

# 鋼材出荷計画エキスパートシステム と分枝限定法

福村 聡, 佐能 克明, 山川 栄樹\*

## 1. はじめに

われわれの従事している鉄鋼業では、経営計画・設備建設・生産計画・設備操業・エネルギー利用・輸送といったさまざまな面でORアプローチによる問題解決を行ってきた。

特に、輸送問題を考えてみると、「鉄鋼業は輸送業である」という言葉が示すように、実に多くの問題があり、またその効率化のために多くの検討を積み重ねてきた。原料岸壁の能力検討、工場・倉庫の立地選択、トビードカー・車両・船の適正台数評価、それらの点検・修理周期の最適化、クレーン台数の適正化および運行ルールの適正化、など教え上げればきりが無いほどである。

極端にいえば物（原料・半製品・製品）が運ばれるところすべてにその能力、運用方法がムリ・ムダのない形で行なわれているかという問題が発生する。このような問題に対し、数理計画法、待ち行列、PERT、シミュレーションといったいわゆる代表的なOR手法を活用して問題解決してきわけである[1]。

さて、ORを生産現場に適用することによるシステム改善を主業務としているわれわれは、しばしば現実の世界とモデルの世界のギャップを痛感することがある。すなわちわれわれが枝葉末節と感ずることが、現実には大きな役割を果たしていたり、大きな制約になっていることは多い。マクロな視点で捉える場合は問題ないが、現実には日々、あるいは時々人・物・設備の活動を計画する場合には無視できない問題である。そのためシステムは例

ふくむら さとし, さのう かつあき, やまかわ ひでき\* (\*水島製鉄所)

川崎製鉄(株)東京本社 システム部 システム研究室

〒100 千代田区内幸町 2-2-3

外処理の宝庫と化し、LPモデルは数千の制約条件をもち、計画評価のために精密なシミュレーションが行なわれる、という事態になっている。

また最近の環境条件として、「ユーザーニーズの多様化・高度化」ということで、生産現場での設備・操業のライフサイクルが非常に短期化している。したがって、生産システムそのものが柔軟な対応を要求されており、当然情報システムもそれに対応できなければならない。

このような背景の中で今回われわれは、輸送問題の中で最も現場に近い「日間作業計画立案のシステム化」ととりくんだ。システム化に当っては、現在注目を集めているエキスパートシステムのアプローチを全面的に採用し、世に言う「知識の有効活用」「柔軟性」が前述の問題点を本当に克服するかという、エキスパートシステム技術に対する評価の試みでもあった。

今回は、このシステム化の中で用いた問題解決手順と分枝限定法の関係を中心に、システムの紹介を行なう。

## 2. 問題の概要

鉄鋼生産は一見、少品種大ロット生産の代表のように見られがちであるが、実際は10トン~20トンといった個々にサイズや規格が異なる注文にもとづく受注生産方式をとっており、典型的な多品種小ロット生産である。ただ最終製品に行き着くまでのプロセスが非常に大きな設備を使ったものであり、かつプロセスが進むにしたがって拡散・細分化して所定の仕様を造り込んでいくため、組み立て産業等における生産とは事情が異なる。

製品出荷はこれらのプロセスの最終工程であり、生産の過程で分岐・合流を繰り返してきた製品群を、御客様の要望するまとまりで納期どおりに届けるという、いわば生産プロセスと御客様との調整機能を果さねばならない。そのため製品倉庫をもち、所定の期日が来たら製品

