

高品質動画像伝送における FEC の性能評価

近 堂 徹[†] 西 村 浩 二^{††} 相 原 玲 二^{††}
前 田 香 織^{†††} 大 塚 玉 記[†]

広帯域ネットワークの整備、普及により動画像伝送の本格的利用が期待されている。しかしながら、ベストエフォート型のネットワーク上で動画像伝送を行う場合にはパケット損失や遅延対策を考慮する必要があるが、一般的にこれらを完全に回避することは不可能である。特に、広帯域を利用する高品質動画像伝送ではパケット損失による影響も大きくなる。本論文では、高品質動画像伝送に前方誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction) を適用した場合の損失回復性能について、理論的側面と実験的側面の両側面から有効性に関して検証する。FEC を用いた動画像伝送システムのプロトタイプについて述べ、システムを利用して行った実測評価から導出する損失回復性能の理論式の妥当性を示す。さらに、広域ネットワークでのマルチキャスト配信の実証実験を通して、FEC を適用した場合のパケット損失回復性能の評価を行い、その有効性を示す。

Performance Evaluation of FEC for High Quality Video Transmission

TOHRU KONDO,[†] KOUJI NISHIMURA,^{††} REIJI AIBARA,^{††}
KAORI MAEDA^{†††} and TAMAKI OTSUKA[†]

In recent years, multimedia data such as motion pictures increases the Internet traffic because of the wide spread deployment of high-speed applications over the Internet. Nevertheless, current best-effort networks do not provide guaranteed resources such as bandwidth or guaranteed performance measures such as packet loss rate. Even though it is generally difficult to avoid these problems, we need to consider how to minimize the effects of such problems. To address these problems, FEC (Forward Error Correction) is effective mechanism in packet loss. In this paper, we verify the correctness of theoretical analysis of an FEC recovery performance through the observational experiment. Moreover, we show the effectiveness of an FEC with results of a multicast delivery experiment.

1. はじめに

IP トラフィックの爆発的増加により、バックボーン回線の高速化、一般家庭への高速通信網の普及整備が進んでいる。ISP (Internet Service Provider) と利用者間のアクセスネットワークは、xDSL (Digital Subscriber Line) や CATV (CABLE TV), FTTH (Fiber To The Home) の普及により、インターネット利用者が容易に高速ネットワークを構築できる環境が整いつつある。これにともないバックボーン回線の増強、

ルータのスイッチング性能の向上などによってバックボーンネットワークの高速化も急速に加速している。このような背景から、動画像伝送のような広帯域データがトラフィックの多くを占めるようになってきた。しかし、ベストエフォート型のインターネットでは、伝送路上には多くのルータが存在し、さらに他のトラフィックと共存する形が一般的である。このような環境下で動画像伝送を行おうとする場合、つねに変化するトラフィックがネットワーク品質にも影響を与える。パケット損失やジッタが発生し、それらが動画像や音声の品質低下をもたらすことが知られている¹⁾。さらに、動画像伝送では高速性を理由に UDP (User Datagram Protocol) を利用して伝送されるため、その信頼性は保証されず、パケット損失やジッタによる品質への影響が大きくなる。特に、広帯域を利用する高品質動画像では伝送する情報量が増えるため、狭帯域伝送の場合と比較して同一パケット損失率であっても 1 フレームあたりのデータの欠落数が多くなり、そ

[†] 広島大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

^{††} 広島大学情報メディア教育研究センター

Information Media Center, Hiroshima University

^{†††} 広島市立大学情報処理センター

Information Processing Center, Hiroshima City University

現在、日立ソフトウェアエンジニアリング株式会社

Presently with Hitachi Software Engineering Co., Ltd

の影響が大きくなる。MPEG2(Moving Picture Experts Group) などのフレーム間圧縮技術を使った高圧縮データの場合、データ欠落の影響はさらに大きくなる。

ネットワーク構築の観点から考えると、QoS(Quality of Service) を保証し高品質動画伝送に耐えうるため、パケット損失率を限りなく 0% に近づけるにはきわめて多大なコストが必要であり、帯域を共有するインターネットの優位性と相反する。アプリケーションがパケット損失対策などを施すことで要求されるネットワーク品質の許容範囲を指定できれば、ルータやネットワークの設計も容易となり、必要なコストも大幅に軽減される。したがって、広域ネットワークで動画伝送を考えるとパケット損失対策は必要不可欠である。

ネットワーク伝送でのパケット損失回復は大別すると、損失の検出を自動的に送信側に伝えて再送要求を出す自動再送要求 (ARQ: Automatic Repeat Request) 方式と情報ビットに冗長ビットを付加して伝送し、伝送の途中で発生したビット誤りを冗長ビットを利用して受信側で損失回復する前方誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction) 方式とに分けられる。一般的に、動画像や音声といったマルチメディアデータ伝送は IP マルチキャストによる利用が想定され、空間的スケーラビリティを考慮した場合は FEC によるパケット回復技術が有効である。

