

# 通信網における待ち行列

—理論の応用と課題—

滝根 哲哉, 村田 正幸

## 1. はじめに

通信網は多数の利用者が共有する回線や交換機からなるシステムである。回線の容量や、交換機において一時的に情報を蓄積するバッファの容量は高々有限であり、これらの資源に対する利用要求の発生は、予めスケジュールされたものではない。それゆえ、個々の利用者が通信網を利用する際、必ずしもこれらの資源を直ちに利用できるとは限らない。そこで、利用者が満足できる通信サービス品質（例えば、電話をかけたとき99%の確率で回線が確保できる）を提供するためにはどの程度、資源を敷設しておけば良いかという問題が生じる [1]。

待ち行列理論は、共有資源に対する利用要求が確率的に発生するという仮定の下で、資源競合問題を抽象化した数学モデルの構築と解析に関する理論である。それゆえ、上記のような問題に対して、抽象化されたモデルを通して、システムの定量的な評価を行い、問題解決への指針を与えるという役割を担っている。通信網への応用を意識したとき、待ち行列理論は通信トラヒック理論とも呼ばれており、電話網の設計問題を解決するための枠組として、20世紀初頭に研究が開始されている。それ以降、パケット交換網、衛星通信、LAN、狭帯域 ISDN、広帯域 ISDN (ATM) などの新しい通信網の出現に伴い新しいモデルが導入され、理論の発展が加速されてきた。

通信網は（資源競合を内在する）非常に複雑なシステムであり、その性能評価とは、現状ならびに将来の技術動向／利用動向に即した形で、システムの性能を量的に評価することである。端的に言えば、待ち行列理論自身は（応用）数学であるが、システムの性能評価は工学であり、得られた結果は（現状あるいは将来の利用状況に即した）実際のシステム設計に寄与する

ものでなければならない。本稿では、待ち行列理論が通信網の性能評価へどのように応用されているかを幾つかの例を取り上げ紹介するとともに、通信網の性能評価という観点から、今後、待ち行列理論がより発展し、かつ、工学的見地からも有益な理論となるためにはどのような道を進んでいけば良いかを論じたい。なお、本稿の草稿に対し貴重な御意見をいただいた、小沢利之氏、高木英明氏、山下英明氏に深謝する。

## 2. 通信網における理論の応用

通信方式は回線交換型 (circuit switching) とパケット交換型 (packet switching) に大別される。回線交換型では、送信要求（呼）が発生すると、実際に送信を開始する前に、必要な帯域（回線）を送り手と受け手の間で確保し、その後、送信が開始される。一方、パケット交換型では送り手は送信要求と同時に、受け手情報を含む予め定められたパケットと呼ばれる形式でデータを送出する。これらのパケットは、各交換機で一旦蓄積され、パケットがもつ受け手情報に従って、順番に適切な回線へ送り出される。

一般に、回線交換網では、送信要求が発生したとき、即座に通信網の資源（回線）を要求し、もし、資源が確保できなければ送信要求そのものが失われる。一方、パケット交換網では即座に資源（回線）が確保できない場合は、バッファで一時的に待ち、順次、処理されていくと見ることが出来る。このような観点から通信網は即時系 (loss system) と待時系 (delay system) に分類することができる。即時系での主な性能指標は資源が確保できず送信要求が失われる確率（呼損率）である。一方、待時系での主な性能指標は、（平均）遅延時間である。実際には待時系であってもバッファ容量は有限であるため、バッファ溢れによるパケットの棄却が生じる可能性がある。そのため、必要なバッファ容量を見積もるためのパケット棄却率も関心のある性能指標である。以下では、即時系と待時系について、それぞれ、待ち行列理論がどのようにシステ

たきね てつや 大阪大学大学院工学研究科  
〒565-0871 吹田市山田丘 2-1  
むらた まさゆき 大阪大学大学院基礎工学研究科  
〒560-8531 豊中市待兼山 1-3

ムの性能評価に応用されてきたかを紹介する。

## 2.1 即時系通信網の性能評価

多数の利用者を収容している回線交換網内の帯域  $c$  をもつ、特定のリンク（回線群）に注目する。ここでは、まず、各呼が要求する帯域はすべて等しいものとする。すなわち、各呼はこのリンクに対して一定の帯域  $r$  を要求するとし、呼発生時に、空き帯域が少なくとも  $r$  あれば、帯域  $r$  を予約したうへ伝送を開始し、伝送終了後、帯域  $r$  を解放する。一方、呼発生時に空き帯域が  $r$  未満ならば、この呼は呼損となる。

このような状況下で、注目するリンクにおける呼損率を求めめるため、まず、呼の発生過程を考える。一般に、通信網における呼の発生は、互いに独立な利用者（呼源）からの呼の重ね合わせと見なせる。多数の利用者を収容している通信網では、送信要求全体に占める個々の利用者からの送信要求の割合は極めて小さい。一方、（各利用者からの送信要求の発生過程を表す）非常に強度の弱い独立な確率過程の重ね合わせの極限は Poisson 分布に従うことが知られている。それゆえ、多数の利用者を収容する通信網における呼の発生過程は Poisson 過程でモデル化可能である。

