60 Mb/s MUSE デジタル伝送用符号化装置の開発

正会員 今 泉 浩 幸[†], 正会員 本 田 正 巳^{††}Development of 60 Mb/s Digital Transmission Codec
for HDTV MUSE SignalsHiroyuki Imaizumi[†] and Masami Honda^{††}

Abstract This paper describes the development of a codec which reduces the bit-rate of HDTV MUSE digital signals to 60 Mb/s. This codec makes it possible to attain high quality international HDTV transmission through the use of a 36 MHz (BW) transponder in a communications satellite by using QPSK modulation.

The bit-rate reduction algorithm is based on predictive coding. The coding efficiency is improved by the introduction of intra/interfield adaptive predictions, adaptive quantizations to predicted values and quasi-variable word-length coding.

Coding parameters were determined by assessing the quality of decoded pictures at the end of a transmission and by considering picture degradation through both the MUSE coding and the predictive coding. As a result, optimized picture quality for end viewers is achieved.

The 1992 Winter and Summer Olympics in France and Spain were broadcast by using this newly developed codec with the HDTV transmission system, viewers in Japan were able to enjoy highquality, live coverage of the Olympic Games.

1. ま え が き

我が国のハイビジョン放送は、1991年11月25日より試験放送の段階となり、1日の平均放送時間も8時間に拡大された。この試験放送の開始により、充実した番組編成への期待がいつそう高まるとともに、オリンピックなど海外からのイベント中継の機会も増加

してきている。これまでの海外からのハイビジョン中継は、放送衛星の1ch(27 MHz帯域幅)でのハイビジョン放送を実現するために開発されたMUSE方式による帯域圧縮をそのまま用いて、アナログFM方式により伝送が行われてきた。しかしながら、国際間の通信回線では、高能率符号化によるビットレート低減や誤り訂正符号化による回線品質の高信頼化が期待さ

キーワード：ビットレート低減、予測符号化、MUSE、HDTV、衛星伝送

1990年3月22日、テレビジョン学会放送方式研究会で発表

1992年10月6日受付、1992年12月8日再受付

[†] NHK放送技術研究所(〒157 東京都世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-2227)

^{††} NHK技術局(〒150-01 東京都渋谷区神南2-2-1, TEL 03-5478-5289)

[†] NHK Science and Technical Research Laboratories (1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157, Japan)

^{††} NHK Engineering Administration Department (2-2-1, Jin'nan, Shibuya-ku, Tokyo 150-01, Japan)

れるデジタル伝送方式への転換が図られており、国際通信衛星においても多くの帯域がデジタル変調波によって占められている。したがって、ハイビジョン伝送においてもデジタル化が重要な課題となっている。

国際通信衛星では、通常 36 MHz 帯域幅の利用が可能であり、QPSK 変調方式を用いることにより、約 60 Mb/s のデジタル伝送を行うことができる。MUSE 信号のビットレートは約 130 Mb/s であるが、高能率符号化技術を用いて、このビットレートを 60 Mb/s 以下に低減できれば、通信衛星により MUSE 信号をデジタル伝送することができる。

MUSE 方式はサブサンプリング処理によりハイビジョン信号の帯域圧縮を行うアナログ伝送方式であるが、MUSE エンコーダ内の信号処理はデジタル処理であり、終段のデジタル/アナログ変換の前からデジタル MUSE 信号を取出すことで、容易にデジタル伝送との整合をとることができる。また、MUSE 信号に対してビットレート低減を行う符号化方式では、MUSE 方式との縦続接続により生じる双方の画質劣化を考慮して方式決定することにより、最終的に MUSE 方式で放送する場合に有利な符号化方式とすることができる。

通信衛星による MUSE 信号のデジタル伝送を実現するため、MUSE 信号のビットレートを 60 Mb/s に低減する符号化装置を開発した。基本的な符号化アルゴリズムは予測符号化方式であり、フィールド間/フィールド内適応予測、予測値適応量子化、準可変長符号化の導入により符号化効率の向上を図った。

本稿では、2 章において、計算機シミュレーションにより行ったビットレート低減のための符号化方式の検討について述べ、3 章では、製作した装置の構成と伝送フォーマットならびに誤り訂正符号化について述

