

CD 再生機の特性について

山紫会オーディオ

廣田 昭 伊藤晴夫 佐伯泰顕

はじめに

オーディオの分野には解明すべき基本的事項が存在し、特に MJ テクニカルレポート「セシウム原子発振器を用いた CD カッティング実験」⁽¹⁾にはクロック問題のヒントがある、と考えて始めた以下一連の研究結果です。デジタル再生音であるにもかかわらず、CD 再生機からの再生音はその再生機の種類によって異なるために、スタジオ等の音楽制作現場では標準再生機が導入されねばならないという現実が、この研究の必要性を確信させてくれました。

私たち山紫会オーディオのメンバーはオーディオの専門家ではありませんが、それぞれが信号の計測、分析、処理、等の各分野での優れた経験者達です。まずは CD 再生信号のフーリエ分析から始めました。そしてそこに従来問題視されていない原信号とは異なる雑音成分が存在し、それは比較的ゆっくりとした振幅変動と位相変動であること、さらにその変動が聴覚的にも影響のあることが見出されたので以下その報告です。

1 原信号と再生信号の比較

有信号時の CD 再生信号の雑音を調べるにあたり、まずは図 1 のように、単一正弦波を記録した CD-R を再生し、その原信号としての 16 ビットデータと再生アナログ信号の 24 ビット AD 変換データの FFT 比較から開始した。

ここで単一正弦波周波数としては $1378.125\text{Hz}(=F_s/32)$ を選んだ。この周波数は CD のサンプリング周波数 (F_s) 44.1KHz に対して、その一波が 32 サンプルで作られているので、FFT の入力サンプル数 2 の N 乗に対し、必ず整数波となり、その正弦波信号は変換後に単一スペクトルとなることを期待したものである。

しかし原信号周波数としてこの周波数を使っても、CD 再生機と AD 変換器のクロック周波数の間にわずかながら差が存在し、そのために FFT

変換スペクトラムとしては、その中心周波数の前後に周波数差 ΔF による成分が現れ、求めたい雑音との区別がつかない。そこで 1378.125Hz からの周波数差 ΔF を求めて、それを周波数変換でゼロにして FFT に入れる修正フーリエ変換 (MFT) を使うことで、主信号成分の単一スペクトル化が実現し、初めてその他雑音信号を観察できるようになった。

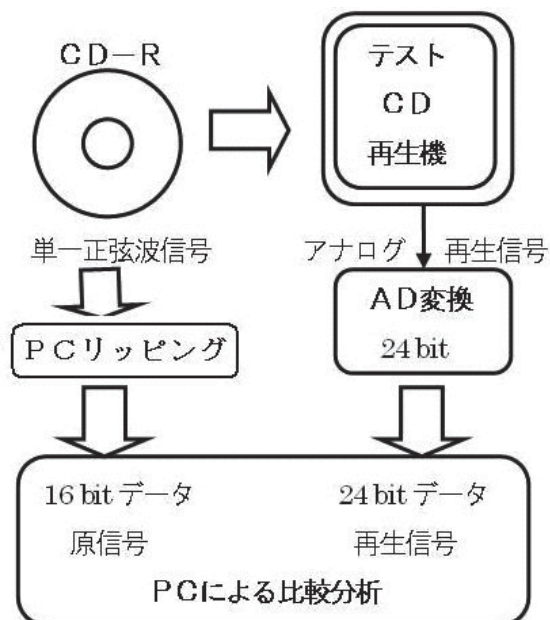
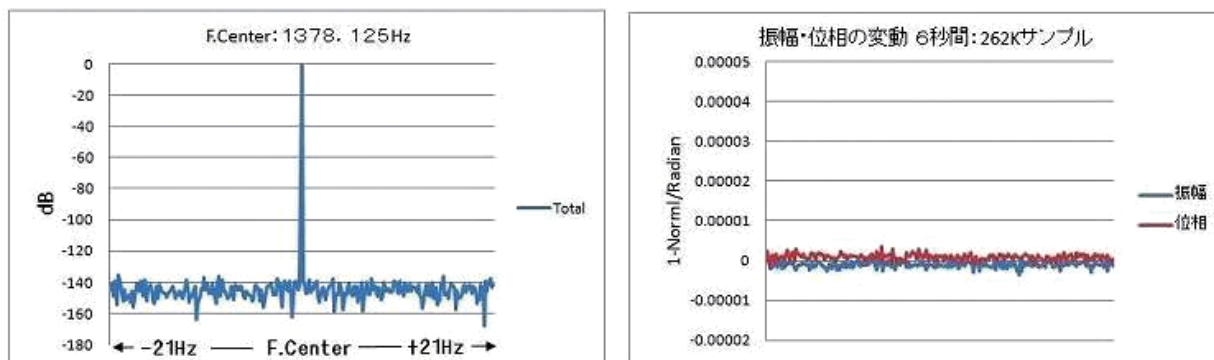


