

制御用計算機による生産のダイナミックコントロール

Dynamic Computer Control of Production

小 淵 要* 井 原 広 一* 井 手 寿 之*

Kaname Obuchi

Hirokazu Ihara

Jūshi Ide

小 野 光**

Hikaru Ono

三 森 定 道***

Sadamichi Mitsumori

要 旨

多種多量生産の工場では、従来のような長い周期ごとの人手や計算機によるスタティックな生産管理では円滑な生産が行なわれにくくなり、オンラインでの積極的な生産管理が望まれる。本稿ではダイナミックな生産管理の手法の例とそれを実現する手段、適用例について記す。

1. 緒 言

デジタル電子計算機による生産管理は、すでに各方面に取り入れられ、各種の新しい手法が開発されている。しかしながら、現実の計算機の利用という点では、単に生産管理にともなう帳票業務の機械化という程度にとどまっている例が多い。人手では、とうてい処理しきれない大量、複雑なデータを、計算機によって整理、格納、変換すること自体にも、大きな意義が認められるが、電子計算機の有する無限の可能性を十分に引き出したものとはいえない。つまり計算機の即時、高速処理の能力を利用して、生産現場の状況データを、リアルタイムで入力し、瞬時瞬時に、与えられた条件下で最適な方針を決定して、現場に指示または制御すること、いわばクローズドループ的な生産の制御が可能である。

最近の各業種における製品の多様化と、国際競争に勝ち抜くためのコストの低減の要求、さらには人手不足対策のために、これからは、ますます積極的な生産管理の必要性が高まると考えられる。一方制御用電子計算機は、いわゆるプロセス制御の分野で飛躍的に普及しつつあるが、その高信頼性、プロセス入出力機能、現場設備としてのタフネスなどの特長により、生産工場におけるオンライン生産管理の分野でも有力な手段を提供している。本文では、制御用計算機システムによる生産ラインに直結した生産管理、生産制御について述べる。

2. ダイナミックな生産管理

物を生産するところにはすべて生産を能率よく行なうために生産管理が必要である。従来は主として人手によりあるいはデジタル計算機を利用して、月ごと、週ごとまたは日ごとに生産計画を立て、それに対する実績をは握する方式の管理が行なわれていることが多い。これらはいわばスタティックな管理であり、一度立てられた計画はそのとおりに実行されるように努力され、計画と実績との差は翌月、翌週または翌日の計画時に考慮される。

多品種、多量生産の工場ではこのような管理を行なうと、部品の保管場所が大きくなり、仕掛り品の金額も高額になる。また最近、生産量、生産速度ともに増大し、生産現場の現状は握が困難になってきている。そこで、管理も分単位秒単位に行なう必要が生まれ制御用計算機により自動的に生産ラインの状況を刻々監視しながら、その時点で最も効率的な指示を与え制御する方式が導入されはじめている。すなわち、生産管理の部門に従来のインライン、スタティック工程管理に代わりオンライン、ダイナミック生産管理が採り入れられつつある。

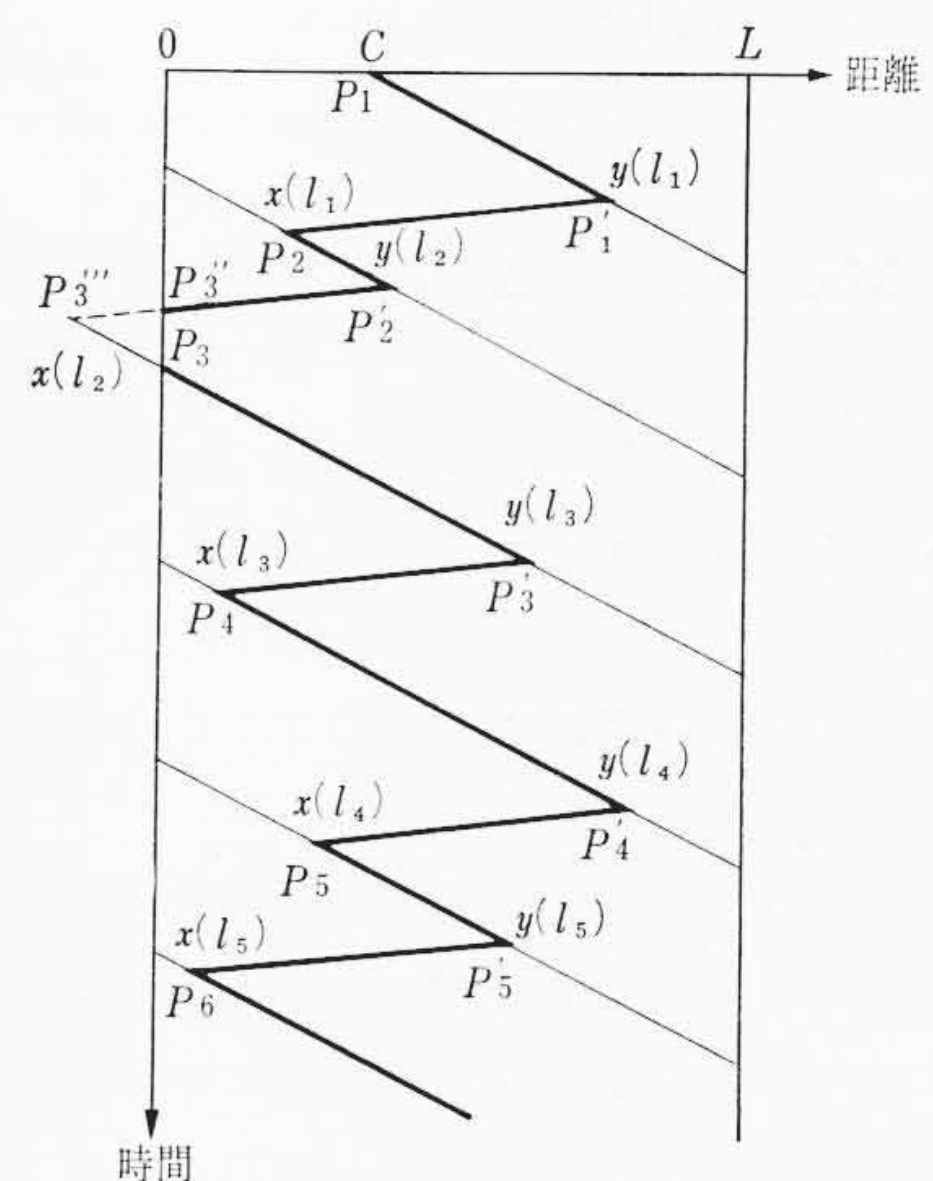


図1 作業軌跡

多種多量生産の一つの典型として、自動車組立工場があげられる。自動車の生産は、年々急ピッチで上昇を続けているが、これに伴い車種が増加し、おのこの顧客の好みに合わせて車を作るために塗装色、ドア、シート、エンジンその他の部品にいたるまで、各種各様の仕様指定がなされている。特に組立工程は、塗装や部品など半製品工程を集大成する部門であるため、前段階の工程の乱れの影響を受けることが多く、また組立ライン内部でも人員や、設備の故障、不良の発生など乱れの原因を有している。このような生産ラインの工程管理には、種々困難な問題が含まれているが、要は一定の生産設備、一定の人員でいかに多くの車を正確に作りあげるかにある。そのためには多種の車をいかに最適な順序で組立ラインに流すか、また前後の工程の乱れに応じて、その時点、その時点で組立のスケジュールをいかにコントロールしていくかが、もっとも重要なかぎとなる。

