

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

Arrangement of WFQ Schedulers for Enhancement of Application-level QoS in Audio-Video Streaming IP Transmission

学生会員 竹尾 淳[†], 田坂 修二[†]

Jun Takeo[†] and Shuji Tasaka[†]

Abstract We investigated how the arrangement of two packet scheduling algorithms (WFQ and FIFO) affects the application-level QoS of an audio-video streaming service over IP networks (typified by IPTV). We ran two computer simulations: (i) only the packet scheduling algorithms were applied, and (ii) both the packet scheduling algorithms and a media synchronization control were applied. Results showed that in case (i), a high application-level QoS with a relatively low delay was achieved when the WFQ was applied to congested nodes and to the node next to the media senders. In case (ii), a high QoS was achieved independently of the arrangement of WFQ nodes only if the bandwidth requirement was satisfied at the congested nodes.

キーワード：音声・ビデオIP伝送，ストリーミング，WFQ，スケジューラ配置，アプリケーションレベルQoS，メディア同期

1. ま え が き

インターネットに代表されるIPネットワークにおいて、高速アクセス回線の普及により、IPTV、コンサートのライブ中継、ビデオチャットなど、音声・ビデオをストリーミングIP伝送するサービスに高い関心が寄せられている。これらのサービスが送出するフローには時間構造があるため、この構造が乱されるとQoS（Quality of Service，サービス品質）が劣化する。

IPネットワークの転送機能は階層構造を成しており、物理、ノード（リンク）、ネットワーク、エンド・ツー・エンド（トランスポート）、アプリケーションの5レベルに分けられる。QoSの制御・評価項目も、それぞれのレベルごとに定義することができる¹⁾。例えば、音声・ビデオストリーミングIP伝送では、ネットワーク上で劣化した時間構造を回復するために、アプリケーションレベルのQoS制御である連続メディア同期制御が有効である²⁾。また、より高いQoSを保つためには、複数のレベルにおけるQoS制御が有効である。

QoS制御には数多くの方法があり、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^{3)~6)}。例えば、文献4)では、WFQ (Weighted Fair Queueing)⁷⁾⁸⁾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9)10)などがある。文献9)で

2009年3月31日受付，2009年6月22日再受付，2009年7月16日採録
†名古屋工業大学 大学院 工学研究科

(〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町1, TEL 052-732-2111)

† Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
(1, Gokiso-cho, Syowa-ku, Nagoya 466-8555, Japan)

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を対象とした検討が必要がある。文献 11)~13) ではその試みが行われている。文献 11) では、エンド-エンド間のノードに WFQ や SCFQ (Self-Clocked Fair Queueing)¹⁴⁾ 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 12) 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 13) では、シミュレーションと解析に加え、162 個の PlanetLab¹⁵⁾ 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。

ユーザの体感品質 (QoE: Quality of Experience) 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 (Protocol Data Unit, 本論文では、これを MU (Media Unit) と呼び、音声では一定個数のサンプル、ビデオでは 1 フレームに相当する) 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 16) 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 17) 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。

そこで本論文では、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 (メディア同期制御) の有無が連続メディア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。

以下、2) において、本論文のシミュレーションで用いたノードレベルとアプリケーションレベルの QoS 制御を概説する。そして、3) にてシミュレーション条件を示し、4) で結果と考察を述べる。

2. ノードレベルとアプリケーションレベルの QoS 制御技術

本論文では、ノードレベルとアプリケーションレベルの QoS 制御を検討する。シミュレーションでは、それぞれの QoS 制御技術として、WFQ パケットスケジューラと VTR (Virtual-Time Rendering) メディア同期アルゴリズム¹⁸⁾ を用いる。

2.1 WFQ スケジューリング

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り当てされる。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。

2.2 VTR メディア同期アルゴリズム

VTR メディア同期アルゴリズムは、ネットワーク遅延の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

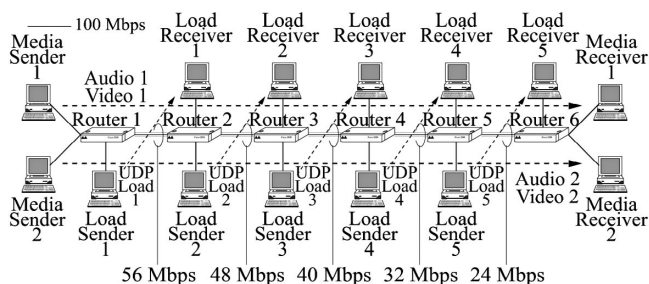


図 1 シミュレーションでのネットワーク構成
Network configuration in simulation.

