

# 計画・スケジューリング形 エキスパートシステムへのアプローチ

## Approach to Planning and Scheduling Expert Systems

計画問題は、システム化のニーズが高いにもかかわらず、組み合わせ爆発などの問題が生じやすいため、実用化が進んでいなかった。日立製作所は、この問題を解決するために、実用的な計画形ES(Expert System)を構築するための方法論を考案した。

基本的な考え方は、専門家モデル、知識モデルおよび知識ベースをプロトタイプ化しながら作成していくことである。各段階で、計画問題の基本要素である仕事(ジョブ)と資源(リソース)と時間(タイム)およびそれらの間の関連を明らかにしていく。

この方法論は、現在複数プロジェクトで適用中であり、効果をあげている。

浜崎孝志\* *Takashi Hamazaki*  
 亀田達也\* *Tatsuya Kameda*  
 奥出 聡\* *Satoshi Okuide*  
 小六正修\*\* *Masanobu Koroku*  
 小塚 潔\*\*\* *Kiyoshi Kozuka*

### 1 緒 言

計画形ES(計画・スケジューリング形Expert System)は、これまで開発の中心であった分析形のシステムと比較して、定量的効果が把握しやすいなどの理由から、製造業を中心に年々構築の要求が強まりつつある。しかし、計画・スケジューリング問題(計画問題)は、3章でも述べるとおり、組み合わせ爆発などの問題が生じやすい非常に難しい問題であり、実用化のためには高度な技術と多大な工数が必要になる。

本稿は、まず計画問題について考察を加え、次に、日立製作所が考案した実用的な計画形ESを構築するための方法論について述べる。

### 2 計画問題へのアプローチ

計画形ESの開発を支援する一つの方法として、問題向きシェル(ドメインシェル)による支援が考えられる。しかし、ドメインシェルを考慮する前に、まず実用的な計画形ESを構築するための方法論を確立する必要がある。それは、問題の分類から解法まで、十分な問題分析・理解なくしては、実用に耐えられるドメインシェルなど開発できるはずがないからである(紙の上で解けないものが、機械の上で解けるはずがない)。

そこで日立製作所は、まず実際に汎(はん)用シェルを利用して構築した経験をもとに、計画問題およびその解法を分析し構築方法論を完成させ、次にその成果をベースに、より高

度なシェルを開発する、というアプローチをとることにする。

### 3 計画問題の考察

#### 3.1 計画問題の定義

本稿では、計画問題を次のように定義する。

「各種制約条件のすべてを満足し、ある評価尺度(目的関数)からみて、最適な仕事(ジョブ)と資源(リソース)と時間(タイム)の組み合わせを決定する問題」

（制約のすべてが満足できない場合には、その一部を緩和し解を求める場合がある。  
 また、評価尺度が主観的な場合には、最適ではなくても十分良い解で満足することもある。）

ここで、ジョブとはスケジューリングの対象となる最小の単位のことであり、リソースとはジョブを割り付ける対象のことである。

そして、ジョブとリソースとタイムを計画問題の基本要素と定義する。計画問題の例を表1に、イメージを図1に示す。

#### 3.2 問題点

(1) 顧客システムおよび顧客の真のニーズの把握が困難

生産工程、物流システムに関する知識は顧客側にあり、SE(System Engineer)の知識は必ずしも十分でない。そのため何をインタビューしたらよいかかわからず、顧客システムおよび顧客の真のニーズを書き下ろせない、あるいは非常に時間

\* 日立製作所 情報システム工場 \*\* 日立製作所 情報事業本部 \*\*\* 日立製作所 ソフトウェア工場

表1 計画問題の例 計画問題の具体的な例を示す。ワークスケジューリングは人の作業スケジュールを立案するシステム、配車配送計画は各トラックの配達順序を決めるシステム、そして工程スケジューリングは工場の生産計画を立案するシステムである。

システム名	ジョブ	リソース	制約条件	評価尺度
ワークスケジューリング	作業	作業員	作業可能職種、作業時間上限など	すべての作業をこなしているか。
配車配送計画	注文(製品名, 量, 納期, 届け先など)	トラック	積載量, 配送可能車種など	配送コスト
工程スケジューリング	注文(製品名, 量, 納期など)	装置	生産可能装置の段取り替えなど	稼働率

