

実時間処理システム—MARS 101 の シミュレーション結果とその分析*

大 須 賀 節 雄**

1. ま え が き

本稿は、国鉄の座席予約システム MARS 101 を対象として行なったシミュレーション結果の分析を行なったものである。MARS 101 システムの概要ならびにここで用いたシミュレーションの手法については、前稿¹⁾「実時間処理システム—MARS 101 のシミュレーション」を参照されたい。本稿で用いている記号および用語はすべて前稿のものと同一である。

2. シミュレーションの実施およびその結果

シミュレーションによってできるだけ一般的な結果を有効に得るためには、各種パラメータの最良の組み合わせを選ばねばならない。そのためにまず簡単なシステム・モデルについての解析によって、パラメータの大体の範囲をきめ、次いで数回の予備実験によってそれを修正し、各種パラメータの妥当な組み合わせ約 150 組を選んだ。

個々の試行の繰り返し回数は乱数発生回数によって規定しており、これを 5,000 回としている。Item 数は 8 種で、そのうち乱数を必要とするのは 4 種であるから、実際の繰り返し回数は最大の場合 10,000 回になり、システム内で処理される呼の数は最大 1,250 個となる。ただし入力発生割合がシステム処理能力を上まわり、システム外部待ち合わせができる場合にはこの数は減少する。呼の処理個数は最小の場合約 500 となっている。

この回数は、統計的データを得るための回数であるが、このようなデータはシステムが定常状態に入ったのちに得ることが望ましい。過渡状態におけるデータは、特に過渡現象に注目するのでない限り、あまり意味はないからである（過渡現象はカレント・データによって調べることができる）。そこで試行開始後定常状態に達するまで、データをとらずに試行を繰り返すことが必要である。しかし一般にはどこまでが過渡状態であるかをあらかじめきめることは難しい。そのた

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100) (101) (102) (103) (104) (105) (106) (107) (108) (109) (110) (111) (112) (113) (114) (115) (116) (117) (118) (119) (120) (121) (122) (123) (124) (125) (126) (127) (128) (129) (130) (131) (132) (133) (134) (135) (136) (137) (138) (139) (140) (141) (142) (143) (144) (145) (146) (147) (148) (149) (150)

- (1) 試行回数
- (2) 生じた事象間の時間間隔
(0.5 ms 単位)
- (3) Item No.
- (4) Item 2 行内呼数
(システム外部待ち合わせ)
- (5) Item 3 行内呼数
(入力受信呼数)
- (6) Item 4 行内呼数
(処理待ち呼数)
- (7) Item 5 行内呼数
(TC 列)
- (8) Item 6 行内呼数
(FC 列)
- (9) Item 7 行内呼数
(照合列)
- (10) Item 8 行内呼数
(出力送信呼数)

第 1 図 (a) シミュレーション結果の一例
(カレント・データ)

	Item 3 入力受信	Item 4 処理待ち	Item 5 T C 列	Item 6 F. C 列	Item 7 照 合 列	Item 8 出力送信
0	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000
1	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000
2	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000
3	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000
4	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000
5	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000	0000000
6	0000073	0000073	0000000	0000000	0000000	0000000
7	0000429	0000432	0000000	0000000	0000000	0000000
8	0000244	0000251	0000000	0000000	0000000	0000000
9	0000456	0000227	0000000	0000000	0000000	0000000
10	0000492	0000538	0000000	0000000	0000000	0000000
	0005632	0005654	0000000	0000000	0000000	0000000
	0007236	0007329	0000000	0000000	0000000	0000000

* Results of a Simulation of a Real-Time Processing System-MARS 101 and their Analyses, by Setsuo Osuga (Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo)

** 東京大学宇宙航空研究所

第 1 図 (b) シミュレーション結果の一例
(統計的データ)

め各種パラメータの組み合わせのうち、定常状態になり難いと考えられるものをいくつか選び、再び数回の予備実験を繰り返し、この結果に基づいて過渡状態としての繰り返し回数を6,000回ときめた。

