

CSMA-CDシステムにおけるACK

トラヒックの解析

正員 田坂 修二[†] 正員 谷 正徳^{†*} 正員 高橋 健一[†]

Analysis of Acknowledgment Traffic in CSMA-CD Systems

Shuji TASAKA[†], Masanori TANI^{†*} and Kenichi TAKAHASHI[†], Members

あらまし Slotted nonpersistent CSMA-CDシステムにおいて、アクノリッジパケット(ACK)によるトラヒックの影響を考慮した場合の動特性の解析が行われている。平衡点解析の手法を用いて、スループット及び平均応答時間特性を求めると共に、システムの安定性をも示している。ACKに優先権を付与した場合としない場合との2通りについて解析を行い、優先権付与がシステムの特性に及ぼす影響について考察している。優先権付与方式として、Acknowledging Ethernet で用いられているものを取り上げた。更に、この方式において、成功したデータパケットの伝送終了、ACKのそれ、そして失敗伝送期間の終了の3種を、各端末が区別できる場合とできない場合とについて検討した。その結果、優先権付与による特性の改善効果は、当然のことながら3種の伝送終了を区別できるとした優先方式において大きく、また、システムの負荷がある程度大きく且つデータパケット長とチャンネル伝搬遅延との比が小さい程、顕著に現われることが分かった。

1. ま え が き

CSMA-CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) プロトコル⁽¹⁾は、バス状ローカルエリアネットワークのチャンネルアクセスプロトコルとして注目され、その標準方式の一つにもなりつつある。このため、CSMA-CDプロトコルの特性評価に関しても、これまでに多くの研究がなされている^{(2)~(7)}。それら従来の研究の大部分においては、データパケットによるトラヒックのみが解析の対象とされ、アクノリッジパケット(以下、簡単のためACKと記す)によるトラヒックは無視されていた。しかし、実際には、データパケットの種類によっては受信側が必ずACKを返送する必要がある場合もある。この場合には、ACKの伝送のためにチャンネル容量の一部が使用されるので、その特性は、ACKを無視して得られた特性に比べて劣化することになる。従って、データパケットとACKの両方が存在する場合の特性を評価しておくことは必要なことと考えられる。更には、システムの特徴を有効に利用したACK返送方式を考察することも重要な課題となる。

CSMA-CD (又はCSMA)におけるACKトラヒックの解析に関しては、これまでわずかな研究が行われているだけであり、文献(8)、(3)、(10)に見られる程度である。文献(8)は、無線パケット通信網を対象とし、nonpersistent CSMA及び1-persistent CSMA (共にCD機能なし)におけるACKトラヒックの問題を取り扱っている。特に、ACKに優先権を与え、ACKには衝突が生じないようにしたACK返送方式を提案し、その特性を解析している。この方式は、端末がチャンネルをアイドルと検知(センス)したとき、データパケットの送信に際しては直ちには送信を行わず、チャンネルの最大伝搬遅延時間だけ待った後に再びチャンネルを検知し、その時にアイドルであるならば送信を行うというものである。一方、ACKの送信に際しては、チャンネルがアイドルと検知されれば直ちに送信が行われる。このため、ACKとデータパケットが衝突することはありえない。この考え方は、Acknowledging Ethernet⁽⁹⁾におけるACK返送方式と基本的には同じものである。しかし、文献(8)は、CSMAのみを考えており、CSMA-CDは取り扱っていない。更に、その特性解析は、スループットSとチャンネルトラヒックGとの関係を示したいわゆるS-G解析⁽¹¹⁾であり、システムの安定性と応答時間については全く検討を行っていない。

一方、文献(3)は、slotted 1-persistent CSMA-

[†]名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466 Japan

*現在, トヨタ自動車株式会社

CDの動特性を解析し、スループットと平均応答時間特性を求めている。ACKに優先権を与えずデータパケットと同等に取り扱い方式とACKに優先権を与え無衝突ACK返送を実現する一つの方式との両方を解析している。しかし、非優先ACK方式においては、ACKとデータパケットとの対応関係を考慮していない、すなわち一つのデータパケットが成功するとそれに対応してACKが返送されるようにシステムモデルが構成されていないため、その解析結果の精度は悪くなっている。又、文献(3)の優先ACK方式においては、成功したデータパケットの伝送終了、ACKの伝送終了及び失敗伝送期間の終了の3種の伝送終了を、すべての端末が区別できるという前提が置かれている。しかし、この前提は常に容易に満足されるものではない。文献(8)の優先ACK方式とAcknowledging Ethernet⁽⁹⁾においては、このような前提は置かれていない。

更に、文献(16)においてはAcknowledging Ethernetの解析が行われている。しかし、この研究もシステムの静特性のみを取り扱ったものであり、安定性の問題は検討されていない。

本論文は、ACKトラヒックを考慮した slotted nonpersistent CSMA-CDシステムの動特性を、平衡点解析^{(10),(11)}の手法を用いて解析したものである。モデル化に際してはデータパケットとACKとの対応関係を考慮しており、非優先ACK方式と優先ACK方式の両方を取り扱っている。後者については、上記の3種の伝送終了を区別できる場合とできない場合の2通りの解析を行っている。以下、まず2.でモデル化のための共通の仮定について述べる。続いて、3.で非優先ACK方式、4.で優先ACK方式の特性を解析する。更に、5.で数値例によって両方式及びACKトラヒックを無視した場合の特性の相互比較を行う。

なお、無衝突ACK返送を実現する他の方法として、ACK専用の別チャンネルを設ける方式も考えられる。文献(8)では、与えられたチャンネルを二つに周波数分割多重化し、それぞれデータパケットとACKの伝送専用とする方式の検討が行われている。しかし、このような方式はシステム構成の複雑化を招くため、本論文では検討の対象としない。

2. モデル化のための仮定

本論文では、slotted nonpersistent CSMA-CDプロトコル⁽²⁾を用いるシステムについて考察する。システムのモデル化のため以下の仮定を置く。

