アナログ・デジタル縦続映像伝送系の 雑音規定に関する一検討

正会員 井 上 正 之[†]

あらまし アナログ・デジタル縦続接続系における雑音の品質劣化配分方法について検討した。伝送品質の規定方法に関する一般的な考え方を示すとともに、デジタル系としてフレーム内DPCM系を想定した場合について具体的に検討した。まず、粒子性雑音の品質規定について検討し、物理測度を定義した。次に、ランダム雑音との類似性に関し、見え方の違い、視感度の差について定量的に検討した。その結果、粒子性雑音に対し、約5dBの視感度補正を施すことにより、等価的にランダム雑音に換算できることが明らかになり、したがって、アナログ・デジタル縦続接続系に対しても、従来のアナログ系に対する電力和相加則がそのまま適用可能であることがわかった。

1. ま え が き

近年、光ファイバ伝送方式などの導入により、中継伝送路のデジタル化、大容量化が着実に進展している。しかし、全国的にみれば、なおかなりの長期間にわたりアナログ・デジタル両伝送路の混在形態が続くものと予想される¹⁾。

このような状況の下で、最近顕在化しつつある映像通信の長距離化に対するニーズに即応するため、アナログ・デジタル縦続接続による映像伝送システムへの期待が強まり、そのための効率的な伝送品質設計法の確立が緊急かつ重要な課題となってきた。

ところで、映像通信系伝送品質の規定方法の現状について見ると、アナログ系については、よく知られているCCIR勧告567²⁾があり、体系的に確立されている。一方、デジタル系については、品質評価法の提案例はあるが³⁾、現在のところ、体系として確立されるには至っていない。

また従来、品質規定の問題は、アナログ系、デジタル系、それぞれ個別に考えられてきたが、画面上での品質劣化現象の心理的独立性ということに着目する

と、アナログまたはデジタルの単独系に対する考え方は縦続接続系に対しても拡張可能と考えられる。その際、心理的に独立な要因間の総合則については、すでにいくつかの総合品質予測式が提案されており、それらのいずれかがそのまま適用可能と考えられる。一方、独立でない要因間については見直す必要がある。実際、アナログ系、デジタル系、それぞれにおける要因は大部分相互に独立と考えられ、上記予測式の適用が可能である⁴⁾。しかし、アナログ系における支配的な要因であるランダム雑音とデジタル系の粒子性雑音の組合せについては、類似した品質劣化現象であるため、独立とはいえない。したがって、この場合には、新たに品質劣化配分の方法について考えておく必要がある⁴⁾。

そこで本稿では、この残された問題である縦続接続系での雑音規定の方法について検討する。具体的には、アナログ系ランダム雑音と前値予測フレーム内DPCM系の粒子性雑音が相加する場合について検討する。

2. アナログ・デジタル縦続伝送系 映像品質規定の一般原則

一般に映像品質の規定方法に対して要求される条件について考えると、

- (1) 品質評価結果に再現性・信頼性があること

[†] NTT 電気通信研究所

"A Proposed Method for Noise Determination in Mixed Analog-Digital Video Transmission Systems" by Masayuki Inoue (NTT Electrical Communications Laboratories, Yokosuka)

(2) 任意の方式に対して適用可能であること

(3) 客観測定との整合が良いこと

が挙げられる。これらの条件を満たすためには、品質規定方法を図1に示すように、3段階に分けて構成することが考えられる。

第1段階：画面上での品質劣化現象を単独刺激（品質劣化要因と呼ぶ）に分解する。

第2段階：品質劣化要因ごとに品質規定用物理測度を選定し、それを用いて品質を定量化する（単独画質を求める）。

第3段階：品質総合則を用い、単独画質から総合画質を算出する。

前述の CCIR 勧告 567 の規定方法および小林の提案した品質評価法³⁾、における考え方は基本的にこの考え方と一致している。

以上の議論は、伝送系の総合規格を念頭においたものであり、したがって、End-to-End で見たときの異種劣化要因の相加のみが想定されている。しかしながら、現実の伝送系では、このほかに伝送路設計などのリンク配分における同種劣化要因間の相加について考える必要がある。したがって本稿では、異種要因間については“総合則”を、同種要因間については“相加則”という用語をそれぞれ用いることにし、両者を明確に区別することにする。