このようにして行われたシミュレーション結果の一例を第1図に示す。(a)図はカレント・データの一部、(b)図は統計的データの一部である。(b)図で中央の一部分に呼あたりの占有時間分布の一部が示され、他は各行列内の呼ごとの占有時間とその有効待ち時間が示されている。その他の諸結果は端末に記録されているので、ここには現われていない。

シミュレーション時間はカレント・データをとる場合約30分、統計的データの場合には約4分を要した。実際にはカレントデータは時間を要するため、少数例についてののみ求めている。

3. 結果の分析

シミュレーションのデータを分析することによって多くの興味ある結果を導くことができる。以下これを(1)システム平均処理能力、(2)1件の処理時間、(3)システム動作効率、という三つの立場から検討してみる。

3.1. システム平均処理能力

システム平均処理能力は単位時間内に処理し得た呼の平均個数であるが、以下ではこの逆数すなわちシステムの平均処理時間をもって評価する。これを τ と表わすと

$\tau = T/N$, T : 総時間, N : 総処理呼数である。

3.1.1. 入力割合との関係

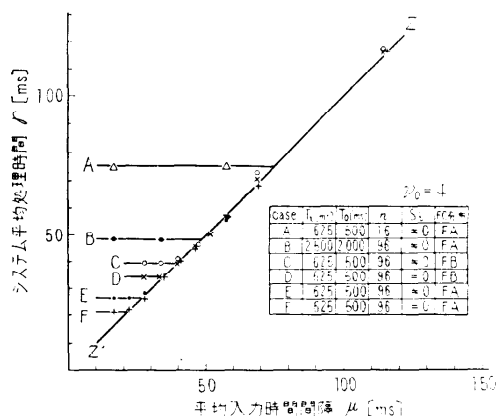
τ と入力呼との関係を調べるに際しても、以下しばしば入力割合 λ の逆数すなわち平均入力時間間隔 μ を用いる。 τ と μ の関係、システム外部待ち合わせの状況および外部待ち合わせの平均成長速度を示したのがそれぞれ第2, 3および4図である。

(1) τ は μ が大なる範囲では $\mu = \tau$ であり、 μ がシステムの他の諸パラメータにより定まる一定値($\tau_{\min}$)よりになると、 τ は入力にフォローすることができず、この一定値 $\tau_{\min}$ に固定される(第2図)。

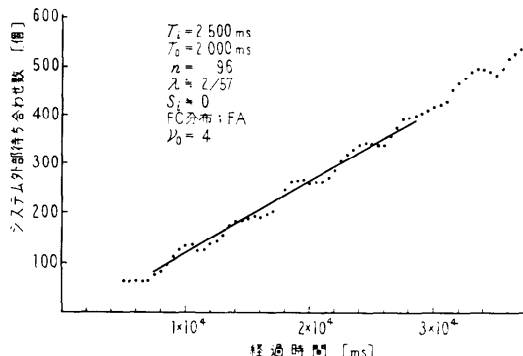
(2) $\tau_{\min}$ はシステム・パラメータに依存する最小処理時間である。 $\tau_{\min}$ に大きな影響を与えるのは i) TRC チャンネル数, ii) 通信時間, iii) FC の平均処理時間である(第2図)。

(3) $\mu < \tau_{\min}$ の場合にはシステム外部待ち合

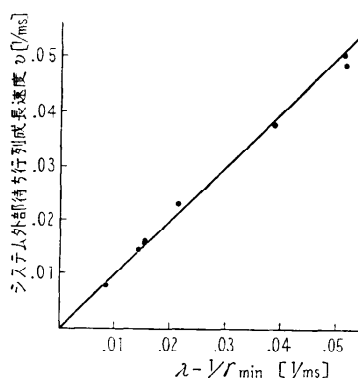
せが成長してゆくが(第3図)、この平均成長速度はほぼ $\lambda - 1/\tau_{\min}$ に等しい(第4図)。なほ第3図の結果はまだ定常状態に達していないため脈動を示している。



第2図 入力時間間隔とシステム平均処理時間の関係



第3図 システム外部待ち合わせ数の時間的变化



第4図 システム外部待ち行列成長速度 v と $\lambda - 1/\tau_{\min}$ の関係

3.1.2. TRC チャンネル数および通信時間との関係

TRC の送受信機能がシステム処理能力に及ぼす影響をみるため、TRC チャンネル数 n について $\gamma_{\min}$ をプロットしたのが第5図である。

