

## 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

正員 田坂 修二<sup>†</sup> 非会員 深谷 和義<sup>†\*</sup>

## An Analysis of Window Flow Control Schemes in CSMA/CD Networks

Shuji TASAKA<sup>†</sup>, Member and Kazuyoshi FUKAYA<sup>†\*</sup>, Nonmember

あらまし 本論文は、CSMA/CD ローカルエリアネットワークの論理リンク制御層においてウィンドウフロー制御を行った場合のシステム性能を解析したものである。媒体アクセス制御プロトコルとしては、slotted nonpersistent CSMA/CD を用いる。フロー制御を実行するために必要な送達確認応答パケット (ACK) の返送方式として、データパケットと ACK との衝突が生じうる非優先 ACK 方式 (NP-ACK) と、ACK の無衝突伝送を実現する一つの優先 ACK 方式 (P-ACK I) とを考える。各端末がマルチパケットメッセージを発生するものとして、これら二つのフロー制御方式の近似マルコフモデルを構成する。これらのモデルに平衡点解析の手法を適用し、各方式のスループット、平均応答時間、安定性の解析を行う。また、ウィンドウサイズとシステム性能との関係についても検討している。その結果として、十分良好な性能が得られるようにウィンドウサイズを適切に選べば、NP-ACK フロー制御方式と P-ACK I フロー制御方式との性能上の差はほとんどなくなることを明らかにしている。

## 1. まえがき

ウィンドウフロー制御方式は、データ通信ネットワークにおけるフロー制御方式の中でも代表的なものであり、多くのプロトコルにおいて用いられている<sup>(1)</sup>。この種のプロトコルとしては、データリンク層における HDLC、ネットワーク層における X.25 などがよく知られている<sup>(1)</sup>。このフロー制御の目的は、いずれも、送・受信局間でのトラヒックの流れを調整し、受信局でのバッファのふくそうを防止することにある。ウィンドウフロー制御方式の性能解析については、これまでも多くの研究が行われている。しかし、その大部分がポイントツーポイントチャネルを用いたネットワークを対象としたものである。なかでも、パケット交換網のネットワーク層におけるウィンドウフロー制御方式の研究は、代表的なものである(例えば、文献(2)、(3)参照)。

これに対して、ローカルエリアネットワーク(LAN)や衛星通信網などの放送形チャネルを用いたネットワーク(放送形通信網)については、フロー制御方式の

性能解析の研究は少ない。これは、放送形通信網では、ポイントツーポイントチャネルネットワークの各プロトコル層に加えて、放送形チャネルの効率的共有を実現するための層、すなわち、媒体アクセス制御(MAC)層(または多元接続層)を必要とするため、解析が複雑になるからである。放送形通信網のフロー制御は、MAC層より上位の層で行われる。従って、そのフロー制御方式を正確に解析するためには、MAC層とフロー制御を実行する上位層の両方を同時にモデル化しなければならない。このモデルは、MAC層の存在のため、ポイントツーポイントチャネルネットワークのフロー制御方式の解析に用いられている通常の待ち行列網理論を単純に適用するだけでは解析できないのである。

CSMA/CD ローカルエリアネットワークは、現在最も普及している放送形通信網である。このため、そのフロー制御方式についても、既にいくつかの性能解析の研究が発表されている<sup>(4)~(6)</sup>。しかし、そのすべての研究において、MAC層、すなわち CSMA/CD プロトコルを実行する層を単一の待ち行列モデルで近似している。この近似によって解析は簡単になる。しかし、一方、システムの安定性などの MAC 層固有の問題や、MAC 層と上位層のシステムパラメータの相互の影響などを、この近似モデルによって調べることはできな

<sup>†</sup>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, 愛知県立名南工業高等学校

い、従って、これらの問題を検討するためには、MAC層と上位層の相互作用が十分反映できるモデルを構築し、解析する必要がある。本論文は、このような観点から、ウィンドウフロー制御方式を解析したものである。

CSMA/CD ネットワークのフロー制御は、データリンク層の論理リンク制御 (LLC) 副層、ネットワーク層、もしくはトランスポート層のいずれにおいても実行できる。単一パスのネットワークでは、ネットワーク層はデータリンク層に縮退するので、本論文では、簡単のため、単一パスを対象とし LLC 副層においてウィンドウフロー制御が行われると考える。従って、網内の任意の端末対において、一方の端末の送信機と他方の端末の受信機との間でフロー制御が行われる。また、本論文で用いる MAC プロトコルは、解析の簡単のため、slotted nonpersistent CSMA/CD<sup>(14)</sup>とする。

1 対の端末間でウィンドウフロー制御を実行するためには、データパケットの受信端末は、送信端末に向けて送達確認応答パケット (ACK) を返送する必要がある。CSMA/CD ネットワークでは、ACK の伝送はデータパケットと同じチャネルを用いて行われるので、ACK とデータパケットの衝突が発生しうる。そこで、ACK にデータパケットに対する優先権を与え、無衝突 ACK 伝送が実現できるようにした特別の ACK 方式が用いられることもある<sup>(7),(8)</sup>。本論文では、ACK 方式として文献(8)で研究されている二つの ACK 方式、非優先 ACK 方式 (NP-ACK) と優先 ACK 方式 (I) (P-ACK I) とを用いる場合について検討を行う。NP-ACK は、ACK の衝突が生じうる通常の方式である。一方、P-ACK I は、何らかの伝送期間の終了直後には ACK の送信のみを許すことによって、無衝突 ACK 伝送を実現するものである。文献(8)では、P-ACK I よりも優れた性能をもつ別の優先 ACK 方式 (P-ACK II) も研究されている。しかし P-ACK II では、データパケットの成功伝送期間、ACK のそれ、失敗伝送期間の 3 種の伝送期間の終了直後を、すべての端末が区別できなければならないという強い制約がある。そのため、本論文では、P-ACK II は検討の対象としない。なお、本論文の解析は、平衡点解析 (EPA)<sup>(9),(10)</sup> の手法を用いて行われる。

以下、本論文では、まず、2. で NP-ACK を用いたフロー制御方式の解析を行い、続いて 3. で P-ACK I を用いた場合について検討する。更に、4. で数値例によって、解析結果の精度を調べるとともに、システムの性

能について考察する。

## 2. NP-ACK フロー制御方式

### 2.1 仮定

本論文では、MAC プロトコルとして、slotted nonpersistent CSMA/CD を用いる。網内の各端末は、一つまたは複数個のデータパケットより成るメッセージを発生する (以下、単にパケットという場合には、データパケットを意味する)。一つの端末の送信機と、その端末とコネクションが確立されている別の端末の受信機との間で、ウィンドウフロー制御が実行される。ウィンドウサイズを  $W$  とすると、各端末は一時に高々  $W$  個のパケットまで連続送信可能である。送信端末が、送るべきパケットがなくなるか、またはウィンドウ一杯までパケットを送信すると (すなわち、ウィンドウが閉じると)、受信端末はそれに対する ACK を返送する。このとき、受信端末は、受信したパケット数を ACK に記入する。ACK を受け取った送信端末は、ACK に記入されているパケット数の分だけ、更にウィンドウを開くことになる。

このシステムをモデル化するために次の仮定を置く。

- (1) システムは  $M$  個の端末をもつ。
- (2) 任意の二つの端末間の伝搬遅延は一定値  $\tau$  秒とし、チャネルの時間軸は長さ  $\tau$  秒のスロットに分割されている。データパケットおよび ACK の送信は、スロットの開始時点でのみ開始される。
- (3) 一つの端末のメッセージ発生間隔は、平均  $1/\sigma$  スロットの指数分布に従う。
- (4) 一つのメッセージに含まれるパケット数は、平均  $h=1/\gamma$  の幾何分布に従う。
- (5) 各端末は、一つのメッセージに含まれるすべてのパケットが相手端末で正しく受信され、それに対する ACK を受信するまでは、次のメッセージを発生しない。
- (6) 1 個のメッセージは、1 個の端末にのみ向けられる (同報送信は考えない)。
- (7) 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。
- (8) 一つの端末が、ある時点において、送信できるデータパケットまたは ACK をもっているとき、その端末はレディ (ready) であるという。一つのスロット内でレディとなった端末は、次のスロットの開始時点でチャネルを検知する。

