

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

竹尾 淳^{†a)} 田坂 修二[†] 石橋 豊[†]

Application Level QoS Assessment of Continuous Media Transmission Using the AF Service in DiffServ

Jun TAKEO^{†a)}, Shuji TASAKA[†], and Yutaka ISHIBASHI[†]

あらまし 本論文では、DiffServ の AF サービスを用いて、音声やビデオなどの連続メディアを転送する際、UDP と TCP のコンピュータデータフローによる干渉が、アプリケーションレベル QoS の一つである連続メディア同期品質にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。AF サービスは、フローをいくつかの BA に割り当て、BA 間に転送品質の差を設ける。このとき、BA に付与する AFCP によってそれぞれの転送品質が異なり、ユーザの主観品質に影響を及ぼす。特に、連続メディアを扱うアプリケーションではその影響を受けやすく、メディア同期品質が著しく劣化する可能性がある。そこで本論文では、この関係を実験により調査する。実験では、2 組のライブ音声・ビデオを TCP と UDP のデータフローと同時に転送し、TCP フローの 6 通りの AFCP に対して UDP フローの帯域幅を変更した。更に、伝搬遅延の違いが TCP フローの振舞いに影響することを考慮し、この振舞いの違いがメディア同期品質に及ぼす影響を調査した。その結果、TCP フローとビデオを同じクラスに割り当て、TCP フローの廃棄確率が高くなるように設定すると、良好なメディア同期品質が得られることがわかった。また、伝搬遅延が大きい場合は、TCP フローの AFCP による影響の差は小さくなり、どの AFCP の場合でも同等のメディア同期品質が得られることを確認した。

キーワード DiffServ, AF サービス, 連続メディア, メディア同期, 実験

1. ま え が き

近年、インターネットの普及に伴い、ネットワークを用いたアプリケーションに対するユーザの需要が多様化している。特に、これまでの文書や図表などの単なる転送サービスに加え、マルチメディア通信会議やイベントの動画中継、テレビ電話などの音声やビデオの連続メディアを扱うアプリケーションに高い関心が寄せられている。

これらのように音声やビデオをリアルタイムに転送するアプリケーションでは、時間構造をもつトラヒックが生成される。送信端末でのメディアの時間構造が受信端末まで高い精度で保存されれば、ユーザが感じる出力品質、すなわち、ユーザレベル QoS (Quality

of Service; サービス品質)[1] は高く保たれる。しかし、実際のネットワークにおいては、ルータなどでパケットの欠落や遅延の揺らぎが生じてメディアの時間構造が乱され、ユーザレベル QoS は劣化する。そのため、QoS を高く保つための制御が必要となる。

QoS 制御技術は、制御対象となるネットワーク階層の観点から、アプリケーションレベル、エンド・ツー・エンドレベル、ネットワークレベル、ノードレベルなどに分類できる [1]。

最近のインターネットでは、ルータなどのネットワーク機器の性能が向上し、複雑な処理を高速に行うことが可能となりつつあるため、ネットワークレベルでの QoS 制御が注目されている。ネットワークレベルでの QoS 制御には、IETF (Internet Engineering Task Force) が提唱する IntServ (Integrated Services)[2] や DiffServ (Differentiated Services)[3] があげられる。

IntServ では、RSVP (Resource reSerVation

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市
Department of Electrical and Computer Engineering,
Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan
a) E-mail: takeo@inl.elcom.nitech.ac.jp

Protocol) シグナリング [4] によりエンド・ツー・エンドで一定の帯域幅を予約し、フローの QoS を保証する。そのため、中継するすべてのノードはこの機能を有している必要がある。しかし、帯域を予約するフロー数が増加すると、各ルータが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。

一方、DiffServ では、フローはいくつかの BA (Behavior Aggregate) [3] に割り当てられ、BA 間に相対的な転送品質の差を設けることにより QoS を制御する。BA への割当てには、パケットの IP ヘッダ内の DSCP (DiffServ CodePoint) [3] を用いる。そして、BA は、各ノードに設定されている PHB (Per-Hop Behavior) [3] の記述に従って転送される。DiffServ は、IntServ のようにシグナリングを利用せず、ホップごとの制御であるため、中継するノードは各フローの状態を記憶する必要がない。また、中継するすべてのルータが DiffServ の機能を有していなくてもよい。したがって、DiffServ は IntServ のようにエンド・ツー・エンドの QoS を厳密には保証できないが、スケーラビリティの面から IntServ より優れているといえる。そのため、次世代のインターネットアーキテクチャとして高い関心が寄せられている。

DiffServ の代表的な優先サービスに、EF (Expedited Forwarding) サービス [5] と AF (Assured Forwarding) サービス [6] がある。EF サービスでは、EF PHB に入力帯域幅よりも広い出力帯域幅を設定し、他のトラフィックが EF サービスの転送に干渉しないように設定される。そのため、低遅延、低ジッタの高品質な転送を期待できる。一方、AF サービスに割り当てられたトラフィックには、一定の帯域幅などの資源が割り当てられる。したがって、ふくそう時においても、ベストエフォート型の転送より高品質に転送される。