(1) n が小さな範囲では、 $\gamma_{\min}$ は n により支配される。すなわちシステム出入口の制御能力が不足で、ここがボトルネックになっている。

(2) n がシステムの他の諸パラメータによってきまるある一定値を越すと、以後は $\gamma_{\min}$ にほとんど影響しない。これはボトルネックが他の個所に移ったことを示す。この時の n の一定値を n_{cr} とすると、これがシステムのバランスを保つ最適チャンネル数である。

(3) 各呼の入力受信時間および出力送信時間をそれぞれ T_i および T_o とすると、 $n < n_{cr}$ では $\gamma_{\min}$ は通信時間 ($T_i + T_o$) にほぼ比例する。ただし、これは通信時間が内部処理時間に比し十分大なる時に限る。 $n > n_{cr}$ ではボトルネックはシステム内部に移るから、 $\gamma_{\min}$ は通信時間にも影響されない。したがって n_{cr} は通信時間にほぼ比例し、また図でB曲線はA曲線を横軸に約4倍の割合でのばしたものになる。そこで以後Bの場合はAの場合から類推するものとし、Aの場合を主体にして扱う。

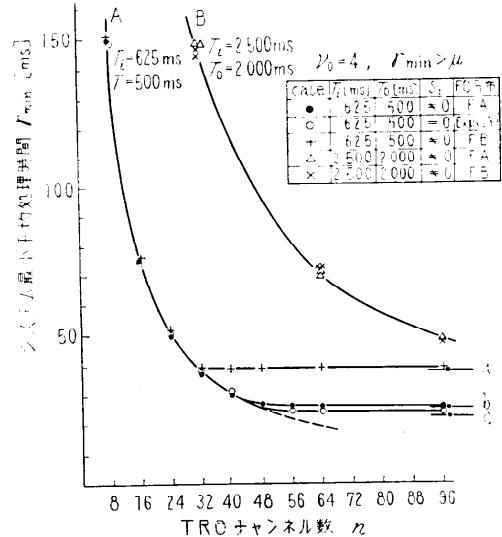
(4) $n < n_{cr}$ の場合の $\gamma_{\min}$ と n および $T_i + T_o = T_T$ の関係は $\gamma_{\min} \doteq (T_T + \bar{c})/n$ で良く表わされる。ここで $\bar{c}$ はシステム内部での処理時間の平均値である。 $T_T \gg \bar{c}$ の時は $\gamma_{\min} \doteq T_T/n$ である。外部待ち合わせができていない場合には TRC の全チャンネルが常に占有されているから $(T_T + \bar{c})/n$ はシステムを出てゆく呼の平均時間間隔で、これが $\gamma_{\min}$ となることは明らかである。

(5) $n > n_{cr}$ の範囲では、 n の変化に伴う $\gamma_{\min}$ の変化は極く僅かであるが、 $n \rightarrow \infty$ とすると $\gamma_{\min}$ はシステム内で新たにボトルネックとなった個所の処理能力に漸近する (図中1点鎖線)。(4)で述べた関係は、 $n \doteq n_{cr}$ に到るまで良く成り立っているので、 $n_{cr} \doteq (T_T + \bar{c})/\bar{\gamma}_{\min}$ ($\bar{\gamma}_{\min}$: $n \rightarrow \infty$ の時の漸近値) である。

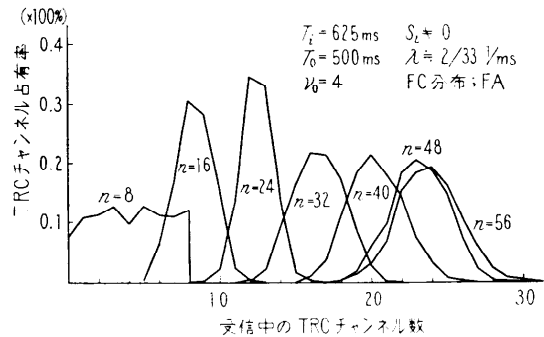
(6) TRC チャンネルの占有状況は第6図のようになる。これは n チャンネルのうち、入力受信中として占有されているチャンネル数 (n_i) の分布状況であり、 $n=8 \sim 56$ の場合が示されている。 n_i の平均値を $\bar{n}_i$ とすると、 $\gamma_{\min} \times \bar{n}_i \doteq T_i$ である。同様にして出力

