

画像・音声の超高再現性 PC の開発

Development of The Ultra Hi-Fi Graphics and Sound PC

片岡 裕

Yutaka Kataoka

kataoka@res.otani.ac.jp

大谷大学文学部人文情報学科, 京都府京都市北区

Otani University, Kita-ku, Kyoto City, Kyoto-Fu

あらまし: 高精度デジタル静止画像データは、マイクロフィルムや印刷より分解能・明度・色調で、より高い再現性を保証可能であることが証明されている[1、2、3]。同様に、96KHz24Bit 以上のデジタル音声データは、44.1/48KHz 再生で誤差が含まれる波形推測を必要とせずに、4 KHz 以上の周波数において高精度再生が可能である。また、デジタル・ハイビジョンは、1920×1080 ピクセルの基本分解能を持つ。このような高精細・高精度データは、PC を用いて再生する以外に、フル・フォーマットでの再生が不可能であることは言うまでもない。すなわち、誤読や誤聴ないデータ共有と評価には、極めて高い再現能力を持つ PC が必須なのである。

しかし、PC では、内部の電氣的ノイズ及び冷却 FAN やモータの振動・騒音により、高再現性を実現し得ないと言われてきた。そのため、PC 内で種々のノイズの影響を検証[4]して排除し、同時に高安定化する研究を行った。その結果、画像(RGB 各 8Bit 範囲¹)は誤差が測定限界以下、音声デジタルアウトは 0.5n 秒以下のジッタ、機械的騒音は 10dB 以下の、Ultra Hi-Fi PC を開発した。さらに、この Ultra Hi-Fi PC を、確実かつ安価に作成する方法を確立した。

キーワード: デジタル博物館、デジタル図書館、高再現性、古典学、HTPC

Keywords : digital museum, digital library, high fidelity, philology, HTPC

1 再現性からの Hi-Fi PC の必要性

データベースのコンテンツは、マルチメディア化が進行しており、再生装置の対象がテキストのみでは不十分である。コンテンツの主要フォーマットは、静止画、動画、音声と多岐にわたる。さらに、それぞれのフォーマットは細分化され、非常に高精度のデータを記録可能となっている。これら種々のフォーマットのデータは、ネットワークでのアクセスを前提としており、フォーマットに依存しない再生機器としての PC の使用が前提となっている。

PC で再生可能なデジタルデータと比較し、マイクロフィルムや写真印刷(静止画)・NTSC ビデオ信号(動画)・CD(音声)などの既存メディアのフォーマットでは、記録および再生精度に大きな制限がある。

静止画

高精細・高精度のデジタル画像データは、マイクロフィルムや印刷より高い再現性を持っている[1、2、3]。

マイクロフィルムの撮影時には、一般に可読性の保証まではされず、モノクロームであり、汚れや着色がある場合、資料の可読性は極めて劣化してしまう(図 1)。さらに、フィルムのデュープリケーションで、再現性が低下する。マイクロフィルム・リーダーの投影画像

¹ ATI 社の Graphics CPU では、RGB 各 10Bit の DAC を内蔵する。

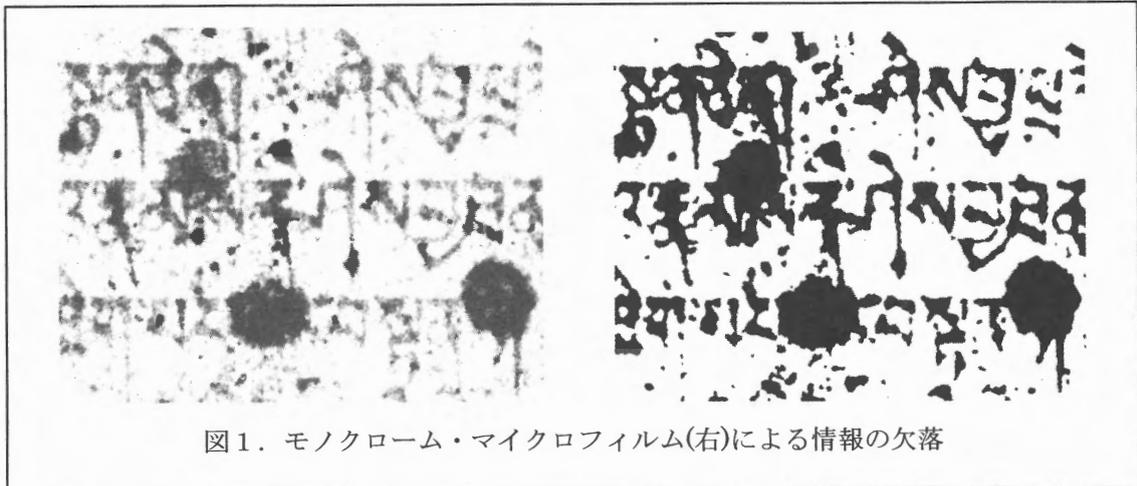


図1. モノクローム・マイクロフィルム(右)による情報の欠落

も色温度に制約があり、カラー・マイクロフィルムの再現性は、著しく損なわれる。

写真印刷は、印刷のカラー分解法が、1ピクセルを複数点の基本色点に分解するため、実質的な解像度と明度階調が低下してしまう。さらに、インクの粒子径を小さくすると、インクの厚みが薄くなり、吸光度が低下し、コントラストが低下する。また、インクの粘度が温度依存性であるため、低温の季節では硬化を防ぐために溶媒量が増加し、結果として色が薄くなる。当然、用紙の白度によって色相が変わってしまう。

静止画のデジタル化と公開は、資料の共有と参照の容易性から、貴重書を中心として実施されている。静止画の高精細化および高精度化は、資料の可読性を上げるに留まらず、可読性および再現性の保証の研究も進められ、

実際にデータベースの構築が進行中である[1, 2, 3]。さらに、画像データの補正に関しても、特定の印刷装置ではなく、標準光源での状態として記録可能である[3]。これらの研究の結果、資料の可読性(分解能)を保証し、同時に色再現性と明度階調を肉眼に近いところまで再現可能である。従って、再現性の差による画質の差は想像以上に大きく、その例を図2に示す。図2は、CRT像を撮影し、ピクセルサイズの領域に分割し平均したものである。ピクセルのジッタが大きい通常のPC(右)では、図2の様に、細部の情報が著しく欠落する。

