

1-persistent C S M A - C D 方式のスロット長可変型解析

阪市大・工 藤 原 値賀人 (Chikato Fujiwara)

増 淵 由 之 (Yoshiyuki Masubuchi)

橋 本 英 之 (Hideyuki Hashimoto)

奥 本 隆 昭 (Takaaki Okumoto)

1. ま え が き

L A N (Local Area Network) におけるバス型ネットワーク方式の 1 つである、C S M A - C D (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 方式は現実には有限数の局から構成され、時間的には連続した形で動作している。T o b a g i ら⁽¹⁾ は有限数の局を有する non-persistent C S M A - C D 方式に対して、スロット長を局間最大伝搬遅延時間とするスロット型解析を与えている。しかしながら、そこでは各スロットごとの状態変化を行列演算で表現し、局数が増加すると計算時間が長くなり、かつ時間軸をスロット化しているために近似が悪くなる場合がある。

従って、解析においては局数を有限とするだけではなく、時間軸を連続とすることが望ましいが、このような形の解析は最近になって non-persistent型に対してのみ行われただけである⁽²⁾。なお文献(2)～(4)では送信メッセージの衝突に関連する競合区間を局間最大伝搬遅延時間に設定すると正しい結果が得られないことも指摘されている。一方、1-persistent型に対しては Takagiら⁽⁵⁾が送信局数を有限とした連続時間型解析を行っているが、そこでは衝突発生時のバックオフを考慮していない。また野村ら⁽⁶⁾は衝突時のバックオフ時間の分布とメッセージ長の分布を考慮した解析を行っているが、そこでは時間軸はスロット化されており、また送信すべきメッセージを有する局が通信路をアクセスした場合に通信路が空きであっても常にそのメッセージを送信するとは限らず、従って 1-persistent CSMA-CD 方式を対象としたものとは言えない。

いま M 局からなる non-persistent CSMA-CD 方式の状態分類を考えると、ネットワーク全体で送信すべきメッセージを有する局の数は 0 から M までの $M+1$ 種類であり局数に比例する。しかし 1-persistent CSMA-CD 方式では送信すべきメッセージを有する局の状態はさらに再送バックオフ中と通信路空き待ちの状態に分けられる。送信すべきメ

メッセージを有する局の数が i である状態を考えると、この状態の中にはさらに通信路空き待ちの局の数が 0 から i までの $i + 1$ 個の状態が含まれる。従って、全体で $\sum_{i=0}^M (i+1) = (M+1) \cdot (M+2)/2$ の M^2 に比例した状態が存在する。このように non-persistent CSMA-CD 方式に比べて状態数が多くなるので 1-persistent CSMA-CD 方式を厳密に解析するのは困難とされてきた。そこで、解析においては状態数の有効な削減法を考える必要がある。

1-persistent CSMA-CD 方式では、メッセージ送信中（成功、衝突に関係しない）に送信要求（新メッセージ、再送に関係しない）が 2 個以上生起するとその個数に関わらず次の送信区間では必ず衝突が発生するので、本研究では送信中に生起する送信要求の数を 0、1 および 2 以上の 3 種類に分けることにより状態数の増加を少なくして解析を行う。

解析においては、まず時間軸を可変長の時間でスロット化したモデルを用いて、スロット長可変型解析を行い、得られた式においてスロット長を極限的に 0 にすることにより連続時間軸上での式が得られる。また本解析の精度を確かめるためにシミュレーション結果と比較することにする。

2. スロット長可変型解析

ここでは 1. で述べたように、1-persistent CSMA-CD 方式のスロット長可変型解析を示す。なお紙面の都合上省略するが、得られた式においてスロット長を 0 にすることにより連続型解析の式を得ることができる。

本研究で解析の対象とするモデルを以下に示す。

【モデル】

(1) 局数を M とする

(2) 時間軸を時間 t でスロット化する。但し、 t は局間平均伝搬遅延時間 δ ($= (M+1)/3(M-1) \times \tau$ 、 τ = 局間最大伝搬遅延時間) ⁽²⁾ を割り切る限り任意である。

