事例研究

多品種生産プロセスのための生産計画ソフトウエア

——合繊工場での事例——

鹿倉　尚夫

1. はじめに

合繊，フィルムなど東レの主力製品の製造プロセスでは，同一のプロセスで原料・口金・運転条件などを切り替えることにより多くの異なる品種を生産している．

このような多品種生産プロセスでは，どの品種をどの機械でどれだけ，いつ生産するかについて自由度が大きく，また切替ロスも発生しやすいため，生産計画の良し悪しが生産効率を大きく左右する．

しかし顧客ニーズの多様化にともなう多品種化の進展で計画立案作業はその複雑さを増し，いかなる熟練者といえども常に良い計画を作成することは困難になってきた．

ここで紹介する生産計画ソフトウエアは，こうした状況のもとで“より有利な計画”を作成するため，熟練者のノウハウをもとに計画作業に関する基準を明確にし，その中で普遍性のある部分をシステム化したものである．

2. 合繊製造プロセスの生産計画

2.1 プロセスの概要

図1は，対象とする合繊製造プロセスの概要である．

しかくら　ひさお　㈱東レシステムセンター　第3事業部　〒520 大津市園山1—1—1

合繊工場は紡糸工程，延伸工程という2段階の工程からなる．原料のポリマーは重合工場で基本分子（モノマー）を多数結合する化学反応により作られ，成形して一辺が数mmのチップに造粒されている．

紡糸（Spinning）工程では，この原料チップを溶融してノズル（口金）から高圧で押し出し，空気で冷却固化して糸状にし，中間製品（ドラム）として巻き取る．次の延伸（Drawing）工程では，糸の強度を高めるため繊維を構成する分子を十分に引き伸ばして配向を良くする．

通常は，紡糸，延伸の2工程を経て製品となるが，一部の紡糸機では紡糸と延伸を直結させ高速で巻き取ることにより，それがそのまま製品となり，延伸工程を省略できる one-step 型のものもある．

設　備

紡糸機，延伸機ともに多くの機種があり，各機種ごとに数台の機械（以下マシンという）がある．各々の品種は通常複数の機種で処理可能であるが処理能力や品質面で機種間に差がある．さらに，同一機種の中でもマシンによって品種との取組の良さ（相性）が異なることがある．

品種切替

原料チップの種類，紡糸口金の種類（孔の数・形状），付着させる油剤，巻き取るスピード，温度等を変えることにより，1台のマシンでもさま

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ざまな品種ができる．他の品種に変更するさいには品種切替(段取替)が必要となる．多品種化が進んだ結果，1カ月にマシン当り数回～10回の切替が発生するが，切替の前後の品種によって切替に要する時間，作業量には差があるため，各マシンでの品種の生産順序，特に切替ロスの発生しやすい紡糸工程でのスケジュールが重要になる．操業は24時間作業体制をとっているが，品種切替は日勤作業で行なっている．

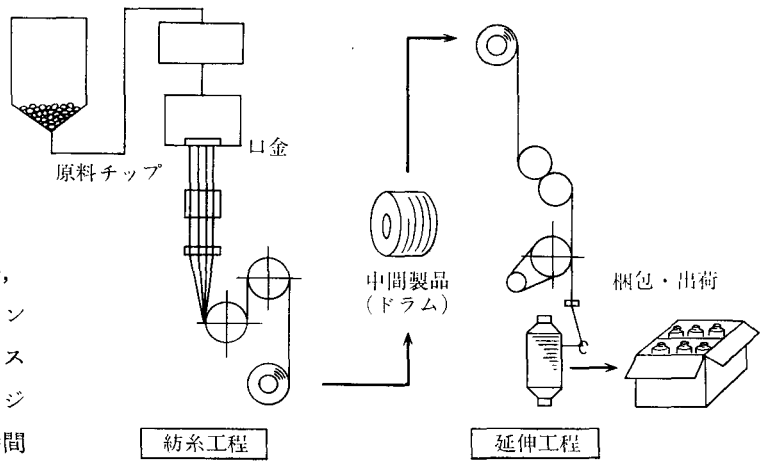

図 1　合繊製造プロセスの概要

2.2　生産計画ソフトウエアの考え方

合繊製造プロセスの生産計画問題は，工程の各マシンの生産品種とそのスケジュールを一定期間(月次，旬次など)まとめ決定することであり，これを“配台”と呼んでいる．配台後，これをもとにさらに詳細な日々の実行スケジュール（時分単位）を決定し，マシンの運転，各種作業を実行していく．

