

## アロハ形予約チャネルを用いた予約方式衛星 パケット通信網の動特性

正員 田坂 修二<sup>†</sup>      准員 石橋 豊<sup>†</sup>

### Dynamic Behavior of a Reservation System with the ALOHA-Type Reservation Channel for Satellite Packet Communication

Shuji TASAKA<sup>†</sup>, Regular Member and  
Yutaka ISHIBASHI<sup>†</sup>, Associate Member

あらまし 衛星パケット通信網における衛星チャネルアクセス方式としては、長いメッセージをバースト的に発生する多数の局が存在する場合には、アロハ形予約チャネルを用いた予約方式が優れている。しかし、Robertsの予約方式に代表されるこの種の方式の動特性の解析は、これまでに行われていない。本論文は、このような予約方式の動特性を求めたものである。ここで検討した方式は、Robertsの予約方式において、予約されたパケット数が0となってもチャネルが予約用スロットのみのアロハ状態になることをなくしたものである。この方式に対して、状態がフレームごとに変化とした近似モデルを構成し、それに平衡点解析の手法を適用して解析を行った。その結果、この近似理論は、スループット、平均メッセージ遅延およびシステムの安定性の評価には十分役に立ち、これを用いれば良好な特性が得られるフレーム長や予約パケットの再送確率を決定することができた。又、システムの安定性は、平均メッセージ長にはほとんど依存せず再送確率とフレーム長によって決定され、更に安定性はフレーム長の変化に対しては不連続的に変化することなどが明らかとなった。

#### 1. まえがき

衛星パケット通信網については、これまでに多くの研究がなされており、米国や我が国においても実際に実験システムが構成されるまでに至っている<sup>(1), (2)</sup>。衛星パケット通信網の構成に際して最も問題となるのは、衛星チャネルのアクセス方式の選択である。この選択は、網に接続される情報源の統計的性質に依存するが、要求される特性や許容されるシステムの複雑さなども十分に考慮して決定されなければならない。計算機通信における代表的なトラヒックである発生確率の小さなメッセージに対しては、何らかの形でチャネルを共有したアクセス方式を用いることが望ましい。この場合、短いメッセージに対してはアロハ方式が、長いメッセージに対しては予約方式が適している<sup>(3)</sup>。中でも、

長いメッセージを発生する多数の局が存在する場合には、ある程度のシステムの複雑さが許容されるならば、アロハ形予約チャネルを用いた予約方式が優れている<sup>(3)</sup>。この種の方式には、Robertsの予約方式<sup>(4)</sup>、C-PODA方式<sup>(5)</sup>、PR-ALOHA方式<sup>(6)</sup>、文献(6)の方式などがある。これらの方では、予約チャネルにおいて、アロハ形システムの特徴であるチャネルの不安定現象が現れるので、その特性解析に際してはこのことをも考慮する必要がある。

上記の方式のうち、Robertsの予約方式と PR-ALOHA 方式については、いわゆる S-G 解析の手法<sup>(8)</sup>を用いてスループット及び平均遅延特性が求められ、フレーム長が特性に及ぼす影響なども明らかにされている。しかし、これらの特性解析は、システムの安定性を考慮しない静特性に関するものである。又、文献(6)の方式についても静特性しか求められていない。静特性解析によってシステムの特性は一応は明らかになる。しかし、実際のシステム設計に際して必要となる安定性をも考慮した上の予約パケットの再送確率や

†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  
論文番号：昭 56-609[B-187]

フレーム長の決定方法については、静特性解析は無力であり、動特性解析を行うことが必要となる。

本論文は、このような予約方式の動特性を求める、システムの安定性をも考慮しながら良好な特性が得られるようなフレーム長と予約パケットの再送確率の決定方法を明らかにしたものである。本論文で検討する予約方式は、Roberts の予約方式において、予約されたパケット数が 0 となつてもチャネルが予約用スロットのみのアロハ状態<sup>(4)</sup>になることをなくしたものである。すなわち、1 フレームに 1 回周期的に予約用スロットが現れる固定長フレームの方式であり、実質的には PR-ALOHA 方式と同じものである。以下本論文では、2. で解析の容易な近似モデルを構成し、3. でそのモデルに福田によって提案された一つの近似解析手法である平衡点解析<sup>(8)</sup>を用いて動特性を求めている。続いて 4. で、数値計算やシミュレーションを行い、理論の近似の精度について検討する。更に、予約方式のスループット及び平均メッセージ遅延特性、安定性、フレーム長や予約パケットの再送確率が特性に及ぼす影響などについて考察する。

## 2 モデル化

本論文で検討する予約方式(reservation system)は、図 1 に示すように、データパケット長に等しいスロット(slot)に分割された衛星チャネルにおいて、一定数( $L+1$ )個のスロットをまとめてフレーム(frame)を構成し、フレームの第 1 スロットを予約用スロット(reservation slot)とし、残り  $L$  個をデータパケット伝送用のデータスロット(data slot)としたものである。予約用スロットは、更に  $V$  個の予約用小スロット(reservation minislot)に分割されている<sup>†</sup>。メッセージを発生した地上局は、次のフレームの  $V$  個の予約用小スロットにフレーム付アロハ(framed-

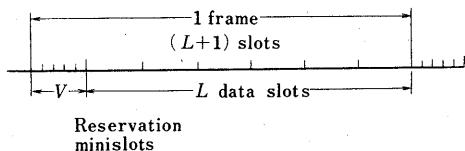


図 1 予約方式におけるフレーム構成  
Fig.1-Frame structure of the reservation system.

