

# パスにそったシグナリングにもとづく端点間 QoS 保証法の開発と評価

金田 泰

日立製作所 中央研究所

〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

E-mail: Yasusi.Kanada.yq@hitachi.com

**あらまし** RSVP や NSLP にちかいプロトコルによって端末からつたえられる QoS 要求をコア網で集約してスケーラブルな QoS 保証を実現する方式を設計・試作した。要求はポリシールーティングとアウトソース型のプロトコルによってポリシーサーバにつたえられる。ポリシーサーバが要求をもとにトラフィック量を予測してコアノードのキュー (WFQ) の帯域分割を制御する。このコアノードの制御の効果を L3 スイッチ GS4000 に MMPP モデルにもとづくバースト性トラフィックをとおして評価した。その結果、大量の会話ビデオ・トラフィックとストリーミング・トラフィックとがあるときに、WFQ における前者のウェイトを後者よりたかめれば、しかるべき条件のもとでは両者ともに満足させられることがわかった。

**キーワード** NGN, 次世代バックボーン, QoS 計測, QoS 保証, Diffserv, 帯域配分, WFQ.

## Development and Evaluation of an End-to-End QoS Guarantee Method Based on Path-Coupled Signaling

Yasusi Kanada

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Higashi-Koigakubo 1-280, Kokubunji, Tokyo 185-8601, Japan

E-mail: Yasusi.Kanada.yq@hitachi.com

**Abstract** A method for scalable QoS guarantee, in which QoS requirements are signaled by using a protocol similar to RSVP or NSLP and are aggregated in backbones, has been developed and prototyped. The requirements are propagated to the policy server by using policy-based routing and a policy outsourcing protocol. The policy server estimates the amount of traffic and controls the bandwidth sharing among the queues (WFQs) of the backbone routers. The effect of core traffic control has been evaluated by using an L3-switch GS4000 and bursty traffic generated by the MMPP model. The results showed that, if there are many conversational video and streaming traffics, the QoS requirements of both types of traffic can be satisfied by relatively increasing the weight of the former than that of the latter in some cases.

**Keywords** NGN, Next generation backbone, QoS measurement, QoS guarantee, Diffserv, Bandwidth sharing, WFQ.

### 1. はじめに

総務省の次世代バックボーンに関する研究開発の一部として、スケーラブル QoS 技術を開発している。この開発は NGN に限定されるものではないが、NGN を意識し、その目標とされている端点間 (end-to-end) QoS 保証を実現するコア網のための技術開発をめざしている。次世代バックボーンにおいて有効なポリシーベースのトラフィック制御法の発見を目標として、端点間 QoS 保証方式の開発、プロトタイプの開発と評価実験とおこなった。

開発した方式においては、RSVP や NSLP にちかいプロトコルによって端末からつたえられる QoS 要求をコア網で集約してスケーラブルな QoS 保証を実現する。上記のプロトタイプにおいてこの要求はポリシールーティングとアウトソース型のプロトコルによってポリシーサーバにつたえられ、ポリシーサーバが要求をもとにトラフィック量を予測してコアノードのキュー (WFQ) の帯域分割を制御する。評価実験としては計算機上のシミュレーションではなく実際のネットワーク機器を使用した実験をおこなって適切な QoS 保証法を発見することを目標とした。そのため L3 スイッチ GS4000 に MMPP (Markov-Modulated Poisson Process) モデルにもとづくバースト性

トラフィックをとおして評価した。評価実験は客観評価と主観評価とで構成される。

この報告においては開発した QoS 保証方式、プロトタイプ構成と、客観評価実験の方法・結果を中心として報告する。第 2 章においては端点間 QoS 保証法とその動作を検証するための実験システムの概要について、第 3 章においては客観評価の方法について説明する。第 4 章において実験結果をしめして検討する。

### 2. 端点間 QoS 保証法と実験システムの概要

#### 2.1 QoS 保証の方針

つぎのような方針にもとづいて QoS を保証する。

- 多様なアプリケーションの QoS 要求に対応

次世代ネットワークにおいては多様なアプリケーションが使用され、サービス / QoS に関しても多様な要求がだされる。そのなかには多様なトラフィック、たとえば実時間会話もストリーミングもあり、通信条件の変化に敏感なものも鈍感なもの、適応的なものとそうでないものなどが混在する。それらのきめこまかい要求をネットワークや通信相手につたえられるようにし、その要求

にこたえられるしかけを構築することをめざす。

- **Over-provision されたコア網において Diffserv を使用**

コア網において個別のフローごとに QoS 保証するのは困難である。したがって、Diffserv [Nic 98] [Car 98] によってクラス単位でトラフィック制御をおこなう。帯域管理は集約された (aggregated) フローに対しておこなう。クラス単位ではきめこまかい制御ができないので、コア網は over-provision されていることを前提とする。

- **アクセス網等ではフロー単位に制御**

アクセス網は輻湊がおこりやすいので、フロー単位でトラフィック制御、帯域管理をおこなう。コア網にはいるまでに Diffserv のためのマーキング、ポリシングなどをおこなう。

