

多工程直列形加工ラインが連結した自動組立生産システムの挙動解析*

井山俊郎*¹, 水野雅裕*¹
本田則夫*², 後藤正三*³Behaviour Analysis of Automatic Assembly System Connected
by Multi-Stage Series Machining LinesToshirou IYAMA, Masahiro MIZUNO,
Norio HONDA and Shōzō GOTŌ

An approximation method is proposed to estimate the system production rate for an automatic merge machining-assembly production system in which L parts are machined in multi-stage series lines and are assembled. In this method, the system is decomposed into L series machining lines, each of which considers the parts delay occurring in other series machining lines. From the comparison between approximation and simulation results, it is found that the estimation error is very small. Furthermore, we study the effects of system parameters on the system production rate. The main results are as follows. (1) As the number of machining lines feeding assembly parts increases, the production rate decreases but the decrease becomes slight. (2) When the number of stages in machining lines is greater than two, the number of stages has little effect on the production rate.

Key Words: Production System, Production Planning, Approximation Method, Machining-Assembly Production System, Multi-Stage Series Line, Production Rate, System Parameters

1. 緒 言

組立に必要な部品を生産する複数の加工ラインが組立工程に連結し、組立に必要な異種部品を組立工程に供給するシステムは、一般に、合流形自動生産システムと呼ばれ、複数の部品から構成される各種機械要素の量産形加工・組立工場で導入されている。このシステムの問題点は、組立工程に連結した部品加工ラインから供給される組立部品が組立工程ですべてそろわないと組立作業が行われないう組立特性にある。この組立特性は、組立工程に部品を供給する加工ラインの最終加工工程にブロック状態を多発させそれを上流の加工工程に伝ばさせる、また、組立工程にアイドル状態を多発させる。この結果、組立製品の生産速度は各加工ラインや組立工程の生産能力に比べ大きく低下する。そこで、合流形自動生産システムの物流挙動を解析し、組立部品の点数、各組立部品を加工する加工ラインのライン特性および組立工程の工程特性がシステム生産率に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、加工ラインのむだな遊休を減少させるための適

切なバッファ導入を考える必要がある。

自動生産システムの物流挙動に関する研究は、これまで数多くの研究者によって扱われてきた。合流形生産システムの基本となる直列形生産ラインに関しては、Buzacottら⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾が多工程直列生産ラインのラインパラメータが物流の停滞現象に及ぼす影響を解析し、ライン生産率を推定するための近似解法を提案した。Park⁽⁶⁾は各工程間にバッファ容量を配分するためのアルゴリズムを提案した。また、合流形生産システムに関しては、2種の部品がそれぞれ単独工程で加工され組立工程に合流するシステムに対し、Lawら⁽⁷⁾がシミュレーションを用いて、古田ら⁽⁸⁾はマルコフモデルを用いて組立特性の影響を解析した。また、井山ら⁽⁹⁾は、任意の数の異種部品がそれぞれ単独工程で加工され組立工程に合流するシステムのシステム生産率を推定するための近似解法を提案した。しかし、組立工程で組み付けられる部品は、一般に、単独工程で加工されるとは限らず、部品ごとに異なる工程数をもつ多工程直列形ラインで加工される場合も数多く存在する。

本研究では、組立工程で組み付けられる L 種の異種部品がそれぞれ異なる工程数をもつ多工程直列形自動生産ラインで加工される一般的な合流形自動生産シ

* 原稿受付 平成6年7月25日。

¹ 正員, 岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。² 学生員, 岩手大学大学院。³ NTN(株)生産技術研究所 (〒438 磐田市東貝塚1578)。

システムの生産率を推定するための近似解法を提案し、近似解法の精度を調べる。また、近似解法を用いて組立工程の特性と加工ラインのライン特性がシステム生産率に及ぼす影響とバッファ導入効果を明らかにする。

2. モデル

合流形自動生産システムのモデルを図1に示す。このシステムは、組付け部品 $k(k=1, 2, \dots, L)$ の加工を行う直列形ライン k と組立作業を行う工程1で構成され、ライン k は加工工程 $k, i(i=1, 2, \dots, N_k)$ と各加工工程の下流に導入されるバッファ k, i で構成される。このとき、合流形自動生産システムは、各工程の作業サイクルタイム T 、各工程の作業サイクルタイムにおいて工程 $j(j=1, k, i)$ が作業可能状態である確率 P_j 、作業不可能状態である確率 $\bar{P}_j=1-P_j$ およびバッファ k, i の容量 $M_{k,i}$ で定義される。このモデルの各ラインは作業時間、トラブルの発生、ラインへの素材の投入に関しては、Sheskin ら⁽³⁾⁽⁴⁾ のモデルと同じである。また、本システムを解析するにあたり以下の仮定を導入する。