<sup>†</sup> この方式の簡単な変形として、図 1 のように全予約用小スロットの合計長を 1 データスロット長に等しくせず、一般に異なった長さとする方式が考えられる。しかし、この変形方式の解析は、後に示す本方式の解析法を若干修正することによって容易にできる。

ALOHA)<sup>(2)</sup>の形式で、すなわち  $V$  個のうちの 1 個を等確率でランダムに選んで、予約パケットを送信する。予約パケットには、発生したメッセージを構成するパケットの数に等しい個数のデータスロットを要求する予約情報が含まれている。送信された予約パケットは、衛星チャネルの放送性によりすべての局によって受信される。従って、送信に成功するとすべての局は送信した局の要求を知ることができるので、システム全体に共通に一つ存在する論理的な待ち行列が構成される。送信の成功によってこの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してメッセージを送信する。一方、予約パケットの送信に失敗すると、以後のフレームでその再送を行う。なお、以後本論文において単にスロットというときには、予約用スロット及びデータスロットの両方を意味するものとする。

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  $M$  個の局を持つ。
- (2) 各局は、各スロットにおいて独立に、確率  $\alpha$  で一つのメッセージを発生する。
- (3) 1 メッセージに含まれるパケット数は、平均  $a$ 、分散  $b$  ( $b \leq a$ ) の一般分布をする。
- (4) 各局は、一つのメッセージの伝送が完了するまでは、次のメッセージを発生しない。
- (5) 衛星チャネルは、 $R$  スロットの round-trip 伝搬遅延を含む。

- (6) パケットの誤りは、互いの衝突によってのみ起るものとし、他の誤りは無視する。

以上の条件の下では、システムの状態はスロット単位で変化すると考えられる。このとき、スロットの開始時点に着目して局のとりうる状態を大ざっぱに分類してみると、T, W, RT, RW, Q, PR, PQ の 7 種類のモード(mode)となる。まず、T モードは、送信すべきメッセージがなく、スロット当り確率  $\alpha$  でメッセージを発生しうる状態である。W モードは、メッセージを発生し、次のフレームの予約用スロットへのアクセスを待っている状態である。このモードは、細かく見れば、現スロットから何スロット先で予約用スロットになるかによって、 $(L+1)$  種類に分けられる。RT モードは、予約パケットの送信の失敗を確認し、現スロットが予約用スロットである状態であり、確率  $\beta$  で予約パケットの再送を行う。又、RW モードは、予約パケット送信の失敗を確認した後、RT モードになるのを待っている状態であり、PR 又は RT モードから入ってくる。このモードは、 $L$  種類に分けられる。Q

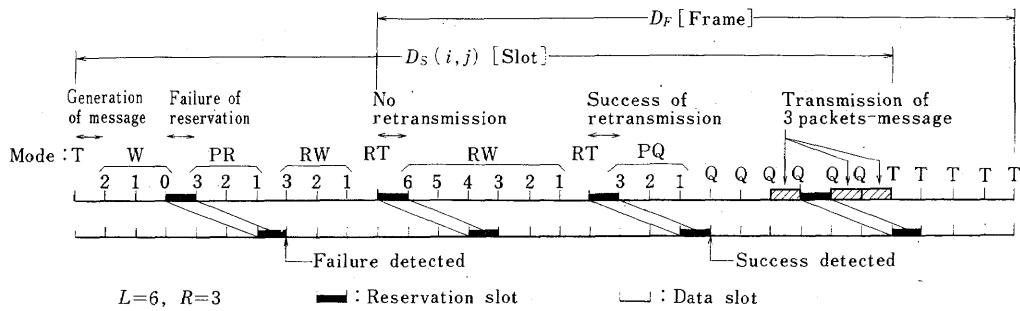


図2 一つの局のモード遷移の例  
Fig.2-An example of mode transitions of a station.