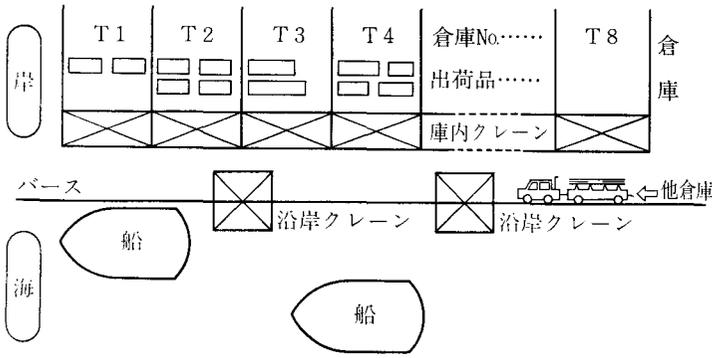


図 1 岸壁での作業状況

各要素のもつ主な属性

- 出荷品：向先（航海距離，最適入港時間），サイズ，取扱条件（雨不可），揚げ日，進捗（置き場），積合せロット
- クレーン：積込能率，稼働計画
- 船：船長，速度，動静（現在の状態，今後の予定）
- 倉庫・バス：使用不可時間帯
- 環境：天候，食休時間

を揃えて出荷作業を行なうのである。しかし生産プロセスの変動を受けるため，その計画性は必ずしも満足できる状態にはない。そこで当社では現在，生産プロセスとの連携をとって計画レベルを向上させるため，情報システムの再構築を行なっている。

今回対象としている鋼材出荷計画は，出荷命令の出された製品を船に積み込むスケジュールであり，製品の出来上がり状況や予約した船の到着予定を勘定しながら，岸壁やクレーンの使い方および未予約の船の到着希望時

刻を日々決定するものである。このさい，各製品毎に付された納期・雨濡れ不可等の取扱条件，船の大きさによる接岸条件，倉庫内での作業容易性等も考慮して，船の停泊時間やクレーンの作業効率に無駄が生じないように計画しなければならない。岸壁での作業状況を図 1 に，結果として出される計画表を図 2 に示す。

この計画は，従来ベテラン計画者が 2～3 時間かかって立案していたが，人によってその出来映えにバラツキがあると言われていた。そこで 1 名の計画者を専門家と

バースプラン		昭和 62 年 9 月 7 日 曜日 天候 ( )																									
積込予定屯数 ( 2920 )		7	9	11	13	15	17	19	21	23	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	1	3	5	7	
1	計画																			朝日丸			乙丸				
	実績																										
2	計画																										
	実績																										
3	計画																										
	実績																										
4	計画																										
	実績																										
5	計画			観音丸																							
	実績																										
6	計画																										
	実績																										
7	計画																										
	実績																										
8	計画																										
	実績																										

図 2 計画表の一例

評価指標
・最適出港時間帯を 守れる船の率 → 最大
・クレーンの非稼働時間 → 最小
・船の停泊時間（滞船料）→ 最小
・仕掛船の船積み中断数 → 最小

立案のノウハウ
・中断残船は最優先
・出荷量の集中する倉庫は優先
・雨漏れ不可品は昼間に積み込み
・交替時刻に合わせる

立案の基準
・仕向先毎の t/h 航海時間
・品種毎のt/h
・特殊品の船積 時間計算

制約条件
<p>&lt;強い制約&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・揚げ日（納期）指定の厳守</li> <li>・船積み優先時刻指定の厳守</li> <li>・雨漏れ不可品の雨天時積込禁止</li> <li>・隣接するバースでの同時船積制限</li> </ul> <p>&lt;弱い制約&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・浜出し未完了の船や未入港の船の船積みは極力計画しない。</li> <li>・配船日の遅い船を先に計画しない</li> <li>・同一バースでの連続出荷はできるだけ回避する。</li> <li>・残船の積込は翌日23時までには終了</li> </ul>

図 3 沿岸作業計画業務の概要

して選定し、計画業務を詳細に観察するとともに徹底的にインタビューを行なった。その結果の例を図3に示す。

この問題は以下のような特徴をもつ。

- (1) 計画の良し悪しを評価する指標は多数存在し、その内容・優先順位は将来にわたって変化することが予想される。
- (2) 立案の基準となる考え方に定量的に表現しにくいものがある。
- (3) 立案の手順は必ずしも一定でなく、諸条件（必ずしも固定的なものばかりでなく、外部との調整の結果決まるものもある）を考慮しながらの試行錯誤である。

