

## CPU利用率に関する Robustness

亀田壽夫・松橋孝人・桑名栄二\*  
(電気通信大学)

**[概要]** CPU利用率は、ある種の多重プログラミングシステムのモデルにおいて、特定の仮定を置くと、スケジューリング（やサービス時間分布）によらず一定となる性質があることが理論的に知られている。ここでは、そのような仮定の範囲外において、この性質がどの程度まで（近似的に）成立するものであるかを調べるために行った、シミュレーション実験の結果を示す。その結果においては、CPU利用率が一定となる性質が、最大の相対誤差10%程度で、成立しているのが観測された。一方、他の性能指標値は、スケジューリングの違いにはるかに大きく依存することが示された。

## 1. はじめに

規模が大きく多人数に共用される大型の計算機システムにおいては、各ジョブに対する応答性や各種装置の利用状況を表す諸性能指標値が問題にされる。中でも特に問題にされる性能指標値に中央処理装置（CPU）の利用率がある。このような諸性能指標値を、計算機システムを記述する諸パラメータ値から計算して求める技法が、計算機関連の一つの重要な技術として発展してきた。その主なものは、待ち行列理論に基づくものである。

このような待ち行列理論の適用範囲に限界があることは明らかである。しかし、適用範囲外にあると考えられる状況の諸性能指標値を、範囲内であると仮定して、待ち行列理論を適用して得られた結果が、実測値と良くあうことがしばしば観測されている。このように適用範囲外と考えられる場合にも成立することを、Robustnessがあるという。

上述したような大型計算機システムは通常多重プログラミング方式を採用しており、その解析にはセントラルサーバモデル（central server model）がよく用いられる（図1.1）。セントラルサーバモデルは閉待ち行列ネットワークモデルの一種であり、その解析に積形解の方法、すなわちBCMP定理を用いることができる[1]。しかし、BCMP定理が適用されるためには、厳密に言えば、CPUなどの処理装置におけるスケジューリング方式が極めて制限されたものである必要がある。

そして、BCMP定理によれば、許されたスケジューリングのもとでは、セントラルサーバモデルにおけるCPUなどの装置利用率が処理時間分布の形によらず一定であることがわかる。

\* 現在、電電公社横須賀通研

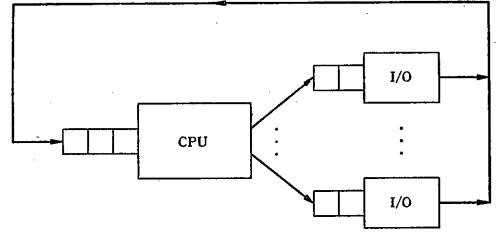


図1.1. セントラルサーバモデル。

一方、セントラルサーバモデルにおいて、I/O（入出力装置）での待ちが無視できるとした漸近的な場合を表すモデルである有限呼源待ち行列モデル（finite source queueing model: 図1.2）において、CPUの諸種のスケジューリングの下である種の性質が得られている[3]。すなわち、モデル内の各ジョブに対するCPU処理時間の平均が異なりI/O処理時間の平均が同一で、各処理時間が指数分布をなす場合、CPU利用率がスケジューリングによらず一定になるというものである。

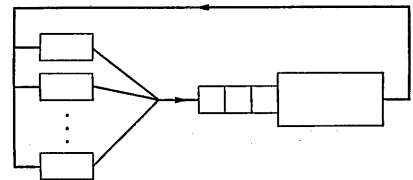


図1.2. 有限呼源待ち行列モデル

以上でみたように、CPU利用率は、種々の条件のもとで同一の値を示すことが、解析的に知られている。我々は、このようなCPU利用率に関する性質が、さらにどの程度まで成り立つか、すなわちCPU利用率に関してどのようなRobustnessがあるか、を調べるためにシミュレーション実験を行った。以下にその結果を記す。

## 2. モデルと既知の解析的性質

1. で述べたように、本稿では、多重プログラミングシステムのモデルとして、有限呼源待ち行列モデルとセントラルサーバモデルを検討する。

## 2. 1. 有限呼源待ち行列モデル (FSM) (図1.2)

ここで考える有限呼源待ち行列モデルは二つのサービスステーションから成る閉待ち行列モデルであり、

一つは単一のサーバ(処理装置と呼ぶ)から成り待ちが生じ得るが、もう一つは複数のサーバ(端末装置と呼ぶ)から成り待ちが生じない。モデルには  $N$  個のジョブがあり、処理装置を出たジョブは各々に対応する端末装置に到着する。端末装置を出たジョブは処理装置に戻る。ジョブ  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) の平均サービス時間は、処理装置と端末装置で、各々、 $1/u_i$ 、 $1/v$  と仮定する。

BCMP定理により、処理装置のスケジューリング方式がprocessor sharingかpreemptive-resume LCFSで、サービス時間分布が任意のとき、モデルの状態確率が積形に与えられることがわかっており[1]、その結果、処理装置利用率( $U$ )は、(1)式で与えられる。

$$U = 1 - \prod_{d_1=0}^1 \prod_{d_2=0}^1 \dots \prod_{d_N=0}^1 \frac{N!}{\prod_{i=1}^N (r_i)^{d_i}} \quad (1)$$

