

## 知識処理を応用したプラント作業工程計画支援方式†

野中久典<sup>††</sup> 満田透<sup>††</sup>  
小林康弘<sup>††</sup> 好永俊昭<sup>†††</sup>

プラントの据付作業や保守作業の計画問題に適用可能なマンマシン協調型の作業工程計画支援方式を提案する。本方式は、専門技術者が行う工程調整作業のスピードアップを目的として、①制約指向プログラミングの手法に基づいた制約条件違反の自動解消、②作業割付順序に関するヒューリスティクス（経験的知識）を用いて処理効率を向上した資源の自動平準化、③対話処理による工程調整に適した工程図表示という3つの特徴的な機能を備えている。本方式は、資源の自動平準化機能により初期工程を作成する第1ステップと、専門技術者が対話処理で工程調整を行い、初期工程を改善する第2ステップとから構成される。制約条件違反の自動解消機能は、工程調整の過程で発生する制約条件違反を自動的に解消する。本方式をプラントの、数十～百程度の作業からなるエリアの作業工程計画問題、約80題に試験的に適用した。この結果、本方式の支援機能により、工程計画に要する時間を専門技術者が手作業で行った場合の約1割に短縮できることを確認した。

### 1. ま え が き

作業工程計画や生産工程計画などのスケジューリング問題を体系的に解くための手法として、従来から線形計画法や整数計画法などの数理計画法が用いられている<sup>1)</sup>。問題に関する情報があらかじめすべて与えられており、問題が量的にも質的にも取り扱いやすい形で数学モデルとして記述可能であれば、数理計画法の適用は問題解決に有効である。しかし、実際のスケジューリング問題には、工程に対する評価関数や制約条件が前もって一義的に定めにくいものがある。例えば、工程の状態に応じて適用すべき制約条件の優先度の変更されるような場合、起こりうるすべての状態に対して制約条件の優先度を設定し、問題を完全に定式化することは実際上不可能である。現実の世界では、前述したような数理計画法の適用が困難なスケジューリング問題の最適解あるいは準最適解（最適解の近似解）を、専門技術者はヒューリスティクス（経験的知識）を用いて効率的に求めている。

近年、スケジューリング問題に知識処理を適用し、ヒューリスティクスに基づく問題解決を計算機化する試みが積極的に行われている。例えば、生産システムにおいて、次に加工すべき部品間に競合が生じた場合、その時々状況に適したヒューリスティックな優先規則に基づいて部品を選択し、競合を解消してス

ケジュールを決定していく知識処理手法が提案されている<sup>2)</sup>。実際的な問題への知識処理の適用も進められており<sup>3)~6)</sup>、その代表的なものに製鋼工程計画<sup>7)</sup>、フライト計画<sup>8)</sup>への適用例がある。前者は、まとまった工程ごとに部分スケジュールを作成し、最後にこれらを合成することにより、すべての制約条件を満足する全体スケジュールを作成する。後者は、制約条件を充足させる問題をいくつかの部分問題に分け、大まかな初期ダイヤを作成した後、細かいチェックを実施してダイヤを詳細化する。このようにヒューリスティクスが計算機で扱いやすい形で記述できるスケジューリング問題に対しては、知識処理は有効である。

本論文で対象としているプラントの建設作業工程計画問題は、他のスケジューリング問題と比較して次のような特徴を持つ。

- (i) 計画の規模が大きい。
- (ii) 作業、作業員、作業手法などが多様である。
- (iii) 計画段階においても、建設工程の見直しルーチンワークとして行われる。

このため工程計画に関するヒューリスティクスを、例えば IF-THEN 型のルールとして記述しようとする場合に次のような問題点が生ずる。

- (i) 作業、作業員、作業手法などの組合せで定まる起こりうる状況の数が膨大であるため、ルールの条件部を記述することが困難である。
- (ii) ある不具合を解消するための手段の選択枝が膨大であり、かつ最良の手段を選択する客観的な基準を定めることが難しいため、ルールの実行部を記述することが困難である。
- (iii) 起こりうる状況と、ある不具合を解消するた

† A Knowledge-Directed Scheduling Support Method for Plant Related Activities by HISANORI NONAKA, TORU MITSUTA, YASUHIRO KOBAYASHI (Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.) and TOSHIKI YOSHINAGA (Hitachi Works, Hitachi Ltd.).