送信中および内部処理中の状態で占有されている平均チャンネル数 $\bar{n}_o$ および $\bar{n}_c$ についても $\gamma_{\min} \times \bar{n}_o \doteq T_o$, $\gamma_{\min} \times \bar{n}_c \doteq \bar{c}$ である。

(7) n が小的时候、過渡状態において TRC チャンネル占有状態に脈動現象が生ずる場合がある。これは呼が少数 (n) のグループに区切られて、受信・処理・送信のサイクルが繰り返されるからである。一般にはこれは時間と共に平均化してゆくが、処理時間の最大値が T_T/n より小さい場合には、脈動が生ずると消えずに残ることになる。



第5図 システム最小平均処理時間と TRC チャンネル数の関係



第6図 受信状態にある TRC チャンネル数の分布

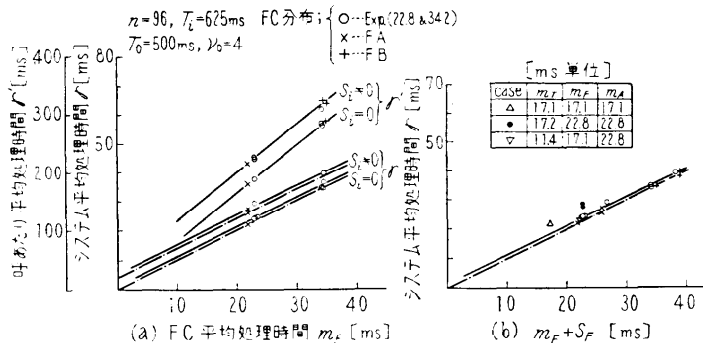
3.1.3 システムの最大処理能力

$n > n_{cr}$ の際のシステム処理能力は、これまでの結果からみても、またシステム内部の各処理装置のうち、FC の処理時間が最大であることから考えても、FC

に依存することは明らかである。シミュレーション結果のうち、 $\mu < \tau_{\min}$ でかつ $n > n_{cr}$ の場合のものを FC の平均処理時間 m_F についてプロットすると第 7 図 (a) が得られる。同図には呼あたりの平均処理時間 γ' が同時に示されている。 γ' は各呼 1 件ごとにシステム内部処理に要した時間の平均値である (第 3.2 節参照)。 $\tau_{\min}$ について横軸に m_F と、FC からの割り込みに対応するプログラム実行時間 s_F との和をとると第 7 図 (b) になる。この関係は $\tau_{\min} = m_F + s_F + \eta$ である。

η は処理待ちの呼が多数存在するにもかかわらず、前後の処理装置との関係で FC が遊休となる場合の平均時間であり、システム損失である。この損失は一般に直列に連なった処理装置のうちの一つの平均処理時間が他のものより十分大であり、かつ各処理装置の前に十分長い待ち行列が許される場合 (さらに各処理装置の処理時間のばらつきが小さい時) には小であるが、そうでないと増大する。各処理装置の平均処理時間が相互にあまり異なる場合の数例が第 7 図 (b) に付加されている。

MARS 101 の場合には $\eta / (m_F + s_F) \div 0.05$ 程度である。



第 7 図 システム平均処理時間および情報あたり平均処理時間と FC 平均処理時間の関係

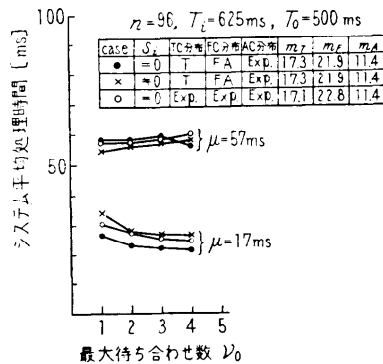
3.1.4. 呼の許容待ち合わせ数の影響

システム損失 η は各処理装置の前の呼の許容待ち合わせ数にも関係する。許容待ち合わせ数 ν_0 と $\tau_{\min}$ の関係を第 8 図に示す。

(1) 一般に $\tau_{\min}$ は、 $\mu < \tau_{\min}$ の場合、 ν_0 と共に減少する。 $\mu > \tau_{\min}$ の場合にはシステム内に同時に存在する呼の数が少なく、各装置間の相互干渉も少ないから ν_0 には無関係である。

