

線形フィルタのアプローチによる 呼種別 ATM セル損失率近似モデル

鳩野 敦生[†] 川北 謙 二^{††}

本論文では、ヒルベルト空間理論に基づく線形フィルタのアプローチを、ATM (Asynchronous Transfer Mode) ネットワークにおけるセル損失率の近似問題に適用し、バースト長が一般分布 (バースト間隔は指数分布) である場合を近似可能な呼種別のセル損失率近似モデルを開発した。そのために、本論文では、以下の新機軸を導入した。(1) 大偏差原理により、バッファが十分に長いときに、各呼種の待ち行列長の分布が指数分布によって張られるヒルベルト空間において漸近的に線形 (1 次) 従属となることから、各呼種の待ち行列長の分布に対する近似を、すべて同一の線形部分空間で行った。(2) 一般化された Edgeworth 展開を適用し、呼種別の出回線溢れ率 (各呼種のセル到着率が回線の伝送速度を上回る確率) を、二項分布によって張られる線形部分空間への直交射影で近似した。これらの新機軸により、呼種間でのセル損失率の相違は、バースト長の相違ではなく、ピークセル速度の相違のみから生じ、セル損失率が最悪となる呼種は、ピークセル速度が最大である呼種となることを示した。シミュレーションにおいても、個々の呼種セル損失率曲線は、ほとんど平行となり、かつ、本近似による最悪となる呼種のセル損失率は、大部分が、シミュレーションの 95% 信頼区間に近い、安全側の近似となった。

A Individual Cell Loss Approximation for Heterogeneous ATM Traffic Based on the Linear Filter Approach

ATSUO HATONO[†] and KENJI KAWAKITA^{††}

This paper describes the application of linear filter approach based on Hilbert space theory to cell loss probability approximation for individual traffic types under heterogeneous asynchronous transfer mode (ATM) traffic stream. This approximation can be applied to any burst traffic type of which burst lengths generate a General distribution and permits near realtime processing without using high speed processors. To develop this approximation, we introduced into the following two linear filter approaches: (1) Since the large deviation principle verifies that queue distributions of individual traffic types became asymptotically linearly dependent on vectors spanned by exponential functions, we approximated the queue distributions of individual traffic types with the identical subspace. (2) Since the Edgeworth theory verifies that an arbitrary distribution can be expanded with a binomial distribution and its associate orthogonal functions, we approximated the distribution of cell arrival rates of individual traffic types with a subspace spanned by a binomial distribution. From the above approximation, we concluded that cell loss probabilities of the individual traffic type are independent of burst lengths and that the worst traffic type in cell loss probability has the maximum peak cell rate among the traffic types. Comparisons with simulation results showed that cell loss probability curves of the individual traffic types were almost parallel to each other and that most of these results of the worst traffic type in cell loss probability were almost the safe approximation close to 95% confidence intervals.

1. はじめに

ヒルベルト空間理論に基づく線形フィルタのアプローチ^{11),12)}は、音声および画像の信号解析/圧縮お

よびパターン認識処理^{15),16)}等、様々な工学の分野に応用されている。なかでも、線形 (1 次) 従属に関する定理は、線形従属となるベクトルが他のベクトルの線形 (1 次) 結合で置き換えることが可能であることを保証しているため、モデル化に用いるベクトルの数 (モデルの状態変数の次元数) を削減するための強力な武器となっている¹²⁾。本論文では、線形フィルタのアプローチにおける線形従属に関する定理を、ATM

[†] 株式会社日立製作所情報通信事業部
Telecommunication Division, Hitachi, Ltd.

^{††} 株式会社日立製作所システム開発研究所横浜ラボラトリー
Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

(Asynchronous Transfer Mode) ネットワークにおける呼種別のセル損失率の近似問題に適用し、個々の呼種ごとのバーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求める OR (Operations Research) のアプローチ^{3)~6)}では不可能であった、バースト長が一般分布(バースト間隔は指数分布)である場合を近似可能、かつ、セル損失率と回線の伝送速度、バッファ長、および、トラヒック記述子との関係をイクスプリシットに表した呼種別のセル損失率近似モデルを開発した。

マルチメディア通信では、情報の転送要求が間欠的に生じるバーストトラヒックとなるために、個々の入回線ごとに最大限必要となる帯域を恒常的に割り当てたのでは、帯域の利用効率が非常に悪くなる。そのために、ATM ネットワークでは、可変長の情報をセルと呼ばれる 53 バイトごとに分割して連続的に転送し、スイッチにおいて、ある回線の空タイムスロットに他の入回線からのセルを埋め込み、トラヒック全体として必要となる帯域を削減する統計多重処理を行う。多数の入回線からのセルが衝突し、セルが出回線から溢れる時には、スイッチ(および多重化装置)に設けられたバッファによってセルの衝突を緩衝する。バッファによって緩衝しきれずに、バッファからセルが溢れる場合には、溢れたセルは損失となる。したがって、ATM ネットワークの設計/運用では、統計多重におけるセル損失率のメカニズムを把握し、許容セル損失率(たとえば回線誤りによるセル損失率以下)を超えない範囲で、どの程度まで統計多重を行うこと可能であるかを見極めるためのセル損失率近似モデルが必要となる。

バーストトラヒックの特性は、端末の転送速度およびメディアの特性によって異なる。以降、本論文では、特性の異なるバーストの種類を呼種と記述し、また、統計多重によるセル損失率削減効果を統計多重効果と記述する。

トラヒック特性が異なる回線を統計多重するときには、セル損失率が呼種ごとに異なると報告されている^{3)~6)}。したがって、ATM ネットワークの設計/運用では、呼種間のセル損失率に極端な相違が生じないようにするために、統計多重を行ったときの呼種間のセル損失率の相違を把握することが可能な呼種別のセル損失率近似モデルが必要となる。

セル損失率近似モデルを構成するためには、バーストトラヒックの特性、および、スイッチの構成をモデル化する必要がある。まず、バーストトラヒックの特性をモデル化するには、バースト長の分布、バースト

間隔の分布が必要となる。音声トラヒックにおいては、バースト長とバースト間隔が、ともに指数分布に従うとしてモデル化するのが一般的である²²⁾。しかしながら、トラヒックの実測に関する報告によると、LAN (Local Area Network) 等からのデータトラヒック⁷⁾、および、ビデオトラヒック¹⁷⁾では、バースト間隔がほぼ指数分布に従い、バースト長の分布が二極分化し、短いバースト長と長いバースト長に分かれている。小数の法則¹⁰⁾により、統計多重を行った場合、非同期に発生する事象の発生間隔は、指数分布に漸近する。データトラヒック、および、ビデオトラヒックの実測において、バースト間隔がほぼ指数分布に従うのは、この小数の法則の作用によると考えることができる。したがって、多重化されたトラヒックでは、データトラヒック、および、ビデオトラヒックも、バースト間隔が指数分布に従うと見なしても工学的には差し支えない。

