

1bit技術を応用してCDの再生音質を向上する
(2.8MHz系 $\Delta\Sigma$ 信号だけが1bit技術ではないよ)

第13回1ビット研究会
2016年6月22日
中田 宏
work@nakata-jp.org

Nakata who?

自己紹介

- 昭和育ちの職人気質エンジニア
- 職業経験35年超（ほとんど開発現場で過ごしてきた）
- 35年前の専門はコンピューターのソフトウェアだったけど、今ではデジタルのハードウェアまで手を出している
- 職種は企画から設計、実装、運用、デバッグまでなんでもあり
- 分野は、TVゲームから、FA、金融、国防、科学技術計算、インターネットのサーバーまでいろいろ体験した
- 肩書はほとんどなし
 - 博士号なし
 - MBAなし
 - 海外留学経験なし
 - 大企業のコンサルもやっていない

聴講上のご注意

- オーディオ・ファン向けの柔らかい話から始めますが、突然ディープな技術論(大学の理工学部講義レベル)になったりします
- オーディオの基本的な知識を前提とします
- 客観的事実、世間の常識、理論的考察、単純な感想などを、厳密に書き分けるために表記にこだわります
 - 個人的な意見を示すために『中田は…』という表現を多用します。個人名を売り込みたいわけではありません。客観的でなく個人の体験、感想をもとにしている箇所を明示します
 - 1箇所だけ例外があって、個人名を売り込む場所が出てきます
- 正直に客観的事実と理論を語るので、オーディオ業界の商売に都合の悪いネタが出てくる場合があります
- 発表者がオヤジなので、ギャグネタが古いです
- マニアックな技術論(あるいはネタ)を語り出すと止まらないので、質問はお手柔らかにお願いします

中田はなぜ オーディオを自作するのか？

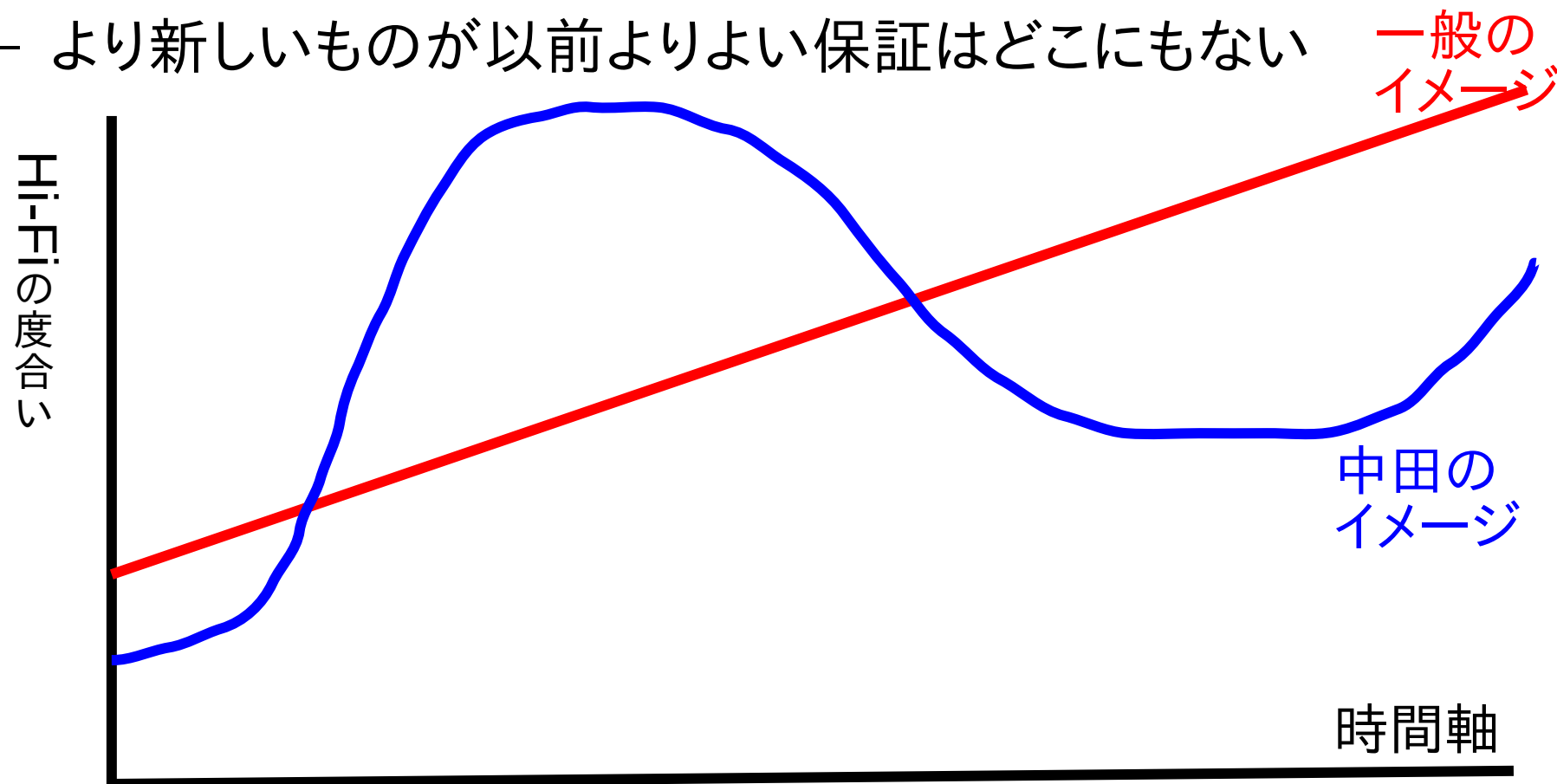
- そこにオーディオがあるから… ではないと思う
- No Music No Life(音楽なしでは生きられない人種)だから
- 高級オーディオは高くて買えないが、自分で作ると納得の行く回路を安価に実現できるので
- 今までに体験したことのない高音質を聴くと感動するので
音質向上を一度体験するとヤミツキになる。
ハマると抜け出せなくなるのは、きっと自作オーディオ派全員に当てはまると思う。
 - 高音質とは具体的に言うとは？… 次ページへ

