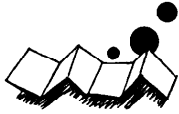


解説

FA 用情報処理技術



計算機を用いた生産システムの設計†

武田 健二††

1. はじめに

電機、機械などの組立産業における工場の自動化は今、FA (Factory Automation) と呼ばれ、単なる作業の自動化から計算機による情報処理をともなった自動化の段階を迎えている。特にマイクロエレクトロニクスの技術革新によって、ロボットを始めとして生産システムの構成要素である生産機械の知能化が進み、生産制御の形態も高度化しようとしている。このような背景の中で、生産性の大幅向上を目指した自動化システムの設計が期待されている。ここ1、2年に盛んに開発されたFMS (Flexible Manufacturing System) もその試みと言える<sup>1),2)</sup>。しかし、これらのシステムは、多額の投資が必要で、そのリスクを避けるためにも、充分なシステムの検討が必要である。新しい設備の導入効果の評価から、その新しい組み合わせによる作業の再設計まで、様々な生産性に関する指標によりシステム構成を評価し、最適設計しなければならない。このような生産システムの設計に計算機を用いる研究が、1970年頃から盛んになってきた。生産システムの設計には、構想の立案から、次第に構成の詳細化を進めて行き、最終的には各システム構成要素の詳細仕様とレイアウト決定に至る段階的な過程がある(図-1)。この過程で、特に、計算機シミュレーションや、計算機によるレイアウト最適化については、研究だけでなく実用された例

も多くなってきている。そこで、この2つの技術について、これまでの動向と現状を解説する。

2. 設備構成計画

生産システムの設計にあたって、まず生産の基本形態である見込生産か受注生産かにより、大きく設備構成が異なる。一般に見込生産では、単一の品種で充分に生産量が多く、大量生産形態を採ることが多いため、製品の加工工程順に設備を割り当て、コンベアラ

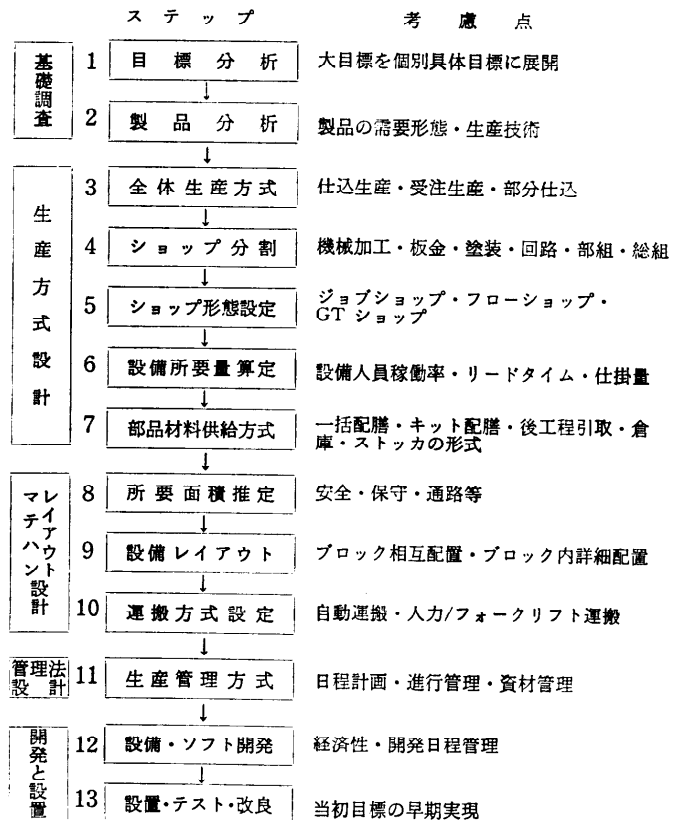


図-1 生産システム設計手順<sup>3)</sup>

† Planning of Production Systems Using Computers by Kenji TAKEDA (Production Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所生産技術研究所