音声やビデオなどの連続メディアにおいては、転送品質の劣化がユーザレベル QoS に大きく影響するため、これらの必要とする帯域幅を EF PHB で確保し、EF サービスで転送することが望ましい。しかし、音声とビデオの両方の帯域幅が EF PHB によって占有されると、他のフローの転送が著しく妨げられるおそれがある。したがって、DiffServ の実装として現実的とはいえない。そこで、AF サービスを利用することが考えられる。AF サービスは、指定した帯域幅が最低保証されるため、帯域幅が広いトラフィックを転送する場合にも、ある程度の QoS を保証することができ

る。特に、イントラネットなどの中規模ネットワークにおいては、あらかじめ、おおよそのトラフィック量やメディアの種類を特定できる。そのため、それらに特化した QoS 制御が可能となる。AF サービスの詳細を 2. にて述べる。

実際のネットワーク環境では、連続メディアと Web アクセスなどによる離散メディアは同じノードを通過する。転送に用いられるトランスポートプロトコルは、前者では UDP、後者では TCP であることが多い。そのため、異なるトランスポートプロトコルによるフローが AF サービスにより転送される場合、連続メディアがどのような影響を及ぼされるかを明らかにすることは、DiffServ ドメインの設計上、重要である。

AF サービスでトランスポートプロトコルの異なるフローを扱った研究は、既にいくつか行われている [7] ~ [10]。例えば、文献 [7] では、廃棄制御の設定が TCP と UDP 混在フローに及ぼす影響を調査している。そして、スループットの観点から、UDP と TCP のフローを別のバッファに割り当てることが良い解決策であると述べられている。また、文献 [9] では、音声やビデオなどの連続メディアやコンピュータデータを扱い、回線速度に応じて、それらをどのように複数のクラスに割り当てればよいかを調査している。そして、T1 などの低速回線ではアプリケーションごとにクラスに割り当てることが良いとしている。

上記の研究を含め、従来のこの分野の研究は、スループットやパケット遅延などのネットワークレベルにおける QoS 評価を目的としており、連続メディア同期品質 [11] などのアプリケーションレベル QoS を議論の対象としていない。連続メディアを扱っている場合では、音声またはビデオの一方のみを対象としている研究がほとんどである。更に、複数の連続メディアを対象としている場合でも、相互の時間構造を考慮していない。ネットワークレベル QoS とアプリケーションレベル QoS との関係は必ずしも自明ではないため、アプリケーションレベル QoS の観点からの評価は必須である。

そこで本論文では、AF サービスを用い、音声・ビデオ、及び、UDP と TCP のコンピュータデータフローを同時に転送し、これらのフローが音声とビデオに及ぼす影響を調査する。このとき、コンピュータデータは連続メディアに対して負荷データとなる。

品質測定の方法は、計算機シミュレーションと実機による実験に大別できる。計算機シミュレーションで

は、実機において実現が困難な大規模なネットワークを想定した測定が可能である。しかし、メディアの符号化や復号化、各ノードでの転送処理などに要する時間、及びその揺らぎなどを考慮に入れることは困難である。本論文の目的は、ユーザレベル QoS に近いアプリケーションレベル QoS の評価であるため、これらの要因を含めた評価が必要である。したがって、本論文では実験による測定を行う。

実験では、TCP 負荷データの AFCP (AF Code-Point) と UDP 負荷データの帯域幅を種々の値に設定し、それらの影響を調べる。評価は、連続メディアを扱うアプリケーションの代表的なアプリケーションレベル QoS であるメディア同期品質を対象とする。

更に、ネットワークが広域化した場合の影響を考慮し、エンド・ツー・エンドの遅延が増大した場合の検討も行う。実験では、ボトルネックリンクに追加遅延を与えることによりこれを擬似し、測定を行う。

以下、まず、2. において AF サービスの詳細を述べる。次に、3. では、連続メディアと TCP フローが同時に転送される場合を想定し、TCP フローの AFCP とメディア同期品質との関係を示す。更に、ボトルネックリンクの伝搬遅延の影響に関する検討を 4. にて行う。

2. 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。RFC 2597 [6] では、優先度の異なる 4 個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 ($1 \leq i \leq 4$) に属する廃棄優先度 j ($1 \leq j \leq 3$) をもつパケットは AF_{ij} と表される。本論文では、この値を AFCP と呼び、各 AFCP に対応する DSCP をパケットに付与することを、単に AFCP を付与すると記す。

ノードに転送されてきたパケットは、それぞれの DSCP の値に対応する BA へ割り振られる。DSCP は、IP ヘッダ内の ToS フィールドを 6 ビットに拡張したものである。AF サービスでは、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 ビットは使用されおらず、常に 0 とする。

RFC 2597 [6] では AF PHB の実装に関する規定を

与えていないため、その構成は自由に決めてよい。そこで、本論文では帯域割当てと廃棄制御に焦点を絞り、DiffServ ノードの構成要素のうち、リマーカ、スケジューラ、ドロップを利用する。AF PHB に割り当てられたパケットは次のように処理される。まず、条件に合致するフローに DSCP がマークされる^(注1)。次に、設定や条件に応じてパケットの廃棄が行われる。そして、スケジューラが各クラスの重みに従いパケットをスケジュールし、パケットは次のノードへ転送される。

