値のずれと標準偏差が大きくなっていくことが分かった。また、フレーム長は長くなるに従い、測定精度が改善される傾向にあるが、市販 CD のように、512 サンプルから 4096 サンプルまでは、あまり大きく精度改善がない場合もあることが分かった。このように、音楽信号に応じて測定精度が変わるのは、音楽信号のスペクトルがより広帯域でスペクトルレベルが高いほど、雑音や量子化歪みの影響を受けにくいためである。実際に RWC-MDB-P-2001 No.7 の方が、この条件に合っていた。

以降の測定では、時間分解能との兼ね合いより、512 サンプルのフレーム長を用い、結果としてその半分の約 5.8ms 毎に、二つの信号の時間差を測定した。この条件では、図 3 より、測定値のずれの平均は 0.001 サンプル以下、その標準偏差は 0.004 サンプル以下であると見積もられる。

3.3.3 測定実験結果

測定系は第 2 節と同じであり、CD プレーヤのライン出力を

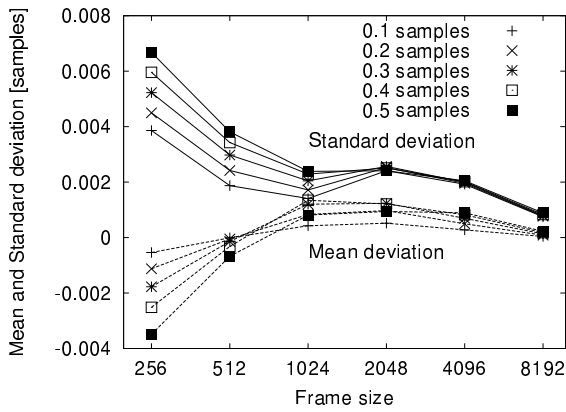


Fig. 3 'えりあし'での遅延時間測定シミュレーション結果. 上は標準偏差, 下は平均値のずれ. 単位はいずれもサンプリング間隔.

AD変換器として用いるDelta66のラインイン入力に直結し、内部クロックを用いてAD変換を行った。1曲目と2曲目を続けて再生し録音する作業を、5種類のメディアが一順するように、2回あるいは3回繰り返して測定を行った。

図5に、Origに記録されているデジタル信号に対する、Origの1曲目をCDP1を使ってDA/AD変換後に得られたデジタル信号の遅れの時間変化を、1曲中レベルが低く測定値にばらつきが大きい区間を除いた40000フレーム分(約232秒)、サンプリング周期を単位に示した。この図からは、CDP1で再生した音は、この間に575サンプル程度進んでいることが分かる。これはDA/AD変換器両方合わせたサンプリング周波数が44100Hzに対して0.0056%高いことを意味する。また、プレーヤのDA変換器と、Delta66のAD変換器のサンプリング周波数が約2.48Hz異なっていたとも言える。

図6には、横軸にCDメディアを測定時系列にそってならば、40000フレームの遅れ時間波形に最小自乗直線を当てはめて得られた定常的なサンプリング周波数ずれを%で示した。この図からはサンプリング周波数ずれはメディアに依存することはなく、ずれ幅の変動も0.00001%のオーダーであることが分かる。

この例のように、1サンプルを越えて、2つの信号の遅れ時

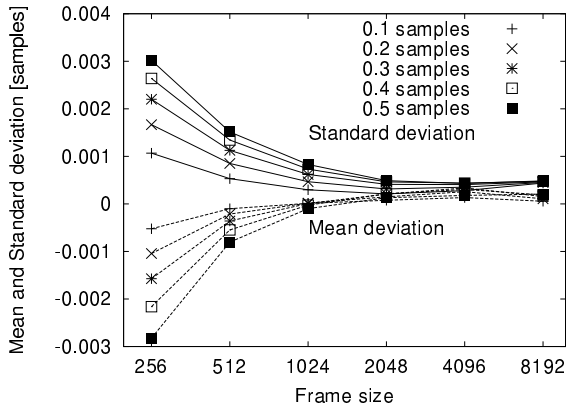


Fig. 4 RWC-MDB-P-2001 No.7での遅延時間測定シミュレーション結果. 上は標準偏差, 下は平均値のずれ. 単位はいずれもサンプリング間隔.

