

通信放送統合型 ATM 網における長期依存性を考慮した MPEG2 セルのジッタ評価

安達 直世[†] 笠原 正治[†] 高橋 豊^{††}

Jitter of MPEG2 Cells Multiplexed with Long-range Dependent Traffic in ATM Network Integrating CATV and Internet

Naotoshi ADACHI[†], Shoji KASAHARA[†], and Yutaka TAKAHASHI^{††}

あらまし イーサネット LAN 等のデータ通信ネットワーク上で観測されるインターネットトラフィックには、自己相似性や長期依存性の性質が見られ、それらの性質がネットワークの性能を劣化させる一因であることが報告されている。このようなトラフィックが伝送されている ATM ネットワーク上で、実時間系アプリケーションの配信を同時に行う場合には、インターネットトラフィックのもつ長期依存的な性質が QoS 保証の障害になると考えられる。そこで本論文では、長期依存的なインターネットトラフィックと MPEG2 ジッタとの関係をシミュレーションにより定量的に評価する。具体的には、FGN 過程を利用した自己相似性トラフィックを生成するモジュールを OPNET 上で実装し、長期依存性の強さを変化させたときの MPEG2 ジッタの特性を評価する。また ATM 交換機の出力バッファ方式として共有バッファ方式とフローごとにバッファを割り当てる方式を考え、それぞれのバッファ方式のもとでの MPEG2 ジッタの特性を評価し比較を行う。

キーワード MPEG2, ジッタ, ATM, CATV, 長期依存性

1. ま え が き

近年、通信回線の大容量化及び情報端末の性能が飛躍的に向上したことに伴い、データ通信と放送メディアの統合化が進みつつある。このような統合型ネットワークにおけるトラフィック管理・制御手法の調査・研究を目的として、通信・放送機構、神戸多段接続リサーチセンターによる実験ネットワーク（図 1）が 1998 年 3 月に稼働した。このプロジェクトでは、神戸市・西宮市・尼崎市各ケーブルテレビ網を ATM 交換機を介して光ファイバで接続し、通信・放送統合型ネットワークを構成する。この実験ネットワークでは、各ケーブルテレビ局の放送番組を MPEG2 over ATM により他の 2 局に配信する。また、各ケーブルテレビ網の加

入者は、自宅に設置されたケーブルモデムを用いることにより、神戸局に設置されているゲートウェイサーバを介して、電子メール、WWW、FTP などのインターネットサービスを利用できる。

このような構成からなる ATM ネットワーク上では、異なる QoS をもった 2 種類のセルが混在している。一つは、インターネット通信を目的としたセルであり、これらのセルは棄却率及び遅延が重要な要素となる（以下、インターネットセルと呼ぶ）。もう一つは、MPEG2 による放送番組の配信を目的としたセルで、実時間での動画転送を目的としている性質上、時間的制約が厳しい（以下、MPEG セルと呼ぶ）。実験ネットワークにおいて、十分なサービスを提供するためには、これら二つの異なる QoS を満たす必要がある。

一方、近年イーサネット LAN などのデータ通信ネットワーク上を流れるトラフィックは、自己相似性・長期依存性と呼ばれる統計的性質をもつことが報告されている [3], [5]。特に、長期依存性をもったトラフィックはルータやスイッチをふくそうさせ、ネットワークの性能を劣化させる傾向がある。したがって、ネットワー

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科，生駒市
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, 8916-5 Takayama, Ikoma-shi, 630-
0101 Japan

^{††} 京都大学大学院情報科学研究科，京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-
Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8501 Japan

