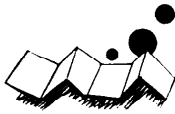


解説

生産設計の自動化†



岩田 一 明††

1. はじめに

CAD/CAM システムはフレキシブル生産システム (FMS), 産業用ロボット, 知能化センサと並んで, 1980 年代の生産革新の最重要技術として位置づけられ, 実用化が急テンポで進められている. CAD/CAM システムの実現にあたっては, CAD と CAM の真の有機的統合が求められるが, 現段階では未だ十分な汎用的システムが完成されるには至っていないと見ることが出来る. その主原因は度々指摘されるように, 「生産設計, 中でも工程設計がボトルネックとなっている」ことにあるものと思われる.

生産設計は研究分野によって, 「生産能率と経済性を向上させるように機能設計したものを修正する設計」と製品設計に近い解釈をとる場合と, 「実際の製品を生産するのに必要な情報を生成する設計」とより生産に近く, かつ広義の把え方をする場合がある. ここでは後者の解釈に重点をおく形で, 「製品設計や部品設計からの出力情報や図面にもとづいて, 製品を生産するための技術的情報を生成する過程」と定義することとする. この生産設計は生産工程設計と呼ばれることも多い.

本稿では, 生産設計における情報の流れと CAD/CAM システムのかかわり, 生産設計のうち, とくに工程設計の基本的な考え方, 代表的なコンピュータ採用工程設計システムの開発例を中心に, 自動化の動向を概説してみたい.

2. 生産設計における情報の流れ

生産システムは図-1 に示すように製品計画システム, 技術情報処理システム, 管理情報処理システム, 生産制御システム, 生産プロセスシステムから構成され, 生産設計は技術情報処理システムの中核に位置す

る. また, 生産設計は製品設計, 生産制御システム, 管理情報処理システムとかかわり合っている.

生産設計は工程設計と作業設計に大別される. 工程設計は, 製品, 部品や素材に関する設計情報から生産方法, 生産順序, 生産機械の種類・数量・順序など, 全般的な生産工程の情報を求めることである. 他方, 作業設計は工程設計で得られた情報にもとづいて, 各作業工程で行われる詳細な技術情報を得ることである. これら設計の結果, 生産機械, 生産用工具, 治具・取付具などの種類と数量, 生産機械の稼動条件, 工具径路データなどの情報が求められる<sup>1)</sup>.

いま, 機械部品の加工を主対象とした場合の生産設計における情報の流れは図-2 のようにまとめられる. 図-2 の流れの中で, 自動化は作業設計の最下位レベル, すなわち, 工具径路の決定から始められた. その緒は APT (Automatically Programmed Tools) と呼ばれる NC プログラミング言語の開発であり, その名はあまりにも有名である.

その後, 加工条件の決定, 工具の選択, 工程内の作業手順の決定と, 順次上位レベルを包含した自動プロ

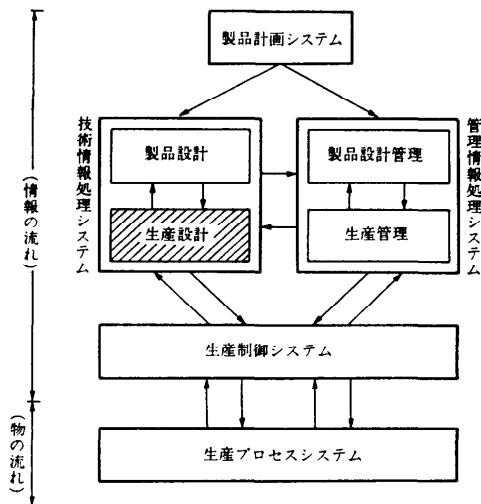


図-1 生産システムにおける生産設計の位置づけ

† Computer-Aided Production planning by Kazuaki IWATA (Kobe University).

†† 神戸大学工学部

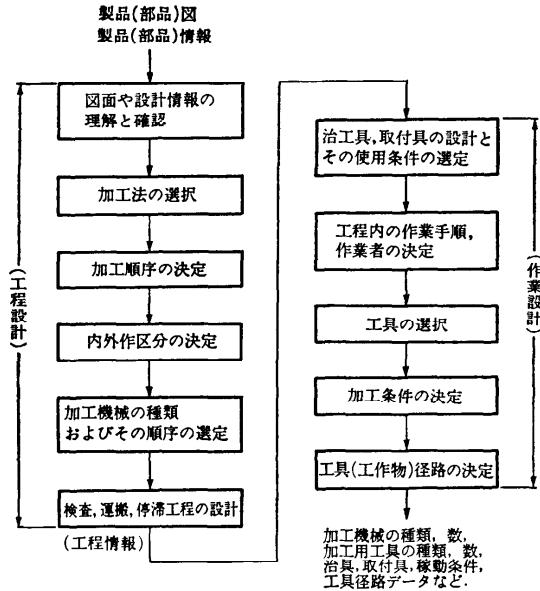


図-2 機械部品の生産設計における情報の流れ

プログラミングが開発された。EXAPT, MITURN, AUTOPLAN などはその代表的な汎用自動プログラミングの例である。他方、専用の自動プログラミングは各企業において枚挙にいとまのないほど作成され、実用化された。

