

## トラフィック特性に基づく複数パスへのトラフィック振り分け方法の検討

北辻 佳憲<sup>†</sup> 勝野 聡<sup>††</sup> 鶴 正人<sup>†††</sup> 滝根 哲哉<sup>††††</sup> 尾家 祐二<sup>††††</sup>

E-mail: kitaji@kyushu.jgn2.jp, katsuno@kddilabs.jp, {tsuru,oie}@cse.kyutech.ac.jp,  
takine@comm.eng.osaka-u.ac.jp

**あらまし** トラフィックエンジニアリングにおいて、エッジルータ間の複数の通信経路（パス）を用いてトラフィックを分散させる場合、単に利用効率を向上させるだけでなく達成されるトラフィックフローの品質を考慮する必要がある。そこで、本報告では流体モデルを用いて異なる特性のトラフィックを多重化した時のバッファ遅延（平均、分散、99.5パーセンタイル）を解析し、それをもとに、トラフィックの特性を考慮した複数パスへのトラフィック振り分け方法に関して検討した。そして、特性が異なるトラフィックを帯域が同じ2つのパスへ振り分ける場合には、パスの利用率が一致するようにトラフィックフローを均等に分けると、バッファ遅延を最小にできることを明らかにした。また、パスの帯域が異なる場合には、パスの利用率を一致するとバッファ遅延を最小にできず、パスの帯域、トラフィック特性、フロー数によって最適な振り分け方法が異なることを明らかにした。

**キーワード** トラフィック特性、品質保証、パス選択、流体モデル、トラフィックエンジニアリング

## On the path selection of traffic based on their characteristics

Yoshinori KITATSUJI<sup>†</sup>, Satoshi KATSUNO<sup>††</sup>, Masato TSURU<sup>†††</sup>, Tetsuya TAKINE<sup>††††</sup>,  
and Yuji OIE<sup>†††</sup>

E-mail: kitaji@kyushu.jgn2.jp, katsuno@kddilabs.jp, {tsuru,oie}@cse.kyutech.ac.jp,  
takine@comm.eng.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In a traffic engineering, a key issue is how the QoS of traffic flows is guaranteed besides optimizing utilization for network resources when traffic is balanced over multiple paths. In this paper, we first analyzed, using stochastic fluid flow model, packet queuing delay (mean, variance and 99.5th percentile) when two types of traffic flows with different characteristics are multiplexed into an infinite buffer. And then, we investigated a method to balance these flows over two paths on the basis of the characteristics of multiplexing flows. In the case that the bottleneck bandwidths of two paths are the same, the minimum queuing delay can be achieved under balancing flows based on the equal-load of the paths. However, in the case of the different bottleneck bandwidths for paths, the method to balance flows to minimizing the packet queuing delay strongly depends on the bandwidth of paths, traffic characteristics, and the number for flows.

**Key words** Traffic characteristics, QoS guarantee, path selection, stochastic fluid flow model, and traffic engineering

### 1. ま え が き

アクセス回線の高速化にともなってインターネットの通信量は増大しており、インターネットサービスプロバイダー（ISP）ではネットワークの高速化を余儀なくされている [1]。特に、大規模 ISP のバックボーンネットワークでは、ネットワークの高速化とともに、一次的にネットワークの一部を集中して通過するトラフィックをバックボーン全体へ分散する、トラフィックエンジニアリング技術 [2] が求められる。

将来のバックボーンネットワークは、通過するトラフィックの規模から、集約されるトラフィックを円滑に転送するコア網と、

それを取り囲む比較的トラフィック量が少ないエッジルータで構成されると考えられる。コア網を構成するルータは、パケットヘッダに記されたラベルに基づくネクストホップへのパケット転送処理が極限まで最適化され、そのため、エッジルータが主体となって、高度なパケット転送処理（入力するトラフィックの網全体への分散や品質保証のためのバッファ制御）を行うと考えられる。このとき、バックボーンネットワークを通過するトラフィックが最初に入力するエッジルータ（ingress ルータ）と、最後に通過してバックボーンから出ていくエッジルータ（egress ルータ）の間の通信経路（以下、単にパスと省略する）は複数確立され、上述の高度なパケット転送処理はこのパスにトラヒッ

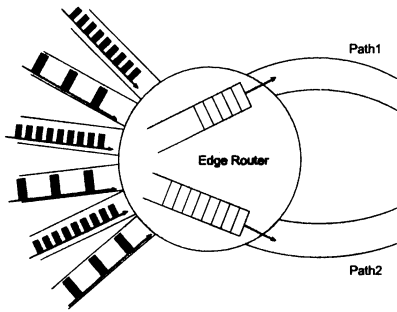


図1 Router balances two types of flows over two paths.