FEC によるパケット損失回復モデルは図 1 のように示すことができる。マルチメディアデータ伝送に対して FEC を適用する場合には、インタリーブ法²⁾が一般的に用いられる。これは、複数パケットデータを 1 つのユニットとし、ユニット含まれるデータパケットに対して垂直方向に FEC エンコーディング、デコーディングを行う手法である。この場合、パケットの回復性能はユニット内の全パケット数 N に対するデータパケット数 K の組合せで決まり、ユニット内で欠落したパケット e が $N - K$ 以下であるならば、FEC により復元可能である。ここで、FEC が対象とする誤りは雑音などによるビット誤りとシンボル自体の損失誤りの 2 つに分けられるが、本論文ではエラーはパケット損失によってのみ起こるものとする。

FEC を適用しマルチメディアデータ伝送に信頼性を提供する手法はこれまで数多くの研究、議論がなされている^{3),4)}。回復性能の解析的評価としては、FEC による損失パケット回復の性能評価に関する研究⁵⁾がある。これは、インターネット上でのパケット損失の実測データを採取し、その損失モデルに対して FEC を適用したときの回復性能について述べている。しか

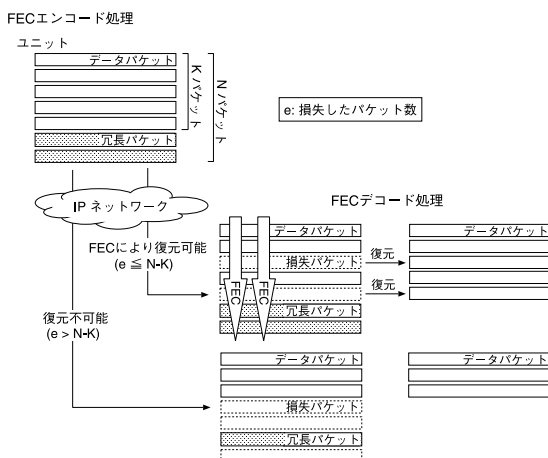


図 1 FEC によるパケット損失回復モデル
Fig. 1 FEC recovery model.

し、この損失モデルは 56 kbps の低ビットストリームを想定した実測データに基づく性能評価であり、実際に FEC を実装して評価されたものではない。

一方、IPv6 フラグメント処理⁶⁾を利用した FEC を付加する手法や QoS 保証された経路で FEC を利用した研究⁷⁾が行われており、この中で実際のメディアデータに対して FEC を適用し、その回復性能に関する評価が行われている。これらの中で示されている損失回復性能の理論式は、ユニット内で回復できない数のパケット損失が発生した際に、そのユニット内のすべてのパケットを破棄することを想定している。データパケットに加えて冗長パケットを伝送する FEC 方式の場合、正常に受信できたデータパケットはそのまま受信データとして利用できるため、そのことを考慮した理論式の導出と損失回復性能の評価が必要である。

今後のさらなる動画像トラフィックの増加にともない、個々のアプリケーションが要求する異なるネットワーク品質を効率良く保証することはますます難しくなってくると考えられる。アプリケーションごとに対策を行う場合を想定し、解析的評価とあわせて実ネットワーク上で実際に FEC を適用したときの損失回復性能に関する定量的評価を行うことで、FEC の有効性を検証する必要がある。

本論文では、まず FEC によるパケット損失回復機能を有する伝送システムのプロトタイプを実装する。次に、確率論から FEC のパケット損失回復性能の理論式を導出し、これと実装したシステムを用いて行った実測結果を比較することで本論文で示す解析的評価の妥当性を示す。さらに、システムを利用して実施した広域ネットワーク上での大規模マルチキャスト配信

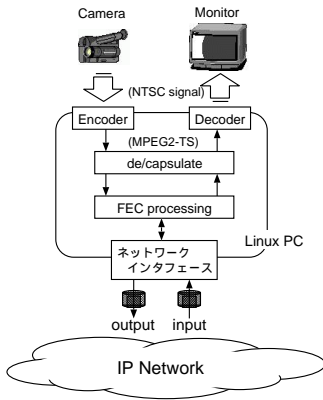


図2 伝送システムの構成
Fig. 2 The configuration of system.

の実証実験から FEC の有効性を示す．最後に，パラスト損失と FEC の損失回復性能について述べる．

2. 動画像伝送システムのプロトタイプ概要

FEC の性能評価の実測定を行うために，筆者らがすでに開発している MPEG2 over IP 伝送システム⁸⁾に FEC として RS (Reed-Solomon) 符号方式によるパケット損失回復機能を付加したシステムのプロトタイプを実装した．MPEG2 over IP 伝送システムは MPEG2 トランスポートストリーム (以下 MPEG2-TS) 形式の動画像データを IP ネットワークを通して伝送するシステムであり，IPv4/IPv6，IP マルチキャストにも対応している⁹⁾．

2.1 システム構成

プロトタイプシステム¹⁰⁾の処理概要を図2に示す．システムは PC-UNIX 上で開発を行っており，1 台の PC で送受信可能としている．

現時点では，エンコーダは Kfir MPEG2 encoder ，デコーダは CineView ， Video Plex Xpress に対応している．また，ATM 接続インタフェースを有するハードウェア MPEG2 CODEC にも対応，動作確認している．さらに，IEEE1394 入力および DVB-ASI 出力にも対応し SDTV から HDTV までの画像フォーマットをサポートする．

以下送信側，受信側の動作を示す．送信側ではまず NTSC 信号をエンコーダにより MPEG2-TS へ変換する．次に TS パケット (MPEG2-TS を伝送する際の固定長最小基本構成単位) 偶数個をカプセル化して固定長データを作る．FEC において固定長データが

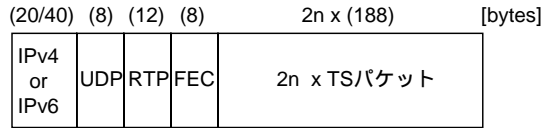


図3 パケットフォーマット
Fig. 3 Packet format.

