



生産システムの最適設計と運用管理に関する研究

安田, 一彦

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1983-03-31

(Date of Publication)

2008-05-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0424

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000424>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



生産システムの最適設計と
運用管理に関する研究

昭和58年3月

安 田 一 彦

OPTIMAL DESIGN AND OPERATIONAL CONTROL
OF PRODUCTION SYSTEMS

By

Kazuhiko Yasuda

Doctoral Dissertation

Division of Industrial Science
Graduate School of Science and Technology
Kobe University

March 1983

目 次

第1章	緒 論	1
1.1	緒 言	1
1.2	生産システム設計における設備配置問題	3
1.3	生産システム運用における生産スケジューリング問題	8
1.4	本研究の目的と論文構成	11
第2章	ライン生産システムの設備配置計画	17
2.1	緒 言	17
2.2	設備配置モデル	18
2.2.1	前提条件	18
2.2.2	隣接設備間距離と設備間運搬距離	19
2.2.3	評価基準	21
2.3	総運搬費用最小化の設備配置	23
2.3.1	分岐限界法による解法	23
2.3.2	下界の計算法	24
2.3.3	最適化アルゴリズム	29
2.3.4	数値実験	30
2.4	期待総運搬損失費用最小化の設備配置	32
2.4.1	決定手順	32
2.4.2	数値計算例	33
2.5	結 言	35
第3章	循環形生産システムの設備配置計画	37
3.1	緒 言	37
3.2	設備配置モデル	38
3.2.1	対象とする生産システム	38
3.2.2	前提条件	40
3.2.3	数学モデル	41

3.3	分岐限界法による解法	42
3.3.1	代替設備シーケンスの選択	44
3.3.2	最適設備配置の決定	46
3.4	最適化アルゴリズム	48
3.5	数値計算例	50
3.6	結 言	54
第4章	セル構造生産システムの設備配置計画	55
4.1	結 言	55
4.2	セル・レイアウト・モデル	56
4.2.1	前提条件	56
4.2.2	セル間レイアウトとセル内レイアウト	57
4.2.3	評価基準	57
4.3	セル・レイアウトの決定手順	59
4.3.1	決定手順の概要	60
4.3.2	セル・モジュールの決定	61
4.3.3	MAX-MIN法の利用	62
4.3.4	修正総入替法の提案	64
4.4	セル間レイアウトの決定	71
4.4.1	初期セル間レイアウトの構成	71
4.4.2	初期セル間レイアウトの改良	72
4.5	セル内レイアウトの決定	72
4.5.1	初期セル内レイアウトの構成	72
4.5.2	初期セル内レイアウトの改良	72
4.6	セル・レイアウトの設計例	73
4.7	結 言	77
第5章	コンピュータ援用設備レイアウト計画システム	79
5.1	結 言	79
5.2	面積と形状の記述法	81

5.2.1	フロアの面積と形状の記述	81
5.2.2	配置の柔軟性に基づく設備の分類	83
5.2.3	設備の面積と形状の記述	84
5.2.4	候補場所の記述	85
5.3	設備レイアウト問題	87
5.3.1	総設備レイアウト費用	87
5.3.2	設備間の運搬距離	88
5.3.3	問題の記述と定式化	89
5.4	最適設備レイアウトの決定	90
5.4.1	設備配置順序と候補場所探索順序	91
5.4.2	分岐限界法による解法	92
5.4.3	最適化アルゴリズム	94
5.5	コンピュータ援用設備レイアウト計画システムCOFLAP	95
5.6	ケーススタディ	99
5.7	結 言	112
第6章	フローショップ生産システムの生産スケジューリング	113
6.1	緒 言	113
6.2	生産スケジューリング・モデル	115
6.2.1	対象とする生産システム	115
6.2.2	前提条件	117
6.2.3	生産スケジューリング問題	118
6.2.4	ネットワーク・グラフによる問題の記述	119
6.2.5	時間関係式の定式化	125
6.3	最適生産スケジュールの決定	130
6.3.1	分岐限界法による解法	130
6.3.2	分岐操作	135
6.3.3	限界操作	136
6.3.4	例題による最適化アルゴリズムの説明	138
6.4	数値計算例	144

6.5	結 言	148
第7章	ジョブショップ生産システムの生産スケジューリング	149
7.1	緒 言	149
7.2	生産スケジューリング・モデル	150
7.2.1	対象とする生産システム	150
7.2.2	前提条件	151
7.2.3	作業の定義	153
7.2.4	作業間の時間的關係	155
7.3	生産スケジューリング問題	159
7.3.1	問題の記述	160
7.3.2	問題の構造	161
7.4	生産スケジュールの決定	162
7.4.1	ディンジョンルール	162
7.4.2	生産スケジュールの決定手順	166
7.4.3	バッファ制約の取り扱い	168
7.5	数値計算例	170
7.5.1	生産スケジューリングの一例	170
7.5.2	ディンジョンルールの比較	173
7.6	結 言	178
第8章	結 論	181
	参 考 文 献	185
	付 録	205
	コンピュータ援用設備レイアウト計画システム	
	COFLAPのプログラム・リスト	
	謝 辞	223

第 1 章 緒 論

1.1 緒 言

生産システムは原材料，作業者，生産設備，運搬設備などのハードウェアと，生産技術，生産計画，生産管理などのソフトウェアが有機的に統合され，生産をとりまく多様な環境のもとで，要求される機能を発揮する製品を生み出す，複雑で高度に組織化された合目的な人工システムである。

JIS Z 8121(1980年)によれば，「システムとは，多数の構成要素が有機的な秩序を保ち，同一目的に向かって行動するもの」と定義されている。一般に，システムには特定の単一ないし複数の明確な目的が設定されるが，生産システムにおいては，所定の生産活動を効率的かつ経済的に遂行すること，すなわち，「生産性の向上」が究極の目的である。これはメカニカル・オートメーションを主体とする大量生産システムにおいて最大限に達成されてきた。しかしながら，今日のようなエネルギーをはじめとする各種資源の枯渇，労働環境の悪化，国際的な経済成長の低迷化，各種公害問題の発生など，諸々の社会情勢の変化を考えると，これまでの「大量生産・大量消費」は根本的に変革を余儀なくされている。しかも顧客ニーズの多様化・個性化，製品ライフサイクルの短命化といった生産環境の急激な変化に適応してゆくためには，個々の生産システムは必然的に「多品種少量生産」へ移行せざるをえない。多品種少量生産とは，ある生産期間に生産の対象となる製品の種類が多く，それぞれの生産量が少ないものであり，多くは注文生産形態であり，個別ないしロット生産方式をとる^{1.1)}。

ところで，このような多品種少量生産において，実際に素材を製品へ変換する生産活動の場である工場においては，次のような種々の問題点をかかえている^{1.2)~1.4)}。たとえば，

- (1) 生産の対象となる製品の品種が多く，また素材から製品までの製造手順が多様であるため，対象製品全体の生産に適した生産諸設備の空間的設備

配置（レイアウトともよばれる）を行うことが難しく、そのために工場内の物の流れが極めて複雑となり、運搬工数の増加を招いている。

- (2) 工場内の設備配置を計画する段階で、将来における製品生産量の変動を考慮していない場合が多いため、多様化製品の需要変動に対して柔軟に対処しえず、結果的に非能率的な設備配置のままで生産が行われている。
- (3) 多くの多品種少量生産工場で見うけられる機能別設備配置では、多様な生産工程をもつ対象製品群の基本的な物の流れのパターンに基づいた生産諸設備の合理的な配置を行うことができない。
- (4) 効果的な生産スケジューリング手法が確立されていないために、多種多様な生産対象製品ごとの綿密な生産実施計画の立案が難しく、その結果、生産リードタイムの延長を招いている。
- (5) 生産工程の多様性や複雑な物の流れのために、合理的な生産スケジューリングを行うことが困難であり、各種資源（生産設備、作業員、原材料、エネルギーなど）の有効利用がなされていない。
- (6) 従来の経験と勘による生産スケジューリングでは、生産工程の部分的な最適化は可能であるとしても、工場全体の最適化は極めて困難である。そのため、生産設備間の負荷バランスがとれず、低稼働率の生産設備が生じる反面、他方では多大な仕掛在庫をもつ結果となる。

などである。これら諸問題点のうち、(1)、(2)、(3)は主に生産システムの設計段階、とりわけ生産諸設備の空間的配置を決定する設備配置計画に関するものであり、他方(4)、(5)、(6)は生産システムの運用管理段階における生産実施計画の立案、すなわち生産スケジューリングに関するものである。

多品種少量生産においては、上記諸問題を早急に解決することはもちろん、生産システムの究極目的である生産性の向上にむかって不断の努力が払われなければならない。このような状況において、高い生産性と柔軟性に富んだ生産システムを実現するためには、生産システム自体の自動化、効率化を進める一方、生産システムの設計段階においては、その最適設計のための方法論を確立し、運用管理段階においては有効な生産管理技法、運用手法を開発することが

肝要である。これらの状況に鑑み、本研究では機械加工生産システムを対象に、その最適設計段階で極めて重要な位置を占める設備配置計画と運用管理段階の中心的課題の一つである生産スケジューリングに対して、数理計画法を援用したシステム工学的アプローチを試みるものである。

1.2 生産システム設計における設備配置問題

生産システム設計の初期段階における意思決定の多くは、主として生産システムのハードウェアに関するものである。とくに生産システムの主要な構成要素である生産諸設備の空間的配置を決定する設備配置計画は、生産活動の効率を左右し、「物の流れ」としての生産システム構造を限定する。したがって、生産の対象とする製品の種類と数量に応じて、それらが最も効率的かつ円滑に生産システム内を移動できるように、設備の空間的配置を計画することは極めて重要である。

生産諸設備の配置計画、いわゆるレイアウト計画 (layout planning) の目的は、すでに明らかなように、製品や部品の生産において物の流れが停滞せずに、円滑となるようにすることであり、これによって運搬工数と運搬距離の削減、良好な生産環境条件の設備、仕掛品の減少、生産期間の短縮、機械稼働率の向上などの効果が期待され、生産システムの究極目的である生産性の向上が図られることになる。

一般にレイアウトの形式は、生産する製品あるいは部品の種類とその数量の関係により、製品別レイアウト (product layout)、機能別レイアウト (functional layout)、グループ・レイアウト (group layout) の3形式に大別される^{1.5)}。製品別レイアウトは、基本的には生産設備を各製品別にその加工工程順序に従って配置するものであり、主として少品種多量生産の場合に採用される。したがって、物の流れは直線的になるので、ライン・レイアウト (line layout) ともよばれる。他方、多品種少量生産の場合は、各製品ごとに加工工程が異なるため、製品別レイアウトを採用することができずに、

生産設備を機種ごとに配置する機能別レイアウトとなる。これは通常、機械加工工場によく見られるもので、いわゆるジョブショップ・レイアウト(job-shop layout)である。グループ・レイアウトは上記両レイアウトの中間的な場合で、加工工程が類似した製品をグループにまとめて生産できるようなときに採用される。ここでは、類似製品群に対して生産設備もグループ化される場合が多く、グループ・レイアウトはセル・レイアウト(cell layout)とよばれることもある。

ところで、レイアウト計画の問題は、次のように広範囲にわたる^{1.6)}。

- (1) 工場立地計画：工場を新設ないし移転する場合、地理的にどこに敷地を求めるかという問題
- (2) 建屋配置計画：工場の建屋を敷地内のどの位置に定めるかという問題
- (3) 部門配置計画：工場の建屋内において機械加工部門、組立部門などの各生産部門をどのように配置するのかという問題
- (4) 設備配置計画：各部門内の設備、たとえば機械加工部門の工作機械を適切に配置する問題

本研究におけるレイアウト計画の問題は、上記の(3)および(4)をさしている。(3)において工場を一部門と考え、各部門を設備とみなせば、この部門配置計画は(4)の設備配置計画と同等の取り扱いができる。したがって、本研究では生産システムの設備配置計画を対象にして検討を進める。なお、上述したレイアウトの3形式との関連についてみると、製品別レイアウトが本論文の第2章ならびに第3章で、グループ・レイアウトが第4章で、そして機能別レイアウトが第5章で、それぞれ取り上げられている。

1960年を前後して、非常に多くの研究者や実務家がレイアウト計画に関する問題に取り組み、そして多くの著書や論文が発表された^{1.7)~1.11)}。その中で、1961年にMuther,R. 著の“Systematic Layout Planning(SLP)”^{1.8)}が出版され、国内外に話題をよんだ。これは上述したレイアウト計画の各段階を系統的に記述し、それぞれの段階で必要な作業内容のすべてが図表の形でまとめられ、その使い方も含めて、詳細にかつわかりやすく紹介されている。

Mutherが提唱した計画手順やアクティビティ（部門，設備などをさす）相互の関連性，近接性の強さを図表に表わしたアクティビティ相互関連図表（activity relationship chart），アクティビティ相互関連ダイヤグラム（activity relationship diagram），面積相互関連ダイヤグラム（space relationship diagram）および作成したレイアウト案についての定量的評価法などは，レイアウト計画のツールとして極めて有効な，そして価値ある設計手法として一般に認められ，その後，多くの人が活用し引用している。Mutherによって開発されたSLPは，このように実用的かつ系統的ではあるが，反面，レイアウト計画者の経験と勘が最終レイアウト案の良否に大きな影響を及ぼす。さらに，設備をどのように配置すべきであるかというレイアウト計画の基本的問題である設備配置計画に対しては，試行錯誤法によって，経験の積み重ねによる直観的判断が必要とされる。

そこで近年，レイアウト問題の数学モデルを設定し，その最適化問題をコンピュータの援用によって解くことが試みられるようになった。レイアウト問題の最適化にあたっては評価関数の設定が問題であり，評価関数としては次のようなものが考えられる^{1.12),1.13)}。

- (1) 「運搬量×運搬距離」の合計
- (2) 総運搬費用
- (3) 物の流れの方向に逆行する総運搬距離
- (4) 総生産費用（＝加工費用＋運搬費用＋仕掛費用）
- (5) 総設備レイアウト費用
- (6) 設備投資費用
- (7) フレキシビリティ

上記以外の評価関数が設定されることもあるが，一般に(1)ないし(2)の最適化が図られる場合が多い。なお，本論文では，第2章において(2)の最適化が，第3章では(1)の最適化が，第4章では(2)の最適化が，そして第5章では(5)の最適化が試みられている。

ところで，設備配置問題への数理的アプローチは，1950年代後半から大き

く発展してきた。数理計画法 (mathematical programming) の分野^{1.14)}においては、設備配置問題は 2 次の割当問題 (quadratic assignment problem) として定式化され、これまで種々の解法が与えられている^{1.14)~1.21)}。設備配置問題に対する 2 次割当問題の一般的な定式化は次のようである。

配置の対象となる設備数および配置候補場所数を n 、そして設備 i を場所 k に、設備 j を場所 l にそれぞれ配置したときに考慮する費用を c_{ikjl} とする。さらに、 x_{ik} ($i, k=1, 2, \dots, n$) を決定変数とする。ただし、 x_{ik} は 0-1 型の変数で、設備 i が場所 k に配置されるとき $x_{ik} = 1$ 、設備 i が場所 k に配置されないとき $x_{ik} = 0$ とする。このとき、設備配置問題の評価関数ならびに制約条件は次のように記述される。

$$\text{評価関数 : } C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n c_{ikjl} x_{ik} x_{jl} \rightarrow \text{最小化}$$

$$\text{制約条件 : } \sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$x_{ik} = 0 \text{ または } 1 \quad (i, k = 1, 2, \dots, n)$$

この種の問題は、一般に組合せ最適化問題 (combinatorial optimization problem) とよばれ^{1.14)}、その中でもとくに、この 2 次割当問題は難しい問題とされている。近年、設備配置問題や次節で述べる生産スケジューリング問題などの組合せ最適化問題を解く際の計算複雑性に関して、NP-完全 (Nondeterministic Polynomial - complete) の概念が提起されている^{1.21)}。すなわち、NP-完全に属する設備配置問題や生産スケジューリング問題に対しては、設備数あるいは部品数に関する多項式オーダーの計算時間で最適解を得る手法はほぼ存在しないであろうということである。そして、多くの設備配置問題と生産スケジューリング問題は NP-完全に属するとの証明がある。^{1.22)}

設備配置問題に対する解法は最適解法と近似解法に大別される^{1.5)}。最適解

法の中で代表的なものとして、分岐限界法(branch and bound method)^{1.14),1.21)}が上げられる。この分岐限界法は完全列挙法(complete enumeration method)に比べて、より大きな規模の問題を解くことができるが、それでも計算時間の面で解き得る問題規模に制限があり、現実問題に対処するのは容易でない。これに対して、近似解法は準最適解ではあるが、大規模問題を解くことができる。なお、分岐限界法については、Lawlerら^{1.23)}およびMitten^{1.24)}の論文に詳しい。また、本論文では、第2、第3、第5章の設備配置問題および第6章の生産スケジューリング問題に対する解法に分岐限界法を援用しているが、各問題ごとにそれぞれ工夫がなされている。他方、第4章の設備配置問題ならびに第7章の生産スケジューリング問題に対しては、それぞれ近似解法が採用されているが、その詳細は第4章および第7章で述べる。

小規模な設備配置計画においては、設備数が少ないため、前述したSLPの計画手順に従って設備配置案をレイアウト計画者が比較的容易に作成することができる。しかし、現実の問題は複雑で、対象とする設備配置問題の規模も一般に大規模化する。そうすると、取り扱うデータは多量となり、考慮しなければならない要因も多くなるので、このような複雑かつ大規模な問題をレイアウト計画者だけで取り扱うことは時間、労力とも極めて多大なものとなる。そこで、設備配置問題のデータ処理や各種数値計算にコンピュータを導入して、時間と労力の削減を図ることが行われるようになった。

1960年代半ばより、コンピュータの生産システムへの広範な利用とともに、コンピュータ関連技術のハードウェアおよびソフトウェアの両面における急速な進歩・発展は、レイアウト計画へのコンピュータ利用を大いに促進させた。コンピュータ援用レイアウト計画(computerized layout planning)^{1.25)}はその傾向に合致し、レイアウト計画者に迅速に適切なレイアウト案を提示することが可能となった。このような傾向は、今後ますます強まるであろう。現在までに開発されたレイアウト計画のためのコンピュータ・プログラムに関する調査・分析は、主にMoore^{1.26)~1.28)}、Carrie^{1.29)}、Nof^{1.30)}などにより行われている。なかでもMooreの報告によると、実際のレイアウト計画において用

いられているシステムはごくわずかであり、主に CORELAP(Computerized RElationship LAYout Planning)^{1.31)}ないし CRAFT(Computerized Relative Allocation of Facilities Technique)^{1.32)}が利用されているのみである。そして、現在も新しいシステムの開発が各地で続けられていると Moore は報告している。本論文でも、このような状況に鑑み、新しい自動レイアウト・システムの開発を行っている。詳細は第 5 章で述べている。

1.3 生産システム運用における生産スケジューリング問題

生産システムの究極目的である生産性の向上に関連して、生産システム内を移動するものとして、前節で述べた「物の流れ」のほかに「情報の流れ」がある。生産活動を管理する立場からみれば、生産システムは生産目的を遂行する手続きの連鎖としてとらえることができる。これは、いわゆる生産の管理システムであり、素材を製品へと変換する生産活動を計画・運用し、それに基づく生産結果に応じて、統制を行う一連の管理行為であり、情報の流れを形成する。生産システムの効率的運用管理における重要な意思決定の一つは、生産計画で意思決定された規定の期間に生産すべき製品の種類と数量を完成させるために、いつ、だれが、どの生産設備で、何を行うかを決定する時間的側面に関する実行可能な生産実施計画を作成し、設定された評価基準に対して、それを最適化していく生産スケジューリング (production scheduling) である。

一般に生産スケジューリング問題は、それが対象とする生産システムの構造に基づいて、次の 3 種類に大別される^{1.1)}。

- (1) 単一機械スケジューリング (one machine scheduling)
- (2) フローショップ・スケジューリング (flow - shop scheduling)
- (3) ジョブショップ・スケジューリング (job - shop scheduling)

単一機械スケジューリング問題は生産スケジューリングの最も基本的な問題であり、与えられた製品 (これをジョブとよぶ) を単一の生産設備で処理する場合である。これは単にジョブを処理する順序を決定すればよいので、順序付

け問題 (sequencing problem) とよばれる。装置工業などのように全生産設備を一つとみなしてよい場合や、機械加工工場内のトランスファ・ラインなどの場合がこれに該当する。ところで、現実の生産工場では、部品加工が前述の単一生産設備で完了することはまれであり、複数台の設備で処理される場合が普通である。 n 個のジョブが m 台の設備によって多段階で処理される順序がすべて同一である場合の生産スケジューリングがフローショップ・スケジューリングである。他方、ジョブごとにその処理順序が異なり、使用する設備も異なる場合がジョブショップ・スケジューリングである。通常の機械加工工場における生産スケジューリングの大部分は、このジョブショップ・スケジューリングである。

単一機械スケジューリングに関しては、すでに多くの研究がなされ、一応の成果が得られているようである。したがって、本研究では取り上げていない。多品種少量生産においても、フローショップ形式は存在するが、そこでの生産スケジューリングは前述したフローショップ・スケジューリングとは異なる場合が少なくない。フローショップ生産システムといえども同一ジョブのみを連続して生産する場合はまれであり、処理順序が類似している部品群を生産する場合も多い。本論文では、このような場合のフローショップ・スケジューリング問題を第 6 章で取り扱っている。他方、一般スケジューリング問題 (general scheduling problem)^{1,33)} とよばれている、より一般的なジョブショップ・スケジューリング問題は第 7 章で取り上げている。

生産スケジューリング問題とは、実行可能な有限の生産スケジュールの中から与えられた評価基準に対して最適なものを選ぶことであり、その選ぶ基準が生産スケジュール評価基準である。これには種々のものがあるが、最も多く用いられ、かつ実用的なものの一つは、すべてのジョブを完了するのに必要な総時間、すなわち総所要時間 (makespan) である。次に重要な評価基準としては、平均滞留時間 (mean flow time) があげられる。これは、すべてのジョブが完了するまでの各ジョブの滞留時間の平均値であり、工場内の平均仕掛量と密接な関係がある。このほかにも、納期を考慮した平均納期遅れ、最大納期

遅れ，納期ずれ，納期遅れジョブ数の最小化，工場に関する設備のアイドル時間の最小化ないし稼働率の最大化，そして費用を考慮した総生産費用の最小化などがある。このような評価基準の中からどれを選ぶかは，対象とする生産システムあるいは生産スケジューリング問題の特徴を考慮した上で決められる。しかし，ここで留意しなければならないことは，一つの評価基準による最適生産スケジュールが必ずしも他の基準による最適化に通じるとは限らないということである。本論文で取り扱う生産スケジューリング問題では，いずれも総所要時間最小化の評価基準を採用している。なお，第7章のジョブショップ・スケジューリング問題では，平均滞留時間および設備の稼働率に関する評価基準も考慮されている。

設定された評価基準に関して最適化を図るアプローチの方法として，次の4通りを上げることができる。

- (1) 組合せ法 (combinatorial method) またはスケジューリング定理による方法
- (2) 数理計画法 (mathematical programming)
- (3) 発見的方法 (heuristic method)
- (4) シミュレーション (simulation)

(1)の組合せ法は，いわゆる完全列挙法であり，必ず最適解が得られる。しかしながら，フローショップ・スケジューリング問題における実行可能スケジュールの総数は，ジョブ間の追抜禁止の条件のもとでも $n!$ 個あり，ジョブショップ・スケジューリングにおいては $(n!)^m$ 個にも達する。ジョブ数 n ，設備数 m のわずかな増加に対しても，実行可能スケジュールの総数が急激に増大し，現実的にすべての実行可能スケジュールを調べることは不可能である。他方，スケジューリング定理による解法は，極めて限定された生産スケジューリング問題にのみ適用可能であり，多くの場合，単一機械スケジューリングに限られている。生産スケジューリング問題は設備配置問題と同様，組合せ最適化問題であり，極めて複雑かつ解くのに困難であることはすでに前節で述べたとおりである。(2)に関する方法には整数計画法，線形計画法，動的計画法などがあり，具体的な解法手順としては分岐限界法が用いられる場合が多い。本論文

の第6章では、フローショップ・スケジューリング問題に対する分岐限界法の利用が試みられている。発見的方法とは、決定規則がわかっていない構造の問題に対して、人間の思考過程を模擬して、各試行段階で評価を加えながら最終結果を求める方法で、ときとして最適解を得る場合も少なくない。実際の生産スケジューリングにおいては、よく用いられる方法である。生産スケジューリングで最適解が得られるのは、上述のように、限られた場合にすぎない。実際の生産現場では数多くの種類・台数の生産設備があり、生産の対象となるジョブの種類も多く、かつ時間的に動的であり、処理時間も確率的に変動する。このような現実の工場について、生産スケジューリングの最適化を解析的行なうことは、不可能に近いといってよい。そこで試みられているのが、(4)の生産スケジューリング・シミュレーションないしジョブショップ・シミュレーションである。ここでは、ジョブを設備に負荷する順序を決定することが主たる目的となり、そのための方法が優先規則ないし差立規則 (dispatching rule) である。これまでに考案された差立規則は約100種類以上あるといわれ、Panwalker ら^{1.34)} および Blackstone ら^{1.35)} が詳細な報告を行っている。本論文第7章のジョブショップ・スケジューリングにおいては、差立規則の考え方を拡張したディシジョンルール (decision rule) を用いて実行可能な生産スケジュールを作成している。

生産スケジューリング問題に関しては、1954年に Johnson^{1.36)} が2台の生産設備でジョブを同じ順序で処理するフローショップ・スケジューリング問題に対して総所要時間を最小にする決定規則 (いわゆる Johnson rule) を発表して以来、多くの研究がなされ、かなりの数の論文が発表されてきた。それらは、Conway ら^{1.37)} , Baker^{1.38)} , 鍋島^{1.39)} などの著書に詳しく述べられている。

1.4 本研究の目的と論文構成

以上述べたように、本研究では主に機械加工生産システムを対象に、その最適設計段階で極めて重要な位置を占める設備配置計画と運用管理段階の中心的

課題の一つである生産スケジューリングに対して、数理計画法を援用したシステム工学的アプローチにより、生産システムの最適設計法ならびに運用管理手法の確立の足がかりを与えようとする試みがなされている。これら研究成果をまとめた本論文は 8 章より成り、それらは次の二つの主題に基づいている。

(1) 生産システム設計における設備配置計画に関するもの

(第 2, 3, 4, 5 章)

(2) 生産システム運用における生産スケジューリングに関するもの

(第 6, 7 章)

全般を通じ、多品種少量生産の機械加工工場によく見られる基本的な生産システム構造を対象に、設備配置計画ならびに生産スケジューリングに関するいくつかの新しい方法論が提案されている。本論文における各章の内容概要は、次のとおりである。

第 2 章では、設備が直線的に配置されるライン生産システムの設備配置計画について論じる。ここでは、まず設備間の運搬量が一意に与えられたもとで、総運搬費用を最小にする最適設備配置を決定するための最適化アルゴリズムを提案する。さらに、物の流れがきびしく制約されるライン生産システムにおいては、製品生産量の変動を考慮した上で設備配置を行うことが重要であることを論究し、期待総運搬費用と期待総運搬損失費用の新しい評価基準も提案する。そして、期待総運搬費用最小化の最適設備配置計画には提案した最適化アルゴリズムが適用可能であることを明らかにし、期待総運搬損失費用最小化の最適設備配置に対してはその決定手順を与える。

第 3 章では、代替設備シーケンスを考慮した循環形生産システムの設備配置計画について論述する。一般に生産の対象となる部品の各加工工程に対して、代替設備が存在する場合が少なくない。このような場合、各部品の代替設備シーケンスを考慮して設備配置を行うことが、経済的かつ円滑な物の流れを実現する上で極めて重要である。ここでは、設備シーケンスの代替性と運搬の方向を考慮した循環形生産システムの設備配置計画を 2 レベルの階層構造をもつ最適化問題と考え、各部品の最適設備シーケンスと設備の最適配置を同時に決定

するための最適化アルゴリズムを提案する。さらに数値計算例を通して、提案したアルゴリズムの妥当性と有効性をも検討する。

第4章では、グループ・テクノロジーの概念に基づくセル構造生産システムの設備配置計画について考究する。ここでは、セル配置と各セル内の設備配置の決定を統合したセル・レイアウト問題を提唱する。また、設備配置問題に対する近似解法として、広くその有効性が実証されてきた総入替法の欠点の一つを明らかにし、これを解決するための手法を新たに提案する。ついで、提案手法が従来法より優れていることも数値実験により検証する。さらに、提案したセル構造生産システムのセル・レイアウト問題とその設計法を具体的に説明するために、セル・レイアウトの一設計例を例示する。

第5章では、工場レイアウト設計における設備配置計画の自動化を図るためのコンピュータ援用設備レイアウト計画システムを開発する。本システムの開発にあたって、レイアウトの対象となる工場や設備の面積と形状を記述するための新しい方法を提案する。また、配置対象の全設備を配置可能な候補場所の多少に応じて、4種類の設備グループに分類する考え方を述べる。ついで、総設備レイアウト費用最小化の設備レイアウト問題を定式化し、最適設備レイアウトを得るための最適化アルゴリズムを提案する。さらに、提案アルゴリズムの効率化を図るために、分岐限界操作を容易に実施しうる方法についても検討する。そして、開発した本システムの工場レイアウト設計における設備配置計画への適用例を簡単なケーススタディで例示し、本システムへの必要な入力情報と得られる結果についても述べる。

第6章では、生産システムの運用管理の観点から、フローショップ生産システムの生産スケジューリングについて議論する。ここでは、バッファ容量に制限があり、部品ごとにその処理順序が異なり、さらに各部品の各工程には複数の候補機械が存在する柔軟性に富んだフローショップ生産スケジューリング問題に対して、総所要時間最小化の最適生産スケジューリング手法を確立する。提案手法によれば、総所要時間を最小にするような生産システムへの部品の投入順序、各部品の各工程における使用機械および各使用機械での部品の負荷順

序を同時に決定できることを明らかにする。

第7章では、第6章に引き続きジョブショップ生産システムの生産スケジューリングについて議論する。ここでは、まず機械、搬送機器、バッファおよび作業員で構成されたジョブショップ生産システムを対象に、極めて現実的な生産スケジューリング・モデルを構築する。ついで、総所要時間を評価基準として、各部品の加工スケジュール、各機械の稼働スケジュール、各搬送機器の搬送スケジュールおよび各作業員の作業スケジュールを同時に決定する生産スケジューリング問題を設定し、ディシジョンルールを用いた近似解法を提案する。その際、機械、搬送機器および作業員の各平均稼働率の向上を意図した新しいディシジョンルールも提案する。さらに数値計算を通じて、提案した生産スケジューリング手法とディシジョンルールの妥当性と有効性を検討する。

最後に第8章の結論では、本研究で得られた主な成果を要約する。

なお、以上各章の相互間の関係と本論文の構成をまとめると図1.1のとおりである。

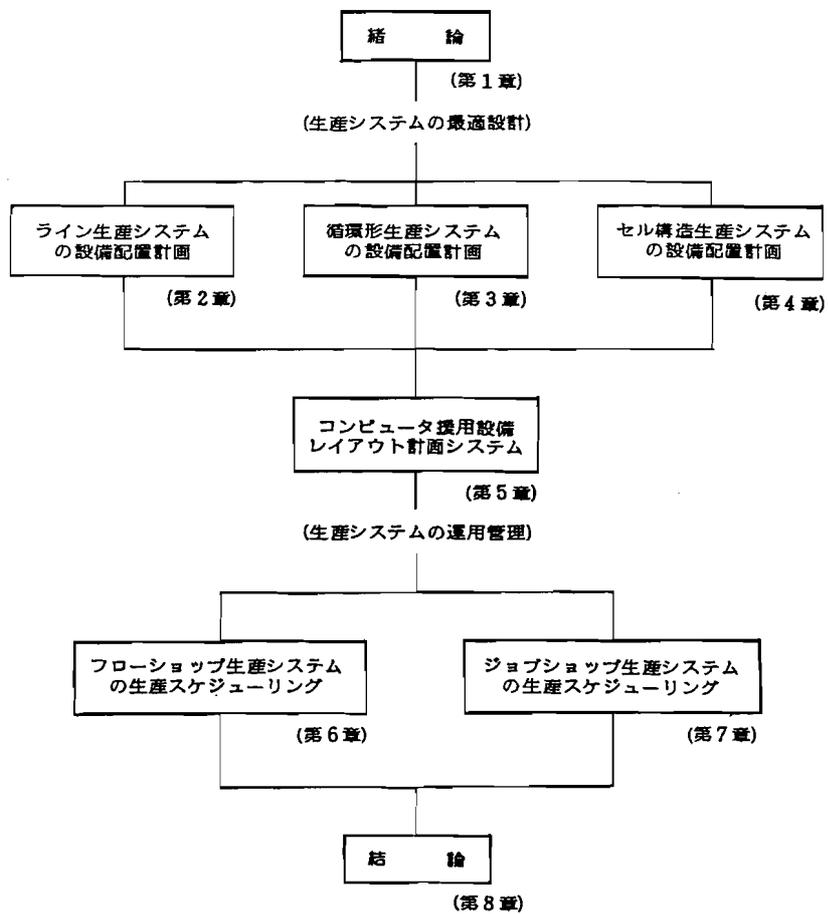


図1.1 本論文の構成

第2章 ライン生産システムの設備配置計画

2.1 緒 言

近年、多品種中少量生産においては生産性の向上とともに生産システムの柔軟性が強く要請されている^{2.1)}。レイアウト計画における柔軟性の問題は以前から議論され^{2.2)~2.7)}、レイアウトに影響を及ぼす要因として、Craigら^{2.8)}は次の4要因を挙げている。すなわち、製品種類の変化、製品生産量の変動、加工プロセスの変更および製品原材料の変更である。とりわけ製品生産量の変動に対して、計画されたレイアウトが柔軟であるためには、レイアウトの計画段階で将来に予測される生産量変動を陽に考慮することが必須である^{2.9)}。とくに物の流れがきびしく制約されるライン生産システムのレイアウト計画においては、製品生産量の変動に対するレイアウトの柔軟性は重要な課題である。しかしながら、設備を直線的に配置する直線形設備配置問題に対して、これまで数理的技法を用いた研究は数多くなされているが^{2.10)~2.16)}、製品生産量の変動を考慮した上で設備配置を行う方法論が開発されるまでには至っていない。

そこで本章では、設備が直線的に配置されるライン生産システムの設備配置計画において、将来の製品生産量の変動によって設備間の運搬量が増加する場合に、期待総運搬費用と期待総運搬損失費用が最小となる最適設備配置を決定する方法を提案する^{2.17)}。そのために、まず評価基準として期待総運搬費用と期待総運搬損失費用を定義する。次に設備間の運搬量がFrom-Toチャートの形で一意に与えられたもとで、総運搬費用を最小にする最適設備配置を求めるための分岐限界法に基づく最適化アルゴリズムを展開し、その妥当性と有効性を数値実験により検討する。そして提案した最適化アルゴリズムを用いて、製品生産量の変動を考慮した設備配置問題に対する解法の第1段階として、期待総運搬損失費用が最小となる設備配置案を求めるための決定手順を示す。最後に期待総運搬費用最小化と期待総運搬損失費用最小化のライン生産システムの設備配置計画の一例を示す。

2.2 設備配置モデル

対象とするライン生産システムの一例を図 2.1 に示す。この例では、6 台の生産設備が往復搬送可能な一本の搬送ラインで連結されている。生産すべき製品の原材料は搬入設備から生産システム内に投入され、与えられた加工の技術的順序に従って必要な生産設備で加工を受け、完成製品として搬出設備で生産システムから取り出される。なお、物（製品）の流れに関して、搬入設備側をラインの上流とし、搬入設備（上流）から搬出設備（下流）へ向う物の運搬を順行運搬とよび、その逆を逆行運搬とよぶこととする。

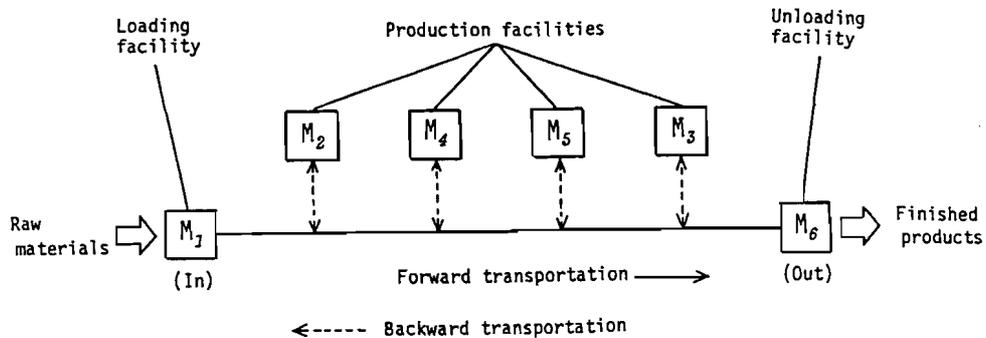


図 2.1 ライン生産システムの場合

2.2.1 前提条件

ライン生産システムにおいて、製品生産量の変動を考慮した設備配置の最適化に際し、次の前提条件をおく。

- (1) 配置の対象となる設備は n 台あり、設備 i を M_i で表す。ここに $i = 1, 2, \dots, n$ 。
- (2) n 台の設備は直線的な搬送経路に沿って配置される。ただし M_1 と M_n は、配置位置がそれぞれラインの最初（上流）と最後（下流）に前もって指定されている固定設備とする。
- (3) M_i には設備の大きさを考慮するための幅が与えられており、これを W_i で表す。
- (4) 順行運搬に対して単位量・単位距離当りの順行運搬費用が設定されており、これを c_f で表す。一方、逆行運搬に対しては逆行運搬費用 c_b が設定

されている。ここに $c_f \leq c_b$ とする。

- (5) 設備間の運搬距離は設備の重心間距離とし、 M_i, M_j 間の運搬距離を d_{ij} で表す。ここに $i, j = 1, 2, \dots, n$ で、 $d_{ij} = d_{ji}$ かつ $d_{ii} = 0$ 。
- (6) 将来に予測される製品生産量の変動によって設備間の運搬量が変化すると考え、設備間の運搬量を与える From-To チャートが K 通り設定されている。
- (7) k 番目の From-To チャートの形で与えられる設備間運搬量行列を F^k で表し、これが実現する生起確率を p^k とする。ここに $k = 1, 2, \dots, K$ で、 $0 \leq p^k \leq 1$ かつ $p^1 + p^2 + \dots + p^K = 1$ 。
- (8) 製品生産量の変動によって配置の対象となる設備の種類と台数は変化しないものとする。

上記の前提条件で構築されたライン生産システムの設備配置モデルによる設備配置の結果は、図 2.1 の場合を例にとれば、図 2.2 のように示される。

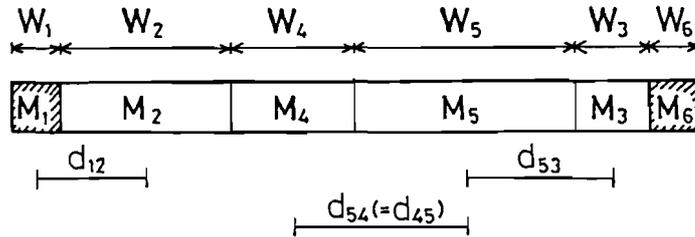


図2.2 設備配置結果の表示法

2.2.2 隣接設備間距離と設備間運搬距離

ある設備配置案において、 M_i と M_j が隣接して配置されたとき、 M_i, M_j 間の重心間距離を隣接設備間距離とよび、これを \bar{d}_{ij} で表す。この \bar{d}_{ij} は次式で与えられる。

$$\bar{d}_{ij} = (W_i + W_j) / 2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに $\bar{d}_{ij} = \bar{d}_{ji}$ かつ $\bar{d}_{ii} = 0$ 。

ところで、 M_1 と M_n はともに固定設備であり、前提条件(2)より、いかなる設備

配置案においても隣接して配置されることはないが，次に述べる設備間運搬距離を計算する際の便宜上，式(2.1)で求めておくことにする。

一方，ある設備配置案において，ラインの上流から第 u 番目に M_i が，そして第 v 番目 ($u < v$) に M_j がそれぞれ配置されたとき， M_i ， M_j 間の運搬距離 d_{ij} は次式で与えられる。

$$d_{ij} = d_{[u][v]} = \overline{d}_{ij} + \sum_{m=u+1}^{v-1} W_{[m]} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに記号 [] はライン上流からの設備の配置順序を示し，たとえば $M_{[4]}$ はライン上流から第 4 番目に配置された設備の設備番号が 2 であることを意味する。したがって，固定設備 M_1 ， M_n については，つねに $M_{[1]} = M_1, M_{[n]} = M_n$ である。

図 2.1 に示された各設備の大きさが表 2.1 のように与えられたときの隣接設備間距離と図 2.2 の設備配置案における設備間運搬距離は，それぞれ式(2.1)，式(2.2)より表 2.2 のようになる。

表2.1 設備の大きさ

設備 M_i	設備の大きさ W_i
M_1	1
M_2	4
M_3	2
M_4	3
M_5	6
M_6	1

表2.2 隣接設備間距離と設備間運搬距離

から \ / へ	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
M ₁	0	2.5	1.5	2.0	3.5	1.0
M ₂	2.5	0	3.0	3.5	5.0	2.5
M ₃	1.5	3.0	0	2.5	4.0	1.5
M ₄	2.0	3.5	2.5	0	4.5	2.0
M ₅	3.5	5.0	4.0	4.5	0	3.5
M ₆	1.0	2.5	1.5	2.0	3.5	0

から \ / へ	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
M ₁	0	2.5	14.5	6.0	10.5	16.0
M ₂	2.5	0	12.0	3.5	8.0	13.5
M ₃	14.5	12.0	0	8.5	4.0	1.5
M ₄	6.0	3.5	8.5	0	4.5	10.0
M ₅	10.5	8.0	4.0	4.5	0	5.5
M ₆	16.0	13.5	1.5	10.0	5.5	0

2.2.3 評価基準

M_i から M_j への運搬量を f_{ij} とすれば、 M_i が M_j よりラインの上流に配置された設備配置案の総運搬費用 C は次式で与えられる。

$$C = c_f \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \leftarrow j}} \sum f_{ij} \cdot d_{ij} + c_b \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \leftarrow j}} \sum f_{ji} \cdot d_{ji} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに式(2.3)の右辺第1項は順行運搬費用の総和、第2項は逆行運搬費用の総和であり、記号 $i \leftarrow j$ は M_i が M_j よりラインの上流に配置されていることを意味し、 N は設備の全体集合を表す。

式(2.3)において、 M_i から M_j への運搬量 f_{ij} が一意に与えられた場合には、総運搬費用 C を最小にする最適設備配置案を求めることができる。しかしながら、前提条件(6)、(7)で将来に予測される製品生産量の変動によって設備間の運搬量が変化する場合には、この運搬量の変化を陽に考慮した評価基準を採用する必要がある。本章では、以下に述べる期待総運搬費用と期待総運搬損失費用の2種類の評価基準を新たに設定する。

(1) 期待総運搬費用

製品生産量の変動による M_i から M_j への期待運搬量を \tilde{f}_{ij} とすれば、次式で与えられる。

$$\tilde{f}_{ij} = \sum_{k=1}^K p^k \cdot f_{ij}^k \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここに f_{ij}^k は k 番目の運搬量行列 F^k における M_i から M_j への運搬量を表す。

したがって、ある設備配置案における M_i 、 M_j 間の運搬距離は式 (2.2) で求められるので、ライン上流から第 u 番目に M_i が、そして第 v 番目 ($u < v$) に M_j が配置された設備配置案の期待総運搬費用 \tilde{C} は次式で与えられる。

$$\tilde{C} = c_f \sum_{u=1}^{n-1} \sum_{v=u+1}^n \tilde{f}_{[u][v]} \cdot d_{[u][v]} + c_b \sum_{u=1}^{n-1} \sum_{v=u+1}^n \tilde{f}_{[v][u]} \cdot d_{[v][u]} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

これは式 (2.3) において f_{ij} の代わりに \tilde{f}_{ij} としたときに対応する。

(2) 期待総運搬損失費用

ある運搬量行列 F^k に基づいて計画された 総運搬費用最小の最適設備配置案がほかの運搬量行列 $F^{k'}$ ($k' \neq k$) に対しても最適であるとは限らない。このような場合、 F^k に基づいて計画された最適設備配置案において運搬量行列が $F^{k'}$ に変化したときの総運搬費用と、はじめから $F^{k'}$ に基づいて総運搬費用が最小となるように計画した最適設備配置案の総運搬費用との差が小さい設備配置案が望ましい。そこで、将来に予測される製品生産量の変動によって生じる運搬費用の損失を考慮するために、運搬量行列 F^k に基づいて計画された設備配置案に対して、次式で与えられる期待総運搬損失費用 \tilde{L}_k を定義する。

$$\tilde{L}_k = \sum_{k'=1}^K p^{k'} \cdot |C(k' | k) - C(k' | k')| \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここに $C(k' | k')$ は $F^{k'}$ に基づいて計画した総運搬費用最小の最適設備配置案の総運搬費用であり、式 (2.3) において f_{ij} の代わりに $f_{ij}^{k'}$ を用いて求められる。一方、 $C(k' | k)$ は F^k に基づいて計画された総運搬費用最小の最適設備配置案において運搬量行列が $F^{k'}$ となったときの総運搬費用を表し、次式で計算される。

$$C(k' | k) = c_f \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \leftarrow j}} f_{ij}^{k'} \cdot d_{ij}^k + c_b \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \leftarrow j}} f_{ji}^{k'} \cdot d_{ji}^k \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここに d_{ij}^k は F^k に基づいて計画した総運搬費用最小の最適設備配置案における M_i から M_j への運搬距離である。

式(2.5)で与えられる期待総運搬費用と式(2.6)で与えられる期待総運搬損失費用を最小にする最適設備配置を求めることが本章の目的である。

2.3 総運搬費用最小化の設備配置

期待総運搬費用と期待総運搬損失費用が最小となる最適設備配置案を求める際、運搬量行列が一意に指定されたもとで式(2.3)の総運搬費用を最小にする設備配置を決定しなければならない。この種の設備配置問題は組合せ計画法の^{2.18)}中でも複雑な2次の割当問題として定式化され、種々の解法が提案されている。本章では、式(2.3)で与えられる総運搬費用を最小にする最適設備配置を決定するために、組合せ計画問題を解くための有効な一手法である分岐限界法を用いる。

2.3.1 分岐限界法による解法

ある運搬量行列 F^k が与えられたもとで式(2.3)の総運搬費用を最小にする最適設備配置を求める際の設備配置順序は、ラインの上流から順次、配置するものとする。いま、 M_1 がラインの最初に配置され、 M_n がラインの最後に配置された設備の配置状態を出発点とし、 M_1 の次に配置される設備が M_2, M_3, \dots, M_{n-1} のおのおのであるとして、 $(n-2)$ 個のノードの集合 $\{N_2\}$ に分岐する。これより次に分岐すべき一つのノード(最小の下界を与えるもので、複数個存在する場合には設備番号の小さいもの)を選び、第3番目に配置されるべき設備が残りの $(n-3)$ 台の未配置設備のどれであるかにより、 $(n-3)$ 個のノードの集合 $\{N_3\}$ に分岐する。

このようにして、第 r 番目 ($r = 2, 3, \dots, n-1$) までの設備が $M_1, M_{[2]}, \dots, M_{[r-1]}, M_{[r]}, \dots, M_n$ の順に配置された $(n-r)$ 個のノードの集合 $\{N_r\}$ の一つが、まだ分岐されていないすべてのノードのなかで最小の下界をもつならば、そのノードが選ばれて、第 r 番目までの設備配置が同じで、第 $(r+1)$

番目の設備が残りの $(n-r-1)$ 台の未配置設備のどれかにより、 $(n-r-1)$ 個のノードの集合 $\{N_{r+1}\}$ に分岐される。

2.3.2 下界の計算法

ラインの最初と最後にそれぞれ M_1 と M_n が、そして上流から第 r 番目までの位置に設備がすでに配置された状態のノード N_r における総運搬費用の下界は、次のような考え方に基づいて計算される。

いま、ノード N_r における設備の配置状態が図 2.3 で示されるとき、すでに配置が決定された配置済設備の集合を N_r で、まだ配置が決定されていない未配置設備の集合を \bar{N}_r で表す。式 (2.3) より、総運搬費用は順行運搬費用の総和と逆行運搬費用の総和であるから、ノード N_r における総運搬費用の下界も図 2.4 に示すような 10 種類の運搬費用項の和として計算する。

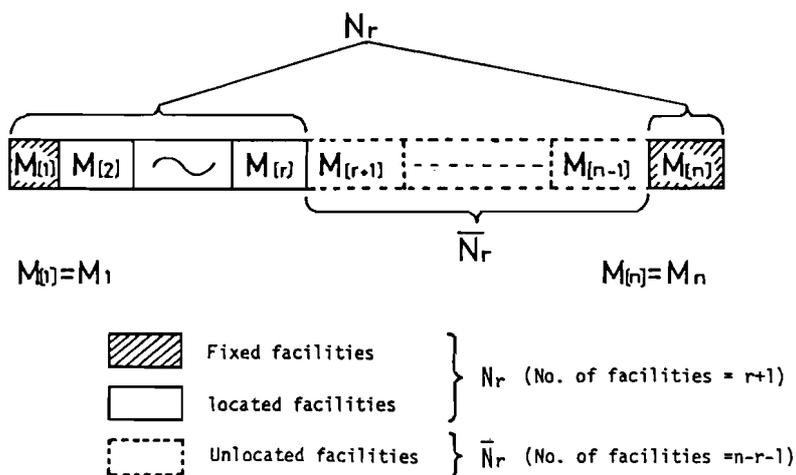


図2.3 ノード N_r における設備の配置状態

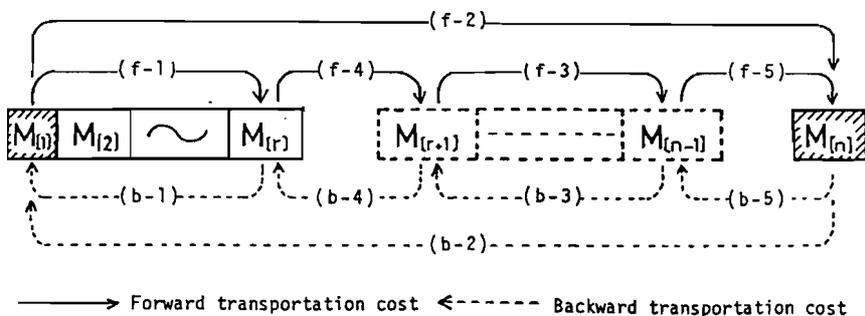


図2.4 総運搬費用の下界を構成する運搬費用項

まず、配置済設備群 (N_r) に関する運搬費用項 ($f-1$), ($f-2$), ($b-1$) および ($b-2$) の総和は次式で計算できる。

$$\begin{aligned}
 C^1 &= c_f \sum_{u=1}^{r-1} \sum_{v=u+1}^r f_{[u][v]} \cdot d_{[u][v]} + c_f \sum_{u=1}^r f_{[u][n]} \cdot d_{[u][n]} \\
 &\quad + c_b \sum_{u+1}^{r-1} \sum_{v=u+1}^r f_{[v][u]} \cdot d_{[v][u]} + c_b \sum_{u=1}^r f_{[n][u]} \cdot d_{[n][u]} \\
 &= \sum_{\substack{i, j \in N_r \\ i \leftarrow j}} (c_f \cdot f_{ij} + c_b \cdot f_{ji}) \cdot d_{ij} \quad \dots\dots\dots (2.8)
 \end{aligned}$$

次に未配置設備群 (\bar{N}_r) に関する運搬費用項 ($f-3$) および ($b-3$) の下界値は次のように求めることができる。各設備間の運搬量 f_{ij} ($i, j \in \bar{N}_r$) は既知であり、 $c_f \leq c_b$ である。設備間の運搬距離は、各設備が隣接して配置されるときに最小となるので、 $f_{ij} > f_{ji}$ ならば M_i を M_j の直前に配置することによって M_i , M_j 間の順行運搬費用と逆行運搬費用の和は最小となる。したがって、未配置設備間の運搬費用の総和に対する下界値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 C^2 &= c_f \sum_{i, j \in \bar{N}_r} \max\{f_{ij}, f_{ji}\} \cdot \bar{d}_{ij} + c_b \sum_{i, j \in \bar{N}_r} \min\{f_{ij}, f_{ji}\} \cdot \bar{d}_{ij} \\
 &= \sum_{i, j \in \bar{N}_r} \{c_f \cdot \max\{f_{ij}, f_{ji}\} + c_b \cdot \min\{f_{ij}, f_{ji}\}\} \cdot \bar{d}_{ij} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

配置済設備群 (N_r) と未配置設備群 (\bar{N}_r) の間の運搬費用に対する下界値を求めるにあたって、次のよく知られた定理^{2.19)}を用いる。

〔定理〕 二つの数列 $\{a_i\}$, $\{b_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) の対応する項の

積和 $\sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i$ は、一方を非減少順に並べ、他方を非増加順に並べたときに最小となる。

まず、図 2.4 の ($f-4$) に該当する順行運搬費用の下界値を求めるために、 $(n-r-1)$ 台の未配置設備を設備の大きさ w_j ($j \in \bar{N}_r$) の非減少順に仮配置する。このとき、ラインの上流から数えて第 $(r+y)$ 番目に M_j ($j \in \bar{N}_r$) が仮

配置されたとすると $M_{[r+y]}=M_j$ である。ただし y は $1 \leq y \leq n-r-1$ 。第 x 番目 ($1 \leq x \leq r$) にすでに配置された配置済設備 $M_{[x]}$ が $M_i (i \in N_r - \{n\})$ であるとき、 M_i から各 M_j への運搬距離は式 (2.2) より求められ、次の関係が成り立つ。

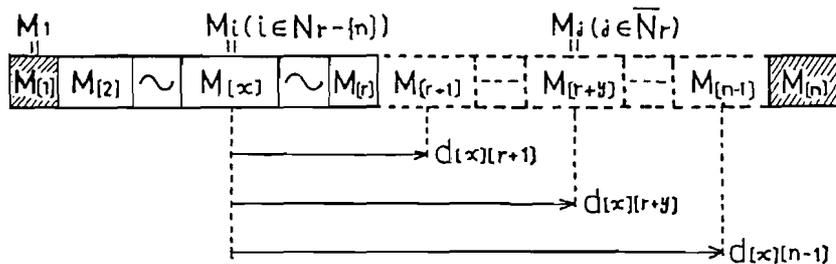
$$d_{[x][r+1]} < d_{[x][r+2]} < \dots < d_{[x][r+y]} < \dots < d_{[x][n-1]} \quad (2.10)$$

一方、ある配置済設備 $M_{[x]}=M_i$ から各未配置設備 M_j への運搬量を $f_{[x]j_y}(i)$ ($y=1, 2, \dots, n-r-1$) で表し、これらを非増加順に並べ、次の関係を得る。

$$f_{[x]j_1}(i) \geq f_{[x]j_2}(i) \geq \dots \geq f_{[x]j_y}(i) \geq \dots \geq f_{[x]j_{n-r-1}}(i) \quad (2.11)$$

上述の定理により、式 (2.10)、式 (2.11) の対応する項の積和は最小となるので、図 2.4 の (f-4) に該当する順行運搬費用に対する下界値は次式で与えられる (図 2.5 参照)。

$$c_f \sum_{x=1}^r \sum_{\substack{y=1 \\ i \in N_r - \{n\} \\ j_y(i) \in \bar{N}_r}}^{n-r-1} f_{[x]j_y}(i) \cdot d_{[x][r+y]} \quad \dots \quad (2.12)$$



$$W_{[r+1]} \leq W_{[r+2]} \leq \dots \leq W_{[r+y]} \leq \dots \leq W_{[n-1]} \quad (1 \leq y \leq n-r-1)$$

$$d_{[x][r+1]} < d_{[x][r+2]} < \dots < d_{[x][r+y]} < \dots < d_{[x][n-1]}$$

$$f_{[x]j_1}(i) \geq f_{[x]j_2}(i) \geq \dots \geq f_{[x]j_y}(i) \geq \dots \geq f_{[x]j_{n-r-1}}(i)$$

図 2.5 配置済設備から未配置設備への順行運搬費用

次に、図 2.4 の (b-4) に該当する逆行運搬費用の下界値を上述と同様の考え方に基づいて求める。 $d_{ij} = d_{ji}$ であるから、式 (2.10) よりただちに次の関係が成立する。

$$d_{[r+1][x]} < d_{[r+2][x]} < \dots < d_{[r+y][x]} < \dots < d_{[n-1][x]} \dots \dots \dots (2.13)$$