本論文における実験では、AF サービスを提供するために Cisco 社製のルータを用い、廃棄制御には WRED (Weighted Random Early Detection) [12] を、スケジューリングには CBWFQ (Class-Based Weighted Fair Queueing) [12] を用いる。

2.1 WRED

WRED は、ふくそう回避アルゴリズム RED [13] を拡張し、廃棄優先度ごとの相対的な廃棄処理を可能としたものである。WRED では、優先度ごとに二つのしきい値 (min_{th} , max_{th}) と二つのパラメータ (P_d , α) を設ける。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。

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

そして、 avr としきい値を比較し、そのパケットの廃棄確率 $P(avr)$ を次式より決定する。

$$P(avr) = \begin{cases} 0, & avr \leq min_{th} \text{ のとき} \\ 1, & max_{th} \leq avr \text{ のとき} \\ \frac{avr - min_{th}}{P_d(max_{th} - min_{th})}, & \text{その他} \end{cases}$$

2.2 CBWFQ

CBWFQ は、フロー単位で制御を行う WFQ をクラス単位での制御に拡張したものである。WFQ では各フローの最低保証帯域を各フローの重みから算出するのに対し、CBWFQ ではノードの管理者が各クラスに対して帯域を指定する。余剰帯域は、フローの存在するクラスに、それらのクラスの最低保証帯域幅の割合で再割当てされる。

(注1): 本実験において、ルータによる DSCP のマーキングは TCP フローにのみ行う。これは、本実験で用いた TCP フローを転送するためのアプリケーションが DSCP の付与機能をもっていないためである。UDP フローの DSCP は、各送信ホストにおいてマークされる。

3. TCP 及び UDP 負荷データの影響

本章では、TCP 負荷データの AFTP が連続メディアに及ぼす影響を測定する。このとき、UDP 負荷データの帯域幅を種々に設定し、AF サービス内のふくそうの割合を変化させる。

3.1 実験システム

実験は図 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 2 台の IBM PC/AT 互換機 (PC) を、4 台のルータとデータリンクシミュレータからなるネットワークに接続する。

データリンクシミュレータは ADTECH 社製 SX/12 であり、パケットに 1 ms 単位の一定遅延を付与する機能を有する。本章における実験では、この遅延は 0 とする。ルータ 1 ~ 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 2 MB であり、ルータ 2 では 32 MB 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。各ルータとデータリンクシミュレータは V.35 シリアル回線で接続されている。ルータ間の伝送速度は 2 Mbps 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 ~ 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 (200 MHz) を使用し、128 MB のメモリが搭載されている。WS5 と WS6 は、Ultra SPARC (143 MHz) の CPU と 64 MB のメモリをもつ。PC1 は、Celeron (433 MHz) の CPU, 128 MB のメモリを搭載する。PC2 は、PentiumII (400 MHz) の CPU と 384 MB のメモリをもつ。

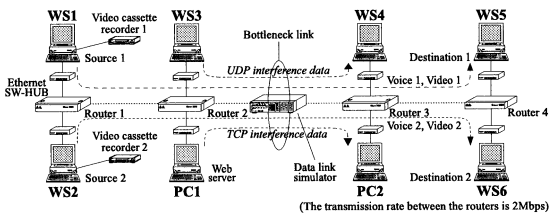


図 1 実験システム

Fig. 1 Configuration of the experimental system.

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2)。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 1 メディアユニット (MU: Media Unit; メディア同期における制御単位) 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 [14]/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。

AF サービスではフロー間に転送品質の差をもたせることができるのを考慮し、転送品質の差とメディア同期品質との関係を測定するため、2 組のメディアを転送している。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 がそれぞれ転送される。各メディアの仕様は表 1 のとおりである。

TCP による負荷データは、PC1 から PC2 に転送される。これは、Web アクセスや FTP ファイル転送を行うことを想定したものである。このフローに対する 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 により行われる。

この負荷データの生成には、WebStone 2.5 [15] 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

表 1 音声とビデオの仕様
Table 1 Specificatoinis of the voice and video streams.

	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 [pixel]	—	320 × 240	
MU サイズ [byte]	400 (一定)	3,253 (平均)	3,247 (平均)
平均 MU レート [MU/s]	20.0		
平均 MU 間隔 [ms]	50.0		
ビットレート [kbps]	64.0 (一定)	520.7 (平均)	519.6 (平均)
実験時間 [s]	120		

(注2): 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。そのため、本実験では 2 種類のメディアソースを用意し、すべての測定ではほぼ同じシーンが転送されるようにした。

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。本実験では、PC1 を Web サーバとし、PC2 を Web クライアントとする。取得するファイルの構成は表 2 に示される。これは、WebStone とともに配布されている 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 [16] であり、ウィンドウサイズは送受信ともに 16 kB である。

また、もう 1 種類の負荷データとして、WS3 から WS4 に UDP フローを送信する。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。

以下では、WS3 から WS4 に転送される UDP データフローを UDP 負荷データ、単位時間 (秒) におけるその発生量の平均を UDP 平均負荷と呼ぶ。また、PC1 から PC2 に転送される TCP データフローに関しても同様に、それぞれ、TCP 負荷データ、TCP 平均負荷と呼ぶ。

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 [17] 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} には 100 ms を用いる。また、ライブメディアにおいて、双方が了解していれば 400 ms までの遅延は許容できる [18] ため、最大許容遅延 Δ_{al} を 400 ms とする。これら以外のしきい値と

表 2 Web サーバから取得されるファイルの構成
Table 2 A set of files to be retrieved.

