

情報ネットワークの性能評価 — 平衡点解析によるアプローチ —

田坂修二
名古屋工業大学 工学部

あらまし 情報ネットワークの性能をマルコフモデルを用いて解析しようとする際、問題となるのがモデルにおける状態数の増大と、それに伴う状態推移確率の計算の困難さである。この問題を解決するために、これまで多くの研究が行なわれている。平衡点解析は、この問題解決への一つのアプローチである。この手法は、多次元マルコフ連鎖の近似解析手法であり、状態推移確率の計算を必要としない一種の流体近似である。平衡点解析は、これまで主として、ローカルエリアネットワーク、衛星パケット通信網などの放送形通信網の解析に用いられ成功を収めている。本報告は、平衡点解析の原理を説明し、これまで情報ネットワークにおけるどのような問題の解析に用いられているかを簡単に紹介する。

Performance Evaluation of Information Networks — An Approach by the Equilibrium Point Analysis —

Shuji Tasaka
Faculty of Engineering,
Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466, Japan

Abstract The equilibrium point analysis (EPA) is an approximate analytical technique of multidimensional Markov chains. It is a fluid-type approximation that is applied only to the steady-state: it assumes that the system is always at an equilibrium point. Therefore, EPA does not necessitate calculating state transition probabilities of the Markov chain. The EPA method has been successfully applied to various configurations of information networks, particularly, packet broadcast networks. This report describes the principle of EPA and explains how this method has been applied to the performance evaluation problems in information networks.

1 まえがき

情報システムの高度化・分散化に伴って、その基盤となる情報ネットワークは益々大規模になり複雑化している。情報ネットワークが有用であるためには、その目的に合うだけの性能を持つことが必須であるとは言うまでもない。しかしながら、実際には、ネットワークの構築自身に目が奪われ、性能にまで十分配慮が行き届かないことが多い。そのため、ネットワークの構築後に所期の性能が得られなく、ネットワークの再設計、再構築を余儀なくされることもある。また、現在稼働中のネットワークを拡張・高性能化しようとする際、試行錯誤的な方法によってこれを行うため、予想外の時間と費用を費やすことも少なくない。このような問題を解決するためには、ネットワークの性能を正確に評価できる手法の確立が是非とも必要である。

ネットワーク性能評価手法については、これまで多くの研究が行われており、既に種々の手法が利用可能である。しかし、多種多様な情報ネットワークがあり、その各々が複雑なシステムであるので、あらゆる場合に適用可能な手法は存在しない。また、ネットワークの高度化・高機能化に伴って、次々と新しい問題も現れており、いまなお研究すべき課題は多い。

本報告は、ネットワーク性能評価手法の一つとして筆者らが研究を行っている平衡点解析 (Equilibrium Point Analysis: EPA)^{[1],[2]}の手法を紹介するものである。平衡点解析は、多次元マルコフ連鎖の近似解析手法であり、これまで衛星パケット通信網、ローカルエリアネットワーク (LAN)、地上無線通信網などの性能評価に用いられ成功を収めている^[1]。以下、2. で、ネットワーク性能評価手法の種類を概観し、その中で平衡点解析を位置づける。続いて3. で、平衡点解析導入の準備として、スロット付アロハのマルコフ解析を説明する。そして4. で平衡点解析を導入し、その原理や簡単な適用例を紹介する。最後に5. で、平衡点解析のその他の適用例に簡単に触れる。

2 性能評価の手法

現在、ネットワーク性能評価に用いられる主な手法は次の三つである。

- (1) 実際のシステムを用いた測定
- (2) 計算機シミュレーション
- (3) 解析的手法

これらの手法には、それぞれ長所・短所があり、状況に応じて使い分けられている。このうち解析的手法は、適応範囲は限られるが、システム全体の振舞いを総合的且つ経済的に調べることができるという特徴がある。

解析的手法の主体を成すのが確率過程論の応用によるものである。これは、通常のポイント・ツー・ポイントチャネルを用いたネットワークの解析においては、待ち行列網理論という形で確立されており、積形式解の利用が一般的である (例えば、文献 [3] 参照)。