図 1 テストブロック図

その修正フーリエ変換 (MFT) については後述するが、MFT を使った原信号と再生信号それぞれ約 6 秒間データの分析結果を次の図 2 に示す。この MFT 処理のすべては Windows-VISTA の PC で Excel2007 を使って行った。

原信号



CD再生信号

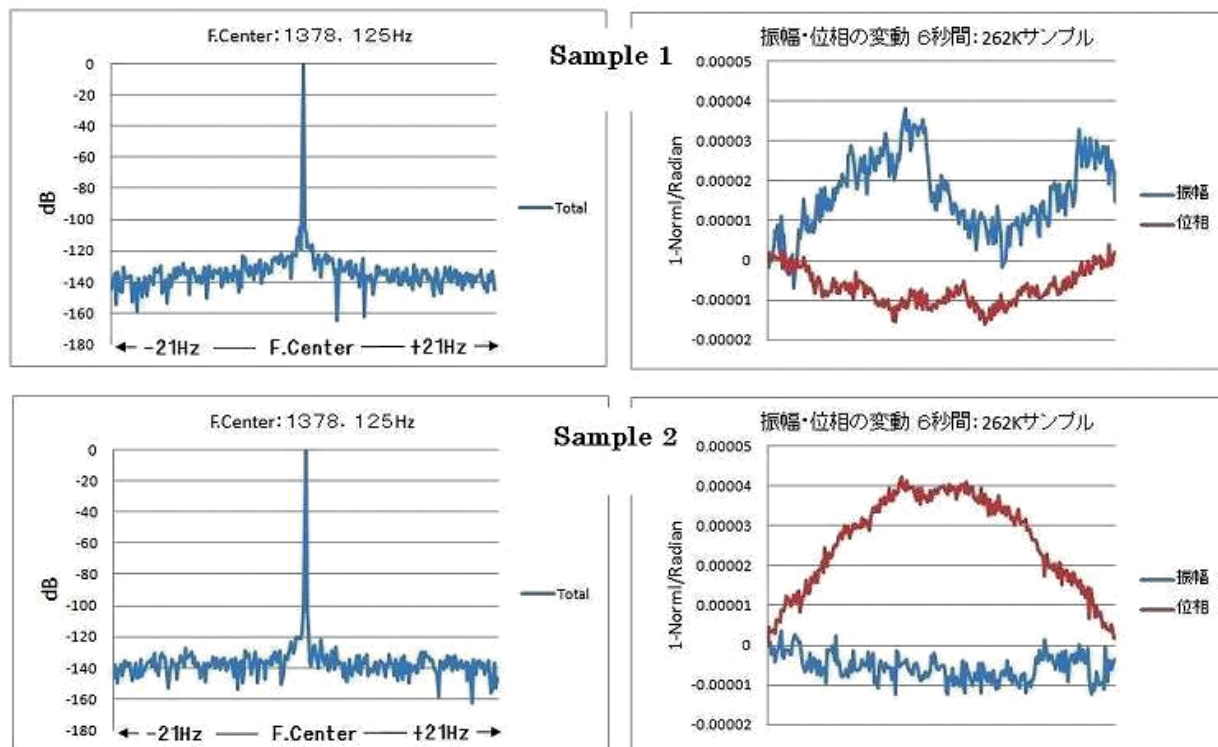


図 2 原信号と CD 再生信号 周波数スペクトルと振幅・位相の変動

図 2 の原信号 (16 ビット) の周波数は、あえて 1378.125Hz ではなくその 1.000001 倍の周波数を使った。その周波数差 ΔF のために通常 FFT では単一スペクトル化が出来ないが、ここでは MFT で実現している。さらにここで、16 ビット量子化雑音が約 -140dB のホワイト雑音となっていて、このレベルまでのその他雑音を識別可能としている。