一方、配置済設備 $M_{[x]} = M_i$ への各未配置設備 M_j からの運搬量は $f_{j_y(i)[x]}$ であるから、これらを非増加順に並べ、次の関係を得る。

$$f_{j_1(i)[x]} \geq f_{j_2(i)[x]} \geq \dots \geq f_{j_y(i)[x]} \geq \dots \geq f_{j_{n-r-1}(i)[x]} \dots (2.14)$$

上述の定理により、式 (2.13)、式 (2.14) の対応する項の積和は最小となるので、図 2.4 の (b-4) に該当する逆行運搬費用に対する下界値は次式で与えられる。

$$c_b \sum_{x=1}^r \sum_{\substack{y=1 \\ i \in N_r - \{n\} \\ j_y(i) \in \bar{N}_r}}^{n-r-1} f_{j_y(i)[x]} \cdot d_{[r+y][x]} \dots \dots \dots (2.15)$$

したがって、 M_n を除いた配置済設備と未配置設備の間の運搬費用の総和に対する下界値は、式 (2.12)、式 (2.15) の和として次式で与えられる。

$$C^3 = \sum_{x=1}^r \sum_{\substack{y=1 \\ i \in N_r - \{n\} \\ j_y(i) \in \bar{N}_r}}^{n-r-1} \{ c_f \cdot f_{[x]j_y(i)} + c_b \cdot f_{j_y(i)[x]} \} \cdot d_{[x][r+y]} \dots (2.16)$$

最後に、未配置設備群 (\bar{N}_r) とラインの最後に配置済の固定設備 $M_{[n]} = M_n$ の間の運搬費用の下界値を求める。

まず、図 2.4 の (f-5) に該当する順行運搬費用の下界値を求めるために、 $(n-r-1)$ 台の未配置設備を設備の大きさ $W_{j'} (j' \in \bar{N}_r)$ の非増加順に仮配置する。このとき、ラインの上流から数えて第 $(r+z)$ 番目に $M_{j'} (j' \in \bar{N}_r)$ が

仮配置されたとすると、 $M_{[r+z]} = M_{j'}$ である。ただし z は $1 \leq z \leq n-r-1$ 。これら $(n-r-1)$ 台の各 $M_{j'}$ から $M_{[n]}$ への運搬距離は式 (2.2) より求められ、次の関係が成り立つ。

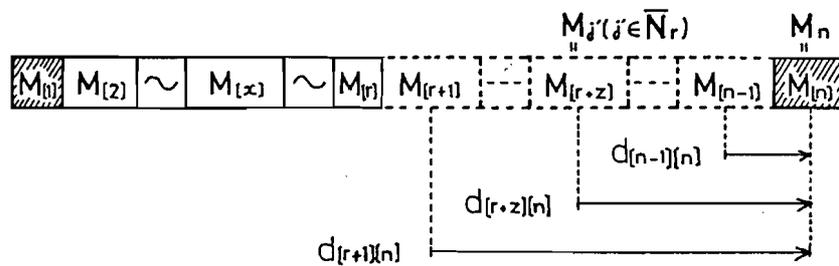
$$d_{[r+1][n]} > d_{[r+2][n]} > \dots > d_{[r+z][n]} > \dots > d_{[n-1][n]} \quad \dots \quad (2.17)$$

一方、各未配置設備 $M_{j'}$ から M_n への運搬量を $f_{j'_z n}$ ($z = 1, 2, \dots, n-r-1$) で表し、これらを非減少順に並べ、次の関係を得る。

$$f_{j'_1 n} \leq f_{j'_2 n} \leq \dots \leq f_{j'_z n} \leq \dots \leq f_{j'_{n-r-1} n} \quad \dots \quad (2.18)$$

上述の定理により、式 (2.17)、式 (2.18) の対応する項の積和は最小となるので、図 2.4 の (f-5) に該当する順行運搬費用に対する下界値は次式で与えられる (図 2.6 参照)。

$$c_f \sum_{\substack{z=1 \\ j'_z \in \bar{N}_r}}^{n-r-1} f_{j'_z n} \cdot d_{[r+z][n]} \quad \dots \quad (2.19)$$



$$W_{[r+1]} \geq W_{[r+2]} \geq \dots \geq W_{[r+z]} \geq \dots \geq W_{[n-1]} \quad (1 \leq z \leq n-r-1)$$

$$d_{[r+1][n]} > d_{[r+2][n]} > \dots > d_{[r+z][n]} > \dots > d_{[n-1][n]}$$

$$f_{j'_1 n} \leq f_{j'_2 n} \leq \dots \leq f_{j'_z n} \leq \dots \leq f_{j'_{n-r-1} n}$$

図 2.6 未配置設備から固定設備 M_n への順行運搬費用

次に、上述と同様の方法で図 2.4 の (b-5) に該当する逆行運搬費用に対する下界値を求めると、次のようになる。

$$c_b \sum_{\substack{z=1 \\ j'_z \in \bar{N}_r}}^{n-r-1} f_{nj'_z} \cdot d_{[n][r+z]} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

したがって、未配置設備群とラインの最後に配置された固定設備 M_n との間の運搬費用の総和に対する下界値は、式(2.19)、式(2.20)の和として次式で与えられる。

$$C^4 = \sum_{\substack{z=1 \\ j'_z \in \bar{N}_r}}^{n-r-1} \{c_f \cdot f_{j'_z n} + c_b \cdot f_{nj'_z}\} \cdot d_{[r+z][n]} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

以上の展開から、ノード N_r における総運搬費用 C に対する下界値 $LB(N_r)$ は次式で与えられる。

$$LB(N_r) = C^1 + C^2 + C^3 + C^4 \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

2.3.3 最適化アルゴリズム

以上の結果より、 n 台の設備を直線的に配置するライン生産システムにおいて設備間の運搬量行列が一意に与えられたとき、式(2.3)の総運搬費用 C を最小にする最適設備配置を決定する最適化アルゴリズムは次のようになる。

- [ステップ1] 分岐レベル $r = 1$ ，分岐対象ノード $N_r^\circ = \{M_1, M_n\}$ ，実行可能解の総運搬費用の値 $C^* = \infty$ に設定する。
- [ステップ2] 分岐対象ノード N_r° を分岐し， $r = r + 1$ とする。作成された $(n - r)$ 個の最新ノード N_r について下界値 $LB(N_r)$ を計算する。
- [ステップ3] $LB(N_r) \geq C^*$ なる最新ノードを削除する。その結果， $LB(N_r) < C^*$ なる未分岐のノードがなければステップ6へ行く。
- [ステップ4] 未分岐のノードのうちで最小の下界値 $LB(N_r)$ をもつノードを分岐対象ノード N_r° とする(このとき、同じ値をもつノードが複数個存在する場合には、分岐レベルの進んだノードを選ぶ。分岐レベル r が同じ場合には、設備番号 i の小さいノードを選ぶ)。この分岐対象ノード N_r° の下界値を $LB^*(N_r^\circ)$ とする。

[ステップ5] $r < n - 1$ ならばステップ2へもどる。 $r = n - 1$ ならば $C^* = LB^*(N_r^0)$ として、ステップ3へもどる。

[ステップ6] C^* を与えるノードに対応する設備配置が最適設備配置である。終了。

ところで、式(2.5)の期待総運搬費用 \tilde{C} を最小にする最適設備配置案を求める場合には、設備間の運搬量を式(2.4)で計算された期待運搬量からなる運搬量行列を用いて、上述の最適化アルゴリズムを適用すればよい。

2.3.4 数値実験

提案した最適化アルゴリズムの妥当性を簡単な例題を用いて検討する。設定した例題は固定設備2台を含む6設備問題であり、各設備の大きさは表2.1に示されたデータを用い、各設備間の運搬量を表2.3に示す。単位量・単位距離当りの順行運搬費用 c_f と逆行運搬費用 c_b はそれぞれ $c_f = 1.0$ 、 $c_b = 1.5$ である。

表2.3 設備間の運搬量(From-To チャート)

から \ へ	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
M_1	0	200	0	120	80	0
M_2	0	0	0	150	60	50
M_3	0	0	0	0	40	350
M_4	0	60	240	0	0	0
M_5	0	0	150	30	0	0
M_6	0	0	0	0	0	0

設備 M_1, M_6 はともに固定設備で、
 $M_{[1]} = M_1, M_{[6]} = M_6$ 。

ライン生産システムにおける総運搬費用最小化の設備配置に対する最適化アルゴリズムをコンピュータ・プログラム化し(FORTRAN IV)、設定した例題を実行した。図2.7は前述の最適化アルゴリズムに従う最適解探索過程を示

した分岐図であり、総ノード数 18、CPU 時間 1.14 秒で最適設備配置 ($M_1 - M_2 - M_4 - M_5 - M_3 - M_6$) ($C^* = 7662.5$) を得た。これによると、比較的少ないノード数で最適解が求まることがわかる。

次に最適化アルゴリズムの有効性を検討するために、さらに数多くの例題を実行した。アルゴリズムの有効性の検討に関して重要な事柄は、設備数と CPU 時間ないしはノード数の関係を調べることである。このため、固定設備 2 台を含む設備数 6、8、10、12 の例題をそれぞれ 10 題ずつ設定し、計算を実行した。その結果を表 2.4 に示す。設備数 12 の問題に対しては、CPU 時間の上限を 30 秒としたために、10 問題のいずれにおいても許容時間内で最適解を得ることができなかった。これらの結果から、提案した最適化アルゴリズムの適用可能な設備数の限界は、ノード数、CPU 時間の関係から 10 台程度 (固定設備 2 台を含む) と考えられる。

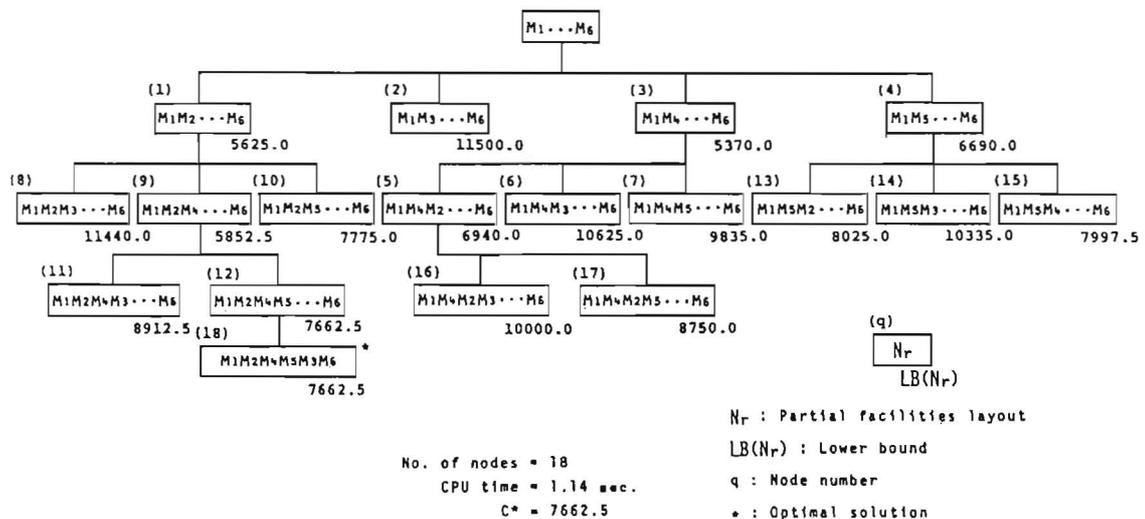


図 2.7 総運搬費用最小化の分岐図

表 2.4 ノード数と CPU 時間の値

問題 番号	** 設備数	問題数	ノード数			CPU 時間 s		
			最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
1	6	10	13	22	29	1.05	1.13	1.17
2	8	10	113	162	227	1.40	1.74	2.12
3	10	10	2305	3004	3763	15.02	20.37	25.90
4	12	10	*	*	*	*	*	*

* : 最適解に達せず (打切り CPU 時間 30 秒)

** : 各問題とも固定設備 2 台を含む

使用計算機 : 神戸大学計算センターの NEAC/ACOS システム 900

2.4 期待総運搬損失費用最小化の設備配置

前節では、分岐限界法を利用した最適化アルゴリズムを提案し、設備間の運搬量行列が一意に与えられたもとで総運搬費用および期待運搬費用を最小にする最適設備配置の決定法について述べた。本節では、将来に予測される製品生産量の変動によって設備間の運搬量に変化する場合に、式 (2.6) の期待総運搬損失費用が最小となる最適設備配置案を選定する方法を提案する。

2.4.1 決定手順

前提条件 (6), (7) より、将来に予測される製品生産量の変動を考慮して、設備間の運搬量行列が From - To チャートの形で K 通り設定されており、 k 番目の運搬量行列 F^k の生起確率は p^k である。このとき、製品生産量の変動を考慮したライン生産システムで、 n 台の設備を直線的に配置する場合に式 (2.6) の期待総運搬損失費用が最小となる最適設備配置案を選ぶ決定手順は次のようになる。なお、決定手順において運搬量行列 F^k に基づいて計画された総運搬費用最小の設備配置案を $LAYOUT(k)$ で表す。

[ステップ 1] $k = 1$ とおく。

[ステップ 2] 設備間の運搬量行列 F^k に基づいて、前節で提案した最適化アルゴリズムに従って総運搬費用 C を最小にする設備配置案 $LAYOUT(k)$ を求める。

- [ステップ3] $k' = 1$ とおく。
- [ステップ4] LAYOUT(k)において、運搬量行列が $F^{k'}$ となったときの総運搬費用 $C(k'|k)$ を式(2.7)で計算する。
- [ステップ5] 運搬量行列を $F^{k'}$ に固定し、これに基づいてLAYOUT(k')を求め、このときの総運搬費用 $C(k'|k')$ を計算する。そして、 $k' = k' + 1$ とする。
- [ステップ6] $k' < K$ ならばステップ4へもどる。
- [ステップ7] LAYOUT(k)に対して、式(2.6)で与えられる期待総運搬損失費用 \tilde{L}_k を計算する。そして、 $k = k + 1$ とする。
- [ステップ8] $k < K$ ならばステップ2へもどる。
- [ステップ9] $\min_k \tilde{L}_k$ なるLAYOUT(k)を選択する。これが期待総運搬損失費用を最小にする最適設備配置である。終了。

2.4.2 数値計算例

製品生産量の変動を考慮したライン生産システムの設備配置計画において、期待総運搬損失費用を最小にする最適設備配置案を決定する方法を例題により示す。設定した例題は固定設備2台を含む6設備問題であり、用いたデータを表2.5に示す。また、製品生産量の変動を考慮した結果として、表2.6に示すような4通りの運搬量行列が設定されている。

表 2.5 数値計算例のデータ

設備 M_i	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
設備の大きさ W_i	1	4	2	3	6	1

単位量・単位距離当りの運搬費用 : $C_f = 1$, $C_b = 2$

設備 M_1 、 M_6 はともに固定設備で、 $M_{[1]} = M_1$ 、 $M_{[6]} = M_6$ 。

提案した期待総運搬損失費用最小化の設備配置決定手順に従って得られた結果を表2.7にまとめて示す。これによると、各運搬量行列に基づいて計画され

表2.6 製品生産量の変動に対する運搬量行列

運搬量行列 F^1 ($p^1=0.35$)							運搬量行列 F^2 ($p^2=0.25$)						
から \diagdown へ	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	から \diagdown へ	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
M_1	0	60	150	30	40	0	M_1	0	20	30	200	50	0
M_2	0	0	70	0	210	0	M_2	0	0	250	0	50	0
M_3	0	0	0	60	190	90	M_3	0	0	0	20	80	220
M_4	0	180	60	0	0	150	M_4	0	230	20	0	0	30
M_5	0	40	60	300	0	40	M_5	0	50	20	60	0	50
M_6	0	0	0	0	0	0	M_6	0	0	0	0	0	0

運搬量行列 F^3 ($p^3=0.25$)							運搬量行列 F^4 ($p^4=0.15$)						
から \diagdown へ	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	から \diagdown へ	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
M_1	0	170	50	0	90	0	M_1	0	20	150	0	150	0
M_2	0	0	90	0	220	0	M_2	0	0	150	0	20	150
M_3	0	0	0	170	140	170	M_3	0	150	0	20	150	20
M_4	0	50	170	0	0	50	M_4	0	0	20	0	0	100
M_5	0	90	170	100	0	90	M_5	0	150	20	0	0	150
M_6	0	0	0	0	0	0	M_6	0	0	0	0	0	0

表2.7 数値計算例の結果

製品生産量の変動 k	運搬量行列 F^k	生起確率 p^k	最適設備配置案 LAYOUT(k)	総運搬費用			期待総運搬損失費用 \bar{L}_k
				k'	$C(k' k)$	$C(k' k')$	
1	F^1	0.35	$M_1 - M_2 - M_3 - M_5 - M_4 - M_6$	1	13780	13780	2724.75
				2	14535	8370	
				3	14950	10990	
				4	10570	9280	
2	F^2	0.25	$M_1 - M_4 - M_2 - M_3 - M_5 - M_6$	1	16660	13780	2454.75
				2	8370	8370	
				3	15355	10990	
				4	11650	9280	
3	F^3	0.25	$M_1 - M_2 - M_5 - M_3 - M_4 - M_6$	1	14020	13780	2283.75
				2	14595	8370	
				3	10990	10990	
				4	13570	9280	
4	F^4	0.15	$M_1 - M_5 - M_3 - M_2 - M_4 - M_6$	1	14060	13780	2481.75
				2	11865	8370	
				3	15910	10990	
				4	9280	9280	

た4種類の総運搬費用最小の設備配置案はすべて異なっている。結果として、運搬量行列 F^3 に基づいて計画した設備配置案が最小の期待総運搬損失費用を与える最適設備配置案であるとして選択される。これは、設備配置案 LAYOUT (3)が製品生産量の変動に対して計画された4つの代替案の中で最も柔軟性に富んだものであるといえる。なお、この例題において期待総運搬費用 \tilde{C} を最小にする最適設備配置案は $M_1 - M_2 - M_5 - M_3 - M_4 - M_6$ であり、期待総運搬損失費用最小の設備配置案と一致した。

2.5 結 言

本章では、設備を直線的に配置するライン生産システムの設備配置に対する一設計法を提案した。本章における研究成果を次に総括して述べる。

- (1) 設備間の運搬量が一意に与えられたもとで総運搬費用を最小にする最適設備配置を決定するために、分岐限界法に基づく最適化アルゴリズムを提案し、数値実験によって提案アルゴリズムの妥当性と有効性を検討した。その結果、提案アルゴリズムは適用可能な設備数に制限があるものの、比較的小規模な設備配置問題に対して有効であることが確認された。
- (2) 将来に予測される製品生産量の変動によって設備間の運搬量が変化するような現実的な生産環境において、設備配置案を評価するための評価基準として期待総運搬費用と期待総運搬損失費用を新たに提案した。そして、期待総運搬費用最小化の最適設備配置は既述した最適化アルゴリズムを適用することにより決定できることを述べ、期待総運搬損失費用最小化の最適設備配置に対してはその決定手順を与えた。
- (3) 設備配置計画における柔軟性の問題は、これまで定性的な議論が中心であったために、製品生産量の変動に対して最適な設備配置を行うための具体的な設計法と設備配置案の定量的な評価法が確立されるまでには至って

いなかった。本章で提案した設計法ならびに2種類の評価基準はライン生産システムの設備配置計画用ではあるが、上記した問題を解決するための有効な指針を与えるものであり、これは数値計算例をとおして明らかにされた。

第3章 循環形生産システムの設備配置計画

3.1 緒 言

本章では、複数台の生産設備が一方向に移動可能な循環形の閉ループ式搬送装置で連結された循環形生産システムの設備配置計画において、代替設備シーケンスと運搬の方向を考慮した設備配置問題を取り上げ、分岐限界法に基づく最適設計法を提案する。

第1章緒論の1.2節でも述べたように、設備配置計画は一般に2次の割当問題として定式化され、数理計画法の分野でこれまで数多くの研究がなされ、種々の解法が与えられている^{3.1)~3.7)}。しかしながら、これらのほとんどすべてが、設備間の運搬量が既知で、一意に与えられていることを前提としている。ところが、実際の機械加工工場では、加工プロセスの各段階において代替設備のあるのが普通であり、どの設備を使用するかによって設備間の運搬量は変化する。また、従来の設備配置問題の定式化においては、設備間の運搬距離は運搬の方向とは無関係に一意に設定しているものが多く、運搬方向を考慮した研究はわずかである^{3.8)~3.10)}。このことは、設計された設備配置案に基づいて実際に生産を実施する際に種々の問題が生じる要因となる。とくに生産設備を閉ループ状に搬送装置で連結した循環形生産システムでは、各部品の使用設備シーケンスの代替性や運搬の方向を考慮に入れた設備配置計画が、経済的かつ円滑な物の流れを実現する上で重要である。

そこで本章では、循環形生産システムの設備配置計画において、各部品の使用設備シーケンスの代替性と運搬の方向を考慮して、設備間の「運搬量×運搬距離」の合計を最小にする最適設備配置を決定すると同時に、各部品の最適設備シーケンスも決定する問題を取り扱う^{3.11)}。このとき、この設備配置問題を各部品の最適設備シーケンスを選択する部分と設備の最適配置を決定する部分からなる2レベルの階層構造で構成されていると考え、分岐限界法による解法を与える。そのために、まず設備間の運搬量が一意に与えられたもとの、評価尺

度である「運搬量×運搬距離」の合計を最小にする設備配置問題の解法に対する最適化手順を与える。次に、この最適化手順を用いて、最適設備シーケンスの選択と最適設備配置の決定を統合した最適化アルゴリズムを提案する。最後に、提案した問題と解法の妥当性を数値計算例により検討する。

3.2 設備配置モデル

3.2.1 対象とする生産システム

図 3.1 に設備配置計画の対象とする循環形生産システムの代表例を示す。ここでは、6 台の生産設備が一方向に移動可能な循環形のループ式搬送システムで連結されている。この種の循環形レイアウト構成の生産システムは、近年、機械部品加工の分野で実用化が進められているフレキシブル生産システムの基本タイプの一つと考えられている^{3.12),3.13)}。このような生産システムの設備配置計画の段階では、生産実施時における運搬の最小化を図るために、各部品の加工プロセスに対応して、それぞれの使用設備シーケンスの代替性と設備間の部品搬送に伴う運搬の方向を考慮することが重要である。

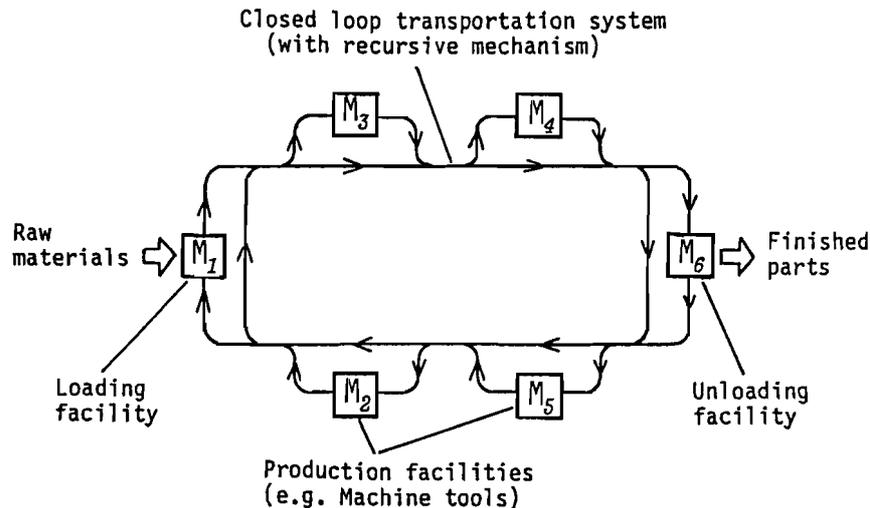
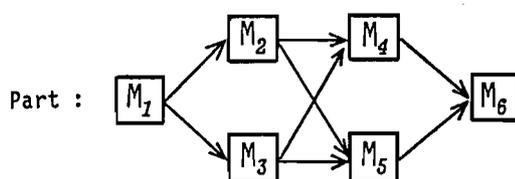


図 3.1 循環形生産システムの例

(1) 使用設備シーケンスの代替性

一般に図 3.1 のような生産システムは、マシニング・センタのような複数の加工機能を実現しうる工作機械（以後、生産設備とよぶ）で構成されている場合が多い。このとき、ある部品のある加工を実行できる生産設備には代替設備が考えられる。たとえば、図 3.2 (a) に示すように、ある部品が 4 工程で処理され、第 2、第 3 工程でそれぞれ代替設備が 2 台ずつ存在する場合には、その部品の代替設備シーケンスとしては同図 (b) のような 4 通りの可能な設備シーケンス

Process : 1 2 3 4



(a) 各工程での代替設備

- Sequence 1 : $M_1 - M_2 - M_4 - M_6$
- Sequence 2 : $M_1 - M_2 - M_5 - M_6$
- Sequence 3 : $M_1 - M_3 - M_4 - M_6$
- Sequence 4 : $M_1 - M_3 - M_5 - M_6$

(b) 可能な代替設備シーケンス

図 3.2 代替設備シーケンス

スが考えられる。ここで、どの設備シーケンスを選択するかは設備の配置状態や他の部品の設備シーケンスを考慮してなされなければならない。他方、設備シーケンスの選び方によっては設備間の運搬量が増加するため、設備の配置は大きく影響を受ける。したがって、このような場合には、設備間の運搬量を一意に固定せずに設備シーケンスの選択により変化するものとして、使用設備シーケンスの代替性とその選択の可能性を考慮した設備配置を行わなければならない。

(2) 運搬の方向

図 3.1 のような循環形のループ式搬送システムを採用している生産システムでは、運搬方向が一方向であるために、設備 (i) から設備 (j) への運搬距離は設備 (j) から設備 (i) へのそれとは異なる場合が普通である。たとえば、図 3.1 において、設備 M_3 の配置場所 (k) から設備 M_4 の配置場所 (l) への運搬距離 (d_{kl}) と設備 M_4 から設備 M_3 への運搬距離 (d_{lk}) とは明らかに異なる（ただし、 d_{kl} が

ループ全長の $1/2$ であるとき、そのときに限って $d_{k\ell} = d_{\ell k}$ となる)。このような場合、設備 M_3 から設備 M_4 への運搬量 (f_{34}) が逆の運搬量 (f_{43}) より多ければ (つまり、 $f_{34} > f_{43}$)、図 3.1 に示すような配置が適切であり、逆に $f_{34} < f_{43}$ ならば、設備 M_3 と設備 M_4 の位置を交換した配置が適切であろう。このように、一般に $d_{k\ell} = d_{\ell k}$ が仮定できない場合には、運搬の方向を考慮することは必要であり、余分な運搬をできる限り取り除く観点からも重要である。

3.2.2 前提条件

本章で取り扱う循環形生産システムの設備配置モデルの前提条件は次のとおりである。

- (1) 配置の対象とする設備は n 台とし、設備を M_i で表す。ここに $i = 1, 2, \dots, n$ 。
- (2) 設備の配置される候補場所は n 箇所あり、閉ループ上に位置している。候補場所を S_k で表す。ここに $k = 1, 2, \dots, n$ 。
- (3) 運搬方向は一方向で、場所 S_1 を基準に時計方向に循環する。場所番号 k は移動方向に沿って順次、番号付けがなされている。
- (4) 場所 S_k から場所 S_ℓ への距離は移動方向に沿って測られ、その距離は前もって与えられており、 $d_{k\ell}$ で表す。ただし $d_{kk} = 0$ 。また閉ループの全長は既知であり、これを d で表す。
- (5) 加工対象部品は m 種類あり、部品を P_g で表す。ここに $g = 1, 2, \dots, m$ 。
- (6) 部品 P_g には H_g 通りの可能な使用設備シーケンスが設定されており、第 h 番目の設備シーケンスを R_{gh} で表す。ここに $h = 1, 2, \dots, H_g$ 。
- (7) 部品 P_g は H_g 通りの使用設備シーケンスの中から一つの設備シーケンス R_{gh} を選択する。このとき、部品 P_g に関して設備 M_i から設備 M_j への運搬量を f_{ij}^{gh} で表す。

上記の前提のほか、配置すべき場所があらかじめ指定された設備 (固定設備) はなく、また部品のロット分割は行わないものとする。

3.2.3 数学モデル

代替設備シーケンスを考慮した循環形生産システムの設備配置問題を 3.2.2 節の前提条件に基づいて記述すれば、次のようになる。

n 台の設備があり、その各々が n 箇所の候補場所の一つに、一意に配置されるものとする。このとき、

f_{ij} : 設備 M_i から設備 M_j への運搬量 ($i, j = 1, 2, \dots, n$)

$d_{k\ell}$: 場所 S_k から場所 S_ℓ への運搬距離 ($k, \ell = 1, 2, \dots, n$)

とすると、ここでの設備配置問題は次式で与えられる評価尺度：設備間の「運搬量 × 運搬距離」の合計^{3.14)~3.16)}

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

を最小にする配置

$$k = \rho(i), \ell = \rho(j) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

および設備シーケンス

$$\delta_{gh} = \left\{ \begin{array}{l} 1 : \text{部品 } P_g \text{ が設備シーケンス } R_{gh} \text{ を選択する} \\ 0 : \text{部品 } P_g \text{ が設備シーケンス } R_{gh} \text{ を選択しない} \end{array} \right\} \dots\dots (3.3)$$

を決定する問題である。

ただし、

$$f_{ij} = \sum_{g=1}^m \sum_{h=1}^{H_g} f_{ij}^{gh} \cdot \delta_{gh}, \quad \sum_{h=1}^{H_g} \delta_{gh} = 1 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$d_{k\ell} + d_{\ell k} = d, \quad d_{kk} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

であり、記号 ρ は $y = \rho(x)$ のとき、設備 x を場所 y に配置することを表す。

ところで、前提条件(2), (3)で場所 S_k は閉ループ上に場所 S_1 を基準に移動方向に沿って順次、 S_2, S_3, \dots, S_n と位置しているとしたので、場所 S_k から隣接場所 S_{k+1} への距離を $d_{k,k+1}$ とすると、ループ全長が d であるから、図 3.3

に示すように場所 S_{k+1} から場所 S_k への距離は $d_{k+1,k} = d - d_{k,k+1}$ となる。ただし S_{n+1} は存在しないので、 $S_{n+1} = S_1$ とする。さらに、すべての距離は単位距離 d_u の整数倍で与えられるものとする。

次節以下では、式 (3.1)~式 (3.5) で定式化された設備配置問題に対する解法を与える。

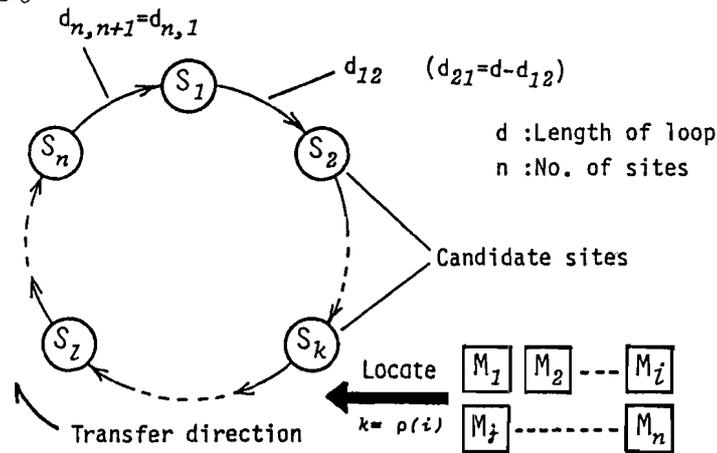


図3-3 運搬方向と候補場所間の距離

3.3 分岐限界法による解法

式 (3.1) で与えられる評価尺度を最小にする各部品の最適設備シーケンスと最適設備配置を同時に決定するために、本章でも分岐限界法を用いる。

3.2 節で設定した設備配置問題では、各部品の設備シーケンスを選択する際の組合せ数は $H_1 \times H_2 \times \dots \times H_m = \prod_{g=1}^m H_g$ であり、 n 台の設備を n 箇所の場所に配置する方法の組合せ数は $n \cdot (n-1) \dots 2 \cdot 1 = n!$ である。したがって、この問題の実行可能解は $n! \times \prod_{g=1}^m H_g$ 個存在することになり、わずかな設備数と代替設備シーケンス数でも莫大な組合せ数となるので、実行可能解のすべてを探索し、最適解を求めることは困難である。そこで、この問題を図 3.4 に示すような 2 レベルの階層構造をもつ最適化問題と考え、それぞれのレベルで分岐限界法を利用する。

ところで、この問題では図 3.4 に示すように各部品の使用設備シーケンスと設備配置を同時に決定するので、分岐限界法における分岐操作としては設備シ

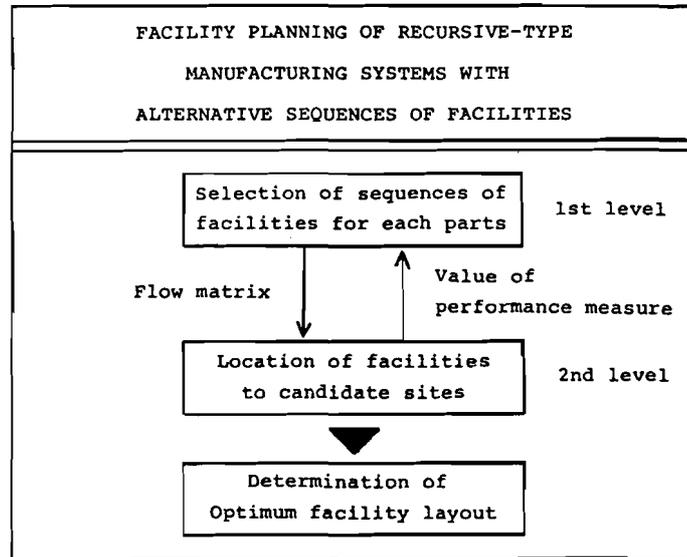


図3.4 2レベル階層構造の設備配置問題

ーケンスの選択のための分岐と設備配置の決定のための分岐の両方を行わなくてはならない。ここで、各部品の使用設備シーケンスの選択に対応するノードをシーケンス・ノードとよび、設備配置の決定に対応するノードをロケーション・ノードとよぶ。分岐操作の基本的な考え方は次のようである。まず、ある部品の代替設備シーケンスを分岐して新たなシーケンス・ノードを作り、次いでそのノードから設備配置に対応する設備を分岐してロケーション・ノードを作る。そして、いくつかの部品について選択された当該設備シーケンスの組合せに基づく最適設備配置が終了したら、そこからまだ選択されていない残りの部品の代替設備シーケンスを分岐して、その後、新たにロケーション・ノードを作る操作を行う。このように設備シーケンス選択のための分岐と設備配置決定のための分岐を交互に行うことによって分岐操作が進められる。

いま、すでに u 種類の部品について、それぞれの設備シーケンスの選択がなされており、さらに選択された設備シーケンスの組合せに対して v 台の設備配置が決定されているものとする。このとき、代替設備シーケンスないし部品の集合 (N_u と \bar{N}_u) と設備の集合 (N_{uv} と \bar{N}_{uv}) を次のように定める。

N_u : 設備シーケンスの分岐段階(シーケンス・レベルとよぶ) u のノード, またはそのノードで選択された設備シーケンスないし部品の集合

\bar{N}_u : シーケンス・ノード N_u でまだ選択されていない設備シーケンスないし部品の集合

N_{uv} : シーケンス・ノード N_u のもとで, 設備の分岐段階(ロケーション・レベルとよぶ) v のノード, またはそのノードで配置が決定された設備の集合

\bar{N}_{uv} : ロケーション・ノード N_{uv} でまだ配置が決定されていない設備の集合

以下では, 各レベルにおける分岐限界操作の基本的な考え方を述べる。

3.3.1 代替設備シーケンスの選択

第1レベルでの分岐・限界操作は次のように行う。

(1) 分岐操作

部品 P_g の部品番号 g を生産量の非増加順に番号付けを行う。いま, すべての可能な代替設備シーケンスの組合せ集合 ϕ を出発点として, まず部品 P_1 の代替設備シーケンス $R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1H_1}$ のそれぞれに対応して, H_1 個のシーケンス・ノードの集合 $\{H_1\}$ に分岐する。この中から次に分岐すべき一つのシーケンス・ノード(最小の下界を与えるもので, 同じ値のノードが複数個存在する場合には値 h の小さいもの)を選び, 部品 P_2 の代替設備シーケンス R_{2h} ($h = 1, 2, \dots, H_2$) のうちでどの設備シーケンスを選択するかにより, H_2 個のシーケンス・ノードの集合 $\{N_2\}$ に分岐する。このようにして, シーケンス・レベル u ($u = 1, 2, \dots, m$) で分岐して得た H_u 個のシーケンス・ノードの集合 $\{N_u\}$ の一つがまだ完全に分岐されていないすべてのシーケンス・ノードのなかで最小の下界をもつならば, そのノードが選ばれる。そして, 部品 P_{u+1} の代替設備シーケンス $R_{u+1,h}$ ($h = 1, 2, \dots, H_{u+1}$) のうちでどの設備シーケンスを選択するかにより, H_{u+1} 個のシーケンス・ノード

の集合 $\{N_{u+1}\}$ に分岐される。

(2) 限界操作

代替設備シーケンスの分岐を行う際のノード選択のための下界値として、第 2 レベルで決定される最適設備配置に対して計算された評価尺度の値を用いる。

ところで、第 2 レベルにおいて設備の最適配置を決定するにあたっては、式 (3.1) における設備間運搬量 f_{ij} の各値が一意に求められていなければならない。しかし、第 1 レベルのシーケンス・レベル u では部品 P_1, P_2, \dots, P_u についての設備シーケンスの組合せの選択しかなされておらず、残りの部品 $P_{u+1}, P_{u+2}, \dots, P_m$ については、それぞれがどの設備シーケンスを選択するかはわかっていない。したがって、式 (3.4) ではすべての設備間運搬量 f_{ij} の値を求めることができない。そこで、式 (3.4) の代わりに次式を用いて f_{ij} 値を計算する。

$$f_{ij} = \sum_{g \in N_u} \sum_{h=1}^{H_g} f_{ij}^{gh} \cdot \delta_{gh} + \sum_{g \in \bar{N}_u} f_{ij}^g \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ただし、

$$\sum_{h=1}^{H_g} \delta_{gh} = 1 \quad (g \in N_u) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$$f_{ij}^g = \min_h f_{ij}^{gh} \quad (g \in \bar{N}_u) \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

ここで、式 (3.6) の意味は次のとおりである。すでに選択が決定された各部品の設備シーケンスについては、それによって生じる設備 M_i から設備 M_j への運搬量の総和を式 (3.6) の右辺第 1 項で計算する。他方、まだ選択のなされていない部品については、どの代替設備シーケンスを選択するかはわかっていないが、いずれの設備シーケンスを選択したとしても、かならず設備 M_i から設備 M_j へ運搬される量があるならば、そのうちの最小の量を式 (3.8) で陽に考慮し、式 (3.6) の右辺第 2 項でそれらの総和を計算する。なお、式 (3.8) では、

代替設備シーケンスの選択レベルにおける分岐限界過程で分岐レベルの深さに対する下界の単調非減少性を保証するために、まだ設備シーケンスの選択がなされていない各部品についてはそれぞれの代替設備シーケンスの中で設備間運搬量の最小値をとっている。

3.3.2 最適設備配置の決定

式(3.1)におけるすべての f_{ij} 値が式(3.6)で求められた状態で、 n 台の設備を n 箇所の候補場所に設置する問題を考える。ここでも分岐限界法を利用する。第2レベルでの分岐・限界操作は次のように行う。

(1) 分岐操作

第1レベルで作成されたシーケンス・レベル u での H_u 個のシーケンス・ノードのうちの一つについて設備配置決定のための分岐操作を考える。ここで、設備の場所への配置方法は場所番号の小さい順に順次、配置するものとする。このとき、設備 M_1 を場所 S_1 に固定すると、まず場所 S_2 に配置される可能性をもつ M_2, M_3, \dots, M_n の $(n-1)$ 台の設備に対応して、 $(n-1)$ 個のロケーション・ノードの集合 $\{N_{n1}\}$ に分岐する。この中から次に分岐すべき一つのロケーション・ノード(最小の下界を与えるもので、同じ値のノードが複数個存在する場合には設備番号 i の小さいもの)を選び、場所 S_3 に配置されるべき設備が残りの $(n-2)$ 台の設備のどれかにより、 $(n-2)$ 個のロケーション・ノードの集合 $\{N_{n2}\}$ に分岐する。このようにして、ロケーション・ノード v ($v=1, 2, \dots, n-1$)で分岐して得た $(n-v)$ 個のロケーション・ノードの集合 $\{N_{uv}\}$ の一つがまだ分岐されていないすべてのロケーション・ノードのなかで最小の下界をもつならば、そのノードが選ばれる。そして、場所 S_{v+1} までの設備配置が同じで、場所 S_{v+2} に配置される設備が残りの $(n-v-1)$ 台の設備のどれかによって $(n-v-1)$ 個のロケーション・ノードの集合 $\{N_{u,v+1}\}$ に分岐される。

以下、同様の操作をすべての設備が配置されるまで繰り返し、最適設備配置を決定する。その後、残りの (H_u-1) 個のシーケンス・ノードに対しても同様

の分岐操作を順次、行う。

(2) 限界操作

第 2 レベルの目的は、部品の設備シーケンスのある組合せにより設備間の運搬量が式(3.6)で与えられたもとで、 n 台の設備を n 箇所の候補場所に式(3.1)の評価尺度が最小となるように最適配置を決定することである。以下では、この最適設備配置問題を独立した問題と考え、その解法を与える。記述の便宜上、下界の計算式には次の記号を使用する。

Q_r : 分岐レベル r ($= 1, 2, \dots, n-1$) のノード, またはそのノードで配置が決定された設備の集合で, N_{uv} に対応する。

\bar{Q}_r : ノード Q_r において, まだ配置が決定されていない設備の集合で, \bar{N}_{uv} に対応する。

設備 M_1 は場所 S_1 にすでに配置されているとしたから, 設備 M_1 を含めて $(r+1)$ 台の設備の配置が決定されたロケーション・ノード Q_r に対して下界 $LB(Q_r)$ を次のように設定する。なお, 設備 M_i から設備 M_j への「運搬量 \times 運搬距離」の値を $F \cdot D$ 値とよぶこととする。

$$\begin{aligned}
 LB(Q_r) = & \sum_{i,j \in Q_r} f_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} + \sum_{\substack{i,j \in Q_r \\ i \neq j}} f_{ij} \cdot d_u \\
 & + \sum_{i \in Q_r} \sum_{j \in \bar{Q}_r} f_{ij} \cdot d_{\rho(i), r+2} + \sum_{i \in Q_r} \sum_{j \in \bar{Q}_r} f_{ji} \cdot d_{n, \rho(i)} \\
 & \dots\dots\dots (3.9)
 \end{aligned}$$

これは全設備をすでに配置が決定された設備群 (Q_r) とまだ配置が決定されていない設備群 (\bar{Q}_r) とに分けて個別に $F \cdot D$ 値の和を計算している。式(3.9)の右辺第 1 項は, Q_r に属するすべての設備ペア間の $F \cdot D$ 値の和を表す。第 2 項は, 運搬距離が単位距離 d_u であるとして計算された \bar{Q}_r に属するすべての設備ペア間の $F \cdot D$ 値の和に対する下界値である。第 3, 第 4 項は, 次の配置候補場所 S_{r+2} と最後の場所 S_n に配置される残りの各設備に着目したものである。第 3 項は, Q_r に属するすべての設備から, 残りの \bar{Q}_r に属するすべ

ての設備が場所 S_{r+2} に配置されたとして計算された $F \cdot D$ 値の和に対する下界値であり、第 4 項は、 \bar{Q}_r に属するすべての設備が場所 S_n に配置されたとして計算された \bar{Q}_r に属するすべての設備から Q_r に属するすべての設備への $F \cdot D$ 値の和に対する下界値である。

(3) 設備配置決定の最適化手順

ここでは式 (3.6) で設備間の運搬量が計算されたもとで、最適設備配置のみを決定する手順を分岐限界法に基づいて与える。

〔手順 1〕 ロケーション・レベル $r = 0$ ， Q_r の中で分岐の対象となるロケーション・ノード $Q_r^i = \{ M_1 \}$ ，実行可能解の評価尺度の最小値 $L^* = \infty$ に設定する。

〔手順 2〕 分岐対象となるロケーション・ノード Q_r^i を分岐して、 $r = r + 1$ とする。作成された $(n - r)$ 個の最新のロケーション・ノード Q_r について下界値 $LB(Q_r)$ を計算する。

〔手順 3〕 $LB(Q_r) \geq L^*$ なるロケーション・ノードを削除する。その結果、 $LB(Q_r) < L^*$ なるロケーション・ノードがなければ、手順 6 へ行く。

〔手順 4〕 未分岐のロケーション・ノードのうちで最小の下界値 $LB(Q_r)$ をもつノードを分岐対象となるロケーション・ノード Q_r^i に選ぶ（このとき、同じ値のノードが複数個存在する場合には、値 r の大きいものを選ぶ。値 r が同じ場合は設備番号 i の小さいものを選ぶ）。この分岐対象となるロケーション・ノード Q_r^i の下界値を $LB^*(Q_r)$ とする。

〔手順 5〕 $r < n - 1$ かつ $LB^*(Q_r) < L^*$ ならば手順 2 へもどる。 $r = n - 1$ ならば $L^* = LB^*(Q_r)$ として、手順 3 へもどる。

〔手順 6〕 L^* を与えるロケーション・ノードの設備配置が最適設備配置である。終了。

3.4 最適化アルゴリズム

前節で述べた分岐限界法による解法の基本的な考え方に基づいて、式 (3.1)

で与えられる評価尺度を最小にする各部品の最適設備シーケンスと設備の最適配置を同時に決定する最適化アルゴリズムは次のようになる。ただし、本アルゴリズムの途中で、前節で提案した設備配置の最適化手順を使用する場合には、ロケーション・レベル r を v ，ロケーション・ノード Q_r を N_{uv} ，下界値 $LB(Q_r)$ を $LB(N_{uv})$ とおきかえる。

〔ステップ1〕 シーケンス・レベル $u = 0$ ， N_u の中で分岐の対象となるシーケンス・ノード $N'_u = \{\phi\}$ ，実行可能解の評価尺度の最小値 $C^* = \infty$ に設定する。

〔ステップ2〕 分岐対象となるシーケンス・ノード N'_u を分岐して， $u = u + 1$ とする。作成された H_u 個の最新のシーケンス・ノード N_u について，それぞれ式 (3.6) により運搬量 f_{ij} を計算する。

〔ステップ3〕 各設備間の運搬量が与えられたもとの， H_u 個のすべてのシーケンス・ノード N_u に対して前節で展開した最適化手順に従って，それぞれの最適設備配置を決定する。そして，各シーケンス・ノード N_u に対して得られた $L^* = LB^*(N_{u, n-1})$ の値をそれぞれの下界値 $LB(N_u)$ とする。

〔ステップ4〕 $LB(N_u) \geq C^*$ なるシーケンス・ノードを削除する。その結果， $LB(N_u) < C^*$ なるシーケンス・ノードがないならばステップ7へ行く。

〔ステップ5〕 未分岐のシーケンス・ノードのうちで最小の下界値 $LB(N_u)$ をもつノードを分岐対象となるシーケンス・ノード N'_u に選ぶ（このとき，同じ値のノードが複数個存在する場合には，値 u の大きいものを選ぶ。値 u が同じ場合は設備シーケンス番号 h の小さいものを選ぶ）。この分岐対象となるシーケンス・ノード N'_u の下界値を $LB^*(N_u)$ とする。

〔ステップ6〕 $u < m$ かつ $LB^*(N_u) < C^*$ ならばステップ2へもどる。 $u = m$ ならば $C^* = LB^*(N_u)$ として，ステップ4へもどる。

〔ステップ7〕 C^* を与えるシーケンス・ノードにおける設備シーケンスの選択とそれに基づく最適設備配置が最適解である。終了。

上記の分岐限界法に基づく最適化アルゴリズムの概略を図示すれば、図 3.5 のフローチャートのようなになる。

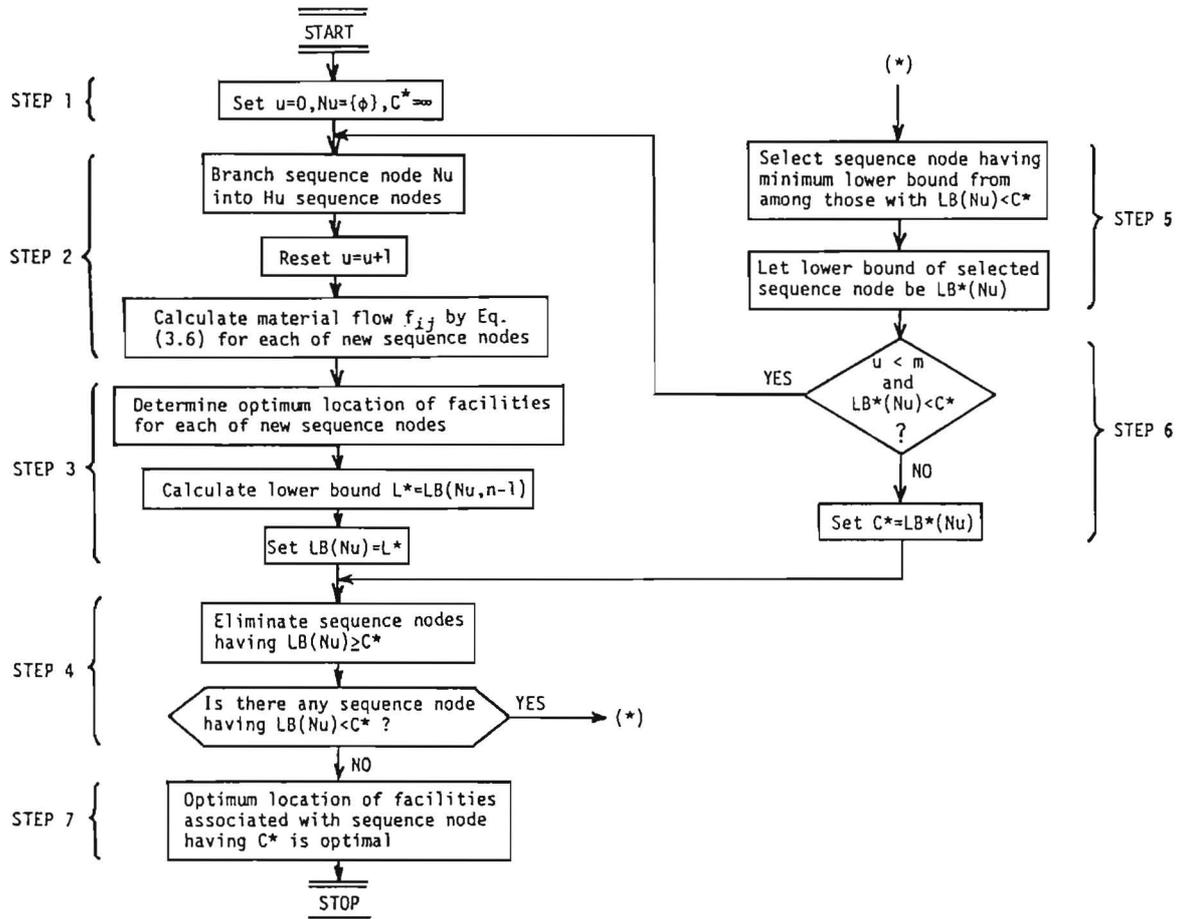


図3.5 最適化アルゴリズムのフローチャート

3.5 数値計算例

代替設備シーケンスを考慮した循環形生産システムの最適設備配置問題と前節で提案した最適化アルゴリズムの妥当性と有効性を示すために数値計算例を与える。

(1) 妥当性の検討

まず、提案した最適化アルゴリズムの妥当性を検討するために、表 3.1 に示

す3部品, 5工程(代替設備シーケンス各2本), 5設備問題を考える。各部品の代替設備シーケンスの様子は図3.6に示すとおりである。また, 設備が配置される候補場所は閉ループ上に等間隔に位置しているものとし, 隣接した候補場所間の運搬距離は単位距離 $d_u = 1$ とする。

表 3.1 数値計算例の問題

部 品	代替設備シーケンス					生産量	
	1	2	3	4	5		
P ₁	R ₁₁	M ₁	-M ₃	-M ₃	-M ₂	-M ₅	30
	R ₁₂	M ₁	-M ₄	-M ₃	-M ₂	-M ₅	
P ₂	R ₂₁	M ₁	-M ₄	-M ₂	-M ₃	-M ₅	15
	R ₂₂	M ₁	-M ₂	-M ₄	-M ₃	-M ₅	
P ₃	R ₃₁	M ₁	-M ₄	-M ₃	-M ₂	-M ₅	5
	R ₃₂	M ₁	-M ₄	-M ₃	-M ₄	-M ₅	
設 備	M ₁ , M ₂ , M ₃ , M ₄ , M ₅ 各一台ずつ						

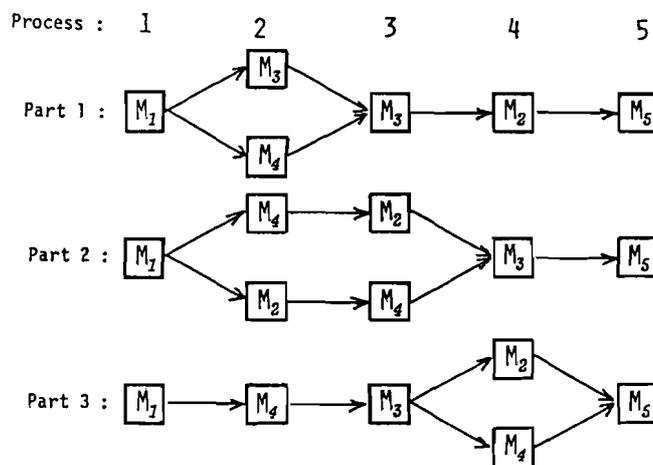


図3.6 各部品の代替設備シーケンス

最適化アルゴリズムをコンピュータ・プログラム化し(FORTRAN IV), 設定した例題を実行した。その結果を表3.2, 図3.7に示す。

表3.2は最適化アルゴリズムより求められた各部品の最適設備シーケンスと最適設備配置, およびそのときの評価尺度の最適値である。図3.7はこの最適

表 3.2 例題の最適解

部 品	最適設備シーケンス				
P ₁	R ₁₁ : M ₁ -M ₃ -M ₃ -M ₂ -M ₅				
P ₂	R ₂₂ : M ₁ -M ₂ -M ₄ -M ₃ -M ₅				
P ₃	R ₃₁ : M ₁ -M ₄ -M ₃ -M ₂ -M ₅				
最適設備配置					
場 所	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
設 備	M ₁	M ₃	M ₂	M ₅	M ₄
評価尺度の値 C* = 250					

表 3.3 例題の結果

代替設備シーケンスの組合せ	最適設備配置					評価尺度の値 C
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	
R ₁₁ , R ₂₁ , R ₃₁	M ₁	M ₃	M ₄	M ₂	M ₅	300
R ₁₁ , R ₂₁ , R ₃₂	M ₁	M ₃	M ₅	M ₄	M ₂	375
R ₁₁ , R ₂₂ , R ₃₁	M ₁	M ₃	M ₂	M ₅	M ₄	250*
R ₁₁ , R ₂₂ , R ₃₂	M ₁	M ₃	M ₂	M ₅	M ₄	275
R ₁₂ , R ₂₁ , R ₃₁	M ₁	M ₄	M ₂	M ₃	M ₅	375
R ₁₂ , R ₂₁ , R ₃₂	M ₁	M ₂	M ₄	M ₃	M ₅	375
R ₁₂ , R ₂₂ , R ₃₁	M ₁	M ₂	M ₅	M ₄	M ₃	350
R ₁₂ , R ₂₂ , R ₃₂	M ₁	M ₂	M ₄	M ₃	M ₅	375

* : 最適解を示す

表 3.4 ノード数とCPU時間の値 (各問題10題)

部品数	代替設備シーケンスの組合せ数	設備数	シーケンス・ノード数			ロケーション・ノード数			CPU時間s		
			最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
3	8	6	6	8	10	660	681	885	3.49	3.96	4.53
4	16	5	10	14	18	261	443	669	2.83	3.28	3.83
4	16	6	10	17	28	1042	1297	1712	4.98	5.70	6.88
5	32	5	14	19	26	335	588	868	3.02	3.66	4.36
5	32	6	16	21	30	1264	1582	2003	5.66	6.44	7.52