†† (株)日立製作所エネルギー研究所

††† (株)日立製作所日立工場

めの手段との組合せによりルール数が膨大なものとなる。

このため、プラントの建設作業工程計画に関するヒューリスティクスをルールとして完全に記述し、かつあらゆる状況に対応するルールを準備することは原理的には可能であっても実際上不可能であり、知識処理技術を用いても工程計画の完全自動化は困難である。現在は専門技術者が工程の状況にアド・ホックに対応し、手作業で工程計画を実施しており、その効率の悪さが問題となっていた。この問題点を解決するためには、専門技術者が工程計画の過程で工程改善のために行う工程調整を適切に支援する方式が必要とされる。本論文では、このような工程計画問題に適用可能な、マンマシン協調型の作業工程計画支援方式を提案する。本方式は、専門技術者が対話的に行う工程調整業務のスピードアップを目的とする。

## 2. 作業工程計画支援方式

### 2.1 方式の概要

作業工程計画では、まず各作業に要する標準的な作業期間、人員や機器などの資源の使用量などの作業データ、作業の順序に関する制約条件などが与えられ、次に工程に対する計画目標や制約条件を満足するように各作業の作業時期（作業の開始・完了時期）を具体的に決定していく。計画自体種々の観点から評価されることを反映して、計画目標も一般には工程計画を行うに当たって考慮すべき複数の副目標の組合せで表される。ここで副目標とは、例えば「特定の資源の使用量を平準化する。」といった基本的な目標である。計画の過程において、必要に応じて標準的な作業データを修正する場合もある。最終的に得られるのは、各作業の作業時期、期間、使用資源量などである。

作業工程に対しては、多様な制約条件が存在する。この制約条件は、例えば「作業Aは、作業Bの完了後に開始しなければならない。」といった特定の作業や作業群に対するローカルな制約条件と、「全工期は200日以内でなくてはならない。」といった作業工程全体に対するグローバルな制約条件とに分けられる。さらにこれらは各々、絶対に守らなくてはならない強い制約条件と、場合によっては変更の認められる弱い制約条件とに分類される。

作業工程計画問題は、計画目標が単純でないことから多目的最適化問題<sup>9)</sup>の1つであるとも考えられるが、各副目標に対応した目的関数の重み付け係数や、適用

すべき弱い制約条件などは、工程計画の結果を評価した後でなければ決定することは難しい。このような理由から、本方式を、以下に述べる2つの処理ステップから構成する。

第1のステップでは、すべての制約条件を強い制約条件とみなし、副目標を1つ選択して、これに対応した目的関数を最適化するような工程を自動的に作成する。以下では、これを工程の局所的最適化と呼び、この結果得られた工程を初期工程と定義する。プラント作業工程計画における代表的な副目標には、全工期短縮と資源平準化とがある。工程計画に際してどちらを優先させるかは一概には言えず、個々の問題に依存する面もあるが、特に計画の初期段階では、全工期を入力として与え、この工期の下で資源平準化を目的とした工程計画を行う場合が多い。本方式では、第1のステップで選択する副目標を、資源の平準化とした。

第2のステップにおいては、専門技術者が弱い制約条件や第1ステップで選択しなかった副目標などを考慮しながら、初期工程に対して対話的に工程調整を実施し工程の改善を図る。ここで工程調整とは、作業期間や作業時期の変更、制約条件の内容の変更や追加・削除などを指す。

本方式の基本構成を図1に示す。以下では各ステップの概略を説明する。

#### (1) 入力データ

入力データは次の3種類である。

##### ①作業データ

工程の各作業の属性の初期データをデータファイル

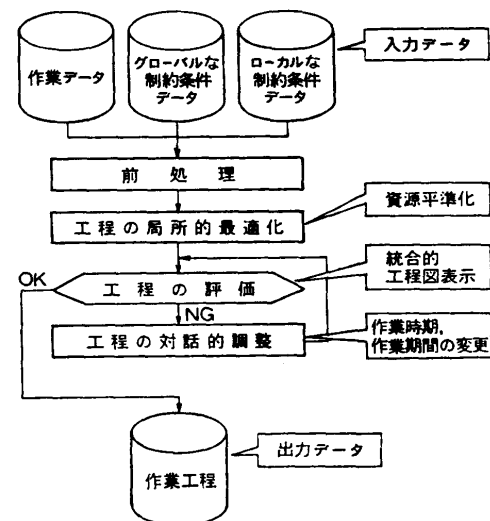


図1 作業工程計画支援方式の基本構成  
Fig. 1 System configuration.

に図2に示す形式で設定する。作業属性として、先行作業名、標準的な作業期間および人員や機器などの資源の1日当りの標準的な使用量などを与える。先行作業とは、現在着目している作業を開始するために完了してはならない作業または作業群である。1つの作業に対して複数の資源が設定できる。

### ②グローバルな制約条件データ

全工期および1日当りの使用資源量の総量に対する上限値を設定する。

### ③ローカルな制約条件データ

作業の時間関係に関する制約条件を、図3に示すルール形式でデータファイルに設定する。本方式では

作業名	先行作業名	標準作業期間	使用資源名
(NAME)	PRE-WORKS	DATE	RES1)
( A )	( )	4	5 → 使用資源量
( B )	( )	5	3 )
( C )	( )	2	4 )
( D )	( A )	5	7 )
( E )	( A )	5	2 )
( F )	( B )	6	5 )
( G )	( B )	5	2 )
( H )	( C )	9	6 )
( I )	( C )	6	4 )
( J )	( D )	3	1 )
( K )	( D )	8	4 )
( L )	( F K )	5	6 )
( M )	( E G I )	2	4 )

図2 作業データの表現

Fig. 2 Representation of work data.