- (1) システムは M 個の端末を持つ。
- (2) 任意の二つの端末間の伝搬遅延は一定値 τ 秒とし、チャンネルの時間軸は長さ τ 秒のスロットに分割されている。すべてのパケット送信は、スロットの開始時点でのみ開始される。
- (3) 一つの端末のデータパケット発生間隔は、平均 $1/\sigma$ スロットの指数分布に従う。
- (4) 1個のデータパケットは、1個の端末にのみ向けられているものとする。すなわち、1個のデータパケットに対しては1個のACKが対応する。
- (5) 自分宛のデータパケットを正しく受信した端末は、受信後直ちにACKを返送する。
- (6) 受信されたデータパケットの成否のチェックとACKの準備のための時間は十分小さく、無視できるものとする。
- (7) 各端末は、一つのデータパケットの伝送が完了し、それに対するACKを受信するまでは、次のデータパケットを発生しない。
- (8) データパケット、ACKともに固定長であるとし、それぞれ H スロット長、 J スロット長であるとする。
- (9) あるスロット内で、データパケットを発生した端末や、データパケット又はACKの再送が可能、すなわちレディ(ready)となった端末は、次のスロットの開始時点でチャンネルを検知する。
- (10) チャンネルの検知は瞬時に行われる。
- (11) データパケット又はACKの衝突が生じた場合、送信開始から K スロット後にすべての送信が中止される。
- (12) データパケット又はACKの送信に失敗した端末とチャンネルの検知結果がビジーであった端末は、平均 $1/\mu$ スロットの指数分布に従う遅延の後にレディとなる。
- (13) 一つの端末で、データパケットとACKの送信要求が同時に生じた場合には、ACKを優先する。ACKの送信完了後に、データパケットの送信に取りかかる。又、複数個のACKの再送要求がある場合には、FIFOとする(一つのACKの最初の送信は仮定(5)に従う)。
- (14) データパケット又はACKの誤りは、互いの衝突によってのみ起こるものとし、他の誤りは無視する。特性の評価基準としては、スループット(throughput) \bar{S} と平均応答時間(average response time) D_R とを用いる。スループットは、1データパケット伝送時間当りに正しく伝送される平均データパケット数と定義する。又、平均応答時間は、データパケット

の発生時点から対応するACKの受信完了までの平均時間と定義し、1データパケット伝送時間を単位として表わす。

3. 非優先ACK方式の解析

この方式では、端末はチャンネルをアイドルと検知したときにはいつでもデータパケットを送信できる。ACKは成功したデータパケットの受信直後に送信されるので(仮定(5))、成功したデータパケットの伝送終了直後にチャンネルがアイドルとなった時間に何らかのデータパケットの送信が開始されれば衝突が生じる。衝突したACKは、仮定(12)に従って再送されるが、その際にも衝突が生じる可能性がある。

3.1 モデル化

システムの動特性を解析するためには、システムの確率的な振舞を表現するマルコフモデルを構成する必要がある。そのためには、各端末の取りうる状態を詳細に分類し、それらの相互の関係を指定すればよい。今の場合、一つの端末の状態は、自分が送信するデータパケットに関する状態と、他の端末から受信した自分宛のデータパケットに対するACKに関する状態によって特徴づけられる。前者の状態としては、データパケットを発生していない状態、データパケットを正しく送信している状態、衝突中である状態、再スケジュール中である状態、データパケットが相手側に正しく受信され相手端末がそれに対するACKを正しく送信中である状態、同じく衝突中である状態、再スケジュール中である状態などが考えられる。後者の状態としては、他端末から何らのデータパケットも受信していない状態、1個のデータパケットを受信しそれに対するACKを正しく送信中である状態、衝突中である状態、再スケジュール中である状態、更に、2個のデータパケットを受信している場合には、その各々が上記の1個の場合の状態を取りうるのでそのすべての組み合わせ、以下同様に3個以上のデータパケットに対するすべての組み合わせなどが考えられる。更に、以上の送信・受信の状態を、通信しうるすべての端末の組み合わせについて考える必要がある。

以上の考察より明らかなように、このシステムを厳密にモデル化することは、端末数 M が極めて小さい場合を除いては実質的にはほとんど不可能である。そこで本論文では、自分が送信するデータパケットに関する状態のみ着目した近似モデルを構成する。受信に関する状態を無視することによって考慮すべき状態数

を大幅に削減でき、モデル構成の簡単化が図れる[†]。

この簡単化による解析結果の誤差については、後にシミュレーションで検討を行う。

こうして構成された近似モデルを図1(a)に示す。これは、スロットの開始時点にのみ着目して得られた離散時間モデルである。図1(a)において、四角の箱で表わされているのが各端末の取りうる状態であり、モード(mode)と呼ばれる。あるスロットの開始時点において、各端末はこれらのモードのいずれか一つにあり、次のスロットの開始時点で他のモードに遷移することができる。これらのモードの意味は次のとおりである。まず、 T モードは、送信すべきデータパケットを持っていない状態であり、このモードの端末は仮定(3)に従う。 RT モードは、データパケットの送信に失敗したか又はチャンネルの検知結果がビジーであったため、データパケット送信のために再スケジュールしている状態である。 RT モードにある端末は仮定(12)に従う。 S_i モード($0 \leq i \leq H$)は、データパケットの送信に成功し、 i スロット後にその送信を完了する状態である。従って、 S_0 モードは、データパケットの送信を完了し、それが受信されるのを待っている状態であり、チャンネル伝搬遅延の影響を表わしている。 S_0 モードに端末がある場合には、仮定(5)より、次のスロ

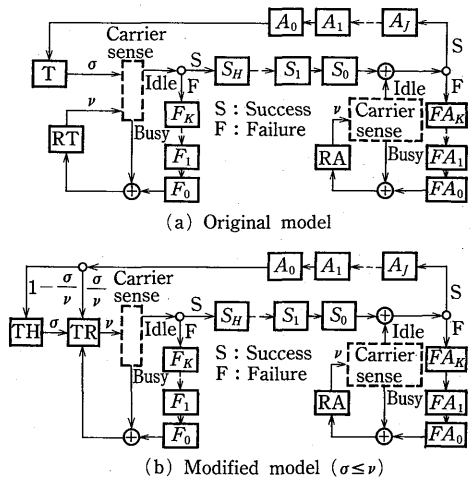


図1 非優先ACK方式を用いたCSMA-CDの近似モデル
Fig.1 An approximate model of the CSMA-CD system with the nonpriority acknowledgment scheme.