クを振り分けることで実現されると考えられる [3], [4], [5].

ところで、先に述べたアクセス回線の高速化は、様々なアプリケーション開発の引金にもなっており、将来は分散アプリケーションがより一般的に利用され、そのトラヒック特性も多様化すると考えられる。その結果、一部のトラヒックに対する通信品質への要求も一層高まり、バックボーンネットワークにおいてもそのようなトラヒックの品質保証は不可欠になると予想される。

上述の構成を採るバックボーンネットワークでは、多様な性質のトラヒックに対してパスが少数となってしまうことが予想され、一つのパスに複数の特性の異なるトラヒックが振り分けられることが考えられる。特性の異なるトラヒックフローが一つの出力バッファを共有すると、パスの利用率が高くなる程トラヒックフローが互いに影響して、一部のトラヒックが品質劣化を起こすことが報告されているが [6], [7], [8]、ingress ルータが各 egress ルータに複数のパスを確立するため、パケットスケジューリングのバッファを各パスに複数設定するのは困難である。

そこで本稿では、バックボーンを通過するトラヒックを、品質保証の観点から、トラヒックを複数パスへ振り分ける方法について検討する。簡単のため、ingress ルータに入力する性質の異なるトラヒックフロー群を2種類とし、2つのパスにトラヒックを振り分けるときのバッファ遅延の平均、分散、99.5パーセンタイルに着目し、適切な振り分け方法について考察する。なお、性質の異なるトラヒックを一つのパスへ多重化するときのバッファ遅延の解析には流体モデルを用いる。

## 2. 解析モデル

ingress ルータが、性質の異なる2種類のトラヒックを2つのパスに振り分けるとする(図1)。確立されるパスはコア網において帯域が保証され、トラヒックがパスを通過するときの遅延変動は、ingress ルータにおけるバッファ遅延に比べて十分小さいものとする。以下では、ingress ルータを単にエッジルータと略す。性質が異なるトラヒックは、それぞれ複数のUDPフロー(送信元と宛先のアドレスおよびポート番号によって区別される)で構成されるとする。パスへ振り分けられたトラヒックフローはフィードバック制御が行われず、エッジルータでのバッファ遅延によって後続の入力トラヒックの特性が変化しないものとする。

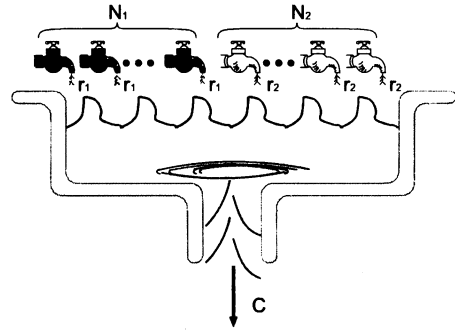


図2 Fluid flow model.

このような状況において、トラヒックが経験するバッファ遅延を小さく抑えることを目標に、エッジルータが入力するトラヒックフローの特性を検知してパスへ振り分けるものとする。

### 2.1 流体モデル

2種類の on-off 流体を収容する無限バッファ流体モデルを考える(図2)。 $N_k$  をクラス  $k$  ( $k = 1, 2$ ) の流体のフロー数とする。クラス  $k$  の流体の on 期間, off 期間はそれぞれパラメタ  $\mu_k^{(on)}$ ,  $\mu_k^{(off)}$  を持つ指数分布に従う(平均は  $1/\mu_k^{(on)}$  と  $1/\mu_k^{(off)}$ )。クラス  $k$  の流体が on 期間にあるとき、一つの流体フローは一定の率  $r_k$  で送り込まれる。一方、滞留している流体は一定の率  $C$  で排出される。

流体が on 状態ならびに off 状態である定常確率を、それぞれ、 $p_k^{(on)}$ ,  $p_k^{(off)}$  と定義すると、クラス  $k$  の流体の強度  $\rho_k$  および総流体強度  $\rho$  は、

$$\rho_k = r_k p_k^{(on)}, \quad \rho = \sum_{k=1}^2 N_k \rho_k$$

で与えられる。以下では

$$\rho < C, \quad \sum_{k=1}^2 N_k r_k > C$$

と仮定する。

時刻  $t$  のクラス 1, 2 の on 状態のフロー数を  $(i, j) \in S$ 、滞留量を  $U(t)$ 、 $U(t)$  の変化率を  $c_{ij} = ir_1 + jr_2 - C$  と定義する。

