

博士論文

IP ネットワークにおける
広帯域ストリームの配送に関する研究

平成18年3月

広島大学大学院工学研究科

近堂 徹

概要

インターネットの急速な普及発展は、常時接続・大容量通信を前提としたブロードバンドネットワーク環境を一般家庭にまで浸透させ、既に今日の社会生活に必要不可欠な基盤の1つとして重要な役割を担うに至っている。通信基盤の整備拡大が進むにつれ、IPアーキテクチャを取り巻く環境も大きな変革期を迎えており、通信形態の多様化が進んでいる。特に、映像・音声といった広帯域マルチメディアデータがインターネットトラフィックの多くを占めるようになり、それらを利用した新しいアプリケーションも急速な広がりをみせている。このような背景のもと、広帯域リアルタイム通信の広域展開かつ通信品質(QoS)の保証が必要不可欠な要素となってきた。最善努力型(best-effort)のインターネットではエンドホスト間での通信品質が保証されておらず、伝送品質の低下はそのままアプリケーションの品質低下につながる恐れがあるため、ネットワーク帯域の格差や通信品質の違いなどにより生じる障害を吸収する必要がある。加えて、異なるプロトコルが混在するネットワーク環境下では配信自体に問題が生じることもあり、伝送基盤が拡大すればするほどこのような問題が顕著化する可能性がある。しかしながら、従来のIP層でのQoS保証技術では、多様化するアプリケーションからの要求に対しデータ特性や利用用途などの情報を考慮した制御が難しく、これらを解消する柔軟な広帯域ストリーム伝送手法の検討は必須である。

本論文では、上記問題に対してネットワーク層で解決するのではなく、アプリケーション層で制御するアプローチを提案する。アプリケーション層でネットワークに適応しながら特性に応じてQoSを高めることのできる、広帯域ストリームの配信基盤の構築とこれを実現するための要素技術の確立を目的とする。アプリケーション層QoS制御やデータ転送処理、アプリケーション特性に応じた付加機能を利用することで、様々なアプリケーション要求が混在するネットワーク環境においてエンドホスト間通信を高品質化した配信を目指す。要素技術として、パケット損失に対するQoS制御のひとつであるソフトウェア損失回復制御の性能評価と、QoSを考慮した高品位動画像伝送システムの実装と評価について述べ、ネットワーク特性に適応するアプリケーション層制御の有用性を示す。さらに、これを広域展開する際の一手法として、アプリケーション層で展開する広域配信フレームワークを提案する。アプリケーションゲートウェイをネットワーク上に広域分散配置し、ゲートウェイでエンドホスト間通信を終端することで、従来のIP層処理では実現不可能な、高品質で柔軟性の高いアプリケーション指向の配信基盤を構築することが可能になる。評価実験や実証実験などを通して、本手法の発展性についても考察する。

目次

概要	i
本文目次	iii
表目次	vii
図目次	ix
第1章 はじめに	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
第2章 広域IPネットワークにおける広帯域ストリーム配送	5
2.1 広帯域ストリーム配信への要求	5
2.2 本研究における定義	6
2.3 ストリーム配信のための要素技術	7
2.3.1 IPネットワークにおけるストリーム配信技術	7
2.3.2 インターネットにおけるQoS保証の実現	12
2.3.3 広域配信における課題	13
2.4 アプリケーション指向制御による広域配信	14
2.5 本章のまとめ	15
第3章 広帯域ストリーム伝送のためのソフトウェア損失回復制御	17
3.1 背景と目的	17
3.2 ストリーム伝送における損失回復制御	18
3.2.1 損失回復制御の概要	18
3.2.2 FECに関する先行研究	19

3.3	FECの適用手法	20
3.4	性能評価実験	22
3.4.1	ランダム損失に対する評価実験	23
3.4.1.1	理論式による解析的評価	23
3.4.1.2	実測定による定量的評価	24
3.4.1.3	実験結果と考察	26
3.4.1.4	パリティ符号との比較	28
3.4.2	実運用ネットワーク上でのバースト損失に対する評価実験	30
3.4.2.1	パケット損失モデルの推定	31
3.4.2.2	回復性能のシミュレーション実験	35
3.4.2.3	回復制御処理負荷と処理時間の実測定	36
3.4.2.4	実験結果と考察	38
3.4.2.5	FEC適用方法の検討	43
3.5	本章のまとめ	44
第4章	QoS保証を考慮した高品位映像伝送システム	47
4.1	IPネットワークにおける映像伝送技術	47
4.2	高品位映像伝送システム Robst	48
4.2.1	システム構成と対応インタフェース	48
4.2.2	RS符号のためのRTPヘッダと冗長化手法	50
4.2.2.1	パケットフォーマット	50
4.2.2.2	Protection OperationによるFEC	51
4.2.3	処理内容とシステム実装	53
4.2.4	ネットワーク環境に適応する冗長度の動的変更機構	55
4.3	性能評価	58
4.3.1	評価実験1	58
4.3.2	評価実験2	62
4.4	本章のまとめ	66
第5章	アプリケーション指向制御による広域配送とその可能性	67
5.1	アプリケーションゲートウェイの設計と実装	67
5.1.1	ゲートウェイシステム概要	68
5.1.2	FECゲートウェイ	69
5.2	評価実験	71

5.2.1	実験概要	71
5.2.2	実験結果と考察	72
5.3	アプリケーション層で展開するハイビジョン広域配信	75
5.3.1	実験概要	75
5.3.2	実験結果と考察	77
5.4	ストリーム広域配送基盤の発展性	79
5.5	本章のまとめ	82
第6章	おわりに	85
6.1	本研究の成果	85
6.2	今後の課題と展望	87
	謝辞	91
	参考文献	93
付録		
付録A	実証実験事例	101
A.1	事例一覧	101
A.2	Live! Eclipse 2001 アフリカ皆既日食中継	107
A.2.1	中継概要	107
A.2.2	中継結果	108
A.3	Live! Eclipse 2005 Hybrid 金環・皆既日食中継	111
A.3.1	実験概要	111
A.3.2	実験結果と考察	111
A.4	IPv6 Summit in Hiroshima 中継実験	114
A.4.1	実験概要	114
A.4.2	MPEG2-TS スイッチャのプロトタイプ実装	115
A.4.3	中継結果と考察	118
A.5	中国 JGN2 シンポジウム 2005 中継	119
A.5.1	実験概要	119
	研究業績一覧	125

表目次

3.1	ARQ と FEC の比較	19
3.2	使用機器の仕様	27
3.3	帯域増加量の比較	30
3.4	使用機器の仕様	32
3.5	各時間帯でのトレースデータの詳細	34
3.6	実トレースデータと Extended Gilbert モデル	35
3.7	生成したロスパターンの特徴	36
3.8	FEC, インタリーブとバッファリングパケット数の関係	37
3.9	インタリーブとブロックサイズを変化させた場合の比較	39
3.10	FEC とインタリーブによる遅延時間	42
4.1	対応フォーマットとインタフェース	49
4.2	パケット損失率と冗長度, 帯域増加量の関係	58
4.3	評価実験 1 における使用機器	59
4.4	メディアパケットの受信統計	60
4.5	評価実験 2 における使用機器	63
4.6	パケット損失率と冗長度 (FEC 回復後: $10^{-6}\%$)	63
4.7	システムにおける損失回復性能	64
4.8	メディアパケットの受信統計	64
5.1	使用した HD 映像の仕様	77
5.2	ゲートウェイ PC のスペック	77
5.3	各受信拠点でのゲートウェイ CPU 使用率	78
A.1	各受信拠点のパケット損失率	109

目次

2.1	ユニキャスト通信	7
2.2	マルチキャスト通信	9
2.3	XCAST 通信	11
2.4	アプリケーション層で展開する広域通信	14
3.1	損失回復制御の分類	18
3.2	FEC によるパケット損失回復モデル	21
3.3	パケットインタリーブ法による FEC	22
3.4	伝送システムのプロトタイプ	25
3.5	パケットフォーマット	26
3.6	FEC ヘッダフォーマット	26
3.7	FEC 回復性能の実測定環境	26
3.8	RS 符号を用いた場合の FEC 性能測定結果	27
3.9	パリティ符号を用いた場合の性能測定	29
3.10	Extended Gilbert モデル	32
3.11	実験構成図	33
3.12	実トレースのパケット損失間距離	35
3.13	シミュレーション方法	36
3.14	パケット損失の時間的変動	37
3.15	インタリーブの効果 (N=15)	39
3.16	デコード処理時の CPU 使用率の時間的推移	41
3.17	FEC 処理時間とパケットバッファリング時間の比較	43
4.1	システム構成図	49
4.2	パケットフォーマット	50
4.3	FEC フィールドフォーマット	50
4.4	Protection operation による FEC エンコーディング処理	52

4.5	Protection operation による FEC デコード処理	54
4.6	Robst 送信部の詳細	55
4.7	Robst 受信部の詳細	55
4.8	RTCP による冗長さの変更機構	57
4.9	パケット損失回復性能の理論値	57
4.10	実験構成図	59
4.11	FEC 回復後のパケット損失数 (冗長さ (15,13))	61
4.12	FEC 回復後のパケット損失数と冗長さの変化	61
4.13	受信ホストの CPU 使用率	62
4.14	FEC 復元前のパケット損失率と冗長さの推移	65
4.15	FEC 復元後のパケット損失率	65
5.1	アプリケーションゲートウェイのシステム概要	69
5.2	FEC ゲートウェイの構成	70
5.3	ネットワークモデル1	72
5.4	ネットワークモデル2	72
5.5	FEC ゲートウェイの効果 (モデル1の場合)	73
5.6	FEC ゲートウェイの効果 (モデル2の場合)	74
5.7	モデル2の対数表示	74
5.8	ネットワークの全体図	76
5.9	RIBBII ネットワークの配送木例	77
5.10	広島大学での受信の様子	78
5.11	富山におけるパケット損失率 (FEC 復元前)	80
5.12	富山におけるパケット損失率 (FEC 復元後)	80
5.13	アプリケーションゲートウェイの利活用モデル	82
A.1	マルチキャスト配信の実証実験の接続図	107
A.2	井口明神小学校の受信の様子	109
A.3	白島小学校の受信の様子	109
A.4	京都におけるパケット損失率の変動 (FEC 復元前)	110
A.5	京都におけるパケット損失率の変動 (FEC 復元後)	110
A.6	Live Eclipse2005 実験構成図	112
A.7	Live Eclipse2005 配送木	112
A.8	小金井における送信トラフィックの推移	113

A.9 広島における受信トラフィックの推移	113
A.10 秋田における受信トラフィックの推移	113
A.11 高知における受信トラフィックの推移	113
A.12 小金井 (東京) での様子	114
A.13 広島大学の受信の様子	114
A.14 IPv6 Summit in Hiroshima 中継構成図	115
A.15 MPEG2-TS スイッチゲートウェイの構成	116
A.16 MPEG2 ストリームのパケット化	117
A.17 MPEG2 ストリームのフレーム構造	117
A.18 MPEG2-TS の分離/多重化処理	119
A.19 MPEG2-TS の処理構成	119
A.20 広島における送信トラフィックの推移	120
A.21 富山における受信トラフィックの推移	120
A.22 山梨における受信トラフィックの推移	120
A.23 会場の様子	121
A.24 広島市立大学での受信の様子	121
A.25 中国 JGN2 シンポジウム 2005 中継構成図	122
A.26 会場の様子	123
A.27 兵庫での受信の様子	123

第1章 はじめに

1.1 本研究の背景

米国防総省の研究機関である DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [Clark04] の実験ネットワークを起源にスタートしたインターネットは、ブロードバンド環境の普及とともに急速な拡大・進化を続け、その利用形態も多様化の一途を辿っている。個人ユーザの情報発信や受信のみならず、社会、行政、国際レベルでの情報通信のインフラとして、我々の生活の深くまで入り込み、既に社会基盤の1つとして必要不可欠なものになってきている。総務省が行った調査結果 [総務省 05a] によれば、ブロードバンド通信サービスの契約数は2100万件に達し (2005年9月末現在)、より安価で高品質なアクセスラインの普及拡大が続いている。それと同時に、広帯域で安定性の高い環境への移行も進みつつあり、ADSL (Asynchronous DSL) や FTTH (Fiber To The Home)、無線インフラといった、低コストで高性能な通信インフラは今後も広帯域化への道を進むと考えられる。このように、様々な側面で発展し続けるインターネットは、これからの情報通信基盤として欠かすことのできない重要な役割を担っている。

通信基盤整備とともに、IP (Internet Protocol) を取り巻く環境も大きな変革期を迎えている。1981年に公表され、20年以上にわたり用いられてきた IPv4 [Postel81] は、社会におけるインターネットの普及・発展に対してプロトコル拡張という形で対応してきたが、IPアドレスの枯渇問題やセキュリティ問題など根本的な技術的課題が発生し、変革の必要が迫られてきていた。次世代プロトコルとして研究開発されてきた IPv6 [Deering98] への移行は、研究フェーズから実運用フェーズへと進み、今日では一般家庭においても IPv6 による通信が可能になってきている。広大なアドレス空間を持つ IPv6 の利点を活かすことで、従来のコンピュータだけでなく、情報家電や携帯端末などの様々な情報機器が接続されるユビキタスなネットワーク環境の実現が予測される。ネットワーク接続形態が複雑化する中での通信の必要性は想像するに難しくない。

広域 IP ネットワーク上で利用するアプリケーションも高度化、多様化してきており、ト

ラフィックモデルも大きく変わりつつある。多様化という観点から考えると、従来、Webやメール等のサーバ・クライアント型の通信形態が主流であったものが、近年では映像や音楽、VoIP (Voice over IP) などのピア・ツー・ピア型の通信形態がより一般化し、VoD (Video On Demand) やライブ中継などのストリーム型のトラフィックも増加してきている。

ブロードバンドインターネットのアプリケーションとして、さまざまな分野で映像ストリーム伝送のニーズが高まってきている。例えば、放送分野では、地上波デジタル放送の開始などに伴う多チャンネル化に対応するため、海外を含めた映像素材の迅速な伝送収集が求められるようになってきている。また、エンドユーザ向けのIP放送に対する要求も高くなってきている [鬼木02][総務省05b]。教育分野では、仮想教室や仮想キャンパスのように、遠隔地の講師や黒板の様子を通じて遠隔授業を行う需要が高まり、既に実用段階に入ってきている [SOI][三川03]。医療分野においても同様に、遠隔医療のための高精細動画像のリアルタイム伝送が必要不可欠な要素となっている [中島05]。動画像を取り入れた遠隔コミュニケーションや映像配信は、インターネットを最大限に活用できるアプリケーションのひとつとして、今後も拡大していくことが予測され、インターネットのトラフィックのほとんどが動画像ストリームになるともいわれている。このようなストリーム伝送を広域で実現できるメリットは計り知れない。インターネットに接続された情報端末さえあれば、いつでもどこでも時間や距離の壁を越えた情報伝達が可能となることによって、人々の生活に恩恵をもたらすことができるだろう。

しかしながら、現状のIP層処理では十分にアプリケーションの性能を引き出すことができず、QoS (Quality of Service) 保証の問題が大きな課題となっており [Towsley93][Aras94]、広域で展開するが故に生じる課題も存在する。まず、高品質な動画像や音声の伝送には広帯域のネットワークが必要となり、その分増大するコストがボトルネックになる可能性があるという点である。ベストエフォート型のインターネットではエンドホスト間での通信品質が保証されておらず、伝送品質の低下はそのままアプリケーションの品質低下につながる恐れがあることが数多く指摘されている [Jiang00][Ito04]。これを解消するために、広帯域な動画像や音声をより効率良く伝送する方式の検討が望まれる。さらに、通信拠点間で生じるネットワーク帯域の格差やユーザの接続環境の違いを吸収する必要性や多様化するアプリケーション要求への対応の必要性もある。伝送基盤が拡大すればするほどこのような問題が顕著になると考えられ、これらのQoS保証を考えることも必要不可欠となる。

1.2 本研究の目的

本研究では、広域 IP ネットワーク環境での広帯域ストリーム伝送の効率的な配信手法について考える。広帯域ストリームを利用したアプリケーションは今後も拡大の一途を辿ることが予想される。しかしながら、広域網でのストリーム配信では、ネットワーク上で生じる様々な障害がアプリケーションに大きな影響を与え、品質低下を引き起こす可能性がある。そのため、多様化するアプリケーションに対して利用者やネットワーク特性を考慮した高品質な配送が望まれ、QoS 保証が必要不可欠となる。本研究では、上記課題に対する解決策として、アプリケーション指向の広域配送基盤の構築と、それを実現するための要素技術の確立を目的とする。アプリケーション層での配送制御を行うことで、個々のアプリケーションに対して高品質な配送基盤を提供することを目指す。

上述の目的のもと、本研究ではまず、広帯域ストリームの広域配信の概要について示し、既存の配送手法やその課題などを含めた議論を行う。次に、IP 伝送において問題となるパケット損失や揺らぎによる影響についてまとめ、それに対するソフトウェアレベルの解決策について考える。広帯域ストリームの広域配信において、最も影響が大きいと考えられるパケット損失に対する回復制御技術としてソフトウェア FEC (Forward Error Correction) [Rizzo97b][山内 98][近堂 04]に着目し、性能評価を通して、効果的な適用方法について検討する。次に、QoS を考慮した高品位映像伝送システムの開発を通して、ネットワーク特性に適応するアプリケーション層制御について述べる。アプリケーション情報を利用した QoS 制御を行うことで、IP 層の情報だけでは困難な柔軟な制御が可能になる。さらに、ネットワーク品質が時間的に変化する伝送路上での通信へも適用することができる。実運用ネットワーク上での実証実験より、本制御の有効性について検証する。

これらの要素技術に加えて、より広域での展開を可能とするアプリケーションゲートウェイの設計と実装について示す。エンド間通信を高品質化するノードを導入することで、ネットワーク接続環境や IP インフラの差異を吸収し、アプリケーション層で制御することの利点を活かした配送基盤の確立を目指す。実運用インターネットを用いた広域伝送実験などを通して、その有用性と発展性について述べる。

今後、広域ネットワーク上で高品位映像を始めとする広帯域ストリームがやり取りされることで、1対1のコミュニケーション活用だけでなく1対多のマスメディアとしての役割を担うことができる。本研究で提案するアプリケーション指向の配送基盤とそのフレームワークは、これらの適用範囲において効果的に機能することができると考えられる。

1.3 本論文の構成

本論文は6章から構成されている。

2章では、まず広域IPネットワークにおけるストリーム配信技術の現状と課題についてまとめる。後半では、その議論に基づき本研究で考えるアプリケーション層で展開するストリーム広域配信フレームワークについて示す。3章および4章では、提案するフレームワークを実現するための構成要素について述べる。3章では、広帯域ストリーム配信に対するソフトウェア損失回復制御の評価実験から、アプリケーション層制御の効果的な適用方式の検討を行い、有用性を示す。4章では、QoSを考慮した高品位映像伝送システムの実装と評価を通して、実運用ネットワークに適応するアプリケーション層QoS制御の有効性について述べる。5章では、前章までに示した構成要素技術で実現できる配送とその問題点について示し、アプリケーション指向配信フレームワークの提案と評価について述べる。本フレームワークで実現できる広域配送基盤の有用性を示し、その可能性について議論する。最後に6章で、本研究のまとめを行い、本研究の成果について示すとともに、今後の課題と展望について述べる。

第2章 広域IPネットワークにおける広帯域ストリーム配送

2章では、アプリケーション層で展開するストリーム広域配信について考える。まず広帯域ストリーム配信の必要性とそれを構成する要素技術について示し、広域展開における課題について議論する。次に、その議論に基づきアプリケーション指向制御によるストリーム広域配信の効果について考える。従来のIP層におけるエンドホスト間通信に加え、本研究で考える手法を取り入れることによる効果と課題について整理する。

2.1 広帯域ストリーム配信への要求

インターネットがもたらすグローバルスケラビリティを活用するアプリケーションとして、映像・音声を用いたコミュニケーション支援やライブ中継などに対する需要が高まっていることは既述の通りである。インターネットによる広域配信は時間的制約・地理的条件を克服できるだけの能力を持っており、放送・教育・医療などの分野だけでなくエンドユーザの情報発信ツールなど様々な分野での活用が期待されている。これからのIPインフラの一層の拡大と共に、高価な専用線ではなく安価なインターネット回線を利用して、どこでもだれでもが利用できる広帯域ストリーム配信技術が必要不可欠になると考えられる。

このような要求に対して、ストリーム配信の品質保証が大きな問題となっている。遠隔地間で円滑なストリーム配信を実現するためには、品質要求を満たす高品質かつ安定した映像や音声を伝送する技術が必要となる。しかしながら、品質要求は利用場面や環境によって大きく変わる。例えば、一方向性のみのストリーム配信であれば若干の遅延を許容することで品質劣化を抑制することも可能であり、逆にインタラクティブ性を考慮するのであれば遅延には厳しく若干の品質劣化は許容する、という要求が考えられる。また、メディア特性によっても重要度が異ってくる。テレビ電話や遠隔会議を例に考えると、音声によるコミュニケーションだけでも十分意志の疎通が行えるため、映像につ

いては多少の品質劣化は許容されるが、音声についてはいかなる損失や遅延も許されないといったことも考えられる。インターネットにおけるQoSは、プロトコルの階層化と同様に複数のレベルに分けて定義することができ[石橋04]、IP層すなわちパケットレベルでのQoSだけでなく、アプリケーションの質に対するQoSも考える必要がある。このようにストリーム配信ひとつにしても、アプリケーション毎に要求条件は大きく異なるため、個々に適応するQoS保証は非常に難しくなってくる。

2.2 本研究における定義

本論文における広帯域ストリームの定義について述べる。一般的にストリームは狭帯域と広帯域の2種類に区別することができる。本研究では、数Mbpsから数十Mbpsの広帯域ストリームを取り扱う。映像品質に置き換えて考えると、通常のテレビ品質（解像度：640x480，毎秒30フレーム）から高精細（ハイビジョン）映像品質（解像度：1920x1080，毎秒30フレーム）を対象とする。

さらに、本研究を行うにあたり、いくつかの条件を定める。本研究では、主に即時性を有する広帯域ストリームの広域伝送を対象とする。即時性とは転送と再生が同時に行われることを意味し、転送のための即時性および再生のための遅延変動の極小化が望まれる。また、データ損失に対しては比較的緩いストリームを対象とする。これは、一貫性を有するデータと違い、一部が欠落したとしてもデータ全体が参照できなくなるまでの影響は生じないということの意味している。例えば、映像や音声の場合であれば、データ損失により一時的に画像や音声が乱れるが、その損失がすべてのデータに対して影響することはない。また、対象とするネットワークは動画像を伝送できるだけの容量を確保できるとする。ベストエフォート型のインターネットでは、伝送に十分な帯域が確保されていても、常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、他のトラフィックとの競合やルータ上でのルーティング処理負荷、回線のノイズ等、様々な要因がアプリケーション品質の劣化を招く恐れがある。規模としては、局所的なネットワークではなく、複数サイトをまたぐブロードバンドインターネット環境を想定する。サイトとは独立したポリシーで運営されているネットワークを意味する。本研究では、このような特性を持つネットワーク上での広帯域ストリームの広域配信を取り扱うこととする。

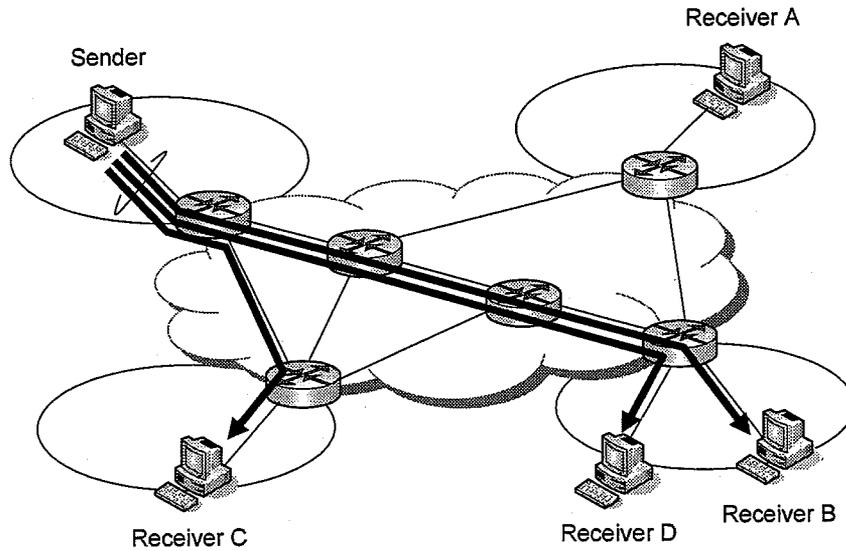


図 2.1: ユニキャスト通信

2.3 ストリーム配信のための要素技術

IP インフの整備に伴い、様々な分野でストリーム広域配信が利用され、配送手法も多様化してきている。ここでは、ストリーム配信における既存の配信手法とその問題点についてまとめ、QoS 保証技術についても述べる。

2.3.1 IP ネットワークにおけるストリーム配信技術

インターネットにおけるストリーム広域配信は、その配信形態により以下の4つに大別することができる。

IP ユニキャストによる配信

通常のエンドホスト間の通信であり、IP 層にて1対1の配信を行う（図2.1）。エンドホスト間の接続性さえ保証されていれば途中経路上の拡張が必要ないため、規模適応性が高い。一方で、データフローは通常のIPルーティングによって経路が決定されるため、終点アドレスベースの配送となり、IP層にてフローの集約が行われてしまう。また、1対多の配信を行う場合には、それに応じたユニキャストストリームを送出する必要があり、送信側近傍でボトルネックが発生する恐れがある。

IP マルチキャストによる配信

IPの一機能として、1対多の効率的配信を実現するIPマルチキャストがある(図2.2)。マルチキャストグループによって識別されるホストにのみパケットが送られ、通信経路上のルータでマルチキャスト配送木に従いデータを複製することにより、通信路を圧迫する効率良く配信することが可能である。マルチキャストは広域同時配信においては非常に優れたアーキテクチャであり、IPv6では標準機能として組み込まれている。しかしながら、IPv4の場合と同様にベンダー間のインターオペラビリティや以下に挙げる問題が障害となり、十分な広域展開には至っていない[加藤04]。故に、現状で利用されているマルチキャストは特定のISP内や単一のアクセスネットワーク内で閉じたものが主であり、複数ISPをまたがるような広域インターネットマルチキャストについては、実験段階がほとんどである。

マルチキャストルータの制約 上述したように、送信ホストと受信ホスト間の全てのルータがマルチキャストに対応する必要があるという制約条件が存在する。つまり、IPマルチキャストではマルチキャスト用に割り当てられたアドレスフィールドからアドレスを確保して使用するため、通信経路上のすべてのルータがこのマルチキャストアドレスを識別し、それに従い転送処理を行えなければならない。

ネットワークの帯域の不均一性 ネットワーク帯域が不均一な広域ネットワークでのマルチキャスト配信では、品質が十分に確保できない区間では品質低下が発生する恐れがある。IPマルチキャスト配送木は接続性のみに従い構築され、その品質などは考慮されないため、その下流に属するネットワークすべてに影響をもたらす可能性がある。

LAN上でのフラッディング マルチキャストパケットは通常LAN上ではフラッディングされる。そのため、途中のL2スイッチで別ポートにマルチキャストが流れることでバッファ溢れを発生させ、パケット損失を誘発する可能性もある。近年では、IPマルチキャストのグループ管理を司るIGMP[Fenner97]/MLD[Deering99]のフィルタリングによるフラッディング抑制(IGMP/MLD Snooping)機能を搭載したスイッチが多くなってきているが、未対応のスイッチが途中で1つでもあるとこのような問題を抱えることとなる。

マルチキャストアドレス管理 IPマルチキャストでは、広域にわたって使用するアドレスがユニークであることを保証しなければならないが、その管理方法がないため、競合の危険性がある。

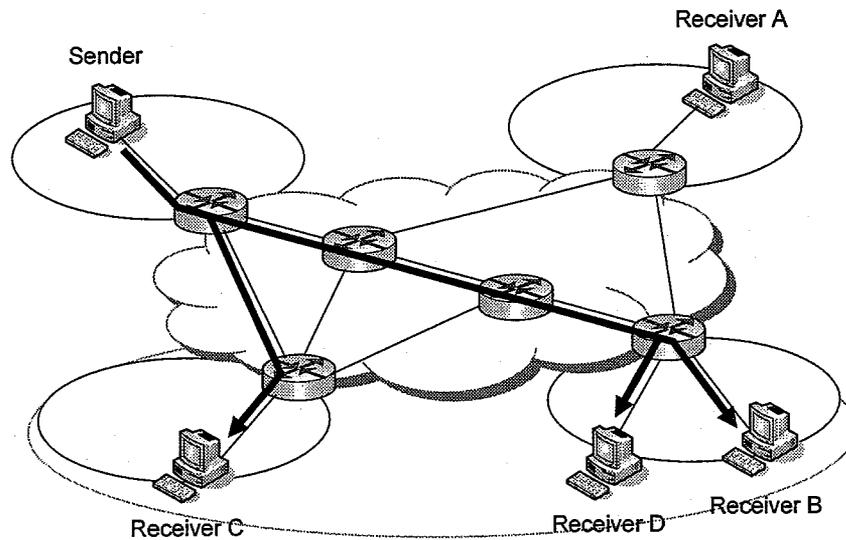


図 2.2: マルチキャスト通信

CDN (Contents Delivery Network) を活用した配信

広域 IP ネットワーク上でのコンテンツ分散配信の手法として CDN がある。CDN とは以下に示す技術を積極的に活用し構築された、コンテンツ配信のために最適化されたネットワークのことである。

コンテンツキャッシュ技術 ネットワークの適当なポイントにキャッシュサーバを設置し、エンドユーザを分散させることで、コンテンツを効率的に配信する技術

コンテンツルーティング技術 エンドユーザのアクセスより、最も効率的にコンテンツを配信できるキャッシュサーバへリクエストをルーティングすることで、そこから配信するための技術

コンテンツ管理技術 コンテンツへの課金処理、ライセンス管理を行うことで、著作権のあるコンテンツの複製や 2 次利用を防ぐための技術

CDN は、サロゲートサーバへのキャッシュ (ミラーリング) 技術とユーザのコンテンツリクエストをどのサロゲートサーバへルーティングするかというコンテンツルーティング技術が大きな要素となっている。これにより、ユーザからのアクセス要求に対して、ユーザからネットワーク的に近い場所にあるサロゲートサーバにアクセスするように負荷を分散させ、1 つのサーバに負荷が集中しないように複数のサーバに分散させながらコンテンツの配信を行うことが可能になる。CDN はこの他、コンテンツに対する課金処理

やコンテンツ保護などの枠組みも定義されており、統合的な配信ネットワークを構築することができる。

しかしながら、その対象としてはオンデマンド配信が主であり、即時性の強いライブ配信などでの活用に対して十分に考えられているとはいえない。これは、CDNが商業的サービスとして発展している経緯があり、現状ではライブ配信よりオンデマンド配信の方がビジネスとしての価値が高いためと考えられる。ライブ配信においては、サロゲート間での効率的なコンテンツルーティング手法を考える必要性が生じる。

P2P (Peer-to-Peer) 通信による配信

近年の計算機能力の発達により、任意の利用者の計算機同士（エンドホスト）を接続し配送ネットワークを構築することにより、アプリケーション層でマルチキャストを展開する手法がでてきている。

P2P型CDNでは、上述したCDNにおけるサロゲートをエンドホスト（P2Pではこれをピアと呼ぶ）が行うことで、配送ネットワークを構築することができる。ストリーミング系の代表的なシステムとして、インデックス検索のためのセンターサーバの存在するハイブリッドP2P型のSharecast[Sharecast]、センターサーバの存在しないピュア型P2PのPeercast[Peercast]がある。P2P型CDNの利点としては、ピアがサロゲートサーバとしてリレー機能を有するため、サーバ側の帯域が少なくすむ、耐故障性が高いという点が挙げられる。逆に、各エンドホストはコピーのためにCPU処理能力や通信帯域が消費される、様々な環境のユーザが接続することによりストリーム品質が不安定になる場合があるという欠点である。つまり、スケーラビリティおよび耐故障性と性能は相反関係にあるといえる。

別のアプローチとして、XCAST/XCAST6 (eXplicit Multicast/ XCAST for IPv6)がある。概要図を図2.3に示す。XCAST6[伊藤02][Imai05]は、パケット内に明示的に宛先リストを既述することでマルチキャストを実現する技術である。IPマルチキャストが、多数の宛先ヘッダを送信するマルチキャストを対象にしているのに対し、XCASTは少数のグループにデータを送信するマルチキャストを意識した技術となっている。XCAST6では経路制御ヘッダに宛先リストを格納することで、数珠つなぎに複数拠点への配送を実現している。経路上にXCASTに対応したルータが存在する場合、ヘッダを解析し各々の宛先の次ホップに基づきパケット分割後、次ホップに適切なXCASTヘッダをつけてパケットを転送を行う。これにより、配送の効率化を図ることができる。XCASTの特長と

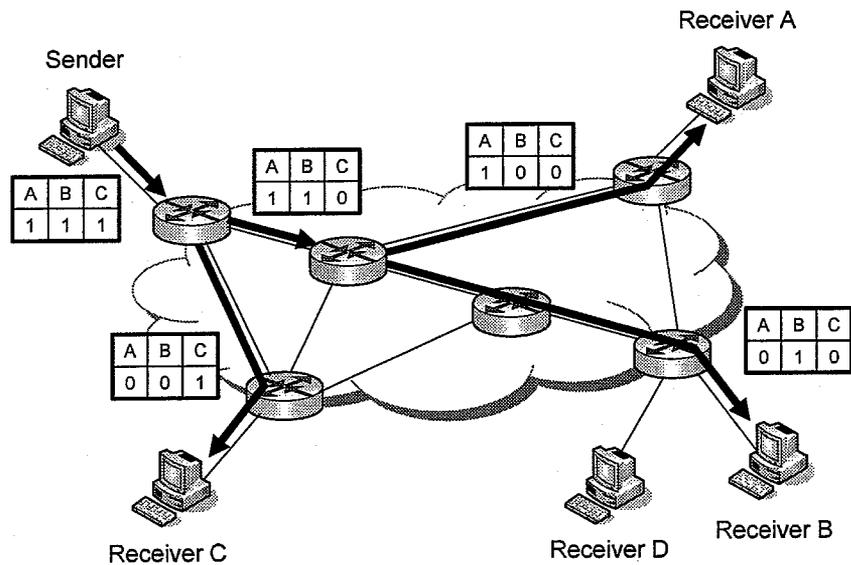


図 2.3: XCAST 通信

しては、経路上のルータでマルチキャストのステータスを保持しなくてよくマルチキャストルーティングプロトコルを必要としない、マルチキャストアドレス割り当ての重複問題を考えなくてよい、などの点がある。一方、指摘されている問題点として、複数のアドレスリストを含むことによるオーバーヘッド、複雑なヘッダ処理、受信者数が制限される、などの点が挙げられる。

以上に挙げた P2P 通信における大きな問題点として、通常のクライアントがリレーを行うことである。サーバと異なり、接続されるネットワーク帯域やホストの処理能力も不均一であるため、ノードの構成によっては十分な性能が発揮できない可能性もある。

これまでに示したように、ストリームの特性や適用範囲に応じて様々な配信手法が考えられるが、現状のネットワークでは、即時性を有するストリームをエンドホスト間で広域配信を行おうとする場合に様々な問題が存在する。これは、IP がベストエフォート型のプロトコルであり、IP パケットレベルでの転送処理を考えたアーキテクチャであることに起因している。これについて次項以降で詳説する。

2.3.2 インターネットにおけるQoS保証の実現

既存のIPネットワークの経路制御プロトコルは、リンクの接続性を検出し、それに応じて最短経路を探索することで、経路の決定が行われる。ネットワーク上を流れるIPパケットは、ルータが保持する経路表から、終点アドレスを基に次に転送すべきルータがHop-by-Hopで決められるが、その決定にリンクの特性やQoS保証などは考慮されない。そのため、特定のパケットに対するQoSを保証する経路制御や、特定のリンクにトラフィックが集中することによる輻輳を回避することができない。これらを改善するために、QoSを考慮したネットワークに関する研究も行われている。

QoS保証技術としては、Intserv/RSVPやDiffservが挙げられる。Intserv[Braden94]では帯域と最大遅延を保証するGS (Guaranteed Service) とベストエフォート型のCL (Controlled-Load Service) の2種類のサービスを定義しており、これらを実現するための資源予約を行うシグナリングプロトコルとして、RSVP[Metz99]が定義されている。Intserv/RSVPの特徴としては、個々のフローに対する制御が行える半面、コネクション数に対するスケラビリティ、RSVPを有効にするためには経路上のすべてのルータが対応することが必要であるという空間的スケラビリティの欠如、といった問題がある。このようなIntservにおける問題点を解決するためにDiffserv[Blake98]が提案されている。DiffservはQoSの差別化を目的としたアーキテクチャであり、コネクションの集合をクラスとして集約し、クラス毎に異なるQoS制御を行う。Diffservでは、ルータ上で各フローのステータスを維持する必要がなく、パケット内のDSCP (DiffServCode Point) フィールドに従いパケット毎に処理を行う。特徴としては、Intservとは逆に、スケラビリティを有することができるが個々のフローに対する適切なQoS制御が困難になるという問題がある。つまり、他のフローに対する相対的制御は行えるものの、それは絶対的な制御ではないということを意味する。

また、これらIP層におけるQoS制御の問題点として次の点も考えられる。

- IPヘッダ内のラベルや特定フィールドによる制御であり、アプリケーション毎の特性に基づいた制御ができない。
- IP層での処理のため、各ルータはパケットの識別/選択 (Classification) が必要となる。特に、処理すべきトラフィック量が多くなるにつれて、その負荷が大きくなる。

Intserv, Differvがそれぞれ、コネクションレベルでのQoS保証, QoSの差別化である一方、パスレベルでトラフィックを制御すること (TE: Traffic Engineering) によりQoSを保証する技術が提案されており、代表的なものとしてMPLS (Multi Protocol Label

Switching) [Black02] がある。MPLS はネットワーク層とデータリンク層の中間に位置し、ラベルスイッチング方式によるパケット転送を行う。これは、複数ノードをまたがったドメインのエッジノード間にパスを設定し、論理的なネットワークを構築したうえで、エッジノードで IP パケットにラベルを付与し MPLS ネットワークに流すことで、そのラベルに従って設定されたパス上をフローが流れる仕組みである。MPLS が今日多く利用されるようになった背景に、明示的な経路指定ができる点が挙げられる。帯域などのリンク情報を収集し、その情報を基に制約付き最短経路アルゴリズムにより明示的な経路を定めることで、そのパスに従ったトラフィック制御が可能になる [佐藤 02]。

MPLS は TE として非常に優れたアーキテクチャであり、今日のインターネットバックボーンでの制御などで利用されている。しかしながら同時に、宛先 IP アドレスによりフローが集約される点や MPLS が適用できる範囲が MPLS 網内に限られてしまう、などの問題も存在する。

2.3.3 広域配信における課題

これまで示してきた要素技術は、即時性を有するストリーム配信に対してベストエフォートな IP 層での制御を主としている。IP 層で行うことにより、適用アプリケーションに対するスケーラビリティを損なうことなく制御することができ、今後拡大が予想される未知のアプリケーションやサービスに対して柔軟に対応することができる。しかしながら、同時に幾つかの問題が生じる。IP 層におけるパケット転送処理は、送信ノードから受信ノードへの転送は終点アドレスのみをキーとして行われるため、含まれるデータの特性や傾向まで考慮した制御が困難となっている。ひとつの基盤の上で取り扱われるアプリケーションが多様化する中で、終点アドレスだけでなく、アプリケーションの種類や始点アドレス、回線の特徴、利用形態など、様々な要因を考慮した転送が必要とされているが、これに対応することができない。また、ルーティングと同様に QoS 制御の問題もある。IP 層での QoS 保証は、そのデータ特性やアプリケーションの特定が難しいため、要求に対して十分な制御を行うことができない。特に、伝送する範囲が広くなるにつれてリンク特性による受信品質の格差が大きくなる恐れがあるが、これに対しても十分な解決策がない。

さらに、広帯域アプリケーションを広域で展開する場合、IP インフラそのものがボトルネックとなる場合がある。特に、異なるプロトコルが混在する環境下は問題が顕著化する

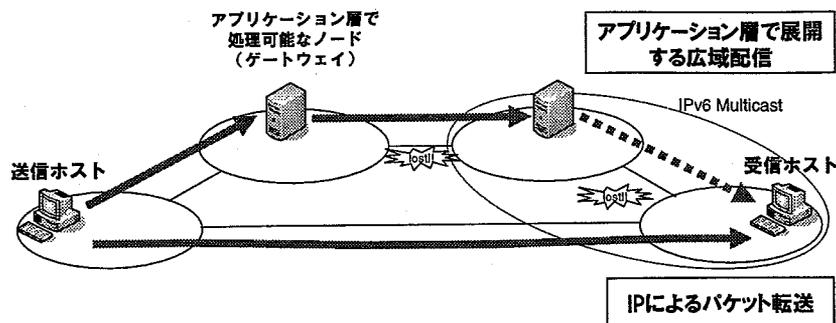


図 2.4: アプリケーション層で展開する広域通信

る. IP 層を例に考えてみると, IP マルチキャスト対応ネットワークと非対応ネットワークが混在する環境や IPv4 と IPv6 ネットワークが混在する環境などが挙げられる. IP マルチキャストの場合には, 対応ネットワークであっても 2.3.1 で述べたような障害が発生することで配送が難しくなる. また, IPv4/v6 ネットワークの混在環境は, 今後 IPv6 への移行時期には避けて通れない問題であると考えられる.