(1) 組立工程は組立に必要な組立部品を1個ずつ保持でき、すべての種類の部品がそろそろと組立作業を開始する。そろわない場合には、組立工程はアイドル状態(入力欠乏による工程機械の遊び)となり、組立作業を行わずに不足部品を待つ。

(2) 各工程間の部品の移動時間は、各工程の作業時間に比べ無視できるほど小さい。

(3) 加工工程 $k, 1$ では常に素材の供給があり、素材の欠乏によるアイドル状態は発生しない。組立工程1では組立作業を終えた完成品は即座に工程外に出力され、ブロック状態(出力閉塞による工程機械の遊び)

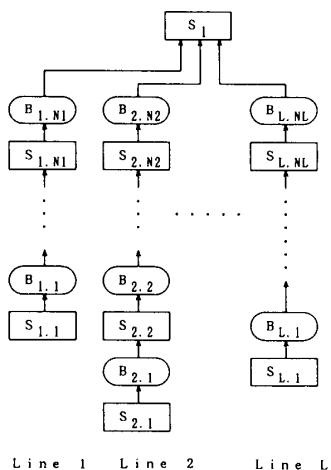


図1 合流形自動生産システム

は発生しない。

(4) 作業可能状態と不可能状態は各工程、各作業サイクルタイムで独立である。

(5) システム生産率は、任意の作業サイクルタイムに組立工程から完成品が出力される確率と定義する。

3. 近似解法

本研究で示す近似解法は、合流形自動生産システムを組立工程を含む L 本の部品加工直列形ラインに分解して考えるため、3・1節で多工程直列形ラインの近似解法を3・2節で合流形自動生産システムの近似解法を示す。

3・1 多工程直列形自動生産ラインの近似解法

工程 $i(i=1, 2, \dots, N)$ と工程 i の下流にあるバッファ $i(i=1, 2, \dots, N-1)$ で構成される多工程直列形生産ラインを作業可能状態確率 P_i とバッファ容量 M_i で定義する。多工程直列形ラインは工程数が増加するとライン状態数が増加するため、一般に、マルコフモデルによる解析が困難となる。そこで、本節では、山下ら⁽⁴⁾ の近似解法を用いる。この解法は、多工程直列形ラインを、図2に示すように、2工程直列形ライン $i(i=1, 2, \dots, N-1)$ に分解して生産率を推定する方法である。このとき、工程 $i, i+1$ 、バッファ B_i で構成される2工程直列形ライン i において、工程 $i+1$ がアイドル状態となる確率 $X_{T,i}(P_i, P_{i+1})$ および工程 i がブロック状態となる確率 $X_{B,i}(P_i, P_{i+1})$ はそれぞれ式(1)、(2)で与えられる。

$$X_{T,i}(P_i, P_{i+1}) = \frac{1 - P_i/P_{i+1}}{1 - (P_i/P_{i+1})^2 (P_i \bar{P}_{i+1} / \bar{P}_i P_{i+1})^{M_i+1}} \quad (P_i \neq P_{i+1})$$

$$= \frac{\bar{P}_i}{2\bar{P}_i + M_i + 1} \quad (P_i = P_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$X_{B,i}(P_i, P_{i+1}) = (P_i \bar{P}_{i+1} / \bar{P}_i P_{i+1})^{M_i+1} \cdot X_{T,i}(P_i, P_{i+1}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

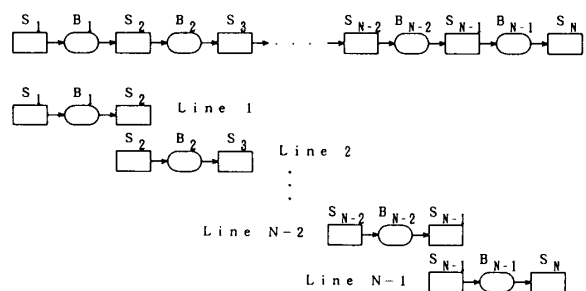


図2 直列形ラインの分割

近似解法の手順を以下に示す。ただし、工程 i において作業サイクルタイムのはじめに仕掛品があり、かつその仕掛品がそのサイクルタイムに加工を終了する確率を Q_i 、工程 $i+1$ において作業サイクルタイムのはじめに仕掛品があった場合そのサイクルタイムに加工が終了し工程から出力される確率を W_{i+1} とする。

