

# デジタルオーディオにまつわる迷信とその克服

早稲田大学理工学部 山崎 芳 男

LSI 化された PCM プロセッサがすでに数社から発売され、今秋には DAD (デジタル・オーディオ・ディスク) の発売と、デジタルオーディオもいよいよ実用期を迎えようとしている。

ところで一部にはデジタル特有の音、歪が存在するといった主張をするむきもある。また一方では、DAD になるとどの装置で再生しても、同じ音になってしまい面白くないといった声も聞かれる。

本稿では、まずオーディオ分野へのデジタル技術導入の背景について考え、次にデジタルオーディオの問題点を明確にし、これらに対する正しい対処の方法について述べる。いわれなき誤解を解き、あるいは迷信？を克服し、デジタルオーディオを正しく理解する一助となれば幸いである。

## \* AD 変換器, DA 変換器はアナログ機器

デジタルオーディオは、同じ工学の分野にありながら、もっとも距離のあったともいえる広帯域音響信号とデジタル信号処理の融合が要求される。しかるに、あまりにも実用化の速度が速いため、それが必ずしもうまくいっているとはいえない。

的確な処理を施せば、阻止、軽減できるデジタルオーディオ特有の聴感上不快な雑音、歪が放置され、前述の前前の指摘が妥当といわざるを得ないシステムも散見される。

一方、後者については面白い面白くないかは別として、同じディスクを再生した場合、伝送機器である DA D プレーヤの出力は、どこの製品であれ、同じ音がすること自体、むしろ望ましいといえる。

しかし、AD 変換器、DA 変換器は広帯域音響信号を符号に、あるいはその逆の変換をするアナログ機器、それも、さまざまな制約条件のある特殊なアナログ機器である。したがって、理想的な変換特性からある程度の誤差は不可避であり、当分の間は機器による音質差は覚悟しなければならない。残念ながら後者の指摘は今のところ杞憂といえる。

## \* 『音は良いが、膨大な帯域を要する』は二重の誤り

デジタルオーディオは音質は良くなるが、ビデオ信号に匹敵する膨大な帯域、伝送容量を必要とするといった声を時折耳にする。これは前段、後段ともに誤りである。前段はオーディオ信号をデジタル化すると、信号は劣化こそすれ、良くなるなどということはありません。もちろん、機器全体の性能として見た場合にはテープレコーダのように、現行アナログ機器の信号劣化よりもデジタル化した方が劣化が少ない機器もある。

後段については、デジタル伝送は元来そんなに能率の悪い伝送手段ではない。情報論の見地に立てば、ある伝送路でアナログ伝送できる音は、同じ伝送、記録媒

体を使って少なくとも同程度の質でデジタル伝送、記録が可能ならずであるからである。

最近、コンパクトカセットを使ったPCMテープレコーダが数社から発表されており、一部では画期的なことのよういわれているが、アナログのカセットテープレコーダの性能を考えれば、これは当然のことである。もちろんデジタル化すればコピーによる音質劣化や経年変化は避けられるといった性能面の特長も期待できる。しかし、大多数のユーザーにとっては性能面よりは、むしろアナログよりチャンネル数が増えるとか、テープ走行速度が遅くできるといった新たな機器の追加、あるいは機器やテープの価格が大幅に安くなるといった利点が生まれて、はじめてデジタル化の意味があるといえるのではないか。

業務用マルチチャンネルテープレコーダでは、すでにテープ消費量でアナログを大幅に下回り、運用コストの低減をもたらしている。

#### \* デジタルオーディオの歴史

音響分野へのデジタル信号処理の導入の歴史を振り返ってみると、まず目にとまるのが音声の分析、合成の研究への、電子計算機によるソフトウェア処理の導入である。特に1965年、FFT（高速フーリエ変換）のアルゴリズムが紹介されると、音声の研究は飛躍的な発展を遂げ、最近では音声合成用のLSIが市販されるに至っている。また、電話回線のPCM多重伝送や衛星通信という形で、ハードウェアによる音声のデジタル伝送も実用に供されている。