生産計画のソフトウエア作成に当っては，計画のエキスパートのノウハウから計画作業に関する基準を明確にし，自動計画（自動配台）のためのアルゴリズムを確立するとともに，実用上のフレキシビティを高めるため対話型修正システムによりこれを補完することにした(図2)．すなわち，コンピュータでの自動化はソフトウエアの複雑化・硬直化を避けるため計画の細部までカバーすることはせずある限度にとどめ，最終調整は人間に任せることにした．

アルゴリズムに関しては，特に次の点に留意した．

① 多品種，多機種，複雑な加工パタンのもとで，紡糸・延伸両工程間の物量バランス，原料消費量，所要工数分布など，現場全体の整合性を保証する．

② 配台の有利さの基準となる項目(切替ロス，設備負荷，作業負荷，品質など）の重要度の判断・選択については，そのときどきの政策を柔軟に反映できるようにする．

以下，自動配台を中心に紹介する．

3.　自動配台のアルゴリズム

3.1　自動配台の概略

合繊工場での生産計画(配台)立案にさいして考慮すべき要因には，次のようなものがある．

(1) 販売からの要求
- 製品の品種構成，要求量，納期

(2) 生産からの要求
- 生産の連続性，品種切替の容易性
- 資源消費の平準化（設備負荷，作業負荷，原料消費など）
- 設備保全（工事）と技術テスト
- 製造条件（製糸パタン，品種とマシンの取組，マシン能力など）

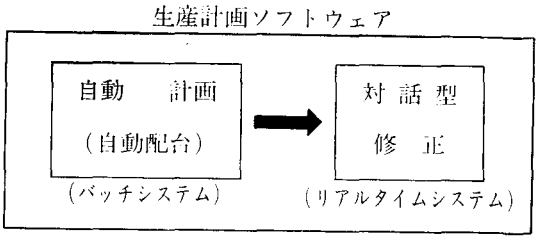

図 2　生産計画ソフトウエアの構成

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

• 作業条件(切替作業の日勤対応など)

自動配台では，以上の要因を

A．各マシンへの品種の割付けに関する要因群

B．マシン内での品種の並び順に関する要因群

に分け，Aをステップ1，Bをステップ2で扱うことにした．また各々のステップで制約が最も弱い要因を目的関数，その他を制約条件とした(図3)．

すなわち自動配台は2つのステップで構成し，ステップ1では①品種構成・要求量 ②工事・テスト日数 ③マシン能力 ④製糸パタを制約条件とし，そのもとで品種とマシンの取組をできるだけ良いものにする．

ステップ2では，ステップ1で求まったマシン別品種割付量(生産量)をもとに①切替条件 ②納期 ③工事・テスト日程 ④製糸パタン ⑤日勤作業条件を制約とし，そのもとで資源消費の平準化度をできるだけ大きくする．

対象工程はステップ1，ステップ2を通じ紡糸，延伸の両工程とし，工程間バランスをとるため両工程を同時に考慮する．計画期間は1カ月を基本としているが限定する必要はなく，10日，15日としても論理は不変である．

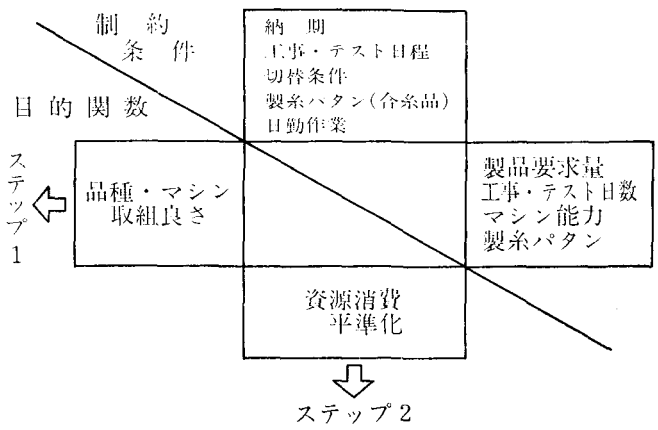

図 3 配台に関する要因の整理

適用手法としては，ステップ1では線形計画法，ステップ2では発見的な平準化アルゴリズムを用いている．また各ステップの目的関数については，そのウエイトを政策的に重みづけすることによって状況の変化に的確に対応できるようにした．