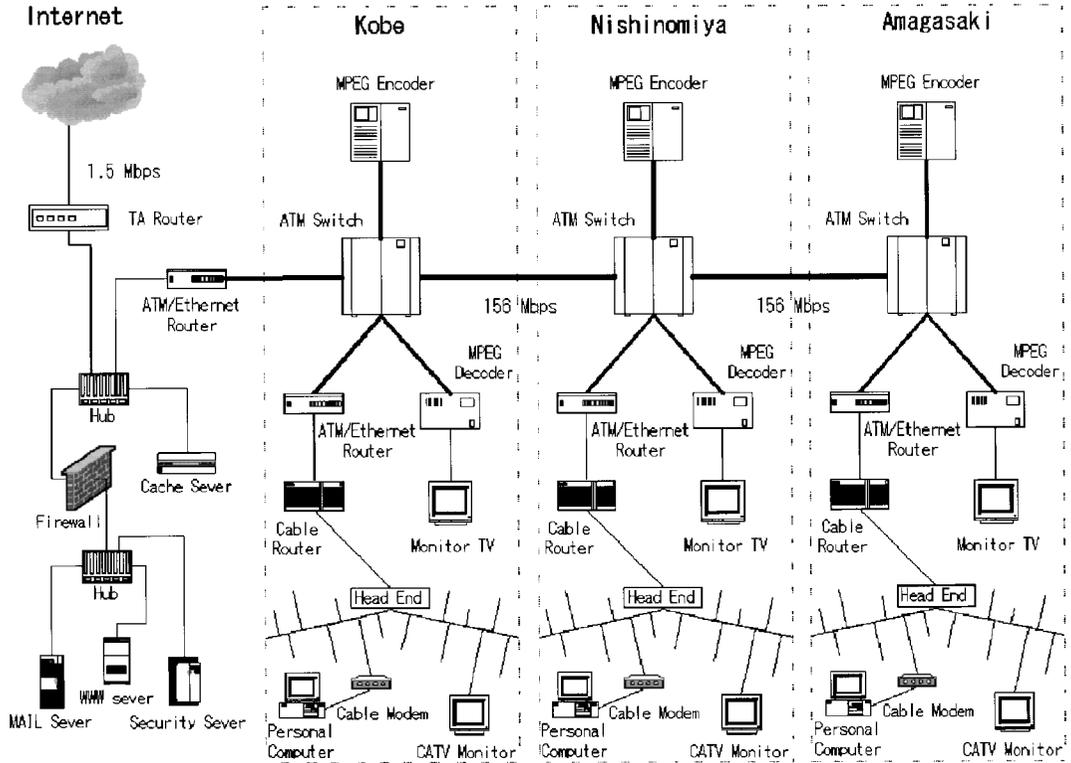


図1 CATV インターコネクトプロジェクト
Fig.1 CATV Interconnect project.

クの性能評価を行う際、トラフィックの長期依存性を考慮することが重要と考えられる。

これまで、ネットワークの性能評価を行う際に到着過程モデルとしてしばしば用いられてきたポアソン過程では、長期依存性を表現することができない。長期依存性の有無については、測定トラフィックにおける自己相似性の確認、及び自己相似性の指標である Hurst パラメータ H の値から判別される。具体的には、Hurst パラメータ H が $0.5 < H < 1$ のとき、対象としているトラフィックは長期依存性を有する [2]。

トラフィックの自己相似性の有無については、イーサネット [5] や ATM [4] においてその存在が確認されている。これらの報告をもとに、筆者らも実験ネットワークの神戸・西宮間を流れるトラフィックを測定し統計解析を行った。その結果、実験ネットワークのトラフィックにはある程度の長期依存性がみられることを確認した。また、計測したトラフィックデータのうち、インターネットトラフィックについても長期依存性がある

ことを確認した [17]。

これまで、自己相似性と QoS に関する過去の研究では、ふくそうの観点から遅延及び棄却率に関して数多くの研究が行われてきた。セル棄却が主に重要視されるデータ通信と異なり、放送を目的とした通信では実時間での転送及び目的地での正常な再生が要求される。しかし、ネットワークをふくそうさせる傾向をもつ長期依存性トラフィックは、MPEG セルの要求する厳しい実時間特性を保証する際の障害となることが考えられる。そこで、MPEG セルに対する QoS としてセル棄却・遅延だけでなく遅延揺らぎ（ジッタ）も重要な要素として考慮に入れる必要がある（ここでは文献 [7] での定義にならない、MPEG セルの到着時間間隔の分散をジッタと定義する）。しかし、マルチメディア通信における、長期依存性をもったトラフィックがジッタに与える影響については、これまであまり研究が行われていない。

そこで本論文では、長期依存性をもつインターネッ

表 1 計測データ
Table 1 Measured data.

ATM セルストリームの観測結果						
計測日: 1999 年 1 月 8 日 13:00 ~ 14:00						
データ名	計測時間 [s]	ビットレート [Mbps]	インターネットセルの量 [%]	インターネットセルの平均ビットレート [Mbps]	MPEG セルの量 [%]	MPEG セルの平均ビットレート [Mbps]
R-1	6.0910829	9.124	25.8	2.353	74.2	6.771
R-2	5.5301356	10.049	32.6	3.280	67.4	6.769
R-3	6.3653521	8.731	22.5	1.962	77.5	6.769

トセルと多重化された MPEG セルのジッタ特性を定量的に評価する。具体的には、文献 [1] で開発した実験ネットワークのシミュレーションモデルをもとに、自己相似性をもつ確率過程として知られている Fractional Gaussian Noise (FGN) を用いて長期依存型トラヒック生成モジュールを作成する。このモジュールを用いて、インターネットセルの長期依存的な性質と MPEG セルのジッタ特性との関連についてシミュレーションにより調べる。また、ATM 交換機の出力バッファ方式として、共有バッファ方式とフローごとにバッファを割り当てる方式を考え、それぞれの方式のもとでの MPEG セルのジッタ特性を評価する。

以下、2. では文献 [17] での Hurst パラメータの推定結果について概要を述べる。3. では自己相似性トラヒック生成モジュール及びシミュレーションモデルについて説明を行い、4. でシミュレーション結果を示す。最後に 5. で結論を述べる。

2. 実験ネットワークにおける長期依存性

図 1 の実験ネットワークを流れるトラヒックの長期依存性を調べるために、神戸局に設置されている ATM アナライザ (HP E4210B) を用いて、神戸から西宮方向に流れるトラヒックを観測し、神戸局にセルが到着する時間と局からセルが離脱する時間を記録した。このアナライザの計測精度は 10^{-5} 秒である。

計測データを表 1 に示す。この 3 種類のデータに対して、分散解析法、絶対値解析法、R/S 解析法の三つの推定方法を用いて Hurst パラメータの推定を行った。これら三つの推定方法の詳細については、文献 [2], [5], [15], [16] で述べられている。これらの計測データに対する Hurst パラメータの推定結果を図 2 に示す。図 2 において、横軸は計測データの番号を、縦軸は Hurst パラメータの推定値を示している。これら三つのサンプルデータは計測時間が短いため、推定方法により結果にばらつきがあるが、グラフより Hurst パラメータの推定値はおおよそ 0.6 ~ 0.8 であることが