(3) 新パケットの発生間隔は平均 $1/\lambda$ 秒の指数分布に従う。

(4) メッセージの送信要求が生起した時、通信路が空きならそのメッセージは次のスロット開始点から送信される。

(5) メッセージの送信要求が生起した時、通信路が空いでないなら空くまで待ち、空き次第メッセージを送信する。

(6) メッセージが送信開始されてから δ 秒間を競合区間とし、その間に他のメッセージの送信要求があれば衝突が

発生する。その際、メッセージが送信開始されてから通信路から消滅するまでの時間（ジャム時間を含める）を $\gamma + \delta$ とする。

（7）バックログ局の再送試行間隔は平均 $1 / \mu$ 秒の指数分布である。

（8）メッセージ長は T 秒で一定とする。

（9）全局はスロットに同期して動作する。

なおスロット長を 0 にした連続時間型解析においては仮定の（2）と（9）は不要であり、仮定（4）は

（4'）メッセージの送信要求が生起したとき、送信路が空きならそのメッセージは即座に送信される。

となる。

図 1 にこのモデルの送信サイクルを示す。この図において送信サイクルは、1 つ前の送信サイクルの終了点（第 1 スロット開始点）から始まる。メッセージ送信要求が第 I スロットで生起したとすると、このスロットの終了点で空き区間が終了し、第 $I + 1$ スロット開始点よりメッセージの送信が行われる。ここで第 I スロット開始点から δ 秒間が競合区間であり、この区間で他局において送信要求が生起しなければ送信が成功し、他局において送信要求が 1 個以上生じるとメッ

セージの衝突が発生し送信が失敗すると仮定している。送信が終了した後に δ 秒でメッセージが通信路から消滅し、この時刻をサイクル終了時刻とする。

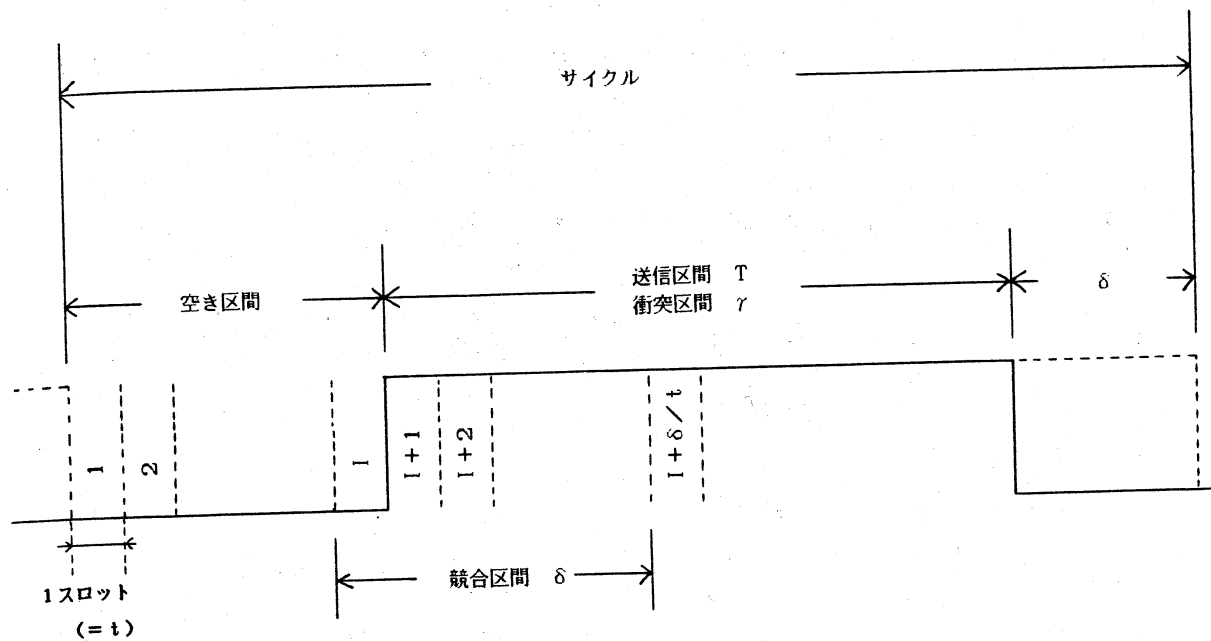


図 1. 送信サイクル

解析に先立ち、各スロット開始点における状態 f をその時点での送信待ち局数により次の 3 種類に分ける。

- $f = 0$: 送信待ち局数が 0、
- $f = 1$: 送信待ち局数が 1、
- $f = 2$: 送信待ち局数が 2 以上。

また

$N_i =$ 第 i スロット開始点でのバックログ局数

$f_i =$ 第 i スロット開始点での送信待ち局数に関する状態

とする。

次に

$$\pi^{t_f, k} = \text{Pr} \{ f^1 = f, N^1 = k \}$$

$$P^{t_{fs}, f_e}(k | i)$$

$$= \text{Pr} \{ \text{サイクル終了点の状態} = f_e, \text{バックログ局数} \\ = k \mid f^1 = f_s, N^1 = i \}$$

