

フロー状態通知を利用した分散協調型ストリームフロー QoS 制御方式

グエン・ヴィン・タム[†] 小林 亜樹[†] 山岡 克式^{††} 酒井 善則[†]

[†] 東京工業大学 工学部 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{††} 東京工業大学 学術国際情報センター 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: †nguyen@net.ss.titech.ac.jp, ††{koba,ys}@ss.titech.ac.jp, †††yamaoka@gsic.titech.ac.jp

あらまし 筆者等は広域ネットワーク上の MPEG ビデオストリーミングにおける再生品質の公平性を指針とした帯域制御方式 [1] を提案して、ネットワーク内にボトルネック回線が存在する場合においても、輻輳を発生させず、ボトルネック回線を共有するフローの再生品質の均一化を実現した。しかしこの方式では、ルータ間の協調性が乏しいため、空き帯域や動画像フローの特性の変動に対する応答性が悪く、再生品質の迅速な収束を実現する仕組みが求められた。本稿では、フロー状態通知を利用した分散協調型ストリームフロー QoS 制御方式を提案する。本方式では、ルータが回線やその上を流れるフローの状態・状況を監視し、サーバに対する個別な制御を行い、サーバが伝送経路上のルータへのフロー状態を通知することにより、QoS の分散協調制御を実現する。各ルータは、接続された回線の輻輳を検出すると、その上を流れるフローの状態および再生品質に基づいてそれらの送出元サーバに対して要求メッセージを送る。計算機シミュレーションにより本方式の有効性を確認した。また、ネットワークの変動に対応する時間の長さや各種パラメータとの関係式についても検討した。

キーワード ストリームフロー, 分散協調型ストリームフロー QoS 制御方式, QoS, 公平性, 収束性

Distributed Cooperative Stream Flow QoS Control Scheme Using Flow State Acknowledgment

Vinh TAM NGUYEN[†], Aki KOBAYASHI[†], Katsunori YAMAOKA^{††}, and Yoshinori SAKAI[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

^{††} Global Scientific Information and Computer center, Tokyo Institute of Technology 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

E-mail: †nguyen@net.ss.titech.ac.jp, ††{koba,ys}@ss.titech.ac.jp, †††yamaoka@gsic.titech.ac.jp

Abstract The bandwidth management scheme [1] was proposed, to obtain fairness for MPEG video streaming QoS on wide area network. In this scheme, when bottlenecks exists in the network, the QoS of video streams that share the bottleneck can be maintained. However, the lack of cooperativeness among the routers make response to the change of available bandwidth and video characteristic slow. Therefore, the scheme that can make quick response to the network dynamics is required. This paper proposes the distributed cooperative control scheme of stream flow based on flow state, video characteristic and available bandwidth. In this method, the router plays an important role for distributed QoS control. It has the function of monitoring link bandwidth, flow state of video streams which share that link, and sending message to streaming server. Futhermore, server has the function to acknowledge the flow state to all of the routers on the path. When congestion in a link is detected, router sends appropriate acknowledgements to the streaming servers which share that link, based on the flow state, video characteristic, and available bandwidth. By simulations, it is shown that the proposed scheme can give quick response to the change of network resources. We also study the relation between the responsiveness and parameters.

Key words Stream Flow, Distributed Cooperative Stream Flow QoS Control Scheme, QoS, Fairness, Convergence

を送る。回線状態は以下の3つに分けられる。状態間の遷移を図2に示す。

- 非飽和状態 (Desaturation State) : $B_r > T_h$
- 安定状態 (Stability State) : $T_h \geq B_r > 0$
- 輻輳状態 (Congestion State) : $0 \geq B_r$

ここでは、 B_r [bps] は監視対象回線の余剰帯域、 T_h [bps] はその回線の輻輳検出閾値である。

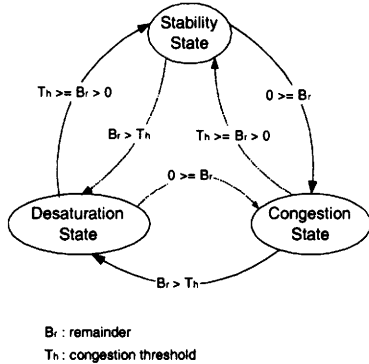


図2 回線状態遷移図

2.3.1 フロー状態更新アルゴリズム

ルータの管理している各フローの状態は、ネットワークの変動に応じて常に変化する。特定フローの経路上のどこかにボトルネックが発生する、即ち経路上のどこかに輻輳状態もしくは安定状態が発生すると、そのフローの送出元サーバは、ボトルネックから「輻輳状態」または「安定状態」通知を受け、状態を更新した後、経路上の全ルータへ同様の通知を行う。

