織布工場における人・機械システムの最適化

(第2報) 織機台持作業のシミュレーションと適正受持台数の決定法

東 洋 紡 績 桑 田 秀 夫 (会員)
大阪大学工学部 堀 川 明 (〃)

Optimization of Man-Machine System in a Weaving Mill.

Part 2 : Simulation of Weaving Operation and Determination of Optimal Number of Operating Machines.

Hideo Kuwada* and Akira Horikawa**,

*Toyobo Co., Ltd., Osaka.

** Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Osaka.

Abstract

The simulation system is established for operation of a weaving mill. An operator's one round time, ratio of idle time, loom's waiting time for repair and ratio of downtime have been obtained by giving initial conditions to the system. Next, these items have analytically been solved by the formulation of a definite mathematical model. As above two results coincide with actual conditions in a mill, it is verified that the simulation system and the mathematical model approximate to the real state of a weaving mill. So the method to determine an optimal number of looms which can be attended by operators is proposed from a rate of weaving operation and a limit of one round time according to these data.

(Received July 3, 1984)

摘 要

目的 本研究の目的は、織機台持員の適正な受持台数を設定する方法を見出すことである。台持ち作業に関しては織機と台持員の間に待ち行列理論の標準型¹⁾をそのまま適用することはできない。したがって従来は受持台数の設定には主として経験的な見積りが行われてきた。本文では織機の停台率や台持員の作業時間を、1つはシミュレーションで数値解を求めることを考え、今1つは確定的な数学模型で定式化し解析的に解を求める方法を試みた。そしてこれらの検討過程と結果を利用して適正受持台数の設定方法を検討した。

成果 小型電算機を使って生産現場での日常管理に役立つシミュレーション システムを開発した。つぎに織機の停台率や台持員の1巡回時間、手空き率などを数学模型を使って解析的に求めた結果は、シミュレーションの実現値および工場実績とよく一致しているため、数学模型およびシミュレーション システムの有効性が検証できた。そして織機稼働率の面から得られる最も経済的な受持台数と、巡回時間の制限値から得られる受持台数から、適正受持台数を設定する方法を提案した。

(昭和59年7月3日受理)

1. 緒 言

(1)織布工場の台持員の行動と織機の稼働状態に関して、前報²⁾では待ち行列理論を用いた確率的模型と関数関係を用いた確定的模型を使って解析的に求めた。台持作業でも糸切れ処理のみに待ち行列理論を適用することは比較的容易であるが、ユニフィル処理その他織機の停台を伴わない台持作業が含まれる場合、さらには織機の巡回待ちがある場合には待

ち行列理論を適用することは困難である。またユニフィル処理のごとく関係式を簡単な関数で表現しかねる場合も近似でしか得られない。

このような場合には、むしろシミュレーションによって解を求める方が便利であり、本報文では、台持作業の糸切れ処理のほかにユニフィル処理を加えた主作業を対象にシミュレーション システムを開発し、手近かな小型電算機を使って、人・機械総合システムの最適解をシミュレートした。

(2)前報で台持作業の実態を模型化して確定的な関数で表現したが、今回シミュレーションの対象作業についても同様な関数関係で表現し、シミュレーションの実現値との対比、実態の模型や待ち行列理論模型との対比などを通して、従来不明確であった台持作業時間の定式化を行った。

(3)織機台持員の受持台数の決定方法は、従来受持台数と織機稼働率の間の関係が不明確であったために経験的でしかなかったが、今回その関係を定式化し、これを使って最適受持台数の決定法を提案した。

2. 織機台持作業のシミュレーション

2.1 システムの概要

ここで実行するシミュレーション³⁾は織機台持作業のシミュレーションであり、台持員の作業として1人の責任受持台の たて糸切れ処理、よこ糸切れ処理、ユニフィル処理を対象としている。通常はこれらの外に切下ろし、たて糸手入作業があるが、これの発生頻度は小さいのでシステムの複雑さを避けシミュレーションの対象から外した。

本報文では、たて糸、よこ糸をそれぞれ経糸、緯糸と書き、経糸切れ、緯糸切れ、経緯総合した糸切れおよびユニフィル処理をそれぞれ T , W , C , U で表わし、添字に t , w , c , u を用いることにする。

作業時間中の織機の遊び時間と台持員による処理作業の模型の一例を図1に示し、その記号をつぎのように定める。

図1 織機台持作業の模型

n : シミュレーション試行順番号

: 処理順番号 $n = 1, 2, \dots; i, \dots, N$

N : T , W , U 発生総件数 $N = N_t + N_w + N_u$

N_t , N_w , N_u はそれぞれ T , W , U の発生件数

N_c : T , W 合計発生件数 $N_c = N_t + N_w$

s_i : i 番目の試行の処理時間

$$\begin{aligned}\sum_i s_i &= S = S_c + S_u \\ &= \sum_k s_{ck} + \sum_l s_{ul}\end{aligned}$$