べる。4 章では、QPSK 変復調器を接続して行った室内伝送実験により、符号化画質とデジタル伝送で問題となる伝送路符号誤りの影響について検証する。

2. ビットレート低減方式の検討¹⁾

MUSE 信号はサブサンプリングによりすでに帯域圧縮された信号であり、高域周波数成分が低減に折り返った信号であるが、サンプル値間には相関が残っており、予測符号化方式によるビットレート低減が可能である。

2.1 フィールド間/フィールド内適応予測

図 1 に MUSE 信号のサブサンプルパターンと予測関数を示す。図 2 では予測誤差電力が最小となる予測係数で予測誤差電力を比較した。この検討により、予測誤差電力が小さく、しかも予測に用いる画素の個数が少ない組合せを選択し、予測係数を決定した²⁾。なお、図 2 における最適予測とは、予測に用いる画素を充分多くとった場合の収束値であり、フィールド内予測における予測誤差電力の最小値に相当する。

1 フィールド前の画素を用いてフィールド間予測を行うと、さらに予測誤差電力を低減することができる。ただし、画像の動き領域では予測誤差が大きくなるため、フィールド内予測を用い、静止領域でのみフィールド間予測を用いる適応処理が必要となる。

静/動の判定は画素ごとに行い、図 1 における符号化画素 (X) の前ラインの画素 (B, C) のデコード値と前フィールドの画素により予測したそれぞれのフィールド間予測値との差、すなわちフィールド間差が閾値以下であれば「静止」、B, C の一方でも閾値を越えていれば「動き」と判定する。この方法では、フィールド間差をローカルデコード値から求めることで、静/動の情報を伝送せずに、符号側と復号側の予測方式を一致させることができる。静/動の判定方式とし

図 1 予測関数
Prediction coefficients. (a) Luminance signals, (b) color-difference signals.

図 2 予測に用いる画素の位置と予測誤差電力
Position of picture element used for prediction and prediction error variance.
(a) Luminance signals, (b) color-difference signals.

図 3 予測値適応量子化器の構成
Block diagram of prediction value adaptive quantizer.

て、この他に、フィールド間差の多数決による方式、フィールド内前ライン 2 画素の差による方式などを検討したが、動エッジ部分に画質劣化が生じ、本方式による画質が最も良好であった³⁾。

静/動の判定情報を伝送しない方式では、符号誤りにより符号側と復号側で静/動の判定の不一致が発生し、大きな画質劣化となる場合がある。この不一致を解消するため、リフレッシュとして予測方式をフィールド内予測のみに固定するフィールドを周期的に設ける。この周期が短いほど符号誤りの解消は速いが、フィールド間予測が用いられる比率が減少するため、画質的には不利である。本符号化装置では、この強制的なフィールド内予測を 63 フィールド毎に設定した。なお、回線品質が低下した際には、この周期を短く設定することで、符号誤りによる画質劣化を低減するこ

図 4 予測値適応量子化特性の例
Example of quantizing characteristic of a prediction value adaptive quantizer.

とができる。

2.2 予測値適応量子化⁴⁾

予測符号化では、符号化する画素の値とその予測値との差、すなわち予測誤差を量子化する方法が一般的である。しかし、予測誤差値は画素値の 2 倍のダイナミックレンジを必要とするため、限られた量子化レベル数ではエッジ部に生じる勾配過負荷雑音が問題となる。この問題を解決する手段として、予測誤差値の範囲が予測によって限定されることを用いて、出現し得

ない符号を別の量子化レベルに割当てて符号を有効に利用する折り返し量子化器⁵⁾があるが、折り返し量子化の制約により、大きな予測誤差値に対して細かい量子化が行われ、視覚特性に適合した量子化特性とはなっていない。

