

## 衛星パケット通信網における MAC および LLC プロトコル構成法の比較

正員 鈴木 隆宏<sup>†</sup> 正員 田坂 修二<sup>†</sup>

A Comparison of Construction Methods for MAC and LLC Protocols  
in Satellite Packet Communication Networks

Takahiro SUZUKI<sup>†</sup> and Shuji TASAKA<sup>†</sup>, Members

あらまし 本論文は、衛星パケット通信網における OSI 第 2 層(データリンク層)の階層構成法を、システム性能の観点から検討したものである。媒体アクセス制御(MAC)副層と論理リンク制御(LLC)副層とを独立に定義した方式(分離型)と、MAC および LLC 副層を関連づけて定義した方式(結合型)を取り上げ、これら二つの方式の性能を、スループットおよび平均応答時間を評価基準として比較する。MAC プロトコルとしては TDMA 予約とスロット付アロハを、LLC プロトコルとしてはコネクション型を対象とする。TDMA 予約通信網については、まず、分離型の解析を平衡点解析の手法により行い、次に、分離型および結合型の性能を、解析とシミュレーションにより比較する。比較により、分離型より結合型の方が常に性能が良いことを定量的に示す。また、スロット付アロハ通信網の場合には、分離型と結合型との性能差はほとんど見られないことをシミュレーションにより明らかにする。

キーワード：衛星パケット通信網、階層化プロトコル、データリンク層、TDMA 予約通信網、コネクション型 LLC プロトコル

### 1. まえがき

衛星パケット通信網を効率的に機能させるためには、これに適したネットワークアーキテクチャを明確にする必要がある。そのためには、最適なプロトコル階層化法および各階層のプロトコルについて総合的な検討が行われなければならない。

しかし、従来の衛星パケット通信網に関する研究は、多元接続(または、媒体アクセス制御：MAC)プロトコルに関するものがほとんどであり、MAC 副層より上位については、階層の分け方についてさえ組織的な研究は見られない。筆者らは、文献(1), (2)において、MAC プロトコルとその上位で動作する論理リンク制御(Logical Link Control : LLC)プロトコルとを同時にモデル化して、LLC 副層におけるコネクション方式について検討している。しかし、これらの研究でも、MAC 副層と LLC 副層との階層構成法そのものについては考察していない。そこで、本論文では、衛星パ

ケット通信網におけるプロトコルの階層構成法に関する研究の第 1 歩として、OSI 第 2 層(データリンク層)の階層化方法について検討する。

OSI 第 2 層は、LAN については、IEEE 802 委員会および ISO において MAC と LLC との二つの副層に分割されるという標準化がなされている。衛星通信網においても、この構成法が、それへの適合性についての詳細な検討もなく用いられる傾向にある。すなわち、実用若しくは実験用として、これまでに実現されている衛星パケット通信網においても、MAC プロトコルと上位のプロトコルとを独立に考えているものが多く<sup>(3)~(8)</sup>、中には OSI 第 2 層を LAN と同様に、二つの副層に分割しているシステムもある<sup>(5)~(7)</sup>。これらの実現された通信網においては、MAC プロトコルとして、純アロハ、スロット付アロハのランダムアクセス方式、TDMA 予約等の予約方式、更に、ランダムアクセス方式と予約方式とを組み合わせた AA/TDMA (adaptive assigment TDMA) 方式<sup>(7)</sup>などが用いられている。LLC プロトコルとしては、SNA/SDLC あるいは HDLC 手順に準拠したものがよく用いられている。

† 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

衛星パケット通信網は、LANと比較してチャネル伝搬遅延時間が非常に大きく、最適なMACプロトコルも衛星パケット通信網とLANとでは一般に異なっている<sup>(9)</sup>。従って、衛星パケット通信網とLANとでは、最適な階層化方法が同じであるとは限らない。特に、衛星パケット通信網において、予約方式のMACプロトコルを用いた場合には、予約によるオーバヘッドが存在するため、伝搬遅延の影響がよりいっそう大きく現れる。この場合、MAC副層とLLC副層とを明確に分割しない方が効率的なプロトコルが設計できる可能性がある。

そこで、本論文では、システム性能の観点から、衛星パケット通信網におけるMAC(多元接続)およびLLCプロトコルの構成法についての検討を試みる。このために、MAC副層をLLC副層と関係づけて定義した方式と、独立に定義した方式とを取り上げる。本論文では、前者を結合型(combined type)、後者を分離型(isolated type)と呼ぶ。そして、これら二つの方式の性能を、スループットおよび平均応答時間を評価基準として比較する。

本論文では、MACプロトコルとしては、予約方式とランダムアクセス方式の代表例として、各々、TDMA予約およびスロット付アロハを取り上げる。これは、予約によるオーバヘッドのある場合とない場合とを比較するためである。LLCプロトコルとしては、文献(1)と同様のコネクション型(CO)を用いる。また、LLC副層より上位の層は、単なる無制御の情報源として取り扱う。

以下、2.でTDMA予約通信網における分離型および結合型の性能比較を行い、3.でスロット付アロハ通信網の場合について検討する。そして、4.で、結論および今後の課題について述べる。

## 2. TDMA予約通信網

### 2.1 分離型および結合型

本章で検討する分離型および結合型を以下に定義する。ここでは、MACプロトコルとしてTDMA予約、LLCプロトコルとしてCO型を用いる。

#### (1) 分離型

本論文では、CO-LLCプロトコルを対象とするので、LLC副層では次の6種類のフレームを考える必要がある。コネクション確立(CE)フレーム、CEフレームに対するACK(CE-ACK)、データフレーム、データフレームに対するACK(D-ACK)、コネクション終結

(CT)フレーム、CTフレームに対するACK(CT-ACK)。

分離型の場合には、LANの場合と同様に、MAC副層とLLC副層とを完全に分離し、独立に定義する。このため、LLC副層における上記の各種フレームは、MAC副層においては、単なるデータフレームとして扱われる。従って、MAC副層においては、LLC副層におけるフレームの種類を判別できない。以下、本論文では、MAC副層におけるフレームをMACフレームと呼ぶ。特に、MAC副層におけるデータフレームをデータMACフレーム、制御フレームを制御MACフレームと呼ぶ。分離型のTDMA予約通信網において、制御MACフレームに該当するのは予約フレームのみである。単に、データフレーム、あるいは、制御フレームと言う場合には、LLC副層でのフレームの種類を表すものとする。

まず、CO-LLCプロトコルの動作を説明する。一つのメッセージを発生した局は、まず、相手局に向けて、CEフレームを送信する。受信局は、CEフレームを受信すると、CE-ACKを返送する。送信局がCE-ACKを正しく受信した時点で、コネクションが確立される。そして、送信局は、次にデータフレームの送信を行う。このとき、サイズWフレームのウィンドウフロー制御が行われる。すなわち、送信局は、最大Wデータフレームまで連続送信可能である。データフレームを受信すると、受信局は、これに対してD-ACKを返送する。送信局が、最後に送信したデータフレームに対するD-ACKを受信すると、送信局はCTフレームの送信を行う。そして、それに対して返送されたCT-ACKを送信局が受信した時点で、コネクションは終結される。

