

待ち行列網解析システム TEDAS-Q†

吉 野 秀 明^{††} 片 山 勁^{††}

通信システム・情報処理システム等の複雑で大規模なネットワーク型システムのトラヒック評価・設計の迅速化・効率化を目的として、待ち行列網モデルを解析するソフトウェア・パッケージ TEDAS-Qを開発した。本稿では、TEDAS-Qの機能と特徴、解析アルゴリズム、およびその適用例について述べる。TEDAS-Qは、分解近似法と呼ばれる近似解法に基づき、優先処理モデル、複数サーバモデルに対して拡張・改良を加えた解析アルゴリズムを用いている。これにより、客（ジョブ）の到着間隔、サービス時間が共に一般分布に従う非マルコフ型モデル、網内の各ノードで非割込み優先処理を行う優先処理モデル等の一般的なクラスの大規模な待ち行列網モデルの解析を可能としている。このように解析可能なモデルが広範囲であることのほかに、評価・設計支援用のソフトウェア・パッケージには優れた操作性、応答性が要求される。TEDAS-Qでは、メニュー形式のパラメータ入出力、出力結果の汎用データベースソフトへの自動変換機能等のマン・マシンインタフェースを備え、パラメータの入力・修正、モデルの変更、出力結果の編集に際して優れた操作性、応答性を実現している。本稿では、これらの TEDAS-Qの機能と特長を示すと共に、基本的なモデルでの精度検証、音声・データ統合パケット交換網モデルへの適用例を挙げ、その有効性を示す。

1. はじめに

情報社会の進展に伴い、新たな通信サービス・情報処理サービスに対する要求が近年ますます高度化・多様化する傾向にある。これらの要求を満たす通信システム・情報処理システムを経済的に開発、構築していくためには、システムの定量的な性能評価・設計が重要な役割を担っている。また、システムの設計、開発、運用・管理の各段階で、性能評価・設計結果を効率的に反映させるには、評価・設計作業の迅速化・効率化が求められている。

トラヒック評価・設計支援システム「TEDAS(Traffic Evaluation and Design Assistant System)」¹⁾は、このような背景から開発に着手したものであり、既に、各種待ち行列モデルや状態方程式の数値解析機能を有した数値解析サブシステム「TEDAS-N」¹⁾、およびトラヒックモデルの図形入力によりシミュレーションを実行するシミュレーション支援システム「TEDAS-S」²⁾を開発し実用に供してきた。

TEDAS-Nは、アラン損失式や待合せ式等の単一ノード待ち行列モデルに対する計算式を用いて数値解析するシステムである。TEDAS-Nを用いてネットワークを構成する基本要素である単一ノードを詳細に解析することは方式設計段階および設備数算出段階において重要である。しかしながら、単一ノードの解析

のみでは、ネットワーク内の異なるノード間の強い相関を無視することになるため、対象とするシステムをネットワークとして捉え、総合的にそのトラヒック特性を評価することは不可能である。

このような理論解析が困難である複雑なネットワーク型システムの性能評価にはシミュレーションが使われることが多い。TEDAS-Sは、利用者が対象とするモデルを図形により入力することでシミュレーション実行プログラムを自動的に生成する機能を有するシミュレーション支援システムである。これにより、利用者がシミュレーション言語を知らなくてもシミュレータが作成でき、シミュレーション言語の習得およびモデル作成に要する時間を大幅に削減できる。しかしながら、モデルが大規模、複雑になるにつれて実行時間および所要メモリ量が膨大となり、シミュレーションによるシステム評価が困難となる場合がある。

以上に示したような単一ノードモデルおよびシミュレーションモデルでは解析が困難な複雑で大規模なネットワーク型システムに対する性能評価モデルとして、待ち行列網モデル (Queueing Network モデル、以下、QN モデルと略す) が広く知られており、特に、計算機システムに対する優れた解析モデルとして数多くの適用例の報告がある³⁾。

今回、文献 4) に示される優先権のある待ち行列網モデルに対する近似解析法に基づき、パソコン入出力による優れた操作性・応答性を実現した待ち行列網解析システム「TEDAS-Q」を開発した。

本稿では、TEDAS-Qの開発の背景、機能・構成の概要およびその適用例を述べる。本稿の構成は以下の

† Queueing Network Analysis System: TEDAS-Q by HIDEAKI YOSHINO and TSUYOSHI KATAYAMA (Switching Technology Laboratory, NTT Communication Switching Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation).

†† 日本電信電話(株)NTT 交換システム研究所交換技術研究部

とおりである。まず、2章では、TEDAS-Qの開発の背景として、TEDAS-N、TEDAS-Sおよび既存の待ち行列網解析手法の有利領域を明確にし、TEDAS-Qの開発目標を示す。続いて、3章では、TEDAS-Qのシステム構成と機能概要をその特徴と併せて示し、4章では、各種機能を実現する上での中心となる解析アルゴリズムの概要を示す。最後に5章において、TEDAS-Qの適用例を示し、その精度検証を行う。

