

組立工程設計プログラム“CADAP”の開発

CADAP-A Practical Computer Program for Design of Assembly Systems

武田健二* Kenji Takeda

To obtain manually an optimum design for assembly line is one of the most difficult design tasks as it should fulfil numerous manufacturers' requirements.

The computer program CADAP described here assigns each of the work elements composing the whole assembly of a product to the most adequate work station in the assembly line to get the line balanced. Simultaneously, it makes full use of the operator's skill and simplifies the flow of materials while ensuring the required production rate and loading efficiency.

Through the analysis of assembly lines, it has been made clear that the usual manufacturers' requirements to be taken into account in design can be categorized into two types; (1) Demand for separation of work elements into different work stations, and (2) demand for gathering of work elements into the same work station. Hence, work elements are classified into gathering or separation groups according to requirements and CADAP fulfils the requirement using the correlationship of the groups.

The algorithm of CADAP is mainly based on the method of Back Track Programming and partly adopts heuristics.

An effect of the application of CADAP to the assembly line of an electric appliance factory is shown, which shows far better line balancing than attained by usual manual design.

1 緒 言

現在、多くの製造業における組立作業は自動化が遅れており、人間による作業が中心になっている。このような組立作業の工程設計の特徴は、人間の多能性からある程度自由に作業者の配置転換や作業内容の変更が行なえることである。特に、造船や重電機と違って家電品など比較的小さな製品の組立では、大がかりな機械設備を必要とせず、工程設計の主眼は、「作業者に対して、いかに効率的な生産が可能な作業分配をするか」に置かれていることが多い。

そこで一般に組立工程を設計する場合に、考慮しなければならない点をあげてみると、(1)生産量を確保するために必要な生産速度を達成できること、(2)作業者の遊休時間を少なくして稼働率を上げること、(3)作業者の技能を有効利用できること、(4)機械や治工具を適正に配置できること、(5)部品供給などの物の流れが効率的になること、などたくさんある。このうち(1)、(2)については、定量的に推定、評価することが比較的容易であるが、(3)、(4)、(5)などについては、なかなか定量的に評価しにくい。しかも、対象とする製品によって各評価項目の内容や重要性が違ってくる。

ところで、近年の需要の多様化に伴うライフサイクルの短期化によって、モデルチェンジが頻繁に行なわれたり、製品が多種であったりすると、常に組立工程を設計し直さなければならない。また大量生産の場合では、わずかな工程設計の違いが生産性に大きな影響を及ぼすこともある。このような場合では、人手で最適な工程設計を行なうことがしだいに困難になってくる。

これまで組立工程の設計に寄与する手法や道具としては、ラインバランスのプログラムがある。これは、コンピュータの迅速な処理能力を利用して、作業者の遊休時間の少ない工程編成を得るためのものである。しかし前に述べたように、良い組立工程を設計するには、ラインの負荷バランスを良くするだけでは不十分である。そこで新たににより多くの機能を持つプログラム(Computer Aided Design of Assembly Processes以下“CADAP”と略す)を開発した。“CADAP”の特長は、ラインバランシングを行なうと同時に、(1)その他の評価項目(例えば、作業性とか工具)を考慮できること、(2)作業者の能力に関して考慮できること、などであり、広く組立工程設計の道具として適用できる。

2 組立工程設計と“CADAP”

2.1 基本的なラインバランス問題

組立職場の生産形態には各種あるが、ここでは代表的な形態であるラインを扱う。ラインでは作業者が作業する場所を通常「工程」と呼び、一つの製品を組み立てるために必要な全作業が互いに重複のない要素作業に分割されて、各工程に割り当てられている。製品は、各工程をほぼ一定の速度で通過して組み立てられるが、これがその製品の生産速度である。各工程でのある製品についての作業開始時刻から次の製品についての作業開始時刻までの時間をサイクル時間という。このサイクル時間はライン上の各工程で等しい。各工程の正味所要時間は、その工程に割り当てられた要素作業の作業時間

