
報 文

複数の部品加工工程が連結された 自動組立生産ラインの挙動解析

井 山 俊 郎*

複数の異種部品から構成される組立製品を量産する場合、フローショップタイプの加工・組立自動生産ラインが導入される。このラインでは、各組立工程で組み付ける部品の種類に応じて種々の数の加工工程が連結されるため、ライン形状は、幹状の組立ラインに枝状の加工工程が連結された木構造の合流形ラインとなり、物流挙動の解析が困難である。本研究では、 L 個の組立工程からなる直列形組立ラインの各組立工程に任意の数の枝状の加工工程が連結し、加工工程から組立工程に組み付け部品を供給する一般的な多工程加工・組立自動生産ラインの物流挙動について考察する。はじめに、ライン生産率の近似解法を提案し、近似解法の有効性を調べる。さらに、近似解法を用いて、組立工程数と組立工程に連結している加工工程数および各工程の作業能力がライン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。

Behaviour Analysis for Automatic Assembly Line with Multi Merge Machining Stages

Toshiro IYAMA*

In this paper, we study the behaviour of machining-assembly automatic transfer lines. The line consists of an L -stage series assembly line and L_i machining stages which supply necessary parts to assembly stage i . At first, a new approximation method is proposed to estimate a line production rate, and the approximation error is presented. This method has two steps. Step 1 is that an L -stage series assembly line is decomposed into 2-stage merge lines. Step 2 is that a 2-stage merge line is decomposed into 2-stage series lines. Next, using the approximation method, we numerically analyze the effects of numbers of assembly and machining stages on the production rate, and analyze the effect of installing buffer storages.

1. 緒 言

自動車部品であるグローブラグやパワーステアリング用バルブなど複数の異種部品から構成される組立製品を量産する場合、組み付け部品の加工工程(注(1))と組立工程から構成されるフローショップタイプの自動生産ラインが導入される。このラインでは、各組立工程で組み付ける部品は組立工程に連結した加工工程から供給されるが、組立工程で要求する部品の種類に応じて様々な数の加工工程が連結されるため、ライン形状は幹状の組立ラインに複数の枝状の加工工程が連結した木構造の合流形ラインとなる。

このようなラインでは、1つの加工工程でのトラブルが、隣接した上流工程の組立工程と加工工程にブロック状態を下流の組立工程や加工工程にそれぞれアイ

ドル状態やブロック状態を引き起こし、それらが次々と上流と下流の工程に伝播する。したがって、多くの枝状の加工工程が連結されると、加工工程が連結されていない直列形組立ラインに比べ、ライン生産率は大幅に低下する。また、ライン生産率は、組立工程に連結する加工工程の数や作業能力によって影響を受ける。したがって、組立製品の種類により種々の木構造の合流形ラインとなるため、所定のライン生産率を生み出す自動組立生産ラインを設計するには、組立工程に任意の個数の枝状の加工工程が連結した場合の多工程加工・組立ラインの挙動を解析し、加工工程の連結による物流挙動の変化を調べる必要がある。また、加工工程のトラブルによる物流挙動の停滞を緩和するための適切なバッファ導入を考える必要がある。

組立ラインの物流挙動に関する問題は、これまで数多くの研究者によって扱われてきた。加工工程が連結していない直列形、並列形自動組立ラインに関しては、Sheskin ら[1]～[4]が、組立工程の故障特性が物流挙動に及ぼす影響やバッファ導入効果を明らかに

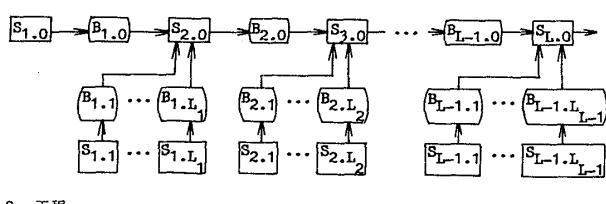
* 岩手大学(Iwate University)
受付：1993年9月10日，再受付(1回)
受理：1994年11月22日

し、さらに、ライン生産率を推定するための近似解法を提案した。一方、加工工程を連結し部品の合流点を持つ加工・組立生産ラインに関しては、1つの組立工程を持つラインに対し Law ら [5]～[7] がシミュレーション、マルコフモデルあるいは近似解法を用いて物流挙動を解析した。しかし、任意の数の組立工程を持つ直列形組立ラインに任意の数の加工工程が枝状に連結し組み付け部品を供給する多工程加工・組立合流形ラインの挙動については、そのモデル化が困難なためほとんど解析が行われていない。

そこで本研究では、 L 個の組立工程からなる直列形組立ラインの各組立工程に任意の数の枝状の加工工程が連結し加工工程から組み付け部品が供給される一般的なフローショップタイプの多工程加工・組立合流形自動生産ラインの物流挙動について考察する。はじめに、ライン生産率の近似解法を提案し、マルコフモデルあるいはシミュレーション結果を用いて近似解法の有効性を調べる。さらに、近似解法を用いて、組立工程数と組立工程に連結している加工工程数および各工程の作業能力がライン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. ラインモデル

