

解説



待ち行列ネットワークモデルによる計算機システムの性能評価†

橋田 温†† 川島 幸之助††

1. ま え が き

従来、計算機システムにおける平均応答時間、スループットなど確率的特性の評価には、待ち行列理論がよく用いられてきた。そこでは、サービス段の多段連続やフィードバックのある総合システムを個々のサービス段に分解し、それぞれを独立に解析した結果を後で総合化するのが常套手段である。この場合、多段やフィードバックによる段間の従属性が考慮されず、総合特性の推定精度が問題であり、シミュレーションなどの補助手段が必要となる。しかし、近年、計算機システムを待ち行列ネットワークにモデル化し、総合システムとしての性能を評価する試みが盛んであり、かなりの成果をあげている。

本稿では、待ち行列ネットワークモデル (QNM, Queueing Network Model) による解析手法を簡単に説明するとともに、実際の計算機システムにおける適用例にもとづいて、性能評価手法としてのQNMの妥当性と今後の展望について述べる。なお、複雑な待ち行列ネットワークをそのままシミュレーションで評価する方法もあるが、ここではQNMによる方法を近似解析も含めた待ち行列理論にもとづく解析的手法に限定する。

2. 待ち行列ネットワークモデル

待ち行列理論の分野では、1950年代よりJacksonらによりQNMの研究が進められていた¹⁾⁻³⁾。1960年代の後半よりタイムシェアリング、多重プログラミング等の新しい概念による計算機が開発されるようになる

と、計算機の性能を評価するために、QNMが使われ出され、Baskettらによって、より一般的なモデルの研究がなされた⁴⁾。QNMの理論面に関する概説論文として文献5), 6) 等がある。

2.1 ジャクソン型* QNM

(1) 開放型 QNM

系(ネットワーク)外からの客の到着がポアソン過程に従い、各段での処理時間が指数分布に従うQNMに対しては平衡方程式が成立し、平衡状態の同時確率が陽な形で求められる¹⁾。段数(待ち行列数)が N 、外部から第 i 段への到着率(ポアソン到着)を e_i 、 i 段の処理率(指数分布処理時間)を μ_i 、 i 段の処理装置数を s_i 、 i 段の処理を終了した客が次に j 段へ移る(ルーティング)確率を r_{ij} とする。1- $\sum_{j=1}^N r_{ij}$ の確率で系外へ去るものとする。 i 段への総到着率を λ_i とすれば、 λ_i は

$$\lambda_i = e_i + \sum_{j=1}^N \lambda_j r_{ji}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

によって決定される。 i 段の系内客数を k_i 、平衡状態における同時確率を $p(k_1, k_2, \dots, k_N)$ とすれば、これは次の積形式で表わされる。

$$p(k_1, k_2, \dots, k_N) = \prod_{i=1}^N p_i(k_i) \quad (2)$$

ただし、平衡条件として

$$\rho_i = \lambda_i / (s_i \mu_i) < 1, \quad i=1, 2, \dots, N.$$

ここで、 $p_i(k_i)$ は i 段の系内客数が k_i である周辺分布であり、到着率 λ_i 、処理率 μ_i の $M/M/s_i$ 待ち行列モデルの状態確率として与えられる。すなわち

$$p_i(k_i) = \begin{cases} \frac{(s_i \rho_i)^{k_i}}{k_i!} p_i(0), & 0 \leq k_i \leq s_i \\ \frac{\rho_i^{k_i} s_i^{s_i}}{s_i!} p_i(0), & k_i \geq s_i \end{cases} \quad (3)$$

ただし

$$p_i(0) = 1 / \left(\sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{(s_i \rho_i)^k}{k!} + \frac{(s_i \rho_i)^{s_i}}{s_i! (1 - \rho_i)} \right)$$

† Computer System Performance Evaluation by Queueing Network Models by On HASHIDA and Konosuke KAWASHIMA (Musashino Electrical Communication Laboratory, N. T. T.).

