

電力系統設計計画支援エキスパートシステム

Expert Systems for Electric Power System Design and Scheduling

電力系統の設計・計画業務を支援するために、知識工学を活用した各種のエキスパートシステムを開発している。本稿では、これらの典型例として電力系統の設計・解析、需給計画、電圧・無効電力運用計画、および変電所レイアウト設計への応用例を紹介する。

電力系統の運用計画や制御システムの設計を行うには、さまざまな知識やノウハウが必要である。紹介するシステムでは、複雑に関連するアルゴリズムを意識することなく、知識やノウハウを追加・修正して機能の向上を図ることができる。また、適切な助言機能や自動解析計算機能など、ユーザーの実情に合ったシステムを構成できる。

田中秀雄*	Hideo Tanaka
赤根政男*	Masao Akane
川上潤三**	Junzō Kawakami
工藤博之***	Hiroyuki Kudō
小林康弘****	Yasuhiro Kobayashi
狩野泰信*****	Yasunobu Kanō

1 緒言

設計や計画作業は、無限に近い可能性の中から最適(または最適と思われる)解を選択したり、合成することを目的としている。最適性の評価基準は、問題を解く人の主観に依存する部分が多い。そのため、設計や計画作業は、

- (1) 専門家のノウハウや知識を多く必要とする、
- (2) 評価・判断基準の変更が多い、
- (3) 最適解までの繰り返し計算が多い、

などのために、人間の創造的活動に属する本質的に難しい問題と考えられている^{1)~3)}。

このような設計・計画作業に、計算機を利用して作業者の負担を軽くしようとする支援システムとしては、従来からCAD(Computer Aided Design)やCAE(Computer Aided Engineering)があり、一部は実用に供されている。

知識工学を応用したシステムは、従来のCADやCAEをより高機能で使いやすいものにしようとする試みであり、特定の設計・計画問題に専門家のノウハウや知識を直接に利用しようとするシステムである。知識処理システムは、従来の数値計算に対して、記号処理と論理演算によって推論を行い、知識を推論と独立した表現形式で記述できる。したがって、アルゴリズムを意識する必要がないこと、知識やノウハウを追加・修正して機能の向上を図ることができるなどの特長があり、ユーザーの実情に合ったシステムを構成しやすい。

そこで、電力系統の設計・計画業務を支援するために、知識工学を活用した各種のエキスパートシステムを開発してい

る^{4)~9)}。本稿では、電力系統の設計・解析、需給計画、電圧・無効電力運用計画、変電所レイアウト設計などに知識工学を応用した例を紹介するとともに、その有効性について述べる。

2 設計・計画問題への応用事例

2.1 知的対話形系統解析支援システム^{4),5)}

2.1.1 開発のねらい

電力系統の運用計画や制御システムの設計を行うには、さまざまな知識やノウハウに基づく解析計算が必要である。そこで、必要な知識を備え、適切な助言機能を持ち、初心者にも使える解析支援システムを開発した。このシステムは、解析作業にかかわる知識やノウハウ、判断基準などの知識ベースを備え、ユーザーは電力系統を表すグラフィックスと処理手順のガイダンスに従い、対話形式で容易に解析できる。

2.1.2 機能の概要

本システムは、図1の構成要素から成る。

(1) 数値解析部

(a) 処理関数(タスク)

データ入力、データベース変更および画面表示などに関する関数と、解析プログラムから成る。これらは、インタフェース管理プログラムによって呼び出される。解析プログラムには、これまでに(i)短絡容量計算、(ii)直流法潮流計算、(iii)交流法潮流計算、(iv)周波数特性計算、(v)過渡安定度計算のプログラムを用意している。このほかにも、ユーザ

* 東京電力株式会社 ** 日立製作所日立研究所 工学博士 *** 日立製作所日立研究所 **** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ***** 日立製作所国分工場

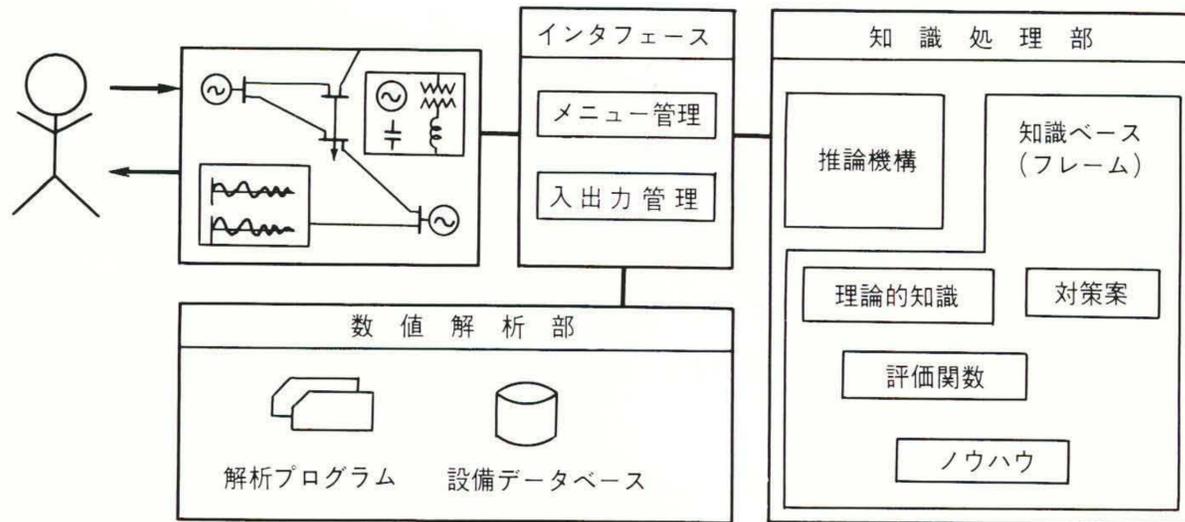


図1 知的系統解析支援システムの構成 解析上のルールやノウハウを知識ベースとして備え、解析者はディスプレイ上に作った系統図やガイダンスと対話しながら、各種の解析プログラムを使うことができる。