## 2.2 実験システムの概要

実験で使用する IPv4 ネットワークの構造を図 1 にしめす。コア網としてはノードとして 1 台の L3 スイッチ GS4000 を VLAN 設定によって論理的に 2 台にわけて使用した。GS4000 には Gigabit Ethernet によって直接、PC ベースのトラフィック発生器とトラフィック吸収器 (測定器) とを接続した。他の実験に使用するためコア網にエッジルータ GR2000B を介して 2 つの LAN (Ethernet) を接続し、アプリケーション (図の “voiscapc サーバ” および “UA”) を使用した。図 1 のルータ機能拡張部については次節において説明する。

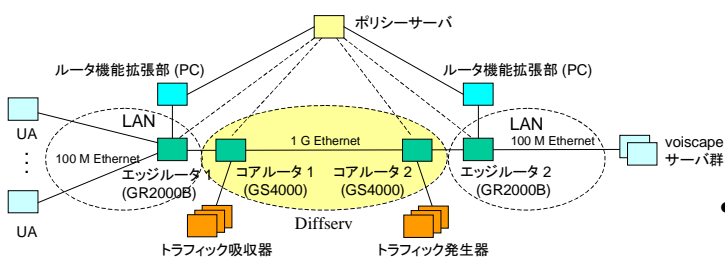


図 1 実験ネットワーク

## 2.3 パスにそったシグナリングによる端点間 QoS 保証法

この実験のために採用した方式の最大の特徴であるフローパスにそったシグナリングについて概説する。

- **セッション制御時の交渉には SIP を使用**

NGN の IMS (IP Multimedia Subsystem) のアーキテクチャにおいては、セッション制御に SIP を使用し、通信相手との交渉には QoS に関しても SDP / SIP を使用する。この SDP メッセージの情報は SIP プロキシ (P-CSCF) において資源確保のために利用され、必要なばかきかえられる。今回の実験においては基本的にこのアーキテクチャにしたがうが QoS ポリシーの決定には SDP / SIP の情報は使用しない。

- **資源要求をたばねてポリシーを決定**

端末からエッジノード (エッジルータ) まではセッションごとに資源要求を伝達し、エッジノードから要求を伝達されたポリシーサーバが要求を集約する。コアノードでは集約された資源要求にもとづいて帯域などの資源を配分する。すなわち集約された資源要求ごとにポリシーサーバは要求に対応するデータパス上の各ルータのポリシーを配布・変更する<sup>1</sup>。資源要求を集

<sup>1</sup> データパスがルーティングによって変化するときは、集約された資源要求に対応するシグナリングをコア網上においておこなえば、そのメッセージが通過したルータからの情報をポリシーサーバにつたえることによってデータ

約するのはおもにコア網のオーバーヘッドをへらすためである。

- **QoS 仕様記述は QoS-NSLP を基準**

既存のプロトコルのなかで QoS 仕様記述の参考になるのは RSVP である。しかし、RSVP にはジッターが記述できないなど、NGN のための QoS 仕様記述のためには不足があるので、IETF NSIS ワーキンググループにおいて開発されている QoS-NSLP [Man 06] における仕様記述 (QSPEC [Ash 06]) を基準とする。

- **フローパスにそった資源要求シグナリングの使用**

資源要求のためのシグナリングの方法としては 3GPP などの標準ドキュメントにおいても RSVP のようなフローパスにそったシグナリングを使用する方法とフローパスを経由しない方法とが併記されている。つぎの点において前者のほうが有利だとかんがえられるため、ここでは前者を採用する: 1) フローパスを把握するのが容易であり、2) 管理システム間の情報交換への依存性が減少し、3) 資源要求シーケンスに疑念がない。フローパスにそった資源要求シグナリングとしては受信者が要求する (receiver-initiated) 方式と送信者が要求する (sender-initiated) 方式とがあるが、ここではより実装が容易な後者を採用し、それを実現する簡易プロトコル SNSLP を開発・実装した。

- **ポリシールーティングによる資源要求メッセージの捕捉**

エッジルータ GR2000 には SNSLP を処理する機能がないので、ポリシー・ルーティングによって SNSLP のパケットを PC 上のルータ機能拡張部 (ソフトウェア) に転送する。ルータ機能拡張部はそのパケットから情報を抽出したあと、もとのエッジルータに返送する。そのパケットは本来のパスをとって受信側の LAN に到達し、さらに受信者に到達する。

- **アウトソース型プロトコルによる資源要求のポリシー決定**

捕捉した情報は COPS-RSVP [Her 00] のようなアウトソース型の簡易プロトコル SCOPS によってポリシーサーバにつたえ、それにもとづいてポリシーを決定する。

## 2.4 トラフィックの種類

Diffserv においては QoS クラスがこまかく分類されることもあるが、コア網においてそれほどこまかく制御するのは困難であろう。したがって、ここでは 3GPP における 4 分類 [3GP 06] をアプリケーション・レベルの QoS クラスとして採用する。ただし、クラスとしては 4 分類であっても、帯域幅は自由に指定できるし遅延時間やジッターもこまかく指定できる。ITU-T の勧告案 Y.1541 の分類は 6 クラスだが、この 3GPP における分類との明確な対応関係がある。