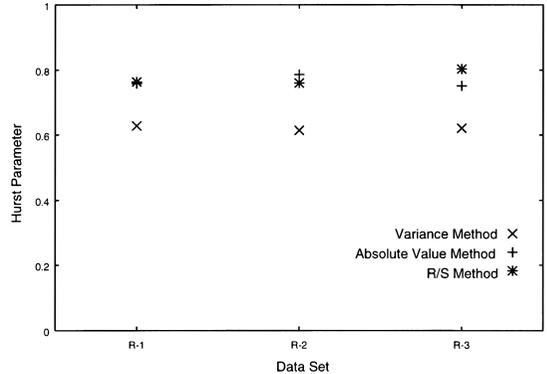


図 2 Hurst パラメータの推定結果
Fig. 2 Estimation results of Hurst parameter.

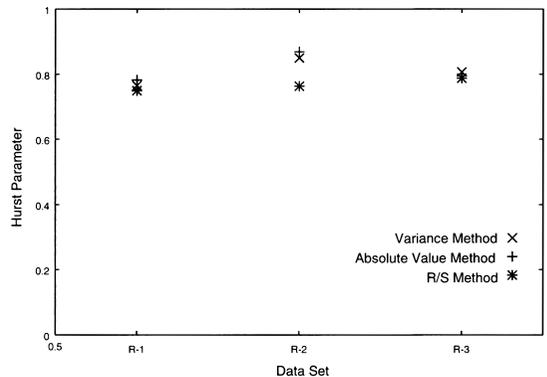


図 3 インターネットトラヒックに対する推定結果
Fig. 3 Estimation results for Internet traffic.

わかる。実験ネットワークを流れるトラヒックに自己相似性があると仮定するならば、推定結果より長期依存性を有することがいえる。

また、インターネットトラヒックに注目し、測定データから Hurst パラメータの推定を行ったところ、図 3 のような結果になった。文献 [10], [11] によると、TCP 及び UDP を利用するインターネットトラヒックは強い長期依存性をもつことが示されている。推定結果は

図2の場合と同様、解析手法によって結果にばらつきがあるが、実験ネットワーク上を流れるインターネットトラフィックは長期依存性をもっていると考えられる。

そこで次章から、長期依存性をもったトラフィックを考慮したシミュレーションモデルを開発し、長期依存性をもったトラフィックがジッタに与える影響をシミュレーションにより評価する。

3. シミュレーションモデル

シミュレーションは、OPNET を用いて行った。本論文では、文献[1]で筆者らが開発したモジュールをもとに、長期依存性を有するトラフィックを生成するようにインターネットサーバモジュールを再構築した。文献[1]では、次のモジュール群を開発した。

(1) MPEG2 エンコーダ: 指数分布あるいは一定分布に従って MPEG2 セルを生成する。

(2) MPEG2 デコーダ: MPEG2 エンコーダで生成された MPEG2 セルを受け取り、セルの到着時間間隔を記録する。

(3) インターネットサーバ: インターネットクライアントからの接続要求を受け取りクライアントヘータを送出する。本論文では、シミュレーションを開始した時点から FGN を利用した長期依存型トラフィックをインターネットクライアントに向けて送出的。

(4) インターネットクライアント: 指数分布に従ってサーバに接続要求を送る。本論文では、シミュレーションを開始した時点からサーバからのトラフィックを受信するため、サーバへの接続要求は送らない。

(5) ATM 交換機: マルチキャスト機能を有する、出力バッファ型の交換機モジュール。

長期依存性を有するトラフィックを生成するために、インターネットサーバモジュールに改良を加えていく。

3.1 インターネットサーバモジュールの改良

これまで、長期依存性をもったトラフィックに対する分布の推定やトラフィックモデルの構築に関する研究が数多く行われてきた [8], [10], [12]。一般に、インターネット通信によって発生するトラフィックでは、転送データのファイルサイズや転送タイミングなどの変化により、観測される Hurst パラメータはおよそ 0.7~0.9 の間の値を示すことが知られている。しかし、文献 [8], [10], [12] によるモデルでは Hurst パラメータを陽に指定してトラフィックデータを生成することができない。

文献 [1] では文献 [8] の結果に従い、パレート分布を

用いてデータサイズを決定し、インターネットセルを生成するインターネットサーバモジュールを作成した。しかしながら、そのモジュールからは非常に強い長期依存性 ($H > 0.9$) をもったトラフィックしか生成できなかった。

そこで本論文では、長期依存性の強さとジッタの関連を定量的に調べるため、自己相似性をもつ確率過程として知られている FGN を利用したモジュールの開発を行う。これにより、長期依存性をもつトラフィックを生成する際、Hurst パラメータの値を陽に指定することができる。

FGN の生成には文献 [13] の高速フーリエ変換法を用いる。高速フーリエ変換法では Hurst パラメータ・平均・分散を指定し、単位時間におけるセルの発生個数を生成できる。ここでは、単位時間としてアナライザの計測精度である 10^{-5} 秒を採用する。時刻 n における FGN の実現値を X_n とすると、インターネットサーバモジュールでは $n \times 10^{-5}$ 秒の時点で X_n 個のセルを生成し、ネットワークに向けて送信する。生成された X_n は FGN の性質上負の値もとるが、このような場合は $X_n = 0$ とした。この影響については 4. で数値例を示す。

