

論文

UDC [681.324.078:621.396.4]:[621.394.346:681.323.072.6]:519.872.6

CSMA 及び CSMA-CD プロトコルの特性評価

正員 石橋 豊^{†*} 正員 田坂 修二[†]

Performance Evaluation of the CSMA and CSMA-CD Protocols

Yutaka ISHIBASHI[†] and Shuji TASAKA[†], Regular Members

あらまし 本論文は、nonpersistent CSMA 及び CSMA-CD の動特性について考察を行ったものである。CSMA-CD の動特性の解析は、従来、チャネルの検知がパケットの発生（又はレディとなった）時点でなされるという条件の下で、行われている。しかし、チャネルの時間軸がスロット化された状況においては、その次の小スロットの開始時点で、チャネルの検知を行う方が自然且つ実際的であり、又特性が良くなると考えられる。本論文では、まず、検知時点に関するこれら二つの条件の下で、slotted CSMA-CD の動特性を解析し、特性に関する上記の推測が正しいことを示す。続いて、nonslotted CSMA-CD の動特性の解析を行う。これらの解析の特別な場合として、CSMA に対する結果も与える。更に、こうして得られた特性の比較を行い、スロット化、衝突検出機能の付加及び伝搬遅延が特性に及ぼす影響を考察する。その結果、伝搬遅延が小さい場合には、スロット化による特性の改善の割合が衝突検出機能の付加によるそれと比べて小さいことが明らかとなった。一方、伝搬遅延が大きくなると、その関係は逆になる。

1. まえがき

Ethernet⁽¹⁾形のバス状ローカルネットワークは、信頼性や拡張性が高く、しかも経済的構成が簡単であるという特徴を持つ。そのため、最近多くの研究が行われている。この種のネットワークにおける多元接続プロトコルの代表的なものには、CSMA^{(2)~(4)}やCSMA-CD^{(5)~(9)}プロトコルがある。

この CSMA と CSMA-CD に関して、文献(2)~(9)において、種々の観点から研究がなされている。これらのプロトコルでは、ランダムアクセスシステムの特徴であるチャネルの不安定現象が現われる所以、これをも考慮した特性の解析、すなわち動特性の解析が必要である。しかし、この動特性解析に関するこれまでの研究は、必ずしも十分なものではない。

文献(3), (6)は、動特性解析に関する従来の研究の基本ともいべきものである。これらは、それぞれ slotted nonpersistent CSMA, slotted nonpersistent CSMA-CD を取り扱っている。その解析は、伝送期間 (Transmission Period : TP)^{(3), (6)}終了直後の空スロッ

トを隠れスロットとした隠れマルコフ連鎖でモデル化し、通常のマルコフ連鎖の解析手法を用いて行われたものである。また、それは、チャネルの検知がパケットの発生（又はレディとなった）時点においてなされるという条件の下で行われている。しかし、CSMA に関する最初の研究である文献(2)においては、チャネルの検知は小スロットの開始時点でなされるとしている。チャネルの時間軸がスロット化された状況においては、システム内の端末は、そのクロックに同期して動作するのが自然であり、従ってチャネルの検知も小スロットの開始時点に取るのが妥当であり、且つ実際的であると考えられる。このようなチャネルの検知時点の違いが、システムの特性にどのような影響を及ぼすかは、これまでには明らかにされていない。

また、nonpersistent CSMA については、時間軸をスロット化することによって、スロット化しない場合よりも特性が改善されるということも、静特性の面からこれまでに明らかにされている⁽²⁾。このことは、nonpersistent CSMA-CD についても同様に成立する。従って、動特性の面から、スロット化による特性改善の度合がどの程度のものであるか、更に、スロット化が特性改善の点からみて常に必要なことであるかどうかということを、nonslotted 方式との比較において検討しておくのは、必要なことと考えられる。しかし、

† 名古屋工業大学工学部情報工学科、名古屋市

Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466 Japan

* 現在、電気公社武蔵野電気通信研究所

論文番号：昭58-論415[B-129]

nonslotted nonpersistent CSMA-CDの動特性解析は、解析上の困難さのため、従来行われておらず、従って上記の問題についても検討されていない。

そこで、本論文では、上記二つの問題を検討するために、(1)チャネルの検知を小スロットの開始時点に行う、(2)パケットの発生(又はレディとなった)時点に行う、という二通りの場合の slotted nonpersistent CSMA-CD(以下、slotted CSMA-CDと略す)の動特性と、nonslotted nonpersistent CSMA-CD(以下、nonslotted CSMA-CD)の動特性とを解析する。これらの解析を統一的且つ容易に行うために、本論文では多次元マルコフ連鎖の有力な近似解析手法である平衡点解析の手法^⑩を用いた[†]。この手法によって、nonslotted CSMA-CDの動特性の解析が可能となった。更に、本論文では、これらのプロトコルの特性の比較を行い、スロット化、衝突検出機能の付加及びチャネルの伝搬遅延が特性に及ぼす影響について総合的に考察する。