モードは予約パケットの成功を確認し、システム全体に共通の待ち行列に加わっている状態である。PRモードはRWモードの前状態であり、予約パケットの送信に失敗したが伝搬遅延が存在するためにそれを知ることができず、失敗の確認を待っている状態である。このモードはR種類に分けられる。PQモードはQモードの前状態であり、PRモードと同じく伝搬遅延の影響を表しており、R種類に分けられる。

上記のモードの意味をより明確にするために、図2に一つの例を示す。これは、 $L = 6$ 、 $R = 3$ のときに、一つの局が3パケットより成るメッセージを送信する場合のモード遷移の一例を示したものである<sup>†</sup>。W、PR、RW、PQの各モードのところに記入してある数字は、これらの各モード内での更に詳細な分類を表している。最初にTモードにあった局がメッセージを発生してWモードとなり、予約用スロットにおいて予約パケットを送信するが失敗する。送信後3スロット経過して失敗が確認され、次のフレームの予約用スロットで予約パケットの再送が可能となる。しかし、このフレームでは再送を見送り、更に次のフレームで再送を行い成功する。成功を確認した局はQモードに入るが、今の場合、その局の前に2パケットが送信待ちの状態であるとする。このため、その局は2スロット後にパケットの送信を開始し、続けて3個のパケットを送信する。但し、この例では、送信の途中で予約用スロットが現れているため、パケットの送信が中断されている。3個のパケットを送信し終えると、局はTモードとなる。

以上の説明から明らかのように、この予約方式においては、局のとりうる状態の数は多く、しかもその相

互の関係は複雑である。従って、これまでのように、取りうる状態を基にして、元のシステムの動作を正確に表現するマルコフモデルを構成するという方法<sup>(8),(9)</sup>を用いるのは、今の場合困難である。このように、状態変化をスロット単位でとられたマルコフモデルの厳密な構成が困難になるのは、文献(8), (9)におけるシステムでは、すべてのスロットが同じ性質を持っていて、いわばチャネル全体が均質であったのに対して、今のは1フレームに1回予約用スロットが存在するので、チャネルの均質性が損なわれるためである。そこで、本論文では、解析の容易な近似モデルを構成し、それを用いることにする。

本論文で用いるモデルでは、フレームの開始時点にのみ着目し、システムの状態はフレーム単位で変化するものとみなす。すなわち、システムの状態変化をフレーム単位でとらえることによって、状態変化の単位の均質性を保証するのである。この前提の下で、更に元のTモードとWモードをまとめて一つのTWモードで近似する。TWモードでは、フレーム当たり確率

$$\alpha \leq (L+1) \sigma \quad (1)$$

でメッセージを発生し、予約パケットを送信するものとする。

まず、説明の簡単のために、 $R \leq L$ の場合のモデルについて考える。この場合には、予約パケット送信の成否は、そのフレームが終了するまでには判明することになる。従って、図2の例より明らかのように、システム内の局は、フレームの開始時点では、TW, RT, Qの3モードのいずれかにある。これらのモードの相互関係は、図3において $J = 0$ としたもの、すなわち $PQ_i$ 及び $PR_i$ モード（但し、 $1 \leq i \leq J$ ）を取り除いたものとなる。明らかにこのモデルは、元のシステムにおける確率過程を正確に表現したものではなく、

<sup>†</sup> 図中の $D_F$ と $D_S(i, j)$ は、後に平均メッセージ遅延の計算の説明に用いるものである。

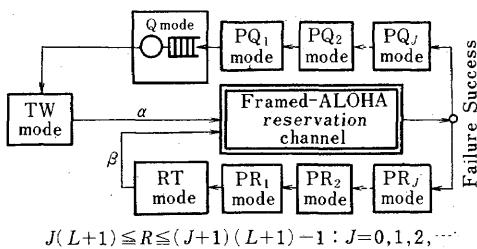


図3 予約方式の近似モデル

Fig.3-An approximate model of the reservation system.

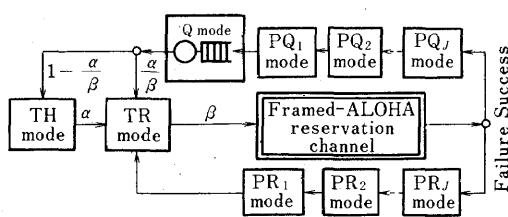


図4 図3の変形モデル( $\alpha \leq \beta$ の場合)  
Fig.4-Modified model of Fig.3 for  $\alpha \leq \beta$ .