本研究で扱う多工程加工・組立合流形生産ラインの構成を図 1 に示す。 $S_{i,0}$ ($i=1, 2, \dots, L$) と $S_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, L-1; j=1, 2, \dots, L_i$) はそれぞれ組立工程と組立工程 $S_{i+1,0}$ に連結した部品加工工程で、 $S_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, L-1; j=0, 1, \dots, L_i$) の下流には組立工程から出力された仕掛け品と加工工程から出力された部品を一時貯えるバッファ $B_{i,j}$ が導入されている。このときラインは、各工程の加工、組立作業サイクルタイム T 、各作業サイクルタイムにおいて $S_{i,0(i,j)}$ が作業可能状態である確率 $A_{i,0(i,j)}$ 、作業不可能状態である確率 $\bar{A}_{i,0(i,j)} = 1 - A_{i,0(i,j)}$ および $B_{i,j}$ の容量 $M_{i,j}$ で定義される(注(2))。このモデルは、作業時間、作業トラブルの発生、ラインへの素材入力およびラインからの完成品出力等に関しては、Sheskin ら [1], [3] の直列形自動生産ラインのモデルと同じである。また、こ



S : 工程
B : バッファ

図 1 複数の加工工程が連結された組立ラインモデル

のラインを解析するにあたり以下の仮定を導入する。

- (1) 各組立工程は、組立に必要な上流工程からの仕掛け組立品と組み付け部品をそれぞれ 1 個ずつ保持でき、サイクルタイムの初めに必要な品が揃うと組立を開始する。揃わない場合にはアイドル状態(入力欠乏による工程機械の遊び)が発生し、組立作業を行わずに必要な品の到着を待つ。
- (2) 加工、組立作業が終了した部品や仕掛け品は、下流の工程やバッファに空きがあれば搬送される。空きがない場合にはブロック状態(出力閉塞による工程機械の遊び)が発生し、作業を行った工程に停滯する。
- (3) 組立工程 $S_{1,0}$ および加工工程 $S_{i,j}$ に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 $S_{L,0}$ 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は発生しない。
- (4) 工程間における部品と仕掛け品の移動時間は、各工程の作業時間に比べ無視できるほど小さい。
- (5) 作業可能および不可能状態確率は、各工程、各作業サイクルタイムで独立である。
- (6) 生産率は、任意の作業サイクルタイムに組立工程 $S_{L,0}$ から完成品が出力される確率とする。

このラインの物流挙動は、任意の作業サイクルタイムにおけるライン状態と状態推移を考えることでマルコフモデルとして解析可能である。しかし、ライン状態総数 JN が式(1)で与えられ、工程数やバッファ容量が増加すると状態総数が急増し、大型計算機を用いても解析が困難になる。

$$JN = \prod_{k1=1}^{L-1} (M_{k1,0} + 3) \cdot \prod_{k2=1}^{L-1} \prod_{k3=1}^{L_{k2}} (M_{k2,k3} + 3) \quad (1)$$

3. 近似解法

本研究で提案する生産率の近似解法は、 L 個の組立工程からなる多工程加工・組立合流形ラインを相続く 2 つの組立工程と下流組立工程に連結した加工工程からなる 2 工程加工・組立合流形ライン(2 工程合流形ライン)に分割し、逐次、ライン生産率を推定する方法である。このとき、2 工程合流形ラインの生産率も近似解法で推定する。そこで、3.1 で 2 工程合流形ラインの生産率に対する近似解法を 3.2 で L 工程加工・組立合流形ライン(L 工程合流形ライン)の生産率に対する近似解法を示す。

3.1 2 工程合流形ラインの生産率に対する近似解法

L 工程合流形ラインを図 2 のように組立工程 $S_{i,0}$, $S_{i+1,0}$ 、加工工程 $S_{i,j}$ ($j=1, 2, \dots, L_i$) およびバッファ $B_{i,0}, B_{i,j}$ からなる 2 工程合流形ラインに分割し、各作業サイクルタイムにおける各工程の作業可能状態確率

を $A_{i,0}, A_{i+1,0}, A_{i,j}$ および各バッファの容量を $M_{i,0}, M_{i,j}$ とする。また、 $S_{i,0}$ から出力された仕掛品を仕掛品 $i,0$, $S_{i,j}$ から出力された部品を部品 i,j とする。

2工程合流形ラインでは、 $S_{i,0}$ と $S_{i,j}$ から出力された仕掛け品 $i,0$ と部品 i,j が $S_{i+1,0}$ ですべて揃った場合に組立作業が行われ、揃わない場合には作業が行われない。したがって、2工程合流形ラインを図2に示す L_i+1 個の2工程直列形ライン k ($k=0, 1, 2, \dots, L_i$) に分割し、各直列形ライン k の $S_{i+1,0}$ に $S_{i,k}$ 以外の各工程から出力される仕掛け品と部品の未供給状態を含ませることで生産率が近似的に推定可能となる。近似解法の説明にあたって、任意の作業サイクルタイムにおいて分割した2工程直列形ライン k の $S_{i+1,0}$ が $S_{i,k}$ から出力された仕掛け品あるいは部品 i,k を持たない確率を $F_{i,k}$, $S_{i+1,0}$ が i,k 以外の仕掛け品と部品をすべて保有し、 $S_{i,k}$ から出力された仕掛け品あるいは部品 i,k と任意の作業サイクルタイムで組立作業が行える確率すなわち $S_{i+1,0}$ の作業可能状態確率を $P_{i+1,k}$ と定義する。このとき、 $F_{i,k}$ は2工程直列形ライン k において $S_{i+1,0}$ が $S_{i,k}$ から出力された仕掛け品あるいは部品を持たない確率で表され式(2)となり、 $P_{i+1,k}$ は

