

QoS 及び QoE を考慮したマルチメディア
IP ネットワークの設計・運用に関する研究

2009年9月

竹 尾 淳

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	IP ネットワーク	2
1.2	マルチメディア通信	3
1.2.1	圧縮符号化方式	3
1.2.2	メディア同期	8
1.3	QoS	9
1.3.1	定義	9
1.3.2	QoS パラメータ	10
1.4	QoE	11
1.4.1	系列カテゴリー法	12
1.4.2	QoS マッピング	14
1.5	アプリケーションレベル QoS 制御技術	14
1.6	ネットワークレベル QoS 制御	15
1.6.1	IntServ	15
1.6.2	DiffServ	16
1.7	ノード（リンク）レベル QoS 制御	19
1.7.1	WFQ	19
1.7.2	CBWFQ	20
1.7.3	WRED	20
1.7.4	PQ	20
1.8	日本における NGN	21
1.8.1	ショールーム	21
1.8.2	IPTV サービス	22
1.9	本論文の目的と構成	22
第 2 章	DiffServ AF サービスにおける音声・ビデオストリーミング伝送と Web アクセスに適した AFCP	25
2.1	まえがき	25
2.2	評価実験	26
2.2.1	システム構成	26
2.2.2	実験方法	29
2.3	実験結果と考察	31
2.3.1	UDP 付加データの影響	31
2.3.2	付加遅延の影響	37

2.4	むすび	42
第3章	音声・ビデオストリーミングIP 伝送のアプリケーションレベル QoS を向上させる WFQ スケジューラの配置	43
3.1	まえがき	43
3.2	アプリケーションレベル QoS 測定	45
3.2.1	実験環境	45
3.2.2	測定内容	47
3.3	測定結果と考察	48
3.3.1	単一ルータに WFQ を適用する場合	48
3.3.2	メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合	54
3.3.3	その他の場合	55
3.4	QoE 測定実験	57
3.4.1	シミュレーション環境	57
3.4.2	測定内容	57
3.4.3	QoE パラメータ測定方法	58
3.4.4	測定結果	59
3.5	むすび	60
第4章	音声・ビデオ帯域保証 IP 伝送におけるコンテンツタイプに基づいた QoE 推定代表回帰式の精度	63
4.1	まえがき	63
4.2	提案方法	64
4.3	実験環境	65
4.3.1	コンテンツタイプ	65
4.3.2	アプリケーションレベル QoS 測定方法	67
4.3.3	QoE 測定方法	68
4.4	測定結果と考察	70
4.4.1	アプリケーションレベル QoS 測定結果	70
4.4.2	QoS マッピング結果	71
4.4.3	QoE パラメータ推定精度比較	73
4.5	むすび	83
第5章	結論	85
	謝辞	87
	参考文献	89
	発表論文一覧	95

第1章 序論

インターネットは WWW (World Wide Web) や電子メールの登場によって爆発的に普及した。さらに、インターネットは汎用性の高い IP (Internet Protocol) [1] を基本とするネットワークであるため、マルチメディアを一元的に扱うことが容易で、現在ではインフラストラクチャーの一つとなっている。

ユーザが利用する端末として代表的なものに、テレビ、携帯電話、PC がある。従来、これらは独自のネットワークを持ち、サービスを展開してきた。しかし、最近では IP ネットワークを補助的に使い、情報や利便性を補完している。そのため、ユーザは背後に接続されるネットワークを意識せずにサービスを利用できるようになりつつある。

一般家庭においては、これまで、家庭内 LAN (Local Area Network) を構築するのは、一部のヘビーユーザのみであった。しかし、近年、手軽にネットワークを構築できる製品が数多く出回っているため、初心者にも広まった。また、無線 LAN も普及し、今や、意識をせずに無線 LAN を使っているユーザもいる。PC のみならず、テレビを含む AV 機器や携帯電話、ゲーム機、電子楽器など、家庭内 LAN に接続されるデバイスは多種多様である。

操作面に関しても、AV 機器や PC 及びモバイル端末は、従来、機器ごとにプロトコルが異なっていたため、同じネットワークに接続されていても相互に操作やデータのやり取りをすることができなかった。しかし、最近では、DLNA (Digital Living Network Alliance) [2] の登場により、これらの端末が相互に接続され、端末が何であることを意識をせずに操作やコンテンツの視聴が可能となりつつある。

一方、インターネットプロバイダと家庭を結ぶアクセス回線は、光回線の普及で大幅に高速化した。もはや、家庭とプロバイダ間の通信は、理論的には家庭内ネットワークと同等の速度が実現可能である。そのため、ストリーミングによって高画質な映画を視聴したり、双方向のビデオチャットを行うことが可能となった。

また、インターネットにおいても、接続機器の高機能化や低廉化にともない、帯域制御や優先制御などの QoS (サービス品質, Quality of Service) [3] 制御を行うことが可能となりつつある。現に、NGN (Next Generation Network) [4] の登場により、インターネットの一部は QoS を保証するようになった。

ここで注意すべきは、現在のインターネットに代表される IP ネットワークの大部分はベストエフォート型であり、基本的に QoS を保証しない。そのため、パケット化された情報は欠落が生じたり、遅延揺らぎが生じる。これは、QoE (ユーザ体感品質, Quality of Experience) [5] の劣化を引き起こす。

QoE の劣化を抑えるため、ネットワーク転送機能階層における複数の階層で QoS を制御する必要がある [6]。例えば、音声・ビデオ伝送サービスでは、アプリケーション

レベル QoS 制御である連続メディア同期制御 [7] が有効である．また，Web アクセスサービスではエンド・ツー・エンド（トランスポート）レベル QoS 制御である誤り制御などが有効である．

本論文では，種々の IP ネットワーク形態を想定し，実験とシミュレーションを用いて QoS の制御・測定，及び，QoE の測定を行う．そして，音声・ビデオストリーミング伝送，及び，Web アクセスに適した IP ネットワークの設計・運用指針を提案する．さらに，QoS から QoE を推定する手法を検討し，QoE 測定の負担を軽減させる手法を示す．

以下では，本論文における議論の前提となる要素技術を紹介する．1.1 節では，IP ネットワークに触れ，1.2 節において，メディアの圧縮符号化とメディア同期を説明する．1.3 節において，QoS の概要と評価尺度を述べる．そして，1.4 節で QoE を略説する．1.5～1.7 節では，それぞれ，エンド・ツー・エンドレベル，ネットワークレベル，ノード（リンク）レベルの QoS 制御技術を紹介する．1.8 節にて NGN のサービス例に触れる．最後に，1.9 節にて本論文の目的と構成を示す．

1.1 IP ネットワーク

IP ネットワークとは，ネットワーク層プロトコルとして IP を用いたネットワークである．IP ネットワークの代表例として，コンピュータネットワークが普及するきっかけとなったインターネットと，次世代のインターネットと言われる NGN（Next Generation Network）[4] を略説する．

● インターネット

代表的な IP ネットワークにインターネットがある．インターネットは，TCP/IP（Transmission Control Protocol/IP）を標準プロトコルとした汎用コンピュータネットワークである．IP 自体は誤り制御などの QoS 保証機能を持たないため，TCP などの上位プロトコルがその機能を担う必要がある．

インターネットの起源は，1969 年に開始された米国国防総省高等研究計画局 ARPA（Advanced Research Projects Agency）による，核戦争に耐え得るネットワークの研究である．この研究において，軍事及び研究利用を目的とした ARPANET（Advanced Research Projects Agency Network）が誕生した．ARPANET は，パケット交換を用いるため，単一の通信路において複数のユーザが同時に利用することができる．また，核攻撃などにより，ある地域の回線が切断された場合でも，別の回線が利用できれば通信が可能である．

その後，1972 年に ARPA が DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）として再編された際に，ARPANET は大学や研究機関に解放され，非軍事目的の利用が始まった．公開実験により，ARPANET で使われていた通信プロトコルが見直され，1982 年にその仕様が確定した．その後，TCP と IP が作られ，さらに翌年の 1983 年には米国国防総省によりインターネットの標準プロトコルが TCP/IP と定められた．

- NGN

近年，次世代ネットワークとしてNGNが考案され，実際にサービスが始まっている．NGNの主な特徴として，固定網，移動網との融合（Fixed Mobile Convergence）があげられる．これまで，電話網，携帯電話網などは別々のネットワークを持っていたため，一元的な制御やサービスを行うことが困難であった．NGNでは，これらをIPネットワークに集約することによって，これまでの問題点を解決する．また，NGNはエンド・ツー・エンドのQoS保証を可能としている．従来はベストエフォートネットワークが主流だったため，エンド・ツー・エンドの品質保証が制御できなかったが，NGNではSIP（Session Initiation Protocol）や帯域制御などの利用などにより，これを可能とする．

1.2 マルチメディア通信

マルチメディア通信とは，文章や図表，音声やビデオなどの複数のメディアを組み合わせた通信のことである．従来では，これらを転送するには郵便や電話などの別々の通信手段を用いる必要があった．マルチメディア通信ではこれら情報を符号化し，単一の通信手段を用いて転送するため，メディアの扱いが容易になる．また，複数のメディアを組み合わせることで転送することにより，新しいサービスが誕生している．

マルチメディア通信サービスの例として，マルチメディア通信会議が挙げられる．マルチメディア通信会議システムとは，離れた場所に存在する参加者がネットワークを介してリアルタイムに会議を行えるようにするシステムである．話者の音声や画像，プレゼンテーション資料などを共有することができ，円滑なコミュニケーションが可能となる．

マルチメディア通信では扱う情報量が膨大となるため，情報の符号化には圧縮符号化方式が用いられることが望まれる．また，連続メディアにおいては，その時間構造を保持することが高いQoSを保つための条件となる．そのため，メディア同期制御を適用する必要がある．

以下では，マルチメディア通信サービスの実現に必要なこれらの技術について述べる．

1.2.1 圧縮符号化方式

音声やビデオの情報は，時間的及び空間的に冗長度が高く，その冗長部分のある程度削除しても主観的な品質には影響がない．したがって，有限であるネットワーク資源を考慮して，これらのメディアは圧縮して転送するのが望ましい．その一方で，近年のネットワークのブロードバンドに伴い，音声のように必要帯域幅が狭いメディアは，圧縮をせず符号化のみで伝送することも可能となった．

以下に，音声とビデオの代表的な圧縮方式について述べる．

音声の圧縮符号化方式

本論文の実験では、音声の圧縮符号化方式として無圧縮であるリニア PCM (Pulse Code Modulation) と ITU-T (International Telecommunications Union – Telecommunications Standardization Sector) が勧告する G.711[8] で圧縮された PCM を用いる。一般に用いられる MP3 (MPEG Audio Layer-3) [9] と AAC (Advanced Audio Coding) も加えて、以下に紹介する。

● リニア PCM

一定の周波数で標本化し、一様に量子化する方法である。主として、CD (Compact Disc) に用いられる方式である。圧縮されていないため、高い音質である一方、伝送には広い帯域幅を必要とする。

本論文で用いるリニア PCM は、48kHz でサンプリングし、16 ビットで量子化したものである。モノラル (1 チャンネル) の場合は 768 kb/s、ステレオ (2 チャンネル) の場合は 1,536 kb/s の伝送速度を要する。

● G.711

G.711 では、まず、音声信号を 8kHz のサンプリング周波数で標本化する。そして、標本化された値を、256 段階 (8 ビット) のレベルで量子化する。量子化された値はそのまま符号化される。したがって、転送速度は 64kb/s となる。

量子化においては、レベル間隔を均一にする (一様量子化) 場合、振幅が小さい部分で SNR (信号対雑音比) が大きくなる。そこで、振幅の大きい部分でレベル幅を大きく (圧縮) する非一様量子化が用いられる。圧縮特性としては対数関数が一般的であるが、G.711 では対数関数式が μ に依存する μ 則 PCM を規定している。

● MP3

狭義の MP3 は MPEG-1 Audio Layer-3 規格を指す。これは非可逆圧縮である。音楽であれば約 128 kb/s、会話であれば約 32 kb/s まで圧縮しても、主観的にはオリジナルと大差がない。CD の音楽をコンピュータに保存する際のフォーマットとして広く普及した。

圧縮アルゴリズムでは、MDCT (修正離散コサイン変換) による直交変換の後、聴覚心理に基づいた周波数領域での適応的ビット割り当てを行い、ハフマン符号化により圧縮する。

● AAC

MP3 などの MPEG-1 Audio や MPEG-2 Audio BC (Backward Compatible) を超える高音質・高圧縮率を目標として、MPEG (Moving Picture Experts Group) により策定された方式である。AAC には MPEG-2 AAC[10] と MPEG-4 AAC[11] があるが、ほぼ同一のものである。一般に利用されるのは、AAC-LC (AAC Low Complexity) である。

MPEG-2 AAC は、BS デジタル放送と地上デジタルテレビジョン（以下、地デジ）放送や SD-Audio などに用いられている。一方、MPEG-4 AAC は、米アップル社のデジタルオーディオプレイヤーや携帯電話の音楽再生機能に利用されている。

基本的な圧縮アルゴリズムは MP3 と同じだが、それぞれの段階において種々の改良がなされている。

ビデオの圧縮符号化方式

本論文では、JPEG (Joint Photographic Experts Group) [12] ビデオと MPEG-1[13] を用いる。また、近年、普及した MPEG-2[14]、H.264[15] にも触れる。

● JPEG

JPEG とは、画像データベースやカラーファクシミリ、印刷などの分野に適用するためのカラー静止画像符号化標準方式を目指して設立された検討グループを指している。また、一般に“JPEG 画像”と呼ばれている画像圧縮の標準方式の正式な名称は、“Digital compression and coding of continuous-tone still images”であり、モノクロ又はカラーの連続的な階調を有する静止画の符号化技術である。

一般に、JPEG とは静止画像のことを指すため、JPEG 静止画像の連続したビデオを“JPEG ビデオ”や“Motion JPEG”と呼ぶこともある。この方式では、空間的冗長度を考慮した圧縮が施されている。しかし、時間的冗長度に関しては処理されていない。

一般的な JPEG 圧縮方式は DCT (Discrete Cosine Transform: 離散コサイン変換) 符号化方式であり、非可逆圧縮である。この方式では、入力画像を 8×8 画素のブロックに分割し、DCT により符号化する。さらに、各ブロックを量子化ステップサイズ Q factor (Quantization factor) で割り、余りを丸め、エントロピー符号化を行い JPEG 画像が生成される。

圧縮後の情報量は、元画像と比較して約 $1/10$ から $1/20$ である。また、JPEG 方式は汎用性を重視してつくられているため、この他にも可逆圧縮を行うモードもある。

● MPEG-1

“MPEG”は動画像情報の圧縮技術の標準化作業をする委員会の名称である。また、その委員会で決定された圧縮アルゴリズムの勧告の名称でもある。圧縮方式には MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4 などがある。

本論文で用いる MPEG-1 の正式名称は“Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at Up to about 1.5 Mbit/s”であり、CD やハードディスクに 1.5 Mb/s 程度の圧縮された動画データを蓄積するための国際標準である。ビデオテープレコーダー程度の画質を標準としている。

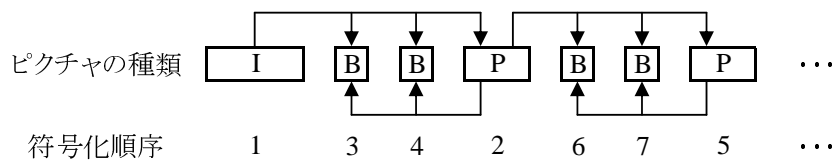


図 1.1: ピクチャタイプ間の依存関係

MPEG-1 の圧縮は、空間的・時間的冗長性を削減することにより行われる。空間的冗長性の削減の方法には直交変換を用い、時間的冗長性のそれは予測符号化を用いている。I ピクチャ、P ピクチャ、B ピクチャという三つのタイプを用いて、双方向予測を実現している。以下に、それぞれのピクチャの特徴を示す。

I ピクチャ (Intra-Picture : イントラ符号化画像) I ピクチャはその画面情報だけから符号化された画面で、フレーム間予測を使わずに生成される。従って、I ピクチャはそれ自身の情報のみで復号できる。また、各 GOP の独立性を保つために GOP 内には最低 1 枚の I ピクチャが必要である。

P ピクチャ (Predictive-Picture : 順方向予測符号化画像) P ピクチャは、直前の I ピクチャまたは P ピクチャからのフレーム間予測を行うことによってできる画面である。従って、直前の I ピクチャまたは P ピクチャが復号されていないと正常に画像が復元されない。

B ピクチャ (Bidirectionally predictive-Picture : 双方向予測符号化画像) B ピクチャは、MPEG の特徴である双方向予測によって生成される画面で、I-P ピクチャ間、または、P-P ピクチャ間の双方向予測情報を持っている。I または P ピクチャが復号されていないと、そのピクチャから予測された B ピクチャは復号できない。

MPEG-1 は蓄積メディア向けに開発されたため、早送りや一時停止などのトリックプレイに対応している。予測符号化方式は、ある画面を復号する際、その画面一枚だけでは完結した情報にならない場合があるため、ランダムアクセスには不向きである。そのため、MPEG-1 ではイントラ符号化画像 (I ピクチャ) を一枚以上含む画面のまとまりである GOP (Group of Picture) という概念を導入し、GOP ごとでのランダムアクセスを可能とすることで、これに対応している。

また、B ピクチャは双方向予測を用いて符号化されるので、各ピクチャの符号化の順序は図 1.1 のようになる。さらに、処理順序と伝送メディア上での順序が原画面と異なる (図 1.2)。従って、符号化のための時間が JPEG より長く必要になり、ライブメディアに用いる場合は遅延が大きくなり、リアルタイム性が犠牲になる。

● MPEG-2

MPEG-2 は MPEG-1 を拡張したものであり、1995 年に MPEG により規格化された。主な特徴として、蓄積メディアだけでなく、通信・放送メディアへの適用

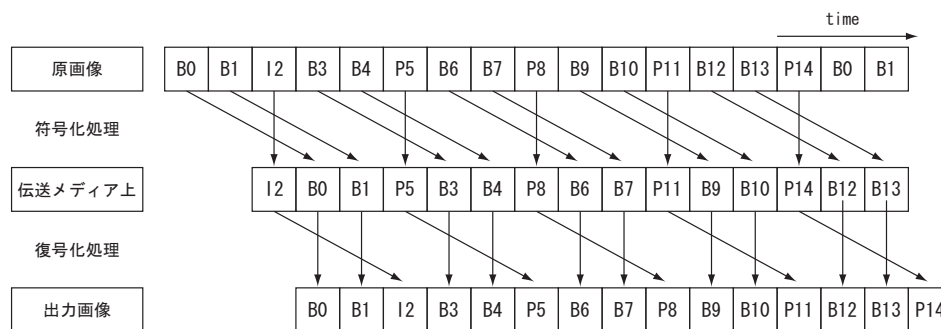


図 1.2: ピクチャの符号化及び複合化の順序

表 1.1: MPEG-2 のメインプロファイルにおける各レベルのパラメータ

レベル	伝送速度 [Mb/s]	画素数/ライン	ライン数/フレーム	フレーム/秒
High	80	1,920	1,152	60
High-1440	60	1,440	1,152	60
Main	15	720	576	30
Low	4	352	288	30

も考慮されていること，SDTV (Standard Definition TeleVision) 品質以上の高品質画像を対象とし，HDTV (High Definition TeleVision) 品質へも拡張可能な点があげられる．また，MPEG-2 の再生装置で MPEG-1 を再生することが可能である．

MPEG-2 では圧縮率が改善されており，低いレベルでは MPEG-1 相当，高いレベルでは HDTV 相当の画質に対応できる．これらの品質は，解像度などを規定する 4 つのレベルと，符号化機能を規定する 5 つのプロファイルによって分類され，例えば，MP@ML (Main Profile at Main Level) のように表現される．なお，上位は下位を包括する．プロファイルとレベルの例を表 1.1 に示す．

● H.264

H.264 は低ビットレートから高ビットレートの利用を想定した圧縮符号化方式である．ITU-T と ISO/IEC の共同で策定されたため，ISO/IEC における規格名である MPEG-4 AVC の名を付け，H.264/MPEG-4 AVC などと記すことが多い．

MPEG-1 や MPEG-2 と比べ，圧縮率の高さが特徴としてあげられる．圧縮原理は MPEG-1 や MPEG-2 などと基本的には同様であり，空間変換，フレーム間予測，量子化，エントロピー符号化などを採用している．H.264 では，これらのアルゴリズムに多数の改良がなされており，さらに，整数変換，デブロッキングフィルタ，イントラ予測などの機能が追加されている．そのため，MPEG-2 と比較して 2 倍以上の圧縮率を実現すると言われている．

MPEG-2 同様，品質を規定するためにプロファイルとレベルが用いられる．プロファイルは 7 種類，レベルは 16 段階ある．

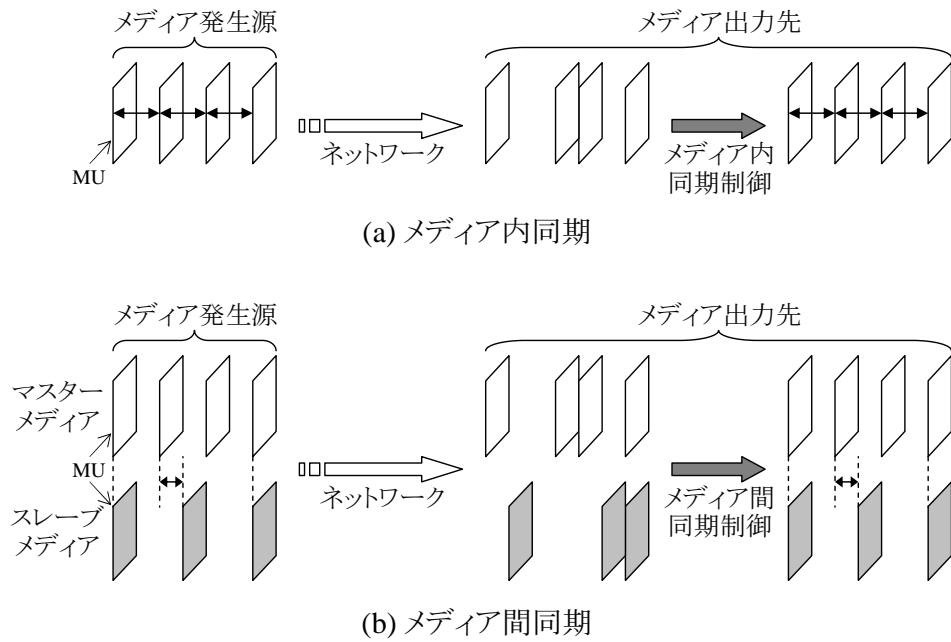


図 1.3: メディア内同期とメディア間同期

1.2.2 メディア同期

メディア同期 [7] は、オブジェクト同期と連続同期に分類することができる。前者はハイパーメディアにおけるオブジェクト間の同期を指す。シナリオに基づいてメディアの出力開始時間の制御を行う。後者は連続メディアの出力タイミングを調整するものである。以下に連続同期の概略を示す。

連続同期は、メディア内同期とメディア間同期に分類できる。前者では、単一メディア内の MU (Media Unit) の時間構造を維持する。ここで、MU とは音声サンプルやビデオフレーム等に相当するものである。時間構造の維持とは、図 1.3 (a) に示されるように、メディア発生源で発生した MU の間隔をメディア出力先で回復することを指す。この時間構造が乱されると、MU の出力の滑らかさが失われ、メディアの主観品質が劣化する。後者は、音声やビデオなど、複数のメディアが存在する場合に、それらの間での時間構造を維持する。この時間構造が乱されるとメディアの間に出力タイミングのずれが生じ、リップシンク (話者の口の動きと音声との合致) が乱れる。

メディア間同期制御においては、重要度の高いメディアをマスタメディアとし、残りのメディアをスレーブメディアとする。そして、図 1.3 (b) のように、マスタメディアのメディア内同期を優先し、スレーブメディアは対応するマスタメディアとの時間関係を維持する。

一般に、音声はビデオよりもメディア内同期品質に敏感であるため、本論文では音声をマスタメディアとし、ビデオをスレーブメディアとする。

表 1.2: インターネットにおける QoS

ネットワーク階層	QoS のレベル
(ユーザ) (注)	QoE
アプリケーション	アプリケーション
トランスポート (TCP, UDP)	エンド・ツー・エンド (トランスポート)
ネットワーク (IP)	ネットワーク
データリンク (ノード)	ノード (リンク)
物理 (デバイス)	物理

注) ネットワーク階層においてユーザ層は存在しないが、アプリケーションサービスエンティティのサービスユーザはユーザとなるため、表中にユーザ層を含めた。

1.3 QoS

IP ネットワークは、設計・運用を柔軟に行うため、転送機能は階層化されている。それぞれの層の品質を表すには、層に応じた品質尺度が必要である。また、目的や用途が異なれば、それぞれに品質尺度が必要となる。サービス品質 (QoS) の考え方は、それらを一元的に捉えるものである。それぞれの評価対象に QoS パラメータを定義し、定量的な評価により、転送機能の性能の評価が可能となる。

以下に、QoS の定義と QoS パラメータを概説する。

1.3.1 定義

QoS を厳密に定義することは難しく、状況に応じて多種多様の解釈がなされている。文献 [16] では“あるべき姿への一致度”と定義されている。“あるべき姿”とは理想的なサービスを意味するが、評価する対象によって理想的とされるサービスは異なる。通信において理想的なサービスとは、通信手段を介さずに直接ユーザ同士が情報を交換したときに提供されるサービスと考えることができる。ビデオ通信会議を例に挙げると、参加者同士が直接会って会議を行う状態、すなわち、話者の音声は明瞭に聞こえ、話者の口の動きと声が一致し、会議資料が損傷なく閲覧できる状態である。

インターネットの QoS を考える場合は、ネットワークの転送機能階層ごとに QoS が定義される (表 1.2) [6]。これまでの研究において、連続メディアの評価は、ネットワークレベル QoS やエンド・ツー・エンドレベル QoS を対象に行われているものが多い。しかし、QoS 制御の目的はアプリケーションを利用するユーザが主観的に感じる品質 (すなわち、QoE^{注 1)}) を高く保つことにある。したがって、QoE を直接測れない場合は、ネットワークレベル QoS やエンド・ツー・エンドレベル QoS ではなく、より QoE に近いアプリケーションレベル QoS を測定することが望まれる。

(注 1) ユーザレベル QoS や知覚 QoS とも呼ばれる。

表 1.3: QoS パラメータの例

QoS のレベル	音声	ビデオ	コンピュータ データ
ユーザ	MOS 心理的尺度		
アプリケーション	PESQ R 値	SNR MU レート	HTML スループット 因果順序逆転率
エンド・ツー・エンド (トランスポート)	TCP コネクション確立時間 UDP スループット		
ネットワーク	経路切り替え時間		
ノード (リンク)	パケット損失率 パケット伝送遅延		
物理	伝送速度 SNR ビット誤り率		

1.3.2 QoS パラメータ

QoS を定量的に評価するために，サービスの品質を表すいくつかの特徴的な項目を数値化する必要がある．この項目は QoS パラメータと呼ばれる．インターネットの QoS においては，各階層の QoS ごとに QoS パラメータが存在する．特に，アプリケーションレベル QoS では，転送するメディアによっても異なる QoS パラメータを持つ．メディア同期品質もアプリケーションレベル QoS の一つである．表 1.3 には，QoS パラメータの例を示す．

以下に，本論文で用いる，音声・ビデオストリーミング伝送に関する主なアプリケーションレベル QoS パラメータとその意味を説明する．

出力間隔の変動係数（音声： C_a ，ビデオ： C_v ）これは MU の出力間隔がどれくらい揺らいでいるかを示す尺度である．この値が小さいほど滑らかに表示されていることを意味する．MU の出力間隔の標準偏差を MU の出力間隔の平均で割った数値である．

メディア内同期平均二乗誤差（音声： E_a ，ビデオ： E_v ）MU の出力間隔から発生間隔を引いた値の二乗を平均したものである．出力間隔の変動係数と同様，メディア出力の滑らかさを表す．

メディア間同期平均二乗誤差（ E_{int} ）この値はメディア間（音声-ビデオ間）において，どの程度ずれが生じているかを表す．この値が小さいほどメディア間のずれが少なく，いわゆるリップシンクが保たれている状態と言える．マスタ MU とそれに対

応するスレーブ MU の出力時刻の差から，それらの MU 発生時刻の差を引いたものを二乗し，総和をとり，出力 MU 数で割って求める．

文献 [17] を参考にすると，この値が $6,400 (=80^2) \text{ ms}^2$ 以下であれば，メディア間同期の品質は高いと言える．逆に， $25,600 (=160^2) \text{ ms}^2$ を越えると，同期外れである．

平均 MU レート（音声： R_a ，ビデオ： R_v ）単位時間（秒）にどれだけの MU が出力されるかを表す．総出力 MU 数をメディアの総出力時間で割って求める．この値が高いほどメディアは滑らかに表示される．

MU 欠落率（音声： L_a ，ビデオ： L_v ）出力されなかった MU 数を送信された MU 数で割った値である．

平均 MU 遅延（音声： D_a ，ビデオ： D_v ）バッファリングやネットワーク遅延などにより，MU がどの程度遅れて出力されるかを表す．各出力 MU の出力時刻とその発生時刻（タイムスタンプ）との差の総計を出力 MU 数で割って求める．値が小さいほどリアルタイム性が高い．

文献 [18] によれば，音声通信において送信者と受信者の相互の了解がある場合は，400 ms までの遅延を許容できるとされている．したがって，本論文もこれに従う．

次に，Web アクセスサービスで用いるアプリケーションレベル QoS パラメータを示す．

平均取得時間 HTML ファイルを取得するのに要する時間の平均値である．TCP コネクションを生成する時間と，HTML ファイルを転送する時間が含まれる．ユーザにとっては，ハイパーリンクをクリックするなどして Web ページの転送要求を行ってから，ページの表示が完了するまでの時間となる．

平均転送時間 平均取得時間から TCP コネクション生成時間を除いた時間である．

HTML スループット 転送が完了した全 HTML ファイルのサイズを，測定時間で割った数値である．

転送ファイル数 測定中に転送が完了した HTML ファイルの数である．

1.4 QoE

最終的なサービスの受け手であるユーザは，一般に，QoS パラメータの数値を参考にはするが，主観品質の高いサービスを良いサービスとする．したがって，QoS 制御の究極目標は QoE を高めることにある．適切な QoS 制御を検討する際，実際に人に対象を見てもらう主観評価が欠かせない．これには時間や人員コストが膨大にかかる．

さらに，QoE はアプリケーションレベル以下の QoS の影響に加え，人の感性や年齢，性別など，アプリケーションレベル以下の QoS とは関係のない要素も含む．そのため，

表 1.4: 5 段階品質尺度

評価値	評価基準
5	非常に良い
4	良い
3	普通
2	悪い
1	非常に悪い

アプリケーションレベル以下の QoS の影響のみを定量的に測定するには，心理学的な手法が必要となる．

一方，測定コストを抑えるために，下位の QoS から QoE を推定する手法がある．これにより，サービス提供者は膨大な調査コストを費やすことなく，QoE を高めるための QoS 制御を知ることが可能となる．

QoE パラメータとしては，次節にて述べる心理的尺度や ITU 勧告の MOS (Mean Opinion Score) [19] などがある．MOS は測定が容易な反面，得られる結果は被験者の判断結果の大小関係のみを表す順序尺度である．系列カテゴリー法 [20] によって求められる尺度では，判断結果の順序に加えて主観量の間隔も表すことができ，より正確に QoE を測定することが可能である．したがって，本論文では心理的尺度を QoE パラメータとして用いる．

以下に，系列カテゴリー法，及び，アプリケーションレベル QoS パラメータと QoE パラメータを対応付けるための QoS マッピング手法を示す．

1.4.1 系列カテゴリー法

系列カテゴリー法は，QoE を定量的に評価するための計量心理学的測定法の一つである．評定尺度法による評価を行い，カテゴリー判断の法則 [20] を適用する．これにより，QoE パラメータを得る．

評定尺度法

評定尺度法では実験者が複数段のカテゴリーをあらかじめ設定し，被験者は評価対象をそのカテゴリーに分類する．尺度には表 1.4, 1.5 のように品質尺度と妨害尺度がある．前者は評価対象に“良い”，“悪い”などの絶対的な品質で評価する．そのため，対象の良さや好ましさなどの評価に広く用いられる．一方，後者は提示された基準に対しての劣化程度を評価する．そのため，ノイズや劣化などの妨害刺激を対象とした評価に使用される．後者では予め基準が提示されるため，被験者は品質を判断しやすい利点がある．また，カテゴリーの数は，精度や評価のしやすさから 5 ないし 7 が用いられる．