インのような一貫した物の流れとなるように構成する。これをフローショップと呼ぶ。これに対して、受注生産は、生産すべき対象の製品の種類が多く、フローショップの構成が採れないため、共通に必要な設備を各製品が異なる順序で経由して行くジョブショップと呼ばれる構成となる。計算機による設備構成計画においても、対象がフローショップか、ジョブショップかで扱いが異なる。

## 2.1 フローショップ設計

フローショップ設計における代表的な計算機利用は、1950年代の組立ラインバランス問題にさかのぼる。これは、ある製品を組み立てるために必要な作業を、要素作業に分割し、各要素作業を与えられた生産量から算出されたサイクルタイムの範囲内で、作業ステーションに割り付ける問題である。評価関数は、たとえば次式で表わされる総遊休時間  $D$  の最小化である。

$$D = \sum_{i=1}^N (\tau - T_i) = \sum_{i=1}^N (\tau - \sum_{j \in J_i} t_j)$$

$\tau$ : サイクルタイム

$T_i$ : 第  $i$  作業ステーションに割り当てられた実作業時間,  $i=1 \sim N$

$t_j$ : 第  $j$  要素作業の実作業時間

$J_i$ : 第  $i$  作業ステーションに割り当てられた要素作業の集合

ここで、要素作業の集合は、技術的に組み立て可能性を保証するための順序関係の制約がある。この制約を守りかつ総遊休時間  $D$  を最小化する組み合わせを求める配分問題である。

このような単純なラインバランス問題は、分枝限定法 (branch and bound method) 等によって定式化でき最適解を求めることができるが、計算時間が膨大になることから、古くから発見的手法 (heuristic method) が開発されている<sup>5)</sup>。しかし、実際のラインにおいては、単なる作業負荷のバランスだけでなく、同一工具を使う要素作業をまとめたり、汚れを避けねばならない要素作業の考慮など、各種の条件を考慮することが重要である。このような考慮ができる汎用プログラムとしては、米国の IITRI (Illinois Institute of Technology Research Institute) で開発された CALB のように、複数の企業で実際に使用されたものがある<sup>6)</sup>。

以上の組立ラインバランス問題は、主に人手作業中心の組立ラインを対象にしている。これに対し、最近

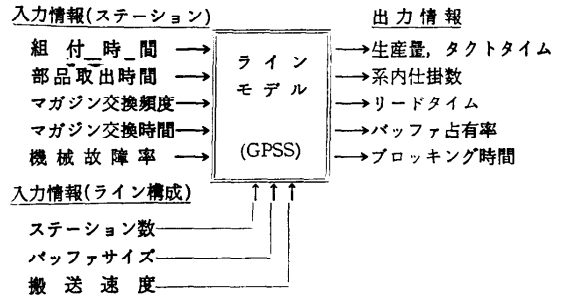


図-2 高速組立ラインのシミュレーションプログラム入出力情報の例

の組立 (特に部品組立) ラインのように、高速でしかも完全に自動化されたラインを設計する場合には、むしろ各作業ステーションでの設備の故障等の外乱がライン全体の稼働率にどのような影響を与えるかを評価の方が重要になる。また、その影響を小さくするためのバッファストックの容量や代替機械の設置といった改善策の定量的な評価も同時に必要である。この評価は、高速ラインであればあるほど詳細に行わなければならない。一般に計算機シミュレーションが有効である。ラインの各作業ステーションでの物の細かい動きを記述するために、汎用言語によるモデル化が多く用いられる<sup>5)</sup>。特に、シミュレーション専用の汎用言語である GPSS がよく知られている<sup>6)</sup>。図-2 は、シミュレーションプログラムの入出力情報の例である。