1. 絶対時間での制約条件
(r1 time (A must end before (1990 9 1)))
① ② ③
①: ルールのID
②: 本ルールが時間的制約条件に関するものであることを示す。
③: ルールの本体であり「作業Aは、1990年9月1日以前に完了しなければならない。」という制約条件を表わす。
2. 相対時間での制約条件
(r2 time (B must start before 2 after C end))
④
④: 「作業Bは、作業Cの完了日の2日後より前に開始しなければならない。」という制約条件を表わす。

図3 制約条件の表現

Fig. 3 Representation of constraints.

制約条件として、ある作業の作業時期を具体的な日時で規定する絶対時間での制約条件と、ある作業と他の作業との相対的な時間関係を規定する相対時間での制約条件の2種類を扱うことができる。

### (2) 工程の局所的最適化

作業データおよび制約条件を固定した条件下で、資源の使用量を全工期に渡って平準化する。

### (3) 工程の評価

工程図、資源の山積み表、全体工期などの情報を参照して専門技術者が工程を評価する。

### (4) 工程の対話的調整

専門技術者が必要と判断した場合、対話的調整を実施し、工程の改善を図る。調整の過程で発生した制約条件違反は自動的に解消される。

### (5) 出力データ

本方式の出力データには、各作業の作業時期、期間、資源名とそれに対応する使用資源量などの計画結果のほかに、工期や制約条件などの計画条件、資源の山積み表の作画用データなどが含まれる。データファイルに記憶された出力データから再び工程図を作成し、これに対してさらに工程調整を継続することもできる。

## 2.2 特徴的な機能

以下、本方式の特徴的な機能である、制約条件違反の自動解消、資源の自動平準化、および統合的表示について説明する。

### (1) 制約条件違反の自動解消

時間に関する制約条件を例に説明する。工程内の各作業は、図3に示したような時間に関する制約条件を介して複雑に関連しあい、いわゆる制約ネットワークを構成している。この制約ネットワークは、その規模が大きく複雑になると、専門技術者が直観的に把握するのが難しくなり、1つの作業に対して行った工程調整が、工程の思わぬ部分の制約条件違反を引き起こす場合がある。従来は、専門技術者が各作業間の制約条件を考慮しながら作業時期や作業期間を調整し、手作業で制約条件違反を解消していた。しかし、考慮すべき制約条件や違反の解消法の選択枝は多く、手作業による違反解消処理の効率の悪さが問題となっていた。本機能は、制約条件違反を自動的に解消することにより、専門技術者の行う工程調整作業を支援する。

本機能は、制約指向プログラミングの手法に基づいて<sup>10),11)</sup>、制約条件違反を制約ネットワーク上で伝播させ、違反に関連した作業の作業時期を自動的に調整

することにより違反を解消する。制約ネットワークは無向グラフであり、制約条件違反の伝播は双方向的に起こりうる。本機能においては、専門技術者の行った工程調整に起因して制約条件違反が発生した場合には、工程調整の直接の対象とされた作業を基準として、ここから伝播を開始して違反の解消を図る。これにより、専門技術者の要望に沿った実行可能な工程を求めることができる。

制約条件違反の自動解消手順を図4に示す。本機能は、大きく監視プログラム、作業時期変更プログラム、および制約条件データベースから成る。制約条件データベースには、専門技術者が記述した宣言的な制約条件を、制約条件チェックプログラムの形式(LISPのS式)に変換したものが記憶されている。このS式を評価することにより、それに対応する制約条件の成否を判定することができる。

制約条件違反の解消問題は、制約ネットワーク上の作業において、すべての制約条件を満たす作業時期の組合せを求める探索問題として捉えることができる。作業時期変更プログラムは制約指向プログラミングの手法に基づいて探索を実行する。本プログラムの処理手順を以下に説明する。

- ①制約条件データベース上のS式を逐次評価しているとき、その成否を調べる。制約条件がすべて満足されているならば、処理を終了する。

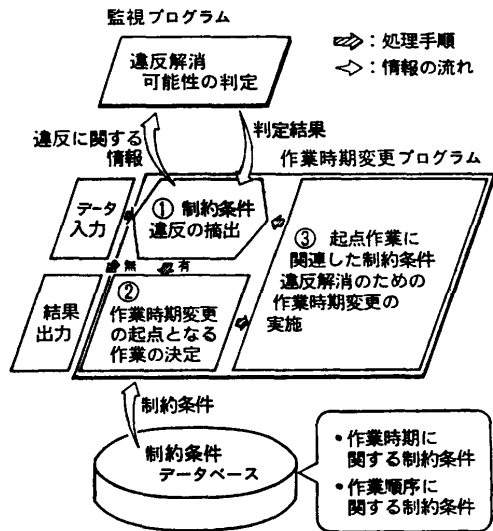


図4 制約条件違反の自動解消手順  
Fig. 4 Configuration of automatic dissolution of constraint violations.

