1. 放送局のデジタル化

1-1 トータルデジタル化への展望

正会員 筒井 健夫[†], 正会員 千早 正敏[†]

1. ま え が き

1993年10月、スイス・ジュネーブで開催された国際電気通信連盟 (ITU-R) の無線通信研究グループ 11 B (SG 11/B) の全体会議で、いくつかの注目されるべき新勧告案の提案が出された。なかでも注目されるのは、文書番号 11 B/TEMP/51-E の「デジタル・テレビジョン信号 (CTV, EDTV と HDTV) の放送 (地上、衛星)・一次・二次分配と関連する応用のためのジェネリック・ビットレート圧縮符号化」と題された文書である。

11 B は、この提案書の中でテレビ信号の圧縮符号化をスタジオから送信・受信に至るまでの全放送系の中での一貫した技術として位置づけ、ジェネリックな符号化と名づけている。

スタジオで扱うテレビ信号を圧縮する必要があるのか、また、圧縮する場合はその圧縮度をどの程度まで許せるかなど、議論のあるところではある。しかし、少なくともデジタル化された信号源の精度を確保できる程度の、実質ロスレス符号化をも含めて、ジェネリック符号化という概念で全放送系の信号フローをとらえようとする考え方は、トータルデジタル放送システムの構築に関して、ひとつの方向を示したもののといえる。

最近では、マルチメディアや多チャンネル放送など、デジタルであるがために生ずる特徴を最大限に取り入れたメディアの議論が盛んである。しかし、伝送媒体がデジタルであることと、その媒体によって運ばれる情報が利用者にとってどれだけの価値をもたらすものであるかは、本来区別されるべき問題であ

る。

デジタル化のメリットは、高度な信号処理、伝送、記録を行う場合に発揮される。情報伝達手段としてのデジタルの得失を、放送システムのトータルデジタル化という現実的な観点から考えてみたい。

2 放送システム

システムのデジタル化を考える場合、単に信号の伝送という観点からだけでなく、番組制作から送信・受信に至るまでの番組の流れを番組を作る立場からよく理解することが大切である。

2.1 取材、ロケ収録、中継、スタジオ制作

ニュースの取材、ドラマ番組のロケ、スポーツ番組の中継などで使用する機材は機動性が必要で、機材の小型・軽量化、低消費電力化、安定性が強く求められる。屋外で使用する場合には、過酷な環境に耐える堅牢性を具備しているかが問題となる。信号の後処理の多いスタジオ制作やドラマロケの機材には、高い画像品質が要求される。

2.2 編集、ポストプロ、CG

ニュース、ドラマなどあらゆる番組は、ポストプロといわれる編集、音入れ、テロップだぶり、特殊効果などの後処理を施す必要がある。特に、ニュース編集では、編集時間の短縮と、フィルム感覚の編集性が求められている。このステージでは、信号処理、ダビングを繰り返すことによる画質劣化が大きな問題となる。

2.3 番組、ニュース送出

集中設備配置が取られている放送局では、あらかじめ決められた編成に従って番組を送出するため、VTR、回線などのリソースを、番組制作スタジオや他局に接続・送出するための設備の集合であり、基本的には交換機と考えられる。安定・確実な接続と伝送が必須の条件となる。省力運用される場合が多く、自動監視、自動障害回避の機能も重要な要素となる。ニュース送出にあっては、柔軟なオーダ変更や飛び込み

[†] NHK 技術局 技術開発センター

"Digitalization for TV Broadcasting Stations, The Prospects for the Total Digitalization of a Broadcasting Chain" by Takeo Tsutsui and Masatoshi Chihaya (Engineering Development Center, Engineering Administration Department, NHK, Tokyo)

処理など臨機の対応が求められる。

2.4 回 線

伝送回線業者の回線や、番組を中継するための SNG, FPU, 放送所に番組を伝送する STL などである。純粋に技術的観点から設計・評価が可能な設備である。いかに狭い帯域幅で高品質な信号伝送ができるかが鍵となる。SNG や FPU など事故現場に持ち込んで運用する機器には、小型軽量、低消費電力が求められる性能となる。また、多数の放送局をループ接続する例もあり、コーデックの縦続接続による画質劣化と遅延の検証が必要である。