しかし、工程設計の分野は熟練者のノウハウが深くかかわっていることもあって自動化の歩みは一步遅れている。以下、工程設計の自動化を中心に解説を進めよう。

### 3. 自動化の基本的な考え方

工程設計の自動化へのアプローチは、表-1 に示すように、(A) デシジョンテーブル方式、(B) 創成方式、(C) 準創成方式、の3種類に大別できる。

デシジョンテーブル方式は過去の経験を集大成したデシジョンテーブルと GT (グループテクノロジー) の概念に準拠するもので、最も現実的かつ堅実な方式である。従来は主として (a) の流れがとられたが、CAD が進歩するにつれて、CAD で用いた情報から GT コードを自動発生させ、その GT コードに対して工程設計を自動的に出力する (b) の流れがとられつつある。この方式では GT コードと加工順序、加工法と加工機械間のデシジョンテーブルをどの様に構成させるか、またどの様なアルゴリズムに従って工程探索を行うかが重要な点である。

創成方式は設計情報に対して生産の公理を適用し、できる限り最適な加工法や加工機械を自動的に創成する方法である。この方法は表中(a), (b)に示す様に二通りの流れがある。方式自体は理論的ではあるが、人間の認識、思考、判断といった能力のアルゴリズム化が極めて困難な現状を考えると実現は容易ではない。

準創成方式は創成方式とデシジョンテーブル方式の折衷的な方式である。図面または CAD 情報から加工機能をコーディングしたり、抽出したりする段階までは人間の手を借りたり、デシジョンテーブルを用いる。しかし、一たん加工機能が認識されると、以後は創成的に工程を自動出力する。この方法では加工機能より加工順序、加工機械順序を定める論理の構築が重要課題である。

以上の3方式のうち、最近の中心となる考え方は準創成方式である。準創成方式の工程設計を構築する上で留意したい技術には次のものがあげられる。

- (1) 工程探索への人工知能の手法の応用
- (2) 工程決定規則の作成
- (3) 加工形状要素と加工単位の対応関係の分析

表-1 工程設計自動化の基本的な考え方

		[細線: マニュアル] [太線: 自動化]
<b>A. デシジョンテーブル方式 (バリエーション方式)</b>		
(a)	図面 → 部品、加工面の形態及び技術情報のコーディング (GT 分類法の適用)	GT コードと加工順序、加工法と加工機械間のデシジョンテーブル → 工程設計の出力
(b)	CAD 情報 → GT コードの自動発生	→ 工程設計の出力
<b>B. 創成方式 (ジェネラティブ方式)</b>		
(a)	図面 → 図面形状の幾何及び技術情報のコーディング	形状情報より加工順序、加工機械順序を定める論理 → 工程設計の出力
(b)	CAD 情報 → 生産にかかわる形状情報の自動抽出	→ 工程設計の出力
<b>C. 準創成方式 (セミジェネラティブ方式)</b>		
(a)	図面 → 加工面の加工機能のコーディング	加工機能より加工順序、加工機械順序を定める論理 → 工程設計の出力
(b)	CAD 情報 → 加工機能情報の自動抽出	→ 工程設計の出力

```

**** RULE NO. 9 ****
**** CONDITION-PART OF RULE ****
IF          FORM IS CYLINDER
AND        HOLE IS 'ROUGH' FINISHED
OR         HOLE IS 'FIN' FINISHED
AND        HOLE IS THROUGH HOLE
AND        MAX TOLERANCE OF DIA- MIN TOLERANCE OF DIA >= 0.2
AND        DIA NOMINAL > 50.0
AND        DIA NOMINAL/ DEPTH NOMINAL >= 4

THEN

**** PROCESS-PART OF RULE ****
MAJORWORD: MILL
DIAMETER  : DIA NOMINAL
DEPTH     : DEPTH NOMINAL+0.05* DIA NOMINAL
RDEPTH   : DEPTH OF UPPER HOLE-1.0
FEED      : 200
SPEED    : 50.0
TOOL1    : 3
TYPE      : 2