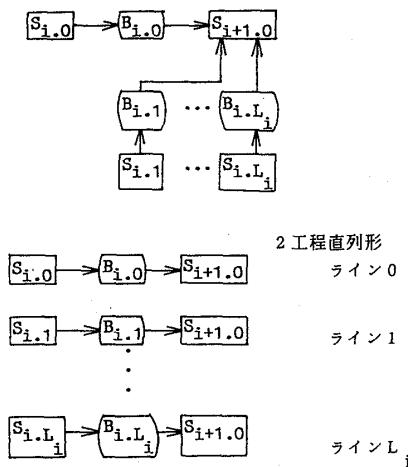


図2 2工程合流形ラインの分割

$S_{i+1,0}$ の生産能力と $S_{i+1,0}$ が i,k 以外の部品をすべて保有する確率の積で与えられ式(3)となる。

$$F_{i,k}(A_{i,k}, P_{i+1,k}) =$$

$$\begin{cases} \frac{1 - A_{i,k}/P_{i+1,k}}{1 - (A_{i,k}/P_{i+1,k})^2 \cdot (A_{i,k}\bar{P}_{i+1,k}/\bar{A}_{i,k}P_{i+1,k})^{M_{i,k}+1}} & (A_{i,k}/P_{i+1,k} \neq 1) \\ \frac{\bar{A}_{i,k}}{2\bar{A}_{i,k} + M_{i,k} + 1} & (A_{i,k}/P_{i+1,k} = 1) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{i+1,k} = A_{i+1,0} \cdot \prod_{k'=0, k' \neq k}^{L_i} (1 - F_{i,k'}) \quad (3)$$

この結果、2工程合流形ラインでは、 $S_{i+1,0}$ が i,k 以外の仕掛け品と部品をすべて保有する場合のみ $S_{i,k}$ から出力された仕掛け品あるいは部品と組立作業を行うから、そのライン挙動は、各工程の作業可能状態確率 $A_{i,k}, P_{i+1,k}$ およびバッファ容量 $M_{i,k}$ の2工程直列形ライン k の挙動で近似できる。近似解法の手順を以下に示す。

ステップ1 初期値 $F_{i,k}=0$ ($k=1, 2, \dots, L_i$) とする。ライン 0 に対し $A_{i,0}$ と $P_{i+1,0}$ を用いて式(2)から $F_{i,0}$ を求め、新たに得られた $F_{i,0}$ から式(3)を用いて $P_{i+1,1}$ を計算する。

ステップ2 ステップ1と同様に、ライン k ($k=1, 2, \dots, L_i-1$) に対し $A_{i,k}$ と新たに得られた $P_{i+1,k}$ を用いて $F_{i,k}$ を計算し、 $P_{i+1,k+1}$ を順に求める。このようにして得られた P_{i+1,L_i} と A_{i,L_i} からライン L_i に対し F_{i,L_i} を求める。

ステップ3 ステップ2で得られた $F_{i,k}$ ($k=1, 2, \dots, L_i$) を用いて再び $P_{i+1,0}$ を求め、ライン 0 に対し $A_{i,0}$ と $P_{i+1,0}$ から $F_{i,0}, P_{i+1,1}$ を計算する。

ステップ4 ステップ2と3を生産率が収束するまで繰り返す。ただし、生産率 PR_i は式(4)で与えられる。

$$PR_i = P_{i+1,0} \cdot \{1 - F_{i,0}(A_{i,0}, P_{i+1,0})\} \quad (4)$$

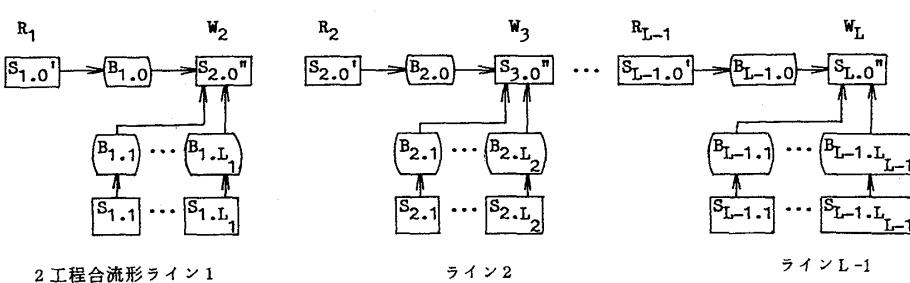
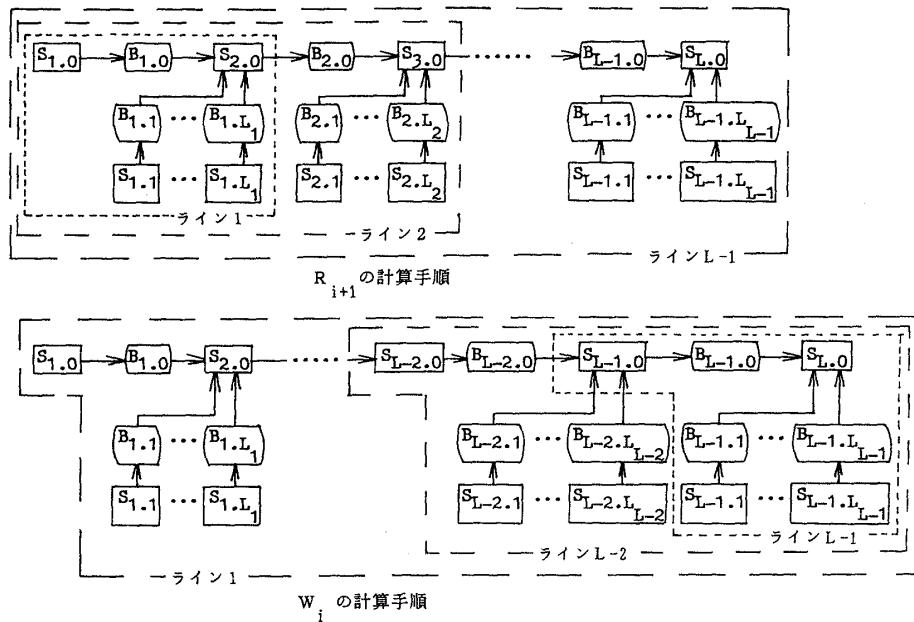