中田にとって良い音って何？

- 主観的なもので、数値化不可能
- 聴きなれた音源から、今まで聴こえていなかったディテールを発見できること。
普段聞いているJ-Rockを聴き直すと、具体的にはこんな感じ。
 - このタイミングで小さくパーカッションが鳴っていたのに今気づいた
 - ドラムスの低音がボン、ボンではなくて、ドン、タン、スタンと異なる音色で聴き分けられる
 - コーラス一人一人の声(誰が歌っているか)が聴き分けられる
 - ギターの弦を弾く指使い、ドラムスの革のテンション、ヴォーカルのブレスが感じ取れる
 - 無音部分が今までよりもさらに静かに感じられる
- 単純に音が分離して聴こえることではなく、全体のバランスが崩れていないことも重要
個々の楽器の評価をしたいのではなく、音楽を聴きたいから
- 実は、普段より再生時のボリュームを上げるだけで、上記の多くが体験ができる。
 - もっとも、普段不快に感じる音量に設定した際でも不快に感じなくなる現象は、音質向上効果の一つ

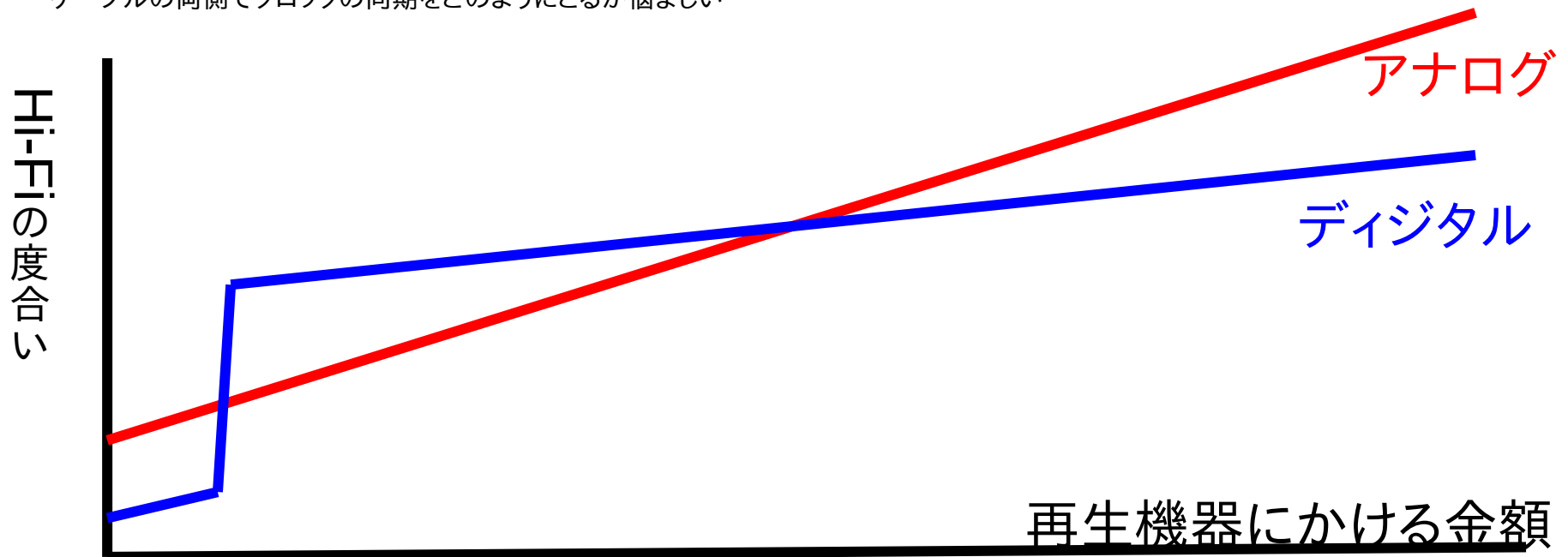
オーディオ技術の進化

- 技術は右肩上がりに進化するとは限らない
 - より新しいものが以前よりよい保証はどこにもない



アナログ VS デジタル

- デジタルが新しいからと言って、アナログを超えているわけではない
- デジタルの長所は再現性の良さ
 - アナログ時代の製品はばらつきが大きかった
 - アナログアンプの音は、暖まって安定するまで時間がかかった
 - アナログは部品に金をかければかけるほど、品質向上がそれなりに見込めた
- デジタルの短所1は再現性の良さ
 - いくら部品を高価なものに交換しても、出力品質に影響が少ない
- デジタルの短所2はリアルタイム再生が苦手なこと
 - ケーブルで伝送するとき、送信/受信の両側にバッファを用意することになる
 - ケーブルの両側でクロックの同期をどのようにとるか悩ましい