[†] 文献(3)や文献(8)は、上記のような厳密なモデル化の困難さについて考察しておらず、従って明記もしていない。しかし、これらの文献のモデル化においても、実質的には受信に関する状態は無視されている。

ットの開始時点で必ず相手端末によるACKの送信が開始される。一方、 F_j モード ($0 \leq j \leq K$)とは、データパケットの送信に失敗し、 j スロット後にその送信を中止する状態をいう。このうち、 F_0 モードは、 S_0 モードと同じく伝搬遅延の影響を表わしている。残りの A_k ($0 \leq k \leq J$)、 $F A_j$ ($0 \leq j \leq K$)、 $R A$ モードは、データパケットが相手側に正しく受信され、相手端末がそれに対して送信するACKの送信状況を表現したものである。これら3種のモードは、ACKが、それぞれ正しく送信中、衝突中、再スケジュール中(仮定(12)に従う)に対応している。図2に、一つの端末がデータパケットの伝送に成功し且つそれに対するACKも最初の送信で成功した場合のモード遷移の例を示しておく。

図1(a)のモデルは、受信に関する状態を無視しているため、システムの振舞を忠実に表現するものではない。特に、送信に関する状態と受信のそれとの相互干渉が表現できていない。このことは、例えば、 $R T$ モードにある端末がデータパケットを受信した場合に問題となる。この場合、その端末は仮定(5)と(13)とにより直ちにACKを送信することになるので、データパケットの送信を開始することはありえない。これは、仮定(12)と矛盾する。又、 T モードにある端末が、丁度データパケットを発生したときに他端末からのデータパケットを受信すると同様の問題が生じることは明らかである。モデルのこのような表現力不足にもかかわらず、このモデルは、少なくともスループットと平均応答時間に関しては、十分正確な解析結果を与えることが後に示される。

文献(5)、(6)、(11)と同様に、解析の簡単のために、 $\sigma \leq \nu$ と仮定して図1(a)のモデルの T と $R T$ モードを、図1(b)のように確率的に等価な $T H$ と $T R$ モードに変形する。 T モードは、 $T H$ と $T R$ を継続したモードに分割され、 $R T$ モードは $T R$ モードの一部になっている。興味あるシステムでは一般に $\sigma \leq \nu$ であるので、本論文ではこの場合のみを検討する。

図1(b)において、 $T R$ 、 S_i ($0 \leq i \leq H$)、 F_j ($0 \leq j \leq K$)、 $R A$ 、 A_k ($0 \leq k \leq J$)、及び $F A_j$ ($0 \leq j \leq K$)モードにある端末数をそれぞれ、 n_1 、 m_i 、 l_j 、 n_2 、 x_k 、 y_j とすると、状態ベクトル $\mathbf{n} \triangleq (n_1, m_i, l_j, n_2, x_k, y_j : 0 \leq i \leq H, 0 \leq j \leq K, 0 \leq k \leq J)$ はスロット毎に状態遷移が起きるマルコフ連鎖となる。このマルコフ連鎖は取りうる状態数が多く、通常の手法では解析できないので、本論文では平衡点

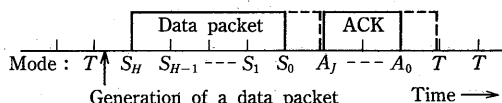


図2 一つの端末のモード遷移の一例
Fig.2 An example of mode transitions for a terminal.

解析の手法を用いる。平衡点解析の基本的な考え方や適用例については、文献(10)、(11)を参照されたい。

3.2 平均点解析

平衡点解析では、システムは常に平衡点に留まっていると仮定する。平衡点は、すべてのモードにおける1スロット当りの平均増加端末数が0となる点として定義される。平衡点を求める準備として、まず状態変数に関して次式が成立することに注意しておく。

$$\left. \begin{aligned} m_i &= 1 \text{ 又は } 0 \quad (0 \leq i \leq H), \\ x_k &= 1 \text{ 又は } 0 \quad (0 \leq k \leq J) \\ \sum_{i=0}^H m_i + \sum_{k=0}^J x_k &= 1 \text{ 又は } 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} l_j + y_j &= 0 \text{ 又は } \geq 2, \quad \sum_{j=0}^K (l_j + y_j) = 0 \text{ 又は } \geq 2 \\ l_i + y_i &\geq 2 \text{ ならば, 全ての } j \neq i \quad (0 \leq j \leq K) \text{ に対して } l_j + y_j = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)は、データパケット又はACKの成功は一時には一つしかありえないことから理解できよう。又、式(2)は、一つの衝突には必ず2個以上の端末が関与し、衝突期間中には新たな衝突は起こりえないことを示している。

次に、現スロットの開始時点でシステムが状態 \mathbf{n} にあるとき、次のスロットの開始時点でチャンネルがアイドルである場合に、データパケット、ACKの送信に成功する確率を、それぞれ $s_1(\mathbf{n})$ 、 $s_2(\mathbf{n})$ で表わす。又、同じく現スロットの開始時点でシステムが状態 \mathbf{n} にあるとき、次のスロットの開始時点でチャンネルがアイドルとなるならば1、ビジーならば0となる関数を定義し、これを $P_I(\mathbf{n})$ で表わす。更に、状態 \mathbf{n} で、キャリアセンスする $T R$ モード、 $R A$ モードの端末数が、それぞれ平均 $n_{1\nu}$ 、 $n_{2\nu}$ のポアソン分布に従うと近似する。このとき、次式が成立する。

$$s_1(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) = \{P_I(\mathbf{n}) - m_0\} n_{1\nu} e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} \quad (3)$$

$$s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) = \{P_I(\mathbf{n}) - m_0\} e^{-n_{1\nu}} n_{2\nu} e^{-n_{2\nu}} + m_0 e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} \quad (4)$$