近似となっている。例えば、TWモードにある局が予約パケットの送信に成功し、そのフレーム内でデータパケットの送信も完了してしまった場合には、次のフレームの開始時点では再びTWモードとなっている。従って、この場合には、図3のモデルでは、メッセージが発生することなく1フレーム経過した場合と区別ができなくなる。このように、図3のモデルは、フレームの開始時点においてのみ観測を行っているため、システムの状態変化に正確に追従できる形となっていない。そのため、図3のモデルから得られる確率分布は、元の分布とは異なるものとなる。しかし、上記のような現象が発生する確率が小さければ、この違いはほとんど問題とはならない。

次に、一般に

$$J(L+1) \leq R \leq (J+1)(L+1)-1 : J=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

となる場合について考える。上述の  $R \leq L$  の場合は、 $J=0$  のときに相当している。式(2)は、予約パケット送信の成否が、現フレームから  $J$  個先のフレーム内で判明することを意味している。この場合には、フレームの開始時点で局は TW, RT, Q の 3 モードのほかに PQ, PR の両モードにもなりうるので、そのモデルは図3のようになる。図中の PQ<sub>i</sub>, PR<sub>i</sub> モードは、それぞれ PQ, PR モードをフレームを単位として細かく

分類したものであり、現フレームから  $i$  フレーム先で、それぞれ Q, RT モードになる状態である。

### 3. 平衡点解析

図3のモデルでは、フレーム付アロハ予約チャネルへの入口が二つあるので、解析の簡単のため、文献[11]と同様にして入口を一つにまとめると、 $\alpha \leq \beta$  の場合には図4のモデルが得られる。 $\alpha > \beta$  の場合も同様に変形できる<sup>[11]</sup>。図4において、TR, Q モードにおける局数を、それぞれ  $n_1, n_2$  とし、PQ<sub>i</sub>, PR<sub>i</sub> モード（但し、 $1 \leq i \leq J$ ）における局数を、それぞれ  $m_i, l_i$  とすると、状態ベクトル  $n \triangleq (n_1, n_2, m_1, \dots, m_J, l_1, \dots, l_J)$  は、フレームごと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、極めて多くの状態を持つので、その解析には平衡点解析の手法<sup>[8]</sup>を適用する。平衡点解析は、システムの状態を変化させようとする確率的な力がつり合う状態（平衡点）を求め、システムは常に平衡点にあるものとして解析を行う近似解析手法である。平衡点解析の原理と適用の仕方については、文献[8]～[12]を参照されたい。

まず、あるフレームでシステムが状態  $n$  にあるとき、フレーム付アロハ予約チャネルで送信に成功する局の平均個数  $F_R(n)$  は、文献[11], [12]と同様にして、

$$F_R(n) = n_1 \beta (1 - \beta)^{n_1 - 1} \quad (3)$$

となる。更に、1フレームの間にQモードを出てゆく局の平均個数を  $X(n)$  で表すことにする。このとき、各モードにおける局の平均増加数を求めて0とおき、独立な式をまとめると次のようになる。

$$(1 - \alpha/\beta)X(n) - \left\{ M - n_1 - n_2 - \sum_{i=1}^J (m_i + l_i) \right\} \alpha = 0 \quad (4)$$

$$m_1 - X(n) = 0 \quad (5)$$

$$m_1 = m_2 = \dots = m_J = F_R(n) \quad (6)$$

$$l_1 = l_2 = \dots = l_J = n_1 \beta - F_R(n) \quad (7)$$

式(4)は THモード、式(5)は Qモード、式(6), (7)はそれぞれ PQ<sub>i</sub>, PR<sub>i</sub> モードに関する式である。上式を整理すると、次式が得られる。

$$F_R(n) - X(n) = 0 \quad (8)$$

$$n_1 = \{M - n_2 - (1/\alpha - 1/\beta)X(n)\} / (1 + J\beta) \quad (9)$$

上式の非負の実数解  $n_e \triangleq (n_{e1}, n_{e2}, m_{e1}, \dots, m_{eJ}, l_{e1}, \dots, l_{eJ})$  が平衡点である。式(8), (9)を解くためには、関数  $X'(n)$  を具体的に与えることが必要である。しかし、これを厳密に計算するのは困難であるので、取り扱いが容易な式で近似することを考える。

Qモードの待ち行列系は、客がフレーム周期で周期

的に、しかも集団で到着する集団到着個別処理待ち行列 $D^{(X)}/G/1$ とみなすことができる<sup>†</sup>。一つの到着集団に含まれる客数は、一つのフレームの予約用スロットで予約パケットの送信に成功する局数で与えられ、ランダムに変化する。そこで、本論文では、一人の客が $G I^{(X)}/G/1$ 待ち行列内に留まる平均時間 $T$ に関して得られている次の近似式<sup>13</sup>を利用する。

$$T = h + \frac{\rho h}{2(1-\rho)} (\hat{C}_f^2 + \hat{C}_h^2) K + \frac{(g^{(2)} - g) h}{2g} \quad (10)$$

$$K \cong \exp \left\{ -\frac{2(1-\rho)}{3\rho} \cdot \frac{(1-\hat{C}_f^2)^2}{\hat{C}_f^2 + \hat{C}_h^2} \right\}, \quad \hat{C}_f \leq 1 \quad (11)$$

$$\rho = \lambda g h \quad (12)$$

$$\hat{C}_f^2 \cong (1-g_0) C_f^2 + g_0 \quad (13)$$

$$\hat{C}_h^2 \cong (1-g_0) \{ \text{Var}(x)/g + C_h^2 \} / g - g_0 \quad (14)$$

上式にて、 $\rho$ は窓口利用率、 $\lambda$ は集団の平均到着率、 $h$ は平均サービス時間、 $C_f$ 、 $C_h$ はそれぞれ到着間隔、サービス時間の変動係数を表している。又、 $x$ は一つの到着集団に含まれる客数を表す不規則変数であり、次の諸量が定義されている。

$$g_0 \cong P_r(x=0), \quad g \cong E(x), \quad g^{(2)} \cong E(x^2) \quad (15)$$