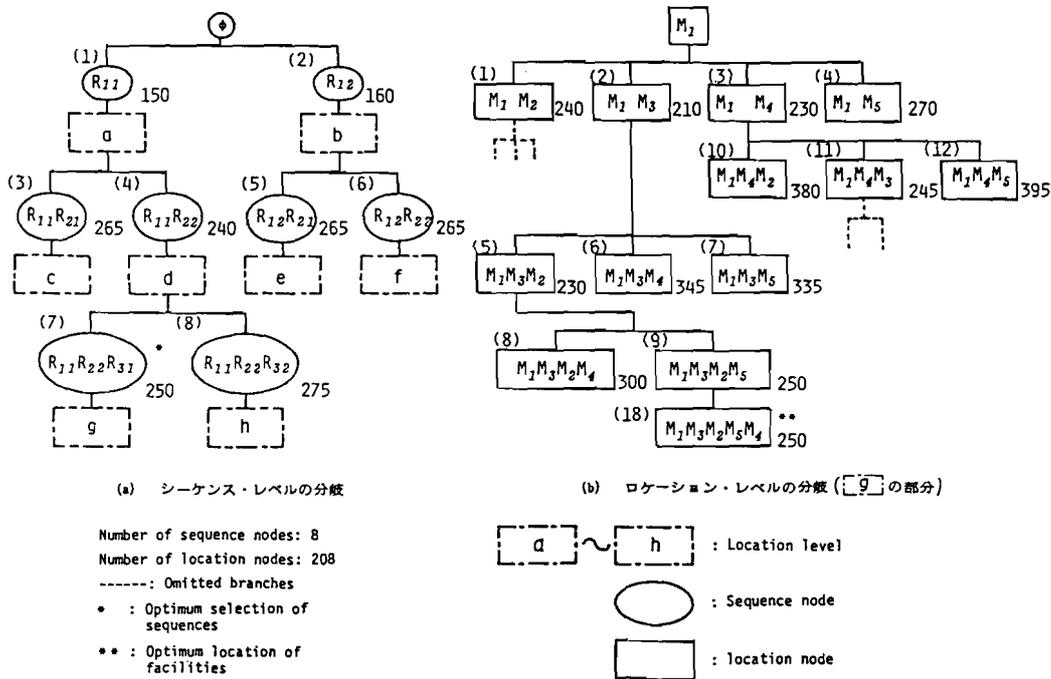


図 3.7 例題の分岐図

解にいたるまでの探索過程を示した分岐図である。なお、最適解を得るまでに作成したシーケンス・ノード数は 8 個で、ロケーション・ノード数は 208 個であり、計算に要した CPU 時間は 2.61 秒であった。これより、提案した最適化アルゴリズムは、代替設備シーケンスの選択を行うためのシーケンス・ノードで仮の最適設備配置を決定する分岐限界操作を繰り返し適用して行くという入れ子形の二重構造になっていることがわかる。

(2) 有効性の検討

表 3.3 は上記の例題において、すべての代替設備シーケンスの組合せに対する最適設備配置の結果と、そのときの評価尺度の値を示したものである。評価尺度の最小値を与える代替設備シーケンスの組合せとそのときの最適設備配置は、表 3.1 と同一である。これより、各部品の代替設備シーケンスを考慮して、各部品の最適設備シーケンスの選択と最適設備配置の決定とを統合化した問題として取り扱うことの重要性が明らかにされている。

次に、最適化アルゴリズムの有効性を検討するために、さらに多くの例題を実行した。その結果を表 3.4 にまとめて示す。提案した最適化アルゴリズムの構造より、あらかじめ予想された結果であるが、作成された各シーケンス・ノードのすべてに対してそれぞれ最適設備配置を決定しているために、ロケーション・ノード数はかなり多くなっている。したがって、代替設備シーケンスの組合せ数の増加はロケーション・ノード数と CPU 時間を大きく増加させる。他方、設備数の増加はそれほどシーケンス・ノード数の増加に影響を及ぼさないで、シーケンス・ノード数が同じ場合には、CPU 時間の増加は比較的ゆるやかな傾向を示している。

なお、上記の数値計算には、神戸大学計算センターの NEAC/ACOS システム 700 を使用した。

3.6 結 言

本章では、代替設備シーケンスを考慮した循環形生産システムの設備配置問題を取り上げ、その解法を提案した。本章で得られた研究成果を要約すれば、次のようになる。

- (1) 循環形生産システムの設備配置計画において、各部品の各工程で代替設備が存在する場合には、代替設備シーケンスを考慮に入れた設備配置問題として取り扱うことが重要であることを明らかにした。
- (2) 設備シーケンスの代替性と運搬の方向を考慮した循環形生産システムの設備配置問題を定式化し、この問題を 2 レベルの階層構造をもつ最適化問題と考え、分岐限界法を利用した各部品の最適設備シーケンスと最適設備配置を同時に決定する最適化アルゴリズムを与えた。
- (3) 数値計算例により提案した設備配置問題と最適化アルゴリズムの妥当性と有効性を検討した。その結果、本章で設定した設備配置問題と提案した最適化アルゴリズムが評価尺度の「運搬量×運搬距離」の合計の最小化にとって有効であることを明らかにでき、今後循環形生産システムの設備配置計画を行う上での指針を提供した。

第4章 セル構造生産システムの設備配置計画

4.1 緒言

多品種少量生産の生産性向上をめざす効果的な手法の一つとしてグループ・テクノロジー (GT: Group Technology) がある^{4.1)~4.3)}。これは部品の形状、寸法、加工法などの類似性を基準にして、部品のグループ化を図り、部品設計、機械設備、治工具、工程、レイアウトなどの共通化を進めて、生産性を高めようとするものである。初期のGTに関する研究は、主として部品分類システムの開発^{4.4)}であったが、近年、類似部品の加工に適したフレキシブル生産システムの実用化に伴って、部品・製品設計^{4.5)}、作業設計^{4.6)}、工程設計^{4.7)}、レイアウト計画^{4.8)}、生産計画^{4.9)}、生産スケジューリング^{4.10)}、生産管理^{4.11)}などの生産のあらゆる局面で、GT概念の適用が行われるようになってきた^{4.12)~4.18)}。とりわけ類似部品を効率よく生産するための設備配置、すなわちGTレイアウト^{4.19)}に関しては従来から研究がなされているが、その多くは設備のグループ化に関するもので^{4.20)~4.34)}、グループ化された設備群の配置を決定する設備配置問題についての研究は少ない^{4.35)}。

GTレイアウトは、グループ化された類似部品群の加工の流れに基づいて、GTライン、GTセル、GTセンターの三つのタイプに大別され^{4.36)}、GTセルで構成された生産システムはセル構造生産システム (cellular manufacturing system) とよばれている^{4.37)}。ジョブショップ生産システムをこのようなセル構造生産システムに変更することによって得られる効果については、実例に基づいた種々の報告がなされているが^{4.38)~4.42)}、セル構造生産システム設計の方法論に関してはごくわずかである^{4.43)~4.45)}。とくに設備グループ(セル)間のレイアウトと各セル内の設備配置を決定しなければならないセル構造生産システムの設備配置計画に対しては、ほとんど研究がなされていない。第1章緒論で指摘したように、多品種少量生産における生産性の低さは生産諸設備の非合理的な配置に起因している場合が多い。したがって、セル構造生産システ

ムが多品種少量生産にとって真に効果的な生産システムとなるには，セル構造生産システムの設備配置計画のための方法論の確立が必要不可欠である。

本章では，このような観点から，セル構造生産システムの設備配置計画において，セル配置と各セル内の設備配置の決定を統合したセル・レイアウト問題を取り扱う。設備の相対的な位置関係を決定することを主目的に，解法の第1段階として，MAX-MIN法^{4.46)}と総入替法^{4.47)}を援用したヒューリスティックな近似解法について検討する。その際，これまで開発された初期解構成法と改良法の概要について言及し，総入替法の欠点の克服をねらった修正総入替法を提案する。そして，セル・レイアウト問題を2レベルの階層構造をもつ最適化問題と考え，各レベルごとにその解法を与える。具体的には，まずセル間の総運搬費用最小化基準に基づいてセル配置を決定し，次に全設備間の総運搬費用最小化基準に基づいて各セル内の設備配置を決定する。最後に，簡単な数値計算例により，セル構造生産システムの設備配置計画におけるセル・レイアウトの設計例を示す。

4.2 セル・レイアウト・モデル

本節では，セル構造生産システムの設備配置計画において，セル配置と各セル内の設備配置の決定を統合した問題をセル・レイアウト問題 (cell layout problem) とよび，そのモデル化を行う。

4.2.1 前提条件

セル・レイアウト問題の基本的なモデルとして，次の前提をおいた最も単純な場合を考える。

- (1) 配置の対象とする設備は n 台あり，設備 i を M_i で表す。ここに $i = 1, 2, \dots, n$ 。
- (2) 各設備の面積は同一とし，設備を単位面積の正方形ブロックで表す。
- (3) n 台の設備はすでに g 個のセルに分けられており，セル s を G_s で表す。ここに $s = 1, 2, \dots, g$ 。

- (4) セル G_s に属する設備数を n_s で表す。
- (5) レイアウトの対象となる工場ないし職場の敷地（これをフロアとよぶ）は設備と同じ大きさの正方形ブロックの集合として記述され、設備を配置することのできる候補場所の数は設備数に比べて十分多いものとする。
- (6) 各セルの面積は同一とし、セルはセル・モジュール（本章 4.3.2 節で定義する）とよぶ正方形ブロックの集合で記述される。
- (7) 同一セルに属する設備はすべて同じセル・モジュール内に配置される。
- (8) 設備 M_i , M_j 間の運搬量は既知であり、これを f_{ij} で表す。
- (9) 設備間の運搬距離は設備の重心間とし、直交距離^{4.48)}で計算される。

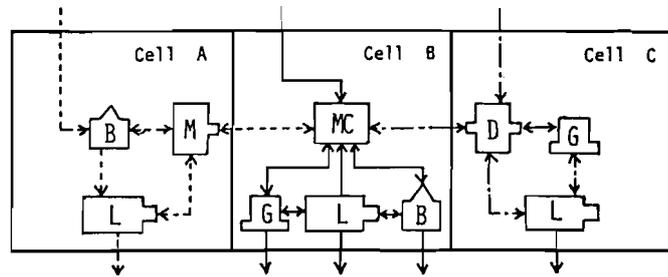
図 4.1 (a) にセル構造生産システムの一例が示されている。ここでは、3 個のセルが構成されており、生産システム内の物の流れが実線等で表示されている。一例として、上記の前提条件に基づいて、このセル構造生産システムのセル・レイアウトをモデル化して記述すれば、同図(b)のように表される。ここで、破線で囲まれたブロックが設備の面積を記述する単位面積の正方形ブロックであり、一点鎖線で囲まれたブロックの集合がセル・モジュールに対応している。なお、隣接した 2 つの正方形ブロックの中心間の距離を単位距離 1 とし、運搬距離は単位距離の整数倍で与えられるものとする。

4.2.2 セル間レイアウトとセル内レイアウト

セル・レイアウトでは、フロア内のセルの相対的位置関係（セル配置）とそれぞれのセルにおける設備の相対的位置関係（設備配置）をどのように決定するかが問題となる。本章では、フロア内のセル配置をセル間レイアウト、各セル内の設備配置をセル内レイアウトとよぶ。

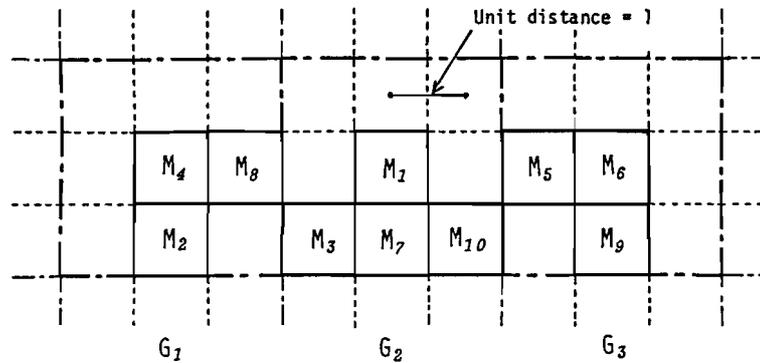
4.2.3 評価基準

セル・レイアウトの決定に際し、設備配置問題において一般によく用いられている総運搬費用最小化^{4.48)}を評価基準として採用する。ところで、セル構造生産システムにおける運搬形態には、セル間における運搬と各セル内での運搬という 2 種類の運搬があると考えられる。前者をセル間運搬、後者をセル内運



B : Boring machine , D : Drilling machine , G : Grinding machine
M : Milling machine , MC : Machining Center , L : Lathe

(a) セル構造生産システムの例



(b) セル・レイアウトの例

図4.1 セル構造生産システムのセル・レイアウト・モデル

搬とすれば，セル内運搬の方がセル間運搬に比べてその発生頻度が高いことは容易に想像できる。このことは，類似部品の加工の流れに基づいて設備がグループ化されているセル構造生産システムの特徴からも明らかである。したがって，本章では単位量・単位距離当りの運搬費用がセル内運搬とセル間運搬では異なると考え，総運搬費用を次のように定義する。

各セル内の単位量・単位距離当りの運搬費用を a ，セル間の単位量・単位距離当りの運搬費用を b とし，総運搬費用 C を次式で与える。

$$C = a \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \cdot \lambda_{ij} + b \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \cdot \bar{\lambda}_{ij} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

式(4.1)の右辺第1項はセル内運搬費用の総和であり、第2項はセル間運搬費用の総和である。ここに $d_{\rho(i)\rho(j)}$ は設備 M_i が場所 $\rho(i)$ に、設備 M_j が場所 $\rho(j)$ にそれぞれ配置されたときの設備 M_i 、 M_j 間の運搬距離で、 $d_{\rho(i)\rho(j)} = d_{\rho(j)\rho(i)}$ かつ $d_{\rho(i)\rho(i)} = 0$ である。また、変数 λ_{ij} 、 $\bar{\lambda}_{ij}$ はともに0-1変数で、前提条件(3)より次のように与えられる。

$$\lambda_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1 : \text{設備 } M_i, M_j \text{ が同一セルに属するとき} \\ 0 : \text{設備 } M_i, M_j \text{ が同一セルに属さないとき} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\bar{\lambda}_{ij} = 1 - \lambda_{ij} \text{ かつ } \lambda_{ii} = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

4.3 セル・レイアウトの決定手順

第2章および第3章でみたように、組合せ最適化問題の一つである設備配置問題の解法に対して、現在のところ最も有効であるといわれている分岐限界法を援用したとしても、設備数の増加に伴って最適解を得るための困難さは急激に増す。前章までに取り扱ってきた設備配置計画はいずれも機械加工工場の一部分である特殊な構造をした生産システムを対象としているため、比較的設備数が少なく、したがって最適化アルゴリズムに分岐限界法を適用することが可能であった。しかしながら、本章で取り上げるセル構造生産システムは主として工場全体を対象としているため、取り扱う設備数は必然的に多くなり、その結果として、解くべき設備配置問題は設備数の多い大規模な問題となる。これは分岐限界法の適用を極めて困難なものとする。通常、このような場合、得られる解に対する最適性の保証はないが、大規模問題に対して効率よく、かつ良好な近似解を得ようとするアプローチがとられる。いわゆるヒューリスティックな解法はその厳密さに欠けるものの、実用面から高く評価されている。本章では、このような観点から、セル構造生産システムのセル・レイアウト問題に対するヒューリスティックな近似解法を提案する。

4.3.1 決定手順の概要

セル・レイアウト決定手順の概略フローチャートを図 4.2 に示す。設備間の運搬量データ (f_{ij})、セルおよび設備に関するデータ (g, n_s, n, λ_{ij})、単位量・単位距離当りの運搬費用 (a, b) が与えられたもとで、まず、次節

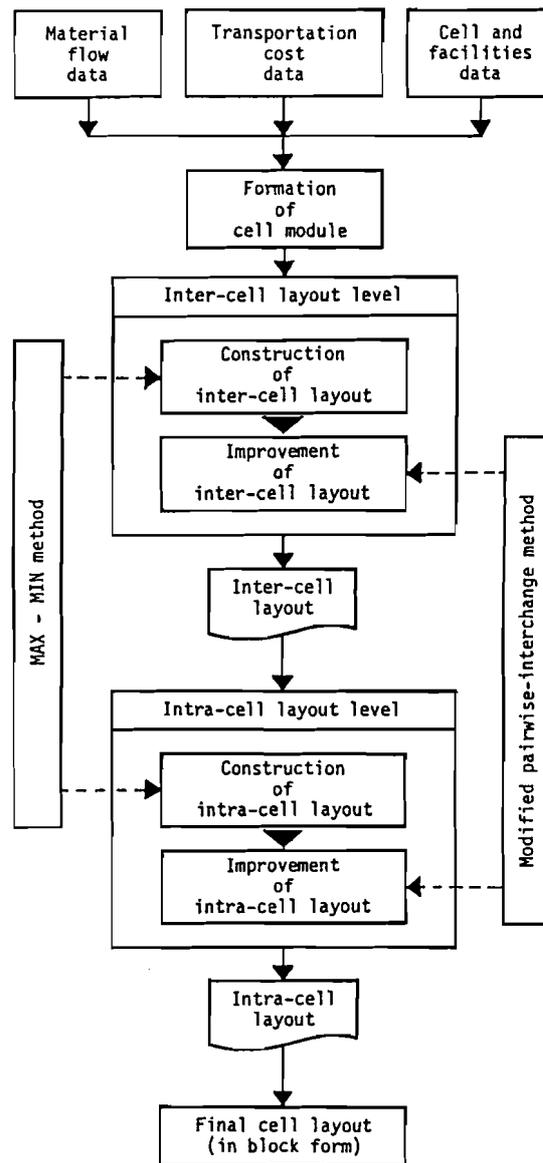


図 4.2 セル・レイアウトの決定手順

4.3.2で述べるセル・モジュールを決定する。次に、セル・レイアウト決定手順の第1段階として、決定されたセル・モジュールを用いてセル間総運搬費用最小化基準に基づくセル間レイアウトを次のように決定する。河原・中井^{4.46)}によるMAX-MINを援用してセル間レイアウトの初期解を構成する。ついで、本章で提案する修正総入替法に従って、初期セル間レイアウトの改良を行い、最も好ましいセル間レイアウトを決定する。セル・レイアウト決定手順の第2段階は、セル間レイアウトが固定されたもとで、式(4.1)で与えられる総運搬費用を最小にするような各セル内の設備配置を決定するセル内レイアウト段階である。まず、各セルを独立と考えて、それぞれのセル内の設備配置をMAX-MIN法によって求める。こうして決定された設備配置をセル内レイアウトの初期解とし、今度はセル間の関連も考慮しながら初期解を修正総入替法に従って改良して行く。最終的に得られたセル内レイアウトが、総運搬費用最小化基準のもとで最も好ましいセル・レイアウトとして選ばれる。

以上がセル・レイアウト決定手順の概略であるが、その詳細は4.4節ならびに4.5節で述べられる。なお、決定手順の第1段階(セル間レイアウトの決定段階)と第2段階(セル内レイアウトの決定段階)では若干の相違があるが、基本的には同じ手順が繰り返される。これについても次節以降で述べる。

4.3.2 セル・モジュールの決定

本章では、セル・モジュールを次のように定義する。セル・モジュールとは、単位面積の正方形ブロックの集合で、セル間レイアウトを決定する際にセルの大きさを記述するための基本単位である。セル・モジュールの大きさを決定するにあたっては、セル・レイアウトの第2段階において、セルの大きさが設備配置を行う際の制約とならぬように留意すること、および短時間で効率よく設備配置が行えるようなセルの大きさに設定することが重要である。ところが、前者はセルの大きさを大きくする要因であり、後者はその逆の要因である。このような相反する2つの要因を考慮して適切なセル・モジュールを決定するためには、なお多くの検討の余地はあるが、本章では以下のように設定する。

設備数が最大のセルに着目し、次式を満足する正整数 r を求める。

$$\max_s \{ n_s \} \leq \min_r \{ (2r+1)^2 \} \dots\dots\dots (4.4)$$

そして、一辺が $(2r+1)$ 個の正方形ブロックからなる $(2r+1)^2$ 個の正方形ブロックの集合をセル・モジュールとする。したがって、セル・モジュール自身も正方形となる。前出図 4.1(b) に示したセル・モジュールはこのような方法で決定されたものである。なお、一辺を奇数個の正方形ブロックで構成した理由は、セル・モジュールの中心を最小単位である単位面積の正方形ブロックの中心に一致させるためである。

4.3.3 MAX-MIN 法の利用

設備配置問題を一般的に述べれば、次のようである。ある評価基準に対して設定された目的関数を最適にするように、 n 台の設備をそれぞれ n 箇所の候補場所の一つに一意に割り当てることである。このとき、すべての設備が任意の候補場所に配置可能な場合、この問題の実行可能解（実行可能な設備配置案）の総数は $n!$ となり、設備数の増加に伴って実行可能解の総数は急激に増大する。したがって、すべての実行可能解を作成し調べる完全列挙法や分岐限界法をはじめとする組合せ最適化手法では、設備数の多い大規模な設備配置問題を解いて最適解（最適設備配置案）を求めるには莫大な計算時間が必要となり、しばしば実行不可能となる。そこで、最適解になるべく近い良好な近似解を短い計算時間で求めることができる各種の近似解法が開発されるようになった。

初期解構成法とは、このような近似解法のうちで、白紙の状態から出発して良好な設備配置案を導出する方法であり、導出された設備配置案は通常、次節 4.3.4 で述べる改良法の初期設備配置案として用いられる。これまで開発された初期解構成法には、乱数を用いた方法^{4.49)}、Muther の SLP で代表される試行錯誤法^{4.50)}、Noy の方法^{4.51)}、Wimmert 法^{4.52)}、Willoughby の方法^{4.53)}、Edwards らの MAT^{4.54)}、藤原らの決定理論を応用した LAPLACE, MINIMAX, HURWICZ の 3 手法^{4.55)}、MAT の改良形である古川らの方法^{4.56)}、河原・

中井のMAX-MIN法^{4.46)}などがあり，これら手法間の有効性に関して比較検討した結果も報告されている^{4.54)~4.57)}。そして，河原・久保の報告^{4.57)}によると，各種数値実験において得られる解の近似性と計算時間の点から，MAX-MIN法が優れていると指摘されている。これら従来の研究成果を勘案した結果，本章ではセル・レイアウト決定手順における初期解構成法にMAX-MIN法を採用する。以下にMAX-MIN法の概要を述べておく。なお，用いる記号は文献(4.46)に準拠している。

MAX-MIN法では，設備配置案を評価するための尺度を次のように定義している。

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n W_{ij} \times D_{ij} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

ただし， n : 設備数

W_{ij} : 設備 M_i と設備 M_j との相互関連の深さ ($W_{ij} = W_{ji}$)

D_{ij} : 設備 M_i と設備 M_j との間の距離 ($D_{ij} = D_{ji}$)

ここに， W_{ij} はFrom-Toチャートに表される設備間の物の運搬量 またはRELチャート^{4.50)}に表される近接性を要求する度合いを定量化したものである。さらに，次のような記号を定義している。

$$N_{ik} = \sum_{p \in P} W_{ip} \times D_{k\ell(p)} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$N_{uv} = \max_{i \in I} [\min_{k \in K} (N_{ik})] \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ただし， p : すでに配置されている設備の番号の集合 P の要素

i : 配置されていない設備の番号の集合 I の要素

k : 配置の候補場所の集合 K の要素

$\ell(p)$: 設備 M_p の配置されている場所の番号

W_{ip} : 設備 M_i と設備 M_p との相互関連の深さ

$D_{k\ell(p)}$: 設備 M_i を場所 k に配置したときの設備 M_i と設備 M_p との間

の距離

ここに、 N_{ik} は配置しようとしている設備（すなわち、まだ配置されていない設備） M_i を配置候補場所 k に配置したときの、設備 M_i とすでに配置されている設備との相互関連の深さと距離の積の総和を表す。すでに配置されている設備間の相互関連は考慮しないので、配置しようとしている設備 M_i とすでに配置されている設備との間だけの関係に着目し、それらの間の相互関連の深さと距離の積の総和を表すのが N_{ik} である。他方、配置しようとしている各設備について、 N_{ik} が最小の値をとる場所をまず探し、そのなかで最大の値をとる設備 M_u を求め、その場所を v とする。これが N_{uv} である。

MAX-MIN法による設備配置の手順は次のようである。

- 〔手順Ⅰ〕 固定設備を指定場所に配置する。
- 〔手順Ⅱ〕 配置しようとしている設備 M_i をすべての配置候補場所 k に配置するとして、 N_{ik} を求める。
- 〔手順Ⅲ〕 $\min_{k \in K} (N_{ik})$ なる場所を求める。
- 〔手順Ⅳ〕 設備 M_i をかえて手順Ⅱ、Ⅲを繰り返す。
- 〔手順Ⅴ〕 $\max_{i \in I} [\min_{k \in K} (N_{ik})]$ なる設備 M_u とその配置候補場所 v を求め、設備 M_u を場所 v に配置する。
- 〔手順Ⅵ〕 手順Ⅱ～Ⅴを繰り返し、すべての設備を配置する。

このように、MAX-MIN法は最初に一つ以上の固定設備を指定場所に配置し、 N_{uv} を満たす設備 M_u と場所 v を求め、順次1設備ずつ配置していき、すべての設備の相対的な位置関係を決定するヒューリスティック・アルゴリズムである。本章では、上記MAX-MIN法をセル間レイアウトおよびセル内レイアウトの初期解導出段階に採用している。

4.3.4 修正総入替法の提案

前節4.3.3で述べた近似解法のうち、与えられた初期設備配置案をより良く改良して行く方法が改良法である。Steinbergの方法^{4.58)}、CRAFTで用いられている総入替法^{4.47)}、移動の有効度による入替法^{4.59)}、Hillier and Connors

の方法^{4.60)}, Biased Sampling 法^{4.61)}, COL^{4.62)}, FRAT^{4.63)}など,数多くの改良法が提案されているが,いずれも改良解を見出すために各設備の入れ替えを試み,その入れ替えによる目的関数の増減を調べ,目的関数の値が改善する設備の入れ替えを行い,次の解を作成するという方法をとっている。これら改良法についても,初期解構成法と同様,各手法の優劣が数値実験によって比較検討されているが^{4.60),4.61),4.63)~4.70)},本章ではすべての改良法の基本的な手法である総入替法を取り上げる。

Armour ら^{4.47)}が提案した総入替法の基本的な手続きは,ある初期解について可能なすべての入れ替えを行って,そのなかで目的関数の値を最も減少させる2台の設備を入れ替えて行くという手順である。具体的には,設備配置案を評価するための目的関数の値(以後,この値を評価値とよぶ)に対して,次のような計算と評価がなされる。ある設備配置案の評価値は次式で計算される。

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n r_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

- ただし, n : 設備数
 r_{ij} : 設備 M_i, M_j 間の関係の強さで,式(4.5)の W_{ij} に同じ
 $d_{\rho(i)\rho(j)}$: 設備 M_i を場所 $\rho(i)$ に,設備 M_j を場所 $\rho(j)$ にそれぞれ配置したときの設備 M_i, M_j 間の距離

初期設備配置案において n 台の設備のうち2台の設備を交換すれば,全部で $nC_2 = n(n-1)/2$ 個の新しい設備配置案が作成されることになり,これらすべてについて初期設備配置案からの式(4.8)で与えられる評価値の増減を調べることはかなりの計算量となる。しかし,評価値の増減を調べるためには,式(4.8)を改めて計算しなおす代わりに,交換に選ばれた2台の設備とそれら配置場所に関する部分的な評価値を計算すればよい。場所 $\rho(p)$ と $\rho(q)$ にそれぞれ配置されている設備 M_p と M_q がここで交換の対象として選ばれたとすると,これら2台の設備に関連する交換前の部分的評価値は次式のようなになる。

$$c_p + c_q = \sum_{i=1}^n r_{ip} d_{\rho(i)\rho(p)} + \sum_{i=1}^n r_{iq} d_{\rho(i)\rho(q)} - r_{pq} d_{\rho(p)\rho(q)} \dots\dots (4.9)$$

そこで、設備 M_p を場所 $\rho(q)$ に、設備 M_q を場所 $\rho(p)$ にそれぞれ配置しなおせば、交換後の部分的評価値は次のようになる。

$$c'_p + c'_q = \sum_{i=1}^n r_{ip} d_{\rho(i)\rho(q)} + \sum_{i=1}^n r_{iq} d_{\rho(i)\rho(p)} + r_{pq} d_{\rho(p)\rho(q)} \dots (4.10)$$

したがって、 Δc_{pq} をこのような 2 台の設備 M_p 、 M_q の交換による評価値の変化量とすれば、この値は式 (4.9) から式 (4.10) を引いた値に等しい。

$$\begin{aligned} \Delta c_{pq} &= \sum_{i=1}^n r_{ip} d_{\rho(i)\rho(p)} + \sum_{i=1}^n r_{iq} d_{\rho(i)\rho(q)} - \sum_{i=1}^n r_{ip} d_{\rho(i)\rho(q)} \\ &\quad - \sum_{i=1}^n r_{iq} d_{\rho(i)\rho(p)} - 2 r_{pq} d_{\rho(p)\rho(q)} \dots\dots\dots (4.11) \end{aligned}$$

初期設備配置案に対して、 $n(n-1)/2$ 通りの設備の交換によって求まる評価値の変化量 Δc_{pq} のうち最大値を与える設備の交換を行い、その結果得られた新しい設備配置案を次の交換のための (初期) 設備配置案として選ぶ。そして、この新しい設備配置案についても同様の設備交換を行う。以下、同様の手続きを Δc_{pq} がすべて零または負になるまで繰り返す。このようにして得られた最後の設備配置案が最適解に近いものあるいは最適解として採用される。

以上が Armour らの総入替法の概要であるが、ここで次のような問題が生じる。上述のように、この総入替法では、ある設備配置案から次の改良された設備配置案を選ぶ際に評価値の変化量 Δc_{pq} の最大値に着目している。ところが、このような最大値を与える新しい設備配置案が複数存在する場合でも、上記の総入替法はそのうちの一つだけを考慮し、これを次の交換のための新しい設備配置案として選んでいる。しかし、選択した設備配置案が以後の交換でより良い改良案を生むか否かはこの段階では判明せず、結果的に誤った選択がなされ

ている場合もある。このことは、改良の余地がある複数の設備配置案の中からただ一つの設備配置案を選んでいることに起因している。

前述のような Armour らの総入替法（以後、これを従来法とよぶ）の欠点を解消し、より良い改良案を求めるために、本章では最大の評価値の変化量 Δc_{pq} を与える新しい設備配置案をすべて考慮し、これらを次の交換のための新しい設備配置案として選ぶことにする。具体的には、次のような手順を繰り返す。ある設備配置案に対して $n(n-1)/2$ 通りの設備の交換を行ったとき、評価値の変化量が最大の新しい設備配置案が複数個求められたとする。このとき、これら複数の新しい設備配置案をそれぞれ次の設備の交換のための設備配置案として選択し、それぞれに対して従来法を適用して設備配置案の改良を進める。すなわち、改良の可能性が高い設備配置案をすべて考慮することによって最適な設備配置案の探索範囲を広げ、より良い最終設備配置案を求めようとするものである。そして、探索過程で枝分れして得られた複数の最終設備配置案の中で最小の評価値をもつ設備配置案を近似最適解ないし最適解として採用する。このような手順で初期設備配置案をより良く改良して行く方法を、本章では修正総入替法あるいは提案法とよぶことにする。

上記の手順を次に示す簡単な例題で説明する。図 4.3 はこの例題の初期設備配置案であり、隣接する設備間の距離は単位距離 1 としている。各設備間の関係の強さ r_{ij} を表 4.1

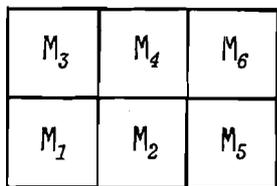


図 4.3 例題の初期設備配置案

表 4.1 設備間の関係の強さ r_{ij}

$i \backslash j$	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
M_1	0	0	0	150	0	200
M_2	0	0	100	0	300	0
M_3	0	100	0	100	0	200
M_4	150	0	100	0	100	150
M_5	0	300	0	100	0	0
M_6	200	0	200	150	0	0

のように与える。

図 4.3 の初期設備配置案に対して $6C_2 = 15$ 通りの設備の交換を行ったところ、設備 M_1 と M_5 、設備 M_2 と M_6 、設備 M_3 と M_6 の 3 通りの交換によって、評価値の変化量は最大の 400 になる。そこで、まず設備 M_1 と M_5 の交換によ

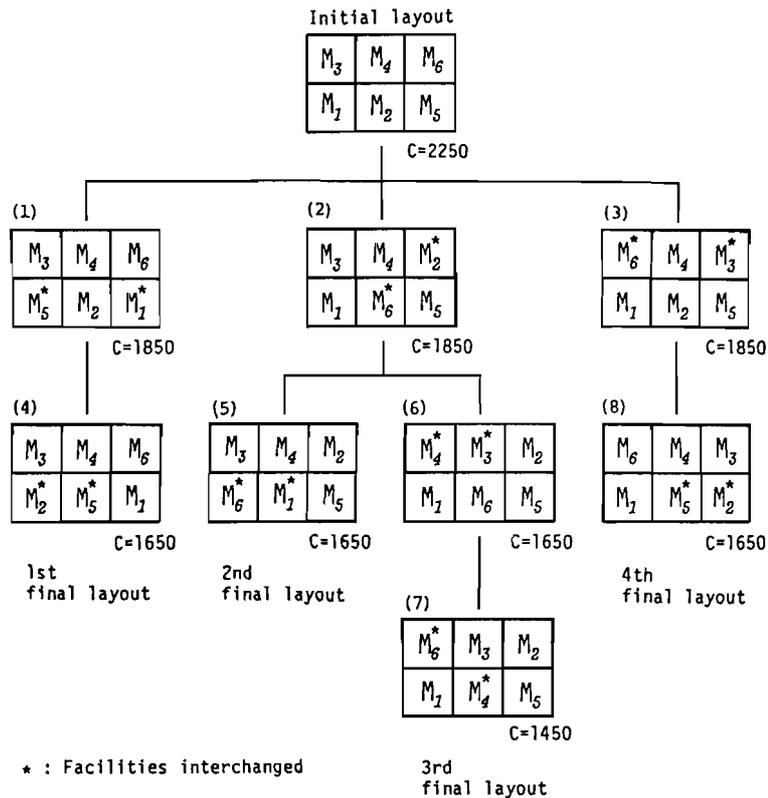


図 4.4 提案法による初期設備配置案の改良過程

って得られた改良設備配置案に対して第 2 回目の設備の交換を行う。設備 M_2 と M_5 の交換が最大の評価値の変化量 200 を与える。第 3 回目の改良を行う場合、どのような設備の交換を行っても、評価値の変化量は零または負となり、改良の余地のないことがわかる。したがって、第 2 回目の改良設備配置案を初期設備配置に対する第 1 番目の最終設備配置案とする。次に設備 M_2 と M_6 の交換によって得られた第 1 回目の改良設備配置案に対して第 2 回目の設備の交換を行うと、設備 M_1 と M_6 、設備 M_3 と M_4 の 2 通りの交換が最大の評価値の変

化量 200 を与える。そこで、設備 M_1 と M_6 の交換によって得られた第 2 回目の改良設備配置案に対して第 3 回目の改良を行ったところ、評価値の減少はない。したがって、第 2 回目の改良設備配置案を初期設備配置案に対する第 2 番目の最終設備配置案とする。一方、設備 M_3 と M_4 の交換によって得られた第 2 回目の改良設備配置案に対して第 3 回目の改良を行うと、設備 M_4 と M_6 の交換によって評価値が最大に減少し、第 3 回目の改良設備配置案を得る。これに対して第 4 回目の改良を試みたところ、どのような設備の交換を行っても評価値は減少しない。したがって、第 3 回目の改良設備配置案を初期設備配置案に対する第 3 番目の最終設備配置案とする。最後に設備 M_3 と M_6 の交換によって得られた第 1 回目の改良設備配置案に対して第 2 回目の設備の交換を行う。設備 M_2 と M_5 の交換が最大の評価値の変化量 200 を与えるので、この交換を行った後の第 2 回目の改良設備配置案に対して第 3 回目の改良を行う。しかし、どのような設備の交換を行っても評価値の変化量は零または負となり、改良の余地のないことがわかる。したがって、第 2 回目の改良設備配置案を初期設備配置案に対する第 4 番目の最終設備配置案とする。図 4.4 に上述の初期設備配置案の改良過程を示す。

このようにして、初期設備配置案の改良解として 4 通りの最終設備配置案が得られた。本章で提案する修正総入替法では、これら 4 通りの最終設備配置案のうちで最小の評価値を与える設備配置案を近似最適解ないし最適解として選択する。したがって、第 3 番目の最終設備配置案が最小の評価値 $C = 1450$ を与えているので、これが修正総入替法による改良解として採用される。なお、従来法によれば、図 4.4 に示されている第 1 番目の最終設備配置案が改良解として選択される。これまでの説明ですでに明らかのように、提案法は従来法を拡張したものであり、与えられた初期設備配置案をより良く改良して行く点で従来法より優れている。さらに、提案法による最終改良解と従来法によるそれとが結果的に同じである場合でも、従来法では唯一の最終改良解しか得られないのに対して、提案法では複数の代替的な最終改良解が得られる場合もある。このことは、つねに最適解を与えることのできない近似解法によって重要なこ

とである。

上述した提案法の優位性を確認するために、設備数10台の問題を10通り設定し、次のような数値実験を行った。各問題ごとに異なる初期設備配置案と設備間の関係の強さを与え、同一問題に対して提案法と従来法を適用した。表4.2はこの結果を整理したものである。表中の改善率%は次式で求めた。

$$\text{改善率} = \frac{(\text{初期解の評価値}) - (\text{最終改良解の評価値})}{(\text{初期解の評価値})} \times 100 \quad (4.12)$$

10問題中、6問題に対して提案法がより良い最終改良解を与えている。また、3問題に対しては、提案法は複数の最終改良解を与えている。問題番号3の問題では、提案法と従来法はともに同じ最終改良解を与えている。設定した問題のデータ構造により改善率は異なるが、提案法の優位性は認められる。したがって、本章では上記の提案法、すなわち修正総入替法をセル間レイアウト

表 4.2 提案法と従来法の比較

問題 番号	初期解の 評価値	提案法		従来法	
		評価値	改善率%	評価値	改善率%
1	9100	7600*	16.5	8200	9.9
2	11000	7400*	32.7	7800	29.1
3	10600	7600**	28.3	7600	28.3
4	11600	7600*	34.5	7800	32.8
5	9100	7500*	17.6	7700	15.4
6	11700	7600*	35.0	7600	35.0
7	10300	7600*	26.2	7800	24.3
8	10100	7400*	26.7	7400	26.7
9	9800	7400*	24.5	7900	19.4
10	10100	7700*	23.8	7700	23.8

+ : 提案法が優れている場合

* : 提案法で複数の最終改良解が得られた場合

** : 提案法と従来法が一致した場合

およびセル内レイアウトの初期解改良段階に採用する。

4.4 セル間レイアウトの決定

セル・レイアウトの第1段階は、4.3.2節で定められたセル・モジュールを用いてセル間の総運搬費用を最小にするようなセル間レイアウトを決定することである。セル間の総運搬費用を C^c とし、次式で与える。

$$C^c = b \sum_{s_1=1}^{g-1} \sum_{s_2=s_1+1}^g f_{s_1 s_2}^c \cdot d_{\rho(s_1)\rho(s_2)} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

ここに、 $f_{s_1 s_2}^c$ はセル G_{s_1}, G_{s_2} 間の総運搬量を表し、次式で与えられる。

$$f_{s_1 s_2}^c = \sum_{i \in G_{s_1}} \sum_{j \in G_{s_2}} f_{ij} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

他方、 $d_{\rho(s_1)\rho(s_2)}$ はセル G_{s_1} が場所 $\rho(s_1)$ に、セル G_{s_2} が場所 $\rho(s_2)$ にそれぞれ配置されたときのセル G_{s_1}, G_{s_2} 間の運搬距離で、セル・モジュールの中心間を直交距離で計算したものである。

4.4.1 初期セル間レイアウトの構成

式(4.5)の代わりに式(4.13)で与えられるセル間総運搬費用を最小にするようなセル間レイアウトの初期解を4.3.3節で述べたMAX-MIN法によって求める際、セルを設備と考える。ところで、MAX-MIN法による設備配置の手順では、固定設備がすくなくとも一台以上あることが暗に仮定されている。したがって、セル間レイアウトの初期解導出段階では、次式で定義されるような他のセルとの関連が最も強いセルを固定セルとみなし、フロアの中心部に配置する。

$$\max_s \left\{ \sum_{s'=1}^g f_{s s'}^c \right\} \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

そして、4.3.3節で述べたMAX-MIN法の設備配置手順に従って残りのセルをフロアに配置することによって、初期セル間レイアウトが構成される。

4.4.2 初期セル間レイアウトの改良

前節 4.4.1 で得られたセル間レイアウトの初期解に対して、4.3.4 節で提案した修正総入替法を適用することによって、式(4.13)のセル間総運搬費用を最小にする最適セル間レイアウトの近似解として最も好ましいセル間レイアウトが決定される。

4.5 セル内レイアウトの決定

セル・レイアウトの第2段階は、セル間レイアウトが決定されたもとの、式(4.1)の総運搬費用Cを最小にするようなセル内レイアウトを決定することである。

4.5.1 初期セル内レイアウトの構成

セル内レイアウトの初期解を導出する際、各セルを独立と考え、それぞれのセルに対してMAX-MIN法を適用する。このとき、セル G_s における総運搬費用を C_s とし、式(4.5)の代わりに次式を用いる。

$$C_s = a \sum_{i,j \in G_s} f_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

さらに、MAX-MIN法の適用にあたっては、配置場所が指定されている固定設備が必要となるので、各セルごとにセル内の他の設備との関連が最も強い設備をそのセルにおける固定設備とみなし、これをセルの中心に配置する。セル G_s における固定設備として、次式で定義される設備を選ぶ。

$$\max_i \left\{ \sum_{j \in G_s} f_{ij} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

4.5.2 初期セル内レイアウトの改良

各セルを独立と考えて構成したセル内レイアウトの初期解に対して、修正総入替法を適用する際、今度はセル間の関連も考慮して式(4.1)で与えられる総運搬費用最小化を図る。このとき、4.2.1 節で述べた前提条件(7)が満足されね

ばならないので、設備の入れ替えは各セルごとに行い、異なるセルに属する設備が交換されることはない。したがって、セル内レイアウトの各改良段階で行われる設備の交換は $\sum_{s=1}^g \{n_s(n_s-1)/2\}$ 通りとなる。

4.3.4 節で提案した修正総入替法に従って初期セル内レイアウトの改良を行うことによって、式(4.1)の総運搬費用を最小にする最適セル内レイアウトの近似解として最も好ましいセル内レイアウトが決定される。そして、このようにして得られたセル内レイアウトが、最終的なセル・レイアウトとして選択されることになる。

4.6 セル・レイアウトの設計例

前節までに展開したセル構造生産システムの設備配置計画のための一設計法を次の例題に適用し、セル・レイアウトの設計例とする。用いる例題は、30台の設備が5つのセルに分けられたもとでセル配置と各セル内の設備配置の決定を統合したセル・レイアウト問題である。各セルに属する設備を表4.3に示し、設備間の運搬量を表4.4のように与える。各セル内の単位量・単位距離当りの運搬費用を $a = 2$ 、セル間の単位量・単位距離当りの運搬費用を $b = 5$ に設定した。

表 4.3 各セルに属する設備

セル G_s	各セルに属する設備 M_i	設備数 n_s
G_1	$M_1, M_2, M_3, M_{13}, M_{21}$	5
G_2	$M_4, M_5, M_{14}, M_{15}, M_{16}, M_{22},$ $M_{23}, M_{24}, M_{27}, M_{28}$	10
G_3	$M_6, M_7, M_{17}, M_{18}, M_{25}$	5
G_4	$M_8, M_{19}, M_{20}, M_{30}$	4
G_5	$M_9, M_{10}, M_{11}, M_{12}, M_{26}, M_{29}$	6

上述のデータにより設定されたセル構造生産システムのセル・レイアウトを

4.3節の決定手順に従って決定する。

(1) セル・モジュールの決定

表 4.3 より設備数が最大のセルはセル G_2 であり，その設備数は $n_2=10$ である。式 (4.4) を満足する正整数 r を求めると， $r=2$ となる。したがって，セル・モジュールは，一辺が $(2r+1)=5$ 個の正方形ブロックからなる 25 個の正方形ブロックの集合として記述される。

(2) 初期セル間レイアウトの構成

式 (4.14) に従ってセル間の運搬量を計算すると，表 4.5 のようになる。固定セルに相当するセルを式 (4.15) により求めれば，セル G_2 である。そこで，このセル G_2 をフロアを中心部に配置し，以下 MAX-MIN 法によって残りのセルを配置すると，図 4.5 に示すような初期セル間レイアウトが得られた。なお，このときのセル間総運搬費用は $C^c=46850$ である。

(3) 初期セル間レイアウトの改良

図 4.5 の初期セル間レイアウトをセル間レイアウトの初期解として，これに修正総入替法による改良を行ったところ，式 (4.13) で与えられるセル間の総運搬費用はどのようなセルの交換を行っても減少しなかった。したがって，初期セル間レイアウトの改良解は初期解に等しく，セル間レイアウトは図 4.5 のままである。

(4) 初期セル内レイアウトの構成

4.5.1 節で述べたように，各セルを独立と考え，それぞれのセルに対して MAX-MIN 法を適用した結果，図 4.6 の初期セル内レイアウトが決定された。なお，各セルにおいて固定設備に相当する設備がそれぞれのセル・モジュールの中心に配置されていることがわかる。

(5) 初期セル内レイアウトの改良

図 4.6 の初期セル内レイアウトをセル内レイアウトの初期解として，式 (4.1) で与えられる総運搬費用を最小にするように修正総入替法を適用して改良を進める。4.5.2 節で述べた手順に従って設備の交換を行ったところ，まず設備 M_5 と M_{23} が交換され，次に設備 M_7 と M_{18} が交換された。その後，いずれの設

表 4.5 セル間の運搬量 $f_{s_1 s_2}^c$

$s_1 \backslash s_2$	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
G_1	0	147	130	40	105
G_2	147	0	175	145	475
G_3	130	175	0	55	110
G_4	40	145	55	0	50
G_5	105	475	110	50	0

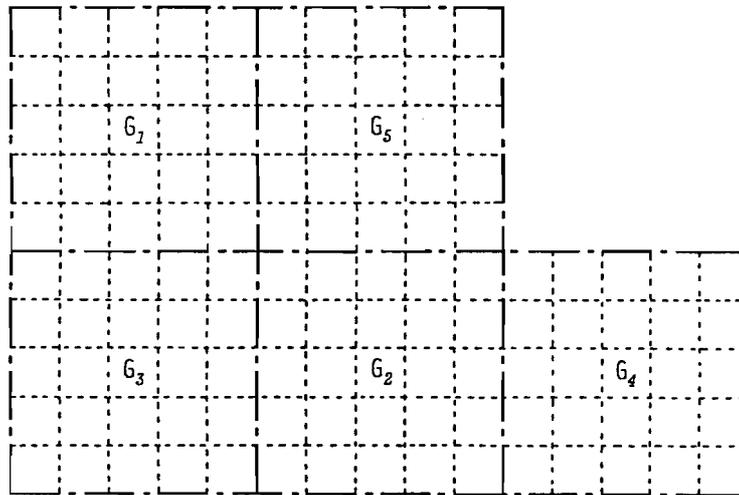


図 4.5 初期セル間レイアウト

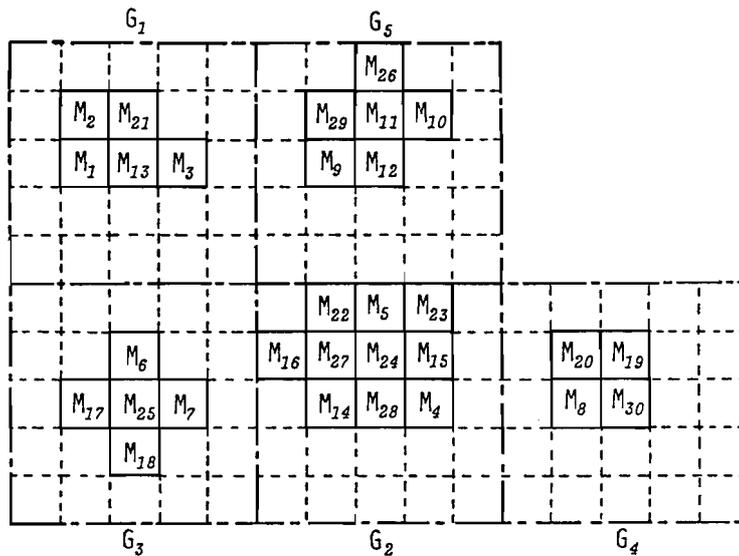


図 4.6 初期セル内レイアウト

備を交換しても、総運搬費用 C の値は減少しなかった。図 4.7 がその結果である。このときの総運搬費用は $C = 102020$ である。

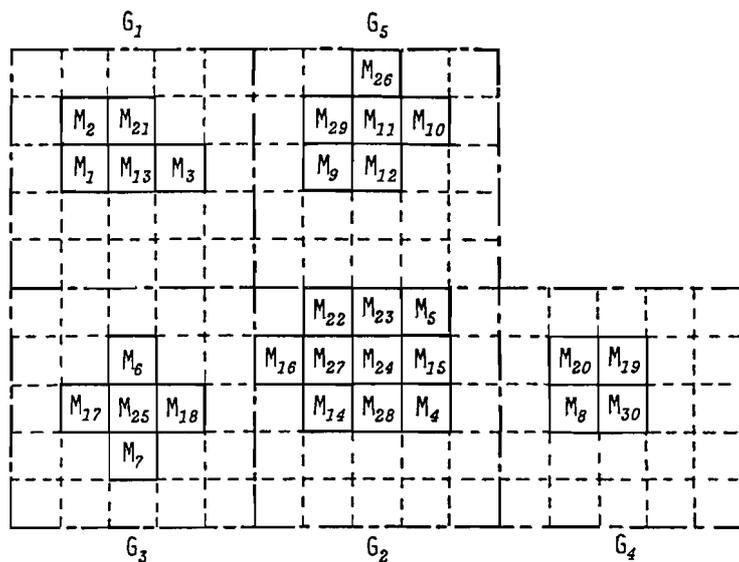


図 4.7 セル・レイアウトの結果

以上より、設定したセル構造生産システムに対する最終的なセル・レイアウトは図 4.7 となり、セル配置と各セル内の設備配置が決定された。なお、上記のセル・レイアウトを決定するために、本章で述べた手順をコンピュータ・プログラム化し (FORTRAN IV)、神戸大学計算センターの NEAC/ACOS システム 900 で実行した結果、3.99 秒の CPU 時間を要した。

4.7 結 言

本章では、GT 概念に基づくセル構造生産システムの設備配置計画におけるセル・レイアウト問題に対して、解法の第 1 段階としてヒューリスティックな近似解法について考察した。本章における研究成果を次に総括して述べる。

- (1) セル構造生産システムの設備配置計画において、セル配置と各セル内の設備配置の決定を統合したセル・レイアウト問題を提唱し、セル・レイア

ウトを行うための一設計法を確立した。

- (2) 設備配置問題に対する近似解法において，改良法の基本である総入替法の欠点の一つを明らかにし，これを解決するための修正総入替法を新たに提案した。ついで，数値実験により提案した修正総入替法の優位性が検証された。
- (3) 本章で提案したセル・レイアウトの決定手順は，設備の相対的な位置関係を決定することを主眼としたものであり，このことはセル・レイアウトの設計例をとおして明らかにされた。
- (4) セル・レイアウト問題をセル配置と各セル内の設備配置を同時に決定する2レベルの階層構造をもつ最適化問題として定式化するための基礎を与えた。その結果，今後セル構造生産システムの設備配置計画の最適化を図る上での指針を提供した。

第5章 コンピュータ援用設備レイアウト計画システム

5.1 緒 言

前章までに取り扱ってきた設備配置計画は、それぞれ物の流れのパターンに特徴をもった特定の生産システムに対する合理的な設備配置の設計法の発展に寄与することを主眼としていた。具体的に、第2章では製品生産量の変動を考慮したライン生産システム、第3章では代替設備シーケンスと運搬の方向を考慮した循環形生産システム、そして第4章ではGT概念に基づくセル構造生産システムに対する設備配置計画のための設計法がそれぞれ確立された。本章では立場を変えて、通常の機械加工工場によく見られるジョブショップ・レイアウトを対象に、一般的な設備配置問題を取り上げ、コンピュータ利用を前提とした汎用の自動レイアウト・システムの開発を試みる。

近年の情報処理技術の急速な発展に伴い、生産システムの設計、管理、運用のあらゆる局面でコンピュータが利用され、いわゆるCAD/CAMシステム（Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing system）およびこれらの一貫処理をめざした総合生産システム（IMS: Integrated Manufacturing System）の開発が進められている^{5.1)}。これまでレイアウト設計担当者の経験と勘によることが多かった設備レイアウト計画に対しても、1960年代初頭よりコンピュータ利用を前提とした自動レイアウト・システムの開発が行われてきた^{5.2)}。第1章1.2節で述べたように、設備レイアウト計画は生産システム内の効率的な物の流れを実現するように生産諸設備の空間的配置を決定することであり、生産システムの設計過程における重要な意思決定の一つである。したがって、総合生産システムの実現化において、設備レイアウト計画の自動化を図ることは極めて重要な課題であるといえる。このような設備レイアウト計画の自動化に対して、これまで開発された代表的なコンピュータ・プログラムは約40システムあるといわれ、これに関する調査ならびに報告がいくつかなされている^{5.3)~5.10)}。Nugentら^{5.11)}の分類によれば、これら

システムはレイアウト構成方法の違いにより次の二つに大別される。一つは、白紙の状態から出発し、順次新しい設備の配置を決定しながら最終的に望ましいレイアウト案を構築する構成方式（ construction procedure ）で、この代表例には CORELAP^{5.12)}、ALDEP^{5.13)} などがある。他の一つは、CRAFT^{5.14)} や COFAD^{5.15)} で代表される改良方式（ improvement procedure ）で、これは既存あるいは仮のレイアウトを基にして、設備の配置場所を変更しながらレイアウト案を修正・改良して行く方式である。これら以外にも、グラフ理論を援用した RUGR^{5.16)}、Moore の方法^{5.17)}、PLANTAPT^{5.18)} などや、レイアウト設計担当者とコンピュータの対話形式の Interactive CORELAP^{5.19)}、CHART^{5.20)}、MODULAP^{5.21)} などがあり、現在も新しいシステムの開発が積極的に進められている^{5.22)}。

ところで、上記した自動レイアウト・システムには、なお解決されねばならない多くの問題が残されているが、とくに次の諸点は重要な課題である。すなわち、(1)レイアウトの対象となる工場や職場の面積と形状の記述、(2)不規則な形状をした設備の取り扱いと設備の面積と形状の記述、(3)固定設備のような配置場所が指定されている設備の取り扱い、(4)設備を配置する際の設備の配置可能な向きの考慮、(5)設備レイアウト案の定量的評価のための評価基準の確立、および(6)設定した評価基準のもとで最適設備レイアウトを構築するための方法論の確立、などである。もちろん、これら諸問題の中には、これまで開発された自動レイアウト・システムの中で個別に解決されているものもあるが、すべてを同時に解決したシステムが開発されるまでには至っていない。そこで、著者はこの点に着目し、既存システムがかかえている問題点を解決すべく新たにコンピュータ援用設備レイアウト計画システム COFLAP (Computerized Facilities Layout Planning) の開発を行った^{5.23)}。

本章では、COFLAP システムの開発にあたって、レイアウトの対象となる工場や設備の面積と形状を記述する新しい方法を提案する^{5.24)}。その際、配置対象の全設備を配置可能な候補場所の多少に応じて、4種類の設備グループに分類することを考える。ついで、総設備レイアウト費用最小化の設備レイアウト

ト問題を定式化し，最適設備レイアウトを得るための方法論として分岐限界法による最適化アルゴリズムを提案する。さらに，提案した最適化アルゴリズムの効率化を図るために，分岐限界操作を容易に実施しうる方法についても検討する。そして，上記所論に基づいて開発したCOFLAPシステムの概要について述べるとともに，COFLAPシステムの特徴を明確にする。最後に，工場レイアウト設計の設備配置計画に対するCOFLAPシステムの適用例を簡単なケーススタディで示し，本システムへの必要な入力情報と得られる結果についても述べる。