本符号化装置で採用した予測値適応量子化器は、予測誤差値ではなく画素の値そのものを、予測値ごとに異なる量子化特性で量子化することにより、すべての符号を有効に利用し、しかも、制約なしに量子化特性を設計することができる。図3に予測値適応量子化器の構成を、図4に量子化特性とその符号割当の例を示す。従来、非線形量子化特性は予測誤差信号分布から設計されることが一般的であったが、この予測値適応量子化器では、予測値ごとに自由に量子化特性を設計することができ、量子化誤差電力を、従来の方法による最小値よりさらに低減することが可能である。また、画像の暗部や明部では、従来の予測誤差を量子化する方式では、半数の符号が出現し得ない無効な符号となってしまうが、予測値適応量子化によれば、すべての符号を有効に利用することができる。これは量子化ビット数の1ビットの改善に相当し、大振幅の予測誤差に生じる勾配過負荷雑音の低減に効果的である。

次に、予測値適応量子化における伝送路符号誤りの収束効果について述べる。予測値適応量子化に図4に示す符号割当を行うことにより、符号誤りの拡がりを抑圧させることができる。連続した実線は同一の符号で再構成される代表値を示しており、その実線の微係数 $|d \text{代表値} / d \text{予測値}|$ の絶対値が1以下であるから、符号誤りによって生じた予測値の誤り $|d \text{予測値}|$ より、代表値の誤り $|d \text{代表値}|$ が小さくなり、符号誤りの影響がしだいに解消される。この効果は量子化特性の非線形性が小さいほど大きく、PCM符号化の特性に近づいて行く。図5に予測値適応量子化と折り返し量子化についての伝送路符号誤りによる画質劣化の比較を示す。シミュレーションでは、フィールド内固定予測、固定長符号化(4ビット/サンプル)とし、予測関数と量子化特性を評価画像ごとに量子化誤差電力最小となるように最適化した。予測値適応量子化の採用により符号誤りによる画質劣化は5~6 dB改善される。

非線形量子化特性の設計では、MUSE信号の予測誤差信号分布をラプラス分布、

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{\sigma}|x|\right) \quad (1)$$

x : 画素値-予測値
によって近似し、予測誤差の出現範囲を考慮したうえ

予測係数のリークはフルーツ (0.99)、運河 (0.95)

図5 伝送路符号誤りによる画質劣化の比較
Comparison of picture degradation by transmission errors.

表1 非線形量子化パラメータ
Parameter of non-linear quantization.

予測 Y/C	フィールド間 予測量子化特性	フィールド内 予測量子化特性	間/内量子化特性 を同一にする場合
輝度	$\sigma=5$	$\sigma=25$	$\sigma=15$
色差	$\sigma=5$	$\sigma=15$	$\sigma=10$

差信号分布が近似式 $p(x) = \exp(-\sqrt{2}/\sigma|x|)/(\sqrt{2}\sigma)$ で表されるとして、量子化誤差電力が最小となる非線形量子化特性を設計する。ただし、 x : (画素値-予測値)であり、 $0 \leq \text{画素値} \leq 255$ であるから、 $(-\text{予測値}) \leq x \leq (255 - \text{予測値})$ の範囲で設計する。

で、2乗平均量子化誤差最小となる非線形量子化特性を用いることとした。 σ の値は実際の装置を用いた画質評価により最適化し、表1のとおり決定した。

なお、フィールド間/内で同一の量子化特性に設計すると、予測方式の判定を誤った場合に生じる画質劣化を低減することができ、伝送路の誤り率が誤り訂正能力を越える恐れがあるときに有効である。しかしながら、画像の平坦部に生じるグラニュラノイズが増加し、符号化画質がやや低下するため、実際の装置では採用しなかった。ただし、量子化テーブルの変更は容易であり、切り替えは可能である。

2.3 準可変長符号化⁶⁾

60 Mb/s 伝送は MUSE 信号の 1 画素当たり 3.7 ビットでの伝送に相当し、固定長符号化では 1 画素あたり 12 レベルの量子化に当たる。しかし、12 レベルではレベル数が不十分のためグラニュラノイズや静止したエッジにエッジビジネスが生じる場合がある。そこ

表 2 準可変長符号とバッファ制御
quasi-variable word-length code and bit-rate control.