以下、2.で各プロトコルをモデル化するための共通の仮定について述べる。続いて、3.で slotted CSMA-CD、4.で nonslotted CSMA-CDの動特性を解析する。

最後に、これらの解析結果を用いて、5.で特性の比較を行う。

2. 仮定と評価基準

各プロトコルの特性を共通の基盤の上で比較するために、次の仮定を置く。

- (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とし、これを τ 秒とする。
- (3) 一つの端末のパケットの発生間隔は、平均が τ/α 秒の指數分布に従う。
- (4) 各端末は、一つのパケットの伝送が完了し、そのパケットが受信されるまでは、次のパケットを発生しない。
- (5) パケットの長さは一定とし、その伝送時間を T 秒とする。
- (6) nonslotted 方式の場合には、失敗伝送期間(unsuccessful TP)^⑪において 2 番目にパケットを送信する端末の送信開始時点から $K\tau$ 秒後に、衝突に

[†] 文献(4), (8)でも、それぞれ nonpersistent CSMA, nonslotted 1-persistent CSMA-CDの動特性を平衡点解析の手法を用いて解析している。

含まれる全ての端末が送信を中止する[†]。一方、

slotted 方式の場合には、パケットの送信開始時点が小スロットの開始時点に同期づけられるので、失敗伝送期間の開始時点から $K\tau$ 秒後に送信を中止する。

(7) パケットの送信に失敗した端末とチャネルの検知結果がビジーであった端末は、平均が τ/ν 秒の指數分布に従う遅延の後に^{††}、パケットの再送が可能、すなわちレディ(ready)となる。

(8) チャネルの検知は瞬時に行われる。

(9) パケットの誤りは、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、次のものを用いることにする。(i)スループット(throughput) S : 1 パケット伝送時間当たりに正しく伝送される平均パケット数。(ii)平均パケット遅延(average packet delay) D : パケットの発生時点からその送信完了時点までの平均時間(1 パケット伝送時間を単位とする)。

以下の議論においては、簡単のため、伝搬遅延時間 τ 秒を時間の単位とする。そこで、パケット伝送時間 T 秒をこの時間の単位に換算しておく。これを H で表わすと、次式が成立する。

$$H \triangleq T/\tau = 1/\alpha, \quad \alpha \triangleq \tau/T \quad (1)$$

3. slotted CSMA-CD の特性解析

3.1 チャネルの検知を小スロットの開始時点で行う場合

本節では、文献(2)と同様にチャネルの検知が小スロットの開始時点でなされるという条件の下で、slotted CSMA-CDの動特性の解析を行いう。

このプロトコルでは、チャネルの時間軸が伝搬遅延に等しい大きさの小スロットに分割されている。ある小スロット内でパケットを発生した(又はレディとなった)端末は、次の小スロットの開始時点でチャネルを検知する。その結果、チャネルがアイドルであれば、その端末は直ちにパケットを送信する。送信に失敗した場合には、仮定(6)と(7)とに従う。一方、チャネルがビジーであれば、仮定(7)に従う。

3.1.1 モデル化

前章の仮定の下で、システムのマルコフモデルを構

[†] 伝送期間を開始した端末の次にパケットを送信する端末が、その伝送期間の開始後 τ 秒の間に、パケットの送信を開始すれば、それらの送信は失敗することに注意されたい。

^{††} slotted 方式の場合には、連続分布にするよりも離散分布にした方が自然である。筆者らは、その一例として幾何分布を採用したときの slotted CSMA-CD の解析を文献[1]で行っている。しかし、 ν の値が小さい場合には、両者の特性の差はほとんどない。

成するために、小スロットの開始時点にのみ着目する。この時点において、端末が取り得る状態を分類してみると、 $T, RT, S_i (1 \leq i \leq H), D_S, F_j (1 \leq j \leq K)$ 及び D_F モードが考えられる。

まず、 T モードは送信すべき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、パケットの衝突を検出して送信を中止した状態、又はチャネルの検知結果がビジーであった状態である。但し、パケットの送信に失敗した場合には、チャネルがアイドルとなった時点でこのモードに入る。 RT モードの端末は、仮定(7)に従う。また、 S_i モードとは、パケットの送信に成功し、 i 小スロット後にその送信を完了する状態をいう。 D_S モードは、パケットの送信を完了し、受信されるのを待っている状態である。一方、 F_j モードとは、パケットの送信に失敗し、 j 小スロット後にその送信を中止する状態をいう。 D_F モードは、衝突に含まれた全ての端末がパケットの送信を中止し、チャネルがアイドルになるのを待っている状態である。以上のモードのうち、 D_S と D_F モードは伝搬遅延の影響を表わしている。

解析の簡単のため、文献[1]と同様にして、 T 及び RT モードを TH 及び TR モードに変形すると、図1 のモデルが得られる。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だけを考察する。

3.1.2 平衡点解析

図1において、 $TR, D_S, S_i (1 \leq i \leq H), D_F, F_j (1 \leq j \leq K)$ モードにある端末数をそれぞれ n, m_0, m_i, l_0, l_j とすると、状態ベクトル $\mathbf{n} \triangleq (n, m_0, m_i, l_0, l_j : 0 \leq i \leq H, 0 \leq j \leq K)$ は、小スロット毎に状態推移が起きるマルコフ連鎖となる。これに平衡点解析の手法^[10, 11]を適用する。