次に、TDMA予約プロトコルについて述べる。この多元接続プロトコルでは、図1のように、衛星チャネルはL個の大スロットからなるフレーム構造をなしている。一つの大スロットは、更に、一つのデータスロットとV個の小スロットに分割されている。データスロットの長さは、一つのデータMACフレーム伝送時間と等しい。また、小スロットの長さは、予約フレームの伝送時間と等しく、1フレームにつき各局につきずつTDMA的に固定割当てされている。このとき、システム内の局数をMとすると次式が成立する。

$$V = \lceil M/L \rceil \quad (1)$$

但し、 $\lceil x \rceil$ は、xより小さくない最小の整数である。一つの局で、データMACフレームの送信要求が生

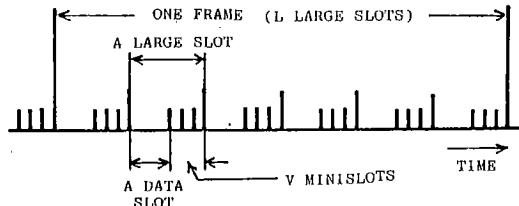


図 1 TDMA 予約通信網のチャネルフレーム構造  
Fig. 1 Channel frame structure of the TDMA-Reservation network.

じると、このフレームの送信に必要なデータスロット数を記して、予約フレームの送信を行う。予約フレームの送信は最初に現れる自局割当ての小スロットを用いて行われる。予約フレームは、衛星チャネルの放送性のため、システム内の全局で受信される。そして、このフレームが受信された時点では、予約フレームの送信局はシステム内に共通に形成されている仮想的な待ち行列に加わる。この待ち行列を、仮想待ち行列と呼ぶ<sup>(1)</sup>。仮想待ち行列に加わった局は、先着順にデータスロットを使用する。

分離型においては、CE フレームなどの LLC 副層での制御フレームは、すべて、データ MAC フレームとして送信されるため、予約が必要となることに注意されたい。

## (2) 結合型

結合型においても、LLC プロトコルは分離型と同じであるが、MAC 副層が LLC 副層と関連付けて定義される。すなわち、結合型では、MAC 副層における分離型のフレーム送信規則を、「予約フレームの送信だけでなく、LLC 副層における各種制御フレームの送信にも、自局割当ての小スロットを用いる。」と改める。これは、結合型においては、予約フレームのほか、LLC 副層における各種制御フレームも制御 MAC フレームとして取り扱うことを意味する。そして、データフレームのみを、データ MAC フレームとして扱う。従って、この方式の場合、MAC 副層のレベルで、上位の LLC 副層から受け取ったフレームの種類を判別できる必要がある。このため、結合型は、MAC 副層と LLC 副層とが完全には分離されてなく関連付けて定義されていると言える。

先に述べたように、分離型の場合には、LLC 副層においてフレームの送信要求が生じ、それが MAC 副層に引き渡されるたびに、この層において予約フレームの送信が必要となる。これに対して、結合型では、予約フレームの送信が必要となるのは LLC 副層におい

てデータフレームの送信要求が発生したときのみであり、各種制御フレームの送信は、予約なしに行うことができる。このため、分離型に比べ結合型は、予約によるオーバヘッドが明らかに小さくなる。

本章で対象としている結合型は、文献(1)でモデル化および解析している方式と同じである。従って、本論文では、分離型のみを解析する。

## 2.2 分離型のモデル化

分離型をモデル化する際に次の仮定をおく。

- (A 1) システムは  $M$  個の局からなる。
- (A 2) 衛星チャネルの伝送速度を  $C \text{ bit/s}$  とする。
- (A 3) 衛星チャネルの往復伝搬遅延時間を  $R$  データスロット長とする。
- (A 4) すべての MAC フレームの転送は誤りなく行われる。
- (A 5) 一つの局でのメッセージ発生間隔は、平均  $1/\sigma$  データスロット長の幾何分布をなす。
- (A 6) 一つのメッセージは、平均  $h=1/\gamma$  の幾何分布に従う数のデータフレームに分割される。
- (A 7) メッセージの転送は、一つの局から、他の一つの局への一方に行われる。
- (A 8) 一つのメッセージを発生した局は、すべてのデータフレームの送信が完了し、コネクションが終結するまで、次のメッセージを発生しない。
- (A 9) 一つの局のコネクション確立要求は、相手局で必ず受け入れられる。
- (A 10) LLC 副層における各種制御フレームは、MAC 副層においてはすべてデータ MAC フレームとして扱われる。これらの各フレームは、一つのデータスロットを予約することにより送信される。
- (A 11) すべての局において、1 コネクション当りのウィンドウサイズを  $W$  とする。これは、各局が、1 コネクション当り  $W$  データフレーム分の受信バッファをもっていることに相当する。
- (A 12) フレーム処理時間および各種 ACK の作成時間は無視する。
- (A 13) 一つの局で、二つ以上のフレームの送信要求が同時に発生した場合には、先着順にフレームの送信を行う。

本論文においては、文献(1)と同様に、モデルにおける時間の単位を 1 大スロット長とする。そこで、仮定 A 3 と仮定 A 5 を次のように修正する。

- (A 3m) 衛星チャネルの往復伝搬遅延時間を  $J$  大スロット長とする。但し、

$$J \triangleq [R/(1+V\eta)] \quad (2)$$

である。ここで、 $\eta$ は小スロット長とデータスロット長との比を表す。

(A 5 m) 各局は、1大スロット当たり確率  $\alpha$  で一つのメッセージを発生する。但し、

$$\alpha \triangleq (1+V\eta)\sigma \quad (3)$$

である。また、メッセージの発生は、大スロットの開始時点で起こるものとする。

分離型の動作は非常に複雑なため、厳密なモデル図を作成することは困難である。そこで、モデル化のために、文献(1)と同様に、更に次の仮定をおく。

(A 14) [ACK 仮説] 一つの局は、何らかの ACK を

待っているとき、その局の状態を相手局が送信する ACK の状態によって表現する。

(A 15) [メッセージ長の近似] 送信すべきデータフレームをもっているにもかかわらずウインドウが閉じた局が D-ACK を受信したとき、次に送信しようとするデータフレーム数は、平均  $h=1/\gamma$  の幾何分布に従って新たに決定される。

(A 16) ある局が、空の仮想待ち行列に加わった場合、1大スロットだけ送信開始を遅らせる。

(A 17) ある局が、現大スロットにおいて一つの予約フレームを発生したとする。この場合、その局に割り当てられた小スロットは、確率  $1/L$  で  $i$  ( $0 \leq i \leq L-1$ )

