

## 新 連 載

## AD・DA 変 換 技 術

早稲田大学理工学総合研究センター 山 崎 芳 男

元来アナログ信号である音響信号をデジタル処理するにはAD/D A変換が不可欠である。本誌では今回から連載でAD/DA変換機およびその周辺の信号処理技術に改めて目を向けてみることにする。

## 1. 音響信号のデジタル化

## 1.1 デジタル信号処理の歴史

デジタル信号処理の概念は17世紀に発展した数値解析に端を発しているとみることができる。しかし、デジタル信号処理が今日隆盛を究めるに至った原動力は第一が1940、50年代のシャノンを中心とした情報論の発展と電子計算機の実用化であり、第二が最近のLSIを中心とした半導体技術の飛躍の発展であるといえる。とくにデジタル集積回路の性能の向上と価格の低減には目を見張らされるものがあり、好むと好まざるとにかかわらずデジタル化の波が押し寄せつつある。

オーディオの分野ではコンパクトディスクはソフト、ハードともすでに広く普及し、業務用に続き家庭用のテープレコーダー(DAT)も登場し、また衛星直接放送や8mm VTRの音声系にPCMが導入されたり、デジタル・シグナル・プロセッサ(DSP)を使用した音場制御等を目的とした効果用機器が出現し

たりと、デジタルオーディオもいよいよ本格的な実用期を迎えようとしている。

音響分野へのデジタル信号処理技術の導入は、電子計算機による信号処理、アナログ処理、機器のデジタル化および新しいデジタル処理システムの構築に大別される。

これらはかならずしも歴史的な流れに対応しているわけではないが、当初は電子計算機による信号処理が行われ、しだいに性能、操作性の向上あるいは価格の低減を図った機器単体のデジタル化が始まり、測定および処理時間の短縮、新しい評価パラメータの抽出、あるいは将来の活用を考慮してできるだけ生に近い形でデータの保存といった観点から、新しい形の測定・処理システムが生まれつつある。

電子計算機によるソフトウェア処理は、音声の分析・合成の研究に早くから使われていた。とくに1965年にJ. W. CooleyとJ. W. TukeyによってFFTのアルゴリズムが紹介されると<sup>(1)</sup>、音声の研究は飛躍的な発展をとげた。

騒音制御や建築音響の分野でも電子計算機を使った室内音場のシミュレーションや測定データの解析は1960年代から行われていた。とくにFFTとデジタルフィルターは汎

用電子計算機のソフトウェア処理あるいは測定機器にハードウェア、マイクロプロセッサの形で、盛んに利用されている。インテンシティ計測など一部では小型ロボットも導入されている。

ところで、オーディオ分野で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、遅延装置や残響付加装置等が1960年代後半からアメリカやヨーロッパで相次いで発表された。信号伝送系のデジタル化は放送中継、PCM録音、測定データの収集等の業務分野で1970年頃から始まり、当初はアナログ伝送路の陸路を、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ふ形の導入が主であった。

一方、アナログ音響機器のハードウェア技術はほぼ飽和点に達しており、これ以上の向上をアナログ的手法で追及すると、大幅な価格の上昇あるいは重量や容積の増大を招き、時代の流れに逆行する恐れもある。これに対し、デジタルハードウェアの性能の向上と価格の低下は当分の間続くものと予想され、とくにコストの大部分が開発経費である集積回路は、大量使用により単価は大幅に低下する。したがって、これから

は高品質、低コストを達成した当然の帰結として大量生産の期待できる家庭用機器に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、新しい形の音響信号処理が実用に供される時代となろう。

### 1.2 アナログとデジタル

アナログ信号とは時間、振幅方向ともに連続した信号のことである。これに対しデジタル信号とは時間、振幅ともに離散的な信号のことをいう。ところでシャノンは信号の単位時間当たりの平均情報量エントロピーより大きな伝送容量を持つ伝送系を使えば、あいまい度を限りなく小さくしうる符号化法が存在することを明らかにしている<sup>(2)</sup>。音響分野で扱う信号は当然アナログ信号でありそのエントロピーは無量大である。誤りない伝送をするには無量大の伝送容量を必要とする。しかるに現実のハードウェアはかならず雑音が存在し、伝送容量は有限である。したがって、アナログ伝送・処理された信号には雑音、誤差が加わり、あいまい度を含むことになる。すなわち信号は多かれ少なかれ伝送過程で劣化する。

