

# 機械加工ショップ状態遷移表現 へのペトリネット図の適用

小館 英實

ペトリネット図は相互に作用し合う並進的要素からなる計算機システムをモデル化するために、C. A. Petriにより考案され、1962年に発表された[9]。この内容については計算機の入出力機器の多様化と分散処理の導入にともない、計算機の特長な技法として解説がなされ[10]、本誌にも3回にわたり紹介された[11]。最近、計算機以外の分野でも、実用期に入ったFA(Factory Automation)システムの強力な関連技法として注目を集め、種々な解説が続々と公表されている[1][2][6][7][13]。また、成書[8]とその邦訳書[3]も発行され、まさに、ペトリネット図の応用期に入った感がある。ペトリネット図の応用はモデル化とシステム解析の2つに大別することができるが、本文では、FAシステムの部分システムであるFMS(Flexible Manufacturing System)のシミュレーションを行なうため、プログラム作成の一段階として、システム挙動をペトリネット図により表現したこと[5]、すなわちモデル化について記す。また、モデル化により得られたペトリネット図のプログラム作成における活用についても説明する。

## 1. 対象システム

シミュレーションの対象である生産システムの機械加工ショップ(FMS)の概要を図1に示す。FMSは狭義では加工する部品種類数と生産量で分類され、表1のごとく中種中量生産である。無人搬送車1台と加工機械7台が主要な作動体であり、補助的な作動体として、作業員とAPC(自動パレット着脱)装置がある。機械7台中、3台にはAPC装置が付設し、加工材(ワーク)

はプレート上に治具とともに組立てられていて、機械にはAPC装置がプレートを自動的に着脱する。残り4台の機械では作業員がワーク着脱作業を行なうので、機械は大別すれば2群に分割できる。機械は工具、治具、ワークの順、または工具、プレートの順にとりつけられ加工に入るが、1個のワークが加工完了したときにはパレット内に未加工ワークがあれば、加工済ワークをとりはずして、未加工ワークをとりつけ、またはプレート上に未加工ワークがあれば、プレート位置を変更して加工をくりかえす。すべてのワークを加工完了したときには最後に治具と工具、または工具をとりはずす。無人搬送車は工具、治具、ワークをパレットに収納して、パレットあるいはプレートをそれぞれの置場から機械の受入台に運び、機械加工後に機械の送出台から各々の置場へもどす動作をくりかえす。このシステムを部品搬送方式に着

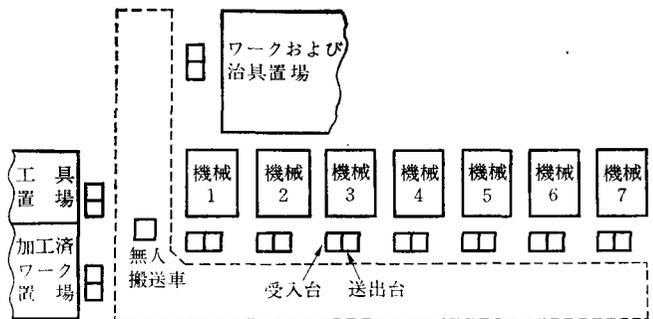


図1 対象システム概要図

表1 システム形態と部品種類、生産量

システム形態	部品種類	生産量
トランスフェライン	少(1~2)種	7,000以上
フレキシブルトランスフェライン	中(3~10)種	1,000~10,000
FMS(複数台工作機械、搬送機、計算機、等)	中(4~50)種	50~2,000
加工セル(MC1台と搬送機)	中(30~500)種	20~500
工作機械(NCまたは汎用)	多(200以上)種	1~50

(注) MC: マシニングセンター, NC: 数値制御

こたて ひでみ

幹東芝 重電技術研究所

目して分類すれば、表2[14]から、部品搬送ランダムアクセス形FMSと呼ぶことができる。

FMSは複数台の機械で、整数個のワークを加工するもので、離散系である点が1つの特徴である。また、複数台の機械が個々に作動条件が成立すれば、運転状態に入るという並進的であることも特徴となっている。FMSの設計において、シミュレーションによりシステム評価を行ない、改善することがくりかえされ、よりよいシステムの実現となる。シミュレーションにおいて、FMSの離散性(Discreteness)はシステム記述やシステム評価をむずかしくする