2. TEDAS-Q 開発の背景と目標

前章にも示したように、ネットワーク型システムの性能評価の際のアプローチ法としては以下の3種の方法が挙げられる。

方法1) 網内の各ノードを独立とみなし、個々のノードを待ち行列モデルで記述して数値解析により特性量を算出する。

方法2) 網全体の特性量をシミュレーションにより算出する。

方法3) 網全体をQNモデルで記述し、数値解析により特性量を算出する。

方法1は、個々のノードへの到着過程をポアソン過程等の解析の容易なものと仮定し、網内の各ノードを独立に解析した結果を総合化する方法である。この方法は、上記仮定の下では特性量を陽に算出することが可能であるが、フィードバックを含むモデル等のノード間の相関が強いモデルでは、個々のノードを独立とみなすことによる誤差が大きくなり、計算精度の点で問題がある。また、方法2は、厳密解析が困難な複雑な制御等を含む単一ノードモデルや網型モデルの評価に適用可能である。しかし、計算コスト(メモリ量・実行時間)の観点から、パラメータを可変とし繰り返し計算を実行する場合やノード数の多い大規模なモデルの評価には適していない。

一方、方法3は、対象とするシステムがQNモデルにモデル化できるものに限られるが、システムの特徴を捉えてバランス良くモデル化ができれば、システムの総合性能の評価がある程度の精度で可能である。また、方法2と比較し、計算コストがはるかに少なく、様々なパラメータが性能に与える影響を繰り返し評価できるという利点を持つ。

TEDAS-Qに先行し開発したTEDAS-N、TEDAS-Sは、それぞれ方法1、方法2を支援するシステムである。TEDAS-Qは、上記方法3のアプローチを採用し、方法1(TEDAS-N)および方法2(TEDAS-S)

では精度上の問題が生じるか、あるいは解析が困難なシステムをその適用対象とする。

QNモデルに基づくアプローチ法には、既にいくつかの解析法が提案されており、大きく分けて以下の4種に分類できる。

- (1) マルコフ型QNに対する厳密解析
- (2) 積形式解を持つQN(積形式QN)に対する厳密解析
- (3) 大規模積形式QNに対する近似解析
- (4) 一般的な積形式解を持たないQNに対する近似解析

QNモデルを解析する既存のソフトウェア・パッケージのほとんどは、上記(2)、(3)の解析法に基づくもの、あるいはシミュレーションと組み合わせたハイブリッド型のものである⁶⁾。

上記(1)、(2)の解析法は状態数の増大に伴い計算コストを要すること、および、客(ジョブ、タスク、呼)の到着間隔とサービス時間が共に一般分布に従う積形式解を持たない(以下では、非マルコフ型と呼ぶ)QNにモデル化されるシステムが特に通信システムには多いことから、TEDAS-Qでは、上記(4)の近似解析法に基づくアプローチを採用する。このアプローチを採ったソフトウェア・パッケージとしては、Bell研究所で開発されたQNA^{6),7)}が広く知られている。

TEDAS-Qは、QNAで採用されている解析法および入出力インタフェースに改良・拡張を加えることで、QNAを越えるソフトウェア・パッケージの確立を目指し、次に挙げる設計目標を掲げて開発に着手した。

- (1) 客の到着間隔・サービス時間が共に一般分布に従う任意の網形態の非マルコフ型モデルが扱えること。
- (2) 通信システム・情報処理システムで頻繁に見受けられる優先処理モデルが扱えること。
- (3) QNAの問題点の一つとして示されている⁷⁾複数窓口ノードに対する近似を改良し精度向上を図ること。
- (4) トラヒック設計者のみでなく一般利用者にも容易に使えるよう、高度なマン・マシンインタフェースを備え、パラメータの入力・修正、モデルの変更等の操作性および応答性に優れていること。

3. システム構成・機能

3.1 システム構成

TEDAS-Q は、対象とする待ち行列網モデルを定義する入力処理部、入力パラメータをもとにネットワークの性能評価を行う解析処理部、およびスループット、網内総滞在時間等の解析結果を出力、編集する出力処理部からなる(図1)。複雑な待ち行列網モデルをユーザが定義する入力処理部と出力部には、高度なマン・マシンインタフェースが要求される。このため、入出力処理部は操作性・汎用性に優れたパソコンで行い、行列演算を要する解析処理部はホスト計算機で行う構成とした。また、開発言語には、ソフトウェアの開発効率・移植性等を考慮して、入力処理部にC言語を採用し、さらに、既存ソフトの流用等を考慮し、解析処理部にFORTRANを採用した。

3.2 主要機能

(1) 非マルコフ型モデルが解析可能
解析アルゴリズムには、QNAと同様、網内の客のフローを2次までのモーメント(到着率, 変動係数)で特徴付け、網内の各ノードを各々独立なノードとして解析する“分解近似法”を採用している。これにより、ノード間の相関を反映した総合的なネットワークの評価を可能とすると共に、大規模な(100ノードまで)非マルコフ型待ち行列網モデルの解析を可能としている。表1にTEDAS-Qで解析可能なモデル条件を示す。

(2) 優先処理モデルが解析可能

QNAで解析可能なモデルは、ノードでのサービス規律として先着順規律のみに限られていた。TEDAS-Qでは、通信網や計算機システムで頻繁に見受けられる優先処理に対応するため、客のクラスとして2クラスまでを許し、2クラスの客が加わるノードでは非割込み優先処理に従うとする優先権のある待ち行列網モデルの解析を可能としている。このために必要な解析アルゴリズムは独自に開発したものをを用いている⁴⁾。

(3) パソコン入出力による容易な操作性

データの入力(図2(a), (b))は、パソコン(PC9801シリーズ)でのメニュー入力形式、すなわち、ディスプレイ上の漢字仮名混じりの画面の指定欄にパラメータを入力する形式を採用していることから、極め

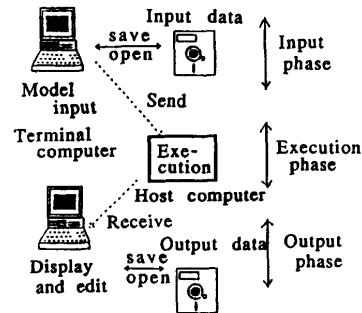


図1 TEDAS-Qのシステム構成
Fig. 1 TEDAS-Q system structure.