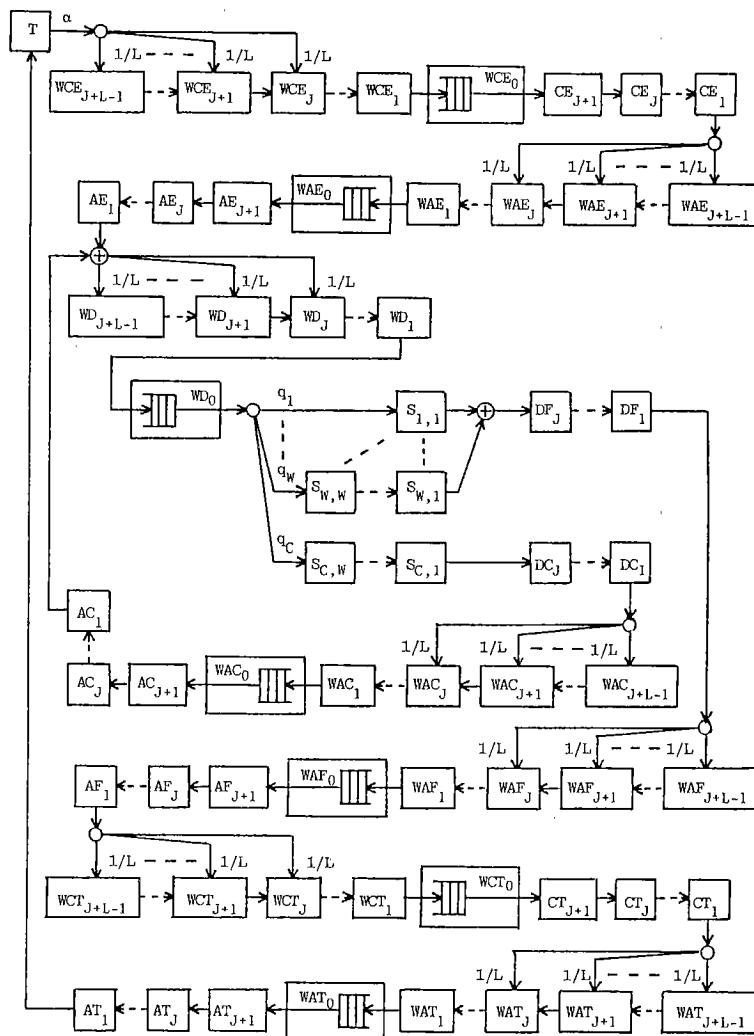


図 2 TDMA 約束通信網における分離型の近似モデル

Fig. 2 An approximate model of the isolated type for the TDMA-Reservation network.

大スロット後に現れる。

以上のすべての条件の下で作成した近似モデル図を図 2 に示す。図中のモードの意味は次のとおりである。

$T$  モードは、送信すべきメッセージをもっていない状態を表す。

$WCE_i (1 \leq i \leq J+L-1)$  モードは CE フレーム送信のための予約フレームの送信を行っている状態を表す。仮定(A 17)より、ある局が予約フレームを発生した場合、その局に割り当てられた最初の小スロットが現れるのは、確率  $1/L$  で  $i (0 \leq i \leq L-1)$  大スロット後である。この影響を表したもののが  $WCE_i (J \leq i \leq J+L-1)$  モードである。 $i=0$  の場合には、その局は  $T$  モードで予約フレームの送信を行い、 $WCE_j$  モードに遷移する。 $1 \leq i \leq L-1$  の場合には、確率  $1/L$  で  $WCE_i (J+1 \leq i \leq J+L-1)$  モードのいずれかに遷移する。このとき、実際に予約フレームの送信が行われるのは、 $WCE_{j+1}$  モードである。また、 $WCE_i (1 \leq i \leq J)$  モードは、チャネル伝搬遅延の影響を表す。 $WCE_0$  モードは、予約が完了して仮想待ち行列に加わっている状態を表す。但し、 $WCE_0$  モードには、仮定(A 16)が用いられている。

$CE_u (1 \leq u \leq J+1)$  モードは、CE フレームの送信を表す。実際に、CE フレームの送信が行われるのは、 $CE_{j+1}$  モードであり、 $CE_u (1 \leq u \leq J)$  モードは、チャネル伝搬遅延の影響を表す。

$WAE_i, WD_i, WAC_i, WAF_i, WCT_i, WAT_i (1 \leq i \leq J+L-1)$  の各モードは、すべて予約フレームの送信を表しており、これらのモードにおける添字の意味は、 $WCE_i (1 \leq i \leq J+L-1)$  モードの場合と同じである。また、 $WAE_0, WD_0, WAC_0, WAF_0, WCT_0, WAT_0$  の各モードは、 $WCE_0$  モードと同様、すべて予約が完了して仮想待ち行列に加わっている状態を表す。この仮想待ち行列に加わっている状態を表すモードは、図 2 においては 7 個ある。しかし、実際のシステム内の仮想待ち行列は唯一つであり、これらの各モードに入っているすべての局は同じ待ち行列に加わっていることに注意されたい。また、これらの各モードにも仮定(A 16)が用いられている。

$AE_u (1 \leq u \leq J+1)$  モードは、CE-ACK の送信を表す。 $AC_u$  および  $AF_u (1 \leq u \leq J+1)$  モードは D-ACK の送信を表す。また、 $CT_u (1 \leq u \leq J+1)$  モードは、CT フレームの送信を、 $AT_u (1 \leq u \leq J+1)$  モードは、CT-ACK の送信を表している。これらのモードの添字の意味は、 $CE_u (1 \leq u \leq J+1)$  モードと同様である。ま

た、 $AE_u, AC_u, AF_u, CT_u, AT_u (1 \leq u \leq J+1)$  の各モードの表現するフレーム送信のための予約フレームの送信は、各々、 $WAE_i, WAC_i, WAF_i, WCT_i, WAT_i (1 \leq i \leq J+L-1)$  モードで行われる。更に、これらのモードのうち、ACK の送信に関する状態を表現したモードには、仮定(A 14) [ACK 仮説] が用いられている。

$S_{n,n} \sim S_{n,1} (1 \leq n \leq W)$  モードは、 $n$  個のデータフレームの連続送信を表しており、この送信によって、手持ちのデータフレームの送信が終了した場合に対応する。 $S_{c,h} (1 \leq h \leq W)$  モードは、 $W$  個のデータフレームの連続送信を表しており、送信局には、まだ送信すべきデータフレームが残っている場合に対応する。データフレーム送信に対する予約フレームの送信は、 $WD_i (1 \leq i \leq J+L-1)$  モードで行われる。また、 $DC_j$  モードおよび  $DF_j (1 \leq j \leq J)$  モードは、チャネル伝搬遅延の影響を表す。

図 2 において、確率  $q_n (1 \leq n \leq W)$ ,  $q_c$  は、仮定(A 6), (A 15) によって、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} q_n &= \gamma(1-\gamma)^{n-1} & 1 \leq n \leq W \\ q_c &= (1-\gamma)^W \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

以上のように、システム内の仮想待ち行列は、実際には唯一つであるにもかかわらず、図 2 のモデルにおいては、この仮想待ち行列に加わっている状態を表すモードが 7 個もある。一方、文献(1)で解析されている結合型のモデルでは、この種のモードは一つだけである。このため、分離型の解析は、結合型の解析よりもかなり複雑なものとなる。