はじめに、2 工程直列形ライン $i(i=1, 2, \dots, N-1)$ に対し順に Q_i と W_{i+1} を用いて式(3)から Q_{i+1} を求める。ただし、 $Q_1=P_1$ 、 $W_{i+1}=P_{i+1}$ とする。

$$Q_{i+1}=P_{i+1} \cdot \{1 - X_{L,i}(Q_i, W_{i+1})\} \dots \dots \dots (3)$$

次に、ライン $i(i=N-1, N-2, \dots, 2)$ に対し順に式(3)で得られた Q_i と W_{i+1} を用いて式(4)から W_i を求める。ただし、 $W_N=P_N$ とする。

$$W_i=P_i \cdot \{1 - X_{B,i}(Q_i, W_{i+1})\} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、再び、ライン $i(i=1, 2, \dots, N-1)$ に対し順に Q_i と式(4)で得られた W_{i+1} を用いて式(3)から Q_{i+1} を求める。以下、ライン $i(i=N-1, N-2, \dots, 2)$ に対し順に Q_i と W_{i+1} を用いて W_i を、その後、ライン $i(i=1, 2, \dots, N-1)$ に対し順に Q_i と W_{i+1} を用いて Q_{i+1} を求め、この手順を Q_N が収束するまで繰返す。このようにして得られた Q_N は多工程直列形生産ラインの高精度な生産率を与える。

3・2 合流形自動生産システムの近似解法 L 種部品の合流形システムでは、直列形加工ライン 1, 2, ..., L から出力された加工部品がすべてそろった場合に組立作業が行われ、そろわない場合には作業が行われない。したがって、合流形システムを、図 3 に示すように、組立工程を含む L 個の (N_k+1) 工程直列形ライン $k(k=1, 2, \dots, L)$ に分解し、組立工程に各直列形ラインからの組立部品の未供給状態を含ませることでシステム生産率が推定可能となる。ここでは、未供給状態の影響を各直列形ラインに連結した組立工程の作業可能状態確率に含ませる。

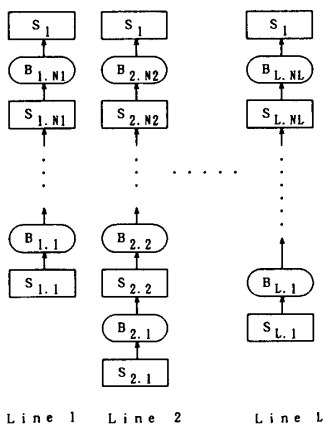


図 3 合流形自動生産システムの分割

近似解法の手順を以下に示す。ただし、任意の作業サイクルタイムにおいて組立工程が直列形ライン k から供給される組立部品 k を保有しない確率を F_k 、組立工程に k 以外の組立部品がすべて存在し直列形ライン k から組立部品 k が出力されると組立作業が可能になる確率を PR_k とおく。このとき、 PR_k は組立部品 $j(j=1, 2, \dots, L; j \neq k)$ の未供給状態の影響を考慮した組立工程の作業可能状態確率となり式(5)で与えられる。

$$PR_k=P_i \cdot \prod_{j=1, j \neq k}^L (1 - F_j) \dots \dots \dots (5)$$

ステップ 1 直列形ライン 1 に対し、 $F_j=0(j=2, 3, \dots, L)$ と置き、式(5)から組立工程の作業可能状態確率 PR_1 を求める。さらに、加工工程 1. $i(i=1, 2, \dots, N_1)$ の作業可能状態確率 $P_{1,i}$ とバッファ容量 $M_{1,i}$ および PR_1 から 3・1 節の手順を用いて直列形ライン 1 の生産率を求める。ここで得られた生産率は、任意の作業サイクルタイムで組立工程が 1 以外の部品をすべて保有しているという条件下で求めているため、合流形システムのシステム生産率に対する第 1 近似解である。