5.2 面積と形状の記述法

工場レイアウト設計における設備配置計画の段階では，対象とする工場や設備などの面積と形状が与えられたもとで，工場建屋内の設備の空間的配置を決定することが問題となる。したがって，工場ないし職場の形状，建屋内の壁・柱・通路・階段などの位置，設備の面積と形状などを正確に取り扱えることが要求される。設備などの面積を取り扱うための一方法として，正方形で与えられる単位面積ブロック^(*)を用いた方法があり，これまでCRAFTをはじめとして多くの自動レイアウト・システムがこれを採用している^{5.25)~5.23)}。しかし，これらは単に面積のみを表示しているだけであり，形状は考慮されていない場合が多い。本章では，正方形の単位面積ブロックを用いて面積を表示するとともに，工場や設備の形状も同時に記述できる方法を提案する。

5.2.1 フロア面積と形状の記述

レイアウトの対象となる工場ないし職場の敷地（以後，フロアとよぶ）を記述するために，図 5.1 に示すような m 行 n 列のフロア記述マトリックスとよぶ単位面積ブロックからなる矩形を用いる。各ブロックには，図に示すような一

(*) 面積表示の基準となるブロックの大きさは，対象とする設備配置計画の内容に応じて任意に設定することができる（たとえば， $1\text{m} \times 1\text{m}$ ）。本章では，配置対象となる設備群の中で最小の面積をもつ設備の面積と形状を考慮して，これに最も近い正方形を単位面積のブロックとして採用している。

連の番号（以後、これをフロアブロック番号とよぶ）が付記されている。レイアウトの対象となるフロアの面積と形状は、これに相当するフロア記述マトリックス内のフロアブロック番号を指定することによって記述される。図 5.1 では、60個のブロックからなるフロア記述マトリックス（ $m=6$ 、 $n=10$ の場合）上に、面積が45単位面積のフロア形状が白色ブロックの集合として記述されている。このような記述法を採用することによって、次のような利点を得る。

- (1) 不規則な形状をしたフロアでも、フロアブロック番号を指定することにより記述でき、その結果として、フロア形状を正確に取り扱うことができる。
- (2) 壁・柱・階段などの建屋の一部を陽に考慮することができる。たとえば、

n=10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
m=6	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

Block number Column

図5.1 フロア記述マトリックスによるフロアの記述例

図中の斜線で示されているブロック（フロアブロック番号37の部分）が柱の位置に該当するならば、このブロックをフロアから除くことによって柱の位置を陽に考慮することができる。

これらは、CORELAPやCRAFTなどの従来の自動レイアウト・システムにおいて取り扱いが困難とされていた問題であるが、上述の記述法を用いることにより解決できる。

5.2.2 配置の柔軟性に基づく設備の分類

本章では、「設備」を単に工作機械などの生産設備に限定せず、コンベア、エレベータなどの搬送装置、さらに倉庫、事務所などの部門も含めた広い意味をもつものとする。ところで、このような設備の中には、エレベータのように、すでにその配置場所が決められている設備や、出入口のような建屋外部と接する位置にその配置場所が限定される設備もある。そこで、本章では、設備を配置することのできる候補場所の多少（これを設備の「配置の柔軟性」とよぶ）に応じて、全設備を表5.1に示すような4種類の設備グループに分類し、指標 α （= 0, 1, 2, 3）で表示する。

表5.1 配置の柔軟性に基づく設備の分類

候補場所が前もって一意に、一箇所に指定されている設備	$\alpha = 0$
候補場所が複数箇所指定されている設備	$\alpha = 1$
候補場所が限定された領域内に指定されている設備	$\alpha = 2$
フロア内のいずれの場所でも配置可能な設備	$\alpha = 3$

この分類法によれば、候補場所が前もって一意に、一箇所に指定されているような固定設備を取り扱えることはもちろん、4章で展開したセル構造生産システムの設備配置計画におけるセル内レイアウト段階に対しても、本章5.5節で述べるコンピュータ援用設備レイアウト計画システムCOFLAPを利用することができる。すなわち、各セルに属する設備は候補場所が限定された領域内

(つまり・セル・モジュール内)に指定された設備であると考えられるので、これらの設備は配置の柔軟性が $\alpha = 2$ の設備となる。そして、セル・モジュールが限定された配置候補領域に対応する。

5.2.3 設備の面積と形状の記述

設備の面積と形状を記述するために、5.2.1節で述べたフロアを記述する際に用いた単位面積ブロックと同じ大きさのブロックを採用する。まず、設備の所要面積に相当する単位面積ブロックの必要個数を計算し、求められたブロックの個数で設備の面積を表す。次に、設備の形状は配置の柔軟性の違いにより次のように記述される。

- (1) 配置の柔軟性が $\alpha = 0, 1$ の設備については、フロア上の候補場所に該当するフロアブロック番号を指定することによって記述する。この記述法は次節5.2.4で詳述する。
- (2) 配置の柔軟性が $\alpha = 2, 3$ の設備については、単位面積ブロックからなる矩形の設備記述マトリックスを用いて記述する。

図5.2に設備記述マトリックスを用いた設備の面積と形状の記述例を示す。図5.2(a)に示す設備*i*の面積と形状を設備記述マトリックスを用いて記述すれば、同図(b)のようになる。設備形状は設備番号*i*が記入されているブロックの集合で表示され、図中の斜線入りブロックは設備*i*の基準点を表す。ここで、設備の基準点とは、設備間の運搬距離を求める際の起点と終点であり、その設備への資材などの搬入、搬出口に対応するように設定することが望ましいが、これに限定されるものではなく、任意に設定してもよい。そして、このように設定された設備の基準点を原点とし、図5.2(c)のような $U_i - V_i$ 座標系を設定すれば、設備*i*を構成する各ブロックは図に示すような座標点として記述できる。さらに、設備の基準点を中心にその設備を90度ずつ回転させることにより、設備を配置する際の「配置向き」も考慮できる。たとえば、図5.2(d)は同図(c)の設備を時計方向に-90度回転した場合であり、設備の面積と形状はそのまま保存され、設備の配置向きだけが90度変更されている。

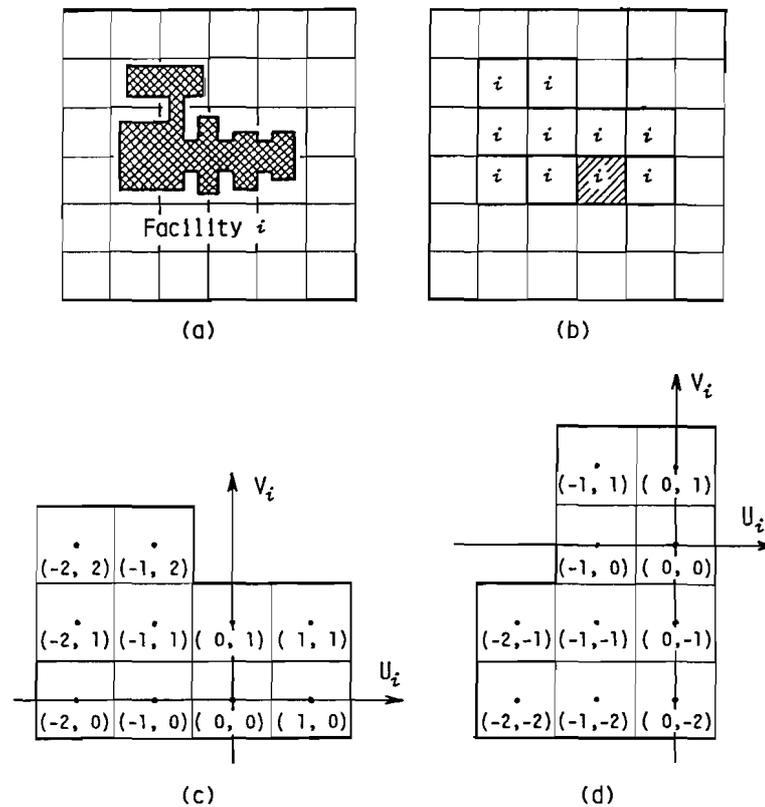


図5.2 設備記述マトリックスによる設備の面積と形状の記述例

このような設備記述マトリックスを配置の柔軟性が $\alpha = 2, 3$ の全設備についてそれぞれ準備することにより、従来の自動レイアウト・システムにおいて取り扱いが困難であった次の点が容易に解決できる。

- (1) 設備の面積だけでなく、その形状も設備配置案に正確に表示できる。
- (2) 設備の基準点を中心に設備を回転することができるので、その設備をフロア上に配置する際の配置向きも考慮できる。

5.2.4 候補場所の記述

配置の柔軟性の違いにより、設備が配置される候補場所の記述法は異なる。

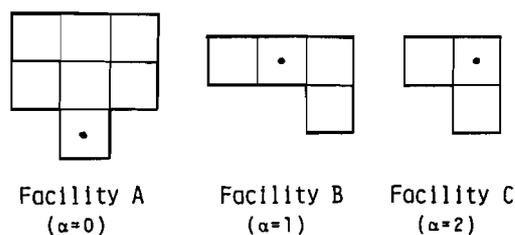
5.2.3節で述べたように、配置の柔軟性が $\alpha = 0, 1$ の設備については、それらが配置される候補場所を前もって与えておく必要がある。ここでは、Bazaraa^{5.34)}

の方法と同様に候補場所に該当するフロアブロック番号を指定することにより、その設備の候補場所を記述するとともに、設備の面積と形状も同時に記述する。この記述法の一例を図 5.3 に示す。60個の単位面積ブロックからなるフロア上に、図 5.3(a)のような面積と形状をもつ設備 A (固定設備) と設備 B (候補場所が 2箇所の場合) を配置するとき、設備 A, B のそれぞれの候補場所をフロアブロック番号で次のように与える。

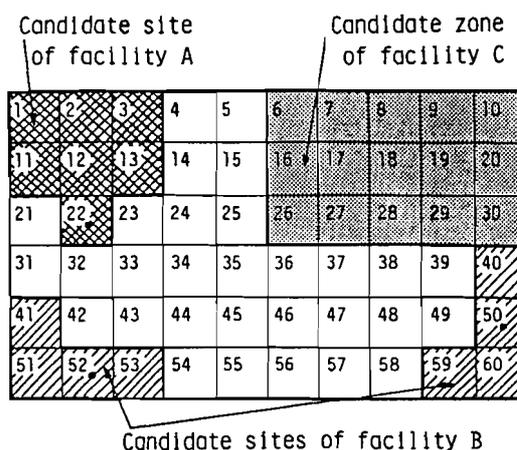
設備 A : (1, 2, 3, 11, 12, 13, 22)

設備 B : (41, 51, 52, 53) または (40, 50, 59, 60)

図 5.3(b) に示すように、フロアブロック番号で指定された各候補場所はそれぞれの設備の面積と形状も同時に記述していることがわかる。ここに、下線の引



(a) 設備の面積と形状



(b) 配置候補場所の指定

図 5.3 設備の配置候補場所の記述例

かれたフロアブロック番号は設備の基準点に対応するブロックを示し，図中では点印(・)で表示されている。

一方，配置の柔軟性が $\alpha = 2$ の設備については，フロア内の限定された領域として候補場所を設定するので，配置候補領域に該当するフロアブロック番号を各設備ごとに指定する。たとえば，図 5.3(a)の設備 C について，この設備の配置候補領域が同図(b)の黒色ブロックで表示された領域であるならば，これら黒色ブロックに付記されたフロアブロック番号(6, 7, 8, 9, 10, 16, 17, 18, 19, 20, 26, 27, 28, 29, 30)を指定することにより，設備 C の配置可能な候補領域が記述される。ここで，これらフロアブロック番号を設備 C に対する領域ブロック番号とよぶことにする。

配置の柔軟性が $\alpha = 3$ の設備については，フロア全体が配置可能な候補領域であるから，その領域に該当するフロアブロック番号，すなわち， $\alpha = 3$ の設備に対する領域ブロック番号をあらためて指定する必要はない。

5.3 設備レイアウト問題

5.3.1 総設備レイアウト費用

本章では，設備レイアウト計画の最適化に際し，2次の割当問題でよく用いられている評価関数^{5.35)}を採用し，総設備レイアウト費用 C を次式で与える。

$$C = \sum_{i=1}^N c_{i\rho(i)} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ただし，

N : 設備数

$c_{i\rho(i)}$: 設備 i を候補場所 $\rho(i)$ に配置するときの設備配置費用

$d_{\rho(i)\rho(j)}$: 設備 i が場所 $\rho(i)$ に，設備 j が場所 $\rho(j)$ にそれぞれ配置されたときの設備 i, j 間の運搬距離で， $d_{\rho(i)\rho(j)} = d_{\rho(j)\rho(i)}$ かつ $d_{\rho(i)\rho(i)} = 0$

- e_{ij} : 設備 i , j 間の単位距離当りの運搬費用で, $e_{ij} = g_{ij} \cdot f_{ij}$ かつ $e_{ii} = 0$
 f_{ij} : 設備 i から設備 j への運搬量で, $f_{ii} = 0$
 g_{ij} : 設備 i , j 間の単位量・単位距離当りの運搬費用で, $g_{ij} = g_{ji}$ かつ $g_{ii} = 0$
 i, j : 設備または設備番号 ($i, j = 1, 2, \dots, N$)
 $\rho(i)$: 設備 i が配置された候補場所, またはその場所が占有するフロアブロックの集合

式(5.1)の右辺第1項はフロア上の候補場所に各設備を配置するのに要する費用で, レイアウト実施のための施工費用の一部に相当する。たとえば, ある設備をその候補場所のうちの一箇所に配置するのに必要な工事費用や設備移転費用などがこれに該当する。これら費用の総和を総設備配置費用とよぶ。他方, 第2項は総運搬費用とよばれるもので, 計画されたレイアウトにおいて, 材料, 製品などの運搬に伴って発生する運搬費用の総和であり, レイアウトの良否によって大きく変動する。

5.3.2 設備間の運搬距離

式(5.1)で右辺第2項の運搬費用を計算する際, 設備間の運搬距離 $d_{\rho(i)\rho(j)}$ を求める必要がある。設備レイアウト問題においては, 一般に直交距離とユークリッド距離とよばれる2種類の設備間運搬距離の計算法があるが^{5.27)}, 本章では前者の直交距離を採用する。そこで, まずフロア上に配置された設備の基準点に対応する座標を求める。

いま, $m \times n$ 個のブロックからなるフロア上に, 設備 i, j が配置された場合を考える。図5.4に示すようなフロアブロック番号1のブロックの中心を座標(1, 1)とする $X-Y$ 座標系を設定する。このとき, 任意のフロアブロック番号 b ($=1, 2, \dots, m \times n$) のブロックの中心座標を (x_b, y_b) とすれば, 次式で与えられる。

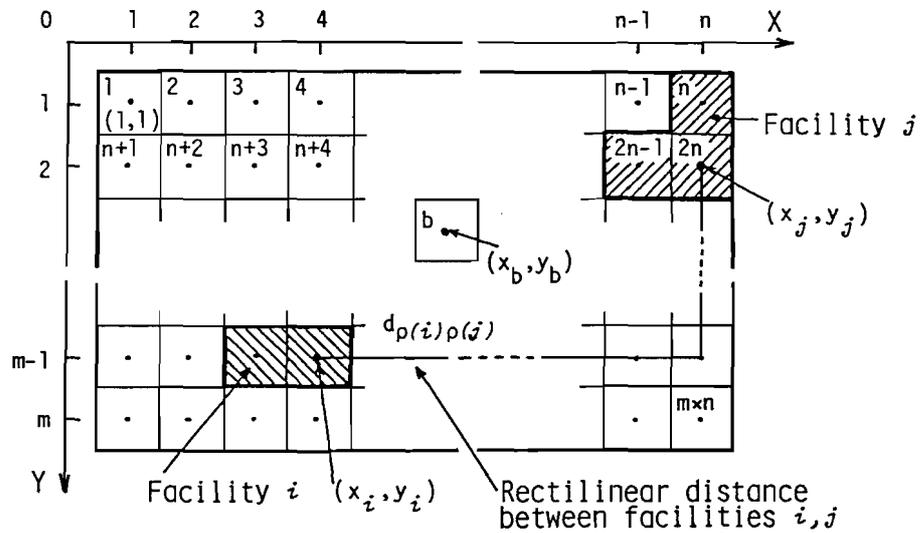


図5.4 直交距離による設備間の運搬距離

$$\left. \begin{aligned} x_b &= b - \lceil (b-1)/n \rceil \times n \\ y_b &= \lceil (b-1)/n \rceil + 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここに、記号 $\lceil a \rceil$ はガウス記号で、実数 a を越えない最大整数を意味する。

式(5.2)を用いて設備 i, j の基準点に対応するフロアブロックの中心座標がそれぞれ $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ と求められたとすれば、設備 i, j 間の運搬距離は次式で計算される。

$$d_{\rho(i)\rho(j)} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \dots\dots\dots (5.3)$$

ここに、 $d_{\rho(i)\rho(j)} = d_{\rho(j)\rho(i)}$ かつ $d_{\rho(i)\rho(i)} = 0 (i, j = 1, 2, \dots, N)$ 。

5.3.3 問題の記述と定式化

フロアと各設備の面積と形状が5.2節で述べた方法で記述され、さらに各設備についての設備配置費用と設備間の運搬量および単位量・単位距離当りの運搬費用が与えられたとする。本章で最適設備配置案を得るために解くべき設備レイアウト問題は次のように述べられる。

〔問題〕 式(5.1)で与えられる総設備レイアウト費用が最小となるように、

すべての設備をフロア内のそれぞれの候補場所のうちの一箇所に一意に配置せよ。

このとき、次の諸点が考慮される。

- (1) 設備が配置されるフロアの面積と形状を指定できること。
- (2) 各設備の面積と形状を正確に考慮でき、不規則形状の設備も取り扱えること。
- (3) 設備ごとに配置可能な位置を候補場所あるいは候補領域として指定できること。
- (4) 固定設備や設備を配置する際の配置向きも取り扱えること。

ここで、総設備レイアウト費用最小化の設備レイアウト問題を定式化すると、次のようになる。

評価関数：

$$\text{Minimize } C = \sum_{i=1}^N c_{i\rho(i)} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

制約条件：

$$\rho(i) \in I_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

$$\rho(i) \cap \rho(j) = \phi \quad (i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j) \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

ここに、 I_i は設備 i に関するすべての候補場所に該当するフロアブロックの集合である。

上記制約条件の式(5.5)は、フロア内の任意の一箇所に複数の設備を重複して配置することを禁止するための制約である。

5.4 最適設備レイアウトの決定

式(5.5)、式(5.6)の制約のもとで、式(5.4)で与えられる総設備レイアウト費用を最小にする最適設備レイアウトを決定するために、本章ではバック

トラッキングによる分岐限界法^{5.36)}を用いる。ここで、バックトラッキングを採用した主な理由は、前節までに述べた方法でフロアや設備の面積と形状および配置候補場所を記述し、これらをコンピュータ内部に記憶するのに多くの記憶容量が必要であり、解の探索用にあまり多くの記憶容量を割当てることができないというコンピュータの記憶容量面からの制約である。

5.4.1 設備配置順序と候補場所探索順序

バックトラッキングによる分岐限界法では、分岐操作がきわめて機械的に実行されるため、分岐限界アルゴリズムの有効性は下界の設定法とともに、分岐方法に大きく依存する^{5.37)}。したがって、最適解に至る探索過程の効率化を図る目的で、本章では設備の配置順序と候補場所の探索順序を次のように与える。

(1) 設備の配置順序

5.2.2節で述べたように、本章では全設備を配置の柔軟性に応じて4種類の設備グループに分類している。柔軟性の低い設備は最適設備レイアウトを求め際の一種の制約と考えられるので、設備を配置する順序はこの点を考慮して決定される。基本的には、まず設備グループ間の配置順序を決定し、次に各グループ内の設備についての配置順序を決定する。設備グループ間の配置順序は配置の柔軟性の低い順とし、 $\alpha = 1, 2, 3$ の各設備グループ内の配置順序は次のとおりである。

配置の柔軟性が $\alpha = 1$ の設備グループ内配置順序は、配置候補場所の数が少ない設備ほど配置の代替性は低いと考えられるので、この候補場所数の少ない順を配置順序とする。同数の場合は任意とする。

配置の柔軟性が $\alpha = 2$ の設備グループ内配置順序は、(配置候補領域面積/設備面積)の比の値の小さい順を配置順序とする。比の値が同じ場合には任意とする。

配置の柔軟性が $\alpha = 3$ の設備グループ内配置順序は、設備面積の大きい順を配置順序とする。面積が同じ場合には任意とする。

(2) 候補場所の探索順序

配置候補場所が複数箇所存在する設備については、あらかじめ候補場所の探索順序を決めておくことによって分岐操作を効率よく行うことができる。ここでは、候補場所の探索順序を次のように定める。なお、配置の柔軟性が α の設備グループを S_α で表す。

配置の柔軟性が $\alpha = 1$ の設備に対する候補場所の探索順序は、次のとおりである。ある設備 i ($\in S_1$) について、設備配置費用 $c_{i\rho(i)}$ の小さい順を候補場所 $\rho(i)$ ($\in I_i$) の探索順序とする。 $c_{i\rho(i)}$ が同じ値のときは任意とする。

配置の柔軟性が $\alpha = 2$ の設備に対する候補場所の探索順序は、設備の配置向きも考慮して決定される。ある設備 i ($\in S_2$) について、設備 i の配置候補領域における最小の領域ブロック番号をもつブロックに設備 i の基準点を合せ、この設備の最も望ましい配置向きに従って設備を配置する。これを設備 i に関する第1探索順位の候補場所とする。次に、その設備 i が90度回転により4方向の向きに配置可能であるならば、設備の基準点をそのままにして、順次、90度ずつ配置向きを変えることによって占有されるブロックの集合をそれぞれ第2、第3、第4の候補場所とし、その順位を候補場所の探索順序とする。その後、設備の基準点を次に小さい領域ブロック番号をもつブロックに移し、同様の手続きで候補場所の探索順序を決定する。このようにして、最大の領域ブロック番号をもつブロックまで設備の基準点を移動させながら、逐次、候補場所の探索順序を決定してゆく。

配置の柔軟性が $\alpha = 3$ の設備に対する候補場所の探索順序は、 $\alpha = 2$ の設備に対する配置候補領域をフロア全体とすることにより、既述と同様の手続きで決定される。

5.4.2 分岐限界法による解法

5.4.1節で決定した設備の配置順序と各設備の候補場所の探索順序をそれぞれ設備の設備番号と候補場所番号とする。ところで、配置の柔軟性が $\alpha = 0$ の設備は指定された唯一の候補場所に配置されねばならないので、分岐操作の対

象から除外される。ここでの分岐操作は、配置の柔軟性が $\alpha = 1, 2, 3$ のすべての設備について、それぞれの候補場所の中から一つの候補場所を選択し、その場所に設備を配置することに対応する。

(1) 分岐操作

配置の柔軟性が $\alpha = 0$ の設備グループ S_0 に属するすべての設備がフロア内の指定された候補場所に配置された状態を出発点として、まず、設備の配置順序に従って残りのすべての設備を、それぞれの配置可能な候補場所の中で最も探索順位の高い場所に配置することによって、一つの実行可能な設備レイアウトを得る。次に、こうして得られた最初の実行可能解に対する総設備レイアウト費用を最新の上界値として、配置順位の最も低い設備について、他の候補場所への配置替えを候補場所の探索順序に従って実行し、順次、暫定解の更新を行う。そして、その設備の配置替えがこれ以上不可能となったとき、次に配置順位の低い設備に移り（この操作がバックトラッキングとよばれる）、同様の手続きを行う。このような配置替えとバックトラッキングを配置順位の低い設備から順に繰り返し実行することによって分岐操作が進められる。

(2) 限界操作

バックトラッキングによる分岐限界法では、解の探索に必要な記憶容量は作成するノード数に依存しないので、解の探索を終了するまでに要する総計算時間が短くなるような下界が望まれる。本章では、個々の下界値を求める計算時間を短くすることにより総計算時間の短縮を図ることを主目的に、下界の計算式としては単純なものを採用する。分岐レベル r のノード Q_r に対する下界 $LB(Q_r)$ を次のように設定する。

$$LB(Q_r) = \sum_{i \in Q_r} c_{i\rho(i)} + \sum_{i,j \in Q_r} e_{ij} \cdot d_{\rho(i)\rho(j)} + \sum_{i \in Q_r, j \in \bar{Q}_r} e_{ij} + \sum_{i \in \bar{Q}_r} \min_{\rho(i) \in I_i} \{c_{i\rho(i)}\} + \sum_{i,j \in \bar{Q}_r} e_{ij} \dots\dots\dots (5.7)$$

式(5.7)では、分岐レベル r の段階で、すでに配置が決定された設備群 (Q_r)

とまだ配置が決定されていない設備群 (\bar{Q}_r) とに分けて総設備レイアウト費用の下界値を計算している。式 (5.7) 右辺第 1 項はすでに配置済の設備に関する設備配置費用の総和であり、第 2 項はこれら配置済設備間の運搬費用の総和である。第 3 項は配置済設備と未配置設備の間の総運搬費用に対する下界値であり、第 4 項は未配置設備に関する総設備配置費用に対する下界値、および第 5 項は未配置設備間の総運搬費用に対する下界値である。ここに、第 4 項の未配置設備に関する総設備配置費用については、各未配置設備がそれぞれの候補場所のうちのいずれに配置されるかはわかっていないが、いずれの候補場所に配置されたとしても最小限必要となる設備配置費用の最小値を考慮し、これらの総和を下界値としている。他方、第 3、第 5 項では、いずれも設備間運搬距離をすべて単位距離 (ここでは、単位距離を 1 としている) として、総運搬費用の下界値を計算している。

5.4.3 最適化アルゴリズム

以上の展開より、総設備レイアウト費用最小化基準のもとで最適設備レイアウトを決定するアルゴリズムは次のように述べられる。なお、配置の柔軟性が α の設備グループ S_α に属する設備数を N_α で表し、与えられた設備レイアウト問題の実行可能性を判定するための指標を t とする。

〔ステップ 1〕 配置の柔軟性が $\alpha = 0$ の設備をフロア上の指定された候補場所に配置する。分岐レベル $r = 0$ ，分岐対象ノード $Q_r = \{1, 2, \dots, N_0\}$ ，設備番号 $i = N_0$ ，実行可能性の判定指標 $t = 0$ ，実行可能解の総設備レイアウト費用の値 $C^* = \infty$ に設定する。

〔ステップ 2〕 分岐レベル $r = r + 1$ ，設備番号 $i = i + 1$ ，設備 i の配置候補場所の探索順位を $p_i = 1$ とする。

〔ステップ 3〕 設備 i を第 p_i 探索順位の候補場所 $\rho(p_i)$ に配置するための枝を分岐し、最新ノード $Q_r = Q_{r-1} + \{i\}$ を作成する。

〔ステップ 4〕 設備 i を候補場所 $\rho(p_i)$ に配置できるかどうかを調べ、
(i) 配置可能ならば、ノード Q_r について下界値 $LB(Q_r)$ を計算する。

- (ii) 配置不可能ならば、下界値を $LB(Q_r) = \infty$ とおく。
- [ステップ5] 最新ノード Q_r についての下界値 $LB(Q_r)$ が、
 - (i) $LB(Q_r) \geq C^*$ ならば、ステップ6へ行く。
 - (ii) $LB(Q_r) < C^*$ ならば、ステップ9へ行く。
- [ステップ6] 設備 i の候補場所 $\rho(p_i)$ への配置を取り消す。
- [ステップ7] 設備 i の配置替えを行うために、次の候補場所を探し、
 - (i) 候補場所があれば、 $p_i = p_i + 1$ としてステップ3へもどる。
 - (ii) 候補場所がなければ、設備 i をノード Q_r から取り除き、 $Q_r = Q_r - \{i\}$ としてステップ8へ行く。
- [ステップ8] $r = r - 1$, $i = i - 1$ とし、
 - (i) $r = 0$ かつ $t = 0$ ならば、ステップ10へ行く。
 - (ii) $r = 0$ かつ $t \neq 0$ ならば、ステップ11へ行く。
 - (iii) $r \neq 0$ ならば、ステップ7へもどる。
- [ステップ9] 分岐レベル r について、
 - (i) $r = N - N_0$ ならば、 $t = t + 1$, $C^* = LB(Q_r)$ とする。このノード Q_r に対応する解がこれまで得られた実行可能解の中で最良のものであるから、これを最新の暫定解とし、ステップ7へもどる。
 - (ii) $r < N - N_0$ ならば、ステップ2へもどる。
- [ステップ10] 与えられた問題に対する実行可能解は存在せず、この問題は実行不可能である。終了。
- [ステップ11] C^* を与えるノード Q_r に対応する実行可能解が最適設備レイアウトである。終了。

なお、上記最適化アルゴリズムのステップ4において、設備 i をその候補場所 $\rho(p_i)$ に配置できるかどうかを調べることは、式(5.5)、式(5.6)の制約条件を満足するかどうかを確認することに対応する。

5.5 コンピュータ援用設備レイアウト計画システム COFLAP

5.2節で述べた面積と形状の記述法、5.3節で設定した総設備レイアウト費

用最小化の設備レイアウト問題，および 5.4 節で提案した分岐限界法による最適化アルゴリズムに基づいて，これら一連の処理手続きをコンピュータ利用を前提とした自動レイアウト・システムとして，アプリケーション・プログラム化した。開発したシステムをコンピュータ援用設備レイアウト計画システム COFLAP (COmputerized Facilities LAYout Planning) と名付けた。以下に，このシステムの概要を述べる。

開発した COFLAP システムは，図 5.5 に示すようにフロア情報，設備情報，コスト情報および設備間の運搬量に関するフロー情報を入力として，総設備レイアウト費用最小化基準のもとで最適設備レイアウト案をブロック・レイアウトの形で出力するシステムである。本システムを開発するにあたっては，既存システムの長所を生かしつつ，次の基本的な構想に基づいて開発した。

- (1) レイアウトの対象となるフロアや設備の面積と形状を記述するための手段として，既存システムと同様，正方形で与えられる単位面積ブロックを面積・形状記述の最小基準単位として採用する。
- (2) 新規レイアウト計画および既存レイアウトの再レイアウト計画のいずれにも適用できるように，レイアウト・アルゴリズムは構成方式とする。
- (3) 設備ごとに配置可能な位置を候補場所ないし候補領域として指定できるように，配置候補場所の多少，すなわち，配置の柔軟性に応じて設備の分類を行う。
- (4) 設備レイアウト案を定量的に評価するために，総設備レイアウト費用最小化を評価基準として採用する。
- (5) 最適設備レイアウト案を得るために，バックトラッキングによる分岐限界法を最適化手法として採用する。

図 5.6 に本システムのプログラム構成を示す。プログラムは，(1)入力情報を加工し，設備レイアウト問題をコンピュータ内部に構築するデータ処理ルーチン (READ, DEFINE)，(2)設備配置を実行し，総設備レイアウト費用を計算して，設備レイアウト案を評価する設備配置ルーチン (ASSIGN, CALCUL, EVALU)，(3)設備レイアウト案と各種結果のまとめを出力するレポート作成

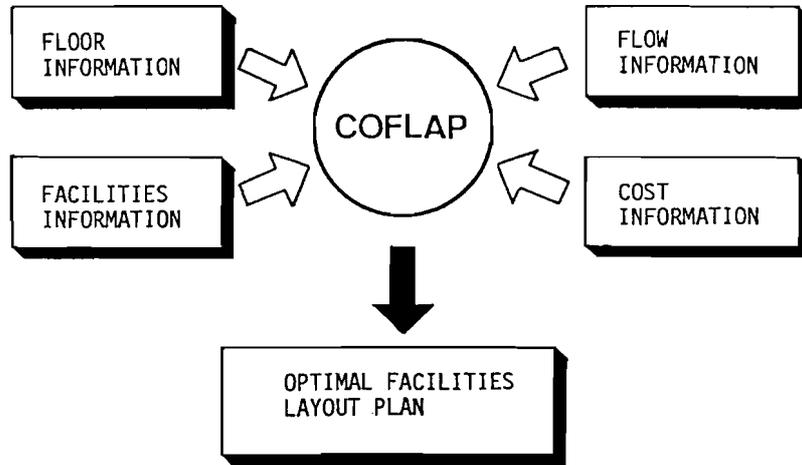


図5.5 COFLPシステム

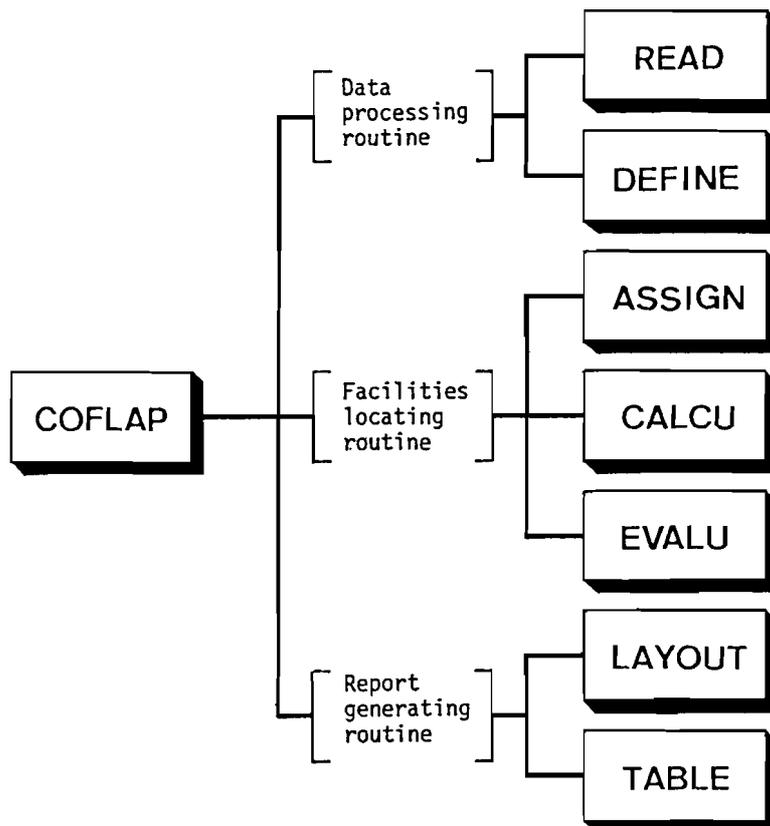


図5.6 COFLAPシステムのプログラム構成

ルーチン (LAYOUT , TABLE) の主要 3 部分からなる。ここに, 5. 4. 3 節で提案した最適化アルゴリズムが本システムの主要部である設備配置ルーチンに対応している。本システムのプログラムは FORTRAN IV 言語で書かれ, プログラム・ステップ数は約 450 ステップであり, 所要メモリー容量は約 35 Kワードである。本システム全体のプログラム・リストが付録に掲げられている。なお, COFLAP システムへの 4 種類の入力情報に関する詳細は, 次節のケーススタディにおいて述べる。

本章 5. 1 節で述べたように, 開発した COFLAP システムは既存の自動レイアウト・システムの短所あるいはこれまで取り扱いが困難であった点を解消することを主眼としたシステムであり, 最終的な詳細レイアウト案を提供しうるものではない。あくまでも, 工場レイアウト設計の設備配置計画段階において, レイアウト設計担当者の設計行為の一部分を支援する一つの手段であると著者は考えている。もちろん, この点に関しては CORELAP や CRAFT をはじめとする既存の自動レイアウト・システムも同じであるが, 次のような諸点において COFLAP システムの有用性が認められよう。

- (1) 既存システムの大部分が設備の面積しか表示しえないのに対して, 本システムでは設備形状も記述できる。
- (2) 設備を配置する際の配置向きを考慮することはこれまで不可能であったが, 本システムでは考慮できる。
- (3) 固定設備を取り扱うことのできる既存システムはすでに存在しているが (たとえば, ALDEP など), 本システムのように配置候補領域を設定し, 領域内であればいずれの場所でも配置できるような設備も取り扱うことができる自動レイアウト・システムはいまだ開発されていない。
- (4) レイアウトの対象となるフロアの形状を矩形に限定したものが多かったが, 本システムでは不規則な形状をしたフロアでも取り扱うことができる。
- (5) 本システムによれば, 総設備レイアウト費用最小化基準のもとで最適設備レイアウトを得ることができる。

ところで, 上記(5)は COFLAP システムの長所である反面, 短所でもある。

それは、5.4.3節で提案した最適化アルゴリズムが分岐限界法を援用しているため、設備数の多い大規模な設備レイアウト問題に対して、有効な計算時間内で最適解を得ることが極めて困難となるからである。さらに、設備レイアウト案の評価を総設備レイアウト費用最小化基準だけで行っている点である。通常、工場レイアウト設計は多目標の最適化問題であるので、たとえ最適設備レイアウト案を得ることができたとしても、一つの評価基準に対して最適化を図ることは問題であろう。しかしながら、このような問題点を残しているものの、既述の諸長所を考慮すれば、本システムはこれまで開発された既存システムに比べ有用であると考えられる。なお、上述した問題点を解決するために、著者は、得られる解の最適性の保証はないが、短時間で複数の実行可能な近似解を提供しうる自動レイアウト・システム^{5.38)}も開発していることを付記する。

5.6 ケーススタディ

開発したCOFLAPシステムを用いた設備レイアウト計画の一例を簡単なケーススタディで示す。用いた例題は、8行10列のフロア記述マトリックス内の72個のブロックからなるフロアに、11台の設備を総設備レイアウト費用が最小となるように配置する問題である。COFLAPシステムへの入力情報は以下のとおりである。

(1) フロア情報

設備レイアウトの対象となる工場フロアの面積と形状は、5.2.1節で述べたように矩形のフロア記述マトリックスを用いて記述される。本ケーススタディでは、図5.7に示す8行10列($m=8$, $n=10$)のフロア記述マトリックス上に、面積が72単位面積の不規則な形状をしたフロアを考える。図中の白色ブロック以外の領域(フロアブロック番号67, 68, 69, 70, 77, 78, 79, 80の部分)はフロア対象外であり、したがって設備を配置することはできない。フロアの面積と形状は、フロアに該当するフロアブロック番号か、あるいはフロア対象外の部分のフロアブロック番号のいずれかを指定入力するこ

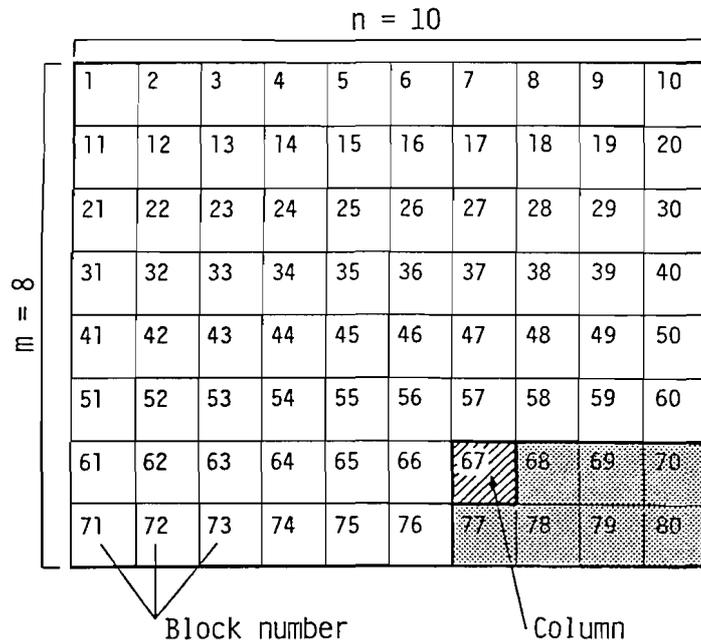


図5.7 フロア情報

とによって記述される。なお、本システムでは、入力操作の便宜上、後者の方法を採用している。

(2) 設備情報

配置対象である設備として、それぞれ面積と形状が異なる 11 台の設備を考える。5.2.2 節で述べた配置の柔軟性に基づいて、これら 11 台の設備が次のように分類される。

- (a) 候補場所が前もって一意に、一箇所に指定されている設備 ($\alpha = 0$)
 2 台 (設備 A, B)
- (b) 候補場所が複数箇所指定されている設備 ($\alpha = 1$)
 4 台 (設備 C, D, E, F)
- (c) 候補場所が限定された領域内に指定されている設備 ($\alpha = 2$)
 3 台 (設備 G, H, I)
- (d) フロア内のいずれの場所でも配置可能な設備 ($\alpha = 3$)
 2 台 (設備 J, K)

設備情報には、各設備の(i)設備名、(ii)設備番号、(iii)配置の柔軟性を表す指標 α 、(iv)単位面積ブロックの集合で記述される設備の面積と形状、および設備の基準点、(v)配置候補場所ないし配置候補領域を指定するフロアブロック番号、(vi)配置の柔軟性が $\alpha = 2$ と 3 の設備に対する配置可能向き、および (vii)設備配置費用の 7 種類のデータがある。表 5.2 はこれらを整理したものである。ここで、設備 A から F までは、それぞれの配置候補場所に該当するフロアブロック番号を (v) 欄のように指定することによって、面積と形状が記述される。他方、設備 G から K までの 5 台の設備については、5.2.3 節で述べた方法により、それぞれの面積と形状を記述する。これを、設備 G を例にとり説明する。設備 G は 4 個の単位面積ブロックからなる長方形の設備で、設備の基準点は表 5.2 の (iv) 欄に示されている。そこで、この基準点を設備 G についての座標原点とし、5.2.3 節のように直交座標を設定すれば、設備 G を構成する 4 個の単位面積ブロックの各中心点は次のような座標点として表示される。

$$(-1, 0), (0, 0), (1, 0), (2, 0)$$

そして、上記各数値をこの順に入力することによって、設備 G の形状がコンピュータ内部に記憶される。

(3) コスト情報

コスト情報には、次の 2 種類のデータがある。

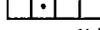
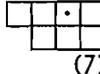
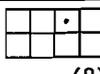
(a) 設備配置費用： $c_{ip}(i)$

(b) 設備間の単位量・単位距離当りの運搬費用： g_{ij}

配置の柔軟性が $\alpha = 1$ の設備に対して、代替候補場所ごとに異なる設備配置費用を設定することができる。他方、配置の柔軟性が $\alpha = 2, 3$ の各設備については、それぞれの配置候補領域に対し、一律の設備配置費用を設定する。これら設備配置費用に関する数値は、表 5.2 の (vii) 欄に示されている。

設備間の単位量・単位距離当りの運搬費用については、運搬方法、運搬手段などの違いを考慮して、任意の 2 設備間ごとに異なる費用を設定することができる。本ケーススタディでは、運搬方法や運搬手段などを積極的に考慮していないため、各設備間の単位量・単位距離当りの運搬費用はすべて 1 単位費用と

表 5.2 設 備 情 報

I	II	III	IV	V	VI	VII
A	1	$\alpha = 0$	 (6)	55,56,65, 66,75,76	—	100
B	2	$\alpha = 0$	 (6)	39,40,49, 50,59,60	—	200
C	3	$\alpha = 1$	 (8)	1, 2, 3,11, 12,13,21,22	—	100
				8, 9,10,18, 19,20,29,30		110
D	4	$\alpha = 1$	 (6)	53,54,63, 64,73,74	—	150
				5, 6, 7, 15,16,17		200
E	5	$\alpha = 1$	 (7)	41,51,52,61, 62,71,72	—	100
				3, 4, 5, 6, 13,14,15		120
				27,28,37,38, 47,48,58		150
F	6	$\alpha = 1$	 (1)	3	—	100
				13		100
				22		100
				23		100
G	7	$\alpha = 2$	 (4)	25,26,27,28, 35,36,37,38, 45,46,47,48	↑ (1)	100
H	8	$\alpha = 2$	 (7)	1, 2,11,12, 21,22,31,32, 41,42,51,52, 61,62,71,72	↑ (1)	160
I	9	$\alpha = 2$	 (7)	32,33,34,35, 42,43,44,45, 52,53,54,55, 62,63,64,65, 72,73,74,75	↕ (3)	100
J	10	$\alpha = 3$	 (7)	Whole floor	↗ (2)	110
K	11	$\alpha = 3$	 (8)	Whole floor	↕ (2)	120

しているが、任意の場合の取り扱いも可能である。

(4) フロー情報

各設備間の材料、製品などの運搬量に関するフロー情報は、一般に表 5.3 に示すような From - To チャートの形で与えられるが、本システムでは、設備 i

から設備 j への運搬量 (f_{ij}) と設備 j から設備 i への運搬量 (f_{ji}) の総和を設備 i, j 間の運搬量として入力している。

表 5.3 フロ - 情報

From \ To	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	0	0	20	0	60	0	120	10	0	0	50
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	50	0	0	20	0	0	0	0	0	0
D	0	0	50	0	10	0	0	80	0	0	60
E	0	10	0	0	0	0	0	60	40	20	0
F	0	0	0	0	0	0	0	20	10	10	30
G	0	0	0	80	40	0	0	0	0	10	0
H	0	20	0	60	0	20	0	0	10	0	80
I	0	0	0	50	0	10	10	0	0	0	40
J	0	0	0	10	0	10	0	20	0	0	0
K	0	180	0	0	0	30	0	0	50	0	0

以上の各種データを COFLAP システムに入力することにより、コンピュータ内部に本ケーススタディで取り扱う設備レイアウト問題が構築される。以下では、COFLAP システムによる最適設備レイアウトの設計過程を出力結果にそって述べる。図 5.8(a)~(k) は COFLAP システムからの出力結果である。最適解の探索過程において、暫定解の更新が行われるごとにそのときの実行可能解が出力される。出力される情報は次のとおりである。

- (1) 得られた暫定解の探索順位 (*** INCUMBENT SOLUTION *** □)
- (2) 作成されたノードの中で、下界値が計算されたノード数 (NO OF ACCEPTED NODES = □)
- (3) 作成されたノードの中で、最適化アルゴリズムのステップ 4 において制約条件の式 (5.5), (5.6) を満足しなかったために除去されたノード数 (NO OF REJECTED NODES = □)
- (4) これまでに作成された総ノード数 (TOTAL GENERATED NODES = □)
- (5) これまでに得られた実行可能解の数 (NO OF FEASIBLE SOLUTIONS = □)

(6) 得られた暫定解における総設備レイアウト費用(TOTAL FACILITIES LAYOUT COST = □)

(7) 得られた暫定解における設備レイアウト案(ブロック・レイアウト形式)。各設備はその設備番号で表示されている。また、数字 0 はその場所には何も配置されていないことを、他方、数字 -1 はフロア対象外であることを意味する。

(8) 各設備の基準点に対応するフロアブロック番号

そして、最適設備レイアウトを与える暫定解と、最適解を得るまでに作成された上記(2), (3), (4), (5)の情報が最後に出力される。

(1) 暫定解 1 (図 5.8(a))

最初に得られた暫定解を図 5.8(a)に示す。これに対する総設備レイアウト費用は 9 6 9 0 単位費用であるから、この値を限界操作における上界値として、以後の探索が進められる。

(2) 暫定解 2 (図 5.8(b))

設備配置順位の最も低い設備 K (設備番号 1 1) について、配置向きの変更が行われている。この結果、総設備レイアウト費用が 5 6 0 単位費用減少し、暫定解と上界値の更新がなされる。

(3) 暫定解 3 (図 5.8(c))

設備の配置替えとバックトラッキングを、設備配置順位の低い設備から順に繰り返し行った結果、図 5.8(c)に示される第 3 番目の暫定解を得た。設備 F (設備番号 6) までバックトラッキングが行われたことがわかる。さらに、暫定解 2 と 3 の途中で、一つの実行可能解が得られているが、このときの総設備レイアウト費用が暫定解 2 のそれよりも大きいために、暫定解の更新はなされなかった。

(4) 暫定解 4 (図 5.8(d))

再び設備 K について配置替えが行われている。ただし、総設備レイアウト費用は暫定解 3 と同じく 8 9 9 0 単位費用である。

(5) 暫定解 5 (図 5. 8 (e))

設備 D (設備番号 4) までバックトラッキングして、設備の配置替えを行ったために、総設備レイアウト費用がかなり減少している。これまでとは違った設備レイアウトの結果が得られていることがわかる。

(6) 暫定解 6 (図 5. 8 (f))

設備 J (設備番号 1 0) の配置位置が変更されているが、総設備レイアウト費用は 7 8 0 0 単位費用のままである。

(7) 暫定解 7 (図 5. 8 (g))

この設備レイアウト結果は、暫定解 5 における結果と比較すれば、設備 G (設備番号 7) と設備 K (設備番号 1 1) の配置位置が入れ替わっているだけであるが、総設備レイアウト費用は 4 0 単位費用減少していることがわかる。

(8) 暫定解 8 (図 5. 8 (h))

暫定解 7 における設備レイアウトで、設備 K の配置向きを変更しただけで総設備レイアウト費用が 2 8 0 単位費用減少し、暫定解の更新が行われた。

(9) 暫定解 9 (図 5. 8 (i))

設備 J と設備 K の配置替えがなされている。その結果、総設備レイアウト費用は 7 4 2 0 単位費用となった。

(10) 暫定解 1 0 (図 5. 8 (j))

再び設備 F までバックトラッキングが行われ、第 3 2 番目の実行可能解として図に示すような設備レイアウトを得た。

その後、設備の配置替えとバックトラッキングを繰り返した結果、図 5. 8 (k) に示すような最終結果に至った。これによると、解の探索終了までに作成した総ノード数は 2 0 4 8 5 個で、そのうち 2 0 1 4 6 個のノードに対応する設備の配置が制約条件を満足しなかったとして除去され、実際に下界値が計算されたノード数が 3 3 9 個であったことがわかる。さらに、解の探索終了までに得られた実行可能解の総数は 3 4 個であり、第 1 0 番目に得られた暫定解における設備レイアウトが最適であることが示されている。図 5. 9 はこの最適設備レイアウトを書き改めたものである。なお、本ケーススタディの計算には、神戸大学計

```

***  INCUMBENT SOLUTION  ***  1
-----
NO OF ACCEPTED  NODES=  28
NO OF REJECTED  NODES= 326
TOTAL GENERATED NODES= 354
-----
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS=  1
-----
TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 9690
-----

```

8	8	6	11	11	11	11	3	3	3
8	8	0	11	11	11	11	3	3	3
8	0	0	0	7	7	7	7	3	3
8	9	9	9	10	10	10	10	2	2
5	9	9	9	9	10	10	10	2	2
5	5	4	4	1	1	0	0	2	2
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1

```

-----
FACILITY :    1    2    3    4    5    6    7    8    9   10   11
CENTROID  :   65   39   19   64   62    3   26   12   44   37    6
-----

```

(a) 暫定解 1

```

***  INCUMBENT SOLUTION  ***  2
-----
NO OF ACCEPTED  NODES=  29
NO OF REJECTED  NODES= 339
TOTAL GENERATED NODES= 368
-----
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS=  2
-----
TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 9130
-----

```

8	8	6	11	11	11	11	3	3	3
8	8	0	11	11	11	11	3	3	3
8	0	0	0	7	7	7	7	3	3
8	9	9	9	10	10	10	10	2	2
5	9	9	9	9	10	10	10	2	2
5	5	4	4	1	1	0	0	2	2
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1

```

-----
FACILITY :    1    2    3    4    5    6    7    8    9   10   11
CENTROID  :   65   39   19   64   62    3   26   12   44   37   15
-----

```

(b) 暫定解 2

図 2.5 COFLAP システムの出力結果

*** INCUMBENT SOLUTION *** 3

NO OF ACCEPTED NODES= 46
NO OF REJECTED NODES= 1253
TOTAL GENERATED NODES= 1299

NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 4

TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 8990

8	8	0	11	11	11	11	3	3	3
8	8	6	11	11	11	11	3	3	3
8	0	0	0	7	7	7	7	3	3
8	9	9	9	10	10	10	10	2	2
5	9	9	9	9	10	10	10	2	2
5	5	4	4	1	1	0	0	2	2
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1

FACILITY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CENTROID :	65	39	19	64	62	13	26	12	44	37	15

(c) 暫定解 3

*** INCUMBENT SOLUTION *** 4

NO OF ACCEPTED NODES= 84
NO OF REJECTED NODES= 3170
TOTAL GENERATED NODES= 3254

NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 11

TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 8990

8	8	11	11	11	11	0	3	3	3
8	8	11	11	11	11	0	3	3	3
8	0	6	0	7	7	7	7	3	3
8	9	9	9	10	10	10	10	2	2
5	9	9	9	9	10	10	10	2	2
5	5	4	4	1	1	0	0	2	2
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1
5	5	4	4	1	1	-1	-1	-1	-1

FACILITY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CENTROID :	65	39	19	64	62	23	26	12	44	37	14

(d) 暫定解 4

図5.8 COFLAPシステムの出力結果(続き)

*** INCUMBENT SOLUTION *** 5

NO OF ACCEPTED NODES= 155
NO OF REJECTED NODES= 6518
TOTAL GENERATED NODES= 6673

NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 13

TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 7800

8	8	6	10	4	4	4	3	3	3
8	8	10	10	4	4	4	3	3	3
8	0	10	10	7	7	7	7	3	3
8	0	10	10	11	11	11	11	2	2
5	0	0	9	11	11	11	11	2	2
5	5	9	9	1	1	0	0	2	2
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1

FACILITY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CENTROID :	65	39	19	16	62	3	26	12	54	24	37

(e) 暫定解 5

*** INCUMBENT SOLUTION *** 6

NO OF ACCEPTED NODES= 158
NO OF REJECTED NODES= 6622
TOTAL GENERATED NODES= 6780

NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 15

TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 7800

8	8	6	0	4	4	4	3	3	3
8	8	10	0	4	4	4	3	3	3
8	10	10	0	7	7	7	7	3	3
8	10	10	0	11	11	11	11	2	2
5	10	10	9	11	11	11	11	2	2
5	5	9	9	1	1	0	0	2	2
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1

FACILITY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CENTROID :	65	39	19	16	62	3	26	12	54	33	37

(f) 暫定解 6

図5.8 COFLAPシステムの出力結果 (続き)

*** INCUMBENT SOLUTION *** 7											
NO OF ACCEPTED NODES= 189											
NO OF REJECTED NODES= 8924											
TOTAL GENERATED NODES= 9113											
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 19											
TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 7760											
8	8	6	10	4	4	4	3	3	3		
8	8	10	10	4	4	4	3	3	3		
8	0	10	10	11	11	11	11	3	3		
8	0	10	10	11	11	11	11	2	2		
5	0	0	9	7	7	7	7	2	2		
5	5	9	9	1	1	0	0	2	2		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
FACILITY : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11											
CENTROID : 65 39 19 16 62 3 46 12 54 24 27											

(g) 暫定解 7

*** INCUMBENT SOLUTION *** 8											
NO OF ACCEPTED NODES= 190											
NO OF REJECTED NODES= 8937											
TOTAL GENERATED NODES= 9127											
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 20											
TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 7480											
3	8	6	10	4	4	4	3	3	3		
8	8	10	10	4	4	4	3	3	3		
8	0	10	10	11	11	11	11	3	3		
8	0	10	10	11	11	11	11	2	2		
5	0	0	9	7	7	7	7	2	2		
5	5	9	9	1	1	0	0	2	2		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
FACILITY : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11											
CENTROID : 65 39 19 16 62 3 46 12 54 24 36											

(h) 暫定解 8

図5.8 COFLAPシステムの実出力結果(続き)

*** INCUMBENT SOLUTION *** 9											
NO OF ACCEPTED NODES= 197											
NO OF REJECTED NODES= 9321											
TOTAL GENERATED NODES= 9518											
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 23											
TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 7420											
8	8	6	0	4	4	4	3	3	3		
8	8	10	0	4	4	4	3	3	3		
8	10	10	11	11	11	11	0	3	3		
8	10	10	11	11	11	11	0	2	2		
5	10	10	9	7	7	7	7	2	2		
5	5	9	9	1	1	0	0	2	2		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
FACILITY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CENTROID :	65	39	19	16	62	3	46	12	54	33	35

(i) 暫定解 9

*** INCUMBENT SOLUTION *** 10											
NO OF ACCEPTED NODES= 288											
NO OF REJECTED NODES=15205											
TOTAL GENERATED NODES=16493											
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 32											
TOTAL FACILITIES LAYOUT COST= 7340											
8	8	10	10	4	4	4	3	3	3		
8	8	10	10	4	4	4	3	3	3		
8	6	10	10	11	11	11	11	3	3		
8	0	10	10	11	11	11	11	2	2		
5	0	0	9	7	7	7	7	2	2		
5	5	9	9	1	1	0	0	2	2		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
5	5	9	9	1	1	-1	-1	-1	-1		
FACILITY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CENTROID :	65	39	19	16	62	22	46	12	54	24	36