オーディオ技術の改良を分類すると？

a)大改良＝発明(文句なく特許がとれる)…例えば

- ダイアモンド差動回路の発明
- アナログ音源からデジタル音源へ
- $\Delta\Sigma$ 方式の考案

b)中改良＝イノベーション(理屈の上でも改良効果が予想できる)

- アンバランス伝送をバランス伝送に変える
- DAC LSI中身の動作を工夫する
- 今回の中田の発表はここ 中改良

c)小改良(机上で理屈をこねるネットワーカーにコケにされることもある)

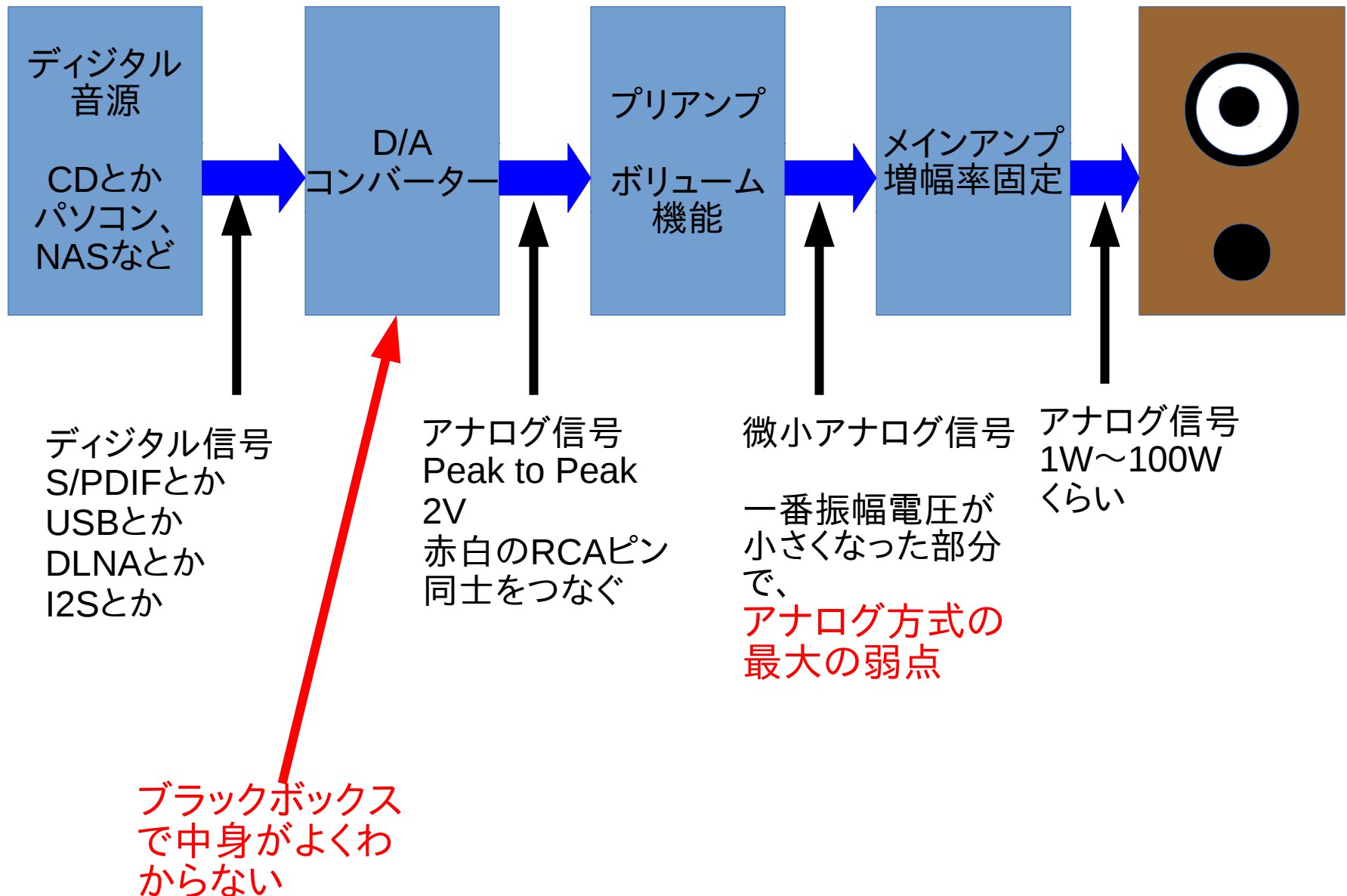
- ケーブルや電子部品、半田素材を高級品に交換する
- 音声信号が直接流れない電源やケースにも工夫を加える
- オーディオ・ルーム専用に変圧器を増設してもらう
- 中田個人の私見を表明すると、