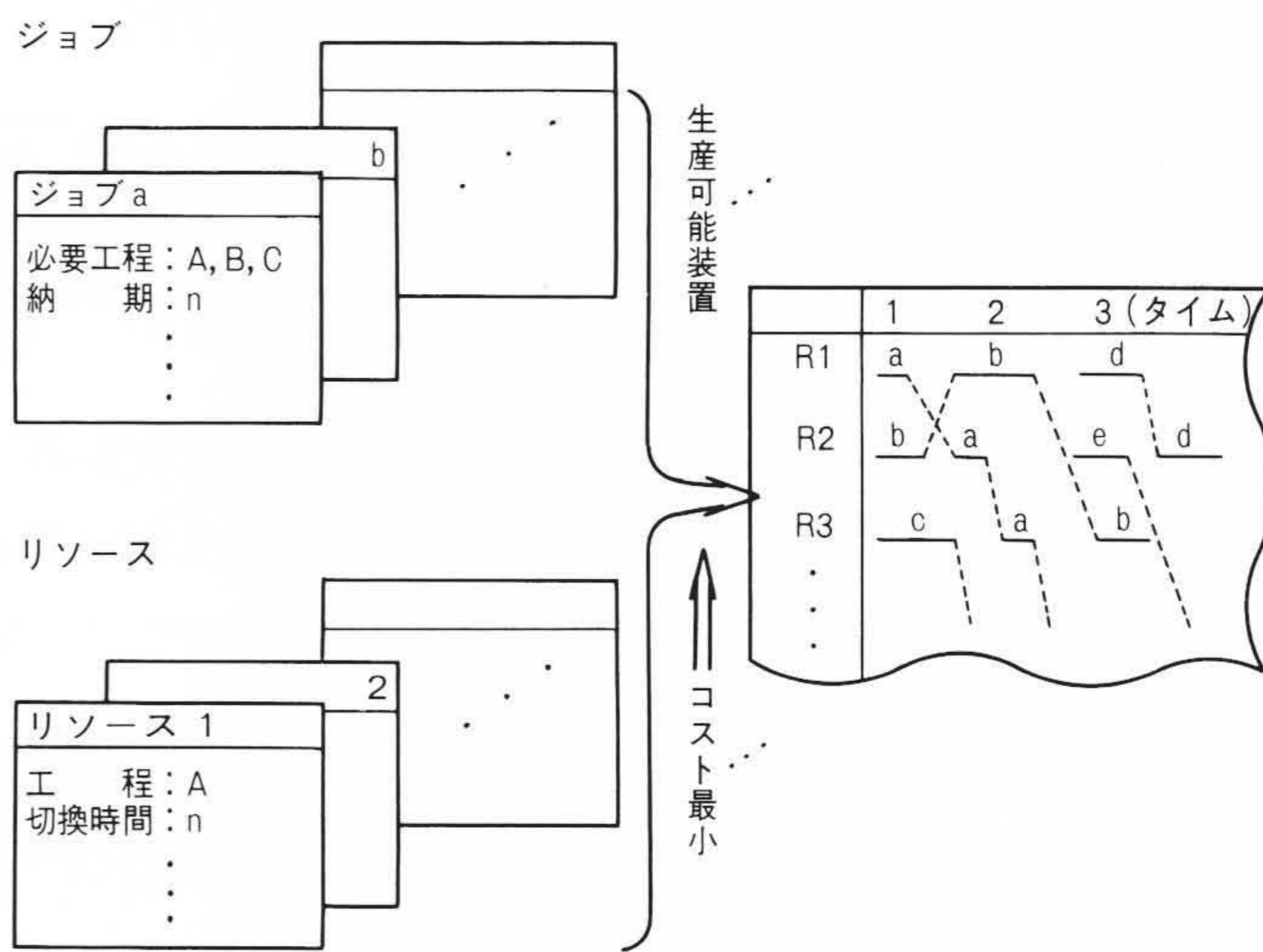


図1 計画問題のイメージ 計画問題とは、「生産可能装置」のような制約条件を満足し、かつ「コスト最小」のような評価尺度からみて最適なジョブとリソースとタイムの組み合わせを決定することである。

がかかる。

(2) 問題の一般化が困難

計画形問題の分類(問題記述：システム構造, 制約, 専門家知識)がなされていないため, 類似システムに関する情報があるにもかかわらず, 類似との認識ができず, 個々のSEが個別にアプローチの方法を模索してきた。

(3) 組み合わせ爆発

計画問題は, 基本的にジョブとリソースとタイムの組み合わせを決定する問題なので, 少し問題が複雑になると, すぐにその組み合わせの数が増え探索空間が膨大になり, 現実的な時間内では解が得られなくなってしまう傾向がある。

例えば, 問題の特質を考慮せずに, 問題記述と解法技法の両方に対して, すべてルール・フレームで表現するアプローチをとる場合, 性能が劣化することが多い。

(4) 最適解よりも満足解

最適化問題として解く試みは, これまでに多くみられたが,

組み合わせ爆発を起こしやすく, また, そもそも「最適性」を評価すべき単一のコスト関数が存在しない(決定できない)ことも多い。計画立案の専門家は, かなり妥協して解を得ていることが多い。

3.3 分類

ひと言で計画問題といっても, 問題のタイプは種々雑多であり, これらをすべて同一のタイプとして扱うには無理がある。そこで, 計画問題全体を業務からみて表2に示すように分類することを提案する。

