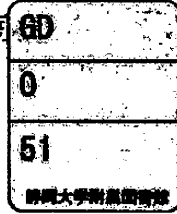


電子科学研究科



0002515435

R

51

# 静岡大学 博士論文

## 過渡流体近似法による 移動無線パケット通信網の特性解析

1993年 4月

静岡大学  
図書

棕本 介士

# 目 次

1. 序論 .....	1
1.1 まえがき .....	1
1.2 ランダムアクセス方式 .....	3
1.3 陸上移動無線システム .....	5
2. ランダムアクセスシステムの特徴解析手法 .....	8
2.1 まえがき .....	8
2.2 システムモデル .....	9
2.3 S-G解析 .....	11
2.4 マルコフ解析 .....	13
2.5 平衡点解析 .....	16
2.6 過渡流体近似解析 .....	25
2.7 まとめ .....	36
3. 時変伝送路上のスロット付きアロハシステムの特徴解析 .....	39
3.1 まえがき .....	39
3.2 システムモデル .....	40
3.3 特徴解析 .....	43
3.4 解析結果の検討 .....	50
3.5 時変伝送路の影響 .....	55
3.6 まとめ .....	59

4. 時変伝送路上のスロット付きアロハシステムの特性解析	
捕捉効果のある場合	61
4.1 まえがき	61
4.2 システムモデル	63
4.3 特性解析	65
4.4 捕捉効果モデル	68
4.5 結果と考察	71
4.6 まとめ	77
5. ゾーン構成のスロット付きアロハ方式	79
5.1 まえがき	79
5.2 システムモデル	82
5.3 特性解析	84
5.3.1 静特性解析	85
5.3.2 動特性解析	85
5.4 数値例と考察	89
5.5 まとめ	100
6. むすび	102
付録: その他のランダムアクセス方式に対する過渡流体近似解析	107
A.1 ISMA方式の過渡流体近似解析	107
A.1.1 システムモデル	107
A.1.2 過渡流体近似解析	109

A. 1. 3 解析結果の考察 .....	112
A. 2 純アロハ方式の過渡流体近似解析 .....	117
A. 2. 1 システムモデル .....	117
A. 2. 2 過渡流体近似解析 .....	118
A. 2. 3 解析結果の考察 .....	123
A. 3 CSMA方式の過渡流体近似解析 .....	125
A. 3. 1 システムモデル .....	125
A. 3. 2 過渡流体近似解析 .....	128
A. 3. 3 解析結果の考察 .....	133
参考文献 .....	136
謝辞 .....	142

# 1. 序論

## 1.1 まえがき

無線によるパケット通信網は、バースト的情報源への適応性、網トポロジーの簡単化、移動端末の収容、端末の参入離脱への柔軟性など多くの特長を備えており、小型コンピュータの普及等によるデジタル伝送需要の増加など時代の要求ともあいまって、その研究は、近年益々盛んになる傾向にある。中でも、端末機器の小型軽量化技術の発展により、移動端末を含むシステムの需要が増大している。こうした状況を反映して、端末の移動やそれに伴う伝送路の状態変化を考慮した特性解析の必要性が認識され、数多くの研究が行われている。

ランダムアクセスシステムの研究において、端末の移動に関連して特に考慮すべき問題の1つに、端末と局間の伝送路状態の時間変化がある。従来のランダムアクセスシステムの特性解析においては、端末と局間の伝送路の状態はパケット送信時点毎に独立であるとする無記憶伝送路モデルが仮定されているが、これは、端末の移動による伝送路の状態変化が、パケット送信間隔などに比べて十分に速い場合にのみ成り立つ仮定である。実際には、端末の移動速度は、パケット送信間隔等の端末動作の状態変化速度に比べ一般に緩慢であると考えられるので、より現実的なシステム特性の考察には、記憶のある伝送路モデルを用いる必要がある。記憶のある伝送路モデルを用いたランダムアクセスシステムの特性解析に関しては、これまで全く報告されていなかったが、最近になってその必要性が指摘され、シミュレーション等による簡単な考察が行われている<sup>[28]</sup>。

ランダムアクセスシステムの研究において、端末の移動を考慮すべきもう1つの重要な問題は、端末のゾーン間移動に関する問題である。複数の基地局で構成されたゾーン構造の網形態は、周波数利用効率の向上、端末装置の小型軽量化、通信不能地域の減少など様々な利点を有している<sup>[36]</sup>。このため、陸上移動無線システムでは、一般にゾーン構造の網形態をとることが多い。ランダムアクセス方式をそうしたゾーン構造の移動無線システムに用いた場合の特性評価に関しては、現段階で報告されている研究は極めて限られている。そこでの解析は、無限個

数の端末を仮定した静特性解析が中心であり、パケット送信時点毎の端末位置（即ち、その端末がどのゾーンに属しているか）については独立であると仮定されている<sup>[37] [38]</sup>。

本論文では、ランダムアクセスシステムの特性評価において端末の移動に関連して生じる様々な問題を扱う。そこでは、各端末の状態は、その動作状態と位置状態（あるいは伝送路状態）によって表される。一般に、ランダムアクセスシステムの特性解析は、各端末の取りうる状態数が増加するに従って複雑なものとなる。本論文では、最初に、こうした複雑なシステムの諸特性を求めるための近似解析手法を開発する。この解析手法は、流体近似<sup>[40]</sup>を用いてシステムの諸特性を数値的に求めるもので、従来の手法では解析が極めて困難であると考えられる各種の複雑なシステムの動特性を比較的容易に求めることができる。

この近似解析手法は、過渡流体近似解析と呼ばれ、その詳細は、最も基本的なランダムアクセスシステムの1つであるスロット付きアロハシステムを具体例として2. で示される。2. では、また、ランダムアクセスシステムの代表的な解析手法であるS-G解析、マルコフ解析、そして平衡点解析<sup>[3]</sup>の紹介を行う。

3. では、端末の移動により生じる伝送路状態の時間変化がスロット付きアロハシステムのシステム特性に与える影響を考察する。そこでは、各端末と局間の伝送路状態は、端末の移動によりマルコフ的に遷移するものと仮定される。また、その伝送路状態としては、3つの極端な状態、即ち、非常に良好な状態、伝送路が存在しない状態、極めて大きな歪を生じる状態、が仮定される。この様に簡略化した伝送路モデルを用いる目的は、記憶のある伝送路モデルに基づくスロット付きアロハシステムの解析結果を比較の見通しのよい形で示すことにより、端末の移動がシステムの諸特性へ与える基本的な影響を定性的に考察するためである。

4. では、より実際的な状況下での伝送路状態変動の影響を考察するために、パケットを送信する端末の位置により局における平均受信電力が異なるものと仮定し、それに基づいて、雑音による伝送の失敗や捕捉効果<sup>[7]</sup>を考慮したシステム特性の解析が行われる。

5. では、ゾーン構造のスロット付きアロハシステムにおいて、端末の移動がシステム特性に与える影響を考察する。ここでは、システムは複数の基地局と多数の移動端末により構成さ

れているものと仮定される。各基地局はゾーンと呼ばれる互いに重複する可能性のある領域をカバーしているものされ、端末はそれらのゾーン間を自由に移動するものと仮定される。こうしたゾーン構造のランダムアクセスシステムの実験評価には、端末の地理的な分布、移動速度などを考慮した特性解析が必要となる。そのため、ここでも各端末の状態は、その動作状態と位置状態によって表現される。ゾーン構造のランダムアクセスシステムの研究は、比較的新しい研究分野であるので、静特性解析などの基礎的な考察も不足している。そのため、5. では最初に、静特性解析を行い、ゾーン構造のシステムの基本的な特徴を明らかにする。続いて、過渡流体近似解析による動特性解析を行い、端末の移動速度やゾーンの重り具合、トラヒックの偏りなどの影響を定量的・定性的に考察する。

本論文では、また、付録として陸上移動無線システムの代表的なランダムアクセス方式<sup>[39]</sup>である純アロハ方式<sup>[40]</sup>、CSMA方式<sup>[41]</sup>、及びISMA方式<sup>[42]</sup>への過渡流体近似解析の適用方法を示す。そこでの説明は、従来の理想伝送路モデルを仮定した場合を具体例として行われる。伝送路状態変動や捕捉効果等の存在を仮定したシステムの特性解析は、各方式ともスロット付きアロハ方式の場合と基本的には同様にして行うことができる。しかし、各アクセス方式はそれぞれに異なる特徴を持っているため、解析方法が基本的に同じであっても、その解析結果は異なる特性を示す可能性がある<sup>[43]</sup>。そうした端末の移動に関連して生じる各々のランダムアクセス方式に固有の問題については、今後の課題として残される。

以下、この章の後半では、本論文の理解を容易にするための準備として、ランダムアクセス方式及び陸上移動無線システムの概要を簡単に示す。

## 1.2 ランダムアクセス方式

無線によるパケット通信網の研究は、ハワイ大学のALOHAシステムに始まるとされている [1]。ALOHAシステムで採用されたアクセスプロトコルは、アロハ方式と呼ばれ、その後の研究に大きな影響を与えている。以下では、アロハ方式の概要を説明し、ランダムアク

セス方式の発展と関連分野の研究状況を紹介する。

アロハ方式では、各端末で発生した情報は、送・受信局アドレス、制御情報などが付加され、図1-1の様なパケットとして送信される。パケットの送信は、端末毎に独立に同一のチャネ



図1-1 典型的なパケットの形式

ル上で行われる。このため、受信局ではパケット同士が衝突してその内容が正しく受信されない場合が生じる。受信局は、パケットに含まれる誤り検出情報（CRCなど）により、パケット伝送の成否を検出し、パケットが正しく受信された時のみ、Ackを返送する。送信端末は、パケット送信後一定時間たってもAckを受信できないとき、パケット伝送は失敗であったと判断し、繰り返し衝突を避けるためのランダム遅延を行った後、パケットの再送を行う。

この様にランダム遅延によりパケットの繰り返し衝突を避けるアクセス方式は、総称してランダムアクセス方式と呼ばれている。主なランダムアクセス方式には、上述のアロハ方式（以下、純アロハ方式と呼ぶ）の他に、スロット付きアロハ方式、CSMA方式などがある。スロット付きアロハ方式については、2. で、CSMA方式等については付録で詳しく紹介する。

ランダムアクセス方式の様にパケット同士の衝突を見越したアクセス方式は、一般にコンテンション方式と呼ばれている。コンテンション方式には、ランダムアクセス方式の他に、確定的な手段によって繰り返し衝突をさけるコリジョンリゾリューション方式があり、この範疇の方式としては、TREE [44]、WINDOW [45] 方式などがよく知られている（図1-2）。

ランダムアクセスシステムは、他のアクセス方式と比較して端末の参入離脱が容易であるという特長を持っており、不特定多数の端末が頻繁に出入する可能性のある陸上移動通信網には



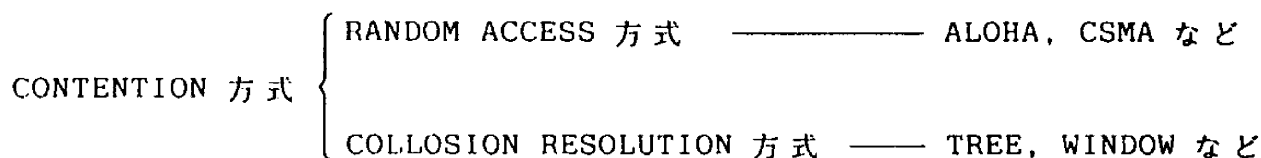


図 1 - 2 コンテンション方式の分類

最も適した方式であると考えられている。

本論文では、理論的な取り扱いが比較的容易なスロット付きアロハ方式を中心に考察が進められる。スロット付きアロハ方式は、各端末の packets 送信時刻を同期させることにより、チャネル容量を純アロハ方式の 2 倍に向上させるものである。この方式は、純アロハ方式とともに、最も基本的なランダムアクセス方式と考えられ、また実現が比較的容易で、高速通信にも利用可能であるとされている。このため、現在も数多くの研究が行われ、多数のシステムが開発、運用されている。

### 1.3 陸上移動無線システム

ランダムアクセスシステムの実験的解析に関する初期の研究は、衝突がないときそしてそのときにのみ packets の伝送が成功するとした理想チャネルを仮定したものがほとんどであった。しかし、陸上移動無線システムにおいては、各端末から送信された電波は、山やビルディングなどの障害物やパスロスなどのためにさまざまな減衰を受けて局に到達する。また、端末と局間には、一般に多数の電波伝搬路が存在し、各伝搬路を通過して到達した電波は、その伝搬路長の違いや端末の移動方向及び速度に関連したドップラー周波数の違いなどにより複雑に干渉し合って、受信局における受信電力の急激な変動（フェージング）を生じさせる<sup>[31] [46]</sup>。

こうした受信電力の時間変化は、一般に、変動周期が比較的長いもの（長期間変動）と短い

もの（短期間変動）とに分類される。陸上移動無線システムにおいては、長期間変動の原因として、シャドーイングとパスロスが考えられ、この変動は、主に端末の位置に依存している。長期間変動による受信信号の包絡線の変化は、短期間平均（局所平均とも呼ばれる）が対数正規分布になるとされている。一方、短期間変動は、主に端末の移動方向や速度に依存しているものと考えられ、これによる受信信号の包絡線の変化は、陸上移動無線システムの場合、レイリー分布（衛星回線では、ライス分布）に従うとされている。このため、陸上移動無線システムにおける短期間変動は、レイリーフェージングとも呼ばれる。

受信電力の違いは、捕捉効果や雑音による伝送誤りなど様々な形でランダムアクセスシステムの特性に影響を与えるものと考えられる。また、CSMA方式の様に他の端末の動作状態を観測してパケットの衝突を回避する方式では、端末と局間ばかりでなく、端末同士の間での伝送路の状態もシステム特性に大きな影響を与える（隠れ端末問題<sup>[17]</sup>）。

陸上移動無線システムにおいては、都市化、伝送レートの高速度化、利用周波数の高周波化などにより、こうした問題の考察がますます重要な課題となっている。しかし、無線伝送路自体の研究については、かなり詳細な報告がなされているものの、一般に複雑過ぎて、そのままではランダムアクセスシステムの特性解析への応用には適していない。近年、衛星回線を利用した移動無線ランダムアクセスシステムの伝送路モデルとして、マルコフ伝送路モデルが注目されている<sup>[17][18]</sup>。このマルコフ伝送路モデルでは、局（衛星）と端末間の伝送路状態は2つの状態（端末からの電波の局における平均受信電力が比較的大きな状態と小さな状態）間をマルコフ的に遷移するものと仮定される。平均受信電力が小さな状態は、シャドーイングを表しているものとされ、ライスフェージング等の短期間変動は、各状態におけるランダム変動として解析に考慮される。

陸上移動無線によるランダムアクセスシステムの特性解析においても、同様なマルコフ伝送路モデルの適用が考えられ、実際そうした伝送路モデルに基づく研究が開始されている<sup>[31]</sup>。本論文でも、陸上移動無線システムの伝送路モデルとしてマルコフ伝送路モデルを仮定した特性解析が行われ、端末の移動がランダムアクセスシステムに与える様々な影響が考察される。

こうした伝送路モデルは、実際の陸上移動無線システムにおける伝送路の特徴を抽象化したものであり、必ずしも現実の伝送路の特性を忠実に表わしたものではないが、従来の無記憶伝送路モデルでは考慮することのできなかつた様々な問題への新しい接近法としてその発展が期待されている。

従来のランダムアクセス方式の特性解析に関する多くの論文の場合と同様、本論文でもACKの伝送失敗やスロットの同期はずれ等はないものと仮定して議論が展開される。これは、解析及び説明の簡単化のためであるが、これらの問題は、移動無線システムの実現にあたっては特に重要な問題となる可能性があり、本論文ではそうした点の指摘も随時行われている。

本論文の4. では、パケットの伝送誤りや捕捉効果に関する考察が行われるが、そうした問題では、用いられる変復調方式がどのようなものであるかによってシステム特性が大きく異なる可能性がある。しかし、本論文では、伝送誤り確率や捕捉確率が受信電力等の関数としてあらかじめ与えられているものとして特性解析が行われる。このため、変復調方式を陽に仮定した考察は行われぬ。移動無線システムの変復調方式としては、従来の狭帯域伝送技術の他に、スペクトル拡散方式を用いたものも数多く研究されている<sup>[27]</sup>。スペクトル拡散を利用したシステムの研究は、捕捉効果に関する研究と密接な関係があり、その特性解析には受信電力の大小に加えて捕捉窓等を考慮したより詳細な考察が必要となる<sup>[22] [24]</sup>。本論文で用いられる解析手法や結果の一部は、スペクトル拡散技術を用いたシステムにおいても適用可能であると思われるが、この点の詳細な検討には、具体的に変復調方式を仮定するなどより現実的な考察が必要となる。

## 2. ランダムアクセスシステムの特徴解析手法

### 2.1 まえがき

Abramson による ALOHA システムの特徴解析以来、ランダムアクセスシステムの特徴解析は、様々な方法で行われてきた。この章では、そうした特徴解析法の内、最も代表的ないくつかの手法及び本論文で新たに提案する過渡流体近似解析法の紹介をスロット付きアロハシステムを具体例として行う。

ランダムアクセスシステムの特徴解析は、その目的によって静特徴解析と動特徴解析とに大別される。静特徴解析は、最適トラヒック量やチャネル容量などの導出を目的として行われ、通常、S-G 解析と呼ばれる手法が用いられる。S-G 解析では、1 スロット当りに送信されるパケットの総量（トラヒック）が、ある平均値（通常、 $G$  で表される）を持ったポアソン分布に従うものと仮定され、それを基にスループット（通常、 $S$  で表される）などが求められる<sup>[1]</sup>。しかし、平均トラヒック量  $G$  は、実際のシステムにおいては、確率的に変動するシステムの状態に依存してスロット毎に変化するものである。

そうしたシステム状態の確率的な変動を考慮した特徴解析は動特徴解析と呼ばれている。動特徴解析では、全端末数、パケット生成確率、パケット送信確率といったシステムパラメータを具体的に設定し、それに基づいてスループットや平均伝送遅れなどのシステム特性が求められる。動特徴解析は、一般に、システムを1つの確率過程としてモデル化することから始められる。そこでは、パケット生成時間やパケット送信間隔は、通常、簡単化のために指数分布あるいは幾何分布といった無記憶分布に従うものと仮定される。次に、得られた解析モデルに対して、マルコフ過程としてその振舞を記述することができる様に、適当な状態変数（通常、在庫パケット数などが用いられる）が選ばれる。このマルコフ過程を厳密に解析し、それに基づいて各種のシステム特性のを求める手法は、一般にマルコフ解析<sup>[2]</sup>と呼ばれる。マルコフ解析は、在庫パケット数の分布など詳細なシステム特性を厳密に求めることができる反面、端末数や各端末の状態数が増加するとその計算量が急激に増加するという欠点がある。このため、

複雑なシステムの特性評価には、通常、近似解析が用いられる。

近似解析の手法としては、平衡点解析<sup>[3]</sup>、拡散近似解析<sup>[4]</sup>など様々なものが提案されている。本論文で提案する過渡流体近似解析も、そうした近似解析手法の一つである。過渡流体近似解析は、複雑なシステムの近似解析に有効なばかりでなく、従来の近似解析手法では困難であった過渡特性の解析にも利用可能である。本論文での特性解析は、主に、この過渡流体近似解析を用いて行われる。

以下では、スロット付きアロハシステムを具体例として各種の解析手法の基本的な原理を紹介する。この目的のために、まず最初に、スロット付きアロハシステムの解析モデルを2.2で定義する。このシステムの静特性は、2.3でS-G解析により示される。スロット付きアロハ方式は理論的な取り扱いが比較的容易であり、2.2で示す様な”理想的”な状況を仮定した場合、マルコフ解析による厳密な動特性解析が可能である。マルコフ解析については、2.4で具体的に紹介される。2.5では、従来から知られている近似解析手法の例として、過渡流体近似解析と関係の深い平衡点解析が紹介される。最後に、2.6で過渡流体近似解析を紹介する。そこでは、過渡流体近似解析の数学的な根拠が示されるとともに、具体的な数値例による解析結果の考察が行われる。

純アロハ方式、CSMA方式などスロット付きアロハ方式以外のシステムへの過渡流体近似解析の適用については、付録で紹介する。

## 2.2 システムモデル

1つの局とM個の端末からなる集中形のスロット付アロハシステムを考える。ランダムアクセスシステムの端末動作は、新規に生成されたパケットを直ちに送信するか、再送パケットと同様ランダム遅延を行った後送信するかによって、2通りに分類される。前者は、I F T (Immediate First Transmission)、後者は、D F T (Delayed First Transmission)と呼ばれている<sup>[5]</sup>。ここでは、比較的解析の容易なD F T形の端末モデルを仮定して、過渡流体近似解析

を説明する。I F T形のシステムは、等価な特性を持ったD F T形のシステムに変換することが可能である<sup>[6]</sup>。

図2-1は、D F T形端末の動作を示している。パケットを持っていない状態（この状態を

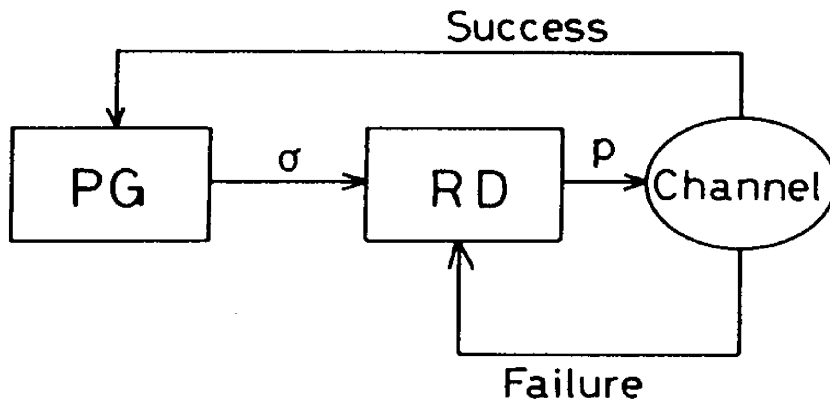


図 2 - 1 D F T 端 末 の 動 作

P G (Packet Generating) モードと呼ぶ)にある端末は、スロット当り確率 $\sigma$ で新パケットを生成し、ランダム遅延状態（この状態をR D (Random Delay) モードと呼ぶ)となる。R Dモードにある端末は、スロット当り確率 $p$ でそのパケットの送信を行う。送信されたパケットは、他のパケットとの衝突がない時、そしてその時に限り、正しく局に受信されるものと仮定する（本論文では、この仮定を満たす伝送路は理想伝送路と呼ばれる）。また、パケット伝送の成否は直ちに各端末に知らされるものとする。パケットの伝送に成功した端末は、P Gモードに戻り、次のパケットの生成を行う。パケットの伝送に失敗した端末は、R Dモードに戻り、伝送が成功となるまでスロット当り確率 $p$ でパケットの送信を繰り返す。

ランダムアクセス方式のシステムモデルとしては、上述の様な照会応答形端末を仮定したものが最も一般的であるが、他に各端末が送信用バッファを複数個持っている場合や音声パケット等を想定して衝突回数や経過時間によってパケットが破棄されるとする場合など上述とは異

なるシステムモデルに基づいた研究も行われている<sup>[7]</sup>。本論文では、議論の簡単化のため、パケット損失のない照会応答形システムのみを取り扱うが、ここで提案する過渡流体近似解析は、それ以外のシステムの特徴解析においても利用可能であると考えられる。

### 2.3 S-G解析<sup>[1]</sup>

ランダムアクセスシステムの特徴解析は、チャネル容量などの解析を目的とした静特性解析と、パケット送信確率等を具体的に設定してスループットや平均伝送遅れなどを求めることを目的とした動特性解析とに分けられる。静特性解析は、通常、S-G解析と呼ばれる手法を用いて行われる<sup>[8]</sup>。S-G解析では、1スロット当りに送信されるパケットの総量（トラヒック）が、ある一定の平均値（通常、 $G$ で表される）を持ったポアソン分布に従うものと仮定され、それを基に最適な平均トラヒック量やチャネル容量などが求められる。

即ち、平均トラヒック量  $G$  が与えられると、1つのスロットで送信されるパケットの総数  $K$  は、ポアソン分布、

$$Prob(K = k) = G^k \cdot \exp(-G) / k! \quad (2-1)$$

に従うと仮定される。2.2の仮定の基では、あるスロットでパケットの伝送が成功するのは、そのスロットで伝送されるパケットが唯1つである時に限られる。従って、1スロット当りの平均伝送成功パケット数、即ち、スループット  $S$  は、

$$S = Prob(K = 1) = G \cdot \exp(-G) \quad (2-2)$$

で与えられる。

上式は、図2-2に示す様な曲線となる。この曲線の最大値は、一般に、スロット付きアロハ方式のチャネル容量  $C$  と呼ばれている。この  $C$  は、式(2-2)を  $G$  で微分し、0と置くことにより、容易に求められ、

$$C = \exp(-1)$$

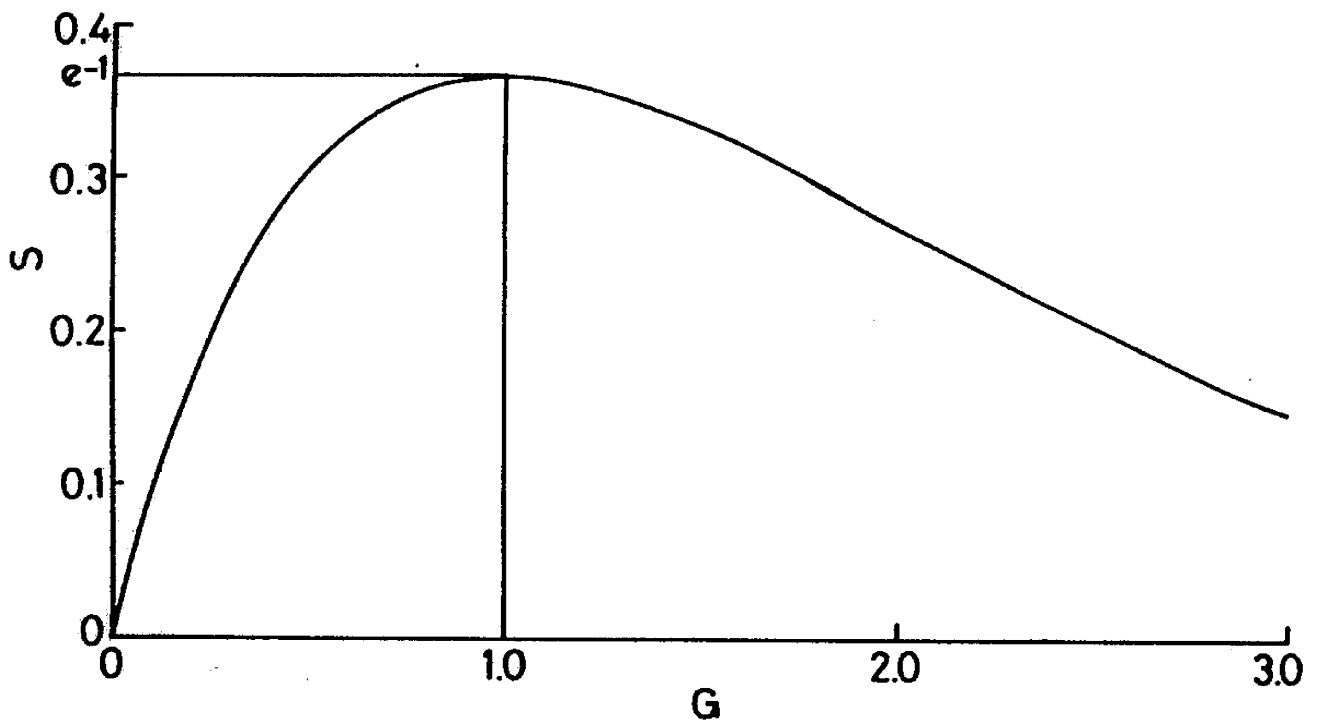


図 2 - 2. スロット付きアロハ方式の  $S - G$  特性



となる。また、この時の平均トラヒック量  $G$  は最適平均トラヒック量  $G_{opt}$  と呼ばれ、 $G_{opt} = 1$  である。

## 2.4 マルコフ解析<sup>[2]</sup>

各スロットの開始時点を隠れ点として、端末の動作状態を観測すると、各端末は、常に、PGあるいはRDモードのいずれかにある。あるスロットの開始時点において、RDモードにある端末の数を表す確率変数を  $n$  とすると、この時、PGモードにある端末の数は  $M - n$  で与えられる。PGモードにある端末は、スロット当り確率  $\sigma$  で新パケットを生成すると仮定されているので、このスロットで生成されるパケットの総数、即ち、PGモードからRDモードに移る端末の数  $K$  は、次の様な平均  $(M - n)\sigma$  の2項分布となる。

$$Prob(K = k) = \begin{cases} 0 & k > M - n \\ \binom{M - n}{k} \sigma^k (1 - \sigma)^{M - n - k} & k \leq M - n \end{cases} \quad (2-3)$$

一方、このスロットでパケットの伝送が成功する確率  $S(n)$  は、RDモードにある  $n$  個の端末の内、唯1つがパケットを送信する確率に等しく、

$$S(n) = np(1 - p)^{n-1} \quad (2-4)$$

で与えられる。

DF Tでは、あるスロットでの新パケットの生成数とパケット伝送の成否は完全に独立しているので、あるスロットの開始時点における  $n$  が与えられると、次のスロットの開始時点における  $n$  の分布は、式(2-3),(2-4)より容易に求められる。即ち、このシステムは、 $n$  を状態変数とし、その状態がスロット毎に遷移する離散マルコフ連鎖として表すことが可能である。その状態遷移図は、 $n = 0 \sim M$  の  $M + 1$  個の状態からなる図2-3の様なものとなる。このマルコフ連鎖の状態遷移確率行列  $P$  (その要素を  $p_{ij}(i, j = 0 \sim M)$  とする) は、

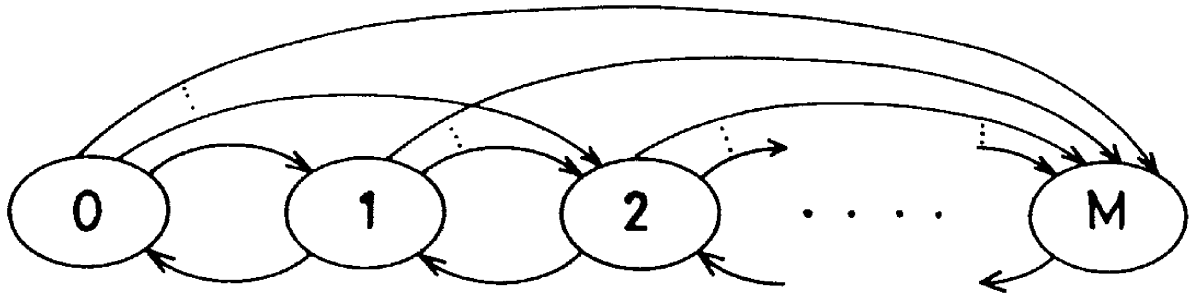


図 2 - 3 スロット付きアロハシステムの状態遷移図

$$p_{ij} = \begin{cases} 0 & j \leq i - 2 \\ S(i) \cdot \text{Prob}(K = 0) & j = i - 1 \\ S(i) \cdot \text{Prob}(K = j - i + 1) + \{1 - S(i)\} \cdot \text{Prob}(K = j - i) & j \geq i \end{cases} \quad (2-5)$$

で求められる。

第  $t$  スロットの開始点におけるシステム状態  $n$  の分布を確率ベクトル

$$\Pi_{n(t)} = (\text{Prob}(n(t) = 0), \text{Prob}(n(t) = 1), \dots, \text{Prob}(n(t) = M)) \quad (2-6)$$

(ここに、 $n(t)$  は第  $t$  スロットの開始点における  $n$  の値を表す確率変数である。) を用いて表すとすると、第  $t+1$  スロットの開始点における確率ベクトル  $\Pi_{n(t+1)}$  は、状態遷移確率行列  $P$  を用いて、

$$\Pi_{n(t+1)} = \Pi_{n(t)} P \quad (2-7)$$

で与えられる。スロット付きアロハシステムの過渡特性は、この漸化式を用いて再帰的に求めることができるが、実際にはそうした解析結果は報告されていない。

式 (2-7) の様な漸化式で表されたマルコフ連鎖の過渡解析手法としては、一般に Z 変換を用

いた手法や固有値に着目した接近法などが知られているが<sup>[8]</sup>、ランダムアクセスシステムの解析には適用されていない。これは、従来のランダムアクセスシステムの研究がもっぱら定常特性の解析に向けられていたためであると考えられる。しかし、過渡解析の重要性は明らかであり、今後の発展が期待される。本論文では、近似解析手法の説明と関連して、スロット付きアロハシステムの過渡特性に関する簡単な考察が行われる。しかし、3章以降の端末の移動の影響を考察する際には、従来と同様、定常特性を中心に議論を展開する。

図2-3のマルコフ連鎖は、明らかに既約であり、かつ非周期的な時不変マルコフ連鎖であるから、定常解（極限確率）が存在する<sup>[8]</sup>。式(2-7)の定常解 $\Pi_{n(\infty)}$ は、方程式

$$\Pi_{n(\infty)} = \Pi_{n(\infty)} P \quad (2-8)$$

を解くことにより求められる。この計算には、通常、行列 $P$ の特徴（ $j \leq i-2$ のとき  $p_{ij} = 0$ ）を利用して計算時間を短縮する手法が用いられる<sup>[2]</sup>。しかし、それでも、その計算時間は $M$ のほぼ2乗に比例して増加するため、端末数の大きなシステムでは、かなり長時間の計算が必要となる。

ランダムアクセスシステムの定常特性を評価する上で最も重要な評価量は、スループットと平均伝送遅れであるとされている。そうしたシステムの諸評価量は、 $\Pi_{n(\infty)}$ から次の様にして求められる。

スループット $S$ は、定常状態におけるスロット当りのパケット伝送成功確率であるから、

$$S = \sum_{n=0}^M S(n) \text{Prob}(n(\infty) = n) \quad (2-9)$$

で求められる。ところで、定常状態においては、スロット当りのパケット伝送成功数（伝送成功数は1または0であるから、平均伝送成功数と伝送成功確率は一致する）は、スロット当りに生成される新パケットの平均数に一致するはずである。従って、

$$S = \{M - \bar{n}(\infty)\} \sigma \quad (2-10)$$

が成り立つ。ここに、

$$\bar{n}(\infty) = \sum_{n=0}^M n \cdot \text{Prob}(n(\infty) = n) \quad (2-11)$$

である（以下では、しばらくの間、定常特性のみを扱うので、特に混乱のおそれのない限り、 $n(\infty)$ を単に  $n$  で表す）。実際、スループット  $S$  は、式 (2-9)、(2-10) のいずれを用いても求めることができ、両者は一致する。なお、式 (2-10) は、一般に、システムの定常条件式と呼ばれている。

平均伝送遅れ  $D$  は、システムを次の様な待ち行列システムと考えることにより容易に求められる。即ち、パケットを客と考え、パケットの発生を待ち行列システムへの客の到着、伝送成功を客の退去と考える。これにより、システム内客数は R D モードにある端末の数に、システム内時間は伝送遅れに対応することになる。また、客の到着率は定常状態では  $(M - \bar{n}) \sigma$  で与えられ、これは、スループット  $S$  に等しい。従って、この待ち行列システムにリトルの公式<sup>[8]</sup>を適用すると、平均伝送遅れは、

$$D = \frac{\bar{n}}{S} = \frac{M}{S} - \frac{1}{\sigma} \quad (2-12)$$

と求められる。上式より、 $M$  および  $\sigma$  が与えられると、平均伝送遅れは、スループットの単調減少関数となることがわかる。

スロット付きアロハシステムに限らず、一般にランダムアクセスシステムの主な平均特性（スループット、平均伝送遅れなど）の導出においては、 $\bar{n}$  が非常に重要な役割を持つ場合が多い。そのため、ランダムアクセスシステムの解析においては、平均在庫端末数  $\bar{n}$  自体も、システム特性を考察する上で重要な評価量と考えられている。

## 2.5 平衡点解析<sup>[9]</sup>

平衡点解析は、スロット付きアロハシステムの振舞に関する次の様な直感的考察に基づいて開発された近似解析手法である。あるスロットの開始時点において、R D モードにある

端末の数が  $n$  であったとすると、このスロットでパケットの伝送に成功し、PGモードに移る端末数の期待値は、式(2-4)、即ち、

$$S_{out}(n) = np(1-p)^{n-1} \quad (2-13)$$

で与えられる。なお、ここでは、説明の便宜のために、RDモードからPGモードに移る端末数の期待値を表す変数として  $S(n)$  の代わりに  $S_{out}(n)$  を用いている。一方、このスロットでPGモードからRDモードに移る端末数の期待値  $S_{in}(n)$  は、

$$S_{in}(n) = (M-n)\sigma \quad (2-14)$$

となる。従って、RDモードにある端末の増加量の期待値  $\delta(n)$  は、

$$\delta(n) = S_{in}(n) - S_{out}(n) \quad (2-15)$$

で求められる。この  $\delta(n)$  が0となる  $n$  の値、即ち、RDモードへ出入りする端末の数の期待値が等しくなる点は、平衡点と呼ばれている ( $n$  は本来整数であるが、平衡点は実数値となる)。

式(2-13)、(2-14)の関係を図で示すと、例えば図2-4の様なものとなる。この図では、 $n$  が平衡点  $n_c$  より大きい時には、RDモードに入る端末数に比べ、RDモードから出ていく端末数の期待値が大きいため、 $n$  の値は減少する傾向がある。また、 $n$  が  $n_c$  より小さい時には、逆に  $n$  の値は増加する傾向を持っている。このため、定常状態における  $n$  の値の分布は平衡点  $n_c$  の近傍に集中することになる。図中の  $Prob(n(\infty))$  は、定常状態における  $n$  の分布をマルコフ解析により求めたものであるが、 $n$  の分布が  $n_c$  の近傍に集中する様子を実際に示している。この様に  $n$  の分布が集中する平衡点は、以下に示す不安定平衡点と区別するために安定平衡点と呼ばれる。

平衡点は、システムパラメータ (このシステムでは、 $M$ 、 $\sigma$ 、及び  $p$ ) によって、複数個 (この場合3個) となる場合がある。図2-5はそうした場合の平衡点  $n_{c1}$ 、 $n_{c2}$ 、 $n_{c3}$  を示したものである。この場合、 $n$  の値が  $n < n_{c1}$ 、 $n_{c2} < n < n_{c3}$  の時には、 $n$  は増加傾向にあり、 $n_{c1} < n < n_{c2}$ 、 $n_{c3} < n$  では減少する傾向にある。このため、 $n$  の分布は  $n_{c1}$ 、 $n_{c3}$  の近傍に集中

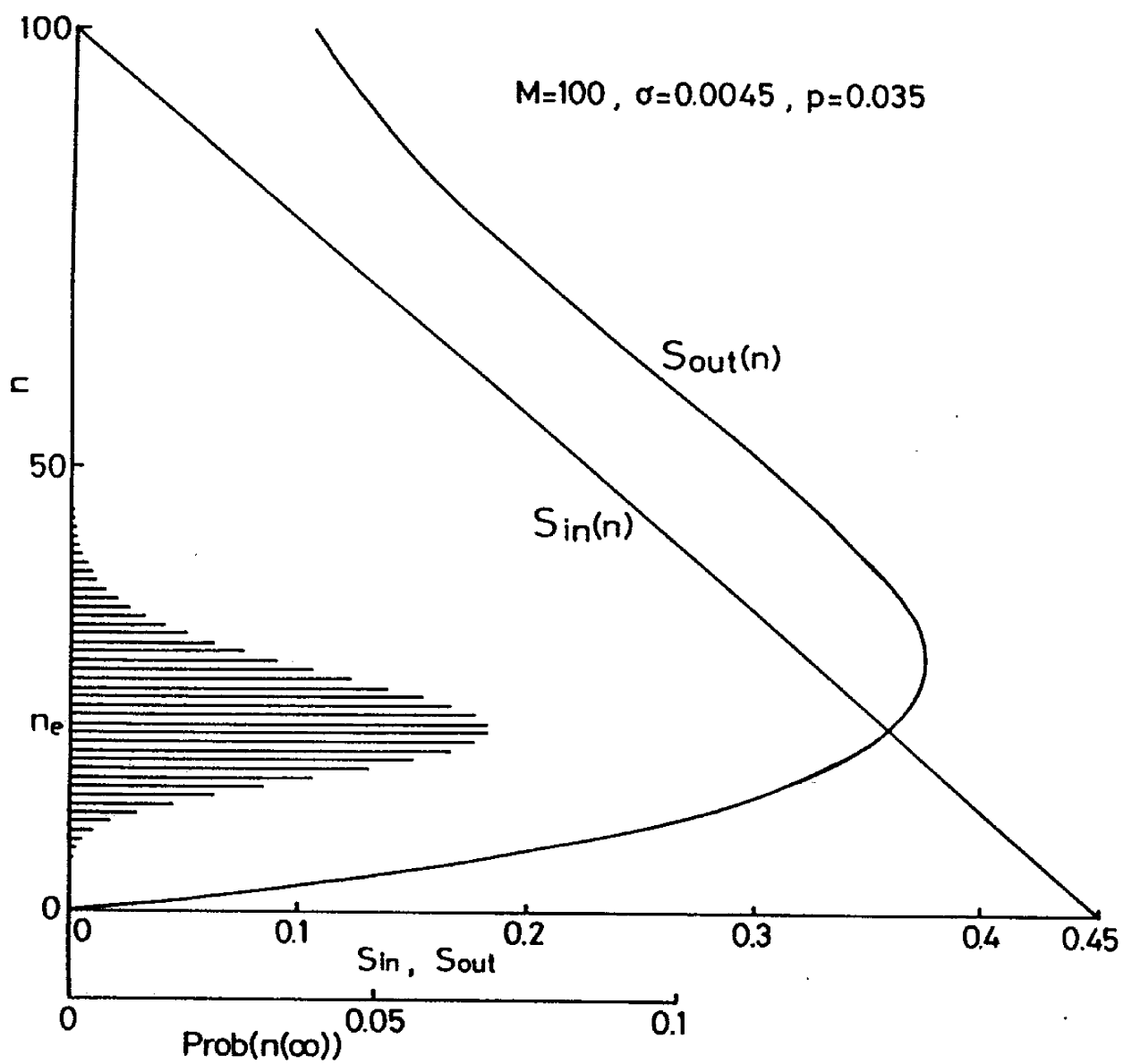


図 2 - 4 安定システム

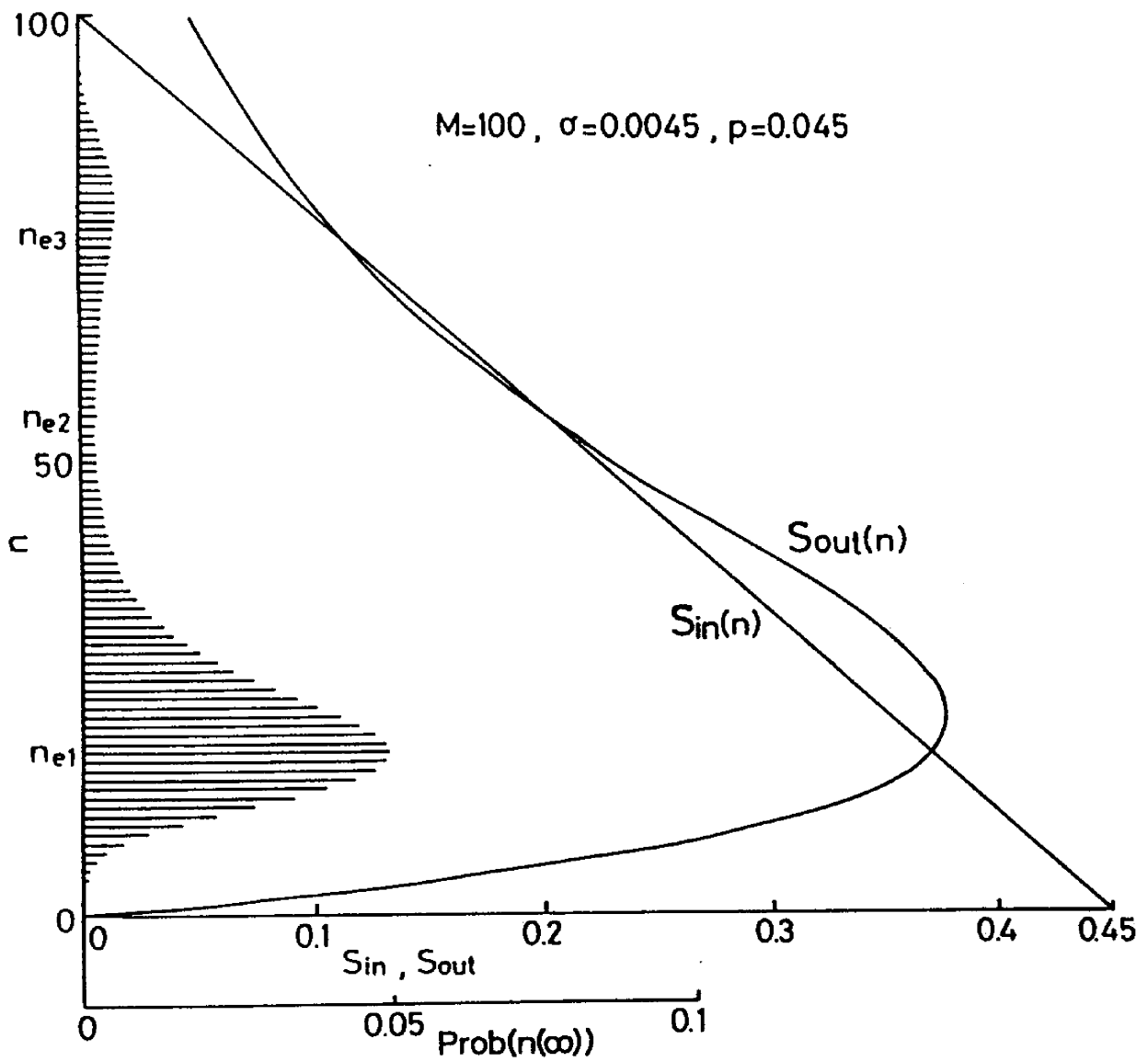


図 2 - 5 双安定システム

し、 $n_{c2}$ からは離れる傾向を持つ。この場合の  $Prob(n(\infty))$  は、図に示す様な2つの頂点を持った双安定特性となる。一般に  $n_{c1}, n_{c3}$  が安定平衡点と呼ばれるのに対して、 $n_{c2}$  は不安定平衡点と呼ばれている。平衡点  $n_{c1}$  では、 $S_{in}(n), S_{out}(n)$  共に比較的大きな値を持ち、パケットの生成、伝送の成功など端末の活動が比較的活発に行われている。一方、 $n_{c3}$  では、両者は比較的小さな値を持ち、各端末の動作は停滞した状況にあるものと言える。 $n_{c3}$  は、 $n_{c1}$  と区別するため、飽和平衡点と呼ばれることもある。