- ②S式が成立しなかった、すなわち制約条件違反が存在した場合には、このS式から制約条件違反に関連した作業を取り出す。取り出された作業のうち、制約条件違反の伝播の基準とする作業を起点作業と呼ぶ。
- ③起点作業の作業時期を固定し、制約ネットワーク上で起点作業と隣り合った作業の作業時期を変更して

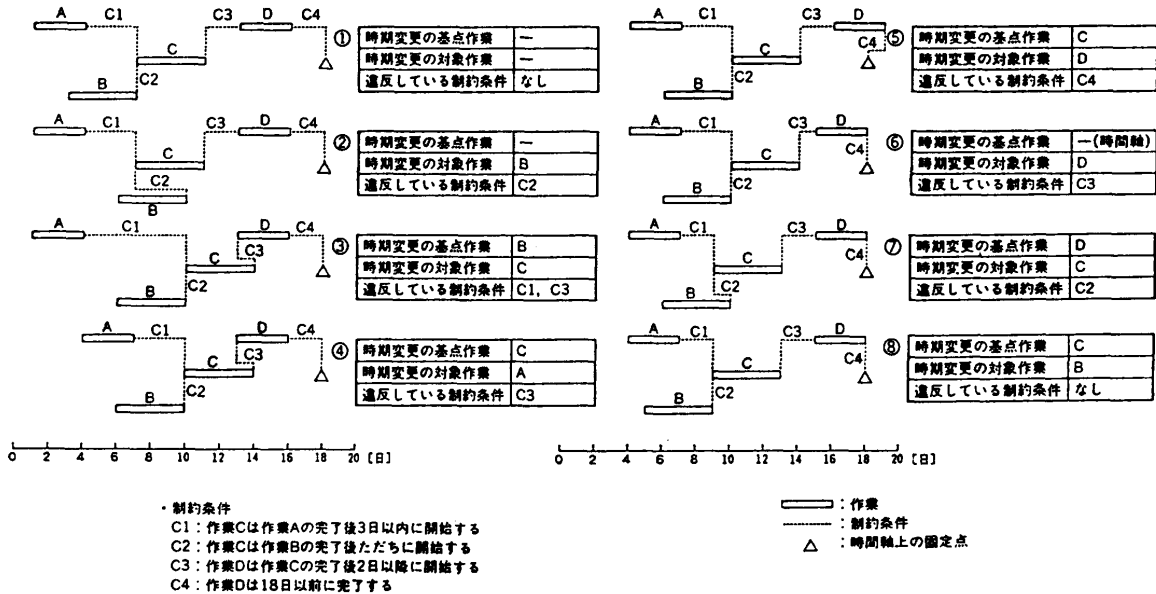


図5 制約条件違反の自動解消の例  
Fig. 5 An example of automatic dissolution of constraint violations.

制約条件違反を解消する。次に作業時期が変更された作業を新たな起点作業として、それに関連する制約条件の成否を調べ、違反が存在している場合にはさらに同様の作業時期変更を継続して行い、違反の解消を図る。起点作業に関連した制約条件違反がすべて解消された場合には①に戻る。

制約条件違反の自動解消の具体例を図5に示す。図5においてステップ①は初期工程であり、すべての制約条件が満たされている。この工程に対し、ステップ②で専門技術者が作業Bの作業開始時期を時間軸上で3日から6日に遅らせたとする。この結果、まず制約条件C2が破られる。ステップ③から⑤までは作業Bを基準として作業時期変更を行い制約条件違反の解消を図る。しかし、作業Dは絶対時間での制約条件C4により規定されているため、ここで制約伝播の方向が逆転され、ステップ⑥以下では作業Dを基準として作業時期変更が行われる。最終的には、ステップ⑧において作業Bの開始時期が5日に変更され、すべての制約条件違反が自動的に解消される。

監視プログラムは、作業時期変更プログラムで検出された制約条件違反に関する情報を受け取り、その制約条件違反が解消可能であるかどうかを判定する。情報として用いられるのは、制約条件違反の伝播の履歴である。違反の解消が不可能になるのは、制約条件間に矛盾が存在し、制約条件違反の伝播が無限ループに陥ってしまうような場合である。その単純な例としては、「作業Aは作業Bの完了後に開始しなくてはならない。」という制約条件と「作業Bは作業Aの完了後に開始しなくてはならない。」という矛盾する制約条件が同時に存在する場合がある。

無限ループには、図6に示すように、制約伝播の状態が閉じたループになる場合と、ある範囲において振動する場合とがある。監視プログラムはこれらを、制約条件違反の伝播の履歴に基づいて検出しユーザに通知する。例えば、 $r_1, r_2, r_3$  を違反した制約条件とすると、ループでは違反した制約条件の履歴は  $r_1, r_2, r_3, r_1, r_2, r_3, \dots$  といった基本パターン（この例では  $r_1, r_2, r_3$ ）の繰返しを生ずる。振動の場合には、履歴は  $r_1, r_2, r_3, r_3, r_2, r_1, \dots$  といった形で基本パターンと、その反転パターンとの繰返しが発生する。