```

```

**** PREVIOUS STATE OF HOLE ****
// SHAPE OF SIDE // CYLINDER
// DIA NOMINAL // 25.0
// MAX // 0.5
// MIN // 0
// GROOVE // DON'T EXIST
// ROUGH'SS OF SIDE // ROUGH(*)
// DEPTH NOMINAL // DEPTH NOMINAL
// MAX // 0.5
// MIN // -0.5
// FLAT BOTTOM // FALSE
// THROUGH HOLE // TRUE

```

図-3 工程設計のためのプロダクション・ルール例 (松島らによる)

注) if; 形状の記述, then; 加工法→前加工形状

(1) 工程探索への人工知能の手法の応用

工程設計は多くの知識と経験を参照して行われるから、システムの開発にあたってはこれら知識が自然な形で組み込まれるとともに知識の変化にも適応していかなければならない。このことから、人工知能の手法を適用した「知識ベースのプログラム」への関心が高まっている。

これまでの試行例としては、「プロダクション・システム」と「 $\alpha$ - $\beta$  探索」を用いたものがある<sup>2),3)</sup>。ここでは、「IF-THEN」ルールを用いて加工形状と加工工程を関連づけている。図-3には大きな直径で浅い穴を加工する場合のルールの例を示す。これらルールは対話的に修正、追加、削除することが可能である。

プロダクション・ルールにもとづいて加工法が一つ

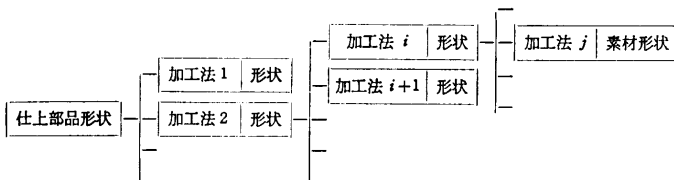


図-4 最適加工工程を探索する「木」の構造 (松島らによる)

表-2 工程決定規則における工程公理と加工公理の例

(a) 工程公理	Rough turn external features with a lathe if EI is true. (もし、条件 EI が真ならば、旋盤で外周旋削を行う。)
(b) 加工公理	TS with insert CS 203-2 and holder CS 103-7 (if) shoulder=90°; Finish>16; material is 4340. (肩部角度が 90°, 所定の仕上面あらさ 16 以上、材質が合金鋼の場合、切削工具インサートは CS 203-2、ホルダには CS 103-7 を使用する。)

選択されると、加工後の形状に演算が行われて加工前の形状に変化するが、その演算にともなってデータベースの内容も変化する。一連のプロダクションルールを最終仕上形状に適用することによって図-4 の様なプロセスを経て素材形状が求められ、すなわち「木の探索」が行われると、その結果として加工シーケンスを得ることができる。

(2) 工程決定規則の作成

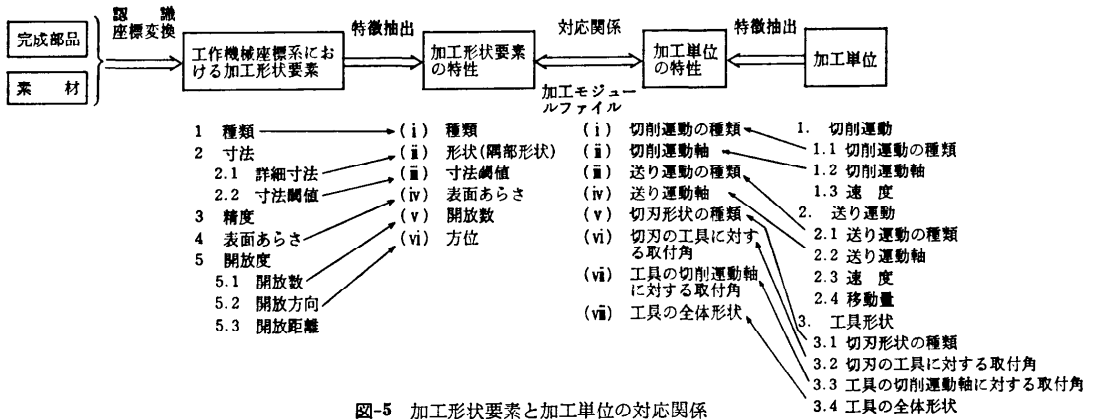
工程の選定に際しては、各企業のもっている加工法、工作機械、ツーリングなどに関する情報を活用するため、工程設計用専用言語による工程決定規則が種々、作られている。いま、代表例をユナイテッド・テクノロジー社(アメリカ)の場合について見ると、表-2 の様な工程公理と加工公理が含まれている<sup>4)</sup>。工程公理は作業法の探索に、他方、加工公理は特定の切削ステップや工具の決定に用いられる。