図2-6は、図2-4と同様に唯一つの平衡点を持つ場合を示しているが、その平衡点が  $S_{out}(n)$  を最大とする  $n$  より大きな値となる場合である。その様な平衡点  $n_c$  では、チャンネル上に送出されるパケットの総数  $G = n_c p$  は最適値（スロット付きアロハシステムの場合、 $G = 1$ ）を超過している。 $n$  の分布は唯一つの平衡点  $n_c$  の周りに集中するので、このシステムは、ほとんど常にトラヒック過剰の状態で稼動していることになる。このため、図2-6のシステムは、唯一つの平衡点を持つという点では安定システムであるが、図2-4のシステムと区別するために、特に飽和システムと呼ばれる。また、図2-5の様な双安定システムであっても、平衡点  $n_{c1}$  へ向かう傾向が弱く、 $n$  の分布のほとんどが平衡点  $n_{c3}$  の周りに集中している場合にも、飽和システムと呼ぶことがある。

飽和システムは、システムの処理能力に比べ負荷が過剰な場合に生じる。従って、飽和システムの平均伝送遅れは、通常大きな値となり、一般に好ましくない状態であるといえる。また、安定システムでは、 $M, \sigma$  などの負荷の増加は、スループットの増加によってカバーされるのに対して、飽和システムでは、スループットの低下を招き、伝送遅れはさらに増加することになる。

この様に平衡点は、ランダムアクセスシステムの特性を考察する上で非常に重要な意味を持っている。平衡点解析は、この平衡点に着目してシステムの特性を考察する手法である。以下では、2.2の2スロット付きアロハシステムを具体例として平衡点解析を行い、その手法を紹介する。

平衡点解析では、システムの状態は常に平衡点にあるものとして特性解析を行う。このため、



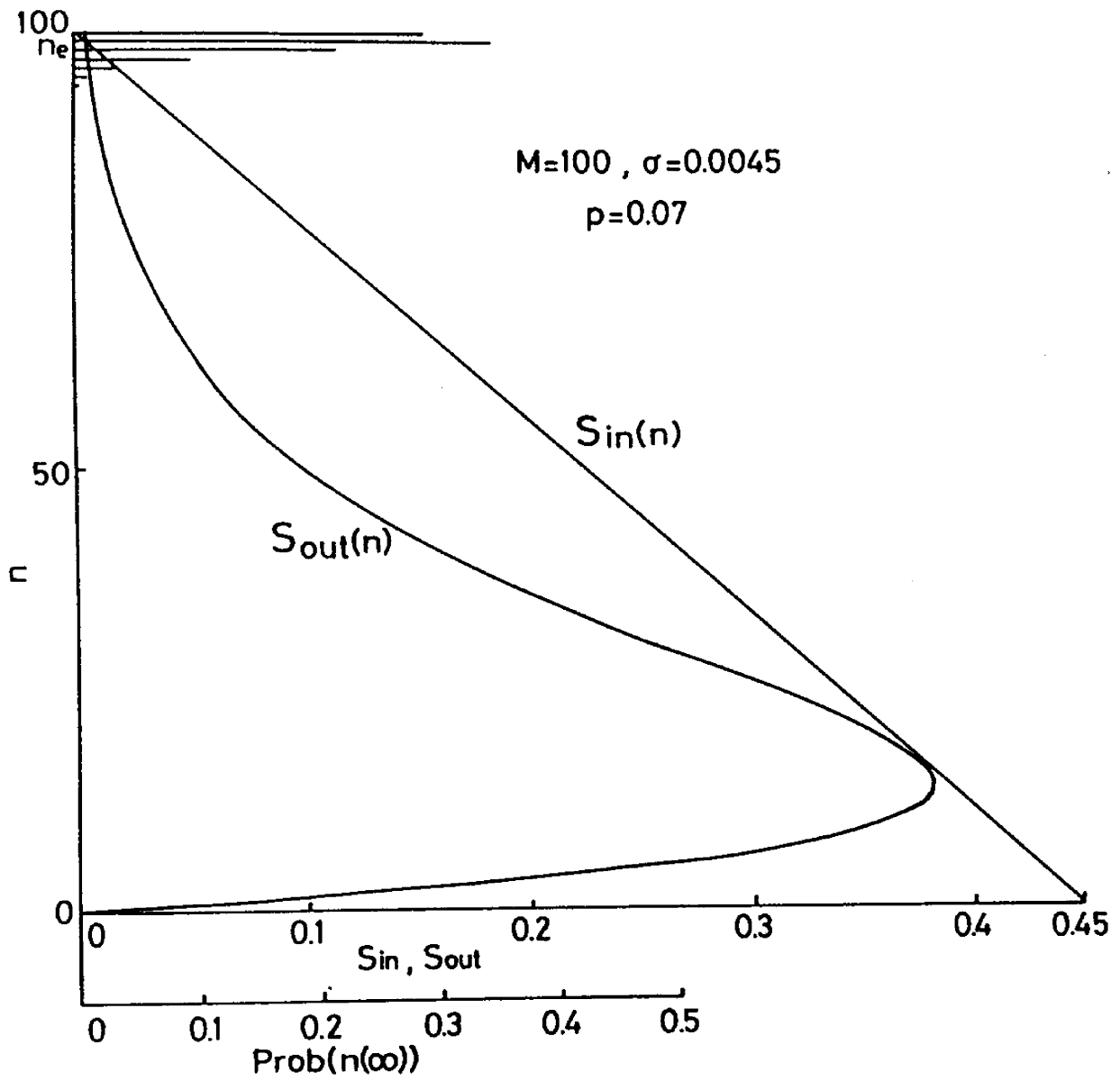


図 2 - 6 飽和システム

まず最初に $\delta(n) = 0$ 、即ち、

$$(M - n) \sigma = np(1 - p)^{n-1} \quad (2-16)$$

を解いて平衡点 $n_c$ の導出が行われる。この非線形方程式は、複数の解を持つ可能性があり、解析的に解くことは一般に困難である。そこで、通常は数値的に解が求められる。

$\delta(0) > 0$ 、 $\delta(M) < 0$ であるから、上式は、 $(0, M)$ の範囲内に1つ以上、奇数個の解（実数解）があることが保証されている。また、複数個の解があった場合、その大きさが奇数番目の解は $\delta'(n_c) < 0$ となり、安定平衡点となることがわかる。さらに、複数個の解がある場合、式(2-14)から、解の値が大きなものほど $S_{in}(n) (= S_{out}(n))$ は小さく、従って、その状態におけるスループット、平均伝送遅れなどが悪くなることがわかる。複数個の平衡点がある場合、平衡点解析では、通常、最悪の平衡点におけるシステム特性を用いて考察が行われる。これは、システム特性の下限値を見積もるためである。

平衡点 $n_c$ が求められると、その点におけるスループット $S(n_c)$ は、

$$S(n_c) = (M - n_c) \sigma \quad (2-17)$$

あるいは

$$S(n_c) = n_c p (1 - p)^{n_c - 1} \quad (2-18)$$

で求められる。この時の平均伝送遅れ $D(n_c)$ は、

$$D(n_c) = M / S(n_c) - 1 / \sigma \quad (2-19)$$

で求められる。

また、平衡点解析は伝送遅れの分散など2次特性の解析にも有効であることが知られている<sup>[9]</sup>がここでは省略する。

図2-7は、 $M = 100$ 、 $\sigma = 0.0045$ とした時のスロット付きアロハシステムに対するスループット特性を平衡点解析により示したものである。このシステムの特徴は、次の3つの領

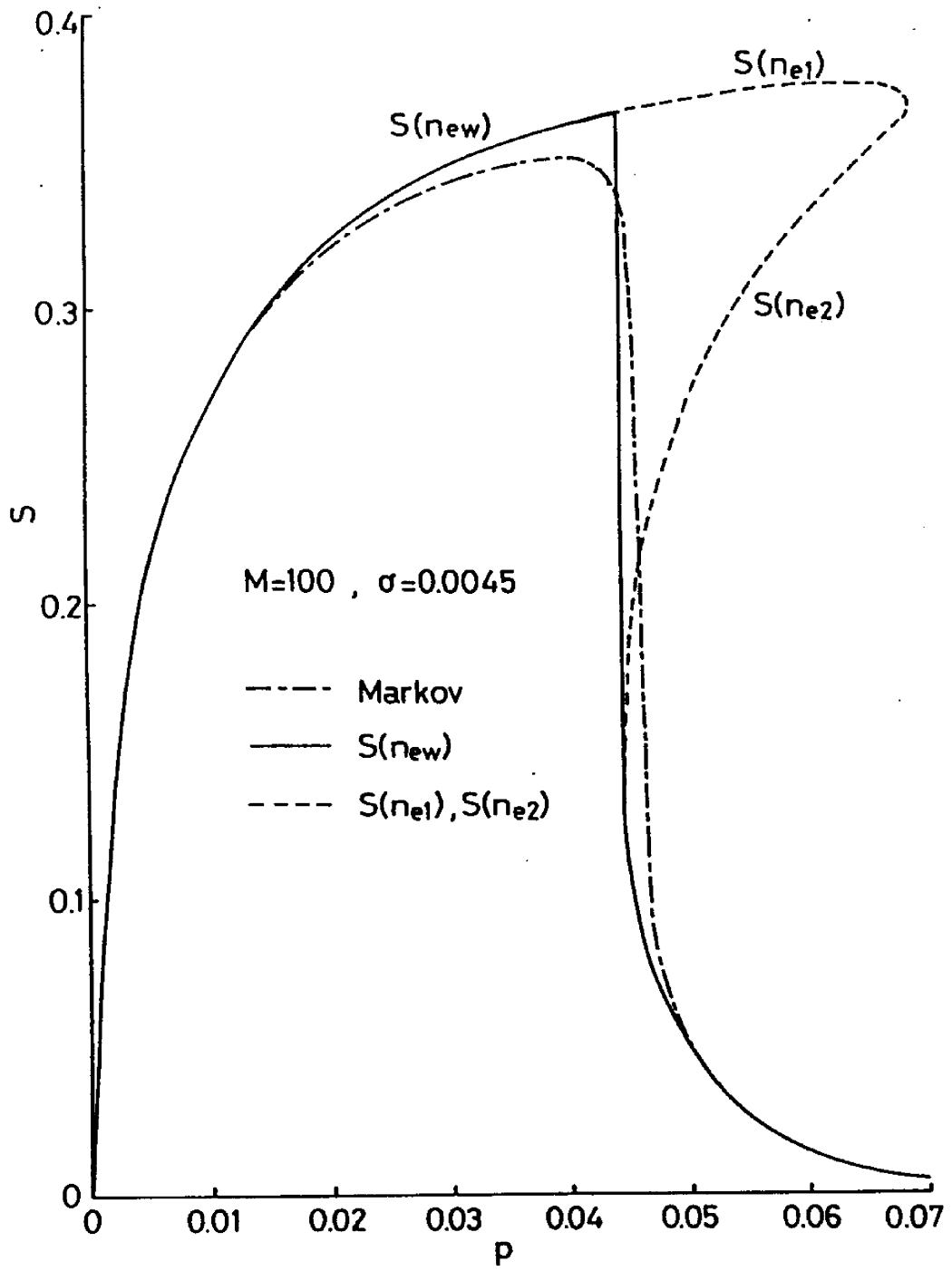


図 2 - 7 スロット付きアロハシステムのスループット特性

域に分けることができる。即ち、唯1つ安定平衡点をもつ安定領域、3つの平衡点をもつ不安定領域（双安定領域とも呼ばれる）、飽和平衡点のみをもつ飽和領域である。図中、実線は最悪平衡点  $n_{cw}$  におけるスループット  $S(n_{cw})$  であり、破線は他の平衡点  $n_{c1}, n_{c2}$  におけるスループットである。 $n_{cw}$  は、平衡点が唯1つの時はその平衡点を表し、複数の時はその値が最大の平衡点（この場合  $n_{c3}$ ）を表す。また、 $n_{c1}, n_{c3}$  は安定平衡点、 $n_{c2}$  は不安定平衡点であり、常に  $S(n_{c1}) > S(n_{c2}) > S(n_{c3})$  である。

図には、また、マルコフ解析により求められた厳密なスループット特性が一点鎖線で示されている。平衡点解析による解析結果とマルコフ解析のそれを比較すると、平衡点が1つの安定領域では、平衡点におけるスループット  $S(n_{cw})$  は、厳密なスループット  $S$  とよく一致していることがわかる。また、 $S(n_{cw})$  を  $S$  の近似と考えた場合、この領域での近似誤差は、スループットを高め評価する方向に現われる。不安定領域では、各平衡点におけるスループット  $S(n_c)$  はいずれも真のスループット  $S$  とは異なった値となる。これは、スループット  $S$  が無限に永い時間システムを観測した時の平均特性を表しているのに対して、各平衡点におけるスループット  $S(n_c)$  は短期間（システムがその平衡点に留まっている期間）の特性を表しているからである。平衡点解析では、通常、最悪の平衡点  $n_{cw}$  における特性（従って、常に  $S > S(n_{cw})$  となる）を用いて考察が行われる。これは、ある程度の時間継続する安定状態が複数個存在する場合には、実際のシステム設計においては、厳密な平均特性よりも最悪の状況下における特性の方が重要となるものと考えられるからである。飽和領域では、再び  $S(n_c)$  と  $S$  はよく一致し、常に  $S(n_c) < S$  となる。

安定領域及び飽和領域における  $S$  と  $S(n_c)$  の誤差の原因については、以下に示す Jensen の不等式を用いて、次の様に説明することができる。

## Jensen の不等式<sup>[62]</sup>

下に凸な関数  $g()$  と 1 次モーメント  $\bar{X}$  が存在する確率変数  $X$  に対して、

$$\bar{g}(X) \geq g(\bar{X}) \quad (2-20)$$

が成り立つ。

式 (2-16) に示した平衡点方程式

$$(M - n) \sigma = np(1 - p)^{n-1}$$

は、システムの定常条件を表す厳密式

$$\overline{S_{out}(n)} = (M - \bar{n}) \sigma \quad (2-21)$$

において、 $\overline{S_{out}(n)}$  を  $S_{out}(\bar{n})$  で近似したものと考えることができる。関数  $S_{out}(n)$  は、式 (2-13) あるいは図 2-2 からわかるように安定平衡点の近傍では上に凸、飽和平衡点の近傍では下に凸であるから、安定領域では  $\overline{S_{out}(n)}$  (即ち、スループット  $S$ ) は、大きめに見積もられ、飽和領域では小さめに見積もられることになるのである。なお、平衡点解析の近似誤差に関するより詳細な考察は、文献 [3] で行われている。

図 2-8 は、平均伝送遅れに対する同様な解析結果である。平均伝送遅れは、式 (2-9) 及び (2-16) により、マルコフ解析、平衡点解析ともにスループットの単調減少関数となるので、その特徴はスループット特性のそれと同様な傾向を示している。

最後に、平衡点解析は、平均特性の近似解析という側面の他に、システムの振舞を示す直感的な評価量としても有用であり、短期間のシステム特性等の考察時にも重要な役割をはたす点を付記しておく。

## 2.6 過渡流体近似解析

過渡流体近似解析では、システムの振舞を次の様な  $M$  個の互いに従属な離散確率過程の集合と考えて解析を行う。即ち、まず最初に、個々の端末の振舞を図 2-9 の様なスロットの

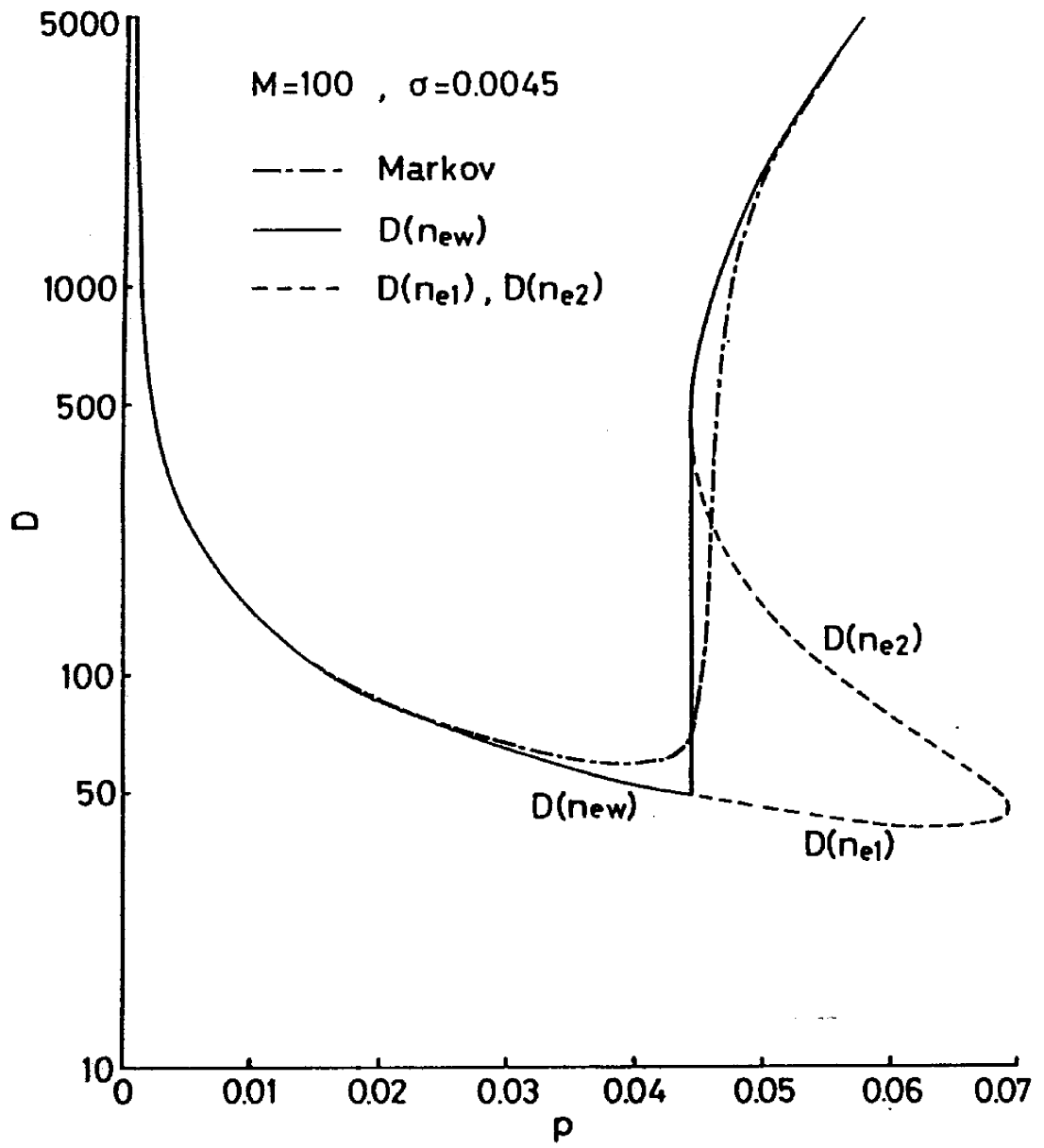


図 2 - 8 スロット付きアロハシステムの平均伝送遅れ特性

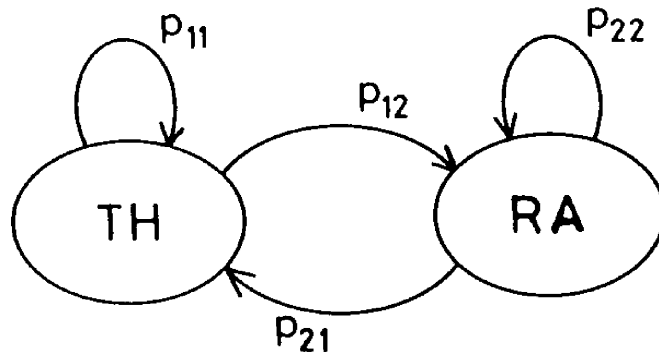


図 2 - 9 各端末の動作状態遷移図

開始時点毎にその状態が変化する離散確率過程と考える。図中、状態 TH (THinking) 及び RA (Random Access) は、そのスロットの開始時点において、注目端末が PG 及び RD モードにあることを示している。各端末のスロット毎の状態遷移を示すこの図では、端末の動作を表した図 2 - 1 と違って、同じ状態への遷移も定義されている。

第  $t$  スロットの開始時点において、状態 TH, RA にある端末の数を表す確率変数をそれぞれ  $m(t), n(t)$  とし、ベクトル  $\mathbf{n}(t) = (m(t), n(t))$  をシステムの状態ベクトルと呼ぶ。この場合、全端末数  $M$  が固定されているので、システムの状態を表すには、 $n(t)$  あるいは  $m(t)$  のいずれか一方のみを示せば十分であるが、ここでは、説明の便宜のためにベクトル  $\mathbf{n}(t)$  を用いてシステム状態を表す。

$M$  個の端末は、全て同じ種類のものであると仮定されているので、システムの振舞は、この  $\mathbf{n}(t)$  を状態ベクトルとするマルコフ連鎖として完全に記述される。従って、この  $\mathbf{n}(t)$  の確率的な性質を調べることにより、システムの諸特性が求められる。過渡流体近似解析は、この  $\mathbf{n}(t)$  の期待値 (集合平均)  $\bar{\mathbf{n}}(t)$  を漸近的に求め、それを基にシステムの諸特性を解析する手法である。以下では、 $\bar{\mathbf{n}}(t)$  の導出方法を示す。

図2-9の各状態遷移確率  $p_{ij} (i, j = 0, 1)$  は、システムの状態が  $\mathbf{n}(t) = \mathbf{n} = (m, n)$  であったとすると、

$$\begin{aligned} p_{11} &= 1 - \sigma & p_{12} &= \sigma \\ p_{21} &= p(1-p)^{n-1} & p_{22} &= 1 - p(1-p)^{n-1} \end{aligned} \quad (2-22)$$

で与えられる。第  $t$  スロットにおける端末  $T_k$  の状態を

$$\pi_k(t) = \begin{cases} (1, 0) & \text{状態 TH にある時} \\ (0, 1) & \text{状態 RA にある時} \end{cases} \quad (2-23)$$

で表すとする。第  $t+1$  スロットにおける端末  $T_k$  の状態の期待値  $\bar{\pi}_k(t+1)$  は、行列  $\mathbf{P}(n) = (p_{ij})$  を用いて、

$$\bar{\pi}_k(t+1) = \pi_k(t) \mathbf{P}(n) \quad (2-24)$$

で求められる。ここで、上式を  $k = 1 \sim M$  について加え合わせると、次式が導かれる。

$$\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n}) = \mathbf{n} \mathbf{P}(n) \quad (2-25)$$

ここに、 $\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n})$  は  $\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}$  という条件の基での第  $t+1$  スロットにおけるシステム状態の期待値である。

次に、初期状態が  $\mathbf{n}(0)$  であった時の第  $t$  スロットにおける  $\mathbf{n}(t)$  の分布  $Prob(\mathbf{n}(t) = \mathbf{n} | \mathbf{n}(0))$  が与えられたとする。この時、第  $t+1$  スロットにおけるシステム状態の期待値  $\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0))$  は、明らかに、

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) &= \sum_{\mathbf{n}} \bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n}) Prob(\mathbf{n}(t) = \mathbf{n} | \mathbf{n}(0)) \\ &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M \bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n}) Prob(\mathbf{n}(t) = \mathbf{n} | \mathbf{n}(0)) \end{aligned} \quad (2-26)$$

で求められる。ここで、上式の  $\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n})$  を  $\mathbf{n}$  の関数と考え、 $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$  の周りで  $\mathbf{n}$  に関してテーラー展開すると、

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) &= \bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))) + \frac{1}{2} \left\{ \frac{d^2 \bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n})}{d\mathbf{n}^2} \right\}_{\mathbf{n} = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))} \cdot \sigma_m^2(t) \end{aligned}$$



$$+ 2 \left. \frac{d^2 \bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n})}{dm dn} \right|_{\mathbf{n} = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))} \cdot \sigma_{mn}(t) + \left. \frac{d^2 \bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n})}{dn^2} \right|_{\mathbf{n} = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))} \cdot \sigma_n^2(t) \Big\} + \dots \quad (2-27)$$

となる。ここに、 $\sigma_m^2(t), \sigma_n^2(t)$  は、それぞれ  $m(t), n(t)$  の分散であり、 $\sigma_{mn}(t)$  は  $m(t), n(t)$  の共分散である。

ここでは、 $M = m(t) + n(t)$  であるので、 $\sigma_m^2(t) = \sigma_n^2(t) = -\sigma_{mn}(t)$  および、

$$\mathbf{n}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n}) = \mathbf{n}(t+1 | n(t) = n) \quad (2-28)$$

より、式(2-27)は、

$$\begin{aligned} \bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(0)) &= \bar{n}(t+1 | n(0)) \\ &= \bar{n}(t+1 | n(t) = \bar{n}(t | n(0))) + \frac{1}{2} \cdot \left. \frac{d^2 \bar{n}(t+1 | n(t) = n)}{dn^2} \right|_{n = \bar{n}(t | n(0))} \cdot \sigma_n^2(t) + \dots \end{aligned} \quad (2-29)$$

と簡単化できる。しかし、ここでは、過渡流体近似解析をより一般的に説明するため、 $M = m(t) + n(t)$  なる関係を用いずに議論を進める（過渡流体近似解析は、 $m(t) + n(t)$  が変化する場合や状態ベクトルが3次以上の場合などへの適用が可能である）。

一般に  $|\sigma_{mn}(t)| \leq |\sigma_n(t)\sigma_m(t)|$  であるので、式(2-27)において、 $m, n$  の分散が小さく、 $\bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \mathbf{n})$  が  $\bar{n}(t | \mathbf{n}(0))$  の近傍で  $m, n$  に関して線形であると見なせるとすると、第2項以降を無視することができ、

$$\bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(t) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))) \quad (2-30)$$

が得られる。これに式(2-25)を代入すると、漸化式

$$\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0)) \mathbf{P}(\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))) \quad (2-31)$$

が導かれる。この漸化式により、初期状態  $\mathbf{n}(0)$  が与えられると任意のスロット  $t$  におけるシステム状態の期待値  $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$  が求められる。

ところで、式 (2-31) の極限ベクトル  $\bar{n}(\infty | n(0))$  は、それが存在するとすると、方程式

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}P(\mathbf{n}) \quad (2-32)$$

の解の 1 つと一致する。  $\mathbf{n} = (m, n)$  とすると、上式は 2 つ非線形方程式

$$\begin{aligned} m &= m(1 - \sigma) + np(1 - p)^{n-1} \\ n &= m\sigma + n\{1 - p(1 - p)^{n-1}\} \end{aligned}$$

を表すが、これらは、同じ方程式

$$m\sigma = np(1 - p)^{n-1} \quad (2-33)$$

となる。上式は、また、  $m = (M - n)$  とおくことにより平衡点方程式 (2-16) と一致する。即ち、漸化式 (2-31) は平衡点に収束することがわかる。

これは、偶然の一致ではなく、システム状態が多次元のベクトルで表される様な複雑なシステムに対しても成り立つ一般的なものであることが次の様にして示される。

最初に、2. 5 で示された平衡点の定義をシステムの状態が多次元で表される場合に拡張する。即ち、システムの状態が  $d$  次のベクトル  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_d)$  で表されるとき、平衡点ベクトル  $\mathbf{n}_e$  を次の様に定義する。ベクトル  $\mathbf{n}$  の増加量の期待値ベクトル

$$\Delta(\mathbf{n}) = \bar{\mathbf{n}}(+1 | \mathbf{n}) - \mathbf{n} \quad (2-34)$$

を考え、制約条件

$$M = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_d \quad (2-35)$$

の基で  $\Delta(\mathbf{n}) = \mathbf{0}$  とする  $\mathbf{n}$  を平衡点ベクトル  $\mathbf{n}_e$  と呼ぶ。ここに、  $\bar{\mathbf{n}}(+1 | \mathbf{n})$  は、あるスロットの開始時点においてシステム状態が  $\mathbf{n}$  であったという条件の基での次のスロットの開始時点におけるシステム状態の期待値である。ところで、式 (2-25) より、

$$\bar{\mathbf{n}}(+1 | \mathbf{n}) = \mathbf{n}P(\mathbf{n}) \quad (2-36)$$

であるから、これを式(2-34)に代入すると $\Delta(\mathbf{n}) = \mathbf{0}$ は式(2-32)と一致することがわかる。なお、遷移確率行列 $P$ の各行の和が1であることから、初期状態ベクトル $\mathbf{n}(0)$ が制約条件(2-35)を満たすとき、式(2-31)によって導かれるすべての $\mathbf{n}(t)$ は制約条件(2-35)を満たしている。

一般に多次元の平衡点ベクトルの導出には、複数の解を持つ可能性のある連立非線形方程式を解くことが必要となる。しかし、そうした方程式の解法には、一般に非常に煩雑な計算が必要となる。一方、漸化式(2-31)の極限ベクトル $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$ は、十分に大きな $t$ における $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$ で $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$ を近似することにより機械的に求められる。このため、複雑なシステムの特性解析においては、定常特性の解析であっても平衡点解析の代わりに過渡流体近似解析を用いると平衡点の導出が容易になる。

図2-10, 11は、 $\mathbf{n}(0) = (M, 0)$ 及び $(0, M)$ とした時の $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$ を示したものである。図中、破線は、式(2-7)を用いてマルコフ解析により求めた厳密な過渡特性であり、実線は式(2-31)を用いた過渡流体近似解析の結果である。図2-10は、システムが安定領域 $p = 0.035$ にある時の過渡特性であり、近似誤差は、定常に達する直前で僅かに増加するものの全般に極めて小さいことがわかる。この近似誤差の原因は、この付近で $S_{out}(n)$ の曲率が最も大きくなり、また以下に示すように $n$ の分散が増加するため、 $\overline{S_{out}(n)}$ と $S_{out}(\bar{n})$ の差が増加することによるものであると考えられる。図2-11は、双安定領域 $p = 0.046$ における過渡特性である。過渡流体近似解析による解析結果は、 $\mathbf{n}(0) = (M, 0)$ では400スロット付近で、 $\mathbf{n}(0) = (0, M)$ では3000スロット付近で定常に達し、それぞれの平衡点に留まっているのに対して、マルコフ解析では、平衡点に達した後も徐々に変化し、定常値 $\bar{n} = 50$ に達するには50000スロット以上の時間が必要となる。ここで、マルコフ解析による解析結果は、無限回の試行を行ったときの平均を表すもので、個々の試行における $n(t)$ の変化を示したものではない点に注意する必要がある。実際、後に示すように、 $t$ が増加すると、 $n(t)$ の分布の大半は2つの平衡点 $n_{c1}, n_{c3}$ の周りに集中し、システムの状態が $\bar{\mathbf{n}}(t)$ 付近にある時間の割合は僅かであると考えられる。

図2-12, 13は、 $n$ の分布 $Prob(n(t) = n | \mathbf{n}(0))$ が定常状態に達するまでの様子をマルコフ解析により示したものである。図2-12は、安定領域 $p = 0.035$ において $\mathbf{n}(0) = (0, M)$

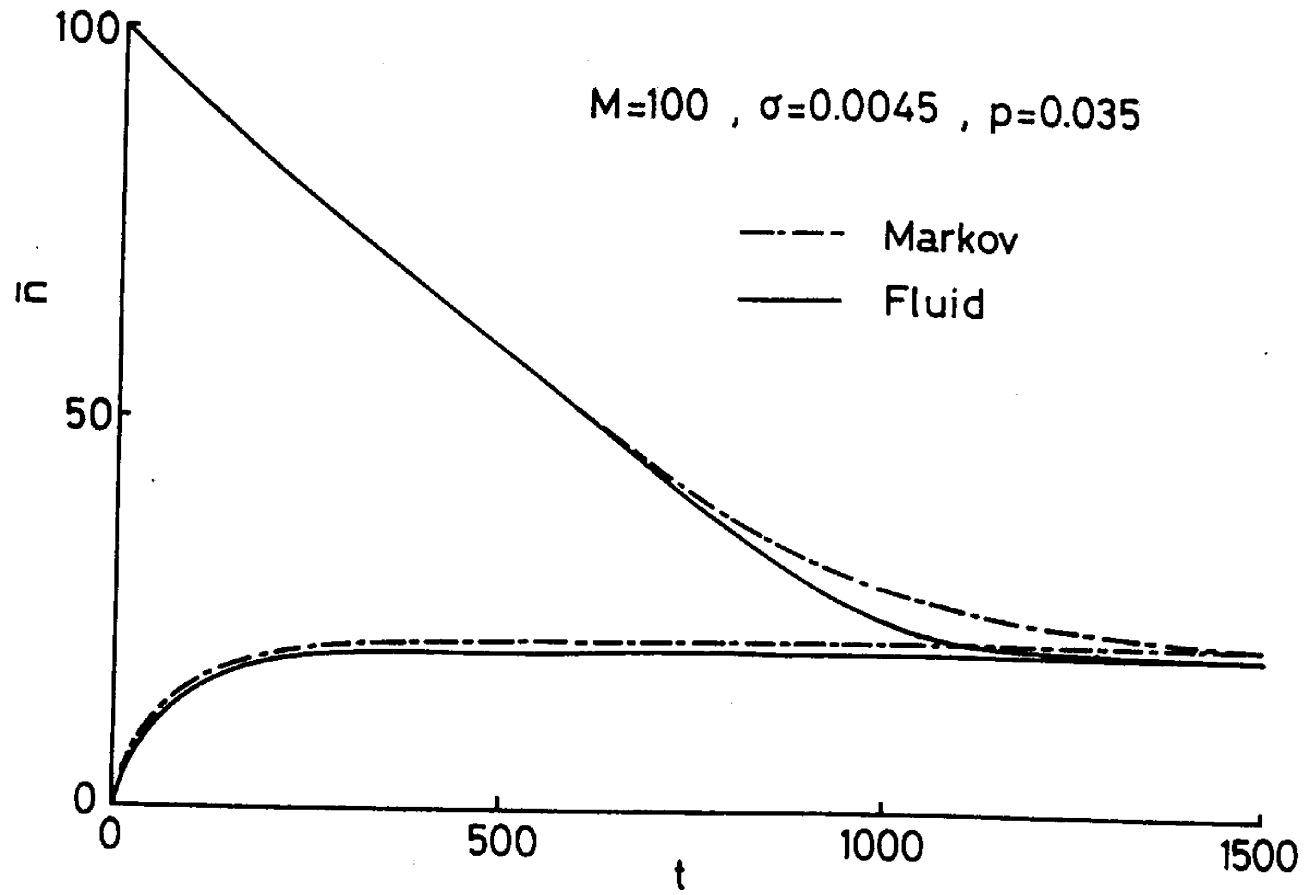


図 2-10 スロット付きアロハシステムの過渡特性 (安定システム)

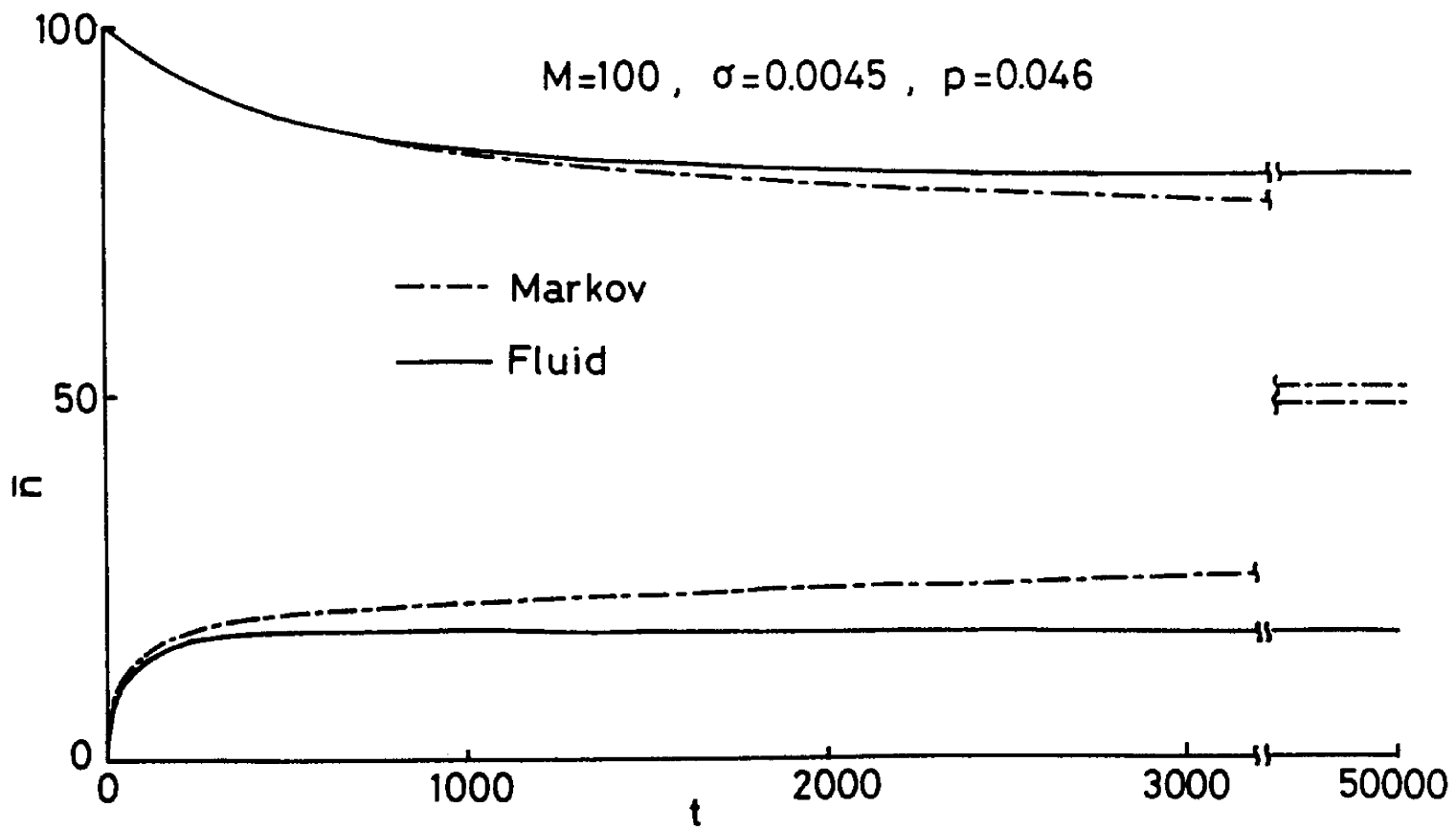


図 2 - 1 1 スロット付きアロハシステムの過渡特性 (双安定システム)

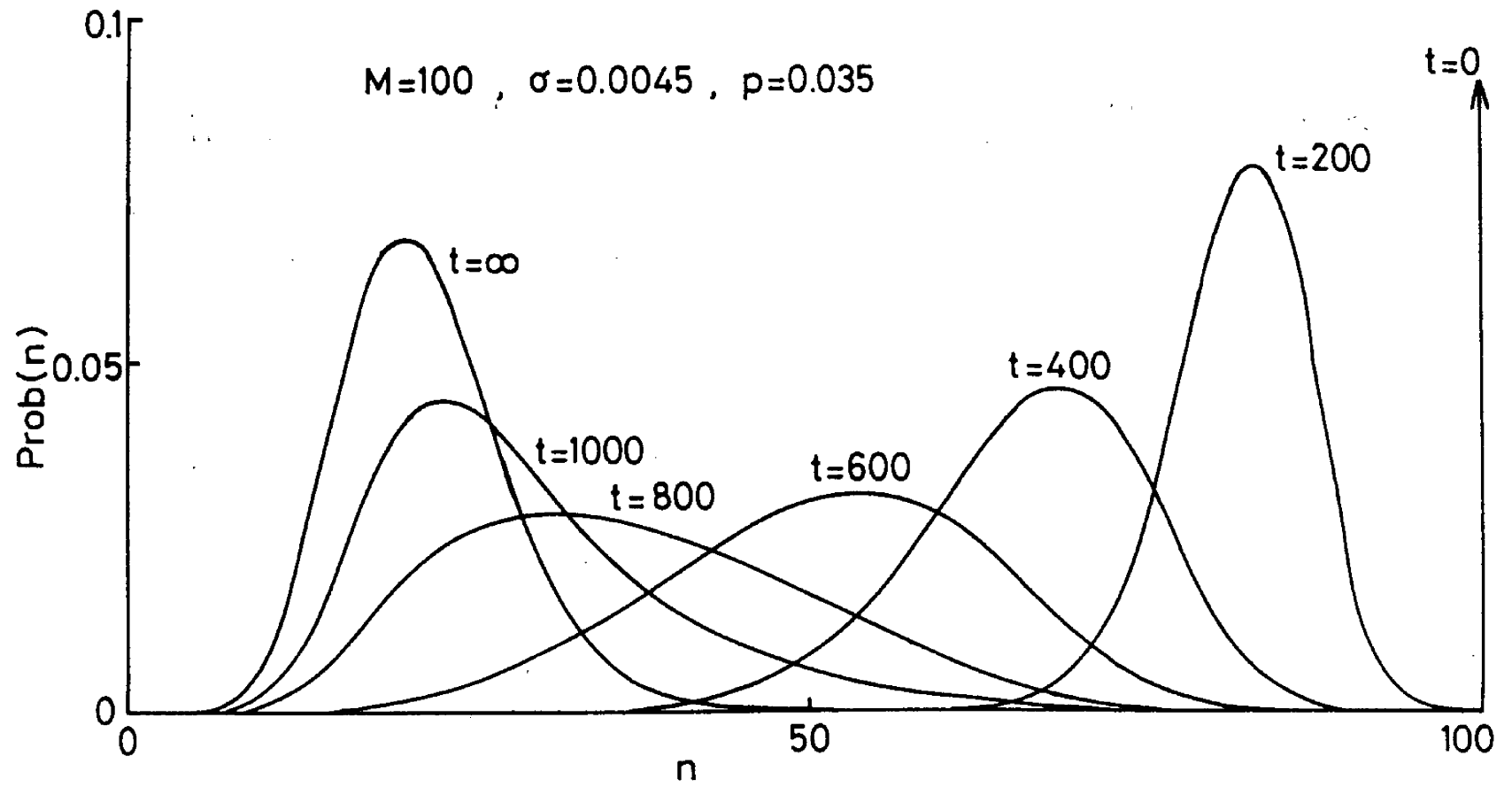


図 2-12 n の分布の過渡特性 (安定システム)