● ルータは、送出元サーバから「フローが輻輳状態である」メッセージを受けると、そのフローの状態を輻輳状態にし、チェック対象の S [ms] 周期の間には、更なる通知をすべて無視する。

● ルータは、送出元サーバから「フローが安定状態である」メッセージを受けると、そのフローの状態が輻輳状態でない場合、そのフローの状態を安定状態にし、チェック対象の S [ms] 周期の間には、輻輳通知以外の更なる通知をすべて無視する。

特定フローの状態を非飽和状態に開放するに当たっては、Max-Min fairness と呼ばれる公平性を実現するために、そのフローの経路上の各ルータは、監視対象回線が非飽和状態になった時に限って自立的にその回線を共有する全フローの状態を非飽和状態に開放する。Max-Min fairness とは、ボトルネックを共有しているフロー間では再生品質が公平になるように制御が行われるが、それ以外の回線の帯域が余っている場合は、利用可能な帯域を使える限り使うことである。

2.3.2 帯域制御アルゴリズム

● 本フローが流れる回線に対するルータの帯域制御を、以下に示す。

(1) 非飽和状態 (Desaturation State) と判定した場合

[step 1] 割り振る増加レートの基本値である B =

$$B_r - T_h - s \cdot U - \frac{i(i+1)}{i} \cdot U$$
 を求め、輻輳状態および安定状態であるフローを除いて、残りの全フローの送出元サーバに対して、PSNR 値の高いフローから、下記のアルゴリズムに従ってフローの増加レートおよび、フロー当たりの空き帯域 $B_{per_flow} = \frac{B_r - T_h}{i}$ を算出、割り振る。PSNR 値の高いフローほど低い帯域を割り振るようにするアルゴリズムである。ただし、 s は安定状態であるフローの数、 c は輻輳状態であるフローの数である。

```

1 For (k = 0; k < i; k++)
2   If (B ≤ 0)
3     If (B + (k + 1 + s + c) * U ≤ 0) Then
4       増加レート ← 0
5     Else
6       増加レート ← ((int)  $\frac{B}{i}$  + k + 1 + s + c) * U
7   Else
8     増加レート ← (k + 1 + s + c) * U
  
```

[step 2] 全フローを非飽和状態に開放する。

(2) 安定状態 (Stability State) と判定した場合

$$ND > (i - N)U \quad (1)$$

を満たす最小の N を求め、その時点でフローテーブルに保持されている PSNR 値が高い順に N 本のフローの状態を輻輳状態にし、その送出元サーバに対して、輻輳状態の通知メッセージを送る。

残りの $(i - N)$ 本のフローの状態を安定状態にし、その送出元サーバに対して、安定状態の通知メッセージを送る。

(3) 輻輳状態 (Congestion State) と判定した場合

[step 1] i 本全てのフローの送出元サーバに対して、輻輳状態の通知メッセージを送り、

$$B'_r \leftarrow B_r \quad (2)$$

とし、step 2 に進む。

[step 2] S [ms] 経過後、再び監視対象回線の余剰帯域のチェックを行い、輻輳状態と判定し、かつ $B'_r \geq B_r$ の場合、 S [ms] 周期を半減する。

3. シミュレーションとその結果

3.1 シミュレーションの条件

パケットロス は輻輳のみにより発生するとし、各フローのパケット伝送間隔はパケット伝送間隔の平均値 (= $\frac{\text{パケットサイズ}}{\text{送出レート}}$) の 0.5 から 1.5 倍程度で変動させることによりジッタを発生させる。

なお、シミュレーションでは、実際に動画を伝送せず、 $PSNR[\text{dB}] = a + \text{Bitrate} * b$ といった形のビットレート-PSNR 特性関数を複数用意し、その中からランダムに与えられた特性関数を持つ擬似フローを用いた。この関数により、ある時点の PSNR をその時点のビットレートから求めることができる。各フローの伝送開始時刻はランダムである。その他のパラメータは表 2 に示す。

