

TCP と UDP が混在する広域ネットワークにおける UDP パケット廃棄特性に関する研究¹

澤島 秀成[†], 堀 良彰[§], 砂原 秀樹[†], 尾家 祐二[†]

[†]奈良先端科学技術大学院大学 情報科学センター
[§]九州芸術工科大学 芸術工学部

広域ネットワークにおいて、音声や画像などの実時間通信は、その実時間性を満足させるために UDP が用いられることが多い。しかしながら、広域ネットワークにおいて使用されているトラフィックの約 80% は、TCP トラフィックである。TCP は UDP と異なり独自のフロー制御機構を持つために、これらが混在した広域ネットワークにおける UDP のトラフィック特性は、TCP の影響を大きく受けることになる。本研究では、TCP と UDP が混在する広域ネットワークについてシミュレーションを行い、UDP のパケット廃棄特性を TCP のフロー制御の挙動との関係から調査した。複数の TCP コネクション間において、その輻輳ウィンドウのサイズ変化に同期が見られる場合、UDP の廃棄率が著しく大きくなり、そのバースト性を示す連続廃棄数も増加することが分かった。また、音声通信などの場合、UDP の送信レートを下げても、UDP のパケット廃棄率に目立った改善が見られないことが分かった。

1 背景

広域ネットワークにおけるトラフィックは、指数的な勢いで増加し続けている。特に、WWW (HTTP) トラフィックの増加は著しく、従来から最も多かったファイル転送 (FTP) をさらに追い越してネットワークトラフィックの増加に拍車をかけている。

一方、近年、広域ネットワークにおいて、音声や画像などの情報を実時間で扱うようなアプリケーションの出現が目覚しくなってきた。これらを用いて、インターネットで代表されるような広域ネットワークにおいて、テレビ会議やコンサート中継の実験も行われている。これらの実時間通信アプリケーションでは、実時間性を重視するために TCP は用いられず、UDP が用いられる。

一般に、インターネット上を流れるトラフィ

クの約 80% は TCP トラフィックである [1]。

TCP は、フロー制御を用いることにより、ネットワークの輻輳に対処している。ネットワークの輻輳は、そのパケット廃棄をもって知ることが出来る。TCP は輻輳を検知した場合、その輻輳ウィンドウサイズを調整することにより、ネットワークに送出するパケットの量を減少させ、その輻輳を回避あるいは解決する。

一方、UDP はこれらのフロー制御機構を持たない。従って、UDP を用いて実時間通信を行う場合、その通信の品質 (以下 QoS とする) は、これらの TCP のフロー制御機構に大きく左右される。

TCP を用いたデータ転送において、複数の TCP ストリームが同一のリンクを共有する場合、そのコネクション間における輻輳ウィンドウのサイズ変化に同期 (以下、TCP の同期) が見られるのは良く知られている [2]。また、この同期がネットワークに悪影響を及ぼすため、その回避策も考えられている [3][4]。

¹Characteristics of UDP Packet Loss: Effect of TCP Traffic, Hidenari SAWASHIMA, Yoshiaki HORI, Hideki SUNAHARA, Yuji OIE

一方、UDP のパケット廃棄特性に関しては、実際のインターネットにおいて UDP のパケット廃棄を調べた報告がある [5]。また、インターネットトラフィックを 1 つのストリームとしてモデル化し、UDP ストリームと組み合わせることにより、そのパケットの連続廃棄を調べた報告もある [6]。しかし、これらは、TCP のフロー制御機構や、それによって起こる接続間の TCP の同期などの影響を考察したものではない。

本研究では、シミュレーションを用いて、TCP と UDP が混在する広域ネットワークにおける UDP のパケット廃棄特性を明らかにする。特に TCP のフロー制御の挙動が UDP パケット廃棄特性に与える影響に着目する。対象とした UDP のトラフィックパラメータは、実際にインターネット上で使用されている音声通信のアプリケーションに基づいて設定した。また、その結果より、UDP を用いて音声通信などの実時間通信を行う場合の効果的な方法について考察を行う。

