

生産管理におけるAIアプローチ

伊藤 謙治

1. はじめに

今日生産活動をとりまく環境はめまぐるしく変化し、これを円滑に、効率よく計画、管理することを目的とする生産管理は、非常に複雑で困難な状況になっている。この背景としては、次に示すような理由が挙げられる。

1. 管理の対象となるシステムの構造が複雑である。生産管理においてはその情報帯域により、戦略 (strategic) レベル、戦術 (tactic) レベル、運用 (operational) レベルといった垂直的關係が存在し、それぞれ複雑に関係しあっている。また、個々の製造工程、さらに資材調達、生産、物流管理などといった水平的關係も存在し、これらも問題を複雑にしている。
2. ここで対象となっている問題は悪構造 (ill-structured) なものが多く、それを分析、解明する手段、手法が確立されていない。これらの問題は構造が複雑であるだけでなく、問題自体がよくわかっていない場合も多くみられる。
3. ニーズの多様化により、これに対処するための弾力的な生産が望まれている。
4. 変化の速度が非常に速く、それに追従するのが困難である。
5. 生産に対して数多くの制約が存在する。さらに、管理の目標自体が多数あり、それらが互いに影響をおよぼしあっている。

このような現在の生産状況から、以下に示す各項目が現在の、そしてこれからの生産管理に求められている。

- 生産の各階層を統合したグローバルな管理…トータル・システム化 (Total)
- 目に見えるわかりやすい管理…視覚化 (Visual)
- 弾力的な生産、問題解決…柔軟性 (Flexible)
- 素早い対応…リアルタイム処理 (Real Time)

このような現実問題に対する生産管理のアプローチとして、近年 AI (Artificial Intelligence; 人工知能)、およびエキスパート・システム (expert system) が脚光を浴びている。ここ数年の間に、スケジューリング、工程管理などの生産管理に関する数多くの分野で、エキスパート・システムが構築されている [13]。

従来 OR 的アプローチが、専門家の問題解決の方法が必ずしも最適なものではない、という立場に立っているのとは対照的に、エキスパート・システムは専門家の問題解決の方法を積極的に容認している。すなわち、エキスパート・システムとはその領域を専門とする管理者の知識を利用して、専門家と同様の過程による問題解決を行なうものである。そのため、従来機械 (コンピュータ) により解くことのできなかった戦略的意思決定のような情報帯域の高いレベルの問題に対しても、その知識さえ獲得することができれば、解決が可能である。

この方法は専門家が存在する範囲において、生産管理のすべての階層の問題を解決する潜在的能力をもち、これら個々の問題解決を効果的に統合することにより、グローバルな管理が可能となる。また、このような方法は機械特有の方法による問題解決ではなく、人間の常日頃用いている方法による解決であるので、柔軟な、わかりやすい問題解決、あるいは管理が期待できる。

エキスパート・システムだけでなく、AI の他の手法も生産管理に利用されている。その代表的な手法として探索 (search) 手法 [14] が挙げられる。探索手法を生産管理の問題に応用した代表的な例としては、ISIS [3] というジョブ・ショップ・スケジューリング・システムがある。スケジューリング問題に関してはほかにも、探索を利用して解決しているものが数多くある [2, 8, 11, 12]。スケジューリングのほか、ルーティング問題への適用 [1] など、さまざまな生産管理の分野に利用されている。