そこで、注目するリンクの使用状況を以下のようにモデル化する。呼の発生は 1 秒当たり平均  $\lambda$  個の Poisson 過程に従うとする。また、各呼が回線を占有する時間（保留時間）は平均  $h$ （秒）とする。 $\rho = \lambda h$  としたとき、呼損率  $B$  は

$$B = \frac{\rho^s}{s!} \bigg/ \sum_{n=0}^s \frac{\rho^n}{n!} \quad (1)$$

で与えられる。ただし  $s = \lfloor c/r \rfloor$  は容量  $c$  のリンクで同時に送信が可能な最大呼数である。式 (1) はアーラン呼損式 (Erlang Loss Formula) と呼ばれ、保留時間が指数分布に従う場合について 20 世紀初頭には既に導かれていた。当時から、任意の保留時間分布に対して式 (1) が成立することが推測されており、50 年代後半にはそれが証明されている。すなわち、呼が Poisson 過程に従って発生するリンクにおける呼損率は、保留時間の分布形とは無関係に、その平均値のみで定まる。これを保留時間分布に対する不感 (insensitivity) という。この性質は、保留時間に関しては、その平均値のみを推定すれば良いということであり、電話網の回線数を設計する際の実用的な公式として用いられてきた（電話網の場合、 $c$  は回線数、 $r = 1$ ）。

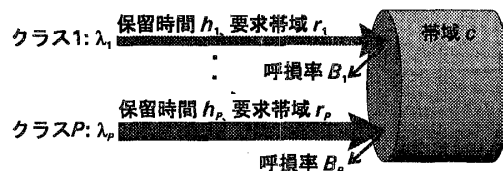


図 1: 資源共有モデル

統合サービスデジタル網 (ISDN) では、音声のみならず、データなど様々な情報の伝送を 1 つの通信網で行うことができる。それゆえ、個々の呼が要求する帯域（あるいは回線数）は一定ではない。このような通信網は以下のようにモデル化できる（図 1）。帯域  $c$  をもつリンクを利用する  $P$  種類のクラスの呼があるとする。クラス  $i$  ( $i = 1, \dots, P$ ) の呼の発生は 1 秒当たり平均  $\lambda_i$  個の Poisson 過程に従うと仮定する。また、クラス  $i$  の各呼は帯域  $r_i$  を要求するものとし、その保留時間は平均  $h_i$ （秒）とする。クラス  $i$  の呼の発生時に空き帯域が少なくとも  $r_i$  あれば、その内  $r_i$  だけ予約したうへ伝送を開始し、送信終了後、帯域  $r_i$  を解放する。一方、空き帯域が  $r_i$  未満ならば呼損となる。このようなモデルは共有資源 (shared resource) モデルと呼ばれており、クラス  $i$  の呼損率  $B_i$  は

$$B_i = 1 - G(c - r_i) / G(c) \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_P)$  ( $n_i \geq 0$ )、 $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_P)^T$  に対して  $\Omega(\mathbf{x}) = \{\mathbf{n}; 0 \leq \mathbf{n}\mathbf{r} \leq \mathbf{x}\}$  とし、 $\rho_i = \lambda_i h_i$  としたとき、 $G(\mathbf{x})$  は

$$G(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{n} \in \Omega(\mathbf{x})} \prod_{i=1}^P \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (0 \leq \mathbf{x} \leq c)$$

で与えられる。アーラン呼損式と同様に、この結果も保留時間分布に関して不感 (insensitivity) を持っている。 $P = 1$  のとき（1 種類の呼しかない場合）、式 (2) は式 (1) と等価であることに注意する。

ここまで、通信網内の特定のリンクに注目したモデルを紹介した。実際の回線交換網では、送り手から受け手に至るパス（連続するリンクの列）に沿って帯域を予約できたときのみ、送信を開始することが出来る。上で紹介したモデルはパス上の負荷が最も集中するリンクにおける性能を評価する際に利用できるが、回線交換網全体を見渡した、ネットワーク全体を評価できるモデルも必要である。そこで、共有資源問題を拡張した、呼損網 (loss network) と呼ばれる待ち行列網モデルがある。以下にその概略を示す。

通信網は  $J$  本のリンクから成るとする。リンク  $j$  の容量は  $c_j$  とする。この通信網で発生する呼を、送り手

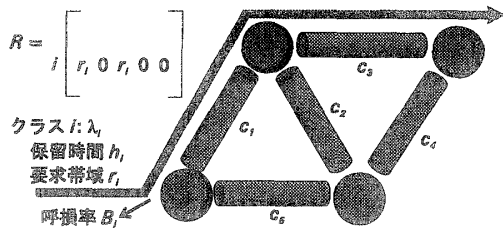


図 2: 呼損網

と受け手の組, 利用する経路, 要求する帯域によって  $P$  種類のクラスに分類する. クラス  $i$  の呼の発生は 1 秒当たり平均  $\lambda_i$  個の Poisson 過程に従うと仮定する. また, クラス  $i$  の各呼は帯域  $r_i$  を要求するものとし, その保留時間は平均  $h_i$  (秒) とする.  $i$  番目のクラスの呼の発生時に, 予め定められた経路上の全てのリンクに少なくとも  $r_i$  だけ空き帯域があれば, 個々のリンクに対して  $r_i$  だけ予約を行い送信を開始し, 送信終了後, 帯域  $r_i$  を解放する. 一方, 経路上のリンクの内, 一つでも空き帯域が  $r_i$  未満のリンクがあるならば呼損となる (図 2).

