

生産システムにおけるスケジューリング理論

Scheduling Theory for Production System

三森定道* *Sadamichi Mitsumori*

The scheduling theory for production control is constructed from the viewpoint of load balancing. The production modes such as switching, mixed, and half mixed production, and the in-process inventory are framed upon the concepts of static and dynamic load balancing. The in-process inventory is looked upon as so-called low pass filter for the preceding process from the succeeding process, and the concept of limiting inventory quantity is introduced. Therefore, the inventory control is looked upon as a problem of controlling the mean preceding days of the preceding process for the succeeding process. The optimality of switching production is the minimization of change-over loss under the condition of delivery time and production capability. The optimality of mixed production is the minimization of fluctuation in load for all workers. These optimal scheduling methods are explained.

1 緒 言

コンベヤ生産方式が自動車工業に最初に採り入れられた時代には、多種生産と多量生産とは相いれないものと考えられていた。多量生産を行ない生産コストの低減を図るには、少品種でなければならないというのが生産管理の常識であった。多種多量の製品が生産されているのは過渡的例外的な事態であって、そのうち少数の標準製品に落ち着くはずであると考えられがちであった。しかし、現在は規格品のみ作って売れる時代ではない。流れ作業方式の導入により、機能的には満足できる製品を安価に供給できるようになったが、人間の欲求はそこにとどまらず、個別な多様な要求を満たす製品を求めるようになってきている。そのため、生産工場では工程内の物の流れが複雑化し、労働力と設備の利用効率を高めるのが困難になってきている。

ところで、このような生産環境の変化に、従来のスケジューリング理論や在庫理論は適合しているであろうか。たとえば、 n 仕事、 m 機械ジョブショップスケジューリング問題⁽¹⁾を考察するにこの問題は次のように述べることができる。すなわち、 m 台の機械を使って、 n 個の製品を加工するものとする。製品 i ($i=1, 2, \dots, n$) の加工のための機械の使用順序と機械 j ($j=1, 2, \dots, m$) の占有時間とが与えられている。製品の加工処理中に作業を中断しないこと、一製品を同時に2台以上の機械で処理できないこと、1台の機械で同時に2製品以上の加工ができないことを条件として、全製品の加工処理完了までの時間の最短化を目的とした、 n 製品の各機械における加工順序を求めるのがこの問題である。特に、各製品を加工する際の機械の通過順序がすべて等しい場合をフローショップ問題と呼んでいる。

この問題が現在の生産環境にそぐわない第一の点は、加工対象がすべて生産工程の前にそろっているとしていることにある。これは、上流工程との間に大量の仕掛け品の中間在庫を設けているということであり、生産日数の増加を招くことになる。生産日数が増加し、需要予測可能日数よりそれが

増加すると、市場変動に応じにくくなる。しかも、需要変動が激しく予測が困難なのが現在である。

第二の点は、 n 個の製品で生産が完了するように問題設定がなされていることにある。連続的に生産が続けられている現実の生産工場では、ある有限個数の製品の加工完了時刻の最短化という最適性は全く現実ばなれしている。というのは、時間の流れの中での動的な最適化問題となっていないからである。

次に、在庫理論について考察すれば、現在の在庫理論⁽²⁾は複雑に発展しているが、その基本的な考え方は次のようなものである。それは、各製品別に、発注損失(段取り損失)、在庫損失、品切れ損失の和の最小化を目的関数として、各製品の発注ロット(生産ロット)、発注時点(生産時点)、在庫量を決定するものである。しかし、各種製品の生産要求の競合からくる生産工程の負荷変動を押えることが考慮されていないため、現実の生産工場ではこの種の理論は使われていない。従来の在庫理論は、供給側に及ぼす影響が考慮されていないため、流通在庫には適用できても生産工場の在庫(製品、中間在庫)には適用できないのである。

以上の議論から、生産工場の管理技法としてのスケジューリング問題は新しい立場から再検討しなければならないことがわかる。ここでは、各種生産と需要変動のもとで、設備と労働力の利用効率の最大化を図ることを目的として、負荷バランスの立場から、スケジューリング理論を展開する。

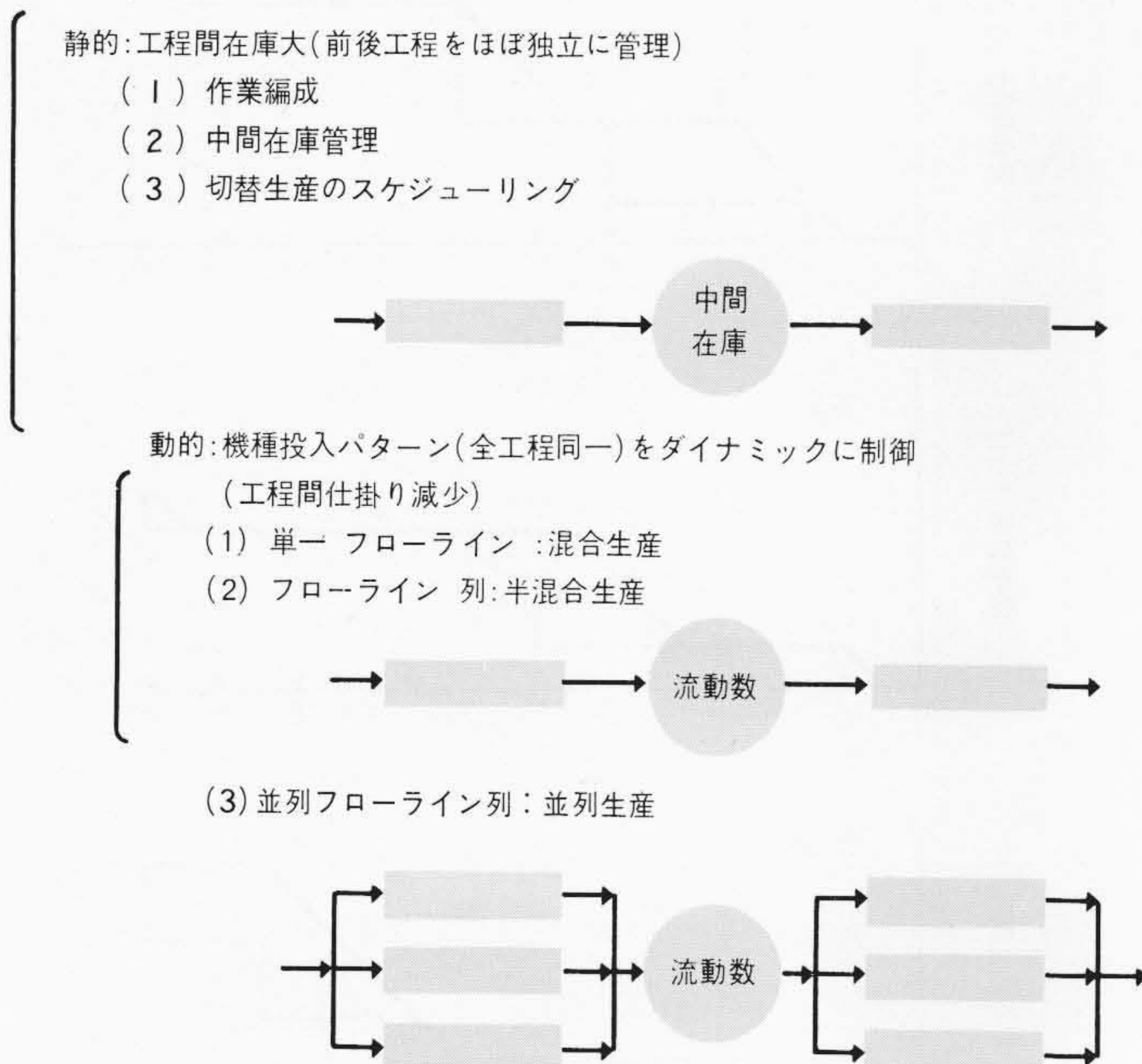
2 負荷バランス

多種生産下で生産効率が低下する最大の理由の一つは、設備的にも、時間的にも負荷バランスがくずれることにある。特定の設備に負荷が集中し加工物の設備待ちが生ずる一方、別の設備は軽負荷となり設備の加工物待ちが生ずる時間帯が現われ、生産工程全体としての物の流れが渋滞する。そのため、生産工程の負荷を設備的かつ時間的にバランスさせるこ