『消費者がオーディオを自作、改造する場合、趣味の世界だから他人に迷惑をかけない限り(ここ重要)小改良でも何でもアリ』だと思う。

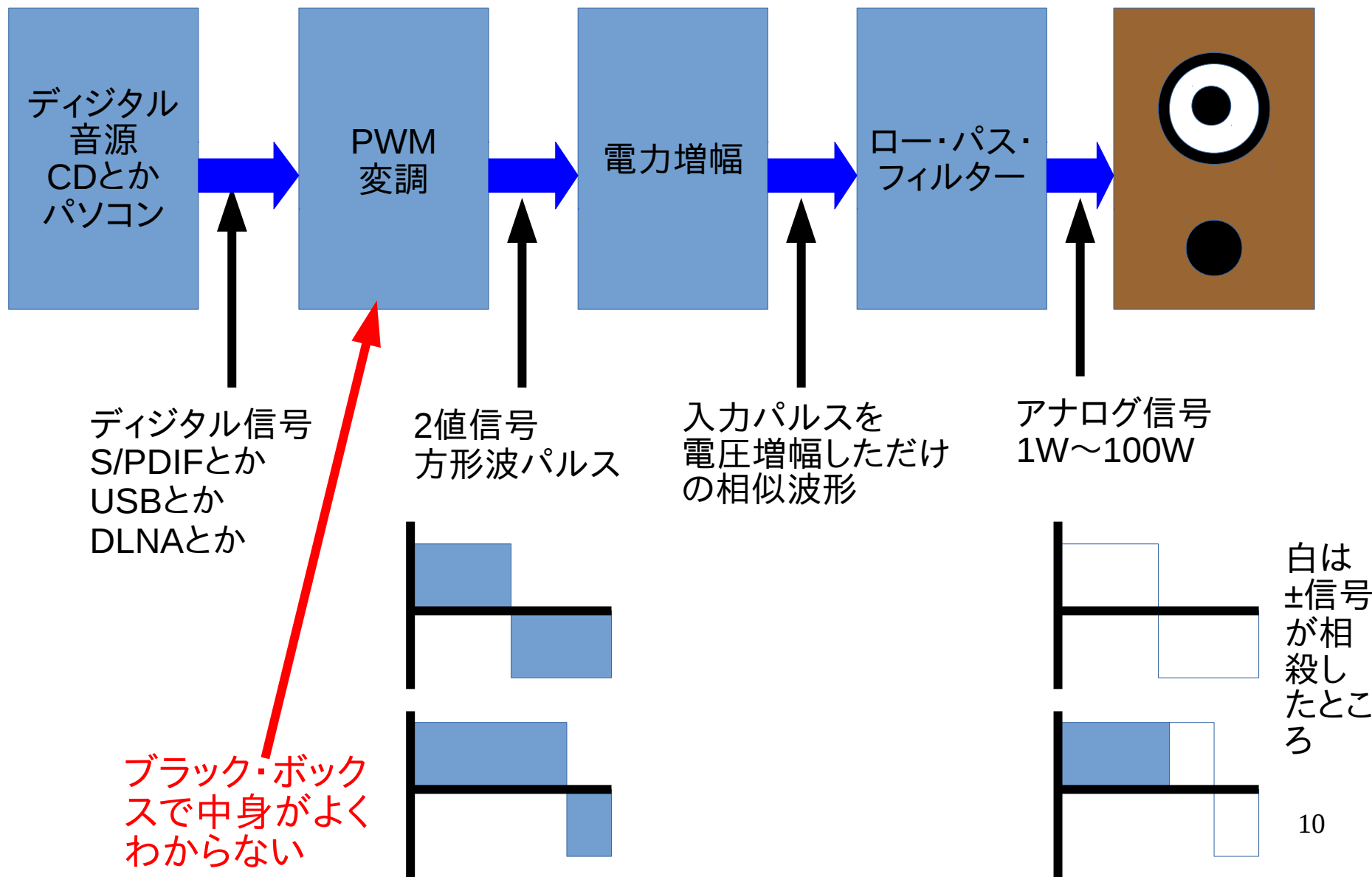
趣味の世界は他人の言葉に左右されず、自分の信じる道を突っ走ったほうが楽しい。ただ、中田が今興味を持っているところは、中改良か大改良。

メーカーが『小改良したふりをして去年と同じ技術を売る』のはやめた方が良いと思う。

復習 デジタル音源のアナログ増幅



復習 デジタル音源の フル・デジタル増幅



アナログvsフル・デジタル 最終段増幅方式で対決

- 耐ノイズ

- アナログ増幅は、プリアンプのボリューム直後に一旦アナログ信号がmV、 μ Vオーダーの微小信号になるため、比較的ノイズに弱い
- フル・デジタル方式は、どの部分でも信号電圧が数V以上のオーダーなので、比較的ノイズに強い