本プログラムでは、第1段階で上記の繰返しパターンが検出された場合に、第2段階としてそのパターン内で行われている作業時期調整の内容をさらに詳細に分析し、それが偶発的に発生した見かけ上のものでな

	ループ	振動
現象		
第一段階判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>違反条件の履歴が基本パターンの繰返しか</li> </ul> $\frac{r_1, r_2, r_3, r_1, r_2, r_3}{\text{基本: } P_1} \quad \frac{r_1, r_2, r_3}{\text{基本: } P_2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>違反条件の履歴が基本パターンと反転パターンとの繰返しか</li> </ul> $\frac{r_1, r_2, r_3, r_3, r_2, r_1}{\text{基本: } P_1 \quad \text{反転: } P_2}$
第二段階判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業時期変更が全く同じか</li> </ul> $\Delta T(P_1, r_j, X) = \Delta T(P_2, r_j, X)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業時期変更が相殺するか</li> </ul> $\Delta T(P_1, r_j, X) = -\Delta T(P_2, r_j, X)$

A, B, C : 作業名  
 $r_i$  : 制約条件の番号  
 $\Delta T(P_i, r_j, X)$  : パターン  $P_i$  中の違反条件  $r_j$  に関連した作業  $X$  の時期の変更量  
 $\longrightarrow$  : 制約伝播の方向

図6 解消不可の制約条件違反  
 Fig. 6 Unsolvble constraint violations.

く、真のループあるいは振動であるかどうかを調べるとい段階的検出法を採用している。第2段階では具体的には、 $i$  番目のパターン  $P_i$  中の違反条件  $r_j$  に関連した作業  $X$  の時期の変更量を  $\Delta T(P_i, r_j, X)$  と表した場合に、ループと予想される場合には、 $\Delta T(P_i, r_j, X) = \Delta T(P_{i+1}, r_j, X)$  が成り立つかどうか、振動と予想される場合には、 $\Delta T(P_i, r_j, X) = -\Delta T(P_{i+1}, r_j, X)$  が成り立つかどうかを調べる。段階的検出法により、ループや振動の検出の効率と精度を両立させている。

上記の無限ループが検出されない場合、全く同じ作業時期調整が繰り返されていないことが保証される。これは、あらゆる制約ネットワーク上の作業の作業時期の組合せが試みられることを意味する。制約ネットワーク全体としての開始時期と完了時期は、絶対時間での制約条件により与えられており、制約ネットワーク上のすべての作業はこの開始時期と完了時期の制約を受ける。したがって、作業時期の組合せの数は有限個であるから、本手法により、無限ループが検出されない場合には、有限時間内ですべての制約条件を満たす解が求められることが保証できる。

ループや振動が検出された場合、これらの解消方法の選択枝は複数存在するが、その時点でどれが最も適切な解消方法であるかを客観的に決定することは難しい。本機能においてはループあるいは振動に関与した制約条件および作業をユーザに提示して指示を仰ぐだ

けに留めている。

(2) 資源の自動平準化

作業工程計画支援方式では、まず初期工程を自動的に作成し、専門技術者が対話的に工程を改善する。したがって完成度の高い初期工程を効率良く作成できれば、専門技術者の工程調整作業に要する労力を低減することができる。

資源の自動平準化機能の処理手順の概略を図7に示す。本機能は、基本的には組合せ最適化の手法を用いている。すなわち、各作業に逐次着目していき、着目した作業の余裕期間内で、平準化の目的関数の値を最も改善する作業時期を探索し、その時期に作業を割り付ける。ここで余裕期間とは、ある作業が他の作業との順序関係を正しく保つことのできる時間的範囲のことを言う。この処理をすべての作業について繰り返し、工程が最適になった場合、すなわち目的関数がそれ以上改善できなくなった時点で処理を終了する。ここで平準化の目的関数は、全工期に渡る毎日の使用資源量の変動の二乗和である。しかし、このような単純な組合せ最適化の手法に従うと、問題の規模が大きくなった場合、評価すべき工程案の数は膨大となり、実際的な時間内で処理が終了できなくなる。この問題点を解決するために、平準化処理の過程に次の2種類の手法を用いて求解効率の向上を図っている。

①ヒューリスティックな知識を用いた作業割付順序の決定

資源の平準化問題は、一般的には、多峰性の最適化

問題である。すなわち、大域的な最適解のほかに、局所的な最適解が複数個存在する。局所的な最適解とは、見かけ上の最適解を指すといってもよく、その存在は単純な組合せ最適化の手法によっては目的関数を十分に最適化できない状況を生ずる。このような問題において、常に大域的な最適解を求めることは計算量の点から難しいが、作業割付順序に関する適切なヒューリスティックスを用いることにより、大域的な最適解の近似解を実際の時間内に得ることが期待できる。本方式においては、「作業期間が長く、かつ作業の余裕期間が短い作業から先に割付を実施していく。」といったヒューリスティックな知識を用いている。

