

新世代オーディオと方式をめぐる課題*

山崎芳男 (早稲田大学)

1. まえがき

オーディオの原点をどこに求めるかには議論もあるが、エジソンのレコードから SP, LP レコードと進んできたオーディオ信号はすっかりデジタル化されてしまい、いまや身近なアナログメディアはカセットテープくらいになってしまった。

デジタルの起源は人類が数という概念を使い始めたころにあり、のろしや旗による通信という形で情報のデジタル伝送も古くから行われてきた。17世紀に数値解析が発展してデジタル信号処理の基礎が出来上がり、19世紀にはモールス符号によるデジタル通信、電信が実用化された。しかしデジタル信号処理技術が今日の隆盛を究めるに至った原動力は、1940、50年代の C. E. Shannon の業績に代表される情報理論の発展と電子計算機の実用化と1970年代以降の半導体技術の飛躍的發展にあるといえよう。

音響分野へのデジタル技術の導入の道には大きな山が幾つかあった。最初は、1960年代の電話中継回線のデジタル化、放送局やレコード制作用のデジタルテープレコーダなど莫大な投資をしてアナログ伝送路の隘路をデジタル化することにより改善した「黎明期」である。

第二の山は、手軽に良い音が楽しめるようになった CD, MD, パーソナルコンピュータ、家庭用デジタル VTR など LSI 化と大量生産による身近な分野へのデジタル技術の「浸透期」である。

第三の山はここ数年の動きである。膨大な帯域、高価な機器を必要としていたデジタル処理であったが、最近では有限な電波の有効利用を目的に、いわば「省資源」の観点からの導入、

デジタル化による携帯電話や放送の多チャンネル化などが始まっている。

当初は畏敬の念をもって迎えられたデジタルオーディオも、現行フォーマットの限界が論じられさまざまな方式の提案があったり、省資源や安く丈夫だからといった観点から導入されるようになったりと、新たな時代を迎えようとしている。

2. AD / DA 変換と符号化

シャノンの美しい定理 シャノンは信号の単位時間当たりのエントロピー (Entropy) 即ち平均情報量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する符号化法が存在するという美しい定理を導いている⁽¹⁾。

このシャノンの情報理論の第1定理は信号の無ひずみ伝送の可能性を示唆している。アナログ信号が無限の情報量をもつならば、伝送容量が有限なデジタル伝送路ではひずみのない伝送は不可能である。しかるにわれわれが情報伝達に用いる信号の情報量は一般に有限である。そもそも情報が意味を持つということはその情報量が有限の値であることに他ならない。適確な符号化を施せば、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・処理が期待できることになる。

劣化としないという欠点 アナログでは伝送過程で加わった雑音やひずみは修復不可能であるが、デジタルでは数字が読めさえすればもとどおりに清書することが可能である。さらに例えば数字の合計をメモしておけばどれか一つが読めなくとも修復することが可能となる。これがデジタル信号処理の大きな特長、誤り訂正機能

* Some topics in new generation audio. By Yoshio Yamasaki (Waseda University)

である。

このようにデジタル伝送では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・処理が期待できる。従って信号処理への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である。

また、一般にアナログでは質の高い処理を行うには熟練を要するのに対し、デジタルでは誰が何時行なっても同じ結果が期待できるという利点もある。

信号をデジタル化すると、たとえ雑音のある伝送路を使っても信号劣化のない伝送が可能である。これはデジタルの大きな特徴であるが、ソフトウェアに携わる側にある種の戸惑いがあったことも事実である。それはアナログでは多かれ少なかれ劣化した信号が聴取者の耳に届いていたが、デジタル化すると信号は劣化することなくそのまま届く。また、デジタルでは劣化のないコピーが可能である。法律的な観点からの議論も盛んに行われており、デジタル透かしなどの導入も検討されている。

伝送段階で劣化しないという利点が場合によっては欠点となりかねない。

標本化と量子化は表裏一体 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、標本化周波数と量子化ビット数の積である伝送容量、信号伝送速度が重要な意味を持っており、個々に論じられるものではない。

量子化ステップ に比較して入力信号の振幅が大きい場合あるいは適確なディザが導入されている場合には量子化雑音は入力信号と無相関な標本化周波数の1/2の帯域に一様に分布する電力 $d^2/12$ の周波数成分の平坦な白色性の雑音となることが知られている^(2,3,4,5)。

従って標本化周波数を高くすれば信号帯域内の量子化雑音は減少し、1bit量子化で20kHz帯域でダイナミックレンジを100dB確保するこ

とも原理的には可能である。しかしこの場合標本化周波数は3GHzにも達してしまい実現不可能である。

標本化周波数と量子化ビット数はアナログ信号のデジタル化の際に必ず設定しなければならないパラメータであるが、その選定は必ずしも容易ではない。現に次世代オーディオを見据えた様々なパラメータが提案されている。