表 2 シミュレーション条件

初期レート	2.0 Mbps
送出レート上昇量 (U [bps])	10 kbps
送出レート減少量 (D [bps])	100 kbps
輻輳検出閾値	150 kbps(残り)
S [ms] 周期	200 ms
GOP 長	400 ms
ゲートウェイバッファサイズ	1000 packets
パケットサイズ	1000 bytes

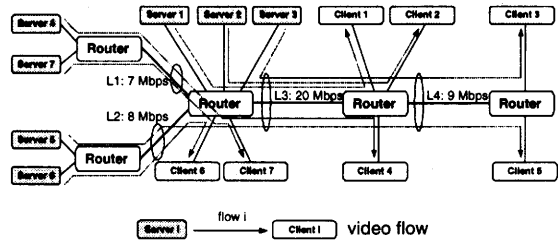


図 4 多リンクモデル (2)

表 3 各回線の帯域容量と流れるフロー

回線番号	帯域 [Mbps]	フロー番号
L1	7	4,7
L2	8	5,6
L3	20	1,2,3,4,5
L4	9	3,5

3.2 単一リンクモデル

3.2.1 ネットワークモデル

シミュレーションは ns-2 [3] を使い、2 台のルータ間を 20[Mbps] の回線で接続し、それぞれのルータに 5 台ずつのサーバとクライアントを接続するモデルで行った (図 3)。動画像は、回線を共有してサーバからクライアントへ 1 対 1 で伝送される。

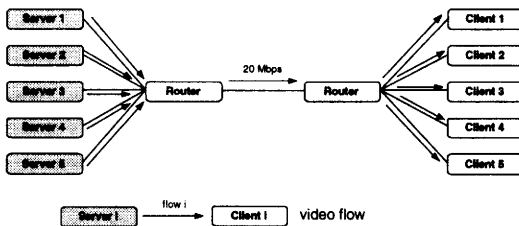


図 3 単一リンクモデル

3.2.2 評価

単一リンクのモデルを用いたシミュレーションの結果を図 6、図 7 に示す。図 6(a) は各フローのビットレートの時間変化を、図 6(b) は各フローの PSNR の時間変化を、図 7(c) は共有回線の使用帯域の時間変化を、図 7(d) は各フローのロス率の時間変化を表している。図 6、図 7 に示したように、PSNR は迅速な収束をして、一定の範囲で変動している。このことから、再生品質の公平性が実現されており、空き帯域や動画像フローの特性の変動に対する応答性が速いことが確認できる。

3.3 多リンクモデル

ボトルネックがなりうる回線が複数存在する場合、Max-Min fairness と呼ばれる公平性が実現される必要がある。

3.3.1 ネットワークモデル

図 4 に示すネットワークモデルを用いる。5 台のルータが 4 本の回線で接続されているネットワークにおいて、それぞれ 7 台ずつのサーバとクライアントが 1 対 1 で動画像伝送を行う。サーバおよびクライアントにつけられる番号は、そのままフローの番号とし、回線の帯域およびその回線を共有するフローは、表 3 に示す。

3.3.2 評価

図 4 のネットワークモデルを用いたシミュレーションの結果を図 8、図 9 に示す。図 8(a) は各フローのビットレートの時間変化を、図 8(b) は各フローの PSNR の時間変化を、図 9(c) は共有回線の使用帯域の時間変化を、図 9(d) は各フローのロス

率の時間変化を表している。

図 8(b) から分かるように、シミュレーション開始から 300 秒の間、フロー 7 のネットワークへの参入前に、回線 L3 がボトルネックとなり、回線 L3 を共有するフロー 1、2、3、4、5 の再生品質は、同程度の幅に収束する。フロー 5 が 3.5[Mbps] 前後までしか送出レートを上げられないから、フロー 5 と共に回線 L2 を共有するフロー 6 は余剰帯域を最大限に利用する。

