- 18) C. G. Bachman: Some Recent Developments in RCS Measurement Techniques, Proc. IEEE, **53**, 8 (1965) 962-972
- 19) テレビ学会編: テレビジョン測定技術, 日本放送出版協会(1973) 396
- 20) 伊藤, 倉掛, 山内, 中村: 電界強度地図の自動作成, 昭 46 電気四学会連大, No. 248
- 21) 王丸: SHF 放送, テレビ誌, **29**, 4 (1974) 296-300
- 22) 王丸: SHF 放送の市街地サービス 状態の推定, テレビ全大, **8**-14 (1973)
- 23) 水戸部, 伊藤: 建築用コンクリート壁面材のテレビ電波反射特性, NHK 技研月報, **17**, 3 (1974) 103-109
- 24) 伊藤: 計算機を利用した飛行機フラッターの推定法, テレビ誌, **28**, 5 (1974) 389-395
- 25) K. Hacking, D.E. Susans: Synchronous Demodulation in LF/MF Receivers, BBC Engineering (Jan. 1972) 14-22
- 26) Y. Itoh: System Design of Color Television Facilities, J. SMPTE, **76**, 12 (1967) 1175-1183
- 27) Y. Itoh and H. Naitoh: A Systems Approach to Linear Integrated Circuits for Color Television Chains, J. SMPTE, **82**, 1 (1973) 1-11
- 28) C.E. Shannon and W. Weaver: The mathematical theory of communication, Univ. of Illinois Press, Ill. (1949), p.5
- 29) Specification of Television Standards for 625-line System-1 Transmission, BBC and ITA, Jan. 1971
- 30) NHK 技研, 研究紹介資料 (昭 50)

3-3 通信トラヒックのモデルとシミュレーション

日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所 小 平 邦 夫
布 谷 嘉 章

1. ま え が き

通信トラヒック (Teletraffic) の問題は電話が発明されて間もない頃から研究されており, 通信トラヒック理論として多くのモデルが解明されている. しかし, 複雑なシステムにおいては理論必ずしも万能ではなく, 常にシミュレーションによる評価が重要な位置を占めて来た¹⁾.

シミュレーションの目的は, 設計の基本データとして平常時の特性を調べることに, 適用する近似理論の妥当性を確認すること, および障害や過負荷等の異常時における劣化特性を調べ, 対策の有効性を確認することにある.

通信システムにおけるトラヒックモデルは, 一般待行列の客に相当する呼の到着 (生起) 過程, サービス (保留) 時間分布, 設備 (窓口, 扱者) 数, およびサービス順序等, システムの処理方式によって規定される.

本稿では, 情報化時代にマッチするものとして, 現在導入の拡大が図られつつある電子交換機に焦点を絞って, 最近シミュレーションが行われたモデルを紹介する.

2. 通信トラヒックのモデル

電子交換機は, 図 1 に示すように, 通信内容を通過させる通話路系, 外部記憶装置との情報のやりとりや, 人

間-機械通信に携わる入出力系, 制御全般を行う中央制御系よりなる. そのトラヒック特性の分析はこの3つの系に分割して行われている.

2.1 通話路系

任意の空き入線・空き出線間の接続が常に可能な交換線群を完全群というが, 一般の通話路は通常この条件が満たされない不完全群で構成される. 入線に呼が生じた時, 目的とする出線群に空きがあるにもかかわらず接続できない確率を内部輻輳率と呼び, 不完全群の評価尺度とする.

現在, 電話交換用のクロスバ交換機や電子交換機には空間分割型のリンク方式が用いられている. リンク方式とは, 入線・出線間に2つ以上のスイッチが介在し, リンクと呼ぶ線がスイッチ間を結んでおり, すべての入線・出線間に経路が存在するが, 通話路内部の状態によっては接続できない場合があるような構成の通話路である. 一例を図 2 に示す.

データ交換においては, 扱う情報が離散的なものであるため, 時分割交換機の検討が中心になっている. 時分割交換機には空間分割にない幾つかの特殊性がある. また, 電話交換機と違って, 1つのシステムでビットレー

図 1 ネットワーク交換機の構成要素

"3-3 Model and Simulation Studies in Tele-Traffic Engineering" by Kunio Kodaira and Yoshiaki Nunotani (Musashino Electrical Communication Laboratory, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, Tokyo)

図2 リンク方式の例

トの異なる多種類の呼を扱うので、これら異速度呼に共通に通話路を使用させてシステム効率を上げることができる。このような処理を多元トラヒック処理という。解析的には解けない問題であり、現在シミュレーションによる検討が進められている。

2.2 中央制御系

電子交換機は従来の交換機と異なり蓄積プログラム制御方式をとっているため、非常に錯綜した待ち行列を内包している。中央制御系に現われる膨大な量の待ち行列の一部を以下に例示する。