この問題解決の手段として、われわれの提案する「ダイナミック・スケジュール・コントロール」がある。

2.1 コンベヤラインのモデル化

コンベヤラインはゾーンに分割され、各ゾーンにはそれぞれ一定の作業が割当てられる。単一ゾーン内を作業員が作業を行なうためにコンベヤに沿って移動した軌跡を描くと図1のようになる。同図では横軸に空間的距離、縦軸に時間をとっている。以下では加工対象のことを“仕事”と呼ぶことにする。図1は5個の要素からなる仕事集合 $J \equiv (1, 2, 3, 4, 5)$ の仕事を $[l_1, l_2, l_3, l_4, l_5]$ なる順序でコンベヤラインに流した場合の作業員軌跡である。線分 $P_i P_i'$ ($i=1, 2, \dots$) はコンベヤ上の“仕事”に対して加工を行なっていることを示している。線分 $P_i' P_{i+1}$ はコンベヤでの作業を完了して、次の“仕事”を受取るために、後方に戻っていくことを示している。ただし $P_2' P_3$ では、ゾーンの先端に達しても、次の仕事の流れが来ていない。 P_3''

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所機電事業本部

*** 日立製作所中央研究所

P_3 で示される時間だけゾーンの先端で作業員は待っていなければならない。この時間を Idle Time と呼ぶ。直線 P/P_i のこの配はコンベヤスピードであり、相隣り合うこれら直線間の距離は一定である。

n 個の要素からなる仕事集合 $J \equiv (1, 2, \dots, n)$ に対して、 $n!$ の配列順序、すなわちコンベヤイン順序が考えられる。この配列順序の集合を仕事集合 J に対する順列集合 P_J と呼ぶことにする。任意の配列順序 $[l_1, l_2, \dots, l_i, l_{i+1}, \dots, l_n] \in P_J$ に対して

$$y(l_i) = x(l_{i-1}) + v_c t_{li} : x(l_0) = c \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$x(l_i) = \text{Max}[y(l_i) - A, 0] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$= \text{Max}[x(l_{i-1}) + v_c t_{li} - A, 0] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 v_c : コンベヤ速度

t_{li} : 仕事 l_i の作業時間

A : 作業員が次の仕事のために戻る距離

なる漸化式が成立する(図1参照)。

$$\Delta l_i = v_c t_{li} - A \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおけば、

$$x(l_i) = \text{Max}[x(l_{i-1}) + \Delta l_i, 0] : i=1, 2, \dots, n \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $x(l_0) = c$

v_c, A が常数であるため、(4)式からわかるように Δl_i は仕事 l_i の作業時間のみによって定まる値である。この Δl_i を、仕事 l_i の作業変分と呼ぶこととする。

図1に示すような作業軌跡にて、どのような作業軌跡を描けば配列順序が最も望ましいかを考察する。

作業員軌跡の各頂点、すなわち作業終了地点 $y(l_i)$ と、ゾーンの終端 L との距離 $L - y(l_i)$ は仕事 l_i の作業余裕と考えられる。この余裕が大きいほど、その仕事に対する作業に不手際があっても、ゾーンの中で作業が完了できやすくなる。またこのことは、コンベヤ速度をアップすることが可能であるということと同値である。

したがって最適配列順序は次式で表わされる。

仕事集合 $J \equiv (1, 2, \dots, n)$ の順列集合を P_J とするとき、

$$\text{Max}_{[l_1, l_2, \dots, l_n] \in P_J} \text{Min}_{i=1 \sim n} (L - y(l_i))$$

すなわち

$$\text{Min}_{[l_1, l_2, \dots, l_n] \in P_J} \text{Max}_{i=1 \sim n} y(l_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

または

$$\text{Min}_{[l_1, l_2, \dots, l_n] \in P_J} \text{Max}_{i=1 \sim n} x(l_i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

とする配列順序 $[l_1, l_2, \dots, l_n]$ が最適配列順序である。

2.2 最適配列順序の求め方

2.2.1 Branch and Bound Method

最適配列順序決定で基本的役割を演ずるのは Branch and Bound Method (BBM) である。BBM は解析的な手法が不可能であるか、または実地的でない最大最小問題に適用して有効な手段である。

BBM の手法は、次の2点を決定することに帰せられる。

- (1) 実行可能解の部分集合への分割.....Branching
- (2) 実行可能解の部分集合に対する目的関数の下限計算式.....

Bounding

先頭の r 個の配列がすべて $l_1, l_2, \dots, l_r$ である実行可能解の部分集合を $\{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ で示すことにする。

この部分集合に対する目的関数の下限計算式を求めると次式が得られる。

$$LB(\{l_1, l_2, \dots, l_r\}) = \text{Max} \left[\text{Max}_{i=1 \sim r} x(l_i), x(l_r) + \sum_{l_k \in J_r} \Delta l_k, \text{Max}_{l_k \in J_r} \Delta l_k \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $J_k = J - (l_1, l_2, \dots, l_r) : r=1, 2, \dots, n$

2.2.2 計算例

表1で示した仕事集合と初期作業位置とから最適な仕事の配列順序を求めてみる。まず $6!$ 個の実行可能解の全集合を $\{i\} : i=1, 2, \dots, 6$ の6個の部分集合に分割する。 $\{i\}$ は前述のように仕事 i が先頭である配列順序の集合である。

表1 計算例のデータ

仕事 i	1	2	3	4	5	6
作業変分 Δl_i	0.18	-0.32	0.2	-0.4	-0.3	0.22

初期作業位置 $C=0.4$

(8)式と(5)式を適用すれば

$$LB(\{1\}) = \text{Max}[x(1), x(1) + \sum_{i \in J_1} \Delta l_i, \text{Max}_{i \in J_1} \Delta l_i]$$

$$= \text{Max}[0.4 + 0.18, 0.4 + 0.18 + (-0.6), 0.22] = 0.58$$

ただし、 $J_1 = J - (1) = (2, 3, 4, 5, 6)$

$$LB(\{2\}) = \text{Max}[x(2), x(2) + \sum_{i \in J_1} \Delta l_i, \text{Max}_{i \in J_1} \Delta l_i]$$

$$= \text{Max}[0.4 + (-0.32), 0.4 + (-0.32) + (-0.1), 0.22] = 0.22$$

ただし、 $J_1 = J - (2) = (1, 3, 4, 5, 6)$

同様の計算により、 $LB(\{3\})=0.6, LB(\{4\})=0.22, LB(\{5\})=0.22, LB(\{6\})=0.62$ を得る。したがってこの問題に対するBBM適用の計算過程を示す図2で、#1の部分まで計算がすんだことになる。この段階でのTreeの先端で示される各部分集合の中で最小のLBを持つのは、 $\{2\}, \{4\}, \{5\}$ である。まず $\{2\}$ を#2の $\{2, 1\}, \{2, 3\}, \dots, \{2, 6\}$ に分割して前記の計算を行なう。この段階でのTreeの先端は、図2の $\{2\}$ を除く#1と#2である。最小のLBを持つ部分集合は $\{2, 5\}, \{4\}, \{5\}$ であるが、最小の要素数を持つ $\{2, 5\}$ を分割する。以下同様の手順により、#3, #4, #5, #6と分割およびLBの計算を行なう。#6を計算した段階での最小のLBをもつTreeの先端は $\{4\}$ である。したがって、#6の次には#7, #8, #9, #10と計算が行なわれる。#10から $\{4, 1, 2, 3, 5, 6\}$ が最適配列順序であることがわかる。