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。

3. シミュレーション条件

本論文では、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した。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。

シミュレーションで用いたネットワーク構成を図 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 Mbps 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 Mbps 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 Mbps 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 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ド長 1472 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 トラヒックなどの多量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。

表 1 音声とビデオの仕様
Specifications of the audio and video streams.

	Audio 1	Audio 2	Video 1	Video 2
符号化方式	ITU-T G.711	μ -law	MPEG-1 (CBR)	
ピクチャパターン			IPPPPP	
ビットレート [kbps]	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 2 各フローの優先度と割当帯域幅
Priority of each flow and its allocated bandwidth.

	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 の値が大きいかほど優先度が高い。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 kbps 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 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 トラヒ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 の転送品質に基づいて動的に調整される。

3.1 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、紙面の都合上 (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 に示される六つの case を比較する。(ii) は、CDN のように、メデ

表 3 測定内容 (単一ルータに WFQ を適用する場合)
Cases of the measurement when WFQ is applied to a single router.

	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 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)
Cases of the measurement when WFQ is applied to the router(s) close to the media senders).

	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

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 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。

3.2 評価尺度

本論文では、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。したがって、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、本論文では以下の四つのパラメータの測定結果を示す。

出力間隔の変動係数 出力間隔の変動係数とは、MU の出力間隔の標準偏差を、MU の出力間隔の平均値で割ったものである。この値が小さいほどメディアは滑らかに出力され、メディア内同期品質が高いといえる。

メディア間同期平均 2 乗誤差 音声とビデオのずれを表す尺度であり、この値が小さいほど音声とビデオが同期していることを表す。メディア間同期平均 2 乗誤差は、スレーブメディア (ビデオ) の MU 出力時刻とマスターメディア (音声) の MU の出力時刻との差から、それぞれの MU 生成時に付与されるタイムスタンプの差を引いた値の 2 乗平均である。文献 19) を参考にすると、この値が $6,400 (= 80^2) \text{ ms}^2$ 以下の場合、メディア間同期品質が良好であるといえる。逆に、 $25,600 (= 160^2) \text{ ms}^2$ 以上の場合、メディア間同期が外れていることになる。

MU 欠落率 転送効率を表す尺度であり、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 これはリアルタイム性をあらわす尺度で

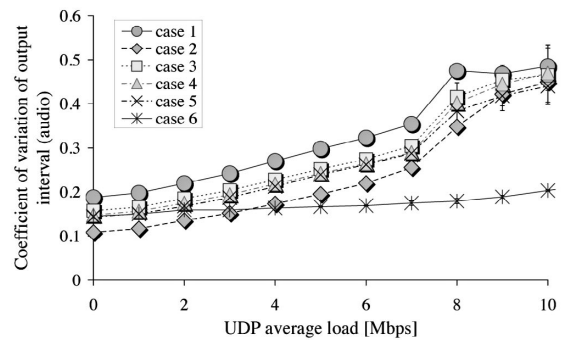


図 2 出力間隔の変動係数 (単一ルータに WFQ を適用する場合、音声 1, NC)
Coefficient of variation of output interval for audio 1 with NC (WFQ on a single router).

ある。メディア送信端末で MU が生成された瞬間から、メディア受信端末がその MU を受信し、出力する瞬間までの時間の平均である。文献 20) によると、双方向通信において双方が遅延の存在を了解している条件下では、400 ms の遅延が許容できる限界である。

4. シミュレーション結果と考察

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概説する。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。

4.1 単一ルータに WFQ を適用する場合

図 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 では、図 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 4 には VTR における音声 1 の変動係数を示す。図 5 には NC のビデオ 1 の変動係数を表す。図 6 にはビデオ 1 の MU 欠落率が示され、図 7 には音声 2-ビデオ 2 のメディア間同期平均 2 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 2) において、平均負荷が約 4 Mbps 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 のバーストラフィ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

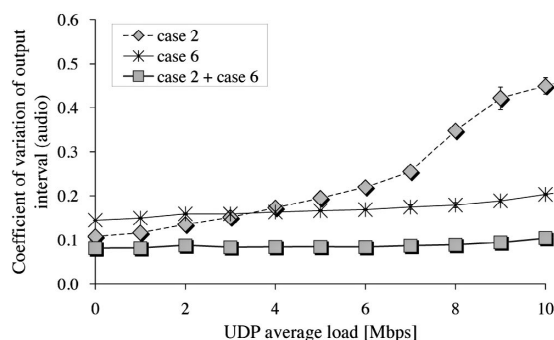


図3 出力間隔の変動係数 (ネットワークの端に WFQ を適用した場合, 音声 1, NC)

Coefficient of variation of output interval for audio 1 with NC (WFQ on an edge or both edges of the network).

