

組立生産システムにおける生産量の最大化

竹 田 仁

和文要旨：組立生産システム（単一型流れ作業システム）において、(1)要素作業時間が分布に従って確率的に変動する。(2)各要素作業に個別的な習熟が起こる。(1)、(2)が同時に起こると、流れ作業システムの始動期は各工程間でライン・バランスが良くても、次第にライン・バランスが悪くなり作業能率の低下が起こる。この時点で、一層生産量を高めるようなライン・バランスの組替えと、要素作業の再配分について理論的な考察を試みることにする。

A Study of Production in Conveyor Serviced Production Line System

HITOSHI TAKEDA

Abstract: This report analyzes the problem on relation-ship with production processes and the pitch-time including following preconditions in conveyor serviced production line system.

(1) Work time changes according to the normal-distributions. (2) Operator's proficiency occurs at the starting period. (3) Elements-work assignments relocate. (4) Line balancing combinatorial method.

1 序 論

現在多くの生産品たとえば、小さい物では鉛筆削機、時計、カメラ、電気製品から大きい物では自動車まで多くが組立生産システムによって組み立てられている。最近の傾向として、従来人間労働に依存してきた作業を、産業用ロボットなど機械に代替する傾向が見られる。しかし、技術的に機械化しにくいことや、多品種少量生産では採算の取れないことが多く、この種の作業には、人間労働に依

存する傾向がある。この組立生産システムは、生産性の向上を実現するのに最も有効な手段とされ、T型フォード車の組立が初めて適用されて以来、量産形態を中心とする工業の生産性に大きく貢献し、今でも世界的に広く普及されているばかりではなく目下のところ、この生産システムにとって代る有効な手段はまだ開発されているとは言えない。しかし、ECの社会労働委員会が、“流れ作業の廃止”の声明を発表したように世界的な脱生産システムの動きも見られる。この背景は、日本の

国情が異なっているためである。日本では EC 等と違いそれほど労働力不足ではないし、労働条件も労働者気質も違うため、激烈な市場競争下にある企業にとっては今後も取り入れられると考えられる。

組立生産システムにおいて、よく問題になるのがバッファ量、ラインバランシング、ピッチタイムなど直接生産量に関する問題と、作業者の作業時間を減少させ作業効率を高める問題である。前者は、特にラインバランシングとピッチタイムの問題を理論的に考慮する場合、結局組合せ問題に帰着してしまうため、理論的になればなるほど実用性が失われ、実用的になればなるほど理論性が失われるのがこの問題であり、基本的な性格である。後者は、組立生産システムの編成計画をする上で重要と考えられている。後者を換言すると、1 サイクルの作業の中には、加工品の取り置きという付随作業が発生する。そこで、組立生産システム(静止作業式流れ作業システム)の形態では、工程数の増加に伴って付随作業(品物や工具の取り置き)の回数が増し、それだけ製品 1 個当たりの総作業時間が大きくなる。すなわち、工程ごとに加工品の取り置き作業が発生するので、主体作業時間に占める付随作業時間の比率が増大することになる。とくにサイクルタイムが著しく小さくなると、時間的に主体作業よりも付随作業のほうが大きくなる場合がある。したがって、分業化に応じた工程数の増加による製品 1 個当たりの総作業時間の変化の状況は、図 1 のようになる。

工程数が少ないうちは、主体作業時間に占める付随作業時間の割合は微々たるもので、分業化が進むにつれて主体作業時間の割合は低下し、付随作業時間の割合が大きくなる。一方主体作業時間については、分業化が進むにつれて時間が短縮するが、極度に細分化するとバランスが悪くなるため総体的にむしろ増加する。⁽¹⁾

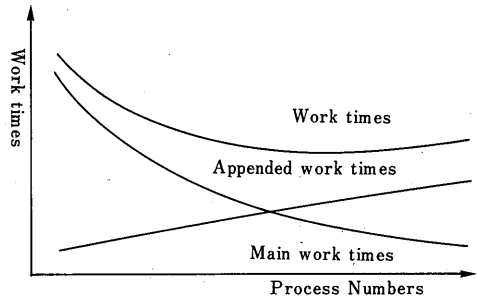


図 1 工程数の増加による製品 1 個当たりの総作業時間の変化

これまで発表されてきた論文の多くは、理論的なものであれ、実際のなものであれ要素作業時間が一定という仮定のもとで、ラインバランシング、ピッチタイム、最適作業分割などを考察している。無論要素作業時間が変動するという実際の仮定のもとで組立生産システムの問題を扱った論文も存在する。⁽²⁾ 師岡・生田は、要素作業時間が変動するという仮定はより一般的であり、かつ实际的である。そしてこの変動についても 2 つの側面があり、その 1 つはある一定分布に従って変動する確率的変動であり、他の変動は傾向的変動である。実際の要素作業では、この 2 つの変動が同時に起こるものであると言っている。⁽³⁾ 換言すると、図 2 のように時間の経過と共に要素作業時間が分布に従って変動し、又要素作業時間の平均値も減少して行く(習熟によるもの)ことである。