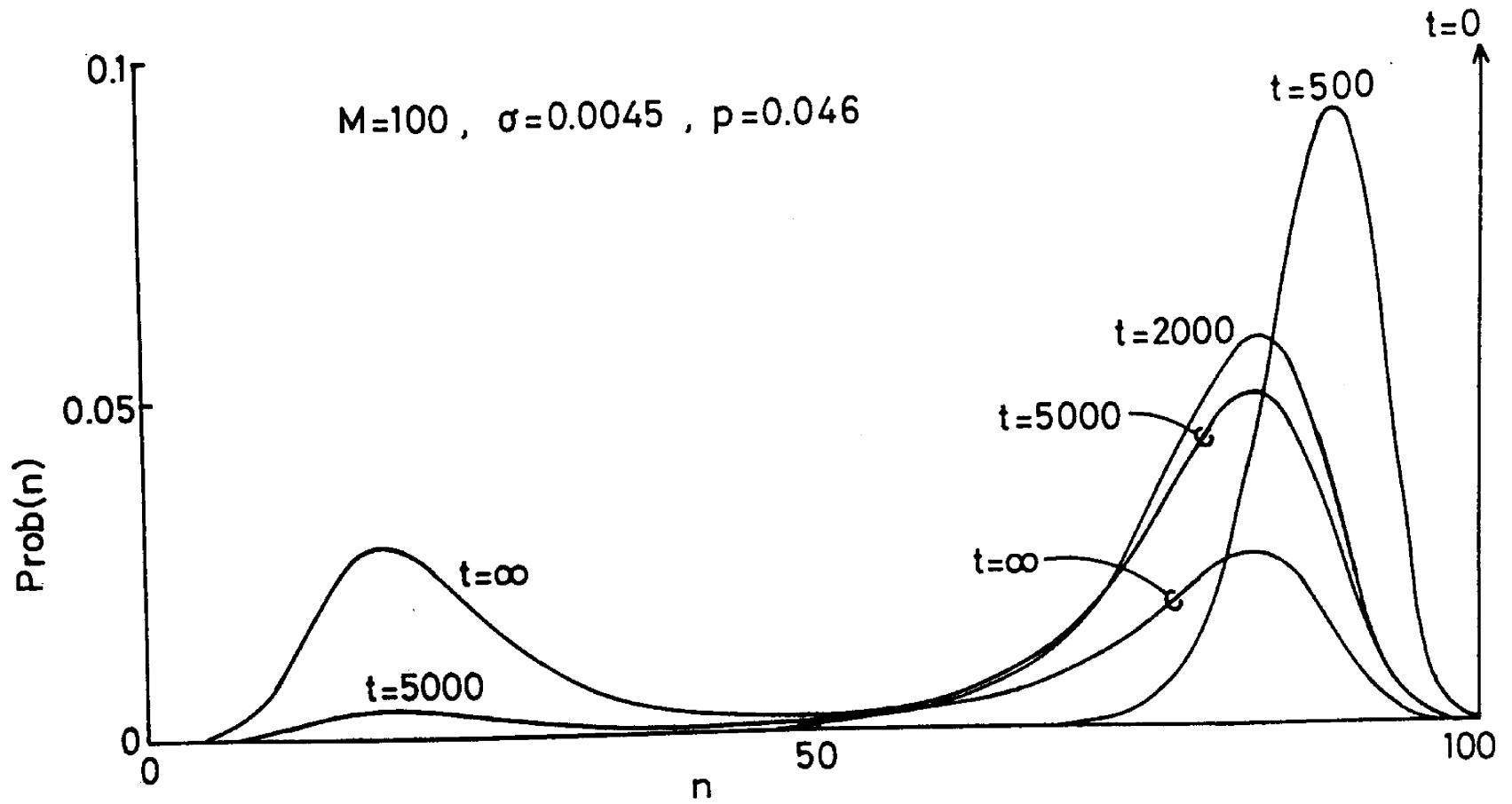


図 2 - 1 3  $n$  の分布の過渡特性 (双安定システム)

とした場合であるが、時間の経過とともに  $Prob(n(t) = n | n(0))$  の分散が増加し、 $t = 800$  付近で最大となった後、定常状態に向かうに従って再び分布が集中する様子が示されている。これは、図 2-10 で過渡流体近似解析による過渡特性の近似誤差が定常状態の直前で増加し、その後定常状態に達するに従って誤差が減少する理由となっている。図 2-13 は、双安定領域  $p = 0.046$  において  $n(0) = (0, M)$  とした場合である。双安定領域では、 $t$  が増加すると、 $n(t)$  の分布は 2 つの安定平衡点  $n_{c1} = 17, n_{c3} = 81$  の周りに集中するようになり、 $\bar{n}(t)$  の近傍には、ほとんど存在しないことがわかる。即ち、図 2-11 のマルコフ解析による解析結果、即ち  $\bar{n}(t)$  の変化は、システムの実際の動作がゆるやかに定常状態に向かって変化することを示したのではなく、無限回の試行の結果得られる  $n(t)$  の分布が  $n_{c1}$  及び  $n_{c3}$  の近傍に集中する割合が変化した結果であるといえる。

先に示した様に、過渡流体近似解析を定常特性の近似解析手法として用いた場合、その解析結果は平衡点解析のそれと一致する。このため、過渡流体近似解析により求められた定常特性の近似誤差等に関する考察は省略する。

## 2.7 まとめ

この章では、ランダムアクセスシステムの近似解析手法として本論文で提案する過渡流体近似解析及び従来から用いられている代表的な解析手法の紹介を行った。ここで紹介した 3 つの動特性解析手法を定常特性の解析手法として見た場合、表 2-1 の様な関係にあると考えられる。ここで、新たに過渡マルコフ解析とした手法は、漸化式 (2-7) を繰り返し用い、その極限として定常特性を導出する手法を意味する。また、この過渡マルコフ解析と通常のマコフ解析を区別するため、ここでは線形連立方程式 (2-8) を解く手法を特に定常マルコフ解析と呼ぶ。

定常マルコフ解析、過渡マルコフ解析がシステムの状態遷移確率行列を用いてシステムモデルを厳密に解析するのに対して、平衡点解析、過渡流体近似解析はシステム状態  $n$  の変化量の期待値に着目して解析を行う流体近似解析手法である。マルコフ解析の場合、状態遷移確率行



表 2 - 1 ランダムアクセスシステムの解析手法

	方程式による解法	漸化式による解法
マルコフ解析	定常マルコフ解析	過渡マルコフ解析
流体近似解析	平衡点解析	過渡流体近似解析

列の導出が不可欠であるが、この行列の大きさは、システム状態数の増加とともに増大する。このため、各端末の取りうる状態数や全端末数が増加すると、この手法による解析では膨大な計算量が必要となる。また、遷移確率行列自体の導出も極めて困難となる場合が多い。一方、流体近似解析では、個々の端末の遷移確率行列（その次数は、各端末が取りうる状態数に等しい）を用いて解析が行われるので、かなり複雑なシステムに対しても容易に近似特性を求めることができる。

平衡点解析と過渡流体近似解析の関係は、定常マルコフ解析と過渡マルコフ解析のそれと非常によく類似している。過渡流体近似解析及び過渡マルコフ解析では、各端末の遷移確率行列あるいはシステムの遷移確率行列を用いて1スロット毎の状態変化を解析し、その極限として漸近的に定常特性を求めるのに対して、平衡点解析及び定常マルコフ解析では、定常状態方程式から直接定常特性が求められる。

マルコフ解析では、時不変システムの定常状態方程式は線形連立方程式となるので、定常特性の解析において定常マルコフ解析の代わりに過渡マルコフ解析を用いる利点はほとんど見当たらないが、流体近似解析の場合には、平衡点方程式は一般に非線形方程式あるいは連立非線形方程式となるので、有力な数値解析方法がない場合には、定常特性の解析であっても過渡流

体近似解析が有用となる。

### 3. 時変伝送路上のスロット付きアロハシステムの特性解析

#### 3.1 まえがき

初期のアロハ形システム<sup>[1]</sup>の研究においては、各端末は互いに見通し内にあり、衝突がない時そしてその時に限りパケットの伝送が成功すると仮定した理想伝送路に基づく特性解析が行われてきた<sup>[2]</sup>。1980年代に入ると、陸上移動無線システム等の研究を中心に、捕捉効果<sup>[10]</sup>や雑音による伝送誤りを考慮した、より現実的な伝送路モデルに基づく特性解析が行われている。しかし、移動無線システムの伝送路状態は、端末の移動に伴って変化するものであるにもかかわらず、ほとんどの論文では、そうした伝送路の時変性には注意が払われなかった。ここでは、移動無線システムにおける伝送路状態の時変性をマルコフ伝送路モデル<sup>[11]</sup>を用いることにより考慮したスロット付きアロハシステムの特性解析を行い、伝送路状態の時間変化がランダムアクセスシステムのシステム特性に与える基本的な影響を考察する。

この章では、各端末と局間の伝送路状態は、3つの極端な状態（端末と局間に伝送路がない状態、伝送路が良好な状態、信号が著しくひずんで伝送される状態）間をマルコフ的に遷移するものと仮定される<sup>[12]</sup>。このマルコフ伝送路モデルは、マルチパスやシャドローイング、パスロスなどの端末の移動に伴う伝送路状態の時間変化を抽象的に表したものである<sup>[14]~[18]</sup>。伝送路状態の違いは、局における受信電力の違いをもたらすので、伝送路状態の変動を考慮した特性解析には、本来は捕捉効果の影響を無視することはできない。しかし、この章では、伝送路状態の変動がシステム特性に与える基本的な影響を考察するため、捕捉効果等はないものと仮定して解析が行われる。捕捉効果・雑音による伝送誤りを考慮した特性解析は次章で行われる。

この章での議論は、概ね次の様な構成で展開される。最初に3.2で、端末動作及び伝送路モデルの定義が示される。3.3では、その解析モデルに基づいて動特性解析が行われる。3.2の解析モデルの妥当性と3.3で行われる近似解析の誤差については、3.4で考察される。3.5では、解析結果を基に伝送路状態変動の基本的な影響が考察される。

### 3.2 システムモデル

1つの基地局（以下、単に局と呼ぶ）と  $M$ 個の移動端末（以下、単に端末と呼ぶ）からなる集中形のスロット付きアロハシステムを考える。各端末は、2.2で定義された様なDFT形の動作をする照会応答形端末とする。即ち、各端末の動作は、以下に示す様なものと仮定する（図2-1参照）。

各スロットの開始時点における各端末の動作状態は、パケット生成状態（PGモード）、ランダム遅延状態（RDモード）のいずれかの状態にある。PGモードにある端末は、スロット当たり確率 $\sigma$ でパケットを生成し、RDモードに移る。RDモードにある端末は、スロット当たり確率 $p$ でパケットの送信を行う。パケットの伝送に失敗した端末は、RDモードに戻り、スロット当たり確率 $p$ でそのパケットの再送を繰り返す。パケットの伝送に成功した端末は、PGモードに移って次のパケットの生成を行う。

パケット伝送の成功を知らせる局からのAck信号の伝送方法としては、上りとは別帯域を利用する方法、上りと同一帯域を時間分割で利用する方法などが考えられるが、ここでは具体的な伝送方法には言及せず、単に、各端末は伝送の成否をパケット送信後直ちに知ることができるものと仮定する。実際には、雑音等によりAckの伝送が失敗する可能性もあり、パケット送信後一定時間以内にAckが正しく受信されない場合には、その伝送は失敗と判定される。従って、パケット伝送の成否には、Ackの伝送も含めて考える必要がある。Ackの伝送失敗は、システム特性に対して、後述の伝送路状態  $C_2$ にある端末がパケット送信を行った場合と同様な影響を与えるものと考えられる。また、Ackの伝送が“瞬時”でない場合には、伝送の成功から次のパケット生成までの時間や再送間隔は幾何分布とはならず、その厳密な解析は極めて困難なものとなる<sup>[13]</sup>。しかし、Ackの伝送に要する時間が平均パケット生成時間や平均パケット送信間隔に比べて十分小さい場合には、もとの幾何分布の平均をAckの伝送に要する時間だけ増加させた平均を持つ幾何分布で近似してもスループット等の平均特性にはほとんど影響しないことが知られている<sup>[2]</sup>。

ここでは、各端末と局間の伝送路の状態は、次の3つの状態のいずれかにあるものと仮定

する。即ち、それぞれの状態にある端末から送信されたパケットが、

$C_0$ :衝突がなくても正しくは受信されず他のパケットの妨害ともならない状態

$C_1$ :衝突がなければ正しく受信される状態

$C_2$ :衝突がなくても正しくは受信されず他のパケットの妨害となる状態

である。

状態  $C_0$  は、局と端末間に建築物、丘等の障害物があって、その状態にある端末から送信されたパケットが局に到達しないか、あるいは到達しても雑音等に比べて信号レベルが十分でない状態である。状態  $C_1$  は、局と端末との間の電波伝搬状態が理想的な場合を表しており、雑音等による伝送誤りはないものと仮定される。実際にはフェージング等のために波形歪やレベル変動が存在したとしても、その程度が小さく、等化器やダイバーシチ、誤り訂正符号等を用いて正しく復調できるものであれば、状態  $C_1$  にあると考えることができる。状態  $C_2$  は、その状態にある端末から送信されたパケットが、マルチパス等のためにその一部あるいは全体が破壊されて局に到達する場合を表している。端末位置の近傍の雑音が大きく、上りパケットは正しく局に伝送することができても、その Ack が正しく受信できない場合なども状態  $C_2$  に含めて考えることができる。

各端末のスロット同期確立方法としては従来のスロット付きアロハシステムの場合と同様、例えば局が別帯域で伝送する方法、TVの同期信号等の別のシステムの同期信号を利用する方法などが考えられる。ところで別システムの同期信号を利用した場合、端末と局間の伝送路が状態  $C_1$  にあっても同期信号の放送局と端末間に伝送路がなく、同期信号を受信できない場合が考えられる。この場合、そうした端末はパケットの送信を行わないとすれば、その端末は結果として状態  $C_0$  にあると考えることができる。またもし何等かの方法で自走同期してパケットを送信するとすれば、本論文での解析がそのまま適用できるが、新たに同期はずれの問題を考慮する必要がある。一方、局が別帯域でスロット同期信号を送信する場合には、そのスロット同期信号を観測することによって各端末は伝送路の状態を知ることができるかもしれない。この場合には、状態  $C_2$  にある端末がパケットの送信を見合わせる等の制御を行うことにより特性

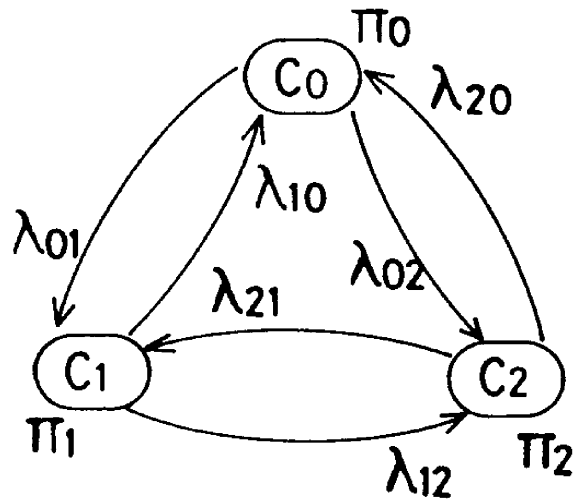


図 3 - 1 各端末の伝送路状態遷移図

の向上が期待される。このようにスロット同期に関しては、伝送路状態の変動を仮定したシステム特性の評価に際して考慮すべき数多くの問題が存在している。しかし本論文では、そうしたスロット同期等に関する二義的な問題は今後の課題とし、各端末のパケット送信は、その端末がいずれの状態にあっても常に正しくスロットに同期して行われるものと仮定する。

各端末の伝送路状態は、その端末の位置に依存して決まるものと考えられ、端末の移動に伴って3つの状態間を図3-1の様にマルコフ的に遷移するものと仮定する。状態  $C_i (i = 0 \sim 2)$  から状態  $C_j (j = 0 \sim 2, j \neq i)$  への遷移速度を  $\lambda_{ij}$  とすると、端末の伝送路状態が  $C_i$  にある確率  $\pi_i (i = 0 \sim 2)$  は、

$$\pi_0 = (\lambda_{12}\lambda_{20} + \lambda_{20}\lambda_{10} + \lambda_{10}\lambda_{21}) / d \quad (3-1)$$

$$\pi_1 = (\lambda_{01}\lambda_{20} + \lambda_{01}\lambda_{21} + \lambda_{21}\lambda_{02}) / d \quad (3-2)$$

$$\pi_2 = (\lambda_{01}\lambda_{12} + \lambda_{12}\lambda_{02} + \lambda_{10}\lambda_{02}) / d \quad (3-3)$$

で与えられる。ここで、

$$d = \lambda_{01}\lambda_{12} + \lambda_{12}\lambda_{20} + \lambda_{01}\lambda_{20} + \lambda_{01}\lambda_{21} + \lambda_{12}\lambda_{02} + \lambda_{20}\lambda_{10} + \lambda_{10}\lambda_{21} + \lambda_{21}\lambda_{02} + \lambda_{10}\lambda_{02} \quad (3-4)$$

である。

実際のシステムでは、各状態の区別は明確なものではなく、遷移時間分布も指数分布とは限らないが、ここでは解析の簡単化のために上述の様な仮定を用いている。なお、遷移時間分布に関しては、その分布形がスループット特性等に与える影響は僅かであることが、3.4でシミュレーションを用いた考察により示される。

### 3.3 特性解析

ここでは、2.6の過渡流体近似解析の手法に基づいて上述のシステムの動特性解析を行う。そのため、まず最初に、各端末の動作状態の変化を、各スロットの開始時点毎にその状態が遷移する図2-9の様な離散確率過程と考える。次に、解析の簡単化のために、伝送路状態の変化はスロット長に比べ十分緩慢であると仮定し、伝送路の状態変化もスロットの開始時点においてのみ生じるものとする。これにより、各端末の伝送路状態の変化は、各スロットの開始時点毎にその状態が遷移する離散マルコフ連鎖として表される。以下では、スロット長を時間の単位とし、伝送路状態の遷移確率 $\lambda_{ij}(i, j = 0 \sim 2)$ を、改めてあるスロットの開始時点において伝送路状態 $C_i$ にある端末が次のスロットの開始時点で状態 $C_j$ となる確率と定義する（離散過程となったために、状態が変化しない確率 $\lambda_{ii}(i = 0 \sim 2)$ も新たに定義される）。

以上の様な簡略化により、各端末の動作状態と伝送路状態を同時に考慮した各端末の状態変化は、図3-2に示す様な6個の状態間をスロットに同期して遷移する離散確率過程となる。図中、状態 $TH_i, RA_i$ は、それぞれ、その端末の動作状態が図2-9で示された状態 $TH, RA$ にあり、伝送路状態が状態 $C_i(i = 1 \sim 3)$ にあることを表している。この図の各状態間の遷移確率は表3-1に示されている。表中の $P_S$ は、図2-9の遷移確率 $p_{21}$ に対応し、端末の動作状態が状態 $RA$ から $TH$ へ遷移する確率を表している。このシステムの場合、 $P_S$ は、また、状態

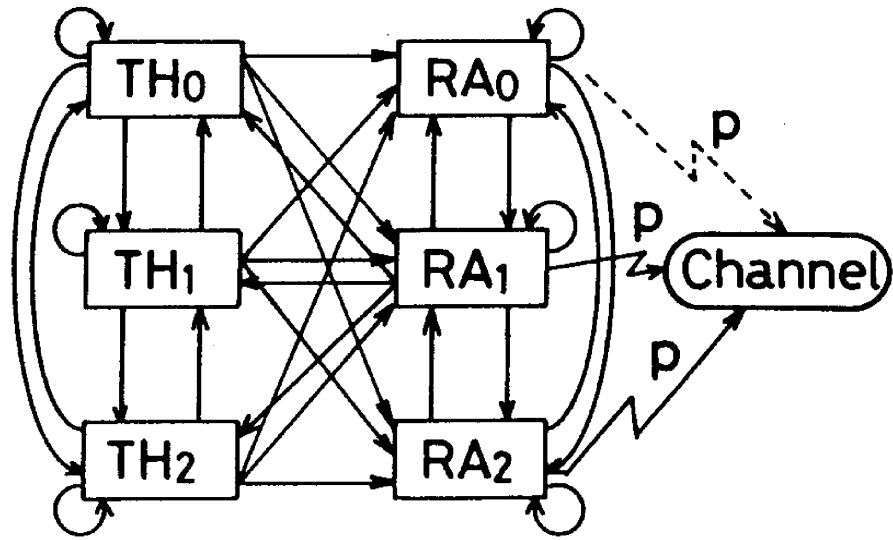


図 3 - 2 各端末の状態遷移図 (I)

from \ to	TH0	TH1	TH2	RA0	RA1	RA2
TH0	$(1-\sigma)\lambda_{00}$	$(1-\sigma)\lambda_{01}$	$(1-\sigma)\lambda_{02}$	$\sigma\lambda_{00}$	$\sigma\lambda_{01}$	$\sigma\lambda_{02}$
TH1	$(1-\sigma)\lambda_{10}$	$(1-\sigma)\lambda_{11}$	$(1-\sigma)\lambda_{12}$	$\sigma\lambda_{10}$	$\sigma\lambda_{11}$	$\sigma\lambda_{12}$
TH2	$(1-\sigma)\lambda_{20}$	$(1-\sigma)\lambda_{21}$	$(1-\sigma)\lambda_{22}$	$\sigma\lambda_{20}$	$\sigma\lambda_{21}$	$\sigma\lambda_{22}$
RA0	0	0	0	$\lambda_{00}$	$\lambda_{01}$	$\lambda_{02}$
RA1	$P_S\lambda_{10}$	$P_S\lambda_{11}$	$P_S\lambda_{12}$	$\lambda_{10}$	$1-P_S-\lambda_{11}$	$\lambda_{12}$
RA2	0	0	0	$\lambda_{20}$	$\lambda_{21}$	$\lambda_{22}$

表 3 - 1 状態遷移確率



RA<sub>1</sub>にある1つの端末がパケットを送信し、その伝送が成功して、状態 TH<sub>i</sub>(*i* = 0~2)のいずれかの状態に移る確率と言い換えることができる。

ところで、状態 RA<sub>1</sub>から TH<sub>0</sub>, TH<sub>2</sub>への遷移は、パケット送信中に伝送路状態が C<sub>1</sub>から C<sub>0</sub>, C<sub>2</sub>へ変化したことに対応している。しかし、実際には、このような場合の伝送は失敗となるはずであり、これらの遷移は、本来は存在しないものである。このような矛盾は、もともと連続過程であった伝送路状態の遷移を離散過程としたために生じたものであるが、そうした状況の発生は、スロット長に比べて伝送路状態の変化が緩慢であるとした仮定の基では極めて僅かであると考えられる。

状態 TH<sub>i</sub>, RA<sub>i</sub>(*i* = 0~2)にある端末の数を、それぞれ、*m<sub>i</sub>, n<sub>i</sub>*とし、ベクトル  $\mathbf{n} = (m_0, m_1, m_2, n_0, n_1, n_2)$  をこのシステムの状態ベクトルと呼ぶことにする。3. 2の仮定の基では、パケットの伝送が成功するのは、そのパケットが状態 C<sub>1</sub>にある端末から送信されたものであって、状態 C<sub>1</sub>または C<sub>2</sub>にある他の端末が同じスロットでパケットの送信を行わない時そしてその時に限られる。従って、システムが状態  $\mathbf{n}$ ある時、ある1つの端末が状態 RA から TH へ遷移する確率  $P_S(\mathbf{n})$  は、

$$P_S(\mathbf{n}) = p(1-p)^{m-1} \cdot (1-p)^{n_2} \quad (3-5)$$

となる。なお、状態 C<sub>0</sub>にある端末はパケットを送信しても他のパケット伝送の妨害とはならないと仮定されているので、*n<sub>0</sub>*は上式には含まれない。

各端末の状態遷移確率行列  $P(\mathbf{n})$  は、その各要素が表3-1の状態遷移確率からなる。従って、

$$P(\mathbf{n}) = \begin{pmatrix} (1-\sigma)\lambda_{00} & (1-\sigma)\lambda_{01} & (1-\sigma)\lambda_{02} & \sigma\lambda_{00} & \sigma\lambda_{01} & \sigma\lambda_{02} \\ (1-\sigma)\lambda_{10} & (1-\sigma)\lambda_{11} & (1-\sigma)\lambda_{12} & \sigma\lambda_{10} & \sigma\lambda_{11} & \sigma\lambda_{12} \\ (1-\sigma)\lambda_{20} & (1-\sigma)\lambda_{21} & (1-\sigma)\lambda_{22} & \sigma\lambda_{20} & \sigma\lambda_{21} & \sigma\lambda_{22} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{00} & \lambda_{01} & \lambda_{02} \\ P_S(\mathbf{n})\lambda_{10} & P_S(\mathbf{n})\lambda_{11} & P_S(\mathbf{n})\lambda_{12} & (1-P_S(\mathbf{n}))\lambda_{10} & (1-P_S(\mathbf{n}))\lambda_{11} & (1-P_S(\mathbf{n}))\lambda_{12} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{20} & \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

である。この状態遷移確率行列を用いることにより、システムの初期状態ベクトル $\bar{n}(0)$ が与えられると、2.6の過渡流体近似解析の手法に従って、任意のスロットの開始時点におけるシステム状態の期待値ベクトルが、漸化式

$$\bar{n}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{n}(t | \mathbf{n}(0))P(\bar{n}(t | \mathbf{n}(0))) \quad (3-7)$$

より求められる。また、この漸化式の極限ベクトル、即ち、平衡点ベクトル $\mathbf{n}_r$ は、連立非線形方程式、

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}P(\mathbf{n}) \quad (3-8)$$

の解として求められるが、この場合、この方程式の解は、次の様な近似を行うことにより比較的容易に導出される。

即ち、 $\sigma \ll 1, \lambda_{ij} \ll 1 (i, j = 0 \sim 2, i \neq j)$ であり、また、一般に $P_S(\mathbf{n}) \ll 1$ である<sup>†</sup>、ことから、式(3-6)の状態遷移確率行列 $P(\mathbf{n})$ において、 $\lambda_{ii} = 1 - \sum_{j \neq i} \lambda_{ij}$ を代入し、 $\sigma, \lambda_{ij} (i, j = 0 \sim 2, i \neq j), P_S(\mathbf{n})$ の積の項を無視すると、

$$P(\mathbf{n}) = \begin{pmatrix} \lambda_{00} - \sigma & \lambda_{01} & \lambda_{02} & \sigma & 0 & 0 \\ \lambda_{10} & \lambda_{11} - \sigma & \lambda_{12} & 0 & \sigma & 0 \\ \lambda_{20} & \lambda_{21} & \lambda_{22} - \sigma & 0 & 0 & \sigma \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{00} & \lambda_{01} & \lambda_{02} \\ 0 & P_S(\mathbf{n}) & 0 & \lambda_{10} & \lambda_{11} - P_S(\mathbf{n}) & \lambda_{12} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{20} & \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

が得られる。これは、伝送路状態の変化と動作状態の変化が1スロットの間に同時に起こる場合を無視することに対応している。また、このときの各端末の状態遷移図は図3-3のようになる。連立非線形方程式(3-8)は、この簡略化した状態遷移確率行列を用いることにより、次の様にしてその数値解を求めることができる。

<sup>†</sup> $P_S(\mathbf{n})$ は状態RAにある1つの端末が伝送に成功する確率であるから、常に $P_S(\mathbf{n}) < p$ である。一般に $p \ll 1$ であるから、 $P_S(\mathbf{n}) \ll 1$ が成り立つ。

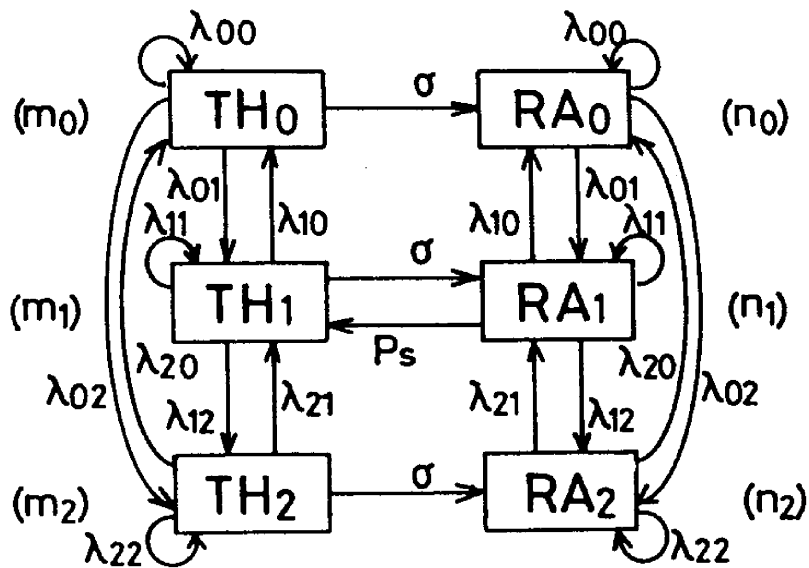


図 3 - 3 各端末の状態遷移図 (II)

式(3-8)の解法

行列方程式(3-8)は、連立方程式の形で表すと以下の6つの方程式となる。

$$m_0(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \sigma) = m_1\lambda_{10} + m_2\lambda_{20} \quad (3-10)$$

$$m_1(\sigma + \lambda_{12} + \lambda_{10}) = m_0\lambda_{01} + m_2\lambda_{21} + P_S(\mathbf{n})n_1 \quad (3-11)$$

$$m_2(\sigma + \lambda_{21} + \lambda_{20}) = m_0\lambda_{02} + m_1\lambda_{12} \quad (3-12)$$

$$n_0(\lambda_{01} + \lambda_{02}) = n_1\lambda_{10} + n_2\lambda_{20} + m_0\sigma \quad (3-13)$$

$$n_1(\lambda_{10} + \lambda_{12} + P_S(\mathbf{n})) = n_0\lambda_{01} + n_2\lambda_{21} + m_1\sigma \quad (3-14)$$

$$n_2(\lambda_{20} + \lambda_{21}) = m_2\sigma + n_0\lambda_{02} + n_1\lambda_{12} \quad (3-15)$$

上式は、6個の変数  $m_i, n_i (i = 0 \sim 2)$  に対して6個の方程式を与えているが、1つは従属であり、解ベクトル  $\mathbf{n}_e = (m_{e0}, m_{e1}, m_{e2}, n_{e0}, n_{e1}, n_{e2})$  を求めるには、上式に加えて、制約条件

$$m_0 + m_1 + m_2 + n_0 + n_1 + n_2 = M \quad (3-16)$$

が必要となる。最初に、式(3-10).(3-12)より、 $m_0, m_2$ が  $m_1$ の関数として、以下の様に求められる。

$$m_0 = m_1 \cdot \frac{\lambda_{10}(\sigma + \lambda_{21} + \lambda_{20}) + \lambda_{12}\lambda_{20}}{(\sigma + \lambda_{01} + \lambda_{02})(\sigma + \lambda_{21} + \lambda_{20}) - \lambda_{20}\lambda_{02}} \quad (3-17)$$

$$m_2 = m_1 \cdot \frac{\lambda_{12}(\sigma + \lambda_{01} + \lambda_{02}) + \lambda_{10}\lambda_{02}}{(\sigma + \lambda_{01} + \lambda_{02})(\sigma + \lambda_{21} + \lambda_{20}) - \lambda_{20}\lambda_{02}} \quad (3-18)$$

上式は、 $m_0, m_2$ が  $m_1$ に比例することを表している。次に、式(3-13).(3-15)より、 $n_0, n_2$ が以下の様に求められる。

$$n_0 = \frac{n_1(\lambda_{12}\lambda_{20} + \lambda_{10}\lambda_{21} + \lambda_{10}\lambda_{20}) + m_0\sigma(\lambda_{20} + \lambda_{21}) + m_2\sigma\lambda_{20}}{\lambda_{01}\lambda_{20} + \lambda_{21}\lambda_{02} + \lambda_{01}\lambda_{21}} \quad (3-19)$$

$$n_2 = \frac{n_1(\lambda_{01}\lambda_{12} + \lambda_{10}\lambda_{02} + \lambda_{12}\lambda_{02}) + m_2\sigma(\lambda_{01} + \lambda_{02}) + m_0\sigma\lambda_{02}}{\lambda_{01}\lambda_{20} + \lambda_{21}\lambda_{02} + \lambda_{01}\lambda_{21}} \quad (3-20)$$

これにより、 $n_0, n_2$ が  $m_1$  及び  $n_1$  の関数として表されたことになる。さらに、式 (3-17)~(3-20) を式 (3-16) に代入し、 $m_1$  について解くと、 $m_1$  も  $n_1$  の関数として表されるが、その結果は、式 (3-2) の  $\pi_1$  を用いて、

$$m_1 = \pi_1 M - n_1 \quad (3-21)$$

となる。上式の結果は、実は伝送路の状態変化が端末の動作状態とは独立に起こることからも明らかである<sup>†</sup>。最後に残った  $n_1$  は、以下に示す様な非線形方程式を数値的に解くことで与えられる。非線形方程式としては、式 (3-11) あるいは (3-14) に式 (3-17)~(3-21) を代入したものをを用いてもよいが、ここでは物理的意味がより明確な次式を用いることにする。

$$(M - n_0 - n_1 - n_2)\sigma - n_1 P_S(\mathbf{n}) = 0 \quad (3-22)$$

上式は、状態 TH と RA 間の平均入出力端末数の平衡を表すもので、式 (3-10)~(3-12) あるいは式 (3-13)~(3-15) から容易に導出することができる。式 (3-22) の解は、複数個存在する可能性があるが、一旦  $n_1$  が求められると、それに対応して式 (3-8) の解ベクトルの他の要素は、式 (3-17)~(3-21) より一意に求められる。なお、 $m_0$  と  $n_0$ 、 $m_2$  と  $n_2$  に対しても、式 (3-21) と同様な関係式、

$$n_0 = \pi_0 M - m_0 \quad (3-23)$$

$$n_2 = \pi_2 M - m_2 \quad (3-24)$$

が式 (3-17)~(3-21) から導出される。従って、 $n_0, n_2$  の計算には、式 (3-19)、(3-20) の代わりに、式 (3-23)、(3-24) を用いてもよい。

式 (3-22) の左辺は  $n_1 = 0$  の時、正、 $n_1 = M$  の時、負であるから、0 から  $M$  の間に少なくとも1つの根を持っている。この根は、2. 6 で示した様にシステムの状態変化量の期待値が 0 となる点を表し、平衡点ベクトル  $\mathbf{n}_e = (m_{e0}, m_{e1}, m_{e2}, n_{e0}, n_{e1}, n_{e2})$  と呼ばれる。以下では、この平衡点ベクトル  $\mathbf{n}_e$  おけるシステム特性を用いてシステムの定常特性を近似する。また、式 (3-22) の根が複数個存在する場合には、最大の根  $n_{ce1}$  をもとに得られる平衡点ベクトル  $\mathbf{n}_{ce}$  を

<sup>†</sup>伝送路状態と動作状態の独立性は、図3-3のモデルでも保たれており、式(3-1)~(3-3)が成り立つ。

用いてシステムの定常特性を近似する。 $n_{c1}$ が大きな値のとき、式(3-21)より $m_{c1}$ は小さく、式(3-17),(3-18)より $m_{c0}, m_{c2}$ も小さくなる。さらに、式(3-23),(3-24)より $n_{c0}, n_{c2}$ が大きくなる。従って、式(3-22)より、 $\mathbf{n}_{cw}$ は、 $n_1 P_S(\mathbf{n})$ を最小とする平衡点ベクトルであるといえる。なお、平衡点が複数個存在する場合に最悪の平衡点における特性でシステムの定常特性を近似するという方法は、平衡点解析では一般的に用いられる手法である。以下では、平衡点ベクトルとして $\mathbf{n}_{cw}$ のみを用いるので、添字のwを省略して単に $\mathbf{n}_c$ で $\mathbf{n}_{cw}$ を表す。

システムが平衡点ベクトル $\mathbf{n}_c$ で表される状態にあるとすると、1スロット当りのバケット伝送成功確率 $S_c$ は、

$$S_c = n_{c1} P_S(\mathbf{n}_c) = n_{c1} p (1-p)^{n_{c1} + n_{c2} - 1} \quad (3-25)$$

で与えられる。平衡点解析では、スループット $S$ はこの $S_c$ を用いて近似される<sup>[3]</sup>。また、平均伝送遅れ $D$ は、リトルの結果を用いて、

$$D = (\overline{n_0 + n_1 + n_2}) / S \quad (3-26)$$

となるが、システムが定常状態にあるとすると、

$$(M - \overline{n_0} - \overline{n_1} - \overline{n_2}) \sigma = S \quad (3-27)$$

が成り立つことから、次の関係式が導かれる。

$$D = M/S - 1/\sigma \quad (3-28)$$

上式は、平均伝送遅れがスループットの単調減少関数となることを示しているが、この関係は、照会応答形のランダムアクセスシステムにおいては、広く一般に成り立つものである。

### 3.4 解析結果の検討

ここでは、伝送路状態の時間変化を考慮したスロット付きアロハシステムの動特性を実際に計算し、3.2で示されたシステムモデルに基づくシミュレーション結果と比較することにより解析の近似誤差等の考察を行う。

最初に、典型的な移動無線システムの例を示し、具体的なシステムパラメータの設定を行う。移動端末の総数  $M$  を 400 と仮定し、それは基地局を中心とする半径 10km の範囲に分布しているものと仮定する。チャネルの伝送速度を 100kbit/s とし、パケット長を 1000bit とすると、パケットの伝送に要する時間は 10ms となる。スロット長は、実際には、電波伝搬時間などを考慮してパケット長より多少長くする必要はあるが、ここでは簡単のためにパケット長と等しいものとする<sup>†</sup>。 $\sigma, \lambda_{ij} (i, j = 0 \sim 2, i \neq j)$ <sup>††</sup> は、このスロット長を時間の単位として与えられ、各端末が平均 10 秒に 1 回新しいパケットを生成するとすると、 $\sigma$  は 0.001 となる。 $\lambda_{ij}$  は、実際には移動端末の種類、地形、変復調方式、使用周波数、帯域幅など様々な要素に複雑に依存して決まるパラメータである。しかしここでは、次の様にして先験的に求めた値を用いることにする。

実際のシステム設計においては、状態  $C_i (i = 0 \sim 2)$  となる領域の分布状況や移動端末の分布状況などが実測データとして与えられるものと考えられる。これらの基礎データから状態確率  $\pi_i (i = 0 \sim 2)$  が比較的容易に求められるものと考えられる。また、各移動端末が状態  $C_i (i = 0 \sim 2)$  に滞在する平均時間  $\tau_i$  も比較的容易に求められるものと考えられる。 $\pi_i, \tau_i (i = 0 \sim 2)$  から状態遷移確率  $\lambda_{ij}$  を求めるために、通常平衡条件に加えて状態  $C_i (i = 0 \sim 2)$  から  $C_j (j \neq i)$  に移動する端末の平均数は  $C_j$  から  $C_i$  に移動する端末の平均数に等しいと仮定する。これにより、

$$\lambda_{01} = \pi_1 \lambda_{10} / \pi_0 \quad (3-29)$$

$$\lambda_{12} = \pi_2 \lambda_{21} / \pi_1 \quad (3-30)$$

$$\lambda_{20} = \pi_0 \lambda_{02} / \pi_2 \quad (3-31)$$

なる関係が導かれる。また、各伝送路状態での滞在時間は指数分布であると仮定されているの

<sup>†</sup>この場合、最大電波伝搬時間は 0.033ms である。

<sup>††</sup>ここでの  $\lambda_{ij}$  は、3.2 で定義された連続時間上での伝送路状態の遷移速度を表している。なお、スロット長を時間の単位とした場合、この遷移速度の値は、3.3 の解析において用いられた離散時間モデルにおける伝送路状態の遷移確率に等しくなる。

で、その平均 $\tau_i$ は、 $\lambda_{ij}$ を用いて

$$\tau_0 = 1/(\lambda_{01} + \lambda_{02}) \quad (3-32)$$

$$\tau_1 = 1/(\lambda_{12} + \lambda_{10}) \quad (3-33)$$

$$\tau_2 = 1/(\lambda_{20} + \lambda_{21}) \quad (3-34)$$

で与えられる。これらの式から $\lambda_{ij}$ は、

$$\lambda_{01} = \frac{\pi_0/\tau_0 + \pi_1/\tau_1 - \pi_2/\tau_2}{2\pi_0} \quad (3-35)$$

$$\lambda_{12} = \frac{-\pi_0/\tau_0 + \pi_1/\tau_1 + \pi_2/\tau_2}{2\pi_1} \quad (3-36)$$

$$\lambda_{20} = \frac{\pi_0/\tau_0 - \pi_1/\tau_1 + \pi_2/\tau_2}{2\pi_2} \quad (3-37)$$

$$\lambda_{10} = \frac{\pi_0/\tau_0 + \pi_1/\tau_1 - \pi_2/\tau_2}{2\pi_1} \quad (3-38)$$

$$\lambda_{21} = \frac{-\pi_0/\tau_0 + \pi_1/\tau_1 + \pi_2/\tau_2}{2\pi_2} \quad (3-39)$$

$$\lambda_{02} = \frac{\pi_0/\tau_0 - \pi_1/\tau_1 + \pi_2/\tau_2}{2\pi_0} \quad (3-40)$$

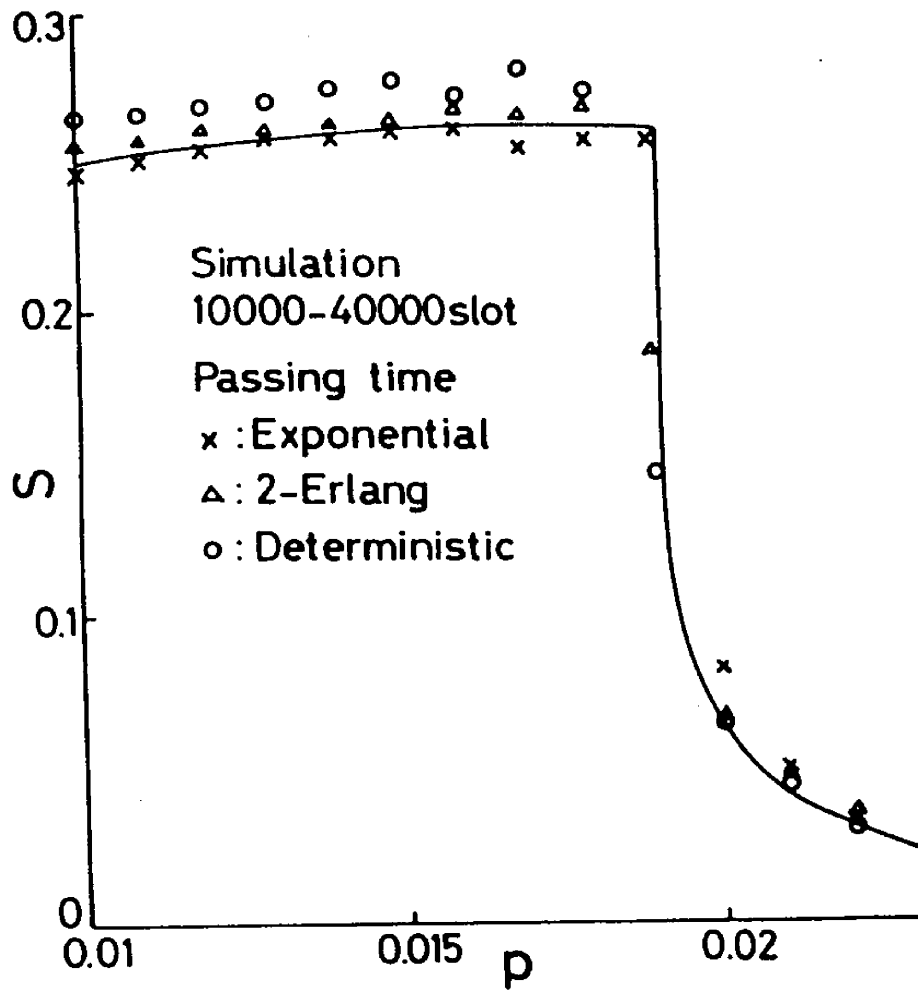
と求められる。3. 3の離散時間モデルにおける伝送路状態の遷移確率 $\lambda_{ij}$ も同様に上式から求められる。また、その場合、 $\lambda_{ii}$ は、

$$\lambda_{ii} = 1 - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^2 \lambda_{ij} \quad (i=0 \sim 2) \quad (3-41)$$