QoS クラスの定義と用意するトラフィックはつぎのとおりである。

- **会話クラス (conversational class)**

遅延がちいさく (たとえば < 80 ms)、ジッターもちいさい、実時間のトラフィックのためのクラス。この実験においては音声・ビデオのトラフィックの束を模擬したトラフィックを使用する。

- **インタラクティブ・クラス (interactive class)**

遅延はちいさいが (たとえば < 80 ms)、ジッターについては規定しない、非実時間のトラフィックのためのクラス。実トラフィックとして小規模の SIP (UDP, TCP) と RTCP のトラフィックを使用するが、この実験においては模擬トラフィックは使用しない。

パスを把握することができる。そのため、この方法においてはネットワーク・ポリシーの管理システムと連携しなくてもデータパスが把握できる。

- **ストリーミング・クラス (streaming class)**  
遅延は中くらいであり (たとえば < 400 ms), ジッターは小さい, 実時間のトラフィックのためのクラス. 実トラフィックとして RTP の音声ストリーミングを使用し, ビデオ・トラフィックの束を模擬したトラフィックをあわせて使用する.
- **ベストエフォート・クラス (best effort class)**  
遅延については規定せずジッターについても規定しない (保証要求しない), 非実時間のトラフィックのためのクラス. 必要に応じて UDP のトラフィックを使用する. 実際のネットワークにおいては TCP が多用されるとかんがえられるが, 今回はトラフィック発生器の都合により UDP だけを使用する.

## 2.5 コア網における QoS クラスと QoS クラス間マップ

実験でコア網において使用する Diffserv のためのクラスわけと, アプリケーションの QoS クラスとのマップはつぎのようにする.

- **EF (Expedited Forwarding PHB)**  
端点間の帯域保証をおこなう仮想専用線サービスのための PHB である. テレビ電話などにおける動画を EF によってあつかうと AF トラフィックが不当に圧迫される可能性があるため, 前節のクラスのうち会話クラスの音声だけをここにマップする.
- **低遅延 UDP 通信用 AF (Assured Forwarding PHB)**  
AF は EF よりゆるい保証サービス, すなわち最低帯域保証付きのベストエフォート・サービスのための PHB である. AF クラスのうちの 1 個を会話クラスのビデオとインタラクティブ・クラスの UDP 通信 (SIP/UDP の通信等) をマップする.
- **ストリーミング用 AF (Assured Forwarding PHB)**  
ストリーミング・クラスを AF クラスのうちの 1 個にマップする.
- **DF (Default Forwarding PHB)**  
このクラスは, 最小限の資源をわりあてる条件があることをのぞいてベストエフォートを意味する. ベストエフォート・クラスをここにマップする.

## 2.6 コアノードにおける制御

この QoS 保証法においては, エッジノードにおいてフローごとにポリシングをおこなうとともに, シグナリングにおける QoS 仕様記述によって指定された QoS クラスごとにことなる DSCP をあたえる (マーキングする). コアルータ上ではこの DSCP にしたがってパケットのスケジューリングとバッファ制御をおこなう.

GS4000 のスケジューリング機能はネットワーク・インタフェースの種類ごとにある程度のちがいがあがるが, 大半のインタフェースはレガシーシェイパーとよばれるスケジューリング装置をもっている. これを使用すれば 1 本の優先キューと 3 本の帯域保証キュー (WFQ) を使用して, 優先キューが使用しない帯域を各帯域保証キューが分割して使用するように設定できる. レガシーシェイパーの設定は llq+3wfq (1 Low Latency Queue + 3 WFQs) [Hit 06] とする.

Diffserv によってマルチメディア・トラフィックをあつかうときは, 会話音声には優先キューをわりあて (Diffserv の EF PHB をわりあて), ストリーミング・ビデオなど, 他のトラフィックには帯域分割キューをわりあてる (Diffserv の AF または DF PHB をわりあてる) のがよいとかんがえられる. レガシーシェイパーを使用してこのような設定をおこなうには, 上記の llq+3wfq の設定を使用する.

実験のために開発したポリシーサーバにおいては, 初期設定時に各キューにわりあてる帯域のわりあい (パーセンテージ) をきめて

コアノードに設定するが, SNSLP による資源要求にともなって (集約された資源要求が発生すると) これらの値はかきかえられる.

## 3. 客観評価の方法

前章の方式にもとづいてプロトタイプを開発・使用し, プロトタイプ全体の評価をふくむ各種の評価を実施した. この報告では実験ネットワークのコアノードにおいて実トラフィックにちかいかい性質をもつトラフィックを通過させておこなった測定の結果についてだけのべる. これはコア網だけの実験であり, シグナリング機能やポリシーサーバは使用していない. この章では実験に使用したトラフィックの種類・構成およびモデルについてのべ, 実験法を記述する.

### 3.1 トラフィック生成に関する課題と生成法

トラフィック生成に関してはつぎのような課題があった.