また、LAN や衛星通信網に代表される放送形通信網の場合には、標準的な待ち行列網理論の利用は一般に困難であり、待ち行列理論の基礎を成すマルコフ過程論、特にマルコフ連鎖の理論に立ち返ってモデル化・解析が行われる。これは、放送形通信網では、任意の一つの局が送出した信号が他の全ての局によってほぼ同時に受信されるため、各局の待ち行列が互いに干渉し合うためである。このような待ち行列過程を、interfering queueing process という。この種のシステムにおいては、待ち行列のサーバーのサービスレートのシステムの状態に複雑に依存する。そのため、通常の待ち行列網理論をそのままの形でこの種のシステム

の解析に適用するのは、一般には困難となるのである。そこでマルコフ連鎖の理論に立ち返ってモデル化・解析を行うことになるが、その際、問題となるのがモデルにおける状態数の増大 (state space explosion) と、それに伴う状態推移確率の計算の困難さである。従って、多くの状態数を持つ多次元マルコフ連鎖の効率的な解析法が必要となる。

平衡点解析 (EPA) は、多次元マルコフ連鎖の近似解析手法であり、状態推移確率の計算を必要としない一種の流体近似である。この手法は、これまで、主として放送形通信網の性能解析に用いられてきた。

次章では、スロット付アロハシステムを例に取り、通常のマルコフ連鎖の理論を用いて、現実的な形で放送形通信網を解析することの困難さを説明する。そして、多次元マルコフ連鎖の何らかの近似解析手法が必要であることを示す。

3 スロット付アロハのマルコフ解析

スロット付アロハは、ランダムアクセス多元接続 (または M A C) プロトコルの一種である。チャネルの時間軸は、パケット長に等しい長さのスロットに分割化されており、各端末はそのスロットに同期して自分のパケットをランダムに送信する。従って、パケットが衝突することもある。衝突の時には、それらの端末は各々独立にランダムな遅延の後に、パケットを再送する。再送遅延の選択が適切でないと、いわゆるシステムの不安定現象が現れることがよく知られている。この問題、すなわち、システムの安定性 (stability) 問題は、ランダムアクセスシステムの性能評価において本質的に重要なものである。従って、この安定性問題が取り扱える手法が必須となる。

そこで、Kleinrock と Lam は、衛星チャネルを用いたスロット付アロハシステムの解析にマルコフ連鎖理論を適用することを試みた^[4]。マルコフ連鎖理論による解析を、ここでは、単にマルコフ解析と呼ぶ。マルコフ解析によるこのシステムの現実的なモデル化・解析は、極めて困難である。これは、約 0.27 秒に及ぶ衛星チャネルの往復伝搬遅延と各端末のバッファに蓄えられるパケット数とを表現するためには、多くの状態を持つモデルを構築する必要があるからである。そこで、Kleinrock と Lam は、システムの状態数を大幅に削減するために、次のような仮定を置いた。

(A1) 衛星チャネルの往復伝搬遅延は零である。

(A2) 各端末の送信バッファは、1 パケット分である。従って、既にバッファ内にパケットを持っている端末は、その送信に成功しバッファを空にしないと、次のパケットを発生できない。

(A3) 各端末は、スロット当り確率 σ で新しいパケットを発生する (ベルヌーイ過程)。

(A4) 衝突を起こしたパケットは、スロット当り確率 p で再送される (ベルヌーイ過程)。

これらの仮定によって、システムの状態を単一の確率変数で記述することが可能になる (スカラーの状態変数)。このとき、システム内の端末数を M とすると、図 1 のようなモデルが得られる。各端末の取りうる状態をモード (mode) と呼ぶことにすると、図 1 は、一つ端末は、 T モードまたは RT モードのいずれかにあることを示している。 T モードは、送信バッファ内にパケットを持っていない状態であり、仮定 A3 に従う。一方、 RT モードは、1 個のパケットを持っており、それを再送しようとしている状態であり、仮定 A4 に従う。ここで、 N^i を時刻 t で RT モードにある端末数を表す確率変数とすると、 N^i はスロット毎に状態遷移が起こる離散時間マルコフ連鎖となる。