以下、第 2 章では、実時間通信における QoS と実時間通信に UDP を用いる利点と欠点について述べる。第 3 章では、シミュレーションのシナリオについて述べ、第 4 章では、その結果を示し、実時間通信に UDP を用いる場合の効果的な方法について考察を行う。最後に第 5 章では、本研究のまとめを行い、今後の課題についても述べる。

2 実時間通信の QoS と UDP

音声や画像を実時間で扱う通信においては、従来のファイル転送型の通信と異なり、様々な QoS を満足させる必要がある。以下に、実時間通信の中でも、特に音声通信における主な QoS のパラメータについて列挙する。

- 帯域

音声を伝送する場合、符号化方式によって決まる帯域が必要となる。必要な帯域が得られない場合、情報は欠落し、音声品質が劣化することになる。

- 伝送遅延

伝送遅延は、そのネットワークの距離によって生じるものと、途中のルータなどの中間ノードの処理能力によって生じるものがある。実時間通信においては、ある時間内に受信側に到着しなかった情報は、全く価値のないものとなる。

- 遅延ゆらぎ

遅延のゆらぎとは、送信側がネットワークに投入したデータ間隔と、受信側がそれを受け取る際の間隔の異なる現象である。音声伝送の場合は、この遅延のゆらぎが大きくなると、音声品質が急激に劣化する。

- パケット廃棄率

パケット廃棄は、中間ノードや受信側におけるバッファあふれや異常停止などによって起こるものと考えられている。実時間通信においては、このパケット廃棄が、ある許容範囲を越えると通信が困難になる。

実時間通信では、以上のような QoS パラメータを満足させる必要があるが、現在の広域ネットワークでは、これらの QoS を保証するような仕組みは実現されていない。

一方、現在の広域ネットワークにおける実時間通信アプリケーションでは、TCP を用いるよりも UDP が用いられることが多い。それは以下の理由による。

- 再送によるエラー訂正を行わないために、実時間性が確保出来る。

- マルチキャストが可能である。

- コネクションセットアップのオーバーヘッドがない。

- 送信レートを一定に保つことができる。

実際、広域ネットワークにおいては、TCP を用いて画像や音声を送信するよりも UDP を用いたほうが、スループットが上がる事が報告されている [7]。つまり、現在の広域ネットワークにおいて実時間通信に UDP を用いることは、適切であると言える。

しかし、UDPは以上の利点に加えて、大きな欠点もある。それは、パケット廃棄を補償する仕組みを持たないことである。TCPにおいてパケット廃棄は、再送によって補償されるが、UDPはこれらの仕組みを持たないため、そのパケット廃棄を少なくするような伝送方法の開発が望まれる。特に、音声や画像などをUDPで送信する場合、連続的なパケット廃棄はその品質に著しく悪影響を与える。

従って、以下シミュレーションでは、広域ネットワークにおけるUDPのパケット廃棄率と、その連続廃棄特性を中心に調べる。

3 シミュレーション

シミュレーションは、あるローカルエリアネットワーク(以下、LAN)から広域ネットワーク(以下、WAN)を通じて別のLANにUDPを用いて、音声の実時間情報を転送する場合を想定した。

シミュレータには、UCB(University of California, Berkeley)で開発されたREAL 4.0 [8]を用いた。REAL 4.0は、本来TCPの性能評価を中心としたシミュレータであるので、それにUDP sourceを追加し、またパケットの連続廃棄を調査出来るよう改良した。

シミュレーションのシナリオを図1に示す。

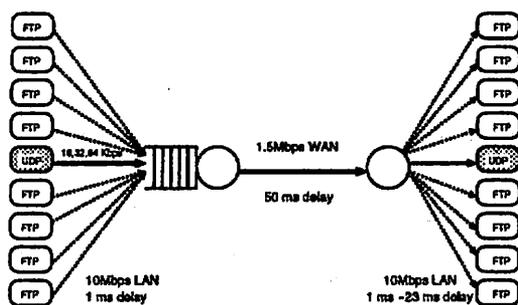


図1: Scenario for Wide Area Network simulation.