まず、ある小スロットの開始時点でシステムの状態が \mathbf{n} のとき、チャネルがアイドルであるという条件の下で、パケットの送信に成功する平均端末数を $S_{SA}(\mathbf{n})$ と置く。1 小スロット当たり TR モードからランダムアクセスする端末の個数が平均 $n\nu$ のポアソン分布に従うと近似すると、これは次式で与えられる。

$$S_{SA}(\mathbf{n}) = n\nu e^{-n\nu} \quad (2)$$

また、チャネルがアイドルであれば 1、ビジーならば 0 となる関数を考え、これを $P_I(\mathbf{n})$ と置く。このとき、各モードにおける平均増加端末数を求めて 0 とおき、独立な式をまとめると次のようになる。

$$m_0 = m_1 = \dots = m_H = P_I(\mathbf{n}) S_{SA}(\mathbf{n}) \quad (3)$$

$$l_0 = l_1 = \dots = l_K = P_I(\mathbf{n}) [n\nu - S_{SA}(\mathbf{n})] \quad (4)$$

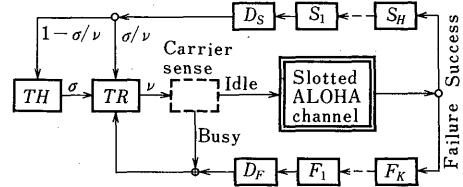


図1 Slotted CSMA-CD のモデル ($\sigma \leq \nu$)
Fig.1-A model of the slotted CSMA-CD system ($\sigma \leq \nu$).

$$\left(M - n - \sum_{i=0}^H m_i - \sum_{j=0}^K l_j \right) \sigma = (1 - \sigma/\nu) m_0 \quad (5)$$

但し、式(5)の導出においては、 σ の 2 次以上の項は無視した。以下の解析においても同様の近似を行う。

式(2)～(5)の解が平衡点 $\mathbf{n}_e \triangleq (n_e, m_{ie}, l_{je})$ である。しかし、これを求めるためには、 $P_I(\mathbf{n})$ を具体的に与えることが必要である。そこで、平衡点における値 $P_I(\mathbf{n}_e)$ を考え、これを小スロットの開始時点においてチャネルがアイドルである確率で近似する。又、 S_i モードに端末が存在する確率を m_{ie} で近似する。 $S_1 \sim S_H$ 及び $F_1 \sim F_K$ モードに端末が存在しないときだけ、次の小スロットの開始時点でチャネルがアイドルとなる。このため、 $P_I(\mathbf{n}_e)$ は次のように表わすことができる。

$$P_I(\mathbf{n}) = 1 - \sum_{i=1}^H m_i - K P_I(\mathbf{n}) [1 - e^{-n\nu} - S_{SA}(\mathbf{n})] \quad (6)$$

但し、上式では、記述の簡単のため、平衡点を表わす添字 e は省略してある。以下の式においても添字 e は省略する。上式において、 $P_I(\mathbf{n}) [1 - e^{-n\nu} - S_{SA}(\mathbf{n})]$ は、パケットの送信に失敗する確率である。従って、上式の右辺の第 3 項は、 $F_1 \sim F_K$ モードのいずれかに端末が存在する確率を表わしている。

式(3)～(6)を整理すると、次式を得る。

$$M - n - P_I(\mathbf{n}) [(K+1)n\nu + S_{SA}(\mathbf{n})(H-K+1/\sigma - 1/\nu)] = 0 \quad (7)$$

$$P_I(\mathbf{n}) = 1 / \{1 + H S_{SA}(\mathbf{n}) + K [1 - e^{-n\nu} - S_{SA}(\mathbf{n})]\} \quad (8)$$

平衡点方程式(2), (7), (8)は、 n に関して解くことができる。ここで、スループット S を、平衡点において 1 パケット伝送時間当たり正しく伝送される平均パケット数で近似する。このとき、次式が得られる。

$$S = H P_I(\mathbf{n}) S_{SA}(\mathbf{n}) \quad (9)$$

また、平均パケット遅延 D は、図1の変形前のモデルにリトルの公式を用いると、次式で与えられる。

$$D = M/S - a/\sigma - a/2 \quad [\text{単位: } T] \quad (10)$$

但し、上式の右辺の第 3 項は、パケットの発生時点が

小スロット内で一様分布に従うということを考慮したものである。

上の理論式において $K=H$ と置くと, slotted CSMA の理論式が得られることは明らかである。

更に, 式(9)に式(2), (8)を代入し, $n\nu=g$ と置くと,
 $S=Hg e^{-g}/[1+Hg e^{-g}+K(1-e^{-g}-ge^{-g})]$ (11)