ただし k , l はそれぞれ C , U の処理順番号
 q_i : i 番目の試行の処理待ち時間

$$\begin{aligned}\sum_i q_i &= Q = Q_c + Q_u \\ &= \sum_k q_{ck} + \sum_l q_{ul}\end{aligned}$$

h_i : i 番目の試行の巡視歩行時間

$$\sum_i h_i = H$$

r_i : i 番目の試行の巡回待ち時間

v_i : i 番目の試行の行列待ち時間

Z : シミュレーションの総経過時間

$$\text{作業時間 } Z = H + S$$

T_i : 受持台の1周時間

m : 台持員の受持台数

Y : 織機総停台時間 $Y = S_c + Q_c$

y : 織機停台率 $y = Y/mZ$

x : 台持員手空き率 $x = H/Z$

λ_t , λ_w , λ_c , λ_u はそれぞれ T , W , C , U の発生率

μ_t , μ_w , μ_c , μ_u はそれぞれ T , W , C , U のサービス率

ρ_c , ρ_u : C , U のサービス因子

$$\lambda_c = \lambda_t + \lambda_w$$

$$\rho_c = \rho_t + \rho_w = \lambda_t/\mu_t + \lambda_w/\mu_w$$

t_m : 織機 m 台の1巡回正味歩行時間

t_0 : 織機1台当たりの正味歩行時間

図1に従って、糸切れの発生から処理終了までの織機の停台と台持員の活動を記述するとつぎのとおりである。台持員の受持台 m 台を対象に考えることにする。織機の経または緯の糸切れ発生時刻は $C(I-2)$, $C(I)$, $C(I-1)$ の順であるが、台持員の処理順は $(I-2)$, $(I-1)$, (I) で処理開始時刻と終了時刻をそれぞれ $S(I-2):F(I-2)$, $S(I-1):F(I-1)$, $S(I):F(I)$ とする。 $C(I-2)$ 糸切れ台は時刻 $C(I-2)$ に糸切れを起してから台持員が到着するまで q_{i-2} の処理待ち時間があり、 $S(I-2)$ から $F(I-2)$ の s_{i-2} の間糸切れ処理を受けて修復し稼働につく。 $C(I-1)$ 糸切れ台は $S(I-2)$ と $F(I-2)$ の間で糸切れを起し、その時点から $F(I-2)$ までは v_{i-1} の行列待ちを起し $F(I-2)$ から $S(I-1)$ までの r_{i-1} の巡回待ちがあつて、 $S(I-1)$ で糸切れ処理が開始され s_{i-1} の処理サービスを受ける。この場合は $v_{i-1} + r_{i-1} = q_{i-1}$ が処理待ち時間である。 $C(I)$ 糸切れ台は $(r_{i1} + r_{i2} + r_{i3})$ の巡回待

ちと $(v_{i1} + v_{i2})$ の行列待ちを起し、それらの総合計として q_i の処理待ち停台があり、 s_i の処理サービスを受ける。

経糸切れ T 、緯糸切れ W 、ユニフィル処理 U の発生間隔は、 T 、 W 、 U がそれぞれポアソン分布に従いつつそれぞれ独立に発生するものとして、つぎの累積分布関数から求める¹⁻³⁾。

$$A_t(t) = e^{-\lambda_t t}, A_w(t) = e^{-\lambda_w t}$$

$$A_u(t) = e^{-\lambda_u t}$$

ただし t は T 、 W または U の発生間隔、ここで初期条件として m 、 λ を与え、累積分布関数 $A(t)$ に一様乱数の数値を代入し $t = -\log A(t)/m\lambda$ から発生間隔 t を求めて t の系列を作り逐次加算して発生の時系列を作成する。さらに T 、 W 、 U を込みにして発生系列を作成する。

糸切れなどの処理時間はつぎのようにして与える。工場内では織機台持員は特定の作業員にほぼ固定されており、歩行時間 t_0 と平均処理時間 $1/\mu$ は台持員の技量と経験によってほぼ決まるから、その工場における t_0 と $1/\mu$ の分布はほとんど変わらないとみなすことができる。したがってシミュレーションでは、 t_0 には一定値を与え、処理時間については工場の実測値をもとに T 、 W 、 U 別に累積分布曲線を作って平滑化し、これを数値表にして初期条件として与えておき計算機に一様乱数を発生させてその値に対応する処理時間値を作成する。この方法は特性値の分布が数学模型に表現しにくいユニフィル処理時間値のような場合であっても工場の実態に即した実測値を利用できることが特徴的である。この分布曲線を図2に示す。

シミュレーションの初期条件としては、① T 、 W 、 U の発生率 λ_t 、 λ_w 、 λ_u ② T 、 W 、 U 別平均処理時間 $1/\mu_t$ 、 $1/\mu_w$ 、 $1/\mu_u$ ③ 1 台当たり正味歩行時間 t_0