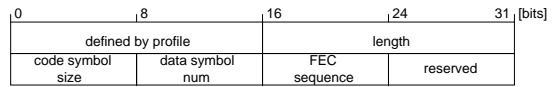


図4 FEC ヘッダフォーマット
Fig. 4 FEC header format.

ら冗長パケットを生成し，順に送信キューに格納する．最後に図3に示すパケットフォーマットに従い，FEC，RTP，UDP，IP の順に各ヘッダを付加して IP パケットを構成した後，ネットワークインタフェースから IP ネットワークを介して受信ノードに転送する．受信処理では送信処理の逆をたどり，受信したパケットから FEC により可能な限り損失パケットの復元と誤り訂正を行い，MPEG2-TS を再構成する．この際に FEC 復元不可能である場合は受信したデータパケットのみを出力する．

2.2 FEC 処理の実装

FEC のエンコード/デコード処理には RS 符号による FEC パッケージ¹¹⁾を用いてシンボル長 4 ビットの (15, K) コード (一般に K 個のデータパケットを冗長化し，N 個のパケットを生成する方法を (N, K) コードと呼ぶ) を実装した．FEC エンコード/デコード処理は図1と同様に，複数パケットデータに対して垂直方向に FEC を行う．

システムは，IPv4/v6，IP マルチキャストにも対応しており，UDP と RTP を用いる．RTP はリアルタイム性の要求されるマルチメディアデータ伝送に一般的に用いられる．FEC ヘッダは RTP の拡張ヘッダとして現在実装している．RTP 拡張が理解できないノードではこの FEC ヘッダは無視されるため，FEC ヘッダに対応していない受信ノードにおいても悪影響を及ぼさない．ペイロードには MPEG2-TS パケットを偶数個カプセル化する．図4に示される FEC ヘッダフォーマットの defined by profile，length フィールドは RTP 拡張で定義された固定フィールドであり，defined by profile は 0 とする．CS，DS，FEC シーケンスフィールドを追加して FEC ヘッダとした．

ユニット内でのパケット順序は FEC シーケンスによって示される (CS: Code Symbol size，DS: Data Symbol number，FEC シーケンスは図4で示される

<http://www.linuxtv.org/mpeg2/index.html>
<http://www.vela.com/> [現在製造中止]
<http://www.optibase.com/html/index.html>

FEC ヘッド中の各フィールドに対応). CS はビット単位のシンボルの長さ (一連の FEC 処理ユニットに含まれるパケットの数は $2^{CS} - 1$ 個) で, DS はデータシンボルの長さ (データパケットの個数) である. RS 符号は複数個の連続したビット単位 (シンボル) の誤りを訂正することが可能で高度な訂正能力を持つ反面, 複雑な演算による処理速度がネックになりやすい. そこで処理速度, 処理遅延, 処理の単純化を考慮して 1 シンボル 4 ビット ($CS = 4$) とした. そのためパケット 15 個 ($2^{CS} - 1$) を 1 つのユニット (そのうち DS 個がデータパケット) として処理している.

本プロトタイプの実装では, FEC の回復性能の評価に重点を置いているため, FEC によって生成されるのはデータ部分のみで, ヘッド (IP, UDP, RTP, FEC) は冗長化しない.

3. FEC の性能評価

FEC の損失回復性能について評価する. ネットワークのパケット損失率に対する RS 符号による FEC 復元後のパケット損失率の理論式を導出し, LAN 環境における実測定と比較することで, 導出する理論式の妥当性と FEC の有効性を示す.

3.1 理論値の導出

計算では図 1 で示した回復性能モデルを用いる. ユニット内で復元不可能なパケット損失が発生した場合でも, その中で正常に受信されたデータパケットはそのまま受信データとして扱う. FEC は (N, K) 符号とし, 各パケットの損失は独立して発生すると仮定し 2 項分布でモデル化する. すなわち, 理論値の導出においては, FEC による冗長データを付加することで輻輳状態が誘発されるようなことはなく, 高品質動画を伝送するのに十分な帯域が確保されており, 各パケットの損失にも相関のないものと仮定している.

個々のパケットの損失率を p としたとき, FEC 復元後のパケット損失率の理論値は次のように導出できる: N, K, p を入力パラメータとし, FEC 復元後の損失パケット数の期待値を求め, K で除算すると FEC 復元後のパケット損失率の理論値が得られる. データパケット K 個の中から FEC 復元後に i 個損失しているという事象を X_i とし, X_i が起こる確率 $P[X_i]$ を以下計算する.