次に必要となるのが、スイッチ構成のモデル化である。ATM ネットワークでは、スイッチの後に、出回線から溢れたセルを緩衝するためのバッファを配置する出バッファ型スイッチがよく用いられている。そこで、本論文では、出バッファ型スイッチに対し、出回線をサーバ、バッファを待ち室とした単一サーバ単一待ち行列モデルでモデル化を行った。

呼種別のセル損失率近似モデルの開発におけるポイントは、出回線からの溢れおよびバッファ内における各呼種間の相互作用をどのようにしてモデル化するかにある。これまでにも、呼種別のセル損失率近似モデルは、いくつか提案されている。しかしながら、これまでに発表されている近似モデルは、OR のアプローチ^{3)~6)}に基づき、個々の呼種ごとのバーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求め、出回線からの溢れおよびバッファ内における各呼種間の相互作用を状態遷移確率マトリックスによりモデル化していた。そのため、これら OR のアプローチに基づくモデルでは、遷移確率マトリックスの次元数が呼種ごとの多重数とバッファ内のセル数の積となり、呼種数およびバッファ長が小さい場合にしか適用できないという問題がある。したがって、これまでは、呼種別のセル損失率近似モデルと称していても、実際には、2呼種の場合の解析しか行われていない^{3)~6)}。さらに、遷移確率マトリックスを容易に求めることができるバーストトラヒックは、バースト長の分布およびバースト間隔の分布が指数分布に従うトラヒックに限られるが、これでは、バースト長の分布が必ずしも指数分布に従わないマルチメディアトラヒック

クに対応することができない。以上の理由に基づき、これまででは、ATM ネットワークの設計/運用に供することが可能である呼種別のセル損失率近似モデルは、存在しなかった。

我々は、線形部分空間と直交射影のアプローチを ATM におけるセル損失率近似の問題に適用し、単一呼種のセル損失率近似モデル¹⁾および多呼種のセル損失率近似モデル²⁾を開発してきた。上述のアプローチでは、バーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求める代わりに、パターン認識および信号解析/圧縮に用いられている類似度および直交射影というコンセプトを用いて、モデルの状態変数の次元数を削減した近似モデルである。

本論文では、我々が開発してきたセル損失率近似モデルをさらに発展させ、呼種別のセル損失率近似モデルへと拡張した。OR のアプローチに基づくモデルが組合せパターンの爆発を引き起こすのは、各呼種間の相互作用を、個々の呼種ごとのバーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求めているためである。したがって、呼種別のセル損失率近似の開発のポイントは、各呼種間の相互作用を、組合せパターン数の爆発を起こすことなく、モデル化することにある。そこで、本論文では、拡張にあたり、線形部分空間と直交射影のアプローチに加えて、線形従属性により近似モデルの状態変数の次元数を削減するアプローチを追加し、個々の呼種ごとのバーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求めることを避けることを可能とした。

ATM でのセル損失は、バーストが衝突して出回線からセルが溢れ、溢れたセルをバッファが保持できなくなったときに生じる¹⁾。そこで、統計多重効果は、出回線帯域による統計多重効果とバッファによる統計多重効果とに分類されている¹³⁾。出回線帯域による統計多重効果は、1つの呼のピークが他の呼の谷によって相殺されることによる出回線から溢れるセルを削減する効果である。バッファによる統計多重効果は、バースト到着の統計的な揺らぎをバッファが平滑化することによるバッファから溢れるセルを削減する効果である。この観点からすると、待ち行列の分布がバッファによる統計多重効果を表していることになる。

以上の考え方に基づき、本論文では、拡張にあたり、以下の新機軸を導入した。

(1) バッファが十分に長いときに成り立つ大偏差原理^{8),9)}とヒルベルト空間理論における線形従属に関する定理を適用し、バッファによる統計多重効果を表している個々の呼種の待ち行列長の分布を、指数

分布によって張られるヒルベルト空間における同一の線形部分空間で近似した。

(2) バーストレベルの出回線帯域による統計多重効果を表す呼種別の出回線溢れ率（各呼種のセル到着率が出回線の伝送速度を上回る確率）にも Edgeworth 展開¹⁰⁾を適用し、二項分布によって張られる線形部分空間への直交射影で近似した。

大偏差原理^{8),9)}により、任意の確率分布の裾の分布が指数分布に漸近することが数学的に保証されている。この原理は、無線工学においては有名な原理で、ガウス雑音に対し PSK (Phase Shift Keying) が FSK (Frequency Shift Keying) よりも 3dB 有利であることを証明することに用いられている⁸⁾。この大偏差原理により、個々の呼種の待ち行列長の分布も、指数分布に漸近し、また、全体の待ち行列長の分布も、大偏差原理により指数分布に漸近する。全体の待ち行列長の分布は、個々の呼種の待ち行列長の分布を呼種について平均したものとなるので、個々の呼種の待ち行列長の分布の線形結合となる。ところで、ヒルベルト空間理論に基づく線形フィルタのアプローチによると、パラメータが異なる指数分布は、指数分布によって張られるヒルベルト空間において、互いに線形 (1次) 独立であり、指数分布が線形従属となるのは、パラメータが同じ指数分布に限られる。したがって、個々の呼種の待ち行列長の分布は、全体の待ち行列長の分布と同じ指数分布に漸近し、指数分布によって張られるヒルベルト空間における同一の線形部分空間で近似可能となる。このことは、物理的には、呼種間のセル損失率の相違はバーストレベルの出回線帯域による統計多重効果の相違のみに由来することを意味する。

呼種別の出回線溢れ率は、多呼種トラヒック全体の出回線溢れ率よりも、より一層複雑なものとなる¹⁴⁾。そこで、本論文では、呼種別の出回線溢れ率にも Edgeworth 展開を適用し、二項分布によって張られる線形部分空間への直交射影で近似した。

以上の検討に基づき、実際の ATM ネットワークの設計/運用に供することが可能である呼種別のセル損失率近似モデルを開発した。以下では、2章でバッファ長が十分に長い場合、各呼種の待ち行列長の分布が線形従属となることを用いて、個々の呼種の待ち行列長の分布を、指数分布によって張られるヒルベルト空間における同一の線形部分空間で近似することが可能であることを示した。3章で、Edgeworth 展開により、二項分布とそれに随伴する正規直交関数系によって張られる低次元の線形部分空間で近似することにより、呼種別の出回線溢れ率 α_k を求めた。4章で、2章お

よび3章の結果を用いて、多呼種のセル損失率近似モデルを呼種別のセル損失率近似モデルへと拡張した。5章で本近似の精度を評価するために、本近似結果をシミュレーション結果と比較した。