* 日立製作所中央研究所

表1 静的/動的負荷バランシング 負荷バランスを図る種々の方法の説明図

Table 1 Static/Dynamic Load Balancing



とが生産管理の主要目的の一つとなる。しかも、負荷を時間的に平滑化することは、予測しにくい擾乱(じょうらん)による工程の乱れの発生確率を最小化することにもなっている。

負荷バランスを図る方法としては、設備計画に中心をおく方法と、生産順序(スケジュール)に中心をおく方法とがある。前者を静的負荷バランス、後者を動的負荷バランスと呼ぶことができよう。次に、表1に従って、両者を説明する。

3 静的負荷バランシング

静的負荷バランシングを、単一工程と工程列とに分けて考察すると、単一工程に対する典型的な問題はコンベヤラインの作業編成の問題⁽³⁾である。工程列については、工程間に中間在庫を設け、工程間の負荷バランスを図るのが静的負荷バランシングの方法である。この中間在庫によって、両工程の結合度が弱まり、各工程の運用スケジューリングがほぼ独立に作成できる。各工程の運用スケジュールの最適性は、生産工程の能力条件、納期条件の下で作業編成の切替回数(損失)の最小化である。このスケジューリング問題を切替生産の最適スケジューリング問題と呼ぶことにする。

3.1 中間在庫

中間在庫は下流工程(あるいは市場)の生産スケジュール(あるいは需要変動)に対する上流工程へのローパスフィルタとなっているという簡明な発想から以下の議論を進める。

下流工程が生産工程である場合には、その生産能力は設備投資が行なわれないかぎり、生産機種による相違はあるにしてもほぼ一定である。また、下流工程が市場である場合でも日程計画を立てる程度の期間では、個々の製品の需要は変動しても総需要はほぼ一定と考えられる。一方、上流工程の生産能力も、下流工程と同じ理由でほぼ一定である。したがって、短期間では中間在庫量の総和は一定となる。この総和、すなわち、総在庫量は、上流工程の下流工程に対する平均先

行日数と呼ぶことができる。

次に、この平均先行日数をいかに決めるべきかを考察する。いま、平均先行日数を S 、需要を D とすると、段取り損失(作業量)は $f(S, D)$ と書くことができる。 S が大きくなれば、下流工程のスケジュールの上流工程に及ぼす影響が小さくなるため、上流工程の段取り回数が減少する。したがって、 f は S の減少関数となる。また、 D の増加関数でもある。需要 D に対する生産が可能であるためには、次式が成立しなければならない。

上流工程の全作業量(D により定まる) $+f(S, D)$

$\leq$ 上流工程の生産能力……………(1)

(1)式より、生産可能であるための平均先行日数 S の下限値 S_0 が求まる。すなわち、

$S \geq S_0(D, \text{上流工程の生産能力})$ ……………(2)

この S_0 を限界平均先行日数、あるいは限界在庫量と呼ぶことにする。

以上の議論の帰結として、静的負荷バランスにおける在庫管理とスケジューリングとの関係は次のようになる。

- (1) 需要変動(景気変動、生産機種の変更)に対する限界在庫量の制御
- (2) 下流工程の生産スケジュール(あるいは、需要変動)から現在の在庫量を差し引いたものを需要とみなしての、上流工程の生産スケジューリング

(2)式より、限界在庫量は需要 D の変化に応じて増減しなければならないが、この増減には生産所要日数という時間遅れがあることと、需要予測の確かさとの関連で、(1)の制御は複雑である。(2)は、次に述べる切替生産のスケジューリングである。

3.2 切替生産のスケジューリング⁽⁴⁾

(1) 問題の定式化

問題の本質をそこなわずに、定式化を容易にするために、時刻 τ を $1, 2, \dots, t$ なる自然数で表現し、各製品の生産量(需要量)はその単位時間あたりの生産量で正規化する。次に記号を導入する。

$I_n \equiv (1, 2, \dots, n)$: 製品名の集合

$D(\tau) \equiv (d_1(\tau), d_2(\tau), \dots, d_n(\tau))$; $\tau \in [0, t]$: 時刻 τ における各製品の累積需要量。ただし、 $D(0) = \phi$ (零ベクトル)

$\Gamma \equiv (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$: 各製品の段取り一回あたりの損失

$X(\tau) \equiv (x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau))$; $\tau \in [0, t]$: 時刻 τ における各製品の累積生産量

一般に生産工程をマクロにながめれば、フローラインとみなせるため、まずフローラインでの切替生産のスケジューリングを議論する。生産量の正規化と一時点では一機種のみしか生産できないことのために、次式が成立しなければならない。

$\|X(\tau)\| \equiv \sum_{i \in I_n} x_i(\tau) = \tau$; $\tau \in [0, t]$ ……………(3)

これは生産工程の能力条件といえるものである。さらに、各機種の各時点での累積生産量はその累積需要量を満足しなければならない。

$x_i(\tau) \geq d_i(\tau)$; $\tau \in [0, t], i \in I_n$ ……………(4)

これは納期条件である。

(3)式より、 $\sum_{i \in I_n} x_i(t) = t$ であるが、一般には $\sum_{i \in I_n} d_i(t) \leq t$ である。したがって、スケジュール期間の最終時点までに、 $t - \sum_{i \in I_n} d_i(t)$ なる余力(平均先行日数にあたる)がある。この余力をどの機種に振り当てるかは、 $D(\tau)$; $\tau > t$ の需要予測から求めるべきものである。この余力の振り当てを $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ なる量で指定すれば、

$x_i(t) = a_i$; $i \in I_n$ ……………(5)

が成立しなければならない。これを終端条件と呼ぶ。

以上から、切替生産の最適スケジュールは、(3)~(5)式の条件の下で、次式を最小にする $X(\tau); \tau \in [0, t]$ である。

$$\sum_{i \in I_n} \gamma_i \times C_i(\{x_i\}) \dots \dots \dots (6)$$

$C_i(\{x_i\})$ は製品 i の切替回数であって $x_i(\tau); \tau \in [0, t]$ だけで定まる。すなわち、 $\frac{1}{2} \sum_{i \in I_n} \sum_{\tau \in [0, t]} |\Delta^2 x_i(\tau)|$ 、ただし、 $x_i(-1) = x_i(0)$ 、 $x_i(t+1) = x_i(t)$ 、 $\Delta x_i(\tau) \equiv x_i(\tau+1) - x_i(\tau)$ とする

(2) 最適解計算法

これは、各機種の生産量とともに生産順序を求める問題であり、数学的には一般的解法が存在していない「順序づけ問題」である。ただ、最適解を探索する一つの考えとして、ブランチアンドバウンド法 (Branch-and-Bound Method: 以下BBMと略称する)⁽⁵⁾がある。次に、BBMを説明し、本問題のBBMによる解法の概略構成を示す。