†† 日本電信電話公社成野電気通信研究所

* Jacksonの論文(2)は、開放型、閉鎖型を含むので、ここで述べるQNMをジャクソン型とよぶ。

平衡状態確率に関しては、各段が独立の $M/M/s_i$ モデルとして扱えるということが大きな特長である。

(2) 閉鎖型 QNM

開放型 QNM において、外部との客の出入がなく、系（ネットワーク）内の客数が一定値に保たれている QNM を閉鎖型とよぶ。開放型 QNM において、すべての i に対して外部到着率を $e_i=0$ 、ルーチング確率を $\sum_{j=1}^N r_{ij}=1$ とし、 $\sum_{i=1}^N k_i=K$ とすれば閉鎖型モデルとなる。本モデルの平衡状態における同時確率 $p(k_1, k_2, \dots, k_N)$ は、次の積形式で与えられる³⁾。

$$p(k_1, k_2, \dots, k_N) = \frac{1}{G(K)} \prod_{i=1}^N \frac{x_i k_i}{\beta_i(k_i)} \quad (4)$$

ただし

$$G(K) = \sum_{k_1 + \dots + k_N = K} \prod_{i=1}^N \frac{x_i k_i}{\beta_i(k_i)} \quad (5)$$

ここで、 x_i は次の連立方程式

$$\mu_i x_i = \sum_{j=1}^N \mu_j x_j r_{ji}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

の根（相対値。比例定数は残る。）であり、 $\beta_i(x_i)$ は次式で定義される。

$$\beta_i(k_i) = \begin{cases} k_i! & , 0 \leq k_i \leq s_i \\ s_i! s_i^{k_i-s_i} & , k_i \geq s_i \end{cases} \quad (7)$$

状態確率を直接求めるには、所要計算量あるいはメモリ量が非常に大きくなるが、周辺分布 $P_r\{k_i=n\}$ 、 i 段の平均系内客数などのシステムの特性を求める場合には、計算量、メモリ量が少なくすむ計算アルゴリズムが考えられている²⁾。数値計算アルゴリズムが発表されて以来、閉鎖型 QNM の性能評価への適用が非常に盛んになった。

なお、Jackson は、閉鎖型 QNM を特殊例として含む一般的な開放型 QNM に関する解析を行っている²⁾。

2.2 BCMP 型 QNM

ジャクソン型 QNM は、(i) 客のクラスが 1 種類であること、(ii) 扱えるサービス規律が先着順 (FCFS) だけであること、(iii) 処理時間分布が指数分布であることなどの制約があり、計算機システムのモデル化には不十分であった。そこで、サービス規律として次の 4 種類のタイプを許し、複数クラスの客の扱える QNM に対しても、平衡状態における同時確率が積形式で表現できることが示された⁴⁾。このモデルを 4 人の著者の頭文字をとって BCMP 型モデルとよぶことにする。

タイプ 1: FCFS $- \cdot / M / 1$: この場合、平均処理時間はその段の系内客数の関数でもよい。（したがって

複数処理装置でもよい。）ただし、全クラスの客に対して同一とする。

タイプ 2: PS $- \cdot / G_r / 1$: サービス規律はプロセッサシェアリング。（ラウンドロビン方式でタイムスライスを無限小とした方式。） G_r は、LST（ラプラス・スチルチェス変換）が有理関数である処理時間分布⁵⁾であり、客のクラスごとに異なってもよい。

タイプ 3: $- \cdot / G_r / \infty$: 単なる遅延時間のモデル化に使用される。

タイプ 4: 割込み継続型 LCFS $- \cdot / G_r / 1$

客の外部からの到着過程としては、ポアソン過程またはクラスごとに独立なポアソン過程であり、そのパラメータは系内客数に依存する値でもよい。外部からの到着がない場合もモデルに含むので、客のクラスの異なる開放型、閉鎖型ネットワークの混在も可能である。また段間を移動するときにクラスの変更が許される。

上記のような到着過程、サービス規律をもつ待ち行列ネットワークにおいては局所平衡⁹⁾ (local balance) の成立つことが知られている。局所平衡とは、サービス段 i と系の状態 S_j に対し次式が成立つ場合である。

〔 i 段への到着により $S_j \rightarrow$ 遷移する割合〕

$=$ 〔 i 段からの退去により S_j から遷移する割合〕

状態 S_j を固定して上の局所平衡方程式を加えると通常の平衡方程式（これを全域平衡方程式、global balance equation という。）を得る。したがって、局所平衡方程式は全域平衡方程式の十分条件になっていて、平衡方程式の解を探すのに有用である。

局所平衡が成立つ場合には、平衡状態の同時確率は次の積形式で与えられる。

$$p(k_1, k_2, \dots, k_N) = \frac{1}{C} d(K) \prod_{i=1}^N p_i(k_i) \quad (8)$$

ただし、 k_i は i 段の系内客数ベクトル（各クラスについての）、 $d(k)$ は系の状態（系内客数）に依存する

表-1 主な数値計算パッケージ

名 称*	モ デ ル
ASQ ¹⁰⁾	BCMP 型モデル（閉鎖型のみ）。
QNET 4 ¹¹⁾	BCMP 型モデル。
RESQ ¹⁴⁾	QNET 4 と再生点を利用したシミュレーションプログラム (APLOMB) の合成
QM-1 ¹⁵⁾	機械修理工モデルの利用。
QSEC ¹⁶⁾	QNET 4 とほぼ同一。
BEST ¹⁷⁾	BCMP 型モデルの他に、優先権等も近似的に扱えるようにしたもの。