探索手法の特徴としては、解法の効率化が挙げられる。数式で定式化された問題だけでなく、さまざまな問

いとう けんじ 東京工業大学 経営工学科

〒152 目黒区大岡山 2-12-1

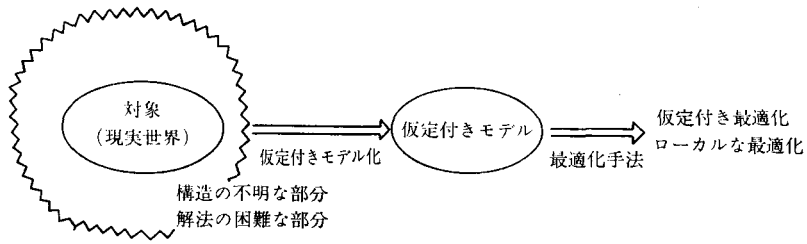


図1 解法指向型アプローチ

題に適した効率のよい解決技法が提案されている [5].
 このような方法を高速なコンピュータで実現することにより、効率のよい素早い問題解決が期待できる。

本稿は現実の生産管理問題に対する解決といった観点に立ち、AI手法を応用した問題指向型アプローチについて論ずる。ここではさらに、生産管理問題の例としてジョブ・ショップ・スケジューリングをとりあげ、上記アプローチを適用したシステムを紹介する。

2. 生産管理問題へのアプローチ

2.1 解法指向型アプローチ

生産管理問題とは、対象とする現実世界をモデル化し、そのモデルをさまざまな手法を用いて解くことである。ここでは、現実世界を的確に表現するモデル化の問題と、そのモデルを簡単に、よい解を求める解法（アルゴリズム）の問題の大きく2つの内容が含まれている。

従来の生産管理研究の多くは、後者の解法の問題に焦点が当てられていたと思われる。最適化手法を用いた解法指向型生産管理研究のアプローチは、図1に示すように、対象とする現実の問題に対して、構造の不明な部分、または解法にさいして困難な部分を、解法の都合に合わせた“仮定付き”モデルを対象としていた。この仮定が現実の生産状況にマッチしていない、あるいは現実社会の現象を記述するにはあまりにも単純すぎる、といったことが数多く見受けられる。すなわち、この種の研究ではモデル化の問題は重視しておらず、その多くはこのようにして構築したモデルに対して最適化手法を用い

て解く。この解は仮定付きモデルの最適解（optimal solution）ではあるが、現実問題に適用すると必ずしも最適解とはいえない。さらに、実行可能解（feasible solution）ですらないといった場合もある。

このアプローチの弱点としてはさらに次のようなことも考えられる。第1章でも述べたように、現実の生産管理システムは垂直的、および水平的関係において、数多くの階層、および工程で形成され、これらが複雑に関係しあっている。このアプローチで導かれた解はローカルな最適解である。生産管理システムを構成する複数の工程、機能を個々に、ローカルに最適化したとしても、システム全体としては最適でないことは明らかである。

2.2 問題指向型アプローチ

第1章で述べた現実社会での生産管理の課題と、前節で述べた解法指向型生産管理のアプローチの問題点から顧み、新しい問題指向型生産管理アプローチは以下のようにまとめられる。

まず、現実にとぐわなない仮定にもとづく最適解より、実際の問題点を正しく反映した形での実行可能解の方が、多くの場合は有用であることを認識する必要がある。そのためには、図2に示すように、現実社会の問題を注意深く分析し、その問題の構造を同定するフェーズ（構造化フェーズ）と、その構造のもとに解を求め、意思決定を行なうフェーズ（意思決定フェーズ）に明確に区分する必要がある [6]。ある大手鉄鋼メーカーの製鉄所では、生産管理システムに対して、“業務の論理”と“解法の論理”という言葉を用いて、これらのフェーズを明

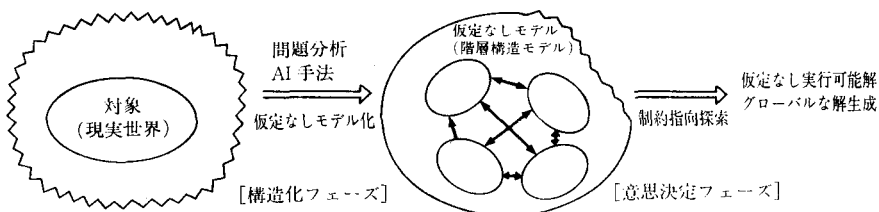


図2 問題指向型アプローチ

確に区分している。

構造化フェーズでは、対象とする問題に関する制約を明らかにし、実際の製造工程の稼働時の生産条件とともに、目的関数を決定する。たとえば、1日の実働時間、および残業の有無などの決定がこれにあたる。また、機械の使用法と加工可能なジョブとの対応が複数あるような場合、あらかじめ1つの方法に決定しておくこともこれに含まれる。