(9) 各端末がチャネルを検知する際、チャネル上のキャリヤの有無は瞬時に判別される。

(10) データパケットまたは 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。

(11) 一つの端末がデータパケットまたは ACK の送信に失敗した場合や、チャネルを検知してビジーであった場合、あるいは送るべきパケットをもっているがウィンドウが閉じている端末が ACK を受信した場合、それらの端末は平均  $1/\mu$  スロットの指数分布に従う遅延の後にレディとなる。

(12) ウィンドウサイズ  $W$  のウィンドウフロー制御を行う。

(13) 自分あての一連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。このときの受信データパケット数は、送信側で発生したメッセージの長さが  $W$  以下の場合には全メッセージ分となる。一方、メッセージ長が  $W$  を超えると、 $W$  個のものがいくつかとその残り ( $W$  個以下) が一つとなる。この点については、後に更に定量的に議論する。

(14) 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。

(15) 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。また、複数個の ACK の再送要求がある場合には先着順とする (一つの ACK の最初の送信は仮定(13)に従う)。

(16) データパケットまたは 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。

(17) データリンクコネクションの確立および解放フェーズは無視し、データ転送フェーズのみを考える。

ここに、後のモデル化の準備として、一つのメッセージに含まれるすべてのパケットを送信してしまうのに必要な成功送信回数について述べておく。仮定(5)および(12)より、一つのメッセージに含まれるパケット数が  $W$  個以下の場合には 1 回の成功で十分であり、 $(W+1)$  個以上であると複数回の成功が必要になることは明らかである。一つのメッセージに含まれるパケット数が  $t$  個 ( $1 \leq t \leq W$ ) である確率を  $q_t$ 、 $(W+1)$  個以上である確率を  $q_M$  とすると、仮定(4)より次式が成立する。

$$q_t = (1-\gamma)^{t-1} \gamma, \quad t=1, 2, \dots, W \quad (1)$$

$$q_M = (1-\gamma)^W \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^W q_t + q_M = 1 \quad (3)$$

従って、一つのメッセージが発生すると、確率  $q_M$  で複数回の送信成功が必要になる。

## 2.2 モデル

上記の仮定のもとで、システムのマルコフモデルを構成するためには、まず、システムの取りうるすべての状態を見出して、しかる後にそれらの状態間の遷移の関係を指定しなければならない。こうして得られるモデルを、平衡点解析 (EPA) では、モード遷移図と呼んでいる。現システムでは、システムの取りうる状態の数が膨大なものとなるため、厳密なモード遷移図を書き下すことは困難である。この状態数の増大は、今の場合、各端末について、自分のメッセージの送信活動に伴う状態と他端末から受信したメッセージに対する ACK の送信活動に伴う状態という 2 種類の状態を同時に考慮しなければならないことに起因する。この問題の複雑さは、LLC 層を考慮することによって生じたものである。MAC 層のみを考える場合には、問題とならないことは明らかであろう。

さて、取り扱うべき状態数を削減し、上記のモデル化に伴う困難さを回避するために、文献(11)で提案されている ACK 仮説 (ACK assumption) を本論文でも用いることにする。すなわち、

[ACK 仮説] 各端末が、他端末あてに返送する ACK の送信活動に伴う状態をすべて無視する。言い換えると、一つの端末が送信したメッセージがどの端末に向けられたものであるかということは、モデルには反映しない。

ここで、各端末に関係する ACK には、2 種類あることに注意されたい。すなわち、自分が他端末に向けて送信する ACK と、他端末から受信する ACK とがある。ACK 仮説は、このうち前者を無視しようというものであり、後者は考慮される。しかし、その ACK がどの端末から送信されたものであるかはモデル化しないのである。この意味は、後に実際のモデルの説明を見れば、より明りょうになるであろう。ACK 仮説について更に詳しくは、文献(11)を参照されたい。

ACK 仮説を用いて構成された近似モデルを図 1 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。このモデルを作成するに当たって、更にもう一つ次の近似を用いている。

[メッセージ長の近似] ウィンドウが閉じている端末がACKを受信したとき、次に送信しようとするパケット数は、平均  $h=1/\gamma$  の幾何分布に従って新たに決定される。

この近似は、個々の端末については、厳密な意味では正しくない。しかし、システム全体の統計量を考える場合には、幾何分布の無記憶性により妥当なものとなる。

図1において、四角の箱がモードを表す。この図は、スロット単位のモード遷移図となっている。モードのうち、添字に  $M$  の付いているものはすべて、そのモードにある端末が送信前に  $W$  個より多いパケットをもっていたことを意味している。個々のモードの意味は次のとおりである。まず、 $T$  モードは、送信すべきメッセージをもっていない状態である。 $B$  モードは、パケットの送信のために、再スケジュールを行っている状態である。このモードに入るのは、パケットの送信に失敗したか、チャネルの検知結果がビジーであったか、パケットをもっているにもかかわらずウィンドウが閉じた後ACKを受信したか、のいずれかの場合である。

$S_{it}$  ( $1 \leq t \leq W$ ,  $0 \leq i \leq tH$ ) モードは、 $t$  個のパケットの連続送信に成功し、 $i$  スロット後にその送信を終了する状態である。 $S_{Mv}$  ( $0 \leq v \leq WH$ ) モードも、 $W$  個のパケットの送信に成功した状態であり、 $v$  スロット後に送信を終了する。但し、 $S_{M,WH} \sim S_{M0}$  モードを通過し終えた端末のウィンドウは閉じてしまう。 $S_{i0}$ ,  $S_{M0}$  モードは、パケットの送信を終え、それが受信されるのを待っている状態であり、チャネル伝搬遅延の影響を表している。この二つのモードに端末がある場合には、次のスロットの開始時点で必ず相手端末によるACKの返送が開始される。一方、 $F_j$  ( $0 \leq j \leq K$ ) モードは、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である。このうち、 $F_0$  モードは、 $S_{i0}$ ,  $S_{M0}$  モードと同じく伝搬遅延の影響を表している。なお、このモデルでは、 $T$  または  $B$  モードにある端末は、パケット送信開始後直ちに  $S_{i,WH}$  ( $1 \leq t \leq W$ ),  $S_{M,WH}$ , または  $F_K$  モードのいずれかに遷移している。これは、パケット送信開始時に直ちに成功か失敗かのいずれかに運命付けられるという意味であって、送信端末がそのことを直ちに知ることができるという意味ではないことに注意されたい。成否を知ることができるのは、あく