広帯域音響信号については、1960年代中頃から室内音響の研究を目的とした電子計算機によるソフトウェア処理は行われていた。しかし、オーディオ分野へのハードウェアの形での導入は1970年頃からである。

最初にデジタル化が試みられたハードウェアはホールやスタジオで使われる効果用機器で、遅延装置や残響什加装置等がアメリカやヨーロッパで相次いで発表された。これらは単に効果用機器内のデジタル化であった。主要な信号伝送系のデジタル化は、放送中継や録音など伝送や複製を繰り返す業務分野から始まった。当初はアナログ伝送路のあい路を、ハードウェアの複雑化や価格の上昇をある程度容認した上で、デジタル化して質の向上を図るといった形の導入が主であった。

1980年代は、高品質、低コストを追及した当然の帰結として好むと好まざるとにかかわらずデジタル技術が導入され、さらにデジタル処理の特長を生かした実時間適応形処理といったアナログでは不可能な新しい形の音響信号処理が実用に供される時代となる。

#### \* デジタル化すれば伝送段で信号劣化はない

オーディオ機器を通して音が耳に達するまでには、收音、録音、伝送、再生等の処理を必要とし、多くの機器を通過する。アナログ伝送、処理では信号波形をそのままの形で扱うので、信号は機器を通過する毎に、多かれ少なかれ劣化する。

これに対し、信号を一旦デジタル化したうえで伝送、処理すると、デジタル信号として扱われる範囲では劣化のない伝送、処理が可能となる。これは信号が各標本を量子化した符号“数字”として扱われるので、数字が間違いない読みさえすれば、清書することにより元の数字列が再現できるからである（実際、われわれの日常生活を考えても、数字は乱れていても、インクがにじんで不鮮明でも、余程ひどくない限り判読可能である）。

#### \* 量子化による信号劣化は避け難い

アナログ信号をデジタル化するには標本化と量子化の操作が必要である。一般に音響信号の周波数帯域は有限であるから、標本化定理に基づき情報の欠落のない標本化が可能である。

一方、量子化は連続分布する標本値を離散的な値で表現する操作であるから、情報の欠落は不可避である。この量子化出力と入力標本値との差を量子化雑音と呼ぶ。

雑音というと信号と相関のないテープヒスやクリックを想像しがちであるが、量子化雑音はかなり厄介な性質をもっている。

オーディオ信号の量子化では、レベルが高く多くの量子化ステップの間を素早く行き来するような入力信号に対しては、量子化雑音は入力とは無相関な白色性の雑音となる。しかし、入力レベルが低く量子化ステップ数が少ない場合には、量子化雑音は入力と強い相関のある、一種の歪となる。

また、たとえ入力レベルが高くとも、ごくゆっくり変化する信号に対しては、量子化ステップが変化する毎に

聴感上不快な雑音が発生する。的確な対策が施されていないデジタルオーディオ機器に、若干のオフセットのある調整卓の出力を接続し、アウトプットフェーダーをゆっくり絞る時などにしばしば経験する。

これは量子化ビット数が有限なため、すなわち有限語長の影響である。いずれにしてもデジタルオーディオのようなアナログ信号のデジタル処理は、有限語長との戦いにつきるといっても過言ではない。

**\* 量子化雑音のディザによる白色化**

ダイナミックレンジの広い広帯域音響信号を扱う場合、これらの量子化雑音による聴感上の悪影響を軽減すべく、量子化ビット数は可能な限り多く設定する。しかし耳のダイナミックレンジは100dBにも及ぶので、小レベルに対し十分な量子化ビット数を与えるハードウェアの実現は困難である。

量子化雑音を白色化する目的で、信号にディザと呼ばれる白色性雑音を重畳したうえで量子化する手法が知られている。

ディザの導入の目的は、雑音による歪のマスクングにあるのではなく、あくまでも量子化雑音の入力信号との無相関にある。

ディザの減算を行う場合には、量子化ステップ幅  $\pm \Delta/2$ 、あるいはその整数倍に一樣分布するディザを用い量子化後に加えたディザを引き去ることにより、量子化雑音は入力に無相関な、振幅  $\Delta$  に一樣分布する電力  $\Delta^2/12$  の白色性雑音となる。