以下では簡単化のため、全ての  $c_{ij}$  ( $(i, j) \in S$ ) は 0 ではないとする。このとき、

$$S_+ = \{(i, j); (i, j) \in S, c_{ij} > 0\},$$

$$S_- = \{(i, j); (i, j) \in S, c_{ij} < 0\}$$

を定義し、 $S_+$ ,  $S_-$  に含まれる状態数をそれぞれ  $M_+$ ,  $M_-$  とする。以下では、on 状態の流体の組  $(i, j) \in S$  のうち、最初の  $M_+$  個が  $S_+$  に含まれており、 $M_+ + 1$  番以降が  $S_-$  に含まれるように並べ替えられ、1 から  $M = (N_1 + 1)(N_2 + 1) = M_+ + M_-$  まで番号が振られているものとする。

この流体モデルは、状態数  $M$  の規約な連続時間マルコフ連鎖に変調される入力を持つ、無限バッファモデルと考えることができる。 $M$  状態マルコフ連鎖の推移率行列を  $T$  とすると、

定常状態確率ベクトル  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_M)$  は次式を満たす ( $\mathbf{e}$  は全ての要素が 1 の列ベクトル)。

$$\pi \mathbf{T} = \mathbf{0}, \pi \mathbf{e} = 1$$

滞留量の定常状態確率変数を  $U$  とし、滞留量の分布および積率を求めるために、先ず準備として行列  $\pi, \hat{\mathbf{T}}, \mathbf{C}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$  を定義する。 $\mathbf{T}, \pi$  は  $M_+, M_-$  によって以下のように分割されているものとする。

$$\mathbf{T} = \begin{array}{c} M_+ \quad M_- \\ M_+ \quad \left( \begin{array}{cc} \mathbf{T}_{+,+} & \mathbf{T}_{+,-} \\ \mathbf{T}_{-,+} & \mathbf{T}_{-,-} \end{array} \right) \\ M_- \end{array}$$

$$\pi = \left( \begin{array}{cc} M_+ & M_- \\ \pi_+ & \pi_- \end{array} \right)$$

組  $(i, j)$  を並び変えた  $m$  番目 ( $m \in 1, 2, \dots, M$ ) の変化率を  $C_m$  とし、 $C_m$  で与えられる対角行列を  $\mathbf{C} = \text{diag}(\mathbf{C}_+, \mathbf{C}_-) = \text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_M)$  と定義する。次に、行列  $\hat{\mathbf{T}}$  を次式で定義する。

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{\Pi}^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{\Pi}$$

ただし、 $\mathbf{T}^T$  は行列  $\mathbf{T}$  の転置行列を表し、 $\mathbf{\Pi}$  は  $m$  番目の要素が  $\pi_m$  で与えられる対角行列  $\mathbf{\Pi} = \text{diag}(\mathbf{\Pi}_+, \mathbf{\Pi}_-) = \text{diag}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_M)$  である。このとき、 $\hat{\mathbf{T}}$  の 4 分割は次の様に与えられる。

$$\hat{\mathbf{T}} = \begin{array}{c} M_+ \quad M_- \\ M_+ \quad \left( \begin{array}{cc} \hat{\mathbf{T}}_{+,+} & \hat{\mathbf{T}}_{+,-} \\ \hat{\mathbf{T}}_{-,+} & \hat{\mathbf{T}}_{-,-} \end{array} \right) \\ M_- \end{array}$$

さらに、次式を満たす対角要素が負、非対角要素が正、各行和が非正の行列  $\mathbf{V}$  を定義し、

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}_+^{-1} \hat{\mathbf{T}}_{+,+} + \mathbf{C}_+^{-1} \hat{\mathbf{T}}_{+,-} \int_0^\infty e^{(-\mathbf{C}_-)^{-1} \hat{\mathbf{T}}_{-,-} v} \times (-\mathbf{C}_-)^{-1} \hat{\mathbf{T}}_{-,+} e^{(\mathbf{V}v)} dy \quad (1)$$