この計算で、6個の仕事の配列順序は、 $6! = 720$ 通りあるのだから、すべての場合を当てるのに比べれば大幅に計算時間が短縮される。したがってオンライン・ダイナミックな計算制御が可能となった。

一般には、多数ゾーンからなっているが、これまで述べたことを拡張して、全体のゾーンを通しての最小作業余裕が最大となる

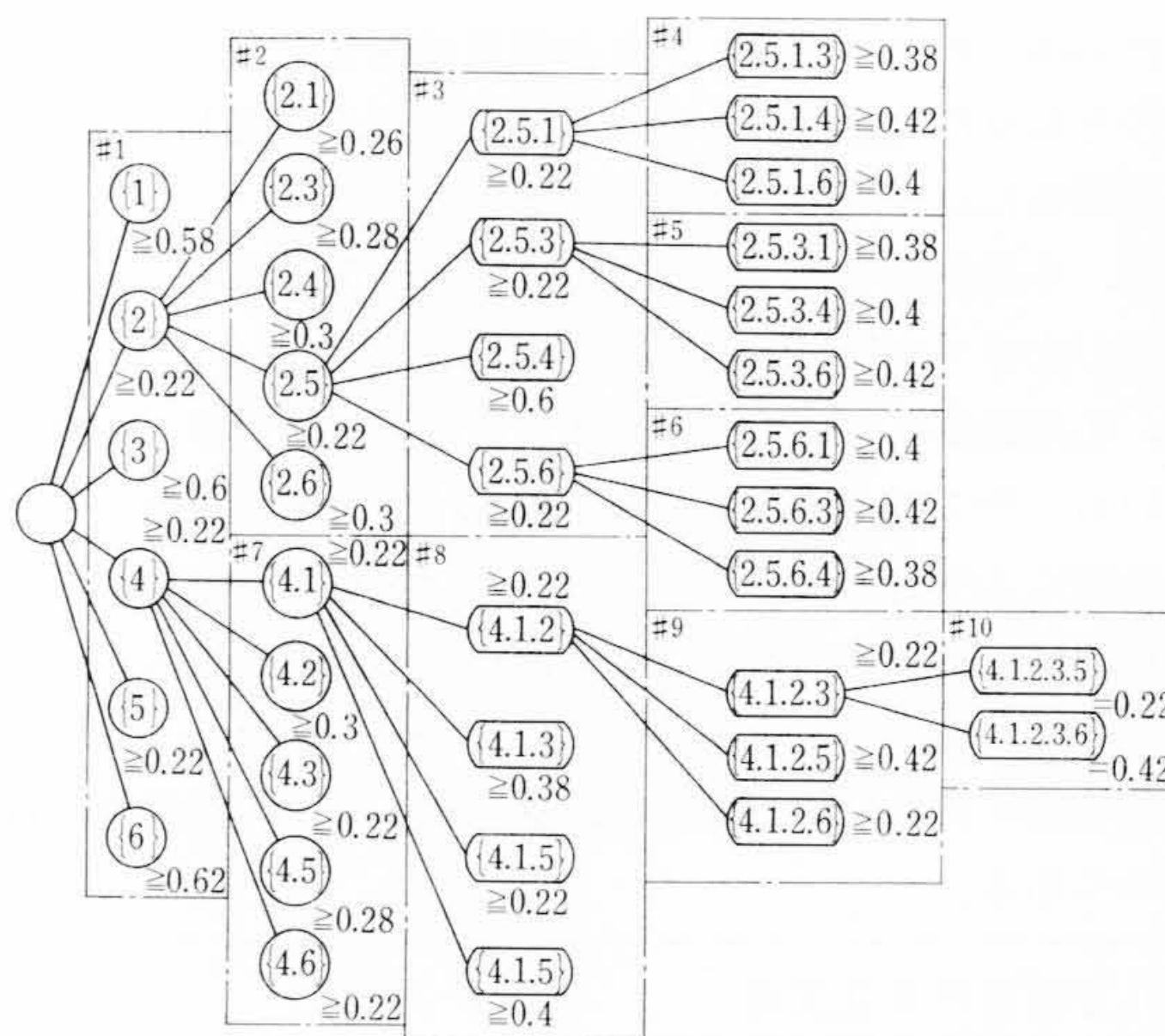


図2 最適配列順序決定過程

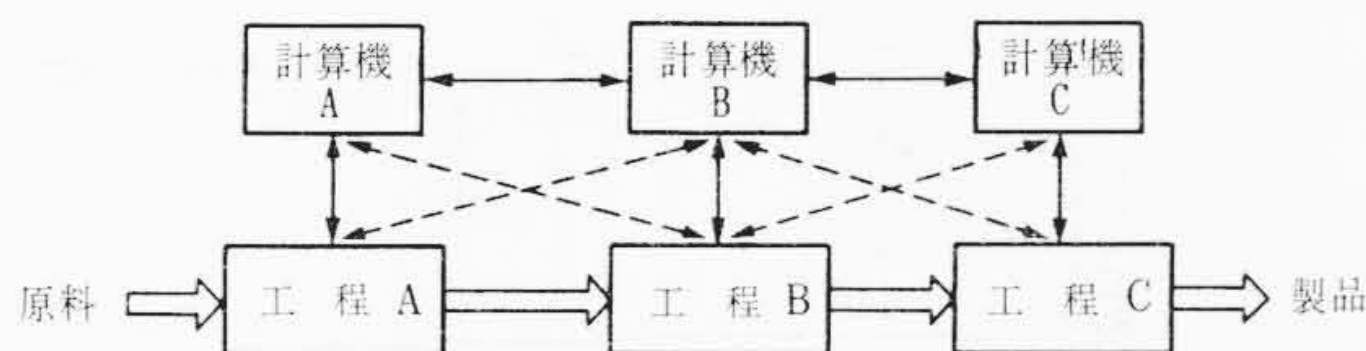


図3 負荷分割システム

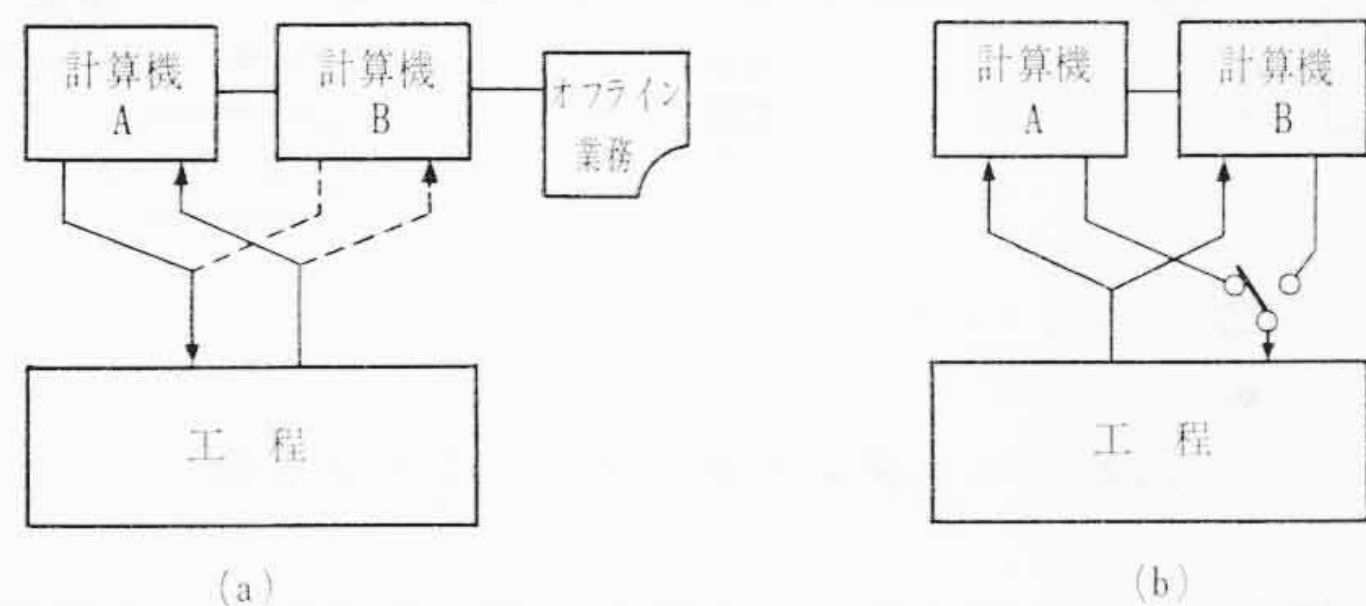


図4 二重系システム

ような配列順序を求めるようにすればよい。

3. 計算機システムと端末装置

生産管理をオンラインでダイナミックに行なおうとする場合には、システム設計上考慮すべき点として、

- (1) システムの信頼性
- (2) プラント・マシン・コミュニケーション
- (3) マン・マシン・コミュニケーション

がある。

いわゆるプロセス制御用システムとの大きな差異は、マン・マシン・コミュニケーションにある。特に装置産業のように人手による加工が多いところでは、このマン・マシン・コミュニケーションの方法がそのシステム全体の評価を決定してしまうといっても過言ではない。プラント・マシン・コミュニケーションは、通常はデジタル量の自動入出力に限定されるのでプロセス制御の場合より単純であるが端末機器の信頼性には十分留意しなければならない。

3.1 システムの信頼性

バッチ生産にしる、流れ連続生産にしる、計算機システムがしばしば故障を起こすのでは、前後データの消失により生産ラインが完全に停止したり混乱を起すのは明らかである。計算機システムが、一度停止するなり誤動作を起こしたあと、復旧したとしても、生産を再開するためには、生産ラインの状況をあらためて計算機に入れてやらねばならない。一般にデータ入力、生産ラインのチェックポイントで人手により行なうものであるから、チェックポイント間のデータも短時間で入力せねばならず、そのための労力や時間が問題となる。したがって、ダイナミックな生産管理のためには、プロセス制御の場合と同様にシステムの稼働率 (Availability) も重要であるが、これに加えて平均故障間隔 (MTBF: Meantime between failure) を重要視する。

計算機システムの休止はすなわち製造設備の休止であり、さらに工場の休止とつながり、生産量はその休止時間分だけ低下することになる。

システムとしての休止を避けるためには、構成機器の個々の高信頼化とともに、システム構成による高信頼化、バックアップモード、フォールバックモードによる運転も考慮しておかねばならない。

