

## TCP 通信を帯域保証する場合の問題点の分析

林 孝典\*, 山崎 真一郎\*, 森田 直人\*  
相田 仁\*\*, 武市 正人\*\*, 土居 範久\*\*\*

\*通信・放送機構 麻布台リサーチセンター  
〒106-0041 東京都港区麻布台1-11-10 日総22ビル3階  
Tel: 03-5545-7611, E-mail: {hayashi, yamasaki, morita}@arc.tao.or.jp  
\*\*東京大学, \*\*\*慶應義塾大学

あらまし 本稿では、まず最初に、フロー制御を行わないUDP通信に対して、WFQは各コネクション間の通信品質のばらつきを抑える利点があることを確認した。これを、フロー制御やパケット損失等に伴う再送処理を行うTCP通信に適用した場合の通信品質を分析した結果、TCP通信に対しても有効であることを示した。次に、帯域保証には不向きとされるTCP通信に対して、RSVPとWFQの組み合わせにより帯域保証した場合のスループット特性を分析した。その結果、帯域保証技術を適用する場合には、パケットシェーピング機能等、保証帯域を越えるトラフィックを発生しない制御機構が必要となることが分かった。

キーワード TCP通信, 帯域保証, WFQ, RSVP

## A Study of Guaranteed Rate for TCP Communication

Takanori HAYASHI\*, Shin'ichiro YAMASAKI\*, Naoto MORITA\*  
Hitoshi AIDA\*\*, Masato TAKEICHI\*\*, Norihisa DOI\*\*\*

\*Telecommunications Advancement Organization of JAPAN Azabudai Research Center  
Nisso-22 Bldg. 3F, 1-11-10, Azabudai, Minato-ku, Tokyo 106-0041  
Tel: +81-3-5545-7611, E-mail: {hayashi, yamasaki, morita}@arc.tao.or.jp  
\*\*The University of Tokyo, \*\*\*Keio University

Abstract This paper describes that Weighted Fair Queuing (WFQ) is one of the effective queuing technique on fairness of quality for multiple UDP/TCP communications. This paper also evaluates TCP performance with guaranteed rate using WFQ and Resource Reservation Protocol (RSVP). The relationships among TCP traffic rate, reserved bandwidth and TCP throughput were analyzed. As a result, TCP traffic rate control, such as a packet-shaping function, should be needed to apply guaranteed rate technique to TCP communication.

key words TCP Communication, Guaranteed Rate, WFQ, RSVP

## 1. はじめに

近年、インターネットのユーザ数とホスト数の増大に伴い、通信トラフィック量が急増している。複数の通信トラフィックが同じ回線帯域を共有する場合、コネクション毎の通信品質のばらつきを抑えるため、ルータにおいてWFQ[1](Weighted Fair Queuing)やRED[2](Random Early Detection)等の技術が開発されている。WFQは、フロー当たりのパケット数とパケットサイズの積(単位時間当たりのデータ量)を重みとし、各フロー毎の重みが平等になるようにキューイングするため、UDPショートパケットを多用するマルチメディアアプリケーションに対して特に有効となる。

また一方で、インターネットを利用したマルチメディア通信が普及するにつれて、品質保証型通信の重要性も高まってきており、RSVP[3](Resource ReSerVation Protocol)等の帯域保証型プロトコルが検討されている。RSVPは、特に、固定ビットレートのマルチメディアアプリケーションに対して有効である。こうした中で、現在のインターネットの主要プロトコルであるTCPは、通信速度が定まらないため、帯域保証には不向きとされている。

本稿では、固定ビットレートのUDP通信に対して特に有効であるWFQやRSVPを、TCP通信に対して適用した場合の通信品質を分析し、その有効性や問題点について考察する。2章において、まず、フロー制御を行わないUDP通信に対して、WFQは各コネクション間の通信品質のばらつきを抑える利点があることを確認する。次に、フロー制御やパケット損失等に伴う再送処理を行うTCP通信に対して、WFQを適用した場合の通信品質を測定し、その有効性について分析する。3章では、TCP通信をRSVPとWFQの組み合わせにより帯域保証した場合のスループット特性を測定し、TCP通信に帯域保証技術を適用する場合の問題点を分析した結果について示す。