### 2.3 分離型の解析

図 2 のモデルを平衡点解析(EPA)<sup>(10)</sup> により解析する。そのため、各モードにある局数を表す確率変数を定義する。最初に、 $T$  モードにある局数を表す確率変数を  $t$  とし、これを、 $T \rightarrow t$  と記す。この記法を用いて、他の確率変数を次のように定義する。 $WCE_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{cei}, WAE_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{aei}, WD_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{di}, WAC_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{aci}, WAF_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{afi}, WCT_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{cti}, WAT_i (0 \leq i \leq J+L-1) \rightarrow w_{ati}, CE_u (1 \leq u \leq J+1) \rightarrow c_{eu}, AE_u (1 \leq u \leq J+1) \rightarrow a_{eu}, S_{n,k} (1 \leq n \leq W, 1 \leq k \leq n) \rightarrow s_{nk}, S_{c,h} (1 \leq h \leq W) \rightarrow s_{ch}, DC_j (1 \leq j \leq J) \rightarrow d_{cj}, DF_j (1 \leq j \leq J) \rightarrow d_{fj}, AC_u (1 \leq u \leq J+1) \rightarrow a_{cu}, AF_u (1 \leq u \leq J+1) \rightarrow a_{fu}, CT_u (1 \leq u \leq J+1) \rightarrow c_{tu}, AT_u (1 \leq u \leq J+1) \rightarrow a_{tu}$ 。このとき、このシステムの状態ベクトル  $\mathbf{n}$

は、 $\mathbf{n} \triangleq (t, w_{CEi}, w_{AEi}, w_{Di}, w_{ACi}, w_{AFi}, w_{CTi}, w_{ATi}, c_{Eu}, a_{Eu}, s_{nk}, s_{ch}, d_{Cj}, d_{Fj}, a_{Cu}, a_{Fu}, c_{Tu}, a_{Tu} : 0 \leq i \leq J+L-1, 1 \leq u \leq J+1, 1 \leq n \leq W, 1 \leq k \leq n, 1 \leq h \leq W, 1 \leq j \leq J)$  と定義される。

解析のため、まず、次の変数を定義する。

$$u(\mathbf{n}) \triangleq \begin{cases} 1 & \text{現大スロットでの状態が } \mathbf{n} \text{ のとき、現大スロット中のデータスロットを用いて何らかのフレームの送信が行われる場合} \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (5)$$

同様に、現大スロットでの状態が  $\mathbf{n}$  のとき、現大スロット中のデータスロットを用いて CE フレームの送信が行われる場合のみ 1 となり、それ以外の場合は 0 であるような変数を  $u_{CE}(\mathbf{n})$  とする。更に、同様の変数を、CE-ACK については  $u_{AE}(\mathbf{n})$ 、データフレームについては  $u_D(\mathbf{n})$ 、D-ACK(送信局がまだ送信すべきデータフレームをもっている場合)については  $u_{AC}(\mathbf{n})$ 、D-ACK(送信局が送信すべきデータフレームをすべて送信し終えた場合)については  $u_{AF}(\mathbf{n})$ 、CT フレームについては  $u_{CT}(\mathbf{n})$ 、CT-ACK については  $u_{AT}(\mathbf{n})$  と定義する。このとき、一つのデータスロットで送信されるフレーム数はたかだか一つであるので次式が成り立つ。

$$u(\mathbf{n}) = u_{CE}(\mathbf{n}) + u_{AE}(\mathbf{n}) + u_D(\mathbf{n}) + u_{AC}(\mathbf{n}) + u_{AF}(\mathbf{n}) + u_{CT}(\mathbf{n}) + u_{AT}(\mathbf{n}) \quad (6)$$

ここで、

$$f \triangleq \frac{\gamma}{1 - (1 - \gamma)^W} \quad (7)$$

と定義する。このとき、 $1/f$  は、仮定(A 6), (A 15) の下でサイズ  $W$  フレームのウィンドウフロー制御を行ったとき、各局が 1 回の予約で送信できるデータフレーム数の平均となる。この場合、システムの状態が  $\mathbf{n}$  のとき、次の大スロットで  $w_{CE_0}, w_{AE_0}, w_{D_0}, w_{AC_0}, w_{AF_0}, w_{CT_0}, w_{AT_0}$  の各モードを出していく局数の期待値は、各々、 $u_{CE}(\mathbf{n}), u_{AE}(\mathbf{n}), f_{uD}(\mathbf{n}), u_{AC}(\mathbf{n}), u_{AF}(\mathbf{n}), u_{CT}(\mathbf{n}), u_{AT}(\mathbf{n})$  となる。

システムが状態  $\mathbf{n}$  にあるとして、各モードにおける一大スロット当りの増加局数の条件付き期待値を計算して 0 とおき、独立な式をまとめる(フローバランスマスを求める)。そして、文献(1)と同様な方法で、このようにして得られた式を整理し、更に、網内の局数が  $M$  であることを利用すると、次式が得られる。

$$M - (w_{CEoe} + w_{AEoe} + w_{Doe} + w_{ACoe}$$

$$+ w_{AFoe} + w_{CToe} + w_{AToe}) - f_{uD}(\mathbf{n}_e) \cdot \left\{ \sum_{n=1}^W n q_n + (W - 2L - 8J - 2) q_c + \frac{(1 - q_c)}{\alpha} + 12J + 3L + 2 \right\} = 0 \quad (8)$$

$$u_{CE}(\mathbf{n}_e) = u_{AE}(\mathbf{n}_e) = u_{AF}(\mathbf{n}_e) = u_{CT}(\mathbf{n}_e) = u_{AT}(\mathbf{n}_e) = (1 - q_c) f_{uD}(\mathbf{n}_e) \quad (9)$$

$$u_{AC}(\mathbf{n}_e) = q_c f_{uD}(\mathbf{n}_e) \quad (10)$$

上式は、平衡点  $\mathbf{n}_e$  において成立する式であるので、各確率変数には、添字  $e$  が付けてある。式(6), (9), (10)より、次の関係が成り立つ。

$$u_D(\mathbf{n}_e) = \frac{u(\mathbf{n}_e)}{\{1 + (5 - 4q_c)f\}} \quad (11)$$

ここで、

$$w_0 \triangleq w_{CE0} + w_{AE0} + w_{D0} + w_{AC0} + w_{AF0} + w_{CT0} + w_{AT0} \quad (12)$$

と定義すると、確率変数  $w_0$  は仮想待ち行列に加わっている局数を表す。EPA では、ある変数の期待値は、その確率変数の平衡点における値で近似される<sup>(10)</sup>。従って、式(12)は平衡点  $\mathbf{n}_e$  においても成立する。このため、式(11), (12)より式(8)は次のようになる。

$$M - w_{0e} - \frac{fu(\mathbf{n}_e)}{\{1 + (5 - 4q_c)f\}} \cdot \left\{ \sum_{n=1}^W n q_n + (W - 2L - 8J - 2) q_c + \frac{(1 - q_c)}{\alpha} + 12J + 3L + 2 \right\} = 0 \quad (13)$$