図2 A工場の織機経緯糸切れ、ユニフィル処理時間累積分布

④台持員の受持台数 m ⑤ T 、 W 、 U 発生総件数 N を与え、出力として① T 、 W 、 U 別平均処理時間 $\bar{s}_t$ 、 $\bar{s}_w$ 、 $\bar{s}_u$ ②糸切台の平均処理待ち時間 $\bar{q}_i$ ③台持員の巡視歩行時間合計 H ④総作業時間 Z ⑤受持台の1周時間 T_f ⑥織機停台時間 Y 、停台率 y 、または稼働率 $(1-y)$ ⑦台持員手空き率 x を得る。

シミュレーションは糸切れ0の状態から始めるので、受持台 m 台の織機稼働率は1.00から始まり糸切れ発生の試行繰返しとともに低下し、糸切れの発生と処理の均衡がとれた処で平衡状態に到達する。

シミュレーションの終了は、織機の稼働率が平衡状態に達した時点で打切る方法もあるが乱数の現われ方によっては一時的に平衡状態のようにみえて判断を誤ることが起こるのでこれを避けて、糸切れなどの試行回数 N を初期条件に応じて350回から800回段階的に与え、平衡状態を確認して打切る方法をとった。シミュレーションには64KBの小型電算機を使用し、そのフローチャートを図3に示す。

図3 織機台持作業シミュレーションのメインフローチャート

2.2 シミュレーションの結果と検討

現在の工場の操業状態をシミュレーションによって再現するとつぎのとおりである。

初期条件：

$$\begin{aligned} \lambda_i &= 0.00573 & \lambda_w &= 0.00477 & \lambda_u &= 0.00515 (\text{件}/\text{min}) \\ 1/\mu_i &= 0.893 & 1/\mu_w &= 0.370 & 1/\mu_u &= 0.295 (\text{min}/\text{件}) \\ m &= 55 (\text{台}) & t_0 &= 0.032 (\text{min}/\text{台}) & N &= 350 (\text{件}) \end{aligned}$$

結果：

$Z = 408.8$ (min)の間における T , W , U の発生件数, 発生率および平均処理時間の実現値は

$$\begin{aligned} N_i &= 120 & N_w &= 105 & N_u &= 125 \\ \bar{\lambda}_i &= 0.00534 & \bar{\lambda}_w &= 0.00467 & \bar{\lambda}_u &= 0.00556 (\text{件}/\text{min}) \\ \bar{s}_i &= 0.843 & \bar{s}_w &= 0.381 & \bar{s}_u &= 0.306 (\text{min}/\text{件}) \end{aligned}$$

となり, これらは初期条件に比較的良好に一致している. シミュレーションの結果は $\bar{q}_c = 1.77$ (min/件) $y = 0.0240$, $T_i = 3.14$ (min), $x = 0.561$ この織布工場の経緯糸切れによる停台率の実績値は0.02から0.04, 台持員の T , W , U 作業以外の時間割合は前報のワーク サンプルング結果から 0.490 ± 0.039 であり, 実験結果は工場の実績値に近い. また1周時間 T_i も実績値 $2.6 \sim 3.6$ min の中間にあり, 比較的良好に一致している.

この織布工場では織機220台を4人または3人で受持つから, その場合の受持台配分はそれぞれ (55台持×4人) または (77台持×2人, 66台持×1人) となるので, $m = 55, 66, 77$ の場合について先ほどの初期条件を使ってシミュレーションを実行し, そのときの織機稼働率が平衡状態に到達するまでの過程を繰返し回数20回おきに打点し図4に示す.

図4 シミュレーション経過図

この場合, ①平衡状態に到達するまでの糸切れの試行繰返し回数は約300回から400回を要している.

②稼働率が一度低下すると回復までに時間を要することがわかる. 稼働率の変動原因には, 主として発生間隔の変動 $V(t_i)$ と乱数の現われ方が影響し, 平衡状態に到達するまでの試行繰返し回数は分散 $V(t_i) = (\bar{t}_i)^2$ に比例する.

一方, 糸切れ発生率 λ は仕掛品種によって異なり,

かつ日間変動もあるから種々の λ に対して $\lambda_i/\mu_i + \lambda_w/\mu_w = \rho_c$ を変数として ρ_c の変動範囲 0.004, 0.006, 0.008, 0.010, 0.012 をとり, 受持台数 $m = 50, 70, 90$ についてシミュレーションを実行し, その織機稼働率の推移を図5に示す.

図5 シミュレーション経過図

織機稼働率が平衡状態に到達するまでの糸切れの試行繰返し回数は図5に示すとおり, 初期条件の m と ρ_c によって決まり, $m = 50$, $\rho_c = 0.004$ では200回, $m = 70$, $\rho_c = 0.010$ および $m = 90$, $\rho_c = 0.006$ では400回を要する. m , ρ_c が大きくなり, ユニフィル処理を含めた糸切れ等の発生率 $m \lambda_{\text{new}}$ がサービス率 μ_{new} に対して $m \lambda_{\text{new}}/\mu_{\text{new}} = m(\rho_c + \rho_u) > 1$ のところでは平衡状態には至らず稼働率は低下し続けて遂に0となり, $m(\rho_c + \rho_u) \approx 1$ のときも同様の現象を示す.