本論文では、バースト内のセル間隔の平均の逆数をピークセル速度、1つのバースト内のセル数をバースト長とする。なお、バーストが持続する時間をバースト長と記述する文献もある。以降、呼種*i*の平均セル速度を $\langle v_i \rangle$ 、ピークセル速度を v_i 、平均バースト長の逆数を μ_i 、多重数を N_i 、 C_i^2 をバースト長の平方変動係数とした。 Σ は呼種について総和を表す。また、 ρ を出回線利用率、出回線速度を V とする。 X をセルの待ち行列長に関する確率変数とし、 x を確率変数 X に対応する変数とする。 P_{loss} はセル損失率を、 x_0 はスイッチのバッファ長を、 α_0 はセルの衝突による出回線溢れ率を、 α_k はバーストの衝突による*k*呼種の出回線溢れ率を表す。 γ_0 はピッチ成分による待ち行列長の最大変動モードに対応する指数分布のパラメータであり、 γ は包絡成分による待ち行列長の最大変動モードに対応する指数分布のパラメータである。

2. バッファによる統計多重効果

大偏差原理により、個々の呼種のバッファによる統計多重効果を表す待ち行列長の分布は、指数分布に漸近し、また、全体の待ち行列長の分布も、指数分布に漸近し、指数分布によって張られるヒルベルト空間において、互いに線形従属となる。そこで、本章では、待ち行列長の分布が互いに線形従属となることを用いて、大偏差原理が有効となる大容量バッファを備えたスイッチでは、個々の呼種ごとのバーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求めることなく、個々の呼種の待ち行列長の分布を、指数分布によって張られるヒルベルト空間における同一の線形部分空間で近似することが可能であることを示す。

2.1 線形従属性と指数分布

まず、 f および f_i を線形空間上の任意のベクトル、 C_i を結合係数とする。線形フィルタのアプローチによると、線形空間上のベクトルが線形結合で、

$$f = \sum C_i f_i \quad (1)$$

と表されたとき、0以外の値となる結合係数 C_i が1つでも存在するときには、ベクトル f は、各ベクトル f_i に対して線形従属となる。線形従属となるベクトルは、他のベクトルの線形結合で置き換えることができるので、モデル化に用いるベクトルの数(モデル

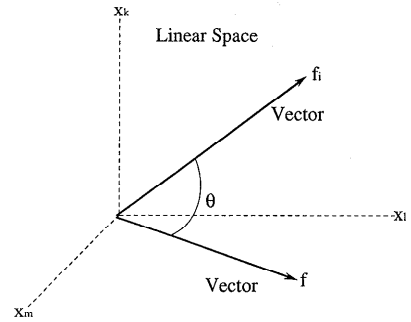


図1 線型独立
Fig. 1 Linear independency.

の次元数)を削減することが可能となる¹²⁾。

ところで、線形従属は、幾何的には、ベクトルが互いに平行であることを意味する。したがって、ベクトルどうしが線形従属であるかどうかを判定するためには、ベクトルどうしの挟角 θ が 0 または 180° となるかどうかを調べればよい(図1)。ヒルベルト空間上における関数どうしの挟角 θ は、パターン認識の分野で単純類似度¹¹⁾と呼ばれている方向余弦を介して、

$$\cos^2 \theta = \frac{\langle u_i(x), u_j(x) \rangle^2}{\langle u_i(x), u_i(x) \rangle \langle u_j(x), u_j(x) \rangle} \quad (2)$$

と定義できる。ここで、指数分布どうしの内積の定義は、文献1)により、

$$\begin{aligned} \langle u_i(x), u_j(x) \rangle \\ \equiv \beta_i \beta_j \int_0^\infty \exp\{-(\beta_i + \beta_j)x\} dx \end{aligned} \quad (3)$$

である。 $u_i(x)$ 、 $u_j(x)$ は、指数分布であり、それぞれ、 $u_i(x) = \beta_i \exp(-\beta_i x)$ 、 $u_j(x) = \beta_j \exp(-\beta_j x)$ となる。また、 β_i 、 β_j は、指数分布のパラメータである。

指数分布の場合、式(2)による方向余弦(単純類似度)は、

$$\cos^2 \theta = \frac{4(\beta_i/\beta_j)}{\{1 + (\beta_i/\beta_j)\}^2} \quad (4)$$

となる。指数分布のパラメータの値が正值であるため、指数分布どうしがヒルベルト空間上において平行となるのは、挟角 $\theta = 0$ ($\cos \theta = 1$)となるときであり、

$$\beta_j = \beta_i \quad (5)$$

の場合に限られる。このことは、パラメータの値が異なる指数分布は、ヒルベルト空間上において線形(1次)独立であり、指数分布が線形従属となる場合は、パラメータの値が同じ指数分布に限られることを意味する。

2.2 大偏差原理と線形従属

待ち行列長が十分に長い場合には、個々の呼種の待ち行列長の分布 $y_i(x)$ は、大偏差原理により、

$$y_i(x) = A_i \exp(-\beta_i x) \quad (A_i \neq 0) \quad (6)$$

と指数分布で表すことができる。すると、全体の待ち行列長の分布は、個々の呼種 i の待ち行列長の分布 $y_i(x)$ を呼種について平均したものであるから、

$$y(x) = \sum C_i A_i \exp(-\beta_i x) \quad (7)$$

と、個々の呼種の待ち行列長の分布である指数分布の線形結合で表すことができる。ここで、結合係数 C_i は、

$$C_i = \frac{N_i(v_i)}{\sum N_k(v_k)} \quad (8)$$

となり、 $C_i \neq 0$ である。

ところで、大偏差原理は、任意の分布が指数分布に漸近することを保証しているのだから、全体の待ち行列長の分布 $y(x)$ をも、待ち行列長が十分に長い場合には、

$$y(x) = A \exp(-\beta x) \quad (9)$$

と指数分布で表すことができる。したがって、大偏差原理により個々の呼種の待ち行列長の分布および全体の待ち行列長の分布の両者が、指数分布に漸近するので、

$$\sum C_i A_i \exp(-\beta_i x) = A \exp(-\beta x) \quad (10)$$

なる関係が、 $C_i A_i \neq 0$ かつ $A \neq 0$ であるにもかかわらず、待ち行列長 x の値にかかわらず恒等的に成り立たなければならない。このことは、待ち行列長が十分に長い場合には、全体の待ち行列長の分布が個々の呼種の待ち行列長の分布に対して線形従属でなければならないことを意味している。

前節で述べたように、パラメータが異なる指数分布は、互いに線形（1次）独立であり、指数分布が線形従属となるのは、パラメータが同じ指数分布に限られる。したがって、式(10)が待ち行列長 x の値にかかわらず恒等的に成り立つための必要十分条件は、

$$\beta = \beta_i \quad (11)$$

となる。したがって、個々の呼種の待ち行列長の分布は、全体の待ち行列長の分布と同じ指数分布に漸近し、バッファによる統計多重効果が各呼種間で相違がなく、同一となる。セル損失におけるバースト長の影響は、出回線帯域による統計多重効果を表す出回線溢れ率には現れず、バッファによる統計多重効果を表す待ち行列長の分布のみに現れる^{1),2)}。このことは、大容量バッファを備えたスイッチでは、バースト長の相違により呼種間でセル損失率に相違が生じないことも意味する。

