

## 時変トラヒックに対するレートベースフロー制御方式の性能評価

准員 林 圭作<sup>†</sup> 正員 石橋 豊<sup>†</sup>  
正員 田坂 修二<sup>†</sup>

Performance Evaluation of a Rate-Based Flow Control Scheme for Time-Varying Traffic

Keisaku HAYASHI<sup>†</sup>, Associate Member, Yutaka ISHIBASHI<sup>†</sup> and Shuji TASAKA<sup>†</sup>, Members

<sup>†</sup> 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市

Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466 Japan

あらまし 本論文では、受信側端末におけるバッファ占有量に着目したレートベースフロー制御方式について、時変トラヒックに対する性能をシミュレーションにより評価する。そして、レート変更の契機を複数設定する方が、単一の場合よりも性能が良いことを示す。

キーワード レートベースフロー制御, 時変トラヒック, シミュレーション, パワー

### 1. まえがき

近年、ネットワークの伝送速度が急激に向上し、伝送速度が 100 Mbit/s 以上の高速ネットワークが構築されつつある。このような高速ネットワークにおいて、低速・低品質回線を対象とした従来のプロトコルを用いると、プロトコル処理がボトルネックとなり、エンド・ツー・エンドでは、物理的な伝送速度に比べて十分な転送速度が得られていない<sup>(1)</sup>。このため、プロトコル処理の高速化に対する要求が高まっている。プロトコル処理の高速化の手法としては、ハードウェアによるプロトコルの実装<sup>(2)</sup>やプロトコル仕様の軽量化<sup>(3)</sup>が挙げられる。

両者を併用した高速軽量プロトコルに採用されているフロー制御方式として、レートベースフロー制御方式がある。この制御方式は、従来のウィンドウフロー制御方式と異なり、パケットの送信間隔を受信側端末の処理間隔に応じて変化させることによりフロー制御を行う。ここで、パケットの送信間隔が受信側端末での処理間隔よりも小さいと、受信側端末においてパケットのバッファ占有量が大きくなる。このとき、バッファオーバフローが発生すると、あふれパケットの再送により遅延が増加する。逆に、パケットの送信間隔が処理間隔よりも大きいと、スループットが低下することになる。従って、送信間隔を受信側端末の処理間

隔にいかに対応させればよいか問題となる。

送信間隔の適応手法としては、これまでに、文献(4)~(6)等において、いくつかのものが提案されている。このうち、文献(5)、(6)では、受信側端末のバッファ占有量に着目して、レート変更の契機としてバッファ占有量のしきい値を一つ設定し、受信側端末のバッファ占有量がこのしきい値を超えたときおよび下回ったときに、送信間隔を変更する方式を検討している。この方式は、インプリメントが容易で、優れた性能をもつことが知られている。しかし、バッファ占有量に対するしきい値の設定方法については、必ずしも十分な検討が行われていない。例えば、これらの文献では、しきい値の個数を一つとしているが、複数個設定することも可能である。これにより、受信側端末の負荷変動の大きさに応じた制御が可能になる。すなわち、しきい値が一つの場合には、考えられる最大の負荷変動に対応できるように制御を行う必要がある。従って、変動が小さいときには、過剰な制御となり、性能が劣化する。しかし、複数のしきい値を用いるとこのようなことはない。二つのしきい値の場合について説明すると、負荷変動が小さいときには、第1のしきい値で緩やかに送信間隔を増減することによって、過剰な制御による性能劣化を抑えることができる。また、急激な負荷変動によって、バッファが満杯(若しくは、空)に近づくと、第2のしきい値により、送信間隔を急速に増加(減少)し、オーバフローやバッファの空き時間を少なくすることができる。また、この制御方式は受信側端末のパケットの処理間隔に送信間隔を調節するものである。従って、レートベースフロー制御方式の評価においては、受信側端末の処理速度の変動(これは、同時接続端末数の増減に伴い、見掛け上の処理間隔が変動することを意味する)を考慮することが必要である。しかし、このような時変トラヒックに対する評価は、これまでには行われていない。

本論文では、受信側端末のバッファ占有量に着目した文献(5)、(6)の方式において、しきい値の設定個数や設定値の決定方法を検討する。そのため、この方式を一般化し、しきい値を複数とする。そして、時変トラヒックに対するシミュレーションを行うことにより、しきい値の設定個数や設定値が性能に及ぼす影響を明らかにする。

### 2. レートベースフロー制御方式

本論文で扱うレートベースフロー制御方式では、図1に示すように、受信側端末のバッファ占有量(buffer

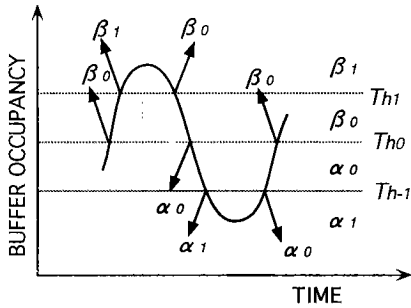


図1 制御パケット送出とバッファ占有量のしきい値との関係

Fig.1 Relation between control packet transmission and threshold values of buffer occupancy.