ファイル名	サイズ [kbyte]	取得確率
file500.html	0.5	0.35
file5k.html	5	0.5
file50k.html	50	0.14
file500k.html	500	0.009
file5m.html	5,000	0.001

パラメータは、文献 [19] と同じ値である。

ルータ 2 に実装した AF PHB は、表 3 のとおりである。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。

3.2 実験方法

実験では、表 4 に示す 6 通りの場合 (case 1 ~ case 6) の各々において、2 組の音声とビデオ、そして、UDP と TCP の負荷データを同時に転送する。表 4 中の A1, A2 は、それぞれ音声 1, 音声 2 を、V1, V2 は、それぞれビデオ 1, ビデオ 2 を表す。また、L(T) と

表 3 ルータ 2 に実装された AF PHB
Table 3 AF PHB on Router 2.

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

注) 上段の値は AFCP を、下段の値は DSCP を表す。

表 4 比較対象
Table 4 A comparative table.

case 1						
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	
Drop 1 (Low)	L(T)	200	A1 [64]	V1 [520]	600	L(U)
Drop 2 (Middle)			A2 [64]	V2 [519]		800
Drop 3 (High)						
case 2						
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	
Drop 1 (Low)		0	A1 [64]	V1 [520]	666	L(U)
Drop 2 (Middle)			A2 [64]	V2 [519]		889
Drop 3 (High)			L(T)			
case 3						
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	
Drop 1 (Low)		0	A1 [64]	V1 [520]	666	L(U)
Drop 2 (Middle)			A2 [64]	V2 [519]		889
Drop 3 (High)				L(T)		
case 4						
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	
Drop 1 (Low)		0	L(T)	V1 [520]	666	L(U)
Drop 2 (Middle)			A1 [64]			V2 [519]
Drop 3 (High)			A2 [64]			
case 5						
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	
Drop 1 (Low)		0	A1 [64]	L(T)	666	L(U)
Drop 2 (Middle)				V1 [520]		889
Drop 3 (High)			A2 [64]	V2 [519]		
case 6						
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	
Drop 1 (Low)		0	A1 [64]	V1 [520]	666	L(U), L(T)
Drop 2 (Middle)				A2 [64]		V2 [519]
Drop 3 (High)						

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当てを示す。

L(U) は、それぞれ TCP 負荷データと UDP 負荷データを指す。

音声とビデオを AF サービスで転送する際、それぞれにどの AFCP を付与するかには多数の組合せがある。筆者らはこれまでに、文献 [20] 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、音声は音声どうし、ビデオはビデオどうしを同じクラスにすることがよ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。そのため本論文では、これに基づく組合せを用いる。

本論文の実験では、イントラネットのように、転送されるフローの仕様が程度事前にわ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 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 ではたかだか 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 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 3、表 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こと、割当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。

実験では、UDP 平均負荷を 0 から約 1.0 Mbps まで変化させる。メディア出力先は受信した MU を出力すると同時にメディア同期品質を測定し、負荷データの受信端末は、それぞれ WS3 及び PC1 から送信される UDP 及び TCP 負荷データのスループットを測定する。

3.3 評価尺度

アプリケーションレベル QoS の一つであるメディア同期品質を評価するための尺度として、MU 出力間隔の変動係数とメディア間同期平均 2 乗誤差、及び、MU 欠落率を用いる。

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 乗誤差は、スレーブメディアの MU 出力時刻と、それに対応するマスタメディアの 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 [21] 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、 $25,600 (= 160^2) \text{ms}^2$ 以上の場合には、メディア間同期が外れていることになる。

また、MU 欠落率は、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。

3.4 実験結果と考察

図 2 と図 3 は、UDP 平均負荷 (UDP average load) に対する、それぞれ、音声 1 とビデオ 1 の出力間隔の変動係数 (coefficient of variation of output interval) を示したものである。図 4 には TCP の負荷データスループット (throughput of TCP data load) を、図 5 には音声 1-ビデオ 1 のメディア間同期平均 2 乗誤差 (mean square error of inter-stream synchronization) を示す。図 6 は、ビデオ 1 の MU 欠落率

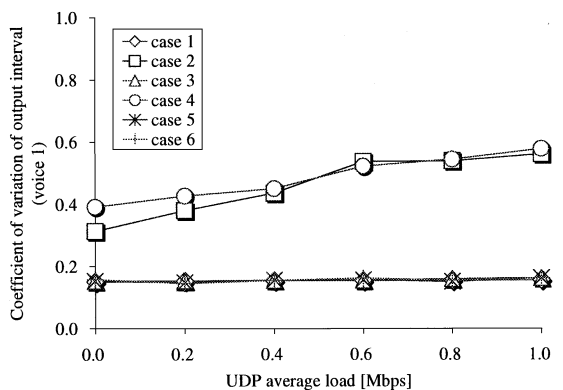


図 2 音声 1 の出力間隔の変動係数と UDP 平均負荷との関係

Fig. 2 Coefficient of variation of output interval for voice 1 versus UDP average load.