Aタイプは, 看護婦のスケジューリングのように, 人の作業スケジュールを決定する問題である。

A'タイプは, Aタイプの一種であるが, 特に学校などの時間割りを決定する問題である。

Bタイプは, トラックの配送計画のように, 荷物を積載した

表2 計画問題の分類 計画問題と言っても種々雑多な問題が含まれる。ここでは, 主に業務の観点から分類する。

分類	内容	ジョブ	リソース	タイム	特徴(Dを基準とする。)
A	作業計画	作業-作業種別	作業員	原則として連続的	●リソースが人である。 ↓ 柔軟な制約条件が多い。
(A')	時間割り作成	作業-教育	作業員-教師(教室)	離散的 (「こま」単位)	●Aとほぼ同じであるが教室を考慮 時間は「こま」単位
B	配送計画	作業-積荷 配達先 仕入れ元	乗り物	それほどきつくない。 (順序程度)	●ジョブに配達先, 仕入れ元情報がある。→ ルーティング問題発生 ●時間はきつくない。
C	工程設計	作業-工程	装置-主装置 副装置	なし	●時間の概念がない。
D	D1	作業-製品種別 (原料)	装置-主装置 副装置	原則として連続的	—
	D2				
E	ダイヤグラム作成	乗物 始発 終着	駅(線路)	連続的	●時間の扱いが厳しい。 (連続的)

乗り物の配送計画(配達の種類)を決定する問題である。

Cタイプは、工程設計のように、工程(ジョブ)の順序を決定する問題である。

Dタイプは、工場の生産計画を決定する問題で、対象とする業務が組立・加工業のように離散的なものをD1タイプ、化学プラントのように連続的なものをD2タイプと分ける。

Eタイプは、鉄道などのダイヤグラムを決定する問題である。

### 3.4 対象分野

3.3節で、業務からみた分類としてAタイプからEタイプまで7タイプに分類したが、各タイプに対する市場の分布状況を図2に示す(日立製作所の顧客を対象に調査を実施し、60システム・業務について分析を行った)。

図2から明らかなように、D1タイプが最もニーズが高いことがわかる。

そこで、日立製作所はまずD1タイプを対象として研究を進め、その他のタイプについては、当面は個別に対処することにした。

## 4 構築技法

### 4.1 基本的アイデア

#### (1) 専門家モデルの分析

本格的ESを開発する場合、専門家の知識をいきなりルールやフレームなどに書き下ろしていくことは、一般には困難である。そこで、概念モデル、知識モデルから成る概念世界を経由して知識ベースを記述する、という方法<sup>2),3)</sup>をとることにする。