動画

VTR、LD、DVDなどの動画は、NTSCビデオ信号を再生するためのテレビ受像機で画像が再生されるため、横方向の分解能は、720ピクセル程度に低下してしまう。縦方向の限

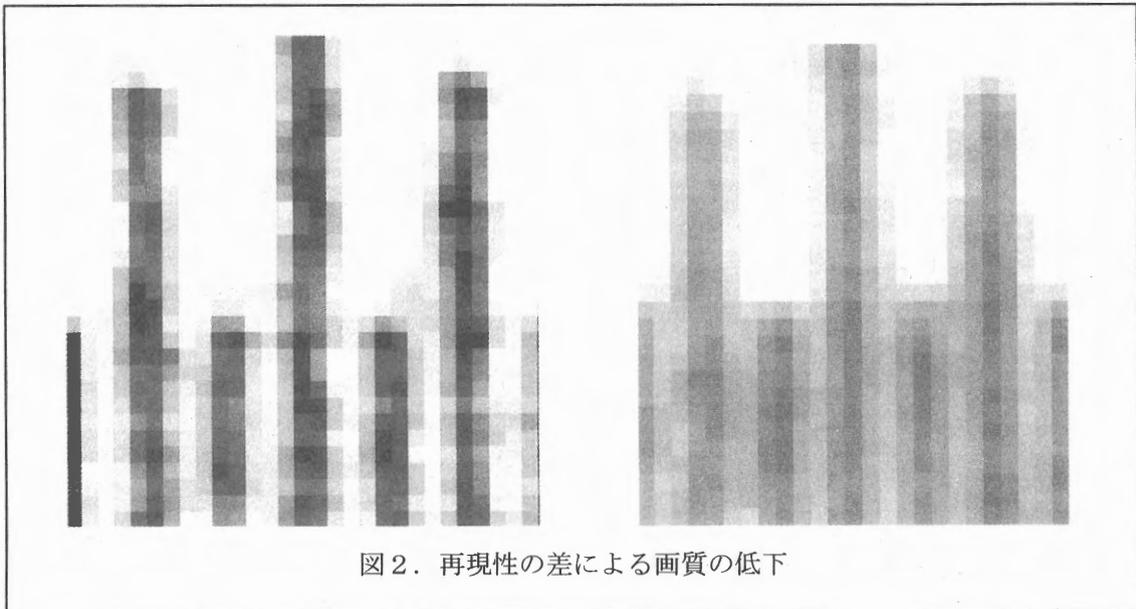


図2. 再現性の差による画質の低下

界は、実質 480 本の走査線である。同様に衛星放送によるデジタル・ハイビジョン放送でも、NTSC 互換受像機では、1920×1080 ピクセルでの再生は不可能である。NTSC 再生では、明度階調が十分な範囲ではなく直線性も低い。

PC は、デジタル・ハイビジョン画像の 1920×1080 ピクセルを持つ動画を、そのままのピクセル数で再生可能である。この動画は、MPEG2 圧縮で 30MBPS のデータ量となり、100BASE のネットワークでの PC への転送が可能であり、インターネットでのストリーミング放送も実験段階にある。デジタル・ハイビジョンの分解能は、医療用に留まらず、フィルム映画のデジタル化(テレシネ)、テキスタイルや遺跡の記録など、極めて用途が広い。また、今後デジタル・ハイビジョン・カメラは、24コマ/秒のプロGRESS方式(ノンインターレース方式)に変更され、プロGRESS・スキップの PC での再生により適合する。

なお、DVD の NTSC ビデオ信号での再生では、マイクロビジョン方式のコピー・プロテクション信号が含まれ、VTR テープと同様、画質が劣化することが多い²。

音声

CD は、44.1KHz16Bit、DAT は、48KHz16Bit のリニア PCM 記録である。最も多用される CD では、18KHz までの記録が可能であるが、高域では波形を記録するサンプリング数が相対的に減少し、誤差が著しく大きくなる。従って、CD や DAT では、そのまま DA 変換し 18KHz をカットするフィルタを通すと、4KHz 以上では数%を越える誤差となる。そのため、CD や LD のデータの再生時には直接 DA 変換を行わず、再サンプリングを行い、サンプリング・レートを 8 倍から 64 倍に上げ(オーバー・サンプリング)、さらに、サインカーブ補間を行うことが一般的である。これでは誤差が残るので、DSP(Digital Signal Processor)を用い、波形の推測を行い、オーバー・サンプリング時の補間を行う方式も多い。また、弱音では、

16Bit の直線性では、山・谷を 2Bit 程度で記録することとなり、やはり誤差が蓄積する。オーバー・サンプリングを行う過程で、16Bit から 20Bit、もしくは 24Bit に拡大して、弱音域の補間を行うことが一般的である。このような AD 変換時の技術は、サンプリング・レートが低く、ダイナミックレンジが小さいことに原因があり、失われた情報の推測に過ぎず、誤差が減少するわけではない。

DVD-Video もしくは DVD-Audio では、192KHz24Bit 記録が可能であるが、コピー防止のため、いまだ再生技法が明確に決定されていない³。

PC では、市販されている AD・DA コンバータは、最大 192KHz24Bit サンプリングまで可能である。96KHz 以上のサンプリング・レートでは、波形の真値との差が少なく、波形補正後の誤差も大きくない。また、同時録音・再生も 8 チャンネル以上が可能である。従って、メディアの規格に左右されずにハイビット・ハイサンプリングレートの記録と再生が可能である。

Hi-Fi PC と Hi-Fi 再生装置の必要性

このように、PC での再生は、既存のメディアの制限を受けず、より簡便に高再現性データの再生が可能である。従って、PC を用いて高精度・高再現性データを再生しなければならず、高再現性 PC、すなわち、Hi-Fi であること保証した PC が必要となるのである。

PC の再生信号は、アナログの映像信号とデジタルの音声信号が中心となる。アナログ映像信号では、RGB 各色の階調は、MPEG2 の再生ではカラーデコーダと DAC が 10Bit であり、Bit 換算で各 10Bit が可能である。しかし、デジタル映像信号転送では、ビット・レートが高くなりすぎるため 8Bit 階調であり、再現性に劣る。そのため、映像の表示装置としては、CRT が選択される。音声に関しては、Dolby Digital 5.1 など種々のフォーマットがあり、再生には専用のデコーダを搭載したアンプを必