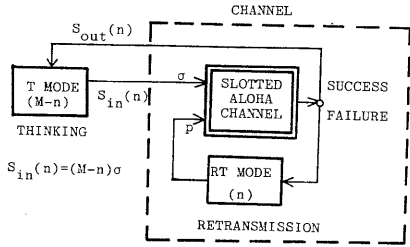


図1: スロット付アロハシステムのマルコフモデル

このマルコフ連鎖の定常確率分布 $P_n \triangleq \Pr[N^t = n]$ $n = 0, 1, \dots, M$, は、次式で与えられる。

$$P_j = \sum_{i=0}^M P_i p_{ij} \quad j = 0, 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^M P_i = 1 \quad (2)$$

上式で p_{ij} は、1 段状態推移確率であり、このシステムにおける状態推移のすべての組み合わせを考えると、次のように表される。

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & j \leq i-2 \\ ip(1-p)^{i-1}(1-\sigma)^{M-i}, & j = i-1 \\ (1-p)^i(M-i)\sigma(1-\sigma)^{M-i-1} \\ \quad + \{1-ip(1-p)^{i-1}\}(1-\sigma)^{M-i}, & j = i \\ (M-i)\sigma(1-\sigma)^{M-i-1}\{1-(1-p)^i\}, & j = i+1 \\ \binom{M-i}{j-i}\sigma^{j-i}(1-\sigma)^{M-j}, & j \geq i+2 \end{cases} \quad (3)$$

こうして得られた P_n を用いれば、システムの性能評価尺度であるスループット \bar{S} と平均パケット遅延 D は、次式で簡単に計算することができる。

$$\bar{S} = \sum_{n=0}^M S_{out}(n) P_n \quad (4)$$

$$S_{out}(n) = (1-p)^n (M-n) \sigma (1-\sigma)^{M-n-1} + n p (1-p)^{n-1} (1-\sigma)^{M-n} \quad (5)$$

$$D = \frac{M}{\bar{S}} - \frac{1}{\sigma} + 1 \quad (6)$$

式(1)-(6)を用いて計算したスループットと再送率 p との関係の一例を、図2に示す。図2は、 p がある値以上に大きくなると、スループットが急激に減少する不安定現象をはっきりと表している。

以上の議論より明らかなように、マルコフ解析を適用するためには、いかに状態推移確率を計算するかがポイントとなる。図1のモデルでは、状態ベクトルがスカラーとなるため、状態推移の全ての組み合わせを考えることは比較的容易であった。しかし、状態ベクトルが多次元になると、このことは極めて難しくなり、現実的にはほとんど不可能とも言える。

先にモデル構築の簡単化のために置いた仮定 A1-A4 のいずれか一つを取り除けば、我々は直ちにこの困難な状況に直面する。例えば、仮定 A1 を外せば、チャンネル伝搬遅延を考慮する必要があるので、図1のモデルの代わりに図3のようなモデルが必要と

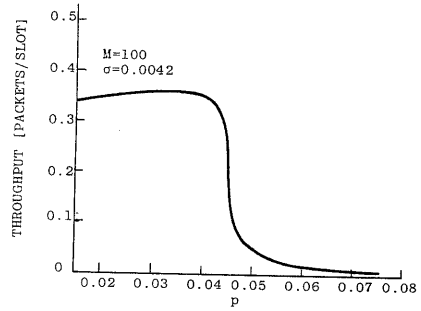


図2: マルコフ解析によるスロット付アロハのスループット特性

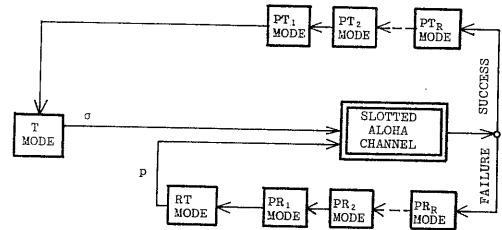


図3: チャンネル伝搬遅延を考慮したスロット付アロハのモデル

なる。但し、図3では、往復伝搬遅延が R スロット長であるとしている。このモデルでは、状態ベクトルは $(2R+1)$ 次元となり、その状態推移確率の一般的な計算は極めて困難である。また、仮定 A2 を取り除けば、図4のモデルとなる。これは、各端末が J パケット分の送信バッファを持つ場合のモデルであり、やはり多次元状態ベクトルとなっている。送信バッファ内に k 個のパケットを持っている端末は TR_k モードにあり、スロット当り確率 p で一つのパケットを送信する。