* () 内は文献番号

値, C は規格化定数, $p_i(k_i)$ は第 i 段の状態のみの関数でありサービス規律により異なる値である。これらの具体的な形については原論文⁴⁾を参照されたい。

BCMP 型モデルに対しても、数値計算アルゴリズムが研究されている^{10), 11)}。また、評価するシステムごとに数値計算プログラムを作成するのは手数がかかるので、汎用的なパッケージが種々開発されている。主なものを表-1に示す。

2.3 積形式解の成立しない QNM と近似解法

現実の計算機システムをモデル化すると、必ずしもジャクソン型または BCMP 型の QNM では表現できないものも多い。例えば次のようなモデルは局所平衡が成立しないために、平衡状態確率は積形式のような簡単な解とはならない。

(i) 優先権のあるモデル。(BCMP 型のサービス規律タイプ 4 は除く。)

(ii) 先着順サービスで客にクラスのあるモデル。あるいは処理時間が一般分布に従うモデル。

(iii) 各段の待ち行列長に制限があり、次段の待ち行列が満員の場合は前段の処理装置を閉塞するモデル。

(iv) 客が同時に複数種類の装置(資源)を要求する並列処理モデル。あるいはハードウェア資源とタスク、メモリー等ソフトウェア資源(受動的資源(passive resource)とよばれる。)を同時に使用するモデル。

(v) ルーティング確率が系の状態に応じて変化するモデル。あるいはスケジューリングを伴うモデル。

これらのモデルを含む QNM の厳密解を求めることは、平衡方程式が得られるもの以外は非常に困難である。マルコフ型モデルに対しては平衡方程式が得られるので、原則的には数値計算が可能である。Wallace らはマルコフ型モデルに対し再帰的待ち行列解析プログラム(RQA)を開発している¹⁸⁾。その原理は次の通りである。平衡状態確率 P は

$$P = P(\Delta A + I)$$

の解である。ただし、 A は遷移確率行列、 I は単位行列、 Δ はスカラーである。 P は反復計算

$$P_n = P_{n-1}(\Delta A + I)$$

により求められる。なお、本解法の詳細、および Δ の選定方法については文献 19) を参照されたい。その他、ガウス・ザイデル法なども用いられている²⁰⁾。これらの方法は、まず遷移確率行列を求め、直接的に数値解を得るという方法であるが、現実システムへの適

用にあたっては、ネットワーク内の段数が増加すると状態数が非常に膨大なものとなり、大型計算機でも計算できなくなるといった問題がある。

そこで、全体のモデルを相互関係の弱いサブシステムに分解して、サブシステムの解析をまず行いそれをもとに全体のシステムを解析するという分解法が提案されている。この場合、あるサブシステムとそれ以外のシステム間の遷移率に比べて、サブシステム内の遷移率ははるかに大きいことが良い近似となる条件である。文献 21) は、分解法を数式的に展開し、誤差についても理論的に検討している。

分解法の 1 つとして、QNM のサブシステムをスループットが等しい 1 段の待ち行列に置き換え、より簡単な QNM に帰着させる等価流量法(flow equivalent method)が提案されている。着目するサブシステムのスループットの定め方には、そのサブシステム以外の待ち行列の処理時間を 0 にするという、電気回路網における Norton の定理と類似の方法がある²²⁾。このとき、BCMP 型 QNM においては、もとの QNM と変形された QNM の待ち行列長分布は一致する。一般処理時間分布(先着順)の QNM などに対しても等価流量法が近似解法として適用され、シミュレーション結果とよく合うことが報告されている²³⁾。

客の到着間隔、処理時間が一般分布に従うときの近似解法として、それぞれの平均、分散を用いて拡散過程として解く拡散近似法があるが、QNM への適用はあまりなされていない²⁴⁾。拡散方程式の解析が困難になるからであろう。

待ち行列長が有限に制限されている場合は、いわゆる閉塞現象が生じる。閉塞現象を含む QNM の厳密な解析は非常に困難であり、近似解法が試みられている²⁵⁾。すなわち、まず各段を独立に解析し、閉塞による影響は到着率、処理率を等価的に増加させ、それをもとに再度各段を解析するという手順を繰り返す反復解法である。

