

## MPEG2 over IPv6 システムの開発と皆既日食中継実験

相原玲二<sup>†</sup> 大塚玉記<sup>‡</sup> 近堂 徹<sup>‡</sup> 西村浩二<sup>†</sup> 前田香織<sup>‡‡</sup>

<sup>†</sup> 広島大学情報メディア教育研究センター

<sup>‡</sup> 広島大学大学院工学研究科

<sup>‡‡</sup> 広島市立大学情報処理センター

あらまし

広帯域 IPv6 インターネット上での高品質画像伝送を行うため、マルチキャスト等に対応する MPEG2 伝送システムを開発した。高品質画像をリアルタイムに伝送するには、パケットロスや伝送遅延ゆらぎのないネットワークが要求されるが、現実には実現困難であり、前方誤り訂正 (FEC) 機能等を持つ伝送システムが必要となる。本稿では、開発した FEC 機能を持つ MPEG2 over IPv6 システムについて述べる。また、アフリカ南部で観測された皆既日食の JGN 回線などを利用した中継実験について紹介する。この実験では、全国 9 地点 (広島を除く) および広島市内 4 地点へ MPEG2 画像を IP マルチキャストにて伝送し、合計 700 名以上の参加者が 2 時間にわたりその中継映像を観察した。その際得られた実測データをもとに、誤り訂正機能が極めて効果的に機能したことを示す。

キーワード: MPEG2, IPv6, IP マルチキャスト, 動画像伝送

## Development of an MPEG2 over IPv6 System and Live Broadcast on the Solar Eclipse

Reiji AIBARA<sup>†</sup> Tamaki OTSUKA<sup>‡</sup> Tohru KONDO<sup>‡</sup> Kouji NISHIMURA<sup>†</sup> Kaori MAEDA<sup>‡‡</sup>

<sup>†</sup> Information Media Center, Hiroshima University

<sup>‡</sup> Graduate School of Engineering, Hiroshima University

<sup>‡‡</sup> Information Processing Center, Hiroshima City University

### Abstract

We developed an MPEG2 over IPv6 transfer system for broadband networks providing IP multicasting. Real-Time transfer of high quality moving pictures requires network without packet loss nor jitter of network delay. We introduced the forward error correction (FEC) to avoid the packet loss influences. In this paper, we describe the MPEG2 over IPv6 system with FEC function. Moreover, we demonstrate the results of an experiment of live broadcast of the solar eclipse observed at region of South Africa on June 21st, 2001. We fed MPEG2 pictures by IP multicasting to 9 locations in Japan, and 4 points in Hiroshima city. We show the effectiveness of the system with FEC function that we developed using results of the experiment.

**Keywords:** MPEG2, IPv6, IP Multicast, Moving Picture Transimission

## 1 はじめに

近年インターネット上を流れる情報は映像、音声を含むマルチメディア情報がその多くを占めるようになってきた。リアルタイムにマルチメディア情報を再生、転送

するアプリケーションもさまざまであるが、これまでは通信帯域の制限により低品質の動画像が主に利用されていた。しかし最近では通信帯域も拡大し、高速通信網の整備普及が進んでいるため、高品質動画像伝送への

期待はいつそう高まっている。一方、Internet Protocol version 6 (IPv6)[1] が次世代インターネットの通信方式として、各方面で研究開発が進められている。IPv6 では1対多の通信を実現するマルチキャスト機能が標準でサポートされ、動画像放送への本格的利用が期待されている。