表1 TEDAS-Qで解析可能なモデル

Table 1 The class of network models which can be analyzed by TEDAS-Q.

Network form	open, any network structure
The number of nodes	Max. 100 nodes (limit of memory on PC)
Class of calls	2 classes (class 1: high priority)
External arrival	renewal process
Node	• general service time distribution • unlimited waiting space • multi-server with FIFO for single class • single-server with NP* for 2 classes
Routing	Markovian routing

* NP: non-preemptive priority.

て操作性が良く、複雑な網モデルも容易に入力することが可能である。図2(b)に示す各ノード・クラスごとのパラメータ入力画面のほかに、表形式でモデル全体のパラメータを修正できる画面も用意している。

入力データは、すべてパソコンのフロッピー・ディスク(FD)上に保存することができ、これらの読出し、書込み等のファイル操作は、ポップアップ・メニュー(図2(a), (c)参照)の中からカーソルキーで項目を選択する形式であるため、入力データの修正、変更を容易に行うことができる。

また、計算実行に際してパソコン・ホスト計算機間の入出力データの送受信は自動化されており、通信エミュレータを介しての煩雑な操作がなく、高速な応答性を実現している。

ホスト計算機での計算終了後自動的にパソコン画面上に表示される解析結果(図2(c))は、入力データと同様、FD上に保存することができると共に、市販の汎用データベース・ソフト(MULTIPLAN, LOTUS 1-2-3等)用ファイルへの変換機能を有し、グラフ、表の作成等、市販ソフトの豊富な編集機能を活用でき

る。

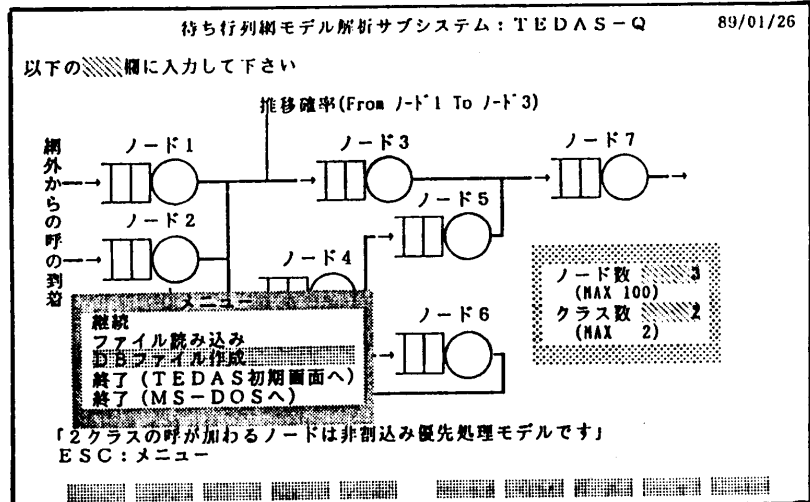
(4) 豊富な入出力

モデルの入力パラメータである網外からの客の到着間隔および各ノードでのサービス時間の入力方法として、平均(到着率)および変動係数を入力する方法と分布を指定する方法の2通りを用意している。選択可能な分布型として、指数分布、単位分布、アーラン分布、超指数分布、指数分布とアーラン分布のコンボリューション(たたみこみ)の5種類があり、各々パラメータを入力することにより、変動係数がパソコン側で計算される。さらに上記2通りの入力のほかに、網外からの到着過程として、音声データをパケット化し転送する際のパケット発生過程モデルとして知られるバースト到着モデル(図3)⁸⁾の入力が可能である。

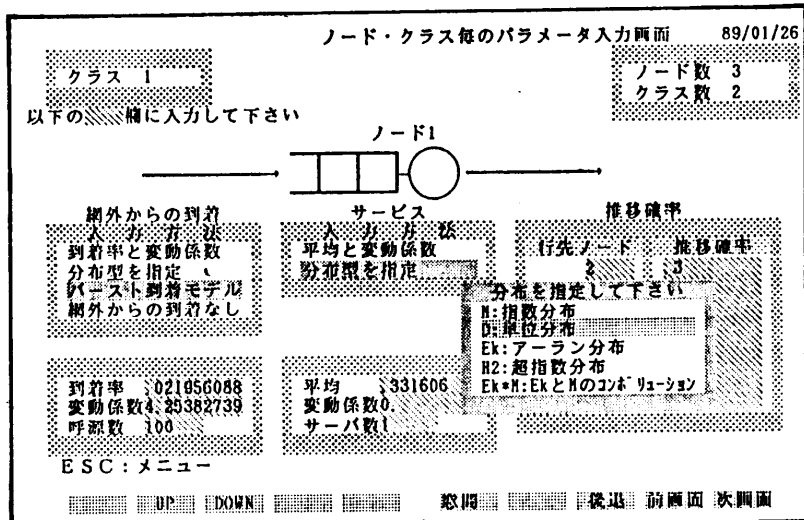
出力項目には、図2(c)に示すとおり、待ち時間、待ち時間の平均・分散等の各ノード・クラスごとの特性量とスループット・網内総客数の平均・分散等の網全体の特性量の2種類を用意している。

