PCM 録音技術 *

山崎　芳男 **
（早稲田大学理工学部）

1．まえがき

最近ではマイクロプロセッサという形でディジタル処理が家庭電化製品にまで入り込んできている。音響の分野でも音声の分析・合成の研究には早くから電子計算機によるソフトウェア処理が行なわれており，PCM（Pulse CodeModulation）による電話回線の多重伝送や衛星中継には専用ハードウェアによるディジタル処理が使われている。広帯域音響信号を扱うオーディオの分野においてはAD，DA変換素子の速度や精度，記憶素子の容量や信頼性等の制約からディジタル処理技術が信号伝送系へ導入されるようになったのは比較的最近のことであり，その実用化例もレコード製作用PCM録音機[1]や放送プログラムの局間PCM中継[2]のような業務用あるいは研究用に限られていたが，この1，2年民生用を含め数多くのシステムが発表，発売されている[3]。

ディジタル伝送の特長はどのような伝送系を使用しても符号誤りさえ起こさなければ信号劣化はなく，伝送系の質が基本的には標本化周波数と量子化ステップによってのみ決まるという点にある。

放送やレコード再生において対象とする音が聴取者の耳に達するまでには，収音，録音，伝送，再生等の処理過程を経由する。当然数多くの機器を信号が通過することになるが，アナログ処理では多かれ少なかれ機器を通過するごとに信号劣化が生ずる。このうち特に信号劣化が大きく，ディジタル処理により改善の期待できる部分がディジタル化の対象となる。前述のPCM録音やPCM中継はそれぞれディスクレコード製作，放送プログラム中継の隘路をディジタル化したものである。

以下，PCM録音を中心に広域音響信号のディジタル伝送の特長，特有の問題点，運用上の注意等について考えてみよう。

2．チーフレコーダの問題点とPCM録音

高周波バイアス方式のテープレコーダには数多くの特長があり，操作が簡単なため音響信号の記録に広く使われているが，その伝送特性は必ずしも満足すべきものではなく，しばしば伝送系の隘路となっているのは周知のとおりである。テープレコーダによる伝送特性劣化は主として記録媒体に磁性体という非線形素子を用いている点と，テープ走行系をもつという2つの原因により生ずるものである。前者によって，ひずみ，ダイナミックレンジの制約，レベル変動，転写，チャンネル間クロストーク等が生じ，後者によりワウ・フラッタ，またその両者が原因となって変調雑音等が生ずる。磁性体やテープ走行系の改良が試みられているが，特性改善はほぼ飽和点に達しており，高周波バイアス方式ではもはや大幅な改善は期待できない。

磁性体の影響についてはFM（FrequencyModulaticn）やPM（PhaseModulation）等による変調記録を用いることによりある程度軽減できるが，走行系の影響の除去については，再生時に走行系のジッターを吸収可能な記録形式，すなわち信号の時間軸の離散化を行なうことにより実現される。

信号をディジタル化して磁気テープに記録し，時間軸の離散化で走行系の影響から逃れ，振幅の離散化で磁性体の影響から逃れたのがPCM録音機である。PCM録音機の基本的構成を**図－1**に示す。個々の機能については後でふれるが，走行系のジッターは再生時にバッファメモリで吸収されるので，符号誤りがなければ伝送特性は標本化周波数と量子化特性によってのみ決まる。**写真-1**に業務用 38cm/s のテープレコーダと，標本化周波数 48kHz，14ビット一様量子化のPCM録音機の 1kHz 正弦波の高調波ひずみ特性，**写真-2**に 400Hz と 7kHz の正弦波を4：1で混合したときの混変調ひずみ特性の比較を示す。

次にPCM録音の伝送特性を決める標本化と量子化について考えてみよう。

3．音響信号のディジタル化

時間，振幅とも離散的な値しか取り得ない信号をディジタル信号とよぶ。信号の時間方向の離散化を漂本化，振幅方向の離散化を量子化とよぶ。

3.1 標　本　化

---

* Digital Recording Technique.
** Yoshio Yamasaki (Waseda University)