式(3)の左辺は、状態 \mathbf{n} が与えられたときに次のスロットでデータパケットの送信に成功する条件付確率に対

応することは明らかであろう。この成功が実現するためには、次の三つの条件が同時に満足される必要がある。(i)次のスロットの開始時点でチャンネルがアイドルであり且つそのアイドルがデータパケットの伝送終了によるものでない(対応するACKと衝突しないため)、(ii)TRモードからキャリアセンスする端末は1個である、(iii)RAモードからキャリアセンスする端末はない。条件(ii)、(iii)が成立する確率は、それぞれ $n_1 \nu e^{-n_1 \nu}$ 、 $e^{-n_2 \nu}$ で与えられる。状態 \mathbf{n} が与えられれば、条件(i)が成立するかどうかは一意的に定まる。条件(i)のうち最初の条件は $P_I(\mathbf{n}) = 1$ であり次の条件は $m_0 = 0$ であるので、これらが共に満足されれば、 $P_I(\mathbf{n}) - m_0 = 1$ となる。しかし、チャンネルがビジーであったり(このとき、 $P_I(\mathbf{n}) = m_0 = 0$)、アイドルであってもデータパケットの伝送終了直後である($P_I(\mathbf{n}) = 1, m_0 = 1$)[†] ならば、 $P_I(\mathbf{n}) - m_0 = 0$ となる。以上より、式(3)の右辺の意味は明らかであろう。式(4)も同様に解釈できる。特に、右辺第1項はRAモードから成功したACK、第2項はS₀モードからのそれに対応している。

以上の結果と考え方をを用いて、状態 \mathbf{n} が与えられたときの、各モードにおける1スロット当りの増加端末数の条件付平均を求めて0とおく。その結果の独立な式をまとめると次のようになる。

$$m_0 = m_1 = \dots = m_H = s_1(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad (5)$$

$$l_0 = l_1 = \dots = l_K = \{n_1 \nu - s_1(\mathbf{n})\}P_I(\mathbf{n}) \quad (6)$$

$$x_0 = x_1 = \dots = x_J = s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad (7)$$

$$y_0 = y_1 = \dots = y_K = n_2 \nu P_I(\mathbf{n}) + m_0 - s_2(\mathbf{n})P_I(\mathbf{n}) \quad (8)$$

$$n_2 \nu P_I(\mathbf{n}) = y_0 \quad (9)$$

$$\left\{ M - n_1 - n_2 - \sum_{i=0}^H m_i - \sum_{k=0}^J x_k - \sum_{j=0}^K (l_j + y_j) \right\} \sigma = (1 - \sigma/\nu) x_0 \quad (10)$$

但し、式(10)の導出においては、普通 $\sigma \ll 1$ であるので、 σ の2次以上の項は無視した。これは、指数分布を幾何分布で近似することを意味する。以下の解析においても同様の近似を行う。

連立方程式(5)~(10)の解が平衡点 $\mathbf{n}_e \triangleq (n_{1e}, m_{ie}, l_{je}, n_{2e}, x_{ke}, y_{je})$ である。但し、解の存在を可能にするために、すべての変数を整数値変数から実数値変数に拡張して考える^{††}。従って、 \mathbf{n}_e は実数値ベクトルである。

先にも述べたように、平衡点解析では、システムは常に平衡点 \mathbf{n}_e に留まっていると仮定する。これは、システムの定常状態確率分布を、 \mathbf{n}_e に存在する単一のインパルス $\delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_e)$ で置き換えることと等価である。従って、状態ベクトル \mathbf{n} の関数である一つの不規則変数 $X(\mathbf{n})$ を考えると、その期待値は次のようになる。

$$E[X(\mathbf{n})] = \int X(\mathbf{n}) \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_e) d\mathbf{n} = X(\mathbf{n}_e) \quad (11)$$

従って、平衡点解析では、一つの不規則変数の期待値は、その不規則変数の平衡点における値で近似される。

式(5)~(10)から \mathbf{n}_e を求めるためには、 $P_I(\mathbf{n}_e)$ の関係式が必要である。 $P_I(\mathbf{n})$ の定義より、 $E[P_I(\mathbf{n})] = Pr[P_I(\mathbf{n}) = 1]$ となり、右辺は次のスロットの開始時点でチャンネルがアイドルである確率である。式(11)より $E[P_I(\mathbf{n})] = P_I(\mathbf{n}_e)$ とするから、 $P_I(\mathbf{n}_e) = Pr[P_I(\mathbf{n}) = 1]$ とおく。次のスロットの開始時点でチャンネルがアイドルとなるのは、現スロットで $S_1 \sim S_H, A_1 \sim A_j, F_1 \sim F_K$ 及び $FA_1 \sim FA_K$ のいずれのモードにも全く端末が存在しないときである。従って、次式が成立する。

$$P_I(\mathbf{n}_e) = 1 - Pr\left[\sum_{i=1}^H m_i = 1\right] - Pr\left[\sum_{k=1}^J x_k = 1\right] - Pr\left[\sum_{j=1}^K (l_j + y_j) \geq 2\right]$$

式(1)、(2)の関係を利用すると上式は次のようになる。

$$P_I(\mathbf{n}_e) = 1 - \sum_{i=1}^H Pr[m_i = 1] - \sum_{k=1}^J Pr[x_k = 1] - \sum_{j=1}^K Pr[(l_j + y_j) \geq 2] \quad (12)$$