以上の関係式をQモードの待ち行列系に適用する。但し、本論文で用いているモデルでは時間の単位をフレームとしているので、時間に関する量はすべてフレーム単位で考えなければならない。まず、到着はフレームごとの一定到着であるので、 $\lambda = 1$ 、 $C_f = 0$ となる。次に、 $x$ は平均 $F_R(n_e)$ のポアソン分布をすると仮定すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} g_0 &= \exp \{-F_R(n_e)\}, \quad g = \text{Var}(x) = F_R(n_e) \\ g^{(2)} &= F_R(n_e) + \{F_R(n_e)\}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

このポアソンの仮定による誤差は、 $V$ があまり小さくない限りそれ程大きくはない。更に、サービス時間については、2の仮定(3)より、平均 $a$ スロット、分散 $b$ (スロット)<sup>2</sup>となる。これをフレーム単位に換算するに際しては、1フレーム( $L+1$ )スロットのうち実際にデータパケットに対してサービス可能なのは $L$ スロットだけであるので、1フレームを $L$ スロットとみなす。そうすると、サービス時間の平均は $a/L$ フレーム、分散は $b/L^2$ (フレーム)<sup>2</sup>となり、

$$h = a/L \text{ (フレーム)}, \quad C_h^2 = b/a^2 = C_m^2 \quad (17)$$

となる。従って、 $\rho$ は次式で与えられる。

$$\rho = a F_R(n_e) / L \quad (18)$$

<sup>†</sup> 文献的には、メッセージ内パケット数が幾何分布をする場合に、Qモードの待ち行列系を $M/M/1$ 形で近似しているが、本論文のように $D^{(X)}/G/1$ 形を用いる方が汎用性があり、近似の精度も高い。

式(16)～(18)を用いると、 $T$ に関する次の式が得られる。

$$T = \frac{a}{L} + \frac{a^2(1-e^{-L\rho/a})(1+C_m^2)}{2L^2(1-\rho)} + \exp \left\{ -\frac{2L(1-\rho)(1-e^{-L\rho/a})}{3a(1+C_m^2)} \right\} + \frac{\rho}{2} \quad (19)$$

Qモードにある局の平均個数 $\bar{n}_2$ は、リトルの公式を用いると

$$\bar{n}_2 = F_R(n_e) \cdot T \quad (20)$$

となり、 $X(n_e)$ は次式で近似できる。

$$X(n_e) = \rho/h = L\rho/a \quad (21)$$

$\bar{n}_2$ を $n_{e2}$ で近似し、以上得られた関係式を用いると、平衡点方程式(8)、(9)は次のようになる。

$$n_1 \beta (1-\beta/V)^{n_1-1} - L\rho/a = 0 \quad (22)$$

$$n_1 = \{ M - n_2 - (1/\alpha - 1/\beta) L\rho/a \} / (1 + J\beta) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} n_2 &= \rho + \frac{a\rho(1-e^{-L\rho/a})(1+C_m^2)}{2L(1-\rho)} \\ &\quad + \exp \left\{ -\frac{2L(1-\rho)(1-e^{-L\rho/a})}{3a(1+C_m^2)} \right\} + \frac{L\rho^2}{2a} \end{aligned} \quad (24)$$

但し、上式では、簡単のため平衡点を表す添字 $e$ は省略してある。上式が $\rho$ のみの一変数の方程式となることは明らかである。ここで、スループット $S$ を1スロット当たり正しく伝送される平均データパケット数と定義すると、これは上式の解 $\rho$ を用いて、

$$S = L\rho / (L+1) \text{ (パケット/スロット)} \quad (25)$$

と表される。式(22)～(24)の解が複数個あるときには、スループットが最小のものを選ぶこととする<sup>[8]</sup>。

次に、平均メッセージ遅延 $D_m$ を、メッセージが発生してから正しく受信されるまでの平均スロット数と定義して、これについて考察する。図3のモデルにおいて、局がTWモードを出てから再びTWモードに帰ってくるまでの平均フレーム数を $D_F$ で表すと、これはリトルの公式を用いて次のように表される。

$$D_F = aM/(L\rho) - 1/\alpha \text{ (フレーム)} \quad (26)$$

メッセージが発生してから、その最後のパケットを送信し終えるまでの平均スロット数を $D_S$ で表す。更に、メッセージの発生がフレーム内の第 $i$ スロットで起り、最後のパケットの送信が第 $j$ スロットで行われたという条件の下での $D_S$ を $D_S(i, j)$ で表すと、これと $D_F$ との関係は図2に示すようになる。但し、図2では、 $i = 5, j = 3$ となっている。図2より

$$D_S(i, j) = (L+1)(D_F+1) - i+j+1 \text{ (スロット)} \quad (27)$$

となることが分かる。 $i$ と $j$ は互いに独立であり、 $i$ は $1 \leq i \leq L+1$ で一様分布し、 $j$ は $2 \leq j \leq L+1$ 。