図3 L工程合流形ラインの分割

図4 L 工程合流形ラインと分割した2工程合流形ラインの関係

3.2 L 工程合流形ラインの生産率に対する近似解法

L 工程合流形ラインの生産率近似解法は、 L 工程合流形ラインを図3の様に $L-1$ 個の2工程合流形ライン i ($i=1, 2, \dots, L-1$) に分割し、2工程合流形ライン i の組立工程 $S_{i,0'}$ と $S_{i+1,0''}$ にそれぞれ上流側と下流側のライン要素の物流挙動を含ませて逐次生産率を推定する方法である。分割された2工程合流形ラインと対応するライン要素の関係を図4に示す。

近似解法を説明するにあたり、組立工程 $S_{i,0'}$, $S_{i+1,0''}$, 加工工程 $S_{i,j}$ ($j=1, 2, \dots, L_i$) で構成される2工程合流形ライン i の $S_{i+1,0''}$ が任意の作業サイクルタイムの初めに組立作業に必要な仕掛品と部品を持つ、かつ $S_{i+1,0''}$ での組立作業が終了する確率を R_{i+1} , $S_{i,0'}$ が任意の作業サイクルタイムの初めに組立作業に必要な仕掛品と部品を持つという条件のもとで、組立作業が終了し仕掛け品が $S_{i,0'}$ から出力される確率を W_i と定義する。このとき、 R_{i+1} は、3.1の2工程合流形ラインに対する近似解法によって求められた $P_{i+1,k'}$ と $F_{i,k}$ ($k=0, 1, \dots, L_i$) を用いて式(5)で与えられる。ただし、 $P_{i+1,k}$ は式(6)で与えられ、2工程合流形ラインに対する近似解法では $A_{i,0}$ と $A_{i+1,0}$ にそれぞれ R_i と W_i を代入し $P_{i+1,0}$ が収束するまで繰り返し計算を行う。

$$R_{i+1} = \left[A_{i+1,0} \cdot \prod_{k'=1}^{L_i} \{1 - F_{i,k'}(A_{i,k'}, P_{i+1,k'})\} \right] \cdot (1 - F_{i,0}(R_i, P_{i+1,0})) \quad (5)$$

$$P_{i+1,k} =$$

$$\begin{cases} W_{i+1} \cdot \prod_{k'=1}^{L_i} \{1 - F_{i,k'}(A_{i,k'}, P_{i+1,k'})\} \\ \quad (k=0) \\ \left[W_{i+1} \cdot \prod_{k'=1, k' \neq k}^{L_i} \{1 - F_{i,k'}(A_{i,k'}, P_{i+1,k'})\} \right] \\ \quad \cdot \{1 - F_{i,0}(R_i, P_{i+1,0})\} (k=1, 2, \dots, L_i) \end{cases} \quad (6)$$

また、 W_i は、2工程合流形ライン i の $S_{i,0'}$ がブロック状態を引き起こす確率 G_i を用いて式(7)で与えられる。ただし、 G_i は2工程合流形ラインの直列形ライン0に対しブロック状態が発生する確率で与えられ式(8)となる。

$$W_i = A_{i,0} \cdot (1 - G_i) \quad (7)$$

$$G_i = \left(\frac{R_i}{P_{i+1,0}} \right) \cdot \left(\frac{R_i \bar{P}_{i+1,0}}{\bar{R}_i P_{i+1,0}} \right)^{M_i+1} \cdot F_{i,0}(R_i, P_{i+1,0}) \quad (8)$$

上述の R_{i+1} と W_i を用いて L 工程合流形ラインの生産率を近似的に推定する方法は、図4に示したように、2つの手順からなる。一つは、ライン i ($i=1, 2, \dots, L-1$) に対し $S_{i,0'}$ と $S_{i+1,0''}$ の作業可能状態確率 $A_{i,0}$ と $A_{i+1,0}$ をそれぞれ R_i と W_{i+1} に置き換え R_{i+1} を求める手順であり、もう一つは、ライン i ($i=L-1, L-2, \dots, 1$) に対し、同様に、 W_i を求める手順である。以下に手順の詳細を示す。