2.4 アプリケーション指向制御による広域配信

本研究では, 前節までに示した問題点に対して, IP 層で解決するのではなくアプリケーション層で制御するアプローチを考える. ネットワークレベルで QoS 保証を実現するためには多大なコストが必要となる. IP ネットワークは従来行われてきたパケットを転送することのみに徹し, アプリケーションで個別に適切な対策を行うことで, ネットワーク構築に一定の許容範囲を持たせることができれば, 構築に必要なコストも削減することができる. アプリケーション層でデータ特性や適用環境を考慮した制御を組み込むことで, IP 層で発生する諸問題を解決し効率的な配信を可能にする.

ここで, アプリケーション層制御を取り入れた広域配信の概念とその効果を考える. 図 2.4 にその概念図を示す. 本研究では, アプリケーション層制御を組み込んだエンドホストの他に, その制御に対応しエンドホスト間通信を処理できる (これを終端するという) 特定ノードをネットワークに分散配置することを考える. 本論文ではこれをアプリケーションゲートウェイ (以下, ゲートウェイ) と呼ぶ. このようにアプリケーション層での挙動をネットワーク環境やアプリケーション特性により変更可能とすることで, 以下の効果を得ることができる.

1. アプリケーション層で終端することにより, その特性に応じた制御をエンドホスト

間通信の途中で適用することができる。例えば、リンクの特性が異なる境界に設置することで、ネットワーク状況に応じた QoS 制御を行うことができる。また、アプリケーションのデータ構造に特化した制御なども組み込むことが可能となる。

2. アプリケーションルーティングが可能になる。つまり、従来の IP パケットレベルでのルーティングとは異なり、中身のデータ特性や利用しているアプリケーションの特性、利用環境などの情報を基にルーティングすることができるようになる。エンドホスト間通信において、高機能で柔軟性の高いネットワークを構築することができる。
3. アプリケーション層で様々な IP プロトコルに対応することで、IP プロトコルの差異を吸収し、柔軟な配送ネットワークを構築することができる。例えば、ゲートウェイを IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークの境界やマルチキャストネットワークと非マルチキャストネットワークの境界に設置しプロトコル変換を行うことで、アプリケーションから見て透過的な配送を実現できる。

これらを組み合わせることで、広域展開における諸問題をアプリケーション層で吸収し、アプリケーションや利用形態に特化した配送ネットワークを構築することができる。パケット損失優先や遅延優先などの制約条件に基づいた、配送ネットワークの動的構成も可能になる。従来の IP 層処理では実現不十分だったアプリケーション指向の制御が実現できるようになり、IP 層での QoS 保証と組み合わせることにより、より強固な QoS 制御を行うこともできるようになる。

その一方で、ネットワーク品質と伝送遅延はトレードオフの関係になることに注意が必要である。アプリケーション層で制御することによる冗長性が処理遅延を招く恐れがあり、ネットワーク品質によって大きく左右される。配送環境が良好な場合はアプリケーション処理は不必要であり、遅延増加は発生しないため、利用目的に応じた選択が必要になる。このように、アプリケーション層での広域展開は、その特性を活かした柔軟な配送ネットワークを構築できる反面、その影響について見極める必要があり、これらに関する詳細な検証が必要とされる。

2.5 本章のまとめ

本章では、アプリケーション特性やネットワーク接続環境、利用形態などにより多様化する広帯域ストリーム配信への要求事項についてまとめ、これに対して IP 層で要求を

満たすのではなくアプリケーション層で実現するアプローチを示した。それを基に、アプリケーション指向の配送ネットワークについて述べ、その有効性を示した。

ストリーム配信では、様々な要因により品質への要求は大きく変わってくる。広域 IP ネットワーク上で展開可能にするには、専用回線のような帯域占有型の通信路ではなく、スケラビリティを確保できるベストエフォート型のインターネット上で実現することが望まれるが、それと同時に QoS 保証を考慮することが必要となる。このとき、現在のエンドホスト間通信で発生するパケット損失やジッタに対する対策が非常に重要となるが、従来の IP 層での QoS 保証ではアプリケーション情報やメディア情報は考慮されず、アプリケーション毎の品質保証が困難であるという問題を含んでいる。

そこで本研究では、対象とするアプリケーションをリアルタイムストリーム伝送に限定し、エンドホスト間通信をアプリケーション層で終端可能なアプリケーションゲートを取り入れた、アプリケーション指向の配送ネットワークを提案した。ネットワーク層で QoS 制御を実現するのではなく、アプリケーション層でネットワークに適応しながら特性に応じて QoS を高めるアプローチをとることで、高品質で柔軟性のある通信を可能にし、IP プロトコルの差異を吸収した配送ネットワークを形成することが可能になる。

第3章 広帯域ストリーム伝送のためのソフトウェア損失回復制御

3章では、広域IPネットワーク上での広帯域ストリーム伝送を実現するための損失回復制御について示し、関連研究を挙げるとともに性能評価実験の必要性について述べる。2つの異なる損失モデルを用いた性能評価から、ソフトウェア損失回復制御の効果的な適用方法について検討し、その効果や有効性について示す。本研究で示す評価指標は、広帯域ストリーム伝送において損失回復制御を利用する際の基準の1つとすることができる。

3.1 背景と目的

ベストエフォート型のインターネットではエンドホスト間での通信品質が保証されおらず、IPネットワーク上で発生するパケット損失や伝送遅延などが上位層であるアプリケーションのQoSに影響を与える可能性があることは前章までに述べた。ネットワークレベルでパケット損失率やジッタを限りなくゼロに近づけることでQoSを保証することも考えられるが、これらの要求を完全に満たすネットワークを構築することは多大なコストが必要となり、インターネットのもつスケーラビリティと相反する。さらに、使用するアプリケーションの要求条件も様々であることから、信頼性を必要とするアプリケーション毎に個別に適切な対策を行うことが重要になってくる。

また、映像や音声といった即時性を有するマルチメディア通信では、その特性やマルチキャスト通信への対応を考慮して、トランスポートプロトコルとしてUDP (User Datagram Protocol) を用いる場合が多く、トランスポート層でのデータ伝送信頼性は保証されない。ゆえに、QoS保証を行うためにはアプリケーション層での制御が必要とされる。本研究では、広帯域ストリーム伝送におけるソフトウェア損失回復制御に焦点を当て、その効果と影響について明らかにする。

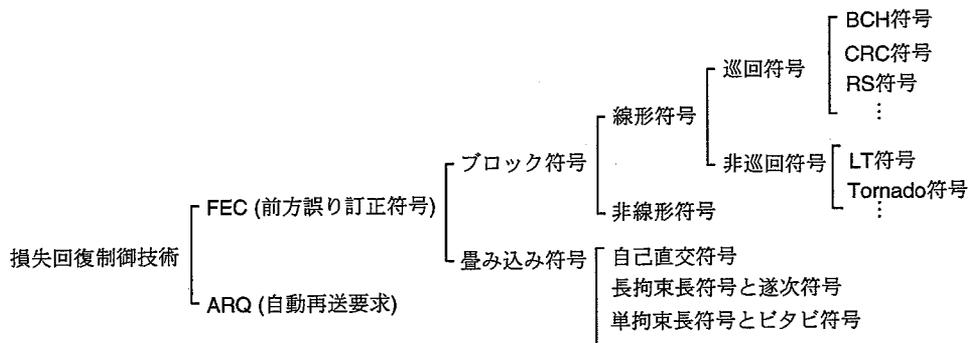


図 3.1: 損失回復制御の分類

3.2 ストリーム伝送における損失回復制御

3.2.1 損失回復制御の概要

損失回復制御を構成別に分類したものを図 3.1 に示す。ネットワーク伝送でのパケット損失回復制御は大別すると、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) 方式に分類される。両者の比較を表 3.1 にまとめる。ARQ は受信側では単純に損失の有無を検出するだけの処理に留めておき、損失を検知すると送信側に再送要求をすることで回復することができる。復号器の実装は容易となるが、その反面、損失率が高くなると再送要求による通信が多発し、効率が悪くなる。また、受信者数が大規模の場合に応答が送信者に集中する可能性があり、スケーラビリティに乏しく、マルチキャストには適さないという特徴を持つ [Rubenstein01][Kostas02]。一方、FEC はあらかじめ冗長データを付加した状態でネットワーク上を伝送させ、FEC は受信者ベースで回復処理を行う手法である。受信者駆動で回復処理が可能のため、受信者数に対するスケーラビリティに優れ、IP マルチキャストでの動画や音声のリアルタイム伝送に有効であるが、符号化および復号化のための演算処理が必要となる。また、冗長データを越えるパケット損失は復元することができない、冗長データを付与することによる帯域増加が常に発生する、といった特徴を有する [Parkins98]。

FEC にもその適用手法により大きく分けて 2 種類の符号化方式が存在する。ブロック符号は、ブロック単位で独立した符号化が行われるものであり、前後の処理に対する依存性がない。畳み込み符号 [新井 03] は過去のブロックの影響も受けて現在の符号が逐次的

表 3.1: ARQ と FEC の比較

項目	ARQ	FEC
信頼性	信頼度が高く、予測できない誤りに対して強い	非常に長いバースト誤りに対して対応が困難
遅延による影響	再送による遅延	演算処理による遅延
処理負荷	比較的軽い	演算処理負荷が発生
規模適応性	乏しい	あり
復号器の設計	簡単	若干複雑

に決まるものであり、前後のブロックとの依存関係により強度も変わってくる一方、バッファリング遅延などの影響を受ける可能性がある。畳み込み符号の代表的な符号化方法としては、やBS デジタルやCDなどのビット誤り訂正に比較的多く用いられているターボ符号がある。なお、本研究ではストリーム伝送の即時性とIP マルチキャストも含めた広域配信を対象とするため、FECとしてRS (Reed-Solomon) 符号 [Reed60] やパリティ符号などのブロック符号を用いる。

3.2.2 FECに関する先行研究

既存の損失回復制御に関する研究について議論する。

ブロック符号の符号化種類について述べる。最も単純な符号としてパリティ符号がある。これはXORによる演算で誤り検出/訂正を行う符号であり、その訂正能力は低い。また近年、1962年にGallagerによって提案された低密度パリティ符号 [D.J.C.MacKay99] が再発見され第3世代移動通信などへ実用化されている。代表的な符号としてはLT符号やTornado符号が存在する。複数ビット (シンボル) 単位で符号化する代表的な手法としてReed-Solomon符号がある。シンボル単位で符号化/復号化されるために、バースト損失に強い一方、複雑な演算処理を伴う。

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 [Rizzo97a][Luby02]。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 [田沢 01] 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られている。しかし、この損失モデルは56kbps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。また、パケット損失を効率良く復元するための様々な手法が提案されているが、高ビットレートのストリーミングに適用した場合について十分な評価がなされていない [Liang02][Rizzo97b]。一方、IPv6 フラグメント処理 [米山 00] 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 [古村 01] 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、FEC 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、そのユニット内の全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。

また、本研究では多様化するアプリケーションに対する適応性を考え、ソフトウェア処理による FEC を採用する。ソフトウェア処理の長所としては、処理機能の拡張性および柔軟性に優れており、開発コストや拡張に伴うコスト削減が可能であるという点が挙げられる。一方で、汎用プロセッサを使用することによる処理負荷の増大が短所として挙げられ、特に本研究で取り扱うような広帯域ストリームではボトルネックとなる可能性がある。故に、処理負荷と回復性能の関係性について考える必要があるが、実運用ネットワーク上での評価はこれまでほとんど行われていない。

3.3 FEC の適用手法

評価を行うにあたり、本研究が想定する損失回復制御の適用方法について述べる。

FEC によるパケット損失回復モデルは図 3.2 のように示すことができる。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。パケット内のビット誤りはチェックサム等によって検出、破棄されることにより、アプリケーション層での FEC 処理時にはパケット損失として処理される。UDP チェックサムは、UDP ヘッダとデータ全体の信頼性を保証し、IPv6 を利用する場合は必須の機能とされている。近年では、一部のビット誤りによるパケット全体の破棄を防ぐために、パケットの任意の先頭部分のみ信頼性を保証する UDP-Lite [Larzon04] も提案されている。しかし、本論文ではパケット全体の信頼性を保障するため、通常の UDP チェックサムを用いるものとする。

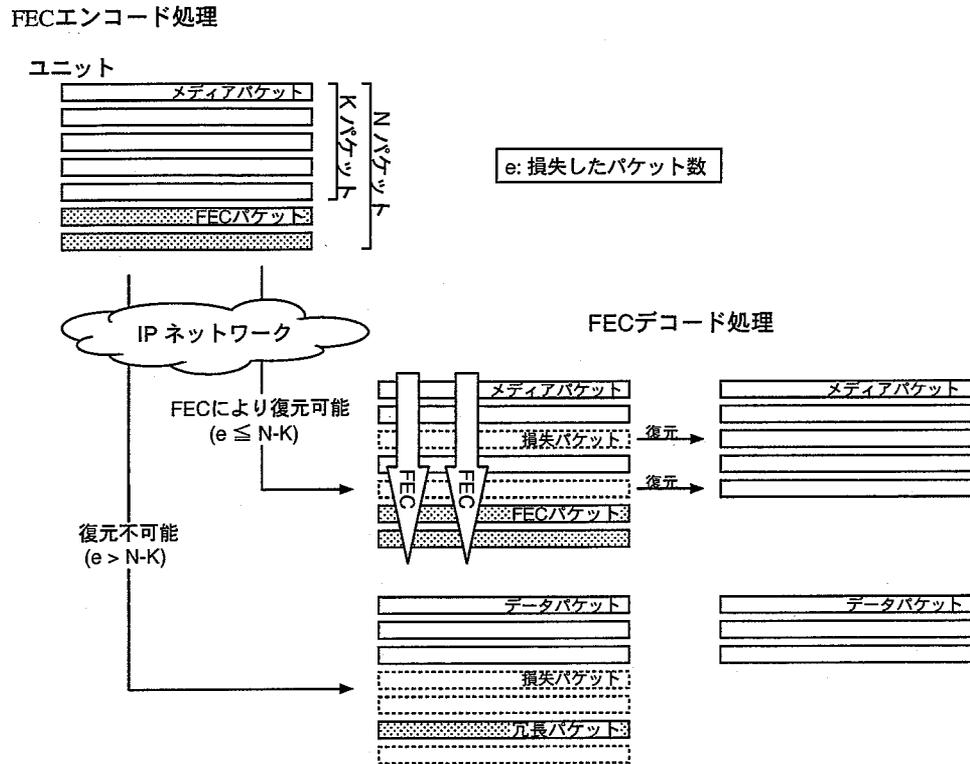


図 3.2: FEC によるパケット損失回復モデル

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 [山内 98] が一般的に用いられる。これは、複数メディアパケットデータを1つのFECユニットとし、FECユニット含まれるメディア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なう手法である。ここで、メディアパケットはユーザデータを指し、FECパケットはFEC処理によって新しく生成したパケットである。この場合、パケットの回復性能はFEC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、FEC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。以降、本論文ではこれを (N, K) 符号と明記する。

パケットインタリーブを用いる場合のモデルを図 3.3 に示す。FECユニットを余分に深さ (d) 分バッファリングしインタリーブを行う処理単位をインタリーブユニットと定義する。バッファリングした各々のパケットをラウンドロビンにより送出することで、途中で発生したバースト損失を複数FECユニットに分散させることができ、処理負荷や冗長帯域の増加なしに効率よく損失を復元できることが可能になる。図では、6パケット連続して損失するバースト損失に対し、 $d = 2$ のインタリーブにより3つのFECユニットに分散して復元する様子を示している。

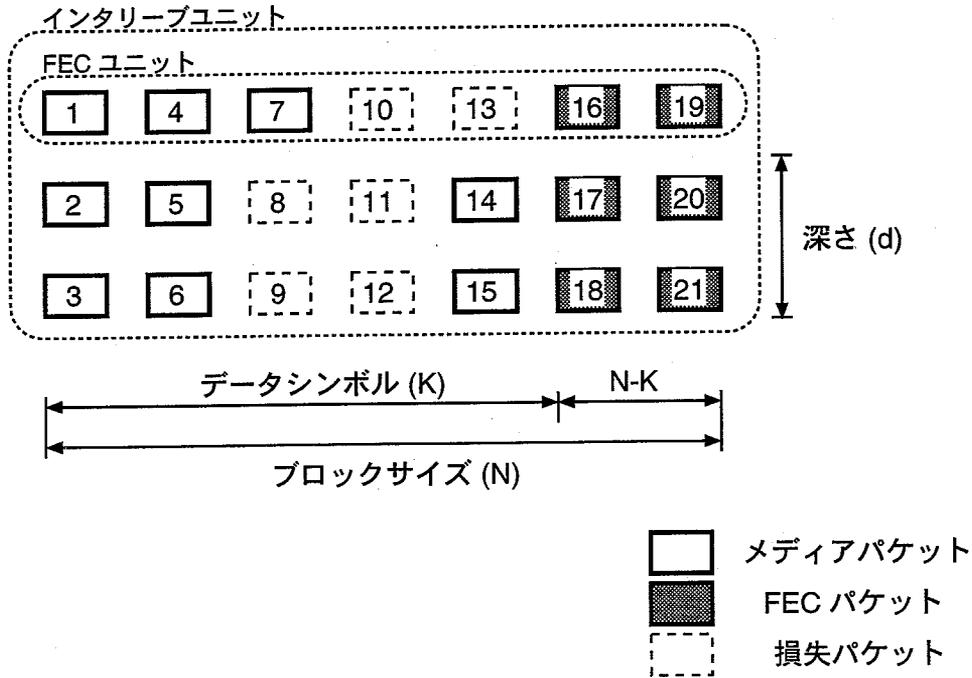


図 3.3: パケットインタリーブ法による FEC

3.4 性能評価実験

広帯域ストリーム伝送における FEC の回復性能について定量的評価を行う。FEC の誤り訂正能力には限界があり、回復能力を越えるパケット損失に対応することができない。一方、必要以上に高い冗長度を適用することは処理負荷や伝送帯域・他のストリームとの親和性の面から見て好ましくない。そのためにも、回復性能とその影響について定量的に評価する必要がある。本研究では、ランダム損失の場合と実運用ネットワークの損失モデルを用いた場合の 2 つのパケット損失の発生パターンについて、回復性能を求めることで、FEC の有効性を検証する。なお、使用する FEC にはブロック符号である RS-FEC とする。ここで示す実験結果は、今後 FEC を利用する場合において、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制御パラメータを決定する指標の一つとすることができる。

3.4.1 ランダム損失に対する評価実験

FECの基本回復性能の評価実験として、ネットワークの packets 損失率に対する RS-FECによる復元後の packets 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、実測による評価実験の妥当性を述べる。さらに、パリティ符号との比較を行うことでRS符号による有効性を示す [近堂 04]。

3.4.1.1 理論式による解析的評価

理論式の導出には図 3.2 で示した回復性能モデルを用いる。FEC ユニット内で復元不可能な packets 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 packets はそのまま受信データとして扱う。FECは (N, K) 符号とし、各 packets 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。即ち、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、各 packets の損失にも相関のないものと仮定している。

個々の packets の損失率を p としたとき、FEC 復元後の packets 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 packets 数の期待値を求め、 K で除算すると FEC 復元後の packets 損失率の理論値が得られる。データ packets 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。

$$P[X_i] = {}_K C_i p^i (1-p)^{K-i} \sum_{j=t}^{N-K} {}_{N-K} C_j p^j (1-p)^{N-K-j}. \quad (3.1)$$

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

(3.1) 式は復元できなかったデータ packets 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 packets の損失のみで $N-K$ を越える場合、もう 1 つはデータ packets と冗長 packets 合わせて $N-K$ を越える場合である。前者 $(N-K < i \leq K)$ の場合、冗長 packets 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、 Σ 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 $N-K$ 個までの時となる。故に、 t はデータパケットの損失が冗長度を越える境界で場合分けする必要がある。

$i=0$ の場合は全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ければならないので

$$P[X_0] = \sum_{j=0}^{N-K} {}_N C_j p^j (1-p)^{N-j}. \quad (3.2)$$

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。

$$\begin{aligned} P[X] &= \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K iP[X_i] \\ &= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K i {}_K C_i p^i (1-p)^{K-i} \sum_{j=t}^{N-K} {}_{N-K} C_j p^j (1-p)^{N-K-j}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

3.4.1.2 実測定による定量的評価

実測定による定量的評価を行うために、RS-FECによるパケット損失回復機能を付加した伝送システムのプロトタイプを実装した。高品位映像伝送システムについては4章にて詳説するため、ここではFEC実装部のみ説明する。

FEC処理の実装

プロトタイプシステムの処理概要を図3.4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。

FECのエンコード/デコード処理にはRS-FECパッケージ [Karn] を用いてシンボル長4ビットの $(15, K)$ 符号を実装した。FECエンコード/デコード処理は図3.2と同様に、複数パケットデータに対して垂直方向にFECを行なう。

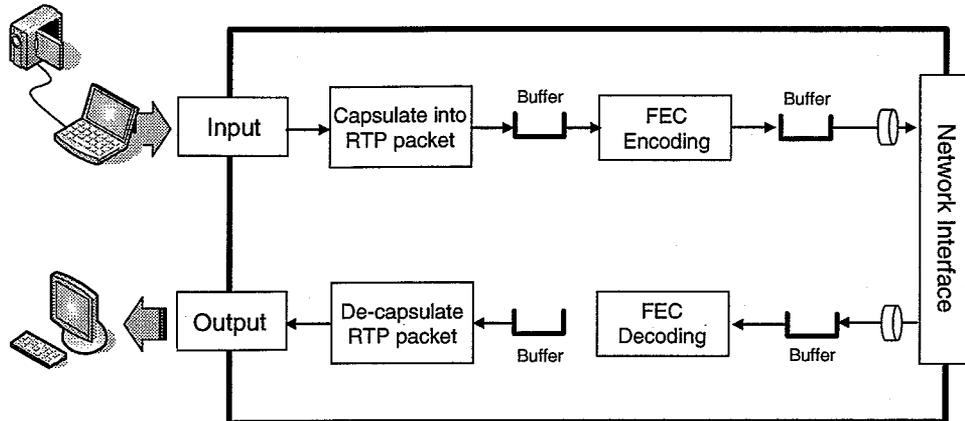


図 3.4: 伝送システムのプロトタイプ

実装におけるパケットフォーマットを図 3.5, FEC ヘッダフォーマットを図 3.6 に示す。パケットは RFC3350 [Schulzrinne03] に準拠した RTP パケットフォーマットとしている。復元処理に必要な FEC パラメータを受信側に通知するために, RTP の拡張ヘッダとして FEC ヘッダを実装した。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 3.6 で示される FEC ヘッダ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, 処理の簡単化を考慮して 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 個が冗長パケット) として処理している。以上のデータをパケット内に格納することで, 受信者駆動で独立した FEC デコード処理が可能となる。

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, 独自フォーマットを採用している。FEC によって生成されるのはデータ部分のみで, ヘッダ (IP, UDP, RTP, FEC) は冗長化しない。

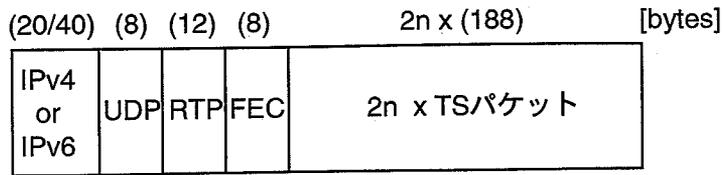


図 3.5: パケットフォーマット

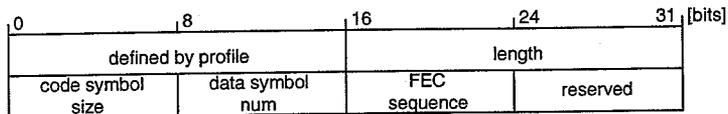


図 3.6: FEC ヘッダフォーマット

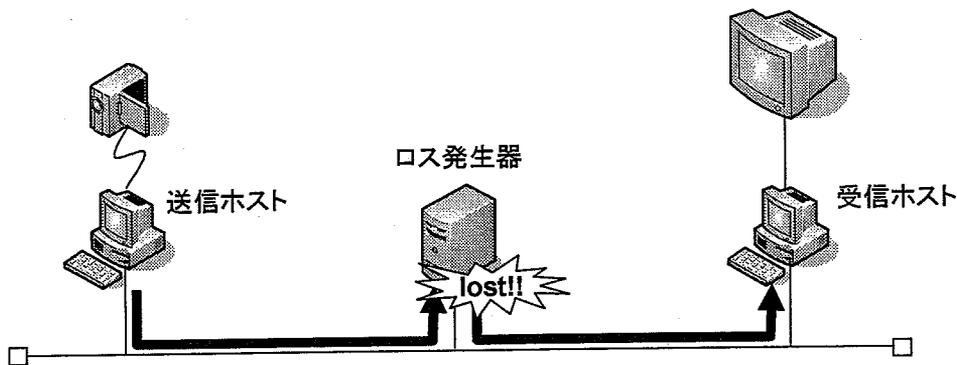


図 3.7: FEC 回復性能の実測定環境

ロス発生器による実測定

図 3.7, 表 3.2 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、送信ホストからロス発生器経由で受信ホストへ転送し、その際にロス発生器では 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い、理論式との比較を行う。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 復元前後のパケット損失率を 1 時間測定した。

表 3.2: 使用機器の仕様

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

3.4.1.3 実験結果と考察

パケット損失率の測定結果とともに式 (3.3) から算出した各冗長度の理論値を図 3.8 に示す。横軸は FEC 復元前のパケット損失率、縦軸は復元後のパケット損失率である。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、実証実験の有効性を確認し、本実験結果がネットワークのパケット損失率に対して FEC 復元後のメディアデータの損失率を計算する上での一つの指標とすることが可能であることが分かった。

3.4.1.4 パリティ符号との比較

次に、比較対象としてパリティ符号による損失回復性能の理論式を導出する。この方式は RFC2733[Rosenberg99] 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。

データパケット数を 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 、各パケットのパケット損失率を p とし、パケットの損失確率 P_i を計算する。まずパリティチェック後のパケット損失が 0 個となる確率は全パケット ($K+1$) 個が届く場合とデータパケット K 個が届き、パリティパケットが損失する場合があるので

$$P[X_0] = (1-p)^{K+1} + {}_{K+1}C_1 p(1-p)^K$$

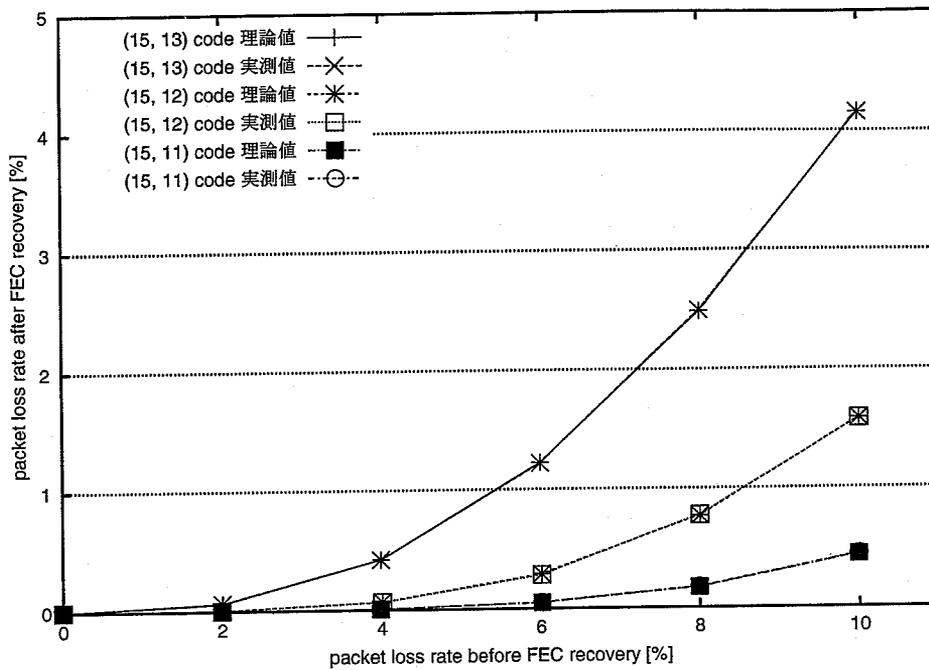


図 3.8: RS 符号を用いた場合の FEC 性能測定結果

$$= (1 + Kp)(1 - p)^K. \quad (3.4)$$

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

$$\begin{aligned} P[X_1] &= {}_K C_1 p (1 - p)^{K-1} \times p \\ &= K p^2 (1 - p)^{K-1}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

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

$$\begin{aligned} P[X_1] &= {}_K C_1 p (1 - p)^{K-1} \times p \\ &= K p^2 (1 - p)^{K-1}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

表 3.3: 帯域増加量の比較

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

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

$$P[X_i] = {}_K C_i p^i (1-p)^{K-i}. \quad (3.7)$$

パリティチェック後の損失パケット数の期待値を $E[X]$ とすると、 $E[X] = \sum_{i=0}^K i P[X_i]$ で表せられるので、パリティチェック後のパケット損失率 $P[X] = E[X]/K$ は次のようになる。

$$P[X] = p^2 (1-p)^{K-1} + \frac{1}{K} \sum_{i=2}^K i {}_K C_i p^i (1-p)^{K-i}. \quad (3.8)$$

パケット損失率を 0% から 10% まで 2% ずつ変化させた場合の式 (3.8) に基づくパリティチェック後のパケット損失率の変化を図 3.9 に示す。

図 3.8 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パケットの個数を増やすにしたがって大きくパケット損失率が改善されていることが分かる。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 3.3 に各冗長度における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-FEC の方が復元後の損失率がかなり改

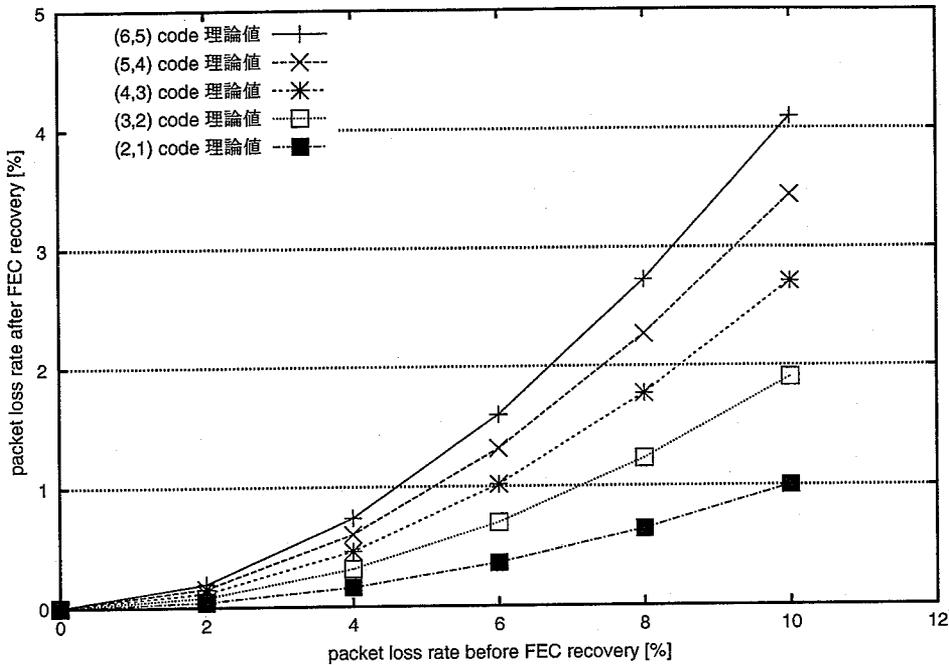


図 3.9: パリティ符号を用いた場合の性能測定

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。

3.4.2 実運用ネットワーク上でのバースト損失に対する評価実験

前項では、二項分布に従う簡単な損失モデルを用いた評価について述べた。しかしながら、実運用ネットワークではルータ上でのキュー溢れなどにより連続するパケット損失（バースト損失）が発生することが知られており、これが FEC の回復性能に大きく左右する。バースト損失を効果的に回復するための対策として、インタリーブとの併用やブロックサイズを拡大することが挙げられる。しかしながら、その影響や回復性能について十分な定量的評価は行われていないため、実インターネット環境におけるパケット損失に対する評価を行い、バースト性を有する効果を見極める必要がある。本研究では、

評価実験を行うに当たり、実環境におけるパケット損失のトレースを採取しロスパターン特性を決定する損失モデルを推定する。次に、そのロスパターンを用いた回復性能のシミュレーション実験とソフトウェア処理による処理遅延と負荷の実測定より、これらの関係性について調べる。さらに、結果と考察から広帯域ストリーム伝送における FEC の適用方法について検討する [近堂 05]。

3.4.2.1 パケット損失モデルの推定

ネットワーク上のパケット損失の特性に関する研究は、これまで様々な報告がなされている [Bolot93][Borella98][Yajinik99][Chung03]。パケット交換ネットワークにおけるパケットの到着確率は、公衆電話網などでみられるポアソン過程ではなく、Self-similar (自己相似性) で Long-range dependence (長期依存性) の特徴を持つことが、これまでの解析結果として示されている [串田 03]。ここで、自己相似性とは、パケット損失や到着間隔などのバースト性が観測するタイムスケールによらないことを意味する。このような環境下では各パケット損失に時間的依存関係があり、バースト性をもつパケット損失が発生すると考えられる。FEC は、パケット損失の分布がその回復性能に大きく影響するため、評価を行うにあたりこの点を考慮する必要がある。

RFC3357[Koodli02] に、インターネット上のパケット損失に関する特性を見極めるために、連続してパケット損失する長さを表す “loss period” (損失長) とパケット損失の発生間隔を表す “loss distance” (損失間距離) の 2 つの基準が定義されている。なお、本論文では、連続して損失するパケット損失をバースト損失と定義する。この点を考慮したモデルの研究が、これまでなされている [Jiang00]。本論文も、この 2 つの要素を取り扱ったロスパターンを考えることで、ブロードバンド環境におけるバースト性をもつパケット損失をシミュレートする。

バースト損失のモデルでは、Gilbert モデルや Markov モデルなどが用いられているが、本論文ではバースト損失を適切にモデル化できる Extended Gilbert モデルを採用する。Extended Gilbert モデル [Sanneck00] は図 3.10 に示すように、過去の n 連続で損失した状態により現在の状態が決まる、つまり、 $P[X_i | X_{i-1} \text{ to } X_{i-n} \text{ all lost}]$ となるモデルである。