ステップ 2 ステップ 1 の直列形ライン 1 において組立工程がアイドル状態となり組立部品 1 を保有しない確率 $X_{L,N1}(Q_{1,N1}, W_{N1+1}=PR_1)$ を 3・1 節の手順を用いて求める。次に、直列形ライン 2 に対し、 $F_1=X_{L,N1}(Q_{1,N1}, W_{N1+1}=PR_1)$ 、 $F_j=0(j=3, 4, \dots, L)$ と置き、式(5)から組立工程の作業可能状態確率 PR_2 を求める。さらに、加工工程 2. $i(i=1, 2, \dots, N_2)$ の作業可能状態確率 $P_{2,i}$ とバッファ容量 $M_{2,i}$ および PR_2 から 3・1 節の手順を用いて直列形ライン 2 の組立工程がアイドル状態となり組立部品 2 を保有しない確率 $X_{L,N2}(Q_{2,N2}, W_{N2+1}=PR_2)$ を求める。以下、ライン $k(k=3, 4, \dots, L)$ に対し順に、 $F_j=X_{L,Nj}(Q_{j,Nj}, W_{Nj+1}=PR_j)(j=1, 2, \dots, k-1)$ 、 $F_j=0(j=k+1, k+2, \dots, L)$ と置き、式(5)から組立工程の作業可能状態確率 PR_k を求める。さらに、加工工程 $k. i(i=1, 2, \dots, N_k)$ の作業可能状態確率 $P_{k,i}$ とバッファ容量 $M_{k,i}$ および PR_k から 3・1 節の手順を用いて直列形ライン k の組立工程がアイドル状態となり組立部品 k を保有しない確率 $X_{L,Nk}(Q_{k,Nk}, W_{Nk+1}=PR_k)$ を求め、 $F_k=X_{L,Nk}(Q_{k,Nk}, W_{Nk+1}=PR_k)$ と置く。このようにして、すべての組立部品に対し F_k を求める。

ステップ 3 直列形ライン 1 に対し、ステップ 2 で得られた $F_j(j=2, 3, \dots, L)$ を用いて式(5)から新たに PR_1 を求め、直列形ライン 1 の生産率を再び求める。ここで得られた生産率は、ステップ 1 の生産率

と異なり、 PR_1 が組立工程での組立部品2~ L の未供給状態を考慮しているの、合流形システムのシステム生産率に対するよりよい近似を与え第2近似解となる。

ステップ4 ステップ3の直列形ライン1に対し、再び、組立工程がアイドル状態となり組立部品1を保有しない確率 $X_{L,N_1}(Q_{L,N_1}, W_{N_1+1}=PR_1)$ を求める。以下、直列形ライン $k(k=2, 3, \dots, L)$ に対し、ステップ2同様、新たに得られた $F_j(j=1, 2, \dots, k-1)$ と以前に得られた $F_j(j=k+1, k+2, \dots, L)$ を用いて $X_{L,N_k}(Q_{k,N_k}, W_{N_k+1}=PR_k)$ を求め F_k を順に置き換える。

ステップ5 ステップ3に戻り、ステップ4で得られた $F_j(j=2, 3, \dots, L)$ を用いて式(5)から新たに PR_1 を求め、直列形ライン1の生産率を再び求める。以下、ステップ4と3を合流形システムの生産率が収束するまで繰り返す。このようにして得られた生産率は、合流形システムの高精度なシステム生産率を与える。

なお、本研究で示した近似解法の収束条件を示すことは困難であるが、各工程の作業可能状態確率を0.61~0.99、組付け部品数を1~4、加工ラインの加工工程数を1~5、バッファ容量を0~20の範囲で変化させた場合の909例のシステムパラメータの組合せに対しては、すべての例において数値計算は収束した。

4. 近似解法の精度

近似解法の精度を調べるため、一例として、図4にすべての工程が等しい作業可能状態確率 $P_1=P_{k,i}=P(k=1, 2, \dots, L; i=1, 2, \dots, N_k)$ をもつシステムの生産率相対誤差を、図5に組立工程と加工工程が異なる作業可能状態確率をもつシステムの生産率相対誤差を