電子交換機では交換台における電話交換手に相当する中央制御装置が1台で、すべての呼の接続を行っている。そこで、1つ1つの呼に対してはごく短時間ずつ処理しながら、多数の呼の接続を並行して進める多重方式が採用されている。ダイヤル数字などの信号の送受信のように、一定時間内に必ず行われなければならない処理は、周期的に割込むクロックレベルで行われる。クロックレベルで行われる処理は、さらに H (High) レベルと L (Low) レベルに分けられ、割込み型の優先順位が与え

		クロックレベル		ベースレベル		
		H	L	1	2	3
クロックレベル	H	FCFS	2	2	2	2
	L	0	FCFS	2	2	2
ベースレベル	1	0	0	FCFS	1	1
	2	0	0	0	FCFS	1
	3	0	0	0	0	FCFS

0: 優先権なし
1: 非割込み形優先権
2: 割込み形優先権
FCFS: 先着順

図3 各レベルの間の優先順位
(行の要素から列の要素への優先権を示す)

図4 各レベルの実行処理の様子(例)
(②は割り込まれたBレベル第2クラスの処理を示す)

られる。これらのレベル分けは、処理の緊急度に応じた分類により決定される。クロックレベル以外で処理されるものは B (Base) レベルと呼ばれ、B レベルはさらに第1, 第2, 第3のクラスに分かれ、この順番に非割込み型の優先順位が与えられる。クロックレベルで割込まれたBレベルの処理は、割込みが終了すると割込まれた点から再開される。図3に各レベルの優先順位の関係を、図4に各レベルの処理実行の様子を示す。

このような待ち行列モデルに対しては、Bレベル第1, 第2クラスの待ち時間が評価尺度となる。なお、Bレベル第3クラスは呼の処理には直接関与しないので、評価尺度としなくてもよい。

加入者が送受器をあげてから発信音を聞くまでの呼処理の流れを図5に示す。図5に示すように、この処理階段には5つの待ち行列が多段につながれており、したがって、この多段待ち行列を経由して発信音が出される。

わが国では接続品質のひとつとして、加入者が送受器をあげてから発信音を聞くまでの時間(発信音遅延時間)が3秒以上になる確率を0.01以下と規定している。この規格値は、交換機の呼処理能力を決定する重要な要因である。

一般に、社会的突発事故などにより呼処理能力を越える呼が交換機に加わる現象を過負荷と呼ぶ。過負荷時にも呼の接続処理に異常をきたさないためには、過負荷時の中央制御系の輻輳現象の解明と、効果的な自動過負荷制御法の確立が不可欠である。過負荷時のトラヒックモデルは、過渡現象であること、平常負荷時には無視できる待合せも考慮しなければならないことなどにより、きわめて複雑なものとなる。

3. 通信トラヒックのシミュレーション

3.1 シミュレーションの方法

通信トラヒックの問題では、電子計算機が出現するまでは、抵抗雑音を増幅クリップし生起頻度がポアソン分布に従うような擬似呼を発生させ、電子管装置で交換線群を擬似するような擬似トラヒック装置などによりシミュレーションを行っていた⁹⁾。しかし現在では、電子計算機を利用したシミュレーションが一般的である。

電子計算機を利用した通信トラヒック問題のシミュレーションは、解析的なシミュレーション、モンテカルロ

図 5 呼処理の流れ (発呼から発信音送出まで)

シミュレーションに大別される。解析的なシミュレーションとは、部分的に解明されたものをつなぎ合わせ、数値計算により総合的なトラヒック特性を得る方法である。モンテカルロシミュレーションとは、トラヒックモデルの系における状態変化を乱数を使用して実現させてゆき、待ち時間、待ち呼数などのトラヒック特性を得る方法である。

以下に、通信トラヒック問題のシミュレーションによく使用されるモンテカルロシミュレーションについて、もう少し説明を加える。

トラヒックモデルの系における状態変化の実現の仕方により、モンテカルロシミュレーションは、時間経過とは無関係に状態の変化のみに注目してゆくマルコフ連鎖法と、呼の到着時刻と終了時刻を決め、実際の系の進行と同じ状態を再現する時系列法とがある。前者は到着間隔、保留時間がともに指数分布に限られるのに対し、後者はより一般的である。しかし、計算時間、使用メモリー数に関しては通常前者の方が少なく有利である。

状態変化を実現させるなど確率的な現象を規定するときには、計算機内部で順次一定の算術的演算を施して得られる一様擬似乱数をもとに、所望の分布に変換した乱数を用いる。

トラヒックモデルを記述する言語としては、FORTRAN (FORMula TRANslator) と GPSS (General Purpose System Simulator) がよく使用される。マルコフ連鎖法には FORTRAN が、時系列法には GPSS が主として使用される¹⁰⁾。