ただし、 $r_i = v/u_i$ 、 $i = 1, 2, \dots, N$ 。

また、他の多くのスケジューリング方式に対しては、積形解が得られないこともわかっている[2]。しかし、サービス時間がジョブごとに指数分布であると仮定すると、非常に多くのスケジューリング方式に対して、処理装置利用率が一定であり、(1)式で表現できることが、理論的に知られている[3]。

理論的に明らかにされていないのは、多種のスケジューリング方式に対して、各装置におけるサービス時間分布が指数的でない場合のモデルの性質である。

## 2. 2. セントラルサーバモデル (CSM) (図1.1)

ここで考えるセントラルサーバモデルは、1台の中央処理装置 (CPU) と  $M$  台の入出力装置 (I/O) とから成る閉待ち行列モデルである。モデル内には  $N$  個のジョブがあり、ジョブ  $j$  のサービス時間は、CPUにおいて異なった平均 ( $1/u_j$ ) を持ち、I/Oにおいて同一の平均 ( $1/v$ ) を持つとする。I/Oにおけるスケジューリング方式はFCFSとする。CPUを出たジョブは、 $M$  台のI/Oのどれかに等確率で到着する。I/Oを出たジョブはCPUに戻る。BCMP定理により、CPUにおけるスケジューリング方式がprocessor sharingかpreemptive-resume LCFSであるとすれば、CPU利用率  $U$  は次のように計算できる (例えば[6])。

$$U = 1 - C[(M+N-1)!] \quad (2)$$

$$C = 1 / \left[ \sum_{J \subseteq N} J! (M+N-1)! \prod_{i \in J} (Mv/u_i) \right]$$

ただし、 $N$  はシステム中にある全てのジョブの集合を表し、 $J$  と  $N$  は各々集合  $J$  と  $S$  のサイズを表すものとする。サービス時間の分布は、指数分布に限らず任意のものでよい。

## 2. 3. 理論的に明らかされていないCPU利用率のRobustnessの範囲

上述の二つのモデルにおいて、CPUに対応する装置の利用率が、種々の場合において一定であることを見た。しかし、有限呼源待ち行列モデルにおいて装置処理時間が非指数分布をなす場合や、セントラルサーバモデルにおいて装置 (特にCPU) スケジューリング方式が積形解を許さないものである場合には、CPUに対応する装置の利用率が一定であることは証明されていない。以下の実験では、このような場合について調べる。

## 3. シミュレーション実験の方法と対象モデル

前節で述べた二つのモデルについて、各装置におけるサービス時間分布やジョブ数等をいろいろに変えてシミュレーション実験を行った。

### 3. 1. 装置処理時間分布

特にCPU時間分布については、非指数分布としてアーラン分布・超指数分布の他に以下に示すような方法で求めた実測データに基づくワイブル分布も用いた。以下で、 $f(x)$  は処理時間が  $x$  である確率密度関数を表すとする。

[アーラン分布] 次に示すようなアーラン分布

$$f(x) = (uk)^k x^{k-1} e^{-kux} / (k-1)!$$

[平均:  $1/u$ , 変動係数:  $k^{-1/2}$  となる]

を用いた。

[超指数分布] 次に示すような超指数分布

$$f(x) = tv_1 e^{-v_1 x} + (1-t)v_2 e^{-v_2 x}$$

[平均:  $1/v_1 + 1/v_2$ , 変動係数:  $[t/v_1^2 + (1-t)/v_2^2]^{-1/2}$  となる]

を用いた。

[ワイブル分布] 幾つかのプログラムのトレースをとり、各プログラムについて、I/O要求を発生してから次のI/O要求を発生するまでのCPU処理時間の系列を求め、その頻度分布をワイブル紙にプロットすると、比較的良好に適合するのが観測されている。これから、CPU処理時間を表すワイブル分布が得られる[5]。実験では、次に示すような分布を用いた。

$$f(x) = (m/\alpha) x^{m-1} \exp(-x^m/\alpha)$$

[平均:  $\alpha^{1/m} \Gamma(1+1/m)$ , 変動係数:  $\{ \Gamma(1+2/m) - [\Gamma(1+1/m)]^2 \}^{1/2} / \Gamma(1+1/m)$  となる]

確率分布関数は

$$F(x) = 1 - \exp(-x^m/\alpha)$$

ただし、 $\alpha$  は尺度のパラメータ、 $m$  は形状のパラメータと呼ばれている。

### 3. 2. 装置スケジューリング方式

処理装置 (CPU) におけるスケジューリング方式として次のものを調べた。

- FCFS (First-Come-First-Served)
- LCFS (Last-Come-First-Served -- nonpreemptive)
- LCFS-PR (Preemptive-Resume-Last-Come-First-Served)
- SEPTPR (Preemptive-Resume-Shortest-Processor-Time-first)
- LEPTPR (Preemptive-Resume-Longest-Processor-Time-first)
- RR (Round-Robin)

I/O装置におけるスケジューリング方式はFCFSとした。

LCFS-PRを採用した場合、BCMP定理を用いて理論的に求めた値とほぼ一致する実験値が得られるはずであることに注意されたい。また、RRを採用した場合も、time quantum が短かければ、その理論値に近い実験値が得られるはずである。