### 3. 問題解決の手順

#### 3.1 問題解決の基本プロセス

エキスパートシステムでは、われわれがシステムの機能を決定するのではなく、「専門家自身の思考過程をシステムで実現することを目標とする」といわれている。われわれは専門家の計画過程を詳細に調査する中で、それが分枝限定法のプロセスと非常に近似していると感じた。

すなわち、計画表に1船ずつ「書いてみては眺め、次の船を書く、場合によっては消して書き直す」というプロセスを繰り返しているのであるが、その時むやみに船を選ぶのではなく、有力候補からある程度先も見ながら選んでいるのである。

そこで、分枝限定法の考え方にならって以下のような

問題解決プロセスを構成し、解空間の分割（探索木の生成）、分割問題の評価（探索木の限定）に専門家の知識・ノウハウを活用することとした。

- (1) ある時点で、船積みを行なうべき未スケジュールの船より優先順位をつけて候補船を選択する。
- (2) 優先順位の高い船について、積み込み開始時刻と終了時刻を決定する。
- (3) その船のスケジュール結果に問題がないかチェックする。
  - (3-1) 問題があれば、その船を候補から外し、まだ評価されていない他の候補を選び(2)へ戻る。
  - (3-2) 問題がなければ、時点を進め(1)へ戻る。
- (4) すべての船がスケジュールされたら、全体としての評価を行なう。さらに別のスケジュール案が必要なら、保留中の候補船まで戻って(2)から始める。（バックトラック）
- (5) 複数のスケジュール案を評価の良い順に並べる。

上記各プロセスに対応する専門家の知識例を図4に示した[2]。

#### 3.2 探索効率化のための知識表現[3]

ここで特に注意を払ったのは、探索木の生成・限定を効率化するための知識の表現方法および構成方法である。「納期は厳守する」といった知識をとってみてもさまざまな表現が可能である。たとえば