行列  $\mathbf{W}$  およびベクトル  $\alpha$  を次式で定義する。

$$\mathbf{W} = \int_0^\infty e^{(-\mathbf{C}_-)^{-1} \hat{\mathbf{T}}_{-,-} v} (-\mathbf{C}_-)^{-1} \hat{\mathbf{T}}_{-,+} e^{(\mathbf{V}v)} dy$$

$$\alpha = \pi_+ + \pi_- \mathbf{W}$$

このとき、[9] から以下が成立する。

$$\Pr[U > x] = \alpha e^{(\mathbf{V}x)} \mathbf{e}, \quad (2)$$

$$E[U^n] = n! \alpha \{(-\mathbf{V})^{-1}\}^n \mathbf{e} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

式 (2) および (3) は無限バッファを外から見たときの滞留量の分布および積率である。状態  $m$  ( $m \in 1, 2, \dots, M$ ) のときの合計入力レートを要素に持つ列ベクトルを、 $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_+, \mathbf{r}_-) = (r_1, r_2, \dots, r_M)$  と定義すると、流体が入力する瞬間のバッファ滞留量の分布および  $n$  次の積率は、

$$\Pr[\tilde{U} > x] = \frac{\alpha e^{(\mathbf{V}x)} \mathbf{r}_+}{\pi \mathbf{r}} \quad (4)$$

$$E[\tilde{U}^n] = \frac{n! \alpha \{(-\mathbf{V})^{-1}\}^n \mathbf{r}_+}{\pi \mathbf{r}} \quad (5)$$

となる。ただし、 $\tilde{U}$  は流体が入力する瞬間のバッファ滞留量の確率変数とする。

## 2.2 トラヒック振り分けの指標

トラヒックを 2 つのバスへ振り分ける際の指標に、トラヒックが経験するバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルを用いる。バッファ遅延の平均は、エンドアプリケーション間の片道遅延の増加量を示し、片道遅延が性能に影響するアプリケーション (例えば、インタラクティブ性のあるリアルタイム系ストリーム通信) にとっては、小さい方が望ましい。バッファ遅延の分散および 99.5 パーセンタイルは、通過するトラヒックの遅延変動の大きさを示し、エンドアプリケーションにおけるトラヒック受信バッファの大きさの設定に用いられ、小さい方が望ましい。

2 つのバスの帯域が異なる場合、トラヒックが経験するバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルはバスごとに異なる。振り分けられるトラヒックは、フローごとにアプリケーションが異なると仮定し、トラヒックフローのバスへの振り分けでは、2 つのバスにおいて上述の指標の悪い (大きい) 値の方に着目する。以下では、二つのバスの内トラヒックが経験するバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルの最大値を、それぞれ単に、バッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルと省略する。

バスへ振り分けられるトラヒックフローを前節の流体モデルの流体フローに、各バスの帯域を流体モデルの排出量に当てはめた場合、バッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルは次のように定義することができる。先ず準備として、トラヒッククラスを  $k (= 1, 2)$ 、バス  $P_l$  ( $l = 1, 2$ ) に振り分けるフロー数を  $F_{(k,l)}$ 、バス  $P_l$  の帯域を  $c_l$  とする。各バスのバッファキュー長の平均を  $B_l$  とすると、バッファ遅延の平均  $A$  は次のように定義される。

$$A = \max_l \frac{B_l}{c_l} \quad (6)$$

バスごとのキュー長の分散を  $S_l$  とすると、バッファ遅延の分散  $D$  は次のように定義される。

$$D = \max_l \frac{S_l}{c_l^2} \quad (7)$$

バスごとのキュー長の 99.5 パーセンタイルを  $x_l$  とすると、バッファ遅延の 99.5 パーセンタイル  $M$  は次のように定義される ( $U_l$  はバス  $P_l$  のキュー長の確率変数)。

$$M = \max_l \frac{x_l}{c_l}, \quad \text{where } \Pr[U_l > x_l] = 0.005 \quad (8)$$

## 3. 数値解析

ルータがトラヒック特性に基づいてフローを振り分けるときに、バッファ遅延の平均 (式 [6])、または、分散 (式 [7])、99.5 パーセンタイル (式 [8]) を最小化する振り分け方法について検討するため、性質の異なるトラヒックを振り分け数を変えてバスへ配分したときのバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルを解析する。以下の解析では、表 1 の 2 種類のバスの組合せを用いる。

### 3.1 トラヒックフローの組合せとバッファ遅延の平均

表 2 に示す 2 種類のトラヒックの組合せについて、各トラヒックの組がバスへ振り分けられるときのフロー数とバッファ遅延の平均の関係を解析する。以下では、on 状態の入力レート

表 1 Path combinations over which traffic flows are allocated.