システムの信頼性を向上するには

負 荷 分 割
二 重 化
フォールバック

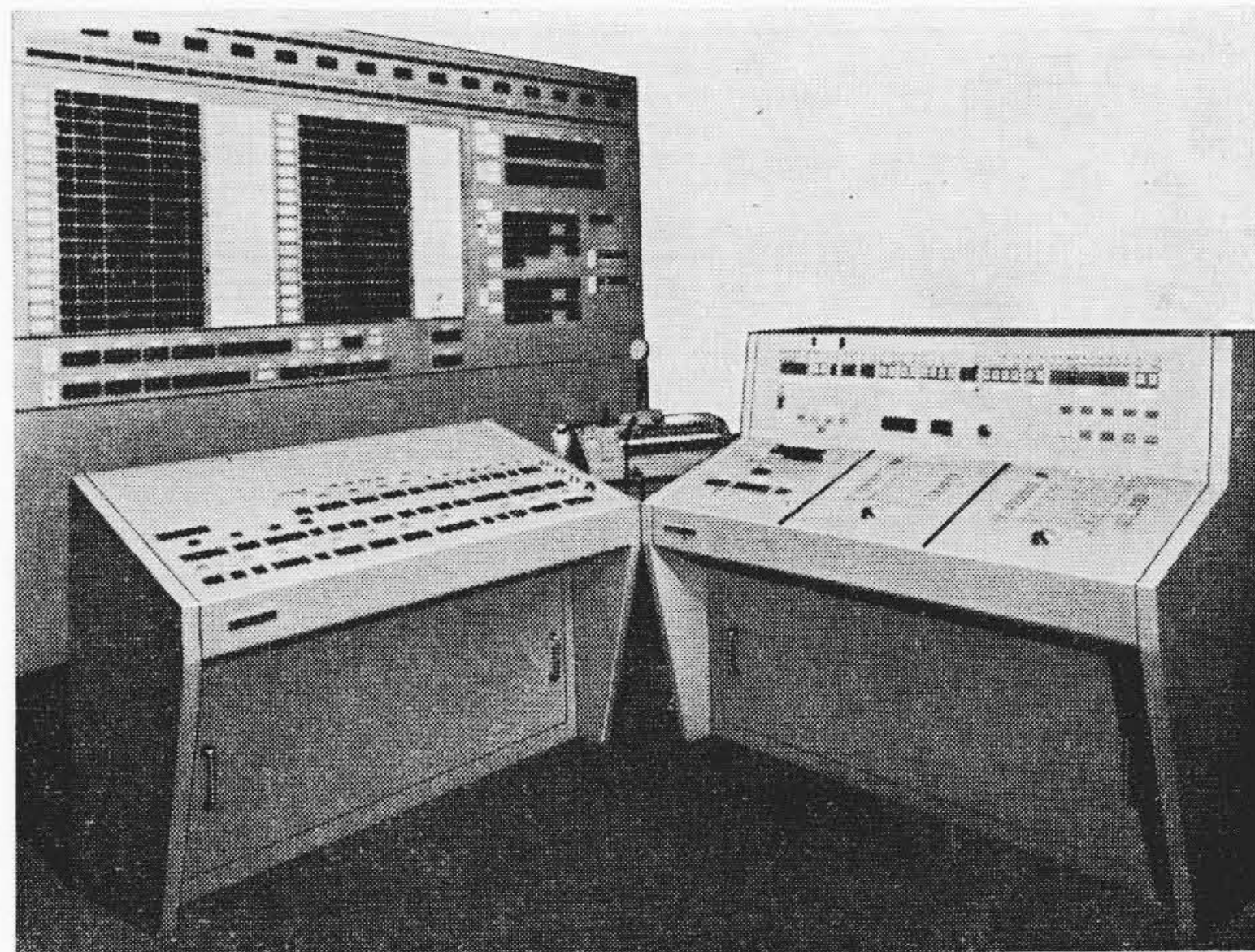


図5 設 定 盤

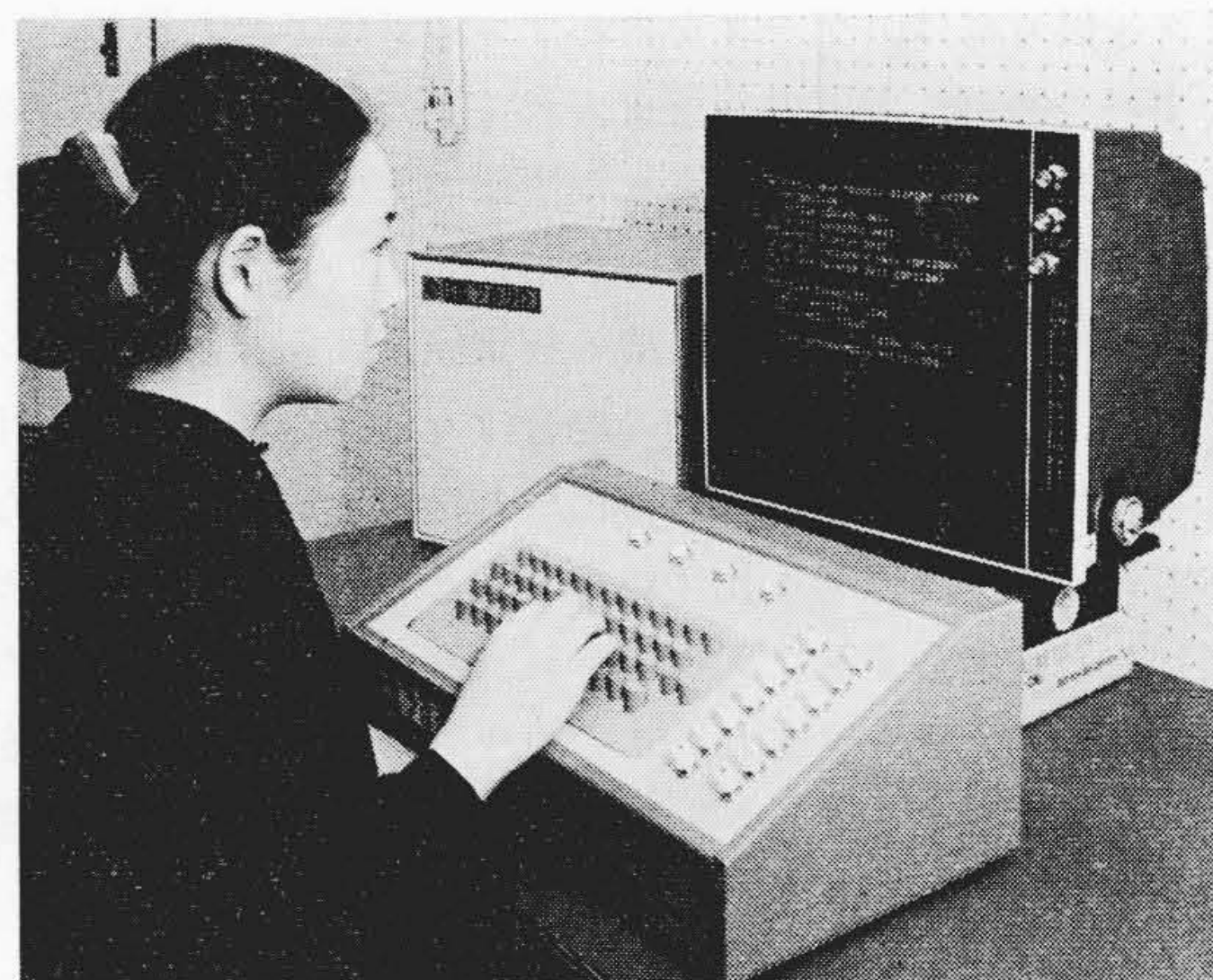


図6 表 示 装 置

の三つの方法がある。

負荷分割とは数台の計算機に生産ラインに従って担当すべき役割を分担させておき、そのうち一つに障害が起こったとき、最悪のピーク状態以外では、残りの計算機に肩代り処理をさせるシステムである。この場合人間が肩代わりしてもよい。すなわち全体が止まるより、ゆっくりでもよいから走るというシステムである。このシステムの例を示したのが図3である。

二重化システムは、2台の計算機を使用して一方に障害がおきたとき他方に切り換えるシステムである。このシステムには図4で示すようにいくつかの方法が考えられる。二重化システムの $MTBF_D$ と1台の計算機の $MTBF_s$ との関係は次式のようなになるが、一般に高価なものとなる。

$$MTBF_D = \frac{3 + MTBF_s / MDT}{2} \times MTBF_s$$

ただし、MDT: 平均修理時間

フォールバックとは、ある部分が故障したときにシステムが完全に止まってしまうず、別の処理方法を用いて仕事を続行させることである。このときシステムのサービスの品質は低下するが、最低限は確保する方法である。これは、種々レベルがあるが一般に入出力装置の障害に対して有効である。たとえば、カード出力装置が故障した場合にタイプライタでその分のデータを記録しておく場合である。