このような品質規定の考え方は、とくにアナログ系、デジタル系を意識したものではなく、きわめて一般的なものである。すなわち、この考え方をアナログ・デジタル縦続接続系に適用すると、その発生原因や、アナログ系、デジタル系ということは無関係に、妨害現象の画面上での見え方が心理的に異なる場

合（相互に独立な要因の場合）には総合則を用い、同種の現象として見える場合（相互に独立でない要因の場合）には相加則を用いて、それぞれ劣化配分を行う、ということになる。

3. DPCM 符号化処理系で生じる粒子性雑音

3.1 粒子性雑音の概念

一般に、フレーム内符号化処理系で発生する品質劣化は、画面上での妨害現象に着目すると、粒子性雑音、勾配過負荷、偽輪郭、エッジビジネスの4種類の品質劣化要因に分類できる³⁾。一方、アナログ系の雑音については、ランダム雑音、ハム雑音、周期性雑音などの品質劣化要因に分類整理されている²⁾。

これらのアナログ系、デジタル系の要因のうち、大部分の組合せについては心理的に相互に独立と考えられるが、ランダム雑音と粒子性雑音の組合せについては、画面上で、きわめて類似した見え方となるため独立とはいえない⁴⁾。そこで本稿では、ランダム雑音と粒子性雑音を対象に、相加則を検討することにする。

このうち、デジタル系については、フレーム内系の中でもさらに一般的な DPCM 系に限定して考えることにすると、粒子性雑音の発生原因は、主に差分量子化器の低レベル入力信号に対する量子化ひずみであることが知られている³⁾⁵⁾。したがって本稿では、粒子性雑音を、差分量子化器の低レベル入力に対してのみ量子化ひずみを発生し、高レベル入力に対しては無ひずみであるようにモデル化した量子化特性を用いて発生することにする。このように量子化特性をモデル化することにより、他のデジタル系の品質劣化要因から粒子性雑音だけを切り離して独立に扱うことができ

図1 映像品質規定方法の構成
Composition of picture quality specification procedure.

図2 粒子性雑音の発生領域（差分量子化特性）
Granular noise caused by distortions in DPCM quantizer characteristics.

る。図2に粒子性雑音の発生モデルの模式図を示す。

3.2 粒子性雑音に対する物理測定

(1) 物理的記述方法についての考察

従来、粒子性雑音に対する品質規定は、画面上での見え方がランダム雑音と類似しているため、ランダム雑音との主観的等価値 (PSE) を用いて行われてきた。また、デジタル系全体のひずみに対する客観的測定として、従来から入出力信号間の自乗平均誤差を用いる方法が検討されてきた。しかしながら、主観評価を行わない限り符号化器の画質がわからないという欠点や、見え方の異なるひずみをひとまとめにして取扱うため、視感度との対応が悪いという指摘がなされてきた⁶⁾⁷⁾。

ところで、上述の粒子性雑音の発生原因に着目すると、差分量子化器入力の低レベル部分で生じるひずみのみを用いて S/D を定義することが考えられ、この S/D を用いることにより、視感度との対応関係の改善が期待できる。具体的には、図2に示した領域内での入出力信号間の自乗平均誤差として、次式で S/D を定義する。

$$S/D=10\log\frac{S_{P-P}^2}{D_{rms}^2},\ (S_{P-P}=0.7\text{ V})\quad (1)$$

$$D_{rms}^2=\sum_{i=-A}^Ax_i^2p(x_i)$$

- x_i : 歪信号 (MSE 信号) の振幅
- $p(x_i)$: x_i の発生確率
- A : 図2で定義された値

(2) ひずみの発生領域とランダム雑音との類似度との関係

図2に示した S/D の計算範囲を、単純な前値予測 DPCM 系の量子化特性の場合について、ランダム雑音との類似度を手掛りとした主観評価実験を行い求めることとした。