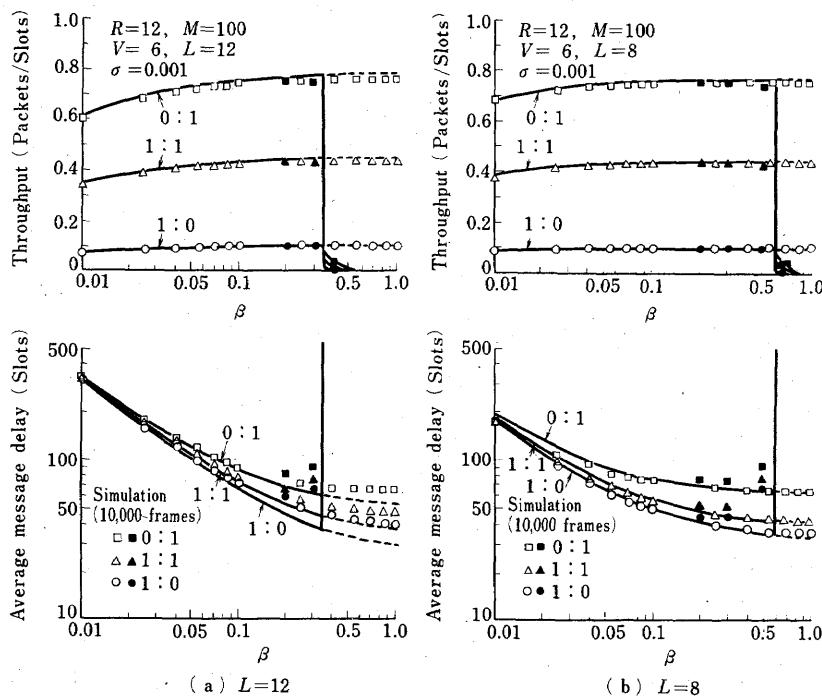


図5 スループット及び平均メッセージ遅延特性  
Fig. 5 -Throughput and average message delay performance.

で一様分布していると仮定する。この条件を用いて、式(27)を  $i, j$  について平均すると、

$$D_S = (L+1)(D_F + 1) + 3/2 \quad (\text{スロット}) \quad (28)$$

となる。 $D_m$  は、 $D_S$  に最後のパケットの伝搬時間  $R$  スロットを加えたものとなり、 $D_m = D_S + R$  で与えられる。この式に、式(1), (26), (28)を代入し、式(25)を用いると、最終的に次式が得られる。

$$D_m = aM/S - 1/\sigma + L + R + 5/2 \quad (\text{スロット}) \quad (29)$$

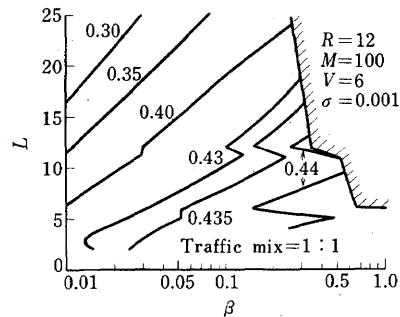
#### 4. 数値例とシミュレーション

本章では、前章の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共に、予約方式の特性について考察する。まず、対象とするトラヒックは、文献(4)と同様に单一パケットメッセージと8パケットメッセージとの混合とし、各局においてこれら2種類のメッセージがある一定の比率で発生するものとする。このようなトラヒック混合(traffic mix)に対する予約方式の特性の例を図5に示す。これは、 $M = 100$ ,  $R = 12$ ,  $V = 6$ ,  $\sigma = 0.001$  のとき、 $L = 12$  及び  $L = 8$  とした場合の  $\beta$  に対するスループット及び平均メッセージ遅延の理論

値と1万フレーム分のシミュレーション結果とを示したものである。図5(a), (b)は、それぞれ  $L = R$  ( $J = 0$ ),  $L < R$  ( $J = 1$ )の場合に対応している。図5には、単一パケットメッセージと8パケットメッセージの発生比率として次の3種のものが示してある。