で与えられる。

図3-4は、 $\pi_0 = 0.4$ 、 $\pi_1 = 0.5$ 、 $\pi_2 = 0.1$ とし、 $\tau_0 = 400$ 、 $\tau_1 = 500$ 、 $\tau_2 = 100$ とした時のスループット特性をパケット送信確率 $p$ の変化に対して示したものである。この例では、各伝送路状態における平均滞在時間 $\tau_i$ は、その状態確率 $\pi_i$ に比例するように設定されている。 $\tau_0 = 400$





$$\lambda_{00}=0.9975, \lambda_{01}=0.00125, \lambda_{02}=0.00125$$

$$\lambda_{10}=0.001, \lambda_{11}=0.998, \lambda_{12}=0.001$$

$$\lambda_{20}=0.005, \lambda_{21}=0.005, \lambda_{22}=0.99$$

図 3 - 4 解析結果とシミュレーション結果

は、ここで仮定されたシステム例では4秒間に相当するが、これは端末の移動速度を40km/hとすると44mの距離に対応している<sup>†</sup>。

図中、実線は解析結果であり、×印は3.2のシステムモデルに基づくシミュレーション結果である。アロハ形のシステムには、一般に複数の安定平衡点が存在する可能性がある。そのため、初期状態の違いによって異なったシミュレーション結果となる場合が予想される。本論文でのシミュレーションは、システムの特徴を控えめに評価するために、第0スロットにおいてすべての端末が状態RAにあり、状態C<sub>i</sub>にある端末の数はそれぞれ $\pi_i M$ 個であるという状態から開始されている。また、シミュレーションは、すべて図3-1の実時間モデルに基づいて行われ、40000スロットのシミュレーションの内、第10000~40000スロットの結果を集計するという方法を用いている。この図より、解析結果はシミュレーション結果と非常によく一致していることがわかる。

また、図には各伝送路状態での滞在時間の分布形がシステム特性に与える影響を考察するために、各滞在時間が指数分布以外の場合のシミュレーション結果も示されている。○印は、各状態での滞在時間が一定とした時のシミュレーション結果であり、△印は、2次のアーラン分布に従うとした時のシミュレーション結果である。この図より、安定領域（即ち、この図では $\rho < 0.0192$ の領域）では、分散が小さな分布ほど高いスループットを示すことがわかる。しかしその違いは僅かであり、○印、△印のシミュレーション結果とも×印の結果とほぼ同様な特性を示している。このことから、滞在時間の分布形がシステム特性へ与える影響は僅かであると考えられる。

なお、上述のシステムパラメータ以外の場合に対しても同様な検討を行ったが、図3-4の場合と同様な平衡点解析特有の誤差が含まれるものの、解析結果は全体としてシミュレーション値とよく一致することが確かめられた。

---

<sup>†</sup>シャドーイングの平均継続時間は、使用周波数や端末の移動速度、地理的環境など様々な要因に依存している。そのため、その典型的な値は、数秒~10秒程度であるとする論文<sup>[15]</sup>もあれば、数100ms程度が一般的とする報告<sup>[16]</sup>もある。この値は、都市化、高周波化が進につれて増加する傾向にある点を考えると、このシステム例の $\tau_0 = 4$ 秒は妥当な値であるといえる。

### 3.5 時変伝送路の影響

ここでは、3.3で求めた解析結果を基に伝送路状態の時間変化がシステム特性に与える影響を考察する。

( $\pi_2 = 0$  の場合)

最初に、 $\pi_2 = 0$  の場合、即ち伝送路状態が  $C_0$  と  $C_1$  のみの場合について考察する。このシステムに対する解析結果は3.3での解析結果に  $\lambda_{12} = 0, \lambda_{02} = 0$  を代入することで与えられる。シャドール状態にある端末からの電波は局には到達しないのであるから、このシステムの特徴は全端末数が  $M\pi_1$  の伝送路状態が変化しないシステム（伝送路状態が常に  $C_1$  のシステム）と類似したものになることが予想される。そこで以下では、この2つのシステムを比較しながら考察を行う。

あるスロットにおいて、状態  $RA_1$  にある端末数が  $n_1$ 、状態  $RA_1$  以外の状態にある端末数がその  $n_1$  に対応した平衡状態、即ち式 (3-17), (3-19), (3-21) で与えられる値である時、その次のスロットで状態  $TH$  から状態  $RA$  へ移る端末数の期待値  $S_{in}(\mathbf{n})$  は、

$$S_{in}(\mathbf{n}) = (m_0 + m_1)\sigma = \left(1 + \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{01} + \sigma}\right)(M\pi_1 - n_1)\sigma \quad (3-42)$$

となる。また、状態  $RA$  から  $TH$  へ移る端末数の期待値  $S_{out}(\mathbf{n})$  は、

$$S_{out}(\mathbf{n}) = n_1 p (1-p)^{n_1-1} \quad (3-43)$$

となる。一方、全端末数が  $M\pi_1$  で伝送路状態が常に  $C_1$  のシステムでは、

$$S_{in}(\mathbf{n}) = (M\pi_1 - n_1)\sigma \quad (3-45)$$

$$S_{out}(\mathbf{n}) = n_1 p (1-p)^{n_1-1} \quad (3-46)$$

であるから、状態  $TH$  から  $RA$  へ移る端末数の期待値には、 $\{\lambda_{10}/(\lambda_{01} + \sigma)\}(M\pi_1 - n_1)\sigma$  個のずれがある。この項は、シャドール状態にある端末の状態  $TH$  から  $RA$  への移行を表している。

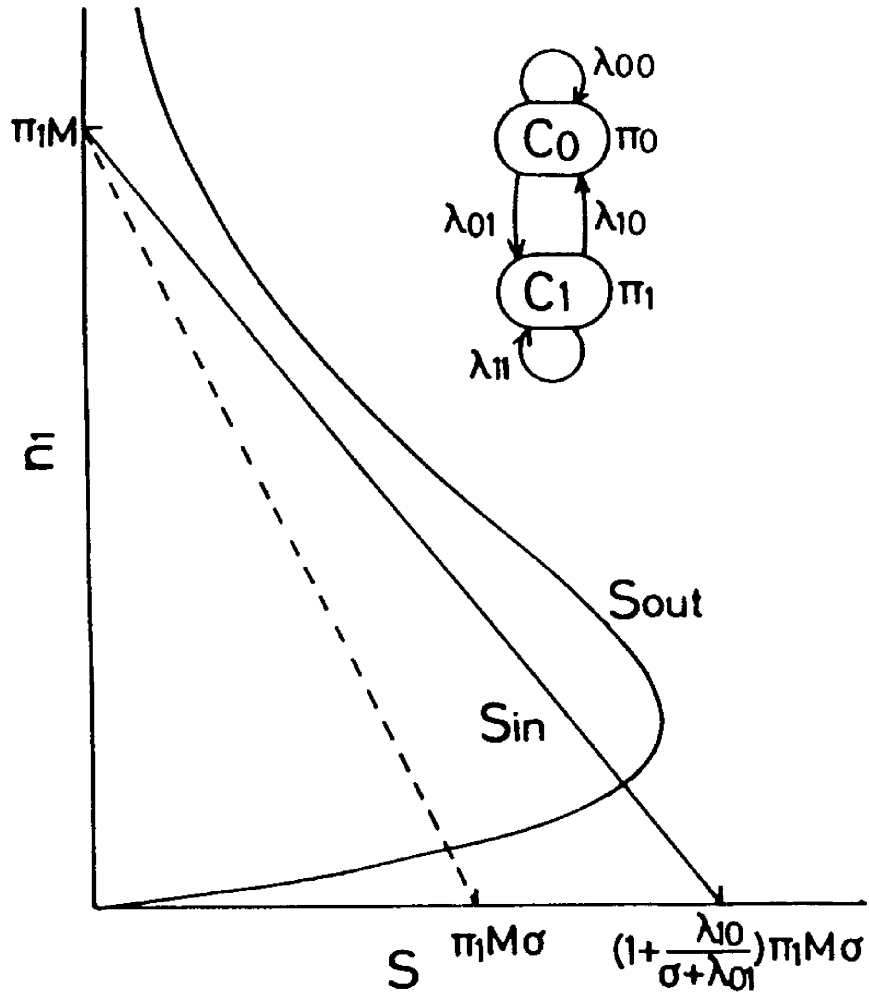


図 3 - 5  $\pi_2 = 0$  の場合の入出力バランス

図3-5は、上式の関係を図で表したものである。状態 RA への入出力端末数の期待値が等しくなる  $m_1$  の値は、安定領域で動作している場合にはシャドー状態のあるシステムの方が大きく、スループットもシャドー状態のあるシステムの方が大きくなることがわかる。また、両特性の差は  $\lambda_{10}/(\lambda_{01} + \sigma)$  で決り、 $\lambda_{10}, \lambda_{01}$  が  $\sigma$  に比べて小さな場合、即ち端末の移動速度がパケット発生間隔に比べて緩慢である場合には、その差は小さくなり、移動がまったくない場合に両者は一致することがわかる。なお、式(3-42)で与えられる負荷線は、 $n_0, m_0, m_1$  が平衡状態にあるという仮定の基で導かれたもので、実際には負荷直線自体も確率的に変動することに注意する必要がある。

( $\lambda_{ij} = \lambda (i, j = 0 \sim 2, i \neq j)$  の場合)

ここでは、簡単のために、 $\lambda_{ij} (i, j = 0 \sim 2, i \neq j)$  が全て同じ値  $\lambda$  である場合を考える ( $\lambda_i (i = 0 \sim 2)$  は  $\lambda$  でなくともよい)。この場合、明らかに  $\pi_i = 1/3, \tau_i = 1/(2\lambda) (i = 0 \sim 2)$  となる。また、

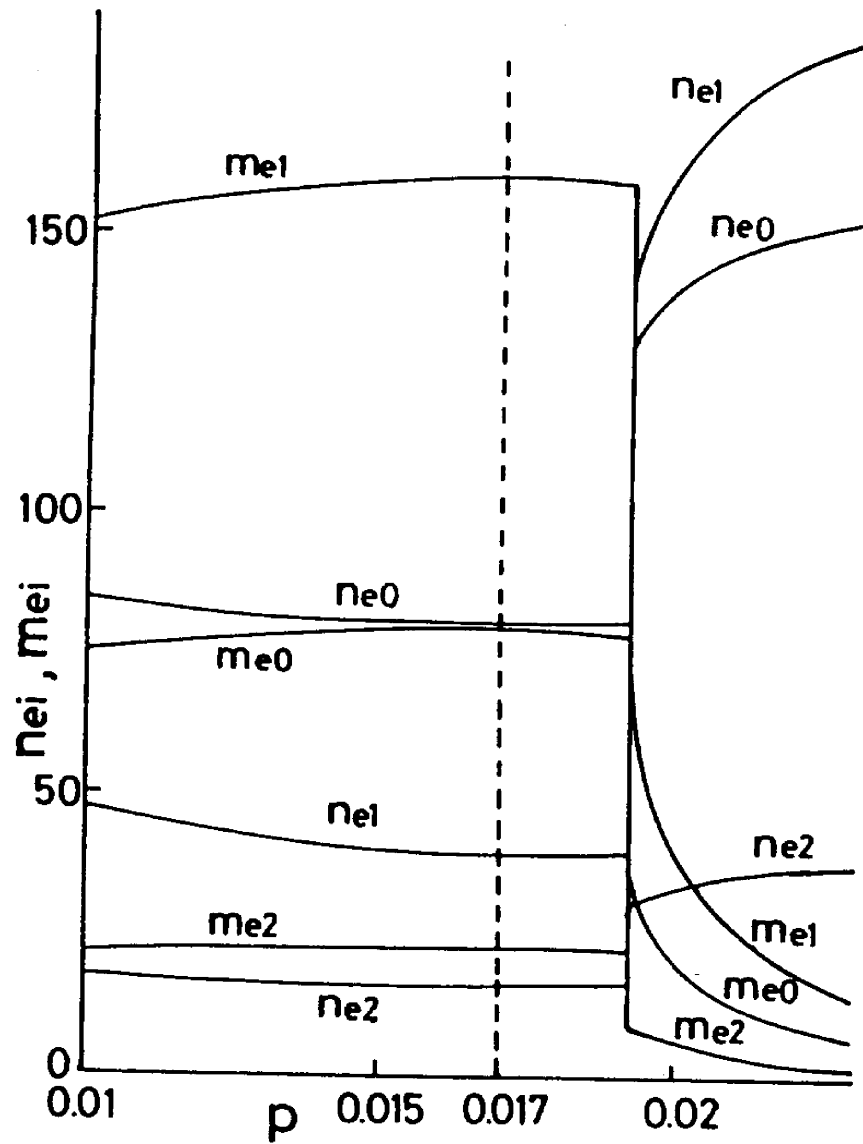
$$m_{c0} = m_{c2} = m_{c1} \lambda / (\sigma + \lambda) \quad (3-46)$$

$$m_{c1} = M/3 - n_{c1} \quad (3-47)$$

$$n_{c0} = n_{c2} = n_{c1} + \sigma m_{c1} / (\sigma + \lambda) \quad (3-48)$$

となる。これらの式から、 $m_{c0}, m_{c2}$  は  $m_{c1}$  に比べ小さく、 $n_{c0}, n_{c2}$  は  $n_{c1}$  に比べ大きくなることがわかる。また、その差は、パケット生成確率  $\sigma$  と伝送路状態遷移確率  $\lambda$  の比によって決まり、 $\sigma/\lambda$  が大きい時、即ちパケットの生成が端末の移動速度に比べて頻繁に行われる時、大きくなる。これは、状態 RA から TH への遷移が伝送路状態  $C_1$  の場合に限られているからであり、状態  $C_0, C_2$  から  $C_1$  への遷移が頻繁に起こる場合には、 $m_{c0}, m_{c2}$  と  $m_{c1}$  あるいは  $n_{c0}, n_{c2}$  と  $n_{c1}$  の差は小さくなる。

伝送路状態  $C_0, C_2$  にある端末は、 $C_1$  にある端末に比べてその動作状態が RA である確率が高いという傾向は、 $\lambda_{ij} = \lambda (i, j = 0 \sim 2, i \neq j)$  の場合以外にも一般に存在する。図3-6は前述のシステム例に対する  $n_{ci}, m_{ci} (i = 0 \sim 2)$  の変化の様子を示したものであるが、この図よ



$$\begin{aligned} \lambda_{00} &= 0.9975, \lambda_{01} = 0.00125, \lambda_{02} = 0.00125 \\ \lambda_{10} &= 0.001, \lambda_{11} = 0.998, \lambda_{12} = 0.001 \\ \lambda_{20} &= 0.005, \lambda_{21} = 0.005, \lambda_{22} = 0.99 \end{aligned}$$

図 3 - 6 各状態にある端末の数

り、伝送路状態が  $C_0$  あるいは  $C_2$  の端末は、状態  $C_1$  にある端末に比べ在庫パケットをもっている確率が高くなることが確かめられる。特にパケット伝送成功確率  $P_S(n_i)$  の大きな安定領域 ( $p < 0.0192$ ) では、この傾向が強く、例えば、 $p = 0.017$  では  $n_{c1}/(m_{c1} + n_{c1}) = 0.20$  であるのに対して  $n_{c0}/(m_{c0} + n_{c0}) = 0.50$ ,  $n_{c2}/(m_{c2} + n_{c2}) = 0.50$  となっている。一方、不安定領域 ( $p > 0.0192$ ) では、 $P_S(n_i)$  が小さいために、状態  $RA_1$  から  $TH_1$  への遷移が減少し、在庫パケットを持った端末の割合はどの伝送路状態でも同様な値となる。

### 3.6 まとめ

ここでは、各端末と局間の伝送路の状態が端末の移動に伴ってマルコフ的に変化するスロット付きアロハシステムの特性格解析を行った。ここでの解析は、過渡流体近似解析の手法を用いて行ったが、結果として平衡点方程式が導出され、平衡点解析と同様にしてシステムの近似特性が求められた。その解析結果は、平衡点に着目した解析に特有の近似誤差を含むものの、全体としてシステムの動特性を非常によく表していることが確かめられた。また、シミュレーションを用いて、各伝送路状態での滞在時間の分布形の違いがシステム特性へ与える影響が考察され、平均滞在時間が同じならば、分布形の違いによるスループット特性の違いは僅かであることが示された。次に、 $\pi_2 = 0$  や  $\lambda_{ij} = \lambda (i, j = 0 \sim 2)$  の場合といった特殊な状況下での伝送路状態変動の影響が解析され、その解析結果を基に伝送路状態の変化がシステム特性に与える基本的な影響を考察した。加えて、そうした基本的な時変伝送路の影響は、一般的な状況下でも存在することが示された。

この章での伝送路モデルは、伝送路状態の時間変化がランダムアクセスシステムのシステム特性に与える基本的な影響を示すために、実際の陸上移動無線システムにおける状況を大幅に簡略化したものである。実際の陸上移動無線システムにおける伝送路状態の違いは、この章で仮定した様な極端なものではなく、局における受信電力の違いや波形ひずみの大小といった量的な違いとして表われる。端末の移動に伴って生じる伝送路状態の時間変化が局における平均受信電力を変化させるものと仮定した場合、その特性格解析においては捕捉効果の存在や雑音

による伝送の失敗を考慮する必要がある。次章では、そうしたより実際に近い状況下での伝送路状態の時変性がシステム特性に与える影響を考察する。



## 4. 時変伝送路上のスロット付きアロハシステムの特性解析

### —捕捉効果のある場合—

#### 4.1 まえがき

この章では、捕捉効果や雑音による伝送誤りを考慮したスロット付きアロハシステムの特性解析を、各端末と局間の伝送路状態が端末の移動にともなって変化する時変伝送路を仮定して行う。そのため、前章のマルコフ伝送路モデルを発展させた次の様な伝送路モデルを仮定する。

前章では、シャドーイング、パスロスなど端末の位置に依存して変化する各端末と局間の伝送路状態の時間変化を、3つの極端な状態間を遷移するマルコフ連鎖として表現し、システム特性の解析を行った。ここでは、各端末と局間の伝送路状態は、2つの状態（即ち、その端末から送信された電波の局における平均受信電力が比較的大きな状態と小さな状態）の間をマルコフ的に遷移するものと仮定する。これは、シャドーイング、パスロスなどの端末位置に依存した伝送路状態の変化、即ち長期間変動を表したもので、前章の状態  $C_1$ 、 $C_0$  に対応している。ここでは、更にフェージングなどの短期間変動の影響を考慮するため、局における受信信号の包絡線がその端末と局間の伝送路の状態に対応する平均値を持ったレイリー分布に従うものと仮定される。また、ガウス雑音の存在が仮定され、雑音による伝送誤りについても考慮される。なお、状態  $C_2$  に対応する受信信号がひずんで到達する場合については、この章では取り扱わない。しかし、そうした伝送路状態を含むシステムへの議論の拡張は比較的容易であることが、議論の展開の中で具体的に示される。

以下では、この章での議論に関連する研究分野の概況を簡単に紹介する。捕捉効果の存在については、アロハ形システムの研究が開始された当初から指摘されていた<sup>[1][20]</sup>。しかし、1970年代における研究者の関心は、もっぱらランダムアクセス方式特有の現象であるパケットの衝突に起因する不安定現象の解明やその制御に向けられていた<sup>[2]</sup>。そのため、パケットの伝送は、他のパケットとの衝突がない時、そしてその時に限り伝送に成功するとした理想伝送路モデルに基づく研究が主流であった。1980年代に入ると、陸上移動無線システムの研究を中心とし

て、より現実的な伝送路モデルに基づいたランダムアクセス方式の特性解析が行われるようになる。その結果、捕捉効果を考慮した場合、複雑な伝送制御を用いない方式でも比較的高いスループット特性を示すことが明らかとなり<sup>[14]</sup>、アロハ方式など基礎的なランダムアクセスシステムの研究が、より現実的な伝送路モデルの基で、再び盛んに行われている。また、アロハ形システムの研究が盛んに行われる様になったもう1つの理由として、電子機器等の進歩による伝送速度の増加があげられる。伝送速度の増加は、相対的に伝送制御等に要する時間を増加させるので、キャリアセンスなどの伝送制御を行ってもそれに見合うスループット特性の向上が望めないという状況が生ずる場合がある。実際、近年構築された GSM システムの制御チャンネルのアクセス方式として、スロット付きアロハ方式が採用された背景にはこうした事情がある<sup>[14]</sup>。

一方、フェージング、シャドーイング、パスロスなど移動無線システムにおける伝送路状態の変化に関する研究も古くから行われているが<sup>[15][16][29][30]</sup>、近年では、特に、ランダムアクセスシステムへの応用を意識した研究が盛んである<sup>[18][31]~[35]</sup>。シャドーイングやパスロスなど端末の地理的な位置に依存して生じる伝送路状態の変化は比較的長い変動周期を持つため、ランダムアクセス方式の特性解析においては、各端末の packets 送信時点毎の伝送路の状態に相関がある点を考慮する必要がある<sup>[18][31]</sup>。こうした時変伝送路の数学モデルとしては、一般に2状態あるいは数状態のマルコフ連鎖を用いた伝送路モデルが利用されている<sup>[17][18][31][36]</sup>。

しかし、ランダムアクセスシステムのこれまでの研究においてマルコフ伝送路モデルを仮定したものは、主に衛星回線を利用したシステムに限られていた。この章では、陸上移動無線システムにおける伝送路状態の時間変化を記述するために、短期間変動と長期間変動を同時に考慮したマルコフ伝送路モデルを仮定し、捕捉効果や雑音による伝送誤りがスロット付きアロハシステムのシステム特性に与える影響を考察する。

なお、この章は次の様に構成されている。4.2では、この章で用いられる伝送路モデルの厳密な定義を端末の動作モデルとともに示す。そのモデルに基づいたシステム特性の解析は、4.3で過渡流体近似解析により行われる。ここでの解析方法は、ほとんどの捕捉効果モデル

に対して適用可能であるが、ここで具体例として考察される捕捉効果モデルは、文献 [7] のモデルを複数の伝送路状態がある場合に拡張したもので、4.4で定義される。4.5では、求められた解析結果がシミュレーション結果とよく一致していることが示されるとともに、伝送路状態変動の影響が考察される。

ところで、この章では、伝送路モデルとして2状態のマルコフ連鎖を用いた場合のみを考察するが、それが陸上移動無線システムにおける伝送路の状況を示すのに十分であるか否かという点の検討は行われぬ。衛星回線を用いたシステムにおいては、2状態のマルコフ伝送路モデルの妥当性が検討されているが<sup>[17]</sup>、陸上移動無線システムの場合には、距離の違いによるパスロスや周囲の地理的状況の影響を強く受けるので、そうした点の考察は一般的には極めて難しいものと考えられる。このためここでは、伝送路のマルコフモデルを2状態の場合に限定して、解析法の紹介及び基本的な特性の考察が行われる。しかし、解析法自体は、伝送路の状態数が3以上の場合にも容易に拡張可能であり、また、解析結果の考察においてなされる定性的な議論は、かなり一般的に成り立つものであると考えられる。

## 4.2 システムモデル

1つの基地局（以下、単に局と呼ぶ）と  $M$  個の移動端末（以下、単に端末と呼ぶ）からなる集中形のスロット付きアロハシステムを考える。各端末は、その動作が図2-1で表される照会応答形端末とする。この端末動作に関する説明は、2.2及び3.2での議論と重複するのでここでは省略する。また、この章においても、パケット生成確率及び送信確率を、それぞれ  $\sigma$  及び  $p$  を用いて表すことにする。

一方、各端末と局間の伝送路モデルとしては、局における受信電力の短期間変動と長期間変動を同時に考慮するために、前章のモデルを発展させた図4-1の様なマルコフ伝送路を仮定する。図中、状態  $C_1$  は伝送路が良好な状態（その端末から送信された電波の局における平均受信電力が比較的高い状態）であることを表し、この状態にある端末は、平均  $1/\lambda_{10}$  の指数分

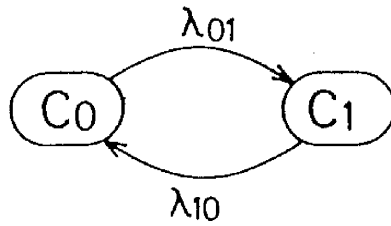


図 4 - 1 各端末の伝送路状態遷移図

布に従う時間その状態に留まった後、シャドー状態  $C_0$  に遷移する<sup>†</sup>。状態  $C_0$  での滞留時間は平均  $1/\lambda_{01}$  の指数分布に従うものとする。また、各端末の状態遷移は、互いに独立に行われるものと仮定する。

異なった伝送路状態にある端末から送信されたパケットは、局に到達したとき、平均受信電力や信号歪の大きさなどに関して、異なった性質を持つものと考えられる。従って、捕捉確率や衝突以外の原因による伝送誤りの発生確率に関しても、それぞれ異なった値となるものと考えられる。ここでは、あるスロットで状態  $C_0$  にある端末から送信されるパケットの数を  $i_0 (i_0 \geq 0)$ 、同じスロットで状態  $C_1$  の端末から送信されるパケットの数を  $i_1 (i_1 \geq 0)$  としたとき、そのスロットで状態  $C_0$  及び  $C_1$  にある端末から送信されたパケットが捕捉される<sup>††</sup> 確率は、それぞれ異なった値  $q_0(i_0, i_1)$ 、 $q_1(i_0, i_1)$  を持つものとする。なお、 $1 - q_0(1, 0)$  及び  $1 - q_1(0, 1)$  は、それぞれ状態  $C_0$ 、 $C_1$  にある端末から送信されたパケットが、衝突以外の原因でその伝送に失敗する確率を表している。

<sup>†</sup> 長期間変動の要因としては、シャドーイング、パスロスなどが考えられるが、以下では説明の簡単化のために平均受信信号レベルが低い状態を、単にシャドー状態と呼ぶ。

<sup>††</sup> 従来の FM 通信等の捕捉効果に関する記述では、“信号が局を捕捉する” という表現が一般に用いられている。しかし、無線パケット通信の分野では、“信号が局に捕捉される” という表現も数多く見受けられ、本論文では、後者の表現を採用している。

### 4.3 特性解析

ここでは、過渡流体近似解析により上述の伝送路モデルに基づいたスロット付きアロハシステムの動特性解析を行う。そのため、各端末の状態の変化を表す離散マルコフ連鎖を、前章での議論と同様、次の様にして導出する。最初に、各端末の動作状態の変化を、スロットの開始時点毎にその状態が遷移する図2-9の様な離散マルコフ連鎖を用いて記述する。次に、伝送路状態の変化はスロット長に比べ十分緩慢であると仮定し、伝送路の状態遷移もスロットに同期して起こるものと近似する。即ち、各スロットの開始時点の伝送路状態をそのスロット全体の伝送路状態とし、1スロット間に複数回の状態遷移が起こることはないものと仮定する。これにより、伝送路状態の変化もスロット毎にその状態が遷移する離散マルコフ連鎖となる。スロット長を時間の単位とすると、前章で定義された伝送路状態遷移速度 $\lambda_{ij}(i, j = 0 \sim 1, i \neq j)$ は、数値的に上述の離散マルコフ連鎖の遷移確率と一致する。このため、ここでは $\lambda_{ij}(i, j = 0 \sim 1)$ を、改めてあるスロットで伝送路状態 $C_i$ にある端末が次のスロットで状態 $C_j$ となる確率と定義する（離散過程となったために、状態が変化しない確率 $\lambda_{ii}(i = 0 \sim 1)$ も新たに定義される）。

動作状態と伝送路状態を含めた各端末の状態変化は、4つの状態間をスロットの開始時点毎に遷移する図4-2の様なモデルで表される。図中、 $TH_k$ 及び $RA_k(k = 1, 2)$ は、それぞれ端末の動作状態が状態 $TH$ 及び $RA$ にあり、かつ、その伝送路状態が状態 $C_k$ にあることを表している。第 $t$ スロットの開始時点において、状態 $TH_k$ 、 $RA_k$ にある端末の数をそれぞれ、 $m_k(t), n_k(t)$ で表すとすると、このときのシステムの状態は、ベクトル $\mathbf{n}(t) = (m_0(t), m_1(t), n_0(t), n_1(t))$ により表される。システム状態が $\mathbf{n}$ であるときの各端末の状態の遷移を表す行列 $\mathbf{P}(\mathbf{n})$ は、

$$\mathbf{P}(\mathbf{n}) = \begin{pmatrix} \lambda_{00}(1-\sigma) & \lambda_{01}(1-\sigma) & \lambda_{00}\sigma & \lambda_{01}\sigma \\ \lambda_{10}(1-\sigma) & \lambda_{11}(1-\sigma) & \lambda_{10}\sigma & \lambda_{11}\sigma \\ \lambda_{00}P_{s0}(\mathbf{n}) & \lambda_{01}P_{s0}(\mathbf{n}) & \lambda_{00}(1-P_{s0}(\mathbf{n})) & \lambda_{01}(1-P_{s0}(\mathbf{n})) \\ \lambda_{10}P_{s1}(\mathbf{n}) & \lambda_{11}P_{s1}(\mathbf{n}) & \lambda_{10}(1-P_{s1}(\mathbf{n})) & \lambda_{11}(1-P_{s1}(\mathbf{n})) \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

である。ここに、 $P_{s0}(\mathbf{n}), P_{s1}(\mathbf{n})$ は、それぞれ状態 $RA_0, RA_1$ にある1つの端末がパケットを

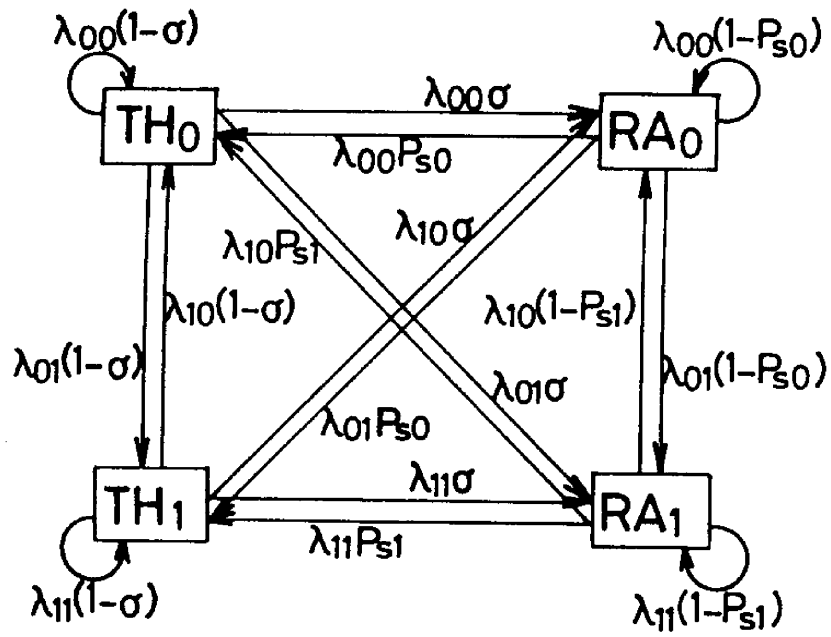


図 4 - 2 各端末の状態遷移図

送信し、その伝送が成功する確率を表し、 $k = 0, 1$  に対して、

$$P_{Sk}(\mathbf{n}) = \frac{1}{n_k} \sum_{i=0}^{n_0} \sum_{j=0}^{n_1} \binom{n_0}{i} \binom{n_1}{j} p^{i+j} (1-p)^{n_0+n_1-i-j} q_k(i, j) \quad (4-2)$$

で求められる。

2. 6の過渡流体近似解析の手法を用いることにより、第0スロットの開始時点におけるシステムの状態ベクトル $\mathbf{n}(0)$ が与えられると、第 $t$ スロットの開始時点におけるシステム状態の期待値 $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$ は、近似的に次の漸化式から求められる。

$$\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0)) P(\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))) \quad (4-3)$$

以下では、上式の極限ベクトル $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$ を用いて、システムの定常特性を考察する。極限ベクトル $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$ は、それが存在するならば、

$$m_0 + m_1 + n_0 + n_1 = M \quad (4-4)$$

を制約条件とする連立非線形方程式

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}P(\mathbf{n}) \quad (4-5)$$

の解（この解は、一般に平衡点ベクトルと呼ばれ、複数個存在する可能性がある）の1つと一致する。従って、定常特性のみを考察する際には、式(4-5)の効率的な解法が存在するならば、それを利用することができる。一方、効率的な解法が存在しない場合にも、式(4-3)を繰り返して適用することにより、漸近的に数値解を求めることが可能である。この章では、後者の方法で式(4-3)の極限ベクトル $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$ を求め、それを基に定常特性の考察を行う。

極限ベクトル $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$ は、平衡点ベクトルが複数個存在する場合には、初期ベクトル $\mathbf{n}(0)$ によって異なった値に収束する可能性がある。この章の以下の考察では、システム特性を控えめに見積もるため、初期ベクトルとして $\mathbf{n}(0) = (0, 0, \pi_0 M, \pi_1 M)$ （全ての端末が在庫パッケージを持ち、各伝送路状態にある端末の数が定常状態における値と等しい状態）を用いた場合のみを扱う。このため、特に混乱する恐れのないときには、状態ベクトル $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$ の初期条件 $\mathbf{n}(0)$ を省略し、単に $\bar{\mathbf{n}}(t)$ で表すことがある。

極限ベクトル $\bar{n}(\infty)$ が求められると、スループット $S$ は、そのときの伝送成功確率

$$S_{\infty} = n_0(\infty)P_{S0}(\mathbf{n}(\infty)) + n_1(\infty)P_{S1}(\mathbf{n}(\infty)) \quad (4-6)$$

で近似される。一方、平均伝送遅れ $D$ は、リトルの結果を用いて、

$$D = \frac{n_0 + n_1}{S} \quad (4-7)$$

となるが、定常状態では、

$$(M - \bar{n}_0 - \bar{n}_1)\sigma = S \quad (4-8)$$

が成り立つので、通常のランダムアクセスシステムの場合と同様、次の関係式が導かれ、

$$D = \frac{M}{S} - \frac{1}{\sigma} \quad (4-9)$$

平均伝送遅れはスループットの単調減少関数となることがわかる。

#### 4.4 捕捉効果モデル

ここでは、捕捉確率 $q_1(i, j), q_2(i, j)$ の具体例を示す。この具体例は、文献[7]で示された捕捉効果モデルを、異なった伝送路状態が混在する場合に拡張したものである。

あるスロットで同時に送信されたパケットの数を $i$ 個とし、各パケットの局における受信電力をそれぞれ $P_j (j=1 \sim i)$ 、また局における雑音電力を $P_N$ とすると、 $i$ 個のパケットの内の1つが局に正しく受信されるのは、

$$P_k / \left( \sum_{j=1}^i P_j - P_k + P_N \right) > h \quad (4-10)$$

となる $P_k$ が存在する時であると仮定する。ここに、 $h$ は捕捉比と呼ばれる1以上の定数である。

なお、この捕捉効果モデルは、近年、最も広く用いられているものである<sup>[13][33]</sup>。 $P_j, P_N$ の分

<sup>1</sup>全ての $P_j (j \neq k)$ に対して $P_k/P_j > h$ の時、受信電力 $P_k$ を持つパケットが捕捉されると仮定される場合<sup>[26]</sup>や、パケット伝送途中の電力変化、捕捉窓の大きさを考慮したもの<sup>[22]</sup>など、これとは異なる仮定の基で捕捉効果が論じられている論文も存在する。



布や $h$ の値は、実際には、変復調方式、ダイバーシチ利用の有無、アンテナの指向性、周囲の地形など様々な要因に依存して決まるものであるが、ここでは次の様に仮定して議論が進められる。

文献 [7] では、 $P_j$ の分布は独立で同一の指数分布(レイリーフェージング)に従うと仮定されているが、本論文では、そのパケットを送信した端末の伝送路の状態が $C_0$ にあるか $C_1$ にあるかによって異なった平均 $W_0, W_1$ を持つ独立な指数分布に従うものと仮定される。即ち、それぞれ確率密度関数、

$$f_0(x) = \frac{1}{W_0} e^{-x/W_0} \quad (4-11)$$

$$f_1(x) = \frac{1}{W_1} e^{-x/W_1} \quad (4-12)$$

に従うものと仮定する。また、雑音電力 $P_N$ としては、付加的白色ガウス雑音を想定して、その確率密度関数を、

$$f_N(z) = \frac{1}{W_N} e^{-z/W_N} \quad (4-13)$$

と仮定する。このとき、各伝送路状態から送信されたパケットが捕捉される確率は、次の様にして求められる。

#### $q_0(i_0, i_1)$ 及び $q_1(i_0, i_1)$ の導出

最初に、 $i+1$ 個の独立で非負な確率変数 $X_k (1 \leq k \leq i)$ 及び $Z$ の確率分布が与えられた時、ある1以上の定数 $h$ に対して、 $X_1 > h(\sum_{k=2}^i X_k + Z)$ となる確率を求める。

$X_k (1 \leq k \leq i)$ の内、 $X_1$ が最大となり、その値が $x_1$ となる確率密度 $f_{max}(x_1)$ は、 $X_k$ の分布関数、密度関数をそれぞれ $F_k(), f_k()$ とすると、

$$f_{max}(x_1) = \prod_{k=2}^i F_k(x_1) f_1(x_1) \quad (4-14)$$

で与えられる。一方、 $X_k < x_1$ という条件の基での $X_k$ の密度関数 $f_k(x | X_k < x_1)$ は、

$$f_k(x | X_k < x_1) = f_k(x) / F_k(x_1) \quad (2 \leq k \leq i) \quad (4-15)$$

で与えられ、そのラプラス変換は、 $f_k()$  のラプラス変換を  $v_k()$  とすると、

$$\psi_k(s | X_k < x_1) = v_k(s) / F_k(x_1) \quad (2 \leq k \leq i) \quad (4-16)$$

となる。 $Z$  の密度関数のラプラス変換を  $\psi_z()$  とすると、上式より、 $X_k < x_1 (2 \leq k \leq i)$  という条件の基での  $Y = \sum_{k=2}^i X_k + Z$  の確率密度関数  $f_Y(y | X_2 < x_1, X_3 < x_1, \dots, X_i < x_1)$  のラプラス変換は、

$$\psi_Y(s | X_2 < x_1, X_3 < x_1, \dots, X_i < x_1) = \psi_z(s) \prod_{k=2}^i \frac{v_k(s)}{F_k(x_1)} \quad (4-17)$$

で与えられる。従って、 $X_1 > hY$  となる確率は、

$$\begin{aligned} Pr(X_1 > hY) &= \int_0^\infty \int_0^{x_1/h} f_Y(y | X_2 < x_1, X_3 < x_1, \dots, X_i < x_1) f_{max}(x_1) dy dx_1 \\ &= \int_0^\infty \mathcal{L}^{-1}(\psi_z(s) \prod_{k=2}^i v_k(s)) \cdot \{1 - F_1(hy)\} dy \end{aligned} \quad (4-18)$$

となる。ここでは、 $f_k()$  は指数分布と仮定されているので  $1 - F_1(hy) = e^{-hy/X_1}$  となり、

$$Pr(X_1 > hY) = \psi_z(h/\bar{X}_1) \prod_{k=2}^i \psi_k(h/\bar{X}_1) \quad (4-19)$$

が得られる。

$X_k$  を、あるスロットで伝送路状態  $C_0$  にある端末から送信されたパケットの局における受信電力を表すものとする、式(4-11)より、

$$\psi_k(s) = \frac{1}{sW_0 + 1} \quad (4-20)$$

となる。同様に、 $X_k$  を伝送路状態  $C_1$  にある端末からのパケットの受信電力とすると、式(4-12)より、

$$\psi_k(s) = \frac{1}{sW_1 + 1} \quad (4-21)$$

となる。また、 $Z$  を雑音電力とすると、式(4-13)より、

$$\psi_z(s) = \frac{1}{sW_n + 1} \quad (4-22)$$

となる。従って、あるスロットで伝送路状態  $C_0$  にある端末から送信されたパケット数を  $i_0$ 、状態  $C_1$  からのパケット数を  $i_1$  とすると、そのスロットで状態  $C_0$  及び  $C_1$  からのパケットの1つが捕捉される確率  $q_0(i_0, i_1)$  及び  $q_1(i_0, i_1)$  は、式(4-19)より、それぞれ、

$$q_0(i_0, i_1) = \frac{i_0 r_0}{(r_0 + h)(1 + h)^{i_0 - 1} (1 + h r_1 / r_0)^{i_1}} \quad (4-23)$$

$$q_1(i_0, i_1) = \frac{i_1 r_1}{(r_1 + h)(1 + h)^{i_1 - 1} (1 + h r_0 / r_1)^{i_0}} \quad (4-24)$$

となる。ここに、 $r_0 = W_0/W_N, r_1 = W_1/W_N$  であり、 $h$  は捕捉比である。

この捕捉確率の導出は、伝送路状態数が3以上の場合に対しても同様に導くことができる。また、伝送路の歪み、Ackの伝送誤りなど、雑音や他のパケットとの電力差以外の原因で伝送が失敗する可能性がある場合の特性解析は、そうした原因による失敗が起こらない確率をそれぞれ上式に掛けることで考察できるものと思われる<sup>[1]</sup>。一方、 $P_j (j=1 \sim i), P_N$  が指数分布以外の分布に従う場合については、式(4-18)の逆ラプラス変換が問題となる。なお、 $q_0(i_0, i_1), q_1(i_0, i_1)$  の導出方法には、こうした解析による方法の他に実験や経験則による方法も考えられる<sup>[23]</sup>。

## 4.5 結果と考察

図4-3は、上述の捕捉効果モデル及び伝送路モデルに基づいたスロット付きアロハシステムのスループット特性を示したものである。図中、実線は解析結果を、○及び×印はそのシミュレーション結果を示している。この数値例では、伝送路状態  $C_1$  にある端末から送信されたパケットの平均  $S/N$  比  $r_1$  を 15dB とし、状態  $C_0$  にある端末からのそれが、比較的小さい場合 ( $r_0 = -3\text{dB}$ ) と大きい場合 ( $r_0 = 5\text{dB}$ ) の特性を示している。また、表4-1, 2は、それぞれの場合の捕捉確率を示している。

ここでの解析結果は、初期値  $\mathbf{n}(0) = (0, 0, \pi_0 M, \pi_1 M)$  として、

$$|\bar{\mathbf{n}}(t)| = |\bar{m}_0(t) - \bar{m}_0(t-1)| + |\bar{m}_1(t) - \bar{m}_1(t-1)| +$$