ハードウェア資源と同時にソフトウェア資源を保留するモデル²⁶⁾や、異なる資源の同時保留モデル²⁷⁾、優先権のあるモデル²⁸⁾などに対しても近似解析法が試みられている。

3. 計算機システムの性能評価への応用

3.1 計算機システムにおける QNM

計算機システムを QNM によって表現すると、一般に図-1 のような形となる。TSS においては、系内の

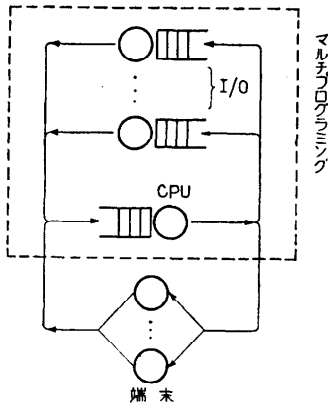


図-1 TSS の QNM

総客数が同時接続ユーザ数（アクティブユーザ数）に対応する。マルチプログラミングシステムでは、同時に処理可能なジョブ数（図中破線内）が制限されており、多重度とよばれる。多重度に着目して、端末を除去したモデルはセントラルサーバモデル（central server model）といわれ、センター側の性能評価によく使われる。このモデルは、Buzen²⁹⁾、Arora³⁰⁾ らの研究以来、計算機システム性能評価の主要モデルとなっている。なお、バッチ処理システムは、通常高負荷であるから、図-1 のモデルで端末時間を 0 としたモデルで表現できる。場合によっては開放型 QNM も使用される。

初期においては、図-1 において端末がなく CPU と I/O がそれぞれ 1 台ずつのいわゆる循環待ち行列（cyclic queue）モデルが、マルチプログラミングの基本モデルとして用いられた³¹⁾。また、初期の TSS に対しては、いわゆる機械修理工（machine repairman）モデルが用いられ、平均応答時間に関して実測値と良い一致を得ている³²⁾。

さて、図-1 のモデルを計算機システムに適用する際のパラメータとしては、一般に次のようになる。

- (i) CPU は一般処理時間分布で、その処理規律は FCFS、またはラウンドロビンや多段帰還などの量子（タイムスライス）処理が多い。量子処理はプロセスシャッフル（PS）で近似される。
- (ii) 端末は $-1/M/\infty$ で表現できる。
- (iii) 各 I/O はそれぞれ独立であり、FCFS の $-1/G/1$ が多いが、 $-1/M/1$ でも近似できる。
- (iv) ルーティング確率 (r_{ij}) はクラスに依存するものが多い。

これらから、ほとんどの計算機システムは基本的には BCMP 型の QNM に帰着される。しかし、現実のシステムでは BCMP 型的前提条件を満たされないものもあり、それらに対しては近似手法が研究されている（2.3 節参照）。

なお、計算機システム性能評価への QNM の適用に関する概説的な論文集として文献 33) がある。

3.2 実際のシステムにおける適用例

QNM を実際のシステムに適用した論文のうち、実測値との比較を行っている主なものを表-2 に示す。実例からみると次のようなことがうかがえる。

(i) 平均応答時間、CPU 使用率等に対する QNM による計算結果と実測値はよく一致（10% 以内の例が多い）しており、解析的手法により充分評価可能である。OS の細部にわたるスケジューリングの影響もみられず、QNM は総合特性の評価に有用である。

(ii) 解析の方法としては、階層化あるいは分解手法が使われることが多い。個々のサブシステムの解析はそれぞれの特徴をとらえたモデル⁴⁵⁾により行われ、総合モデルとして、閉鎖型 QNM あるいはセントラルサーバモデルが適用される。

(iii) シミュレーション、統計的手法、あるいは実測値との併用もみられる。複雑なモデルに対する評価のひとつの方向であろう。

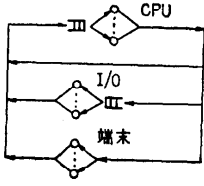
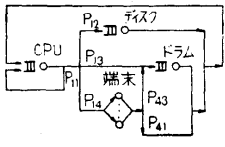
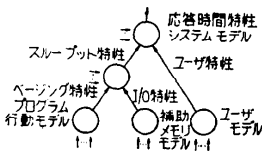
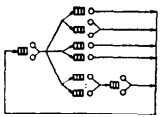
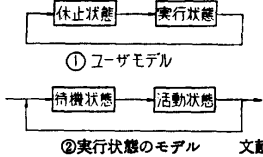
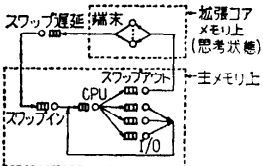
4. 今後の展望