これに対し信号をデジタル化すると、そのエントロピーは有限な値となるので、伝送容量の有限な現実の機器を使用しても劣化のない伝送・処理が可能である。

けっきょく質の点から見たデジタル信号処理導入の採否は、アナログ処理による信号劣化の総量とデジタル化の際生じる信号劣化との比較により決定すべきものといえる。

また、音響測定等においてもアナログでは質の高い処理を行うには熟

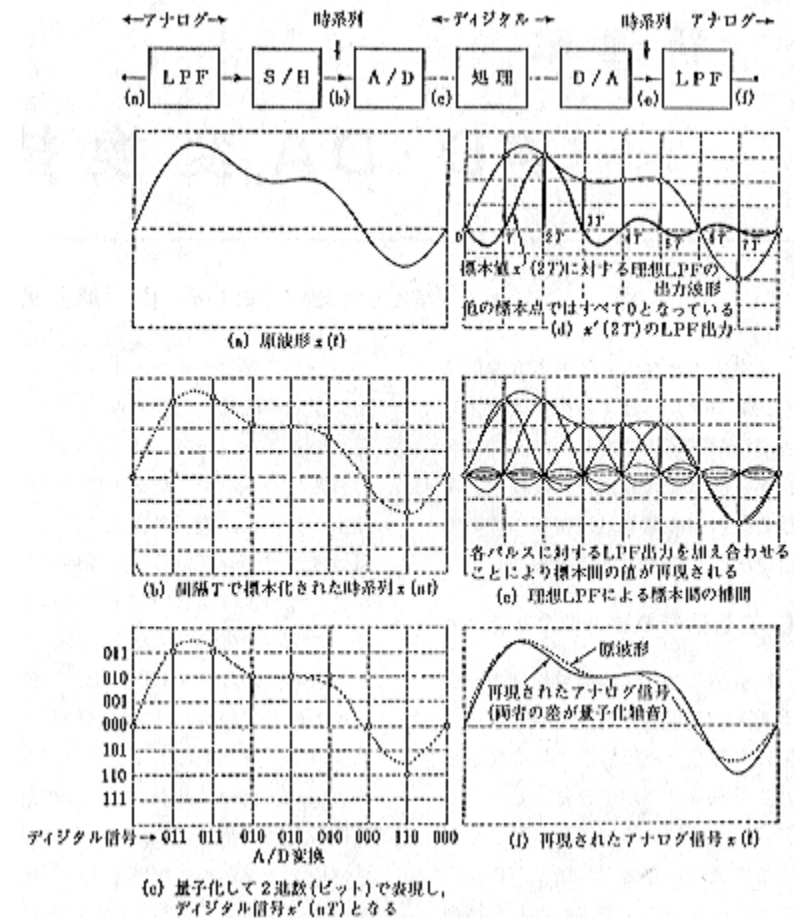


図1 デジタル信号処理の流れ

練を要するのに対し、デジタル信号処理では誰が何時行なっても同結果が期待できるという特長もある。

### 1.3 標本化と補間

図1にアナログ信号のデジタル化さらにアナログへの復元過程と各部の波形を示す。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。デジタル化されたアナログ信号はDA変換したうえ補間フィルターを経てアナログ信号にもどる。

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。標本化された標本値の列を時系列と呼ぶ。

帯域  $1/(2T)$  [Hz] の信号  $x(nT)$  は時系列  $x(nT)$  を使って

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \cdot \frac{\sin \pi(t-nT)/T}{\pi(t-nT)/T}$$

と書くことができる。この式は  $1/(2T)$  [Hz] に帯域制限された原信号 [Hz] が、時系列  $x(nT)$  を帯域  $1/(2T)$  の理想低域フィルターに通すことにより再現されることを示している。これが標本化定理である。

時系列からアナログ信号を再現するには、理論的には標本値に比例した幅のないパルス列を理想低域フィルターで補間する。このとき幅  $\tau$  の

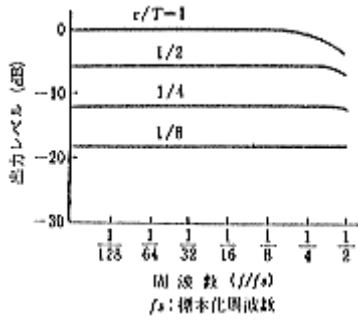


図2 保持効果

パルスを使うと、たとえば純音  $x(t) = \cos 2\pi ft$  に対して復元出力は

$$y(t) = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin \tau\pi f}{\tau\pi f} \cos 2\pi f \left( t - \frac{\tau}{2} \right)$$