し、並進性(Concurrency)は使用計算機が通常、順序機械であることとの関連で、時間進行に工夫を必要とする。シミュレーションの結果は作動体の基本的動作の開始、終了時刻をすべて出力することとし、主要な作動体である機械と無人搬送車の状態遷移時刻に注目した。シミュレーション時間進行は主要な作動体の個々の動作条件の生成、消滅を記録するモニターを作成し、逐一これを参照して、状態遷移時刻ごとに行なった。このさい、システム記述として、状態の遷移を明確にするために、ペトリネット図を作成した。

## 2. ペトリネット図による状態遷移表現

ペトリネット図に類似した表現方法は計算機の並列演算に関する図表現を中心に多数知られていて、すでにJ. Petersonが図2のごとく階層的にまとめている[8]。その階層の最上位にある拡張ペトリネット図はその下部

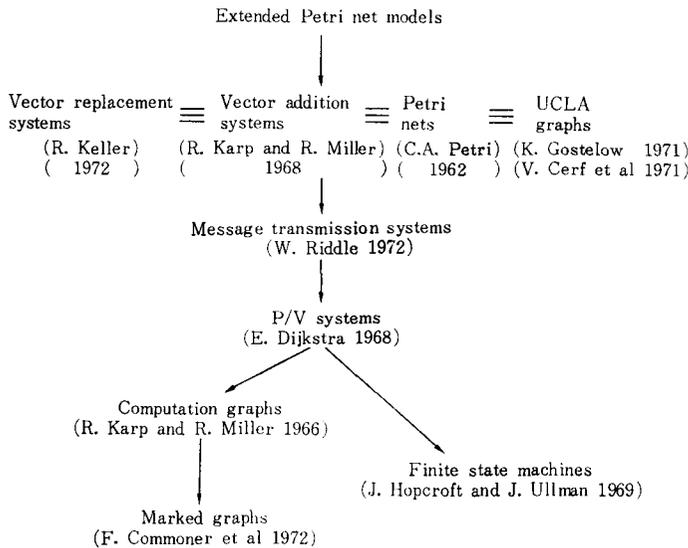
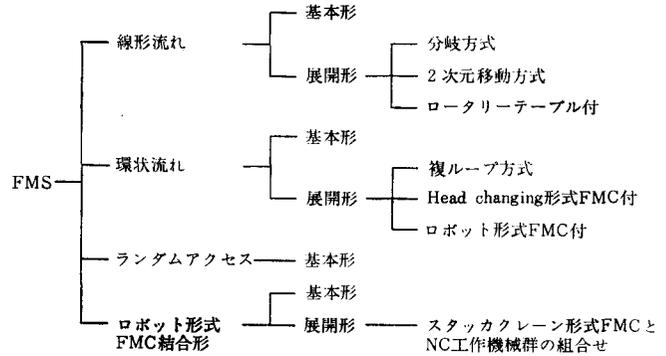


図2 並進事象図表現法

表2 FMSの部品搬送方式による分類



の基本的なペトリネット図に制約条件(S. Patil : 1970), 排他的OR (J. Noe : 1971), スイッチ (J. Baer : 1973), 抑止線 (S. Kosaraju : 1973), 優先度 (M. Hack : 1975) 等の諸点を加味したものである。今回適用したペトリネット図は基本的なもので、その構造は場所  $P$ 、遷移  $T$ 、入力  $I$ 、出力  $O$  から成り、 $C = (P, T, I, O)$  となる。場所  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\} (m \geq 0)$ 、遷移  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} (n \geq 0)$ 、 $P \cap T = \phi$ 。入力関数  $I : T \rightarrow PB$ 、出力関数  $O : T \rightarrow PB$  ( $P$  の添字  $B$  は Bags (多重集合) の意)。すなわち遷移を重視して、個々の遷移は入力、出力とも場所数が複数となってもよいペトリネット図である。