そのような中で画像圧縮方式である MPEG2[2] はデジタル放送にも採用され、動画像伝送の標準方式となりつつある。さらに高品質、高圧縮率という特徴がある。高品質を提供する画像圧縮方式として MPEG2 のほか DV 方式もあるがフレーム間圧縮を行う MPEG2 方式と行なわない DV 方式では圧縮率の点で大きな違いがある。またテレビ品質 (SDTV) で比較すると画像フレーム間圧縮を行なう MPEG2 方式の方が圧縮遅延は若干大きくはなるが、画像自体の品質にそれほど大きな差は見られない。我々は帯域圧縮率の高い MPEG2 を IPv4/IPv6 ネットワークにて伝送を行なうシステム [3][4] を構築してきたが MPEG2 方式はもともと低品質回線での使用は考えられておらず、フレーム間圧縮を行っているためパケット損失に対して脆いという側面もある。そこで FEC (Forward Error Correction: 前方誤り訂正) を導入することによりこの点の改善を図った。本稿では通信・放送機構の研究開発用ギガビットネットワーク (以下、JGN) などを使用した、広域ネットワーク実験の実測結果を基に、本システムの有効性を示す。

## 2 MPEG2 over IPv6 システム

我々が構築してきた MPEG2 over IPv6 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 IPv4/IPv6 ネットワークを通して伝送するシステムであり、IP マルチキャストにも対応している。これまで IPsec (IP Security) を併用した場合の通常のテレビ品質 (SDTV) 画像や高品質テレビ (HDTV) 画像の伝送実験などを行ってきた。しかし、MPEG2 は画像フレーム間圧縮により高圧縮率を実現しているためわずかのパケット損失でも画像の乱れが顕著に現れるため、広域ネットワークでの使用を考えるとパケット損失対策が必須であることが分かっている。

## 2.1 Forward Error Correction

ネットワーク伝送での誤り訂正は、誤り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 (Automatic Repeat Request: ARQ) 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ビット訂正する前方誤り訂正 (Forward Error Correction: FEC) 方式とに大別できる。遠隔会議や遠隔講義など、リアルタイム性が強く要求され、さらにマルチキャストされる可能性がある通信においては誤り制御方式として FEC が用いられる [7]。

誤りを検出、訂正する能力は FEC に使用する符号化方式によって違いがある。パリティ符号化を用いる FEC のための RTP (Real-Time Transport Protocol) [5] フォーマットが RFC2733 [6] として標準化されている。RFC2733 では RTP ヘッダの特定フィールドについても冗長化され、可変長データにも対応している。また、データパケットと冗長パケットは別ストリームとして伝送され、後方互換性を提供する。しかし、後述するように、冗長度に対する誤り訂正能力は低い。

Reed-Solomon 符号は誤り訂正符号の一つであり、連続した複数ビット単位 (シンボル) で誤りの検出、訂正をすることが可能である。一般にビット誤りが集中して発生するバースト誤りに強いといわれており、無線通信や DSL モデム、デジタルテレビ放送などに広く用いられている。特長としてデータ部分をエンコードしないため、Reed-Solomon 符号方式を認識しないノードではデコード処理の必要がなく、冗長部分のみを取り除くことで元のデータを得られるという点が挙げられる。一方、処理過程に複雑な演算を多用するために処理速度の低下を引き起こすという問題もある。

## 2.2 システムの処理概要

本システムの処理概要を図1に示す。本システムでは送信と受信は1台の Linux マシンで動作可能である。エンコーダとデコーダにはそれぞれカメラとモニタが NTSC インターフェースにて接続される。現在の実装では、エ

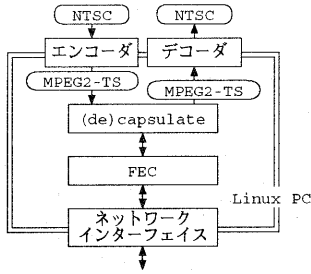


図 1: 伝送システムの処理.