要約すると、開発したインターネットサーバモジュールでは、平均ビットレートと分散に加えて Hurst パラメータを指定することで長期依存性を有するトラフィックを生成することができる。

3.2 フーリエ変換を用いたサンプルパス生成法

離散高速フーリエ変換を用いた FGN 系列の生成方法の概要は以下のとおりである [6]。

いま、FGN 過程のパワースペクトル $f(\lambda; H)$ が既知であると仮定する。このように仮定すると、このパワースペクトルに対応した複素数系列 $\{z_i\}$ が存在し、この複素数系列に逆離散時間フーリエ変換を施すことにより、時間領域での系列 $\{x_i\}$ となる。この時系列 $\{x_i\}$ は FGN 過程のパワースペクトルをもつように作り出しているため、系列 $\{x_i\}$ は FGN 過程がもつような自己相関特性をもつことが保証されている。

ここで、FGN 過程のパワースペクトルが既知であることを仮定したが、文献 [2] より、FGN 過程のパワースペクトルは、

$$f(\lambda; H) = A(\lambda; H)[|\lambda|^{-2H-1} + B(\lambda; H)] \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $0 < H < 1$, $-\pi \leq \lambda \leq \pi$ であり、

$$A(\lambda; H) = 2 \sin(\pi H) \Gamma(2H + 1) (1 - \cos \lambda)$$

$$B(\lambda; H) = \sum_{j=1}^{\infty} [(2\pi j + \lambda)^{-2H-1} + (2\pi j - \lambda)^{-2H-1}]$$

である .

式 (1) を用いてパワースペクトルを求める場合 , $B(\lambda; H)$ は無限和を含んでいるため , このままでは (1) を計算できない . そこで , $B(\lambda; H)$ の無限和の計算には文献 [13] で与えられている以下の近似式を用いる .

$$B(\lambda; H) \approx a_1^d + b_1^d + a_2^d + b_2^d + a_3^d + b_3^d + \frac{a_3^{d'} + b_3^{d'} + a_4^{d'} + b_4^{d'}}{8H\pi} \quad (2)$$

ここで ,

$$d = -2H - 1$$

$$d' = -2H$$

$$a_k = 2k\pi + \lambda$$

$$b_k = 2k\pi - \lambda$$

である . これにより , $f(\lambda; H)$ の近似式 $\tilde{f}(\lambda; H)$ を得る . この近似式を用い , 次のようにして近似 FGN 過程の系列を得る .

(1) $f_j = \tilde{f}(2\pi j/n; H)$ として , 系列 $\{f_1, \dots, f_{n/2}\}$ を計算する .

(2) 系列 $\{f_j\}$ に平均 1 の独立な指数確率変数を各要素に掛ける . これを \hat{f}_j とする .

(3) 複素系列 $\{z_1, \dots, z_{n/2}\}$ を $|z_j| = \sqrt{\hat{f}_j}$ により計算する . 位相については , パワースペクトルが \hat{f}_j のものと一致するように $0 \sim 2\pi$ の間で決定する [14] .

(4) $\{z_1, \dots, z_{n/2}\}$ から

$$z'_j = \begin{cases} 0, & \text{if } j = 0 \\ z_j, & \text{if } 0 < j \leq n/2 \\ \overline{z_{n-j}} & \text{if } n/2 < j < n \end{cases}$$

として , $\{z'_0, \dots, z'_{n-1}\}$ を計算する . ここで , $\overline{z_{n-j}}$ は z_{n-j} の共役複素数である .

(5) 得られた $\{z'_j\}$ に逆離散フーリエ変換を施すことにより , 近似的な FGN の時系列 $\{X_i\}$ を得る .

3.3 ATM 交換機モジュール

文献 [1] ではマルチキャスト機能をもった ATM 交換機を開発した . 本研究においては , ATM 交換機の出

力バッファの構成がジッタに及ぼす影響を調べるために , 次の二つの場合についてシミュレーションを行う .

(1) 2本の出力バッファが用意されている場合 (以下 , 分割バッファ型と呼ぶ)

MPEG セルとインターネットセルはそれぞれ別々のバッファに格納される . 出力バッファのサービス規範はラウンドロビンとしている .

(2) 1本の出力バッファが用意されている場合 (以下 , 共有バッファ型と呼ぶ)

MPEG セル及びインターネットセルは同じバッファ上に格納される .

4. シミュレーション結果と考察

文献 [1] で構築した実験ネットワークに対するシミュレーションモデル (図 4) に , 3. で示したモジュールを適用した . 図 4 において , jitter 1~3 は MPEG2 エンコーダのモジュールであり , それぞれ神戸局 , 西宮局 , 尼崎局のエンコーダに対応する . Decode 1~3 は各地域に設置されている MPEG デコーダである . 各放送局からの MPEG セルは , ATM スwitch に実装されたマルチキャスト機能を用いて各都市の受信局へ配信される . sw_1~3 は ATM スwitch のモジュールである . 回線速度はすべて 156 Mbps としている . 最後に ip_clients 1~3 はインターネットクライアントのモジュールである . ip_server はインターネットサーバのモジュールで , クライアントに向けて長期依存性をもったトラフィックを送信する .