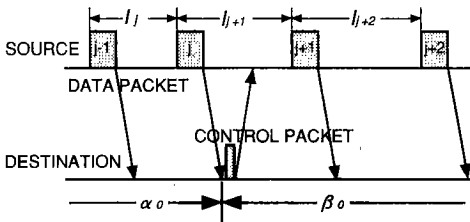


図2 パケット送信の一例

Fig.2 An example of packet transmission.

occupancy) に対して複数のしきい値を設定する(図1では、 $T_{h-1}$ 、 $T_{h0}$ 、 $T_{h1}$ のしきい値を設定している)。本論文では、端末ごとに一定容量のバッファを固定的に割り当てている。受信側端末は、バッファ占有量としきい値の大小関係に応じて、送信間隔増加または減少の制御パケットを送信側端末に送る。図1では、バッファ占有量が  $T_{h0}$  を上回る場合には送信間隔を増加させ、下回る場合には減少させる制御パケットを送信する。また、バッファ占有量が  $T_{h1}$  を上回る場合、および  $T_{h-1}$  を下回る場合には、それぞれ送信間隔の増加率と減少率を大きくする制御パケットを送信する。送信側端末は、文献(4)と同様に、以下の式に従い、送信間隔をそれぞれ増加、減少させる。

$$I_j = \beta_k I_{j-1} \quad (1)$$

$$I_j = \frac{1.0}{\alpha_k + \frac{1.0}{I_{j-1}}} \quad (2)$$

但し、 $I_j$  は  $j$  番目の送信間隔であり、 $\beta_{k+1} > \beta_k > 1$ 、 $\alpha_{k+1} > \alpha_k > 0$  ( $k=0, 1, \dots$ ) である(図1参照)。この方式において、しきい値の個数を1とし、しきい値を1とすると、文献(5)、(6)の方式になることに注意された。

図2にレートベースフロー制御方式におけるパケッ

ト送信の一例を示す。この図において、 $j$  番目のパケットの送信時には、送信側端末 (source) は制御パラメータ  $\alpha_0$  で、パケット送信ごとに式(2)により送信間隔を減少しているとする。また、 $j$  番目のパケットの受信時に、受信側端末 (destination) のバッファ占有量が  $T_{h0}$  のしきい値を超えるとす。このとき、受信側端末は、送信間隔を大きくする制御パラメータ  $\beta_0$  をもつ制御パケットを送信する。これを受信した送信側端末は、制御パラメータ  $\beta_0$  を用いて式(1)により送信間隔を求める。その後、次の制御パケットを受信するまで、送信側端末はパケット送信ごとに式(1)により送信間隔を増加し続ける。

### 3. シミュレーションモデル

#### 3.1 仮定

シミュレーションを行う上での仮定を以下に示す。

(A1) 一つまたは複数個の送信側端末は、一つの受信側端末と、各送信側端末ごとに全2重回線で1対1に接続されている。

(A2) 送信側端末は常に送信すべきパケットを持っており、受信側端末はもたない。

(A3) 受信側端末における1送信側端末当りの受信バッファ容量を一定とする。バッファオーバフローが発生した場合、欠落したパケットは選択再送される。

(A4) 伝送誤りは発生しない。

#### 3.2 時変トラヒックモデル

本論文では、図3に示すような負荷 (load) 変動を考える。図3は、受信側端末の処理速度の1送信側端末当りの時間的変動を示したものである。受信側端末の処理速度の変動は、複数回線をもつ場合に同時接続された送信側端末数の増減によって、送信側端末当りの見掛け上の処理間隔が変わることを意味する。図3において、時刻0秒から1秒まで負荷1 (軽負荷) の状態にあり、時刻1秒から  $T$  秒間は負荷  $L$  (高負荷) の状態にあるとする。そして、時刻  $T+1$  秒に再び負荷1の状態に戻る。負荷  $L$  の状態での受信側端末における送信側端末当りの処理速度は負荷1の状態の処理速度の  $1/L$  とする。