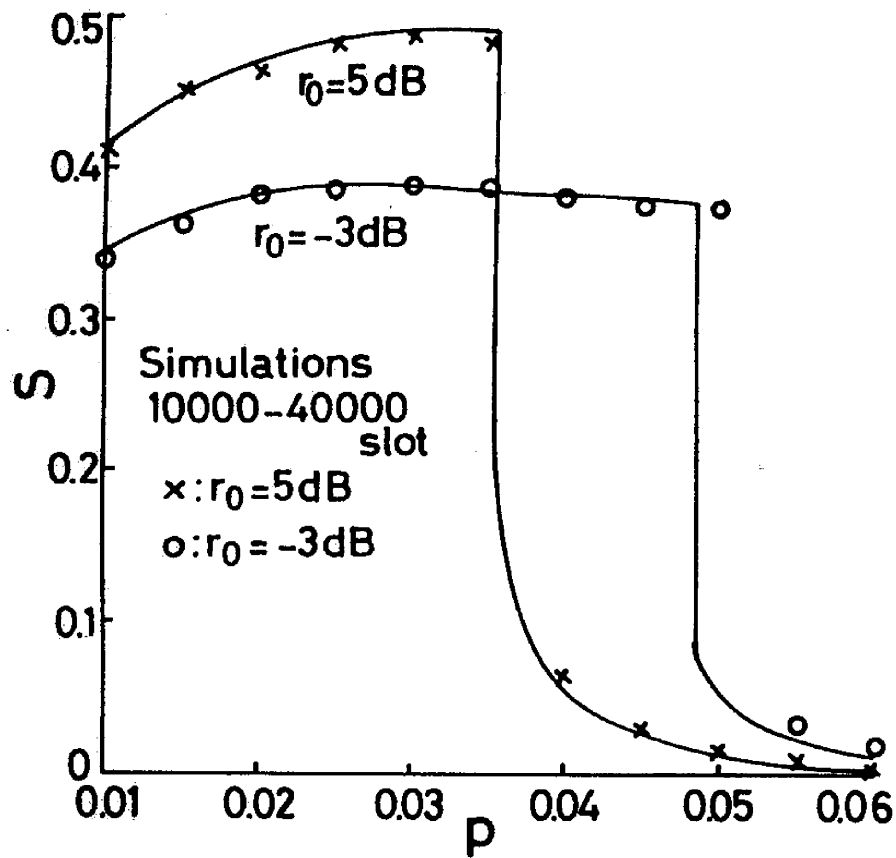


図 4 - 3 スループット特性  
 ( $M=300, \sigma=0.002, \lambda_{e1} = \lambda_{1e} = 0.001,$   
 $\pi_e = \pi_1 = 0.5, r_1 = 15\text{dB}, h=3\text{dB}$ )

表 4 - 1  $r_0 = -3\text{dB}$ ,  $r_1 = 15\text{dB}$ ,  $h = 3\text{dB}$  の場合

$q_0(i, j)$					
$j \backslash i$	0	1	2	3	4
0	0.0000	0.2008	0.1341	0.0671	0.0299
1	0.0000	0.0016	0.0011	0.0005	0.0002
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

$q_1(i, j)$					
$j \backslash i$	0	1	2	3	4
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.9407	0.9118	0.8839	0.8568	0.8305
2	0.6281	0.6088	0.5902	0.5721	0.5546
3	0.3145	0.3049	0.2956	0.2865	0.2777
4	0.1400	0.1357	0.1316	0.1275	0.1236

表 4 - 2  $r_0 = 5\text{dB}$ ,  $r_1 = 15\text{dB}$ ,  $h = 3\text{dB}$  の場合

$q_0(i, j)$					
$j \backslash i$	0	1	2	3	4
0	0.0000	0.6131	0.4094	0.2050	0.0912
1	0.0000	0.0293	0.0195	0.0098	0.0044
2	0.0000	0.0014	0.0009	0.0004	0.0002
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

$q_1(i, j)$					
$j \backslash i$	0	1	2	3	4
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.9407	0.7842	0.6537	0.5450	0.4544
2	0.6281	0.5236	0.4365	0.3639	0.3034
3	0.3145	0.2622	0.2186	0.1822	0.1519
4	0.1400	0.1167	0.0973	0.0811	0.0676

$$|\bar{n}_0(t) - \bar{n}_0(t-1)| + |\bar{n}_1(t) - \bar{n}_1(t-1)| < 0.01$$

(4-25)

となるまで、式(4-3)を繰り返すことにより求められた $\bar{n}(\infty)$ を用いて導出したものである。なお、式(4-2)の計算においては、簡単化のために、実数 $n$ に対しても

$$\binom{n}{i} = \frac{n(n-1)\dots(n-i)}{i(i-1)\dots 1}$$

として計算を行い、 $i_0 > 10$  または  $i_1 > 10$  のとき、

$$q_0(i_0, i_1) = q_1(i_0, i_1) = 0$$

とした。また、シミュレーション結果は、4.2のシステムモデル及び4.4の捕捉効果モデルに基づいて、 $\mathbf{n}(0) = (0, 0, \pi_0 M, \pi_1 M)$ を初期値として40000スロットのシミュレーションを行い、10000～40000スロットを集計した結果である。

図より、 $r_0 = 5\text{dB}, -3\text{dB}$ の場合共に、解析結果は平衡点解析に特有の誤差を含むものの全体としてシミュレーション結果とよく一致し、システムの定常特性をよく近似していることがわかる。 $r_0 = 5\text{dB}$ における $p = 0.035$ 付近および $r_0 = -3\text{dB}$ における $p = 0.045$ 付近での解析結果の急激な劣化は、平衡点が複数個となり、 $\mathbf{n}(t)$ が新たに生じた別の平衡点に収束したためであると考えられる。

図4-4, 4-5は、それぞれ $r_0 = -3\text{dB}, 5\text{dB}$ のシステムに

おいて、伝送路状態の変化速度 $\lambda_{01}$ をパラメータとしてスループット特性を示したものである。なお、この場合に対するシミュレーション結果も、図4-3の場合と同様、解析結果とよく一致することが確かめられている。また、図中、 $\lambda_{01} = 0$ は伝送路状態が時不変な場合を表している。図4-5の $r_0 = 5\text{dB}$ の場合には、伝送路状態の変化速度の違いがスループット特性に与える影響は僅かであるのに対して、図4-4の $r_0 = -3\text{dB}$ の場合には、その影響が顕著であり、伝送路状態の変動速度が速い程スループットが高くなる。これは、 $r_0 = -3\text{dB}$ の場

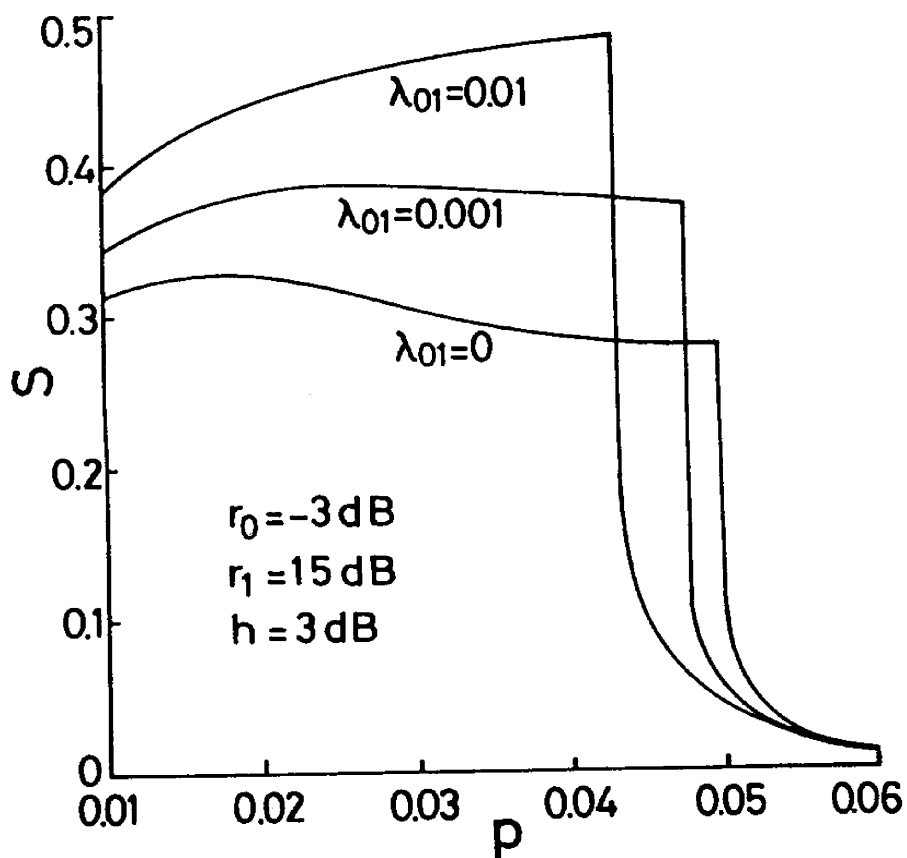


図 4 - 4 スループット特性 ( $r_0 = -3\text{dB}$ の場合)  
 ( $M=300, \sigma=0.002, \lambda_{1e} = \lambda_{e1},$   
 $\pi_0 = \pi_1 = 0.5, r_1 = 15\text{dB}, h=3\text{dB}$ )

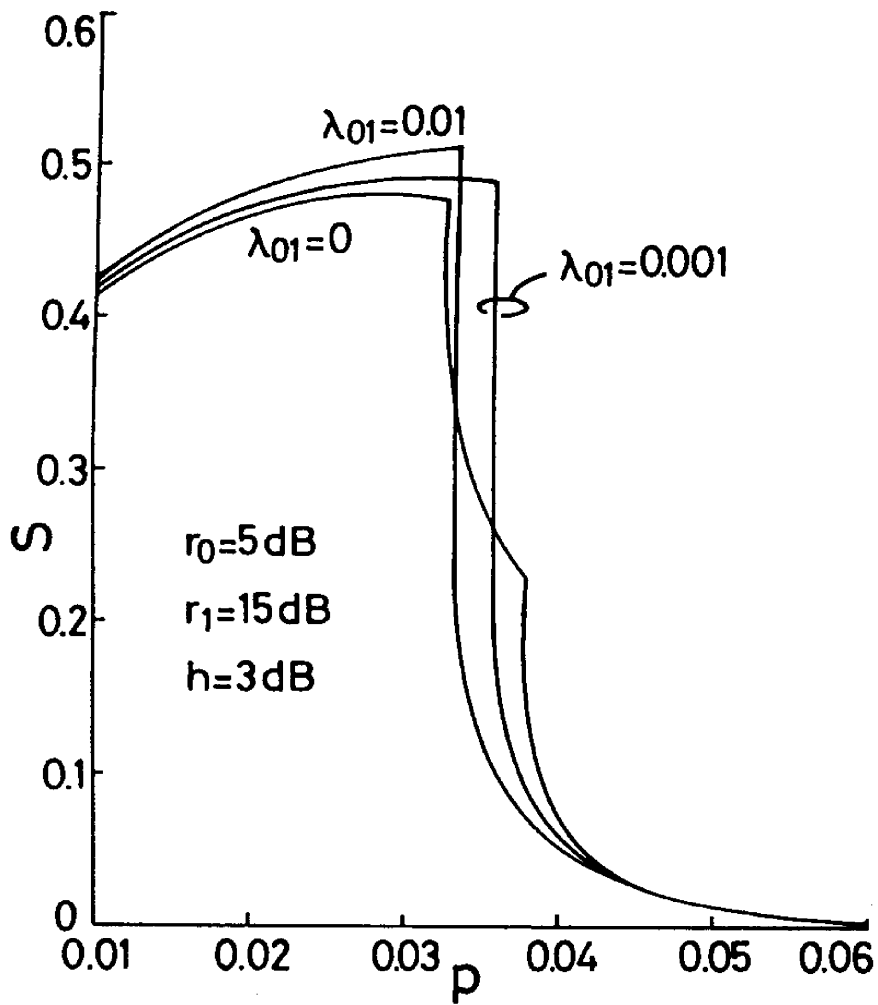


図 4 - 5 スループット特性 ( $r_0=5\text{dB}$ の場合)  
 ( $M=300, \sigma=0.002, \lambda_{10}=\lambda_{01},$   
 $\pi_0=\pi_1=0.5, r_1=15\text{dB}, h=3\text{dB}$ )



合、状態  $C_0$  にある端末の成功確率が僅かであるため、 $RA_0$  モードにある端末がパケットの伝送に成功するためには、一旦  $RA_1$  モードへ遷移することが必要となるからである。

また、 $r_0 = -3\text{dB}$  の場合、 $\lambda_{01}$  が小さい程、不安定状態となる（スループットが急激に劣化する） $p$  の値が大きくなるが、これは次の様な理由によるものと考えられる。この数値例では、 $\pi_0 = \pi_1 = 0.5$  であり、 $P_{S_1} > P_{S_0}$  であるので、 $RA_0$  モードにある端末数  $n_0$  は  $RA_1$  モードにある端末数  $n_1$  に比べ大きくなる。そして、この  $n_0$  と  $n_1$  の差は  $\lambda_{01}$  が小さい程大きくなる。ところで、状態  $C_0$  にある端末からのパケットの受信電力は小さいので、 $n_0$  の増加は、衝突によるパケット伝送の失敗をあまり増加させないが、状態  $C_1$  からのトラヒック量の増加は、衝突による伝送の失敗を増加させることになる。従って、 $n_1$  の小さくなる  $\lambda_{01}$  の小さなシステム程、不安定状態となる  $p$  の値は、大きくなるものと考えられる。

$r_0 = 5\text{dB}$  の場合にも、基本的には  $r_0 = -3\text{dB}$  の場合と同様な傾向が見られるが、 $\lambda_{01} = 0$  のとき、スループットの急激な低下が2回見られる点が注目される。これは、伝送路状態  $C_0$  の端末が不安定となる点 ( $p = 0.033$  付近) と伝送路状態  $C_1$  の端末が不安定となる点 ( $p = 0.038$  付近) にずれが生じたためであると考えられる。また、この様な現象は、状態  $C_0$  からのパケットの伝送成功確率がある程度高く、各端末の伝送路状態の変化が緩慢であるとき起こるものと考えられる。

## 4.6 まとめ

この章では、捕捉効果等を考慮したスロット付きアロハ方式の特性が、端末の移動に伴って生ずるシャドーイングなどの伝送路状態の変動により、どのような影響を受けるかを考察するために、その解析モデルを提案し、解析手法の開発を行った。解析結果は、シミュレーション結果とよく一致していることが示され、この解析手法を用いたシステム特性の考察が行われた。その結果、伝送路の状態によって受信電力に大きな差が生じる場合には、状態変化の速度がスループット特性に与える影響は顕著であり、変動速度が速い程スループットが高くなることが示された。また、不安定状態となる  $p$  の値は、変動速度が小さい場合程、大きくなることなど

も示された。

本論文での考察は、システムモデルの提案と解析手法の開発を中心に行った。解析結果の考察については、伝送路モデルの妥当性が十分に検討されていないこともあって、伝送路状態の変化速度がシステム特性に与える極く基本的な影響を示したに留まっている。

従来の無線伝送路の研究においては、伝送路状態の時変性にはあまり大きな注意が払われてこなかったが、この章及び前章の解析結果は、ランダムアクセスシステムにおける伝送路状態の時変性がシステム特性に与える影響を示すことで、その問題の重要性を指摘している。ここで用いたマルコフ伝送路モデルは、伝送路状態の時変性を表現することが可能であり、しかもシステム特性等の解析に利用可能な簡単な伝送路モデルであるという点で、移動端末を含むランダムアクセスシステムの特性解析においては、最も妥当な伝送路モデルであると考えられる。しかし、陸上移動無線システムにおいて、その伝送路モデルとしてマルコフ伝送路モデルを用いることはこれまであまり検討されておらず、状態数等のパラメータをどのように設定すべきかといった実際的な問題の研究が不足している。こうした問題の検討には、大規模で組織的な実験が必要であると考えられるが、近年のデジタル移動無線システムの発展を考えると、そうした基礎研究の早急な実施が望まれる。本章での考察は、そうした伝送路モデルに対する実験的検討と平行して、伝送路状態数が3つ以上の場合や歪みのある状態を含む伝送路モデルへの拡張を行う必要がある、それにより、より現実的な状況下でのランダムアクセスシステムの特性解析が可能になるものと期待される。

## 5. ゾーン構成のスロット付きアロハシステム

### 5.1 まえがき

移動無線パケット通信システムでは、ゾーン構成の網形態をとることが多い。ゾーン構成の通信網は、一般に、互いに有線等で接続されたいくつかの基地局と、無線でそれらの基地局と交信を行う多数の移動端末により構成される<sup>[37][38]</sup>。この章では、そうしたゾーン構成の移動無線パケット通信網において、上りトラヒックの伝送制御手順としてスロット付きアロハ方式を用いた場合のシステム特性を考察する。

ゾーン構成のパケット通信網におけるランダムアクセス方式の特性解析に関しては、これまでに次の様な報告がなされている。

M. Sidi らは、互いに重複するサービス領域を持った複数の基地局からなるスロット付きアロハシステムの静特性解析を行っている<sup>[37][38]</sup>。そこでは、各端末がアクセスできる基地局が決まっている場合 (Fixed Forwarding Scheme, 固定転送方式) と各端末から送られたパケットがどの基地局でも受け付けられる場合 (Random Forwarding Scheme, 任意転送方式) が考察されている。任意転送方式では、1つのパケットが複数の基地局に受信されることがあるが、総チャネル利用率の計算においては、唯1つの基地局のみが有効な受信を行ったものとしてその特性が考察されている。また、彼らはスロット付きアロハ方式以外のアクセス方式に対してもその特性解析を行っている<sup>[50]</sup>。

榊原らも、複数の基地局を備えたスロット付きアロハ方式の特性解析を行っている<sup>[7]</sup>。そこでは、各端末から送信されたパケットはすべての基地局に到達し、その受信電力は基地局毎に独立なランダムな値となると仮定され、捕捉効果を考慮した特性解析が行われている。また、彼らは基地局間のパケット伝送についても研究を行っている<sup>[51]</sup>。

C. T. Lau らの研究は、複数の基地局を仮定したものではないが、複数の指向性アンテナと複数の受信機により空間分割されたスロット付きアロハシステムの特性が考察されている<sup>[28]</sup>。この論文の特性解析は、各端末がサービス領域内に一様に分布しているものとして、捕捉効果

を考慮した動特性解析を行ったものである。そこでの解析は、パケット送信時における端末の位置がその端末の前回のパケット送信時におけるその端末の位置と独立であると仮定して行われている。彼らは、この仮定を初めて陽に示し、端末の移動速度がパケット送信間隔に比べて十分に速い場合にのみ成り立つ仮定であることを指摘している。彼らはまた、端末の移動速度の影響を考察するために、シミュレーションを用いて各端末が全く移動しない場合の特性を示している。

ここでは、ゾーン構成の移動無線システムにおける上りトラヒックのシステム特性を考察するために、端末の移動速度を考慮した解析モデルを提案し、その解析手法を示す。また、その解析結果から、端末の移動速度やゾーンの重なり具合などがランダムアクセスシステムの特性に与える影響を考察する。ここで考察されるシステムは、文献 [37][38] の任意転送方式に対応するもので、その概略は次の様なものである。

システムは、複数の基地局と多数の移動端末からなるものとする。各基地局に到達するパケットは、その基地局がカバーする領域（ゾーン）内にいる端末からのものに限られ、捕捉効果、雑音による伝送誤りなどはないものと仮定される。パケットの送信には、どのゾーンでも同じ周波数が用いられ、各端末は自分がどのゾーンにいるかを意識することなくスロット付きアロハ方式によりパケットの送信を行う。各基地局間は有線等で接続されていて、各端末からのパケットは任意の基地局で受け付けられ、目的の局あるいは端末に転送される。従って、パケットの伝送は、そのパケットが少なくとも1つの基地局に正しく受信されたとき成功する。このシステムモデルの詳細は5. 2で定義される。

一般に、アロハ形システムの特性解析は、チャネル容量などの解析を目的とした静特性解析と、パケット送信確率等を具体的に設定してスループットや平均伝送遅れなどを求めることを目的とした動特性解析とに分けられる。静特性解析は、通常、S-G解析<sup>[6]</sup>を用いて行われる。S-G解析では、1スロット当りに局に到達するパケットの総量（トラヒック）が、ある一定の平均値（通常 $G$ で表される）を持ったポアソン分布をなすものと仮定され、これを基に最適なトラヒック量やチャネル容量などが解析される。しかし、複数のゾーンで構成されたシステム

では、それぞれの基地局に到達するトラヒックの量に相関関係が存在するため、それぞれのトラヒック量が独立に任意に変化できるものとして各基地局の伝送成功確率などを求めても、それだけではあまり意味がない。そこでここでは、次の様にして静特性解析が行われる。

各端末の状態は、その動作状態と位置状態によって表すことができる。動作状態はその端末が送信パケットを持っているか否かを表し、位置状態はその端末がどの基地局と交信可能であるかを表すものである。ここでは、各々の位置状態にある端末からのトラヒック量が、各端末がその位置状態にいる確率に比例しているものとして静特性解析が行われる。これは移動速度無限大の無限個の端末が無限小の送信確率でパケットの送信を行っている場合に対応している。この静特性解析の手法に関しては5. 3. 1で詳しく紹介される。

ところで、端末の数や移動速度が有限な実際のシステムでは、各基地局に到達するトラヒック量の割合は端末の移動速度やパケット送信確率などに強く依存している。従って、実際的なシステムの各トラヒック量の間関係を求めるためには、端末の移動速度やパケット送信確率等を具体的に設定する必要がある。端末数、パケット生成確率、パケット送信確率などの各種の具体的なパラメータを設定して、在庫端末数の変化などシステム状態の変動を考慮した特性解析は、一般に動特性解析と呼ばれている。アロハ形システムの動特性解析では、システムの動きは、通常、在庫パケットを持っている端末の数を状態変数とするマルコフ過程として表され、その定常状態確率等を用いてスループット、平均伝送遅れなどが求められる。複数のゾーンからなるスロット付きアロハシステムでは、各端末の状態として動作状態と位置状態の両方を考慮する必要があるため、多数の端末を含むシステムの振舞を記述するマルコフ過程はかなり複雑なものとなり、厳密な解析は一般に極めて困難なものとなる。ここでは、過渡流体近似解析を用いて、この複雑なシステムの動特性解析を行う。この解析法の詳細は、5. 3. 2で示される。

静特性解析及び動特性解析の解析結果については、5. 4で考察され、端末の移動速度やゾーンの重なり具合がシステム特性に与える影響などが定性的および定量的に示される。

## 5.2 システムモデル

$L$  個の基地局  $B_1, B_2, \dots, B_L$  と  $M$  個の移動端末からなるシステムを考える。基地局に到達する信号は、その基地局がカバーする領域内にいる端末からのものに限られると仮定する。1つの基地局がカバーする領域はゾーンと呼ばれ、基地局  $B_i$  がカバーする領域を  $Z_i$  とする。各ゾーンは、図5-1に示す様に他のいくつかのゾーンと部分的に重複することも考えられる。パケットの送信にはどのゾーンでも同じ周波数が用いられ、各端末は自分がどのゾーンにいるかを意識することなく、スロット付きアロハ方式によりパケットの送信を行うものとする。基地局間は互いに有線等で接続されていて、各ゾーンのスロットは同期しているものとする。

各端末の動作は、前章の場合と同様、図2-1の様な動作をする DFT 形の照会応答型端末と仮定する。即ち、PG モードにある端末は、1スロット当り確率  $\sigma$  でパケットを生成し、RD モードに移る。RD モードにある端末は、確率  $p$  でパケットの送信を行う。この端末動作は、2.5で示した様に、スロットの開始時点毎にその状態が遷移する図2-9の様な状態遷移図で表される。一方、端末の位置状態は、その端末の送信パケットがどの基地局に到達するかによって、理論的には  $2^L - 1$  通り（どの基地局とも交信できない状態を含めれば  $2^L$  通り）の状態が考えられる。各端末は、その動作状態や他の端末の動きとは無関係にゾーン間を移動するものとし、各位置状態での滞在時間が指数分布をなすと仮定する。これにより、位置状態の遷移はマルコフ連鎖として表すことができる。端末の各位置状態での平均滞在時間がスロット長に比べて十分に長いとすると（実際、車の移動など機械的な速度に比べてスロット長は一般に十分短いものと考えられる）、このマルコフ連鎖もスロットの開始時点毎にその状態が変化する離散マルコフ連鎖で近似することができる。この時、動作状態と位置状態を合わせた各端末の状態数は、最大  $2(2^L - 1)$  個となる。

この章で示す解析法は、いずれも任意の基地局数に対して適用可能であるが、議論の簡単化のために、以下では  $L = 2$  の場合を仮定して説明を行う<sup>†</sup>。

<sup>†</sup> $L > 2$  の場合の解析は、ここでの議論をそのまま拡張することで容易に導くことができる。しかし、その計算量は、 $L$  の増加、正確には位置状態数の増加とともに増加する。

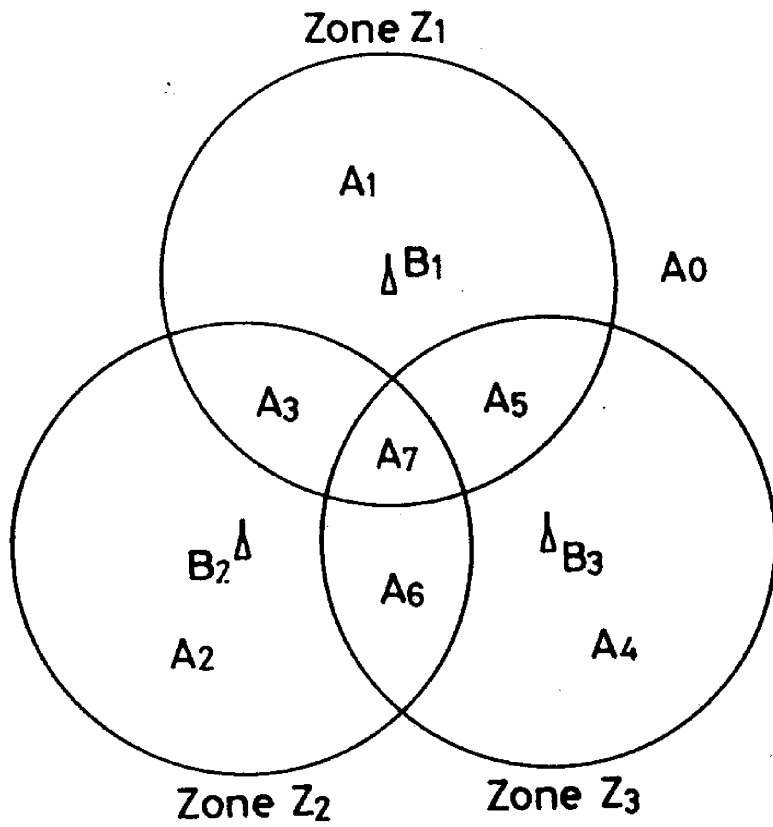


図 5 - 1 ゾーン構成の移動無線パケット通信網

### 5.3 特性解析

各端末の位置状態は、その送信パケットが基地局  $B_i (i = 1, 2)$  のみに到達する状態  $A_i$  あるいは基地局  $B_1, B_2$  の両方に到達可能な状態  $A_3$  のいずれかにあるものとする<sup>1</sup>。各端末の各位置状態での滞在時間はスロット長に比べ十分長いものと仮定したため、各端末は状態  $A_1$  から  $A_2$  へあるいは  $A_2$  から  $A_1$  への遷移に際して、少なくとも1スロットの間状態  $A_3$  に滞在することになる。従って、各端末の位置状態の遷移は、図5-2の様なマルコフ連鎖となる。図中、 $\phi_{ij}$  は位

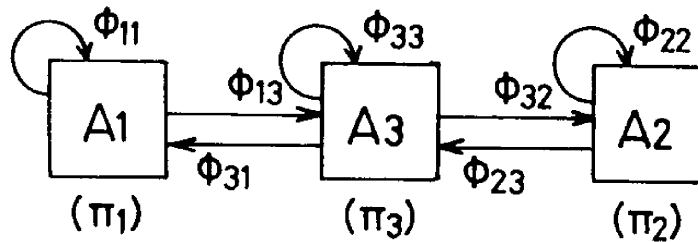


図5-2 各端末の位置状態遷移図

置状態  $A_i$  にある端末がそのスロットで状態  $A_j$  へ遷移する確率を表している。各位置状態の定常状態確率  $\pi_i (i = 1 \sim 3)$  は、この  $\phi_{ij}$  を用いて、

$$\pi_1 = \frac{\phi_{23}\phi_{31}}{\phi_{23}\phi_{31} + \phi_{13}\phi_{32} + \phi_{23}\phi_{13}} \quad (5-1)$$

$$\pi_2 = \frac{\phi_{13}\phi_{32}}{\phi_{23}\phi_{31} + \phi_{13}\phi_{32} + \phi_{23}\phi_{13}} \quad (5-2)$$

$$\pi_3 = \frac{\phi_{23}\phi_{13}}{\phi_{23}\phi_{31} + \phi_{13}\phi_{32} + \phi_{23}\phi_{13}} \quad (5-3)$$

で求められる。

<sup>1</sup>  $A$  の添字の値は、それを2進数で表した時、 $k$ 桁目が1ならば基地局  $B_k$  と通信可能であることを示している。



### 5.3.1 静特性解析

領域  $A_i$  から 1 スロット 当りに送信されるパケットの総数はその領域のトラヒック量と呼ばれる。領域  $A_i$  のトラヒック量が平均  $g_i$  のポアソン分布に従うとすると、この時、システム全体のスループット  $S$  は、

$$S = (g_1 + g_3)e^{-g_1 - g_3} + (g_2 + g_3)e^{-g_2 - g_3} - g_3e^{-G} \quad (5-4)$$

で与えられる<sup>[37][38]</sup>。ここに、 $G = g_1 + g_2 + g_3$  であり、システム全体の平均トラヒック量を表している。ところで、上式の  $g_i$  は、互いに独立に任意に設定できるものではなく、端末の移動速度や各領域での滞在時間などによって決まる相関関係を持っている。ここでの静特性解析においては、各領域の平均トラヒック量が、その領域内にある端末の平均数に比例しているものと仮定し、各領域からのトラヒック量  $g_i$  は、システム全体の平均トラヒック量  $G$  を用いて、

$$g_i = \bar{n}_i G \quad (5-5)$$

で与えられるものとする。この仮定は、端末の移動速度がパケット送信間隔に比べて十分に速く、各パケット送信時点の端末の位置状態がその端末の前回のパケット送信時点における位置状態と独立であるとみなせる場合に対応している。このため、本論文ではこの仮定を移動速度無限大の仮定と呼ぶことにする。また、よく知られているように、トラヒック量がポアソン分布に従うとする仮定は、無限個の端末が無限小の確率でパケットを送信している場合に対応している。従って、ここでの解析の結果は、移動速度無限大の無限個の端末が無限小の送信確率でパケットを送信しているシステムの特性を表しているものといえる。従来のアロハ形システムの用語に対応して、本論文では、式 (5-5) の仮定のもとでの式 (5-4) の最大値をチャンネル容量と呼ぶことにする。

### 5.3.2 動特性解析

ここでの動特性解析は、過渡流体近似解析を用いて行われる。最初に、動作状態と位置状態を同時に考慮して、各端末の状態遷移を図 5-3 の様に表す。図中、 $TH_i$  および  $RA_i$  モード

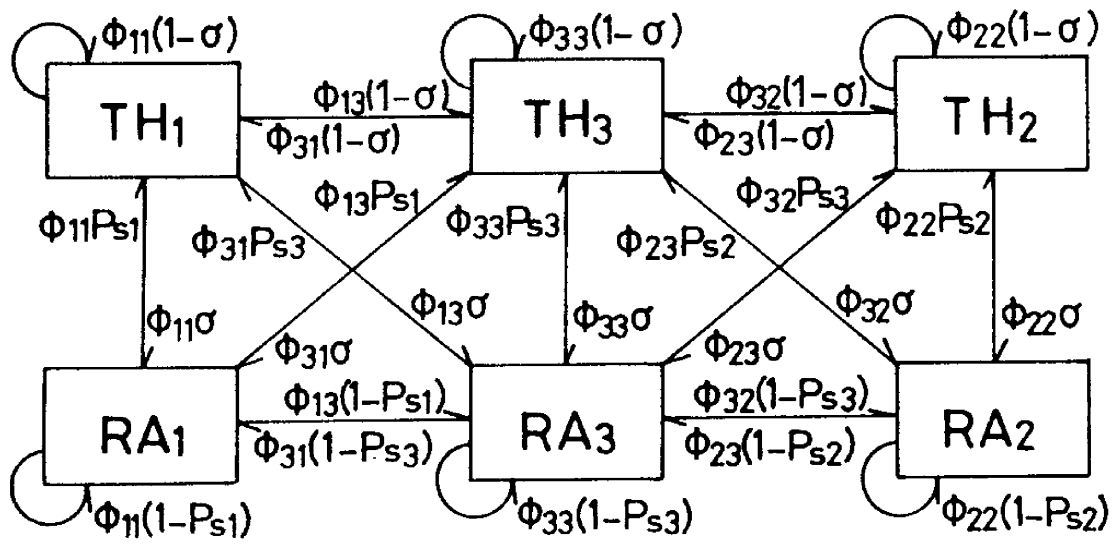


図 5 - 3 動作状態と位置状態を合わせた各端末の状態遷移図

( $i = 1 \sim 3$ ) は、端末の動作状態がパケット生成状態あるいはランダムアクセス状態にあり、位置状態が状態  $A_i$  にあることを表している。 $P_{Si}$  ( $i = 1 \sim 3$ ) は、 $RA_i$  モードにある 1 つの端末がパケットを送信し、そのパケットの伝送が成功して  $TH_i$  モードへ移る確率を表している。第  $t$  スロットの開始時点において、 $TH_i$ ,  $RA_i$  モードにある端末の数をそれぞれ  $m_i(t), n_i(t)$  とし、ベクトル  $\mathbf{n}(t) = (m_1(t), m_2(t), m_3(t), n_1(t), n_2(t), n_3(t))$  を用いて第  $t$  スロットにおけるシステム状態を表すとする。雑音等によるパケット伝送の失敗、捕捉効果などはないものとする、システムが状態  $\mathbf{n}(t)$  にあるとき、 $P_{Si}$  ( $i = 1 \sim 3$ ) は、それぞれ、

$$P_{S1}(\mathbf{n}(t)) = p(1-p)^{m_1(t)+n_1(t)-1} \quad (5-6)$$

$$P_{S2}(\mathbf{n}(t)) = p(1-p)^{n_2(t)+n_3(t)-1} \quad (5-7)$$

$$P_{S3}(\mathbf{n}(t)) = p(1-p)^{m_1(t)+n_3(t)-1} + p(1-p)^{n_2(t)+n_3(t)-1} - p(1-p)^{m_1(t)+n_2(t)+n_3(t)-1} \quad (5-8)$$

となる。システムの状態が  $\mathbf{n} = (m_1, m_2, m_3, n_1, n_2, n_3)$  にあるときの各端末の状態遷移を表す行列  $\mathbf{P}(\mathbf{n})$  は、

$$\mathbf{P}(\mathbf{n}) = \begin{pmatrix} \phi_{11}(1-\sigma) & 0 & \phi_{13}(1-\sigma) & \phi_{11}\sigma & 0 & \phi_{13}\sigma \\ 0 & \phi_{22}(1-\sigma) & \phi_{23}(1-\sigma) & 0 & \phi_{22}\sigma & \phi_{23}\sigma \\ \phi_{31}(1-\sigma) & \phi_{32}(1-\sigma) & \phi_{33}(1-\sigma) & \phi_{31}\sigma & \phi_{32}\sigma & \phi_{33}\sigma \\ \phi_{11}P_{S1} & 0 & \phi_{13}P_{S1} & \phi_{11}(1-P_{S1}) & 0 & \phi_{13}(1-P_{S1}) \\ 0 & \phi_{22}P_{S2} & \phi_{23}P_{S2} & 0 & \phi_{22}(1-P_{S2}) & \phi_{23}(1-P_{S2}) \\ \phi_{31}P_{S3} & \phi_{32}P_{S3} & \phi_{33}P_{S3} & \phi_{31}(1-P_{S3}) & \phi_{32}(1-P_{S3}) & \phi_{33}(1-P_{S3}) \end{pmatrix} \quad (5-9)$$

で与えられる。ただし、記述の簡単化のために、上式においては  $P_{Si}(\mathbf{n})$  ( $i = 1 \sim 3$ ) とすべきところを  $P_{Si}$  で表している。

過渡流体近似解析の手法に従って、初期状態ベクトル  $\mathbf{n}(0)$  が与えられると、漸化式

$$\mathbf{n}(t+1|\mathbf{n}(0)) = \mathbf{n}(t|\mathbf{n}(0)) \mathbf{P}(\mathbf{n}(t|\mathbf{n}(0))) \quad (5-10)$$

から、第  $t$  スロットにおけるシステム状態の期待値  $\mathbf{n}(t|\mathbf{n}(0))$  が近似的に求められる。以下では、その極限ベクトル  $\mathbf{n}(\infty|\mathbf{n}(0))$  を用いて、システムの定常特性を考察する。極限ベクトル

$\mathbf{n}(\infty|\mathbf{n}(0))$  は、それが存在するならば、連立非線形方程式

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}P(\mathbf{n}) \quad (5-11)$$

の解の1つと一致するはずであり、この解は一般に平衡点ベクトルと呼ばれている。

ここでは、漸化式(5-10)の初期ベクトルとして $\mathbf{n}(0) = (0, 0, 0, \pi_1 M, \pi_2 M, \pi_3 M)$ を用いたとき得られる極限ベクトル $\mathbf{n}(\infty|\mathbf{n}(0))$ を平衡点ベクトル $\mathbf{n}_c$ とよび、この平衡点ベクトルによって表される平衡状態における特性を用いて、システムの定常特性を近似する。即ち、システム全体のスループット  $S$  は、この $\mathbf{n}_c$ を用いて、

$$S = n_{1c} P_{S1}(\mathbf{n}_c) + n_{2c} P_{S2}(\mathbf{n}_c) + n_{3c} P_{S3}(\mathbf{n}_c) \quad (5-12)$$

で近似される。また、基地局ごとの受信成功率  $S_i (i = 1, 2)$  は、

$$S_i = n_{ic} P_{Si}(\mathbf{n}_c) + n_{3c} p(1-p)^{m_1+m_2-1} \quad (5-13)$$

で与えられるが、同時に2つの局にパケットが受信された場合、片方のパケットは破棄されるので、一般に

$$S \leq S_1 + S_2$$

となる。一方、送信したパケットの伝送成功確率  $P_{Si} (i = 1, 3)$  に関しては、式(5-6)~(5-8)より、常に

$$P_{S3} > \max(P_{S1}, P_{S2})$$

なる関係が成り立つことがわかる。

システム全体の平均伝送遅れ  $D$  は、リトルの結果を用いて、

$$D = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{S} \quad (5-14)$$

で与えられる。ところで、定常状態では、1スロット当りに生成されるパケットの総数  $\{M - \overline{(n_1 + n_2 + n_3)}\}$  は総スループット  $S$  に等しくなければならないから、この関係を上式に代入す

ると、

$$D = \frac{M}{S} - \frac{1}{\sigma} \quad (5-15)$$

が導出される。上式は、 $M, \sigma$ が一定であれば、平均伝送遅れ  $D$ は総スループット  $S$ の単調減少関数となることを示している。

## 5.4 数値例と考察

最初に、静特性解析によりシステム特性の概略を考察する。図5-4は、対称システム( $\pi_2 = \pi_1$ )及び非対称システム<sup>†</sup>( $\pi_2 = 2\pi_1$ )に対するS-G特性を $\pi_3$ をパラメータとして示したものである。図より、対称システムでは、総スループット  $S$ の値は $\pi_3$ の増加にほぼ比例して減少することがわかる。これは、 $\pi_3$ の増加に比例して両方の基地局に同時に受信されるパケット数が増加するためである。非対称システムの場合は、 $\pi_3$ が小さい時を除き全体として対称システムのそれとよく似たものとなっている。 $\pi_3$ が小さい時には、最大値付近のスループットが対称システムの場合に比べて低下している。こうした結果は、次の様に説明することができる。

最初に、 $\pi_3 = 0$ の場合を考えると、基地局ごとのパケット受信成功確率はその基地局に到達するトラヒック量が1の時、最大値  $e^{-1}$ となるが、非対称システムでは、各基地局へのトラヒック量を同時に1とすることはできない。このため、総スループットの最大値は対称システムの場合に比べて低下することになる。また、この低下量は非対称の度合いが増加するにつれて大きくなる。 $\pi_3 \neq 0$ の場合を考えると、非対称システムでは、領域  $A_3$ からのトラヒックが両方の基地局に同時に受信される確率は、対称システムの場合に比べて小さいので、 $\pi_3$ の増加による最大スループットの低下は対称システムほど大きくはない。このため、 $\pi_3$ の増加につれて対称システムとの差は減少することになる。

図5-5は、 $\pi_3$ の変化に対するチャネル容量  $C$  (即ち、 $S$ の最大値)の変化を $\pi_2 = \pi_1$ ,  $\pi_2 = 2\pi_1$

<sup>†</sup>ここでの非対称システムに対する解析結果は、1つの具体例である $\pi_2 = 2\pi_1$ の場合に対するものである。従って、非対称の度合いが異なれば、ここで示される結果の定量的なものは異なったものとなる可能性がある。しかし、定性的な議論に関しては全ての非対称システムに対して有効であると考えられる。

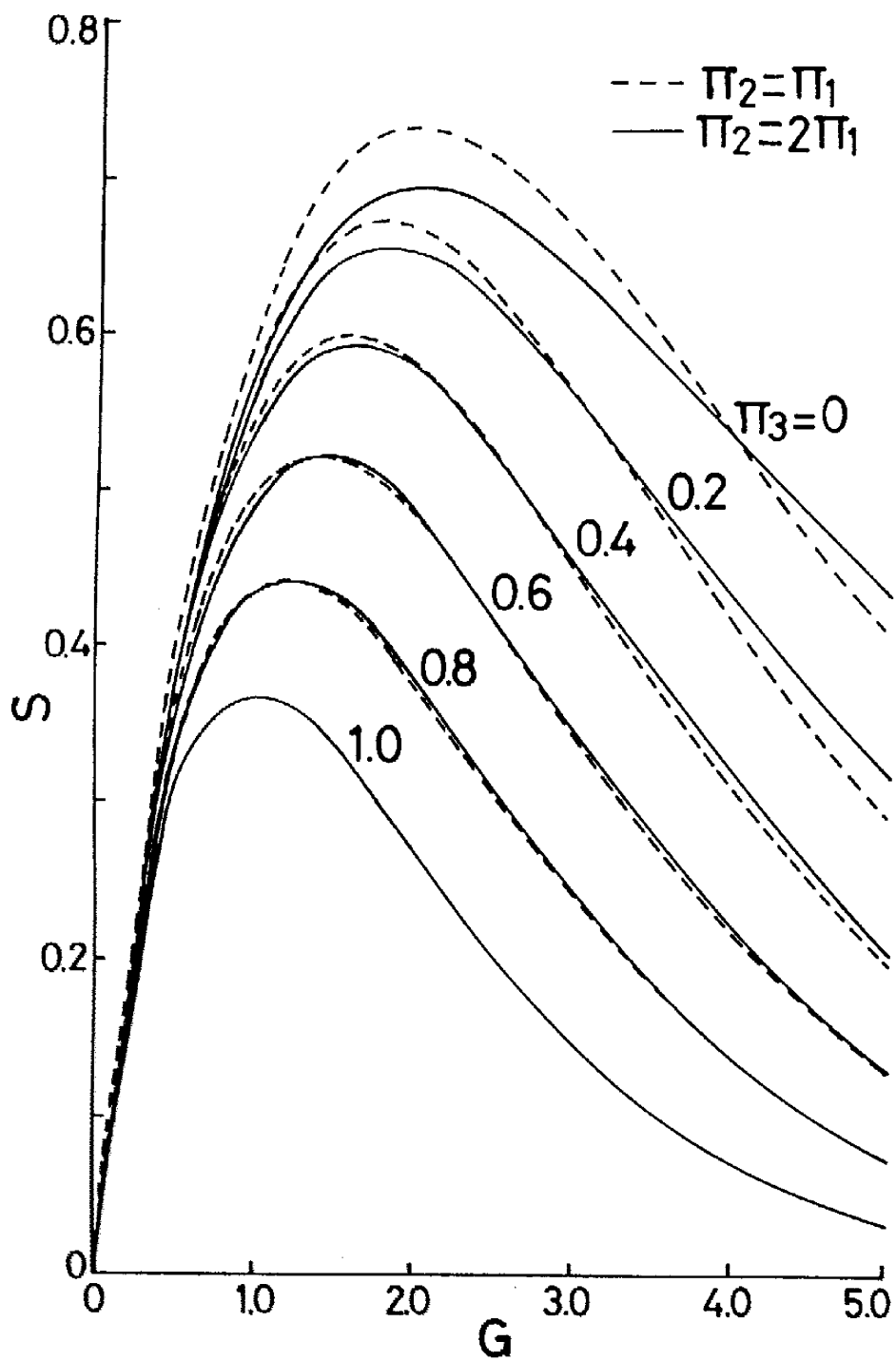


图 5 - 4 S - G 特性

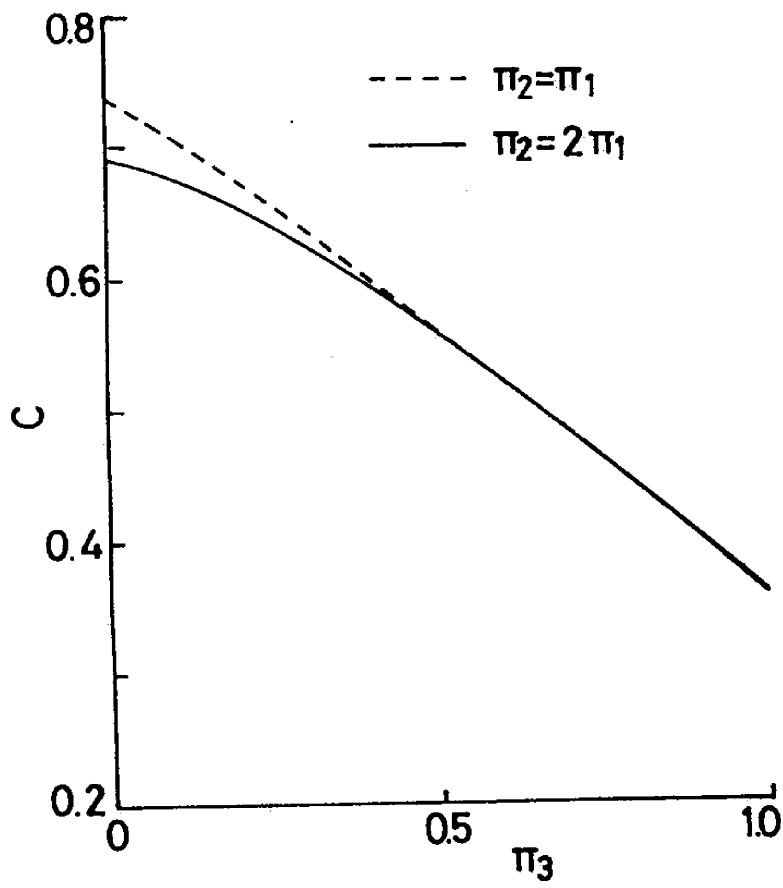


図 5 - 5 チャンネル容量 vs.  $\pi_3$

の場合について示したものであるが、両特性は $\pi_3$ が小さい時に差があるだけでほぼ同様な特性となることがわかる。

先に指摘した様に、こうした静特性解析には、システムの安定性や端末の移動速度などが考慮されていない。以下では、より実際的なシステムの特性を考察するために、5.3.2の動特性解析を用いて、パケット送信間隔、端末の移動速度、ゾーンの重なり具合などがシステム特性に与える影響を示す。