- **自己相似型統計モデルにしたがう実パケットの生成**  
この実験では実ネットワークにちかいかい環境での測定を実現するため自己相似型トラフィックの使用をめざした. 自己相似型トラフィックに関する実験は従来おもにシミュレータ上でおこなわれてきたが, この実験では実パケットを発生させる必要があった.
- **ギガビットにせまる生成性能**  
この実験では数個のトラフィック生成器によってギガビット・イーサネットをうめる必要があった.
- **種類がことなる複数のトラフィックの生成**  
今回の実験においては音声, 映像, 制御トラフィックなど, 数種類のトラフィックを擬似的に発生させた. これらは本来, それぞれことなる統計的な特性をもつ. トラフィック生成にあたっては, それぞれの特性をシミュレートする必要があった.

これらの課題を解決するため, MMPP モデルにもとづくトラフィック生成 / 吸収プログラムを開発し, アプリケーションの性質を考慮してパケット長分布をきめた. トラフィック量は MMPP のパケット生成基本周期をかえて調整した. トラフィック生成法と測定法の詳細は付録に記述する.

### 3.2 実験手順

会話音声, 会話ビデオ, ストリーミング・ビデオという 3 種類のトラフィックの模擬トラフィックをそれぞれ 2 個ずつのトラフィック生成器によって生成し, それらにコア網を通過させる実験をおこなった. 会話音声には優先キューが使用されるため, 他のトラフィックが会話音声トラフィックにあたる影響は最低限である. したがって, 実験のおもな興味は会話ビデオとストリーミング・ビデオとのバランスにある. すなわち, GS4000 のキューイング等に関するパラメータを変化させたときにこれらのトラフィックがどのような影響をうけるかを調査することを主目的として実験をおこなった.

6 個のトラフィック生成プロセスを 3 秒程度のあいだにつぎつぎと (手動で) 起動する. 起動後はキャリブレーション・フェーズ 1, 実験フェーズ, キャリブレーション・フェーズ 2 の順でプログラムの状態が自動的に遷移して実験が進行する (付録 6.3 節参照). 2 つのキャリブレーション・フェーズにおいては片道の遅延が ping コマンドによって計測できる往復の遅延の半分であることを仮定して実験フェーズにおける測定値を補正する. NTP (Network Time Protocol) による同期はおこなわずにこのような方法をとったのは, NTP によって 1 ms 以下の精度で時計を同期させるのが困難なためである.

## 4. 結果

まず基礎的なデータをえるためにおこなったトラフィック量と QoS との関係に関する実験結果をしめし、つづいてこの評価実験の主要な結果である WFQ のウェイト比と QoS との関係に関する実験結果をしめす。

### 4.1 トラフィック量と QoS との関係に関する実験結果

コアルータを通過するトラフィックの量を変化させたときの遅延, ジッター, パケット廃棄率の変化を, MMPP にしたがうトラフィックと単純なポアソン分布にしたがうトラフィックの両方で測定した。図 2 は MMPP の測定結果である。会話ビデオ (実線) とストリーミング・ビデオ (点線) のトラフィックを測定している。これらのトラフィックに関する WFQ のウェイトはひとしくしている<sup>1</sup>。

図 3 はポアソン分布の測定結果である<sup>2</sup>。平均トラフィック量が増加するにしたがって MMPP では QoS がなだらかに劣化する。これに対してポアソン分布ではリンク容量の 90% 以上まで QoS が良好な状態が保持されるが、それをこえると急激に悪化する。Ethernet の特性がほぼそのまま反映されているとかがえられる。なだらかに遅延や廃棄率が変化する MMPP とのちがいはあきらかである。

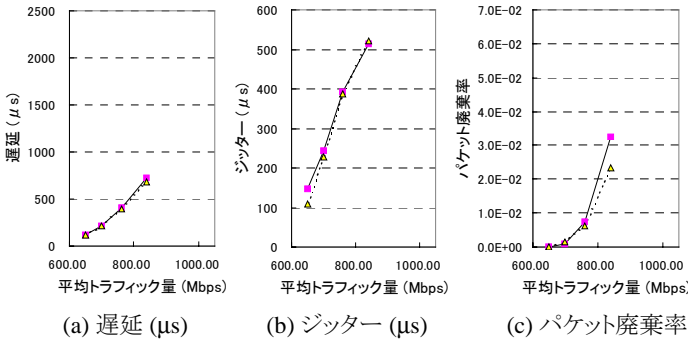


図 2 平均トラフィック量と QoS の関係 1 (バースト性があるとき (MMPP))

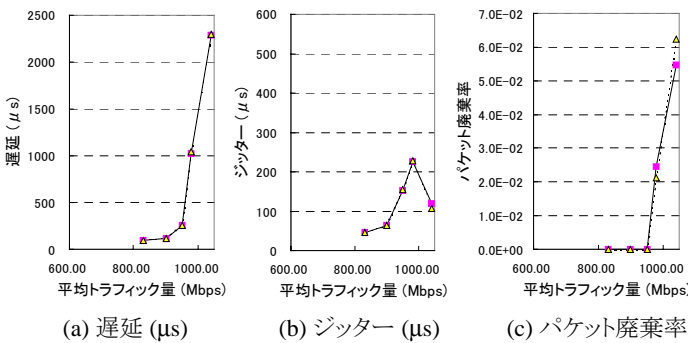


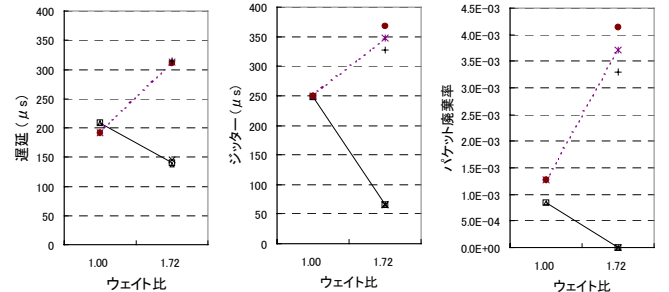
図 3 平均トラフィック量と QoS の関係 2 (バースト性のないとき (ポアソン分布))