を得る。これは、文献(6)の無限端末モデルに対する結果と一致する。その結果は、チャネルの検知が小スロットの開始時点での行われるとして得られたものである。もちろん、上式において、 $K=H$, $g=aG$ と置き、式(1)を用いれば、上式は文献(2)の slotted CSMA に対する結果とも一致する。

3.2 チャネルの検知をパケットの発生（又はレディとなった）時点で行う場合

本節では、文献(3), (6)と同様にチャネルの検知をパケットの発生（又はレディとなった）時点で行うという条件の下で、slotted CSMA-CD（以下、前節のプロトコルと区別するために、slotted CSMA-CD* と記す）の動特性を解析する。

ある小スロット内でパケットを発生した（又はレディとなった）端末は、その発生（又はレディとなった）時点でチャネルを検知する。その結果、チャネルがアイドルならば、次の小スロットの開始時点でパケットの送信を開始する。

3.2.1 モデル化

システムのモデルを構成する際に注意すべきことは、今の場合、仮定(6)が必ずしも妥当ではないということである。これは、伝送期間 (TP) の開始後 1 小スロット内においてパケットを発生する（又はレディとなる）端末がチャネルをアイドルと検知するためである。一例として、衝突検出時間及びジャム時間⁽⁶⁾を無視した場合を考えてみる。失敗伝送期間の開始後 1 小スロット内にチャネルを検知する端末が存在しないときには、前節の場合と同様に、1 小スロット後に送信が中止される。一方、伝送期間の開始後 1 小スロット内にチャネルを検知する端末が存在するときには、2 小スロット後に送信が中止される。

このような事実にもかかわらず、本論文では、解析の簡単のため仮定(6)を置く。 K の値としては、安全のため、伝送期間の開始後 1 小スロット内にチャネルを検知する端末が存在する場合の値を用いることとする（上の例では、 $K=2$ ）。この近似の精度については、

5.でシミュレーションによって検討する。

上の近似の下で、端末の取り得る状態としては、

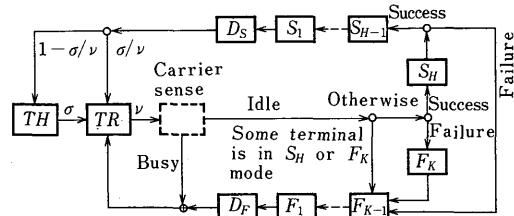


図 2 Slotted CSMA-CD* の近似モデル ($\sigma \leq \nu$)
Fig.2-An approximate model of the slotted CSMA-CD* system ($\sigma \leq \nu$).

3.1.1 と同じモードが考えられる。但し、この場合の S_H モードは、現小スロット内でチャネルを検知する端末が存在しないとき、 H 小スロット後に送信を完了する状態である。それらの相互の関係を図 2 に示す。

図 2において、一つの伝送期間を開始する TR モードの端末は、まず成功か失敗かに従い、それぞれ S_H , F_K モードに入る。この伝送期間の開始後 1 小スロットの間に TR モードの端末がチャネルを検知する場合には、その伝送は確率 1 で最終的に失敗することになる。このとき、 S_H (又は F_K) モードの端末と TR モードからチャネルを検知した端末は、 F_{K-1} モードに入る。一方、チャネルを検知する端末が存在しない場合には、 S_H モードの端末は S_{H-1} モードに入る。

3.2.2 平衡点解析

まず、ある小スロットの開始時点においてシステムの状態が $n \triangleq (n, m_i, l_j : 0 \leq i \leq H, 0 \leq j \leq K)^{\dagger}$ のとき、 S_H 及び S_{H-1} モードに入る平均端末数をそれぞれ $s_H(n)$, $s_{H-1}(n)$ と置く。更に、 S_H 又は F_K モードに端末が存在するとき 1, そうでないとき 0 となる関数を $f(n)$ とする。又、小スロットがアイドル期間 (idle period)⁽²⁾ にあれば 1, ビジー期間 (busy period)⁽²⁾ にあれば 0 となる関数を $P_I(n)$ と置く。このとき、

3.1.2 と同様な議論により、次の関係式を得る。

$$m_0 = m_1 = \dots = m_{H-1} = s_{H-1}(n) \quad (12)$$

$$m_H = s_H(n) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} l_0 &= l_1 = \dots = l_{K-1} \\ &= f(n) n \nu + l_K + \lceil [m_H - s_{H-1}(n)] \rceil \end{aligned} \quad (14)$$

$$l_K = P_I(n) n \nu - s_H(n) \quad (15)$$

$$\left(M - n - \sum_{i=0}^H m_i - \sum_{j=0}^K l_j \right) \sigma = (1 - \sigma / \nu) m_0 \quad (16)$$

$$f(n) = P_I(n) (1 - e^{-n \nu}) \quad (17)$$

$$s_H(n) = P_I(n) n \nu e^{-n \nu} \quad (18)$$

$$s_{H-1}(n) = m_H e^{-n \nu} \quad (19)$$

[†] この変数の定義は、3.1.2 のそれに従ったものである。なお、4.2 でもこの定義に従う。

$$P_I(n) = 1 - \sum_{i=0}^{H-1} m_i - f(n) - K P_I(n) [1 - e^{-n\nu} - S_{SA}(n)] \quad (20)$$

$$S_{SA}(n) \triangleq n\nu e^{-n\nu} \quad (21)$$

但し、小スロットがアイドル期間にあるのは、 $D_S, S_1 \sim S_H, D_F$ 及び $F_1 \sim F_{K+1}$ モードに端末が存在しないときだけであることから、式(20)が導かれる。