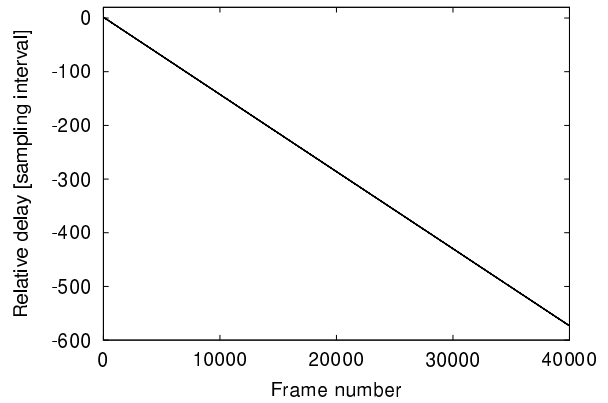


Fig. 5 CDに記録された信号に対するOrig再生録音後信号の遅れ時間変化.

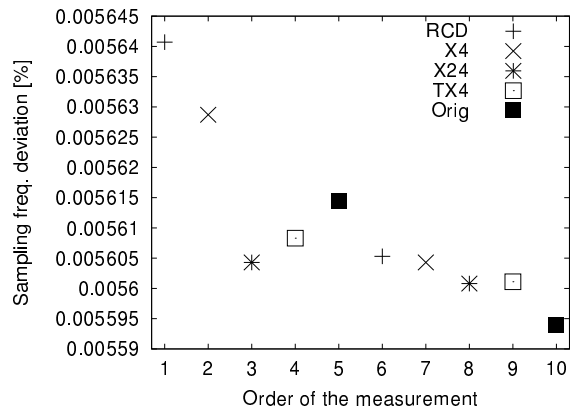


Fig. 6 サンプリング周波数の定常的なずれ. 横軸は測定時刻順.

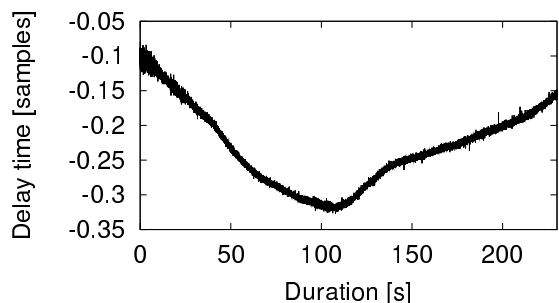


Fig. 7 遅れ時間のゆらぎ波形. 測定対象は CDP1, Orig.

間が変化する場合、進んでいる信号のフレームを1サンプル遅れさせて、2つのフレームがほぼ同じ信号となるように操作した。実際には、フレームの遅れおよび進みを調節するのは、2つのフレーム間で ± 0.6 サンプルを越える遅延が生じた時とした。しかし、この ± 0.5 サンプル前後の遅延が生じる際には、図3, 4からも分かるように、遅延時間測定誤差が相対的に大きくなる。このため、フレーム間の遅延補正が必要な都度、つまり両信号が1サンプルずれる周期で、測定値に偏りが生じる恐れがある。これを確認するために、サンプリング周波数変換によって、数10サンプル引き延ばした信号と原音楽信号との間の遅延時間測定シミュレーションを行ったところ、両信号が1サンプルずれる周期で遅延時間に変化が見られることが分かった。