3.2 プラント・マシン・コミュニケーション

計算機システムと工場内諸設備との間で、人手を介さず直接電気信号としてやりとりされる情報はほとんどデジタル信号である。

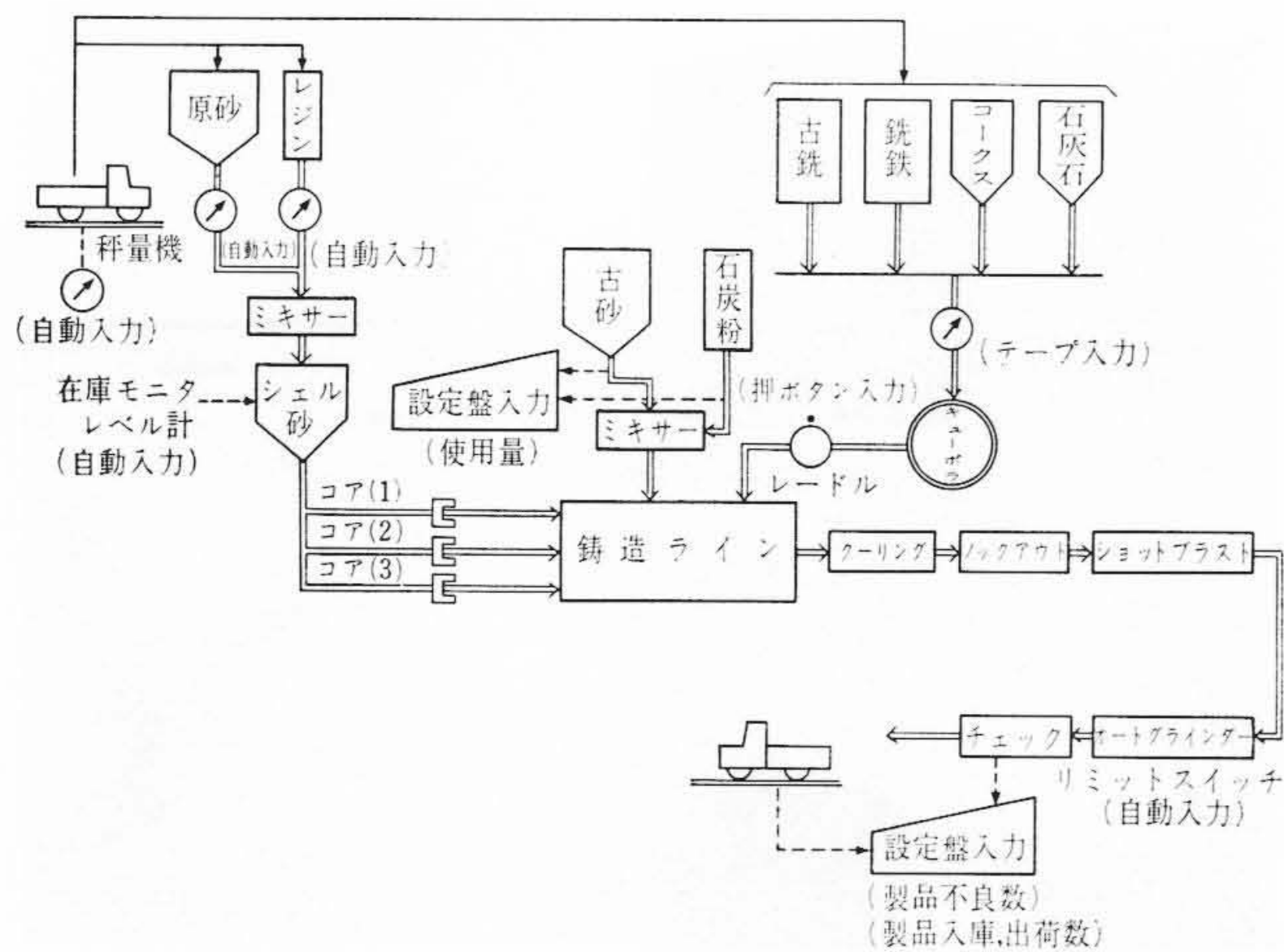


図7 鑄造工程システム図

デジタル信号には、データを表わすコード化された情報とデータを表わすパルス列、機器の状態を表わす接点およびタイミングを表わすパルスがある。コード化された情報の入力、計算機に対して割込み信号となるリミットスイッチなどからのタイミングパルスと組み合わされて使われる。秤量機の秤量値、回転数計、カウンタの出力などがこの例である。出力の場合はコード化情報を出力するとともにその情報をもう一度計算機に取り込み、チェックを行なってはじめてタイミング信号を出す場合がある。パルス列はプロセス量に比例したパルス数として入出力され、高速入力の場合数けたのカウンタによってカウントされ、このカウンタのオーバーフローを割込み入力として積算することが一般的で、低速入力の場合は直接割込み入力とする。

1ビットの間違いが大混乱を招くので、必ずパリティチェック、あるいはセルフチェックコードを用い、場合によっては突き合わせチェックを行なうことになっている。

3.3 マン・マシン・コミュニケーション

計算機システムと操作員あるいは作業員との情報交換が少ないほど自動化が高度で望ましいのであるが、現状では自動検出装置の開発が遅れているため、コード化された情報の入出力は、人の目に頼らざるを得ないことが多い。製品番号や、伝票上の情報を読みとり、デジタルスイッチや、押ボタン、ロータリスイッチなどで入力する。計算機からの指示は、表示盤や、ランプなどで与えられる。最近、ビデオデータ入出力装置が開発され、今後のマン・マシン・コミュニケーションの花形になりつつある。また、ブラウン管上に色分けで図形やグラフが表示されるグラフィックディスプレイとか、スライドを用いたスライドディスプレイなど各種の試みがなされている。

人間工学的な配慮がじゅうぶんにいきとどいており、使いやすい、疲れにくい、誤りにくい装置でなければならないと同時に、現場機器としてじゅうぶんタフな構造で、工業用制御装置なみの考慮が必要である。

4. 自動車工業における応用の例

前章までに記したダイナミック生産コントロールの方式や、ハードウェアシステムの手法はライン作業を中心とした工業、たとえば自動車工業、鉄鋼圧延工程、電子機械のアセンブリー工程においては、特に有用であるが、ここでは発展の著しい自動車工業における応用例について概略を紹介する。