意思決定フェーズにおいては、構造化フェーズで構造の定まった問題、すなわちモデルに対して、その構造に合った方法で解を導出する。

そしてさらに、これら2つのフェーズ間を必要に応じて、簡単に往来できるようにインターフェースが必要不可欠である。構造化フェーズで問題の構造が決まった後、意思決定フェーズで解が求まらない場合がある。これは問題の構造が適切でなかったために起こるものであり、問題の構造を修正しなければならない。このとき、意思決定フェーズでの診断内容を、構造化フェーズにフィードバックする必要がある。このように、これら2つのフェーズを何度かくりかえし実行することにより、意思決定が行なわれるのが通常である。

3. スケジューリング問題への適用と

A I 手法

3.1 構造化フェーズ

ジョブ・ショップ・スケジューリング(job shop scheduling)は1つ、あるいは、複数の機械、工程(shop)を持つ作業現場において、数多くの製品(job)の製造に対する加工順序とその加工時刻を決める問題である。このようなスケジューリング問題に対して、問題指向型アプローチを適用することを考える。この問題における構造化フェーズは、対象とする生産状況を数理的、あるいはヒューリスティックな解法に持ち込むまでのモデル構築の段階であり、これには、たとえば次の項目が含まれる。

1. 問題の状況に応じて、目標、または目的関数を設定する。複数の目的関数がある場合は、その優先順位などを明確にしておく。
2. 問題の制約、制約間関係などを明らかにしておく。
3. 計画当日の生産において、スケジューリングするジョブを決定する。
4. ジョブの数、種類、およびその性格などから、使用

する機械の選択を行なう。

この構造化フェーズ全体をすべてコンピュータにより自動化することは、現在のところ不可能であり、人間が介在しなければならない。そのため、問題の構造を分析する手法、あるいは構造化を支援する方法が必要である。しかし、対象とする問題と構造化する項目を限定すれば、コンピュータによる自動化もある程度は可能と思われる。

ここでは詳しい説明は省略するが、このフェーズに対しては数多いA I手法のうち特に、フレーム(frame) [7]、意味ネット(semantic network) [9]、概念依存(conceptual dependency; CD) 表現 [10]、述語論理など、問題の構造を表現するさまざまな知識表現方法、および問題解決における専門家の知識の利用が有効と考えられる。

3.2 意思決定フェーズ

構造化フェーズで定義したモデルは、すでに構造の定まった(悪構造でない)問題であるので、これを解く意思決定フェーズに対しては、従来から用いられてきた数理的、あるいは最適手法が利用可能ならば、その手法を利用すればよい。すなわち、その問題の構造に適した解法を、ヒューリスティック、またはアルゴリズム的な方法を問わず、必要に応じて選択すればよい。しかし、現実の問題は制約が数多く存在し、組合せの爆発(combinatorial explosion)を起こし、最適手法では容易に解くことができないものが多い。そのためこの段階では、制約の伝播(constraint propagation) [14]、および探索手法 [5] が有効な手段になりうる。

4. スケジューリング問題における

A I 手法

4.1 問題の構造化と解決

本章では、第3章で示した問題指向型アプローチを、A I手法を用いて実現した2つのシステムを簡単に紹介する。本章ではNUDGEとBARGAIN [4] という会議のスケジューリングを対象とするシステムを例に、構造化フェーズと意思決定フェーズ、およびこれらフェーズ間のインターフェースをどのように実現しているのかをみていく。

NUDGEとBARGAINは生産スケジューリングではないが、システム全体の機能を構造化フェーズと、意思決定フェーズのそれぞれに対応する2つのモジュールに分割して、問題解決を行なっている。このシステムの