シミュレーションの精度は次のようにして評価される。適当な時間間隔で測定した中間結果を統計学における標本値とみなし正規分布すると仮定して、たとえば、95% 信頼区間を求める。この区間幅が狭いほど実現精度は良いとみなせる。なお、測定結果のうち初期状態の影響が現われる初めの部分は捨て、定常状態で得られる測定結果を標本とする。

図 6 内部輻輳率の近似計算値とシミュレーション結果との比較

図 7 リンクの同時接続数分布の一例

図 8 Bレベル平均待合せ時間

3.2 シミュレーションの例

(1) 通話路系

内部輻輳率は簡単なリンク方式でも理論的に求めることが難しいので、通常近似理論式で計算し、その精度をシミュレーションにより確認している。シミュレーションは、マルコフ連鎖法により行われる。各リンク方式ごとに厳密なシミュレーションを行うのは困難なので、簡略化シミュレーターや汎用シミュレーターの試みもなされている²⁾⁵⁾。

大局用市内電子交換機の場合の近似計算値とシミュレーション結果との比較を図6に、近似理論式で計算する際に用いたリンクの同時接続数分布と実際の分布との比較を図7に示す⁷⁾。

(2) 中央制御系

中央制御系のシミュレーションは時系列法による。すなわち、呼の接続を行う呼処理プログラムをトラヒック的に忠実に追跡し、適当な処理単位ごとに処理時間を積

図 9 発信過負荷時におけるトラヒック特性の経時変化

図 10 自動過負荷制御を行ったときの呼処理特性

算して実時間性を与え、これに基づき各種接続遅延時間、待ち時間、保留時間などを測定する。

制御系全体の理論的検討が困難なため、全体のシミュレーション結果をもとに、とくに、トラヒック特性の変動の顕著な個所を取り出してトラヒックモデルとして検討することは、設計変更などに対する評価尺度を得るうえで有効である。中央制御系の代表的なモデルである割込みまたは非割込みの優先権のある待ち行列の評価尺度、Bレベル第1、第2クラスの平均待ち合せ時間について、理論検討がなされている³⁾。

理論計算値と上記シミュレーションによる結果との比較を図8に示す。図8からわかるようにBレベルの仕事量が増えると、優先順位の低いBレベル第2クラスの平均待ち時間が急激に増加する。したがって、過負荷時の交換機のトラヒック特性は、このBレベル第2クラスの待ち時間に大きく左右される。自動過負荷制御を行った場合のBレベル第2クラス平均待ち合せ時間、平均発信音遅延時間などのトラヒック特性の経時変化を図9に、呼処理特性を図10に示す⁴⁾。

4. む す び

システムが解析的に得られない場合、実際にそのシステムを作って、想定される条件で動作させ、特性を測定する方法も考えられるが、システムが完成しないと評価できないうえ、要する時間、コストも多大なものになる。特に、大規模なシステムで、多数の代案を比較したいような場合、この方法はほとんど不可能といつてよい。さいわい、トラヒック特性に関するシステムのパラメーターや動作は比較的厳密に記述可能である。複雑なシステムのトラヒック検討を行う場合、計算機シミュレーションが必須の手順となっている。

ただ、シミュレーションの限界として、得られる結果が確定した値ではないことがあげられる。代案の比較にはこれで充分であるが、このままでは所要設備数を算出する際のデータとしては使えないこともある。その場合には近似式または実験式を作成し、この用途に当てている。

電子交換機のような大規模システムでは、電子計算機の高速化、大容量化にもかかわらず、全システムの一括シミュレーションは難しく、本文に述べたように中央制御系、通話路系のように分割して検討を行っている。過負荷時等、相互の影響が必ずしも明らかでない場合の検討が今後必要であろう。

ページ数の関係で本稿では触れられなかったが、遠隔制御交換機や共通線信号方式、データ通信等に関連して入出力系のシミュレーションが、網に関しては網制御やルーティング、特にパケット網における各種方式のシミュレーションが行われている。(昭和50年6月30日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 村尾洋ほか：オペレーションズリサーチ，16，5（1971）18-24
- 2) 浅野正一郎ほか：信学会交換研究会資料，SE 73-25（1973）
- 3) 村尾洋：同上，SE 74-78（1975）
- 4) 鈴木輝信ほか：同上，SE 73-39（1973）
- 5) R. S. Grantges, et al.: BSTJ, 43, 3（1964）965-1004
- 6) 藤木正也ほか：研実報，18，4（1969）865-885
- 7) 高木謙三ほか：同上，18，8（1969）1797-1831
- 8) 橋田温：信学誌，58，4（1975）424-433
- 9) 猪瀬博：同上，36，4（1953）27
- 10) G. Gordon: System Simulation, Prentice Hall（1969）