ペトリネット図の作成においては、状態遷移は瞬時に生起、消滅すると考え、正確に、かつ簡潔に表現しなければならない。簡潔にするために、主要な作動体である無人搬送車1台と機械7台について、場合分けを少なくするようにした。無人搬送車は10カ所のパレット置台を始点、終点として移動するが、ワーク送出处、機械部、加工済ワーク置場部の3エリアに群化し、それぞれS、M、Fエリアと名づけた。7台の機械はA P C装置の有無により、2群にまとめてとり扱うことにした。動作を規定するシナリオは状態遷移に着目してIF~THENの文型を用いると作成しやすい[12]。その結果、得られたペトリネット図が図3-1、図3-2である。場所数88、遷移数65で構成できた。シナリオは表3-1が遷移、表3-2が場所に関するものである。ソース  $t_1$  から始まり、シンク  $t_2$  で終了する。遷移入力が複数の場合、これらすべてが成立したときに遷移が可能となり、遷移出力状態となる。たとえば、遷移  $t_{17}$  では、無人搬送車がSエリアでのパレット積作業待ち状態  $p_4$  にあるときに、作業員も待ち状態  $p_7$  にあれば、遷移が生起し

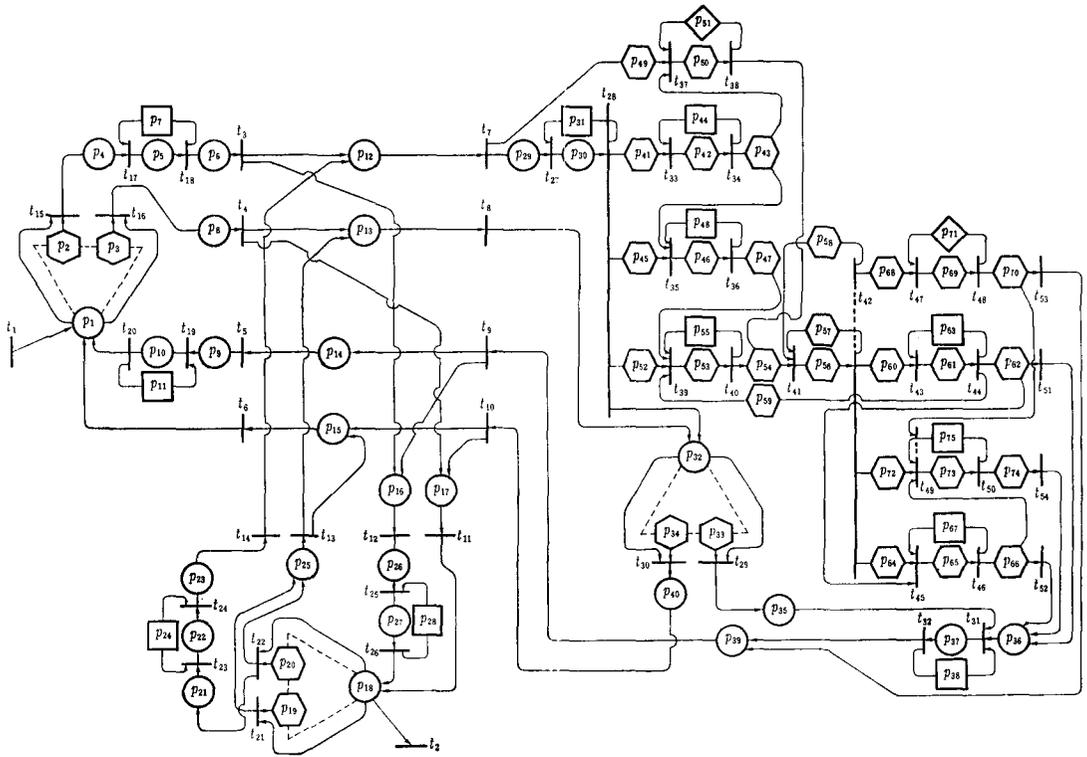
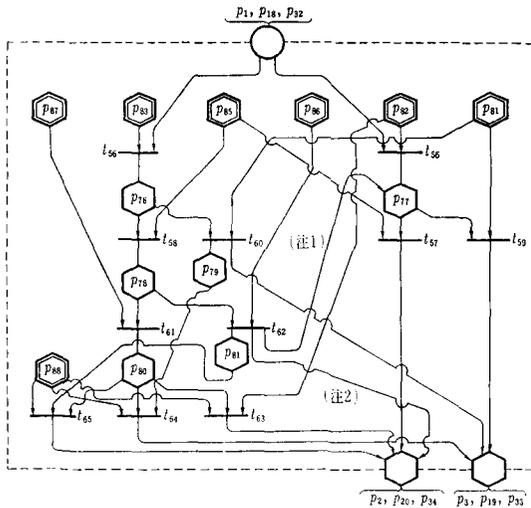