図1に正弦波の量子化の例を示す。(a)はディザを加えないで、(b)はディザを加えて量子化、(c)は量子化後にディザの減算を行ったものである。

ディザを付加すると、付加しない場合生ずる不感帯もなくなり、量子化ステップ以下の振幅値に対する分解能力も生まれる。さらに、同期加算を併用すると、使用したAD変換器の分解能以上の精度も期待できる。

ディザの減算が不可能な系では、入力値により量子化雑音の分布幅が  $\Delta$ 、電力が  $\Delta^2/4$  変化する。この変化が耳で検知できないように、少なくとも振幅  $4 \sim 8\Delta$  のディザによる雑音を残留させざるを得ない。この場合、当然雑音電力は増加する。

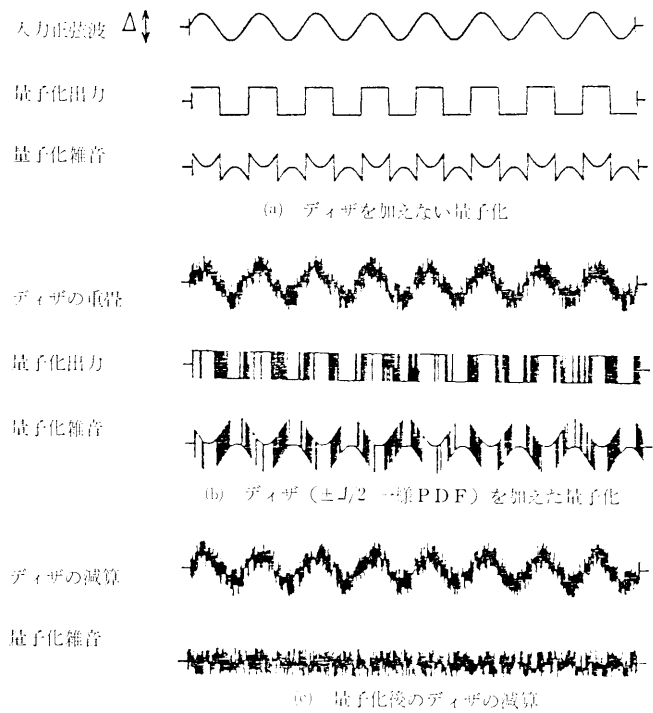


図1 ディザの重畳減算効果(正弦波の量子化)

**\* 入力に雑音を加える方が歪が少ない**

換言すると、的確な対策を施ささえすれば、やっかいな量子化雑音を信号と無関係な、ちょうどアナログ機器のいわゆる雑音と同じ白色性にすることが可能である。

この手法、ディザの重畳、減算は画像・音声の符号化については検討が加えられている。デジタルオーディオの現状は、必ずしもすべてのシステムにディザが導入されているわけではない。

導入されている場合でも、もっぱらAD変換の際ディザの付加が行われるのみで減算は行われていない。ディザの減算を行わない場合、量子化雑音の振幅は前述のように入力値に依存する。

そのうえ、理論的に望ましい一樣分布ではなく、ガウス分布の雑音がディザとして用いられている例が多い。

ディザについて配慮されていないデジタルシステムに、広帯域音響信号を入力する場合には、むやみに残留雑音を減らすとかえって不快な歪が発生する。雑音を減らす努力などせず、むしろ雑音(できれば一樣分布の)を予め信号に混合することにより、S/Nを悪くするこ

とはなるが、聴感上不快な歪は減り、総合的な伝送特性はむしろ改善される。(余談になるが、初期のトランジスタ・パワーアンプのクロスオーバー歪のようなアナログシステムのゼロクロス付近の不連続歪についても同じことがいえる。)