2.5 送 信

最終的に受信者の家庭に番組を届ける設備であり、無人運用される。山頂や遠隔地に設置されることが多く、高度な信頼性と安定度が要求される。電波など、伝送路の帯域を有効に利用でき、受信機のコストが安くなる伝送方式が望まれる。

2.6 受 信

低コスト、高品質、高信頼性、低消費電力が要求され、伝搬障害を排除する機能も重要となる。

2.7 測 定

ディジタル化された機器やシステムの測定機器開発は、いまだその端緒にあるといってもよいが、ディジタルシステムの安定運用を左右する重要な研究課題である。シリアルインタフェースの性能測定、圧縮信号の測定、OFDM や SSCDM 電波の測定など、すべて早急な取り組みが要請される未踏の分野である。

3. アナログ信号のディジタル化

我々をとりまく森羅万象すべてアナログの世界である。放送のシステム設計に当たっても、直接ディジタル信号変換ができない場合もあり、信号の劣化を生じない範囲では、アナログ信号のまま扱うのが自然である。しかし、システムをディジタル化する場合、品位の劣化を発生しない入り口段階のどこかでアナログ信号からディジタル信号に変換 (A/D 変換) する必要がある。現状技術を使って A/D 変換する場合の留意点を整理してみる。

3.1 アナログ信号のダイナミックレンジ

人間が知覚する自然界の光と音の強弱は、表 1 に示すように極めて幅が広い。これを電気信号に変換して処理・記録・伝送し、再び電気信号から元の光と音に戻す放送システムでは、トランスデューサの持つ変換特性がシステムの基本特性を決めるといってもよい。しかし、近年のカメラやマイクロフォンの性能向上は著しく、カメラの物理的 S/N 60 dB 以上、マイクロ

表 1 人間の視聴覚諸元

視 覚 (映像)	聴 覚 (音声)
可視波長 400~700 nm	可聴周波 20 Hz~20 kHz
ダイナミックレンジ 10 ⁻² ~10 ⁴ lux (視力 0.1)	ダイナミックレンジ 10 ⁻³ ~10 ³ Pa

フォンのダイナミックレンジ 110 dB 以上が得られている。これらの値は、現在使用可能な A/D 変換器の性能と拮抗あるいは、これをりょう駕するものであり、A/D 変換についても細心の注意が払われなければならない。

3.2 A/D 変換のビット数(量子化雑音)

A/D 変換に伴う量子化雑音の S/N は、 n ビットで量子化した場合、信号をピークツーピーク、雑音を rms で表すと、 $6.02n+10.8$ dB となることはよく知られている。しかし、この関係は量子化誤差 $\bar{e}^2$ を算出する (1) 式で、入力信号 $m(t_i)$ の確率密度が、量子化幅を s とした時、任意の量子化値 $q_i \pm s/2$ の範囲において一様であると仮定した場合であり、条件を満足させるためには 2^n が充分大きな値でなければならない。

$$\bar{e}^2 = \sum_{i=0}^{2^n-1} \int_{q_i-s/2}^{q_i+s/2} f(p_i) [m(t_i) - q_i]^2 dp_i \quad (1)$$

ここで $f(p_i)dp_i$ は、入力信号 $m(t_i)$ が、 $q_i - s/2 \leq m(t) < q_i + s/2$ の範囲にある確率を示す。量子化誤差の最大値は $\pm s/2$ である。

映像は、当初の ITU-R の勧告 601 に記載されていた通り 8 ビットで量子化されていたが、信号源 (カメラ) の S/N が向上したこと、量子化幅が大きいため、滑らかな傾斜を持つ画像に等高線状の雑音が発生するなどの理由から、10 ビットで量子化することが普通になった。これにともない、勧告 601 とディジタル信号の伝送に関する勧告 656 に 10 ビットの規格が追加された。映像の 10 ビット A/D 変換は、現状のカメラとバランスのとれた処理といえよう。

音声は、マイクロフォン出力のダイナミックレンジが 110 dB 以上もあることから、アナログ回路で何らかのダイナミックレンジ圧縮処理を行う必要がある。音声用の A/D 変換器は、DAT などディジタル機器の普及により、デルタシグマ型のノイズシェーピング A/D 変換器など、性能向上を狙った製品が市場に多く出されている。ビット数も 16 ビットから 20 ビットなどと多くなっているが、ダイナミックレンジ 100 dB を越えるのは至難のようである。公称のビット数