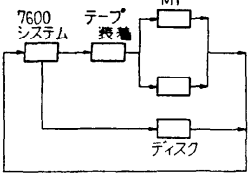
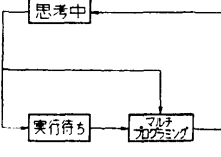
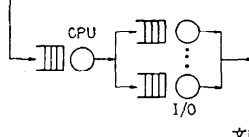
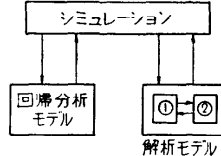
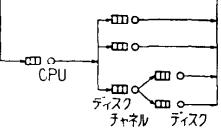
一般的な待ち行列ネットワークの解法には、いわゆる QNM による解法の外、Q-GERT⁴⁶⁾ とシミュレーションがある。QNM による解法では、積形式解による方法の拡張や近似手法の開発も期待できるが、実際のシステムへの適用には限界があり、他の方法との組み合わせが今後の方向であろう。以下に、QNM の発展方向のうち、特徴的なものを列挙する。

(i) CPU 使用率、スループット、平均応答時間、など総合システムとしての評価尺度のロバストネスに注目すると、より簡単な性能評価手法が期待される。特に、BCMP 型の QNM でも系内ジョブ数が増えると計算時間と計算精度が問題となり、より簡単な方法が望まれる。この方向としては、評価尺度と測定パラメータ間のグローバルな関係を利用するオペレーショナル法⁴⁷⁾や平均値解析法⁴⁸⁾などの方法が提案されている。

(ii) 複雑なシステムや大規模システムに対しては、階層化やブロック化によってサブシステムを切り

表-2 実際のシステムに対する QNM の適用例

システムとモデル	手 法	結 果
1) ETSS (電気試験所のTSS)  文献34)	• Gordon と Newell の CQN* に関する解析結果²⁾ を実際例に適用。総合システムの解析としては最初のものである。	• 同時接続数に対して平均応答時間を求め実測値と比較。非常によく一致している。
2) PDP-10 二重プロセッサシステム  P12・スワップアウトの確率 文献35)	• CQN を使用。 • 思考状態のプログラムは必ずしもスワップアウトされない。系の状態に依存する。 • 分岐確率の初期値を仮定して反復解法により求める。	• 実測値、本方法および思考状態のプログラムはすべてスワップアウトされるという方法(従来方法)で求めた値と比較。実測値と本方法で求めた値との誤差は10~30%。本方法は従来方法よりすぐれている。
3) MIT Multics システム (HIS 645)  文献36)	• 階層構造モデル • 各種パラメータを入力として、下位レベルから順次モデル化。計算を行い、そのモデルの特性を出力する。その結果は上位レベルの入力パラメータの1つとなる。 • システムモデルには機械修理工モデルを適用。	• 平均応答時間の実測値と計算値は非常によくあっている。 • 応答時間の分布についても計算し、実測値と比較している。
4) 米国防軍物資部の Advanced Logistics System (ALS). CDC Cyber 73, 74.  文献37)	• 総合モデル(マクロモデル)は左図のようなCQN。 • 各サブシステムのモデル(マイクロモデル、図中①~④)を個別に解析する。①においてはマルチプロセッサによるメモリ競合も考慮する。 • 著者らの開発した数値計算パッケージ ASQ を使用。	• 実測結果が得られないのでシミュレータを作成し、解析結果と比較。結果は非常に良好であった。 • シミュレータと解析の併用を推せんしている。
5) Xerox SIGMA 9 -UTS (Universal Time Sharing) TSS とバッチ  文献38)	• 階層化モデル(次のモデルに分解) ① ユーザモデル……CQN (指数分布) ② 実行状態のモデル……メモリの有限性を考慮して活動状態のジョブ数の確率を求める。 ③ 活動状態のモデル……BCMP 型 QNM. (複数クラスのセントラルサーバモデル) ④ スワッピングのモデル	• CPU 使用率中のバッチ処理の使用分、TSS とバッチのスループットを求める実測値と計算値の比較はよくあっている。(測定の精度内)
6) CDC 6400/6600, UT-2 D システム (テキサス大学)  文献39)	• モデルを分解 ① 機器モデル……左図の総合モデルで思考状態を無視したもの。 ② メモリモデル……ジョブ数、メモリ量、ジョブサイズを与えてメモリ上のジョブ数を求めるモデル。 ③ 総合モデル……端末と計算機システム(1つの待ち行列に絡み退化)からなる CQN。	• 実測値と比較してメモリ使用率について10%以下の誤差、その他(CPU 使用率等)について20%以下の誤差。