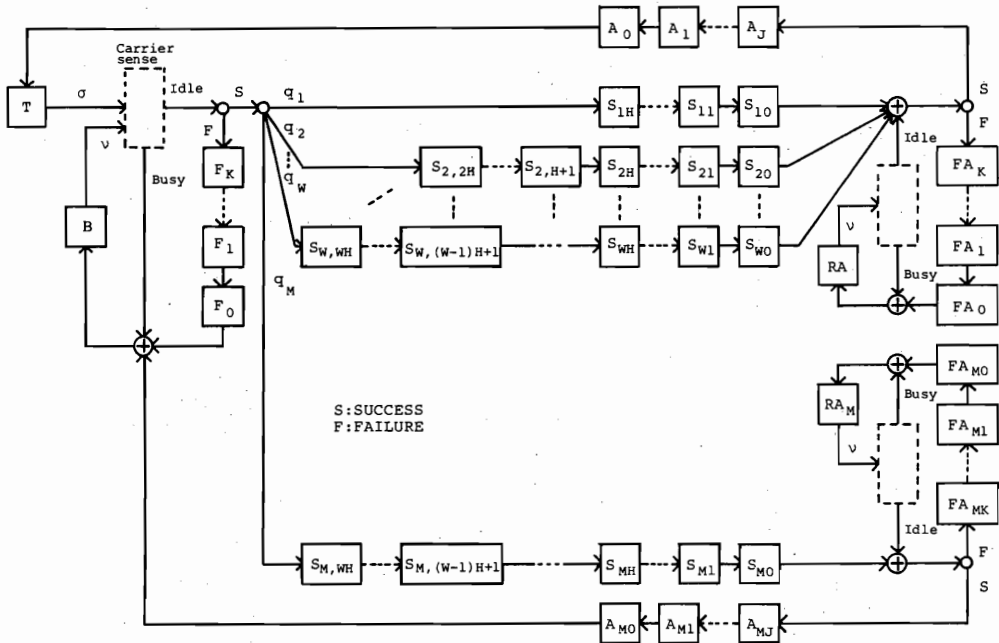


図1 NP-ACK フロー制御方式を用いた slotted nonpersistent CSMA/CD ネットワークの近似モデル

Fig. 1 An approximate model of a slotted nonpersistent CSMA/CD network with the NP-ACK flow control scheme.

までも 1 スロット後である。

残りのモードはすべて、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返送する ACK の送信状況を表現したものである。RA, RA<sub>M</sub> モードは、ACK の送信に失敗したか、または、チャネルの検知結果がビジーであったので、ACK 送信のために再スケジュールを行っている状態である。A<sub>k</sub>, A<sub>Mk</sub> (0 ≤ k ≤ J) モードは、ACK の送信に成功した状態、FA<sub>j</sub>, FA<sub>Mj</sub> (0 ≤ j ≤ K) モードは、ACK の送信に失敗した状態である。今、例えば、一つの端末 (端末 a としよう) が A<sub>j</sub> モードにあるとする。このとき、端末 a からのパケットを受信した別の端末 (端末 b とする) が ACK の送信に成功し J スロット後に送信を完了することになる。その際、ACK 仮説は、端末 b がどの端末であるのかはモデルに反映しないのである。このように、ACK 仮説は、各端末の状態について、データパケットは送信側の動作を用いて、ACK は受信側の動作を用いて記述するものであるとも言える。

以上より明らかなように、図 1 のモデルは、ACK 仮説とメッセージ長の近似とを用いた近似モデルである。しかし、これが十分良い近似となることは後の数値例で示される。

### 2.3 解 析

まず、解析を簡単にするために、EPA の適用に際してしばしば行われるように、σ ≤ ν と仮定してモデルの変形<sup>(10)</sup>を行う。変形モデルの一部を図 2 に示す。図 2 においては、図 1 のモデルの T および B モードは、確率的に等価な TH および TR モードに変換されている。T モードは、TH と TR の継続した二つのモード

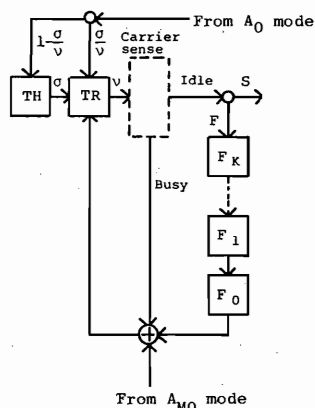


図 2 変形モデルの一部 (σ ≤ ν のとき)

Fig. 2 A part of the modified model in the case of σ ≤ ν.

に分割され、B モードは TR モードの一部になっている。

変形モデルにおいて、TR モードにある端末数を n<sub>1</sub> とする。これを TR → n<sub>1</sub> という記号で表す。他のモードについても同様に、RA → n<sub>2</sub>, RA<sub>M</sub> → n<sub>3</sub>, S<sub>ti</sub> (1 ≤ t ≤ W, 0 ≤ i ≤ tH) → m<sub>ti</sub>, S<sub>Mv</sub> (0 ≤ v ≤ WH) → m<sub>Mv</sub>, A<sub>k</sub> (0 ≤ k ≤ J) → x<sub>k</sub>, A<sub>Mk</sub> (0 ≤ k ≤ J) → z<sub>k</sub>, F<sub>j</sub> (0 ≤ j ≤ K) → l<sub>j</sub>, FA<sub>j</sub> (0 ≤ j ≤ K) → y<sub>j</sub>, FA<sub>Mj</sub> (0 ≤ j ≤ K) → w<sub>j</sub> とする。このとき、状態ベクトル **n** ≡ (n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub>, m<sub>ti</sub>, m<sub>Mv</sub>, x<sub>k</sub>, z<sub>k</sub>, l<sub>j</sub>, y<sub>j</sub>, w<sub>j</sub>; 1 ≤ t ≤ W, 0 ≤ i ≤ tH, 0 ≤ v ≤ WH, 0 ≤ k ≤ J, 0 ≤ j ≤ K) はスロットごとに状態遷移が起きるマルコフ連鎖となる。

さて、現スロットの開始時点でシステムが状態 **n** にあるとしよう。このとき、次のスロットの開始時点でチャネルがアイドルであるという条件のもとで、データパケットの送信に成功する確率を、s<sub>1</sub>(**n**) で表す。また、同じ条件の下で、一つのメッセージに含まれるすべてのデータパケットの伝送終了に対する ACK (以下、ACK<sub>E</sub> と記す) の送信に成功する確率を s<sub>2</sub>(**n**)、ウィンドウが閉じて送信が中断されたメッセージ (すなわち、W 個一杯のデータパケット) に対する ACK (同じく、ACK<sub>M</sub>) のそれを s<sub>3</sub>(**n**) で表す。更に、

$$P_1(\mathbf{n}) = \begin{cases} 1, & \text{次のスロットの開始時点で} \\ & \text{チャネルがアイドルのとき} \\ 0, & \text{ビジーのとき} \end{cases} \quad (4)$$

とすると、次式が成立する

$$s_1(\mathbf{n})P_1(\mathbf{n}) = \left\{ P_1(\mathbf{n}) - \sum_{t=1}^W m_{t0} - m_{M0} \right\} n_{1\nu} \cdot e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} e^{-n_{3\nu}} \quad (5)$$

$$s_2(\mathbf{n})P_1(\mathbf{n}) = \left\{ P_1(\mathbf{n}) - \sum_{t=1}^W m_{t0} - m_{M0} \right\} e^{-n_{1\nu}} \cdot n_{2\nu} e^{-n_{2\nu}} e^{-n_{3\nu}} + \sum_{t=1}^W m_{t0} e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} e^{-n_{3\nu}} \quad (6)$$

$$s_3(\mathbf{n})P_1(\mathbf{n}) = \left\{ P_1(\mathbf{n}) - \sum_{t=1}^W m_{t0} - m_{M0} \right\} \cdot e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} n_{3\nu} e^{-n_{3\nu}} + m_{M0} e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} e^{-n_{3\nu}} \quad (7)$$

但し、上式においては、状態 **n** でキャリヤセンスする TR, RA, RA<sub>M</sub> モードの端末数が、それぞれ平均 n<sub>1ν</sub>, n<sub>2ν</sub>, n<sub>3ν</sub> のポアソン分布に従うと近似している。これは、2 項分布をポアソン分布で近似することに相当し、EPA における解析を容易にする<sup>(10)</sup>。以下においても、この近似を用いる。