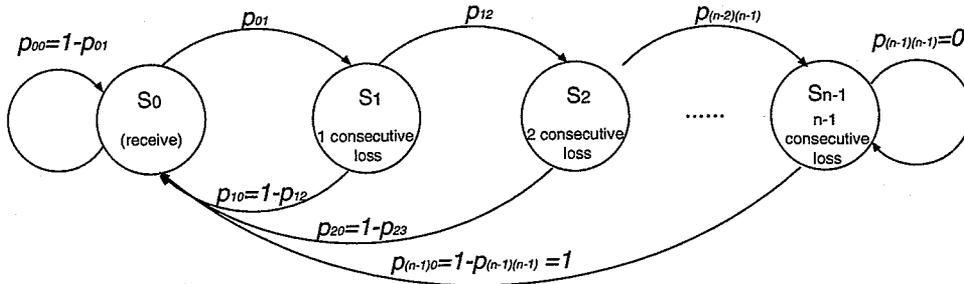


図 3.10: Extended Gilbert モデル

この推移行列は以下ようになる。

$$P = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{10} & \cdots & p_{(n-1)0} \\ p_{01} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_{12} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix}$$

よって各状態確率 $(\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{(n-1)})$ は次のように計算される。

$$P \times \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \vdots \\ \pi_{(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \\ \vdots \\ \pi_{(n-1)} \end{bmatrix}, \quad \sum_{i=0}^{n-1} \pi_i = 1$$

Extended Gilbert モデルは損失長のモデルであり，損失間距離に関しては考慮されていない。ある FEC のパラメータを決定したとき，その回復性能は発生するパケット損失の間隔に大きく依存するため，同じ平均パケット損失率でも損失間距離の違いにより回復性能も異なってくる。以降では，これを考慮した損失モデルについて考える。

ブロードバンドインターネット環境のパケット損失特性を Extended Gilbert モデルで表すために，実ネットワークのトレースデータを採取し，損失パターン特性を決定する。

本実験における，使用機器および実験構成図を表 3.4，図 3.11 に示す。実験では，TCP を含む様々なフローが混在する実運用ネットワーク環境を用いて行った。hostA は広島大学のネットワークに接続された PC で，hostB は FTTH 100Mbps サービスを受けている一般家庭に設置された PC である。traceroute の結果では，東京を経由して SINET と ISP バックボーンが接続され，両ホスト間には 16 のルータが接続されていた。

表 3.4: 使用機器の仕様

	host A	host B
CPU	P3 Mobile-750 MHz	P4-1.5GHz
memory	256MB	512MB
OS	Vine 2.6r4	Vine 2.6r4

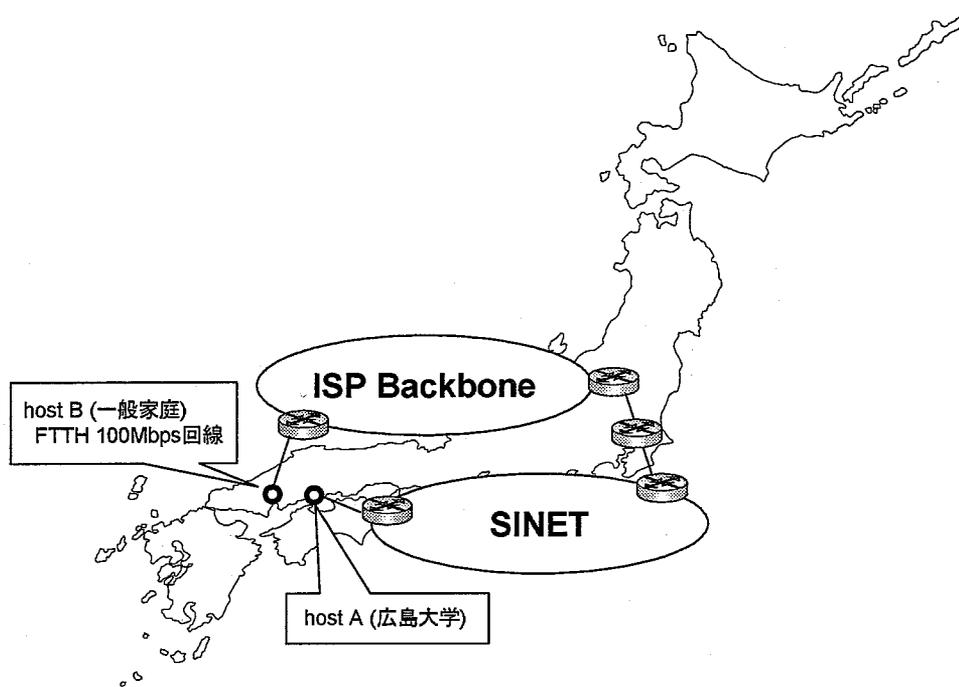


図 3.11: 実験構成図

測定を行うにあたり、RTC (Real Time Clock) [Gortmaker96]を利用して ($i/8192$) μsec 間隔 ($i = 1, 2, 3, \dots$) で RTP パケットが送出可能なシステムを構築した。これを用いて、host A から host B へ一定レートのトラフィックを流し、host B で受信パケットの RTP ヘッダ内のシーケンス番号およびタイムスタンプを記録することで、損失パケットと伝送遅延のトレースを採取した。測定では、データ長 1128Byte とし、データ伝送レートは BS/地上デジタル放送のハイビジョン放送波として使用されている MPEG2-TS (Transport Stream) 程度を想定し、24.6Mbps ($i = 3$) とした。

時間帯における平均パケット損失率、平均損失長、損失長の分散、最大損失長と全てのトレースデータを合わせた統計を表 3.5 に示す。このように、特性が時間帯によって大きく変動していることが分かる。ブロードバンド環境下では、伝送帯域が確保されてい

表 3.5: 各時間帯でのトレースデータの詳細

trace	Date / Time	Avg. Loss Rate [%]	Avg. burst length [pkt.]	deviation [pkt.]	Max. burst length [pkt.]
1	04220 / 13:35 - 16:25	0.00964	2.44	13.02	266
2	04220 / 16:50 - 19:50	0.1939	1.20	0.536	23
3	04221 / 14:45 - 16:25	0.9681	1.24	0.576	12
4	04221 / 19:10 - 21:10	3.9315	1.22	0.650	283
5	04223 / 10:00 - 12:25	0.1098	1.50	3.283	193
6	04223 / 12:30 - 14:50	0.1686	1.39	0.790	30
7	04223 / 15:20 - 17:40	0.1667	1.38	1.137	139
statistics of all traces		0.793	1.238	0.849	283

でもパケット損失が発生し、そのバースト性は時間的な要素により大きく変わることができる。

実トレースデータを基に、損失長と損失間距離の2つの観点から損失モデルのパラメータを推定し、評価で用いるロスパターンを決定する。Extended Gilbert モデルの推移確率の計算には、表 3.5 に示した全トレースデータから得られた損失長の統計を用いた。Extended Gilbert モデルにおける推移確率の計算式は以下のようなになる [Jiang00]。ここで、 $m_i, i = 1, 2, \dots, n-1$ を長さ i のバースト損失の発生回数 ($n-1$ が最大損失長) で、 m_0 を到着したパケット数とする。

$$p_{01} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} m_i}{m_0} \quad (3.9)$$

$$p_{(k-1)(k)} = \frac{\sum_{i=k}^{n-1} m_i}{\sum_{i=k-1}^{n-1} m_i} \quad (3.10)$$

実トレースの特性がモデルに反映されているかどうかを確認するために、算出した推移確率を用いて loss/receive の状態遷移のシミュレーションを行い (試行回数 10^9 回)、損失長について記録した。

実トレースと推定したパラメータの比較を表 3.6 に示す。結果より、平均値はほぼ実測データに沿って推移しており、バースト損失も実現できていることが確認できる。次に、採取したトレースデータの損失間距離の統計を図 3.12 に示す。横軸はパケット損失間隔で、縦軸は全体に対する発生割合である。先に述べたように、Extended Gilbert モデル

表 3.6: 実トレースデータと Extended Gilbert モデル

loss run length	1	2	3	4	5	6	7	8
Trace [%]	81.78	14.30	2.96	0.68	0.18	0.060	0.017	0.006
Extended Gibert Model [%]	81.78	14.30	2.96	0.68	0.18	0.060	0.016	0.006

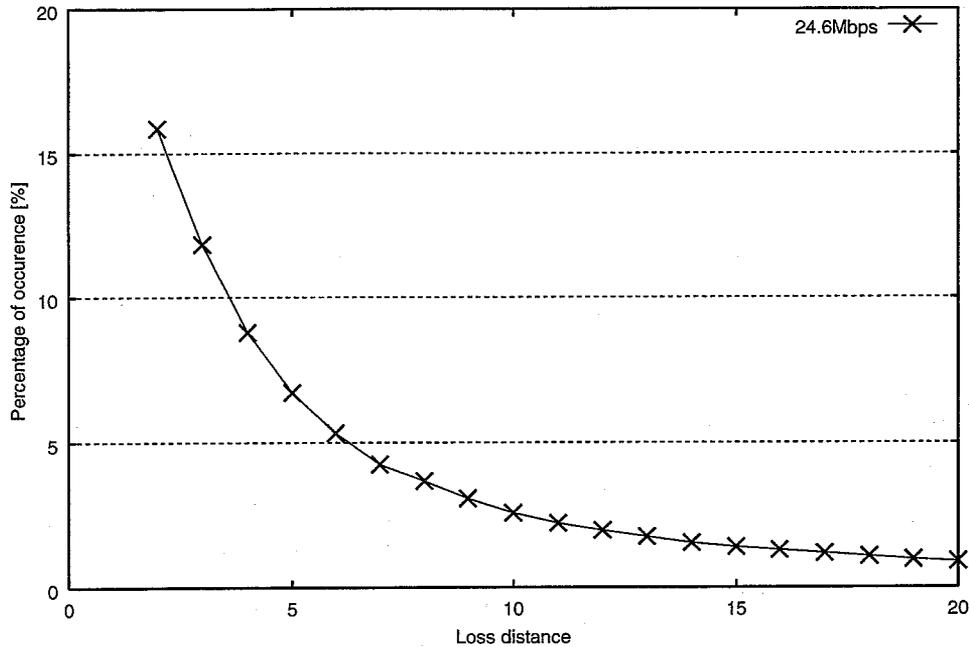


図 3.12: 実トレースの packets 損失間距離

は損失長のみで損失発生間隔については考慮されていないが、この図から分かるように、実ネットワークでは損失間距離にかなりの偏りがあることが分かる。

以上の結果より、FECの評価を行う際に用いるロスパターンとして、Extended Gilbert モデルによる損失長に加え実トレースで観測された損失間距離の偏りを反映したものを生成する。

3.4.2.2 回復性能のシミュレーション実験

実験では、1 パケット 1128Byte、伝送レート 24.6Mbps の CBR UDP ストリーム（パケット送信間隔は $358.2\mu\text{sec}$ ）に対して RS-FEC やインタリーブを利用した時の回復性能と処理負荷について調べた。RS 符号はブロックサイズ $N = 15, 30, 60, 90$ の 4 種類を用いた。

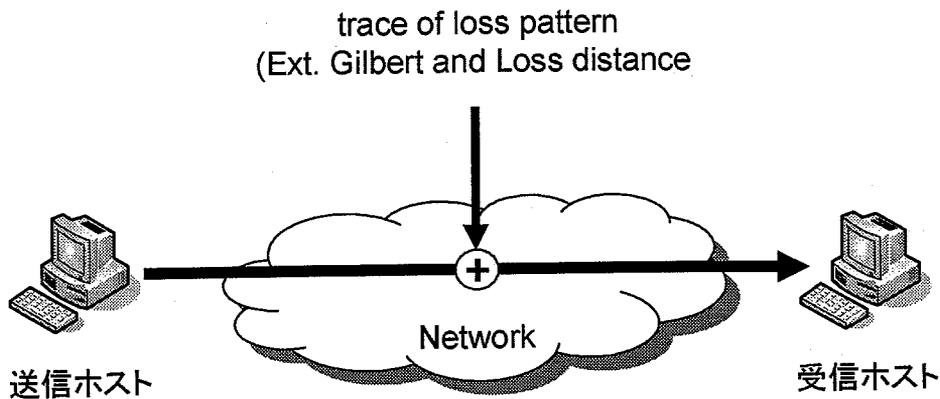


図 3.13: シミュレーション方法

表 3.7: 生成したロスパターンの特性

Avg. Loss Rate [%]	Mean burst length [pkt.]	deviation [pkt.]	Max burst length [pkt.]
0.6638	1.238	0.9821	139

シミュレーション環境を図 3.13 に示す。FEC のブロックサイズ、冗長度、インタリーブの深さ、および生成したロスパターンを入力パラメータとし、FEC 復元後のメディアパケットの損失率を計算するプログラムを作成し、1 時間のストリーム伝送を想定したときの回復性能について調べた。

FEC の適用方法は図 3.2、図 3.3 の通りとし、ロスパターンは、Extended Gilbert モデルに図 3.12 の実トレースの損失間距離を考慮して生成した。その特性を表 3.7 に示し、パケット損失率の時間的変動の様子を図 3.14 に示す。なお本実験では、冗長度が変化したことによる帯域増加による損失率の変動は考慮していない。回復性能について評価する点は、以下の 2 点である。

1. 冗長度とインタリーブの深さを変化させた場合の比較
2. ブロックサイズを大きくした場合とインタリーブの深さを深くした場合の比較

(1) は、インタリーブの深さを変えることでどの程度損失が抑制できるかを調べるためである。(2) は、同じバッファリングパケット数と冗長度（帯域消費量）における回復性能と、同じ誤り訂正能力を提供する時の遅延時間の両側面からの比較を行う。なお、本

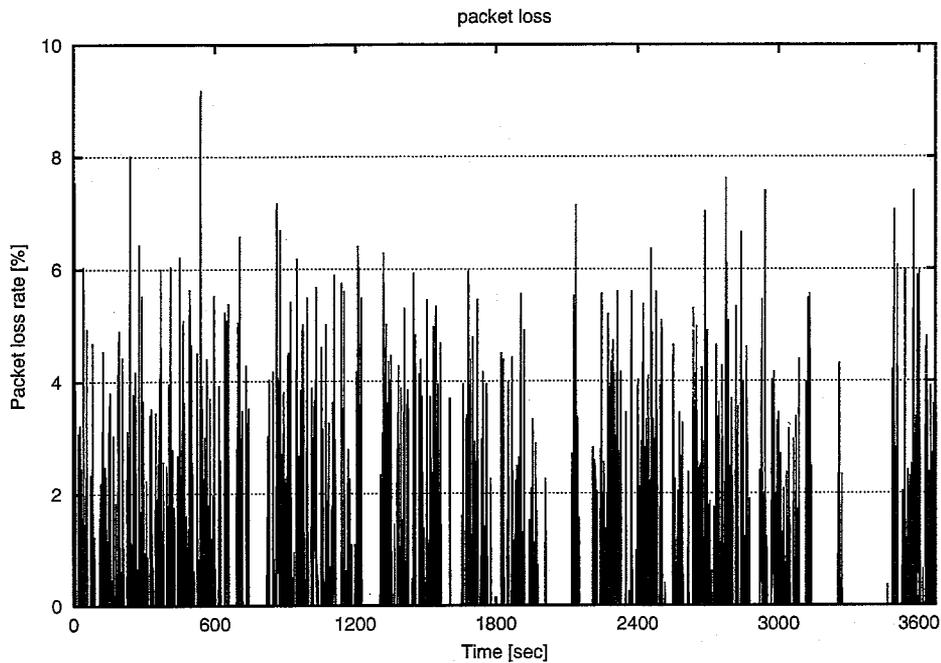


図 3.14: パケット損失の時間的変動

論文で取り扱うバッファリングパケット数とブロックサイズ、インタリーブの深さの関係を表 3.8 に示す。

3.4.2.3 回復制御処理負荷と処理時間の実測定

処理負荷の実測定

実トレースデータを採取する際に使用した UDP トラフィック発生プログラムに 1 シンボル 8 ビット長の RS-FEC を実装し、FEC のソフトウェア処理による負荷を調べた。送信および受信ホストには CPU PentiumIV-2.8GHz の PC を用いて測定を行った。RS-FEC には、3.4.1.2 と同様に Phil Karn によって作成された RS ライブラリを使用した。

評価の指標は、帯域消費量 1.15 倍固定でシミュレーション実験と同様のブロックサイズでの FEC エンコード/デコード処理による CPU 使用率とした。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し、1 時間の平均

表 3.8: FEC, インタリーブとバッファリングパケット数の関係

バッファリング パケット数	インタリーブの深さ d			
	(15,13)	(30,26)	(60,52)	(90,78)
30	1	0	—	—
60	3	1	0	—
90	5	2	0	0
120	7	3	1	0
180	11	5	2	1
360	23	11	5	3
540	35	17	8	5

値とする。デコード処理負荷の測定には、生成したロスパターンに従ってパケット損失を発生させることが可能なロス発生器をホスト間に挿入することで、図 3.14 のロスパターンで行った。測定結果を表 3.9 に示す。

処理時間の実測定

処理負荷の実測定時と同様の環境で、FEC ユニット単位のエンコード/デコード処理時間について調べた。 10^5 ユニット分の FEC 処理時間から 1 ユニット当りの処理時間の平均値を求めた。デコード処理時間の測定には、最も処理時間を必要とする場合として、ユニット内で回復可能な上限値である $N - K$ 個のパケット損失を意図的に発生させ測定した。なお、 $N - K$ 個以上のパケット損失が発生した場合には、FEC デコード処理は行われないうちに注意が必要である。結果は表 3.9 に示す。

3.4.2.4 実験結果と考察

3.4.2.2 の (1) について、冗長度とインタリーブの深さの変化に伴う回復性能の一例として、 $(15, k)$ 符号 ($k = 11, 12, 13$) における測定結果を図 3.15 に示す。横軸はインタリーブの深さで、縦軸が FEC 復元後の損失率である。インタリーブユニットを大きくすると、ユニット内に含まれる損失数も増えるために、バッファリング遅延に対する復元性能は低くなる。許容する遅延時間とネットワーク特性から、適切な冗長度と深さを選択する必要があるといえる。

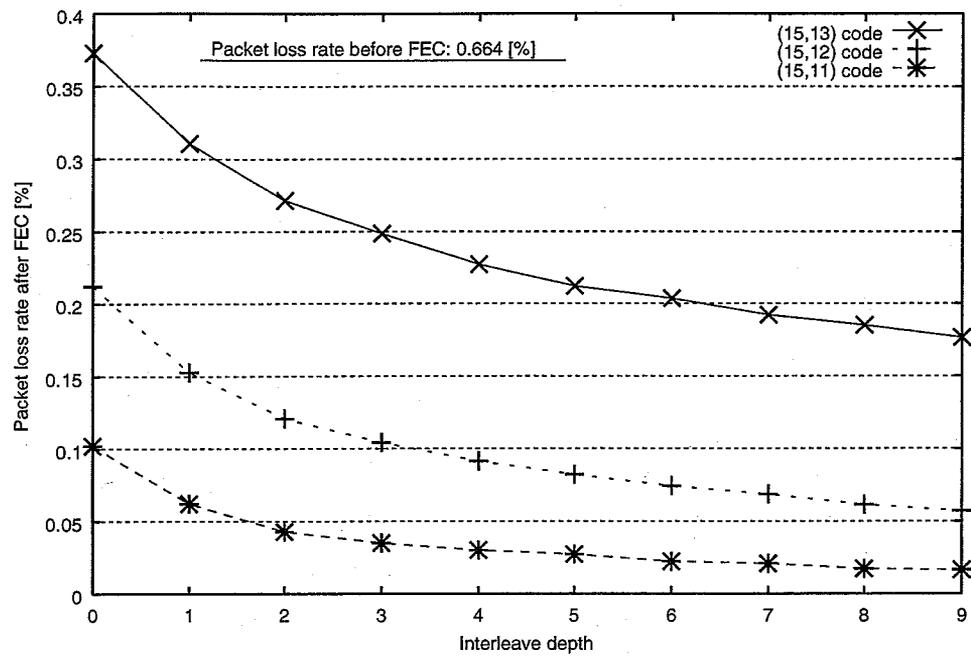


図 3.15: インタリーブの効果 (N=15)

表 3.9: インタリーブとブロックサイズを変化させた場合の比較

バッファリング パケット数	FEC 復元後の損失率 [%]			
	(15,13)	(30,26)	(60,52)	(90,78)
30	0.311	0.291	—	—
60	0.248	0.216	0.189	—
90	0.212	0.171	—	0.121
120	0.192	0.147	0.110	—
180	0.170	0.118	0.081	0.063
360	0.135	0.081	0.041	0.027
540	0.119	0.064	0.025	0.017
FEC エンコード処理負荷 [%]	75.9	70.9	83.0	92.1
FEC デコード処理負荷 [%]	16.3	12.1	14.5	17.0
FEC エンコード処理時間 [msec]	3.05	5.76	14.04	24.98
FEC デコード処理時間 [msec]	4.06	7.11	16.01	27.07

次に、3.4.2.2の(2)および実測定結果より、バッファリングパケット数を同じに設定したとき、ブロックサイズを拡大した場合とインタリーブの深さを変化させた場合の回復性能と処理時間および負荷の比較結果を表3.9に示す。ここで、インタリーブ処理はバッファリングと送出順序を変更する処理のみであり、これによる負荷はないものとする。なお、図中のハイフンで示す部分は、バッファリングパケット数がブロックサイズ境界と一致しないために、測定不可能な点である。また、図3.16にデコード処理に伴うCPU使用率の時間的推移を併せて示す。

表3.9の結果より、ソフトウェア処理負荷については、エンコード処理ではブロックサイズを拡大することで処理時間および負荷が上昇する傾向にあることが分かる。デコード処理負荷については、図3.16に示すように、細かい粒度でCPU使用率を見ると、1049秒のところ(▼印)などでブロックサイズに応じてCPU負荷が上昇している部分があることが分かる。しかし、生成したロスパターン特性よりデコード処理を必要としないFECユニットが支配的であるため、ブロックサイズによる違いが顕著に現れず、全体的に平均値が低くなっている。また、(15,13)符号と(30,26)符号を比較すると、(15,13)符号の方が負荷が高くなっている。これは、ブロックサイズが小さい範囲ではユニット単位の処理時間がほとんど変わらないため、演算回数の多いことが起因していると考えられる。

ソフトウェアFEC処理では、高ビットレートのストリームに対してFECエンコードおよびデコード処理が実時間で処理可能かどうか重要になる。これは、FEC処理において、 i 番目のFECユニットが形成されるまでに $i-1$ 番目のFECユニットの処理が終了しているかということと同等であると考えられる。つまり、FECエンコードおよびデコード処理時間ともに、FECユニット形成のためのパケットバッファリング時間より小さい必要がある。FEC処理時間は、各ブロックサイズにおいて最も処理時間を必要とする場合を考え、表3.9のFEC処理時間の測定結果から比較した結果を図3.17に示す。横軸はデータパケットのバッファリング数、縦軸は時間を示す。この結果より、FECエンコード/デコード処理ともにバッファリング時間を下回っており、実時間で処理可能であることが分かる。実測定では、(90,78)を越えるブロックサイズでは実時間処理が不可能であった。

本論文の構成における、インタリーブとFEC処理に伴う遅延について考察する。メディアパケットの送出間隔を i 、FECエンコード時間を F_e 、デコード時間を F_d 、インタリーブの深さを d とし、図3.3における $d=0$ のFECユニットの遅延について求める。なお、本論文では、ソフトウェア処理固有の遅延(メモリの確保、データのコピー等)につい

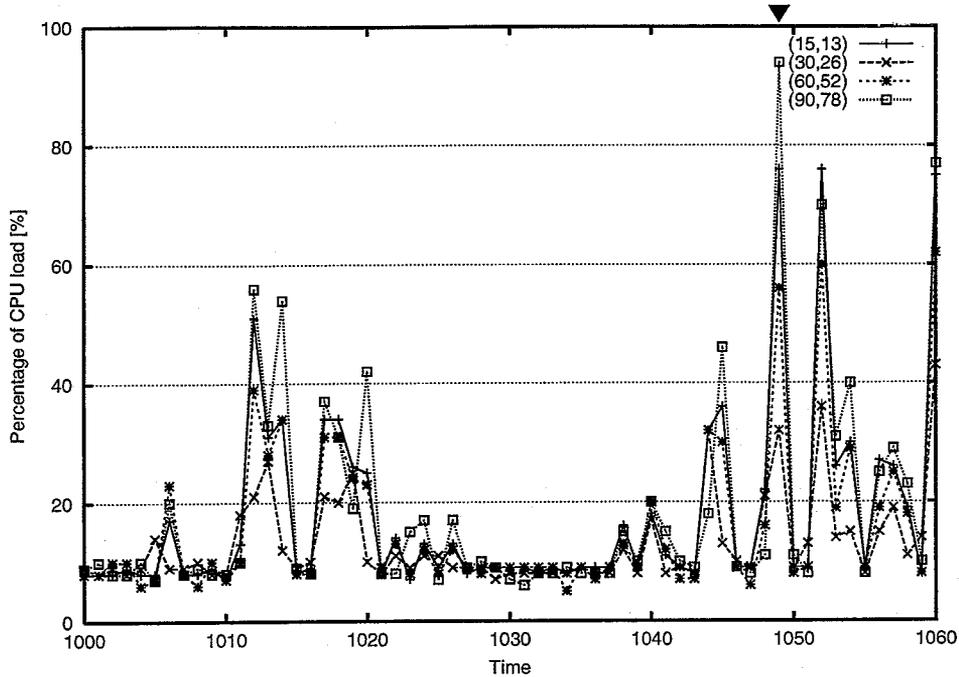


図 3.16: デコード処理時の CPU 使用率の時間的推移

てはブロックサイズやインタリーブの深さに依存しないため考慮しない。

送信側での遅延 t_s は、

$$t_s = \{(K \times i_s) + F_e\}(d + 1) \quad (3.11)$$

一方、受信側での遅延 t_r は、

$$t_r = \{(N \times i_r)(d + 1)\} + F_d \quad (3.12)$$

となり、 $t = t_s + t_r$ が FEC を付加したことによる遅延となる。

上式と表 3.9 から求めた遅延時間を表 3.10 に示す。なお、送信側の i_s は実験環境と同じく $358.2 \mu\text{sec}$ とし、受信側の i_r は帯域消費量 1.15 倍の冗長符号の付加を考慮したレート $310.5 \mu\text{sec}$ とした。この結果より、ブロックサイズが小さなところでは影響がほとんど見られないが、大きくするに従い生成する冗長パケットも増え、復元パケット数も増加するため、処理遅延時間が増大していることが分かる。故に、ソフトウェア処理の影響としてこの点を注意する必要がある。

表 3.10: FEC とインタリーブによる遅延時間

バッファリング パケット数	遅延時間 [msec]			
	(15,13)	(30,26)	(60,52)	(90,78)
30	28.79	31.5	-	-
60	53.52	55.89	67.31	-
90	78.25	80.28	-	107.9
120	102.9	104.7	118.6	-
180	152.4	153.4	169.9	188.8
360	300.8	299.8	323.7	350.5
540	449.2	446.1	477.7	512.3

最後に、表 3.9 と表 3.10 の結果から、ブロックサイズを拡大した場合とインタリーブの深さを変化させた場合の回復性能と遅延について比較を行う。同じ帯域消費量、バッファリング時間であれば、インタリーブユニットよりもブロックサイズを大きくする方がよい回復性能が得られることが分かる。これは、インタリーブでは基本となる FEC ユニットの制約があるのに対し、ブロックサイズを拡大した場合は、FEC ユニット内でのロスパターンに依存することなく回復できるためである。次に、ほぼ同じ誤り訂正能力を提供している FEC 復元後の損失率 0.081% の (60,52) 符号と (30,26) 符号について遅延時間を比較すると、インタリーブの深さが深くなる (30,26) 符号の方が表 3.10 の遅延時間が大きくなっている。本実験環境では FEC 処理に対して CPU 能力に余裕があるため、ブロックサイズが大きい場合の FEC 処理遅延に比べてインタリーブのためのバッファリング遅延による影響が大きくなっていると考えられる。バッファリング遅延は、バッファリングパケット数とパケットサイズおよび伝送レートによって一意に決まる遅延である。一方、処理時間の測定結果からも分かるように、FEC 処理による遅延は、ブロックサイズに対してリニア以上のオーダーで増大し、また CPU 性能によっても大きく変動する。よって、ブロックサイズを大きくすることで CPU 負荷が限界近くの状態になると、FEC 処理遅延が増大し、ブロックサイズを大きくする方が遅延時間が大きくなる可能性もある。さらにブロックサイズを大きくすると、リアルタイム処理が不可能となる。インタリーブの利点は、複雑な演算を必要とせず、FEC エンコード、デコード処理遅延および負荷を軽減することができる点にあるといえる。

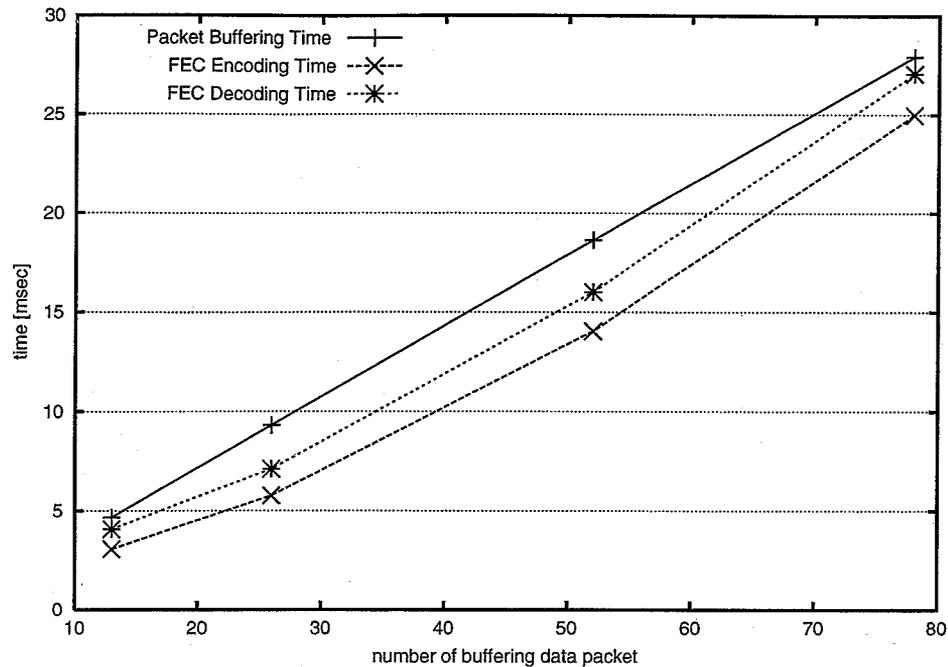


図 3.17: FEC 処理時間とパケットバッファリング時間の比較

3.4.2.5 FEC 適用方法の検討

バッファリング遅延と回復性能はトレードオフの関係にあり、回復性能はネットワーク上のパケット損失特性に大きく依存する。実験結果より、遅延を優先する場合にはブロックサイズを小さくすることが必要であり、回復性能を優先する場合にはインタリーブよりブロックサイズを拡大する手法が適していることが分かる。しかしながら、必要以上に大きなブロックサイズを用いると、バッファリング遅延に加えてFEC処理遅延の影響を受ける要因となる。ゆえに、処理負荷がボトルネックとなる状況下ではインタリーブを用いることでFECをより効果的に適用することができる。このように、ネットワーク特性とアプリケーションの要求条件（遅延や最終的な損失率など）に応じて、ソフトウェア処理で動的かつ適切なブロックサイズと冗長度を選択する必要があるといえる。

これらパラメータの決定方法としては、事前測定による決定または受信ノードからのパケット損失率や遅延情報のフィードバックから決定する手法が考えられる。しかし、FECの適用を想定する環境のひとつとして、IPマルチキャストでのリアルタイム伝送がある。マルチキャスト環境では、各ノードの接続環境が異なるとネットワーク品質も均一でなくなるため、FECパラメータの決定が難しくなる。例えば、ある一端末からの要求に応じて、送信ノードで冗長度を上げる（ $N - K$ を増大）ことにより、帯域の狭いネットワー

クを経由する他の受信ノードで輻輳状態を発生させ、パケット損失を誘発する恐れがある。逆に、冗長度を下げることにより、他の受信ノードで本来回復できるはずのパケットを損失として扱ってしまう可能性が生じる。このため、IP マルチキャスト環境では複数の受信ノードの要求を考慮した FEC パラメータの決定が必要となるが、この点は今後の課題である。

3.5 本章のまとめ

本章では、2章で示したフレームワークを実現するための要素技術のひとつとして、広帯域ストリーム伝送におけるソフトウェア損失回復制御の性能評価について述べた。本性能評価より、アプリケーション層で実現するソフトウェア損失回復制御が効果的に機能することを示した。

本研究では、受信者に対する規模適用性とストリーム配信の即時性という2つの要素を考慮し、前方誤り訂正符号である RS (Reed-Solomon) 符号に着目した。RS-FEC は、バースト損失に対して脆く、複雑な演算処理による処理負荷と遅延に対する影響が生じる恐れがある。特に、伝送するデータ量が増加する広帯域ストリームに対してソフトウェア処理で実現する場合に問題が顕著化する。本実験では、パケット損失に関してランダム性を有する場合とバースト性を有する場合の2パターンを考え、各々に対する損失回復制御の性能評価を通して、有効的な適用方法とその効果について定量的評価を行った。

ランダムパケット損失に対する耐性評価では、FEC の基本回復性能を調べるために、ネットワークのパケット損失に対する RS-FEC の回復性能の理論式を導出し、さらに LAN 環境における実測定と比較することで、実測定による評価実験の妥当性を示した。さらに、FEC のひとつとして用いられるパリティ符号との帯域消費量対損失回復性能の比較評価を行うことで、RS-FEC の有用性について示した。

バースト性を有するパケット損失に対する耐性評価では、実運用インターネットにおけるトラフィックトレースから損失モデルを推定し、そのモデルに対して FEC とパケットインタリーブを組み合わせた損失回復制御の性能評価を行った。バッファリング遅延と回復性能はトレードオフの関係にあり、回復性能はネットワーク上のパケット損失特性に大きく依存する。故に、ネットワーク特性とアプリケーションの要求条件（遅延や最終的な損失率など）に応じて、ソフトウェア処理で適切なブロックサイズと冗長度を選択し、処理負荷がボトルネックとなる状況下ではインタリーブを用いることで FEC を

より効果的に適用することができることを定量的に示した。本章で示した理論値および実測値は、これらのパラメータを決定する指標の一つとすることができる。その一方で、より一層の効果を得るためには、アプリケーションの要求条件やネットワーク特性に応じて、パラメータを動的に適用していくことが必要であるといえる。

第4章 QoS保証を考慮した高品位映像 伝送システム

4章では、広域IPネットワークを介した映像配信、遠隔コミュニケーションのための広帯域ストリーム伝送技術について述べる。まず、IPネットワークにおける映像伝送技術と問題点についてまとめ、前章で示した広帯域ストリーム伝送のためのソフトウェア回復制御を取り入れ開発した高品位映像伝送システムについて示す。実運用ネットワーク上での性能評価実験から、ネットワーク環境に適応するアプリケーション層QoS制御の有効性を示す [Nishimura03a][Kondo04a][Kondo04b]。

4.1 IPネットワークにおける映像伝送技術

IPネットワーク上で取り扱われる大容量メディアのひとつに映像・音声がある。目や耳から入っている情報量の多さからも分かるように、映像コンテンツを用いたサービスアプリケーションは、ブロードバンド環境においてビジネスだけの促進でなく教育や医療など日々の生活を豊かにするために不可欠なアプリケーションである。映像について考えると、SD (Standard Definition:標準テレビ品質) からHD (High Definition:高品位テレビ品質) への移行が急速に進んでいる傾向があり、その価値は高まる一方である。

映像信号を単純にデジタル化し伝送するためには、100Mbpsを越える帯域が必要となり、その情報量の多さゆえに圧縮が必要となる。本研究では、広帯域を必要とするDV (Digital Video) [IEC99]とMPEG2 (Moving Picture Experts Group) [IEC94]の2種類の映像フォーマットを取り上げ、これらを伝送することを考える。この2種類の圧縮方法の大きな違いは、フレーム間での圧縮にある。DVはフレーム内のみ圧縮し時間軸に対する依存性は発生しないのに対し、MPEG2は時間軸方向にも圧縮(フレーム間圧縮)し、動き補償予測技術を用いて情報量の削減を行う。1ストリーム当りに必要なデータ量を考えてみると、SD品質の映像では、DVが35Mbps必要とするのに対し、MPEG2は4-6Mbps程度の帯域に圧縮可能となる。MPEG2はHD品質の映像でも20-50Mbpsに圧

縮することができる。その一方で、ひとつのデータ欠落が複数のフレームに影響を与えてしまう可能性があるため、損失やノイズなどによる画質への影響はMPEG2の方がDVに比べて脆くなる。しかし、音声についてはDVとMPEG2ともに同程度の耐性となるため、結果的に音声を重視するアプリケーションに大きな影響をもたらす可能性がある。この他に、圧縮遅延においても大きな違いがある。フレーム内圧縮のみであるDVは圧縮伸張に伴う遅延が100msec-200msecであるのに対し、MPEG2は500msec-1sec程度必要とする。このことより、映像伝送には用途や利用環境などに応じた使い分けが要求されるといえる。

使用する映像や音声の品質は、そのアプリケーションの質を大きく左右するため、データ損失や伝送遅延などのQoS保証は必須である。しかし、ストリームのフォーマットが違えばその特性も大きく異なり、要求条件も多様化する。加えて、実運用ネットワークでは回線特性が不均一であり、端末や接続機器の性能により品質が大きく変化するため、ネットワークをモデル化することは難しいとされる[Floyd01]。ネットワーク資源は有限であるため、アプリケーションがネットワーク環境に適応する必要がある。故に、本研究では、QoS制御をアプリケーション層で行う伝送システムの構築を考える。

4.2 高品位映像伝送システム Robst

高品位映像伝送システム Robst (Robust Streaming Tool)(以下、本システム)は、広域IPネットワーク上での遠隔コミュニケーションや映像配信のためのシステムであり、映像/音声品質の劣化を抑制した伝送を実現している。

4.2.1 システム構成と対応インタフェース

システム構成の概要を図4.1に示す。システムは表4.1に示す動画像フォーマットおよびインタフェースに対応しており、Linux-PC上で動作するソフトウェアとして実装している。現在、MPEG2-TS (Transport Stream) およびDVに対応している。MPEG2-TSは、HD およびSDを利用することができ、HDについては、IEEE1394 および DVB-ASI (Asynchronous Serial Interface) [LinearSystems]、Mediagluе社のMGHDB3 (PCI HDデコーダカード) [Mediagluе]に対応している。SDについてはPCI MPEG2エンコーダ/デコーダカード [Visiontech][Phillips][Optibase]を使用しており、ビデオカメラ等から取

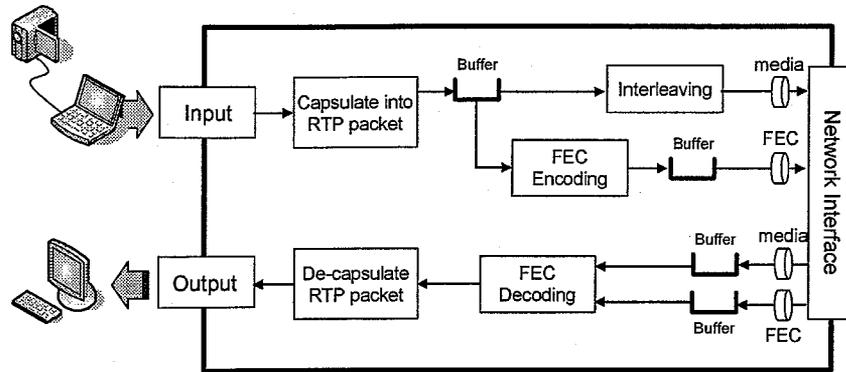


図 4.1: システム構成図

表 4.1: 対応フォーマットとインタフェース

Format	Quality	Interface	
MPEG2-TS	Standard Definition	Encoder	BMK-Elektronik MPEG2 Encoder
			MPEX MPEG2 Encoder
		Decoder	Optibase MPEG2 Decoder
	High Definition	Encoder	Victor HD-GR1, HD-JY10 HDV
			Sony HDF-FX1, HC1 HDV
			Linear System DVB Master FD
Decoder	mediagluе MGHDB-3 HDTV Decoder		
	Linear System DVB Master FD		
DV	Standard Definition	Enc/Dec	DV Camcorder

り込んだNTSC信号をMPEG2-TSデータを変換し、プログラムに受渡しされる。DVについてはIEEE1394入出力が利用可能であり、DVフォーマットのデータ転送が行われる[Kobayashi].

