

リレー解説



エキスパートシステムの諸事例-II

製紙プラント運転計画作成システム†

小島 昌一†† 森 芳立†††

1. はじめに

本稿は王子製紙(株)苫小牧工場の製紙プラントの運転計画作成システムについて述べる。このシステムは工場全体の生産活動を支援する統合システムであるミルワイドシステムの計画レベルに位置づけられており、他のプラントの状況や受注の状況に応じて効率のよい運転計画を作成するものである。

従来からスケジューリング技法はORの分野で研究され、PERT、MRPやジャスト・イン・タイム・スケジューリングなどの成果を生み出してきた。しかし生産の条件が複雑化してくるに従って、このような技法だけでは対応しきれなくなってきた。これは例外的な条件がいろいろ存在するため、割合単純な条件下を仮定している従来の技法で「最適解」を求めることが難しくなってきたためである。われわれはこのような状況のもとで、専門家が使っているノウハウを計算機に載せることによって種々の条件を満たす「満足解」を得ることを目的とした。スケジュールの評価はいろいろな側面での評価があり、それらを統合して一つの指標にするのが困難な上に、ヒューリスティックスを用いて探索空間を狭めているために「最適性」は保証されないが、各種指定された制約条件は全て満たす解を求めるようにした。

ここでは運転計画を作成するための方式及び知識とその運用のための環境を中心に述べる。

2. システムの概要

王子製紙(株)苫小牧工場は大型の新聞用紙専用

抄紙機5台、印刷出版関連用紙用の中型抄紙機5台の計10台の抄紙機があり、その生産規模は年産およそ百数十万トンで我が国で消費する新聞用紙の約30%を供給している。原料のパルプを製造する設備は10数種類の系列があり、トータルで約20種類あるパルプ原料を製品の品質に合わせて配合して1カ月で約200種類の製品を生産している。またパルプ製造と抄紙工程で消費されるエネルギーは電力250MW/H、蒸気900t/Hの規模であり、これは北海道で消費する電力の約1/10に当たっている。

苫小牧工場では図-1に示すように計画から管制・操業までの全てのレベルで工場全体の生産活動を支援するためのミルワイドシステムと呼ばれるコンピュータシステムを構築している。このなかで計画レベルに位置し、抄紙の計画を作成するシステムをエキスパートシステムとして実装している。この計画を基にエネルギー経済運用システムや原質工程(パルプ製造工程)総合情報システムが最適化手法などを使って最適運転され、動力の供給やパルプの供給がなされる。このエキスパートシステムは1カ月の月次計画と1週間の実行レベルの計画の2種類の生産計画を立てている。

上記のおのおの計画は次のような種々の制約条件を考慮しながら行われなければならない。

- (1) 製品を生産する抄紙機、納期、生産量
- (2) 製品間の生産の組合せ
- (3) 原料バランス、エネルギーバランス

(1)は受注した製品を生産する抄紙機の指定と納期及び要求される生産量で、製品個別の制約とすることができる。

(2)は製品の品質や付帯する設備上の制限から生じるもので、1台の抄紙機の中での生産順序を規定する制約や抄紙機間での同一期間で生産することに関する制約である。たとえば「同じ抄紙機

† Various Cases of Expert Systems-II A scheduling System for a Paper Making Plant by Shoichi KOJIMA (Systems & Software Engineering Laboratory, Toshiba Corp.) and Yoshitatsu MORI (Control Systems Department, Oji CO. Ltd.).

†† (株)東芝システム・ソフトウェア技術研究所
††† 王子製紙(株)制御本部

で白色度の高い紙を抄いた直後に白色度の低い紙を抄いてはいけない」というような制約や「ある種類のパルプを原料として抄いている紙は他の抄紙機では同時に抄いてはいけない」というような制約である。

(3)は、パルプを製造/供給している原質・調成部門や動力部門からの要求で「なるべく原料やエネルギーの消費量を規定値以下にする」という制約である。もちろんこれらの供給能力を越えて生産に使うことはできない。

この計画システムは本社から送られてくる製品受注量に基づき、各抄紙機の製品ごとの生産開始時刻と終了時刻を全ての制約条件を満たすように決定するものである。

3. 階層スケジューリング

この計画を作成するためには考えられる組合せの大きさと制約条件の複雑さから探索空間はかなり大きなものになっている。この大きな探索空間を小さくすることは効率的に計画を行うために不可欠である。