ここで  $(i, j)$  要素が, リンク  $j$  がクラス  $i$  の経路に含まれているならば  $r_i$ , それ以外の場合は 0 であるような  $P$  行  $J$  列の行列  $R$  を導入する.  $c = (c_1, \dots, c_J)$  とし,  $e_i$  を  $i$  番目の要素が 1 である  $P$  次元 (行) 単位ベクトルとすると, クラス  $i$  の呼損率  $B_i$  は

$$B_i = 1 - G(c - e_i R) / G(c) \quad (3)$$

で与えられる. ただし,  $n = (n_1, \dots, n_P)$  ( $n_i \geq 0$ ),  $x = (x_1, \dots, x_J)$  ( $x_j \geq 0$ ) に対して,  $\Omega(x) = \{n; 0 \leq nR \leq x\}$  とし,  $\rho_i = \lambda_i h_i$  としたとき,  $G(x)$  は

$$G(x) = \sum_{n \in \Omega(x)} \prod_{i=1}^P \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (0 \leq x \leq c)$$

で与えられる. アーラン呼損式, 共有資源モデルと同様に, この結果も保留時間分布に関して不感性を持っている.  $J=1$  のとき (網が 1 つのリンクからなる場合), 式 (3) は式 (2) と等価であることに注意する. また, 経路が予め定められていれば, マルチキャストにも適用できる.

上で示したように, 待ち行列理論を用いれば, 回線交換型あるいは帯域予約型の通信網の性能評価はかなり正確に行うことが出来る. 実際の通信網では, 予め定められた経路上に帯域が確保できない場合は代替経路で再び帯域予約を試みる方式など, より高度の制御を行っている. また, 呼の発生頻度は時間帯や曜日によって変動する. 前者に対しては呼損網を拡張した近似解析法が用意されており, 後者に関しては, 呼

損率をある値以下に抑えようとするれば, 最繁忙時間に着目した呼損率の評価を行えばよい. 上で示した一連の結果は待ち行列理論の応用が最もうまくいった例といえる. 本節の結果ならびにより詳細な内容については, 例えば [2] を参照.

## 2.2 待時系通信網の性能評価

60年代になって, 現在, 盛んに利用されているインターネットの祖先である ARPANET と呼ばれるパケット交換網の構築が米国で始まり, 待時系通信網の性能評価の必要性が高まった. 一般に, パケット交換網は待ち行列網でモデル化できるが, 従来から知られていた積形式解をもつ待ち行列網 (ジャクソン網) では, 各ノードにおける, 客のサービス時間は独立であるとの仮定が必要であった.

一方, 実際の通信網では, 網内を流れる一つのパケットに注目すると, 各リンクでの伝送時間 (サービス時間に対応) はパケット長に比例するため, 経路上の各ノードでの伝送時間に相関がある (例えば, 同じ回線速度なら伝送時間は全てのノードで同一). それゆえ, ジャクソン網の仮定を満たしていない. そこで, 膨大なシミュレーション実験の結果, 実際の通信網, 特に, 各ノードへ入ってくるリンク数ならびに出ていくリンク数が多い場合, 伝送時間の従属性を無視し独立であると仮定しても (パケット網における独立性の仮定と呼ばれる), 結果として得られる平均伝送遅延に大きな誤差を生じないことが示された. この独立性の仮定により, パケット網の性能評価はジャクソン網を用いて行えるようになった. 詳細は [3] を参照.

70年代後半から, LAN の代表的プロトコルである CSMA/CD ならびに Token Passing 方式の性能評価に関する多く研究が行われた [4]. 特に後者は, 複数の待ち行列を単一のサーバが巡回しながらサービスを行う待ち行列 (ポーリングモデル) としてモデル化でき, 多くの研究がなされてきたが, 詳細は省略する.

近年, 高速通信網の基盤技術として確立されつつある ATM 網では, パケットはセルと呼ばれる固定長の小さな伝送単位 (ヘッダ 5 バイト, 情報部 48 バイト) に分割され, 通信網へ送り出される. この場合, 一つのパケットを構成するセルは次々と通信網へ送り出されるため, (パケットがランダムに発生しても) セルの発生過程には相関が生じる. 一般にこのような発生パターンをバーストと呼んでいる. 各ノードでは複数のバーストを多重化した上で出力回線へ送り出すため,