表現① 納期を満足していない案は採用しない。

表現② 納期が近づいてきたら優先する。

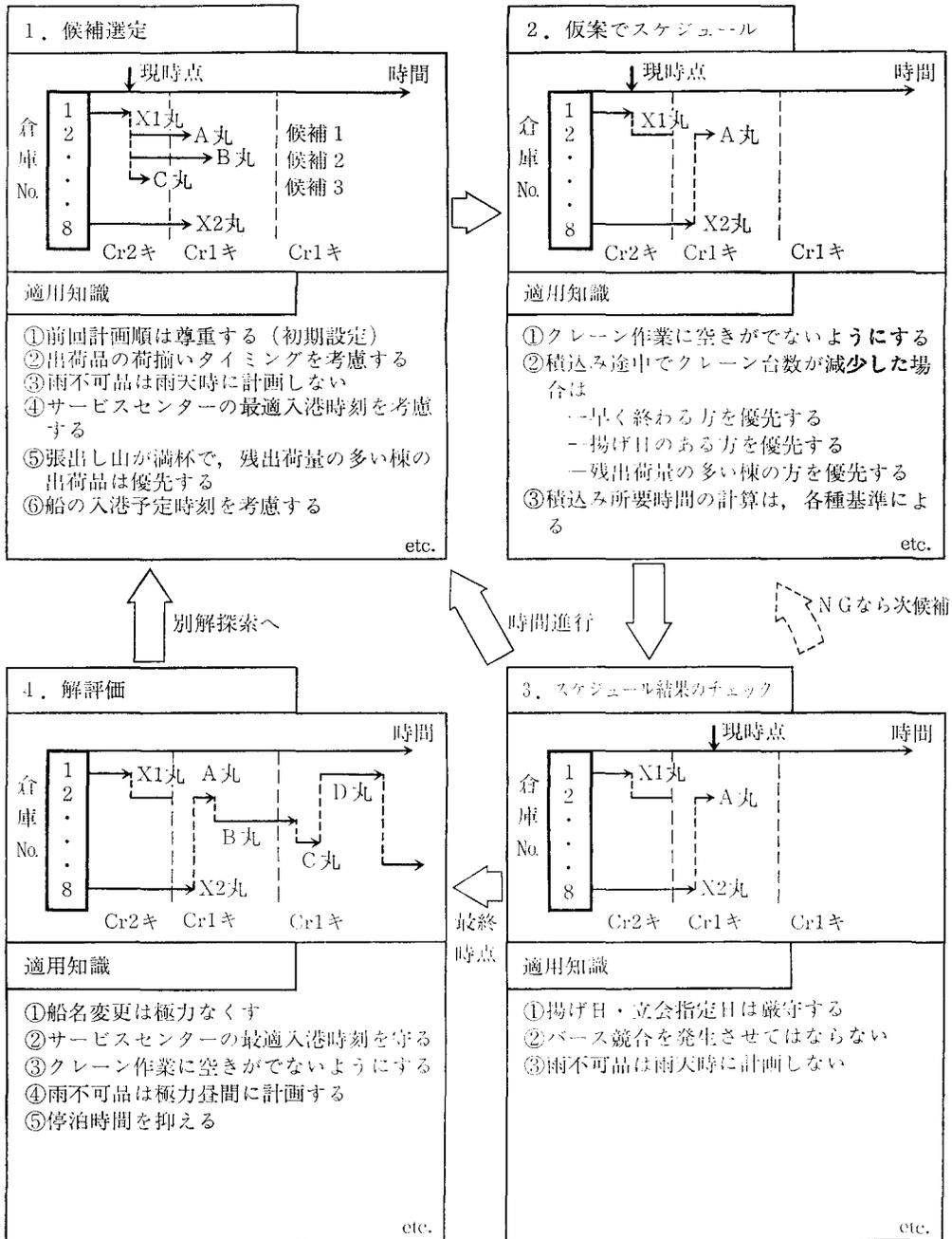


図 4 問題解決プロセスと適用知識例

簡単な例で考えてみる。\*月\*日7時よりA丸、B丸、C丸の3船の船積を行なう。積み込み所要時間はそれぞれ4時間、2時間、3時間。ただし、C丸の出荷品は納期が厳しく13時に出港しないと間に合わない。一方、A丸、B丸は昨日から入港しており、停泊料がかさんでい

る。ここで2案を作成することにしよう。

まず表現①を単純にスケジュール結果のチェックに使うことにしよう。候補船を選定するさいには、配船日(船の予約日)の早い船A丸、B丸を優先する(船積の準備がなされているため)。ところが納期制約により最後にC

丸がチェックされ、次々とバックトラックがかかり、結局2案が見つかるまでに12個のノードがチェックされる(図5)。

しかしこの図を見れば、明らかにC丸がチェックされた段階でC丸は第1船目でなければならないことが判明している。そこで、納期制約に反することが判明した段階で、船積終了時刻が当該船の必要積み込み開始時刻より遅い船に対応するノードをすべて削除したうえで、当該船を最優先とすべく優先順位をつけ直すことができる。この操作を行えばチェックされるべきノードの数は8個に減少する(図6)。

次に表現②も追加してみよう。ここでは候補船の選定をするさいに、「現時点が必要積み込み開始時刻の2時間前を過ぎれば、最優先とする」と表現する。すると納期制約をもつ船が早めに候補となり、さらに効率的となる。この例では、チェックされるべきノードの数は7個となった(図7)。