* 日立製作所生産技術研究所

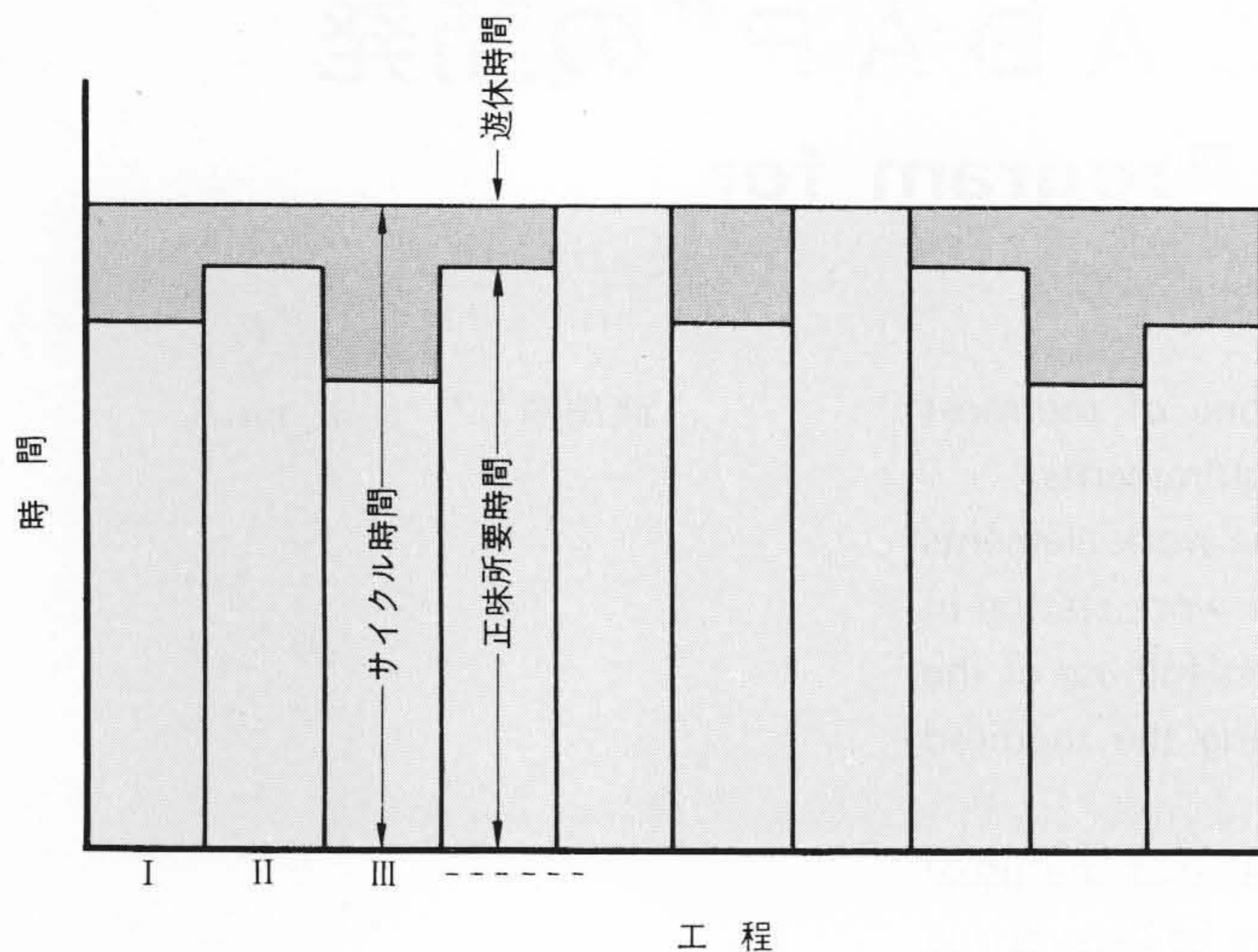


図1 工程別の作業量 工程間には多少の作業量の相違があり、最大の作業時間がラインのサイクル時間となる。

Fig. 1 Work Loads of Work Stations

の合計であるから、図1に示すように工程間に多少の差が生ずる。その場合サイクル時間は、全工程の正味所要時間のうち最大のものと等しい。したがって同図のように各工程に少しずつ遊休時間が生ずることとなる。要素作業の各工程への割当て方によって、この遊休時間の総計を少なくすることがライン バランスの目的である。また最近では、パート タイマーの採用などによりライン上の作業員間に習熟度や技能の差が生ずることがある。この場合のライン バランスは、作業の標準時間だけでなく、作業員の能力をも含めて考えなければ妥当な結果が得られない。

ある製品の組立ラインのサイクル時間と工程数との間には、図2に示すような関係がある。稼働率限界曲線というのは、全く遊休時間なしの編成ができた場合の工程数とサイクル時間の組み合わせを示しており、この曲線に対して原点から遠い領域のみ実現可能であるが遠ざかるほど稼働率が低くなる。また、生産量限界曲線より原点に対して反対側の領域の組み合わせを選んでしまうと、決められた期間内に希望する生産量を達成できなくなる。したがって、工程数とサイクル時間の組み合わせは、図2の網目の部分の領域内で、できる限り矢印の示すように、稼働率限界に近いものを選ぶことが望ましい。そこで、ライン バランス プログラムの機能としては、工程数とサイクル時間のいずれを条件として与えても解けることが必要とされる。

各作業は、実行する順序に関して技術的制約がある。これは、図3に示すような優先関係図として表現することができる。例えば作業Cは、作業A、Bがともに終了しなければ着手できないことを示している。

2.2 作業の合併と分離の要求

図4で優先関係からすれば、作業A、B、C、Dは、互いにどのような順序で実行されてもかまわない。しかし、AとBがマイナス形ドライバ、CとDがプラス形ドライバを使うとすれば、工具の有効利用や工具を持ち換えるといった無駄動作の排除といった観点から、AとB、CとDがそれぞれ一緒に行なわれることが望ましい。このように共通な性質を有するいくつかの作業をできる限り集めて、同一の工程としたいという要求がいろいろの場合に生ずる。例えば、同程度の技能を必要とする作業をまとめて、それに見合った技能を持つ