この計画に課せられた制約をみてみると、納期や組合せ制約のように個別の製品を計画する時点でそれぞれ評価できるものと、バランス制約のように全体の計画が一応できた時点ではじめて評価できるものがある。そこでわれわれはまずスケジューリングを二つのフェーズに分けた。一つは

納期や組合せ制約を満たすスケジューリングであり、もう一つはその結果をベースとした原料やエネルギーのバランスをとるスケジューリングである。さらに納期や組合せ制約を満たすスケジューリングの探索空間を削減するためにそれを二つのスケジューリングに分割した。その結果、計画全体は以下のように3サブシステムに分割され階層的に計画を立てていく方式となった。

第一のサブシステムは大枠配置と呼ばれるもので、性質が似ており納期の近い製品を一つのグループ(大枠と呼ぶ)としてまとめ、そのグループごとで計画を立てるものである。ここでは大枠単位での納期、生産要求量、組合せ制約を満足するように計画が行われる。

第二のサブシステムは詳細配置と呼ばれるもので、大枠配置で決められたおのおののグループの中を各製品に分解していくものである。ここでは各製品ごとの納期、生産要求量、組合せ制約を満足するように計画が行われる。

第三のサブシステムは置換え処理と呼ばれるもので、詳細配置で作られた運転計画を制約条件の範囲内で置き換えることにより、原料のパルプの消費量バランスやエネルギーの消費量の制約をとるようにするものである。

このように三つのサブシステムに分けることによって一時に考慮する制約条件や製品の数を減らして効率的なスケジューリングを行っている。

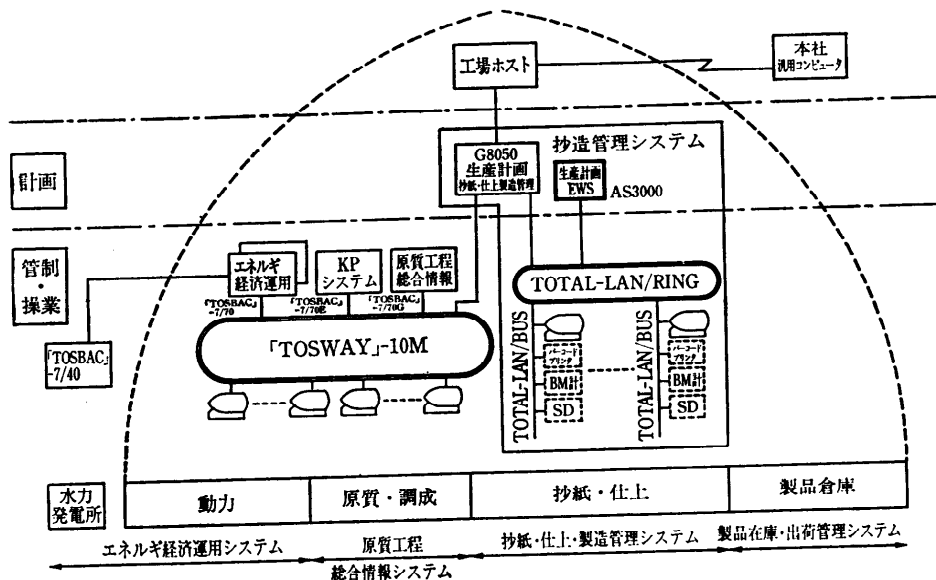


図-1 王子製紙(株)苫小牧工場ミルワイドシステムの構成

これらのサブシステムは大枠配置、詳細配置、置換え処理の順で実行されるが、前のサブシステムの結果が後ろのサブシステムのことをまったく考慮していないと、解が求まらないで前のサブシステムを実行し直したり、後ろのサブシステムで解を求めるのにかなりの時間が必要であったりすることが考えられる。

大枠配置と詳細配置の関係では、配置された大枠の範囲内で詳細配置ができないというケースがこれに当たる。これは大枠配置で大枠に対して与えられる制約の中に個々の製品で与えられている制約の一部が入っていない場合に起きる可能性がある。これに関しては大枠を構成するときに、製品特性が似ている、つまり与えられている制約が似ているものをグループ化し、問題になる可能性のある制約は大枠の制約として取り入れることで実際には問題が起こらないようにしている。