図 2 で Sample1、2 で示した CD 再生機は A 社ならびに B 社の市販品、AD 変換は UA101 (ローランド) を使用した。

中心周波数に対し±21Hzの周波数分析(図2の左側)によって、その±数Hzの範囲に原信号には存在しないスペクトル雑音成分が認められる。磁気テープ等では変調雑音として扱われる雑音に似ている。そしてこの雑音成分は、これもMFT処理から得られる振幅・位相変動図(図2の右側)によって、その変動そのものに原因していることがわかる。原信号に比べ数十倍の振幅と位相の変動が見られる。なおここに示されている変動数値は振幅ではその振幅を1とした時の変動値であり、位相はラジアン単位の変動値である。

ここに見られる振幅の変動は、特に電源投入直後にはさらに大きな値が検出され、アナログ的なゲイン(またはロス)の変動と考えられる。1秒間に10のマイナス5乗オーダーの変動であるが、銅の抵抗が1℃あたり0.007変化することを考えると、温度変化の影響も小さくない。このCD再生機問題とは別の、スピーカー・ボイスコイルの材質で変わる音質問題や、ケーブルで変わる音質問題等も未解明だが、この振幅変動との関係が予想される。

一方位相変動はクロック精度の問題と考えられる。2台の再生機で、下に凸か上に凸かの特徴的な違いがあるが、共に再生機クロックとAD変換器クロックとの相対的な変動である。この位相変動を放物線状の2次曲線変化とすると、上に凸は再生機の相対的クロック周波数が直線的に下降し、下に凸は直線的に上昇している事に相当する。

この放物線状の位相変動として検出されている値は、直線的な周波数変化 $\Delta F/F$ としては、1秒間で10のマイナス9乗、1分間でも10のマイナス7乗以下で、水晶発振器としては決して悪い値ではない。

MJテクニカルレポートに報告されたセシウムクロックの効果も、この周波数安定度の効果であろう。決してクロック周波数の早い変動の問題ではないので、技術的にはGPSとかJJYへの同期クロックの採用で容易に現実的に解決できる問題とわかった。

2 修正フーリエ変換 MFT について

有信号時の雑音を調べるに当たり、FFTによる周波数分析は一般的な手法である。私たちも当初この通常FFTで、再生単一正弦波周波数の近傍に変調雑音の存在を確認することから始めた。そしてその雑音は比較的ゆっくりとした振幅と位相の変動であると判明した。しかし当初、FFT分析時間に入る正弦波が、正確な整数波からずれるそのずれによる分析誤差の混入を避けられなかった。それで単一周波数を単一スペクトルに変換するMFT(修正フーリエ変換)を作り、さらにこの間の振幅・位相の変動を表示することで、この信号近傍の雑音と振幅・位相変動を正しく評価できるようになったので、ここでこのMFTの詳細を説明する。

MFTの入力データは

$M \times N$ 々のデータ D_{mn} をあつかう。

ここで $m: 1 \sim M$ $n: 1 \sim N$

テスト信号の周波数は原則として、 N サンプルに整数波が入ることとして次の値を使う。

$F_j = F_s \times j / N$ 、 (j は整数)

ただし実際のデータには、偏差 ΔF が含まれ、

これは $F_j + \Delta F$ としてあつかう。

図2の例では

$$M=256 \quad N=1024 \quad j=32$$

$F_s=44.1\text{KHz}$ (サンプリング周波数)

$F_j=1378.125\text{Hz}$ である。

そしてMFTは次の3ステップで行う。

第1ステップ (ベクトル化とBPF)

次の式(1)によって連続Nサンプル毎に得られる各複素数を1信号ベクトルVと考え、合計MヶのベクトルV1~VMを作る。

$$V_m = 2 \left[\sum_{n=0}^{N-1} D_{m,n} \times \cos(2\pi F_j(n-N/2)/F_s) + i \sum_{n=0}^{N-1} D_{m,n} \times \sin(2\pi F_j(n-N/2)/F_s) \right] / N \quad \dots (1)$$

なおこの(1)式はNヶデータの中から F_j 成分を取り出すフーリエ変換式であり、BPF(バンドパスフィルター)として V_m から F_j 以外の周波数成分を取り除く働きもある。

第2ステップ (周波数変換)

MヶのベクトルV1~VMの始点から終点までの回転角度 Φ を求め、次の式(2)によって各ベクトル V_m に位相補正を加える。結果として始点と終点間の回転角が0度となり、 $\Delta F=0$ への周波数変換となる。

$$V_m = V_m \cdot [\cos(m\Phi / (M-1)) - i \sin(m\Phi / (M-1))] \quad \dots (2)$$