主観評価実験は次の2段階から構成した。まず、①被験者に、被写体画像にランダム雑音を重畳させた場合の画像を提示し、そのときの雑音レベルを次々と変化させることにより品質劣化現象の特徴を記憶させた。次に、②差分量子化器の量子ひずみ発生領域を変化させ、それぞれの特性について①で記憶させた劣化現象との類似度を判定させた。

主観評価実験で使用した実験系の構成図を図3に、観視条件を表1にそれぞれ示す。また、被写体には SMPTE スライド#5、#13、天気図の3種類を用い、評価尺度には (+2) 似ている、(+1) やや似ている、(0) どちらともいえない、(-1) やや似ていない、(-2) 似ていない、という5段階の類似度尺度を用い

図3 実験系の構成図
Block diagram of experimental setup.

表1 主観評価実験条件
Testing conditions for the subjective assessment.

観 視 条 件	室内照度	約 300 lx
	画面最高輝度	400 cd/m ² (白黒), 180 cd/m ² (カラー)
	画面背景輝度	40 cd/m ²
	管面反射輝度	約 7 cd/m ²
	視距離	6 H (H: 画面高)
	コントラスト比	25:1 (白黒), 18:1 (カラー)
アスペクト比		4:3
テレビジョン方式		NTSC標準方式

た。被験者には女子学生 10 名を用い、充分評価の経験を持たせ、評価のばらつきが安定したところで熟練者と見なした。

ひずみの発生は、ひずみの発生する入力信号レベル A を種々変化させた、20 種類の差分量子化特性を用いて行い、そのときレベル A だけにひずみが生じている場合と、 A を中心としてその前後のレベルを含めた 3 レベルにひずみが生じている場合の 2 通りについて検討した。なおその際、入出力信号のレベル差 D については、劣化現象が目に見えるようになる程度に適当に設定した。3 レベルひずみの場合の量子化特性の例を図4に示す。

3 レベルひずみの場合に対する評価結果を図5に示す。同図で、縦軸の類似度は基本的に +1 または +2 を選んだ被験者の比率を表す。0 (どちらともいえない) については、0.5 人の選択があったものとした。1 と 2 の差については、評点が +1 側と -1 側に分かれた場合についてのみ考慮した。

同図より、被写体信号によってかなり違いはあるが、線画風の画像の場合で $\pm 4/255 \sim 7/255$ V、人物画の場合で $\pm 10/255 \sim 20/255$ V 付近の入力レベルを

図 4 類似度評価で用いた差分量子化特性
Characteristics of DPCM quantizers used in the subjective tests on similarity.

図 5 ひずみの発生領域とランダム雑音との類似度
The degree of similarity to random noise disturbance in connection with the area of quantization distortion.

境として、類似度が50%を上下しており、したがって、計算範囲としては $\pm 15/255$ V 付近までを考えておけば充分と考えられる。

(3) 心理量と物理量との対応

(1)式で定義した S/D が粒子性雑音を表す物理測度であるための要件は、 S/D と品質との関係が1価関数になっていることである。すなわち、どのような粒子性雑音であっても、 S/D が一定であれば常に同じ品質になっていることである。

そこでここでは、差分量子化特性でのひずみの発生領域の形状をいろいろ変化させたときに、その形状の違いにかかわらず S/D が同じであれば、常に同じ品質になっているか否かを調べることにし、 S/D の物理測度としての妥当性を調べることにした。

差分量子化特性を、ひずみ発生領域の形状により4つのグループに分け、それぞれについて4水準程度ずつ変化させた合計18種類を対象とした。図6に対象とした差分量子化特性の一例を示す。

ここでは、差分量子化特性の形状の違いによる差異

(a) グループ I

(b) グループ II

図 6 各種ひずみ発生領域に対する差分量子化特性
Characteristics of DPCM quantizers to generate quantization distortions in various areas.