(j) 暫定解 10

図5.8 COFLAPシステムの出力結果(続き)

```

*****
*****
OPTIMAL FACILITIES LAYOUT PLAN
*****
*****
***  INCUMBENT SOLUTION  ***  10
NO OF ACCEPTED  NODES= 339
NO OF REJECTED  NODES=20146
TOTAL GENERATED NODES=20485
NO OF FEASIBLE SOLUTIONS= 34

```

(k) 最終結果

図5.8 COFLAPシステムの実出力結果(続き)

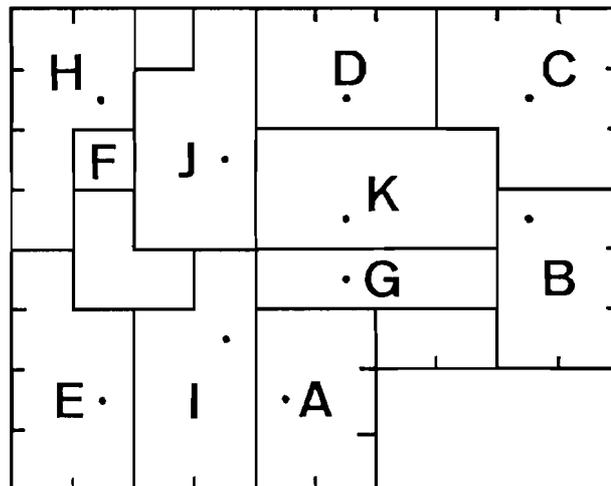


図5.9 例題の最適設備レイアウト

算センターのNEAC/ACOSシステム900を使用し、計算に要したCPU時間は3.49秒であった。

5.7 結 言

本章では，工場レイアウト設計における設備配置計画の自動化に対し，レイアウトの対象となる工場や設備の面積と形状の正確な記述，固定設備などの配置場所が指定されている設備の取り扱い，定量的な評価基準に基づく最適設備レイアウト案の構築などを可能とするコンピュータ援用設備レイアウト計画システムCOFLAPを開発した。本章における研究成果は次のようにまとめられる。

- (1) 正方形の単位面積ブロックからなるフロア記述マトリックスを用いることにより，不規則な形状をした工場や職場の面積と形状が正確に記述でき，壁・柱などの建屋要素の一部も陽に考慮できることを示した。
- (2) 配置の対象である設備を配置の柔軟性に応じて4種類の設備グループに分類した。その結果，配置場所が固定されている固定設備はもちろん，配置場所が限定された領域内であれば，いずれの場所でも配置できるような設備も取り扱うことができるようになった。
- (3) 設備の面積と形状を記述するための一方法として，設備記述マトリックスを用いた記述法を与えた。そして，この方法によれば，設備を配置する際の配置向きも考慮できることを示した。
- (4) 面積と形状を考慮した総設備レイアウト費用最小化の設備レイアウト問題を定式化し，分岐限界法による最適化アルゴリズムを提案した。さらに，提案した最適化アルゴリズムの効率化を図る目的で，設備の配置順序と候補場所の探索順序の決定法を考案した。
- (5) 簡単なケーススタディにより開発したCOFLAPシステムの利用法について述べ，最適設備レイアウトが得られることを示した。

以上，本章で開発したコンピュータ援用設備レイアウト計画システムは，従来の自動レイアウト・システムの短所を解消し，新たな機能を付加したものであり，今後工場レイアウト設計の一貫した自動化に際して十分大きな貢献を果たすものと期待される。

第6章 フローショップ生産システムの生産スケジューリング

6.1 緒 言

緒論でも述べたように、多品種少量生産システムの生産性向上を図るためには、生産システム設計のための方法論の確立と生産システム運用等の管理技術、運用方法の開発が不可欠であり、そのために前章までは前者の生産システムの設計段階における設備配置計画を取り上げ、このための方法論をいくつか確立してきた。引き続き本章と次章では、後者の生産システムの運用管理段階の中心的課題の一つである生産スケジューリングに的を絞り、合理的な生産実施計画を作成するための生産スケジューリング手法の開発について考究する。

もちろん、合理的な生産を実施するためには生産スケジューリングのみならず、需要予測、生産計画、設備計画、人員計画、資材計画、工程計画、在庫管理、品質管理などのあらゆる段階での生産に関する多種多様な意思決定が有機的に統合され、最適化されねばならないことはいうまでもない。このような各分野にわたる生産実施のための意思決定の中で、実際に生産を行う生産現場においては、とくに生産の時間的側面に関する具体的な生産実施計画が必要不可欠である。この生産実施計画を決定するのが生産スケジューリングである。第1章緒論の1.4節ですでに述べたように、本論文では、フローショップ生産システムの生産スケジューリング問題を本章で、ジョブショップ生産システムの生産スケジューリング問題を第7章で取り扱っている。

フローショップ生産スケジューリングに関しては、Johnson^{6.1)}以来、すでに多くの研究がなされている^{6.2)~6.4)}。そこでは、ほとんどの場合、無限の中間在庫容量（以後、バッファ容量とよぶ）と生産対象部品の同一処理順序の仮定のもとで生産スケジューリング問題が議論されている。しかし、現実のフローショップ生産システムでは、工場の空間的制約ないし生産システムの構造上の制約からバッファ容量に何らかの制限が課せられるはずである。このような観点から、バッファ容量に制限のあるフローショップ生産スケジューリング問題

を取り扱った研究には, Dutta ら^{6.5)}, Hitz^{6.6) 6.7)}, 由良ら^{6.8)} のものがあるが, その数は極めて少ない。他方, フローショップ生産システムといえども同一部品のみを連続的に生産する場合だけでなく, 処理順序が類似している部品群を生産する場合も少なくない。このような場合には, 部品ごとに処理順序が多少異なるので, 部品ごとの処理順序を考慮することが必要である。しかしながら, この種のフローショップ生産スケジューリングに関しては, Hitz^{6.6) 6.7)}の研究が報告されているだけである。

従来のフローショップ生産スケジューリングは, 主として生産システムへの部品の投入順序を決定する順序付け問題であった^{6.2)}。そこでは, 各部品の各加工工程における使用機械は前もって指定されており, 使用機械の選択は一般に工程設計の問題として取り扱われ, 生産スケジューリング問題とは独立に処理されている。しかしながら, 今日のフレキシブル生産システムのように多機能化された機械群で構成されたフローショップ・タイプの生産システムでは, 同じ加工機能を実現できる機械が複数台存在しうるので, 加工工程に対する代替機械を考慮して使用機械の選択も同時に決定することが必要である。このことは, 生産システム運用時における生産の最適化を指向するうえで極めて重要な課題である。

そこで本章では, バッファ容量に制限があり, 部品ごとに処理順序が異なり, さらに各部品の各工程には複数の候補機械が存在する柔軟性に富んだフローショップ生産スケジューリング問題を取り扱う^{6.9)}。具体的に言えば, 各部品に対する加工の技術的順序が与えられたもとで, 生産システムへの部品の投入順序, 各部品の各工程における使用機械および各使用機械での部品の負荷順序を同時に最適化することによって, 総所要時間を最小にする最適生産スケジュールを決定する問題を考える。以下では, この問題をネットワーク・グラフを用いて記述し, 分岐限界法による解法を与える。さらに, 提案した最適化アルゴリズムの妥当性を示すために数値計算例を与える。

6.2 生産スケジューリング・モデル

6.2.1 対象とする生産システム

本章で取り扱うフローショップ生産システムは図 6.1 に示すような複数台の機械，ローディング／アンローディング・ステーション，素材／完成品倉庫，バッファ，およびこれらを連結し，生産対象部品を搬送するコンベア・システムから構成された機械加工システムである。各機械はマシニング・センタ（MC：Machining Center）やターニング・センタ（TC：Turning Center）のように，ジグ・工具の組合せによって複数の加工機能を実現しうる柔軟性に富んだ加工ステーションであり，生産の対象である部品はパレットに固定された状態で搬送され，加工を受ける。部品をパレットに取付ける作業とパレットから完成部品を取り外す作業は，それぞれローディング・ステーションとアンローディング・ステーションで自動的に行われる。また，各ステーションの前には部品が一時的に留まることができるバッファが設置されている。生産システムの基本構成要素の一つである搬送システムは，素材倉庫から完成品倉庫へ向って動く一方方向のメイン・コンベアと，メイン・コンベアと各ステーションを連結するバイパス・コンベアから構成されている。本章では，対象とする生産システムを，(1)NC 工作機械群からなる機械加工システム，(2)コンベアによる自動搬送

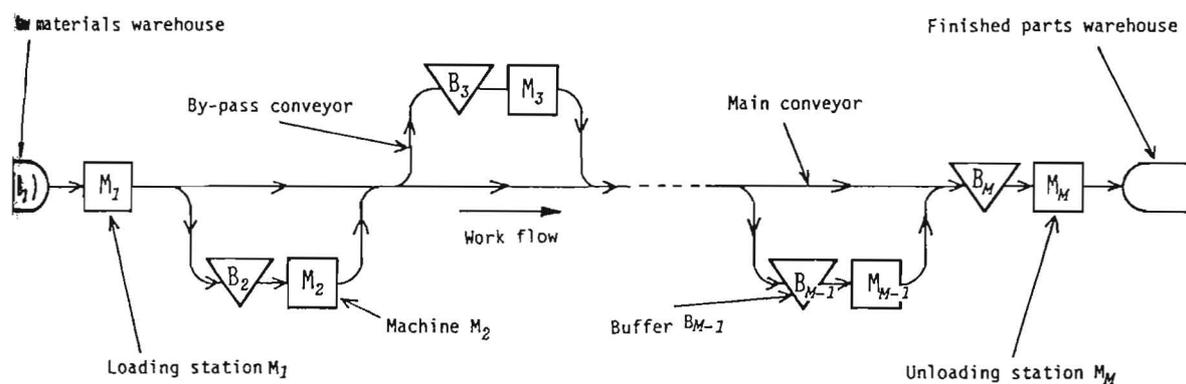


図 6.1 対象とする生産システム

システム，(3)バッファおよび素材／完成品倉庫からなる貯蔵システムの3つのサブシステムから構成され，これらすべてがコンピュータ制御のもとで統合的に稼動する無人化指向の自動生産システムとする。既述のごとく，対象とする生産システムは，各ステーションがメイン・コンベアに沿って直線的に配置されたライン生産システムであり，物の流れが一方向であるため，とくにこのような生産システムをオートマティク・トランスファ・ライン(automatic transfer line)^{6.10)}あるいはフレキシブル生産ライン(flexible manufacturing line)^{6.11)}ないしフレキシブル・フローショップ(flexible flow-shop)^{6.6)}とよぶことがある。

次に，生産システム内の部品の流れを記述する。生産システムに到着した部品の素材は直ちに素材倉庫に収納され，ローディング作業を受けるまで素材倉庫で待つ。ローディング・ステーションが空き次第，直ちに部品が移動され，パレット上に固定される。ローディング作業を完了した部品はメイン・コンベアとバイパス・コンベアを經由し，最初の加工を実行しうる候補機械の中から適当な機械を選択し，その機械の前に設置されたバッファまで搬送され，そこで加工待ち部品が構成する待ち行列に加わる。機械がバッファ内の待ち行列から次に加工すべき部品を選択する規則は先着順規則(FCFS:First Come First Service)である。このとき，現在加工中の部品の加工が完了し，機械が開放された時点でバッファ内に加工すべき部品がない場合，その機械は遊休状態(idling)となる。他方，加工すべき部品がある場合には，待ち行列の先頭にある部品が直ちにその機械に負荷され，加工が開始される。そして，加工完了後，次の加工を実行しうる候補機械の中から再び適当な機械を選択し，その機械の前のバッファまで搬送されるわけであるが，搬送先の機械の前に設置されたバッファが空いていない場合には，その部品は現工程の機械上に留まる。このとき，その機械は閉塞状態(blocking)となる。指定されたすべての加工を終了した部品は最後にアンローディング・ステーションに搬送され，パレットから外された後，直ちに完成品倉庫に送られ収納される。このように，各部品は与えられた加工の技術的順序に従って機械を選択しながら，素材から完成

品へと順次変換されてゆく。

6.2.2 前提条件

上述のフローショップ生産システムに対する生産スケジューリング・モデルとして、次の前提をおいた場合を考える。

- (1) 機械は M 台あり、機械 k を M_k で表す。ここに $k = 1, 2, \dots, M$ 。ただし、 $k = 1$ はローディング・ステーション(M_1)、 $k = M$ はアンローディング・ステーション(M_M)とする。
- (2) M_1, M_M を除く各機械はジグ・工具の組合せにより、複数種類の加工を実行することができる。
- (3) 生産の対象である部品は P 種類あり、部品 i を P_i で表す。ここに $i = 1, 2, \dots, P$ 。
- (4) 各部品は与えられた加工の技術的順序に従い、多段階工程で処理され、その処理順序は部品によって異なる。部品 P_i の総工程数を J_i とする。
- (5) すべての部品について、第1工程の作業はローディング・ステーション M_1 におけるローディング作業であり、最終の第 J_i 工程の作業はアンローディング・ステーション M_M におけるアンローディング作業である。
- (6) 各部品の各加工工程には、それぞれ複数台の候補機械が存在する。部品 P_i の第 j 工程($j = 1, 2, \dots, J_i$)には、 m_{ij} 台の候補機械がある。ただし、前提条件(5)より、 $j = 1, j = J_i$ に対しては $m_{ij} = 1$ となる。
- (7) 各機械の前にはバッファが設置されており、その容量に制限がある。機械 M_k の前のバッファを B_k で表し、その容量を b_k とする。ただし、 $k = 1$ に対しては B_1 を素材倉庫とし、その容量 b_1 は無有限大とする。
- (8) 各部品の素材倉庫到着時刻、ローディング/アンローディング作業時間、各機械での加工時間、およびステーション間の搬送時間は既知である。
- (9) パレットに固定された部品の機械への取付け時間、および機械からの取り外し時間は一定とし、処理時間に含める。部品 P_i の第 j 工程の作業を機械 M_k で行うときの処理時間を p_{ijk} で表す。

- (10) 各機械は同時に一つの部品しか処理できず，作業開始は機械への部品取付け後，直ちに行われる。
- (11) アンローディング作業を完了した部品は直ちにアンローディング・ステーションを離れ，完成品倉庫へ送られる。このときの搬送時間は，ここでは考慮しない。
- (12) ある工程での加工が完了した部品は，次工程の機械あるいはその前に設置されたバッファが空いていない場合には，現工程の機械上に留まる。
- (13) バッファ内で加工待ちしている部品の中から次に加工すべき部品を選択する規則は先着順とする。
- (14) コンベア上での部品の停滞は許されない。

6.2.3 生産スケジューリング問題

前節 6.2.2 の諸前提で構築された生産スケジューリング・モデルに基づいて，既述のフローショップ生産システムの生産スケジューリング問題を設定する。本章では，生産の対象である部品が与えられた加工の技術的順序に従って，素材から完成品へと変換される生産過程において，次の生産スケジューリング問題を考える。

〔問題〕 総所要時間が最小となるように，ローディング・ステーションへの部品の投入順序，各部品の各工程における使用機械，および各使用機械での部品の負荷順序を決定せよ。

ここで総所要時間（makespan）とは，素材倉庫に最初の部品が到着した最早素材倉庫到着時刻から，すべての部品の加工が完了し最後に完成品倉庫に収納された部品の最遅完成品倉庫納入時刻までに要する時間である。

上述の問題に対する生産スケジューリングの情報処理構造を図示すると，図 6.2 のような 3 レベルの階層構造となっていることがわかる。第 1 章緒論 1.3 節ですでに述べたように，生産スケジューリングは生産の対象である部品が素材から完成品へと変換される生産過程において，いつ，どの機械で，何の加工を行うのかを指示する詳細な生産実施計画を立案することである。したがって，

上述の問題を解くことにより、本章で取り上げたフローショップ生産システムにおける総所要時間最小の生産スケジュールが得られるわけである。以下では、最適生産スケジュールを得るための上記問題に対する解法を与える。

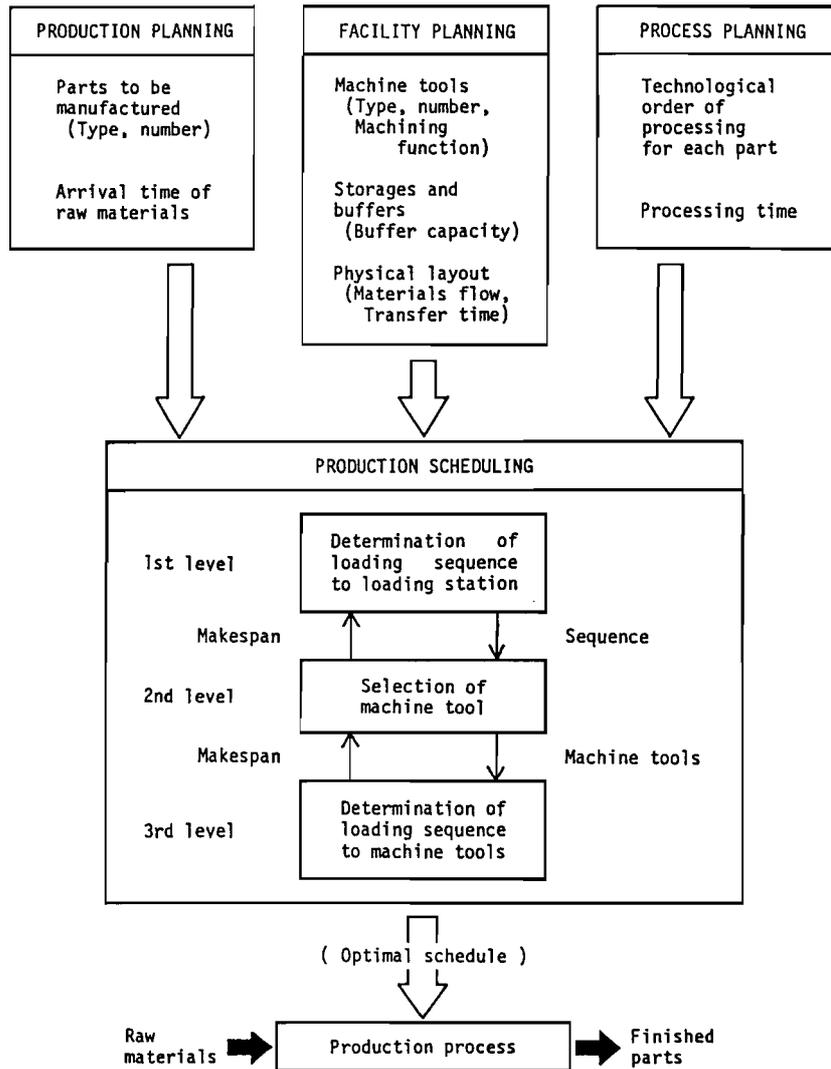


図6.2 生産スケジューリング問題の情報処理構造

6.2.4 ネットワーク・グラフによる問題の記述

前節で設定したフローショップ生産システムの生産スケジューリング問題を

解くにあたって、この問題をネットワーク・グラフにより記述する。この種の最適化問題に対して、ネットワーク・グラフを用いた問題記述が有効であることが、すでに岩田・室津らの研究^{6.12)~6.14)}で明らかにされている。本章でも、その記述法を基本的に踏襲する。

(1) ネットワーク・グラフの節点と枝

部品 P_i の第 j 工程の作業を機械 M_k で処理するとき、この作業を $q(i, j, k)$ で表す。そしてこの作業 $q(i, j, k)$ をグラフの節点 (node) とし、作業間の先行関係を枝 (branch) とする。いま、部品 P_i の第 j 工程に対して m_{ij} 台の候補機械が存在するとすれば、一台の候補機械に対して一つの節点に対応するので、部品 P_i の第 j 工程には m_{ij} 個の節点が割当てられる。したがって、部品 P_i の総工程数は J_i であるから、 $\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{J_i} m_{ij}$ 個 ($i = 1, 2, \dots, P; j = 1, 2, \dots, J_i$) の節点が存在する。さらに、すべての節点に先行する開始節点と最後におかれる完了節点を付加すると、生産スケジューリング問題を記述するためのネットワーク・グラフの総節点 L は次式で与えられる。

$$L = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{J_i} m_{ij} + 2 \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

なお、作業 $q(i, j, k)$ を表すグラフの節点を作業節点とよぶ。

(2) 作業節点の番号付け

図 6.3 に示すように、すべての作業節点に一連の通し番号 l ($= 1, 2, \dots, L-2$) を付記する。番号付けの方法は次のようである。まず、部品 P_1 の第 1 工程はローディング・ステーション M_1 でのローディング作業であるが、この作業節点の番号を $l = 1$ とする。次に、部品 P_1 の第 2 工程を第 1 候補機械で行うときの作業に対応する作業節点番号を $l = 2$ とし、第 m_{12} 候補機械までの作業節点に対して、順次 $l = 3, 4, \dots, m_{12} + 1$ と番号付けする。そして部品 P_1 の第 3 工程に対する作業節点についても同様の手続きで、 $l = m_{12} + 2, m_{12} + 3, \dots, m_{12} + m_{13} + 1$ と作業節点番号を付ける。以下同様にして、部品 P_1 の最終工程での作業、つまりアンローディング・ステーション M_M でのア

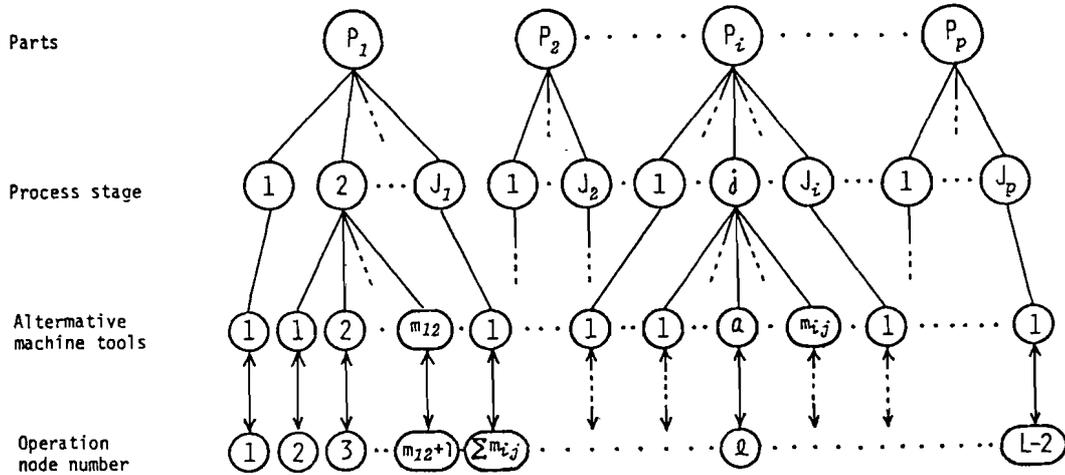


図 6.3 作業節点の番号付け

ンローディング作業 $q(1, J_1, M)$ に対して, $\ell = \sum_{j=1}^{J_1} m_{1j}$ の節点番号が与えられる。このような手続きを部品 P_2 以下, 残りのすべての部品に対して行い, 最後の部品 P_p の最終工程 J_p でのアンローディング作業 $q(P, J_p, M)$ に対して, 節点番号 $\ell = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{J_i} m_{ij} = L - 2$ が付けられる。

一般に, 部品 P_i の第 j 工程の作業を第 a 候補機械 ($a = 1, 2, \dots, m_{ij}$) で処理するとき, それに対応する作業節点の節点番号 ℓ は次式で計算される。

$$\ell = \min[1, i-1] \cdot \sum_{f=1}^{i-1} \sum_{g=1}^{J_f} m_{fg} + \sum_{h=1}^j m_{ih} + a - m_{ij} \quad \dots \dots \dots (6.2)$$

なお, ネットワーク・グラフの開始節点と完了節点に対しては, それぞれ $\ell = 0$, $\ell = L - 1$ の節点番号が与えられる。

(3) ネットワーク・グラフの例

ネットワーク・グラフにおける 3 種類の節点を図 6.4 のように表示する。開始節点には生産スケジュールの最早開始時刻 (IT), 完了節点には総所要時間 (T) が与えられる。一方, ネットワーク・グラフの枝は一对の節点間に引かれた実線 (\rightarrow) ないし破線 (\dashrightarrow) で示される有向枝で表示され, その枝上には搬送時間が与えられる。ここで, 実線の有向枝は節点間の先行関係を表すと

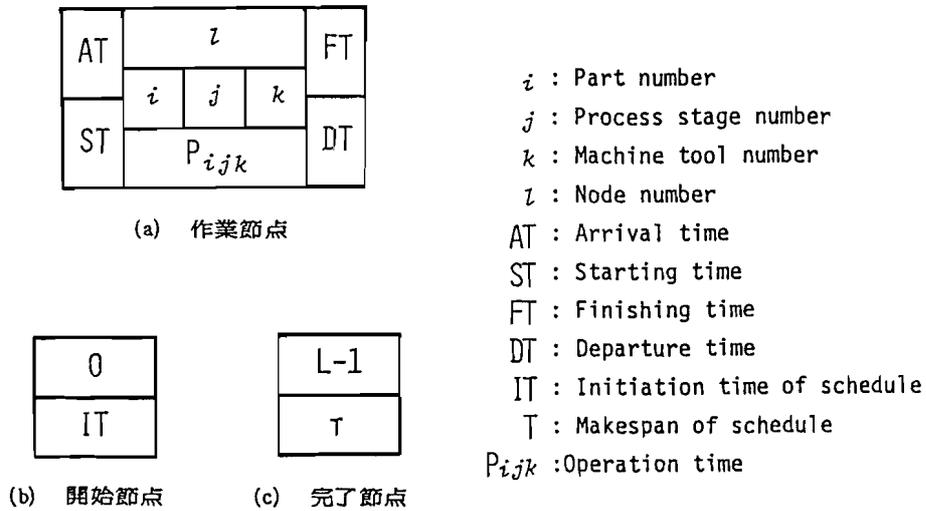


図6.4 ネットワーク・グラフにおける節点の表示法

もに、搬送行為も意味する。他方、破線で示される有向枝は機械番号の大きい機械での作業から番号の小さい機械での作業への部品搬送を表している。ところで、図 6.1 に示すように、本章で対象とする生産システムでは、物の流れが一方向であり、逆流を禁止している。さらに、機械番号は物の流れに沿って上流から下流に向けて番号付けられているので、破線で示される部品搬送は不可能である。破線の有向枝はこれを明示するために導入されたものであり、その枝上に付記される搬送時間を無限大とすることにより物の逆流を禁止することができる。

さて、ネットワーク・グラフによる生産スケジューリング問題の記述法とその解法の基本的な考え方を説明するために、6 台の生産設備からなる生産システムにおいて 2 種類の部品 P_1, P_2 がそれぞれ 4 工程で処理される場合を考える。このとき、説明の便宜上、バッファ容量はすべて無限大とする。図 6.5 は上述の場合の生産スケジューリング問題をネットワーク・グラフで表示したものであり、実行可能な生産スケジュールの一例もあわせて示されている。

部品 P_1 の第 1 工程のローディング作業はローディング・ステーション M_1 で行われ、第 2 工程の加工は機械 M_2, M_3 のいずれか一方で行われる。第 3 工程

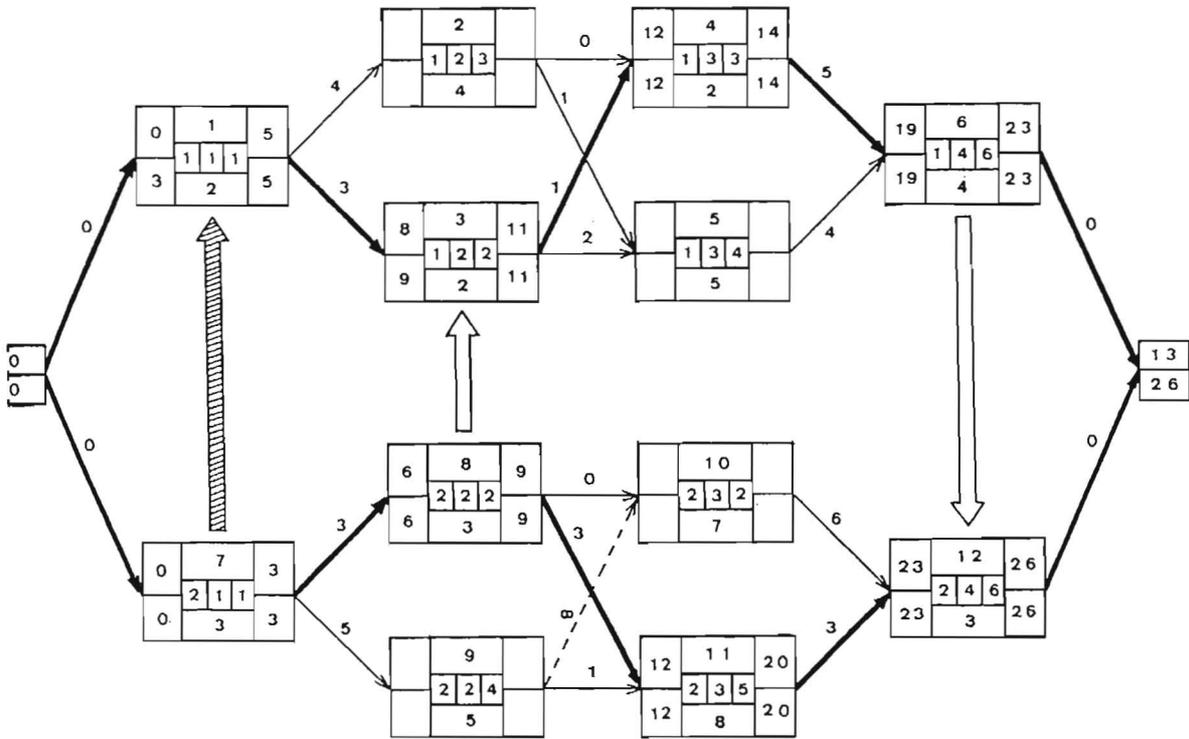


図6.5 生産スケジューリング問題のネットワーク・グラフ表示

の加工に対しては機械 M_3, M_4 が使用可能であり、最終工程はアンローディング・ステーション M_6 でのアンローディング作業である。他方、部品 P_2 については、第2工程での候補機械が M_2, M_4 で、第3工程での候補機械が M_2, M_5 であること以外は部品 P_1 と同じである。ただし、部品 P_2 の第2工程の加工を候補機械 M_4 で行う作業節点（節点番号9）から第3工程の加工を候補機械 M_2 で行う作業節点（節点番号10）に向う有向枝は、既述した理由により破線で表わされている。さらに、各節点間の枝には図6.5に示すように搬送時間が付記されている。式(6.1)より、ネットワーク・グラフの節点数は14個となり、式(6.2)に従って節点番号が図のように付けられる。このネットワーク・グラフにおいて、一つの節点を選択することによって、この作業節点に関連する部品、工程および使用機械を知ることができる。

ネットワーク・グラフの開始節点と完了節点の間に、図6.5に示すような有

有向枝 \blackrightarrow の連鎖として、各部品に対してそれぞれ一本のパスが与えられると、そのパスに対応して、各部品の各工程での使用機械が決定される。このとき、同一機械が異なる幾つかの部品の加工に使用される場合がある。しかしながら、6.2.2節で述べた前提条件 (10) により、機械は同時に複数個の部品加工を行うことはできない。したがって、これら同一機械で同時加工の可能性がある部品の作業対はネットワーク・グラフにおける選択弧 (disjunctive arc)^{6.4)} であり、これら作業対間に機械の使用順序、いいかえればその機械への部品の負荷順序を規定する先行関係を導入する必要がある。そこで、このような先行関係を図中に示すような有向枝 \rightleftarrows あるいは \blackleftarrow で表示し、ネットワーク・グラフに付加する。

一般に、図 6.5 に示すように、有向枝 \blackrightarrow の連鎖として、開始節点と完了節点の間に各部品ごとに一本のパスが与えられたとき、そのパスに対応して、部品の各工程での使用機械が決定される。また、異なるパス間で使用機械が共通で、しかもその使用時間帯が重複する作業対、あるいは後続作業でその可能性のある作業対に対して、先行関係を規定する有向枝 \rightleftarrows を与えることにより、その機械への部品の負荷順序が決定される。さらに、すべての部品に対して、第 1 工程のローディング作業を行うローディング・ステーションへの部品の投入順序は有向枝 \rightleftarrows の代わりに有向枝 \blackleftarrow を与えることによって決定される。したがって、6.2.3節で設定したフローショップ生産システムの生産スケジューリング問題を解くことは、この問題を記述したネットワーク・グラフに有向枝 \blackleftarrow , \blackrightarrow , \rightleftarrows を付加することになる。すなわち、総所要時間が最小になるように、これら 3 種類の有向枝を決定することがここでの課題である。

図 6.5 のネットワーク・グラフから次のことがわかる。まず、ローディング・ステーション M_1 への部品の投入順序は有向枝 \blackleftarrow により部品 P_1 , P_2 の順である。次に、有向枝 \blackrightarrow の連鎖に従って、各部品はそれぞれの各工程において次のように使用機械を選択している。部品 P_1 については、機械 M_1 , M_2 , M_3 , M_6 の順であり、部品 P_2 については機械 M_1 , M_2 , M_5 , M_6 の順である。さらに、

機械 M_2 とアンローディング・ステーション M_6 は部品 P_1, P_2 の両方に共通して使用されており、機械 M_2 への部品の負荷順序は部品 P_2, P_1 の順であること、他方、アンローディング・ステーション M_6 への部品の負荷順序は部品 P_1, P_2 の順であることが有向枝 \Rightarrow で示されている。なお、図 6.5 に示された実行可能な生産スケジュールの総所要時間は完了節点に記入されており、26単位時間である。

6.2.5 時間関係式の定式化

生産の対象であるすべての部品について、それぞれの各工程で使用する機械が確定した後、すなわち使用機械の選択がなされた後の生産スケジュールにおける作業間の時間的關係を検討し、時間関係式の定式化を行う。そこで、部品 P_i の第 j 工程の作業を機械 M_k で処理するときの作業 $q(i, j, k)$ について次の記号を導入する。

$T_A[P_i]$: 部品 P_i の素材倉庫到着時刻

$T_I[P_i]$: 部品 P_i の完成品倉庫納入時刻

$T_a[q(i, j, k)]$: バッファ B_k への到着時刻(=AT)

$T_s[q(i, j, k)]$: 作業 $q(i, j, k)$ の開始時刻(=ST)

$T_f[q(i, j, k)]$: 作業 $q(i, j, k)$ の完了時刻(=FT)

$T_d[q(i, j, k)]$: 機械 M_k からの離脱時刻(=DT)

$t_p[q(i, j, k)]$: 作業 $q(i, j, k)$ の処理時間(= p_{ijk})

$t_w[q(i, j, k)]$: 部品 P_i のバッファ B_k での待ち時間

$t_r[q(i, j, k)]$: 部品 P_i が作業 $q(i, j, k)$ の完了後、機械 M_k 上に留まっている時間、つまり部品 P_i による機械 M_k の閉塞時間

$t_t[q(i, j-1, k^-), q(i, j, k)]$: 機械 M_{k^-} から機械 M_k への搬送時間。ここに記号 $q(i, j-1, k^-)$ は部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程での作業が機械 M_{k^-} で処理されることを示し、 $k^- \leq k$ である。

機械 M_k における部品 P_i の第 j 工程の作業 $q(i, j, k)$ に着目し、作業間の時間関係式を定式化する。

まず、ローディング作業 $q(i, 1, 1)$ とアンローディング作業 $q(i, J_i, M)$ について考える。すべての部品は生産システムに到着すると、直ちにローディング・ステーション M_1 のバッファ B_1 である素材倉庫に収納されるので、次式が成立する。

$$T_A[P_i] = T_a[q(i, j, k)] \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

他方、所定のすべての加工を受けた部品は、最後にアンローディング・ステーション M_M においてアンローディング作業 $q(i, J_i, M)$ を受けた後、直ちにアンローディング・ステーションを離れ、前提条件(1)に基づいて完成品倉庫に納入されるので、次の関係が成り立つ。

$$T_I[P_i] = T_d[q(i, J_i, M)] = T_f[q(i, J_i, M)] \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

一般に、機械 M_k における部品 P_i の第 j 工程での作業 $q(i, j, k)$ について次の関係式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} T_a[q(i, j, k)] &= T_d[q(i, j-1, k^-)] \\ &\quad + t_t[q(i, j-1, k^-), q(i, j, k)] \\ T_s[q(i, j, k)] &= T_a[q(i, j, k)] + t_w[q(i, j, k)] \\ T_f[q(i, j, k)] &= T_s[q(i, j, k)] + t_p[q(i, j, k)] \\ T_d[q(i, j, k)] &= T_f[q(i, j, k)] + t_r[q(i, j, k)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.5)$$

とくに部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程と第 j 工程での作業が同一機械 M_k で連続して処理されるときには、 $t_t[q(i, j-1, k^-), q(i, j, k)] = 0$ 、 $t_w[q(i, j, k)] = 0$ 、 $t_r[q(i, j, k)] = 0$ とおけばよい。ここに $k = k^-$ である。

式(6.3)～式(6.5)の時間関係式を用いて、部品 P_i の第1工程から最後の第 J_i 工程までの各作業について逐次、時刻を計算することにより、部品 P_i の生産に関する時間的推移が明らかになる。すなわち、これら時間関係式は部品 P_i に対して与えられたパス上の作業間の先行関係とその時間的関係を規定

するものであり，図 6.5 のネットワーク・グラフに付加された有向枝 \blackrightarrow に対応する。したがって，部品 P_i が所定の作業をすべて完了し，完成品倉庫に納入される時刻 $T_I[P_i]$ は次式で計算される。

$$\begin{aligned}
 T_I[P_i] = & T_A[P_i] + \sum_{j=1}^{J_i} t_p[q(i, j, k)] \\
 & + \sum_{j=2}^{J_i} t_t[q(i, j-1, k^-), q(i, j, k)] \\
 & + \sum_{j=1}^{J_i} \{t_w[q(i, j, k)] + t_r[q(i, j, k)]\} \dots\dots\dots (6.6)
 \end{aligned}$$

ところで，式(6.6)の右辺第4項は，部品 P_i の直前に機械 M_k に負荷されていた部品との関係および機械 M_k の前に設置されているバッファの容量を考慮しなければならない。そこで，バッファ B_k の容量 b_k を考慮して，第4項の $t_w[q(i, j, k)]$ および $t_r[q(i, j, k)]$ を求める。

いま，機械 M_k において，部品 P_i の第 j 工程での作業 $q(i, j, k)$ と部品 P_i の直前に負荷される部品 P_i^* の第 j^* 工程での作業 $q(i^*, j^*, k)$ の時間的關係を考える。部品 P_i が機械 M_k の前に設置されたバッファ B_k 内で待つ時間 $t_w[q(i, j, k)]$ は，部品 P_i がバッファ B_k に到着する時刻と部品 P_i^* が機械 M_k を離れる時刻との関係から，次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 t_w[q(i, j, k)] = & \max\{T_d[q(i^*, j^*, k)] - T_a[q(i, j, k)], 0\} \\
 & \dots\dots\dots (6.7)
 \end{aligned}$$

これより，部品 P_i が素材倉庫で待つ時間は

$$t_w[q(i, 1, 1)] = \max\{T_d[q(i^*, 1, 1)] - T_A[P_i], 0\} \dots\dots\dots (6.8)$$

となり，最終工程のバッファ B_M 内で待つ時間は

$$t_w[q(i, j_i, M)] = \max\{T_I[P_i^*] - T_a[q(i, j_i, M)], 0\} \dots\dots\dots (6.9)$$

となる。

一方、作業 $q(i, j, k)$ が完了後、部品 P_i が機械 M_k 上に留まる時間 $t_r[q(i, j, k)]$ は次のようにして求められる。いま、部品 P_i の第 $(j+1)$ 工程での使用機械が M_{k+} であるとし、機械 M_{k+} の前に設置されたバッファを B_{k+} 、その容量を b_{k+} とする。さらに機械 M_{k+} において部品 P_i の第 b_{k+} 番目前に負荷される部品を P_i^{**} 、その工程番号を j^{**} とすれば、作業 (i^{**}, j^{**}, k^+) が開始される以前に部品 P_i を機械 M_{k+} のバッファ B_{k+} に投入することはできない。なぜなら、その時刻以前では、バッファ B_{k+} は部品 P_i^{**} を含めて b_{k+} 個の部品によって占有されており、部品 P_i の入る余地がないからである。したがって、部品 P_i が機械 M_k 上に留まる時間 $t_r[q(i, j, k)]$ は次式で与えられる。

$$t_r[q(i, j, k)] = \max \{ T_s[q(i^{**}, j^{**}, k^+)] - (T_f[q(i, j, k)] + t_t[q(i, j, k), q(i, j+1, k^+)]) , 0 \} \dots (6.10)$$

ただし、最終工程のアンローディング・ステーションにおいては、アンローディング作業完了後、直ちにそこを離れるので、次式が成り立つ。

$$t_r[q(i, J_i, M)] = 0 \dots \dots \dots (6.11)$$

以上より、作業 $q(i, j, k)$ の開始時刻は、機械 M_k において部品 P_i の直前に負荷された部品 P_i^* の作業 $q(i^*, j^*, k)$ との時間的關係を考慮して、次のように決定される。まず、部品 P_i のローディング作業の開始時刻 $T_s[q(i, 1, 1)]$ は、部品 P_i が素材倉庫に到着しており、部品 P_i^* がローディング・ステーション M_1 を離れた後であるから次式で与えられる。

$$T_s[q(i, 1, 1)] = \max \{ T_A[P_i], T_d[q(i^*, 1, 1)] \} \dots \dots \dots (6.12)$$

ただし、部品 P_i が最初に M_1 を使用する場合には、 $T_s[q(i, 1, 1)] = 0$ とおく。式(6.12)で与えられる部品 P_i と P_i^* の時間關係式から、ローディング・ステーション M_1 への部品の投入順序とその投入時刻が規定され、有向枝 

が決定される。他方、アンローディング・ステーション M_M への部品の負荷順序に関する時間的關係は次式で与えられる。

$$T_s[q(i, J_i, M)] = \max\{T_a[q(i, J_i, M)], T_f[q(i^*, J_i^*, M)]\} \dots\dots (6.13)$$

一般に、機械 M_k においては次の關係式が成り立つ。

$$T_s[q(i, j, k)] = \max\{T_a[q(i, j, k)], T_d[q(i^*, j^*, k)]\} \dots\dots\dots (6.14)$$

式(6.13)および式(6.14)は機械 M_k への部品の負荷順序に関する時間的關係を与えるものであり、有向枝 \Rightarrow に対応する。なお、作業 $q(i, j, k)$ の完了時刻 $T_f[q(i, j, k)]$ は式(6.5)の第3式で計算される。すなわち、

$$T_f[q(i, j, k)] = T_s[q(i, j, k)] + t_p[q(i, j, k)]$$

最後に、部品 P_i が機械 M_k の前に設置されたバッファ B_k に到着する時刻 $T_a[q(i, j, k)]$ は

$$T_a[q(i, j, k)] = \max\{T_s[q(i^0, j^0, k)], T_f[q(i, j-1, k^-)] + t_t[q(i, j-1, k^-), q(i, j, k)]\} \dots\dots\dots (6.15)$$

で与えられ、機械 M_k からの部品 P_i の離脱時刻 $T_d[q(i, j, k)]$ は

$$T_d[q(i, j, k)] = \max\{T_s[q(i^{**}, j^{**}, k^+)] - t_t[q(i, j, k), q(i, j+1, k^+)], T_f[q(i, j, k)]\} \dots\dots\dots (6.16)$$

で与えられる。ここに $T_s[q(i^0, j^0, k)]$ は機械 M_k において部品 P_i の第 b_k 番目に負荷された部品 P_i^0 の第 j^0 工程での作業 $q(i^0, j^0, k)$ の開始時刻である。

なお、すべてのバッファの容量に制限がない場合、つまり $b_k = \infty$ ($k=1, 2, \dots, M$) のときには、機械上での部品の停滞は発生しないので、上述の各式における $t_r[q(i, j, k)]$ の項を無視すればよい。ただし、バッファ内での待ち

行列規則は先着規則とする。

本章で設定した生産スケジューリング問題の評価基準は総所要時間最小化であった。6.2.3節における総所要時間の定義から、生産の対象となるすべての部品を完成するのに要する総所要時間 T は次式で与えられる。

$$T = \max_i \{ T_I [P_i] \} - \min_i \{ T_A [P_i] \} \dots\dots\dots (6.17)$$

6.3 最適生産スケジュールの決定

ここでは前節で設定された生産スケジューリング問題において、式(6.17)で与えられる総所要時間 T を最小にする最適生産スケジュールを分岐限界法によって決定する方法について述べる。

6.3.1 分岐限界法による解法

与えられた生産スケジューリング問題に対する最適生産スケジュールを決定することは、その問題を記述したネットワーク・グラフにおける作業節点を選択すること、ないし3種類の有向枝 , ,  を決定することに対応している。そして、このことはすでに6.2.4節で述べた。以下ではネットワーク・グラフにおいて、総所要時間を最小にする作業節点のシーケンスを分岐限界法によって求める方法について述べる。なお、分岐限界法を適用する際に用いる作業節点の集合に関する基本的な考え方は、すでに岩田・室津ら^(6.12)~6.14)によって提案されており、本章でもそれを踏襲する。

(1) 作業の選択指標(α)

まず、全作業(これらはネットワーク・グラフの作業節点に対応する)のスケジューリングの進行状況に応じて次の4つの状態に分類し、選択指標 α によって区別する。

- (i) 実行されないことが決定された作業 ($\alpha = 0$)
- (ii) 実行されることが決定され、機械への負荷順序も決定された作業 ($\alpha = 1$)
- (iii) 実行されることは決定されたが、機械への負荷順序は未決定の作業

($\alpha = 2$)

(IV) 実行されるかどうか未決定の作業 ($\alpha = 3$)

また、選択指標 α の作業を q_α , その作業の集合を Q_α と表すことにする。なお、ネットワーク・グラフにおいては、作業節点の下に選択指標 α を付記することにより、スケジューリングの進行状況を視覚的に理解できるようにしている。すべての作業が $\alpha = 3$ の状態をスケジューリングの初期状態とし、ある段階から次の段階へスケジュールを逐次、確定してゆく方法を考える。これはネットワーク・グラフの作業節点を前より段階的に選択することに対応する。そして、全作業の選択指標が $\alpha = 0$ または $\alpha = 1$ となったとき、一つの実行可能な生産スケジュールが得られるわけである。

(2) カット集合 (Q_{cut})

分岐操作の基本となる作業の集合で、次のように定義される。まだ実行されるかどうか未決定の作業の集合 Q_3 の中で、各部品において最も早い工程での作業の集合を Q_3^* ($\subset Q_3$) で表す。また、各部品において実行されることは決定されているが、まだ機械への負荷順序が未決定の作業の集合 Q_2 を求める。ここで、カット集合を Q_{cut} とすれば、 Q_{cut} は集合 Q_3^* と Q_2 の和集合として次式で与えられる。

$$Q_{cut} \triangleq Q_3^* \cup Q_2 \quad \dots\dots\dots (6.18)$$

すなわち、カット集合 Q_{cut} はスケジューリングの任意の段階において、次にスケジュールが決定されるべき作業の集合を表している。

(3) セレクト集合 ($Q_{sel.}$)

次に、カット集合 Q_{cut} の部分集合であり、分岐操作において分岐対象となる可能性のある作業の集合をセレクト集合とよび、これを $Q_{sel.}$ で表す。セレクト集合は本章で提案する新しい作業集合であり、以下の手続きで求められる。

〔手順 I〕 カット集合 Q_{cut} の中で同一部品の直前作業から有向枝 \Rightarrow が
きいている作業 (これを $(\Rightarrow q)$ と表示する) が存在するとき、この作業
($\Rightarrow q$) を Q_{cut} に残し、この作業と同じ機械を使用する作業の集合 Q'

($\subset Q_{cut}$) を Q_{cut} から取り除く。つまり,

$$Q_{cut} \triangleq Q_{cut} - Q' \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

とおく。

〔手順Ⅱ〕 手順Ⅰで得られた Q_{cut} の中で同一機械 M_{k_1} を使用する作業集合 Q^{k_1} があり, その中で直前作業でも同一機械 M_{k_2} を使用する作業集合 Q^{k_2} ($\subset Q^{k_1}$) がある場合, Q^{k_2} の中で直前作業が最も早く $\alpha = 1$ となった作業(これを q' とする)を Q_{cut} に残し, Q^{k_2} を Q_{cut} から除外する。つまり,

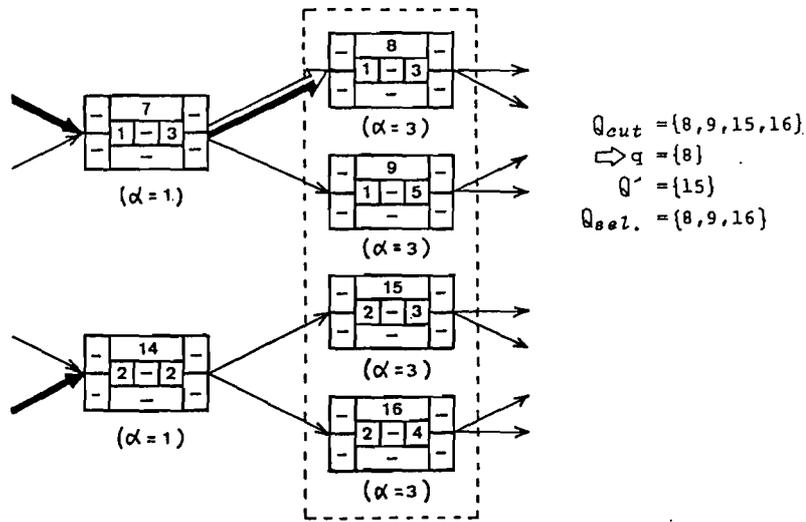
$$Q_{cut} \triangleq Q_{cut} - Q^{k_2} + \{q'\} \quad \dots\dots\dots (6.20)$$

とおく。そして, 式(6.20)で与えられる Q_{cut} をセレクト集合 $Q_{sel.}$ とする。

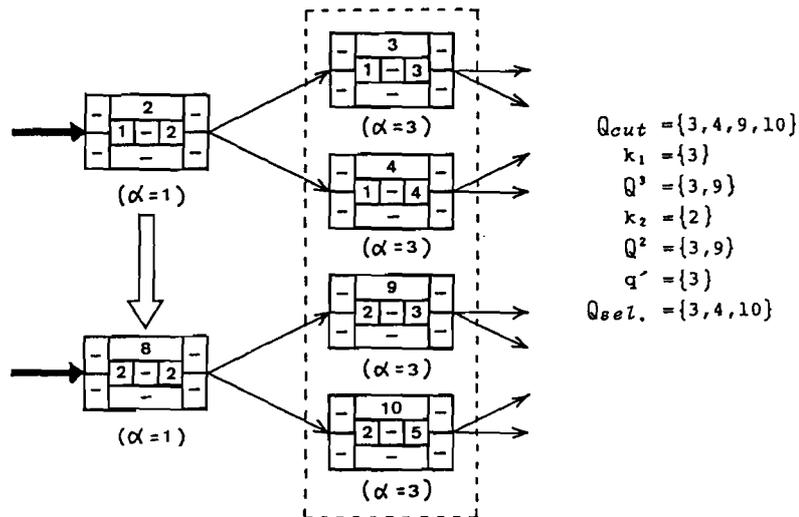
なお, 上述の手順Ⅰ, Ⅱにおいて, 作業($\Leftrightarrow q$), 作業集合 Q^{k_1} がそれぞれ複数存在する場合には, その各々について手順Ⅰ, Ⅱを繰り返し適用し, 得られた各 $Q_{sel.}$ に対してそれらの和集合を求め, これを改めて $Q_{sel.}$ とする。

上述のセレクト集合を求める手続きの理解を深めるために, 手順Ⅰ, Ⅱを簡単な例により説明する。図 6.6 はネットワーク・グラフの一部であり, 説明の便宜上, 節点番号, 部品番号, 機械番号および選択指標以外は省略してある。図 6.6 (a)が手順Ⅰに対応し, 同図(b)が手順Ⅱに対応している。

図 6.6 (a)において, カット集合に属する作業は破線内の4つの作業であるから, $Q_{cut} = \{8, 9, 15, 16\}$ となる。このうち部品 P_1 の作業 8 が直前作業 7 から有向枝 \Rightarrow の来ている作業($\Leftrightarrow q$)である。したがって, 手順Ⅰにより作業 8 を Q_{cut} に残し, Q_{cut} 内で作業 8 と同じ機械 M_3 を使用する作業 15 を Q_{cut} から取り除く。すなわち, $Q' = \{15\}$ とし, $Q_{cut} \triangleq Q_{cut} - Q' = \{8, 9, 16\}$ となる。ここで, 次の手順Ⅱに該当する作業は存在しないので, 求めるセレクト集合は, $Q_{sel.} = Q_{cut} = \{8, 9, 16\}$ である。手順Ⅰは次のような



(a) 手順 I の場合



(b) 手順 II の場合

図 6.6 セレクト集合生成手順の説明図

状況を考慮している。作業 15 を作業 8 に先立って機械 M_3 で処理するとすれば、作業 7 と作業 8 は部品 P_1 の連続した作業であるにもかかわらず、機械 M_3 で連続的に処理できる可能性が排除される。つまり、機械 M_3 は作業 7 → 作業 15 → 作業 8 の順で処理することになる。これは総所要時間最小化に反する。手順 I はこのような場合を回避するために行われる。

次に、手順Ⅱを図 6.6 (b)を用いて説明する。手順Ⅰに該当する作業は存在しないので、カット集合は $Q_{cut} = \{3, 4, 9, 10\}$ となる。このうちで作業3と作業9が同一機械 M_3 を使用するので、 $Q^3 = \{3, 9\}$ となる。さらに、これら作業の直前作業（作業3に対しては作業2，作業9に対しては作業8）も、同一機械 M_2 を使用している。したがって、 $Q^2 = \{3, 9\}$ である。ところで、作業2から作業8へは有向枝 \implies が付加されているので、作業2の方が作業8に比べて最く $\alpha = 1$ となった作業であることがわかる。よって、 Q^2 の中で直前作業が最も早く $\alpha = 1$ となった作業は作業3であるから、 $q' = \{3\}$ となる。これより、作業3を Q_{cut} に残し、 Q^2 を Q_{cut} から除外すると、 $Q_{cut} \triangleq Q_{cut} - Q^2 + q' = \{3, 4, 9, 10\} - \{3, 9\} + \{3\} = \{3, 4, 10\}$ となり、求めるセレクト集合は $Q_{sel.} = Q_{cut} = \{3, 4, 10\}$ である。手順Ⅱを実行する根拠は次のようである。機械 M_2 では部品 P_1 の作業2が部品 P_2 の作業8に先行して処理されることが決定されているにもかかわらず、作業9を選択すれば、機械 M_2 の下流にある機械 M_3 で部品 P_2 の作業9が部品 P_1 の作業3に先行して処理されることになる。これは明らかに前提条件に反する。手順Ⅱはこのような矛盾の発生を回避するために行われる。

(4) コンフリクト集合 ($Q_{conf.}$)

(3)で求めたセレクト集合 $Q_{sel.}$ 内の作業で、かつ加工完了時刻の最も早い作業を q_e (ただし複数個あるときには、そのうちの最も若い作業節点番号をもつ作業を選ぶ) とし、 $Q_{sel.}$ 内で作業 q_e と同一機械を使用する作業の集合を Q_s ($\subset Q_{sel.}$) とする。コンフリクト集合 $Q_{conf.}$ とは、セレクト集合の部分集合で直接分岐操作の対象となる作業の集合であり、次のように定義される。

$$Q_{conf.} \triangleq \{q_e\} \cup Q_s \quad \dots\dots\dots (6.21)$$

したがって、次節 6.3.2 で述べる分岐操作は、コンフリクト集合内のどの作業を選択するかによって行われる。すなわち、コンフリクト集合内の各作業が分岐操作における分岐ノードになるわけである。