#### 3.3 評価方法

文献(6)と同様に、評価指標としてパワー (スループット/平均パケット遅延) を用いる。但し、観測期間は、図3に示すように、時刻1秒から3秒までの期間

†  $I_{j+1}$  は、 $j$  番目のパケット送信後に式(2)により求められる。しかし、制御パケットが  $j+1$  番目のパケット送信時刻よりも早く到着したため、新たに式(1)により  $I_{j+1}$  を計算し直している。

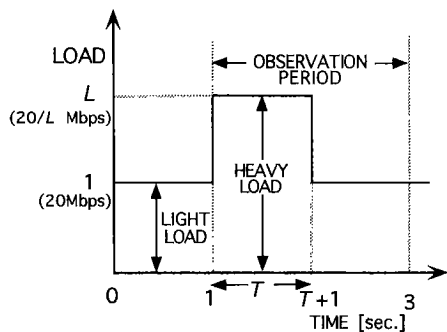


図3 時変トラフィックモデル  
Fig. 3 A time-varying traffic model.

とする。ここで、スループットは、単位時間当りに受信側端末で処理される平均ビット数とする。また、平均パケット遅延は、送信側端末のパケット送信開始時点から、受信側端末のバッファに到着するまでの平均時間とする。これにより、バッファオーバフローによる影響を考慮に入れている。

評価においては、まず、図3のモデルにおいて、負荷  $L=2$ ,  $T=1$  のときのパワーが最大となるように、 $\alpha_k$  と  $\beta_k$  を選択する。次に、この  $\alpha_k$  と  $\beta_k$  を用いて、負荷  $L$  や  $T$  のパワーに及ぼす影響を調べる。

#### 4. シミュレーション結果と考察

以下の数値例では、送受信端末間の回線速度を 100 Mbit/s、伝搬遅延を 5 ms とし、パケット長を 3 kByte (文献(4)~(6)と同様に、パケットヘッダ長は 0) とする。また、受信側端末の 1 送信側端末当りの受信バッファ容量は 10 パケット分とし、負荷  $L=1$  の状態における受信側端末の処理速度を 20 Mbit/s とする。そして、一つの送信側端末の振舞いのみ注目して、シミュレーションを行う。

##### 4.1 制御パラメータ $\alpha_k$ と $\beta_k$ の選択

図4と図5に、 $L=2$ ,  $T=1$  とした場合の  $\alpha_k$  と  $\beta_k$  に対するパワーを示す。図4はしきい値の数を一つ ( $T_{h0}=1$ ) とし、図5はしきい値の数を二つ ( $T_{h0}=1$ ,  $T_{h1}=7$ ;  $\beta_1=1.2\beta_0$ )†として示している。図4から、パワーを最大とする制御パラメータ値として、 $\alpha_0=2 \times 10^{-5}$ ,  $\beta_0=1.02$  を得る。図5の場合には、 $\alpha_0=10^{-5}$ ,  $\beta_0=1.003$  のときにパワーが最大となる。図4と図5を比較すると、複数しきい値を用いた方がパワーの大きくなる領域が広くなり、制御パラメータ値の選択に幅があることがわかる (なお、しきい値の数を三つとした場合にも、二つの場合と同程度の選択の幅があった)。

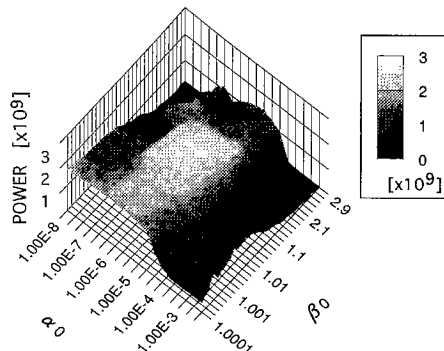


図4 しきい値が一つの場合の  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  に対するパワー ( $T_{h0}=1$ )

Fig. 4 Power vs.  $\alpha_0$  and  $\beta_0$  in the case of a single threshold.