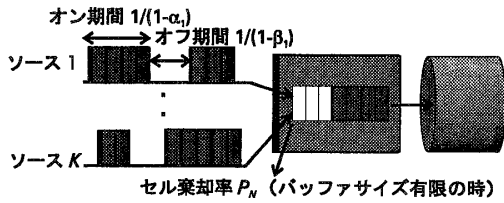


図 3: オン・オフソースの多重化

その性能評価には、複数のバースト入力をもつ待ち行列モデルが必要となる。また、セルが固定長であることから、離散時間型の待ち行列モデルに対する関心が一気に高まり、数多くの研究がなされてきた。

一つのソースに注目すると、パケットを送出している期間と送り出していない期間が交互に現れる。これをセルの発生過程に置き換えると、セルが次々と生み出される期間（オン期間）とセルが生み出されない期間（オフ期間）が交互に現れるとみなすことができる。それゆえ、しばしば、ソースはオン状態とオフ状態が交互に現れるマルコフ連鎖でモデル化される。さらに通信網では、これら個々のソースから発生するセルが交換機で多重化され、一本のリンク上に送り出される。リンクをサーバと見立てると、これは、オン、オフを繰り返すソースを多数重ね合わせた単一サーバ待ち行列と見ることができる。

例えば、各ソースからのパケットの発生がランダムであり、かつ、パケット長もランダムである（指数分布に従う）と仮定する。ATM では各パケットは固定長のセルに分割されるため、パケット長が指数分布に従うならば、パケットを構成するセル数は幾何分布に従うことになる。それゆえ、オン、オフの期間がそれぞれ幾何分布に従うソースを多数重ね合わせた入力をもつ離散時間待ち行列を用いて、特定のリンクに向かうセルの交換機内での振舞いをモデル化できる。例えば、 $K$  個のソースが多重化されるとし、ソース  $i$  は平均  $(1 - \alpha_i)^{-1}$  の幾何分布に従うオン期間と平均  $(1 - \beta_i)^{-1}$  の幾何分布に従うオフ期間をもつとし、オン期間においては単位時間当たり 1 つのセルが発生するとする（図 3）。このとき、ソース  $i$  のトラヒック強度  $\rho_i$  は  $(1 - \beta_i)/(2 - \alpha_i - \beta_i)$  であり、全体でのトラヒック強度  $\rho$  は  $\sum_{i=1}^K \rho_i$  である。システムが安定であるならば ( $\rho < 1$ )、十分大きな容量をもつバッファでのセルの平均待ち時間  $W$  は

$$W = \frac{1}{\rho(1-\rho)} \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{k=i+1}^K \frac{\rho_i \rho_k (1 - \gamma_i \gamma_k)}{(1 - \gamma_i)(1 - \gamma_k)} \quad (4)$$

で与えられる [5]。ただし  $\gamma_i = \alpha_i + \beta_i - 1$  である。

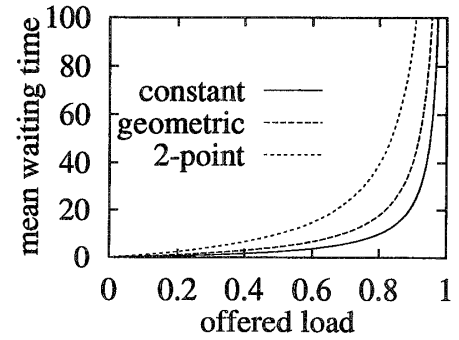


図 4: 平均待ち時間 ( $K = 100$ )

もし、ソース  $i$  のオン期間が幾何分布ではなく、平均  $(1 - \alpha_i)^{-1}$ 、2 次積率  $\alpha_i^{(2)}$  をもつ任意の分布に従う場合、

$$\gamma_i = 1 - \frac{2}{(1 - \rho_i)(1 + (1 - \alpha_i)\alpha_i^{(2)})}$$

とすれば、再びセルの平均待ち時間は式 (4) で与えられる [6]。さらに、Little の公式 (Little's Law) を用いれば、バッファで蓄えられる平均セル数  $L$  は  $\rho W$  で与えられる。図 4 に平均オン期間長が 5 の同質な 100 個のソースを多重化した時の平均待ち時間を示す。constant はオン期間長が一定の場合（2 次積率 25）、geometric は幾何分布（2 次積率 45）、2-point は確率 25/28 で 2、確率 3/28 で 30（2 次積率 100）の場合である。このグラフから、平均待ち時間は 2 次積率の値によって大きく異なることが分かる。

実際の交換機におけるバッファは有限であり、セル棄却が起こる可能性がある。それゆえ、ATM 網において、従来の電話網と同等の通信サービス品質を保つためにはセル棄却率を非常に小さくする必要がある（例えば  $10^{-8}$  以下）。オン、オフ期間が幾何分布に従う上記のモデルにおいて、バッファサイズ  $N$  が十分大きい場合、 $a_i(z) = (z\alpha_i + \beta_i)/2$  に対して

$$\delta_i(z) = a_i(z) + (a_i^2(z) - z\gamma_i)^{1/2} \quad (5)$$

とおき、 $z^*$  を  $z = \prod_{i=1}^K \delta_i(z)$  の  $z > 1$  における最小根とすれば、セル棄却率  $P_N$  は

$$P_N = \frac{(1 - \rho)^2}{\rho} \frac{q(z^*)}{z^* p(z^*) - 1} \left(\frac{1}{z^*}\right)^{N-1}$$