表 1.5: 5 段階品質妨害

評価値	評価基準
5	劣化がわからない
4	劣化がわかるが気にならない
3	劣化が気になるが邪魔にならない
2	劣化が邪魔になる
1	劣化が非常に邪魔になる

カテゴリー判断の法則

評定尺度法により得られた結果は，品質の順序のみを表す順序尺度である．統計的処理を施すには距離尺度の尺度水準を満たす必要があるため，カテゴリー判断の法則を用いる．

カテゴリー判断の場合では，次のような想定が行われている．

1. 距離尺度は順位づけられた特定数のカテゴリーまたは段階に分割される．
2. 様々な要因により，所定のカテゴリーの境界は必ずしも距離尺度上の一定の位置にあるとは限らず，距離尺度上において正規分布を成して変動する．異なるカテゴリーの境界は，異なる平均と標準偏差を持つ．
3. 各刺激の距離尺度上に持つ値（弁別過程）が，あるカテゴリーの境界値より小さければ，常にその境界よりも下のカテゴリーに分類される．

これらの想定から，本質的にはカテゴリーの境界も，刺激と同じように振る舞うことがわかる．そのため，次のような式が導出されている．

$$t_g - R_j = Z_{jg} \sqrt{\sigma_j^2 + d_g^2 - 2r_{jg}\sigma_j d_g} \quad (1.1)$$

ただし，

- j : 1, 2, ..., n
- g : 1, 2, ..., m
- $m + 1$: カテゴリーの数
- t_g : g 番目のカテゴリーの境界の平均値
- d_g : g 番目のカテゴリーの標準偏差
- R_j : 刺激 j の尺度値
- σ_j : 刺激 j の標準偏差
- Z_{jg} : 刺激 j が境界 g 以下として判断された割合 p_{jg} より求められた正規偏差
- r_{jg} : 刺激 j と境界 g のそのときの相関

である．しかし，式 1.1 は未知数に対して得られる条件数が少ないため，このままの形で解くことができない．そこで，Torgerson は弁別仮定とカテゴリーの境界の分布に対する仮定に応じて，式を条件 A ～ D の四つに分類した．本論文では，仮定が簡潔な条件 D を適用することとする．すなわち， $d_g^2 = c, \sigma_j^2 = c, r_{jg} = 0$ と仮定し，

$$t_g - R_j = Z_{jg}c \quad (1.2)$$

とする．

カテゴリー判断の法則の適用後，変換された尺度と実測値との適合度を確認するため，Mosteller の適合度検定 [21] を行う．これによって得られた尺度を心理的尺度と呼び，QoE パラメータとする．

1.4.2 QoS マッピング

前節で得られた QoE パラメータをアプリケーションレベル QoS パラメータにマッピングするため，本論文では回帰分析を用いる [22]．QoE パラメータを従属変数とし，アプリケーションレベル QoS パラメータを独立変数とすることにより，アプリケーションレベル QoS パラメータを用いて QoE パラメータを表現できるようにする．この回帰式（推定式）によって QoE を推定することが可能となる．この方法を以下に説明する．

はじめに，得られたアプリケーションレベル QoS パラメータに対して回帰分析を行う．このとき，独立変数の候補としては多くのものが考えられるが，多重共線性の問題より，すべてを独立変数にはできない．そこで，独立変数の候補となるパラメータに対して主成分分析を行う．

次に，以下のように独立変数を選出する．各主成分の累積寄与率に基づき，候補となるすべてのパラメータを表現するために必要な主成分の数を求める．そして，各主成分の主成分負荷量から，各主成分に基づき，候補となるパラメータをいくつかのカテゴリーに分類する．さらに，各カテゴリーの中から独立変数を一つずつ選ぶ．

求められたすべての独立変数の組み合わせに対して回帰分析を行い，自由度調整済み重相関係数（回帰式の精度を表す係数）が最も大きい組み合わせを求める．

最後に，求めた回帰式の偏回帰係数に対して検定を行い，重回帰式に寄与していない独立変数を除外する．

1.5 アプリケーションレベル QoS 制御技術

アプリケーションレベル QoS 制御は，アプリケーションの特性に応じた制御を行う．例えば，ビデオオンデマンドサービスでは，動的解像度制御，フレームスキップ制御，誤り補償制御，再送制御，及び，同時視聴者数の制御などがこれにあたる．

音声・ビデオストリーミング伝送で有効な VTR (Virtual-Time Rendering) メディア同期アルゴリズム [23] がある．以下に，VTR アルゴリズムを略説する．

音声やビデオなどの時間構造を持つメディアは，ネットワーク上で生じたパケットの遅延揺らぎや欠落により，時間構造が乱される可能性がある．そのため，メディアの同

期品質が大きく低下する恐れがある．受信端末で遅延揺らぎを吸収できれば，同期品質の劣化を抑えることができるが，実際のネットワークでは遅延揺らぎの大きさが分からない．

VTR アルゴリズムは，このように遅延揺らぎの最大値が分からない場合を想定しており，動的にバッファリング時間を変更することにより，遅延の揺らぎを吸収している．バッファリング時間の変更は，仮想時間原点の移動を意味する．これは MU を単位として行われる．

仮想時間原点は，まず，最大遅延揺らぎの推定値 J_{\max} を用いて設定される．これを初期バッファリング時間とする．その後，各 MU の目標出力時刻（MU を出力しようとする時刻）の変更によって，再設定される．蓄積メディア転送の場合，目標出力時刻は遅らされるのみである．しかし，ライブメディア転送の場合は，リアルタイム性を保つために，バッファリング時間が最大許容遅延 Δ_{al} よりも大きくならないように目標出力時刻が設定される．特に，MU がその目標出力時刻より早く出力できる状態においては，目標出力時刻を早めることによって，遅れは回復される．

VTR アルゴリズムでは，同期品質に最も敏感なメディアをマスタメディアとし，それ以外をスレーブメディアとする．目標出力時刻の変更はマスタメディアによってのみ行われる．スレーブメディアの目標出力時刻の変更は，マスタメディアのそれに連動する．

1.6 ネットワークレベル QoS 制御

ネットワークレベルにおける QoS 制御には，IETF (Internet Engineering Task Force) が提唱する IntServ (Integrated Services) [24] や DiffServ (Differentiated Services) [25], [26] がある．

以下では，これらの概要を述べる．

1.6.1 IntServ

IntServ は，フローを単位とする QoS 保証のためのアーキテクチャである．フローごとにエンド・ツー・エンド間のネットワーク資源を予約するため，厳密に QoS を保証することが可能である．

IntServ を利用するアプリケーションは，通信に先立って RSVP (Resource ReSerVation Protocol) シグナリング [27] を用い，必要な資源予約を確保する．まず，RSVP コネクション確立し，送信アプリケーションは送信するフローのトラヒック特性をネットワークと受信アプリケーションに通知する．そして，受信アプリケーションはフローに必要な QoS を決定してネットワークに通知する．そのため，IntServ を利用するには，中継するすべてのノードがこの機能を有していなければならない．また，帯域を予約するフローが増加すると，各ノードで保持しなければならない状態数が増え，その要求を満たすことが困難となる．したがって，IntServ は高い QoS を保証できる一方，スケーラビリティに欠けると言える．

現在では、次の三つのサービスが提案されている。

保証型 (GS: Guranteed Service) [28] フローのサービスレートとフロー内のパケット最大遅延を保証するサービスである。リアルタイム型のアプリケーションや、回線シミュレーションに用いる。

負荷制御型 (CL: Control Load Service) [29] ネットワークのふくそう状態に関わらず、このサービスが適用されているフローは一定の QoS が確保される。ある程度のパケット欠落や遅延ジッタが許容される蓄積型メディア配信や非リアルタイム型のアプリケーションに用いる。

ベストエフォート (BE: Best Effort) 転送品質は現在のインターネットの形態であるベストエフォートと同一である。しかし、接続性は保証される。

1.6.2 DiffServ

DiffServ は、IntServ よりも大規模なネットワークにおける QoS 制御を目的としたものである。DiffServ では複数のフローをいくつか束ねて扱う。そして、その束の間に転送品質の差を設けることにより相対的な QoS を提供する。どのように QoS を制御するかはすべてのルータで同一である必要はなく、各ノードの管理方針により自由に決定することができる。

また、一般に、複雑なクラス分けは、パケットが DS ドメイン (DiffServ によって QoS 保証を行うノードのみで構成されたネットワーク) に入るときのみ、DS 境界ノード (DS ドメインと非 DS ドメインの境界のノード) にて行われる。そして、DS ドメイン内では、DS 境界ノードが付与した情報を元にクラス分けが行われる。そのため、高速な動作が可能となる。

DiffServ の具体的な制御はホップごとに行われる。そのため、希望するエンド・ツー・エンドの QoS が必ずしも保証されるとは限らない。しかし、フローの状態をノードで保持する必要がなく、また、すべてのノードが DiffServ を実装していない場合でも通信は可能である。その高いスケーラビリティから、DiffServ は次世代アーキテクチャとして注目されている。

DiffServ アーキテクチャ

DS ドメインでは、ノードにパケットが到着すると、まず、トラヒック調整機能により処理される。次に、各パケットの DSCP (DiffServ Code Point) [26], [30], [31] の値に従って、対応する PHB (Per-Hop Behavior) [26], [30], [31] に割り振られる。DSCP とは DS フィールドに記された識別子である。DS フィールドは、IPv4 ヘッダの ToS (Type of Service) フィールド [1]、もしくは IPv6 ヘッダの Traffic Class フィールド [32], [33] を 6 ビットに拡張したものである。このとき、同じ DSCP を持つパケットは BA (Behavior Aggregate) [26], [30], [31] と呼ばれ、BA 内のパケットは同じ転送条件が適用される。そ

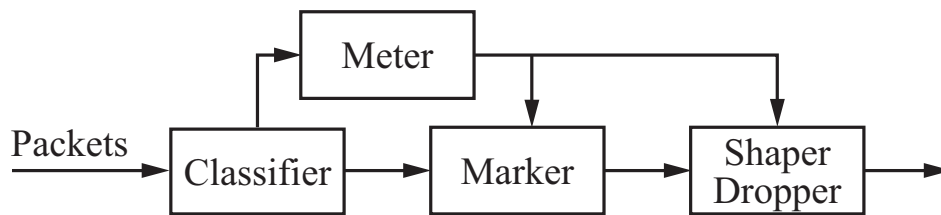


図 1.4: DiffServ の各コンポーネントの関係

して、各サービスに割り振られたパケットは、それぞれのサービスの PHB の記述に従って転送される。

以下では、トラフィック調整機能を説明し、サービスの種類と特徴を示す。

トラフィック調整機能

トラフィック調整は、ノードに実装される DiffServ コンポーネントによって行われる。これらの論理的な関係は、図 1.4 のとおりである。

Classifier パケットヘッダに記されている DSCP、送信元アドレスやプロトコル ID などに基づいてパケットのクラス分けを行う。一般に、DS ドメインの内部のノードでは、DSCP のみによってクラス分けが行われる。

Meter トラフィックプロファイル（DSCP、ビットレートなど）に対して、Classifier で選択されたパケットの時間的な特性を測定する。得られた情報は、Marker 及び Shaper に渡される。

Marker Meter の測定結果に基づき、DS フィールドに DSCP をセットする。

Shaper ストリームをトラフィックプロファイルに準拠させるために、ストリーム内のパケットの幾つか、あるいはすべてを遅らせる。このとき、パケットを格納するための十分なバッファが無ければ、パケットは廃棄される。

Dropper Meter の報告に基づき、パケットを廃棄する。Dropper は、Shaper のバッファがない場合として実装される。

DiffServ のサービス

DiffServ には、EF (Expedited Forwarding)、AF (Assured Forwarding)、及び Default サービスが存在する。これらは、それぞれ EF PHB[34]、AF PHB[26]、[35]、Default PHB[26]、[30]、[31] によって定義される。これらのサービスでは保証する QoS の程度が異なり、EF が最も高く、以下、AF、Default の順になる。各 DSCP と PHB の対応関係は、表 1.6 のとおりである。各 PHB にはノードの外部から観測される状態が記述されるのみであり、実際にどのようにパケットの転送を行うかは、ノードの実装に依存する。

以下では、これら三つのサービスを概説する。

表 1.6: 各 PHB に対応する DSCP

PHB	DSCP				
EF PHB	101110				
AF PHB		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
	Drop 1	001010	010010	011010	100010
	Drop 2	001100	010100	011100	100100
	Drop 3	001110	010110	011110	100110
Default PHB	000000				

EF サービス エンドホスト間に仮想専用線（Virtual Leased Line：VLL），もしくはポイント・ツー・ポイントのコネクションが張られている状態を実現する．そのため，EF PHB では出力帯域が入力帯域以上となるように設定される．また，他サービスのトラヒックが EF サービスの転送に影響を及ぼさないように設計することが望まれる．また，保証帯域以上のトラヒックは廃棄されるため，トラヒックシェーピングなどを併用しなければならない．

AF サービス AF サービスでは，AF PHB に割り当てられた BA 間に異なるレベルの品質保証を提供する．PHB に指定された一定の帯域の転送は保証されるため，最低帯域保証付きベストエフォート型サービスとも呼ばれる．RFC2597[35]，RFC3260[26]では，優先度の異なる四つのクラスと，三段階の廃棄優先度を定義することが推奨されている．クラス i に属する廃棄優先度 j を持つパケットは AF_{ij} と記される．これは AFCP（AF CodePoint）と呼ばれ，DSCP とは表 1.7 の関係にある．各パケットは DSCP の値に基づき，対応するクラス及び廃棄優先度に割り振られる．AF PHB では，DSCP の最上位ビットから 3 ビットをクラスとして，続く 2 ビットを廃棄優先度として解釈する．残りの 1 ビットは使用されておらず，常に 0 である．

ふくそうした DS ノードは，より高い廃棄優先度を持つパケットを廃棄することにより，廃棄優先度の低いパケットの欠落を防ぐ．

Default サービス Default サービスは，現在のインターネットと同様のベストエフォート型のサービスである．Default PHB の DSCP が 000000 であるため，ネットワークが DiffServ で動作していることを知らない送信者によるパケットに対しては，このサービスが適用される．

なお，上記の三つの PHB の他に，Class Selector PHB[26]，[30]，[31] が存在する．これは，IPv4 の ToS フィールドとの互換性のために定義されている．ToS フィールドは DS フィールドの先頭 3 ビットであるため，これに対応する DSCP は “xxx000”（ x は 0 または 1．ただし，000 を除く）の 7 種類である．

表 1.7: AFCP (AF Code Point)

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Low Drop Precedence (Drop 1)	AF11 001010	AF21 010010	AF31 011010	AF41 100010
Middle Drop Precedence (Drop 2)	AF12 001100	AF22 010100	AF32 011100	AF42 100100
High Drop Precedence (Drop 3)	AF13 001110	AF23 010110	AF33 011110	AF43 100110

上段は AFCP を，下段は DSCP を示す．

1.7 ノード（リンク）レベル QoS 制御

ノード（リンク）レベルの QoS 制御は，ノード単体で利用可能なため，ネットワーク階層の上位にあたるネットワークレベル QoS 制御の実現のために利用されることもある．本論文では，DiffServ の実現のため，帯域制御に CBWFQ (Class-Based Weighted Fair Queueing) [36]，廃棄制御に WRED (Weighted Random Early Detection) [36] を用いている．また，本論文では検討対象としないが，EF サービスを実現するためのスケジューリングアルゴリズムの一つである PQ (Priority Queueing) [36] についても触れる．

以下，優先制御である WFQ (Weighted Fair Queueing) [37], [38]，そして，CBWFQ，WRED，PQ を概説する．

1.7.1 WFQ

WFQ は，GPS (Generalized Processor Sharing) におけるビット単位でスケジューリングを行う仮定を，パケット単位で扱えるように近似したパケットスケジューラである．各パケットの送出は，パケットの重みにパケットサイズを掛けた値を比較し，その値の小さいものから行われる．

これをフローベースのスケジューラと見なすと，WFQ はフローに割り当てる帯域幅を動的に変更するアルゴリズムである．各フローが利用できる帯域幅は，次のように決定される．フローの要求帯域幅の総和が出力帯域幅より狭い場合は，それらの要求帯域幅を利用できる．また，余剰帯域幅は，要求帯域幅が満たされないフローに対し，それらに付与された優先度の割合で再割当てされる．一方，要求帯域幅の総和が出力帯域幅よりも広い場合は，その瞬間バックログ状態にあるフローの総和に対する，各フローの要求帯域の割合分を利用可能である．

1.7.2 CBWFQ

CBWFQ とは、WFQ をクラス単位で動作するように拡張したパケットスケジューラである。CBWFQ では優先度やアドレス単位でフローをクラスに束ねる。そして、クラスに対して指定された帯域幅を確保できるよう、WFQ と同様にパケットの転送順序を制御する。余剰帯域は、フローの存在するクラスに、最低保証帯域幅の割合で再割当てされる。

1.7.3 WRED

WRED は、ふくそう回避アルゴリズムである RED[39] を拡張したものであり、廃棄優先度ごとに相対的な廃棄処理が可能である。WRED では、優先度ごとに二つの閾値 (min_{th} , max_{th}) と二つのパラメータ (P_d , α) を設ける。

まず、パケットが到着するごとに、現在の待ち行列長 q を用いて、平均待ち行列長 avr を次式により更新する。

$$avr \leftarrow (1 - \alpha)avr + \alpha q \quad (1.3)$$

そして、 avr と閾値を比較し、そのパケットの廃棄確率 $P(avr)$ を次式により決定する。

$$P(avr) = \begin{cases} 0 & , avr \leq min_{th} \\ \frac{avr - min_{th}}{P_d(max_{th} - min_{th})} & , min_{th} < avr < max_{th} \\ 1 & , max_{th} \leq avr \end{cases} \quad (1.4)$$

$avr \leq min_{th}$ における廃棄をテイルドロップと呼び、 $min_{th} < avr < max_{th}$ におけるそれをランダムドロップと呼ぶ。

複数の廃棄優先度を持つ場合は、図 1.5 のようになる。

1.7.4 PQ

PQ は待ち行列の優先度に基づいて、パケットを転送するスケジューラである。出力インタフェースがふくそうしている場合、最も優先度の高い待ち行列のパケットが転送される。最も優先度の高い待ち行列が空になった場合に、次に優先度の高い待ち行列のパケットが転送される。

高い優先度の待ち行列に割り当てられたトラヒックは、遅延や遅延揺らぎが少なく伝送される。そのため、音声通話などのトラヒックが PQ の高い優先度によって伝送されることが多い。一方、優先度の高い待ち行列が空にならないと次の待ち行列が処理されないため、ビデオのような広帯域のトラヒックの伝送には不向きである。

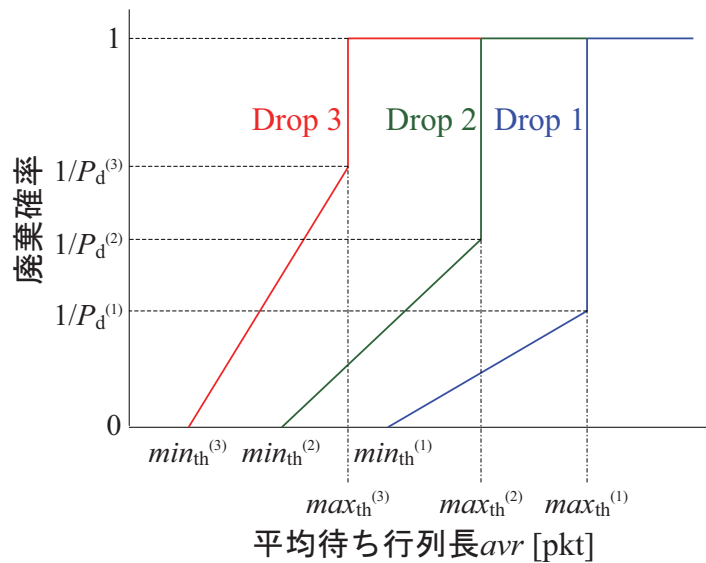


図 1.5: 平均待ち行列長 avr に対する廃棄優先度ごとの廃棄確率

1.8 日本における NGN

次世代インターネットとして NGN がサービスされていることは 1.1 節で述べた．本節では，日本における NGN の実例として，一般サービス開始前に公開されていた体験ショールームと，現在サービスを行っている NTT ぷららの IPTV サービス “ひかり TV” [40] を略説する．

1.8.1 ショールーム

NTT は 2006 年 12 月に NTT グループが開始する NGN フィールドトライアルを紹介するショールーム “NOTE” (NGN Open Trial Exhibition) を開設した．これは，企業や一般ユーザに広く NGN を知ってもらうために開設されたものである．ショールームにて展示されていた内容の一部を紹介する．

ハイビジョン映像コミュニケーション これは遠隔地にいる相手が等身大で表示されるテレビ会議システムである．65 インチのディスプレイと 3 台の高精細カメラ，H.264 コーデック装置を利用する．15 Mb/s の帯域を必要とするが，NGN の QoS 制御により，安定した品質を得られる．実際にその場にいるような高臨場感を実現でき，場の空気を共有することが可能である．

ハイビジョン映像通信と電子カルテ NGN ではハイビジョン品質の映像通信を行えるため，遠隔地間の病理診断に補助的に利用することが可能である．また，顕微鏡などを正確に遠隔操作し，摘出サンプルを高精細な動画像で見るという一連の診察を単一の NGN ネットワークで行うことができる．さらに，NGN のセキュア機能により，電子カルテの送受信も可能である．

広域イーサネットサービス 企業向けには、広域イーサネットサービスがある。これは、複数の拠点を経由して最高 10 Gb/s で接続し、アプリケーション毎に保証する QoS を設定することができる。上述のハイビジョン映像コミュニケーションなどで利用する。転送制御方式としては DiffServ を想定し、高品質を要求するものには EF サービスを、中程度の品質を要求するものには AF サービスを割り当てることが推奨されている。

1.8.2 IPTV サービス

“ひかり TV” は、NGN に対応する新しい IPTV サービスとして、2008 年 3 月にサービスを開始した。2009 年 2 月現在、放送型のテレビサービスは 76ch、VOD 型のビデオサービスは 10,000 タイトル以上、カラオケサービスは 13,000 曲以上提供している。また、2008 年 5 月からは、地デジ放送 IP 再送信を一部地域で開始し、2008 年 12 月からは NHK オンデマンドサービスの利用が可能となった。

地デジ IP 再送信の受信には NGN 網（商品名：フレッツ光ネクスト）への加入が前提である。テレビサービスと地デジ IP 再送信の配信には IPv6 マルチキャストが用いられ、ビデオサービスの配信には IPv6 ユニキャストが用いられる。

テレビサービス、ビデオサービス、地デジ IP 再送信システムでは、受信機でのエラーによる再生不良を避けるため、FEC (Forward Error Correction) が適用される。また、IP ネットワーク内で発生する遅延や遅延揺らぎを軽減するため、送出時にはトラヒックシェーピングが行われる [41]。

1.9 本論文の目的と構成

インターネットの主要な構成である IP ネットワークは、基本的に、QoS を保証しない。そのため、Web アクセスや音声・ビデオストリーミングなどのトラヒックが混在すると、QoS の劣化に敏感である音声・ビデオストリーミングサービスの QoE は容易に劣化する。そこで、音声・ビデオの QoE を確保するためには、複数のネットワーク転送機能階層で QoS の制御が必要となる。

本論文では、IP ネットワークにおいて、主に、音声・ビデオストリーミング伝送に関し、想定しうる運用形態を網羅的に扱っている。様々なネットワーク形態において、音声・ビデオストリーミング伝送サービス、及び、Web アクセスサービスの品質を制御し、それらのアプリケーションレベル QoS を評価する。また、主観評価により QoE を評価し、さらに、QoE を推定する手法を提案する。それらの結果から、QoE を向上させるネットワークの設計・運用指針を示すことを、本論文の目的とする。

第 2 章では、DiffServ における AF サービスを対象とする。音声・ビデオ、Web アクセス、及び、その他のトラヒックを分類し、実機による実験により優先度付与の方法がそれぞれのアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響を調査する。また、音声・ビデオを対象に、アプリケーションレベル QoS 制御技術である連続メディア同期制御を併

用した場合も検討する．そして，それぞれのアプリケーションを考慮した優先度付与の指針を示す．

第3章では，第2章で扱った DiffServ における要素技術であるパケットスケジューラに焦点を当て，スケジューラの配置を検討する．網羅的にネットワークシミュレーションを行い，音声・ビデオストリーミングに適したスケジューラの配置を，アプリケーションレベル QoS の有無を含めて議論する．さらに，主観評価を行い，高い QoE を得るためのスケジューラの配置を示す．

第4章では QoE の推定を扱う．QoE 推定方法の一つとして，代表回帰式を用いる推定方法を検討する．コンテンツをジャンルに基づいてタイプ分けし，各タイプに属するコンテンツから得られた回帰式によって，コンテンツ内の QoE を推定する方式を提案する．実機によるアプリケーションレベル QoS の測定に加え，主観評価による QoE を測定する．それらのマッピング結果から QoE の推定を試みる．そして，代表，個別の回帰式から得られた推定結果と測定値を比較することにより，提案手法の有効性を示す．

第2章 DiffServ AFサービスにおける 音声・ビデオストリーミング伝 送とWebアクセスに適した AFCP

2.1 まえがき

近年、インターネットを用いた多種多様のサービスが提供され、ユーザの幅広い需要に応えようとしている。しかし、現在、大部分のインターネットはベストエフォート型であるため、ネットワークのふくそうなどにより QoS は劣化する。例えば、音声やビデオなどの連続メディアをストリーム伝送するサービスでは、パケットの欠落や遅延、遅延の揺らぎなどによりメディアの時間構造が乱され、メディア出力の滑らかさが損なわれる。また、Web アクセスなどのように、主として離散メディアを転送するサービスでは、ファイルの転送に要する時間が増加する。そのため、QoS を高く保つための制御が必要となる。

インターネットでは転送動作が階層化されており、それぞれの階層において QoS 制御を考えることができる。筆者らは、これまでに、文献 [42]–[44] 等において、アプリケーションレベルにおける QoS 制御である連続メディア同期制御とネットワークレベルの QoS 制御である DiffServ を適用し、音声・ビデオストリーム伝送のアプリケーションレベル QoS を評価した。特に、文献 [42], [44] では、音声とビデオをどのように BA に割り当てれば良いかを明らかにしている。

一方、実際のネットワークでは、ストリーム伝送の他に、多種のアプリケーショントラフィックが同時に転送されている。そのため、それらのアプリケーションに関しても、その QoS パラメータを定義し、ネットワークの状況と各 QoS パラメータの関係を調査する必要がある。代表的なサービスとしては Web アクセスが挙げられる。Web アクセスによって生成される HTML ファイルのトラフィックは、音声・ビデオのそれとは異なり離散トラフィックである。このサービスでは、ファイルの転送時間や Web サーバの応答時間などがユーザの主観品質に影響を及ぼす。

Web アクセスに関するこれまでの研究においては、アプリケーションレベル QoS や QoE を対象とした検討が行われている [45]–[48]。例えば、文献 [45] では、WWW を用いた e コマースを想定し、Web ページの表示待ち時間とユーザに閲覧される Web ページ数の関係などを調査している。また、文献 [46] では、ネットワークのふくそう状態に応じて、転送される JPEG 静止画像の圧縮率を変更し、圧縮率がファイルの転送遅延や

帯域幅に及ぼす影響を測定している．しかし，これらは，Web アクセスのみを対象としており，同時に転送される他のアプリケーションの QoS との関係は考慮していない．

そこで，本章では，Web アクセスと音声・ビデオストリーミング伝送の両方のサービスに焦点を合わせる．筆者らは，すでに，AF サービスにおいてこれらのサービスを同時に提供する場合，HTML フローの AF 機能が両方のアプリケーションレベル QoS にどのような影響を及ぼすかを，ボトルネックリンクに付加遅延を与えた状況下で調査している [49]．本章では，更に，HTML フローに異なる伝送遅延を与える場合についても実験による検討を行う．

以下，2.2 節では，実験システム及び実験方法を示す．そして，2.3 節にて実験結果と考察を述べる．

2.2 評価実験

本節では，HTML フローと二組の音声・ビデオストリームを同時に転送し，Web アクセスと音声・ビデオストリーミング伝送サービスの両方のアプリケーションレベル QoS を測定する．

実験では，AF サービスを提供するために Cisco 社製のルータを用い，廃棄制御に WRED を，スケジューリングには CBWFQ を用いる．

2.2.1 システム構成

実験は 2 種類行う．一つ目は，ネットワークふくそうが各サービスのアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響を調査するために，同時に転送される UDP 負荷データの帯域幅を変化させる測定を行う．二つ目は，ネットワークの広域性の影響を調査するため，Web アクセスに対して付加遅延を付与した場合の測定を行う．

UDP 負荷データの影響測定

実験は図 2.1 に示されるシステム構成で行われる．6 台のワークステーション (WS) と 4 台の IBM PC/AT 互換機 (PC) を，4 台のルータからなるネットワークに接続する．

ルータ 1 からルータ 3 は Cisco 2611，ルータ 4 は Cisco 2514 である．搭載メモリ量は，ルータ 1，3，4 では 2MB であり，ルータ 2 では 32MB である．また，OS のバージョンは，ルータ 1 から 3 では IOS 12.0(7)T，ルータ 4 では IOS 11.2 である．ルータ間の伝送速度は 2Mb/s としている．それ以外は，Ethernet (10BASE-T，半二重) により接続されている．

WS1 と WS2 は Sun Ultra 2 であり，WS3 から WS6 は Sun Ultra 1 である．WS1，WS2，WS5 及び WS6 は，JPEG ビデオボード (Parallax Graphics 社製 Power Video) を搭載し，ハードウェアで JPEG ビデオのエンコードとデコードが可能である．WS1 と WS2 には，CPU に Ultra SPARC (200MHz) を使用し，128MB のメモリが搭載されている．WS5 と WS6 は，Ultra SPARC (143MHz) の CPU と 64MB のメモリを持つ．

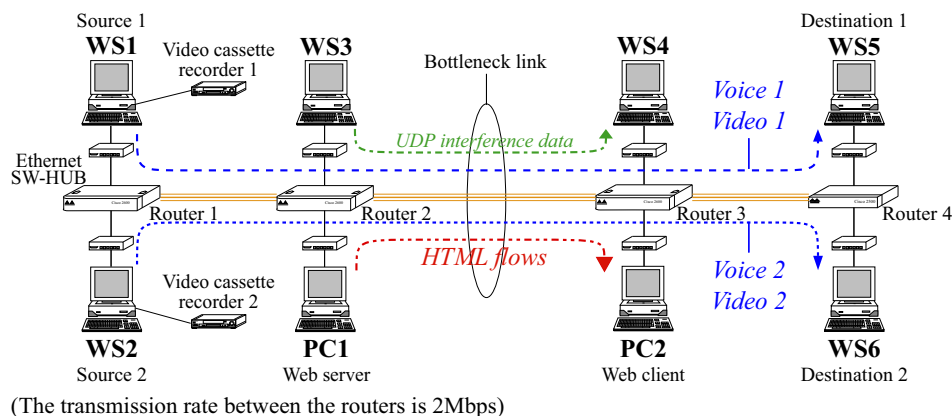


図 2.1: 実験システム (UDP 負荷データの影響測定)

表 2.1: Web サーバから取得されるファイルの構成

file name	size [bytes]	frequency
file500.html	500	0.35
file5k.html	5,125	0.5
file50k.html	51,250	0.14
file500k.html	512,500	0.009
file5m.html	5,248,000	0.001

PC1 は, Celeron (433MHz) の CPU, 128MB のメモリを搭載する. PC2 は, PentiumII (400MHz) の CPU と 384MB のメモリを持つ.

実験においては, HTML フローは PC1 から PC2 に転送される. このフローの生成には, WebStone 2.5[50] を用いる. WebStone は, Web サーバ評価のためのアプリケーションであり, 測定対象の Web サーバから連続的にファイルを取得する. WebStone は, 起動されると Web クライアントとなる子プロセスを指定された数だけ生成する. これらの子プロセスは, 互いに独立して Web サーバから指定されたファイルを取得する. 取得には HTTP 1.0 GET リクエスト [51] を用いているため, 1 ファイル取得するごとにその TCP コネクションを解放する. 取得するファイルの構成は表 2.1 に示される. これは, WebStone と共に配布されている filelist.standard と同じ内容である. 例えば, 5 kbyte の HTML ファイル (ファイル名 file5k.html) は 0.5 の確率で取得される. 生成される子プロセスの数は 4 とする. すなわち, 最大 4 個の TCP コネクションが同時に生成される. なお, PC1 と PC2 に実装されているふくそう制御アルゴリズムは NewReno[52] であり, ウィンドウサイズは送受信ともに 16 kB である. これらのパケットに対する DSCP のマーキングは, パケットがルータ 2 に流入する際, ルータ 2 によって行われる.