近年作業時間が一定の場合の組立生産システム問題から、作業時間が変動する場合の組立生産システム問題へと研究の流れが作業時間が変動する方向に向けられ始めている。しかし、上記の 2 つの変動を含んださいの生産量とピッチタイムの関係に関する論文や、分業化と付随作業に関する論文はまだ発表されていないばかりか、分業化と付随作業の研究においては、要素作業がある一定分布に従って変動する場合の研究もまだ皆無である。

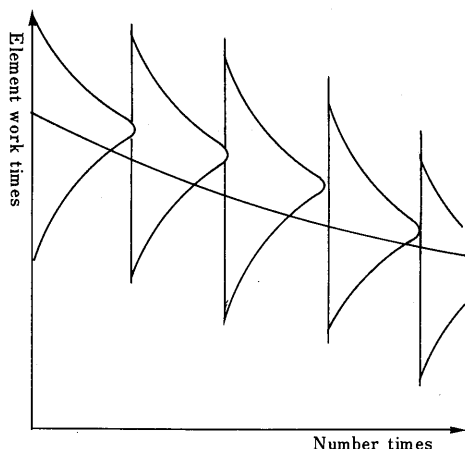


図2 要素作業時間の変動

現在大多数の製造工場において、ピッチタイムの決め方はネック工程のサイクルタイムの平均値に適当な余裕時間を加えて算出するという方法が用いられている。そして生産の立ち上り期にはその数値を割増し、逆に実績が上って作業に余裕が出てきたら、ピッチタイムを小さくするという方法が取られており、多分に経験的試行錯誤的である。そこで本研究の目的は、組立生産システム（静止作業式コンベヤーシステム）を対象にして、以下の3つの条件を考慮に入れたうえでの生産量を最大にするピッチタイムに対する要素作業の再配分と、分業化と付随作業について理論的に考察を試みることにする。

- (1)要素作業時間は確率的に変動する。その変動は正規分布に従うものとする。
- (2)要素作業時間は作業始動期などには作業回数にともなって減少して行く、つまり各要素作業において固有な習熟性が必ず存在する。
- (3)上記の(1)(2)を総合すると、組立生産システムの初期流動期においてはかなりの習熟が存在するはずである。初めは各工程間でラインバランシングが良くても、各工程間の要素作業の習熟程度がまちまちであるため、次第にそのラインバランシ

ングがくずれ作業能率の低下が起こる。そこで、この場合各工程間で要素作業の再配分、分業化と付随作業について理論的に考察して行くものとする。

2 モデル・記号

本研究で対象とする「組立生産システム」について以下の条件で取り扱うことにする。

- (1)このシステムを用いて組み立てられる製品は、比較的小型でコンベヤー上に乗るものとする。
- (2)このシステムは、静止作業式コンベヤーシステムであり、各工程には1人の作業者が配置されている。
- (3)このシステムは、N個の工程からなり、単一製品が加工され組立てられる。
- (4)要素作業時間は、各々独立で確率的に変動する。その変動は正規分布に従うものとする。
- (5)各要素作業時間には、それぞれ固有な習熟性が必ず存在する。本研究では、生産開始時を考慮しているため、初期習熟の個別所要時間値を適用するものとする。
- (6)各要素作業において、(4)(5)が同時に起こるものとする。換言すれば、図2のように要素作業時間は作業回数に応じて正規分布に従って、要素作業時間が減少して行く。
- (7)ピッチタイムは、N工程中最大の工程作業時間に余裕時間を加えたものとする。
- (8)各要素作業間での優先順序は、与えられているものとする。
- (9)各工程での作業は、数個の要素作業に分割できるものとする。
- (10)このシステムで、生産開始時には、各工程間でのラインバランシングが良いが、次第にバランスが悪くなってくる。この場合要素作業の再配分を行なう。このさい要素作業がK工程から(K+1)工程へ移されたさい(K+1)工程では、1回