## 2.2 ジョブショップ設計

フローショップに比べ、ジョブショップの設計は複雑で困難である。そして、計算機によるシミュレーションは、この点に関してシステムが大規模化、複雑化するにつれて必要性が増すのに反して、実施が困難になる。一般に、図-1 に示す設計過程の中でも第6ステップにあたる設備構成では、いくつかの代替案を考えては比較評価して選択・改良するという試行錯誤的な方法が採られる。この設備構成の評価にあたって、詳細なシミュレーションによらず、まず巨視的な粗い評価ができれば有効である。その場合、評価基準の最も基本的なものは、各生産設備の稼働率と各製品の着手から完了までの平均停滞時間の2つである。そこで、設備構成案を与えられた時に、この2つの指標を計算するために、待ち行列理論を応用した解析的方法が Solberg により提案された<sup>8)</sup>。

これは、ジョブショップの設備構成を図-3 に示すような閉ネットワーク待ち行列のセントラル・サーバ・モデルとして扱うもので、生産システムにおける搬送

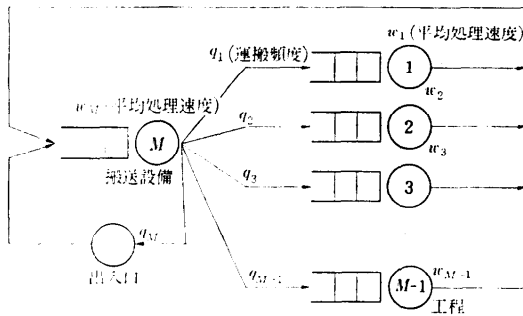


図-3 生産システムのセントラル・サーバ・モデル

機能に着目している。一般に、製品は入口に到着した後、必要な加工を受けて出口に至るまでに、搬送・待ち・処理（加工）の3つの状態を繰り返しており、常に搬送が介在している。そこで、搬送機能をセントラル・サーバとして扱えることができる。また、システムの平衡状態を仮定した閉ネットワークであるため、システム内の製品の数（仕掛け数）が常に一定で、完成した物が一単位出口から出ると新しく材料が投入さ

れると考える。

このように、生産システム内の物の流れを搬送側から眺めると、製品によって異なる処理順序を無視できる。搬送設備の各設備に対するランダムなサービスと見なすことができ、各生産設備に対する搬送の頻度の相対的な割合  $q_i$  で代表させることができる。また、各生産設備での作業時間も、製品の種類によって異なるが、これも指数分布を仮定して平均処理速度  $w_i$  で代表させる。各生産設備の平均稼働率  $u_i$  は、次式で求められる。

$$u_i = u_M q_i \frac{w_M}{w_i}$$

ここで、 $w_M$  は搬送設備の平均処理速度である。また、搬送設備の平均稼働率  $u_M$  は、Buzen により考案された解法により求めることができる<sup>9)</sup>。また、平均停滞時間  $T$  は、Little の公式より、次式で与えられる。

$$T = \frac{N}{P}$$

ここで、 $N$  はシステム内の物の総数（仕掛け数）で、

表-1 専用シミュレータの工程基本要素例

工程基本要素	シンボル	特性決定要因			模擬状態	
		基本特性	作業可能時間帯決定要因	変動特性項目	作業可否状態	作業状態
ストレージ S/G		$C = X \cdot Y \cdot Z$ (容量=奥・幅・高)	—	—	—	—
プロダクション マシン P/M		$D_s$ (段取時間) $P$ (加工能率)	MTBF, MTTR $T_s$ (作業開始時刻) $T_e$ (作業終了時刻)	$D_s$ $T$ (加工時間) MTBF, MTTR 加工不良率	A <sub>1</sub> (作業時間帯—正常) A <sub>2</sub> (作業時間帯—故障) A <sub>3</sub> (非作業時間帯—正常) A <sub>4</sub> (非作業時間帯—故障)	B <sub>1</sub> (待機) B <sub>2</sub> (段取) B <sub>3</sub> (加工)
コンベヤ C/V		$L$ (コンベヤ長) $\tau$ (シフト間隔時間)	P/Mと同じ	$\tau$ MTBF, MTTR	P/Mと同じ	B <sub>1</sub> (停止) B <sub>2</sub> (シフト中)
コンベヤガイド C/D		$Y$ 座標系 (1次元)	—	—	—	—
ハンドリング マシン H/M		$v$ (移動速度) $h$ (ハンドリング時間)	P/Mと同じ	$v$ $h$ MTBF, MTTR	P/Mと同じ	B <sub>1</sub> (待機) B <sub>2</sub> (移動中) B <sub>3</sub> (取上) B <sub>4</sub> (搬送中) B <sub>5</sub> (取下)
レール R/L		$l$ (ブランチの長さ) ブランチ別 YZ 座標系 (2次元)	—	—	—	—
コネクタ C/N		取上設備と取下設備	—	—	—	—