ステップ1 このステップでは、下流の組立、加工工程から受けるブロック状態を無視して上流工程からのアイドル状態の影響のみを考慮する。初めに、2工程合流形ライン(ライン1)の $S_{1,0'}$, $S_{2,0''}$, $S_{1,j}$ ($j=1, 2, \dots,$

L_1) の作業可能状態確率に $R_1 = A_{1,0}$, $W_2 = A_{2,0}$, $A_{1,j}$ を代入し、ライン挙動を 3.1 の近似解法を用いて解析する。この結果、式(5)から $S_{2,0''}$ の R_2 が求められる。この R_2 は、上流工程 $S_{1,0''}$, $S_{1,j}$ ($j=1, 2, \dots, L_1$) から出力される仕掛品と部品の流れの停滞によって発生する $S_{2,0''}$ のアイドル状態を考慮している。以下、ライン i ($i=2, 3, \dots, L-1$) の $S_{i,0''}$, $S_{i+1,0''}$, $S_{i,j}$ ($j=1, 2, \dots, L_2$) の作業可能状態確率にここで得られた R_i , $W_{i+1} = A_{i+1,0}$, $A_{i,j}$ を代入し、ライン 1 と同様、 $S_{i+1,0''}$ で発生するアイドル状態を考慮した R_{i+1} を順に求める。この結果、ここで得られた R_L は生産率の推定値となるが、この生産率は、下流工程からのブロック状態の影響を無視しているため、 L 工程合流形ラインに対する第 1 近似解である。

ステップ 2 このステップでは下流工程からのブロック状態の影響を考慮する。ステップ 1 で R_L を求めた解析手順から、式(8), (7)を用いて $S_{L-1,0''}$ のブロック状態確率 G_{L-1} と W_{L-1} を求める。この W_{L-1} は、下流工程 $S_{L,0''}$, $S_{L-1,j}$ ($j=1, 2, \dots, L_{L-1}$) から出力される仕掛品と部品の流れの停滞によって発生する $S_{L-1,0''}$ のブロック状態を考慮している。以下、ライン i ($i=L-2, L-3, \dots, 2$) の $S_{i,0''}$, $S_{i+1,0''}$, $S_{i,j}$ ($j=1, 2, \dots, L_i$) の作業可能状態確率にステップ 1 で求めた R_i , ここで得られた $W_{i+1}, A_{i,j}$ を代入し、 $S_{i,0''}$ で発生するブロック状態を考慮した W_i を順に求める。

ステップ 3 ライン 1 の各工程の作業可能状態確率に $R_1 = A_{1,0}$, ステップ 2 で得られた $W_2, A_{1,j}$ を代入し、再び、 R_2 を求める。以下、ステップ 1 と同様、ライン i ($i=2, 3, \dots, L-1$) に対して新たに得られた R_i , ステップ 2 で得られた $W_{i+1}, A_{i,j}$ を代入し、 $S_{i+1,0''}$ の R_{i+1} を順に求める。ただし、 $W_L = A_{L,0}$ 。この結果、ここで得られた生産率 R_L は、下流工程からのブロック状態の影響をステップ 2 で考慮しているため、 L

工程合流形ラインに対するより良い近似を与える第 2 近似解となる。

ステップ 4 ステップ 3 で得られた R_i ($i=2, 3, \dots, L-1$) を用いて再びステップ 2 にもどり、 W_i ($i=L-1, L-2, \dots, 2$) を求める。新たに得られた W_i を用いて再びステップ 3 を繰り返す。以下、ステップ 2 と 3 を生産率が収束するまで繰り返す。このようにして求められた生産率は、 L 工程合流形ラインに対する高精度の生産率を与える。

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 5 に各工程が等しい作業可能状態確率 $A_{i,j}=A$ ($i=1, 2, \dots, L$; $j=0, 1, \dots, L_i$) を持つラインの生産率に対する相対誤差を、また、図 6 に組立工程と加工工程が異なる作業可能状態確率を持つラインの生産率に対する相対誤差を示す。相対誤差は、 $L=3, L_i=0, 1$ の場合にはマルコフモデルの結果をその他の場合にはシミュレーション結果を用いて計算した。ただし、 $M_{i,j}=M$ ($i=1, 2, \dots, L-1$; $j=0, 1, \dots, L_i$) とする。図 5 から、各工程が等しい作業可能状態確率を持つ場合、 $M=0$ 付近で大きな誤差を持つが、 M が増加するにつれ 0 に収束することが示される。このとき、 L と L_i が大きくなるにつれ誤差はわずかに大きくなるが、 $A \geq 0.80, L \leq 10, L_i \leq 3$ に対して $M \geq 2$ で約 1.0%, $M \geq 4$ で約 0.5% となる。また図 6 から、組立工程と加工工程が異なる作業可能状態確率を持つ場合、加工工程の作業可能状態確率が組立工程よりも 10% 程度小さいときには $M \geq 2$ に対して約 2% の誤差を持つが、逆に 10% 程度大きいときには、加工工程と組立工程が等しい作業可能状態確率を持つ場合とほぼ等しい誤差となる。したがって、ここで示した近似解法は、 $A_{1,0} = A_{i,j}$ あるいは $A_{1,0} < A_{i,j}$ の場合、 $M \geq 2$ の多工程加