とすると $\pi^{t_f, k}$ は次の式から求められる。

$$\pi^{t_f, k} = \sum_{f_s=0}^2 \sum_{i=0}^M \pi^{t_{fs}, i} P^{t_{fs}, f_e}(k | i) \quad (1)$$

$$\sum_{f=0}^2 \sum_{i=0}^M \pi^{t_f, i} = 1 \quad (2)$$

ここで $f = f_e$ でありサイクル間遷移確率 $P^{t_{fs}, f_e}(k | i)$ は次の様にして求められる。

いま

$$S^{\delta, t_{fs}}(j | i)$$

$$= \text{Pr} \{ \text{送信成功}, N^{1+\delta/t} = j \mid f^1 = f_s, N^1 = i \}$$

$$F^{\delta, t_{fs}}(j | i)$$

$$= \text{Pr} \{ \text{送信失敗}, N^{1+\delta/t} = j \mid f^1 = f_s, N^1 = i \}$$

とすると、これらは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S^{\delta, t}_{0, t}(j | i) &= \frac{i(1 - e^{-\mu t})e^{-\lambda \delta(M-i) - \mu \delta(i-1)}}{1 - e^{-\lambda t(M-i) - \mu t i}} \quad (j=i) \\ &= \frac{(M-i)(1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda \delta(M-i-1) - \mu \delta i}}{1 - e^{-\lambda t(M-i) - \mu t i}} \quad (j=i+1) \\ &= 0 \quad (j < i, j > i+1) \end{aligned} \quad (3)$$

$$S_{1,t}^{\delta,t}(j|i) = e^{-\lambda\delta(M-1)-\mu\delta(i-1)} \quad (j=i) \\ = 0 \quad (j < i, j > i) \quad (4)$$

$$S_{2,t}^{\delta,t}(j|i) = 0 \quad (5)$$

$$F_{0,t}^{\delta,t}(j|i) = \frac{e^{-\lambda\delta(M-i)} [1 - e^{-\mu\delta i} - i(1 - e^{-\mu\delta(i-1)})]}{1 - e^{-\lambda\delta(M-i)} - \mu\delta i} \quad (j=i) \\ = \frac{(M-i)e^{-\lambda\delta(M-i-1)} [(1 - e^{-\lambda\delta})(1 - e^{-\mu\delta i}) + e^{-\lambda\delta}(1 - e^{-\mu\delta i})(1 - e^{-\lambda\delta(i-1)})]}{1 - e^{-\lambda\delta(M-i)} - \mu\delta i} \quad (j=i+1)$$

$$= \frac{\binom{M-i}{j-i} e^{-\lambda\delta(M-j)} [(1 - e^{-\lambda\delta})^{j-i} - e^{-\lambda\delta(j-i)} - \mu\delta i (1 - e^{-\lambda\delta(i-1)})^{j-i}]}{1 - e^{-\lambda\delta(M-i)} - \mu\delta i} \quad (j > i+1) \\ = 0 \quad (j < i) \quad (6)$$

$$F_{1,t}^{\delta,t}(j|i) = e^{-\lambda\delta(M-i)} (1 - e^{-\mu\delta(i-1)}) \quad (j=i) \\ = \binom{M-i}{j-i} e^{-\lambda\delta(M-j)} (1 - e^{-\lambda\delta})^{j-i} \quad (j > i) \\ = 0 \quad (j < i) \quad (7)$$

$$F_{2,t}^{\delta,t}(j|i) = \binom{M-i}{j-i} e^{-\lambda\delta(M-j)} (1 - e^{-\lambda\delta})^{j-i} \quad (j \geq i) \\ = 0 \quad (j < i) \quad (8)$$