スロット付アロハシステムは、放送形通信網の中でも最も解析が容易なものである。その簡単なシステムでさえも、より現実的な条件の下で性能を評価しようとするれば、多次元マルコフ連鎖を解析しなければならない状況となる。更に複雑な放送形通信網を解析する際の困難さは、容易に想像できるであろう。従って、多次元マルコフ連鎖の何らかの近似解析手法が必要となる。このための手法は、良い近似精度を与えと共に簡単で使い易いものであることが望ましい。平衡点解析は、このような試みの一つである。

4 平衡点解析

平衡点解析 (EPA) は、定常状態にのみ適用される一種の流体近似であり、システムは、常に平衡点に留まると仮定する。従って、状態推移確率を計算する必要がなく、多次元マルコフ連鎖も容易に解析することができる。平衡点解析を適用するためには、いかにして平衡点を求めるかが重要となる。

以下に、平衡点解析の原理を簡単に紹介する。そして、平衡点解析がどのように多次元マルコフ連鎖の解析に使用されるかを、図4のモデルを用いて示す。平衡点解析のより詳細や適用例については、文献 [1] を参照されたい。

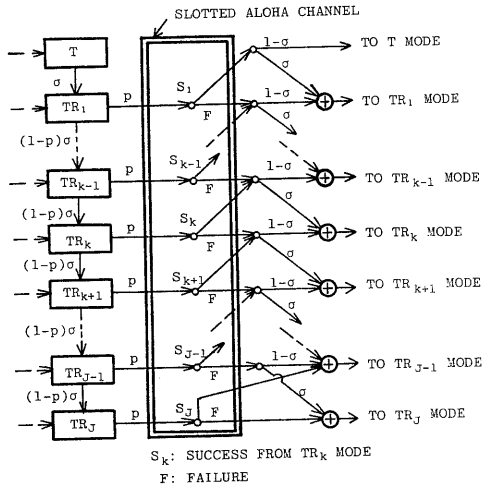


図4: 複数パケット送信バッファを持つスロット付アロハのモデル

4.1 平衡点

まず、Kleinrock と Lam の方法^[4]に従って平衡点の概念を導入する。再び、図1のモデルを考え、 N^t を時刻 t で RT モードにある端末数を表す確率変数としよう。このとき、 $N^t = n$ でのチャネル出力率(条件付スループット)を $S_{out}(n)$ とし、 $N^t = n$ でのチャネル入力率(パケット発生率)を $S_{in}(n)$ とすると、これらは次式で与えられる。

$$S_{out}(n) = (1-p)^n (M-n) \sigma (1-\sigma)^{M-n-1} + n p (1-p)^{n-1} (1-\sigma)^{M-n} \quad (7)$$

$$S_{in}(n) = (M-n) \sigma \quad (8)$$

上記二つの式を用いて、平衡点 n_e は、次式の解として定義される。

$$S_{in}(n_e) = S_{out}(n_e) \quad (9)$$

上式を平衡点方程式と呼ぶ。平衡点方程式の解が1個の時、システムは安定(stable)、2個以上の時は不安定(unstable)という。平衡点のうち、僅かな擾乱によってシステムの状態がその点から離れて行くようなものを不安定平衡点、擾乱があってもその点に戻ってくるようなものを安定平衡点と呼ぶ。安定なシステムの平衡点は必ず安定であり、総体安定平衡点(globally stable equilibrium point)と呼ぶ。一方、不安定なシステムは、安定な平衡点と不安定な平衡点の両方を持ち、このうち、安定な平衡点を局所安定平衡点(locally stable equilibrium point)と呼ぶ。