どの様な決定規則を作成するか、その際どの様な言語を用いるかによってシステムの特性は異なってくることは言うまでもない。

(3) 加工形状要素と加工単位の対応関係の分析

(1), (2)でのべたルールや axioms と呼ばれる公理を作成するには、加工形状要素(所定の寸法精度、形状精度、表面精度をもった平面、溝、段などのように、加工に特有な形状)を創成するための工作機械の運動や工具形状(これら要素の一組の組合せを加工単位と呼ぶ)の対応関係を十分に分析しておくことが重要である。

加工形状要素と加工単位の関係の例を図-5に示す<sup>5)</sup>。図より、加工形状要素を特徴づけるパラメータとしては、種類、付属形状(接続形状)、寸法しきい値、表面あらさ、開放数、方位の6項目があげられる。他方、加工単位を特徴づけるパラメータとしては、切削運動の種類、送り運動軸、送り運動の種類、送り運動軸、切刃形状の種類、切刃の工具に対する取付角、工



具の切削運動軸に対する取付角，工具の全体形状の 8 項目が抽出される。

これら選択された加工形状要素と加工単位の特性を示すパラメータとの関係は一般にファイルの形に整理される。

#### 4. 代表的なコンピュータ援用工程設計システム

従来から公表されているコンピュータ援用工程設計システムを整理すると表-3 のようになる。表は前章でのべた基本的な考え方にに基づき，かつ筆者の目にとまったものに限られていることをお断りしておきたい。

表から一目瞭然なように，ここ 3~4 年の開発の中心は準創成方式である。以下，準創成方式の二，三のシステムを見てみよう。

##### (1) XPS (Experimental planning system)

XPS は 1980 年から CAM-I (Computer Aided Manufacturing-International) において開発が進められている準創成形・対話形のシステムである。図-6 に XPS-N システムの全体概念図を示す。システムは図に見られるように，モード制御，ファイル管理/質問プロセッサ，デジジョンテーブルプロセッサなど多数のモジュールと，幾何形状データベース，工具データベース，デジジョンテーブルファイルなど種々のデータベースから構成されている。

表-3 コンピュータ援用工程設計システムの例

基本的な考え方	システム名	開発場所	開発年(発表)
デジジョンテーブル方式	1. GT 手法による工程，標準時間の自動設定システム	日立製作所	1968
	2. AUTOPROS (automated process planning system)	NAKK (ノルウェイ)	1969
	3. CAPP (computer-aided process planning system)	IMSS 研究会 (神戸大，京大，大阪府大)	1972
	4. 機械加工自動方案見積システム	三菱重工	1974
	5. CAM-I CAPP (CAM-I automated process planning)	CAM-I (国際的共同開発機関)	1975
	6. CMS (the optimal planning of computerized manufacturing systems)	Purdue Univ. (アメリカ)	1975
創成方式	1. decision of machining sequence by functional analysis of machine tool	東大	1973
準創成方式	1. CAPSY (computergestutztes arbeits-plannungs-system)	Berlin T.H. (西ドイツ)	1974
	2. CMPP (computerized manufacturing process planning)	United Technologies Co. (アメリカ)	1976
	3. CIMS/PRO (computer-aided integrated manufacturing system/production planning)	神戸大	1976
	4. API (automatically processing of manufacturing information system)	東大，三菱電機	1977
	5. APPAS (automatic process planning and selection)	Purdue Univ. (アメリカ)	1977
	6. AUTAP	Aachen T.H. (西ドイツ)	1978
	7. semi-generative process planning system	Budapest Tech. Univ. (ハンガリー)	1979
	8. AUTOTECH	Technish Hochschule "Otto V. Gueriche" (東ドイツ)	1979
	9. XPS-1 (experimental planning system one)	CAM-I (国際的共同開発機関)	1981
	10. TOM (technostructure of machining)	東大	1982

このシステムの特徴は、デシジョンテーブルに入っている論理を処理することによって工程計画を出力することで、デシジョンテーブルはGTを応用してパートファミリーごとにまとめられている。また、部品の特徴はデシジョンテーブルを集合させること(set oriented decision table の概念と呼ばれる)によってプロセッサを用いて調べる。