## 2. 複数コネクションの通信にWFQを適用する場合の通信品質

2章では、まず、複数本のUDPコネクションに対してWFQを適用し、コネクション毎の通信品質のばらつきが抑えられることを確認する。次に、WFQをTCP通信に適用した場合の通信品質を分析し、その有効性について考察する。

### 2.1 通信品質測定実験

図1に示すように、3台のワークステーション(WS: Workstation) WS1～WS3が、2台のルータを

介してWS4と通信する実験系を構築した。WSとルータ間は10Mbit/sイーサネット、また、ルータ間はクロックレートを125kbit/sに設定したシリアル回線で接続した。

3組のWS間のUDP及びTCPトラフィックの発生には、DBS[4](Distributed Benchmark System)を用いた(WS1～WS3がデータ送信しWS4が受信する)。コネクション数は、1、3、6、12、18、24と変化させたが、6コネクション以上の条件では、通信する各組のWSが複数コネクションを確立するようにした。トラフィックが輻輳するシリアル回線のインタフェースにおいてFIFO(First-In First-Out)あるいはWFQを設定し、UDP及びTCPコネクション数とスループット特性の関係を分析した。測定時間はUDPの場合は60秒、TCPの場合は各コネクションが300パケット以上を転送できる時間とした。以下に、UDP及びTCPトラフィックの発生条件を示す。

#### ○UDPトラフィック

- ・1コネクションのトラフィックレート: 32kbit/s
- ・データパケットサイズ: 160, 1000byte  
(パケット発生間隔: 0.04秒(パケットサイズ160byte), 0.25秒(パケットサイズ1000byte))

#### ○TCPトラフィック

- ・データパケットサイズ: 160, 1460byte

## 2.2 UDP通信にWFQを適用した場合の通信品質 UDPコネクション数と平均スループット及びその

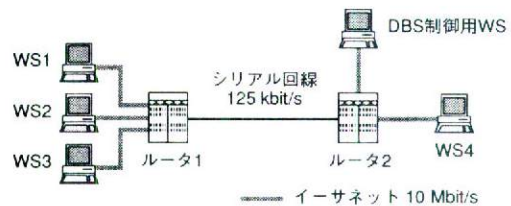


図1 実験系の構成(1)

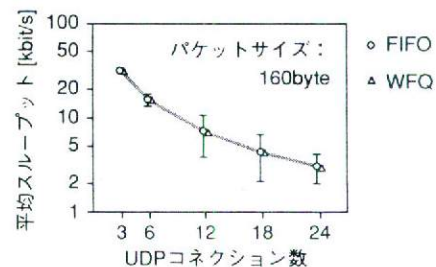


図2 UDPコネクション数と平均スループットの関係

ばらつきを関係を図2に、UDPコネクション数とパケット到着時間間隔の累積密度分布を図3に示す。図2より、FIFOの場合に見られた平均スループットのばらつきが、WFQ処理により抑えられていることが分かる。また、図3より、WFQ処理時のパケット到着時間間隔はほぼ一定に保たれ、スループットの時間変動が少ないことを示している。

図4に、異なるUDPパケットサイズの通信が混在した場合のスループット特性を示す。FIFOの場合は、パケットサイズが大きいトラフィックの方がパケット損失(ルータでのバッファ溢れ)を起こす確率が高くなるため、スループットが低くなっている。一方、WFQでは、フロー当たりのパケット数とパケットサイズの積を重みとし、各フロー毎の重みが平等になるようにキューイングされるため、パケットサイズの違いによるスループットのばらつきは抑えられる結果となった。