こうして定義された平衡点について、Kleinrock と Lam は、次の二つの興味深い性質を見出した^[4]。

- (1) 安定なシステムの定常状態でのスループット・遅延特性は、総体安定平衡点での特性で十分良く近似される。
- (2) 不安定なシステムでは、局所安定平衡点でのスループット・遅延特性は、ある有限時間の間だけ達成される。

これら二つの性質が、平衡点解析の出発点である。特に性質(1)を利用すると、“システムは常に平衡点に留まる”と仮定して解析しても十分良い近似となることが予想される。このように仮定すると、いかに組織的に効率良く平衡点を求めるかが問題となる。

4.2 平衡点の求め方

ここで、観点を改めてもう一度、平衡点の定義を見直してみよう。

$\delta_T(n)$ を、 $N^t = n$ の時、 T モードにある端末の1スロット当りの増加数の条件付期待値とし、 $\delta_{RT}(n)$ を、 $N^t = n$ の時、 RT モードにある端末の1スロット当りの増加数の条件付期待値とすると、これらは次のようになる。

$$\delta_T(n) = S_{out}(n) - S_{in}(n) \quad (10)$$

$$\delta_{RT}(n) = S_{in}(n) - S_{out}(n) \quad (11)$$

このとき、式(9)より、平衡点 n_e において、次式が成立する。

$$\delta_T(n_e) = \delta_{RT}(n_e) = 0 \quad (12)$$

従って、平衡点は、各モードにおける単位時間当りの端末の増加数の期待値が零となる点と定義することもできる^[5]。式(9)の定義による方法と比べて、この定義による方法の方が、より容易に組織的に平衡点を求めることができる。すなわち、式(9)の方法によると、多次元マルコフモデルの場合、チャネルの定義が明確でなく、どの箇所でもフローバランスを取るかが曖昧となる。それに対して、式(12)の方法では、各モード毎にフローバランスを取ればよく、マルコフモデルさえ構築できれば容易に平衡点方程式を求めることができる。

以上の議論により、平衡点の求め方は次のようになる。

$\mathbf{n} \triangleq (n_1, n_2, \dots, n_H)$ をシステムの振舞いを記述するマルコフ連鎖とする。但し、 n_i ($1 \leq i \leq H$)は、第 i モードにある端末数を表す確率変数である。

[ステップ1] $i = 1, 2, \dots, H$ に対して、第 i モードにおける単位時間当りの端末の増加数の条件付期待値 $\delta_i(\mathbf{n})$ を計算する。

[ステップ2] 平衡点方程式を求める。

$$\delta_1(\mathbf{n}) = \delta_2(\mathbf{n}) = \dots = \delta_H(\mathbf{n}) = 0$$

但し、 H 個の方程式のうち、1次独立な式は、 $H-1$ 個である。

[ステップ3] \mathbf{n} が実数ベクトルであると仮定して、平衡点方程式を解く。その解が、平衡点 $\mathbf{n}_e \triangleq (n_{1e}, n_{2e}, \dots, n_{He})$ である。

ここで、平衡点解析における近似の意味を説明しておく。システムが常に平衡点に留まると仮定することは、 \mathbf{n} の定常確率分布を、平衡点 \mathbf{n}_e に位置する単位インパルス $\delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_e)$ で置き換えることに相当する。従って、 $X(\mathbf{n})$ を \mathbf{n} の関数である一つの確率変数とすると、次式が成立する。

$$\begin{aligned} E[X(\mathbf{n})] &= \int X(\mathbf{n}) \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_e) d\mathbf{n} \\ &= X(\mathbf{n}_e) \end{aligned} \quad (13)$$

上式より、平衡点解析では、一つの確率変数の \mathbf{n} に関する期待値は、その確率変数の平衡点 \mathbf{n}_e における値で近似されることが分かる。