$P_I(\mathbf{n}_e)$ の場合と同様の議論によって、

$$Pr[m_i = 1] = m_{ie}, \quad Pr[x_k = 1] = x_{ke} \quad (13)$$

とする。又、データパケットもしくはACKの衝突が生じる確率を \bar{P}_c とすると、次式が成立することは明らかである。

$$Pr[(l_j + y_j) \geq 2] = \bar{P}_c, \quad j = 0, 1, \dots, K \quad (14)$$

\bar{P}_c を求めるために、状態 \mathbf{n} が与えられたときに何らかの衝突が生じるという条件付確率 $P_c(\mathbf{n})$ を考える。 $P_c(\mathbf{n})$ は、データパケットの送信に失敗する(すなわち、データパケット同士又はデータパケットとACKとが衝突する)確率 $P_{c1}(\mathbf{n})$ とACK同士のみの衝突が生じる確率 $P_{c2}(\mathbf{n})$ との和に等しい。すなわち、

$$P_c(\mathbf{n}) = P_{c1}(\mathbf{n}) + P_{c2}(\mathbf{n}) \quad (15)$$

$P_{c1}(\mathbf{n})$ と $P_{c2}(\mathbf{n})$ とは、式(3)、(4)と同様の考え方で求められ、次のようになる。

[†] $m_0 = 1$ ならば必ず $P_I(\mathbf{n}) = 1$ となることに注意されたい。逆は必ずしも成立しない。

^{††} 平衡点解析は、流体近似の一種である⁽¹⁰⁾。

$$P_{c1}(n) = P_f(n) \{1 - e^{-n_1\nu} - s_1(n)\} \quad (16)$$

$$P_{c2}(n) = m_0 (1 - e^{-n_2\nu}) e^{-n_1\nu} + \{P_f(n) - m_0\} (1 - e^{-n_2\nu} - n_2\nu e^{-n_2\nu}) e^{-n_1\nu} \quad (17)$$

$\bar{P}_c = E\{P_c(n)\}$ であるから、 $\bar{P}_c = P_c(n_e)$ とおく。以上の結果を式(12)に代入する。その結果に、更に式(5), (7)を用いて、 $P_f(n_e)$ について解くと次式が得られる。

$$P_f(n) = \{1 + Hs_1(n) + Js_2(n) + K\{1 - s_1(n) + (n_2\nu s_1(n) - 1 - n_2\nu) e^{-(n_1+n_2)\nu}\}\}^{-1} \quad (18)$$

但し、上式では簡単のため添字 e は省略してある。以下の議論においても、添字 e を明記しなければ誤解を生じるような場合以外は、この添字は省略する。次に、式(5)を式(3), (4)に代入し、それぞれ $s_1(n)$, $s_2(n)$ について解くと次式が得られる。

$$s_1(n) = \frac{n_1\nu e^{-(n_1+n_2)\nu}}{1 + n_1\nu e^{-(n_1+n_2)\nu}} \quad (19)$$

$$s_2(n) = \{n_2\nu + (1 - n_2\nu) s_1(n)\} e^{-(n_1+n_2)\nu} \quad (20)$$

又、式(5)を式(8)に代入し、式(9)を利用すると、

$$s_1(n) = s_2(n)$$

となる。従って、式(19)を式(20)の両辺に代入すると次式が得られる。

$$n_1\nu = n_2\nu + n_1\nu e^{-(n_1+n_2)\nu} \quad (21)$$

更に、式(5)~(9)を式(10)に代入すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \{M - n_1 - n_2 - P_f(n) \{ (H - K) s_1(n) + (J + 1) s_2(n) \\ & \quad + (K + 1) (n_1 + n_2) \nu \} \} \sigma \\ & = (1 - \sigma / \nu) s_2(n) P_f(n) \end{aligned} \quad (22)$$

式(18)~(22)を連立させれば、 n_1 と n_2 に関して数値的に解くことができる。この解を用いれば平衡点が得られる。

状態 n におけるスループット $S(n)$ は、

$$S(n) = \sum_{i=1}^H m_i$$

となる。従って、式(5)と式(11)より、スループット $\bar{S} = E\{S(n)\}$ は

$$\bar{S} = Hs_1(n_e) P_f(n_e) \quad (23)$$

となる。又、平均応答時間 D_R は、図 1 (a) にリトルの公式を適用することによって、次式のように表わされる。

$$D_R = M / \bar{S} - 1 / (\sigma H) + 1 / (2H) \quad (24)$$

〔単位：パケット伝送時間〕

但し、上式の右辺第 3 項は、データパケットの発生時点がスロット内で一様分布しているということを考慮したものである。

4. 優先 ACK 方式の解析

本章では、まず成功したデータパケットの伝送終了、

ACK の伝送終了、そして失敗伝送期間の終了の 3 種の伝送終了を、すべての端末が区別できない場合の優先 ACK 方式を考える。この方式では、何らかのビジー期間終了直後にチャネルを検知した端末は、データパケットの送信は行わず、ビジーと検知した場合と同様に動作する。これによって無衝突 ACK 返送が実現できる。この方式を、優先 ACK 方式(I)と呼ぶ。次に、3 種の伝送終了が区別でき、成功したデータパケットの伝送終了直後にチャネルを検知したときにのみ、アイドルにもかかわらず送信を行わない方式について検討する。これを優先 ACK 方式(II)と呼ぶ。

4.1 優先 ACK 方式(I)

図 3 に、この方式のモデルを示す。図中のモードの意味は、図 1 (b) におけるものと同じである。本方式では、ACK の衝突がないため、図 3 のモデルは図 1 (b) のそれから $FA_0 \sim FA_K$ 及び RA モードを取り除いた形になっている。但し、図 3 では、キャリアセンスの結果がアイドルであってもビジー期間終了直後であるならば、 TR モードに入ることに注意されたい。

本章においても、各モードにある端末数を表わす変数や他の諸量に関して、前章と同じ定義のものを用いることにする。但し、現方式に対しては、状態ベクトル n は、 $n \triangleq (n_1, m_i, l_j, x_k : 0 \leq i \leq H, 0 \leq j \leq K, 0 \leq k \leq J)$ と定義される。

まず、 F_0 モードにある端末数 l_0 に対して、 $l_0 > 0$ のとき 1、 $l_0 = 0$ のとき 0 となる関数 $u(l_0)$ を定義する。このとき、 $m_0 = 1, x_0 = 1, u(l_0) = 1$ は、次のスロットの開始時点が、それぞれ成功データパケットの伝送終了直後、ACK のそれ、失敗伝送期間の終了直後となることを意味している。従って、 $m_0, x_0, u(l_0)$ は同時には 1 になりえず、一時に 3 者のうち一つだけが 1 になりうる。このとき、必ず $P_f(n) = 1$ となる。これらの性質を用い、前章と同様の考え方に基づいて次式が得られる。

$$s_1(n) P_f(n) = \{P_f(n) - m_0 - x_0 - u(l_0)\} n_1\nu e^{-n_1\nu} \quad (25)$$