次のような一般的な最小化問題についてBBMの手法を説明する。

問題: $\min_{x \in S} R(x)$ とする x を求めよ。

ただし、 S は実行可能解の集合

BBMによる最適解探索過程は図1の「木」によって表現できる。実行可能解の集合をなんらかの基準により分解する(図1では S_1, S_2 の二つの部分集合に分割)。次に、 x の領域が S_1 または S_2 に制限されたときの目的関数 $R(x)$ の下界 $LB(S_1), LB(S_2)$ を計算する(図1では $LB(S_1)=15, LB(S_2)=25$)。この段階の「木」の先端で最小の下界を持つ部分集合をさらに分割する。図1では S_1 を S_3 と S_4 とに分割し、これらに対して下界を計算している。このように、実行可能解の集合と下界計算とを繰り返していけば、ついには実行可能解を一つだけしか含まず最小の下界(この場合には、その一つの実行可能解の目的関数の値)を持つ部分集合を得る。図1では、この部分集合は S_6 であり、これが最適解である。

このように、BBMの考え方はきわめて単純であり有用であるが、実行可能解の分割法と下界の計算法とは問題ごとに考案しなければならない。特に、下界が真の最小値に近くなければ、すべての実行可能解をあたることにもなりかねない

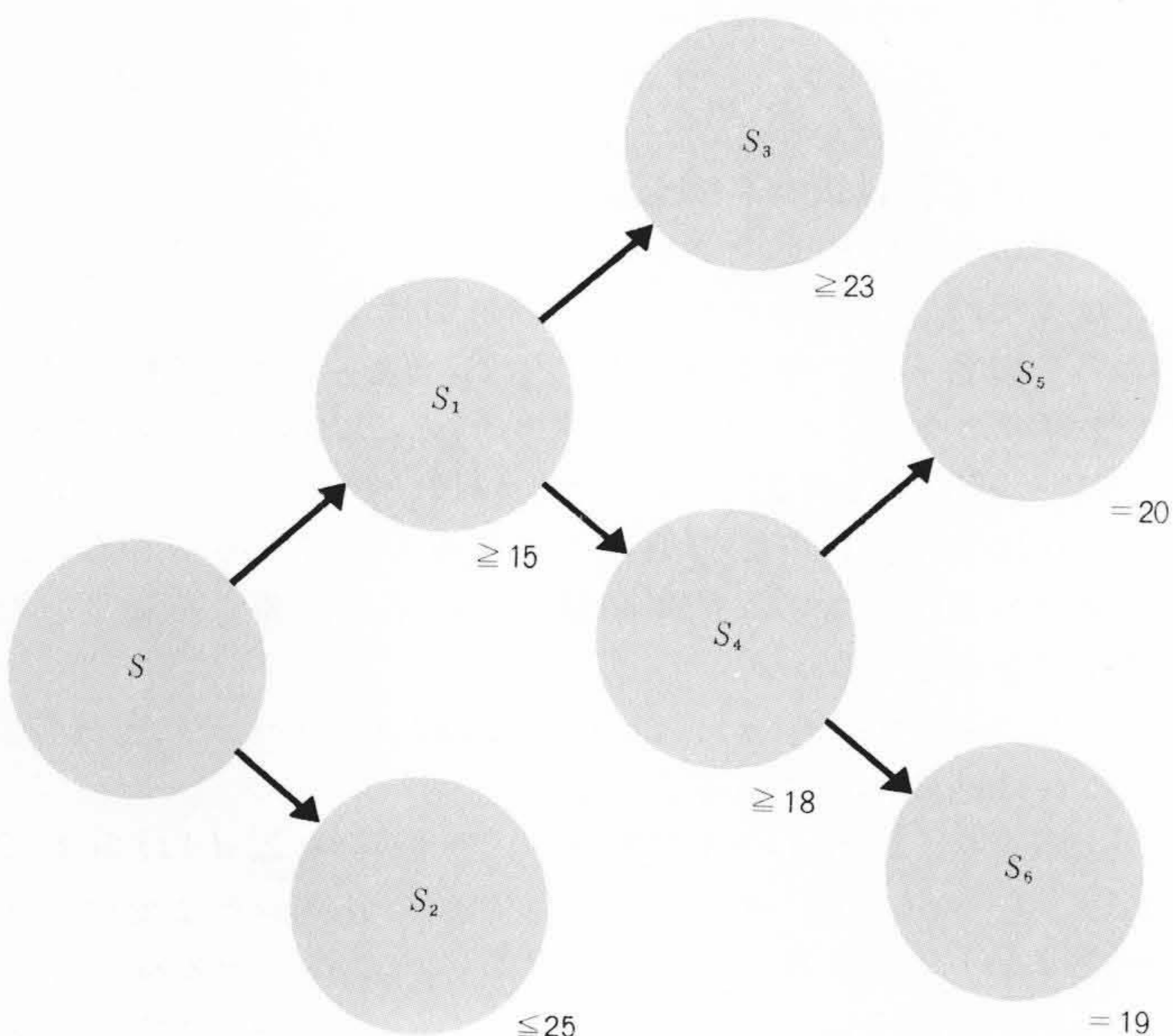


図1 ブランチ・アンド・バウンド法の説明図
ブランチ・アンド・バウンド法による最適解探索過程の説明図を示す。

Fig. 1 Explanation of Branch-and-Bound Method

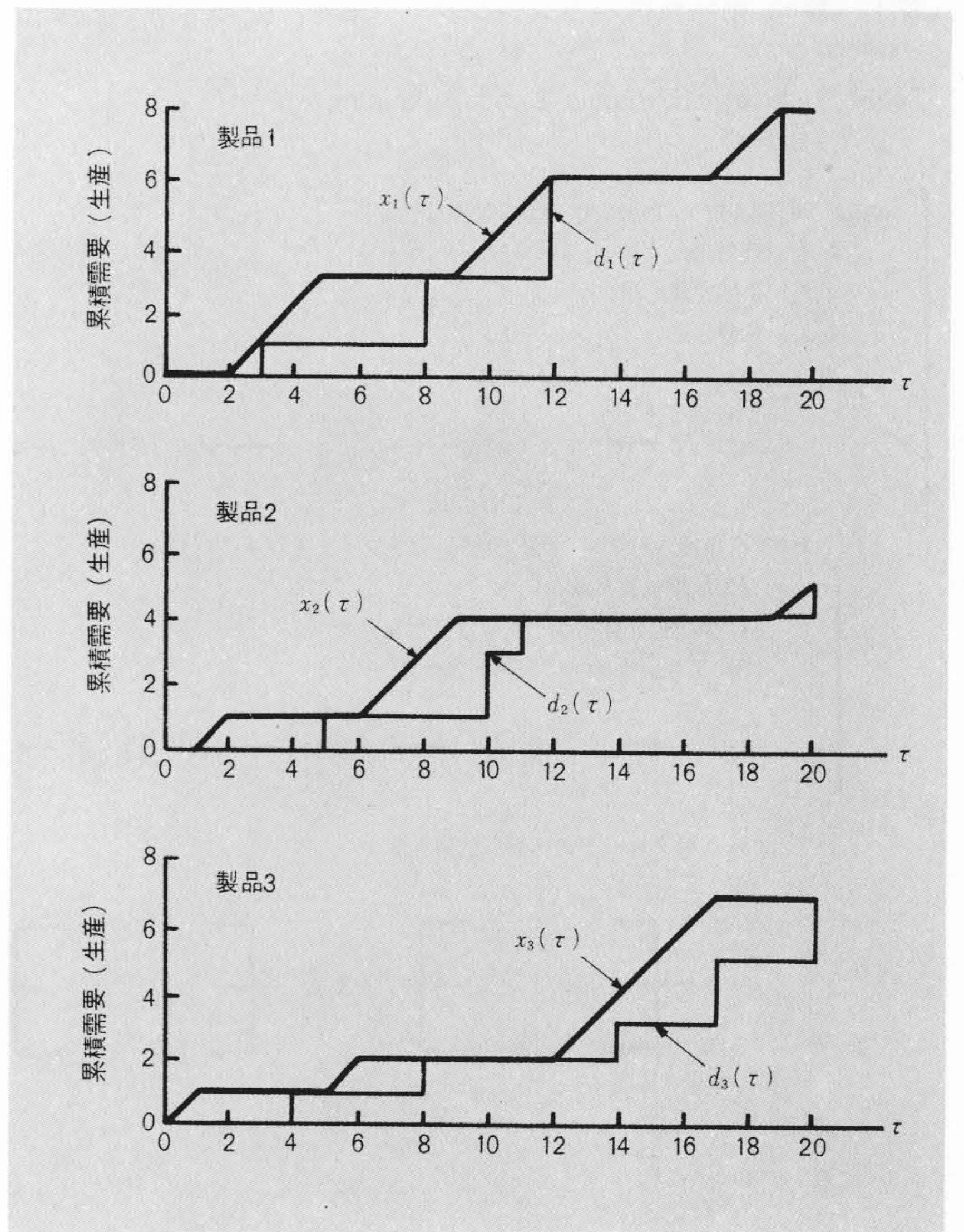


図2 累積需要と最適スケジュール
累積需要とその納期条件を満たす最適スケジュールの一例を示す。

Fig. 2 Cumulative Demand and an Optimal Schedule

め、下界計算式の定め方は重要である。

まず、実行可能解の部分集合の分割法を次に示す。

(i) 期間 $[0, t_H]$; $t_H = \|H\|$ では、終端条件を H とする可能スケジュール

(ii) 期間 $[t_H, t]$ ではすべて同一のスケジュール

であるような期間 $[0, t]$ の可能スケジュールの部分集合を、BBMの「部分集合」とする。この「部分集合」を $[H]$ で表わし、一義的に定まっている $\tau \in [t_H, t]$ の部分を $S[H]$ で示すことにする。次に、 $[H]$ の分割としては次式で定まるもののみで良い(証明略)。