7) CDC 7600  文献 40)	- モデルを階層化 ① 全体モデル (左図) ② 7600 内部処理モデル ③ ディスク処理モデル ①, ②のモデルにはジャクソン型の閉鎖型 QNM を使用. サブモデル間のパラメータの整合には反復計算を使用.	2つのケースについて実測値と計算値を比較. 1% の誤差.
8) IBM VM/370 (仮想計算機システム)  文献 41)	- マルチプログラミング状態は、複数クラスの客のいる CQN としてモデル化し、この部分を取り出して解析する。(分解法) アルゴリズムは Reiser ら¹¹⁾のものを使用. - マルチプログラミング部と他の部分とのパラメータの整合をとるために反復解法を使用.	- 各種 CPU モデルの性能を評価した結果, CPU 使用率, 平均応答時間は実測値とよくあっている. - ただし, 負荷を実際に測定し, それをモデルへの入力としている. システム構成を変更した時は, ベンチマーク (基準) 負荷を利用.
9) IBM 370/155-2  文献 42)	- CPU のサービス規律は FCFS 又はプロセッサシェアリング. 客はバッチ, TSS の2クラス. (BCMP 型). - 手法・ステップ 1 モデルに実測不可能なパラメータが含まれているとき, CPU の実測値と計算値が一致するようにパラメータを定める. (calibration) - 手法・ステップ 2 システム構成を変更した (I/O の追加時) 時の性能評価はステップ 1 で求めたパラメータを用いて CQN で行う. (prediction)	システムを変更したときの CPU, チャネル使用率の実測値と, 予測値はよく一致している.
10) IBM OS/V2 リリース 3.7 MVS (Multiple Virtual Storage)  ① セントラルサーバモデル ② ページングモデル 文献 43)	- QNM とシミュレーション, 統計的手法の組合せ. - QNM 部分は複数クラスのジョブのあるセントラルサーバモデル. CPU のサービス規律はプロセッサシェアリング (PS) 又は割込再開型優先方式. 前者 (PS) に対しては数値計算パッケージ QNET 4¹³⁾を, 後者に対しては反復解法を使用.	実測値との比較では, CPU 使用率, 平均応答時間ともよく一致している. 応答時間の分布もかなり一致.
11) Honeywell 6000  文献 44)	4種類の解析方法を比較. ① 決定論的モデル ② セントラルサーバモデル (CSM) ③ I/O チャンネルを含む CSM (左図参照) ④ 2クラス (TSS とバッチ) のジョブのある③のモデル.	- 計算値とハードウェアモニタによる実測値との比較を行う. - 方法①は良くない. 方法③が最良. システムスループットは5%以内, デバイススループットは10%以内の誤差. - TSS とバッチのジョブがある場合は方法④. バッチについては過大評価, TSS については過小評価.

* Closed Queueing Network の略. 本表で使用.

出し, それぞれを理論またはシミュレーションで解析した結果を用いて QNM により総合性能を評価する分解法が一般的である. これには, 段間の相互作用や従属性またはサービス時間の大幅な相違などに注目して, 総合システムをサブシステムにうまく分解するアルゴリズムが望まれる.

(iii) 使い易く数値計算が簡単なこと, 広いシステ

ムへの適用性, および正当性評価の容易さ, などを考慮すると, BCMP 型の計算プログラムのほか, RQA 型の計算プログラムとシミュレーションも組み合わせたハイブリッド形のパッケージが望まれる. RESQ, Q-GERT もその方向の例と考えられる. この場合, ネットワーク形態や入力条件を汎用的に記述できる方法が必要であり PETRI-NET⁴⁹⁾などの適用も考えら

れる。

(iv) マルチプログラミング主体の計算機システムはセントラルサーバモデルに近いものにモデル化され、近似解析手法なども種々提案されている。しかし、コンピュータネットワーク、分散処理、分散データベース、などの動向を考えると、今後はこれまでと異なった形態のQNMが色々と現われ、それぞれの特徴を生かした近似解析手法・簡易解析手法が開発されるであろう。

5. あとがき

実システムへの適用例での結果から見ると、QNM、特にジャクソン型またはBCMP型による解析手法は、計算機システムの総合的性能をかなり精度よく評価できると言える。しかし、性能評価の精度をよくするには、(i)システムをうまくモデル化すること、および(ii)パラメータの推定精度がよいこと、が要求される。(i)は、今のところ、システム評価者のセンス、知識、経験、など個人的資質にかなり依存している。(ii)は、測定機能を充実して運用中の測定データを収集・分析する必要性を意味する。