² 現在、コピー・プロテクション信号を除去することは違法行為である。

³ PC による 96KHz24Bit 以上の DVD 音声のデジタル出力は、現在ではコピー・プロテクションのために不可能である。

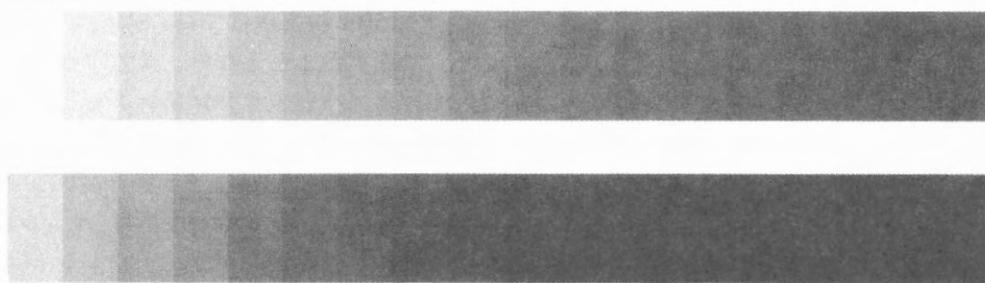


図3. 1/6D グレー・スケール(上)と 1/3D グレー・スケール(下)
CRT の明度階調範囲計測と誤差計測に使用する(左端の白は見えない)

要とする。従って、これらの装置の再現性と共に PC の再現性を考えなければならない。

特に映像の再生装置である CRT とプロジェクタの性能差は極めて大きく、適切な機器を選択しなければ、PC 出力信号の画質の評価すら不可能である。図3は、画像出力機器の性能を評価するためのグレー・スケールである。1/6D 階調のグレー・スケールを全て表示可能である表示装置は少ない。1/3D 階調グレー・スケールで、3.5D の範囲が表示可能であり、1/6D 階調グレー・スケールで図の全階調が表現可能でなければ、静止画の正しい表示はできない。本論文の印刷では、図3は正しく表示されないの、正しいグレー・スケールによる CRT 調整の詳細は、下記の URL を参照していただきたい。

<http://www.hifi-pc.com/crt.htm>

液晶は、シャッターから光が漏れて階調表現が正確ではなく、アナログ画像信号を AD 変換して再生するため、さらに誤差が大きくなる。CRT は、21 インチでシャドーマスクピッチの小さい円形シャドーマスク形式でないと、1920×1440 ピクセルの分解能を得ることはできない。アパチャーグリル型 CRT では、縦横の分解能が異なってしまう。最近の平面に近いアパチャーグリル方式では、左右と中央のグリル間隔が異なり、高い再現性を持ち得ない。プロジェクタでは、9 インチ管を使用した 3 管式でなければ、1920×1440 ピクセルの表示で十分に電子線を絞りきれない。

音声の DA 変換では、外付けの AV アンプを使用するだけでなく、その精度に十分注意が必要である。1 Bit 方式 DAC では、ジッタによって PIM 歪が発生してしまうため、倍音

の位相が狂って聴こえてしまう。同様に、スピーカでは、エンクロージャの振動により発音するタイプのスピーカでは、正確な再現が困難である。ヘッドフォンによる再生では、頭部に装着した時の周波数特性を考慮した規格を満たす製品でないと、再生周波数全域に渡っての正しい音圧を得られない。

2 無対策 PC の再生誤差

無対策 PC では、PC 内のノイズによって出力誤差は極めて大きい。RGB 各 256 段階の 8Bit-DAC の画像出力は 240 以下には誤差が含まれ、正しい暗部色調は望めない。ピクセルの位置揺らぎは、近接 2 ピクセルの重なり合いとして、横方向 1920 ピクセルでは 60% を超える(図 2)。Sync 信号(輝度基準・掃引時間基準)の誤差は 10% 以上である。デジタル出力音声では、最大で 10n 秒を越えるジッタであり、高再現性再生に必要な最大で 1n 秒以下にはならない。ジッタが 1n 秒では、マルチチャンネル音声再生での各音声チャンネルの相関は、聴感上で明らかなほど劣化する。なお、Dolby Digital 信号では、出力装置が時間管理のマスターとなるため、AV アンプによってジッタの排除はできない。そのため、PC のデジタル音声信号のジッタは、最後まで再生品位に影響を与えてしまう。PC 内の DAC を使用した場合、特殊な製品を除き 24 Bit 再生では下位 4 Bit に相当する誤差を含み、さらに電氣的ノイズが混入して S/N 比が劣化し、評価に十分な品位は持ち得ない。

また、PC の再現性だけでなく、PC からの画像と音声信号の再生装置の再現性も、前項

に示したように極めて重要である。図書館や博物館では、実測した数値を示せる精度を持った CRT やスピーカを設置すべきである。

3 PCの電氣的ノイズの原因

PCの出力信号の劣化は、電氣的ノイズが原因である。しかし、PCのノイズの原因と対策をPC全体にわたって追求した研究はないが、ノイズの主因は、スイッチング電源のリップル電圧とデジタル信号路が輻射するノイズであると考えられてきた。

電氣的ノイズは、コモンモードとノーマルモードに分類され、どちらも輻射と考えれば、電流量の増減の絶対値に比例する[5]。電流の実測値は、デジタル信号が5mA程度なのに対し、CPUやI/Oチップ、メモリへの電源電流は約0.5Aから最大12A程度で約100KHz~数GHzの断続的電流である。HDDやDVDドライブへの電源電流も、0.5Aから最大4Aに達する断続的電流である。これら断続的大電流の経路からのノイズは、信号や電源由来のノイズより1000倍以上大きい。同様にFANやモータには、逆起電力吸収用と放電防止用のキャパシタが無く、12V駆動であるため、強いノイズを発生している。これらのノイズは、デジタル信号にジッタを加え、多大な回数のエラーとリトライをチップ内とチップ間で発生させる。さらにアナログ回路の混変調歪を極端に増加させ、リニアリティーを減少させている。