大枠配置、詳細配置と置換え処理の関係では、置換え配置で調成すべき場所の多さが問題になる。調成が必要な原因としてはパルプの製造能力と電気の供給能力がある。パルプを製造するために必要な電気はかなりばらついているため、どの種類のパルプを製造するかで電気の消費量が変わってくる。パルプの製造能力から問題になるパルプの種類は経験的に分かっており、それらの問題のパルプをある量以上使う製品については同時に製造しないように大枠配置や詳細配置で制約をかけている。また、パルプの製造能力での問題がなくても、そのパルプを製造するために大量の電気を消費するパルプを使用する製品に関しても同様に同時に製造しないように制約をかけている。つまり、供給能力に比べて消費が多くなる可能性のある資源に関しては、それらを大量に使用する製品同士の間で制約をつけることによって置換え処理での処理を抑えている。

4. 運転計画作成の知識分類

各サブシステムにおいて計画を行うための知識は大きく分けて以下の三つに分類される。

- (1) タスク制御知識
- (2) ドメイン知識
- (3) 戦略知識

タスク制御知識は計画を作成するためにどのようなタスクがどのように実行されるかを表すため

の知識で、問題解決のフローである。この知識は専門家の問題解決の手順から作られる。この知識はプロダクション・ルールで記述されている。

ドメイン知識は問題の特徴を決めている知識である。たとえば製品に対するパルプの配合率やエネルギーの使用量であり、各種の組合せ制約条件である。前者のような知識は製品のデータベースなどからとることができる。一方、後者のような知識は専門家の経験から得られるものであり、どのような制約があり、その制約を守るためにどのような操作が必要かをフレームとプロダクション・ルールを使って記述している。

最後の戦略知識は計画を効率的に行うための知識で、大枠配置や詳細配置では大枠や製品をスケジューリングする順序や最初にスケジューリングする場所及びバックトラックに関する知識がある。これらの知識はプロダクション・ルールや手続きによる評価関数などで記述されている。また、置換え処理においては置換え相手の探索を行うための知識が最も重要な知識の一つである。

以上をまとめると表-1 のようになる。

5. 運転計画作成システムの実装

運転計画作成システムはエキスパートシステム構築ツール ASIREX²⁾ 上に構築されている。この章では各サブシステムの推論方法について述べる。

5.1 大枠配置

このサブシステムで行う問題はいわゆる制約充足問題¹⁾として定式化できるものである。ここでは原則として生成検査法に従って以下のような手順で計画を作っている(図-2)。

- (1) 未決定の大枠を余裕度に従って一つ選ぶ。
- (2) 大枠の開始時刻を決める。
- (3) 組合せ制約をチェックし、余裕度を計算する。
- (4) 全ての制約が満たされていれば(1)へ行く。
- (5) 制約を満足するのにボトルネックとなっている大枠を探す。
- (6) 探した大枠を移動する。
- (7) (1)へ戻る。

このサブシステムでは(1)の大枠の選択が重要で

ある。ここでの選択の誤りは後で多くのバックトラックを引き起こし、推論効率を落とす原因になるためである。ここでは最小余裕戦略と呼ばれる戦略を採用している。これは各未配置の大枠ごとに、

$$\text{余裕度} = \text{配置可能時間} / \text{大枠の配置時間}$$

で余裕度を計算し、余裕度の小さい順に配置をしていく戦略である。ここで配置可能時間はそれぞれの大枠が全ての既配置の大枠に対して制約条件を満たせる時間の合計である。つまり、余裕度が1.0であれば、それを配置できる所はそこだけという意味であり、1.0未満であれば既配置の大枠のいずれかを変えないかぎり計画ができないという意味になる。このシステムでは組合せ制約は大枠の2項関係で全て表せるので、余裕度の計算は簡単にすることができる。

5.2 詳細配置

ここでは大枠配置と同様の方式で計画を作成する。大枠配置と異なる点は扱うものの単位が大枠から個々の製品に細分化されている点と、大枠配置で決定された範囲内で個々の製品の配置を考えればよいことである。

5.3 置換え処理

すでに詳細配置で全ての組合せ制約が満足された計画を視点を変えて約20種類ある原料のパルプやエネルギーの消費を規定量以下にして平準化を図る処理である。しかし、全てのものが完全に平準化されることは専門家が行ってもできない場合が存在する。また、ここでは製品の生産の分割も考慮に入れており探索空間はほとんど無限である。そこでわれわれは平準化の目標を最初から最

終目標とせず、暫定的な目標が満たされたら目標を一段上の目標に改める逐次改善方式を取っている。ここでどのくらいのスピードで目標を上げていくかが推論の効率を左右する大きな知識である。また、製品の生産の分割もいくつかのパターンだけに固定して探索空間を減らしている。