計画問題は、すでに述べたように、少し問題が複雑になるとすぐに現実的な時間内では解が得られなくなってしまう傾

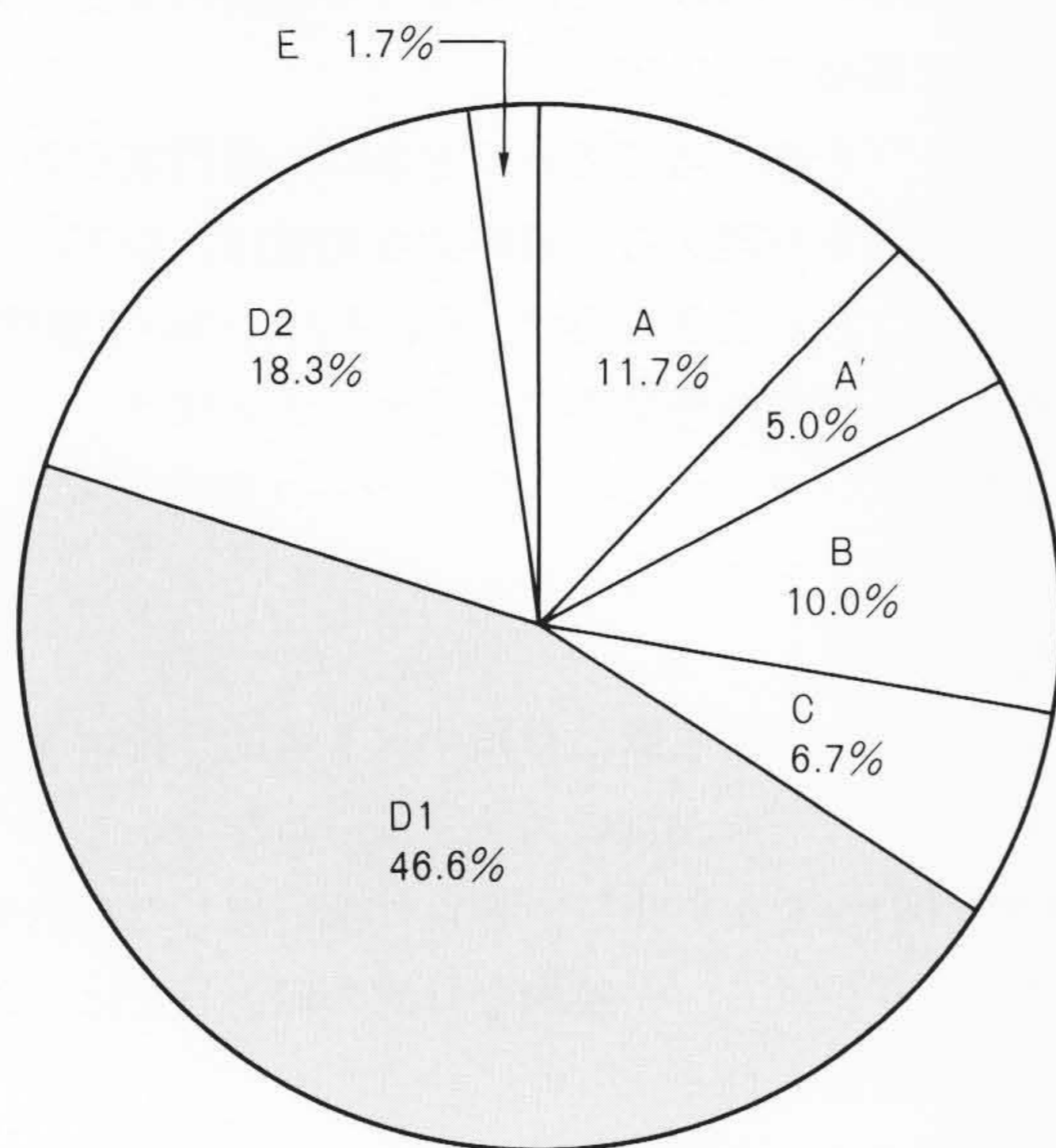


図2 マーケット分布状況 計画問題のタイプごとの分布を示す。日立製作所の顧客に対して調査を実施し、60システム・業務について分析した。

向がある。しかし、スケジュールの専門家は、この作業をせいぜい数日程度の時間でなんとかこなしている。これは、すべての組み合わせを考えているわけではなく、勘と経験によって探索空間を大幅に狭めているからである。この点に着目し、専門家の知識を利用して複雑な問題でも組み合わせ爆発を起こさず解こう、というのがヒューリスティックアプローチである。したがって、専門家が問題をどのようにとらえ、どう解いているか、という専門家モデルを分析することが計画問題を解く上で最も重要になってくる。

#### (2) プロトタイピングアプローチ<sup>2),3)</sup>

アプローチの方法としては、最初から完全な知識ベースの構築を目指さず、構築できる部分からシステム化し、それをベースに専門家からより上質の知識を獲得しシステムを洗練していく、というプロトタイプ手法をとる。

計画問題の場合、性能を早めに見きわめる必要があることから、プロトタイピングは特に重要である。また、一般的に計画形ESの出力となるスケジュール結果(例えば、ガントチャートなどで表したものを)を専門家がチェックすることで、新たな知識・制約条件が明らかになることが多い。

#### (3) 計画問題の基本要素

3.1節で定義したとおり、計画問題の基本要素はジョブとリソースとタイムである。したがって、計画問題を解くためには、これら基本要素および基本要素間の関連を明らかにしていくことが重要になる。

### 4.2 手順

この節では、開発フェーズについて詳しく述べるが、それに先立ち知識獲得の技法について方式を提案する。

#### 4.2.1 知識獲得～統一したインタビュー技術

知識獲得では、SEが専門家にインタビュー(問答)することが必要になる。専門家へのインタビューは、基本的には対話によって行われるが、専門家は必ずしも統一した形式で返答するとは限らない。

したがって、専門家が答えやすいように、またSEは取りまちなげないよう問答する必要がある。そのために、専門家の答えを図3に示すようにパターン化することを提案する。

このパターンでは「何々が良い」という評価知識を重視して、S(subject)+R(reason)+C(condition)+V(verb)のパターンで専門家から知識獲得をする(この手法をSRCV法と呼ぶ)。もちろん、すべての知識がこの形式で聞き出せるとは限らないが、ここで明らかになった知識は、抽象化のフェーズで知識を整理する際の核になる。

専門家から上記のパターンで知識獲得をしたとき、R(reason)が抜けやすいので注意を要する。専門家は、明示できる理由なしに勘で知識を持っている場合があるからである。