4. 解析アルゴリズム

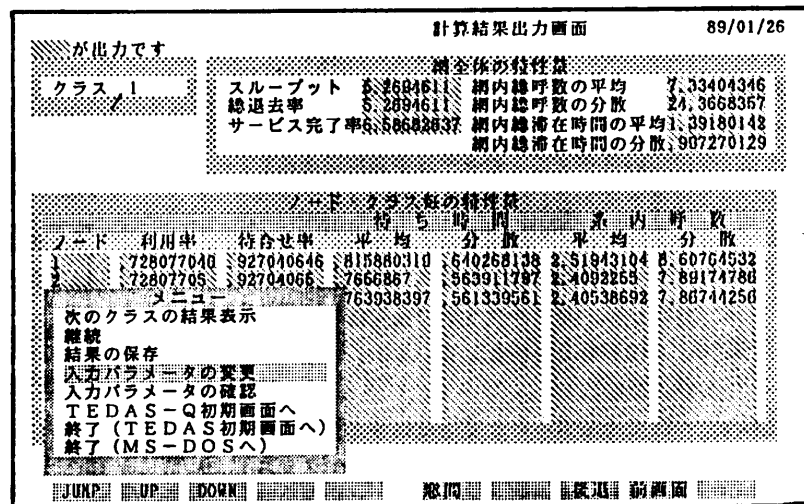
本章では、TEDAS-Qの各種機能を実現する上での中心となる解析アルゴリズムについて概説する。前章に示したとおり、この解析アルゴリズムは、QNAで用いられている非マルコフ型待ち行列網モデルに対する分解近似法をもとに、優先処理モデルを扱えるよう拡張し、さらに複数サーバモデルの待ち特性量の近似に改良を加えたものである。そこで以下では、これら



(a) 初期画面



(b) 入力画面



(c) 出力画面

図2 TEDAS-Qの入出力画面例

Fig. 2 Examples of input and output display.

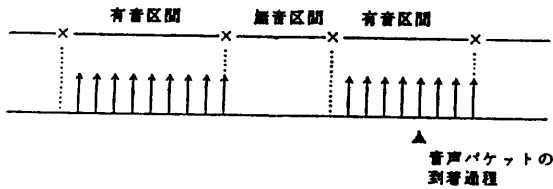


図3 バースト到着モデル

Fig. 3 The burst arrival model.

の改良・拡張点を中心に本近似解析アルゴリズムの概要を示す。なお、QNA の分解近似法の詳細に関しては、文献 6), 7) を参照されたい。

4.1 優先処理モデルに対する近似解法

優先権のある待ち行列網モデルは、割込み継続型後着順サービスに従う BCMP 型モデルを除いては積形式が成立しない。このため、優先権のある待ち行列網モデルに対する既存研究では近似解析による検討が行われており、その中心をなす近似解法として仮想サーバ法と呼ばれる手法が知られている⁹⁾⁻¹³⁾。

TEDAS-Q では、この優先権のある待ち行列網モデルに対する仮想サーバ法と単一クラスのマルコフ型待ち行列網モデルに対する分解近似法の二つを併用した近似解法により、網内の各ノードが非割込み優先処理を行う単一サーバからなる非マルコフ型待ち行列網モデルの解析を可能としている。以下では、これら2種類の近似解法の概要を示す。

(1) 仮想サーバ法

優先処理ノードを優先客(クラス1)、非優先客(クラス2)を別々にサービスする二つの仮想的なサーバ(仮想サーバ)に分離することで、2クラスの客が加わる待ち行列網モデルを解析の容易な二つの単一クラス待ち行列網モデルに分離する。

割込み継続型待ち行列網に対する既存の仮想サーバ法では、そのほとんどが仮想サーバへの到着間隔およびサービス時間分布として指数分布を仮定している。これは、分離後のクラスごとのモデルを積形式の成立するマルコフ型モデルとして解析を容易にするためである。TEDAS-Q では、到着間隔およびサービス時間の2次モーメントまでを考慮した新たな仮想サーバ法⁴⁾を用いることで、非マルコフ型の優先権のある待ち行列網モデルの解析を可能としている。

(2) 分解近似法

仮想サーバ法を適用することで得られるクラスごとの待ち行列網モデルは積形式解を持たない単一クラスのマルコフ型待ち行列網モデルとなる。これに対する近似解法として、QNA に採用されている分解近似

法を適用する。

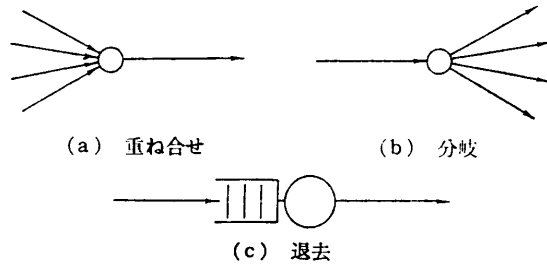
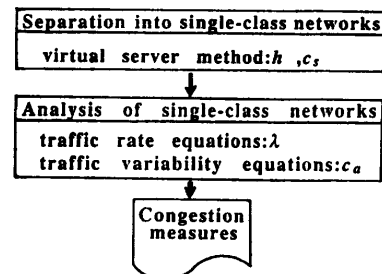
分解近似法の基本となる手法は、各ノードへの客の到着過程および各ノードでのサービス過程を二つのパラメータ、平均と変動係数によって特徴付けることにより、各ノードを独立な待ち行列モデルとして近似解析を行う点にある。