$$[H] \Rightarrow [G_p], S[G_p] = (k_p)p S[H]; p \in I_n^* \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $G_p = H - k_p e_p$, $k_p = \max\{k; k > 0, H - k e_p \in F_H\}$, $I_n^* = \{p \in I_n, G_p \neq H\}$ F_H は終端条件を H とする $[H]$ の存在領域したがって、すべての実行可能解の集合は $[A]$ である。

次に、 $[H]$ に対する下界計算法の概要を述べる。まず、 $[H]$ で示される実行可能なスケジュールの存在領域 F_H を求める。 F_H は、 $n+1$ 次元空間 (n 個の製品の累積生産(需要)量と時刻とで張られる空間) であり、その形状を直接とらえることはできないので、 F_H の二次元空間 (製品 i の累積生産(需要)量と時刻とで張られる空間) への射影 F_H^i ; $i \in I_n$ を求める。次に、 F_H^i の中で製品 i のみについて考えた最適部分スケジュール $x_i^t(\tau); \tau \in [0, t]$ (略して $\{x_i^t\}$) と F_H の最適スケジュール $X(\tau); \tau \in [0, t]$ (略して $\{X\}$) の F_H^i への射影である $\{x_i\}$ との相互関係から、次の下界計算式を得ている。

$$LB([H]) = \sum_{i \in I_n} \min_{\{x_i^t\} \in F_H^i} \gamma_i C_i(\{x_i^t\}) + \delta \min_{i \in I_n} \gamma_i + \sum_{i \in I_n} \gamma_i C_i(S[H]) \dots \dots \dots (8)$$

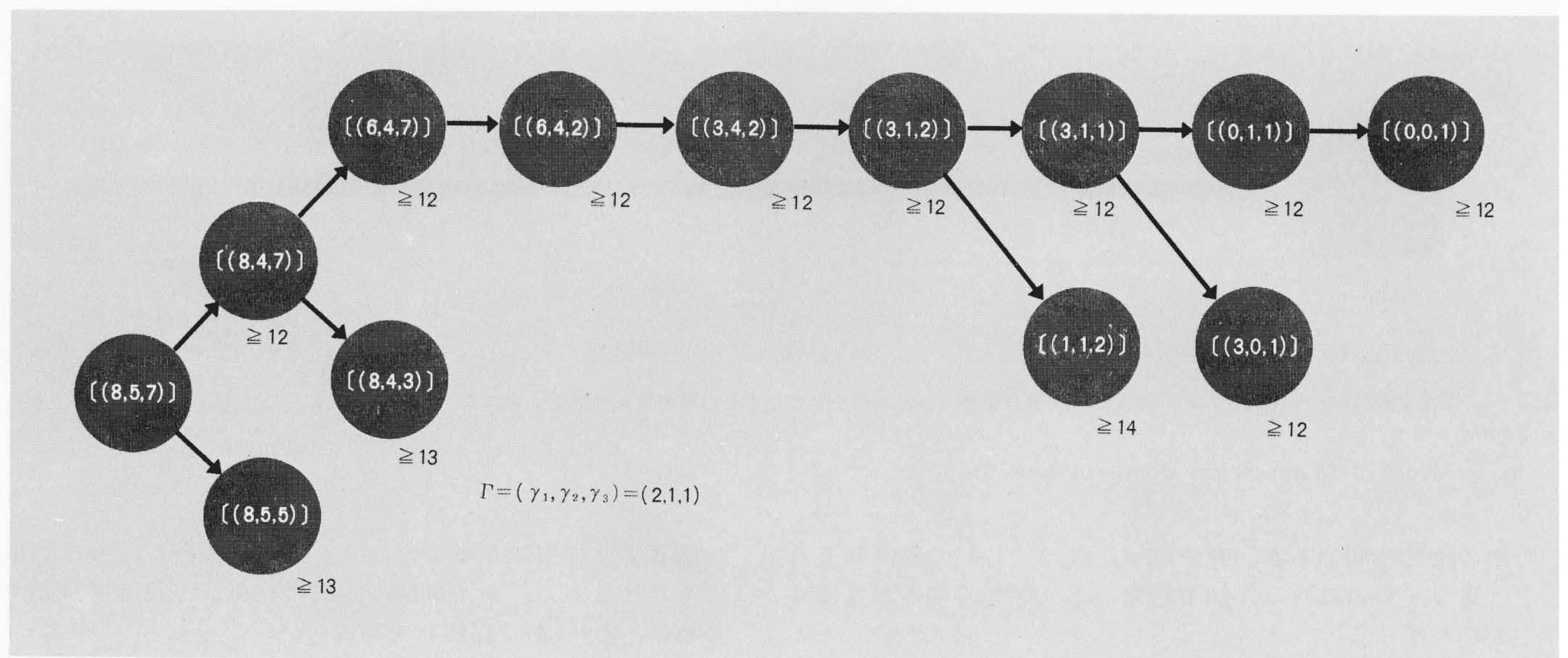


図3 最適スケジュール決定過程 ブランチ アンド バウンド法による図2の最適スケジュールの計算過程を示す。

Fig. 3 Deciding Process of an Optimal Schedule

(8)式の第2項を除けば、 F_H の最適スケジュールの射影スケジュール $\{x_i\}; i \in I_n$ がすべて各 F_H^i の最適部分スケジュールであるとき、 $LB([H])$ は真の最小値となっている。そうならないことが簡単に判定できる場合の補正項が第2項である。そのとき $\delta=1$ 、他の場合は $\delta=0$ である。