### 3.3. シミュレーション実験の方法

シミュレーションは、以下に示す各実験対象モデルの各シミュレーションケースについて、一つの長いRUNを11の同じ長さの区間に分割し、最初の区間を遷移区間として捨て、残りの10区間の計測値を標本として、その平均値を得る、single-run method と呼ばれる方法を用いた [例えば、4]。そして、各性能指標値について95%信頼区間をも求めた。

シミュレーション言語としては、主にSIMTRAN (GASP類似の言語)を用いたが、一部のケースについては、GPSS類似の言語をも用いてシミュレーションプログラムを別に作成して独立に実験を行い、両者をつきあわせて精度の検定を行った。

### 3.4. 実験対象モデル

2節であげた有限呼源待ち行列モデル(FSM)とセントラルサーバモデル(CSM)を、理論的に解析できない場合に拡張した次の諸モデルについて、シミュレーション実験を行った。各モデルは、装置処理時間分布の違いにより次のように分類される。

[FSM-1] 処理装置において非指数分布が用いられることの影響を調べるために、アーラン分布と超指数分布の諸パラメータ値を調節して、いくつかの(1より大きい小さい値の)変動係数が得られるようにしたもの。

[FSM-2] 処理装置(CPUと見做す)サービス時間分布として、実測に基づくワイブル分布を用いたもの。

[CSM-1] 各ジョブのCPUサービス時間もI/Oサービス時間も、ジョブごとに指数分布をなすとしたもの。

[CSM-2] CPUサービス時間分布として、実測に基づくワイブル分布を用いたもの。

## 4. 実験結果

4.1. FSM-1 N (モデル内のジョブ数) が6である有限呼源待ち行列モデルについて調べた。各ジョブの処理装置サービス時間の平均値の組3通りのケース各々について、アーラン分布・超指数分布のパラメータ値をいろいろに変え、異なった変動係数が得られるようにした。そして、各ケースごとに、異なった変動係数の場合に対して、スケジューリングの違いによる影響を調べた。平均値の3通りの組は、次に示すようなものである。

	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$U^*$
ケース1	1/256	1/64	1/16	1/4	1	4	.965
ケース2	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	1/2	.660
ケース3	1/4096	1/1024	1/256	1/64	1/16	1/4	.275

ただし、 $r_j = v/u_j$  であり  $U^*$  はスケジューリングがLCFS-PRであるときの処理装置の利用率 (BCMP定理で計算できる) を表す。RRのtime quantum は  $1/v$  の  $1/32$  とした。

ケース1, 2, 3における異なった変動係数にたいする処理装置利用率の実験値を、それぞれ、図4.1, 図4.2, 図4.3に示す。

他の性能指標値についてのいくつかの例を図4.4および図4.5に示す。図4.4は、ケース1・ケース2の場合の全装置利用率を示し、図4.5は、ケース2において変動係数が1と4.15の場合の各ジョブに対する応答比 (response ratio: 平均処理装置サービス時間に対する平均応答時間の比) を表す。

4.2. FSM-2 有限呼源待ち行列モデルにおいてN (モデル内のジョブ数) が6である場合を調べた。各ジョブの処理装置サービス時間のワイブル分布の組3通りのケース各々について、スケジューリングの違いによる影響を調べた。ワイブル分布の3通りの組は、次に示すようなものである。

まず、各ジョブの処理装置サービス時間の分布のパラメータ値を次のように与える。

job no. i	1	2	3	4	5	6
ワイブル m	0.49	0.72	0.47	0.41	0.38	0.41
パラメータ $\ln \alpha$	-1.50	-0.97	-0.32	-0.03	0.23	0.64
$1/u_i$ (msec)	0.129	0.320	1.154	2.917	7.030	14.951

次に、端末装置サービス時間を次の3通り用意し、3つのケースとした。

	$1/v$ (msec)	$U^*$
ケース1	7.21	0.965
ケース2	25.43	0.660

ただし、 $U^*$ は4.1で述べたものと同じ意味を持つとする。RRのtime quantumは5.12msecとした。

ケース1, 2, 3における異なったスケジューリング方式にたいする処理装置利用率の実験値を、それぞれ、図4.6内の折れ線で示す。

他の性能指標値についてのいくつかの例を図4.7~図4.10に示す。図4.7は、ケース1, 2, 3の場合の全装置利用率を示し、図4.8~図4.10は、それぞれ、ケース1, 2, 3の場合の各ジョブに対する応答比

(response ratio: 平均処理装置サービス時間に対する平均応答時間の比)を表す。

4.3. CSM-1 セントラルサーバモデルにおいてM(I/O台数)もN(ジョブ数)も6である場合(CASE1)とM=4およびN=8の場合(CASE2)とについて調べた。各ジョブのCPUサービス時間もI/Oサービス時間も、ジョブごとに指数分布をなす場合である。CASE1については、平均I/Oサービス時間の値を一定( $1/v = 896.0$ ただし(6)については $1/v = 819.2$ )とし、各ジョブの平均CPUサービス時間( $1/u_j$ )との値の組の次に示す6通りのケースについて実験した。

