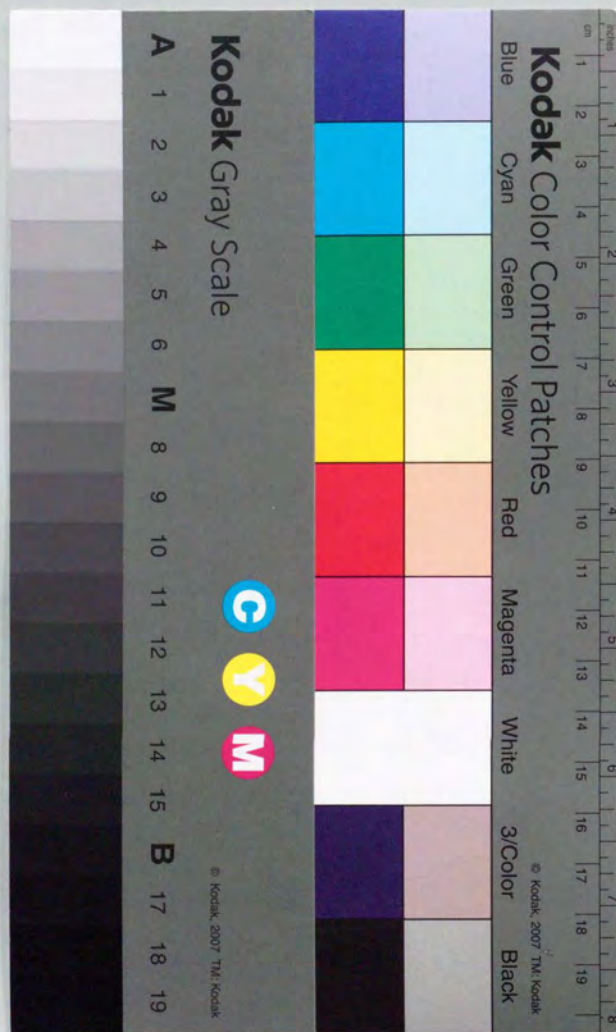


ATMにおけるバーストラヒックの解析と
その制御法に関する研究

平成8年1月

阿部俊二



①

ATMにおけるバーストラヒックの解析と その制御法に関する研究

平成 8 年 1 月

阿部 俊二

Outline

A Study on Analyzing and Controlling Burst Traffic in ATM

Much effort is now being put into the research and development of multiplexers and switching systems that use asynchronous transfer mode (ATM) technology. Such systems are required to establish a B-ISDN (broad-band ISDN) and multimedia computer network. No satisfactory method of traffic control to assure the quality of services required by all telecommunication media, has yet been developed. Research and development into traffic control methods for ATM are, therefore, urgently required.

This thesis describes the results of research on a traffic control method which can assure the quality of telecommunication services that uses ATM technology.

Chapter 1 is an introduction describing the problems of applying traffic control to ATM by comparing ATM switching system with conventional STM switching and packet switching systems. This chapter clarifies the objectives and context of the research and how it fits into the structure of telecommunication technologies.

In Chapter 2, we present a new method of analyzing the traffic characteristics by approximating the multiplexed (superposed) burst traffic flow using the renewal process. This is significant because understanding the traffic characteristics of multiplexed burst traffic is an important factor in the design of an ATM traffic control method. Up to now, the QNA and Albin methods have been used for an approximate analysis by the renewal process. These are relatively simple methods using the average and secondary moment of traffic flow. For burst

traffic in ATM, however, the traffic flow cannot be approximated only well enough using the average and secondary moment.

The method presented in this chapter approximates burst traffic and its superposing process by taking account of the tertiary moment, thus enabling more accurate modeling to take place. This chapter describes a simple method for estimating the secondary and tertiary moments, using an index of dispersion for counts (IDC). The effectiveness of the proposed analysis is demonstrated by comparing its delay characteristics with those obtained using computer simulation.

In addition, the traffic characteristics versus the number of multiplexed burst calls were investigated using the proposed analysis method. The results show that the influences of burst can be almost ignored for an intermediate load under 70%, provided that the number of multiplexed burst calls is less than 1000. As the speed of the transmission path increases, therefore, the telecommunication quality becomes less susceptible to burst, and statistically higher multiplexing effects can be expected.

Chapter 3 describes a long-term congestion control method. This can be used to prevent deterioration of telecommunication quality for a certain period during which burst traffic statistics, such as average and dispersion values, can be handled as stable values.

In the case of long-term congestion control, the following are assumed: Before starting a telecommunication, the user notifies the public network (local switch) of the bandwidths required for the telecommunication, including the maximum and average bandwidths for the telecommunication traffic; the local switch then determines whether the telecommunication quality can be assured, from the bandwidths notified by the user, thus accepting or rejecting the call from the user. It is, however, difficult for all users to notify the telecommunication bandwidths exactly. If all users could precisely notify the telecommunication bandwidths, the traffic condition at entry to the public network might substantially differ from the original traffic generated by the user terminal. This type of problem occurs due to the effects of passing through various customer networks between the public network and the user terminal. Indeed,

the bandwidth information as notified by the user may no longer be intelligible enough for the local switch to determine whether to accept or reject the call from the user.

To avoid this type of problem, we present an intelligent call admission control method, as follows: The local switch measures the user traffic statistics, corresponding to the bandwidth information notified by the user, from the user telecommunication traffic pattern at the entry to the public network, and then stores these data. The local switch can thus autonomously determine the traffic statistics, for the telecommunication media notified by the user. In this chapter, we also propose an algorithm to determine whether to accept or reject a call depending on the traffic statistics. This algorithm predicts congestion by means of a combination of Gauss and Poisson distributions. Statistical multiplexing effects corresponding to a high-speed transmission path can be replicated with this algorithm. The results obtained from Chapter 2 are used in this algorithm.

Chapter 4 describes a short-term congestion control method. This can be used to prevent instantaneous deterioration of telecommunication quality, such as caused by several ATM cells arriving simultaneously when burst traffic is multiplexed. For short-term congestion control, we propose a congestion prevention method using read and write control based on whether the cell is privileged or non-privileged in the buffer of the ATM switching node. This method is suitable because telecommunication quality degrades very rapidly. The effectiveness of this method was shown by evaluating the cell loss rate characteristics, versus time, using computer simulation. As a result, this method is effective in assuring the quality of those services for which instantaneous cell loss greatly affects the quality, such as VBR dynamic image processing.

Chapter 5 describes switch configuration and control methods for ATM, that contribute to assuring the telecommunication quality. As a switching configuration method, we present MSSR, consisting of a multilink connection of switch modules based on self-routing principle. This configuration enables high-speed switching for each cell and prevents deterioration of the communication quality due to instantaneous load variation, caused by burst traffic. This

configuration can also be expanded flexibly. The effectiveness of MSSR is shown by comparing it with other switch configuration methods from the viewpoint of the expansibility and the quality deterioration prevention capability against instantaneous load variation.

To employ multilink connection of switch modules, the routing of MSSR must be controlled by balancing the load for each link, so as to prevent congestion from occurring easily within MSSR. This chapter shows that simply balancing the average load is not sufficient when burst traffic is being superposed, as in the case of ATM. Balanced routing that takes account of the variation (dispersion) in load is thus important. Route assignment to unify the number of calls for each media (call type) is described, as a method of balancing the average and dispersion of the load relatively easily.

Chapter 6 is a conclusion. The results of the research are summarized and problems yet to be solved are described.

内容梗概

B-ISDN (広帯域 ISDN) の実現やマルチメディア・コンピュータ・ネットワークの実現に向けて, ATM (Asynchronous Transfer Mode: 非同期転送モード) 技術を採用した多重化装置や交換機等の研究ならびに実用化開発が活発に進められている. しかし, 各通信メディアが要求する通信品質を保証するトラヒック制御法に関して, 必ずしも十分に満足 of いく制御方式が得られておらず, ATM におけるトラヒック制御の研究開発が急務である.

本論文は, ATM 技術を基本とする通信における通信品質保証のためのトラヒック制御法の研究の成果をまとめたものである.

第1章序論では, 従来の STM を基本とする回線交換方式ならびにパケット交換方式と, ATM 交換方式との比較により, ATM におけるトラヒック制御を実現する上での問題点を述べ, 本研究の目的と意義を明確にするとともに, 本研究の位置付けを行った.

第2章では, ATM のトラヒック制御法を考える上で, パーストラヒックを多重した場合のトラヒック特性を把握することが重要となることから, パーストラヒックを多重 (重畳) したトラヒック流を再生過程で近似し, トラヒック特性を解析する手法を新たに提案した. 従来, このような解析は QNA や Albin 法が良く知られている. これらの手法は, トラヒック流の平均と2次モーメントを用いた比較的簡便な方法ではあるが, ATM で扱うパーストラヒックにおいては, 平均と2次モーメントの2つのモーメントだけでは十分に近似できないと言った問題がある.

本章で提案した手法は, パーストラヒックならびにその重畳過程を, 3次までのモーメントを用いて近似するため, パーストラヒックをより厳密にモデル化できる. 2次および3次のモーメントの推定法として, IDC (Index of Dispersion for Counts: 変動指数) から簡便に推定する方法について述べるとともに, 計算機シミュレーションとの遅延特性比較より提案法の有

効性を示した。

さらに、提案解析手法を用いて、バーストラフィックの多重数によるトラフィック特性の把握を行い、70%程度以下の中負荷では、1000以下の多重数でバーストの影響をほぼ無視できることが明らかになった。このことから、高速な伝送路ほどバーストによる品質劣化の影響が少なく、より統計多重化効果が期待できることが判明した。

第3章では、バーストラフィックの平均や分散等の統計量が安定量として扱うことができる程度に十分長い期間の通信品質劣化を回避する長期品質制御法を議論する。

長期品質制御では、ユーザが通信を始める前に、その通信に必要な帯域(最大帯域や平均帯域等)を網(交換機)に申告し、交換機はユーザの帯域申告値から通信品質の保証が可能か否かの判断によりユーザ通信の受け付けを判断すると言った方法が考えられている。しかし、通信を要求する全てのユーザが通信帯域を厳密に申告することが非常に困難であることが予想される。さらに、たとえユーザが厳密な申告ができたとしても網とユーザ端末間に形成される様々な宅内系ネットワークの影響により、ユーザ端末の発生するトラフィックの状況と網(交換機)入り口との状況が著しく異なる可能性があることから、ユーザ申告値が交換機での通信受け付け判断にほとんど意味をなさないと考えた問題がある。

そこで、本章では、網の入り口の部分でユーザ通信のトラフィックパターンを観測することで、ユーザ申告値に対応するトラフィック統計量の測定と学習をし、ユーザの通信メディア等の申告により交換機が申告メディアに対応したトラフィック統計量を自律的に決定して受け付け判断する知的呼受け付け制御法を提案した。さらに、トラフィック統計量から呼受け付けの判断を行うアルゴリズムとして、第2章の結果を反映させ、高速伝送路に対応した統計多重化効果が期待できるガウス分布とポアソン分布の組み合わせによる輻輳予測を用いた方法を提案した。

第4章では、長期品質制御では回避困難であるバーストラフィックの多重化時に複数のATMセルの同時到着により生じる瞬時的な通信品質劣化を回避する短期品質制御法を議論する。通信品質の劣化がかなりの短期間で生じることを考慮し、ATM交換機スイッチバッファでのセルの優先/非優先に基づいた書き込み・読み出し制御による輻輳回避法を提案した。セル廃棄率の時間特性を計算機シミュレーションで評価することにより、その有効性を示した。VBR動画像等のような瞬時的なセル廃棄に品質が大きく影響するサービスの品質保証法として有効である

ことが確認できた。

第5章では、通信品質保証の観点を中心にATMに対応したスイッチ構成法ならびにスイッチの制御法について議論する。スイッチ構成法に関しては、ATMによる通信の特徴を十分に考慮し、セル毎の高速なスイッチング、バーストラフィックによる瞬時的な負荷変動による通信品質劣化耐力ならびに規模の柔軟な拡張性を有する自律型スイッチモジュールの多段リンク接続からなるMSSRを提案した。交換機の大容量化に向けての規模の拡張性とバーストラフィックの瞬時的負荷変動に対する品質劣化耐力の観点から他方式と比較し、MSSRの有効性を示した。

MSSRのルーティング制御法に関して、スイッチモジュールの多段リンク接続構成を採用するため、MSSR内に輻輳が容易に生じないように各リンクの負荷をバランス化するルーティング法が必須となる。ATMのようにバーストラフィックが混在する場合には、単純に平均負荷をバランス化するだけでは十分でなく、負荷の揺らぎ(分散)も考慮してバランス化するルーティング法が重要であることを示すとともに、その方法を検討する。比較的簡便に負荷の平均と分散をバランス化できる方法として、メディア(呼種)毎の個数が均等化するように各ルート割り付ける方法を示した。

第6章は、結論であり、本研究で得られた成果をまとめるとともに今後の残された課題について述べる。

目次

1 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 ATM の原理	1
1.1.2 トラヒック制御の必要性	3
1.2 本研究のねらい	5
2 ATM における多重化バーストラヒックの解析	7
2.1 緒言	7
2.2 重畳過程を再生過程で近似するための平方変動係数の推定	11
2.2.1 基本的考え方	11
2.2.2 平均残余稼働時間を用いた推定法	14
2.2.3 規格化残余仕事量 (NMW) を用いた推定法	17
2.2.3.1 NMW の軽負荷近似	19
2.2.3.2 NMW の重負荷近似	20
2.2.3.3 組み合わせによる時間長の決定	21
2.3 重畳過程を再生過程で近似するための3次モーメントの推定法	22
2.3.1 規格化増分等価法	23
2.3.2 定常法	23
2.4 モーメントマッチングによる平均待ち時間近似	24
2.5 数値例による近似法の検証	25
2.6 重畳数によるバーストラヒックの影響	31

2.7 結言	36
3 ATM 通信における長期品質制御方式	38
3.1 緒言	38
3.2 トラヒック申告による長期品質制御の問題点	39
3.3 問題解決へのアプローチ	40
3.4 品質保証制御方式	43
3.5 知的呼受け付け制御方式	44
3.5.1 ガウス分布による輻輳予測	46
3.5.2 ボアソン分布による輻輳予測	50
3.5.3 トラヒックパラメタ測定と推定法	55
3.5.4 ガウス・ボアソン組み合わせによる呼受け付け判断アルゴリズム	57
3.6 結言	61
4 ATM 通信における短期品質制御方式	62
4.1 緒言	62
4.2 セル廃棄率の時間特性	62
4.3 多閾値つきバッファ制御メカニズムによる短期輻輳制御法	65
4.4 短期輻輳制御法の有効性の評価	65
4.5 結言	72
5 ATM 交換スイッチ構成と制御方式	73
5.1 緒言	73
5.2 ATM 対応スイッチ方式 (MSSR 方式)	74
5.2.1 スイッチ構成上の考慮点	74
5.2.2 多段自己ルーティングスイッチ方式	75
5.2.2.1 自己ルーティングスイッチモジュール構成比較	76
5.2.2.2 多段自己ルーティングスイッチ構成比較	78
5.3 MSSR における品質制御法	80

5.3.1 ルーティング制御上の要件	81
5.3.2 負荷の平均と変動のバランス化ルーティング法	83
5.4 結言	85
6 結論	86
謝辞	89
参考文献	90
関連発表論文	99

第1章

序論

1.1 研究の背景

研究の背景として、ATMの基本原理について触れ、ATMのトラフィック制御の必要性について述べる。

1.1.1 ATMの原理

ATM(Asynchronous Transfer Mode:非同期転送モード)は、1990年にCCITT(現在のITU-T)で、広帯域ISDN(B-ISDN)実現に適用される転送モードとして合意された基本技術であり、従来の回線交換で代表される回線モードとパケット交換のパケットモードの長所を合わせ持っている。B-ISDNでは、音声、データ、画像、固定速度動画、可変速度符号化(VBR)動画等の低速から高速までの速度とバースト性の異なるトラフィックを効率的に伝送・交換することが要求される。

回線モードでは、周期的に配置されたタイムスロットから構成されるハイウェイ上の毎周期同一のタイムスロット位置に、音声等のユーザ通信情報を乗せ、伝送・交換される。ユーザ情報を乗せるタイムスロット位置はチャンネルと呼ばれる番号で識別され、またチャンネルは通信要求の呼設定時にend-to-endで一意に決められる。このようにチャンネルとタイムスロット位置は一对一に対応するため、交換などの処理はタイムスロット位置の入れ替えを行えばよく、一周期内にあるタイムスロットを識別するカウンタで一周期分記憶したメモリのread/writeの制御

で簡便に、且つ高速化が容易なハードウェアで実現できる。

しかし、毎周期同一タイムスロットに一つのユーザ情報を割り付けるため、データのように間欠的(バースト的)にユーザ情報を発生するメディアについては、情報が発生しないにも拘わらずタイムスロットが占有されるので効率の良い伝送ができない。さらに、動画像のように音声より高速な情報を発生するメディアを送送・交換する場合、同時に複数のタイムスロットを割り付ける必要があり、通信するのに必要なタイムスロット数が空いていても、入力ハイウェイと出力ハイウェイ間の同一位置のタイムスロットが空いていなければ使用できないと言ったブロッキングの問題がある。また、このブロッキングを回避するには複雑な制御が必要となる欠点がある。

パケットモードは、データのように情報が間欠的に発生するバースト性を有するメディアの通信に向いており、情報が発生する毎にパケットにユーザ情報を乗せ伝送・交換する。したがって、網リソースを有効に利用できる。しかし、パケットモードで用いられるプロトコル、X.25、はエラーレート品質のそれほど良くない伝送路を想定しているため、品質の確保から伝送エラー検出やエラー時の再送制御などをソフトウェア制御により行っている。したがって、end-to-endの転送遅延ならびに遅延揺らぎをそれほど小さくできない。このため、音声や動画像のようにリアルタイム性が厳しい情報の遅延品質確保が難しいと言う問題がある。

以上のことから、ATMは、回線交換でのスイッチングの高速性とパケット交換での網リソースの有効利用の利点を持ち合わせた以下の原則から成っている。

- ユーザ情報を固定長(53バイト)のパケット(ATMではセルと呼ぶ)に乗せ伝送する。パケットモードと同様に、ユーザ情報が発生したときにのみセルを発生させるため、網リソースの有効利用が図れる。またセルを固定長とすることで、セル位置検出によるセル同期が容易となり、ハードウェアによる高速スイッチングに向く。
- ユーザ情報の識別は、53バイトのセル内の5バイトのヘッダ内のVCI(Virtual Channel Identification)で行われ、回線交換と同様に呼設定時にend-to-end間で一意に決められる(コネクション・オリエンテッド)。このため、セル毎の経路制御が不要となりセルの高速転送が可能となる。
- 高品質な光ファイバー伝送路を前提とし、網内でのエラー制御ならびにフロー制御のプ

ロトコル処理を行わない。スイッチングに係わるソフトウェア処理を無くすことで高速ハードウェアスイッチングを実現する。

図1.1にSTMとATMの伝送の違いを示し、図1.2にATMの基本的な通信のしくみを示す。

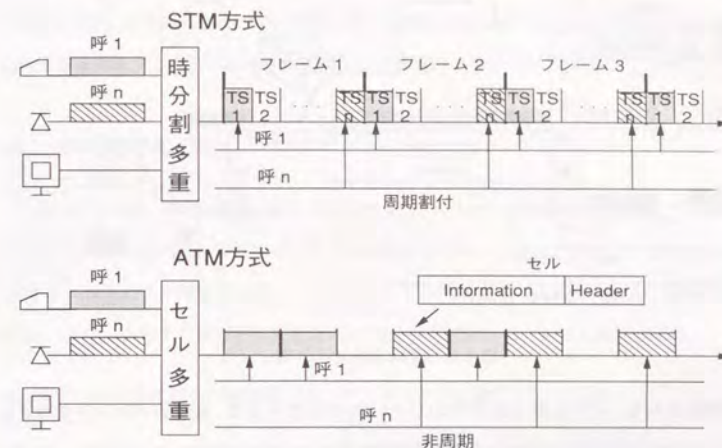


図 1.1: STM と ATM の原理の違い

1.1.2 トラヒック制御の必要性

ATMは回線交換と同様にコネクション・オリエンテッドであり、パケット交換のように統計多重により網リソースを有効利用可能な技術である。回線交換では、固定速度のメディアを扱うのが基本であり、呼設定時にメディアに必要な速度(帯域)のコネクションをend-to-endに設定すれば、通信中は他のコネクションの影響によらず、通信品質は一定に保たれる。

しかし、ATMでは、セルによる統計多重により網リソースの使用の効率化を図るため、同一伝送路に設定された複数のコネクション間で相互に影響し合い、そのままでは必要な通信品質が保たれない。すなわち、複数コネクションから到着するセルの同時到着による衝突が生じ、

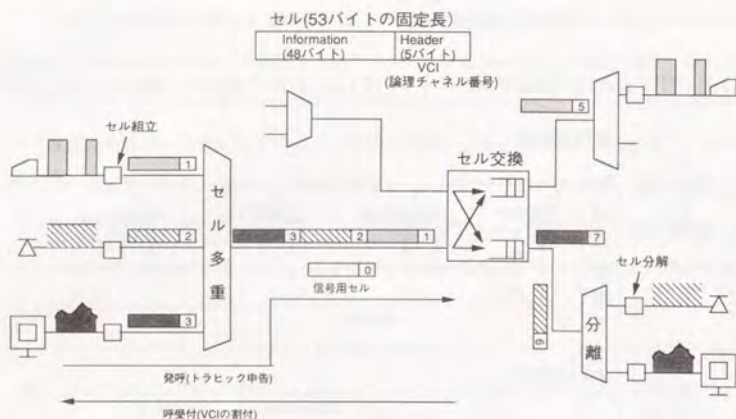


図 1.2: ATM 通信のしくみ

セルが廃棄される。これを避ける為にはバッファが必須となる。従来のパケット交換では、バッファの輻輳状態に応じてパケット送出を抑制するフロー制御が行われる。しかし、ATM セルは 155.52Mb/s の速度で高速に伝送されるため、フロー制御が効き始めるまでに相当数のセルが廃棄される可能性があり、フロー制御は有効でない。また、フロー制御はセル転送遅延揺らぎを大きくする原因となり、リアルタイム性を必要とする通信には好ましくない。

このようなことから、ATM では、コネクションの設定が行なわれる呼受け付け時に、ユーザから通信すべく情報の必要帯域として情報の最大速度、平均速度、バースト度合い等をトラフィックパラメタとして申告してもらい、網（交換機）側で、申告パラメタを下に通信品質が保証できるか否かの判断によりコネクション設定を行う。これをコネクション（呼）受付制御（Connection Admission Control, または Call Admission Control: CAC）と言っている。さらに、通信中の品質の保持をするために、ユーザが申告したトラフィックパラメタで通信しているか監視を行う UPC (Usage Parameter Control) 機能が必須となる。

CAC での呼受け付けの判断基準となる通信品質としては、155.52Mb/s 以上の高速な伝送路を用いる場合、リアルタイム性を要求する通信の遅延品質はほぼ満たされる状況にあるため、

セル廃棄率を考えるのが通常である。最近では、155.52Mb/s をバーチャルパス (VP) で分割し、155.52Mb/s より遅い仮想伝送路による運用が考えられることや、ATM 技術を無線通信に応用したワイヤレス ATM の研究 [97] が行われるようになり、遅延品質も含めて考える必要性が出てきている。

ATM では、上述のように従来には無い新しい考えに従ったトラフィック制御法が必要であり、ATM 通信を実現する上でトラフィック制御は重要課題の一つとなっている。

1.2 本研究のねらい

本研究の目的は、通信品質を保証するための ATM トラフィック制御の実現にある。特に、CAC を実現していくためには、複数のバースト性を有するコネクションが多重された場合のセル品質に係わるトラフィック特性を把握し、その特性を十分に考慮して CAC の方法に反映する必要がある。また、これまで検討されてきた CAC [34]–[44] では、以下の点に問題がある。

- (1) 全てのユーザに対して厳密なトラフィックパラメタ申告の期待ができない。
- (2) ユーザが厳密にパラメタの申告をして、正確にパラメタ通りにトラフィックを発生させたとしても、交換機とユーザ端末間での宅内ネットワークの影響により、端末でのトラフィック発生パターンと交換機側での発生パターンが著しく異なる場合があり、有効な申告パラメタとならない。
- (3) CAC はトラフィック統計量の申告を基本とするため、トラフィック統計量が安定する程度の十分長い時間での輻輳回避手段である。バーストラフィックは、比較的短い時間でそのトラフィック強度を変化する特徴があり、短期間での他バーストとの衝突により生ずる輻輳の回避が困難である。

まず、バーストラフィックの多重化におけるトラフィック特性の把握としては、計算機シミュレーションで行う方法、近似理論解析で行う方法が考えられる。計算機シミュレーションで行う場合、多重するバーストラフィックの数が多くなると膨大な計算時間が必要となり、かなりの困難がともなう。近似解析による方法としては、IPP（断続ポアソン過程）[17, 24] や対称型

超指数分布 (対称型 H_2) [9]–[13] による再生過程近似法, MMPP (マルコフ変調ポアソン過程) [27, 55], PH-MRP (位相型マルコフ変調再生過程) [54] 等が提案されている。IPP では, 多重数に依存した確率ベクトルを用いて解析されるため, 多重数が大きい場合に計算時間が大きく, さらに数値演算誤差を小さくするために計算手法にかなりの工夫が必要となる。対称型 H_2 については, 計算は非常に簡便となるが, 近似精度がそれほど良くない。MMPP および PH-MRP については, モデル化のために 4 つのパラメータを決定する必要があり, その決定方法が明確でないとといった問題がある。

そこで, 第 2 章では, バーストラヒックの多重化における遅延に関するトラヒック特性を効率的に, 且つ良好な近似精度で評価可能とすることを目的として, バーストラヒックの解析手法を提案する [61]。

次に, 問題 (1) と (2) を解決するために第 3 章では, ユーザのトラヒックパラメータの申告なしに, ユーザの通信メディアの申告により, 交換機側でユーザの通信メディアに適したトラヒックパラメータの自律的な決定から受け付け判断を行う知的呼受付制御方式 [32, 67] を提案するとともに, 第 2 章の結果を応用し, ガウス分布とポアソン分布の組み合わせによる輻輳予測に基づいた呼受け付け判断アルゴリズム [32] を提案する。

問題 (3) の解決のために第 4 章では, 瞬時的なセル品質の劣化の動きを考慮し, セルの優先/非優先に基づいたバッファ読み・書き制御による高速制御可能な方法 [32, 65, 66] を提案する。シミュレーションによるセル廃棄の時間特性評価により, 提案方法の有効性を示す。

さらに第 5 章では, 輻輳が発生がしにくいスイッチ構成法ならびに制御法について述べ, その構成法として自律型スイッチモジュールの多段リンク接続構成 (MSSR) [70, 71, 72, 73, 74, 68] を提案し, MSSR 内のルーティング制御法 [64] を述べる。

最後の第 6 章で本研究のまとめとする。

第 2 章

ATM における多重化バーストラヒックの解析

2.1 緒言

バーストラヒック[†]を多重化した場合のトラヒック解析を行う場合, バーストラヒックのモデル化, 多重化バーストラヒックのモデル化, ならびにトラヒック特性を得るための解析手法が重要となる。

図 2.1 に示すようなトラヒック発生に関する階層化モデルにより, バーストラヒックの基本的な振舞いを考えることができる。例えば, 有音と無音検出による 32kb/s 符号化 ADPCM 音声を考えると, 電話通信の要求 (発呼) がコールレベル, 電話の通信中に有音と無音と言うように音声情報の間欠的な発生 (ON-OFF 発生) を表すのがバーストレベル, 情報の発生区間のみセルが発生するセルレベルとなる。また, ファイル転送のような ftp を用いたデータ通信でも, ftp セッションをコールレベルと考え, ファイル転送中のブロック (またはパケット) 転送がバーストレベル, ブロック転送区間にデータがセルに寄せられ運ばれるセルレベルとモデル化できる。

ATM のバーストラヒックの解析では, セルレベルのバーストラヒックのモデル化をす

[†]本論でのバーストは, 発生間隔の平方変動係数 (C_s^2), または $(0, t]$ の発生数の変動指数 ($I(t)$) が 1 より大きい場合を意味している。