(2) 平均値にたいして処理時間のばらつきの大き

な指数分布の場合により多くの ν_0 を必要とする傾向がみられる。



第 8 図 システム平均処理時間と最大待ち合わせ数の関係

3.2. 1 件の処理時間

各呼ごとに、入力受信を終ってシステム内に入ったのち、処理を終って送信開始までの経過時間を求め、平均をとったのが呼あたりあるいは 1 件平均処理時間 γ' である (γ' は通信時間や TRC 内部での処理待ち時間は含まない)。 γ' と μ および n の関係をプロットしたものがそれぞれ第 9、10 図である。両図でそれ

れ μ の小なる場合 (第 9 図) および n の大なる場合 (第 10 図) に γ' が一定値をとっているのは、システム内部に入り得る呼の数が限定されているためで、処理待ちの時間を含めると図の破線で示したように増加する。以下主として第 10 図について述べる。

(1) n の小なる範囲では n の増加による γ' の増加は小さいが、 n がさらに増すと ($n \div n_{cr}$) γ' は急速に増加する。これは n の値によって内部処理の性質が変化する

ためと考えられる。すなわち n の小なる間はシステム内部にはたかだか 1~2 個の呼が存在するのみで、システム内部での処理は並列処理になっていない。したがって 1 件処理時間は呼が TC, FC, 照合の順で処理される過程の各処理時間の和である。この状態は呼の数が多少増しても各行列の待ち合わせが少ない間はあまり変化しない。そのため n のある範囲にわたって γ' は比較的分散である。この場合の γ' は

$$\gamma' \div m_T + m_F + m_A + s_A + s_F + s_T$$

であり、同図でAの場合 64.6 ms, Bの場合 77.4 ms になり、結果と良く一致している。

(2) n が大になるとシステム内の呼の数が増し、各処理装置の並列処理の割合が増してくる。1件処理時間は待ち合わせ時間のために増加する。この状態では主として FC によって r' がきめられ

$$r' = (\bar{v}_T + \bar{v}_F)(m_F + s_F + \eta) + m_A + s_A \\ = (\bar{v}_T + \bar{v}_F)r_{\min} + m_A + s_A$$

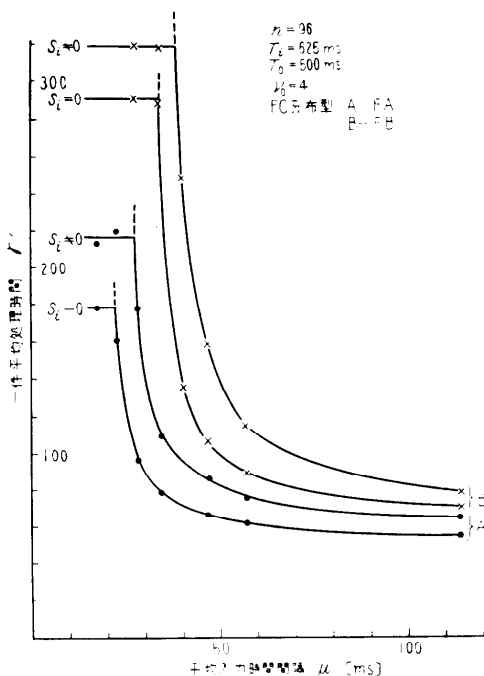
である。 $\bar{v}_T$ および $\bar{v}_F$ はそれぞれ TC および FC の行列内平均待ち合わせ数である(第7図(a)参照)。

(3) 上記(1)から(2)の状態への遷移は、 n の変化の比較的小さな範囲内で急速に行なわれる。

(4) $\times$ 印(第10図B')はBの場合の通信時間を4倍にした場合であり、傾向はBの場合と同様である。 $\mu > r_{\min}$ の場合はシステム内の呼の数は n に無関係であるから、 r' は n によらず一定値をとる。