ジョブ j	1	2	3	4	5	6	$U^*$
(1)	5.0	20.0	80.0	320.0	1280.0	5120.0	0.950
(2)	3.5	14.0	56.0	224.0	896.0	3584.0	0.899
(3)	2.25	9.0	36.0	144.0	576.0	2304.0	0.799
(4)	1.4	5.6	22.4	89.6	358.4	1433.6	0.654
(5)	14.0	28.0	56.0	112.0	224.0	448.0	0.448
(6)	0.2	0.8	3.2	12.8	51.2	204.8	0.164

CASE2については、各ジョブの $u_j$ と $v$ の値の組のうち、次に示す6通りについて実験した。

	$1/u_1$	$1/u_2$	$1/u_3$	$1/u_4$	$1/u_5$	$1/u_6$	$1/u_7$	$1/u_8$	$1/v$
(1)	23	46	92	184	368	736	1472	2944	906
(2)	18	36	72	144	288	576	1152	2304	916
(3)	13	26	52	104	208	416	832	1664	920
(4)	8.5	17	34	68	136	272	544	1088	873
(5)	5	10	20	40	80	160	320	640	869
(6)	1.75	3.5	7	14	28	56	112	224	939

ただし、(1)~(6)に対する $U^*$ の値はCASE1のものと同じである。ここで $U^*$ は4.1で述べたものと同じ意味を持つとする。RRのtime quantumは100とした。

CASE1と2とにおける異なったスケジューリング方式に対するCPU利用率の実験値を、それぞれ、図4.11と図4.12内の折れ線で示す。

他の性能指標値についてのいくつかの例を図4.13~図4.16に示す。図4.13と図4.14は、それぞれCASE1と2の場合の全装置利用率を示し、図4.15と図4.16は、それぞれ、CASE1の(1)とCASE2の(1)における各ジョブに対する応答比(response ratio: 平均処理装置サービス時間に対する平均応答時間の比)を表す。

4.4. CSM-2 CPUサービス時間が、実測値に基づくワイブル分布であるセントラルサーバモデルについて、次の各場合を調べた。

	N	M
CASE1	6	6
CASE2	8	4
CASE3	16	4
CASE4	16	8

各CASEについて、平均I/Oサービス時間を幾とおりか変えて、異なった $U^*$ の値が得られるようにして実験した。(RRのtime quantumは100msec相当とした)。

CASE1~CASE4における異なったスケジューリング方式に対するCPU利用率の測定値を、図4.17~図4.20に表した。各図において、これを、平均I/Oサービス時間それぞれに対し、別の折れ線グラフで表示した。特に、 $U^*$ が0.950と0.654の場合の測定値を、それぞれ、表1と2に示した。その中では、 $U^*$ と実測値との間の絶対誤差と相対誤差をも示した。

一方、セントラルサーバモデルの諸性能指標値を求めるのに、それを有限呼源待ち行列モデルに近似する方法が考えられるが、その場合のCPU利用率の近似による誤差をも求めて、(CPUスケジューリングがLCFSPRの場合を)表3に示した。

他の性能指標値についてのいくつかの例を図4.21~図4.28に示す。図4.21~図4.24は、それぞれCASE1~4の場合の全装置利用率を示し、図4.25~図4.28は、それぞれ、CASE1~CASE4における、 $U^*$ が0.950の場合の、各ジョブに対する応答比を表す。

## 5. 議論

FSM-1の結果を見るとわかるように、2.2節で見た処理装置利用率がスケジューリングによらず一定であるという性質は、処理装置サービス時間分布が非指数的であればあるほど成立しなくなることがわかる。この利用率が、調査したスケジューリング方式によって異なる度合は、分布の変動係数が4程度どき、 $U^*$ (スケジューリングがLCFSPRであるときの処理装置(あるいはCPU)の利用率)が0.275の場合2%程度迄、0.660と0.965の場合8~9%程度迄、となっている。しかし、これは、全装置利用率やジョブご

との応答率のスケジューリング方式の違いによる差異に比べれば、はるかに小さいことがわかる。

このことを、より現実的な分布について調べたものが、FSM-2の結果として示されている。これらにおいても、処理装置利用率がスケジューリングによって異なる差異は、最大 10% 程度以内であった。これに対して、他の性能指標値は、スケジューリングの違いに対してはるかに大きな差異を示している。さらに、より細かくいうと、スケジューリングの中でもFCFS, LCFS, LEPTPR は、LCFSPR 等よりも、処理装置および全装置の利用率を低くする傾向が観測されている。

有限呼源待ち行列モデル (FSM) で証明された、処理装置 (CPU) 利用率が一定になる性質が、それと類似のセントラルサーバモデルにどのように引き移されるかを見るために調べられたのが、まずCSM-1であり、次にCSM-2である。

CSM-1の結果によると、このセントラルサーバモデルにおいても、CPU利用率のスケジューリング方式による差異は、最大 10% 程度以内であり、他の性能指標値の差異よりはるかに小さかった。さらにより細かくいうと、FCFS, LCFS, LEPTPRは、LCFSPR等よりもCPU利用率を低くする傾向が見られた。