ノード間リンクの帯域は、実際のインターネットを取り巻く環境を考慮して、LANでは10Mbps、

WANでは1.5Mbpsとした。また、送信側のLANにおけるネットワーク遅延は1ms、WANにおいては50ms固定とする。

TCPのフロー制御は、全てのTCPが同リアルゴリズムを使用している。そのため、例えば、ラウンドトリップタイム(RTT)が非常に似通っているコネクション間では、その輻輳ウィンドウのサイズ変化に同期が見られる。このTCPの同期は、UDPのパケット廃棄にも大きな悪影響を及ぼしていると考えられる。

そこで本シミュレーションでは、受信側のLANにおけるネットワーク遅延について、TCPを同期させる場合は、すべてのコネクションで1msと固定する。また、TCPを同期させない場合としては、受信側のLANにおけるネットワーク遅延について、1msからはじめて、コネクションの順に2msの遅延の時間差を加えることにした。

TCPは、4.3BSD-Renoを使用し、TCPのモデルは、バルクデータ転送(FTP)とする。TCPパケットサイズは、512バイトにTCPヘッダとIPヘッダを付加したものとし、Ackサイズは、40バイトとする。

図1において、TCPコネクション数は、3、6、9、12本の場合について調べた。これは、TCPのみのコネクションで実験した場合、3本のTCPでは全てのコネクションが最大ウィンドウサイズでデータ転送し続けるのに対して、12本のTCPでは、コネクションのセットアップすら出来ないコネクションが発生したので、これらの間について調べるのが妥当と考えたからである。

また、TCPの同期は、ネットワーク遅延が同じならば、データ転送の開始時刻を任意に変化させた場合においても同様に現れるので、本シミュレーションでは、全てのコネクションのデータ転送の開始時刻は、同一とする。

UDPのパケットサイズは、320バイト、160バイト、80バイトの3通りについてUDPヘッダとIPヘッダを付加したものとし、また、送信レートを16Kbps、32Kbps、64Kbpsと変化させた場合について調べた。これらは、実際にインターネット上で音声通信を行うために用いられているアプリケーションに基づくものである。全てのノードのコネクション当たりのバッファ

サイズは、8832バイトとした。これは、TCPにおける16パケット分に相当する。また、中間ノードでのバッファは、FCFSに基づく管理を行うものとする。

シミュレーション時間については、予備実験において、2,000秒(32Kbps, 320バイトで25,000パケット)で行った場合と200秒(同様2,500パケット)で行った場合の、そのUDPパケット廃棄率に大きな違いが見られなかったため、すべて200秒で行った。

以上のシミュレーションのシナリオにおいて、

1. TCPの同期の影響。
2. TCPのコネクション数の影響。
3. UDPパケットサイズの影響。
4. UDP送信レートの影響。

の観点からUDPパケット廃棄特性について調べた。

4 結果および考察

4.1 TCPのみのトラフィックの場合

前章のシナリオにおいて、UDPの送信を行わず、6本のTCPコネクションのみのデータ転送を行った場合のTCP輻輳ウィンドウの挙動を調べた。図2は、個々のコネクションのネットワーク遅延に時間差を付けた場合であり、図3はネットワーク遅延を同一にした場合である。(ただし、両図においては、輻輳ウィンドウの挙動を見やすくするため、開始後50秒について示した。)

図2を見ると、あるコネクションでは、輻輳によりタイムアウト起こし、ウィンドウサイズを1パケットにしていることが分かる。また、それと同じ時刻にあるコネクションでは、最大ウィンドウサイズで送信を行っていることも分かる。この場合、各コネクションのウィンドウサイズには同期がみられない。このような状態は、一般に複数のホストが広域ネットワークを通じて、それぞれネットワーク遅延の違ったホストとの間でデータ転送を行う場合の状態と考えら

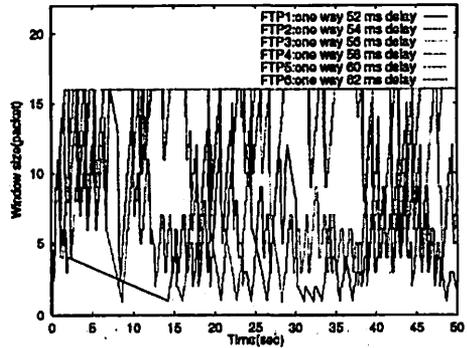


図2: Window size of 6 FTPs (different network delays).