2.3 シミュレーションの特徴と問題点

織機の糸切れ発生間隔および処理時間は λ , μ を使って指数分布またはアーラン分布で表現できるが^{1,4)}, ユニフィル作業の処理時間をそれらで正確に表現することはやや困難であり別の数学模型を用意しなければならない. このような場合には処理時間

の実績値を使ってモンテカルロ法^{3,6)}によって解を求める方が容易である。また台持作業中の糸切れに関しては待ち行列理論を適用して織機の稼働率や作業員手空き率を求めることができるが、台持作業全体を対象に待ち行列理論をあてはめることは困難である。このような場合にも、モンテカルロ法によってシステムの解を求める方が適当である。しかしこの場合でも、台持ちの作業すべてを模型に組入れると、システムが複雑になりシミュレーションの精度が低下するから、発生率の低い切下ろしや経糸手入れ作業は模型から外してシミュレーションの結果を補正する方法をとる方が簡単である。

しかしここでのシミュレーションの最大の問題点は停台率などの結果がなかなか平衡状態に到達しないことであり、それはつぎの2つの要因が大きく影響している。

A. 糸切れ発生間隔および処理時間の変動

糸切れ発生間隔および処理時間を t_λ , t_μ とおき、その分散を $V(t_\lambda)$, $V(t_\mu)$ とすると、実測値から $V(t_\lambda) = 2.778$, $V(t_\mu) = 0.195$ ゆえ $V(t_\lambda)$ は $V(t_\lambda)$ に比して十分に小さく、 t_λ と t_μ は互いに独立であるから織機停台率 y の分散は $V(t_\lambda)$ を中心に考えることにすると、 $\sqrt{V(t_\lambda)} = \bar{t}_\lambda$ ゆえ y の誤差を95%の信頼限界で相対誤差0.10に収めるための試行回数は、 $N = (2/0.10)^2 = 400$ 相対誤差0.05に対しては $N = 1\,600$ を必要とする。つまり y の精度を上げるためには、 N を十分大きくする必要がある^{3,5)}。

B. 一様乱数がわずかに歪みを持つ場合

単位時間の糸切れ発生率、機台番号の現われ方にランダムネスの検定および一様分布の検定を試みた結果³⁾、部分的に一様乱数とはいえないことがある。シミュレーションを実行してランダムでない数列が20から30継続したために一時的に稼働状態を低下させることが起こると、その回復にはかなりの時間を必要とする。つまり平衡状態に達するのに時間がかかる。

以上の原因によって y が平衡状態を保つまでの試行回数は、初期条件によって異なるが最低300回は必要とし、ときには1,000回以上も必要となるので小型電算機ではやや無理がある。したがってできる限り現実に近い数学模型を構築することができるならば、これを利用して数値計算をする方が簡単である。

3. 台持員・織機システムの確定的模型

台持員の保修作業には第1報で述べたごとく経緯

糸切れ処理以外にユニフィル処理、切下ろしならびに経糸手入作業と5種の作業があること、および保修台は台持員が巡回してくるまで巡回待ちが発生することから、現在の待ち行列理論では特別な場合を除いてその完全解を求めることは困難である。そのため理論模型では経緯糸切れ以外の作業は省略し、かつ巡回待ちも無視している。この保修作業の発生は確率的現象であるから待ち行列理論などの確率的模型で解くべきであるが、上の事情から確定的模型によって解を求めることにした。またシミュレーションは確率的模型として組立てているが、複雑さを避けて経、緯、ユニフィル作業のみで構成したため、その不足部分を補正する必要がある、確定的模型の助けをかりることにした。

ここでは工場の実態模型とシミュレーション模型および待ち行列理論の構造を確定的な数学模型で表現して解析的方法によって解を求め、シミュレーションの実現値や待ち行列理論の計算結果²⁾と比較検討する。

3.1 処理待ち時間 q

経糸切れ、緯糸切れにより停台を起こした織機が、台持員の到着を待った状態で停台している時間を処理待ち時間 q とすると前報5節より

$$\left. \begin{aligned} q &= t_m / 6(1 - m\rho) \\ &= t_m / 6 + qm\rho_{c+u} + qm\rho_{d+b} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (1)$$

ただし ρ_{c+u} , ρ_{d+b} はそれぞれ経緯糸切れ C , ユニフィル処理 U および切下ろし D , 経糸手入作業 B のサービス因子、 $\rho = \rho_{c+u} + \rho_{d+b}$ シミュレーションでは切下ろし D および経糸手入れ B 両作業を省いているから、その模型の構造は

$$\left. \begin{aligned} q_b &= t_m / 6(1 - m\rho_{c+u}) \\ &= t_m / 6 + qm\rho_{c+u} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (2)$$