平準化の目標が設定されると、その目標を満たすためにまず専門家のヒューリスティックを用いて置換えを行う。もし置換えのヒューリスティックがない場合は最大超過最小使用戦略を使って置換えを行う。これは以下の手順で行う(図-3)。

- (1) 最も超過しているパルプまたはエネルギーとそれを使っている製品を見つける。

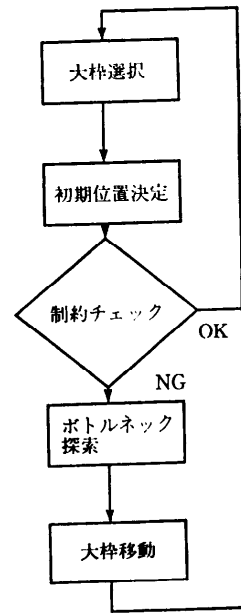


図-2 大枠配置のタスクフロー

表-1 知識分類表

知識分類	サブシステム			知識表現	保守担当者
	大枠配置	詳細配置	置換え処理		
タスク制御知識	図-2	図-2	図-3	プロダクション・ルール	開発者
ドメイン知識	組合せ制約	組合せ制約	組合せ制約 パルプ配合率 エネルギー消費率	フレーム + プロダクション・ルール テーブル	エンドユーザ 計算機の専門家 エンドユーザ
戦略知識	大枠選択 初期配置位置 バックトラック	製品選択 初期配置位置 バックトラック	置換え対象探索 ゴール移動	評価関数 プロダクション・ルール プロダクション・ルール 手続き 手続き	開発者 開発者 開発者 計算機の専門家 開発者

(2) 問題のバルブまたはエネルギーをあまり使っていない製品を探す。

(3) 置換えを行い、他の全てのバルブやエネルギー使用量をチェックする。

(4) もし前より悪い状態であれば(2)にバックトラックする。

(5) (1)へ行く。

6. 知識の保守

運転計画支援システムの運用環境は常に変化することが予想される。たとえば、生産する製品の種類が増えたり、抄紙機がリプレースされたりする。このような事態に対応するために知識の保守性を上げておくことは重要なことである。また、実際の運用になればシステムを構築した人はほとんど保守の場にはいないと予想できる。そこでわれわれは問題の構造の変化をとまなうような大きな変化を除いてはできるだけ現場で保守をできるように考えた。

変化の頻度と保守の難しさによって知識を三つのレベルに分け保守のツールや方法論を整備した。

最も頻繁に保守されるレベルは新しい製品や原料が追加された場合などである。この場合は新しい組合せ制約が追加される。ほとんどの組合せ制約は数種類の定型的なパターンで記述できることが分かっている。そこでこのレベルの保守は計算機の知識がほとんどないシステムの利用者が直接行えるようにパターンごとの表形式のエディタを用意した(図-4)。

次のレベルは新しいタイプのパターンに属する制約の追加や置換え処理における置換え対象を探索する戦略の保守である。これらの知識は一定の枠組みのプロダクション・ルールで記述されておりそれを追加・修正すればよい。しかし、枠組みは定型のパターンとしては用意できないのでこのレベルの保守は計算機のある程度分かった人が担当する部分とし、一定の形式に従って知識を追加変更していけばよい。最後のレベルはタスクの制御知識などシステム

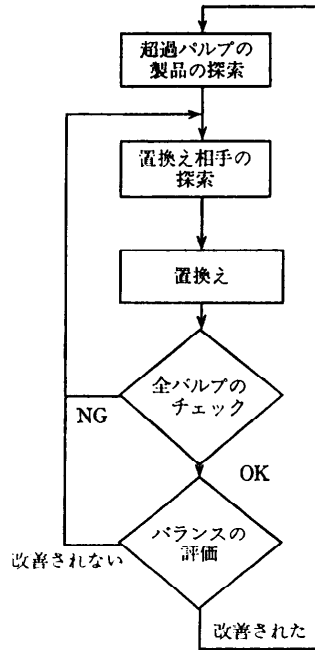


図-3 置換え処理のタスクフロー

一定期間後抄道ルール						
(抄紙機1の抄物1)の抄道後、(期間)以内、(抄紙機2の抄物2)を抄かない						
抄紙機1	抄物1		抄紙機2	抄物2		期間
	品番	大枠名称		品番	大枠名称	
MC 3	322	ZP956	MC 3	278	QE33256	1.0
MC 8 MC10	264	RL6543	全M/C	280	QE33256	96.0
全M/C	452	F13832	MC 2 MC 3 MC 4	326	AJ39289	120.0
MC 1 MC 2 MC10	350	YQ38912	MC 1 MC 2 MC10	407	DK8493	96.0
MC 3 MC 4 MC 5	466 405	GE9533 DK8493	MC 3 MC 4 MC 5	331	DP93822	120.0
MC 3 MC 4 MC 5 MC 6 MC 7	407	DK8493	全M/C	271	ZI539	168.0