②制約条件に基づく作業調整可能範囲の限定<sup>12)</sup>

資源平準化処理の過程において、各作業の作業時期は余裕期間内で調整されるが、作業時期に関する制約条件により作業時期の調整範囲をさらに限定できる場合がある。例えば「作業Aは、9月1日以降に開始しなくてはならない。」といった制約条件が存在した場合、作業Aを8月31日以前に開始するような工程案を作成し評価する必要はない。本機能では資源の平準化処理に先立ち、実行可能な最早着手工程と最遅着手工程とを求めることにより各作業が実際に存在する範囲を限定する。最早着手工程とは、すべての作業の開始時期を、各々の作業が開始可能な最も早い時期に設定した工程である。逆に最遅着手工程とは、すべての作業の完了時期を、各々の作業を完了しなくてはならない最も遅い時期に設定した工程である。資源の平準化の処理の過程では、着目した作業の調整可能範囲内で作業時期を調整する。このように作業の存在範囲を限定することによって不必要な工程案の作成を回避し、求解の効率を向上している。

本機能により作成される最適工程は、必ずしも大域的な最適解ではないが、経験的に、試行錯誤的な手作業による局所最適解よりも良い解が得られていることから、大域的な最適解に近い局所的な最適解であると考えている。なお、作業時期だけでなく作業期間を自動的に変更することにより資源をさらに平準化することは原理的には可能であるが、規模の大きな組合せ最適化問題となり処理時間を著しく増大するため行っていない。

(3) 統合的工程表示

本工程計画支援方式は、基本的には、マンマシン協調型であることから、マンマシンインタフェースの重要性は高い。本方式では、図8に示す形式の工程図を

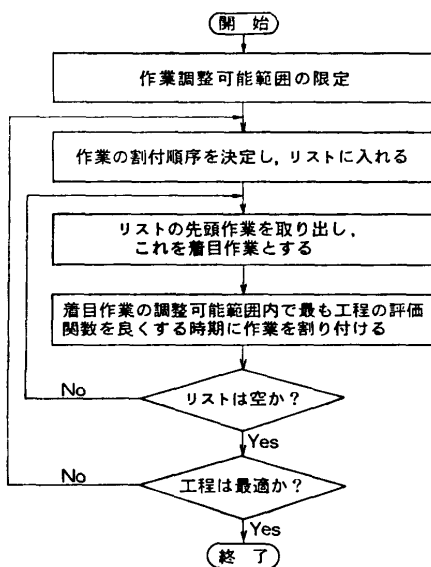


図7 資源の自動平準化の処理手順  
Fig. 7 Process for resource leveling.

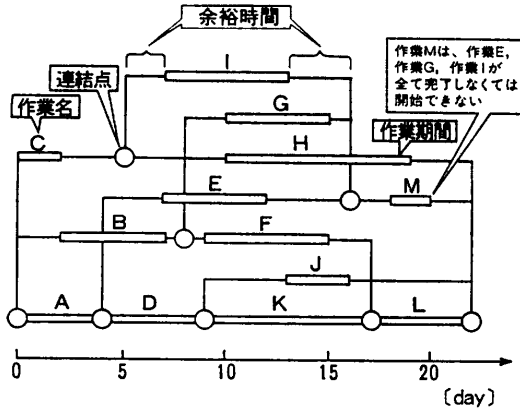


図 8 統合的工程図  
Fig. 8 Unified scheduling chart.

用いて、専門技術者が工程の評価および調整を実施する。従来から一般に用いられている工程図としては、作業の順序関係を有向グラフで表現したネットワーク図、および各作業の作業時期を時間軸に沿った棒グラフで表現したガントチャートがある。図8に示す工程図は、作業の順序関係を表現できるネットワーク図と、作業時期を表現できるガントチャートとを機能として統合した工程図である。本方式ではこれを統合的工程図と呼ぶ。統合的工程図は、画面の横軸を時間軸として、作業時期を太線で、作業の余裕時間を細線で区別して表し、順序関係のある作業と作業とを連結点を介して結ぶことにより、これらの順序関係を表現する。さらに、不必要な線分の交差を排除して見やすくするために、例えば、「余裕時間のない連続した作業群であるクリティカルパスを図の最下部に配置する」といったルールを用いて線分の配置を決定している。以上述べたように統合的工程図では、作業時期および作業の順序関係を同時に1つの工程図でわかりやすく表現することができるため、任意の作業に対する工程調整の影響を視覚的かつ定量的に予測することが容易である。また統合的工程図と資源の山積み表とを併用することにより、資源の平準化を目的として対話的に行う工程調整作業を、効果的に支援することができる。