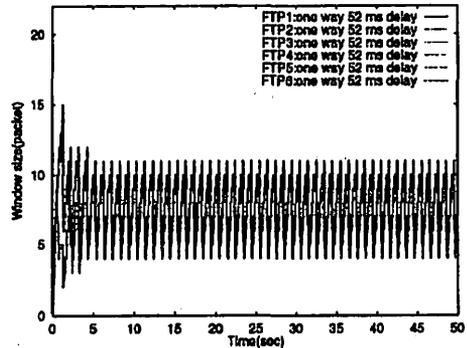


図3: Window size of 6 FTPs (same network delays).

れる。この場合のネットワーク利用率は、TCPヘッダを除くペイロードで91.3%であった。

一方、図3では、明らかにウィンドウサイズが同期しており、どのコネクションも最大ウィンドウサイズで送信することなく、またタイムアウトも起こらない。これは、例えば、複数のホストが同じかあるいは非常にネットワーク遅延が似通ったホストと通信を行っている場合や、あるホストのみがこの回線を使用しており、HTTPなどように殆ど同じホスト間において複数のデータ転送を行う場合などが考えられる。この場合のネットワークの利用率は82.7%であった。つまり、ネットワークの利用率は非常に悪くなっていることが分かる。

図2及び図3は、TCPコネクション6本の場合であるが、9本、12本の場合も全く同様の傾向が見られた。また、TCPの同期が起こる場合のネットワーク利用率は、TCPコネクション数が増加するに従って、更に悪化した。つまり、TCPの同期は、ネットワークの利用率に非常に悪い影響を与えることが分かる。

次に、このTCPの同期がUDPパケットの廃棄特性に与える影響について調べる。

4.2 UDPパケット廃棄特性

4.2.1 TCPの同期の影響

図2の状態に32KbpsのUDPストリーム(データサイズは、160バイト)を加えた場合の1秒あたりのパケット廃棄の分布(図4)、連続して廃棄されたパケット数(以下、連続パケット廃棄数)の分布(図5)およびTCP輻輳ウィンドウの挙動(図6)を示す。

図4からも分かるように、パケット廃棄は、時間軸に対してランダムに起こる。また、図5よりこの場合のパケットの連続廃棄数は非常に少ないことが分かる。この場合のパケット廃棄率は2.24%、パケット廃棄が起こった場合の平均の連続パケット廃棄数(以下、平均連続パケット廃棄数)は、1.05パケットであった。一方、図6よりTCP輻輳ウィンドウの挙動を見ると、UDPストリームを送信してもTCPの同期は見られないことが分かる。

次に、TCPが同期している場合、つまり図3の状態に前記と同様のUDPストリームを加えた場合の、1秒あたりのパケット廃棄の分布(図7)、連続パケット廃棄数の分布(図8)およびTCP輻輳ウィンドウの挙動(図9)を示す。

図4と比較して、図7においては、パケット廃棄が増加していることが分かる。また、図8を見ると、パケットの連続廃棄数も増加しており、最悪3パケットが連続して廃棄されている場合が頻繁に生じていることが分かる。

これは、UDPが3パケットを送る間に、中間ノードの輻輳が回避されなかったことを意味する。つまり、このUDPが3パケットを送っている間、TCPも輻輳回避を行わず、パケットを転

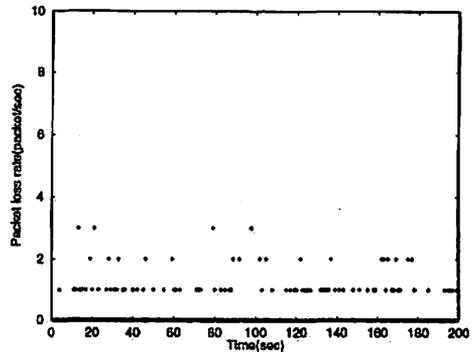


図4: UDP packet loss rate with 6 FTPs(different network delays).