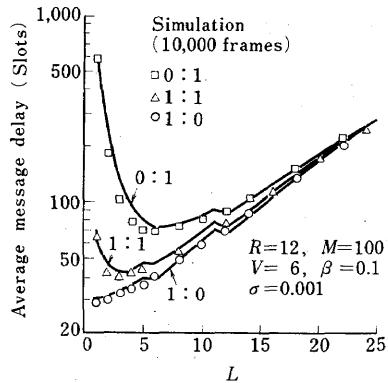
- (i) 1:0 ( 単一パケットメッセージのみ。 $a = 1$ ,  $b = 0$  )
- (ii) 1:1 ( 両者が等確率で発生。 $a = 4.5$ ,  $b = 12.25$  )
- (iii) 0:1 ( 8パケットメッセージのみ。 $a = 8$ ,  $b = 0$  )

図5には、アロハ形システムの特徴である双安定特性<sup>(7)</sup>が現れており、 $L = 12, 8$  の場合には  $\beta$  がそれぞれ 0.35, 0.60 以上の領域ではシステムが不安定になっている。この領域における破線は、スループットが大きい方の安定平衡点<sup>(7)</sup>を選んだときの理論値を参考のために示したものである。図5において、理論値とシミュレーション値とは全般によく一致している。但し、特に  $L = 12$  の場合の安定領域においては、双安定領域に近づくにつれて平均メッセージ遅延の誤差が若干大きくなっている。これは平衡点が極大値の近傍に来ているためであり、平衡点解析には特有の現象であ

図 6 スループット等高線  
Fig. 6 -Throughput contour.

る<sup>(8)～(12)</sup>。なお、シミュレーションにおいて、黒く塗りつぶしてある方はすべての局の初期状態を RT モードとした結果であり、塗りつぶしていない方は初期状態を T モードとしたものである。従って、図 5 より、システムが安定な場合には、初期状態をどちらに選ぼうとも結局は平衡点の近傍に留まることが分かる。一方、双安定特性を示す場合には、1 万フレーム程度のシミュレーションでは、システムは初期状態によってどちらか一方の安定平衡点の近傍にのみ留まっている。この二つのことより、理論はシステムの安定性に関しても正確であることが分かる。従って、本論文の理論は、システムのモデル化や解析の際に大幅な近似を行って得られたものであるにもかかわらず、スループット、平均メッセージ遅延およびシステムの安定性の評価には十分役に立つものであるといえよう。

安定性に関して図 5 より更に分かることは、システムが不安定となる  $\beta$  の値は平均メッセージ長にはほとんど依存せず、 $L$  の値、すなわちフレーム長によって決定されているということである<sup>†</sup>。このことは、同じくフレーム構成のチャネルを用いている予約アロハ衛星パケット通信システムの安定性が平均メッセージ長に大きく依存する<sup>(9)</sup>ことと対照的である。予約方式においてこのような現象が生じるのは次の理由による。まず第 1 に、メッセージ長のいかんにかかわらず一つのメッセージに一つの固定長の予約パケットが対応し、システムの安定性を決定するのは予約パケットのランダムアクセス動作であり、メッセージそのものには依存しないことである。次に、この予約方式では、全チャネル容量のうち  $1/(L+1)$ だけが予約チャネルに

図 7 平均メッセージ遅延と  $L$  の関係  
Fig. 7 -Average message delay versus  $L$ .

割り当てられているので、予約パケットのランダムアクセス動作が  $L$  の値に依存するためである。一方、予約アロハシステムでは、一つのスロットが予約用とデータ用の両方を兼ねているため、平均メッセージ長が長くなり予約されたスロットの割合が多くなると、ランダムアクセスできるスロット数が減少する。すなわち、平均メッセージ長によって実質的な予約チャネルの容量が変化するので、安定性が平均メッセージ長に依存することになる。

予約方式におけるフレーム長と安定性との関係を更に明確にするために、トラヒック混合 1:1 の場合の  $L$  と  $\beta$  に対するスループット等高線図を図 6 に示す。但し、 $L$  は本来離散的な量であるが、図を見やすくするために連続的に描いてある。図中の斜線部は、システムが不安定となる領域を表している。安定領域と不安定領域の境界に注目すると、これは  $L = 12$  と  $11$  の間と  $L = 6$  において不連続的に変化しており、 $L \leq 5$  では不安定領域が消滅していることが分かる。その理由は、予約方式においてはシステムの安定性を決定する予約パケットの再送動作が、フレーム長そのもののみならずフレーム長と伝搬遅延  $R$  との相互関係にも依存しているからである。すなわち、予約パケットの平均再送間隔（フレーム数）は、予約パケットを送信してからその失敗が判明し再送が可能となるまでのフレーム数 ( $J+1$ ) とランダム再送遅延の平均値  $1/\beta$  との和で与えられる。このうち  $J$  は、 $L$  と  $R$  との関係で式(2)を満足するように決まるため、 $L$  に対して不連続に変化するからである。図 6 の場合には、 $L \geq 12$  のとき  $J = 0$ 、 $6 \leq L \leq 11$  のとき、 $J = 1$ 、 $L = 5$ 、4 のとき  $J = 2$ 、 $L = 3, 2, 1$  のときそれぞれ 3, 4,