で与えられる [7]。ただし

$$p(z) = \sum_{i=1}^K \frac{\alpha_i \delta_i(z) - \gamma_i}{2(a_i(z)\delta_i(z) - z\gamma_i)}$$

$$q(z) = \prod_{i=1}^K \frac{(1 - \gamma_i)(\delta_i(z) - z\gamma_i)}{2\{(a_i(z) - \gamma_i)\delta_i(z) + (a_i(z) - z)\gamma_i\}}$$

である。オン期間の長さが位相型分布に従う場合についても同様の結果があるが詳細は省略する。図 5 に平

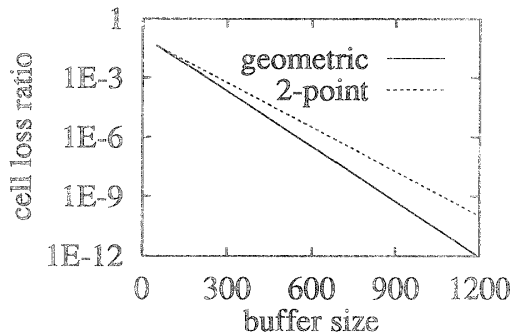


図 5: セル棄却率 ( $K = 100, \rho = 0.8$ )

均オン期間長 10, 2 次積率 190 の同質な 100 個のソースを多重化した時のセル棄却率を示す。geometric はオン期間長が幾何分布に従う場合, 2-point はオン期間長が確率 90/91 で 9, 確率 1/91 で 100 の場合である。平均待ち時間がオン期間長の 2 次までの積率で決まるのに対し, セル棄却率は分布形に依存することに注意する。

上記のモデルはセルを伝送単位としたモデルであった。一方, もう少しマクロな目で個々の呼源を眺め, バーストそのものを直接モデル化する試みがある。すなわち, オン期間の間, 一定の流量でバッファへ流体を注ぎ込むとし, リンクは一定の流量でバッファに溜っている流体ならびに各呼源から注ぎ込まれる流体を放出する, 流体モデルが考案された。このモデルは, 各ソースのオン期間, オフ期間の分布, ならびにオン期間における入力流量率とリンクの出力流量率で特徴付けられ, 適当な仮定の下で, 十分に大きな容量のバッファがある場合, バッファに溜る流体の量の分布を求めることが出来る。例えば [8] 参照。

一般に, 多数のソースが多重化された入力をもつ有限バッファ待ち行列におけるセル棄却率の計算は, 計算量の点から困難な場合が多い。そこで, 同じ入力をもつ無限バッファ待ち行列を考え, 待っている客数, あるいはバッファ内に溜っている流体の量  $L$  がバッファ量  $N$  よりも大きくなる確率  $\Pr(L > N)$  で, セル棄却率  $P_N$  を見積もろうという考え方が出てきた。この確率  $\Pr(L > N)$  は, (待ち行列長の) 裾野分布とよばれ, 近年, 様々な待ち行列モデルに対して, 非常に多くの研究がなされている。

一方, ATM 網では, 受け付けた呼の通信サービス品質を保証するため, リンク速度  $c$  とバッファ量  $N$  が与えられたとき, 既に伝送中の呼に加えて, 新たに発生した呼の伝送を行っても, セル棄却率  $P_N$  が十分小さなある値  $\epsilon$  以下となるならば, 新たな呼の伝送

を許可し, 大きくなるのであれば拒否するという, 呼受付制御が必要となる。これは, ATM が基本的にパケット交換技術であり, セル送出率 (ソースに割当てられる帯域) を任意に設定できる仕組みを持つため, 逆に, 呼を受け付ける時, 品質 (ここではセル棄却率) を予測しておくことが必須となるためである。このような制御は, 実効帯域 (effective bandwidth) を用いることにより, 実現可能である。以下に, その概要を述べる。

まず, 十分小さな  $\epsilon = \exp(-dN)$  を満たす, 通信サービス品質 (セル棄却率  $P_N$ ) を定めるパラメタ  $d$  を導入する。このとき, 適当な仮定の下で,

$$P_N \approx \Pr(L > N) \leq e^{-dN} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^K g_i(d) \leq c$$

を満たすような, 各呼  $i$  の統計的性質から定まる実効帯域  $g_i(d)$  が存在することが知られている。すなわち,  $A_i(s, t)$  を呼  $i$  から時間間隔  $[s, t)$  の間に発生するセル数とし,

$$A_i^*(d, t) = \sup_{s \geq 0} \frac{1}{d} \ln E \left[ e^{dA_i(s, s+t)} \right]$$