より現実的なサービス時間分布を持つ場合を調べたのが、CSM-2である。この場合では、CPU利用率のスケジューリングによる差異として観測されたものは、最大のものでも 7% 程度以下であった。これに対して他の観測された性能指標値は、スケジューリングの違いに対応してはるかに大きな差異を示している。より細かく見ると、現実的な分布を用いるFSM-2において観測された各スケジューリングごとの傾向と、CSM-1において観測された傾向とが、多少、相殺しあっているように考えられる。

以上の結果の範囲では次のことがいえる。処理装置 (CPU) 利用率がスケジューリング (や分布) によらず一定であるという性質は、理論的に証明された範囲外でここで実験したどの場合についても、厳密には成立していなかった。しかし、この性質は、実験した殆ど全ての場合に近似的に成立しており、差異の程度は最大 10% 程度迄であった。すなわち、多くの場合の差異は通常の実験誤差にふくまれる程度以下と考えられる。これに対して、他の性能指標値は、スケジューリングの違いに対してはるかに大きな変動を示したのである。このことは、現実の複雑な計算機システムにおいて、パラメータ値からCPU利用率等のある種の性能指標の値を予測するのに、制約の強い仮定において理論的に求めた性質に基づく予測値でも、比較的良好に適合する可能性があることを示唆するものと考えられる。

一方、セントラルサーバモデルの諸性能値を求める

場合に、そのモデルの近似として有限呼源待ち行列モデルを用いることが考えられ得るが、その場合の誤差を調べたところ非常に大きくなる場合があることがわかった (相対誤差 462.8% 迄: 表3 参照)。これは、有限呼源待ち行列モデルにおいて証明されたCPU利用率に関する性質が、セントラルサーバモデルにおいても近似的に成立することを示唆する実験結果が得られたのと対照的である。

謝辞 本研究は、以下に記す諸君の多大な援助の下に行なわれた。杉山與裕 (現、日本電気)、田中誠也 (現、アイシン精機)、中井孝博 (現、富士通)、内川清美 (現、諏訪精工舎)、藤本幸広 (電気通信大学) の諸君である。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] Baskett, F., et al.: Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers, *J.ACM* 22, 2 (April 1975), 248-260.
- [2] Chandy, K.M., et al.: Product form and local balance in queueing networks, *J.ACM* 24, 2 (April 1977), 250-263.
- [3] Kameda, H.: A finite-source queue with different customers, *J.ACM* 29, 2 (April 1982), 478-491.
- [4] Kobayashi, H.: Modelling and Analysis: An Introduction to System Performance Evaluation Methodology. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1978.
- [5] 南沢英雄: プログラムの性質の実験的分析, 電気通信大学修士論文 (1979).
- [6] Spirn, J.R.: A model for dynamic allocation in a paging machine, Proc. 8th Annual Princeton Conf. on Information Sciences and Systems (March 1974), 331-334.

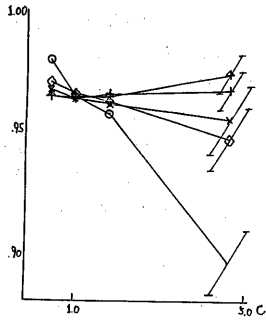


図 4.1 処理装置利用率 (ケース1)

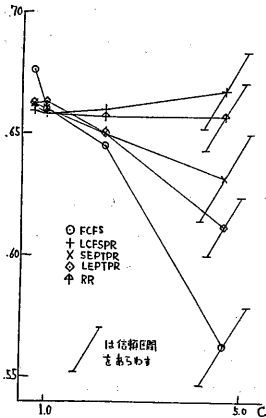


図 4.2 処理装置利用率 (ケース2)

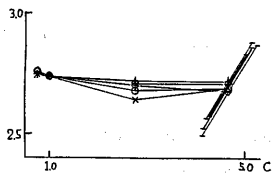


図 4.3 処理装置利用率 (ケース3)