動特性解析には、各種のシステムパラメータを具体的に設定する必要がある。ここでは、しばらくの間、負荷  $M, \sigma$  を  $M = 400, \sigma = 0.002$  と固定して考察を進める。端末の平均移動速度を表すには  $\omega_{ij} (i = 1 \sim 3, j = 1 \sim 3)$  を指定する必要があるが、ここでは議論の簡単化のために、 $\omega_{31} = \omega_{32}$  と仮定し、 $\omega_{13}$  のみを端末の平均移動速度を表すパラメータとして用いることにする（他の  $\omega_{ij}$  は  $\pi_i (i = 1 \sim 3)$  が決まると一意に求められる）。 $\omega_{31} = \omega_{32}$  とする仮定は、領域  $A_3$  内にある端末がその領域から出るとき、次に移る領域が  $A_1$  であるか、 $A_2$  であるか、が等確率であることを表している。これは、例えば、領域  $A_1$  から  $A_2$  への、あるいは  $A_2$  から  $A_1$  への通過時にのみ端末が領域  $A_3$  内に入るような場合などで成り立つ仮定である。

図5-6、5-7は、それぞれ対称システム ( $\pi_1 = \pi_2$ )、非対称システム ( $\pi_2 = 2\pi_1$ ) に対して、 $\pi_3 = 0.1$  としたときのスループット特性を  $\omega_{13}$  をパラメータとして示したものである。図中、 $\omega_{13} \gg p$  とした曲線は、各パケット送信時点における端末の位置に相関がないものとして、平衡点解析を行った結果であり、端末の移動速度がパケット送信間隔に比べ、十分に速い場合に相当する。×、○印は、それぞれ  $\omega_{13} = 0.001, 0$  に対するシミュレーション結果である。各シミュレーション値は初期状態  $\mathbf{n}(0) = (0, 0, 0, \pi_1 M, \pi_2 M, \pi_3 M)$  から開始したシミュレーション結果の10000～40000スロット間を集計したものであり、解析結果とよく一致している。図5-6より、この対称システムのスループット特性は端末の移動速度の影響をほとんど受けていないことがわかる。一方、非対称システムでは、図5-7に示す様に、端末の移動速度が異なると異なったシステム特性となることがわかる。図5-7において、 $\omega_{13} = 0.001, 0$  の曲線の  $p = 0.02 \sim 0.025$  付近の特性は、基地局  $B_1$  が安定状態であるのに、基地局  $B_2$  が不安定状態



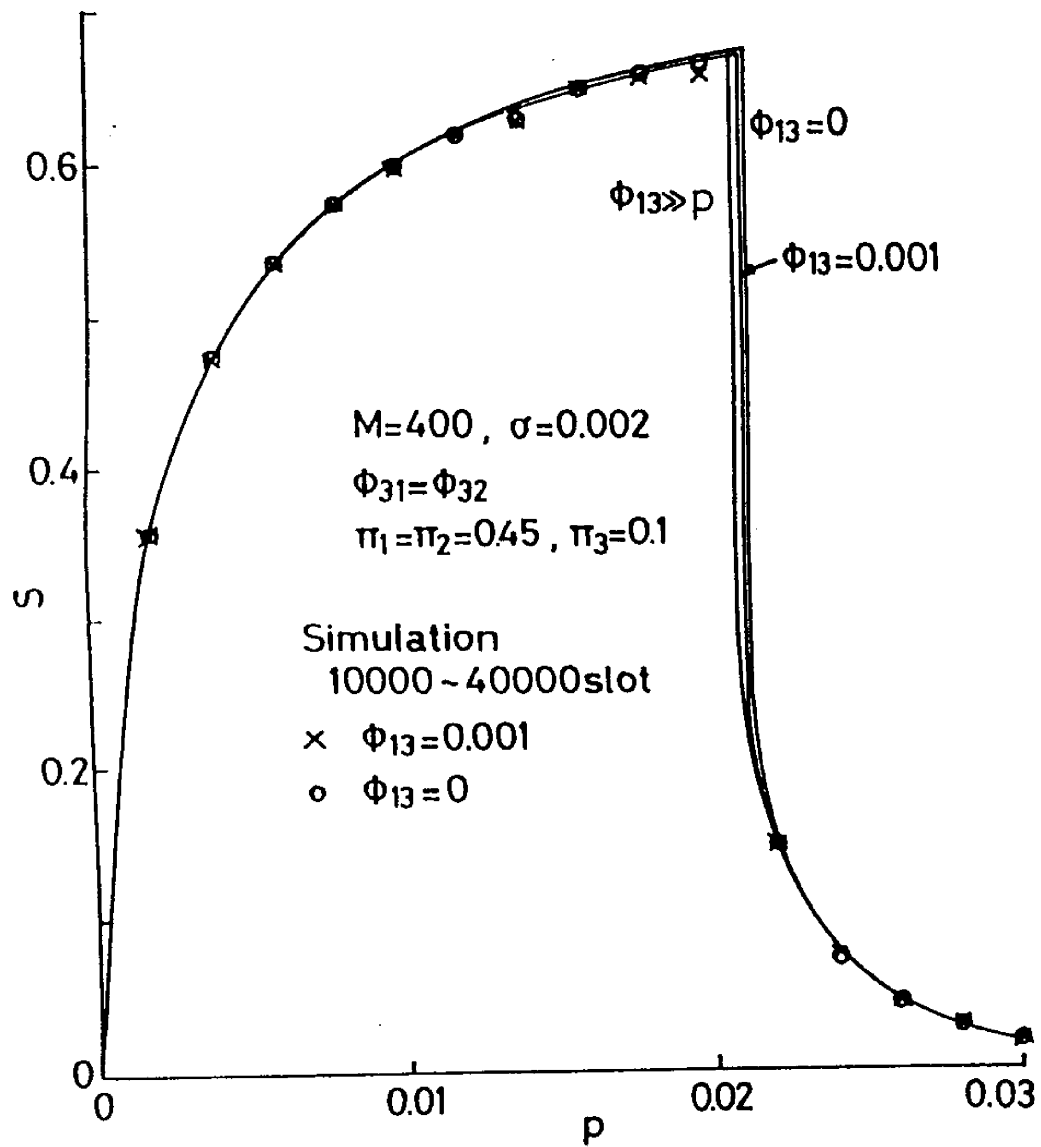


図 5 - 6  $\phi_{13}$  をパラメータとするスループット特性  
 (  $\pi_1 = \pi_2$  の場合 )

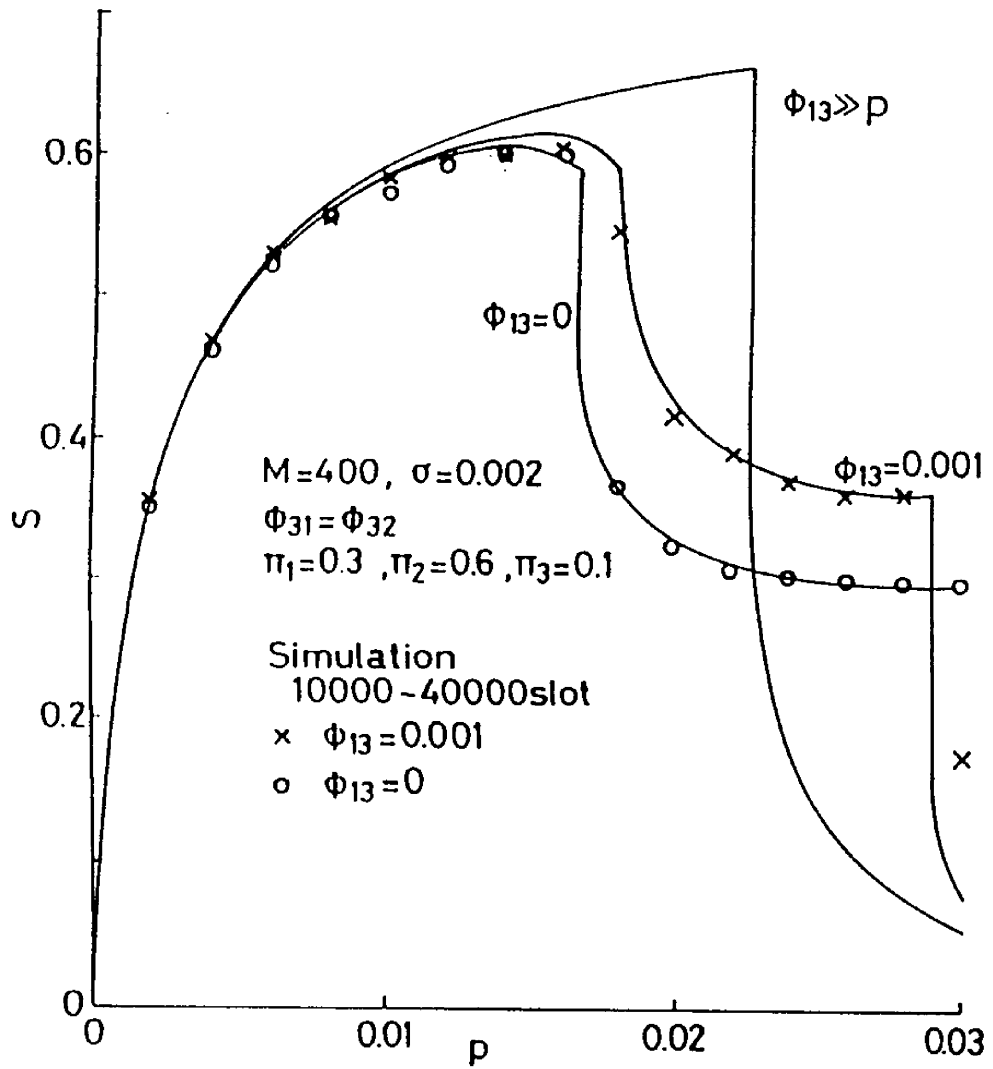


図 5 - 7  $\phi_{13}$  をパラメータとするスループット特性  
 ( $\pi_2 = 2\pi_1$  の場合)

となった結果であると考えられる。対称システムの場合には、両基地局へのトラヒック量が等しいので、この様な現象は起っていない。

これらの特性は、ここで与えられたパラメータに対する結果であり、パラメータが異なれば、異なった特性となることも考えられる。そこで以下では、移動速度の違いが、システム特性へ影響を与える機構を示し、対称システム、非対称システムの特徴を定性的に考察する。

最初に、移動速度無限大の場合を考える。この場合、在庫パケットを持っている端末の割合  $\bar{n}_i / (\bar{m}_i + \bar{n}_i)$  は、明らかに、どの領域でも同じ値となる。 $\bar{n}_i$  は近似的に  $n_{ii}$  に等しく、各領域の伝送成功確率  $P_{Si}$  は式(5-6)~(5-8)の  $n_i(t)$  を  $n_{ii}$  で置換えた  $P_{Si}(n_{ii})$  で近似される。総スループット  $S$  は、この  $P_{Si}(n_{ii})$  を用いて、式(5-12)で求められる。一方、端末が全く移動しない場合には、領域  $A_i$  からのスループットを  $n_{ii} P_{Si}(n_{ii})$  で近似して求めた安定条件式、 $(M\bar{\pi}_i - n_{ii})\sigma = n_{ii} P_{Si}(n_{ii})$  より、

$$\frac{n_{ii}}{\bar{\pi}_i M} = \frac{\sigma}{P_{Si}(n_{ii}) + \sigma} \quad (5-16)$$

となって、伝送成功確率が大きい領域ほど、在庫パケットを持っている端末の割合が小さくなるのがわかる。これらのことから、端末の移動速度が有限な場合には、在庫パケットを持っている端末の割合は伝送成功確率が高い領域ほど小さく、その割合の違いは、端末の平均移動速度が遅いほど大きくなるのがわかる。また、その割合の分母は、 $\bar{m}_i + \bar{n}_i = M\bar{\pi}_i$  で端末の移動速度によらないことから、端末の平均移動速度が減少すると伝送成功確率の小さな領域の平均在庫端末数は増加し、伝送成功確率の大きな領域のそれは減少することがわかる。総スループット  $S$  は、 $n_{ii}$  (あるいは、 $n_i$ ) の関数として式(5-12) (あるいは、安定条件式  $S = (M - \bar{n}_1 - \bar{n}_2 - \bar{n}_3)\sigma$ ) で求められるから、平均移動速度の変化が、 $S$  の値を変化させることが予想される。また、静特性解析での考察から、 $S$  の最大値は  $\bar{n}_3$  が小さい程、また  $\bar{n}_1$  と  $\bar{n}_2$  の差が小さい程大きくなるものと考えられる ( $g_i = \bar{n}_i p$  で  $p$  は定数であるから)。

対称システムの場合、 $P_{S1} = P_{S2} < P_{S3}$  であるから、端末の移動速度が減少すると  $g_3$  も減少する。このため、対称システムでは、端末の移動速度が遅い程、最大スループットは増加するものと考えられる。また、移動速度の違いによるスループット特性の差は、ゾーンの重なり

が増加する程、増加するものと考えられる。一方、非対称システムでは、端末の移動速度の減少は、 $g_3$ の減少とともに $g_1$ と $g_2$ の差を増加させるので、ゾーンの重なり具合や非対称の度合いにもよるが、移動速度の減少により最大スループットが低下する可能性がある。図5-6の対称システムでは、端末の平均移動速度が小さくなると僅かではあるが最大スループットが増加し、図5-7の非対称システムでは逆の傾向が現われているのは、こうした理由によるものであると考えられる。対称システムでは、両基地局は同じ $p$ で飽和状態となるので、移動速度の違いによるスループット特性の差は、非対称システムの場合ほど顕著ではない。一般に基地局はゾーンの重なりがなるべく小さくなるように配置されるものと考えられるので、ここでは具体例として $\pi_3 = 0.1$ を用いた考察を行ったが、なんらかの事情でゾーンの重なりが大きくなる場合には対称システムであっても端末の移動速度の影響を考慮する必要がある。なお、図の掲載は略すが、 $\pi_3$ を変えて同様のスループット特性を求めたところ、対称システムでは、 $\pi_3 = 0.2$ 程度まで端末の移動速度の影響は極めて僅かであった。また、さらに $\pi_3$ を増加すると、端末の移動速度の影響は顕著となり、移動速度の減少により、最大スループットが増加し、安定領域も増加する現象が見られた。

図5-8、5-9は対称および非対称システムにおいて、 $\rho_{13} = 0.001$ の時のスループット特性を $\pi_3$ をパラメータとして示したものである。これらのグラフより得られる最大スループットと図5-5のチャンネル容量を比較すると、 $\pi_3$ が小さなきには、両者はほぼ一致するが、 $\pi_3$ が増加するにつれて最大スループットがチャンネル容量を上回ることがわかる。これは端末の移動速度が有限であるために、領域 $A_3$ からのトラヒック量 $g_3$ が式(5-5)の値に比べて小さくなるからであると考えられる。また、非対称システムでは、 $\pi_3 = 0.0.2$ のとき $p$ の増加に対してスループットの急激な減少が2回生じるという現象が見られるが、これは、 $p$ の値によって、両基地局とも安定な状態、片方の基地局のみ安定な状態、両基地局とも不安定な状態が存在することを意味している。

図5-10は負荷の変化の影響を示したもので、非対称システムにおいて、 $\sigma$ が変化したときのスループットの変化を、 $\rho_{13}$ をパラメータとして示している。 $\rho_{13} = 0.0.001$ の場合ともに

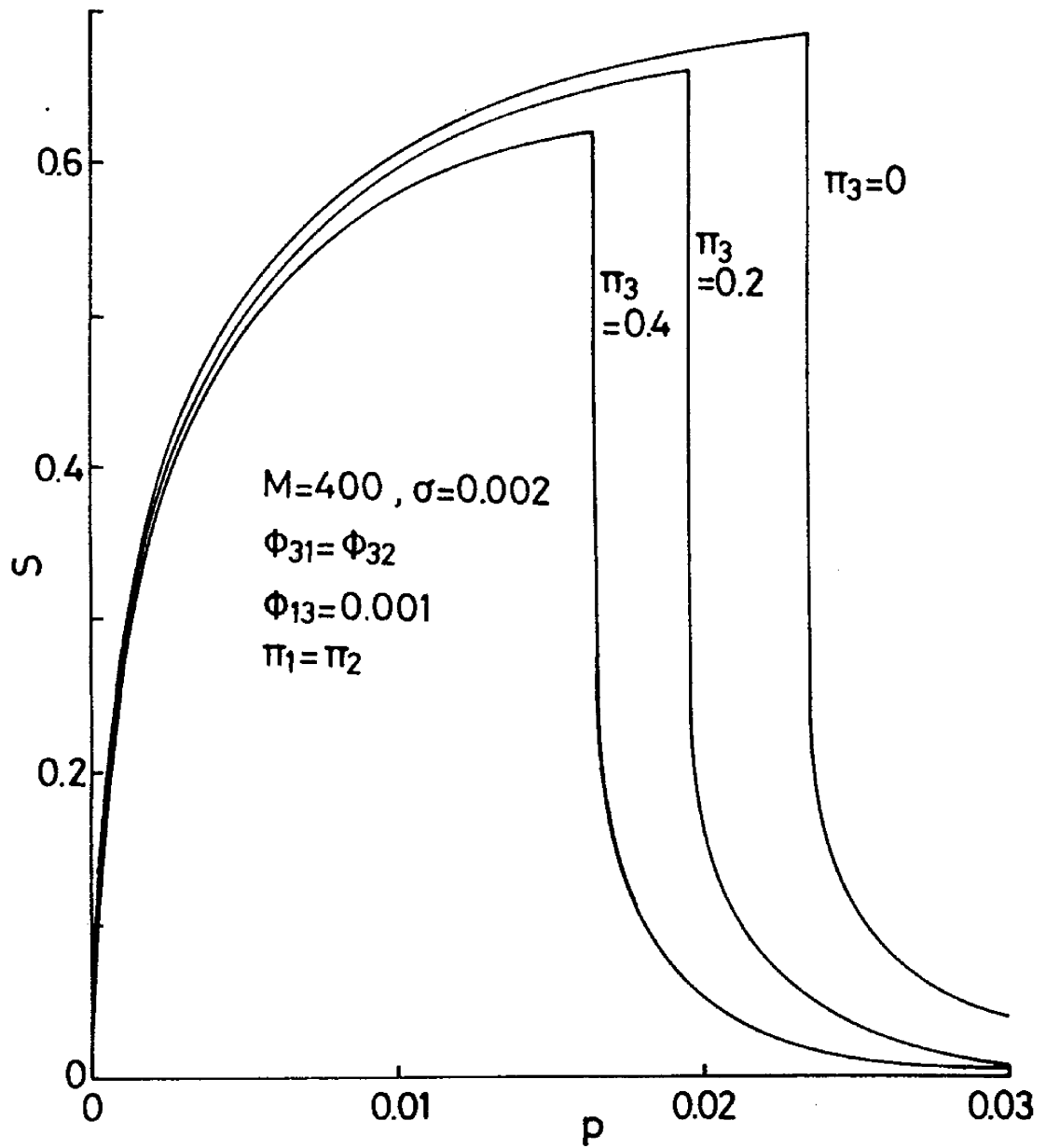


図 5 - 8  $\pi_3$  をパラメータとするスループット特性  
 (  $\pi_1 = \pi_2$  の場合 )

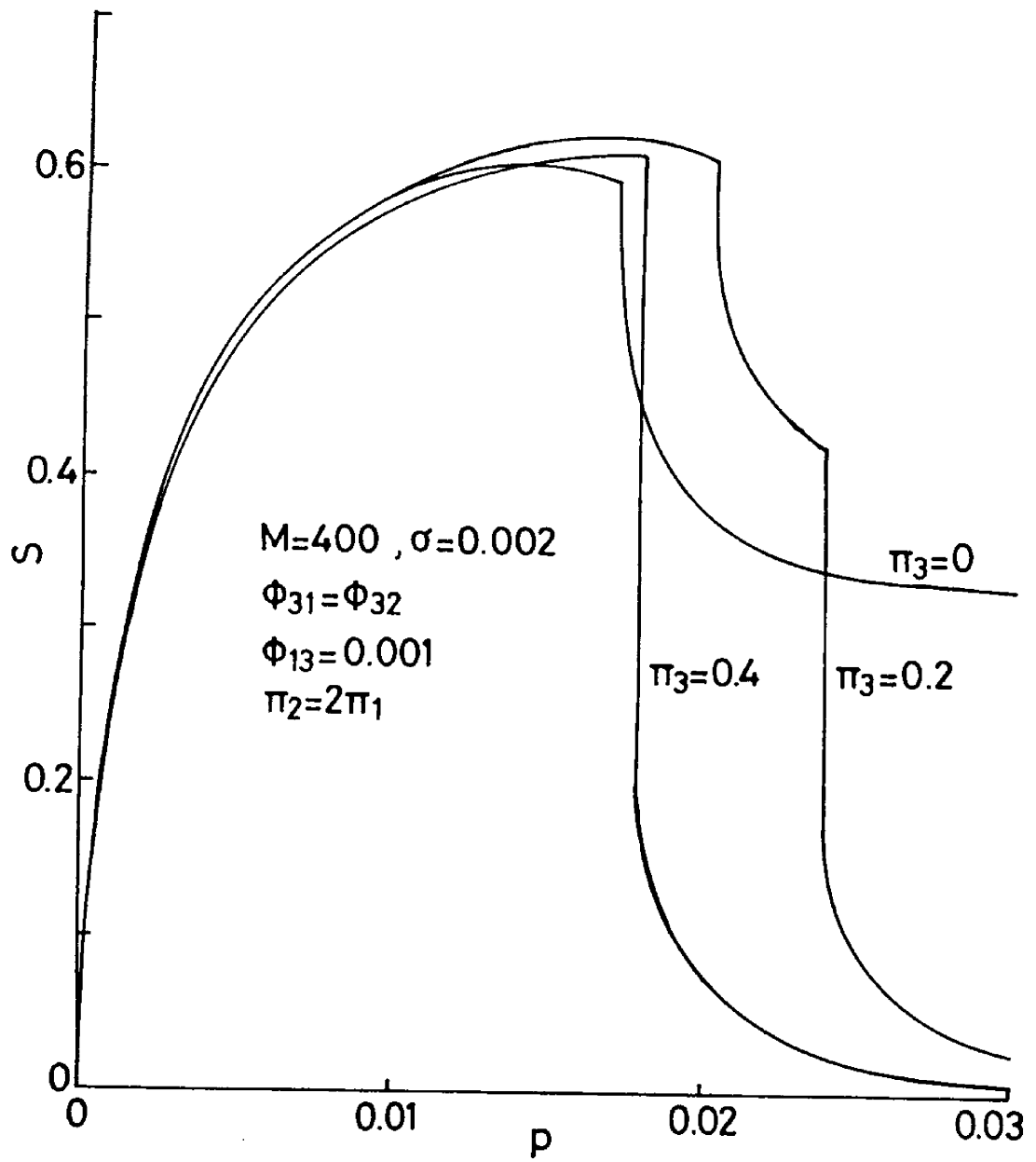


図 5 - 9  $\pi_3$  をパラメータとするスループット特性  
 ( $\pi_2 = 2\pi_1$  の場合)

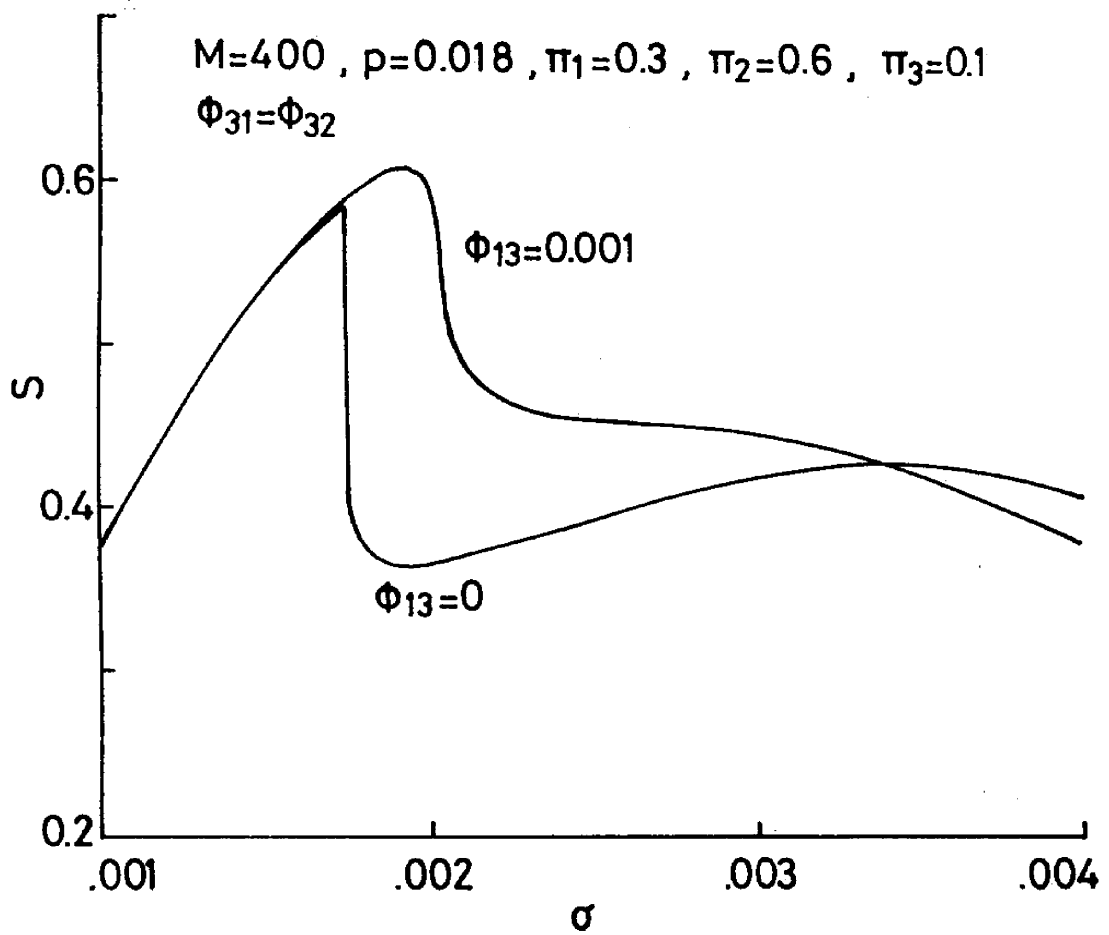


図 5 - 1 0 スループット vs.  $\sigma$  ( $\pi_2 = 2\pi_1$  の場合)

$\sigma$ が小さな領域では、 $\sigma$ の増加に比例してスループットも増加するが、 $\omega_{13} = 0$ では $\sigma = 0.0017$ 付近で、 $\omega_{13} = 0.001$ では $\sigma = 0.002$ 付近で基地局  $B_2$ へのトラヒックが飽和状態となり、スループットの急激な低下が起こる。しかし、基地局  $B_1$ へのトラヒックにはまだ余裕があるので、システム全体としては完全な飽和状態とはならず、総スループットは0.4程度に保持される。 $\omega_{13} = 0$ の場合と $\omega_{13} = 0.001$ の場合を比較すると、 $\omega_{13} = 0.001$ の方がより大きな $\sigma$ に対して両基地局とも安定状態を保持できるが、これは端末の移動が各基地局へのトラヒック量を均一化する効果を持つためである。このことから、非対称システムでは、端末の移動速度が速いほど各基地局への負荷が均一化され、より高いパケット生成確率の端末、あるいはより多くの端末を収容できることがわかる。なお、図5-6の考察から容易に予想される様に、対称システム( $\pi_3 = 0.1$ の場合)では、 $\omega_{13}$ の違いによる  $S-\sigma$ 特性の違いはほとんど見られなかった。

## 5.5 まとめ

この章では、ゾーン構成のスロット付きアロハシステムの解析モデルを紹介し、その解析手法を示した。また、その解析結果を用いて、端末の移動速度やゾーンの重なり具合がシステム特性に与える影響を考察した。その結果、

- ゾーンの重なりが少ない時には、端末の移動速度の影響は非対称システムで顕著であり、対称システムでは僅かである。
- ゾーンの重なりが増すと、2つの基地局に同時に受信されるパケットの数が増加するので、総スループットは減少することになるが、動特性を考慮した場合の低下量は、静特性解析による結果ほど大きくはない。
- 非対称システムでは、ゾーンの重なり具合や移動速度によっては、片方の基地局へのトラヒックのみが飽和状態となる場合がある。
- 端末の移動速度の増加は、各領域からのトラヒック量を均一化する効果を持つ。

などの性質が定量的、定性的に示された。



この章での議論は、簡単化のために、2つの基地局で構成されたシステムを例として行われている。しかし、実際の移動無線システムでは、多数の基地局が経済性や地理的条件などを考慮して配置されるものと考えられる。そうした多数のゾーンが複雑に重なりあったシステム の特性解析に対しても、各領域間の遷移確率が与えられれば、静特性解析、動特性解析ともに、ここでの解析法が適用可能である。また、5.4での定性的な考察からもわかるように、そうしたシステムにおける端末の移動速度やゾーンの重なり具合の影響についても、ここでの解析結果と基本的には同様な傾向を示すものと考えられる。

ゾーンの構成法は、移動無線システムの設計において最も重要な問題の1つである。端末が領域間を遷移する確率は、移動速度が同じでも領域の大小によって変化する。従って、ゾーンの大きさは、ゾーン内にある端末の平均数ばかりでなく、各端末の位置状態の遷移確率をも変化させることになる。ゾーンの形は、周囲の地形等に強く依存するが、基地局の受信アンテナの指向性を変化させることにより、ある程度自由に設計することができるものと考えられる。基地局の配置やゾーン設計の問題は、今後の移動無線システムの重要な研究課題となるものと思われるが、その際には、システムの動特性や端末の移動速度を考慮して行う必要があり、ここで示した解析法が有用となる。また、ゾーンの重なりは、スループット特性のみを考えた場合なるべく減らした方がよいと考えられるが、ゾーンの重なりを小さくすると、どのゾーンにも含まれない領域が増加する可能性がある。ここで示した解析法は、そうしたどのゾーンにも属さない領域  $A_0$  を持つシステムに対しても適用可能である。

基地局の配置やゾーン設計の問題、捕捉効果や雑音による伝送誤り等の影響を考慮した場合の特性解析などは、今後の研究課題である。

## 6. むすび

本論文では、ランダムアクセス方式を用いた陸上移動無線パケット通信網のシステム特性に関する研究を行った。そこでは、端末の移動に関連して生じる2つの大きな問題、即ち伝送路状態の時間変動に関する問題とゾーン構成の通信網に関する問題を扱った。これらの問題においては、システムの状態を正確に記述するために、各端末の動作状態に加えて、その位置状態をも考慮する必要がある。そのため、これらの問題の厳密な特性解析は極めて複雑なものとなる。そこで本論文では、最初に、そうした複雑なシステムの近似特性を比較的容易に求めることができる新しい解析手法（過渡流体近似解析）の開発を行った。

過渡流体解析手法の詳しい説明は、2. でスロット付きアロハシステムを例として示されている。2. では、また、ランダムアクセスシステムの代表的な解析手法として従来から知られているS-G解析、マルコフ解析、及び平衡点解析の紹介が行われ、過渡流体近似解析との比較が行われた。過渡流体近似解析は、1スロット毎の平均的なシステム状態の変化を個々の端末の状態遷移確率行列を用いて漸近的に求めて行く手法であり、スループット、平均伝送遅れなどの定常特性は、漸近的に得られるシステム状態ベクトルの極限值を基に計算される。この極限值は、ランダムアクセスシステムの特性を考察する上で極めて重要な意味を持つ平衡点の1つと一致する。従って、過渡流体近似解析により得られる定常特性は、平衡点を基にシステムの特性格解析を行う平衡点解析による解析結果と一致する。定常特性の解析において、平衡点解析の代わりに過渡流体近似解析を用いる利点は、解の導出が一般に極めて難しい複数の解を持つ可能性のある連立非線形方程式を解く代わりに、計算機の利用が容易な漸化式が用いられる点にある。

また、過渡流体近似解析のもう1つの大きな特長として、過渡特性解析への適用が挙げられる。ランダムアクセスシステムの研究においては、これまで過渡特性に関する考察はほとんど行われていなかった。しかし、実際のシステム設計やその特性評価において過渡特性の重要性は明らかである。過渡流体近似解析は、各種のランダムアクセスシステムの過渡特性を比較的

容易に導出することができ、システム起動時の特性解析やラッシュアワー解析、端末数や再送確率が制御されているシステムの特性解析などへの応用が期待される<sup>[51]</sup>。ところで、スロット付きアロハシステムのようにマルコフ解析が可能な（従って、システムの状態遷移確率行列を求めることが可能な）システムでは、2. 3で示した様な方法で比較的容易に厳密な過渡特性を求めることが可能である。しかし実際には、そうした過渡解析もこれまでは行われていなかった。マルコフ解析による過渡特性もここで初めて示されたものであり、本論文で得られた成果の1つであるといえる。

過渡流体近似解析は、スロット付きアロハ方式以外のランダムアクセス方式を用いたシステムにも容易に適用可能である。本論文では、その具体的な適用方法を示すため、陸上無線パケット通信網の代表的なアクセス手法として知られている3つの方式、ISMA方式、純アロハ方式、CSMA方式を用いたシステムに対して、この過渡流体近似解析の適用方法を付録として紹介している。ISMAシステムは、スロット付きアロハ方式の場合と同様、マルコフ解析による厳密な特性解析が可能であり、付録A.1では、過渡流体近似解析の適用方法が示されると共に、マルコフ解析による解析結果との比較が行われている。なお、ISMAシステムのマルコフ解析も従来は行われておらず、本論文で初めて示されたものである。過渡流体近似解析は、純アロハシステム、CSMAシステムなどマルコフ解析が困難なランダムアクセスシステムに対しても適用可能であり、定常特性及び過渡特性の解析に利用することができる。これらの方式に対する適用方法、及び解析結果の具体例は付録A.2, A.3で示されている。

本論文の3. 及び4. では、端末の移動により生じる各端末と局間の伝送路状態の時間変化がスロット付きアロハシステムの特性に与える影響を考察した。従来のこの種の研究では、各端末と局間の伝送路モデルとして、無記憶伝送路モデルが仮定されていた。しかし、端末の移動速度は、一般にパケット送信間隔に比べて緩慢であると考えられ、パケット送信時点毎の伝送路状態には、通常強い相関があるものと考えられる。この点については、すでにいくつかの論文で指摘され、シミュレーション等により、伝送路状態の従属性を考慮した解析の必要性が示されている。

本論文の3. では、そうした記憶のある伝送路の解析モデルとして、3つの極端な状態を持つマルコフ伝送路モデルを仮定してスロット付きアロハシステムの特性解析を行った。そこでの特性解析は、過渡流体近似解析の手法を用いて平衡点方程式を導出し、それを数値的に解くという方法で行われた。その結果得られた近似解は、シミュレーション結果との比較により、全体としてシステムの動特性を非常によく表していることが確かめられた。また、各伝送路状態での滞在時間分布に関して、その平均が同じであれば、分布形の違いによるスループット特性への影響は僅かであることが、シミュレーションにより確かめられた。この章では、また、2つの特別な場合、即ち各端末と局間の伝送路状態としてシャドウ状態と良好な状態のみを仮定した場合、及び各伝送路状態間の遷移確率が全て等しい場合、における時変伝送路の影響が解析され、その解析結果を基に伝送路状態の時間変化がシステム特性に与える様々な影響が考察された。また、そこで考察された特徴は、一般的な状況下でも存在することが示された。

4. では、より現実的な状況下での伝送路状態変動の影響を考察するため、捕捉効果及び雑音による伝送誤りの影響を考慮したスロット付きアロハシステムの特性解析を行った。そこで用いられた伝送路モデルでは、3. の様に確定的な性質の違いによって各伝送路状態を定義する代わりに、それぞれの状態にある端末から送信されたパケットの局における平均受信電力の大きさによって各伝送路状態が定義された。また、レイリーフェージングとガウス雑音の存在が仮定され、受信電力の違いによる捕捉効果、及び雑音による伝送誤りの影響を考慮した特性解析が、過渡流体近似解析により行われた。その結果、伝送路の状態によって受信電力に大きな差が生じる場合には、状態変化の速度がスループット特性に与える影響が顕著であり、変動速度が速い程スループットが高くなることなどが、定性的、定量的に示された。

5. では、端末の移動に関連したもう1つの重要な問題として、近年注目されているゾーン構成のスロット付きアロハシステムについて研究を行った。ゾーン構成のランダムアクセスシステムは、比較的新しい研究分野であり、静特性解析などの基礎研究も不足している。そこで、この章では、2つの基地局を持つスロット付きアロハシステムを例として、S-G解析による静特性解析、及び過渡流体近似解析による動特性解析を行い、端末の移動速度やゾーンの

重なり具合がシステム特性に与える基本的な影響を考察した。そしてその結果、5.5で示した様な様々な性質が明らかとなった。ここでの議論は、2つの基地局を持ったシステムに対して行われたものであるが、解析法自体は、多数の基地局を持ったシステムに対しても同様に適用することができる。また、解析結果から得られた端末の移動速度やゾーンの重なり具合がシステム特性に与える影響に関しても、この章で示された定性的な考察から基本的には同様な傾向を示すものと考えられる。

本論文で紹介した過渡流体近似解析は、本文及び付録で示した適用例の他に、音声とデータの統合伝送システムの動特性解析<sup>[4]</sup>などにも適用され、従来の手法では解析困難な複雑なシステムの近似特性を比較的容易に導出できる手法として高い評価を得ている。この過渡流体近似解析に関する今後の課題としては、前述した様な過渡特性解析への応用や負荷の変化するシステムへの適用が挙げられる。

3.及び4.で行った時変伝送路上でのスロット付きアロハシステムの研究に関しては、次の様な課題が残されている。ここでは、ランダムアクセスシステムの特性解析において伝送路状態の時変性を考慮するため、マルコフ伝送路モデルを用いることを提案している。また、その解析結果から、移動無線パケット通信網の特性評価において伝送路状態の時変性を考慮することの必要性を示している。しかし、時変性を考慮した実際の伝送路の特性は、これまでほとんど報告されていなかった。そのためここで用いた伝送路モデルのパラメータは、典型的な車の移動速度や障害物の大きさなどから先験的に求めたものである。より現実的なランダムアクセスシステムの特性解析には、より実際に近いパラメータを伝送路モデルの利用が不可欠であり、今後は、時変性を考慮した伝送路状態の組織的な調査研究が望まれる。

5.で扱った複数の基地局で構成されたランダムアクセスシステムの研究は、比較的新しい研究分野であり、今後、移動電話網の小ゾーン化など各種移動通信網の小ゾーン化傾向とも呼応して、最も発展が期待される研究分野の1つである。本論文では、そうしたマルチゾーンシステムの解析手法を開発すると共にその基本的な特性を考察した。ここでの研究成果は極めて基礎的なものであり、基地局の配置に関する問題やスロット付きアロハ方式以外のランダムア

クセス方式を用いた場合の特性解析など様々な課題が残されている。

付録：その他のランダムアクセスシステムにおける  
過渡流体近似解析

A.1 ISMA 方式<sup>[42][60][61]</sup>の過渡流体近似解析

A.1.1 システムモデル

スロット付きアロハ方式の場合と同様、1つの局と  $M$  個の端末からなる集中形のシステムを考える。ISMA 方式では、通常、各端末は図 A1-1 で示される様な DFT 形の動作をするものと仮定される。即ち、パケット生成状態 (PG モード) にある端末は、平均  $1/\sigma$  の指数分布時

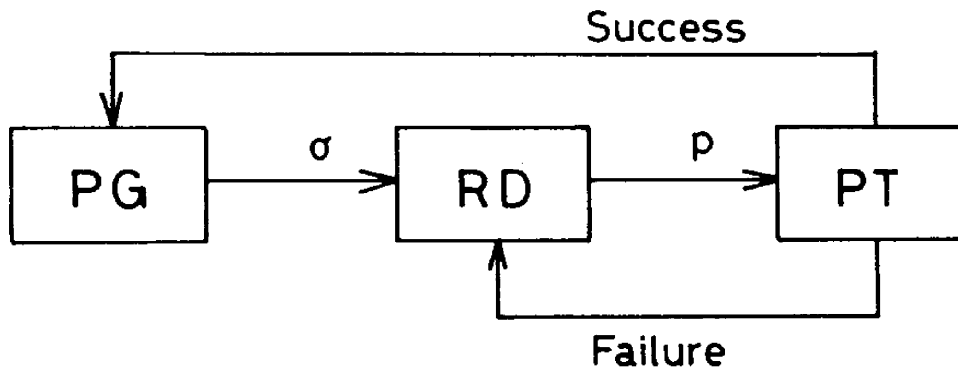


図 A 1 - 1 I S M A システムにおける端末動作

間後にパケットを生成して、ランダム遅延状態 (RD モード) となる。RD モードにある端末は、アイドル信号 (以下、単に IS と呼ぶ) と呼ばれる局からの制御信号に同期して確率  $p$  でパケットを送信する。ISMA 方式は、可変長パケットの収容も可能である<sup>[42]</sup>が、ここでは固定長パケットを仮定し、パケットの伝送路上での長さを時間の単位とする。従って、端末がパケット送信状態 (PT モード) に留まる時間は 1 となる。パケットの伝送は、同じ IS に同期して送信されるパケットがないとき、そしてそのときに限り成功するものとし、各端末は、パケット

伝送の成否をそのパケットの送信完了後直ちに知る事ができるものとする<sup>†</sup>。パケットの伝送に成功した端末は、PG モードに戻り、次のパケットの生成を行う。パケットの伝送に失敗した端末は、RD モードに戻り、IS の受信毎に確率  $p$  でパケットの再送を繰り返す。