ところで、コンフリクト集合 $Q_{conf.}$ 内の各作業に代替作業が存在する場合

には、 $Q_{conf.}$ 内のどの作業も選択せずに、それらの代替作業が選択される可能性があることを考慮しなければならない。そこで、これら代替作業に相当するものとして、コンプリメント作業とよばれる一つの仮想的な作業をコンフリクト集合に付加する。コンプリメント作業を q_c とすると、コンフリクト集合は次のようになる。

$$Q_{conf.} \triangleq \{q_e\} \cup Q_s \cup \{q_c\} \dots\dots\dots (6.22)$$

なお、代替作業が存在しない場合には、式(6.21)の定義式によりコンフリクト集合を求める。

このようなコンフリクト集合を求めることにより、分岐操作の対象となる作業が限定され、その結果、作成される分岐ノード数を減らすことができる。

6.3.2 分岐操作

いま、一つの実行可能スケジュールを決定する途中の段階を考える。このとき、前述のカット集合 Q_{cut} 、セレクト集合 $Q_{sel.}$ 、およびコンフリクト集合 $Q_{conf.}$ を順に求める。そして、 $Q_{conf.}$ 内の一つの作業を選択したとき、これに対応して一つに分岐ノードが与えられ、選択された作業と他の作業の間に次に述べる先行関係が与えられる。すなわち、コンプリメント作業 q_c 以外の作業を選んだとき、選択された作業は $Q_{conf.}$ 内の他のすべての作業に先行する。同時に、この作業の後工程において同一機械を使用する作業がある場合には、その作業にも先行する。そして、選択された作業の選択指標を $\alpha = 2$ とし、その代替作業の選択指標を $\alpha = 0$ とする。さらに、選択された作業を処理する機械において、その作業と他の作業との間に使用時間の重複がなければ、選択した作業の選択指標を $\alpha = 1$ とする。以上の手続きをコンプリメント作業を除く $Q_{conf.}$ 内のすべての作業に対して行う。このようにして、 $Q_{conf.}$ 内のすべての作業に対応した分岐ノードが作成され、それぞれの下界値が次節 6.3.3 で述べる方法で計算される。ただし、コンプリメント作業 q_c が選ばれた場合は、 $\{q_e\} \cup Q_s$ の全作業されないものとして同様の計算を行うことにより、下界

値が求められる。現在の分岐ノードから次の分岐ノードへ進むとき、この下界値が最小である分岐ノードに分岐する。ただし、最小の下界値をもつ分岐ノードが複数個ある場合には、それらの中で最も若い作業節点番号に対応する分岐ノードを選ぶものとする。

以上の操作を一つの実行可能スケジュールが得られるまで繰り返す。そして、実行可能スケジュールが得られたとき、その下界値がこれまでの上界値（以前に得られた実行可能スケジュールにおける総所要時間の最小値であり、初期状態では無限大とおく）より小さい場合には、いま得られた下界値を新しい上界値とし、それ以上の下界値をもつ分岐ノードをすべて消去する。そして、残された分岐ノードの中で最も若い作業節点番号をもつ作業に対応する分岐ノードから分岐操作を再開し、上界値より小さい下界値をもつ分岐ノードがなくなるまで上記の手続きを繰り返す。

6.3.3 限界操作

限界操作の基本的な考え方は次のようである。各部品の最終工程での作業の最早完了時刻を以下に述べる方法で求め、その最大値を限界操作における下界値とする。

6.2.5節で述べたように、最終工程での作業完了時刻 $T_f[q(i, J_i, M)]$ は式(6.4)と式(6.6)により計算される。そして、各作業の到着時刻、開始時刻、完了時刻および離脱時刻は、6.2.5節で定式化された各時間関係式を逐次計算することによって求められる。しかしながら、これはすべての作業が $\alpha = 1$ または $\alpha = 0$ のときであり、スケジューリングの途中の段階では $\alpha = 2$ または $\alpha = 3$ の作業も存在するので、厳密な各時刻を求めることはできない。そこで、スケジューリングの途中の段階では、以後どのようなスケジュールとなってもこの値以下にはならない各作業の各時刻に対する最早時刻を次のように求める。

(1) $\alpha = 1, 2$ の作業

作業間の先行関係、加工の技術的順序およびバッファ容量の制約を考慮して、選択指標が $\alpha = 1, 2$ の作業に対するバッファへの到着時刻 $T_a[q(i, j, k)]$,

作業の開始時刻 $T_s[q(i, j, k)]$, 作業の完了時刻 $T_f[q(i, j, k)]$, 機械から離脱時刻 $T_a[q(i, j, k)]$ は次のように計算される。

スケジューリングの途中の段階で, 新たに選択指標が $\alpha = 1$ または $\alpha = 2$ となった作業を $\hat{q}(i, j, k)$ とすれば, バッファへの到着時刻は式 (6.15) により, 作業の開始時刻は式 (6.14) により求められる。作業の完了時刻は式 (6.5) の第 3 式で決定される。他方, 機械からの離脱時刻は式 (6.16) の代わりに次式を用いて計算する。

$$T_a[\hat{q}(i, j, k)] = T_f[\hat{q}(i, j, k)] \dots\dots\dots (6.23)$$

そして, 部品 P_i の第 i 工程の機械 M_k での作業 $\hat{q}(i, j, k)$ の選択指標が $\alpha = 1$ または $\alpha = 2$ となった時点で, すでに選択指標が $\alpha = 1$ または $\alpha = 2$ となっている部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程の機械 M_{k^-} での作業 $q(i, j-1, k^-)$ に関する機械 M_{k^-} からの離脱時刻は次式で計算される。

$$T_a[q(i, j-1, k^-)] = \max \{ T_a[\hat{q}(i, j, k)] - t_t[q(i, j-1, k^-), \hat{q}(i, j, k)], T_f[q(i, j-1, k^-)] \} \dots\dots\dots (6.24)$$

式 (6.24) から求められる機械 M_{k^-} からの離脱時刻を式 (6.5), 式 (6.14) ~ 式 (6.16) に代入することにより, 選択指標 $\alpha = 1, 2$ のすべての作業についての各時刻が修正され, 逐次求められる。

(2) $\alpha = 3$ の作業

選択指標が $\alpha = 3$ の作業は現時点では実行されるかどうか決定されていないので, バッファ内での待ち時間や機械上での停滞時間を無視し, 作業間の先行関係と加工の技術的順序のみを考慮して次のように各時刻を計算する。

部品 P_i の第 i 工程の機械 M_k での作業に対して, 部品 P_i のバッファ B_k への到着時刻 $T_a[q(i, j, k)]$ は次のようである。この作業の直前作業に選択指標が $\alpha \neq 0$ の複数個の代替作業がある場合には, それらから最も早くこのバッファに到着することができる時刻を選ぶ。すなわち, $\alpha \neq 0$ の直前作業を処理する機械の集合を \mathbf{M} とすれば, 到着時刻は次式で与えられる。

$$T_a[q(i, j, k)] = \min_{k^* \in M} \{T_f[q(i, j-1, k^*)] + t_t[q(i, j-1, k^*), q(i, j, k)]\} \dots\dots\dots (6.25)$$

作業の開始時刻 $T_s[q(i, j, k)]$ はバッファ内での待ち時間を無視して、

$$T_s[q(i, j, k)] = T_a[q(i, j, k)] \dots\dots\dots (6.26)$$

で計算し、作業の完了時刻 $T_f[q(i, j, k)]$ は

$$T_f[q(i, j, k)] = T_s[q(i, j, k)] + t_p[q(i, j, k)] \dots\dots\dots (6.27)$$

で求められる。他方、機械からの離脱時刻 $T_d[q(i, j, k)]$ は機械上での停滞時間を無視するので、式(6.27)で与えられる完了時刻に等しくなる。すなわち、

$$T_d[q(i, j, k)] = T_f[q(i, j, k)] \dots\dots\dots (6.28)$$

なお、選択指標が $\alpha = 0$ の作業は実行されないことが決定された作業であるから、これに関連した時刻を求める必要はない。

図 6.7 に上記の分岐限界法に基づく最適化アルゴリズムの概略フローチャートを示す。

6.3.4 例題による最適化アルゴリズムの説明

これまでに述べてきた分岐限界法に基づく最適化アルゴリズムの概要を、図 6.8(a)から(e)までの一連のネットワーク・グラフで示された例題を用いて説明する。対象とするフローショップ生産システムはローディング／アンローディング・ステーションを含む 6 台の生産設備からなる。生産の対象となる部品は 3 種類で、各部品に関する情報（工程数、各工程での代替機械、処理時間）は図 6.8(a)のネットワーク・グラフに示されている。説明の便宜上、搬送時間はすべて零とし、各部品の素材倉庫到着時刻は生産スケジュール開始時刻の零に等しいものとする。また、すべてのバッファの容量は無量大とした。

図 6.8(a)は生産スケジュールリングの初期状態を示しており、すべての作業節

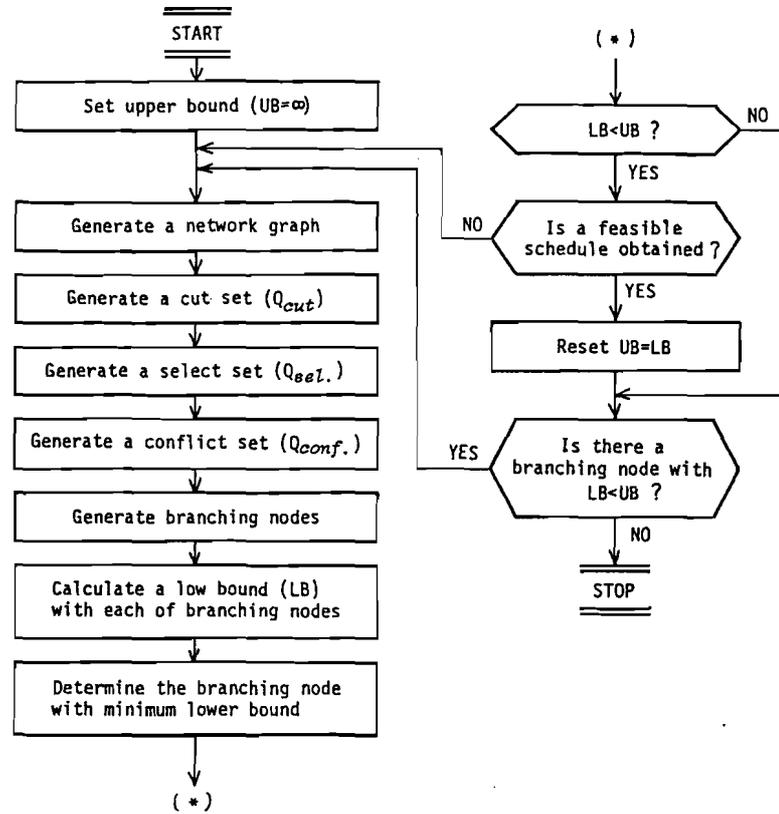


図6.7 最適化アルゴリズムの概略フローチャート

点の選択指標は $\alpha = 3$ である。ネットワーク・グラフに記入されている各作業節点の到着時刻，開始時刻，完了時刻および離脱時刻はすべて，各部品を独立と考え，部品ごとに作業間の先行関係と加工の技術的順序のみを考慮して，前節 6.3.3 (2) の手続きで求められた値である。また，カット集合を構成する作業を破線で囲むことにすると，このときのカット集合は $Q_{cut} = \{1, 6, 12\}$ である。さらに，6.3.1 節で述べた手順に従ってセレクト集合 $Q_{sel.}$ ，コンフリクト集合 $Q_{conf.}$ を求めた結果を図 6.8 (a) に示す。

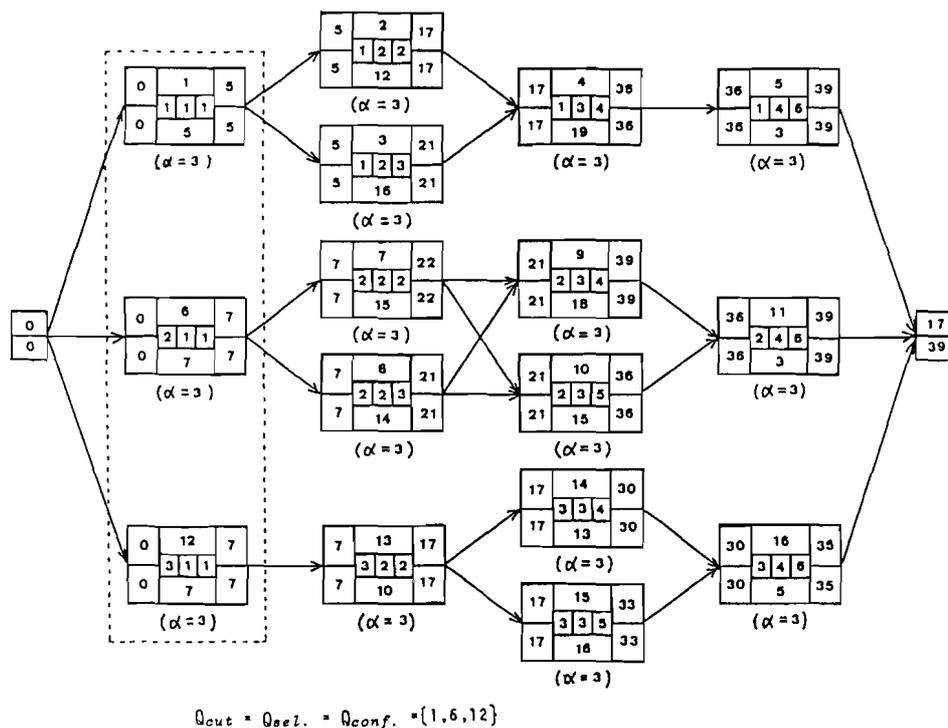
図 6.8 (a) に示されたコンフリクト集合内の 3 つの作業をそれぞれ選択したときの分岐ノードについて下界値を計算すると，作業 1 を選択した場合に最小の下界値が得られた。そこで，作業 1 を選択することにして，分岐操作が一段階

進められた状態のネットワーク・グラフを図 6.8 (b)に示す。開始節点から作業 1 へ有向枝 \blackrightarrow , 作業 1 から作業 6, 12 へそれぞれ有向枝 \blackrightarrow が付加され, 作業間の先行関係が与えられている。さらに, 作業 1 が選択されたことにより, その選択指標は $\alpha = 2$ となるが, ローディング・ステーション M_1 において他の作業との処理時間の重複がないので, 選択指標を $\alpha = 1$ とする。そして, カット集合とセレクト集合を求めると, 図のようになる。求められたセレクト集合内で最早完了時刻をもつ作業節点は作業 6 であり, この作業と同一機械で処理される作業は作業 12 であることが示されている。したがって, コンフリクト集合は式 (6.21) より, $Q_{conf.} = \{6, 12\}$ となる。

図 6.8 (c)は, 前の同図(b)におけるコンフリクト集合の中から作業 6 を選択した状態を示している。カット集合は図中の破線で囲まれた作業から構成されるので, $Q_{cut} = \{2, 3, 7, 8, 12\}$ である。他方, セレクト集合は 6.3.1 節(3)の手順 II を行う必要がある場合であるから, 手順 II に従い作業 7 と 8 を Q_{cut} から除外する。得られたセレクト集合は $Q_{sel.} = \{2, 3, 12\}$ である。さらに, コンフリクト集合は $Q_{sel.}$ 内で最早完了時刻をもつ作業節点に対応する作業 2 と。これが選択されずに代替作業を選ぶ場合を考慮した仮想的なコンプリメント作業 q_c から構成される。したがって, $Q_{conf.} = \{2, q_c\}$ となる。この手続きは 6.3.1 節(4)ですでに述べた。

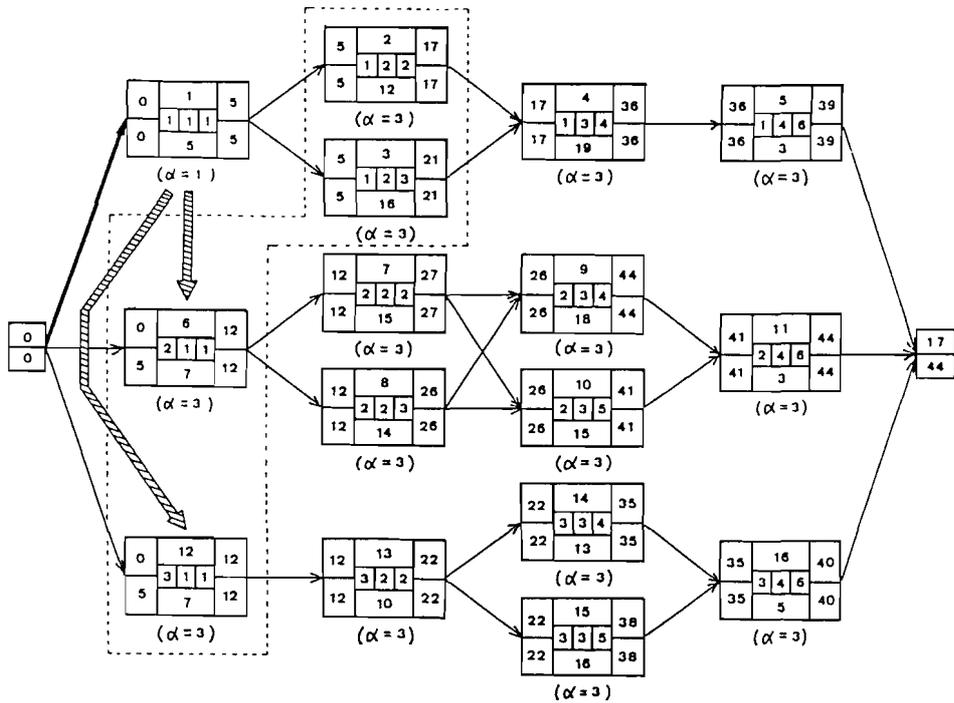
次に, 図 6.8 (c)の $Q_{conf.} = \{2, q_c\}$ のうちで下界値の小さい分岐ノードに対応する作業を選ぶと, 作業 2 となる。そして, この作業 2 を選択し, かつ実行することも決定すれば, 3 種類の作業集合はそれぞれ $Q_{cut} = \{4, 7, 8, 12\}$, $Q_{sel.} = \{4, 7, 8, 12\}$, $Q_{conf.} = \{12\}$ となる。そこで, 作業 12 を選択し, あわせて実行することも決定した状態のネットワーク・グラフを図 6.8 (d)に示す。ここで, カット集合は直ちに $Q_{cut} = \{4, 7, 8, 13\}$ と求められるが, セレクト集合とコンフリクト集合はそれぞれ 6.3.1 節で述べた手続きによらねばならない。その結果として, $Q_{sel.} = \{4, 7, 8\}$, $Q_{conf.} = \{8, q_c\}$ を得る。そして, 次の分岐操作では作業 8 かコンプリメント作業 q_c のいずれかを選択することになる。

以上の手続きを最初の実行可能スケジュールが得られるまで、分岐操作を繰り返す。その結果、得られた実行可能スケジュールを図 6.8(e)に示す。完了節点にこの実行可能スケジュールの総所要時間が計算され記入されている。この値を新しい上界値として、これよりも小さい下界値をもつ分岐ノードにもどり、そこから再び分岐操作を行う。このような分岐操作と限界操作を繰り返し行うことにより、最終的に総所要時間が最小となる最適生産スケジュールが求められる。



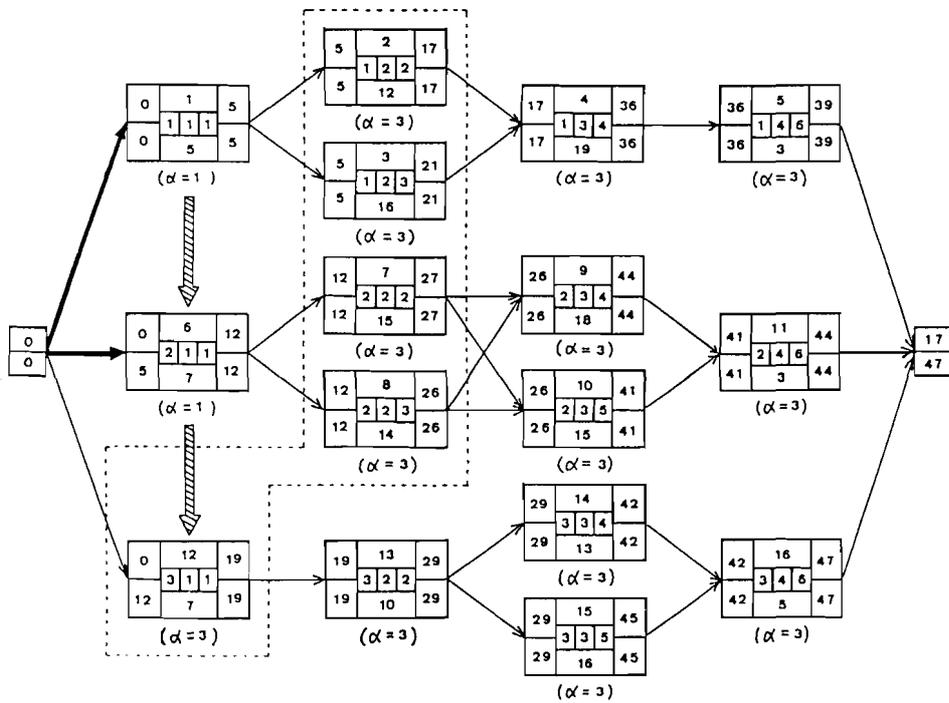
(a) 生産スケジュールリングの初期状態

図 6.8 例題のネットワーク・グラフ



$Q_{cut} = Q_{sel.} = \{2,3,6,12\}$, $Q_{conf.} = \{6,12\}$

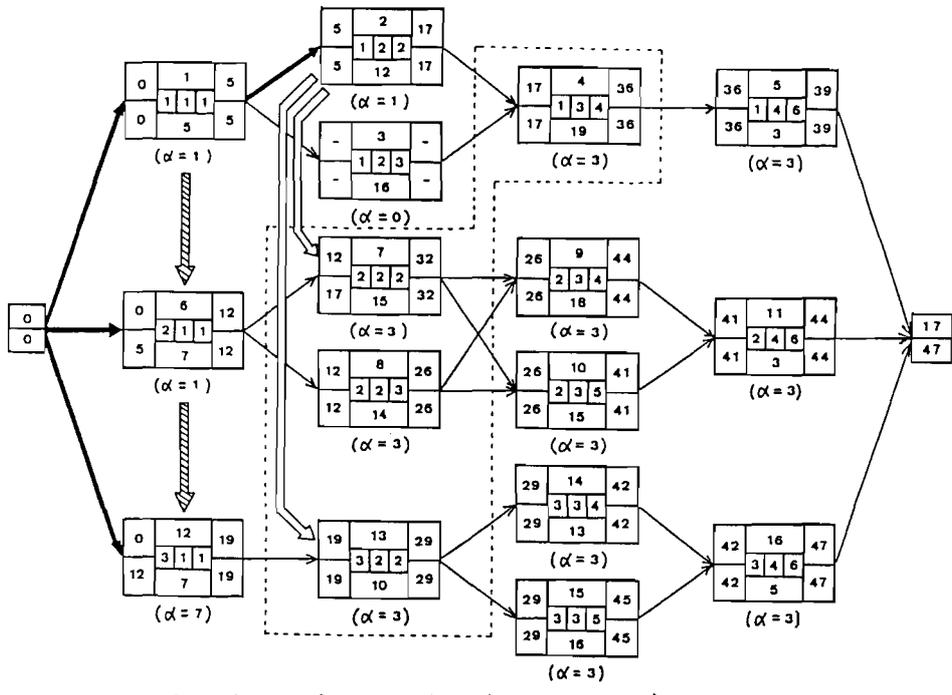
(b) 作業節点 1 が選択された状態



$Q_{cut} = \{2,3,7,8,12\}$, $Q_{sel.} = \{2,3,12\}$, $Q_{conf.} = \{2,9,0\}$

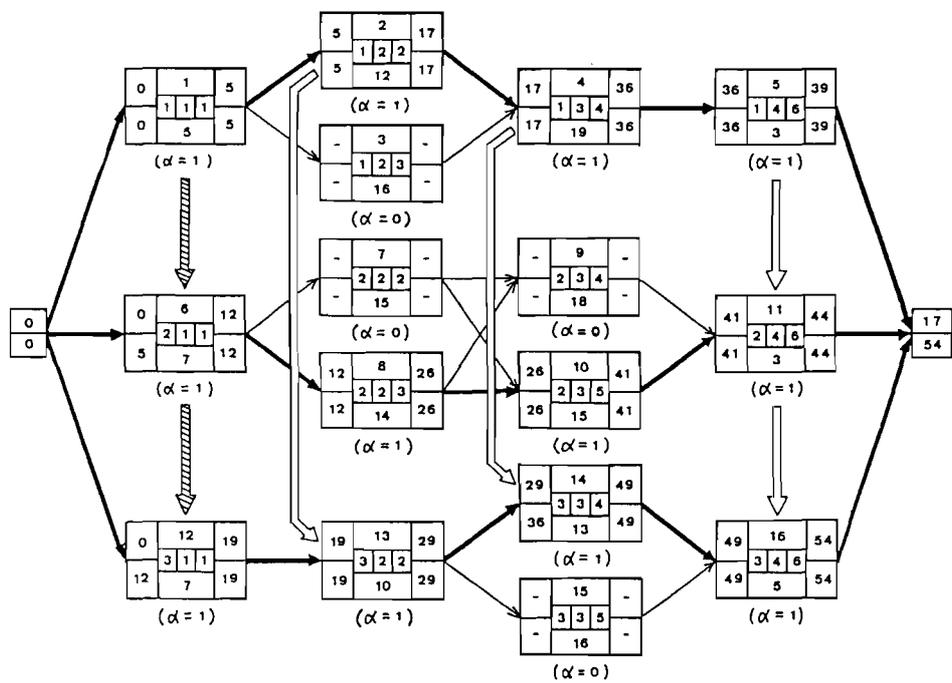
(c) 作業節点 6 が選択された状態

図 6.8 例題のネットワーク・グラフ (続き)



$Q_{out} = \{4, 7, 8, 13\}$, $Q_{sel} = \{4, 7, 8\}$, $Q_{conf} = \{8, 9c\}$

(d) 作業節点 1 2 が選択された状態



(e) 実行可能スケジュールが得られた状態

図6.8 例題のネットワーク・グラフ (続き)

6.4 数値計算例

前節で展開したフローショップ生産システムの生産スケジューリングに対する総所要時間最小化の最適化アルゴリズムをコンピュータ・プログラム化し、以下に述べる生産スケジューリング問題を数値計算例として取り上げる。ここでは、提案した最適化アルゴリズムによって最適生産スケジュールが得られることを示すために、簡単な問題を設定した。

6.2.3節で設定したフローショップ生産システムの生産スケジューリング問題は次のようであった。「総所要時間が最小となるように、ローディング・ステーションへの部品の投入順序、各部品の各工程における使用機械、および各使用機械での部品の負荷順序を決定せよ。」

生産スケジューリングの対象とする生産システムは図 6.1 に示したようなフローショップ生産システムで、ローディング・ステーション (M_1)、4 台の工作機械 ($M_2 \sim M_5$)、アンローディング・ステーション (M_6)、バッファ ($B_1 \sim B_6$) およびコンベアから構成されている。生産の対象となる部品は 4 種類 ($P_1 \sim P_4$) であり、各部品の各工程とそこで使用可能な候補機械および処理時間は表 6.1 にまとめて示されている。各部品の素材倉庫到着時刻はいずれもスケジューリング開始時刻に等しく零としている。また、機械間の搬送時

表 6.1 数値計算例のデータ (時間単位: min)

部品	ローディング工程		加工工程				アンローディング工程	
	第1工程		第2工程		第3工程		第4工程	
	使用機械	処理時間	候補機械	加工時間	候補機械	加工時間	使用機械	処理時間
P_1	M_1	5	M_2	25	M_3	30	M_6	7
			M_3	22	M_4	28		
P_2	M_1	6	M_2	20	M_4	36	M_6	8
			M_3	18	M_5	39		
P_3	M_1	5	M_2	28	M_4	25	M_6	7
			M_4	30	M_5	30		
P_4	M_1	6	M_3	18	M_4	28	M_6	10
			M_4	22	M_5	30		

間を表 6.2 のように与え、各機械の前に設置されたバッファの容量はローディ

表 6.2 搬送時間 (時間単位: min)

TO FROM	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
M ₁	0	2	3	4	5	6
M ₂	*	0	2	3	4	5
M ₃	*	*	0	2	3	4
M ₄	*	*	*	0	2	3
M ₅	*	*	*	*	0	2
M ₆	*	*	*	*	*	0

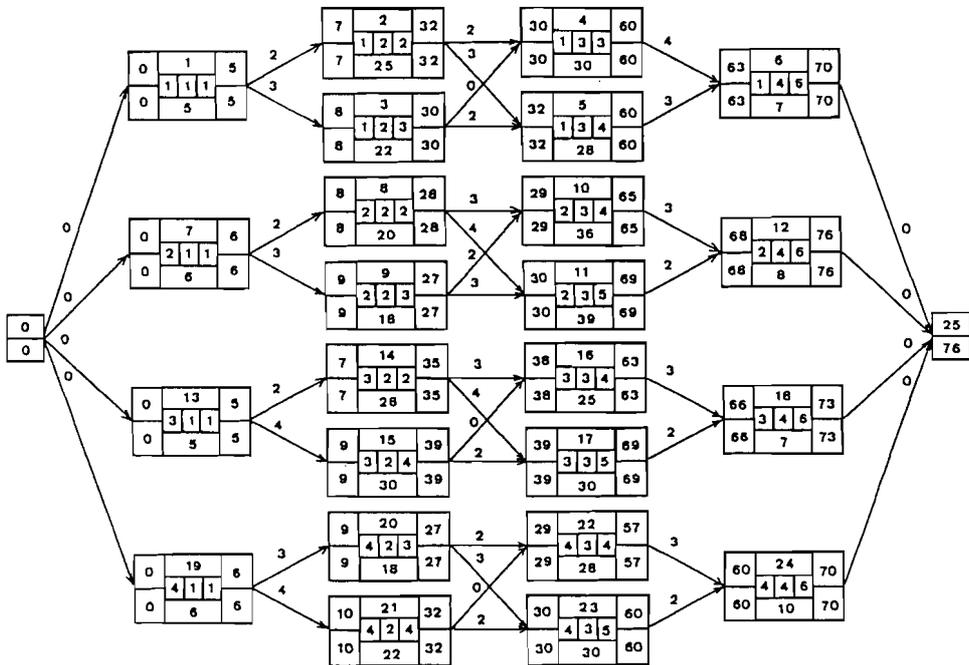


図 6.9 数値計算例のネットワーク・グラフ

ング・ステーションを除いてすべて1単位に設定されている。図 6.9 はこれら諸データに基づいて作成した生産スケジューリングの初期状態を表すネットワーク・グラフである。

上記の問題に対して前節 6.3 で提案した分岐限界法による最適化アルゴリズムに従って得られた最適生産スケジュールを図 6.10 のネットワーク・グラフで示す。図から明らかのように、ローディング・ステーションへの部品の投入順序は有向枝 \Rightarrow で示され、 $P_1-P_4-P_2-P_3$ の順である。各部品の各工程における使用機械は有向枝 \rightarrow のシーケンスとして次のように決定されている。部品 P_1 については $M_1-M_2-M_3-M_6$ の順で、部品 P_2 については $M_1-M_3-M_5-M_6$ の順で、部品 P_3 については $M_1-M_2-M_4-M_6$ の順で、部品 P_4 について

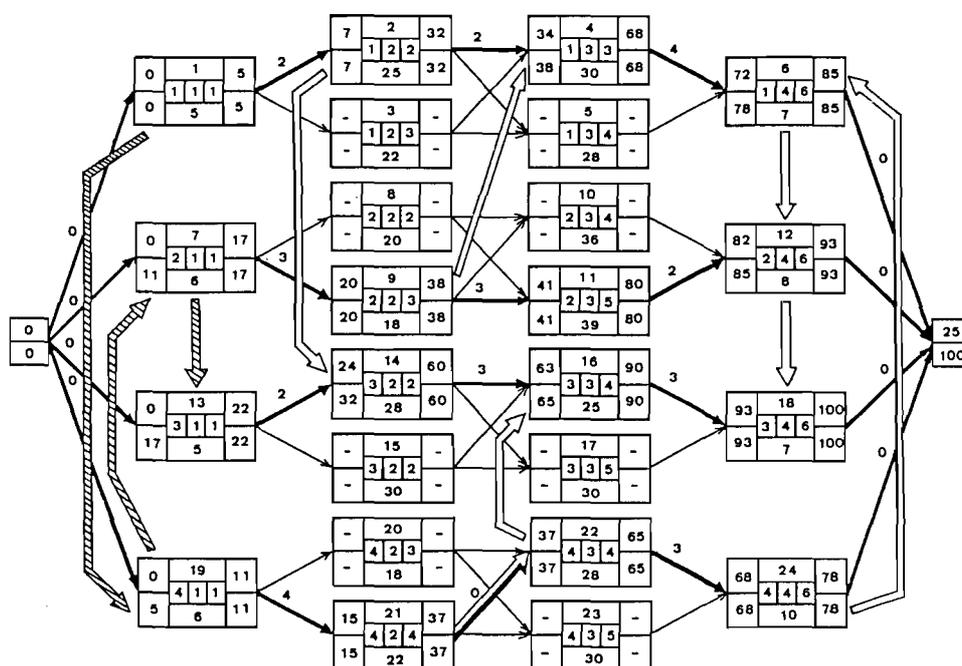


図6.10 最適生産スケジュールのネットワーク・グラフ

は $M_1-M_4-M_4-M_6$ の順である。ここで、部品 P_4 の第2工程と第4工程がともに機械 M_4 で連続的に処理されている。他方、有向枝 \Rightarrow によって部品間で共通して使用される機械に対する部品の負荷順序が与えられている。機械 M_2 では P_1-P_3 の順に、機械 M_3 では P_2-P_1 の順に、機械 M_4 では P_4-P_3 の順に、最後のアンローディング・ステーション M_6 では $P_4-P_1-P_2-P_3$ の順に部品が負荷されている。そして、4部品を生産するのに要した総所要時間は100 (min)であることが完了節点25に示されている。図6.10のネットワーク・グラフから得られる生産スケジュール情報をガントチャートの形に整理したものが図6.11である。同図(a)は機械を基準に表現したものであり、同図(b)は部品を基準にしたものである。これによれば、上述の生産スケジューリング結果が容易に理解できる。なお、最適生産スケジュールを得るまでに要した計算時間は113秒(神戸大学計算センター-NEAC/ACOSシステム700を使用)で、作成した分岐ノード数は2218個であった。

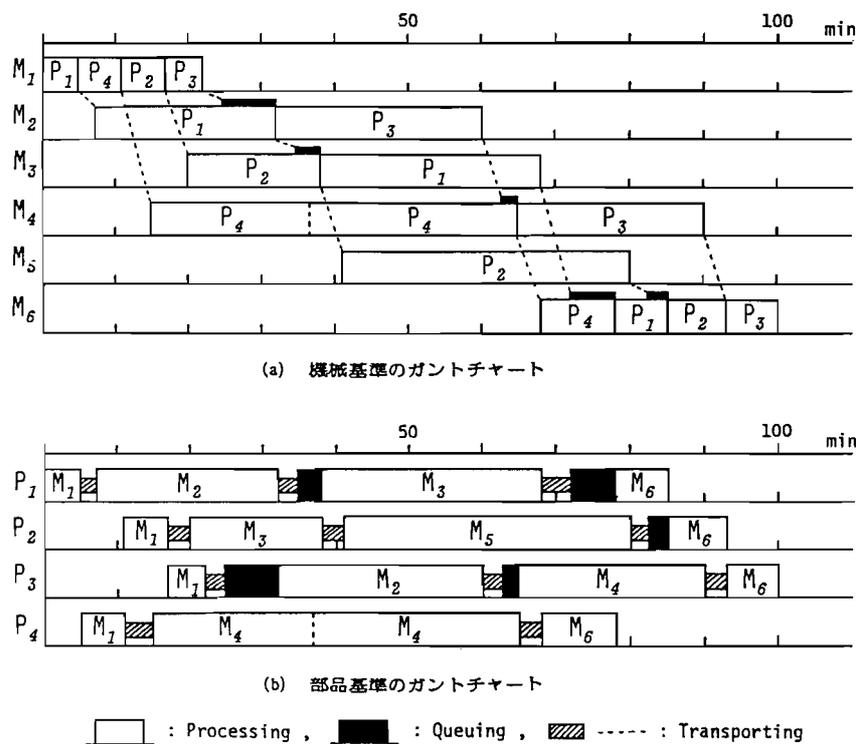


図6.11 最適生産スケジュールのガントチャート

6.5 結 言

本章では、生産システムの運用管理の観点からフローショップ生産システムの生産スケジューリング問題を取り上げ、総所要時間最小化の最適生産スケジューリング手法を提案した。本章における研究成果は次のとおりである。

- (1) バッファ容量に制限があり、部品ごとにその処理順序が異なり、さらに各部品の各工程には複数の候補機械が存在する柔軟性に富んだフローショップ生産スケジューリング・モデルを構築し、これによってフローショップ・タイプのフレキシブル生産システムの生産スケジューリングを可能とした。
- (2) 総所要時間を最小にするように生産システムへの部品の投入順序、各部品の各工程における使用機械および各使用機械での部品の負荷順序を同時に決定する生産スケジューリング問題を設定し、ネットワーク・グラフを用いてこの問題を記述し解析する方法を提示した。
- (3) 従来の生産スケジューリング研究において重要であるにもかかわらず、その取り扱いが複雑なために、あまり考慮されていなかったバッファ容量の制約と搬送時間を陽に考慮した時間関係式を定式化した。
- (4) 最適生産スケジュールの決定に際し、フローショップ生産スケジューリングの特徴を勘案したセレクト集合を新たに提案した。さらに、分岐限界法を利用した最適化アルゴリズムを開発し、例題ならびに数値計算例によって提案アルゴリズムの妥当性を検討した。その結果、提案アルゴリズムによる生産スケジュールの決定段階の一部をネットワーク・グラフで示し、総所要時間を最小にする最適生産スケジュールが得られることを確認した。

なお、提案した最適化アルゴリズムは、従来の最大滞留時間最小化ないし平均滞留時間最小化のフローショップ生産スケジューリング問題にも適用可能であり、また時間関係式を一部修正するだけで、段取り替え時間を考慮した生産スケジューリング問題に対しても拡張適用の余地を有する。ただし、最適化手法に分岐限界法を援用しているため、本手法は理論的であるが、部品数の多い大規模問題を効率よく解く観点からはまだ不十分なものであろう。したがって、提案アルゴリズムの改良ないし実用面からの近似解法の開発が望まれることになるが、後者については次章で論じる。

第7章 ジョブショップ生産システムの生産スケジューリング

7.1 緒 言

本章では、前章に引き続き生産システムの運用管理の観点から、ジョブショップ生産システムの生産スケジューリング問題を取り扱う。

本章で取り上げる生産スケジューリングは、一般にジョブショップ・スケジューリングとよばれ、そこで対象とする最も一般的な生産システムは m 台の異なる機械で n 個の異なる部品を加工する機械加工工場である。ここでは、生産の対象となる部品の加工の技術的順序や所要工程数は、部品ごとにならずとも同一でない。このようなジョブショップ・スケジューリングにおける実行可能な生産スケジュールの総数は、 $(n!)^m$ であるといわれている^{7.1)}。このように、ジョブショップ・スケジューリングは極めて複雑な問題であり、現在までに完全に解かれているのは、2部品・ m 機械問題と n 部品・2機械問題において最大滞留時間を最小にする場合だけである^{7.1)~7.3)}。

ジョブショップ・スケジューリングに関しては、すでに多くの研究がなされているが^{7.1),7.4)}、それらの大部分はディスパッチングルール(dispatching rule)による部品の機械への順序付け問題を取り上げ、新しいルールの開発あるいはルール間の比較・検討をシミュレーションによって行っている^{7.5),7.6)}。これまでに考案されたディスパッチングルールは約100種類以上あるとされ、Panwalkarら^{7.7)}およびBlackstoneら^{7.8)}が詳細な報告を行っている。このように、ジョブショップ・スケジューリングに関する研究が数多くなされているにもかかわらず、未だ実用的な生産スケジューリング手法が確立されるまでには至っていないようである^{7.9)}。その主な理由は、上述したジョブショップ・スケジューリングの複雑性から、対象とする生産システムを極端に単純化し、非現実的な仮定のもとで構築された生産スケジューリング・モデルを用いているためである。このようなモデルから得られた生産スケジュールは、ほとんど実行不可能である。

ジョブショップ生産システムの生産スケジューリングにおいて、現実に実行可能な生産スケジュールを得るには生産スケジューリング・モデルの構築にあたって、以下にあげるような種々の課題が考慮されねばならない。すなわち、

- (1) 各部品の各工程において使用できる機械を前もって一意に指定しておく^{7.10),7.11)}のではなく、複数台の候補機械の中から適切な機械が選択できること
- (2) 複数台の機械を受けもつ作業者に対して、適正な作業スケジュールが計画できること^{7.12)}
- (3) 加工待ち部品の貯蔵スペースとしてのバッファについて、バッファ容量の制約が考慮できること
- (4) 部品の機械間搬送について、搬送時間を考慮するとともに、その搬送手段に関する制約も取り扱えること

などである。これらのうち、搬送手段とバッファに関する制約の取り扱いは、最近の自動生産システムを運用管理する上で極めて重要である。

そこで本章では、とくに上述の(3)と(4)に着目し、岩田ら^{7.12)}が提案した作業者の作業スケジュールの決定に加えて、搬送手段とバッファに関する制約を陽に考慮し、加工と搬送のスケジュールの決定を統合した生産スケジューリング問題を取り上げる^{7.13),7.14)}。そして、実用規模の生産スケジューリング問題を解くためのディシジョンルールによる近似解法を提案する。具体的にいて、7.2節では現実的な生産スケジューリング・モデルを構築し、7.3節では対象とする生産スケジューリング問題を設定し、その構造を明らかにする。そして、7.4節において実行可能な生産スケジュールを得るための決定手順について述べる。最後の7.5節では、提案した近似解法の妥当性とディシジョンルールの効果が数値計算例をとおして検討されている。

7.2 生産スケジューリング・モデル

7.2.1 対象とする生産システム

本章で取り扱う生産システムは、適当にレイアウトされた M 台の機械 M_m

($m = 1, 2, \dots, M$), H 台の搬送機器 H_h ($h = 1, 2, \dots, H$), およびこれら機械ないし搬送機器上での作業を担当する O 人の作業者 O_y ($y = 1, 2, \dots, O$) と各機械の前に設置された有限容量 C_m のバッファ B_m ($m = 1, 2, \dots, M$) により構成されており, P 種類の部品 P_i ($i = 1, 2, \dots, P$) がロットサイズ K_i で負荷されるジョブショップ生産システムである。

このようなジョブショップ生産システム内の部品の流れを記述すれば, 次のようである。生産システムに到着した部品の素材は素材倉庫に入る。そして, 候補搬送機器の中から選択された搬送機器により, 既定の搬送経路を通して, 第1工程の候補機械の中から選択された機械の位置まで, ラップフェイジング方式で搬送される。このとき, 機械の前に設置されたバッファが空いていない場合には, その搬送機器上でその位置に留まる。そして, バッファが空き次第, その部品はバッファに投入される。バッファ内の各部品は, その直前の部品の加工が完了し, 機械から取り外されたら, ただちにその機械へ取付けられ, 加工を受けて取り外される。ただし, 機械の段取り替え作業は各部品ロットの第1工作物の機械への取付け作業の前に行われる。機械から取り外された部品は再び搬送機器に取付けられ, 次工程の使用機械の位置まで搬送され, 加工を受ける。このようにして, 全工程の処理を完了した部品は製品倉庫へと搬送される。なお, 上述の各作業に対して作業者の支援が必要であれば, その作業を実行できる作業者の中から適切な作業者が選定される。

7.2.2 前提条件

前述したジョブショップ生産システムにおける生産スケジューリング・モデルの構築にあたって, 以下の前提をおく。

- (1) 各機械はジグ・工具の組合せにより複数種類の加工を実行でき, その加工内容は既知である。
- (2) 各機械の前にはバッファが設置されており, その容量は有限である。
- (3) 各搬送機器は特定の複数種類の部品を搬送することができる。

- (4) 各作業者は特定の複数台の機械ないし搬送機器を取り扱える。
- (5) 各部品は与えられた加工の技術的順序に従って、素材から順次完成品へと仕上げられる。
- (6) 各部品はロット単位で処理され、一つの部品ロット内の各々（これらをその部品の工作物とよぶことにする）は連続的に加工される。すなわち、ロット内の第1工作物の機械への取付け開始から最終工作物の取り外し完了まで、他の部品がその機械に負荷されることはない。
- (7) 各部品の工程間搬送は、そのロット内の1工作物の加工・取り外しが完了するごとに、逐次、次工程の使用機械まで搬送するラップフェイジング方式とする。
- (8) 各部品の各工程での加工に対しては、複数台の候補機械が存在する。
- (9) 任意の2機械間の部品搬送に対しては、複数台の候補搬送機器が存在する。
- (10) 各機械での作業として、段取り替え作業、部品の取付け・取り外し作業および実加工作業を考え、部品ごとの各作業時間は既知である。
- (11) 各搬送機器での作業として、部品の取付け・取り外し作業および実搬送作業を考え、部品ごとの各作業時間は既知である。

以上の前提条件で構築される生産スケジューリング・モデルに対して、次の記号を用いる。

$M = \{ M_m \mid m=1, 2, \dots, M \}$: 機械の集合

$H = \{ H_h \mid h=1, 2, \dots, H \}$: 搬送機器の集合

$O = \{ O_y \mid y=1, 2, \dots, O \}$: 作業者の集合

$P = \{ P_i \mid i=1, 2, \dots, P \}$: 部品の集合

J_i : 部品 P_i の総工程数 ($j=1, 2, \dots, J_i$)

K_i : 部品 P_i のロットサイズ (個)

$M_s(i, j)$: 部品 P_i の第 j 工程の候補機械の集合

$H_p(i)$: 部品 P_i を搬送可能な候補搬送機器の集合

$H_t(m, m')$: 機械 $M_m, M_{m'}$ 間の部品搬送を実行できる候補搬送機器の集合

$O_s(m)$: 機械 M_m を取り扱える作業者の集合

$O_t(h)$: 搬送機器 H_h を取り扱える作業者の集合

B_m : 機械 M_m の前に設置されたバッファ

C_m : バッファ B_m の容量 (個)

7.2.3 作業の定義

本章では、部品を素材から完成品へと変換する生産過程において生産スケジューリングの対象となる生産活動の最小単位を「作業 (operation) 」と定義する。

従来の生産スケジューリング問題の多くは、機械上での加工作業のみを対象として、各機械に対する部品の負荷順序を決定する、いわゆる順序付け問題であった。そして、加工作業に付随する他の作業、たとえば機械の段取り替え作業、部品の取付け・取り外し作業などは無視するか、また考慮したとしても、それら各作業は連続的に行われるものと仮定し、それら各作業に要する作業時間を加工時間に含めて取り扱っていた。しかしながら、実際の生産活動では、機械の段取り替え作業は部品がその機械に到着する以前でも実行可能であり、また部品の取付け、加工、取り外し作業を担当する作業者がそれぞれ異なる場合には、これら作業が連続して実行されるとは限らない。したがって、現実に実行可能な生産スケジュールを作成するにあたっては、これら作業をそれぞれ独立した作業として取り扱うことが必要である。このことは、ジョブショップ生産システムを実際に運用する際に、詳細な生産実施計画を与えるという意味においても極めて重要である。

前提条件(10)、(11)で述べたように、本章では、機械での作業として、次の4種類の作業を考慮している。

- (1) 機械の段取り替え作業
- (2) 機械への部品取付け作業
- (3) 部品の実加工作業
- (4) 機械からの部品取り外し作業

他方、部品搬送に関しては、搬送機器での作業として、次の3種類の作業を考慮している。

- (1) 搬送機器への部品取付け作業
- (2) 部品の実搬送作業
- (3) 搬送機器からの部品取り外し作業

上記7種類の作業を生産スケジューリングの対象とし、次の記号を用いて統一的に表示する。

$a_{xyz}(i, j, k)$: 作業

x : 作業認識番号 ($x = 1, 2, \dots, 7$)

$x = 1$: 機械の段取り替え作業

$x = 2$: 搬送機器への部品取付け作業

$x = 3$: 部品の実搬送作業

$x = 4$: 搬送機器からの部品取り外し作業

$x = 5$: 機械への部品取付け作業

$x = 6$: 部品の実加工作業

$x = 7$: 機械からの部品取り外し作業

y : 担当作業番号 ($y = 1, 2, \dots, O$)

z : 生産設備 (機械および搬送機器) 番号

$z = m$ (ただし, $x = 1, 5, 6, 7$ のとき)

$z = h$ (ただし, $x = 2, 3, 4$ のとき)

i : 部品番号 ($i = 1, 2, \dots, P$)

j : 工程番号 ($j = 1, 2, \dots, J_i$)

k : ロット内の工作物番号 ($k = 1, 2, \dots, K_i$)

記号 $a_{xyz}(i, j, k)$ で表される作業は次のようである。作業 $a_{xyz}(i, j, k)$ は、作業員 O_y が部品 P_i 、第 k 工作物の第 j 工程を機械 M_m または搬送機器 H_h で実施する作業 x であることを意味している。なお、部品搬送に関しては、第 j 工程での実加工作業を行うために直前工程で使用した機械から当該工程で使用する機械までの搬送を第 j 工程のための搬送とする。

ところで、生産スケジュールを作成することは、上述の各作業についての開始時刻と完了時刻を決定することである。本章では、作業 $a_{xyz}(i, j, k)$ に関するこれら時刻ないし作業時間を次のように表す。

$T_s[a_{xyz}(i, j, k)]$: 作業 $a_{xyz}(i, j, k)$ の開始時刻

$T_f[a_{xyz}(i, j, k)]$: 作業 $a_{xyz}(i, j, k)$ の完了時刻

$t_p[a_{xyz}(i, j, k)]$: 作業 $a_{xyz}(i, j, k)$ の作業時間

$t_t(h, m, m')$: 搬送機器 H_h の機械 M_m から機械 $M_{m'}$ への移動時間

$t_o(y, m, m')$: 作業員 O_y の機械 M_m から機械 $M_{m'}$ への移動時間

ここに、 $t_p[a_{xyz}(i, j, k)]$ 、 $t_t(h, m, m')$ および $t_o(y, m, m')$ の各時間値は、生産スケジュールリングを行う際に前もって与えられる。

7.2.4 作業間の時間的關係

7.2.1 節ですでに述べたジョブショップ生産システム内の部品の流れに着目し、前節 7.2.3 で取り上げた 7 種類の作業について、それら作業間の時間的關係を明らかにする。

いま、部品 P_i の第 j 工程における第 k 工作物を考える。この加工が候補機械の集合 $M_s(i, j)$ の中から選択された機械 M_m で行われることが決定され、さらに第 $(j-1)$ 工程での使用機械 $M_{m^-} (\in M_s(i, j-1))$ から機械 M_m への工作物搬送には、機械 M_{m^-} から機械 M_m への部品搬送が可能で、かつ部品 P_i を搬送できる候補搬送機器の集合 $H_t(m^-, m) \cap H_p(i)$ の中から搬送機器 H_h が選択されたとする。このとき、機械 M_m および搬送機器 H_h での既述 7 種類の作業に対して、次のような時間的關係が成立する。以下、各作業について、時間關係式を定式化する。なお、各作業の担当作業員は、それら作業が実施される機械 M_m ないし搬送機器 H_h を取り扱うことができる作業員の集合 $O_s(m)$ あるいは $O_t(h)$ からそれぞれ選定された作業員 O_y として定式化されている。したがって、その作業が自動化されている場合には、各作業の開始時刻を決定する際の作業員に関する制約を無視すればよい。

(1) 機械の段取り替え作業 $a_{1ym}(i, j, 1)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

- (i) 機械 M_m において、部品 P_i の直前に負荷されていた部品 P_{i-} の第 $j-$ 工程における最終工作物 K_{i-} の機械 M_m からの取り外し作業 $a_{7y-m}(i^-, j^-, K_{i-})$ が作業者 O_{y-} によって完了していること
- (ii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*y^*z^*}(i^*, j^*, k^*)$ を終了し、機械 M_m までの移動が完了していること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{1ym}(i, j, 1)] \geq \max \{ T_f[a_{7y-m}(i^-, j^-, K_{i-})], T_f[a_{x^*y^*z^*}(i^*, j^*, k^*)] + t_o(y, z^*, m) \} \dots (7.1)$$

$$T_f[a_{1ym}(i, j, 1)] = T_s[a_{1ym}(i, j, 1)] + t_p[a_{1ym}(i, j, 1)] \dots (7.2)$$

ただし、機械 M_m について、この段取り替え作業が生産スケジューリング開始後の最初の作業である場合には、式(7.1)の右辺第1項を機械 M_m の使用開始可能時刻とする。

(2) 搬送機器への部品取付け作業 $a_{2yh}(i, j, k)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

- (i) 第 k 工作物について、第 $(j-1)$ 工程での使用機械 M_{m-} からの取り外し作業 $a_{7y-m-}(i, j-1, k)$ が作業者 O_{y-} によって完了していること
- (ii) 搬送機器 H_h について、当該作業の直前まで塔載していた部品 P_{i+} の搬送機器からの取り外し作業 $a_{4y+h}(i^+, j^+, k^+)$ が作業者 O_{y+} により機械 M_{m+} で終了し、機械 M_{m-} までの移動が完了していること
- (iii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*y^*z^*}(i^*, j^*, k^*)$ を終了し、機械 M_{m-} までの移動が完了していること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{2yh}(i, j, k)] \geq \max \{ T_f[a_{7y^-m^-}(i, j-1, k)], \\ T_f[a_{4y^+h}(i^+, j^+, k^+)] + t_i(h, m^+, m^-), \\ T_f[a_{x^*yz^*}(i^*, j^*, k^*)] + t_o(y, z^*, m^-) \} \dots (7.3)$$

$$T_f[a_{2yh}(i, j, k)] = T_s[a_{2yh}(i, j, k)] + t_p[a_{2yh}(i, j, k)] \dots (7.4)$$

ただし、 $j = 1$ に対しては、式(7.3)の右辺第1項を部品 P_i の素材倉庫到着時刻とする。また、搬送機器 H_h について、この部品取付け作業が生産スケジュール開始後の最初の作業である場合には、式(7.3)の右辺第2項を搬送機器 H_h の使用開始可能時刻とする。

(3) 部品の実搬送作業 $a_{3yh}(i, j, k)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

- (i) 第 k 工作物について、搬送機器 H_h への取付け作業 $a_{2y-h}(i, j, k)$ が作業者 O_{y^-} によって完了していること
- (ii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*yz^*}(i^*, j^*, k^*)$ を終了し、機械 M_m までの移動が完了していること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{3yh}(i, j, k)] \geq \max \{ T_f[a_{2y-h}(i, j, k)], \\ T_f[a_{x^*yz^*}(i^*, j^*, k^*)] + t_o(y, z^*, m^-) \} \dots (7.5)$$

$$T_f[a_{3yh}(i, j, k)] = T_s[a_{3yh}(i, j, k)] + t_p[a_{3yh}(i, j, k)] \dots (7.6)$$

(4) 搬送機器からの部品取り外し作業 $a_{4yh}(i, j, k)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

- (i) 第 k 工作物について、実搬送作業 $a_{3y-h}(i, j, k)$ が作業者 O_{y^-} によって完了していること
- (ii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*yz^*}(i^*, j^*, k^*)$ を終了し、機械 M_m までの移動が完了していること
- (iii) 機械 M_m の前に設置されたバッファ B_m に余裕があること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{4,yh}(i,j,k)] \geq \max\{T_f[a_{3y-h}(i,j,k)], T_f[a_{x^*y_z^*}(i^*,j^*,k^*)] + t_o(y,z^*,m)\} \dots\dots (7.7)$$

(ただし、この時点においてバッファ B_m に空があること)

$$T_f[a_{4,yh}(i,j,k)] = T_s[a_{4,yh}(i,j,k)] + t_p[a_{4,yh}(i,j,k)] \dots\dots (7.8)$$

(5) 機械への部品取付け作業 $a_{5,ym}(i,j,k)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

- (i) 第 k 工作物について、搬送機器 H_h からの取り外し作業 $a_{4y-h}(i,j,k)$ が作業者 O_{y-} によって完了していること
- (ii) 機械 M_m において、部品 P_i の第 $(k-1)$ 工作物の取り外し作業 $a_{7y+m}(i,j,k-1)$ が作業者 O_{y+} によって完了していること
- (iii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*y_z^*}(i^*,j^*,k^*)$ を終了し、機械 M_m までの移動が完了していること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{5,ym}(i,j,k)] \geq \max\{T_f[a_{4y-h}(i,j,k)], T_f[a_{7y+m}(i,j,k-1)], T_f[a_{x^*y_z^*}(i^*,j^*,k^*)] + t_o(y,z^*,m)\} \dots\dots (7.9)$$

$$T_f[a_{5,ym}(i,j,k)] = T_s[a_{5,ym}(i,j,k)] + t_p[a_{5,ym}(i,j,k)] \dots\dots (7.10)$$