以上の式を整理すると、次の平衡点方程式を得る。

$$\begin{aligned} M - n - P_I(n) & [n\nu (2K + 1 - Ke^{-n\nu})] = 0 \\ & + S_{SA}(n) (H - K + 1/\sigma - 1/\nu) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P_I(n) & = 1 / \{HS_{SA}(n) + K[1 - e^{-n\nu} - S_{SA}(n)] \\ & + 2 - e^{-n\nu}\} \end{aligned} \quad (23)$$

スループット S と平均パケット遅延 D は、それぞれ式(9), (10)で与えられる。

4. nonslotted CSMA-CDの特性解析

本プロトコルでは、前章のプロトコルとは異なり、チャネルの時間軸はスロット化されていない。そのため、チャネルの検知は、パケットの発生（又はレディとなった）時点で行われる。

4.1 モデル化

本プロトコルの場合には、これまでのように、2. の仮定の下でシステムの正確なマルコフモデルを構成するのは困難である。そこで、本論文では、伝搬遅延に等しい間隔で周期的にチャネルを観測することによって、離散時間の近似モデルを構成することにする。

このとき、成功伝送期間 (successful TP)⁽⁶⁾ は、その長さが $(H+1)$ となるので、 $(H+1)$ 個の引き続く観測時点での観測される。一方、失敗伝送期間は、 $(K+1)$ 又は $(K+2)$ 個の引き続く観測時点での観測されることになる。これは、失敗伝送期間の長さが一定でないためである。すなわち、仮定(6)より、失敗伝送期間の開始時点とその期間における2番目のパケット送信開始時点との時間間隔を Y (Y は、 $0 < Y < 1$ なる確率変数) とすると、その期間長は $(Y+K+1)$ となるためである。

上の議論から、観測時点において、各端末は、 T, RT, S_i ($1 \leq i \leq H$), D_S, F_j ($1 \leq j \leq K+1$) 及び D_F モードのいずれかの状態にあると考えられる[†]。明らかに、これらのモードの意味は、3.1.1 のそれとは若干異なっている。しかし、これらの意味は容易に類

[†] 観測時点と伝送期間の開始時点とが一致することはほとんどない。このため、端末の状態の定義の仕方には、この他にもいくつかの方法が考えられる。しかし、本論文では、前章でのそれとの整合性のため、このような定義の仕方をした。

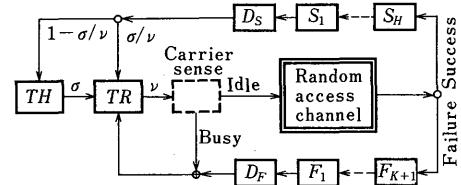


図3 Nonslotted CSMA-CDの近似モデル ($\sigma \leq \nu$)
Fig.3 - An approximate model of the nonslotted CSMA-CD system ($\sigma \leq \nu$).

推できるので、その説明は省略する。

失敗伝送期間の長さが $(Y+K+1)$ となるので、上記のモードの相互の関係を厳密にモデル化するのは困難である。そこで、本論文では、失敗伝送期間の長さを $(K+2)$ としてモデル化し、図3のモデルを得る。もちろん、このモデルは、現実のシステムの状態推移を、必ずしも正確に表現するものではない。しかし、後に示すように、システムの安定性、スループット及び平均遅延の評価には、このモデルで十分である。

4.2 平衡点解析

ある観測時点において、システムの状態が $n \triangleq (n, m_i, l_j : 0 \leq i \leq H, 0 \leq j \leq K+1)$ のとき、その観測区間がアイドル期間を含めば 1、そうでなければ 0 となる関数を $P_I(n)$ と置く。また、チャネルがアイドル期間にあるという条件の下で、単位時間当たりパケットのランダムアクセスに成功する平均端末数を $S_{RA}(n)$ と置く。単位時間当たり TR モードを出る端末数が平均 $n\nu$ のポアソン分布に従うと近似すると、これは次式で与えられる。

$$S_{RA}(n) = n\nu e^{-n\nu} \quad (24)$$

また、3.1.2 と同様な議論により、次式が成立する。

$$M - n - P_I(n) [(K+2)n\nu]$$

$$+ S_{RA}(n) (H - K - 1 + 1/\sigma - 1/\nu) = 0 \quad (25)$$

$P_I(n)$ は、図3のモデルをもとにして、これまでと同様に求めることもできる。しかし、ここでは、その値を正確に評価するために、特に従来の結果との整合性のために（式(22)参照）、失敗伝送期間の平均長を $(\bar{Y}+K+1)$ (但し、 \bar{Y} は Y の平均値) として、これを求める。成功及び失敗伝送期間が生じる確率がそれぞれ $P_I(n) S_{RA}(n)$, $P_I(n) n\nu (1 - e^{-n\nu})$ であることから、次式を得る。

$$\begin{aligned} P_I(n) & = 1 - (H+1) P_I(n) S_{RA}(n) \\ & - (\bar{Y}+K+1) P_I(n) n\nu (1 - e^{-n\nu}) \end{aligned} \quad (26)$$