目の作業と考えて初期習熟をするものとする。

(11) 作業中に昼休み、午前・午後の小休憩の前までに第1工程に入った製品は最終工程まで終わるものとする。換言すれば、休み後は第1工程から作業が開始される。

(12) コンベヤーには、作業速度を規制するために製品を乗せる位置を指定するマークが、一定間隔で付けられている。製品はピッチマークに従って、ライン・オンされ作業が進められる。各工程の作業者は作業の終わった製品を必ず元のピッチマーク上に乗せることを要求される。したがって、製品の間隔はつねに一定である。

(13) 遅れとは、その工程で作業中の製品を作業終了後コンベヤー上に置く位置が、その工程の作業域をこえた時点以降を言う。作業者は遅れが発生した時点で現在作業中の製品をその工程で脱落させる。よって次の工程へは進まない。

(14) 作業域の長さ \leq 製品の到着間隔。

(15) 昼休み、小休憩などのあとのコンベヤー速度は、前の速度と変化させることも可能である。

以上の条件は、一般的な仮定であり、組立生産システムの本質を損なうことがない。

記号とその定義は以下の通りである。

$C(N, k)$	工程数が N 、累計生産個数が k 個目のピッチタイム
$T_i(N, k)$	工程数が N 、累計生産個数が k 個目の i 工程での作業時間
$t_{f,i}(N, k)$	工程数が N 、累計生産個数が k 個目の i 工程での付随作業時間
$t_{s,i}(N, k)$	工程数が N 、累計生産個数が k 個目の i 工程での主体作業時間
$W_{ij}(N, k)$	工程数が N 、累計生産個数が k 個目の i 工程中 j 番目の要素作業時間
$\sigma_{ij}(N, k)$	同上の標準偏差
$W_{f,ij}(N, k)$	工程数が N 、累計生産個数が k

個目の i 工程中 j 番目の要素作業中の付随作業時間

$\sigma_{f,ij}(N, k)$ 同上の標準偏差

$W_{s,ij}(N, k)$ 工程数が N 、累計生産個数が k 個目の i 工程中 j 番目の要素作業中の主体作業時間

$\sigma_{s,ij}(N, k)$ 同上の標準偏差

$b_{ij}(N)$ 工程数が N 、 i 工程中 j 番目の要素作業時間の習熟係数

* 文字の右上に * 印をうけた文字は、要素作業の再配分を行なったことを示す。

$$T_i(N, k) = t_{f,i}(N, k) + t_{s,i}(N, k) \dots\dots\dots (1)$$

$$W_{ij}(N, k) = w_{f,ij}(N, k) + w_{s,ij}(N, k) \dots\dots (2)$$

初期習熟は、

$$W_{ij}(N, k) = \frac{W_{ij}(N, 1) \{1 - b_{ij}(N)\}}{k^{b_{ij}(N)}} \dots\dots (3)$$

3 解 析

組立生産システムにおいて、コンベヤー作業編成表（動作時間研究、優先順位図作成、工程分割などにより作られた最後の案）により要素作業順序が示される。この優先順序の与えられている要素作業を N 工程にできる限り均等に配分する。これ以後の生産量を最大にする要素作業の再配分（工程数不変）と工程の分割（工程数変化）について考察して行く。

3.1.1 コンベヤー始動期と同じラインバランシング（再配分なし） i 工程中の要素作業を j 個とすると、各要素作業は正規分布に従い、かつ各要素作業は別作業でそれぞれ独立であるから、 $T_i(N, 1)$ の分布は(4)式となる。

$$T_i(N, 1) = N \left(\sum_{j=1}^j W_{ij}(N, 1), \sum_{j=1}^j \sigma_{ij}^2(N, 1) \right) \dots\dots\dots (4)$$

累計生産個数が、 k 個目の作業時間分布は(5)式となる。

$$N \left(\sum_{j=1}^j \frac{W_{ij}(N, 1) \{1 - b_{ij}(N)\}}{k b_{ij}(N)} \right), \sum_{j=1}^j \sigma_{ij}^2(N, 1) \quad \dots\dots(5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \left\{ \sum_{j=1}^j \sigma_{ij}^2(N, 1) \right\}^{1/2}} \int_{-\infty}^{C(N,1)} \exp \left\{ - \frac{\left\{ T_i(N, k) - \sum_{j=1}^j \frac{W_{ij}(N, 1) \{1 - b_{ij}(N)\}}{k b_{ij}(N)} \right\}^2}{2 \left\{ \sum_{j=1}^j \sigma_{ij}^2(N, 1) \right\}} \right\} dT \quad \dots\dots(6)$$