示す。相対誤差の計算には、100 000 サイクルタイムのシミュレーション結果から得られたシステム生産率を用いた。シミュレーションでは、任意の作業サイクルタイムにおける各工程の仕掛部品個数を記憶し、サイクルタイムの経過とともに作業完了部品を1工程ずつ移動させる、あるいはバッファに貯える方法でシステム内の物流挙動を解析した。ただし、 $M_{k,i}=M$ とする。図4から各工程の作業可能状態確率が等しいシステムに対し、 $M=0$ で比較的大きな誤差をもつが、 $P_1=P_{k,i} \geq 0.7$ のとき、 $M \geq 1$ で約1.1%以下、 $M \geq 5$ で約0.8%以下となることが示される。図5から組立工程が加工工程より大きな作業可能状態確率をもつシステムに対し $M \geq 1$ で約1.1%以下、 $M \geq 5$ で約0.8%以下、逆に、小さな作業可能状態確率をもつシステムに対し $M \geq 1$ で約0.3%以下となることが示される。また、異なる工程数をもつ加工ラインが連結したシステムに対

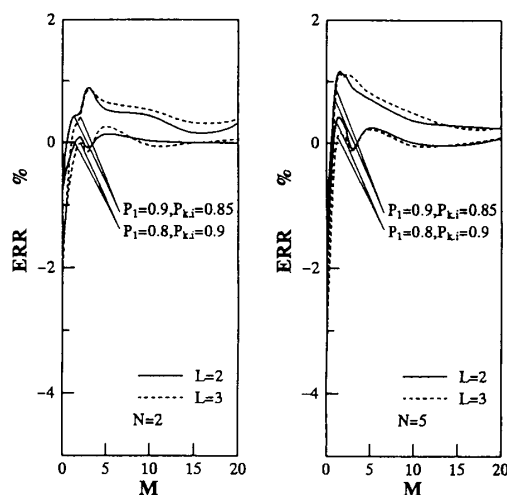


図5 近似解法の精度 ($P_1 \neq P_{k,i}$)

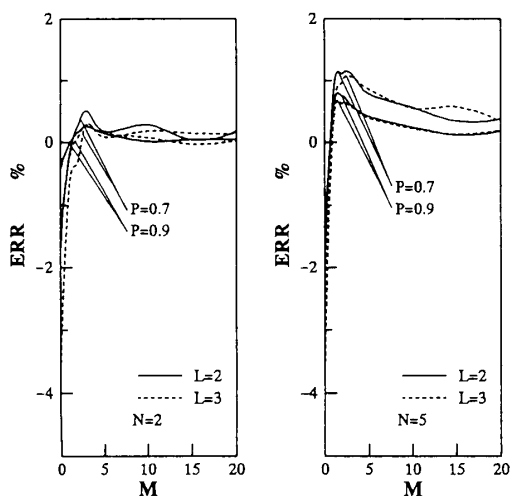


図4 近似解法の精度 ($P_1 = P_{k,i}$)

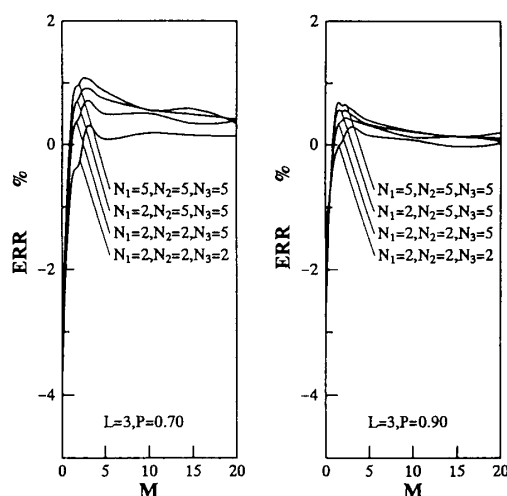


図6 近似解法の精度 ($N_k \neq N$)

する近似解法の精度を調べるため、一例として、工程数が2と5の加工ラインが連結したシステムの生産率相対誤差を図6に示す。図6から、加工ラインが異なる工程数をもつシステムの誤差は、すべての加工ラインが最大の工程数をもつシステムと最小の工程数をもつシステムの誤差の間に位置することが示される。

以上のことから、各直列形加工ラインが異なる工程数をもつ場合にも近似解法は適用可能であり、本研究で示した近似解法は、 $M \geq 1$ の合流形自動生産システムの生産率推定法として使用できる。

5. 合流形自動生産システムの挙動解析

本章では近似解法を用いて複数の多工程直列加工ラインから組立部品が組立工程に出力される生産システムの特性を調べる。はじめに、組立部品数 L と加工ラインの工程数 $N_k = N (k=1, 2, \dots, L)$ およびバッファ容量 $M_{k,i} = M (i=1, 2, \dots, N_k)$ がシステム生産率 R に