音声・ビデオストリーム伝送サービスに関しては, AF サービスではフロー間に転送品質の差を持たせることができるよう, 2 組の音声・ビデオストリームを転送する. WS1 から WS5 へは音声 1 及びビデオ 1 が, WS2 から WS6 へは音声 2 及びビデオ 2 が転送さ

表 2.2: 音声とビデオの仕様

	音声 1, 音声 2	ビデオ 1	ビデオ 2
符号化方式	ITU-T G.711 μ -law	JPEG	
表示サイズ [ピクセル]	—	320 × 240	
MU サイズ [byte]	400 (一定)	3253 (平均)	3247 (平均)
平均 MU レ - ト [MU/s]	20.0		
平均 MU 間隔 [ms]	50.0		
ビットレ - ト [kb/s]	64.0 (一定)	520.7 (平均)	519.6 (平均)
実験時間 [s]	120		

れる．WS1 と WS2 は，それぞれに接続されたビデオデッキから取り込んだ音声とビデオを，リアルタイムに符号化する^(注 1)．そして，音声では 400 サンプル，ビデオでは 1 ビデオフレームを 1MU とし，それに DSCP を付与し，それぞれ WS5 と WS6 へ送信する．トランスポートプロトコルには RTP[53]/UDP を用い，音声とビデオは別ストリームとして転送される．各メディアの仕様は表 2.2 の通りである．

ルータ 2 では，WS1，WS2，WS3，及び PC1 から送信されるパケットの DSCP を監視する．そして，AF PHB に基づいたクラス分けをし，廃棄制御，スケジューリングを行い，ルータ 3 へ転送する．

WS5 と WS6 は，音声とビデオを受信し，拡張された VTR (Virtual-Time Rendering) メディア同期アルゴリズム [54] に基づいてそれらを出力する．初期バッファリング時間 J_{\max} は 100 ms，最大許容遅延 Δ_{al} は 400 ms とする．これら以外の閾値とパラメータは，文献 [43] と同じ値である．

また，これらのフローと同時に，WS3 から WS4 に UDP フローが送信される．これは，指数分布に従う間隔で送信される 1,472 バイトの UDP データグラムである．このフローは，多種のデータの転送が多重化されたものを模擬している．なお，このフローに対する DSCP のマーキングは，WS3 において送信時に行われる．

ルータ 2 に実装された AF PHB は，表 2.3 の通りである．このとき， P_d と α の値は，それぞれ 3 と 2^{-9} である． P_d の値は予備実験にて得られた結果を参考にして決定した．また， α に関しては，実験で用いたルータの初期設定値を用いている．

(注 1) 各測定において，発生するトラフィックの特性は，ほぼ同一であることが望ましい．本実験では 2 種類のメディアソースを用意し，すべての測定でほぼ同じシーンが転送されるようにした．

表 2.3: ルータ 2 に実装された AF PHB

			Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
割り当て帯域 [kb/s]			200	400	600	800
Drop 1	min_{th}	24	AF11	AF21	AF31	AF41
	max_{th}	48	001010	010010	011010	100010
Drop 2	min_{th}	16	AF12	AF22	AF32	AF42
	max_{th}	40	001100	010100	011100	100100
Drop 3	min_{th}	8	AF13	AF23	AF33	AF43
	max_{th}	32	001110	010110	011110	100110

注) 上段の値は AFDP を, 下段の値は DSCP を表す.

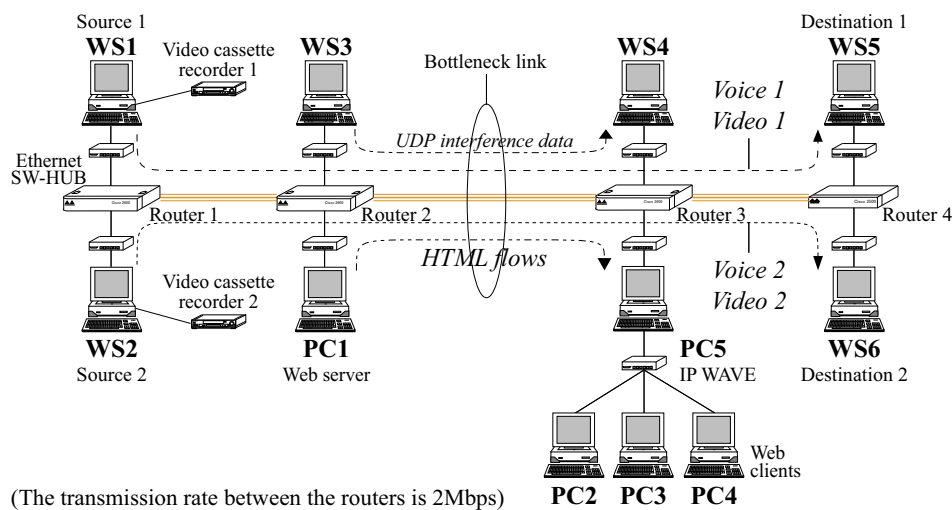


図 2.2: 実験システム (付加遅延の影響測定)

付加遅延の影響測定

ネットワーク遅延と各サービスのアプリケーションレベル QoS の関係は, 図 2.2 に示される環境を用いて調査する. 前節の環境と異なるのは, PC2 の位置が変更され, PC3 から PC5 が追加されている点である.

PC5 には, Adtech 社の回線障害エミュレータである IP WAVE がインストールされている. 本実験ではこれにより, 送受信端末対ごとにそれらのパケットに対して異なる固定遅延を与える. そして, PC3 と PC4 は, PC2 と同様に WebStone が準備された PC/AT 互換機であり, Web クライアントとして動作する.

2.2.2 実験方法

実験では, 表 2.4 に示す 6 通りの場合 (case 1 ~ case 6) の各々において, HTML フローと二組の音声とビデオストリーム, そして, UDP 負荷データを同時に転送する. 表中の Load は UDP 負荷データを表す.

表 2.4: 比較対象

case 1

	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
Drop 1	HTML	200	Voice 1 [64]	400	Video 1 [520]	600	Load	800
Drop 2			Voice 2 [64]		Video 2 [519]			
Drop 3								

case 2

	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
Drop 1		0	Voice 1 [64]	444	Video 1 [520]	666	Load	889
Drop 2			Voice 2 [64]		Video 2 [519]			
Drop 3			HTML					

case 3

	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
Drop 1		0	Voice 1 [64]	444	Video 1 [520]	666	Load	889
Drop 2			Voice 2 [64]		Video 2 [519]			
Drop 3					HTML			

case 4

	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
Drop 1		0	HTML	444		666	Load	889
Drop 2			Voice 1 [64]		Video 1 [520]			
Drop 3			Voice 2 [64]		Video 2 [519]			

case 5

	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
Drop 1		0		444	HTML	666	Load	889
Drop 2			Voice 1 [64]		Video 1 [520]			
Drop 3			Voice 2 [64]		Video 2 [519]			

case 6

	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
Drop 1		0	Voice 1 [64]	444	Video 1 [520]	666	Load, HTML	889
Drop 2			Voice 2 [64]		Video 2 [519]			
Drop 3								

注) [] 内は各メディアが必要とする帯域である．各クラス内の右側の列の数字は，割り当てられる帯域の目安である．網掛部は TCP による負荷データの割り当てを示す．

各フローにどの AFCP を付与するかには多数の組み合わせがある．音声・ビデオのストリーミング伝送サービスに関しては，筆者らはこれまでに，文献 [42] において，メディア同期と UDP 負荷データのスループットの観点から，音声は音声同士，ビデオはビデオ同士を同じクラスにすることが良いことを明らかにしている．また，負荷データのトランスポートプロトコルを TCP に変更した場合も同様の結論が得られることを，別途実験により確認している．そのため，本報告ではこれに基づく組み合わせを用いる．

本報告の実験では，イントラネットのように，転送されるフローの仕様が事前にある程度分かるようなネットワークを模擬することを考える．これは，インターネットのコア部などの大規模なネットワークでは，表 2.4 のように，音声とビデオを異なる BA に割り当てるのは現実的ではないと考えられるためである．すなわち，RFC が推奨する AF PHB では高々 12 個の BA しか扱うことができず，例えば，本実験のように 1 種類

のアプリケーションで4個のBA^(注2)を利用すると、全体の1/3のBAを使用することになる。そのため、ネットワークの規模が大きくなり、優先して転送したいトラフィックの種類が増えた場合には、BAの数が不足することになる。逆に、アクセスネットワーク等の小規模ネットワークでは、DiffServを用いず、スケジューリング等による工夫のみで対処できると考えられる。

表2.3, 2.4では、2種類の音声をClass 2に割り当てた際に、音声の要求帯域が満たされるように設定されている。これは、音声の帯域が狭いため、それらの帯域が容易に保証されると考えられるためである。一方、2種類のビデオをClass 3に割り当てた場合は、それらの要求帯域が満たされないようになっている。これは、ビデオの帯域が広いから、割り当て帯域内には収まらず、AFサービスの特徴である要求帯域の一部のみが保証される場合を想定している。

ネットワーク負荷がWebアクセスと音声・ビデオトリーミング伝送サービスのアプリケーションレベルQoSに及ぼす影響を測定する実験では、WS3からWS4に送信されるUDP平均負荷を0から約1.0 Mb/sまで変化させ、それぞれの場合においてWebアクセス、及び、音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベルQoSを測定する。

HTMLフローに付加される遅延が各サービスに及ぼす影響の測定では、WS3からWS4に送信されるUDPを約0.6 Mb/sとし、PC5上のIP WAVEによってPC1とPC2、PC3、PC4間に伝搬遅延を付与する。それぞれの遅延量を d_2, d_3, d_4 とすると、付与する遅延量は次の式の通りである。実験では、 $m = 0, 1, \dots, 4$ の場合におけるアプリケーションレベルQoSを測定する。

$$(d_2 \ d_3 \ d_4) = \begin{cases} (0 \ 0 \ 0) & , m = 0 \\ (50(m-1) \ 50m \ 50(m+1)) & , 1 \leq m \leq 4 \end{cases} \quad (2.1)$$

2.3 実験結果と考察

以下、2.3.1節ではUDPフローによる平均負荷帯域幅を変更した場合の実験結果と考察を示す。次に、2.3.2節にてWebアクセスに対する付加遅延量を変更した場合について実験結果と考察を述べる。

2.3.1 UDP 付加データの影響

WebアクセスのアプリケーションレベルQoSパラメータとして、図2.3と図2.4に、それぞれ、UDP平均負荷(UDP average load)に対する平均取得時間(average retrieval time)とHTMLスループット(throughput)を示す。また、図2.5には、ファイルサイズ5,125バイトのHTMLファイルの転送ファイル数(number of transferred files)を示す。音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベルQoSに関しては、WS5で観測された値(音声1-ビデオ1)を示す。図2.6から図2.9に、それぞれ、音声1の出力間隔の変

(注2)本実験では、1組の音声-ビデオを転送するために二つのBAを用い、更に、それらに2段階の転送品質を提供することを想定する。そのため、計4つのBAを利用する。

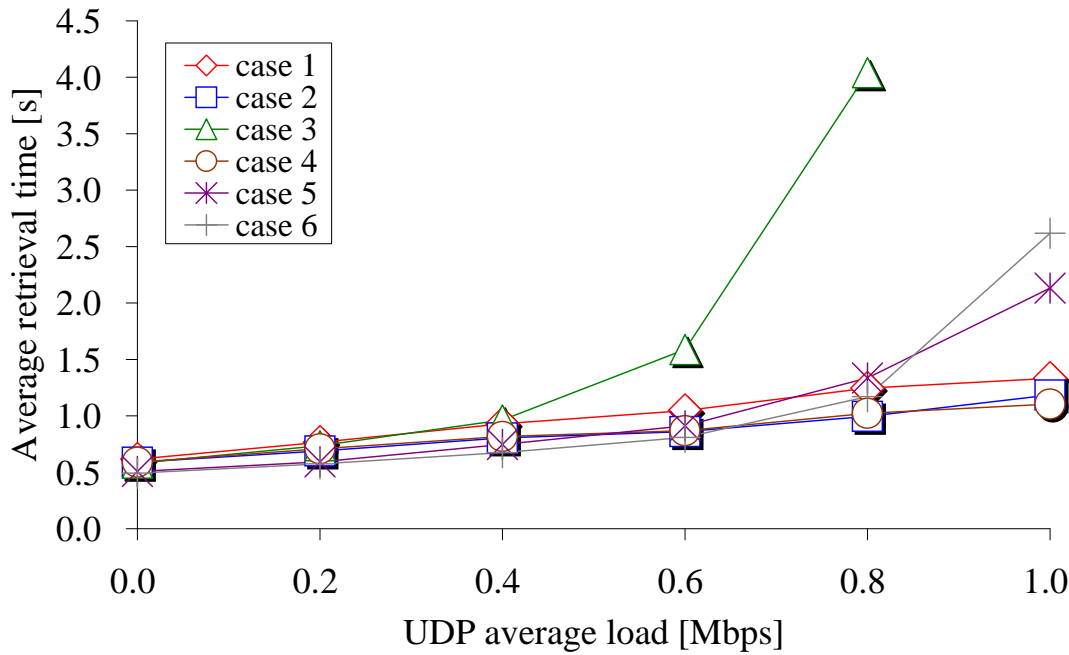


図 2.3: 平均取得時間

動係数 (coefficient of variation of output interval) , ビデオ 1 の出力間隔の変動係数 , ビデオ 1 の平均 MU レート (average MU rate) , 音声 1–ビデオ 1 のメディア間同期平均二乗誤差 (Mean square error of inter-stream synchronization) を示す .

まず , 表 2.1 に示される , 転送されたすべての HTML ファイルを対象とした測定結果と考察を述べる . 図 2.3 では , 平均負荷約 0.8 Mb/s 以上の領域において , case 1 , 2 , 4 の値が他の値よりも小さい . 一方 , case 3 の値は , 平均負荷約 0.2 Mb/s 以上の領域で最も大きい . case 1 , 2 , 4 は , HTML フローが属する Class に余剰帯域がある . そのため , 高負荷時においても , HTML フローの一部の帯域幅が保証され , Web アクセスのアプリケーションレベル QoS は他の case の場合のそれよりも高くなる . 逆に , case 3 では , HTML フローがビデオと同じ Class 3 に割り当てられており , かつ , Class 3 の最低保証する帯域幅が 2 組のビデオの必要帯域幅よりも狭い . さらに , HTML フローの廃棄優先度がビデオのそれよりも高い . そのため , HTML フローのパケットの欠落が著しく多く , TCP による再送が多発する . その結果 , HTML ファイルの転送時間が大幅に増加する . しかし , 平均負荷約 0.8 Mb/s 時においても , 平均取得時間が 5 秒以下であり , 主観的には許容できる範囲内といえる [45] .

図 2.4 に示される HTML スループットにおいても , 平均負荷約 0.8 Mb/s 以上の高負荷時には , case 1 , 2 , 4 の値が他のそれより大きく , これらの case のアプリケーションレベル QoS は高いと言える . これは , 上述した理由による .

ファイルサイズ 5,125 バイトの HTML ファイルの転送ファイル数 (図 2.5) からは , 図 2.3 と図 2.4 と同様に , 高負荷時における case 1 , 2 , 4 の値が大きいことが分かる . 逆に , 平均負荷 0.2 Mb/s 以上のにおける case 3 の値は最も小さく , 特に , 平均負荷約 1.0 Mb/s 時における値は 0 であった .

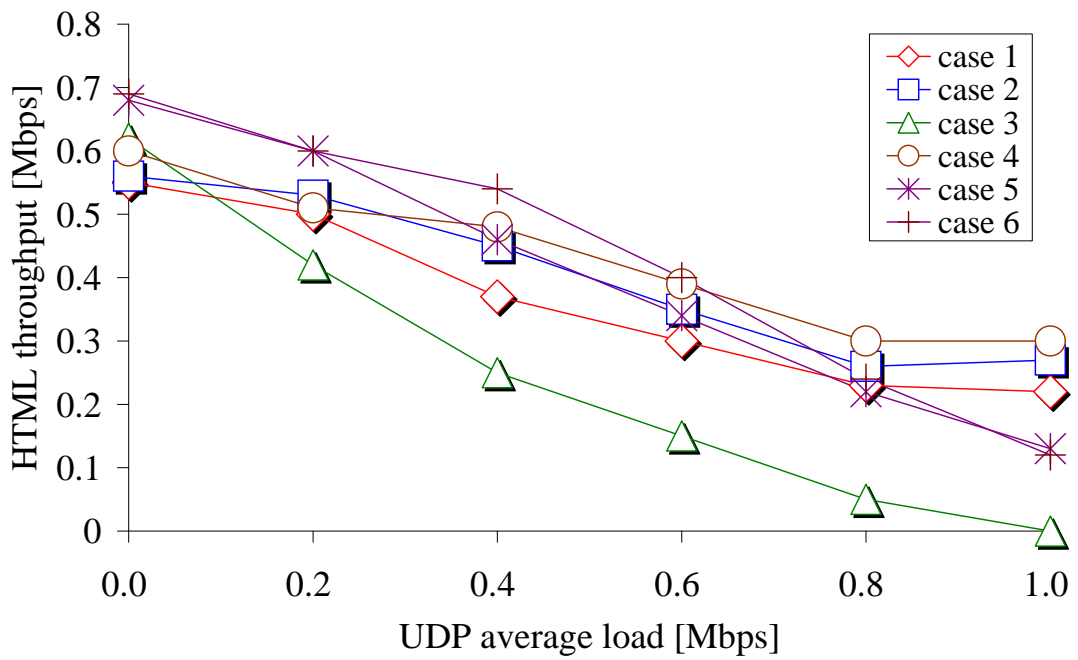


図 2.4: HTML スループット

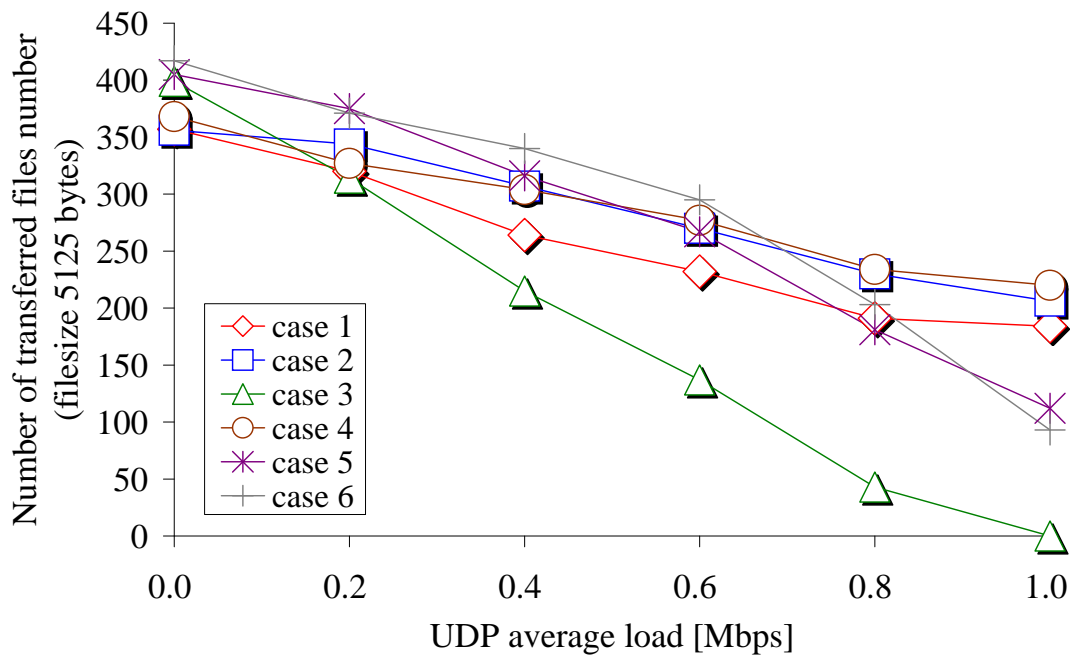


図 2.5: 転送ファイル数 (ファイルサイズ 5,125 バイト)

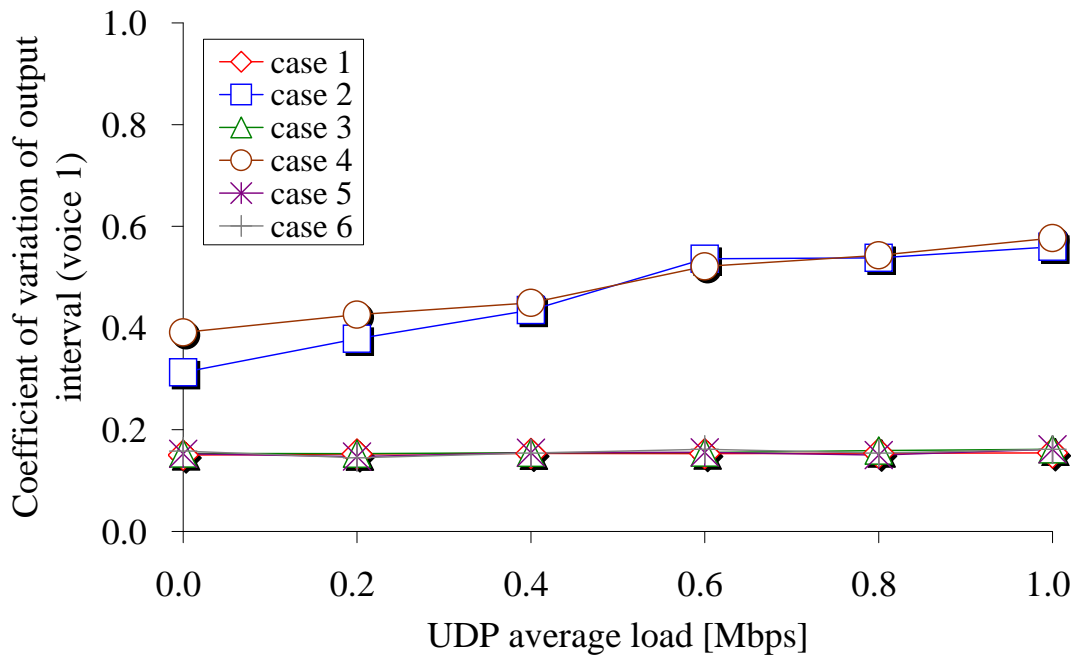


図 2.6: 出力間隔の変動係数（音声 1）

次に、音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベル QoS に注目する．図 2.6 からは、case 2 と 4 の値が大きく、これらの音声のメディア内同期品質が劣化していることが分かる．case 2 と 4 では、音声と HTML フローを同じクラスに割り当てられているため、音声の転送が HTML フローによって乱されるためである．

一方、図 2.7 に示されるように、ビデオのメディア内同期品質に関しては、測定領域全体において、case 2、4～6 の値が大きく、これらのメディア内同期品質が劣化していることが分かる．case 2 と 4 に関しては、本実験で用いた VTR メディア同期制御が、音声とビデオを密結合 [23] しているため、音声のメディア内同期品質の劣化がビデオの同期品質に影響を及ぼすためである．case 5 では、HTML フローとビデオが同じ Class に割り当てられ、かつ、ビデオの廃棄優先度が HTML フローに比べて高い．そのため、ビデオ MU の欠落が生じ、メディア内品質が劣化する．case 6 は、HTML フローと UDP 負荷データが Class 4 に割り当てられる．Class 4 は AF PHB における最低保証帯域幅が最も広いため、Class 2 の余剰帯域の多くは、Class 4 にて転送される HTML フローと UDP 負荷に奪われる．そのため、ビデオのメディア内同期品質は劣化する．

case 5 と 6 については、図 2.8 に示されるビデオ 1 の平均 MU レートが上述の考察を裏付ける．図 2.8 におけるこれら二つの case の値は、平均負荷約 0.4 Mb/s 以下の低負荷領域においても他の case よりも小さい．一方、この図において、測定を行った全領域において case 3 の値が大きい．また、ビデオ 1 の変動係数（図 2.7）においても、平均負荷約 0.2 Mb/s 以上の領域において、case 3 の値が最も小さく、それぞれ、case 3 の場合のビデオのメディア内同期品質が高いことを表している．これは、Web アクセスのアプリケーションレベル QoS の場合とは逆であり、音声・ビデオ伝送のそれとトレードオフの関係であることを示している．

メディア間同期品質に関しては、図 2.9 に示されるメディア間同期平均二乗誤差を評

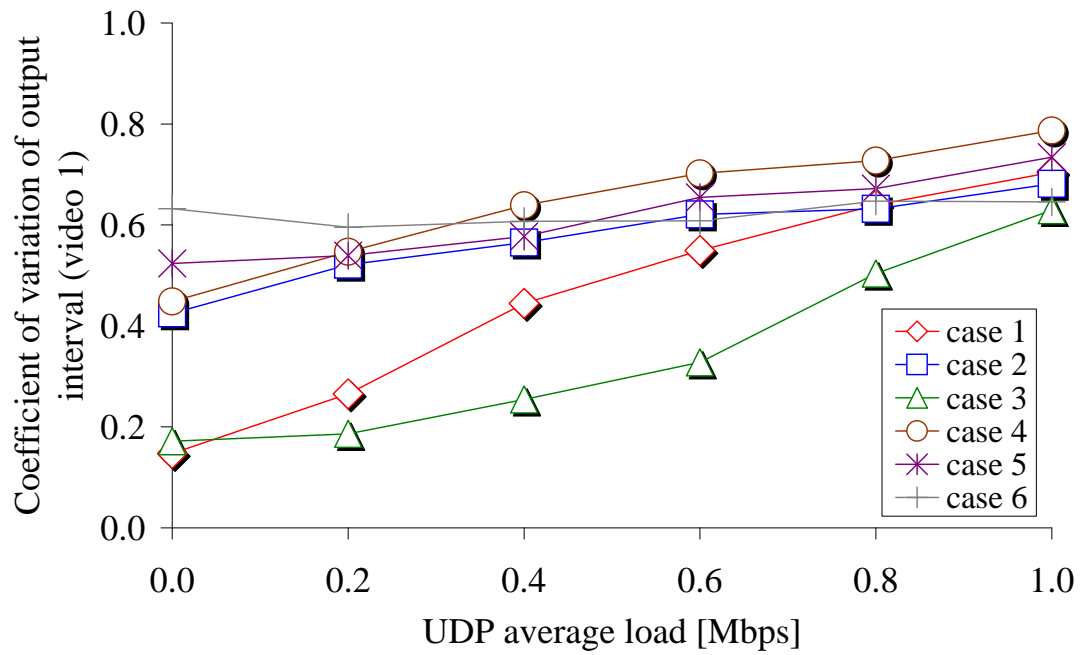


図 2.7: 出力間隔の変動係数 (ビデオ 1)

価する．Web アクセスのアプリケーションレベル QoS の高い case 1, 2, 4 に注目すると，case 1 と 2 の値は平均負荷約 0.6 Mb/s 以上の領域で $25,600 \text{ ms}^2$ を超え，メディア間同期品質は劣化していることが分かる．一方，case 4 の値は小さいが，これは音声とビデオが同じように劣化しているためであり，主観的には良好でなかった．

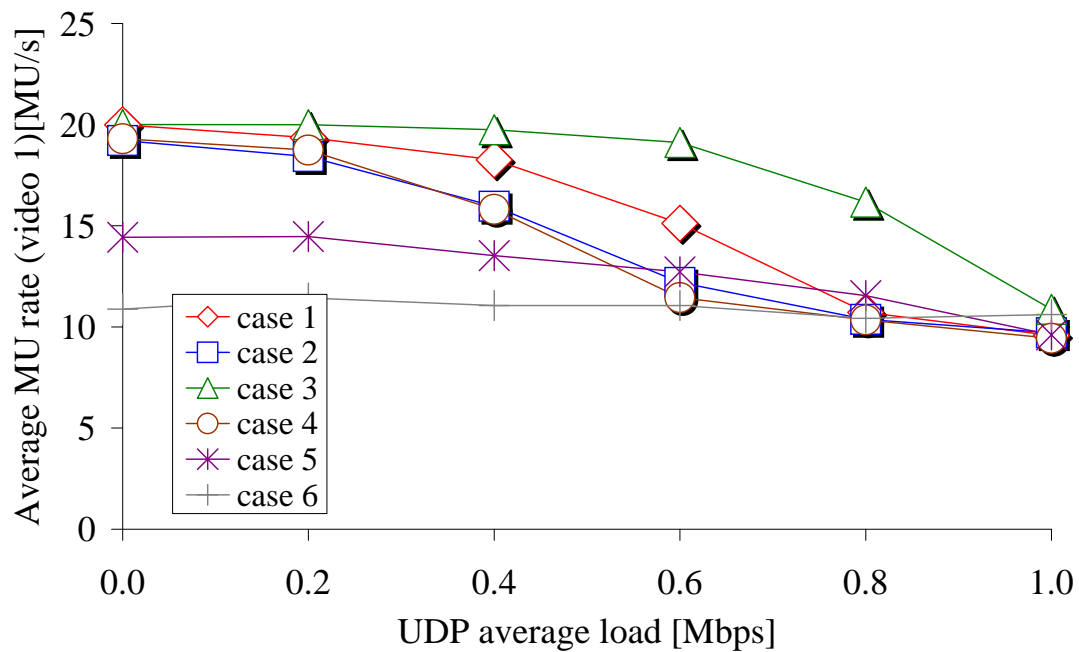


図 2.8: 平均 MU レート (ビデオ 1)

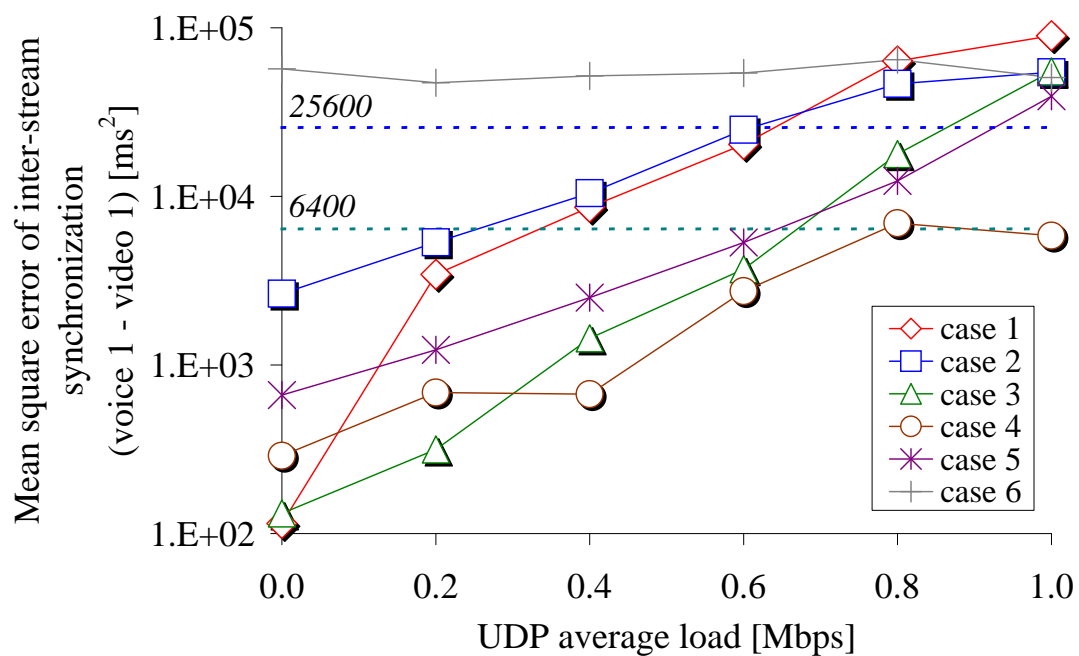


図 2.9: メディア間同期平均二乗誤差 (音声 1-ビデオ 1)

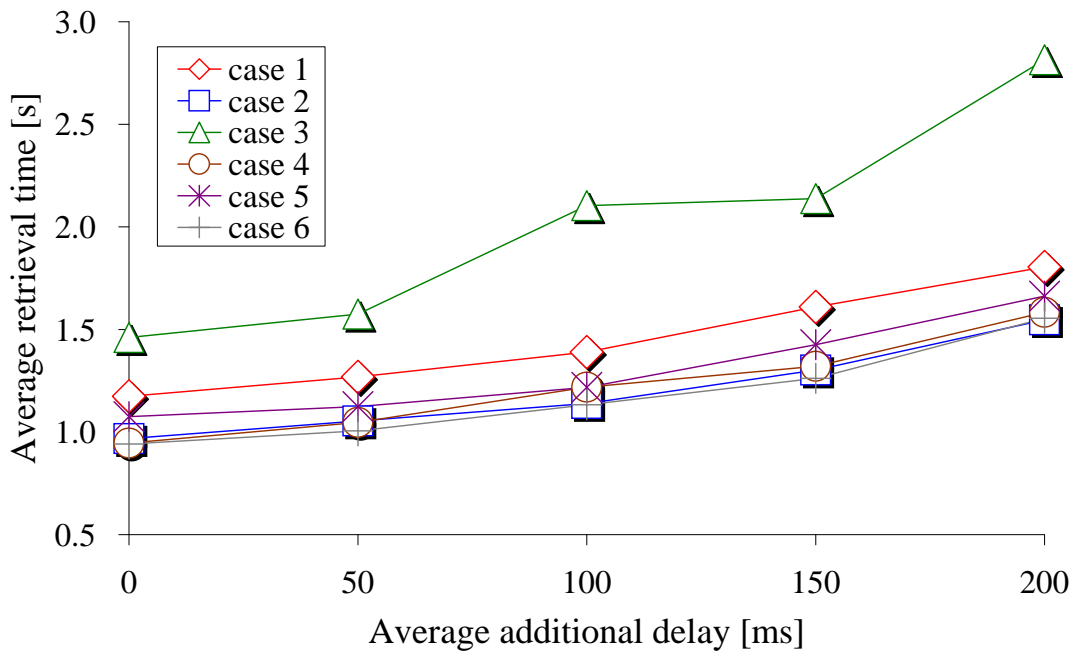


図 2.10: 平均取得時間

2.3.2 付加遅延の影響

本節では，Web アクセスへの付加遅延量を変更した場合の実験結果を示す．以下に示す Web アクセスのアプリケーションレベル QoS パラメータは，PC3 で観測されたものである．音声・ビデオ伝送に関しては，WS5 で観測された値（音声 1–ビデオ 1）を示す．