**\* 大振幅ディザによる量子化誤差の軽減**

ところで現実のAD変換器、DA変換器には理想量子化特性からの誤差が存在する。

ラダー抵抗と電流スイッチを組み合わせる構成したDA変換器や、逐次比較型AD変換器の変換誤差は、特に多数の桁の符号が変化するゼロ交叉近傍などに偏在することが多い。

理想量子化特性から誤差のある変換器を使う場合、誤差に経時変化がなく確定していれば演算により補正できる。経時変化を伴う不確定な誤差に対してはかなり振幅の大きいディザを付加して量子化し、量子化出力からこのディザを引き去る手法を導入することにより、誤差の分散、精度の向上が期待できる。すなわち、ディザがない場合、あるアナログ入力に対する量子化ステップは特定されるが、比較的振幅の大きいディザを重畳すると、広い範囲の量子化ステップが使われ、ある入力値に集中していた誤差が分散平均化されるからである。

図2に入力が1.3Δのときのミッドレッド形の例を示す。(a)は量子化特性が理想的でディザがない場合は、量子化出力はΔに一義的に確定される。量子化雑音は0.3Δとなる。

±2Δのディザを重畳すると、量子化出力は-Δ, 0, Δ, 2Δ, 3Δに現れる。このうち0, Δ, 2Δにはそれぞれ1/4, -Δには1/20, 2Δには1/5の確率で出現する。したがって量子化出力の長時間平均値、すなわち期待値は1/20×(-Δ)+1/4×(0)+1/4×(Δ)+1/4×(2Δ)+1/5×(3Δ)=1.3Δとなり、入力値と一致する。すなわち、量子化雑音の期待値N<sub>q</sub>は0である。

次に(b)に示すような理想量子化特性からの誤差がある場合、ディザがないと量子化出力は2Δに一義的に決まってしまう。このときN<sub>q</sub>=-0.7Δである。

±Δ/2のディザを重畳すると、量子化出力X<sub>q</sub>は、-Δに1/10, 0に1/5, Δに9/40, 2Δに13/40, 3Δに3/20の確率で出現する。

量子化出力の期待値は、1/10×(-Δ)+1/5×(0)+9/40

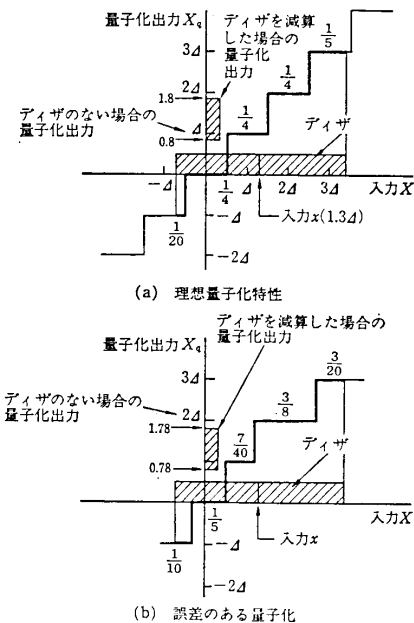


図2 大振幅ディザの効果

×(Δ)+13/40×(2Δ)+3/20×(3Δ)=1.28Δとなる。このときN<sub>q</sub>=-0.02Δで、ディザがない場合の比べて大幅に減少する。

さらに量子化出力から加えたディザを減算すると、±Δ/2のディザを重畳、減算した結果と同様に、理想量子化特性では出力は入力値1.3Δ±Δ/2に分布する。変換誤差がある場合は1.28Δ±Δ/2に分布する。

重畳するディザの量は振幅は大きいほど効果はあるが、大き過ぎると入力信号の過負荷レベルが下がるので、量子化ビット数-4ビット程度とすべきである。

図3に12bitモジュール型AD変換器を使って行った実験結果を示す。入力は過負荷レベル-66dBの1kHzの正弦波、標本化周波数は44.1kHzで、(a)はディザなしの量子化出力のスペクトル分布である。量子化雑音の他に変換器の変換誤差に起因すると思われる高調波歪が現れている。

(b)は理論的に最適±Δ/2のディザを重畳、減算した結果である。量子化雑音は白色化されるはずであるが、変換誤差に起因すると思われる2次、4次の高調波歪がかなり残っている。