図2は、累積需要とそれに対する最適スケジュールを、図3は上記計算法による計算過程を示している。

3.3 ジョブ ショップ スケジューリング⁽⁶⁾

ジョブ・ショップもマクロにながめれば、ある一定能力を持つ1台の機械（等価機械）とみなせる。この等価機械の概念の導入によって、ジョブ・ショップは一台のフローラインに変換され、能力条件を考慮してロットを定めることが可能となる。したがって、このスケジューリングは、

- (i) 等価機械の決定

- (ii) 等価機械に対する切替生産の最適スケジューリング
 - (iii) 機械別各ロットの生産順序、時刻の決定
- の3段階に分割できる。

次に、等価機械の能力を決定する方法を述べる。ジョブ・ショップの能力は、その設備能力だけでなく、生産機種別の需要パターン、加工経路と各機械での作業時間の組合せで変化する。そのため、試行錯誤的に等価機械の能力を定める方法（図4）が考えられる。

図4の*のスケジューリング結果の評価（「機械別各ロットの生産順序・時刻の決定」に対する）で、全般的に納期余裕が大であれば、等価フローラインの能力を増加させ、納期遅れが発生していれば、能力を減少させる。納期余裕が大きいということは、さらにロットを大きくしてもよいということであり、納期遅れが大ということはロットが大き過ぎるということである。また、ロットを大きく（小さく）するには、設備能力を大きく（小さく）すればよいからである。

4 動的負荷バランシング

4.1 単一フローライン…混合生産の最適スケジューリング⁽⁷⁾

(1) 問題の定式化

単一フローラインにおける動的負荷バランシングの方法が混合生産であり、自動車組立ラインにみられる生産形態である。自動車産業では、同一形式でありながら内装、外装に消費者の選択の自由を与え、多様な製品を作っている。

混合生産の組立ラインは、いくつかのコンベヤラインの列から成り、各コンベヤの間には流れの順序を調整するための数十台の半製品を格納できるストレージがある。一つのコンベヤラインは一つのストレージと N 個の作業域から成る（図5）。各作業域では、作業員はコンベヤ上の半製品の移動に伴って動きながら加工していくが自己の作業域内でしか作業はできない。

半製品の集合 $J \equiv (1, 2, \dots, n)$ を $[l_1, l_2, \dots, l_n]$ なる順序で流した場合の、ある作業域 j での作業状態を示したのが図6である。図の $P_i P_i'$; $i=1, 2, \dots, n$ は半製品に加工を加えている状態を、 $P_i' P_{i+1}$ は次の半製品の処理のために後方に戻っていく状態を示している。 $P_3' P_3$ は次の半製品が到着していない