#### 4.2.2 抽象化の作業内容

4.2.1項で述べた方法(SRCV法)や、マニュアルから獲得し

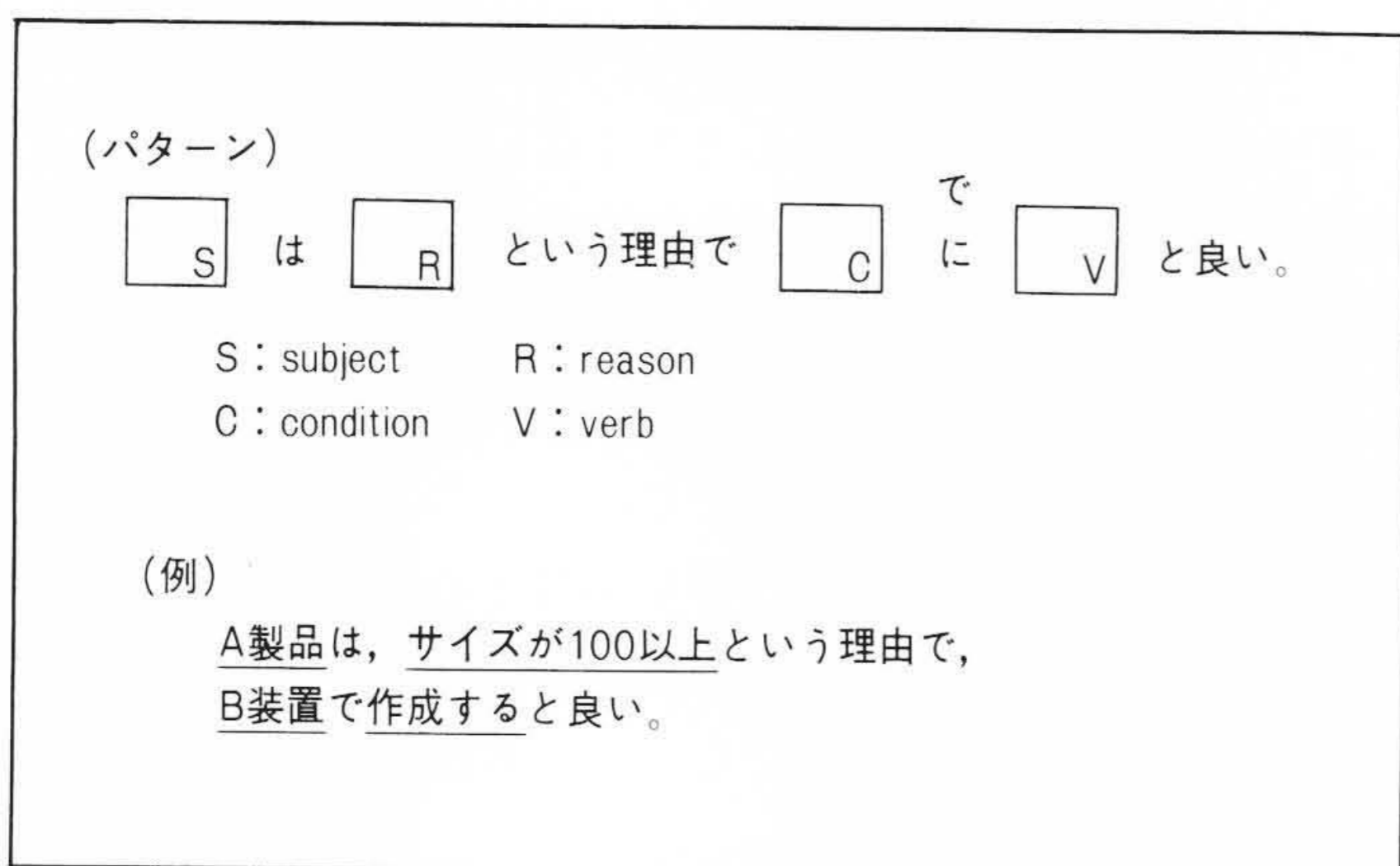


図3 インタビューの統一パターン 専門家から知識を獲得する際に、パターンに従ってインタビューを行うことにより、勘違いなどのミスを防ぐ。

た知識を以下のような観点で整理する。また、初期モデル構築時点では決定するのが困難な項目もある〔例えば、4.2.3(2)の(d), 4.2.3(2)の(e)のプライオリティ〕ので、プロトタイプングしていく過程で精度を上げていく。

(1) ジョブ・リソースおよびその他オブジェクト群の洗い出し

ジョブ・リソースおよびその他のオブジェクト群について、以下の項目を整理する。ここで、その他のオブジェクト群とは、ジョブ・リソースではないが制約条件などでジョブ・リソースにかかわってくるもののことであり、例えば在庫情報、原料情報などが考えられる。

また、割り付け結果(=スケジュール表)も合わせてここで考える。

(a) 属性

どのようなデータ項目を持つか、できるだけ詳しく記述する。特に、他のオブジェクトとの関連を表すようなもの、例えば注文情報中の製品名は製品情報中の製品名と一致する、などは明確にしておく。

(b) 個数

レコード数(リソースの場合は装置数)

(c) 所在と形式

ワークステーション上か、ホスト上かなど(既存のファイルの場合だけ)