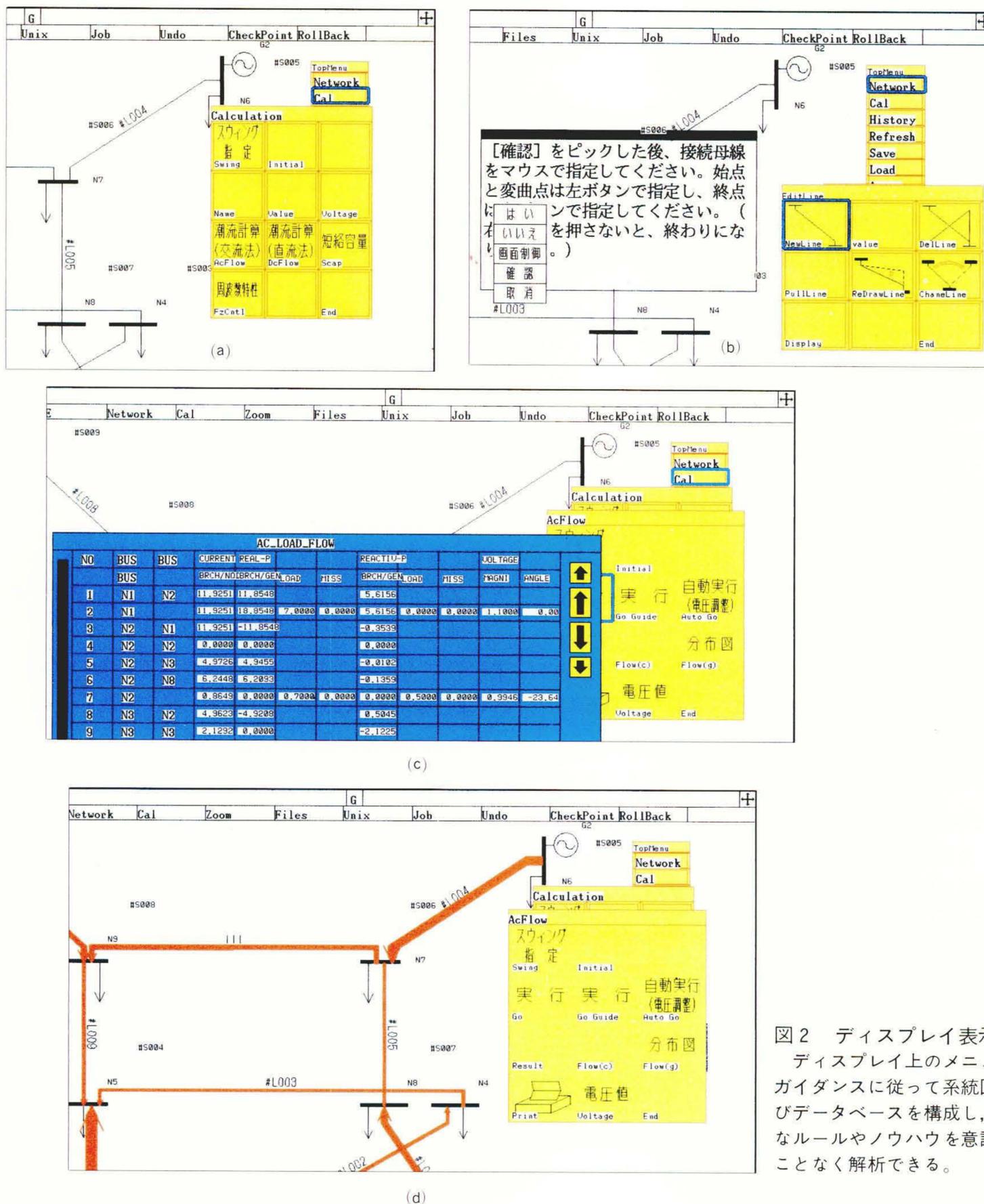


図2 ディスプレイ表示例
ディスプレイ上のメニューやガイダンスに従って系統図およびデータベースを構成し、複雑なルールやノウハウを意識することなく解析できる。

一の開発したフォートラン(またはC)プログラムを必要に応じて組み込むことができる。

(b) 系統データベース

電力系統の階層構造に基づくネットワーク形データベースを採用しており、系統定数を各プログラムに共通にデータベース化できる。さらに、グラフィックディスプレイ上に描かれた系統のデータをディスプレイ上から容易に追加、修正できる(図2)。

(2) 知識処理部

(a) 推論エンジン

推論を行うための制御管理部で、数値処理部との通信、知識ベースによる推論を行う。(i)解析支援モード、(ii)推論起動モード、(iii)自動操作モードの三つの実行モードを選択できる。

(b) 知識ベース

電力系統の階層構成に合わせたネットワーク形のデータベース構造を採用している。ディスプレイ上に描かれる系統データとシステム内の系統データベースとが一致するように、データベース管理を行っている。

(3) インタフェース管理部

融通性のある対話処理を可能にするために、インタプリタによる逐次解釈方式を採用している。インタプリタは、すべてライブラリとして登録されているタスクを必要に応じて呼び出す。このインタプリタによるフロー制御方式には、

(a) 解析フローの追加、変更が容易であり、ユーザーの好みに合わせたオーダーメイドなマンマシンインタフェースを

作ることができる、

(b) 機能拡張は、タスクだけ改造または追加すればよい、

(c) インタプリタ方式のため、知識処理部からの割り込み時(ガイダンス表示など)の処理を管理しやすい。自動操作モードではタスク単位の操作ができる、

などの利点がある。

過電圧対策に関する知識ベースを基に電圧調整を行う、自動操作モードの一例を図3に示す。解析者が必要な知識を追加することによって、適切なガイダンスを表示したり、解析を自動化することが可能となる。潮流の計算結果をプリンタイメージで表示したものと、矢印の太さと方向でグラフィカルに出力した例を図2(c)、(d)に示す。後者は、解析者のマクロな判断に有効である。

2.2 需給計画支援システム^{6),7)}

2.2.1 開発のねらい

需給計画とは、想定した電力需要に対応して多様な電源の運用計画(負荷配分)を立案する作業である(図4)。本システムは、発電機各ユニットの運転・停止スケジュールを決めるために必要な個々の電源ユニットの特性や、運用上の制約、供給信頼度などの多くのパラメータを自由に組み合わせ、総合的に効率性と経済性を追求する作業を支援する。