となり、 $\tau/2$ の時間遅れと高域の減衰が生ずる。これを保持効果(図2)と呼ぶ。時間遅れは問題とならないが、高域の減衰はDA変換器の後に設けるアナログゲートでパルス幅を細くするか、フィルターで補正するかの対策が必要となる。

1.4 量子化とディザの導入

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。図3に一様量子化の例を示す。aはミッドライザ型 bはミッドトレッド型とよばれている。今量子化器に小振幅の正弦波入力に加わったものとしよう。ミッドライザ型では振幅が $\Delta$ 以下であるとどのような振幅に対しても振幅 $\pm\Delta/2$ の方形波が出力されてしまう。またミッドトレッド型では逆に振幅 $\pm\Delta/2$ までは量子化出力はなににも現れない。何れにしても入力と量子化出力は大きく異なる。この差が量子化雑音とよばれ、量子化による信号の劣化、情報の欠落は不可避である。

広帯域音響信号の量子化では多くの量子化ステップの間を素早く行き

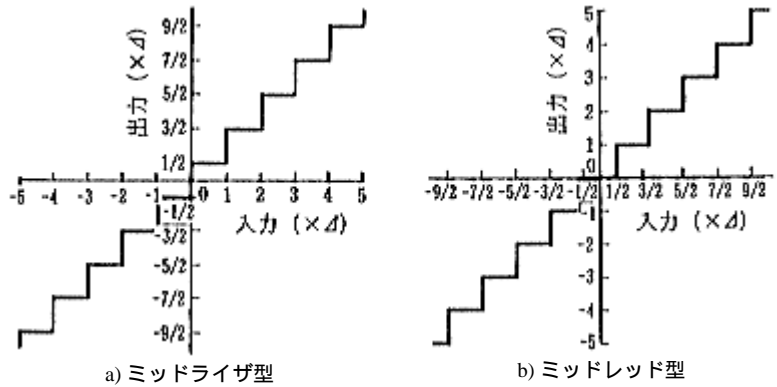


図3 一様量子化特性

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<sup>(3)</sup>。しかし、入力レベルが低く量子化ステップ数が少ない信号、あるいは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、量子化雑音は入力と強い相関のあるひずみとなる。

量子化雑音を白色化する目的で、図4に示すように信号にディザと呼

図6は振幅 $\Delta/2$ の正弦波を量子化したときの時間領域の波形(A)と信号の周波数を1kHz、標本化周波数を40.96kHzとしたときの量子化出力の周波数スペクトルをコンピュータシミュレーションにより求めたもの(B)である。aはディザ無 bは $\pm\Delta/2$ のディザを重畳、cは量子化後にディザの減算を行ったものである。

ディザが無いと正弦波を入力した

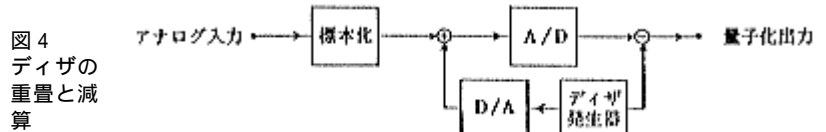


図4 ディザの重畳と減算

ばれる確率変数を重畳したうえで量子化する手法が知られている<sup>(4)(5)</sup>。理論的には量子化ステップ幅に一樣分布する、雑音のような信号、確率変数を量子化に先立ち信号に重畳し、量子化された信号から同じディザを引き去ることにより、量子化雑音を幅 $\Delta$ に一樣分布する電力 $\Delta^2/12$ の白色性雑音とすることが可能である。

図5にミッドライザ型量子化で、aはディザ無、bは $\pm\Delta/2$ 、cは $\pm 2\Delta$ の一樣分布の擬似ランダム系列をディザとしたときの、入出力特性と量子化雑音を示したものである。

にもかかわらず、あたかも方形波が入力された形となり、奇数次の高調波が生じ、標本化周波数の1/2を超える成分は折り返される。帯域内の量子化雑音電力の総和は $\Delta^2/12$ となる。