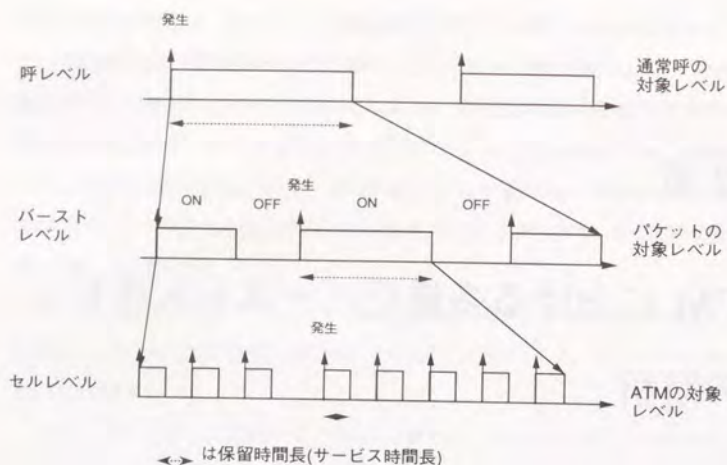


図 2.1: バーストラヒックの考え方

る必要がある。幾つかのモデル化が提案されており、まとめて図 2.2 に示す。バーストレベルで情報が ON-OFF 発生することの観点と、ある時間区間毎にセルの発生率が異なる (MMPP モデル) という観点からセルのモデル化を大別している。ON-OFF モデルについては、ON 区間と OFF 区間の区間長の分布と、さらに ON 区間でのセルの発生分布で分類している。MMPP については、相異なる発生率の設定数 (位相数) で区別した。ただし、IPP は、MMPP の特殊な場合であり、ON 区間長と OFF 区間長が共に負の指数分布で、ON 区間でのセルの発生分布がポアソンの場合と一致する。

ADPCM 音声やファイル転送等のデータは、ON-OFF モデルの代表例で、ON と OFF の区間長が負の指数分布、ON 区間でのセル発生を一定およびポアソン分布でほぼモデル化できる。モデル化パラメタとしては、ON 区間と OFF 区間のそれぞれの平均区間長と ON 区間でのセル発生率の 3 つである。さらに、OFF 区間長を一般分布とする事で、VBR 動画像のモデル化も可能となる。たとえば、動画像情報が一定フレーム周期で異なる情報を発生する場合、各フレーム毎の情報発生区間を負の指数分布として、次の情報が発生するまでの残り時間長を一般分布に従った OFF 区間としてモデル化できる。OFF 区間長を一般分布とする場合のモデル化

モデル			モデル化パラメタ数	適用可能バーストソース	
ON-OFF モデル ON OFF ON ↑↑↑ ↑↑↑	ON区間、OFF区間が負の指数分布	ON区間中一定発生	3	音声バースト	
		ON区間中ポアソン発生	3	音声バースト、データ	再生過程
	ON区間：負の指数分布 OFF区間：一般分布	ON区間中一定発生	≥ 3	VBR動画像、データ	
		ON区間中ポアソン発生	≥ 3	VBR動画像、データ	
MMPP モデル 位相1 位相2 ↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑↑	IPP		3	音声バースト、データ	非再生過程
	2 位相		4	VBR動画像	
	m 位相		≥ 4	VBR動画像	

図 2.2: バーストラヒックモデル化の動向

パラメタ数としては、OFF 区間の一般分布を決定するために平均長のみで決定出来ないため、4 つ以上必要となる。しかし、VBR 動画像の場合は、フレーム周期と ON 区間の平均長、そして ON 区間のセル発生率の 3 つのパラメタでモデル化が可能である。

MMPP モデル (2 位相以上) は、VBR 動画像等のある時間区間毎にセルの発生率の異なるバーストラヒックをモデル化するのに適している。しかし、モデル化するのに必要なパラメタは最低でも 4 つ必要であり、さらにパラメタの決定に一般的手法が無いことに難しさがある。

多重化バーストラヒックに関しては、MMPP[27, 8], N-IPP[17], H_2 [9, 11, 12] などの近似法がある。

文献 [27], [8] は ADPCM 音声の多重化を 2 位相 MMPP で近似し、解析を行っている。2 位相 MMPP でモデル化するには、各位相へ遷移する確率 (各位相が継続する平均時間長)、と各位相でのセルの平均発生率の 4 つのパラメタを決定する必要がある。文献 [27] では、有限時間 t_1 と t_2 におけるセル発生数における分散と 3 次モーメントを用いてパラメタを決定しているが、時間長 t_1, t_2 の決定方法が明確でなく、ADPCM 音声以外のバーストに有効かどうかは不明である。文献 [8] は、時間長 $t = 0$ と $t = \infty$ に関する分散指数 (Index of Dispersion for

Counts:IDC) と歪み指数 (Index of Skewness for Counts:ISC) を用いて決定している。しかし、ADPCM 音声多重以外での検証がなされていない。

N-IPP は、ADPCM 音声バーストを IPP で近似し、その多重化を N-IPP 過程で解析しているが、トラヒック特性の計算にマトリックス法 [18] を用いるため、多重数が多い場合に計算時間が膨大となる。

図 2.2 で示した ON-OFF モデルに基づくバーストラヒックは、再生過程として知られている [1]。再生過程をなすトラヒックモデルにおいて、バースト性の強いトラヒック発生をモデル化するのに 2 次の超指数分布 (H_2) がよく使われる。 H_2 は 3 つのパラメタにより完全に分布の型が決定されるが、対称条件 [19] を考慮すると 2 つのパラメタで分布型を決定することができる。2 つのパラメタで決定された H_2 は対称型 H_2 と呼ばれている。これに対して、3 つのパラメタにより決定された H_2 を非対称型 H_2 と呼んでいる。

バーストラヒックを対称型 H_2 でモデル化し、さらにその多重化トラヒックも対称型 H_2 で近似してトラヒック解析を行う手法として Whitt の QNA や Albin 法 [9, 11, 12] がよく知られている。これらの方法は、バーストラヒックと多重化トラヒックをそれぞれ 2 つパラメタでモデル化できること、さらに古くからよく研究されている再生入力の待ち行列システム ($H_2/G/1$) の多くの研究成果を用いて多重化のトラヒック特性を求めることができることなど、簡便で実用的である。しかし、少なくとも 3 つのパラメタを必要とする ON-OFF モデルを、2 つのパラメタでしか近似できないため、トラヒック特性評価の近似精度がそれほど良くない。さらに、今後のマルチメディア通信の環境を考えると、様々なバースト性を持つトラヒックの発生が予想されることから、2 つのパラメタによるモデル化には限界があると考えられる。

本章では、バーストラヒックのモデル化に対する広範囲な適応性、モデル化パラメタの少なさ、トラヒック解析の簡便性、そして近似の高精度化を考慮して、再生過程である非対称型 H_2 を用いたバーストラヒックの解析法について提案する。バーストラヒックの非対称型 H_2 へのモデル化は、バーストラヒックと非対称型 H_2 のそれぞれの到着過程に関する 3 次までのモーメント (平均 (λ), 平方変動係数 (C_a^2), 歪み度 (Sk)) を一致させることで行う (これをモーメントマッチング法と言う)。したがって、バーストラヒックの重畳過程は非対称型 H_2 の重畳過程として考えることができる。そこで、非対称型 H_2 の重畳過程を H_2 でモデル化

する新たな近似法と、その近似法を応用して $\sum H_2/G/1$ システムの性能を評価する方法について述べる。

重畳過程を H_2 で近似するには、重畳過程を H_2 で近似するための平均、平方変動係数、歪み度と言った 3 次までのモーメントが必要となる。重畳過程を H_2 で近似すべく平方変動係数 C_{an}^2 を、時間区間 $(0, t]$ に到着する点過程 (セル数) の変動指数 $I(t)$ から推定する。このとき、時間長 t をどのように決定するかが問題となる。重畳過程については、その到着に相関があるため、厳密には再生過程を成さない。再生過程で近似するには、到着の相互相関を旨く考慮して t を決める必要がある。この時間長 t を、 $H_2/G/1$ システムの (1) 稼働期間の余命時間と (2) 規格化平均残余仕事量 (Normalized Mean Workload: NMW) [5], [6] の軽負荷近似と重負荷近似の組み合わせから、それぞれ決定する方法を論じる。歪み度については、 $I(t)$ と到着間隔過程の 3 次モーメントの関係を導出し、その関係を用いて推定する方法、すなわち $I(t=0)$ に関する規格化増分等価法と重畳過程の定常分布を用いる定常法を述べる。

次に、上述の方法で求めた 3 次までのモーメントを用いて H_2 分布にモーメントマッチングして、平均待ち時間の性能評価を行う。平均と平方変動係数を用いる 2-モーメントマッチングと歪み度も用いる 3-モーメントマッチングによる平均待ち時間評価法を示す。この H_2 分布にモーメントマッチングした場合の平均待ち時間は、 $H_2/G/1$ システムの厳密解を与えるスペクトル分解法 [2, 3, 4] を用いて評価する。

超指数分布の重畳過程を超指数分布で近似するための 3 次までのモーメントの推定法ならびに平均待ち時間の性能評価法の有効性と適用範囲を明らかにするために、計算機シミュレーション結果および QNA/Albin 法との比較を行うと共に多重数ならびにバースト性の強さによるトラヒック特性について述べる。

2.2 重畳過程を再生過程で近似するための平方変動係数の推定

2.2.1 基本的考え方

ATM のセルはパケット長を固定とした一種のパケットである。ここでは、議論を一般化するために、可変長も含めた一般パケットに付いて考える。

バーストパケットの到着数に関する変動指数 (IDC) から、バーストパケットの重畳過程を再生過程で近似すべく平方変動係数を推定する方法の基本的考え方を述べる。パケット到着の IDC は、時間区間 $(0, t]$ における到着数の分散 $V[N(t)]$ と平均 $E[N(t)]$ の比、 $I(t) = V[N(t)]/E[N(t)]$ 、で定義される。ただし、 $N(t)$ は時間区間 $(0, t]$ に到着するパケット数の確率変数である。パケットの到着過程を超指数分布 H_2 で近似する場合、 H_2 分布として、

$$F(t) = 1 - C_1 e^{-\lambda_1 t} - C_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (2.1)$$

を用いる (ただし、 $C_1 + C_2 = 1$)。 H_2 分布の平均を λ^{-1} 、平方変動係数を C_a^2 とすると、IDC は次式で求まる。

$$I(t) = C_a^2 - \frac{(C_a^2 - 1)^2}{2I'(0)t} \left(1 - e^{-\frac{2I'(0)t}{C_a^2 - 1}} \right) \quad (2.2)$$

ここで、 $I'(0) = C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2 - \lambda$ である。 $C_1, C_2, \lambda_1, \lambda_2$ は、2 次および 3 次までのモーメントマッチングでそれぞれ決めることができる。また IDC には、 $t \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ の極限に関して以下の性質がある。

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} I(t) &= 1 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} I(t) &= C_a^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

n 個の同一パラメータを持つ再生過程を重畳した場合の IDC、すなわち $I_n(t)$ を考える。この場合も同様に、 $I_n(t) = V[N_n(t)]/E[N_n(t)]$ で定義される。ただし、 $N_n(t)$ は n 重畳過程に関する時間区間 $(0, t]$ に到着するパケット数の確率変数である。個々の再生過程の独立性を仮定すると、 $E[N_n(t)] = nE[N(t)]$ 、 $V[N_n(t)] = nV[N(t)]$ となるので、 $I_n(t) = I(t)$ となり、 n 重畳過程とシングル再生過程の IDC は同一となることが分かる。しかし、 n 重畳過程とシングル再生過程の状態が変化する時間を見ると、例えば、シングル再生過程の平均到着間隔を λ^{-1} とすると、 n 重畳過程では λ^{-1}/n 、すなわち n 重畳過程ではシングル再生過程に比べて $1/n$ の短い時間で状態の変化が生じる。したがって、 n 重畳過程の IDC の特性量を扱う場合は、 $I_n(t) = I(t/n)$ のごとく時間スケールを考慮する必要がある。

n 重畳過程をシングル再生過程で近似するための平方変動係数 C_{an}^2 を $I_n(t)$ から推定する場合に、時間長 t としてどのような性質を持つ必要があるかを考える。Whitt や Albin らの近似による C_{an}^2 は、負荷 ρ 、重畳数 n に関して以下の性質を持つ [11, 12]。

$$\left. \begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} C_{an}^2 &= 1 \quad (0 < \rho < 1) \\ \lim_{\rho \rightarrow 1} C_{an}^2 &= C_a^2 \quad (0 < n < \infty) \\ \lim_{\rho \rightarrow 0} C_{an}^2 &= 1 \quad (0 < n) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

式 (2.4) と式 (2.3) を比較し、 $I_n(t) = I(t/n)$ を考慮すると、次の関係を得る。

$$\left. \begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} C_{an}^2 = 1 &= \lim_{n \rightarrow \infty} I_n(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} I\left(\frac{t}{n}\right) \\ &\quad (0 < \rho < 1, 0 < t < \infty) \\ \lim_{\rho \rightarrow 1} C_{an}^2 = C_a^2 &= \lim_{t \rightarrow \infty} I_n(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} I\left(\frac{t}{n}\right) \\ &\quad (0 < n < \infty) \\ \lim_{\rho \rightarrow 0} C_{an}^2 = 1 &= \lim_{t \rightarrow 0} I_n(t) = \lim_{t \rightarrow 0} I\left(\frac{t}{n}\right) \\ &\quad (0 < n) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

このことから、 t をうまく選べば IDC を用いて C_{an}^2 を決めることができる。このとき $t = t(\rho)$ で表すことができ、 ρ の 0 と 1 の極限に関して以下の性質を持つ必要がある。

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\rho \rightarrow 0} t(\rho) &= 0 \\ \lim_{\rho \rightarrow 1} t(\rho) &= \infty \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

また、 n 重畳過程を再生過程で近似すべく平方変動係数 C_{an}^2 は、シングル再生過程の IDC を用いて推定することができ、式 (2.6) を満たすシングル再生過程である適当な時間長 $t(\rho)$ を $1/n$ 倍すれば良いことが分かる。

次に式 (2.6) の性質を満たす時間長 $t(\rho)$ を、 n 重畳過程のパケット到着間隔に関する k 個の到着間隔の相関を考慮した到着間隔に関する変動指数 (Index of Dispersion for Intervals: IDI) C_{kn}^2 [1] から考える。 C_{kn}^2 の性質は、文献 [1] の Proposition 2, 3 で示されており、以下となる。

$$\left. \begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} C_{kn}^2 &= C_a^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} I_n(t) \\ \lim_{n \rightarrow \infty} C_{kn}^2 &= 1 = \lim_{n \rightarrow \infty} I_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

これは相関を考慮する範囲 k と時間長 t の関係を示しており、時間長 t が相関の観点から議論できることを示している。

2.2.2 平均残余稼働時間を用いた推定法

待ち行列システムの動作を考えると、サービスを行っている稼働期間 (busy period), サービスを行っていない遊休期間 (idle period) が交互に現れるような動作が繰り返されている。このことから、到着してくるバケット間の直接相関を与える範囲として、稼働期間を考えるのが妥当であると思われる。相互相関を考慮すべき範囲として稼働期間を考えることは、文献 [7] でも指摘されている。稼働期間については、その平均長に比較して分散が非常に大きいことが知られており [15], 負荷 ρ が大きい場合にそれが顕著である。分散が平均に比べて非常に大きい場合、平均量の実用性が余り無いことが考えられる。特に ρ が大きい場合、時間長 t として稼働期間の平均を採用すると、 C_{an}^2 を小さく推定することが予想される。この様なことを避けるため、再生理論で良く用いられる任意時点からの平均再生時間 (平均余命時間) [4] に対応する量を稼働期間に関して考える。本論文では、平均残余稼働時間 (Mean of Residual Life Time for The Busy Period), R_b , と呼ぶこととする。この平均は、再生理論での平均余命時間の定義と同様に稼働期間の平均 (m_b) と 2 次モーメント (m_{b2}) で以下の様に定義する。

$$R_b \equiv \frac{m_{b2}}{2m_b} \quad (2.8)$$

R_b の導出は次節で行うが、式 (2.6) の要件を満たしている (文献 [61] の付録を参照のこと)。従って、 $t(\rho) = R_b$ と置き、次の様に C_{an}^2 を推定できる。

$$C_{an}^2 = I\left(\frac{R_b}{n}\right) \quad (2.9)$$

平均残余稼働時間は、式 (2.8) の定義より稼働期間の平均と 2 次モーメントから求めることができる。GI/G/1 における稼働期間については、文献 [2] でスペクトル分解法により解析されており、稼働期間分布のラプラス変換の形式で厳密解が与えられている。本論文では、 $H_2/G/1$ にこの結果を適用し、平均と 2 次モーメントを導出する。

$H_2/G/1$ の稼働期間分布のラプラス変換を $\gamma(z)$ とすると、文献 [2] の式 (58) から、 $\gamma(z)$ は以下のようになる。

$$\gamma(z) = \Phi_-(1, 0, z) = 1 - \frac{s_0(1, z)}{\Psi_-(1, 0, z)} \quad (2.10)$$

これは、到着間隔分布のラプラス変換を $\alpha(s)$ 、サービス分布のラプラス変換を $\beta(s)$ として、以下のスペクトル分解、

$$x\beta(s+z)\alpha(-s) - 1 = \frac{\Psi_+(x, s, z)}{\Psi_-(x, s, z)}$$

を考えることで、

$$\Phi_-(x, s, z) = 1 + \frac{s - s_0(x, z)}{\Psi_-(x, s, z)}$$

で表すことができる。ただし、 $s = s_0(x, z)$ は以下の方程式の解である。

$$x\beta(s+z)\alpha(-s) - 1 = 0$$

また、この方程式に関して、 $x \rightarrow 1, z \rightarrow 0$ の時、 $s_0(x, z) = 0$ となる性質を持つ。

式 (2.10) の結果を $H_2/G/1$ に適用する。 H_2 分布 (式 (2.1)) のラプラス変換は、

$$\alpha(s) = \frac{(C_1\lambda_1 + C_2\lambda_2)s + \lambda_1\lambda_2}{(s + \lambda_1)(s + \lambda_2)} \quad (2.11)$$

となるので、スペクトル分解による $\Psi_-(x, s, z)$ は以下となる。

$$\Psi_-(x, s, z) = \frac{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)}{s_1(x, z) - s} \quad (2.12)$$

したがって、最終的に $\gamma(z)$ は以下で計算できる。

$$\gamma(z) = 1 - \frac{s_0(1, z)s_1(1, z)}{\lambda_1\lambda_2} \quad (2.13)$$

また、 $s_0(x, z)$ と $s_1(x, z)$ は、

$$x\{\lambda_1\lambda_2 - (C_1\lambda_1 + C_2\lambda_2)s\}\beta(s+z) - (\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s) = 0 \quad (2.14)$$

を満たす解で、

$$\left. \begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 1, z \rightarrow 0} s_0(x, z) &= 0 \\ \lim_{x \rightarrow 1, z \rightarrow 0} s_1(x, z) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

である。

稼働期間の平均と 2 次モーメントについては、 $m_b = -\gamma'(0)$, $m_{b2} = \gamma''(0)$ で求まるが、 $s_1(1, z = 0)$, $s_0'(1, z = 0)$, $s_0''(1, z = 0)$, $s_1'(1, z = 0)$ を計算する必要がある。 $s_1(1, z = 0)$ は、式 (2.14) において、 $x = 1, z = 0$ と置いた場合の解で、正の実根である^{††}。特に、 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$,

^{††} $x = 1, z = 0$ の場合の式 (2.14) の根が $s = 0$ と $Re(s) > 0$ に唯一存在することがルーシェの定理を用いて証明できるが、本論文では割愛する。その具体的証明方法は、文献 [3] が詳しいので参照されたい。

すなわち $\rho = 0$ の時は, $s_0(1, z = 0) = s_1(1, z = 0) = 0$ となる. また, $0 < \rho \leq 1$ の範囲では $s_1(1, z = 0) > 0$ である. $s'_0(1, z = 0)$, $s''_0(1, z = 0)$, $s'_1(1, z = 0)$ については, 式 (2.14) に関し, $x = 1$ と置き, $s = s_0(1, z)$ または $s = s_1(1, z)$ として, z で微分してから $z \rightarrow 0$ の極限を取れば, それぞれが求まる. 最終的に, $H_2/G/1$ の m_b , m_{b2} , R_b が以下の様に求まる.

$$m_b = \frac{h}{W(0^+)} \quad (2.16)$$

$$m_{b2} = \frac{\rho(C_a^2 + C_s^2)s_1h}{r\lambda(1-\rho)^3} - \frac{2\rho\beta'(s_1)(-s_1f_0 + r\lambda)}{r\lambda(1-\rho)[\{\beta(s_1) - 1\}f_0 + \beta'(s_1)(s_1f_0 - r\lambda) + 2s_1 - r]} \quad (2.17)$$

$$R_b = \frac{(C_a^2 + C_s^2)h}{2(1-\rho)^2} - \frac{\beta'(s_1)(-s_1f_0 + r\lambda)}{s_1[\{\beta(s_1) - 1\}f_0 + \beta'(s_1)(s_1f_0 - r\lambda) + 2s_1 - r]} \quad (2.18)$$

ただし, h は平均サービス時間, C_s^2 はサービス分布の平方変動係数,

$$\left. \begin{aligned} W(0^+) &= \frac{r(1-\rho)}{s_1} \\ s_1 &\equiv s_1(1, z = 0) \\ f_0 &\equiv C_1\lambda_1 + C_2\lambda_2 \\ r &\equiv C_2\lambda_1 + C_1\lambda_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

である. $W(0^+)$ はバケットが待ち行列システムに到着した時に待たない確率である. f_0 は H_2 分布関数 [式 (2.1)] の密度関数 $f(x)$ の原点 ($x = 0$) における密度を表す. また, 文献 [4] の式 (3.102) と式 (3.101) で示されている 2-モーメントマッチングおよび 3-モーメントマッチング法を用いると, f_0 と r はそれぞれ平均 λ の一次式で表すことができる. それを

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \xi\lambda \\ r &= \zeta\lambda \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

とする. ξ と ζ は, 2-モーメントマッチングでは C_a^2 の関数, 3-モーメントマッチングでは C_a^2 と歪み度 S_k の関数でそれぞれ表すことができる. 例えば, 2-モーメントマッチングでは, $\xi = 2C_a^2/(C_a^2 + 1)$, $\zeta = 2/(C_a^2 + 1)$ となる.

平均残余稼働時間 R_b を具体的に求めるには, $x = 1, z = 0$ と置いた場合の方程式 (2.14) の解 s_1 を計算する必要がある. 一般サービス分布を考えているため, s_1 は区間縮小法 (Regula Falsi) [20] やニュートン・ラフソン (Newton-Raphson) [20] などの逐次法により求めることが基本となる. しかし, サービス分布のラプラス変換 $\beta(s)$ の関数によっては, 陽形式として s_1 を求めることができる. 例えば, 負の指数分布の $\beta(s) = 1/(s+1)$, H_2 分布の $\beta(s) = 2(C_s^2s+1)/\{(C_s^2+1)s^2 + 2(C_s^2+1)s + 2\}$, 2 次のアーラン分布の $\beta(s) = 4/(s+2)^2$ の場合がそうである. ただし, サービス分布の平均 $h = 1$ である.

逐次法で計算する場合でも, ルーシェ (Rouche) の定理 [3, 21] から求める解が, $Re(s) > 0$ に一つしか存在しないことが保証されるので, 確実に解を求めることができる. ニュートン・ラフソン法では, 以下のアルゴリズムで計算できる.

$$\left. \begin{aligned} s_{1,k+1} &= s_{1,k} - \frac{G(s_{1,k})}{G'(s_{1,k})} \\ G(s) &= s^2 - \{f_0 + r - f_0\beta(s)\}s + \lambda\{1 - \beta(s)\} \\ G'(s) &= 2s - \{f_0 + r - f_0\beta(s)\} + f_0\beta'(s)s - \lambda r\beta'(s) \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

ただし, $G(s)$ は式 (2.14) を式 (2.19) を用いて変形したものである. また, $G'(s)$ は $G(s)$ の微分を表す.

図 2.3 に s_1 を求めるのに必要な繰り返し計算回数 k を示している. ニュートン・ラフソン法の場合は, 初期値として $s_{1,k=0} = \rho$ とした. また, 比較のため, 区間縮小法も示している. 区間縮小法では, 2 つの初期値を必要とするので, $\rho \ll 1$ のときの $s_{1,\rho \ll 1}$ と $\rho = 1$ のときの $s_{1,\rho=1}$ を用いて計算した. ニュートン・ラフソン法では, 10 回未満の繰り返し計算で十分な精度の解が得られることが分かる. したがって, R_b についても僅かな時間で計算可能であり, 十分実用に耐え得る簡便な方法であると言える.

2.2.3 規格化残余仕事量 (NMW) を用いた推定法

$H_2/G/1$ システムの規格化残余仕事量 (NMW) の軽負荷近似と重負荷近似の組み合わせから時間長 $t(\rho)$ を決定する方法を述べる. NMW は, $GI/G/1$ の平均残余仕事量 (Average unfinished work) を $M/D/1$ の平均残余仕事量で規格化した量で定義される [5, 6]. 残余仕事量はまた仮待ち時間 (Virtual waiting time) でもあるので, 待ち行列システムの平均仮待ち時間を $W_{v,GI/G/1}$

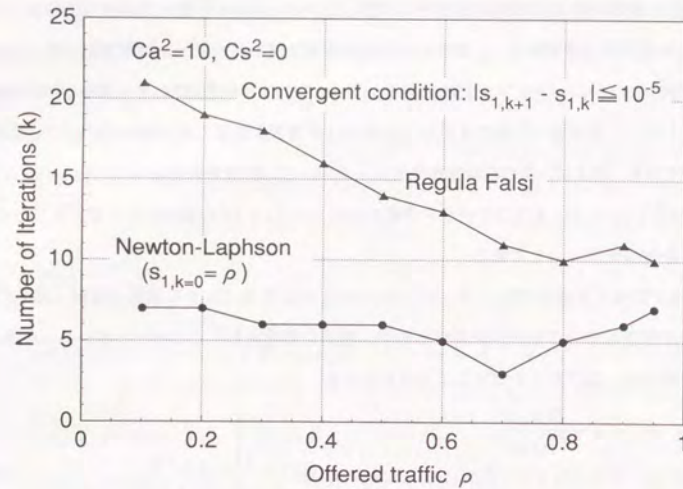


図 2.3: s_1 の逐次解法による必要計算回数

で表し, $H_2/G/1$ システムの NMW を $C_z^2(\rho)$ で表す. すなわち,

$$C_z^2(\rho) \equiv \frac{W_{v,H_2/G/1}}{W_{v,M/D/1}} \quad (2.22)$$

で定義される. ただし, $W_{v,M/D/1} = \rho h / \{2(1-\rho)\}$ である.

$H_2/G/1$ の平均実待ち時間 $W_{a,H_2/G/1}$ がスペクトル分解法 [2, 3, 4] より, 次の式 (2.23) で求まるので, 仮待ち時間は, 式 (2.24) の実待ち時間との関係 [14] を用いると式 (2.25) で求まる.

$$\left. \begin{aligned} W_{a,H_2/G/1} &= \frac{\rho h}{2(1-\rho)} [1 + C_s^2 + (C_a^2 - 1)\omega] \\ \omega &= \frac{f_0 h - (1 - W(0^+))}{\rho(f_0 h - \rho)} \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

$$W_{v,H_2/G/1} = \rho W_{a,H_2/G/1} + \frac{\rho(C_s^2 + 1)h}{2} \quad (2.24)$$

$$W_{v,H_2/G/1} = \frac{\rho h}{2(1-\rho)} [1 + C_s^2 + \rho\omega(C_a^2 - 1)] \quad (2.25)$$

式 (2.25) を式 (2.22) に代入すると $H_2/G/1$ の $C_z^2(\rho)$ が求まる.

$$C_z^2(\rho) = 1 + C_s^2 + \rho\omega(C_a^2 - 1) \quad (2.26)$$

2.2.3.1 NMW の軽負荷近似

シングルバーストを入力とする $H_2/G/1$ の規格化平均残余仕事量 $C_z^2(\rho)$ と重畳過程を入力とする $\Sigma H_2/G/1$ の規格化平均残余仕事量 $C_{zn}^2(\rho)$ に関する $\rho = 0$ 近傍のテーラ展開による軽負荷近似と, $I(t)$ の $t = 0$ 近傍の近似との比較より, 時間長 $t(\rho)$ の関係を求める.

$C_z^2(\rho)$ と $C_{zn}^2(\rho)$ の $\rho = 0$ におけるテーラ展開をするために, $C_z^2(0)$, $C_z^{2'}(0)$, $C_{zn}^2(0)$, $C_{zn}^{2'}(0)$ に関して文献 [5] の式 (74), 式 (77), 式 (151) を適用すると次式が得られる.

$$C_z^2(\rho) = C_s^2 + 1 + \left(\frac{f_0}{\lambda} - 1\right)(C_s^2 + 1)\rho \quad (2.27)$$

$$C_{zn}^2(\rho) = C_s^2 + 1 + \frac{\left(\frac{f_0}{\lambda} - 1\right)(C_s^2 + 1)\rho}{n} \quad (2.28)$$

一方, $I(t)$ に関して, $t = 0$ の近傍では,

$$I(t) = I(0) + I'(0)t = 1 + \lambda\left(\frac{f_0}{\lambda} - 1\right)t \quad (2.29)$$

と近似できる.