Path combination	1	2
Path 1	1000Kbps	700Kbps
Path 2	1000Kbps	1300Kbps

表 2 Traffic class combinations.

Traffic combination	1		2	
Traffic class	1	2	1	3
Number of flows	8	192	8	128
Average of on-period [ms]	1	1	1	1
Average of off-period [ms]	3	5	3	3
Probability of on-state	1/4	1/6	1/4	1/4
Rate of on-state [Kbps]	256	16	256	16
$\rho$ of a flow [Kbps]	64	2.666	64	4
$\rho$ of traffic class [Kbps]	512	512	512	512

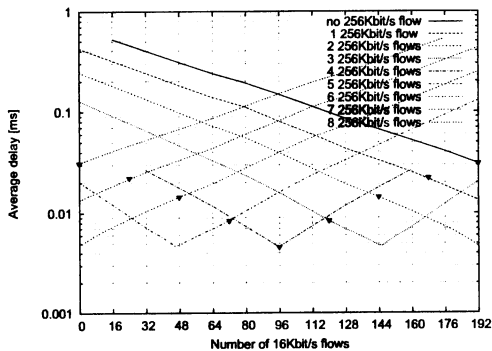


図 3 Mean of buffer delay for traffic combination 1 which is allocated over two 1Mbit/s paths.

が小さいフローを低レートフローと、on 状態の入力レートが大きいフローを高レートフローと省略する。

トラヒックの組合せ 1 をパスの組合せ 1 (同じ帯域の組合せ) へ振り分けたとときの、バッファ遅延の平均を図 3 に示す。トラヒックの組合せ 2 については、トラヒックの組合せ 1 と同様の結果となったため、割愛する。グラフは、パス 1 に入力するフロー数とそのときのバッファ遅延の平均を示している。例えば、図 3 における折れ線 “2 256Kbit/s flows” の “Number of 16 Kbit/s” = 32 の値は、トラヒッククラス 1 の 2 本のフローとトラヒッククラス 2 の 32 本のフローをパス 1 に振り分け、残りの、トラヒッククラス 1 の 6 本のフローとトラヒッククラス 2 の 96 本のフローをパス 2 に振り分けたとときのバッファ遅延の平均である。最小値は高レートフロー (トラヒッククラス 1) と低レートフロー (トラヒッククラス 2 または 3) を均等に分割したときに得られた。図の  $\nabla$  印は、パスの利用率が一致するフロー数の組合せのときのバッファ遅延の平均を示している。

トラヒック振り分けにはいくつかの組合せがあることがわかる。利用率の観点からフローの振り分けを考えた場合、高レートフローと低レートフローを均等に分割したときに、バッファ遅延の平均が最小になる。しかし、利用率が一致する他の組合せでは、2 つのパスの間でトラヒッククラスごとのフロー数の差が大きくなるほど、バッファ遅延の平均が悪化する (大きく

表 3 Mean of buffer delay for each of paths on combination 1.

Number of flows assigned to path 1		Mean of buffer delay	
Class 1	Class 2	Path 1	Path 2
2	192	0.00382 ms	0.00471 ms
3	146	0.00472 ms	0.00459 ms
4	96	0.00459 ms	0.00459 ms
5	46	0.00459 ms	0.00472 ms
6	0	0.00471 ms	0.00382 ms

なる) ことがわかる。このような場合、よりバッファ遅延の平均を小さくするためには、利用率が等しくなるフローの組合せから低レートフローをより偏らせれば良いことがわかる。

その他の振り分け方として、全ての低レートフローを一方のパスに振り分け、高レートフローを適当に振り分けることでも最小値に近い値を得られることがわかる。各トラヒックを均等に分割する方法は、トラヒック制御の観点から簡潔で望ましいが、表 3 に示すように、低レートフローを一方のパスに振り分けた場合には、バッファ遅延が小さい方のパス (低レートフローのみのパス) がより小さいバッファ遅延を示し、トラヒックを交換するアプリケーションにとってはこちらの方が望ましい。

図 4 は、パスの組合せ 2 (表 1、帯域が不一致) について、トラヒックの組合せ 1 (表 2) を振り分けたとときのバッファ遅延の平均を示している。グラフのフロー数は、パス 1 (帯域: 700kbit/s) へ振り分けられたフロー数を示している。