ただし、 $k=1$ に対しては、式(7.9)の右辺第2項を機械 M_m の段取り替え作業完了時刻とする。

(6) 実加工作業 $a_{6,ym}(i,j,k)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

- (i) 第 k 工作物について、機械 M_m への取付け作業 $a_{5y-m}(i,j,k)$ が作業者 O_{y-} によって完了していること
- (ii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*y_z^*}(i^*,j^*,k^*)$ が終了し、機械 M_m までの移動が完了していること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{6,ym}(i, j, k)] \geq \max \{ T_f[a_{5,y-m}(i, j, k)], \\ T_f[a_{x^*y_z^*}(i^*, j^*, k^*)] + t_o(y, z^*, m) \} \dots (7.11)$$

$$T_f[a_{6,ym}(i, j, k)] = T_s[a_{6,ym}(i, j, k)] + t_p[a_{6,ym}(i, j, k)] \dots (7.12)$$

(7) 機械からの部品取り外し作業 $a_{7,ym}(i, j, k)$

この作業を開始するための条件は次のとおりである。

(i) 第 k 工作物について、実加工作業 $a_{6,y-m}(i, j, k)$ が作業者 O_y によって完了していること

(ii) 作業者 O_y について、当該作業の直前に行っていた作業 $a_{x^*y_z^*}(i^*, j^*, k^*)$ を終了し、機械 M_m までの移動が完了していること

したがって、次式が成立する。

$$T_s[a_{7,ym}(i, j, k)] \geq \max \{ T_f[a_{6,y-m}(i, j, k)], \\ T_f[a_{x^*y_z^*}(i^*, j^*, k^*)] + t_o(y, z^*, m) \} \dots (7.13)$$

$$T_f[a_{7,ym}(i, j, k)] = T_s[a_{7,ym}(i, j, k)] + t_p[a_{7,ym}(i, j, k)] \dots (7.14)$$

以上のように、7種類の作業についての時間関係式が定式化された。

7.3 生産スケジューリング問題

生産スケジューリングは、生産計画によって決定された生産品種とその生産量に基づいて、生産諸資源・生産諸設備等に関する制約を考慮し、工程設計、作業設計、時間見積り、費用見積りなどの情報を用いて、どの生産設備で、どのような作業を、いつ開始し、いつ終了するかを決定する詳細な時間的側面に関する生産実施計画活動である。これまで取り扱われてきた生産スケジューリング問題の多くは、対象とする生産システム・モデルを極端に単純化し、非現実的な仮定に基づいて生産スケジューリング・モデルを構築していた。たとえば、搬送機器、バッファ、作業者などは必要なときに随時、利用できることを暗に前提としており、これらに関する制約はなかった。したがって、立案された生産スケジュールがたとえ最適であっても、実際にこれを適用する際には、

生産スケジューリングの際に考慮していなかった諸制約を加味して再調整しなければならない。

本章では、7.2.2節の諸前提で構築される極めて現実的な生産スケジューリング・モデルに基づいて、既述したジョブショップ生産システムの生産スケジューリング問題を次のように設定する。

7.3.1 問題の記述

本章で取り扱うジョブショップ生産システムの生産スケジューリング問題は次のようである。

〔問題〕 総所要時間が最小となるように、各部品の加工スケジュール、各機械の稼働スケジュール、各搬送機器の搬送スケジュールおよび各作業者の作業スケジュールを決定せよ。

ここで総所要時間とは、素材倉庫に最初に到着した部品の最早素材倉庫到着時刻から、すべての部品の加工が完了して最終部品が製品倉庫に入る最遅製品倉庫入庫時刻までに要する時間で、総所要時間を T とすれば次式で与えられる。

$$T = \max_{i \in P} \{ T_I[P_i] \} - \min_{i \in P} \{ T_A[P_i] \} \quad \dots\dots\dots (7.15)$$

ここに $T_A[P_i]$ は部品 P_i の素材倉庫到着時刻であり、 $T_I[P_i]$ は部品 P_i の最終工作物 K_i の製品倉庫入庫時刻である。

作成された生産スケジュールを多面的に評価するために、本章では次のような評価基準を設定する。まず、部品の平均滞留時間 \bar{T} を次式で与える。

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^P T_i}{P} \quad \dots\dots\dots (7.16)$$

ここに T_i は部品 P_i の滞留時間で、次式で与えられる。

$$T_i = T_I[P_i] - T_A[P_i] \quad \dots\dots\dots (7.17)$$

次に、機械の平均稼働率 $\bar{\lambda}$ (%) を次式で与える。

$$\bar{\lambda} = \left\{ \sum_{m=1}^M \lambda_m / (M \times T) \right\} \times 100 \quad \dots\dots\dots (7.18)$$

ここに λ_m は、機械 M_m が実加工作業に使用された時間の総和である。
 他方、搬送機器の平均稼働率 $\bar{\mu}$ (%) を次式で与える。

$$\bar{\mu} = \left\{ \sum_{h=1}^H \mu_h / (H \times T) \right\} \times 100 \quad \dots\dots\dots (7.19)$$

ここに μ_h は、搬送機器 H_h が実搬送作業に使用された時間の総和である。
 最後に、作業者の平均稼働率 $\bar{\nu}$ (%) を次式で与える。

$$\bar{\nu} = \left\{ \sum_{y=1}^O \nu_y / (O \times T) \right\} \times 100 \quad \dots\dots\dots (7.20)$$

ここに ν_y は、作業者 O_y が実際に作業を行った時間の総和である。

7.3.2 問題の構造

前節 7.3.1 で設定したジョブショップ生産システムの生産スケジューリング問題は、図 7.1 に示すような 4 レベルの意思決定構造をもっと考えられる。まず、第 4 レベルの機械選択で、ある部品のある工程での実加工作業を実行できる候補機械の中から適当な使用機械を選択し、この情報を第 3 レベルに送る。第 3 レベルの搬送機器選択においては、使用することが決定されたある 2 機械間の部品搬送を実行できる候補搬送機器の集合から適当な使用搬送機器が選択される。ついで、第 2 レベルの作業者選定では、使用することが決定された機械および搬送機器での各作業に対して、適当な担当作業者が決定される。そして、第 1 レベルにおいて、すでに決定された諸情報に基づいて各機械への部品の負荷順序、各搬送機器への部品の負荷順序および各作業者の作業順序を決定し、各作業が 7.2.4 節で定式化した時間関係式を満足するように時間軸上での開始時刻ならびに完了時刻を決定する。このような各レベルでなされた意思決定の結果が、総所要時間最小化基準に基づいて評価され、再び第 4 レベルの入力

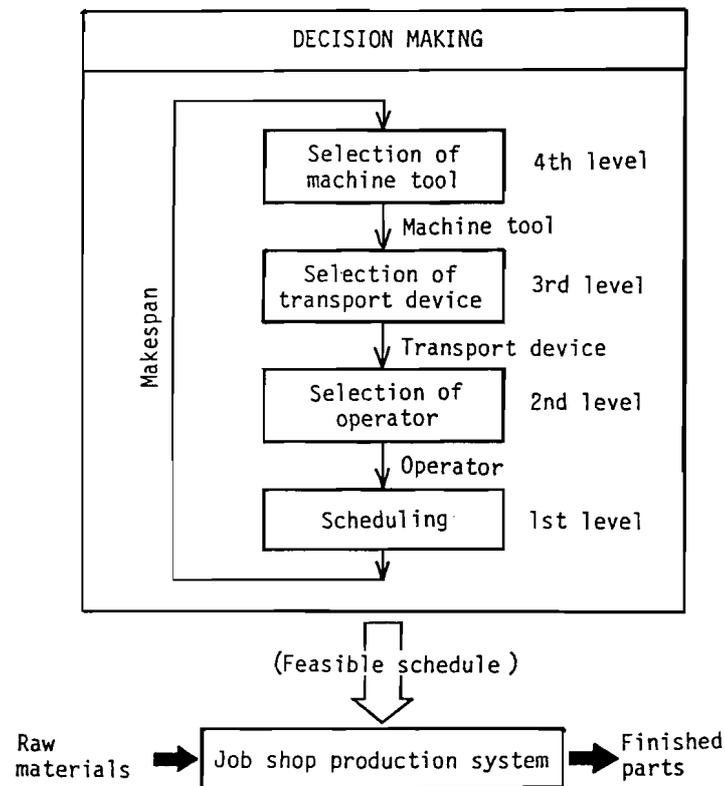


図7.1 生産スケジューリング問題の意志決定過程

情報としてフィードバックされる。

本章では、現実的な規模のジョブショップ生産システムに対する上記生産スケジューリング問題の近似解を得ることを目的として、ディシジョンルールを用いた解法を提案する。次節7.4はその解法を述べている。

7.4 生産スケジュールの決定

7.4.1 ディシジョンルール

実行可能な生産スケジュールを得るには、前出図7.1にみるように、各部品の各工程における使用機械の選択、各工程間の部品搬送に対する使用搬送機器の選択、および使用することが決定された機械と搬送機器での各作業を担当する作業者の選定という3種類の意思決定を行う必要がある。これら意思決定の

基準となるルールを，ここでは「ディシジョンルール (decision rule)」とよぶ。本章では，機械選択と搬送機器選択に対して SOTA, ESTA, EFTA の 3 種類のルールを，そして作業者選定に対して ESTARルールを採用する。これらのルールは，いずれも代替作業を考慮したものである。

以下，各ディシジョンルールについて述べる。

(1) SOTA (Shortest Operating Time with Alternatives considered)

SOTAルールは，機械あるいは搬送機器上での占有時間が最小となる機械あるいは搬送機器を選択するもので，従来ディスパッチングルールとして広く採用されている SPT (Shortest Processing Time), SST (Shortest Setup Time) および両ルールを結合した SOT (Shortest Operating Time) の各ルールの考え方を統合・拡張したものである。ここに占有時間とは，機械選択レベルでは当該部品についての機械段取り替え作業，取付け・取り外し作業および実加工作業の各作業時間の総和である。他方，搬送機器選択レベルでは搬送機器への部品取付け，取り外し作業および実搬送作業の各作業時間の総和である。

(2) ESTA (Earliest Starting Time with Alternatives considered)

ESTARルールは，生産スケジュールの作成段階の各意志決定を行う時点で，遊休中の機械，搬送機器ないし作業者を優先的に選択するもので，それぞれの稼働率の向上と負荷の平滑化を図ろうとするルールであり，本章で案出した新しいディシジョンルールである。

(3) EFTA (Earliest Finishing Time with Alternatives considered)

EFTARルールは，前述の SOTAルールと ESTARルールを統合したものであり，部品の滞留時間の短縮化を図ろうとするものである。本ルールはすでに岩田・室津ら^{7.11),7.12)}によって提案されたルールであり，その有効性は検討されている。

次に，上記 3 種類のディシジョンルールの適用法を意思決定のレベルごとに詳述する。

(1) 機械選択レベル

いま、生産スケジューリングのある段階で、部品 P_i について第 $(j-1)$ 工程までの全作業（すなわち、7.2.3 節で述べた 7 種類の作業）がすでにスケジューリングされ、次の第 j 工程における機械の段取り替え作業、部品の取付け・取り外し作業および実加工作業をこれからスケジュールする時点を考える。このとき、第 j 工程で使用する機械をまず選択しなければならない。

SOTA ルールによれば、部品 P_i の第 j 工程における候補機械の中から、機械上での占有時間が最小となる機械が選択される。SOTA ルールは次式で定義される。

$$\min_{m \in M_s(i, j)} \left\{ t_p[a_{1 \cdot m}(i, j, 1)] + \sum_{k=1}^{K_i} \sum_{x=5}^7 t_p[a_{x \cdot m}(i, j, k)] \right\} \quad (7.21)$$

式 (7.21) により、次にスケジュールされる部品 P_i とその第 j 工程で使用する機械 M_m が決定される。なお、式中の記号 (\cdot) は作業者の制約を無視していることを意味する。

ESTA ルールによれば、部品 P_i の第 j 工程における候補機械の中から、段取り替え作業が最も早く完了でき、その結果、実加工作業に最も早く着手できる可能性の高い機械が選択される。ESTA ルールは次式で定義される。

$$\min_{m \in M_s(i, j)} \{ T_s[a_{5 \cdot m}(i, j, 1)] \} \dots\dots\dots (7.22)$$

式 (7.22) により、次にスケジュールされる部品 P_i とその第 j 工程で使用する機械 M_m が決定される。

EFTA ルールによれば、部品 P_i の第 j 工程における候補機械の中から、第 $(j-1)$ 工程から第 j 工程までの部品搬送と第 j 工程のバッファ制約を考慮した上で、最終工作物 K_i の加工が終了し、機械からの取り外し作業が完了する時刻の最も早い機械が選択される。EFTA ルールは次式で定義される。

$$\min_{m \in M_s(i, j)} \{ T_f[a_{7 \cdot m}(i, j, K_i)] \} \dots\dots\dots (7.23)$$

式(7.23)により、次にスケジュールされる部品 P_i とその第 j 工程で使用される機械 M_m が決定される。なお、第 $(j-1)$ 工程から第 j 工程までの部品搬送に関しては、搬送機器の制約がないものと考え、最短時間で部品搬送ができると仮定している。他方、バッファ制約については7.4.3節で述べる。

(2) 搬送機器選択レベル

いま、生産スケジューリングのある段階で、部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程での使用機械が M_{m^-} であり、第4レベルの機械選択レベルにおいて第 j 工程で使用する機械が M_m と決定された時点を考える。このとき、機械 M_{m^-} から機械 M_m への移動ができ、かつ部品 P_i を搬送することができる候補搬送機器の集合から適当な搬送機器を選択しなければならない。

SOTALルールによれば、搬送機器上での占有時間が最小となる搬送機器が選択される。SOTALルールは次式で定義される。

$$\min_{h \in H_t(m^-, m) \cap H_p(i)} \left\{ \sum_{x=2}^4 t_p[a_{x \cdot h}(i, j, k)] \right\} \dots\dots\dots (7.24)$$

式(7.24)により、次にスケジュールされる部品 P_i の第 k 工作物とその第 $(j-1)$ 工程から第 j 工程までの部品搬送に使用する搬送機器 H_h が決定される。

ESTARルールによれば、実搬送作業を最も早く開始できるように搬送機器への部品の取付け作業の開始時刻が最早の搬送機器が選択される。ESTARルールは次式で定義される。

$$\min_{h \in H_t(m^-, m) \cap H_p(i)} \{ T_s[a_{2 \cdot h}(i, j, k)] \} \dots\dots\dots (7.25)$$

式(7.25)により、次にスケジュールされる部品 P_i の第 k 工作物とその第 $(j-1)$ 工程から第 j 工程までの部品搬送に使用する搬送機器 H_h が決定される。

EFTARルールによれば、搬送機器からの部品取り外し作業が最も早く完了す

る搬送機器が選択される。EFTAルールは次式で定義される。

$$\min_{h \in H_t(m^-, m) \cap H_p(i)} \{ T_f[a_{4,h}(i, j, k)] \} \dots\dots\dots (7.26)$$

式(7.26)により、次にスケジュールされる部品 P_i の第 k 工作物とその第 $(j-1)$ 工程から第 j 工程までの部品搬送に使用する搬送機器 H_h が決定される。

以上のように、搬送機器選択レベルでは、作業者の制約を考慮外とし、各部品の各工作物ごとにその搬送を行う搬送機器が選択される。

(3) 作業者選定レベル

いま、生産スケジューリングのある段階で、部品 P_i の第 j 工程での使用機械が M_m と第4レベルの機械選択レベルで決定され、第3レベルの搬送機器選択レベルで部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程での使用機械 M_{m^-} から第 j 工程での使用機械 M_m までの部品搬送に搬送機器 H_h が決定された時点を考える。このとき、生産スケジューリングの対象となる7種類の作業が作業者の支援のもとで実行される場合には、各作業について担当作業者を決定しなければならない。

ESTARルールによれば、当該作業に最も早く取りかけられる作業者が選定される。ESTARルールは次式で定義される。

$$\min_{y \in O_s(m) \text{ or } O_t(h)} \{ T_s[a_{xyz}(i, j, k)] \} \dots\dots\dots (7.27)$$

式(7.27)により、作業 $a_{xyz}(i, j, k)$ ごとに担当作業者 O_y が決定される。

7.4.2 生産スケジュールの決定手順

前節7.4.1で述べた3種類のディシジョンルールを用いて実行可能な生産スケジュールを決定する方法を、前出図7.1の意思決定過程に従って機械選択レベル、搬送機器選択レベルおよび作業者選定レベルに分けて述べる。なお、本章においても、第6章同様、7.3節で設定した生産スケジューリング問題をネットワーク・グラフを用いて記述し、各作業に対応する節点と作業間の時間的関係を与える有向枝を順次選択することによって生産スケジュールを決定して

いる。

(1) 機械選択レベル

機械選択レベルでは、各部品の各工程における使用機械が決定されると同時に、それら使用機械への部品の負荷順序も決定される。各部品の各工程における使用機械の選択方法と機械への部品の負荷順序の決定方法は、第6章で述べたとおりであり、また岩田・室津ら^{7.10)~7.12)}の方法と同一である。すなわち、スケジューリングの有接対象となる作業の集合であるコンフリクト集合を作成し、この中から所定のディシジョンルールにより、一つの作業を選択する。この選択によって、その作業を行うための使用機械とその機械への部品の負荷順序が同時に決定されるわけである。

(2) 搬送機器選択レベル

いま、機械選択レベルで部品 P_i の第 j 工程での使用機械が M_m に決定されたとする。そして、部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程での使用機械が M_{m^-} であったとあったとすると、機械 M_{m^-} から機械 M_m への部品搬送に使用する搬送機器を決定する。このとき、選択の対象となる候補搬送機器の集合を搬送機器選択レベルのコンフリクト集合とし、記号 $Q_{conf.}^H$ で表す。コンフリクト集合 $Q_{conf.}^H$ は次式で定義される。

$$Q_{conf.}^H \triangleq \{H_h \mid h \in H_t(m^-, m) \cap H_p(i)\} \dots\dots\dots (7.28)$$

部品 P_i の工程間搬送に対して、この集合 $Q_{conf.}^H$ の中から所定のディシジョンルールを用いて、各工作物ごとに一台の搬送機器を選択することによって、部品 P_i の機械 M_{m^-}, M_m 間の搬送に使用される搬送機器が決定される。

(3) 作業員選定レベル

機械選択レベルにおいて部品 P_i の第 j 工程での使用機械が M_m に、さらに搬送機器選択レベルで部品 P_i の第 $(j-1)$ 工程での使用機械 M_{m^-} から機械 M_m への部品搬送に使用する搬送機器が H_h に決定されたとする。このとき、使用機械 M_m および搬送機器 H_h での7種類の各作業について担当作業員を選定する。選定対象となる候補作業員の集合を作業員選定レベルのコンフリクト集合とし、記

号 Q_{conf}^0 で表す。コンフリクト集合 Q_{conf}^0 は次のように定義される。

機械上での作業 ($x=1, 5, 6, 7$) に対しては次のようである。

$$Q_{conf}^0 \triangleq \{O_y \mid y \in O_s(m)\} \dots\dots\dots (7.29)$$

他方、搬送機器上での作業 ($x=2, 3, 4$) に対しては次のようである。

$$Q_{conf}^0 \triangleq \{O_y \mid y \in O_t(h)\} \dots\dots\dots (7.30)$$

そして、この Q_{conf}^0 の中から所定のディシジョンルールを用いて、各作業ごとに一人の担当作業者が選定される。

上述した各レベルでの処理によって使用機械、使用搬送機器および担当作業者が決定された作業について、7.2.4節で展開した作業間の時間関係式を満足するように各作業の開始時刻と完了時刻を決定する。これが第1レベルのスケジューリングである。

以上の手順を逐次、繰り返すことにより、総所要時間最小化を意図した各製品の加工スケジュール、各機械の稼働スケジュール、各搬送機器の搬送スケジュールおよび各作業者の作業スケジュールが決定されて行き、最終的に求める生産スケジュールが作成されることになる。

7.4.3 バッファ制約の取り扱い

機械 M_m の前に設置されたバッファ B_m を考える。バッファ容量 C_m が有限の場合には、部品を搭載した搬送機器がこのバッファの位置に到着しても、バッファの利用状況によっては、ただちにその部品の搬送機器からの取り外し作業に着手できるとは限らない。バッファに余裕がなければ、搬送してきた部品をそのバッファに投入できないからである。したがって、搬送機器からの部品の取り外し作業の開始時刻を決定するためには、バッファの制約を考慮しなければならない。以下では、この制約条件を定式化する。

いま、バッファ B_m の容量が工作物3個分で、その利用状況が図7.2のように決められている場合を例にとり、バッファの制約を説明する。バッファ

B_m への工作物（記号 W で表す）の投入順序が W_a, W_b, W_c, W_d とすでに決定されているものとする。また、スケジューリング期間中に、このバッファ B_m へ第 n 番目に投入される工作物の投入時刻を $T_I[m, n]$ とし、他方、第 n 番目にこのバッファ B_m から取り出される工作物の取り出し時刻を $T_O[m, n]$ とする。このとき、第 5 番目に投入される工作物を W_e とすれば、工作物 W_e の投入時刻は、すでに投入されることが決定している工作物 W_d の投入時刻 $T_I[m, 4]$ 以後でなければならない。なぜなら、機械 M_m への工作物の負荷順序は機械選択レベルですでに決定しており、その結果として、バッファ内の工作物の機械へ

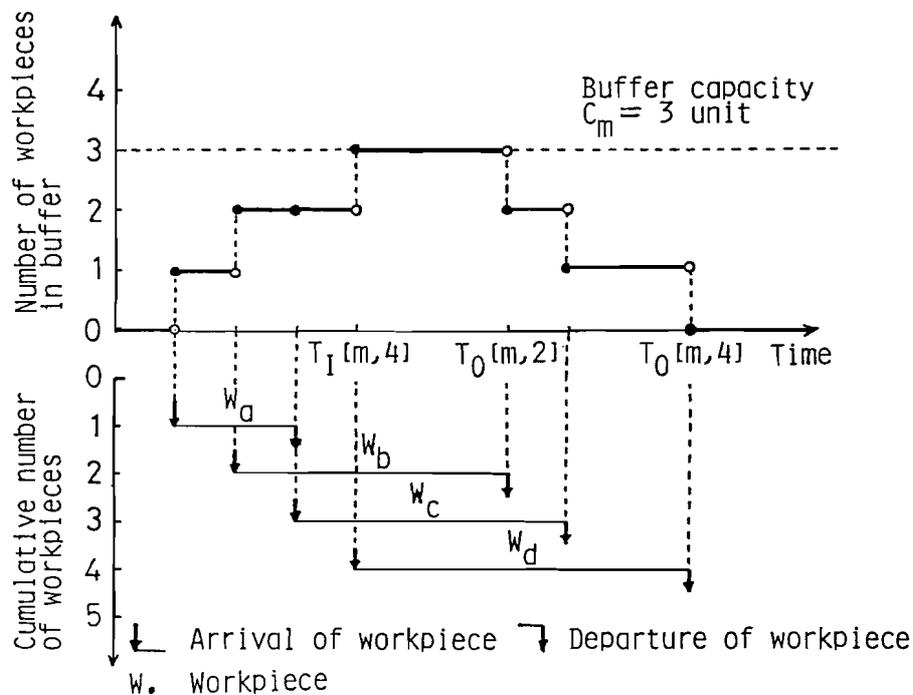


図 7.2 バッファの利用状況の一例

の負荷順序は先着順となる。したがって、工作物 W_e が時刻 $T_I[m, 4]$ 以前にバッファへ投入されると、すでに決定済の機械への工作物負荷順序に変更が起こり、改めてスケジュールを作成しなければならない。一方、時刻 $T_I[m, 4]$ 以後では、時刻 $T_O[m, 2]$ までの間はバッファが完全につまっているので、や

はり工作物 W_e を投入することはできない。このことから、工作物 W_e の搬送機器からの取り外し作業の開始時刻は $T_0[m, 2]$ 以後でなければならない。

一般に、搬送機器からの部品取り外し作業 $a_{4yh}(i, j, k)$ の開始時刻を決定する際のバッファ B_m による制約は次式で与えられる。

$$T_s[a_{4yh}(i, j, k)] \geq \max\{T_l[m, n], T_0[m, n - C_m + 1]\} \dots\dots\dots (7.31)$$

したがって、搬送機器からの部品取り外し作業の開始時刻は、式(7.7)と式(7.31)の両方を考慮して決定される。

7.5 数値計算例

前節で展開したジョブショップ生産システムの生産スケジューリングに対する総所要時間最小化のディシジョンルールを用いた決定手順をコンピュータ・プログラム化し、いくつかの例題を設定して解いた。7.5.1節では、提案した生産スケジュールの決定手順によって実行可能な生産スケジュールが得られることが示されている。さらに、ディシジョンルールの違いによる生産スケジューリング結果の比較・検討が7.5.2節でなされている。

7.5.1 生産スケジューリングの一例

図7.8に生産スケジューリングの対象とする生産システムを示す。3台の機械(M_1, M_2, M_3)、自走式台車による2台の搬送機器(H_1, H_2)、2人の作業員(O_1, O_2)および各機械の前に設置されたバッファと素材・完成品倉庫からなる機械加工システムである。バッファは、その機械で加工を受けるために加工待ち部品が一時的に留まる入力側バッファと加工済部品を一時的に保管しておく出力側バッファに分割されており、各バッファ容量はすべて工作物1個分である。各機械上での実加工作業は自動化されているが、機械の段取り替え作業、部品の取付け、取り外し作業は作業員の支援を必要とする。他方、搬送機器上での各作業はすべて自動化されている。

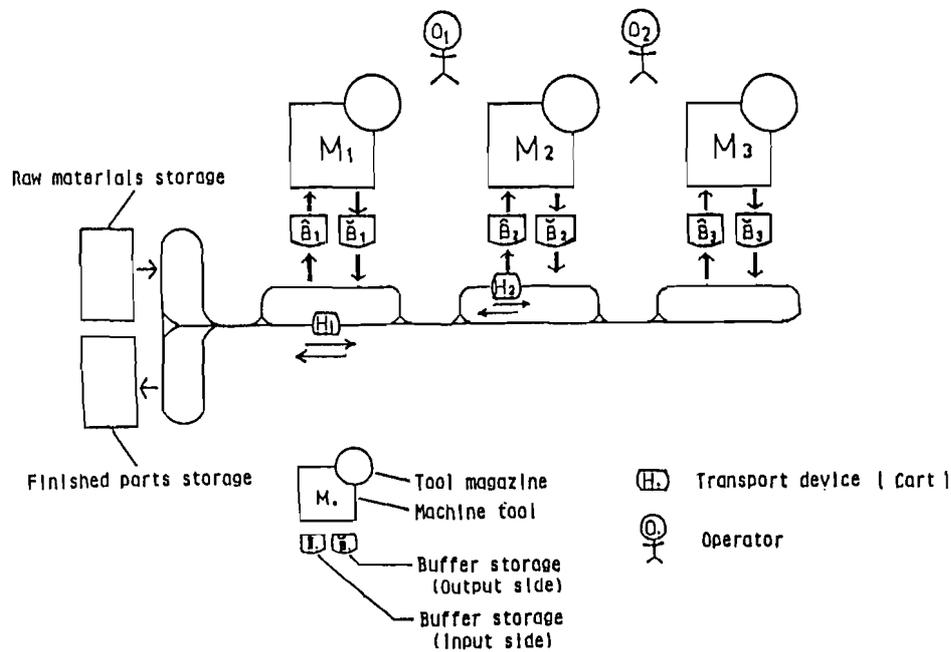


図 7.3 対象とする生産システム

生産対象部品は部品 P_1, P_2 の 2 種類で、それぞれロットサイズは 2 である。2 部品とも、2 工程の加工を受ける。部品 P_1 の第 1 工程に対しては M_1, M_2 、第 2 工程に対しては M_1, M_3 がそれぞれ候補機械として使用可能である。他方、部品 P_2 については、第 1 工程の候補機械は M_2, M_3 であり、第 2 工程では M_1, M_2 である。また、両部品とも搬送機器 H_1, H_2 のいずれにも搭載可能である。各作業時間に関するデータを表 7.1 にまとめて示す。

以上のデータを用いて、生産スケジューリングを実行した結果、図 7.4 のガントチャートで示される生産スケジュールが得られた。2 部品を加工するのに要した総所要時間は 185 分であり、部品の平均滞留時間は 167 分である。機械、搬送機器ならびに作業者の平均稼働率はそれぞれ 25.9%、32.4%、38.6% であった。なお、図 7.4 の実行可能な生産スケジュールは、機械選択レベルと搬送機器選択レベルに EFTA ルールを、作業者選定レベルに ESTA ルールを採用して作成されたものである。

表7-1 作業時間データ (時間単位: min)

(a) 機械での取付け、取り外し時間および実加工時間

部品 P_i	ロット サイズ K_i	第 1 工 程			第 2 工 程				
		候 補 機 械	取付け 時 間	実加工 時 間	取り外 し時間	候 補 機 械	取付け 時 間	実加工 時 間	取り外 し時間
P_1	2	M_1	5.0	20.0	5.0	M_1	3.0	21.0	3.0
		M_2	4.0	19.0	4.0	M_3	4.0	15.0	4.0
P_2	2	M_2	5.0	18.0	5.0	M_1	2.0	13.0	2.0
		M_3	6.0	14.0	6.0	M_2	3.0	18.0	3.0

(b) 各機械の段取り替え時間

M_1			M_2			M_3		
TO FROM	P_1	P_2	TO FROM	P_1	P_2	TO FROM	P_1	P_2
P_1		20.0	P_1		14.0	P_1		19.0
P_2	16.0		P_2	24.0		P_2	17.0	
*	19.0	18.0	*	18.0	11.0	*	21.0	28.0

(c) 搬送機器での
取付け・取り外し時間

部品	取付け 時 間	取り外 し時間
P_1	2.0	2.0
P_2	3.0	3.0

* : 機械が初めて使用される場合

(d) 搬送機器の移動時間

TO FROM	M_1	M_2	M_3	RMS	FPS
M_1		6.0	12.0	6.0	6.0
M_2	6.0		6.0	12.0	12.0
M_3	12.0	6.0		18.0	18.0
RMS	6.0	12.0	18.0		1.0
FPS	6.0	12.0	18.0	1.0	

RMS : 素材倉庫 FPS : 完成品倉庫

(e) 作業者の移動時間

TO FROM	M_1	M_2	M_3	RMS	FPS
M_1		2.0	4.0	2.0	2.0
M_2	2.0		2.0	4.0	4.0
M_3	4.0	2.0		6.0	6.0
RMS	2.0	4.0	6.0		1.0
FPS	2.0	4.0	6.0	1.0	

RMS : 素材倉庫 FPS : 完成品倉庫

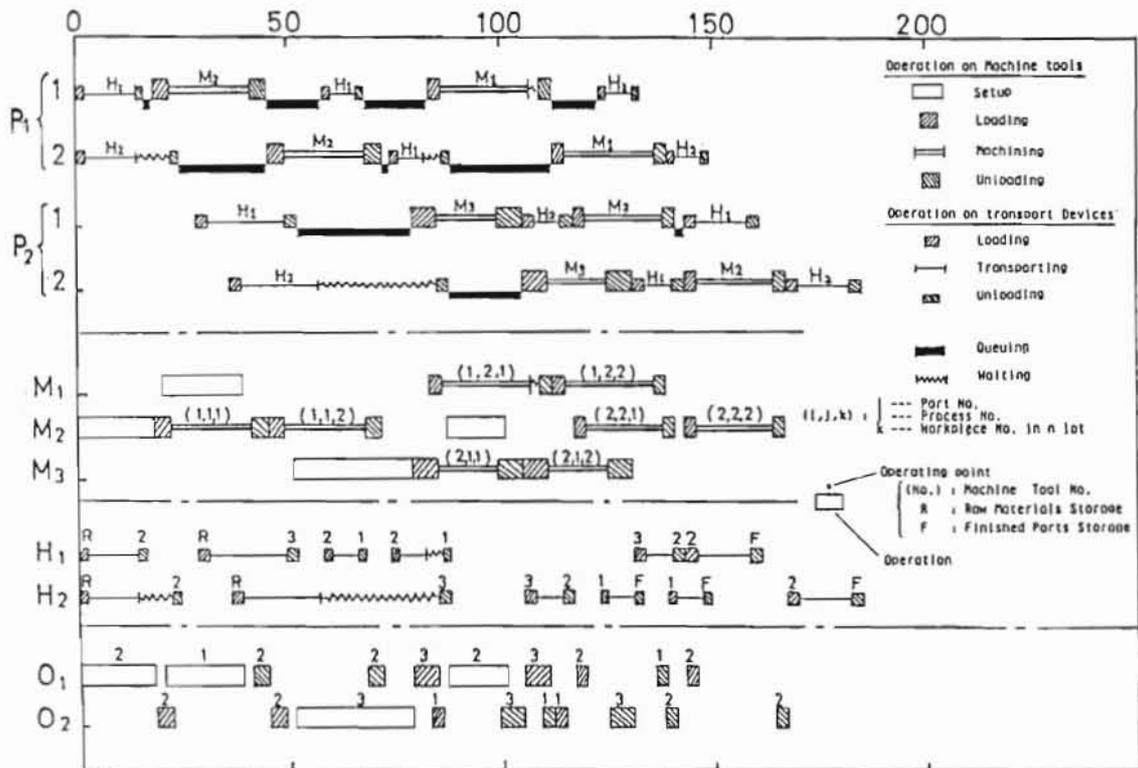


図 7.4 例題のガントチャート

7.5.2 ディシジョンルールの比較

7.4 節で述べた生産スケジュールの決定手順によれば、総所要時間最小化を意図した実行可能な生産スケジュールが得られることが前節 7.5.1 の例題で確認された。本節では、7.4.1 節で取り上げた 3 種類のディシジョンルールの有効性を比較・検討するために、さらに数多くの数値計算を行った。

数値計算用の例題として、10 種類の部品（各部品はロットサイズ 5，加工工程数 10）を、10 台の機械と 10 台の搬送機器からなる自動化された機械加工システムで生産する場合を考える。ここで、各部品の各工程にはそれぞれ 5 台の候補機械が、また任意の 2 機械間の部品搬送にはそれぞれ 5 台の候補搬送機器が割当てられている。この生産システムの生産スケジューリング問題に対して、表 7.2 に示す範囲の一様分布にしたがう各作業時間データを用い、バッファ容量の変化に対する総所要時間、部品の平均滞留時間および機械、搬

送機器の平均稼働率の各変化を，ディシジョンルールの9通りの組合せについて調べた。これらの結果を図7.5～7.8に示す。図中の各点は，スケジューリング1回ごとに表7.2の各作業時間データを発生させ，それぞれ25回のスケジューリング結果の平均値である。

まず，図7.5ならびに図7.6におけるディシジョンルールに着目すると，総所要時間と部品の平均滞留時間は機械選択にEFTAルールを採用したときにいずれも良好な値となっている。これは，機械選択レベルにおいて，部品搬送の制約をも考慮して局所的に部品の滞留時間の最小化を図ることが総所要時間と部品の平均滞留時間の短縮化につながることを意味している。

表7.2 数値計算例に用いるデータ

作業認識 番号： x	作 業 時 間 (min)							搬送機器の 移動時間 (min)
	1	2	3	4	5	6	7	
最 小 値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
最 大 値	100.0	10.0	30.0	10.0	20.0	50.0	20.0	20.0

他方，機械の平均稼働率は図7.7より明らかなように，機械選択に用いるディシジョンルールの違いによってグループ化されている。その中で，機械選択にESTARルールを採用したときに良好な値を示していることがわかる。これは，スケジューリングの途中の段階で，ESTARルールにより遊休中の機械が優先的に選択されることによって，各機械の稼働率が向上し，さらに負荷が平滑化されたためであると考えられる。一方，図7.8に示された搬送機器の平均稼働率は，搬送機器選択のディシジョンルールによる違いが，かなり顕著に現われている。そして，機械選択にEFTAルールを，搬送機器選択にESTARルールをそれぞれ採用したときに，搬送機器の平均稼働率が最も高くなっている。この理由として，EFTAルールによって総所要時間の短縮が図られ，さらにESTAR

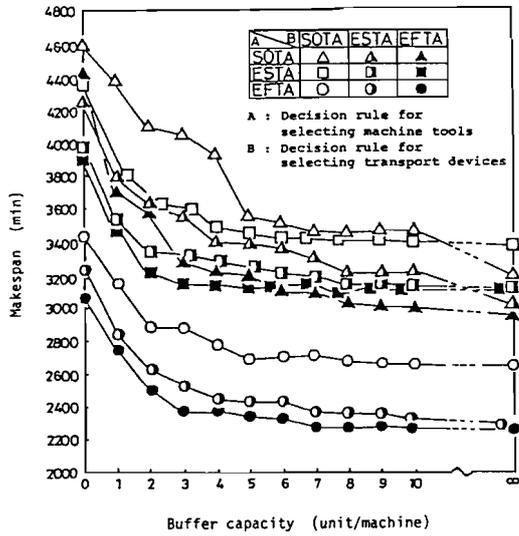


図 7.5 総所要時間の变化

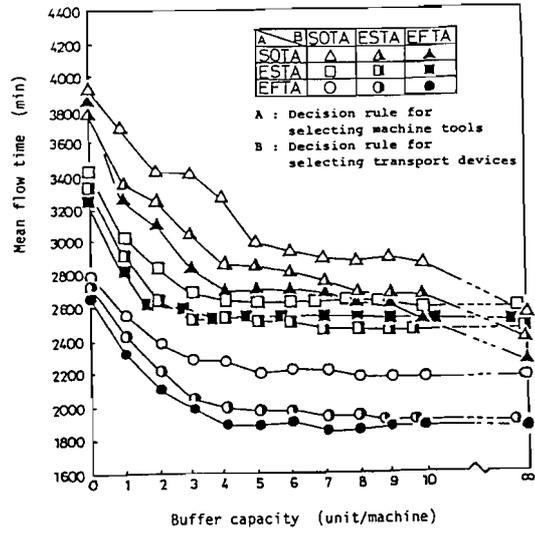


図 7.6 部品の平均滞留時間の变化

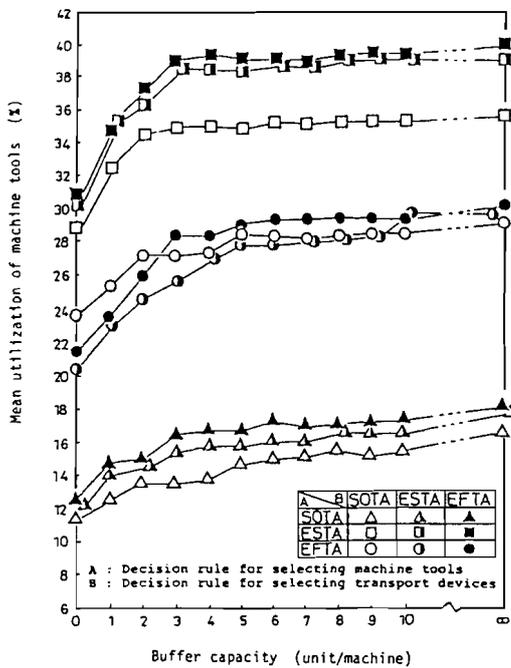


図 7.7 機械の平均稼働率の変化

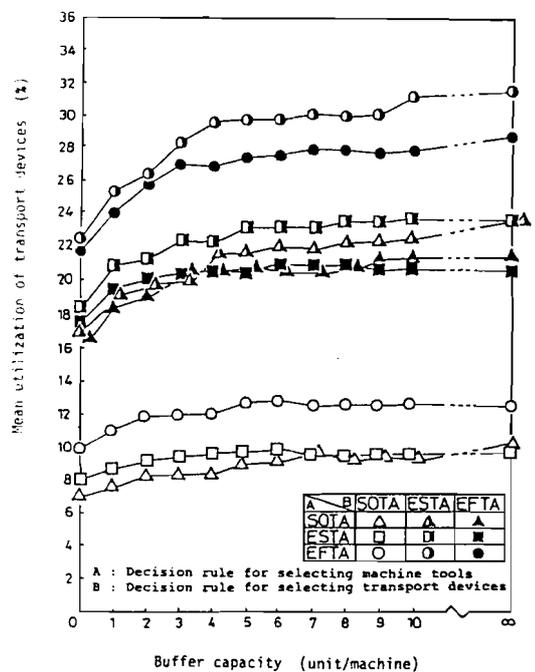


図 7.8 搬送機器の平均稼働率の変化

ールによって遊休中の搬送機器が優先して使用されるために、実搬送作業に費やされる時間が増加し、結果として搬送機器の平均稼働率が向上したことが考えられる。

次に、バッファ容量の変化に対する総所要時間、部品の平均滞留時間および機械、搬送機器の平均稼働率の変化をみる。バッファ容量の増加に伴って、総所要時間ならびに部品の平均滞留時間はともに減少し、機械と搬送機器の平均稼働率はそれぞれ増加している。しかしながら、バッファ容量が4～6個付近を遷移域として、それ以上バッファ容量を増加させても各評価基準はあまり改善されずに、バッファ容量が無限大の場合、すなわちバッファ容量の制約がない場合の近傍値となっていることがわかる。これは、とくに機械選択にEFTAルールないしESTARルールを採用したときに顕著である。この理由の一つとして、ロットサイズの影響が考えられる。ロット生産においては、通常1ロットの加工の前に作業時間が比較的長い段取り替え作業が行われ、この作業が完了するまで部品の機械への取付け作業は開始できない。したがって、その機械で加工することが決定された部品の各工作物が段取り替え作業中に次々と搬送されてきて、この機械の前に設置されているバッファに集中することとなる。ところで、機械選択にEFTAルールあるいはESTARルールを採用すれば、各機械の負荷バランスがとれ、特定の機械に負荷が集中することを避けることができる。その結果、各機械の前のバッファ内で加工待ちをしている工作物の個数は平均的にロットサイズに近い値となり、バッファ容量をその水準以上に増加させても、あまり効果がないと考えられる。そこで、これを検証するために、ロットサイズのみを変化させて数値計算を行った。機械選択と搬送機器選択に対して、いずれもEFTAルールを採用した。この結果を図7.9に示す。同図より、総所要時間および部品の平均滞留時間の変化は、バッファ容量がロットサイズに等しくなる付近を遷移域としていることがわかる。このことより、ロットサイズとバッファ容量が密接に関係していることが認められる。

ディシジョンルールの9通りの組合せに対して、実行可能な生産スケジュールを得るのに要した平均CPU時間を表7.3に示す。同表より、EFTAルール

を採用した場合に平均CPU時間が長くなっている。これは、機械選択あるいは搬送機器選択の際に、それまで作成された部分的生産スケジュールを考慮し

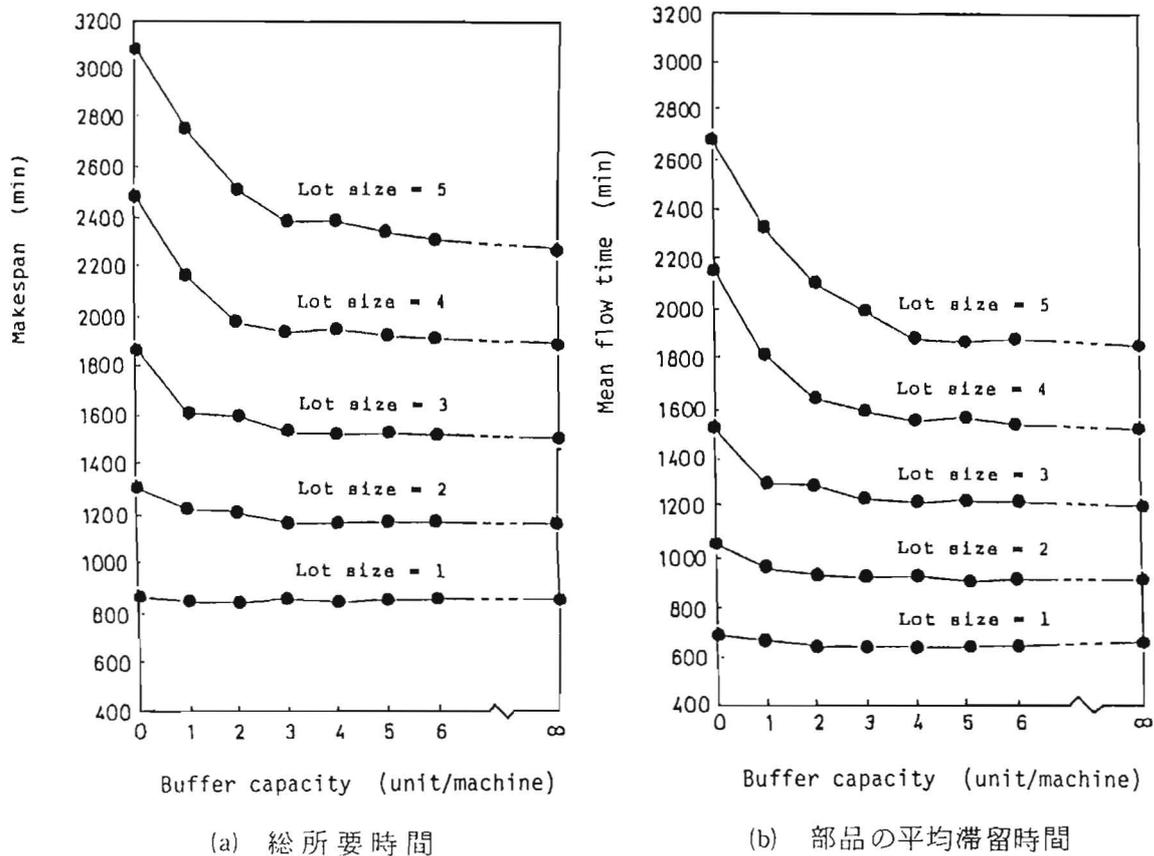


図7.9 ロットサイズとバッファ容量の関係

た上で、次に使用すべき機械ないし搬送機器を仮に選定したとして、このときの取り外し作業の完了時刻を計算し、その結果に基づいて機械選択あるいは搬送機器選択の意志決定を行っているためである。他方、機械選択にESTARルールを採用した場合に、いずれも平均CPU時間が最も短くなっている。これは、機械選択の際に、各候補機械に当該部品を負荷するとしたときの段取り替え作業、取付け・取り外し作業および実加工作業について各作業時間を求め、その総和を比較しなければならないSOTARルールに対して、ESTARルールは各機械のその時点までに決定されている最終作業の完了時刻だけを求め、比較すれば

よい，ということに起因していると考えられる。

なお，上記の計算には神戸大学計算センターのNEAC/ACOSシステム700Sを使用した。

表7-3 平均CPU時間 (sec)

A \ B	SOTA	ESTA	EFTA
SOTA	3.19	3.36	3.32
ESTA	3.06	3.17	3.32
EFTA	4.11	4.14	4.18

A : 機械選択の
ディシジョンルール

B : 搬送機器選択の
ディシジョンルール

7.6 結 言

本章では，機械，搬送機器，バッファおよび作業員で構成されたジョブショップ生産システムを対象に，総所要時間を評価基準として，各部品の加工スケジュール，各機械の稼働スケジュール，各搬送機器の搬送スケジュールおよび各作業員の作業スケジュールを同時に決定する生産スケジューリング問題を取り上げ，ディシジョンルールを用いた近似解法を提案した。本章における研究成果を要約すると次のとおりである。

- (1) 従来のジョブショップ・スケジューリングにおいて，ほとんど考慮されていなかった搬送手段とバッファに関する制約を考慮した生産スケジューリング・モデルを構築した。さらに，スケジュールの対象となる作業として，機械の段取り替え作業，機械での部品取付け・取り外し作業，実加工作業ならびに搬送機器での部品取付け・取り外し作業，実搬送作業を取り上げ，これら作業間の時間的関係を定式化した。その結果，より現実的な生産スケジュールの作成が可能となった。
- (2) ジョブショップ生産システムの生産スケジューリングを機械選択，搬送

機器選択，作業者選定およびスケジューリングの4レベルからなる階層構造の意思決定過程ととらえ，ディシジョンルールによる生産スケジュールの決定手順を与えた。この手順は総所要時間最小化に対する近似解法であるが，大規模な生産スケジューリング問題においても適用可能である。

- (3) 代替機械，代替搬送機器および代替作業者を考慮したジョブショップ・スケジューリング問題に対して，それぞれの平均稼働率の向上を意図としたディシジョンルールとして，ESTARルールを新たに提案した。
- (4) 数値計算の結果より次のことが明らかになった。
 - (i) 機械選択および搬送機器選択におけるディシジョンルールの組合せによって，総所要時間，部品の平均滞留時間，機械および搬送機器の平均稼働率に大きな差異が現われる。
 - (ii) 機械選択と搬送機器選択においてEFTARルールを採用することによって，総所要時間および部品の平均滞留時間を短縮することができる。
 - (iii) 機械および搬送機器の平均稼働率を向上させるには，ESTARルールが優れている。
 - (iv) バッファ容量をある水準以上に増加させても，総所要時間，部品の平均滞留時間，機械および搬送機器の平均稼働率はあまり改善されない。そして，その水準は部品のロットサイズと密接な関係がある。

なお，本章で提案したディシジョンルールによる近似解法は，搬送機器に関する時間関係式を一部修正するだけで，第6章で取り扱ったフローショップ・スケジューリング問題に対しても適用可能である。さらに，加工費用，搬送費用，段取り替え費用などで構成される総生産費用最小化の経済的評価基準と本手法を結びつければ，生産システムの経済的運用管理を行うことも可能となる。

第 8 章 結 論

以上，多品種少量生産の機械加工工場を対象に，生産システムの最適設計ならびに運用管理における方法論の一端を論じてきた。具体的には，第 2 章から第 5 章までは，生産システム設計段階で極めて重要な位置を占める設備配置計画を，また第 6 章および第 7 章では，生産システム運用段階の中心的課題の一つである生産スケジューリングを取り上げた。本論文で論及した研究成果を総括し，項目別に箇条書きすると，次のようになる。

- (1) 設備を直線的に配置するライン生産システムの設備配置計画に対して，総運搬費用を最小にする最適設備配置を決定するための最適化アルゴリズムを提案した。さらに，将来に予測される製品生産量の変動を考慮した設備配置案評価のための評価基準として，期待総運搬費用と期待総運搬損失費用を新たに提案し，期待総運搬費用最小化の最適設備配置には提案した最適化アルゴリズムが適用可能であることを明らかにし，期待総運搬損失費用最小化の最適設備配置に対してはその決定手順を与えた。
- (2) 循環形生産システムの設備配置計画において，生産の対象となる部品の各加工工程に対して代替設備が存在する場合には，代替設備シーケンスを考慮に入れた設備配置問題として取り扱うことが重要であることを明らかにした。そして，設備シーケンスの代替性と運搬の方向を考慮した循環形生産システムの設備配置問題を 2 レベルの階層構造をもつ最適化問題として定式化し，各部品の最適設備シーケンスと設備の最適配置を同時に決定する最適化アルゴリズムを提案した。
- (3) G T 概念に基づくセル構造生産システムの設備配置計画に対して，セル配置と各セル内の設備配置の決定を統合したセル・レイアウト問題を提唱し，セル・レイアウトを行うための一設計法を確立した。また，設備配置問題に対する近似解法において，改良法の基本である総入替法の欠点の一つを明らかにし，これを解決するための修正総入替法を新たに提案した。そして，提案した修正総入替法が従来法より優れていることを数値実験に

より検証した。

- (4) 工場レイアウト設計における設備配置計画の自動化に対し、レイアウトの対象となる工場や設備の面積と形状の正確な記述，配置場所が指定されている固定設備などの取り扱い，定量的な評価基準に基づく最適設備レイアウト案の構築などを可能とするコンピュータ援用設備レイアウト計画システムCOFLAPを開発し，自動レイアウト・システム開発の発展に寄与した。開発した本システムは，従来の自動レイアウト・システムの短所を解消し，かつ新たな機能を付加したものであり，今後工場レイアウト設計の一貫した自動化・最適化に際して大いに役立つものと期待される。
- (5) 生産システムの運用管理の観点から，バッファ容量に制限があり，部品ごとにその処理順序が異なり，さらに各部品の各工程には複数の候補機械が存在する柔軟性に富んだフローショップ生産システムの生産スケジューリング問題を取り上げ，総所要時間最小化の最適生産スケジューリング手法を確立した。本手法によれば，総所要時間を最小にするような生産システムへの部品の投入順序，各部品の各工程における使用機械および各使用機械での部品の負荷順序を同時に決定することができる。
- (6) 機械，搬送機器，バッファおよび作業員で構成されたジョブショップ生産システムを対象に，総所要時間を評価基準として，各部品の加工スケジュール，各機械の稼働スケジュール，各搬送機器の搬送スケジュールおよび各作業員の作業スケジュールを同時に決定する生産スケジューリング問題を取り上げ，ディシジョンルールを用いた近似解法を提案した。その際，機械および搬送機器の平均稼働率の向上を意図としたディシジョンルールとして，ESTAルールを新たに案出した。さらに，数値計算の結果より次のことが明らかになった。
 - (i) 機械選択および搬送機器選択におけるディシジョンルールの組合せによって，総所要時間，部品の平均滞留時間，機械および搬送機器の平均稼働率に大きな差異が現われる。
 - (ii) 機械選択と搬送機器選択においてEFTAルールを採用することによっ

て、総所要時間および部品の平均滞留時間を短縮することができる。

(iii) 機械および搬送機器の平均稼働率を向上させるには、ESTAルールが優れている。

(iv) バッファ容量をある水準以上に増加させても、総所要時間、部品の平均滞留時間、機械および搬送機器の平均稼働率はあまり改善されない。

そして、その水準は部品のロットサイズと密接な関係がある。

以上のように、本研究は現実の機械加工工場で見られる基本的な生産システムを対象に、新たに開発した設備配置計画法ならびに生産スケジューリング手法を体系的にまとめたものである。

参 考 文 献

第 1 章

- [1.1] 岩田一明、ほか 5 名：生産システム学、コロナ社 (1982)。
- [1.2] 江木実夫：多品種少量生産の工程管理、日刊工業新聞社 (1967)。
- [1.3] 長谷川幸男 (編)：多品種少量生産システム、日刊工業新聞社 (1970)。
- [1.4] 人見勝人：生産システム工学、共立出版 (1975)。
- [1.5] 高橋輝男、久保 章：プラント・レイアウト－工場設計の理論と実際、建帛社(1973)。
- [1.6] 人見勝人 (監修)：GTによる生産管理システム、日刊工業新聞社(1981)。
- [1.7] Reed, R. Jr.: Plant Layout - Factors, Principles, and Techniques, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois (1961)。
- [1.8] Muther, R.: Systematic Layout Planning, Industrial Education Institute, Boston, Massachusetts (1961)。
- [1.9] Moore, J. M.: Plant Layout and Design, The Macmillan Company, New York, New York (1962)。
- [1.10] Apple, J. M.: Plant Layout and Materials Handling, The Ronald Press Company, New York, New York (1963)。
- [1.11] Wilson, R. C.: A Review of Facility Design Models, The Journal of Industrial Engineering, Vol. 15, No.3, pp. 115-121 (1964)。
- [1.12] El-Rayah, T. E. and Hollier, R. H.: A Review of Plant Design Techniques, International Journal of Production Research, Vol. 8, No.3, pp.263-279 (1970)。
- [1.13] 大崎紘一、ほか 3 名：生産システム技法、共立出版 (1981)。
- [1.14] 茨木俊秀：組合せ最適化の理論、電子通信学会 (1979)。
- [1.15] McMillan, C. Jr.: Mathematical Programming - An Introduction to the Design and Application of Optimal Decision Machines, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York (1970)。
- [1.16] Lawler, E. L.: The Quadratic Assignment Problem, Management Science, Vol. 9, No.4, pp.586-599 (1963)。

- [1.17] Hillier, F. S. and Connors, M. M.: Quadratic Assignment Problem Algorithms and the Location of Indivisible Facilities, *Management Science*, Vol.13, No.1, pp.42-57 (1966).
- [1.18] Graves, G. W. and Whinston, A. B.: An Algorithm for the Quadratic Assignment Problem, *Management Science*, Vol.17, No.7, pp.453-471 (1970).
- [1.19] Hanan, M. and Kurtzberg, J. M.: A Review of the Placement and Quadratic Assignment Problems, *SIAM Review*, Vol.14, No.2, pp.324-342 (1972).
- [1.20] Liggett, R. S.: The Quadratic Assignment Problem - An Experimental Evaluation of Solution Strategies, *Management Science*, Vol.27, No.4, pp.442-458 (1981).
- [1.21] 今野 浩、鈴木久敏(編): 整数計画法と組合せ最適化、日科技連(1982)。
- [1.22] Lenstra, J. K. and Rinnooy, K.A.H.G.: Computational Complexity of Discrete Optimization Problems, *Annals of Discrete Mathematics*, Vol. 4, pp.121-140 (1979).
- [1.23] Lawler, E. L. and Wood, D. E.: Branch-and-Bound Methods - A Survey, *Operations Research*, Vol. 14, No.4, pp.699-719 (1966).
- [1.24] Mitten, L. G.: Branch-and-Bound Methods - General Formulation and Problems, *Operations Research*, Vol. 18, No.1, pp.24-34 (1970).
- [1.25] Francis, R. L. and White, J. A.: Facilities Layout and Location - An Analytical Approach, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1974).
- [1.26] Moore, J. M.: Computer Aided Facilities Design - An International Survey, *International Journal of Production Research*, Vol. 12, No.1, pp.21-44 (1974).
- [1.27] Moore, J. M.: Who Use the Computer for Layout Planning?, *Proceedings of the 4th International Conference on Production Research*, Tokyo, pp.829-843 (1977).