高速標本化1ビット量子化 われわれは少なくともAD/DA変換については選択が困難であるのならば、いっそその片方の極限である高速標本化1bit量子化で信号の情報量と人間の聴覚特性に見合った符号化方式が可能なのではないかと様々な検討を加えてきた。1974年には高次差分PCMにより標本化周波数が1/6以下のダイナミックレンジを拡大することが可能であることを明らかにし⁽⁶⁾、1979年には量子化器を帰還ループの中に設けその順方向伝送特性 $H(s)$ と帰還特性 $H(z)$ を適当に選び、量子化雑音のスペクトルを制御することにより広帯域音響信号を扱う1ビット量子化が可能であることを明らかにした⁽⁷⁾。

この方式は比較器と1bit遅延回路以外はアナログ素子で構成されているにもかかわらず、出力の1bit信号はれっきとしたデジタル信号である。この回路はトランジスタか演算増幅器あるいは真空管で構成するアナログ積分器と比較器で実現することが可能である。極端にひずみの多いアナログ素子である1bit量子化器を、低域に大きなループ利得を持つ帰還ループに入れることにより、低域のひずみの低減を図ったシステムの最もひずみの多い点から出力を取り出した回路とみなすことができる。

そのスペクトル分布はデジタル信号でありながら低域には入力信号のスペクトルがそのまま存在し、高域に量子化雑音が集中している。したがって復調にマルチビットのDA変換器は不要であり、低域通過フィルタを通過した1bit信号の低域成分がそのまま復調アナログ信号と

なる。また高域集中ディザとして作用することによるひずみの軽減も期待できる。

7MHz 標本化 1bit 量子化で直流から 20kHz では 130dB, 100kHz にわたり 100dB のダイナミックレンジを確保した信号の伝送が可能である。我々の研究室では 1985 年来この方式のマルチチャンネル録音用ハードウェアを数台試作し音響計測やスタジオ録音等実用に供している。

この信号は 1bit であるから語同期の必要が無く伝送誤りに強いという特徴を併せ持っている。実験衛星 COMETS を使ったこの方式による伝送実験を郵政省通信総合研究所と計画していたが、残念ながら先日の H2 ロケットによる打ち上げが軌道に乗らず今のところ実験は実現していない。また一部では次世代デジタルオーディオへのこの方式の導入が提案されている。伝送符号や処理にまで現行のマルチビット方式を否定する必要はないが AD/DA 変換やひずみの発生が懸念されるアナログ回路への導入効果は大きい。

3. ネットワーク時代のオーディオ

“文明人”の感性に頼るな 最近 MPEG など人間の聴覚や視覚特性を積極的に利用した音や映像の高エネルギー符号化方法が数多く提案され、すでにビデオ CD や DVD-VIDEO, デジタル衛星放送等の符号化に使われ始めている。

これらの規格・標準化作業を眼鏡や拡声器が当たり前の生活をして、知らず知らずのうちに聴覚や視覚が衰えてしまった、「文明人」の目や耳、感性に頼って行ってよいものであろうか。地球上には目や耳の優れた人々がたくさんいるはずである。新しいシステムこそこれらの人の力を結集して人間が本来持っていた壊れた感性を満足する仕様にしなければならない。

聴覚特性を利用した符号化はオーディオとは別次元のものであると論ずる向きもあるが、次世代オーディオが人々の英知と感性を結集して、優れた聴覚・視覚能力をも十分満足する符号化方法などが実現できればと期待している。

高エネルギー符号化には信号の情報量に着目してその冗長度を除去することにより、無ひずみで伝送容量の節約を図る方法と、人間の感覚を利用してひずみを出来るだけ感知されがたく工夫した圧縮とに大別される。一般に信号を圧縮するという側面のみ捉えられがちであるが、高エネルギー符号化はむしろ、伝送路は節約したうえ質の向上を図るという前向きな技術として捉えるべきものである。MPEG オーディオは、マスキングや臨界帯域により、耳で検知することが出来ない音を伝送の対象から除外することにより伝送量を節約する高エネルギー符号化である。

著者らは一般化調和解析による高エネルギー符号化について検討を加えてきた。窓幅 10 ~ 50ms で一般化調和解析した 100 周波数成分程度を合成することにより聴感上、原音と違いのない音が得られた。マスキングや臨界帯域を考慮して窓幅や抽出する周波数成分を変化させることにより伝送容量約 107 kbit/s で聴感上原音と変わらない高エネルギー符号化が可能であることが確認されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

約束ごとは最小限に 現行オーディオでは標本化周波数や量子化特性に始まり各種の高エネルギー符号化、伝送形式等少々約束事が多すぎるきらいがある。これがシステムの自由度を制約する結果につながっているのではないか。標本化周波数や量子化特性、エンファシス特性などどんな方式で書かれているかを媒体ごとに記しておく、このメモがきに従って再生系を設定するようなシステムがあっても良いはずである。