状態 **n** が与えられたとき、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き期待値を求めて0とおき、その結果の独立な式をまとめると次のようになる。

$$\left\{ M - n_1 - n_2 - n_3 - \sum_{t=1}^W \sum_{i=0}^{tH} m_{ti} - \sum_{v=0}^{WH} m_{Mv} - \sum_{j=0}^K (1_j + y_j + w_j) - \sum_{k=0}^J (x_k + z_k) \right\} \sigma = (1 - \sigma) \nu x_0 \quad (8)$$

$$m_{t0} = m_{t1} = \dots = m_{t,tH-1} = m_{t,tH} = q_{tS_1}(\mathbf{n}) P_t(\mathbf{n}), \quad 1 \leq t \leq W \quad (9)$$

$$m_{M0} = m_{M1} = \dots = m_{M,WH-1} = m_{M,WH} = q_{MS_1}(\mathbf{n}) P_t(\mathbf{n}) \quad (10)$$

$$l_0 = l_1 = \dots = l_K = \{n_{1\nu} - s_1(\mathbf{n})\} P_t(\mathbf{n}) \quad (11)$$

$$x_0 = x_1 = \dots = x_J = s_2(\mathbf{n}) P_t(\mathbf{n}) \quad (12)$$

$$z_0 = z_1 = \dots = z_J = s_3(\mathbf{n}) P_t(\mathbf{n}) \quad (13)$$

$$y_0 = y_1 = \dots = y_K = n_{2\nu} P_t(\mathbf{n}) + \sum_{i=1}^W m_{i0} - s_2(\mathbf{n}) P_t(\mathbf{n}) \quad (14)$$

$$w_0 = w_1 = \dots = w_K = n_{3\nu} P_t(\mathbf{n}) + m_{M0} - s_3(\mathbf{n}) P_t(\mathbf{n}) \quad (15)$$

$$n_{2\nu} P_t(\mathbf{n}) = y_0 \quad (16)$$

$$n_{3\nu} P_t(\mathbf{n}) = w_0 \quad (17)$$

以上の連立方程式の解が平衡点  $\mathbf{n}_e \triangleq (n_{1e}, n_{2e}, n_{3e}, m_{tie}, m_{Mve}, x_{ke}, z_{ke}, l_{je}, y_{je}, w_{je} : 1 \leq t \leq W, 0 \leq i \leq tH, 0 \leq v \leq WH, 0 \leq k \leq J, 0 \leq j \leq K)$  である。平衡点  $\mathbf{n}_e$  を求めるためには、 $P_t(\mathbf{n}_e)$  の関係式が必要である。EPA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<sup>(10)</sup>。従って、 $E[P_t(\mathbf{n})] = P_t(\mathbf{n}_e)$  とする。これより、 $P_t(\mathbf{n})$  は0または1の整数値であるのに対し、 $P_t(\mathbf{n}_e)$  は0と1の間の実数値となることに注意されたい。一方、式(4)より、 $E[P_t(\mathbf{n})] = \Pr[P_t(\mathbf{n})=1]$  となるから、 $P_t(\mathbf{n}_e) = \Pr[P_t(\mathbf{n})=1]$  と近似する。すなわち、 $P_t(\mathbf{n}_e)$  を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近似する。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、 $S_{it} (1 \leq t \leq W, 1 \leq i \leq tH)$ ,  $S_{Mv} (1 \leq v \leq WH)$ ,  $A_k, A_{Mk} (1 \leq k \leq J)$ ,  $F_j, FA_j, FA_{Mj} (1 \leq j \leq K)$  のいずれのモードにも一つの端末も存在しないときである。このことより、次式が成立する。

$$P_t(\mathbf{n}_e) = 1 - \sum_{i=1}^W \sum_{t=1}^{tH} \Pr[m_{ti}=1] - \sum_{v=1}^{WH} \Pr[m_{Mv}=1] - \sum_{k=1}^J \Pr[(x_k + z_k)=1] - \sum_{j=1}^K \Pr[(1_j + y_j + w_j) \geq 2] \quad (18)$$

ここで、データパケットまたはACKの衝突が生じる確率を  $\bar{P}_c$  とすると

$$\Pr[(l_j + y_j + w_j) \geq 2] = \bar{P}_c : j=0, 1, \dots, K \quad (19)$$

となる。更に、 $P_t(\mathbf{n}_e) = \Pr[P_t(\mathbf{n})=1]$  の近似と同様の議論を  $m_{ti}, m_{Mv}, x_k, z_k$  に適用すると、式(18)は次のようになる。

$$P_t(\mathbf{n}_e) = 1 - \sum_{i=1}^W \sum_{t=1}^{tH} m_{tie} - \sum_{v=1}^{WH} m_{Mve} - \sum_{k=1}^J (x_{ke} + z_{ke}) - K \bar{P}_c \quad (20)$$

$\bar{P}_c$  を求めるために、状態  $\mathbf{n}$  が与えられたときにデータパケットまたはACKの衝突が生じるという条件付き確率  $P_c(\mathbf{n})$  を考える。まず、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、またはデータパケットとACKとが衝突する)確率を  $P_{c1}(\mathbf{n})$  とする。次に、ACK<sub>E</sub> 同士のみの衝突が生じる確率を  $P_{c2}(\mathbf{n})$ , ACK<sub>M</sub> 同士のみの衝突が生じる確率を  $P_{c3}(\mathbf{n})$  とする。更に、ACK<sub>E</sub> とACK<sub>M</sub> とが衝突する確率を  $P_{c4}(\mathbf{n})$  とすると、 $P_c(\mathbf{n})$  はこれらの総和になる。すなわち、

$$P_c(\mathbf{n}) = P_{c1}(\mathbf{n}) + P_{c2}(\mathbf{n}) + P_{c3}(\mathbf{n}) + P_{c4}(\mathbf{n}) \quad (21)$$

$P_{c1}(\mathbf{n}) \sim P_{c4}(\mathbf{n})$  は、式(5)~(7)と同様の考え方で求められ、次のようになる。

$$P_{c1}(\mathbf{n}) = P_t(\mathbf{n}) \{1 - e^{-n_{1\nu}} - s_1(\mathbf{n})\} \quad (22)$$

$$P_{c2}(\mathbf{n}) = \sum_{i=1}^W m_{i0} (1 - e^{-n_{2\nu}}) e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{3\nu}} + \left\{ P_t(\mathbf{n}) - \sum_{i=1}^W m_{i0} - m_{M0} \right\} (1 - e^{-n_{2\nu}} - n_{2\nu} \nu e^{-n_{2\nu}}) e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{3\nu}} \quad (23)$$

$$P_{c3}(\mathbf{n}) = m_{M0} (1 - e^{-n_{3\nu}}) e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} + \left\{ P_t(\mathbf{n}) - \sum_{i=1}^W m_{i0} - m_{M0} \right\} (1 - e^{-n_{3\nu}} - n_{3\nu} \nu e^{-n_{3\nu}}) e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} \quad (24)$$

$$P_{c4}(\mathbf{n}) = \sum_{i=1}^W m_{i0} (1 - e^{-n_{3\nu}}) e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{2\nu}} + m_{M0} (1 - e^{-n_{2\nu}}) e^{-n_{1\nu}} e^{-n_{3\nu}} + P_t(\mathbf{n}) (1 - e^{-n_{2\nu}}) (1 - e^{-n_{3\nu}}) e^{-n_{1\nu}} \quad (25)$$

$\bar{P}_c = E[P_c(\mathbf{n})]$  であり、 $E[P_c(\mathbf{n})] = P_c(\mathbf{n}_e)$  とするから、 $\bar{P}_c$  は次式のように表される。

$$\bar{P}_c = [1 - s_1(\mathbf{n}_e) - \{1 + (n_{2e} + n_{3e})\nu(1 - s_1(\mathbf{n}_e))\} e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu}] \cdot P_t(\mathbf{n}_e) \quad (26)$$