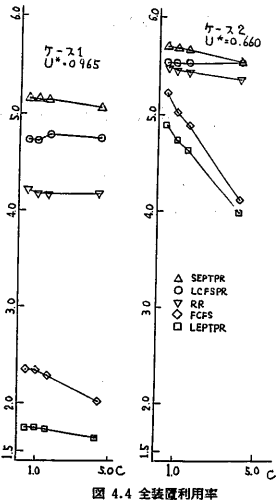


図 4.4 全装置利用率

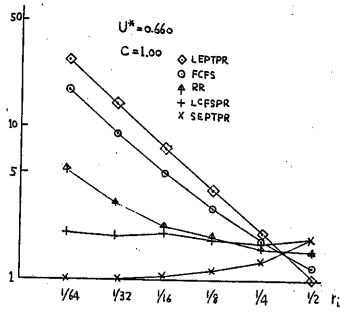


図 4.5 応答比

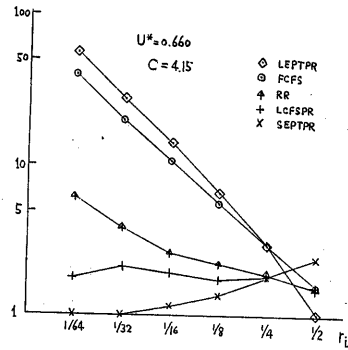


図 4.6 応答比

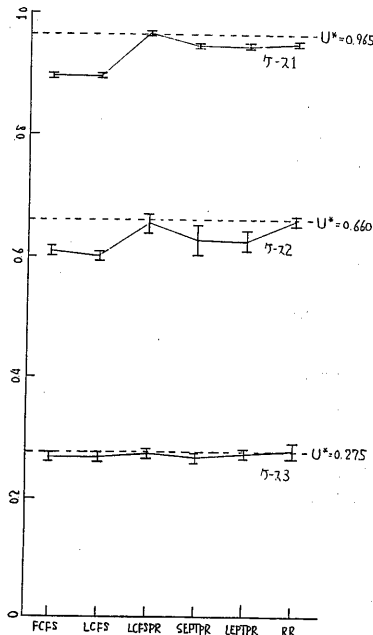


図 4.7 全装置利用率

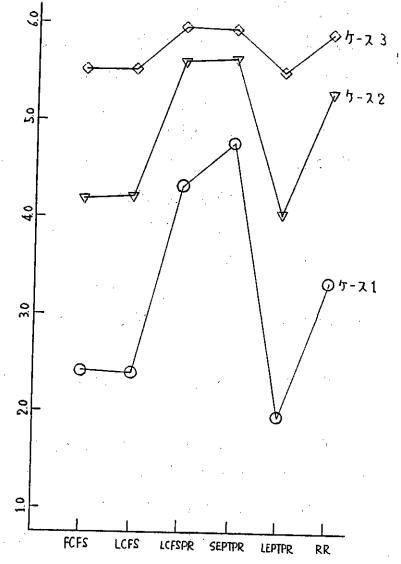


図 4.8 応答比 (ケース1)

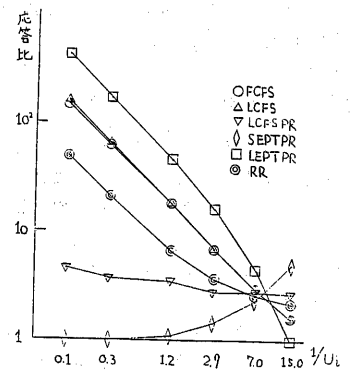


図 4.9 応答比 (ケース2)

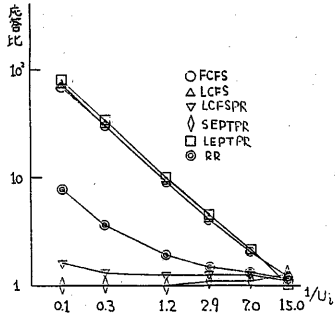


図 4.10 応答比 (ケース3)

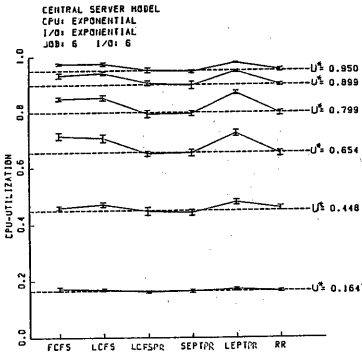


図 4.11 CPU利用率 (CASE1)

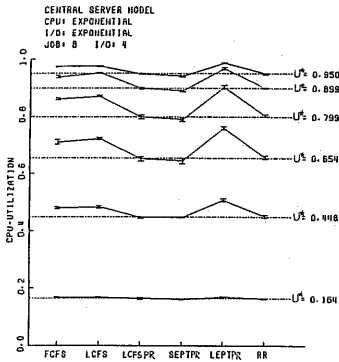


図 4.12 CPU利用率 (CASE2)

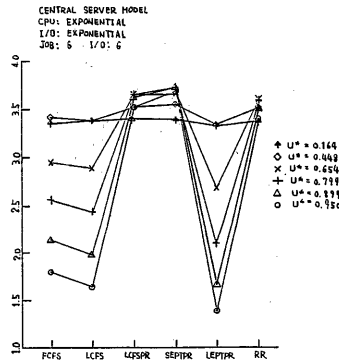


図 4.13 全装置利用率 (CASE1)

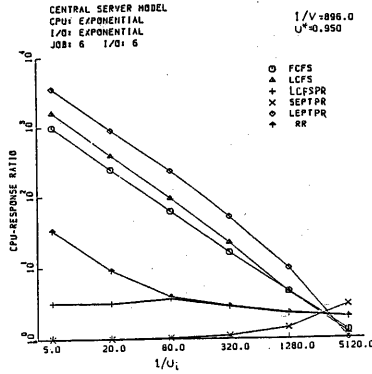


図 4.15 応答比 (CASE1 (1))

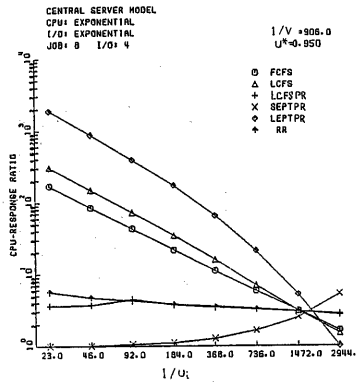


図 4.16 応答比 (CASE2 (1))