に対応した性能を持つ A/D 変換器の開発が待たれるところである。また、A/D 変換器の性能評価も、FFT 解析や正弦波を入力した場合の確率密度分布などにより行われているが、更なる精度の向上や適切な手法の導入が必要であろう。音声の A/D 変換には、16 ビット以上、ダイナミックレンジ 94 dB 以上が最低限の性能として要求されるところである。

3.3 サンプル周波数(アライアシング)

サンプリング定理によれば、ディジタル化する場合のサンプリング周波数は、ベースバンドで必要な帯域の 2 倍以上に設定すればよい。映像信号の帯域がどこまで必要であるかの研究結果は、必要なビット数と同様、これまで世界中の研究機関から発表されている。これらは標準テレビの輝度信号で 4.5~6.0 MHz、色差信号に対しては 1.5~3.0 MHz の値を提示している。

したがって、勧告 601 で規定しているサンプリング周波数 13.5 MHz は、これらの条件を満足する周波数といえよう。

一方、NTSC などのコンポジット信号のディジタル化にあたっては、サブキャリアの周波数を考慮したサンプリング周波数を選択することが、ビート対策と信号処理上の回路規模を考えた場合、有利となろう。NTSC の場合は、サブキャリア周波数の 4 倍、14.3 MHz が良い候補である。

最高周波数成分 f_m を持つベースバンド信号 $m(t)$ を、サンプリング周波数 $f_s=1/T_s$ 、パルス幅 τ を持つ $s(t)$ でサンプリングすると、(2) 式に示すような、ベースバンド信号 $m(t)$ 以外の信号も発生する。

$$s(t)m(t)=\tau/T_s[m(t)+2m(t)\cos 2\pi f_s t+2m(t)\cos 2\pi f_s t+\cdots] \quad (2)$$

ベースバンド信号に影響を及ぼす成分(アライアシング成分)は、 f_s から折り返してくる成分である。必要なベースバンド成分が折り返し成分で汚染されることを防ぐには、ベースバンド信号の帯域をサンプリング周波数の 1/2 以下に厳しく制限しなければならない。しかし、必要なベースバンド信号の上限周波数 f_m と $f_s/2$ の周波数が近い場合には、極めて急峻な遮断特性をもつアナログフィルタが必要になる。急峻な特性のフィルタの実現には、構成する素子の性能など自ずから限度があり、リングングなどの画像劣化も発生する。

注意深く設計しても、勧告 601 で規定されるパスバンド 5.5 MHz まで 0.05 dB、5.75 MHz まで 0.1 dB 以内というフィルタの特性が限度であろう。最近の高速 A/D 変換器の出現は、映像においてもオーバサン

プリング技術の採用を可能にし、アナログフィルタの特性緩和と映像品位の向上に貢献するであろう。

4. 信号処理と丸め誤差

ディジタル信号は本質的に量子化誤差を持っている。さらに様々な信号処理により誤差が増幅・蓄積される。丸め誤差は信号処理を有限のビット数で行い、さらに信号処理後、伝送路の伝送容量に合わせるために行う丸めによって発生する。画像や音声信号を演算する場合、位取りをどう考えるかが問題となる。インタフェースでは、整数 8 ビット、小数 2 ビットとして扱っているが、もうひとつの考え方として、すべてを 1 以下の小数として扱うこともできる。いずれの場合も現段階ではハードウェア上の制約から、一般の計算機の演算と異なり、浮動小数点演算として最後まで有効桁を保持し、最終的に定められた位取りに合わせるような方法は取られていない。演算のたび毎に結果を決められた位取りに合わせているので、できるだけ誤差が増幅されないよう注意しなければならない。

量子化誤差 ϵ_1 と ϵ_2 を持つディジタル化された 2 つのベースバンド信号、 m_1 と m_2 を信号処理する場合を考える。それぞれ原信号の誤差比率は ϵ_1/m_1 と ϵ_2/m_2 であるが、処理後の誤差比率は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{加算} & \sqrt{(\epsilon_1)^2+(\epsilon_2)^2}/(m_1+m_2) \\ \text{乗算} & \sqrt{(m_1\epsilon_2)^2+(m_2\epsilon_1)^2+(\epsilon_1\epsilon_2)^2}/m_1m_2 \end{aligned}$$