としたとき, 実効帯域は  $g_i(d)$  は

$$g_i(d) = \limsup_{t \rightarrow \infty} A_i^*(d, t)/t$$

で与えられる。例えば, 呼  $i$  は平均  $(1 - \alpha_i)^{-1}$  の幾何分布に従うオン期間と平均  $(1 - \beta_i)^{-1}$  の幾何分布に従うオフ期間をもつとし, オン期間においては単位時間当たり 1 つのセルが発生する (ピークレートが 1) とすると, 式 (5) で与えられる  $\delta_i(z)$  を用いて, 実効帯域  $g_i(d)$  は

$$g_i(d) = \delta_i(d)/d$$

で与えられる。もし, ピークレートがある自然数  $R$  に対して  $1/R$  で与えられるならば, 実効帯域は  $1/R$  倍となる。様々なモデルに対する実効帯域は [9] を参照。

各呼の実効帯域が既知であれば, 以下のように呼受付制御を行うことが出来る。例えば, 既に呼 1 から呼  $K$  まで  $K$  本の呼が伝送中である時, リンク容量  $c$  と現在伝送中の呼の実効帯域  $\sum_{i=1}^K g_i(d)$  との差 (残余容量) が, 新たに加わる呼  $K+1$  の実効帯域  $g_{K+1}(d)$  より大きければ, すなわち  $g_{K+1}(d) \leq c - \sum_{i=1}^K g_i(d)$  ならば, 呼  $K+1$  を受付可能である (呼  $K+1$  を加えてもセル棄却率は  $\exp(-dN)$  以下) と判定できる。

上記のような一連の研究から, ATM 交換機の性能は収容するトラヒックの統計的性質に大きく依存することが明らかになった。それゆえ, ATM 網のトラヒック

ク制御を行うためには、収容するトラヒックの性質をかなり正確に把握する必要がある。例えば、実効帯域を用いて呼受付制御を行おうとすれば、発生した全ての呼にトラヒックの性質を宣言させる必要がある。現在の ATM 網では、統計的な変動を持つトラヒックを統計多重することによって回線の効率的な利用を行うようなサービス (ATM では VBR サービスクラスと呼ばれている) も標準化されているが、その実現に関しては 3 章にも一例を示すように様々な問題が指摘されている (例えば, [10] 参照)。

一方, ATM では、呼の要求する帯域をそのまま割当てるサービス (CBR サービスクラス) もある。統計的な変動を持つトラヒックについては、その最大帯域を用いて呼受付制御を行うというものである。この場合、回線の効率的な利用は期待できないが、制御が簡素化できる。また、品質設計の立場から見ると、即時系の網理論がそのまま適用できる利点もある。

### 3. 待ち行列理論の課題

#### 3.1 通信網への応用における課題

前章でも紹介したように、通信網に限らず、システムの性能評価を行おうとすれば、随所に待ち行列理論が必要となる。しかし、一方で待ち行列理論が工学的に本当に役立っているか、という批判もある。もちろん、理論的結果自体が意味を持つ例も多い。例えば、FIFO や PS (Processor Sharing) など現実のシステムでも広く用いられている処理規律を定式化して説明し、それによって処理規律に対する普遍的な知見が得られるような場合である。しかし、ここでは特に応用分野として通信網の性能評価を考えた場合に、待ち行列理論に対する批判に答えるために今後どのように取り組んでいくべきか考えてみたい。

システム設計者にとって、性能評価の第一義的な目的は定量的な性能指標の導出であり、そのための道具として待ち行列理論の適用が考えられる。しかし、待ち行列理論を専門としないシステム設計者が、性能評価のために待ち行列理論を適用してみようという気にならないという現実が一方にある。おそらく最大の問題は、従来の結果が適用できるのか、または従来の理論的結果では取り扱えないような新たなモデルが必要なのか、あるいは新しいモデルが理論的に取り扱えるのか、がよくわからないということであろう。待ち行列理論の専門家がこの問題に対処しようとするれば、

以下の点に留意する必要がある。

#### [課題 1] シミュレーションに対する優位性はあるか?

最近の計算機の GUI の発達とともに優れたシミュレーションツールが登場し、既存システムがライブラリとして備えられている。シミュレーションに対する待ち行列理論の利点として、

- (1) 数学的な取り扱いによって結果の再現性がある。
- (2) 各種パラメータのシステム性能に与える影響の見通しがよい。そのためには、前章に示したように指標に関する陽な表現式が与えられていることが望ましい。
- (3) 計算時間が短い。また、高次モーメントに関わる性能指標 (パケット棄却率、遅延分布、呼損率など) が精度良く計算できる。

などが挙げられる。逆に、上記の項目を満たさない理論的結果を用いるくらいなら、手軽にシミュレーションをしてしまおう、ということになる。待ち行列理論の研究者は常にそのことを念頭において、理論的結果を提示する必要がある。

#### [課題 2] 理論的結果の再利用は可能か?

課題 1 とも深く関連するが、システム設計者が待ち行列理論を適用しようと決めた時の最大の難関は、理論的結果の再利用の困難性であろう。論文に示された式を追い、プログラミングすることは容易ではない。そのため、例えば、ACM TOMS [11] などのように、まずは解析プログラムのライブラリ化が望まれる。計算プログラムの公表は、得られた理論的結果の信頼性の向上にも役立つであろうし、他の待ち行列理論の専門家にも有益であると考えられる。また、ライブラリ化が困難であっても、待ち行列理論の専門家がその研究成果をインターネットなどを通じて積極的に公開することも重要であろう。