- フル・デジタルならではの欠点

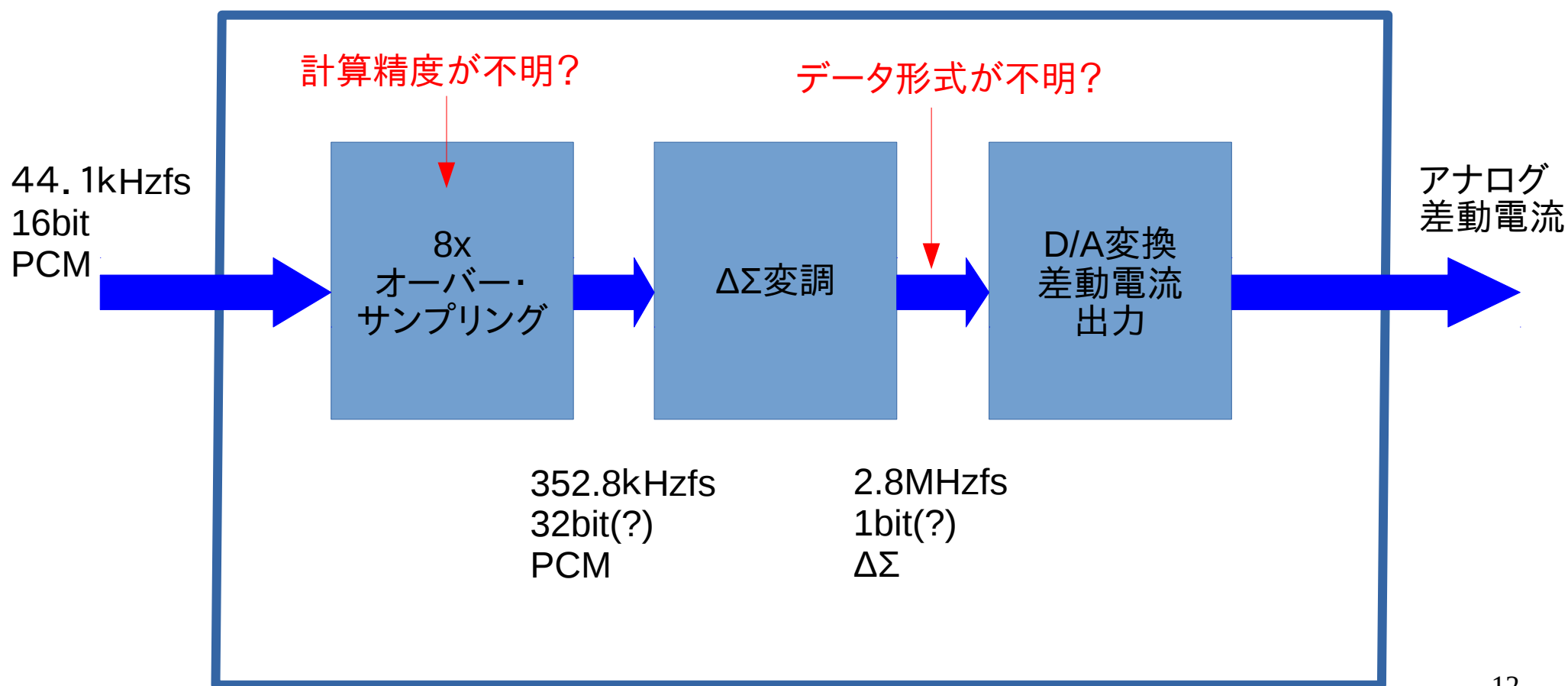
- 増幅は、ボリューム制御が難しい
 - 増幅段の振幅(電源電圧)制御を行うのが望ましいが、 $-\infty$ dBから0dBまで連続して調整できる回路を作るのは非常に困難(不可能かも)
 - PWM変調の前にデジタル・データのスケールリングを入れると、小音量再生時に精度が落ちて音質劣化を招く
- PWM周波数のノイズが出る
 - ロー・パス・フィルターが必須(LC回路ではなくスピーカーそのものをロー・パス・フィルターとして働かせるアイディアもある)
- ロー・パス・フィルター以降のアナログ部分で歪が発生しても、キャンセルする目的で誤差をフィードバックすることが難しい

- フル・デジタルならではの長所

- フル・デジタル方式は、ロー・パス・フィルターの直前まで、信号精度を把握(PWM変調方式によっては精度が落ちることもあるので『維持』ではなく『把握』)できる
 - アナログだと、同じ回路でも部品や配線の引き回しで、歪みが変わる
- 電源効率の良さ
 - ロー・パス・フィルターから相殺した電力が電源に戻るので、電源効率が良い
もっともそのおかげで、電源電圧を安定させるのが難しい