XPS-N の第一段階のシステムとして現在 XPS-1 が開発されつつあり、図-7 にそのシステム構成を示す<sup>6)</sup>。このシステムの主要構成要素は、工程設計実行、XPS 制御、デシジョンテーブルプロセッサ、デシジョンテーブルドライバ、質問、データ定義/辞書、データ管理制御から成り立っている。

工程設計実行はシステムを稼働させるための入力点であり、XPS 制御はユーザがコマンドを入力する制御点である。XPS 制御では CRT に表示した質問項目に対してユーザがコマンドを入れ、次の制御へ移る。デシジョンテーブルプロセッサはデシジョン・ライブラリやファイルから必要なテーブルを探索・処理し、工程選定、分類コード、編集/シーケンスの各モジュールを処理する。

デシジョンテーブルドライバはデシジョンテーブル処理、質問/デシジョンインタフェース、アクション処理の3機能を行う。データ定義/辞書及び質問はデシジョンテーブルのプロセッサとドライバを支援する。また、データ管理制御はデシジョンテーブル、部品番号情報データベースの生成とメンテナンスを行う。

このシステムのケーススタディとしては回転形状部品と板金部品が検討されており、得られた結果はねじ

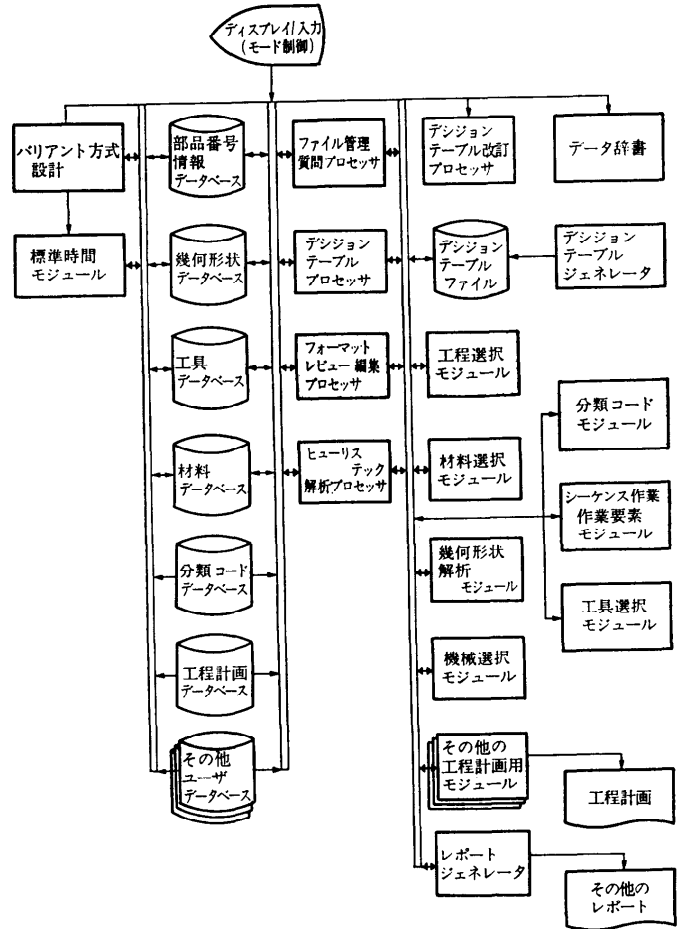


図-6 XPS-N システムのトータル概念図 (CAM-I)

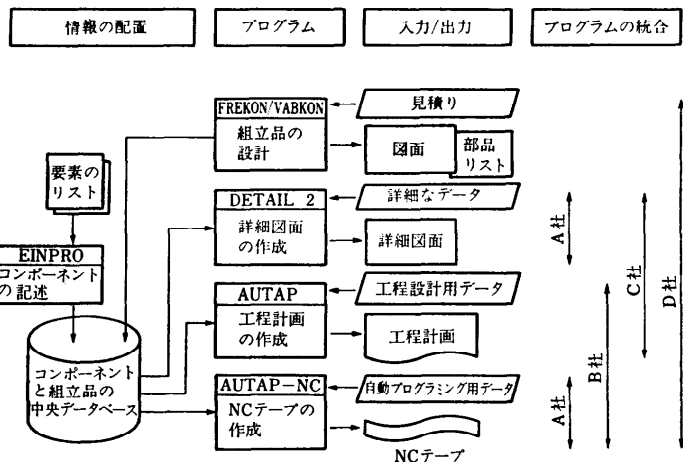


図-8 コンピュータ援用生産計画書作成システム (アーヘン工大)