ンコーダには Kfir MPEG2 encoder[8]、デコーダには CineView[9] または Optibase VideoPlex XPress[10] が使用可能である。これらはいずれも PCI カードである。

以下、送信側と受信側の動作を簡単に示す。送信側では NTSC 信号をエンコーダにより MPEG2-TS へ変換し、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 部において固定長データか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 FEC, RTP, UDP, IP の各ヘッダを付加し IP パケットを構成した後、ネットワークインターフェイスから IP ネットワークを介して受信ノードに転送する。受信処理は、送信処理の逆を行い、受信パケットから可能な限り損失パケットの復元 (誤り訂正) を行ない、MPEG2-TS を再構成する。この際、喪失パケットが多く FEC 復元不可能である場合は受信したデータパケットをそのまま出力する。

なお、我々は既に別の実装として、ATM インターフェイスを持つ市販の MPEG2 CODEC を利用するシステムも開発しているが、今回開発した PCI カードを利用するシステムとは相互通信可能である。MPEG2 CODEC は PCI カードに比べ高価であるが、エンコード出力が安定である等の特長を持つため、後述する皆既日食中継実験では送信側として MPEG2 CODEC システムを使用した。

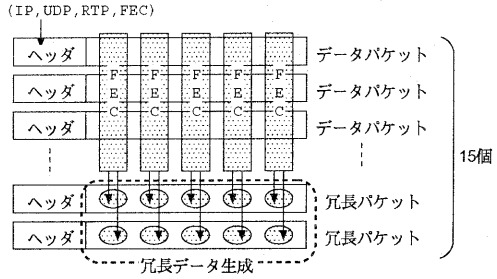


図 2: FEC エンコード処理.

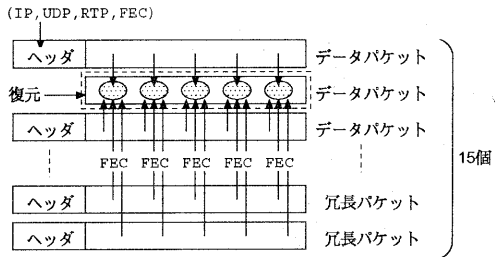


図 3: FEC デコード処理.

### 3 FEC 処理

FEC エンコード処理を図 2、デコード処理を図 3 に示す。FEC エンコード処理およびデコード処理では、複数パケットデータを 1 つのユニットとし、パケットデータを順に並べた垂直方向の FEC ブロックに対して FEC エンコーディング、デコーディングを行なう。ここで 1 ユニット当たりのパケット数は  $2^{CS} - 1$ 、そのうち冗長パケットの数は  $DS$  個であり、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, DS, FEC シーケンスは図 5 で示される FEC ヘッダ中の “code symbol size”, “data symbol num”, “FEC sequence” フィールドにそれぞれ対応している。Reed-Solomon 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、処理に複雑な演算を多用するため処理速度がネックになりやすい。そこで本実装では、処理速度および処理の簡素化を重視して 1 シンボル 4 ビット ( $CS = 4$ ) 固定とした。そのためパケット 15 個 ( $2^4 - 1$ ) が 1 つのユニット (そのうち  $DS$

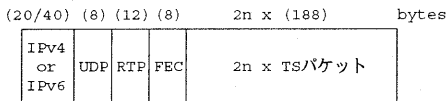


図 4: パケットフォーマット.

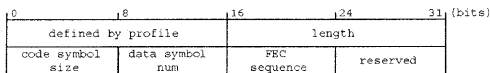


図 5: FEC ヘッダフォーマット.

個が冗長パケット)として処理される。図2で示されるように FEC によって生成されるのはデータ部分のみであり、ヘッダ (IP, UDP, RTP, FEC) は冗長化されない。

### 3.1 パケットフォーマット

本システムでのパケットフォーマットを図4に示す。IP version 6, 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の伝送に用いられる。現在 FEC ヘッダは RTP の拡張ヘッダとして実装している。RTP 拡張が理解出来ないノードではこの FEC ヘッダは無視されるため、この FEC ヘッダに対応していない受信ノードにおいても冗長パケットの付加されていない通常の MPEG2-TS として受信可能なはずである。ペイロードには MPEG2-TS パケットを偶数个カプセル化するが、その個数は起動時の引数にて指定可能である。