まず、パスの利用率に基づいてフローを振り分けると、バッファ遅延の平均を最小にできないことがわかる。次に、狭帯域パス (パス 1) に振り分ける高レートフロー (トラヒッククラス 1) のフロー数を減らすほど、バッファ遅延の平均を小さくでき、高レートフローと低レートフローをそれぞれ広帯域パス (パス 2) と狭帯域パスへ振り分けると、バッファ遅延の平均が最小になる。トラヒックの組合せ 2 についても同様の結果となった (図は割愛する)。

このような、性質が異なるトラヒックを完全に分離する振り分け方法が最適になるのは、各トラヒックの特性とパス帯域が何らかの条件を満たす特別な場合と考えられる。一般的なトラヒックの組合せの一つとして、一方のトラヒッククラスのピー

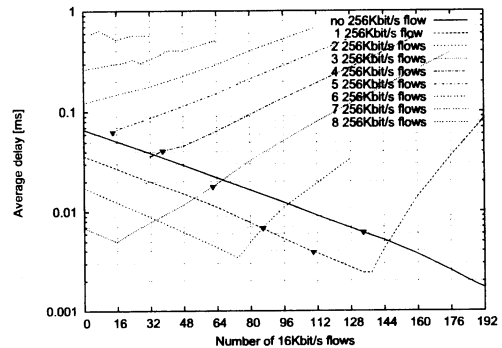


図 4 Mean of buffer delay for traffic combination 1 which is assigned over 700 Kbit/s and 1300 Kbit/s paths.

表 4 Combination of traffic class in the case that the peak rate of one of classes is less than 700 Kbit/s.

Traffic combination	3		4	
Traffic class	1	4	1	5
Number of flows	8	40	8	40
Average of on-period [ms]	1	1	1	1
Average of off-period [ms]	3	5	3	3
Probability of on-state	1/4	1/6	1/4	1/4
Rate of on-state [Kbps]	256	16	256	16
$\rho$ of a flow [Kbps]	64	2.666	64	4
$\rho$ of traffic class [Kbps]	512	106.7	512	160

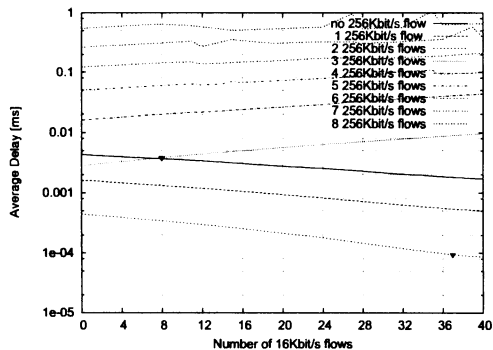


図 5 Mean of buffer delay for traffic combination 3 which is assigned over 700 Kbit/s and 1300 Kbit/s paths.

クレート (各フローの on 状態の入力レートの総和) が、狭帯域バス (1) を埋めきれないほど少ない場合について調べる。

表 4 は、トラフィッククラス 2 および 3 のフロー数をそれぞれ 40 本に減らしたトラフィッククラス 4、5 と、トラフィッククラス 1 の組合せを示している。トラヒックの組合せ 3 のときのフロー数に対する平均バッファ遅延の平均を図 5 に示す。グラフのフロー数は、バス 1 (帯域: 700kbit/s) へ振り分けたフロー数を示している。バスの利用率が一致するフロー数の組合せ (▽印) は、高レートフローが 2 または 3 本の 2 つしかなく、そのどちらのバッファ遅延の平均も最小値とはならなかった。

低レートフローが少ない場合には、帯域が小さいバスにも高レートフローを振り分ける方がバッファ遅延の平均を小さくできることがわかる。低レートフロークラスのピークレートは狭帯域バスよりも小さいため、直観的には、全ての低レートフローを狭帯域バスへ割り当ててしまう方が振り分けが簡単になると考えられ、実際にそのようにすることで最小値が得られている。トラヒックの組み合わせ 4 のときは、バス 1 へ高レートフローを 2 本入力するとバッファ遅延の平均を最小化できる点は上述と同じであったが、全ての低レートフローを狭帯域バスへ割り当ててしまう方法ではバッファ遅延の平均を最小にできず、狭帯域バスに 34 本の低レートフローを入力すると、平均を最小にできた (図は割愛する)。

次に、狭帯域バスを埋め尽くせないほど高レートフローが少ない場合を調べた (図は割愛する)。このとき、トラヒックの特性および組合せを表 2 と同じにし、高レートフローのフロー