したがって実際の構造模型とシミュレーション模型の間には、 $q - q_s = qm\rho_{d+b} / (1 - m\rho_{c+u})$ だけの差異がある。また t_m は m に比例するものとして

$$t_m = (5.29/55) \cdot m = 0.0962 m \cdots \cdots (3)$$

とおけば

$$q = 0.0160 m / (1 - m\rho) \cdots \cdots (1')$$

3.2 織機停台率 y

織機停台時間は糸切れ台の処理時間と処理待ち時間から成立つから、停台率 y の実際の構造模型は前

報5.3節より

$$y = \rho_c + q\lambda_c \dots\dots\dots(4)$$

シミュレーション模型の構造は

$$y_s = \rho_c + q_s\lambda_c \dots\dots\dots(5)$$

で, (4), (5)式の右辺第1項は処理停台率, 第2項は処理待ち停台率でそれぞれ対応している. これに対して待ち行列理論で扱った停台率は

$$y_0 = M_s/m + M_v/m \dots\dots\dots(6)$$

右辺第1項は処理停台率, 第2項は行列待ち停台率であり, 巡回待ち停台率はまったく含まれていない. $M_s/m \equiv \rho_c$ であるが, M_v/m は $q\lambda_c = (qm\rho_c + qm\rho_{u+d+b} + t_m/6)\lambda_c$ の中の $qm\rho_c\lambda_c$ に対応するが, q が T, W, U, D, B すべての作業を対象にしているのに対して M_v は T, W 作業のみしか対象にしていないことから $M_v/m < qm\rho_c\lambda_c$ したがって y_0 の補正は M_v/m を $q\lambda_c$ に置換える必要がある.

3.3 1周時間 T_l

台持員は受持台の後回り2周と前回り1週の合計3周を1巡回として巡視しているから1周時間を単純に1巡回時間の1/3とすると1周時間 T_l の構造模型は前報5.1節より

$$\left. \begin{aligned} T_l &= t_m/3(1-m\rho) \\ &= t_m/3 + T_l m\rho_{c+u} + T_l m\rho_{d+b} \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

シミュレーションでは切下ろしおよび経系手入作業を省いているから, その構造模型は,

$$\left. \begin{aligned} T_s &= t_m/3(1-m\rho_{c+u}) \\ &= t_m/3 + T_s m\rho_{c+u} \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

したがって実際の構造模型とシミュレーション模型には

$$T_l - T_s = mt_m\rho_{d+b}/3(1-m\rho)(1-m\rho_{c+u})$$

だけの差異が存在する.

3.4 台持員手空き率 x

台持員が処理作業をしていない時間割合を手空き率と定義すると, 手空き率 x は(7)式において右辺第1項の正味歩行時間のみからなり

$$\left. \begin{aligned} x &= t_m/3T_l \\ &= (1-m\rho) \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

シミュレーションにおける手空き率は

$$\left. \begin{aligned} x_s &= (t_m/3 + T_l m\rho_{d+b})/T_l \\ &= (1-m\rho_{c+u}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

前報の待ち行列理論で求めた手空き率は

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= (t_m/3 + T_l m\rho_{u+d+b})/T_l \\ &= (1-m\rho_c) \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

(9)~(11)式の相異点は対象作業の差異により ρ が異なることである.

ここで $m = 55$ 台の場合, 前の初期条件のほかに $\rho_{d+b} = 0.00087$ を加えて(1), (4), (7), (9)式に代入して実際の構造模型の解析解①を求め, ついで(2), (5), (8), (10)式に代入してシミュレーション模型の解析解②を求める. ①~②によって ρ_{d+b} 部分の補正值を求めて, シミュレーションによる実現値③に加えて修正実現値④を算出し表1に示す.

①の実模型および④の修正実現値は, T, W, U のほかに D, B 各作業を含めた台持員の作業全体を対象にしており, シミュレーション実現値の修正値は生産現場の実態に比較的良好一致している.

同様に $m = 66, 77$ の場合についても前の初期条件のもとでシミュレーションを実行し, その実現値の修正値④と実模型の解析解①を算出して表2に示す. この範囲では両者はよく一致しているから, 実

表1 確定的模型の計算値とシミュレーション実現値 ($m=55$ 台)

特 性 値	実際の構造模型の解析解 ①	シミュレーション模型の解析解 ②	シミュレーションによる実現値 ③	シミュレーション実現値の修正値 ④=③+(①-②)
処理作業サービス因子 ρ	0.00925	0.00838	0.00798	0.00885
処理待ち時間 q (min)	1.79	1.64	1.77	1.92
織機停台率 y	0.0256	0.0241	0.0240	0.0255
1周時間 T_l (min)	3.59	3.27	3.14	3.46
台持員手空き率 x	0.4912	0.5391	0.5612	0.5133
対象としている作業内容	T, W, U, D, B	T, W, U	T, W, U	T, W, U, D, B

$$\begin{aligned} t_0 &= 0.032 \text{ min/台} \\ \rho_u &= 0.00152 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_c &= 0.00686 \\ \rho_{d+b} &= 0.00087 \end{aligned}$$