(d) データの構造

すでに洗い出している各データの属性を分析し、データ間に何らかの関連がないか調べる。関連のしかたとしては、順序性、グループ化などが考えられる。

(2) タイムの扱い方

3.1節で定義したように、計画問題はジョブをリソースとタイムの二次元の平面にマッピングすることが基本になるが、ここではその平面の時間軸の取り方について考える。

タイムの扱い方としては、幾つかのレベルが考えられるが、

表3 タイムの扱い方のレベル 計画問題の基本要素であるタイムの扱い方には六つのレベルがある。

レベル	内 容	時間軸のとり方
TL0	時間的考え方がまったくない。	時間軸がない。
TL1	順序関係だけを考える。	時間軸はあるが、目盛りがない。
TL2	離散的で前詰め	目盛りがあり、その目盛りどおりにしか値をとれない(デジタル的)。
TL3	離散的でランダムな指定	
TL4	連続的で前詰め	アナログ的に値をとれる。
TL5	連続的かつランダムな指定	

日立製作所は表3に示す六つのレベルへの分類を提案する。

ここで離散的とは、時間の最小単位(例えば時間割りでの「こま」のようなもの)があるもののことで、連続的とは、その最小単位が限りなく小さいもののことである。

また、前詰めとは、対象リソースに最後に割り当てられたジョブの直後にしか次のジョブを割り当てないもののことで、ランダムとはそういう制限のないもののことである。

(3) 制約条件の洗い出しと分類

ジョブ、リソースおよびタイムに関する制約条件を、すべて洗い出す。しかし、インタビューの中ですべての制約条件を漏れなく洗い出すことは非常に困難であるから、洗い出し作業の助けとして、表4に示す制約条件の分類方法を提案する。

また、洗い出した制約条件のおおのについて、ハードな制約かソフトな制約か分類する。ここでハードな制約とは、絶対に守らなければならない制約のことで、ソフトな制約とは原則としては守らなければならないが、他の制約と競合した場合は、無視あるいは緩和できるような制約のことである。

(4) 割り当て戦略の洗い出し

実際にジョブを割り当てていくときに、専門家が使っている戦略的な知識を整理する。戦略的な知識は、以下の二つの知識に分けることができるので、それぞれについて整理する。

(a) 各ソフト制約条件間のプライオリティ付け

(b) 割り付けノウハウ(ジョブ、リソース絞り込みのノウハウ)の洗い出し

(5) 目的の洗い出し

スケジュールリングする際に目指すべき目的、換言すると、どういうスケジュールが良いスケジュールなのかという評価基準(コスト関数)を洗い出し、さらに洗い出した目的間にプライオリティを付ける。一般的な目的の例としては、以下のようなものが考えられる。

(a) リードタイムの短縮

(b) 稼働率の向上

(c) 在庫量の縮小

表4 制約条件のタイプ 例えは“J-R”とは、ジョブとリソースの組み合わせに関する制約を、|J|とは、ジョブ単独の制約であることを示す。

タイプ	例
J-R形	実行可能装置, 生産可能製品, 生産最小(または最大)単位, 実行優先装置, 生産優先品
J-T形	納期, 処理時間, 開始時間帯, 処理時間の最小(または最大)単位, 一定時間の処理件数
R-T形	定期点検, 稼働時間, 不稼働日
J-J形	段取り替え, 順序性(優先度)
R-R形	ライン干渉, 人の制約, 場所の制約, 負荷バランス, 台数, 稼働率
J 形	必要原料, ロット分割(または併合)
R 形	生産能力, 治工具
T 形	カレンダー(休日), 就業時間, 最小単位

略語説明: J(ジョブ), R(リソース), T(タイム)

(6) 割り付けの難しさ

ジョブ, リソースおよび制約条件を考慮すると, 割り付けは混んでいるのか, 空いているのか。つまり, リソースの状態は重負荷なのか, 軽負荷なのかを調べる。

(7) 運用イメージの明確化

スケジューリングシステムを実際に利用するときのイメージ, つまり通常の利用方法, 例外的な利用方法を検討する。特に, 上記(6)で過負荷な場合は, スケジューリングが失敗することが十分考えられるため, その場合の操作イメージを検討しておく必要がある。

4.2.3 形式化の作業内容

専門家モデルを, ツールの知識表現に対応づける(つまり, 知識モデルを作成する)。ここでツールとしてはES/KERNEL (Expert System/KERNEL)シリーズ<sup>4)</sup>のように, ルール, フレームを基本とするハイブリッド形のツールを仮定する。

(1) データ構造の決定

ジョブ, リソースおよびその他のオブジェクトを, ツールの知識表現を使ってどのように表すかを決定する。

- (a) まず, フレーム(is\_a階層)で表現するのがふさわしいかどうかを検討する。
- (b) 次に, フレームで表現するものに関して, フレーム構造を決定する。つまり, フレームのクラス-インスタンス階層の形とフレームどうしをの関係を, 明らかにする。
- (c) フレームで表現する, しないにかかわらず, オリジナルの情報知識ソース上に持つのか, 外部ファイル上に持つのかを決める。
- (d) また, 外部ファイルを使う場合, どのようなファイル形式にするかを決定する。