図 2.10 と図 2.11 には，それぞれ，平均付加遅延（average additional delay）に対する平均取得時間と HTML スループットを示す．また，図 2.12 にはファイルサイズ 5,125 バイトの HTML ファイルの平均転送時間を示す．図 2.12 には，95 %信頼区間も付記されている．

音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベル QoS に関しては，図 2.13 から図 2.16 に，それぞれ，音声 1 の出力間隔の変動係数，ビデオ 1 の出力間隔の変動係数，ビデオ 1 の平均 MU レート，音声 1–ビデオ 1 のメディア間同期平均二乗誤差を示す．

まず，HTML ファイル全体の測定結果を示す．図 2.10 の平均取得時間では，全測定領域において case 3 の値が他の case より大きい．さらに，その増加の度合いは，他のケースのそれよりも急峻である．case 3 では，先述したように HTML フローのパケット欠落が多くなるため，TCP におけるスライドウィンドウのサイズが広がらない．さらに，伝搬遅延が大きい場合は，TCP におけるスロースタートからの立ち上がり速度が緩やかになるため，図 2.10 に示されるような結果が得られる．

HTML スループット（図 2.11）においても，case 3 の値が最も小さく，Web アクセスのアプリケーションレベル QoS が低いと言える．しかし，平均付加遅延が大きくなるに従い，case 間の差が小さくなっている．そのため，伝搬遅延が大きい場合には，どの case を適用しても大差ないと言える．

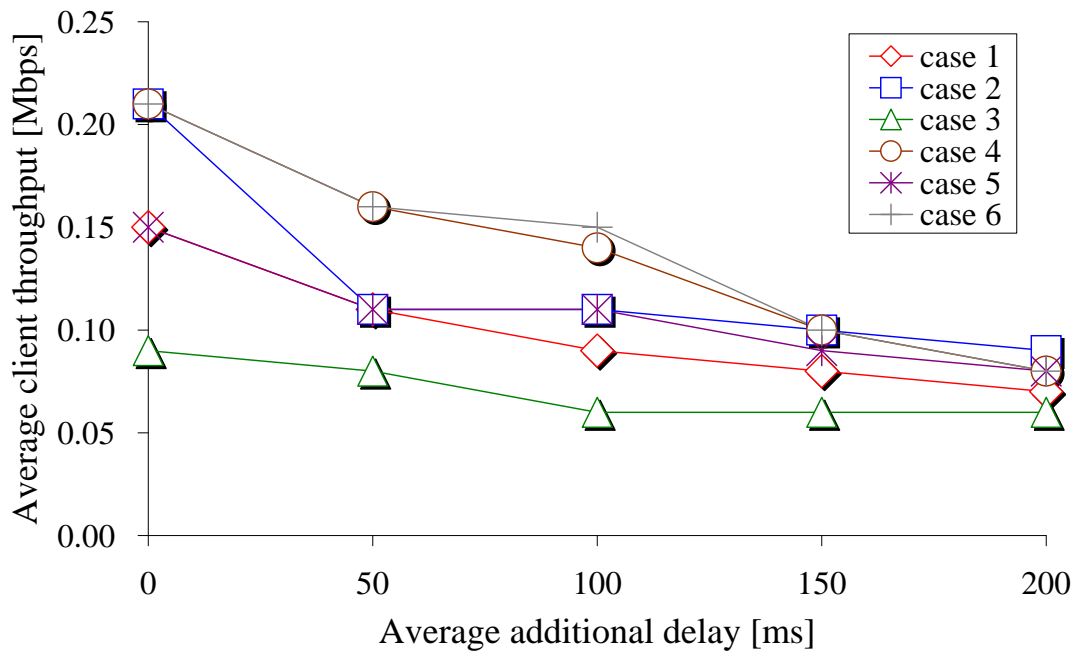


図 2.11: HTML スループット

次に、ファイルサイズが5,125 バイトのHTMLファイルに注目する．図 2.12 における平均転送時間では、HTML ファイル全体の平均取得時間（図 2.10）と同様の傾向が見られる．しかし、case 3 の場合は、転送時間の分散が大きいため、主観品質が劣化していると考えられる．

続いて、音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベル QoS に関する結果を述べる．図 2.13 の音声 1 の変動係数からは、2.3.1 節でも述べたように、case 2 と 4 の値が他の case より大きくなっていることが分かる．しかし、平均付加遅延が大きくなるにつれ、他の case の値との差が小さくなっている．これは、図 2.11 から分かるように、これらの case における HTML フローの占有する帯域幅が狭くなり、音声・ビデオが利用できる帯域幅が増加するためである．

図 2.14 に示されるビデオ 1 の変動係数においては、case 3 の値が平均付加遅延の値に依らず、小さな値を示している．つまり、case 3 のメディア内同期品質は HTML フローに影響されていないと言える．また、case 1 の値は case 3 の値に次いで小さい．そのため、メディア内同期品質の観点からは、case 1 の適用は case 3 の次の選択肢と言える．

ビデオ 1 の MU レート（図 2.15）においても、上述と同様の傾向が見られる．全測定領域において case 3 の値が最も大きく、逆に、平均付加遅延 100 ms 以下の領域では、case 6 の値が最も小さい．case 6 に次いで case 4 の値が小さくなっている．これは、先に示した HTML スループット（図 2.11）と逆の特性であることが分かる．

メディア間同期品質は、図 2.16 に示されるメディア間同期平均二乗誤差を用いて評価する．この図においては、case 3 と 5 の値が、全測定領域において $6,400 \text{ ms}^2$ より小さく、これらのメディア間同期品質が高いと言える．case 3 に関しては上述の通りであり、Web アクセスの QoS が犠牲となっているためである．case 5 は、ビデオと HTML

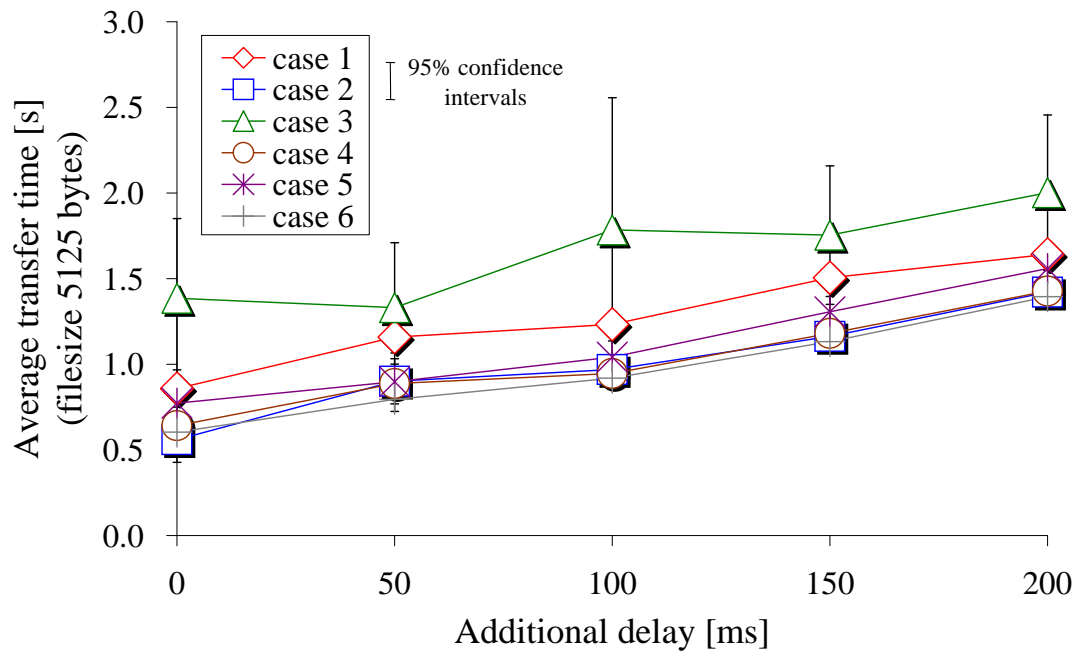


図 2.12: 平均転送時間 (ファイルサイズ 5,125 バイト)

フローを同じクラスに割り当て、HTML フローの廃棄優先度が低い場合である。そのため、ふくそう時には HTML フローのパケットよりもビデオ MU の方が欠落しやすくなり、ビデオ MU がルータ内の待ち行列に滞在する時間が短くなる。したがって、音声 MU とのメディア間同期品質が高く保たれ、このような結果が得られた。しかし、ビデオ MU の欠落は多く、主観的には良好ではなかった。

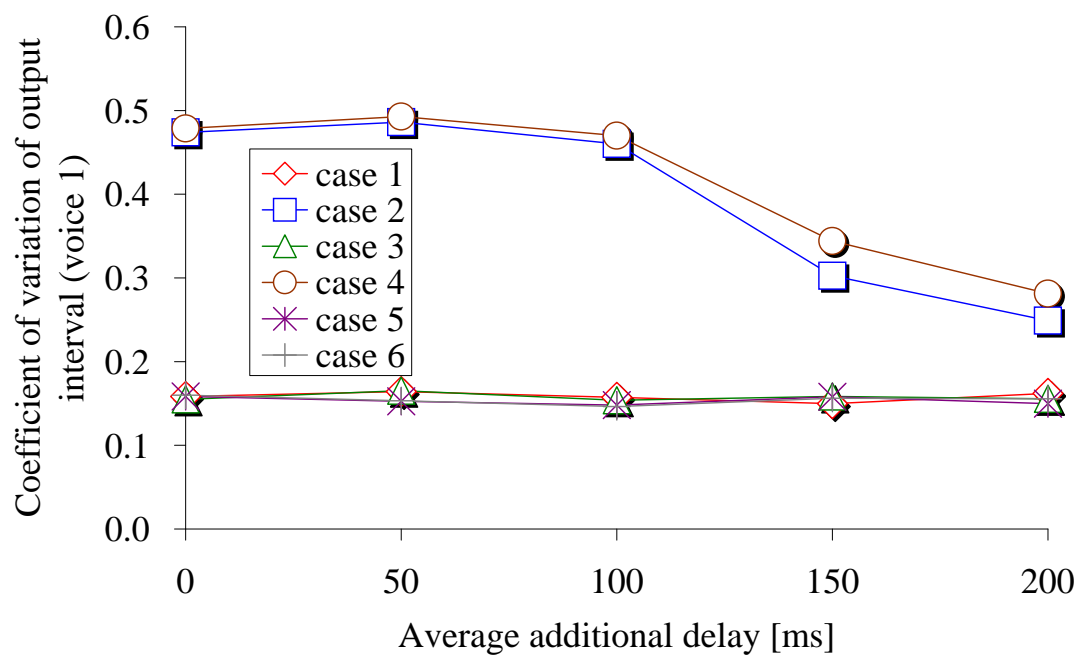


図 2.13: 出力間隔の変動係数（音声 1）

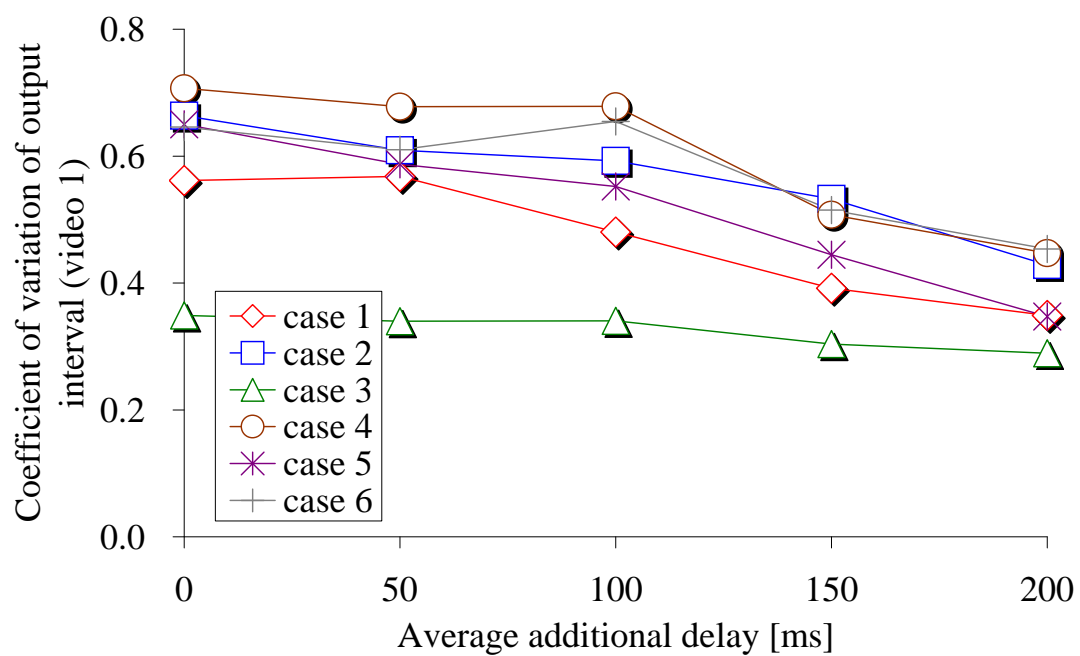


図 2.14: 出力間隔の変動係数（ビデオ 1）

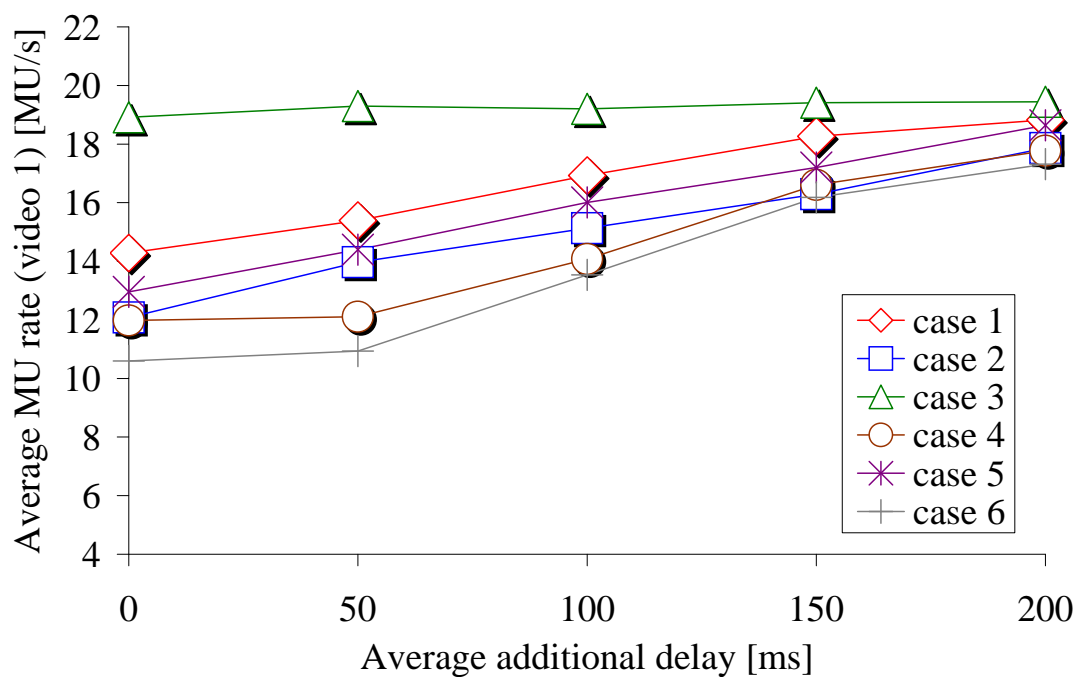


図 2.15: 平均 MU レート (ビデオ 1)

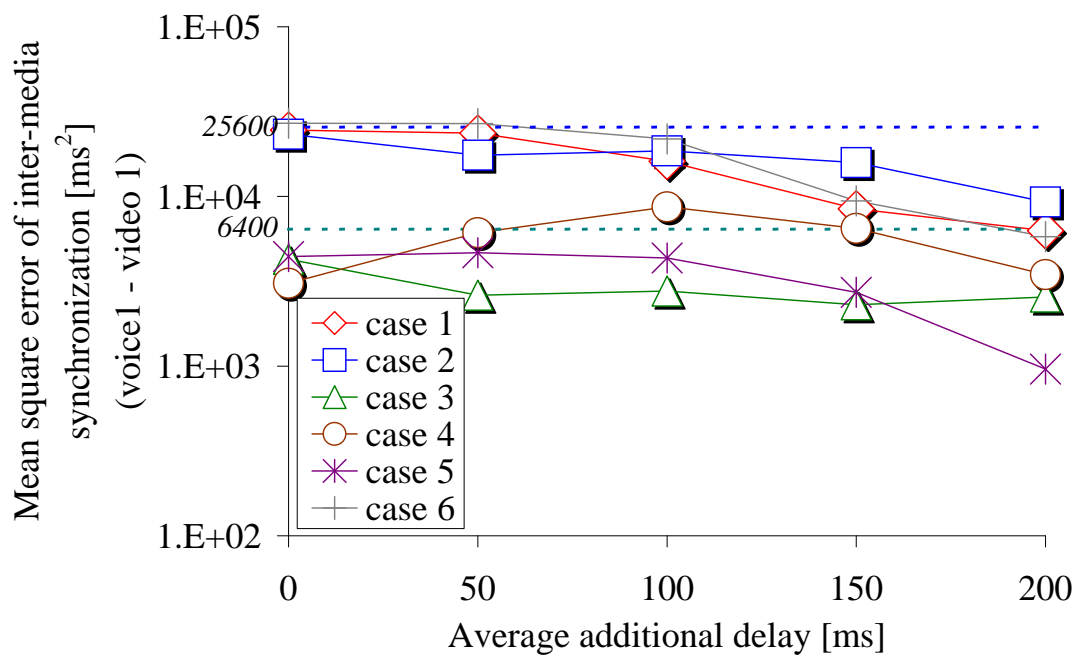


図 2.16: メディア間同期平均二乗誤差 (音声 1-ビデオ 1)

2.4 むすび

本章では、DiffServ の AF サービスを用い、Web アクセスと音声・ビデオ伝送サービスを提供する場合、Web アクセスに付与する AFCP がそれぞれのアプリケーションレベル QoS にどのような影響を及ぼすかを、ネットワーク負荷と付加遅延量を変更する実験により調査した。

得られた結果から、DiffServ ドメインを構築する際の指標は、次のようになる。Web アクセスのアプリケーションレベル QoS を重視した DiffServ ドメインを構築する場合には、少なくとも HTML フローの一部が転送保証されるように、すなわち、case 1, 2, 4 のように AFCP を設定すれば良い。一方、音声・ビデオストリーミングサービスを重視する場合は、Web アクセスのフローをビデオと同じ Class で転送し、その廃棄確率を音声・ビデオのそれよりも高く、すなわち、case 3 のように設定すれば良い。そして、これらのサービスのトレードオフの観点からは、case 1 のように Web アクセスを音声・ビデオと別の Class に設定し、Web アクセスの属する Class の最低保証帯域幅を音声・ビデオのそれよりも狭くする。

さらに、ネットワーク遅延が大きい場合、HTML フローの AFCP は音声・ビデオストリーミング伝送のアプリケーションレベル QoS を大きく左右させない結果が得られた。したがって、ネットワーク規模が大きく、エンド・ツー・エンドの遅延が大きくなる場合は、ストリーミング伝送サービスの観点からも、Web アクセスを重視した設計を行ってよいと言える。

本実験は、一定の帯域幅を保証するという AF サービスの特性を考慮し、それぞれのサービスが必要とする帯域幅が必ずしも満たされない条件下で測定を行った。しかし、実験結果から分かるように、メディアの必要帯域幅が AF PHB により確保されている場合（例えば、case 2 と 4 以外の音声）には、この限りではないと言える。

Web アクセスサービスに関しては、単一の HTML ファイルからなる Web ページを想定し、そのアプリケーションレベル QoS を調査した。しかし、実際の Web ページはいくつかのファイルから成り立つことが多いため、そのページ構造を含めた評価が必要である。さらに、Ajax (Asynchronous JavaScript + XML) などを使った Web ページは、複数のコネクションを生成し、非同期に通信を行う。そのため、トラヒックの特性は複雑になる。これらの評価方法の検討は今後の課題である。

第3章 音声・ビデオストリーミングIP 伝送のアプリケーションレベル QoSを向上させるWFQスケ ジューラの配置

3.1 まえがき

第2章では、Web アクセス、及び、音声・ビデオストリーミングサービスを対象に、ネットワークレベル QoS 制御の一つである DiffServ の AF サービスにおける AFCP の付与指針を明らかにした。本章では、DiffServ が QoS 制御のために使う要素技術の一つであるパケットスケジューラに焦点を当て、ネットワーク内でのパケットスケジューラの配置が音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベル QoS、及び、QoE に及ぼす影響を明らかにする。

QoS 制御には数多くの方法があるが、中でも、近年のネットワーク機器の高機能化・低価格化により実現されたルータの QoS 制御機能は、容易に利用可能な手段である。特に、ノード（リンク）レベル QoS 制御に相当するパケットスケジューラは、ノード単体で適用可能であり、実際にネットワーク機器の一部に適用されている。しかし、パケットスケジューラを持たないノードや、管理方針からパケットスケジューラを適用しないノードも存在する。そのため、エンド-エンド間のすべてのノードがパケットスケジューラを適用しているケースは稀である。

これまでのパケットスケジューラに関する研究は、トラヒックの構造を考慮していないものと、それを考慮しているものに大別できる。

トラヒックの構造を考慮していないものでは、既存のスケジューラの改良や、他の技術との組合せによって性能を向上させることを目的としたものが多い [55]–[58]。例えば、文献 [56] では、WFQ とバッファ管理機能を組み合わせ、必要とされるバッファサイズとリンク使用率のトレードオフを求めている。そして、少数の待ち行列によって動作する WFQ とバッファ管理機能の組合せによって高い QoS が実現されると述べている。しかし、これらの研究の多くは、スケジューラの性能を評価する際に、トラヒックの内容や構造を考慮せず、ネットワークレベル QoS を評価している。

一方、トラヒックの構造を考慮を行い、実際の音声やビデオを想定したトラヒックを転送し、スケジューラの評価を行っている研究には文献 [59], [60] などがある。文献 [59] では、瞬時的な帯域の公平性がユーザの主観品質の向上には必ずしも結びつかない点に注目し、少数のユーザの QoS を犠牲にすることにより、高い QoS を提供できるユー

ザ数を多く保つ制御を提案し、評価している。これらの評価には、ネットワークレベル QoS パラメータ、すなわち、IP パケットを単位としたパケット欠落率や遅延ジッタなどの尺度が用いられる。

ネットワークトポロジーに関しては、スケジューラがノードレベルでの QoS 制御であることから、単一ノードを対象としているものが多い。しかし、実際のネットワークでは、エンド-エンド間には多くのノードが存在する。そのため、多段に接続されたトポロジーを対象とした検討が必要がある。文献 [61]–[63] ではその試みが行われている。文献 [61] では、エンド-エンド間のノードに WFQ や SCFQ (Self-Clocked Fair Queueing) [64] などの帯域保証型のスケジューラが適用された場合を想定し、パケットに生じる遅延の上限を解析している。また、文献 [62] では、エンド-エンド間のノードに種類の異なるスケジューラを適用し、フロー間のスループットの公平さを解析している。文献 [63] では、シミュレーションと解析に加え、162 個の PlanetLab[65] ノードを用いた大規模な実験を行っている。そして、ホップごと、パスごと、エンド-エンドごとにおいて、それぞれのパケット欠落率などを調査している。しかし、これらの研究の多くでは、上述と同様に、単に IP パケットのスループットや欠落率などのネットワークレベル QoS パラメータを評価しているのみである。

QoE に近い品質の評価を行うためには、ネットワークの機能階層における、より上位の QoS パラメータを用いることが望ましい。すなわち、アプリケーションレベルで評価することが望まれる。つまり、IP パケットのスループットや欠落率など、ネットワークレベルの QoS パラメータを測定するのみでは不十分であり、アプリケーションの PDU を単位とした測定を行い、アプリケーションレベル QoS を評価することが重要である。従来研究のようにパケット単位で評価を行うと、例えば、パケット欠落率が 20% としても、複数のパケットから成り立つ MU の再構築が全くできず、MU 欠落率が 100% となることがあり得る。また、MU の出力揺らぎの場合、パケットの到着がどれだけ揺らいでも、MU 構築時にバッファが揺らぎを吸収することもあり得る。したがって、ネットワークレベル QoS は、本論文で扱うアプリケーションレベル QoS の代替指標には成り得ない。

アプリケーションレベル QoS を考慮した研究には文献 [66] がある。伊藤らは代表的なスケジューラを用いて音声・ビデオの転送を行い、WFQ の適用がアプリケーションレベル QoS を最も高く保つと述べている。さらに、文献 [67] において、2 台のルータにおける WFQ と FIFO の組合せとアプリケーションレベル QoS の関係を実験により調査している。しかし、中継するノードの数が多い場合、スケジューラの配置には多くの組合せが考えられ、その場合のアプリケーションレベル QoS がどのようなようになるかは明らかでない。

そこで本章では、まず、エンド-エンドの一部ノードに WFQ が適用される場合を想定し、そのノードのネットワーク的な位置とアプリケーションレベル QoS 制御（連続メディア同期制御）の有無が音声・ビデオストリーミング伝送のアプリケーションレベル QoS にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

QoE に関しては、サービスを提供する際、ユーザー一人ひとりの QoE を高く保つことは重要だが、個別に調査することは現実的には難しい。したがって、本章では、実験的なネットワークにおいて主観評価を行い、QoE を高めるスケジューラの配置を明らか

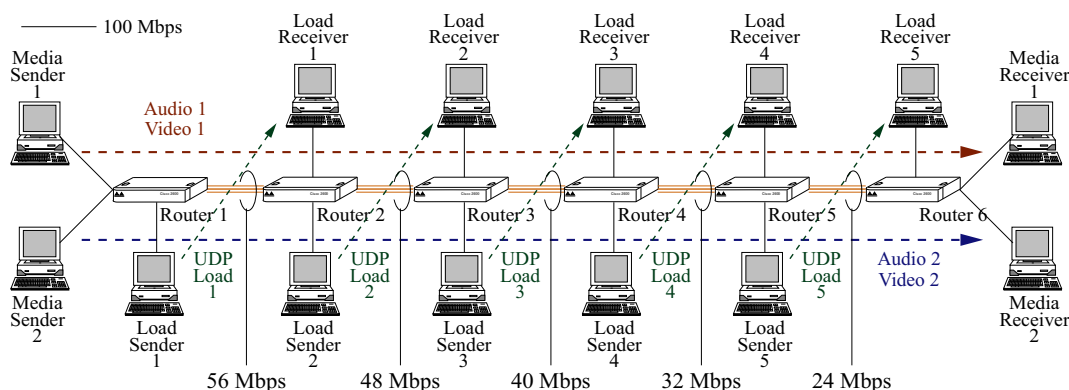


図 3.1: シミュレーションでのネットワーク構成

にする．そして，実際のネットワークにおけるスケジューラ配置の指針を論じる．

以下，3.2，3.3 節にてアプリケーションレベル QoS 測定に基づいたスケジューラの配置を議論する．さらに，3.4 節では QoE 測定し，QoE を高めるスケジューラの配置を明らかにする．

3.2 アプリケーションレベル QoS 測定

本節では，WFQ の配置と VTR アルゴリズムの適用の有無が音声・ビデオのアプリケーションレベル QoS にどのような影響を及ぼすかを，シミュレーションによって測定する．シミュレーションでは，ネットワーク転送中に複数のトラヒックに干渉される場合を想定している．

3.2.1 実験環境

シミュレーションで用いたネットワーク構成を図 3.1 に示す．6 台のルータ (Router) からなるネットワークに，2 台のメディア送信端末 (Media Sender)，2 台のメディア受信端末 (Media Receiver)，5 台の負荷送信端末 (Load Sender)，5 台の負荷受信端末 (Load Receiver) が接続されている．各ルータ間の接続速度は，ルータ 1–ルータ 2 間が 56 Mb/s であり，ルータ 2 からルータ 5 までルータ 1 台経過する毎に 8 Mb/s ずつ減少させている．したがって，ルータ 5–ルータ 6 間は 24 Mb/s である．これは，例えば，CDN (Contents Delivery Network) のように，メディア送信端末がバックボーンネットワーク，すなわち，高速なリンクで接続されるネットワークに配置されている場合を想定している．

メディア送信端末は，それぞれ一組の音声 (Audio)・ビデオ (Video) を，対応するメディア受信端末に送信する．メディア送信端末で構築された MU は，構築された直後に IP パケットに分解され，即座にネットワークに送出される．メディア送信端末 i ($i = 1, 2$) から送信される音声とビデオを，それぞれ音声 i とビデオ i と呼ぶ．メディアの仕様は表 3.1 に示される．音声・ビデオへの干渉トラヒックとして，負荷送信端末はペイロー

表 3.1: 音声とビデオの仕様

	Audio 1	Audio 2	Video 1	Video 2
符号化方式	ITU-T G.711 μ -law		MPEG-1(CBR)	
ピクチャパタン	――		IPPPPP	
ビットレート [kb/s]	64.0 (一定)		8,004 (平均)	8,004 (平均)
MU サイズ [kbyte]	0.4 (一定)		41.70 (平均)	41.67 (平均)
平均 MU レート [MU/s]	20.0		24.0	
測定時間 [秒]	72			
測定回数 [回]	3			

表 3.2: 各フローの優先度と割当帯域幅

	Priority	Router				
		1	2	3	4	5
Audio 1	1	64	64	64	64	64
Video 1	1	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Audio 2	0	64	64	64	64	64
Video 2	0	8,000	8,000	8,000	7,957	5,290
Load 1-5	1	39,872	31,872	23,872	15,915	10,582

注) Priority の値が大きいほど優先度が高い。上記の割当帯域幅は、余剰帯域幅の再分配が行われた後のものである。割当帯域幅は理論値であり、単位は kb/s である。

ド長 1,472 バイトの UDP データグラムを指数分布に従う間隔で生成し、対応する負荷受信端末に送信する。以下、これを負荷データとし、この平均送信ビットレートを平均負荷 (UDP average load) と呼ぶ。これは、Web や FTP トラフィックなどの多種のデータ伝送が多重化されたものを模擬したものである。

ノードレベルの QoS 制御として、ルータ 1 からルータ 5 に WFQ または FIFO を適用する。ルータ 6 には常に FIFO を適用する。本シミュレーションでは、各フローに表 3.2 に示される優先度を付与するため、WFQ を適用されるルータでは、同表のように帯域割当が行われる。優先度に関しては、Web や FTP トラフィックなどの負荷データが音声・ビデオと同じ優先度で転送される場合と、それらよりも低い優先度で転送される場合を測定するためにこの値を選択した。

アプリケーションレベル QoS 制御には、連続メディア同期アルゴリズムの VTR を用いる。VTR のパラメータとして、 J_{\max} には 200 ms を、 Δ_{al} には 400 ms を指定した。また、連続メディアの主観品質は音声の品質に対して敏感であるため、VTR アルゴリズムにおけるマスタメディアを音声とした。したがって、バッファリング時間は音声 MU

表 3.3: 測定内容（単一ルータに WFQ を適用する場合）

	Router 1	Router 2	Router 3	Router 4	Router 5
case 1	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 2	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 3	FIFO	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO
case 4	FIFO	FIFO	WFQ	FIFO	FIFO
case 5	FIFO	FIFO	FIFO	WFQ	FIFO
case 6	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	WFQ

表 3.4: 測定内容（メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合）

	Router 1	Router 2	Router 3	Router 4	Router 5
case 1	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 2	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 3	WFQ	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO
case 4	WFQ	WFQ	WFQ	FIFO	FIFO
case 5	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ	FIFO
case 6	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ

の転送品質に基づいて動的に調整される。

3.2.2 測定内容

本シミュレーションでは，

- (i) 単一のルータに WFQ を適用する場合，
- (ii) メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合，
- (iii) メディア受信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合，
- (iv) ネットワークの中心から WFQ を繰り返し適用する場合，
- (v) ネットワークの両端から WFQ を繰り返し適用する場合