以上の検討に基づき、大偏差原理が有効となる大容

量バッファを備えたスイッチでは、個々の呼種ごとのバーストの到着数とバッファ内のセル数に関する組合せパターンを忠実に求めることなく、個々の呼種の待ち行列長の分布を、指数分布によって張られるヒルベルト空間における同一の線形部分空間で近似することが可能となる。

3. 出回線帯域による統計多重効果

前章では、線形フィルタのアプローチにおける線形従属に関する定理により、大容量バッファを備えたスイッチでは、個々の呼種の待ち行列長の分布を指数分布によって張られるヒルベルト空間における同一の線形部分空間で近似することが可能であることを示した。本章では、Edgeworth 展開により、呼種別のセル到着率分布を二項分布による線形部分空間への直交射影で近似し、呼種ごとのバーストの到着数に関する組合せパターンを忠実に求めることなく、図2に示した出回線帯域による統計多重効果を表す呼種別の出回線溢れ率 α_k を求めることが可能であることを示す。

3.1 バーストレベルの出回線溢れ率

まず、バーストの衝突による呼種別の出回線溢れ率から求める。バーストを流体と見なす¹⁾と呼種別の出回線溢れ率 α_k は、

$$\alpha_k \equiv \frac{1}{N_k(v_k)} \left\{ \sum_{nv_k+u>V} \sum_{s_1} \dots \sum_{s_j} \cdot P_k(n) U(m_1, \dots, m_j) \cdot \left(nv_k - \frac{nv_k}{u} V \right) \right\} \quad (12)$$

となる¹⁴⁾。ここで、 $P_k(n)$ は、呼種 k のセル到着率の分布関数であり、

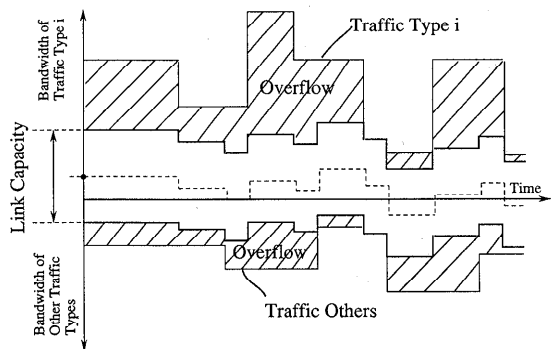


図2 呼種別の出回線溢れ率

Fig. 2 Burst overflow probability for each traffic type.

$$P_k(n) = {}_N C_n \left(\frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^n \left(1 - \frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^{N_k - n} \quad (13)$$

なる二項分布となる。\$U(m_1, \dots, m_j)\$ は、呼種 \$k\$ 以外の呼種を束ねたセル到着率の分布関数であり、

$$U(m_1, \dots, m_j) = \prod_{i \neq k} {}_{N_i} C_{m_i} \left(\frac{\langle v_i \rangle}{v_i} \right)^{m_i} \left(1 - \frac{\langle v_i \rangle}{v_i} \right)^{N_i - m_i} \quad (14)$$

なる二項分布となる。ここで、\$m_i\$ は、呼種 \$i\$ のセル到着率を表す。\$u\$ は、全呼種を束ねたセル到着率であり、

$$u = m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots + m_j v_j \quad (15)$$

となる。分子の多重和は、\$(nv_i + u - V) > 0\$ となる \$n\$ と \$m_1, m_2, \dots, m_j\$ の組合せについて行う。\$S_1 \dots S_j\$ は、全呼種の多重数を表す。\$j\$ は、全呼種の数を表し、(呼種の数 - 1) となる。式 (12) の組合せパターン数は、各呼種の多重数の積となるので、呼種数が大きくなると計算の爆発を引き起こす。そこで、本論文では、文献 2) における多呼種場合と同様に、Edgeworth 展開¹⁰⁾を行い、線形部分空間への直交射影のアプローチを適用する。

Edgeworth 展開を適用するためには、出回線溢れ率 (12) が呼種を束ねたセル到着率の分布関数と全呼種を束ねたセル到着率 \$u\$ のみで表されている必要がある。ところが、式 (12) の分子には、個々の呼種の確率分布に依存する \$nv_k\$ なる因子が存在するので、このままでは、Edgeworth 展開を適用できない。そこで、式 (12) を変形すると、

$$\alpha_k \doteq \sum_{u > V - v_k} \sum_{S_1}^{N_k} \dots \sum_{S_j}^{N_j} Q_k(n) \cdot U(m_1, \dots, m_j) \left\{ 1 - \frac{V}{u + v_k} \right\} \quad (16)$$

となる。ここで、\$Q_k(n)\$ は、

$$Q_k(n) = {}_{N_k - 1} C_m \left(\frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^m \left(1 - \frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^{N_k - 1 - m} \quad (17)$$

である。この変形において、

$$\begin{aligned} & {}_{N_k} C_m \left(\frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^m \left(1 - \frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^{N_k - m} \\ &= \left(\frac{{}_{N_k} C_m v_k^m}{v_k^m} \right) {}_{N_k - 1} C_{m-1} \\ & \cdot \left(\frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^{m-1} \left(1 - \frac{\langle v_k \rangle}{v_k} \right)^{N_k - m} \end{aligned} \quad (18)$$

なる関係を用いた。すると、呼種 \$k\$ のピークセル速

度である \$v_k\$ は、定数であり、セル到着率の分布関数 \$Q_k(n)U(m_1, \dots, m_j)\$ とは、無関係となる。したがって、式 (16) は、呼種を束ねたセル到着率の分布関数 \$Q_k(n)U(m_1, \dots, m_j)\$ と全呼種を束ねたセル到着率 \$u\$ のみで表されているので、文献 2) における多呼種の場合と同様に、Edgeworth 展開を適用できる。

以降、\$M\$ をセル到着率 \$u\$ の平均値、\$Max\$ をセル到着率 \$u\$ の最大値、\$\sigma^2\$ をセル到着率 \$u\$ の分散、\$E^3(k - mp)\$ をセル到着率 \$u\$ の \$mp\$ のまわりの 3 次モーメントとする。また、\$v_q\$ を定義域の量子化単位、\$m\$ を定義域の分割数、\$k\$ を \$[u/v]\$、\$p\$ を \$(M/Max)\$ とする。さらに、\$[a]\$ はガウス記号であり、\$a\$ を超えない最大の整数を表す。

\$Q_k(n)U(u)\$ は、二項分布とそれに随伴する直交関数系で

$$Q_k(n)U(u) = P(k, m, p) \{ 1 + a_1 L_{m,1}(k, p) + a_2 L_{m,2}(k, p) + a_3 L_{m,3}(k, p) + \dots \} \quad (19)$$