FEC ヘッダフォーマットを図5に示す。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 には 0 を使用している。これに 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。

### 3.2 FEC の性能評価

本システムの FEC パケット損失回復性能について解析モデルを作成し、実験室内における実測値との比較を行った。詳細は文献[11]で述べられているので、ここでは結果のみ簡単に紹介する。

図6に測定環境の構成を、表1に使用した機器の仕様を簡単に示す。本システムを用い送信マシンからロス生成マシン経由で受信マシンへ伝送する。その際、ロス生成マシンでは 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。パケットの回復率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  $K$  で決まる。なお、FEC として付加される冗長パケット数は  $N - K$  である。この測定では  $N$  は 15 固定とし、 $K$  を 10, 11, 12, 13 と変化させ、それぞれの場合について FEC デコード後のパケット損失率を測定した。以下、ユニット内のデータパケット数の組合せを  $(N, K)$  と示す。

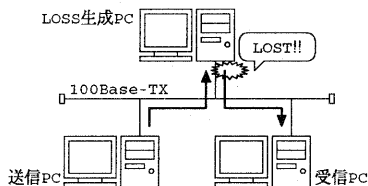


図 6: 測定システムの構成.

表 1: 測定に用いた機器.

PC	CPU	memory	OS
送信	PiII-800MHz	256MB	FreeBSD 4.2R
ロス生成	PiII-450MHz	128MB	FreeBSD 4.2R
受信	PiII-866MHz	128MB	Vine Linux 2.1

表 2: 帯域増加量の比較.

Reed-Solomon		パリティ	
冗長度	帯域増加量 [倍]	冗長度	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

測定により得られた実測値と解析的に求めた理論値を図7に示す。横軸は FEC 適用前のパケット損失率、縦軸は FEC 適用後の実効的なパケット損失率である。このグラフより、実測値と理論値に若干の差異が認められるが、これはロス生成マシンにおける擬似乱数の精度が原因と考えられる。

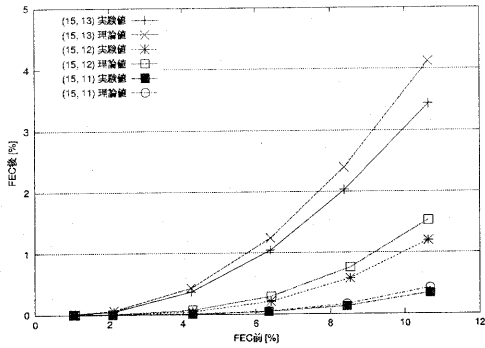


図 7: 本システムにおける FEC 性能.

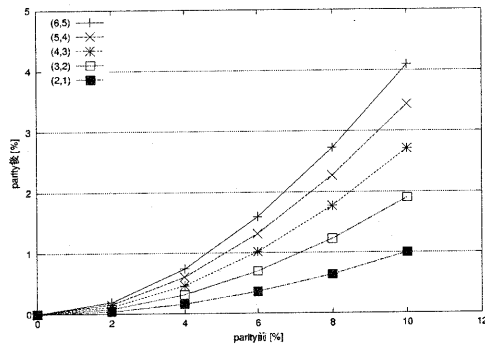


図 8: パリティを用いた場合の FEC 性能.