<sup>†</sup> フレーム長によっては、システムが不安定となる  $\beta$  の値の平均メッセージ長に対する依存度が図 5 の場合よりも大きくなることもある。しかし、その依存度はフレーム長に対するものと比べれば極めて小さい。

6となっている。ある一定のスループットの値を与える等高線がこれらの $L$ の値で不連続的に変化しているのも同じ理由による。以上のように、この予約方式では、衛星チャネルの伝搬遅延と1フレームに1回予約用スロットが存在するというチャネルの不均質性によって、システムの安定性が大きな影響を受けている。なお、図6より明らかのように $L$ の値が小さい程システムが安定になるのは、予約チャネルの容量が大きくなるためである。図6のような等高線図を用いれば、システムの安定性を考慮しながら、最大のスループット（従って、最小の平均メッセージ遅延）を与えるような $L$ と $\beta$ の値を決定することができる。システムの特性の $L$ に対する依存性を具体例で示したのが図7である。図7は、 $\beta = 0.1$ と固定した場合の $L$ に対する平均メッセージ遅延特性である。これによると、各トラヒック混合に対して最適な $L$ が存在することが分かる。

## 5. むすび

本論文では、アロハ形予約チャネルを用いた予約方式に対しフレームごとに状態が変化するとした近似モデルを構成し、それに平衡点解析の手法を適用して動特性を求めた。その結果、スループット、平均メッセージ遅延およびシステムの安定性の評価には、理論は十分役に立つものであることが分かった。又、システムの安定性は、平均メッセージ長にはほとんど依存せず、予約パケットの再送確率とフレーム長によって決定され、更に、安定性はフレーム長の変化に対しては不連続的に変化することが明らかになった。本論文で得られたこれらの結果を用いれば、システムの安定性を考慮しながら良好な特性が得られるようなフレーム長と予約パケットの再送確率を容易に決定することができよう。今後の課題として、まず2の仮定(4)の制約を取り除いて、各局においてメッセージの待ち行列が形成されることを許容したシステムの解析が考えられる。次に、C-PODA方式のように、トラヒックに応じて1フレーム内における予約用スロット数とデータスロット数の配分を動的に変化させるシステムの解析も重要な問題となる。更に、予約方式を、動特性の面からスロット付アロハや予約アロハなどの他の方式と

比較することも必要であろう。

謝辞 御討論頂いた静岡大学福田明助教授、東京大学安田靖彦教授、本学太田正光教授に感謝する。

## 文献

- (1) Jacobs, I.M., Binder, R. and Hoversten, E.V. : "General purpose packet satellite networks", Proc. IEEE, 66, 11, pp. 1448-1467 (Nov. 1978).
- (2) 高橋、柿沼、内田、伊藤、松本、大橋："CS利用用コンピュータ・ネットワーク実験システムの概要", 昭55信学通信全大, 529.
- (3) Lam, S.S. : "Satellite packet communication -multiple access protocols and performance", IEEE Trans. Commun., COM-27, 10, pp. 1456-1466 (Oct. 1979).
- (4) Roberts, L.G. : "Dynamic allocation of satellite capacity through packet reservation", NCC, AFIPS Conf. Proc., 45, pp. 711-716 (1973).
- (5) Ono, K. : "The performance tradeoffs of periodic reservation satellite channels for packet switching multi-access system", Trans. IECE Japan, E63, 2, pp. 104-111 (Feb. 1980).
- (6) 須田、宮原、長谷川："衛星通信回線における競合予約アクセス方式の性能評価", 信学技報, CS80-162 (1980-12).
- (7) Kleinrock, L. and Lam, S.S. : "Packet switching in a multiaccess broadcast channel : performance evaluation", IEEE Trans. Commun., COM-23, 4, pp. 410-423 (April 1975).
- (8) 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).
- (9) 田坂、古川："マルチパケットメッセージを持つアロハ形衛星パケット通信網の特性解析", 信学論(B), J63-B, 12, pp. 1177-1184 (昭55-12).
- (10) 古川、田坂："FADRA衛星パケット通信システムの動特性", 信学論(B), J63-B, 11, pp. 1150-1151 (昭55-11).
- (11) 田坂修二："予約アロハシステムの動特性", 信学論(B), J63-B, 6, pp. 566-573 (昭55-06).
- (12) 古川、田坂："フレーム付アロハチャネルとFADRA方式の平衡点解析", 信学技報, CS79-229 (1980-02).
- (13) 藤木、雁部："通信トラヒック理論", 12章, p. 409, 丸善 (昭55).
- (14) 田坂、石橋："アロハ形予約チャネルを持つ予約方式衛星パケット通信網の動特性", 信学技報, CS80-222 (1981-02).

(昭和56年5月18日受付)