#### [課題 3] システム設計者との共同作業の可能性?

理論的結果の再利用を一步進めれば、システム設計者と待ち行列理論の専門家の共同作業ということになる。例えば、次のようなシナリオが考えられる。

- (1) システム設計者が評価に必要な性能指標を洗い出す。
- (2) システム設計者が評価システムの対象となるパラメータ領域を設定する。
- (3) システム設計者と待ち行列理論の専門家が相談して解析可能な評価モデルを構築する。対象となるシステムパラメータ領域で必要な性能指標が

得られることが大前提である。

- (4) 待ち行列理論の専門家がモデルの解析を行う。
- (5) システム評価を行う。システム設計者のフィードバックを得て、モデルの再検討／拡張を行う。

以上によって、待ち行列理論の専門家が新しい技術に触れ、新たな研究課題をを発見できる可能性もある。

理論的な研究成果が大きな役割を果たした一例は、IBM社のトークンリング LAN の採用にみる事ができる。1980年代に CSMA/CD 方式に基づいたイーサネット LAN が脚光を浴びつつあった時、IBM 社は Token Passing 方式によるトークンリング LAN を採用した。これは、理論的な研究に基づいて両方式の比較評価を行い、Token Passing 方式が性能的に優位性を持つことが示されたためである。ただし、当時の技術ではその実現が困難であったために市場への進出が遅れ、また、当時、計算機の主流がワークステーションに移行しつつあったため、IBM 社のトークンリング LAN は市場では必ずしも浸透せず、現在でもイーサネットが主流となっているのは周知のとおりである。

一方、工学的にみて価値のない理論的結果も過去に多数産み出されてきた一因は、上記項目の(1)や(2)、(3)を十分に検討してこなかった点にある。その端的な例が、前章でも述べた ATM における統計多重に関する研究であろう。ATM が登場した当初、盛んに喧伝されたのが統計多重化効果による網の効率的な利用であった。統計多重化効果を調べること自体の意味は大きいですが、特定のアプリケーションを考えるようになって話がおかしくなった。

典型的な例が動画像、特に MPEG [12] の多重化特性に関するものである。MPEG は、原画像をそのまま圧縮する I フレーム、原画像と I フレームを用いて前方向差分圧縮する P フレーム、原画像と I、P フレームを用いて双方向差分圧縮する B フレームからなり(図 6)、それらの組み合わせによって動画像の符号化圧縮を行う。画像の圧縮により網資源が有効に利用できるというのはすぐに思い付く。一方、バースト性を有するトラフィックを多重化すれば資源の有効利用が期待できるというのも事実である。その結果、MPEG のモデル化や多重化特性に関する研究が盛んに行われた。しかし、ATM における最終的な目標が通信サービス品質の保証であるという肝心な点が忘れ去られたものが多い。その結果、次のような問題が生じている。

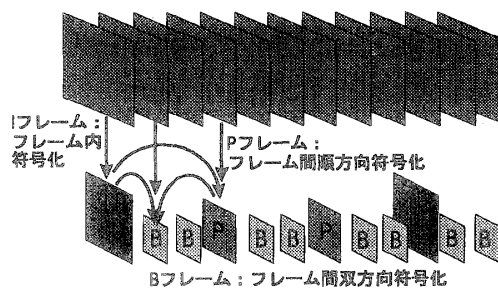


図 6: MPEG の符号化圧縮技術

- 多重数が与えられた時にセル棄却率がどの程度になるかという結果は得られたが、セル棄却率がどの程度であれば品質が良いと言えるのかという問題が置き去りにされたままである。先述のように、MPEG では重要度の高い I フレームの情報量が大きいですが、統計多重すると重要度の高い I フレームのセルが多く失われ、それが後のフレームの品質にも影響する。従って、単純な統計多重では MPEG の品質保証ができないということになる(上記シナリオにおける(1)の欠如)。
- 2.2節でも示したように、通信サービス品質を保証しようとするれば、予めトラフィック特性の予測が必要である。しかし、トラフィック特性は動画像の内容に依存するものであり、実際には予測は困難である((1)の欠如)。
- 動画像のモデル化に熱心なあまり、解析をむやみに複雑化し、興味の対象となるシステムパラメータ領域では解が得られない((2)、(3)の欠如)。例えば、動画像をマルコフ過程としてモデル化する研究もさかんに行われているが、動画像の詳細なモデル化によって状態数が爆発し、解を得たいシステムパラメータ領域(例えば、多重数 50、バッファサイズ 100、これでも現在の技術水準を考えると控え目な数字であろう)では実際には計算できない、といった例である。

MPEG に関しては、一方で発生レートを固定する符号化方式(Test Model 5 [13])もあり、その場合には前章に示した呼損網の結果がそのまま適用できる。

### 3.2 待ち行列理論に対する期待

本節では見方を変え、今後、通信網から見て待ち行列理論の進展が期待される項目を挙げる。

#### (1) データ通信の評価

これまで待時系の評価では、パケットの発生過程はシステムの状態とは独立であると仮定されたものが

ほとんどである。しかし、データ通信で多く採用されているプロトコル（例えば、インターネットのTCP）は基本的にフィードバック系である。すなわち、網への到着がその輻輳状態に依存するような問題に対する取り組みが望まれる。