次に、式(26)を式(20)に代入する。更に、 $\mathbf{n} = \mathbf{n}_e$  として式(9), (10), (12), (13)を用いて、式(20)を  $P_t(\mathbf{n}_e)$  について解くと次式が得られる。

$$P_t(\mathbf{n}_e) = \left[ 1 + H \left( \sum_{i=1}^W t q_t + W q_M \right) s_1(\mathbf{n}_e) \right]$$

$$\begin{aligned}
 &+ J\{s_2(\mathbf{n}_e) + s_3(\mathbf{n}_e)\} \\
 &+ K[1 - s_1(\mathbf{n}_e) - \{1 + (n_{2e} + n_{3e}) \\
 &\cdot \nu(1 - s_1(\mathbf{n}_e))\}e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu}]^{-1} \quad (27)
 \end{aligned}$$

また、 $\mathbf{n} = \mathbf{n}_e$  として式(9)、(10)を式(5)~(7)に代入し、それぞれ  $s_1(\mathbf{n}_e)$ ,  $s_2(\mathbf{n}_e)$ ,  $s_3(\mathbf{n}_e)$  について解くと次式が得られる。

$$s_1(\mathbf{n}_e) = \frac{n_{1e}\nu e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu}}{1 + n_{1e}\nu e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu}} \quad (28)$$

$$s_2(\mathbf{n}_e) = \left\{ n_{2e}\nu + \left( \sum_{i=1}^W q_i - n_{2e}\nu \right) s_1(\mathbf{n}_e) \right\} \cdot e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu} \quad (29)$$

$$s_3(\mathbf{n}_e) = \left\{ n_{3e}\nu + (q_M - n_{3e}\nu) s_1(\mathbf{n}_e) \right\} \cdot e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu} \quad (30)$$

$\mathbf{n} = \mathbf{n}_e$  として式(9)、(10)を式(14)、(15)に代入し、式(16)、(17)を利用すると、 $s_2(\mathbf{n}_e)$ ,  $s_3(\mathbf{n}_e)$  はそれぞれ、

$$s_2(\mathbf{n}_e) = \sum_{i=1}^W q_i s_1(\mathbf{n}_e) \quad (31)$$

$$s_3(\mathbf{n}_e) = q_M s_1(\mathbf{n}_e) \quad (32)$$

となる。上式を、式(29)、(30)に代入し、更にその結果の式に式(28)を代入すると、次のようになる。

$$n_{3e} = -n_{1e} - n_{2e} - (1/\nu) \cdot \ln \left\{ 1 - n_{2e} / \left( n_{1e} \sum_{i=1}^W q_i \right) \right\} \quad (33)$$

$$q_M n_{1e}\nu = n_{3e}\nu + q_M n_{1e}\nu e^{-(n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu} \quad (34)$$

更に、 $\mathbf{n} = \mathbf{n}_e$  として式(9)~(17)を式(8)に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 &\left[ M - n_{1e} - n_{2e} - n_{3e} - P_I(\mathbf{n}_e) \left[ \left\{ H \left( \sum_{i=1}^W q_i \right) \right. \right. \right. \\
 &+ Wq_M + 1 \left. \right\} s_1(\mathbf{n}_e) + (J - K) \{ s_2(\mathbf{n}_e) \\
 &+ s_3(\mathbf{n}_e) \} + (K + 1) (n_{1e} + n_{2e} + n_{3e})\nu \left. \right] \sigma \\
 &= (1 - \sigma/\nu) s_2(\mathbf{n}_e) P_I(\mathbf{n}_e) \quad (35)
 \end{aligned}$$

連立方程式(27)~(30)、(33)~(35)は、 $n_{1e}$ ,  $n_{2e}$ ,  $n_{3e}$  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。

次に、スループット (throughput)  $\bar{S}$  と平均応答時間 (average response time)  $D_r$  とを計算しよう。スループットは、1 データパケット伝送時間当り正しく伝送される平均データパケット数と定義される。また、平均応答時間は、一つのメッセージが発生してからそのすべてのデータパケットの伝送が完了し、それに対する ACK が正しく受信されるまでの平均時間と定義され、1 データパケット伝送時間を単位として表される。

まず、状態  $\mathbf{n}$  における条件付きスループット  $S(\mathbf{n})$  は、

$$S(\mathbf{n}) = \sum_{i=1}^W \sum_{t=1}^{Ht} m_{it} + \sum_{d=1}^{WH} m_{Md} \quad (36)$$

となる。 $\bar{S} = S(\mathbf{n}_e)$  とするので、式(9)、(10)より次式が得られる。

$$\bar{S} = \left( \sum_{i=1}^W tq_i + Wq_M \right) H s_1(\mathbf{n}_e) P_I(\mathbf{n}_e) \quad (37)$$

また、 $D_r$  は図1のモデルにリトルの公式を適用することによって、次式のように表される。

$$\begin{aligned}
 D_r = &\left( \sum_{i=1}^W tq_i + Wq_M \right) M / \left( \bar{S} \sum_{i=1}^W q_i \right) \\
 &- 1 / (\sigma H) + 1 / (2H) \\
 &[\text{単位: データパケット伝送時間}] \quad (38)
 \end{aligned}$$

但し、上式の右辺第3項は、メッセージの発生時点がスロット内で一様分布していることを考慮したものである。

### 3. P-ACK I フロー制御方式

本章では、ACK 方式として優先 ACK 方式 (I) (P-ACK I)<sup>(8)</sup> を用いるフロー制御方式について考える。P-ACK I では、何らかの伝送期間 (データパケットの成功伝送期間、または ACK のそれ、または失敗伝送期間) の終了直後には、ACK の送信開始のみを許し、データパケットの送信は禁止する。ACK の送信は、データパケットの成功伝送期間の終了直後にのみ開始される。しかも仮定(6)より、このとき送信される ACK は1個だけである。従って、上記の送信規則により、データパケットと ACK との衝突はもちろん、ACK 同士の衝突もなくなり ACK の無衝突伝送が実現できる。P-ACK I を実現するために、前章の仮定(1)~(17)のほかに、次の仮定(18)を置く。

(18) データパケットの送信のために、何らかの伝送期間の終了直後にチャネルを (アイドルと) 検知した端末は、あたかもビジーと検知したかのように動作する。

仮定(18)の導入によって、前章の仮定(1)~(17)も、ACK が衝突した場合を除くように修正しなければならない。この修正は容易であるので、ここでは記さない。

P-ACK I を用いる場合のモデルは、NP-ACK に対するモデルから ACK の衝突に対応するモードを除去し、仮定(18)を組み込むことによって得られる。すなわち、図1のモデルにおいて、 $RA$ ,  $FA_0 \sim FA_K$ ,  $RAM$ ,  $FA_{M0} \sim FA_{MK}$  モードを除去し、キャリアセンスの結果