式 (2.27) と式 (2.29) および式 (2.28) と式 (2.29) を各々比較して,

$$t = \frac{(C_s^2 + 1)\rho}{\lambda} \equiv t_H \quad (2.30)$$

と置くと,

$$C_z^2(\rho) = C_s^2 + 1 + \{I(t_H) - 1\} = C_s^2 + I(t_H) \quad (2.31)$$

$$C_{zn}^2(\rho) = C_s^2 + 1 + \left\{I\left(\frac{t_H}{n}\right) - 1\right\} = C_s^2 + I\left(\frac{t_H}{n}\right) \quad (2.32)$$

の NMW と IDC との関係が得られる. $C_{zn}^2(\rho)$ が式 (2.31) の t_H に $1/n$ を掛けることで簡単に求められることが分かる.

軽負荷を条件として求めた式 (2.30) の時間長 t_H が, $t(\rho)$ の要件式 (2.6) の $\rho \rightarrow 0$ の場合を満たしていることから, $\rho \ll 1$ での C_{an}^2 の推定として, $C_{an}^2 = I(t_H/n)$ を考えることができる.

2.2.3.2 NMWの重負荷近似

ここでは、 $C_z^2(\rho)$ の $\rho = 1$ 近傍における近似から $t(\rho)$ を求める方法について述べる。まず、 $(1-\rho) \ll 1$ において、 $C_z^2(\rho)$ を以下の形式で近似する。

$$C_z^2(\rho) = C_z^2(1) - C_z^{2'}(1)(1-\rho) \quad (2.33)$$

$C_z^2(1)$ を求めるため、式 (2.26) の ω についての $\rho \rightarrow 1$ の極限を考える。 ω 中の $W(0^+)$ は、バケットが待ち行列システムに到着時に待たない確率であるので、 $\lim_{\rho \rightarrow 1} W(0^+) = 0$ である。したがって、 $\lim_{\rho \rightarrow 1} \omega = 1$ となる。このことから、次式を得る。

$$C_z^2(1) = C_a^2 + C_s^2. \quad (2.34)$$

次に $C_z^{2'}(1)$ を求める。式 (2.26) を ρ で微分し、 $\rho \rightarrow 1$ の極限を取ると、

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{dC_z^2(\rho)}{d\rho} = \frac{C_a^2 - 1}{\frac{f_0}{\lambda} - 1} \left[1 - \lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{dM(0)}{d\rho} \right] \quad (2.35)$$

ただし、 $M(0) = 1 - W(0^+)$ で待ち率を表し、また

$$\frac{dM(0)}{d\rho} = \frac{r}{s_1} - \frac{\left(\frac{dr}{d\rho}s_1 - r\frac{ds_1}{d\rho}\right)(1-\rho)}{s_1^2} \quad (2.36)$$

である。式 (2.36) の $\rho \rightarrow 1$ の極限を考える。 $\rho \rightarrow 1$ における s_1 は正の実数であり、また r は λ の一次式で表わすことができるので、以下となる。

$$\lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{dM(0)}{d\rho} = \lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{r}{s_1} \quad (2.37)$$

式 (2.34)、式 (2.35)、式 (2.37) を式 (2.33) に代入することにより、最終的に次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} C_z^2(\rho) &= C_s^2 + 1 + [1 - \theta(1-\rho)](C_a^2 - 1) \\ \theta &= \frac{1 - \lim_{\rho \rightarrow 1} \frac{r}{s_1}}{\frac{f_0}{\lambda} - 1} \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

次に時間長 t の決定法を考える。重負荷近似で代表される拡散近似では、十分長い時間長 t を考えて、区間 $(0, t]$ に到着する点過程の分散指数を C_a^2 で近似する。これは、 $I(t) \simeq C_a^2$ と近似することと等価である。このことから、式 (2.38) の C_a^2 の代わりに $I(t)$ と置いて、左辺に等しくなる様に t を決めることを考える。まず $\rho = 1$ の時の場合を考えると、 $C_z^2(1) = C_s^2 + C_a^2$ であり、

これを満たす t は、 $t = \infty$ であることが容易に分かる。一方、 $\rho = 0$ の場合は、 $C_z^2(0) = C_s^2 + 1$ である。この場合も、 $I(t=0) = 1$ であるので、 $\rho = 0$ の時 $t = 0$ を満たすことが分かる。したがって、 $t(\rho)$ の要件式 (2.6) を満たしている。

このことから、以下の様に時間長を決め、 C_{an}^2 を推定することが可能である。すなわち、

$$C_z^2(\rho) = C_s^2 + 1 + [1 - \theta(1-\rho)][I(t_{hl}) - 1] \quad (2.39)$$

を満たす t_{hl} を逐次代入法により計算し、 $C_{an}^2 = I(t_{hl}/n)$ で推定する。ただし、 $t \geq 0$ に対して $1 \leq I(t) \leq C_a^2$ であるので、式 (2.39) から t_{hl} を決定できるのは、

$$C_z^2(\rho) \leq C_s^2 + 1 + [1 - \theta(1-\rho)](C_a^2 - 1) \quad (2.40)$$

の条件下である。

例えば、図 2.4 に示すような $H_2/D/1$ の $C_z^2(\rho)$ を考える。 $C_a^2 = 10$ の時の $S_k = 9.4552$ と $S_k = 13.2373$ に関する $C_z^2(\rho)$ を実線でそれぞれ示しており、また破線は重負荷近似を示している。 $S_k = 9.4552$ の場合は、 ρ が約 0.08 以下、 $S_k = 13.2373$ の場合は、 ρ が約 0.56 以下で、それぞれ条件式 (2.40) を満たさなく、式 (2.39) より t_{hl} を決定できない。

2.2.3.3 組み合わせによる時間長の決定

個々の軽負荷近似と重負荷近似による時間長 $t(\rho)$ の決定方法では、先に述べたように不十分である。すなわち、軽負荷近似では、 $\rho \rightarrow 1$ で $t(\rho)$ の要件式 (2.6) を満足せず、一方重負荷近似では、式 (2.40) を満たさない中軽負荷で時間長の決定ができない。そこで、軽負荷近似と重負荷近似とを組み合わせることにより、それぞれの問題を補完して $t(\rho)$ を決定する方法を述べる。

図 2.4 から、条件式 (2.40) を満足しない ρ の範囲における $C_z^2(\rho)$ は、 ρ に対してほぼ線型であることが分かる。すなわち、NMW の軽負荷近似式 (2.27) が ρ の線型近似であることから、条件式 (2.40) を満足しない範囲での時間長として t_{ll} が適用できる。そこで、NMW を適用した時間長 $t(\rho)$ の決定として、次の軽負荷近似と重負荷近似を組み合わせる方法を考える。

$$t_{cmb} = \begin{cases} t_{ll} & \text{(式 (2.40) を満たさないとき)} \\ t_{hl} & \text{(式 (2.40) を満たすとき)} \end{cases} \quad (2.41)$$

で時間長を決め、重畳過程を再生過程で近似すべく平方変動係数を

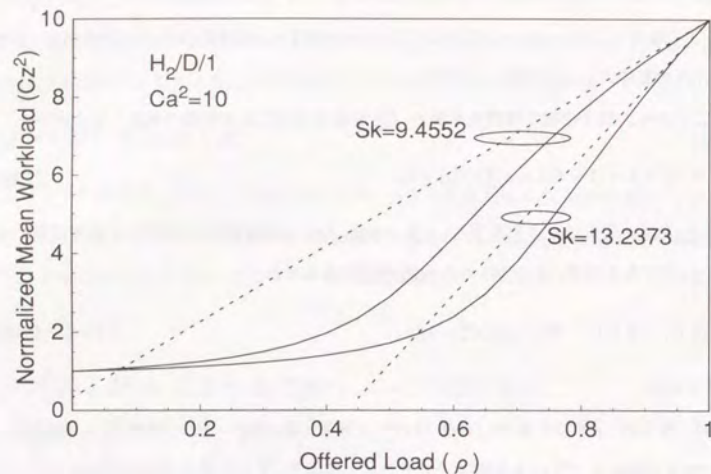


図 2.4: 規格化平均残余仕事量の例

$$C_{an}^2 = I\left(\frac{t_{cmb}}{n}\right) \quad (2.42)$$

から推定する。

2.3 重畳過程を再生過程で近似するための3次モーメントの推定法

IDC の $t \rightarrow \infty$ における $I(t)$ の漸近展開より重畳過程を再生過程で近似すべく3次モーメントを推定する。式(2.2)の漸近展開は以下となる。

$$I(t) \sim C_a^2 - \frac{(C_a^2 - 1)^2}{2I'(0)t} \quad (2.43)$$

一方、文献[16]のp.58の式(18)を用いると、

$$I(t) \sim C_a^2 - \frac{1}{t} \left[\frac{\lambda^2 m_3}{3} - \frac{(C_a^2 + 1)^2}{2\lambda} \right] \quad (2.44)$$

となる。式(2.43)と式(2.44)を比較し、 $I'(0) = f_0 - \lambda$ を考慮して、3次モーメント m_3 について解くと以下が得られる。

$$m_3 = \frac{3}{2\lambda^3} \left[\frac{(C_a^2 - 1)^2}{\frac{f_0}{\lambda} - 1} + (C_a^2 + 1)^2 \right] \quad (2.45)$$

重畳過程を再生過程で近似するための平均を λ_n 、平方変動係数を C_{an}^2 、3次モーメントを m_{3n} 、原点における密度を f_{0n} として式(2.45)の関係をを用いると、 $f_{0n}/\lambda_n - 1 = (f_{0n} - \lambda_n)/\lambda_n$ を決めれば、 m_{3n} を推定できることが分かる。次に $(f_{0n} - \lambda_n)/\lambda_n$ の近似法を述べる。

2.3.1 規格化増分等価法

重畳過程を再生過程で近似すべく H_2 の IDC を $\tilde{I}(t)$ と置く。ソースの H_2 には、 $(f_0 - \lambda)/\lambda = I'(0)/\lambda$ の関係があるので、重畳過程を近似する H_2 に関しても $(f_{0n} - \lambda_n)/\lambda_n = \tilde{I}'(0)/\lambda_n$ の関係を考えることができる(図2.5を参照)。 $I'(0)$ は、 $I(t)$ の原点における増分を示しているが、これを $C_a^2 - 1$ で規格化した量を考える。また、再生近似重畳過程の $\tilde{I}'(0)$ についても、 $C_{an}^2 - 1$ で規格化した量を考える。これら量がシングル再生過程と再生近似重畳過程で等しいと置いて $(f_{0n} - \lambda_n)/\lambda_n$ を決める。すなわち、

$$\frac{I'(0)}{C_a^2 - 1} = \frac{\tilde{I}'(0)}{C_{an}^2 - 1} \quad (2.46)$$

これより、

$$(f_{0n} - \lambda_n) = \frac{C_{an}^2 - 1}{C_a^2 - 1} (f_0 - \lambda) \quad (2.47)$$

となる。式(2.47)を式(2.45)に適用すると m_{3n} が得られる。

2.3.2 定常法

これは、再生過程の重畳過程についての定常分布より求めるものである。再生過程の到着間隔分布を $F(t)$ 、その重畳過程の到着分布の定常分布を $F_n(t)$ 、 $f_{0n} = \lim_{t \rightarrow 0} dF_n(t)/dt$ と置き、文献[10]の式(4.4)の $F_n(t)$ と $F(t)$ の関係を用いて、 f_{0n} を直接に計算すると次式を得ることができる。

$$\frac{f_{0n}}{\lambda_n} - 1 = \frac{\frac{f_0}{\lambda} - 1}{n} \quad (2.48)$$

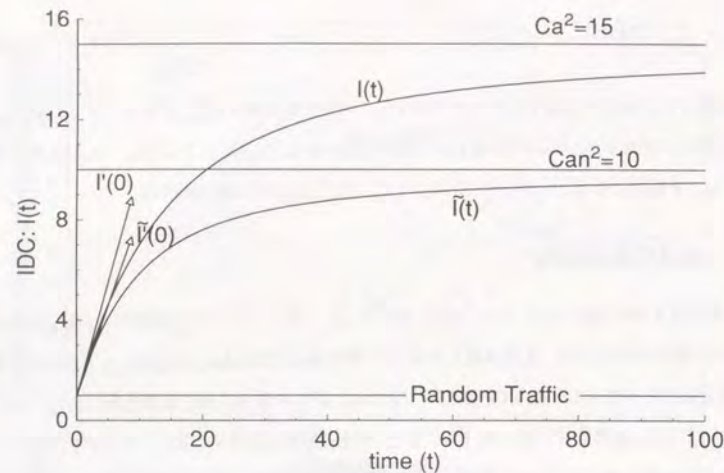


図 2.5: 規格化増分等価法の考え方

2.4 モーメント マッチングによる平均待ち時間近似

重畳過程を再生過程で近似するために推定した2次および3次までのモーメントを用いて、これらモーメントに等価な H_2 分布にマッピングすることにより、 $\sum H_2/G/1$ システムを $H_2/G/1$ システムで扱うことができる。したがって、 $\sum H_2/G/1$ の平均待ち時間は、スペクトル分解より求めた厳密式 (2.23) で近似評価できる。2-モーメントマッチングは文献 [4] の式 (3.102)、3-モーメントマッチングは文献 [4] の式 (3.101) をそれぞれ適用する。ただし、各式を計算する場合の各モーメントについては、到着率として $n\lambda$ 、平方変動係数として C_{an}^2 、歪み度として S_{kn} をそれぞれ用いる。また、 S_{kn} は以下の3次モーメント m_{3n} の関係を用いて計算する。

$$\left. \begin{aligned} S_{kn} &= \frac{m_{3n} - 3m_{1n}m_{2n} + 2m_{1n}^3}{(m_{2n} - m_{1n}^2)^{3/2}} \\ m_{1n} &= \frac{1}{n\lambda} \\ m_{2n} &= (C_{an}^2 + 1)m_{1n}^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

2.5 数値例による近似法の検証

$\sum H_2/G/1$ システムの平均待ち時間に関する近似評価法の有効性を、計算機シミュレーション結果との比較から検証する。 R_b と t_{cmb} からそれぞれ推定した C_{an}^2 を用いる2-モーメントマッチング (2-MM) と、さらに規格化増分等価法 [式 (2.47)] と定常法 [式 (2.48)] からそれぞれ推定した3次モーメント m_{3n} までを用いる3-モーメントマッチング (3-MM) による各近似法を検証する。従来法との比較を行うが、QNA と Albin 法とではほぼ同程度の近似精度であることが文献 [13] で確認できるので、ここでは、QNA との比較を行う。QNA は文献 [12] の式 (33)、式 (29)、式 (44) を用いて計算した。

計算機シミュレーションについては、シミュレーション専用言語 SLAMII を用いた。一回のシミュレーション実行に関して、 $\rho = 0.1er1$ 当たり約40万パケットを発生させ、50回のシミュレーション実行の平均値をシミュレーション結果とした。表2.1で示すシミュレーション結果の括弧内の値は95%信頼区間であり、 t 分布より求めた。各近似評価値の下段のパーセント値は、シミュレーション結果に対する相対誤差、(近似値 - シミュレーション結果) * 100 / シミュレーション結果、を示している。表中の最下段は、各近似法に対する誤差の絶対値の平均を示している。

まず、対称型 H_2 をソースとする $\sum H_2/G/1$ の平均待ち時間についての検証結果を表2.1に示す。1ソースのパケット発生率 $\lambda = 0.00732$ 、平均サービス時間 $h = 1$ として、ソースの平方変動係数 C_a^2 が15.0、サービス分布の平方変動係数 C_s^2 が0, 1.0, 5.0とした場合の比較を示している。

表2.1の $C_a^2 = 15$ 、 $C_s^2 = 0$ について考える。まず、時間長 R_b と t_{cmb} による C_{an}^2 の推定法の違いによる各平均待ち時間の近似精度は、それほど大きな差はなく、僅かではあるが R_b による推定法の方が高精度である。 R_b および t_{cmb} で推定したどの C_{an}^2 についても、規格化増分等価法で求めた m_{3n} を用いる3-MMの近似法が、他の方法と比べて最も精度が良い。平均絶対値誤差においてもQNAと同程度の近似精度が得られることが分かる。また、 $\rho = 0.9$ を越える範囲では、平均20%台の大きめの値になり、QNAと比較して近似精度は劣る。しかし、 $\rho = 0.9$ 未満では、誤差10%未満の近似精度にあり、QNAよりも高い近似精度が得られことが分かる。さらに、2-MMと比較すると、約70%-90%の範囲の負荷に関して、3-MMの方が格段に近似精度が良くなり、規格化増分等価法で推定した3次モーメントを用いて近似性能評価することの有効性が確認できる。

一方、定常法で推定した3次モーメントを用いる3-MMは、軽負荷の範囲では誤差数%程度の高精度近似が得られるが、負荷が高くなるに連れ、近似精度が極端に悪くなり、かなり小さな値となる。したがって、定常法による3-MMは軽負荷の範囲で有効な方法であることが分かる。

次に、 $C_s^2 = 1, 5$ とサービス分布の平方変動係数を変化させた場合について考える。ただし、 $C_s^2 = 5$ の場合のサービス分布は、対称型 H_2 を適用した。それぞれの近似法の精度は、 $C_a^2 - C_s^2$ の差が小さいほど、すなわち、 C_s^2 が大きくなるほど良くなる。また、2-MM と規格化増分等価法による3-MMとの近似精度に差がほとんどなくなっていることが分かる。これは、平均待ち時間がサービス分布(パケット長分布)の C_s^2 の大きさにも関係しており(一般に C_s^2 が大きいほど平均待ち時間は大きい)、 C_s^2 が大きい場合は、 C_{an}^2 の推定に多少の誤差が含まんでも、あまり平均待ち時間の近似精度に大きな影響を及ぼさないためと考えられる。

一方、定常法による3-MMについては、 $C_s^2 = 0$ の場合と同様に、軽負荷で高精度な近似となるが、高負荷になるに従いかなり小さな近似となる。このことから、定常法による3次モーメントの推定は、軽負荷領域のみに適用するのが妥当であることが分かる。

平均絶対値誤差の点から最も近似精度の良い近似法を考える。 t_{cmb} を用いる場合は、規格化増分等価法による3-MMが最良な近似である。 R_b を用いる場合については、 $C_a^2 = 15, C_s^2 = 1$ の時に規格化増分等価法による3-MM、 $C_a^2 = 15, C_s^2 = 5$ の時に2-MMがそれぞれ最良近似となるが、これらの精度誤差の差はほんの僅かである。さらに、これらは、 C_s^2 が大きくなるに連れ、QNAの近似精度との差がほとんどなくなる。また、 $C_s^2 = 5$ の時には、2-MMおよび規格化増分等価法の3-MMの双方がQNAの近似精度より良くなることが確認できる。

表2.1の検証全体を通して考えると、 R_b および t_{cmb} から推定した C_{an}^2 と規格化増分等価法で推定した m_{3n} を用いる3-MMが、 C_s^2 が小さくかつ90%を越える負荷の範囲で+20%を越える近似誤差があるものの、良好な近似であることが分かる。また、90%未満の負荷の範囲では、QNAと同等またはそれ以上の近似精度が得られることが分かる。

次に、非対称 H_2 をバーストソースとする $\sum H_2/G/1$ の平均待ち時間近似の検証を行う。特に、 C_s^2 が小さいほど、 C_{an}^2 の推定誤差が平均待ち時間の近似精度に大きく影響することから、 $C_s^2 = 0$ の場合について検証する。また、表2.1の結果より、 C_{an}^2 の推定方法として t_{cmb} より R_b を用いた方が良好な近似が得られることから、 R_b による C_{an}^2 について考える。さらに、定常法による

表 2.1: 対称型超指数分布の重畳を入力とする待ち行列システムの平均待ち時間比較

(1) $\lambda = 0.00732, C_a^2 = 15, h = 1, C_s^2 = 0$									
Number of Sources n	Traffic Intensity ρ	Simulation estimate (95% C. Int.)	Approximations						QNA
			$C_a^2 = 1(R_b/n)$			$C_a^2 = 1(t_{cmb}/n)$			
			2-MM $m_{3n} = Eq(2.47)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	2-MM	3-MM $m_{3n} = Eq(2.47)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	
20	0.146	0.0908 (0.09053 <-> 0.09108)	0.0858 -5.5%	0.0855 -5.8%	0.0877 -3.4%	0.0896 -1.3%	0.0861 -3.2%	0.0896 -1.3%	0.1069 17.7%
60	0.439	0.4101 (0.4094 <-> 0.4107)	0.4063 -0.9%	0.3937 -4.0%	0.4001 -2.4%	0.4119 0.4%	0.3946 -3.8%	0.4005 -2.4%	0.4640 13.2%
100	0.732	1.6234 (1.617 <-> 1.630)	2.0901 28.7%	1.5560 -4.2%	1.4098 -13.2%	1.9881 22.5%	1.5275 -5.9%	1.4095 -13.2%	2.0151 24.1%
110	0.805	2.8957 (2.869 <-> 2.922)	4.2540 46.9%	2.8363 -2.1%	2.1489 -25.8%	4.0530 40.0%	2.7536 -4.9%	2.1486 -25.8%	3.708 28.1%
120	0.878	8.9364 (8.971 <-> 9.082)	13.178 47.5%	9.6497 8.0%	3.8210 -57.2%	12.896 44.3%	9.4077 5.3%	3.8208 -57.2%	9.8295 10.0%
125	0.915	21.8381 (21.45 <-> 22.23)	31.561 44.5%	27.754 27.1%	5.8524 -73.2%	31.566 44.5%	27.759 27.1%	5.8524 -73.2%	21.822 -0.1%
132	0.966	129.8738 (125.6 <-> 134.1)	179.12 37.9%	178.01 37.1%	17.526 -86.5%	180.65 39.1%	179.59 38.3%	17.550 -86.5%	138.06 6.3%
134	0.9807	292.9466 (277.6 <-> 308.3)	361.32 23.3%	360.96 23.2%	37.601 -87.2%	362.46 23.6%	362.13 23.6%	37.603 -87.2%	322.27 10.0%
Average Absolute Relative Percent Error			29.4%	13.9%	43.6%	27.0%	14.3%	43.3%	13.7%
(2) $\lambda = 0.00732, C_a^2 = 15, h = 1, C_s^2 = 1$									
Number of Sources n	Traffic Intensity ρ	Simulation estimate (95% C. Int.)	Approximations						QNA
			$C_a^2 = 1(R_b/n)$			$C_a^2 = 1(t_{cmb}/n)$			
			2-MM $m_{3n} = Eq(2.47)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	2-MM	3-MM $m_{3n} = Eq(2.47)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	
20	0.146	0.1814 (0.1807 <-> 0.1822)	0.1720 -5.2%	0.1711 -5.7%	0.1749 -3.6%	0.1817 0.2%	0.1726 -4.9%	0.1789 -1.4%	0.1922 5.9%
60	0.439	0.8154 (0.8185 <-> 0.8212)	0.8154 -0.5%	0.7893 -3.7%	0.7987 -2.6%	0.8352 1.9%	0.7935 -3.2%	0.8001 -2.4%	0.8553 4.3%
100	0.732	3.1624 (3.170 <-> 3.195)	3.6314 14.1%	3.0720 -3.5%	2.8164 -11.5%	3.6997 13.4%	3.0651 -3.7%	2.8162 -11.5%	3.3807 6.2%
110	0.805	5.5177 (5.481 <-> 5.555)	6.6727 20.9%	5.3858 -2.4%	4.2932 -22.2%	6.6742 21.0%	5.3867 -2.4%	4.2932 -22.2%	5.7721 4.6%
120	0.878	14.3222 (14.10 <-> 14.54)	17.646 23.2%	14.827 3.5%	7.6333 -46.7%	18.050 26.0%	15.189 6.1%	7.6339 -46.7%	13.428 6.2%
125	0.915	30.2913 (29.81 <-> 30.78)	38.560 27.3%	35.404 16.9%	11.692 -61.4%	39.985 32.0%	36.865 21.7%	11.690 -61.4%	27.204 10.2%
132	0.966	150.8964 (146.2 <-> 155.6)	195.75 29.7%	194.79 29.1%	34.938 -76.8%	198.94 31.8%	198.07 31.3%	34.935 -76.8%	152.27 0.9%
134	0.9807	324.3544 (307.7 <-> 341.0)	388.29 19.7%	388.29 19.6%	74.030 -77.2%	380.32 20.3%	390.04 20.3%	74.043 -77.2%	347.68 7.2%
Average Absolute Relative Percent Error			17.6%	10.5%	37.8%	18.3%	11.7%	37.5%	5.7%
(3) $\lambda = 0.00732, C_a^2 = 15, h = 1, C_s^2 = 5$									
Number of Sources n	Traffic Intensity ρ	Simulation estimate (95% C. Int.)	Approximations						QNA
			$C_a^2 = 1(R_b/n)$			$C_a^2 = 1(t_{cmb}/n)$			
			2-MM $m_{3n} = Eq(2.47)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	2-MM	3-MM $m_{3n} = Eq(2.47)$	3-MM $m_{3n} = Eq(2.48)$	
20	0.146	0.5457 (0.5429 <-> 0.5485)	0.5187 -4.9%	0.5141 -5.8%	0.5222 -4.3%	0.5570 2.1%	0.5224 -4.3%	0.5340 -2.1%	0.5341 -2.1%
60	0.439	2.4583 (2.452 <-> 2.465)	2.4241 -1.4%	2.3752 -3.4%	2.3853 -3.0%	2.5079 2.0%	2.4066 -2.1%	2.3950 -2.6%	2.4204 -1.5%
100	0.732	9.3619 (9.322 <-> 9.402)	9.4273 0.7%	8.9426 -4.5%	8.4202 -10.1%	9.6984 3.6%	9.1184 -2.6%	8.4278 -10.0%	8.8454 -5.5%
110	0.805	15.4970 (15.39 <-> 15.61)	15.718 1.4%	14.760 -4.8%	12.838 -17.2%	16.320 5.3%	15.229 -1.7%	12.847 -17.1%	14.028 9.5%
120	0.878	33.5186 (33.16 <-> 33.88)	34.538 3.0%	32.689 -2.5%	22.821 -31.9%	36.525 9.0%	34.575 3.2%	22.837 -31.9%	27.821 -17.0%
125	0.915	59.8927 (59.06 <-> 60.73)	65.178 8.8%	63.088 8.8%	34.929 -41.7%	69.235 15.6%	67.213 12.2%	34.954 -41.6%	48.734 -18.6%
132	0.966	219.6712 (214.0 <-> 225.4)	259.39 18.1%	258.74 17.8%	103.20 -53.0%	263.86 20.1%	263.32 19.9%	103.26 -53.0%	209.09 -4.8%
134	0.9807	447.9212 (428.2 <-> 467.6)	494.11 10.3%	493.90 10.3%	211.41 -52.8%	496.74 10.9%	496.56 10.9%	211.51 -52.8%	449.31 0.3%
Average Absolute Relative Percent Error			6.1%	6.8%	26.7%	8.6%	7.1%	26.4%	7.4%

3-MM に関しては、中・高負荷の範囲で、近似精度が極端に悪くなることから検証の対象から除外する。

多重化のソースとなる非対称 H_2 分布として、 $C_a^2 = 10$ を固定し、大小二つの異なった歪み度 S_k を考える。また、 $C_a^2 = 10$ に対応する対称型 H_2 分布の歪み度は 9.4552 であり、これを S_{ks} で表す。検証は、ソースの多重数 n と負荷 ρ を変化した場合のシミュレーション結果に対する相対誤差の比較より行った。

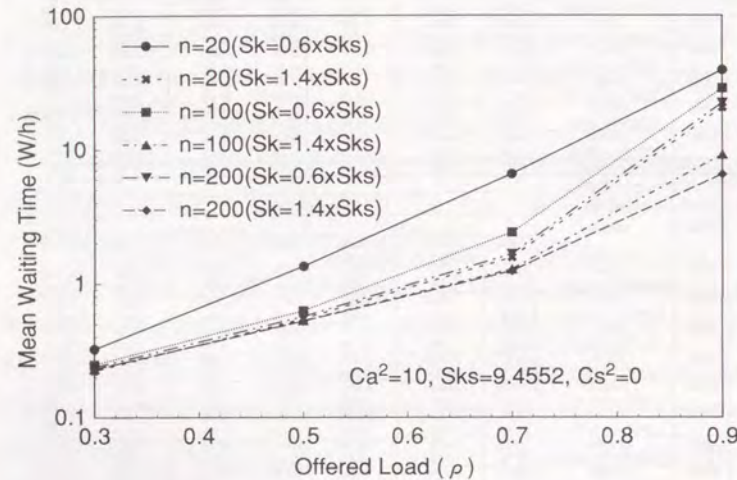


図 2.6: 非対称 H_2 を重畳した場合の平均待ち時間特性

まず、歪み度 S_k の大きさの違いによる重畳過程の平均待ち時間の基本的な特性を知るため、シミュレーションより平均待ち時間を求めた (図 2.6)。多重数 n と負荷 ρ を固定した場合、 S_k の値の小さい方が平均待ち時間が大きく、特に ρ が大きい程、 S_k が平均待ち時間に与える影響が顕著に現れる。また、 ρ が小さい場合、 n が大きいくなるに従い、 S_k の大きさの違いによる平均待ち時間の差がほとんどなくなる。しかし、 ρ が大きい場合には、 n を大きくしてもその差がそれほど縮まらないことが分かる。したがって、特に負荷の大きい場合には、非対称 H_2 分布を重畳した $\sum H_2/G/1$ の平均待ち時間を、対称型 H_2 分布で近似して評価することに限界がある