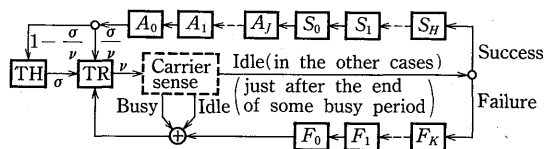


図 3 優先 ACK 方式(I)を用いた CSMA-CD の近似モデル

Fig. 3 An approximate model of the CSMA-CD system with the priority acknowledgment scheme (I).

$$x_0 = x_1 = \dots = x_J = m_0 = m_1 = \dots = m_H = s_1(n) P_I(n) \quad (26)$$

$$l_0 = l_1 = \dots = l_K \\ = n_1 \nu \{ P_I(n) - m_0 - x_0 - u(l_0) \} - s_1(n) P_I(n) \quad (27)$$

$$\left(M - n_1 - \sum_{i=0}^H m_i - \sum_{j=0}^K l_j - \sum_{k=0}^J x_k \right) \sigma = (1 - \sigma / \nu) x_0 \quad (28)$$

$$P_I(n) = 1 - \sum_{i=1}^H m_i - \sum_{k=1}^J x_k - K \bar{P}_c \quad (29)$$

$$P_c(n) = \{ P_I(n) - m_0 - x_0 - u(l_0) \} \\ \cdot (1 - e^{-n_1 \nu} - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}) \quad (30)$$

$E[u(l_0)] = Pr[l_0 > 0] = \bar{P}_c$ であるので、 $u(l_0)$ の平衡点における値は \bar{P}_c で近似できる。一方、 $P_c(n_e) = \bar{P}_c$ とするので、式(30)より次式が得られる。

$$\bar{P}_c = \frac{(1 - e^{-n_1 \nu} - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}) \{ 1 - 2 s_1(n) \} P_I(n)}{2 - e^{-n_1 \nu} - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}} \quad (31)$$

式(26)、(31)を式(29)に代入し、その結果の式を $P_I(n)$ について解くと次のようになる。

$$P_I(n) = \frac{2 - e^{-n_1 \nu} - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}}{\left((2 - e^{-n_1 \nu} - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}) \{ 1 + (H+J) s_1(n) \} \right. \\ \left. + K(1 - e^{-n_1 \nu} - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}) \{ 1 - 2 s_1(n) \} \right)} \quad (32)$$

又、式(26)と(31)を式(25)に適用すると、次式が得られる。

$$s_1(n) = \frac{n_1 \nu e^{-n_1 \nu}}{2 - e^{-n_1 \nu} + n_1 \nu e^{-n_1 \nu}} \quad (33)$$

式(25)と(27)より、 $l_0 = l_1 = \dots = l_K = s_1(n) P_I(n) (e^{n_1 \nu} - 1)$ となるので、この式と式(26)を式(28)に代入すると次のようになる。

$$\{ M - n_1 - s_1(n) P_I(n) \{ H + J - K + 1 + (K+1) e^{n_1 \nu} \} \} \sigma \\ = (1 - \sigma / \nu) s_1(n) P_I(n) \quad (34)$$

連立方程式(32)~(34)は、 n_1 に関して数値的に解くことができる。この場合のスループットと平均応答時間も、前章と同じく、それぞれ式(23)、(24)で表わされることは明らかであろう。

4.2 優先ACK方式(II)

この場合のモデルは、図3の優先ACK方式(I)のモデルにおいて、キャリアセンスの結果アイドルであるにもかかわらずTRモードに入る場合を、成功したデータパケットの伝送終了直後のみに改めればよい。解析は前節とほとんど同様に行えるので、次に最終結果のみを示す。

$$P_I(n) = \frac{1 + n_1 \nu e^{-n_1 \nu}}{\left((1 + (H+J+1) n_1 \nu e^{-n_1 \nu} + K(1 - e^{-n_1 \nu}) - n_1 \nu e^{-n_1 \nu}) \right)} \quad (35)$$

$$s_1(n) = \frac{n_1 \nu e^{-n_1 \nu}}{1 + n_1 \nu e^{-n_1 \nu}} \quad (36)$$

$$M - n_1 - P_I(n) \left[\left(H + J + 1 - K + \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\nu} \right) s_1(n) \right. \\ \left. + (K+1) n_1 \nu \{ 1 - s_1(n) \} \right] = 0 \quad (37)$$

式(35)~(37)は、文献(5)のslotted nonpersistent CSMA-CDに対する平衡点方程式において、 H を $(H+J+1)$ で置き換えて得られる式と実質的に同じになることが容易に示される。これは、優先ACK方式(II)の動作原理を考えれば、当然の結果と言えよう。この方式に対するスループットと平均応答時間も、やはり、それぞれ式(23)、(24)で表わされる。

5. 数値例及びシミュレーション

本章では、3.及び4.で得られた理論結果の精度をシミュレーションによって検討するとともに、各方式の特性の相互比較も行う。以下の数値例では、 $M=100$ 、 $K=1$ とする。シミュレーションにおいては、各端末は残りの $(M-1)$ 個の端末の各々に対して等確率でパケットを送信するとした。すなわち、トラヒック行列の対角要素以外のすべての要素の値を $1/(M-1)$ とした。また、一つのシミュレーションランの長さとは、10000データパケット伝送時間分とした。

$H=100$ 、 20 、 10 のときの、 ν に対するスループットと平均応答時間との関係を、それぞれ図4、5、6に示す。各図には、非優先ACK方式(図では、NP-ACKと記す)、優先ACK方式(I)(同じく、P-ACK I)、優先ACK方式(II)(P-ACK II)、ACKを考慮しない場合(NO-ACK)の4通りの特性が示されている。各図では、 $J=H/10$ としてあり、負荷の軽い場合($M\sigma H=0.20$)と重い場合($M\sigma H=0.80$)とについて検討している。理論値は実線で示してあるが、システムが不安定(双安定)な場合には、これはスループットが小さい方の安定平衡点¹¹⁾に対応している。更に、双安定領域では、参考のため、スループットが大きい方の安定平衡点に対する理論値も破線で示してある。シミュレーション結果で、黒く塗りつぶしてある方はすべての端末の初期状態をRTモードとしたものであり、塗りつぶしてない方はTモードと