ディザを重畳しただけで減算を行わないと、量子化された波形は入力正弦波とは大幅に異なり、量子化雑音は入力正弦波とある種の相関があるが、スペクトル分布を見る限り量子化雑音は白色化されている。量子化雑音電力の総和はディザを加えない場合の2倍 $\Delta^2/6$ となる。

ディザを減算すると、量子化され

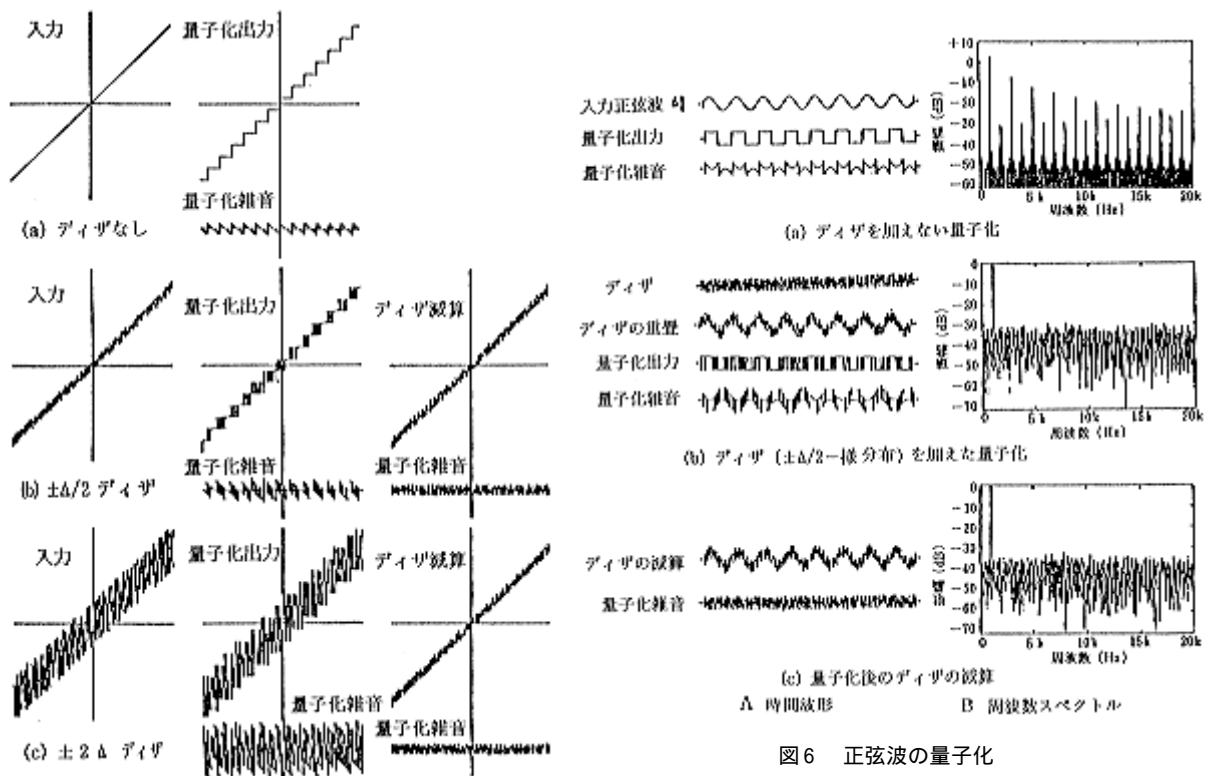


図5 ディザの分布と量子化出力，量子化雑音の関係

た波形は入力正弦波に一定振幅の雑音が重畳された形となる。量子化雑音は加えたディザと同様の一様分布となり、量子化雑音電力は重畳しただけの場合に比べて半減し、ディザの無い場合と等しい  $\Delta^2/12$  となる。すなわち量子化雑音は増えずに入力信号と相関のない白色性の雑音に帰着しようということである<sup>(6)(7)</sup>。

## 2. AD / DA 変換系の構成

AD / DA 変換器にはさまざまな方式があるが、最近低ビット高速標本化の  $\Sigma\Delta$  型 AD / DA 変換器が盛んに使われるようになってきた。量子化器を帰還ループの中に設け量子化雑音を高域に集中させる考え方自体は新しいものではないが、精度を時間軸に取ることによって LSI 化が容易である。この形の変換器には