の五つを検討した．ここでは，(i)と(ii)について詳述する．残りの場合については，シミュレーション結果のみを簡単に述べる．

(i)はメディア送信端末と受信端末の中間部分に WFQ が適用される場合を想定している．このとき，表 3.3 に示される六つの case を比較する．(ii)は，CDN のように，メディア送信端末に近いネットワークに QoS 制御が適用される場合を想定している．この場合，表 3.4 に示す case を測定する．

それぞれにおいて，VTR アルゴリズムを適用する場合としない場合を測定する．以下では，前者を *VTR*，後者を *NC* (No Control) と呼ぶ．

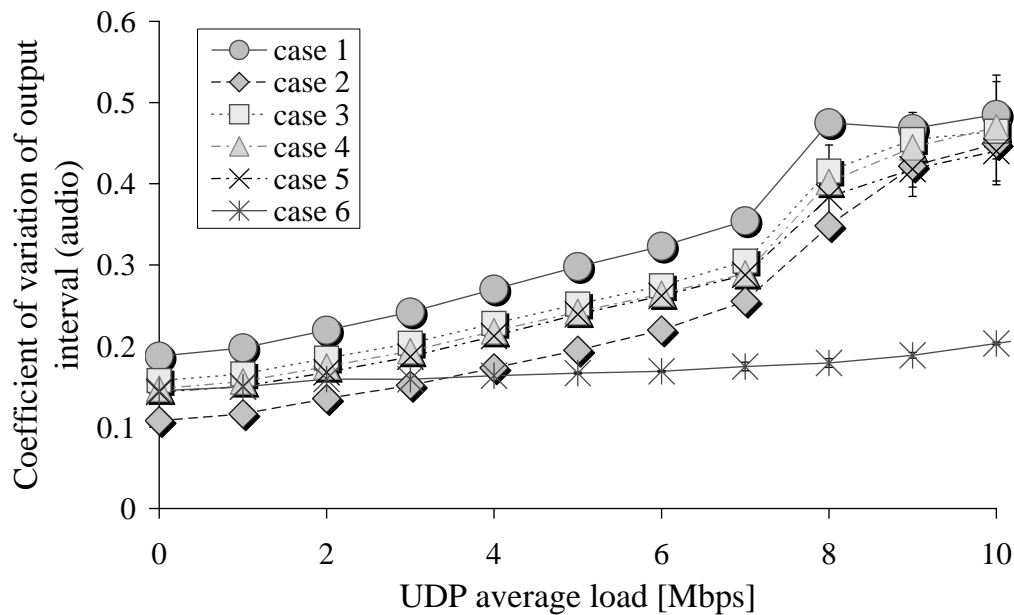


図 3.2: 出力間隔の変動係数（単一ルータに WFQ を適用する場合，音声 1，NC）

3.3 測定結果と考察

まず，単一のルータに WFQ を適用した場合のシミュレーション結果を示す．次に，WFQ をメディア送信端末に近いルータから順に繰り返し適用した場合について述べる．最後に，その他の場合の結果に簡単に触れる．

3.3.1 単一ルータに WFQ を適用する場合

図 3.2 には平均負荷に対する NC における音声 1 の出力間隔の変動係数を示す．図 3.3 では，図 3.2 の case 2 と case 6 に注目し，それぞれの場合と両者の条件を同時に適用した場合の変動係数を比較している．図 3.4 には VTR における音声 1 の変動係数を示す．図 3.5，3.6 には，それぞれ，NC のビデオ 1 とビデオ 2 の変動係数を表す．図 3.7 にはビデオ 1 の MU 欠落率が示され，図 3.8 には音声 2-ビデオ 2 のメディア間同期平均二乗誤差が示される．それぞれの測定点には 95 %信頼区間が併記されている．

NC の音声 1 の変動係数（図 3.2）において，平均負荷が約 4 Mb/s 以下の低負荷領域では，case 2 の値が最も小さい．しかし，平均負荷の増加に伴う case 6 の値の増加が他の case に比べて小さいため，それ以上の領域では case 6 が最も小さい値を示すようになる．

case 2 のように，最もふくそう程度の軽いルータ 1 への WFQ の適用が効果的であるのは，次の理由による．ルータ 1 に WFQ を適用しない場合，メディア送信端末から送信されたビデオ MU のバーストラヒックがその構造を保ったままルータ 2 へ転送される．このとき，ビデオ MU の後にルータに流入した音声 MU はビデオ MU が転送された後に転送される．そのため，音声の時間構造が乱され，変動係数の値が大きくな

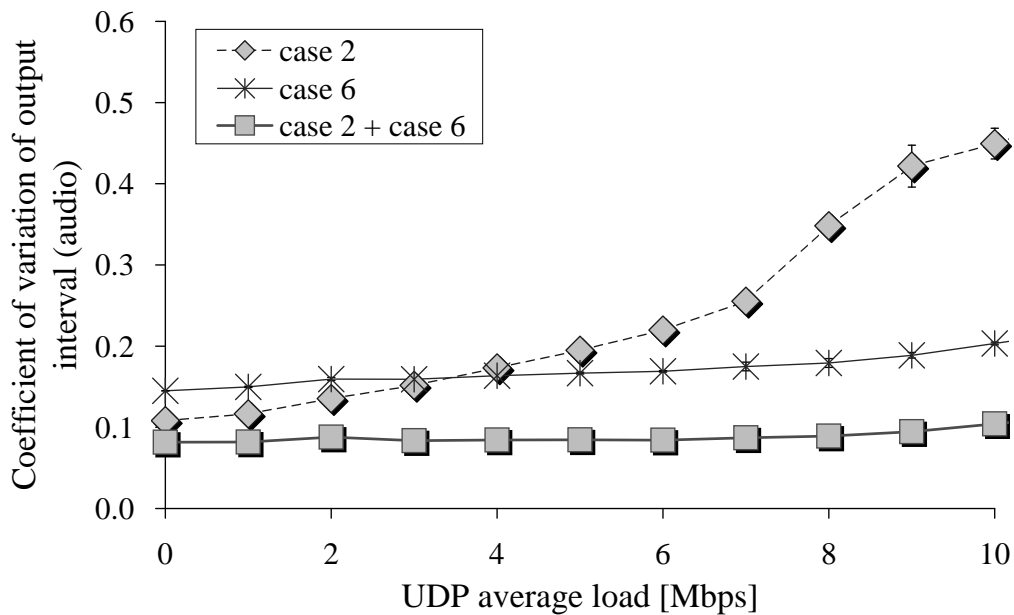


図 3.3: 出力間隔の変動係数 (ネットワークの端に WFQ を適用した場合, 音声 1, NC)

る．一方, WFQ を適用した場合は, 音声 MU のパケットサイズが小さいために, ビデオ MU のパケットに優先されて転送される．そのため, 転送品質の劣化は少なく, 高い QoS が得られる．

case 6 の値の増加傾向が他の case のそれと異なるのは, 最もふくそうするルータ 5 に WFQ が適用され, 必要帯域が保証されているためである．case 2 から 5 のようにルータ 1 から 4 に WFQ を適用しても, 高負荷時にはルータ 5 において転送品質が著しく劣化し, 高いアプリケーションレベル QoS を得ることができない．

したがって, 低負荷領域では, ビデオのバースト性が緩和されるという理由から, メディア送信端末に最も近いルータへの WFQ の適用が高いアプリケーションレベル QoS を得るために有効であるとわかる．また, 高負荷領域においては, ルータにおける帯域幅確保という観点から, 最も帯域幅の狭いリンクに接続されているルータ, すなわち, メディア受信端末に最も近いルータへの WFQ の適用がアプリケーションレベル QoS を高く保つ．

図 3.3 から, ネットワークの両端のルータに WFQ を適用する (case 2 + case 6) と, 出力間隔の揺らぎがより減少することがわかる．さらに, その他のルータ (ルータ 2 から 4) に WFQ を適用しても, ルータ 1 から 5 のすべてに WFQ を適用しない限りは, case 2 + case 6 とほぼ同じ結果であった．

音声 1 に VTR を適用した場合, 図 3.4 に示されるように, case 6 では全測定領域で, その他の case では平均負荷約 7 Mb/s 以下の領域で, 品質の劣化がほとんど見られない．これは, VTR アルゴリズムがメディアの時間構造の揺らぎをほぼ完全に吸収したためである．一方, それ以上の領域においては, case 1 から 5 の値が大きくなる．すべてのルータが FIFO で動作する case 1 の値が最も大きい, case 1 から 5 の間には大きな差が見られない．なお, 最もふくそうするルータに WFQ が適用されている case 6 の値は, 必要帯域が満たされているために, 高負荷時においても良好な出力品質が得られる．

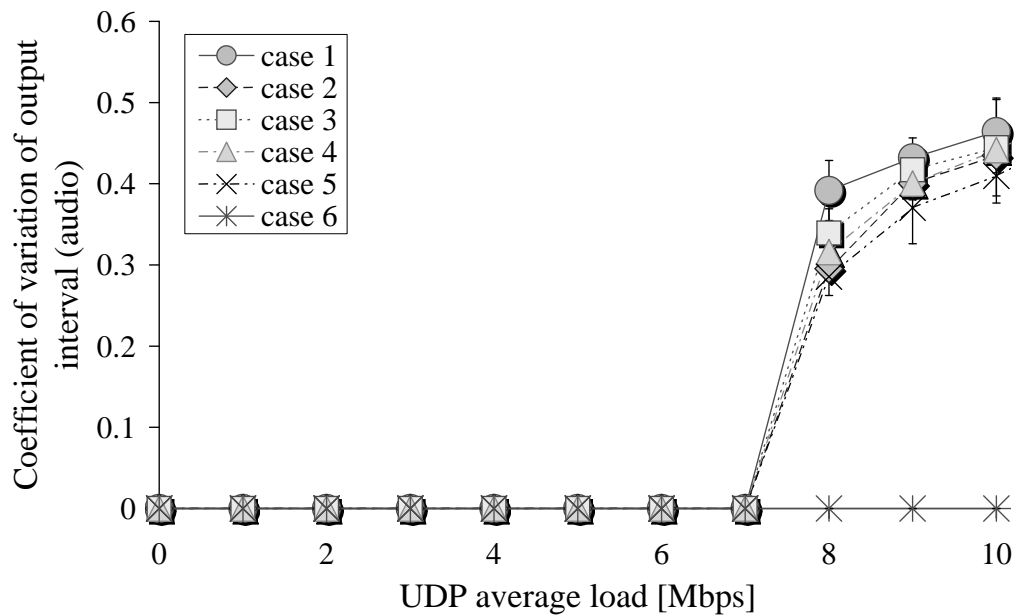


図 3.4: 出力間隔の変動係数（単一ルータに WFQ を適用する場合，音声 1，VTR）

ビデオ 1 の NC の場合（図 3.5）は，音声と異なり，平均負荷約 7 Mb/s 以下の領域では case 1 から 5 の値はほぼ同じである．したがって，この領域では，ビデオの変動係数は WFQ の配置に影響されないことがわかる．なお，VTR を適用した場合は，音声と同様の傾向が見られた．

なお，平均負荷約 7 Mb/s 以下の領域で，最もふくそうするルータ 5 に WFQ が適用されている case 6 の値が最も大きいのは次の理由による．ビデオは大きなバーストを持つため，ルータでは瞬時的に待ち行列が生成される．このとき，ビデオ 2 の優先度が負荷データのそれより低いため，いくつかの負荷データのパケットの転送は，ビデオ 2 のそれに優先する．そのため，ビデオ 2 の MU が待ち行列内に留まる時間は長くなり，それらの MU が次のルータに転送される前にビデオ 1 の MU が流入する．ビデオ 1 とビデオ 2 の優先度の違いがあるため，再びビデオ 2 のパケットのいくつかはビデオ 1 のそれに優先される．したがって，ビデオ 1 とビデオ 2 のパケットの転送順序が入り乱れる．その結果，MU が転送されるのに要する時間にばらつきが生じ，両方のビデオのメディアの時間構造が乱れる（図 3.6）．

平均負荷約 7 Mb/s 以上の領域で生じる音声とビデオの転送品質の劣化は，MU の欠落によるものである．音声 1，音声 2，ビデオ 1 の MU 欠落は同様の傾向であった．図 3.7 に示されるビデオ 1 の MU 欠落率では，case 1 から 5 はほぼ同じ値で増加している．しかし，case 6 の値は全測定領域中，ほぼ 0 である．これは，最もふくそうするルータ 5 へ WFQ が適用されており，かつ，メディアの必要帯域幅が満たされているためである．一方，ビデオ 2 に関しては，必要帯域幅が満たされないため，case 6 の MU 欠落率は case 1 から 5 よりも大きな値を示していた．

VTR を適用した場合のメディア間同期品質に関して，音声 1-ビデオ 1 のメディア間同期平均二乗誤差は全測定領域でほぼ 0 であった．一方，音声 2-ビデオ 2 の case 6 では，平均負荷約 7 Mb/s 以上の領域で $25,600 \text{ ms}^2$ を越えており（図 3.8），メディア間同

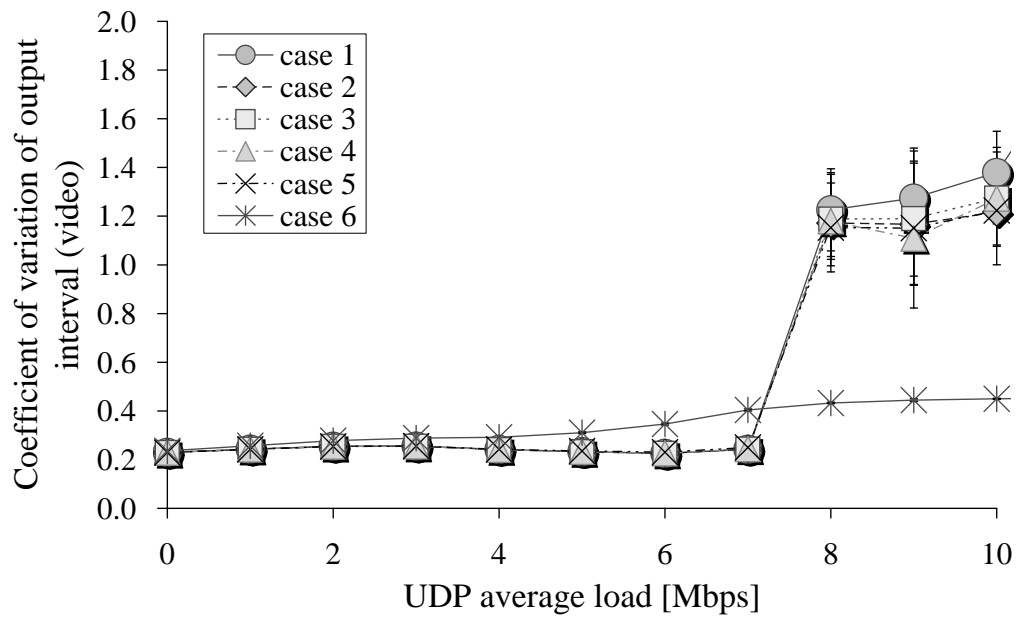


図 3.5: 出力間隔の変動係数（単一ルータに WFQ を適用する場合，ビデオ 1，NC）

期品質が劣化しているといえる．これは，ルータ 5 においてビデオ 2 の必要帯域幅が満たされず，音声 2 とビデオ 2 の平均 MU 遅延の差が大きくなるためである．ビデオ 2 の case 6 の平均 MU 遅延は，平均負荷約 7 Mb/s 以上の領域で，他の case より 200 ms 程度増加していた．しかし，音声 2 ではこのような増加は見られなかった．

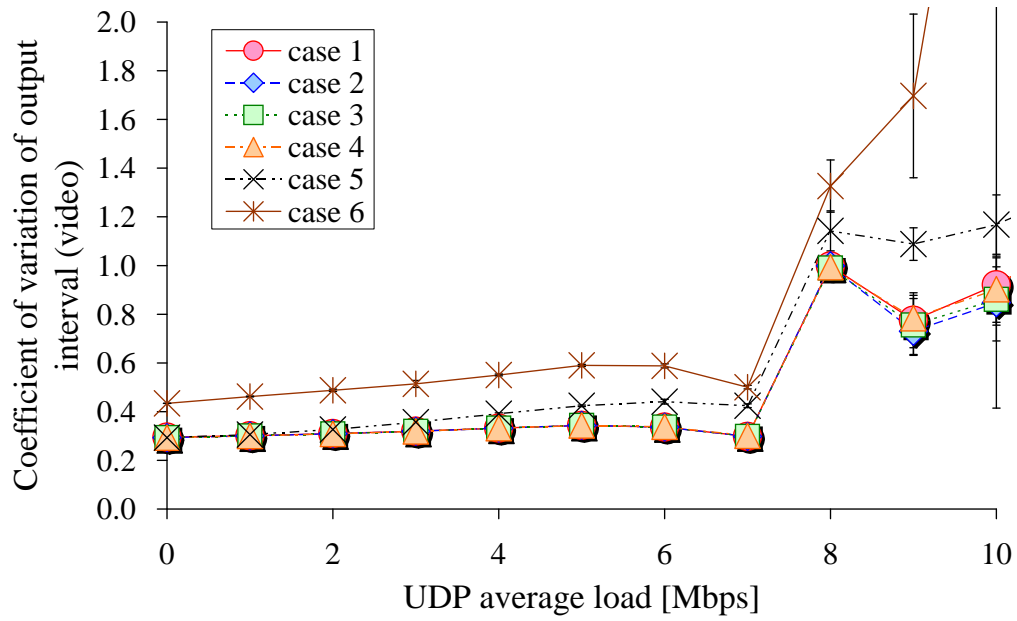


図 3.6: 出力間隔の変動係数（単一ルータに WFQ を適用する場合，ビデオ 2，NC）

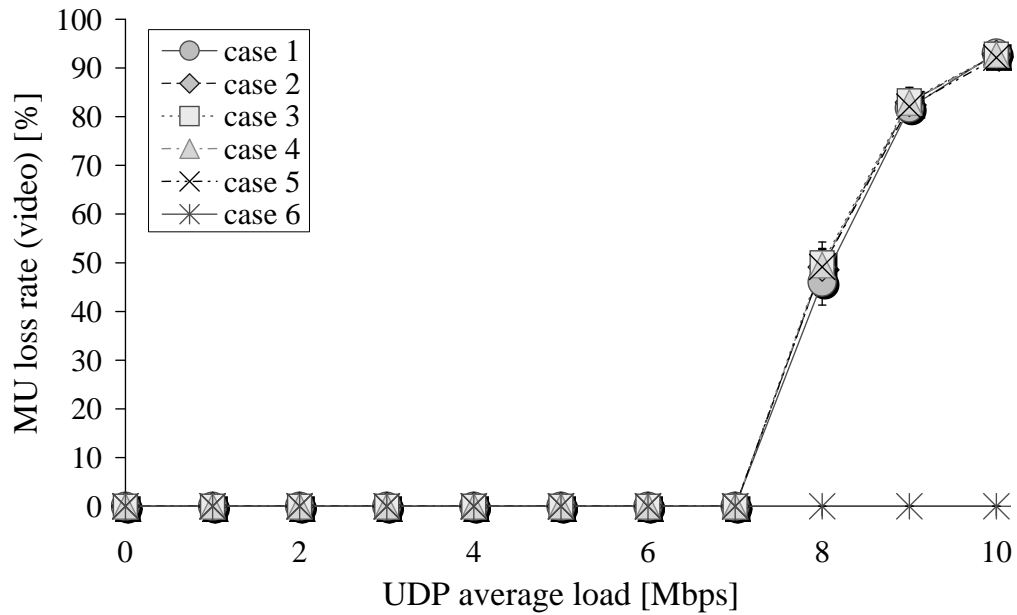


図 3.7: MU 欠落率（単一ルータに WFQ を適用する場合，ビデオ 1）

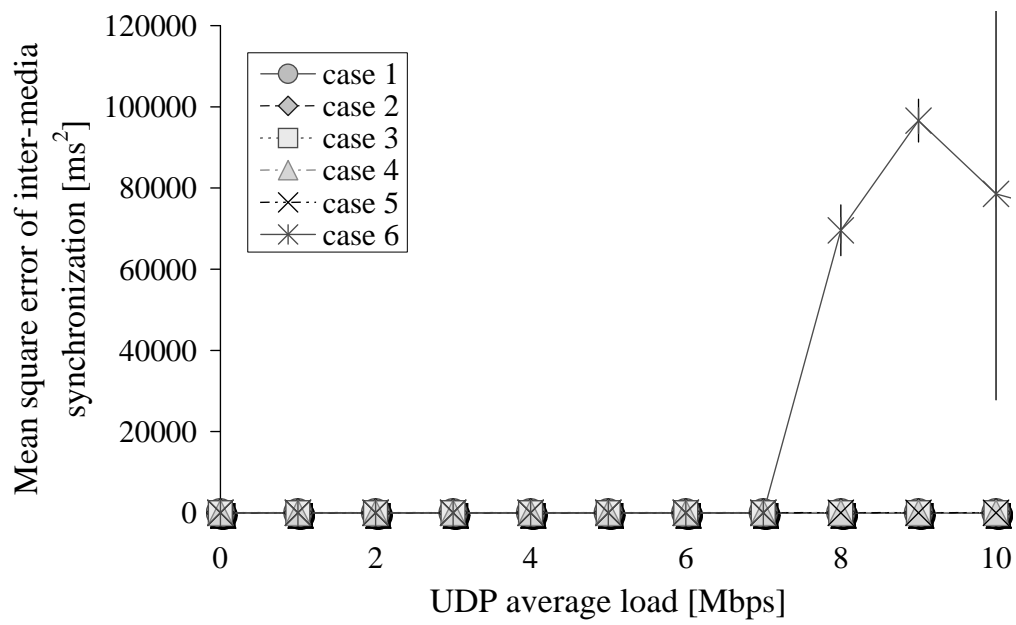


図 3.8: メディア間同期平均二乗誤差（単一ルータに WFQ を適用する場合，音声 2-ビデオ 2，VTR）

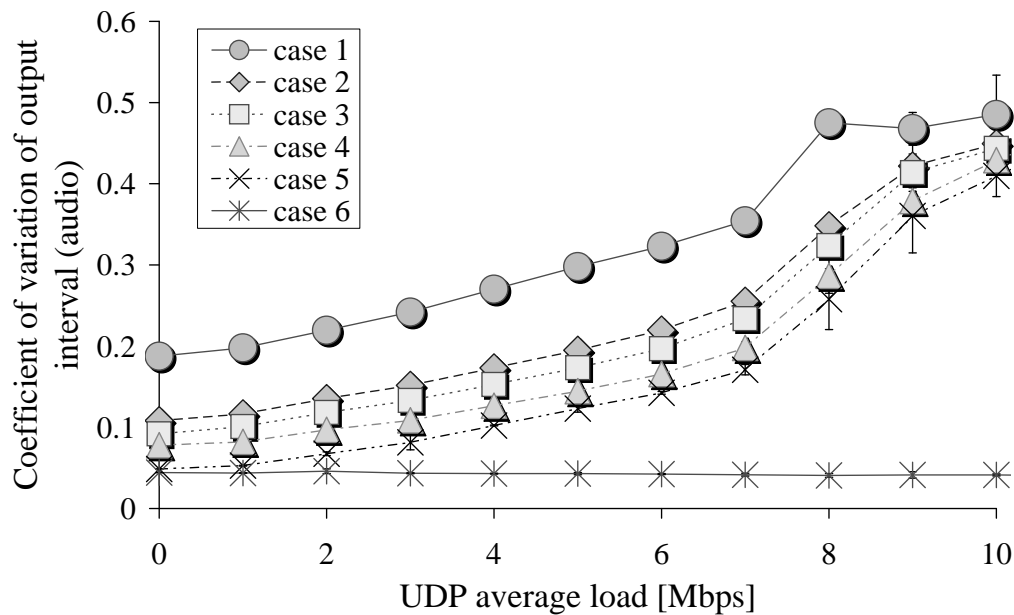


図 3.9: 出力間隔の変動係数 (メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合, 音声 1, NC)

3.3.2 メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合

図 3.9 には平均負荷に対する NC の場合の音声 1 の出力間隔の変動係数を示し, 図 3.10 にはその VTR の場合を示す. 図 3.11 には NC における音声 1 の平均 MU 遅延が示される. 各測定点には 95%信頼区間が併記されている.

NC における音声 1 の出力間隔の変動係数 (図 3.9) では, case 1 の値が最も大きく, case 2 から 6 の順で小さくなる. そして, case 1 から 5 において, 隣接する case の値の差に注目すると, case 1 と 2 の差が最も大きい. このことから, ルータ 1 への WFQ の適用が効果的であるといえる. また, このとき, ルータ 2 から 5 への適用による改善効果は小さいことがわかる. case 6 の値は, 負荷のビットレートに関らず最も小さく, ほぼ一定である. この case ではルータ 1 から 5 のすべてに WFQ が適用され, 必要帯域幅が満たされるためである.

VTR を適用した場合 (図 3.10), 平均負荷約 7 Mb/s 以下の領域では, すべての case の値がほぼ 0 になっている. 平均負荷が約 8 Mb/s の場合でも, case 1 と 2 の値の差が他の隣接する case 間の値よりも大きく, ルータ 1 への WFQ の適用の効果が確認できる. また, NC と同様, case 6 は全測定領域でほぼ 0 を示している.

一方, ビデオに関しては, メディア送信端末に近いルータに WFQ を適用しても大きな効果は得られず, case 6 のようにすべてのルータに WFQ を適用した場合のみ, 音声と同様, QoS の劣化が改善された. したがって, メディア送信端末に近いルータの WFQ のみでは, ビデオ自身の QoS 劣化の抑制に結びつかないことがわかる.

WFQ ルータの数が MU 遅延の増加に影響を及ぼす可能性があると考えられるが, NC では平均負荷約 7 Mb/s 以下の領域で, case 間に遅延量の差が見られなかった (図 3.11).

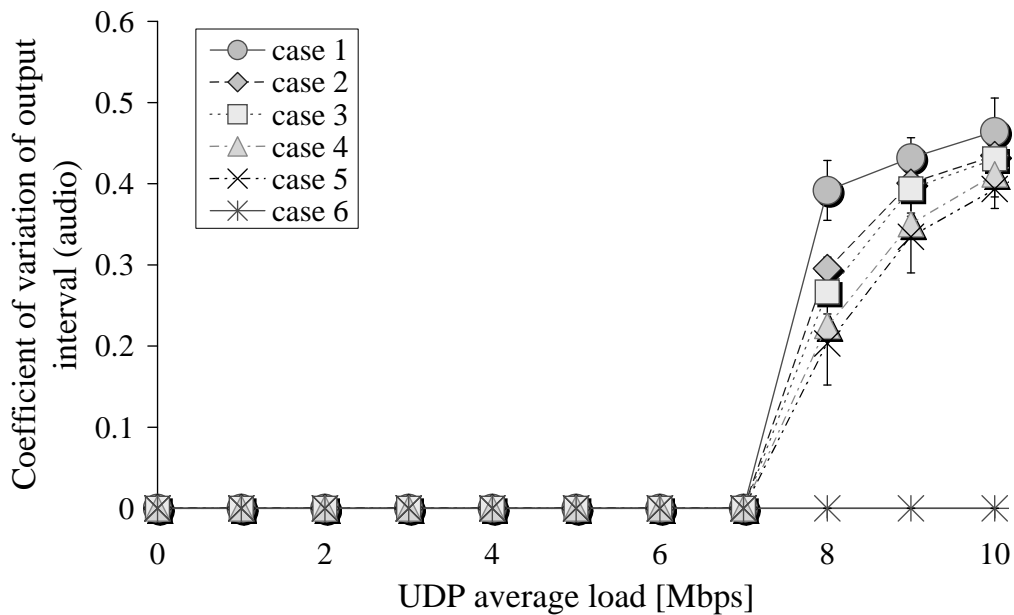


図 3.10: 出力間隔の変動係数 (メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合, 音声 1, VTR)

それ以上の領域では, case 6 以外の値が大きくなっている. しかし, VTR を適用するとバッファリングのための遅延が生じるため, すべての case の平均 MU 遅延は約 280 ms 程度となり, case による違いは吸収された.

メディア間同期品質に関して, 音声 1-ビデオ 1 のメディア間同期平均二乗誤差は, NC においてもすべての case について全測定領域で $6,400 \text{ ms}^2$ より小さく, 良好であった. 音声 2-ビデオ 2 については, 平均負荷約 8 Mb/s 以上の領域ですべての case の値が $100,000 \text{ ms}^2$ 程度となり, メディア間同期は外れていた. これは, 同領域において, ビデオ 2 の平均 MU 遅延が約 500 ms となり, 音声 MU と同期させることが困難となるためである.

3.3.3 その他の場合

メディア受信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用した場合 (3.2.2 節の (iii)) は, ふくそう時において, メディア受信端末に最も近いルータへの WFQ の適用が, 最もアプリケーションレベル QoS を大きく改善する [68]. しかし, 順にメディア送信端末に近いルータに繰り返し適用して WFQ ルータの数を増やしても, メディア受信端末に最も近いルータへの適用ほどの効果は見られなかった.

ネットワークの中心のルータから WFQ を繰り返し適用した場合 (同 (iv)) は大きな効果が得られなかった. メディア送信端末に最も近いルータとメディア受信端末に最も近いルータを含むすべてのルータに WFQ を適用しない限りは, すべてのルータに FIFO を適用した場合と大差はない.

一方, ネットワークの両端のルータから WFQ を適用する場合 (同 (v)), 両端のルータに WFQ が適用された時点で, アプリケーションレベル QoS の劣化は大幅に改善さ

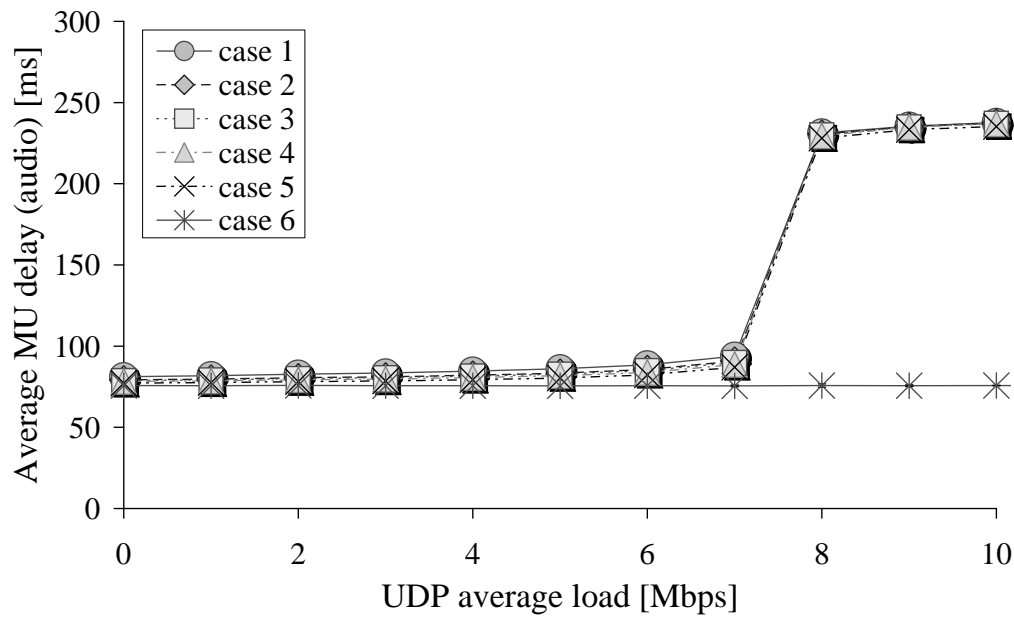


図 3.11: 平均 MU 遅延 (メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合, 音声 1, NC)

れる^(注 1)。しかし, ネットワークの中心に向かってルータに WFQ を繰り返し適用しても, 得られる効果は小さく, その効果は VTR の適用によって吸収される程度のものであった。

また, ネットワークの途中にボトルネックがある場合, そのノードに WFQ を適用すれば, 高いアプリケーションレベル QoS が得られることも, 別の実験により確認している [69]。さらに, リンク速度が均一の場合 [70], ツリー型トポロジを用いた場合, エンド-エンド間のホップ数が多い場合の検討も行った。これらのシミュレーションからも同様の結論が得られることを確認した。

(注 1) この場合における NC の音声 1 の変動係数は, 図 3.3 の case 2 + case 6 に示される。

表 3.5: 音声とビデオの仕様

	Audio 1	Audio 2	Video 1	Video 2
符号化方式	リニア PCM モノラル		MPEG-1(CBR)	
表示サイズ	——		640 × 360	
ピクチャパタン	——		IPPPPP	
ビットレート [kb/s]	768 (一定)		5,999 (平均)	5,999 (平均)
MU サイズ [kbyte]	4.8 (一定)		31.26 (平均)	31.29 (平均)
平均 MU レート [MU/s]	20.0		24.0	
測定時間 [秒]	60			
測定回数 [回]	5			

3.4 QoE測定実験

3.2, 3.3 節では, コンピュータシミュレーションにより, いくつかの場面を想定してアプリケーションレベル QoS を測定した. 本節では, さらに QoE パラメータを測定することにより, QoE を考慮したスケジューラの配置を求める.