以上に述べた自動配台の考え方を図4にまとめた．

3.2 ステップ1——線形計画によるモデル化

ステップ1は，紡糸，延伸両工程の各マシンで，どの品種をどれだけの量生産するかという“割付けの問題”である．これをＬＰモデルによって定式化すると，

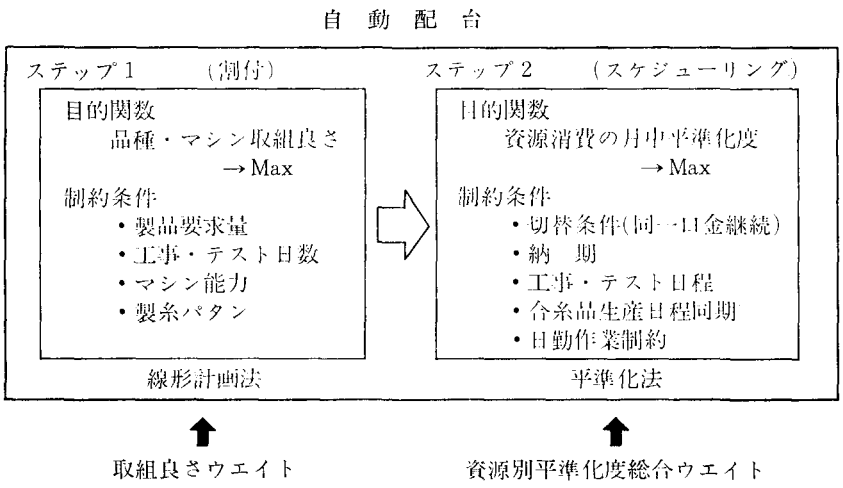

図 4 自動配台の考え方

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会. 無断複写・複製・転載を禁ず.

（モデル１）

$$\underset{x,z}{\text{Max}} \quad wx \tag{1}$$

subject to

$$A\begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}=0 \tag{2}$$

$$z=r \tag{3}$$

$$Bx \leqq c \tag{4}$$

とかける．ここで，

	次元
x：品種・マシン別生産量ベクトル	$N\times 1$
z：製品別生産量ベクトル	$M\times 1$
w：評価ベクトル	$1\times N$
A：物量バランス式係数マトリクス	$L\times(N+M)$
r：要求量ベクトル	$M\times 1$
B：能力マトリクス	$P\times N$
c：設備ベクトル	$P\times 1$
0：ゼロベクトル	$L\times 1$

N：品種・マシン取組の数，M：製品の数，L：バランス式の数，P：マシンの数

である．

モデル１の制約条件(2)は，各々の品種について工程と工程，および工程と製品のあいだでの物流バランスを保証する．Aは図５に示す種々の製糸パタンに応じた物量バランス式の係数マトリクスである．(3)は製品要求量の保証，(4)は各工程のマシン能力についての条件である．

目的関数(1)は品種とマシンの取組みの良さを最大にする．目的関数の係数すなわち評価ベクトルwの要素は，次の式で定義している．

$$w_i=\sum_j u^{(j)} v_i^{(j)}/r_i \tag{5}$$

ここで，

$u^{(j)}$：品種・マシンの取組に関する条件jの重み

$v_i^{(j)}$：品種・マシンの取組iについて条件jが成立するとき１，しないとき０

r_i：該当品種の要求量

である．取組に関する条件jとは品質や生産の履歴に関するものであり，その例を表１に示す．

式(5)では重みの和をその品種の要求量r_iで割っている．これによって，同じ重みならば少量品種が優先的に割りつく．これは一般に品種切替にともなう品質の不安定が多いことを考慮し，取組の良いマシンでの切替が多くなることをねらいとしたものである．

重み$u^{(j)}$は，どの条件を重視するかを政策的に変えることができるよう外部テーブルで点数登録を行なう．

表１　取組の条件の例

取組の条件 j	内　容	$u^{(j)}$	$v_i^{(j)}$	w_i
1	製造可能のみ	1	0	$\sum_{j=1}^{7}\frac{u^{(j)}v_i^{(j)}}{r_i}=82/r_i$
2	３カ月前生産	2	1	
3	２カ月前生産	4	0	
4	前月(末以外)生産	8	0	
5	優先マシン	16	1	
6	優先機種	32	0	
7	前月末生産	64	1	