<sup>1</sup> パラメータはつぎのとおりである。ポアソン分布:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = (0.25, 0.45, 0.65, 0.85, 1.05, 1.25, 1.45, 1.65, 1.85, 2.05)$  ( $n = 10$ ), 生成消滅過程:  $p = 0.1, q = 0.1$ 。基本周期に関してはつぎの値を基準とし, 比例的に周期を延長または短縮してトラフィック量を調整した。疑似会話音声:  $\tau_1 = 49, \tau_2 = 51$ 。疑似会話ビデオ:  $\tau_3 = 64, \tau_4 = 65$ 。疑似ストリーミング・ビデオ:  $\tau_5 = 63, \tau_6 = 66$ 。このパラメータが実際のネットワークのどのような状態に対応しているか等はわかっていないが, 実験目的にあう程度のバースト性がえられる値としてこのパラメータ値を使用した。

<sup>2</sup> パラメータはつぎのとおりである:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 1.5$ 。

### 4.2 WFQ のウェイト比と QoS との関係に関する実験結果

以下の実験では MMPP だけを使用した。平均負荷は 70% 程度で実験をおこなった。まず, 会話ビデオとストリーミング・ビデオの WFQ のウェイト比を変化させ他のパラメータは固定して, 遅延, ジッター, パケット廃棄率の変化をみた。結果を図 4 にしめす。<sup>3</sup>



(a) 遅延 ( $\mu\text{s}$ ) (b) ジッター ( $\mu\text{s}$ ) (c) パケット廃棄率  
図 4 WFQ のウェイト比 (横軸) と QoS の関係 1 (バースト性が均等なとき)

会話ビデオのほうが遅延に敏感であるから, WFQ のウェイトをストリーミング・ビデオよりおおくするのがよいとかがえられる。実際, 会話ビデオはウェイト比を 1.72 (62% と 36%) とするとウェイト比が 1 (49% と 49%) のときより遅延, ジッター, パケット廃棄率ともに改善されている。しかし, その一方でストリーミング・ビデオは遅延, ジッターが 40~50% 程度増加し, とくにパケット廃棄率は 4 倍ちかくに増加している。これは, キューの平均長が増加したのにキューの最大長さなわちバッファを増加させていないからである。

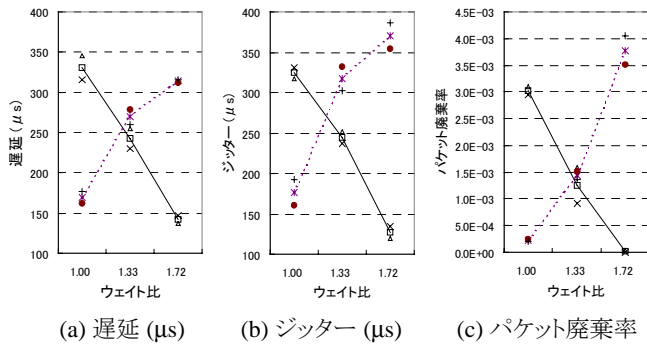
以下, バッファ量を固定したまま QoS 条件をみたくする方法について考察する。会話ビデオとストリーミング・ビデオのトラフィックの性質がひとしければ, バッファを増加させずにウェイト比を変化させるとストリーミング・ビデオのパケット廃棄率に関する条件がみだせなくなる可能性がある。しかし, もしストリーミング・ビデオのほうがバースト性がよわいときは, 会話ビデオとストリーミング・ビデオのバッファ・サイズがひとしくてもパケット廃棄率をおさえたまにウェイト比を変化させられるであろう。この予想を確認するためにおこなった実験の結果を図 5 にしめす。この実験においてはストリーミング・ビデオだけ, 他と MMPP のパラメータを変化させている。<sup>4</sup>

ウェイト比が 1 のときには疑似ストリーミング・ビデオのほうが遅延, ジッター, パケット廃棄率のいずれにおいても, 会話ビデオよりはるかによいが, ウェイト比を 1.72 にするとそれが逆転する。ウェイト比を 1.33 (56% と 42%) 程度にすると両者のバランスがよい。

また, ウェイト比 1 と 1.72 のときの音質を 24 人の被験者による主観評価によって比較し, 上記の客観評価と同様の結果をえた。

<sup>3</sup> パラメータはつぎのとおりである。ポアソン分布:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = (0.25, 0.45, 0.65, 0.85, 1.05, 1.25, 1.45, 1.65, 1.85, 2.05)$  ( $n = 10$ ), 生成消滅過程:  $p = 0.1, q = 0.1$ 。疑似会話音声:  $\tau_1 = 49, \tau_2 = 50$ 。疑似会話ビデオ:  $\tau_3 = 63, \tau_4 = 65$ 。疑似ストリーミング・ビデオ:  $\tau_5 = 62, \tau_6 = 64$ 。基本的に 2 回ずつ測定してプロットし平均値を線でむすんだ。