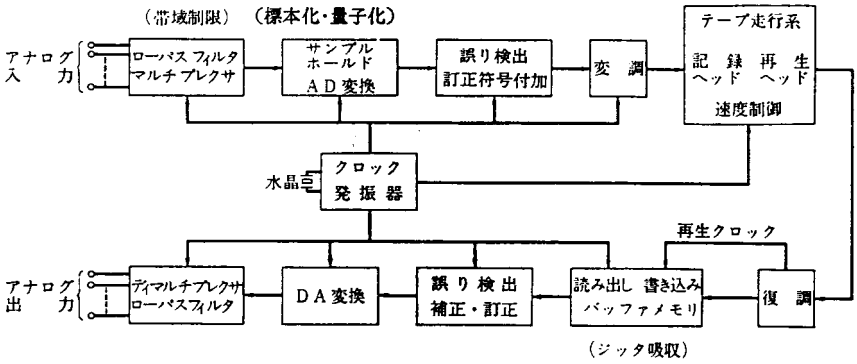

図-1　PCM録音機のブロック図

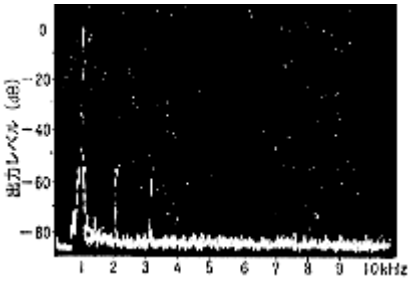

写真-1A　テープレコーダの高調波ひずみ特性

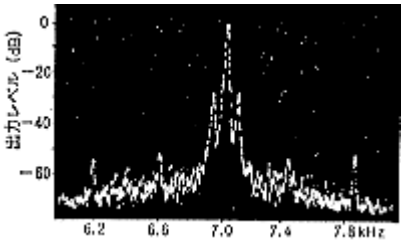

写真-2A　テープレコーダの混変調ひずみ特性

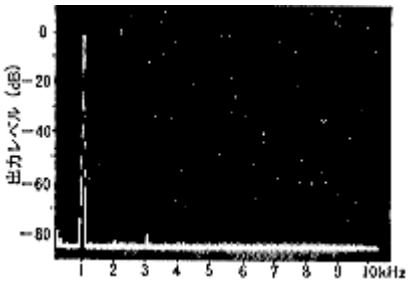

写真-1B　PCM録音機の高調波ひずみ特性

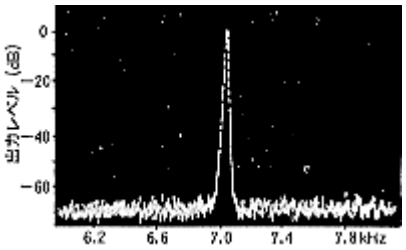

写真-2B　PCM録音機の混変波ひずみ特性

標本化とは文字通り連続信号のある時点の値を読み取る操作のことである。周波数帯域の有限な信号は標本化しても劣化しない。すなわち標本化定理によれば，少なくとも信号の帯域の2倍の周波数で標本化を行なえばその標本列に原信号のすべての情報が含まれるからである。いま $1/2T$(Hz) に帯域制限された信号を $x(t)$ とすると，$x(t)$ は漂本 $x(nT)$ を使って，

$$x(t)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}x(nT)\cdot\frac{\sin\frac{\pi}{T}(t-nT)}{\frac{\pi}{T}(t-nT)} \qquad (1)$$

とかける。(1) 式は原信号 $x(t)$ が，帯域 $1/2T(Hz)$ の理想低域フィルタに全標本を通すことにより再現できることを示している。

現実には完全な帯域制限，幅のないパルス列と理想低域フィルタによる復調は実現不可能である。帯域制限が不完全であると，標本化した信号のスペクトルに重なりが生ずる。標本化により一度生じた重なりは分離不可能で，この重なりによるひずみを折り返し雑音と呼ぶ。