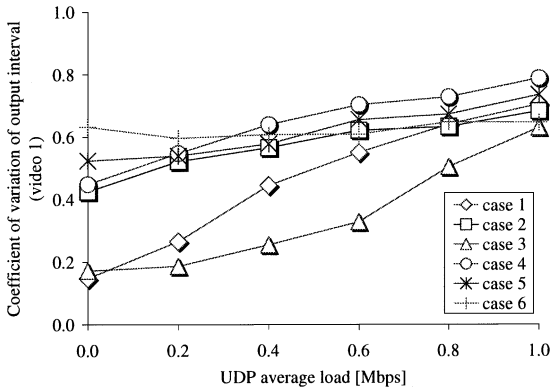


図 3 ビデオ 1 の出力間隔の変動係数と UDP 平均負荷との関係
Fig. 3 Coefficient of variation of output interval for video 1 versus UDP average load.

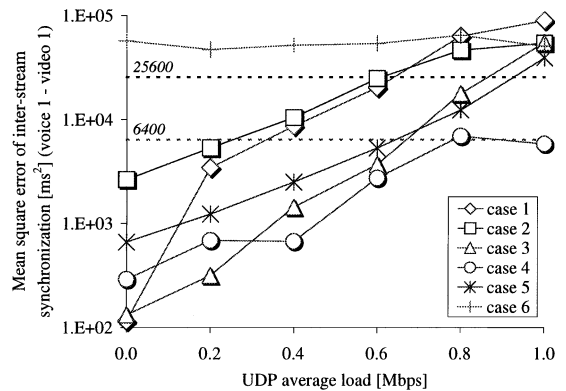


図 5 音声 1-ビデオ 1 のメディア間同期平均 2 乗誤差と UDP 平均負荷との関係
Fig. 5 Mean square error of inter-stream synchronization between voice 1 and video 1 versus UDP average load.

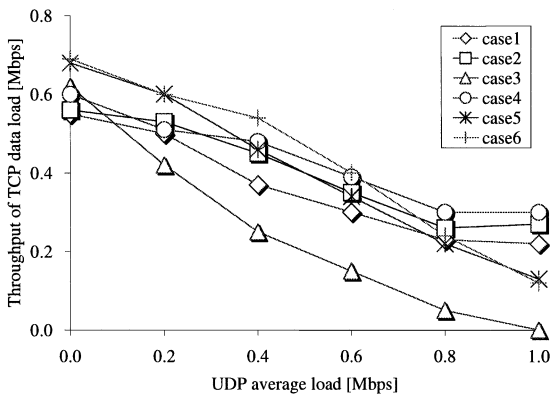


図 4 TCP 負荷データのスループットと UDP 平均負荷との関係
Fig. 4 Throughput of TCP interference data versus UDP average load.

case 3 に次いで小さい値をもつ。case 3 では TCP 負荷データと 2 種類のビデオが同じクラスで転送され、かつ、TCP 負荷データが Drop 3 に設定されている。そのため、図 4 に示されるように、TCP 負荷データのスループット低下が著しく、結果として、連続メディアが利用できる帯域幅が広がる。

一方、case 1 では、TCP 負荷データは Class 1 で転送されており、Class 1 はこのフローのみを扱っている。そのため、音声やビデオに与える影響は小さい。また、Class 1 は 200 kbps の帯域が保証されているため、図 4 に示されるように、TCP 負荷データのスループットは case 3 よりも高い。したがって、case 1 のように、TCP 負荷データを連続メディアとは別の小さい帯域のクラスに割り当てても、良好なメディア内同期品質が得られることがわかる。

また、図 3 からわかるように、音声と TCP 負荷データが同じクラスに割り当てられている case 2 と case 4 では、ビデオのメディア内同期品質も劣化している。これは、ビデオに十分な帯域が割り当てられていないため、UDP 負荷データに割り当てられている Class 4 の余剰帯域を TCP 負荷データとビデオが奪い合うためである。一方、case 3 では、TCP 負荷データはビデオと同じクラスであり、かつ、廃棄されやすいため、このような現象は生じないことに注意されたい。

メディア間の同期品質に関しては、図 5 より、case 6 以外では UDP 平均負荷が約 0.6 Mbps 以下の領域において、値が 25,600 ms² より小さく、メディア間の同

(MU loss rate) を表示している。

まず、音声のメディア内同期品質を調べる。図 2 より、case 2 と case 4 以外の値は測定範囲内において常に小さく、これらのメディア内同期品質は高く保たれていることがわかる。一方、case 2 と case 4 では、TCP 負荷データが音声と同じクラスに割り当てられており、Class 2 には割当帯域以上のデータが入力される。そのため、音声の転送タイミングが乱される。