2.2.2 機能の概要

すべての制約を考慮して問題を一度に解くことは不可能なので、計画策定者が行う手順に従って、次のようにステップを踏み、概略決定から順次詳細な計画を立てていく。

(1) 運転状況の決定

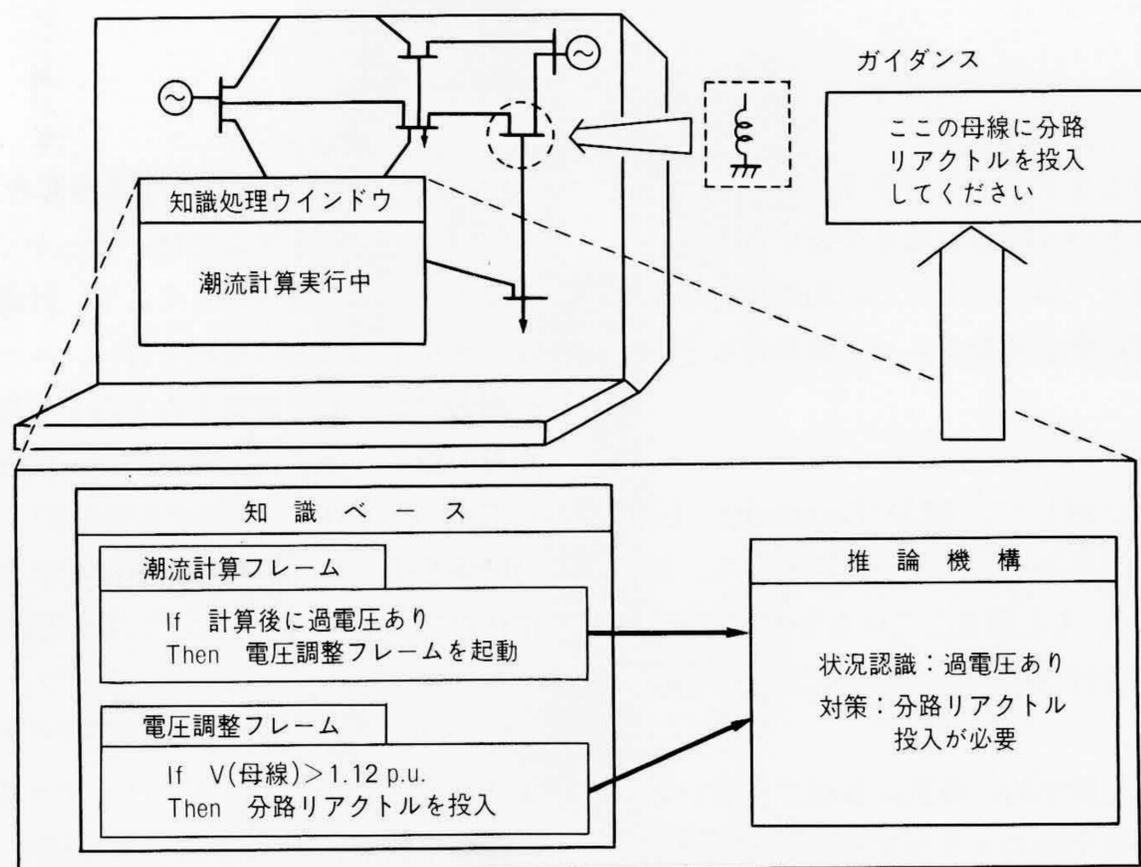


図3 知的支援の動作例(過電圧対策) 知識ベースに解析上の評価基準や対策などを入れておくことによって、解析計算および評価の自動化を行うことができる。

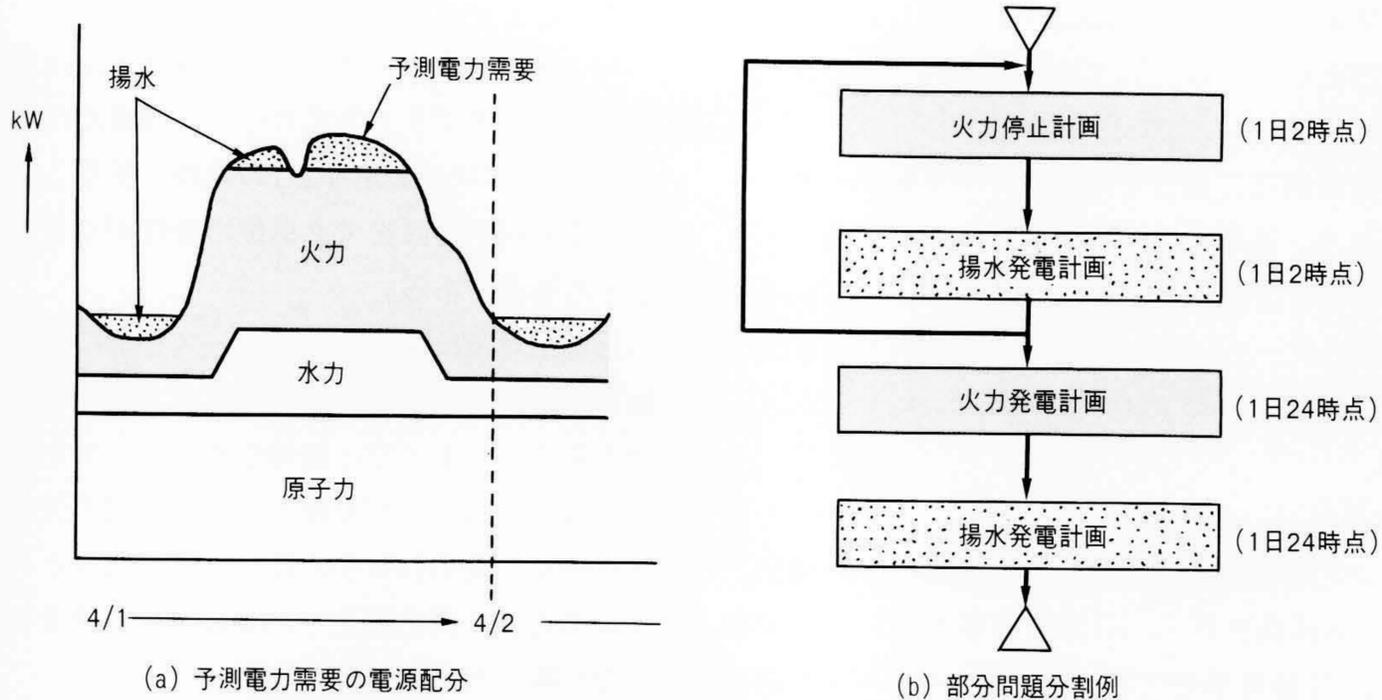


図4 需給計画の概要 予測電力需要に合わせて、1日2時点および24時点の各種発電ユニットの運転・停止計画を決める。実際には規模が大きいため、部分問題に分割して解く。