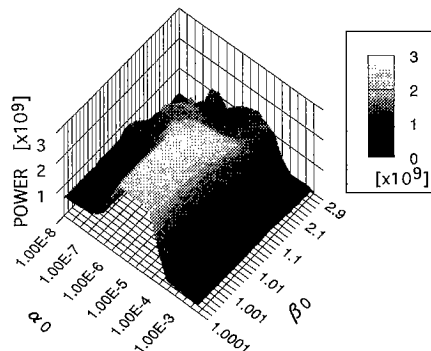


図5 しきい値が二つの場合の  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  に対するパワー ( $T_{h0}=1$ ,  $T_{h1}=7$ )

Fig. 5 Power vs.  $\alpha_0$  and  $\beta_0$  in the case of dual threshold.

##### 4.2 負荷 $L$ のパワーに及ぼす影響

図6に負荷  $L$  を変化させたときのパワーを示す ( $T=1$ )。図中には、しきい値の数が一つの場合 ( $T_{h0}=1, 5, 8$ )、二つの場合 ( $T_{h0}=1, T_{h1}=7$ ;  $\beta_1=1.2\beta_0$ )、および三つの場合 ( $T_{h-1}=1, T_{h0}=2, T_{h1}=7$ ;  $\alpha_1=5\alpha_0, \beta_1=1.2\beta_0$ )††のシミュレーション結果を示す。各制御パラメータ  $\alpha_k, \beta_k$  は、前節と同様にして、 $L=2, T=1$  のときのパワーが最大となるように選ばれている。また、参考のため、完全スケジューリングを行った場合 (バッ

†  $\beta_1$  と  $\beta_0$  の比率を大きく設定しすぎると、最大パワーが小さくなるだけでなく、 $\beta_0$  の値によっては急激にパワーが劣化する。逆に、比率を小さく設定しすぎると、単一しきい値の場合と同じになる。本論文では、単一しきい値と同程度のパワーが得られ、急激な劣化を極力伴わない比率を選択している。最適な比率の決定は、今後の課題である。

††  $\alpha_1$  と  $\alpha_0$  の比率は、 $\beta_1$  と  $\beta_0$  の比率と同様に決定している。最適な比率の決定は、今後の課題である。

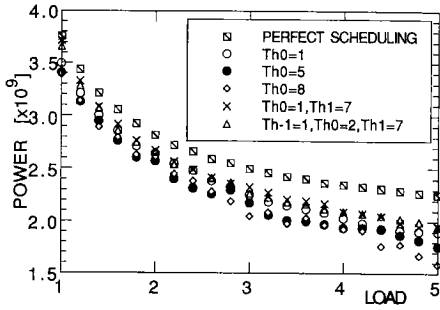


図6 負荷変動のパワーに及ぼす影響 ( $T=1$ )  
Fig. 6 Effect of the load variation on the power ( $T=1$ ).

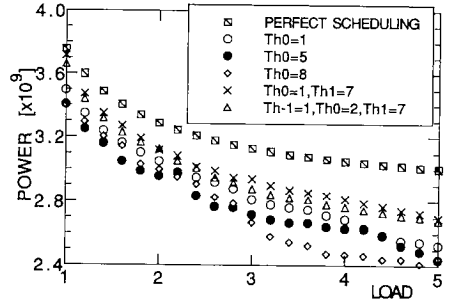


図8 負荷変動のパワーに及ぼす影響 ( $T=0.5$ )  
Fig. 8 Effect of the load variation on the power ( $T=0.5$ ).

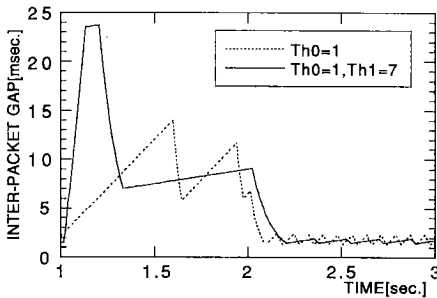


図7 パケット送信間隔の時間的変動 ( $L=5, T=1$ )  
Fig. 7 Dynamic behavior of the inter-packet gap ( $L=5, T=1$ ).