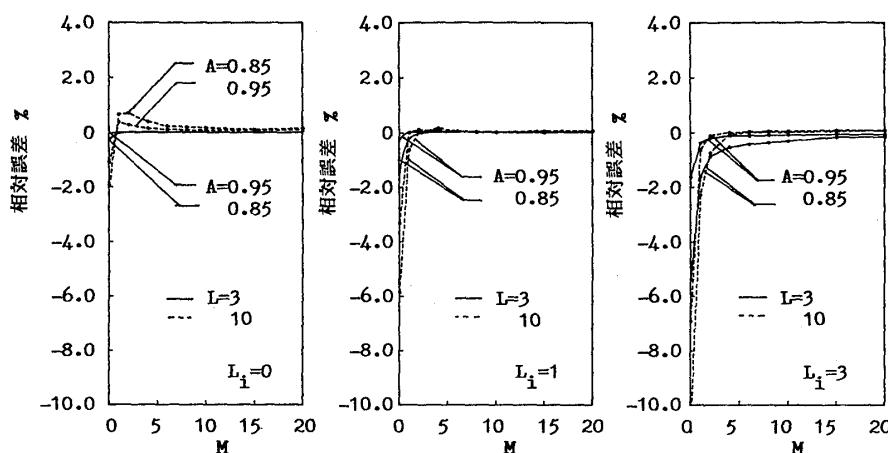


図 5 相対誤差 ($A_{1,0} = A_{i,j}$)

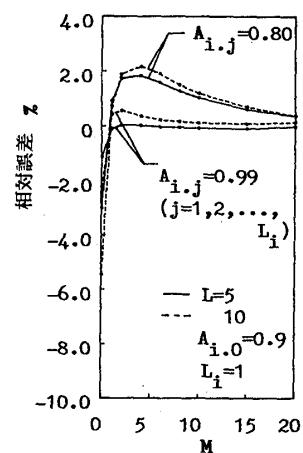


図 6 相対誤差 ($A_{1,0} \neq A_{i,j}$)

工・組立合流形ラインの生産率推定法として使用できる。

5. 多工程加工・組立合流形ラインの特性

5.1 組立工程数、加工工程数およびバッファ容量が生産率に及ぼす影響

図7に組立工程に連結される加工工程数 L_i とバッファ容量 M が生産率に及ぼす影響を、図8に組立工程数 L が生産率に及ぼす影響を示す。ただし、図7には比較のため加工工程を持たない直列形ラインの生産率を破線で示す。図7から、加工工程数が増加するにつれ生産率は低下するが、加工工程数の増加による生産率低下量は次第に減少することがわかる。したがって、組立工程に連結した加工工程数が多いラインでは、さらに加工工程を連結しても生産率に大きな影響を持たないと言える。また、バッファ容量が増加するにつれ生産率は急増し、直列形ラインの生産率に近づく。

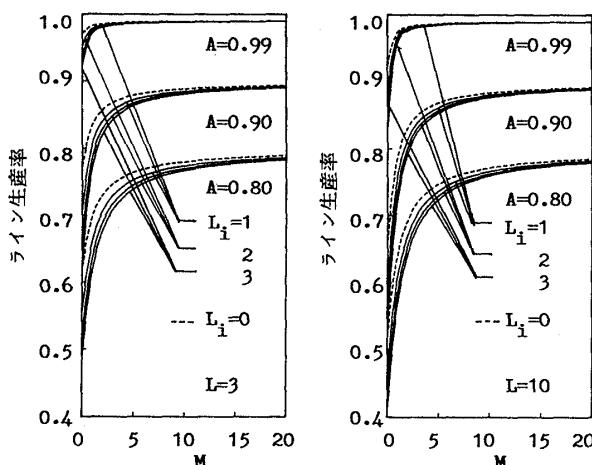


図7 加工工程数とバッファ容量の影響

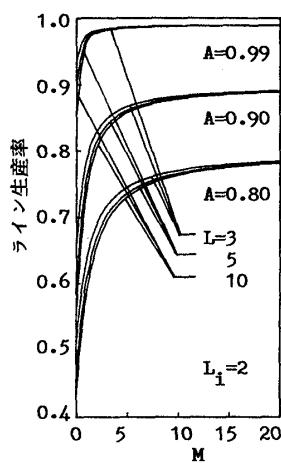


図8 組立工程数の影響

づく。したがって、加工工程の連結による停滯現象はバッファの導入により緩和される。一方、図8から、組立工程数が増加した場合、加工工程と同様、生産率は低下するが、組立工程数が増加するにつれ生産率の低下量はしだいに小さくなることがわかる。したがって、組立工程数が大きなラインではさらに組立工程を増加しても生産率に及ぼす影響は小さいと言える。また、バッファ容量が増加するにつれ生産率は急速に増加し、組立工程数の影響は小さくなる。