発電機名称		4/1		4/2		4/3	
		昼	夜	昼	夜	昼	夜
第一発電所	1	1	0	1	0	1	0
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	0	0	*	*
	4	*	*	*	*	*	*

〔制約条件〕

- 縦形制約 (例 最小運転ユニット数)
- 横形制約 (例 最低連続運転日数)

〔決定戦術〕

どの順序で升目を埋めるか

(1: 運転, 0: 停止)
*: 運転を仮定

図5 火力停止計画 知識ベース内のいろいろな制約条件や決定戦術を自由に組み合わせて、火力ユニットの運転・停止を順次決めていく。

1日の需要のピーク時とオフピーク時の2時点に注目し、どの発電機を停止するかという運転状況を決定する(図5)。制約条件としては、予備力、ユニットごとの起動可能条件、連続運転日数条件、発電所最低運転ユニット数条件などを考慮する。

(2) ユニット出力の算定

(1)で定めた運転状況に対して、ELD (Economic Load Dispatching) 計算を行って各ユニットの出力を求める。線路潮流の条件をチェックして、もし違反しているものがあれば、満足するよう出力の調整を行う。条件が満足できない場合には(1)へ戻る。

需給計画には、必ずしも数学的に厳密に表現できない制約や評価因子が多い。最適化手法のようなアルゴリズム開発が可能としても、長期には電源構成の変動に従った既存の電源の運転形態の変動、燃料事情の変化などの、制約や評価因子

を根本的に変化させるような事態も考えられる。したがって、固定したアルゴリズムでは、せっきくのプログラムが使えなくなる危険性も大きい。そこで、計画策定者の手足となり、データ整備、結果の整理を行い、ルーチンの作業を代行し、計画者の創造力を刺激するものを目指した。具体的には、計画者の指示に従って所定の方法で制約条件を満足する計画案を求め、制約条件を満足する案のないときはその原因を教え、対策案を提示する必要がある。このような考察に基づいて試作したプロトタイプシステムを、図6に示す。

本システムは、総合管理プログラム、知識ベース(ライブラリ)、入出力インタフェースプログラム、推論作業実行環境の4ブロックで構成される。ライブラリには、計画作成のための戦略や戦術(ノウハウ)、制約条件、各種問題の統合された戦略、各種数値計算プログラムが含まれている。総合管理プログラムに従って、ライブラリから必要な戦略、戦術、制約