次に、ビデオに関しては図 3 より、UDP 平均負荷が約 0.2 Mbps 以上の領域において、case 3 の値が最も小さいことがわかる。また、UDP 平均負荷が約 0.2 Mbps から約 0.6 Mbps までの領域では、case 1 が

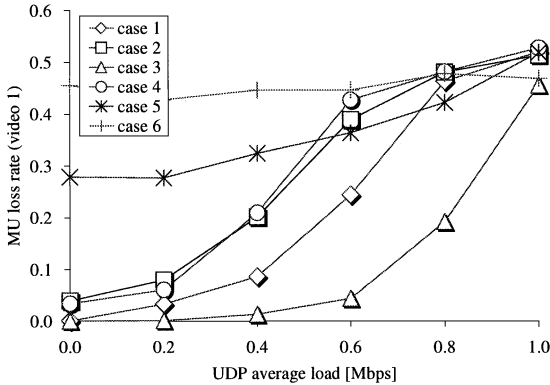


図 6 ビデオ 1 の MU 欠落率と UDP 平均負荷との関係
Fig. 6 MU loss rate for video 1 versus UDP average load.

期は保たれていると考えられる。特に, case 3, case 4, case 5 の値はこの領域において $6,400 \text{ ms}^2$ より小さくなっており, メディア間同期品質は良好である。しかし case 5 の場合, 図 6 からわかるように, UDP 平均負荷が 0 Mbps の場合においてもビデオ 1 の MU 欠落率は約 0.28 となっている(ビデオ 2 では約 0.5)。case 4 の場合でも, UDP 平均負荷が増加するに伴い MU 欠落率が増加する。このため, これらの場合は音声とビデオの同期は保たれていたとしても, 主観的には良好とはいえなかった。

更に, WebStone の子プロセス数が 32 の場合の実験も行ったが, case 4 と case 5 の同期品質が大幅に劣化する結果が得られた。これらは, TCP 負荷データを, それぞれ音声とビデオと同じクラスに割り当て, かつ, 負荷データの廃棄しきい値が音声とビデオよりも大きい場合である。したがって, メディア同期品質の観点からはこのような設定は好ましくないことがわかる。

4. エンド・ツー・エンド遅延の影響

3. では, 連続メディアと UDP/TCP の負荷データが AF サービスによって転送される場合を検討した。しかし, TCP はそのふくそう制御のため, RTT (Round Trip Time) が大きい場合には, スロースタートからの立ち上がりが遅く, また, 定常時のスループットも小さくなるという特徴をもつ。したがって, エンド・ツー・エンドの遅延時間によって, TCP フローが連続メディア同期品質に及ぼす影響が異なると考えられる。

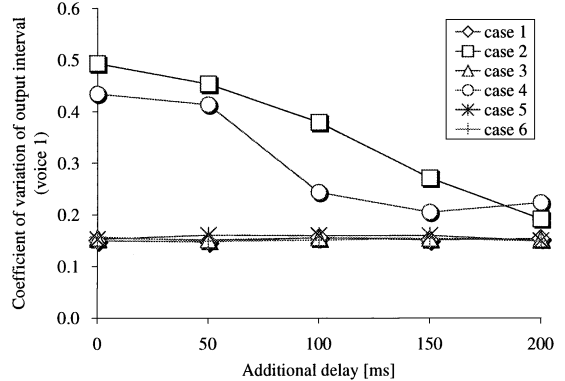


図 7 音声 1 の出力間隔の変動係数と付加遅延との関係
Fig. 7 Coefficient of variation of output interval for voice 1 versus additional delay.

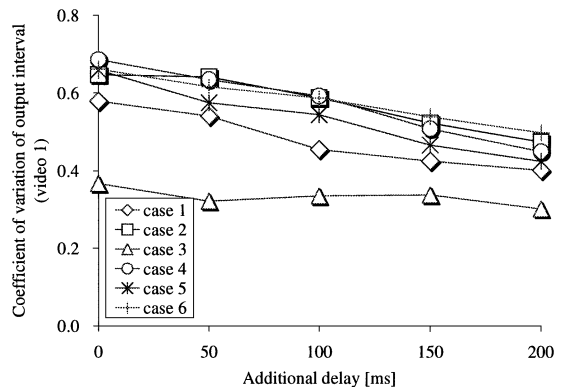


図 8 ビデオ 1 の出力間隔の変動係数と付加遅延との関係
Fig. 8 Coefficient of variation of output interval for video 1 versus additional delay.