4.1 鑄造工場生産管理システム

鑄造工場においてはユニット工場からの月間生産要求に基づきユ

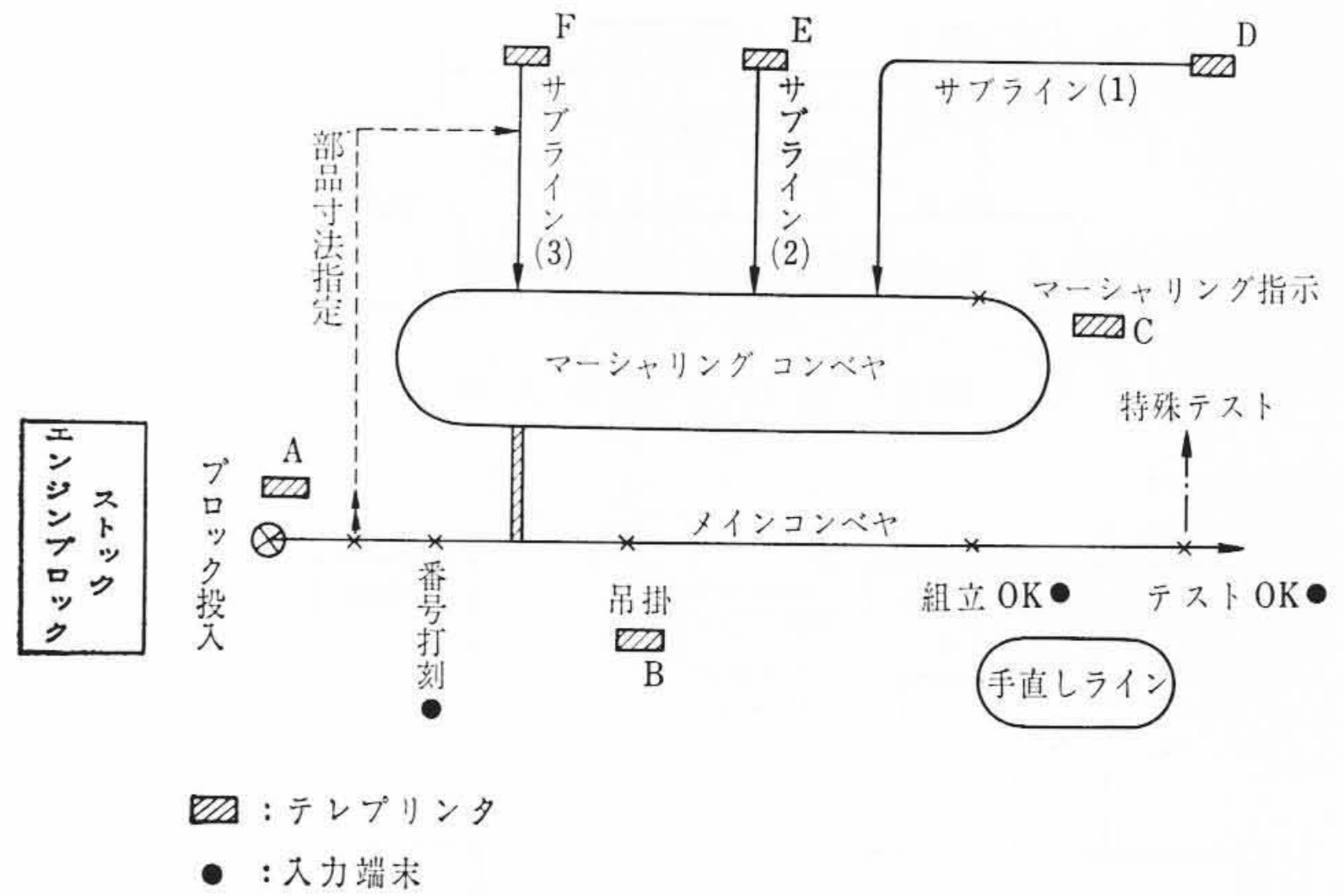


図8 エンジンアセンブリーラインの例

ニット部品素材を生産する。この種の工場の生産形態は少品種多量生産方式となっており、鑄造ライン、鑄造機、キューボラ、中子工程などの設備能力の制限を受けるために、計算機導入による生産能力の飛躍的向上は望み難い。また素材工場にあっては、製品中に占める原材料コストの割合が他工場製品に比べて著しく高いために、生産管理の主眼は必然的に仕掛を最少にするように計画されねばならない。このために、各ショップごとの生産実績を正確には握ることが要請される。従来の実績は握の方法はバッチ的であったが、制御用計算機を採用することにより、設備機械に取り付けた動作リミットスイッチなどからの信号により、オンラインでリアルタイムに正確な生産実績をは握できるとともに、実績収集のために人手をかける必要もなくなることは高く評価されるべきである。

上記、生産実績に基づき各ショップへの生産指示が行なわれて、

- (1) 製品仕掛量の適確な把握→適正在庫の実現
- (2) 適正原材料在庫の確保
- (3) 現状に即した生産計画の立案と修正

が実現されることになる。またこの種の生産形態では、各ショップの設備負荷の変動余裕がじゅうぶんでないために、設備負荷率の変動を許容範囲におさえて、要求生産量を消化するための、最適生産スケジュールをきめるアルゴリズムの開発に重点がおかれねばならない。日立製作所が某社で実施している例では、ある生産条件(過去数ヶ月の実績平均)のもとで、月間生産シミュレーションを行なって、現状に最も即した生産計画を決定する方式を採用している。