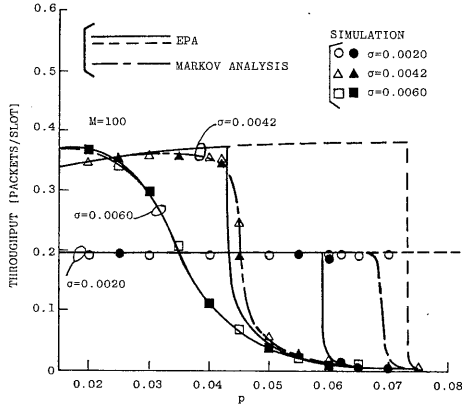


図 5: 平衡点解析による解析結果の例

4.3 平衡点解析の精度

平衡点解析の近似の精度を調べるために、前章の仮定 A1-A4 の下でのスロット付アロハシステム ($M = 100$) の解析結果の一例を図 5 に示す。比較のため、図にはマルコフ解析の結果とシミュレーション結果も示してある。図 5 より、平衡点解析の精度について、次のようなことが分かる。

- (1) システムが多数の端末を持ち、安定であり且つ不安定領域から十分速く離れている時には、解析結果は正確である。
- (2) システムが安定であっても、不安定領域の近傍では、解析結果の精度は悪くなる。
- (3) システムが不安定であると、解析結果は一般に不正確である。しかし、この場合でも、システムが正常に動作するか又は飽和している有限時間内のスループット・遅延特性は評価することができる。

更に、紙数の関係で数値例を示すことはできないが、次の性質も存在する。

- (4) システム内の端末数が少ない場合には、解析結果は不正確である。

上記四つの性質が存在する理由や精度についての更に詳細な議論は、文献 [1] を参照されたい。

4.4 適用例

本節では、平衡点解析が多次元マルコフ連鎖の解析にいかん用いられるかを、図 4 のモデルを例にして説明する。

各端末は、 J パケット分の送信バッファを持つ。いま、 n_k を TR_k ($1 \leq k \leq J$) モードにある端末数とすると、状態ベクトルは、 $\mathbf{n} \triangleq (n_1, n_2, \dots, n_J)$ となる。そこで、まず、 TR_k モードにある一つの端末がパケットの送信に成功する確率を計算すると次のようになる。

$$S_k(\mathbf{n}) = n_k p (1-p)^{N-1} \quad (14)$$

但し

$$N \triangleq \sum_{k=1}^J n_k \quad (15)$$

上式を用いて、状態 \mathbf{n} での条件付スループット $S(\mathbf{n})$ は、次式で与えられる。

$$S(\mathbf{n}) = \sum_{k=1}^J S_k(\mathbf{n}) = N p (1-p)^{N-1} \quad (16)$$

以下簡単のため、 $S_k(\mathbf{n})$ を S_k 、 $S(\mathbf{n})$ を S と書く。

次に、各モードにおける端末の増加数の条件付期待値を求めて零とおくと、次の J 個の独立な式が得られる。

$$(M-N)\sigma = S_1(1-\sigma) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} n_k(1-p)\sigma + n_k p &= n_{k-1}(1-p)\sigma \\ &+ \{(n_{k-1}p - S_{k-1}) + S_k\}\sigma \\ &+ \{(n_k p - S_k) + S_{k+1}\}(1-\sigma) \\ & \quad (2 \leq k \leq J-2) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} n_{J-1}(1-p)\sigma + n_{J-1}p &= n_{J-2}(1-p)\sigma \\ &+ \{(n_{J-2}p - S_{J-2}) + S_{J-1}\}\sigma \\ &+ (n_{J-1}p - S_{J-1})(1-\sigma) + S_J \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} n_J p &= n_{J-1}(1-p)\sigma + (n_{J-1}p - S_{J-1})\sigma \\ &+ (n_J p - S_J) \end{aligned} \quad (20)$$

以上の式をまとめると、次の平衡点方程式が得られる。

$$(M-N)\sigma = \frac{N p (1-p)^{N-1} - N \sigma}{1 - \sigma A^{J-1} - (1-\sigma)A^J} \quad (21)$$

但し

$$A \triangleq \sigma \{1 - p(1-p)^{N-1}\} / \{p(1-p)^{N-1}(1-\sigma)\} \quad (22)$$