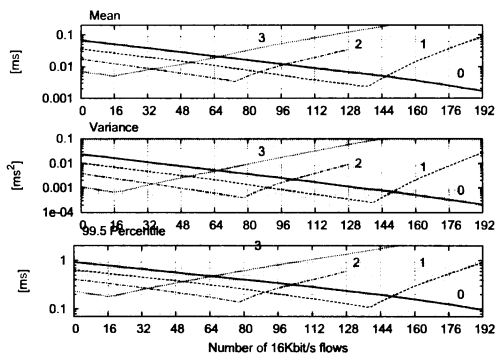


図 6 Comparison of mean, variance and 99.5 percentile of buffer delay on traffic combination 1 which is assigned over 700Kbit/s and 1300Kbit/s paths

数を 2 本にした。結果は、利用率を一致させるフロー数の組合せではバッファ遅延の平均を最小にできず、全ての高レートフローを狭帯域バスに振り分け、低レートフローを適切に振り分けると、バッファ遅延が最小になった。

### 3.2 バッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルに基づく振り分けの比較

本節では、表 2 のトラヒックの組合せ 1 がバスの組合せ 1 または 2 (表 1) のバスに振り分けられたときの、バッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルの比較を行った。

フロー数に対するバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルの値を比較すると、バスの帯域が同じ場合 (図は割愛する) には、バッファ遅延の平均が最小になるフロー数のときに、分散および 99.5 パーセンタイルも最小になった。しかし、バスの帯域が異なる場合 (図 6、グラフ中の数値は、バス 1 へ入力する高レートフローの本数) には各高レートフローの本数において、平均、分散、99.5 パーセンタイルの最小を得るための低レートフローの本数は、少しの差で異なった。バッファ遅延の平均を得る本数を基準にすると、分散が最も低レートフローバランスしないように偏らせる方向へ、99.5 パーセンタイルも分散程ではないが低レートフローバランスをバランスしない方向へずれている。さらに、バスの組合せ 2 の場合には、全ての高レートフローを広帯域バスに、全ての低レートフローを狭帯域バスへ偏らせるとバッファ遅延の平均を最小にできていたが、分散および 99.5 パーセンタイルも同じ結果となった。

上述の 3 つの特徴は、他のトラヒックの組合せ (トラヒッククラス 2~5) および、次節に示す他のフロー数の組合せ (表 6) においても同様に現われた。ただし、平均、分散、99.5 パーセンタイルをそれぞれ小さくする低レートフローの本数の差は、トラヒックの組合せによって異なっていたことから、高レート/低レートフローのトラヒック特性によって本数の差は異なると考えられる。

### 3.3 帯域が一致しないバスでのトラヒックの振り分けの検討

前節の解析結果から、バスの帯域が異なる場合には、フロー数の組合せによってトラヒックの振り分け方が異なることがわかった。そこで、前節のトラヒックの組合せ 1, 2 (表 2) のフロー数

表 5 Number of flows

Combination	Traffic class	Small	Middle	Large
1	Low rate flows	40	64	192
	High rate flows	2	4	8
2	Low rate flows	40	64	128
	High rate flows	2	4	8

表 6 Flow allocation depending on the bandwidth of paths and peak rate of traffic classes

Traffic class		How to balance	
Low rate	High rate	combination 1	combination 2
Large	Large	(narrow, broad)	(narrow, broad)
Middle	Large	(separate, separate)	(separate, separate)
Large	Middle	(separate, separate)	(separate, separate)
Middle	Middle	(separate, separate)	(separate, separate)
Small	Large	(narrow, separate)	(separate, separate)
Large	Small	(separate, narrow)	(separate, narrow)

を変化させ、バスの組合せ 2(表 1) について、バッファ遅延が最小になるような最適な振り分け方を検討する。フロー数は、各トラフィッククラスのピークレートが 2 つのバスの帯域よりも少ない場合、一方より少なく一方より多い場合、2 つのバスより多い場合の 3 種類(表 5) について調べた。表の small はピークレートが狭帯域バスの帯域よりも小さいことを、middle は狭帯域バスの帯域と広帯域バスの帯域の間にあることを、large は広帯域バスの帯域よりも大きいことを示している。

このとき、フロー数をどのように振り分けると、バッファ遅延が発生する組合せは表 6 の 6 種類である。表 6 には、それぞれのフロー数におけるバッファ遅延の平均の最小値が得られるトラフィックの振り分けを、示している。表の (A, B) は、A が低レートフローについて、狭帯域バスに全てのフローを振り分ける (narrow) か、広帯域バスに全てのフローを振り分ける (broad) か、両方へ適当に振り分ける (separate) かを示し、B は高レートフローについて同様のことを示している。