よって、最初に二つの信号全体の長さの差を求めて、それを補正するサンプリング周波数変換を行い、前段落で説明したようなフレーム間の遅延補正が不要な条件をつくり出し、改めて両信号の遅延時間測定を行う手順をとった。なお、ここで行ったサンプリング周波数変換はDCT(離散コサイン変換)を用いるものである。この変換を二回行って元の信号長に戻した後の波形に対して16bit量子化を行うと、変換を行う前の波形と同一であるため、サンプリング周波数変換を行うことによる測定誤差の増加は無視できる。結果として、遅れ時間波形から定常的なサンプリング周波数ずれを差し引いたことになり、遅れ時間のゆらぎ波形を求めた。このゆらぎ波形を図7に示した。

このゆらぎ波形は、(定常的なずれは持つが)正確な間隔を刻むクロックを用いたサンプリング点とのずれの割合、つまりサンプリング・ジッター振幅を、256サンプル毎に測定したものと見なせる。よって、このジッターが引き起こす歪み成分に対する解釈を明確にするために、従来の研究で示してきたように、サンプリング・ジッター振幅を秒の単位に変換し、サンプリング・ジッター波を周波数分析して比較することによって、音楽再生時におけるCDメディア間のジッター特性の違いを検討することにした。

図8に、1曲のうちレベルが低くて測定値にばらつきが大きい区間を除いた40000フレームのサンプリング・ジッター波形に、Hanning窓をかけて得られた、OrigメディアをCDP1で再生した時のジッタースペクトルを示した。図9には、CDP2で再生した時のジッタースペクトルを示した。CDP1では約2.5Hzを基本波とするジッター波が存在し、基本波の振幅は約53nsであった。これに対して、CDP2では、約0.70Hzを基本波とし、

その振幅は約38nsであるジッター波が存在した。これらジッタースペクトルの特徴は、1曲目、2曲目通じて同じであり、さらにCDメディアが違っていても同じであった。

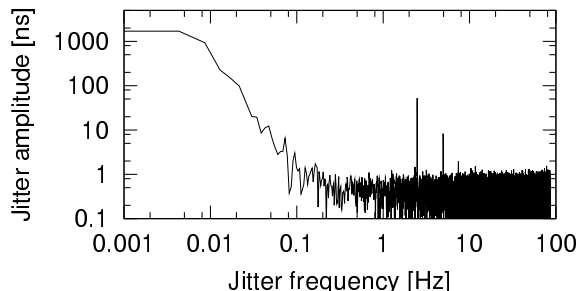


Fig. 8 サンプリング・ジッタースペクトル. 測定対象は CDP1, Orig.

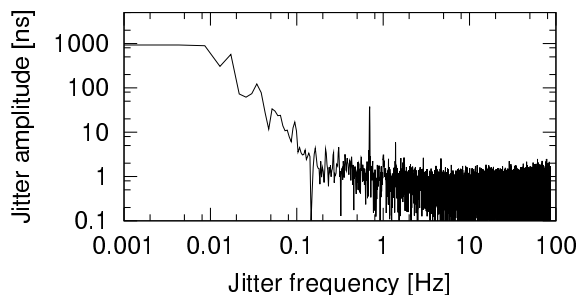


Fig. 9 サンプリング・ジッタースペクトル. 測定対象は CDP2, Orig.

これらのジッタースペクトルで特徴的なことは、CDプレーヤとAD変換器のサンプリング周波数の差に相当する周波数に、ジッター成分が現れていることである。さらに、ここでは示していない別のCDプレーヤを対象とした測定でも同様なジッター成分が現れた。このメカニズムについては不明であり、今後検討を要する。一方、従来の純音や音楽信号を用いたジッター測定[8]でも、同じ機器を対象に測定を行っているが、このようなジッター成分は現れていない。その理由として、従来の測定では、ジッタースペクトルを求める際の時間窓が1秒であり、スペクトルの周波数分解能が今回の測定に比べて低いことが挙げられる。今後は、より長い純音信号を用い、低域ジッターの分解能を向上させた測定を行い、今回得られたジッター成分が、音楽信号再生特有のものなのかどうかを確認する必要がある。