MTBF: 平均故障間隔時間, MTTR: 平均復旧所要時間

データとして与えられ、システムの平均生産速度  $P$  は、次式で求められる。

$$P = q_M \cdot w_M \cdot u_M$$

ここで、 $q_M$  は搬送設備への物流量比である。

最近の FA の主役の1つである FMS は、自動化された機械群に対し、無人搬送車で被加工物を供給する。このような FMS の設備構成においては、搬送車が要になっており、搬送車の台数、搬送速度、被加工物の着脱時間等がシステム全体の性能に大きな影響を与える。このような場合、搬送機能をセントラル・サーバとしたモデルによる計算が最適システム設計に役に立つ。

設備構成の基本設計の後、詳細設計の段階でのシステム評価は、やはりシミュレーションによらざるを得ない。しかし、フローショップと異なり、ジョブショップを GPSS 等の汎用シミュレーション言語でプログラムすることは困難な点が多い。たとえば、1つ1つの被加工物が異なる経路を通ることの表現やデータの持ち方、スケジューリング・アルゴリズムやデータの持ち方等である。そこで、ジョブショップを対象にした各種専用のシミュレータが研究開発されている<sup>10)</sup>。これらは、汎用シミュレーション言語が言語形式で対象システムを記述するのにに対し、データによりモデルを表現するものが多い。

たとえば、三留の MAFLOS の例<sup>11)</sup>で示すと、生産設備群をその種類・特性で分類すると表-1 のような工程基本要素として表現できる。これを用いて実際のシステムを図-4 のように記述し、データを作成する。このようなシミュレータでは、生産システムに関する知識さえあれば、言語のように習得のために多くの時間を費す必要はない。

さらに最近では、図形処理技術やコンピュータ・グラフィックスの進歩によって、専用シミュレータの入出力方式として図形表現をとっての対話形式のものもあり、グラフィックスを介してのレイアウト入力や<sup>12)</sup>、アニメーション的にシミュレーションの進行を表示するものが研究されている<sup>13)</sup>。このような方式によれば、使い易く、しかも視覚に訴えて入力の実誤を防ぐことができる。また、設計活動に必要な人間の創造性を刺激する効果も期待できる。

### 3. 設備配置設計

最適な設備配置設計の基本的な命題は、生産システム内の効率的な物の流れや人の流れを実現するように生産設備の空間的な配置を決定することである。従来から、設計作業の中心は人間の創意工夫であり、経験豊富な技術者が手際よく設計を進められるような手法として、Muther の SLP が代表的である<sup>14)</sup>。しかし、

このような手法だけでは、設計結果についての基本的な評価尺度がなく説得性に欠けることや、設計時間や結果の良否が設計者の経験・知識に大きく左右される等の問題がある。そこで、計算機を利用する手法が、1960年代から盛んになった。現在までに、40を越す計算機プログラムが開発されており、米国を中心に市販もされている<sup>15)</sup>。

設備配置設計の最も基本的な数理的取り扱い扱いは、平面配置で、配置される設備を占有面積で代表し、対象領域の中に座標的に割り付けていく。一般的な計算処理手順を計算機と設計者との会話形式として図-5に示す。以下、この図の各ステップに従って説明する。