まず最初に , インターネットサーバモジュールが長

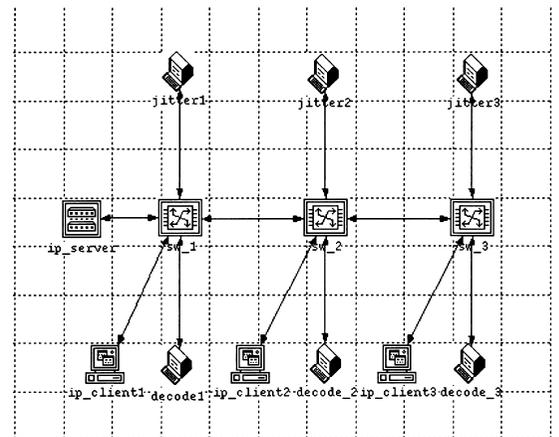


図 4 OPNET 上でのネットワークモデル
Fig. 4 Network model on OPNET.

表 2 FGN 系列の生成に用いたパラメータ
Table 2 Parameter sets of FGN.

パラメータ	設定値
Hurst パラメータ	0.7
スロット当り (10^{-5} s) の平均セル数	0.05514
スロット当りのセル数の分散	0.16082
観測点の数	1048576

期依存性をもったトラヒックの生成が可能であるかを
確認する．図 4 において，ip_server から ip_client3 に
向けてセルを送り，sw_1・sw_2 間を流れるトラヒッ
クから Hurst パラメータを推定する．インターネット
サーバのパラメータについては，計測データの結果を
もとに表 2 のように設定した．

図 5 は sw_1・sw_2 間の測定データに対する分散解
析法の結果を示している．縦軸は到着セル数過程の平
均化過程における分散を表し，横軸は時間スケールを
表している [15]．この図の直線の傾きより Hurst パ
ラメータは $H = 0.66$ と推定できる．ここで，系列を
生成するときに指定した Hurst パラメータの値 (0.7)
より推定結果の値は小さくなっているが，その原因と
しては FGN 系列の負の値を 0 として扱っていること
が考えられる．このように，シミュレーションデータ
から得られた Hurst パラメータの推定結果は若干小さ
くなってはいるが，改良を加えたモジュールによって
指定値に近い長期依存性をもったトラヒックを生成す
ることが可能となった．これより後に示す Hurst パ
ラメータの値は，FGN の系列を生成するときに指定し
た値を示している．

図 6 は，改良モジュールを用いて Hurst パラメータ
を 0.5 から 0.8 に変化させたときの平均化過程の分散
減少の様子を示している．ここで， $H = 0.5$ のときト
ラヒックは短期依存性， $H > 0.5$ のときには長期依
存性をもつ．平均・分散については表 2 の値を用いて
いる．図 6 より，Hurst パラメータが大きくなるに従
って，時間スケールが大きくなって平均化過程の分散
が減少しにくいことがわかる．

次に，ATM スイッチに実装されているマルチキャ
スト機能を利用して，各放送局 (jitter 1, 2, 3) から
MPEG セルをそれぞれ各受信局に (decode_1, 2, 3)
向けて配信する場合を考える．この状況下で，イン
ターネットサーバ (ip_server) から尼崎局に設置され
ているクライアント (ip_client3) へインターネット
セルを伝送し，神戸局で生成された MPEG セルが各
都市のデコーダに到着したときのジッタを計測する．

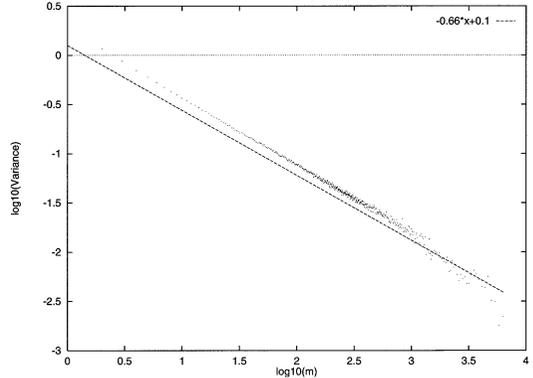


図 5 分散解析法による推定結果
Fig. 5 Result of variance method.

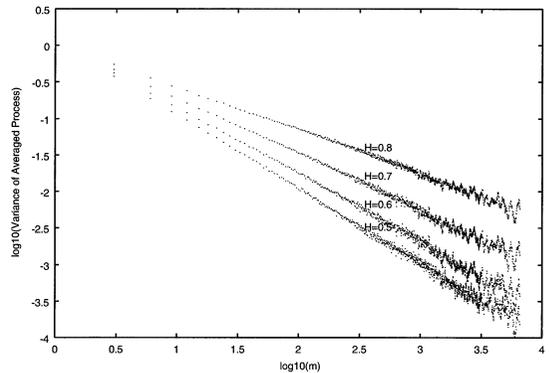


図 6 Hurst パラメータごとの分散減少
Fig. 6 Result of variance method.

表 3 インターネットサーバモジュールのパラメータ
Table 3 Parameter sets for Internet server.