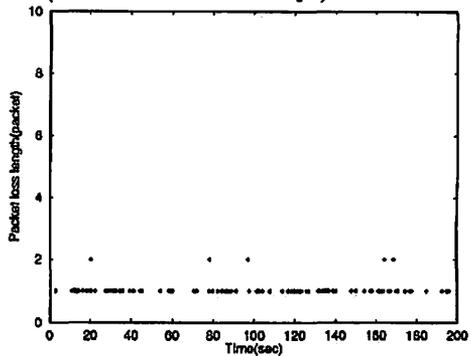


図5: UDP consecutive packet loss with 6 FTPs(different network delays).

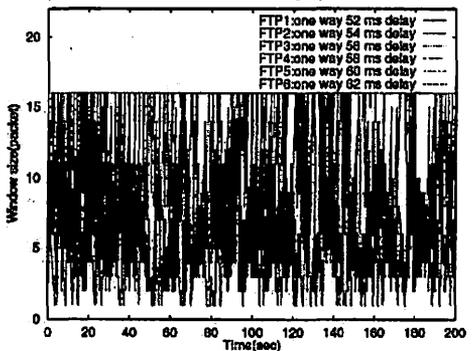


図6: Window size of 6 FTPs(different network delays).

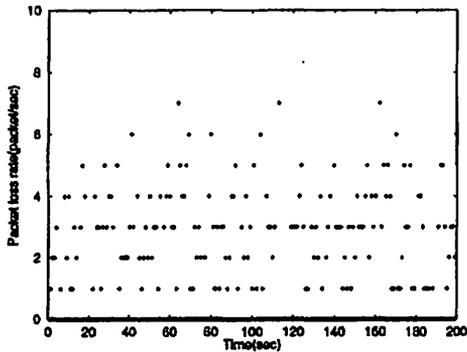


図 7: UDP packet loss rate with 6 FTPs(same network delays).

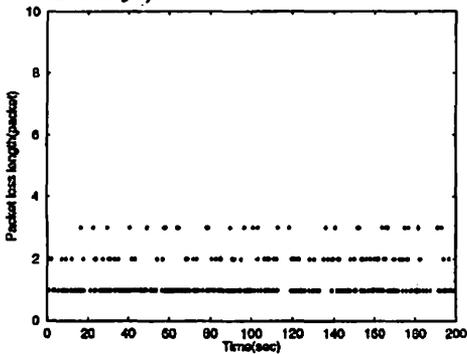


図 8: UDP consecutive packet loss with 6 FTPs(same network delays).

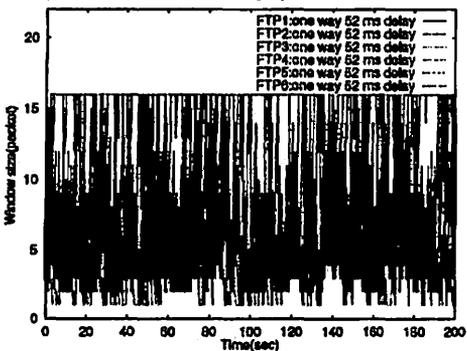


図 9: Window size of 6 FTPs(same network delays).

送り続けていることにより、パケットがバースト的に廃棄されている。この場合のパケット廃棄率は 10.1%、平均連続パケット廃棄数は 1.37 パケットと非常に悪い結果となった。

一方、TCP の輻輳ウィンドウは、TCP のみの場合では、同期が見られていたが、UDP ストリームが加わると、その同期は、一部でくずれることが分かった。

以上の結果は、TCP コネクション数が 6 本の場合を示したが、全く同様の傾向が 9 本、12 本の場合にも見られた。つまり TCP の同期は、UDP ストリームに対して、そのパケット廃棄率を増加させ、また連続的にパケットを廃棄するような非常に悪い影響を及ぼしていることが分かる。

4.2.2 UDP パケットサイズの影響及びコネクション数の影響

次に、送信レート 32Kbps の UDP ストリームにおいて、そのパケットサイズを変化させ、TCP コネクション数とその TCP が同期している場合と同期していない場合の廃棄率の変化について調べたものを図 10 に示す。