更に、 Y ($0 < Y < 1$) の確率分布関数は、 $F_Y(y) \triangleq (1 - e^{-n\nu y}) / (1 - e^{-n\nu})$ で与えられる。従って、 \bar{Y} は次

のようになる。

$$\bar{Y} = \int_0^1 (1 - F_Y(y)) dy = 1/(n\nu) - e^{-n\nu}/(1 - e^{-n\nu}) \quad (27)$$

式(24), (27)を式(26)に代入すると、次式が得られる。

$$P_I(n) = 1/[HS_{RA}(n) + (K+1)n\nu(1-e^{-n\nu}) + 2 - e^{-n\nu}] \quad (28)$$

式(24), (25), (28)の解が平衡点 n_e であり、これは n に関して求めることができる。

スループット S と平均パケット遅延 D は、

$$S = H P_I(n) S_{RA}(n) \quad (29)$$

$$D = M/S - a/\sigma - a \quad [T] \quad (30)$$

と表わされる。但し、式(30)の右辺の第3項は、パケットの発生時点と送信完了時点とが観測区間内で一様分布に従うということを考慮したものである。

4.3 CSMAの場合への拡張

CSMAの場合には、端末が衝突検出機能を持たないので、パケットの送信を途中で中止することはない。このため、失敗伝送期間の長さは $(Y+H+1)$ となる。但し、この場合の Y は、失敗伝送期間の開始時点とその期間において最後にパケットを送信する端末の送信開始時点との時間間隔である。前節と同じ近似の下で、 Y の確率分布関数が $F_Y(y) \triangleq e^{-n\nu(1-y)} / (1 - e^{-n\nu})$ となるので、 Y の平均 \bar{Y} は次のようになる。

$$\bar{Y} = 1/(1 - e^{-n\nu}) - 1/(n\nu) \quad (31)$$

以上のことから、本プロトコルに対する理論式は、前節の理論式において、 $K=H$ と置いて、式(27)の代わりに式(31)を用いることによって得られることが分かる。このようにして得られたスループット S において、式(1)を代入し、 $n\nu=aG$ と置くと、次式を得る。

$$S = G e^{-aG} / [(1+2a)G + e^{-aG}] \quad (32)$$

これは、文献(2)の結果と一致する。また、本節で得られる理論式は、文献(4)の結果と近似的に一致する。

5. 特性比較

本章では、これまでに得られた理論式を用いて数値計算を行い、シミュレーションによって理論の近似の精度について検討するとともに、各プロトコルの特性の比較を行う。なお、以下の数値例では、 $M=100$ の場合を考察する。また、シミュレーション結果は、10000T分のものを示してある。

再送確率 ν に対するスループット及び平均パケット遅延の理論値とそれに対するシミュレーション結果とを図4に示す。図4(a)では $a=0.1$, $\sigma=0.7 \times 10^{-3}$, 図4(b)では $a=0.01$, $\sigma=1.0 \times 10^{-4}$ としてある。但し、

CSMA-CDの場合には、 K の値として、衝突検出時間及びジャム時間を無視したときのものを選んでいる。すなわち、slotted 及び nonslotted CSMA-CDの場合には、 $K=1$ としてある。又、slotted CSMA-CD* の理論値は、 $K=2$ とした†。

図4には、ランダムアクセスシステムの特徴である双安定現象¹⁰が現われている場合がある。この領域において、実線はスループットが小さい方の安定平衡点¹⁰、破線は大きい方のそれを選んだときの理論値を表わす。安定領域では、唯一つだけ存在する平衡点における理論値を実線で示してある。また、シミュレーションにおいて、黒く塗りつぶしてある方は全ての端末の初期状態をRTモードとした結果であり、塗りつぶしてない方はTモードとしたものである。安定領域では、初期状態をどちらに選ぼうとも、理論値とシミュレーション値はよく一致している。しかし、図4(b)の平均パケット遅延特性において、システムが不安定となる直前の領域で、その誤差が大きくなっている。これは、平衡点解析においてよく現われる現象である。一方、双安定領域では、少なくとも、初期状態がRTモードのときのシミュレーション値は、スループットが小さい方の平衡点における理論値とよく一致している。これらのことから、理論は、スループットと平均パケット遅延だけでなく、システムの安定性に関する十分に正確であることが分かる。

図4から分かることは、まず slotted CSMA-CD が最も優れた特性を示しているということである。これに対して、slotted CSMA-CD* の特性は、 $a=0.1$ の場合に大きく劣化している。