この平衡点方程式は、 N について数値的に解くことができる。その解 N_e を用いれば、平衡点 $\mathbf{n}_e = (n_{1e}, n_{2e}, \dots, n_{Je})$ を容易に計算することができる。スループット \bar{S} は、 $\bar{S} = S(\mathbf{n}_e)$ と表され、平均パケット遅延は、次式で与えられる。

$$D = \left(\sum_{k=1}^J k n_{ke} \right) / \bar{S} + 1 \quad (23)$$

以上の式を用いて計算したスループットの数値例と、対応するシミュレーション結果とを図 6 に示す。

5 その他の適用例

平衡点解析は、これまで、情報ネットワークにおける種々の問題の解析に用いられている。ここでは、その適用例を簡単に紹介する。

(1) 多元接続 (MAC) プロトコル [1],[2],[5]~[12]

まず、衛星ネットワークにおける多元接続プロトコルのうち、スロット付アロハ、予約アロハ、アロハ形予約、TDMA 予約、SRUC、TDMA などに適用されている。また、LAN については、CSMA/CD、BRAM などが解析されている。更には、地上無線パケット通信網への適用例も多い。1985 年までの平衡点解析によ

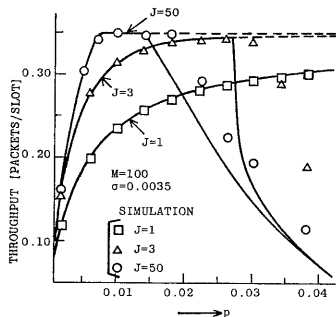


図 6: J パケット分の送信バッファを持つスロット付アロハの平衡点解析による解析結果

る多元接続プロトコルの研究成果は、文献 [1] の REFERENCES にすべて上げてあるので、参照されたい。

(2) 論理リンク制御 (LLC) プロトコル [13]~[21],[25],[26]

LLC 副層は、MAC 副層のすぐ上に位置し、これら二つの副層で放送形通信網のデータリンク層を構成している。LLC プロトコルの解析においては、二つの端末間での双方向のデータ転送を考慮する必要があり、MAC プロトコルの場合よりもモデル化が複雑になる。このため、筆者らは、ACK 仮説 [16] と呼ぶ仮定を導入し、モデル構築の簡単化を計って、LLC プロトコルの解析を行っている。平衡点解析によって、LLC プロトコルの機能のうち、送達確認 [13]~[16]、フロー制御 [17],[18]、コネクション制御 [19]~[21],[25],[26] などの解析が行われている。

(3) リング形 LAN [22]~[24]

レジスタ挿入型スロットリング [22]~[24] の他、トークンリング、スロットリング、レジスタ挿入リングへの適用も行われている。

6 むすび

本稿では、平衡点解析の原理と適用例を簡単に紹介した。紙数の制約があり、十分な議論ができなかったが、更に詳細は、末尾の参考文献を参照されたい。

本稿では、平衡点解析の情報ネットワークへの応用についてのみ触れた。しかし、平衡点解析は、本来、多次元マルコフ連鎖の解析手法であり、マルコフ連鎖でモデル化できるシステムならばどのようなものでも、原理的には解析可能である。更に、数学的な厳密さを抜きに言えば、モデルにマルコフ性がなくとも、十分有効に平衡点解析が適用可能となる。より広範囲の多様なシステムへの適用が期待できるのである。

参考文献

- [1] S. Tasaka, *Performance Analysis of Multiple Access Protocols*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1986.
- [2] 福田, 田坂: “確率的フローシステムと平衡点解析”, 信学誌, 66, 12, pp.1228-1233 (1983-12).
- [3] T. G. Robertazzi, *Computer Networks and Systems: Queuing Theory and Performance Evaluation*, Springer-Verlag New York Inc., 1990.
- [4] L. Kleinrock and S. S. Lam, “Packet switching in a multi-access broadcast channel: Performance evaluation,” *IEEE Trans. Commun.*, COM-23, 4, pp.410-423 (Apr. 1975).
- [5] 福田明: “アロハ形システムの平衡点による特性解析”, 信学誌, J61-B, 11, pp.959-966 (1978-11).