$i \neq 0$ の場合は以下の式で表すことができる.

$$P[X_i] = \binom{K}{i} p^i (1-p)^{K-i} \sum_{j=t}^{N-K} \binom{N-K}{j} p^j (1-p)^{N-K-j}. \quad (1)$$

$$t = \begin{cases} 0 & (N-K < i \leq K) \\ N-K-i+1 & (0 < i \leq N-K) \end{cases}$$

式 (1) は復元できなかったデータパケットが存在する場合について考えている. これには 2 通りの状況が存在する. 1 つはデータパケットの損失のみで $N-K$ を超える場合, もう 1 つはデータパケットと冗長パケット合わせて $N-K$ を超える場合である. 前者 ($N-K < i \leq K$) の場合, 冗長パケット中の損失の有無に関係なく復元できない. つまり, 冗長パケットが損失する場合すべての和となる. よって $t = 0$ となり, \sum の値が 1 となることに注意が必要である. 後者 ($0 < i \leq N-K$) の場合, FEC により復元できないのは冗長パケット中の損失が $N-K-i+1$ から $N-K$ 個までのときとなる. ゆえに, t はデータパケットの損失が冗長度を超える境界で場合分けする必要がある.

$i = 0$ の場合はすべての損失パケットが復元できる場合である. ゆえに損失パケット数が許容範囲内でないといけないので

$$P[X_0] = \sum_{j=0}^{N-K} \binom{N-K}{j} p^j (1-p)^{N-K-j}. \quad (2)$$

損失パケット数の期待値を $E[X]$ とすると $E[X] = \sum_{i=0}^K iP[X_i]$ であるので, パケット損失率 $P[X]$ は次のようになる.

$$P[X] = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K iP[X_i] = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K i \binom{K}{i} p^i (1-p)^{K-i} \sum_{j=t}^{N-K} \binom{N-K}{j} p^j (1-p)^{N-K-j}. \quad (3)$$

$$t = \begin{cases} 0 & (N-K < i \leq K) \\ N-K-i+1 & (0 < i \leq N-K) \end{cases}$$

3.2 ロス発生器による実測定

3.2.1 測定方法

図 5, 表 1 に測定に使用した機器とその構成をそれぞれ示す. 測定では, システムを用い送信ホストからロス発生器経由で受信ホストへ転送する. その際ロス発生器では 0, 2, 4, 6, 8, 10% の確率でパケット損失をランダムに発生させた. ロス発生器はソフトウェアで動作し, 疑似乱数をもとにパケットを破棄するか否かを決定する. ランダム損失を発生させるロス発生器を用いて性能評価を行うことで, 実験的側面から理

表 1 使用機器の仕様

Table 1 Specification of hosts.

	送信ホスト	ロス発生器	受信ホスト
CPU	PentiumIV-2 GHz	PentiumIV-2.5 GHz	PentiumIV-1.9 GHz
memory	128 MB	1024 MB	256 MB
OS	Vine 2.1.5	Vine 2.6	Vine 2.5
encoder/ decoder	Kfir MPEG encoder		Video Plex Xpress

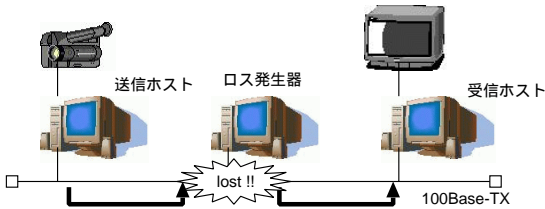


図 5 FEC 回復性能の実測定環境

Fig. 5 Experiment environment for FEC performance measurement.

論式の妥当性を確認する。

FEC は $(15, K)$ を使用し, K を 11, 12, 13 と変化させ, それぞれの場合について受信ホストで FEC 復元前後の packets 損失率を 1 時間測定した。

3.2.2 測定結果と考察

packets 損失率の測定結果とともに式 (3) から算出した各冗長度の理論値を図 6 に示す。横軸は FEC 復元前の packets 損失率, 縦軸は復元後の packets 損失率である。なお, 測定ではロス発生器で入力パラメータとして指定した損失率と受信側で記録された FEC 復元前の損失率が異なっていたため, 結果の理論値は実際に生じたネットワーク損失率を基に算出している。

両者の結果を比較すると, 実測定における回復性能が理論値とほぼ一致していることが分かる。理論値と実測値の誤差は最大でも 0.009% 以内に収まっていた。この結果から, 本理論式をネットワークの packets 損失率に対して FEC 復元後のメディアデータの損失率を計算するうえでの 1 つの指標とすることが可能であると考える。

3.3 パリティ符号との比較

他の方式としてパリティ符号を用いた場合の損失回復性能を計算し, 比較する。この方式は RFC2733¹²⁾ で標準化された, マルチメディアデータ伝送にパリティ符号を利用する手法である。

データ packets 数を K 個, その中からパリティチェック後に i 個損失しているという事象を X_i , 各 packets の packets 損失率を p とし, packets の損失確率 P_i を計算する。まずパリティチェック後の packets 損失が 0 個となる確率は全 packets ($K+1$) 個が届く

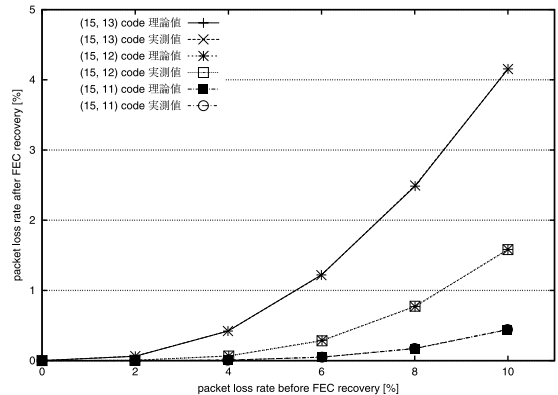


図 6 RS 符号を用いた場合の FEC 性能測定結果

Fig. 6 FEC performance in the case of RS code.