と Edgeworth 展開できる。このとき、\$P(k, m, p)\$ は、二項分布

$$P(k, m, p) = {}_m C_k p^k (1 - p)^{m - k} \quad (20)$$

を表す。また、二項分布に随伴する直交関数系 \$L_{m,i}(k, p)\$ は、

$$L_{m,i}(k, p) P(k, m, p) = \frac{\partial^i P(k, m, p)}{\partial P^i} \quad (21)$$

となる。さらに、\$a_i\$ は、各正規直交基底への射影長である \$i\$ 次の展開係数を表す。3 次までの展開係数は、

$$a_1 = \frac{M/v_q - mp}{1!m} \quad (22)$$

$$a_2 = \frac{\sigma^2/v_q^2 - mp(1-p)}{2!m(m-1)} \quad (23)$$

$$a_3 = \frac{1}{3!m(m-1)(m-2)} \{ E^3(k - mp)/v_q^3 - 3(1-2p)\sigma^2/v_q^2 + 2mp(1-p)(1-2p) \} \quad (24)$$

となる。

文献 2) における多呼種の場合と同様に、式 (19) において、1 次の項は展開に用いる二項分布の平均値がセル到着率 \$u\$ の平均値と一致すると消え、2 次の項は二項分布の分散がセル到着率 \$u\$ の分散と一致すると消える。したがって、展開に用いる二項分布の量子化単位 \$v_q\$ と分割数 \$m\$ をセル到着率 \$u\$ の平均値と分散が一致するように決めると、無条件に 1 次の項と 2 次の項を削除できる。しかしながら、分割数 \$m\$ は、整数でなければならないので端数が生じる。工学的には

安全側の近似であることが望まれるので、 m の値を切り上げて

$$m = \left\lceil \frac{M(\text{Max} - M)}{\sigma^2 + 1} \right\rceil \quad (25)$$

$$v_q = \frac{\text{Max}\sigma^2}{M(\text{Max} - M)} \quad (26)$$

とした。また、3 次以上の展開項は、展開係数が次数 i の階乗および m の $i-1$ 乗に比例して小さくなるので、 m が十分に大きい場合には、無視できる。

以上の検討に基づき、本論文では、呼種 k の出回線溢れ率を、二項分布によって張られる 1 次元の線形部分空間へ直交射影を行い、

$$\alpha_k \doteq \sum_{rv_q > V - v_k}^m m C_r \left\{ 1 - \frac{V}{rv_q + v_k} \right\} \cdot \left(\frac{M}{\text{Max}} \right)^r \left(\frac{1 - M}{\text{Max}} \right)^{m-r} \quad (27)$$

と近似した。本近似によれば、呼種 k の出回線溢れ率は、個々の呼種のセル到着率の最大値、平均値、分散の総和から、容易に

$$\text{Max} = \sum N_i v_i - v_k \quad (28)$$

$$M = \sum N_i \langle v_i \rangle - \langle v_k \rangle \quad (29)$$

$$\sigma^2 = \sum N_i \langle v_i \rangle (v_i - \langle v_i \rangle) - \langle v_k \rangle (v_k - \langle v_k \rangle) \quad (30)$$

と求めることができる。

今、多重数が十分に大きく、

$$\sum N_i v_i \gg v_k \quad (31)$$

$$\sum N_i \langle v_i \rangle \gg \langle v_k \rangle \quad (32)$$

$$\sum N_i \langle v_i \rangle (v_i - \langle v_i \rangle) \gg \langle v_k \rangle (v_k - \langle v_k \rangle) \quad (33)$$

が成り立つときには、二項分布によって張られる 1 次元の線形部分空間は、ほとんど呼種に依存しなくなり、全呼種について同一の二項分布に漸近する。この場合には、呼種 k の出回線溢れ率は、呼種 k のピークセル速度 v_k が大きくなるほど大きくなり、ピークセル速度が最も大きい呼種の出回線溢れ率が、最も大きくなる。

ピークセル速度が等しい場合には、実効ピークセル速度 v_q が、実際のピークセル速度 v に一致するので、呼種別の出回線溢れ率を、もう少し簡単にすることができて、

$$\alpha_k \doteq \sum_{rv > V - v}^{N_q} N_q C_r \left\{ 1 - \frac{V/v}{r+1} \right\} \cdot \left(\frac{M}{\text{Max}} \right)^r \left(\frac{1 - M}{\text{Max}} \right)^{N_q - r} \quad (34)$$

で近似することができる。このとき、実効多重数 N_q は、 $N_q = \sum N_i - 1$ となり、この式には、呼種に依存するパラメータがまったく存在しないので、すべての呼種のピークセル速度が等しい場合には、出回線溢れ率は、同じ値となり、出回線帯域による統計多重効果は、すべての呼種について同一となる。以上の検討によって得られたこれら 2 つの性質は、直観的にも納得のいく結果である。

3.2 セルレベルの出回線溢れ率

セルレベルの衝突では、固定長のセル自体を流体と見なす¹⁾ので、すべての呼種のピークセル速度が入り線の物理的なリンク速度と等しくなる。したがって、前節の検討により、セルレベル衝突に関する出回線溢れ率 α_0 は、式 (34) より、

$$\alpha_0 \doteq \sum_{r=0}^{N_q} N_q C_r \left\{ 1 - \frac{1}{r+1} \right\} \cdot \left(\frac{M}{V \sum N_i} \right)^r \left(1 - \frac{M}{V \sum N_i} \right)^{N_q - r} \quad (35)$$

となる。ここで、式 (34) と同様に、 $N_q = \sum N_i - 1$ である。この値は、最終的に

$$\alpha_0 \doteq \left(\frac{1}{2} \right) \rho \left(1 - \frac{1}{\sum N_i} \right) \quad (36)$$

で近似することができ、セルレベルの出回線帯域による統計多重効果は、すべての呼種について同一となる。

2 章で述べたように、バッファによる統計多重効果は、すべての呼種について同一となる。3.1 節で述べたように、バーストレベルの出回線帯域による統計多重効果の相違は、ピークセル速度の相違のみから生じ、ピークセル速度が最大である呼種の効果が最も小さくなる。また、本節で述べたようにセルレベルの出回線帯域による統計多重効果は、すべての呼種について同一となる。したがって、呼種間でのセル損失率の相違は、ピークセル速度の相違のみから生じ、セル損失率が最悪となる呼種は、ピークセル速度が最大である呼種となる。

以上の検討に基づき、二項分布による線形部分空間への直交射影で近似するアプローチによると、個々の呼種ごとのバーストの到着数に関する組合せパターンを忠実に求めることなく、呼種別の出回線溢れ率を求

めることが可能となる。

4. セル損失率モデル

2章および3章で、呼種間でのセル損失率の相違は、バーストレベルの出回線帯域による統計多重効果の相違を生じさせるピークセル速度の相違のみから生じることを示した。本章では、2章および3章の結果を用いて、多呼種のセル損失率近似モデルを呼種別のセル損失率近似モデルへと拡張した。