及ぼす影響を調べるため、 $P_i = P_{k,i} = P$ の条件下で得られたシステム生産率を図7に示す。ただし、 $L=1$ と $N=1$ の場合の結果を比較のため一点鎖線で示す。図7から L の増加は生産率を減少させ、特に、バッファ容量の小さなシステムでその影響は強いことが示される。しかし、 L が増加するにつれ L の増加による生産率減少幅は小さくなり、組立部品が多いシステムではさらに組立部品を増やしてもその影響は小さい。また、 N の増加は、 L と同様、生産率をわずかに減少させ、 $N \geq 2$ では生産率がほとんど変化しない。したがって、加工ラインの工程数増加は、2工程以上では生産率にほとんど影響をもたないといえる。さらに、バッファ導入は生産率向上に効果的であることが示される。このとき、組立特性の影響を緩和するには、 P が小さくなるにつれまた L が増加するにつれ大きな容量のバッファを導入しなくてはならない。

以上のことから、システム生産率を支配する要因は、

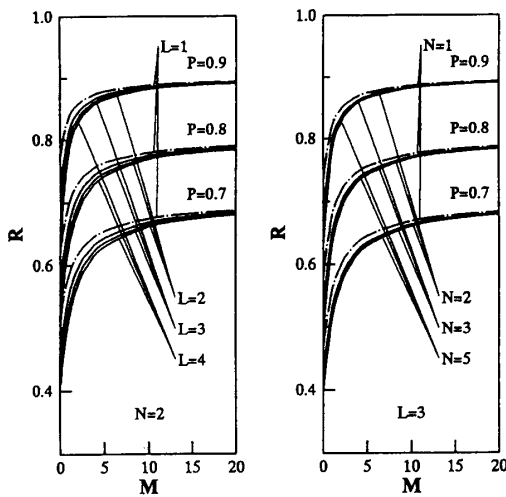


図7 L, M, N の生産率に及ぼす影響

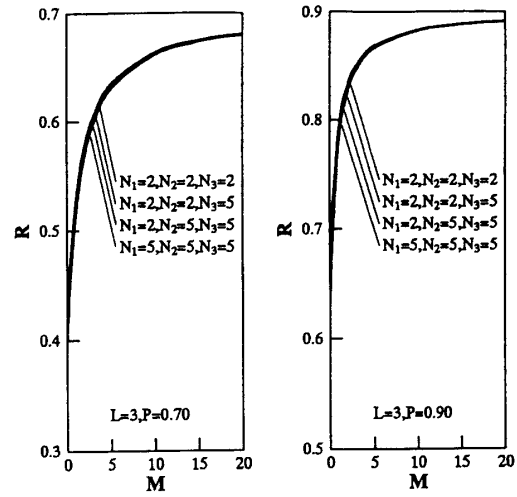


図8 N_k の生産率に及ぼす影響

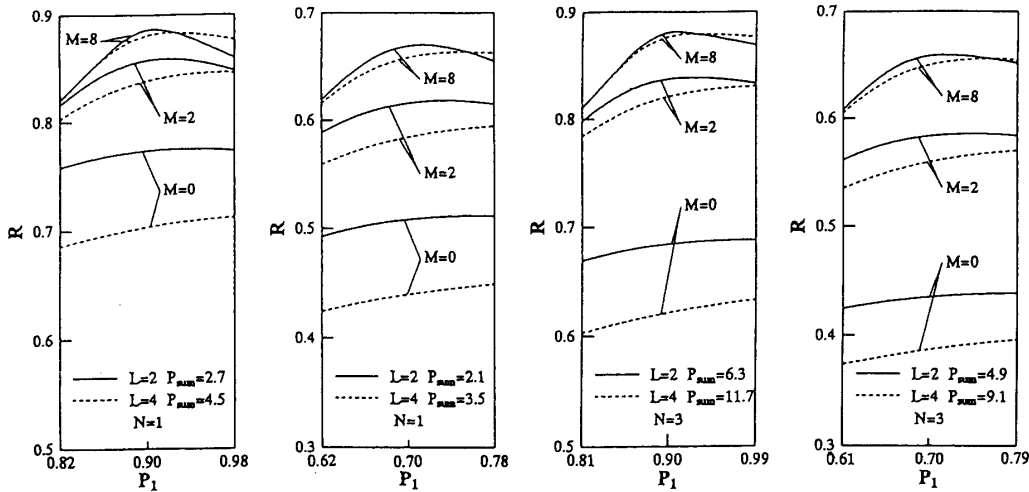


図9 $P_1, P_{k,i}$ の生産率に及ぼす影響

主として、各工程の作業可能状態確率とバッファ容量であり、次いで、組立部品数となる。

また、各加工ラインの工程数が異なるシステムにおいて工程数の生産率に及ぼす影響を調べるため、 $N_k=2$ と5の2種類の加工ラインが混合して組立工程に接続した場合の生産率を図8に示す。図8から加工ラインが異なる工程数をもつシステムでは、システム生産率がほとんど変化せず、すべての加工ラインが N_k の最小値と最大値をもつシステムの生産率の間に位置することが示される。しかし、 N_k のシステム生産率に及ぼす影響はかなり小さいので、結局、組立部品数が一定の場合、組立工程に連結する加工ラインの工程数がシステム生産率に及ぼす影響はほとんどないと考えてよい。

次に、組立工程と加工ラインを構成する加工工程の生産能力のバランスがシステム生産率に及ぼす影響を調べるため、システムを構成する工程全体の作業可能状態確率の和

$$P_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^N P_{k,i} + P_1$$