表2 確定的模型の計算値とシミュレーション修正実現値

特 性 値	66		77	
	シミュレーション 実現値の修正値 ④	実際の構造模 型の解析解 ①	シミュレーション 実現値の修正値 ④	実際の構造模 型の解析解 ①
処理作業サービス因子 ρ	0.00899	0.00925	0.00904	0.00925
処理待ち時間 q (min)	2.95	2.72	4.42	4.29
織機停台率 y	0.0369	0.0353	0.0515	0.0518
1 周時間 T_t (min)	5.25	5.43	8.26	8.58
台持員手空き率 x	0.4067	0.3895	0.3043	0.2877
$t_0=0.032\text{min/台}$ $\rho_u=0.00152$		$\rho_c=0.00686$ $\rho_{a+b}=0.00087$		

模型の数値計算によって実態を推定することができる。

このシミュレーション システムは m, λ, μ, t_0 などの任意の条件のもとで実行することが可能であるが、ここでは初期条件として $t_0 = 0.032 \text{ min/台}$, $\lambda_u = 0.00515 \text{ 件/min}$ の分布を与え、 μ_i, μ_w, μ_s については処理時間の累積分布関数を数値表にして与えておく。 $m = 50, 70, 90$ および λ_i, λ_w を与えて $\lambda_i/\mu_i + \lambda_w/\mu_w = \rho_c = 0.004, 0.006, 0.008, 0.010, 0.012$ を助変数としてシミュレーションを実行し、出力として T, W, U 別発生率、処理時間ならびに処理待ち時間、織機停台率、1 周時間、台持員手空き率を求めた。これに対応してシミュレーション模型の解析解 q_s, y_s, T_s, x_s を求めて表 3 に示し、さきのシミュレーションの実現値と比較する。

＊＊印の所は $m \lambda_{twu} > \mu_{twu}$ すなわち T, W, U の発生率がサービス率を上回っているため、台持員は操業維持不能であることを意味している。＊印の所は $m \lambda_{twu}$ が μ_{twu} に接近しており、模型の計算値が示すごとく 1 周時間は長く、停台率も高く、台持員手空き率は極めて少ない。実際には台持員はさらに切下ろしや経糸手入れ作業および巡回監視を行うから、 $m = 70, \rho_c = 0.012$ の場合は操業維持不能、 $m = 90, \rho_c = 0.008$ の場合も操業維持不能に近い。事実、シミュレーションを実行してもいずれも解は不定となる。このことは(2), (5), (8), (10)式からも容易に推定されるところである。

4. 適正受持台数の決定

織機台持員の受持台数決定の主要因には、品質維持の立場からみた 1 巡回時間と、人・機械システムの経済性の立場からみた織機の稼働率がある。台持人員を増加することによって生産費用は上昇するが、織機の停台損失は減少するから両者の費用関数を最小にする最適点が存在する。従来は受持台数と織機

稼働率の関係が不明確であったために受持台数の決定方法は経験的であったが、本報文 3 節で得られた受持台数 m と織機停台率 y の関係を使って受持台数の最適値を求める方法を設定する。

ここで改めて製織の 8 時間当たり加工収益を P , 8 hr 当たり加工費用を C とすると、加工利益 P_0 は

$$P_0 = P - C \cdots \cdots \cdots (12)$$

$$P = p_0 V_0 \cdot \sum_{i=1}^l m_i (1 - y_i) \cdots \cdots \cdots (13)$$

$$C = \{C_l l + C_p V_0 \cdot \sum_{i=1}^l m_i (1 - y_i) + C_f\} \cdots (14)$$

$$\sum_{i=1}^l m_i = M, i = 1, 2, \cdots, l$$

ただし、

- V_0 : 織機 1 台 8 hr 当たり生産能力
- p_0 : 単位長当たり織加工収益単価
- m_i : i 番目の台持員の受持台数
- M : 対象工場の全織機台数
- y_i : m_i の織機の停台率
- l : 織機 M 台の台持員数
- C_l : 1 人 8 hr 当たり人件費
- C_p : 単位長当たり比例加工費
- C_f : 8 hr 当たり固定加工費

また y_i は(1)', (4)式より

$$y_i = \lambda_i / \mu_c + q_i \lambda_i$$

$$= \lambda_i \{1 / \mu_c + 0.0160 m_i / (1 - m_i \rho)\} \cdots \cdots (15)$$

$$\rho = \rho_c + \rho_{a+b}$$

いま、ある特殊綿織物工場の実績値から、

- $M = 220$ (台) $V_0 = 37$ (m/台, 8 hr)
- $p_0 = 86$ (円/m) $C_l = 7500$ (円/人, 8 hr)
- $C_p = 16$ (円/m) $C_f = 410000$ (円/8 hr)
- $\lambda_c = 0.0105$ (件/min) $\mu_c = 1.531$ (件/min)
- $M = 220$ 台の織機を 5 人 ($m_1 = m_2 = m_3 = m_4 =$