マザーボード上のCPUは、800MHz駆動のPentium-3で約20Wを消費する。実際の使用時では、負荷の平均値はDVD再生などでも40%を超えることは稀であるが、上述の様に消費電流の短時間の増減は極めて大きい。メモリおよびNorth Bridge(CPU、AGPバス、メモリ、PCIバスへのデータ転送機構)も同様の電流消費パターンである。これらのLSIへの給電系は、1500 μ F程度の比較的高周波特性の良いアルミ電解コンデンサで瞬間的な電流変動に対応するようになっている。しかし、消費パターンの分析からGHzにまで及ぶことが判り、150KHz程度のリップルまでしか効果

がないアルミ電解コンデンサでは、周波数特性として十分ではない。このため、AGPバスおよびPCIバスにリップル電圧が発生し、クロックジッタなどの影響を与え、ピクセルが重なり合って画像の明度・彩度を下げ、デジタル音声出力のジッタを増加させる。

AGPバスおよびPCIバスには、DDコンバータで電圧変動が抑制されているが、バッファとなるアルミ電解コンデンサの容量が不足している場合が多い。最近のグラフィクス・ボードのメモリは64MBの高速メモリであり、グラフィクス・ボード上のCPUも大電力を消費するので、アルミ電解コンデンサでは周波数特性的にも十分ではない。同様に、高度なサウンド・カードも比較的消費量の大きいLSIを搭載しており、挿入してあるPCIバスの位置にキャパシタによる電流供給の安定化と電圧変動の抑制が必要である。

PC内は給電電流路が長く、振動に由来するノイズは、数10mVに達する低周波成分である。これは、直接的に画像信号のSync信号の時間軸上と電圧(明度基準信号)のジッタとなり、同時にデジタル音声出力のジッタとなる。

さらにこれらのノイズ源はPC内に広く分散しており、それぞれの輻射が空間で合成され極めて大きいノイズとなる。この合成ノイズは、繰り返しの無いパルス状となり、オシロスコープでの確認は極めて困難である。また、磁性体は全て、入力周波数より高い周波数で、強く2次輻射することが判明したため、PC筐体内の鉄やステンレスまでがノイズ源となってしまう。

4 機械的な再現性低下の要因

上述の輻射系ノイズに加え、再現性低下にメカニカルな要因がある。HDD(ハード・ディスク・ドライブ)は、動作中に共振点を持ち、リードエラーが多発する記録領域がある。この領域では、ヘッドのサーボが振動によって激しく動作し、消費電流も増加している。このような領域は、HDD内に数箇所あり、HDDの固定方法によっては、リード速度が10分1以下にまで低下することがある。従って、ハ

イビット・ハイサンプリングレートの声再生や動画再生では、時間的な遅れが発生してしまうことになる。リード時間の遅延は、デバイスドライバのスピンドロック時間を長くし、CPU 負荷を上昇させ、画像・音声用のデバイスドライバの処理時間を圧迫する。結果、画像信号と音声信号のジッタとして現れる。

DVDD(DVD ドライブ)も、HDD 同様に機械的な共振点を持ち、DVD メディアの偏心によって、レーザー・ヘッドが読み出しに時間を要する領域ができてしまう。このような領域は、DVD メディア上で5、6 から 30 以上あり、画像のデコード時間を奪うため、画像を極端に劣化させ、さらに音声画像に同期しているため、音声までがジッタを含んでしまう。DVDD は、再生中加減速を繰り返す、そのための歳差運動も大きい。DVDD の機構のほとんどは、ゴムによるダンパーで動くように支持されるため、この運動によるリードエラーとサーボの増加は無視できない。

このような機械的な共振と機構そのものが原因となるノイズは、時間軸上の誤差だけでなく、サーボ電流を増加させ、グラフィクス・ボードとサウンド・カードへの給電電圧を変動させてしまい、S/N 比を劣化させる要因にもなっている。

5 ノイズへの対策方針

上述のように、PC のノイズは給電回路、輻射および振動由来であることが判明した。従って、次の方針と手法でノイズをカットし精度を向上した。

1. ノイズ対策が可能で、その結果が反映される高精度・高品位部品を選択する⁴。
2. 磁性体を排除し、100Hz 以上の電波・磁場を遮蔽する Al 板で、電源、ドライブ、マザーボード、ドータ・カードを分離する。
3. 硬度の異なる Al 板による制振合板を、振動モードにあわせて作成して筐体内部を補強し、ドライブから振動の発生と伝達を阻止す

⁴ 部品によって、100 倍程度ノイズ量が異なり、10 倍程度精度も異なる。

る。

4. HDD と DVD ドライブの内部に制振処理をしてサーボ量を減らし、電流消費を下げる。

5. 大電流かつ断続電流消費部品・チップの近傍に低 ESR 大容量コンデンサを接続し、給電回路の電流・電圧変動を減少させる。

6. 電源・給電回路の高周波インピーダンスを上げ、さらに給電ケーブルは全てツイスト⁵し、高周波の輻射を減少させる。

7. エアフローを設計し、FAN(コンデンサ付き)を電源内のみとし、FAN はスポンジで浮かせ、サイレンサーを設け、振動・風切り音を取る。

8. 筐体内の Graphics、Sound card 部では、近傍のケーブルを排除する。

さらに、2 次輻射の無い非金属非磁性体製ノイズ吸収剤(開発中)で、給電回路と Al 板表面のノイズ反射を吸収し、シールド効果を高めた。

6 部品の選択

Ultra Hi-Fi PC の開発は、部品の選択によって始まる。前項で述べたように、高精度の部品を使用しなければ、改造・改良後にも良い結果を得られない。また、直接的に信号を生成するグラフィクス・ボード、サウンド・カードだけで性能が決定されるわけではない。

PC 筐体

最も精度と S/N に影響を与える部品は、PC 用筐体である。「OWL-PC-61」ブラック(オウルテック社)を選択した。

本筐体は、インナー・ケースの剛性が比較的高く、改造に適した構造であることと、全体が Al 合金でできており、2 次輻射が少ないことによる。現在では、最も適したケースは、Silent Master(Japan Value 社)である。