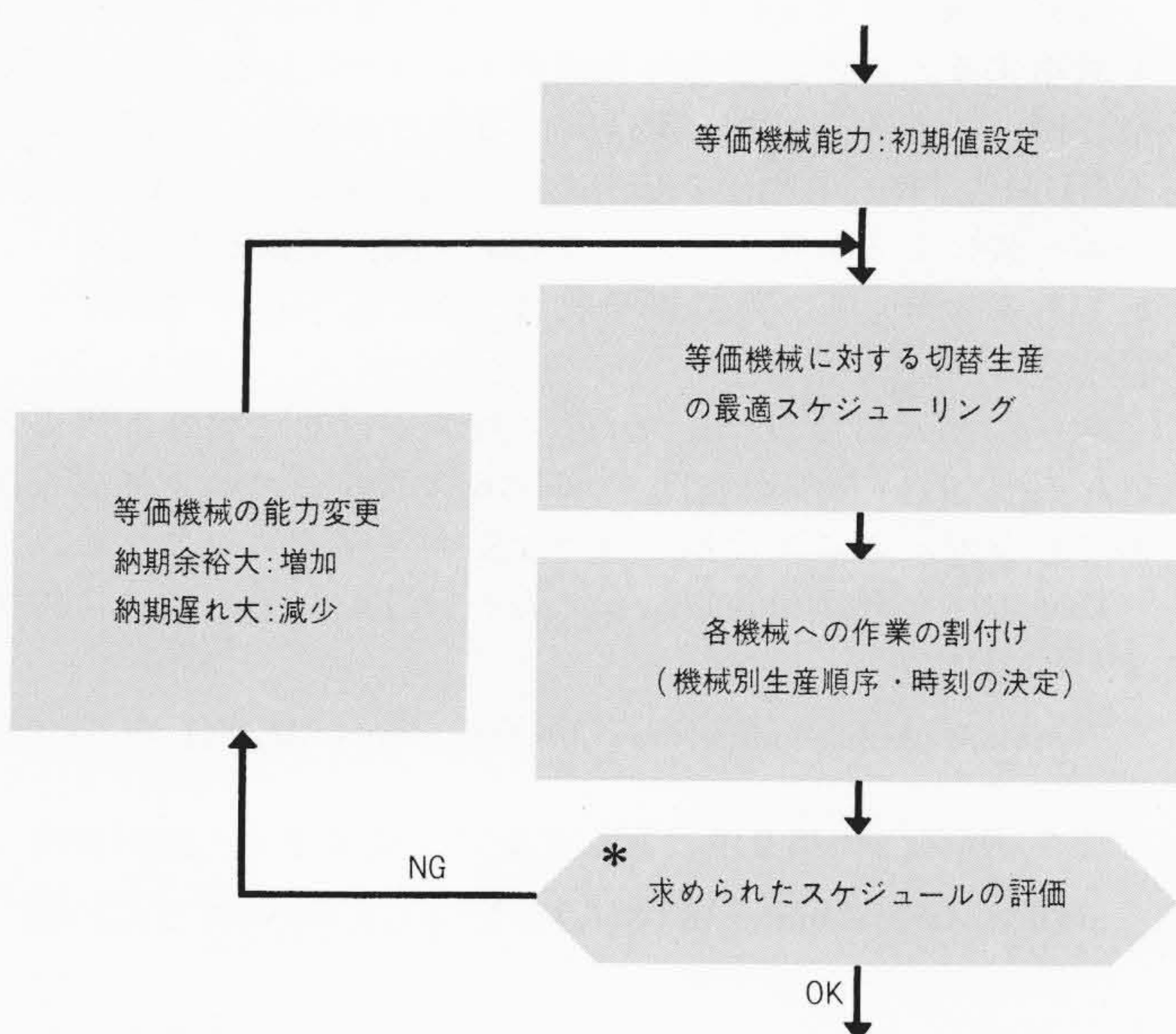


図4 ジョブ ショップ スケジューリングの方針 切替生産の最適スケジューリング手法をジョブ ショップ スケジューリングへ適用する一方針を示す。

Fig. 4 Outline of the Job Shop Scheduling Method

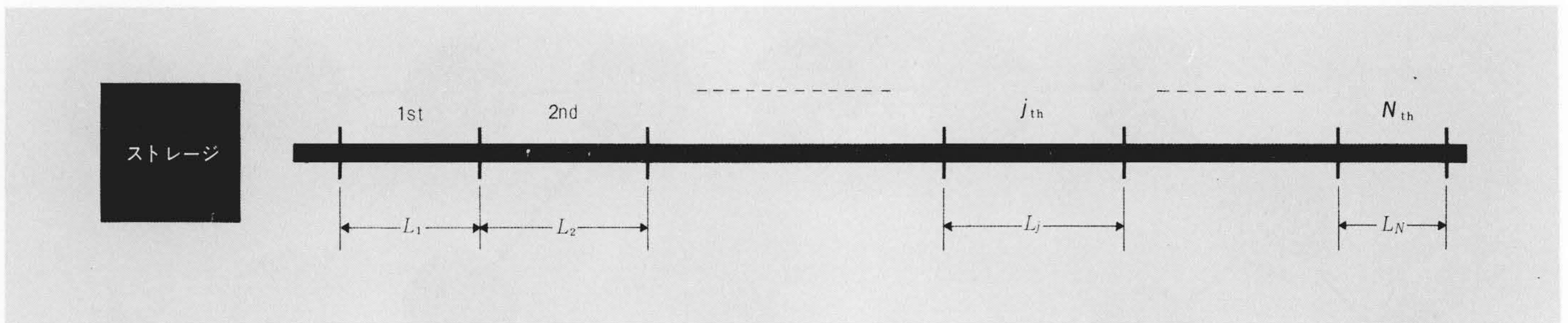


図5 N作業域コンベヤラインのモデル 混合生産の作業状態を定式化するためのコンベヤラインの工程モデルを示す。

Fig. 5 Model of N-work-zone Conveyor Line

ための待ち時間である。 $P_i P_{i+1}; i=1, 2, \dots, n$ の長さがそれぞれ異なっているのは、加工対象により作業時間の異なることを示している。

定式化のために次の記号を導入する。

t_{jli} : 半製品 l_i の第 j 作業域での作業時間

V_c : コンベヤスピード

V_{mj} : 第 j 作業域での作業員の歩行速度

$x_j^0(l_i)$: 第 j 作業域での半製品 l_i の作業終点

C_j^0 : 第 j 作業域での初期作業位置

W : コンベヤ上の半製品の間隔

L_j : 第 j 作業域の幅

したがって、図6より次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} x_j^0(l_i) &= \max[x_j^0(l_{i-1}) + d_{jli}, 0]; i=1, 2, \dots, n \\ x_j^0(l_0) &= C_j^0, j=1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、 $d_{jli} = V_c t_{jli} - A_j, A_j = V_{mj} W / (V_{mj} + V_c)$

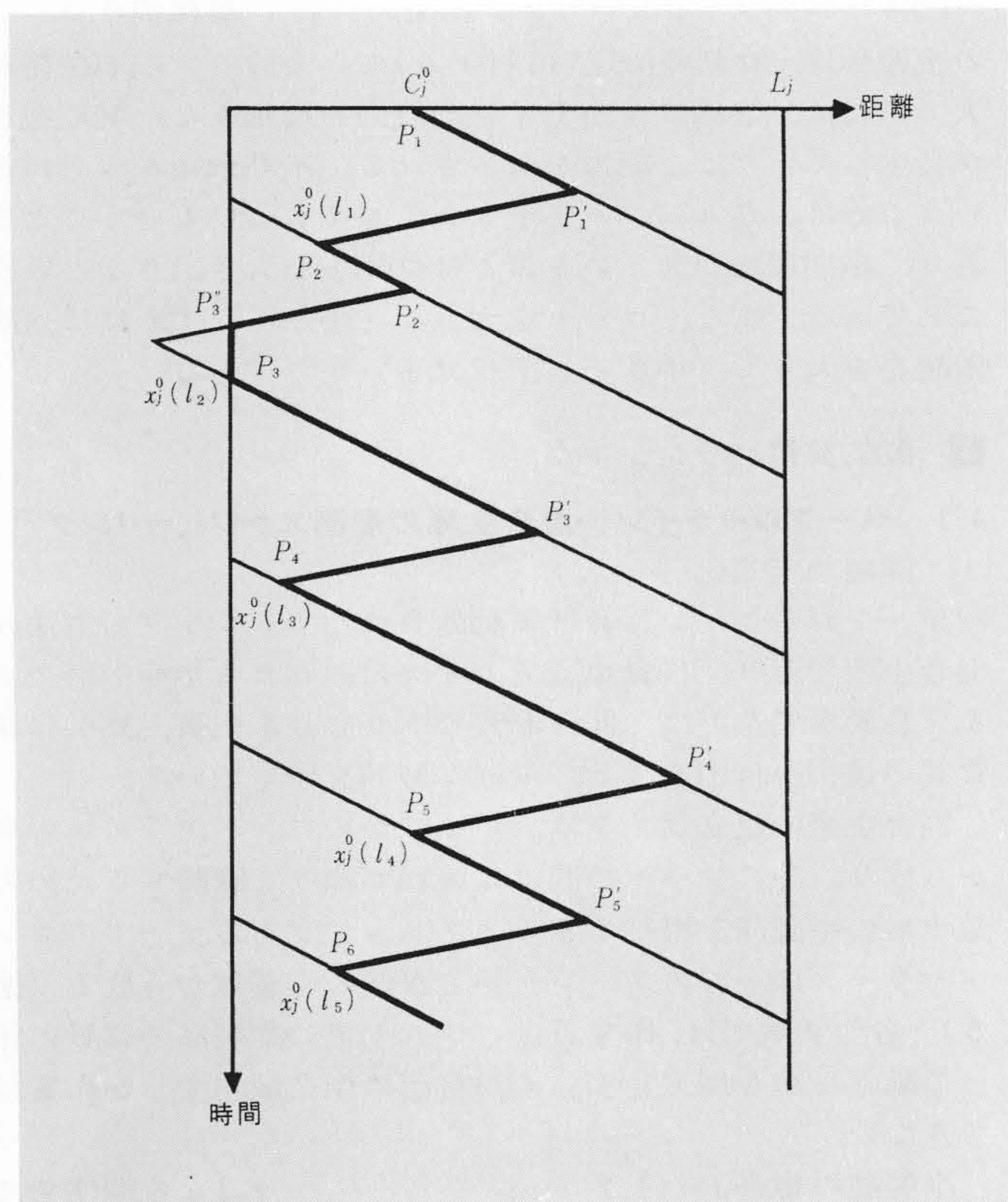


図6 作業員の移動軌跡(第 j th 作業域) 各作業域の作業状態を作業員の移動軌跡で表現したものを示す。

Fig. 6 Locus of the Worker Moving to Work within the j -th Work Zone

図6より理解できるように、 $L_j - A_j - x_j^0(l_i)$ を作業余裕とみなせるから、全作業域の作業余裕を同一尺度で評価するために、 $L_j - A_j$ で正規化を行ない、

$$x_j(l_i) \equiv x_j^0(l_i) / (L_j - A_j), C_j \equiv C_j^0 / (L_j - A_j)$$

$$\Delta j l_i \equiv d_{jli} / (L_j - A_j)$$

$$X(l_i) \equiv (x_1(l_i), x_2(l_i), \dots, x_N(l_i))$$

$$\Delta l_i \equiv (\Delta 1 l_i, \Delta 2 l_i, \dots, \Delta N l_i)$$

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$$

と定義すれば、N作業域コンベヤラインの状態方程式として、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} X(l_i) &= \max[X(l_{i-1}) + \Delta l_i, \phi]; i=1, 2, \dots, n \\ X(l_0) &= C \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