多呼種のセル損失率は、線形部分空間と直交射影のアプローチにより

$$P_{\text{loss}} = \alpha_0 \{0.4 \exp(-3\gamma_0 x_0) + 0.6 \exp(-\gamma_0 x_0)\} + \alpha \{0.4 \exp(-3\gamma x_0) + 0.6 \exp(-\gamma x_0)\} \quad (37)$$

と近似することができる²⁾。ここで、第1項と第2項がピッチ成分の代表パターンであり、第3項と第4項が包絡成分の代表パターンである。 x_0 はスイッチのバッファ長を表し、 α_0 はセルレベルの衝突による出回線溢れ率を表し、 α はバーストの衝突による出回線溢れ率を表す。 γ_0 は、ピッチ成分による待ち行列長の最大変動モードに対応する指数分布のパラメータである。 γ は、包絡成分による待ち行列長の最大変動モードに対応する指数分布のパラメータである。

式(37)において、バーストの衝突による出回線溢れ率がバーストレベルの出回線帯域による統計多重効果を反映している。2章および3章で示したように、呼種間のセル損失率の相違は、バーストレベルの出回線帯域による統計多重効果の相違のみから生じる。したがって、待ち行列長の分布およびセルレベルの出回線溢れ率は、呼種間で同一であり、バーストレベルの出回線溢れ率のみが呼種ごとに異なると見なすことができる。すると、呼種セル損失率は、式(37)の多呼種のバーストレベル出回線溢れ率を、呼種別のバーストレベルの出回線溢れ率を置き換えた

$$P_k = \alpha_0 \{0.4 \exp(-3\gamma_0 x_0) + 0.6 \exp(-\gamma_0 x_0)\} + \alpha_k \{0.4 \exp(-3\gamma x_0) + 0.6 \exp(-\gamma x_0)\} \quad (38)$$

と近似できる。

式(38)において、その他のパラメータは、文献2)における多呼種の近似と同じであり、

$$\gamma = \frac{\mu_q(1-\rho)}{\left(1 - \frac{\sum N_i \langle v_i \rangle}{\sum N_i v_i}\right) \left(1 - \frac{V}{\sum N_i v_i}\right)} \quad (39)$$

$$\gamma_0 = \frac{2\mu_0(1-\rho)}{\left(1 - \frac{1}{\sum N_i}\right) \left(1 - \frac{\rho}{\sum N_i}\right)} \quad (40)$$

$$\frac{1}{\mu_q} = \frac{\sum N_i \langle v_i \rangle \frac{(1 - \langle v_i \rangle / v_i)(1 + C_i^2)}{2\mu_i}}{\left(\sum N_i \langle v_i \rangle\right) \left(1 - \frac{\sum N_i \langle v_i \rangle}{\sum N_i v_i}\right)} \quad (41)$$

$$\frac{1}{\mu_0} = \frac{\sum N_i \langle v_i \rangle \frac{(1 - \langle v_i \rangle / V)(1 - v_i / V)}{2}}{\left(\sum N_i \langle v_i \rangle\right) \left(1 - \frac{\rho}{\sum N_i}\right)} \quad (42)$$

となる。

以上の検討に基づき、式(27)、(36)、(38)~(42)により、呼種別のセル損失率の近似値を求めることを可能とした。なお、本近似式は、式(16)において各呼種の出回線帯域による統計多重効果に対し、一般化されたEdgeworth展開による線形部分空間への直交射影に基づく近似を行っているため、本近似による各呼種のセル損失率の平均は、文献2)における多呼種の近似によるセル損失率と、厳密には、一致しない。

5. シミュレーションとの比較

本章では、本近似方法の精度を、シミュレーションと比較することにより近似モデルが使用に耐えうる精度があるかどうかを検証する。ATMの場合は、セルが断続的に到着するバーストラヒックとなり、 10^{-5} から 10^{-10} 程度のセル損失率を引き起こすためには、 10^7 から 10^{12} 程度の反復が必要となる。そこで、本論文では、文献2)と同様に大偏差原理を用いた外挿法により、 10^{-4} 程度のセル損失までの(モンテカルロ)シミュレーションにより検証する。

本シミュレーションでも、バースト長の分布の代表として、 Γ 分布^{18)~20)}と、確率変数の値が常に一定の値となるデルタ分布¹⁸⁾を選んだ。本論文において、 Γ 分布で一般分布を代表させたのは、以下の理由による。

(1) Edgeworth理論により、重み関数として Γ 分布を選ぶと、 Γ 分布と正規直交関数系であるラゲール関数で、任意の確率分布を展開することができる¹⁰⁾。

(2) 指数分布、位相 k のアーラン分布、超指数分布、デルタ分布等、通信トラヒック工学およびコンピュータの性能評価における重要な分布は、パラメータを適切に選ぶことによって、1個の Γ 分布で近似的に表すことができる²²⁾。

(3) 位相 k のアーラン分布よりもパラメータの自由度が大きく、平方変動係数 C^2 が0.75となる分布を生成することができる^{18)~20)}。

ここで、 Γ 分布の定義 $G(x)$ は

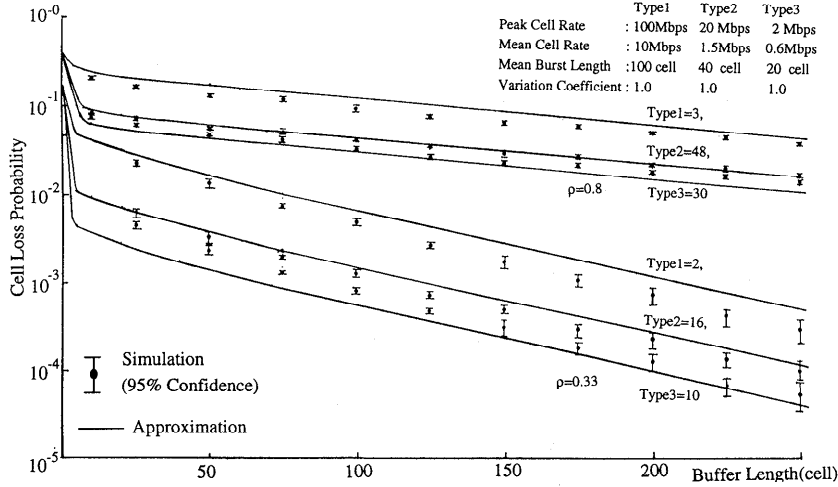


図3 シミュレーションとの比較 (指数分布)
 Fig.3 Comparison with simulation results (exponential).

$$G(x) = \frac{\exp(-\alpha x)}{\Gamma(\beta)} \alpha(\alpha x)^{\beta-1} \quad (43)$$

である ($x \geq 0, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$). Γ 分布において, β を固定したまま, やみくもに α を ∞ まで動かしても, 平均 $\rightarrow \infty$, 分散 $\rightarrow \infty$ となり, 物理的に意味のある分布にならない. そこで, 本シミュレーションでは, 平均値 M と平方変動係数 C^2 で α, β を

$$\alpha = 1/C^2 \quad (44)$$

$$\beta = 1/(MC^2) \quad (45)$$

と表し, 平均値 M を固定したままで, 平方変動係数 C^2 を 1 から 0.25 まで変化させ, 平方変動係数 C^2 が 1 のときに指数分布となり, 平方変動係数 C^2 が 0 に近づくにつれてデルタ分布に漸近するようにした.