この補正後ベクトルの振幅と位相の変動は分析対象信号の振幅と位相の変動を示している。

またこの Φ の値から次の、

$$\Delta F = \Phi \times F_s / (2\pi (M-1) N) \text{ が求まる。}$$

第3ステップ (複素フーリエ変換)

補正後のベクトルV1~VMに対して次の式(3)で複素フーリエ変換を行えば、各複素成分の絶対値が F_j を中心とした周波数成分のスペクトル分布を示す。

$$C_k = G \left[\sum_{m=0}^{M-1} V_m \times \cos(2\pi km/M) + i \sum_{m=0}^{M-1} V_m \times i \sin(2\pi km/M) \right] / M \quad \dots (3)$$

Gはフーリエ係数で、 $G=2$ ($k=0$ の時)、 $G=1$ ($k \neq 0$ の時)

なおここで

kは $-M/2 \sim 0 \sim +M/2$ の整数で、

C_k に対応する周波数は $F_j + k \times dF$

dFが分析分解能で $dF = F_s / (M \cdot N)$

分析範囲は $F_j - dF \times M/2 \sim F_j + dF \times M/2$

図2の例では $dF=0.168\text{Hz}$ で、その結果の分析範囲は $1378\text{Hz} \pm 21\text{Hz}$ である。

第1ステップの ΔF 補正

以上がMFTの基本3ステップで、 $\Delta F=0$ とした周波数変換となっているが、未だ第1ステッ

ブに ΔF によるわずかな誤差が残る。それで再度第 1 ステップに次のように F_j 値を入れ替えて行く。

$$F_j \rightarrow F_j - \Delta F$$

実際の周波数 $F_j + \Delta F$ に対しここでは $F_j - \Delta F$ を使うが、これで第 1 ステップの ΔF による誤差が完全に除去される。

以上の手順でこの MFT 手法が 32 ビット信号の解析にまで使用可能となっていることを図 3 に示す。雑音としては量子化雑音だけの正弦波 PCM16 ビット信号、24 ビット信号、32 ビット信号の分析結果である。 $\Delta F/F=0.0003$ の存在にもかかわらず完全な単一スペクトル化が実現し、そのスペクトル雑音はそれぞれ -140dB 、 -190dB 、 -240dB のホワイト雑音となって、その他雑音検出に十分に使えることを示している。