次に確率 $Q_{s,fe}(k|j)$ と $Q_{f,fe}(k|j)$ をそれぞれ

$$Q_{s,fe}(k|j)$$

$$= \text{Pr} \{ \text{送信成功、} f_{I+(\delta+L)/t} = f_e, N_{I+(\delta+L)/t} = k \\ | N_{I+\delta/t} = j \}$$

$$Q_{f,fe}(k|j)$$

$$= \text{Pr} \{ \text{送信失敗、} f_{I+(\delta+L)/t} = f_e, N_{I+(\delta+L)/t} = k \\ | N_{I+\delta/t} = j \}$$

と定義すると、これらの確率は次式で与えられる。

$$Q_{S,0}^L(k|j) = e^{-\lambda l(M-j) - \mu l(j-1)} \quad (k=j) \\ = 0 \quad (k > j, k < j) \quad (9)$$

$$Q_{S,1}^L(k|j) = (j-1)(1-e^{-\mu l})e^{-\mu l(j-2) - \lambda l(M-j)} \quad (k=j) \\ = (M-j)(1-e^{-\lambda l})e^{-\lambda l(M-j-1) - \mu l(j-1)} \quad (k=j+1) \\ = 0 \quad (k < j, k > j+1) \quad (10)$$

$$Q_{S,2}^L(k|j) \\ = e^{-\lambda l(M-j)} [1 - e^{-\mu l(j-1)} - (j-1)(1-e^{-\mu l})e^{-\mu l(j-2)}] \quad (k=j) \\ = (M-j)(1-e^{-\lambda l})e^{-\lambda l(M-j-1)}(1-e^{-\mu l(j-1)}) \quad (k=j+1) \\ = \binom{M-j}{k-j}(1-e^{-\lambda l})^{k-j} e^{-\lambda l(M-k)} \quad (k > j+1) \\ = 0 \quad (k < j) \quad (11)$$

$$Q_{F,0}^L(k|j) = e^{-\lambda l(M-j) - \mu l j} \quad (k=j) \\ = 0 \quad (k > j, k < j) \quad (12)$$

$$Q_{F,1}^L(k|j) = j(1-e^{-\mu l})e^{-\mu l(j-1) - \lambda l(M-j)} \quad (k=j) \\ = (M-j)(1-e^{-\lambda l})e^{-\lambda l(M-j-1) - \mu l j} \quad (k=j+1) \\ = 0 \quad (k < j, k > j+1) \quad (13)$$

$$Q_{F,2}^L(k|j) \\ = e^{-\lambda l(M-j)} [1 - e^{-\mu l j} - j(1-e^{-\mu l})e^{-\mu l(j-1)}] \quad (k=j) \\ = (M-j)(1-e^{-\lambda l})e^{-\lambda l(M-j-1)}(1-e^{-\mu l(j-1)}) \quad (k=j+1) \\ = \binom{M-j}{k-j}(1-e^{-\lambda l})^{k-j} e^{-\lambda l(M-k)} \quad (k > j+1) \\ = 0 \quad (k < j) \quad (14)$$

また

$$P^{\delta+L} \cdot t_{S, f_s, f_e} (k|i)$$

$$= P r \{ \text{送信成功、} f^{I+(\delta+L)/t} = f_e, N^{I+(\delta+L)/t} = k$$

$$| f' = f_s, N' = i \}$$

$$P^{\delta+L} \cdot t_{F, f_s, f_e} (k|i)$$

$$= P r \{ \text{送信失敗、} f^{I+(\delta+L)/t} = f_e, N^{I+(\delta+L)/t} = k$$

$$| f' = f_s, N' = i \}$$

とすると、これらは $S_{\delta, t_{fs}}(j|i)$ 、 $F_{\delta, t_{fs}}(j|i)$ 、 $Q_{\delta, s, fe}(k|j)$ 、 $Q_{\delta, F, fe}(k|j)$ を用いて、次の様に表せる。

$$P_{S, fs, fe}^{\delta+e, t}(k|i) = \sum_{j=0}^M S_{fs}^{\delta, t}(j|i) Q_{S, fe}^e(k|j) \quad (15)$$

$$P_{F, fs, fe}^{\delta+e, t}(k|i) = \sum_{j=0}^M F_{fs}^{\delta, t}(j|i) Q_{F, fe}^e(k|j) \quad (16)$$