本シミュレーションにおいて, 呼種 1 を, 高速 LAN のトラヒックと想定し, ピークセル速度を 100 Mbps, 平均セル速度を 10 Mbps, 平均バースト長を 100 セルとした. 呼種 2 を, 中速 LAN のトラヒックと想定し, ピークセル速度を 20 Mbps, 平均セル速度を 1.5 Mbps, 平均バースト長を 40 セルとした. 呼種 3 を, フレームリレーのトラヒックと想定し, ピークセル速度を 2 Mbps, 平均セル速度を 0.6 Mbps, 平均バースト長を 20 セルとした.

比較は, 呼種 1 の多重数を 3, 呼種 2 の多重数を 48, 呼種の種類 3 の多重数を 30 とした第 1 の場合と, 呼種 1 の多重数を 2, 呼種 2 の多重数を 16, 呼種 3 の多重数を 10 とした第 2 の場合について行った. 図 3 は, すべての呼種のバースト長の分布を指数分布とした場合の結果である. 図 4 は, すべての呼種のバースト長の分布をデルタ分布とした場合の結果である.

図 5 は, 呼種 1 の平方変動係数を 0.75, 呼種 2 の平方変動係数を 0.5, 呼種 3 の平方変動係数を 0.25 とした場合の結果である.

これらの結果によると, シミュレーションにおいても, 各呼種のセル損失率曲線は, バースト長の分布にかかわらず, グラフ上でほとんど平行となり, 理論で予測されたとおり, 呼種間でバッファによる統計多重効果に相違が生じなかった. また, 呼種間でのセル損失率の相違は, ピークセル速度の相違によって生じ, ピークセル速度が最大となる呼種のセル損失率が最悪となり, ピークセル速度が最小となる呼種のセル損失率が最良となった.

シミュレーション結果と比較すると, 本近似によるセル損失率は, バースト長がデルタ分布で利用率が 0.33 である場合 (図 4) を除き, バースト長の分布にかかわらず, シミュレーション結果の 95% 信頼区間にきわめて近く, かつ, 本近似による結果とシミュレーションによる結果が両者ともに直線に漸近し, ほとんど平行となったので, 本近似による結果を 10^{-5} のレベルのセル損失率から外挿したとしても, 大偏差原理により, 10^{-10} のレベルのセル損失率においても, 本近似は, ほぼ同じ程度精度で成り立つことが期待できる.

さらに, 上記の例外であるバースト長がデルタ分布で利用率が 0.33 である場合においても, バッファ長が 125 セルを超える領域において, すべての呼種について, 本近似による結果とシミュレーションによる結果が両者ともに直線に漸近し, ほとんど平行となった. したがって, この例外の場合も, 10^{-5} のレベルのセル損失率の結果を, 10^{-10} の領域に外挿したとし

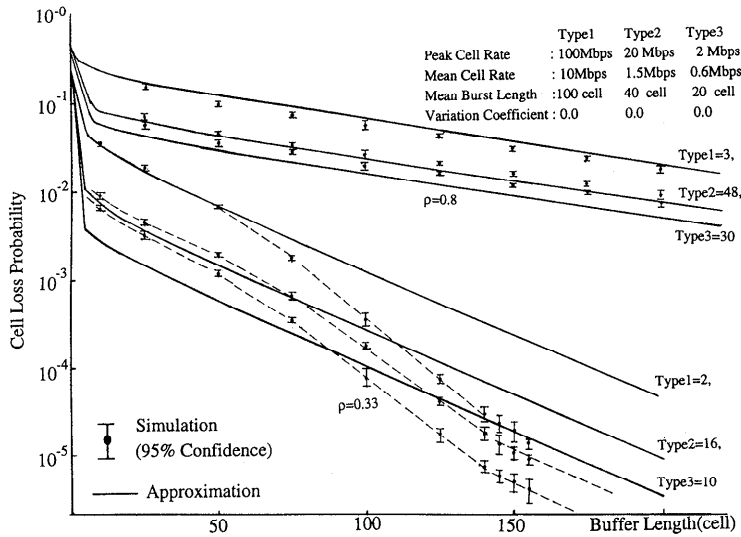


図 4 シミュレーションとの比較 (デルタ分布)
 Fig. 4 Comparison with simulation results (deterministic).

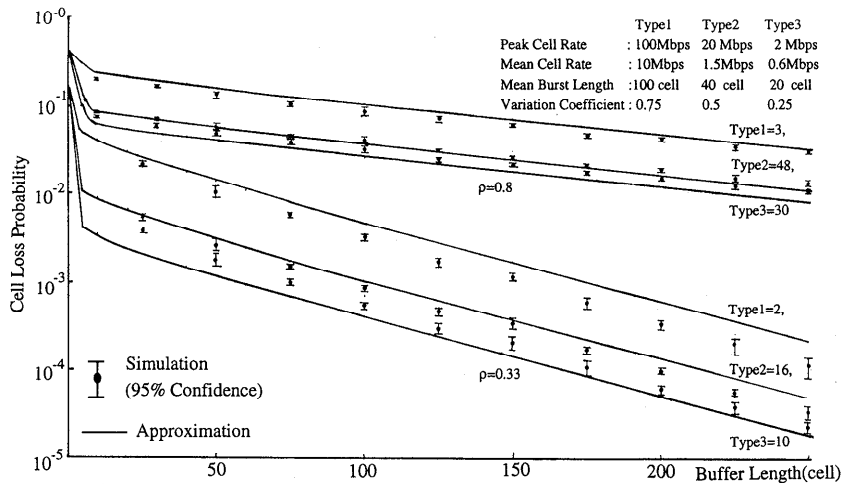


図 5 シミュレーションとの比較 (ガンマ分布)
 Fig. 5 Comparison with simulation results (Γ).