ただしこの表現の「2時間」という値は、状況により適正值が異なり、大きくとりすぎると計画案全体の評価を低下させるという問題をもっている。

このように、専門家の1つの言葉もさまざまな捉え方が可能であり、専門家自身もさまざまな意味・用法を1つの言葉に(意識的あるいは無意識に)込めているようである。今回、分枝限定法の考え方になって知識を構造化したことにより、知識表現は類型化され、個々の知識の位置づけは明確なものとなり、知識ベースの開発効率・可読性が向上したと考えている。

### 3.3 知識ベースの全体構成[2]

上記の基本プロセスを核として、計画作成までの知識全体構成を表現したものが図8である。すなわち計画作成のためには、船の順序づけ以外に、

#### (1) 積み込み場所の決定

同一船に積み込む出荷物が複数倉庫にまたがっている場合や、工場から直接岸壁に運ばれる場合、どの岸壁で作業をするのが効率のか、を決定する。

#### (2) クレーン台数の決定・調整

想定される出荷の進捗状況から考えて、クレーンの適正な稼働台数を班単位に設定する。

#### (3) 計画立案不能時の次善案提示

制約条件をすべて満足する計画が立案できない時、条件緩和を外部に要求するため、次善策を提示する。

などの知識が必要とされる。また、現時点での作業(仕掛船)を決定する知識と、すでに予約済の船(残船)を

計画する知識と、これから予約する船(配船要求分)を計画する知識は異なるため、別々に構成している。

## 4. システムの実現方法

システム開発に当っては、エキスパートシステム構築支援ツール(以降ツールと呼ぶ)ESHELLを使用した。現在市販されている多くのツールは、知識表現方法として、ルール型表現とフレーム型表現をサポートしている。今回は前述のような計画組みに関する知識を約200のルールで、それらの知識適用のベースとなる出荷品に関する情報・船に関する情報等を約300のフレームで表現した[4]。

ESHELLはイベント駆動型のツールであり、ルールが次に動くべきルール群(KS)を起動予約し、そのさいルールの適用対象(ノード)をも指定する形式をとる。そこで分枝限定法の各ステップをルール群化し、分枝限定法のノード(今回の問題では、ある時点でのある船の積込作業)を指定しながら、処理予約をすることによりバックトラックが容易に実現できる。ちなみに、図8におけるルール群間の実線は、起動関係を表現している。

## 5. おわりに

当システムは、昭和61年9月から開発を開始し、11月にプロトタイプシステムを作成、その後知識の追加修正を行ないながら昭和62年4月から実運用に入った。システム化の効果としては、計画の均質化による計画精度の向上であり、船の停泊料の削減・現場作業の効率化が図られた。

今回われわれは、非常に“OR的”とも思えるスケジューリング問題にエキスパートシステムの方法論を取り入れてシステム化を行なった。このことによる効用としては、比較的短期間でシステム開発が行なえたこと、専門家並みのきめの細かい配慮がなされ得たことである。一方、この方法は最適法という観点からは、当然専門家の(最高)レベルを越えるものを提供しないが、“最適”という概念自体が明確になりづらい今回のような問題においては、実用上有効な手法である。

エキスパートシステムにおいても、“知識の構造化”という名のもとに一種のモデリングが行なわれる。ORにおけるモデリングが主として“問題のモデル化”から入るのに対し、エキスパートシステムのそれが“解法のモデル化”から始まるという差がある。