乗算を行った結果は、双方の桁数を加算した桁を生じるため、演算回数が増えるたびに桁数が増加する。丸め誤差の発生を最小に収めるためには、装置内で桁落ちしないようにする必要があるが、現実には扱える桁はハードウェアの制約がある。加算をした場合には、桁合わせを前提にすると雑音は減少し、乗算の場合には増加する。2 信号の誤差と桁が等しい場合には、加算での雑音は $1/\sqrt{2}$ となり、乗算では $\sqrt{2}$ 倍となる。もし原信号と同じ桁が残るような丸めを行うと、ビット数で決まる量子化誤差が新たに加算される。

ディジタル化の基本型は、ベースバンド信号を均一に量子化する直線量子化である。これまで 8 ビット/サンプルの量子化信号を縦続接続した場合、画質に影響するコーデックの基本的な回路の研究が CCIR (現 ITU-R) に報告されている。特に信号の品位に関連する重要な点は、

- ・前置・後置フィルタの特性
- ・ブランキングレベルの安定度
- ・立ち上り・立ち下りの急な信号の量子化歪み

・クロックパルスのジッタと走査線時間の非直線性とされる。これらの項目が考慮されたコーデックにおいては、画質劣化の主要因は量子化雑音であり、8段の縦続接続では予測される値に近い9 dBの雑音増加となった。この報告は主にA/DとD/Aを繰り返すために発生する雑音増加に関するものである。

1987年、Crollらにより発表された報告によれば、エラーフィードバックと呼ばれる適切な丸めを行えば、低位ビットの精度が保たれるといわれる。これは1つのサンプルの中で丸められる下位のビットを切り捨てないで、次のサンプルに加算するものである。8ビット/サンプルの場合、簡単な丸めを行うと目につくコンタアを発生したのに対し、この丸め方では、目に見えない高い周波数の量子化歪みに変換されたといわれる。

5. 伝送と記録

5.1 ビット誤り率と画質

ディジタル化された信号に誤りが発生し、画像に雑音が混入した場合、視聴者が画面を見て検知できる誤り率はどの程度であろうか。NTSCコンポジット信号を10ビットで量子化し、シリアル伝送インタフェースフォーマット、10B1Cの伝送路のビット誤り率を変化させた場合のNHKが実施した主観評価結果を図1に示す。図でもわかるように、誤り率 10^{-7} では、注意深い専門家のみが雑音が混入していることを検知している。誤り率 10^{-9} では、専門家でも誤りがあることを画面から検知することはできない。この結果は、システム設計に当たってのひとつの目安となる

図1 ビット誤り率の評価

う。

5.2 室間伝送(10B1C, 10BSNRZ, AES/EBU)

現在、我が国で実用されている標準テレビ用のシリアルインタフェースは、ITU-Rの勧告656に規定されている10ビットスクランブルノンリターンゼロ(10BSNRZ)と、勧告656のフットノートに記述されている10B1Cである。ハイビジョン用のシリアルインタフェースは、日本ではBTA、国際的にはSMPTEや、ITU-Rで議論されている。

10B1Cと10BSNRZの無信号からカラーバー、カラーバーで位相が $8\mu\text{s}$ ずれた2つの信号を切り替えた場合の、ワード同期確立時間の実測値を図2に示す。ワード同期は、10B1Cの場合、11ビットに1ビット挿入されているコンプリメンタリビットで検出しているのに対して、10BSNRZは、1水平期間に1カ所挿入されているタイミング基準信号(TRS)を利用して同期をとっている。10BSNRZの同期確率時間が著しく長いのは、このような方式の違いによるものである。なお、10B1Cは、前方5段、後方10段

図2 シリアルインタフェース同期確立時間

図3 光減衰と伝送エラーレート

の同期保護が施されており、同期の強さで C/N 換算 3 dB の差があるが、切り替え時間はこれを含んだものである。図 3 に光減衰による伝送誤り率の実測特性を示す。