電源

電源は、300W の静音電源(Seven team 社)である。これは、ファンが 1 個であり、輻射が平均的で、改造が容易であるため選択した。

⁵ PC では、グラウンドに平均約 3 A の電流が流れており、シールドケーブルを使用するとシー

電源は公差が大きく、全体の部品の組み合わせで最適のものを選択し選別すべきである。なお、PCではグラウンド電流が流れることに注意が必要である。

マザーボード

マザーボードは、筐体について、ノイズの下限を決定する重要な要因である。CUV4X-E(Asus Tech社)を選択した。本マザーボードは、CPUとNorth Bridgeへの給電に多数の1500 μ Fのアルミ電解コンデンサを使用しており、余裕がある。マザーボード上で使用する電圧は、12Vを除き、全てDDコンバータによって生成され、リップル電圧を下げられる構造になっている。また、フェライト製チョークコイルなどの輻射が激しい素子とコネクタ類が、出力信号を生成する部品が挿入されるAGPバスおよびPCIバスから離れている。さらに、付加コンデンサを取り付けるスルーホールがある。

グラフィクス・ボード

グラフィクス・ボードは画像信号を生成するため、直接精度に影響を与える部品である。RADEON64MBVIBO(ATI社)を選択した。このボード上のDACは、10Bitで、静止画で使用される上位8Bitの誤差が極めて少ない。また、MPEG2再生では、カラーマップが10Bit分あり、動画部のDA変換は10Bitを使用することができる。このため、全て8Bitである他のグラフィクス・ボードより高再現性を考慮した設計となっている。なお、比較的公差が少ないボードであるが、飛び込みノイズの影響を受けやすい。なお、本ボードは、グラフィクス専用バスであるAGPバスに挿入される。

サウンド・カード

サウンド・カードもグラフィクス・ボードと同様に直接再生信号の精度に影響を与える。RME DIGI 96/8 PST(RME社)を選択した。本カードは、最大96KHz24Bit再生と記録が可能であり、アナログ入出力機能を持っている。本カードは、高再現性を目標に設計されており、高いポテンシャルを持っている。特にデバイスドライバの性能が良く、CPUの負荷が

ルドに流れる電流で、輻射ノイズが増大する。

極めて小さく、遅延も少ない。

DVDドライブ

DVDD(DVDドライブ)は、GD7000(日立)を選択した。GD7000は、最も動作音が小さい。DVDDは、動作音を除いて、機種ごとの大きな精度上の差は少ないが、構造から公差が大きい。従って、複数から選択することになる。

HDD

IC35L020(IBM)を選択した。このHDDは、7200RPMで、騒音がやや大きく、適してはいない。最適なHDDは、2.5インチのモバイルPC用である。3.5インチHDDでは、流体軸受けを使用した5400RPMの静音型が適している。

HDDケース

HDDは、振動と騒音が激しくそのまま装着すると機械的ノイズを取れない。そのため、Smart Drive(グローアップジャパン社)を選択した。騒音が問題でなければ、PH-35B PRO(Japan Value社)が最も制振性とノイズ遮断性に優れている。

IDEケーブル

フラットケーブルでは、輻射の反射があるため、丸型ケーブルのGCWF-100S(Justy社)の29cmを選択した。本ケーブルは、ATA100対応で、HDDとDVDDに1本ずつ使用している。

CPU

動画再生の品位にも着目した場合、ピーク電流の大きなCPUを選択することはできないので、Celeron633(cC0コア)をFSB=100MHzとし950MHzで駆動している。

CPUヒートシンク

高さ85mm幅60mm長さ60mmの特殊なヒートシンク(サーマルコンポーネント社)を選択した。ヒートシンクが高いと輻射が大きくなるが、輻射防止が可能となったので、振動防止のため、電源のファンの排気量で冷却可能な熱交換能であるのでこれを用いた。

メインメモリ

256MBのSDRAM(Winbond社)で、低消費電力の選別品を選択した。消費電力が大きい物を選択すると、リフレッシュ時に大電流が流れ、AGPバスとPCIバスへのリップルが増加する。

ネットワーク・カード

基板が小さく、高周波の輻射が比較的小さいので、EtherExpress Pro100+(Intel 社)を選択した。

その他

FDD(フロッピー・ディスク・ドライブ)は、OS に Windows2000(SP2)を選択したため、接続していない。

電源ケーブルは、4線対向スタagger結線で、アース線でコイル状に全体を巻き、アースに関して高周波フィルタ特性を持つケーブルを自作した。

電源環境

部品ではないが、電源環境が良くなければ、高再現性再生は不可能である。壁の電源コンセントは、HUBELL 社製の US Hospital grade を使用し、第1種アースに近い接地抵抗のアースを接続した。

7 ノイズ対策加工

部品を選択し、組み合わせても Ultra Hi-Fi PC にはならない。すなわち、一般的な PC の組み立てではノイズ対策にはならず、部品に対する加工と配線の工夫が必要となる。

PC 筐体

インナー・ケースに硬度と厚みの異なる Al 板を取り付け、全体を制振合板化した。特に振動の激しい HDD と DVDD の取り付けは、側板部に剛性の低い Al 板で制振合板化し、ダンブ機構付き板バネ構造とし、振動エネルギーを積極的に摩擦熱に変換すると共に捻れの反動を吸収した。HDD と DVDD は、ゴムワッシャを介してポリカーボネート製ネジを使用し、高周波振動の吸収を行った。

3.5インチベイに無共振煉瓦を硬質スポンジで浮かせて固定し、共振周波数をずらし、共振の鋭さである Q を分散した。Q と共振周波数の分散は、振動エネルギーの伝達を阻止する。

マザーボードの取り付け板に対し、厚さ 3mm と厚さ 2mm の Al 板を取り付け、間に Cu 箔 (t=0.1mm) を挟み、グラウンド電流を Cu 箔に通すと共に、表面輻射抑制と制振合板化を行っ

た。

電源部、ドライブ部、マザーボード部を Al 板(t=2mm)で分離し、輻射の影響を除いた。純銅は、輻射の反射が大きく使用できない。

結果、ほとんどの振動が吸収され、マザーボードには伝達されなくなった。なお、振動防止のため、冷却ファンは取り付けない。

磁性体およびステンレスは全て、500MHz から 1 GHz の 2 次輻射が大きく、画質・音質に大きく影響するため全て排除し、ネジなどは、黄銅とした。

冷却ファン

冷却ファンには、10 μ F の無極性アルミ電解コンデンサを取り付け、給電ケーブルをツイストした。

電源

グラウンドに高周波ノイズが伝達されることを防ぐため、グラウンドへ 3 ターンのコイルで結線した。冷却ファンの振動を防止するため、硬質スポンジでケースから分離した。コンデンサおよびヒートシンクを非磁性体のノイズ吸収材で覆い、輻射と振動を押さえた。ケースの内側および外側は、同上のノイズ吸収材で覆い、輻射を約 20dB 下げた。