次に、 $w_{0e}$  と  $u(\mathbf{n}_e)$  との関係を導く。システムの仮想待ち行列は、フィードバックを伴った複雑な待ち行列系をなしている。そのため、この待ち行列の厳密な解析を行うことは困難である。そこで、解析の簡単のため、この仮想待ち行列を単純な  $M/G/1$  待ち行列で近似する。仮想待ち行列のサービス時間については次のように考える。

まず、仮想待ち行列に加わった局がデータフレームを送信するという条件のもとで、サービス時間(伝送時間)が  $t$  データスロットである条件付き確率を  $P_{SD}(t/D)$  とすると、これは、仮定(A 6), (A 15) より、次のように表される。

$$P_{SD}(t/D) = \begin{cases} \gamma(1 - \gamma)^{t-1} & t = 1, 2, \dots, W-1 \\ \gamma(1 - \gamma)^{t-1} + (1 - \gamma)^t & t = W \end{cases} \quad (14)$$

次に、仮想待ち行列に加わった局が何らかの制御フレームを送信するという条件のもとで、サービス時間が  $t$  データスロットである条件付き確率を  $P_{S/C}(t/C)$  とすると、これは、仮定(A 10)より次式で与えられる。

$$P_{S/c}(t/C)=1, t=1 \quad (15)$$

また、仮想待ち行列に加わった局がデータフレームの送信を行う確率を  $P_D$  とし、何らかの制御フレームの送信を行う確率を  $P_C$  とする。そして、 $P_D/P_C$  を次のように近似する。

$$\frac{P_D}{P_C} = \frac{f u_D(\mathbf{n}_e)}{\left( u_{CE}(\mathbf{n}_e) + u_{AE}(\mathbf{n}_e) + u_{AC}(\mathbf{n}_e) + u_{AF}(\mathbf{n}_e) + u_{CF}(\mathbf{n}_e) + u_{AT}(\mathbf{n}_e) \right)} \quad (16)$$

上式は、 $P_D$  と  $P_C$  の比を、平衡点  $\mathbf{n}_e$  において、1 大スロット当り  $WD_0$  モードを出していく局数と、一大スロット当り  $WCE_0$ ,  $WAE_0$ ,  $WAC_0$ ,  $WAF_0$ ,  $WCT_0$ ,  $WAT_0$  の各モードを出していく局数の和との比で近似している。式(16)は、式(9), (10)より

$$P_D/P_C = 1/(5-4q_c) \quad (17)$$

となり、 $P_D+P_C=1$  より、次式が得られる。

$$P_D = 1/(6-4q_c) \quad (18)$$

$$P_C = (5-4q_c)/(6-4q_c) \quad (19)$$

このとき、仮想待ち行列に加わった局に対するサービス時間が  $t$  データスロットである確率を  $P_S(t)$  とするとき、

$$P_S(t) = P_{S/D}(t/D)P_D + P_{S/c}(t/C)P_C \quad (20)$$

となる。従って、 $P_S(t)$  は、式(14), (15), (18)～(20)より次のように表すことができる。

$$P_S(t) = \begin{cases} (\gamma + 5 - 4q_c)/(6 - 4q_c) & t=1 \\ \gamma(1-\gamma)^{t-1}/(6-4q_c) & t=2, 3, \dots, W-1 \\ (1-\gamma)^{t-1}/(6-4q_c) & t=W \end{cases} \quad (21)$$

ここで、仮想待ち行列を、式(21)で与えられるサービス時間分布をもつ  $M/G/1$  待ち行列で近似する。このとき、EPA の原理より、 $E[w_0] = w_{0e}$  となるから、この仮想待ち行列にポラツェック・ヒンチンの式<sup>(11)</sup>を適用すると、次式が得られる。

$$w_{0e} = \frac{\rho^2[1-\gamma-(3-2q_c)\{2(1-\gamma)^W(1+W\gamma-\gamma)+(5-4q_c)\gamma^2+(1-q_c)\gamma\}]}{(1-\rho)(5-4q_c)\gamma+1-q_c^2} \quad (22)$$

但し、 $\rho$  は窓口利用率である。この場合、 $\rho$  はデータスロットにおいて何らかのフレームが伝送されている割合と考えることができるので、 $\rho$  を次のように近似する。

$$\rho = \sum_{n=1}^W \sum_{k=1}^n S_{nk} + \sum_{h=1}^W S_{Ch} + C_{E,J+1e} + a_{E,J+1e} + a_{C,J+1e} + a_{F,J+1e} + C_{T,J+1e} + a_{T,J+1e} \quad (23)$$

図 2 より得られるフローバランスの式と式(6)を利用すると上式は次のように書くことができる。

$$\rho = \frac{fu(\mathbf{n}_e)}{\{1+(5-4q_c)f\}} \left\{ \sum_{n=1}^W nq_n + (W-4)q_c + 5 \right\} \quad (24)$$

ここで、式(5)より、 $E[u(\mathbf{n})] = P_r[u(\mathbf{n})=1]$  となる。一方、EPA の原理より、 $E[u(\mathbf{n})] = u(\mathbf{n}_e)$  となる。従って、 $p = P_r[u(\mathbf{n})=1]$  とおくと、

$$u(\mathbf{n}_e) = p \quad (25)$$

が得られる。式(13), (22), (24), (25)を用いると、最終的に次の平衡点方程式が得られる。

$$M = \frac{\left[ \left( \sum_{n=1}^W nq_n + (W-4)q_c + 5 \right)^2 f^2 p^2 [1-\gamma] - (3-2q_c)\{2(1-\gamma)^W(1+W\gamma-\gamma) + (5-4q_c)\gamma^2+(1-q_c)\gamma\} \right]}{2(1+(5-4q_c)f)\{(5-4q_c)\gamma+1-q_c\}^2} - \frac{\left[ 1+(5-4q_c)f - \left\{ \sum_{n=1}^W nq_n + (W-4)q_c + 5 \right\} fp \right]}{-\frac{fp}{1+(5-4q_c)f} \left\{ \sum_{n=1}^W nq_n + (W-2L-8J-2)q_c + \frac{(1-q_c)}{\alpha} + 12J+3L+2 \right\}} = 0 \quad (26)$$

上式は、 $p$  の 2 次方程式である。この 2 次方程式の根のうち、 $0 \leq p \leq 1$  の範囲内のものを用いれば、平衡点  $\mathbf{n}_e$  が求められる。

次に、スループット  $\bar{S}$  と平均応答時間  $D_r$  を求める。スループット  $\bar{S}$  は、1 データ MAC フレーム伝送時間(1 データスロット長)当たりに伝送されるデータフレームの平均数と定義される。文献(1)と同様の議論により、スループット  $\bar{S}$  は、次のように表される。

$$\bar{S} = \frac{\left( \sum_{n=1}^W nq_n + Wq_c \right) fp}{\{1+(5-4q_c)f\}(1+V\eta)} \quad (27)$$