量子化器	レベル数	長符号可変部 拡張ビット数	バッファ 占有量
Q ₀	8	0 b	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> ↑ 大 ↓ 小 </div> <div> 符号の例(Q₂) *:拡張ビット 111 *** 110 101 100 011 010 001 000 *** </div> </div>
Q ₁	14	2 b	
Q ₂	22	3 b	
Q ₂ '	22	3 b	

Q₂'では4画素毎に必ず長符号とする。すなわち、
 該当画素が短符号の場合3ビットのダミー符号を
 伝送する。非線形量子化特性はQ₂と共通。
 Q₁の場合は拡張ビットが2
 ビット(**)になる

で、短符号と長符号を用意し、発生確率の高い符号に短符号を割当ててことで、レベル数を拡大した。表2に示すように、バッファ占有量により3種類の量子化器を選択し、伝送ビットレートを一定に保つよう制御する。なお、量子化器の切り替えは、画像の部分的な劣化を避けるためフィールド単位とした。また、連続するフィールドではQ₀⇄Q₁⇄Q₂のように量子化器がなめらかに切り替わるようにバッファメモリ容量と量子化器切り替え閾値を設計した。

2.4 計算機シミュレーション

MUSE エンコーダのデジタル出力信号を計算機に取込み、シミュレーションによる符号化、復号化処理の後、計算機から取り出したデジタル信号をMUSE デコーダによりデコードした映像により、符号化画質の検討を行った。

計算機に接続された画像メモリの容量は64 MByteであり、約4秒間のMUSE信号のシミュレーションが行える。評価には静止領域と動き領域を持つ画像として「技研前交差点」、シーンチェンジを含む動画像として「ソウル・オリンピック」などを用いた。

フィールド間/内適応予測の導入により、フィールド間固定予測において画質劣化が顕著であった水平方向に移動するエッジが良好に再現されるようになった。また、静止領域ではフィールド内固定予測で生じていたグラニュラノイズが改善された。さらに、準可変長符号化により、平均量子化レベル数が拡大され、画質が改善されることが確かめられた。

表3に量子化誤差のS/N換算値を示す。フィールド間/内適応予測による量子化誤差電力の改善は、フィールド内固定予測との比較では0.4~2.6 dB、フィールド間固定予測との比較では0.6~9.4 dBである。

表 3 方式による量子化誤差電力の改善 (輝度信号)
Quantization error variance for each coding
scheme. (luminance signals)
 $S/N = 10 \log(255^2 / \text{量子化誤差電力})$ (dB)

方 式	交差点	オリンピック	シーンチェンジ
フィールド内 予測(12レベル)	39.2 (dB)	41.5 (dB)	41.7 (dB)
フィールド間 予測(12レベル)	40.3 (dB)	38.9 (dB)	32.7 (dB)
間/内適応予測 (12レベル)	46.9 (dB)	44.1 (dB)	42.1 (dB)
間/内適応予測 (短/長符号)	43.3 (dB)	48.0 (dB)	46.6 (dB)

交差点、オリンピックは連続する30フィールドの平均を、シーンチェンジはオリンピック内の1フィールドを用いた。

また、各々の評価画像において適応予測による量子化誤差電力は、いずれの固定予測と比較しても小さくなっており、予測モードが適切に選択されていることが確認できる。準可変長符号化による量子化誤差電力の改善は2.4~4.5 dBであり、レベル数に換算すると、固定長符号化では12レベルだったものが16~20レベルに拡大されたことに相当する。

各符号化アルゴリズムによるシステムの改善をサンプル当たりのビット数で表せば、フィールド間/内適応予測により0.1~1.6ビット、準可変長符号化により0.3~0.6ビットそれぞれ改善される。予測値適応量子化により、画像の暗部や明部では量子化レベル数が2倍になり、1ビットの改善に相当する。ただし、改善の対象は大振幅の予測誤差に限定されるため、符号化誤差電力としては顕著ではない。予測値適応量子化の採用による最大のメリットは、伝送路符号誤りによる画質劣化の低減であり、5~6 dBの改善が得られる。

3. 符号化装置の構成と伝送フォーマット

MUSE デジタル伝送用符号化・復号化装置の構成を図6に、諸元を表4に示す。また、写真1は製作した装置の外観である。

MUSE エンコーダでは、デジタル処理によりFM プリエンファシス、伝送路波形等化などを行っているが、符号化装置への入力信号は、それらの前段から取出した信号である。符号化装置の出力ならびに復号化装置への入力信号は、シリアルビットストリームとそのクロックである。復号化装置からは、FM プリエンファシス、伝送路等化フィルタ処理などを行った通常のアナログMUSE信号が出力される。また、記

図 6 符号化・復号化装置の構成
Block diagram of the coder and decoder.