伝送プロトコルはIPv4/v6、伝送方式はIPユニキャスト（1対1の他に1対Nで複数同時送付も可能）、IPマルチキャストに対応しており、様々な配信形態をとることができる。メディアデータはRFC3350に準拠したRTPストリームとして伝送され、FECデータはメディアデータとは別ストリームとして伝送するため、VideoLAN Client[VLC]やDVTS [DVT]といったFEC未対応ソフトウェアでも、メディアデータのみを受信することで再生が可能である。冗長化手法については次節以降に示す。

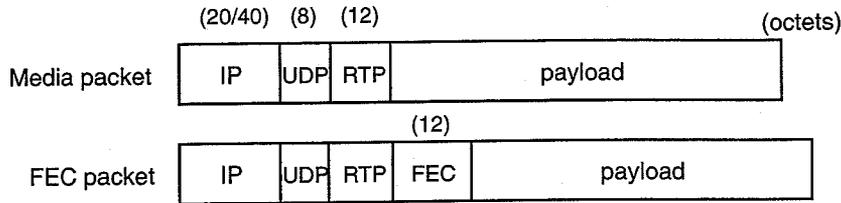


図 4.2: パケットフォーマット

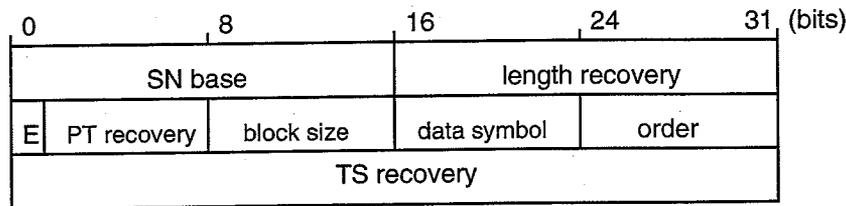


図 4.3: FEC フィールドフォーマット

4.2.2 RS 符号のための RTP ヘッダと冗長化手法

パリティ符号を用いる FEC のための RTP フォーマットが RFC2733[Rosenberg99] として標準化されている。しかしながら前章で示したように、パリティ符号化は RS 符号と比べ冗長度に対する誤り訂正能力は低い。そこで本研究では、RFC2733 にて標準化された冗長化手法を取り入れた RS-FEC のための RTP ヘッダフォーマットを定義した。

4.2.2.1 パケットフォーマット

パケットフォーマットを図 4.2 に示す。メディアパケット (media packet) は送信元から伝送されるユーザデータで、FEC パケット (FEC packet) は FEC 処理によって新しく生成したパケットである。2つのパケットはそれぞれ別ストリームとして伝送し、後方互換性を提供する。つまり、メディアパケットのみを受信することで、FEC に対応していないノードでも正常に動作することが可能になる。FEC フィールドを図 4.3 に示す。FEC パケットの RTP/FEC ヘッダの一部は、次節に示す Protection Operation により生成され、length recovery, PT (payload type) recovery, TS (time stamp) recovery にそれぞれ冗長化されたデータが付加される。SN base は FEC 処理によって保護されたメディアパケットの最小シーケンス番号を付加し、block size, data symbol は RS-FEC の (N, K) コードに対応している。

4.2.2.2 Protection Operation による FEC

FEC のエンコード/デコード処理には、protection operation を用いることで RTP ヘッダの特定フィールドの冗長化も行う。protection operation による冗長パケットの生成方法を図 4.4 に示し、具体的な FEC エンコード手順について以下に示す。

FEC エンコード処理では、メディアパケットの RTP ヘッダから特定のフィールドを連結したビットストリング複数パケット分を1つのユニットとし、それに対し垂直方向に FEC エンコーディングを行うことで、冗長データを生成する。

1. RTP ヘッダの特定フィールドとペイロード部分を連結したビットストリングを生成する。FEC ユニット内でビットストリング長が異なる場合、最大パケット長に合わせるようにゼロでパディングを行う。これにより、可変長パケットに対する FEC を可能にしている。
 - Padding bit (1 bit)
 - Extension bit (1 bit)
 - CC bit (4 bits)
 - Marker bit (1 bit)
 - Payload Type (7 bits)
 - Timestamp (32 bits)
 - length (16 bits)
 - length field は CSRC リスト部、パディング部、ヘッダ拡張部、メディアデータ部を合計したバイト値となる。
 - CC bit が 0 でない場合、CSRC List (可変長)
 - X bit が 1 の場合、RTP ヘッダ拡張部 (可変長)
 - ペイロード部 (可変長)
 - 必要に応じて、パディング部 (可変長)
2. 複数個の生成したビットストリングを1つの FEC ユニットとして、垂直方向に FEC エンコード処理を行い、冗長データを生成する。
3. 生成された冗長データは、FEC パケットの各フィールドに格納される。FEC パケットのペイロード部には、CSRC リスト、RTP ヘッダ拡張、メディアデータ、パディング部の冗長化されたデータが格納される。

これによって生成されたビットストリングを冗長パケットの RTP/FEC ヘッダの特定フィールド、ペイロードに埋めることで RTP ヘッダを含むパケットの RS 符号による冗長化が可能となる。

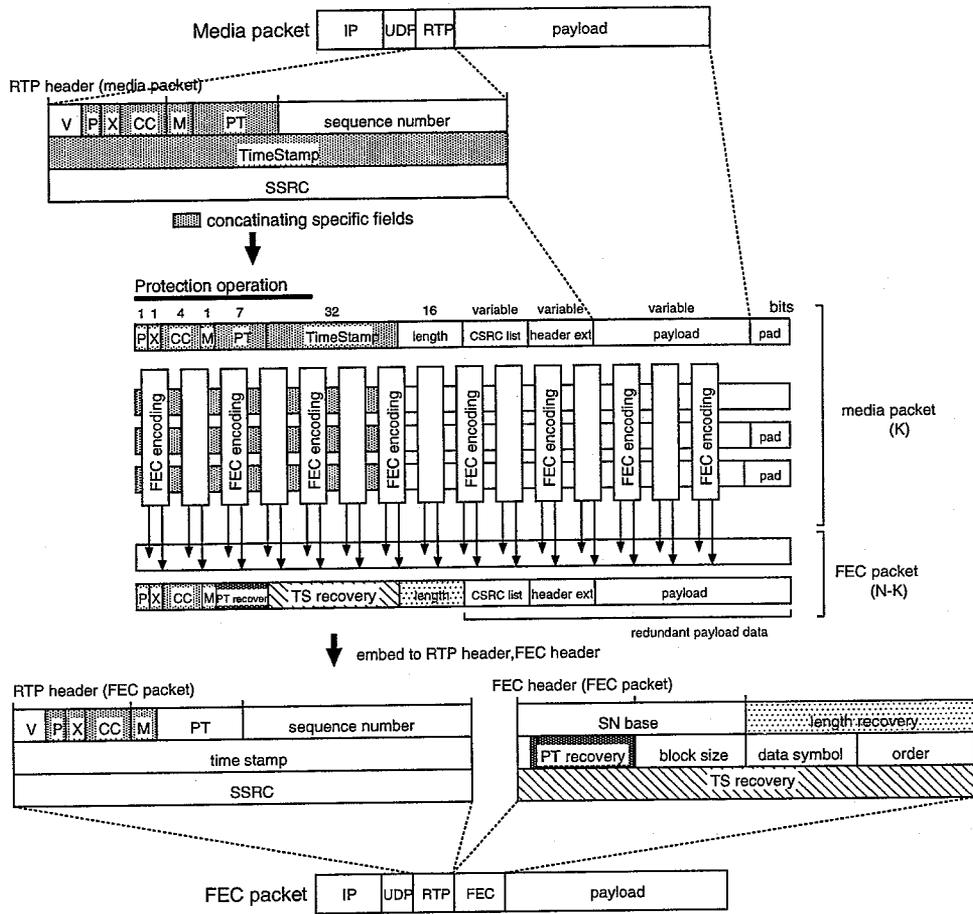


図 4.4: Protection operation による FEC エンコーディング処理

デコード処理では、エンコード処理の逆の処理を辿る。復元手法を図 4.5 に示し、具体的な復元手順を以下に述べる。ここで、メディアパケット X_i を復元するための FEC ユニットを T とする。

1. メディアパケットについては、Protection Operation と同様の手法でビットストリングを生成する。
2. FEC パケットについては、以下の点を除いて Protection Operation と同様にビットストリングを生成する。
 - Payload Type の代わりに PT recovery field を使用する
 - Timestamp の代わりに TS recovery field を使用する

- CSRC リスト部, RTP ヘッダ拡張部, メディアデータ部, パディング部は FEC パケットのペイロード部分をそのまま使用する.
3. もしメディアパケットから生成したビットストリングが, FEC パケットから生成したビットストリングより短ければ, それに合わせるようにパディングを行う. なお, この状態になるのは, Protection Operation 時にパディングしていたことを意味する.
 4. 生成した複数ビットストリングをひとつのユニットとして, 垂直方向に FEC デコード処理を行う.
 5. 生成されたビットストリングが復元パケットのデータとなり, そこから 12Byte の RTP ヘッダとペイロード部を復元する.
 6. シーケンス番号フィールドに FEC ユニットから求められるシーケンス番号を格納し, 復元パケットが完成する.

このようなデコード処理を施すことで, 損失した RTP パケットの復元を行う.

4.2.3 処理内容とシステム実装

伝送システムの送信部および受信部のシステム実装について図 4.6, 図 4.7 に示す. 送受信ともに, 3つのスレッドから構成される.

送信部 送信部では以下のような実装になっている. read スレッドにより, インタフェースからデータストリームを受信し, 固定長データを形成する. それに RTP ヘッダを付与し, FEC エンコードスレッドへコピーすると同時に send スレッドのキューへ格納する. FEC エンコードスレッドでは, 前項に示した手法により冗長化した FEC パケットを send スレッドへ格納する. send スレッドでは, read スレッドで生成されるシグナルを受けて送信キューに溜ったパケットをネットワーク上に送信する. シグナルは以下の 2 種類を定義し, 実装した.

- read スレッドが送信キューに格納する度に生成するシグナル
- RTC (Real Time Clock) により一定時間間隔に生成されるシグナル

シグナルを利用しない場合, 入力インタフェースにおけるデータ到着の揺らぎや FEC 処理による揺らぎが, そのままネットワーク送出の際に伝搬することにより, バースト的なトラフィックフローが発生し経路上のスイッチやルータに悪影響を及ぼす可能性がある.

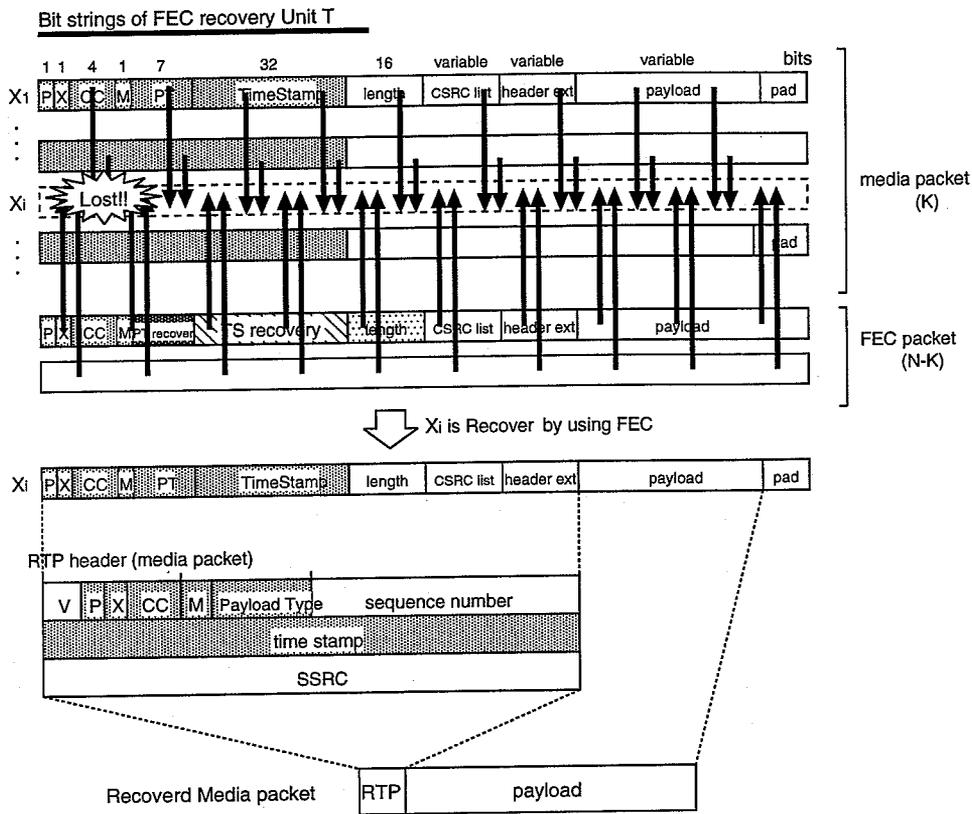


図 4.5: Protection operation による FEC デコード処理

そこで、この揺らぎを吸収するために RTC を用いたパケット送出間隔の調整を可能にした。RTC とは時刻を保持するためのハードウェアクロックのことである。この RTC にアクセスすることで、2Hz から 8192Hz まで 2 の冪乗きざみの周波数、即ち $1/2^n \text{ sec}$ の精度で割込みをかけることが可能である。割込み信号は `/dev/rtc` のキャラクタデバイス経由で得ることができ、本システムでは $1/8192 \text{ sec}$ 間隔での割込み信号を利用して $n/8192 \text{ sec}$ ($n=1,2,\dots,8192$) の間隔でシグナルを生成できるように実装している。パケットの送出間隔に関しては、プログラム内部の送信バッファの空き容量を見ながら決定するようにし、送出間隔の制約条件を定義することで帯域の上限を設定できるようにしている。

受信部 受信部では以下のような実装になっている。receive スレッドでは、IP パケットを受信し、RTP ヘッダから各情報を取得する。シーケンス番号からはパケットの重複や欠落等の検知を行う。現在の実装では、到着順序が入れ替わっているパケットに関しては受信バッファで対応できる遅延範囲では順序入れ換えをし、対応不可能な場合はパケッ

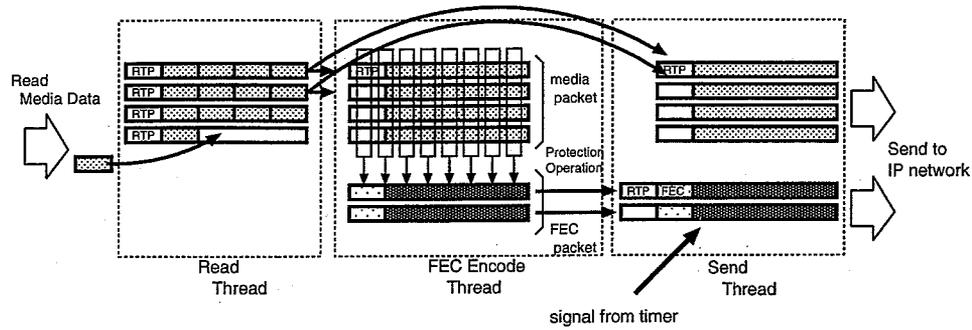


図 4.6: Robst 送信部の詳細

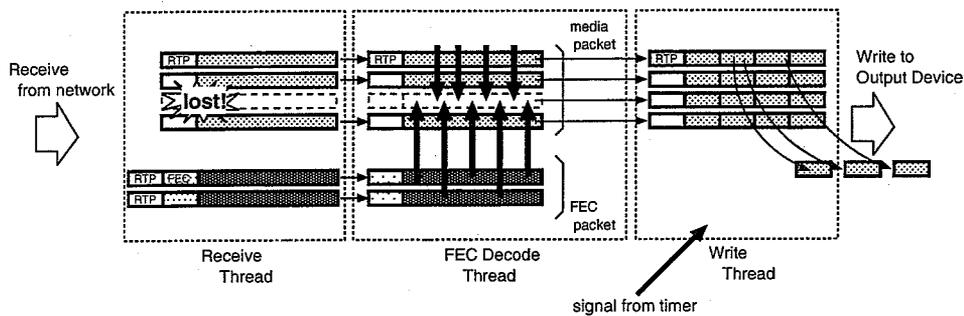


図 4.7: Robst 受信部の詳細

ト損失とみなして処理を行う。このようにして受信パケットをバッファに格納し、処理を FEC デコードスレッドに移す。FEC デコードスレッドでは、パケット損失があり、かつ回復可能であるならば、前項で示した FEC デコード処理により再構成したデータを write スレッドに渡す。もし、FEC 処理の必要が無ければ冗長なパケットを取り除いたデータのみを渡す。write スレッドでは、シグナルを受けて出力インタフェースにデータが出力される。シグナルは、送信部と同様の形となっており、FEC デコードスレッドからのシグナルか RTC を選択することが可能である。

4.2.4 ネットワーク環境に適応する冗長度の動的変更機構

アプリケーション層でのソフトウェア FEC 処理の利点として、アプリケーション指向で柔軟な制御を組み込むことが可能である点が挙げられる。FEC を用いることでパケット損失に対する耐性を強化することは可能だが、必要以上に耐性の高い FEC を用いると通信帯域を無駄に消費するため、ネットワークとの親和性を考えると好ましくない。ま

た、FEC 回復後のパケット損失率は伝送路自体の損失率に依存するため、伝送路上で損失率が時間的に変化するような場合に脆いという側面を持つ。そこで本研究では、通信帯域の最適化を目的としてネットワークの状態に応じて冗長度を動的に変更しすることで、伝送路上でのパケット損失率の変化に柔軟に対応できるようなアプリケーション処理機構を組み込む。

処理概要

本システムにおける処理概要を図 4.8 に示す。冗長度の変更は、送信側で受信側のフィードバック情報を基に算出したメディアパケットの損失率と FEC 回復後のメディアパケット損失率の目標値（任意に指定可能）を比較することで決定される。送受信間でのフィードバック情報などのやりとりは IETF 標準プロトコルである RTCP (Real-Time Transport Control Protocol) [Schulzrinne03] をベースにしている。RTCP は先述した RTP を利用して送受信者間のセッションの制御をするプロトコルとして標準化されており、受信者が RTCP パケットを送信者側に定期的に送信することで、ネットワーク上で損失したパケット数や伝送時間の揺らぎなどの検出を可能にする。 i 番目のレポートから得られるネットワーク上のパケット損失率は式 4.1 で表すことができる。ここで P_i は、 $i-1$ と i 番目のレポート間に送信した RTP パケット数、 l は累積パケット数を示しており、 $l_i - l_{i-1}$ で $i-1$ と i 番目のレポート間に損失した RTP パケット数を示す。

$$R_i = \frac{l_i - l_{i-1}}{P_i} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

FEC 回復後のメディアパケット損失率の目標値は前章で示したランダムパケット損失の理論値を用いている。3 章で示した RS-FEC 符号の損失回復性能の理論式 (式 3.3) から求めた、各冗長度における RS 符号のパケット損失回復性能を図 4.9 に示す。なお、横軸は FEC 回復前、縦軸は FEC 回復後のパケット損失率である。

本システムではこの理論値を用いて、フィードバック情報から求めた損失率と回復後の目標値を比較して冗長度を決定する。例えばパケット損失率 10% 以内のネットワークを対象とし、回復後の目標値を 0.01% 以下に設定する場合、損失率と冗長度および帯域増加量の関係は表 4.2 のようになる。これにより、送信側では、フィードバック情報から求めた損失率と表 4.2 のテーブルを参照し、対応した冗長度を選択することで、FEC 回復後の損失率が目標の 0.01% 以下とするように合わせた伝送帯域で FEC を使用することが可能になる。求められた冗長度 (N, K) を FEC ヘッダに埋め込み FEC エンコード処理

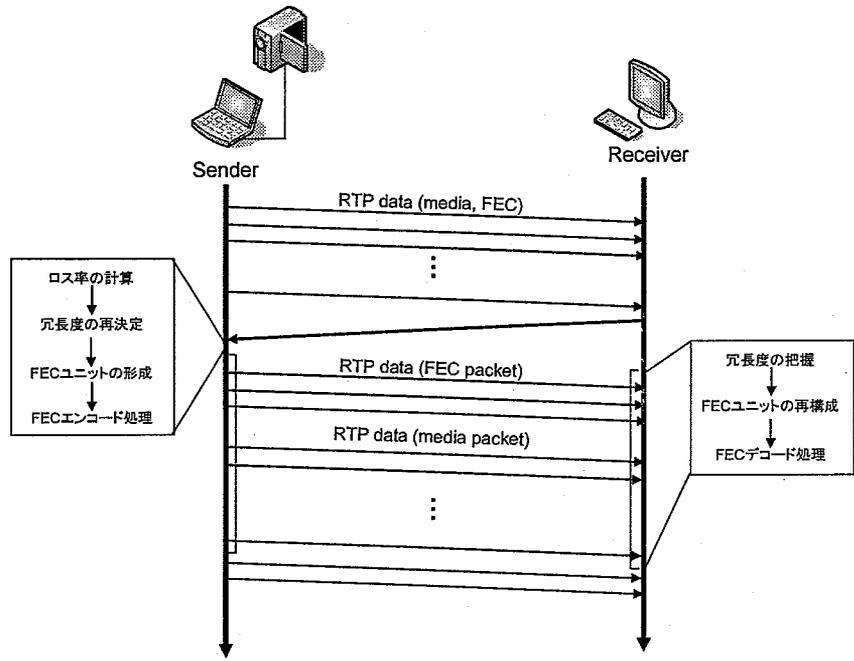


図 4.8: RTCP による冗長度の変更機構

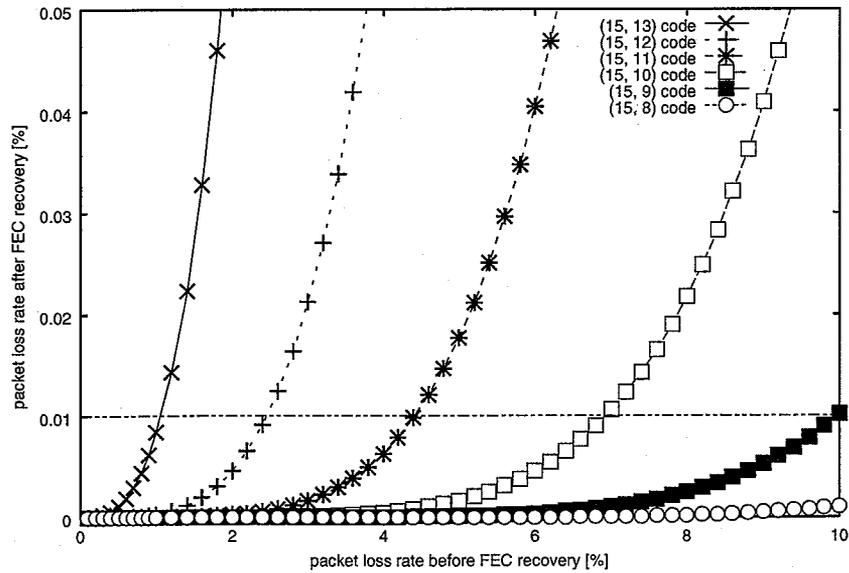


図 4.9: パケット損失回復性能の理論値

表 4.2: パケット損失率と冗長度, 帯域増加量の関係

パケット損失率	冗長度	帯域増加量 [倍]
1%未満	(15,13)	1.15
1%以上 2.4%未満	(15,12)	1.25
2.4%以上 4.4%未満	(15,11)	1.36
4.4%以上 6.8%未満	(15,10)	1.5
6.8%以上 9.8%未満	(15,9)	1.67
9.8%以上	(15,8)	1.86

を行って送信する。受信側は、この FEC ヘッダフィールドを参照することで FEC ユニット毎に送信側の冗長度変更に従従することができる。

要求される最終的なメディアの損失率は、利用するストリームタイプやアプリケーションによって変化することが予想される。例えば、TV 会議のような音声と映像を使用するアプリケーションで各々を別ストリームとして伝送する場合、映像に関しては損失の許容範囲は比較的広いが、音声に関しては高品質な伝送が要求されると考えられる。提案する方式であれば、アプリケーション毎に要求する損失率に合わせて冗長度を動的に変化することも可能で、パケット損失への耐性を強化させるとともに消費帯域量を可能な限り抑えることができる。

4.3 性能評価

4.3.1 評価実験 1

FEC の冗長度動的変更によるパケット損失の時間的変化に対する有効性を評価するために、IP ネットワーク上でランダムな確率でパケット損失を発生、さらに発生させる損失率を任意の時間で変化可能なパケット損失発生器を作成し、それをを用いて冗長度変更を行う場合と行わない場合で、どの程度パケット損失への耐性に違いが見られるかを測定した。

図 4.10, 表 4.3 に実験の構成図と使用した機器をそれぞれ示す。実験では SDTV MPEG2 (TS レート 6Mbps) のストリームを使用し、送信ノードはパケット損失発生器を経由させて受信ノードへデータを伝送する。パケット損失発生器では、損失率を 0% から 10% ま

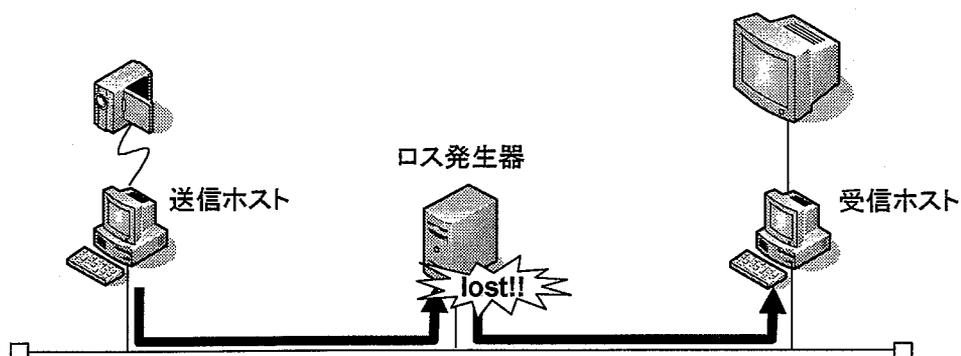


図 4.10: 実験構成図

表 4.3: 評価実験 1 における使用機器

	送信ホスト	受信ホスト	Loss generator
CPU	P4-2.5GHz	P3-2.0GHz	P3-750MHz
memory	1024Mbyte	128Mbyte	128Mbyte
OS	Vine-2.5	Vine-2.1.5	Vine-2.1
kernel	kernel 2.2.20	kernel 2.2.18	kernel 2.2.17
Encoder	BMK-Elektronik Kfir MPEG2 Encoder Card		
Decoder	Optibase VideoPlex Xpress Decoder Card		

で1分毎に変化させ最後1分間0%で推移するという疑似的な状況を作成し、その時の回復性能と送信側/受信側での FEC 処理による CPU 使用率について評価を行った。

図 4.11, 図 4.12 に冗長度固定の場合と動的に変更させた場合におけるメディアパケットの損失回復性能を示す。横軸は FEC 処理の際のユニット番号 (IP パケット 15 個を 1 とする) であり 12 分間の測定結果で、縦軸は FEC 復元後のユニット内のメディアパケットの損失数である。図中の各区間はパケット損失発生器で発生させた損失率を示している。これより、冗長度固定の場合は損失率の上昇に従い回復できない割合も多くなっているのに対して、動的に変更した場合ではその影響が回復性能に現れていないことが分かる。また、この測定時間中の映像・音声は、パケット損失が発生した箇所以外では正常に再生できていることを確認した。

図 4.12 には FEC の冗長度 (データシンボル数 K) の変更の様子を図中に合わせて示している。これより、パケット損失率の変化に追従して表 4.2 で定めた関係を基に冗長度が動的に変更している様子が分かる。

表 4.4: メディアパケットの受信統計

冗長度	受信 パケット数	損失パケット数 / 損失率 [%]	
		FEC 前	FEC 後
(15, 13)	388212	18935 / 4.65	4783 / 1.17
動的	388673	18478 / 4.54	10 / 0.0025

各測定における受信メディアパケット数, 損失メディアパケット数, FECにより回復できなかったメディアパケットの統計を表 4.4 に示す. 結果より, メディアパケットの損失率が冗長度固定の場合は 1.17%程度であるのに対して, 動的変更を行った場合 0.0025%と冗長度の動的変更による FEC が効果的に機能していることが分かる.

冗長度を動的に変更させた場合 (図 4.12) の測定において, 受信側での FEC のデコード処理に伴う CPU 使用率の推移を図 4.13 に示す. CPU 使用率については 1 つ前に冗長度が変化した時から 1 秒間隔でサンプリングした平均値をプロットしている. この結果から, 冗長度動的変更を適用することで冗長度の上昇に応じて CPU 使用率も上昇する傾向にあることが分かる. しかし, 受信側で最も高負荷と思われる (15, 8) の場合でも CPU 使用率も最大 50%程度であり, 同様に送信側でも測定した結果, 最大 30%程度であることが分かった.

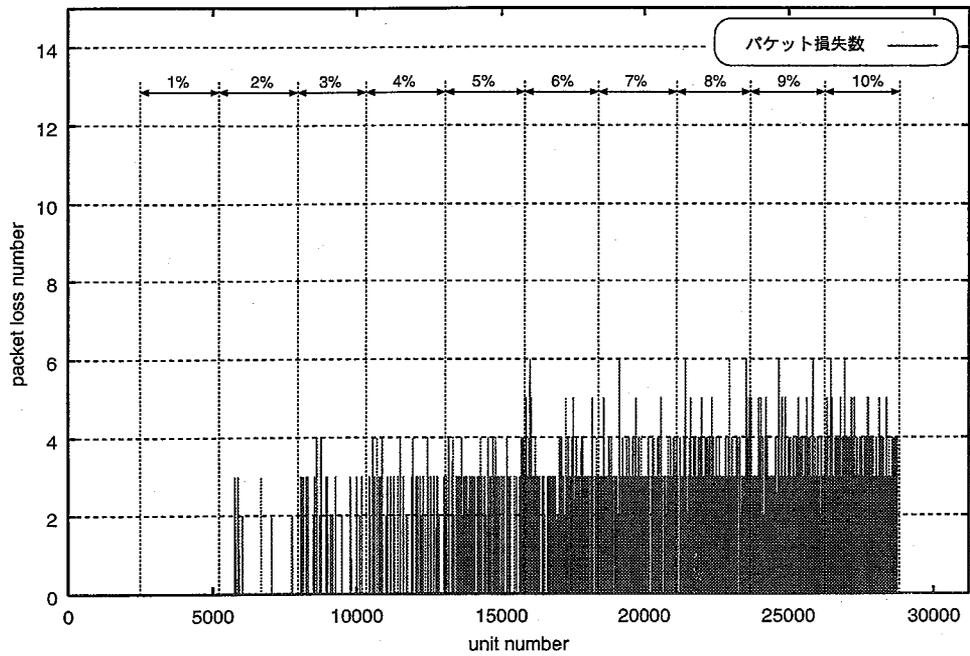


図 4.11: FEC 回復後のパケット損失数 (冗長度 (15,13))

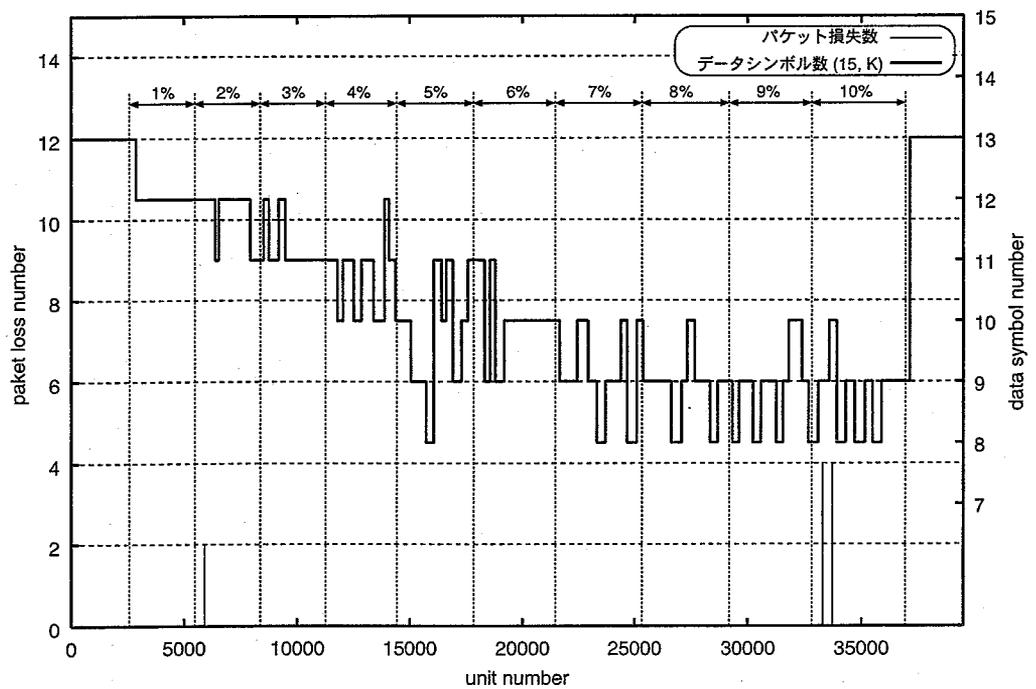


図 4.12: FEC 回復後のパケット損失数と冗長度の変化

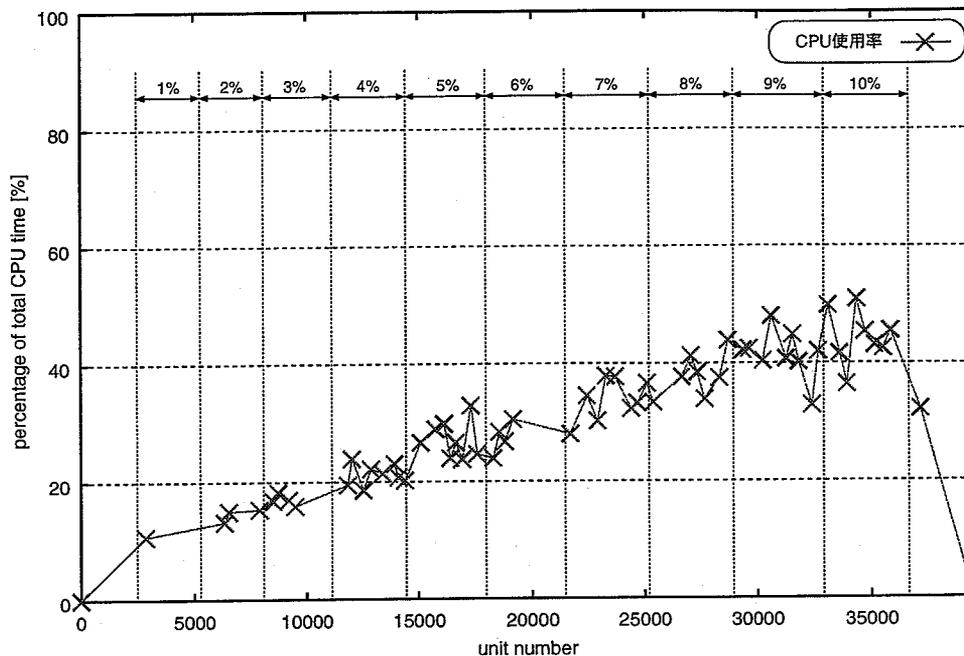


図 4.13: 受信ホストの CPU 使用率

4.3.2 評価実験 2

実運用インターネットにおけるパケット損失の傾向はバースト性を持ちかつ時間的に変動する。そこで、図 3.11 と同様のブロードバンドインターネット環境で、映像劣化抑制の帯域増加量の観点から提案手法の性能評価を行い、実ネットワークの状態変化に適応する制御の有用性を検証する。