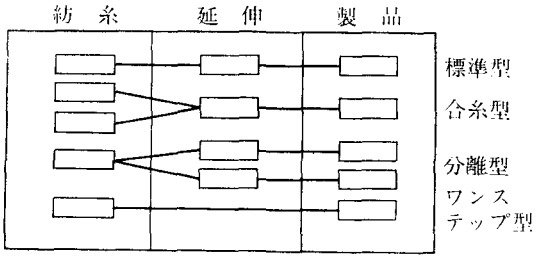

図５　製糸パタン

要求量達成度パラメタθ

モデル１では実行可能解の存在は保証されない．そこで緩めうる制約条件として(3)の製品要求量について要求量達成度のパラメタθを導入し，最小限度のカットとなるよう次のようなパラメトリックＬＰモデルとした．

（モデル２）

$$\underset{x,z}{\text{Max}} \quad wx$$

subject to

$$A\begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}=0 \tag{2}$$

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

$$\theta^* \boldsymbol{r} \leqq \boldsymbol{z} \leqq \boldsymbol{r} \qquad (3)'$$

$$B\boldsymbol{x} \leqq \boldsymbol{c} \qquad (4)$$

ここでθ^*は，(2)，(3)′，(4)を満たす最大のθ($0 \leqq \theta \leqq 1$) である．すなわち，全製品の中の最低の達成度が最も高くなるように$\theta=\theta^*$をパラメトリックに求めている．(3)′式では要求量$\boldsymbol{r}$を製品生産量$\boldsymbol{z}$の上限としているが，これは要求量以上に生産してもよいかどうかはケースバイケースの政策的判断を必要とするからである．

3.3 ステップ2——エントロピーによる平準化

ステップ2は，ステップ1で各マシンに割りつけた品種をどういう順番で生産するかという“スケジューリングの問題”となる．この問題を数学的に表現するため，ここで0-1整数変数y_{it}を導入する．

$y_{it}=1$，品種iを第t日に生産するとき
0，その他

y_{it}により，ステップ2の問題はＩＰモデルとして次のように定式化できる．

（ＩＰモデル）

$$\underset{Y}{\text{Min}}\ v \qquad (1)$$

subject to

$$\sum_t y_{it}=d_i \quad \text{for } \forall i \qquad (2)$$

$$\sum_{i\in M} y_{it}=1 \quad \forall M, t\ (M:\text{マシン}) \qquad (3)$$

$$d_i y_{it}-d_i y_{i,t+1}+\sum_{s=t+2}^{T} y_{is} \leqq d_i \quad \forall i,t \qquad (4)$$

$$\sum_{t=t_1}^{T} y_{it}=0 \quad \forall i\ (t_1:\text{納期}) \qquad (5)$$

$$y_{i1}=1 \quad \forall i\ (\text{前月末品種}) \qquad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\left[y_{it}\sum_j (y_{j,t-1}+y_{j,t+1})\right] \geqq 1 \quad \forall i,j\ (\text{連続品種}) \qquad (7)$$

$$\sum_{t=1}^{T} y_{it}y_{jt} \geqq \min(d_i,d_j)-1 \quad \forall i,j\ (\text{合糸品種}) \qquad (8)$$

$$y_{it}-y_{i,t+1}=0 \quad \forall i,t\ (t:\text{休日}) \qquad (9)$$

$$BY \leqq (1+v)C \qquad (10)$$

ここで，　　次元

Y：品種別生産 on-off マトリクス　$I\times T$
$Y=(y_{it})$，$y_{it}=1$，0

d_i：品種(紡糸) i の生産日数⬅ステップ1

B：資源原単位マトリクス　$K\times I$

C：資源制約マトリクス　$K\times T$

v：資源消費のオーバー率

T：対象期間の日数，K：資源の種類数

である．品種iは紡糸マシンが異なれば別品種として扱う．

ＩＰモデルの制約条件(2)はステップ1で求められた各品種の生産量を，そのマシンの1日当りの能力で割った要生産日数を満足するという条件である．条件(3)は1マシンでは同時に複数の品種は生産できないことを示し，(4)はマシンの中での同一品種の分割を禁じている．(5)は納期制約，(6)は月末生産品種の継続を保証し，(7)は切替の容易な品種間の連続を指定したものである．また(8)は製糸パタンからの制約で合糸品の生産日程をそろえること，(9)は品種切替など日勤作業が休日に行なわれることを禁じたもの，(10)は資源消費量についての制約である．