一方有限幅パルスにより復調を行なうと，保持効果により，高域の周波数特性が劣化する。

実際の系では標本化周波数は人間の可聴周波数帯域とフィルタの遮断特性を考え合せて40～50kHz付近が使

われ保持効果はフィルタで補正するか，DA変換後に標本化間隔の1/10～1/4幅のアナログゲートを設けて軽減している。

3．2 量 子 化

量子化とは振幅を有限個の離散的な値で表現する操作のことである。この離散化した値はふつう2進数で表現し，2進の1桁をビット（bit）とよぴ，Nビットでは2^N個の値が表現できる。ところで量子化は振幅を離散的な値で表現するので，標本化とは異なり丸めによる誤差が生ずる。この誤差を量子化雑音とよぴPCMが原理的に有する雑音である。

量子化ステップを一様とした量子化を一様量子化とよぷ。Mビット一様量子化を行なったとき，最大振幅の正弦波 S と量子化雑音電力 N_Q の比 S/N_Q は，$S/N_Q = 6M + 1.8$(dB)となり，信号対量子化雑音比は信号の振幅に依存する。これに対し，振幅に応じて量子化ステップの大きさを変化させダイナミックレンジの拡大を計った量子化を浮動小数点形量子化，非直線量子化と呼ぶ。

量子化雑音はアナログ機器の雑音とは異なり，量子化した値が真の値と違うために生ずるひずみが，帯域内のものはそのまま，帯域外のものは標本化により帯域内に折り返された一種のひずみと見ることができる。このスペクトル構造は量子化ビット数が多くなるに従って複雑になり，信号の振幅が数ビット以上の場合は帯域内のスペクトルは白色とみなせるが，小振幅時には信号と関係の強いひずみとなる。

いま帯域制限された信号が50kHzで漂本化，量子化される伝送系に振幅が量子化ステップ程度の小振幅の7kHzの正弦波が印加されたとしよう。振幅が小さいため信号は完全な帯域制限を受けているにもかかわらず7kHzの方形波が標本化された形となる。その結果，3倍の21kHzが振幅1/3で現れ，5倍の35kHzが15kHzに振幅1/5で折り返され，7倍の49kHzが1kHzに折り返されというように，**図-2**に示すようなスペクトル構造をもつ量子化雑音を発生する。

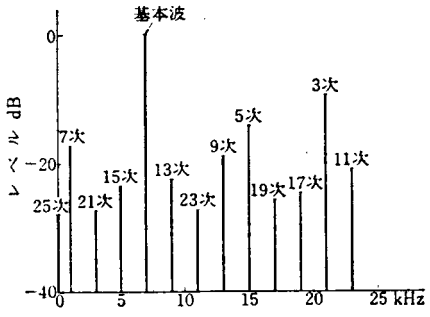

図-2 低振幅時の量子化雑音のスペクトル
信号7kHz正弦波，振幅1ビット，標本化周波数50kHz

このように振幅が小さく比較的周波数の高い信号に対する耳につきやすいスペクトル構造をもつ量子化雑音を特にgranular distortionとよぷことがある。このひずみを除去するには価格に制約がなければ量子化ビット数を増して分解能を上げ，granular distortion を可聴レベル以下に抑えれば良い。現在16ビットのAD変換器までは市販されている。

また耳につきやすいスペクトルを分散させ白色化するために，ditherとよばれる量子化雑音よりレベルの高い雑音を入力に混合する方法も取られることもある。

AD変換器の入力がフルスケールをオーバーしたときにも波形がクリップして標本化周波数の1/3及び1/5近傍に同様のひずみが生ずる。したがってAD変換器が過負荷を起こさないように，前段のアナログ系を設計すべきである。運用に当っても何漂本にも及ぷレベルオーバーには十分注意を払うべきである。

4．記憶媒体と誤り対策

ディジタル化された信号を記憶する素子としては，RAM（Random Access Memory）や磁気バブル，磁気コアのような可動部分をもたない固体記憶素子，磁気テープや磁気ディスク等の磁性体，マイクロフィルムのような光学記憶，ビディオディスクのような機械記憶，レーザーによるホログラム記憶等が考えられる。

信頼性やアクセス時間，コンピュータとのインターフェース等の点では固体記憶素子が有利であるが，現段階では長時間の記憶は不可能である。光学記憶やレーザーホログラムは記録密度や傷に対する強さの点でディジタル記憶に適した素子であると思われるが，録音という観点からはテープレコーダ同様，後処理の簡単な磁性体が現在のところ使われている。