局からの IS の送信は、その時点でチャンネル上にキャリア（パケット）がないことを表し、次の様にして行われる（図 A1-2 参照）。局は、最初の IS を送信した後、一定期間チャンネルを観測

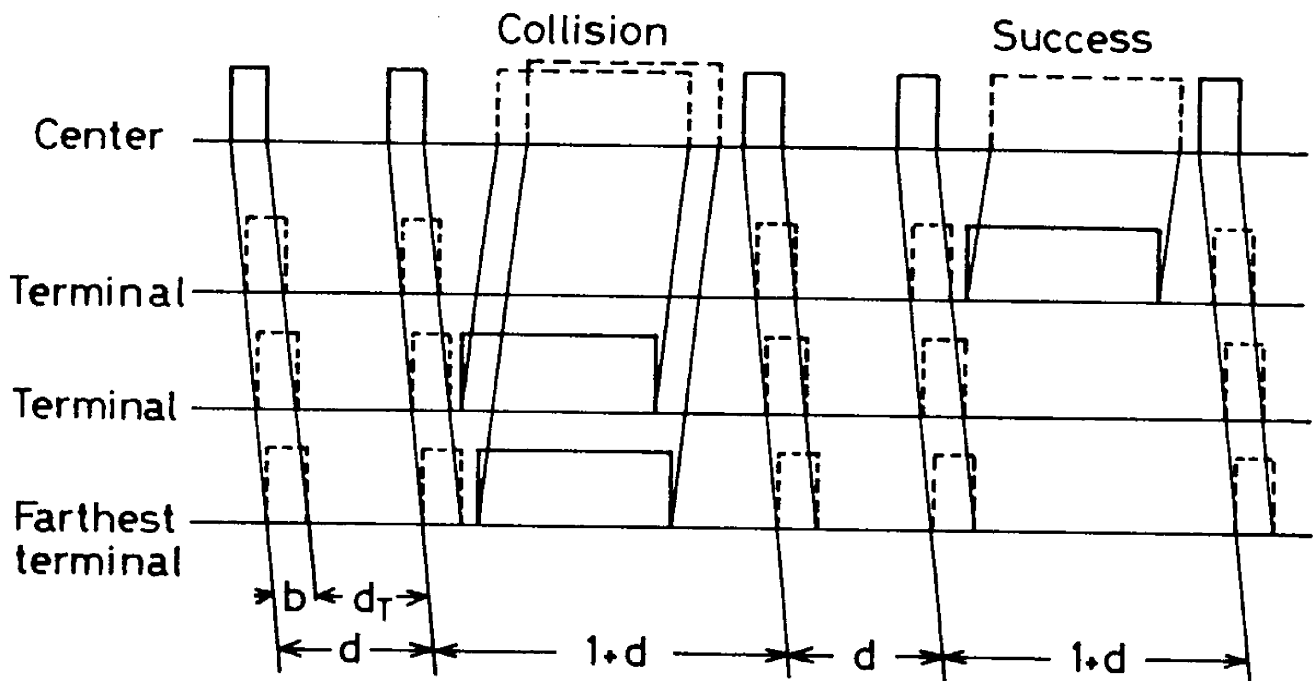


図 A 1 - 2 ISMA システムの動作例

し、その間にパケットの到着がなければ、次の IS を送信する。パケットの到着が観測されれば、そのパケットを受信した後、IS を送信する。チャンネル観測期間  $d_T$  は、最遠の端末に IS が到達し、その端末がパケットを送信した場合に局がそれを感知するのに十分な時間となるように設定される。即ち、 $d_T$  は、最大電波伝搬時間を  $a$ 、キャリア検出時間を  $c_d$  とすると、 $d_T \geq 2a + c_d$

<sup>†</sup>実際、ISMA 方式では、次の IS に Ack 情報を付加するなどの方法で、ほとんどオーバーヘッドなしにこれを実現することができる。



となる様に設定される。IS には、Ack 情報など各種の制御機能を付加する場合も考えられ、そうした場合には、IS の長さが変化することも考えられるが、ここでは IS の長さは一定とし、その伝送路上での長さ（時間）を  $b$  とする。従って、チャンネルがアイドル状態の時には、局は一定の間隔  $d = d_T + b$  で IS の送信を行うことになる。この  $d$  は、後に示されるように、ISMA システムの特性を決定する重要なパラメータとなる。

### A.1.2 過渡流体近似解析

個々の端末の状態変化に着目し、それを離散過程として記述することから解析を開始する。図 A1-1 において、PG モードから RD モードへの変化、即ちパケットの生成は、実際には任意の時刻に生じるが、その直後の IS 受信の直前に起こったと考えてもシステムの振舞は本質的に変化しない。そこでここでは、IS の受信開始直後の時点に着目し、この点を隠れ点として、各端末の状態変化を記述する。IS の送信は、チャンネル上にパケットがないときにのみ行われるのであるから、隠れ点における各端末の状態は、PG あるいは RD モードのいずれかにある。このため各端末の隠れ点毎の状態変化は、図 A1-3 の様な 2 状態の離散過程で表される。図中、状

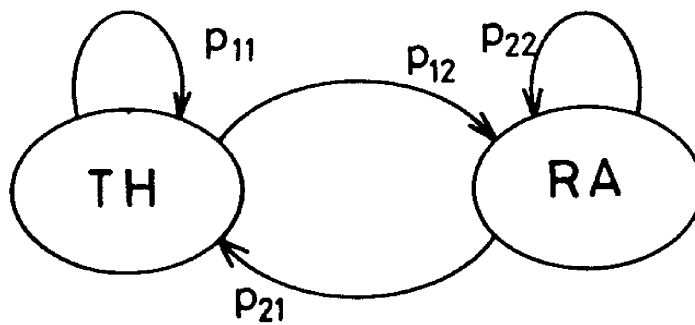


図 A 1 - 3 各端末の状態遷移図 ( I S M A システム )

態 TH 及び RA は、それぞれ、その端末が隠れ点において PG 及び RD モードにあることを表している。

次に、システム全体の振舞について考える。 $t$  番目の IS の受信開始時点において、状態 TH、RA にある端末の数をそれぞれ  $m(t), n(t)$  とし、ベクトル  $\mathbf{n}(t) = (m(t), n(t))$  をシステムの状態ベクトルと呼ぶ。システムの振舞は、この状態ベクトルを用いて考察することができる。各端末への IS の到着は、局からの距離により多少異なるため、実際には、隠れ点は端末毎に異なった時刻となる。しかし、この点は、本質的な問題とはならず、システム全体の振舞も隠れ点毎に（この隠れ点は、IS の受信開始直後を表し、その時刻は端末毎に異なる）その状態が変化する離散過程として記述することができる。

過渡流体近似解析では、初期状態  $\mathbf{n}(0)$  が与えられたときの  $t$  番目の隠れ点におけるシステム状態の期待値ベクトル  $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$  は、漸化式

$$\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0)) \mathbf{P}(\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))) \quad (A1-1)$$

を用いて求められる。ここに、 $\mathbf{P}(\mathbf{n})$  は、システムが状態  $\mathbf{n}$  にあるときの各端末の状態遷移確率を表す行列であり、その要素  $p_{ij}(\mathbf{n})$  は、次の様にして求められる。

#### $p_{ij}(\mathbf{n})$ の導出

隠れ点から次の隠れ点までをサイクルと呼ぶ。サイクルの長さは、そのサイクル内で送信されるパケットがあるか、否かにより、それぞれ、 $d$  あるいは  $d+1$  となる<sup>†</sup>。従って、システム状態が  $\mathbf{n}$  にあるときのサイクル長を表す確率変数として  $T_c(\mathbf{n})$  を、また、そのサイクル内で送信されるパケットの総数を表す確率変数として  $K(\mathbf{n})$  を用いるとすると、

$$\Pr(T_c(\mathbf{n})=d) = \Pr(K(\mathbf{n})=0) = (1-p)^n \quad (A1-2)$$

<sup>†</sup>パケット送信がある場合のサイクル長は、そのパケットを送信した端末と局間の距離により多少異なる可能性があるが、ここでは簡単化のために全て  $d+1$  とした。これは、局からの電波伝搬時間が最大となる位置（円周上）に全ての端末が配置されている場合に相当し、最悪値と考えられる。

$$\Pr(T_c(\mathbf{n})=d+1) = \Pr(K(\mathbf{n}) \neq 0) = 1 - (1-p)^n \quad (\text{A1-3})$$

となる。サイクル長が  $t_c$  であるとき、状態 TH にある端末が、そのサイクルで状態 RA に移る確率  $p_{12}(\mathbf{n}|T_c(\mathbf{n})=t_c)$  は、

$$p_{12}(\mathbf{n}|T_c(\mathbf{n})=t_c) = 1 - e^{-\sigma t_c} \quad (\text{A1-4})$$

であるから、

$$\begin{aligned} p_{12}(\mathbf{n}) &= \sum_{\forall t_c} p_{12}(\mathbf{n}|T_c(\mathbf{n})=t_c) \Pr(T_c(\mathbf{n})=t_c) \\ &= 1 - e^{-\sigma(d+1)} - e^{-\sigma d}(1 - e^{-\sigma})(1-p)^n \end{aligned} \quad (\text{A1-5})$$

となる。  $p_{11}(\mathbf{n})$  は、

$$p_{11}(\mathbf{n}) = 1 - p_{12}(\mathbf{n}) \quad (\text{A1-6})$$

で与えられる。一方、状態 RA にある端末が状態 TH に移る確率  $p_{21}(\mathbf{n})$  は、その端末がそのサイクルでパケットの伝送に成功する確率に等しく、

$$p_{21}(\mathbf{n}) = \frac{1}{n} \Pr(K(\mathbf{n})=1) = p(1-p)^{n-1} \quad (\text{A1-7})$$

で求められる。また、  $p_{22}(\mathbf{n})$  は、

$$p_{22}(\mathbf{n}) = 1 - p_{21}(\mathbf{n}) \quad (\text{A1-8})$$

で与えられる。

漸化式 (A1-1) の極限ベクトル  $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$  は、それが存在するならば、連立非線形方程式

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}P(\mathbf{n}) \quad (\text{A1-9})$$

の解の1つと一致する。上式の解は、平衡点ベクトル  $\mathbf{n}_c$  と呼ばれ、ランダムアクセスシステムの動特性を考察する上で重要な役割を果たしている。平均サイクル長  $\bar{T}_c$ 、スループット  $S$ 、平

均伝送遅れ  $D$  といった定常特性は、この極限ベクトル  $\bar{n}(\infty) = (m(\infty), n(\infty))$  を用いて次の様に求められる。

$$\bar{T}_c = 1 + d - (1 - p)^{n(\infty)} \quad (A1 - 10)$$

$$S = \frac{\Pr(\kappa(\bar{n}(\infty))=1)}{\bar{T}_c} = \frac{n(\infty)p(1-p)^{n(\infty)-1}}{1 + d - (1-p)^{n(\infty)}} \quad (A1 - 11)$$

$$D = M/S - 1/\sigma \quad (A1 - 12)$$

### A.1.3 解析結果の考察

上述の ISMA システムは、 $n(t)$  を状態変数として、IS 毎にその状態が遷移する離散隠れマルコフ連鎖と考えることができる。実際、この隠れマルコフ連鎖の状態遷移確率  $\Pr(n(t+1)=j|n(t)=i)$  は、次式で与えられる。

$$\Pr(n(t+1)=j|n(t)=i) =$$

$$\begin{cases} 0 & j \leq i - 2 \\ \Pr(\kappa(i)=1)e^{-\sigma(1+d)(M-i)} & j = i - 1 \\ \Pr(\kappa(i)=0) \binom{M-i}{j-i} (e^{-\sigma d})^{M-j} (1 - e^{-\sigma d})^{j-i} \\ + \Pr(\kappa(i)=1) \binom{M-i}{j-i+1} \{e^{-\sigma(1+d)}\}^{M-j-1} \{1 - e^{-\sigma(1+d)}\}^{j-i+1} \\ + \Pr(\kappa(i)>1) \binom{M-i}{j-i} \{e^{-\sigma(1+d)}\}^{M-j} \{1 - e^{-\sigma(1+d)}\}^{j-i} & j \geq i \end{cases} \quad (A1 - 13)$$

ここで、

$$\Pr(\kappa(i)=0) = (1 - p)^i \quad (A1 - 14)$$

$$\Pr(\kappa(i)=1) = ip(1 - p)^{i-1} \quad (A1 - 15)$$

$$\Pr(\kappa(i)>1) = 1 - (1 - p)^i - ip(1 - p)^{i-1} \quad (A1 - 15)$$

である。ISMA システムの厳密な定常特性は、この状態遷移確率をその要素とする  $(M+1)$  行  $(M+1)$  列の行列（システムの状態遷移確率行列） $\mathbf{P}$  を用いて、次の様にして求められる（マルコフ解析）。即ち、最初に、行列方程式 (2-8) にこの  $\mathbf{P}$  を代入し、それを解くことにより、定

常状態確率 $\Pi_{n(\infty)}$ を求める。次に、その定常状態確率を用いて、平均サイクル長 $\bar{T}_c$ 、スループット $S$ 、平均伝送遅れ $D$ といった定常特性を次の様に導出する。

$$\bar{T}_c = \sum_{n=0}^M \{[1 + d - (1 - p)^n] \Pr(n(\infty)=n)\} \quad (A1-17)$$

$$S = \sum_{n=0}^M \{np(1 - p)^{n-1} \Pr(n(\infty)=n)\} / \bar{T}_c \quad (A1-18)$$

$$D = \frac{\bar{n}}{S} = \frac{M}{S} - \frac{1}{\sigma} \quad (A1-19)$$

ここで、上式の $\bar{n}$ は、RAモードにある端末数の任意の時点における期待値（即ち、全時間にわたる平均）を表し、

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^M \{[1 + d - (1 - p)^n] n \Pr(n(\infty)=n)\} / \bar{T}_c \quad (A1-20)$$

で与えられる。この値は、隠れ点における期待値

$$\bar{n}(\infty) = \sum_{n=0}^M n \Pr(n(\infty)=n) \quad (A1-21)$$

とは、異なる点に注意する必要がある。即ち、 $n$ が小さい時程、トラヒック量が減少しISが多く送信されるため、 $\bar{n}$ と $\bar{n}(\infty)$ は異なった値となる。

図A1-4は、こうして求めた厳密値と過渡流体近似解析による解析結果をスループット特性に関して比較したものである。過渡流体近似解析による解析結果は、平衡点に着目した解析法に共通した特有の近似誤差を含むものの、全体としてよい近似となっていることがわかる。

図A1-5は、 $p = 0.025$ とし、初期状態 $n(0)$ を $(M, 0)$ 及び $(0, M)$ としたときの過渡特性を示したものである。過渡特性に対しては、マルコフ解析による解析結果も厳密解とはならない。なぜならば、ここでのマルコフ解析は、隠れ点毎のシステムの振舞に着目して行われているからである。実際、漸化式(2-7)の $P$ として上述の状態遷移確率行列を用いることにより得られる $\Pi_{n(t)}$ は、隠れ点毎の状態確率分布となる。従って、これを基にシステム特性を求めた場合、

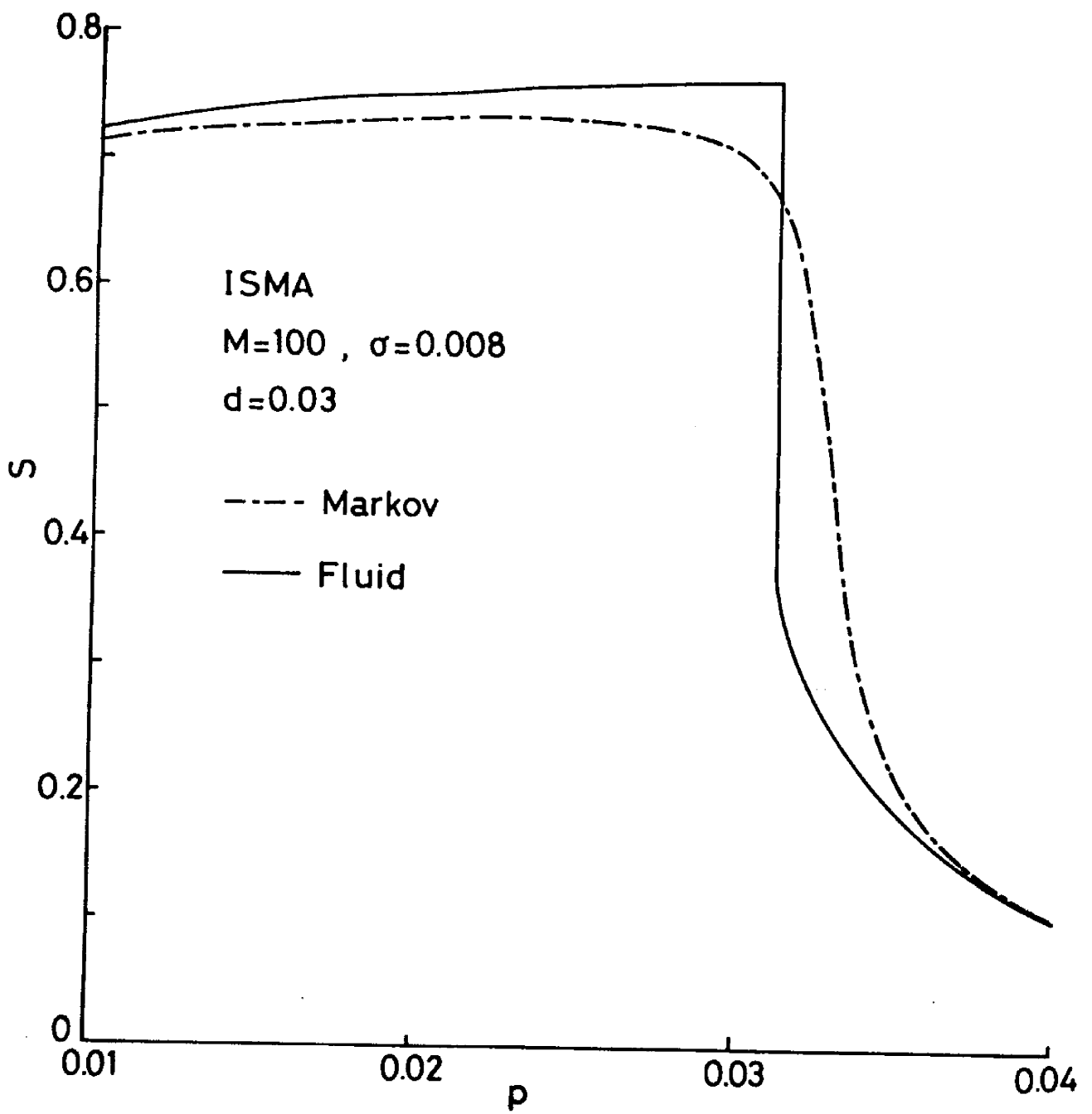


図 A 1 - 4 ISMA システムのスループット特性

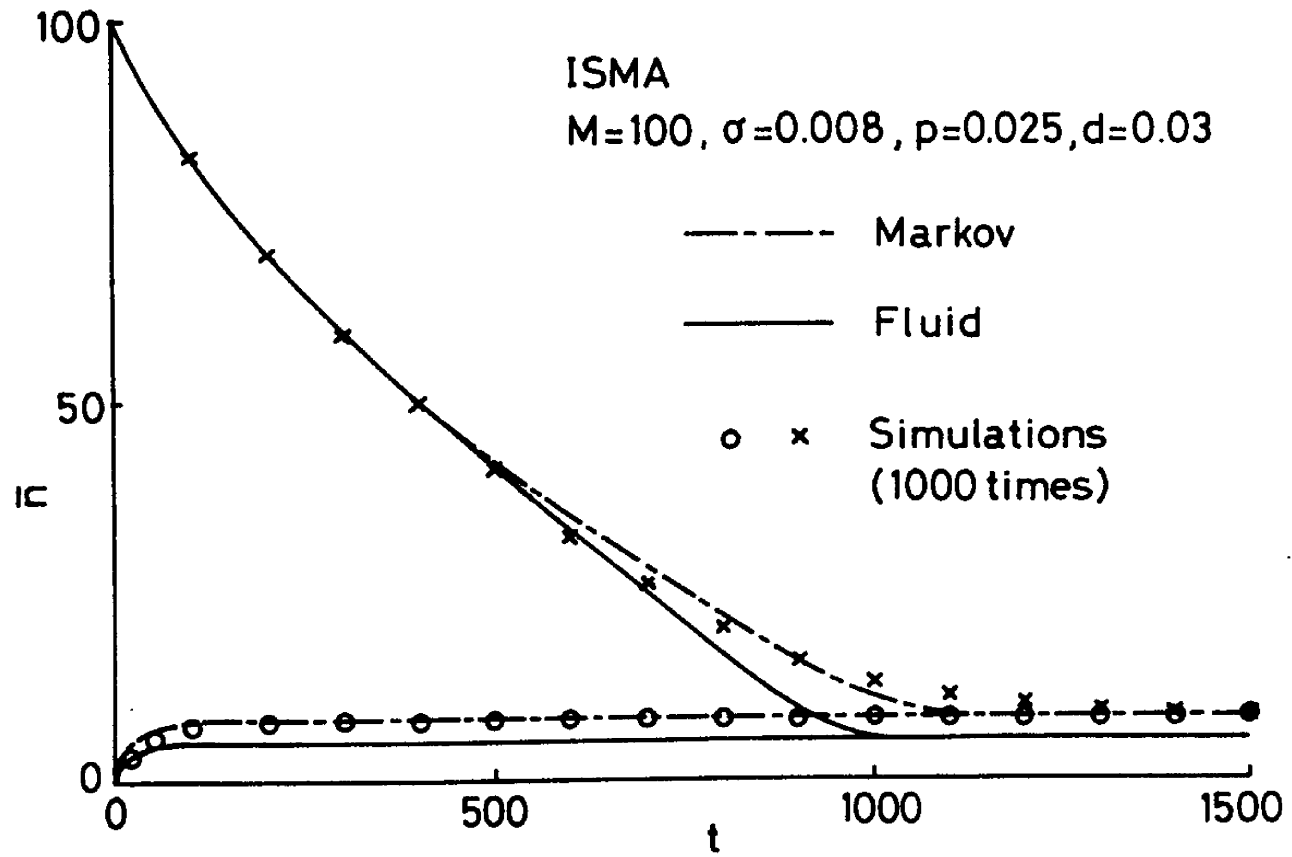


図 A 1 - 5 ISMAシステムの過渡特性

その過渡解析結果は、例えば、 $k$ 番目の隠れ点における特性という形で与えられ、時刻  $t$  における特性とはならない。ここでの解析結果（一点鎖線で示されている）は、

$$\sum_{k=0}^K \bar{T}_c(k) \geq t \quad (A1-22)$$

ただし、

$$\bar{T}_c(k) = \sum_{n=0}^M \{1 + d - (1 - p)^n\} \text{Pr}(n(k)=n) \quad (A1-23)$$

となる最小の  $K$  における特性を用いて、時刻  $t$  における特性を近似したものである。図 A1-5 では、また、1000 回の試行を平均したシミュレーション結果が○及び×印で示されているが、マルコフ解析による解析結果は、それらの結果とよく一致している。一方、過渡流体近似解析による解析結果（実線で示されている）は、全体としてはシステムの過渡特性をよく近似しているものの、 $\bar{n}$  の小さな領域では、かなりの誤差が存在する。これは、 $n$  の確率分布の広がり、 $\bar{n}$  の減少により相対的に大きな意味を持つてくるためであると考えられる<sup>†</sup>。しかし、例えば、スループット特性等のシステム特性に対しては、 $\bar{n}$  の誤差は  $\bar{n}$  自身との相対値としてではなく、 $M - \bar{n}$  との相対値としてその影響が表われる。実際、図中の実線は定常状態 ( $t > 1000$ ) においてもかなりの誤差を含んでいるが、過渡流体近似解析によるシステムの定常特性（例えば、スループット特性）は、図 A1-4 で示した様によい近似を示している<sup>††</sup>。

<sup>†</sup> $n$  の確率分布の広がり、特に、式 (A1-20) の計算において、その影響が大であることが確かめられている。従って、ここでの  $n$  の誤差は、主に隠れ点毎の期待値が任意の観測時点における期待値とは異なることに起因するものである。

<sup>††</sup>スループットは、式 (A1-18) あるいは定常条件式  $S = (M - \bar{n})\sigma$  で求められる。前者は隠れ点毎の  $n$  の分布  $\text{Pr}(n(\infty)=n)$  が、後者は  $M - \bar{n}$  が特性を決定する要因となっている。



## A.2 純アロハ方式の過渡流体近似解析

### A.2.1 システムモデル

1つの局と  $M$ 個の端末からなる集中形の純アロハシステムを考える。各端末で生成されるパケットは全て同じ長さとし、そのパケットの伝送路上での長さを時間の単位とする。ここでは、各端末の動作は図 A2-1 で表される様な IFT 形の動作をするものと仮定する。純アロハシ

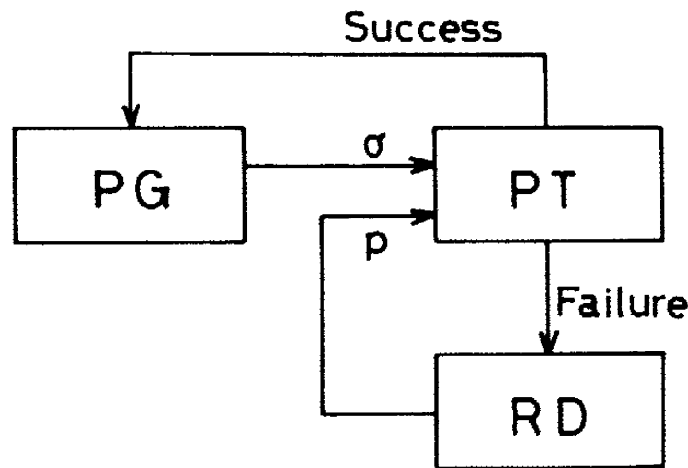


図 A 2 - 1 純アロハシステムにおける端末動作

ステムにおいても、IFT と DFT は互いに等価なモデルに変換できる<sup>[52]</sup>ので、この仮定により一般性が失われることはない。スロット付きアロハ方式及び ISMA 方式では DFT モデルを仮定したのに対して、純アロハ方式においては IFT モデルを仮定する理由は、単に、解析の簡単化のためである。一般に、スロット付きアロハシステムや ISMA システムの様な同期システムの特長解析においては、DFT モデルの方が扱いが容易となるが、純アロハシステムや後に示す CSMA システムの様な非同期システムでは、IFT モデルが有利となる。

IFT モデルでは、パケット生成状態 (PG モード) にある端末は、平均  $1/\sigma$  の指数分布時間後に新パケットを生成し、“直ち”にパケット送信状態 (PT モード) となる。パケットは、そ

の送信期間中に他のパケットとの衝突が“全く”ない時、そしてその時に限り、正しく局に受信されるものとする。純アロハ方式では、スロット付きアロハ方式と違ってパケットの一部のみが他のパケットと重なる場合もあるが、その場合にも伝送は常に失敗するものと仮定する。また、各端末は、パケット送信後瞬時に伝送の成否を知ることができるものと仮定する。パケットの伝送に成功した端末は、PG モードに戻り、次のパケットの生成を行う。伝送に失敗した端末は、ランダム遅延状態 (RD モード) となり、平均  $1/p$  の指数分布時間その状態に待機した後、PT モードに移り、パケットの再送を行う。上述の手順による再送は、パケットの伝送が成功するまで繰り返されるものとする。

### A.2.2 過渡流体近似解析

純アロハシステムにおける局へのパケットの到達状況は、例えば、図 A2-2 の様になる。

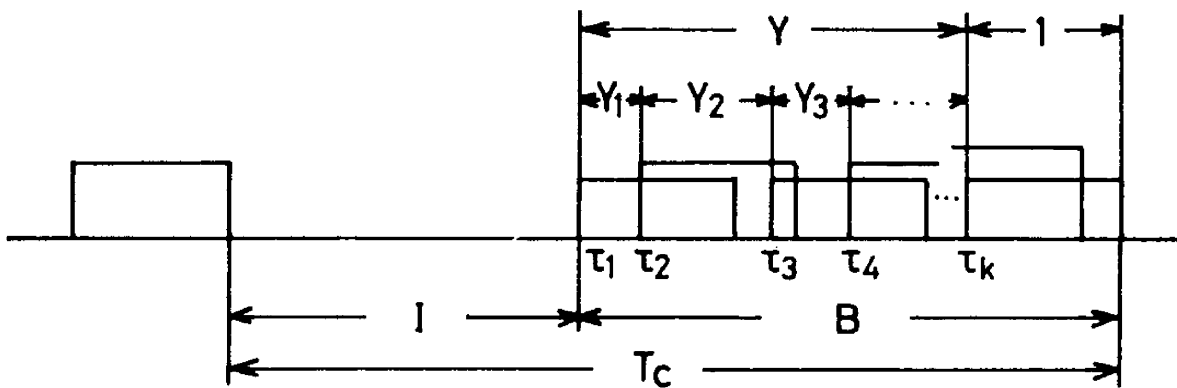


図 A 2 - 2 純アロハシステムの動作例

以下では、一連のパケット到達期間をビジー期間、それ以外の期間をアイドル期間と呼ぶ。また、アイドル期間の開始時点を隠れ点と呼び、ある隠れ点から次の隠れ点までをサイクルと呼ぶ。電波伝搬遅延を 0 と仮定すると、各隠れ点における各端末の動作状態は、PG あるいは RD モードのいずれかにある。端末の状態が、隠れ点において PG モードにある時、その端末

は状態 RA にあると呼び、RD モードにある時、状態 RA にあると呼ぶ。このとき各端末の隠れ点毎の状態変化は、図 A2-3 で表される。図中、 $p_{ij}(i, j = 1, 2)$  は、各状態間の隠れ点毎の遷移確率である。1 番目の隠れ点において、状態 TH, RA にある端末数を表す確率変数をそれぞれ

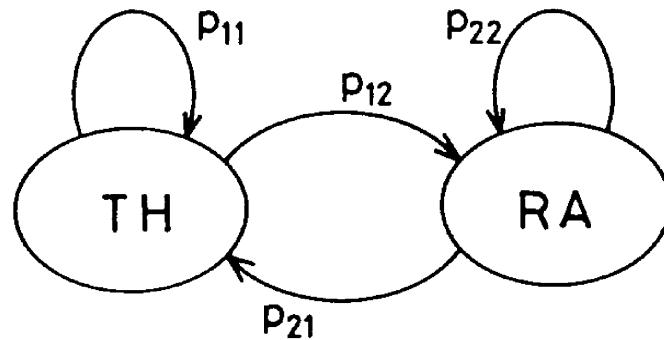


図 A 2 - 3 各端末の状態遷移図 (純アロハシステム)

れ  $m(t), n(t)$  とすると、このシステムはベクトル  $\mathbf{n}(t) = (m(t), n(t))$  を状態ベクトルとする隠れマルコフ連鎖となる (隠れ点では、常に  $m(t) = M - n(t)$  であるから、 $n(t)$  を状態変数とする隠れマルコフ連鎖と考えてもよい)。隠れマルコフ連鎖の解析は、一般に各状態ベクトル間の遷移確率を基に行われるが、過渡流体近似解析では、個々の端末の状態変化に注目して、次の様に解析が行われる。即ち、システムの状態が  $\mathbf{n}$  であるときの各端末の状態遷移確率  $p_{ij}(\mathbf{n})$  (それを要素とする行列を  $P(\mathbf{n})$  とする) を求め、漸化式

$$\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0)) P(\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))) \quad (.42-1)$$

から導出される期待値ベクトル  $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$  を基にシステムの諸特性を解析する。

### 遷移確率 $p_{ij}(n)$ の導出

$i$  番目の隠れ点を時間の原点とし、そのサイクル内の時刻  $\nu$  に PG, RD, PT モードにある端末の数をそれぞれ、 $m(\nu), n(\nu), h(\nu)$  とする。また、このサイクル内で  $i$  番目に到着するパケットの到着開始時刻を  $\tau_i$  とする。この時、サイクル内に局へ到着するパケットの総数  $K$  が  $k$  個である確率は、

$$\Pr(K=k) = \Pr(Y_1 < 1) \Pr(Y_2 < 1) \dots \Pr(Y_k > 1) \quad (A2-2)$$

で与えられる。ここに、 $Y_i$  は  $i$  番目と  $i+1$  番目のパケットの到着時間間隔を表す確率変数であり、 $Y_i = \tau_{i+1} - \tau_i$  である。右辺の各確率は、時刻  $\nu$  におけるトラヒック強度

$$g(\nu) = m(\nu)\sigma + n(\nu)p \quad (A2-3)$$

を用いて、

$$\begin{aligned} \Pr(Y_i < 1) &= 1 - \exp\left(-\int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} g(t)dt\right) & 1 \leq i < k \\ \Pr(Y_k < 1) &= \exp\left(-\int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} g(t)dt\right) \end{aligned} \quad (A2-4)$$

で与えられる。IFT 方式では、各端末のモード変化はパケット送信開始及び終了時点でのみ起こる。従って、アイドル期間中は、 $m(\nu) = m(t), n(\nu) = n(t)$  となる。また、 $\tau_1 < \nu < \tau_2$  では、最初に到着したパケットが新送であれば  $m(\nu) = m(t) - 1, n(\nu) = n(t)$  に、再送であれば  $m(\nu) = m(t), n(\nu) = n(t) - 1$  となる。 $\tau_2 < \nu$  では、それ以前のパケットが新送であったか再送であったか、そしてそれらのパケットの到着が時刻  $\nu$  において継続しているか否か、によって異なった値となる。このため、 $g(\nu)$  の導出には極めて複雑な計算が必要となる。そこでここでは、解析の簡単化のために、サイクル期間中トラヒック強度は変化しないものと仮定し、その値  $g$  を

$$g = g(\nu) = m(t)\sigma + n(t)p \quad 0 < \nu < \tau_k + 1 \quad (A2-5)$$

として解析を行う。この仮定による誤差は、送信途中の端末数  $h(t)$  及びサイクル中に生成されるパケット数が  $m(\nu), n(\nu)$  に比べて少ない時、僅かであると考えられる。実際、そうした値

は、安定に動作している通常のシステムでは極めて僅かである。この仮定により、式 (A2-2) の計算は大幅に簡単化され、

$$\Pr(K=k) = (1 - e^{-g})^{k-1} e^{-g} \quad (A2-6)$$

となる。状態 TH から RA への遷移確率  $p_{11}$  は、サイクルの開始時点  $\nu = 0$  において、PG モードにある端末が、サイクルの終了時点  $\nu = \tau_k + 1$  においても PG モードにある確率と言い換えることができ、

$$\begin{aligned} p_{11} &= \Pr(\text{注目端末がパケットを送信しない} \mid K > 1) \Pr(K > 1) + \Pr(K = 1) \\ &= \sum_{k=2}^{\infty} [(1 - \sigma/g)k \Pr(K=k)] + \Pr(K=1) \\ &= \left\{ 1 + \frac{(1 - e^{-g})(1 - \sigma/g)^2}{1 - (1 - e^{-g})(1 - \sigma/g)} \right\} \cdot e^{-g} \end{aligned} \quad (A2-7)$$

で与えられる。この  $p_{11}$  を用いて、

$$p_{12} = 1 - p_{11} \quad (A2-8)$$

が得られる。一方、状態 RA にある端末が状態 TH へ遷移する確率  $p_{21}$  は、その端末（注目端末）がパケットを送信し、それが成功となる確率（即ち、そのサイクルで送信される唯一つのパケットが、注目端末からのものである確率）に等しく、

$$p_{21} = \Pr(\text{注目端末がパケットを送信する} \mid K = 1) \Pr(K = 1) = \frac{p}{g} e^{-g} \quad (A2-9)$$

で求められる。また、 $p_{22}$  は、この  $p_{21}$  を用いて、

$$p_{22} = 1 - p_{21} \quad (A2-10)$$

で与えられる。

過渡流体近似解析では、システムの定常特性は、漸化式 (A2-1) から求められる極限ベクトル  $\bar{\mathbf{n}}(\infty \mid \mathbf{n}(0))$  を基に解析される。即ち、スループット  $S$  は、再生定理<sup>[2]</sup>を用いて、

$$S = \frac{\Pr(K=1)}{\bar{T}_c(\bar{\mathbf{n}}(\infty \mid \mathbf{n}(0)))} \quad (A2-11)$$

で求められる。ここに、 $\bar{T}_c(n)$  はシステム状態が  $n$  の時の平均サイクル長であり、次の様にして求められる。

### $\bar{T}_c(n)$ の導出

システム状態が  $n = (m, n)$  のサイクルにおけるアイドル期間及びビジー期間の長さを表す確率変数をそれぞれ、 $I(n)$ 、 $B(n)$  とする。このとき、明らかに、

$$\bar{T}_c(n) = \bar{I}(n) + \bar{B}(n) = \bar{I}(n) + \bar{Y}(n) + 1 \quad (A2-12)$$

である。ここに、 $Y(n)$  は、最初のパケット到着開始から最後のパケット到着開始までの時間を表す確率変数であり、図 A2-2 の記号を用いると  $Y(n) = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{k-1}$  となる。従って、その確率密度関数は、

$$f_{(Y(m)=y)} = \Pr(k=1)\delta(y) + \sum_{k=2}^{\infty} f_{(Y_1+Y_2+\dots+Y_{k-1}=y|K=k)} \Pr(K=k) \quad (A2-13)$$

で与えられる。ここに、 $\delta(y)$  はデルタ関数である。 $f_{(Y(m)=y)}$  のラプラス変換を  $F^*(s)$ 、 $f_{(Y_i=y)}$  のラプラス変換を  $F_i^*(s)$  とすると、上式のラプラス変換は、

$$F^*(s) = \Pr(k=1) + \sum_{k=2}^{\infty} F_1^*(s)F_2^*(s)\dots F_{k-1}^*(s) \Pr(k=k) \quad (A2-14)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} F_i^*(s) &= \int_0^1 \frac{ge^{-gy}e^{-sy}}{\Pr(y_i < t)} dy \\ &= \frac{g}{g+s} \cdot \frac{1 - e^{-(g+s)}}{\Pr(y_i < 1)} \end{aligned} \quad (A2-15)$$

であるから、

$$F^*(s) = \frac{(g+s)e^{-g}}{s + ge^{-(g+s)}} \quad (A2-16)$$

となる。従って、

$$\bar{Y}(n) = - \left. \frac{dF^*(s)}{ds} \right|_{s=0} = \frac{1 - e^{-g} - ge^{-g}}{ge^{-g}} \quad (A2-17)$$

が求められる。一方、

$$\Pr(t < \tau) = 1 - e^{-g\tau} \quad (\text{A2-18})$$

であるから、

$$\bar{T} = \frac{1}{g} \quad (\text{A2-19})$$

となり、

$$\bar{T}_c(n) = \frac{1}{ge^{-g}} \quad (\text{A2-20})$$

となる。

上式を式 (A2-11) に代入することにより、

$$S = ge^{-2g} \quad (\text{A2-21})$$

が求められる。この式は、S-G 解析においてよく知られた式<sup>[1]</sup>と同じ形をしているが、S-G 解析における  $G$  は独立変数であるのに対して、ここでの  $g$  は、式 (A2-1) から求められた極限ベクトル  $\bar{n}(\infty | n(0))$  の関数であり、式 (A2-5) を用いて計算される点に注意する必要がある。

### A.2.3 解析結果の考察

純アロハシステムの過渡流体近似解析においては、解析の簡単化のために、サイクル途中のトラヒック強度に関して近似を行っている。そのためここでは、シミュレーションを用いて、トラヒック強度の簡単化及び過渡流体近似解析による近似誤差の影響を考察する。なお、純アロハシステムや後に述べる CSMA システムの様な非同期システムでは、スロット付きアロハシステムや ISMA システムの様にマルコフ解析により厳密解を求めることは不可能であると考えられる。

図 A2-4 は、スループット特性に関して過渡流体近似解析による解析結果とシミュレーション結果を比較したものである。ここで、過渡流体近似解析による解析結果は、 $n(0) = (0, M)$  として漸化式 (A2-1) から求めた極限ベクトル  $\bar{n}(\infty | n(0))$  を基に、式 (A2-11) を用いて計算した

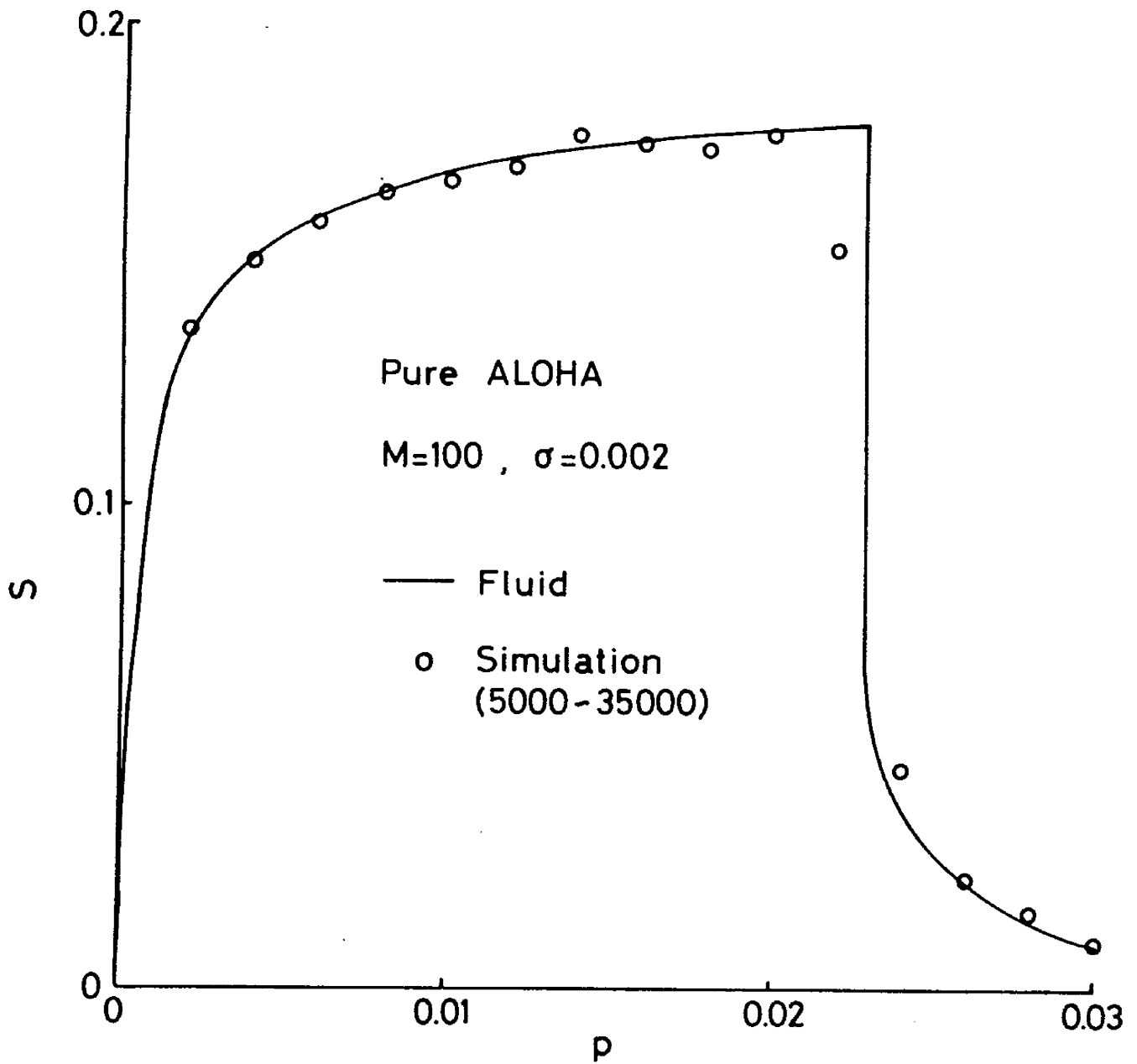


図 A 2 - 4 純アロハシステムのスループット特性



ものである。シミュレーション結果は、全ての端末が RA モードにある状態から開始して 35000 パケット長時間のシミュレーションを行い、5000 ~ 35000 の 30000 パケット長時間について集計した結果である。ここでも、平衡点に着目した解析に特有の誤差が僅かに見受けられるものの、全体として解析結果とシミュレーション結果は極めてよく一致している。