この表から、前節で示したように、高レートフローのピークレートが small で、低レートフローのピークレートが large のときには、始めから全ての高レートフローを狭帯域バスへ振り分け、狭帯域バスの空きと高帯域バスに適当に低レートフローを振り分ければ良いことがわかる。しかし、他のフロー数の組合せでは、2 つのトラフィッククラスの組み合わせを考えなければならない。

前節のバッファ遅延の最小化の分析では、

- 低レートフローと高レートフローを偏らせる
- バス間で利用率を一致させず、低レートフローが多いバスの利用率を高くする

ことがわかっている。そこで、以下の方針でトラフィックを振り分けると、バッファ遅延を最小にするトラフィック振り分けの組合せの探索範囲を狭められると予想される。

- (1) 高レートフローを、利用率が偏るように広帯域バスへ多く振り分ける
- (2) 次に、全体で狭帯域バスの利用率を広帯域バスよりも大きくなるように、低レートフローを振り分ける。

より具体的なトラフィックの振り分け方法については、さらに本稿で示したフローと異なる特性のフローの多重についても解析を行い、振り分け方の細分化が必要である。そして、バッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルの最小値の許容範囲を考慮したフロー数の振り分けが有効と考えられる。これらについては、今後の課題である。

#### 4. まとめ

トラフィック特性が異なるフローを複数のバスへ振り分ける方法を検討するため、2 つの性質の異なるトラフィックを 2 つのバスへ振り分けるときのバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルの解析を行った。

トラフィックの振り分けでは、バスの帯域が一致するときは、2 つのトラフィッククラスを均等に分割するとバッファ遅延の平均、分散、99.5 パーセンタイルを最小にできることがわかった。一方、バスの帯域が一致しないときは、高レートフローが狭帯域バスの帯域より少なければ、同フローを全て狭帯域バスへ振り分け、その他の場合は、次の方針でトラフィックの振り分けを検討すべきことを示した。

- (1) 高レートフローを、利用率が偏るように広帯域バスへ多く振り分ける
- (2) 次に、全体で狭帯域バスの利用率を広帯域バスよりも大きくなるように、低レートフローを振り分ける。

今後は、異なるトラフィック特性の組合せについてさらに解析を行い、より具体的なトラフィック振り分け方法を検討する。

#### 文 献

- [1] K. Fukuda, K. Cho, H. Esaki, "The Impact of Residential Broadband Traffic on Japanese ISP Backbone," ACM SIGCOMM CCR SPECIAL ISSUE: Measuring the internet's vital statistics, Vol 35(1), pp15-22, 2005
- [2] Awduche, D., Chiu, A., Elwalid, A., Widjaja, I., and X. Xiao, "Overview and Principles of Internet Traffic Engineering", RFC 3272, 2002.
- [3] H. Abrahamsson, B. Ahlgren, J. Alonso, A. Andersson, and P. Kreuger, "A Multi Path Routing Algorithm for IP Networks Based on Flow Optimisation," In International Workshop on Quality of future Internet Services (QofIS), Zurich, Switzerland, 2002
- [4] X. Su and G. de Veciana, "Dynamic multi-path routing: asymptotic approximation and simulations," ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 29(1):25-36, 2001.
- [5] A. Sridharan, R. Guerin, and C. Diot, "Achieving Near-Optimal Traffic Engineering Solutions for Current OSPF/IS-IS Networks," Proc. of IEEE Infocom 2003, San Francisco, 2003.
- [6] P. Siripongwutikorn and S. Banerjee, "Per-flow Delay Performance in Traffic Aggregates," Proc. of IEEE Globecom, vol. 21, no. 1, pp.2641-2645, Taipei, (2002)
- [7] V. Trecordi and G. Verticale, "Per-flow Delay Performance in a FIFO Scheduler fed by Policed UDP Sources," Comp. Commun., vol. 23, pp.309-316, 2000
- [8] Y. Xu and R. Guerin, "Individual QoS versus Aggregate QoS: A Loss Performance Study," in Proc. IEEE Infocom 2002, vol.3, pp. 1170-1179, New York, 2002
- [9] V. Ramaswami, "Matrix analytic methods for stochastic fluid flows," Proc. of ITC 16, pp.1019-1030, Elsevier, Amsterdam, 1999.