なお、比較のためパリティによるバケット損失回復性能の理論値を図8に示す。パリティの場合、データバケット数  $K$  に対し、1バケットをパリティバケットとすることで、グループ内での1バケット誤りを訂正することができる。ここでは冗長度を  $(K+1, K)$  で示す。 $K$  が小さい程冗長度が大きくなり、回復性能は向上する。

Reed-Solomon 符号とパリティ符号、それぞれの帯域増加量を表2に示す。これから、例えば、帯域増加量1.25倍の Reed-Solomon 方式(15, 12)と、帯域増加量2倍のパリティ方式(2, 1)がほぼ等しい回復性能を示していることが分かる。

#### 4 皆既日食中継実験

我々は本システムを用いて様々な実証実験を行っている。以下では、その中のひとつである皆既日食の中継実験について述べる。

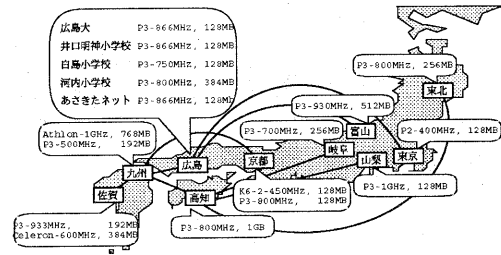


図 9: 日食中継実験の時の各拠点と接続.



図 10: 井口明神小学校の様子.

ライブ!エクリプス実行委員会[12]は、2001年6月21日にアフリカ南部で観測された皆既日食の模様を、衛星回線等を使用して日本ヘリアルタイムに伝送し、インターネットへ配信する試みを行った。我々の実験は、同委員会がインターネットへ配信する前の高品質(SDTV)映像を利用させて頂くため、同委員会の映像編集拠点(東京都)から広島大学(東広島市)まで、JGN回線を利用してATMによるMPEG2伝送を確保した。

広島大学にて受信した映像は、我々が開発したMPEG2 over IPシステムにより、マメdeがんすプロジェクト[13]に参加する広島市内の小学校等4拠点、並びにJGN上

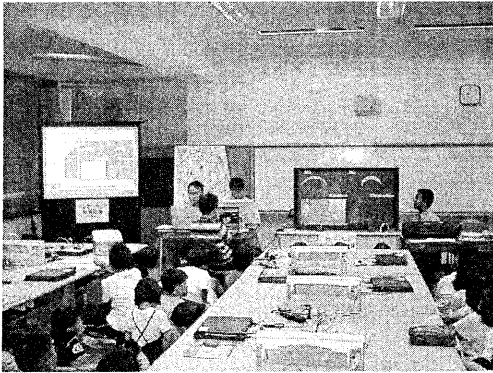


図 11: 河内小学校の様子.

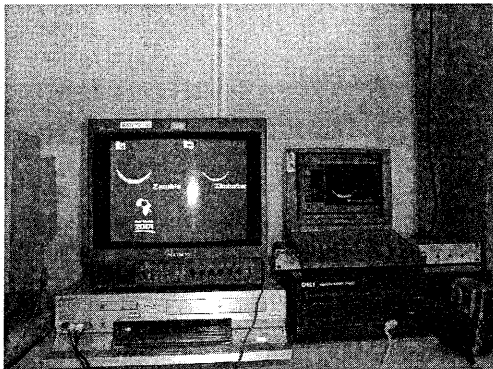


図 12: 広島大学における送信設備 (一部)

の9拠点(図9)に対し、IP マルチキャストによりリアルタイム配信を行った。今回はIP ネットワーク構築の都合によりIPv4 伝送とした。また、FEC は Reed-Solomon (15, 13) を使用した。伝送速度は MPEG2-TS レートで 4Mbps に設定、RTP/UDP/IP ヘッダおよび FEC のオーバーヘッドを含めると約 5Mbps であった。受信会場の様子を図 10、図 11 に、また、広島大学における送信装置の様子を図 12 に示す。

#### 4.1 FEC 性能の評価

映像を配信した約 2 時間のパケット損失率の実測値を表 3 に示す。FEC 適用後については、実測値の他、前

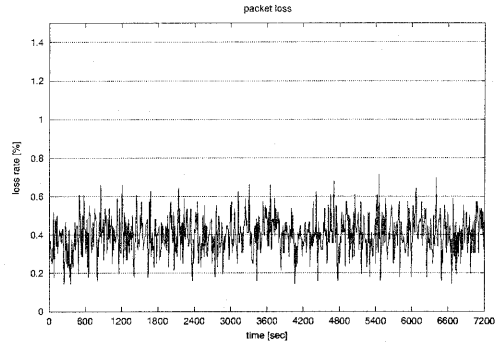


図 13: 河内小学校におけるパケット損失率.