を調べるのが主眼であるので、被写体については、SMPTE スライド#5 と天気図という、人物画と線画の代表的なもの2種類に限定して検討した。

主観評価に先立って、次節で示す被写体の差分振幅分布に基づき S/D を計算した。結果は主観評価結果と合わせて図7に示す。

主観評価は、4 MHz 帯域放送標準画像の品質を基準とし、CCIR 5 段階妨害尺度を用いて行った⁸⁾。評価に際しては、被写体の条件を変えるたびに基準系の画像を原画として事前に提示し、また、典型的な劣化現象を例示することにより被験者の評価基準の安定化を図り、評価結果の信頼性を高めることとした。画像提示は、1回の提示時間を約10秒とし、5秒程度の採点時間をはさんで次々と提示した。また、被験者の疲労を考慮し、30分程度をひと区切りとして繰返すことにした。観視条件、被験者については前節の場合と同様である。

図7に主観評価結果を示す。心理量の記述は、平均オピニオン評点をロジスティック変換を用いて間隔尺度に直したもので行った。また参考のため、平均オピニオン評点と間隔尺度値の関係も示しておいた。同図

図 7 粒子性雑音妨害における心理量対物理量の相関度
 Correlation between psychological quantity and physical quantity in the granular noise disturbance.

にはまた心理量と物理量の相関を見るために、相関係数および回帰直線を求めた結果も示した。その結果、各相関係数に対する t -検定結果は、いずれの被写体の場合にも 0.1% の危険率で有意であり、ひずみの発生領域の形状の違いにかかわらず、粒子性雑音は、 S/D で一義的に表せることがわかった。

3.3 ランダム雑音との視感度の差異—— S/N との関係

S/D で記述された粒子性雑音と S/N で記述されたランダム雑音との間の関係を、主観評価実験を行い、それぞれの視感度の差を比較することにより求めた。粒子性雑音、ランダム雑音のそれぞれに対する発生系の構成は図 3 と同じである。その際、粒子性雑音は図 6 (a) の簡略化した量子化特性を用いて発生させた。

S/D を計算するための準備として、まず表 2 に示す 8 種類の各被写体について、図 3 の測定系を用いフレーム内差分信号の振幅レベル分布を測定し、次に、各被写体について図 6 (a) に示した A (最小量子化ステップ幅) の値を変化させ、それぞれの場合に対する

表 2 各被写体に対する S/D 計算結果
 S/D calculated for test pictures.

被写体	最小量子化ステップ幅 (図 6 の A) 単位: 1/255 V						
	± 1	± 3	± 4	± 6	± 8	± 10	± 12
SMPTE # 3	∞	45.8	41.8	36.1	32.4	29.7	27.6
SMPTE # 4	∞	44.2	40.0	34.6	31.1	28.5	26.5
SMPTE # 5	∞	45.2	40.9	35.5	31.8	29.1	27.0
SMPTE # 9	∞	43.8	39.8	34.6	31.2	28.7	26.7
SMPTE # 13	∞	45.3	41.0	35.5	31.8	29.1	26.9
SMPTE # 14	∞	45.3	41.0	35.4	31.8	29.0	26.9
SMPTE # 15	∞	45.9	41.7	36.2	32.6	29.9	27.8
天気図	∞	45.5	41.4	36.1	32.7	30.1	28.1

図 8 ランダム雑音と粒子性雑音の視感度の差異
 Difference in the visual sensitivity between random noise and granular noise.

S/D を計算した。計算結果を表 2 に示す。

主観評価方法、画像提示方法、視認条件、および被験者については 3.2 節 (3) の場合と同様である。

図 8 に、ランダム雑音、粒子性雑音、それぞれ単独の場合の評価結果の例を、被写体毎に重ね合わせて同時に示す。

同図より、いずれの被写体の場合も S/N で表したランダム雑音の結果と S/D で表した粒子性雑音の結果を、約 5 dB ずらして重ね合わせるとよく一致することがわかる。すなわち、ランダム雑音と粒子性雑音の見え方には約 5 dB の視感度の差があり、雑音量が同じとすれば粒子性雑音の方が目立ちやすくなっている。この視感度の差が生じた原因としては、①粒子性雑音の出現領域が輝度変化の小さい部分に集中していること、②歪信号の振幅に偏りがあること、などが考えられる。

これらの原因のうち、①については、差分振幅分布測定結果によると、被写体により多少の違いはあるが、 $\pm 10/255$ V 以下のレベルに全体の 60~80% が集中しており、一様に分布している場合と比べると、局所的な S/N が 1~2 dB 低下することになる。