今のDAC LSI はブラック・ボックス

Burr Brownに代表される、ここ10年ほどの一般的なDAC LSI内部のブロック図



D/A変換方式の歴史

D/A変換チップ

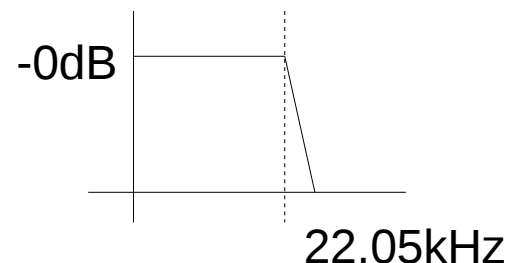
D/A変換
ラダー
抵抗など

Compact Disc
からの
44.1kHzfs16bit2ch
信号

44.1kHzで切り替わる
階段状波形
出力信号のうち22.05kHz
以上の周波数帯にはディジ
タル方式のノイズがある

外付け回路

急峻な
アナログ
LPF



急峻な特性
を求めると、
位相特性など
に悪影響

D/A変換チップ

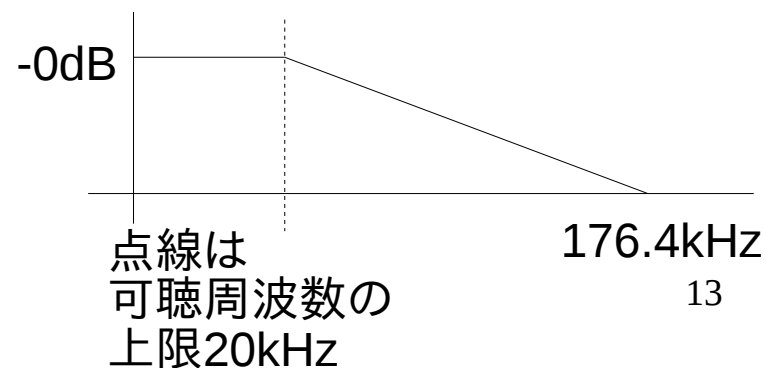
8xオーバー
サンプリング
+
D/A変換

Compact Disc
からの
44.1kHzfs16bit2ch
信号

352.8kHzで切り替わる
階段状波形
ディジタル方式のノイズは、
オーバーサンプリングによ
って
176.4kHz以上に移行する

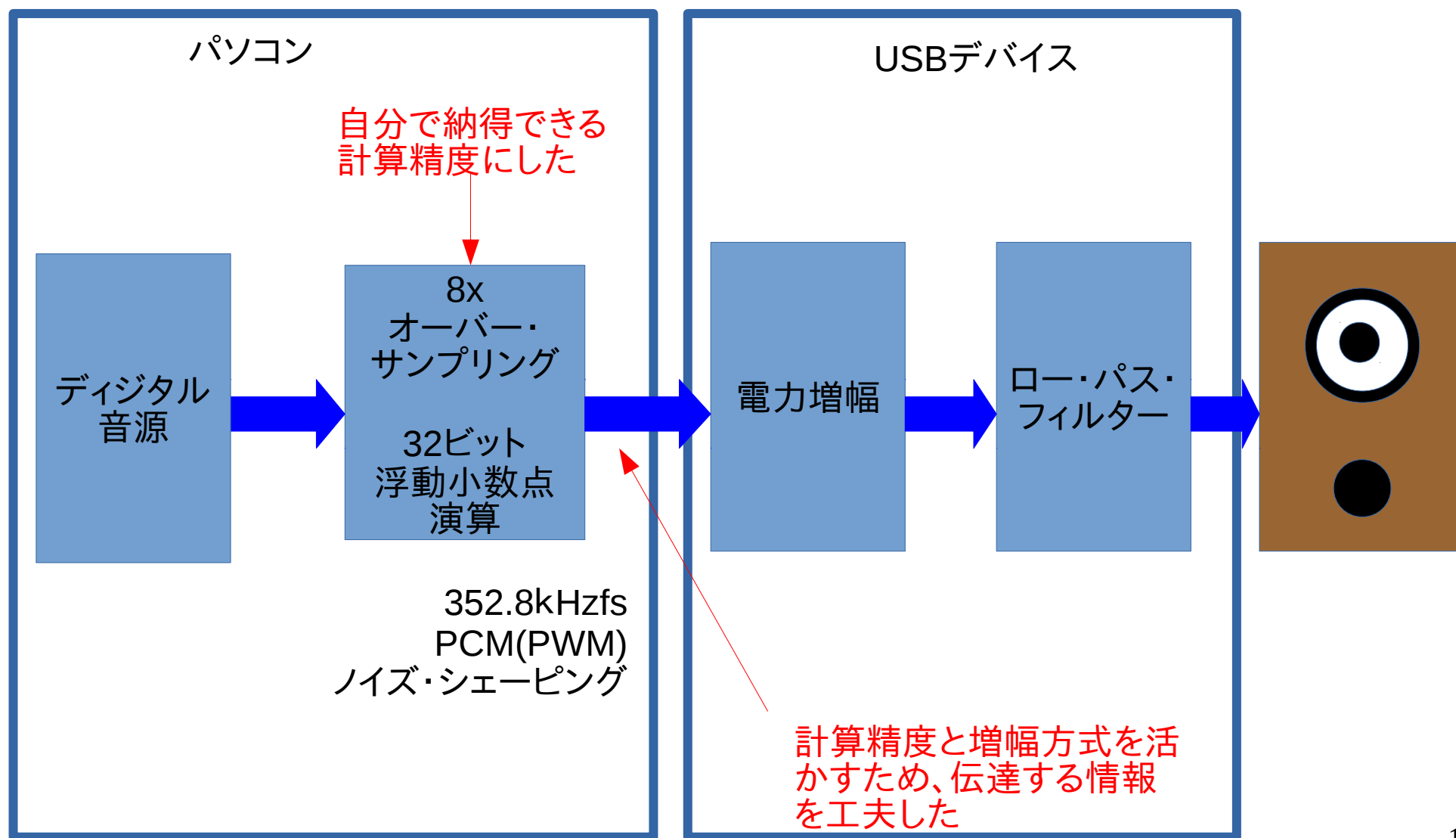
外付け回路

緩やかな
アナログ
LPF



この8xオーバー・サ
ンプリングをソフト
ウェアでシミュレー
ションしてみよう

今回作成した方式



聴感上音質向上した...なぜ？

- 仮説

- 今回ソフトウェアで実装した8xオーバー・サンプリング(32ビット浮動小数点演算精度とFIRのタップ数)が、DAC LSI内部の8xオーバー・サンプリング演算精度を超えたものと考えられる
 - 研究者向けの資料にシミュレーション結果を載せたので、興味がある人は参照されたい
- 見方を変えたと、DAC LSI内部の8xオーバー・サンプリング・フィルターは、演算精度が低いのではないか？
 - 例えば、従来のLSIは16ビット固定小数点演算を使っているとか
 - 従来のDAC LSIより音が良いと言われるCHORD HUGOの内部処理はSpartan-6というFPGAを採用して26kタップのFIRを動かしているそうだ。おそらくロー・パス・フィルター高速乗算処理のため、18bit multiplierユニットを使用していると思われるが、本方式は32bit浮動小数点演算。
- 上記仮説により、最近のハイレゾ・ブーム、自作オーディオ界の流行の一部に説明がつく…次ページへ続く

ハイレゾ・ブームの謎の一つが解決

- 謎

- 同じCDDA音源由来でも、ストレートに44.1kHzfsをDACから再生するより、同じ音源を事前にオーバー・サンプリングしてからハイレゾ・データをDACに送ることによって音質が良くなると言われていた
 - CDレーベルが独自技術でオーバー・サンプリングした場合でも
 - パソコン上のソフトウェアでオーバー・サンプリングした場合でも
- 事前オーバー・サンプリングを試した人によって評価が大きくばらついていた

- 謎の理由説明

- 事前オーバー・サンプリングした音源をDAC LSIに入力すると、LSI内部で働く8xオーバー・サンプリングの低い演算精度がカバーされたと考えられる
 - (ソフトウェアで8xオーバーサンプリング + 市販DAC内部で352.8kHzfsをさらに8xオーバーサンプリング)の方が(市販DAC内部で44.1kHzfsを8xオーバーサンプリング)より良いということ
- 事前オーバー・サンプリングを試した時、評価に使用したDAC LSI品種が異なれば内部演算精度が異なり、改善効果もまちまちだったと解釈できる