網内の客のフローを特徴付けるパラメータは、図 4 において示される、重ね合せ・分岐・退去の3種類の基本的なネットワーク・オペレーションの各々に対する近似を組み合わせることで導かれた「トラヒック率方程式」、「トラヒック変動方程式」を解くことによって得られる。これにより、各ノードへの客の到着過程は、到着率と変動係数の二つのパラメータで近似される。これらのパラメータおよびサービス時間の平均と変動係数を用いて各ノードを独立な GI/G/1 待ち行列モデルとして、待ち時間の平均・分散等の特性量が評価される。

以上の仮想サーバ法、分解近似法の2種類の、近似解法の併用により、優先権のある非マルコフ型待ち行列網モデルの解析が可能となる。本アルゴリズムの解析フローを図 5 に示す。

4.2 複数サーバモデルに対する近似解析

優先処理モデルでは、2クラスの客が加わるノードは単一サーバモデルに限られていたのに対し、1クラスの客のみが加わる場合は、各ノードが複数サーバであるモデルを扱うことが可能である。

図4 基本的ネットワーク・オペレーション
Fig. 4 The basic network operations.図5 TEDAS-Q の解析フロー
Fig. 5 TEDAS-Q analysis flow.

QNA においても複数サーバノードを含む網モデルの解析が可能であるが、複数サーバノードに対して採用されている近似は、単一サーバノードに対する近似と比較して、十分な検討がなされていない。特に、重要な特性量である平均待ち時間の近似には M/M/s モデルの平均待ち時間 ($EW(M/M/s)$) と記す。以下同様) に重負荷近似を考慮した項を乗じた。

$$EW(GI/G/s) = \frac{c_a^2 + c_s^2}{2} EW(M/M/s) \quad (1)$$

c_a^2 : 到着過程の変動係数

c_s^2 : サービス時間の変動係数

を用いており、十分な精度が得られないと考えられる。

一方、GI/G/s モデルの平均待ち時間に対する近似は、Page¹⁴⁾、逆瀬川¹⁵⁾、木村¹⁶⁾、¹⁷⁾らにより検討され、上記(1)式と比較し、より精度の優れている近似式がいくつか提案されている。

そこで、TEDAS-Q では、これらの近似のうち近似精度の点で優れている木村の近似¹⁶⁾：

$$EW = EW(GI/G/1) \prod_{n=2}^s \left[\frac{1-c_a^2}{c_a^2+c_s^2} \cdot \frac{EW(D/M/n)}{EW(D/M/n-1)} + \frac{1-c_s^2}{c_a^2+c_s^2} \cdot \frac{EW(M/D/n)}{EW(M/D/n-1)} + \frac{2(c_a^2+c_s^2-1)}{c_a^2+c_s^2} \cdot \frac{EW(M/M/n)}{EW(M/M/n-1)} \right] \quad (2)$$

をもとに、 $EW(D/M/s)$ 、 $EW(M/D/s)$ に Cosmetatos による近似を用いて簡略化を図った以下の近似式を採用することにより近似精度の向上を図っている。

$$EW(GI/G/s) = \frac{c_a^2 + c_s^2}{2} \cdot f \cdot EW(M/M/s) \quad (3)$$

ここで、

$$f = \frac{\rho}{(c_a^2 + c_s^2)^{s-1}} \prod_{n=2}^s \left[(1-c_a^2) \frac{1-4\gamma(n, \rho)}{1-4\gamma(n-1, \rho)} + (1-c_s^2) \frac{1+\gamma(n, \rho)}{1+\gamma(n-1, \rho)} + 2(c_a^2 - c_s^2 - 1) \right] \quad (4)$$

$$\rho = \exp \left[-\frac{2(1-\rho)(1-\min(c_a^2, 1))^2}{3\rho(c_a^2 + c_s^2)} \right] \quad (5)$$

$$\gamma(n, \rho) = (1-\rho)(n-1) \frac{\sqrt{4+5n-2}}{16\rho n} \quad (6)$$

5. 適用例

本章では、TEDAS-Q の適用例を示す。まず、5.1 節において、基本モデルを対象として、複数サーバモ

デルに対する近似に関して精度検証を行う。続いて、5.2 節において、通信システムの性能評価への適用例として、パケット交換網モデルを取り上げ、TEDAS-Q による評価結果と、2章で示した方法1 (各ノードを独立として評価する方法) とを比較する。なお、優先処理モデルに対する近似解法の精度については、文献 4) において、複雑な網モデルを構成する基本要素である重ね合せ、分岐、フィードバックおよび追越しをそれぞれ含むいくつかの網モデルに対して検証され、サービス時間の変動係数が1以下のノードを含む場合には安全側の評価を与える傾向にあるが、実用上十分な精度が得られることが確認されている。また、客のクラスが1種類で網内の各ノードが単一サーバである網モデルに対しては、QNA と同一の精度となる。QNA の精度検証については、文献 18) において詳細に検討されているので参照されたい。

5.1 精度検証

まず、平均待ち時間に対する近似式 ((3)式) のみの精度を検証するため、単一ノードモデルに対して精度検証を行う。PH/E₂/5 モデルの平均待ち時間に対する厳密解との比較を表2に示す。この表より、(3)式を用いることにより、QNA と比較してかなりの精度の向上が期待できる。また、 $EW(D/M/s)$ 、 $EW(M/D/s)$ に対して Cosmetatos の近似を用いることによる近似精度の劣化はほとんどないことが木村の近似 ((2)式) との比較により確認できる。