### 3. 方式の評価

プラントの機器・配管の据付作業の工程計画では、数十～百程度の作業を含むエリアと称する単位区画ごとに作業工程計画を行う。プラント全体ではエリアの総数は数百に達する。今回、約80エリアの工程計画問題を対象として、本方式の試用評価を行った。

以下では、これらの中から、標準的な規模のエリア

への本方式の適用結果を説明する。このエリアは29個の作業からなり、制約条件は、作業の順序に関するもの38件、作業時期に関するもの15件、および全工期に関するもの1件である。なお、本方式に基づく工程計画支援システムは、約1MIPSの処理能力を持つエンジニアリング・ワークステーション上にCommon Lispを記述言語として実現している。

#### (1) 資源の自動平準化

まず、各作業の作業期間や使用資源量として標準的な作業データを設定する。ここで言う使用資源とは、具体的には作業人員を指す。また、制約条件はすべて強い制約条件と仮定する。以上のような条件の下で、資源の自動平準化により作成した初期工程を図9に示す。平準化の度合いを計る1つの目安となる使用資源量のピーク値は41(人/日)である。

本エリアでは、最早着手工程を入力データとした場合、資源の自動平準化処理は約10分で完了した。同じ処理を制約条件に基づく作業調整可能範囲の限定を用いないで行った場合、処理時間は約30分となった。また作業割付順序に関するヒューリスティックスを用いない場合には、資源が十分に平準化される前に局所最適解で処理が停止してしまい、使用資源量のピーク値はヒューリスティックスを用いる場合よりも10%程度高くなった。このような結果から、本方式での作業調整可能範囲の限定および作業割付順序に関するヒューリスティックス利用の有効性が確認できた。

専門技術者が図9に示す工程図と、工程に関する情報を参照した結果、全体工期はそのままとし、資源量をさらに平準化するために工程調整を実施することを決定した。

#### (2) 工程の対話的調整

対話型工程調整により、使用資源量のピーク値をさらに減少させた結果を図10に示す。この例では、作業期間の変更を中心とした工程調整を実施した。専門技術者が必要であると判断した場合には、制約条件の変更あるいは追加・削除を対話的に行うことも可能であるが、この例では行っていない。4作業の作業期間を延長した結果、制約条件違反の自動解消処理が14回起動され、ピーク値は最終的に34(人/日)まで減少した。専門技術者は本工程を最終結果として採用することを決定した。工程の対話的調整には約10分を要した。

#### (3) 方式の評価

以上説明したように、本エリアにおいて、資源の自





動平準化処理の開始から最終結果を得るまでに要した時間は約 20 分であった。本方式の結果の工程は、専門技術者が手作業で作成した工程と同程度の質である。専門技術者が手作業により資源の平準化を行った場合、本エリアのすべての作業の作業時期を決定するまでに約 3 時間を要した。

また、約 80 のエリアに本方式を適用した結果によると、本方式により、工程計画に要する時間を、専門技術者の手作業による場合の 1 割程度とすることができた。

本方式の制約条件違反の自動解消により、専門技術者は制約条件の存在を意識せずに工程調整を行うことができる。また資源の自動平準化により、完成度の高い初期工程を短時間で得ることができるため、専門技術者の工程調整作業に要する労力が低減される。さらに、対話的に工程調整を実施する際、専門技術者は統合的の工程表示から工程調整作業に有用な情報を視覚的に得ることができ、適切な工程調整を実施することが容易となった。以上のような特徴的な機能を作業工程計画支援方式に組み入れたことにより、対話処理による工程改善を効果的に支援することが可能となった。

今回は、本方式をプラントの据付作業工程計画問題に適用して評価したが、制約条件違反の自動解消や統合的の工程表示などの本方式の機能は、対話形式での工程調整作業に対する潜在的なニーズが存在する生産工程計画や輸送計画などのスケジューリング問題においても有効である。

#### 4. 結 び

プラントの据付作業や保守作業の計画問題に適用可能な作業工程計画支援方式を開発した。これらの工程計画問題では、従来の数理計画法や知識処理によっては工程計画の完全自動化は困難であるため、最終的に専門技術者が対話的に工程を改善するプロセスが必要とされる。本方式は、専門技術者が工程の改善を目的として行う工程調整業務の省力化のために、以下に示す機能を備えている。

- (1) 制約指向プログラミングの手法に基づく「制約条件違反の自動解消」
- (2) 作業割付手順に関するヒューリスティックスと制約条件に基づく作業調整可能範囲の限定を用いる「資源の自動平準化」
- (3) 対話的な工程調整業務に適する「統合的の工程表示」

本方式は、資源の自動平準化機能により初期工程を作成する第 1 ステップと、専門技術者が統合的の工程表示機能を用いて対話的に工程調整を行い、初期工程を改善する第 2 ステップとから構成される。制約条件の自動解消機能は、工程調整の過程で発生する制約条件違反を自動的に解消する。