使用した機器を表 4.5 に示す。両ホストで 4Mbps の MPEG2-TS ストリームの双方向同時送受信を 1 時間行い、FEC 復元前および復元後のパケット損失率と冗長さの推移について記録する。これをそれぞれについて 3 回ずつ行うことで損失回復性能について調べた。なお、RS-FEC は、処理速度と処理遅延を考慮して $(15, K)$ 符号を用い、 K は表 4.6 に示す対応表に従い動的変更を行った (RTCP の送信間隔は 3 秒間に設定)。この表は、損失回復性能の理論式から FEC 回復後の損失率が $10^{-6}\%$ 以下になるように冗長性を定めたものである。

インタリーブの深さを 0, 1, 2 と変化させた場合の各測定の FEC 復元前後の損失率および測定期間全体の平均損失率を表 4.7 に示す。インタリーブの深さ 0 は冗長さの動的変更のみを行い、パケットの送出順序入れ替えは行っていないことを表す。今回の実験は実運用ネットワークを利用して行っているために、パケット損失発生に関して再現性が

表 4.5: 評価実験 2 における使用機器

	host A (広島大学)	host B (広島市 一般家庭)
CPU	P4-1.9GHz	P4-1.9GHz
memory	256MByte	256MByte
OS	Vine-2.1.5	Vine-2.1.5
kernel	kernel 2.2.18	kernel 2.2.18
Encoder	BMK-Elektronik Kfir MPEG2 Encoder Card	
Decoder	Optibase VideoPlex Xpress Decoder Card	

表 4.6: パケット損失率と冗長度 (FEC 回復後: $10^{-6}\%$)

パケット損失率	冗長度	帯域増加量 [倍]
0.05%未満	(15,13)	1.15
0.05 - 0.23%未満	(15,12)	1.25
0.23 - 0.65%未満	(15,11)	1.36
0.65 - 1.38%未満	(15,10)	1.5
1.38 - 2.47%未満	(15,9)	1.67
2.47%以上	(15,8)	1.86

なくそれぞれの損失パターンも異なっているが、すべての場合において FEC が効果的に機能し、FEC 復元後は 0.01% 以下の損失率に抑えられていた。さらにインタリーブを併用することで、測定時間中の全ての損失メディアパケットを回復できていた場合もあり、本実験で用いた実ネットワークで効果的に機能していることが示された。

表 4.7 の結果のうち、インタリーブの深さを 2 とした場合 (◎印) についての詳細な受信統計を表 4.8 に示し、この時のネットワークのパケット損失率と FEC の冗長度の推移、および FEC により回復できなかった最終的なメディアパケットの損失率の推移をそれぞれ図 4.14 と図 4.15 に示す。なお、パケット損失率は 1 秒間隔でプロットしたものである。この結果より、パケット損失率の変動に適応して冗長度の動的変更により帯域調整を行っている様子が確認できる。この実験では、冗長度が最大で (15,9) 符号まで上昇しているが、この (15,9) 符号を固定で使用した場合と比較して、動的に変更することにより帯域増加量を 18.6% 削減できている結果が得られた。このことから、動的な冗長度変更が帯域増加量の抑制に効果があり、実運用ネットワークの状態変化に適応する制御がアプリケーション処理により実現できることが示された。

表 4.7: システムにおける損失回復性能

インタリーブ の深さ	パケット損失率 [%]			
	FEC 復元前	平均値	FEC 復元後	平均値
0	0.01703	0.09047	0.00732	0.00379
	0.04413		0.00044	
	0.21025		0.00036	
1	0.02943	0.01714	0.00297	0.00126
	0.01150		0	
	0.01048		0.00080	
2 [⊙]	0.43453	0.22315	0.00130	0.00116
	0.03491		0.00217	
	0.20001		0	

表 4.8: メディアパケットの受信統計

受信メディア パケット数	損失メディアパケット数 / 損失率 [%]	
	FEC 復元前	FEC 復元後
1373219	846 / 0.434	18 / 0.00130

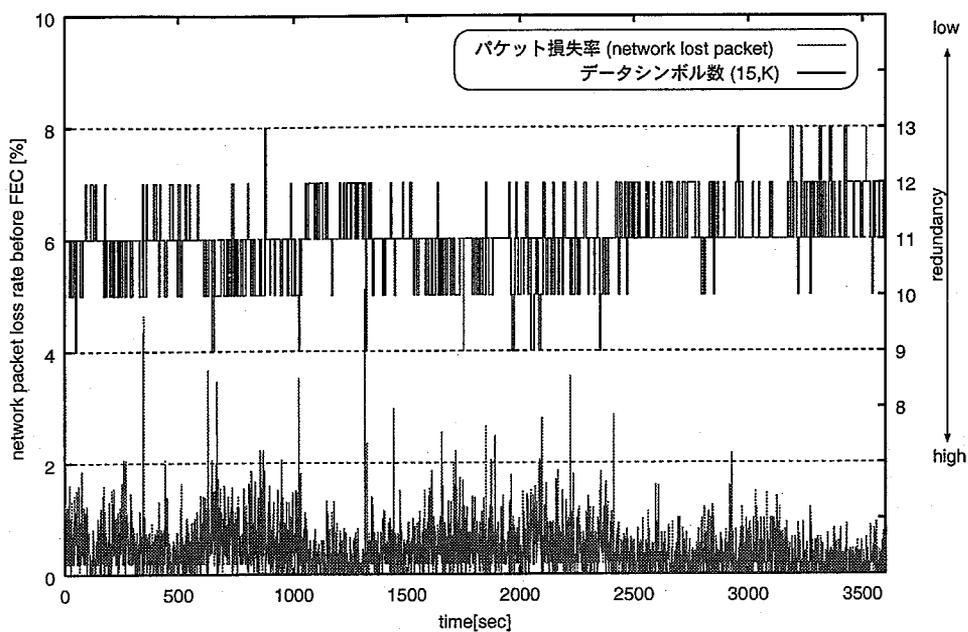


図 4.14: FEC 復元前のパケット損失率と冗長度の推移

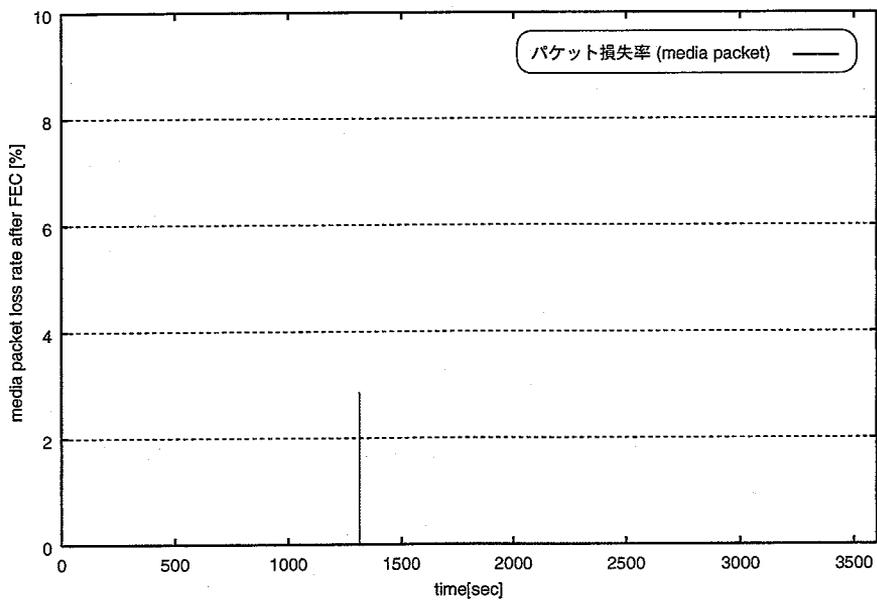


図 4.15: FEC 復元後のパケット損失率

4.4 本章のまとめ

本章では、アプリケーション層 QoS 制御を実現するシステムのひとつとして、高品位映像伝送システム Robst の設計と実装について述べた。システムの性能評価を通して、実運用ネットワークに適應するアプリケーション層ソフトウェア QoS 制御の有効性を示した。

高品位映像は広帯域ストリームの中でも今後最も活用が期待されるアプリケーションであり、IP ネットワークにおける広域展開では QoS 保証の実現が非常に重要となってくる。インターネットなどのベストエフォート型のネットワーク上では伝送路上の品質が刻々と変化し、それがアプリケーションにも影響を与える。このような環境で動画像伝送を行おうとする場合、ネットワークレベルで要求する QoS を満たすことができなければ、アプリケーションレベルでそれに適應する必要がある。これを実現することで、ネットワークレベルでの要求条件を緩和することができ、広域での展開も可能となる。本研究では、構築したシステムを用いた運用ネットワーク上での検証実験を行うことで、ネットワークに適應するアプリケーション層 QoS 制御の効果について明らかにする目的があった。

システムの開発を行うにあたり、マルチメディアデータ伝送で一般的に用いられる RTP に対して RS-FEC 符号を利用可能にするパケットフォーマットを再定義し、損失耐性を強化した RTP ストリーム伝送方式を定めた。そして、このフォーマットを基に、DV や MPEG2 の高品位ストリームに対応する映像伝送システムを設計・開発した。システムとしては、RS-FEC やパケットインタリーブのソフトウェア損失回復制御やネットワークの動的な状態変化に適用する RS-FEC の動的冗長度変更を付加することで、アプリケーション層で処理する QoS 機能を実現した。本システムは、パケット損失の時間的・地理的变化に応じてアプリケーション自身がその振舞いを動的に変更し、ネットワークの状態変化に適應することができる。評価実験より、FEC による冗長度データの増加を抑え通信帯域の最適化を図った損失制御を可能にし、アプリケーション層で柔軟な制御が可能であることを示した。

本提案手法には幾つかの課題が残されている。実運用ネットワークの帯域は有限であり、ネットワーク状態が悪くなった（パケット損失が上昇）際に、動的な冗長度変更機構により冗長度が上がることで帯域を圧迫し、一層のパケット損失を誘発する可能性がある。この場合、メディア自体の帯域を下げ伝送レートを一定に保つことで、問題を解決することができると考えられる。本研究ではメディアの帯域自体を変更することは行っていないが、必要に応じて対処することも考える必要がある。

第5章 アプリケーション指向制御による 広域配送とその可能性

5章では、アプリケーション指向の広帯域ストリーム配送基盤の実現方法について述べる。2章で述べたアプリケーション指向制御の必要性に基づき、3章および4章で示してきた要素技術に加えて新たにアプリケーション層で処理可能なゲートウェイを設計・実装し、それらを利用した広域配送基盤の実現について示す。評価実験および実運用ネットワークでの実証実験を通して、本研究による利点を明確にし、その有用性を示す。さらに、これまでの提案と評価に基づき、広帯域アプリケーションに適した配送ネットワークの発展性について考える。

5.1 アプリケーションゲートウェイの設計と実装

前章までに示したアプリケーション層 QoS 制御は、エンドホスト間のみで適用することを想定しており、パケットはベストエフォート型の IP ルーティングに従い転送されるだけである。この場合、配送範囲の広域化に伴い様々な問題が生じる。例えば、性質や品質の異なるネットワークを通ることにより、品質に対する要求条件が複雑化し、QoS 制御の適用が困難となる。IP パケットの転送はデータリンク層の特性に依存しないため、エンドホストが途中の経路上の特性を細かく知ることは難しい。さらに、複数ホスト宛の配送を考える場合には、対象とするネットワーク範囲が広がることで、より複雑化することが考えられる。前章に示した動的冗長度変更制御も、複数ホストを対象とすることで全体の処理が一部のノードへ影響を与えてしまう可能性も含んでいる。

様々な接続環境、利用形態が混在する広域ネットワークで効率的なストリーム配信を展開するために、本研究ではアプリケーション指向の配送フレームワークについて考える。特定ストリームに対してアプリケーション層で処理することを考え、エンドホスト間のストリーム伝送を処理することのできるアプリケーションゲートウェイ（以下ゲートウェイとよぶ）を設計・構築する。これを活用することで、上述の問題点を克服した、

アプリケーション指向の広帯域ストリーム配送基盤の基礎を確立することができる。

5.1.1 ゲートウェイシステム概要

ゲートウェイの基本構成を図 5.1 に示す。本ゲートウェイはエンドホスト通信の間で利用することを想定し、RFC3350 に準拠した RTP パケットを対象とした転送および各種処理を実現する。具体的には以下の機能を実現する。

IP プロトコル変換 IP/UDP ヘッダの変換処理を行うことで、IPv4 と IPv6 のプロトコル変換が可能となる。インターネット層だけでなくトランスポート層のヘッダについても変換可能であるため、ポート番号も変更することができる。また、ユニキャスト⇔マルチキャスト変換などの配送方式の変換も可能となる。

ストリーム分配機能 ストリームを 1 対 N のユニキャストで転送することで、複数拠点に分配することが可能となる。また同時に、IPv4/v6 マルチキャスト宛に変換し送出することもできる。ゲートウェイを多段に設置しこれらの機能と組み合わせることで、選択的に配送手段を定め、ゲートウェイレベルでの配送木を構築することが可能となる。

アプリケーション指向制御 アプリケーションやデータ特性に応じた制御を行う。ネットワークの状態やアプリケーションの特性・利用場面、利用者特性により異なる制御を行うことで、ゲートウェイ自身の挙動を変え、ストリームアプリケーションを意識した配送を実現することができる。また、複数のゲートウェイを利用した配送により、制御範囲を細分化し、高品質な制御を適用することができる。本研究では、ゲートウェイで処理を行うことを”終端する”と定義する。

これらの機能を提供することで、IP 基盤に依存しない柔軟な配送が可能となり、エンドホスト間通信だけでは不可能な新しい通信基盤が構築できる。

図 5.1 は、サイト間（ネットワーク A とネットワーク B）の通信において、対向でゲートウェイを使用する一例を図示している。具体的なゲートウェイの動作フローを以下に示す。

1. 送信ホストは宛先ホストへパケットを送出するかわりにゲートウェイ A に向けて IP パケットを送信する。
2. ゲートウェイ A は IP パケットを受信し、RTP パケットの状態に展開する。

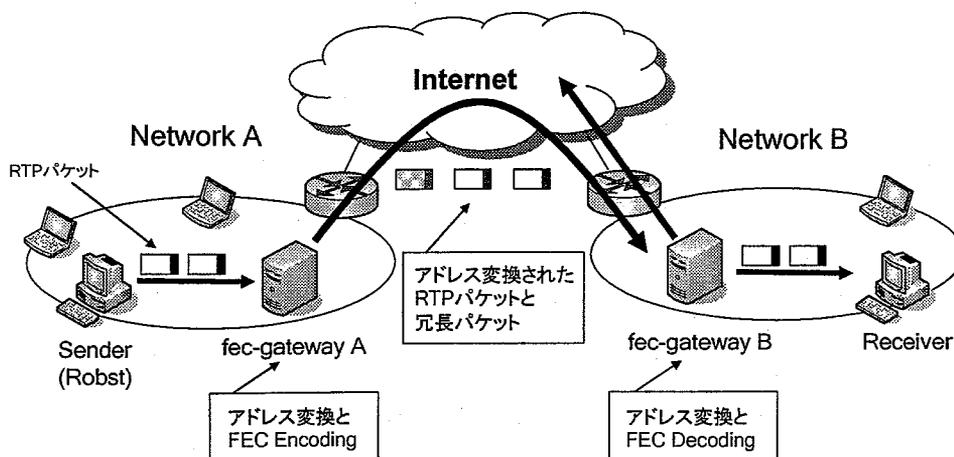


図 5.1: アプリケーションゲートウェイのシステム概要

3. RTP ヘッダからパケット損失の有無などをチェックする。その後、アプリケーション層にて各種処理を施す。
4. 処理終了後、次ホップ（ゲートウェイ）を宛先アドレスとし、ポート番号を格納した IP ヘッダ/UDP ヘッダで RTP パケットをカプセル化し、次ホップにパケットを転送する。このとき、IP パケットの送信元アドレスは自ノードのアドレス、宛先アドレスは転送先ゲートウェイ（この場合、ゲートウェイ B）のアドレスとなることに注意が必要である。
5. ゲートウェイ B はゲートウェイ A からの IP パケットを受信し、同様の処理を行い、受信エンドホストに転送する。それと同時に、必要に応じて他のホスト（およびゲートウェイ）にもパケットを転送する。

5.1.2 FEC ゲートウェイ

ここでは、前項に示したアプリケーション層制御を取り入れたゲートウェイの一例として、FEC ゲートウェイのプロトタイプ実装について述べる。広域展開とアプリケーション指向の制御を実現するために、ネットワーク特性に適應する損失回復機能を組み込んだ FEC ゲートウェイの設計・実装を行った。

FEC ゲートウェイは、転送処理時にアドレス/ポート変換やストリーム分配だけでなくアプリケーション制御として損失回復処理を組み込むことで、パケット損失への耐性を強化する機能をもつ。FEC ゲートウェイで通信を終端することで、特性に応じた制御により損失による影響をゲートウェイ間で局所化できる。図 5.2 に本研究で考える FEC

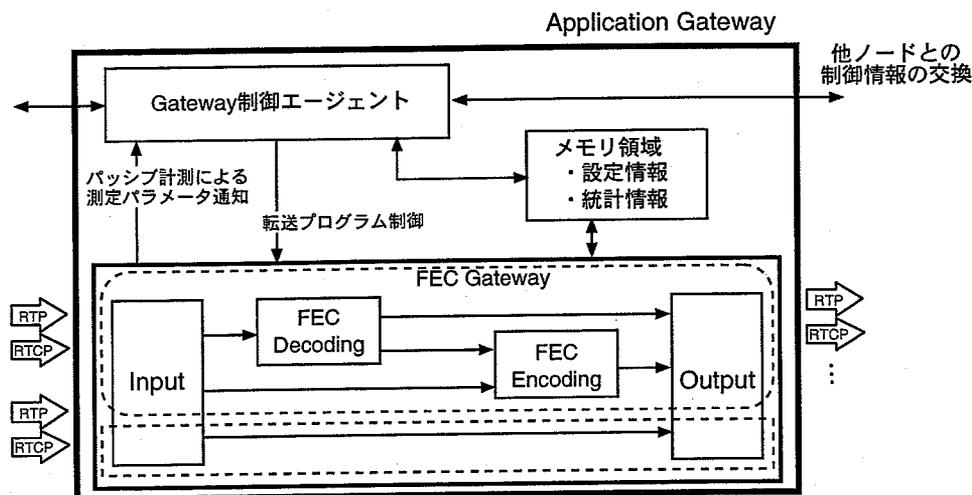


図 5.2: FEC ゲートウェイの構成

ゲートウェイの構成を示す。本研究では、ゲートウェイの動作に最低限必要なパケット転送処理部分（点線部分）についてのみ実装を行っている。開発はPC-UNIX 上で行い、プロトタイプでは利用用途に合わせて選択できるように、以下の2種類のモードを実装した。

IPB モード 転送処理の際に、アドレス変換/ポート変換/マルチキャスト-ユニキャスト変換、などの変換機能のみを有するモード。複雑な処理を回避することで、必要最低限の配送ネットワークを構築することができる。

APP モード IPB モードに FEC 機能を付加したモード。ソフトウェア処理のため負荷は高くなるが、通信を一度終端させパケット損失回復制御を施すことで、リンク特性に合わせた QoS 制御が可能になる。

IPB モードの処理フローは FEC ゲートウェイ内の下の点線枠部分となり、APP モードの処理フローが上の点線枠部分となる。入力部 (Input) から出力部 (Output) に転送するときに、アプリケーション層で処理することで、IPv4/v6、IP ユニキャスト/マルチキャスト変換、ポート変換などの処理が可能になる。FEC の処理手順は4章に示した方式 [Kondo04b] を採用することで、Robst との互換性を確保している。

図5.2の上部は、今後の課題であるゲートウェイ間連携を実現するための必要な要素である。本ゲートウェイは、広域ネットワーク上に複数台設置し、それらを連携した配送ネットワークを構築することを考えている。アプリケーション層プロトコルを定義し、各ゲートウェイ間での統計/制御情報をやり取りするエージェントを定義し、これと実装した転送プログラムとを組み合わせることで動的な配送木設計も可能になると考えている。

5.2 評価実験

評価実験では、ゲートウェイを用いエンドホスト間通信を終端する効果について、パケット損失回復性能に焦点を当てた評価について調べる。

5.2.1 実験概要

FECゲートウェイによる損失回復性能の効果とその傾向を調べるために解析的評価を行った。評価モデルについて述べる。ここでは、各ネットワークにゲートウェイを設置し、ネットワーク間で発生するパケット損失にを局所化することを考える。各リンクの損失特性は3章で求めた式(3.3)で表されるランダム損失を想定し、自ネットワーク内の品質についてはSLA(Service Level Agreement)などによって管理されているものとする。SLAとは、通信サービスの事業者が利用者にサービスの品質を保証する制度であり、契約に従った品質が保証される。このような環境下で、終端するゲートウェイではRS(15,13)符号(帯域 1.14 倍)を用いることとし、以下の2つのモデルについて回復性能評価を行う。

モデル1 図5.3に示すネットワークにおいて、中間のゲートウェイで終端することによる効果を検証する。パケット損失率が変化するとき、終端する場合としない場合の傾向を解析的に求める。

モデル2 図5.4に示す複数NWが接続されるネットワークにおいて、NW8からNW9への配送(リンク数5)の場合を考え、終端するゲートウェイ数を変化させたときと終端する場所を変化させたとき、両ホスト間での損失回復性能を求める。

ここでエンドホスト間で観測されるパケット損失率の導出において記しておく。リンク数Nにより形成される伝送路において、各リンクで発生するパケット損失率を $p_0, p_1 \dots p_{N-1}$ とすると、累積パケット損失率 p_{ac} は以下のように考えることができる。

$$p_{ac} = 1 - (1 - p_0)(1 - p_1) \dots (1 - p_{N-1}) \quad (5.1)$$

各リンクで発生するパケット損失率はパラメータとして与えられ、FEC復元後のパケット損失率は式(3.3)より導出できる。この結果を式(5.1)に当てはめて計算することで、累積損失率を求めることができる。

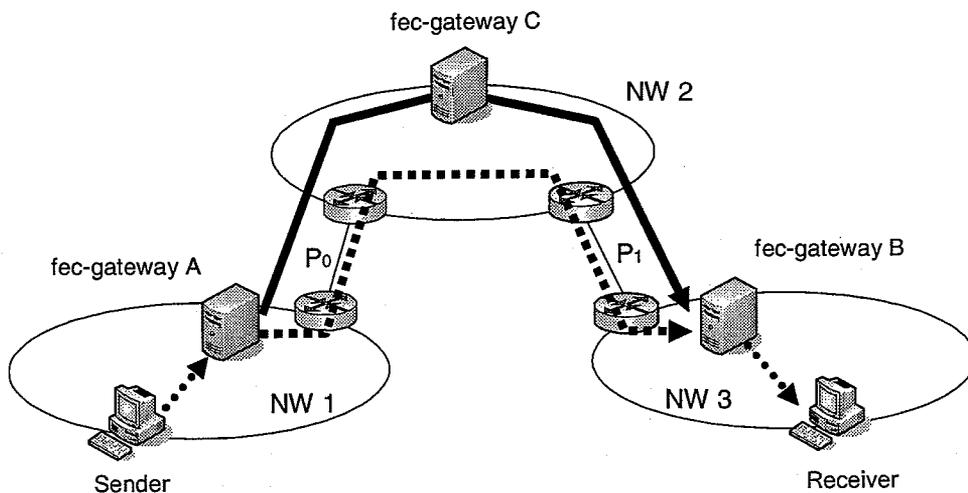


図 5.3: ネットワークモデル 1

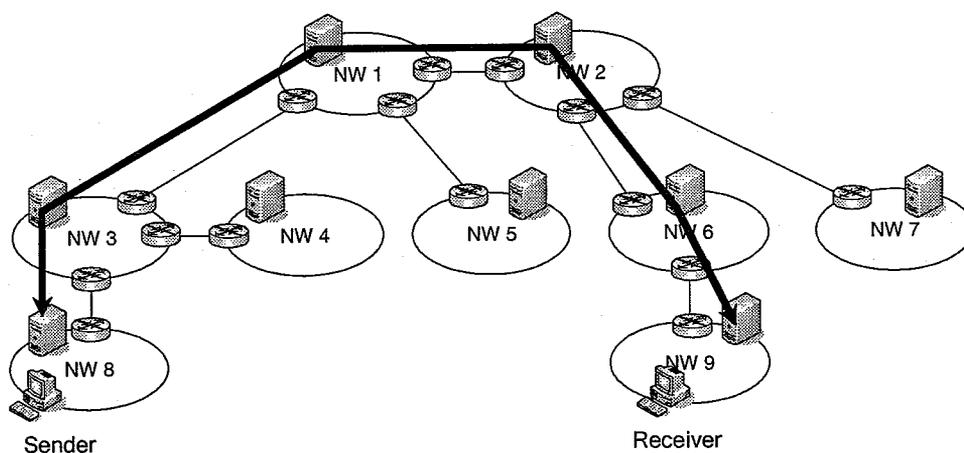


図 5.4: ネットワークモデル 2

5.2.2 実験結果と考察

モデル1, モデル2におけるシミュレーション結果をそれぞれ図 5.5, 図 5.6 に示す. 横軸はリンク間でのパケット損失率, 縦軸は受信ノードにおけるパケット損失率である. 実験では, パケット損失率を 0.01% から 0.1% まで変化させている. また, 図 5.7 は図 5.6 における対数表示であり, パケット損失率 $10^{-3}\%$ から 1% の範囲での傾向を表している.

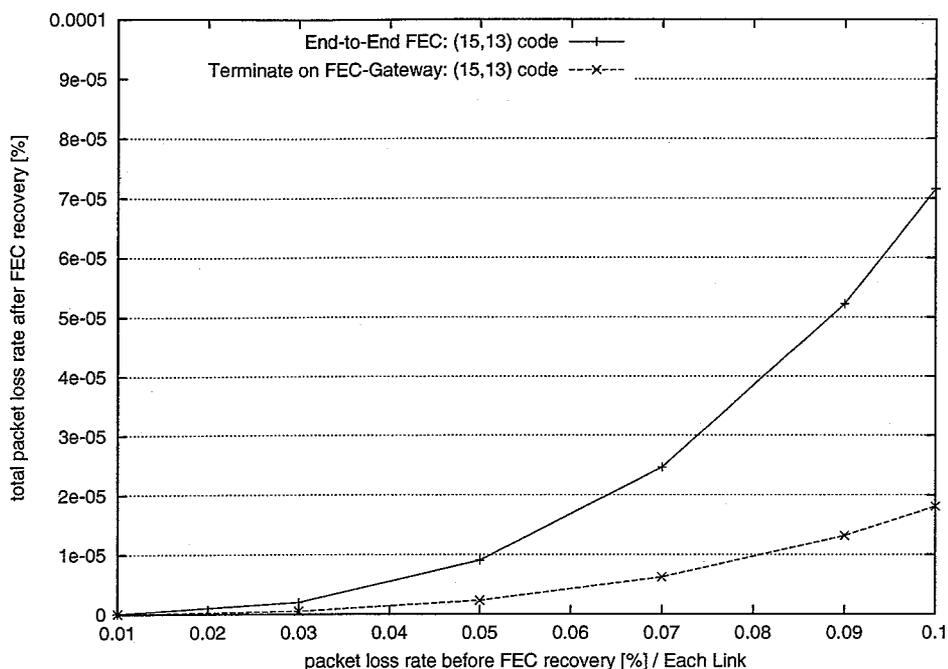


図 5.5: FECゲートウェイの効果 (モデル1の場合)

図 5.5 では、エンドホスト間で FEC を使用する場合と、ゲートウェイで終端する場合の損失回復性能の違いについて示している。図からも分かるように、経路上のゲートウェイで終端させることで、エンドホスト間通信で観測されるの packets 損失が抑制できていることが分かる。図 5.6 では、複数のゲートウェイで終端させることによる効果について示している。この図より、終端するゲートウェイ数が多くなるに従い、エンドホスト間通信の損失率が抑制できている。対数表示において傾きが同一傾向であることから、多段にすることによる回復率の指数関数特性は同じであり、回復できる割合が全体的が上昇していることが分かる。回復性能は、リンクの損失率に大きく依存するが、ゲートウェイで終端させることで、パケット損失に対して局所的に対処し、累積による影響を軽減できているといえる。

本シミュレーション実験では簡単なランダム損失の場合についてのみ考えたが、バースト損失に対する対策も考えなければならない。これについては、2章で示した FEC の適用方法の考察の通り、ブロックサイズを拡大する・インタリーブを併用するなどの対策を行うことでバースト損失に対する効果が期待できる。一方で、ゲートウェイを経由することによる遅延の影響も考慮しなければならない。特に、複数のゲートウェイを経

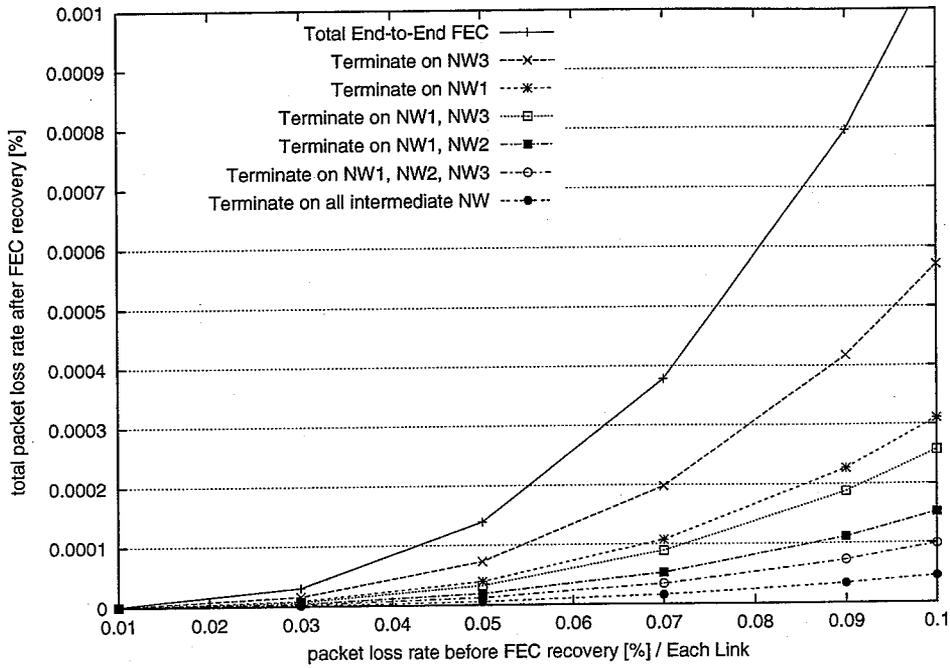


図 5.6: FEC ゲートウェイの効果 (モデル 2 の場合)

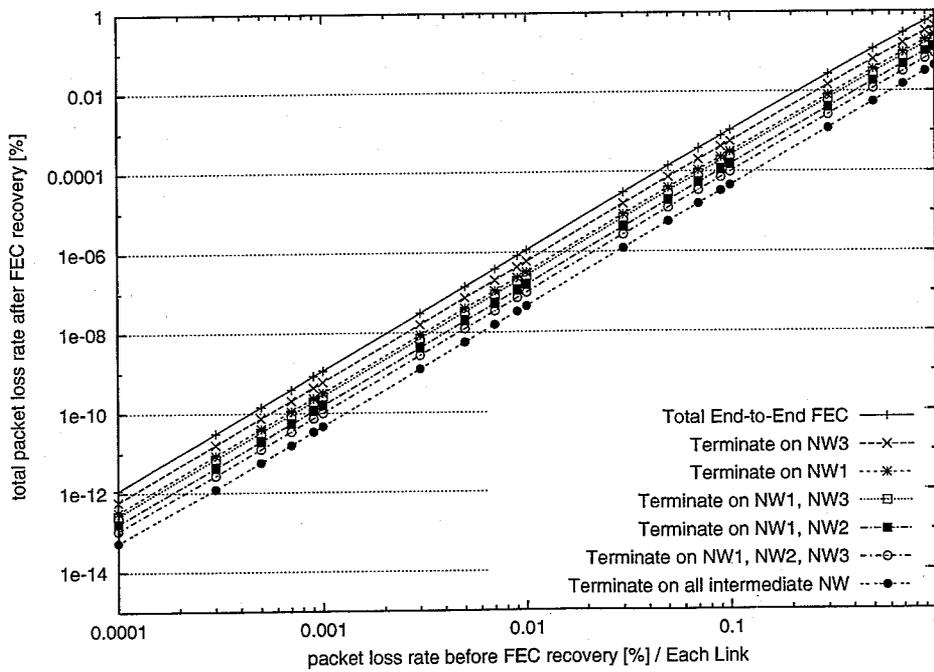


図 5.7: モデル 2 の対数表示

由することによる遅延（揺らぎ）の増大が伝送自体に影響を与える可能性があるが、これについては次節の実証実験で述べる。

5.3 アプリケーション層で展開するハイビジョン広域配信

広域 IP ネットワークでの映像配信の難しさはこれまで述べてきた通りである。特に実運用レベルで考えると、マルチキャスト配送は広域 IP ネットワーク上の一箇所の機器の設定状況が全体の配送に影響を与える可能性もあり、これが運用を難しくする問題のひとつとなっている。本節では、特性の異なるネットワーク上で透過的にマルチキャスト配信を実現することを目的とした実証実験について述べる。広域ネットワーク上での実験を通して、ゲートウェイを用いたアプリケーション層で展開する配送ネットワークの有効性と実運用に向けた可能性について考える。

5.3.1 実験概要

全体のネットワーク構成を図 5.8 に示す。JGNv6 は、JGNII[NICT] が提供する IPv6 テストベットで、IPv6 マルチキャスト可能なネットワークである。実験参加拠点は、札幌、東京、大阪、広島 の 4 拠点で、札幌および東京は送信のみ、大阪は受信のみ、広島は受信および RIBBII ネットワークへの転送を行った。一方、RIBBII ネットワークは地域間相互接続実験プロジェクト II[RIBB] で構築したネットワークで、JGNII 上に構築した実証ネットワーク DistixII[DISTIX] を利用し、2005 年 2 月時点では IPv4 ユニキャストのみ対応となっていた。参加拠点は、広島、高知、山梨、富山の 4 拠点であり、広島を境界とした 2 つのネットワークに対してゲートウェイを利用することで、全受信拠点に透過的なマルチキャスト環境を提供することを可能とした。さらに、ゲートウェイ間は FEC によるパケット損失機能を有効にすることでネットワークの基幹部分で発生するパケット損失に対する耐性を強化させ、受信ホストでの FEC デコード負荷を軽減した伝送を実現した。実験では、本研究との比較としてトンネリング方式を採用する、PTGW[岸田 05] による配信も併せて実施した。

具体的な配送手順について示す。JGNv6 上の東京および札幌から 2 種類の HD ソース映像（表 5.1 参照）を準備し、それぞれ IPv6 マルチキャストで送出する。同時に FEC 処理を施し、冗長データは別ポートで送出する。送信には Robst を利用した。境界のゲー

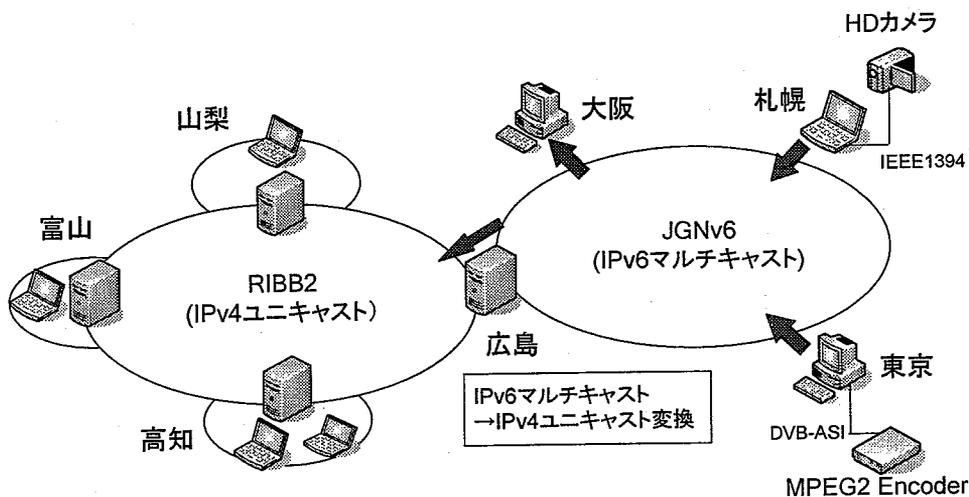


図 5.8: ネットワークの全体図

トウェイで IPv6 マルチキャストパケット (MPEG2-TS データの RTP パケットと冗長パケット) を受信後、損失した RTP パケットが存在する場合、FEC デコードを行い回復を試みる。その後、RTP パケットを IPv4 ユニキャストパケットへ変換し、RIBBII ネットワークに転送する。各ゲートウェイでは、パケットを受信後、一度 FEC デコードを行い、その後 IPv6 マルチキャストパケットに変換してローカルセグメントに配送する。同時に、再 FEC エンコードを行い、予め決められた配送木に従って IPv4 ユニキャストで転送を繰り返す。末端のゲートウェイでは FEC デコードのみを行い、ローカルセグメントに IPv6 マルチキャスト配送する。各拠点に設置された受信ホストは、IPv6 マルチキャストパケットを受信することで、映像を再生することができるようになる。図 5.9 に、実験で用いた配送木の一例を示す (図中の本線)。この図において、境界のゲートウェイは、広島に設置している JGNv6 と RIBBII ネットワークに接続したゲートウェイ、末端のゲートウェイは富山および山梨のゲートウェイを示す。なお、広島には 2 台の PC を設置し、うち 1 台は本ゲートウェイを利用して異なる配送インフラを持つネットワークである MPLS Associao[ASS] への配信に利用した (図 5.9 中の点線)。

実験における検証項目としては、実運用ネットワークにゲートウェイを多段構成で適用した場合の実用性・有効性、およびゲートウェイ間で損失回復制御を適用することの効果を見ることである。特に、多段構成で適用する場合には、アプリケーション層による処理遅延 (揺らぎ) がリアルタイム処理に影響を与える可能性がある。この影響を調べるために、実際に配送ネットワークを構築し、その上で広帯域ストリームを伝送することで本フレームワークの有用性を確認する。