なお生産実績は握および生産計画に付随して、下記の項目に関しても考慮すべきである。

- (4) 原材料購入計画
- (5) 輸送・配車計画
- (6) 設備、人員、負荷率計算
- (7) 品質管理/設備稼働管理

最後に、素材生産工場の生産管理はユニット工場の要求に大きく影響をうけるために、きめ細かな管理の実現にはユニット工場からのフィードバックをスムーズに行なう必要がある。このためには、ユニット工場の生産管理システムと有機的に結合した管理体系をとることが望ましい。

4.2 ユニット工場の部品管理システム

ユニット工場では自家製部品および外注部品を組立てて、エンジン、その他のユニットを生産しているが、この種の工場での共通の管理ポイントは、部品の適正在庫の確保ということである。通常月間生産計画が立案されて、組立ラインへ指示されるのであるが、たとえば、図8に示す組立ラインに対してある仕様のエンジン製作指示が出される場合、ラインサイド数十個所のショップに部品仕様が伝達され、ライントップからエンジンの母体となるブロックが流れ

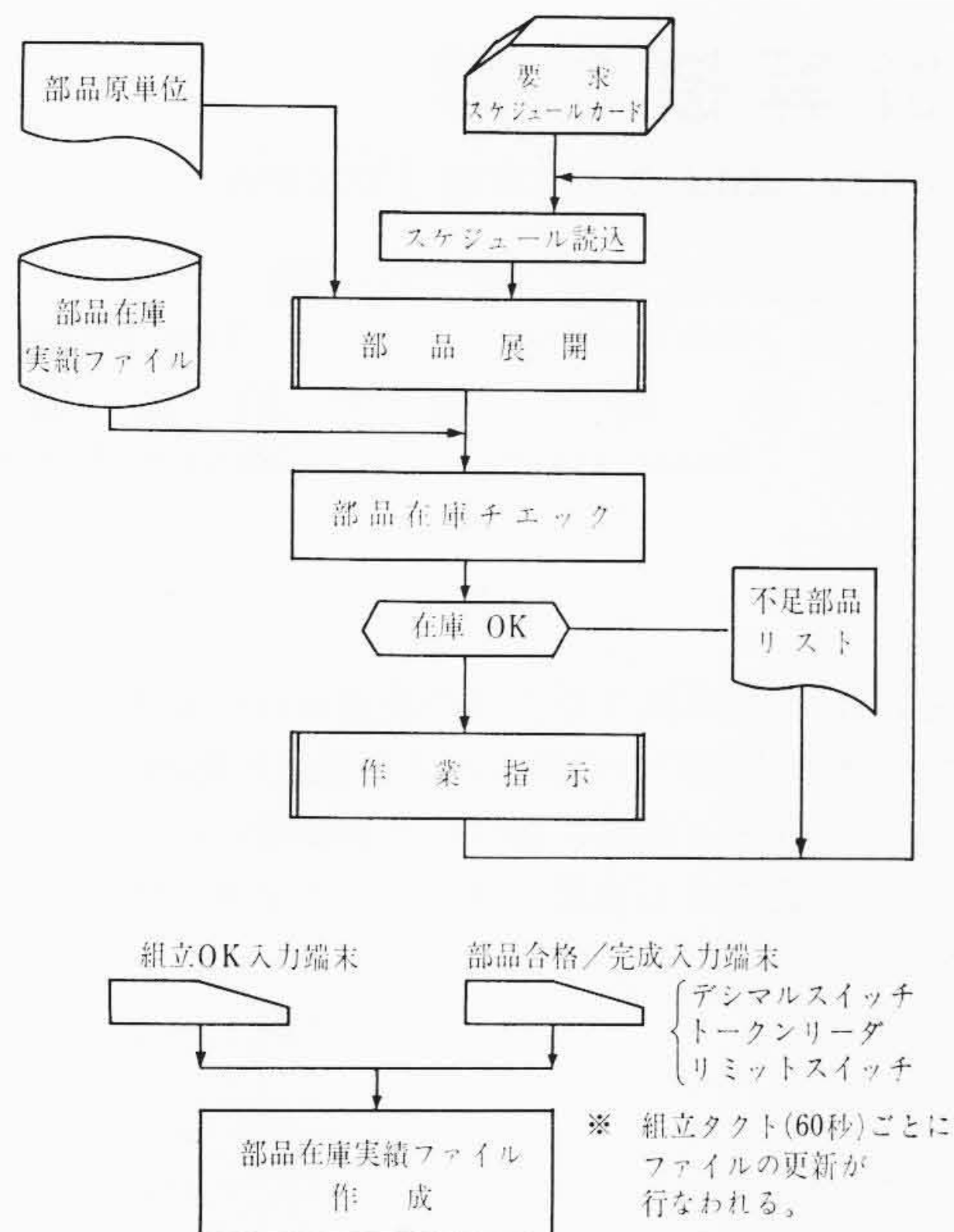


図9 ダイナミック部品管理 Flow の例

始めたとする。組立メインラインとサブアセンブリライン（マージャリングライン）とは同期はとられているものの相当の時間差があるために、エンジンブロック組立の途中になって、特定部品不足が発見され、生産不能が判明することがしばしばある。この種のトラブルの解決のためには、部品在庫をエンジン組立タクト単位で管理することが要求される。このような高精度の管理は人間では不可能であり、また従来のシフト単位バッチ的手法でも不可能である。この種の工場の部品管理は制御用計算機を使用して図9に示すフローに従って実施されることになる。すなわち、