これらは陽な形の式で表現可能であるが紙面の都合上省略する。

サイクル間遷移確率 $P_{fs, fe}^{t_{fs}, t}(k|i)$ は式 (3) ~ (14) から計算可能である。送信成功の場合にはサイクル終了点でバックログ局数が1局減少するのでサイクル間遷移確率は次の様になる。

$$P_{fs, fe}^{t_{fs}, t}(k|i) = P_{S, fs, fe}^{\delta+T+e, t}(k+1|i) + P_{F, fs, fe}^{\delta+r+e, t}(k|i) \quad (17)$$

ここで $(f, k) = (1, 0)$ 、 $(2, 0)$ 、 $(2, 1)$ の状態は存在しないので、 $\pi_{1, 0}^{t_{fs}, t}$ 、 $\pi_{2, 0}^{t_{fs}, t}$ 、 $\pi_{2, 1}^{t_{fs}, t}$ をそれぞれ 0 とし、式 (1)、(2) を用いて、定常状態確率を求める。

いま

$$A^{t_{fs}, t}(i)$$

= E [競合区間内での各スロットごとのバックログ数の

総和 | $f = f$ 、 $N = i$]

$$A^{t,r,s}(i)$$

= E [競合区間を除いた成功送信区間内での各スロット
ごとのバックログ数の総和 $|f'| = f, N' = i$]

$$A^{t,r,F}(i)$$

= E [競合区間を除いた失敗送信区間内での各スロット
ごとのバックログ数の総和 $|f'| = f, N' = i$]

$$I^{t,r}(i)$$

= E [空き区間長 $|f'| = f, N' = i$]

とすると、1 サイクルにわたるバックログ局数のスロット
ごとの総和の期待値 A^t は

$$A^t = \sum_{f=0}^2 \sum_{i=0}^M \pi_{f,i}^t \{ i \cdot I_f^t(i) + A_{f,U}^t(i) + A_{f,S}^t(i) + A_{f,F}^t(i) \} \quad (18)$$

となる。ここで $A^{t,r,u}(i) \sim I^{t,r}(i)$ は

$$A_{f,U}^t(i) = \sum_{m=1}^{\delta/t} \sum_{k=i}^M k t P_{f,U}^{m,t,t}(k|i) \quad (19)$$

$$A_{f,S}^t(i) = \sum_{m=\delta/t+1}^{(T+\delta)/t} \sum_{k=i}^M k t P_{f,S}^{m,t,t}(k|i) \quad (20)$$

$$A_{f,F}^t(i) = \sum_{m=\delta/t+1}^{(T+\delta)/t} \sum_{k=i}^M k t P_{f,F}^{m,t,t}(k|i) \quad (21)$$

$$P^{m,t,t,r,u}(k|i)$$

$$= \text{Pr} \{ N' + m = k \mid |f'| = f, N' = i \}$$

$$; (1 \leq m \leq \delta / t)$$

$$P^{m,t,t_f,s}(k|i)$$

$$= P^r \{ N^{1+m} = k \mid f^1 = f, N^1 = i \}$$

$$; (\delta / t + 1 \leq m \leq (T + \delta) / t)$$

$$P^{m,t,t_f,r}(k|i)$$

$$= P^r \{ N^{1+m} = k \mid f^1 = f, N^1 = i \}$$

$$; (\delta / t + 1 \leq m \leq (r + \delta) / t)$$

より次式の様に計算できる。

$$A_{0,U}^t(i) = M\delta - \frac{(M-i)t(1-e^{-\lambda\delta})(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i})}{(1-e^{-\lambda t})(1-e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i})} \quad (22)$$

$$A_{0,S}^t(i) = \frac{MT e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta(i-1)} [ie^{-\lambda\delta}(1-e^{-\mu t}) + (M-i)e^{-\mu\delta}(1-e^{-\lambda t})]}{1 - e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i}} - \frac{(M-i)t e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta(i-1)-\lambda t} [ie^{-\lambda\delta}(1-e^{-\mu t}) + (M-i)e^{-\mu\delta}(1-e^{-\lambda t})(1-e^{-\lambda T})]}{(1-e^{-\lambda t})(1-e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i})} \quad (23)$$