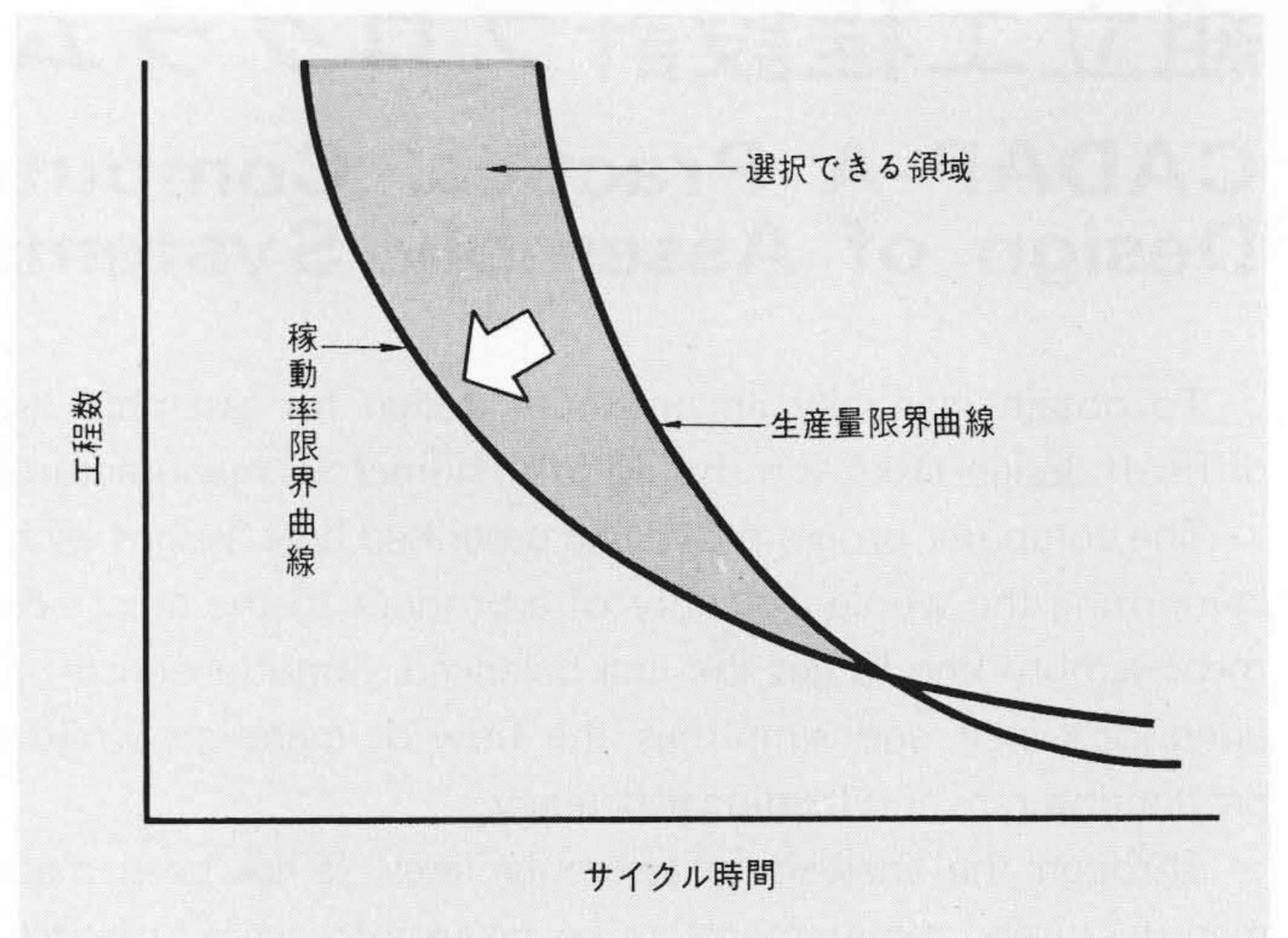


図2 サイクル時間と工程数の関係 ラインのサイクル時間と工程数の組合せは、生産量限界を超さない領域で最も稼働率が高くなるように選択するとよい。

Fig. 2 Relation between Cycle Time and the Number of Work Stations of Line

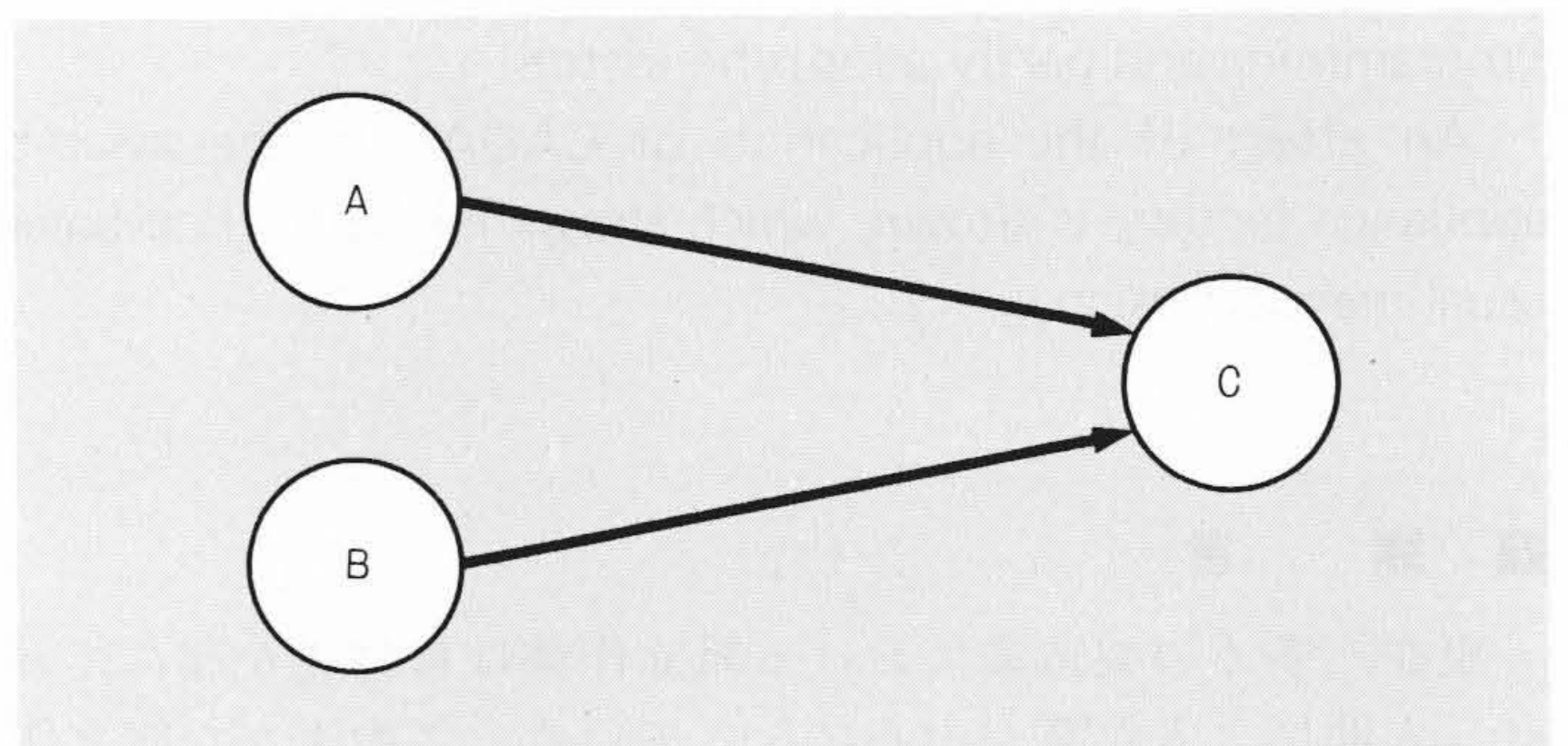


図3 作業の優先関係図 作業を実行する順序に関して守らなければならない技術的制約がある。