図 3-1 機械加工ショップのペトリネット図



(注1) ( $P_{32}, P_{33}, P_{34}$ )のみ  
 (注2) ( $P_1, P_2, P_3$ )と( $P_{18}, P_{19}, P_{20}$ )の場合  
 図 3.2 点線枠内の条件部内容

表 3-1 遷移内容説明

t 1	ワーク加工命令開始(ソース)	t 3	無人搬送車のパレット搭載でのSエリアからの出発
t 2	ワーク加工全命令完了(シンク)	t 4	無人搬送車のパレット不搭載でのSエリアからの出発
		t 5	無人搬送車のパレット搭載でのSエリアへの到着
		t 6	無人搬送車のパレット不搭載でSエリアへの到着
		t 7	無人搬送車のパレット搭載でのMエリアへの到着
		t 8	無人搬送車のパレット不搭載でMエリアへの到着
		t 9	無人搬送車のパレット搭載でのMエリアからの出発
		t 10	無人搬送車のパレット不搭載でのMエリアからの出発
		t 11	無人搬送車のパレット不搭載でのFエリアへの到着
		t 12	無人搬送車のパレット搭載でのFエリアへの到着
		t 13	無人搬送車のパレット不搭載でのFエリアからの出発
		t 14	無人搬送車のパレット搭載でのFエリアからの出発
		t 15	無人搬送車のSエリアでのパレット搭載決定
		t 16	無人搬送車のSエリアでのパレット不搭載決定
		t 17	無人搬送車のFエリアでのパレット積作業開始



- P 26 無人搬送車のFエリアでのパレット卸作業待ち状態
- P 27 無人搬送車のFエリアでのパレット卸作業状態
- P 28 Fエリア作業員のパレット卸作業待ち状態
- P 29 無人搬送車のMエリアでのパレット卸作業待ち状態
- P 30 無人搬送車のMエリアでのパレット卸作業状態
- P 31 Mエリア作業員のパレット卸作業待ち状態
- P 32 無人搬送車のMエリアでの空状態
- P 33 無人搬送車のMエリアでの積荷条件成立状態
- P 34 無人搬送車のMエリアでの積荷条件不成立状態
- P 35 無人搬送車の他の機械へ移動しパレット積作業待ち状態
- P 36 パレットの積作業待ち状態
- P 37 無人搬送車のMエリアでのパレット積作業状態
- P 38 Mエリア作業員のパレット積作業状態
- P 39 無人搬送車のMエリアでのパレット搭載静止状態
- P 40 無人搬送車の空状態でのMエリアから出発待ち状態
- P 41 工具の機械への取付作業待ち状態
- P 42 工具の機械への取付作業状態
- P 43 機械の工具取付状態
- P 44 Mエリア作業員の機械への工具取付作業待ち状態
- P 45 治具の機械への取付作業待ち状態
- P 46 治具の機械への取付作業状態
- P 47 機械の治具取付状態
- P 48 Mエリア作業員の機械への治具取付作業待ち状態
- P 49 NCプレートの機械への取付動作待ち状態
- P 50 NCプレートの機械への取付動作状態
- P 51 APC装置の機械へのNCプレート取付動作待ち状態
- P 52 ワークの機械への取付作業待ち状態
- P 53 ワークの機械への取付作業状態
- P 54 機械の取付状態
- P 55 Mエリア作業員の機械へのワーク取付作業待ち状態
- P 56 機械の加工状態
- P 57 機械の停止状態
- P 58 NCプレートに未加工ワーク取付状態
- P 59 パレット内にワーク存在状態
- P 60 加工済ワークの機械からの取外作業待ち状態
- P 61 加工済ワークの機械からの取外作業状態
- P 62 機械の加工済ワーク取外状態
- P 63 Mエリア作業員の機械から加工済ワーク取外作業待ち状態
- P 64 使用済治具の機械からの取外作業待ち状態
- P 65 使用済治具の機械からの取外作業状態
- P 66 機械の使用済治具取外状態
- P 67 Mエリア作業員の機械から使用済治具取外作業待ち状態
- P 68 NCプレートの機械からの取外動作待ち状態
- P 69 NCプレートの機械からの取外動作状態
- P 70 機械のNCプレート取外状態
- P 71 APC装置の機械からのNCプレート取外動作待ち状態
- P 72 使用済工具の機械からの取外作業待ち状態
- P 73 使用済工具の機械からの取外作業状態
- P 74 機械の使用済工具取外状態
- P 75 Mエリア作業員の機械から使用済工具取外作業待ち状態
- P 76 受入条件不成立下の送出条件検討状態
- P 77 受入条件成立下の送出条件検討状態
- P 78 送出条件不成立下のAPCワークパレット条件検討状態
- P 79 送出条件成立状態
- P 80 無人搬送車の動作不可条件成立状態
- P 81 APCワークパレット条件成立状態
- P 82 機械エリア受入側空条件成立状態
- P 83 機械エリア受入側空条件不成立状態
- P 84 機械エリア送出側パレット有条件成立状態
- P 85 機械エリア送出側パレット有条件不成立状態
- P 86 APC付機械による加工済パレット満載条件成立状態
- P 87 APC付機械による加工済パレット満載条件不成立状態
- P 88 次状態へ推移状態