$$A_{0,F}^t(i) = Mr - \frac{Mr e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta i} [(M-i)e^{-\lambda\delta}(1-e^{-\mu t}) + ie^{-\mu\delta}(1-e^{-\lambda t})]}{1 - e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i}} - \frac{\left\{ (M-i)t e^{-\lambda(\delta+t)}(1-e^{-\mu t}) (1-e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i}) - (1-e^{-\mu t}) e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta(i-1)} \right\}}{(1-e^{-\lambda t})(1-e^{-\lambda t(M-i)-\mu t i})} \quad (24)$$

$$A_{1,U}^t(i) = M\delta - \frac{(M-i)t(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(\delta+t)})}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (25)$$

$$A_{1,S}^t(i) = e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta(i-1)} \left[MT - \frac{(M-i)t(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(T+t)})}{1 - e^{-\lambda t}} \right] \quad (26)$$

$$A_{1,F}^t(i) = Mr(1 - e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta(i-1)}) - \frac{(M-i)t(e^{-\lambda\delta} - e^{-\lambda\delta(M-i)-\mu\delta(i-1)})(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(r+t)})}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (27)$$

$$A_{2,F}^x(i) = M(r+\delta) - \frac{(M-i)t(e^{-\lambda t} - e^{-\lambda(r+\delta+t)})}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (28)$$

$$I_0^x(i) = \frac{t}{1 - e^{-\lambda t(M-i) - \mu t i}} \quad (29)$$

$$I_1^x(i) = t \quad (30)$$

$$I_2^x(i) = t \quad (31)$$

いま

$$P^{t,s,f}(i)$$

$$= \text{Pr} \{ \text{送信成功} \mid f = f, N = i \}$$

とすると平均サイクル長 L^t とスロット S^t は次式により計算できる。

$$L^t = \sum_{f=0}^2 \sum_{i=0}^M \pi_{f,i}^x \{ I_f^x(i) + \delta + P_{s,f}^x(i) \cdot T + (1 - P_{s,f}^x(i)) \cdot r \} \quad (32)$$

$$S^x = \sum_{f=0}^2 \sum_{i=0}^M \pi_{f,i}^x P_{s,f}^x(i) \cdot T / L^x \quad (33)$$

平均バックログ局数 B^t および平均遅延 D^t はそれぞれ

$$B^t = A^t / L^t \quad (34)$$

$$D^t = B^t / S^t \quad (35)$$

より求められる。

以上の諸式により、1-persistent CSMA-CD方式のスロット長可変型解析が可能となる。

CSMA-CD方式において実際には、全送信局はスロット化された時間に同期して動作するのではなく、連続時間上

で動作を行う。従ってより正確な解析を行うためには、このスロット長を0にした連続時間上での式を得る必要がある。本研究で得た諸式においてロピタルの定理を用いて t を0に近づけると連続型解析の式が得られる。これらの式はスロット型の場合の式より複雑になることはないが、2.の始めで述べたように紙面の都合上省略する。また $t = \delta = \tau$, $r = 2\tau$ とすれば局間最大伝搬遅延時間 τ でスロット化したスロット型モデルに対する式が得られる。

3. 計算結果とシミュレーションとの比較

いま

$$\nu = P r \{ \text{バックログ局において } \tau \text{ 秒あたり再送が行われる} \}$$

とすると

$$\nu = 1 - e^{-\lambda \tau} \quad (36)$$

がなりたつ。

計算結果の一例としてこの ν をパラメータとし、その値を $\nu = 0.01, 0.07$ および 0.1 とした場合の連続型解析の結果、およびシミュレーション結果を図2に示す。この計算およびシミュレーションにおいて総局数 M を50、局間最大