場合とデータ packets K 個が届き, パリティ packets が損失する場合がありますので

$$\begin{aligned} P[X_0] &= (1-p)^{K+1} + {}_{K+1}C_1 p(1-p)^K \\ &= (1+Kp)(1-p)^K. \end{aligned} \quad (4)$$

$i=1$ の場合はデータ packets K 個中 1 個が損失かつパリティ packets も損失する場合であるので

$$\begin{aligned} P[X_1] &= {}_K C_1 p(1-p)^{K-1} \times p \\ &= Kp^2(1-p)^{K-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

$i \geq 2$ 個の場合はデータ packets K 個中から i 個損失する場合であるので

$$P[X_i] = {}_K C_i p^i (1-p)^{K-i}. \quad (6)$$

パリティチェック後の損失 packets 数の期待値を $E[X]$ とすると, $E[X] = \sum_{i=0}^K i P[X_i]$ で表せるので, パリティチェック後の packets 損失率 $P[X] = E[X]/K$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} P[X] &= p^2(1-p)^{K-1} \\ &+ \frac{1}{K} \sum_{i=2}^K i {}_K C_i p^i (1-p)^{K-i}. \end{aligned} \quad (7)$$

packets 損失率を 0% から 10% まで 2% ずつ変化させた場合の式 (7) に基づくパリティチェック後の packets 損失率の変化を図 7 に示す。

図 6 の RS 符号方式と比較すると, RS 符号方式の方が付加する冗長 packets の個数を増やすに従って大きく packets 損失率が改善されていることが分かる。

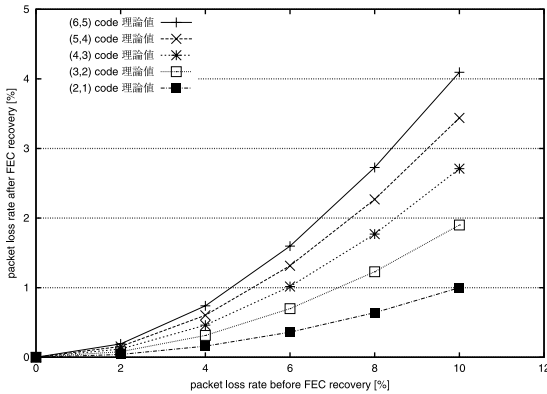


図 7 パリティ符号を用いた場合の性能測定

Fig. 7 FEC performance in the case of parity code.

表 2 帯域増加量の比較

Table 2 Comparison of the amount of increases in bandwidth.

Reed-Solomon 符号		パリティ符号	
FEC	帯域増加量 [倍]	FEC	帯域増加量 [倍]
(15, 13)	1.15	(6, 5)	1.2
(15, 12)	1.25	(5, 4)	1.25
(15, 11)	1.36	(4, 3)	1.33
		(3, 2)	1.5
		(2, 1)	2.0

特に (15, 13) から (15, 12) において回復性能の差が顕著に現れている。また、表 2 にこのときの帯域増加量の理論値を示す。この点を含めて比較すると、1.25 倍の帯域となる RS (15, 12) 符号とパリティ (5, 4) 符号では、RS 符号による FEC の方が復元後の損失率がかなり改善されていることが分かり、RS (15, 12) 符号がパリティ (2, 1) 符号とほぼ同じ復元能力を有していることが分かる。

3.4 FEC 処理による CPU 負荷の測定

RS 符号による FEC は、処理過程において複雑な演算を多用するために処理速度がボトルネックとなる可能性がある。特に高ビットレートの高品質動画伝送に対して適用する場合、実時間で実現可能かどうか重要な問題となる。そこで、FEC デコード処理にともなう処理負荷を調べるために、伝送帯域とパケット損失率の変化にともなう受信処理の負荷について測定した。測定は図 5 の環境で行い、送信ホストでは、任意に指定した帯域を実現するストリームに対して FEC 処理を行うことが可能なソフトウェアを利用した¹³⁾。FEC は (15, 13) 符号とし、評価の指標として CPU 使用率を用いた。ここで CPU 使用率は CPU 総時間 100% からアイドル時間の割合を差し引いたものと定義する。

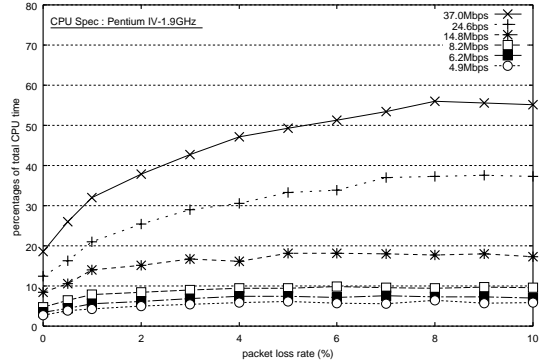


図 8 FEC デコード時の CPU 使用率 : (15, 13) 符号

Fig. 8 CPU activity ratio by FEC decoding.