Fig. 3 Precedence Diagram of Work Elements

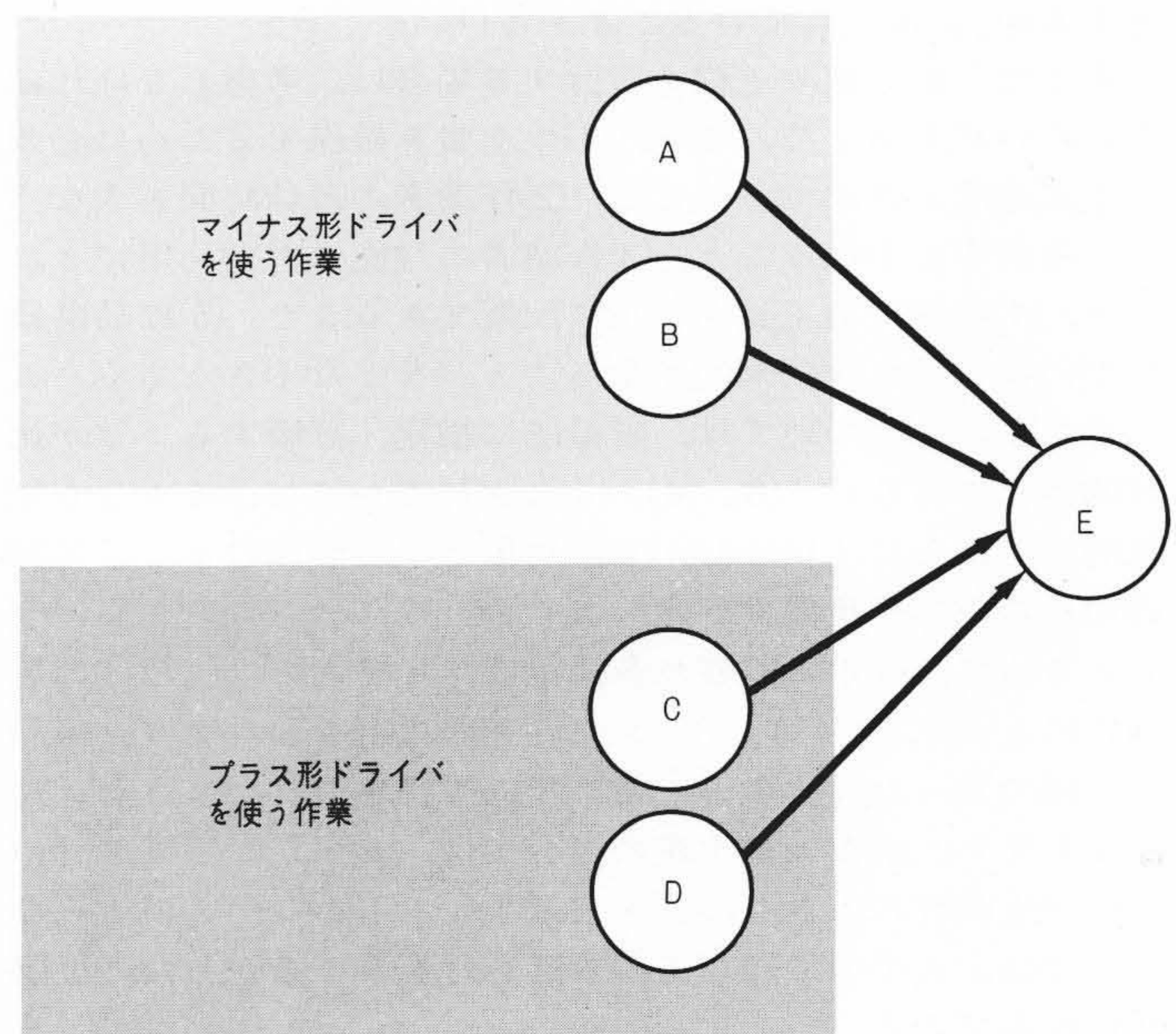


図4 作業の合併の要求 同一工具を使用する作業などは、なるべくまとめたほうが効率的である。

Fig. 4 Requirement for Gathering Similar Work Elements

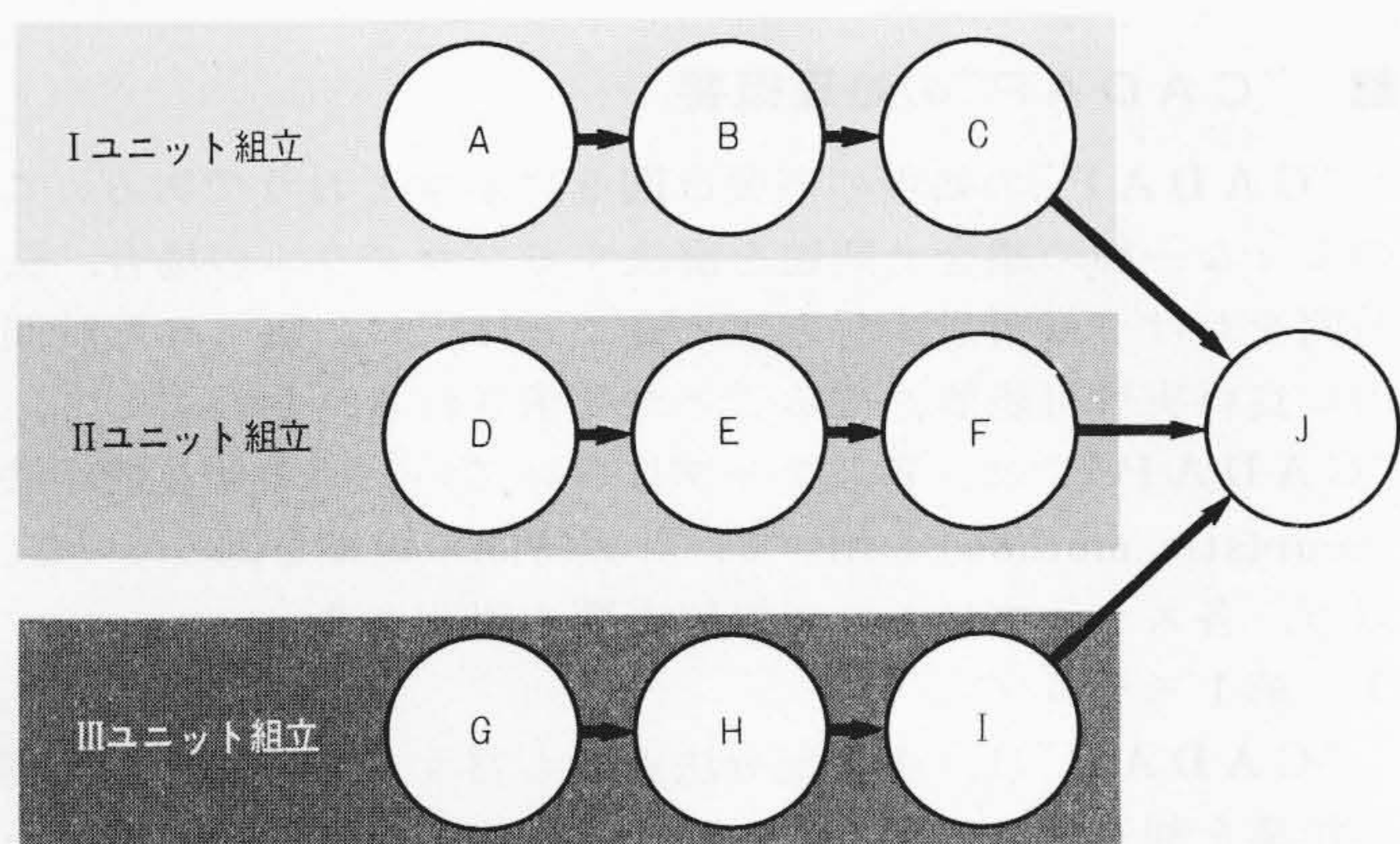


図5 作業の分離の要求 物の流れが複雑にならないように、作業を複数のサブラインに分けることがある。