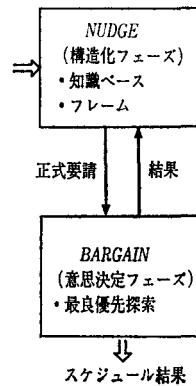
処理概要は図3に示すように、NUDGEが構造化フェーズ、BARGAINが意思決定フェーズを担当している。

このシステムはたとえば、“次の火曜日にBruceと会議をしたい”といったような不完全な要請に対して、会議のスケジュールを立てる。NUDGEはこの情報をもとに、図3に示すようなより詳しい正式な開催要請、および競合する会議がある場合に使用する競合解消の方法を提出し、会議の要請に対して明確に構造化を行なっている。このモジュールはフレーム表現された知識とルールを用いて実行される知識ベースシステムである。

このような会議の構造化を行なうためのNUDGEの知識ベースは、図4に示すような各フレームによる階層構造になっている。このフレームの表現の例を図5に示す。この例を用いて、NUDGEが正式な要請をどのようにして作成していくのかを簡単にみていく。

今、このシステムを実行している要請者が、IraであることをNUDGEは認識できているので、入力情報とともに参加者はBruceとIraであることがわかる。会議フレームを見ると、WHOスロットに議長がいなければ会議はなり立たないことが明記されており、IraかBruceのどちらかが議長の会議が知識ベース内にあるか検索する。知識ベース内のどのフレームが具体的な会議かは、そのフレームのAKO(A-Kind-Of)スロットを見て、これが会議になっていることによりわかる。このような会議としてPA会議が見つかった。これにより、

- ★スケジュールの略式要請
- 次の火曜日
 - Bruceと
- ★欠けている情報
- 時間
 - 場所
 - :



- ★正式な要請
- 参加者: BruceとIra
 - 日時: 次の火曜日15:00 : 1時間
 - 場所: 第1会議室
 - 目的: PA会議
 - +競合解消戦略

図3 NUDGEとBARGAINによるスケジュールリング

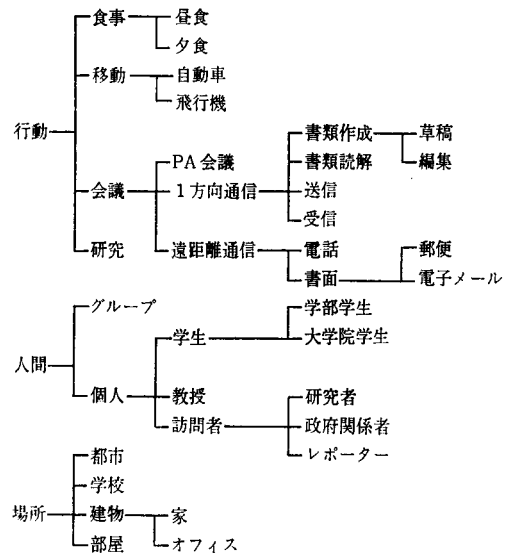


図4 NUDGEの知識ベース

• PA 会議	AKO	\$ VALUE	会議	• Ira	AKO	\$ VALUE	個人
	WHY	\$ VALUE	PA プロジェクト	(会議 WHEN)	\$ PREFER	午後	
	WHERE	\$ DEFAULT	第1 会議室	(会議 WHERE)	\$ DEFAULT	1 号館	金曜日
	WHEN	\$ DEFAULT	金曜日 1 時間	(PA 会議 WHEN)	\$ DEFAULT	15 : 00	第5 会議室
	WHO	\$ DEFAULT	Ira [役割: 議長]			10 : 00	
			Bruce [役割: 技術]		\$ PREFER	火曜日	
			Candy [役割: 購買]	(PA 会議 WHERE)	\$ DEFAULT	1 号館	
			Nitch [役割: 製造]		\$ PREFER	第1 会議室	
		