開発した作業工程計画支援方式を、プラントの約 80 のエリアの工程計画問題に適用した。エリアは数十～百の作業を含む単位区画である。この結果、本方式により工程計画に要する時間を、従来の専門技術者の手作業による場合の約 1 割に短縮でき、本方式が工程調整業務のスピードアップに有効であることを確認した。本方式で提案した対話型工程調整支援機能は、対話的に工程を改善する処理が必要とされる他の分野のスケジューリング問題にも適用可能である。

ここで取り上げたプラント作業工程計画以外にも、実際的なスケジューリング問題へのアプローチとして、マンマシン協調型システムで問題解決を図ることを余儀なくされるケースは少なくない。このようなシステムでは、数理計画法や知識処理などの計算機利用技術に限界があるため計算機が分担できない「より創造的な」部分を人間が分担する必要がある。そのような事例の 1 つにおいて、人間側の負担を軽減することが本方式のねらいであった。今後とも、計算機利用技術の進展とともに、「より創造的な」部分をも積極的に支援をできるようにマンマシン協調型システムにおける計算機の分担をシフトする研究開発を進めていく必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) 茨木俊秀：組合せ最適化の理論，電子通信学会 (1979)。
- 2) 中村 豊ほか：ルールベースに基づいたフレキシブル生産システムのスケジューリング，計測自動制御学会論文集，Vol. 23, No. 1, pp. 66-71 (1987)。
- 3) Bruno, G. et al.: A Rule-Based System to Schedule Production, *IEEE Comput.*, Vol. 19, No. 7, pp. 32-39 (1986)。
- 4) 川口 剛ほか：スケジューリング問題の解法に関する最近の話題，*Proc. of the 7th Mathematical Programming Symposium*, pp. 143-157 (1986)。
- 5) Fox, M. S.: *Constraint-Directed Search: A Case Study of Job-Shop Scheduling*, *Research Notes in Artificial Intelligence*, Pitman, London (1987)。
- 6) 福村 聡ほか：鋼材出荷計画エキスパートシス

- テムと分枝限定法, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 33, No. 1, pp. 33-39 (1988).
- 7) Numao, M. and Morishita, S.: Scheplan—A Scheduling Expert for Steel-Making Process, *Proc. of International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications*, pp. 467-472 (1988).
- 8) Satoh, K. et al.: Toward the Expert System for Scheduling Problems, *Proc. of International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications*, pp. 597-602 (1988).
- 9) 市川惇信 (編著): 多目的決定の理論と方法, 計測自動制御学会 (1980).
- 10) Sussman, G. J. and Steele, G. L. Jr.: CONSTRAINT—A Language for Expressing Almost Hierarchical Descriptions, *Artif. Intell.*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-39 (1980).
- 11) Dechter, R. and Peael, J.: Network-Based Heuristics for Constraint-Satisfaction Problems, *Artif. Intell.*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-38 (1987).
- 12) 茨木俊秀: 組合せ最適化—分枝限定法を中心として—, 講座・数理計画法 8, 産業図書, 東京 (1983).

(平成元年 6 月 5 日受付)

(平成 2 年 5 月 8 日採録)



**野中 久典 (正会員)**

昭和 37 年生。昭和 59 年大阪大学工学部原子力工学科卒業。昭和 61 年同大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所エネルギー研究所入社。知識工学的手法を用いるプラント建設工程計画支援システムの開発, 非線形最適化システムの開発に従事。日本原子力学会会員。



**満田 透 (正会員)**

昭和 28 年 11 月 13 日生。昭和 52 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。昭和 54 年 3 月同大学院理工科研究科修士課程修了。同年 4 月(株)日立製作所エネルギー研究所入所, 現在に至る。BWR 炉心運転管理システムの開発, 配管レイアウト CAD システムの開発に従事。電気学会, 日本原子力学会, IEEE などの会員。



**小林 廣弘 (正会員)**

昭和 22 年 10 月 21 日生。昭和 45 年 3 月東京大学工学部原子力工学科卒業。昭和 50 年 3 月同大学院原子力工学専攻博士課程修了。同年 4 月(株)日立製作所入社。昭和 53 年 4 月より同社エネルギー研究所勤務, 現在に至る。原子力プラントの信頼性・安全性, 新型 BWR 炉心の概念設計, 省エネルギー面からのシステム評価, プラント設計自動化の研究開発に従事。工学博士。人工知能学会, 電気学会, 日本原子力学会, IEEE, AAAI などの会員。



**好永 俊昭**

昭和 16 年 4 月 27 日生。昭和 38 年 3 月茨城大学(短), 日立茨城工専機械工学科卒業。(株)日立製作所日立工場入社。BWR 原子炉圧力容器, 原子炉格納容器設計に従事。昭和 48 年原子力配置配管計画設計, プラント調整設計, 昭和 60 年原子力プラント建設計画, プラント総合調整, 原子力 CIM 設計に従事, 現在に至る。日本機械学会会員。