て、出力であるパレット積作業状態  $p_5$  に移行する。機械の加工状態は  $p_{58}$  である。この図では主要な作動体である無人搬送車と機械に加え、補助的な作動体である作業員とAPC装置もまとめて示してあるので、作動体を区別するため、場所をそれぞれ、円形、六角形、四角形、ダイヤモンド形としている。

### 3. シミュレーションプログラムの構成

プログラムの全体の流れ図は図4である。サブルーチンプログラム21個とブロックデータを主プログラムが結合しており、作動体の動作について、1回ごとの開始、終了時刻を記録していく。動作対象であるワークに関する情報として、その加工命令項番号と種別コード、さらに必要に応じて個数を明示することにした。サブルーチンプログラム21個を機能別に群化して、入力初期化、作

動群選定, モニター, 作動体時間演算, 出力の5群に分けて, 相互関連を示したものが図5である。

入力初期化には回数や時刻を記録する変数の初期化とシステム定数であるブロックデータに加えて, 無人搬送車に関する移動地点間の距離と移動速度とから所要時間を算定する UNMCAR も含んでいる。

作動群選定は主要な作動体を無人搬送車と機械の2種とし, 補助的な作業員とAPC装置の動作を主要な作動体と連結してとり扱うために, 作動体群を形成した結果, 必要となるものである。作動体群は並進的現象を順序機械で演算していくための一対処法であり, 本プログラムの特徴の1つである。作動体個々の単位動作を複数個順序づけして, 群を形成した。機械に関しては, 1個のワーク加工の前後に補助的作動体が介在するが, 無人搬送車については, 多数の作動体群が考えられる。ここで, 図3-1のペトリネット図を活用する。S, M, Fの3エリアにおいて, 無人搬送車が空になった状態  $p_1, p_{s2}, p_{18}$  であるが, これら3状態のうちの一つが始点, その他の2状態の一つを終点とする移動を考える。空で移動

することを従属的移動と名づけることにすれば, 主体的移動は未加工ワークをSからMへ運ぶこと, 加工済ワークをMからFまたはS (APC装置付機械の場合に運ぶこと, さらに, APC装置付機械で加工されたワークは