また、②の効果を定量的に把握するため、適当な擬似ランダムパルス発生器を用い、雑音の振幅レベルを一定にしたうえで画像に重畳し、そのときの視感度を調べ、ランダム雑音の場合と比較した。その際、雑音量の制御は、まずパルスの発生率を画面上でのパルス見え方がちょうどランダム雑音風になるように調節しておき、パルス振幅を変化させて行った。その結果、等振幅化雑音に対する結果は、約 1.5 dB シフトさせて重ね合わせたとき、ランダム雑音に対する結果に最もよく一致することがわかった。したがって、雑音振幅を等振幅化することによる視感度への効果は、約 1.5 dB であるといえる。

以上の考察によって、 S/N で表したランダム雑音と S/D で表した粒子性雑音との間の約 5 dB の視感度の差のうち、2.5~3.5 dB については説明がついたことになる。残りの 1.5 dB~2.5 dB については原因不明である。

4. アナログ・ディジタル縦続接続系雑音に対する品質相加則

4.1 縦続接続系における雑音相加則モデル

前章の結果から、粒子性雑音、ランダム雑音をそれぞれ S/D 、 S/N で表示したとき、それぞれの視感度曲線は、いずれか一方の物理量を約 5 dB シフトさせると、よく一致することがわかった。このことは、いずれか一方、例えば粒子性雑音の S/D に対して約 5 dB の補正を行うことにより、ランダム雑音に換算できることを意味している。

すなわち、縦続接続系についても、従来のアナログ系に対する雑音相加則をそのまま適用できる可能性を示唆している。全体的な相加則モデルを図示すると、

図 9 雑音相加則モデルと検証方法
Model of addition law for noise and a verification method for it.

(a) SMPTE#5
 $S/D=31.8$ dB

(b) 天気図 $S/D=28.1$ dB

写真 1 粒子性雑音の電力スペクトル測定例
Examples of power spectrum of granular noise.

図 9 のようになる。以下では、この相加則モデルの妥当性について検討する。

4.2 粒子性雑音に対する視感度補正

通常、アナログ系のランダム雑音については、雑音の周波数スペクトラムの違いに応じて視感度補正を行う(これを評価補正という)。そこで、粒子性雑音についても同様の評価補正が可能か否かを調べるために、図3の雑音発生系を用い、粒子性雑音の周波数スペクトラムを測定した。測定結果の一例を写真1に示す。同図より、粒子性雑音の周波数スペクトラムは、映像帯域内で平坦であることがわかる。したがって、粒子性雑音に対する雑音評価補正は、平坦ランダム雑音に対するそれと全く同様でよいと考えられる。

したがって、粒子性雑音の S/D に対し、約 5 dB の視感度補正を施すことにより、平坦ランダム雑音の S/N と等価と見なすことができる。

4.3 相加則モデルの検証

図3に示した雑音発生系を縦続接続することにより構成した実験系を用い、①上述の相加則モデルによって求めた総合画質と、②実際に主観評価実験を行って求めた総合画質とを比較検討することにより、相加則モデルの検証を行った。

図9に示した手順で粒子性雑音を実験系にアナログ換算し、

(a) SMPTE #5 (白黒)

(b) SMPTE #5 (カラー)

図10 雑音相加則の検証例

Examples of verification for the addition law of noise.

表3 相加則による画質推測値と総合画質実測値の間の自乗平均誤差

RMS errors between the estimated value of picture quality via addition law and the value measured directly through subjective evaluation test.

被写体	白黒	カラー
SMPTE #3	0.241	—
SMPTE #5	0.206	0.216
SMPTE #13	0.278	0.313
SMPTE #14	0.216	—
天気図	0.290	—

総合的な S/N を算出したうえで、アナログ単独系について求めた評価結果(図8)を用い、総合画質の推測値を求めた。また、ランダム雑音と粒子性雑音が同時に出現する場合については、実際に主観評価実験を行い総合画質を実測した。

結果の一例を図10に示す。同図では比較のため被写体ごとに推測値と実測値を同時に重ねて示した。同図より、相加則による推測値と総合画質実測値がよく一致していることがわかる。