続いて、2ステージのタンデム型モデルに対して、シミュレーションとの比較により近似精度の検証を行う。ここでは、第1ステージへの客の到着間隔分布、および各ステージでのサービス時間分布が共に2次のアーラン分布に従い、第1ステージが単一サーバ、第2ステージのサーバ数が5であるモデル ($E_2/E_2/1 \rightarrow \cdot /$

表2 PH/E₂/5 モデルに対する精度検証
Table 2 Validations of approximations
for PH/E₂/5.

c_a^2	ρ	EXACT	TEDAS-Q Eq. (3)	QNA Eq. (1)	Kimura Eq. (2)
0.25	0.7	0.058	0.057	0.094	0.056
	0.9	0.515	0.507	0.572	0.507
0.5	0.7	0.099	0.103	0.126	0.102
	0.9	0.719	0.727	0.762	0.728
1.0	0.7	0.195	0.193	0.189	0.193
	0.9	1.153	1.151	1.144	1.151
2.0	0.7	0.365	0.363	0.315	0.364
	0.9	1.991	1.973	1.906	1.971
4.0	0.7	0.727	0.707	0.567	0.710
	0.9	3.718	3.619	3.431	3.612

$E_2/5$)を対象に、第2ステージでの平均待ち時間に関して精度検証を行った。第1ステージにおける平均サービス時間を1に固定し、第2ステージにおけるサービス時間を変化させたときのシミュレーションとの比較を表3に示す。ここで、シミュレーションの95%信頼区間内に入る評価値に対しては*を付している。同表より、QNAでは、シミュレーションとの相対誤差が最大41%となっているのに対し、(3)式を採用することで相対誤差が6%以内に収まっていることがわかる。このことから、TEDAS-Qを用いることにより、複数サーバノードを含む網モデルに対しても満足できる精度で評価を行うことが可能であると考えられる。

5.2 応用例

本節では、音声・データ統合パケット交換網モデルに対するTEDAS-Qの適用例を示す。図6に示すような、5個のパケット交換機と14本のリンクからなるパケット交換網モデルを考える。これは、文献19), pp. 122-126, およびQNAの性能評価¹⁸⁾で扱われているパケット交換網モデルをもとに、音声・データの2クラスが加わる優先処理モデルに拡張したものである。

上記文献での定義と同様、網内のパケットのフローを目的地行列 $D \equiv (d_{ij})$ 、およびルーチング行列 $R \equiv (r_{ij})$ により表す。すなわち、 d_{ij} は、外部から交換ノード*i*に到着したパケットが交換ノード*j*を目的地とする割合を示し、 r_{ij} は、目的地が*j*であるパケットが交換ノード*i*から次に経由するリンク番号を表す。ここで、ルーチング方式には確率ルーチングを仮定し、確率*p*でルーチング行列 R_1 に従うルートを選択し、確率 $1-p$ でルーチング行列 R_2 に従うルートを選択するものとする。ここでは、これらのパラメータ

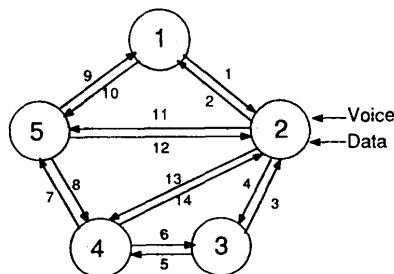


図6 音声・データ統合パケット交換網モデル
Fig. 6 Packet switching network model.

表3 複数サーバ・タンデムモデルに対する精度検証
Table 3 Validations of approximations for a multi-server tandem model.

Utilization	Simulation	TEDAS-Q	QNA	Kimura	
node 1	node 2	(95% conf. int.)	Eq. (3)	Eq. (1)	Eq. (2)
0.4	0.6	0.334(±0.033)	0.314*	0.443	0.314*
	0.7	0.919(±0.065)	0.900*	1.102	0.896*
	0.8	2.481(±0.112)	2.477*	2.771	2.476*
	0.9	8.044(±0.266)	8.176*	8.578	8.188*
0.8	0.6	0.156(±0.010)	0.157*	0.221	0.157*
	0.7	0.445(±0.026)	0.450*	0.551	0.448*
	0.8	1.238(±0.045)	1.238*	1.385	1.238*
	0.9	4.034(±0.214)	4.088*	4.289	4.094*

* means within 95% confidence interval.

として次の値を用いる。

$$D \equiv (d_{ij}) = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.6 \\ 0.3 & 0.0 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0.0 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.0 & 0.6 \\ 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.5 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$R \equiv (r_{ij}) = pR_1 + (1-p)R_2,$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 10 & 10 \\ 2 & 0 & 3 & 13 & 11 \\ 4 & 4 & 0 & 5 & 5 \\ 7 & 14 & 6 & 0 & 7* \\ 9 & 12 & 8 & 8* & 0 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 10 & 10 \\ 2 & 0 & 3 & 13 & 11 \\ 4 & 4 & 0 & 5 & 5 \\ 7 & 14 & 6 & 0 & 14* \\ 9 & 12 & 8 & 12* & 0 \end{bmatrix}.$$

ただし、行列 R_1 、 R_2 の差(上記*)は、ノード4-ノード5間の経路として、確率*p*で直通リンク(リンク番号7, 8)を選択し、確率 $1-p$ でノード2への迂回経路をとることを意味する。

外部到着トラヒックとしては、音声・データの2クラスの packets を考え、リンクへのパケット送出に際し、実時間性の厳しい音声に非割込み優先権を付与するものとする。