• 会議	AKO	\$ VALUE	行動				
	WHO	\$ REQUIRE	(EXIST ? WHO (HAS-役割'議長))				
	WHEN	\$ PREFER	(NOT (> (DURATION ? WHEN (HOUR 1.5)))				

図5 NUDGEにおけるフレームの例

NUDGE は開催したい会議は P A 会議と推論できる。

P A 会議フレームを見ると、WHERE スロットにデフォルト (\$DEFAULT) として、第 1 会議室が記入されている。場所に関して他に情報が無いので、これを採用する。WHEN スロットにはデフォルトとして金曜日が指定されているが、入力情報として火曜日が明示的に指定されているので、こちらが優先される。同じスロットにデフォルトで 1 時間となっているので、継続時間はこれを採用する。

次に、Ira フレームを検索すると、P A 会議 WHEN スロットのファセット PREFER (望ましい) が火曜日になっており、入力要請と一致していることがわかる。このフレームの会議 WHEN スロットにはデフォルトとして 15:00 が記入されており、この時刻を開催時刻とする。

以上のようにして、NUDGE は正式な開催要請として、この問題を構造化する。NUDGE で作成された正式要請は BARGAIN に渡される。BARGAIN では最良優先探索 (best-first search) [14] という一般的な探索アルゴリズムで、競合する会議がないか判断し、正式

な会議のスケジュールを作成する。競合する会議がある場合、正式要請とともに NUDGE から受け取った解消競合戦略をもとに、BARGAIN は妥協案 (代替案) を探索していき、ユーザに回答を求め、スケジューリングを続行する。

4.2 問題指向型スケジューリング

次に本節では、問題指向型のスケジューリング・システムの例として、ISIS [3] の概要を説明する。ISIS は、米国 Westinghouse 社のタービンプレードのスケジューリングを行なう実用システムである。このシステムで扱っているタービンプレードのスケジューリングにおいても、数多くの制約を含んでいる。ここでは、スケジューリング・モデルの構成要素として、オーダー (ジョブ)、ロット、生産資源 (機械、ツール、作業員など)、オペレーション (加工方法、加工時間など)、作業現場、部門、オペレーションの予約、組織などの定義、および制約の記述を含んでおり、これらを前節の NUDGE と同様、フレーム表現で記述している。

システムの処理概要は図 6 に示すように、スケジューリングを “オーダー選択 (order selection)”, “能力分析 (capacity analysis)”, “資源分析 (resource analysis)”, および “予約選択 (reservation selection)” の 4 つの階層的レベルに分け、各レベルの連携を保って実行している。ISIS では構造化フェーズと意思決定フェーズが、完全に明確に区分けされていないが、上記 4 つのスケジューリング階層のうち、オーダー選択、および能力分析が構造化フェーズに、また後続の 2 つのレベルが意思決定フェーズにほぼ対応する。

ISIS のスケジューリング手順を図 6 をもとに、簡単に説明する。最初のオーダー選択では、受注オーダー群に対して、今期の計画対象とするオーダーを選択し、これらの加工の順位づけを行なう。ここで順位づけされたオーダーに対して、最もプライオリティの高いオーダーから順番に以下の手続きをくりかえす。