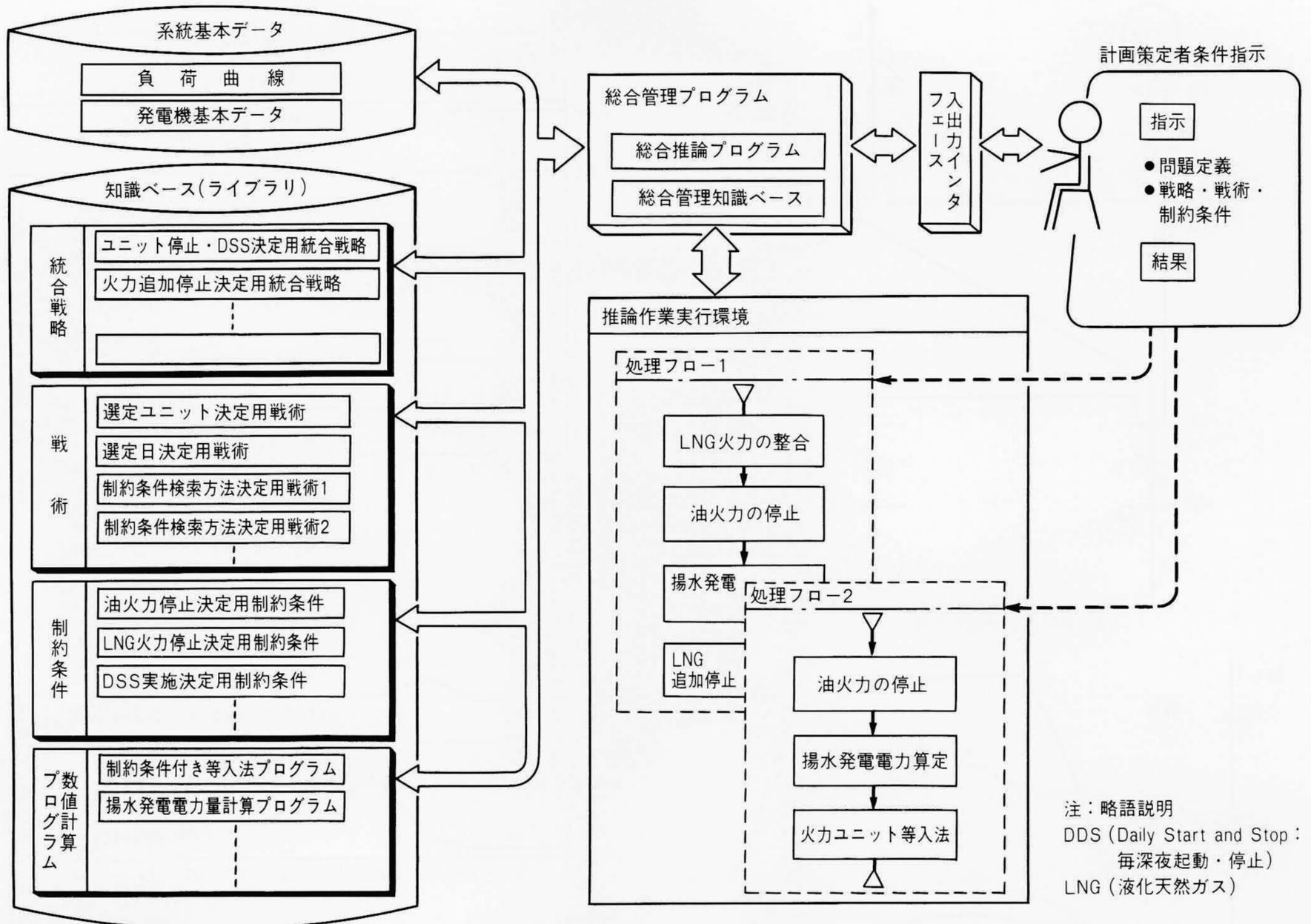


図6 需給計画支援エキスパートシステムの構成
 計画問題ごとに知識ベース内の戦略、戦術や制約条件と、数値計算プログラムおよびシステムデータを組み合わせて発電機の運用計画を策定する。

条件、推論プログラムや計算プログラムが選択され、基本データから選択されたデータと組み合わせられ、計画策定者の指示に従った推論や計算を実行する。すなわち、計画者の意思に従った自由な組み合わせの推論や計算が実行される。さらにライブラリ中の要素の追加、変更もその部分だけで容易に扱うことができる。

本システムは、東京電力株式会社と日立製作所の共同研究によって試作したものである。

2.3 電圧・無効電力運用計画支援⁸⁾

2.3.1 開発のねらい

系統ごとの需要と発電力の予想曲線に基づき、電力用コンデンサや分路リアクトル、変圧器タップなどの電圧・無効電力制御機器の一定期間の運用計画を立案する作業を支援する。本システムでは、電圧 V と無効電力 Q を適正な値にするだけでなく、動作頻度、制御の余裕といった多数の因子を考慮しながら、運用計画者のノウハウを用いて立案できる。

2.3.2 機能の概要

運用計画の作成例を以下に示す。いま、図7の電力系統について、2時間ごとの負荷の需要予測と、発電機 G_1 、 G_2 の出

力予測が与えられている。母線①と⑧の電圧は1.0 p.u. (per unit) に固定されている。このとき、需要曲線を満足するとともに、発電機の運転許容範囲や変圧器のt(タップ)とSC(電力用コンデンサ)の制約などを考慮しながら、負荷が接続された母線③と⑥の電圧を常に0.99~1.01 p.u. に制御する。

本システムでは、次のような潮流計算手法と電圧・無効電力制御戦略を用いて計画を立案する。

潮流計算A：電圧制御対象母線をPV指定として、電圧制御対象母線に必要な無効電力を求める (P ：有効電力)。

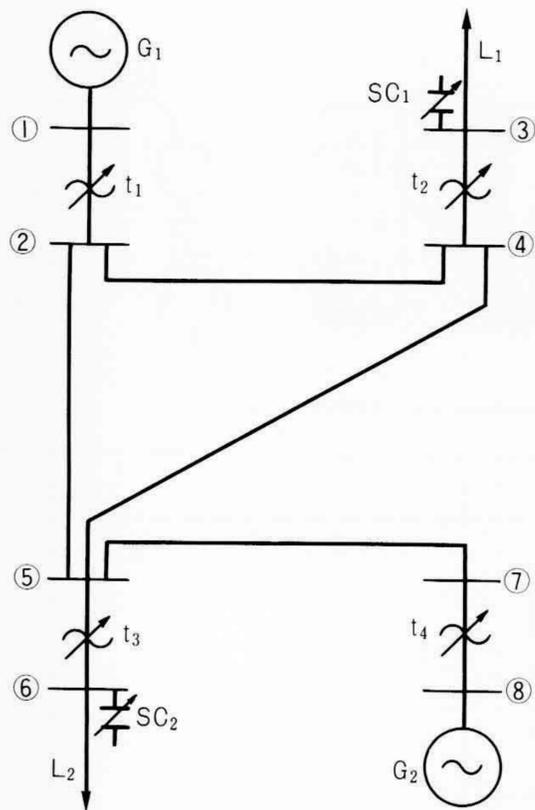
潮流計算B：電圧制御対象母線をPQ指定として、無効電力制御機器の効果と対象の母線電圧が適正値か否かを確認する。

規則1：SCの全投入量が系統全体の無効電力不足量以下ならば、もっとも無効電力が不足している母線に系統構成上もっとも近いSCを1バンク投入する。

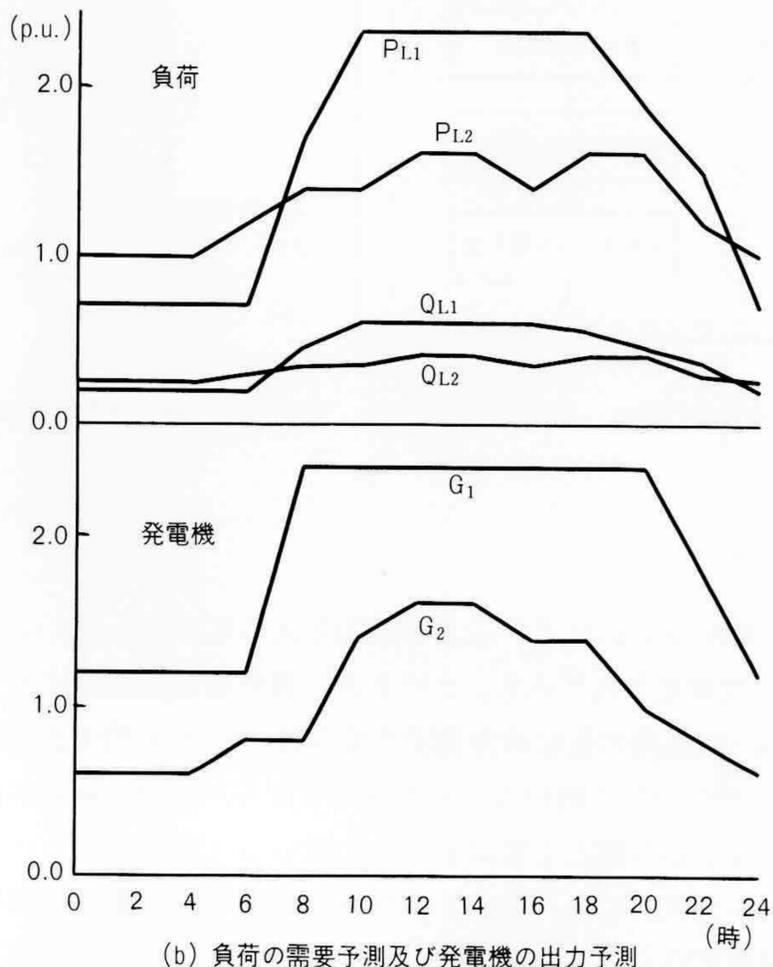
規則2：進相運転になる発電機があれば、もっとも無効電力が余っている母線にもっとも近いSCを1バンク切り離す。