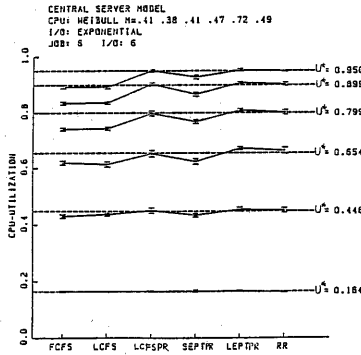


図 4.17 CPU利用率 (CASE1)

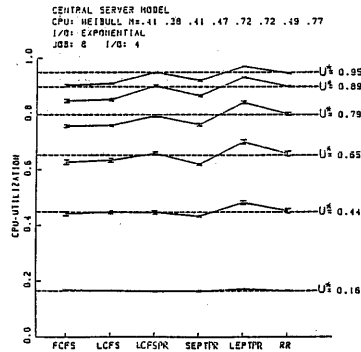


図 4.18 CPU利用率 (CASE2)

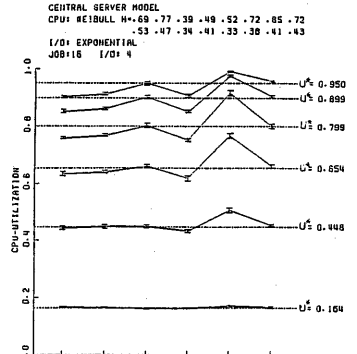


図 4.19 CPU利用率 (CASE3)

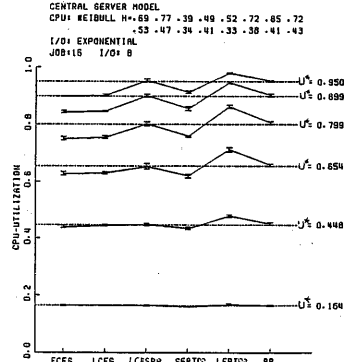


図 4.20 CPU利用率 (CASE4)

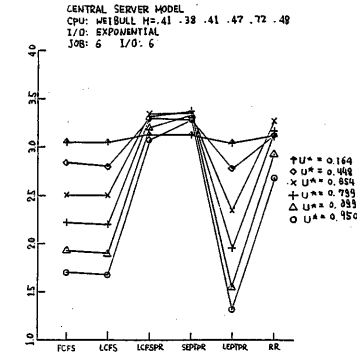


図 4.21 全装置利用率 (CASE1)

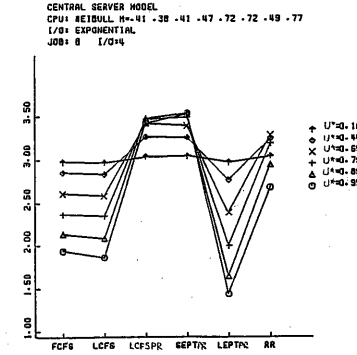


図 4.22 全装置利用率 (CASE2)

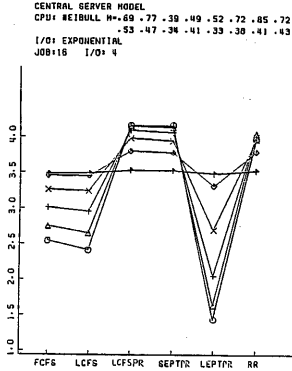


図 4.23 全装置利用率 (CASE3)

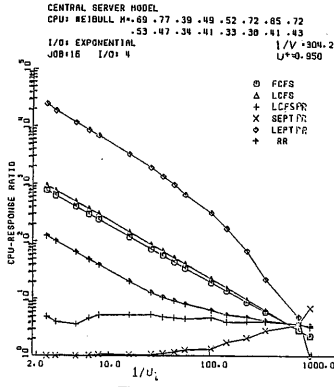


図 4.27 応答比 (CASE3)

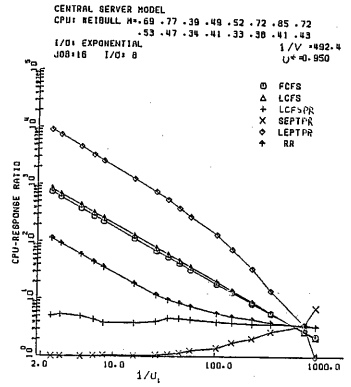


図 4.28 応答比 (CASE4)

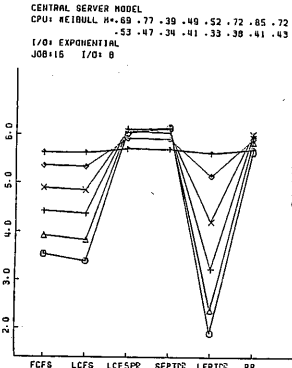


図 4.24 全装置利用率 (CASE2)