Fig. 5 Requirement for Separating Work Elements

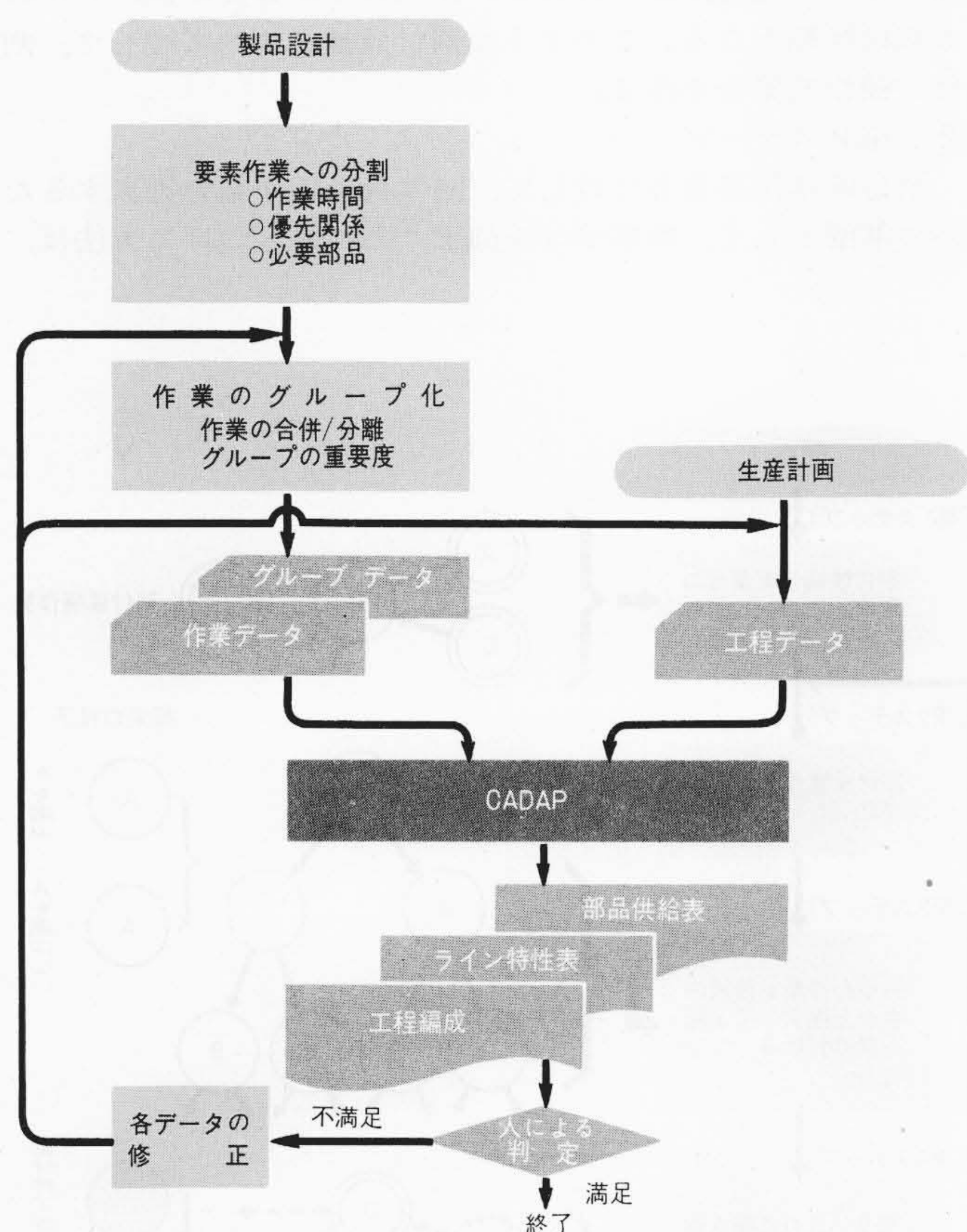


図6 “CADAP”による組立工程設計手順 人間のアイデアを自由に盛り込んだデータを使って“CADAP”により迅速に結果を得る。

Fig. 6 Assembly Line Design Procedure with CADAP

作業者に割り当てれば技能の有効利用となり、品質の向上も期待できよう。また、部品の組込方向や姿勢などが同一の作業をまとめることは、むだなハンドリング動作をなくし、効率を上げることに役立つ。