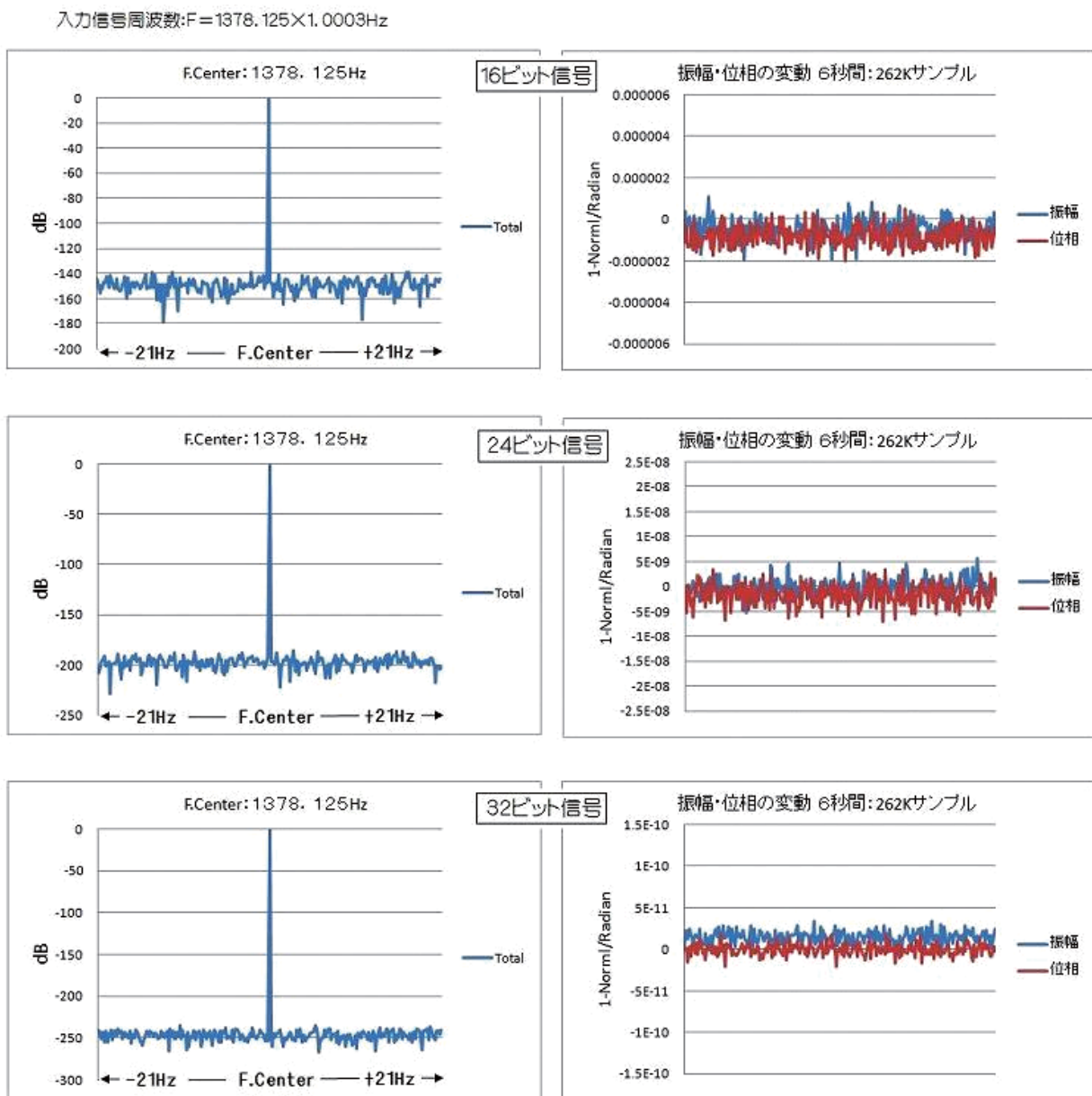


図 3 MFT による量子化雑音の比較

3 振幅・位相の変動と聴感

図 1 に示したように、CD 再生信号には原信号にない振幅変動と位相変動が含まれている。スペクトル的には-80dB~-120dB の変調雑音として観察される雑音である。音響工学ではこれらの成分はマスキング効果で聴覚に影響しないとして無視されている。しかし私たちは各種変動音を実際に聞いて見て、その影響の存在の確認ができたので報告する。

作成試聴した基本信号

先ず試聴テストのため基本的に次のような AM 変調信号と PM 変調信号を用意した。

各信号：モノラル 2 秒間

周波数：500.05Hz (500 Hz からの偏差は量子化雑音の特異な分布をさけるため)

振幅：±10000

AM/PM 変調周波数：1、2、4、8、Hz 4 種

AM/PM 変調度：-20dB、-40dB、-60dB、-80dB、-100dB、-120dB 6 種

なお変調度の 0dB は

AM-0dB=100%変調

PM-0dB=±1radian 変調

以上一通り変調音の試聴結果から、振幅変動と位相変動は dB 値が同じであれば、その影響は似ていること、顔を動かすと聞こえ出して両耳方向感と関係あること、等々定性的にわかったことがある。ただかなり扱いにくい大きな問題音と理解した。そこでこれらテストの経験から、AM/PM 変動が聴覚に影響することを一般的に確認する方法として、代表的な AM4Hz 信号による次の一連のテスト法をまとめた。

第1テスト 基本試聴	第2テスト 先行音付試聴	第3テスト 先行音付短時間試聴
AM4Hz-20dB	APT84andAM4Hz-20dB	APT84andAM4Hz-20dB-0.8sec
AM4Hz-40dB	APT84andAM4Hz-40dB	APT84andAM4Hz-40dB-0.8sec
AM4Hz-60dB	APT84andAM4Hz-60dB	APT84andAM4Hz-60dB-0.8sec
AM4Hz-80dB	APT84andAM4Hz-80dB	APT84andAM4Hz-80dB-0.8sec
AM4Hz-100dB	APT84andAM4Hz-100dB	APT84andAM4Hz-100dB-0.8sec
AM4Hz-120dB	APT84andAM4Hz-120dB	APT84andAM4Hz-120dB-0.8sec
Pure500Hz(無変調)	APT84andPure500Hz	APT84andPure500Hz-0.8sec