3.4.1 シミュレーション環境

WFQ の配置が QoE に及ぼす影響を調査するため, まず, アプリケーションレベル QoS を測定する.

シミュレーションで用いたネットワーク構成は 3.2 節のそれと同じである. メディアの仕様は表 3.5 に示される. 主観評価環境の制限から, 3.2 節とは異なる仕様となっている. ビデオソースには女性ボーカリストのミュージックビデオを用いた.

本シミュレーションでは, Web や FTP トラフィックなどの負荷データが音声・ビデオと同じ優先度で転送される場合と, それらよりも低い優先度で転送される場合を想定する. そのため, 各フローに表 3.6 に示される優先度を付与した. WFQ を適用されるルータでは, 同表のように帯域割当が行われる.

3.4.2 測定内容

3.3 節で得られた結論より, ネットワークの端に WFQ を適用する場合を測定する (表 3.7). これは, CDN と NGN のような品質管理のできるネットワークの間に, ベストエフォート網が挟まれた場合を想定している. 3.3 節との比較を容易にするため, 測定内容は統一した. ただし, 比較のため, すべてのルータが WFQ の場合 (case 7) を追加してある.

表 3.6: 各フローの優先度と割当帯域幅

	Priority	Router				
		1	2	3	4	5
Audio 1	1	768	768	768	768	768
Video 1	1	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Audio 2	0	768	768	768	768	768
Video 2	0	6,000	6,000	6,000	6,000	5,488
Load 1-5	1	42,464	34,464	26,464	18,463	10,976

注) Priority の値が大きいほど優先度が高い。上記の割当帯域幅は、負荷の帯域幅が十分大きい場合に、余剰帯域幅の再分配が行われた後のものである。割当帯域幅は理論値であり、単位は kb/s である。

表 3.7: 測定内容（ネットワークの端に WFQ を適用する場合）

	Router 1	Router 2	Router 3	Router 4	Router 5
case 1	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 2	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 6	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	WFQ
case 2+case 6	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO	WFQ
case 7	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ

評価尺度に関して、音声・ビデオをストリーミング伝送するアプリケーションを測定対象とするため、アプリケーションレベル QoS パラメータはメディアの時間構造を評価するものでなければならない。本シミュレーションでは幾つかのアプリケーションレベル QoS パラメータを測定したが、本節では出力間隔の変動係数のみを示す。

3.4.3 QoE パラメータ測定方法

QoE パラメータの測定には評定尺度法を用いる。評定尺度法における評価尺度には、品質尺度と妨害尺度がある。前者は評価対象に“良い”、“悪い”などの絶対的な品質で評価するが、後者は提示された基準に対しての劣化程度を評価する。あらかじめ基準が提示される後の方が、被験者は品質を判断しやすい。そのため、本論文では 5 段階妨害尺度を用いる。評価語は“劣化がわからない (imperceptible)”，“劣化がわかるが気にならない (perceptible, but not annoying)”，“劣化が気になるが邪魔にならない (slightly annoying)”，“劣化が邪魔になる (annoying)”，“劣化が非常に邪魔になる (very annoying)” の五つである。評価基準には伝送前の音声・ビデオを用いる。評価時間が長くなると被験者が基準を忘れてしまう可能性があるため、評価中に基準を何度でも確認できるようにした。総評価時間の関係から、シミュレーションで用いた音声・ビデオのうち、15 秒間を提示する。

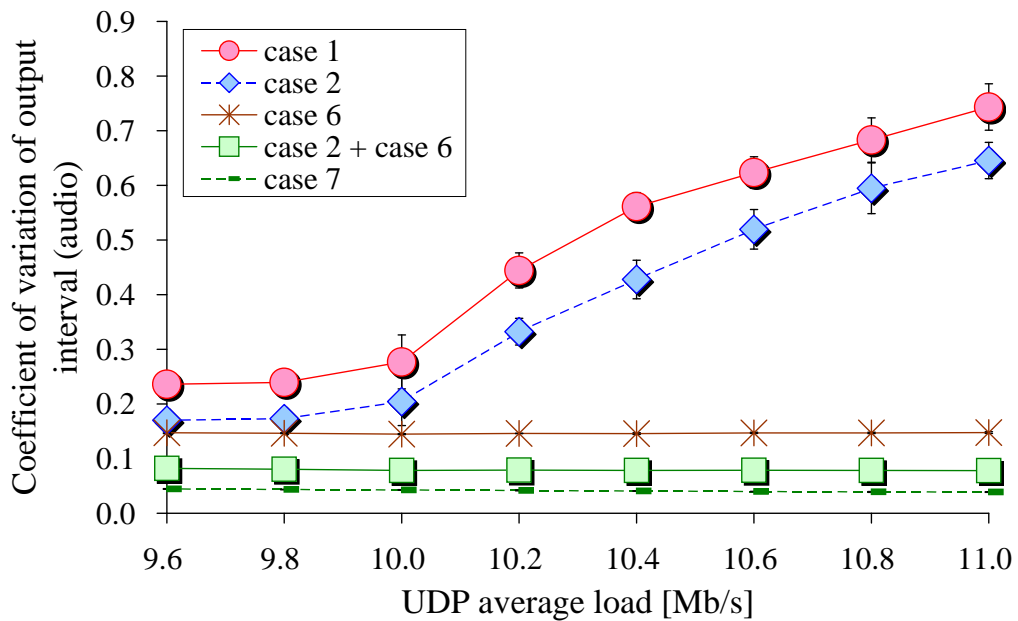


図 3.12: 出力間隔の変動係数（音声 1）

被験者は 20 から 30 代の男性 18 名である．被験者一人当たりの評価時間は約 30 分となった．

3.4.4 測定結果

はじめに，アプリケーションレベル QoS のシミュレーション結果を示す．その後，主観評価によって得られた QoE パラメータを論じる．

アプリケーションレベル QoS

図 3.12 に平均負荷に対する音声 1 の出力間隔の変動係数を示す．全測定領域において，case 6 の値が小さく，メディア受信端末に最も近いルータへの WFQ の適用が有効であることがわかる．case 2 + case 6 のように，ネットワークの両端に WFQ がされる場合，case 6 よりも変動係数は小さくなる．さらに，case 7 のようにすべてのルータに WFQ を適用する場合，最も小さい値を示す．

このように，測定パラメータを変更しても，3.3 節と同様の結果が得られることを確認した．

QoE パラメータ

主観評価によって得られた結果にカテゴリー判断の法則を適用した．適合度検定の結果，有意水準 0.05 で，得られた尺度が実測値に適合するという仮説が棄却されたため，誤差の大きい測定点を順に取り除き，仮説が棄却されなくなった時の尺度を QoE パラメータとした．

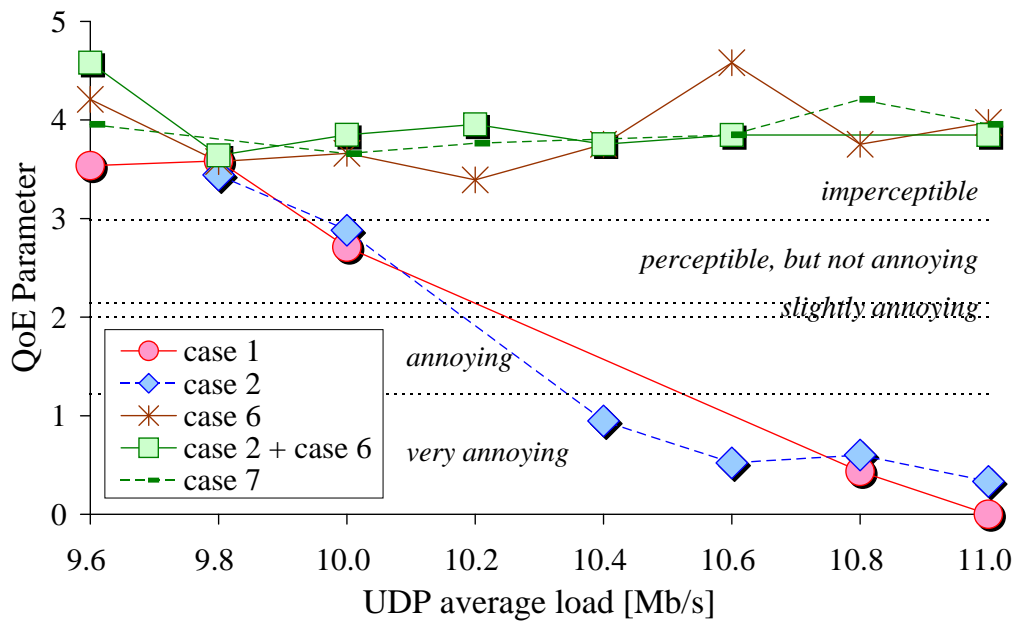


図 3.13: QoE パラメータ (音声・ビデオ 1)

図 3.13 に平均負荷に対する QoE パラメータを示す．図より，case 6，case 2 + case 6，case 7 が，全測定領域において“劣化がわからない”にカテゴライズされている．3.3 節では，WFQ の数が増えるにつれ，すなわち，case 6，case 2 + case 6，case 7 の順に変動係数が小さくなっていたが，主観的には差がない結果となった．

したがって，メディア受信端末に最も近いルータに WFQ を適用するのみで十分に高い QoE が得られるといえる．これは，機械的に測定された QoS パラメータのみでは得られない結果である．

3.5 むすび

本章では，ノードレベル QoS 制御であるパケットスケジューラを対象に，音声・ビデオストリーミング IP 伝送のアプリケーションレベル QoS と QoE を高く保つスケジューラの配置を明らかにした．また，アプリケーションレベル QoS 制御手段である連続メディア同期制御を併用した場合における影響も測定した．シミュレーションでは，パケットスケジューラに WFQ を，連続メディア同期制御に VTR アルゴリズムを用いた．

シミュレーションの結果，アプリケーションレベル QoS の観点からは，ビデオフローのバースト性を軽減させる観点とネットワークふくそうを軽減させる点から，それぞれ，メディア送信端末に最も近いノード（ルータ），及び，最もふくそうするノードに WFQ を適用すると高いアプリケーションレベル QoS が得られることがわかった．更に，このとき，それら以外のノードへ WFQ を適用しても，すべてのノードに WFQ を適用しない限りは，大きな QoS の改善には繋がらないことがわかった．

メディア同期制御を併用する場合は，WFQ の帯域制御の機能のみがアプリケーションレベル QoS に影響を及ぼすことがわかった．すなわち，ふくそうの生じている WFQ

ノードにおいて、ビデオの必要帯域が保証されれば、メディアの時間構造はメディア同期制御によってほぼ完全に回復され、高い QoS が得られる。この場合も、ふくそうするノード以外への WFQ の適用は大きな改善効果を生じなかった。一方、必要帯域幅が保証されない場合は、MU 欠落が生じ、メディアの時間構造の回復は困難となった。したがって、すべてのノードに FIFO を用いた場合と同等、若しくはそれ以下の QoS となる。

以上より、ふくそうするノードにおいて WFQ によりメディアの必要帯域が満たされ、なおかつ、メディア送信端末に最も近いノードへ WFQ が適用されていれば、メディア同期制御を併用することなく高いアプリケーションレベル QoS が得られると言える。すなわち、この方法は、メディア同期制御のためのバッファリング時間を必要としないため、双方向通信などのリアルタイム性を重視するサービスに適している。一方、メディア送信端末に最も近いノードに WFQ が適用されていない場合でも、ふくそうするノードに WFQ が適用され、かつ、メディアの必要帯域が満たされている場合は、メディア同期制御を併用することにより高いアプリケーションレベル QoS が得られる。

主観評価による QoE 測定では、メディア受信端末に最も近いノードへのパケットスケジューラの適用のみで、すべてのノードに適用した場合、ネットワークの両端に適用した場合と同等の高い品質を得られることを明らかにした。

したがって、本測定環境における音声・ビデオストリーミング IP 伝送では、メディア受信端末に最も近いノードにパケットスケジューラを適用することが QoE を高く保つ方法である。つまり、アクセス回線向けの QoS 制御が、効率よく高い QoE を提供するといえる。

第4章 音声・ビデオ帯域保証IP 伝送におけるコンテンツタイプに基づいたQoE推定代表回帰式の精度

4.1 まえがき

3章までは、ノード（リンク）レベル、ネットワークレベル、アプリケーションレベルのQoS制御を用いた場合のIPネットワークの設計・運用を論じた。さらに、第3章の後半ではQoEを測定し、QoEを高めるネットワーク設計指針を明らかにした。しかし、正確なQoEの測定には膨大な手間と人員が必要である。そこで、本章ではQoEをアプリケーションレベルQoSから推定する方法を検討する。

インターネットでは、テレビなどの従来のメディアに比べ、コンテンツを増やすのが容易である。そのため、ユーザの様々な趣向に応えられるよう多種多様のコンテンツが制作されている。さらに、視聴形態も多様化した。そのため、主観品質の面において、ユーザ（視聴者）がどのような状態の音声・ビデオを視聴しているか、すなわちQoEを推定するのは一般に難しい。したがって、QoEを推定する仕組みが望まれる。これは、主に、インターネットがベストエフォートであり、帯域幅の保証がされないためである。

推定の手段にはFR（Full Reference）法、RR（Reduced Reference）法、NR（No Reference）法がある[71]。FR法とRR法は、サービスに用いるビデオに加え、オリジナルまたはオリジナルの特徴量を伝送する。これは、ネットワークリソースの有効活用的一面から望ましくない。したがって、ここではNR法を対象とする。

QoEの推定に関しては、コンテンツの種類に応じてQoEを推定する研究がいくつか行われている[72]、[73]。例えば、文献[72]では、シーンチェンジや動き補償ベクトル、画面の色合いなどからコンテンツのタイプを推定し、六つに分類する。さらに、音声・ビデオのビットレートとフレームレートの情報を加味してMOS（Mean Opinion Score）を求めている。文献[73]では、予めコンテンツやビデオフォーマット方式などのデータベースを用意し、ビットレートとパケットロス率との関係からビデオの品質を推測している。しかし、これらはネットワークの伝送品質を、パケットのバーストロス率や、実現されるフレームレートといったパラメータでモデル化した実験であり、実際のネットワークで発生するようなパケットの到着遅延揺らぎや欠落発生パターンは十分考慮されていない。

アプリケーションレベルQoSからのQoE推定に関する検討も行われている[74]–[76]。文献[74]では、四つのコンテンツタイプにおいて一つずつコンテンツを用意し、それぞ

れの回帰式が QoE パラメータを推定できるか明らかにしている．さらに文献 [75] では，ビデオの時間品質に加え空間品質も考慮に入れている．時間品質のみ，時間品質と NR 法の空間品質の併用，及び，時間品質と FR 法の空間品質の併用の 3 種類の回帰式の推定精度を比較している．そして，時間品質と空間品質の併用が有効であることに加え，NR 法の回帰式が FR 法のそれに匹敵する推定精度を持つことが明らかにしている．また，一つのコンテンツから求められた回帰式を，同じコンテンツタイプの他のコンテンツに適用した場合の検討も行われている．文献 [76] では，ビデオフレームに誤りが起きた場合，QoE の推定値に基づいて，フレームのスキップと誤り補償を切り替える方式を提案し，その有効性を示している．

一方，IP ネットワークでの QoS 保証を実現するために，ITU-T ではいくつかの勧告を策定している．その一つに NGN があり，ノードレベルからエンド・ツー・エンドレベルの QoS 保証フレームワークの勧告がなされている．NGN の特徴は，セッション制御と帯域制御により QoS を確保することにある．国内でも NGN サービスが提供されるようになり，近年，QoS 保証の方法として注目されている．このような背景から，これまでのようにベストエフォート型のネットワークのみを検討対象とするのでは不十分であり，帯域保証型ネットワークも対象とする必要がある．

ここで注意すべきは，前述のように，ネットワーク上で利用されるアプリケーションは無数にあり，音声・ビデオストリーミング伝送に限っても，コンテンツには動きの激しいもの，音質が重要なもの，音声とビデオの同期が重要なものなど，その数は膨大なことである．コンテンツ毎にトラヒック特性が変わり，それが QoE に及ぼす影響も異なる．そのため，理想的にはコンテンツ一つひとつに QoE を推定するための回帰式（以下，個別回帰式と呼ぶ）が存在することが望ましい．しかし，コンテンツは多種多様に存在するため，これは現実的ではない．そこで，コンテンツを分類し，それぞれを代表する回帰式（以下，代表回帰式）に基づいて QoE を推定する方法が考えられる．

本章では，まず，QoS マッピングによってアプリケーションレベル QoS パラメータから QoE パラメータを推測できるか検討する．次に，コンテンツが膨大にあることに対処するための回帰式の求め方を提案し，その有効性を示す．

以下，4.2 節で提案方法を説明し，4.3 節にて実験環境を示す．そして，4.4 節で結果と考察を述べる．

4.2 提案方法

代表回帰式を求めるにあたって，その方法はいくつか考えられる．文献 [77] では，コンテンツをタイプ分けし，タイプ内の代表的なコンテンツをもって代表回帰式とした．しかし，その選択方法では必ずしも適切なコンテンツの代表回帰式が選ばれるとは限らない．

そこで，本章では，代表回帰式をタイプ内の多くのコンテンツから求める手法を提案する．これにより，よりコンテンツの特徴を反映した回帰式が得られると予想される．特に，本章では，扱うコンテンツ数が少ないため，タイプ内のすべてのコンテンツから代表回帰式を求める．

4.3 実験環境

実験では，四つのコンテンツタイプ毎に六つのコンテンツのアプリケーションレベル QoS パラメータを測定した．また，主観評価により QoE パラメータを求めた．

4.3.1 コンテンツタイプ

本章では，コンテンツを，音声重視されるもの，ビデオ重視されるもの，音声とビデオ重視されるものの三つのグループに分けて検討する．分類には，VQEG (Video Quality Experts Group) [78] のテストプランで用いられるコンテンツタイプを参考にした^(注1)．

研究の第一段階として，表 4.1 に示される 24 個のコンテンツを評価対象とする．“ミュージックビデオ”，“スポーツ”，“映画”，及び，“アニメ”の四つのコンテンツタイプを，それぞれ，M，S，F，A と呼ぶ．各コンテンツタイプの六つのコンテンツは，ミュージックビデオは M1，M2，...，M6，スポーツでは同様に S1～S6，映画は F1～F6，アニメは A1～A6 と呼ぶこととする．ミュージックビデオは音声重視されるコンテンツタイプの例であり，スポーツはビデオ重視されるものの例である．映画とアニメは，音声とビデオの両方が重視されるものの例と考える．

(注1) VQEG のテストプランでは，次の 8 つのコンテンツが用いられる：(1)ビデオ会議 (2)映画 (3)スポーツ (4)ミュージックビデオ (5)広告 (6)アニメ (7)ニュース (8)ホームビデオ．

表 4.1: コンテンツの概要

ミュージックビデオ (M)	
M1	一人の女性が歌っている．曲調は明るくポップ．
M2	男性デュオのコンサート．一人が歌い，もう一人は演奏をしている．曲調はアップテンポ．
M3	一人の男性が歌っている．曲調はバラードでスローテンポ．
M4	大勢でのマスゲームのようなものが映されている．歌は男性で，曲調は明るくポップなもの．
M5	一人の女性が歌っている．曲調はバラード．
M6	男性四人のグループによる楽曲．一人が歌っており，残りは演奏を行っている．歌詞は英語．
スポーツ (S)	
S1	サッカーの試合．フリーキックを行うシーン．サポーターの歓声も含まれている．
S2	陸上 200m 走の様子．複数の選手が競い合い，ゴールのシーンまで映されている．実況が音声として含まれている．
S3	F1 レースで，二台の車が競い合っているシーンを映したもの．音声はエンジン音のみ．
S4	力士が相撲を取っているシーン．音声に行司の声が含まれる．
S5	野球の試合．打者がヒットを打ち，一塁に走るところまでが映されている．音声には実況が含まれる．
S6	サッカーの試合．グラウンド全体を斜め上空から映したものである．音声にはサポーターの声援が含まれている．
映画 (F)	
F1	SF 映画で，主人公が俊敏に動いているシーン．会話はなく，音楽が流れている．
F2	少年と子キツネが花畑で戯れているシーン．音声には，少年が子キツネを呼ぶ声と音楽が含まれる．
F3	多くの人々がホールに集まり，新年を祝っているシーン．女性の話し声や大勢の歓声が含まれる．
F4	二人の女性が買い物をしているシーン．二人の会話が音声に含まれる．
F5	アクション映画．二人の忍者が山の中で戦っているシーン．音声には音楽と二人の声が含まれる．
F6	二人の学生と一人の老婆が海辺にいるシーン．学生二人が会話をしている．
アニメ (A)	
A1	CG アニメ．二人の人物が見つめ合っており，それを多くの人々が取り囲んでいるシーン．音楽と多少の会話が含まれている．
A2	一人の男性がベッドで寝ているシーン．音声は少なく，時計の音と話し声一言だけ含まれる．
A3	二人の男性が戦っており，一方の男性がもう一方の男性を殴打しているシーン．音声には男性の叫び声が含まれている．
A4	室内に複数的人々がおり，二人の男性が交互に話しあっているシーン．音声には男性の話し声が常に含まれている．
A5	二人の男性が戦っているシーン．人物の動きが多く，音声には二人の会話が多く含まれている．
A6	CG アニメ．ロボットが戦艦を破壊するシーン．音楽，銃声，爆発音が含まれている．

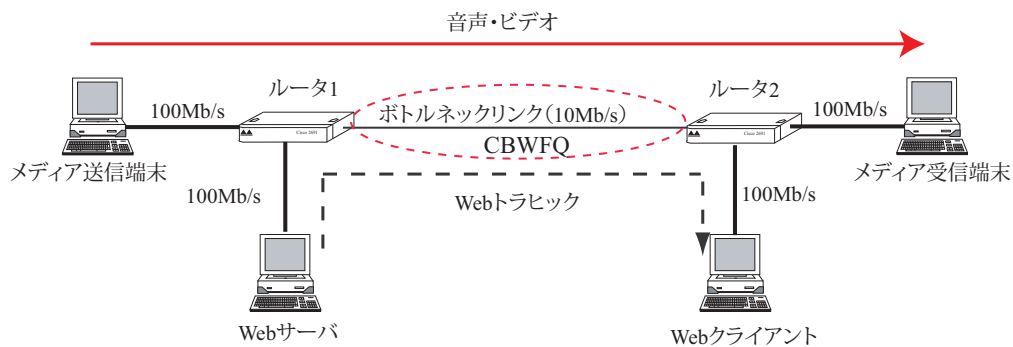


図 4.1: ネットワーク構成

表 4.2: 音声・ビデオの仕様

	音声	ビデオ
符号化方式	リニア PCM ステレオ	MPEG-1
表示サイズ [pixel]	——	320 × 240
ピクチャパタン	——	IBBPBBPBBPBBPBB
平均 MU サイズ [kByte/MU]	9.6 (一定)	10.42 (VBR, 平均)
平均 MU レート [MU/s]	20	30
ビットレート [Mb/s]	1.536 (一定)	2.5 (VBR, 平均)
再生時間 [s]		15

注) ビデオは VBR でエンコードされているため、個々のコンテンツによって最大・最小ビットレートが大きく異なる点に注意されたい。

4.3.2 アプリケーションレベル QoS 測定方法

図 4.1 に実験に用いるネットワークを示す。4 台の端末と 2 台のルータ (Cisco 2691) により構成される。それぞれ、各端末-ルータ間は 100 Mb/s、ルータ-ルータ間は 10 Mb/s の Ethernet で接続される。

メディア送信端末はメディア受信端末に表 4.2 に示される音声・ビデオを転送する。なお、MU に誤りが生じた場合、その MU の出力はスキップされる。

Web クライアントには WebStone が実装されており、Web サーバから表 4.3 のファイルを連続的に取得するプロセスを 50 個動作させる。

ルータ 1 は CBWFQ を実装しており、これにより帯域予約を行う。本章では、議論の簡単化のため、音声には十分な帯域幅 (1.7 Mb/s) を割り当てる。ビデオに関しては、ビデオ MU が約 60 % 欠落する値を下限、全く欠落しなくなる値を上限となる範囲内で

表 4.3: 取得されるファイルの構成

file name	size [bytes]	probability
file500.html	500	0.35
file5k.html	5,125	0.5
file50k.html	51,250	0.14
file500k.html	512,500	0.009
file5m.html	5,248,000	0.001

変化させる．下限より小さい帯域幅では QoE はほとんど変化しないと考えられるため，この帯域幅を測定対象とした．主観評価の総実験時間を考慮し，取りうる予約帯域幅は 17 種類とした．この予約帯域幅の決定方法のため，コンテンツごとにビデオに予約される帯域幅が異なることに注意されたい．例として，ミュージックビデオの予約帯域幅を表 4.4 に示す．なお，Web ブラウザには残りの帯域幅が使われる．

4.3.3 QoE 測定方法

主観評価は 5 段階妨害尺度による評価尺度法によって行われた．カテゴリーの評価語は“劣化がわからない”，“劣化がわかるが気にならない”，“劣化が気になるが邪魔にはならない”，“劣化が邪魔になる”，“劣化が非常に邪魔になる”の五つである．

主観評価には，サイズが 19 インチ（1280 × 1024 ドット）の PC 用液晶モニターを用いた．被験者とディスプレイとの距離は，6 ～ 9 H（H はビデオウィンドウの高さ）を基準とし，被験者が自分で調節できるものとした．

評価基準には伝送前の音声・ビデオを用いる．評価基準を忘れるのを防ぐため，実験中に何度でも評価基準を確認できるようにした．

本実験の被験者は 20 代の男性 15 名である．一人当たりの実験時間は約 100 分となった．

表 4.4: ビデオの予約帯域幅 [Mb/s] (ミュージックビデオ)

予約帯域幅番号	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	2.370	2.400	2.378	2.560	2.400	2.400
2	2.441	2.425	2.405	2.565	2.450	2.441
3	2.512	2.450	2.432	2.570	2.500	2.482
4	2.583	2.475	2.459	2.575	2.550	2.523
5	2.654	2.500	2.486	2.580	2.600	2.564
6	2.725	2.525	2.513	2.585	2.650	2.605
7	2.796	2.550	2.540	2.590	2.700	2.646
8	2.867	2.575	2.567	2.595	2.750	2.687
9	2.938	2.600	2.594	2.600	2.800	2.728
10	3.009	2.625	2.621	2.605	2.850	2.769
11	3.080	2.650	2.648	2.610	2.900	2.810
12	3.151	2.675	2.675	2.615	2.950	2.851
13	3.222	2.700	2.702	2.620	3.000	2.892
14	3.293	2.725	2.729	2.625	3.050	2.933
15	3.364	2.750	2.756	2.630	3.100	2.974
16	3.435	2.775	2.783	2.635	3.150	3.015
17	3.506	2.800	2.810	2.640	3.200	3.056

4.4 測定結果と考察

本節では，実験で得られたアプリケーションレベル QoS パラメータ値と，主観評価によって得られた QoE パラメータ値を示す．また，両者のマッピングを行うことにより，アプリケーションレベル QoS から QoE の推定ができるようにする^(注 2)．

推定のための回帰式は，個別回帰式として，一つのコンテンツから求めたものと，代表回帰式として，タイプに属するすべてのコンテンツから求めたものを用いる．そして，これらの推定誤差を示す．

コンテンツタイプはミュージックビデオのみ詳述し，残りは簡単に述べる．

4.4.1 アプリケーションレベル QoS 測定結果

本節では実験で得られたアプリケーションレベル QoS パラメータ値を示す．各測定値は 10 回の測定結果の平均である．

図 4.2～4.4 に，それぞれ，ミュージックビデオの予約帯域幅番号に対するビデオの MU 欠落率，出力間隔の変動係数，音声・ビデオのメディア間同期平均二乗誤差を示す．各プロットの上下の幅は 95 %信頼区間を表す．

図 4.2 より，予約帯域幅番号が大きくなる，すなわち，予約帯域幅が大きくなるにつれて，全体的に値が小さくなっている．特に，予約帯域番号が 5～10 の領域では各コンテンツの値にばらつきが大きい．これは，ビデオが VBR でエンコードされているためである．本実験では，各コンテンツの平均ビットレートが同じになるようにコンテンツを準備したが，各コンテンツの最大・最小ビットレートはコンテンツ内容に依存する．そのため，このような結果になった．

図 4.3 では，予約帯域幅番号 5～10 において M6 の値が他のコンテンツより小さくなっている．これは，背景色の切り替わりの少ないコンテンツであるため，MPEG ビデオの P 及び B ピクチャのサイズが小さく，ネットワーク負荷の影響を受けにくかったと考えられる．一方，M2 では予約帯域幅番号が 8 以下の領域において値が大きい．これは，コンサートのコンテンツで，会場照明の点滅やアングル切り替えが多用されており，P 及び B ピクチャのサイズの変動が大きいと考えられる．

図 4.4 においては，予約帯域幅番号が大きくなるにつれ，全体的にメディア間同期二乗誤差も小さくなっている．また，予約帯域幅番号 5～16 において，M1 と M6 の値が他と比べて小さいが，これらのコンテンツでは小さいサイズのビデオ MU が多く，音声との同期が乱れにくかったと考えられる．

なお，音声のアプリケーションレベル QoS は，全測定領域において良好であった．これは，本実験では，CBWFQ により音声の必要帯域幅が確保されていたためである．

他のコンテンツについても，上述と同様の傾向が見られた．すなわち，予約帯域幅が広くなるにつれアプリケーションレベル QoS が向上する．コンテンツによってアプリケーションレベル QoS の推移の傾向が異なるという結果が得られた．

(注 2) QoE に影響を及ぼすのは，アプリケーションレベル QoS の他にメディアの符号化方式や符号化パラメータなどが考えられる．本章では簡単のため，QoE はアプリケーションレベル QoS のみによって説

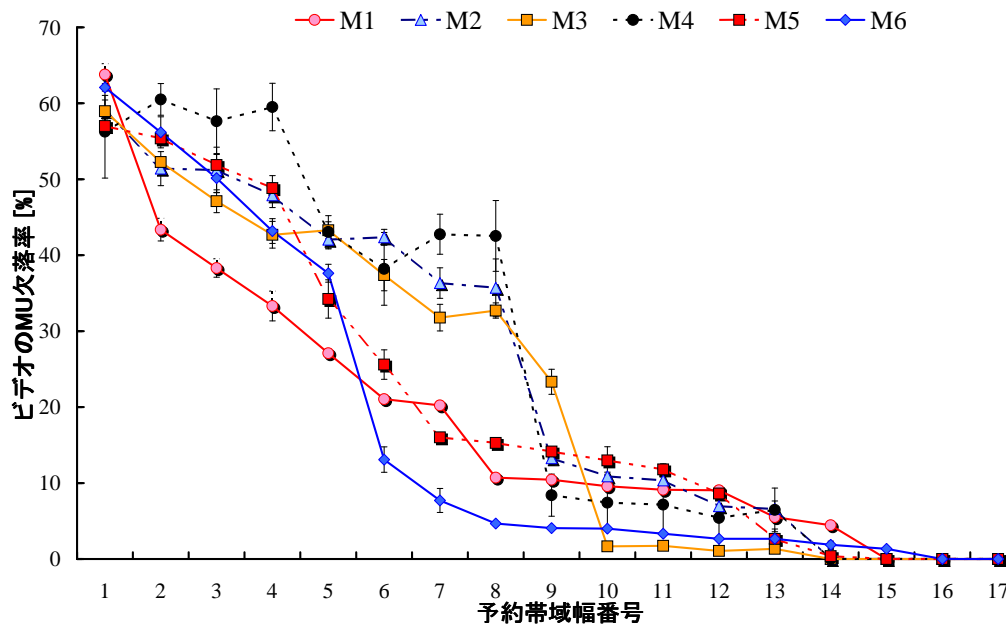


図 4.2: ビデオの MU 欠落率 (ミュージックビデオ)

4.4.2 QoS マッピング結果

まず, QoE パラメータを求める. 主観評価による測定値に対し, カテゴリー判断の法則を適用した. さらに, 変換された尺度が測定値に適合するか判断するため, Mosteller の適合度検定を行った. その結果, 有意水準 0.01 で, 変換された尺度が測定値に適合するという仮説が棄却されたため, 全体の約 5% の測定点を除き, 仮説が棄却されない時点での尺度を QoE パラメータとした. なお, QoE パラメータの最小値を 0 となるように調整すると, カテゴリー間の境界値は, 1.50, 2.95, 4.01, 5.08 であった.