自作オーディオ派のNOSブーム

- 自作オーディオの世界では「Non Over Sampling方式のDAC LSI (P.13の上の図参照)の方が音が良い」と主張する人がいる
 - DAC LSI内部にある8xオーバー・サンプリング演算精度の低さからくる歪に耐えられないのかもしれない
- 過去のオーディオ界で

NOS方式 VS オーバー・サンプリング方式

の対決議論があったと聞いた

『急峻な特性のアナログLPFが生む歪』

VS

『オーバー・サンプリング・フィルタが低精度であるための歪』

という対決だったと認識している人はどのくらいいるだろうか？

新方式を命名する

- 今回の方式に名前を付けた
- オーディオ界の**偉大な先輩**を見習って命名
 - 『中田式 D/A変換方式』
- 新方式の特徴
 - 計算精度で従来を超えたデジタル・オーバー・サンプリング（例えばサンプリング周波数比8xかそれ以上、計算精度は単精度浮動小数点型以上、数千タップのFIRで）を行う。
 - 本方式における計算精度やオーバー・サンプリングのタップ数は、具体的な下限数値を決めない。外付けのアナログLPFを設計しやすくするためにデジタルでオーバー・サンプリングしながら、いつでもその時点で使える技術を応用し出力品質を高くする工夫を行うことが大事。

今回発表の特徴(その1)

- Q1 今回発表はイノベーションか？
- A1 Yes
 - 従来のDAC LSIよりも音質が向上するD/A変換手法を提案した
- Q2 今回発表はパラダイム・シフトしたか？
- A2 Yes
 - 皆が『ハードウェアで行うもの』と考えていた8xオーバー・サンプリングをソフトウェアで行った。
 - でも、それは本方式の本質ではない。高価なハードウェアを使用すれば、同じ計算精度をハードウェアだけで実現することも可能
- Q3 今回発表の欠点は？
- A3 フル・デジタル方式本来の欠点が残っている
 - ボリューム問題
 - PWM周波数のノイズが出力される問題
 - 電源を±ではなく単一電源にして回路を簡略化(BTL駆動)しているので、左右でGNDを共有する3線式のヘッドフォンを直接駆動できない

今回発表の特徴(その2)

- Q4 今回発表に改良の余地はあるか？
- A4 余地だらけ
 - デジタル的改良
 - PWM変調のパルス幅制御をもっと細かくすれば、出力信号の精度向上すなわち音質向上が期待できる
 - アナログ的改良
 - ロー・パス・フィルターの精度
 - 電源電圧の安定性
 - フル・デジタル・アンプ動作原理の問題
 - 増幅段の先、ロー・パス・フィルター以降に誤差(歪の発生)があってもフィードバックしていない
 - スムーズなボリューム制御を実現したい
- Q5 出力を電力増幅してスピーカーにダイレクト接続する代わりにPeak to Peak 2V信号にして、DAC機器としてRCAジャックにアナログ出力できるか？
- A5 Yes
 - ただし、ボリュームの後に微小アナログ信号になってノイズに弱くなってしまうので、従来のアナログ方式と同様の弱点ができてしまう。
- Q6 フル・デジタル増幅方式をやめて、工業用のNOS高速12bit D/Aコンバーターを352.8kHzなどで駆動して現行のオーディオDACの代用として使用できるか？
- A6 試してはいないが、おそらくYes
 - 実は準備中。ただ、1bit技術から離れてしまうので、1bit研究会では発表できない。悪しからず。