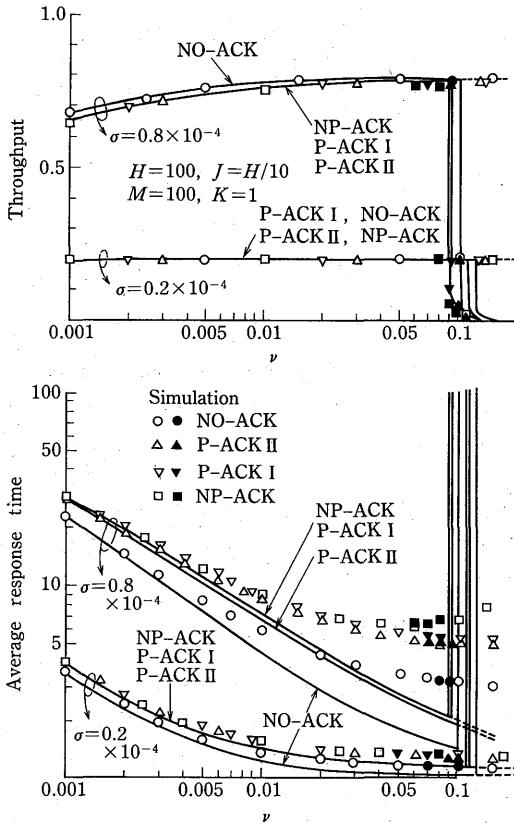


図4 スループット及び平均応答時間特性(1)
H=100の場合

Fig.4 The throughput and average response time versus packet rescheduling probability (1)
H=100.

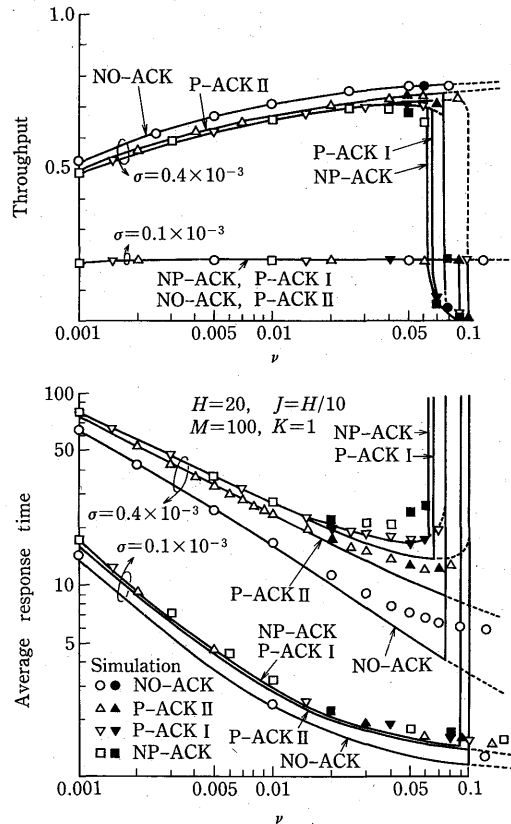


図5 スループット及び平均応答時間特性(2)
H=20の場合

Fig.5 The throughput and average response time versus packet rescheduling probability (2)
H=20.

したものである。

図4～6において、理論値とシミュレーション値は全般によく一致している。また、システムの安定性に関しても、文献(5)と同様の議論によって、理論は十分に正確であることがわかる。システムの特性は、ACKトラフィックを考慮していない場合が最も良く、以下、優先ACK方式(II)、同(I)、非優先ACK方式の順となっている。これは、各方式の動作原理や解析の前提を考えれば当然の結果である。

また、図4～6において、Hが小さい程、すなわちデータパケット長を一定とするとチャネルの伝搬遅延が大きいく程、優先権付与による特性改善の度合は大きくなっている。このことは、特に負荷が重い場合にはっきりと現われている。負荷が軽い場合には、パケットの衝突が少ないため、優先権付与による改善の度合はわずかである。また、全般に、優先ACK方式(I)の

非優先ACK方式に対する改善の度合は大きくない。図4～6と同じ条件の下で、Jの値のみをJ=H/2と変えた場合の特性についても検討してみたが、やはり上記と同様の結果が得られた。

更に、トラヒック行列の問題に関連して、(M-1)個の端末は常に特定の1個の端末にのみパケットを送信し、その特定の端末は他のすべての端末の各々に等確率でパケットを送信する場合(以下、集中形と呼ぶ)についてシミュレーションを行った。その結果、集中形のスループット及び平均応答時間特性は、先に検討した均一なトラヒック行列の場合と比べて、負荷が重い場合にわずかに良くなるだけであった。これは、重負荷の集中形では、特定端末でACKの待ち行列が形成され、ほとんどすべてのACKはその端末から送信されるということがACK同士の衝突を減少させる効果を持つためである。しかし、トラヒック行列の差に

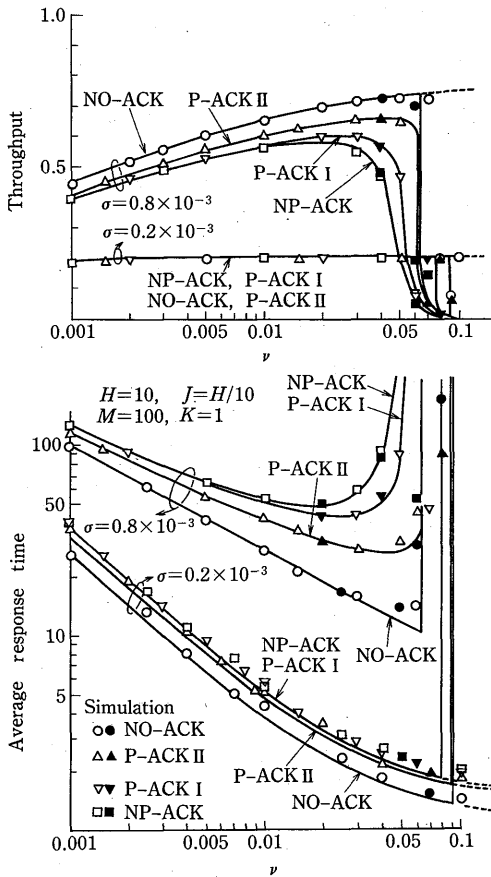


図6 スループット及び平均応答時間特性(3)
H=10の場合

Fig.6 The throughput and average response time versus packet rescheduling probability (3)
H=10.