通常のデジタル信号に変換するデシメーション処理にデジタルフィルタが使われている。

アナログ信号のデジタル化には前述のように標本化と量子化の操作が必要である。一般に標本化周波数が帯域を決め量子化ビット数がダイナミックレンジを決定すると捉えられがちであるが実は両者は密接に関連している。したがって量子化ステップ数が十分に大きい確なディザが重畳減算されている場合には、量子化雑音は入力信号と無相関な白色性の雑音となり、その電力は量子化ステップを  $\Delta$  とすると  $\Delta^2/12$  となる。すなわち、標本化周波数を高く設定すれば、所望帯域内の量子化雑音は減少する。本誌に以前にも述べたように、原理的にはたとえ 1bit であっても 100dB 以上のダイナミッ

クレンジを確保することも可能である<sup>(7)(8)</sup>。現実には標本化周波数が GHz のオーダーとなりハードウェア化は難しい。何等かの方法で量子化雑音の分布を高域に集中することができれば現実的な標本化周波数で帯域内で十分なダイナミックレンジを確保することも可能なはずである。たとえば後述の  $\Sigma\Delta$  変調を導入すると、量子化雑音の総電力は増えるが、その分布が高域に集中し、低域の成分は低減する。

図7に代表的な AD / DA 変換器の構成例を、図8にその周波数スペクトルを示す。DAT や衛星放送で使われている 48kHz 標本化、16bit 量子化系を例に説明すると、(1)は古くから使われている基本的な方法で、アナログフィルタで帯域制限をしようえサンプルホールド回路で 48kHz で標本化し 16bit の AD 変換器で量子化する。復調時には 48kHz、

図6 正弦波の量子化

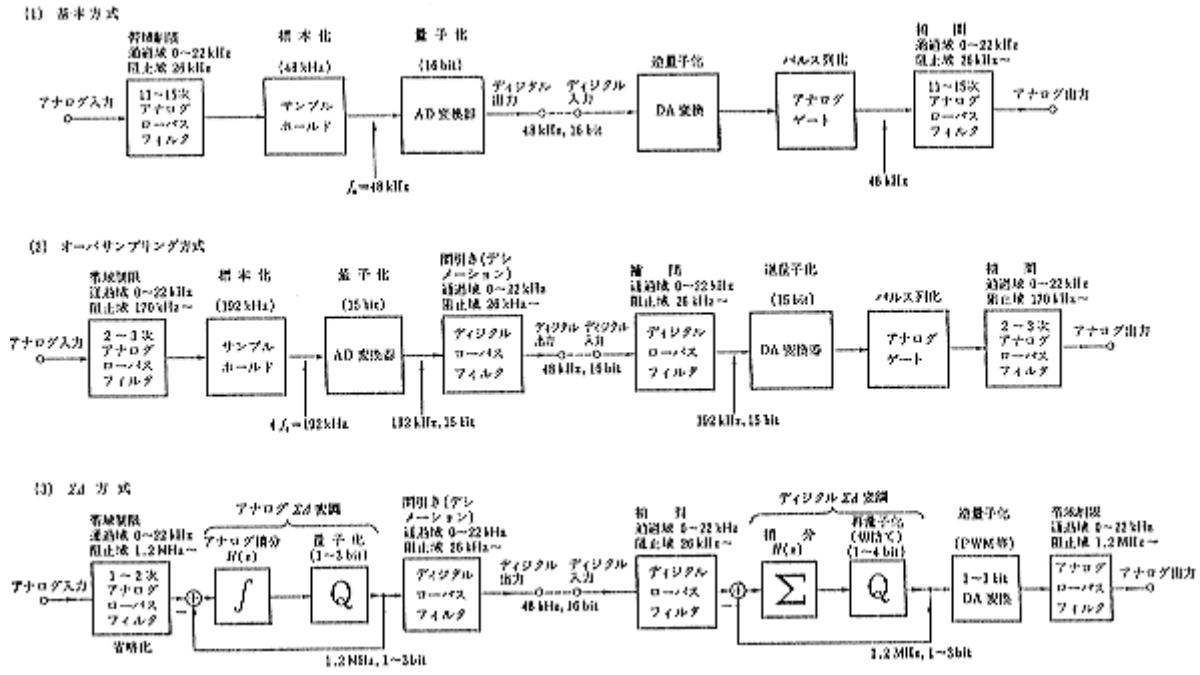


図7 各種のAD / DA変換方式

16bitでDA変換しアナログゲート等でパルス列(PAM波)を作り、アナログローパスフィルタで補間を行う。折り返し雑音の影響を避けるために、アナログフィルタに急峻な遮断特性を要求され、一般に10次