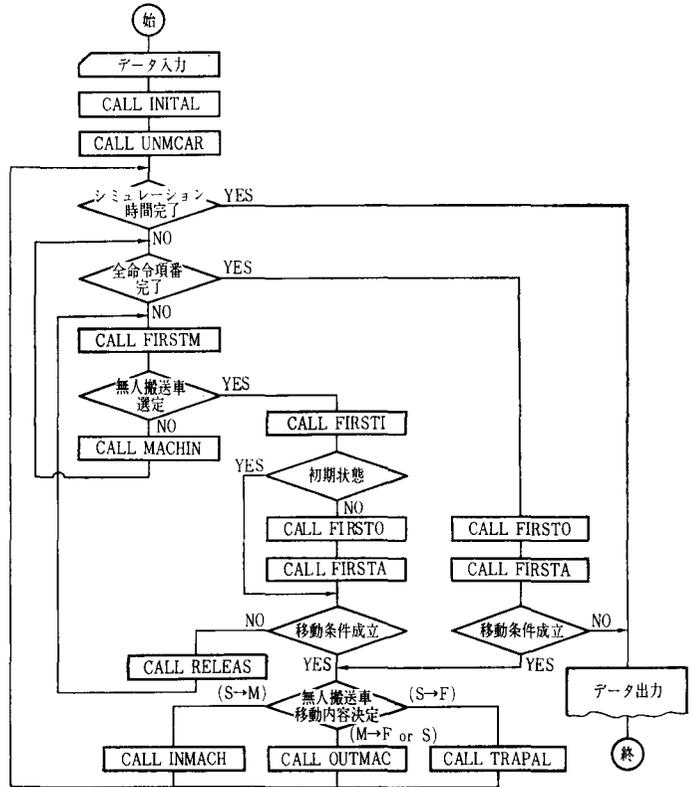


図4 プログラム全体流れ図

いちどSエリアでプレートから解体され, Sエリアでパレット1箱分の個数に達したときに移送可能となるからSからFへの移送の3種がある。ここで, さらに動作対象であるパレットの内容によって異なる場合を考えてみる。

と, SからMの他に, 工具を運ぶ場合のFからMへがある。したがって, パレットの内容も考慮してまとめると9組の作動群が得られる。

(場所の組合せは始点  $p_{18}$  → 終点  $p_1$  を除いた5組となる)

- (i) 工具をFからMへ(始点  $p_{18}$  → 終点  $p_{s2}$ )
- (ii) 治具をSからMへ(始点  $p_1$  → 終点  $p_{s2}$ )
- (v) ワークをSからMへ((ii)と同一)
- (vi) プレートをSからMへ((ii)と同一)
- (iv) 工具をMからFへ(始点  $p_{s2}$  → 終点  $p_{18}$ )
- (v) 治具をMからSへ(始点  $p_{s2}$  →

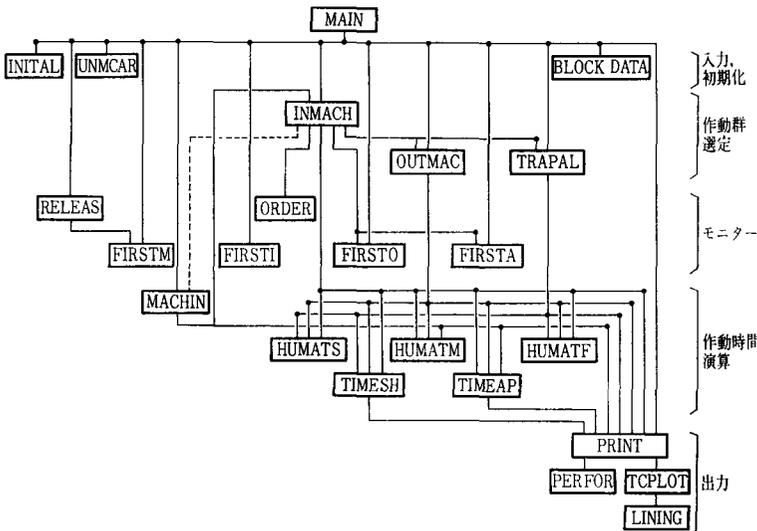


図5 サブルーチンプログラムの関連図

表 4 シミュレーション結果例 (無人搬送車)

* ACTIVITIES OF UNMANNED CAR *						
NO.	TRANSPORTATION		NO. OF ORDER	KINDS OF WORK	WORKING TIMES	
	ORIGIN	DESTINATION			STARTING	ENDING
1	8	10	19	0	0	0.6
2	10	7	19	1	1.6	3.0
3	7	8	19	0	3.0	4.5
4	8	7	19	2	5.5	7.0
5	7	8	19	0	7.0	8.6
6	8	7	19	71	9.6	11.1
7	7	10	16	0	11.1	12.5
8	10	6	16	1	13.5	14.7
9	6	6	16	0	14.7	16.0
10	8	6	16	61	17.0	18.3
11	6	10	13	0	18.3	19.5
12	10	5	13	1	20.5	21.5
13	5	6	13	0	21.5	22.6
14	8	5	13	2	23.6	24.7
15	5	8	13	0	24.7	25.8