(2) 処理方式の決定

処理の基本構造のモデルを図4に示す。

- (a) 基本構造を参考に, 全体の構造を決める。
- (b) 基本サイクルは, リソース中心アプローチなのか, ジョブ中心アプローチなのか, あるいはその組み合わせなのかを決定する。

リソース中心アプローチとは,

- (i) スケジューリングすべきジョブがなくなるまで, (ii)~(iv)を繰り返す。
- (ii) ハードな制約条件を満足するリソースの中から, スケジュールの目的, ソフトな制約条件などを考慮して, その時点で最も良いものを取り出す。
- (iii) 前記(ii)で選択したリソースとの組み合わせで, ハードな制約条件を満足するジョブの中からスケジュールの目的, ソフトな制約条件などを考慮して, その時点で最も良いものを取り出す。
- (iv) 前記(iii)で取り出したジョブを(ii)で取り出したリソースに割り当てる。

ジョブ中心アプローチとは, リソース中心アプローチの(ii)と(iii)を入れ替えたものである。

- (c) 前処理・後処理の内容を決定する。
- (d) スケジュールの目的, ソフトな制約条件および割り付けノウハウにより, 取り出すべきジョブ, リソースを決定する際の決定ロジックを決める。
- (e) 割り付け処理の内容を決定する。
- (f) ジョブをリソースに割り当てるとき, 割り当て可能な時間帯の中で, 前に詰めるか後ろに詰めるか(つまり, 最早