そこで, エンド・ツー・エンドの遅延時間とメディア同期品質の関係を調査するため, 実験を行った。実験システムは, 3.1 と同じである。

実験では, ルータ 2 とルータ 3 間の伝搬遅延をデータリンクシミュレータによって種々の値に設定した。これを, 付加遅延 (additional delay) と呼ぶ。WS3 から WS4 に転送される UDP 平均負荷は約 0.6 Mbps と一定にし, 3.2 と同じ 6 通りの場合を比較した。

図 7 と図 8 には, 付加遅延に対する, それぞれ音声 1 とビデオ 1 の出力間隔の変動係数を示す。また, 図 9 は, 付加遅延に対する TCP 負荷データのスループットを示す。

図 7 では, case 2 と case 4 以外の case の値は, 付

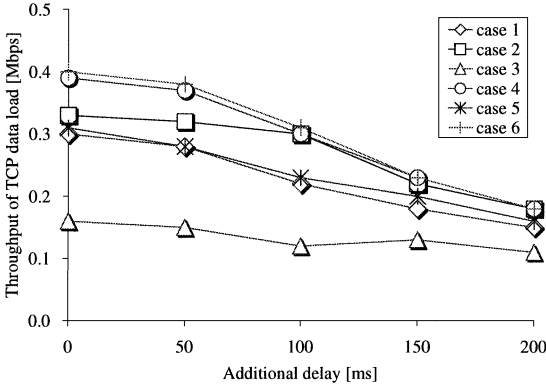


図 9 TCP 負荷データのスループットと付加遅延との関係
 Fig.9 Throughput of TCP interference data versus additional delay.

加遅延の大きさによらず、常に小さい。一方、case 2 と case 4 の値は、他の case よりも大きい値を示している。これら 2 種類の case は、3.4 で述べたように、音声と TCP 負荷データを同じクラスで転送しているため、音声の時間構造が TCP 負荷データによって乱されたためである。しかし、付加遅延が大きくなるにつれ、case 2 と case 4 の値は他の case と同程度の値に近づいている。これは、図 9 に示されるように、TCP 負荷データのスループットが低下するためである。これは、エンド・ツー・エンド遅延が大きくなるに従い、ACK の到着が遅くなり、ウィンドウの更新速度が低下するためである。

図 8 のビデオの場合、case 3 以外の case では、音声の case 2 と case 4 と同様に、付加遅延が大きくなるに従って変動係数の値が小さくなる。一方、case 3 における変動係数はわずかに小さくなる程度である。これは、case 3 では、ビデオと TCP 負荷データが同じクラスで転送され、かつ TCP 負荷データの廃棄しきい値が最も小さいためである。そのため、図 9 からわかるように、付加遅延の増加に対して、TCP 負荷データのスループットはわずかに低くなるのみである。このため、メディア内同期品質に及ぼす影響が微小となる。

上記の実験結果の詳細は、文献 [22] を参照されたい。また、各 TCP フローの RTT が等しい場合、TCP のふくそう制御が同期し、TCP フローがメディア同期品質に及ぼす影響が変化する可能性がある。そのため、異なる RTT の TCP が混在する場合の実験も行っ

た。追実験で用いた環境は、図 1 の環境の PC2 をネットワーク障害エミュレータ (IP Wave) に置き換え、PC2 に 3 台 (PC3, PC4, PC5 とする) の Web クライアントを接続したものである。上述の実験と整合させるため、WebStone の最大コネクション数は PC3 と PC5 では 1, PC4 では 2 とし、合計 4 コネクションとなるようにする。ネットワーク障害エミュレータは、IP データグラム内の送受信端末の IP アドレスを識別し、3 台の Web クライアントとサーバ間の通信にそれぞれ異なる一定遅延を付加する。PC1 と、PC3, PC4, PC5 の各 PC 間の通信の付加遅延量を、それぞれ、 d_1, d_2, d_3 とし、次式のように設定した。

$$\begin{aligned}
 & (d_1 \quad d_2 \quad d_3) \\
 & = \begin{cases} (0 \quad 0 \quad 0), & m = 0 \\ (50(m-1) \quad 50m \quad 50(m+1)), & 1 \leq m \leq 4 \end{cases}
 \end{aligned}$$

データリンクシミュレータによる付加遅延を 0 とし、 m を 0, 1, ..., 4 と変化させ、上述の実験と同様に測定を行った。その結果、上述と同等の結論を得られた。

以上より、エンド・ツー・エンドの遅延時間が増大すると、TCP フローがメディア同期品質に及ぼす影響は小さくなるのがわかる。また、この場合には、TCP フローの AFDP の違いがメディア同期品質に及ぼす影響の違いも小さくなる。

5. む す び

本論文では、DiffServ を用いて連続メディアを転送する場合、アプリケーションレベル QoS の一つである連続メディア同期品質がそれ以外のフローに及ぼされる影響を、実験により定量的に評価した。

まず、AF サービスでは連続メディアのほかに Web などのトラフィックが同時に転送されることを考慮し、TCP フローが連続メディアに及ぼす影響を調査した。この実験では、UDP 平均負荷を変化させ、TCP フローの AFDP の 6 通りの設定について、メディア同期品質を比較した。

更に、エンド・ツー・エンドの遅延によって TCP フローの振舞いに変化することに注目し、付加遅延とメディア同期品質との関係を明らかにした。連続メディアを干渉する UDP 平均負荷を一定とし、いくつかの付加遅延の場合のメディア同期品質を調査した。