以上より、WFQ処理は、フロー制御を行わないUDPトラフィックに対して、各コネクション間の通信品質のばらつきを抑える利点があることを確認した。これに対して2.3節では、フロー制御やパケット損失等に伴う再送処理を行うTCP通信に対して、WFQを適用した場合の通信品質を測定し、その有効性について分析する。

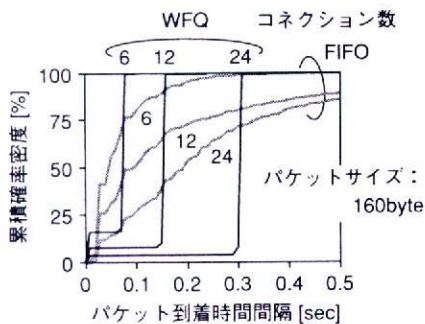


図3 UDPパケット到着時間間隔の累積確率密度分布

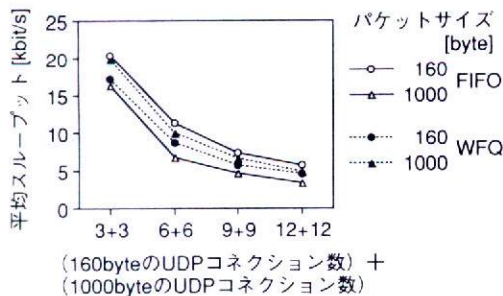
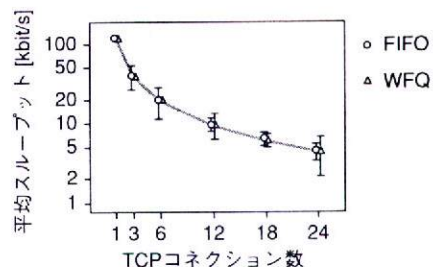


図4 UDPパケットサイズのスループットに及ぼす影響

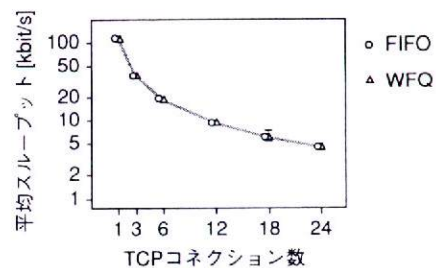
### 2.3 TCP通信にWFQを適用した場合の通信品質

TCPコネクション数と平均スループット及びそのばらつきを関係を図5に示す。各コネクションの平均スループットの平均値は、FIFO、WFQに依らずほぼ同じ値となった。コネクション数が大きくなると、平均スループットは回線帯域をコネクション数で割った値よりも低くなった。全ての条件でルータ1からルータ2へ向かうシリアル回線の利用率は100%であったが、コネクション数が大きくなると、パケット損失等に伴う再送パケットが重複して送られる現象が増えたためである(このパケットを“重複パケット”と称す)。FIFO、WFQ両者の場合とも重複パケットの総数はほぼ等しくなったが、ルータ1でのパケット損失数は、WFQを適用した場合の方が少なくなった。なお、全ての条件でACKパケットの損失は発生しなかった。

図5(a)より、TCPパケットサイズが1460byteの場合の平均スループットは、3、6コネクションの場合にはFIFOの方が、また、12、24コネクションの場合にはWFQの方がばらつきが大きくなった。前述のように、全ての条件で重複パケットの総数はほぼ等しくなったが、各コネクション毎の重複パケット数の分布傾向には差が見られた。コネクション数が大きくなると、FIFOの場合には各コネクション毎で重複パケット数のばらつきが小さいのに対し、WFQの場