- [1.28] Moore, J. M.: Computer Methods in Facilities Layout, Industrial Engineering, Vol. 12, No.9, pp.82-83 (1980).
- [1.29] Carrie, A. S.: Computer-Aided Layout Planning - The Way Ahead, International Journal of Production Research, Vol. 18, No.3, pp.283-294 (1980).
- [1.30] Nof. S. Y.: A Methodology for Computer-Aided Facility Planning, International Journal of Production Research, Vol. 18, No.6, pp.699-722 (1980).
- [1.31] Lee, R. C. and Moore, J. M.: CORELAP - Computerized Relationship Layout Planning, The Journal of Industrial Engineering, Vol. 18, No.3, pp.195-200 (1967).
- [1.32] Buffa, E. S., Armour, G. C. and Vollmann, T. E.: Allocating Facilities with CRAFT, Harvard Business Review, Vol. 42, No.2, pp.136-158 (1964).
- [1.33] 山本正明：スケジューリングの展望、経営科学、Vol. 17, No.6, pp.319-330 (1973).
- [1.34] Panwalker, S. S. and Iskander, W.: A Survey of Scheduling Rules, Operations Research, Vol. 25, No.1, pp.45-61 (1977).
- [1.35] Blackstone, J. H. Jr., Phillips, D. T. and Hogg, G. L.: A State-of-the-Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations, International Journal of Production Research, Vol. 20, No.1, pp.27-45 (1982).
- [1.36] Johnson, S. M.: Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 1, No.1, pp.61-68 (1954).
- [1.37] Conway, R. W., Maxwell, W. L. and Miller, L. W.: Theory of Scheduling, Addison - Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts (1967).
- [1.38] Baker, K. R.: Introduction of Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York (1974).
- [1.39] 鍋島一郎：スケジューリング理論、森北出版 (1974).

第 2 章

- [2.1] Zelenović, D. M.: Flexibility - A Condition for Effective Production Systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 20, No.3, pp.319-337 (1982).
- [2.2] Reed, R., Jr.: *Plant Layout - Factors, Principles, and Techniques*, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois (1961).
- [2.3] Moore, M. J.: *Plant Layout and Design*, The Macmillan Company, New York, New York (1962).
- [2.4] Apple, J. M.: *Plant Layout and Materials Handling*, The Ronald Press Company, New York, New York (1963).
- [2.5] Francis, R. L. and White, J. A.: *Facility Layout and Location - An Analytical Approach*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1974).
- [2.6] Webster, D. B. and Tyberghein, M. B.: Measuring Flexibility of Job-Shop Layouts, *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No.1, pp.21-29 (1980).
- [2.7] Tompkins, J. A.: Modularity and Flexibility - Dealing with Future Shock in Facilities Design, *Industrial Engineering*, Vol. 13, No.11, pp.78-81 (1980).
- [2.8] Craig, R. J., Moore, J. M. and Turner, W. C.: Planned Production Flexibility, *Industrial Engineering*, Vol. 7, No.10, pp.33-37 (1975).
- [2.9] Shore, R. H. and Tompkins, J. A.: Flexible Facilities Design, *AIIE Transactions*, Vol. 12, No.2, pp.200-205 (1980).
- [2.10] Noy, P. C.: Make the Right Plant Layout - Mathematically, *American Machinist*, Vol. 101, No.6, pp.121-125 (1957).
- [2.11] Hollier, R. H.: The Layout of Multi-Product Lines, *International Journal of Production Research*, Vol. 2, No.1, pp.47-57 (1963).

- [2.12] Carrie, A. S.: The Layout of Multi-Product Lines, International Journal of Production Research, Vol. 13, No.6, pp.541-557 (1975).
- [2.13] Chan, A. W. and Francis, R. L.: Some Layout Problems on the Line with Interdistance Constraints and Costs, Operations Research, Vol. 27, No.5, pp.952-971 (1979).
- [2.14] 中井重行、吉本一穂：タイセット行列を用いた設備配置に関する研究、日本機械学会論文集、C編、Vol. 45, No.400, pp.1434-1442 (1979).
- [2.]5] 中井重行、渡辺真一、吉本一穂、田渕行信：カットセット行列を用いた設備配置に関する研究、日本機械学会論文集、C編、 Vol. 46, No.401, pp.122-128 (1980).
- [2.16] 中井重行、吉本一穂：直線型設備配置技法－“移動距離×量”最小配置選択アルゴリズム、日本経営工学会誌、Vol. 32, No.1, pp.29-35 (1981).
- [2.17] 安田一彦：製品生産量の変動を考慮したライン生産システムの設備配置計画、日本経営工学会誌投稿中 (1982).
- [2.18] Hanan, M. and Kurtzberg, J. M.: A Review of the Placement and Quadratic Assignment Problems, SIAM Review, Vol. 14, No.2, pp.324-342 (1972).
- [2.19] Hardy, G. H., Littlewood, J. E. and Polya, G.: Inequalities, Cambridge University Press, New York (1952).

第 3 章

- [3.1] Lawler, E. L.: The Quadratic Assignment Problems, Management Science, Vol. 9, No.4, pp.586-599 (1963).
- [3.2] Cooper, L.: Heuristic Methods for Location - Allocation Problems, SIAM Review, Vol. 6, No.1, pp.37-53 (1964).
- [3.3] Hillier, F. S. and Connors, M. M.: Quadratic Assignment Problem Algorithms and the Location of Indivisible Facilities, Management Science, Vol. 13, No.1, pp.42-57 (1966).

- [3.4] Vergin, R. C. and Rogers, J. D.: An Algorithm and Computational Procedure for Locating Economic Facilities, Management Science, Vol. 13, No.6, pp.B240-254 (1967).
- [3.5] Graves, G. W. and Whinston, A. B.: An Algorithm for the Quadratic Assignment Problem, Management Science, Vol.17, No.7, pp.453-471 (1970).
- [3.6] Hanan, M. and Kurtzberg, J. M.: A Review of the placement and Quadratic Assignment Problems, SIAM Review, Vol. 14, No.2, pp.324-342 (1972).
- [3.7] Liggett, R. S.: The Quadratic Assignment Problem - An Experimental Evaluation of Solution Strategies, Management Science, Vol. 27, No.4, pp.442-458 (1981).
- [3.8] 中井重行、渡辺真一、吉本一穂、田淵行信:カットセット行列を用いた設備配置に関する研究、日本機械学会論文集、C編、Vol. 46, No.401, pp.122-128 (1980).
- [3.9] 中井重行、吉本一穂:直線型設備配置技法-“移動距離×量”最小配置選択アルゴリズム、日本経営工学会誌、 Vol. 32, No.1, pp.29-35 (1981).
- [3.10] 安田一彦:製品生産量の変動を考慮したライン生産システムの設備配置計画、日本経営工学会誌 投稿中 (1982).
- [3.11] 安田一彦、室津義定、岩田一明:代替設備シーケンスを考慮した循環形生産システムの設備配置計画、日本機械学会論文集、C編、 Vol. 48, No.432, pp.1315-1323 (1982).
- [3.12] Vettin, G.: Analyse der Konzeptionen Flexibler Fertigungssysteme, VDI-Z, Vol. 121, No.1/2, pp.14-23 (1979).
- [3.13] 機械技術協会生産技術調査分科会(監修):欧米のFMS事例集、マシニスト出版 (1981).
- [3.14] El-Rayah, T. E. and Hollier, R. H.: A Review of Plant Design Techniques, International Journal of Production Research, Vol. 8, No.3, pp.263-279 (1970).
- [3.15] Francis, R. L. and White, J. A.: Facility Layout and Location - An Analytical Approach, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1974).

- [3.16] Kaltnekar, Z.: Some Algorithms for Decision-Making about Layout of Production Systems, International Journal of Production Research, Vol. 18, No.4, pp.467-478 (1980).

第 4 章

- [4.1] Burbidge, J. L.: The Introduction of Group Technology, Heinemann, London (1975).
- [4.2] Opitz, H. (ed.): Werkstücksystematik und Teilefamilienfertigung, 1963, 65 und 1967, Verlag W. Girardet, Essen (1967), ; 鈴木 隆、三宅 弘(共訳): グループ・テクノロジー, 部品グループ加工によるコストダウン、日本能率協会 (1969).
- [4.3] Pollak, W.: Alle Möglichkeiten der Wiederholung Nutzen, Verband Für Arbeitsstudien (1972); 清水敏允(訳): GTの理論と実際-反復部品の加工法とシステム化、建帛社 (1974).
- [4.4] 機械振興協会(編): グループテクノロジー 導入のためのガイドブック II、機械振興協会 (1979).
- [4.5] Peklenik, J.: Computer-Aided Design of the Part Spectrum Data Base and Its Application to Design and Production, Annals of the CIRP, Vol. 31, No.1, pp.313-317 (1982).
- [4.6] Craven, F. W.: The Interaction of NC and GT, Proceedings of 15th International Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham, Paper No.135 (1974).
- [4.7] Schaffer, G.: GT via Automated Process Planning, American Machinist, May, pp.119-122 (1980).
- [4.8] Rajesham, S. and Mahesh, K. V.: Group Technology Based Production System - An Important Strategy for Developing Nations, Annals of the CIRP, Vol. 31, No.1, pp.341-345 (1982).

- [4.9] Rathmill, K., Brunn, P. and Leonard, R.: Batch Size Selection for Group Technology, Proceedings of 15th International Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham, Paper No.112 (1974).
- [4.10] 吉田照彦 : A Study of Group Production Scheduling, 学位論文、大阪大学 (1979).
- [4.11] Suresh, N. C.: Optimizing Intermittent Production System through Group Technology and MRP System, Production and Inventory Management, Vol. 20, No.4, pp.76-84 (1979).
- [4.12] Durie, F. R. E.: A Survey of Group Technology and its Potential for User Application in the UK, The Production Engineer, February, pp.51-56 (1970).
- [4.13] Burbidge, J. L.: AIDA and Group Technology, International Journal of Production Research, Vol. 11, No.4, pp.315-324 (1973).
- [4.14] PERA: Work Loading and Scheduling in Group Technology Cells, Report 282, Production Technology, May (1974).
- [4.15] Eversheim, W. and Miese, M.: Group Technology Developments and Models of Application, Proceedings of 15th International Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham, Paper No.64 (1974).
- [4.16] 威 仁英 : 欧米における生産システムの現状と将来 - 特にコンピュータ援用生産におけるグループテクノロジーの応用を中心として、日本機械学会誌、Vol. 82, No.722, pp.51-57 (1979).
- [4.17] 窪田雅男 : グループテクノロジーの最近の動向、日本機械学会誌、Vol. 82, No.722, pp.507-513 (1979).
- [4.18] Ham, I.: Current Trends and Future Prospects of Group Technology Applications Related to Integrated Computer Aided Manufacturing, Proceedings of International Conference on Manufacturing Engineering, Melbourne, pp.229-235 (1980).

- [4.19] Groover, M. P.: Automation, Production Systems, and Computer-Aided Manufacturing, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1980).
- [4.20] Burbidge, J. L.: Production Flow Analysis, The Production Engineer, April/May, pp.139-152 (1971).
- [4.21] McAuley, J.: Machine Grouping for Efficient Production, The Production Engineer, February, pp.53-57 (1972).
- [4.22] El-Essawy, I. G. K. and Torrance, J.: Component Flow Analysis - An Effective Approach To Production Systems' Design, The Production Engineer, May, pp. 165-170 (1972).
- [4.23] Purcheck, G. F. K.: Combinatorial Grouping - A Lattice-Theoretic Method for the Design of Manufacturing Systems, Journal of Cybernetics, Vol. 4, No.3, pp.27-60 (1974).
- [4.24] Purcheck, G. F. K.: A Linear-Programming Method for the Combinatorial Grouping of an Incomplete Power Set, Journal of Cybernetics, Vol. 5, No.4, pp.51-76 (1975).
- [4.25] Purcheck, G. F. K.: A Mathematical Classification as a Basis for the Design of Group-Technology Production Cells, The Production Engineer, January, pp.35-48 (1975).
- [4.26] Rajagopalan, R. and Batra, J. L.: Design of Cellular Production Systems - A Graph-theoretic Approach, International Journal of Production Research, Vol. 13, No.6, pp.567-579 (1975).
- [4.27] Beer, C. D., Gerwen, R. V. and Witte, J. D.: Analysis of Engineering Production Systems as a Base for Production-Oriented Reconstruction, Annals of the CIRP, Vol. 25, No.1, pp.439-441 (1976).
- [4.28] Tilsley, R. and Lewis, F. A.: Flexible Cell Production Systems - A Realistic Approach, Annals of the CIRP, Vol. 26, No.1, pp.269-271 (1977).
- [4.29] Beer, C. D. and Witte, J. D.: Production Flow Synthesis, Annals of the CIRP, Vol. 27, No.1, pp.389-392 (1978).

- [4.30] King, J. R.: Machine - Component Grouping in Production Flow Analysis - An Approach using a Rank Order Clustering Algorithm, International Journal of Production Research, Vol. 18, No.2, pp.213-232 (1980).
- [4.31] Witte, J. D.: The Use of Similarity Coefficients in Production Flow Analysis, International Journal of Production Research, Vol. 18, No.4, pp.503-514 (1980).
- [4.32] Chan, H. M. and Milner, D. A.: Direct Clustering Algorithm for Group Formation in Cellular Manufacturing, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 1, No.1, pp.65-75 (1982).
- [4.33] King, J. R. and Nakornchai, V.: Machine - Component Group Formation in Group Technology - Review and Extension, International Journal of Production Research, Vol. 20, No.2, pp.117-133 (1982).
- [4.34] Burbidge, J. L.: The Simplification of Material Flow Systems, International Journal of Production Research, Vol. 20, No.3, pp.339-347 (1982).
- [4.35] Carrie, A. S.: Numerical Taxonomy Applied to Group Technology and Plant Layout, International Journal of Production Research, Vol. 11, No.4, pp.399-416 (1973).
- [4.36] 人見勝人(監修): GTによる生産管理システム、日刊工業新聞社(1981).
- [4.37] Merchant, M. E.: Group Technology - A Sound Foundation for Cellular Control of Cellular Manufacturing Systems, Proceedings of Ninth CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Cranfield (1977).
- [4.38] Marklew, J. J.: The Cell System - A Variety of Applications in the Same Factory, Machinery and Production Engineering, March, pp.442-447 (1971).
- [4.39] Marklew, J. J.: The Cell System of Manufacture - A Detailed Case History of an Application in a Small Firm, Machinery and Production Engineering, August, pp.182-186 (1972).

- [4.40] Marklew, J. J.: An Application of the Cell System in a Small Machine Shop, Machinery and Production Engineering, August, pp.259-263 (1972).
- [4.41] Malik, M. Y. and Dale, B. G.: Cell Formation for a Group Technology Manufacturing System, Machinery and Production Engineering, November, pp. 425-429 (1977).
- [4.42] Nagarkar, C. V. and Fogg, B.: Application of Group Technology to Manufacture of Sheetmetal Components, Annals of the CIRP, Vol. 28, No.1, pp.407-411 (1979).
- [4.43] Crookall, J. R. and Lee, L. C.: Computer - Aided Performance Analysis and Design of Cellular Manufacturing Systems, Proceedings of Ninth CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Cranfield (1977).
- [4.44] Purcheck, G. F. K.: Combinatorial Analysis in Planning for Cellular Manufacture, Proceedings of Ninth CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Cranfield (1977).
- [4.45] Eversheim, W. and Pferdmenges, R.: Planning and Stepwise Realization of Flexible Manufacturing Systems, Proceedings of Ninth CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Cranfield (1977).
- [4.46] 河原 巖、中井重行：理論的段階における設備配置のためのアルゴリズム、早稲田大学理工学研究所報告輯、Vol. 91, pp.75-79 (1980).
- [4.47] Armour, G. C. and Buffa, E. S.: A Heuristic Algorithm and Simulation Approach to Relative Location of Facilities, Management Science, Vol. 9, No.2, pp.294-309 (1963).
- [4.48] Francis, R. L. and White, J. A.: Facility Layout and Location - An Analytical Approach, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1974).
- [4.49] 高橋輝男、久保 章：プラント・レイアウトー工場設計の理論と実際、建帛社 (1973).

- [4.50] Muther, R.: Systematic Layout Planning, Industrial Education Institute, Boston, Massachusetts (1961).
- [4.51] Noy, P. C.: Make the Right Plant Layout-Mathematically, American Machinist, Vol. 101, No.6, pp.121-125 (1957).
- [4.52] Wimmert, R. J.: A Mathematical Method of Equipment Location, The Journal of Industrial Engineering, Vol. 9, No.6, pp.498-505 (1958).
- [4.53] Reed, R. Jr.: Plant Location, Layout, and Maintenance, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Illinois (1967);
松田武彦、山崎 進(共訳): 工場の立地・レイアウト・保全、東洋経済新報社(1970).
- [4.54] Edwards, H. K., Gillett, B. E. and Hale, M. E.: Modular Allocation Technique (MAT), Management Science, Vol. 17, No.3, pp.161-169 (1970).
- [4.55] 藤原 豊、大崎絃一、菊地 進: 決定理論を応用したレイアウト手法、日本機械学会論文集、C編、Vol. 45, No.400, pp.1426-1433 (1979).
- [4.56] 古川 光、久保 章: 設備配置のための初期解誘導法の研究、日本経営工学会誌、No.54, pp.29-33 (1973).
- [4.57] 河原 巖、久保 章: 工場レイアウト設計技法に関する研究-職場配置のためのCAPLAS (Computer Assisted Plant LAYout design System) -, 日本経営工学会誌、Vol. 33, No.5, pp.350-358 (1982).
- [4.58] Steinberg, L.: The Backboard Wiring Problem - Placement Algorithm, SIAM Review, Vol. 3, No.1, pp.37-50 (1961).
- [4.59] Hillier, F. S.: Quantitative Tools for Plant Layout Analysis, The Journal of Industrial Engineering, Vol. 14, No.1, pp.33-40 (1963).
- [4.60] Hillier, F. S. and Connors, M. M.: Quadratic Assignment Problem Algorithms and the Location of Indivisible Facilities, Management Science, Vol. 13, No.1, pp.42-57 (1966).

- [4.61] Nugent, C. E., Vollmann, T. E. and Ruml, J.: An Experimental Comparison on Techniques for the Assignment of Facilities to Locations, *Operations Research*, Vol. 18, No.1, pp.150-173 (1968).
- [4.62] Vollmann, T. E., Nugent, C. E. and Zartler, R. L.: A Computerized Model for Office Layout, *The Journal of Industrial Engineering*, Vol. 19, No.7, pp.321-327 (1968).
- [4.63] Khalil, T. M.: Facilities Relative Allocation Technique (FRAT), *International Journal of Production Research*, Vol. 11, No.2, pp.183-194 (1973).
- [4.64] Graves, G. W. and Whinston, A. B.: An Algorithm for the Quadratic Assignment Problem, *Management Science*, Vol. 17, No.7, pp.453-471 (1970).
- [4.65] Hanan, M. and Kurtzberg, J. M.: A Review of the Placement and Quadratic Assignment Problems, *SIAM Review*, Vol. 4, No.2, pp.324-342 (1972).
- [4.66] Ritzman, L. P.: The Efficiency of Computer Algorithms for Plant Layout, *Management Science*, Vol. 18, No.5, pp.240-248 (1972).
- [4.67] Scriabin, M. and Vergin, R. C.: Comparison of Computer Algorithms and Visual based Methods for Plant Layout, *Management Science*, Vol. 22, No.2, pp.172-181 (1975).
- [4.68] Hitchings, G. G. and Cottam, M.: An Efficient Heuristic Procedure for Solving the Layout Design Problem, *OMEGA, The International Journal of Management Science*, Vol. 4, No.2, pp.205-214 (1976).
- [4.69] 久保 章：設備配置のための改良技法の研究、*日本経営工学会誌*、Vol. 30, No.4, pp.307-312 (1980).
- [4.70] Liggett, R. S.: The Quadratic Assignment Problem - An Experimental Evaluation of Solution Strategies, *Management Science*, Vol. 27, No.4, pp.442-458 (1981).

第 5 章

- [5.1] 岩田一明、ほか 5 名：生産システム学、コロナ社 (1982)。
- [5.2] Armour, G. C. and Buffa, E. S.: A Heuristic Algorithm and Simulation Approach to Relative Location of Facilities, *Management Science*, Vol. 9, No.2, pp.294-309 (1963).
- [5.3] Vollmann, T. E. and Buffa, E. S.: The Facilities Layout Problem in Perspective, *Management Science*, Vol. 12, No.10, pp.B450-468 (1966).
- [5.4] El-Rayah, T. E. and Hollier, R. H.: A Review of Plant Design Techniques, *International Journal of Production Research*, Vol. 8, No.3, pp.263-279 (1970).
- [5.5] Muther, R. and McPherson, K.: Four Approaches to Computerized Layout Planning, *Industrial Engineering*, Vol. 2, No.2, pp.39-42 (1970).
- [5.6] Moore, J. M.: Computer Aided Facilities Design - An International Survey, *International Journal of Production Research*, Vol. 12, No.1, pp.21-44 (1974).
- [5.7] Moore, J. M.: Who Use the Computer for Layout Planning?, *Proceedings of the 4th International Conference on Production Research*, Tokyo, pp.829-843 (1977).
- [5.8] Carrie, A. S.: Computer-Aided Layout Planning - The Way Ahead, *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No.3, pp.283-294 (1980).
- [5.9] Nof, S. Y.: A Methodology for Computer-Aided Facility Planning, *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No.6 pp.699-722 (1980).
- [5.10] Moore, J. M.: Computer Methods in Facilities Layout, *Industrial Engineering*, Vol. 12, No.9, pp.82-93 (1980).
- [5.11] Nugent, C. E., Vollmann, T. E. and Ruml, J.: An Experimental Comparison of Techniques for the Assignment of Facilities to Locations, *Operations Research*, Vol. 16, No.1, pp.150-173 (1968).

- [5.12] Lee, R. C. and Moore, J. M.: CORELAP - Computerized Relationship Layout Planning, The Journal of Industrial Engineering, Vol. 18, No.3, pp.195-200 (1967).
- [5.13] Seehof, J. M. and Evans, W. O.: Automated Layout Design Program, The Journal of Industrial Engineering, Vol. 18, No.12, pp.690-695 (1967).
- [5.14] Buffa, E. S., Armour, G. C. and Vollmann, T. E.: Allocating Facilities with CRAFT, Harvard Business Review, Vol. 42, No.2, pp.136-158 (1964).
- [5.15] Tompkins, J. A. and Reed, R. Jr.: An Applied Model for the Facilities Design Problem, International Journal of Production Research, Vol. 14, No.5, pp.583-595 (1976).
- [5.16] Krejcirik, M.: Computer-Aided Plant Layout, Computer Aided Design, Vol. 2, No.1, pp.7-19 (1969).
- [5.17] Moore, J. M.: Facilities Design with Graph Theory and Strings, OMEGA, The International Journal of Management Science, Vol. 4, No.2, pp.193-203 (1976).
- [5.18] Carrie, A. S.: PLANTAPT - A Package for Group Technology and Plant Layout, in McPherson (ed.): Advances in Computer-aided Manufacturing, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, pp. 367-382 (1977).
- [5.19] Moore, J. M. : Computer Program Evaluates Plant Layout Alternatives, Industrial Engineering, Vol. 3, No.8, pp.19-25 (1971).
- [5.20] 久保 章、朝倉立行、高田和俊：プラント・レイアウトの自動化に関する研究－CHARTの開発、IEレビュー、Vol. 19, No.3, pp.113-118 (1978).
- [5.21] Warnecke, H. J. and Dangelmaier, W.: Plant Layout by Interactive Computer Layout, Proceedings of International Conference on Manufacturing Engineering, Melbourne, pp.296-302 (1980).
- [5.22] 河原 巖、久保 章：工場レイアウト設計技法に関する研究－職場配置のためのCAPLAS (Computer Assisted Plant LAYOUT design System), 日本経営工学会誌、Vol. 33, No.5, pp.350-358 (1982).

- [5.23] 安田一彦、室津義定、岩田一明：コンピュータ援用設備レイアウト計画システム COFLAP, システムと制御投稿中 (1982).
- [5.24] 安田一彦、室津義定、岩田一明：設備の面積と形状を考慮した最適設備レイアウト計画、日本機械学会論文集、C編、Vol. 49, No. 439, [掲載予定] (1983).
- [5.25] Portlock, P. C. and Whitehead, B.: A Program for Practical Layout Planning, Building Science, Vol. 6, pp.213-220 (1970).
- [5.26] Tompkins, J. M.: Computerized Facilities Design, Ph. D. Dissertation, Purdue University (1972).
- [5.27] Francis, R. L. and White, J. A.: Facilities Layout and Location - An Analytical Approach, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1974).
- [5.28] Tompkins, J. M.: Safety and Facilities Design, Industrial Engineering, Vol. 8, No.1, pp.38-42 (1976).
- [5.29] Zoller, K. and Adendorff, K.: Layout Planning by Computer Simulation, AIIE Transactions, Vol. 4, No.2 pp.116-125 (1972).
- [5.30] Hicks, P. E. and Cowan, T. E.: CRAFT-M for Layout Rearrangement, Industrial Engineering, Vol. 8, No.5, pp.30-35 (1976).
- [5.31] Block, T. E.: FATE-A New Construction Algorithm for Facilities Layout, Journal of Engineering Production, Vol. 2, No.2, pp.111-126 (1978).
- [5.32] Jacobs, F. R., Bradford, J. W. and Ritzman, L. P.: Computerized Layout - An Integrated Approach to Special Planning and Communications Requirements, Industrial Engineering, Vol. 12, No.7, pp.56-61 (1980).
- [5.33] Block, T. E.: An Approach to Effective Layout Planning, Proceedings of International Conference on Manufacturing Engineering, Melbourne, pp.309-314 (1980).

- [5.34] Bazaraa, M. S.: Computerized Layout Design : A Branch and Bound Approach, AIIE Transactions, Vol. 7, No.4, pp.432-438 (1975).
- [5.35] Liggett, R. S.: The Quadratic Assignment Problem - An Experimental Evaluation of Solution Strategies, Management Science, Vol. 27, No.4, pp.442-458 (1981).
- [5.36] 茨木俊秀：組合せ最適化の理論、電子通信学会 (1979)。
- [5.37] 茨木俊秀：組合せ最適化問題の複雑性と解法、日本自動制御協会(編)：組合せ最適化手法とネットワークテキスト、pp.1-46 (1979)。
- [5.38] Yasuda, K.: A Heuristic Approach to Computerized Facilities Layout Planning, Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Operational Research, Singapore, pp.418-433 (1982).

第 6 章

- [6.1] Johnson, S. M.: Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 1, No.1, pp.61-68 (1954).
- [6.2] Conway, R. W., Maxwell, W. L. and Miller, L. W.: Theory of Scheduling, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts (1967).
- [6.3] Baker, K. R.: Introduction of Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York (1974).
- [6.4] 鍋島一郎：スケジューリング理論、森北出版 (1974)。
- [6.5] Dutta, S. K. and Cunningham, A. A.: Sequencing Two-Machine Flowshops with Finite Intermediate Storage, Management Science, Vol. 21, No.9, pp.989-996 (1975).
- [6.6] Hitz, K. L.: Scheduling of Flexible Flow Shops, Report No. LIDS-R-879, Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology (1979).

- [6.7] Hitz, K. L.: Scheduling of Flexible Flow Shops-II, Report No. LIDS-R-1049, Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology (1980).
- [6.8] 由良憲二、人見勝人：中間在庫に制限のあるフロー・ショップ・スケジューリング、日本機械学会論文集、C編、Vol. 48, No.431, pp.1094-1106 (1982).
- [6.9] Iwata, K., Murotsu, Y., Oba, F. and Yasuda, K.: Optimum Production Scheduling in Flexible Manufacturing Systems, Proceedings of the 6th International Conference on Production Research, Novi Sad, pp.441-445 (1981).
- [6.10] Law, S. S.: A Statistical Analysis of System Parameters in Automatic Transfer Lines, International Journal of Production Research, Vol. 19, No.6, pp.709-724 (1981).
- [6.11] Eversheim, W. and Herrmann, P.: Technical and Economical Planning of Automated Manufacturing Systems, Proceedings of the 4th International Conference on Production Engineering, Tokyo, pp.278-284 (1980).
- [6.12] 室津義定、岩田一明、大場史憲、植村 隆、的場秀彰：機械選択と部品負荷順序決定を統合した最適ジョブショップ スケジューリング、日本機械学会論文集、C編、Vol. 46, No.409, pp.1160-1170 (1980).
- [6.13] 岩田一明、室津義定、大場史憲、塚崎仁史：作業者及び代替機械を考慮したジョブショップ・スケジューリング、日本機械学会論文集、C編、Vol. 47, No.417, pp.709-718 (1981).
- [6.14] 室津義定、岩田一明、大場史憲、的場秀彰：代替機械を考慮した大規模ジョブショップ スケジューリング問題の一解法、日本機械学会論文集、C編、Vol. 47, No.418, pp.803-811 (1981).

第 7 章

- [7.1] Conway, R. W., Maxwell, W. L. and Miller, L. W.: Theory of Scheduling, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts (1967).
- [7.2] Akers, S. B. Jr.: A Graphical Approach to Production Scheduling Problems, Operations Research, Vol. 4, No.2, pp.244-245 (1956).
- [7.3] Jackson, J. R.: An Extension of Johnson's Results on Job-Lot Scheduling, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 3, No.3, pp.201-203 (1956).
- [7.4] Baker, K. R.: Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York (1974).
- [7.5] Conway, R. W.: Priority Dispatching and Work-in-Process Inventory in a Job Shop, Journal of Industrial Engineering, Vol. 16, No.2, pp.123-130 (1965).
- [7.6] Eilon, S. and Cotterill, D. J.: A Modified SI Rule in Job Shop Scheduling, International Journal of Production Research, Vol. 7, No.2, pp.135-145 (1968).
- [7.7] Panwalkar, S. S. and Iskander, W.: A Survey of Scheduling Rules, Operations Research, Vol. 25, No.1, pp.45-61 (1977).
- [7.8] Blackstone, J. H. Jr., Phillips, D. T. and Hogg, G.L.: A State-of-the-Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations, International Journal of Production Research, Vol. 20, No.1, pp.27-45 (1982).
- [7.9] Graves, S. C.: A Review of Production Scheduling, Operations Research, Vol. 29, No.4, pp.646-675 (1981).
- [7.10] 室津義定、岩田一明、大場史憲、植村 隆、的場秀彰：機械選択と負荷順序決定を統合した最適ジョブショップ スケジューリング、日本機械学会論文集、C編、Vol. 46, No.409, pp.1160-1170 (1980).

- [7.11] 室津義定、岩田一明、大場史憲、的場秀彰：代替機械を考慮した大規模ジョブショップ スケジューリング問題の一解法、日本機械学会論文集、C編、Vol. 47, No.418, pp.803-811 (1981).
- [7.12] 岩田一明、室津義定、大場史憲、塚崎仁史：作業者及び代替機械を考慮したジョブショップ・スケジューリング、日本機械学会論文集、C論、Vol. 47, No.417, pp.709-718 (1981).
- [7.13] Iwata, K., Murotsu, Y., Oba, F. and Yasuda, K.: Production Scheduling of Flexible Manufacturing Systems, Annals of the CIRP, Vol. 31, No.1, pp.319-322 (1982).
- [7.14] 岩田一明、室津義定、大場史憲、安田一彦、加藤江三：搬送およびバッファを考慮した大規模ジョブショップ・スケジューリング、日本機械学会論文集、C編、Vol. 49, No.437, pp.133-141 (1983).

付 録

コンピュータ援用設備レイアウト計画システム
COFLAP のプログラム・リスト

```
1 C *** COFLAP SYSTEM 182/04/01 ***
2 C
3 C
4 C *****
5 C *****
6 C
7 C THIS PROGRAM IS A COMPUTERIZED FACILITIES LAYOUT PLANNING SYSTEM
8 C AS A USEFUL TOOL WHICH MAY BE USED TO DEVELOP THE OPTIMAL FACIL-
9 C ITIES LAYOUT PLAN UNDER THE CONSTRAINTS ON AREAS AND SHAPES OF
10 C PLANT FLOOR AND FACILITIES SO AS TO MINIMIZE THE TOTAL FACILITI-
11 C ES LAYOUT COST. THE LAYOUT PROBLEM IS FORMULATED AS A QUADRA-
12 C TIC ASSIGNMENT PROBLEM, AND AN CONSTRUCTION ALGORITHM IS GIVEN
13 C BASED ON A BRANCH-AND-BOUND METHOD(BACKTRACKING). THE DEVELOP-
14 C ED COMPUTER-BASED SYSTEM IS ENTITLED COFLAP, AN ACRONYM REPRE-
15 C SENTING COMPUTERIZED FACILITIES LAYOUT PLANNING.
16 C
17 C PRODUCED BY KAZUHIKO YASUDA
18 C PROGRAMMED BY TAKASHI TANABE
19 C
20 C *****
21 C *****
22 C
23 C
24 C COMMON ASOL,BAD,FAC,KA,LB,LL,LS,N,N1,N2,N3
25 C COMMON FX,FY
26 C COMMON C1(10),C2(10,5),C3(10),C4(10)
27 C COMMON FW(30,30),G(30),NIAL(10),NNO(4)
28 C DIMENSION AM(10),AOENT(20,4),AREA(30),D1(10,21),D2(10,21,5)
29 C DIMENSION D3(10,500),FLR(50,50),IALT(10),NAR(10),NFLR(10)
30 C DIMENSION OFNT(20),X3(10,19),Y3(10,19),X4(10,19),Y4(10,19)
31 C DIMENSION IRUF(30)
32 C INTEGER AM,AOENT,AREA,C1,C2,C3,C4,D1,D2,D3,FLR,FW,G,OENT
33 C INTEGER X3,Y3,X4,Y4
34 C INTEGER ASOL,BAD,FAC,FX,FY,N,N1,N2,N3,SOL,X1,Y1,Z1
35 C INTEGER XXX,YYY
36 C
37 C ***** PAR(KA=1) OR TOTAL ENUMERATION(KA=OTHER) *****
38 C
39 C READ (5,100) KA
40 C
```



```

81 FLR(K1,K2)=0
82 CONTINUE
83 READ (5,110) K1
84 IF (K1.EQ.0) GO TO 1080
85 DO 1070 K2=1,K1
86 READ (5,110) K3
87 IX=XX(K3,FX)
88 IY=YY(K3,FX)
89 FLR(IX,IY)=1
90 CONTINUE
91 1070 CONTINUE
92 C
93 C --- CANDIDATE LOCATION SITES OR ZONES ---
94 C
95 C * FACILITIES WITH A=0 *
96 C
97 1080 IF (N1.EQ.0) GO TO 1190
98 DO 1160 K1=1,N1
99 K3=AREA(K1)+1
100 READ (5,110) (D1(K1,K2),K2=1,K3)
101 CONTINUE
102 1160 CONTINUE
103 C
104 C * FACILITIES WITH A=1 *
105 C
106 1190 IF (NNO(2).EQ.0) GO TO 1280
107 DO 1250 K1=1,NNO(2)
108 DO 1250 K2=1,IALT(K1)
109 K4=AREA(N1+K1)+1
110 READ (5,110) (D2(K1,K3,K2),K3=1,K4)
111 CONTINUE
112 1250 CONTINUE
113 C
114 C * FACILITIES WITH A=2 *
115 C
116 1280 IF (NNO(3).EQ.0) GO TO 1460
117 DO 1330 K1=1,NNO(3)
118 READ (5,110) (D3(K1,K2),K2=1,AM(K1))
119 CONTINUE
120 1330 CONTINUE
121 C
122 C --- AREA AND SHAPE OF EACH FACILITY ---
123 C

```

```

121 C
122 C * FACILITIES WITH A=2 *
123 C
124 DO 1430 K1=1,NN0(3)
125 IF (AREA(N2+K1).EQ.1) GO TO 1430
126 K3=AREA(N2+K1)-1
127 READ (5,110) ((X3(K1,K2),Y3(K1,K2)),K2=1,K3)
128 1430 CONTINUE
129 C
130 C * FACILITIES WITH A=3 *
131 C
132 1460 IF (NN0(4).EQ.0) GO TO 1580
133 DO 1540 K1=1,NN0(4)
134 IF (AREA(N3+K1).EQ.1) GO TO 1540
135 K3=AREA(N3+K1)-1
136 READ (5,110) ((X4(K1,K2),Y4(K1,K2)),K2=1,K3)
137 1540 CONTINUE
138 C
139 C --- FACILITY EXPOSURE WHEN LOCATING ---
140 C
141 1580 K3=N-N2
142 READ (5,100) ((AOENT(K1,K2),K2=1,4),K1=1,K3)
143 C
144 C --- FACILITIES LAYOUT COST ---
145 C
146 IF (N1.EQ.0) GO TO 1650
147 READ(5,110) (C1(K1),K1=1,N1)
148 IF (NN0(3).EQ.0) GO TO 1670
149 READ(5,110) (C3(K1),K1=1,NN0(3))
150 IF (NN0(4).EQ.0) GO TO 1690
151 READ (5,110) (C4(K1),K1=1,NN0(4))
152 IF (NN0(3).EQ.0) GO TO 1740
153 READ(5,110) ((C2(K1,K2),K2=1,IALT(K1)),K1=1,NN0(2))
154 C
155 C --- FLOW INFORMATION ---
156 C
157 1740 K3=N-1
158 DO 1780 K1=1,K3
159 K4=K1+1
160 READ(5,110) (FW(K1,K2),K2=K4,N)

```

```

161 1780 CONTINUE
162 C
163 C --- TRANSPORTATION COST ---
164 C
165 K1=N-1
166 DO 1860 K1=1,K3
167 K4=K1+1
168 READ(5,110) (FW(K2,K1),K2=K4,N)
169
170 1860 CONTINUE
171 C
172 C *****
173 C *
174 C * REPORT GENERATING ROUTINE *
175 C * (IN TABLE FORMAT) *
176 C *
177 C *
178 C * *****
179 C
180 C
181 C
182 WRITE(6,200)
183 FORMAT(1H1,1) ***** COFLAP SYSTEM *****'////')
184 C
185 WRITE(6,205)
186 FORMAT(1H,1) *** FLOW MATRIX ***'//)
187 DO 1800 K1=1,N
188 DO 1810 K2=1,K1
189 IRUF(K2)=0
190 DO 1820 K2=K1,N
191 IRUF(K2)=FW(K1,K2)
192 WRITE(6,120) (IRUF(K2),K2=1,N)
193 1800 CONTINUE
194 C
195 WRITE(6,210)
196 FORMAT(///1H,1) *** TRANSPORTATION COST MATRIX ***'////')
197 DO 1880 K1=1,N
198 DO 1885 K2=1,K1
199 IRUF(K2)=0
200 DO 1890 K2=K1,N

```

```

201 1890 IRUF(K2)=FW(K2,K1)
202 WRITE(6,120) (IRUF(K2),K2=1,N)
203 1880 CONTINUE
204 C
205 C
206 *****
207 *
208 *
209 * FACILITIES LOCATING ROUTINE *
210 *
211 *
212 *****
213 C
214 C
215 ***** INITIALIZATION *****
216 C
217 K2=NN0(3)+NN0(4)
218 DO 3015 K1=1,K2
219 OENT(K1)=1
220 3015 CONTINUE
221 SOL=0
222 LN=0
223 LS=0
224 FAC=0
225 LR=9999
226 C
227 ***** FACILITIES ASSIGNMENT PROCEDURE *****
228 C
229 C
230 C
231 C
232 IF(N1.EQ.0) GO TO 5010
233 DO 4090 K1=1,N1
234 FAC=K1
235 DO 4090 K2=1,ARFA(K1)
236 K3=K2+1
237 IX=XX(X(01(K1,K3)),FX)
238 IY=YY(Y(01(K1,K3)),FX)
239 IF(FLR(IX,IY).NE.0) GOTO R110
240 FLR(IX,IY)=K1

```



```

281 CALL LBOUND
282 IF (RAD.EQ.1) GO TO 5240
283 IF (FAC.LT.N2) GO TO 5020
284
285 --- LOCATE FACILITIES WITH A=2 ---
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320

```

```

6010 IF (NNO(3).EQ.0) GO TO 7010
6020 FAC=FAC+1
NAR(FAC-N2)=0
6050 NAR(FAC-N2)=NAR(FAC-N2)+1
K1=NAR(FAC-N2)
Z1=D3(FAC-N2,K1)
X1=XX(X(Z1,FX))
Y1=YY(Y(Z1,FX))
IF (FLR(X1,Y1).EQ.0) GO TO 6100
LN=LN+1
GO TO 6320
6100 IF (AREA(FAC).NF.1) GO TO 6110
FLR(X1,Y1)=FAC
GO TO 6450
6110 IF (OENT(FAC-N2).EQ.1) GO TO 6130
K3=5-OENT(FAC-N2)
K4=AREA(FAC)-1
DO 6120 K1=1,K3
DO 6120 K2=1,K4
K5=X3(FAC-N2,K2)=Y3(FAC-N2,K2)
X3(FAC-N2,K2)=Y3(FAC-N2,K2)
Y3(FAC-N2,K2)=K5
X3(FAC-N2,K2)=X3(FAC-N2,K2)
6120 CONTINUE
OENT(FAC-N2)=1
6130 K1=OENT(FAC-N2)
IF (AOENT(FAC-N2,K1).EQ.1) GO TO 6170
6140 IF (OENT(FAC-N2).EQ.4) GO TO 6320
OENT(FAC-N2)=OENT(FAC-N2)+1
K1=AREA(FAC)-1
DO 6150 K2=1,K1
K5=X3(FAC-N2,K2)
X3(FAC-N2,K2)=Y3(FAC-N2,K2)
Y3(FAC-N2,K2)=K5

```

```

321 X3(FAC-N2,K2)=Y3(FAC-N2,K2)
322 CONTINUE
323 GO TO 6130
324 K3=AREA(FAC)-1
325 DO 6250 K2=1,K3
326 IX=X1+X3(FAC-N2,K2)
327 IY=Y1-Y3(FAC-N2,K2)
328 IF(IX.GF.1.AND.IX.LE.FX.AND.IY.GE.1.AND.IY.LE.FY) GO TO 6210
329 LN=LN+1
330 GO TO 6140
331 IF (FLR(IX,IY).EQ.0) GO TO 6220
332 LN=LN+1
333 GO TO 6140
334 IZ=(IY-1)+FY+IX
335 DO 6240 K1=1,AM(FAC-N2)
336 IF (IZ.EQ.03(FAC-N2,K1)) GO TO 6250
337 CONTINUE
338 LN=LN+1
339 GO TO 6140
340 CONTINUE
341 FLR(X1,Y1)=FAC
342 K1=AREA(FAC)-1
343 DO 6300 K2=1,K1
344 IX=X1+X3(FAC-N2,K2)
345 IY=Y1-Y3(FAC-N2,K2)
346 FLR(IX,IY)=FAC
347 CONTINUE
348 GO TO 6450
349 IF (NAR(FAC-N2).LT.AM(FAC-N2)) GO TO 6050
350 IF (FAC-1.LE.N2) GO TO 5210
351 FAC=FAC-1
352 K2=NAR(FAC-N2)
353 K1=D3(FAC-N2,K2)
354 X1=XXX(K1,FX)
355 Y1=YYY(K1,FY)
356 FLR(X1,Y1)=0
357 IF (AREA(FAC).EQ.1) GO TO 6320
358 K1=AREA(FAC)-1
359 DO 6430 K2=1,K1
360 IX=X1+X3(FAC-N2,K2)

```

```

361 IY=Y1-Y3(FAC=N2,K2)
362 FLR(IX,IY)=N
363 6430 CONTINUE
364 GO TO 6140
365 K1=NAR(FAC=N2)
366 G(FAC)=D3(FAC=N2,K1)
367 CALL LBOUND
368 IF (RAD.EQ.1) GO TO 6360
369 IF (FAC.LT.N3) GO TO 6020
370
371 C --- LOCATE FACILITIES WITH A=3 ---
372 C
373 C
374 7010 IF (NNO(4).EQ.0) GO TO 8010
375 7020 FAC=FAC+1
376 NFLR(FAC=N3)=0
377 7050 NFLR(FAC=N3)=NFLR(FAC=N3)+1
378 K1=NFLR(FAC=N3)
379 X1=XXX(K1,FX)
380 Y1=YYY(K1,FX)
381 IF (FLR(X1,Y1).EQ.0) GO TO 7100
382 LN=LN+1
383 GO TO 7290
384 7100 IF (AREA(FAC).NE.1) GO TO 7110
385 FLR(X1,Y1)=FAC
386 GO TO 7420
387 7110 IF (OENT(FAC=N2).EQ.1) GO TO 7130
388 K3=5-OENT(FAC=N2)
389 K4=AREA(FAC)-1
390 DO 7120 K1=1,K3
391 DO 7120 K2=1,K4
392 K5=X4(FAC=N3,K2)=Y4(FAC=N3,K2)
393 Y4(FAC=N3,K2)=K5
394 7120 CONTINUE
395 OENT(FAC=N2)=1
396 7130 K1=OENT(FAC=N2)
397 IF (AOENT(FAC=N2,K1).EQ.1) GO TO 7170
398 7140 IF (OENT(FAC=N2).EQ.4) GO TO 7290
399 OENT(FAC=N2)=OENT(FAC=N2)+1
400 K1=AREA(FAC)-1

```

```

401      DO 7150 K2=1,K1
402      K5=X4(FAC-N3,K2)
403      X4(FAC-N3,K2)=Y4(FAC-N3,K2)
404      Y4(FAC-N3,K2)=K5
405      7150 CONTINUE
406      GO TO 7130
407      K2=AREA(FAC)-1
408      DO 7220 K1=1,K2
409      IX=X1+X4(FAC-N3,K1)
410      IY=Y1-Y4(FAC-N3,K1)
411      IF (IX.GE.1.AND.IX.LE.FX.AND.IY.GE.1.AND.IY.LE.FY) GO TO 7210
412      LN=LN+1
413      GO TO 7140
414      7210 IF (FLR(IX,IY).EQ.0) GO TO 7220
415      LN=LN+1
416      GO TO 7140
417      7220 CONTINUE
418      FLR(X1,Y1)=FAC
419      K2=AREA(FAC)-1
420      DO 7270 K1=1,K2
421      IX=X1+X4(FAC-N3,K1)
422      IY=Y1-Y4(FAC-N3,K1)
423      FLR(IX,IY)=FAC
424      7270 CONTINUE
425      GO TO 7420
426      7290 IF (NFLR(FAC-N3).LT.FX+FY) GO TO 7050
427      IF (FAC-1.LF.N3) GO TO 6330
428      FAC=FAC-1
429      K1=NFLR(FAC-N3)
430      X1=XXX(K1,FX)
431      Y1=YYY(K1,FX)
432      FLR(X1,Y1)=0
433      IF (AREA(FAC).EQ.1) GO TO 7290
434      K2=AREA(FAC)-1
435      DO 7400 K1=1,K2
436      IX=X1+X4(FAC-N3,K1)
437      IY=Y1-Y4(FAC-N3,K1)
438      FLR(IX,IY)=0
439      7400 CONTINUE
440      GO TO 7140

```

```

441 7420 G(FAC)=NFLR(FAC-N3)
442 CALL LROUND
443 IF (RAD.EQ.1) GO TO 7330
444 IF (FAC.LT.N) GO TO 7020
445
446
447 *****
448 *
449 *
450 * REPORT GENFRATING ROUTINE
451 * (IN BLOCK LAYOUT FORM)
452 *
453 *
454 *****
455 *
456 *****
457 R010 SOL=SOL+1
458 K1=LS+LN
459 WRITE(6,R00)
460 WRITE(6,R10) SOL
461 WRITE(6,R20) LS
462 WRITE(6,R30) LN
463 WRITE(6,R40) K1
464 WRITE(6,R50) ASOL
465 WRITE(6,R60) LL
466
467
468 DO R030 K9=1,FY
469 WRITE(6,R70) (F1R(K8,K9),K8=1,FX)
470 R030 CONTINUE
471
472 WRITE(6,R80) (K9,K9=1,N)
473 WRITE(6,R90) (G(K9),K9=1,N)
474
475 IF (NNO(4).GT.0) GO TO 7330
476 IF (NNO(3).GT.0) GO TO 6360
477 IF (NNO(2).GT.0) GO TO 5240
478
479 R110 K1=LS+LN
480 WRITE(6,900)
481 WRITE(6,910)

```

```

481 WRITE(6,910)
482 WRITE(6,920)
483 WRITE(6,910)
484 WRITE(6,910)
485 WRITE(6,930)
486 WRITE(6,810) S01
487 WRITE(6,820) LS
488 WRITE(6,830) LN
489 WRITE(6,840) K1
490 WRITE(6,850) AS0L
491 FORMAT(1H1,////)
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506

```

```

800 FORMAT(1H1,////)
810 FORMAT(1H ,1,*** INCUMBENT SOLUTION ***1,I3)
820 FORMAT(1H0,1 NO OF ACCEPTED NODES=1,I4)
830 FORMAT(1H ,1 NO OF REJECTED NODES=1,I5)
840 FORMAT(1H ,1 TOTAL GENERATED NODES=1,I5)
850 FORMAT(1H0,1 NO OF FEASIBLE SOLUTIONS=1,I3)
860 FORMAT(1H0,1 TOTAL FACILITIES LAYOUT COST=1,I5,////)
870 FORMAT(50I3)
880 FORMAT(1H0,1 FACILITY : 1,50I4)
890 FORMAT(1H ,1 CENTROID : 1,50I4)
900 FORMAT(1H1,////)
910 FORMAT(1H ,1 *****1)
920 FORMAT(1H0,1 OPTIMAL FACILITIES LAYOUT PLAN 1,/)
930 FORMAT(1H0)

```

```

STOP
END

```



```

42 C
43 C
44 C
45 IF (FAC.EQ.N) GO TO 1210
46 IF (FAC.FQ.N=1) GO TO 1160
47 K1=FAC+1
48 K2=N-1
49 DO 1140 KR=K1,K2
50 K3=KR+1
51 DO 1140 KQ=K3,N
52 LL=LL+FW(KB,KQ)*FW(K9,KR)
53 1140 CONTINUE
54 C
55 C
56 C
57 --- CALCULATE FORTH TERM IN LB-EQUATION ---
58 1160 DO 1190 KR=1,FAC
59 K1=FAC+1
60 DO 1190 K9=K1,N
61 LL=LL+FW(K8,K9)*FW(K9,KR)
62 1190 CONTINUE
63 C
64 C
65 --- CALCULATE FIRST AND LAST TERMS IN LB-EQUATION ---
66 1210 IF (FAC.GT.N1) GO TO 1220
67 DO 1215 KR=1,FAC
68 LL=LL+C1(KR)
69 1215 CONTINUE
70 GO TO 1260
71 1220 IF (FAC.GT.N2) GO TO 1230
72 DO 1222 KR=1,N1
73 LL=LL+C1(KR)
74 1222 CONTINUE
75 K1=FAC-N1
76 DO 1224 KR=1,K1
77 K2=N1AL(KR)
78 LL=LL+C2(KR,K2)
79 1224 CONTINUE
80 GO TO 1260
81 1230 IF (FAC.GT.N3) GO TO 1240
82 DO 1232 KR=1,N1
83 LL=LL+C1(KR)
84 1232 CONTINUE

```

```

84      DO 1234 KR=1,NN0(2)
85      K1=NIAL(KR)
86      LL=LL+C2(KR,K1)
87      1234 CONTINUE
88      K1=FAC-N2
89      DO 1236 KR=1,K1
90      LL=LL+C3(KR)
91      1236 CONTINUE
92      GO TO 1240
93      DO 1242 KR=1,N1
94      LL=LL+C1(KR)
95      1242 CONTINUE
96      DO 1244 KR=1,NN0(2)
97      K1=NIAL(KR)
98      LL=LL+C2(KR,K1)
99      1244 CONTINUE
100     DO 1246 KR=1,NN0(3)
101     LL=LL+C3(KR)
102     1246 CONTINUE
103     K1=FAC-N3
104     DO 1248 KR=1,K1
105     LL=LL+C4(KR)
106     1248 CONTINUE
107     C
108     C      ***** ROUNDING PROCEDURE *****
109     C
110     1260 IF (LB.GT.LL) GO TO 1265
111     C
112     C
113     RAD=1
114     GO TO 1270
115     1265 RAD=0
116     1270 IF (FAC.NF.N.OR.LB.LT.LL) GO TO 1280
117     LB=LL
118     RAD=0
119     LS=LS+1
120     IF (FAC.EQ.N) ASOL=ASOL+1
121     IF (KA.EQ.O) RAD=N
122     1310 CONTINUE
123     RETURN
124     END

```

```

1      C
2      C
3      C      *****
4      C      *
5      C      *
6      C      *   X-AXIS CALCULATION   *
7      C      *
8      C      *
9      C      *****
10     C
11     C
12     C      INTEGER FUNCTION XXX(I,J)
13     C
14     C      XXX=MOD((I-1),J)+1
15     C      RETURN
16     C      END

```

```

1      C
2      C
3      C      *****
4      C      *
5      C      *
6      C      *   Y-AXIS CALCULATION   *
7      C      *
8      C      *
9      C      *****
10     C
11     C
12     C      INTEGER FUNCTION YYY(I,J)
13     C
14     C      YYY=(I-1)/J+1
15     C      RETURN
16     C      END

```

謝 辞

本論文の骨子をなす研究を遂行するにあたり、直接の御指導と終始懇切な御鞭撻を頂いた神戸大学工学部生産機械工学科 岩田一明教授 に深甚なる謝恩の意を表す。また、研究の過程で多大な御教示を賜った同生産機械工学科 森脇俊道助教授にも深く感謝する。本論文をまとめるにあたり、有益なる御教示と温かい御配慮を賜った神戸大学工学部機械工学科 松本隆一教授 ならびに同化学工学科 中西英二教授に心から感謝する。さらに、本研究の遂行にあたり、貴重な御示唆と薫陶を賜った大阪府立大学工学部航空工学科 室津義定教授、大場史憲講師 に感謝の意を表す。

日頃著者の研究に関心を寄せられ、有益な御示唆と御助言を賜った神戸大学工学部機械工学科 小坂田宏造助教授、同生産機械工学科 杉村延広助手、ならびに同大学大学院自然科学研究科 荒井栄司助手 にも厚く御礼申し上げます。研究遂行に際し、神戸大学工学部生産機械工学科 倉本智恵技官 には種々の便宜を与えて頂いた。ここに記して謝意を表す。また、日本オペレーションズ・リサーチ学会関西支部数理計画法研究部会を通じて有益な御示唆と薫陶を賜った神戸大学工学部システム工学科 藤井 進助教授 に感謝する。さらに、著者の研究に助力され、第7章に関する一連の研究の共同研究者として一部分担して頂いた当時神戸大学大学院工学研究科生産機械工学専攻修士課程 加藤江三氏 に感謝する。

平素より温かい励ましの御言葉と有益な御教示を頂いた大阪府立大学工学部経営工学科 太田 宏講師，宮崎茂次助手，長沢啓行助手，金沢工業大学経営工学科 中易秀敏助教授，武蔵工業大学経営工学科 細野泰彦助手，ならびに神戸大学非常勤講師 廣嶋孝策先生 に深甚の謝意を表するとともに，本研究を進めるにあたり御協力頂いた神戸大学工学部生産機械工学科岩田研究室の方々に厚く御礼申し上げます。

最後に、著者が大阪府立大学工学部経営工学科に入学以来、永年にわたり終始変わらぬ御指導を頂いた同大学 橋本文雄教授，西山徳幸助教授 にも深く感謝する。

昭和58年3月 早春の六甲台にて 安田 一彦