(5) σ' と示されているのは1件処理時間の標準偏差である。 σ' は r' と同様 n とともに増加するが、 r' が一定となるような n の値に達するとほとんど不連続的に減少してやはり一定値をとる。これはシステム内部の呼が飽和すると、安定化することを示している。

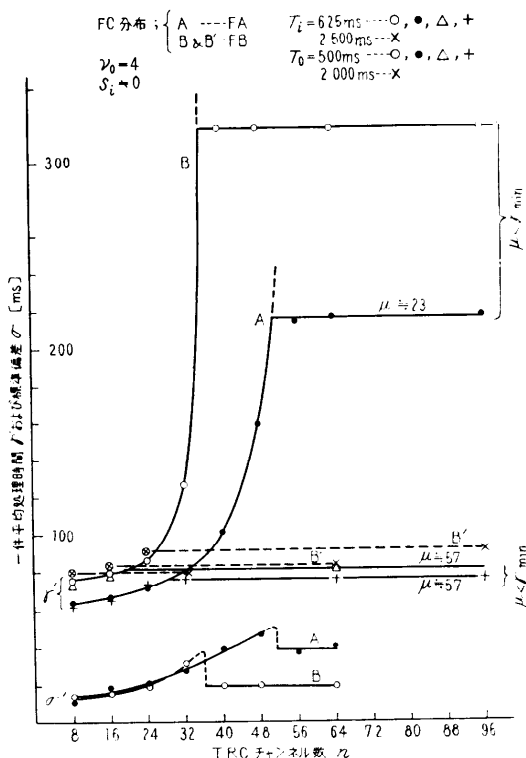
σ' に関しては、照合のための待ち時間が両システ



第9図 1件平均処理時間と平均入力時間間隔の関係

ムの処理時間の差であり、これは σ' に依存するので小であることが望ましい。 n が大なる時の σ' はシステム内部に入り得る呼の数に依存するが、これを少なくすると $r_{\min}$ が大となるため、このかね合いで最適な値をきめることが必要である。

以上のことは第9図についても同様である。第9図で μ の小(大)なることは、第10図で n の大(小)なる場合に相当する。



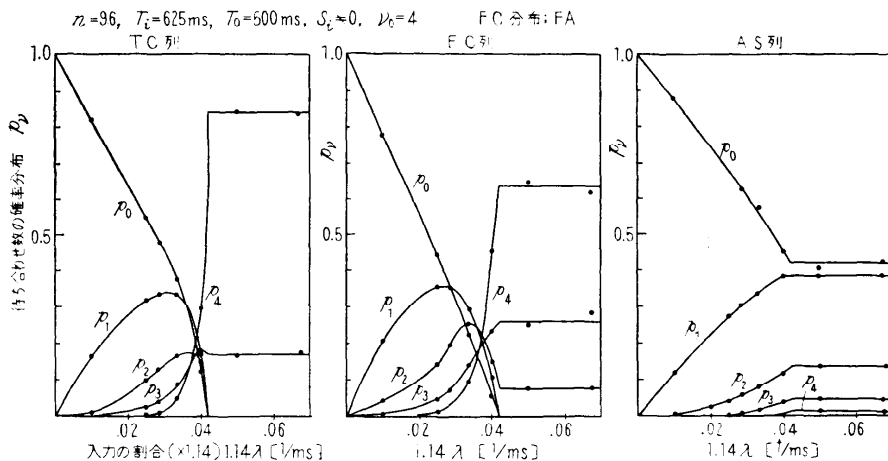
第10図 1件平均処理時間および標準偏差と TRC チャンネル数の関係

3.3. システム内部の状態および動作効率

これまでは $r_{\min}$ や r' といった総合的な結果に基づいて述べてきたが、次にシステム内部の状態をさらに詳細に調べ、また各処理装置の動作効率を求めてみる。

3.3.1. システム内部の呼の分布

i 番目の行列に ν 個の待ち合わせのある確率は、 $p_{i\nu} = T_{i\nu}/T$ である。ここで $T_{i\nu}$ は i 列に ν 個の呼の存在した総時間である。この一例を図示したものが第11図である。図では suffix i は省いており、また横