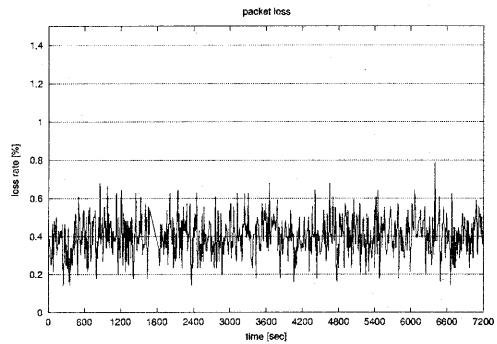


図 14: 佐賀におけるパケット損失率.

述の解析モデルによる理論値も示している。今回受信に参加したほとんどの拠点において、受信時 (FEC 前) のパケット損失率が 0.4% 前後であったため、FEC 適用によりいずれの拠点においても 0.0002%~0.006% 程度に改善された。なお、受信拠点東京は FEC による復元を行わないオプションを付加していたため FEC 後のパケット損失率は求められなかった。映像配信中の 10 秒毎の平均パケット損失率推移の例を図 13、図 14 に示す。他の拠点においてもほぼ同じような傾向であった。

#### 4.2 MPEG2 伝送の評価

マメde がんすプロジェクトでは、本システムと現在インターネットで広く利用されている動画配信方式の比較を行うため、MPEG2 受信拠点のひとつである井口明神小学校で受けた映像を、RealSystem により、384Kbps

表 3: パケット損失率.

受信拠点	パケット損失率 [%]		
	FEC 適用前	FEC 適用後	理論値
広島大	0.00062	0.00025	/ 0.00000
井口明神小学校	0.40449	0.00069	/ 0.00050
白島小学校	0.40526	0.00015	/ 0.00050
河内小学校	0.40033	0.00025	/ 0.00049
あさきたネット	0.40034	0.00025	/ 0.00049
富山	0.40792	0.000218	/ 0.00051
東京	0.20653	-	/ -
九州	0.40115	0.00026	/ 0.00049
	0.40518	0.00225	/ 0.00050
佐賀	0.40243	0.00134	/ 0.00049
	0.40225	0.00133	/ 0.00049
京都	0.41219	0.00555	/ 0.00053
	0.40786	0.00446	/ 0.00051
高知	0.40255	0.00193	/ 0.00049
岐阜	0.40094	0.00052	/ 0.00049
東北	0.37727	0.00000	/ 0.00041
山梨	0.40312	0.00226	/ 0.00050

表 4: マメ de がんす受信拠点.

受信拠点	MPEG2	Real	参加人数
井口明神小学校	○	○	430
白島小学校	○	○	100
河内小学校	○	○	100
あさきたネット	○	○	60
比治山小学校		○	70
安東小学校		○	120

で他の拠点へ再配送した。MPEG2 は 4 拠点で受信したが、RealSystem はそれ以外に 2 拠点でも受信した。マメ de がんすプロジェクトの受信拠点内訳を表 4 に示す。

あさきたネットを除く 5 拠点で、参加者へのアンケートを実施し、MPEG2 伝送等の評価を行った。まず、映像と音声について 5 段階評価とし、会場毎の平均を図 15 に示す。MPEG2 を受信した会場とそうでない会場では、一定の差があることが分かる。MPEG2 と RealSystem 両方を受信した会場については、両者を比較してもらい、どちらの映像が良いと感じたかを評価してもらった。「どちらも良い」、「どちらも悪い」という回答を除いた結果を図 16 に示す。なお、この結果には使用した表示装置の性能差も影響しているものと考えられる。図 17 は、今回中継実験に参加して、本物の日食が見たくなったかという質問に対する結果である。