300 秒時点で、フロー 7 が伝送を開始すると、回線 L1 がボトルネックとなり、回線 L1 を共有するフロー 4 およびフロー 7 は再生品質が同程度に収束するようになる。フロー 4 は送出レートをそれ以上上げられなくなるにつれて、フロー 4 がフロー 1、フロー 2、フロー 3、フロー 5 と共に共有する回線 L3 に余剰帯域が生まれ、フロー 1、2、3、5 がそれを最大限に利用し、収束幅が大きくなる。また、フロー 5 の再生品質が向上すると、フロー 5 と共に回線 L2 を共有するフロー 6 の再生品質が落ちる。

また、900 秒時点で、フロー 3 が終了すると、L3 に余剰帯域が生まれ、L3 を共有するフロー 1、フロー 2、フロー 4、フロー 5 がそれを最大限に利用しようとする。それにつれて、回線 L1 および回線 L2 がボトルネックに化して、回線 L1 を共有するフロー 4 とフロー 7 の再生品質が同じ範囲で変動し、回線 L2 を共有するフロー 5 とフロー 6 が同じ範囲で変動するようになる。フロー 4 およびフロー 5 が頭打ちになっているため、回線 L1 に余剰帯域が生まれ、回線 L1 を共有するフロー 1 とフロー 2 が余剰分を最大限に利用して、同程度の幅に収束することが確認できる。

以上より、提案方式より、余剰帯域と再生品質の変動への迅速な応答性、および Max-Min fairness が実現されることが示された。

4. ネットワークの変動に対する応答性とパラメータの関係

多リンクモデルのシミュレーションでは、900 秒時点で、フ

ロー3伝送の終了に伴って、回線L3に余剰帯域が生まれる。回線L3がそれまでの安定状態から新たな安定状態に落ち着くため、約50秒かかっている。(図9(c))。この時間の大きさは、各フローの安定状態における送出上昇量 U [bps] および輻轉状態における送出レート減少量 D [bps] に依存する。すなわち、 i 本のフローが流れる回線の帯域容量が B_c [bps] 変動した場合、変動が落ち着くまでの時間 T [msec] は以下の式となる。

$$T = \begin{cases} \frac{B_c G}{(1+s+c+1)(1-s-c)U+sU-cD} & B_c \geq 0 \\ \left| \frac{B_c G}{iD} \right| & B_c < 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、対象回線を流れる i 本のフローの内、 s は安定状態にあるフローの数、 c は輻轉状態にあるフローの数であり、 G は動画フローのGOP長である。

上記の式から分かるように、回線の帯域容量が B_c [bps] ($B_c \geq 0$) 変動した場合、新たな安定状態に落ち着くまでの時間を短縮するために、 U を大きくし、 D を小さくする必要がある。

同様のシミュレーションを U および D を変更させて行った結果を図5に示す。 $U = 30$ [kbps]、 $D = 100$ [kbps] と設定した場合、図5(a)は、各フローのビットレートの時間変化を、図5(b)は、各フローのロス率を表す。 U を大きく設定することで、900秒時点で、回線L3の帯域容量上昇に約20秒で対応しているが、各フローの送出レートの変動幅が大きくなり、再生品質変動が激しくなってしまう。また、 U を大きく設定したことで、送出レート上昇量が大きいため、回線の許容帯域を超えがちになり、ロスが発生する(図5(b))。動画の再生品質向上の観点からは、望ましくない。

また、図5(c)は、 $U = 10$ [kbps]、 $D = 300$ [kbps] と設定した場合、各フローのビットレートの時間変化を表す。 D を大きく設定することで、回線の帯域変動量が負 ($B_c < 0$) である場合には、安定状態になるまでの時間が短縮するが、逆に回線の帯域変動量が正 ($B_c \geq 0$) である場合においては、安定状態までの時間が長くなる。さらに、下げ幅が大きいため、再生品質の変動が激しく、しかも回線の有効活用ができず、有効利用観点からは望ましくない。

5. まとめ

本稿では、画像特性、余剰帯域とフロー状態に基づく分散協調型ストリームフロー QoS 制御方式を提案した。シミュレーションによる提案方式の有効性を確認した。本方式では、ルータは回線帯域使用量およびその上を流れる各フローの状態・状況を監視し、輻轉が発生した場合、全フローの送出サーバに対して送出レートの削減を要求する。対象回線に余剰帯域がある場合、その回線を共有する各フローの中で、輻轉状態および安定状態ではなく、送出レートを上げることのできるフローの送出レートを再生品質の低いフローから順に大きく増加させるものである。