図-4 知識エディタ

全体に影響する知識であり、ローカルに修正するのは危険な知識である。また、これらの知識は頻繁に変更されることはないのでシステムの改造という位置づけで保守を行うことになる。

抄送スケジュール (月次計画) 1990年 2月 セット1
半角英数字

抄送スケジュール印刷	欄付表	バルブ取高 (-一括)		バルブ取高 (時間帯)		電力予想負荷		エネルギーバランス		抄送明細		組織基本配合率		バランス計算		ファイル管理		ES実行		紙生産高印刷		終了
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
日付	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木
配合区分	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
MC 1	127	177		1423	212	27	273	23	111	111	115	127	273	14	21							
MC 2	007	073	212	105	29	288	287	28	00	003	286	102	8	224	16	21						
MC 3	27	287	287	277	158	287	284	297	277	158	2	4	166	111	111	111	297					
MC 4	21	71	221	23	13	20	11	21	13	514	13	15	18	154	175	154	154	18	15	18	11	12
MC 5	184	180	151	175	0	127	127	184	273	15	18	15	18	154	175	154	154	18	15	18	11	12
MC 6	419	P12																				
MC 7																						
MC 8	75	703	586	554	183	183	183	602	641	560	665	825	725	725	725	766	735					
MC 9	81	861	85	921	853	902	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
MC10	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221

図-5 実行結果例

7. 実施例

図-5 にスケジュール結果の画面を示す。縦軸が抄紙機を表しており、横軸が時間を表している。各セルには製品切り替え時刻と製品コード及び製品名が入っている。

計画作成の時間は与えられた生産要求によってかなり異なるが、通常は大枠配置に約 20 分、詳細配置に約 45 分、置換え処理に 3~6 時間を要している。この例は専門家が行えば約 3 日程度必要な計画である。

8. おわりに

製紙プラントの運転計画支援システムをエキスパートシステムの部分を中心に紹介した。このエキスパートシステムは 1989 年 1 月から実稼働している。開発に約 27 カ月を要し、ドメインの専門家が 3 人と開発に 3 人かかった。三つのサブシステムはそれぞれルールが約 50 個と数百個の制約条件をもっている。

この計画システムはこの上にかなり高機能なスケジュールのエディタをもっている。これによってユーザはエキスパートシステムが出してきた結果を自由に編集できる。このシステムのようなスケジューリング型のシステムは完全には人間の意図したとおりに動かないことが多いと考えている。エキスパートシステムが出してきた結果の編集機能はこのようなシステムには必須であろう。

スケジューリングのような分野では専門家から全ての知識が得られることがなかなか難しい。ド

メインの知識は比較的よく取れるが、戦略のヒューリスティックスはかなり難しい。しかし、この辺りは学習的な手法を導入していける可能性があると考えている。

参考文献

- 1) Keng, N. and Tum, D.Y.Y.: A Planning/Scheduling Methodology for Constrained Resource Problem, Proc. IJCAI '89, pp. 998-1003 (1989).
- 2) 末田他: エキスパートシステム構築支援ツール IREX, 第 5 回知識工学シンポジウム, pp. 159-163 (1987).

(平成 3 年 7 月 8 日受付)



小島 昌一 (正会員)

1955 年生。1978 年東京工業大学工学部経営工学科卒業。1980 年同大学院修士課程(システム科学専攻)修了。同年(株)東芝入社。総合研究所を経て、現在システム・ソフトウェア技術研究所主任研究員。エキスパートシステムの開発環境の研究開発およびその適用に従事。IEEE, 人工知能学会各会員。



森 芳立

1954 年生。1977 年東京工業大学工学部生産機械工学科卒業。1979 年同大学院修士課程(生産機械工学専攻)修了。同年王子製紙(株)入社。苫小牧工場施設部を経て、現在技術本部制御システム部技師。計算機制御、情報システムの開発・導入、プラント・エンジニアリングなどに従事。日本機械学会、日本 OR 学会各会員。