でも、セル損失率の近似誤差が著しく増大することがない。

バースト長がデルタ分布で利用率が 0.33 である場合は、本近似によるセル損失率は、シミュレーション結果の 95%信頼区間から、ほぼ 1桁 (10倍)程度外れている。本近似は、各呼種の待ち行列長の分布に対する近似を、多呼種セル損失率近似モデル 2) に用いた待ち行列長の分布を用いている。この多呼種の待ち行列長の分布の近似は、小数の法則を用いてバースト長の分布が一般分布の場合も適用可能なようにしたものである。待ち行列長の分布の近似に用いた小数の法則¹⁰⁾は、「非同期的に生じる現象が複数重なった事象

の発生間隔の分布が指数分布に漸近 (収束) すること」を数学的に保証しているが、「個々の事象の発生間隔が指数分布から離れるにつれて、重畳された事象の発生間隔の分布が指数分布に漸近 (収束) するために必要となる事象の重畳数が大きく」なる。そのために、待ち行列長の分布の近似は、バースト長の分布が指数分布に近ければ近いほど、また、多重数が大きければ大きいほど、近似精度がよくなる^{1),2)}。バースト長の分布がデルタ分布で、出回線利用率が 0.33 のときは、数値例のなかで、「バースト長の分布が一番指数分布から遠く、かつ、多重数が一番小さい」場合で、重畳された事象の発生間隔の分布が指数分布に収束するため

に必要となる重畳数に達していないために、近似式の精度が悪くなったものと考えている。

実際の運用においては、セル損失率が最悪となる呼種のセル損失率が許容セル損失率以下となるように運用する必要がある。本近似には、セル損失率が最悪となる呼種のセル損失率が、若干の安全側の近似となる傾向が見られた。したがって、本近似は、セル損失率が最悪となる呼種のセル損失率に対し、工学的には望ましい方向の近似となっている。

6. おわりに

本論文では、ヒルベルト空間理論に基づく線形フィルタのアプローチにおける線形従属性および線形部分空間への直交射影のアプローチにより、バースト長が一般分布（バースト間隔は指数分布）である場合を近似可能、かつ、呼種数が増加しても計算の爆発を起さない呼種別のセル損失率近似モデルを開発した。この開発において、大偏差原理により各呼種の待ち行列長の分布が線形従属となることを用いて、呼種間でバッファによる統計多重効果に相違が生じないことを示した。本近似モデルは、セル損失率が最悪となる呼種のセル損失率に対し、大部分、若干の安全側の近似となり、工学的には望ましい近似となった。

謝辞 本研究の機会を与えてくださった当社システム開発研究所第4部の大町部長（現在、当社情報通信事業部開発センタ長）、本研究を勧めていただいた当社システム開発研究所第4部の水原主任研究員（現在、当社情報通信事業部網管理システム部部長）、さらには、本研究に関し種々と議論していただいた当社システム開発研究所第7部の和田部長（現在、当社情報・通信開発本部分散システム開発センタ長）、第4部の佐々木部長と第4部主任研究員の宮崎博士ならびに当社情報通信事業部の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 鳩野敦生, 川北謙二, 水原 登: バースト長が任意分布である場合に適用可能なセル損失率評価モデルの提案, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10, pp.2476-2486 (1995a).
- 2) 鳩野敦生, 川北謙二: 線形部分空間と直交射影のアプローチによる多呼種 ATM セル損失率近似, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.3, pp.339-409 (1997).
- 3) 小峰隆宏, 山田 博: 音声映像混合入力下での ATM セル多重化特性の解析, 信学論文誌 (B-I), Vol.J75-B-I, No.8, pp.509-516 (1992).
- 4) Bae, J.J., Suda, T. and Simha, R.: Analysis of Individual Packet Loss in a Finite Buffer Queue with Heterogeneous Markov Modulated Arrival Processes, *Proc. INFOCOM '92*, pp.219-230 (1992).
- 5) Kofman, D. and Korezioglu, H.: Loss Probabilities and Delay and Jitter Distribution in a Finite Buffer Queue with Heterogeneous Batch Markovian Arrival Processes, *Proc. GLOBECOM '93*, pp.830-834 (1993).
- 6) Yang, T. and Li, H.: Individual Cell loss Probabilities and Background Effect in a ATM Networks, *Proc. ICC '93*, pp.1373-1379 (1993).
- 7) Shoch, J.F. and Hupp, A.: Measured Performance of an Ethernet Local Network, *Comm. ACM*, Vol.23, No.12, pp 771-721 (1980).
- 8) Bucklew, J.A.: *Large Deviation Techniques in Decision, Simulation, and Estimation*, John Wiley & Sons (1971).
- 9) 小谷真一: 大偏差原理とはなにか, 数理科学, No.380, pp.5-8 (1995).
- 10) 竹内 啓: 確率分布の近似, 教育出版 (1975).
- 11) 長尾 真 (編): パターン認識と図形処理, 2章, 岩波書店 (1983).
- 12) Zadeh, L.A. and Densoer, C.A.: *Linear System Theory*, McGraw-Hill (1963).
- 13) Jordan, S. and Jiang, H.: Connection Establishment in High-Speed Networks, *IEEE JSAC*, Vol.13, No.7, pp.1150-1161 (1995).
- 14) Murase, T., et al.: A Call Admission Control Scheme for ATM Networks Using a Simple Quality Estimate, *IEEE JSAC*, Vol.9, No.9, pp.1461-1470 (1991).
- 15) 村瀬 洋: 古くて新しい画像認識法, 情報処理学会誌, Vol.38, No.1, pp.54-60 (1997).
- 16) Deshuang, H.: The Statistical Properties of the Learning Subspace Methods for Pattern Recognition, *Trans. IPS Japan*, Vol.37, No.6, pp.1081-1087 (1996).
- 17) Lucantoni, D.M., et al.: Methods for Performance Evaluation of VBR video Traffic Models, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.2, No.2, pp.176-180 (1994).
- 18) 岩波数学辞典 (第3版), pp.114, 1187, 岩波書店.
- 19) Kobayashi, H.: *Modeling and Analysis: An Introduction to System Performance Evaluation Methodology*, pp.108-112, Addison-Wesley (1978).
- 20) 藤木正也, 雁部頼一: 通信トラヒック理論, p.17, 丸善 (1980).
- 21) MacDougall, M.H., 小林 誠 (訳): *Simulation Computer Systems: Technique and Tools*, p.54, 工学社 (1990).
- 22) Heffes, H. and Lucantoni, D.: A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multi-

plexer Performance, *IEEE JSAC*, Vol.4, No.6, pp.856-868 (1986).

(平成9年3月17日受付)

(平成9年11月5日採録)



鳩野 敦生 (正会員)

昭和57年電気通信大学電気通信学部物理工学科卒業。昭和59年同大修士課程物理工学専攻修了。同年(株)日立製作所入社。同社システム開発研究所および同社情報通信事業部においてATMネットワークの開発に従事。現在、郵政省通信総合研究所YRC第4研究チームに出向中。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



川北 謙二 (正会員)

昭和53年東京工業大学工学部制御工学科卒業。昭和55年同大修士課程システム科学専攻修了。同年(株)日立製作所入社。同社システム開発研究所において通信ネットワークの研究開発に従事。現在、同4部主任研究員。電子情報通信学会会員。