これら(2)～(10)の制約の中で(10)の資源消費量を緩めうるものとし(バッファーの存在)，そのオーバー率vを最小にする，すなわち資源消費のピークの平準化を図るのが目的関数(1)である．

しかし，この定式化はステップ2の問題を整理する上では役立っても実用には無理がある．整数変数の数が数千～1万になるので，解が存在したとしても企業内で考えうる実用的な時間内ではまず解けない．

そこでステップ2については，多くの場合最適に近いであろう解が必ず得られる近似解法として，以下に述べる“エントロピーによる平準化アルゴリズム”を用いている．

ステップ2のアルゴリズム

このアルゴリズムでは，ＩＰモデルの式(1)～(10)のなかで，マシン内の制約すなわち各マシン単位

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

で考慮できる制約条件(2)～(9)と，多くのマシンを同時に考慮する資源消費平準化の条件(1)，(10)とに分けて考える．そして，アルゴリズムの前半で各マシンごとに条件(2)～(9)を満たすスケジューリング(品種の並べ方)のケースをひろいあげ，後半でそれらのケースからの選択の範囲で，資源平準化を図るという方法をとっている(図6)．

前半部分ではマシン内制約を満たすスケジューリングのケースを効率よくひろいあげることが課題である．このためケース生成についてbranch-and-bound 法の木型探索の考え方を適用し，制約を満たさないケースの生成を大幅に削減している．

アルゴリズムの核は後半の平準化部分にある．ここでは次の2つの概念がキーポイントになっている．

①出現確率

②平準化度(エントロピー)

以下，この2つの概念を中心に平準化部分の説明を行なう．

ＩＰモデルでは0-1整数変数 y_{it} を導入した．この y_{it} を用い，品種の出現確率 p_{it} を次のように定義する．

$$p_{it}=\sum_{s=1}^{\bar{S}_i} y_{it}^{(s)}/\bar{S}_i$$

ここで，

$y_{it}^{(s)}$：スケジュール s について，
品種 i を第 t 日に生産するとき＝1，
他＝0

$\bar{S}_i$：品種 i を含むマシンについて，マシン内の制約を満たすスケジューリングのケース数

である．p_{it} は，スケジュールが確定していない段階で品種 i を第 t 日に生産する確率を求めたものである．p_{it} は次の性質を満たす．d_i は品種 i の要生産日数である．