$T_i(N, k)$ の分布関数を $F \{T_i(N, k)\}$ とすると $\{T_i(N, k)\}$ は(6)式となる。ピッチタイム $C(N, 1)$ の時、累計生産個数が、 k 個目の i 工程での製品の遅れ発生確率 $P \{X_i(k) | C(N, 1)\}$ は(7)式となる。

$$1 - F \{T_i(N, k)\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$F \{T_i(N, k)\}$ の確率で次の $(i + 1)$ 工程へ移動する。累計生産個数が k 個目の製品が、第1工程から第 N 工程まで各工程で遅れず作業が終了する確率は、(8)式となる。

$$\prod_{i=1}^N F \{T_i(N, k)\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

累計生産個数が k 個までの生産量は、(9)式となる。

$$\sum_{k=1}^k \prod_{i=1}^N F \{T_i(N, k)\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

同一ピッチタイムで、コンベヤーが稼働する期間を α とすると、この期間 α 中に投入される製品の個数は、 $\alpha / C(N, 1)$ 個となる。このうち完全な製品として作業が終了する個数は、(10)式となる。

$$\sum_{k=1}^{[\alpha / C(N, 1)]} \prod_{i=1}^N F \{T_i(N, k)\} \quad \dots\dots\dots(10)$$

(10)式は $C(N, 1)$ の関数で、(10)式を満たす最大

値 (10)式の場合は極大値) が生産量を最大にする $C(N, 1)$ の値である。(11)式を満たす $C(N, 1)$ が生産量を最大にするピッチタイムである。

$$d \left\{ \sum_{k=1}^{[\alpha / C(N, 1)]} \prod_{i=1}^N F \{T_i(N, k)\} \right\} / dC(N, 1) \quad \dots\dots(11)$$

3.1.2 要素作業を再配分する場合 コンベヤー始動期には、優先順序の与えられている一群の要素作業を、 N 個の工程にできる限り均等に配分してあったが、各要素作業時間の習熟率がまちまちなため次第にラインバランシングが悪くなり、作業能率の低下をきたし始め、ピッチタイムの減少率が低下したりする。そこで、ある特定の累計生産個数の所で要素作業の再配分を考える。

3.1.2.1 累計生産個数が k 個目で再配分する場合 k 個目の時点で再配分とは、昼休み、小休憩あとの作業開始時に再配分を行なう。再配分前でネック工程が i 工程であると仮定すると、(12)式が成り立つ。

$$\text{Min} \left[F \{T_1(N, k), \dots, F \{T_i(N, k)\} \dots F \{T_N(N, k)\} \right] = F \{T_i(N, k)\} \quad \dots\dots(12)$$

表1 各工程における再配分前後の要素作業内容

第1工程	...	第(i-1)工程	第i工程	第(i+1)工程	...	第N工程
コンベヤー始動期の各工程の要素作業内容						
$W_{11},$ $W_{12} \dots\dots$		$W_{(i-1)1}, W_{(i-1)2}, \dots\dots$ $W_{(i-1)p}$	$W_{i1},$ $W_{i2}, \dots\dots$ W_{ij}	$W_{(i+1)1}, W_{(i+1)2}, \dots\dots$ $W_{(i+1)q}$		$W_{n1},$ $W_{n2} \dots\dots$

再配分後の各工程の要素作業内容
要素作業を1つ移動した場合

A	$W_{11},$ W_{12}, \dots	$W_{(i-1)1}, \dots$ $W_{(i-1)P}, W_{11}$	W_{12}, \dots W_{1j}	$W_{(i+1)1}, W_{(i+1)2}, \dots$ $W_{(i+1)q}$	$W_{n1},$ W_{n2}, \dots
B	$W_{11},$ W_{12}, \dots	$W_{(i-1)1}, W_{(i-1)2}, \dots$ $W_{(i-1)P}$	W_{11}, W_{12}, \dots $W_{1(i-1)}$	$W_{1j}, W_{(i+1)1}, \dots, W_{(i+1)q}$	$W_{n1},$ W_{n2}, \dots

注表1中たとえば、 $W_{ij}(N, k)$ の (N, k) は省略(すべての $W \dots$ の文字の (N, k) を省略)

各要素作業の優先順位が決定しているため、再配分の方法を表1に示す。(i工程の要素作業の個数をj個とする。(i-1)工程の要素作業の個数をP個とする。(i+1)工程の要素作業の個数をq個とする。)