(c)は±32Δのディザを重畳、減算した結果であり、

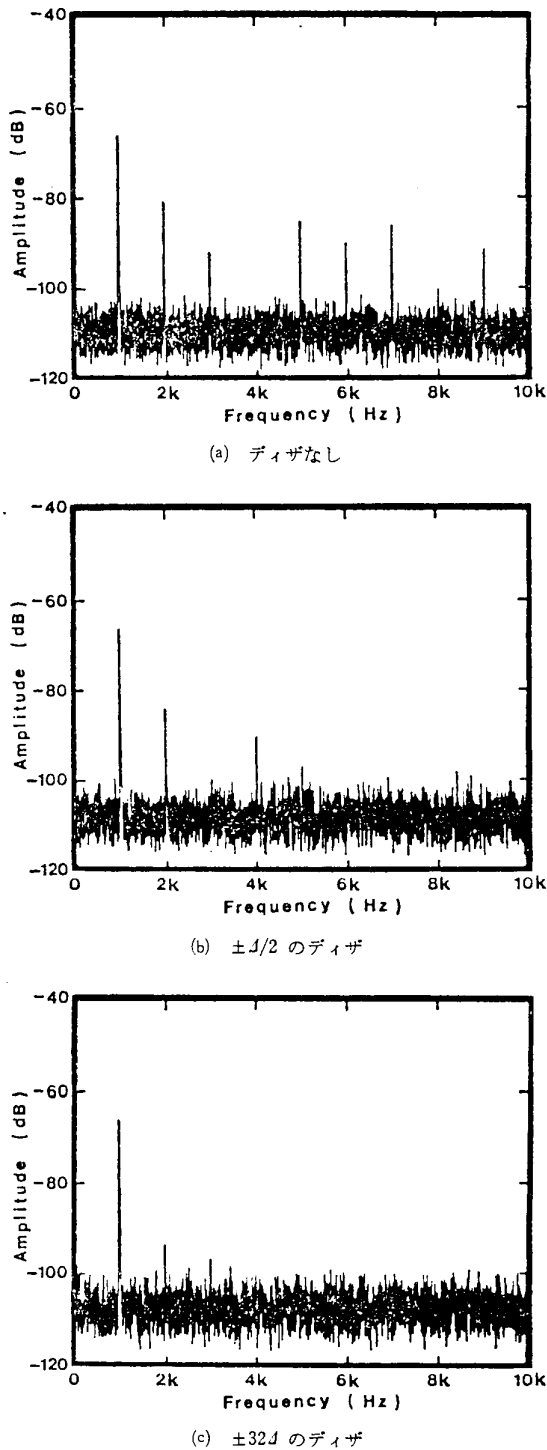


図3 微小レベル正弦波の量子化  
1kHz, 66dB (0dB: 12bit A/D フルスケール)

高調波歪が大幅に軽減されている。

\* デジタルでは信号レベルが高い程音質が良い

デジタルオーディオでは過負荷にならない限り、信号の振幅が大きいほど相対的な歪が少ない。すなわち音質が良いという、アナログシステムとはまったく異なった特性を有している。