加工以外ではほぼ現実の工程に近いことが確認されたとのことである。1982年以降は工作機械データベース及び工作機械の選択モジュールの作成が進捗中である。

(2) AUTAP<sup>7)</sup>

AUTAP は西ドイツのアーヘン工科大学で開発された工程設計用システムで、この他、組立設計用 (FREKON/VABKON)、作図用 (DETAIL 2)、NC テープ作成用 (AUTAP-NC) の各システムとともに図-8 に示すような CAD/CAM 一貫システムを構成する。

AUTAP の基本構成は図-9 に見るように完成部品形状の情報、ロットサイズ、納期などの情報を入力して、加工手順及び作業データの処理を準創成的に行うシステムで、これまで主として軸対称部品並びに板金部品が取扱えるようになっていた。完成部品の形状情報は形状記述システム EINPRO により記述され、これが CAD/CAM システムの共通のデータベースとなる。EINPRO では部品形状を構成する要素を主要素、副要素、技術要素の3種類に大別され、技術要素は主要素と副要素に付加される。

加工手順の決定はモータ軸、モータ軸受キャップ、板金部品など部品グループに対して準備された加工工程の作業ネットワーク(図-10)にもとづいて決定される。図において各箱には切断、旋削など一つの作業が対応しており、このネットワークは各部品グループの加工に必要なすべての作業が含まれている。ネットワークの選択は、W、A で示された選択基準にもとづいて行われる。一たん加工手順が求められると、各作業で使用する工作機械、作業時間が決定され、また、作業指示書が作成される。

(3) CIMS/PRO (Computer-aided integrated manufacturing system/Production planning)

CIMS/PRO システムは部品の形状記述用言語 CIMS/DEC 又は CAD 用 3次元形状モデリングシステム CIMS/MODE に基づいて準創成方式により、機械部品の切削加工における生産工程設計を行うためのプロトタイプシステムである。ここでは CIMS/MO-

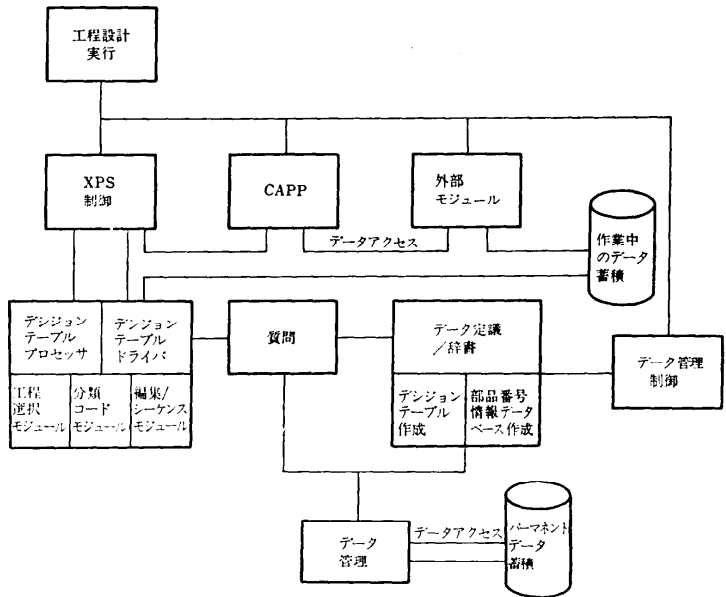


図-7 XPS-1 システムの構成 (CAM-I)

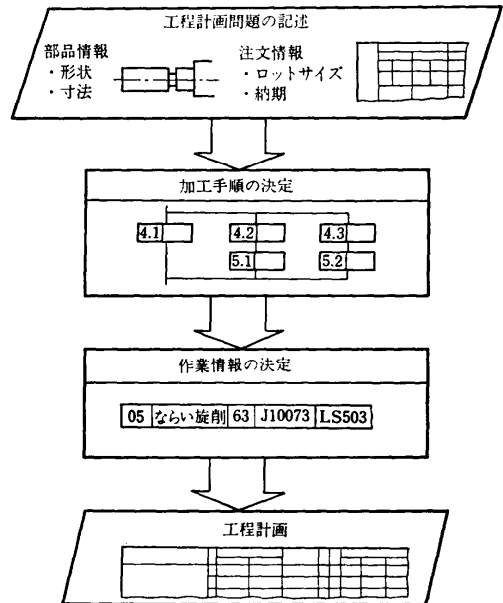


図-9 AUTAP システムの構成 (アーヘン工大)