表 4 符号化・復号化装置の諸元
Specifications of the coder and decoder.

符号器 入力信号	MUSE エンコーダデジタル出力 8 b, 16.2 MHz (129.6 Mb/s)
復号器 出力信号	MUSE アナログ信号 MUSE デジタル信号 (8 b, 16.2 MHz)
符 号 化	フィールド間/フィールド内適応予測符号化 予測値適応量子化 量子化特性 12 種 (輝度/色差, フィールド間/内, $Q_0/Q_1/Q_2$ の組合せ) 短/長 (3/5/6 b) 符号準可変長符号化
符 号 化 制 御	前ラインフィールド間差による予測方式切換 バッファメモリ占有量による量子化器切換 (長符号発生確率を制御)
誤り訂正	リードソロモン (255, 235), 1 ワード = 8 b インタリーブ長: 21 ワード 予測値適応型量子化器による誤り抑圧効果
伝送ビット レート	59.94 Mb/s
消費電力	230 VA (符号器) 340 VA (復号器)
外 形	444 (W) × 450 (D) × 204.5 (H) mm

録などの用途を考慮してデジタル MUSE 信号出力も備えている。

予測値適応量子化器は画素値と予測値を入力とするメモリのテーブル参照方式により構成し、輝度/色差、フィールド間/内、それぞれ独立に用意した。また、量子化特性および予測係数は ROM 交換あるいは外部機器からのローディングにより容易に変更可能である。

デジタル伝送フォーマットを図 7 に示す。1 ラインは映像信号の 1 水平ラインに対応している。映像デ

写真 1 装置の外観
Outview of the coder and decoder.

図 7 伝送フォーマット
Channel framing.

ータは可変長符号をそのまま伝送すると伝送路符号誤りにより、符号の同期がはずれた場合、符号誤りが連

続して発生するため、長符号を固定部（MSB 3 ビット）と可変部に分け、固定部を短符号（3 ビット）とともに位置多重して伝送する。また、12 ライン毎にバッファメモリアドレスを伝送し、符号の同期を回復する。

ビットストリームのなかには符号化した映像データのほかにフレーミングに必要なユニークコード、MUSE エンコードにより DPCM 圧縮された 1.35 Mb/s の音声データ、MUSE 信号内の制御信号、量子化器やバッファ占有量、リフレッシュフィールドなどの情報を示す復号化のための制御信号、ならびに誤り訂正符号がある。

誤り訂正符号は 255 ワード中 20 ワードを冗長ワードに用い、最大 10 ワードの誤りを訂正するリードソロモン RS(255,235) 符号を採用した（1 ワード = 8 b）。インタリーブ長は 21 ワードとし、最大 210 ワードのバースト誤りを訂正する。伝送フォーマット上では 25 ラインあたり 2 ラインを冗長ワードに用いる構成とした。

4. 室内伝送実験

衛星伝送実験に先立ち、符号化画質ならびに伝送路符号誤りの画質への影響を検証するため、図 8 に示した系統により製作した符号化・復号化装置と QPSK 変復調器を用いた室内伝送実験を行った。なお、実験に用いた QPSK 変復調器の諸元を表 5 に示す。

実際の番組素材を用いて、MUSE 処理のみを行った場合と MUSE 処理と本符号化処理を縦続接続した場合の画質を比較したところ、標準的な観視条件のもとでは、画質劣化はほとんど検知できなかった。また、フィールド内固定予測、フィールド間固定予測、固定長符号化などを採用した場合の符号化画質についても検討を行い、実際の装置によっても、フィールド間/内適応予測ならびに準可変長符号化の導入による画質の改善効果を確認した。