伝搬遅延時間 τ を

5.0×10^{-6} 秒、また

衝突時にはジャムを送

信せず即座に送信を打

ち切るものとし、解析

では $\gamma = 2\delta$ とした。

なおシミュレーション

においては各局は等間

隔に配置されていると

した。

図 2 のグラフにおい

て $\times$ は $\nu = 0.01$ 、 Δ

は 0.07 、 $\circ$ は 0.1 のシミュレーション結果を示す。また

$\nu = 0.01$ に対する $t = \delta = \tau$ 、 $\gamma = 2\tau$ としたスロット

型解析の結果も参考のために示す。図 2 からわかるように本

論文の解析結果とシミュレーション結果は、非常に良く一致

している。

4. むすび

本研究では平均伝搬遅延時間 δ を割り切る限りは任意であ

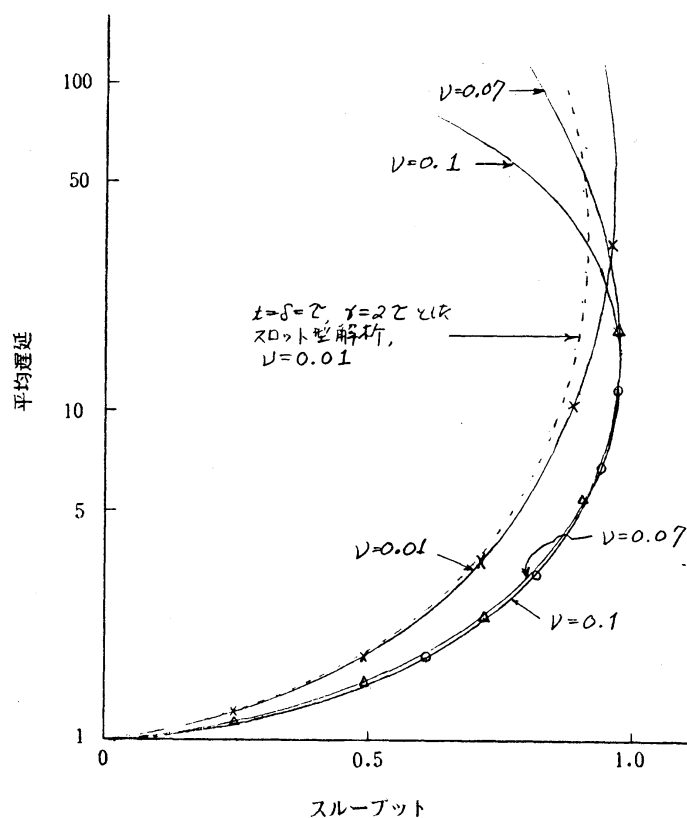


図 2. スループットー遅延特性

るような時間 t で時間軸をスロット化し、さらに送信待ち数に関する状態を3種類に分類して状態の増加を最小限にすることにより、これまで困難とされてきた有限数の局を有する 1-persistent CSMA-CD 方式の解析を可能にした。スロット長を 0 に漸近させることにより連続型解析の式が得られ、また $t = \delta = \tau$, $\gamma = 2\tau$ とすることにより時間 τ でスロット化したシステムに対する式も得られる。シミュレーションを実行した結果連続型解析による結果とシミュレーション結果は非常に良く一致していることが確かめられた。

文献(2)と本研究により non-persistent、および 1-persistent CSMA-CD 方式についてのスロット長可変型および連続時間型解析が与えられたわけであるが、p-persistent CSMA-CD 方式については 1-persistent CSMA-CD 方式よりもさらに状態数が増加するので、その厳密な解析は非常に困難と思われる。従って p-persistent CSMA-CD 方式に対しては、異なった方法による何らかの有効な解析法を見いだす必要がある。

文 献

- (1) F.A.Tobagi and V.B.Hunt: " Performance analysis

of carrier sense multiple access with collision detection", Computer Networks, 4, pp.245-249 (Oct.1980).

(2) C.Fujiwara, S.Hosokawa, K.Yamashita, Y.Ruan and O.Takahashi:"An analysis of CSMA-CD with arbitrary slot size", GLOBECOM'84, pp.35.1.1-5, Atlanta, Georgia, U.S.A. (Nov. 1984).

(3) K.Sohraby, M.L.Molle and A.N.Venetsanopoulos:"Why analytical models of Ethernet-like local networks are so pessimistic", GLOBECOM'84, pp.19.4.1-4.6, Atlanta, Georgia, U.S.A. (Nov. 1984).

(4) 木村："マルチチャネルCSMA/CD方式の連続形解析"、信学論(B)、J68-B, 12, pp.1341-1348 (昭60-12)。

(5) H.Takagi, L.Kleinrock:"Throughput analysis for persistent CSMA Systems", IEEE Trans., Vol. COM-33, 7, pp.627-638 (July 1985).

(6) 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59-2)。