1992 年からの勧告 601, 656, 799 では、8 ビットと 10 ビット規格の互換性を確保するため、10 ビットの現インタフェースが旧 8 ビットのインタフェースに接続された場合、下位 2 ビットを使用しないようにしている。逆の場合は、余分な 2 ビットはゼロ詰めされる。シリアルインタフェースは 10 ビット規格のみで、8 ビットの場合は下位 2 ビットはゼロ詰めされる。

8 ビットと 10 ビット表現の混乱を避けるため、8 つの上位ビットを整数部、下位 2 ビットがある場合には小数部と考えることにしている。

音声のシリアル伝送規格には、AES/EBU 規格が元になった勧告 647 があり、広く使われている。映像信号のアンシラリデータエリアに音声データを重畳する規格はまだ決定されておらず、現在 SMPTE で検討中である。

5.3 FPU, SNG, STL, TSL 伝送

STL や TSL は放送局のクローズな設備であるため、設計仕様に比較的自由度がある。圧縮を行うかどうか、また圧縮を行う場合にはその方式を決定する必要がある。STL については原則的に、より下流に位置する送信の品位が確保できればよい。TSL, SNG, FPU については、伝送される信号は番組素材として信号処理される場合が多く、品質劣化を最小限に抑える必要がある。

ひとつの目安は、8 ビットまたは 10 ビットの量子化雑音と同等または、それ以下に雑音を抑圧できれば通常のデジタル信号処理と同じであり、圧縮伝送に伴った信号劣化のないロスレス伝送であると考えてよい。ITU-R では、番組制作から送信に至るまで共通の符号化方式を用いることが必要であるとし、ジェネリックコーディングの手法として MPEG-2 を候補にしている。必要なビットレートは要求する画質によって決定するが、地上で使用する設備については高い C/N を得ることが可能であり、16 QAM や 256 QAM といった多相多値変調の併用も考慮すべきであろう。

音声についても MPEG-2 の圧縮方式があるが、映像に比較して必要なビットレートが少ないため、高品位な伝送をしても全体のビットレートに対する影響は少ない。STL などのデジタル化に当たっては、放送がデジタルになるまでの文字多重信号の扱いなども考慮する必要がある。

5.4 素材、1 次分配、2 次分配伝送

ITU-R では伝送品質別に、素材伝送、1 次分配伝送、2 次分配伝送というカテゴリーに分けている。素材伝送や 1 次分配伝送が伝送後の信号処理を想定した伝送で、FPU や SNG に相当し、STL や CATV が、信号処理を想定しない 2 次分配伝送に相当する。ITU-R には、素材伝送規格として 140 Mb/s の勧告 721 が、1 次分配用として 34~45 Mb/s の勧告 723 がある。2 次分配伝送規格については現在研究中であるが、MPEG-2 が候補にあがっている。音声の圧縮規格には、サブバンド ADPCM 技術を使った ITU-T の G 722 などがある。最近注目を集めている人間の聴覚特性、マスキングを有効に使った MPEG-2 規格では、64~192 kb/s に圧縮しても劣化がほとんど検知できないといわれている。このような圧縮手法を使う場合には、伝送後の信号処理のマージンを充分考慮する必要がある。

5.5 記録

記録媒体は古くから用いられているテープの他、最近、ディスク、半導体メモリーが注目されている。テープ系では、コンポーネントの D-1 と、コンポジットの D-2, D-3 規格が決定しているが、10 ビットや 18 MHz サンプリングに対応したコンポーネントの D-5 や、ハイビジョンの記録を行う D-6 についても審議されている。記録容量ではテープに劣るものの、ディスクや半導体メモリーにはランダムアクセスができるという特徴があり、作業性の向上、編集時間の短縮など、大きな期待が寄せられているが、特にディスクを使った一体カメラの出現が待たれるところである。記録装置では、編集時に必ず早送りや巻き戻しをしながら画像確認をする必要があり、MPEG-2 のような帯域圧縮を施した信号を記録する場合、注意が必要である。また、編集はフィールド単位で行われ、インサートモードも使われるため、定尺性を確保しなければならない。ビットレートの少ない音声分野では、使い勝手の良い編集機など、すでに多くの製品が出されている。CG 制作など、信号処理とダビングを何回も繰り返す場合には、処理後の丸めのたびに 1 画素に割り当てられているビット数に対応した丸め誤差が加算され、コントアや量子化雑音といった画質劣化が発生するので注意が必要である。