* WAITING HISTORY OF UNMANNED CAR *			
NO.	OBJECT	WAITING TIMES	
		STARTING	ENDING
1	10	0.6	1.6
2	8	4.5	5.5
3	8	8.6	9.6
4	10	12.5	13.5
5	8	16.0	17.0
6	10	19.5	20.5
7	8	22.6	23.6
8	6	25.8	26.8

終点  $P_1$ )

- (ト) ワークをMからFへ(※)と同一)
- (チ) プレートをMからSへ(ク)と同一)
- (リ) ワークをSからFへ(始点  $P_1$ →終点  $P_{18}$ )

従属の移動はこれら9組の始点エリアへ現在停止しているエリアから移動するために必要となる。たとえば、(イ)の場合、無人搬送車がFエリアに在るのであれば、従属の移動は不要であるが、MエリアまたはSエリアに停止しているのであれば、Fエリアまで、空で移動することになる。したがって、無人搬送車の現在位置は常に明示できるように配慮してある。

これら9組の作動体群の選定には、モニターを参照する。無人搬送車か機械かを判定するモニターが FIRSTM、無人搬送車の移動のうち、終点をMエリアとする(イ)~(ニ)について条件成否を調べる FIRSTI、始点をMエリアとする(※)~(ク)について条件成否を見る FIRSTO、残りの(リ)に関する条件調査に FIRSTA があり、さらに、作業対象の内容に関する情報を付与する ORDER、全動作条件不成立のときに生起する硬直状態を解除する RELEASE の6個のサブルーチンプログラムがモニターの内容である。

作動体時間演算は機械、無人搬送車、S、M、Fエリアの作業員、APC装置の各々について、個々の動作の開始、終了時刻を逐一、演算し、かつ記録する。

出力は作動体ごとの基本的な動作記録である作動体時間演算の PRINT が主体である。この記録から、たとえば稼働時間率を算出する PERFOR やプロッターに作画

させるときの TC PLOT など必要な形態にデータ加工していくことができる。

プログラムの流れ(図4)は初期、定常、終期の3期になるが、初期は機械7台全部が稼働状態に入る以前の期間であり、終期はワーク加工命令番が全部加工完了した後の後処理期間である。初期状態において、機械を稼働状態に入れていく順序は FIRSTI により決定される。定常状態では、次の状態遷移が機械か無人搬送車かの判定は FIRSTM で行ない、機械のときには、機械動作時間を MACHIN で演算し、無人搬送車のときには、機械を対象とする FIRSTI と FIRSTO、および機械を対象としない FIRSTA で次に遷移するものを判定し、(イ)~(ニ)については INMACH、(※)~(ク)に関しては OUTMAC、(リ)の場合には TRAPAL が選択される。終期には、(※)~(リ)が対象となるから、FIRSTO と FIRSTA で判定し、作動体群の選定は OUTMAC と TRAPAL で行なわれる。

4. シミュレーション結果例

表4はシミュレーション結果例の一部で、無人搬送車に関するものである。動作時間を記録するために、表裏の関係にある不動作時間の記録も不可欠である。このためには、作動体対の先行関係を明確にしなければならない。整理すると、以下の9通りがある。

- 無人搬送車(空走行)→作業員(荷積)
- 同 上 (積走行)→同 上(荷卸)
- 機械(加工) →同 上(取外)

同上(同上) →A P C装置(取外)  
 作業員(取付) →機械(加工)  
 同上(荷積) →無人搬送車(積走行)  
 同上(荷卸) → 同 上 (空走行)  
 A P C装置(取付) →機械(加工)  
 同 上 (取外) →無人搬送車(積走行)