3.1.2.1. a i 工程中、 $W_{11}(N, k)$ の要素作業を(i-1)工程に移動した。i工程での作業時間分布は(13)式となる。

$$N^* \left(\sum_{j=2}^i \frac{W_{1j}(N, 1) \{1 - b_{1j}(N)\}}{k^{b_{1j}(N)}}, \sum_{j=2}^i \sigma_{ij}^2(N, 1) \right) \dots (13)$$

つねに(14)式が成立する。

$$F\{T_i(N, k)\} < F^*\{T_i(N, k)\} \dots (14)$$

$$F^*\{T_i(N, k)\}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\sum_{j=2}^i \sigma_{ij}^2(N, 1) \right)^{1/2}} \int_{-\infty}^{C(N,1)} \exp \left\{ - \frac{\left\{ \sum_{j=2}^i W_{1j}(N, 1) - \sum_{j=2}^i W_{1j}(N, 1) \{1 - b_{1j}(N)\} / k^{b_{1j}(N)} \right\}^2}{2 \left\{ \sum_{j=2}^i \sigma_{ij}^2(N, 1) \right\}} \right\} dT \dots (15)$$

(i-1)工程での作業時間分布は、要素作業移動前が(16)(17)式、移動後が(18)(19)式となる。

$$N \left(\sum_{P=1}^P \frac{W_{(i-1)P}(N, 1) \{1 - b_{(i-1)P}(N)\}}{k^{b_{(i-1)P}(N)}}, \sum_{P=1}^P \sigma_{(i-1)P}^2(N, 1) \right) \dots (16)$$

$$(16)式を用いた F\{T_{(i-1)}(N, k)\} \dots (17)$$

$$N^* \left(\sum_{P=1}^P \frac{W_{(i-1)P}(N, 1) \{1 - b_{(i-1)P}(N)\}}{k^{b_{(i-1)P}(N)}} + W_{11}(N, 1), \sum_{P=1}^P \sigma_{(i-1)P}^2(N, 1) + \sigma_{11}^2(N, 1) \right) \dots (18)$$

$$(18)式を用いた F^*\{T_{(i-1)}(N, k)\} \dots (19)$$

$$\text{Min} [F\{T_i(N, k)\}, F^*\{T_{(i-1)}(N, k)\}] \dots (20)$$

(20)式の値が、 $F\{T_i(N, k)\}$ ならば、要素作業を再配分した方がピッチタイムを小さくすることができる。(換言すれば、ネック工程が変わり同一ピッチタイムでは遅れ発生確率が減少する。)しかし、生産量を増加させるということではない。

$$F\{T_i(N, k)\} \cdot F\{T_{(i-1)}(N, k)\} \dots (21)$$

$$F^*\{T_i(N, k)\} \cdot F^*\{T_{(i-1)}(N, k)\} \dots (22)$$

(21)式の値<(22)式の値が成立すれば、再配分した方が生産量を増加させることができる。

3.1.2.1. b i 工程中、 $W_{1j}(N, k)$ の要素作業を(i+1)工程に移動した。i工程での作業時間分布は(23)式となる。

$$N^* \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{W_{1j}(N, 1) \{1 - b_{1j}(N)\}}{k^{b_{1j}(N)}}, \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{ij}^2(N, 1) \right) \dots (23)$$

(23)式を用いた $F^*\{T_i(N, k)\}$ (24)

($i + 1$) 工程での作業時間分布は、要素作業移動前が(25)(26)式、移動後が(27)(28)式となる。

$$N\left(\sum_{q=1}^q \frac{W_{ijq}(N, 1) \{1 - b_{(i+1)q}(N)\}}{k^{b_{(i+1)q}(N)}}, \sum_{q=1}^q \sigma_{(i+1)q}^2(N, 1)\right) \quad \text{.....(25)}$$

(25)式を用いた $F\{T_{(i+1)}(N, k)\}$ (26)

$$N^*\left(\sum_{q=1}^q \frac{W_{(i+1)q}(N, 1) \{1 - b_{(i+1)q}(N)\}}{k^{b_{(i+1)q}(N)}} + W_{ij}(N, 1), \sum_{q=1}^q \sigma_{(i+1)q}^2(N, 1) + \sigma_{ij}^2(N, 1)\right) \quad \text{.....(27)}$$

(27)式を用いた $F^*\{T_{(i+1)}(N, k)\}$ (28)

$$\text{Max} \left[F\{T_i(N, k)\}, F^*\{T_{(i-1)}(N, k)\}, F^*\{T_{(i+1)}(N, k)\} \right] \quad \text{.....(29)}$$