表3 シミュレーション模型の計算値と実現値

<div><div><div>λ_t</div><div>λ_w</div><div>ρ_c</div></div><div>特性値</div></div>		持台数 m	50		70		90	
			シミュレーション 模型の解析解	シミュレーション による実現値	シミュレーション 模型の解析解	シミュレーション による実現値	シミュレーション 模型の解析解	シミュレーション による実現値
			②	③	②	③	②	③
λ_t =0.00334 λ_w =0.00278 ρ_c =0.004	m 台の TWU 発生率 $m\lambda_{twu}$		0.564	0.584	0.789	0.806	1.014	1.021
	TWU 処理時間 $(1/\mu)_{twu}$		0.490	0.497	0.490	0.471	0.490	0.489
	処理待ち時間 q_s		1.11	1.27	1.83	2.08	2.87	3.04
	織機停台率 y_s		0.011	0.012	0.015	0.017	0.022	0.021
	1 周時間 T_s		2.21	2.26	3.66	3.61	5.74	5.63
台持手手空き率 x_s		0.724	0.710	0.614	0.621	0.503	0.512	
λ_t =0.00502 λ_w =0.00417 ρ_c =0.006	m 台の TWU 発生率 $m\lambda_{twu}$		0.717	0.720	1.004	0.977	1.291	1.189
	TWU 処理時間 $(1/\mu)_{twu}$		0.526	0.511	0.526	0.523	0.526	0.553
	処理待ち時間 q_s		1.29	1.50	2.37	2.63	4.46	5.44
	織機停台率 y_s		0.018	0.020	0.028	0.025	0.047	0.048
	1 周時間 T_s		2.57	2.53	4.74	4.59	8.93	8.42
台持手手空き率 x_s		0.624	0.633	0.474	0.488	0.323	0.342	
λ_t =0.00668 λ_w =0.00557 ρ_c =0.008	m 台の TWU 発生率 $m\lambda_{twu}$		0.870	0.940	1.218	1.145	1.566	*
	TWU 処理時間 $(1/\mu)_{twu}$		0.548	0.528	0.548	0.574	0.548	
	処理待ち時間 q_s		1.53	1.77	3.36	3.87	10.08	
	織機停台率 y_s		0.027	0.031	0.049	0.048	0.131	
	1 周時間 T_s		3.06	3.15	6.73	6.42	20.15	
台持手手空き率 x_s		0.524	0.507	0.334	0.349	0.143		
λ_t =0.00835 λ_w =0.00696 ρ_c =0.010	m 台の TWU 発生率 $m\lambda_{twu}$		1.023	1.098	1.432	1.304	1.841	**
	TWU 処理時間 $(1/\mu)_{twu}$		0.564	0.535	0.564	0.565	0.564	
	処理待ち時間 q_s		1.89	2.18	5.80	5.38	**	
	織機停台率 y_s		0.039	0.044	0.099	0.088		
	1 周時間 T_s		3.78	3.88	11.9	8.50		
台持手手空き率 x_s		0.424	0.413	0.194	0.263			
λ_t =0.01002 λ_w =0.00835 ρ_c =0.012	m 台の TWU 発生率 $m\lambda_{twu}$		1.176	1.154	1.646		2.117	**
	TWU 処理時間 $(1/\mu)_{twu}$		0.575	0.575	0.575		0.575	
	処理待ち時間 q_s		2.47	2.91	20.94	*	**	
	織機停台率 y_s		0.057	0.063	0.397			
	1 周時間 T_s		4.95	4.76	41.87			
台持手手空き率 x_s		0.324	0.336	0.054				

$\lambda_u=0.00515$ (件/min) $t_0=0.032$ (min/台)
 $1/\mu_t=0.893$ (min/件), $1/\mu_w=0.370$ (min/件), $1/\mu_u=0.295$ (min/件)
**, *印のところは糸切れ発生率がサービス率を上回るか接近しており, 解が不能または不定.

表4 加工利益計算

持台員数	5 人	4 人	3 人
受 持 台 配 分	44台×5 人	55台×4 人	66台×1 人, 77台×2 人
加 工 収 益 P (円/8hr)	68 6529	682 049	667 243
加 工 費 用 C 〃	575 226	566 893	556 638
加 工 利 益 P_0 〃	111 303	115 156	110 605

$m_5=44$ 台), 4 人 ($m_1=m_2=m_3=m_4=55$ 台),
3 人 ($m_1=66$ 台, $m_2=m_3=77$ 台) で受持つ場
合の経済性を比較する.
5 人, 4 人, 3 人受持ち いずれの場合も糸切れ発
生率 $\lambda_c=0.0105$, サービス率 $\mu_c=1.531$, ρ_{u+d+b}
= $\rho_u+\rho_d+\rho_b=0.00239$ とすれば, 受持台数44,
55, 66, 77台に対して織機停台率は(15)式から, それ