能力分析ではそのオーダーの先行関連図および納期などの物理的制約から、

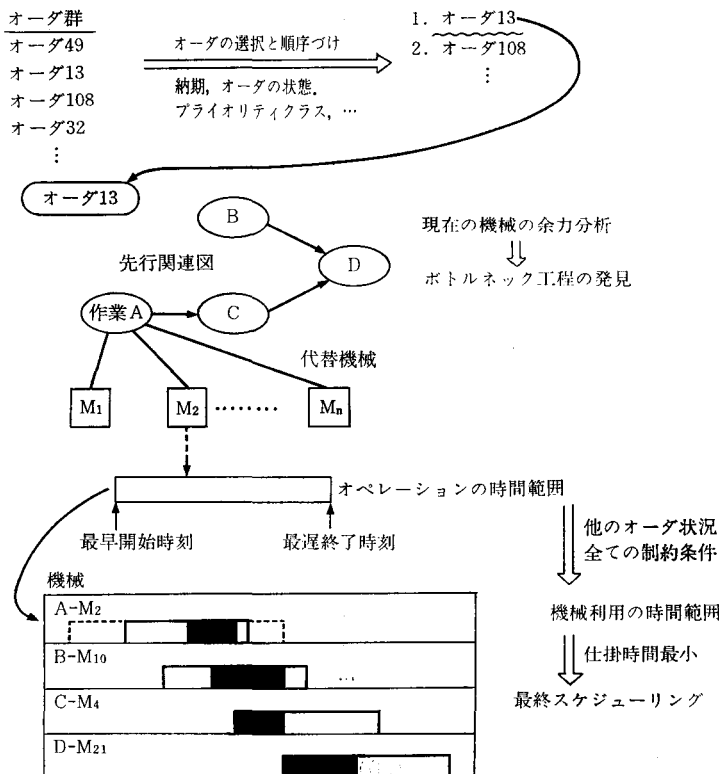


図 6 ISIS のスケジューリング手順

そのオーダに対する機械の余力分析を行ない、ボトルネック工程を発見する。さらに、先行関連図からクリティカル・パス・メソッド (Critical Path Method) を使い、各オペレーションの最早開始時刻と最遅終了時刻を求める。これは、スケジューリングにおける時間的制約を設定していることにほかならない。

一般に1つのオペレーションに対して複数の加工代替案がある。すなわち、あるオペレーションに対して実行可能な機械は複数存在し、それぞれで加工時間は異なる。資源分析では能力分析で求めた各オペレーションの時間範囲に対して、他のオーダの機械の使用状況、および他のすべての制約条件を満足するように、各オペレーションで使用する機械 (すなわちルーティング) を決定し、機械利用の時間範囲を定める。この段階は意思決定フェーズの第1ステップと考えられるとともに、能力制約で設定した時間制約の範囲を、さらに狭める構造化フェーズと解釈することもできる。

ここでは予備分析として、オーダの特性からルールを用いて、開始期日から前進方向 (forward) で計画するか、納期から後退方向にさかのぼるか (backward)、その探索方向を決定する。探索方向が決定した後、ISISでは制約を順次満足していくように解を探索していく制約指向型探索 (constraint-directed search) をビームサーチ (beam search) [14] を用いて実現している。

すべての満足すべき解があるかどうかを調べ、ある場合には、最後の予約選択で仕掛り時間最小を目的として、最終スケジューリングを行なう。なお、このシステムでは制約のチェックにおいて満足する解が得られない場合は、順次制約を緩和して、資源分析を繰り返すといった方法がとられ、構造化フェーズと意思決定フェーズのインターフェースがとられたシステムといえる。

以上のような方法で行なうスケジューリングでは、計画するオーダ全体に対して最適解とはならないが、制約の多い、複雑な現実のスケジューリング問題に対してはほぼ満足のいく実行可能解が求められる。

5. おわりに

本稿は現実社会の生産管理の問題に対する1つの解決策として、問題指向型アプローチをとりあげ、その考え方を紹介した。このアプローチに至るまでの内容にはかなりの独断と偏見があるかもしれない、本稿の終りとしてまずこれに対するお許しを願いたい。しかし、ここで特に言いたかったことは、現実の問題を扱う場合は、その

問題構造をきちっと把握し、それを的確にモデル化することが重要であるということである。

現実にもマッチした、問題の本質を正しく反映するようなモデル化ができれば、その解法に何をを使うかはそれほど重大な問題ではないであろう。特にAI手法である必要もない。われわれが従来から用いてきた最適手法で解ければ、それに越したことはない。つまり、そのモデルに合った手法を適用するということだと思ふ。ただ1ついえることは、このような現実モデルは制約条件が多く、数式により定式化ができないものもあるといったように構造が複雑であるため、最適手法を使うことは困難と思われる。