ともあれ、QNMによる方法は、シミュレーションと比べて労力・コストの点で有利であり、ある程度の精度も期待できるため、計算機システムに対する性能評価手法として有力である。今後、各種システムの評価に使用されるにつれ、その適用領域が広がるとともに、精度・正当性などがより明確になっていくであろう。

参 考 文 献

- 1) Jackson, J.R.: Networks of waiting lines, *Opns. Res.*, Vol. 5, pp. 518-521 (1957).
- 2) Jackson, J.R.: Jobshop like queueing systems, *Manage. Sci.*, Vol. 10, pp. 131-142 (1963).
- 3) Gordon, W.J. and Newell, G.F.: Closed queueing systems with exponential servers, *Opns. Res.*, Vol. 15, pp. 254-265 (1967).
- 4) Baskett, F., Chandy, K.M., Muntz, R.R. and Palacios, J.: Open, closed, and mixed networks with different classes of customers, *J. ACM*, Vol. 22, No. 2, pp. 248-260 (1975).
- 5) Gelenbe, E. and Muntz, R.R.: Probability models of computer systems I: exact results, *Acta Inf.* Vol. 7, No. 1, pp. 35-60 (1976).
- 6) 高橋, 宮原, 長谷川: 待ち行列網理論, システムと制御, Vol. 22, No. 12, pp. 731-737 (1978).
- 7) Buzen, J.P.: Computational algorithms for closed queueing networks with exponential servers, *Commun. ACM*, Vol. 16, No. 9, pp. 527-531 (1973).
- 8) Cox, D.R.: A use of complex probabilities in the theory of stochastic processes, *Proc. Cambridge Philo. Soc.*, Vol. 51, pp. 313-319 (1955).
- 9) Chandy, K.M.: The analysis and solution for general queueing networks, *Proc. 6th Annual Princeton Conf. Information Sci. and Syst.*, pp. 224-228 (1972).
- 10) Muntz, R.R. and Wong, J.W.: Efficient computational procedures for closed queueing network models, *Proc. 7th Hawaii Int'l Conf. on Systems Sci.*, pp. 33-36 (1974).
- 11) Reiser, M. and Kobayashi, H.: Queueing networks with multiple closed chains: theory and computational algorithms, *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 10, No. 3, pp. 283-294 (1975).
- 12) Chandy, K.M., Keller, T.W. and Browne, J.C.: Design automation and queueing networks: An interactive system for the evaluation of computer queueing models, *Proc. 4th Design Automation Conf.*, pp. 357-367 (1972).
- 13) Reiser, M.: Interactive modeling of computer systems, *IBM Syst. J.*, Vol. 15, No. 4, pp. 283-294 (1976).
- 14) Sauer, C.H., Reiser M. and MacNair, E.A.: RESQ-A package for solution of generalized queueing networks, *Proc. AFIPS NCC*, pp. 977-986 (1977).
- 15) 紀, 本郷, 松田: 性能評価用ツール QM-1 について, 情報処理学会システム性能評価研究会, SE 20-1 (1977).
- 16) 池原, 山田: 汎用ネットワーク形待ち行列解析プログラム QSEC について, 信学会通信部門全国大会, No. 161 (1978).
- 17) Buzen, J.P. et al.: BEST/1-Design of a tool for computer system capacity planning, *Proc. AFIPS NCC*, pp. 447-455 (1978).
- 18) Wallace, V.L. and Rosenberg, R.S.: Markovian models and numerical analysis of computer system behavior, *Proc. AFIPS SJCC*, pp. 141-148 (1966).
- 19) 能條, 川島: 状態方程式の性質と数値解法, 信学会交換研究会, SE 78-35 (1978).
- 20) Gaver, D.P. and Humield, G.: Multitype multiprogramming models, *Acta Inf.*, Vol. 7, No. 2, pp. 111-121 (1976).
- 21) Curtois, P.J.: Decomposability: queueing and computer system applications, Academic Press Inc., New York (1977).
- 22) Chandy, K.M., Herzog, U. and Woo, L.S.: Parametric analysis of general queueing networks, *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 19, pp. 36-42 (1975).
- 23) Chandy, K.M., Herzog, U. and Woo, L.S.:

- Approximate analysis of general queueing networks, IBM J. Res. Dev., Vol. 19, pp. 43-49 (1975).
- 24) Kobayashi, H.: Application of the diffusion approximation to queueing networks I: equilibrium queue distribution, J. ACM, Vol. 21, No. 2, pp. 316-328 (1974).
 - 25) Lam, S. S.: Store-and-forward buffer requirements in a packet switching network, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, No. 9, pp. 458-463 (1975).
 - 26) 池原 悟: パッシブ・サーバをもつネットワーク型待ち行列を用いた計算機の性能評価法, 情報処理学会論文誌, Vol. 20, No. 2, pp. 105-112 (1979).
 - 27) Towsley, D., Chandy, K. M. and Browne, J. C.: Models for parallel processing within programs: Application to CPU: I/O and I/O: I/O overlap, Commun. ACM, Vol. 21, No. 10, pp. 821-831 (1978).
 - 28) Sevcik, K. C.: Priority scheduling disciplines in queueing network models of computer systems, Proc. IFIP Congress '77, pp. 565-570 (1977).
 - 29) Buzen, J. P.: Analysis of system bottlenecks using a queueing network model, Proc. ACM-SIGOPS Workshop on System Performance Evaluation, pp. 82-103 (1971).
 - 30) Arora, S. R. and Gallo, A.: The optimal organization of multiprogrammed multilevel memory, *ibid.*, pp. 104-141 (1971).
 - 31) Gaver, D. P.: Probability models for multiprogramming computer systems, J. ACM., Vol. 14, No. 3, pp. 423-438 (1967).
 - 32) Scherr, A. L.: An analysis of time shared computer systems, MIT Press, Cambridge, Mass. (1967).
 - 33) Special issue: queueing network models of computer system performance, ACM Comp. Surveys, Vol. 10, No. 3 (1978).
 - 34) 田中穂積: 並列循環待ち行列を用いたオンラインシステムの解析, 電子通信学会論文誌, Vol. 53-C, No. 10, pp. 756-764 (1970).
 - 35) Chen, P. P.-S.: Queueing network model of interactive computing systems, Proc. of the IEEE, Vol. 63, No. 6, pp. 954-957 (1975).
 - 36) 関野 陽: 階層構造モデルによる Multics システムの性能評価, 情報処理学会性能評価研究会, SE 15-1 (1976).
 - 37) Browne, J. C. et al.: Hierarchical techniques for the development of realistic models of complex computer systems, Proc. of the IEEE, Vol. 63, No. 6, pp. 966-975 (1975).
 - 38) Neilson, J. E.: An analytical performance model of a multiprogrammed batch-timeshared computer, Proc. of Int'l Symp. on Comp. Performance Modeling, Measurement and Evaluation (以後 ISCPME と略), pp. 59-70 (1977).
 - 39) Brown, R. M. et al.: Memory management and response time, Commun. ACM, Vol. 20, No. 3, pp. 153-165 (1977).
 - 40) Guillon, A.: A case study of performance modeling a large computer system, Proc. ISCPME, pp. 235-248 (1977).
 - 41) Bard, Y.: An analytic model of the VM/370 system, IBM J. Res. Dev., Vol. 22, No. 5, pp. 498-508 (1978).
 - 42) Rose, C. A.: A 'calibration-prediction' technique for estimating computer performance, Proc. AFIPS NCC, pp. 813-818 (1978).
 - 43) Chiu, W. W. and Chow, W. M.: A performance model of MVS, IBM Sys. J., Vol. 17, No. 4, pp. 444-463 (1978).
 - 44) Diethelm, M. A.: An empirical evaluation of analytical models for computer system performance prediction, Proc. ISCPME, pp. 139-160 (1977).
 - 45) 橋田 温: 情報処理システムにおける待ち行列理論の応用(1), 情報処理, Vol. 18, No. 2, pp. 184-194. 同(2), No. 3, pp. 289-297 (1977).
 - 46) Pritsker, A. A. B.: Modeling and analysis using Q-GERT networks, Halsted Press, New York (1977).
 - 47) Denning, P. J. and Buzen, T. P.: The operational analysis of queueing network models, ACM Comp. Surveys, Vol. 10, No. 3, pp. 225-262 (1978).
 - 48) Reiser, M.: Mean value analysis of queueing networks, a new look at an old problem, Proc. 4th Int'l Symp. Model. and Perform. Eval. of Comp. Systems, pp. 63-77 (1979).
 - 49) Peterson, J. L.: Petri nets, ACM Comp. Surveys, Vol. 9, No. 3, pp. 223-252 (1977).

(昭和 54 年 12 月 14 日受付)