図 8 に測定結果を示す。なお、各測定点は 1 分間とし、1 秒間隔で取得した CPU 使用率の平均を代表値としている。結果より、伝送帯域の増加につれて CPU 使用率も上昇しており、またパケット損失率の上昇による負荷も伝送帯域の増加に比例して影響を大きく受けている。しかし、本システムのように動画のエンコード、デコードをハードウェア処理とし、FEC 処理のために CPU を優先的に割り当てることが可能ならば、数 Mbps 程度のストリームに対してソフトウェア FEC で十分実現可能であることが分かる。

FEC 処理を行うことにより発生する遅延はユニットを形成するためのパケットバッファリング時間と FEC 処理時間の合計となる。例として (15, 13) 符号で 6 Mbps のストリームを本システムで伝送し FEC デコード処理が必要な場合は、約 25 msec となり 1 フレーム程度の遅延 (揺らぎ) が発生するが、これによる映像への影響は確認されなかった。また、冗長度を上げることにより CPU 負荷は増加するが、本システムでは 6 Mbps, 30 fps のストリームに対して (15, 7) 符号までリアルタイム処理で正常に動作することを確認している。

4. 広域ネットワークを用いたマルチキャスト配信実験

実装したシステムを用いて実施した広域ネットワーク上でのマルチキャスト配信の実証実験を通して、実ネットワークにおける回復性能評価について述べる。

4.1 実験概要

実証実験では、マメ de がんすプロジェクトに参加する広島市内の小学校など 4 拠点と研究開発用ギガビットネットワークである Japan Gigabit Network

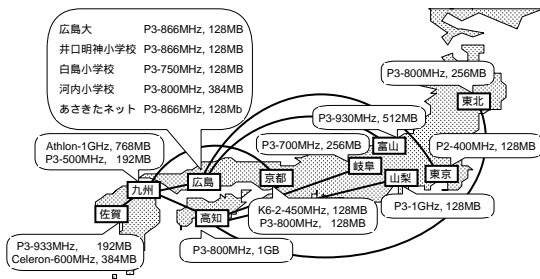


図 9 マルチキャスト配信の実証実験の接続図
Fig. 9 Network composition in an experiment of multicast broadcasting.

表 3 各受信拠点のケット損失率

Table 3 Rate of packet loss in each receiving location.

受信拠点	ケット損失率 [%]		
	FEC 前	FEC 後	
	実測値	実測値	理論値
広島大学	0.00062	0.00025	0.21×10^{-11}
井口明神小学校	0.40449	0.00069	0.00058
白島小学校	0.40526	0.00015	0.00059
河内小学校	0.40033	0.00025	0.00057
あさきたネット	0.40034	0.00025	0.00057
富山	0.40792	0.00021	0.00060
東京	0.20653	—	
九州	0.40115	0.00026	0.00057
	0.40518	0.00225	0.00059
佐賀	0.40243	0.00134	0.00057
	0.40225	0.00133	0.00057
京都	0.41219	0.00555	0.00062
	0.40786	0.00446	0.00060
高知	0.40255	0.00193	0.00058
岐阜	0.40094	0.00052	0.00057
東北	0.37727	—	
山梨	0.40312	0.00226	0.00058

(JGN) 上の 9 拠点を接続する IP マルチキャスト網を図 9 に示すように構築した。そしてライブ! エクリプス実行委員会 の実施する皆既日食ライブ中継を全 14 拠点へマルチキャスト伝送を行った。伝送に使用した FEC は (15, 13) 符号であり、伝送速度は MPEG2-TS レートで 4 Mbps に設定、IP/UDP/RTP ヘッダおよび FEC のオーバーヘッドを含めると約 5 Mbps であった。

4.2 実験結果と考察

各拠点における FEC 復元前後のケット損失率測定結果を表 3 に示す。表には、実測値とともに FEC 復元前の測定値を基に式 (3) から算出した理論値も示している。本実験での実測値は、受信ホストの負荷を考慮し 1 秒ごとに表示される FEC 復元前後の損失率

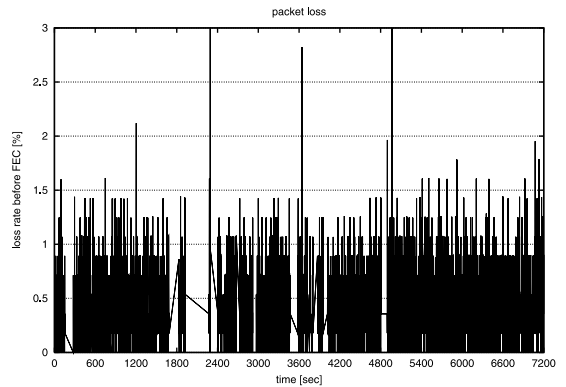


図 10 京都におけるケット損失率の変動 (FEC 復元前)
Fig. 10 Fluctuation of packet loss in Kyoto (before FEC).