が一定の条件下で組立工程の作業可能状態確率を変化させた場合のシステム生産率を図9に示す。ただし、 $N_k=N$ 、 $P_{k,i}=(P_{\text{sum}}-P_1)/(L \cdot N)$ とする。図9から組立工程と加工工程の作業可能状態確率を等しくした場合(図9で $P_1=0.9$ or 0.7)すなわち各工程の生産能力のバランスを取った場合に必ずしも最大の生産率を生み出さず、組立工程の作業可能状態確率を加工工程よりもわずかに高くした場合に最大の生産率を生み出す場合があることが示される。この傾向は、バッファ容量が小さくなるにつれ、組立部品数が多くなるにつれ顕著になるが、加工工程数は最大生産率を生み出す作業可能状態確率にほとんど影響しない。したがって、バッファ容量が小さく組立部品数が多いシステムで最大の生産率を得るには、組立工程の作業可能状態確率を加工工程よりも高くする必要がある。

6. 結 論

本研究では、異なる工程数をもつ複数の多工程直列形ラインで加工された異種組立部品が組立工程に供給され組付けられる合流形自動生産システムの生産率近似解法を提案した。この解法は、システムを構成する加工工程と組立工程をバッファで結合された2工程直列形ラインに分解して生産率を推定する方法であり、任意の工程数をもつ複数の加工ラインが連結したシステムの生産率を推定可能にする。また、システムを構成する各パラメータがシステム生産率に及ぼす影響を調べた結果、主として、各工程の作業可能状態確率とバッファ容量が生産率に大きな影響をもつことが示された。また、組立部品数と部品を加工するラインの工程数の影響については、部品数が増加するにつれ生産率は減少するがその減少幅は次第に小さくなるため、部品数が多い場合には部品数をさらに増やしても生産率に及ぼす影響は小さいこと、また、工程数の増加は2以上ではほとんど影響をもたないことが示された。さらに、組立工程の作業可能状態確率は加工ラインの各工程の作業可能状態確率よりわずかに高くすると等しくした場合より生産率が向上することが示された。この傾向は、組立部品数が増加するにつれ、また、バッファ容量が小さくなるにつれ顕著になるが、加工ラインの工程数の影響はほとんど見られない。

文 献

- (1) Buzacott, J. J. and Kostelski, D., *IIE Trans.*, **19**-4 (1987), 429.
- (2) Gershwin, S. B., *Oper. Res.*, **35**-2(1987), 291.
- (3) Sheskin, T., *AIEE Trans.*, 8-1(1976), 146.
- (4) 山下・鈴木, 機論, **53**-487, C(1987), 807.
- (5) Xie, X., *IIE Trans.*, **25**-1(1993), 99.
- (6) Park, T., *Int. J. Prod. Res.*, **31**-3(1993), 613.
- (7) Law, S. S., Baxter, R. J. and Massara, G. M., *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **97**-3(1975), 1079.
- (8) 古田・大見, 日本経営工学会誌, **28**-4(1978), 394.
- (9) 井山・ほか3名, 機論, **57**-537, C(1991), 352.