テープレコーダを例にとると、図4に示すようにアナ

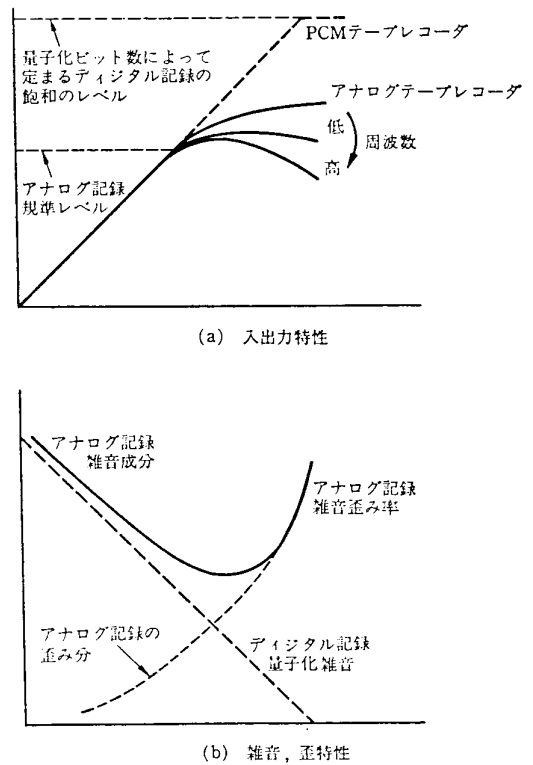


図4 アナログテープレコーダとデジタルテープレコーダの比較

ログでは小振幅時には歪は少なく、白色性の雑音が支配的で振幅が大きくなるに従い歪が増加する、いわゆるソフトクリップ形の特徴を示す。

これに対しデジタルでは、雑音、歪の絶対量は振幅によらず一定で、小振幅時には信号に依存する歪となり、振幅が大きくなるに従い信号と相関のない白色性の雑音となる。したがってレベルが高いほど歪、雑音とも相対レベルが下がり、音質は向上する。過負荷レベルを超えるといわゆるハードクリップし、急激にクリップ歪

が発生する。

前述のディザを導入すると、小振幅時の歪は白色化されるが、振幅が大きいほど音質が良いことに変わりはない。

#### \* デジタルの方がレベル設定がむずかしい

デジタルオーディオではダイナミックレンジが広いのでレベル設定がアナログにくらべて楽になるといった声も耳にするが、これも大きな誤りである。レベル設定はアナログ以上にむずかしい。

アナログではたとえレベル設定を誤って、低くし過ぎても『音質を重視した』といえるし、逆に高くし過ぎても『あえて大振幅時の歪に目をつぶり SN 比を重視した』と主張できる。

これに対しデジタルでは収音する音の最大レベルをオーバーさせることなく、デジタル化した符号の最大値になるよう設定するのが、最適レベルである。すなわち最適レベルは一義的に決まり、大幅にずれた場合、アナログのように弁解の余地はないということである。したがって、神業的な最大値とフルスケールの一致はともかく、少なくとも最上位のビットが一度は使われるようレベル設定しなくてはならない。

#### \* ユーザーの立場から見たデジタルオーディオ

ところで、オーディオ機器に限らず物を作る上での絶対は高品質・低コストの追及にある。

質の上からのデジタル導入の是非は、アナログのまま伝送、記録した場合の信号劣化と、信号をデジタル化する際に発生する信号劣化の比較により決まる。複製や長距離伝送を繰り返す、あるいは長期保存する業務分野では恩恵を受けるが、伝送路の終わりに位置する家庭用オーディオ機器ではデジタル化の恩恵は少ない。

一方、コストの点からは、ICの大量生産の見込める家庭用にデジタル化の意味がある。大量生産、特にLSIによる価格低減効果はアナログに比較してはるかに大きいからである。

しかるに、デジタル化による音質の向上が華やかにうたいあげられているのが現状である。デジタル化により現行テープレコーダやレコード再生時の特にジッターに起因する欠点等は大幅に改善されるが、大多数のユ

ーザーにとっては現行のアナログディスクレコード、放送やカセットテープレコーダの音質、性能は満足できるものである。

#### \* 良いからではなく安いからデジタル

したがって、少なくとも家庭用については質の面からというよりは、機器の価格およびディスク、テープ等の運用コストの面、ハードウェア、ソフトウェアあるいは消費電力を含めた省資源といった観点から大きな意味を見出して初めてデジタルの導入に踏み切るべきである。

ユーザー側からみれば、これだけ普及したシステムの転換を迫られるのであるから大問題である。モノクロームテレビからカラーに移行したときのように、現行アナログシステムと両立性のあるシステムも十分考慮に値しよう。

まったく異なるシステムへの移行であれば、少なくともユーザーにとって、現行システムのどの性能も劣化させることなく、何点かは改善され、機器および運用コストの低減につながるシステムでなければならない。

デジタルオーディオの現状はどちらかというところハードウェアが先行した形となっている。現行のアナログオーディオシステムは、音を作る、伝送する、受け取るそれぞれの立場の人々が、長い年月をかけて試行錯誤した結果得られた合意と見ることができる。デジタルオーディオもソフトウェアに携わる人々、ユーザーを含めた合意が得られてはじめて、システムとして定着するといえよう。

その日が一日も早からんことを祈って筆を置く。