(a) パケットサイズが1460byteの場合



(b) パケットサイズが160byteの場合

図5 TCPコネクション数と平均スループットの関係

合には重複バケット数のばらつきが大きくなった。一方、図5(b)のバケットサイズが160byteの場合には、全ての条件でスループットのばらつきは小さくなった。シリアル回線速度が125kbit/sの場合に毎秒転送できるバケット数は、バケットサイズが1460byte、160byteでそれぞれ約10バケット、約75バケットとなる。バケットサイズが小さく、扱われるバケット数が大きくなると、バケット損失が発生する確率が各コネクション毎で均等化されるためと考えられる。WFQにおいて各フロー毎の重みが平等になるようにスケジューリングされるが、単位時間内に送信可能なバケット数が少ない場合、即ち、バケットサイズが大きく、コネクション数が大きい場合には、各コネクション毎のスループットにばらつきが発生することが分かった。また、ルータ間の回線速度が低くなると、単位時間内に送信可能なバケット数が減るため、この傾向はより顕著に表れた(結果の図は省略)。

ここで、TCPコネクション数と有効なバケットの受信時間間隔の最大値(“最長待機時間”と称す)の関係を図6に示す。ここで、有効なバケットとは、バケットの到着順序を考慮し、かつ、重複バケットを除いたものである。WFQを行った場合は、バケットサイズや、コネクション数が大きくなった時に平均スループットがばらつくという欠点が見られたが、1

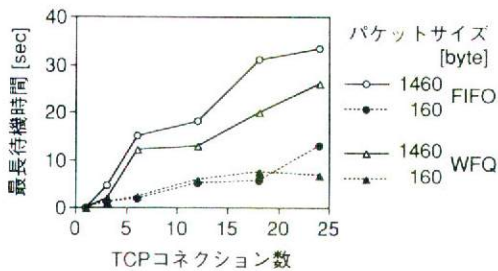


図6 TCPコネクション数と最長待機時間の関係

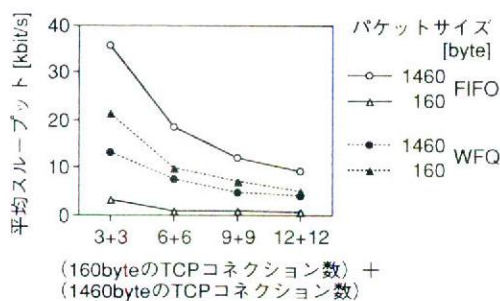


図7 TCPバケットサイズのスループットに及ぼす影響

コネクションのバケットが扱われる時間がある程度均等化されるため、最長待機時間はFIFOよりも小さく抑えられる利点があることが分かった。

次に、異なるTCPバケットサイズの通信が混在した場合のスループット特性を図7に示す。FIFOの場合は、UDPの場合とは反対に、バケットサイズが大きいトラヒックの方が高いスループットを得ていることが分かる。WFQを行うと、両者の差は小さく抑えられているが、コネクション数が小さい場合にはバケットサイズが1460byteのバケットの損失率が高くなり、UDPバケットにWFQを適用した場合と比較して改善効果が少なかった。

以上より、フロー制御やバケット損失等に伴う再送処理を行うTCP通信に対して、WFQを適用すると、最長待機時間、バケット損失率、バケットサイズの影響を抑えられる利点があることが分かった。しかし、輻輳が大きくなる場合、即ち、(1)回線速度が小さい、(2)コネクション数が大きい、(3)バケットサイズが大きい場合に、コネクション毎のスループットがばらつく傾向があることも分かった。

### 3. TCP通信を帯域保証する場合の通信品質

3章では、TCP通信をRSVPとWFQの組み合わせにより帯域保証した場合のスループット特性を測定し、TCP通信に帯域保証技術を適用する場合の問題点を分析した結果について示す。

#### 3.1 帯域保証特性測定実験

図8に示すように、図1の実験系のルータ1に、ルータ3及びWS5を接続し、4台のワークステーションWS1~WS3、WS5が複数のルータを介してWS4と通信できる実験系を構築した。2.1節と同様に、WS間のトラヒックの発生にはDBSを用いた。トラヒックが輻輳するルータ1とルータ2の間において、WS5