次に、全測定点を対象に推測値と実測値の間の自乗平均誤差を算出した。結果を表3に示す。同表より、いずれの被写体についても自乗平均誤差の値は約 0.3 以下になっていることがわかる。

主観評価実験における被験者の判断の鋭さに対するパラメータとして、評点の分布の標準偏差を考えたとき、被験者の経験に応じて、一般視聴者で 0.9、研究所職員で 0.7、テレビ技術者で 0.5 という値になることが報告されている⁹⁾¹⁰⁾。また、通常的主観評価が単独刺激を対象とした単独評価であることを考慮すると、ここで対象としているような総合評価の場合には、この値はさらに大きくなると予想される。

以上を勘案すると、ここで得られた 0.3 という値は、これらの値と比較して充分小さく、予測精度として申し分ない値であるといえる。それゆえ、図9に示した雑音相加則モデルは、アナログ・デジタル縦続接続系に対しても適用可能であると結論できる。

5. む す び

DPCM 系を対象に、アナログ・デジタル縦続伝送系における雑音の品質劣化配分の考え方を示した。

まず、粒子性雑音の品質を規定するための物理測度を定義した。次に、粒子性雑音とランダム雑音の視感度の差異が約 5 dB であることを明らかにした。さらに、粒子性雑音に対し視感度補正を行うことにより、

アナログ・ランダム雑音と同様の取り扱いが可能になり、従来からの電力和相加則を用いたリンク配分が可能であることを示した。

これにより、映像通信サービスの長距離化に伴い、当面問題になると予想されるアナログ・デジタル縦続接続系における粒子性雑音の客観的品質規定が可能となった。また、単純な視感度補正をベースとした粒子性雑音のアナログ雑音への換算法を示したことにより、具体的な雑音の設計配分が容易かつ客観的に行えるようになった。

本研究を進めるにあたり、種々ご指導、ご助言いただいた橋本前画像通信研究部長、ならびに当所 釜江事業所通信研究部長に感謝致します。また、日頃ご指導いただく当所画像通信研究部 杉山部長、結城主席研究員、安田画像通信方式研究室長に感謝致します。またとくに、種々ご指導いただくとともに、熱心なご討論、適切なご助言をいただいた渡辺主幹研究員、酒井主幹研究員、黒田主幹研究員の諸氏に深く感謝致します。最後に、種々議論していただいた室員各位、また、被験者としてご協力いただいた多数の学生諸氏に感謝致します。

(昭和61年7月28日受付、昭和61年11月28日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) CCIR: "Digital or Mixed Analogue-and-Digital Transmission Television Signals", 15th Plenary Assembly, Rep. 646-2, Vol. 12 (1982)
- 2) CCIR: "Transmission Performance of Television Circuits Designed for Use in International Connections", 15th Plenary Assembly, Rec. 567-1, Vol. 12 (1982)
- 3) 小林: 画像信号符号化方式に対する品質評価法の一提案, 信学論 B, **J60-B**, 5, pp. 343-349 (1977)
- 4) 井上: "アナログ・デジタル混在伝送系における TV 画像の品質評価", テレビ大全, 7-7 (1981)
- 5) 橋本: "高能率符号化と視覚特性", テレビ誌, **40**, 4 (1986)
- 6) 荻本, 中川, 宮原: "視覚特性を考慮した画質評価法", 昭和59年信学総大会, 1265 (1984)
- 7) 保坂, 末永: "画像の性質を考慮した画質評価法の検討", 昭和60年信学総大会, S 22-10 (1985)
- 8) CCIR: "Method for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures", 15th Plenary Assembly, Rec. 500-2, Vol. 11, Pt. 1 (1982)
- 9) 伊藤, 高橋: "ひずみの交換とそのシステムデザインへの適用", テレビ大全, 1-5 (1969)
- 10) 宮川, 渡部編著: "画像エレクトロニクスの基礎", コロナ社 (1975)

井上 正之 昭和47年、神戸大学大学院修士課程修了。同年、NTT入社。電気通信研究所に勤務し、現在に至る。映像通信システムに関する視覚特性、画像品質、人間要因などのサービス品質評価法の研究に従事。正会員。