ぞれ
 $0.0193, 0.0257, 0.0353, 0.0518$
したがって, 加工利益は(12), (13), (14)式から表4に示
すとおりとなり, 4 人受持ちが最も経済的である.
ここで仮りに $\mu_c=1.531$ (件/min), $\rho_{u+d+b}=$
 0.00239 を一定とし, 変数 m および助変数 ρ_c に対
する加工利益 P_0 を求めて図示すると図6が得られ

図6 台持員受持台数と加工利益

台数として選定することができる。

以上、日常の作業管理において最もよく変動する ρ_c または λ_c のみを助変数とし、その他の条件は固定して考えてきたが、 ρ_c のつぎに変動が比較的大きくかつ結果に及ぼす影響の大きい変数は収益単価 p_0 であり、その他の条件の変動幅は比較的小さいから、 p_0 の変動に対しては注意しておく必要がある。

5. 結 語

(1)織布工場台持ち作業のシミュレーション システムを開発し、台持員受持台の1巡回時間や織機の停台率などを実験的に求めることができ、生産現場での日常管理手法が得られた。

(2)従来不明確であった台持員の1巡回時間や手空き率、織機の処理待ち時間や停台率などを数学模型で定式化した。この計算結果は実績値やシミュレーション実現値とよく一致しており、模型の信頼性とシミュレーション システムの実用性が確認された。

(3)台持員の適正受持台数は経済的な評価と品質上の制約から設定される。台持員の受持台数を増加すると台持員減から加工費用は軽減されるが、織機稼働率も下がり加工収益が低下する。受持台数を減少すればその逆現象が起こる。したがって、あるところで利益最大の受持台数が存在する。一方、品質維持の立場から設けている基準巡回時間から受持台数の上限が設定される。したがって、この制限持台数のもとで利益最大の受持台数を最適値として設定することにした。

なお、本報文中、シミュレーション システムのプログラミングについては、東洋紡績 技術課長安井照氏にご支援賜ったので、ここに記して深く感謝の意を申し上げる。

参考文献

- 1) 西田俊夫: “待ち行列の理論と応用”, (1971) 朝倉書店
- 2) 桑田秀夫: 繊維論文集, T148, 37, No. 9, (1980)
- 3) 近藤次郎: “応用確率論” (1970) 日科技連
- 4) 森村, 大前: “応用待ち行列理論” (1975) 日科技連
- 5) Q C リサーチグループ: “統計理論” (1959) 日科技連
- 6) 近藤次郎: “オペレーションズリサーチの手法” (1973) 日科技連
- 7) 桑田秀夫: 繊維誌, p. 873, 17, No. 12, (1964)
- 8) 桑田秀夫: “機械干涉”, 繊維学会第6回生産管理研究会資料 (1965, 6)
- 9) 藤田編: “IEの基礎” (1969) 好学社
- 10) Leonard Kleinrock: “Queueing System: Vol I Theory. Vol II Computer Applications,” John Wiley & Sons, Inc., [1975, 76]
- 11) J. A. White etc : “Analysis of Queueing Systems,” Academic Press, (1975)

る。
 $\rho_c = 0.004, 0.006$ のようにサービス因子の低いところでは $m = 80, 60$ 付近に極値が存在するが、 $\rho_c = 0.010, 0.012$ と高いところでは極値は $m = 50$ 以下となり、受持台数を増加することは経済的に、ますます不利となる。

一方、1巡回時間 T'_m は前報²⁾式より
$$T'_m = 0.0962 m / \{1 - m(\rho_c + \rho_{n+d+h})\} \quad \cdots(16)$$

ここで $\rho_{n+d+h} = 0.00239$, $\rho_c = 0.00686$ を代入すると

持 台 数 m (台)	44	55	66	77
1巡回時間 T'_m (min)	7.1	10.8	16.3	25.7

が得られ、 $m = 55$ 台の場合 $T'_m = 10.8$ min となり理想的な巡回時間となる。表4で求めた経済性評価とあわせ考えると、 λ_c, μ_c など上の条件下では220台の織機を4人で受持つことが最適配置となる。

(16)式において $\rho_{n+d+h} = 0.00239$ を一定値として代入し、 ρ_c を助変数として $T'_m = 10, 15, 20$ min に対する m を求めて図6の ρ_c 線上に打点する。1巡回時間は品質維持の立場から制限を設け、品種によって異なるが10 min から最大20 min までと設定しているから、持台数の設定条件はこの制限巡回時間 T_m^* 以下でなければならない。

織布工場の M 台の織機を数人の台持員で受持つとした場合、図において初期条件 ρ_c のもとで、 T_m^* 以下でかつ利益最大近傍の実行可能受持台数の組合わせ数通りが得られるから、おのおのについて加工利益 P_0 を算出し、利益最大の組合わせを適正受持