$$\sum_t p_{it}=d_i$$

$$\sum_{i\in M} p_{it}=1 \qquad M：各マシン$$

図7に p_{it} の計算例を示す．

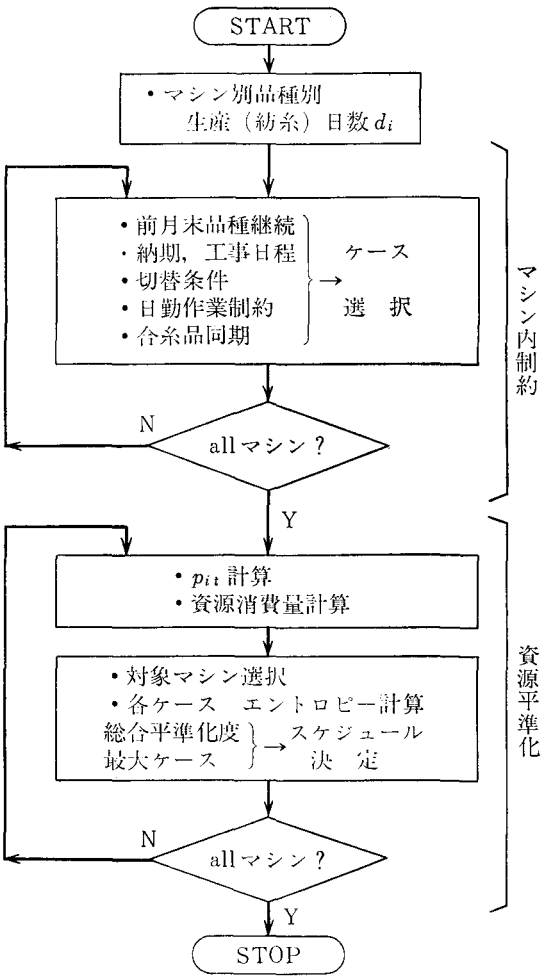

図 6　ステップ2のフローダイアグラム

ステップ2のアルゴリズムの前半では，マシンごとに各マシン単位の制約を満たすスケジュールのケースを選択するが，出現確率 p_{it} はこれらのケースを総合した状態を示している．

資源消費原単位マトリクス B と p_{it} を要素とする出現確率マトリクス P との積 BP によって，総合ケースで計算した資源消費量の推移が求められる．この資源消費量の推移が，計画期間を通してできるだけ平準化するように各マシンでのスケジュールを確定していく．

このとき平準化度を評価する指標としてエントロピーの概念を導入する．資源 k の計画期間での平準化度を，エントロピーの式にしたがい次のよ

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

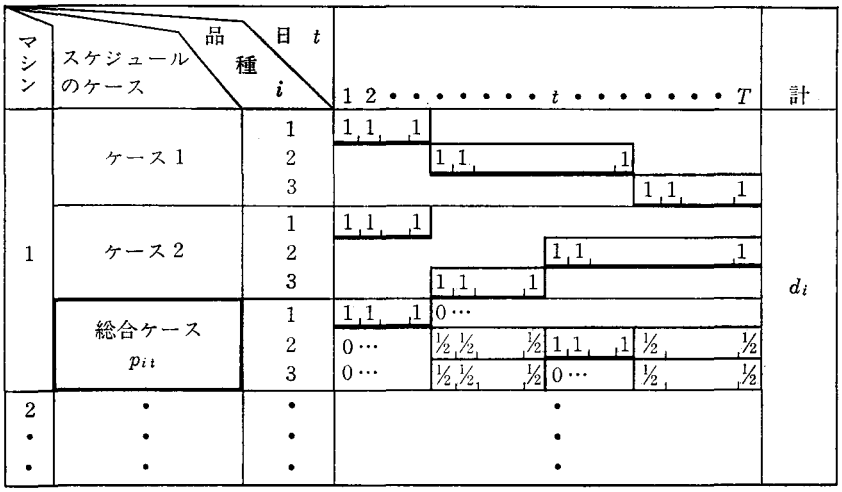

図 7 出現確率

うに定義する．

$$E_k=-\sum_{t=1}^{T} f_t^{(k)} \log_2 f_t^{(k)}$$

ここで，

$\{f_t^{(k)}\}$：資源 k の，制約に対する過不足量の分布

$$f_t^{(k)}=(\boldsymbol{b}_k\boldsymbol{p}_t-c_{kt}+\triangle)\sum_{t=1}^{T}/(\boldsymbol{b}_k\boldsymbol{p}_t-c_{kt}+\triangle)$$

$$\triangle=\min_t(\boldsymbol{b}_k\boldsymbol{p}_t-c_{kt})+\varepsilon$$

$\boldsymbol{b}_k$：資源消費原単位マトリクス B の k 行

$\boldsymbol{p}_t$：出現確率マトリクス P の t 列

c_{kt}：資源制約マトリクス C の (k,t) 要素

である．いま2つのスケジュール S と S' について，資源 k の平準化度が $E_k(S)<E_k(S')$ であったとする．よく知られているように，分布が平準化しているほどエントロピーの値は大きくなる（一様分布のとき最大となる）．したがってこの場合にはスケジュール S' のほうが資源 k についての平準化度が高い．

資源の重要度は設備ネックのとき，あるいは作業負荷ネックのときなど状況に応じて変化する．スケジュール選択にあたっては，これを踏まえ各資源 k の平準化度を総合的に評価することが必要である．そこで資源の総合平準化度 E を次のように定義する．

$$E=\sum_i \beta_i E^{(i)}$$

ここで，

β_i：資源の種類 i についての重要度指定パラメタ

$$0\leqq\beta_i\leqq 1,\qquad \sum_i \beta_i=1$$

$E^{(i)}$：資源の種類 i についての平準化度

$$E^{(i)}=\sum_{k\in(i)} a_k E_k$$

a_k：所要量にもとづく加重平均の重み

である．すなわち，各資源 k の平準化度 E_k を k の所要量にもとづく加重平均によって資源種類ごとの平準化度 $E^{(i)}$ に統合し，さらに政策パラメタ β_i によって総合平準化度 E に統合している．