伝送路符号誤りの影響については、誤り訂正符号化

によりビット誤り率 10^{-4} が許容されることを確認した。実際の衛星回線を用いてデジタル伝送を行う場合、この程度の誤り率が許容されれば、十分なマージンをとって運用が可能である。さらに雑音付加レベルを大きくし、ビット誤り率を劣化させると、誤りによる画質劣化が検知されるようになる。特に、フィールド間/内の適応を復号器側で誤って判定した場合に、判定誤りが伝搬すると画質に与える影響が大きい。このような場合には、2 章で述べたフィールド間/内予測で用いる量子化特性を同一とする方法、フィールド内固定予測とする周期を短くする方法による誤りの影響の軽減が効果的であることが確認された。また、予測値適応量子化による符号誤りの収束効果も確認された。

5. む す び

MUSE 信号のビットレート低減方式を検討し、符号化装置を開発した。

本符号化装置をフランスとスペインで開催された 1992 年冬夏オリンピック大会のハイビジョン中継に

表 5 QPSK 変復調装置の諸元
Specifications of the QPSK modem.

変 調 器	入力信号	59.94 Mb/s シリアルデータ クロック
	出力信号	QPSK 変調信号
	信号レベル	中間周波数 140 MHz 0 dBm (75 Ω)
	伝送用フィルタ	20 % コサインロールオフ アパーチャ補正
	占有帯域幅(99%)	30.6 MHz
復 調 器	入力信号	QPSK 変調信号
	信号レベル	中間周波数 140 MHz -10 dBm ~ -30 dBm (75 Ω)
	復調方式	同期検波
	出力信号	59.94 Mb/s シリアルデータ クロック

図 8 室内伝送実験系統図
Block diagram of measurement system.

使用し、延べ32日間にわたって安定に運用した⁷⁾。現地には MUSE エンコーダ、本符号化装置、QPSK 変調器を配置し、インド洋上のインテルサット衛星を経由して KDD 山口衛星通信所において復調、復号化ののち通常のアナログ MUSE 信号として放送衛星 (BS-3) により放送した。

従来のアナログ MUSE 方式による国際中継と比較すると、S/N 劣化や波形歪みの問題が解消され、最終的な放送受信画質が改善された。また、国際衛星回線の確保や品質管理が容易になり、運用上の操作性も向上した。

今後も、海外からのハイビジョン中継に本符号化装置を使用し、高品質で魅力的なハイビジョン放送を実施していく予定である。

〔参 考 文 献〕

- 1) 本田，今泉ほか：“MUSE 信号の 60 Mb/s デジタル伝送方式”，テレビ学技報，14，20，pp.25-30，BCS'90-23 (1990)
- 2) 今泉ほか：“DPCM による MUSE 信号のデジタル伝送”，1989 年テレビ年次大，12-2 (1989)

- 3) 今泉ほか：“MUSE デジタル伝送装置における伝送路符号誤りの影響”，1992 年テレビ年次大，13-8 (1992)
- 4) 今泉ほか：“符号誤りを抑圧する予測値適応型量子化器の MUSE-DPCM 方式への応用”，1989 年画像符号化シンポジウム，5-6 (1989)
- 5) N. S. Jayant and P. Noll：“Digital Coding of Waveforms”，p. 286, Prentice-Hall, Inc., NJ (1984)
- 6) 今泉，本田：“60 Mb/s MUSE デジタル伝送方式”，1990 年テレビ年次大，27-6 (1990)
- 7) 田中，本田ほか：“MUSE-DPCM による国際衛星伝送”，テレビ学技報，16，26，pp.13-18，BCS'92-14 (1992)

いまい ぎみ ひろゆき

今泉 浩幸 昭和 60 年，東京工業大学大学院修士課程修了。同年，NHK に入局。福島放送局を経て，昭和 63 年より，放送技術研究所に勤務。ハイビジョンの高効率符号化方式の研究に従事。正会員。

ほん だ まさみ

本田 正巳 昭和 59 年，熊本大学大学院修士課程修了。同年，NHK に入局。大阪放送局を経て，63 年より，同技術局に勤務し，現在に至る。ハイビジョン放送システムの開発に従事。正会員。