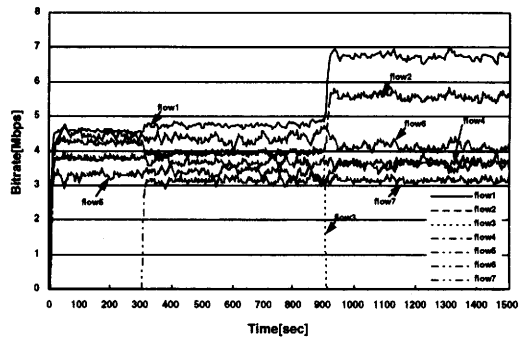
本方式を用いることより、ボトルネックを共有するフローの

再生品質が迅速に収束し、公平性を実現できる。同時に、回線の帯域を最大限に利用するという Max-Min fairness と呼ばれる公平性が実現されることを確認した。

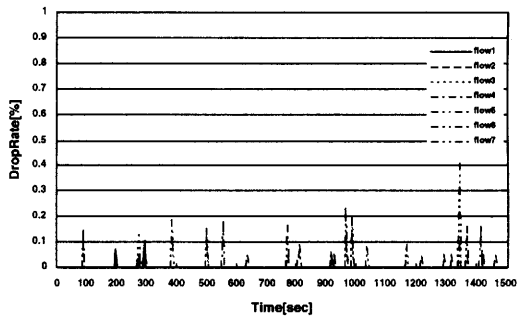
今後は、送出レート上昇量 U [bps] および送出レート減少量 D [bps] の最適値を求め、広域ネットワークでのシミュレーションで確認する予定である。

文献

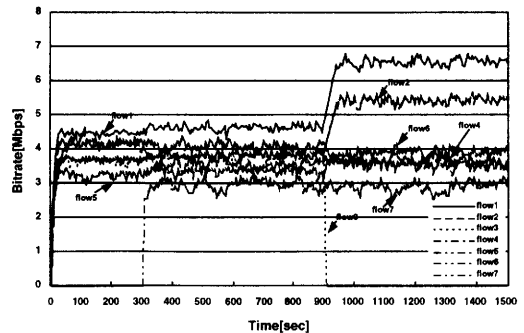
- [1] 小川 賢太郎, 山岡 克式, 酒井 善則, "ストリーミングメディアに対する分散型 QoS 制御," 電子情報通信学会技術報告, CS2002-116, IN2002-104, pp7-12, Dec. 2002.
- [2] M. Gerla, W. Wang, and R. Cigno. "Bandwidth feedback control of TCP and real time sources in the Internet," *Proc. of IEEE GLOBECOM 2000*, pp.561-565, Nov. 2000.
- [3] UCB/LBNL/VINT, "Network Simulator NS," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



(a) $U=30$ [kbps], $D=100$ [kbps]

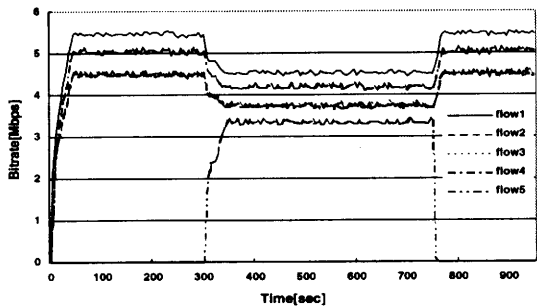


(b) $U=30$ [kbps], $D=100$ [kbps]

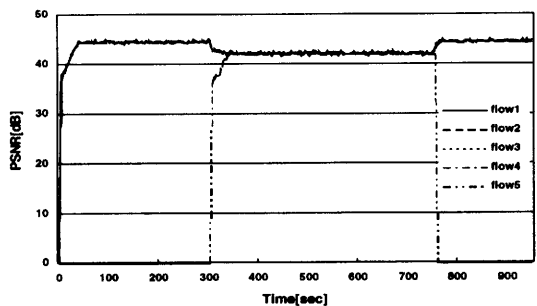


(c) $U=10$ [kbps], $D=300$ [kbps]