これらの結果から、連続メディアと TCP フローを

AF PHB に割り当てる際の指針として、次の項目をあげることができる。まず、連続メディアの転送を最優先させたい場合は、TCP フローをビデオと同じクラスに配置し、かつ、TCP フローの廃棄優先度を連続メディアより高く設定すればよい。そして、TCP フローのスルーブックもある程度確保したい場合は、TCP フローと連続メディアを別のクラスに割り当て、TCP フローのクラスに対する割当帯域幅を、連続メディアのそれよりも狭くすればよい。しかし、TCP フローの RTT が大きい場合には、TCP フローがメディア同期品質に与える影響が小さくなるため、TCP フローの AFDP として何を選んででもほぼ同等のメディア同期品質を得られる。これらは、本論文がアプリケーションレベル QoS を対象に評価を行ったために導かれた結論である。

本論文では、連続メディアが DiffServ ネットワークにより転送される場合のアプリケーションレベル QoS を、研究の第 1 歩として、簡単な構成のネットワークを用いた実験により評価した。今後は、大規模なネットワーク、例えば、インターネットのコアネットワーク部を対象に評価を行う必要がある。また、DiffServ の他のサービスを併用した場合の検討も今後の課題である。

謝辞 本研究の初期の段階において御協力頂いた元大学院生伊藤健二氏（現在、豊田中央研究所）に感謝する。なお、本研究は、平成 14 年度科学研究費補助金基盤研究（B）(2) 課題番号 14350200）によって行われた。

文 献

- [1] 田坂修二, 石橋 豊, “分散マルチメディアアプリケーションにおける QoS と QoS マッピング,” 信学技報, CQ2001-40, July 2001.
- [2] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker, “Integrated services in the Internet architecture: An overview,” RFC 1633, June 1994.
- [3] S. Blake, D. Blake, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, “An architecture for differentiated services,” RFC 2475, Dec. 1998.
- [4] J. Wroclawski, “The use of RSVP with IETF integrated services,” RFC 2210, Sept. 1997.
- [5] B. Davie, A. Charny, J.C.R. Bennet, K. Benson, J.Y. LeBoudec, W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu, and D. Stiliadis, “An expedited forwarding PHB (Per-Hop Behavior),” RFC 3246, March 2002.
- [6] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski, “Assured forwarding PHB group,” RFC 2597, June 1999.
- [7] N. Seddigh, B. Nandy, and P. Piedad, “Study of TCP and UDP interaction for the AF PHB,” draft-nsbnpp-diffserv-tcpudpaf-00, June 1999.
- [8] M. Goyal, A. Duresi, R. Jain, and C. Liu, “Performance analysis of assured forwarding,” draft-goyal-diffserv-afstdy-00, Feb. 2000.
- [9] M.J. Karam and F.A. Tobagi, “On traffic types and service classes in the Internet,” Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2000, pp.548-554, Nov./Dec. 2000.
- [10] N. Seddigh, B. Nandy, and P. Piedad, “Bandwidth assurance issues for TCP flows in a differentiated services network,” Conf. Rec. IEEE GLOBECOM'99, pp.1792-1798, Dec. 1999.
- [11] 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, vol.84, no.3, pp.177-183, March 2001.
- [12] S. Vegesna, IP Quality of Service, Cisco Press, 2001.
- [13] 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.
- [14] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, “RTP: A transport protocol for real-time applications,” RFC 1889, Jan. 1996.
- [15] Mindcraft Inc., “Mindcraft - Webstone Benchmark Information,” <http://www.mindcraft.com/webstone/>.
- [16] S. Floyd, and T. Henderson, “The NewReno modification to TCP's fast recovery algorithm,” RFC 2583, April 1999.
- [17] S. Tasaka, T. Nunome, and Y. Ishibashi, “Live media synchronization quality of a retransmission-based error recovery scheme,” Conf. Rec. IEEE ICC2000, pp.1535-1541, June 2000.
- [18] “Transmission systems and media, general characteristics of international telephone connections and international telephone circuits: One-way transmission time,” ITU-T Recommendation G. 114, Feb. 1996.
- [19] 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, Sept. 2001.
- [20] 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.
- [21] R. Steinmetz, “Human perception of jitter and media synchronization,” IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol.14, no.1, pp.61-72, Jan. 1996.
- [22] 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 DiffServAF 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.

(平成 14 年 3 月 14 日受付, 6 月 13 日再受付)



竹尾 淳 (学生員)

平 12 名工大・工・電気情報卒。平 15 同大大学院博士前期課程了。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。



田坂 修二 (正員:フェロー)

昭 46 名工大・工・電気卒。昭 51 東大大学院博士課程了。同年名工大・情報勤務。現在、同大・電気情報教授。昭 59 ~ 60 UCLA 客員研究員。マルチメディア通信、無線ネットワークの研究に従事。工博、IEEE、ACM、情報処理学会、画像電子学会各会員。



石橋 豊 (正員)

昭 56 名工大・工・情報卒。昭 58 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現、NTT)入社。NTT ヒューマンインタフェース研究所主任研究員を経て、平 5 より名工大・電気情報助教授。現在、同教授。平 12 ~ 13 南フロリダ大客員教授。分散マルチメディアアプリケーションの研究に従事。工博、IEEE、ACM、情報処理学会、映像情報メディア学会、日本パーソナルリアリティ学会各会員。