DE により完成部品形状及び素材形状を表現し、それより工程設計を出力する場合を対象とする。

システムの基本構成は図-11 に示すように、

(a) 入力された完成部品と素材材の形状情報から、機械加工により創成すべき面の認識

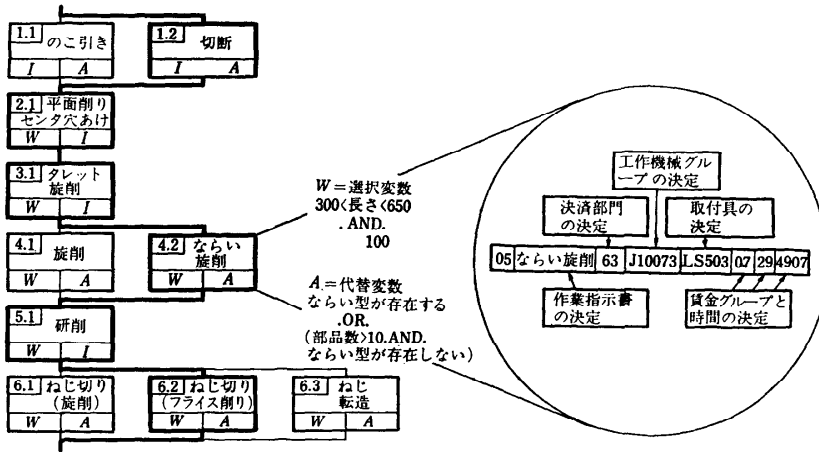


図-10 加工程の作業ネットワーク (アーヘン工大)

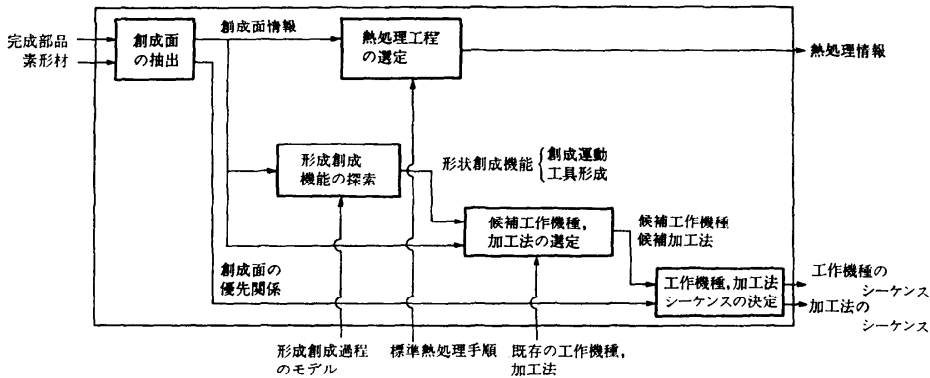
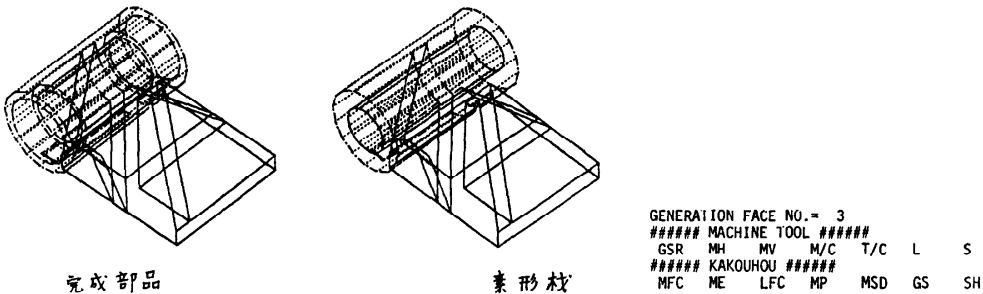
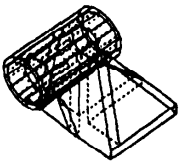




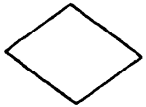





図-11 CIMS/PRO システムの構成






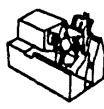

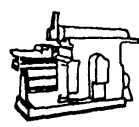


(a) CIMS/MODE によるモデリング (d) 創成面 No. 3 の可能工作法  
 図-12 CIMS/PRO における工程設計例 [(b), (c)は次頁]

- (b) 認識された創成面を加工できる形状創成機能の探索
- (c) 形状創成機能を実現できる工作機械、加工法の探索
- (d) 加工すべきすべての創成面に対して、適切な加工手順及び工作機械のシーケンスの選定
- (e) 熱処理工程の選定の5プロセスから成立っている。