これとは逆に、いくつかの作業を互いに分離して、異なる工程に割り当てる必要のある場合も多い。図5はこの例を示すもので、作業A、B、CとD、E、F及びG、H、IによってそれぞれI、II、IIIのユニットが組み立てられ、これが作業Jによって一つにまとめられる。これらの作業をすべて1本のライン上に配置することももちろんできるが、むしろ

図5に示すように3本のサブラインとして分けるほうが、部品供給も含めた物の流れを単純化できる。その他、油を使用したりする汚れ作業と汚れをきらう作業とは分離する必要がある。

2.3 “CADAP”による工程設計

今回開発した“CADAP”は、以上述べた各種の要求を盛り込んで組立工程を設計できるように、一般のラインバランスの機能のほかに、作業をグループ化して与えることによって、様々な要求を満足させることのできる機能を持っている。

図6は、この機能を示すために“CADAP”を使った組立工程設計の手順を示すものである。この手順の特徴は、組立工程の設計作業を人間の創造性とコンピュータの迅速性とを利用して進めて行く点である。つまり、人間すなわち工程設計者がその製品の特徴に合った設計の方針を決定するが、その方針どおり工程設計を細部まで行なうとどうなるかという工程案を、コンピュータが即時作成して示す。この様子を同図に従って示すことにする。

(1) 製品設計の結果から、組立作業を要素作業に分割し、作業時間を推定し、要素作業相互の技術的な優先関係を調べ、更に必要な主要部品をリストアップする（作業データ）。

(2) 製品組立上の特徴や問題点を整理して、工程設計上の注意点とする。例えば、使用工具の種類が多いとか、作業によって必要とされる技能水準の高さが大きく違うなどである。そして、この注意点の一つ一つに対して効果的な対策を考える。例えば、工具の数ができる限り少ない工程編成にしようとか、技能が有効に利用できる編成にしようとかいう具合である。更に作業をこの各対策に合った特性でグループ化する。例えば、同一工具を使う作業に対して一つのグループを定義する。そしてグループ相互の重要度や合併か分離かといった

作業名	作業の説明	作業時間	優先作業名	所属グループ名 (合併)	所属グループ名 (分離)
-----	-------	------	-------	-----------------	-----------------

(a) 作業データ

作業名	必要部品名	必要部品数	
-----	-------	-------	--

(b) グループデータ

グループ名	重要度	グループの説明
-------	-----	---------

(c) 工程データ
(サイクル時間を
入力する場合)

工程番号	作業能力	
------	------	--

図7 “CADAP”の入力情報 “CADAP”は、この3種類の入力データを必要とする。

Fig. 7 Contents of Input Data for CADAP

特徴を決定する(グループ データ)。なおこの場合、一つの作業が複数のグループに属することはかまわない。

(3) 生産計画や同一ラインに流す他の製品との関係などを考慮して、ラインのサイクル時間か、あるいは工程数かのいずれかを決定する。更に工程間に作業能力の大差がある場合には、作業能力を推定する(工程データ)

このようにして準備した作業データ、グループ データ、工程データを図7のように整理して“CADAP”の入力とする。“CADAP”はこの入力データに基づき次のような点を考慮した工程編成案を作成する。

(1) 技術的な優先関係を遵守しながら、通常のライン バランスを行なうことにより、作業者の遊休時間の最少化を図る。その際、作業能力についても考慮する。

(2) 工程への作業割付けに際して、できる限り同じグループに属する作業が同じ工程になるようにしたり、分離する必要があるグループの作業を別の工程になるようにする。

そして、工程編成とそのライン バランス結果、部品供給先の関係などを図8のような形で出力する。工程設計者がこれを見て、当初の目的に対して満足できる案であるか否かを検討し、修正の必要があれば改めてデータを修正し、再び“CADAP”に入力する。このような操作を試行錯誤的に繰り返すことによって最適な工程を設計する。

工程	工 程 の 内 容				
	作業時間	遊休時間	作業能力		
1	3.5(分)	0.5(分)	1.0		
	作業名	作業の内容	作業時間	優先作業名	所属グループ名
	ASS1	ネジトリツケ	0.5	ASS1	TL01
	ASS2	アームトリツケ	1.0	ASS1	TL01
	ASS3	カバートリツケ	0.3	ASS1	SKIL
2	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(a) 工程編成

総 工 程 数	42	サイクル時間	4.0(分)
総 作 業 数	250	総 遊 休 時 間	18.0(分)
総 作 業 時 間	150(分)	最大遊休時間	
⋮	⋮	⋮	⋮

(b) ライン特性表

工程	必要部品名(数量)	部品名	数量	供給先工程(数量)
1	ARM1(2),FRAM(4)	ARM1	2	1(2)
2	B002(8),B003(8)	FRAM	8	1(4),4(2),5(2)
3	⋮	B001	24	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(c) 部品供給表

図8 “CADAP”の出力情報 “CADAP”では設計結果を評価しやすいように3種類のリストを出力する。

Fig. 8 Contents of Outputs from CADAP

3 “CADAP”の処理概要

“CADAP”の処理の概要は図9に示すとおりである。このような一種の組合せ問題を解決するプログラムの場合、長時間をかけて厳密最適解を求めること以上に、限られた時間内に良い実行可能解を得ることが要求される。したがって、“CADAP”では、各ステップにおいていわゆる発見的手法(heuristic method)を用いて、計算時間の短縮を図っている。以下、各ステップについて処理概要を説明する。

(1) 第1ステップ

“CADAP”は、逐次配分法とでも言うべき方法で、工程へ作業を割り付けて行く。これは、最初または最後の工程から始めて、逐次評価をしつつ作業の割付けを進めて行き、全工程に全作業を割り付け終わったら、解を得たとして終了する。その場合の割付候補作業とは、例えば同図の右に示すように、最初の工程から割付けを開始するとすれば、優先関係において優先作業を持たない作業AとかBとかは、いずれも割付候補となる。このような割付候補をすべて捜して、割付候補作業集合を作る。