#### ① スペースの定義

まず、設備を配置する全体のスペースを図-6に示すように図形として定義する。この図形と同時に寸法も定義され、さらに

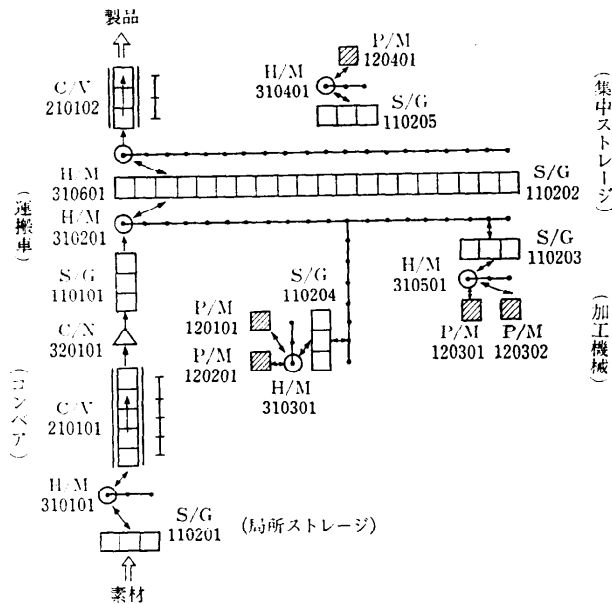


図-4 工程基本要素によるシステム記述例

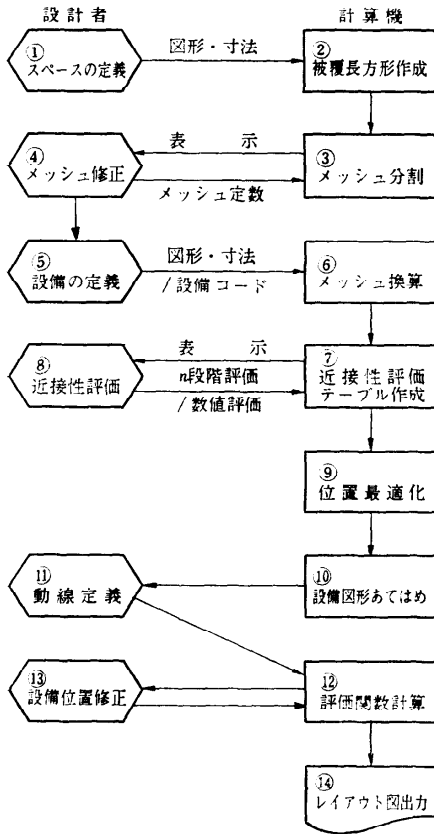


図-5 設備配置設計の計算処理の流れ

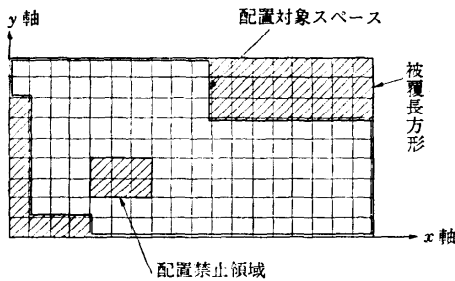


図-6 配置スペースの定義

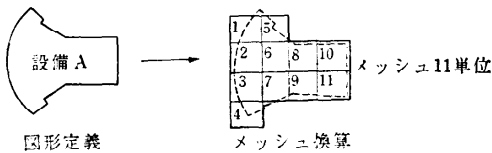


図-7 設備の定義

設備を配置できない柱等を配置禁止領域として定義する。

② 被覆長方形の作成

スペースの定義が完了すると、計算機内部にこのスペースを被覆する長方形を作成し、以下の座標計算処理のために、たとえば下辺、左辺をそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸のように定義する。

③ メッシュ分割, ④ 修正

被覆長方形をメッシュに分割し、以下の計算では実際の寸法でなく、正規化されたメッシュの単位を用いる。メッシュの大きさは、余り小さいと計算時間が長くなり、反対に大き過ぎると配置すべき設備に対して正確さに欠けるので、必要に応じて修正する。

⑤ 設備の定義, ⑥ メッシュ換算

配置する予定の各設備を図形および寸法で定義する。これを計算機内部で、図-7に示すようにメッシュ何単位をスペースとして必要とするかという換算をする。多くのプログラムは、以下のステップにおいて、設備を面積としてのみ扱い、形状を無視している。最も単純なプログラムでは、メッシュ1単位を1設備に充てるだけのものもある。また、安田他のCOFLAPのように、形状をメッシュ表現の範囲で保存し、しかも  $90^\circ$  回転を許したり、設備の搬出入口を設定できるものもある<sup>16)</sup>。

⑦, ⑧ 近接性評価

配置される各設備間の近接性に関する要求を設計者が入力する場合、図-8に示すような近接性評価テーブルを用いてデータを作成する。近接性評価値としては、物理的な諸量を直接に用いずに、 $n$ 段階評価として、 $1 \sim n$ の値に対して重み付け関数を用いる等して、各段階に評価値を与える方法と、直接意味のある数値を与える方法がある。たとえば、数値を用いる場合は、両設備間を流れる被運搬物の単位時間あたりの物

		設備		
		A	B	C
From	To 設備 A	x		
	B	③	x	
	C			x

近接性評価値

図-8 設備の近接性評価

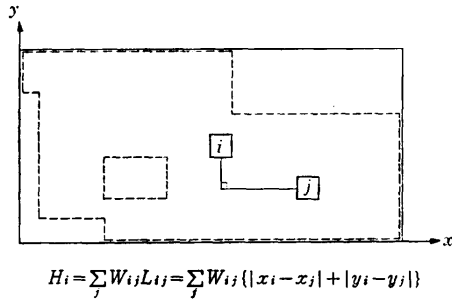


図-9 配置位置の最適化

流量等を用いることが多い。

#### ⑨ 位置最適化

各設備の位置最適化は、一般に図-9に示すような評価関数が考えられる。設備*i*を構成するメッシュの配置に対する評価関数  $H_i$  を考え、これの総和が最小となる配置を求める。この  $H_i$  は、他の設備*j*との直交距離  $L_{ij}$  ( $x$ 軸方向と $y$ 軸方向の距離の和)と設備*i*と*j*の間の近接性評価値  $w_{ij}$  を乗じたものである。

このような定式化に対して、解法を分類すると次のようになる<sup>17)</sup>。

(i) 最適解法：完全列挙法や分枝限定法等があるが、いずれも研究段階で、実用規模の問題に対して幾何級数的に計算時間が増大すると予想される。

(ii) 近似解法：計算機が解を作り出す方式と、入れ替え法により予め入力された初期解の改良を進める方式とがある。前者の代表的なプログラムには CORELAP や ALDEP があり、技法として決定理論の応用<sup>18)</sup> や MAX-MIN 法<sup>19)</sup> 等がある。後者のプログラムでは CRAFT が知られている。

また、中井他は、前提条件と目的関数の組み合わせによる多様な問題が存在するので、各種アルゴリズムが必要であるとし、統一的にグラフ理論を基礎として研究している<sup>20)</sup>。また、図形処理やコンピュータ・グラフィックス技術を応用する方向にも進んでいる<sup>21)</sup>。たとえば、ステップ①や⑤の形状定義や⑩以下のステップでは、大いに有効である。

#### 4. おわりに

生産システムの設計過程の中で、特に計算機利用の進んでいる設備構成計画と設備配置設計について解説した。設備構成のためのシステム・シミュレーションの利点は、事前検討が速く、しかも生産を阻害せずに実