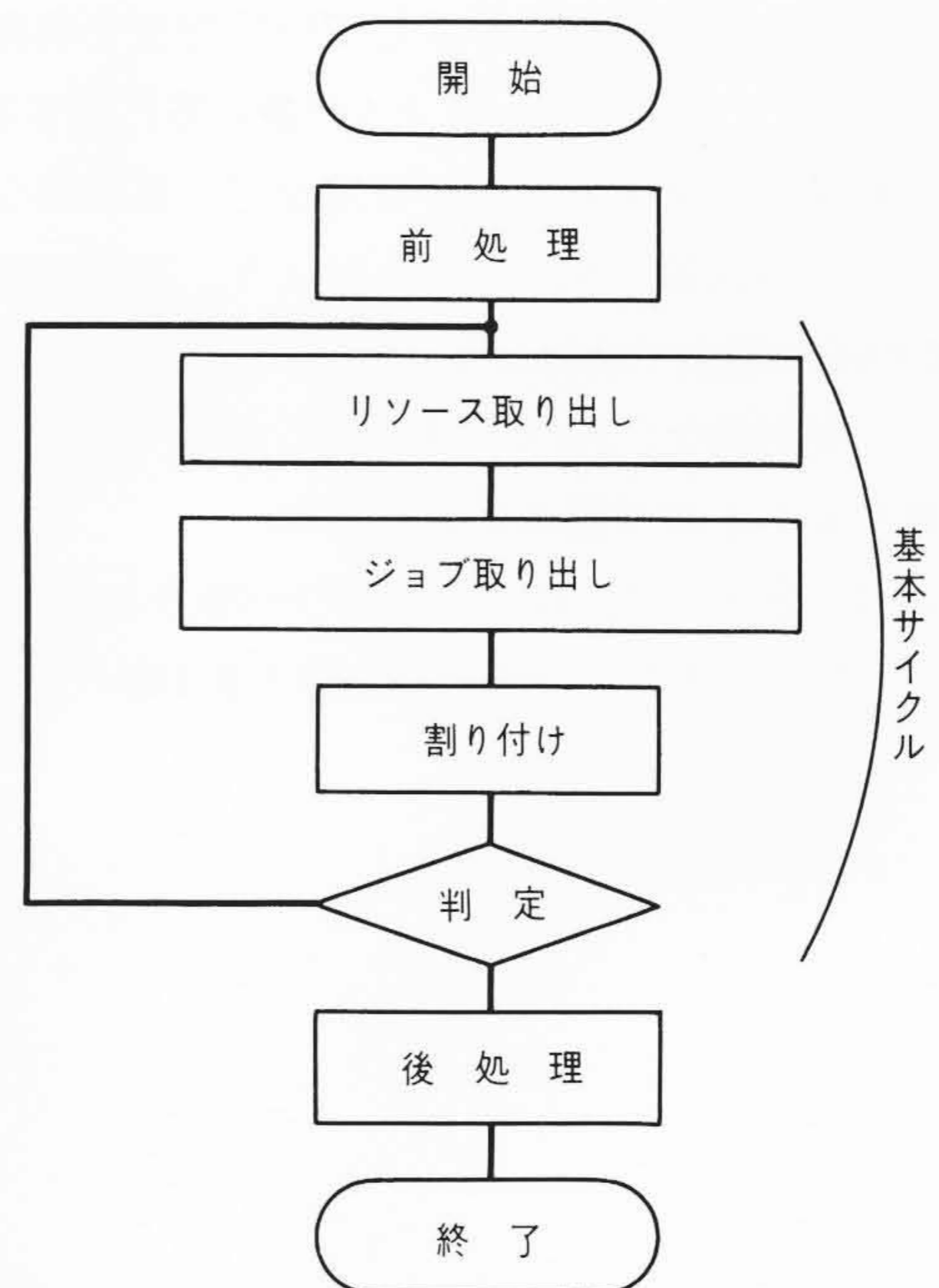


図4 基本構造 計画問題を解く場合の処理フローは, 基本的にこの図のような形態をとることが多い。

開始時刻に割り当てるのか、最遅開始時刻に割り当てるのか)を決定する。

#### 4.2.4 具体化の作業内容

知識モデルをコンピュータ上で処理できる形式にコーディングし、知識ベースを作成する。

##### (1) コーディング

ツールの処理方式を考慮してコーディングをする。

##### (2) デバッグ

各ルールの実行速度を測定し、必要以上に時間を要しているルールについて見直しを行う。

## 5 評価

### 5.1 適用範囲

3.4節で、業務からみた分類を提案したが、問題の解法という観点から再度分類を見直してみる。

4章で詳しく述べたとおり、問題の解法はジョブとリソースの構造およびタイムの扱い方に大きく依存する。このことを考慮して、表5に示す分類を提案する。同表から、本稿で対象としているD1タイプが解ければ、約80%のニーズにこたえられるということがわかる。

## 6 結 言

計画問題について、業務からみた分類方法を提案し、市場性を考慮した上で研究の対象とすべき計画問題のタイプを絞った。

この方法論では、まず計画問題の基本要素をジョブ、リソースおよびタイムであると定義した。そして、抽象化、形式化、具体化という開発ステップを通して、これらの基本要素および基本要素間の関連を明らかにしていく方法を明確にした。その技法として、SRCV法、タイムの扱い方に関する六つのレベル、制約条件に関する八つの分類など、具体的な方法を提案した。この方法論を用いることにより、計画問題の大部分(日立製作所の調査では約80%)について、ESの構築経験のない人でも、実用的な(つまり、実用的な機能と性能を備えた)ESを構築することが可能になる。

この方法論は、Bタイプ、D2タイプの一部およびEタイプをカバーしていない。また、計画問題自体を3.1節の定義のよ

表5 計画問題の分類(解法中心) 業務の観点から七つに分類した計画問題を、解法の観点から分類し直す。特に、ジョブ、タイムの構造が重要である。

タイプ	内 容	解法	%	ジョブ	タイム	%
B	配送計画	$\alpha$	10.0	—	順序だけ	10.0
C	工程計画(設計)	$\beta$	6.7	ジョブ間の関連がまったくない。	ジョブ内での順序だけ	6.7
A	作業計画	$\gamma$	11.7	グループ化可能	離散的	79.9
A'	時間割り作成		5.0			
D1	離散的生産計画		46.6			
D2	連続的 生産計画	$\delta$	18.3	相互に強い関連 (順序性)	連続的で 前詰め	1.7
	連続プロセス					
E	ダイヤグラム作成	$\epsilon$	1.7	—	連続的で ランダム	1.7

うに限定しており、例えば最適なロットサイズの決定のような問題を対象としていない。今後は、これらのタイプ、テーマについて、さらに研究を推進していきたい。

### 参考文献

- 1) 中須賀, 外: 生産ラインのスケジューリングに関する研究の動向について, 計測自動制御学会第4回システム工学部会研究会, 7~16(平1-11)
- 2) 森, 外: エキスパートシステム構築技法入門, オーム社(平成2年)
- 3) 花岡, 外: エキスパートシステム構築標準手順“ESGUIDE”, 日立評論, 72, 11, 1125~1130(平2-11)
- 4) 金森, 外: ES/KERNELでの知識表現方法と高速推論方式, 日立評論, 69, 3, 219~224(昭62-3)
- 5) 富士通ラージシステム研究会: 計画型エキスパートシステムにおけるモデル化のフレームワーク, 情報処理学会第39回全国大会, 2B-8, 163~164(平1-9)
- 6) 工藤, 外: 協調型スケジューリングに基づいたアセンブリーライン・スケジューリングシステム, 人工知能学会第3回全国大会, 11-29, 637~640(平1-7)
- 7) 谷本, 外: 計画型ドメインシェルに対する技術要件, 人工知能学会第3回全国大会, 11-25, 621~624(平1-7)