がアイドルであっても何らかの伝送期間の終了直後ならば B モードに入るように修正すればよい。解析には、前章と同じく変形モデルを用いる。

各モードにある端末数を表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と、今の場合、状態ベクトル  $\mathbf{n}$  は、 $\mathbf{n} \triangleq (n_i, m_{ti}, m_{Mv}, x_k, z_k, l_j, : 1 \leq t \leq W, 0 \leq i \leq tH, 0 \leq v \leq WH, 0 \leq k \leq J, 0 \leq j \leq K)$  となる。残りの解析は、前章と同様にしてできるので、次に最終結果のみを示す。解析の詳細は、文献(12)を参照されたい。

$$P_i(\mathbf{n}_e) = \frac{2 - e^{-n_{1e}v} - n_{1e}v e^{-n_{1e}v}}{\left[ (2 - e^{-n_{1e}v} - n_{1e}v e^{-n_{1e}v}) \{ 1 + H \cdot \left( \sum_{t=1}^W t q_t + W q_M \right) s_1(\mathbf{n}_e) + J s_1(\mathbf{n}_e) \} + K (1 - e^{-n_{1e}v} - n_{1e}v e^{-n_{1e}v}) \cdot \{ 1 - 2s_1(\mathbf{n}_e) \} \right]} \quad (39)$$

$$s_1(\mathbf{n}_e) = \frac{n_{1e}v e^{-n_{1e}v}}{2 - e^{-n_{1e}v} + n_{1e}v e^{-n_{1e}v}} \quad (40)$$

$$\left[ M - n_{1e} - s_1(\mathbf{n}_e) P_i(\mathbf{n}_e) \left\{ H \left( \sum_{t=1}^W t q_t + W q_M \right) + J - K + 1 + (K+1) e^{n_{1e}v} \right\} \right] \sigma = (1 - \sigma/v) \sum_{t=1}^W q_t s_1(\mathbf{n}_e) P_i(\mathbf{n}_e) \quad (41)$$

連立方程式(39)~(41)は、 $n_{1e}$  に関して数値的に解くことができる。スループット  $\bar{S}$  と平均応答時間  $D_r$  は、前章と同じく、それぞれ式(37)、(38)で与えられる。

#### 4. 数値例および考察

本章では、まず、2.および3.で得られた解析結果をシミュレーション結果と比較することによって、近似解析の精度を調べる。続いて、NP-ACK フロー制御方式と P-ACK I フロー制御方式の性能を比較する。更に、ウィンドウサイズ  $W$  とシステム性能との関係についても考察する。以下の数値例では、 $M=100, H=10, J=H/10, K=1$  とする。

図3~6に、 $h=2.0$  とした場合のスループットおよび平均応答時間とスケジューリングレートとの関係を示す。図3、図4は、NP-ACK フロー制御方式に対するものであり、入力率  $MohH$  を、それぞれ0.4、0.8としたものである。一方、図5、図6は、P-ACK I フロー制御方式の場合であり、それぞれ  $MohH=0.4, 0.8$  となっている。図3~6のいずれにおいても、 $W$

$= 1, 2, 5, 16$  としている。これらの図における解析結果とシミュレーション結果の表示方法は、EPAの慣例(10)に従っている。すなわち、解析結果は、実線と破線で示す。但し、破線は、システムが双安定なとき、スループットが大きい方の局所安定平衡点に対する特性である。シミュレーション結果は、2種類示してある。黒く塗りつぶしてある方は、シミュレーションの初期状態を、すべての端末が送るべきメッセージをもっているが他端末あてのACKはもっていないとしたものである。一方、塗りつぶしてない方は、すべての

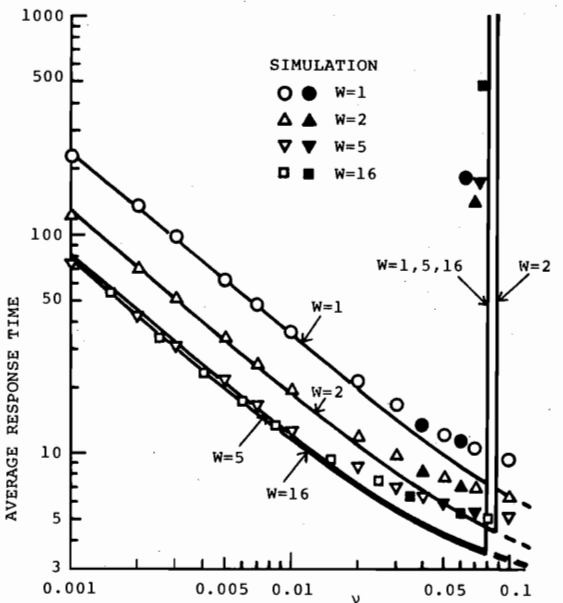
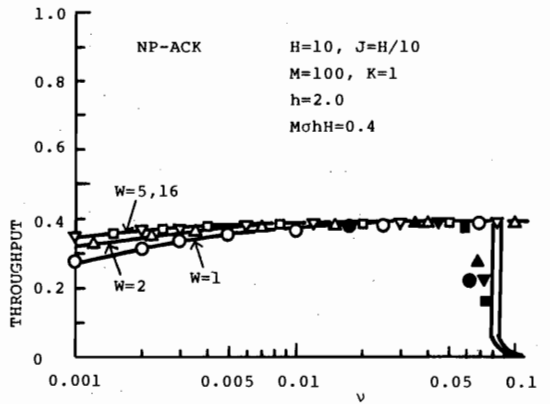


図3 NP-ACK フロー制御方式のスループットおよび平均応答時間特性(1) :  $h=2, MohH=0.4$

Fig.3 The throughput and average response time versus scheduling rate for NP-ACK flow control (1) :  $h=2, MohH=0.4$ .



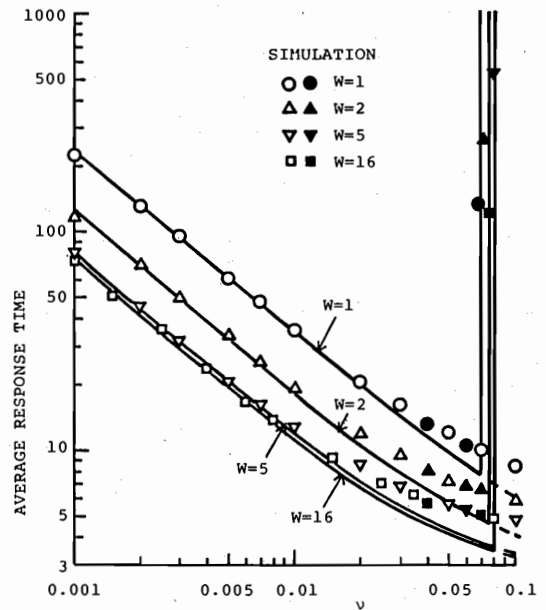
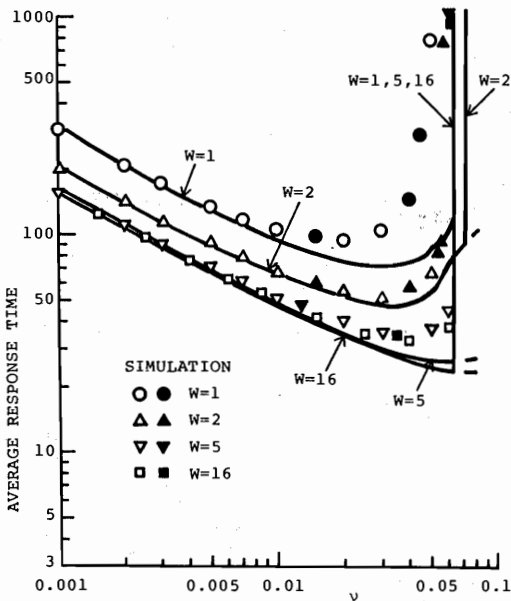
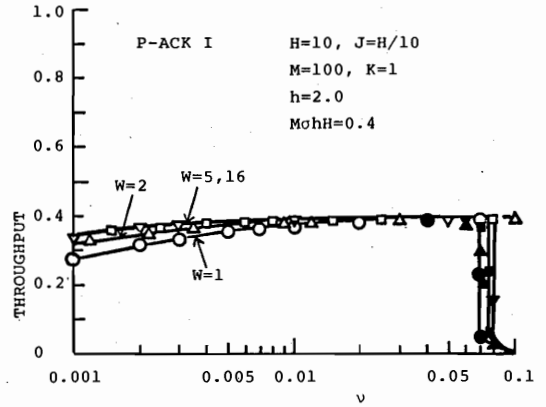
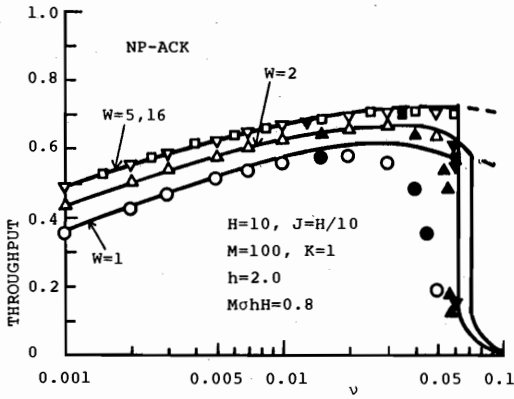


図4 NP-ACK フロー制御方式のスループットおよび平均応答時間特性(2) :  $h=2, MohH=0.8$

Fig.4 The throughput and average response time versus scheduling rate for NP-ACK flow control (2) :  $h=2, MohH=0.8$ .