ことが分かる。

このように、負荷の大きいところで、 S_k の影響が大きいことから、近似精度の検証は中負荷から高負荷について行う。まず、図 2.7 に示す $\rho = 0.5$ の中負荷に関して、 $S_k = 0.6 * S_{ks}$ の場合、多重数 $n = 100$ より小さいところで、2-MM と 3-MM は絶対値で 10% から 20% 台の誤差が生じるが、 n の増加と共に誤差は小さくなる。絶対値誤差の平均で 10% 未満であり、精度の高い近似であることが分かる。 $S_k = 1.4 * S_{ks}$ の場合には、2-MM および 3-MM の近似法に関して絶対値誤差が 10% 以下である。また、QNA よりも高精度な近似であることも確認できる。このように中負荷の範囲では、2-MM および 3-MM 共に非常に良好な近似を与えることが分かる。

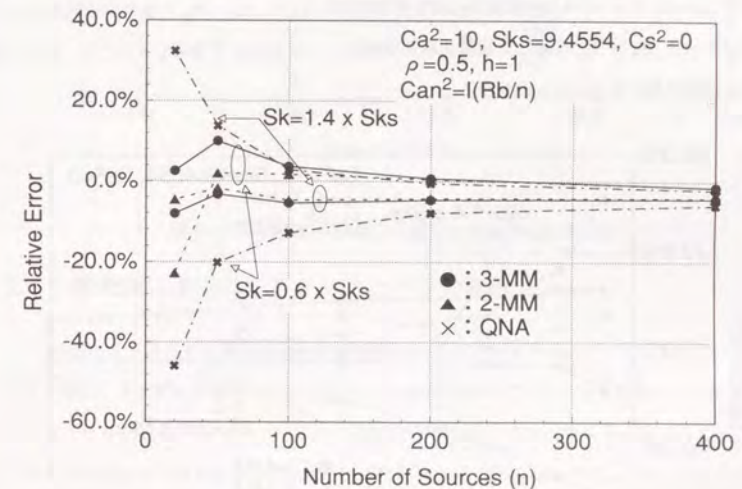


図 2.7: 非対称 H_2 を重畳した場合の近似精度比較 (1)

次に図 2.8 と図 2.9 に示す $\rho = 0.7$ および $\rho = 0.9$ の中負荷から高負荷についての近似精度を考察する。 $S_k = 0.6 * S_{ks}$ に対して、 $\rho = 0.7$ と 0.9 の双方で 2-MM が最も良い近似になっている。3-MM は、20% から 30% の常に大きめの近似となるが、QNA の平均誤差で約 40% から約 50% の常に過小評価する近似と比較して、より実用性の高い近似法である。また、 $\rho = 0.9$ での QNA に関し、 n の増加に対しての近似の改善が殆ど見られないことが分かる。次に $S_k = 1.4 * S_{ks}$

と大きい場合、3-MM は 15% 以下の絶対誤差の高精度近似が得られ、3-MM が 2-MM より高精度な近似になることが分かる。2-MM については、 $\rho = 0.7$ の場合に非常に近似精度は良いが、 $\rho = 0.9$ で S_k が大きい場合には近似精度が 3-MM よりも悪くなる事が分かる。一方 QNA については、常に約 30%-40% の過大な近似値を与えており、3-MM の優位性が確認できる。

以上の近似精度の検証から、規格化増分等価法による 3-MM が、 $\rho = 0.7$ と $\rho = 0.9$ の S_k の小さいところで約 20%-30% 台の大きめの近似となるものの、図 2.7-図 2.9 の全体を通して考えると、より良い近似法であることが分かる。また、表 2.1 で示した様に対称型 $H_2(S_k = S_{ks})$ を重畳した場合には、規格化増分等価法による 3-MM が 2-MM よりも良い近似であった。これを考慮すると、 $\rho = 0.7$ と $\rho = 0.9$ の中負荷から高負荷の範囲に対して、 $S_k < S_{ks}$ の場合の近似法として 2-MM を使い、 $S_k \geq S_{ks}$ の場合に規格化増分等価法による 3-MM を適用することで、さらに高精度な近似評価ができることが分かる。

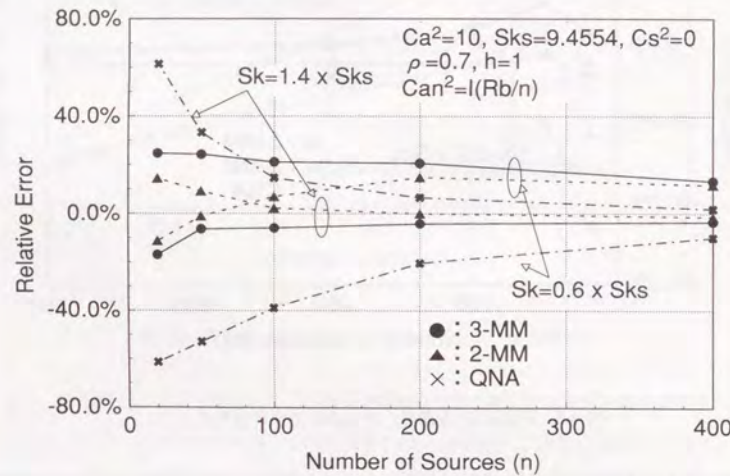


図 2.8: 非対称 H_2 を重畳した場合の近似精度比較 (2)

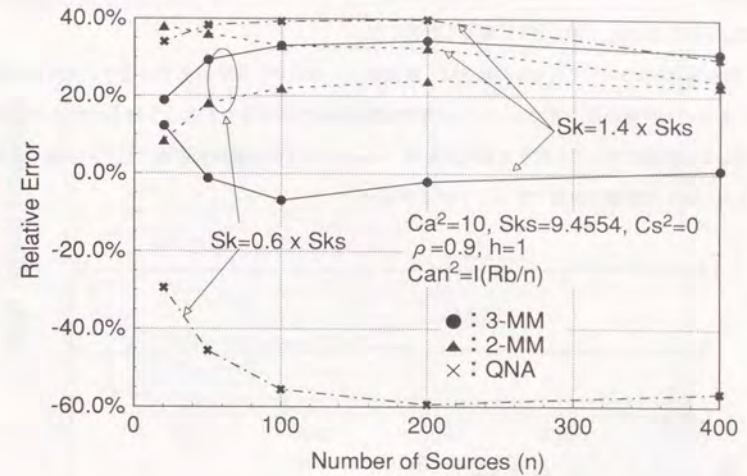


図 2.9: 非対称 H_2 を重畳した場合の近似精度比較 (3)

2.6 重畳数によるバーストラフィックの影響

バーストラフィックを多重した場合の基本的な特性の把握を行う。バーストラフィックを多重する場合、多重数 n を大きくするとバーストの影響が無視できると言う直感的な予測がある。しかし、一方で多重されるバーストソース間での相関があるので、多重数 n を大きくしてもそれほどバーストの影響が無視できる状態にならないと言う予測も成り立つ。

そこで、バーストの影響の残留状況を多重数 n の大きさから検証する。バーストの影響の残留状況を知るため、 n 重畳過程を再生過程で近似すべく平方変動係数 (C_{an}^2) と平均待ち時間 (W_n) を、それぞれ $C_{an}^2 = I(R_b/n)$ と 3-MM 法により計算した。バーストの影響が無視できる状態の判断として、重畳過程のランダム化の状況から行う。すなわち、平方変動係数に関しては、 $C_{an}^2 = 1$ への漸近の状況、平均待ち時間については $M/D/1$ の平均待ち時間への漸近の状況から判断する。

図 2.10 と図 2.11 に対称型 H_2 を多重した場合の C_{an}^2 と W_n の特性をそれぞれ示している。多

重なるソースのパラメタとして、平方変動係数がそれぞれ $C_a^2 = 10$ と 20 を設定し、各加わる負荷 $\rho = 0.7, 0.8 (W_n \text{ のみ}), 0.9$ に関して計算した。

加わる負荷が $\rho = 0.7$ と 0.8 の場合は、多重数 $n = 400$ から 600 以上ではほぼランダム化の状態にあることが分かる。また、ソースの平方変動係数 C_a^2 の大きさにあまり関係せず n の増加に対して、急速にランダム化する傾向がある。 $\rho = 0.7$ 以下の中負荷の範囲では、 n が数 100 程度でバーストの影響を無視できることが分かる。

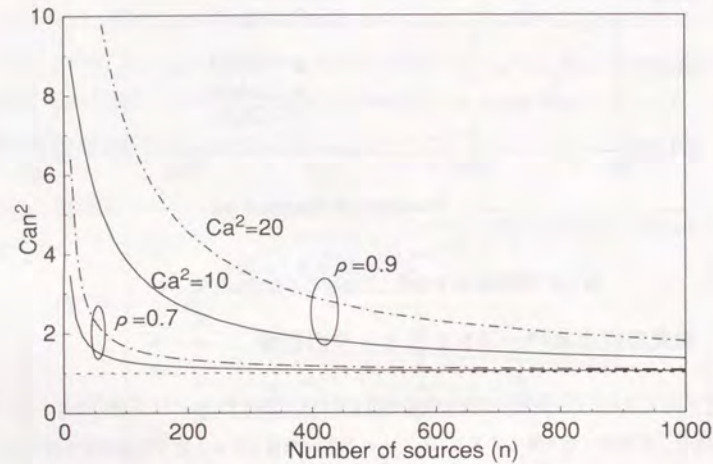


図 2.10: 対称型 H_2 を重畳した場合の多重数 n に対する平方変動係数 (C_{an}^2) 特性

一方、 $\rho = 0.9$ の高負荷では、 $n = 1000$ でもランダム化の状態には至っておらず、バーストの影響がかなり残っていることが確認できる。また、 C_a^2 の大きい程、バースト影響の残留が大きいことも分かる。このことから、 $\rho = 0.9$ を越える高負荷の状態では、バーストの影響を無視して考えることができないことが分かる。

次に、バーストソースの歪み度 S_k の影響によるバーストの残留状況を考える。 S_k の小さな値ほど、平均待ち時間が大きくなることから、対称型 H_2 の歪み度 S_{ks} より小さな S_k について考える。 S_k の設定値としては、それぞれの平方変動係数 $C_a^2 = 10, 20$ に対応する S_{ks} の 0.6 倍

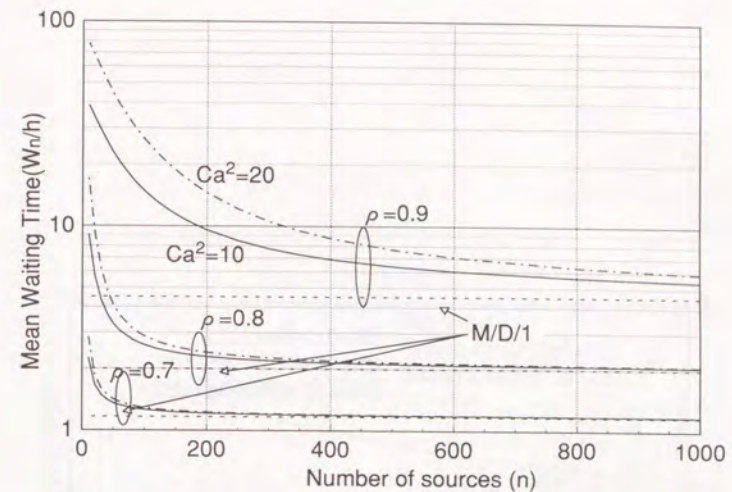


図 2.11: 対称型 H_2 を重畳した場合の多重数 n に対する平均待ち時間特性

とした。32kb/s の ADPCM 音声はバーストの強いトラヒックとして知られていが、ADPCM 音声を ATM で転送する場合のセルトラヒックの平方変動係数と歪みは、それぞれ $C_a^2 \approx 22$, $S_k = 10.8317$ である。 $C_a^2 \approx 22$ に対する対称型 H_2 の歪み度 $S_{ks} = 14.047$ であるので、 $S_k/S_{ks} \approx 0.77$ である。このことから、 $C_a^2 = 20$, $S_k = 0.6 * S_{ks}$ は ADPCM 音声よりも条件の厳しバーストを考えている。その他のパラメタは対称型 H_2 の場合と同様に設定して、 C_{an}^2 と W_n の特性を求めた (図 2.12 と図 2.13)。

両図から、負荷 $\rho = 0.7$ の場合でも、 $n = 1000$ 強で漸くランダム化の状態である。歪み度が、バースト性残留に大きく影響することが分かる。 $\rho = 0.9$ 以上の高負荷では、多重数が相当大きくてもバーストの影響を無視できないことが推測できる。一方、 $\rho = 0.7$ を下回る負荷の範囲では、 $n = 1000$ 以下の範囲でバーストの影響が無視でき、ランダムトラヒックとして扱えられることが分かる。

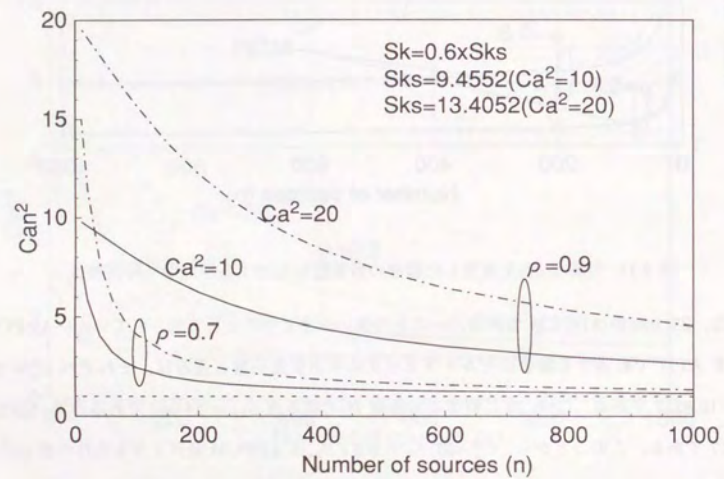


図 2.12: 非対称型 H_2 を重畳した場合の多重数 n に対する平方変動係数 (C_{an}^2) 特性

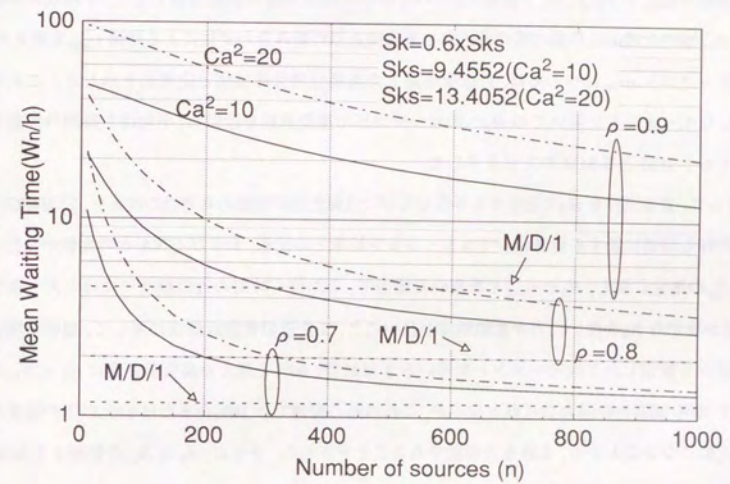


図 2.13: 非対称型 H_2 を重畳した場合の多重数 n に対する平均待ち時間特性

2.7 結言

バーストパケットの重畳を入力する待ち行列システムの平均待ち時間の性能評価に関し、バーストパケットの到着過程を3次モーメントまでが等しい非対称型 H_2 で近似し、それらの重畳過程を再生過程で近似すべく3次までのモーメントをパケットの到着数に関する変動指数 $I(t)$ を用いて推定することで、重畳過程を H_2 の再生過程で近似する手法と、これを応用して $\sum H_2/G/1$ の性能評価を $H_2/G/1$ で近似評価する方法を提案した。重畳過程を H_2 で近似するための平方変動係数を $C_{an}^2 = I[t(\rho)/n]$ で推定し、このときの時間長 $t(\rho)$ の決定方法として、平均残余稼働時間 R_b 、規格化残余仕事量の軽負荷近似と重負荷近似の組み合わせ法による時間 t_{cmb} を考えた。3次モーメント m_{3n} については、 $I(t)$ を応用した規格化増分等価法と定常法を示した。これら推定したモーメントを用いての H_2 へのマッチングで重畳過程を近似し、平均待ち時間の性能を評価する2-MMと3-MMの方法を示した。

さらに、重畳過程を H_2 で近似する手法ならびに近似性能評価法の有効性の検証を、 $\sum H_2/G/1$ の平均待ち時間に関する計算機シミュレーション結果との比較、およびQNAとの比較から行った。 C_{an}^2 の推定に関し、 R_b と t_{cmb} を用いる場合で、平均待ち時間の近似精度にはほとんど差がなく、僅かながら R_b を用いた方が近似精度が良いこと、また近似性能評価法に関して、規格化増分等価法から推定した3次モーメントを用いる3-MMが、90%を超える高負荷並びに $S_k < S_{ks}$ の範囲で20%-30%台の過大な近似となるが、これ以外の範囲では10%台または10%以下の精度の高い近似になることから、良好な近似法であることを示した。さらに、 $S_k < S_{ks}$ の範囲を2-MM、 $S_k \geq S_{ks}$ の範囲で3-MMを適用することで、より近似精度の高い性能評価が可能なることを述べた。QNAとの比較からQNAを上回る近似精度が得られることも確認した。

平均残余稼働時間 R_b や平均待ち時間を、スペクトル分解法を用いて計算するため、関数方程式のゼロ点 (s_1) を求める必要があった。この計算は、基本的には逐次法による数値解法となるが、解は正の領域に一つしか存在しないこと、さらに ρ を初期値した10回未満の逐次計算で実用上十分な精度の解が得られることから、近似性能評価法は計算時間も少なく十分実用に耐え得るものである。

バーストラヒックを重畳した場合の基本的な特性として、重畳数 n に対するバースト性の残留の影響について考察した。バーストラヒックの歪み度がバースト性の残留に大きく影

響し、特に高負荷の領域では重畳数 n を1000を超える大きな値を取ってもバーストの影響が無視できないことが明らかになった。また、 $\rho = 0.7$ 以下の負荷では、 $n = 1000$ 以下ではバーストの影響を無視でき、ランダムトラヒックとして扱えることが分かった。

第3章

ATM 通信における長期品質制御方式

3.1 緒言

ATM は end-to-end の通信経路を呼設定時に行うコネクション・オリエンテッドな回線交換の性質とセルの統計多重により網リソースを共用するパケット交換的な性質を持ち合わせた技術である。したがって、end-to-end に設定されたコネクションで通信する情報のトラヒック量は常に変化する。このため、品質保証を行うための帯域管理法として、従来の回線交換で用いられているコネクションの運ぶトラヒック量を一定とした網リソースの空塞管理法は適用できない。また、パケット交換で行われる網輻輳時のバックワード信号による通信端末へのフロー制御も、制御が効き始めるまでのタイムラグおよび転送揺らぎの大きさの問題から、リアルタイム性を強く要求する通信には有効な品質保証制御とならない。

そこで、ATM 通信では、通信を行うユーザのトラヒックパラメタの申告により事前に網の輻輳状態を把握して、ユーザ通信の受け付け可否判断を行うと言った従来にはない新しい形の品質制御（輻輳制御）が必要となっている。このような ATM で独特な輻輳制御は、基本的には、ユーザ申告トラヒックパラメタを用いたコネクション（呼）受け付け制御（CAC）と申告パラメタが守られているかどうかを監視するポリシング機能（UPC）で実現される。

CAC では、コネクションが保留される時間にほぼ等しい長期間中の統計量（最大帯域、平均帯域、バースト性など）をトラヒックパラメタとして通信要求時にユーザから申告してもらい、そして網は、その通信を受け入れた場合に網全体で通信品質が保証できるか否かの予測の

下、要求されている通信の受け付けの可否判断を行う。したがって、セルの統計多重で網リソースの効率的な利用を行うには、厳密なユーザのパラメタ申告、高精度な長期間での通信品質予測、さらに精度の高い UPC 機能が要求される。

セル廃棄率品質の予測から通信の受け付けの可否判断を行う CAC[34]–[44]、ならびにリーキーバケット、ある決まった位相の周期 T 区間のセル数をカウントするクレジット・ウィンドウ、セル到着情報を時系列的に記憶してある時刻 T 時間前までのセル数をカウントするスライディング・ウィンドウなどによる UPC 方式 [45]–[50] が数多く提案されている。しかし、ユーザ側から見たトラヒックパラメタ申告の難しさ、ユーザ端末と交換機の入力点で必ずしもトラヒックパターンが同じにならないこと、バーストのトラヒック量の短時間に変化する性質を考慮した輻輳制御法の議論がなされていない。

そこで、ユーザのトラヒックパラメタ申告に基づいた CAC と UPC からなる長期の輻輳を回避する品質保証制御法の問題点を述べると共に、短期間での輻輳を回避する品質保証制御の必要性について示す。次に、問題解決へのアプローチを述べ、長期・短期の双方の輻輳を回避する品質保証制御法の基本的考え方を示す。

この基本的考え方に沿って、まずは、ユーザのトラヒックパラメタ申告の難しさの問題を解決するため、ユーザの通信トラヒックの観測から、交換機側でユーザのトラヒックパラメタを推定し、推定パラメタを使って呼の受け付け判断を行う知的呼受付制御方式 [32, 67] を提案する。そして、トラヒックパラメタの推定法なびに呼受け付け判断アルゴリズムについて述べる。

短期輻輳の回避を行う品質制御法は、第4章で詳述する。

3.2 トラヒック申告による長期品質制御の問題点

ユーザのトラヒックパラメタ申告に基づいた CAC では、ユーザに厳密なトラヒックパラメタを申告することが要求される。しかし、全てのユーザが正確に通信すべくトラヒックパラメタを認識し、正確に申告することはかなりの難しさがある。すなわち、ユーザ側からのアクセスが難しい通信方法になっている。

また、正確な申告ができたとしても、ユーザ端末と交換機間に設置される加入者網（宅内系ネットワーク）の影響により、ユーザ端末で発生したトラヒックパターンと交換機入力端で

のパターンが必ずしも一致しないため、ユーザが申告通り守ってトラヒックを発生しても UPC でセルが廃棄される可能性があり、ユーザ申告値が反映されないと言う問題がある。

さらに、CAC では、コネクションの保留時間程度に長い期間に対する統計量で品質の予測をしてコネクションの受け付け判断を行うため、バーストラヒックのトラヒック量の短期的な増加や多重化で生じる瞬時的セル衝突による短期間での大量なセル廃棄を予測することが困難である。短期間に相当量のセルが廃棄される場合、VBR 動画像への品質に悪影響を及ぼすことが考えられる。符号化方式にも大きく依存するが、最悪の場合には、短期間に大量なセルが廃棄されることにより、それ以降の画像の再生ができないことが生じる。

短期間でのセルの廃棄の状況を図 3.1 に示す。本図特性収集の方法や条件などは第 4 章で詳述するが、セルの廃棄時間間隔を横軸にその廃棄時間における頻度を縦軸に取ったものであり、セル廃棄率の時間特性を示している。横にフラットな実線は、測定時間全長での平均セル廃棄率を示す。これは、長時間でのセル廃棄率に相当するものである。また特性は、バーストラヒックとランダムトラヒックをそれぞれ入力とした場合を示して示る。ハッチされた領域は、平均セル廃棄率を越える部分である。

バーストならびにランダムの双方とも、短い時間に相当なセルが廃棄されることが分かる。しかし、バーストの場合には平均セル廃棄率を越える廃棄が、ランダムに比較して非常に多くあり、バーストの短期間でのセル廃棄品質に及ぼす影響の大きさが強いことが分かる。

このことから、長期間での品質保証を行う輻輳制御のみでは不十分で、短期間における品質の保証も考慮した輻輳制御が必要であることが分かる。

3.3 問題解決へのアプローチ

本節では、前節で述べた問題点を解決する方法を述べる。まず、ATM 通信での品質保証の制御法の基本方針を述べる。

(1) 遅延品質別の制御は行わない。

— ATM で適用する伝送路として、加入者線で 155.52Mb/s、交換機間の中継線で 155.52Mb/s よりも速い速度を前提とする。この場合、網内のセル転送遅延ならびに遅延揺らぎは、セルの組立・分解時間に比べて十分無視できるほど小さくなるため、網内での特別な遅延品

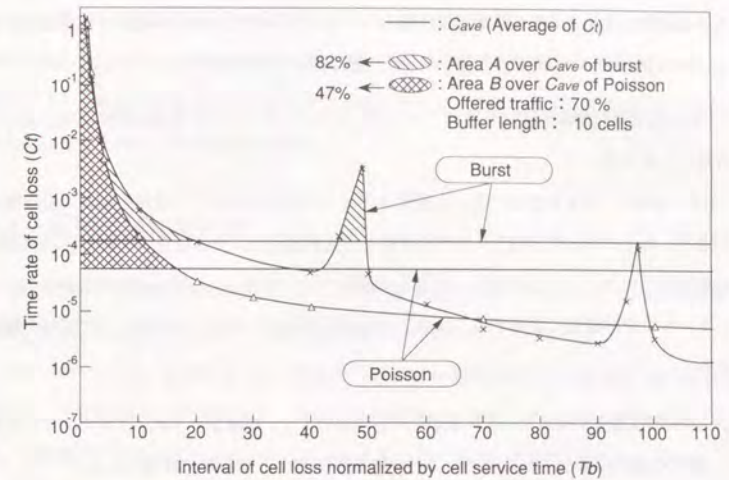


図 3.1: 短期間におけるセル廃棄特性

質保証制御の必要がない。

— 高速な伝送路を適用することで、遅延品質に厳しいリアルタイム性を要求する通信に対しても十分に品質保証できる網内遅延となるが、過剰品質の提供になる可能性がある。過剰品質の是正をすることで、網の利用効率を高めようとする場合には、遅延品質クラス毎の制御が必須となる。しかし、品質クラス制御を行う場合、各クラス毎にバッファを分けての複雑な制御が必要となる。制御の複雑化はシステム実現の困難さ、さらにシステム全体の信頼性の低下を招くため、好ましくない。

(2) セル廃棄率の一番厳しい品質での一元管理による CAC とする。

— セル廃棄クラスによる CAC の制御アルゴリズムならびに帯域管理が複雑化することと、輻輳時に品質要求の厳しくないクラスのセル廃棄により、厳しいクラスの品質保証が比較的容易であり、輻輳時の品質保証に余裕が持てることが理由である。

(3) データサービスに関しては、一番厳しいセル廃棄品質のクラスとして扱わない。

ー 通常、データはセル廃棄品質に厳しいクラスとなるが、end-to-endでの再送によるエラー回復手順の適用が可能なため、データは再送手順に期待する。

上記の品質保証制御の方針を基に、ユーザのトラフィックパラメタ申告の問題解決を次のような方法から考える。

音声、画像、VBR 動画像と言った通信メディア（またはサービス種類）毎に、交換機の入り口点で、ある時間区間 $[0, T]$ における到着セル数を測定し、その測定データと統計処理結果を交換機内データベースに記憶し、記憶した統計データを基にユーザの通信に必要なトラフィックパラメタを交換機側で推定する。このような方法を取ることで、以下のように問題の解決が図れる。

- (a) ユーザは通信すべきサービス種類の申告のみでよく、複雑なトラフィックパラメタは交換機側で自律的に設定されるため、ユーザの通信アクセスが非常に簡便となる。
- (b) ユーザのトラフィックパラメタの決定は、交換機の入り口点でトラフィック測定した結果に基づいて行われるため、加入者網の影響によるユーザ端末と交換機入力側でのトラフィックパターンの不一致を解消できる。
- (c) トラフィックパラメタを測定データとその統計量から推定する際、推定誤差の設定を行うことで、加入者網の影響によるトラフィックパターンの変動に対して、余裕を持ったパラメタの設定が可能となる。