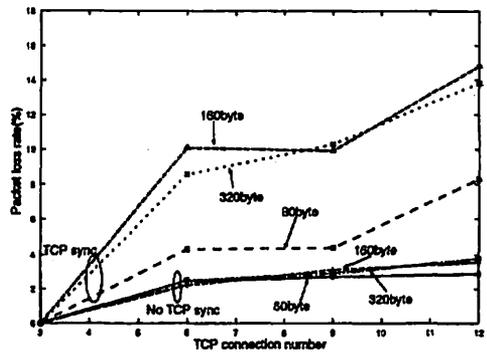


図 10: UDP packet loss for different packet sizes.

TCP コネクションが 3 本の場合には、ボトルネックの帯域において余裕があり、従って、輻輳がなく、UDP パケット廃棄は起こらない。一

方、TCP コネクションが 6 本の場合、ボトルネックにおいて輻輳が起り、UDP のパケット廃棄が起るようになる。

TCP が同期していない場合は、UDP のパケットサイズに変化を加えても、そのパケット廃棄率に大きな差は見られない。また、TCP コネクション数の増加にともなうパケット廃棄率の増加も非常にゆるやかであることが分かる。

一方、TCP が同期している場合は、どのパケットサイズにおいても廃棄率が高くなっており、コネクション数が 12 本になると顕著にパケット廃棄率が増加していることがわかる。

UDP のパケットサイズが 320 バイト及び 160 バイトの場合は、非常にパケット廃棄率が高く、また、その傾向も似通っている。それに対して、UDP のパケットサイズが 80 バイトの場合、TCP の同期が起こっても、他の場合に比べパケット廃棄率は少ない。これは、パケットサイズが小さいため、中間ノードにおけるバッファの輻輳時における、わずかな隙間にもパケットが入り込んで、廃棄されないものと考えられる。

従って、UDP のパケットサイズが小さい方が、そのパケット廃棄率が少なくなることが分かった。

4.2.3 UDP 送信レートの影響

次に、パケット廃棄率が少なかった 80 バイトの UDP について、送信レートを変化させた場合のパケット廃棄率を図 11 に示す。

一般に、ネットワークが輻輳状態にあり、パケット廃棄率が大きい時には、送信レートを下げると良いと考えられ、また、実際に画像などの通信においてその効果が検討されている [9]。しかし、今回実験を行った音声通信におけるパケットサイズ、送信レート範囲では、図 11 の結果から分かるように、レート制御によるパケット廃棄の減少は見られない。さらに悪いことには、TCP が同期しているような場合は、送信レートを下げると逆にパケット廃棄が大きくなることが分かる。

この原因を明らかにするため、TCP の同期している場合に最もパケット廃棄率が高い 16Kbps

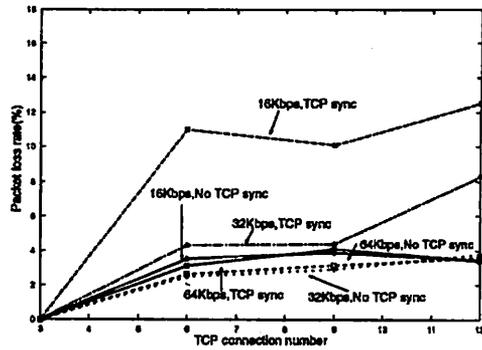


図 11: UDP packet loss for different transmission rates.

で UDP を送信した場合に関して、UDP の連続パケット廃棄数分布 (図 12) と TCP 輻輳ウィンドウの挙動変化 (図 13) の関係を調べる。

図 12 より、連続的に 3 パケットが廃棄される場合が多く、バースト的なパケット廃棄が起こっていることが分かる。また、TCP の輻輳ウィンドウの挙動については、前述の 32Kbps でパケットサイズが 160 バイトの場合 (図 9) では、TCP の同期が一部でくずれるようになったのに対し、図 13 では、TCP の同期がそのまま残っている。つまり、UDP ストリームのパケットサイズ、送信レートをさらに小さくした場合は、TCP のフロー制御に与える影響が小さくなり、その結果、同期が残ることとなる。