音声パケットの到着過程には、3章で述べたバースト到着モデルを仮定し、有音区間・無音区間を各々1,860 ms, 2,850 ms, 有音時のパケット発生間隔を16 ms とする²⁰⁾。また、データパケットはポアソン過程に従って到着するものとする。ここでは、各交換ノードに加わる音声端末数(呼源数)を、交換ノード1から順に61, 152, 61, 85, 122 端末とし、データパケットの到着率は全交換ノードに対して1,500 pkt/s とする。

また、パケット長は、音声・データ共に固定長で64 Byte, リンク速度は1.536 Mb/s とする。このとき、平均サービス時間は、1/3 ms, サービス時間の変動係数は0となる。

以上に示した網モデルを規定する目的地行列, ルーチング行列, 交換ノードへの外部到着トラヒックの3種のパラメータより, TEDAS-Qでの入力データを表4のように求めることができる。

表5は, ルーチング選択確率を $p=0.5$ としたときの上記モデルに対するTEDAS-Qによる解析結果例である。特性量として, 音声・データ各々の各リンクでの利用率および平均待ち時間を示している。また, TEDAS-Qの出力結果との比較を行うため, 各リンクへのパケットの到着が各々独立であると仮定した場合(例えば, 交換ノード3から交換ノード1へのパスを通るパケットは, リンク4とリンク2に, それぞれ独立に加わるとする)の平均待ち時間を以下の2通りに対して求めた値を同表に併記する。

- ① M/D/1 優先モデル: 各リンクへの到着過程を音声・データ共にポアソン過程で近似し, M_1 , M_2/D_1 , $D_2/1$ 非割込み優先モデルにより算出
 - ② G/D/1 優先モデル: 各リンクへの到着過程を, 音声はバースト到着モデルの重畳過程, データはポアソン過程とし, GI_1 , GI_2/G_1 , $G_2/1$ 非割込み優先処理モデルに対する拡散近似解析²¹⁾により算出
- 表5より, 平均待ち時間に対する上記の①の場合の評価結果は, TEDAS-Qによる結果と比較し, かなりの過小評価を与えることがわかる。このことは, 音声

表4 パケット交換網モデルの入力データ

Table 4 The TEDAS-Q input data for a packet switching network model.

ノード (リンク#)	外部到着*		行先ノード (リンク#)	推移確率
	音声	データ		
1	12	0.30	3	0.5
2	46	0.45	—	—
3	61	0.60	—	—
4	18	0.45	2	0.667
5	43	1.05	7, 14	$0.286p, 0.286(1-p)$
6	17	0.30	—	—
7	30	0.53	9	0.115
8	37	0.45	6	0.136
9	37	0.45	—	—
10	49	1.20	8, 12	$0.250p, 0.250(1-p)$
11	15	0.15	9	$0.12(1-p)/\{0.12+1.04(1-p)\}$
12	49	0.60	13	$1.1(1-p)/\{0.15+1.1(1-p)\}$
13	30	0.30	6	$0.15(1-p)/\{0.35+1.1(1-p)\}$
14	38	0.68	11	$1.04(1-p)/\{0.12+1.04(1-p)\}$

* 音声: 端末数; データ: 到着率。

パケット発生過程のバースト性が, 平均待ち時間に与える影響が大きいことを示しており, TEDAS-Qのように, 客の到着過程としてバースト到着モデル等の非マルコフ型モデルを扱えることが待ち行列網解析パッケージには必要であることを示唆している。

また, 上記②のモデルは, TEDAS-Qと比較して過大評価を与えることがわかる。このことは, 上記②のモデルが, 各リンクに加わるパケットをリンクごとに各々独立としており, リンク間にわたるパケットのフロー(例えば, リンク4からリンク2へのパケットのフロー), すなわち, リンク通過後の退去過程が特性量

表5 パケット交換モデルにおける平均待ち時間の解析結果

Table 5 TEDAS-Q output results for a packet switching network model.

ノード (リンク#)	利用率		TEDAS-Q		M/D/1 優先モデル		G/D/1 優先モデル	
	音声	データ	音声	データ	音声	データ	音声	データ
1	0.10	0.10	0.078	0.098	0.037	0.046	0.078	0.098
2	0.48	0.23	0.378	1.268	0.224	0.752	0.425	1.427
3	0.55	0.25	0.589	2.964	0.298	1.497	0.614	3.089
4	0.15	0.15	0.107	0.152	0.058	0.083	0.107	0.152
5	0.35	0.35	0.289	0.975	0.182	0.613	0.289	0.975
6	0.24	0.15	0.102	0.168	0.085	0.140	0.152	0.249
7	0.30	0.22	0.172	0.362	0.124	0.259	0.207	0.432
8	0.35	0.20	0.215	0.484	0.143	0.322	0.250	0.561
9	0.38	0.20	0.224	0.533	0.155	0.369	0.276	0.657
10	0.40	0.40	0.360	1.829	0.224	1.139	0.360	1.829
11	0.42	0.27	0.297	0.998	0.198	0.644	0.347	1.129
12	0.45	0.25	0.352	1.192	0.215	0.724	0.389	1.309
13	0.60	0.30	0.713	7.267	0.378	3.762	0.821	7.977
14	0.36	0.28	0.243	0.672	0.167	0.462	0.278	0.766

に反映されていないためである。TEDAS-Qの解析アルゴリズムには、優先処理ノードからの退去過程も考慮した近似が含まれており、これにより、複雑な網モデルに対しても、ある程度の精度で性能評価を行うことが可能である。