トラフィック測定とその統計処理を記憶して、その記憶結果からトラフィックパラメタの推定を行う一連の処理過程が、学習-推定と言う処理過程と類似し、さらに推定したトラフィックパラメタを用いて呼（コネクション）の受け付け制御を行うことから、本論では知的呼受け付け制御方式と呼ぶこととする。

次に、短期間での輻輳制御では、コネクションの保留時間より非常に短い時間でのセル廃棄を抑制することが重要である。このため、輻輳の検出（品質基準からの品質の劣化の検出）から制御が効き始めるまでの制御遅延が短いことが必須となる。

このことから、セル廃棄品質に厳しいクラスを高優先、厳しくないクラスを低優先とし、バッファ閾値を用いた低優先セル廃棄によるプライオリティ制御が制御の高速性の観点から妥当であると考え、さらに、一番厳しいセル廃棄率品質の一元管理による CAC と組み合わせてプライオリティ制御を適用することにより、高優先クラスの品質を保証できるだけでなく低優先セルの品質をも保証できる可能性がある。

3.4 品質保証制御方式

前節で述べた輻輳制御の基本方針ならびに問題解決アプローチを合わせた品質保証制御方式 [62, 63, 65] を図 3.2 に示す。品質保証制御は二つのステップからなる。

第一ステップは、知的呼受け付け制御を基本とする長期間の輻輳回避制御（長期品質制御）である。知的呼受け付け制御では、ユーザからの直接のトラフィックパラメタ申告の必要はないが、交換機内で設定したトラフィックパラメタを基に呼の受け付け判断を行うことになる。したがって、設定したトラフィックパラメタを越えるトラフィックの網内の流入は輻輳の原因となる。この超過トラフィックの流入を防ぐ機能は UPC である。UPC では、通常、超過トラフィックについては廃棄処理を行う。UPC で監視するトラフィックパラメタはトラフィック測定を基に交換機側で決定したものである。このため、端末や加入者網状態の突然の変化に伴う測定データ不足による原因から、実際のパラメタ値より小さな値を設定することも十分にあり得る。実際より小さなパラメタ値を設定することは、UPC での過剰なセル廃棄につながり好ましくない。

このような状況を避けるため、UPC では過剰流入を即座に廃棄せず、過剰流入セルに対してマークをして、網内に入れて、実際の網輻輳時にマークされたセルを廃棄する方法（マークド・セル方式またはタグド・セル方式と呼ばれている [30, 31]）が妥当であると考え、輻輳時のマークド・セルの廃棄は、交換機内バッファの閾値による制御で行う。

第二ステップは、バッファ閾値を用いたプライオリティ制御による短期間での輻輳回避制御（短期品質制御）である。バッファに滞留しているセル数がある閾値を越えた場合に、セル廃棄率品質が厳しくないクラスの低優先セルを廃棄することにより、セル廃棄率品質に厳しいクラスの品質保証を行う。閾値の選び方によっては、低優先セルの品質保証も可能となる。閾値設定については第 4 章で述べる。

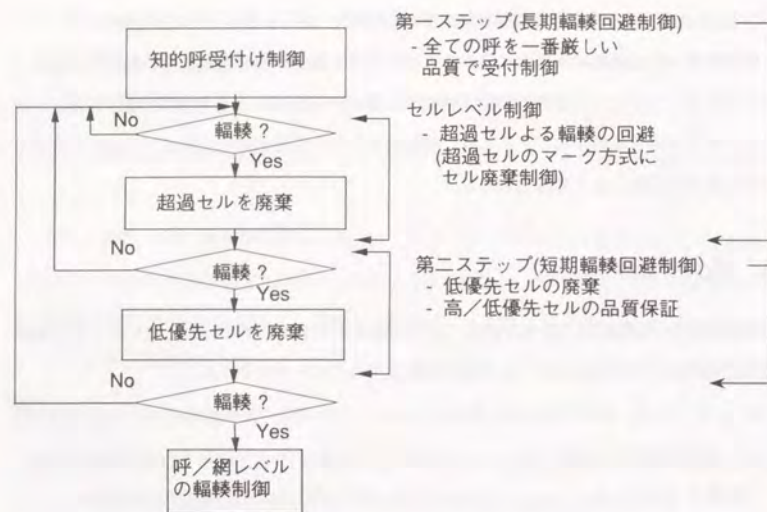


図 3.2: 品質保証制御方式

低優先クラスが殆ど無く、高優先クラスが殆どの場合、プライオリティ制御による輻輳回避は有効にならない可能性がある。このような場合は、高優先クラスの発呼規制や迂回ルーティング等の呼/網レベルでの輻輳回避で対処をする。

3.5 知的呼受け付け制御方式

図 3.3に知的呼受け付け制御の処理の流れを示す。ユーザの通信要求時の通信メディアの申告からトラヒックパラメータを推定するために、ユーザ通信トラヒックの測定データを記憶する部分と、測定データの統計処理から求めたトラヒックパラメータをメディア単位にマッピングするマップテーブルからなるデータベースを設ける。メディア申告を基にテーブルを参照することで、容易にトラヒックパラメータ値を決定することができる。図では、パラメータとして平均の場合の例を示している。

推定すべきトラヒックパラメータを決めるには、受付け判断の方法を明らかにする必要がある。

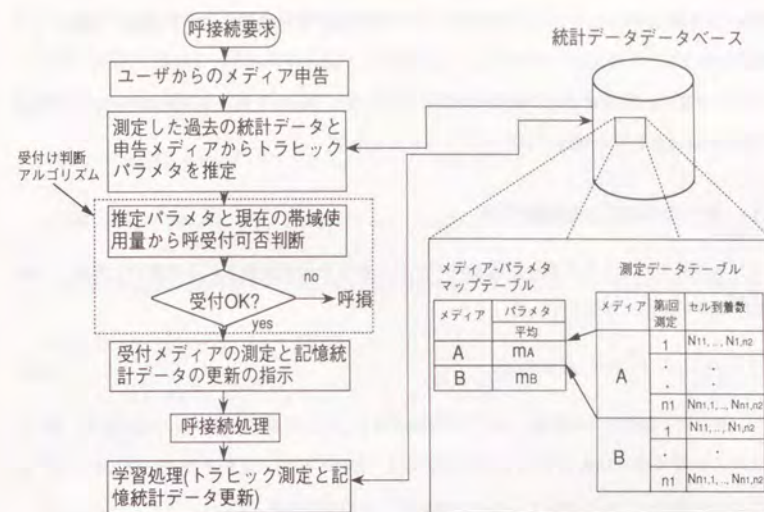


図 3.3: 知的呼受け付け制御方式

受付け判断は、網に加わるバースト多重化トラヒック量からセル廃棄率品質を計算して、長期期間の輻輳状態を推定することで行う。セル廃棄率品質の計算を厳密にできれば、精度の高い輻輳の予測が可能であり、また呼も効率良く網に収容できる。セル廃棄率の評価法として幾つか提案されている [22]–[24], [51]–[60]。しかし、非常に複雑な計算を必要とする。これらの方法を交換機内の処理に組み込んで輻輳予測することは、リアルタイム性を要求される交換機呼処理においては現実的でない。

そこで、ガウス分布を応用したセル廃棄率の上界解析の結果を用いて簡便な条件式により輻輳状態を予測する方法を述べる。この方法では、セル廃棄率を実際よりも大きな値で評価するため、呼の効率的な収容に期待ができない。このため、多重数を大きくとれる高速な伝送路では、バースト性の影響をほぼ無視できることの前章の結果を踏まえて、ポアソン分布により輻輳予測する方法も検討する。ポアソン分布では、帯域を平均のみで簡便に管理できただけでなく、呼の効率的な収容が期待できる。

ガウス分布・ポアソン分布の輻輳予測法の検討に基づいて、交換機側で推定すべきトラヒッ

クパラメタを明らかにし、トラヒックパラメタの測定法、統計処理による推定法、測定データの更新方法について述べる。

本節の最後に、呼の効率的な収容を可能とする、ガウス分布とポアソン分布のそれぞれの輻輳予測法を組み合わせた受付判断アルゴリズムを示す。

3.5.1 ガウス分布による輻輳予測

バーストラヒックを多重した場合のバッファからセルが廃棄される確率の上界は、文献[25, 26]で以下の様に示されている。

$$B \leq \frac{1}{E(N(T))} \int_K^\infty (x - K) dF_T(x) \quad (3.1)$$

ただし、 B はセル廃棄率の厳密値、 $N(T)$ は時間区間 $(0, T]$ に到着するセル数の確率変数、 $F_T(x)$ は $N(T)$ の定常分布、 $E(N(T))$ は $N(T)$ の平均値、 K はバッファ長をそれぞれ表している。また、 T はセルがバッファを通過する最大の遅延で次式の関係がある。

$$T = Kh \quad (3.2)$$

ここで、 h はセルの平均保留時間（平均サービス時間）である。

式(3.1)を計算するには、 $F_T(x)$ を決める必要がある。文献[25]では、 $F_T(x)$ をセル到着数の最大値と平均値を用いた二項分布で近似している。しかし、種類の異なるバーストソースを多重した場合は、多重した種類数を次元とする多次元の二項分布の計算が必要となり、計算が複雑化する。

そこで、 $F_T(x)$ としてガウス分布を用いることで、式(3.1)の計算を簡便に行う。ガウス分布については、ガウス分布に従う確率変数の和の分布はガウス分布になると言う性質を持っている。さらに各確率変数が相互に独立な場合には、和の確率変数の平均と分散のみで分布を表現できる。したがって、バーストソースのセル到着数をガウス分布で近似し、また各バーストソースの独立性の仮定は妥当であると考えられるので、多重化されたセル到着数の分布は、多重化されたセル到着数の平均と分散に従うガウス分布となる。このため、バーストソースの種類数に起因する分布計算の複雑さがなくなる。

n 個の独立なバーストソースの多重を考える。多重化バーストの $(0, T]$ におけるセル到着数 $N(T)$ の平均と分散を、それぞれ $m(T)$ 、 $\sigma^2(T)$ とする。個々のバーストソースに関する平均と分散を $m_j(T)$ 、 $\sigma_j^2(T)$ で表す。 $m(T)$ と $\sigma^2(T)$ は次式で求めることができる。

$$m(T) = m_1(T) + m_2(T) + \cdots + m_j(T) + \cdots + m_n(T) \quad (3.3)$$

$$\sigma^2(T) = \sigma_1^2(T) + \sigma_2^2(T) + \cdots + \sigma_j^2(T) + \cdots + \sigma_n^2(T) \quad (3.4)$$

$F_T(x)$ をガウス分布の下に、式(3.1)を計算すると以下の様にセル廃棄率の上界が求まる。

$$\begin{aligned} B_{ap} &\equiv \frac{1}{E(N(T))} \int_K^\infty (x - K) dF_T(x) \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{K - m(T)}{\sigma(T)}\right) + \frac{\sigma(T)}{m(T)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K - m(T))^2}{2\sigma(T)^2}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ただし、

$$\Phi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^p e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (3.6)$$

で、正規分布を表す。

セル廃棄率の上界式(3.5)の検証を行う。バーストソースモデルとして、ON-OFFモデルを仮定する。ON区間では、 τ の一定間隔でセルが発生し、OFF区間ではセルが発生しないものとする。ON区間とOFF区間は、それぞれ平均が α^{-1} 、 β^{-1} である負の指数分布とする。このモデルのセルの発生間隔の分布 $A(t)$ は文献[27]より以下となる。

$$A(t) = [(1 - \alpha\tau) + \alpha\tau(1 - e^{-\beta(t-\tau)})]U(t - \tau) \quad (3.7)$$

ただし、 $U(t)$ は単位ステップ関数である。

この分布 $A(t)$ から、個々のバーストソースの $(0, T]$ におけるセル到着数の平均 $m_j(T)$ と分散 $\sigma_j^2(T)$ は以下の様に求めることができる。

$$m_j(T) = M_{1j}(T) \quad (3.8)$$

$$\sigma_j^2(T) = M_{2j}(T) - M_{1j}(T)^2 \quad (3.9)$$

ここで、

$$M_1(t) = L^{-1}\left[\frac{\lambda_j}{s^2}\right] \quad (3.10)$$

$$M_2(t) = L^{-1}\left[\frac{\lambda_j(1 + a_j^*(s))}{s^2(1 - a_j^*(s))}\right] \quad (3.11)$$

である。\$a_j^*(s)\$ は \$A(t)\$ のラプラス変換で、

$$a_j^*(s) = [1 - \alpha_j \tau_j + \frac{\alpha_j \tau_j \beta_j}{s + \beta_j}] e^{-s \tau_j}$$

となる。\$\lambda_j^{-1}\$ は \$j\$-バーストソースの平均を表し、演算子 \$L^{-1}\$ は逆ラプラス変換を示す。

式(3.7)で与えられるバーストを \$n\$ 多重した場合のセル廃棄率特性を、上界式(3.5)とシミュレーション結果と合わせて図3.4に示す。バーストソースは、\$\alpha^{-1} = 3.48\text{ms}\$, \$\beta^{-1} = 6.42\text{ms}\$, \$\tau = 0.158\text{ms}\$, \$3.24\text{Mb/s}\$ の最大情報速度とした。\$155.52\text{Mb/s}\$ の伝送路、\$64\$ バイトの固定セル長を仮定して、セルのサービス時間を \$h = 3.3\mu\text{s}\$ とした。上界式(3.5)に関して、最終項を省いた \$1 - \Phi[(K - m(T))/\sigma(T)]\$ の値も示した。\$1 - \Phi[(K - m(T))/\sigma(T)]\$ の方が少し小さな値となるが、双方ともセル上界値になっていることが分かる。そこで、シミュレーション値により近い上界として、

$$B_{ap} = 1 - \Phi[(K - m(T))/\sigma(T)] \quad (3.12)$$

を用いる。

式(3.12)と式(3.6)を用いると、以下の輻輳予測に関する簡便な条件式を得る。

$$m(T) + p_0 \sigma(T) \leq K \quad (3.13)$$

ただし、\$p_0\$ は、要求されるセル廃棄率品質を \$B_{ap}\$ として、

$$B_{ap} = 1 - \Phi(p_0)$$

から決定する。

式(3.13)はCACの帯域管理条件として用いることができる。しかし、条件式が上界式から導出されたため、受け付け可能な最大呼数は、呼の最大帯域で受け付けた場合の受け付け可能な呼数より、少なくなる可能性がある。そこで、以下の補正を行う。

同一のバースト呼を \$n\$ 多重することを考える。バースト呼の \$(0, T]\$ に到着するセル数の最大値(最大帯域)を \$N_p(T)\$ とすると、この最大帯域で多重可能な最大呼数は \$n_p = K/N_p(T)\$ となる。平均 \$m_1(T)\$、分散 \$\sigma_1(T)^2\$ のバースト呼を \$n_p\$ 個多重した場合を想定して、式(3.13)の条件が

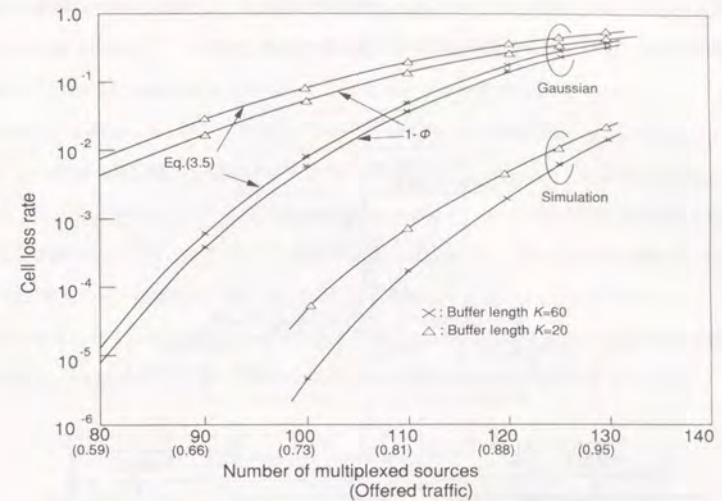


図 3.4: ガウス分布によるセル廃棄率評価

$$n_p m_1(T) + p_0 \sigma_1(T) \sqrt{n_p} > K \quad (3.14)$$

となった場合は、最大帯域で割り付ける方がより多くの呼を受け付けることが可能となるので、最大帯域による割り付けを行う。すなわち、\$m_1(T) = N_p(T)\$, \$\sigma_1(T)^2 = 0\$ として扱う。

以上のことから、ガウス分布による輻輳予測に必要なトラヒックパラメータは、\$m_1(T)\$, \$\sigma_1(T)^2\$, \$N_p(T)\$ となる。

呼の効率的な収容がそれほど必要のない場合は、CACの輻輳予測はガウス分布による方法で十分である。この場合の受け付け判断アルゴリズムは図3.5となる。第 \$j\$ 番目の通信要求に対して、ユーザの通信メディアの申告と測定・統計データのデータベースを用いて、トラヒックパラメータ \$m_j(T)\$, \$\sigma_j(T)^2\$, \$N_{pj}(T)\$ を推定する。次に、最大帯域で収容可能な最大呼数 \$n_p = \rho_G K / N_{pj}(T)\$ を求め、ユーザの要求帯域を、最大帯域、または平均と分散による帯域で推定した方がより多くの呼を収容できるかの判断を行う。この新たな要求呼の帯域の推定値の決定の下、既に通信中の帯域 (\$m(T)\$ と \$\sigma^2\$) に推定帯域を加えて式(3.13)に従う条件の判断により、受け付けの可否判断を行う。受け付け可能になった場合は、通信中帯域の更新を行う。こ

ここで、 ρ_G はシステム定数として、 $0 < \rho_G \leq 1$ の範囲で考える。これは、システム運用の安全性を考慮して、バッファを少し余裕を持たせて使う場合に設定する。

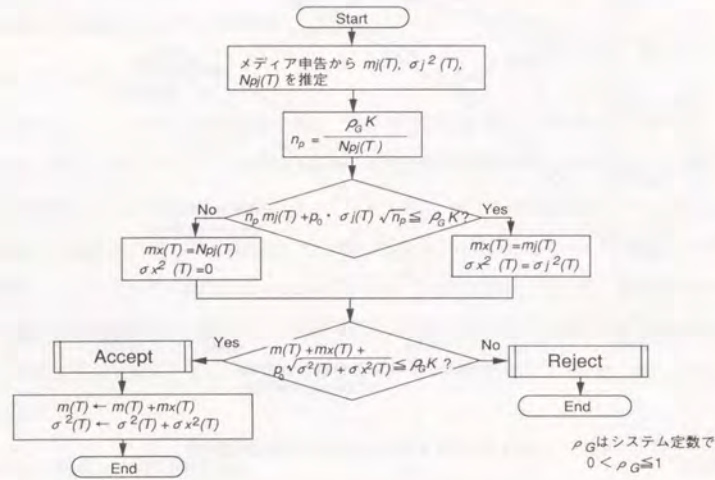


図 3.5: ガウス分布予測による呼受け付け判断アルゴリズム

3.5.2 ポアソン分布による輻輳予測

バーストソースの多重数を大きく取ることができる高速な伝送路では、第2章で明らかになった様に多重化セルトラヒックは、バースト性の影響が無視できランダムトラヒックとして扱うことができる。ガウス分布では、多重数の増加によるランダム化の状況を考慮できないため、効率の良い呼の収容が期待できない。そこで、次にCACにランダム化の状況を考慮する方法を述べる。

第2章では、セル転送遅延についてのランダム化の状況を検証したが、セル廃棄率に関しても同様なことが言えるかどうかを確認する。図3.6と図3.7にバッファ量、多重数、負荷を変化させた場合のセル廃棄率特性を示す。また、各特性は計算機シミュレーションにより求めた。

まず、特徴的なことは、セル廃棄率が、バッファ量の小さいところで、ランダムトラヒックを入

力とするバッファ($M/D/1(K)$)の廃棄率にはほぼ等しく、バッファ量の増加に対して $M/D/1(K)$ と同等な傾きで減少し、さらに、ある点を境にバッファ量を増加させても $M/D/1(K)$ の様に減少せず、非常に緩慢な減少傾向を示すことである。この減少の傾向が変化する点を "Knee Point"[51]と呼んでいる。特に、負荷が大きいく、多重数が小さい場合に、Knee Pointの位置が高く且つ緩慢な減少傾向を強く示す。また、多重数を大きくすることによりKnee Pointの位置を下げるができる。さらに負荷を下げるにより、廃棄率減少の緩慢な傾向を弱められることが分かる。これらのことから、負荷0.7以下の範囲では、1000以下の多重数で、 10^{-7} から 10^{-9} 程度のセル廃棄率は、ほぼ $M/D/1(K)$ の廃棄率で近似できることが予想できる。ATM通信で考えられている一番厳しいセル廃棄率品質で 10^{-9} 程度であるため、上記の負荷と多重数の範囲で、 $M/D/1(K)$ を用いてのセル廃棄率品質の評価が十分可能であると考えられる。

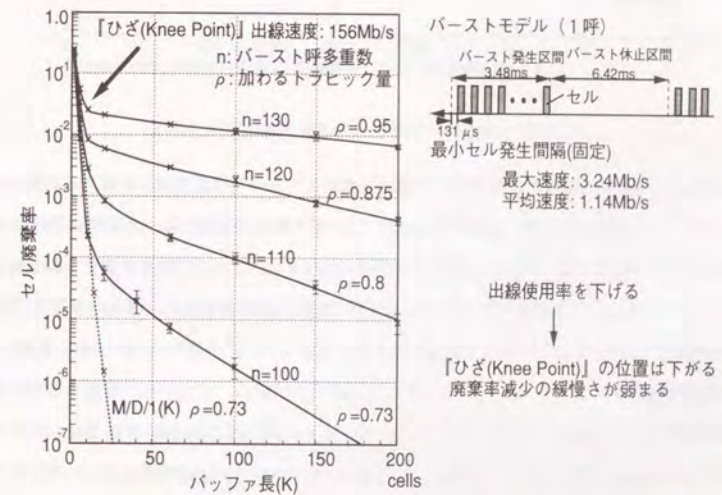


図 3.6: 多重化バーストのセル廃棄率特性 (1)

次に、個々のバースト呼のバースト性の違いがランダム化にどのような影響を及ぼすかを更に調べる。ON 区間長と OFF 区間長の各々が負の指数分布に従う ON-OFF バーストをソースに、同種のソースを多重することを前提として、ソースの平方変動係数 (C_a^2) と ON 区間中に発生

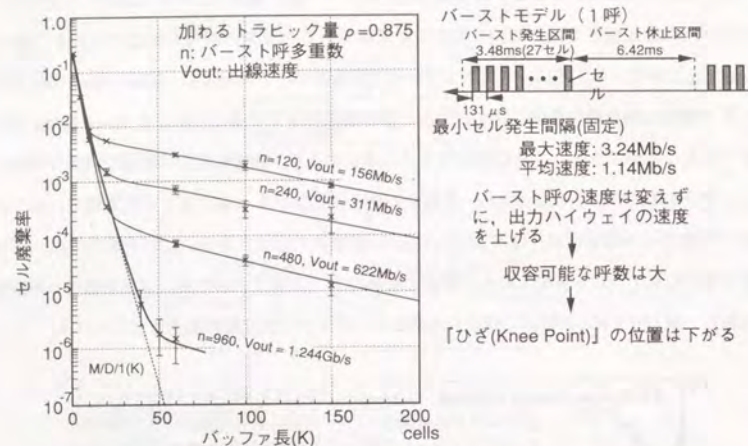


図 3.7: 多重化バーストのセル廃棄率特性 (2)

する平均セル数 (N_b^*) を変えた場合、多重度係数に対するセル廃棄率特性を考える (図 3.8, 図 3.9)。ここで、多重度係数を、伝送路速度/ソースの最大速度で定義する。多重度係数はソースが多重される数の最小数を表している。セル長を 53 バイト、ソースの最大速度を 3.24Mb/s とし、図中の各 C_a^2 、 N_b^* の値となるように ON と OFF の区間長を決め、さらに多重度係数を変えた場合でも常に加わるトラフィック量が 0.7erl となるように、多重するソース数を調整して、セル廃棄率特性をシミュレーションより求めた。図中の破線は、バッファの到着するセル数の分布をポアソンを仮定した場合の (すなわち、ランダム到着) $M/D/1(K)$ で計算されるセル廃棄率を示している。また、図 3.8 は $N_b^* > K$ の場合、図 3.9 は $N_b^* < K$ の場合をそれぞれ示している。

多重度係数の増加に対して、セル廃棄率は一旦 $M/D/1(K)$ のセル廃棄率より小さくなり、 $M/D/1(K)$ のセル廃棄率に近づくことが分かる。多重度係数が大きい場合にはランダムとして扱うことが可能であり、 $M/D/1(K)$ のセル廃棄率が上界値になることが分かる。 $N_b^* > K$ の場合には、 $C_a^2 = 22$ や $C_a^2 = 44$ とかなり大きな変動のバーストでも、多重度係数が 70 程度でラ

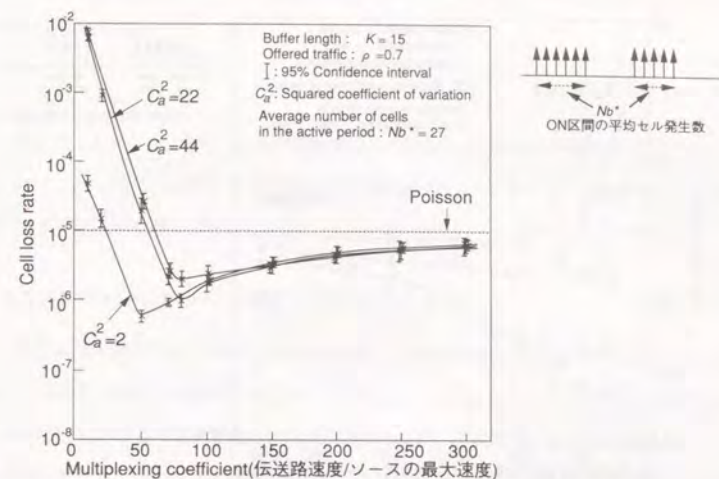


図 3.8: 多重化バーストのセル廃棄率特性 ($N_b^* > K$)

ンダム近似が可能であることが分かる。また、 C_a^2 の大きさが、ランダム近似可能となる多重度係数の値にそれほど大きな影響を及ぼさないことも分かる。一方、 $N_b^* < K$ の場合は、 $N_b^* > K$ の場合とかなり異なり、 $C_a^2 = 16$ でも多重度係数が 90 以上でないとランダム近似ができないことが予想できる。すなわち、 $N_b^* < K$ の場合には、 C_a^2 がランダム近似できる範囲に大きく影響することが分かる。

したがって、セル到着数をポアソン分布とする $M/D/1(K)$ のセル廃棄率により輻輳の予測を行うには、 C_a^2 と N_b^* が重要なパラメタとなる。また、実際にセル廃棄率を $M/D/1(K)$ から求める場合は、平均発生率 λ が必須となる。

平方変動係数 C_a^2 については、以下の関係がある [28]。

$$C_a^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sigma_1^2(t)}{m_1(t)}$$

これより、大きな時間 T_1 に関して C_a^2 を次の様に近似できる。

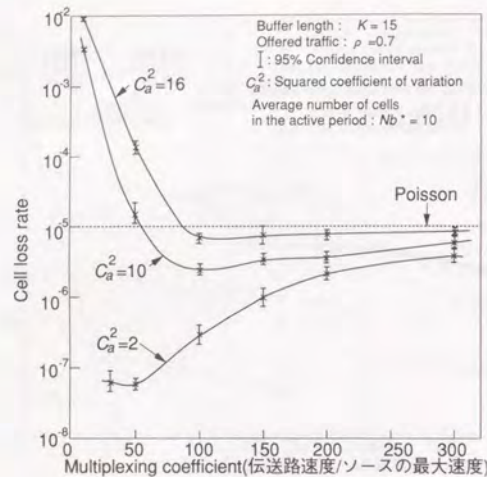


図 3.9: 多重化バーストのセル廃棄率特性 ($N_b^* < K$)

$$C_a^2 \approx \frac{\sigma_1^2(T_l)}{m_1(T_l)} \quad (3.15)$$

式 (3.15) で近似できる必要な T_l の時間長は、ソースのバースト性に大きく依存するが、接続の保留時間程度の時間長で十分である。たとえば、文献 [1, 27] で用いられている 32Kb/s の ADPCM 符号化音声バーストを 64 バイトセルで転送することを仮定すると、このときの C_a^2 の厳密値は 18.1 である。 $T_l = 30$ 秒として、式 (3.15) を計算すると、 C_a^2 は約 18 となる。音声の保留時間は 2 分から 3 分程度なので、 T_l の時間として接続の保留時間で十分と考えられる。また、平均 $m_1(T_l)$ は T_l に比例するため、次のように近似する。

$$m_1(T_l) = \frac{m_1(T)T_l}{T} \quad (3.16)$$

ON 区間中の平均セル発生数 N_b^* については、ON 区間長と OFF 区間長がそれぞれ負の指数分布に従うバーストモデルを仮定して、以下で計算できる [32]。

$$N_b^* = \frac{1}{2} \left[\frac{C_a^2}{(1 - \lambda\tau)^2} + 1 \right] \quad (3.17)$$