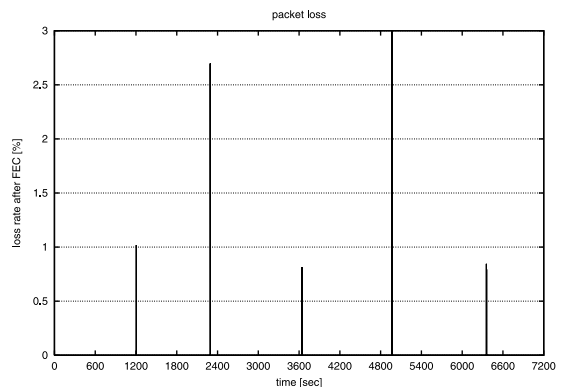


図 11 京都におけるケット損失率の変動 (FEC 復元後)
Fig. 11 Fluctuation of packet loss in Kyoto (after FEC).

から算出している。FEC 復元前の損失率は冗長ケットも含めた値、復元後はデータケットのみを対象として計算し、2 時間の損失率の平均を実測値とした。なお、各拠点の測定結果で白島小学校と富山は後半 1 時間の受信統計から算出した結果である。

その結果、ほとんどの拠点において受信時のケット損失率約 0.4% であったのに対し、FEC 復元後には各拠点いずれも損失が抑えられている結果が得られた。損失の原因としては、回線自体で生じる損失やマルチキャストルータにおけるルーティング処理能力によるものが考えられる。損失の時間的推移の一例として、京都における FEC 復元前後のケット損失率の変動を 1 秒ごとにプロットしたものを図 10、図 11 に示す。今回の配信実験では、他のトラフィックの影響をほとんど受けず帯域を占有できるようなマルチキャストネットワークを構築し実験を行ったが、そのような環境下でもケット損失が発生し、損失率が時間的に変動している様子が見られる。これは、他の拠点においても同じ傾向であった。

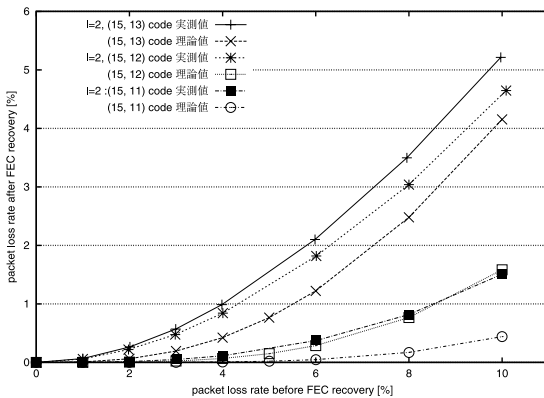


図 12 損失長の変化にともなう FEC 回復性能評価

Fig. 12 Recovery performance with burst length.

図 10 から分かるように、実験期間中に回復できない損失が合計 10 秒間観測されていた。FEC 復元後の平均損失率が最大で 3% を超えたときもあり、1 秒間に集中し発生したパケット損失が FEC 復元後の損失率を引き上げ、理論値との相違が生じたと考えられる。

しかし、本実証実験のような他のトラフィックと共有しないような環境下でも一定のパケット損失は発生し、FEC を適用することにより図 10 に示すようにほぼ毎秒観測されていたパケット損失を図 11 まで復元することができたことから、FEC が効果的に機能していたといえる。

5. FEC とバースト損失に関する考察

3 章では、各パケット損失が独立して発生すると仮定した FEC の損失回復性能について理論的評価と実測評価からその有効性について示してきた。しかし、インターネット上での損失には各パケット間に高い相関があり、連続してパケット損失が発生する場合がある。これは有限キュー長を持つルータのバッファ機構などによる影響と考えられる。ここでは、連続して発生するパケット損失をバースト損失とし、その長さをバースト長 l と定義する。パケット損失率 p が一定でバースト損失長 l が変化したときの損失回復性能について示し、バースト損失が与える影響とそれに対する解決策について述べる。

パケットロス発生器を、上記の条件を満たすように拡張し、実測定を行った。図 5 と同様な環境で $l = 2$ としたときの損失回復性能を求め、各パケットが独立して損失するモデル ($l = 1$) から導出した理論値との違いを図 12 に示す。いずれの冗長さの場合でも、バースト長が大きくなると FEC 復元後の損失率が上昇することが分かる。また、バースト長が大きくなっ

た場合、冗長度を大きくすることで FEC 復元後の損失率を小さくすることが可能であることも分かる。

6. おわりに

本論文では RS 符号方式による FEC の損失パケット回復性能について理論的、および実験的な両側面からその有効性に関する検証を行った。さらに、実ネットワーク上でのマルチキャスト配信の実証実験を通して FEC の回復性能の定量的評価を行い、その有効性に関して述べた。しかしながら、実証実験においてはバースト性が損失回復性能に与える影響について詳細に調べることができなかったために、バースト損失に対する FEC の回復性能の実測評価を行った。その結果から、バースト性とパケット損失率は冗長さの変化に対して同じ傾向の回復性能を示すことから、その解決方法として冗長度を変更する方法をとった場合の損失回復性能がどれだけ改善されるかを示した。

これまでマルチメディアデータ伝送において FEC を適用する手法は多くの研究がなされ、必要不可欠な技術となっている。本論文での実証実験結果から、アプリケーションによるパケット損失対策が効果的に機能し、これがネットワーク構築のコストを軽減する手法として有効であることを示した。また、事前測定などによってネットワーク品質（パケット損失率、バースト性）が既知であるならば、本論文で示した理論値および実測値は、ユーザやアプリケーションの要求を満たす品質を実現するための冗長度を決定する 1 つの指標となる。