	FCFS	LCFS	LCFSPR	SEPTPR	LEPTPR	RR
CASE 1	0.892	0.892	0.950	0.927	0.952	0.948
ABS.	- 5.8%	- 5.8%	+ 0.0%	- 2.2%	+ 0.2%	- 0.1%
REL.	- 6.1%	- 6.1%	+ 0.0%	- 2.4%	+ 0.2%	- 0.1%
CASE 2	0.974	0.973	0.950	0.946	0.977	0.952
ABS.	+ 2.4%	+ 2.4%	+ 0.1%	- 0.3%	+ 2.8%	+ 0.3%
REL.	+ 2.6%	+ 2.5%	+ 0.1%	- 0.3%	+ 2.9%	+ 0.3%
CASE 3	0.903	0.911	0.950	0.921	0.970	0.946
ABS.	- 4.6%	- 3.9%	- 0.0%	- 2.9%	+ 2.1%	- 0.3%
REL.	- 4.9%	- 4.1%	- 0.0%	- 3.0%	+ 2.2%	- 0.4%
CASE 4	0.903	0.913	0.949	0.907	0.991	0.956
ABS.	- 4.7%	- 3.7%	- 0.0%	- 4.3%	+ 4.2%	+ 0.7%
REL.	- 4.9%	- 3.9%	- 0.0%	- 4.5%	+ 4.4%	+ 0.7%

表 1 CPU利用率の実測値と $U^*$ との間の誤差 ( $U^*=0.950$ )

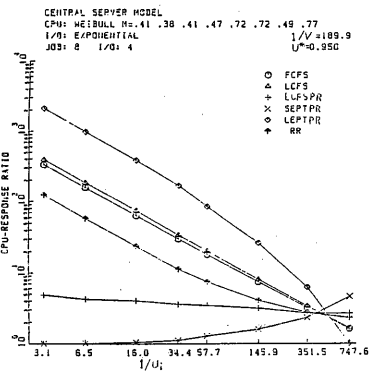


図 4.26 応答比 (CASE2)

	FCFS	LCFS	LCFSPR	SEPTPR	LEPTPR	RR
CASE 1	0.619	0.613	0.651	0.623	0.671	0.662
ABS.	- 3.5%	- 4.0%	- 0.3%	- 3.1%	+ 1.7%	+ 0.8%
REL.	- 5.3%	- 6.2%	- 0.4%	- 4.7%	+ 2.6%	+ 1.3%
CASE 2	0.714	0.705	0.649	0.652	0.723	0.650
ABS.	+ 6.0%	+ 5.1%	- 0.5%	- 0.2%	+ 6.9%	- 0.3%
REL.	+ 9.2%	+ 7.9%	- 0.7%	- 0.2%	+ 10.6%	- 0.5%
CASE 3	0.629	0.635	0.660	0.621	0.701	0.659
ABS.	- 2.5%	- 1.8%	+ 0.7%	- 3.3%	+ 4.7%	+ 0.6%
REL.	- 3.8%	- 2.8%	+ 1.0%	- 5.1%	+ 7.3%	+ 0.9%
CASE 4	0.634	0.639	0.659	0.616	0.766	0.659
ABS.	- 2.0%	- 1.5%	+ 0.6%	- 3.7%	+ 11.2%	+ 0.6%
REL.	- 3.1%	- 2.3%	+ 0.8%	- 5.7%	+ 17.1%	+ 0.9%

表 2 CPU利用率の実測値と $U^*$ との間の誤差 ( $U^*=0.654$ )

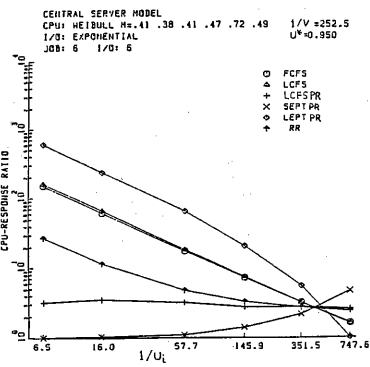


図 4.25 応答比 (CASE1)

	0.950	0.899	0.799	0.654	0.448	0.164
CASE 1	0.987	0.970	0.926	0.836	0.653	0.280
ABS.	+ 3.7%	+ 7.1%	+ 12.7%	+ 18.2%	+ 20.5%	+ 11.6%
REL.	+ 3.9%	+ 7.9%	+ 15.9%	+ 27.8%	+ 45.8%	+ 70.7%
CASE 2	0.997	0.993	0.976	0.931	0.798	0.394
ABS.	+ 4.7%	+ 9.4%	+ 17.7%	+ 27.7%	+ 35.0%	+ 23.0%
REL.	+ 4.9%	+ 10.5%	+ 22.2%	+ 42.4%	+ 78.1%	+ 140.2%
CASE 3	1.000	1.000	0.999	0.997	0.969	0.925
ABS.	+ 5.0%	+ 10.1%	+ 20.0%	+ 34.3%	+ 52.1%	+ 76.1%
REL.	+ 5.3%	+ 11.2%	+ 25.0%	+ 52.4%	+ 116.3%	+ 464.0%
CASE 4	1.000	0.998	0.993	0.986	0.861	0.426
ABS.	+ 5.0%	+ 9.9%	+ 19.4%	+ 31.4%	+ 41.3%	+ 26.2%
REL.	+ 5.3%	+ 11.0%	+ 24.3%	+ 48.0%	+ 92.2%	+ 159.8%

表 3 CSMをFSMで近似したときの誤差