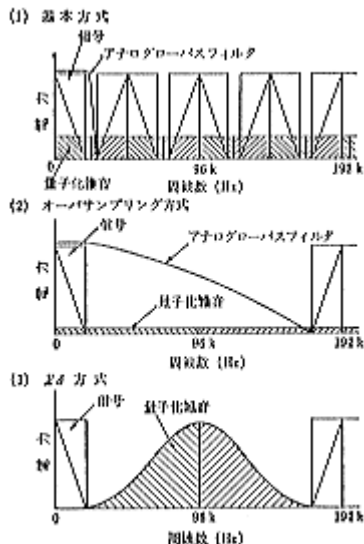


図8 変換方式と周波数スペクトル

以上のチェビシェフ型のフィルタが使われるが、波形伝送や音質が問題にされることが多い。

(2)はいわゆるオーバーサンプリング方式と呼ばれる手法で、AD変換を所定の標準化周波数より高い(一般に正数倍)周波数でデジタル化し、デジタルローパスフィルタで帯域制限を行ったうえでデシメーション(間引き)処理により48kHz, 16bitに変換する。復調時には反対にデジタル補間フィルタにより、たとえば4倍のサンプリング標準植列をつくり高い標準化周波数でDA変換しようとするものである。この方法では高い標準化周波数で動作するので、アナログフィルタは低次の緩やかな遮断特性で十分であり負担は大幅に軽くなる。また16bit以下の精度の量子化器を使用することができ、16bitの量子化器を使用した場合には標準化周波数に応じ

ただだけ量子化精度が向上する。CDプレーヤー等に2ないし16倍のこの方式が広く使われている。

(3)は量子化器を帰還ループの中に設けることにより量子化雑音に微分特性すなわち高域上がり特性を与えるΣΔ方式、ノイズシェーピング方式と呼ばれる変換方式である。標準化周波数を高く設定することにより少ないビット数により十分なダイナミックレンジが得られる。一般に標準化周波数は(2)の場合よりも高く設定されるのでアナログフィルタの負担はより軽くなる。またサンプルホールド回路を省略できる場合が多い。

フィリップス社では、初期のCDプレーヤーに14bit DA変換器と4倍176.4kHz標準化によるこの手法を採用した。最近では1bit DA変換器と1.12MHzによる構成も実現してい

る。

ところで(1)(2)の変換にはほとんどの場合逐次比較型あるいは、積分型のAD変換器やラダー抵抗型あるいはダイナミックエレメントマッチング型や積分型のDA変換器が使われる。これらの変換器が抵抗やコンデンサの充放電の精度に頼っていたのに対し、 $\Sigma\Delta$ 方式ではIC化に適した時間軸の精度を利用した低ビットの量子化器が使われることが多い。

### 3. む す び

連載企画「AD / DA変換技術」の第1回としてAD / DA変換の基礎的事項と、各種のAD / DA変換方式について概説した。次回以降それぞれの変換方式について詳しく解説する。

### 【参考文献】

- (1) J.W.Cooley and J.W.Tukey, "An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series," Math. Comp., 19, 297-301, Apr., (1965).
- (2) C.E.Shannon, "The Mathematical Theory of Communication," B.S.T.J. 27, 379-423 (1948).
- (3) W.R.Bennet, "Spectra of Quantized Signals," B.S.T.J., 27, 7, 446-472 (1948).
- (4) L.G.Roberts, "Picture Coding Using Pseudo - Random Noise," I.R.E.Trans., IT-8, No.2, 145-154 (1962)
- (5) N.S.Jayant and L.R.Rabiner, "The Application of Dither to the Quantization of Speech Signals., B. S.T.J., 51, No.6, 1293-1304 (1972).
- (6) 山崎芳男, "広帯域音響信号の量子化への大振幅ディザの適用", 音響学会誌 39. 7 452-462 (1983).
- (7) 山崎芳男, "大振幅ディザと高速標本化によるAD変換精度の向上", オーディオ協会誌, 1984, 4.
- (8) 山崎芳男, "デジタルオーディオの"迷信"は克服されたが", オーディオ協会誌, 1985, 9.