6. 送 信

6.1 地上、衛星、ケーブル

地上デジタル放送の規格は現在、ITU-R・TG-11/3 で精力的に検討されている。情報源符号化は

MPEG-2を核に考えられており、トランスポートビットストリーム以降のサービス多重、誤り訂正、変調などの規格化が重要な課題になっている。高画質を要求される場合にはビットレートが高くなるため、変調方式も多相多値が必要になるが、地上放送のようにマルチパスやゴーストが発生する場合には、シングルキャリアの多相多値変調では波形等化が難しくなる。シンボル時間を長くして、マルチパスなどの影響が複雑に発生するシンボル時間の始めの期間にガードバンドを設けた直交周波数分割多重方式 (OFDM) が有利となろう。衛星デジタル放送では、衛星上のトランスポンダの特性が変調方式を決定する大きな要素となる。非直線性の大きなトランスポンダの場合には多値変調を用いることは難しく、また、送信電力が大きくとれないためシンボル間隔がとれず、多相の数にも制約が出てくる。地上放送で行われている放送波を使った掛合いで、符号化のための遅延がどこまで許容できるかの検証も重要な課題である。

7. 圧縮の階層化

ITU-Rが提唱するジェネリックコーディングは、川上にあたる番組取材から送信・受信に至る川下まで、変化しない動きベクトルのような情報はそのまま伝送し、スケーラビリティなどの機能を使用して、放送系に適合した品質の階層化を図ろうとするものである。確かに全放送系を伝送という観点からとらえた場合には、的を射た提案である。しかし、放送局の中で行われる番組制作や送出に関わる処理は、ほとんどの場合、ベースバンド信号に対して施されるものであり、符号化された信号のままで行える処理は皆無といってよい。たとえロスレス符号化を行ったとしても、各スタジオや特殊効果、下ダブリなどで、処理が必要になるたびに復号し、処理後再び符号化して伝送するようなシステムは、設備規模や経済的に見て現実的ではない。また、処理の必要な部分のみを復号するなどの中間案も考えられるが、システム全体の見通しが悪くなる。現行のテレビ信号にあっても、200 m程度の長距離室間伝送には光ファイバが用いられており、

HDTVについても、放送局内の伝送に圧縮信号を用いなければならない積極的な理由は見あたらない。局内処理は原則として非圧縮ベースバンド信号とし、局内伝送は非圧縮のシリアルインタフェースで行う。動きベクトル情報や文字情報、その他の制御データなどは、アンシラリデータとして伝送するか、別の伝送路でコードまで導くのが、放送局のシステムを構成する場合のひとつの選択となろう。回線から入って信号処理をせず直に回線に送り出すような信号は、バイパス処理をすれば、信頼度の向上、設備の簡素化、システム見通しの向上に役立つ。ITU-Rの提唱する圧縮の階層化も最終段階で行うのが適当であろう。

8. む す び

放送局のトータルデジタル化について、主として番組を制作、送出、送信する設備・システムを設計する立場から概観した。ITU-Rをはじめとして、MPEG, SMPTE など、世界の標準化機関が放送に関わる規格の研究を行っている。国内でも、BTAがデジタルの測定法、インタフェースや圧縮に関する研究、デジタル放送の検討を行っていることは周知の通りである。放送局の多種多様な設備、システムの機能・性能を規定する規格群は、一朝にして完成するものではない。実際に番組を提供している放送業者、放送に必要な機器を供給している製造業者、放送の研究者が一丸となって、新しい段階を迎えた放送の将来を考え、規格を研究する必要がある。

(1994年2月7日受付)

つつい たけお
筒井 健夫 昭和32年、静岡県静岡工業高等学校電気通信科卒業。同年、NHK 静岡放送局に入局。名古屋放送局を経て、現在、同技術局技術開発センターに勤務。主として、デジタル放送機器・システムの開発に従事。正会員。

ちはや まさとし
千早 正敏 昭和46年、鹿児島大学工学部電子工学科卒業。同年、NHKに入局。山口局、技術本部、熊本局を経て、昭和60年より技術局に勤務。現在、同技術局技術開発センター副部長。自動運行システム、BS中継車等の開発に従事。正会員。