また、平均応答時間  $D_r$  は、一つのメッセージが発生してから、対応するコネクションが終結するまでの平均時間と定義される。まず、一つの局が  $T$  モードを出でから、次に  $T$  モードに戻ってくるまでの平均大スロット数を  $D_b$  とすると、リトルの公式より、

$$D_b = \frac{\left( \sum_{n=1}^W nq_n + Wq_c \right) M}{(1+V\eta)(1-q_c)\bar{S}} - \frac{1}{\alpha} \quad (28)$$

となる。平均応答時間  $D_r$  は、 $D_b$  を用いて次のように表すことができる。

$$D_r = (1+V\eta) \left\{ D_b + \frac{1}{(1+V\eta)} - \left( \frac{2}{1-q_c} + 4 \right) (1-\rho) \right\} \quad (29)$$

上式の中括弧の中の  $1/(1+V\eta)$  は、メッセージの発生が大スロットの開始時点であるのに対し、メッセージ

の転送が完了するのはデータスロットの終了時点であることを考慮したものである。また、 $\{2/(1-q_c)+4\}(1-\rho)$ は、仮定(A 16)のために生じる余分な時間の平均である<sup>(2)</sup>。

式(3), (28), (29)より、 $D_r$ は次のように書くことができる。

$$D_r = \frac{\left(\sum_{n=1}^W n q_n + W q_c\right) M}{(1-q_c) S} - \frac{1}{\sigma} + 1$$

$$- \frac{(6-4q_c)(1-\rho)(1+V\eta)}{(1-q_c)}$$

[単位：データ MAC フレーム伝送時間] (30)

## 2.4 数値例

本節では、まず、EPA による分離型の解析結果の精度をシミュレーションにより調べる。そして、分離型と結合型の性能比較を、理論値とシミュレーション値を用いて行う。以下の数値例においては、 $M=100$ ,  $W=50$ ,  $\eta=0.1$  (データフレーム長 1,125 ビット, 制御フレーム長 112 ビット), チャネル往復伝搬遅延 0.27 秒としている。また、チャネル伝送速度として、 $C=50$  kbit/s ( $R=12$ ) および  $C=10$  Mbit/s ( $R=2,400$ ) の 2 通りの場合を考える。また、シミュレーションにおい

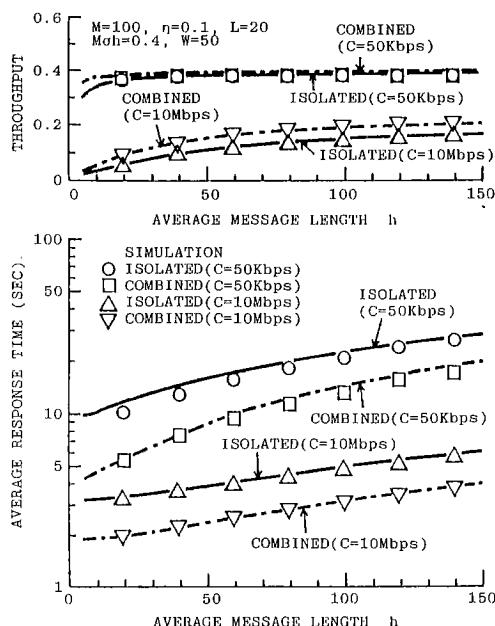


図 3 TDMA 予約通信網におけるスループットおよび平均応答時間と平均メッセージ長との関係

Fig. 3 Throughput and average response time vs. average message length in the TDMA-Reservation network.

ては、仮定(A 1)～(A 13)のほか、更に次の仮定も用いている。

(A 18) 各局で発生したメッセージは、他のすべての局の各々に対して等確率で向けられる。

また、シミュレーションランの長さは  $C=50$  kbit/s の場合は、1,050,000 大スロット、 $C=10$  Mbit/s の場合は、21,000,000 大スロットとし、95% 信頼区間も求めた。以下の図において、EPA による理論値は、分離型は実線、結合型は 1 点鎖線で表し、シミュレーション値は  $\bigcirc \triangle \square \nabla$  で示してある。また、95% 信頼区間にについては、すべて  $\bigcirc \triangle \square \nabla$  の中に含まれるため示していない。

図 3 に、スループットおよび平均応答時間と平均メッセージ長との関係を示す。この図においては、 $L=20$ ,  $Moh=0.4$  としている。図 3 には、 $C=50$  kbit/s および  $C=10$  Mbit/s の両方の場合を示している。また、図 4 および図 5 は、スループットおよび平均応答時間

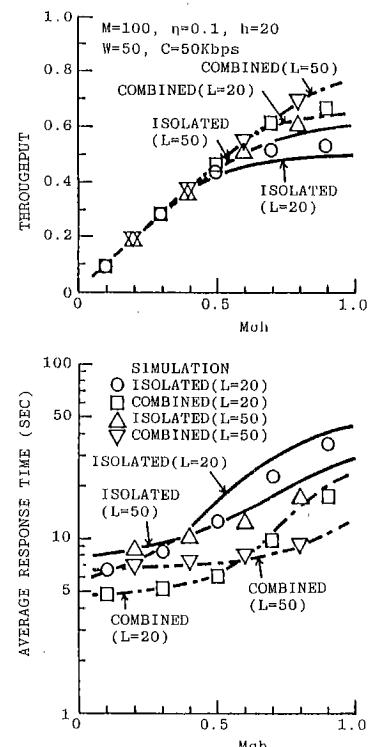


図 4 TDMA 予約通信網におけるスループットおよび平均応答時間と負荷  $Moh$  との関係:  $C=50$  kbit/s

Fig. 4 Throughput and average response time vs.  $Moh$  in the TDMA-Reservation network:  $C=50$  kbit/s.

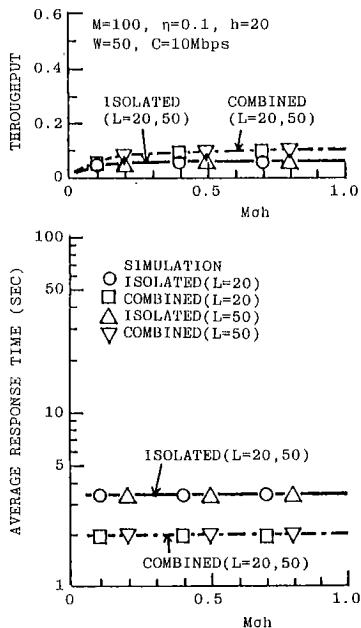


図 5 TDMA 予約通信網におけるスループットおよび平均応答時間と負荷  $M \cdot oh$  との関係:  $C=10$  Mbit/s

Fig. 5 Throughput and average response time vs.  $M \cdot oh$  in the TDMA-Reservation network:  $C=10$  Mbit/s.