つまり後者は、問題そのもののモデル化がむずかしい

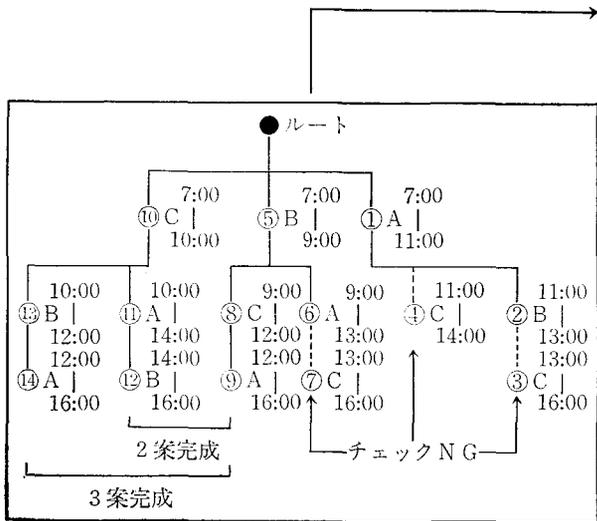


図5 納期制約によるバックトラック

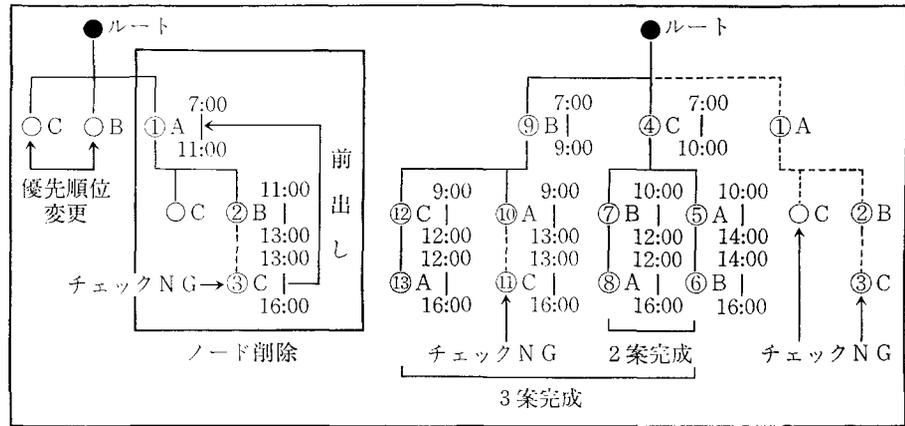


図6 枝の効率的限定

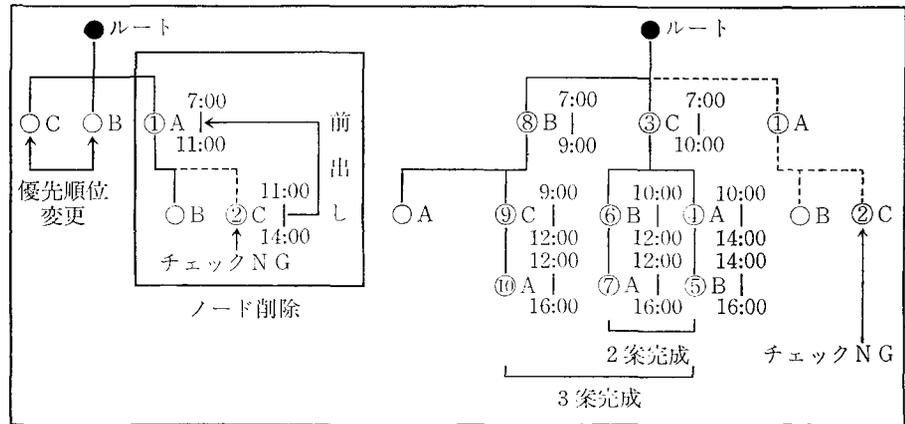


図7 枝の効率的生成

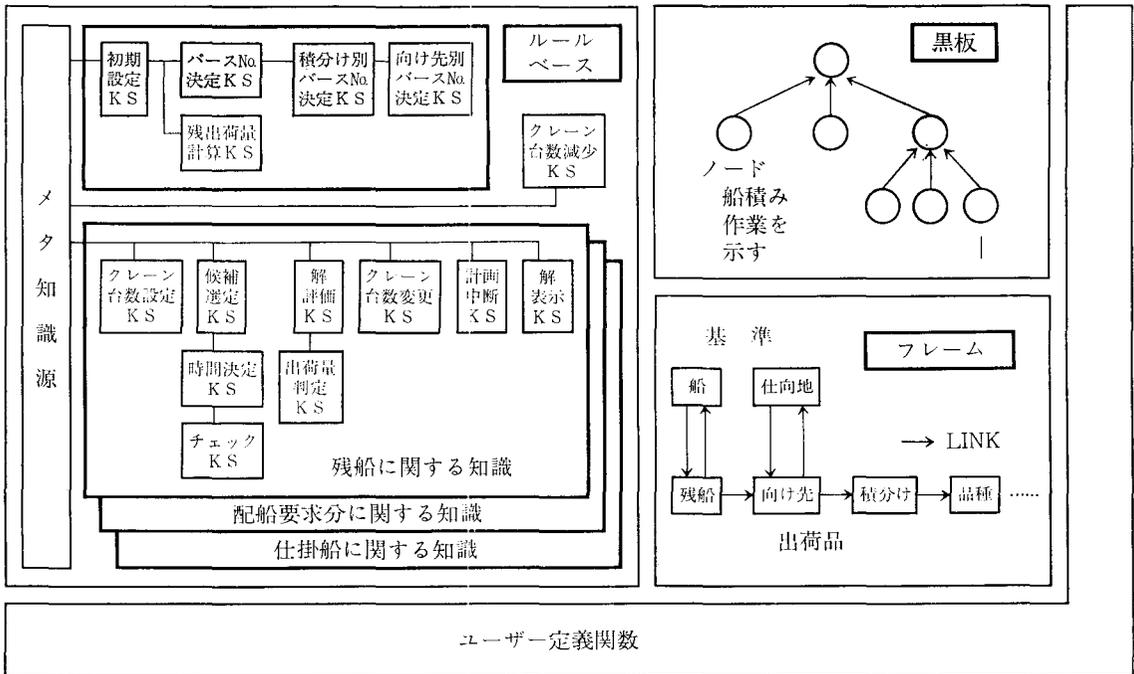


図 8 エキスパートシステム構成 (注) KS (Knowledge Source : 知識源) はルール群を示す

場合に、専門家の解決方法から解法モデルを構成するのである。しかし現実には専門家の解決方法といっても、陽に現われるものではなくそのモデル化は設計者のセンスに任されている状況にある。一方、ORの解法モデルは多数存在しているし、事例も豊富である。したがってエキスパートシステムの効果的な展開のためにも、OR技術の活用が有効になっていくものと思われる。

#### 参 考 文 献

- [1] 佐伯, 他: 物流合理化シリーズ, 鉄鋼のIE, Vol.23, No.1(1985)~Vol.24, No.6(1986)