図5 ビットレートおよびロス率の時間変化

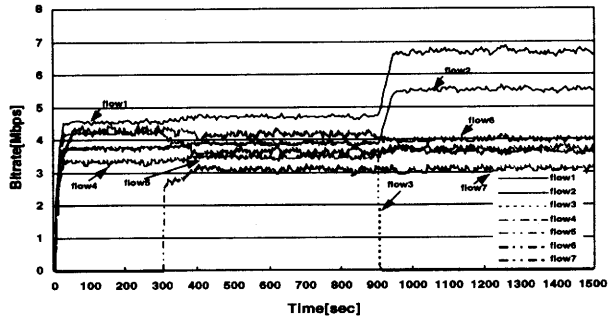


(a) Change in bitrate

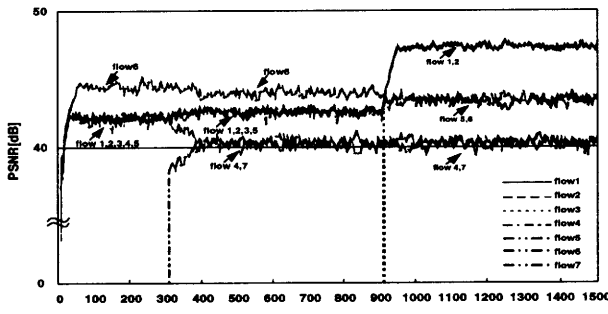


(b) Change in PSNR

図 6 単一リンクモデルにおけるビットレートおよび PSNR の時間変化

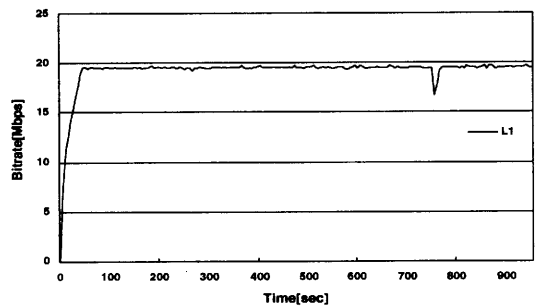


(a) Change in bitrate

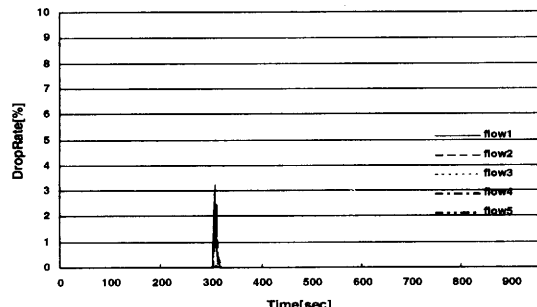


(b) Change in PSNR

図 8 多リンクモデルにおけるビットレートおよび PSNR の時間変化

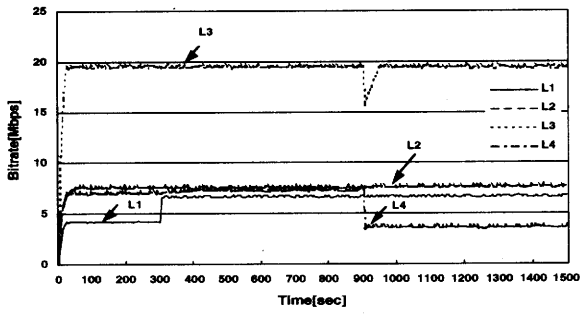


(c) Used bandwidth

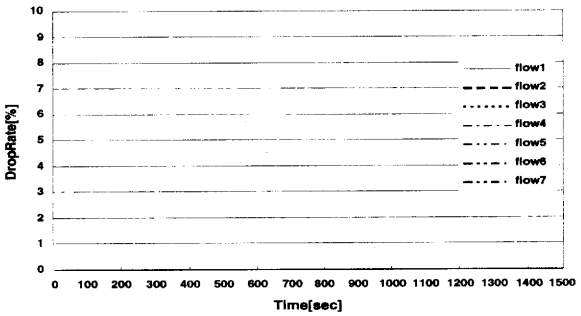


(d) Loss

図 7 単一リンクモデルにおける帯域使用量およびロス率の時間変化



(c) Used bandwidth



(d) Loss

図 9 多リンクモデルにおける帯域使用量およびロス率の時間変化