表 5.1: 使用した HD 映像の仕様

拠点	エンコーダ	ビットレート
札幌	Sony HDR-FX1 (HD カメラ) [Sony]	26.5Mbps
東京	Victor MV400 MPEG2 エンコーダ	20Mbps

表 5.2: ゲートウェイ PC のスペック

	CPU	メモリ	OS
広島大	P4-1.9GHz	256MB	Vine Linux 2.6r4
広島市立大	P4-2.8GHz	1GB	Vine Linux 3.0
高知工科大	P4-2.4GHz	1GB	Vine Linux 2.6r4
山梨	Xeon 3.2GHz	1GB	Vine Linux 2.6r4
富山	AMD 1.8GHz	900MB	Debian Linux

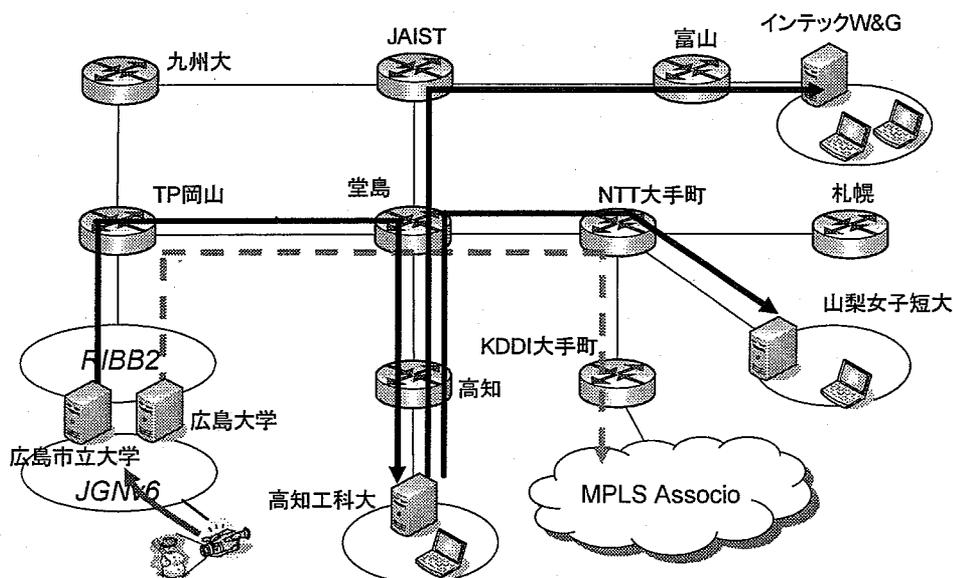


図 5.9: RIBBII ネットワークの配送木例

5.3.2 実験結果と考察

実験は2月7日から17日までの10日間実施し、期間中全ての拠点で正常に映像が受信出来ていることが確認できた。広島大学での受信の様子を図5.10に示す。

表 5.3: 各受信拠点でのゲートウェイ CPU 使用率

	本ゲートウェイ [%]	PTGW [%]
広島(市立大)	19.25	37.45
高知	30.11	38.33
山梨	3.67	11.35
富山	9.74	43.57

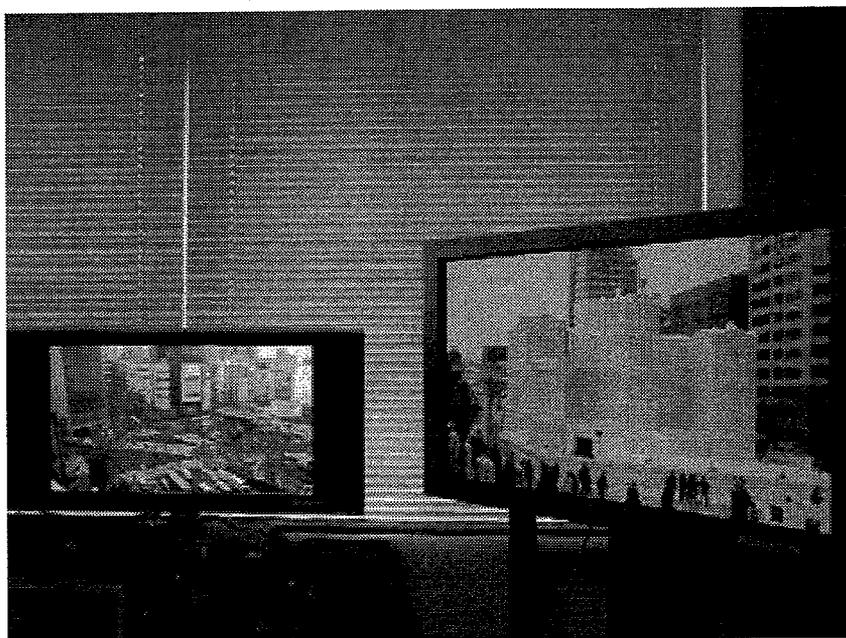


図 5.10: 広島大学での受信の様子

任意の配送木での、各受信拠点での CPU 使用率の統計を表 5.3 に示す。計測条件として、ストリームは Victor MV400 (帯域 20Mbps) を使用、RS 符号は (15,13) 符号 (帯域増加量 1.15 倍) とした場合のものである。CPU 使用率は CPU 総時間からアイドル時間の割合を差し引いたものと定義し、値は 10 分間の平均値である。本ゲートウェイにおける配送木は図 5.9 の構成、PTGW における配送木は、広島から富山に転送、富山から高知と山梨へ 2 ストリーム同時転送する構成である。

この結果から、数十 Mbps のストリームに対してソフトウェア処理による FEC を組み込んだゲートウェイが十分実現可能であることが分かる。また、PTGW を用いた場合には若干 CPU 負荷が高くなっているが、これは、本ゲートウェイが RTP ストリームに特化した設計であるのに対し、PTGW がマルチフォーマットをサポートするためのトンネ

リングを行っているためであるといえる。

また、本実験における FEC の効果を示す結果として、富山における FEC 復元前と復元後のパケット損失率の変動を図 5.11, 図 5.12 に示す。この結果から、ゲートウェイを経由することで、FEC が効果的に機能していることが示された。本実験では、図に示したような定常的なパケット損失は富山以外ではみられなかった。これは富山のネットワークでの問題であると考えられるが、このような障害に対しても局所的なパケット損失対策が効果的に機能していることが示された。また、他の問題として、ゲートウェイを多段にすることにより中継する毎に処理遅延（揺らぎ）が発生し、それが受信ノードでの再生に影響することが懸念された。特に、本ゲートウェイでは中継の際にアプリケーション層処理である FEC デコード/エンコードを繰り返すことによりジッタの影響を受けやすくなるが、今回の実験では正常に再生することが確認できた。

本実証実験では、実運用ネットワークの異なるセグメント間での透過的配送とパケット損失の影響を局所化することで、配送を高品質化することができることを示した。数十 Mbps の広帯域ストリームを広域配送では様々な障害が生じる可能性がある。本実験で示した結果は、これらに対するひとつの手段として有効であるといえる。また今後の課題としては、複数ソース同時配信やゲートウェイ間連携による配送木構築が挙げられる。

5.4 ストリーム広域配送基盤の発展性

近年、地域 IX 技術や分散 IX 技術の発達を背景に、東京一極集中型のアーキテクチャから、地域公共ネットワークの活用と地域をまたぐ広域分散環境でのコンテンツ流通への動きが活発化してきている。地域主導のアプリケーション開発やコンテンツ集積などが重要視され、それをインターネットという地域や時間を問わないグローバルな環境でやり取りすることで、地域特性を活かした情報通信への発展が求められるようになってきている。その中でも、映像配信はキラーアプリケーションとして、今後も地域内、地域間を問わず様々な場面で活用されることが想定される。

ここで、幾つかのアプリケーションモデルを示す。まずは教育分野における活用である。臨場感のある対話や相互の連帯感を生み出す高品質映像を用いた学校間グループ交流 [Kishida04] によって実現する新しい授業形態や、教育資源としての映像配信 [Nishimura03b] によるリアルタイム・オンデマンド教育を通して、e-learning 環境を実現することができる。遠隔地間での安定した高品質映像伝送によるコミュニケーションが

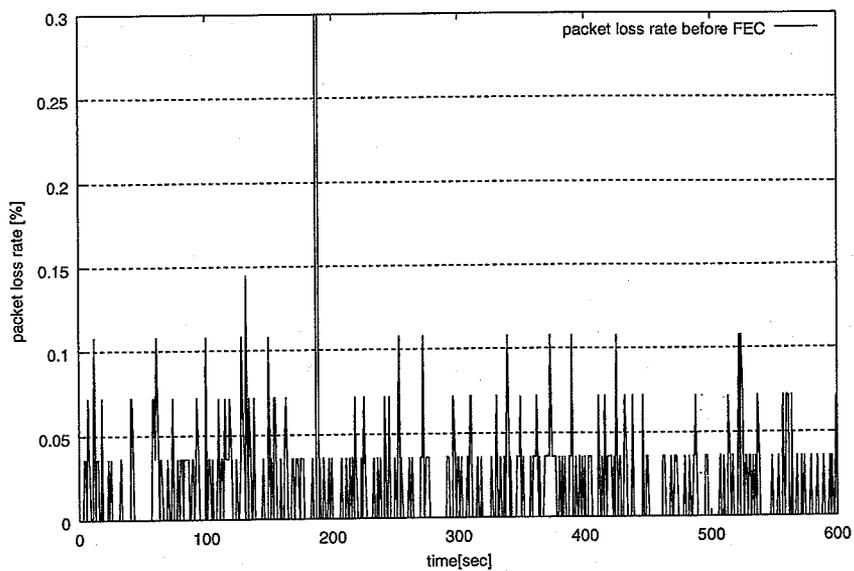


図 5.11: 富山におけるパケット損失率 (FEC 復元前)

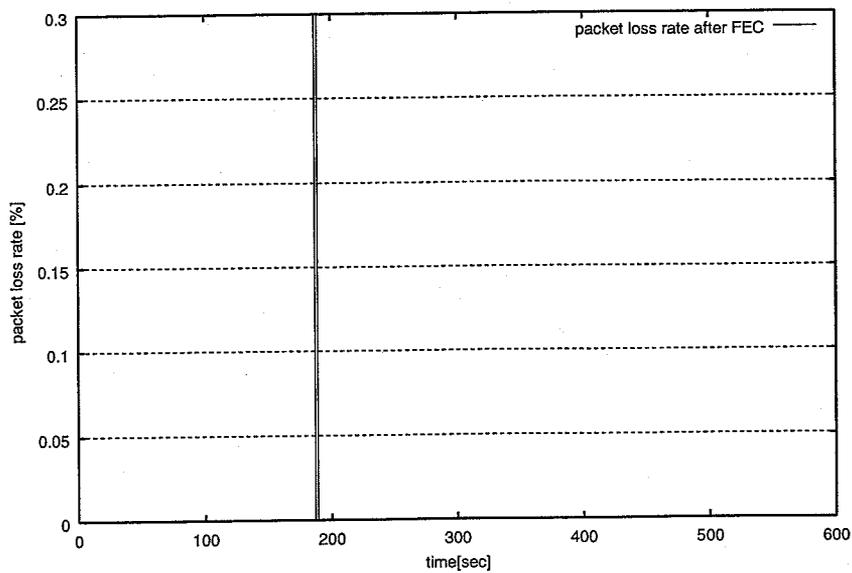


図 5.12: 富山におけるパケット損失率 (FEC 復元後)

教育の質を向上させることにつながる。また、防災分野における活用も考えられる。災害映像情報の収集および配信においては高品質かつ即時性が求められ、必要な地点の安定したリアルタイム映像を必要な時に得ることができなければならない。広域 IP 配信ではそれを実現することができる。以上に挙げたのは一例であり、その活用は多岐にわたる。このような流れのなかで、地域間における高品位映像伝送基盤（図 5.13）の実現を本研究の応用例として考える。地域イントラネットや ISP が繋がる広域 IP バックボーンネットワークにおいて、各 AS 毎にゲートウェイを設置し、アプリケーション層で展開できる高品位映像伝送インフラストラクチャを構築する。地域間での映像コミュニケーションや他地域への映像配信の際に、このインフラを利用することで、アプリケーション特性や利用者を考慮した伝送が実現できる。各ゲートウェイが連携し動作することで、地域から発信されるコンテンツの送信元や属性情報（どのような番組か）などの IP 層では知ることのできない情報によって、ゲートウェイ間でルーティングされ需要のある地域に配送される。この配送中には、アプリケーション特性に応じた QoS 制御やアプリケーション層でのストリーム処理なども可能となる。地域性を取り入れ、かつアプリケーションを意識した高性能ネットワークを構築することで、この上での情報流通を促進することができ、地域から容易かつ高品質に発信可能な基盤を構築することができる。

また、アプリケーション層で IP インフラの差異を吸収できることも、今後のインターネットの普及発展には必要不可欠となる。特に、今後 IPv4 から IPv6 への移行が本格化し、両プロトコルが混在する環境がインターネット上に多く存在することが予想される。本研究で示した基盤を活用することで、この障害を容易に解消することができ、より効率的な配送を実現できると考えられる。

アプリケーション層で管理するアプローチにより、制御対象と目的を明確化することができ、アプリケーションプロトコルによる柔軟な制御/管理が実現できる。これにより、大規模な配信に対しても制御対象の管理が容易となり、広域展開への可能性が大きく広がると考えられる。本研究で考えるインフラはコンテンツ流通基盤の基礎として有用であると考えられるが、実運用ネットワークでサービスを行うためには、セキュリティや利便性の面でまだまだ向上させるべき点が存在する。これらは今後の取り組むべき課題である。

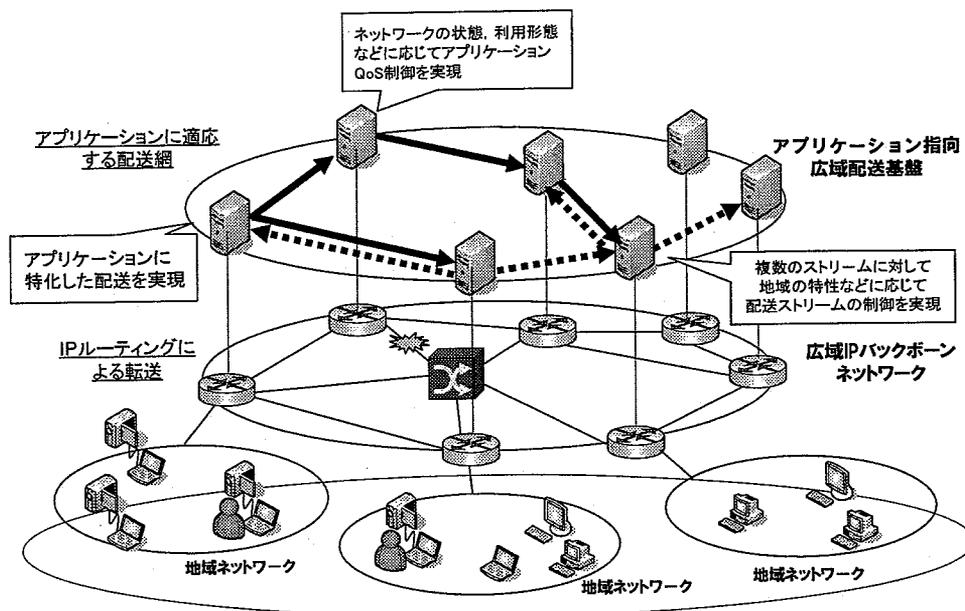


図 5.13: アプリケーションゲートウェイの利活用モデル

5.5 本章のまとめ

本章では、本研究で考えるアプリケーション指向の広域配信基盤の実現手法として、アプリケーションゲートウェイを取り入れたストリーム配送フレームワークを提案し、シミュレーション実験および実証実験による性能評価について述べた。また、配信基盤を用いた地域間での高品位映像伝送やIPインフラの差異を吸収する配信基盤の実現について述べ、その可能性について示した。

アプリケーションが多様化する中で、終点アドレスだけでなく、データ特性や始点アドレス、回線の特徴、利用特性など、様々な要因を考慮した伝送が必要不可欠になってきている。今後インフラも一層多様化し、様々な通信要求が生じることが考えられる。このときにすべてのデータを同じ制御対象として扱い、パケットレベルでの相互運用性を実現するだけでは、広域IPネットワークで効率的な配送を行うことが難しい。本章で示した配信フレームワークでは、ゲートウェイを用いて構築された高機能なアプリケーション層ネットワークが、エンドホスト間での広帯域ストリーム配信を高品質化することができる。ゲートウェイが通信を終端し、IP層で実現不可能な制御をアプリケーション層で適時に取り入れることで、より柔軟で高性能なネットワークインフラを構築すること

ができると考えられる。

本研究では、ゲートウェイの一例としてFECゲートウェイを実装した。FECゲートウェイは、アプリケーション処理としてネットワーク特性に応じた損失回復制御を行うことができる。FECゲートウェイの効果について検証したシミュレーションでは、エンドホスト間通信で発生するパケット損失に対して、ゲートウェイ間で局所的に対処することで損失に対する影響を抑えることが可能であることが示された。

ゲートウェイを多段構成した配送ネットワークにおける処理遅延の影響を調べるために、実運用ネットワークを用いた実証実験も行った。異なる特性を持つ広域IPネットワークに対して、ゲートウェイを用いたアプリケーション層配送ネットワークを構築し、その上でアプリケーションポリシーに基づく静的ルーティングによるハイビジョン映像配信を実施し、配送基盤としての有用性と実用性について検証した。その結果から、ゲートウェイが効果的に機能しインフラ構造が異なるネットワークに対し効率的に配送できることを示した。その一方で幾つかの課題も残された。本実証実験では実現することができなかった、ゲートウェイ連携による動的なアプリケーションルーティング制御や複数ストリームの同時配送などは今後の課題であろう。

これらの結果をもとに、地域間での高品位映像伝送地盤を用いた映像コミュニケーションへの適用や、IPインフラの差異を吸収できる基盤としての発展性についてまとめた。本研究で考えるアプリケーション層で管理する手法は、制御対象と目的を明確化することができる。これにより、柔軟で新しい配信形態を作り出すことが可能になり、広域展開への可能性が大きく広がると考えられる。本研究で示したフレームワークは、ストリーム配送基盤を構築するにあたり、実現手法のひとつとして効果的であると考えている。

第6章 おわりに

本論文では、広域 IP ネットワークにおける広帯域ストリーム配送基盤の実現を目的とした、アプリケーション層で展開する配送フレームワークとそれに必要となる要素技術についてまとめた。広帯域ストリーム配送で問題となる QoS 保証技術のひとつとして、FEC によるパケット損失回復制御に焦点を当て、配送ネットワークを高品質化する柔軟性をもったアプリケーション層制御による効果とその可能性について議論を行った。

6.1 本研究の成果

本研究を通して得られた成果を以下にまとめる。

アプリケーション指向の広域配送基盤の実現 本研究では、広域 IP ネットワークにおけるアプリケーション指向の広域配送基盤の必要性について述べ、フレームワークの提案とその効果について述べた。2章では、広帯域ストリーム配信における問題点を示し、それに対する解決策としてアプリケーション指向配送基盤の必要性について述べた。アプリケーション特性やネットワーク接続環境、利用形態などの変化により広帯域ストリーム配信への要求事項も多様化してきている。従来の IP ルーティングによる配送では、すべてのデータを同じ制御対象として扱うため、パケットレベルでの相互運用性を実現するだけでアプリケーション特性に考慮した効率的な配送を行うことが難しい。また QoS 保証についても同様に、データ特性や利用者特性に応じた制御が困難である。これに対し、本研究で示すアプリケーション指向の配送ネットワークは、取り扱うアプリケーションをリアルタイムストリーム伝送に限定し、エンドホスト間通信を経路の特定ノードで終端するという考えに基づいている。これにより、対象を絞ったアプリケーション QoS 制御を可能にし、IP プロトコルの差異を吸収した、柔軟で高品質な配送ネットワークを容易に形成することが可能になる。この点において、従来の配送基盤にはない利点を持っている。さらに5章において、配送ネットワークの実現手法の一例として、アプリケーション

ン層でパケット損失回復処理が可能なアプリケーションゲートウェイを設計・実装し、これを用いた広域配送フレームワークについて示した。性能評価では、FECゲートウェイによるネットワークに適應したQoS制御とアプリケーション処理の有効性について示し、さらに広域IPネットワークを用いた実証実験を通して、その有用性についても言及した。このような異なる特性を有する広域IPネットワークにおけるハイビジョン映像配信の実証実験はこれまで行われておらず、本研究成果は実運用ネットワークでの広域配信の可能性を示すものとして非常に有用な結果であると考えている。

本研究では、適用するアプリケーションを限定することで、汎用性に対して追求しない分、適用アプリケーションに対する高品質化、高柔軟性を実現している。どちらを優先するかは議論の分かれるところではあるが、単に帯域使用率やIPトラフィックの特性を測るだけでは、多様化するアプリケーションに対してネットワーク・インフラストラクチャを最適化するためには不十分であることも確かである。故に、本研究では、エンドホスト間通信のQoSをアプリケーション層で高品質化するアプローチを採用した。

広帯域ストリームに対する損失回復性能評価 アプリケーション指向制御の構成要素技術としてパケット損失回復制御に焦点を当て、3章にて広帯域ストリームに対する適用方法について議論した。本研究では、広帯域ストリームに対する規模適用性と即時性という2つの要素を考慮し、前方誤り訂正符号であるRS-FECに着目した。RS-FECは、バースト損失に対して脆く、複雑な演算による処理負荷と遅延が生じる恐れがあり、特に伝送するデータ量が増加する場合は問題が顕著化する。本論文で示した性能評価は、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パラメータを決定する指標の一つとすることができる。この意味でも、QoS制御をアプリケーションレベルで適用する場合、本研究で示した評価結果は非常に有用であるといえる。

アプリケーション層QoSを実現する高品位映像伝送システムの開発 広帯域ストリームアプリケーションの中でも映像・音声伝送はキラーアプリケーションとして位置付けられ、今後も様々な場面で利活用されることは想像するに難しくない。本研究では4章にて、DVやMPEG2の数十Mbpsの高品位映像を対象とした伝送システムを開発した。システムの特長としては、パケット損失の時間的・地理的变化に応じたアプリケーション自身はその振舞いを動的に変更することができる。評価実験を通

して、本提案手法の有効性について示した。アプリケーションの QoS 保証の実現手法として、ネットワークレベルまたはアプリケーションレベルでの制御の選択肢が考えられる。ネットワークレベルで QoS 保証技術によりパケット損失率を限りなくゼロにするためには、非常に多大なコストを要することになる。アプリケーションで適切な処理を行うことで、アプリケーション自身が状況に応じて振舞いを変更し、ネットワークに適応して品質を高めることが可能になる。これにより、ネットワークレベルでの QoS に対する要求条件を緩和することができ、インフラ構築のコスト削減を図ることも可能となる。本研究の成果より、本手法が効果的に適用できることを定量的に示すことができた。

なお、本研究で開発した高品位映像伝送システムやゲートウェイソフトウェアは GPL に基づくフリーウェアとして公開しており、広島大学をはじめとする様々な研究教育機関や組織において、遠隔講義や会議などの遠隔コミュニケーション、ライブ映像配信ツールとして利活用されている [Robst].

以上の研究成果による高品位映像コミュニケーション基盤の確立は、技術的側面からだけでなく社会的な部分でも波及効果が期待できる。地域内のみならず地域外とのコミュニケーションツールとしての利用を考えることで、高品質・即時性・双方向性を有するコンテンツ伝送は連携の活性化に直結するアプリケーションである。

また、放送分野での適用も期待できる。ラストワンマイル回線で大容量データ配信に不可欠な光ファイバー網のインフラ整備が進んだことにより、映像・音声・データのトリプルプレイサービスが普及し始めてきており、IP による高品質な映像配信は身近なものになってきている。しかしながら、この配信サービスも ISP 内やサイト内ネットワーク上で数百 Kbps から数 Mbps のストリームを対象としたものが主であり、まだまだ発展途上である。今後、より高ビットレートで広域配信が必要となるとき、本研究で提案したアプリケーション指向基盤は実現手法のひとつとして位置付けることができる。

6.2 今後の課題と展望

本研究では、円滑で高品質な配送を実現するための一手法について考えたが、いくつか残された課題がある。その課題について以下に取り上げ、解決策について考える。

FEC パラメータの決定手法の確立 本研究では、RS-FEC の適用手法の検討を行い、アプリケーション層でネットワーク状況に応じて適用パラメータを動的に変化させ、

冗長データ付加による通信帯域の最適化と損失耐性の強化を実現した。しかしながら、利用形態やアプリケーションによりその要求条件が異なるのは記述の通りであり、FEC パラメータの適用手法も大きく異ってくると考えられる。

これを解決するために、パケット損失の傾向や遅延などのアプリケーションの要求条件から冗長度、ブロックサイズ、インタリーブの深さの各パラメータを導出するための手法を確立することが挙げられる。RTCP を利用して、アプリケーション層で収集可能な情報（伝送遅延、パケット損失率など）をフィードバックする手法については本論文に示した。あとは、この情報から各パラメータを導出するアルゴリズムを考えることで、より高品質な伝送を実現することができると考えられる。

他のトラフィックとの親和性に関する検証 即時性を有するストリーム伝送では、その制約から UDP が使われることが多く、本研究でもこれを採用している。しかしながら、TCP フローと UDP フローが混在する環境下では TCP の輻輳回避機能により、スループットが低下し、転送性能が劣化する恐れがある。今後、さらなる UDP を用いた映像配信アプリケーションの増加により、他の TCP フローへの影響悪化が顕著化する恐れがあるため、この点について考量する必要がでてくると考えられる。これを防ぐために、TCP-Friendly な転送手法の提案がいくつかされている [宮林 00][Wu03][Handley03]。本研究も、これらに示される手法を取り入れることで、TCP トラフィックとの公平性を保ちながら伝送することが可能となる。TCP-Friendly な帯域条件は数式化されており、この帯域制約下でインタリーブやブロックサイズを変更することで、他のフローとの親和性を高めた上で効果的な伝送が実現できると考えている。

実環境での定常運用を考えたシステム構築と検証実験 大規模なストリーム配信基盤を構築するためのさらなる課題として、ゲートウェイ間のより緊密な連携や課金やセキュリティモデルを考慮した定常運用を考えたシステム構築と実証実験が挙げられる。特にアプリケーションゲートウェイについては、アプリケーションプロトコルによる連携について示すまでに至っていない。今後、ゲートウェイ連携による動的な配信ネットワークの管理手法は考える必要がある。また、セキュリティに関する考慮も考えなければならない。IPv6 では、IPsec によるセキュリティ機能が標準で装備されているため、これを利用することで利用者間での安全性は確保できるが、受信者がマルチキャスト通信を利用する場合などは鍵配布方法が問題となる。これまでの研究において、大規模マルチキャストにおけるグループ鍵の管理手法が提案されている [Harney97],[上原 05]。また会議のような小規模マルチキャストでの IPsec 利

用についての研究もなされている [浅野 05]。これらを活用することにより、規模に応じた安全性を提供することができる。

また、ブロードバンドモバイル環境への応用についても検討する必要がある。移動透過通信 [Inayat04][Johnson04] では、通信を維持したまま異なるネットワークへの移動が要求されるが、既存の IP 層での移動透過性を実現するプロトコルでは、ネットワーク移動時に変化する遅延やジッタ、パケット損失といったネットワーク特性を十分に対応することができない。本研究のようなアプリケーション層での処理により、ネットワーク特性の変化に適応し、その影響を軽減することが可能となると考えられる。移動透過通信におけるアプリケーション層 QoS 制御の適用とその有効性の検証も今後の課題である。

地域の枠を越えた広域ネットワーク上での、映像や音声などのリッチコンテンツを用いたサービスアプリケーションは、人々への大きな影響力を持ち日々の生活を豊かにしてくれる可能性を持っている。利用者や環境の特性やアプリケーションによって必要とされる事柄は千差万別であり、そのためにもアプリケーション指向の柔軟な配送は必要不可欠である。以上のような課題への取り組みを通して、定常運用に耐え得るシステムへの発展と運用を通しての評価も今後考えていく必要がある。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，貴重なご助言とご指導を賜りました広島大学大学院工学研究科 渡邊敏正教授，原田耕一教授，藤田聡助教授に心より感謝申し上げます。また，広島大学情報メディア教育研究センター 相原玲二教授には，本研究の全過程を通して熱心なご指導とご助言を頂くとともに，本論文を作成するにあたり多大なる支援を頂きました。心より感謝申し上げます。

広島市立大学情報処理センター前田香織助教授，広島大学情報メディアセンター西村浩二助手には，日頃から研究活動全般において多大なるご助言とご協力を頂き，数々の励ましや支援も頂きました。また，広島大学情報メディア教育研究センター 田島浩一助手，岸場清吾助手，広島市立大学情報処理センター 河野英太郎助手にも，数多くのご指導やご協力を頂きました。深く感謝致します。

本研究を進める上で，広島大学 藤田 貴大君，梶原 大輔君，Rommy Yuka Imai さん，近畿大学 日高 良太君には，日頃より研究室で共に活動し，本研究に関連する数多くの実験やイベントにも積極的に寄与して頂きました。修士学生時代の研究室メンバーだった Tamrat Byle さん，Riaz Inayat さん，大塚玉記さん，秋成 秀紀さん，野村 嘉洋君，藤原裕久君にも，本研究に関するプログラム設計や実装面でも多く議論をしていただき，様々な実証実験にもご協力を頂きました。また，広島市立大学 岸田 崇志君をはじめとする広島市立大学 情報処理センターの学生の皆様には，研究全般を通して幅広く議論して頂いただけでなく，数々のプロジェクトにも積極的にご協力頂きました。この他にも，本研究の遂行にあたりご協力頂いた学生の皆様に感謝致します。ありがとうございました。

本研究を通して，様々な機関やプロジェクトの皆様にもご支援を頂きました。独立行政法人 情報通信研究機構（旧 通信・放送機構，通信総合研究所）様には，数多くの実証実験の実施にご協力頂きました。特定非営利活動法人 中国・四国インターネット協議会 および マメ de がんすプロジェクト，マメ de がんすプロジェクト2の各位には，本研究の成果を実フィールドで活用する場を与えて下さり，研究シーズを社会に還元することの大切さを教えて頂きました。日本学術振興会インターネット技術第163委員会 (ITRC)，

謝辞

および地域間相互接続実験プロジェクトの各位には、本研究をまとめるために必要不可欠だった実証実験にご協力頂いただけでなく、数多くのご議論やご支援も頂き、研究の意義を様々な視点から考える機会を頂きました。

本研究は、机上の理論だけに留まるのではなく実フィールドでの活用を意識したものでした。そのため、ここに書ききれないほどの多くの方々からご支援とご協力を頂くことで、より充実した論文としてまとめることができました。心よりお礼申し上げます。

最後に、ここまで研究を続けるにあたり、様々な面で支えて頂いた両親・家族・親戚の皆様から心から感謝致します。

2006年1月20日

参考文献

- [ASS] Japan Telecom, mpls Associo Website. online available at <http://www.associo.jp>.
- [Aras94] C. Aras, J. Kurose, D. Reeves, and H. Schulzrinne. Real-time communication in packet-switched networks. *IEEE Proceedings*, pp. 122–139, 1994.
- [Black02] U. Black. *MPLS and Label Switching Networks*. Prentice Hall PTR, 2002.
- [Blake98] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. An Architecture for Differentiated Service. RFC 2475, 1998.
- [Bolot93] J.C. Bolot. Characterizing End-to-End Packet Delay and Loss in the Internet. *Journal of High-Speed Networks*, Vol. 2, No. 3, pp. 304–323, 1993.
- [Borella98] M.S. Borella and D. Swider. Internet Packet Loss: Measurement and Implications for End-to-End QoS. *In Proceedings of Internet Conference on Parallel Processing*, pp. 3–12, 1998.
- [Braden94] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview. RFC 1633, 1994.
- [Chung03] J. Chung, M. Claypool, and Y. Zhu. Measurement of the congestion responsiveness of realplayer streaming video over udp. *In Proceedings of the International Packet Video Workshop*, April 2003.
- [Clark04] D. Clark. The design philosophy of the DARPA internet protocols. *Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication archive Symposium proceedings on Communications architectures and protocols*, pp. 106–114, 2004.
- [DISTIX] DISTIX. Next Generation IX Consortium Website. online available at <http://www.distix.net>.

- [D.J.C.MacKay99] D.J.C.MacKay. Good error-correcting codes based on very sparse metrics. *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol. 45, pp. 399–431, 1999.
- [DVT] DVTS (Digital Video Transport System) コンソーシアム. online document available at <http://www.dvts.jp>.
- [Deering98] S. Deering and R. Hinden. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specifications. RFC2460, 1998.
- [Deering99] S. Deering, W. Fenner, and B. Haberman. Multicast Listener Discovery (MLD) for IPv6. RFC2710, 1999.
- [Fenner97] W. Fenner. Internet Group Management Protocol, Version 2. RFC2236, 1997.
- [Floyd01] S. Floyd and V. Paxson. Difficulties in Simulating the Internet. *In IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 9, No. 4, pp. 392–403, 2001.
- [Gortmaker96] P. Gortmaker. Real Time Clock Driver. on line available at <http://www.linux.or.jp/JF/JFdocs/kernel-docs-2.4/rtc.txt.html>, 1996.
- [Handley03] M. Handley, S. Floyd, J. Padhye, and J. Widmer. TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification. RFC3448, 2003.
- [Harney97] H. Harney and C. Muckenhirn. Group Key Management Protocol (GKMP) Architecture. RFC2094, 1997.
- [IEC94] IEC. Generic coding of moving pictures and associated audio information. ISO/IEC International Standard 13818, 1994.
- [IEC99] IEC. Helical-scan digital video cassette recording system using 6,35 mm magnetic tape for consumer use (525-60, 625-50, 1125-60 and 1250-50 systems). IEC International Standard 61834, 1999.
- [Imai05] Y. Imai, W. Livens, O. Paridaens, and E. Muramoto. Explicit Multicast (Xcast) Basic Specification. draft-ooms-xcast-basic-spec-07.txt, 2005.
- [Inayat04] R. Inayat, R. Aibara, K. Nishimura, T. Fujita, and K. Maeda. An End-to-End Network Architecture for Supporting Mobility in Wide Area Wireless Network. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. E87-B, No. 6, pp. 1584–1593, 2004.

- [Ito04] Y. Ito, S. Tasaka, and Y. Fukuta. Psychometric analysis of the effect of end-to-end delay on user-level QoS in live audio-video transmission. *Proc of : IEEE ICC2004*, pp. 2214–2220, 2004.
- [Jiang00] W. Jiang and H. Schulzrinne. Modeling of Packet Loss and Delay and Their Effect on Real-Time Multimedia Service Quality. *In Proceedings of the NOSSDAV 2000*, 2000.
- [Johnson04] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko. Mobility Support in IPv6. RFC3775, 2004.
- [Karn] P. Karn. RS codec 3.1.1. available at <http://www.ka9q.net/code/fec>.
- [Kishida04] T. Kishida, K. Maeda, and E. Kohno. Realization of Active Collaboration in Distance Learning on the Internet. *JSiSE International Journal of Information and Systems in Education*, Vol. 2, No. 1, pp. 77–84, 2004.
- [Kobayashi] K. Kobayashi, A. Ogawa, S. Casner, and C. Bormann.
- [Kondo04a] T. Kondo, K. Nishimura, and R. Aibara. An Efficient FEC Method For High-Quality Video Transmission on the Broadband Internet. *IEICE Transactions on Communications*, No. 3, pp. 643–650, 2004.
- [Kondo04b] T. Kondo, K. Nishimura, and R. Aibara. Implementation and Evaluation of the Robust High-Quality Video Transfer System on the Broadband Internet. *In Proceedings of International Symposium on Applications and the Internet (SAINT) 2004*, pp. 135–141, 2004.
- [Koodli02] R. Koodli. One-way Loss Pattern Sample Metrics. RFC3357, 2002.
- [Kostas02] T. Kostas and S. Jordan. Packet Erasure FEC on ARQ Protocols. *In Proceedings of SPIE*, Vol. 4866, pp. 126–137, 2002.
- [LE] ライブ!エクリプス実行委員会. online document available at <http://www.live-eclipse.org>.
- [Larzon04] L.A. Larzon, S. Pink, E. L-E. Jonsson, and E. G. Fairhurst. The Lightweight User Datagram Protocol (UDP-Lite). RFC3828, 2004.

- [Liang02] Y.J. Liang, J. G. Apostolopoulos, and B. Girod. Model-Based Delay-Distortion Optimization for Video Streaming Using Packet Interleaving. *In Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, Nov. 2002.*
- [LinearSystems] LinearSystems. DVB Master FD. online document available at <http://www.linsys.ca>.
- [Luby02] M. Luby, L. Vicisano, J. Gemmell, L. Rizzo, M. Handley, and J. Crowcroft. Forward Error Correction (FEC) Building Block. RFC3452, Dec. 2002.
- [MAM] 中国・四国インターネット協議会 (CSI) 広島地域の学校における高度マルチメディア通信に関する研究プロジェクト 2. on line document available at <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu>.
- [Mediagluе] C. Mediagluе. MPEG2 Hardware Decoder MGHDB3. online document available at <http://www.mediagluе.co.jp>.
- [Metz99] C. Metz. RSVP: General-Purpose Signaling for IP. *IEEE Internet Computing*, Vol. 3, No. 3, pp. 95–99, 1999.
- [NICT] NICT 独立行政法人情報通信研究機構. Japan Gigabit Network II Website. online available at <http://www.jgn.nict.go.jp>.
- [Nishimura03a] K. Nishimura, T. Kondo, and R. Aibara. High Quality Video Transfer System with Dynamic Redundancy of FEC over Broadband Network. *In Proceedings of Pacific Rim Conference (PACRIM) 2003*, pp. 903–906, 2003.
- [Nishimura03b] K. Nishimura, T. Kondo, and R. Aibara. An MPEG2 over IP Transfer System intergrating Live Distance Lecture and On-Demand Destance Learning. *In Proceedings of International Conference on Computers in Education (ICCE) 2002*, pp. 797–798, 2003.
- [Optibase] Optibase. Video Plex Xpress MPEG-2 Decoder. online document available at <http://www.optibase.com>.
- [Parkins98] C. Parkins, O. Hodson, and V. Hardman. A Survey of Packet Loss Recovery Techniques for Streaming Audio. *IEEE Network*, Vol. 12, No. 5, pp. 40–48, 1998.