磁気テープやディスクに高密度でディジタル信号を記録する場合には，ドロップアウト，傷，ゴミ付着により生ずる符号誤りへの対策は不可欠である。一般に誤り対策は誤り訂正符号による訂正と，誤り検出符号による検出，補正に大別される。前者は符号の訂正能力以内の誤りはすべて訂正するが，訂正のため多くの冗長ビットを必要とする。一方後者はCRC（Cyclic Redundancy Check）等により少ない冗長ビットで誤りを検出し，何らかの補正を行なうものである。補正の方法としては誤った標本に対し1漂本前の値を補正値として用いる前値保持，誤った標本の前後の標本の平均値を用いる平均値補間が正く使われている。これらの補正方式は回路構成が簡単な上，誤り率が 10^{-3} 程度以下であれば楽音については聴感上十分な補正効果が得られる。

しかし，周波数の高い純音や比較的単純な信号に対し

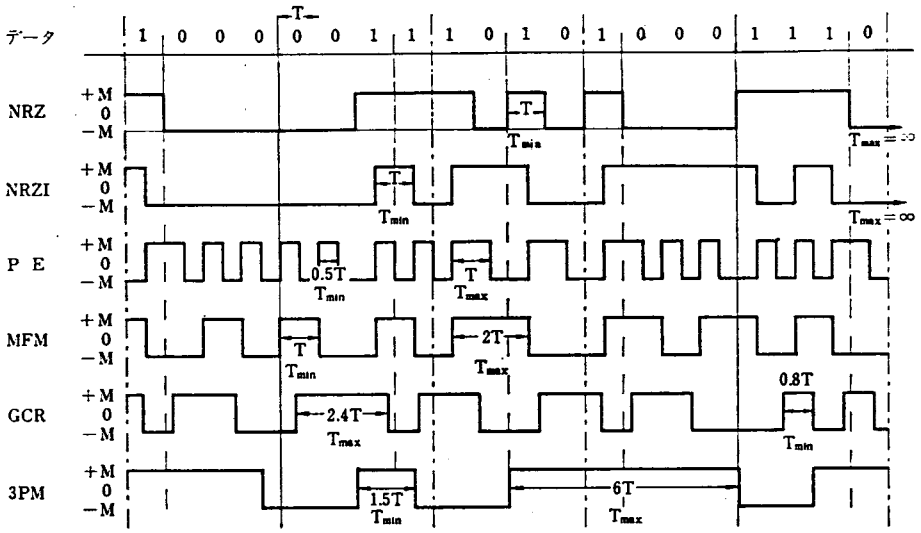

図 - 3　各種の変調方式の記録波形

ては，補正個所が耳で容易に検知されてしまう。これは，このような信号に対しては補正誤差が大きく，その上信号のスペクトル構造が単純なため，スペクトル構造の変化が大きく，容易に検知されるものと考えられる。

誤りが検出された漂本に対し，線形予測の手法を用いて近傍の漂本から補正値を求める方法を取ると，上記のような信号に対しても十分な補正が可能である[4]。これは信号自体のもつ冗長度を利用した誤り補正方式とみることができる。

5．各種の記録方式

既成のVTRやデータレコーダ，ビディオディスク等に書き込む場合には一般に0，1に対応した直流値をFM記録し，専用の録音機を構成する場合には電子計算機の磁気ディスクや磁気テープ装置に使われている変調方式を用いた直接記録が行なわれる。**図 -3** に計算機で使われている　NRZ（Non Return to Zero），NRZI（Non Return to Zero Inverted），PE（Phase Encoding），MFM（Modified Frequency Modulation），GCR（Group Coded Recording）と3PM（3Position Modulation）の各変調方式の記録波形を示す。変調方式の選択にあたっては一般に最小反転間隔は長く，最大反転間隔は短く，変調効率が高く，判定窓の大きいことが望ましいが，最終的には使用する系の符号誤りを最小にする方式を選択すべきである。