と負荷  $M \cdot oh$  との関係であり、各々、 $C=50$  kbit/s,  $C=10$  Mbit/s の場合である。また、図 4, 5においては、 $h=20$  としており、 $L=20$  および 50 の場合を示している。

まず、図 3～図 5 より、分離型の解析結果の精度を調べる。これらの図において、理論値とシミュレーション値とは、一般によく一致している。しかし、図 3 の平均応答時間については、 $C=50$  kbit/s の場合に、 $h$  の値が小さい領域でわずかに誤差が見られる。また、図 4においては、 $M \cdot oh$  の値の大きな領域で理論値とシミュレーション値との間にやや誤差が見られる。これらの誤差の原因是、主として仮想待ち行列を  $M/G/1$  待ち行列で近似したことと考えられる。

次に、分離型と結合型の性能を比較する。図 3～図 5 から、いかなる条件のもとでも分離型より結合型の方がかなり性能が良いことがわかる。これは、分離型の方が結合型より予約フレームの送信回数が多く、予約によるオーバヘッドが大きいことを考えれば当然の結果である。

更に、図 4 より、 $C=50$  kbit/s の場合には、 $M \cdot oh$  の値が大きいときほど、分離型と結合型との性能差も大きくなっている。

これは、ネットワークの負荷が大きい場合には、仮想待ち行列での待ち時間が大きくなるため、これに加わる機会の多い分離型はますます不利になるからである。しかし、図 5 より  $C=10$  Mbit/s の場合には、この現象は見られない。これは、伝送速度が高速になると、チャネル伝搬遅延時間がシステムのボトルネックとなるため、仮想待ち行列での待ち時間は性能にほとんど影響を与えるなくなるからである。また、仮定(A.8)による影響もあると考えられる。

以上より、TDMA 予約通信網の場合には、MAC 副層と LLC 副層とを関連づけて定義した方が、独立に定義するより、システム性能の観点から言えば効率的であると言える。

### 3. スロット付アロハ通信網

#### 3.1 分離型および結合型

本節では、スロット付アロハ通信網における分離型および結合型を定義する。LLC プロトコルとしては、本章においても、前章と同じ CO-LLC プロトコルを用いる。そこで、MAC プロトコルの動作を次に説明する。

##### (1) 分離型

チャネルの時間軸は、データ MAC フレーム長に等しい長さのスロットに分割されている。あるスロットの開始時点で一連のデータ MAC フレームの送信要求が生じると、そのスロットの開始時点からデータ MAC フレームの送信を行う。自局の送信したデータ MAC フレームが衝突したかどうかは、チャネルの放送性により自局自身で知ることができる。自局が送信したデータ MAC フレームに衝突が発生した場合には、その局はスロット当たり確率  $\alpha$  で衝突したフレームと一緒に続いて送信したすべてのフレームの再送を行う。すなわち、go-back- $N$  再送を行う。

##### (2) 結合型

結合型においては、MAC プロトコルの一部を次のように修正する。

一つのスロットを、更に、 $V$  個の小スロットに分割する。但し、 $V=[1/\eta][x]$  ( $x$  は  $V$  より大きくない最大の整数を意味する) とし、 $\eta$  は制御 MAC フレーム長とデータ MAC フレーム長との比を表す。データフレームは、分離型の場合と同様に、データ MAC フレームとして扱われ、1 スロット全部を用いて送信される。一方、各種制御フレームは、制御 MAC フレームとなり、スロット中の  $V$  個の小スロットの中から、等確率で一

つの小スロットを選んで送信される。

この方式の場合、MAC副層のレベルで、上位の LLC副層から受け取ったフレームの種類が、データフレームであるか、または制御フレームであるかを判別する必要がある。従って、MAC副層と LLC副層とを関連づけて定義することになる。

結合型では、一つのスロットで、LLC副層における二つ以上の制御フレームの送信要求が生じた場合でも、異なる小スロットが用いられると衝突なしに送信できる。一方、分離型においては、一つのスロットで、LLC副層における二つ以上の制御フレームの送信要求が生じると必ず衝突が起こる。

また、本章で検討する CO-LLC プロトコルにおいては、送信局の LLC 副層において送信要求の出された一連のデータフレーム(最大  $W$  データフレーム)がすべて、受信局の LLC 副層に渡されるまで、受信局はそれに対する ACK を返送しないとしている。衝突のたびに ACK を返送する方式についても、シミュレーションにより分離型および結合型の性能比較を行ったが、本章で対象とした方式の性能比較と同様の結論を得ている。

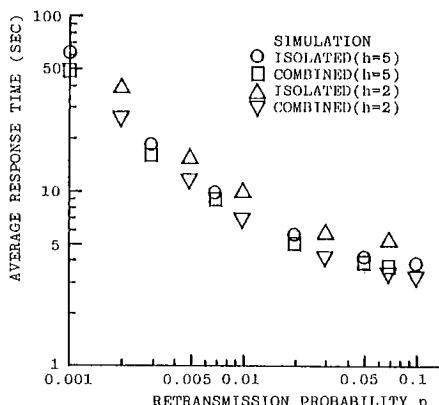
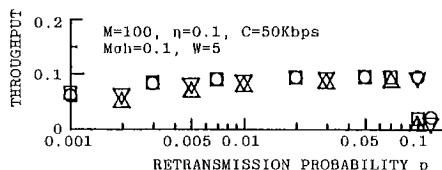


図 6 スロット付アロハ通信網におけるスループットおよび平均応答時間と再送確率との関係： $C=50$  kbit/s

Fig. 6 Throughput and average response time versus retransmission probability in the Slotted-ALOHA network :  $C=50$  kbit/s.

### 3.2 数値例

本節では、スロット付アロハ通信網における分離型および結合型の性能をシミュレーションにより比較する。シミュレーションの前提として、前章の仮定(A 1)～(A 13), (A 18)においてデータスロットという語をスロットに修正したものを用いる。但し、仮定(A 4)および(A 10)については、次のものに変更する。

(A 4 s) MACフレームの誤りは、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。また、一つの局がフレーム衝突を検出した場合、その局は、平均  $1/\eta$  スロットの遅延の後に、衝突フレームおよびその後に送信したすべてのフレームの再送を行う。

(A 10 s) LLC副層における各種制御フレーム(CEフレーム、CE-ACK, D-ACK, CTフレーム、CT-ACK)は、すべて同じ長さとする。分離型の場合、MAC副層において、これらのフレームは長さ1のデータMACフレームとして扱われる。

図6および図7に再送確率  $\eta$ に対するスループットおよび平均応答時間特性のシミュレーション結果の例を示す。これらの図においては、2.4と同様、 $M=100$ ,  $\eta=0.1$ (スロット長1,125ビット、小スロット長

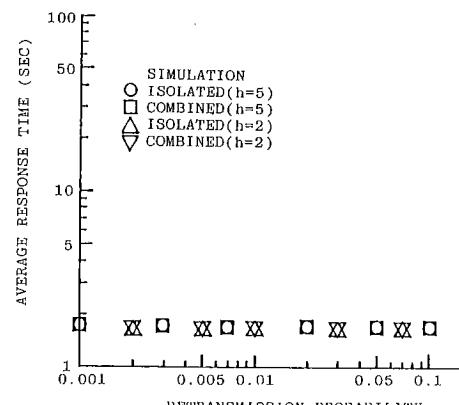
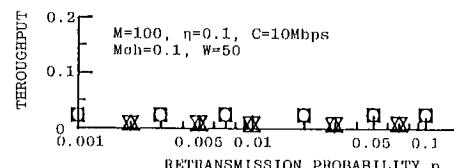


図 7 スロット付アロハ通信網におけるスループットおよび平均応答時間と再送確率との関係： $C=10$  Mbit/s

Fig. 7 Throughput and average response time versus retransmission probability in the Slotted-ALOHA network :  $C=10$  Mbit/s.