験ができ、実際の現象観察だけでは把握が困難な因果関係の評価が可能であるなどで、その重要性はますます高まる。また、計算機技術の進歩により、これまでの計算時間の壁も次々と破られていき、研究も活発になろう。一方、設備配置の設計については、各問題ごとに多様な考慮を加えなければならないことから、数理的な扱いと異なる、知識工学を応用したエキスパート・システムの試みも始まっている。また、CAD技術の応用がさらに進んで、立体モデルを用いたものに発展する可能性がある。そうすると、レイアウトを立体的にもフィジブルか否かがチェックできるし、視点を変えての印象など、創造的な設計を促すことができる。

このように、情報処理の急速な発達にともなって生産システムの設計でも今後は単なる数理的モデルに基づく計算だけでない多様な展開が期待される。

#### 参考文献

- 1) 機械技術協会生産技術調査会：欧米の FMS 事例集，マシニスト出版 (1981)。
- 2) 機械技術協会生産技術調査会：日本の FMS 事例集，マシニスト出版 (1982)。
- 3) Helgeson, W. B. and Birnie, D. P.: Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique, Ind. Eng. (Dec. 1961)。
- 4) 黒田 充：CALB-ラインバランシングのための汎用プログラム，機械振興，Vol. 4, No. 2, pp. 25-32 (1971)。
- 5) 荒井良尚，中里 純ほか：シミュレーションによる VTR メカニズム自動組立ラインの能力評価，日本経営工学会講演予稿集，pp. 89-91 (Oct. 1983)。
- 6) Bobillier, P. A., Kahan, B. C. and Probst, A. R.: Simulation with GPSS and GPSS V, Prentice Hall (1976)。
- 7) 磯田賢一：生産システムの構成と運用の技法，日本機械学会第 515 回講習会教材，pp. 51-71 (1980)。
- 8) Solberg, J. J.: Optimal Design and Control of Computerized Manufacturing Systems, Proc. AIIE Systems Engineering Conference (1976)。
- 9) Buzen, J. J.: Computational Algorithms for Closed Queueing Networks with Exponential Servers, Comm. ACM (1973)。
- 10) 藤井 進：FMS 設計とシステム・シミュレータ，機械学会誌，Vol. 86, No. 779, pp. 1205-1210 (1983)。
- 11) Mitome, K., Tsubara, S. et al.: MAFLOSA Generalized Manufacturing System Simulator, Proc. Winter Simulation Conference,

- pp. 416-425 (1973).
- 12) Fujii, S.: *Computer Applications in Production and Engineering*, p. 437, North Holland (1983).
  - 13) Cook, N. H.: *Design and Analysis of Computerized Manufacturing Systems*, Ann. CIRP, Vol. 28, No. 1, p. 377 (1979).
  - 14) Muther, R.: *Systematic Layout Planning*, Industrial Education Institute, 邦訳 (日本能率協会), (1961).
  - 15) Filley: *CAD for Facilities Planning-Survey Identifies Software, Systems Most Useful to IEs*, Ind. Eng., Vol. 15, No. 3, pp. 66-80 (1983).
  - 16) 安田一彦, 室津義定, 岩田一明: コンピュータ採用設備レイアウト計画システム COFLAP, システムと制御, Vol. 27, No. 10, pp. 657-664 (1983).
  - 17) 久保 章, 河原 巖: コンピュータによる職場配置技法の活用に関する考察, IE レビュー, Vol. 24, No. 3, pp. 121-126 (1983).
  - 18) 藤原 豊, 大崎紘一, 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).
  - 19) 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 CAPLAS, 日本経営工学会誌, Vol. 33, No. 5, pp. 350-358 (1982).
  - 20) 中井重行他: 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).
  - 21) Carrie, A. S.: *Computer-aided Layout Planning—The Way Ahead*, Int. J. Production Research, Vol. 18, No. 3, pp. 283-294 (1980).

(昭和 59 年 2 月 6 日受付)