ステップ2のアルゴリズムでは，各マシンについてその時点で計算した資源消費 BP の総合平準化度 E が最大のケースをもってそのマシンのスケジュールを決定している．そしてスケジュールが決定したマシンについて出現確率 p_{it} を該当ケースの y_{it}（0または1）に変え，BP を再計算して次のマシンのスケジュールを決定する．これを全マシン完了するまでくりかえす．このとき，対象とするマシンの選択の方法が結果に大きな影響をおよぼす．マシンの選択は次のような方法によっている．

手順 1．資源制約オーバー率 v_k が最大の資源 k^*，時点 t^* を抽出（図8）

手順 2．この点に最も強く影響している品種 i^*

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

を選択

手順 3. i^*に対応するマシンを対象として選択

4. 対話型修正システム

自動配台では，以上に述べたアルゴリズムにもとづいて有利な配台を作成するが，ケースバイケースでの政策的な判断は人間のほうが柔軟であり，また細かい条件や例外的な処理などすべてを取り込もうとするとシステムが過度に複雑化，硬直化する．そこで自動配台に100％を求めることはせず，人間の判断を生かせる対話型修正システムと組み合わせることで柔軟に対応できるシステムとした．

5. 適用状況

本稿で述べた生産計画ソフトウエアは昭和56年に完成し，最も多品種化の進んだA合繊工場を対象として適用を図った．その後若干の改訂や機能追加を行ないつつ他工場にも展開し，現在では3工場で定着するに至っている．

その運用形態は，まず月次計画立案時に生産・販売スタッフ間で調整された本社案（各品種の要求量，納期）が工場に伝送されると，①本社案，②コンピュータ内で最新にメンテナンスされている製造条件，③工事・テストなど工場内で事前に入力したデータ，をインプットとして自動配台を実行する．計算時間は，A工場の場合中型汎用コンピュータで約20分を要している．

自動配台結果は当日開かれる工場内の生産会議の場で配布される．計画の担当者は，これをベースに対話型修正システムを用いてさらに詳細に検討し，必要に応じて修正を行なう．また月次計画確定後，月中にしばしば工場内・外の理由による計画変更の要求があり，これについても対話型修正システムを用いて迅速に対処している．

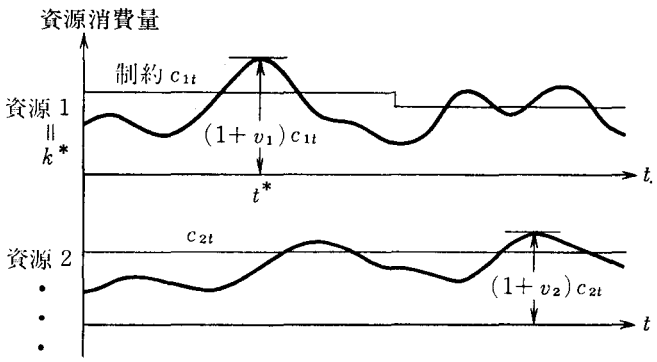

図 8 対象マシンの選択

6. おわりに

合繊工場での例により，多品種生産プロセスのための生産計画ソフトウエアについて紹介した．

生産現場における計画のエキスパートのノウハウをもとに確立したアルゴリズムによって，安定的に有利解が得られる自動配台と，対話修正システムによる使用上の弾力性から，当システムは東レ社内で高い評価を得ており，ORの制度的活用という意味でも数少ない定着例の1つとなっている．

なお，この種の問題はいわゆるエキスパートシステムの格好のテーマでもある．本稿のシステムを基礎として，この知識工学的アプローチをはじめ，さらに多面的な工夫を重ねていきたいと考えている．

参考文献

[1] 鹿倉尚夫：高分子加工プロセスにおける多品種少量生産対応の生産計画ソフトウエア．第6回数理計画シンポジウム論文集，1985

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．