112 ビット), チャネル往復伝搬遅延 0.27 秒としている。図 6 および図 7においては,  $h=2, 5$  の二つの場合が示してある。図 6 は,  $C=50 \text{ kbit/s}$  の場合であり,  $W=5$  としている。 $W$  の値が大きすぎると, 衝突による再送フレームの増加によりシステム性能が大幅に劣下するので,  $W=5$ とした。図 7 では  $C=10 \text{ Mbit/s}$  であり, この場合には  $W=50$  としている。これらの図において, シミュレーションランの長さは, すべて 1,050,000 スロットとし, 95% 信頼区間も求めた。シミュレーション結果は,  $\bigcirc\triangle\blacklozenge\blacktriangledown$  で表しており, 信頼区間については, これらの記号の中に含まれるため示していない。

まず, 図 6 について検討する。 $h=2$  の場合には, 分離型と結合型との間にやや性能差が見られる。これは, 平均メッセージ長がかなり小さいときには, LLC 副層において, データフレームの送信要求に対する制御フレームの送信要求の発生する相対的な割合が大きくなるからである。しかし,  $h=5$  の場合には, 分離型と結合型との間の性能差はほとんど見られない。 $h$  の値が 5 より大きな領域においては, これら二つの方式の性能差は, 明らかに更に小さなものとなる。従って,  $h$  の値がかなり小さな領域を除いては, 分離型と結合型との性能差はほとんどないと言える。

また, 図 7 においては, 結合型と分離型との性能差は見られない。

以上より, スロット付アロハ通信網の場合には, 結合型と分離型との性能差はあまりないことがわかる。従って, 結合型の方が分離型より制御が複雑であるということを考慮すれば, MAC 副層と LLC 副層とを関連づけて定義する必要はないと言えよう。

#### 4. む す び

本論文では, 衛星パケット通信網における MAC(多元接続)および LLC プロトコルの構成法について, システム性能の観点から検討を行った。特に, MAC および LLC 副層を関連づけて定義した方式(結合型)と, 独立に定義した方式(分離型)との性能を比較した。MAC プロトコルとしては, TDMA 予約とスロット付アロハとを用いて, 予約によるオーバヘッドのある場合とない場合とを調べた。また, LLC プロトコルとしては, コネクション型を用いた。

TDMA 予約通信網においては, まず, 平衡点解析(EPA)の手法により分離型の解析を行った。そして, 分離型と結合型の性能比較を解析的に行った。その結

果, 結合型の方が分離型よりも効率的であることがわかった。また, スロット付アロハ通信網についても分離型と結合型の性能をシミュレーションにより比較した。この場合には, 結合型を用いることによる性能の改善はほとんど見られなかった。

以上の検討により, MAC および LLC プロトコルを関連づけて定義すべきか否かは, システム性能の観点からは, 用いられる MAC プロトコルに依存するという結論が得られる。この結論からも, ランダムアクセス方式の MAC プロトコルを用いた LAN において, 分離型の階層構成が採用されているのは, 極めて妥当なことであると言える。

TDMA 予約通信網においては, 分離型よりも結合型の方が性能が良いことが示されたので, 今後の課題として, まず, 他の LLC プロトコルを用いた結合型のモデル化, 解析を行うことが考えられる。また, TDMA 予約またはスロット付アロハ以外の MAC プロトコルについても, 結合型および分離型の性能比較を行うことも興味深い。

本論文は, システム性能の観点からのみ検討を行った。しかし, 最終的にプロトコル構成法を決める場合には, OSI 第 2 層より上位の層との関係や他の通信網との接続性の問題が重要な要因となる。これらの点を考慮して, 衛星パケット通信網に最適な MAC および LLC 副層の構成法について, 更に詳細な検討を進めていくことが必要である。

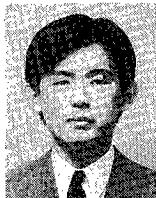
**謝辞** 本研究は, 平成 3 年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)(課題番号 02650244)および第 11 回国際通信研究奨励金によって行われた。

#### 文 献

- (1) 田坂修二, 廣田雅也: “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”, 信学論(B-I), J73-B-I, 4, pp.297-308(1990-04).
- (2) Tasaka S. and Suzuki T.: “A performance comparison of connection-oriented and connectionless LLC protocols in a high-speed satellite data network”, Proc. IEEE INFOCOM'91, pp.489-497(April 1991).
- (3) Chakraborty D.: “VSAT communications networks—An overview”, IEEE Commun. Mag., 26, pp.10-24 (May 1988).
- (4) Chitre D. M. and McCoskey J. S.: “VSAT networks: Architectures, protocols, and management”, IEEE Commun. Mag., 26, pp.28-38 (July 1988).
- (5) 根元義章, 大場俊光, 長沢庸二, 佐藤利三郎, 柿沼淑彦: “衛星利用分散制御型プロトコルによるネットワーク実験”, 信学論(B), J69-B, 11, pp.1370-1377(1986-11).
- (6) 伊藤 昭, 加藤宗子: “多元接続形衛星パケットネットワ

- ーク—LAN 形広域ネットワークの一構成法”, 信学論(B),  
J69-B, 11, pp.1378-1384(1986-11).
- (7) 勅使河原可海, 藤井 章, 手島俊一朗, 飯島信雄: “VSAT  
システムの衛星アクセス方式—AA/TDMA”, 信学技報,  
SAT88-56(1988).
- (8) Waters A. G. and Adams C. J.: “The satellite trans-  
mission protocol of the UNIVERSE project”, Proc.  
ACM SIGCOMM' 84, pp.18-24(June 1984).
- (9) Tanenbaum A. S.: “Computer Networks, Second Edi-  
tion”, Chap3, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ  
(1989).
- (10) Tasaka S.: “Performance Analysis of Multiple Access  
Protocols”, MIT Press, Cambridge, MA(1986).
- (11) Kleinrock L.: “Queueing Systems, Vol. I : Theory”,  
Chap. 5, Wiley-Interscience, New York(1975).

(平成3年7月19日受付)



**鈴木 隆宏**

平1名工大・工・電気情報卒。平3同大  
大学院博士前期課程了。現在、同大学院博  
士後期課程在学中。ローカルエリアネット  
ワークおよび衛星パケット通信網の研究に  
従事。



**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、同大電気情報教授。昭59~60  
UCLA客員研究員。計算機ネットワークの性  
能評価、ネットワークプロトコルの研究に  
従事。IEEE, ACM, 情報処理学会各会員。