(29)式の値が、 $F\{T_i(N, k)\}$ ならば、再配分しない方が、 $F^*\{T_{(i-1)}(N, k)\}$ ならば、 i 工程中の要素作業 $W_{ij}(N, k)$ を ($i - 1$) 工程に移動した方が、 $F^*\{T_{(i+1)}(N, k)\}$ ならば、 i

工程中の要素作業 $W_{ij}(N, k)$ を ($i + 1$) 工程に移動した方が、それぞれピッチタイムを減少させることができる。つまり、ラインバランシングが良くなる。

$$\text{Max} \left[F\{T_{(i-1)}(N, k)\} \cdot F\{T_i(N, k)\} \cdot F\{T_{(i+1)}(N, k)\}, F^*\{T_{(i-1)}(N, k)\} \cdot (15) \text{ 式} \right. \\ \left. \text{の } F^*\{T_i(N, k)\} \cdot F\{T_{(i+1)}(N, k)\}, F\{T_{(i-1)}(N, k)\} \cdot (24) \text{ 式の } F^*\{T_i(N, k)\} \cdot \right. \\ \left. F^*\{T_{(i+1)}(N, k)\} \right] \quad \text{.....(30)}$$

(30)式の値が、一項目ならば、再配分しない方が、二項目の値ならば、 i 工程中の要素作業 $W_{ij}(N, k)$ を ($i - 1$) 工程に移動した方が、三項目の値ならば、 i 工程中の要素作業 $W_{ij}(N, k)$ を ($j + 1$) 工程に移動した方が、それぞれ生産量を増加させることができる。

3.1.2.2 累計生産個数が ℓ 個目で再配分する場合($\ell \leq k$)、前節では、累計生産個数が k 個目の時点でのラインバランシング、生産量最大について考察してきた。しかし、少量生産の場合作業開始後、たとえば、2回目の休憩以前に1ロット生産終了という場合、要素作業の再配分は1回可能である。この1回の再配分で生産量を最大にすることを考察して行く。(再配分した時点では生産量が一時的に減少してもよく、 ℓ 個以降1ロット生産

終了までに生産量が増加すれば良い。)

再配分した ℓ 個目以降について比較する。ピッチタイムが同一(表1による、要素作業の再配分なしと、要素作業1つ移動した場合 A, B の3つのモデルにおいて、 ℓ 個目以降のピッチタイムが同じ場合、ただし ℓ 個目以前と異なってもよい。)の場合は、(30)式のそれぞれ一項目、二項目、三項目の前に $\sum_{k=1}^k$ を付加すれば良い。又(11)式より、それぞれ要素作業を再配分した時の最適(生産量を最大にする)ピッチタイムが求められる。

3.2 優先順序の与えられている要素作業を、 $N, (N - 1)$ 工程にできる限りそれぞれ均等に配分する。これ以後の生産効率を最大にする最適工程数決定について考察して行く。このモデルは、(N 工程に配分した時、 N 工程

の最後の要素作業 $W_{nz}(N, k)$ が $(N-1)$ 工程に配分すると $(N-1)$ 工程の最後の要素作業となる。) i 工程を中心に表すと、表 2 と

なる。 $(N-1)$ 工程に配分すると、 i 工程の要素作業個数は、 N 工程に配分したよりも等しいか、多くなる。

表 2 優先順序の与えられている要素作業を $(N-1)$ 工程、 N 工程に均等に配分した時の表

...	第 $(i-1)$ 工程	第 i 工程	第 $(i+1)$ 工程	...	第 $(N-1)$ 工程	第 N 工程
 $W_{(i-1)P}, W_{i1}$	W_{i2} W_{i3} ... $W_{i+1,1}$ $W_{(i+1)1}$ $W_{(i+1)2}$ W_{nz}
	$W_{(i-1)2},$ $W_{(i-1)2},$ $W_{(i-1)P}$	$W_{i1},$ $W_{i2},$ W_{ij}	$W_{(i+1)1},$ $W_{(i+1)2},$ $W_{(i+1)q}$	 W_{nz}

注表 2 中の文字は N 工程に配分した時の要素作業で示す。よって $W_{ij} = W_{ij}(N, k)$ となり、すべての $W \dots$ の文字の (N, k) は省略

3.2.1 習熟効果を考慮した場合 (注 1)