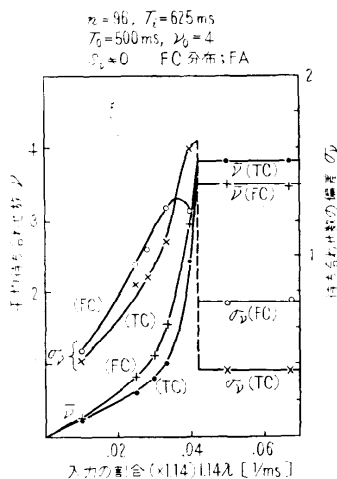


第 11 図 各行列内の待ち合わせ分布と入力の割合の関係

軸には便宜上 1.14λ を用いている。また第 12 図に平均待ち合わせ数およびその偏差が示されている。

(1) λ の小さい範囲では各行列間の相互干渉は少ないが、 λ が増すとこの影響が現われ、さらに $\lambda = \lambda_{cr} = 1/\gamma_{min}$ に達するとシステム内で呼が飽和し、分布が一定となる (第 11 図)。

(2) $\lambda > \lambda_{cr}$ では TC, FC 列内の呼の数が大で、照合列は少ない。これは FC によって呼の流れが限定されていることを示す (第 11 図)。



第 12 図 平均待ち合わせ数および偏差

3.3.2. システムの動作効率

(1) SC の動作効率 e_s を総時間 T に対して SC が使用された時間の割合とすると、

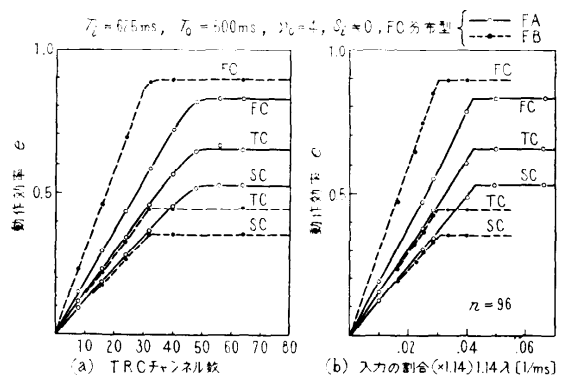
$$e_s = N \sum_i S_i / T = 14 N / T$$

で得られる。 $\sum_i S_i$ は一つの呼について SC がサービスせねばならないプログラム実行時間で、本例では 14ms である (第 13 図)。

(2) TC および FC の動作効率 e_i および遊休の割合 l_i (i はいずれも T または F) は

$$e_i = T_{i1} / T, \quad l_i = T_{i2} / T = (T - T_{i1}) / T,$$

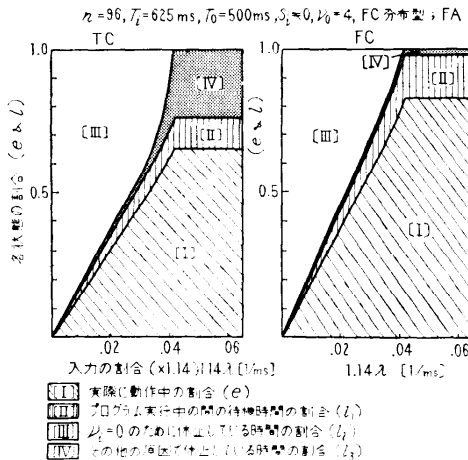
である。 T_{i1} , T_{i2} はそれぞれ総時間 T のうち、実働時間および遊休時間である (第 13 図)。



第 13 図 SC, TC および FC の動作効率

(3) l_i は TC または FC の状態によってさらに細分される。すなわち遊休の場合は、(i) TC または FC が処理終了ののち次の処理開始までの間、SC のプログラム実行時間待つ場合、(ii) 行列内の呼の数が 0 となって次の呼の現われるのを待つ場合、(iii) 次の行列が一杯のため、そこに空きができるまで待つ場合、(iv) SC に割り込んだ後、対応するプログラムが成立するのを待っている場合、に分けられる。このうち (i) および (ii) の場合をそれぞれ l_{i1} および l_{i2}