全作業域(域)に対するすべての製品加工時の作業余裕がバランスされていれば、コンベヤスピードの増加、したがって、生産量を増加させることが可能となる。以上から、ストレージからの半製品のコンベヤラインへの投入順序(スケジュール)の最適性は、次のように定義できる。

最適スケジュール $[l_1, l_2, \dots, l_n]$

$$\min_{[l_1, l_2, \dots, l_n] \in PJ} \max_{j=1 \sim n} M_v X(l_i) \quad (11)$$

ただし、 P_j は J の順列集合、 $M_v X$ はベクトル X の最大要素

(2) 最適解計算法

(11)式を成立させる最適スケジュールを求めるために、BBMを適用する。この問題では先頭の r 個($r=0, 1, 2, \dots$)の順列が全く同一である順列集合 P_J (実行可能解の集合)の部分集合をBBMの「部分集合」とし、その分割を先頭の $r+1$ 個の順列の同一性による分類とする。先頭の r 個の順列が $l_1, l_2, \dots, l_r$ であるスケジュールの部分集合を $\{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ で示すことにする。

次に、部分集合 $\{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ に対する目的関数の下界 $LB(\{l_1, l_2, \dots, l_r\})$ を与えよう。文献(8)で改良された下界式を求めているが、ここでは最も簡単なものを示すことにする。

任意のスケジュール $[l_1, l_2, \dots, l_r, \dots, l_n] \in \{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ に対する目的関数は、

$$\max_{i=1 \sim n} M_v X(l_i) = \max \left[\max_{i=1 \sim r} M_v X(l_i), \max_{i=r+1 \sim n} M_v X(l_i) \right] \quad (12)$$

となり、括弧内の第2項に対して次式が成立する(証明省略)。

$$\max_{i=r+1 \sim n} M_v X(l_i) \geq \max \left[M_v \{X(l_r) + \sum_{k=r+1}^n \Delta l_k\}, \max_{k=r+1 \sim n} M_v \Delta l_k \right] \quad (13)$$

したがって、

$$\max_{i=1 \sim n} M_v X(l_i) \geq \max \left[\max_{i=1 \sim r} M_v X(l_i), M_v \{X(l_r) + \sum_{k \in J/r} \Delta l_k\}, \max_{k \in J/r} M_v \Delta l_k \right] \quad (14)$$

ただし、 $J_r = J - (l_1, l_2, \dots, l_r)$

であり、この右辺を $LB(\{l_1, l_2, \dots, l_r\})$ とすることができる。

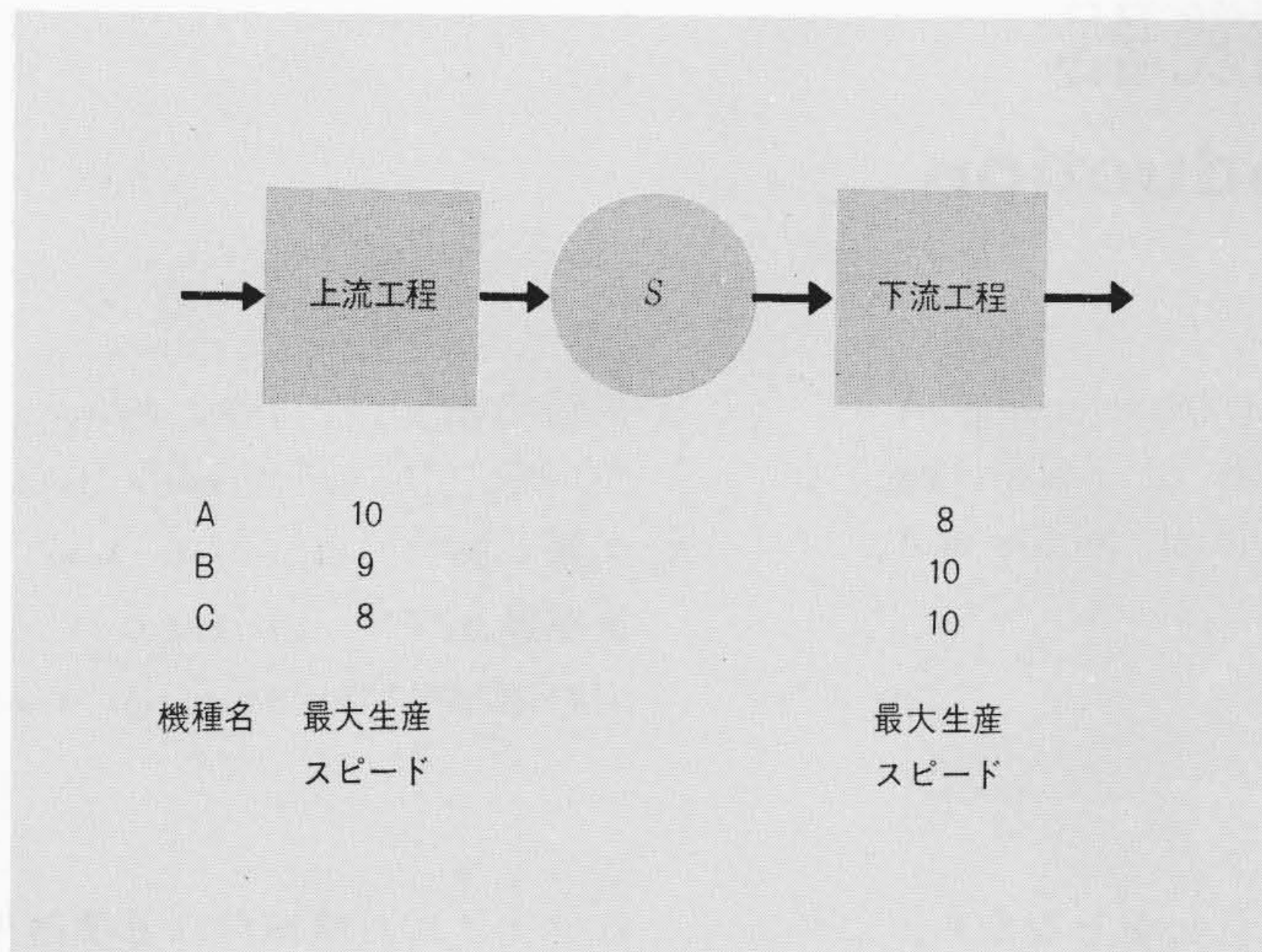


図7 フローライン列 フローライン列と各ラインにおける各機種の生産スピードを示す。

Fig. 7 Sequence of Flow Lines

このスケジュールは、ストレージ内の半製品の状況に応じて変更していかなければならないため、計算時間の短いことが特に要求される。作業域10、半製品20個に対して、計算時間は8～20秒（HITAC 5020）である。機種により作業時間が大幅に異なり、作業負荷の大きい作業域は、1ラインにこの程度であるが、作業域の個数の増加は計算時間をリニアに増加させるだけである。

4.2 フローライン列…半混合生産のスケジューリング⁽⁶⁾

図7に示す生産工程で工程間に中間在庫を持たず、上下両工程を同一ロットで生産するとすれば、一般に、各機種の上下両工程の生産能力が異なっているため、上下両工程を同一ロットで生産すれば各機種の生産スピードは遅いほうの工程で定まってしまう。図7の例では、製品A, B, Cの生産に対して、生産スピードはそれぞれ8, 9, 8となり、おのおの場合、上流工程、下流工程、下流工程が能力以下で作業をすることになる。