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 から, 両方のルータに 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。しかし, このとき, 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 4 に示されるように, 平均負荷約 7 Mbps 以下の領域では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。

ビデオ 1 の NC の場合 (図 5) は, 音声と異なり, 平均負荷約 7 Mbps 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。

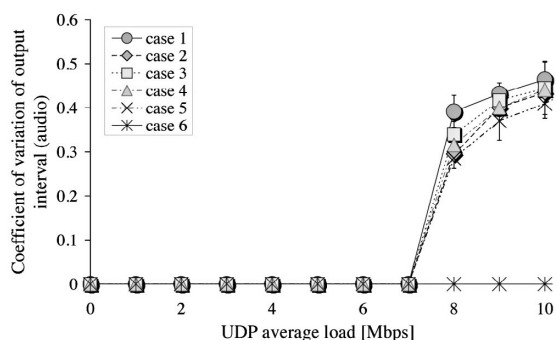


図4 出力間隔の変動係数 (単一ルータに WFQ を適用する場合, 音声 1, VTR)

Coefficient of variation of output interval for audio 1 with VTR (WFQ on a single router).

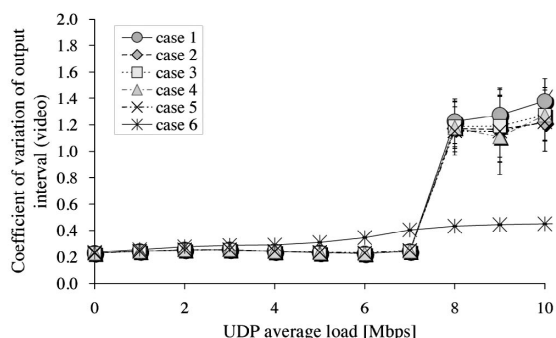


図5 出力間隔の変動係数 (単一ルータに WFQ を適用する場合, ビデオ 1, NC)

Coefficient of variation of output interval for video 1 with NC (WFQ on a single router).

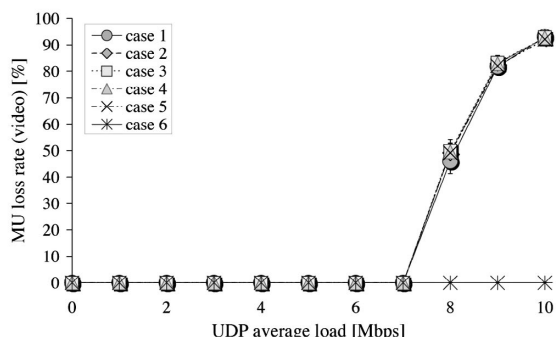


図6 MU 欠落率 (単一ルータに WFQ を適用する場合, ビデオ 1)

MU loss rate for video 1 (WFQ on a single router).

平均負荷約 7 Mbps 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 6

* 平均負荷約 7 Mbps 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 packets 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 packets 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 packets 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。

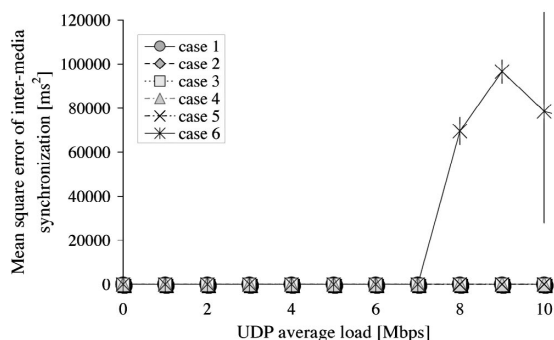


図 7 メディア間同期平均 2 乗誤差 (単一ルータに WFQ を適用する場合, 音声 2-ビデオ 2, VTR)

Mean square error of inter-stream synchronization between audio 2 and video 2 with VTR (WFQ on a single router).

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, 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 2 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 Mbps 以上の領域で $25,600 \text{ ms}^2$ を越えており (図 7), メディア間同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 Mbps 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.