次に, アプリケーションレベル QoS パラメータから QoE パラメータへの QoS マッピングを行う. 独立変数となるアプリケーションレベル QoS パラメータを選択するため, アプリケーションレベル QoS パラメータをすべて併せて主成分分析を行った. ただし, 音声のアプリケーションレベル QoS は非常に高く, 変化も僅かなため, 独立変数として考慮しない. 主成分分析の結果, 第 1, 第 2, 第 3 主成分までの累積寄与率は, それぞれ, 65.8%, 87.6%, 96.5% であったため, 第 3 主成分までを扱う. 主成分負荷量から, アプリケーションレベル QoS パラメータを次の三つのグループに分類した: (i) C_v , L_v , R_v , (ii) E_{int} , D_v , (iii) E_v .

QoE パラメータを従属変数とし, 独立変数として各グループから一つずつパラメータを選び, コンテンツ毎に重回帰分析を行った. L_v , R_v には定性的に線形の関係があるため, R_v を独立変数から外し, 自由度調整済み重相関係数を比較すると (L_v , D_v , E_v) の場合に比較的高い値となることがわかった. そこで, 議論の簡単のため, すべての場合においてこの独立変数の組み合わせを用いることとする.

次に, 独立変数の中で回帰式に寄与していないものを削除した. ほとんどの場合, D_v , E_v の両方, もしくはどちらかが削除された. また, 削除されなかった場合においても,

明されるものとする.

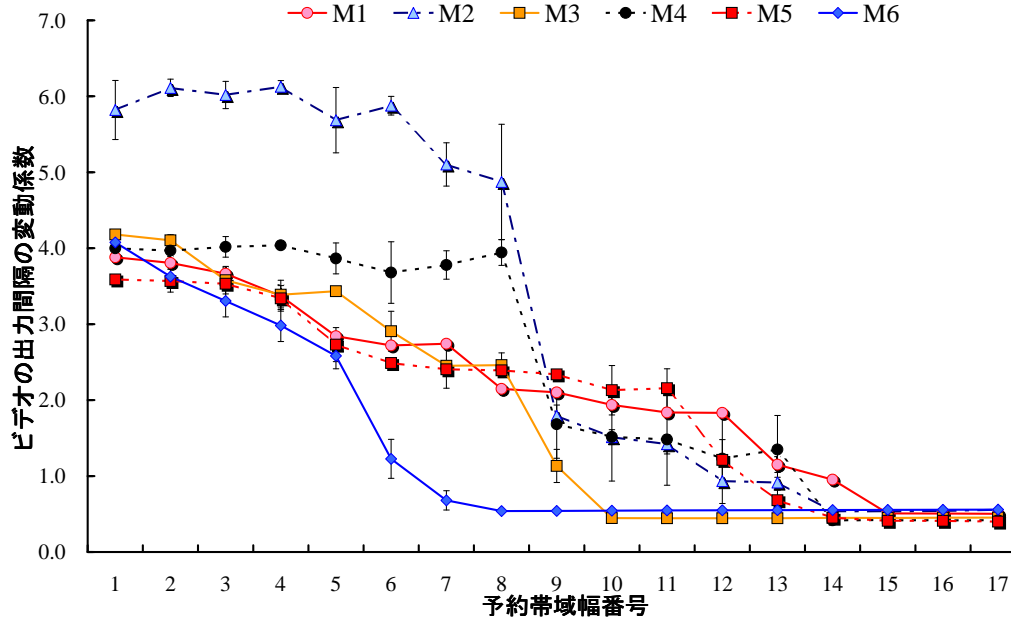


図 4.3: ビデオの出力間隔の変動係数 (ミュージックビデオ)

それらを独立変数から除いても自由度調整済み重相関係数に大きな違いはなかった．よって，すべての場合において， L_v のみを独立変数とする．

ここで， L_v と QoE パラメータ測定値の関係をみたところ，非線形性が確認できた．そこで，独立変数として L_v と L_v^2 の二つを試みたところ， L_v のみよりも高い自由度調整済み重相関係数が得られた．したがって，本節では，独立変数として L_v と L_v^2 を用いることとする．

以下にミュージックビデオの回帰式を示す．式 4.1 ~ 4.6 は M1 ~ M6 に対する個別回帰式，式 4.7 はミュージックビデオのコンテンツタイプに対する代表回帰式である．ただし， \hat{I}_α はコンテンツが α の場合における QoE パラメータの推測値， R^* は自由度調整済み重相関係数とする．

$$\hat{I}_{M1} = 5.26 - 8.83 \times 10^{-2} L_v + 5.86 \times 10^{-4} L_v^2 ; \quad R^* = 0.957 \quad (4.1)$$

$$\hat{I}_{M2} = 5.27 - 1.19 \times 10^{-1} L_v + 1.15 \times 10^{-3} L_v^2 ; \quad R^* = 0.981 \quad (4.2)$$

$$\hat{I}_{M3} = 5.76 - 1.43 \times 10^{-1} L_v + 1.48 \times 10^{-3} L_v^2 ; \quad R^* = 0.989 \quad (4.3)$$

$$\hat{I}_{M4} = 5.61 - 1.27 \times 10^{-1} L_v + 1.11 \times 10^{-3} L_v^2 ; \quad R^* = 0.976 \quad (4.4)$$

$$\hat{I}_{M5} = 4.98 - 8.61 \times 10^{-2} L_v + 6.81 \times 10^{-4} L_v^2 ; \quad R^* = 0.970 \quad (4.5)$$

$$\hat{I}_{M6} = 5.78 - 1.34 \times 10^{-1} L_v + 1.18 \times 10^{-3} L_v^2 ; \quad R^* = 0.978 \quad (4.6)$$

$$\hat{I}_M = 5.50 - 1.88 \times 10^{-1} L_v + 1.03 \times 10^{-3} L_v^2 ; \quad R^* = 0.971 \quad (4.7)$$

式 4.1 ~ 4.6 より，どの回帰式においても R^* が 1 に近く，アプリケーションレベル QoS パラメータから QoE パラメータを高い精度で推定できていることがわかる．また，代表回帰式である式 4.7 から，高い精度で QoE パラメータの推定が可能である．したがって，アプリケーションレベル QoS から QoE を推定できることがわかった．

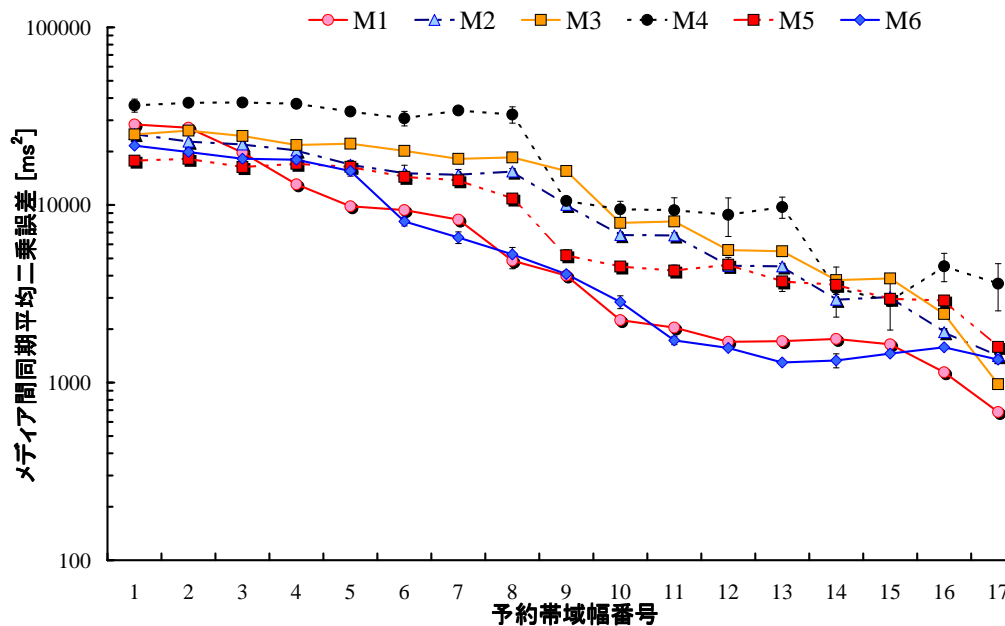


図 4.4: メディア間同期平均二乗誤差 (ミュージックビデオ)

各式の係数を比較すると、コンテンツによってばらつきがあることがわかる。これは、コンテンツの違いが QoE に影響を及ぼすことを裏付けている。

なお、スポーツ、映画、アニメの代表回帰式も、それぞれ、式 4.8～4.10 に示す。これらのコンテンツにおいても R^* が大きく、高い精度で QoE パラメータを推定できるという結果を得た。

$$\hat{I}_S = 5.41 - 1.23 \times 10^{-1} L_v + 8.87 \times 10^{-4} L_v^2; \quad R^* = 0.965 \quad (4.8)$$

$$\hat{I}_F = 5.18 - 1.08 \times 10^{-1} L_v + 6.30 \times 10^{-4} L_v^2; \quad R^* = 0.951 \quad (4.9)$$

$$\hat{I}_A = 5.64 - 1.36 \times 10^{-1} L_v + 1.22 \times 10^{-3} L_v^2; \quad R^* = 0.976 \quad (4.10)$$

4.4.3 QoE パラメータ推定精度比較

前節において、代表回帰式によっても高い精度で QoE パラメータを推定できる結果を得た。ここでは、その有効性を示すため、実際に、コンテンツ毎に個別回帰式と代表回帰式による推定精度の比較を行う。

評価尺度には、カテゴリーヒット率、及び、測定値と各回帰式による推定値との平均平方二乗誤差 (RMSE) を用いる。カテゴリーヒット率とは、測定の数に対し、QoE パラメータの測定値と推定値が評価尺度における同じカテゴリーに属する割合である。実際のサービス運用では、ユーザやコンテンツ配信者の要求する QoE はカテゴリー単位であると想定される。したがって、要求されたカテゴリー範囲内の QoE を提供することが重要であると考え、この尺度を用いる^(注 3)。

(注 3) 要求される QoE はカテゴリー単位であると考えられる一方、QoE パラメータ値がカテゴリーの境界に分布する場合、僅かな値の変化で属するカテゴリーが変わる。この特性の是非を含め、尺度については更なる検討を要する。

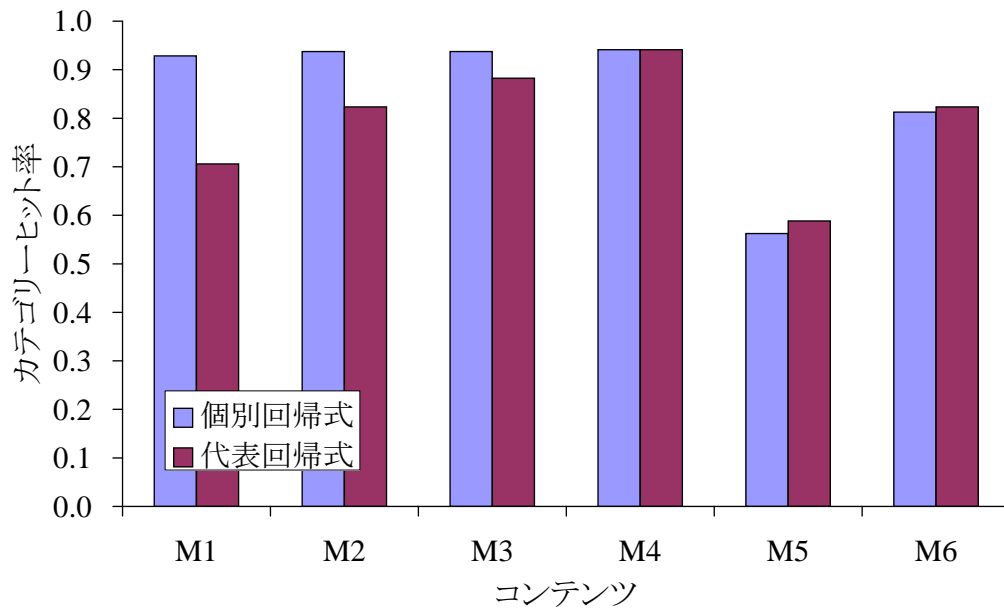


図 4.5: カテゴリーヒット率 (ミュージック)

以下、ミュージックビデオの結果を詳述し、そのほかのコンテンツタイプの結果は簡単に述べる。

ミュージックビデオ

ミュージックビデオにおける測定値に対する個別・代表回帰式のカテゴリーヒット率と RMSE を、それぞれ、図 4.5、4.6 に示す。式 4.1 ~ 4.7 から求めた推定値を、測定値と併せて図 4.7 ~ 4.12 に図示する。横軸はビデオの予約帯域幅である。なお、プロットのない箇所は、検定によって除外されたものである。

図 4.5 より、ミュージックビデオにおける代表回帰式のカテゴリーヒット率は、個別回帰式のそれに近いことがわかる。図 4.6 においても、個別回帰式の値より著しく大きな値はなかった。したがって、ミュージックビデオでは代表回帰式でも QoE パラメータを推定できるといえる。

図 4.7 より、M1 では予約帯域幅 2.583 Mb/s 以下の領域で測定値との誤差が若干あるが、それ以外の領域では個別・代表回帰式のどちらの式も、測定値を良く推定できている。

図 4.8 の M2 では、二つの回帰式の推定値は、ほぼ同じであることが分かる。RMSE、カテゴリーヒット率ともに M1 より良い結果が得られた。予約帯域幅 2.625 Mb/s から 2.675 Mb/s の領域では、代表回帰式の推定値が若干測定値より大きくなっている。これは、予約帯域幅 2.600 Mb/s から 2.625 Mb/s の領域で、測定値が急峻に変化したため、その後の領域の推定が不安定になったと考えられる。

図 4.9 に示す M3 では、予約帯域幅 2.621 Mb/s から 2.648 Mb/s において、急峻に測定値が変化していにも関わらず、個別・代表回帰式のどちらの推定値も測定値を追従している。したがって、カテゴリーヒット率も高い値を示している。

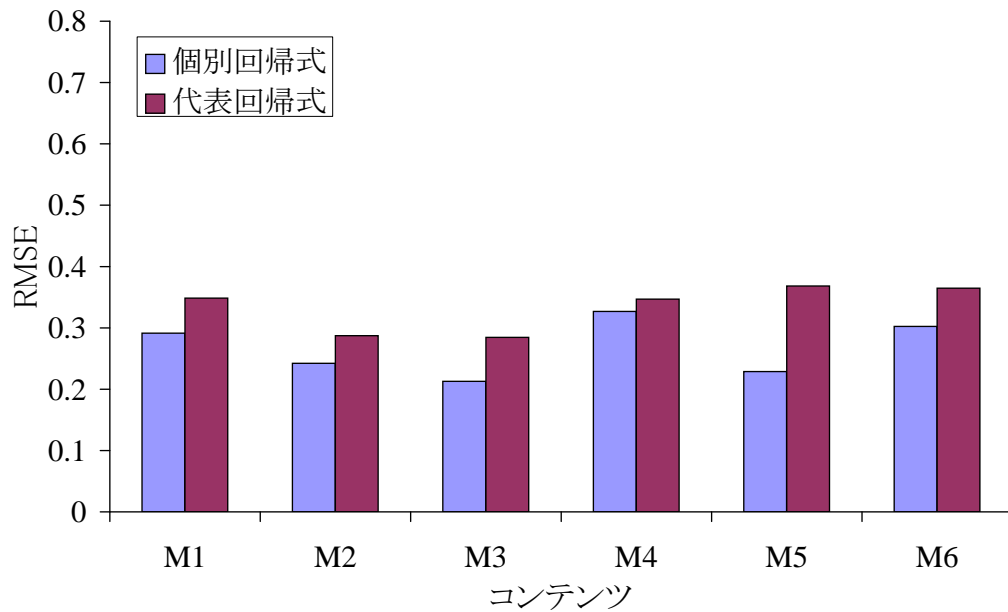


図 4.6: RMSE (ミュージック)

図 4.10 の M4 においても，M3 と同様に予約帯域幅 2.600 Mb/s から 2.605 Mb/s にかけて測定値が大きく変化している．しかし，どちらの回帰式も精度良く測定値を追従している．M3 と比べると，予約帯域幅 2.570 Mb/s と 2.580 Mb/s，及び，2.605 Mb/s から 2.615 Mb/s の領域において，測定値と推定値の間に差があるため，RMSE では M3 に劣るが，カテゴリーヒット率では個別・代表回帰式ともに高い値を示した．

M5 では，カテゴリーヒット率が他に比べて低い．これは，図 4.11 から分かるように，予約帯域幅 2.700 Mb/s 以上の領域で，測定値と推定値がカテゴリー境界付近に分布しているためである．僅かな値の差によって異なるカテゴリーに分類されてしまうため，このような結果となった．実際の運用では，要求された QoE を保証できているかの判断をカテゴリーヒット率のみで行うのではなく，RMSE などの他の尺度も併用するなど，検討が必要である．

M6 に関しては，予約帯域幅 2.892 Mb/s 以上の領域で測定値の乱れがあり，それを回帰式が予測できていない．しかし，同じカテゴリーに入っているためカテゴリーヒット率は高い値を示した．

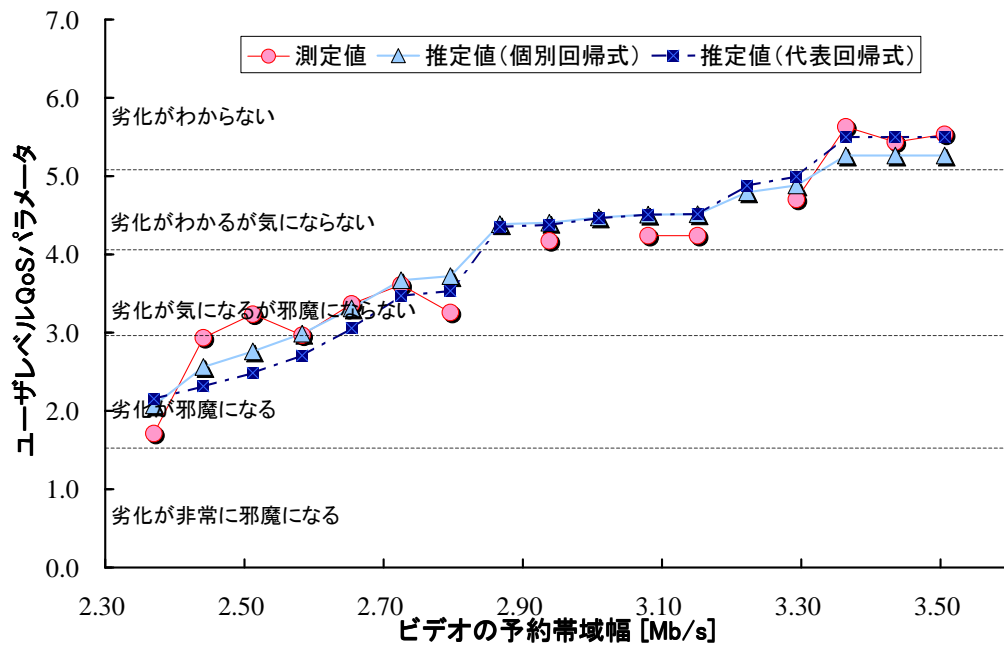


図 4.7: QoE パラメータの測定値と推定値 (M1)

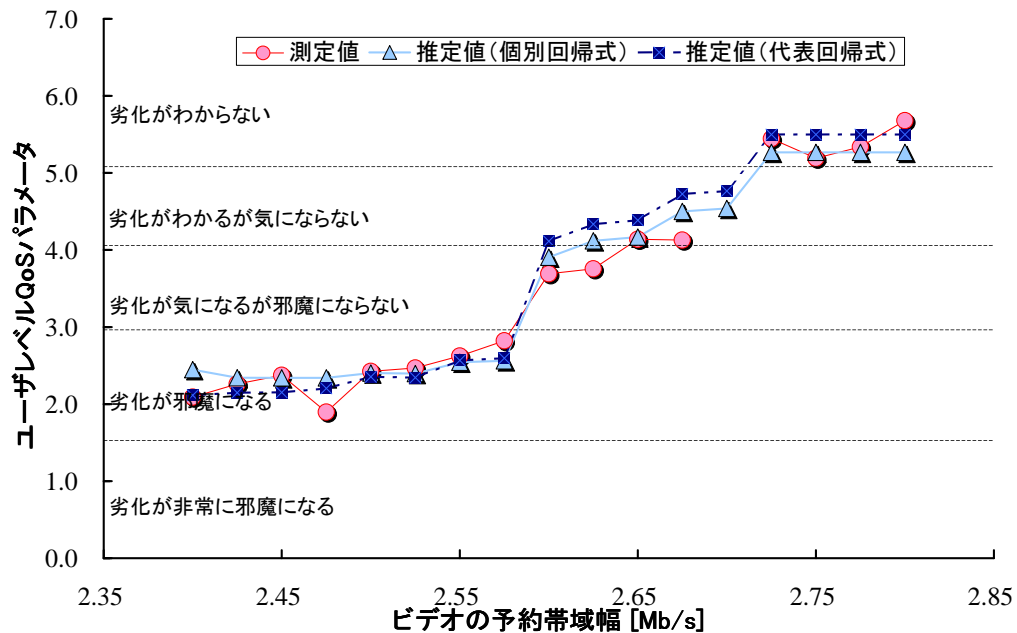


図 4.8: QoE パラメータの測定値と推定値 (M2)

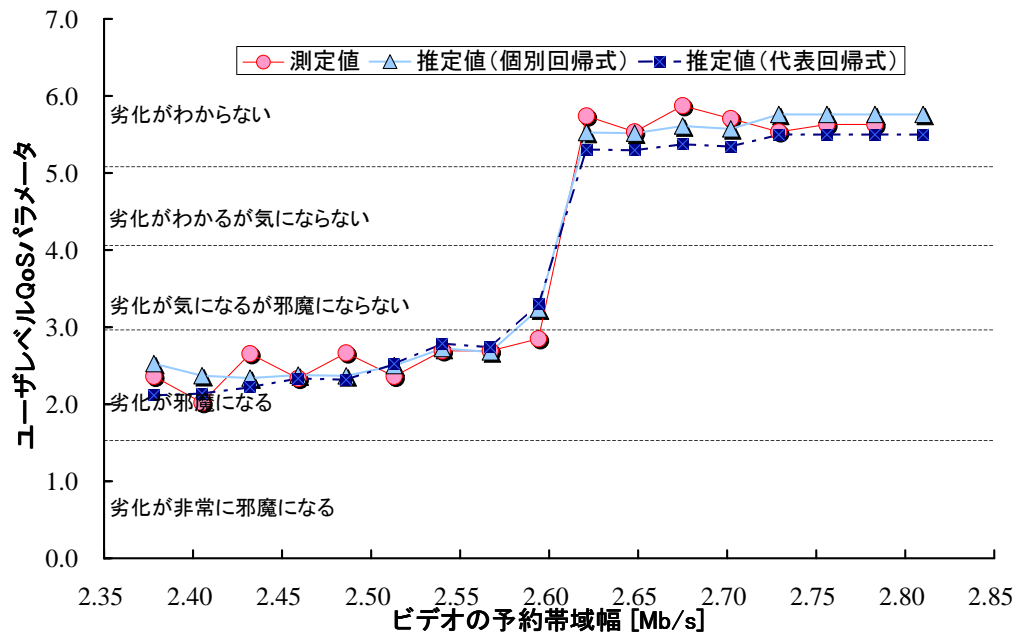


図 4.9: QoE パラメータの測定値と推定値 (M3)

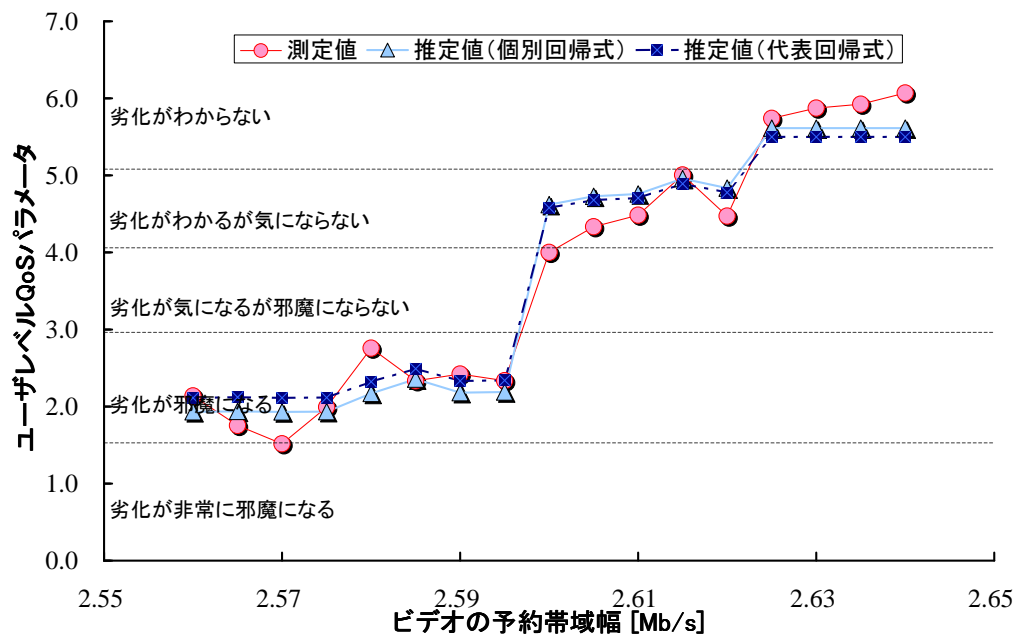


図 4.10: QoE パラメータの測定値と推定値 (M4)

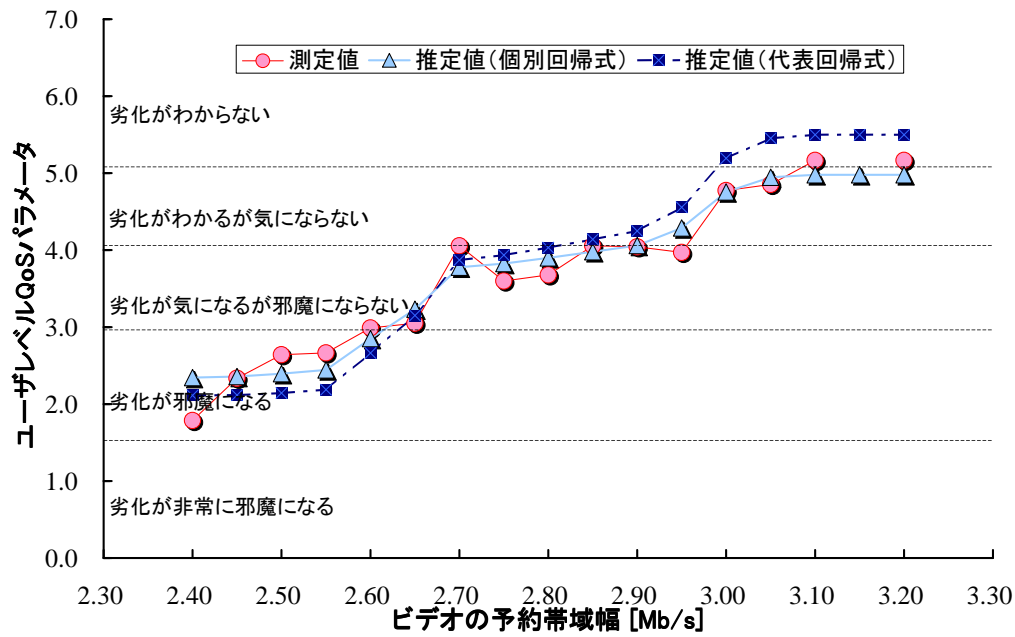


図 4.11: QoE パラメータの測定値と推定値 (M5)

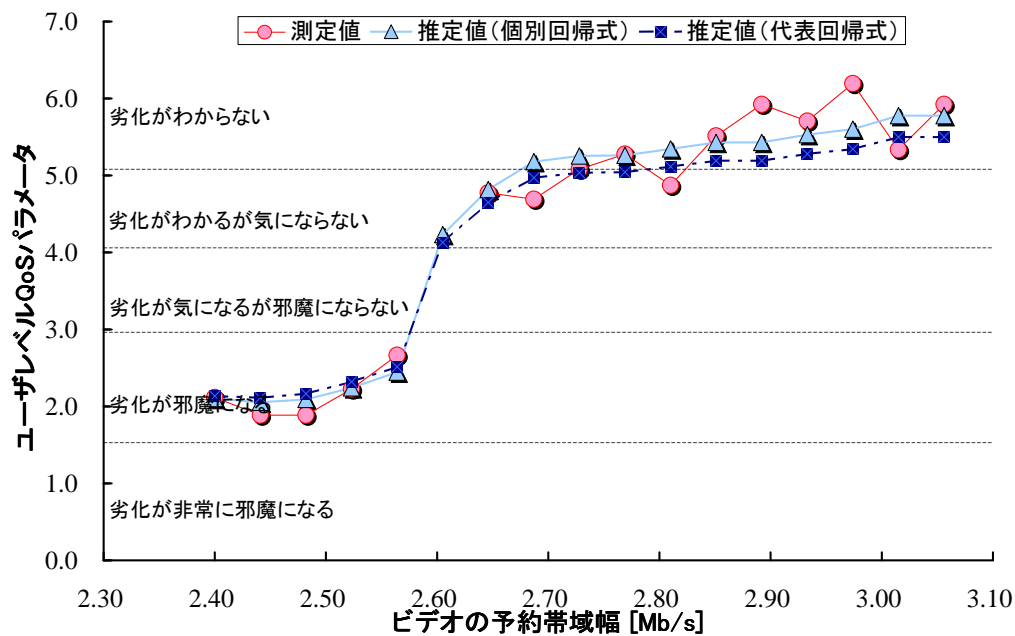


図 4.12: QoE パラメータの測定値と推定値 (M6)

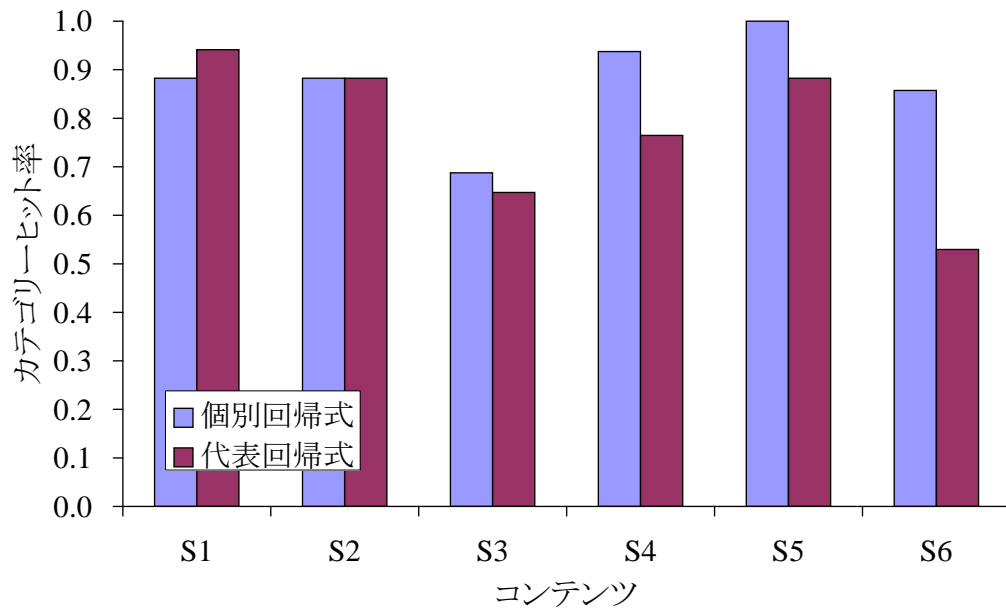


図 4.13: カテゴリーヒット率 (スポーツ)

その他のコンテンツタイプ

以下、ミュージックビデオ以外のコンテンツの推定結果を概説する。図 4.13～4.18 に、それぞれ、スポーツの RMSE とカテゴリーヒット率、映画の RMSE とカテゴリーヒット率、アニメの RMSE とカテゴリーヒット率を示す。

スポーツの場合 (図 4.13, 4.14), S1～S3 では代表回帰式の推定精度が個別回帰式のそれと同等である。一方, S4～S6 では, RMSE において代表回帰式の推定値が個別回帰式のそれに対して, 0.11 から 0.28 大きい。これは, 急峻に測定値が変化する箇所があり, その前後で推定値に誤差が生じているためである。

映画については, 図 4.15 より, コンテンツによって代表回帰式でも十分に QoE 推定可能である。図 4.16 では, F4 の値が大きい, これは測定点のばらつきが大きい, すなわち, 被験者の評価が大きく別れたためである。

アニメでは, 図 4.17 から分かるように, 代表回帰式で推定可能なコンテンツと推定困難なコンテンツに二分される結果となった。図 4.18 より, A5 では平均二乗誤差も大きい。A5 のコンテンツは他のアニメと比べて動きが大きいため, 動画の劣化が QoE に及ぼす影響が大きかったためと考えられる。