図5 P-ACK I フロー制御方式のスループットおよび平均応答時間特性(1) :  $h=2, MohH=0.4$

Fig.5 The throughput and average response time versus scheduling rate for P-ACKI flow control (1) :  $h=2, MohH=0.4$ .

端末がメッセージも ACK ももっていないとした初期状態のものである。

シミュレーションは、NP-ACKでは仮定(1)~(17)、P-ACKIでは仮定(1)~(17)を修正したものと仮定(18)のもとで行われた。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メッセージを送信するとした。また、一つのシミュレーションランの長さは 10000 hH スロットとし、各端末がメッセージも ACK ももっていない初期状態については、シングルラン法により 95%信頼

区間を求めた。信頼区間は図には記入していないが、ほとんどの場合において、図の○、△、▽、□の中に入っていた。

まず、解析結果の精度から検討しよう。NP-ACK(図3および図4)については、 $W=1, MohH=0.8$ の場合以外は、理論値とシミュレーション値はよく一致している。一方、P-ACK I(図5および図6)では、全般に両者はよく一致している。図3~6のいずれにおいても、安定なシステムにおいて、 $\nu$ の値が大きくなるにつれ解析結果の誤差がやや大きくなっている。これは

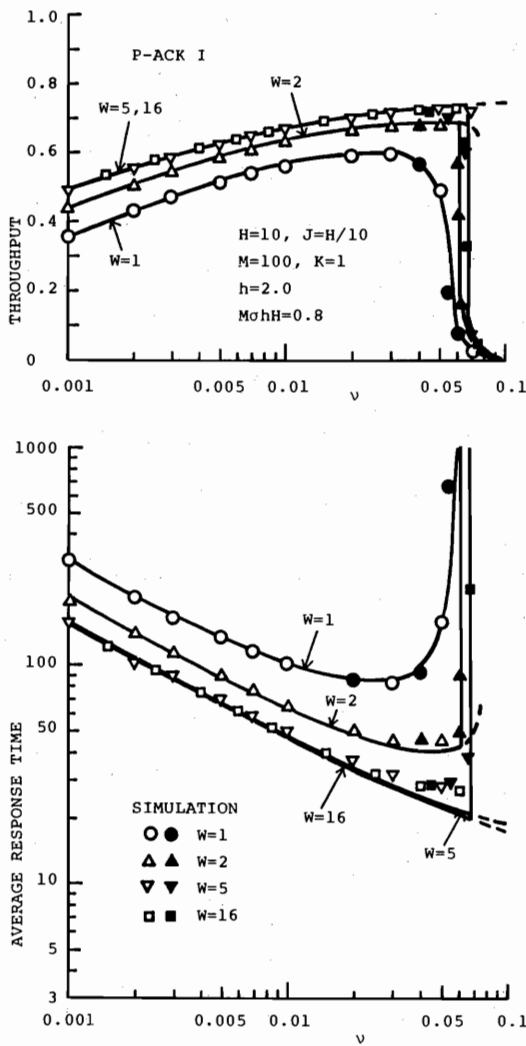


図6 P-ACK I フロー制御方式のスループットおよび平均応答時間特性(2) :  $h=2, MohH=0.8$

Fig.6 The throughput and average response time versus scheduling rate for P-ACK I flow control (2) :  $h=2, MohH=0.8$ .

EPA に一般的に見られる現象である<sup>(10)</sup>.

次に、NP-ACK フロー制御方式と P-ACK I フロー制御方式との性能を比較しよう。文献(8), (13)で示されているように、ACK に対する優先権付与による性能改善の度合は、 $H$  が小さいほど大きい。そこで、本論文では  $H=10$  の場合を考えている(ここで想定しているシステムパラメータのもとでは、 $H>10$ , 例えば  $H=20, H=100$  の場合には、NP-ACK 方式と P-ACK I 方式の性能の差はほとんど見られない<sup>(6)</sup>)。ところが、本論文のようにマルチパケットメッセージに

対してフロー制御を行うと、 $H=10$  のときでさえも、NP-ACK と P-ACK I との性能差は、文献(8)の場合よりも更になくなり、差はほとんどなくなる(文献(8)では、各端末は、単一パケットメッセージを発生し、現パケットに対する ACK を受信するまでは次のパケットを発生しないと仮定されている)。ここでは、図が煩雑になるのを避けるため、NP-ACK と P-ACK I とは、別々の図に分けて示してあるが、両方の図を重ねると大部分の場合ほとんど一致する。すなわち、 $MohH=0.4$  のとき、図3と図5は、すべての  $W$  の値に対して、システムが不安定となる  $\nu$  のしきい値がわずかに異なる以外は、ほとんど一致する。また、 $MohH=0.8$  のとき、図4と図6とを比較すると、 $W=1, 2$  の場合には、NP-ACK と P-ACK I の差は認められるが、 $W=5, 16$  になると差はほとんどなくなる。システム設計の観点からすれば、達成可能な最小の平均応答時間が得られるほど十分大きい  $W$  の値を選ぶべきであるので、 $W$  が小さいときの両 ACK 方式の性能差は問題とならない。以上より、フロー制御を行う場合には、P-ACK I を用いることによる性能上のメリットはほとんどないことがわかる。これは、フロー制御を行うことによって、等価的に  $H$  の値を大きくすることになるからである。すなわち、例えば  $n$  個のパケットを連続送信することは、長さ  $nH$  スロットの1個のパケットを送信することと同じになる。 $H$  の値が大きくなると、先にも述べたように、ACK に対する優先権付与による性能改善効果は小さくなるのである。

最後に、ウィンドウサイズ  $W$  とシステム性能との関係について考察する。図3~6よりわかるように、 $W$  を大きくすると性能は良くなる。しかし、 $W$  がある程度大きくなると(図3~6では  $W=5$  程度)、それ以上の改善はなくなる。この必要最小限の  $W$  の値は、平均メッセージ長  $h$  と入力率  $MohH$  に依存する。システムの動作原理から容易に予想できるように、必要な  $W$  の値は、 $h$  と  $MohH$  が大きいほど大きくなる。図3~6では、 $h=2$  と平均メッセージ長が短いので、このことがはっきりと現れていない。そこで、図5のシステムパラメータにおいて、 $h$  のみを2から10に変化させた場合の特性を図7に示す。図7は、 $h$  が大きくなることにより  $W=5$  では十分でなくなることを示している。

更に、 $W$  が性能に及ぼす影響を明確に示すために、NP-ACK 方式における、最小の平均応答時間  $D_{r,\min}$  と  $W$  との関係の理論値を図8に示す。 $D_{r,\min}$  は、システムが安定であるという条件のもとで、平均応答時間