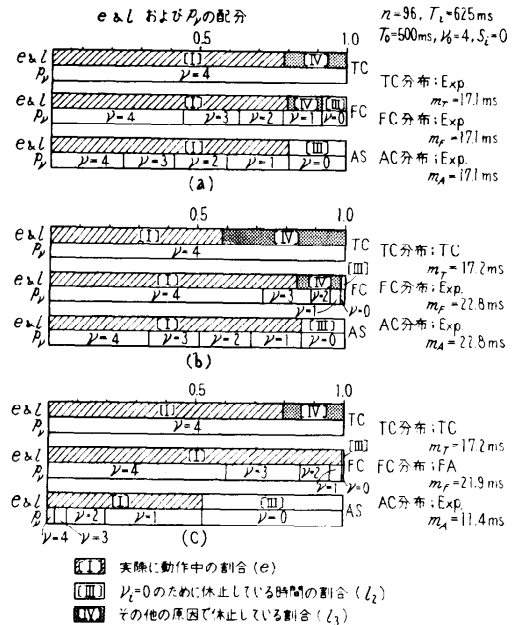
とし、(iii)と(iv)をまとめて l_{i3} と表わす。厳密にはこれらは排反事象ではない。たとえば(ii)と(iii)とは同時に生ずることもあり得るが、 λ が大になると実際上排反事象と考えても大きな影響はない。 l_{i1} は S_i および N から、 $l_{i1}=NS_i/T$ として求められ、 $l_{i2}=p_{i0}$ 、 l_{i3} はこれらの残りの分である(第14図)。



第14図 TC および FC の各種状態の割合と入力の割合の関係

(4) TC では l_{T3} が最大で、 $l_{T3} \doteq (m_F + s_F - m_T - s_T)/T_{\min}$ である。これは TC と FC に処理速度の差がある以上、必然的に生ずる。FC では l_{F1} が最大である。すでに見てきたように、システム全体の処理能力をますためには FC の損失を最小にすることが必要であるが、 l_{F1} を少なくするためには、プログラム時間をできるだけ小さくせねばならない。これは単にプログラム・ステップを少なくするのみでなく、割り込み処理の方法にもよる。この例では各処理装置はプログラムが全部終了するまで待たされるが、プログラム実行中に次の呼の処理に入るようにすれば、SC と各処理装置の Concurrency が増し、 l_{i1} は減少する。ただし SC が占有される時間の長さは変わらず、これに対して割り込み頻度が増すため l_{i3} の分が多少増すことは避けられない。

(5) これまでは FC の処理時間が他に比して大なる場合であったが、2種以上の処理装置の平均処理時間が等しい場合には傾向が異なる。この例を第15図に示す。各処理装置間の相互の影響をみるため、プログラム時間は0にしている。この例にみられるように、各処理装置の処理時間分布に応じて前後段への干渉のしかたや程度が異なってくる。またシステム・バランスを保つことは、各処理装置がこの場合のように直列に連なっている場合には、必ずしも全ての処理装置



第15図 各処理装置の状態の割合および待ち合わせ分布の比較

の平均処理時間を等しくすることではない。しかしこのような場合の一般的な傾向をつかむためには、この点に重点をおいたもっと詳細なシミュレーションあるいはシステム解析が必要である。

4. む す び

実時間処理システムは、一般に待時式あるいは一括処理システムとは異なった、多くの固有の問題を有している。しかし一口に実時間処理システムといってもその立地条件は様々であり、システムに対する要求したがつて評価の基準も異なるし、それぞれの場合に含まれる主要な問題点も異なるのは当然のことである。

MARS101 の場合にはシステム処理能力を増やすことが重要であり、そのための努力がなされているが、一般には各場合に応じて評価基準を明確にし、かつ相互に相反する各種の要求を満足するための方法や、システムの構成を検討することが必要である。

最後に各種の御指導を戴いた東大宇宙航空研究所穂坂衛教授および御多忙の折多大の御協力を戴いた安部城一氏、浅井政幸氏はじめ日立製作所の諸氏に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 大須賀節雄：実時間処理システム-MARS 101 のシミュレーション、情報処理、Vol. 6, No. 1