(2) 第2ステップ

割付候補作業集合に対して、割り付ける作業を選択するための準備として、順序づけを施す。この順序づけの方法は、

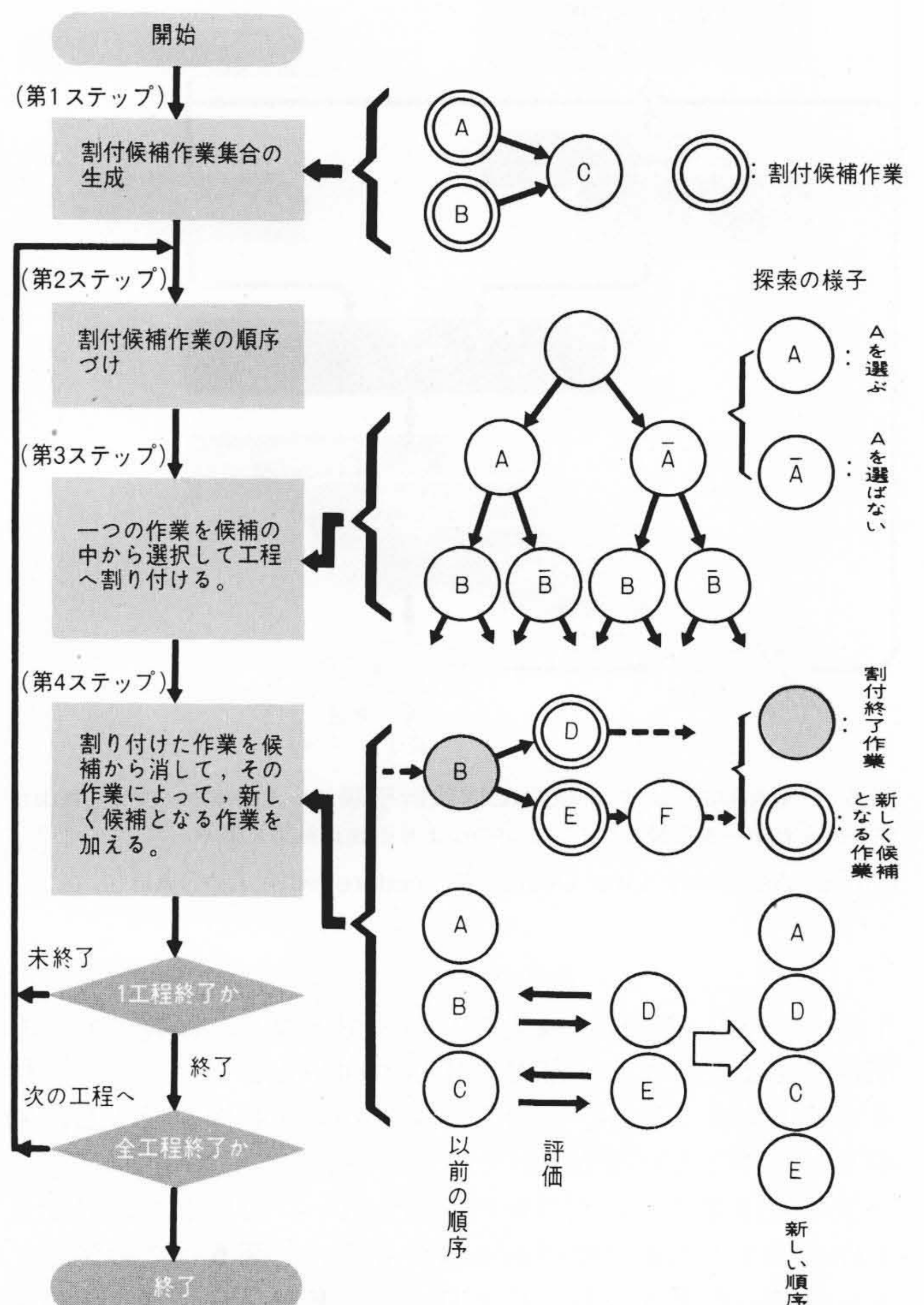


図9 “CADAP”の処理概要 “CADAP”では発見的方法を用いて作業の順序づけを行ない、Backtrack Programmingで組み合わせ問題を解く。

Fig. 9 General Flow of CADAP

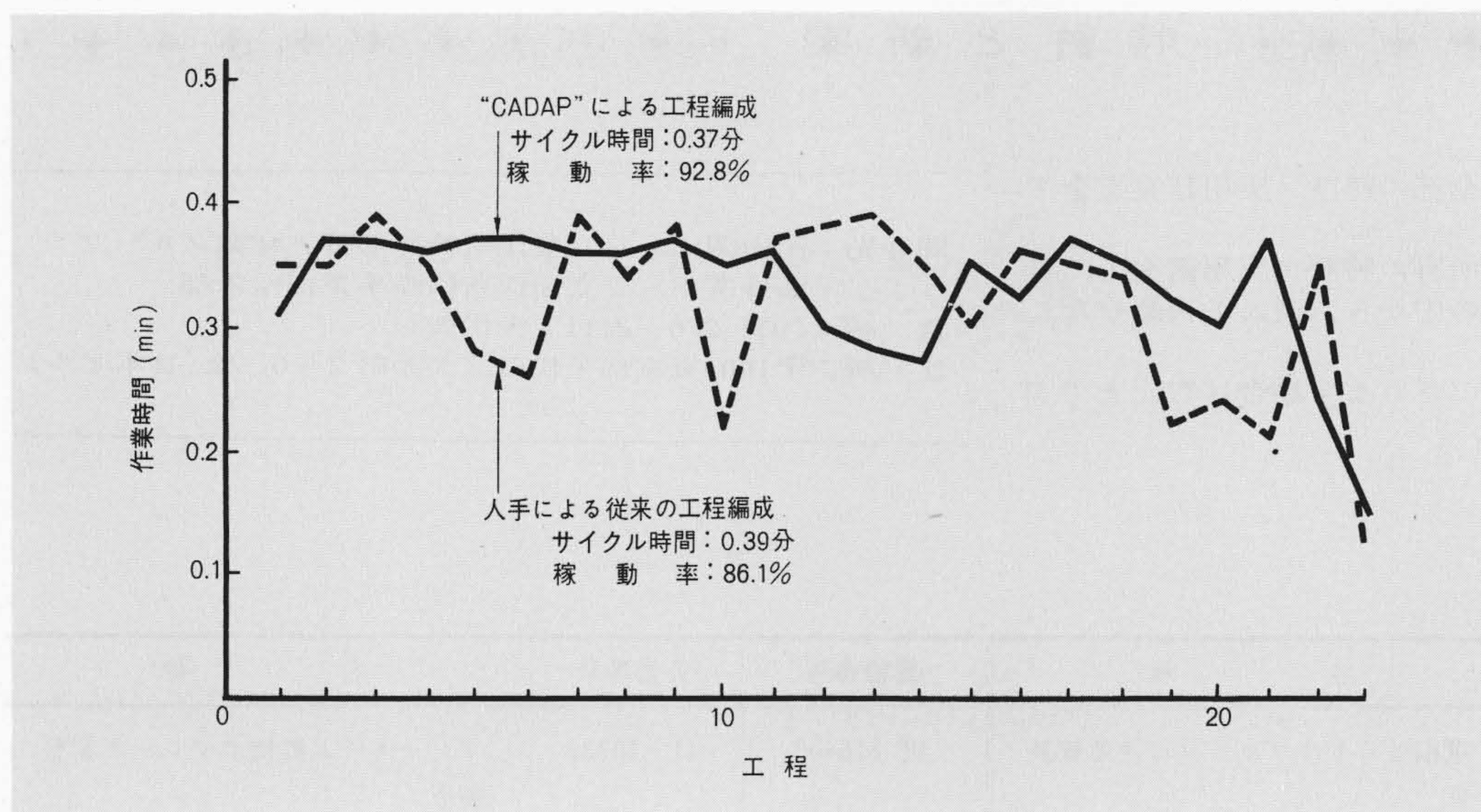


図10 “CADAP”の適用結果
(某家電品組立ラインの場合)
作業時間を各工程について実測してみると、改善を重ねてきた従来の編成より“CADAP”による編成のほうが更に効率的であることが分かる。

Fig. 10 Effect in Application of CADAP

各作業が属しているグループを調べ、作業同士のグループ共通度を評価し、更に各作業時間も参考にして決定する。

(3) 第3ステップ

割付候補作業集合の中から、優先順序の最も高い作業(同図のA)を選んで、工程に割り付けてよいかどうかを評価する。この評価は、(a)これまでその工程に割り付けられた全作業の作業時間合計値に、この作業の時間を加えてもサイクル時間を越さないか、(b)この作業の属するグループに対して、分離の要求のあるグループに属する作業が、既にその工程に割り付けられていないか、などについてである。もし評価の結果、割り付けできないと分かると、次に優先順位の高い作業(同図ではB)を選んで、同様の評価を行なう。このようにして、割り付けてよい作業が発見できるまで捜して行く。もし割付候補作業集合のすべての作業を調べて、なお発見できない場合は、直前に割り付けた作業を再び候補にもどして、前の段階にさかのぼって探索を始める。これはBacktrack Programmingと呼ばれる方法の一種である。

(4) 第4ステップ

一つの作業(同図ではB)が選ばれて工程に割り付けられると、それによって新しく候補になる作業(同図ではD、E)を捜して、割付候補作業集合に加える。そして第2ステップにもどって、新しく候補に加えた作業を含めて、以前に定めた順序づけの評価をやり直し新しい順序づけを施す。

現在の“CADAP”で処理できるモデルの大きさは、作業数が500まで、定義できるグループの数が50までであるが、より大きいモデルを扱えるようにすることは容易である。またこれは、HITAC 8400 (132kB) の場合で、プログラムは全部FORTRANで書かれ、すべてインコア処理である。