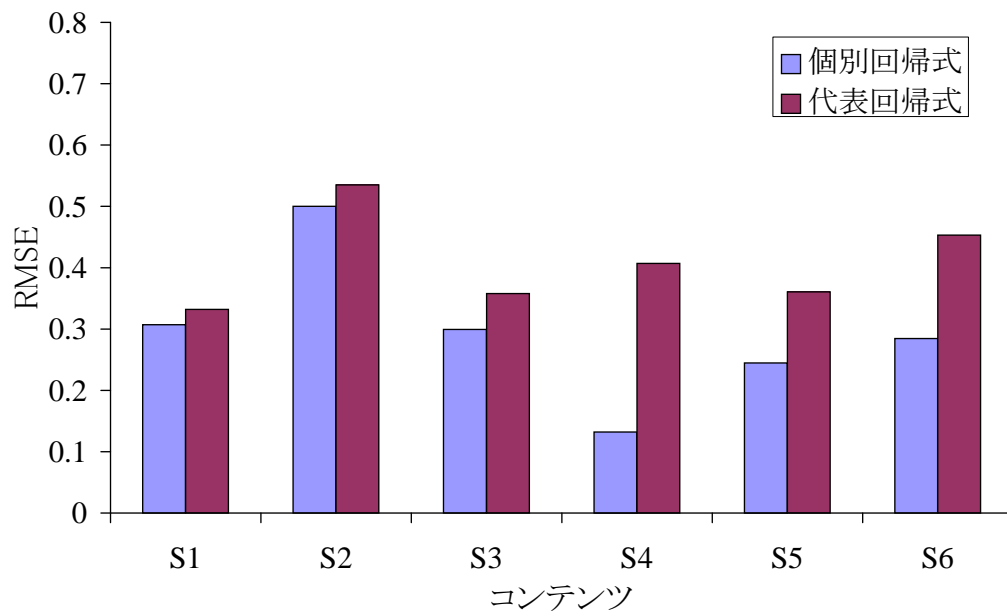


図 4.14: RMSE (スポーツ)

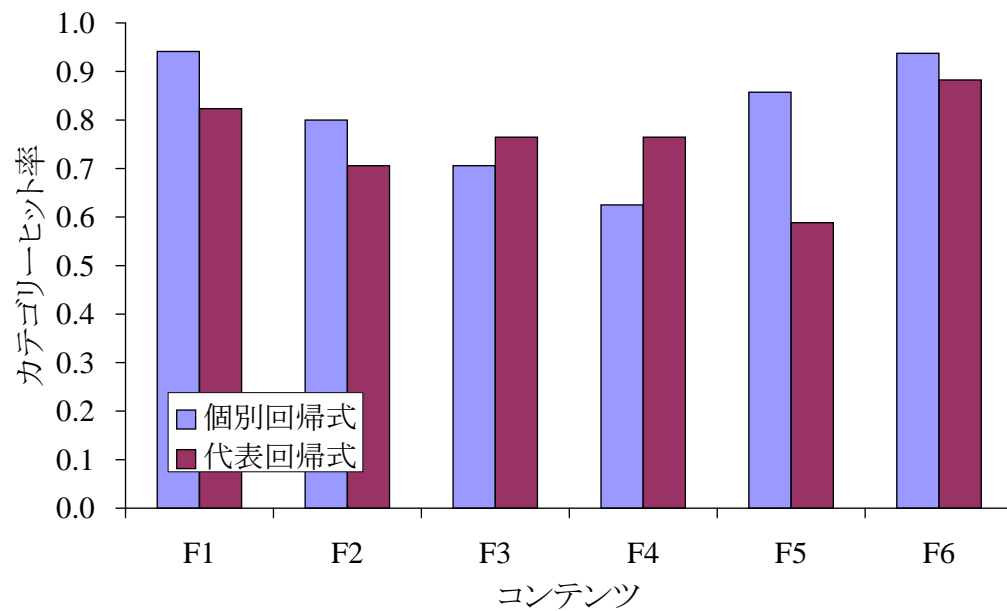


図 4.15: カテゴリーヒット率 (映画)

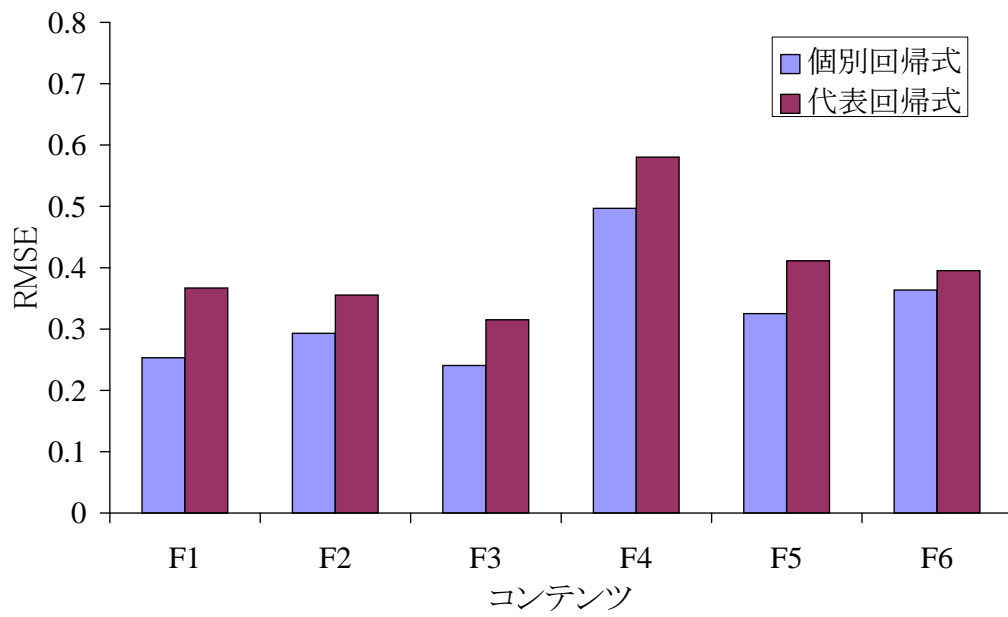


図 4.16: RMSE (映画)

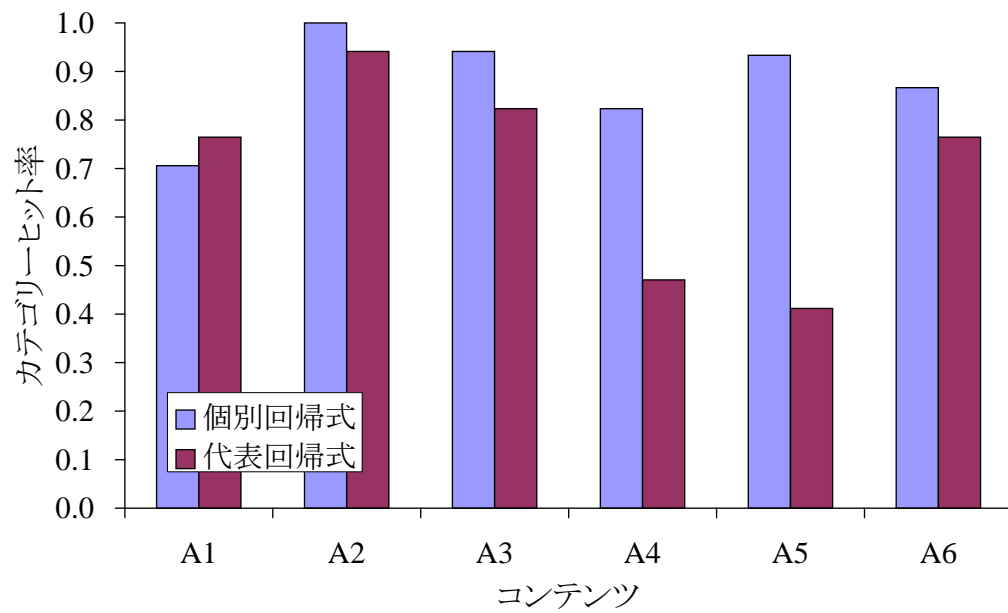


図 4.17: カテゴリーヒット率 (アニメ)

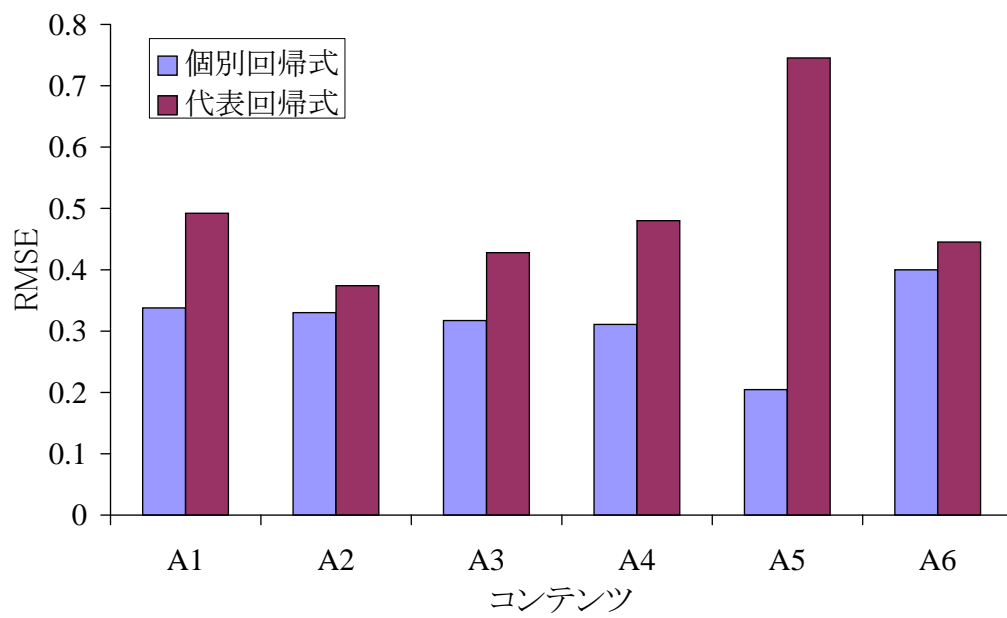


図 4.18: RMSE (アニメ)

4.5 むすび

本章では，帯域保証された IP ネットワークにおいて音声・ビデオをストリーミング伝送する際，アプリケーションレベル QoS パラメータから QoE パラメータを推定できるかどうかを検討した．特に，無数にあるコンテンツをタイプに分類し，タイプ内の多くのコンテンツから求めた代表回帰式によって個々のコンテンツの QoE パラメータを推定する手法を提案し，実験によって推定精度を測定した．

実験では，ミュージック，スポーツ，映画，アニメの四つのコンテンツタイプに対して，それぞれ六つのコンテンツを扱った．客観評価と主観評価のマッピング結果から，コンテンツ毎の個別回帰式と代表回帰式を求め，それぞれの推定値と測定値を比較することにより，提案手法の有効性を検証した．

その結果，個別回帰式で QoE パラメータを推定できることを確認し，さらに，多くのコンテンツでは代表回帰式によっても，個別回帰式と同等の精度で推定が可能であった．推定精度が低い場合は，QoE パラメータがカテゴリーの境界付近に分布していたり，コンテンツの内容がそのコンテンツタイプの主流でないものであった．

本章では MU 誤りへの対処方法としてフレームスキップを対象としたが，今後，音声・ビデオの空間品質を考慮した対処方法の検討が必要である．また，メディアの符号化方式や符号化パラメータによる影響も考慮した議論を要する．

第5章 結論

本論文では、様々な形態の IP ネットワークを対象とし、種々の QoS 制御を適用した場合の音声・ビデオストリーミング伝送サービス、Web アクセスサービスのアプリケーション QoS 評価を行った。さらに、音声・ビデオストリーミング伝送サービスに関しては QoE 測定を行い、QoE に基づいた IP ネットワークの設計指針を明らかにした。また、アプリケーションレベル QoS から QoE を推定する手法を提案し、その有効性を示した。

第 2 章では、DiffServ AF サービスにおいて、音声・ビデオストリームや HTML フローに付与する AFCP がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響が不明であることに注目した。実験では、HTML フローに付与する AFCP を変更し、音声・ビデオストリーミング伝送サービスと Web アクセスサービスのアプリケーションレベル QoS を評価した。また、ネットワークが大規模になった場合を想定し、HTML フローに遅延を加えた場合も測定を行った。その結果、次の結論を得た。

- Web アクセスサービスを重視する場合、HTML フローの一部が転送保証されるよう、AFCP を付与すればよい。
- 音声・ビデオストリーミングサービスを重視する場合、HTML フローをビデオと同じ Class で転送し、HTML フローの廃棄確率をビデオのそれよりも高くするように AFCP を付与すればよい。
- トレードオフの観点からは、HTML フローと音声・ビデオストリームを別の Class にし、尚且つ、HTML フローの最低保証帯域幅を音声・ビデオのそれよりも狭くする AFCP を設定すればよい。
- ネットワークが大きい場合、音声・ビデオストリーミングサービスの観点からも、Web アクセスサービスを重視したネットワーク設計を行ってよい。

第 3 章では、第 2 章の DiffServ で用いたノードレベル QoS 制御に焦点を絞った。ノードレベルの QoS 制御技術である WFQ スケジューリングをとりあげ、WFQ スケジューラの配置が音声・ビデオストリーミング伝送に及ぼす影響を検討した。検討では、必ずしもすべてのノードに WFQ をできない点を考慮し、単一ノードに WFQ が適用される場合、メディア送信端末最近傍ノードから繰り返し適用される場合、メディア受信端末最近傍ノードから繰り返し適用される場合、ネットワークの中心から繰り返し適用される場合、ネットワークの両端から繰り返し適用される場合の五つを対象にシミュレーションを行った。また、WFQ ノードの配置が QoE に及ぼす影響を調査した。その結果、以下の結論を得た。

- メディア送信端末最近傍のノード，及び，最もふくそうするノードに WFQ を適用すると，高いアプリケーションレベル QoS が得られる．
- リアルタイム性を重視しない場合，メディア同期制御を併用し，ふくそうするノードにのみ WFQ を適用すれば，高いアプリケーションレベル QoS を得られる．
- QoE の観点からは，すべてのノードに WFQ を適用する場合，メディア送信端末最近傍のノードと最もふくそうするノードに適用する場合，最もふくそうするノードへのみ適用する場合のどれも同等の主観品質となった．したがって，最もふくそうするノードへ WFQ を適用するのみでよい．

第 4 章では，QoS から QoE を推定する際の回帰式について議論した．QoE がコンテンツタイプに依存することに注目し，代表的な回帰式を求める方法を提案した．提案手法では，コンテンツをタイプに分け，タイプ内の複数のコンテンツから代表回帰式を求める．実機による実験と主観評価により，提案する代表回帰式の有効性を調査した．その結果，次の結論を得た．

- 個別回帰式によって，アプリケーションレベル QoS から QoE を高い精度で推定することが可能である．
- 代表回帰式の QoE 推定精度は，多くのコンテンツにおいて，個別回帰式のそれと同等であった．

以上の結論から，音声・ビデオストリーミングサービス，及び，Web アクセスサービスに適した DiffServ AF サービスによる QoS 制御方法を明らかにすることができた．また，パケットスケジューラによる QoS 制御を行う場合，ネットワークのどの部分に QoS 制御を適用すれば，高いアプリケーションレベル QoS，及び，QoE を得られるか分かった．さらに，アプリケーションレベル QoS から QoE を推定する際，代表回帰式を使うことにより，膨大なコンテンツを調査するコストを省くことが可能となった．

これらの成果は，ネットワーク技術者，及び，コンテンツプロバイダなどにとって，効率よく高品質なサービスを実現する IP ネットワークの設計・運用の指針となる．

今後に残された課題は，次のとおりである．

- 音声・ビデオの時間，及び，空間品質を考慮した QoS 制御の検討．
- 異なる QoS 保証網を相互接続した場合における，マルチメディアのアプリケーションレベル QoS，及び，QoE の検討．
- QoE 推定代表回帰式の信頼性向上のための検討．

謝辞

本研究において、終始熱心に御指導並びに御助言を頂いた田坂修二教授には、深く感謝し、厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行において御議論頂きました石橋豊教授に感謝致します。そして、本論文をまとめるにあたり、有益な御助言を頂きました松尾啓志教授に感謝致します。さらに、日頃から研究の相談に応じてくださった布目敏郎助教に感謝致します。

実験を始めるにあたり、御助言を頂いた元大学院生の伊藤健二氏（現在、株式会社豊田中央研究所勤務）に感謝致します。論文資料の提供をして頂いた平松和之氏（現在、東海旅客鉄道株式会社（JR 東海）勤務）には御礼申し上げます。

末筆ながら、日頃お世話になりました本研究室の皆様、並びに関係者各位に感謝致します。

参考文献

- [1] J. Postel, “Internet protocol,” RFC791, Sep. 1981.
- [2] 嶋 久登, “DLNA 規格と実用化動向”, 映情学誌, vol. 63, no. 7, pp. 901–905, 2009.
- [3] A. Vogel, B. Kerhervé, G. v. Bochmann and J. Gecsei, “Distributed multimedia and QoS: A survey,” *IEEE Multimedia*, vol. 2, no. 2, pp. 10–19, Summer 1995.
- [4] C.-S. Lee and D. Knight, “Realization of the next-generation network,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 10, pp. 34–41, Oct. 2005.
- [5] ITU-T Rec. T. 100/P. 10 Amendment 1, “Amendment 1: New appendix 1 — definition of quality of experience (QoE),” Feb. 2007.
- [6] S. Tasaka and Y. Ishibashi, “Mutually compensatory property of multimedia QoS,” in *Conf. Rec. IEEE ICC2002*, pp. 1105–1111, Apr./May 2002.
- [7] G. Blakowski and R. Steinmetz, “A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 5–35, Jan. 1996.
- [8] ITU-T Rec. G. 711, “Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies,” Nov. 1988.
- [9] ISO/IEC 11172-3, “Information technology — coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s — part 3: Audio,” Aug. 1993.
- [10] ISO/IEC 13818-7, “Information technology — generic coding of moving pictures and associated audio information — part 7: Advanced audio coding (AAC),” Jan. 2006.
- [11] ISO/IEC 14496-3, Subpart 4, “Information technology — coding of audio-visual objects — part 3: Audio,” Dec. 2005.
- [12] G. K. Wallace, “The JPEG still picture compression standard,” *Commun. ACM*, vol. 34, no. 4, pp. 30–44, Apr. 1991.

- [13] ISO/IEC 11172-2, “Information technology — coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s — part 2: Video,” Aug. 1993.
- [14] ISO/IEC 13818-1, “Information technology — generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems,” Oct. 2007.
- [15] ITU-T Rec. H.264, “Advanced video coding for generic audiovisual services,” Mar. 2005.
- [16] 間瀬憲一 編著. マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質. 電子情報通信学会, 1998.
- [17] R. Steinmetz, “Human perception of jitter and media synchronization,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 61–72, Jan. 1996.
- [18] ITU-T Rec. G. 114, “Transmission systems and media, general characteristics of international telephone connections and international telephone circuits: One-way transmission time,” Feb. 1996.
- [19] ITU-T Rec. P.800, “Methods for subjective determination of transmission quality,” Aug. 1996.
- [20] 田中 良久. 心理学的測定法 第二版. 東京大学出版会, 1997.
- [21] F. Mosteller, “Remarks on the method of paired comparisons: III. a test of significance for paired comparisons when equal standard deviations and equal correlations are assumed,” *Psychometrika*, vol. 16, no. 2, June 1951.
- [22] S. Tasaka and Y. Ito, “Psychometric analysis of the mutually compensatory property of multimedia QoS,” in *Conf. Rec. IEEE ICC2003*, pp. 1880–1886, May 2003.
- [23] Y. Ishibashi and S. Tasaka, “A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications,” in *Proc. IEEE INFOCOM’95*, pp. 1010–1019, Apr. 1995.
- [24] R. Braden, D. Clark and S. Shenker, “Integrated services in the Internet architecture: An overview,” RFC 1633, June 1994.
- [25] S. Blake, D. Blake, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang and W. Weiss, “An architecture for differentiated services,” RFC 2475, Dec. 1998.
- [26] D. Grossman, “New terminology and clarifications for diffserv,” RFC 3260, Apr. 2002.
- [27] J. Wroclawski, “The use of RSVP with IETF integrated services,” RFC 2210, Sep. 1997.

- [28] S. Shenker, C. Partridge and R. Guerin, “Specification of guaranteed quality of service,” RFC 2212, Sep. 1997.
- [29] J. Wroclawski, “Specification of the controlled-load network element service,” RFC 2211, Sep. 1997.
- [30] K. Nichols, S. Blake, F. Baker and D. Black, “Definition of the differentiated services field (DS field) in the IPv4 and IPv6 headers,” RFC 2474, Dec. 1998.
- [31] K. Ramakrishnan, S. Floyd and D. Black, “The addition of explicit congestion notification (ENC) to IP,” RFC 3168, Sep. 2001.
- [32] S. Deering and R. Hinden, “Internet protocol, version 6 (IPv6),” RFC 2460, Dec. 1998.
- [33] J. Abley, P. Savola and G. Neville-Neil, “Deprecation of type 0 routing headers in IPv6,” RFC 5095, Dec. 2007.
- [34] B. Davie, A. Charny, J.C.R. Bennett, K. Benson, J.Y. Le Boudec, W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu and D. Stiliadis, “An expedited forwarding PHB (per-hop behavior,” RFC 3246, June 2002.
- [35] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss and J. Wroclawski, “Assured forwarding PHB group,” RFC 2597, June 1999.
- [36] S. Vegesna. *IP Quality of Service*. Cisco Press, 2001.
- [37] A. Demers and S. Shenker, “Analysis and simulation of a fair queueing algorithm,” in *Proc. ACM SIGCOMM’89*, vol. 19, no. 4, pp. 1–12, Sep. 1989.
- [38] A. K. Parekha and R. G. Gallager, “A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 3, pp. 344–357, June 1993.
- [39] S. Floyd and V. Jacobson, “Random early detection gateways for congestion avoidance,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 397–413, Aug. 1993.
- [40] NTT ぷらら ひかり TV, <http://www.hikaritv.net/>.
- [41] 田辺 暁弘, 引地 考文, “IPTV サービス「ひかり TV」”, *映情学誌*, vol. 63, no. 5, pp. 595–599, May 2009.
- [42] 伊藤健二, 竹尾 淳, 田坂修二, 石橋 豊, “DiffServ における AF サービスの連続メディア同期品質”, *信学技報*, CQ2001–38, July 2001.
- [43] 竹尾 淳, 田坂修二, 石橋 豊, “DiffServ AF サービスにおける TCP と UDP フローがメディア同期品質に及ぼす影響”, *信学技報*, CQ2001–47, Sep. 2001.

- [44] 竹尾 淳, 田坂修二, 石橋 豊, “チャンネル伝搬遅延と負荷データが DiffServ AF サービスのメディア同期品質に及ぼす影響”, 信学技報, NS2001-154, CQ2001-66, TM2001-44, Nov. 2001.
- [45] N. Bhatti, A. Bouch and A. Kuchinsky, “Integrating user-perceived quality into web server design,” *Computer Networks*, vol. 33, no. 1-6, pp. 1-16, 2000.
- [46] S. Chandra, C. S. Ellis and A. Vahdat, “Applicatoin-level differentiated multimedia web services using quality aware transcoding,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, Dec. 2000.
- [47] M. Christiansen, K. Jeffay, D. Ott and F. D. Smith, “Tuning RED for web traffic,” in *Proc. ACM SIGCOMM2000*, pp. 139-150, Aug./Sep. 2000.
- [48] H. Chen and P. Mohapatra, “Session-based overload control in QoS-aware web servers,” in *Proc. IEEE INFOCOM2002*, June 2002.
- [49] 竹尾 淳, 田坂修二, “Diffserv AF サービスにおける Web アクセスと連続メディア転送のアプリケーションレベル QoS”, 信学ソ大, B-11-23, Sep. 2002.
- [50] Mindcraft Inc., Mindcraft – Webstone Benchmark Information, <http://www.mindcraft.com/webstone/>.
- [51] T. Berners-Lee, R. Fielding and H. Frystyk, “Hypertext transfer protocol — HTTP/1.0,” RFC 1945, May 1996.
- [52] S. Floyd and T. Henderson, “The NewReno modification to TCP’s fast recovery algorithm,” RFC 2583, Apr. 1999.
- [53] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick and V. Jacobson, “RTP: A transport protocol for real-time applications,” RFC 1889, Jan. 1996.
- [54] S. Tasaka, T. Nunome and Y. Ishibashi, “Live media synchronization quality of a retransmission-based error recovery scheme,” in *Conf. Rec. IEEE ICC2000*, pp. 1535-1541, June 2000.
- [55] M. C. Yuang, J. Shih and Po-L. Tien, “A QoS packet/burst scheduler for broadband networks,” in *Conf. Rec. IEEE ICC2002*, Apr. 2002.
- [56] R. Guérin, S. Kamat, V. Peris and R. Rajan, “Scalable QoS provision through buffer management,” in *Proc. ACM SIGCOMM’98*, vol. 28, no. 4, pp. 29-40, Oct. 1998.
- [57] M. A. Marsan, M. Franceschinis, E. Leonardi, F. Neri and A. Tarelli, “Instability phenomena in underloaded packet networks with QoS schedulers,” in *Proc. IEEE INFOCOM2003*, Mar./Apr. 2003.

- [58] R. Guérin and V. Peris, “Quality-of-service in packet networks basic mechanisms and directions,” *Comput. Netw.*, vol. 31, no. 3, pp. 169–189, Feb. 1999.
- [59] D. A. Hayes, M. Rumsewicz and L. L. H. Andrew, “Quality of service driven packet scheduling disciplines for real-time applications: Looking beyond fairness,” in *Proc. IEEE INFOCOM’99*, pp. 405–412, Mar. 1999.
- [60] Y.-C. Tu, M. C. Chen, Y. S. Sun and W.-K. Shih, “Bulk scheduling for delay sensitive streaming applications,” in *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2006*, no. 1, pp. 2261–2266, Nov. 2006.
- [61] P. Goyal, S. S. Lam and H. M. Vin, “Determining end-to-end delay bounds in heterogeneous networks,” *Proc. of International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video*, Apr. 1995.
- [62] J. Kaur and H. M. Vin, “End-to-end fairness analysis of fair queuing networks,” Dec. 2002.
- [63] G. Lu, Y. Chen, S. Birrer, F. E. Bustamante, C. Y. Cheung and X. Li, “End-to-end inference of router packet forwarding priority,” no. 1, pp. 1783–1791, May 2007.
- [64] S. J. Golestani, “A self-clocked fair queueing scheme for broadband applications,” in *Proc. IEEE INFOCOM’94*, vol. 2, pp. 636–646, June 1994.
- [65] PlanetLab — An open platform for developing, deploying, and accessing planetary-scale services, <http://www.planet-lab.org/>.
- [66] K. Ito, S. Tasaka and Y. Ishibashi, “Media synchronization quality of packet scheduling algorithms,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E85-B, no. 1, Jan. 2002.
- [67] 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “複数ノードのパケットスケジューリングがメディア同期品質に及ぼす影響”, 2001 信学総大, B-11-18, Mar. 2001.
- [68] 竹尾 淳, 田坂修二, “WFQ スケジューラの配置がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響”, 信学技報, NS2003-189, CQ2003-106, TM2003-67, Nov. 2003.
- [69] 竹尾 淳, 田坂修二, “ドメイン間にボトルネックリンクがある場合の WFQ スケジューラが QoE に及ぼす影響”, 信学ソ大, B-11-7, Sep. 2009.
- [70] 竹尾 淳, 田坂修二, “縦続接続されたネットワークにおける WFQ スケジューラの配置がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響”, 信学ソ大, B-11-14, Sep. 2003.
- [71] ITU-T Rec. J. 143, “User requirements for objective perceptual video quality measurements in digital cable television,” May 2000.

- [72] M. Ries, C. Crespi, O. Nemethova and M. Rupp, “Content based video quality estimation for H.264/AVC video streaming,” in *Conf. Rec. IEEE WCNC2007*, no. 1, pp. 2506–2511, Mar. 2007.
- [73] K. Yamagishi and T. Hayashi, “Parametric packet-layer model for monitoring video quality of IPTV services,” in *Conf. Rec. IEEE ICC2008*, vol. 31, no. 1, pp. 110–114, May 2008.
- [74] S. Tasaka and Y. Ito, “Real-time estimation of user-level QoS of audio–video transmission over ip networks,” in *Conf. Rec. IEEE ICC2006*, no. 1, pp. 878–884, June 2006.
- [75] S. Tasaka and Y. Watanabe, “Real-time estimation of user-level QoS in audio–video IP transmission by using temporal and spatial quality,” in *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2007*, no. 1, pp. 2653–2658, Nov. 2007.
- [76] S. Tasaka, H. Yoshimi, A. Hirashima and T. Nunome, “The effectiveness of a QoE-based video output scheme for audio–video IP transmission,” in *Proc. ACM Multimedia2008*, pp. 259–268, Oct. 2008.
- [77] S. Tasaka, Y. Ito, H. Yamada and J. Sako, “A method of user-level QoS guarantee by session control in audio–video transmission over IP networks,” in *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2006*, Nov. 2006.
- [78] The Video Quality Experts Group Web Site,
<http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/>.

発表論文一覧

学術論文（査読あり）

1. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “DiffServ AF サービスにおける連続メディア転送のアプリケーションレベル QoS 評価”, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J85-B, no. 12, pp. 2331–2341, Dec. 2002.
2. 竹尾 淳, 田坂 修二, “音声・ビデオストリーミング IP 伝送のアプリケーションレベル QoS を向上する WFQ スケジューラの配置”, 映像情報メディア学会誌, vol. 63, no. 9, Sep. 2009.
3. 竹尾 淳, 田坂 修二, “音声・ビデオストリーミング IP 伝送における QoE を考慮した WFQ スケジューラの配置”, 映像情報メディア学会誌 研究速報, 掲載予定, vol. 63, no. 11, Nov. 2009.

国際会議（査読あり）

1. J. Takeo and S. Tasaka, “Application-Level QoS of Web Access and Streaming Services with AF Service on DiffServ,” Conf. Rec. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2003), vol. 6, pp. 3590–3595, Dec. 2003.

国内研究会（査読なし）

1. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “連続メディア再送制御方式 RVTR の MPEG への拡張”, 電気学会東海支部若手セミナー, Mar. 2000.
2. 伊藤 健二, 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “DiffServ における AF サービスの連続メディア同期品質”, 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2001–38, July 2001.
3. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “DiffServ AF サービスにおける TCP と UDP フローがメディア同期品質に及ぼす影響”, 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2001–47, Sep. 2001.
4. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “チャネル伝搬遅延と負荷データが DiffServ AF サービスのメディア同期品質に及ぼす影響”, 電子情報通信学会技術研究報告, NS2001–154, CQ2001–66, TM2001–44, Nov. 2001.

5. 竹尾 淳, 田坂 修二, “DiffServ AF サービスによる Web アクセスとストリーミング伝送のアプリケーションレベル QoS 評価”, 電気学会東海支部若手セミナー, Aug. 2002 .
6. 竹尾 淳, 田坂 修二, “WFQ スケジューラの配置がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響”, 電子情報通信学会技術研究報告, NS2003-189 , CQ2003-106 , TM2003-67 , Nov. 2003 .

国内大会（査読なし）

1. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “MPEG ビデオ・音声転送への再送制御方式 RVTR 及びトラフィック制御の適用”, 2000 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-12 , Sep./Oct. 2000 .
2. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “FEC を用いたライブ音声・ビデオ伝送のメディア同期品質”, 2001 年電子情報通信学会総合大会, B-11-19 , Mar. 2001 .
3. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “DiffServ AF サービスのための帯域割当方法がメディア同期品質に及ぼす影響”, 2001 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-3 , Sep. 2001 .
4. 竹尾 淳, 田坂 修二, 石橋 豊, “DiffServ の複数サービスを用いた連続メディア転送のアプリケーションレベル QoS” 2002 年電子情報通信学会総合大会, B-6-97 , Mar. 2002 .
5. 竹尾 淳, 田坂 修二, “DiffServ AF サービスにおける Web アクセスと連続メディア伝送のアプリケーションレベル QoS”, 2002 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-23 , Sep. 2002 .
6. 竹尾 淳, 田坂 修二, “DiffServ におけるストリーム数がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響”, 2003 年電子情報通信学会総合大会, B-11-22 , Mar. 2003 .
7. 竹尾 淳, 田坂 修二, “従続接続されたネットワークにおける WFQ スケジューラの配置がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響”, 2003 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-14 , Sep. 2003 .
8. 竹尾 淳, 山田 洋行, 田坂 修二, “DSCP のリマークが音声・ビデオ伝送のアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響”, 2004 年電子情報通信学会総合大会, B-6-143 , Mar. 2004 .
9. 竹尾 淳, 田坂 修二, “ドメイン間にボトルネックがある場合の WFQ スケジューラが QoS に及ぼす影響”, 2009 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-7 , Sep. 2009 .