また、運用計画を作成する手順を以下に示す。

(1) 潮流計算Aにより、母線③と⑥の2時間ごとの無効電力の過不足量を求める。



(a) 対象とする電力系統

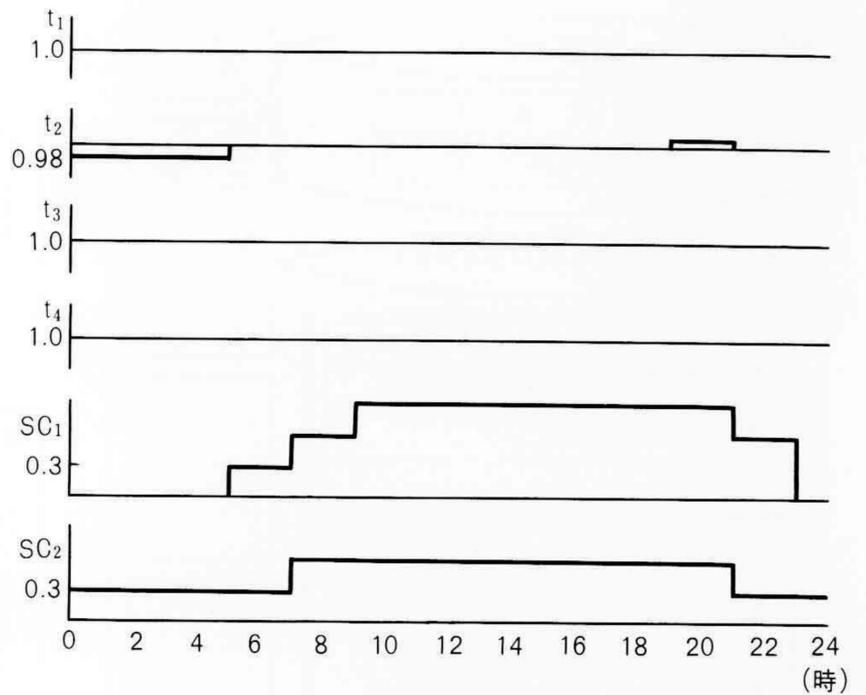


(b) 負荷の需要予測及び発電機出力の予測

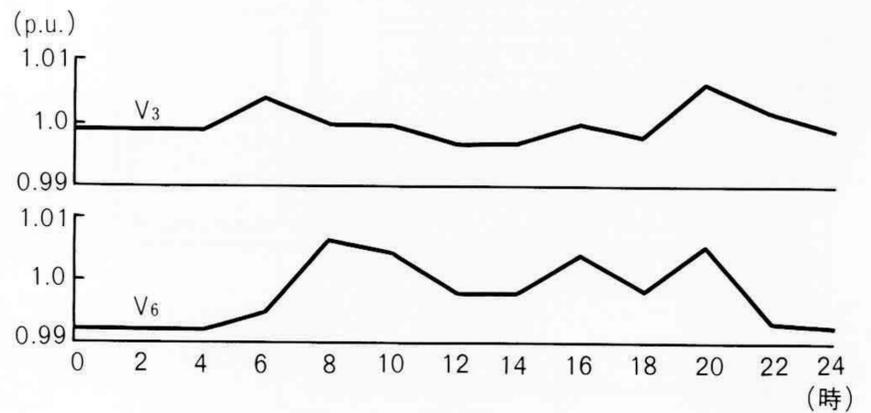
注：略語説明 G₁, G₂ (発電機), L₁, L₂ (負荷), t₁~t₄ (変圧器タップ)
SC₁, SC₂ (電力用コンデンサ), PL₁, PL₂ (有効電力負荷)
QL₁, QL₂ (無効電力負荷)

図7 対象系統の需要予測および発電機出力 負荷の需要予測, 発電機出力, 変圧器タップ, 電力用コンデンサなどを考慮しながら, 母線③と⑥の電圧を常に0.99~1.01 p.u.に制御する。

- (2) 規則 1, 2 に従って, 2 時間ごとの SC 投入量の案を作る。
- (3) 1 日全体を通して SC の操作頻度が少なくなるように, SC 投入量を変更する。
- (4) 2 時間ごとのタップ操作量を求める。
- (5) タップの操作頻度が多い場合, (3)へ戻る。



(a) タップおよびSCの操作量



(b) 母線電圧

図8 電圧・無効電力運用計画の作成例 負荷の需要予測に合わせて, 変圧器タップと電力用コンデンサの操作量および操作頻度を決めた。その結果, 母線③と⑥の電圧変動を±1%以下に抑えた。

(6) 潮流計算Bにより対象母線の電圧および発電機の無効電力出力が適正な値であることを確認し, 運用計画とする。

本システムにより作成したタップ動作値とSCの運用計画, および母線電圧を図8に示す。SCおよびタップの操作量は最小限に抑えられており, 電圧は目標の範囲内に制御されている。

さらに, このような計画例をデータベース化し, この中から曜日, 季節, 天候などの属性を用いて選定したものを, 上記(3)以下の手順に従って改良し, 応用することができる。