アナログレコードでは演奏時間の短い場合には溝間隔を大きく取ることによりダイナミックレンジの広い記録が可能であった。しかるに現行 CD では 30 分収録しようが 74 分収録しようが伝送品質は同じである。自由度を与えさえすれば帯域やダイナミックレンジの広い信号を記録することも、マルチチャンネルのソースをつくることも、BGM を 24 時間 1 枚に収容したディスクを作ることさえ可能になる。

点から空間へ ダミーヘッドホン收音・ヘッドホン受聴あるいはトランスオーラル系によるスピーカ再生はいずれも原音場の空間情報は伝えることができる。しかしこれらは空間でなく2点のみの制御であり人の移動、頭の回転には対応できない。

キルヒホフの積分公式に基づいた方式を採れば所望の音空間の伝送は可能である⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし膨大な数の收音伝送再生系を必要としデジタルでは到底実現は不可能である。境界面の音圧と法線方向の粒子速度を全面記録するアナログ方式が登場するかもしれない。

ハウスシンクからグローバルシンクへ 様々な機器で構成されるシステムの同期を図る目的でハウスシンクが導入されている。業務機器間には SMPTE タイムコードが使用され、また周辺機器には MIDI タイム・コードが使われている。配線は複雑であり離れた機器の同期は不可能である。われわれは手軽に高い精度の得られる GPS を利用したタイムコードを使用している。

マルチメディア統合ファイル GPS を利用して異なる方式の 6.4 マルチメディアファイルが無理なく扱う、1 秒あたり 5 ブロックの絶対時間と位置情報を付加したマルチメディア統合ファイルを試用しはじめている。

コピーライトからコピーレフトへ 最近の学生はレポート、実験結果、場合によっては日記や私信でさえ自分の手元に置くよりはネットワークに委ねた方が安心なのである。考えてみれば膨大な、それも常にバージョンアップされる OS やソフトウェアを個人で所有する必要など全くない。これは明らかに新しいスリムな生活形態の誕生である。ネットワーク上に情報を登録しておくことにより、どこにいても利用できるばかりか自分の意志によってそれを他人に開放することも可能である。むしろソフトはネット

ワークで供給され近い将来 CD や DVD に同じ物を複製して売るといった形態はなくなるかもしれない。同じデジタルデータを何百万枚も複製するのは資源の無駄以外の何者でもないからである。ネットワークを介してアクセスするたびに課金すれば済むことである。

4. むすび

オーディオは周波数も比較的安く取り扱いやすい、あるいは技術はとうに完成しておりいわゆるハイテクとは無縁の存在のように見なされがちである。

現実はまだに正反対、1960 年代後半に実用化されたレーザーをさっそく取り入れて CD を作り上げてしまったり、理論技術段階であった誤り訂正のアルゴリズムを LSI に押し込んで CD や DAT あるいは衛星放送などとデジタルシステムを家庭にまで持ち込んだりと何とも果敢な頼もしい新しい技術に対して貪欲な分野であり、ひょっとすると超伝導なども何らかの形でオーディオ分野に顔を出すかもしれない。

文 献

- (1) C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," Bell Syst. Tech. J., 27, (1948)
- (2) L. G. Rovers, "Picture coding using pseudo-random noise," IRE Trans. IT-8 (2), 145-154 (1962.2)
- (3) N. S. Jayant and L. R. Rabiner, "The application of dither to the quantization of speech signals," Bell. Syst. Tech. J. 51(6), 1291 - 1304 (1972.7-8)
- (4) D. E. L. Shorter and J. R. Cheq, "Application of pulse code modulation to sound signal distribution in a broadcast network," Proc. Inst. Elec. Eng. 119(10), 1442-1448 (1972).
- (5) 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 1.9, 452-462 (1981).
- (6) 山崎芳男, 伊藤毅, "広帯域音響信号の高忠実度 PCM 記録および伝送について," テレビジョン学会, 録画研資 11-2 (1975).
- (7) 山崎芳男, 太田弘毅, 西川明成, 野間政利, 飯塚秀幸, "広帯域音響信号の高速標準化 1bit 処理," 信学技報, EA93-102 (1994).
- (8) 牛山 聡, 東山三樹夫, 飯塚昌弘, 平田能睦, "一般調和解析による波形分析," 信学技報, EA93-103, 39-44 (1994).
- (9) 山崎芳男, "高能率符号化の動向," 音響学会誌, 955-961 (1991. 12).
- (10) 伊勢史郎, "広範囲に現場再現についての研究(1) - キルヒホフ積分公式に基づいて - " 音響講論, 479 - 480 (1993)
- (11) 伊勢史郎様も "広抱当の青桐こついの研究(2) - 多チャンネルステレオフォニクス - , " 音響講論, 481 - 482 (1993)