給電配線

給電ケーブルは、最も大きな輻射の原因である。ループ面積を最小とすると同時に、輻射を打ち消し合わせるため、全てツイストした。ツイストペア線は、ノイズキャンセルに対する効果が極めて大きい。

給電ケーブルは、マザーボードから離し、マザーボードへの給電ケーブルも最もマザーボードから離して配線した。なお、給電ケーブルは、全て固定し、振動による発電を避けた。

HDD

HDD の制振合板が薄いための共振であるので、制振材を貼り、共振を防止して、HDD ケースに取り付けた。HDD ケース内のスポンジの硬度を調整して移動量を制限し、発熱の伝達を向上した。結果、振動が抑制され消費電流が減少した。

DVDD

ヘッドの微振動がリードエラーの原因とな

るため、ヘッドに鉛箔($t=0.3\text{mm}$)を貼り、モータ周辺に微振動抑制のため、制振材を貼った。結果、リードエラーが極めて減少した。当然消費電流が減少し、発生する電氣的ノイズも騒音も激減した。

ドライブ用給電ケーブルフィルタ

HDD と DVDD は、有機半導体固体電解コンデンサ(佐賀三洋工業株式会社)、積層セラミックコンデンサ(日本ケミコン)を取り付けた高周波フィルタを介して給電ケーブル(5V12V)に接続した。なお、有機半導体固体電解コンデンサの容量は、ドライブの消費電流によるが、 $500\mu\text{F}$ 前後が良い。積層セラミックコンデンサは、 $50\text{V}10\mu\text{F}$ である。

この高周波フィルタによって、約 25Hz ~ 20MHz 程度までの断続的な電流消費によるノイズを抑制可能である。

マザーボード

CUV4X-E の CPU への電流供給用 $1500\mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサ3本のうち2本を $1500\mu\text{F}$ の有機半導体固体電解コンデンサ(佐賀三洋工業株式会社)に置換し、残り1本を $2200\mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサ(HD 型:ニチコン株式会社)に置換した。

同様に、North Bridge への給電用 $1500\mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサ3本を、1本の $1500\mu\text{F}$ の有機半導体固体電解コンデンサ(同上)に置換し、1本 $1500\mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサ(同上)、1本を $2200\mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサ(同上)に置換した。

CPU と North Bridge のコンデンサの高周波リップル除去特性を向上することで、AGP および PCI バスへのリップル電圧が減少する。しかし、有機半導体固体電解コンデンサを多用すると、インピーダンスが低下しすぎ、AGP バスと PCI バスへの給電能力が低下する。そのために、HD 型の高性能アルミ電解コンデンサを並列に使用している。アルミ電解コンデンサには、特性向上のため、 $10\mu\text{F}$ の積層セラミックコンデンサを付加した。

AGP バス給電部のアルミ電解コンデンサ($1000\mu\text{F}$)を $560\mu\text{F}$ の有機半導体固体電解コンデンサ(同上)に置換した。この置換で、グラフィクス・ボードへの給電能力が増加すると

同時に電圧リップルが減少し、極めて画質が向上する。

PCI バスのサウンド・カードへのスロット部にあるスルーホールに $560\mu\text{F}(4\text{V})$ と $390\mu\text{F}(6\text{V})$ を付加し、サウンド・カードへの給電能力を上げ、さらにリップル電圧を減少した。この付加で、デジタル音声出力のジッタが激減した。

さらに、非磁性体ノイズ吸収材で、平行配線部を全て覆い、輻射を減少した。

これらの加工で、North Bridge と South Bridge のエラーも減少した。

CPU ヒートシンク

振動と輻射の防止のため、非磁性体ノイズ吸収材で覆った。電源の排気の背圧を利用して冷えるようにダクトをつけた。

グラフィクス・ボードおよびサウンド・カード、ネットワーク・カード

非磁性体ノイズ吸収材で全体を包み、外部からの輻射ノイズの遮断と、ボード上の素子間でのノイズの影響を避けた。このノイズ吸収材は研究途上のものである。良いノイズ吸収材を使用すれば、その効果は劇的である。しかし、一般的な特定の周波数用の磁性体を主としたノイズ吸収材では、2次輻射のため、かえって劣化してしまう。

ネットワーク・カードは、WOL の機能を使用するケーブルを接続すると劣化する。

グラフィクス・カードは AGP バスに、サウンド・カードは PCI バスの3番に、ネットワーク・カードは、PCI バスの6番に挿入し、それぞれの干渉を最小とした。

IDE 配線

非磁性体のノイズ吸収材で覆い、振動を防止して接続した。

8 結果

騒音は 10dB 以下となり、ほとんど無音である。残った騒音の原因は、グラフィクス・ボードのファンの風切り音である。

振動は、DVD が不定速回転中でもほとんどない。振動の影響は、サウンド・カードのアナログ出力電圧の変動で計測できるが、測定



図4. 未対策 PC(上)と Ultra Hi-Fi PC(下)の比較(1920×1440) : 同一部品構成

値には現れなくなった。使用はしないがアナログ音声出力の S/N は、約 20dB を良くなった。これは高級 DAC 並みである。

静止画は、直線性のある階調範囲が 3.7D を越え、さらに RGB 0 と、3.7D が識別可能となった。無信号走査線の輝度が最もノイズを示すが、明度での比較で 20% 以下まで減少した。

ピクセルジッタは、1920×1200 ピクセル表示(60Hz)で、ピクセル間の重なり合いとして、20% 以下になり、1 ピクセル幅の黒と白を完全に分離可能となった。ジッタとしての直接計測は、ほとんど不可能なレベルであるため、CRT を直接撮影して、重なり合いを計測した値であるため CRT の変動を含む。従って、実際のジッタはさらに少ない。CRT は、現在最高の性能を持つ F980 使用し、3 段のノイズフィルタを挿入した極めて安定した電源環境で使用し、D1(Nikon)を用いて撮影した。