5.2 各工程の作業能力が生産率に及ぼす影響

次に、各工程の作業能力が生産率に及ぼす影響を調べるため、 $L=5$ のラインに対し $A=0.8(0.9)$ とし 1 か所の組立工程 $S_{i,0}$ ($i=1, 2, 3, 4, 5$) あるいは加工工程 $S_{i,1}$ ($i=1, 2, 3, 4$) の作業可能状態確率のみを $A^*=0.90(0.99)$ あるいは $0.70(0.80)$ と変化させた場合の生産率を図9に示す。ただし、実線と破線はそれぞれ組立工程と加工工程の作業可能状態確率を変化させた場合の結果である。また、比較のためすべての工程が等しい作業可能状態確率を持つ場合の生産率を一点鎖線で示す。図9から、作業可能状態確率が低い工程が存在すると生産率は大きく低下し、逆に、高い工程が存在してもそれほど生産率は向上しないことがわかる。したがって、作業可能状態確率の低い工程は避ける必要がある。また、組立工程の作業可能状態確率は加工工程よりも生産率に大きな影響を持ち、組立工程の中ではライン中央工程、ライン下流側工程、ライン上流側工程の順に生産率に大きな影響を持つ。しかし、加工工程の作業可能状態確率の影響は組立工程に比べ弱い。したがって、各組立工程の作業可能状態確率は生産率に異なる影響を持つと言え、組立工程に作

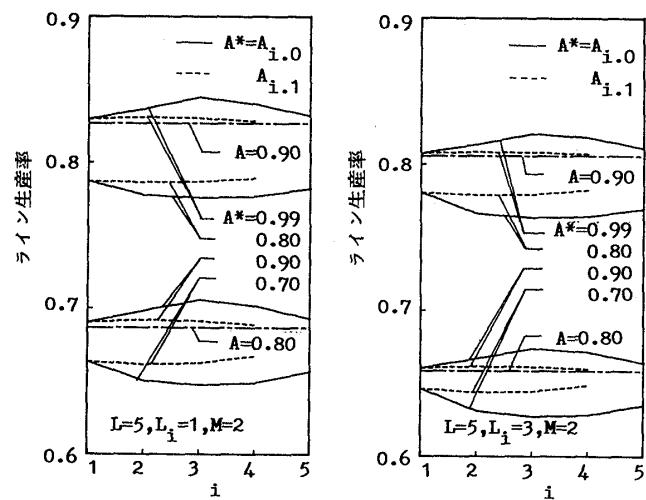


図9 各工程の影響

業能力のアンバランスが生じるなら中央付近の組立工程の作業能力を高めるあるいは上流側の組立工程の作業能力を低くすると生産率向上に有効であり、ライン中央付近の組立工程の作業可能状態確率を低くすることは避けなくてはならない。また、加工工程に作業能力のアンバランスが生じる場合には、作業可能状態確率の高い工程や低い工程をどの位置に配置しても生産率にほとんど影響を持たないと言える。これらの傾向は、加工工程数が増加すると弱くなる。

5.3 各工程間バッファが生産率に及ぼす影響

前節の結果から、各工程の作業可能状態確率は生産率に異なる影響を持つことが示された。したがって、各工程間に配置される各バッファの生産率に及ぼす影響も異なると考えられる。そこで、各工程間バッファ

の生産率に及ぼす影響を調べるために、図10に $L=5$, $A=0.8$ のラインに対し $M=2(6)$ としバッファ $B_{i,0}$ ($i=1, 2, 3, 4$) あるいはバッファ $B_{i,1}$ の容量のみを 0, 1(2, 4) あるいは 3, 4(8, 10) と変化させた場合の生産率を示す。ただし、(a), (b) はそれぞれ $B_{i,0}, B_{i,1}$ を変化させた場合の結果であり、比較のためすべてのバッファが等しい容量を持つ場合の生産率を一点鎖線で示す。図10(a)から、組立工程間のバッファは 5.2 の工程の影響と同様、1か所のバッファ容量が小さい場合には生産率を大きく低下させるが大きい場合には生産率をほとんど向上させないことがわかる。このとき、ライン中央付近のバッファが生産率に大きな影響を持ち、両端のバッファの影響は小さくなる。したがって、1か所のバッファ容量を小さくする、特に、ライン中央付近の容量を小さくすることは避ける必要がある。また、全体のバッファ容量が増加するあるいは加工工程数が増加すると異なる容量を持つバッファの位置の影響は小さくなる。一方、図10(b)から、組立工程と加工工程間のバッファは、組立工程間のバッファより生産率に及ぼす影響は小さく、特に、1か所の容量を大きくすることは意味がない。また、組立工程間のバッファに比べ位置の影響は小さくなる。

6. 結 論

本研究では、複数の加工工程が連結された多工程加工・組立合流形自動生産ラインの生産率に対する近似解法を提案した。この解法は、多工程合流形ラインを2工程合流形ラインに分割しさらに2工程合流形ラインを2工程直列形ラインに分割して生産率を推定するため、任意の数の組立工程と加工工程を持つラインに適用できる。また、ラインの挙動分析の結果、組立工程数が増加するあるいは連結する加工工程数が増加すると生産率は減少するがバッファ導入効果は高くなること、組立工程数の増加と加工工程数の増加による生産率低下は次第に小さくなることを示した。さらに、組立工程の作業可能状態確率が加工工程の作業可能状態確率よりも生産率に大きな影響を持ち、特に、ライン中央付近の組立工程や加工工程の作業可能状態確率が大きな影響を持つこと、また、ラインの中央付近に導入されるバッファが生産率に大きな影響を持つことを示した。

注

- (1) 加工工程は、通常、組立工程で組み付ける部品に対し加工作業を行い部品を供給する工程であるが、本研究では、組み付け部品を加工せず、パーツフィーダーなどにより組立工程に部品を供給する機械や組