- [Peercast] Peercast. online document available at <http://www.pearcast.org>.
- [Phillips] Phillips. MPEX MPEG2 Encdoer. online document available at <http://www.linuxtv.org>.
- [Postel81] J. Postel. Internet Protocol (IP) Specifications. RFC791, 1981.
- [RAT] RAT (Robust Audio Tools). online document available at <http://www-mice.cs.ucl.ac.uk/multimedia/software/rat>.
- [RIBB] RIBB. 地域間相互接続実験プロジェクト Website. online available at <http://www.ribb.org>.
- [Reed60] I. Reed and G. Solomon. Polynomial Codes over Certain Finite Fields. *J.Soc.Ind.Appl. Math*, Vol. 8, pp. 300–304, 1960.
- [Rizzo97a] L. Rizzo. Effective Erasure Codes for Reliable Computer Communication Protocols. *Proc. ACM Computer Communication Review*, Vol. 27, No. 2, pp. 23–36, 1997.
- [Rizzo97b] L. Rizzo. Effective Erasure Codes for Reliable Computer Communication Protocols. *ACM Computer Communication Review*, Vol. 24, No. 2, pp. 24–36, 1997.
- [Robst] Robst. 広島大学情報メディア教育研究センター. online document available at <http://net.ipc.hiroshima-u.ac.jp/robst>.
- [Rosenberg99] J. Rosenberg and H. Schulzrinne. An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction. RFC2733, Dec. 1999.
- [Rubenstein01] D. Rubenstein, J.F. Kurose, and D.F. Towsley. A study of proactive hybrid FEC/ARQ and scalable feedback techniques for reliable, real-time multicast. *Computer Communications*, Vol. 24, No. 5–6, pp. 563–574, 2001.
- [SOI] WIDE Project: SOI(School of Internet) Website. online available at <http://sod.wide.ad.jp>.
- [Sanneck00] H. Sanneck and G. Carle. A Framework Model for Packet Loss Metrics Based on Loss Runlength. In *Proceedings of SPIE/ACM SIGMM Multimedia Computing and Networking Conference*, pp. 177–187, 2000.

- [Schulzrinne03] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC3550, 2003.
- [Sharecast] Sharecast. online document available at <http://www.scast.tv>.
- [Sony] Sony. HDR-FX1 /HC1 ハイビジョンハンディカム. online document available at <http://www.sony.jp/products/Consumer/handycam/PRODUCTS/HDR-HC1>.
- [Towsley93] D. Towsley. Providing Quality of Service in Packet Switched Networks. pp. 560–586, 1993.
- [VLC] Video LAN Client. online document available at <http://www.videolan.org>.
- [Viontech] Viontech. Kfir MPEG2 Encoder. online document available at <http://www.linuxtv.org>.
- [Wu03] H. Wu, M. Claypool, and R. Kinicki. A Model for MPEG with Forward Error Correction and TCP-Friendly Bandwidth. In Proceedings of Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video 2003, 2003.
- [Yajinik99] M. Yajinik, S. Moon, J. Kurose, and D. Towsley. Measurement and Modelling of the Temporal Dependence in Packet Loss. In *Proceedings of the Conference on Computer Communications*, pp. 345–352, 1999.
- [伊藤 02] 伊藤政利, 下川俊彦, 山下雅史. 高信頼性 XCAST プロトコルの設計. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 11, pp. 3530–3539, 2002.
- [加藤 04] 加藤利雄. IP multicast deployment. MPLS Japan, online available at <http://www.mpls.jp/2004.>, 2004.
- [岸田 05] 岸田崇志, 前田香織, 河野英太郎. プロトコル変換ゲートウェイ PTGW の実証実験と評価. 電子情報通信学会技術研究報告 IA2005-8, Vol. 105, No. 219, pp. 7–12, 2005.
- [鬼木 02] 鬼木甫. インフラレベルから見た通信と放送の融合. In *Proceedings of ITME Discussion Paper*, Vol. 103, , 2002.

- [宮林 00] 宮林正樹, 若宮直紀, 村田正幸, 宮原秀夫. TCP データ通信との公平性を考慮した輻輳適応型レート制御による動画像通信の実装. 電子情報通信学会 技術研究報告 (CQ2000-35), pp. 73–78, 2000.
- [近堂 04] 近堂徹, 西村浩二, 相原玲二, 前田香織, 大塚玉記. 高品質動画像伝送における FEC の性能評価. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 1, pp. 84–92, 2004.
- [近堂 05] 近堂徹, 西村浩二, 相原玲二. 広帯域ストリーム伝送におけるソフトウェア損失回復制御の評価. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 10, 2005.
- [串田 03] 串田高幸, 柴田義孝. End-to-End パスにおけるパケット到着間隔および損失の特性解析. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 3, pp. 570–579, 2003.
- [古村 01] 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, 2001.
- [佐藤 02] 佐藤昌平, 吉田万喜子. 次世代インターネットとトラフィック工学. 電子情報通信学会, Vol. 85-B, No. 6, pp. 875–889, 2002.
- [三川 03] 三川荘子, 大江将史, 加藤朗, 大川恵子, 村井純. IPv6 インターネット基盤を利用した遠隔教育環境の実現. 情報処理学会第 65 回全国大会, 2003.
- [山内 98] 山内長承, 城下輝治, 佐野哲央, 高橋修. 高信頼同報バルク転送機構. 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 6, pp. 2009–2019, 1998.
- [上原 05] 上原哲太郎, 川北良一, 辻義一, 佐藤敬, 山岡克式, 泉裕, 齋藤彰一, 國枝義敏, 結城. IP マルチキャストを用いたユーザ認証つきインターネット放送システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 3, pp. 610–624, 2005.
- [新井 03] 新井雅之, 山本篤史, ヤマガチアンナ, 福本聡, 岩崎一彦. $(n, n-1, m)$ 畳み込み符号を用いた連続するパケット損の回復. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J86-D-I, No. 1, pp. 44–47, 2003.
- [石橋 04] 石橋豊, 田坂修二. 分散マルチメディアアプリケーションにおけるメディアの時間構造と QoS. 電子情報通信学会誌, Vol. 87, No. 3, pp. 220–226, 2004.
- [浅野 05] 浅野歩, 岸田崇志, 前田香織, 河野英太郎. 鍵の同期を考慮した鍵の配布・更新の提案と実装. 情報処理学会技術研究報告 DSM2005, 2005.

参考文献

- [総務省 05a] 総務省. ブロードバンドサービス等の契約数. online document available at http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/051129_3.html., 2005.
- [総務省 05b] 総務省, 情報通信審議会. 地上デジタル放送の利活用の在り方と普及に向けて行政の果たすべき役割(答申). 平成17年7月29日, online document available at http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/050729_11.html., 2005.
- [中島 05] 中島直樹, 清水周次, 岡村耕二. アジア太平洋地域におけるブロードバンド遠隔医療ネットワークの普及活動. *Internet Conference 2005*, 2005.
- [田沢 01] 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.
- [米山 00] 米山清二郎, 砂原秀樹. FEC on IPv6 for Reliable Multicast. *Proc. Internet Conference 2000 (IC2000)*, Nov. 2000.

付録 A 実証実験事例

A.1 事例一覧

本研究では、Robst およびアプリケーションゲートウェイを用いた映像配信を数多く行い、実用性や有効性に関する検証を行ってきている。行った実証実験の一例を以下に時系列で示す。なお、2001年度から2002年度にかけて行った教育分野における利活用事例については、中国・四国インターネット協議会 マメ de がんすプロジェクトの Web ページ [MAM] から閲覧可能である。

2001 年度

Live!Eclipse 2001 アフリカ皆既日食中継 2001年6月に実施した中継実験。ライブ!エクリプス実行委員会が実施するアフリカからの皆既日食中継をマメ de がんすプロジェクトの参加組織および JapanGigabit Network (JGN) 上の受信拠点に対し配信したものである。詳細は、A.2にて述べる。

遠隔合唱セッション実験 広島市立河内小学校（広島市佐伯区）で開催されたトーク&ライブを広島市立南観音小学校（広島市西区）に配信することで、遠隔地との交流を深める機会をもつとともに、2つの小学校の間で歌の交歓と遠隔合唱する実験を行ったものである。伝送には MPEG2-SD(4Mbps) のストリームを利用している。同小学校間の遠隔合唱は、7月と11月の2回行われている。詳細はマメ de がんすプロジェクト Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/MAMEdeGansu/dsession/> から閲覧できる。

全国小学校理科研究大会 公開授業 2001年10月に、広島市立井口明神小学校（広島市西区）と広島大学（東広島市）の間で、ゲストティーチャーによる遠隔授業を実施した。10Mbps の IP 網に FEC 付き MPEG2-SD(4Mbps) のストリームを双方向伝送することで、インタラクティブな通信を行っている。詳細はマメ de がんす プロジェ

クト Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/MAMEdeGansu/rika/> から閲覧できる。

JGN シンポジウム 2001 スペシャルセッション 2001 年 11 月, 万国津梁館 (沖縄県名護市) で行われたギガビットネットワーク・シンポジウム 2001 のスペシャルセッションの中で, 白島小学校 (広島市中区) と嘉陽小学校 (名護市) 間で遠隔交流の機会をもった。このうち, シンポジウム会場と白島小学校 (広島市中区) 間は MPEG2-SD(4Mbps) のストリームを用いた伝送を行った。詳細はマメ de がんすプロジェクト Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/MAMEdeGansu/okinawa/JGNsympo/> から閲覧できる。

佐賀大学附属図書館文化講演会 2001 年 12 月に佐賀大学 (佐賀市) で行われた, 佐賀大学附属図書館文化講演会の様子を, v4 マルチキャストにて広島大学と広島市立大学 (広島市安佐南区) に配信した。中継では, ストリームとして FEC 付き MPEG2-SD (4Mbps) を用いている。詳細はマメ de がんすプロジェクト Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/MAMEdeGansu/saga-koen/> から閲覧できる。

佐賀大学からの講演会中継は, 2002 年 7 月にも行っている。この時も同様に IPv4 マルチキャストを利用し, FEC 付き MPEG2-SD(4Mbps) のストリームを, 広島大学・広島市立大学・広島市役所に配信している。この概要は, マメ de がんすプロジェクト Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/saga-20020722/> から閲覧できる。

広島大学情報メディア教育研究センター講演会中継 2001 年 12 月に広島大学で実施された, 広島大学情報メディア教育研究センター講演会の様子を, IPv6 マルチキャストを用いて広島市立大学に向けて配信した。広島市立大学からは広島大学へユニキャストストリームを送ることで, インタラクティブな通信を行っている。詳細はマメ de がんすプロジェクト Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/MAMEdeGansu/hu-koen/> から閲覧できる。

2002 年度

高校生のための遠隔天文学演習 2002 年 8 月に実施した和歌山大学と広島市立基町高校 (広島市中区), 広島大学附属福山中・高校 (福山市) との間での天文に関する遠隔授業である。3 地点での双方向授業を実施するために映像伝送には MPEG2-SD (4Mbps), 音声伝送には RAT(Robust Audio Tool)[RAT] を用いて, v4 マル

チキャストによる通信を行った。詳細はマメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/entech/> から閲覧できる。

広島大学学長から高校生への遠隔授業 2002年10月に、広島大学牟田学長が広島大学の東広島キャンパスから広島大学附属中・高校（広島市南区）と広島大学附属福山中・高校の生徒向けに行う授業を、映像としてFEC付きMPEG2-SD（4Mbps）、音声としてRAT（128kbps）を用いて配送する。映像については、両拠点ともにIPv4ユニキャスト、音声についてはマルチキャスト伝送を行った。詳細はマメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/hu-distance/> から閲覧できる。

隣接小学校-高等学校の交流 2002年10月に広島市立基町高等学校と広島市立白島小学校の間でMPEG2-SD（4Mbps）とRATを利用したテレビ会議を行った。伝送にはIPv4マルチキャストを用いている。

先輩に尋ねてみよう！～遠隔懇談会～ 広島市立大学在学中の学部学生や大学院学生と広島市立基町高校の生徒が交流するためのツールとして、広域イーサネット網10Mbps上でMPEG2-SD（4Mbps）とRAT（342Kbps）を用いた伝送システムを構築した。伝送はユニキャスト双方向伝送し、音声と映像を別ストリームで送ることで、インタラクティブ性を重視したシステム構築している。

広島市立大学では この他にも、『高速ネットワークを用いた高大連携の試み』としRobstを用いた遠隔教育の実践を2002年11月から2月にかけて実施して頂いた。詳細はマメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/hcu-moto/> から閲覧できる。

遠隔合唱実験 2001年に実施した遠隔セッション実験をより高度化した、遠隔合唱実験を2002年11月に行った。広島市立基町高校と広島市立南観音小学校に加え、第3拠点の広島市立大学を結び、映像にはFEC付きMPEG2-SD（4Mbps）、音声にはMRAT（1Mbps）を用いて、低遅延な音声伝送とMPEG2映像を合わせた通信を行った。MRAT[Kishida04]は広島市立大学で開発されたRATの改良版である。詳細はマメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/densemble/> から閲覧できる。

広島市教科外研究会 2002年11月、広島市立井口明神小学校（広島市西区）と広島市立南観音小学校を結び、広島市視聴覚教育研究部会の研究会を中継し

た。映像と音声は MPEG2-SD(4Mbps) を利用し、10Mbps の実験網内を双方向ユニキャストで伝送した。詳細はマメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/kyokagai/> から閲覧できる。

広島大学附属中・高等学校－大阪大学の遠隔授業 2002年12月に、Robst を使い、広島大学附属高等学校と大阪大学吹田キャンパスを結び、高大連携授業を行った。最大帯域 20Mbps の回線を利用し、Robst は MPEG2-SD(4Mbps) にネットワーク環境に適応する FEC を付加し伝送した。詳細は、マメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/hu-fuzoku/> から閲覧できる。

E スクエア・アドバンス成果発表会 2003年3月に、マメ de がんすプロジェクトの成果を E スクエア・アドバンスにて発表した。これにあたり、広島市立大学と東京ファッションタウンビル（東京都江東区）との間で、Robst を使った遠隔授業のデモンストレーションを発表内に行った。回線には、基幹線は SINET を利用、ラストワンマイルは FTTH を利用し、MPEG2-SD(6Mbps) を双方向伝送し、授業を行った。詳細は、マメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/cec-final/> から閲覧できる。

遠隔地との伝統芸能交流 2003年3月に、広島市立白島小学校とカラハイ（沖縄県中頭郡）との間で、沖縄の伝統的な盆踊り（エイサー）の指導をする授業を実施した。双方向での通信を実現するために、映像は FEC 付き MPEG2-SD(4Mbps) を利用、音声には MRAT(128kbps) with FEC を利用している。ネットワークは、マメ de がんすプロジェクトの広域イーサネット 10Mbps と JGN を利用した。詳細は、マメ de がんすプロジェクト 2Web ページ <http://www.csi.ad.jp/activity/2MAMEdeGansu/rinken/> から閲覧できる。

2003 年度

広島大学・広島市立大学・佐賀大学 3 地点遠隔セミナー 2003 年度の授業開講中のほぼ毎週、広島大学と広島市立大学・佐賀大学間で、JGN 上で IPv6 マルチキャストを用いた遠隔セミナーを開催した。映像には、FEC 付き MPEG2-SD(4Mbps) を利用、音声は MRAT(175kbps) with FEC を利用し、v6 マルチキャストによる 3 地点のインタラクティブなセミナーを実現した。2003 年度セミナーに関する情報は、<http://www.v6.csi2.net/seminar> から閲覧できる。

広島 IT フェア - New Education Expo2003 中継 2003年5月に、広島市まちづくり市民交流プラザ（広島市中区）にて行われた”広島 IT フェア”に本システムを出展し、同日東京都で開催されていた New Education Expo2003の様子を MPEG2-HD(19.5Mbps)にて広島市会場へ中継するとともに、MPEG2-SD(4Mbps)の双方向通信を利用したインタラクティブなセッションも行った。ネットワークには、一般商用のプロバイダおよび FTTH を利用した。この様子は、中国総合通信局の発行する”Catch the Wave vol.53” (<http://www.cbt.go.jp/kouhousi/image/catch53.pdf>) にも掲載されている。

2004 年度

広島大学・広島市立大学・佐賀大学 3 地点ハイビジョン遠隔セミナー 2003 年度に SD 映像を利用し行っていた、3 地点での遠隔セミナーをハイビジョン品質に移行することで、より高品質なセミナーを実現した。音声に関しては MRAT を継続して使用している。ネットワークは JGNv6 (JGN 2) を利用し、ネイティブ IPv6 マルチキャストによる 3 地点通信を行っている。帯域は、1 ストリームにつき、約 26Mbps で FEC も付加している。詳細は、2004 年度セミナー <http://www.supercsi.net/seminar/> から閲覧できる。

JGN シンポジウム 2004 ハワイ・韓国 - 東京ハイビジョン伝送デモ 2004 年 1 月に、TFT ビル（東京都江東区）にて行われた、ギガビットネットワーク・シンポジウム 2004 内のデモンストレーションにて、会場と韓国および会場とハワイを結んだハイビジョン伝送のデモンストレーションを行った。ストリームは FEC 付き MPEG2-HD(26Mbps) を利用し、回線については、日本国内は JGN、ハワイおよび韓国との国外線は APII のネットワークを利用した。

広島大学・長崎大学付属中学校 遠隔講演 2004 年 10 月に、広島大学と長崎大学付属中学との間で 2 週にわたり、広島大学から自己探求に関する講演を行った。ネットワークは、JGNv6 を利用し、FEC 付き MPEG2-HD(26Mbps) による双方向通信を実施した。講義の内容は、長崎大学の Web ページ <http://tech.edu.nagasaki-u.ac.jp/study-rel/jikotankyu/> から閲覧できる。

秋田大学・秋田経済大学・秋田県立大学 3 地点遠隔講義システム 秋田大学・秋田経済大学・秋田県立大学では、3 地点で行う遠隔講義のシステム部分に Robst を利用している。ストリームは MPEG2-SD を利用し、マルチキャストを利用した通信を行っ

ている。回線には、FTTHを利用し、低コストな遠隔講義システムを構築、運用へ向けた実証が行われている。

2005 年度

札幌雪祭り 2005 広域配送実験 2005 年 2 月に札幌で開催された雪祭りの映像を JGNv6 および地域間相互接続実験プロジェクトのネットワークを利用して、広域配送した。これについては、5.3 節で述べているので、ここでは割愛する。

Live!Eclipse 2005 Hybrid 金環・皆既日食中継 2005 年 4 月にライブ!エクリプス実行委員会が開催するパナマおよび太平洋上で観測される金環・皆既日食を中継した。ストリームとしては、MPEG2-HD(26Mbps) と MPEG2-SD(4Mbps) の 2 ストリームを利用し、広域配送基盤を用いた配送を実現した。これについては、A.3 にて詳説する。なお、日食中継は 10 月 3 日にも行っている。この時は、マドリッド（スペイン）から MPEG2-HD(26Mbps) を情報通信研究機構（東京都小金井市）まで送り、その映像と編集映像の DV(30Mbps) の 2 ストリームを、地域間相互接続実験プロジェクトの各拠点に対して配送した。日直中継に関する情報は、ライブユニバース Web ページ <http://www.live-universe.org> から閲覧することができる。

IPv6 Summit in Hiroshima 中継 2005 年 5 月に広島市南区民文化センター（広島市南区）で開催された IPv6 Summit in Hiroshima を Robst およびアプリケーションゲートウェイを利用し、JGNv6 および地域間相互接続実験プロジェクトの各拠点に配信した。ストリームとしては、MPEG2-HD(26Mbps) を 2 ストリームを利用し、会場のゲートウェイでスイッチングすることで、アプリケーション層処理を加えた配送を実現した。これについては、A.4 にて詳説する。

中国 JGN2 シンポジウム 2005 中継 2005 年 6 月に広島市南区民文化センターで開催された中国 JGN2 シンポジウム 2005 を上記 IPv6 Summit の配信時と同様に、Robst およびアプリケーションゲートウェイを利用し、地域間相互接続実験プロジェクトの各拠点に配信した。加えて、FTTH が敷設された一般家庭と会場との間でも MPEG2-HD(26Mbps) を流すことで、一般家庭からの遠隔参加のデモンストレーションも行った。これについては、A.5 にて詳説する。なお、JGN2 シンポジウムに関する情報は <http://www.cic-infonet.jp/c-jgn2sinpo2005.htm> から閲覧できる。

この中から、いくつかの実証実験事例を紹介する。

A.2 Live! Eclipse 2001 アフリカ皆既日食中継

A.2.1 中継概要

本実証実験では、2001年6月21日にライブ!エクリプス実行委員会 [LE] が実施するアフリカからの皆既日食中継を、Robst を利用して MPEG2 over IP マルチキャストで日本国内の数拠点に配信したものである。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等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 (JGN) 上の9拠点を接続する IP マルチキャスト網を図 A.1 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、開発した高品位映像伝送システムを用いて全14拠点（視聴者800名以上）へ IPv4 マルチキャスト伝送した。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 4Mbps に設定、システムは図 3.4 に示すプロトタイプを使用し、IP/UDP/RTP ヘッダおよび FEC のオーバーヘッドを含め約 5Mbps に設定した。各拠点での受信統計を取得することにより、エンドホスト間で適用する FEC の有効性について検証した。

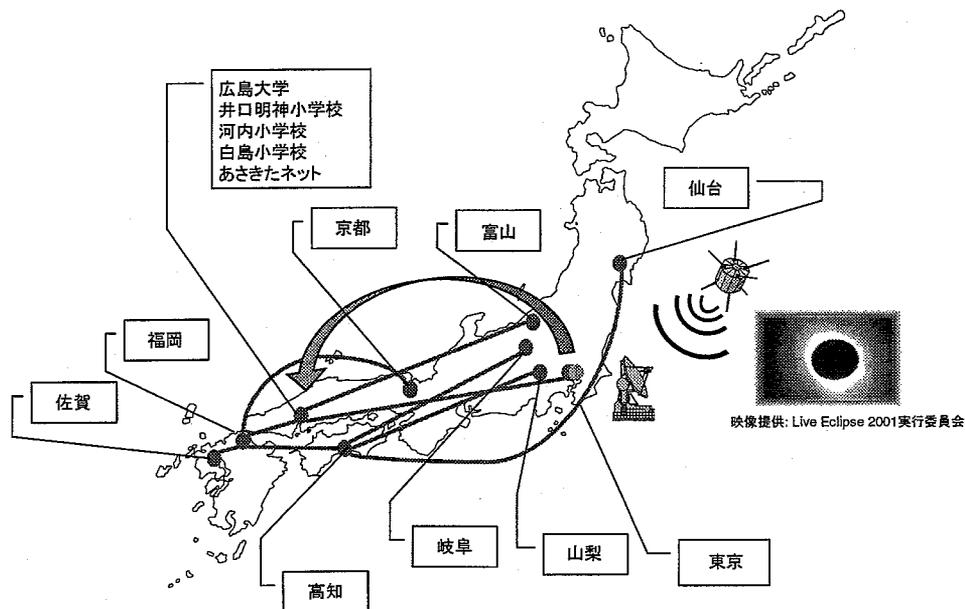


図 A.1: マルチキャスト配信の実証実験の接続図

A.2.2 中継結果

各拠点における FEC 復元前後のパケット損失率測定結果を表 A.1 に示す。表には、実測値と共に FEC 復元前の測定値を基に式 (3.3) 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 秒毎に表示される FEC 復元前後の損失率から算出している。FEC 復元前の損失率は冗長パケットも含めた値、復元後はデータパ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パケット損失率約 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 復元前後のパケット損失率の変動を 1 秒毎にプロットしたものを図 A.4, 図 A.5 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パ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分かる。これは、他の拠点においても同じ傾向であった。図 A.4 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%を越えた時もあり、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 A.4 に示すようにほぼ毎秒観測されていたパケット損失が図 A.5 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。

受信拠点のうち、井口明神小学校の様子と白島小学校の様子を図 A.2, 図 A.3 に示す。



図 A.2: 井口明神小学校の受信の様子



図 A.3: 白島小学校の受信の様子

表 A.1: 各受信拠点の packets 損失率

受信拠点	パケット損失率 [%]		
	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

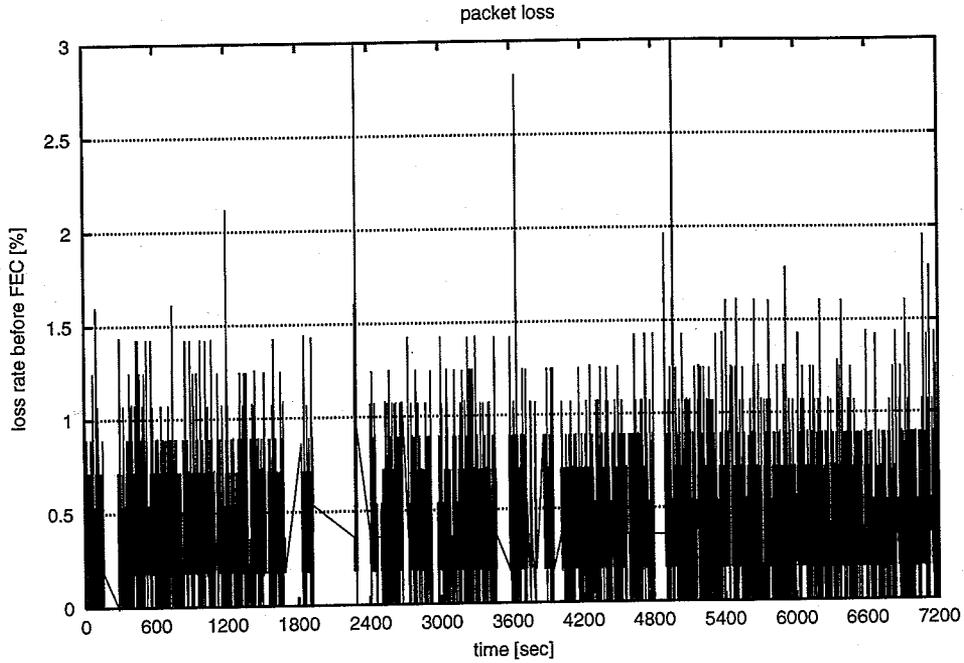


図 A.4: 京都におけるパケット損失率の変動 (FEC 復元前)

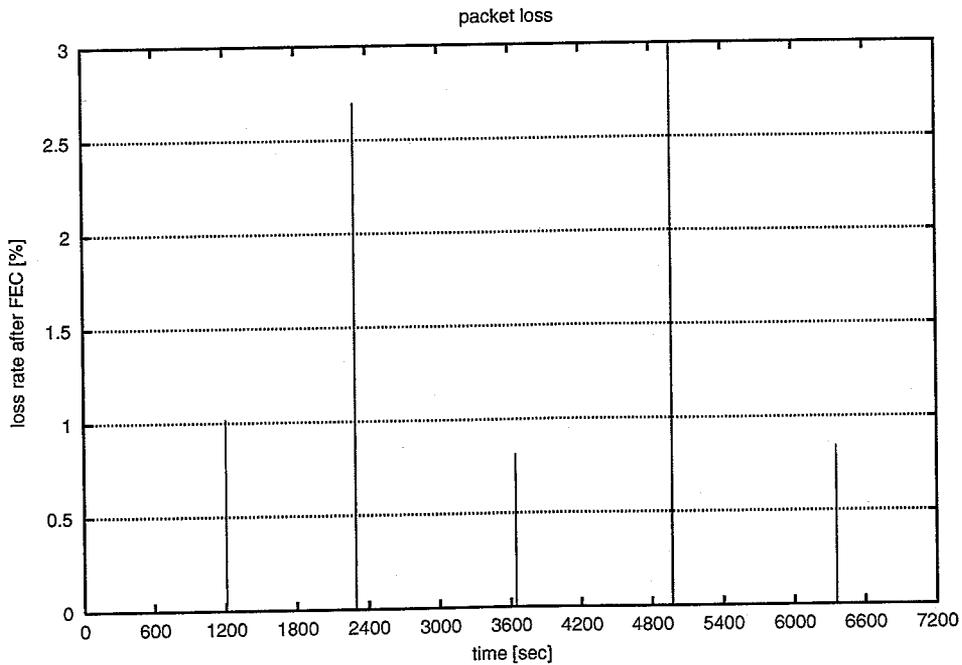


図 A.5: 京都におけるパケット損失率の変動 (FEC 復元後)

A.3 Live! Eclipse 2005 Hybrid 金環・皆既日食中継

A.3.1 実験概要

本実証実験は、2005年4月9日にライブ!エクリプス実行委員会が実施するパナマおよび太平洋上で観測される金環・皆既日食を、アプリケーションゲートウェイを用い地域間相互接続実験プロジェクトに接続される拠点に広域配送したものである。

実験構成図を図 A.6, 配送木を図 A.7 に示す。太平洋上から Inmarsat 経由で送られている静止画および動画を東京の小金井で編集しを MPEG2-SD (MPEX MPEG2 Encoder: 帯域 4Mbps) にエンコードした映像と、実行委員会が作業を行うオペレーションセンターの様子を MPEG2-HD (Sony HDR-FX1: 帯域 25.5Mbps) にエンコードした映像の2種類の映像ソースを用意し、これらをアプリケーションゲートウェイで構築した配送ネットワークに同時配送した。複数ストリームを同時配信することによる帯域のボトルネック回避を目的とし、同一の IP 基盤上に各々異なる配送木を静的に設定した。ゲートウェイ間の配送には IPv4 ユニキャストを利用、ゲートウェイではローカルセグメントへ IPv4 マルチキャストに変換して配信することで、透過的なマルチキャストネットワークを構築している。実験では、ハイビジョンストリームを含めた複数ストリームに対するアプリケーション層配送ネットワークの有効性について検証した。

A.3.2 実験結果と考察

受信拠点のうち、送信元的小金井および受信先の中で広島・秋田・高知のトラフィックの推移を図 A.8 から図 A.11 に示す。実際に日食の様子が放送されていたのは、午前3時から9時の間(図における右端)である。中継では、各拠点ともに両ストリームが受信できていることが確認できた。本実験で静的な配送木設計に基づくアプリケーション層配送ネットワークを構築した。各拠点の帯域上限が 100Mbps という制約条件下で、異なる配送木を考えることで、帯域増加に考慮した配送を行うことが可能となる。本実験では、アプリケーション層で展開するストリーム配送が効果的に機能することを示した。

併せて、小金井の送信の様子を図 A.12, 広島大学での受信の様子を図 A.13 に示す。

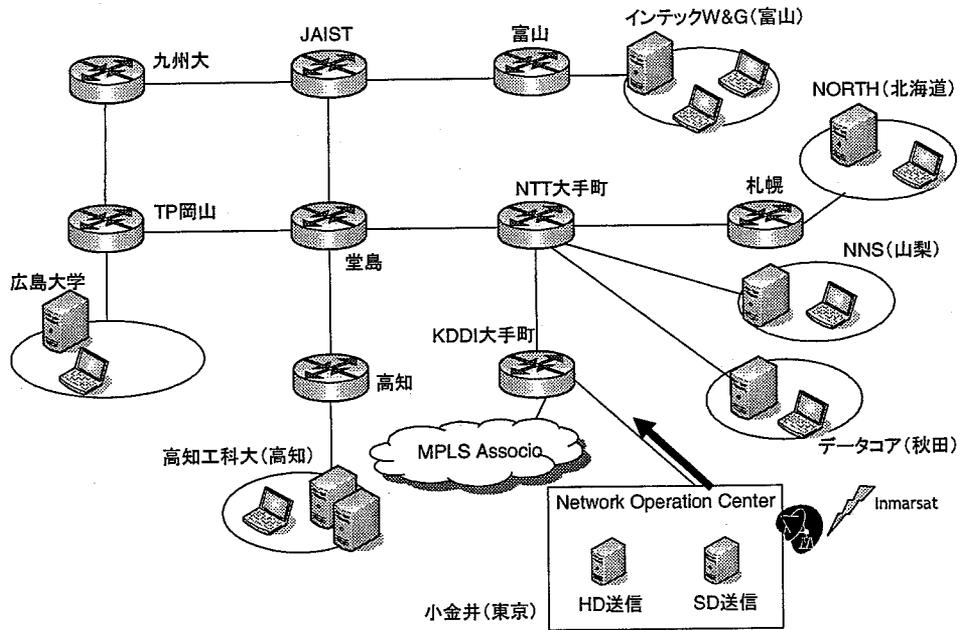


図 A.6: Live Eclipse2005 実験構成図

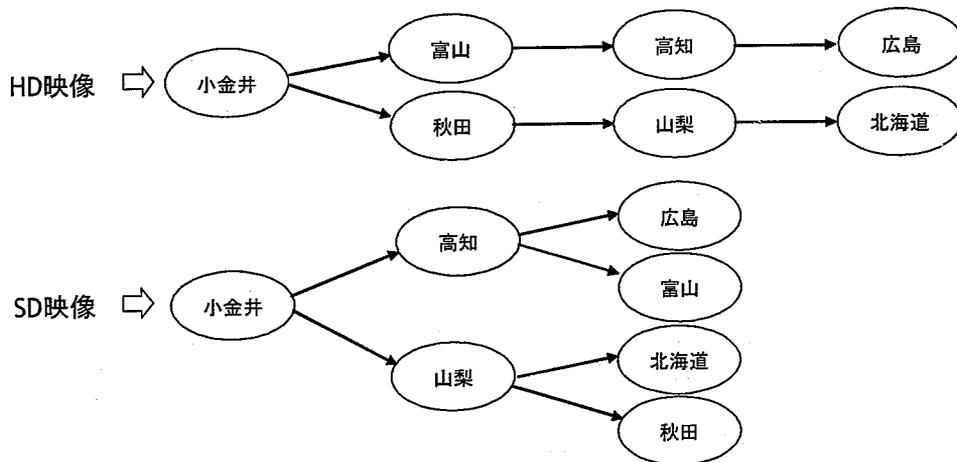


図 A.7: Live Eclipse2005 配送木

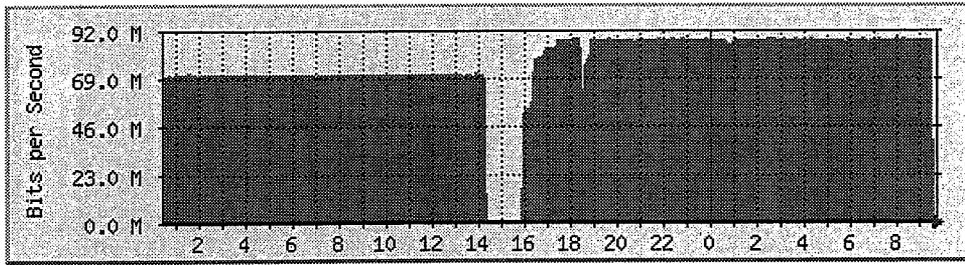


図 A.8: 小金井における送信トラフィックの推移

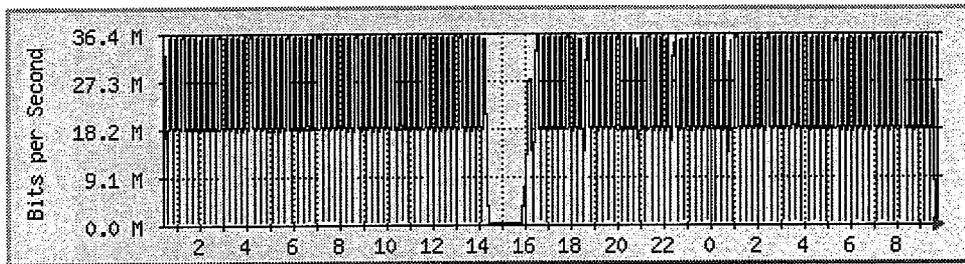


図 A.9: 広島における受信トラフィックの推移

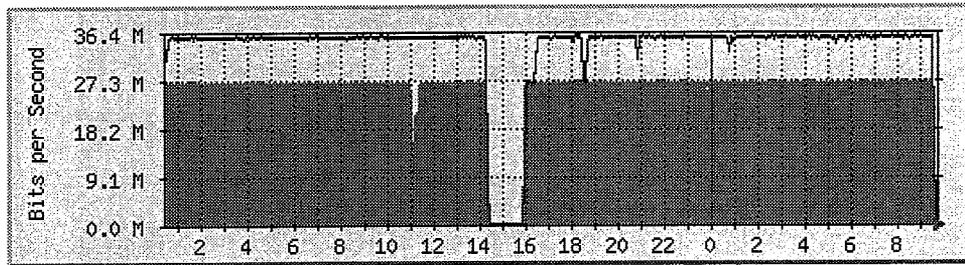


図 A.10: 秋田における受信トラフィックの推移

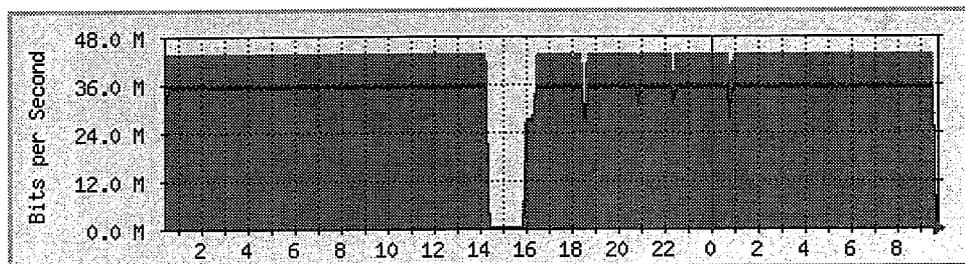


図 A.11: 高知における受信トラフィックの推移

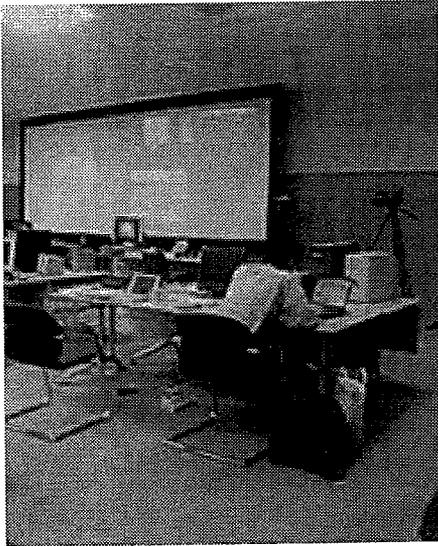


図 A.12: 小金井(東京)での様子

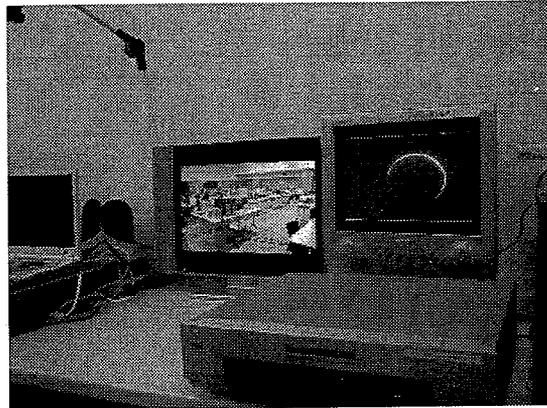


図 A.13: 広島大学の受信の様子

A.4 IPv6 Summit in Hiroshima 中継実験

A.4.1 実験概要

本実証実験は、2005年5月19日に広島市南区で開催された”IPv6 Summit in Hiroshima”の様態をハイビジョンにて全国中継したものである。構成図を図 A.14 に示す。中継ではアプリケーションゲートウェイを用いることで、2つの異なるネットワークに対して配送した。ひとつはIPv6 マルチキャストによってJGNv6 に接続された受信ノード群、もうひとつはIPv6 ユニキャストで構成された地域間相互接続実験プロジェクト2 (RIBB2) ネットワークに接続されたノード群である。JGNv6 に接続されたノードは直にIPv6 マルチキャストアドレスに参加することで受信することができる。一方、RIBB2 のネットワークへは、広島大学に設置したゲートウェイでIPv6 マルチキャストからIPv6 ユニキャストに変換し各拠点のゲートウェイに対してユニキャストリレー配送した後、各拠点ではそれをIPv6 ユニキャストに再変換して下流に配送することにより、透過的なマルチキャスト配送を実現している。なお、本実験ではFECは使用しなかった。