表 1 AM4Hz のテスト信号

第 1 テスト (基本試聴)

初めて各 2 秒間の第 1 テスト信号をヘッドフォンを使って、上から順次試聴すると、検知限として AM 変調音が聞こえるのは人により-20dB~-60dB の範囲で、-80dB まで聞こえる人は珍しい。

第2テスト（先行音付試聴）

第2テストは第1テストの各信号の前に聴覚定位残効⁽²⁾を利用した先行音 APT84 を付加したテストであるが、この場合は低変調音まで変動音が聞こえ出す。最初は聞こえない人も何回か繰り返すと聞こえてくる。但し聞こえる変動音周波数が必ずしもその信号の変調周波数と一致するとは限らない。

この先行音 APT84 は、ステレオの 500Hz-0.8 秒間を 2 回、そのスペースは 0.2 秒、ステレオ音の L 音が R 音に対して進んでいて、第 1 音が 8 サンプル分、第 2 音が 4 サンプル分の進み（1 サンプル分は 1/44100 秒）であり、これで移動感を与えている。

第3テスト（先行音付短時間試聴）

第2テストで変動音が聞こえ過ぎる状態になると無変調音にも変動が聞こえる。この時に単なる記憶再現音と区別して変調度との関係を確認するために、先行音効果を減らし、さらに信号音を短くしたテスト音である。先行音をモノラルにし移動感をなくし、信号音の時間を 0.8 秒間に短縮することで変動音が聞こえにくくなっている。

このテストで -80dB まで聞こえたり -100dB まで聞こえたりして、変調度と関係あることが確認できる。場合によっては、変動音の聞こえ出すまでの繰り返し回数によって、変調度との関係を確認できる。

以上一連のテストで聞こえる変動音は、先行音との関係もあり、単純に検知限が定義できるような問題ではない。しかしオーディオ信号として、これらの振幅変動や位相変動が無視できないことを示すには十分なテストと考えここに報告する次第である。

おわりに

MJ テクニカルレポート「水晶とセシウムのクロックの比較」に見る試聴差の感動的な表現に、伊藤晴夫は動ごかされた。そしてこの研究をはじめ、変調雑音の存在に気付いた。その彼がこの 8 月に急逝した。今回この報告によって、一人でも多くの方がこの課題に関心を持って頂ければ、それこそ彼の願いだったことである。

この研究の副産物・MFT は従来にない新たな解析力を発揮し、デジタル音／アナログ音比較や復調のマルチビット／ $\Delta\Sigma$ 比較等にも新たな見解が見出されつつあるが、これらは別の機会にゆだねたい。

関連資料

- (1) 柴崎功「セシウム原子発振器を用いた CD カッティング実験」MJ 誌 2002/4 p135-p143
- (2) 柏野牧夫「音のイリュージョン」岩波科学ライブラリー168 岩波書店

筆者プロフィール

山紫会は東京工大電気工学科昭和 34 年卒業生の集まりで、メンバーにはオーディオを趣味に持ちそれぞれの深みを極めている面々も多い。この研究に当たった 3 名は共にこの卒業年度から定年まで次のような活動をした。

廣田 昭 日本ビクターにて家庭用 VTR 技術開発、特に VHS 方式作りと規格管理に従事

伊藤晴夫 横河電機に入社、その後 YHP (横河ヒューレット・パカード) にて計測技術の専門家として広範囲のシステム開発に従事

佐伯泰顕 日本放送協会にて放送技術、特に衛星放送、ハイビジョンの開発実用化、に従事

編集事務局 注記

- (1) 本記事については、JAS ホームページ「トピックス&ニュース欄」において、過去 5 回、「CD 再生音の雑音と新測定法」関連のトピックスとして紹介させていただきました。

2008 年 4 月 9 日「CD 再生音の雑音と新測定法」

2008 年 6 月 17 日「位相・振幅の変動測定法」の提案

2008 年 8 月 5 日「CD もうひとつの雑音 (1)」

2008 年 10 月 27 日「CD もうひとつの雑音 (2)」

2009 年 6 月 9 日「CD 再生音問題の原因と対策」

各記事は JAS ホームページ「トピックス&ニュース欄」でご覧下さい。

- (2) 測定法、実際の MFT 計算シート、テスト音などが筆者のブログページで公開されていますのでご覧下さい。

<http://geocities.yahoo.co.jp/gl/otokodawari>