$T_{ij}((N-1)k)$ の分布は、(31)式となる。

$$N \left(\sum_{j=2}^j W_{ij}(N, k) + \sum_{q=1}^2 W_{(i+1)q}(N, k), \sum_{j=2}^j \sigma_{ij}^2(N, k) + \sum_{q=1}^2 \sigma_{(i+1)q}^2(N, k) \right)$$

$$\sum_{j=2}^j W_{ij}(N, k) + \sum_{q=1}^2 W_{(i+1)q}(N, k) = \sum_{j=2}^j (w_{s,ij}(N, k) + w_{f,ij}(N, k)) + \sum_{q=1}^2 (w_{s,(i+1)q}(N, k) + w_{f,(i+1)q}(N, k))$$

$$\sum_{j=2}^j \sigma_{ij}^2(N, k) + \sum_{q=1}^2 \sigma_{(i+1)q}^2(N, k) = \sum_{j=2}^j \sigma_{s,ij}^2(N, k) + \sigma_{f,ij}^2(N, k) + \sum_{q=1}^2 (\sigma_{s,(i+1)q}^2(N, k) + \sigma_{f,(i+1)q}^2(N, k))$$

.....(31)

3.1.1 と同様にして、 $F\{T_i(N-1, k)\}$ が求められ、ピッチタイム $C((N-1), 1)$ の時、累計生産個数が、 k 個目の i 工程での製品の遅れ発生確率

$P\{X_i(k)\} C((N-1), 1)$ は(32)式となる。

$$1 - F\{T_i(N-1, k)\} \quad \text{.....(32)}$$

同一ピッチタイムで、コンベヤーが稼働する期間を α とすると、この期間 α 中に投入される製品の個数は、 $\alpha/C((N-1), 1)$ 個となる。このうち完全な製品として作業が終了する個数は、(33)式となる。

$$\sum_{k=1}^{\alpha/C((N-1), 1)N-1} \prod_{i=1}^{N-1} F\{T_i((N-1), k)\} \quad \text{.....(33)}$$

(33)式は $C((N-1), 1)$ の関数で、(33)式を満たす最大値 ((33)式の場合は極大値) が生産量を最大にし、(34)式を満たす $C((N-1), 1)$ が生産量を最大にするピッチタイムである。

$$d \left\{ \left[\sum_{k=1}^{[\alpha/C((N-1), 1)]} \prod_{i=1}^{N-1} F\{T_i((N-1), k)\} \right] / dc((N-1), 1) \right\}$$

.....(34)

作業効率について、要素作業を $(N-1)$ 工

程に配分した場合が(35)式、要素作業をN工程に配分した場合が、(36)式である。

$$\sum_{k=1}^{[\alpha/f(C(N-1,1))]} \prod_{i=1}^{N-1} F\{T_i((N-1),k)\} \times \frac{1}{N-1} \quad \dots\dots(35)$$

$$\sum_{k=1}^{[\alpha/f(C(N,1))]} \prod_{i=1}^N F\{T_i(N,k)\} \times \frac{1}{N} \quad \dots\dots(36)$$

ただし、(35)式中の $f(C(N-1, 1))$ は(34)式を満たす $C(N-1, 1)$ の値、(36)式中の $f(C(N, 1))$ は(11)式を満たす値である。

工程数を $(N-1)$ 、 N に配分した場合について比較すると、分業化によるメリットを考慮しなければ、(35)式の値 $>$ (36)式の値が成立する。この結果は、分業化を否定している。換言すれば1人の作業者が作業をすべて行なっても、数人の作業者が作業を分業して行なっても主体作業時間は変わらないことを示している。同一作業において、作業分業化が進むにつれて、1人の受け持つ作業割合が減少するので、作業内容がより単純化され、作業困難性が低下する。その結果作業習熟率も大きくなり主体作業時間が減少して行く。しかし、分業化が進むにつれて、付随作業時間が増加して来る。以上を考慮すると常に分業化すると主体作業時間が同じであるとは言えない。

分業化が進むにつれて、主体作業時間は減少するがその減少量は、作業分業化の対数関数的な割合と考えられている。又付随作業時間も増加するが、その増加量も同様に対数関数的な割合と考えられている。上述を考慮すると、分業化により主体作業時間は減少する。ここで、 σ 、 δ を以下のように仮定すると、