よるこの効果は、Jの値が余程大きくない限り小さなものである。

以上の結果より、端末の受信に関する状態を無視することによって得られた近似モデルは、少なくともスループットと平均応答時間の評価に関しては十分役に立つことがわかる。

6. むすび

本論文では、slotted nonpersistent CSMA-CDシステムにおけるACKトラヒックの解析を行い、ACKに対する優先権付与がシステムの特性に及ぼす影響について考察した。優先権付与方式として、成功したデータパケットの伝送終了、ACKのそれ、そして失敗伝送期間の終了の3種を区別できないとした優

先ACK方式(I)と、それらを区別できるとした優先ACK方式(II)とを取り上げ検討した。その結果、優先権付与による特性の改善効果は、システムの負荷がある程度大きく且つデータパケット長とチャネル伝搬遅延との比Hが小さい程、顕著に現われることが分かった。しかし、優先ACK方式(I)による特性の改善度は、優先ACK方式(II)と比べて全般に小さいものであった。

筆者らは、slotted 1-persistent CSMA-CDプロトコルについても本論文と同様の検討を行った。その結果、優先権付与による改善効果は、1-persistentの方が nonpersistent よりも大きいことが分かった。この結果は、別の機会に報告する。又、本論文では優先権付与をACKのみに限定したが、これまでも特にACKに限定しない一般的な優先権付与方式に関する研究が文献(12)~(15)などで行われている。これらの方式をACK返送に適用した場合の特性解析も今後の課題である。

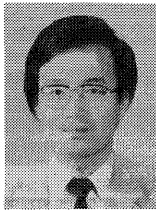
謝辞 御討論頂いた本学太田正光学長、日頃御討論頂く東大安田靖彦教授、静大福田明助教授に感謝する。

文 献

- (1) R.M. Metcalfe and D.R. Boggs: "Ethernet: Distributed packet switching for local computer networks", *Commun. ACM*, 19, 7, pp.395-403 (July 1976).
- (2) F.A. Tobagi and V.B. Hunt: "Performance analysis of carrier sense multiple access with collision detection", *Computer Networks*, 4, pp.245-259 (1980).
- (3) 田丸, 所: "CSMA-CD方式における各種衝突制御方式とアクノレッジ方式の性能解析", *信学論(D)*, J65-D, 5, pp.527-534 (昭57-05).
- (4) 白鳥, 野口: "CSMA/CD方式におけるスループットの一評価法", *信学論(D)*, J66-D, 8, pp.925-931 (昭58-08).
- (5) 石橋, 田坂: "CSMA及びCSMA-CDプロトコルの特性評価", *信学論(B)*, J66-B, 9, pp.1123-1130 (昭58-09).
- (6) 飯田, 安田: "CSMA/CDローカルエリアネットワークとその再送制御アルゴリズムの解析", *信学論(B)*, J66-B, 10, pp.1247-1254 (昭58-10).
- (7) 野村, 岡田, 中西: "Back-offプロトコルを考慮したCSMA/CD方式の性能評価", *信学論(D)*, J67-D, 2, pp.184-191 (昭59-02).
- (8) F.A. Tobagi and L. Kleinrock: "The effect of acknowledgment traffic on the capacity of packet-switched radio channels", *IEEE Trans. Commun.*, COM-26, 6, pp.815-826 (June 1978).
- (9) M. Tokoro and K. Tamaru: "Acknowledging Ethernet", *Proc. COMPCON Fall'77*, pp.320-325 (Sept. 1977).

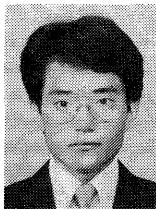
- (10) 福田, 田坂: “確率的フローシステムと平衡点解析”, 信学誌, 66, 12, pp.1228-1233(昭58-12).
- (11) A. Fukuda and S. Tasaka: “The equilibrium point analysis - A unified analytic tool for packet broadcast networks”, Conf. Rec. GLOBECOM '83, pp.1133-1140(Nov. 1983).
- (12) F.A. Tobagi: “Carrier sense multiple access with message-based priority functions”, IEEE Trans. Commun., COM-30, 1, pp.185-200(Jan. 1982).
- (13) 小町, 飯田, 安田: “優先権の再割付けを行う Priority Ethernet”, 信学論(D), J66-D, 1, pp.89-96(昭58-01).
- (14) 申, 室, 長谷川: “優先度付きアクセス待ち時間をもつCSMA/CD方式の性能解析”, 信学論(D), J67-D, 9, pp.1013-1020(昭59-09).
- (15) S.S. Lam: “A packet network architecture for local interconnection”, Conf. Rec. ICC'80, pp.39.2.1-39.2.6(June 1980).
- (16) 申, 室, 長谷川: “Acknowledging Ethernetの性能解析”, 信学技報, SE84-41(1984-06).

(昭和60年4月25日受付)



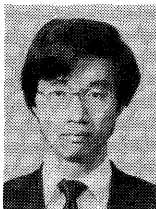
田坂 修二

昭46名工大・工・電気卒。昭51東大大学院博士課程了。工博。同年名工大情報工学科勤務。現在、同大助教授。主として、放送形パケット通信網の研究に従事。IEEE, 情報処理学会各会員。



谷 正徳

昭58名工大・工・情報卒。昭60同大学院修士課程了。同年トヨタ自動車株式会社入社。在学中、放送形パケット通信網の研究に従事。



高橋 健一

昭52名工大・工・情報卒。昭54同大学院修士課程了。同年同大情報助手。現在に至る。この間、画像回復・強調処理および画像データ圧縮符号化の研究に従事。IEEE, 画像電子学会各会員。