- (1) 内製、外注部品の検査合格数のオンライン収集
- (2) 完成ユニットの部品展開による在庫更新
- (3) 要求スケジュールの部品チェック
- (4) 不足部品のチェックアウト
- (5) 組立作業指示
- (6) 生産実績は握と生産計画との対比

などを部品1個ごとの完成時点、ユニット完成時点または不良発生時点ごとに行ない部品ファイルの更新、参照チェックののち、組立作業指示どおりに生産が行なわれるように管理するわけである。

4.3 組立工場の生産管理システム

アセンブリラインにおいては、塗装工場で完成した車体 (Painted Body) をいったんストレージラインに引き入れたのち、ラインバランスを考慮してストレージラインからの取出制御を行ない、取り

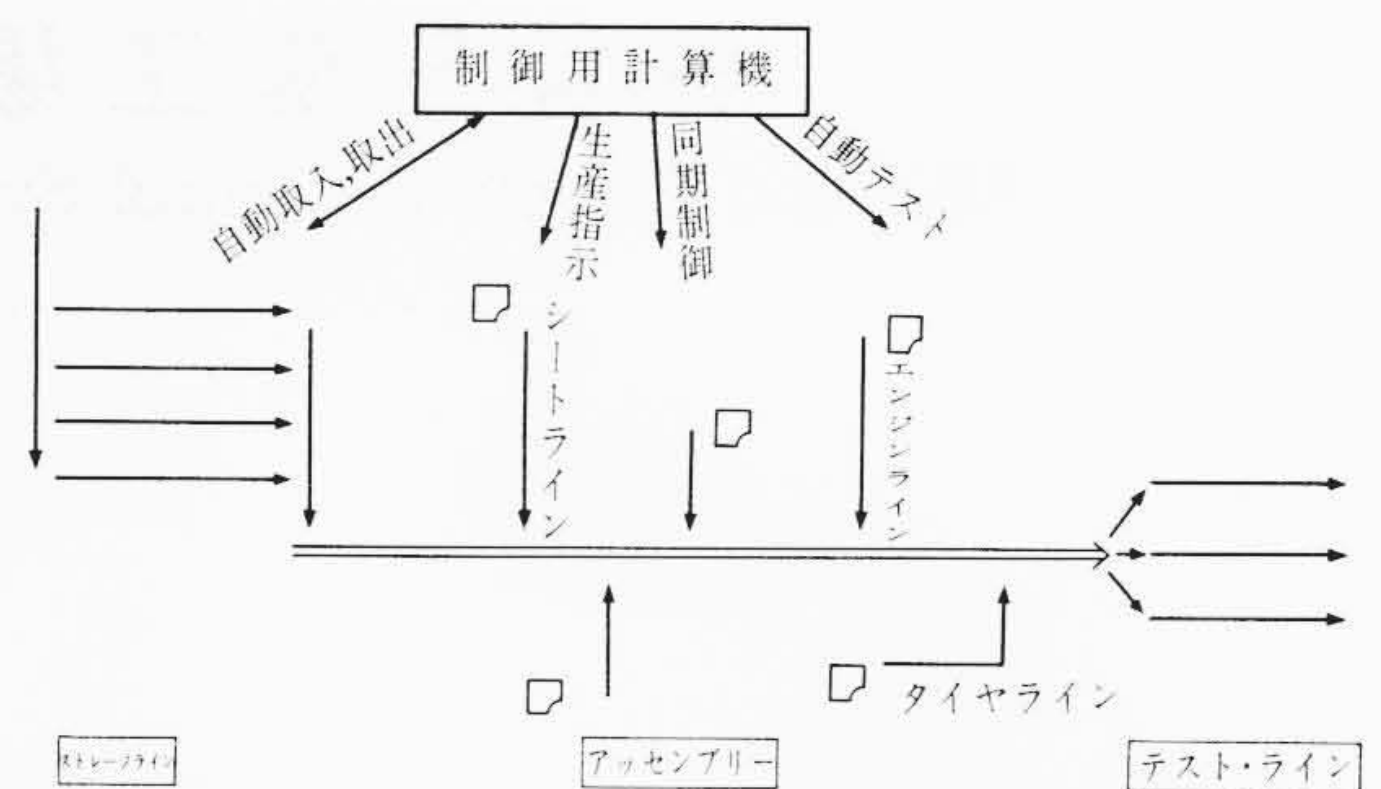


図10 組立工場の制御

出した車体の車番にしたがい、あらかじめ定められたスケジュールからぎ装仕様を決定して、ラインサイドに作業指示をする。

アセンブリラインでは、投入される車種、ぎ装、仕様(オプション仕様を含む)により大幅に作業工数変動するため、この作業工数変動を最少におさえ、各作業ゾーンでの作業余裕を確保できるような順序でストレージからの取り出しを制御せねばならない。このストレージ制御の一般的な理論としては、さきに2.で説明したダイナミックスケジュールコントロールがある。しかしながら個々のアプリケーションにあっては、ストレージの能力(主として格納レーン数)からの制限などにより、理論を簡略化した方法によっている。またラインサイドへの指示は通常、テレプリンタにより行なわれるが、指示のタイミングなどについては、ラインとの同期化、先行指示など個々の実施例ごとに決定されている。

アセンブリラインにおける生産管理のうち、部品や人員の管理と並んで、ラインオフ時点での車両タグおよび品質管理伝票、試験成績票の作成も重要であろう。現在、鋭意推進されている各種の試験装置の自動化が完成した暁には、生産管理用計算制御システムとオンライン結合することにより、より多様な、より正確な、テスト結果をラインオフと同時に現場に発行することが可能である。

5. 結 言

従来のスタティックな生産管理方式に代わって、ダイナミックなオンラインコントロールが行なわれるようになってきた。これを実現するため、ハードウェアでは信頼度の向上方式および最近実用化されるようになった端末装置について言及し、ソフトウェアの面ではダイナミックなスケジュールコントロール方式について述べた。

また応用例のいくつかについても、ごく簡単にふれたが詳細については別稿にゆずりたい。

オンラインでのダイナミックな生産管理は今後広く実用されることになると考えられるが、本文が多少なりとも生産管理の計算制御発展のためになれば幸いである。