このようなことから本稿では、専門家知識の利用、および探索手法などを有するAIアプローチが有効であると考え、その利用法的一端を現実システムをもとに紹介した。これらの手法はわれわれにとって特に真新しいものではなく、昔から使っていた手法もある。たとえば、AIの代表的な手法といわれる探索には、従来からORでよく用いられてきた分枝限定法なども含まれている。いまさらにこれらをAI手法と呼んで、従来の方法とことさらに区別する必要もないように思われる。

最後に、このようにしてモデル化された現実の問題は複雑ではあるが、その構造は明確である。このような問題に対して、最適解ではないが、十分満足できる実行可能解を効率よく求めることができる解法をAI、ORを問わず、研究していくことが重要な課題と考える。

参考文献

- [1] Bowen, J, O'Grady, P., Nuttle, H. and Terrible, M. : An Artificial Intelligence Approach to Loading Workstation Resources in a Distributed Job Shop Controller, *Computer-Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 21~28, 1989.
- [2] Chang, Y., Matsuo, H. and Sullivan, R. S. : A Bottleneck-based Beam Search for Job Scheduling in a Flexible Manufacturing System, *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 11, pp. 1949~1961, 1989.
- [3] Fox, M. S. and Smith, S. F. : ISIS-A Knowledge-based System for Factory Scheduling, *Expert Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 25~49, 1984.
- [4] Goldstein, I. P. and Smith, R. B. : NUDGE,

A Knowledge-based Scheduling Program, *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 1, Pittsburgh, pp. 257~263, 1977.

- [5] 伊藤謙治：探索手法と生産管理への応用，日本経営工学会誌，Vol. 40, No. 6B, pp. B88~B97, 1990.
- [6] Kanet, J. J. and Adelsberger, H. H. : Expert Systems in Production Scheduling, *European Journal of Operational Research*, Vol. 29, pp. 51~59, 1987.
- [7] Minsky, M. : A Framework for Representing Knowledge, in Winston, P. H. (ed), *The Psychology of Computer Vision*, McGraw-Hill, New York, 1975.
- [8] Ow, P. S. and Morton, T. E. : Filtered Beam Search in Scheduling, *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 35~62, 1988.
- [9] Quillian, M. R. : Semantic Memory, In Minsky, M. (ed), *Semantic Information Proces-*

sing, MIT Press, Cambridge, 1968.

- [10] Schank, R. C. : *Conceptual Information Processing*, North-Holland, Amsterdam, 1975.
- [11] Shaw, M. J. : Knowledge-base Scheduling in Flexible Manufacturing Systems : An Integration of Pattern-directed Inference and Heuristic Search, *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 821~844, 1988.
- [12] Shaw, M. J. and Whinston, A. B. : An Artificial Intelligence Approach to the Scheduling of Flexible Manufacturing Systems, *IIE Transactions*, Vol. 21, No. 2, pp. 170~183, 1989.
- [13] 辻 正重：エキスパートシステムと生産管理，日本経営工学会誌，Vol. 39, No. 6B, pp. B56~B66, 1989.
- [14] Winston, P. H. : *Artificial Intelligence (2nd ed.)*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1984.

未来に健全です。

わたしたちは、21世紀高度情報化社会の真の発展に寄与したいと考えます。

TORAY

東レシステムセンターは、新しい価値の創造を通じて社会に貢献する高感度人間集団です。

大きな活動の一つとして、高度情報システムの開発と提供の推進があげられます。この活動を行うことを目的に、東レから誕生した情報技術者集団——東レシステムセンターは、東レの戦略情報システムの開発・運用をはじめ、多くのシステムを多彩な分野に提供しています。

○当社は東レ㈱の100%出資会社です。
○平成3年度、大学及び大学院卒業予定者の募集をしております。
(東レ株式会社社員として採用します。)

株式会社 東レシステムセンター

〒103 東京都中央区日本橋本町1-5-9
☎03-245-5007 FAX.03-245-5009