- [2] 福村: 鋼材出荷計画エキスパートシステム, 富士通ラージシステム研究会事例研究会資料(1987)
- [3] 山川, 他: 日間計画問題に対するアプローチ, 第22回SSOR予稿集(1987)
- [4] 佐能, 他: 鉄鋼業における計画立案業務へのエキスパートシステムの適用, 情報処理学会第35回全国大会予稿集(1987)
- [5] 山川, 他: 計画型エキスパートシステムの開発, OR学会1987年度秋季研究発表会予稿集(1987)

#### 事例研究の原稿募集!

ORの特徴は実践にあるといわれています。実際的な応用をぬぎにした理論ということはORでは考えられません。本誌でも以前から会員の皆様からの事例研究の報告をお願いしてききましたが、まだ十分な成果をあげているとはいえません。

もっと気軽に、「この問題はこう処理したが、もっとよい方法はないか」、「やってみたけどなかなかうまくいかない」というような事例や問題提起をどしどししていただきたいと思います。会員同士の知恵の交換というつもりでこの欄へのご投稿をお願いします。

原稿の長さ: 学会原稿用紙36枚 (25字×12行) 以内 (図・表のスペースを含む)

申し込み: 学会事務局へ原稿用紙をお申し込みください。

(OR誌編集委員会)