- [6] S. Tasaka, “Stability and performance of the R-ALOHA packet broadcast system,” *IEEE Trans. Computers*, C-32, 8, pp.717-726 (Aug. 1983).
- [7] S. Tasaka and Y. Ishibashi, “A reservation protocol for satellite packet communication - A performance analysis and stability considerations,” *IEEE Trans. Commun.*, COM-32, 8, pp.920-927 (Aug. 1984).
- [8] S. Tasaka, “Multiple-access protocols for satellite packet communication networks: A performance comparison,” *Proc. IEEE*, 72, 11, pp.1573-1582 (Nov. 1984).
- [9] S. Tasaka, “Dynamic behavior of a CSMA-CD system with a finite population of buffered users,” *IEEE Trans. Commun.*, COM-34, 6, pp.576-586 (June 1986).
- [10] S. Tasaka and K. Ishida, “The SRUC protocol for satellite packet communication - A performance analysis,” *IEEE Trans. Commun.*, COM-34, 9, pp.937-945 (Sept. 1986).
- [11] 田坂, 石川: “Buffered CSMA/CD システムの特性解析”, 信学誌 (B), J69-B, 3, pp.217-227 (1986-03).
- [12] 石川, 田坂: “Buffered CSMA/CD システムにおけるパケット送信方式の性能比較”, 信学誌 (B), J69-B, 12, pp.1665-1675 (1986-12).
- [13] 田坂, 谷, 高橋: “CSMA-CD システムにおける ACK トラヒックの解析”, 信学誌 (B), J68-B, 10, pp.1093-1102 (1985-10).
- [14] S. Tasaka, “The effect of acknowledgment traffic on the performance of 1-persistent CSMA/CD systems,” in *Conf. Rec. GLOBECOM'86*, pp.1774-1780 (Dec. 1986).
- [15] S. Tasaka, “An analysis of priority acknowledgment schemes for 1-persistent CSMA/CD systems,” in *Conf. Rec. ICC'87*, pp.568-574 (June 1987).
- [16] 田坂, 深谷: “アロハ形予約衛星パケット通信網におけるアクトリッジ方式の解析”, 信学誌 (B), J70-B, 7, pp.780-790 (1987-10).
- [17] S. Tasaka, “Performance analysis of a CSMA/CD system with link level flow control,” in *Conf. Rec. GLOBECOM'87*, pp.1601-1606 (Nov. 1987).
- [18] 田坂, 深谷: “CSMA/CD ネットワークにおけるウィンドウフロー制御方式の解析”, 信学誌 (B), J71-B, 12, pp.1456-1467 (1988-12).
- [19] 田坂, 広田: “CSMA/CD ネットワークにおけるリンクレベルコネクション方式の性能比較”, 信学誌 (B-I), J72-B-I, 6, pp.492-503 (1989-06).
- [20] S. Tasaka, “An analysis of a connection-oriented LLC protocol in the TDMA-Reservation satellite network,” in *Conf. Rec. GLOBECOM'89*, pp.1416-1422 (Nov. 1989).
- [21] 田坂, 広田: “TDMA 予約衛星通信網におけるデータリンクコネクション制御方式”, 信学誌 (B-I), J73-B-I, 4, pp.297-308 (1990-04).
- [22] 不破, 田坂: “レジスタ挿入方式を用いたスロットリングの性能解析”, 信学誌 (B-I), J73-B-I, 3, pp.179-190 (1990-03).
- [23] 不破, 田坂: “レジスタ挿入型スロットリングにおけるスロットタイミングの高効率化とその性能解析”, 信学誌 (B-I), J73-B-I, 11, pp.813-824 (1990-11).
- [24] Y. Fuwa and S. Tasaka, “Register-Insertion type slotted rings: A performance analysis,” in *Proc. INFOCOM'91*, pp.191-201 (Apr. 1991).
- [25] S. Tasaka and T. Suzuki, “A performance comparison of connection-oriented and connectionless LLC protocols in a high-speed satellite data network,” in *Proc. INFOCOM'91*, pp.489-497 (Apr. 1991).
- [26] S. Tasaka, “A fast select connection-oriented LLC protocol in CSMA/CD networks,” in *Conf. Rec. ICC'91*, pp.428-434 (June 1991).