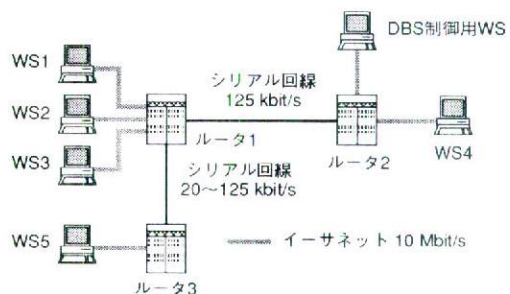


図8 実験系の構成(2)

とWS4の間のTCPトラフィックのみを、RSVPとWFQを用いて帯域保証できるようにした。また、帯域保証しないバックグラウンドトラフィックとして、WS1～WS3とWS4の間で複数のTCPまたはUDP通信を行うようにした。実験では、(1)保証帯域と(2)ルータ1とルータ3の間の通信速度(帯域保証対象となるTCPトラフィックが使用できる最大帯域)を変化させてスループット特性を分析した。測定時間は300秒とした。以下に実験条件の詳細を示す。

- 帯域保証対象TCPトラフィック
  - ・データパケットサイズ：1460byte
- 保証帯域：保証なし，20，39，56，72kbit/s
- ルータ1とルータ3の間の通信速度：
  - 20，39，56，72，125kbit/s
- バックグラウンドTCPトラフィック
  - ・データパケットサイズ：1460byte
  - ・コネクション数：6，12コネクション
- バックグラウンドUDPトラフィック
  - ・1コネクションのトラフィックレート：32kbit/s
  - ・データパケットサイズ：160byte  
(パケット発生間隔：0.04秒)
  - ・コネクション数：6，12コネクション

### 3.2 帯域保証時のTCPスループット特性

帯域保証の対象としたTCPトラフィックの平均スループットを、保証帯域及びルータ1とルータ3の通信速度を変化させて測定した結果を図9，図10に示す。

バックグラウンドトラフィックがない場合には、ルータ1とルータ3の通信速度に比例したスループットが得られた。バックグラウンドトラフィックが付加されると、ルータ1とルータ3の間の通信速度、すなわち、帯域保証対象となるTCPトラフィックが使用できる最

大帯域を大きくしても、保証帯域以上となると、平均スループットは必ずしも大きくなるとは限らないことが分かる。また、バックグラウンドトラフィックが増加すると、平均スループットの低下量は大きくなった。保証帯域を越えて送出されたパケットは帯域保証されていないパケットと同様に扱われるため、パケット損失に伴うTCP輻輳制御(スロースタート)等により平均スループットが低下し、保証帯域を完全に利用できないと考えられる。このため、保証帯域が大きいほど、スロースタート等による平均スループット低下への影響が大きくなった。

ここで、図9中のケース1とケース2の条件におけるスループットの時間変化を図11に示す。ケース1でパケット損失がなかったのに対して、ケース2ではパケット損失に伴う再送処理が行われたため、スループットが大きく変動している。両者で平均スループットはほぼ同じとなったが、ケース2では10秒以上スループットが得られない区間もあり、帯域が確保されているとは言えない。

次に、バックグラウンドトラフィックとして加えたコネクションのスループット特性について述べる。バックグラウンドトラフィックがUDPの場合は、TCP

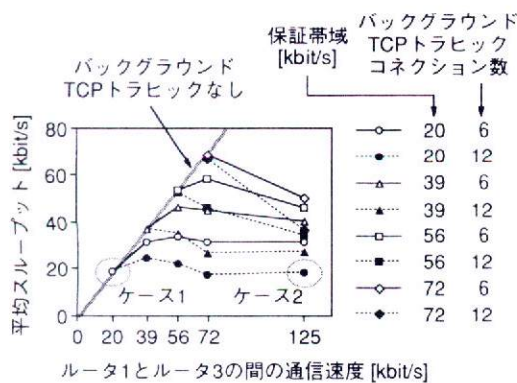


図9 帯域保証時の平均スループット(1)