<sup>4</sup> パラメータはつぎのとおりである。ポアソン分布 (疑似ストリーミング・ビデオ以外):  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = (0.25, 0.45, 0.65, 0.85, 1.05, 1.25, 1.45, 1.65, 1.85, 2.05)$  ( $n = 10$ ), 生成消滅過程:  $p = 0.1, q = 0.1$ 。疑似会話音声:  $\tau_1 = 49, \tau_2 = 50$ 。疑似会話ビデオ:  $\tau_3 = 63, \tau_4 = 65$ 。疑似ストリーミング・ビデオ:  $\lambda_5 = \lambda_6 = (0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25, 1.35, 1.45)$  ( $n = 10$ )  $\tau_5 = 62, \tau_6 = 64$ 。基本的に 2 回ずつ測定してプロットし平均値を線でむすんだ。



(a) 遅延 ( $\mu\text{s}$ ) (b) ジッター ( $\mu\text{s}$ ) (c) パケット廃棄率  
 図5 WFQのウェイト比(横軸)とQoSの関係2  
 (ストリーミング・ビデオのバースト性がややひどいとき)

## 5. 結論

次世代ネットワークのアーキテクチャにおいてはポリシーにもとづく端点間 QoS 制御がおこなわれる。そこで、計算機上のシミュレーションではなく実際のネットワーク機器を使用し、実トラフィックに比較的ちがひ性質をもつ MMPP モデルにもとづくトラフィック生成・計測プログラムを使用し、どのようなポリシーベースのトラフィック制御が有効であるかをしらべた。その結果、会話ビデオ・トラフィックとストリーミング・トラフィックとによってネットワークの利用率がたかまっているときに、WFQ における前者のウェイトを後者よりたかめる(要求帯域の比率より 1.3~1.7 倍程度おおきくする)ことによって、設定した条件のもとでは両者ともに満足させられることをしめた。

## 謝辞

この発表内容は総務省の委託研究「次世代バックボーンに関する研究開発」の研究成果である。実験室の借用と運用等に関してさまざまな便宜をはかっていただいた日立製作所中央研究所総務部の平秀樹氏、藤原富夫氏ほか環境・施設ユニットのメンバーと、実験機器に関して便宜をはかっていただきトラブル・シューティングに協力していただいた中央研究所ネットワークシステム研究部の柴田剛志研究員に感謝する。

## 参考文献

[3GP 06] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “Technical Specification Group Services and System Aspects; Quality of Service (QoS) Concept and Architecture (Release 6)”, 3GPP TS 23.107 V6.4.0, March 2006.

[Ana 03] Anagnostakis, K. G., Greenwald, M., and Ryger, R. S., “cing: Measuring Network-Internal Delays Using Only Existing Infrastructure”, *IEEE Infocom 2003*, pp. 2112–2121, 2003.

[Ash 06] Ash, J., Bader, A., and Kappler, C., “QoS NSLP QSPEC Template”, draft-ietf-nsis-qspec-10, Internet Draft, IETF, June 2006.

[Car 98] Carlson, M., Weiss, W., Blake, S., Wang, Z., Black, D., and Davies, E., “An Architecture for Differentiated Services”, RFC 2475, IETF, December 1998.

[Hef 86] Heffes, H. and Lucantoni, D., “A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 4, No. 6, pp. 856–868, September 1986.

[Her 00] Herzog, S., ed., “COPS usage for RSVP”, RFC 2749, Proposed Standard, IETF, January 2000.

[Hey 03] Heyman, D. P. and Lucantoni, D., “Modeling Multiple IP Traffic Streams with Rate Limits”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 11, No. 6, pp. 948–958, December 2003.

[Hit 06] 日立製作所, GS4000・GS3000 ソフトウェアマニュアル 構成定義

コマンドレファレンス CLI 編 – CLI タイプ 1 階層入力形式 - Vol. 2, Ver. 10-02 対応, 520-10-023-C0, 2006-6.

[Man 06] Manner, J., ed., Karagiannis, G. and McDonald, A., “NSLP for Quality-of-Service Signaling”, draft-ietf-nsis-qos-nsip-11, Internet Draft, IETF, June 2006.

[Moo 99] Moon, S. B., Skelly, P., and Towsley, D., “Estimation and Removal of Clock Skew from Network Delay Measurements”, *IEEE Infocom 1999*, pp. 227–234, March 1999.

[Mus 03] Muscariello, L., Mellia, M., Meo, M., Lo Cigno, R., and Ajmone Marsan, M., “A Simple Markovian Approach to Model Internet Traffic at Edge Routers”, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino, <http://www.tlc-networks.polito.it/muscariello/papers/279TD-03-032.pdf>.

[Nic 98] Nichols, K., Sblake, S., Baker, F., and Black, D., “Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers”, RFC 2474, December 1998.