各機種の各工程での生産スピードをそれぞれ最大値に保つには、工程間の流動数 S が与えられた上下限値の間に入る、すなわち、流動数 $S \leq M$ （一定値）、かつ無作業=0となるように、生産機種を切り替えて生産すればよい。説明を容易にするため、納期を無視して、この事情を図8により説明する。

時刻0から機種Aを生産し続けると、単位時間ごとに2（＝上流工程の生産スピード－下流工程の生産スピード）ずつ流動数 S が増加し、時刻 t_1 で上限値 M に達する。ここで流動数 S を減らすために、機種Bを生産することにする。時刻 t_2 で流動数 S がゼロになるため、これ以上機種Bを生産すれば、下流工程に無作業が生ずるので、機種Aに生産を切り替えることにする。

この生産方式は混合生産に近いが切替生産的でもあるので半混合生産と呼ぶことにしているが、機種投入順序によって、両工程の負荷バランスを図る方法である。

半混合生産の最適スケジュールは、納期条件、能力条件、流動数 $\leq M$ 、無作業=0の条件の下で、切替回数を最小とするものである。本問題で、ロットが決まっており、生産順序のみ適当に定めて N 工程列（ $N \geq 2$ ）の負荷バランスを図るのであれば、混合生産の最適スケジューリング手法が適用できる。すなわち、 j 工程と $(j+1)$ 工程との間のロット i の作業時間の差を Δj_i 、その工程間の流動数を $x_j(i)$ とみなせばよい。

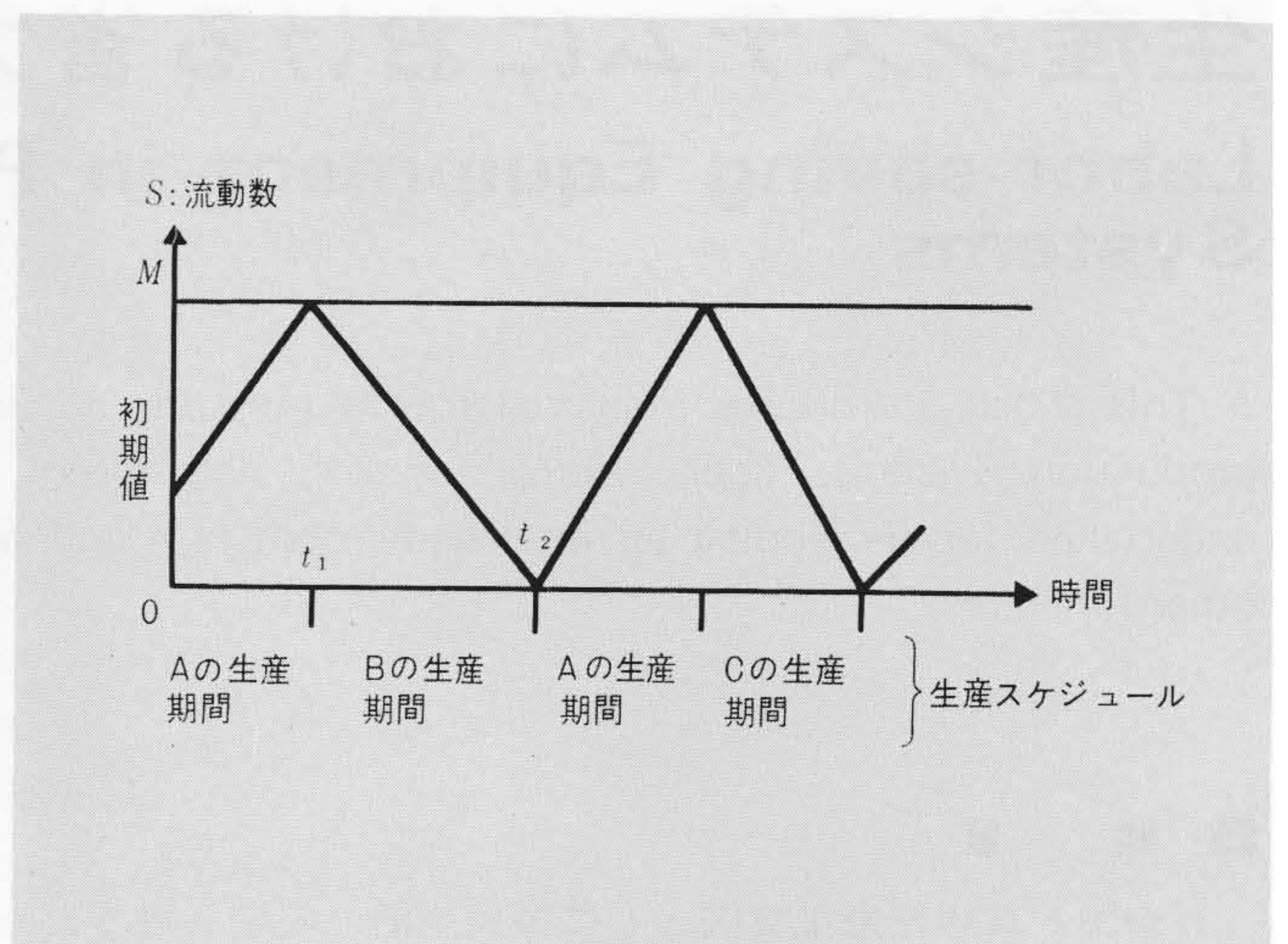


図8 半混合生産の説明図 半混合生産のスケジュールと流動数の変動との関係の説明図を示す。

Fig. 8 Explanation of Half-mixed Production

表1に示した並列フローライン列についても、基本的にはフローライン列と同種の方法で工程間の負荷バランスをはかることができる。ただし、この場合には、多機種を並列的に投入して、その比率を時間的に変動させて負荷バランスを図ることができる。

5 結 言

従来の生産管理におけるスケジューリング理論は、どちらかといえば応用数学的興味にかたよっているため、ほとんど現実には適用されていなかった。本稿では、負荷バランスの立場からスケジューリング理論を構成しているが、これは計算機による生産管理システムの開発を通して得られたものである。

この理論はややライン化された生産工程にかたよって議論されているようにもみえるが、その基本思想はジョブショップ形の生産工程にも適用できるものである。しかし、その場合にはPERT/LOADのようなアプローチも必要であろう。また、負荷バランスとは少し異なった見方として、工程間の同期化の面から生産システムのスケジューリング理論を構成することも興味深い研究テーマであろうと考える。

参考文献

- (1) R. W. Conway, W. L. Maxwell and L. W. Miller, "Theory of Scheduling", Addison-Wesley, 1967
- (2) J. F. マギー著, "生産計画と在庫管理", 紀伊国屋, 1961
- (3) E. J. Ignall, "A Review of Assembly Line Balancing", J. Ind. Eng., 16, No. 4, July-August, 1965
- (4) S. Mitsumori, "Optimum Production Scheduling of Multi-Commodity in Flow Line", IEEE Trans. on SMC, Vol. 2, No. 4, Sept., 1972
- (5) E. L. Lawler and D. E. Wood, "Branch-and-Bound Method : A Survey", Opns. Res., Vol. 14, pp. 699-719, 1966
- (6) 三森: "スケジューリング理論", 電気学会雑誌, 昭和47年 11月号
- (7) S. Mitsumori, "Optimum Schedule Control of Conveyor Line", IEEE Trans. on AC, Vol. 14, No. 6, Dec., 1969
- (8) 三森, 高田, "混合生産におけるコンベヤラインの最適スケジュール制御", 電気学会論文誌, Vol. 92-C, No. 4, 昭和47年 4月