複数しきい値いずれの場合にも送信間隔が増加していることである。高負荷時には、単一しきい値の場合、送信間隔を増加させるための制御パラメータ値  $\beta_0$  が小さいため、送信間隔が増加するまで時間がかかり、バッファオーバーフローが多く発生する。一方、複数しきい値の場合には、 $\beta_1$  による急激な送信間隔の増加により、バッファオーバーフローの発生は少なく抑えることができる。また、時刻 2.2 秒程度以降においては、 $\beta_0$  による制御のため、送信間隔の変動は小さくなることがわかる。

また、図 7 より、送信間隔は、ある周期で振動することがわかる。このため、負荷が変動する時点の位相によってパワーに揺らぎが認められた。そして、複数しきい値の方が単一しきい値の場合より揺らぎが小さく、単一しきい値の場合には、しきい値が小さいほど揺らぎが小さくなることが判明した。

制御パケットは、図 7 において、パケット送信間隔の傾きが大きく変化している時点で送信側端末で受信されている。従って、その数は、しきい値を二つ用いた方が単一しきい値よりも少なくなり、1/2 程度となることがわかる。これは主に、時刻 2.2 秒以降における制御パケット数の違いによる。

#### 4.3 高負荷の持続時間 $T$ のパワーに及ぼす影響

図 8 に高負荷の持続時間  $T$  を 0.5 秒にしたときの負荷  $L$  に対するパワーを示す。図 8 から、高負荷の持続時間が短い場合にも、図 6 と同様の結果となり、しきい値が三つの場合の性能は二つの場合に比べ必ずしも改善されていないことがわかる。従って、この場合にもしきい値は二つ設定すれば十分であると言える。その他の  $T$  の値についても調べた結果、 $T$  のパワーに及ぼす影響は小さいことがわかった。

ファの空きがなく、オーバーフローもない場合) のパワーも図 6 に示している。

図 6 から、複数のしきい値を用いた方が単一のしきい値の場合に比べ、パワーがいく分大きくなっていることがわかる。これは、複数しきい値の場合には、負荷の増加時に、しきい値  $T_{k1}$  によってオーバーフローを抑える制御が行われ、バッファ占有率が、しきい値  $T_{k0}$  を下回るのが単一しきい値の場合よりも早いためである。このことは、図 7 のパケット送信間隔の時間的変動 ( $L=5, T=1$ ) から、最初に送信間隔が増加しその後減少し始める時刻が、単一しきい値では 1.61 秒であり、複数しきい値では 1.20 秒であることから確認できる。また、図 6 では、しきい値を三つにしてもしきい値が二つの場合と比べ、パワーは大きく改善されていないことがわかる。

なお、文献 (6) に示されているように、単一しきい値の場合には、しきい値が小さいほどパワーが大きくなることが確認できる。

更に図 7 からわかることは、時刻 1 秒から  $T$  秒間、急激に負荷が増加することによって、単一しきい値、

## 5. むすび

本論文では、高速ネットワークに対応したフロー制御方式であるレートベースフロー制御方式について、時変トラヒックに対する性能をシミュレーションにより評価した。その結果、レート変更の契機として受信側端末のバッファ占有量のしきい値を複数用いた方が単一のしきい値を用いた場合と比べ、パワーが大きくなることがわかった。また、本論文の数値例では、しきい値の個数は二つ設定すれば十分であることが明らかになった。

複数しきい値における最適なしきい値の個数やその値の決定手法を更に明確にすることのほかに、文献(4)のように欠落パケット数に基づいた制御方式を検討することは残された課題である。

**謝辞** 本研究は、平成5年度文部省科学研究費補助金一般研究(C) (課題番号 04650285) によって行われた。

## 文 献

- (1) 北村 浩, 前原一之: “ワークステーションにおける高速プロトコル処理を目指した性能評価”, 信学技報, **SSE92-38** (1992-09).
- (2) 平田哲彦, 横山達也, 水谷美加, 寺田松昭, 三巻達夫: “プロトコル高速処理装置の適用により高性能化を図ったLAN用通信制御装置の一構成法”, 情報学論, **33**, 2, pp. 234-242 (1992-02).
- (3) Doeringer W. A., Dykeman D., Kaiserswerth M., Meister B. W., Rudin H. and Williamson R.: “A survey of light-weight transport protocols for high-speed networks”, *IEEE Trans. Commun.*, **38**, 11 (Nov. 1990).
- (4) Kuribayashi S.: “Dynamic rate flow control for high-performance communication networks”, *IEICE Trans. Commun.*, **E75-B**, 4, pp. 285-290 (April 1992).
- (5) Bolot J-C. and Shankar A. U.: “Dynamical behavior of rate-based flow control mechanisms”, *Computer Communication Review*, **20**, 2, pp. 35-49 (April 1990).
- (6) Inai H., Kamichika Y., Murata M. and Miyahara H.: “Rate-based congestion control in high speed packet-switching networks”, *IEICE Trans. Commun.*, **E75-B**, 11, pp. 1199-1207 (Nov. 1992).

(平成6年6月20日受付, 9月28日再受付)