静止画だけでなく、最もノイズに影響される DVD 動画でも、色相・分解能・明度共に極めて高精度となり、ほとんど誤差を含まない結果となった(図4)。

音声デジタルインとアウトでは、0.5n 秒以

下のジッタとなり、デジタル記録・再生に専用機器として使用可能である。なお、ワードクロックジェネレータを使用して外部同期とすれば、さらにジッタが減少し、録音・再生マスターに匹敵する。

DVD 再生の音声は、動画が同期マスターであり、通常では動画再生の速度が、コマによって時間内に再生されず、大きなジッタを持つ。この改造によって、全体にわたって遅延が減少し、コマ遅延は全く起きず、またボード上のクロックジッタも極めて少ないため、DVD 専用再生機より良い結果となった。

以上の結果から、PC の出力信号劣化は、デジタル信号自身の輻射や DAC の直線性の低さではなく、給電ケーブル由来のノイズ、振動、マザーボード上のリップルであることが証明された。すなわち、始めから精度の高いグラフィクス・ボードとサウンド・カードを選択し、ノイズ対策を行えば、それらの回路の変更は不要であると言える。

なお、図5に示す円内のアナログ配線部が最もノイズを吸収する部位である。また、マザーボードと同じ速度で振動しないと、ジッ

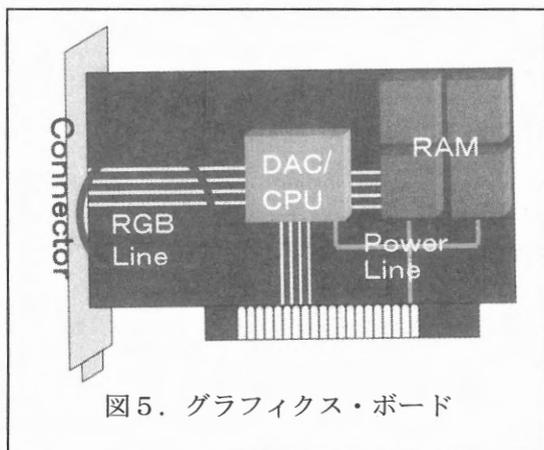


図5. グラフィクス・ボード

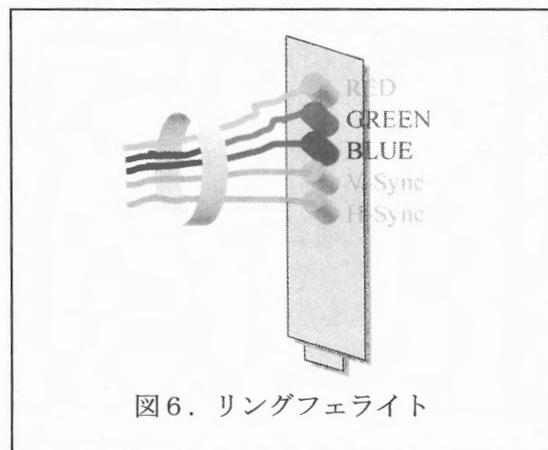


図6. リングフェライト

タを生じるのもこの部分である。さらに、本研究によって、画像ケーブルのリングフェライトが著しく画質を劣化させることが判明した(図6)。しかし、空間ノイズの大きい環境下で水平周波数が130KHz以上の高性能のCRTをリングフェライトが装着されていない映像ケーブルでPCと接続すると、大変危険な状態になる。

2m以下のPCとCRTの接続では、D-SUBコネクタの影響は、高画質用D-SUB to 5BNC変換部を持つ専用ケーブルを使用すれば、大きな劣化はないことが判った。遠距離では、映像ケーブルの品位が極めて大きく画質に影響してしまう。特に、各BNC同軸75Ωケーブルのインピーダンス・ミスマッチングによる反射と、電気的信号長の違いによる同期誤差が映像を劣化させる。

3m以上の接続では、AES/EBUケーブル(110Ω)やBNCケーブルでは、高周波特性が劣化してしまい、音声デジタル信号の立ち上がり電圧加速度が低下し、ここにノイズが混入することで、劇的にジッタが増加してしまう。従って、遠距離では光ケーブルの使用が好ましい。

なお、本実験による計測で、鉄筐体のAVアンプその他AV機器は、48KHz以上のデジタル音声信号を入出力する時、多大な輻射を出すことが判明した。そのため、鉄のラックに入れることは、他の機器への影響のため、極めて好ましくない。本実験で作成したPCは、このような輻射は極めて小さく、他の機器への影響はほとんど無く、そのままスタジオ等での使用が可能である。

9 結語

ノイズを特定し排除することによって、Ultra Hi-Fi PCを実現できた。ノイズの排除には、給電部で電流消費変動の大きい能動素子の直近で変動を吸収することが最大の効果を示すことが証明された。結果としてPCからの輻射も測定限界に近づいた。また、方針を明確に示せた事により、安価にUltra Hi-Fi PCの作成が可能となった。

本指針および改造は、他のデジタル機器の高品位化にも応用可能であった。特に、AVアンプ等のように、消費電流の大きいLSIを使用した機器での向上は非常に大きい。そのため、再生装置側の高再現性の研究を開始した。

オーバーオールで高再現性を実現した研究および教育の効果は、極めて大きく研究と教育の範囲そのものを変えてしまう。例えば、NTSC再生では、細部の消失のため、映画の撮影技法などを正確に示せないが、1920×1080ピクセルでのDVDの再生では可能である⁶。データの精度のみならず、再生環境の精度向上が切望される。

10 謝辞

本研究は、大谷大学が所蔵している北京版大蔵経等の貴重図書のデジタル化による可読性を保証した資料共有データベースの作成研究から支援されている。プロジェクトを推進しておられる草野教授、山本講師、松川講師、箕浦研究員以下、学生諸君に感謝する。特に、京都国立博物館の主任研究員赤尾氏に深く感謝する。