4.2 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 8 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 9 にはその VTR の場合を示す. 図 10 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 8) 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 9), 平均負荷約 7 Mbps 以下

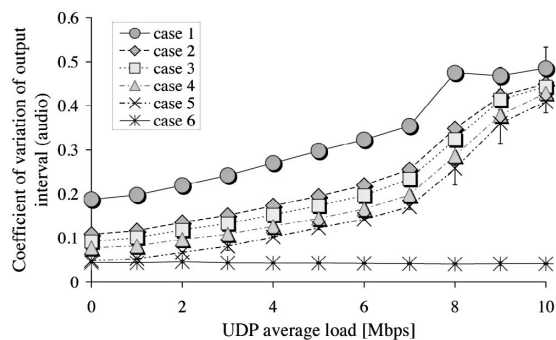


図 8 出力間隔の変動係数 (メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合, 音声 1, NC)

Coefficient of variation of output interval for audio 1 with NC (WFQ on the router(s) close to the media senders).

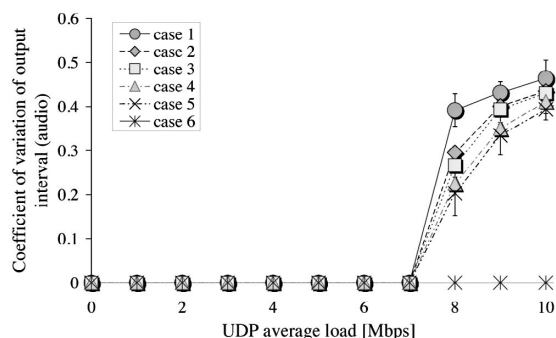


図 9 出力間隔の変動係数 (メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合, 音声 1, VTR)

Coefficient of variation of output interval for audio 1 with VTR (WFQ on the router(s) close to the media senders).

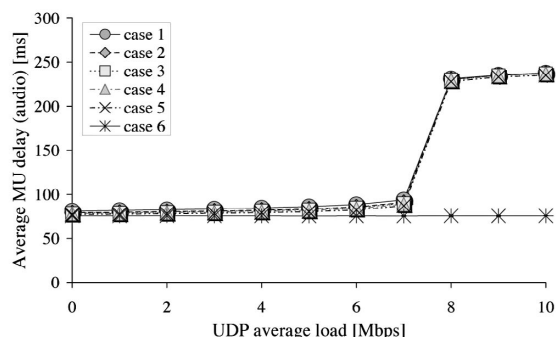


図 10 平均 MU 遅延 (メディア送信端末に近いルータから WFQ を繰り返し適用する場合, 音声 1, NC)

Average MU delay for audio 1 with NC (WFQ on the router(s) close to the media senders).

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 Mbps 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 7Mbps 以下の領域で、case 間に遅延量の差が見られなかった (図 10)。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 2 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 8Mbps 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。

4.3 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 (3.1 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²¹⁾。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れる*。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。

さらに、リンク速度が均一の場合²²⁾、ツリー型トポロジーを用いた場合、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。

5. む す び

本論文では、音声・ビデオストリーミング IP 伝送を対象として、ノードレベル QoS 制御手段であるパケットスケジューラのネットワーク内における配置がアプリケーション

レベル QoS に及ぼす影響を、シミュレーションにより調査した。これは、音声・ビデオのトラフィックが構造を持つため、ネットワークレベル QoS を調査しても音声・ビデオの出力品質を本質的に求められないためである。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。このとき、パケットスケジューラには WFQ を、連続メディア同期制御には VTR アルゴリズムを用いた。

シミュレーションの結果、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観点から、それぞれ、メディア送信端末に最も近いノード (ルータ)、および、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 を得られることがわかった。さらに、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。

本論文では、各フローの必要帯域幅や保証される帯域幅が既知である場合を想定した。それらが不明な場合の優先度の決定方法とアプリケーションレベル QoS との関係については、今後の検討課題である。また、トラフィックシェーピングを行うなど、メディアの送出方法が異なる場合の検討も課題である。

最後に、本研究を進めるにあたり、御議論頂いた布目敏郎助教に感謝する。なお、本研究は、平成 21 年度科学研究費補助金基盤研究 (B) 21360183 によって行われた。