図番号	Hurst パラメータ	インターネットビットレート
7	0.5, 0.6, 0.7, 0.8	2.353 Mbps
8	0.5, 0.6, 0.7, 0.8	23.53 Mbps
9	0.5, 0.6, 0.7, 0.8	2.353 Mbps
10	0.5, 0.6, 0.7, 0.8	23.53 Mbps

MPEG2 エンコーダのセル生成レートは，観測デー
タの値に基づき，6.771 Mbps，つまり離脱間隔時間を
 6×10^{-5} 秒とした．また，MPEG2 セルの伝送に利
用するサービスクラスは CBR とした．インターネッ
トトラヒックがもつ自己相似性と MPEG セルのジッ
タ特性との関連を調べるために，表 3 に示すような
パラメータの場合についてシミュレーションを行った．
以下では長期依存性とジッタの関連に加えて，長期依
存性を有するトラヒックが混在する状況下でバッファ
の管理規範がジッタ抑制にどの程度効果があるかにつ

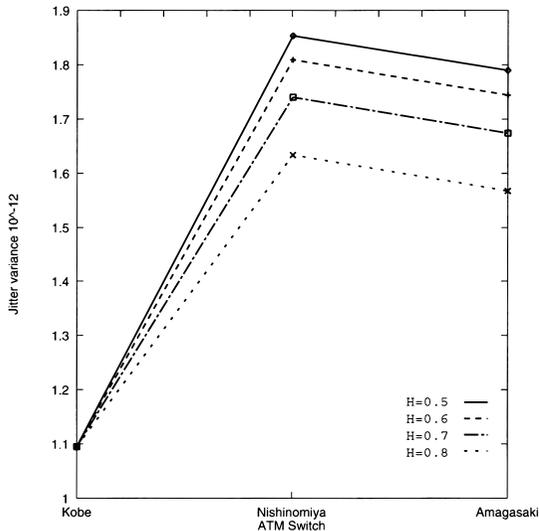


図 7 MPEG セルのジッタ (インターネットビットレート 2.353 Mbps, 分割バッファ)

Fig. 7 Jitter value of MPEG2 (Internet bitrate= 2.353 Mbps, separate buffer case).

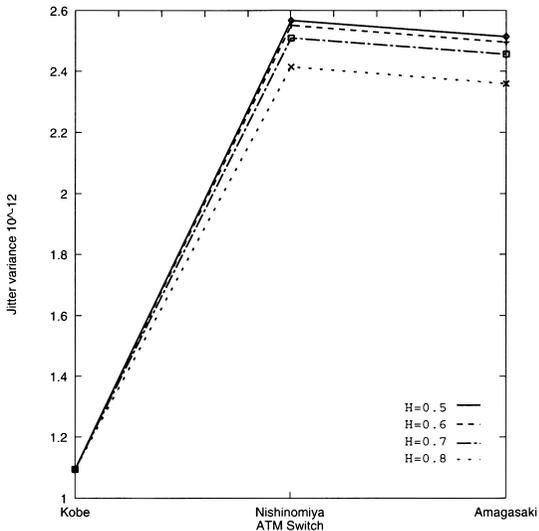


図 9 MPEG セルのジッタ (インターネットビットレート 2.353 Mbps, 共有バッファ)

Fig. 9 Jitter value of MPEG2 (Internet bitrate= 2.353 Mbps, unified buffer case).

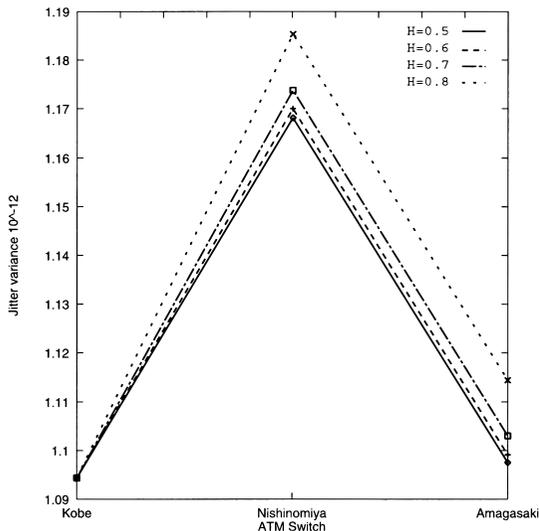


図 8 MPEG セルのジッタ (インターネットビットレート 23.53 Mbps, 分割バッファ)

Fig. 8 Jitter value of MPEG2 (Internet bitrate= 23.53 Mbps, separate buffer case).

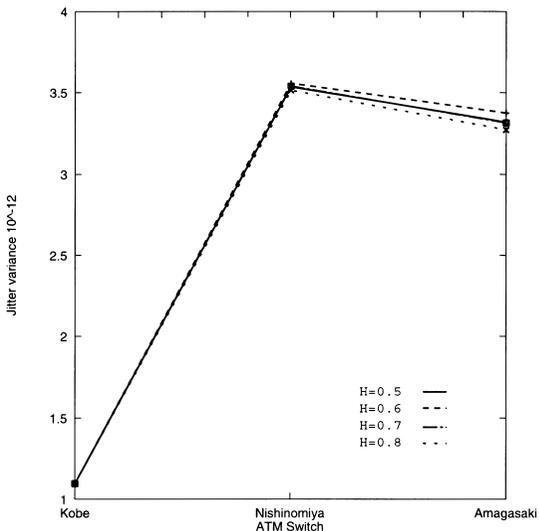


図 10 MPEG セルのジッタ (インターネットビットレート 23.53 Mbps, 共有バッファ)

Fig. 10 Jitter value of MPEG2 (Internet bitrate= 23.53 Mbps, unified buffer case).