4. 考 察

今回の測定に用いた機器には、メディアに依存した音質変化は存在しないことが分かった。一方で、ここで対象としなかった機器では、音質変化が存在するかもしれないことを否定することはできない。しかし今回の結果は、実際のオーディオ機器と音楽CDを用いて可能な音質差測定法を提案し、実施できることを示したことが有用なのである。例えば、メディア依存した音質差が感じられると報告されるメディアあるいはプレーヤが存在すれば、困難な主観評価実験で確認しなくとも、今回の測定法によって、何ら機器の内部や音楽CD自体に手を加えることなく、音質差の測定が可能となるのである。

これまで説明しなかった今回の測定を通して明らかになったことの一つは、デジタル出力をもつ CD プレーヤには、同じメディアを再生しても、同一のデジタル信号を出力できない機器が存在したことである。それが明らかになった時点で、その機器は今回の測定対象から除外した。再生デジタル信号が同一にならない原因としては、プレーヤのデータ読み取り精度、あるいはデジタル信号伝送系に問題があると考えられる。後者の場合は、プレーヤのクロックが不安定、つまりジッタが大きくて、受信側がそれに十分追従できず、データ欠損および連続が生じていると思われる。

このような機器を敢えて測定対象とし、デジタル出力信号のデータ誤りのパターンと再生アナログ信号との関係を、メディアを変えて調べることによって、メディア条件が音質差に与える影響を調べることも可能であろう。また、今回測定した CDP1 も電源投入後、20 分程度は、同一メディア再生によって同一のデジタルデータを出力できないことのあることも分かった。さらに、今回測定には使用しなかったが、44.1kHz デジタル入力信号の記録にサンプリングレート変換器を用いているためか、同一のデジタル信号入力を毎回僅かに異なる信号として記録する機器も存在した。

5. ま と め

CD 媒体個体差によって生じるかも知れないような、微小な音質差を測定するために、二つの測定を行った。ひとつは、CD プレーヤの DA 変換器のクロックと AD 変換器のクロックを同期させて録音された波形同士の差分の実効値を比較する手法であり、サンプリングクロックのゆらぎ以外の要因による音質差の存在を調べるためである。もうひとつは、クロックを同期せずに録音した波形と、原信号の波形の位相をフレーム毎に比較し、遅れ時間の時間変化を測定する手法である。これらの測定によって、今回測定対象とした CD プレーヤには、CD メディアに依存するような音質差は存在しないことが分かった。

クロック非同期条件で得られたサンプリング・ジッタスペクトルには、AD 変換器と DA 変換器のサンプリング周波数の差に相当するであろうジッタ成分が現れた。このジッタ成分生成のメカニズムと、これが音楽信号再生時に特有のものなのかについては、今後の検討を要する。

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] Julian Dunn Ian Dennis and Doug Carson, "An Investigation Of The Sonic Differences Between Numerically Identical Compact Discs," Proceedings of the 101st AES Convention, No. 4399 (1996).
- [2] Julian Dunn Ian Dennis and Doug Carson, "The Numerically-Identical CD Mystery: A Study in Perception versus Measurement," Prism Sound Public Documents, <http://www.prismsound.com/psdownload.htm> (1997).
- [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] 小林幸夫, 石川智治, 宮原誠, "CD Player の時間伸び縮み特性

と高度感性情報再生の評価," 電子情報通信学会技術研究報告, **EA98-17**, 1-6 (1998).

- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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, **7**, 79-92 (2004).
- [9] 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).
- [10] 冬木真吾, 小林幸夫, 石川智治, 宮原誠, "デジタル音楽信号の jitter に起因する高度感性情報の欠落 — "雰囲気", "空気感"(深々さ) の激減衰化 —," 電子情報通信学会技術研究報告, **EA97-03**, 9-16 (1998).
- [11] 大賀寿郎, 山崎芳男, 金田豊, 音響システムとデジタル処理(電子情報通信学会, 東京, 1995), pp. 215-216.
- [12] 後藤真孝, 橘口博樹, 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).