また、チャネルの時間軸をスロット化するか、又は衝突検出機能を付加することによって、特性が改善されていることが分かる。特に、 $a=0.01$ の場合には、衝突検出機能の付加によって、システムの安定性が大きく改善されている。逆に、この場合には、 $a=0.1$ の場合と比べて、スロット化による特性の改善の割合が小さくなっている。一方、 $a=0.1$ の場合には、両者による特性の改善の割合は同じ程度である。

筆者らは、この他、 a の値が更に大きい場合の特性についても調べてみた。その場合には、衝突検出機能の付加による特性の改善の割合はスロット化によるそれよりも小さくなっていた。このことは、 $a=1$ の場合には slotted CSMA の特性が slotted CSMA-CD

† シミュレーションでは、理論値のような K の値の近似は行っていない。図5においても、同様。

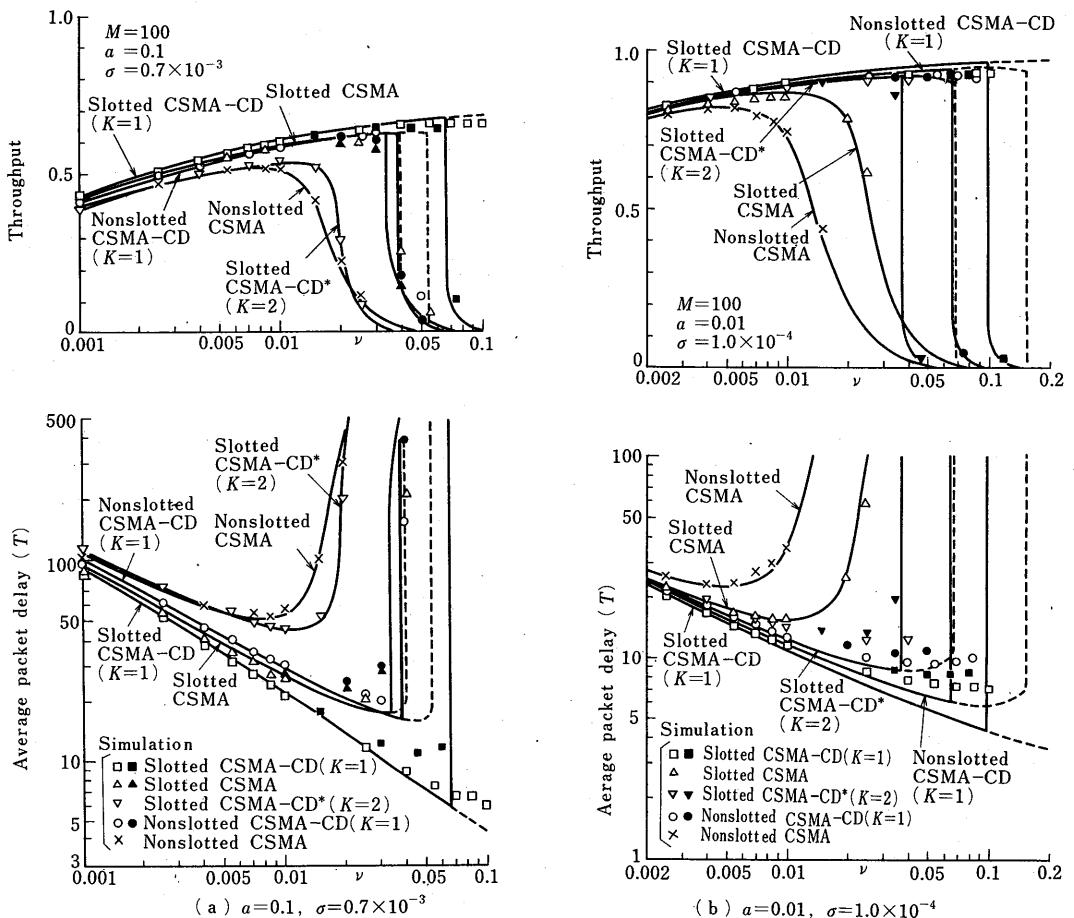


図4 スループット及び平均パケット遅延特性
Fig.4 - Throughput and average packet delay versus v .

のそれと一致することから容易に類推できる。

次に、 $a=0.1$ のときの各プロトコルに対するスループット・平均パケット遅延トレードオフ特性を図5に示す。図中の理論値は、文献[1]と同様に、システムが安定であるという条件の下で、スループットが最大となるように再送確率 v を選んだときのものである。図中には、参考のため、シミュレーション結果も示している。これによると、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。なお、 a の値が0.01程度に小さくなると、文献[1]に示されているように、誤差が大きく現われた。しかし、このような場合にも、少なくとも定性的な議論は可能であった。また、スループットが容量（最大スループット）近くになると、理論値とシミュレーション値はよく一致していた^⑩。従って、理論は、このようなトレードオフ特性の比較に

おいても、十分に役立つと言えよう。

図5においても、スロット化又は衝突検出機能の付加によって、特性が改善されていることが確認できる。しかし、スループットが0.07より小さくなると、スロット化によって特性が劣化している。また、スループットが小さくなると、衝突検出機能による特性の改善の割合も小さくなっている。