2.4 変電所レイアウト設計支援システム^{8),9)}

2.4.1 開発のねらい

変電所の設計仕様, 建設予定地の状況など前提として与えられる条件の下で, 母線・変圧器・開閉装置・調相設備などの各種機器・設備をレイアウトする設計業務を対話的に支援する。

2.4.2 機能の概要

レイアウト設計支援システムXL-S(Expert System for

Layout Design for Substation)⁹⁾は、制約条件を満足するレイアウト案を自動的に作成する機能、レイアウト結果をコスト・騒音などの観点から評価する機能などを持っている。主な特徴は次の2点にある。

- (1) 標準的レイアウトの自動作成、およびレイアウト結果の評価のために、知識ベースに格納した専門知識を利用している。知識ベースの構成は、システムに求められる機能を反映して、表1のようになる。知識ベース内のルール数は約1,900である。ここにはルールの例を分類項目ごとに示しているが、この分類項目がシステムの基本的な機能にほぼ対応している。
- (2) レイアウト自動作成のための前向き推論機能のほかに、レイアウト修正を支援するための推論機能を利用している。この推論機能は、図9に示す計画修正の処理を実現する仕組みであり、レイアウト途中で一度決定した機器の位置を修正する場合に、二次的な矛盾が生じないようにしている。この機能は、データの依存関係を利用した後戻り処理(Dependency Directed Backtracking)による無効データの削除と、デモン(必要に応じて呼び出される処理)によるデータの再構成によって実現している。

また、上記の特徴を持つレイアウトシステムXL-Sを大容量変電所のレイアウト設計に試験的に適用し、設計支援システムとして有効との見通しを得た。使用者の入力したコマンドの処理に要したCPU時間〔性能約24 MIPS(Million Instructions Per Second)の計算機使用〕は、通常1秒以内、最大3秒であった。

3 設計・計画業務への知識処理応用の特色

以上の適用例から、次のような知識処理応用上のポイントを挙げることができる。

(1) 対話環境

問題解決を対話的に進め、問題解決の要所に人間の判断が入れられるように構成している。また、系統解析支援の例に見られるように、専門家のメンタルピクチャに直接訴えるよう表示を工夫している。求められる人間の判断としては、制約条件や評価基準を変更するかどうか、代替案を探索するかどうか、問題解決の手順として次に何をしなければならないかなどである。

(2) 問題解決手段の分割

扱う問題が大きいので、問題解決の流れを概略決定から順順に詳細決定に移るよう部分問題に分割している。その分割は、専門家の問題解決手順の流れに準じている。また、途中で行き詰まったら適当な前の段階に戻り、決定をやり直すようになっている。例えば変電所レイアウトの場合、設計仕様に基づく機器の構成、標準的な機器配置の決定、配置の修正というように問題解決の流れが分割されている。

(3) 問題の単純化

表1 変電所機器レイアウト用ルール レイアウト自動作成に必要な機能別に、1,925のルールを10種に分類した。機器領域の組立や配置修正に関するルールが約4割と多い。

No.	分類	割合(%)	ルールの例
1	制御用	15	入力されたコマンドが領域組立なら領域組立用知識モジュールを起動する。
2	初期入力	7	変電所の電圧を入力する。
3	機器領域組立	21	電圧がUHVのGISは縦の長さを16.5 mとする
4	機器領域配置修正	18	トランス領域とGIS領域は隣接配置とする。
5	ケーブル作成	10	電圧がUHVのケーブルはGICとする。
6	道路作成	4	UHV用トランスの搬入路の幅は12 mとする。
7	ルート探索(5, 6で使用)	4	ルート探索用のサブルーチンを起動する。
8	鉄塔配置	3	第1鉄塔はガントリーから120 mの位置に配置する。
9	配置案評価	3	緑化率=(敷地面積-外周道路内面積)/敷地面積×100
10	土量計算システムコントロール	15	使用者の指示に基づき、レイアウト結果を登録するために標識パターン用ファイル作成モジュールを起動する。

ルール総数(1,925), モジュール数(406), LISP(List Processor)関数(400)

注: 略語説明 UHV(超々高圧: 1,000 kV)
GIS(ガス絶縁開閉装置)
GIC(ガス絶縁ケーブル)

問題解決の各段階の部分問題の詳細度に応じて、問題を単純化している。例えば需給計画では、本来連続量である発電ユニットの出力を、最初の段階では運転か停止かの二つの状態で扱い、最後に連続量で扱っている。また、発電ユニット出力は本来時間的にも連続量であるが、これも最初の段階では1日をピーク時、オフピーク時の二つの時点で扱っている。

(4) デフォルト値の利用

問題解決の各段階で、デフォルト値(ほぼ妥当な標準解)を利用している。需給計画の例では、運転状況の決定に際し一応すべてのユニットは運転という前提のもとで検討を進め、順々に停止できるものを探していく。

(5) 制約条件や評価基準の変更の扱い

設計・計画問題は、前述したように問題解決を行う人の主観に依存する部分が多い。このため、(1)で述べたように随所に人間の判断が入るようにしてあるが、この人間の主観をどう表現し、計算機で扱うかが問題となる。先の例では、これを部分問題ごとの制約条件や評価基準の変更として扱っている。需給計画の場合、制約条件が物理的に絶対的に規定されるものと、そうではないものに分けている。前者は技術や法令によるため簡単には変更できないが、後者は良さそうな解を探すための条件であるため、途中得た解を見て強めたり弱めたりできるようにしている。