テープ長手方向の記録密度は計算機の磁気テープでは6250BPI（bit/inch，1ビット当たり　4.1μ　）が最高であるが，データレコーダでは40,000BPI（1ビット当たり 0.635μ）の実現例もある。一方記録トラック幅は家庭用の回転ヘッドVTRで使われているガードバンドレスアジマス記鐙の 30μ 程度が最高で，固定ヘッドでは薄膜ヘッドにより100μ 程度が実現されている。

回転ヘッド型VTRを使用したPCM録音機では多チャンネルを1トラックに記録し，固定ヘッド型では1チャソネルを1トラックに記録する場合と多トラックに分けて記録する方式とがある。当然トラック数が少ないほど回路構成は簡単になるが，固定ヘッド型でシンク録音を行なう際等には従来型と同じ1チャンネル1トラックが便利である。しかし，現在の記録密度ではテープ走行速度が早くなり，1巻あたりの記録時間が短かくなるという欠点がある。

ところで従来PCM録音はテープ使用量が多いと考えられがちであったが，アナログではダイナミックレンジやクロストークの点でトラック密度に限界があり，16～32チャンネルについてはすでにディジタル記録の方がテープ使用量が少なくてすむ録音機が試作されている。

6．PCM録音の運用

以上PCM録音機の構成について述べたが，最後に少し運用面にふれておこう。

PCM録音機は理論的には標本化周波数で決まる全帯域で，量子化ビット数で決まるダイナミックレンジが保証されている。しかも大振幅時ほどひずみ雑音ともに少ないというアナログのテープレコーダとは全く違った特性を有している。多くの楽音信号は高域の成分は少ないので，録音時にその分，高域を増強してやることにより，更に等価的なダイナミックレンジを拡大することが

できる。

一方，同じ理由で必要以上のヘッドルームを取らないことが肝要である。例えば全曲にわたって録音した結果12dBの余裕があったとすれは，16ビットの録音機を使っていても14ビットの特性しか得られないことになる。

ところで，現在のPCM録音機はどちらかというとアナログテープレコーダの置換えといった要素が強いが現在マルチトラック録音が広く行なわれている一つの原因はアナログテープレコーダの欠点，特にダイナミックレンジの制約とコピーによる特性劣化によるものともいえるので，近い将来，PCM録音機による新しい音作りの形態が生まれるのではないか。

特にコピーによる劣化がないので，編集方法なども含めたコンピュータ制御下の新しい形の総合システムが考えられて，初めてその本領を発揮するのではないだろうか。

7. むすび

以上PCM録音技術を中心に音響分野へのディジタル処理技術の導入について述べたが，プログラムソース作製に使われるいわゆる業務用のアナログ機器はほぼ技術的飽和点に達している上，IC化等による大幅な価格の低減も期待できないので，今後は録音ばかりでなくますます広い範囲にディジタル処理技術が導入されるものと思われる。

一方，民生用のPCM録音機がすでに売り出されているが，ディジタル音響が広く普及するにはソフトウェアが安価にかつ大量に供給されなければならない。現在のところその可能性を有している記憶媒体は，ビディオディスクの技術を応用したレコーデッドディスクであろう。

ところで半導体メモリーや磁気バブル等可動部分のない記憶素子の集積度の向上と価格の低減を考えると，そう遠くない将来，録音にはもちろん家庭での再生にも“固体レコード”が実用化されるものと思われる。

文　献

1) 林，宮下，大新田，轟，穴沢：「ディスクレコードマスター用PCM録音装置について」日本音響学会講演論文集（1972年10月）
2) D.Shorter, J.Chew, D.Howorth and J.Sanders, “Pulse-Code Modulation for High Quality Sound-Sigal Distribution”,：BBC Monograph, 1968/75, Research Department, Engineering Division.
3) 伊賀，小高，橋本，小川，正岡，安田，横田，土井：「家庭用VTRに接続するPCMオーディオユニット」日本音響学会講演論文集（1977年10月）
4) 山崎，山須田，伊藤：「ディジタル化された音響信号の適応年型誤り補正について」日本音響学会講演論文集（1978年5月）