即時系における主たる性能指標である呼損率は、ユーザに直接的に提示可能なものである。一方、待時系の性能指標であるパケット遅延や棄却率は交換機設計における性能項目としては利用できるが、ユーザが直接認識するものではない。よりユーザに近い指標（例えば、ファイル転送時間やWebシステムにおけるリクエスト応答時間など）を評価するための理論的手法が必要である。

## (2) トラヒックの長期依存性/自己相似性

最近になって自己相似性を持つトラヒック特性がイーサネット上の観測によって「発見」され[14]、その他、ISDN呼の保留時間や動画トラヒックについてもよく似た性質が確認された。この研究分野における課題は3つある。すなわち、(a) そのようなトラヒック特性が発生する原因の究明、(b) 特性を表現する数学的モデルの構築、(c) システム性能に与える影響の評価、である。実際、それぞれに関して研究が活発に進められているが、上の3つの項目が密接に関連しているという点に留意すべきである。

例えば、自己相似性を有するモデルとして Fractional Brownian Motion [15] を多重化し、待ち行列長の分布を求めるとする。理論的には解が得られるかも知れない。しかし、イーサネット上で自己相似性を持つトラヒックが観測されたからといって、それを多重化する意味がどこにあるのか？ いったいどこで多重化されるのか？ という疑問がただちに出てくる。ルータのモデル化と考えられないこともないが、イーサネットの上ではTCPが動作し、輻輳によるフィードバックの影響が観測結果に反映されているかも知れない。すなわち、イーサネットでの観測結果は出力過程であり、決して到着過程ではない。

あるいは、長期依存性を有する動画の、交換機における多重化に適用できるかも知れない。しかし、その場合には、遅延や棄却率を求めるのではなく、通信サービス品質保証の観点から多重化の影響を調べることが本筋であろう。実際、バッファは有限なので実時間転送における長期依存性の影響は小さいという研究結果もある。また、発生レートが固定の符号化方

式を用いれば、長期依存性自体がなくなる。工学的に意味のある理論的研究をのためには、上記3つの課題の関連性にじゅうぶん注意する必要がある。

## (3) 対象システムの複雑化/巨大化

インターネットのように世界規模の網が構築されるようになっており、大規模システムを効率的に評価する手法が重要である。単純には待ち行列網理論ということになる。しかし、インターネットに代表されるコンピュータ網とATM網に代表される電気通信網は各々異なる歴史を歩みながら、現在指向するところは同じくマルチメディア網である。すなわち、待時系/即時系トラヒックの混在するシステムを対象とした理論的な取り扱いが望まれる。

## 参考文献

- [1] 間瀬憲一, 木村英俊: “コミュニケーションネットワークのサービス品質に関する動向と課題,” 電子情報通信学会論文誌 (B-I), J80-B-1 (6), 283-295, 1997.
- [2] F. P. Kelly: “Loss networks,” *Ann. Appl. Prob.*, 1 (3), 319-378, 1991.
- [3] L. Kleinrock: *Queueing Systems, Vol. II: Computer Applications*, Wiley, New York, 1976.
- [4] T. N. Saadawi et al.: *Fundamentals of Telecommunication Networks*, Wiley, New York, 1994.
- [5] A. M. Viterbi: “Approximate analysis of time-synchronous packet networks,” *IEEE J. Select. Areas Comm.*, 4 (6), 879-890, 1986.
- [6] M. F. Neuts: “On Viterbi’s formula for the mean delay in a queue of data packets,” *Stoch. Mod.*, 6 (1), 87-98, 1990.
- [7] F. Ishizaki and T. Takine: “Exact loss probability calculation with queue length in the corresponding infinite-buffer queue,” submitted for publication.
- [8] T. E. Stern et al.: “Analysis of separable Markov-modulated rate models for information-handling systems,” *Adv. Appl. Prob.*, 23, 105-139, 1991.
- [9] G. Kesidis et al.: “Effective bandwidths for multiclass Markov fluids and other ATM sources,” *IEEE/ACM Trans. Net.*, 1 (4), 424-428, 1993.
- [10] 村田正幸: “マルチメディアネットワークにおける通信品質保証の実現と課題,” 電子情報通信学会論文誌 (B-I), J80-B-1 (6), 296-304, 1997.
- [11] “Collected Algorithms of the ACM,” available at <http://www.acm.org/toms/calgo/>.
- [12] “MPEG Pointers and Resources,” available at <http://www.mpeg.org/>.
- [13] “Test Model 5,” available at <http://www.bok.net/~tristan/MPEG/MSSG/tm5/>.
- [14] W. E. Leland et al.: “On the self-similar nature of Ethernet traffic,” *ACM SIGCOMM '93*, 183-193, 1993.
- [15] I. Norros: “On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless network,” *IEEE J. Select. Areas Comm.*, 13 (6), 953-962, 1995.