本中継のもうひとつのポイントは、複数ストリームのスイッチング機能を追加させたアプリケーション層で処理するゲートウェイを会場内に設置している点にある。複数ストリームの音と映像を分離・多重化する処理をゲートウェイに組み込むことで、安価にハイビジョンストリームのスイッチングを可能とすることができる。

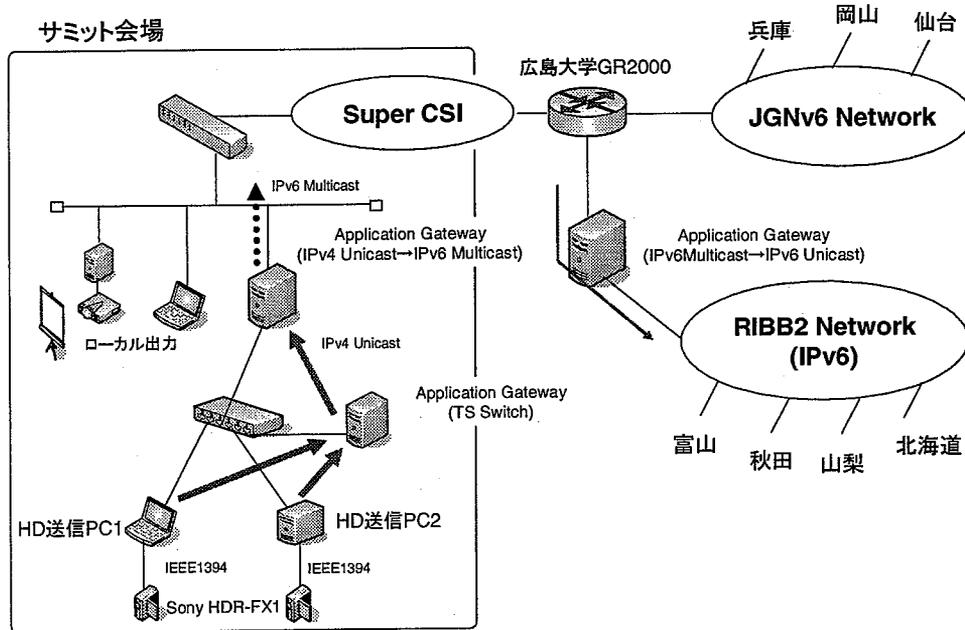


図 A.14: IPv6 Summit in Hiroshima 中継構成図

A.4.2 MPEG2-TS スイッチャのプロトタイプ実装

本研究では、アプリケーション層で実現する機能のひとつとして、帯域圧縮率の大きなMPEG2を利用した複数MPEG2-TS (Transport Stream) の動的な分離/多重化による簡易ストリーム選択機能とフレーム間引きによるレート制御機構を実装した。

本ゲートウェイ機能が有効的に機能する場面について考える。例えば、複数ソースを利用した遠隔講演やスポーツ中継などのライブ配信を考えた時、受信ユーザの好みやその地域特性によって、音声ストリームは固定で受信映像のみを切替えたいという要求がでてくる。従来では、MPEG2-TS ストリームを映像・音声までデコードした後に、アナログレベルでスイッチングを行い再エンコードする手法が取られてきたが、この場合、圧縮処理による遅延を伴ったり、ネットワークをまたいだ選択ができないなどの問題があった。また、高精細画像の特性を活かし、講演者の資料やホワイトボードなどの映像を遠隔地に伝送する場合を考えたとき、動きの少ないメディアに対して必要に応じた帯域調整を行い、伝送帯域の最適化を行いたいという要求が生じる。このような要求に対して、ゲートウェイ上でストリームレベルでの分離/多重化、フレーム間引きが解決策として有効になる。

このMPEG2-TS スイッチゲートウェイの構成を図A.15に示す。図からも分かるよう

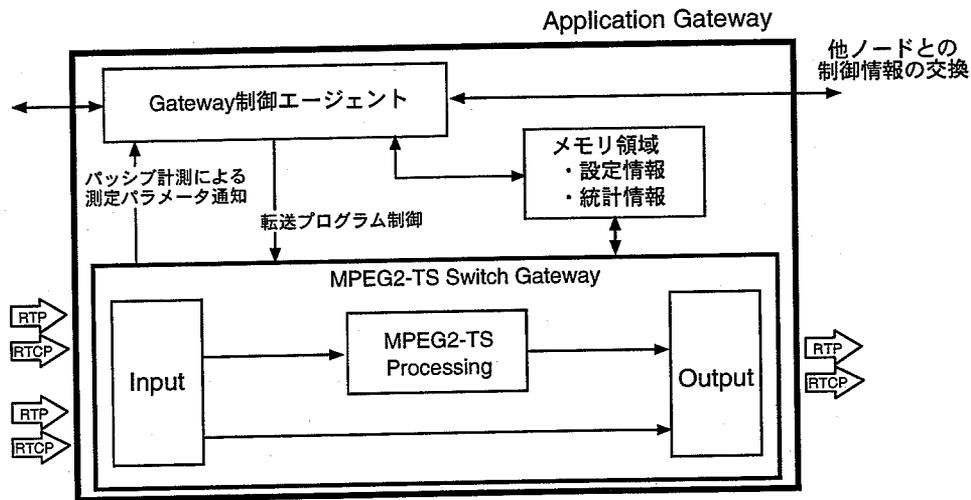


図 A.15: MPEG2-TS スイッチゲートウェイの構成

に、転送処理の基本動作は FEC ゲートウェイを同様で、アプリケーション層処理の内容だけが異なっている。

これらの機能を実現するためには、MPEG2 ストリームの特性を考慮する必要がある。ストリームの伝送には MPEG2-TS (Transport Stream) を利用する。MPEG2-TS は図 A.16 に示すように、映像・音声の個別ストリームを各ピクチャやオーディオユニット毎に分割されパケット化されたもの (PES: Packetized Elementary Stream) と同期再生のための参照時刻情報 (PCR: Program Clock Reference) が付与されたパケットが 188 バイト固定長のパケットに分割され (Partial TS)、この他に TS パケットの識別子情報を持つ制御用の TS パケットなどが加わり、多重化されたものとなる。各々の音声・映像 TS パケットには PCR に準じた再生時刻やフレーム開始コード、ストリームの識別子などがヘッダ内に格納されており、PCR に合わせて自走する時刻情報と一致したときに、受信側のデコーダによりデコード/再生される。

MPEG2 ストリームのフレーム構造を図 A.17 のようになっており、I ピクチャ、P ピクチャ、B ピクチャに分類される。I ピクチャは 1 フレーム全体を圧縮・符号化したものである。P ピクチャは前画面 (I または P ピクチャ) からの差分情報をもとに圧縮・符号化したものであり、B ピクチャは前後の画面からの差分情報をもとに圧縮・符号化したものである。これらを図に示すような順序で出現させ GOP (Group of Picture) を形成し、それを連続させることで映像ストリームとなる。GOP の先頭は I フレームから始まり、PES パケットのヘッダをチェックすることでこれを識別できる。

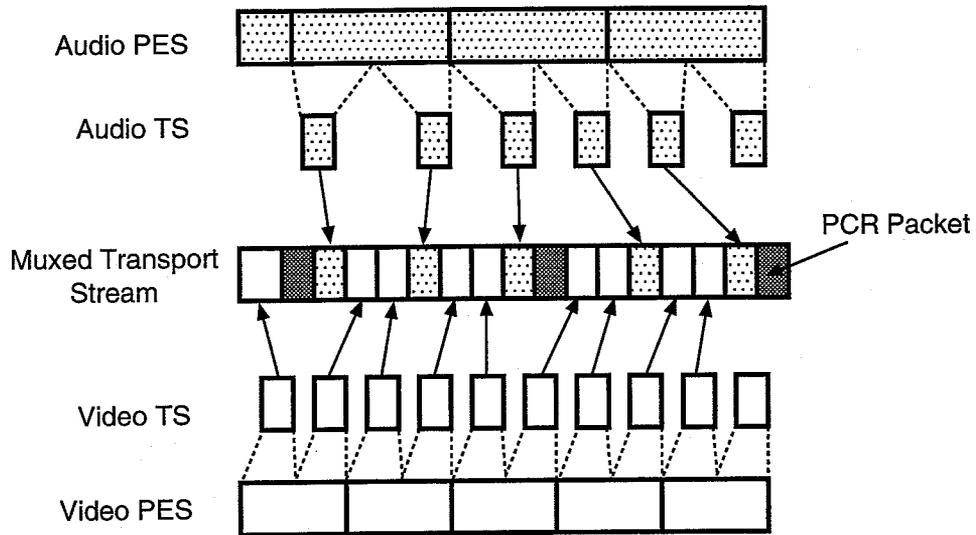


図 A.16: MPEG2 ストリームのパケット化

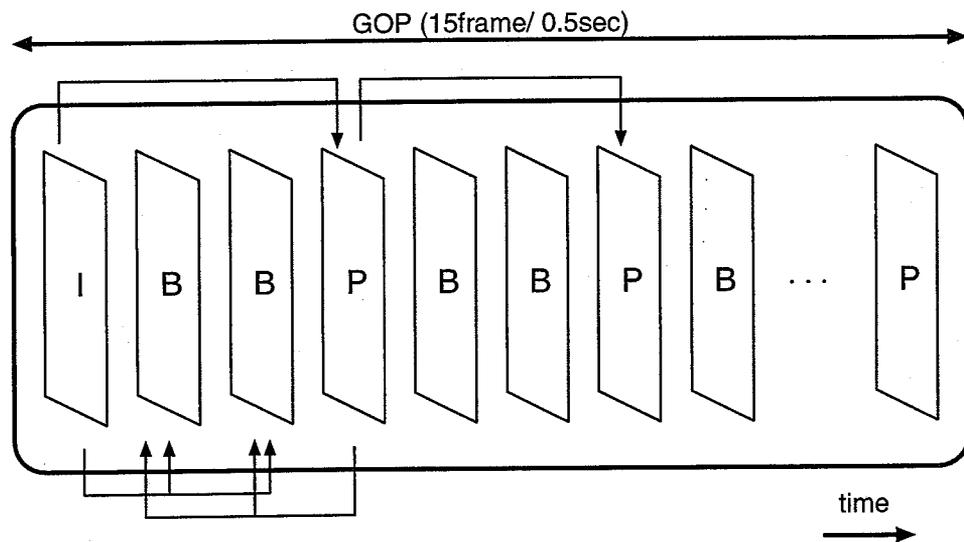


図 A.17: MPEG2 ストリームのフレーム構造

以上の特性を考慮し、ゲートウェイでの分離多重処理は図 A.18 の構成で行う。異なる送信元（エンコーダ）から生成されたストリームはそれぞれ時刻情報も異っているため、単純に分離多重化するだけでは受信側で同期再生することができない。そのため、どちらかのストリームを基準ストリームとして、そのクロックと同期するように切替え対象のストリームの時刻情報を付け変える必要がある。さらに、MPEG2 の場合はフレーム間圧縮を行っているため、切替後のストリームが I フレームから始まらなければ映像に乱れが生じることとなる。本研究では、PCR パケットとオーディオパケットを1つのスト

リームと見なし、1音声ストリームを基準として複数の映像ストリームを切替える場面を想定し、以下のような処理手順としている（図 A.19）。

1. それぞれ独立した複数 MPEG2-TS を入力とし、各ストリーム毎に、オーディオと PCR パケットのグループ（オーディオグループ）とビデオパケットのグループ（ビデオグループ）の 2 種類に分別し、各々キューに格納する。
2. ビデオグループのキューには GOP の先頭の I フレームが常に先頭になるように、バッファリングを行う。
3. 基準とするオーディオグループと切替え対象のビデオグループを選択し、各々のキューから取り出していく。対象のビデオグループがオーディオグループと同一ストリームである場合には、そのまま再構成を行う。異なる場合には、その基準ストリームのビデオグループの時刻情報に準じて対象ストリームのビデオグループの時刻情報を書き換える。
4. 2つのストリームを多重化し MPEG2-TS を再構成する。

なお、この処理ではビデオパケットの時刻情報のみを書き換えることで簡易スイッチ機能を実現しており、現時点ではいくつかの制約条件が存在している。各映像・音声ストリームの識別子は同じ PID が付いていることを前提とし、切替え対象とする各ストリームは同一レートであることを想定している。

またフレームレート制御は、多重化する際に各 MPEG2-TS パケットのヘッダをチェックすることで、I/P/B フレームのパケットを識別し、そのデータパケットを破棄することで制御が可能になる。

A.4.3 中継結果と考察

受信拠点のうち、送信元の広島とゲートウェイを用いた山梨・富山のトラフィックの推移を図 A.20 から図 A.22 示す。この結果から、ゲートウェイにより透過的なマルチキャスト環境が構築できていることが分かる。中継では各拠点ともにクリアなハイビジョン映像が配送できていたことが確認できた。スイッチング機能についても 2 ストリームの場合の動作確認はできたが、より安定性を重視した運用に向けて、切替時のストリーム前後のフレーム処理の改良などが必要である。

また、会場の様子を図 A.23（画像左側の映像が会場から配信している映像を出力されているものである）、広島市立大学での受信の様子を図 A.24 に示す。

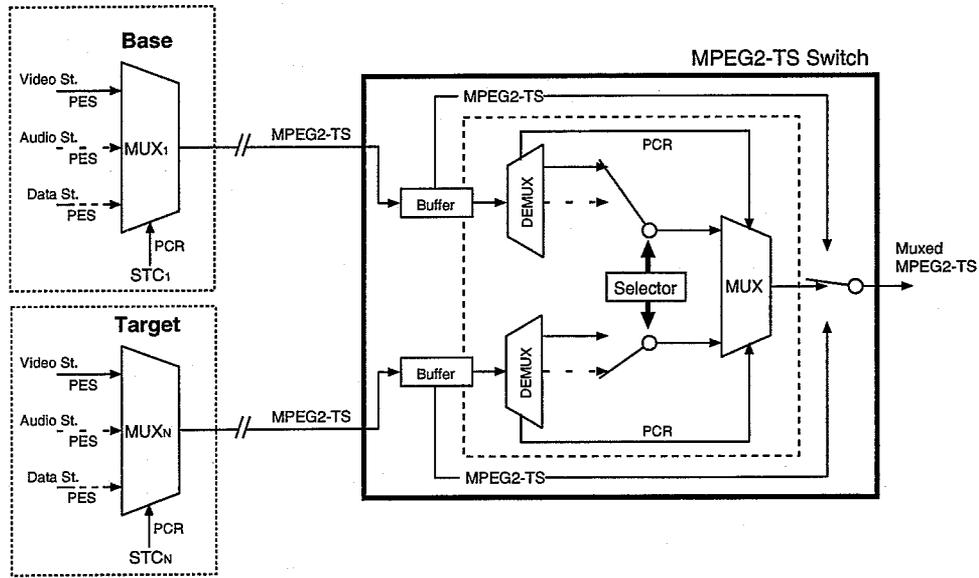


図 A.18: MPEG2-TS の分離/多重化処理

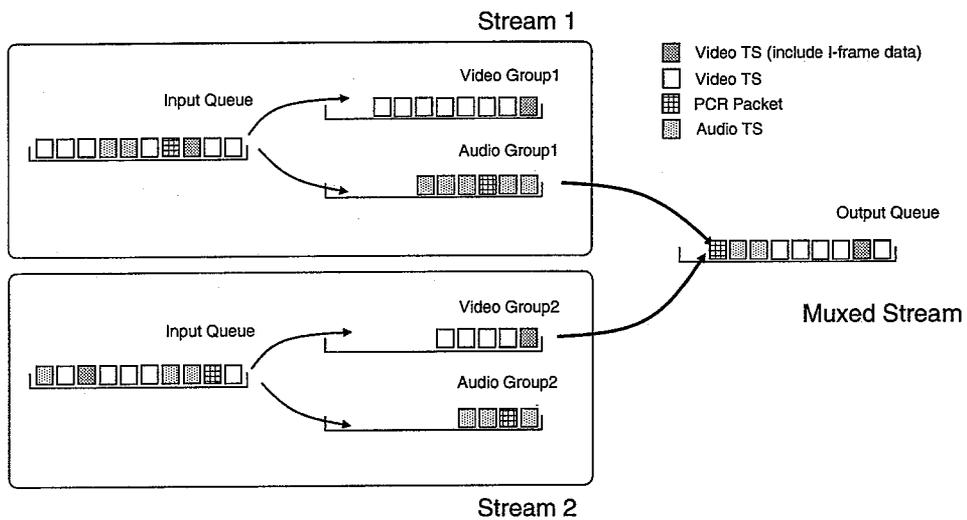


図 A.19: MPEG2-TS の処理構成

A.5 中国 JGN2 シンポジウム 2005 中継

A.5.1 実験概要

本実証実験は、2005年7月14日に広島市南区で開催された”中国 JGN2 シンポジウム 2005”の様子をハイビジョンにて全国中継したものである。構成図を図 A.25 に示す。受信拠点は、秋田・仙台・岐阜・兵庫・鳥取・島根の各拠点である。中継では、ゲートウェ

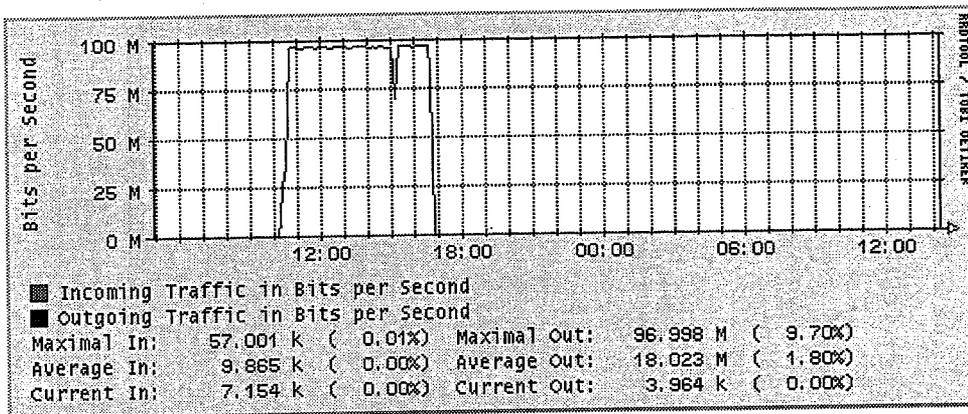


図 A.20: 広島における送信トラフィックの推移

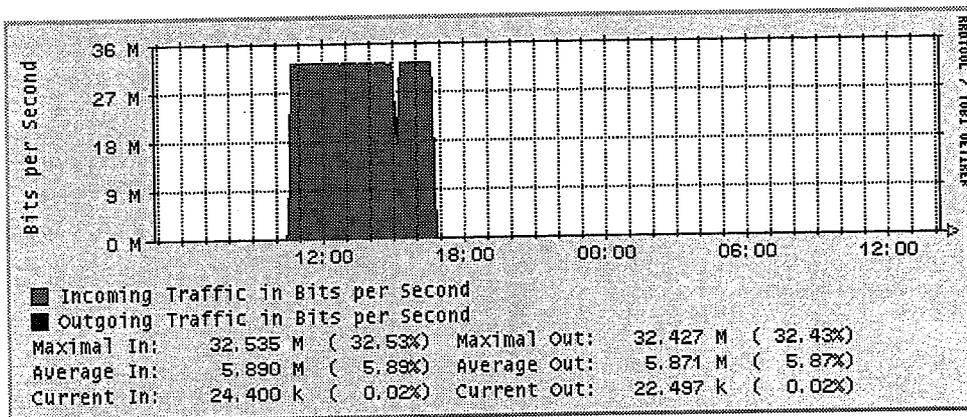


図 A.21: 富山における受信トラフィックの推移

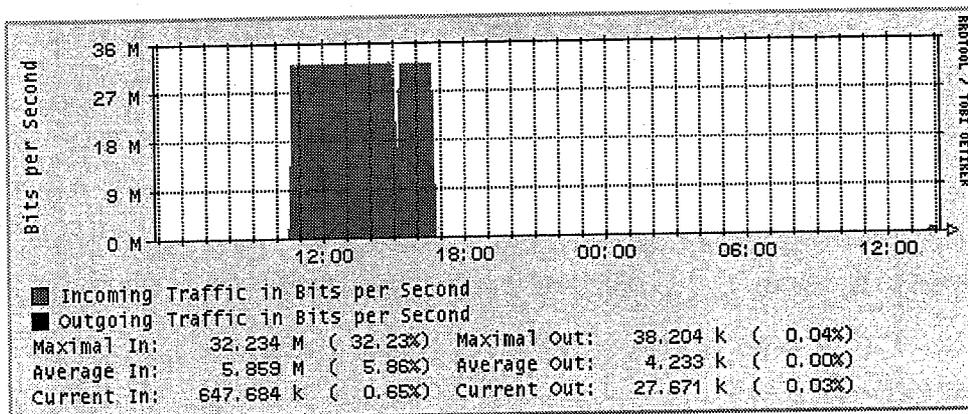


図 A.22: 山梨における受信トラフィックの推移

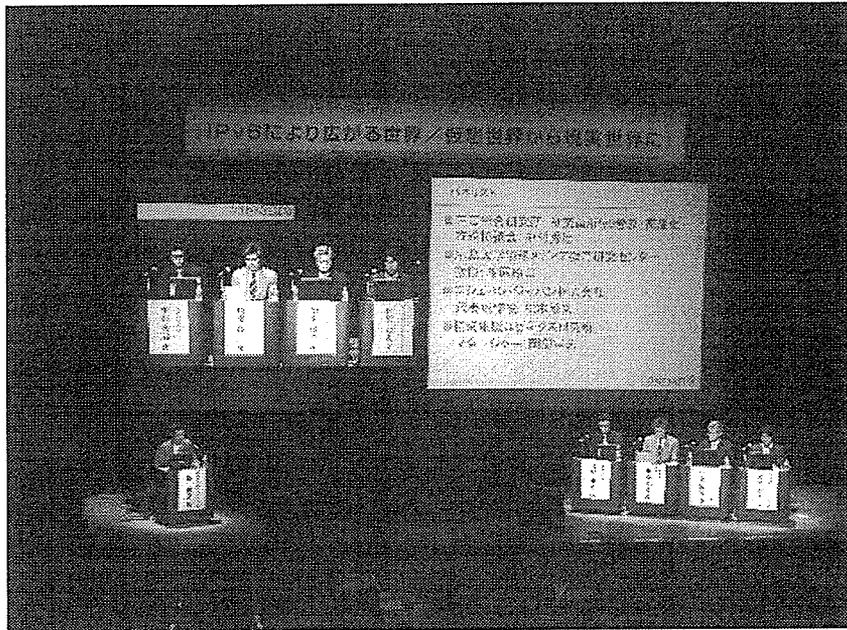


図 A.23: 会場の様子

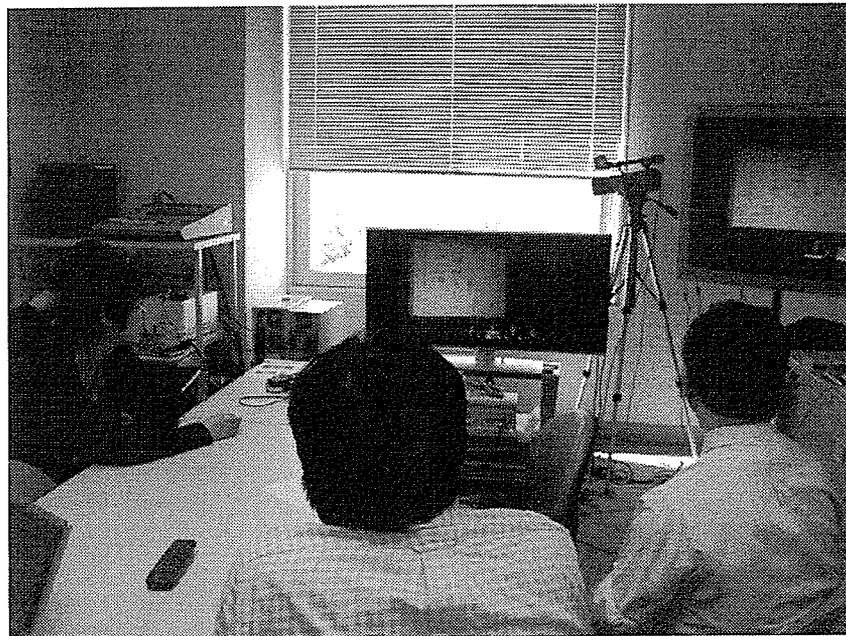


図 A.24: 広島市立大学での受信の様子

イを用いることで2つの異なるネットワークに対して配送するとともに、ゲートウェイにてフレームレートを調整（30fpsから15fpsに間引き）したものを別ストリームとして送信した。さらに、FTTHで接続された一般家庭（広島市内）をサテライト会場としてハイビジョンによる双方向通信で結び、遠隔からの参加のデモンストレーションを行った。

会場の様子を図 A.26（画面スクリーンがサテライト会場のハイビジョン映像）、兵庫での受信の様子を図 A.27 に示す。

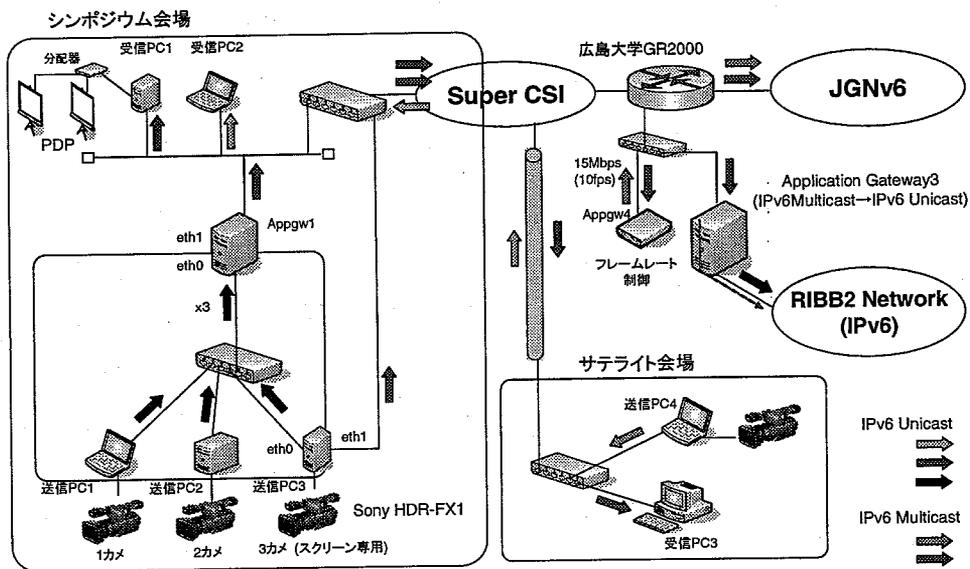


図 A.25: 中国 JGN2 シンポジウム 2005 中継構成図

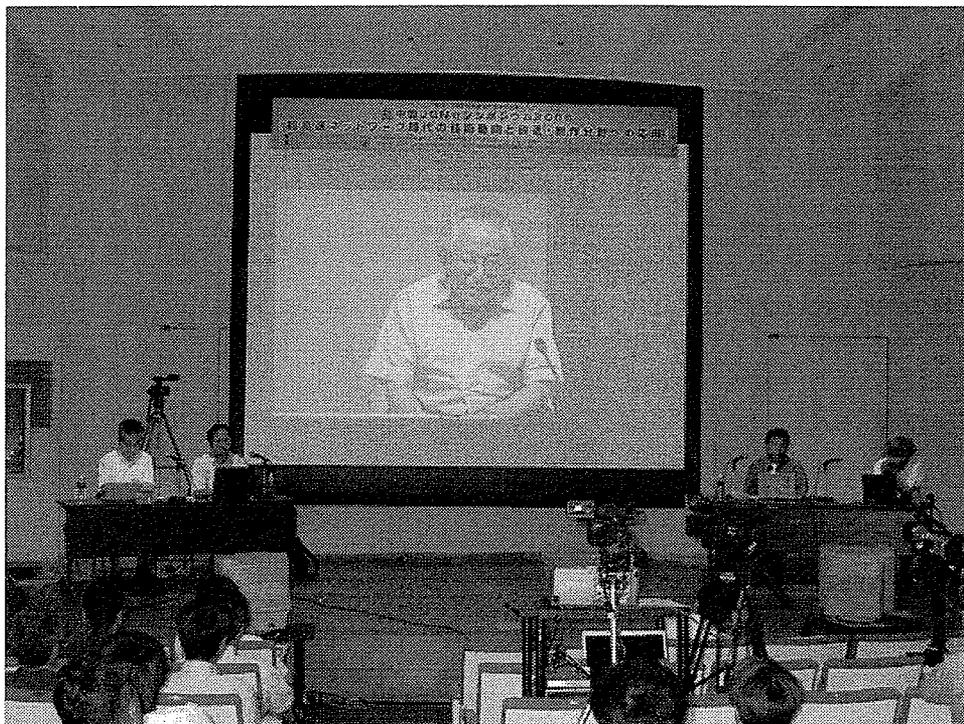


図 A.26: 会場の様子

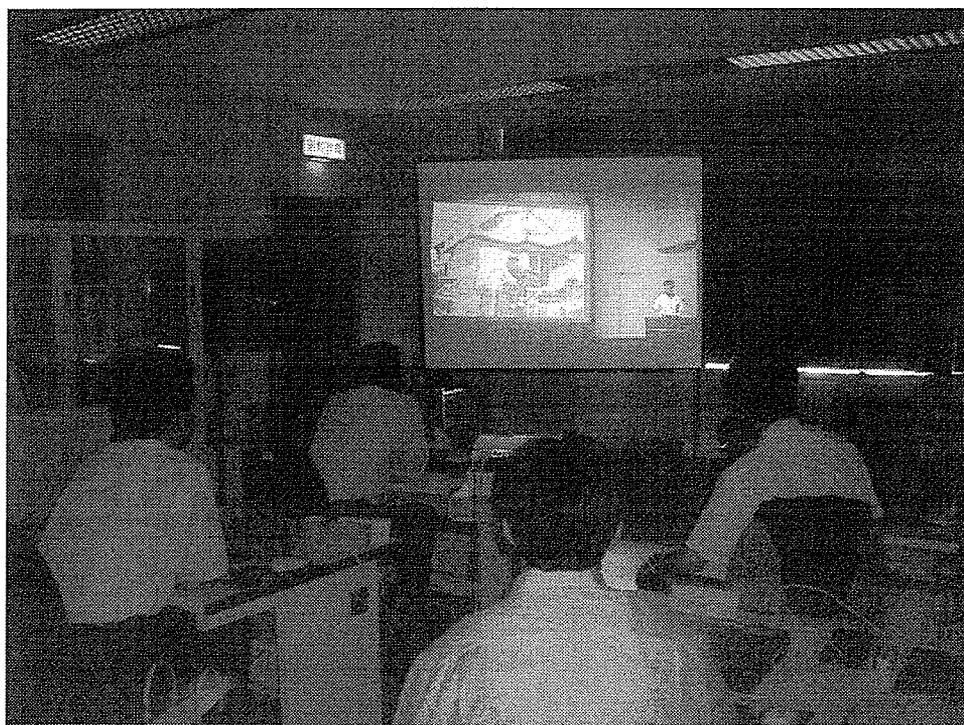


図 A.27: 兵庫での受信の様子

研究業績一覧

論文誌

- [1] 近堂 徹, 西村 浩二, 相原 玲二, 前田 香織, 大塚 玉記. 高品質動画像伝送における FEC の性能評価 情報処理学会論文誌, Vol.45 No.1, pp.84–92, 2004
- [2] Tohru Kondo, Kouji Nishimura, Reiji Aibara. An Efficient FEC Method for High-Quality Video Transmission on the Broadband Internet *IEICE Transactions*, Vol.E87-B No.3, pp.643–650, 2004
- [3] 岸田 崇志, 前田 香織, 河野 英太郎, 近堂 徹, 相原 玲二. 多様な遠隔コラボレーションを実現する音声伝送システム 情報処理学会論文誌, Vol.45 No.3, pp.517–525, 2004
- [4] 近堂 徹, 西村 浩二, 相原 玲二. 広帯域ストリーム伝送におけるソフトウェア損失回復制御の評価 情報処理学会論文誌 Vol.46 No.10, pp.2523–2532, 2005

査読付き論文

- [5] 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. 情報処理学会 分散システム/インターネット運用技術 シンポジウム 論文集, pp.69–74, 2001.
- [6] 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.
- [7] 近堂 徹, 大塚 玉記, 西村 浩二, 相原 玲二. MPEG2 over IP 伝送システム mpeg2ts の開発と性能評価. 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2002 論文集, pp.157–160, 2002.

- [8] Kouji Nishimura, Tohru Kondo, Reiji Aibara. An MPEG2 over IP Transfer System integrating Live Distance Lecture and On-Demand Distance Learning. *Proceedings of International Conference on Computers in Education(ICCE2002)*, pp.797-798, 2002.
- [9] 相原 玲二, 西村 浩二, 近堂 徹, 前田 香織, 渡辺 健次. HDTV MPEG2 over IPv6 伝送システムの開発. *ギガビットネットワークシンポジウム 2002 論文集*, pp.67-72, 2002.
- [10] 近堂 徹, 西村 浩二, 相原 玲二. FEC の冗長度動的変更による動画像伝送の損失率制御. *情報処理学会 分散システム/インターネット運用技術 シンポジウム 2003 論文集*, pp.105-110, 2003.
- [11] 近堂 徹, 西村 浩二, 相原 玲二. ブロードバンドインターネットで利用可能な高品質動画像伝送システム *情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2003 論文集*, pp.509-512, 2003.
- [12] Takashi Kishida, Kaori Maeda, Eitaro Kohno, Tohru Kondo, Kouji Nishimura, Reiji Aibara. Development of a Multipurpose Audio Transmission System on the Internet. *Proceedings of Web and Communication Technologies and Internet-Related Social Issues - HSI2003, Second International Conference on Human.Society@Internet*, pp.372-382, 2003.
- [13] Kouji Nishimura, Tohru Kondo, Reiji Aibara. High quality video transfer system with dynamic redundancy of FEC over broadband network. *Proceedings of 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM '03)*, pp.903-906, 2003.
- [14] Tohru Kondo, Kouji Nishimura, Reiji Aibara. Implementation and Evaluation of the Robust High-Quality Video Transfer System on the Broadband Internet *Proceedings of the 2004 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT)*, pp.135-144, 2004
- [15] 近堂 徹, 岸田 崇志, 西村 浩二, 前田 香織, 相原 玲二. アプリケーションゲートウェイを利用したハイビジョン映像広域伝送実験 *情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2005 論文集*, pp.521-524, 2005

その他の論文

- [16] 相原 玲二, 大塚 玉記, 近堂 徹, 西村 浩二, 前田 香織. MPEG2 over IPv6 システムの開発と皆既日食中継実験. 情報処理学会研究報告 2001-QAI-1, pp.159-166, 2001.
- [17] 相原 玲二, 西村 浩二, 近堂 徹. ライブ遠隔講義とオンデマンド遠隔教育を統合する MPEG2 伝送システム. 情報処理学会研究報告 2002-DSM-26, pp.7-12, 2002.
- [18] 前田 香織, 相原 玲二, 西村 浩二, 近堂 徹, 岸田 崇志, 上浦 大智, 谷口 和久, 平賀 博之. 監視・制御のためのデバイスネットワークの学校教育への応用. 電子情報通信学会 信学技報 2005-05-IA, pp.25-30, 2005.
- [19] 近堂 徹, 日高 良太, 岸田 崇志, 上浦 大智, 前田 香織, 相原 玲二. アジア太平洋地域における Next Generation 活動とその社会的役割について. IEEE 広島学生シンポジウム 2005 論文集, pp.257-258, 2005.

受賞

- [20] 近堂 徹, 大塚 玉記, 西村 浩二, 相原 玲二. MPEG2 over IP 伝送システム mpeg2ts の開発と性能評価. 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2002 優秀論文賞.
- [21] 近堂 徹, 西村 浩二, 相原 玲二. ブロードバンドインターネットで利用可能な高品質動画伝送システム. 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO) シンポジウム 2003, 優秀論文賞, ヤングリサーチ賞.