ただし、 $\lambda = m_1(T)/T$ で、 τ はセル組立時間である。 τ^{-1} は最大セル転送速度となるので、次の様に近似できる。

$$\tau \approx \frac{T}{N_p(T)} \quad (3.18)$$

以上のことから、ボアソン分布で輻輳予測する場合には、交換機で推定すべきトラフィックパラメタとして、ガウス分布による輻輳予測に必要なパラメタに加えて、長期間 T_l でのセル到着数の分散 $\sigma_1^2(T_l)$ が必要となる。

3.5.3 トラフィックパラメタ測定と推定法

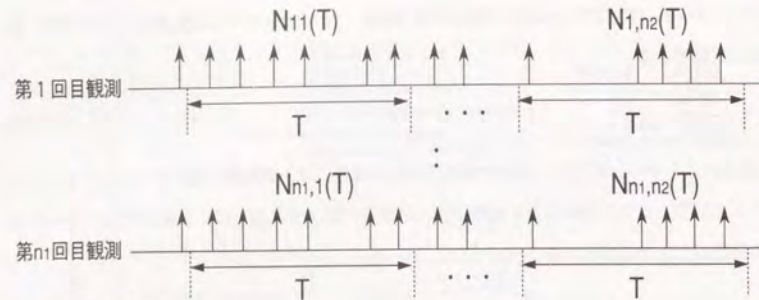
ガウスおよびボアソン分布で長期間の輻輳を予測するための必要なトラフィックパラメタは、 $(0, T]$ における到着セル数の最大 $N_p(T)$ 、平均 $m(T)$ 、分散 $\sigma^2(T)$ 、そして十分に長い T_l に対する $(0, T_l]$ におけるセル到着数の分散 $\sigma^2(T_l)$ であった。交換機は、ユーザの通信メディアの申告から、トラフィックパラメタをユーザ通信メディアのトラフィック測定データを基にして決める必要がある。

トラフィック測定は、音声、ファイル転送、VBR 動画像等の通信メディア単位で行い、時間区間長 T および T_l のセル到着数を n_2 区間観測し、さらに同様な観測を n_1 回行う (n_1 個の呼について行う)。すなわち、時間区間長 T および T_l における到着セル数の観測値を $N_{ik}(T)$ 、 $N_{ik}(T_l)$ とする (図 3.10 を参照)。ただし、 $1 \leq i \leq n_1$ 、 $1 \leq k \leq n_2$ とする。また、常に n_1 個の呼の観測データから推定できる様に、 $n_1 + 1$ 番目の呼が通信される時、1 番目の観測値は棄却する。

確率変数となる観測値 $N_{ik}(T)$ 、 $N_{ik}(T_l)$ がそれぞれ正規分布に従うことを仮定して、 $m(T)$ と $\sigma^2(T)$ の $\alpha\%$ 信頼の区間推定を行うと以下となる [29]。ただし、区間長 T_l の場合も同様であるので、ここでは省略する。

$$\left. \begin{aligned} m^* - t_{n_1 n_2 - 1}(\alpha/2) \frac{S}{(n_1 n_2 - 1)^{1/2}} &\leq m(T) \leq m^* + t_{n_1 n_2 - 1}(\alpha/2) \frac{S}{(n_1 n_2 - 1)^{1/2}} \\ \frac{n_1 n_2 S^2}{\chi_{n_1 n_2 - 1}^2(\alpha/2)} &\leq \sigma^2(T) \leq \frac{n_1 n_2 S^2}{\chi_{n_1 n_2 - 1}^2(1 - \alpha/2)} \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

ただし、 $t_{n_1 n_2 - 1}(\cdot)$ は t -分布、 $\chi_{n_1 n_2 - 1}^2(\cdot)$ はカイ二乗分布、 $m^* = \sum_i \sum_k N_{ik}(T)/(n_1 n_2)$ 、 $S^2 = \sum_i \sum_k [N_{ik}(T) - m^*]^2/(n_1 n_2)$ である。



・平均 $m(T)$ の推定:

$$m(T) = m^* + \theta \frac{S}{(n_1 n_2 - 1)^{1/2}}$$

m^* : $n_1 n_2$ 個観測のサンプル平均
 S : $n_1 n_2$ 個観測のサンプル分散の平方根
 θ : 推定誤差から決まる定数

・観測データと推定値の更新:

- n_1+1 回目の観測を行った時、1 回目の観測データを棄却して、 n_1+1 回目の観測データを用いて推定値の更新を行う

図 3.10: トラフィックパラメータ測定と学習法

これより、 $m(T)$ と $\sigma^2(T)$ の $\alpha\%$ 信頼の上限は次の様になる。

$$\begin{aligned} m(T) &= m^* + t_{n_1 n_2 - 1}(\alpha/2) \frac{S}{(n_1 n_2 - 1)^{1/2}} \\ &= m^* + \theta \frac{S}{(n_1 n_2 - 1)^{1/2}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(T) &= \frac{n_1 n_2 S^2}{\chi_{n_1 n_2 - 1}^2(1 - \alpha/2)} \\ &= \frac{n_1 n_2 S^2}{n_1 n_2 - 1} + \left[\frac{n_1 n_2 - 1}{\chi_{n_1 n_2 - 1}^2(1 - \alpha/2)} - 1 \right] \frac{n_1 n_2 S^2}{n_1 n_2 - 1} \\ &= \frac{n_1 n_2 S^2}{n_1 n_2 - 1} + \zeta \frac{n_1 n_2 S^2}{n_1 n_2 - 1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

ただし、 $N_{ik}(T)$ が正規分布に従う場合、 θ は t -分布の関数、 ζ はカイ二乗分布の関数となる。また、 θ と ζ はそれぞれ推定誤差に対して正の値を割り付けることができる。

$\sigma^2(T_i)$ についても同様に式 (3.21) で求まるが、 $m_1(T_i)$ のサンプル平均について式 (3.16) を考慮して、サンプル分散を次式を用いて計算する。

$$S^2 = \sum_i \sum_k \frac{[N_{ik}(T_i) - m^* T_i / T]^2}{n_1 n_2}$$

次に、最大セル到着数 $N_p(T)$ は、区間 T の n_2 個中の最大値の平均より推定する。

$$N_p(T) = N_p^* + \xi \frac{S_p}{(n_1 - 1)^{1/2}} \quad (3.22)$$

ただし、 $N_p^* = \sum_i N_{pi} / n_1$ 、 $S_p^2 = \sum_i [N_{pi} - N_p^*]^2 / n_1$ 、 $N_{pi} = \max_k [N_{ik}(T)]$ で、 ξ は推定誤差から決まる定数である。

少なくとも $n_1 n_2$ 回の観測が完了しなければ、パラメータの推定ができないので、初期状態として、各メディアを一定速度の通信メディアと考え、最大値をパラメータに割り付ける。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} m(T) &= N_p(T) = N_{ppx} \\ \sigma^2(T) &= \sigma^2(T_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

とする。ただし、最大速度 N_{ppx} は各メディア毎に事前に設定されるものとする。

推定したパラメータ値を越えるセル入力がある場合は、UPC でマークされて輻輳時に網内で廃棄されることになるが、次の条件が満たされない時にマークされる。

$$\left. \begin{aligned} N_{ik}(T) &\leq N_p(T) \\ \text{or } \sum_k N_{ik}(T) &\leq n_2 m(T) \\ \text{or } \sum_k [N_{ik}(T) - m(T)]^+ &\leq n_2 \sigma(T) \quad \text{for fixed } i \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

ただし、 Y^+ は $Y \leq 0$ のときに Y で、それ以外はゼロである。

また、 θ 、 ζ 、 ξ の設定値により、マークされるセルの量を変えることが可能である。たとえば、マークされる量を 1% とすると、推定誤差 1% に対する各設定値を決定することできる。この場合、 $\theta = \xi \approx 2.6$ 、 $\zeta = 0.5$ となる。

3.5.4 ガウス・ポアソン組み合わせによる呼受け付け判断アルゴリズム

ガウス分布の輻輳予測とポアソン分布による輻輳予測を組み合わせた受け付け判断アルゴリズムを述べる。前節では、ポアソン分布で輻輳予測可能な範囲を多重度係数、平方変動係数 C_a^2 、ON 区間中の平均セル発生数 N_s^* のパラメータから考察し、これらパラメータを旨く設定することにより、ポアソン分布による輻輳予測の範囲を決定できることが分かった。

そこで、ポアソン分布で輻輳予測可能な多重度係数を X_c 、平方変動係数を η 、ON 区間中の平均セル発生数とバッファ長との比 (N_b^*/K) を γ として、これらパラメータをシステム定数とする。また、これらパラメータは、計算機シミュレーションや実運用時のトラフィック測定などの結果を用いて、適宜に変更可能なものとする。

伝送路の帯域を $C_{TT}(\text{cell/s})$ とし、ポアソン分布の輻輳予測で受け付け判断を行う仮想帯域を C_{TP} とする。残りの帯域をガウス分布輻輳予測による受け付け判断を行う仮想帯域 C_{TG} とする。各仮想帯域の分割は、以下の様に考える。

(1) 伝送路帯域 C_{TT} に対して、ポアソン分布輻輳予測可能な多重度係数を $x_1 = X_c$ を設定する。

(2) $W_{mp1} = C_{TT}/x_1$ を計算する。 W_{mp1} は、伝送路帯域 C_{TT} に対してのポアソン輻輳予測可能な通信メディアの最大帯域を示している。

(3) W_{mp1} よりも大きな最大帯域を持つ全てのメディアに対しての必要帯域を W_{gp1} とする。この帯域は、呼損率とメディア要求最大帯域を考慮して決める。

(4) 次に、 $C_{TG} = W_{gp1}$ として、 $C_{TP} = C_{TT} - W_{gp1}$ から、各仮想帯域を決める。

たとえば、 C_{TT} として 10Gb/s 以上の伝送路が適用できたとして、 $X_c=100$ 程度に設定すると、ポアソン分布輻輳予測可能なメディアの最大速度はほぼ $W_{mp1}=100\text{Mb/s}$ となる。最大速度 100Mb/s を越えるメディアに対しては、ガウス分布で輻輳予測を行う帯域 W_{gp1} を用いて通信することとなる。メディアの多くは最大帯域 100Mb/s 以下の通信と考えられるため、 W_{gp1} はそれほど大きな帯域とならないと考えられる。したがって、 C_{TP} は C_{TT} にかなり近い値を設定できるものと考えられる。

ガウスとポアソンの輻輳予測を組み合わせた場合の受け付け判断アルゴリズムは次のようになる (図 3.11)。

(1) ユーザのメディア申告から、トラフィックパラメータ $m_j(T)$ 、 $\sigma_j^2(T)$ 、 $N_{pj}(T)$ 、 $\sigma_j^2(T_i)$ を推定

し、 C_a^2 、 τ^{-1} 、 N_b^* を式 (3.15-3.18) を用いて計算する。

(2) ポアソン分布輻輳予測可能か否かの判断をシステム定数 X_c 、 η 、 γ を用いて判断する。ここでの判断では、伝送路帯域の仮想帯域分割を考慮して、ポアソン輻輳予測に対してのバッファ長を $(1 - C_{TG}/C_{TT})K$ として考える。この条件判断が満たせば、ポアソン分布輻輳予測を行い、満たさなければガウス分布輻輳予測を行う。

ポアソン輻輳予測の場合は、次の様になる。

(3) m をポアソン輻輳予測により帯域を割り付けられている通信中の平均帯域 (cell/s) とする。新たに通信を要求している平均帯域 $m_j(T)/T$ と m の和が $\rho_p C_{TP}$ 以下ならば新たな通信要求を受け付け、そうでなければ受け付けの拒否を行う。受け付け可能な場合は、 m に $m_j(T)/T$ を加えて、 m の更新を行う。 ρ_p はシステム定数である。ポアソン輻輳予測で受け付けを行う場合のセル廃棄品質基準とする $M/D/1((1 - C_{TG}/C_{TT})K)$ から求め負荷率よりも小さく設定する必要がある。

ガウス輻輳予測の場合は、以下となる。

(4) 図 3.5 と基本的には同じであるが、仮想帯域分割を考慮して、バッファ長として $(1 - C_{TP}/C_{TT})K$ を適用する。

10Gb/s の光伝送路はすでに実用化レベルに達しており、将来さらに伝送路の高速化が期待できる [33]。このような状況を考慮すると、殆どの通信メディアをポアソン輻輳予測可能であり、より効率的な呼の収容が可能になるものと考えられる。

3.6 結言

ATM の通信品質保証制御で基本となるユーザのトラフィックパラメタ申告による CAC と UPC による長期輻輳制御に関し、ユーザのトラフィック申告の困難さと、加入者網の影響によりユーザ端末と網の入り口 (交換機入力点) とで、ユーザトラフィックパターンが一致しないことの問題の解決を図るため、知的 CAC による長期品質制御法を示した。

知的 CAC では、メディア毎のユーザトラフィックを網入口で測定と学習 (測定データの記憶) をして、ユーザのメディア申告からトラフィックパラメタを網側で推定することで、問題の解決が図れることを示した。

セルの廃棄率の推定から長期輻輳予測を行うガウス分布予測法とポアソン分布予測法の検討から、網側で推定すべくトラフィックパラメタは、バッファを通過する最大遅延を時間 T とする T 中のセル到着数の平均 $m(T)$ 、分散 $\sigma(T)^2$ 、最大 $N_p(T)$ と、コネクションの保留時間程度に長い時間を T_l とする T_l 中のセル到着数の分散 $\sigma(T_l)^2$ で十分であることを述べた。

さらに、セル廃棄率に関して、バーストラフィックの多重数を増加させた場合のランダム化の検証をシミュレーションで行い、セル廃棄率を $M/D/1(K)$ で近似可能な範囲を定めるキーパラメタ (平方変動係数, ON 区間中の平均セル発生数, 多重度係数) が明らかになった。キーパラメタ値を条件としてガウス分布輻輳予測とポアソン分布輻輳予測を組み合わせた、効率的な呼の収容を可能とする受け付け判断アルゴリズムを得た。

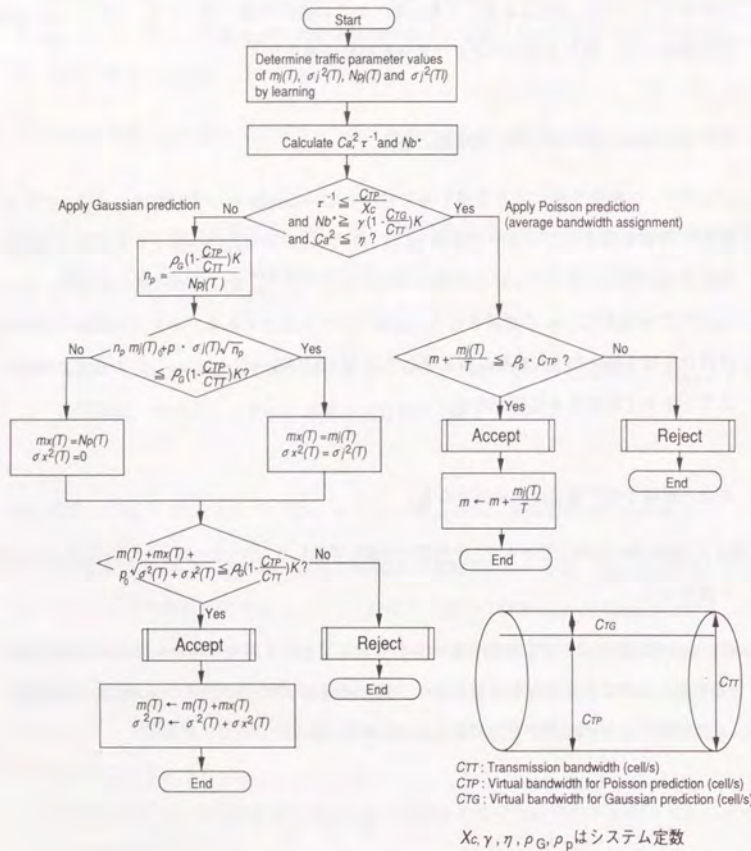


図 3.11: 組み合わせによる受け付け判断アルゴリズム

第4章

ATM 通信における短期品質制御方式

4.1 緒言

バッファ閾値を用いたプライオリティ制御による短期間の輻輳制御について述べる [32, 65, 66]. 短期間での輻輳を考えるには, 統計的平衡状態に達する様な長期におけるセル廃棄の特性では不十分であり, セル廃棄率の時間的な特性を把握する必要がある. 先ず, セル廃棄率の時間的な特性を得るためのシミュレーション法を述べ, 特性の把握を行う. 次に, 短期間輻輳制御を実現するためのバッファ制御メカニズムを示すと共に, シミュレーションに基づいた制御法の有効性について述べる.

4.2 セル廃棄率の時間特性

バッファが busy となる時間的な割合を考える. バッファは, バッファが満杯である busy 状態と, 満杯でない non-busy 状態を遷移する繰り返しの動作をしている. busy 状態となっている時間長を τ_b , non-busy 状態の時間長を τ_i とすると, busy 状態にある時間的な割合は,

$$\frac{\tau_b}{\tau_i + \tau_b}$$

で表すことができる. τ_b は, busy 状態から non-busy 状態になるまでの時間であるので, セルの転送時間 (セルのサービス時間) で近似できる. また, セル廃棄は, バッファが busy 状態でのみ生じるので, τ_i はセルの廃棄間隔で近似可能である (ただし, busy 状態で廃棄されるセル

数は一個で, 多数のセル廃棄は無いものとする). ATM ネットワークでは, セル長が固定であるため, セル転送時間は一定値である. すなわち, τ_b は一定数で, τ_i のみが確率的な変動を有するものと考えることができる.

T_c をセルの転送時間, T_b をセルの廃棄間隔時間として, セル廃棄の時間的な割合を次式で定義する.

$$C_{tr} = \frac{T_c}{T_c + T_b}$$

セル廃棄の時間平均 C_{ave} を考える. T_b の平均 T_{bave} が求まれば, C_{ave} は次式で求めることができる.

$$C_{ave} = \frac{T_c}{T_c + T_{bave}}$$

セル廃棄の時間平均は, 一般にセル廃棄率と等しくはならない. しかし, 後のシミュレーションで検証するが, それほど大きな違いのないことが確認できる. したがって, 基本的な特性の把握には, 時間平均をセル廃棄率として見なしてもそれほど大きな問題とならない.

次に, 廃棄間隔 T_b の発生する頻度を考慮したセル廃棄の時間割合 C_t を考える. すなわち, ある観測区間で廃棄されたセル数を N_T として, N_T に対するセル廃棄間隔 T_b で廃棄された個数 N_{Tb} の比を C_t に掛けた量を考える. こうすることにより, セル廃棄間隔 T_b で廃棄された廃棄の時間割合を求めることができる.

$$C_t = \frac{T_c}{T_c + T_b} \frac{N_{Tb}}{N_T}$$

C_t をシミュレーションより求めた例を図 4.1 に示す. パーストモデルとして, ON-OFF モデルを仮定し, ON 区間は平均が 3.48ms, OFF 区間は平均が 6.42ms のそれぞれ負の指数分布とした. また, ON 区間での情報の最大速度を 3.24Mb/s とした. さらに, 155.52Mb/s の伝送路と 53 バイトのセル長を考慮して, セル化時間を $\tau=0.131\text{ms}$ に設定した (情報フィールド長も 53 バイトとしている). バッファに加わる負荷は, $\rho=0.7$, バッファ長 $K=10$ セルとした.

図中, 実直線は C_{ave} を, 破線はセル廃棄率をそれぞれ示して示す. また, 比較のため, ポアソン入力 (ランダム入力) の場合も合わせて示した. C_{ave} を越える廃棄の時間割合をハッチ部分で示した. 時間平均のセル廃棄率 C_{ave} とセル廃棄率にそれほど大きな差が無いことが確認できる.

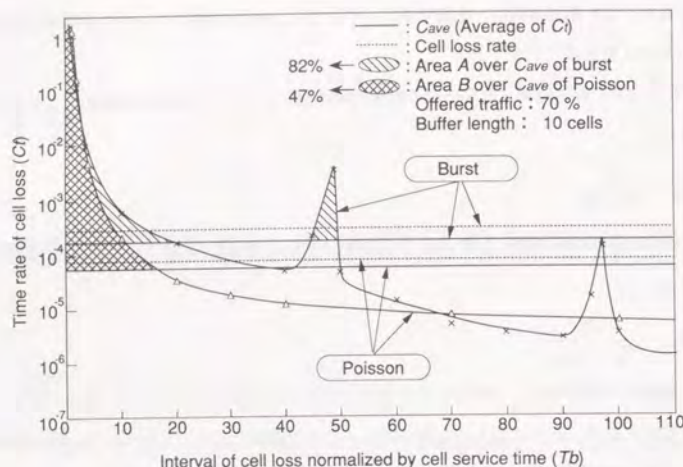


図 4.1: セル廃棄率の時間特性

バースト入力ならびにポアソン入力の場合でも、短い時間間隔で廃棄される割合が大きいことが分かる。特にバースト入力の場合は、 C_{ave} を越える量が大きく、たとえ長期でのセル廃棄率が満足されても、短期ではセル廃棄品質が十分に満足できないことが分かる。また、 C_4 はある一定セル廃棄間隔時間毎にピークが発生している。このピークは、バーストモデルのセル化時間（セルの最大速度）に一致している。VBR 動画像のように比較的ピーク速度が大きいメディアでは、廃棄されるセルの殆どが短期間に生じ、品質に大きな影響を与えることが予想される。

さらに、セル最大速度の推定の誤差が、短期セル廃棄に大きな影響を及ぼすため、セル最大速度の推定を高精度に行うと共に推定値を越える通信の検出 (UPC) は厳密にする必要がある。

以上、短期間でのセル廃棄の状況をセル廃棄間隔に対するセル廃棄の時間割合から考察し、短期間でのセル廃棄の抑制の必要を示した。

4.3 多閾値つきバッファ制御メカニズムによる短期輻輳制御法

バッファの閾値を用いたセルのプライオリティ制御による短期輻輳を回避するバッファ構成ならびに制御アルゴリズムを示す。また、図 3.2 で示した品質制御方式の全体構成で長期輻輳回避に係わるマークド・セルの廃棄もバッファ閾値制御となるので、ここで合わせて示す。

制御メカニズムの基本は二つのステップからなる。第一ステップは、あるバッファ閾値を越えた場合にマークド・セルを廃棄することである。基本は長期輻輳回避に係わる制御である。特にセルの最大速度の設定パラメタを越えるセル量を廃棄することは、前節のセル廃棄間隔に対するセル廃棄の時間割合の特性から明らかになったように、短期セル廃棄の悪影響を抑制する効果がある。第二ステップは、セル廃棄率に厳しいクラスを高優先、厳しく無いクラスを低優先として、第二のバッファ閾値を越えた場合に低優先クラスセルを廃棄することである。

この制御メカニズムを実現するバッファ構成を図 4.2 に示す。バッファ制御装置は、バッファの各閾値を監視し、バッファ内セル量が閾値を越えた場合に、バッファ装置の入力部のスイッチ制御により目的とするセルの廃棄を行う。マークド・セルが廃棄される閾値は X_2 で、低優先セルは閾値 X_3 を越えた時に廃棄される。閾値 X_1 は、マークド・セルの廃棄をストップさせる閾値である。 $X_1 \leq X_2$ に設定することで、ヒステリシスを持たせて制御特性の安定化を図ることが可能である。 X_1 の具体的な設定値は、制御特性の把握の下に決定する。閾値 X_2 は、ATM 網の運用負荷に対応したバッファ内許容残留セル量より決めるのが妥当である。たとえば、図 3.11 のガウスとポアソン組み合わせによる輻輳予測に基づいた受け付け制御では、 $X_2 = \rho_G(1 - C_{TP}/C_{TT})K + \rho_P(1 - C_{TG}/C_{TT})K$ と設定する。閾値 X_3 は、多重化バーストラビックの瞬時的な変動を考慮して X_2 より大きな値とし、高優先と低優先の品質保証を考慮して決定する。次節でのプライオリティ制御特性から X_3 の決定法について触れる。

図 4.3 にバッファ制御アルゴリズムを示した。

4.4 短期輻輳制御法の有効性の評価

バッファのプライオリティ制御による短期輻輳制御の有効性をセル廃棄率特性 (長期間特性) とセル廃棄の時間特性から検証する。各特性はシミュレーションで求め、バーストモデルは第

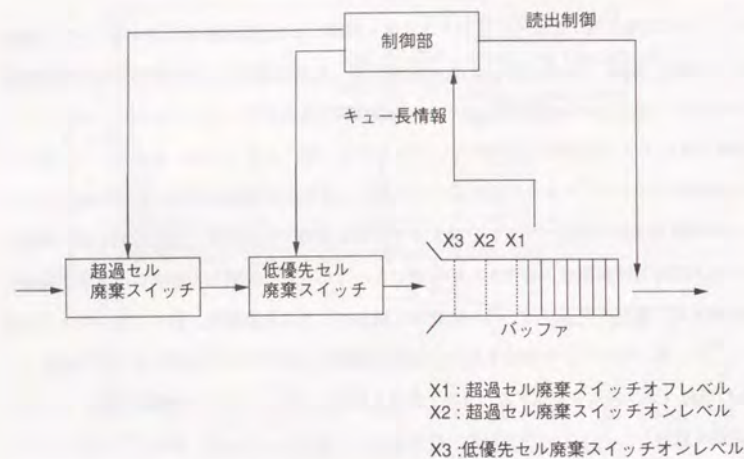


図 4.2: 短期輻輳の制御を実現するバッファ構成

4.2節と同様とした。

図 4.4 にバッファ閾値 X_3 のプライオリティ制御によるセル廃棄率特性を示す。閾値 X_3 はバッファ長で規格化した値で示し、バッファ長は 84 セルとした。高優先と低優先の混在比を 5:5 とし、加わる負荷を $\rho=0.8, 0.9, 0.95$ と変化させた。さらに、図中の“H:L = 8:2”は、高優先と低優先の混在比が 8:2 で、加わる負荷が $\rho=0.8$ の場合の特性を示す。

混在比 8:2 と 5:5 の場合を比較すると、混在比 8:2 の低優先セルの廃棄率がより小さく、高優先セルの廃棄率は逆に大きな廃棄率を示す。閾値 X_3 を変化させた場合の高優先セル廃棄率に関して、混在比 5:5 の方が僅かな閾値 X_3 の変化に対して、高優先セル廃棄率は大きく改善される。これは、混在比 5:5 の方が廃棄すべき低優先セルをより多くバッファ内に含むため、低優先セルの廃棄の効果が大きいものと考えられる。混在比 8:2 は、混在比 5:5 と同等の高優先セル廃棄率を満たすには、混在比 5:5 の閾値より小さな値を設定する必要があるものの、高優先セル廃棄率の改善に効果が十分にあることが分かる。

閾値 X_3 に対する低優先セル廃棄率に関して、高優先セル廃棄率の変化の大きさに比較して、

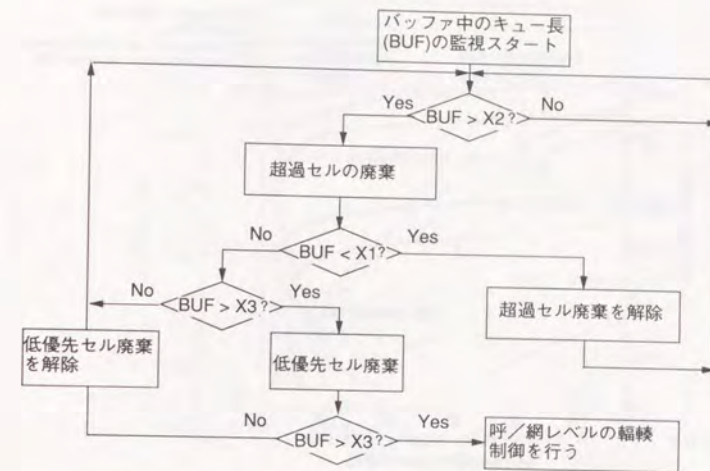


図 4.3: バッファ制御アルゴリズム

低優先セル廃棄率の変化は非常に遅く、殆ど変化が無いことが確認できる。このことから、閾値 X_3 の決定は高優先セル廃棄率の品質保証値を中心に考えられることが分かる。

図 4.5 に加わる負荷に対する高優先・低優先セルの廃棄率特性ならびにプライオリティ制御をしない場合の特性を示す。バッファ長 84 セル、混在比 5:5、閾値 $X_3 = 81$ とした。低優先セル廃棄率は、プライオリティ制御無しの場合のセル廃棄率と殆ど変わらず、高優先セル廃棄率の改善の度合いが非常に大きいことが分かる。このことから、プライオリティ制御の有効性が確認できる。