* この場合における NC の音声 1 の変動係数は、図 3 の case 2 + case 6 に示される。

【文 献】

- 1) S. Tasaka and Y. Ishibashi : “Mutually Compensatory Property of Multimedia QoS”, Conf. Rec. IEEE ICC2002, pp. 1105–1111 (Apr./May 2002)
- 2) 田坂修二 : “ネットワーク環境におけるメディア同期”, 信学誌, **84**, 3, pp. 177–183 (Mar. 2001)
- 3) M. C. Yuang, J. Shih and Po-L. Tien : “A QoS Packet/Burst Scheduler for Broadband Networks”, Conf. Rec. IEEE ICC2002 (Apr. 2002)
- 4) R. Guérin, S. Kamat, V. Peris and R. Rajan : “Scalable QoS Provision through Buffer Management”, Proc. ACM SIGCOMM’98, **28**, 4, pp. 29–40 (Oct. 1998)
- 5) M. A. Marsan, M. Franceschinis, E. Leonardi, F. Neri and A. Tarello : “Instability Phenomena in Underloaded Packet Networks with QoS Schedulers”, Proc. IEEE INFOCOM2003 (Mar./Apr. 2003)
- 6) R. Guérin and V. Peris : “Quality-of-Service in Packet Networks Basic Mechanisms and Directions”, Comput. Netw., **31**, 3, pp. 169–189 (Feb. 1999)
- 7) A. Demers and S. Shenker : “Analysis and Simulation of a Fair Queueing Algorithm”, Proc. ACM SIGCOMM’89, **19**, 4, pp. 1–12 (Sep. 1989)
- 8) 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, **1**, 3, pp. 344–357 (June 1993)
- 9) D. A. Hayes, M. Rumsewicz and L. L. H. Andrew : “Quality of Service Driven Packet Scheduling Disciplines for Real-time Applications: Looking Beyond Fairness”, Proc. IEEE INFOCOM’99, pp. 405–412 (Mar. 1999)
- 10) Y.-C. Tu, M. C. Chen, Y. S. Sun and W.-K. Shih : “Bulk Scheduling for Delay Sensitive Streaming Applications”, Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2006, 1, pp. 2261–2266 (Nov. 2006)
- 11) 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)
- 12) J. Kaur and H. M. Vin : “End-to-end Fairness Analysis of Fair Queueing Networks”, Conf. Rec. IEEE RTSS, (Dec. 2002)
- 13) G. Lu, Y. Chen, S. Birrer, F. E. Bustamante, C. Y. Cheung and X. Li : “End to end Inference of Router Packet Forwarding Priority”, Proc. IEEE INFOCOM2007, 1, pp. 1783–1791 (May 2007)
- 14) S. J. Golestani : “A Self-clocked Fair Queueing Scheme for Broadband Applications”, Proc. IEEE INFOCOM’94, **2**, pp. 636–646 (June 1994)
- 15) PlanetLab — An open platform for developing, deploying, and accessing planetary-scale services : <http://www.planet-lab.org/>
- 16) K. Ito, S. Tasaka and Y. Ishibashi : “Media Synchronization Quality of Packet Scheduling Algorithms”, IEICE Trans. Commun., **E85-B**, 1 (Jan. 2002)
- 17) 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”, 平 13 信学総大, **B-11-18** (Mar. 2001)
- 18) Y. Ishibashi and S. Tasaka : “A Synchronization Mechanism for Continuous Media in Multimedia Communications”, Proc. IEEE INFOCOM’95, pp. 1010–1019 (Apr. 1995)
- 19) R. Steinmetz : “Human Perception of Jitter and Media Synchronization”, IEEE J. Sel. Areas in Commun., **14**, 1, pp. 61–72 (Jan. 1996)
- 20) ITU-T Recommendation G. 114 : “Transmission Systems and Media, General Characteristics of International Telephone Connections and International Telephone Circuits: One-way Transmission Time” (Feb. 1996)
- 21) 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)
- 22) 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”, 平 15 信学ソ大, **B-11-14** (Sep. 2003)



たけ お じゅん
竹尾 淳 2000 年, 名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業。2002 年, 同大学院博士前期課程修了。現在, 同後期課程在学中。DiffServ におけるアプリケーションレベル QoS の研究に従事。学生会員。



た さ か しゅうじ
田坂 修二 1971 年, 名古屋工業大学工学部電気工学科卒業。1976 年, 東京大学大学院博士課程修了。工博。同年, 名古屋工業大学情報工学科勤務。現在, 同大学院工学研究科情報工学専攻教授。1984 年から 1985 年まで, カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員。マルチメディア QoS, 無線ネットワークの研究に従事。