σ : 主体作業の分業化における係数

δ : 付随作業の分業化における係数

たとえば、(31)式中の

$\sum_{j=2}^j W_{ij}(N, k)$ は(37)式に、 $\sum_{q=1}^2 W_{(i+1)q}(N, k)$ は(38)式に、 $\sum_{j=2}^j \sigma_{ij}^2(N, k)$ は(39)式に、 $\sum_{q=1}^2 \sigma_{(i+1)q}^2(N, k)$ は(40)式にそれぞれ変わる。

$$\sum_{j=2}^j (w_{s,ij}(N, k)/(j+1)^\sigma + w_{f,ij}(N, k) \cdot (j+1)^\sigma) \quad \dots\dots(37)$$

$$\sum_{q=1}^2 (w_{s,(i+1)q}(N, k)/2^\sigma + w_{f,(i+1)q}(N, k) \cdot 2^\sigma) \quad \dots\dots(38)$$

$$\sum_{j=2}^j (\sigma_{s,ij}^2(N, k)/(j+1)^\gamma + \sigma_{f,ij}(N, k) \cdot (j+1)^\sigma) \quad \dots\dots(39)$$

$$\sum_{q=1}^j (\sigma_{s,(i+1)q}^2(N, k)/2^\gamma + \sigma_{f,(i+1)q}^2(N, k)2^\sigma) \quad \dots\dots(40)$$

(31)式の値を、(37)、(38)、(39)、(40)式の値に変更すると(35)式は(35)*式に変更される。同様に(36)式は(36)*式に変更される。

(35)*式の値 $<$ (36)*式の値ならば、稼働時間 α の間では、工程数を N にした方が生産効率が良いことを示している。

(35)*式の値 $>$ (36)*式の値ならば、稼働時間 α の間では、工程数を $(N-1)$ にした方が生産効率が良いことを示している。

以上の結果より、組立生産システムにおける要素作業の再配分、分業化と付随作業における最適工程数決定について列記する。

- (1)優先順序の与えられている要素作業を、工程数 $(N-1)$ 、 N にそれぞれできる限り均等に配分する。例 表2
- (2)工程数 $(N-1)$ 、 N のそれぞれのシステムについて、各工程で、要素作業時間分布を求める。例 (5)式
- (3)ピッチタイムに対する生産個数が、工程数 $(N-1)$ 、 N のそれぞれのシステムで求められる。例 (10)式
- (4)工程数 $(N-1)$ 、 N のそれぞれのシステムで、生産量を最大にするピッチタイムが求められる。例 (11)式
- (5)工程数 $(N-1)$ 、 N のそれぞれのシステムで、作業効率が求められ各システムの優劣が示される。(35)/(36)*式

(6)工程数が決定し、初めは各工程間でラインバランシングが良いが、各工程で習熟率が異なるため、次第にラインバランシングが悪くなり作業能率の低下が起こる。そこで、各工程間で要素作業の再配分を行なう。例 (13)式

(7)再配分前後について、生産量の大小を比較して、再配分の方法や、再配分の優劣を検討する。例 (30)式

(8)工程の分割について考察する。上記の(1)へ。

(注 1)

主体作業は、付随作業と比較して習熟効果を起こす要因数が多いため習熟効果を考慮するが、付随作業は習熟要因数が少ないため習熟効果を考慮しない。

たとえば(31)式中の

$$\sum_{j=2}^j W_{ij}(N, k) \\ = \sum_{j=2}^j \left(\frac{W_{s,ij}(N, 1) \{1 - b_{ij}(N)\}}{k \cdot b_{ij}(N)} + w_{f,ij}(N, 1) \right) \quad \dots (41)$$

4 結 言

組立生産システムにおいて、各工程内の要素

作業時間が確率的に変動しその変動が正規分布に従い、なお習熟という動的要因を含めた上での、要素作業の再配分によるラインバランシング問題、分業化と付随作業を考慮した最適工程数決定問題について以下のことを示した。

(1)工程数(N-1), N に分割した場合の生産量が求められた。

(2)工程数(N-1), N に分割した場合の生産量を最大にするピッチタイムが求められた。

(3)作業効率を最大にする最適分割方法が求められた。

(4)ラインバランシングを良くするため、要素作業の再配分を考察し、生産量を増加するような再配分の方法が求められた。

種々の要素作業の作業時間分布、習熟係数の値、分業化が進むにつれて主体作業時間が減少する割合、又それとともなって増加する付随作業時間の割合が決定するならば、現在多くの企業で行なっているピッチタイム、ラインバランシングなど生産量に関する試行錯誤的決定方法が減少するように思う。

文 献

- (1)並木, 多品種少量生産の流れ作業, 日刊工業新聞社
- (2)例えば, 村松・黒田・伊藤, JIMA No. 35 1967-5
- (3)師岡・生田, IE Vol. 10-3 1968