また、図5から、slotted CSMA-CD ($K=1$)は、大部分の（0.07より大きい）スループット領域において、最も優れた特性を持つことが分かる。一方、0.07より小さいスループットでは、nonslotted CSMA-CD ($K=1$)が優れている。

更に、slotted CSMA-CD* の特性は、全てのスループット領域に渡り、slotted CSMA-CD のそれよりも劣っている。これは、後者ではパケットの送信を

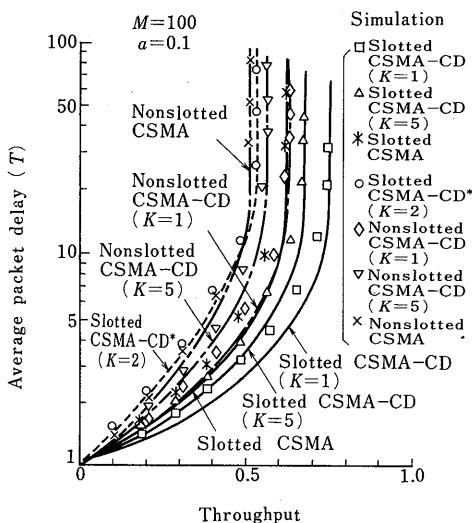


図5 スループット・平均パケット遅延トレードオフ特性

Fig.5 Throughput-average packet delay tradeoff characteristics.

チャネルの最新の状態に基づいて行うのに対し、前者では古い状態に基づいているためである。このことから、チャネルの検知は、パケットの発生（又はレディとなった）時点で行うよりも、その次の小スロットの開始時点で行う方が良いことが分かる。

6. むすび

本論文では、nonpersistent CSMA-CD プロトコルを用いたシステムの振舞をマルコフ連鎖で明確にモデル化することによって、その動特性の解析を行った。また、その解析の特別な場合として、nonpersistent CSMA プロトコルに対する結果も与えた。更に、これらのプロトコルの特性の比較を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) チャネルの時間軸がスロット化された状況においては、パケットを発生した（又はレディとなった）小スコットの次の小スロットの開始時点でチャネルの検知を行うのが良い。
- (2) スループットがかなり小さい場合には non-slotted CSMA-CD、それ以外のスループット領域では slotted CSMA-CD が最も優れた特性を持つ。
- (3) α の値が小さい場合には、スロット化による特性の改善の割合が衝突検出機能の付加によるそれ

と比べて小さい。一方、 α の値が大きくなると、その関係は逆になる。

筆者らは、この他、本論文と同様な手法を用いて、1-persistent CSMA-CD（又、特別な場合として、CSMA）の動特性の解析を行っている¹²⁾。

謝辞 御討論頂いた東京大学安田靖彦教授及び飯田一朗氏、静岡大学福田明助教授、本学太田正光教授に感謝する。

文 献

- (1) Metcalfe, R.M. and Boggs, D.R.: "Ethernet : Distributed packet switching for local computer networks", Commun. ACM, 19, 7, pp. 395-403 (July 1976).
- (2) Kleinrock, L. and Tobagi, F.A.: "Packet switching in radio channels : Part I - Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics", IEEE Trans. Commun., COM-23, 12, pp. 1400-1416 (Dec. 1975).
- (3) Tobagi, F.A. and Kleinrock, L.: "Packet switching in radio channels : Part IV - Stability considerations and dynamic control in carrier sense multiple access", IEEE Trans. Commun., COM-25, 10, pp. 1103-1119 (Oct. 1977).
- (4) 棚本、福田：“CSMA 方式による無線パケット通信システムの安定性と制御”，信学論(B), J63-B, 12, pp. 1240-1247 (昭55-12).
- (5) Lam, S.S.: "A carrier sense multiple access protocol for local networks", Computer Networks, 4, pp. 21-32 (1980).
- (6) Tobagi, F.A. and Hunt, V.B.: "Performance analysis of carrier sense multiple access with collision detection", Computer Networks, 4, pp. 245-259 (1980).
- (7) 田丸, 所: "CSMA-CD 方式における各種衝突制御方式とアノレッジ方式の性能解析", 信学論(D), J65-D, 5, pp. 527-534 (昭57-05).
- (8) 飯田、安田: "CSMA/CD 方式と再送制御アルゴリズムの性能評価", 情報理論とその応用研究会第5回研究討論会資料, pp. 505-512 (昭57-10).
- (9) 飯田、石塚、安田、尾上: "優先権機能を有するランダムアクセスパケット交換構内計算機網", 情報処理論文誌, 22, 3, pp. 233-241 (1981-05).
- (10) 福田明: "アロハ形システムの平衡点による特性解析", 信学論(B), J61-B, 11, pp. 959-966 (昭53-11).
- (11) 石橋、田坂: "ローカルネットワークにおけるキャリアセンス形多元接続プロトコルの平衡点解析", 信学技報, SE82-69 (1982-10).
- (12) 石橋、田坂: "1-persistent CSMA-CD プロトコルの特性解析", 昭58信学総全大, 1667.

（昭和58年4月2日受付）