このような状況下では、ボトルネックとなる中間ノードでは、その queue がパケットで一杯になってパケット廃棄を起こす状態と、比較的 queue にパケットが少なく余裕がある状態を繰り返すこととなり、ある周期で UDP パケットも連続的に廃棄され、パケット廃棄率も増加するようになる。

従って、音声などを UDP で送信する場合、送信レートを下げることによるパケット廃棄率の改善は、見られないことが分かった。

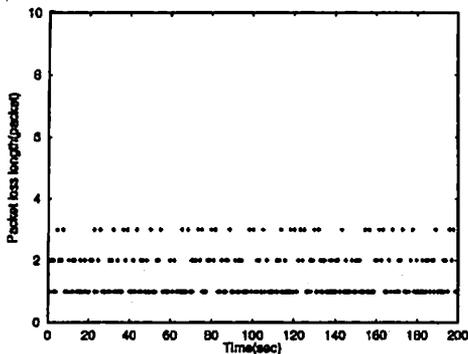


図 12: UDP consecutive packet loss with 6 FTPs(same network delays).

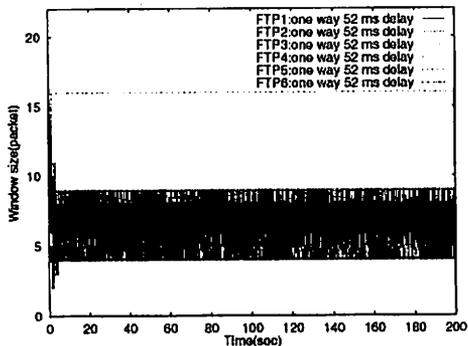


図 13: Window size dynamics of 6 FTPs(same network delays).

5 まとめ

本研究では、主に広域ネットワークでの音声実時間通信を対象としたUDPパケット廃棄特性について調べた。

その結果、以下のことが分かった。

1. TCPの同期はUDPのパケット廃棄に悪影響を与える。
2. UDPのパケットサイズが小さい方が、そのパケット廃棄率が少なくなる。
3. UDPの送信レートを下げても、そのパケット廃棄率に改善は見られない。

これらの結果から、UDPパケットサイズを小さくし、送信レートをあまり下げないことにより、音声などの実時間通信を効果的に行えることが分かった。

また、今後の問題点として、画像における実時間通信の場合や、同様な実時間通信トラフィックが複数存在するような場合についても検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] <http://www.nlanr.net/Flowsresearch/fixstats.21.6.html>
- [2] L.Zhang and D.Clark, Oscillating Behavior of Network Traffic: A Case Study Simulation, *Internetworking: Research and Experience*, Vol.1,pp.101-112,1990.
- [3] S.Floyd and V.Jacobson, The synchronization of periodic routing messages, *ACM SIGCOMM'93*, pp.33-44, Sept.1993.
- [4] S.Floyd and V.Jacobson, On traffic phase effects in packet-switched gateways, *Internetworking:Research and Experience*, vol.3, pp.115-156, Sept.1992.
- [5] D.Sanghi, A.K.Agrawala, O.Gudmundson, and B.N.Jain, Experimental Assessment of End-to-End Behavior on Internet, *Proceedings of the Conference on Computer Communications*, pp.867-874, March/April 1993.
- [6] J-C. Bolot, End-to-end Packet Delay and Loss Behavior in the Internet, In *Proc. ACM SIGCOMM93*, pp.289-298, Sept.1993.
- [7] V.Biondi, Traffic Measurements in Multimedia Documents Real Time Transfer, In *Proc.INET'95*, June.1995 (<http://sunserver.iasi.rm.cnr.it/iasi/Publications/inet95/paper.html>).
- [8] S.Keshav, REAL: A Network Simulator, Tech. Rep. 88/472, Department of Computer science, UC Berkeley, 1988.
- [9] I.Busse, B.Deffner, and H.Schulzrinne, Dynamic QoS control of multimedia applications based on RTP, *International Workshop on High Speed Networks and Open Distributed Platforms*, June. 1995 (<http://www.fokus.gmd.de/step/accontrol/ac.html>).