[Rei 03] Reine, R. and Fairhurst, G., “MPEG-4 and UDP-Lite for Multimedia Transmission”, PostGraduate Network Conference (PGNet 2003), John Moores University, June 2003, <http://www.cms.livjm.ac.uk/pgnet2003/submissions/Paper-15%20.Pdf>.

[Zha 02] Zhang, L., Liu, Z., Xia, C. H., “Clock Synchronization Algorithms for Network Measurements”, *IEEE Infocom 2002*, pp. 160–169, 2002.

## 6. 付録: MMPP によるトラフィック生成

### 6.1 MMPP

長時間の依存性をもつトラフィックを発生させる方法として、さまざまな研究者によって MMPP (Markov Modulated Poisson Process) を使用する方法が研究されている ([Hef 86] [Mus 03] [Hey 03] など)。MMPP とはマルコフ連鎖の各状態のあいだを遷移しながら、状態ごとにパラメタがことなるポアソン分布のトラフィックを生成するモデルである。そのもつとも一般的なかたちは図 6 (a) のようになる。あらかじめ定められた任意の数の状態のあいだを遷移しながら、状態  $s_i$  にあるときには  $\lambda_i$  をパラメタとするポアソン分布にしたがってパケットを生成する。状態  $s_i$  におけるパケット生成確率は  $P(\lambda_i)$  である ( $P(\lambda)$  はポアソン分布)。状態遷移は任意の状態のあいだで発生し、その確率は独立に定められる。

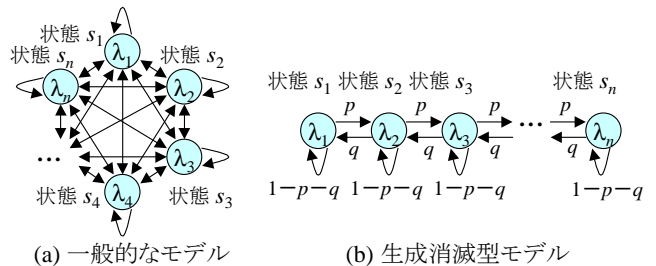


図6 MMPPのモデル

しかし、この一般的なモデルには膨大なパラメタがあるため、それを推定するのがむずかしい。また、モデルの意味もあきらかでない。より制限されたかたちのモデルとして、図 6 (b) の生成消滅型マルコフ連鎖を使用したモデルがある。ここでトラフィック生成源の生成確率が  $p$ 、消滅確率が  $q$  である。このモデルではトラフィック生成源が 1 個ずつ生成したり消滅したりする。状態  $s_0$  がトラフィック生成源がない状態であり、状態  $s_0$  のパケット生成確率  $P(\lambda_0)$  は 0 のはずである。状態が  $s_1, s_2, \dots$  とすすむにつれてパケット生成確率  $P(\lambda_i)$  がたかくなる。この実験では生成消滅型モデルを使用する。

### 6.2 パケット長の分布

この実験においてはトラフィックのモデルとしては上記の MMPP

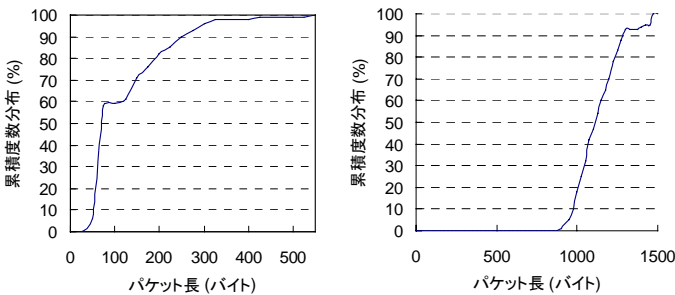
だけを使用した。パケット長の分布に関しては音声を模した分布 (図 7 (a)) とビデオを模した分布 (図 7 (b)) とを使用した。これらの分布は Reine ら [Rei 03] などを参考にして任意にきめたものである。以下、これらにかんたんな説明をくわえる。

● 音声

音声トラフィックのパケット長としては 40 バイトつまりヘッダだけで UDP ペイロードをふくまないものがおおいといわれる。これは Skype などのアプリケーションにおいて静寂時にはペイロードをふくまないパケットが出力されるためだとかんがえられる<sup>1</sup>。

● ビデオ

ビデオ・フレームは通常 1500 バイト以上ある。したがって、LAN を通過するときにはその MTU である 1500 バイトにちかいサイズのパケットがおおくなる。



(a) 模擬音声トラフィック (b) 模擬ビデオ・トラフィック  
図 7 模擬音声トラフィックおよび模擬ビデオ・トラフィックのパケット長累積分布

パケット長は 25 バイトごとに量子化されている。この実験では量子化によっておおきな影響はないとかんがえられる。

6.3 具体的な生成・吸収法

トラフィック生成プログラムにおいては、50 μs 程度の基本周期 τ ごとにパケットを生成する。基本周期は PC の内蔵時計を使用してビジー・ウェイトによってつくりだす。この基本周期ごとに最大 m 個 (この実験では m = 3 に固定) 以下のパケットをつづけて生成する。生成するパケット数は λ<sub>p</sub>m とする (λ<sub>p</sub> は MMPP のパラメタである)。