4 “CADAP”の適用例

“CADAP”はこれまで二、三の製品に対して適用した実績がある。そのうちの一つとして、日立製作所における某家電品の製品組立ラインの場合について紹介する。従来この製品の組立工程の編成は、現場の管理者が行っていた。その後、“CADAP”をこの製品の組立ラインに適用した理由は、(1)量産品には属するが多種化してきており、製品の切替えが多くなって、その都度ライン編成を良好に保つことが困難になってきている。(2)作業は、比較的単純であるが、パート

イマーを常時数名雇用しているため、ライン全体に能力差があり、かつ日ごとに変動するため、迅速に能力に応じたライン編成を得たいなどである。

そこで約60の作業を定義し、各作業の特徴を調べて五つにグループ分けをして、23の工程となるように“CADAP”に入力した。その結果は図10に示すとおりである。これは、実作業時間をラインの横で実測したものである。この製品は、定期的に流れるため、従来の工程編成もこれまで修正を重ねてかなり良好のものになっていたと言える。しかし“CADAP”の結果が、更にこれより6%以上高い稼働率を示したことから、新製品や、めったに流れない製品の場合には、もっと大きな効果が期待できる。なおこのライン中、15番めの作業者は、パートタイマーであったので、標準作業能力に対して、70%の能力とみなして入力したところ、他の工程に比べて約70%程度の作業量が割り付けられた。そして結果的には他の作業員と同じ程度の時間を作業に要していることとなり適正な編成であることが分かった。モデルの複雑さにもよるが、この程度の大きさのモデルに対しては、処理は1分以内で終了する。

5 結 言

組立工程設計プログラム“CADAP”は、一般のラインバランシングの機能のほかに、各種の作業性に関する考慮を加えることができる機能を持っている。したがって、利用者が組立工程を設計する際に、特に重要と考える制約や要求を自由に入力でき、その考慮が反映された工程編成を“CADAP”により即時に得、検討を加えることにより最適な工程編成を得ることができる。このようなプログラムは、設備などに対しての大きな投資を必要とせずに生産性を上げることのできる、管理上有力な道具であると同時に、更にスケジューリングシステムやデータベースとの結合によって、生産システムをより統合化する方向へ高める可能性を与えるものである。

参考文献

- (1) 川畑, 「組立システムとコンピュータ」産業図書(昭46)
- (2) 黒田, 「ラインバランシング」IE, Vol.12, No.10~Vol.13, No.2