本方式で音質向上して全員がハッピーか？

- 実は全員がハッピーになれるとは限らない
 - 従来のDAC LSIの低い演算精度をエフェクターとして利用していたレコーディング・エンジニアが少なくとも一人いるような気がする……………その名は山下達郎
- 中田がラジオ放送で繰り返し聞いた山下達郎の発言内容を引用する
 - 「自分の演じる音楽はR&Rで歪み感が重要だが、ハイレゾでは音がきれいで歪み感がなくなる」
 - 彼の言うところの『歪み感』=『DAC内部の演算誤差を利用した効果』と考えられる
 - 「アナログ・レコードがCDに変わった時、自分の求める音を出すためのマスタリング方法を試行錯誤するのに時間がかかった」
 - CD初期の時代は、DAC LSI内部のD/A変換方式についてメーカーも試行錯誤していたので、同じ音源データを持ってきても再生機器が採用しているLSIによって出音の傾向がばらついていたと考えられる
- 山下達郎に代表されるレコーディング・エンジニアは、出音に真剣に向き合ったために、意図せずDAC LSIの進化の歴史に振り回されてしまった被害者なのでは？
 - オーディオ界商売人がコンシューマーの方だけに向けていたための限界かも
 - 商売人に振り回されているのは、エンジニアも一緒
 - パッケージ音楽業界は、レコーディングから再生までの技術に一貫して責任を取らなくてよいのか？
 - ターゲットの再生装置を安価なポータブル機器に定めてマスタリングをすると、Hi-Fiオーディオで再生しても良い音が出てこない

先人に感謝

- 新方式は私にとっては小さな一歩だが、オーディオ界にとっては大きな飛躍…かもしれない
- 新方式を実装できたのは、中田一人の力によるものではない。スタート点になった技術の蓄積がある。過去のエンジニアが積み重ねてきた血と汗と涙の結晶に、一つの石を追加で乗せたようなもの。スタート地点を用意してくれたすべてのエンジニアに感謝。
- CDの再生技術が今ほど良くなかった時代から、当時の技術で再生不可能な程高音質の信号を、アルミニウム上のピット列に刻み込んでくれていたレコーディング・エンジニアにも感謝。
- そして、新方式がさらに誰かのスタート地点になることを願う。
- 山ほどある参考文献の中から特に貢献度が大きかった2冊を紹介する。
 - 岩田利王 実践ディジタル・フィルタ設計入門 CQ出版社
 - 8xオーバー・サンプリング・フィルタの設計に利用した
 - 本田潤 D級/ディジタル・アンプの設計と製作 CQ出版社
 - オーバー・サンプリングしたデータを用いて直接スピーカーを駆動することに成功した

最後にオヤジ世代へエールを送ろう

- 平成の世の中「若い人の柔軟な発想が必要だ」などとうそぶきながら、若者だけを安く雇って使い捨てる悪徳経営者が多すぎる。
- オヤジ世代は給与が高いという理由だけで、どこでもリストラの対象になっている。
- そのせいで、日本の大企業には新技術を提案できるくらい洞察力のあるエンジニアがほとんどいない。目先のノルマに追われるイエスマンが多い。
- おまけに、オーディオは儲からないジャンルだと敬遠されていて、実力を持つ少数のエンジニアはすぐに別の儲かる分野に転属させられてしまう。
- そんな大企業に期待するのはやめよう。きっと、日本の大企業のほとんどは、寿命の終わりを迎えているに違いない。明治維新に匹敵する変化の時代の荒波を乗り越えられないであろう。
- 我々オヤジ世代には、技術と経験がある。HONDAの本田宗一郎、SONYの井深大、Apple のスティーブ・ウォズニアクに勝るとも劣らない。自信を持って新技術を提案し、モノ作りの真髄を世の中に広めよう。

終わり

- まとめ

- フル・デジタル・アンプの再生において、8xオーバー・サンプリングをパソコンのソフトウェアを用いて32bit浮動小数点精度で行ったら、音質が向上した

せっかくオーバー・サンプリング精度が向上したので、フル・デジタル方式で増幅してみた

- 一人のエンジニアが、自分のアイデアをふくらませて、オーディオの音質向上に成功した……つまり
 - この発表を聞いた皆さんは、イノベーションの瞬間を目撃できたラッキーな人たちなのかもしれない

- 次回予告

- 今回のシステムでCDのPCM再生音質は良くなった

今回のシステムで1bit $\Delta\Sigma$ 信号は一旦PCMに変換して再生している。何とかならないか？

- 実は、検討中の技術がある。次回発表をお楽しみに。

- ご静聴ありがとうございました。