本研究は、多数の企業によって精度向上の協力を得ている。本研究のような複合的な研究は、多数の専門家による協力がなければ、成果を得ることが極めて困難であることを明記しておきたい。高精度写真撮影および高精度デジタル静止画に関しては、Kodak、株式会社ニコン及び、(株)堀内カラー、大日本スクリーン製造(株)、コメント株式会社に感謝する。CRTの解析に関しては、株式会社ナナオの宮保氏および研究開発の方々に深く感謝する。伝送系ケーブルに関しては、カナレ電気株式会社に感謝する。ノイズ吸収材、パーマロイ、フェライトコア等のノイズ対策に関しては、株式会社トーキン、日立金属、TDKに種々の教えとご協力を頂き深く感謝する。

特に本研究に重要なノイズと有機半導体固

⁶ フィルム媒体では、オリジナルのRegionのDVDでないと、フィルムのデュープリケーションでの劣化と、圧縮の差で、劣化が激しいことに注意が必要である。

体電解コンデンサ特性に関して、佐賀三洋工業株式会社の喜多川氏と三洋電子部品(株)の三好氏に御教示と御協力を頂き、深く感謝する。高性能アルミ電解コンデンサに関しては、ニチコン株式会の藤馬氏(技術部)にご教示を頂き、同社営業統括部 4 課の湯地氏と平地に御協力を頂き、深く感謝している。

最後に、非破壊検査株式会社の宮部氏にノイズ測定に関して多大の御教示と御協力を頂き、深く感謝する。

11 参考文献

- [1] 柴田, et al. 北京版チベット大蔵経の高デジタル画像化：写真撮影過程. 文部省科学研究費重点領域研究「人文科学とコンピュータ」第6号, pp.72-79, 1998年10月.
- [2] 柴田, et al. 北京版チベット大蔵経の高再現性デジタル画像化：高精度スキヤニング過程, 情報処理学会「人文科学とコンピュータ研究会」第43回, 「人文科学とコンピュータ」, 43-6, pp.43-50, 1999年7月16日.
- [3] 片岡, Hi-Fi デジタル画像の作成：明度と色調の1段階での補正, 情報処理学会, 「じんもんこん 2000」2000年12月15-16日.
- [4] 片岡, 高精度デジタル画像の高再現性表示, 京都大学大型計算機センター第64回研究セミナー, 口頭発表及び報告書(ISSN 0910-3201), pp.74-85, 2000年3月(24日).
- [5] トランジスタ技術 SPECIAL No.64, 1998年, CQ 出版社.

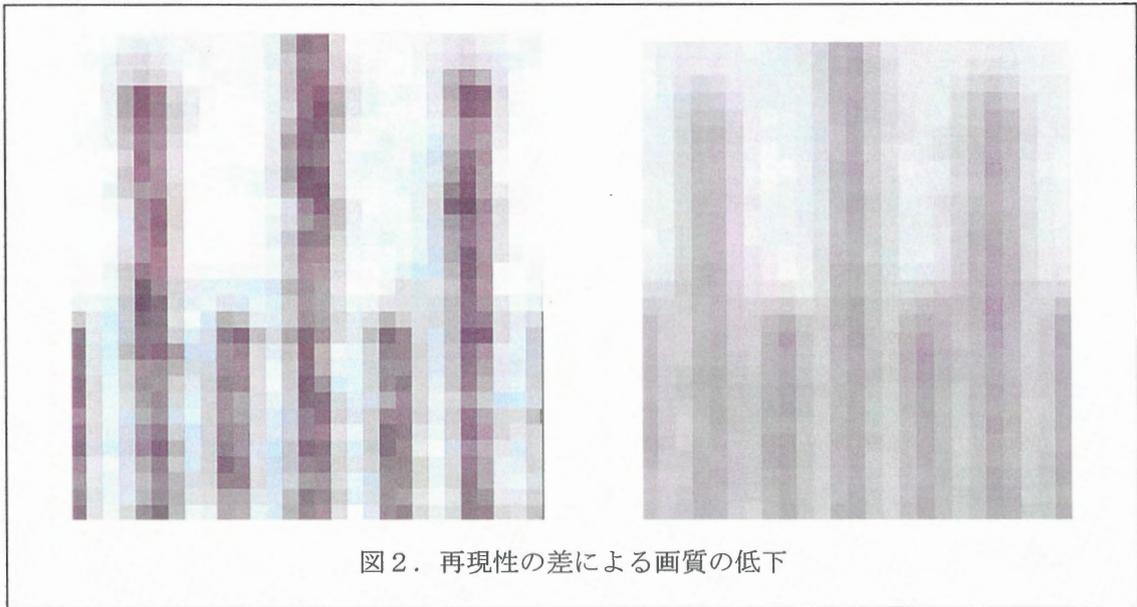


図2. 再現性の差による画質の低下



図4. 未対策 PC(上)と Ultra Hi-Fi PC(下)の比較(1920×1440) : 同一部品構成

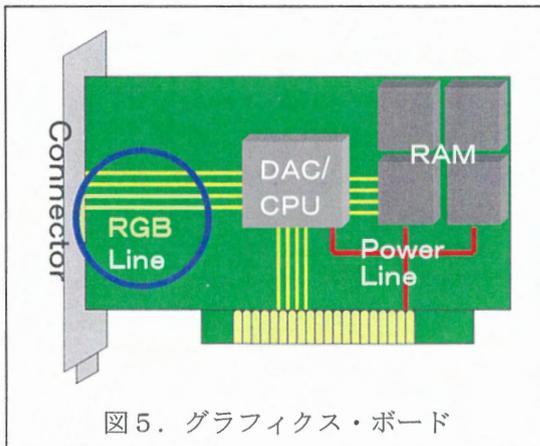


図5. グラフィクス・ボード

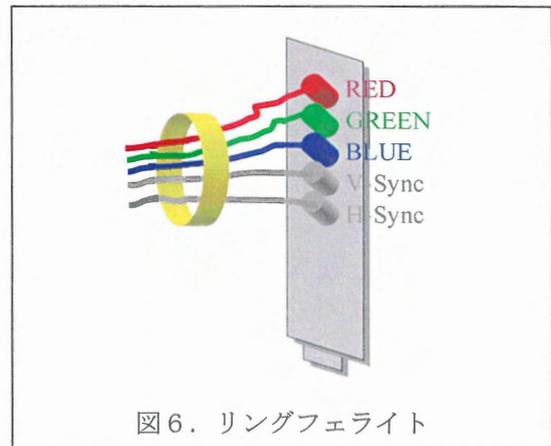


図6. リングフェライト