いても評価を行う。

図 7 と図 8 は分割バッファ型, 図 9 と図 10 は共有バッファ型でのジッタを表している。図 7~ 図 10 では, ジッタ値が神戸局で最小の値をとってから西宮

局で最大となり, 最後の尼崎局で減少するという共通の傾向が観察される。神戸局から送信される MPEG トラフィックは, 同じ神戸局内で変動の大きいインターネットトラフィックと多重化されるため, それが西宮局

で大きなジッタとして観察されると考えられる。一方、西宮局で尼崎方向に多重化される新たなトラヒックは変動の小さい MPEG トラヒックのみであり、それが尼崎局でジッタが小さくなる原因と考えられる。

図 7 はインターネットビットレートが 2.353 Mbps、Hurst パラメータを 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 に設定したときのシミュレーション結果を示している。図 7^(注1)より、西宮、尼崎では Hurst パラメータの値が増加するほどジッタの値は減少することが観察できる。一般に Hurst パラメータの値が増加すると、インターネットセルの待ち行列長が増大する要因となる。ここで、出力バッファのサービス規範はラウンドロビンであるため、インターネットセルの待ち行列長が増大することによって MPEG セルの出力過程が平滑化され、結果としてジッタの値が減少すると考えられる。

図 8 はインターネットビットレートを 23.53 Mbps、Hurst パラメータを 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 に設定したときのシミュレーション結果を示している。図 8 から、Hurst パラメータの値が増大するにつれてジッタの値も増大することが確認できる。Hurst パラメータが低いときにはインターネットセルはバースト的な到着が少ないランダムな到着過程となり、インターネット用バッファ内にセルが存在する機会がランダムに増加するため、結果として各バッファに対しラウンドロビンで安定して処理が行われる。これに対して、Hurst パラメータが高いときはバースト的なセル到着の頻度が増える一方で、バッファが空になるタイミングに偏りが発生する。これより二つのバッファがラウンドロビンで処理される時間と片方だけが処理されている時間にも偏りが発生し、結果として MPEG セルの離脱間隔に影響を与えるためと考えられる。しかし、ジッタ値は西宮で $1.16 \sim 1.19 \times 10^{-12}$ 、尼崎で $1.09 \sim 1.12 \times 10^{-12}$ と非常に小さい値であるため、サービス品質の観点からは Hurst パラメータが変化することによるジッタへの影響はほとんどないと考えられる。

次に、ATM スイッチに共有バッファが一つ用意されている場合について考える。図 9 ではインターネットビットレートが 2.353 Mbps とした場合、図 10 ではインターネットビットレートが 23.53 Mbps とした場合のシミュレーション結果を示している。両方の図において、各目的地におけるジッタの振舞いについては図 7、図 8 の場合と同じように、西宮でジッタの値が増加し尼崎では西宮で観測された値よりも小さくなるといった傾向が見られる。また、図 9 のジッタの値

表 4 MPEG セルのジッタ値
Table 4 Jitter value of MPEG cell.

Hurst パラメータ	神戸	西宮	尼崎
0.5	1.0943	3.5378	3.3175
0.6	1.0943	3.5594	3.3760
0.7	1.0943	3.5413	3.3156
0.8	1.0943	3.5138	3.2699

は図 7 でのジッタの値よりも増大しており、同様のことが、図 10 と図 8 の間にもいえる。これは、ATM スイッチには単一のバッファしか用意されていないため、MPEG セルの待ち時間が変動し、結果として目的地でのジッタも大きくなるためと考えられる。

図 9 においては、図 7 と同様に Hurst パラメータの値が増大するほどジッタの値が減少する傾向が観察される。一方、図 10 では、各都市でのジッタの値は表 4 のようになり、Hurst パラメータの変化とジッタの値とは特に相関は見られない。以上のことから、共有バッファの場合はインターネットビットレートが低いときにはジッタは長期依存性の強さに影響されるが、高いときにはバックグラウンドに流れるトラヒック量自体に大きく影響されることがわかる。

5. む す び

本論文では、自己相似性をもったトラヒックの生成に焦点をあて、実験ネットワークのシミュレーションモデルの開発を行い、自己相似性をもつトラヒックと MPEG セルのジッタ特性との関係を調べた。

シミュレーション結果より、分割バッファ型ではインターネットビットレートが低いときと高いときの両方でジッタ特性に長期依存性の影響が見られる一方で、共有バッファ型ではインターネットビットレートが高いときには長期依存性の影響がほとんど見られず、バックグラウンドに流れるトラヒック量自体にジッタ特性が大きく影響されることがわかった。

実際の MPEG2 の品質に関して 1.5 Mbps MPEG NTSC ビデオにおけるセル遅延分散の許容値は 6.5 ms であるが、20 Mbps HDTV ビデオでは 1 ms になる [9]。図 10 により、最も変動が激しい場合ではおおよそ $\sqrt{3.5594 \times 10^{-12}} \approx 1.9 \mu\text{s}$ となるが、これは MPEG2 のサービス品質要求を満していると思われる。

(注1): ここではインターネットトラヒックと競合しない神戸局自身あてのセルにおいてもジッタが観測されている。これは、OPNET で提供されている ATM スイッチのモジュールでセルのヘッダ情報処理を行う際、他セルの処理中のときにはその処理が終わるまで待たされるという仕様のためである。

また、MPEG2 のジッタ特性については、バックグラウンドに流れるトラフィック量あるいは MPEG ソースの数によりジッタが大きく影響を受けることが知られている [1]。ジッタ抑制については、例えば文献 [18] において ATM スイッチにおけるシェーピングがジッタ抑制に有効であることが示されているが、これら抑制技術を用いたうえでのサービス品質保証について更なる研究が必要と思われる。