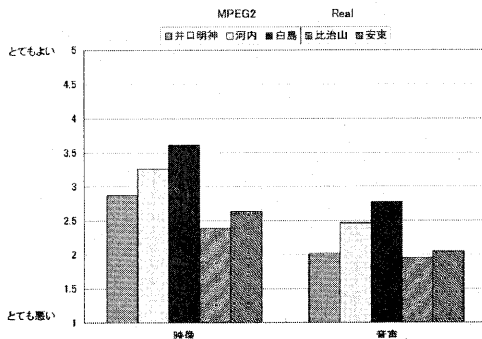


図 15: 映像・音声に対する評価.

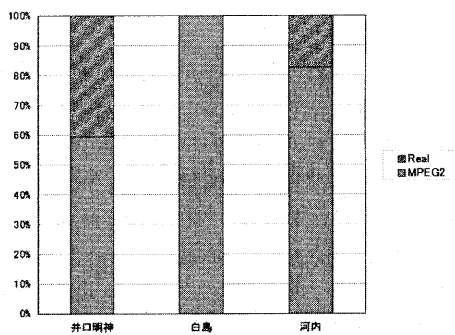


図 16: MPEG2 と RealSystem の比較.

## 5 おわりに

本稿では Reed-Solomon 符号方式による FEC を実装した MPEG2 動画伝送システムについて述べた。パケット損失に対する性能評価を行うとともに、JGN 等を利用した実証実験における評価について示した。現在、本システムの FEC の実装については独自方式を採用し、ペイロード長が固定長である MPEG2-TS を対象としているが、プログラムストリームなど可変長データへの対応のため、RFC2733 を一部変更した方式とすることを検討している。また、本稿で述べた実証実験は IPv4 で行ったが、今後 IPv6 ネットワークでの実験を行う予定である。さらに、HDTV への拡張についても検討中である。

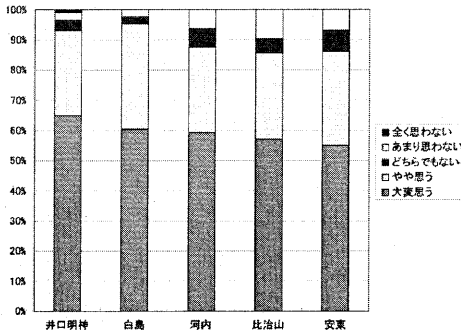


図 17: 本物の日食が見たくなった。

## 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、インターネット技術第 163 委員会 (ITRC)、ライブ! エクリプス実行委員会、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] S. Deering, R. Hinden: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification, RFC 2460, December 1998.
- [2] 藤原 洋監修: ポイント図解式最新 MPEG 教科書, アスキー出版局, 1994.
- [3] Kouji NISHIMURA, Reiji AIBARA, Tamaki OHTSUKA, Tohru KONDO: An MPEG2 Transfer System using IPv6 Multicast and IPsec, Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2001), pp.578-581, 2001.
- [4] <http://net.ipc.hiroshima-u.ac.jp/mpeg2ts/>

- [5] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson: "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", RFC 1889, January 1996.
- [6] J. Rosenberg, H. Schulzrinne: An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction, RFC 2733, December 1999.
- [7] 山内長承 他: 高信頼同報バルク転送機構, 情報処理論文誌, Vol.39, No.6, pp.2009-2019, 1998.
- [8] <http://www.linuxtv.org/>
- [9] <http://www.vela.com/>
- [10] <http://www.optibase.com/>
- [11] 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 DSM 研究会, 2001 年 11 月 (予定).
- [12] <http://www.live-eclipse.org/>
- [13] <http://www.csi.ad.jp/activity/MAMEdeGansu/>