	<p>GENERATION NO. 1 HEIJEN CASE 2 (A2) AREA= .2663D+03 FACE NO. 1 KAIHO-DO= 1 KAIHO-KYORI= 1.0000D+04 ARASA(R)= 189</p> 	<p>GENERATION NO. 2 HEIJEN CASE 2 (A2) AREA= .2663D+03 FACE NO. 18 KAIHO-DO= 1 KAIHO-KYORI= 1.0000D+04 ARASA(R)= 289</p> 	<p>GENERATION NO. 3 HEIJEN CASE 1 (A-) AREA= .4409D+03 FACE NO. 51 KAIHO-DO= 0 KAIHO-KYORI= 1.0000D+04 ARASA(R)= 139 SEIDO(FL)=12155</p> 
<p>GENERATION NO. 4 HEIJEN CASE 1 (A-) AREA= .4409D+03 FACE NO. 52 KAIHO-DO= 1 KAIHO-KYORI= 1.0000D+04 ARASA(R)= 139</p> 	<p>GENERATION NO. 5 HEIJEN CASE 1 (A-) AREA= .2062D+04 FACE NO. 53 KAIHO-DO= 0 KAIHO-KYORI= 1.0000D+04 ARASA(R)= 99</p> 	<p>GENERATION NO. 6 UCHIGAWA ENTOUNEN CASE 1 (--) AREA= .1199D+04 ARASA(LD)= 0</p> 	<p>GENERATION NO. 7 UCHIGAWA ENTOUNEN CASE 1 (--) AREA= .1299D+04 ARASA(LD)= 0</p> 
<p>GENERATION NO. 8 UCHIGAWA ENTOUNEN CASE 1 (--) AREA= .2151D+04 ARASA(LD)= 0</p> 			

(b) 創成面の抽出

<p>GENERATION FACE NO. 3</p> 	<p>MACHINE TOOL =GR</p> 	<p>MACHINE TOOL =PH</p> 	<p>MACHINE TOOL =PU</p> 
<p>MACHINE TOOL =R/C</p> 	<p>MACHINE TOOL =T/C</p> 	<p>MACHINE TOOL =L</p> 	<p>MACHINE TOOL =S</p> 

(c) 創成面 No. 3の運動可能工作機械



このシステムは、(i)工作機械の形状創成機能を表現する数学モデルを基準にしているため、現存する加工法や工作機械のほか、新規の加工法や工作機械にも対応できること、(ii) CAD と一貫したシステムになっていること、(iii)できる限り創成方式に近いアプローチをとっていること、などの特徴をもっている。

いま、このシステムによる処理例を図-12 に示す。

## 5. おわりに

生産設計の自動化は CAD/CAM システムを構築する上で克服しなければならない一つのハードルである。従来はともすると NC 加工における工具径路の自動決定をもって CAM とする風潮もあったが、次第に生産設計を含めた本来の CAM に対する関心が高まってきた。コンピュータ援用生産設計システムの開発例の報告はこれまで決して多いとはいえない。しかし、CAM-I を中心とする国際的共同プロジェクトが活発な動きを見せるなど、本格的な実用期は近いものと思わせるに十分な動きが随所に見うけられる。

生産設計の自動化には、従来、熟練者や経験者がもっていたノウハウや経験を公理の形に凝集させるとともに、新しい知識の追加や従来の知識の修正・変更といったことが容易に行える考え方や手法が必須である。このため、従来、人工知能研究の分野で取扱われ

ていた諸成果が広範囲に導入されることになるものと思われる。

## 参 考 文 献

- 1) 岩田, 沖野, 佐田他: 生産システム学, p.128, コロナ社, 東京 (1982).
- 2) 松島, 岡田, 佐田: 人工知能の手法を用いた CAD/CAM の統合化, 昭和 57 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, pp. 19-21 (1982).
- 3) Matsushima, K., Okuda, N. and Sata, T.: The Integration of CAD and CAM by Application of Artificial-Intelligence Technique, Annals of the CIRP, Vol. 31, No. 1, pp. 329-332 (1982).
- 4) Mann, W. et. al.: Computerized Production Process Planning, United Technologies Co. Report R 76-942625-14 (1977).
- 5) (1)と同じ, p. 174.
- 6) CAM-I: The Detailed Conceptual Design of an Experimental Planning System, XPS-1 (1981).
- 7) Eversheim, W. and Fuchs, H.: Integrated Generation of Drawings, Process Plans and NC-Tapes, Advanced Manufacturing Technology, North-Holland Publishing Co., pp. 303-313 (1980).

(昭和 57 年 9 月 14 日受付)