トラフィック生成器として 3 台の PC (HP Compaq DC5100SF/CT-P3.0 Pentium 4 (3.0 GHz) Dual CPU) を使用し、トラフィック吸収器としても 3 台の PC (同上) を使用した。1 台の CPU において 2 個以上の生成プロセスを動作させるとパケット生成の遅延 (ジッター) が発生するであろうから、CPU 1 台あたり 1 個以下すなわち計 6 個以下のプロセスを動作させた。プロセス P のパラメタ λ<sub>p</sub> (= (λ<sub>p1</sub>, λ<sub>p2</sub>, ..., λ<sub>p<sub>m</sub></sub>)), p<sub>p</sub>, q<sub>p</sub>, τ<sub>p</sub> は P ごとに独立にきめられる。上記の PC を使用したばあい、CPU 1 台あたり模擬音声に関しては最大 60 Mbps くらい、模擬ビデオに関しては最大 300 Mbps くらいのトラフィックを発生させることができる。基本周期をこれよりさらにちぢめて高速にすると、パケットを連続して発生させる際の遅延がおおくなる。

トラフィック生成器はパケットの UDP ペイロードに送信時刻を記入する。トラフィック吸収器はパケット受信時にその送信時刻と受信時刻とから遅延やジッターをもとめる。ただし、トラフィック生成器の内蔵時計とトラフィック吸収器の内蔵時計とは同期していないの

で、遅延に関しては補正が必要である。補正を可能にするため、実験はつぎの 3 フェーズでおこなうようにした。

● キャリブレーション・フェーズ 1

本来の実験にさきだって約 10 秒間、実験ネットワークにおいて遅延やジッターがほぼ 0 となる程度のプローブ・パケットだけを生成する。この状態の遅延時間を静寂時遅延時間とよぶ。

● 実験フェーズ

MMPP のモデルにしたがってトラフィックを発生させ、トラフィック吸収器において遅延とジッターとを計測する。遅延、ジッターとも、パケット 1000 個ずつ平均値をもとめる。よりおおきな単位で計算するとジッターの誤差がおおきいからである。

● キャリブレーション・フェーズ 2

本来の実験のあと、約 10 秒間、遅延やジッターがほぼ 0 となる程度のプローブ・パケットだけを生成する。この状態の遅延時間は静寂時遅延時間と一致するはずである。

実験によってえられる未補正の遅延時間の列をプロットすると、たとえば図 8 のようになる。ここからつぎのようにして補正された遅延時間をえることができる。図 8 にはプロットされた遅延時間のほかに 2 つのキャリブレーション・

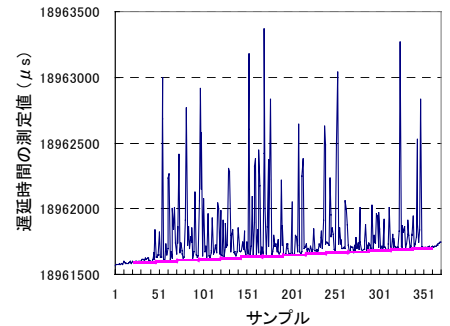


図 8 遅延時間の計測値の例

フェーズにおける測定値をむすぶ直線を記入している。この直線が静寂時遅延時間と対応している。この直線のかたむきが 0 でないのはトラフィック生成器とトラフィック吸収器の内蔵時計のすすみかたがことなる (skew がある) ためである。測定値からこの直線があらわす時間をひき、かわりに静寂時遅延時間の推定値 (64 μs) を加算することによって、遅延時間の推定値をもとめることができる<sup>2</sup>。

トラフィック吸収器においてはパケット損失は測定していないが、GS4000 の show qos queueing コマンドを使用することによって、コマンド・パラメタとして指定されたインタフェースの 4 本の出力キューごとに通過したトラフィックの量と廃棄されたトラフィックの量を計測することができる。この出力からパケット損失を計算する。この方法ではキューに到達するまえに廃棄されたパケットは計測することができないが、この実験条件においてはキュー以外で廃棄されるパケットはほとんどないはずであるから、キューにおける廃棄率がほぼ全体の廃棄率と一致するはずである。

トラフィック生成器の CPU 負荷は 50% 以上になるが、ひとつのトラフィック (1 台のトラフィック生成器で生成したトラフィック) だけを受信するトラフィック吸収器の CPU 負荷は 10% 以下である。しかし、トラフィック吸収器において精度よく QoS の測定をおこなうため、本格的には 1 台の CPU において 1 個だけのプロセスを動作させ、1 台の PC からのトラフィックだけを受信するようにした。

<sup>1</sup> この実験においては最短のパケット長を 40 バイトでなく 50 バイトとしたが、これはこの実験においては送信側におけるタイムスタンプなどの情報を入れる必要があり、ペイロードを確保する必要があったためである。

<sup>2</sup> Moon ら [Moo 99], Zhang ら [Zha 02], Anagnostakis ら [Ana 03] などは skew が存在する状態で正確な遅延をもとめる方法をのべているが、今回の実験においてはキャリブレーションをおこなうことによって、より簡便な方法で遅延をもとめることができた。