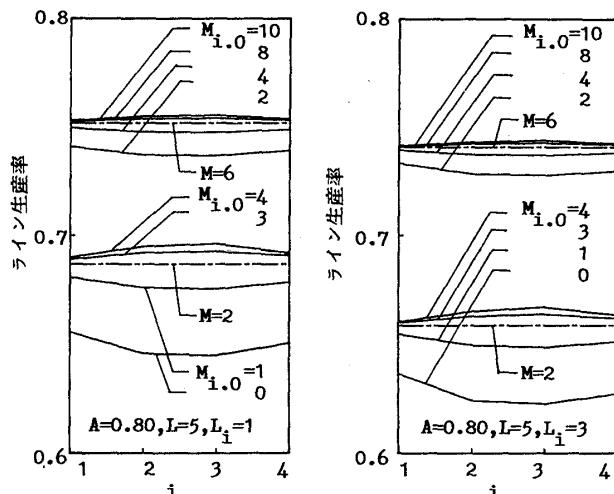


図10(a) バッファ $B_{i,0}$ の影響

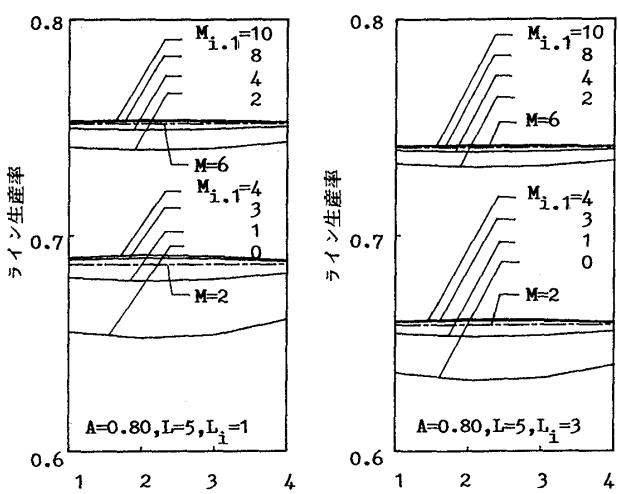


図10(b) バッファ $B_{i,j}$ の影響

立工程での作業をしやすくするためジグ上へ部品を取り付ける機械なども1つの加工工程と見なしている。

- (2) 作業可能状態確率 A は、各作業サイクルタイムに工程から組み付け部品や組立仕掛け品が出力される確率であり、各工程が単独で稼働した場合、 T_r サイクルタイムの間に、トラブルによって工程から部品や組立仕掛け品が出力されないサイクルタイムの総数を $\sum D_i$ とすると $A = 1 - \sum D_i / T_r$ で求められる。ただし、 i は T_r サイクルタイムの間で発生する i 回目の出力停止を D_i は出力停止の継続サイクルタイム数を表す。

工程で発生するトラブル停止には、一般に、機械の故障を修理するための比較的長い作業停止と現場で「ちょこ停」と呼ばれているハンドリングミスや位置決めミスまたそれらが原因で起こる加工ミスや組立ミスなどの比較的短い出力停止がある。これらの停止の中で、機械故障による作業停止は、大きな容量のバッファ導入が必要になりライン内に多くの仕掛け品停滞を生み出すため、ラインを停止させて対処する場合が多い[5]。したがって、本研究では、「ちょこ停」のような1～2サイクルタイム程度の出力停止が多発するラインを対象とした。このような出力停止は、各作業サイクルタイムで独立に発生する作業可能状態と不可能状態で近似的に表現され、作業不可能状態の発生間隔と作業不可能状態の継続期間はそれぞれ平均 $1/\bar{A}$ と $1/A$ サイクルタイムとなる[5]。

参考文献

- [1] Sheskin, T.: "Allocation of Interstage Storage Along an Automatic Production Line", *AIEE Trans.*, pp. 146-152, Vol. 8, No. 1, (1976)
- [2] Buzacott, J. J. and Kostelski, D.: "Matrix-geometric and Recursive Algorithm Solution of a Two-stage Unreliable Flow Line", *IIE Trans.*, pp. 429-438, Vol. 19, No. 4, (1987)
- [3] 山下英明, 鈴木誠道: “ n ステージ直列自動生産ラインの最適バッファ配分の近似解法”, 日本機械学会論文集C編, pp. 807-814, Vol. 53, No. 487, (1987)
- [4] Commault, C. and Dallery, Y.: "Production Rate of Transfer Lines without Buffer Storage", *IIE Trans.*, pp. 315-329, Vol. 22, No. 4, (1990)
- [5] Law, S. S., Baxter, R. J. and Massara, G. M.: "Analysis of In-Process Buffers for Multi-Input Manufacturing Systems", *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, pp. 1079-1086, Vol. 97, No. 3, (1975)
- [6] 古田興司, 大見孝吉: “合流形組立ラインの生産効率”, 日本経営工学会誌, pp. 394-399, Vol. 28, No. 4, (1978)
- [7] 井山俊郎, 後藤文昭, 窪田岳志, 古賀敏生: “合流形自動生産ラインに関する研究(L 種部品が合流する場合の生産率に対する近似解法)”, 日本機械学会論文集C編, pp. 1770-1775, Vol. 57, No. 537, (1991)