謝辞 本研究を進めるにあたって、実験ネットワークでの実測データを採取して頂きました、住友電気工事(株)森田哲郎博士、阪神電気鉄道(株)立住裕史氏に感謝致します。また、Hurst パラメータの推定プログラムを提供して頂いたキヤノン(株)の山田耕平氏に感謝致します。本研究の一部は財団法人テレコム先端技術研究支援センターの援助を受けて行ったものである。

文 献

- [1] N. Adachi, S. Kasahara, and Y. Takahashi, "Simulation Study on Multi-hop Jitter Behavior in Integrated ATM Network with CATV and Internet," IEICE Trans. Commun., vol.E81-B, no.12, pp.2413-2422, 1998.
- [2] J. Beran, Statistics for Long-Memory Processes, Chapman & Hall, New York, 1994.
- [3] M.E. Crovella and A. Bestavros, "Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.5, no.6, pp.835-846, 1997.
- [4] J.L. Jerkins and J.L. Wang, "A Measurement Analysis of ATM Cell-Level Aggregate Traffic" Proc. IEEE GLOBECOM'97, pp.1589-1595, Phoenix, AZ, Nov. 1997.
- [5] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.2, no.1, pp.1-15, 1994.
- [6] V. Paxson, "Fast, Approximate Synthesis of Fractional Gaussian Noise for Generating Self-Similar Network Traffic," Comput. Commun. Rev., vol.27, no.5, 1997.
- [7] W. Matragi, K. Sohraby, and C. Bisdikian, "Jitter Calculus in ATM Networks: Multiple Node Case," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.5, no.1, pp.122-133, 1997.
- [8] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, "インターネット・アクセスネットワーク設計のための WWW トラフィックの分析とモデル化," 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.6, pp.428-437, 1997.
- [9] R. Onvural, Asynchronous Transfer Mode Networks: Performance Issues, 2nd edition, Artech House, Inc., 1995.
- [10] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, "On The Relationship Between File Sizes, Transport Protocols, And Self-Similar Network Traffic," Proc. International Conference on Network Protocols, pp.171-180, Oct. 1996.
- [11] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, "On The Effect Of Traffic Self-Similarity on Network Performance," Proc. SPIE International Conference On Performance and Control of Network Systems, Nov. 1997.
- [12] V. Paxson, "Empirically Derived analytic Models of Wide-Area TCP Connections," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.2, no.4, pp.316-336, Aug. 1994.
- [13] V. Paxson, "Fast, Approximate Synthesis of Fractional Gaussian Noise for Generating Self-Similar Network Traffic," Comput. Commun. Rev., vol.27, no.5, 1997.
- [14] S. Schiff, "Resolving Time-series Structure with A Controlled Wavelet Transform," Electron. Lett., vol.30, no.5, pp.383-384, March 1994.
- [15] M.S. Taqqu, V. Teverovsky, and W. Willinger, "Estimators for Long-range Dependence: An Empirical Study," Fractals, vol.3, no.4, pp.785-798, 1995.
- [16] M.S. Taqqu and V. Teverovsky, "On Estimating the Intensity of Long-Range Dependence in Finite and Infinite Variance Time Series," A Practical Guide To Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications, R. Adler, R. Feldman and M.S. Taqqu, eds., pp.177-217, Birkhauser, Boston, 1998.
- [17] K. Yamada, N. Adachi, S. Kasahara, and Y. Takahashi, "On the characteristics of Cell Stream in ATM Network Integrateing CATV and Internet," 7th International Conference on Telecommunication Systems: Modeling and Analysis, pp.306-315, Nashville, TN, USA, March 19-21, 1999.
- [18] 森田哲郎, 立住裕志, 福永康志, 川西康之, 笠原正治, 滝根哲哉, 高橋 豊, "ATM 伝送系におけるセルジッタによる MPEG 映像乱れの改善手法," 信学技報, CQ2000-34, vol.100, no.176, 2000.

(平成 13 年 9 月 10 日受付, 12 月 28 日再受付)



安達 直世 (正員)

平 8 立命館大・理工・電気電子卒。平 10 奈良先端大修士課程了。同年三洋電機(株)入社。平 13 奈良先端大博士課程了。同年より同大情報科学研究科助手。博士(工学)。情報通信システムのモデル化と性能評価に関する研究に従事。



笠原 正治 (正員)

平 1 京大・工・数理卒．平 3 同大学院修士課程了．平 5 京大情報処理研究センター助手．平 9 奈良先端大情報科学研究科助手，平 10 より同大助教授．博士(工学)．待ち行列理論，情報通信システムのモデル化と性能評価に関する研究に従事．IEEE，情報処理学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会，システム制御情報学会各会員．



高橋 豊 (正員)

昭 50 京大・工・数理卒．昭 55 同大学院博士課程単位取得退学．同年同大・工・助手，平 1 同助教授．平 8 奈良先端大情報科学研究科教授．平 11 より京大大学院情報学研究科システム科学専攻教授．工博．待ち行列理論，情報通信システム・データベースシステム・並列処理システム等のモデル化と性能評価に関する研究に従事．日本オペレーションズ・リサーチ学会，情報処理学会，応用数理学会，システム制御情報学会各会員．