図 A2-5 は、 $p = 0.018$  とした時の過渡特性を、初期状態  $n(0) = (M, 0)$  及び  $(M, 0)$  について示したものである。シミュレーション結果は、4000 パケット長時間のシミュレーションを 1000 回行って集計した結果であり、それぞれ○及び×印で示されている。1000 回という試行回数は必ずしも十分なものではないが、それでもシミュレーション結果と解析結果はよく一致し、過渡流体近似解析は純アロハシステムの過渡特性解析においても有効であるといえる。

### A.3 CSMA 方式の過渡流体近似解析

#### A.3.1 システムモデル

ここでは、次の様な CSMA システムを考える。網の構成は、他のシステムと同様、 $M$  個の端末が 1 つの中心局にパケットを送信する集中形であると仮定する。また、各端末は互に見通し内にあり、隠れ端末はないものとする。局は地理的にもシステムの中心にあるものとし、最遠の端末から局までの電波伝搬時間は、パケット長を単位時間として、 $\alpha$  (従って、最も離れた端末対間の電波伝搬時間は  $2\alpha$ ) とする。各端末の動作は、純アロハ方式の場合と同様、図 A3-1 の様な IFT 形の動作をするものとする。即ち、パケット生成状態 (PG モード) にある端末は、平均  $1/\alpha$  の指数分布時間後にパケットを生成し、チャンネルの観測状態 (CS モード) となる。チャンネルの観測を行った結果、他の端末からのパケット (キャリア) が感知されなければ、PT モードとなりパケットの送信を行う。キャリアが観測されれば、パケットの送信を見合わせランダム遅延状態 (RD モード) となる。RD モードにある端末は、平均  $1/p$  の指数分布時間間隔で CS モードに移り、チャンネルの観測を行う。このとき他の端末からのパケットが観測されなければ、パケットの送信を行い、観測されれば送信を見合わせ、RD モードに戻る。

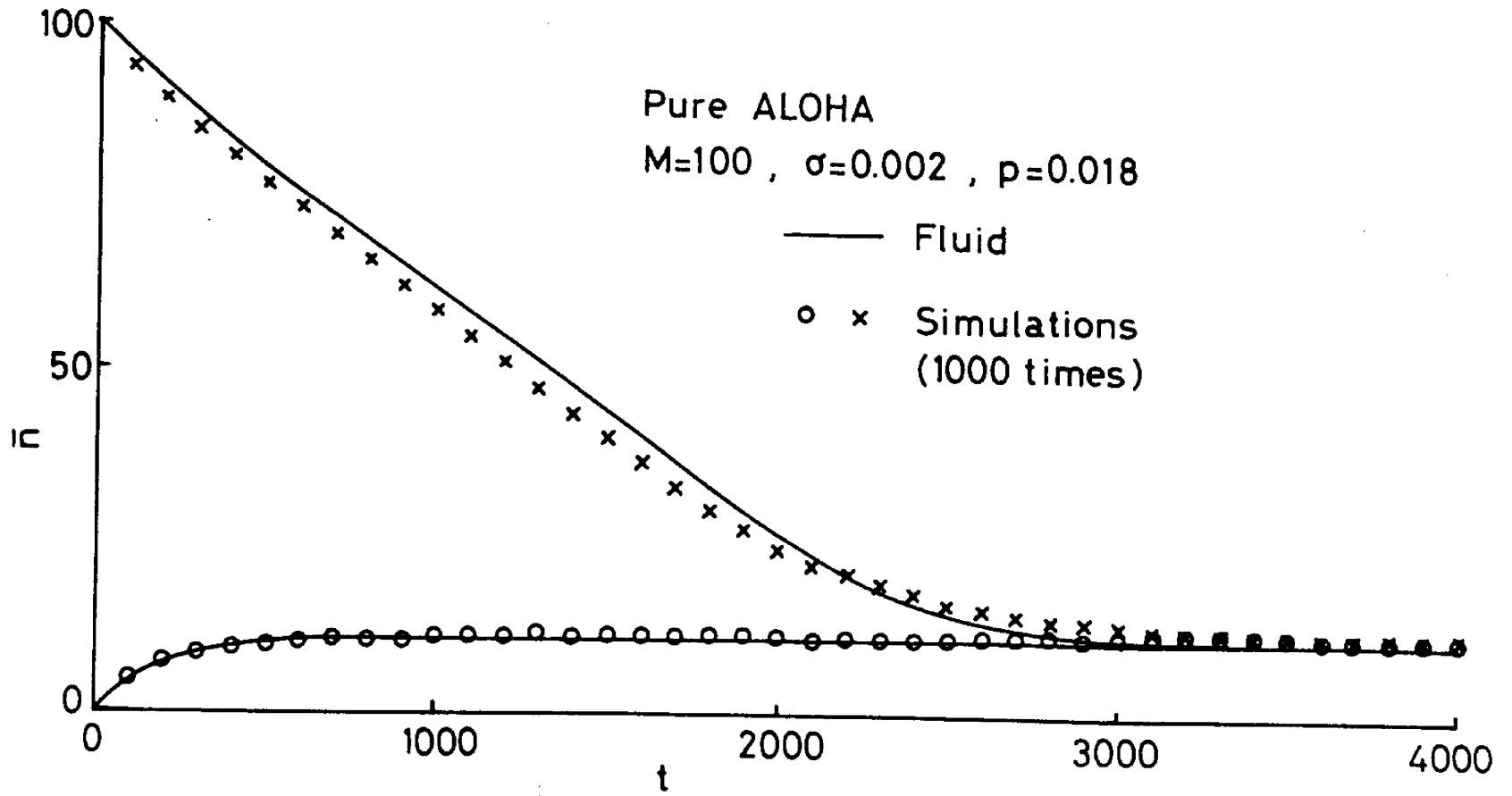


図 A 2 - 5 純アロハシステムの過渡特性

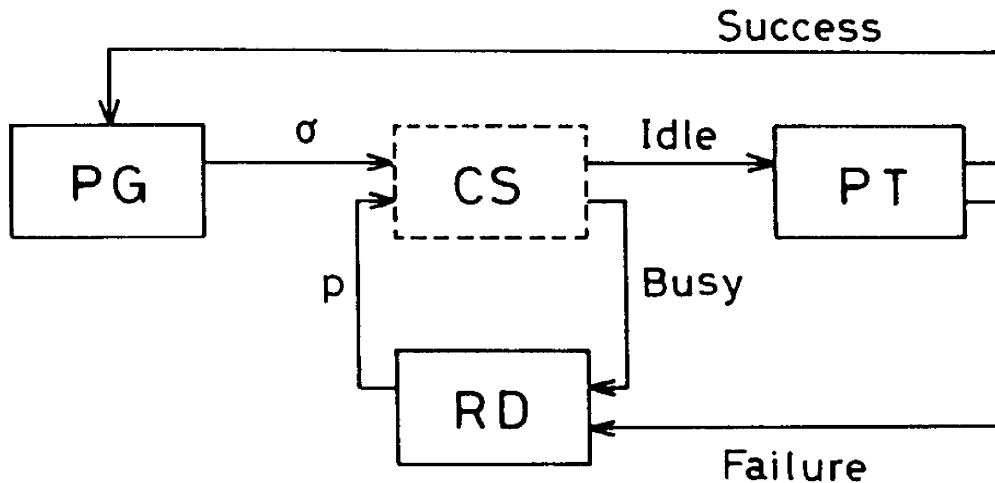


図 A 3 - 1 CSMA システムにおける端末動作

(Non-persistent CSMA<sup>[11]</sup>)。送信されたパケットは他のパケットとの衝突がないとき、そしてその時に限り、正しく伝送されるものと仮定する。各端末はパケット送信後直ちに伝送の成否を知ることができるものとし、パケットの伝送に成功した端末は、PG モードに戻って、次のパケットの生成を行う。失敗した端末は RD モードに戻り、上述の手順による再送を繰り返す。なお、CSMA 方式においても、DFT 形と IFT 形システムは互いに等価なシステムへ変換することができる<sup>[3]</sup>。

CSMA 方式の特性解析においては、一般に、信号観測遅れ ( $= \langle \text{端末間の電波伝搬時間} \rangle + \langle \text{キャリアの有無判定に要する時間} \rangle$ ) に関して、次の様な簡単化が行われる。即ち、全ての端末対間の信号観測遅れは等しく、その値は最も離れた端末対間のそれ  $2a + c_T$  に等しいものと仮定される。ここに、 $c_T$  はキャリアの有無判定に要する時間である。この仮定を用いて導出される解析結果は、システム特性の下限値を見積るという意味で有用であると考えられているが、それが実際のシステムの近似として有効であるか否かの検討は、現段階では不十分である。端末間距離の違いを考慮した CSMA システムの特性解析が困難な理由は、各端末の伝送成功確率はその端末位置に依存するためである。過渡流体近似解析は端末の位置状態を考慮した解

析が可能であり、将来はCSMAシステムにおける遠近問題への適用も考えられるが、ここでは過渡流体解析の紹介を目的としているため、従来と同様、全ての端末対間の信号観測遅れは等しく、その値  $d$  は  $2a + c_T$  である、と仮定して以下の解析を行う。

### A.3.2 過渡流体近似解析

図 A3-2 は、中心局におけるパケット到達状況の一例である。時刻  $\tau$  に局に到達したパケットは  $\tau + a + c_T$  までに全ての端末に観測される。従って、他の端末がパケットを送信する可能

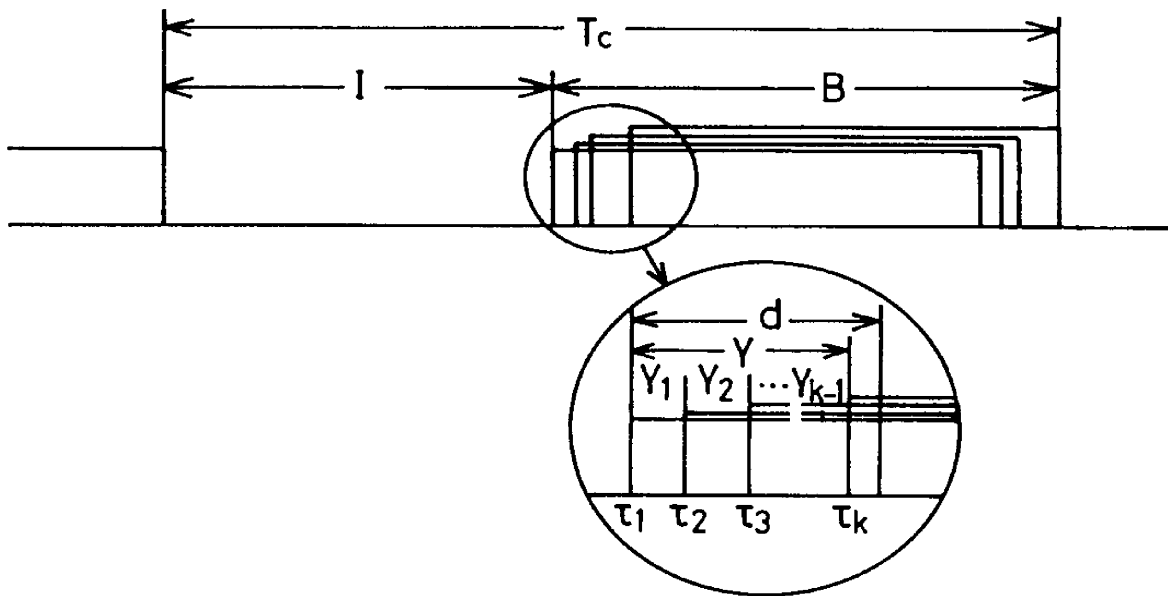


図 A 3 - 2 CSMAシステムの動作例

性があるのは、時刻  $\tau + a + c_T$  までである。時刻  $\tau + a + c_T$  までに送信されたパケットは、時刻  $\tau + 2a + c_T$  までに局に到達する。一方、全ての端末がビジー期間の終了を知るには、局におけるビジー期間終了後  $a + c_T$  かかることになる。このように、CSMA方式では端末毎にチャネル状態の観測結果が異なったものとなる。ここでは、局が観測するチャネルの状態に基づいて隠れ点を設定し、純アロハ方式の場合と同様な手順で過渡流体近似解析を行う。即ち、局にお

けるアイドル期間の開始時刻を隠れ点とし、隠れ点毎のシステム状態の変化を解析する。各隠れ点毎の各端末の状態変化は、純アロハ方式の場合と同様、図 A3-3 で表される。図中、状態

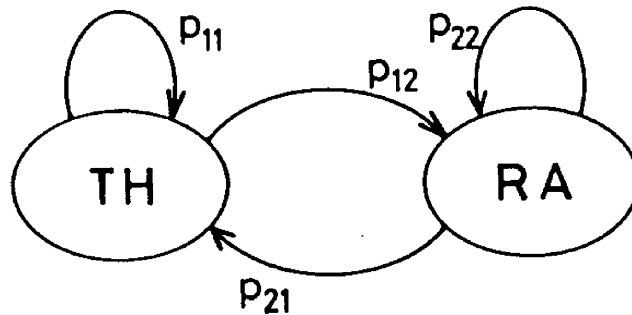


図 A 3 - 3 各端末の状態遷移図 (CSMAシステム)

TH、RA は、それぞれ、その端末が隠れ点<sup>†</sup>において PG、RD モードにあることを表している。 $t$  番目の隠れ点において、状態 TH、RA にある端末の数をそれぞれ  $m(t)$ 、 $n(t)$  とし、ベクトル  $\mathbf{n}(t) = (m(t), n(t))$  をシステムの状態ベクトルと呼ぶ。また、システムが状態  $\mathbf{n}$  にある時の各端末の状態遷移確率を  $p_{ij}(\mathbf{n})(i, j = 1, 2)$  で表し、それらを要素とする行列を  $\mathbf{P}(\mathbf{n})$  とする。この時、各種のシステム特性は、純アロハ方式の場合と同様、漸化式

$$\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0)) = \bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0)) \mathbf{P}(\bar{\mathbf{n}}(t+1 | \mathbf{n}(0))) \quad (A3-1)$$

を用いて求められたシステム状態の期待値ベクトル  $\bar{\mathbf{n}}(t | \mathbf{n}(0))$  を基に解析される。システム状態が  $\mathbf{n}$  である時の各端末の状態遷移確率  $p_{ij}(\mathbf{n})(i, j = 1, 2)$  は次の様にして求められる。

<sup>†</sup>厳密には、チャネル状態がアイドルとなったことをその端末が観測した時点。

$p_{ij}(i, j = 1, 2)$  の導出

$p_{ij}$  の導出も、基本的には純アロハ方式と同様な手順で行われる。 $t$  番目の隠れ点を時間の原点とし、時刻  $\nu$  におけるトラヒック強度  $g(\nu)$  を

$$g(\nu) = m(\nu)\sigma + n(\nu)p \quad (A3-2)$$

とする。アイドル期間中は、システムの状態は変化しないので、ビジー期間開始直前のトラヒック強度  $g(\tau_1 - \Delta\nu)$  も、 $m(t)\sigma + n(t)p$  である。ただし、 $\tau_1$  は、そのサイクル内で  $i$  番目に到着するパケットの到着開始時刻を表し、 $\Delta\nu$  は、微小時間を表す。このサイクルで送信されたパケットが成功する確率、即ち、このサイクル内で送信されるパケットの総数  $K$  が 1 である確率は、 $(\tau_1, \tau_1 + d)$  間に他のパケットが到着しない確率に等しい。ここに  $d$  は、最遠の端末対間の信号観測遅れであり、 $d > 2a + c_T$  である。IFT 形のシステムでは、パケットの送信がない限り、トラヒック強度は変化しないので、

$$\Pr(K=1) = e^{-dg(\tau_1 + \Delta\nu)} \quad (A3-3)$$

となる。 $g(\tau_1 + \Delta\nu)$  は、最初のパケットが新送であるか、再送であるかによって異なり、新送の場合、

$$g(\tau_1 + \Delta\nu) = \{m(t) - 1\}\sigma + n(t)p \quad (A3-4)$$

再送の場合、

$$g(\tau_1 + \Delta\nu) = m(t)\sigma + \{n(t) - 1\}p \quad (A3-5)$$

となる。従って、サイクル内で到着する  $i$  番目のパケットが、新送であるか、再送であるかを表す確率変数として、

$$Tr(i) = \begin{cases} IT & \text{新送の時} \\ RT & \text{再送の時} \end{cases}$$

を用いるとすると、

$$\Pr(K=1|Tr(t)=IT) = e^{-d\{m(t)-1\}\sigma + n(t)p} \quad (A3-6)$$

$$\Pr(K=1|Tr(1)=RT) = e^{-d[m(t)\sigma + \{n(t)-1\}p]} \quad (A3-7)$$

となる。次に、 $k > 1$  の場合について  $\Pr(K=k)$  を求めるために、純アロハ方式の場合と同様、トラヒック強度  $g(\nu)$  に関して次の様な近似を用いることにする。即ち、 $\tau_1 < \nu < \tau_1 + d$  に対して、

$$g(\nu) = g(\tau_1 + \Delta\nu) \quad (A3-8)$$

と仮定する。なお、一般に  $d \ll 1$  であるので、以下の議論からもわかる様に、この仮定のシステム特性への影響は極めて僅かであると考えられる。また、CSMA 方式では、1つの端末が1つサイクル内で送信するパケットはたかだか1個であるので、 $g(\nu)$  は  $\tau_1 < \nu < \tau_1 + d$  において非増加関数となる。即ち、この仮定により、送信されるパケット数は多めに見積もられる。ここでのパケット送信は伝送の失敗を引き起こすので、この近似はシステム特性を安全側に評価することになる。以上の仮定により、 $Tr(1) = IT$  のとき  $g(\tau_1 + \Delta\nu) = g_I$ 、 $Tr(1) = RT$  のとき  $g(\tau_1 + \Delta\nu) = g_R$  とすると、

$$\Pr(K=k|Tr(1)=IT) = \frac{(g_I d)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-g_I d} \quad (A3-9)$$

$$\Pr(K=k|Tr(1)=RT) = \frac{(g_R d)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-g_R d} \quad (A3-10)$$

が得られる。以下では、この  $\Pr(K=k)$  を用いて  $p_{ij}(i, j = 1, 2)$  の導出を行うが、記述を簡略化するため次の様な記号を用いることにする。即ち、 $m(t) \rightarrow m, n(t) \rightarrow n, p_{ij}(n) \rightarrow p_{ij}, g(\tau_1 - \Delta\nu) = m\sigma + np \rightarrow g$  と略記し、局への到着パケットが PG あるいは RD モードにある注目端末  $T_{ref}$  からのものであるという事象を、それぞれ  $IT_{ref}, RT_{ref}$  で表すことにする。また、 $p_{11}$  の導出において、解析の簡単化のために、次の様な近似を行う。CSMA 方式では、状態 TH から RA への遷移はパケットの送信を伴ったものだけでなく、 $(\tau_1 + d, \tau_1 + Y + 1)$  間に新しいパケットが生成された場合にも起こる。ここに、 $Y$  は、 $K = 1$  のとき  $Y = 0$  であり、 $K > 1$  のとき  $Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{k-1}$ 、ただし  $Y_i = \tau_{i+1} - \tau_i$  である。しかし、一般に  $d \ll 1$  であり、 $Y < d$  であるから、ここでは、 $Y$  の正確な分布を導出して  $(\tau_1 + d, \tau_1 + Y + 1)$  間の新パケットの生成確率を求める代わりに、 $(\tau_1 + d, \tau_1 + d + 1)$  間のそれで近似する。

これにより、 $p_{ij}(i, j = 1, 2)$  は、それぞれ次の様に求められる。

$$\begin{aligned}
p_{11} &= \Pr(Tr(1) = IT_{r,f}, K = 1) \\
&+ \Pr(\text{注目端末が } (\tau_1 + d, \tau_1 + d + 1) \text{ 内でパケットを生成しない}, Tr(1) \neq IT_{r,f}, K = 1) \\
&+ \sum_{k=2}^{\infty} \Pr(\text{注目端末が } (\tau_1 + d, \tau_1 + d + 1) \text{ 内でパケットを生成しない}, \\
&Tr(1) \neq IT_{r,f}, Tr(2) \neq IT_{r,f}, \dots, Tr(k) \neq IT_{r,f}, K = k) \\
&= \frac{\sigma}{g} e^{-g_1 d} + \left\{ \frac{(m-1)\sigma}{g} e^{-g_1 d} + \frac{np}{g} e^{-g_R d} \right\} e^{-\sigma} + \sum_{k=2}^{\infty} \left[ \frac{(m-1)\sigma}{g} \left(1 - \frac{\sigma}{g_1}\right)^{k-1} \frac{(g_1 d)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-g_1 d} \right. \\
&\quad \left. + \frac{np}{g} \left(1 - \frac{\sigma}{g_R}\right)^{k-1} \frac{(g_R d)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-g_R d} \right] e^{-\sigma} \\
&= \frac{\sigma}{g} e^{-g_1 d} + \left(1 - \frac{\sigma}{g}\right) e^{-\sigma(1+d)}
\end{aligned} \tag{A3-11}$$

$$p_{12} = 1 - p_{11} \tag{A3-12}$$

$$p_{21} = \Pr(Tr(1) = RT_{r,f}, K = 1) = \frac{p}{g} e^{-gnd} \tag{A3-13}$$

$$p_{22} = 1 - p_{21} \tag{A3-14}$$

CAMA 方式においても、スループット等のシステム特性を導出するためには、システム状態が  $n$  のときの平均サイクル長  $\bar{T}_c(n)$  を求める必要がある。以下では、その導出方法を示す。

### 平均サイクル長の導出

サイクル長  $T_c$  は、アイドル期間長を  $I$  とすると、 $T_c = I + Y + 1$  であるが、 $p_{ij}$  の導出の場合と同様、解析の簡単化のために、 $Y = d$  と近似して、 $T_c = I + d + 1$  とする。 $I$  は平均  $1/g$  の指数分布に従うので、システム状態が  $n$  のとき、サイクル長  $T_c(n)$  の確率密度関数は、

$$\Pr(T_c(n) = t) = g e^{-g(t-1-d)} \tag{A3-15}$$

で与えられる。従って、その平均  $\bar{T}_c(n)$  は、

$$\bar{T}_c(n) = 1 + 1/g + d \tag{A3-16}$$



となる。

システムが状態  $\mathbf{n}$  にあるときの 1 サイクル当りの伝送成功確率  $P_S(\mathbf{n})$  は、

$$P_S(\mathbf{n}) = \Pr(\kappa=1) = \frac{m\sigma}{g} e^{-gtd} + \frac{np}{g} e^{-gnd} \quad (\text{A3-17})$$

であるから、このときのスループット  $S(\mathbf{n})$  は、

$$S(\mathbf{n}) = \frac{P_S(\mathbf{n})}{\bar{T}_c(\mathbf{n})} = \frac{\Pr(\kappa=1)}{\bar{T}_c(\mathbf{n})} \quad (\text{A3-18})$$

で求められる。

### A.3.3 解析結果の考察

図 A3-4 は、 $M = 100, \sigma = 0.08, d = 0.02$  とした時のスループット特性を示したものである。ここで、過渡流体近似解析による解析結果は、 $\mathbf{n}(0) = (0, M)$  とした漸化式 (A3-1) から求めた極限ベクトル  $\bar{\mathbf{n}}(\infty | \mathbf{n}(0))$  を基に、式 (A3-18) を用いて計算したものであり、シミュレーション結果は、 $\mathbf{n}(0) = (0, M)$  を初期状態として 35000 パケット長時間のシミュレーションを行い、5000 ~ 35000 の 30000 パケット長時間について集計した結果である。また、図 A3-5 は、 $p = 0.64$  としたのときの過渡特性をシミュレーション結果とともに示したものである。ここでシミュレーション結果は、 $t = 1000$  までのシミュレーションを 1000 回を行い、その平均をとったものである。いずれの図においても、他のランダムアクセスシステムの場合と同様、解析結果はシミュレーション結果とよく一致し、過渡流体近似解析は CSMA システムの特性解析に対しても有効であることが確かめられる。

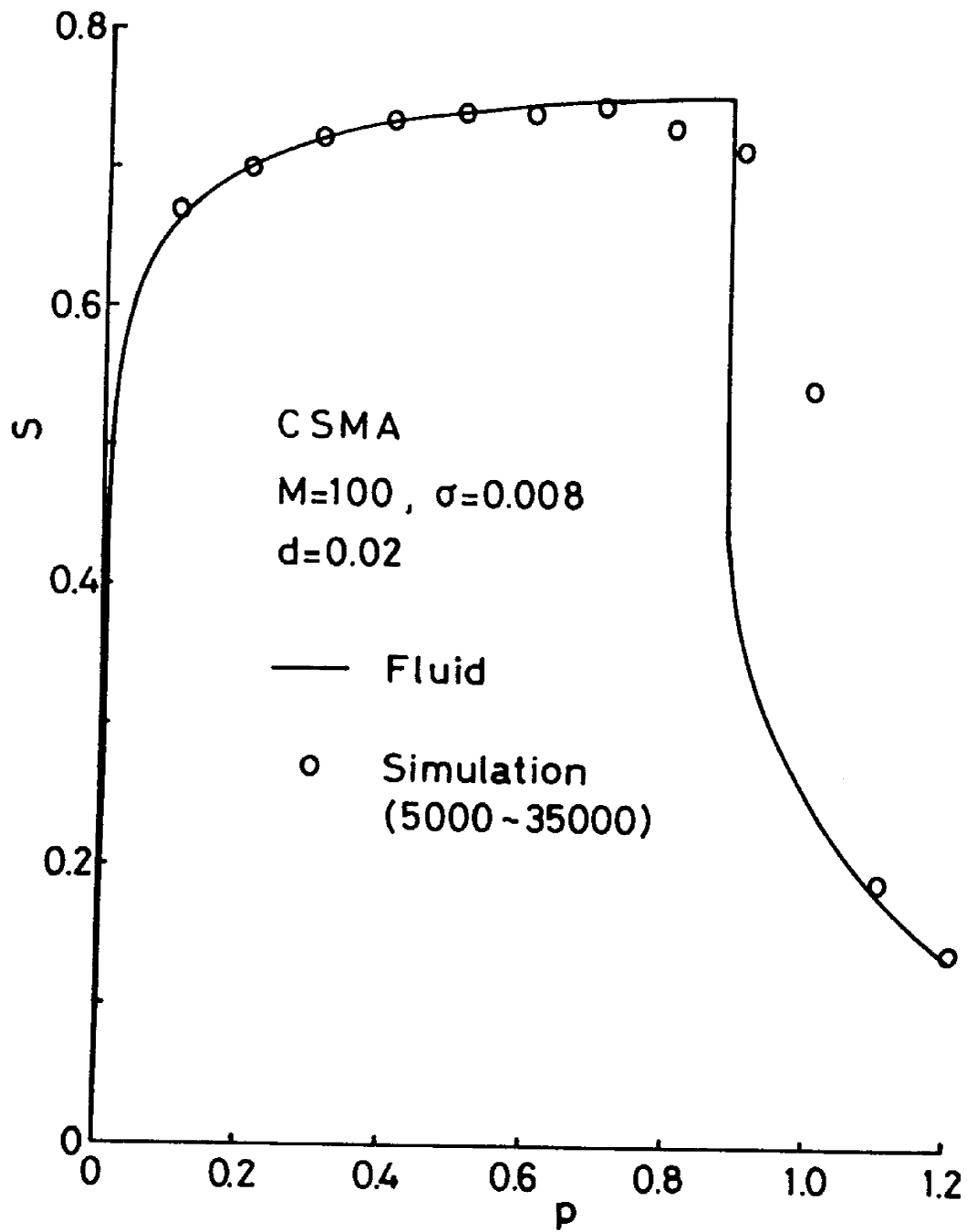


図 A 3 - 4 CSMA システムのスループット特性

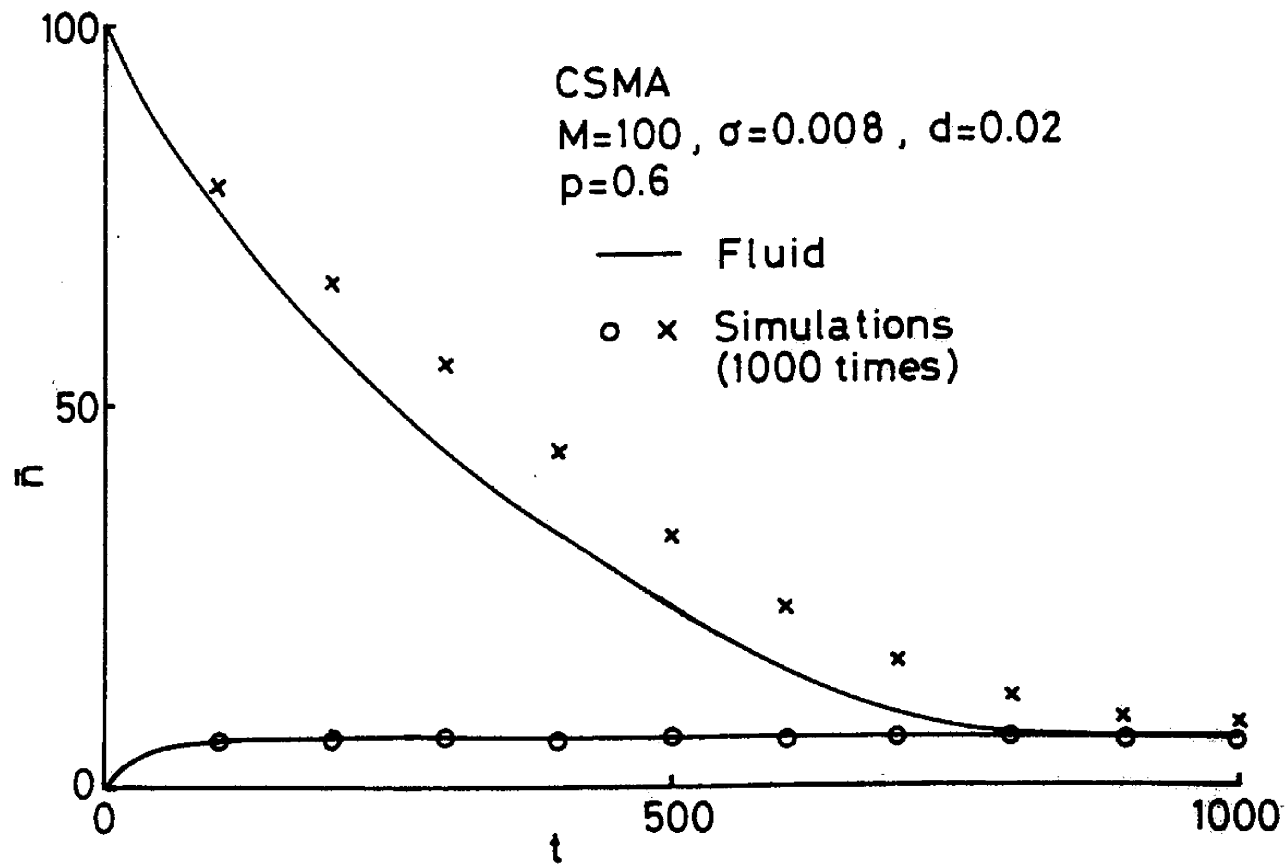


図 A 3 - 5 CSMA システムの過渡特性

## 参考文献

- [1] Abramson,N.:“THE ALOHA SYSTEM -- Another Alternative for Computer Communications”, in Proc. 1970 Fall Joint Comput. Conf.,AFIPS Press,37,pp.281-285(1970).
- [2] Kleinrock,L. and Lam,S.S.:“Packet Switching in Multiaccess Broadcast Channel:Performance Evaluation”.IEEE Trans.COM-23.4,pp.410-423(Apr. 1975).
- [3] 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, pp.959-966(1977-08).
- [4] Kobayashi,H., Onozato,Y., and Huynh,D.:“An Approximate Method for Design and Analysis of an ALOHA System”, IEEE Trans.COM-25 .1, pp.148-157(Jan.1977).
- [5] Tobagi,A.F.:“Analysis of a Two-hop Centralized Packet Radio Network. Part I: slotted ALOHA”.IEEE Trans.,COM-28,2,pp.196-207(Feb.1980).
- [6] 福田 明:“アロハ形システムの動特性について”. 信学論 (D),J60-D,pp.649- 650(1977-08).
- [7] 榊原 勝己, 芹澤 睦:“複数の基地局を備えたスロット付きアロハ方式の捕そく効果を考慮した特性評価”. 信学論 (B-II),J73-B-II,11,pp.612-620(1990-11).
- [8] L.Kleinrock:“Queueing System, vol.1:Theory”,chap.2,John Wiley & Sons(1975).
- [9] 福田 明, 長谷川 正, 椋本 介士:“適応アロハシステム”. 信学論 (B),J62-B,pp.229-236(1979-3).
- [10] Namislo,C.:“Analysis of mobile radio slotted ALOHA Networks”.IEEE J. Sel.Areas Commun.,SAC-2,4,pp.583-588(July 1984).
- [11] Gallager,R.G.:“Information Theory and Reliable Communication”, John Wiley & Sons Inc., pp.97-111(1968).

- [12] Shwartz,A. and Sidi,M.: "Erasure,Capture and Noise Errors in Controlled Multiple-Access Networks", IEEE Trans. Commun.,37,11, pp.1228-1231(Nov.1989)
- [13] 椋本 介士, 福田 明: "アロハシステムにおける送信間隔分布について", 信学論 (B-I),J74-B-I,4,pp.380-383(1991).
- [14] DaSilva,J.S., Hafez,H. and Mahmoud,S.A.: "Optimal packet length for fading land mobile data channels", ICC'80 61.3.1-61.3.5(1980).
- [15] French,R.C.: "The effect of Fading and Shadowing on Channel Reuse in Mobile Radio", IEEE Trans. Veh. Technol. VT-28, 3, pp.171-181(Aug.1979).
- [16] 笹岡 秀一: "緩慢なレイリーフェージング下におけるデジタル陸上移動通信路のブロック内誤り発生確率", 信学論 (B-II), J73-B-II, 11, pp691-698(Nov.1990).
- [17] Lutz,E.: "Land Mobile Satellite Channel—Recording and Modelling". Fourth Internat. Conf. on Satellite Systems for Mobile Commun. and Navig. London,17-19,pp15-19(Oct.1988).
- [18] Ho,K.K.Y., Rao,R.R. and Wolf,J.K.: "Random-Access Systems with a Time-Varying Channel", IEEE Trans. Commun.,38,9, pp.1293-1297(Sept. 1990).
- [19] Sinha,R. and Gupta,S.C.: "Performance Evaluation of a Protocol for Packet Radio Network in Mobile Computer Communications", IEEE Trans. VT-33,3,pp.250-258(Aug.1984).
- [20] Metzner,J.J.: "On Improving Utilization in ALOHA Networks", IEEE Trans. Commun., COM-24,4, pp.447-448(Apr. 1976).
- [21] Roberts,J.A. and Healy,T.J.: "Packet Radio Performance Over Slow Rayleigh Fading Channels", IEEE Trans. Commun., COM-28,2, pp.279-286(Feb. 1980).

- [22] Arnbak,J.C. and Blitterswijk,W. :“Capacity of Slotted ALOHA in Rayleigh-fading Channels”, IEEE J.Sel.Areas Commun. SAC-5. 2. pp.261-269(Feb. 1987).
- [23] Habbab,I.M.I., Mohsen,K., and Sundberg,C.W.:“ALOHA with Capture Over Slow and Fast Fading Radio Channels with Coding and Diversity”. IEEE J.Sel.Areas Commun.vol.7. 1. pp.79-88(Jan. 1989).
- [24] Davis,D.H. and Gronemeyer,S.A.:“Performance of Slotted ALOHA Random Access with Delay Capture and Randomized Time of Arrival”, IEEE Trans. Commun. COM-28.5. pp.703-710(May 1980).
- [25] Wen,J. and Chang,J. :“The Effect of Multipath Interference on the Performance of Packet Radios”, IEEE Trans. Commun., COM-38. 6. pp.740-743(June 1990).
- [26] Goodman,D.J. and Saleh,A.A.M.:“The Near/Far Effect in Local ALOHA Radio Communications”, IEEE, Trans.Veh. Technol., VT-36. 1. pp.19-27(Feb.1987).
- [27] Ramamurthi,B., Saleh,A.A.M., and Goodman,D.J.:“Perfect-Capture ALOHA for Local Radio Communications”, IEEE. SAC-5, 5. pp806-814(June 1987).
- [28] Lau,C. and Leung,C.:“A slotted ALOHA Packet Radio System with Multiple Antennas and Receivers”, IEEE Trans. Veh. Technol., vol.39. 3. pp218-226(Aug. 1990).
- [29] Schwartz,S.C. and Yen,Y.S.:“On the Distribution Function and Moments of Power Sums with Log-Normal Components”, Bell Syst. Tech. J. pp.1441-1462(Sep.1982).
- [30] Rappaport,T.S.:“The Wireless Revolution”. IEEE. Comm., Magazine., pp.60-71(Nov.1991).
- [31] Sinha,R. and Gupta,S.C.:“Mobile Packet Radio Networks: State-of-the-Art”. IEEE, Comm. Magazine. Vol.23. No.3. pp.53-61(Mar. 1985).

- [32] Prasad.R. and Arnbak.J.C.: "Enhanced Throughput in Packet Radio Channels with Shadowing". *Electron. Lett.*, vol.24, No.16, pp.986-988(Aug. 1988).
- [33] Linnartz.J.P.M.G.: "Slotted ALOHA Land-Mobile Radio Networks with Site Diversity". *IEE Proc.-I* Vol.139, No.1, pp.58-70(Feb. 1992).
- [34] Prasad.R.: "Performance Analysis of Mobile Packet Radio Networks in Real Channels with Inhibit-Sense Multiple Access". *IEE Proc.-I*, Vol.138, No.5, pp.458-464(Oct.1991).
- [35] Böttcher,A. and Cygan,D.: "A Combined Performance Analysis of Error Control and Multiple Access for a Mobile Radio Channel". *Proc. IFIP TC6 4th Int. Conf.*, Barcelona, Spain, 20-22, pp.233-246 (June 1990).
- [36] Goodman,D.J.: "Cellular Packet Communications". *IEEE Trans. Commun.* 38, 8, pp.1272-1280(Aug.1990).
- [37] Cidon,I. and Sidi,M.: "Slotted ALOHA in a Multi-Station Packet-Radio Network". *ICC'84*, Amsterdam, The Netherland, pp.438-442(May 1984).
- [38] Sidi,M. and Cidon,I.: "A Multi-Station Packet-Radio Network". *Perform. Eval.*, 8, 1, pp.65-72(Feb.1988).
- [39] 福田 明: "パケット移動通信". *信学会誌*, 11, pp.1219-1223(1985-11).
- [40] 斎藤 正寛, 長谷川 正, 福田 明: "適応純アロハシステム". *信学論 (B)*, J62-B, 11, pp.1056-1058(1979-11).
- [41] Kleinrock,L. and Tobagi,F.: "Packet Switching in Radio Channels: Part I--Carrier Sense Multiple Access Modes and Their Throughput Delay Characteristics". *IEEE Trans., Commun.*, COM-12, pp.1400-1416(Dec. 1975).

- [42] 椋本 介士, 福田 明: "アイドル信号多元接続 (ISMA) 方式による無線パケット通信システム", 信学論 (B), J64-B, 10, pp.1107-1114(1981-10).
- [43] 北村 朋久: "ISMA 方式によるデジタル移動通信システムの研究", 1992 年度, 静岡大学 修士論文.
- [44] Capetanakis, J.I.: "Tree Algorithms for Packet Broadcast Channels", IEEE, Trans. Inform. Theory, IT-25, pp.505-515 (Sept 1979).
- [45] Paterakis, M. and Papantoni-Kazakos, P.: "A Simple Window Random Access Algorithm with Advantageous Properties", Proc. INFOCOM'88, pp.907-915(1988).
- [46] 三瓶 政一: "フェージング対策", 信学会誌, 8, pp.829-835(1990-8).
- [47] Tobagi, F. and Kleinrock, L.: "Packet Switching in Radio Channels: Part II - The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and The Busy-Tone Solution", IEEE Trans., Commun., COM-12, pp.1417-1433 (Dec. 1975).
- [48] 古谷 之綱: "無線回線制御技術", 信学会誌, 8, pp.819-823(1990-8).
- [49] Newell, G.F.: "Applications of Queueing Theory", Chapman and Hall, (1971).
- [50] Bar-David, A. and Sidi, M.: "Collision Resolution Algorithms in Multistation Packet-Radio Networks", IEEE Trans. Com., vol.37, No12, pp.1387-1391 (Dec. 1989).
- [51] 芹澤睦, 榊原勝己: "CSMA/CD方式を無線基地局間ネットワークに用いた無線LAN", 信学論 (B-II), J73-B-II, 11, pp.621-629(1991-10).
- [52] 椋本 介士, 福田 明: "可変パケット長純アロハシステムの安定性と諸特性", 信学論 (B), 62-B, 10, pp.901-908(1979-10).



- [53] 椋本 介士, 福田 明: "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), 63-B, 12, pp.1240-1247(1980-12).
- [54] Wu,G., Mukumoto,K. and Fukuda,A.: "Analysis of Integrated Voice & Data Transmission System with Idle Signal Multiple Access", Proc. ICCT'92, China, pp.18.02.1-18.02.6(Sept. 1992).
- [55] 椋本 介士, 福田 明: "チャネル状態の変動するスロット付アロハシステムの特性解析", 信学論 (B-I), J75-B-I, 8, pp.477-486(1992-8).
- [56] 椋本 介士, 福田 明: "チャネル状態の変動するスロット付アロハ方式の特性解析—捕捉効果のある場合—", 信学論 (B-I), J75-B-I, 8, pp.528-535(1992-8).
- [57] 椋本 介士, 福田 明: "複数のゾーンで構成された移動無線パケット通信網の特性解析", 信学論 (B-I), J75-B-I, 8, pp.714-722(1992-11).
- [58] Mukumoto,K. and Fukuda,A.: "Slotted ALOHA system with Time-Varying Channel", Proc. YUTEL'91, MT/6-1-MT/6-4(Oct.1991).
- [59] Mukumoto,K. and Fukuda,A.: "Slotted ALOHA in Zone Structured Mobile Packet Radio Networks", Proc.ICC'93, Switzerland, pp.49.6.1-49.6.5(May 1993).
- [60] Mukumoto,K. and Fukuda,A.: "Idle Signal Multiple Access (ISMA) Scheme for Mobile Packet Radio Networks", Proc. ICCT'87, pp.108-111(1987).
- [61] Fukuda,A. and Mukumoto,K.: "Channel Assignment Schemes in Centralized Two-way Packet Radio Networks", GLOBECOM'83, pp.43.6.1-43.6.5(1983).
- [62] Marshall,K.T.: "Some Inequalities in Queueing", Oper. Res., 16, pp.651-665(1968).

## 謝

## 辞

最初に、たいへん御多忙の折にもかかわらず、快く査読の任をお引き受け頂き、また懇切な御指導、御助言を賜わった静岡大学工学部、池田 弘明 教授、市川 朗 教授、堀部 安一教授、宮川 達夫教授、そして福田 明 教授に対して厚く御礼を申し上げます。特に、福田 明教授には、筆者が静岡大学に奉職して以来、ひとかたならぬ御指導・御鞭達を頂いております。筆者がこうして学位論文を書くことができたのは、教授の御助力によるところが大であります。ここに謹んで深謝致します。

本論文は、1979年に筆者が文部技官として静岡大学工学部に勤務を開始して以来行ってきた無線パケット交換網の研究に基づいています。この間の筆者の業績は、研究室の博士課程生、大学院生、卒業研究生、研究生など多くの卒業生の協力なくしては、成し得ないものでした。あまりにも多数にのぼるため、1人1人名前を列挙することはできませんが、心から感謝致します。中でも、本学卒業生で現在沼津工業高等専門学校に勤務する長澤 正氏 講師からは、常日頃、議論にお付合頂き、有益なる御助言を頂いております。

本論文の執筆にあたっては、博士課程生の Wu Gang 君を始めとする在校生にも多大な御協力を頂きました。また、執筆に際しては、水野 保則技官を始めとする職場の同僚に御理解と御協力そして励ましを頂きました。ここに、感謝の念を示します。