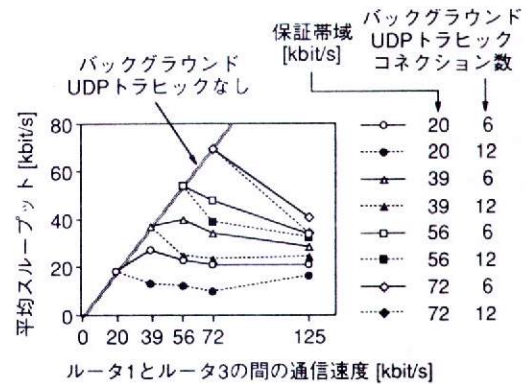


図10 帯域保証時の平均スループット(2)

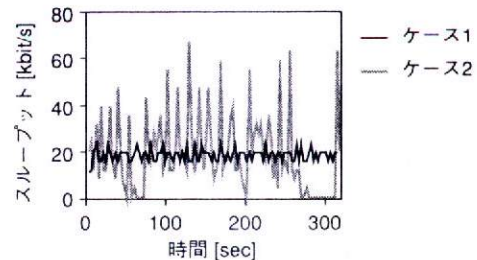


図11 図9中のケース1,2のスループットの時間変化

トラフィックが使用していない帯域を公平に使用していた。保証帯域以上のTCPトラフィックを発生させたことによりスループットの時間変動が激しくなった場合には、バックグラウンドのUDPスループットの時間変動も大きくなった。また、バックグラウンドトラフィックがTCPの場合にも同様であった。回線使用率はどの条件でもほぼ100%となり、TCPフロー制御(スロースタート等)が同期して回線使用効率を低下させる現象は見られなかった。

以上より、TCP通信に帯域保証技術を適用する場合には、(1)パケットシェーピング機能等、保証帯域内にトラフィックを抑える制御機構、(2)TCP輻輳制御の帯域保証への対応(パケット損失が発生した場合にスロースタートするのではなく、保証された帯域が確保されていることを前提としたフロー制御)等が必要になることが分かった。

#### 4. むすび

フロー制御を行わないUDP通信に対して、WFQは、各コネクション間の通信品質のばらつきを抑える利点があることを確認した。これを、フロー制御やパケット損失等に伴う再送処理を行うTCP通信に適用した場合の通信品質を測定した結果、TCP通信に対しても有効であることが分かった。また、RSVPとWFQの組み合わせにより、TCP通信を帯域保証した場合のスループット特性を分析した結果、帯域保証技術を適用する場合には、(1)パケットシェーピング機能等、保証帯域を越えるトラフィックを発生しない制御機構、(2)TCP輻輳制御の帯域保証への対応等が必要になることが分かった。

本稿では、帯域保証時の通信品質をスループットの平均値や時間変動に着目して分析した。実際の各種マルチメディアアプリケーションでは、スループットの時間変動等はアプリケーション品質を劣化させる大きな要因になると考えられる。例えば、Webブラウザ等を考えた場合、同じ平均スループットで画面表示されたとしても、表示等のスピードが変化したり、長い時間止まったりすると、悪い品質に感じると予想される。また、インターネット電話やテレビ会議等においても、スループットの変動は大きな品質劣化要因になると考えられる。今後は、各種マルチメディアアプリケーション品質と帯域保証時のネットワーク品質の対応関係について検討を進めていく。

#### 参考文献

- [1] A. Demers, S. Keshav, S. Shenker, "Analysis and Simulation of a Fair Queuing Algorithm," Journal of

- Internet-working Research and Experience, Sep., 1990  
[2] S. Floyd, V. Jacobson, "Random Early Detection gateway for Congestion Avoidance," IEEE/ACM Transactions on Networking, V.1, N.4, pp.397-413, Aug., 1993  
[3] B. Braden et al., "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification," IETF, RFC 2205, Sep., 1997  
[4] Y. Murayama, S. Yamaguchi, "DBS: a powerful tool for TCP performance evaluation," Conference on Performance and Control of Network Systems, Proceedings of SPIE 3231, pp.570-581, 1997