ここでは、10地点の内容は地点1~7が機械1~7に対応してMエリアとなり、地点8はワークおよび治具置場でSエリア、地点9は加工済ワーク置場、地点10が工具置場であり、Fエリアは地点9と10からなるものとしている。したがって、無人搬送車は第1動作が地点8から地点10へ空中で移動し、運転開始時刻を基点とする時刻表示により、動作開始時刻0.0分、動作終了時刻0.6分であった。時刻0.6分から時刻1.6分まで停止しており、次の第2動作が地点10から機械7へ、工具(ワーク種別は2桁で表示し、機械番号を2桁目で表わし、機械ごとのワーク種別は1桁目で表わすことにした。加えて、工具は1、治具は2とした。)を運んでいる。この例では、480分間のシミュレーションをしたが、無人搬送車は167回動作し、88回待機していた。このプログラムの特徴は等時間間隔でシミュレーション時間を進行させる代わりに状態遷移時刻を探索し、不等時間間隔で進行させている点である。その結果、480分間のシミュレーションを演算時間約100秒(Gibson mix 2.4  $\mu$ s の計算機)という非常に短い時間で実行することができた。なお、プログラムはFORTRANで書き、カード枚数約2500枚である。

## 5. まとめ

ペトリネット図を用いたモデル化において、場所と遷移の区別が時間の長短であり、遷移は瞬時の事象とされているが、瞬時という言葉のあいまいさ(Fuzziness)が問題となることが多い。状態遷移に着目することは「非同期的(Asynchronous)」な取扱いをすることにもなるが、この意味するところは、対立概念である「同期的」な場合には、一定単位時間を基本として時間の長さが有意であり、長い時間の事象に対し、かなり短い時間の事象を無視してもよいのに反して、きわめて短い時間の事象でも無視し得ない場合を含んでいることである。すなわち同期的な場合には、時間の長短が事象の選別基準になりうるが、非同期的な場合には、別の選別基準が必要となる。この選別基準は対象システムの理解とモデル化の目的を適確に把握することにより、個別に作成すべきものとする。またこのモデル化のさいに、理学的な意味の正確さと工学的な簡潔さの競合関係をいかに処理すべきかという重要な問題が出現するが、個別に作成された選別基準によって、この問題の解も得ることができる。

離散システムの状態記述には、有限状態システム(Finite state system)があり、応用されている[4]が、これは数字列の場合に限られている。これに対し、ペトリネット図は、図2の階層構成からも明らかのように、文字列の場合にも適用可能であり、拡張ペトリネット図を採用することにすれば、さらに適用範囲が広がるから、今後、多方面での活用が大いに期待される。

## 参 考 文 献

- [1] 長谷川健介：マークフロログラフとFAへの応用。計測と制御，22，11(Nov. 1983)，44~47
- [2] 市川惇信，小林重信：事象駆動型システムの表現と制御。計測と制御，21，10(Oct. 1982)，7~16
- [3] 市川惇信，小林重信訳(J. L. Peterson著)：ペトリネット入門，共立出版，1984
- [4] 小館英實，小林主一郎，藤井研一：生産命令項番の動的準最適処理ソーケンシングアルゴリズム—有限状態システムアプローチ—。日本OR学会論文誌，24，1(March 1981)，19~36
- [5] 小館英實，長田道昭，倉持健蔵：機械加工ショップ状態遷移表現へのペトリネット図の適用。日本OR学会昭和59年春季研究発表会アブストラクト集，(May 1984)，83~84
- [6] 松島俊章：ペトリネット。電子通信学会誌，66，1(Jan. 1983)，38~43
- [7] 奥山峻史：ペトリネットとその応用，bit(共立出版)，15，10(Apr. 1983)，42~50
- [8] Peterson, J. L. : *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice-Hall, 1981
- [9] Petri, C. A. : *Kommunikation mit Automaten*, Ph. D. Dissertation, Univ. of Bonn, Bonn, West Germany, 1962
- [10] 斉藤信夫訳：ペトリネット。bit(共立出版)，10，16(Dec. 1978)，99~127(原典 Peterson, J. L. : *Petri Nets. Computing Survey (ACM)*，9，3(Sept. 1977)，223~252)
- [11] 篠沢昭二，松島俊章：ペトリネットについて(1)，オペレーションズ・リサーチ，26，7(July. 1981)，383~393(その(2)はAug. 1981，その(3)はSept. 1981。
- [12] Vazsonyi, A. : *Geometry of Information Systems (II)*，*Interfaces (TIMS)*，8，2(Feb. 1978)，88~94
- [13] 山崎秀記：ペトリネットの理論と応用。情報処理，25，3(March 1984)，188~198
- [14] 吉田嘉太郎：FMSの現状について。システムと制御，26，10(Oct. 1982)，639~649