低優先セル廃棄率がプライオリティ制御無しの場合とほぼ等しいことから、以下の様な考えで閾値 X_3 を決定できるものと考えられる。

- (1) 低優先セルの保証すべき廃棄率を満たす負荷 ρ をプライオリティ制御無しの場合のセル廃棄率特性より決める。
- (2) 前記 ρ と高優先・低優先の混在比を用いて、高優先セルの保証すべき廃棄率を満たす閾値

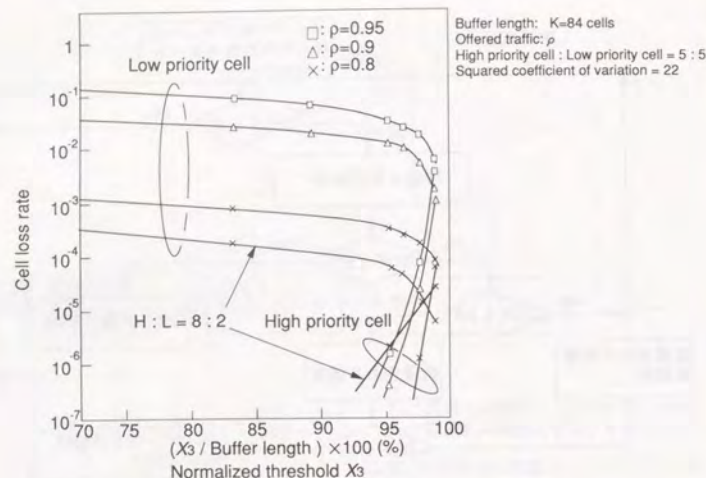


図 4.4: プライオリティ制御におけるセル廃棄率特性

X_3 を決める。

例えば、バッファ長を 84 セル、低優先セルと高優先セルの廃棄率をそれぞれ、 10^{-3} と 10^{-5} とし、また混在比を 5:5 とする。このとき、図 4.5 のプライオリティ制御無しの特長から、セル廃棄率 10^{-3} を満たす負荷は $\rho = 0.85$ である。次に図 4.4 を参照して、 $\rho = 0.85$ で混在比 5:5 のとき、高優先セル廃棄率 10^{-5} を満たす閾値は $X_3 = 81$ セル (バッファ長の 97% 値) となる。このように、プライオリティ制御無しと高優先セルの廃棄率特性より、簡便に閾値 X_3 を決めることができる。

次に、プライオリティ制御を行った場合のセル廃棄率時間間隔に対するセル廃棄率の時間特性を図 4.6 に示す。バッファ長 84 セル、混在比 5:5、閾値 $X_3 = 82$ セル、加わる負荷 $\rho = 0.9$ に設定した。ハッチされたそれぞれの部分 A, B, C は時間平均のセル廃棄率 C_{ave} を越える部分を示している。A はプライオリティ制御を行わない場合、B は低優先、C は高優先である。A は全廃棄セルの 70%, B は 79%, C は 29% となった。プライオリティ制御を行うことで、高優先セルの短期間でのセル廃棄を少なくできることが分かる。さらに、表 4.1 は、閾値 X_3 を変化させた場合

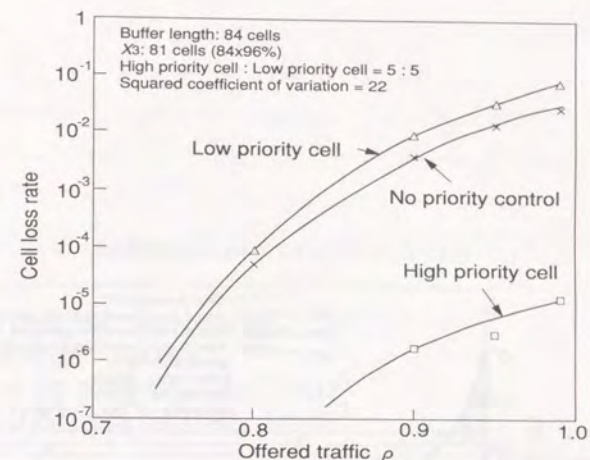


図 4.5: プライオリティ制御の効果

の C と B の大きさを示しているが、ほんの僅かな閾値 X_3 の変化で、効果的に高優先セルの短期間セル廃棄を抑制できる。バッファ長の 95% 値の閾値で C_{ave} を越えるセル廃棄をほぼゼロにできることが分かる。

このことから、閾値 X_3 により低優先セルを廃棄するプライオリティ制御は、高優先セルの短期間でのセル廃棄の抑制に非常効果があり、VBR 動画像などの様に短期間でのセル廃棄に敏感である通信には、有効な制御法になることが分かる。

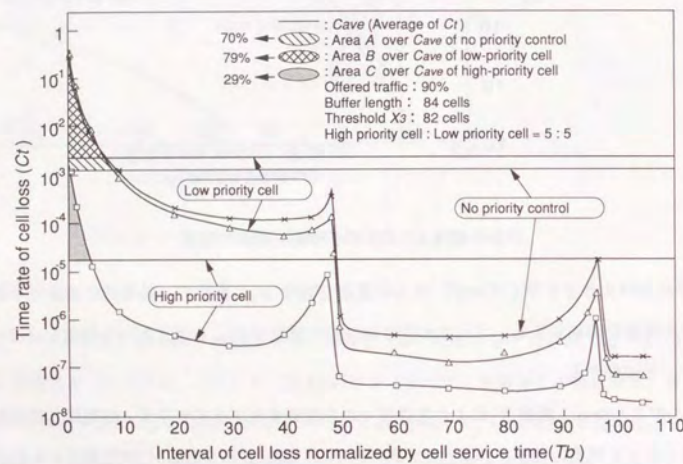


図 4.6: プライオリティ制御による短期間セル廃棄特性

表 4.1: 短期間輻輳におけるプライオリティ制御の効果

High priority cell : Low priority cell = 5 : 5

Buffer length: 84 cells

Cave of high priority cell($X_3=82$): 2.1×10^{-5}

Cave of low priority cell($X_3=82$): 2.4×10^{-3}

Threshold level X_3 (cells)	Area C of high priority cell (Relative percentile to the area related to $X_3=82$)	Area B of low priority cell (Relative percentile to the area related to $X_3=82$)
83 (84x99%)	72% (+43%)	40% (-39%)
82 (84x98%)	29% (0%)	79% (0%)
81 (84x96%)	13% (-16%)	86% (+ 7%)
80 (84x95%)	≐0% (-29%)	90% (+11%)

4.5 結言

短期輻輳回避を目的とする品質制御法として、セル廃棄率に厳しいクラスを高優先、厳しくないクラスを低優先とするバッファの閾値を用いたプライオリティ制御を示した。

セル廃棄間隔時間に対するセル廃棄の時間特性と長期間のセル廃棄特性の計算機シミュレーション実験により、プライオリティ制御は、高優先セルの短期間でのセル廃棄ならびに長期間セル廃棄を効果的に抑制できることが明らかになった。このことから、短期間のセル廃棄に大きな影響を受ける VBR 動画像等のセル廃棄品質に厳しいクラスの品質保証制御として、プライオリティ制御が有効であることの検証ができた。また、高優先・低優先セルの双方の品質の保証を可能とする閾値の決定法を示した。

第 5 章

ATM 交換スイッチ構成と制御方式

5.1 緒言

ATM は、広帯域 ISDN の実現をねらいとし、音声・データ・動画像と言ったトラヒック的性質の異なったマルチメディアな情報通信を効率的に行うものである。このため、ATM では、情報の伝送・交換がシンプルで且つ高速化が可能となる様な仕組みとなっている。その仕組みが、簡略化されたプロトコル、コネクション・オリエンテッド、固定長の短パケット (セル) の基本原則である。

ATM に対応した交換システム関連の基本的な研究が 1986 年頃から次第に活発に行われる様になり [78],[68]-[77],[79]-[92]、近年では、商用型に近い交換機システムによるフィールドトライアルが各所で行われている [95, 96]。適用されているスイッチングメカニズムは、ATM セルヘッダの通信相手先アドレスである VCI(論理チャネル番号)を見て、所望の出線にセルを出力すると言った動作をハードウェアレベルで高速に行うものである。また、交換機規模としては、10Gb/s から 80Gb/s 程度である。将来の本格的商用には、100Gb/s から 1Tb/s のスループットの交換機が必要であることが言われている [93, 94]。

本章では、まず、将来の本格商用に対応できる大容量交換機の実現に関し、基本スイッチモジュールを多段にリンク接続した多段自己ルーティングスイッチ方式 (MSSR)[68, 70, 71] が適していることを述べ、またバーストラヒックを収容する場合に MSSR 方式が有効であることを示す。

次に、MSSR 構成を採ること、入力ハイウェイから出力ハイウェイに至る経路が複数存在することから、MSSR 内のルーティング制御が重要となる。そこで、バーストラヒックの特性を考慮し、入りと出に至る経路間で品質のばらつきのないルーティング制御法の検討を行った。

5.2 ATM 対応スイッチ方式 (MSSR 方式)

ATM に対応したスイッチを構成する上での、基本的な考慮すべき点を述べ、本格的商用に向け大容量交換機に対応可能な MSSR 方式を提案する。

5.2.1 スイッチ構成上の考慮点

ATM のねらい並びに基本原則と交換機の大容量化を考慮し、スイッチを構成する上で、以下の点を考慮した。

(1) 高速なセル毎のスイッチング

セルの出力先ポートの高速設定とハードウェア制御によるスイッチングが可能であること。

(2) セル転送遅延ならびにセル廃棄の抑制

出力ポート競合とバーストラヒックの負荷変動によるセル転送遅延とセル廃棄の増加の抑制ができること。

(3) 規模の拡張性

小規模から大規模までの幅広い交換機規模に適用可能であること。

(1) については、コネクション (呼) 設定時に決定される VCI と同時に入力ポートから出力ポートに至るスイッチ内部の経路を決め、その経路に対応した出力ポート毎にセルを分配し、出力ポート毎にセルを集束させると言う自己ルーティング原理に基づくスイッチング手法を採用した。これにより、セル出力先ポートの高速な選択とハードウェア制御によるスイッチングを可能とした。

(2) については、出力ポート毎にバッファを設け、さらに基本スイッチモジュールのリンク接続による多段構成 (3 段以上) とすることで、入力ポートから出力ポートに至る通信経路を複数持つ構成とした。バッファを設けることにより、出力ポートの競合によるセル廃棄を抑制し、

複数経路化により負荷の分散化を図り、負荷変動に伴うセル転送遅延ならびにセル廃棄の増加の軽減を行うものである。

(3) については、小規模の基本スイッチモジュールの多段構成のビルディングブロックにより、大規模スイッチを可能とするものである。

5.2.2 多段自己ルーティングスイッチ方式

自己ルーティング原理のスイッチング動作を行う自己ルーティングスイッチモジュール (SRM: Self-Routing Module) を基本スイッチモジュールとし、SRM の多段構成からなる多段自己ルーティングスイッチ (MSSR: Multi-Stage Self-Routing switch) 方式を図 5.1 に示す。

構成は、SRM の多段構成からなる通話路部分、通話路入力ハイウェイポートに到着したセルの VCI 番号を出力ハイウェイポートの VCI 番号に変換する機能と出力ハイウェイポートに至る通話路内接続経路情報 (タグ) 発生する VCC (VCI Converter)、信号用に割り当てられた VCI 番号を検出し、呼処理部へ信号用セルを分岐させる信号処理部 (Signal processing)、発呼者の発呼要求を信号用セルで受け、発呼者の通信すべく入出力ハイウェイポートの各 VCI 番号と Tag (タグ) の決定ならびに呼の受け付け判断を行う呼制御部 (Call processing) からなる。

次に基本機能と動作を述べる。Tag は、各ステージにある SRM 出力ポート番号を情報とし、各ステージのポート番号情報の連結からなる。VCC は、呼制御部で決定した入出力 VCI 番号と Tag とを関係づける入力 VCI 番号対応の出力 VCI 番号-Tag マップテーブル (VCI 制御メモリ) を持つ。したがって、VCC は、VCC にセルが到着したとき、入力 VCI を検出し、マップテーブルより、入力 VCI 番号対応の出力 VCI 番号と Tag を即座に取り出すことができる。さらに、VCC は、入力 VCI 番号から出力 VCI 番号への変換を行ったセルと Tag を並走させ第一ステージの SRM へ送る。第一ステージ SRM では、Tag に書かれている出力ポート番号と同一の出力ポートにセルを分岐させ、同時に Tag も同様に分岐・並走させ、第二ステージ SRM へ送る。第二ステージ以降は同様な動作の繰り返しをすることで、所望の出力ハイウェイポートにセルが出力される。

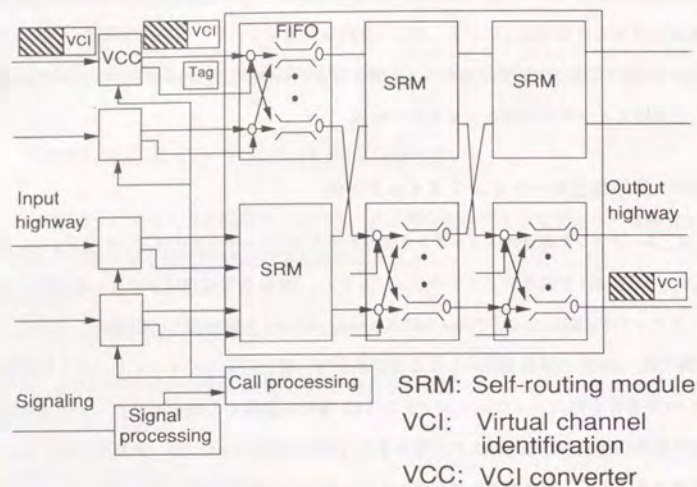


図 5.1: 多段自己ルーティングスイッチ (MSSR) 方式

5.2.2.1 自己ルーティングスイッチモジュール構成比較

基本スイッチモジュールの構成法として、バッファの構成と設置法の違いにより、クロスポイントバッファ型、入力バッファ型、出力バッファ型、入出力バッファ型、共通バッファ型が知られている [82, 93, 94]。これらの構成法を表 5.1 にまとめた。クロスポイントバッファ型は、スイッチ内部の各クロスポイントにバッファを置く構成である。入力バッファ型は、スイッチの入力部の各入線対応に設置し、それとは反対にスイッチの後段に出線対応に設置するのが出力バッファ型である。入出力バッファは、入力バッファ型と出力バッファ型を組み合わせるスイッチの前段と後段にバッファを設置する。共通バッファ型は入力される全てのセルを一つのバッファに一旦入れて、所望の出力ハイウェイへセル読み出しをする構成である。MSSR で適用する基本スイッチモジュール SRM は、実構成としてクロスポイントバッファ型を採用している [75, 76]。

スイッチの大容量化の観点から基本スイッチモジュールの構成法の比較を行う。大容量化を

表 5.1: 他スイッチとの比較

クロスポイント バッファ	入力バッファ	出力バッファ	入出力バッファ	共通バッファ
メモリアクセス速度: $2V$	メモリアクセス速度: $2V$	メモリアクセス速度: $(N+1)V$	メモリアクセス速度: $(\alpha+1)V$	メモリアクセス速度: $2NV$

行う際、高速なハイウェイを収容する基本スイッチモジュールの多段構成により大容量化を図るのが、交換機規模の縮小に有利となる。そこで、より高速なハイウェイを多く収容可能な基本スイッチモジュールの構成の観点から比較する。

クロスポイントバッファは、各クロスポイントにバッファを置くため、入出力ハイウェイの各速度を V とすると、バッファの動作速度は書き込みと読み出しで、 $2V$ である。総バッファ量は、スイッチ規模の 2 乗に比例する。

入力バッファは、スイッチの全段に入力ハイウェイ単位に設けるため、バッファの動作速度は $2V$ となる。しかし、出力ハイウェイポートへの同時アクセスによるセル衝突により、スイッチスループットが 58% で頭打ちになることが知られている [80, 81]。衝突回避のために、スケジューリングがセルが到着毎に必要となり、スケジューリングする速度として NV 以上が必要となる。

出力バッファは、収容する入力ハイウェイ全てのセルを多重し、所望の出力ハイウェイポー

ト対応バッファに分配するため、バッファの動作速度としては $(N+1)V$ が必要となる。

入出力バッファは、入力バッファのセル衝突の問題をスイッチ内部速度をハイウェイ速度の α 倍して解決している。出力バッファは出力ハイウェイ速度に整合を取るために用いられる。バッファの動作速度は $(\alpha+1)V$ となり、 $2V$ よりは大きな値となる。バッファ規模は、収容ハイウェイ数に比例した量ですむ。

共有バッファは、セル衝突の回避を一つのバッファのシェアでできるため、他の構成と比較して、最小のバッファ量ですむ。しかし、収容する入力ハイウェイの全てのセルをバッファに書き込みそして全ての出力ハイウェイへ読み出す必要があるため、動作速度は $2NV$ が必要となる。他と比較して一番高速動作が必要な構成となる。

大容量化をバッファの動作速度の観点だけから見ると、クロスポイントバッファが有望である。しかし、バッファ量の多さが問題となる。最近の HEMT-LSI を用いたクロスポイントバッファ型スイッチ (収容ハイウェイ速度: 19.2Gb/s) の試作と実装に関するフィジビリティ検討の報告 [94] で、156Mb/s のハイウェイを 8000 回線相当の交換機を 4 架で構成可能であることが述べられている。このことから、クロスポイントバッファによる基本スイッチの構成は、本格商用として十分適用可能なもとと考えられる。

5.2.2.2 多段自己ルーティングスイッチ構成比較

多段構成法の比較を行う。MSSR は、 $n \times n$ を基本スイッチモジュールとする 3 段構成が最も基本的な構成となる。他の多段構成法として、 2×2 を基本スイッチモジュールとする Banyan [84, 85] や Benes [89] の自己ルーティングスイッチがよく知られている。

Banyan スイッチは、入出力ハイウェイ数をそれぞれ N とすると、段数は $\log_2 N$ となるので、出力ハイウェイポート番号を 2 進数で表した数字をルーティング情報として、セルの自己ルーティング動作が可能である。例えば、出力ハイウェイポート番号の MSB から第一段のスイッチ制御情報として割り付けて、"0" の場合 2×2 スイッチの "0" ポート、"1" の場合は "1" ポートにそれぞれセルをスイッチさせる。Benes スイッチでは、前半の段にあるスイッチをセルを均等に分配するようにスイッチング動作させ、残りの後段のスイッチを Banyan と同様の制御で自己ルーティング動作させることが考えられている [90]。Banyan, Benes のいずれもハードウェ

ア制御による高速なセルスイッチング可能な多段構成スイッチである。

そこで、MSSR の有効性を明確にするために、トラヒックの疎通能力と規模の拡張性の観点から、これら多段スイッチの比較を行う (表 5.2)。

表 5.2: 他方式との比較

方式名	MSSR	Banyan	Benes
構成			
特定経路への負荷集中/負荷変動耐性	<ul style="list-style-type: none"> 同一出HWに至る経路が複数存在するので、各経路の負荷バランス経路選択で負荷集中回避可能 中間段SWモジュールの増設により負荷変動に対処可能 	<ul style="list-style-type: none"> 同一出HWに至る経路が一通りしか存在しないため、負荷集中が避けられない。このため、前段に負荷を分散させる分配SW設置 / 内部リンクの高速化が必須 	<ul style="list-style-type: none"> 前段の分配SWにより、同一出HWに至る経路が複数存在。各経路の負荷バランス経路選択で負荷集中回避可能 負荷変動に対して、内部リンクの高速化が必須
規模拡張性	<ul style="list-style-type: none"> 例えば $n \times n$ を基本モジュールとする増設が可能 (段数不変) 結線張り替えが比較的容易 	<ul style="list-style-type: none"> 2×2 SW 段の追加 ($\log_2 N$ に比例) SW 間の結線の張り替えが複雑 	<ul style="list-style-type: none"> 2×2 SW 段の追加 ($2 \log_2 N - 1$ に比例) SW 間の結線の張り替えが複雑
その他: セル順序保証性	呼単位での経路選択が必須	常に保証される	呼単位での経路選択が必須
遅延段数	3 (3 段構成)	$\log_2 N$	$2 \log_2 N - 1$

MSSR の場合、同一出ハイウェイポートに至る経路が複数存在するため、負荷の分散化ができる。このため、同一出ハイウェイポートの負荷集中によるスイッチ内部でのセル衝突の回避が可能である。さらに、中間段スイッチを増設することにより、負荷変動による品質劣化の抑制が可能となる。規模拡張に関しては、 $n \times n$ または $n \times m$ をスイッチモジュールとして、モジュールの増設とそのモジュール間を繋ぐ結線の増設により、容易な規模拡張ができる。また、段数を変えない増設が可能である。すなわち、拡張により、セルの転送遅延が増えない。

Banyan については、同一出ハイウェイポートに至る経路が一通りしかないので、同一出ハイウェイポートへの負荷集中で、スイッチ内部でのセル衝突が避けられない。このため、前段に負荷を分散させる分配スイッチの設置 [86]–[88]、または内部リンク速度の高速化が必須であ

る。分配スイッチは Banyan と同一構成からなり、各スイッチの2つの出ポートにセルを交互にスイッチさせ負荷の分散化を図っている。長期的には、スイッチ全体で負荷のバランス化が図れるが、短期での負荷の変動に対しては、負荷のバランス化が旨く図れず、スイッチ内部でのセル衝突は避けられない。内部リンクの高速化による解決は、大容量なスイッチを構成する場合には不利である。拡張性に関しては、2の冪乗の規模拡張となるため、スイッチの前と後にそれぞれ2x2のスイッチを配置する必要がある。このため、結線の切断並びに張り替えが必要で、規模拡張が複雑となる。規模拡張には、段数の増加が必須となる。

Benes については、Banyan を2段接続し、前段を分配スイッチ、後段をルーティングスイッチとして用いる場合と同等であるが、段数で1段少ない構成となる。2つの Banyan を接続する構成と同様に、短期での負荷の変動に対して、負荷のバランス化が旨く図れず、スイッチ内部でのセル衝突が避けられない。内部リンクの高速化で負荷変動に対応可能となるが、大規模交換機を構成していく上では、不利である。規模拡張についても、Banyan と同様に2の冪乗が基本となるため、規模拡張の容易性に難がある。

MSSR は、バーストラフィックの特徴である短期での負荷変動に対して、内部リンク速度をハイウェイ速度と同じにしたままで、品質劣化の抑制が図れる点、規模拡張が容易で且つセル転送遅延を不変に規模拡張ができる点、他の構成法より優れていることが分かる。

MSSR の中間段スイッチの増設による負荷変動耐性を示すハイウェイ負荷特性を図5.2に示す。ランダムトラフィックを仮定して、入力ハイウェイ負荷が0.9でセル廃棄率が 10^{-10} を満たすバッファ量(110セル)をSRMのバッファとして設けた。SRMが収容する入力ハイウェイ数を8として、各入力ハイウェイが x の負荷でMSSRの各リンク負荷もバランスされている状態から、特定の入力ハイウェイの一つが1.5倍の負荷の変動が生じた場合の中間段SRM数 n をパラメータとする出力ハイウェイの負荷(y)の特性を示している。例えば、 $n=11$ の中間段SRMの設置で、 $x=0.9$ の1.5倍の負荷変動の吸収ができることが分かる。

5.3 MSSRにおける品質制御法

MSSR方式は、同一出力ポートへの負荷集中による通話路内部輻輳回避を可能とするために、出力ハイウェイポートに至る経路を複数持ち、負荷の分散化を図っている。さらに、短期的

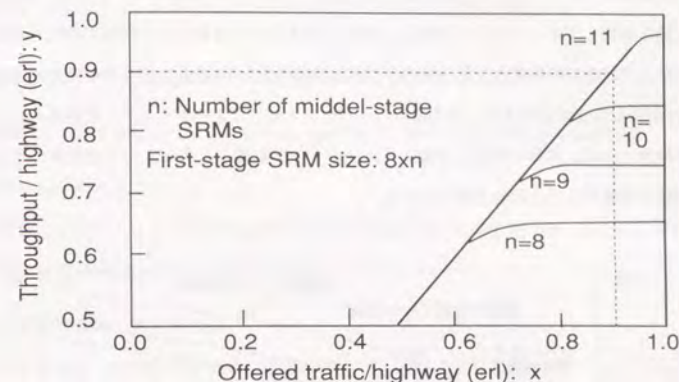


図 5.2: 中間段 SRM 数によるハイウェイ負荷特性

な負荷変動に対しても、中間段SRMの増設により品質の劣化を抑制可能な構成となっている。しかし、このように旨く品質保証を可能とする通話路構成を採ったとしても、通話路内のセルのルーティングを旨く行なわなければ、通話路内リンクの負荷集中により輻輳が生じてしまう。

そこで、本節では、通話路内リンクの負荷がバランス化できる様なルーティング制御法の検討を行う。

5.3.1 ルーティング制御上の要件

通話路内リンク負荷のバランス化を行う一つの方法として、Benesスイッチの前半のスイッチ制御の様に、セルを均等に分配する方法が考えられる。しかし、同一コネクション(呼)に属するセルの経路が常に異なるため、通話路の出ハイウェイポート上でセルの順序の保証ができない。このため、セルの順序の保証する機能のない端末に対しては、交換機側で順序保証制御が必須となり、交換機の構成・制御が複雑化する。交換機構成・制御の簡便化には、同一コネクションに属するセルの通話路内ルートは同一とすることが重要である。

バーストラフィックでは、発生するトラフィック量の変動がかなり大きなものとなるため、それらが加わるリンクでも、負荷の変動を無視して考えることができない。例えば、図 5.3 に負荷の変動を考慮してルーティング制御した場合と考慮しない場合のセル廃棄率特性を示す。変動の異なる 2 種類の呼を考え、第一種の呼の平方変動係数を 10 とし、第二種の呼の平方変動係数を 20 から 100 まで変化させ、平均負荷のみバランス化してルーティングした場合のルートの廃棄率特性である。負荷の変動も考慮してルーティング制御した方が、セル廃棄率が小さく、負荷変動を考慮することの有効性が分かる。

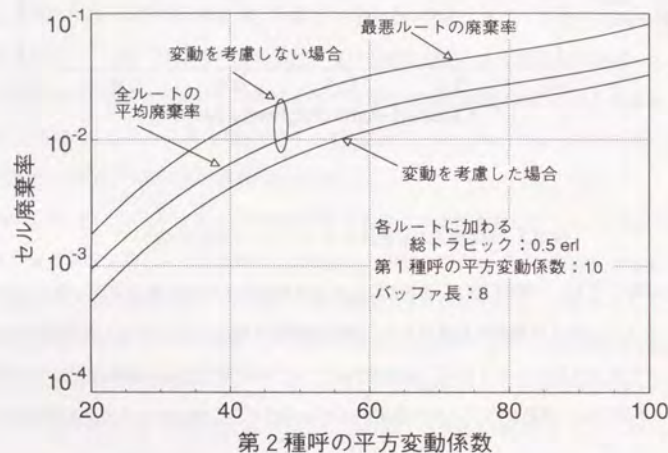


図 5.3: 負荷の変動（分散）を考慮した場合のルートの品質特性

第 2 章と 3 章で、バースト呼が多く多重できる伝送路では、バーストによる負荷変動が無視できる領域が存在することを述べた。このことは、通話路内リンクにも同様に考えることができる。しかし、全てのバースト呼に対応できる領域ではないため、変動を考慮するルーティング制御は重要である。

以上のことから、以下の点を考慮したルーティング制御法を考える必要がある。

- (1) 同一コネクションに属するセルの通話路内ルートは同一とするため、呼単位でのルーティ

ング制御を行う。

- (2) リンク負荷のバランス化には、負荷の平均のみならず変動も考慮する。

5.3.2 負荷の平均と変動のバランス化ルーティング法

呼単位でリンク負荷をバランス化する方法として、以下の方法が考えられる [64]。

- (1) 呼数均一割り当て法

呼数の少ないリンク（中間段 SRM）に新たに発生した呼を割り付ける。または、呼の発生順に中間段 SRM を別々に割り付ける。

- (2) 呼種別呼数均一割り当て法

バーストソースの平均セル発生量と変動（分散）がほぼ同程度のメディアを一つの呼種として、呼種毎に上記 (1) と同様な呼の割り付けを行う。

- (3) 負荷の平均と分散の均一割り当て法

呼のトラフィックパラメタ（平均、分散）と、リンク負荷の平均と分散（それぞれ実測値を用いる）による平均と分散の最小リンク割り付けを行う。

これらの方法について、制御ならびに処理の容易性と負荷のバランス度（品質のバランス度）の観点から比較する（表 5.3）。

呼数均一割り当て法は、管理および制御単位が呼のみであり、制御・処理が非常に簡便である。しかし、変動を考慮できないため、負荷のバランス化は困難である。高速なリンクを用い、バーストによる変動を考慮しなくても良い領域での適用も考えられるが、呼だけでは、平均セル流量の違いを区別できないため、負荷のバランス化に難がある。