6. おわりに

待ち行列網解析システム「TEDAS-Q」の開発の背景、機能概要、およびその精度検証について報告した。TEDAS-Qは、分解近似法と呼ばれる非マルコフ型待ち行列網モデルに対する解析法をもとに、優先処理モデル、複数サーバモデルに対する拡張・改良を行い、さらにマン・マシンインタフェース等の機能の充実を図って実現したシステムである。現在、社内利用を通して使用経験を蓄積している段階であり、利用者の意見および新たな理論的成果を吸収しながら、さらに、改良・拡張を進めていく必要があると考える。今後の改良・拡張の方向としては、以下のものが挙げられる。

- (1) 3クラス以上の優先処理モデルへの拡張
- (2) 閉鎖型待ち行列網モデルへの拡張
- (3) ノードからの退去過程に対する近似の改良

謝辞 本研究の機会を与えていただき、有益なご助言をいただいたNTT交換システム研究所川島幸之助主幹研究員に感謝の意を表します。また、本研究を進めるに当たり、ご指導、ご協力をいただいた交換システム研究所住田主幹研究員ならびに、通信網総合研究所能上主任研究員に深謝いたします。

参考文献

- 1) 戸田, 林: トラヒック評価・設計支援システム TEDAS—数値解析サブシステム, 通研実報, Vol. 35, No. 11, pp. 1159-1169 (1986).
- 2) 住田, 稲守: シミュレーション支援システム TEDAS-S, 信学技報, IN 88-151 (1989).
- 3) 例えば, 橋田: 最近のネットワーク手法, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 26, No. 4, pp. 205-212 (1981).
- 4) Yoshino, H.: An Approximation Method for Queueing Networks with Nonpreemptive Priority and Its Performance, *Trans. IEICE*, Vol. E 73, No. 3, pp. 386-394 (1990).
- 5) 例えば, オペレーションズ・リサーチ: 特集 待ち行列網のパッケージとシミュレータ, Vol. 30, No. 7 (1985).
- 6) Whitt, W.: The Queueing Network Analyzer, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 62, No. 9, pp. 2779-2815 (1983).
- 7) 木村: QNA: Queueing Network Analyzer について (1)/(2)/(3), オペレーションズ・リサーチ, Vol. 29, No. 6/7/8, pp. 366-371/431-439/494-500 (1984).
- 8) Sriram, K. and Whitt, W.: Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. SAC-4, No. 6, pp. 847-855 (1986).
- 9) Reiser, M.: Interactive Modeling of Computer Systems, *IBM Syst. J.*, Vol. 15, No. 4, pp. 309-327 (1976).
- 10) Sevcik, K. C.: Priority Scheduling Disciplines in Queueing Network Models of Computer Systems, *Information Processing '77* (Gilchrist, B. ed.), IFIP, pp. 565-570, North-Holland, Amsterdam (1977).
- 11) Kaufman, J. S.: Approximate Analysis of Priority Scheduling Disciplines in Queueing Network Models of Computer Systems, *Proc. ICC '82*, pp. 955-961 (1982).
- 12) Schmitt, W.: Approximate Analysis of Markovian Queueing Networks with Priorities, *Proc. ITC 10*, Session 1.3.3 (1983).
- 13) Ikehara, S. and Miyazaki, M.: Approximate Analysis of Queueing Networks with Nonpreemptive Priority Scheduling, *Proc. ITC 11*, Session 3.4 A. 2 (1984).
- 14) Page, E.: Tables of Waiting Times for M/M/n, M/D/n and D/M/n and Their Use to Give Approximate Waiting Times in More General Queues, *J. Oper. Res. Soc.*, Vol. 33, pp. 453-473 (1982).
- 15) Sakasegawa, H.: An Approximation Formula $L_q \approx \alpha \rho^B / (1 - \rho)$, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, Vol. 29, Part A, pp. 67-75 (1977).
- 16) Kimura, T.: Heuristic Approximations for the Mean Waiting Time in the GI/G/s Queue, Research Report on Information Sciences, No. B-155, Tokyo Institute of Technology, Tokyo (1984).
- 17) Kimura, T.: Approximation for Waiting Time in the GI/G/s Queue, 情報ネットワークのトラフィック評価に関する基礎的研究シンポジウム, pp. 74-88 (1988).
- 18) Whitt, W.: Performance of the Queueing Network Analyzer, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 62, No. 9, pp. 2817-2843 (1983).
- 19) Gelenbe, E. and Mitrani, M. (秋丸, 橋田監訳): 計算機システムの解析と設計, p. 122, オーム社 (1988).
- 20) 田中, 井上, 秋山: 日本語会話音声時間分布のモデル化, 信学技報, IN 88-68 (1988).
- 21) Takahashi, Y.: Mean-Delay Approximation for a Single-Server Priority Queue with Batch Arrivals of Two Classes, *Trans. IEICE*, Vol. E 72, No. 1, pp. 29-36 (1989).

(平成元年5月16日受付)

(平成2年2月13日採録)

**吉野 秀明 (正会員)**

1960年生。1983年東京工業大学理学部情報科学科卒業。1985年同大学院工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。以来、移動体通信方式、広帯域 ISDN のトラヒック設計の研究に従事。現在、NTT 交換システム研究所伝達ソフトウェア研究部研究主任。電子情報通信学会、日本 OR 学会各会員。

**片山 勲 (正会員)**

1943年生。1967年名古屋工業大学工学部計測工学科卒業。1969年同大学院工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。以来、通信網、交換機など通信システムのトラヒック設計に従事。現在、NTT 交換システム研究所主幹研究員。電子情報通信学会、日本 OR 学会各会員。工学博士(東京工業大学)。