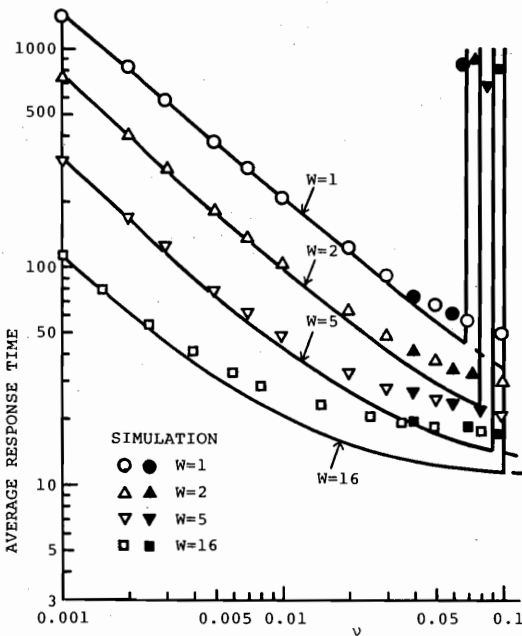
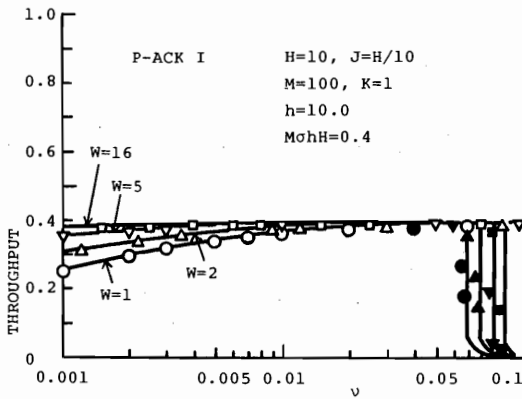


図8 NP-ACKフロー制御方式における最小平均応答時間とウィンドウサイズとの関係  
Fig. 8 Minimum average response time versus window size for NP-ACK flow control.

図7 P-ACK Iフロー制御方式のスループットおよび平均応答時間(3) :  $h=10, MohH=0.4$   
Fig. 7 The throughput and average response time versus scheduling rate for P-ACK I flow control (3) :  $h=10, MohH=0.4$ .

$D_r$  が最小となるように  $\nu$  を選んで得られたものである。図8もまた、 $h$  と  $MohH$  が大きいほど、必要な  $W$  の値は大きくなることを示している。

### 5. むすび

本論文では、slotted nonpersistent CSMA/CD ネットワークについて、論理リンク制御層においてウィンドウフロー制御を行った場合のシステム性能を解析した。フロー制御を実行するのに必要な送達確認方式として、通常の非優先 ACK 方式 (NP-ACK) と一つの

優先 ACK 方式 (P-ACK I) とを考えた。その各々について、ACK 仮説を用いた近似モデルを構成し、平衡点解析 (EPA) の手法により解析を行った。そして、解析結果の精度は、NP-ACK 方式において、ウィンドウサイズが小さく負荷が高い場合にやや悪くなるが、それ以外は全般に良いという結果が得られた。更に、フロー制御を行う場合には、NP-ACK と P-ACK I との性能差はほとんどなく、P-ACK I を用いることによる性能上のメリットはあまりないことも明らかになった。しかし、この結論は、nonpersistent CSMA/CD に対するものであり、Ethernet 等で用いられている 1-persistent CSMA/CD の場合にどの程度成立するのかは明らかでない。ACK に対する優先権付与による性能改善効果は、nonpersistent CSMA/CD よりも 1-persistent CSMA/CD の方が顕著であるということが知られているので<sup>(8),(13)</sup>、この点は今後更に検討を行う必要がある。また、良好な性能を得るのに必要なウィンドウサイズについても検討を行ったが、これはメッセージ長が長く負荷が高いほど大きくしなければならぬという当然の結果が得られた。

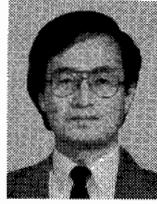
本論文での解析は、システム内のすべての端末がデータ転送フェーズにあるとして行われており、データリンクコネクションの確立および解放フェーズは無視されている。しかしながら、システムの性能を正確に評価するためには、コネクションの確立および解放フェーズを考慮しなければならないことは明らかである。筆者らは、現在、これらの両フェーズをも含んだ解析を検討中である。この解析が可能になれば、コネクションレス方式との比較を行うことも考えている。

謝辞 本研究は、(財)大川情報通信基金昭和62年度研究助成金(助成番号62-06)によって行われた。

### 文 献

- (1) A. S. Tanenbaum: "Computer Networks", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1981).
- (2) M. Reiser: "A queueing network analysis of computer communication networks with window flow control", IEEE Trans. Commun., COM-27, 8, pp. 1199-1209 (Aug. 1979).
- (3) 山本 幹, 秋吉一郎, 中西 暉, 真田英彦, 手塚慶一: "有限容量入力待ち行列を持つウィンドウフロー制御パケット網の近似解析と最適ウィンドウ割当て", 信学論 (B), J70-B, 10, pp. 1157-1167 (昭62-10).
- (4) E. Arthurs, G. L. Chesson and B. W. Stuck: "Theoretical performance analysis of sliding window link level flow control for a local area network", Proc. 8th Data Communications Symposium, pp. 95-100 (Oct. 1983).
- (5) O. Gihir and P. J. Kuehn: "Comparison of communication services with connection-oriented and connectionless data transmission", Computer Networking and Performance Evaluation, ed. T. Hasegawa, H. Takagi and Y. Takahashi pp. 173-186, Elsevier Science Publishers B. V., North-Holland (1986).
- (6) L. C. Mitchell and D. A. Lide: "End-to-end performance modeling of local area networks", IEEE J. Sel. Areas Commun., SAC-4, 6, pp. 975-985 (Sept. 1986).
- (7) M. Tokoro and K. Tamaru: "Acknowledging Ethernet", Proc. COMPCON Fall '77, pp. 320-325 (Sept. 1977).
- (8) 田坂修二, 谷 正徳, 高橋健一: "CSMA-CDシステムにおけるACKトラヒックの解析", 信学論(B), J68-B, 10, pp. 1093-1102 (昭60-10).
- (9) 福田 明, 田坂修二: "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).
- (10) S. Tasaka: "Performance Analysis of Multiple Access Protocols", Computer Systems Series, Research Reports and Notes, MIT Press, Cambridge, MA (1986).
- (11) 田坂修二, 深谷和義: "アロハ形予約衛星パケット通信網におけるアクノリッジ方式の解析", 信学論(B), J70-B, 7, pp. 780-790 (昭62-07).
- (12) S. Tasaka: "Performance analysis of a CSMA/CD system with link level flow control", Conf. Rec. GLOBECOM' 87, pp. 1601-1606 (Nov. 1987).
- (13) S. Tasaka: "An analysis of priority acknowledgment schemes for 1-persistent CSMA/CD systems", Conf. Rec. ICC '87, pp. 568-574 (June 1987).
- (14) F. A. Tobagi and V. B. Hunt: "Performance analysis of carrier sense multiple access with collision detection", Computer Networks, 4, pp. 245-259 (Oct./Nov. 1980).

(昭和63年7月4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。同年名工大情報勤務。現在、同大助教授。昭59 UCLA 客員研究員(文部省在外研究員)。計算機ネットワークの性能評価の研究に従事。IEEE、情報処理学会各会員、著書「Performance Analysis of Multiple Access Protocols」(MIT Press)。



深谷 和義

昭60名工大・工・情報卒。昭62同大大学院修士課程了。現在、愛知県立名南工業高等学校教諭。在学中、放送形パケット通信網の研究に従事。