本論文ではパケット損失モデルとして二項分布を用いて理論値の導出を行っており、よりインターネット環境に近いバースト性を考慮したモデルの検討と理論的評価が今後の課題である。さらに、他のトラフィックが共存する環境下での有効性に関する詳細な検証やバースト損失への耐性を強化したシステムの提案も行う必要がある。

謝辞 本研究の一部は、特定非営利活動法人中国・四国インターネット協議会 (CSI)、広島市立大学特定研究 (1803)、通信・放送機構ギガビットネットワーク利活用研究開発制度 (JGN-P341005, JGN-G13013)、日本学術振興会科学研究補助金 (15700515)、インターネット技術第 163 委員会 (ITRC)、ライブ!エクリプス 2001 実行委員会、沖電気工業株式会社、JGN RIBB プロジェクト (リーダー 麗澤大学林英輔教授)、JGN JB プロジェクト (リーダー 慶應義塾大学村井純教授) の支援を受けて実施しています。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Nishimura, K., Aibara, R., Ohtsuka, T. and Kondo, T.: An MPEG2 Transfer System using IPv6 Multicast and IPsec, *Proc. 7th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2001)*, pp.578-581 (2001).
- 2) 山内長承: 補償度クラス別前方誤り訂正を用いたインターネットマルチメディア転送, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.2, pp.206-212 (2001).
- 3) Luby, M., Vicisano, L., Gemmell, J., Rizzo, L., Handley, M. and Crowcroft, J.: Forward Error Correction (FEC) Building Block, RFC3452 (Dec. 2002).
- 4) Rizzo, L.: Effective Erasure Codes for Reliable Computer Communication Protocols, *Proc. ACM Computer Communication Review*, Vol.27, No.2, pp.23-36 (1997).
- 5) 田沢 力, 山内長承: Forward Error Correction による損失パケット回復の性能評価, *Proc. Internet Conference 2001 (IC2001)*, pp.41-48 (Nov. 2001).
- 6) 米山清二郎, 砂原秀樹: FEC on IPv6 for Reliable Multicast, *Proc. Internet Conference 2000 (IC2000)* (Nov. 2000).
- 7) 古村隆明, 藤川賢治, 池田克夫: QoS 保証された経路での前方誤り訂正の利用, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム 2001, pp.633-638, 情報処理学会 (2001).
- 8) 広島大学情報メディア教育研究センター: Webpage of mpeg2ts. on-line available at <http://net.ipc.hiroshima-u.ac.jp/mpeg2ts>
- 9) 相原玲二, 西村浩二, 大塚玉記, 近堂 徹: IPv6 マルチキャストに対応した MPEG2 伝送システム, 分散システム/インターネット運用技術シンポジウム 2001, pp.69-74, 情報処理学会 (2001).
- 10) 大塚玉記, 西村浩二, 相原玲二, 前田香織: FEC を用いた MPEG2 over IP システムの開発と評価, 情報処理学会研究報告, 2001-DSM-24-8, pp.43-48 (2001).
- 11) Karn, P.: Digital Signal Processing. on-line available at <http://www.ka9q.net/code/fec>
- 12) Rosenberg, J. and Schulzrinne, H.: An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction, RFC2733 (Dec. 1999).
- 13) 相原玲二, 西村浩二, 近堂 徹, 前田香織, 渡辺健次: HDTV MPEG2 over IPv6 システムの開発, 信学技報, IA2002-19, pp.7-12, 電子情報通信学会 (2002).

(平成 15 年 5 月 9 日受付)

(平成 15 年 10 月 16 日採録)



近堂 徹 (学生会員)

2001 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業. 2003 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了. 現在, 同大学院工学研究科博士課程後期在学中. IP ネットワーク上の高品質動画像伝送に関する研究に従事.



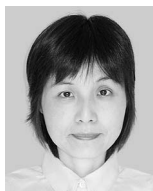
西村 浩二 (正会員)

1989 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業. 1991 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了. 全日空システム企画(株)を経て, 現在, 広島大学情報メディア教育研究センター助手. 博士(工学). マルチメディア機器のリアルタイム遠隔制御, ATM ネットワークの管理に関する研究に従事. 電子情報通信学会会員.



相原 玲二 (正会員)

1981 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業. 1986 年同大学大学院博士課程修了. 同大学同学部助手, 同大学集積化システム研究センター助教を経て, 現在, 同大学情報メディア教育研究センター教授. 工学博士. コンピュータネットワークの研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE Computer Society, Communications Society 各会員.



前田 香織 (正会員)

1982 年広島大学総合科学部卒業. 広島大学工学部助手(財)放射線影響研究所技術員, 広島市立大学情報科学部助手を経て, 1999 年より広島市立大学情報処理センター助教授. 博士(情報工学). コンピュータネットワーク, マルチメディア情報通信に関する研究に従事. 電子情報通信学会, 教育システム情報学会各会員.



大塚 玉記 (正会員)

2000 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業. 2002 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了. 現在, 日立ソフトウェアエンジニアリング株式会社. 動画像の伝送に関する研究に従事.