呼種別呼数均一割り当て法は、平均セル流量と変動を考慮して、呼単位での制御・処理ができ比較的容易な方法である。しかし、呼種の分類数により負荷のバランス化の度合いが異なる。処理量を少なく、制御を簡便化するには、分類数を多くすることができないため、バランス化の度合いはそれほど大きくない。

負荷の平均と分散の均一割り付け法では、リンク負荷の平均と分散を観測することで、最新のリンク負荷状態を反映させながら、新規発呼のセルの平均流量と分散を考慮して、リンク割

り付けを行うため、負荷のバランス化が図り易い。しかし、リンク負荷の測定と統計処理が必要となるため、制御・処理が複雑化する。

交換機の呼処理では、リアルタイム性が要求されるため、呼毎の処理として複雑な処理は好ましくない。処理の簡便性を重視して、リンク負荷のバランス化のルーティングとして、呼種別呼数均一割り当て法が有望であると考ええる。

表 5.3: 呼単位の負荷バランス化ルーティング制御法

制御名	方法	制御 / 処理 の容易性	負荷のバランス度 (品質のバランス度)
(1) 呼数均一 割り当て	呼数の少ないリンク (中間段SW) 割当 / 呼の発生順に中間段 SWを別々に指定	○	×
(2) 呼種別呼数 均一割り当て	(1)の方法を呼種別 に行う	○	△
(3) 負荷(平均)と 負荷の分散 の均一割り付け	呼のトラヒックパラ メタ(平均、分散)に よる平均、分散の 最小リンク割付	△	○

5.4 結言

ATM に対応したスイッチング方式として、セルフルーティング原理に基づく基本スイッチモジュール (SRM) の多段リンク接続による MSSR 方式を提案した。

将来の本格的商用に対応できる柔軟な規模の拡張性とバーストラヒックの短期的負荷変動による品質劣化の抑制の観点から他方式との比較を行い、MSSR の優位性を得た。

MSSR の様にある入力ハイウェイポートからある特定の出力ハイウェイポートに至るルートが複数存在する場合、通話路内リンク輻輳の発生を抑制するために、リンク負荷がバランス化するような通話路内ルーティング制御が必須となる。これに対して、セルの順序保存制御が必要のない、呼単位でリンクバランス化を可能とするルーティング制御法の検討を行い、呼種別呼数均一割り当てによるルーティング制御法の有望な一案を得た。

第6章

結論

ATM 技術を用いての B-ISDN やマルチメディア・コンピュータ・ネットワークの実現においては、バーストラヒックをいかに旨く扱って、通信品質制御を行っていくかが重要な鍵となっている。本論文では、高速な伝送路の適用が可能な公衆網に重点を置き、通信品質を保証するためのトラヒック制御技術の研究を進めた。

品質保証制御を実現して行く上で、バーストラヒックが多重された場合のトラヒック特性の把握が不可欠であることから、第2章で、バーストラヒックならびに多重化バーストラヒックのモデル化法と遅延品質の解析手法についての提案を行った。バーストラヒックが多重された状態での品質評価は、計算機シミュレーションまたは近似解析法が用いられていた。計算機シミュレーションでは膨大な計算時間を要して実用的でなく、また、従来の近似法では、簡便ではあるが近似精度が悪いとか、精度が良いが計算機パワーを必要とするなど、満足の行くものではなかった。

そこで、近似精度が良く、少ない計算機パワーで簡便に計算できる近似法の開発をねらいに、バーストラヒックならびに多重化バーストラヒックをそれぞれ超指数分布 (H_2) で近似して、遅延品質の評価を行う方法を述べた。これは QNA と同様な方法となるが、QNA では、2次までのモーメントしか用いないため、近似精度はそれほど良くなかった。本研究では、3次までのモーメントを用いることで近似精度の向上を図るとともに、3次までのモーメントを推定する新たな方法を示した。計算機シミュレーション結果による近似精度比較により、QNA より良好な近似が得られることの確認を行い、提案手法の有効性を示した。

提案した手法で遅延品質を計算する際、関数方程式のゼロ点を求める必要がある。ニュートン・ラフソン法を用いた数値解法で、10 回未満の逐次計算でゼロ点に集束することを示し、計算時間に関して問題にならないことが確認できた。

さらに、バーストラヒックの重畳数によるバースト性の残留についての検討を行い、約 0.8 以上の高負荷の領域においては、バーストのトラヒックの変動のみならず 3 次モーメント (歪み度) の影響が強く残り、1000 を越える重畳数でもバースト性の影響を無視できないことが明らかになった。また、0.7 以下の負荷の範囲では、1000 以下の重畳数ではほぼバースト性の影響を無視できることも分かった。

第3章では、ユーザのトラヒックパラメタ申告による CAC に基づいた品質保証制御の問題点、(1) ユーザのトラヒック申告の困難さ、(2) 加入者網の影響によりユーザ端末と網の入り口 (交換機入力点) とで、ユーザトラヒックパターンが一致しないこと、(3) 瞬間的なセル衝突によるセル廃棄により生ぜられる短期輻輳が回避できないことを述べた。

問題 (1) と (2) の解決法として、ユーザのメディア申告からトラヒックパラメタを網側で推定し、推定したパラメタを用いて呼の受け付け判断をする知的 CAC を提案した。

メディア申告から推定すべきトラヒックパラメタとして、バッファを通過する最大遅延を時間 T とする T 中のセル到着数の平均 $m(T)$ 、分散 $\sigma(T)^2$ 、最大 $N_p(T)$ と、コネクションの保留時間程度に長い時間を T_l とする T_l 中のセル到着数の分散 $\sigma(T_l)^2$ で十分であることを示した。また、第2章と同様にセル廃棄率に関するバースト性の残留性の検証を行い、ランダム近似可能な範囲を決めるキーパラメタを明らかにした。さらに、キーパラメタを用いてのガウス分布輻輳予測とポアソン分布 (ランダム) 輻輳予測の組み合わせによる、効率的な呼の収容を可能とする受け付け判断アルゴリズムを得ることができた。

第4章では、問題 (3) を解決するために、セル廃棄率に厳しいクラスを高優先、厳しくないクラスを低優先とするバッファの閾値を用いたプライオリティ制御を提案した。

プライオリティ制御については、セル廃棄間隔時間に対するセル廃棄の時間特性と長期間のセル廃棄特性の計算機シミュレーション実験により、高優先セルの短期間でのセル廃棄ならびに長期間セル廃棄を効果的に抑制できることを明らかにした。また、高優先・低優先セルの双方の品質の保証を可能なことも示し、高優先・低優先制御を行う閾値の決定法も明らかにした。

問題 (1)~(3) の解決を通して、長期ならびに短期の輻輳を回避する品質制御方式を得た。

第5章では、ATM に対応したスイッチング方式として、セルフルーティング原理に基づく基本スイッチモジュールの多段リンク接続による MSSR 方式を提案し、将来の本格的商用に対応可能な規模の拡張性とバーストラフィックの短期的負荷変動による品質劣化の抑制の観点から他方式との比較を行い、MSSR の有効性を示した。

入力ポートから出力ポートに至る経路が複数存在する MSSR 方式では、特定リンクに偏る様な経路選択をした場合、リンク輻輳が生じて品質保証ができなくなる、リンク輻輳の発生を抑制するには、MSSR 通話路内リンク負荷がバランス化されるようなルーティング制御が必要である。リンク負荷バランス化ルーティング制御に関して、負荷の平均にみならず変動もバランス化できるような制御法が必要であることを述べ、バーストラフィックの平均セル発生率と変動が同程度のメディアを一つの呼種として、呼種別の呼数が各リンクで均一になるように呼を割り付けるルーティング制御法を示した。呼単位での制御となるため、セルの順序保存保証の複雑な制御の必要が無いこと、またリアルタイム性が要求される呼処理においても呼処理量への負担が少ないことから有効性を述べた。

最近では、マルチメディア・コンピュータ・ネットワークの実現に向けての ATM を用いた高速 LAN 技術の研究開発が非常に活発である。また、ATM を無線通信への応用したワイヤレス ATM の研究も活発化してきている。高速データ通信が中心となる高速 LAN の領域では、UBR(Unspecified Bit Rate) や ABR(Available Bit Rate) のサービスクラスのサポートが必須と考えられ、これらクラスとリアルタイム性クラスが混在した場合の品質制御法の検討が今後重要である。さらに、ワイヤレス ATM のように高速な情報転送ができない場合には、公衆網の場合と異なり、セルの転送遅延が無視できなくなるため、セル廃棄率品質のみならず遅延品質も考慮した品質保証制御法の検討が必要となる。特に遅延品質については、第2章で提案した品質評価法ならびに多重化トラフィック特性の結果が有効に適用できるものとする。

謝辞

本研究は、株式会社富士通研究所において、ATM 交換システムの開発の一環として行ったものであり、筆者がこれら研究成果を、学術情報センターにてまとめたものである。

本研究をまとめるに当たり、とりわけ御懇切なる御指導と御鞭撻を賜った学術情報センター浅野正一郎教授に謹んで深謝の意を表すものであります。更に、種々の御指導御助言を賜った東京大学工学部水町守志教授、東京大学生産技術研究所高木幹雄教授、東京大学工学部羽鳥光俊教授、田中良明助教授、東京大学生産技術研究所瀬崎薫助教授に深謝の意を捧げるものであります。

学術情報センター所長猪瀬博博士、学術情報センター研究開発部長小野欽司博士、富士通研究所取締役副社長高梨裕文博士、富士通研究所林弘マルチメディア研究所長代理、富士通研究所マルチメディア研究所メディア統合研究部長川戸信明博士、富士通クライアントサーバ推進本部長代理八星禮剛博士、富士通クライアントサーバ推進本部ネットワークインテグレーション統括部長中村昂三氏、富士通研究所マルチメディア研究所通信網システム研究部野島聡主任研究員、の方々の御好意ある御指導と御鞭撻により、学術情報センターで研究成果をまとめることができたこと、心より感謝の意を捧げる次第です。

また、富士通研究所において、研究を進めるにあたり、種々な御指導を賜った大阪大学大型計算機センター研究開発部長(元富士通研究所通信網システム研究部長)村上孝三博士、基幹通信事業本部統合通信システム開発部初鹿野一雄課長に感謝の意を表すると共に、研究の御協力を頂いた中国清華大学助教(元富士通研究所招聘研究員)牛志升博士、富士通研究所基幹通信研究部宗宮利夫氏に厚く御礼申し上げる次第です。

参考文献

- [1] K. Sriram and W. Whitt, "Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data," *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, No.6, 1986.
- [2] O. S. Rice, "Single Server System - II Busy Periods," *BSTJ*, No.1, 1962.
- [3] L. Kleinrock, *Queueing Systems Volume I: Theory*, John Wiley Sons, 1975.
- [4] 秋丸, 川島, 情報通信トラヒック, 電気通信協会, 1990.
- [5] K. W. Fendick and W. Whitt, "Measurements and Approximations to Describe the Offered Traffic and Predict the Average Workload in a Single-Server Queue," *Proceeding of IEEE*, Vol. 77, 1989.
- [6] K. W. Fendick, V. R. Saksena and W. Whitt, "Investigating Dependence in Packet Queues with the Index of Dispersion for Work," *Tran. Comm., IEEE*, Vol. 39, No. 8, 1991.
- [7] G. F. Newell, "Approximations for Superposition Arrival Processes in Queues," *Management Science*, Vol. 30, No. 5, 1984.
- [8] T. Okuda and H. Akimaru, "A Simplified Performance Evaluation for Packetized Voice Systems," *Tran., IEICE*, Vol. E73, No. 6, 1990.
- [9] S. L. Albin, "On Poisson Approximations for Superposition Arrival Processes in Queues," *Management Science*, Vol. 28, No. 2, 1982.
- [10] W. Whitt, "Approximating a Point Process by a Renewal Process, I: Two Basic Methods," *Operations Research*, Vol. 30, No. 1, 1982.
- [11] S. L. Albin, "Approximating a Point Process by a Renewal Process, II: Superposition Arrival Processes to Queues," *Operations Research*, Vol. 32, No. 5, 1984.
- [12] W. Whitt, "The Queueing Network Analyzer," *BSTJ*, Vol. 62, No. 9, 1983.
- [13] W. Whitt, "Performance of the Queueing Network Analyzer," *BSTJ*, Vol. 62, No. 9, 1983.
- [14] S. L. Brumelle, "On the Relation Between Customer and Time Averages in Queues," *J. Appl. Prob.*, 8, pp. 508-520, 1971.
- [15] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and Its Applications II*, 2nd ED., pp.199-200, John Wiley & Sons, 1971.
- [16] D. R. Cox, *Renewal Theory*, Chapman and Hall, 1967.
- [17] I. Ide, "Superposition of Interrupted Poisson Processes and its Application to Packetized Voice Multiplexers", *ITC-12*, Torino, 1988.
- [18] M. F. Neute, *Matrix-Geometric Solution in Stochastic Models: An Algorithmic Approach*, Baltimore, MD: The John Hopkins University Press, 1981.
- [19] 藤木, 雁部, 通信トラヒック理論, 丸善, 1980.
- [20] 赤坂 隆, 数値計算, コロナ社, 昭和 51.
- [21] 溝畑 茂, 数学解析 (下), 朝倉書店, 昭和 48.
- [22] J. Burgin, "Broadband ISDN Resource Management," *6th ITC Seminar*, 1989.
- [23] 平野, 渡部, "ATM 交換におけるバーストラヒック多重化特性の評価", *信学論 (B-I)*, Vol. J72-B-I, 4, pp. 264 - 271, 1989.

- [24] 村田, 尾家, 宮原, "トラヒック理論からみた ATM 網におけるトラヒック制御の動向", 信学論 (B-I), Vol. J72-B-I, No.11, 1989.
- [25] H. Saito, "New Dimensioning Concept for ATM Networks," *7th ITC Seminar, New Jersey*, October 1990.
- [26] H. Saito, "A Simplified Dimensioning Method of ATM Networks," *IEICE Japan, Technical Report*, SSE89-112, 1989.
- [27] Heffes and D. M. Lucantoni, "A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, Vol. SAC-4, no. 6, pp. 856-868, 1986.
- [28] D. R. Cox and D. A. W. Lewis, *The Statistical Analysis of Series of Events*, Chapman and Hall, 1966.
- [29] H. Kobayashi, *Modeling and Analysis*, Addison-Wesley, 1978.
- [30] 渡部, 平野, 榊原, "高速バケット交換における統計多重制御法の検討", 信学技報, SE87-138, 1987.
- [31] G. Gallassi, G. Rigolio, and L. Fratta, "ATM: Bandwidth Assignment and Bandwidth Enforcement Policies," *GLOBECOM'89*, 1989.
- [32] S. Abe and T. Soumiya, "A Traffic Control Method for Service Quality Assurance in an ATM Network," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, Vol. 12, No. 2, pp.322-331, 1994.
- [33] 三木, "光波ネットワークの展望", 信学論 (B-I), Vol. J77-B-I, No.5, 1994.
- [34] H. Saito and K. Shiimoto, "Dynamic Call Admission Control in ATM Networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.* Vol.9 No. 7, 1991.
- [35] H. Saito, "Call Admission Control in an ATM Network Using Upper Bound of Cell Loss Probability," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 40, No. 9, 1992.

- [36] R. Guerein et al. "Equivalent Capacity and Its Application to Bandwidth Allocation in High-Speed Networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.* Vol.9 No. 7, 1991.
- [37] M. Decina and T. Toniatti, "On Bandwidth Allocation to Bursty Virtual Connections in ATM Networks," in *Proc. ICC'90*, 1990.
- [38] P. Joos and W. Verbiest, "A Statistical Bandwidth Allocation and Usage Monitoring Algorithm for ATM Networks," in *Proc. ICC'89*, 1989.
- [39] T. Murase, H. Suzuki, S. Sato, and T. Takeuchi, "A Call Admission Control Scheme for ATM Networks Using a Simple Quality Estimate," *IEEE J. Selected Areas in Commun.* Vol.9 No. 9, 1991.
- [40] C. Rasmussen, J. H. Sorensen, K. S. Kvols, and S. B. Jacobsen, "Source-independent Call Acceptance Procedures in ATM Networks," *IEEE J. Selected Areas in Commun.* Vol.9 No. 3, 1991.
- [41] 新井, 川原崎, 能上, "ATM 網における呼受付制御方式の解析", 信学論 (B-I), Vol. J72-B-I, No. 11, 1989.
- [42] 野口, 岡田, "ATM 交換網における帯域管理方式", 信学論 (B-I), Vol. J73-B-I, No. 10, 1990.
- [43] 栗林, "ATM 交換システムにおける帯域割当て制御", 信学論 (B-I), Vol. J73-B-I, No. 11, 1990.
- [44] 阿部, 宗宮, 川崎, "セル廃棄率評価に拡散近似法を適用した呼受付制御方式", 信学秋季全大, B-379, 1990.
- [45] J. S. Turner, "New Directions in Communications(or which Way to the Information Age?)," *IEEE Commun. Mag.* Vol. 24, No. 10, 1986.
- [46] W. Kowalk and R. Lehnert, "The 'Policing Function' to Control User Access in ATM Networks - Definition and Implementation -, " *ISSLS'88*, 1988.

- [47] N. Yamanaka, Y. Sato, and K. Sato, "Performance Limitation of Leaky Bucket Algorithm for Usage Parameter Control and Bandwidth Allocation Methods," *IEICE Trans.*, E75-B, No. 2, 1992.
- [48] 山中, 佐藤, 佐藤, "確定的 UPC による ATM 網トラヒックマネージメント方式", 信学論 (B-I), Vol. J76-B-I, No. 3, 1993.
- [49] R. Kositpaiboon and V. Phung, "Usage Parameter Control and Bandwidth Allocation for B-ISDN/ATM Variable Bit Rate Services," *Multimedia'90*, Bordeaux, Nov. 1990.
- [50] E. P. Rathgeb and T. H. Theimer, "Policing Function in ATM Network," *ISS'90*, Session A 8, 1990.
- [51] A. Baiocchi, N. B. Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, and R. Winkler, "Loss Performance Analysis of an ATM Multiplexer Loaded with High-Speed ON-OFF sources," *IEEE J. Selected Areas in Commun.* Vol.9 No. 3, 1991.
- [52] 阿部, 宗宮, "ATM 通信におけるセル品質評価法の考察", 信学技報, SSE91-118, 1991.
- [53] 阿部, 牛, "パースト多重化装置におけるセル廃棄率の再生入力系列による近似解析", 信学技報, SSE92-130, 1993.
- [54] 山田, 町原, "位相マルコフ再生入力待ち行列モデルの解析と応用", 信学論 (B-I), Vol. J73-B-I, No.3, 1990.
- [55] 牛, 秋丸, 町原, 井出, "選択的パケット廃棄制御を用いた音声パケット多重化装置の性能評価", 信学論 (B-I), Vol. J74B-I, No.4, 1991.
- [56] 鳩野, "ATM トラヒック解析用階層化流体近似モデル", 信学技報, SSE91-152, 1991.
- [57] 佐藤, "仮想待ち行列による ATM セル廃棄率の解析", 信学論 (B-I), Vol. J76-B-I, No.1, 1993.
- [58] H. Kroner, "Statistical Multiplexing of Sporadic Sources - Exact and Approximate Performance Analysis," *13th ITC*, Copenhagen, 1991.

- [59] A. Baiocchi, et. al., "Buffer Dimensioning Criteria for an ATM Multiplexer Loaded with Homogeneous ON-OFF Sources," *Queueing, Performance and control in ATM*, 13th ITC, Copenhagen, 1991.
- [60] R. Nagarajan, J. F. Kurose, and D. Towsley, "Approximation Techniques for Computing Packet Loss in Finite Buffered Voice Multiplexer," *IEEE J. Select. Area Commun.*, Vol.9, No.3, 1991.
- [61] 阿部, "多重化パーストパケット入力待ち行列システムの再生過程近似による性能評価法", 信学論 (BI) に条件付き採録につきに再投稿中.
- [62] S. Abe, T. Soumiya, M. Kusayanagi, H. Mukai: "A Study on ATM Traffic Control," *Multimedia'90*, Bordeaux, Nov. 1990.
- [63] 阿部, 宗宮, "ATM 通信網におけるトラヒック制御の考察", 信学技報, SSE90-119, 1991.
- [64] 阿部, 草柳, 向井, "ATM 網におけるルーティング制御の一考察", 信学秋季全大, B-159, 1989.
- [65] 宗宮, 阿部, "ATM 網における輻輳制御方式", 信学春季全大, B-481, 1991.
- [66] 宗宮, 阿部, "多重パーストラヒックにおけるセル廃棄の時間変動について", 信学秋季全大, B-321, 1991.
- [67] 宗宮, 阿部, 渡部, "ATM 網における知的呼受付制御方式に関する一考察", 信学春季全大, B-289, 1992.
- [68] 初鹿野, 阿部, 村上, "ニュートラnsファモードに対応した広帯域 ISDN 交換方式", 信学総全大, 昭和 62 年 3 月.
- [69] 阿部, 初鹿野, 早見, 村上, "広帯域 ISDN 用新転送モードのセル長の一検討", 信学会情報・システム部門全大, 494, 昭和 62 年.

- [70] S. Abe, K. Hajikano, K. Murakami, "Traffic Design for an Asynchronous Transfer Mode Switching Network", *Proceeding of ITC-12*, 1988.
- [71] 村上, 初鹿野, 阿部, "広帯域 ATM 交換の一方式", 信学論 (BI), J72-B-I, 3, 1989.
- [72] 初鹿野, 早見, 阿部, 村上, "広帯域 ISDN 交換方式の一方式", 信学技報, SE87-58, 1987.
- [73] 初鹿野, 早見, 阿部, 村上, "広帯域 ISDN 用 ATM 交換の一方式", 交換・情報ネットワークワークショップ, 3 月, 1988.
- [74] K. Hajikano, K. Murakami, E. Iwabuchi, O. Isono and T. Kobayashi, "Asynchronous Transfer Mode Switching Architecture for Broadband ISDN," *ICC'88*, 1988.
- [75] 加藤, 初鹿野, 下江, 村上, "広帯域 ISDN 用 ATM 交換機の試作", 信学技報, SSE88-29, 1988.
- [76] Y. Kato, H. Hajikano, T. Shimoe, and K. Murakami, "Experimental Broadband ATM Switching System," *GLOBECOM'88*, 1988.
- [77] T. Nisino, S. Abe, K. Ogasawara, K. Murano, K. Yamaguchi, "Broadband Switching System Configuration and Access Protocol," *ICC'88*, June 1988.
- [78] J. P. Coudreuse and M. Servel, "Prelude: An Asynchronous Time-Division Packet Switch," *ICC'87*, 22.2, 1987.
- [79] 遠藤, 小崎, 櫻井, 郷原, "ATM 交換アーキテクチャの一提案", 信学技報, IN88-38, 1988.
- [80] M. J. Karol, M. G. Hluchyj, and S. P. Morgan, "Input vs. Output Queueing on a Space-Division Packet Switch," *GLOBECOM'86*, 19.4 1986.
- [81] M. J. Karol, M. G. Hluchyj, and S. P. Morgan, "Input Versus Output Queueing on a Space-Division Packet Switch," *IEEE Trans. Commun.*, COM-35, No.12, 1987.
- [82] 鈴木, 竹内, 明石, 鈴木, 岩崎, "ATM 交換機アーキテクチャの一検討", 信学技報, SSE88-60, 1988.

- [83] C. M. Day, et. al., "Applications of Self-Routing Switches to LATA Fiber Optics Network," *ISS'87*, A7.3 1987.
- [84] J. Kulzer, et. al., "Statistical Switching Architecture for Future Services," *ISS'84*, 1984.
- [85] R. Q. Muise, et. al., "Experiment in Widebandpacket Technology," *Zurich Seminar*, 1986.
- [86] J. S. Turner, "New Directions in Communications," *Zurich Seminar*, 1986.
- [87] J. S. Turner, "Design of Broadcast Packet Network," *INFORCOM'86*, 1986.
- [88] J. S. Turner, "Design of an Integrated Services Packet Network," *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, Vol. SAC-4, No.8, 1986.
- [89] D. Nassimi and S. Sahni, "A Self-Routing Benes Network and Parallel Permutation Algorithms," *IEEE Trans. Comput.*, C-30, No.5, 1981.
- [90] 太田, 山口, "パケットスイッチ回路網の非輻輳セルフルーティング制御法", 信学論 (A), Vol. J70-A, No. 2, 1987.
- [91] K. Murakami, K. Hajikano, S. Abe, and Y. Kato, "Communication Service and Media Control Using ATM," *IEICE Trans.*, Vol.E74, No.4, 1991.
- [92] N. Miyaho, M. Hirano, Y. Takagi, K. Shiimoto, and T. Takahashi, "An ATM Switching System Architecture for First Generation of Broadband Services," *ISS'92*, 1992.
- [93] 宮保, 土井, 平野, 高木, "ATM 交換システムの構成技術", *NTT R&D*, Vol. 42, No. 3, 1993.
- [94] 朝永, 松岡, 加藤, 伯田, 村上, "超高速 ATM スイッチの構成法", 信学論 (B-I), Vol. J76-B-I, No.11, 1993.
- [95] NTT 情報通信セミナー (第 24 回 TTC セミナー), "B-ISDN プロトコル講座 [広帯域 ISDN]", 9 月, 1995.

- [96] Special Issue: North Carolina Information Highway, *IEEE NETWORK*, Vol.8, No.6, 1994.
- [97] D. Raychaudhuri and N. D. Wilson, "ATM-Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communication Networks," *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, Vol.12, No.8, 1994.

関連発表論文

[学会論文誌投稿論文]

- (1) 阿部, "多重化バーストパケット入力待ち行列システムの再生過程近似による性能評価法", 信学論 (BI) に条件付き採録にて再投稿中.
- (2) S. Abe, T. Soumiya: "A Traffic Control Method for Service Quality Assurance in an ATM Network," *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, Vol.12, No.2, 1994.
- (3) 村上, 初鹿野, 阿部, "広帯域 ATM 交換の一方式", 信学論 (BI), J72-B-I, No.3, 1989.
- (4) K. Murakami, K. Hajikano, S. Abe, and Y. Kato, "Communication Service and Media Control Using ATM," *IEICE Trans.*, Vol.E74, No.4, 1991.

[国際会議発表論文]

- (1) S. Abe, K. Hajikano, K. Murakami: "Traffic Design for an Asynchronous Transfer Mode Switching Network", *Proceeding of ITC-12*, 1988.
- (2) T. Nisino, S. Abe, K. Ogasawara, K. Murano, K. Yamaguchi: "Broadband Switching System Configuration and Access Protocol", *ICC'88*, Session 29, 1988.
- (3) S. Abe, T. Soumiya, M. Kusayanagi, H. Mukai: "A Study on ATM Traffic Control", *Multimedia'90*, Bordeaux, Nov. 1990.

[研究会発表論文]

- (1) 初鹿野, 早見, 阿部, 村上, "広帯域 ISDN 交換方式の一方式", 信学技報, SE87-58, 1987.

(2) 初鹿野, 早見, 阿部, 村上, "広帯域 ISDN 用 ATM 交換の方式", 交換・情報ネットワークワークショップ, 3 月, 1988.

(3) 阿部, 宗宮, "ATM 通信網におけるトラヒック制御の考察", 信学技報, SSE90-119, 1991.

(4) 阿部, 宗宮, "ATM 通信におけるセル品質評価法の考察", 信学技報, SSE91-118, 1991.

(5) 阿部, 牛, "バースト多重化装置におけるセル廃棄率の再生入力系列による近似解析", 信学技報, SSE92-130, 1993.

[全国大会発表論文]

(1) 初鹿野, 阿部, 村上, "ニュートランスファモードに対応した広帯域 ISDN 交換方式", 信学総全大, 昭和 62 年 3 月.

(2) 阿部, 初鹿野, 早見, 村上, "広帯域 ISDN 用新転送モードのセル長の一検討", 信学情報・システム部門全大, 494, 昭和 62 年.

(3) 阿部, 草柳, 向井, "ATM 網におけるルーティング制御の一考察", 信学秋季全大, B-159, 1989.

(4) 阿部, 宗宮, 川崎, "セル廃棄率評価に拡散近似法を適用した呼受付制御方式", 信学秋季全大, B-379, 1990

(5) 宗宮, 阿部, "ATM 網における輻輳制御方式", 信学春季全大, B-481, 1991.

(6) 宗宮, 阿部, "多重バーストトラヒックにおけるセル廃棄の時間変動について", 信学秋季全大, B-321, 1991.

(7) 宗宮, 阿部, 渡部, "ATM 網における知的呼受付制御方式に関する一考察", 信学春季全大, B-289, 1992.