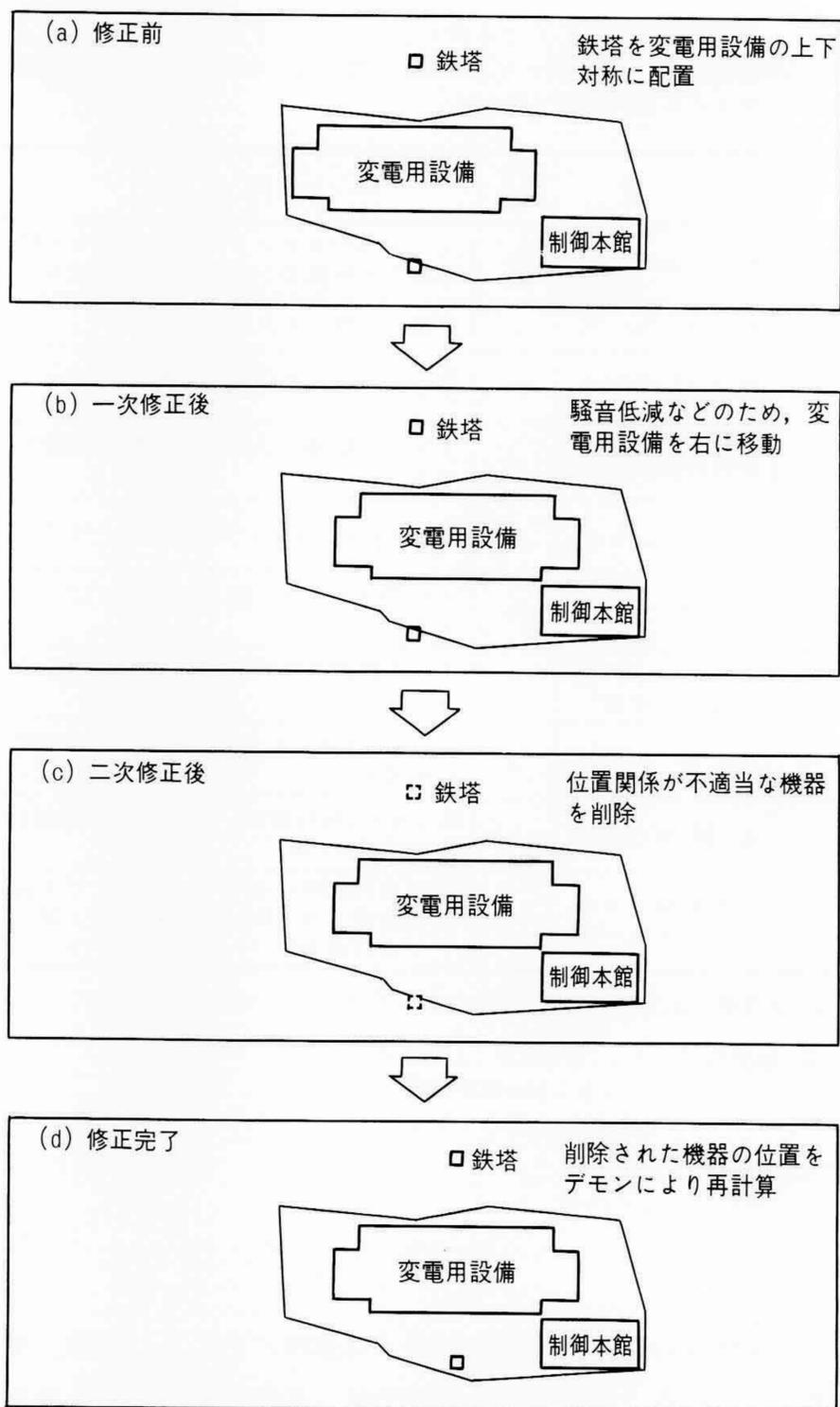


図9 レイアウト計画修正の処理過程 機器の位置を修正すると、そのために配置済みの機器の位置が不適当にならないように再配置する必要がある。

(6) 数値計算プログラムとの融合

知識工学を応用しようとする設計・計画問題の多くは、従来から計算機化され、数値計算プログラムの財産があるものが多い。このようなプログラムの中で利用できるものは、取り込んでいくべきであろう。系統解析支援の例では、処理関数としてユーザープログラムを組み込めるようにしている。

これらの応用手法は、知識処理応用の目的、すなわち

(a) 探索空間の限定化(計算時間、必要記憶容量の低減)

(b) 柔軟な問題解決の達成など

に効果的に作用している。例えば、(2)、(3)、(4)は探索すべき可能性を少なくして、許容時間内にある程度の解を求めるためのテクニックである。また、(1)、(5)は計算機上に表現しにくい判断を人間に行わせ、かつ支援システムの適用範囲を広げ、システムを柔軟にするためにとられた措置である。

ところで、知識工学を応用したシステムで得られた結果が必ずしも最適解となっている保証はない。多くの場合は、ほぼ妥当な解または準最適解が得られているに過ぎない。これは、実効的な時間内で解を求めるように(2)、(3)の手段が取られているためである。実際に扱われる問題は非常に大規模で数学的な性質も悪く、計算時間をかけても真の最適解が得られない場合が多いため、妥当な解を実用的な範囲でうまく利用していると言える。

4 結 言

設計・計画分野への知識工学の応用を、主に適用例を中心に説明した。いずれの例も、人間の創造的活動に属する設計や計画の問題を解決するのを支援することを目的としている。すなわち、人間を単純作業や簡単な評価・判断作業から解放し、できるだけ創造的活動に精力が注げるようにすることを目指している。今後、この分野への知識工学の応用展開はますます拡大していくものと思われる。

知識工学応用のポイントは、何を計算機に行わせ、何を人間に見せ、何を人間が判断するかなど、現在その設計・計画作業に従事している人の意見が反映できることである。そのためには、設計・計画作業に従事している人自らが容易に開発できるような支援システムの開発が急務であり、その実現に向けて必要な技術開発を進めている。

参考文献

- 1) 関根：最近のエキスパートシステム技術の電力系統への適用，OHM，75，12(昭63-12)
- 2) 川上：エキスパートシステムの設計・計画への応用，電気学会全国大会シンポジウム，S.15-3(昭62-4)
- 3) 川上，外：エキスパートシステムの構築技術，電気学会全国大会シンポジウム，S.14-4(昭63-4)
- 4) 福井，外：知的会話型系統解析支援システム，電気学会電力技術研究会，PE-87-101(昭62-7)
- 5) 福井，外：知識工学応用による安定度解析用プログラムジェネレータ，電気学会電力技術研究会，PE-85-103(昭60-7)
- 6) 大坂，外：需給計画支援エキスパートシステムの概念設計，電気学会全国大会，1032(昭61-4)
- 7) 大坂，外：需給計画支援のための知識ベースシステムの開発，電気学会電力技術研究会，PE-87-167(昭62-7)
- 8) 田村，外：電圧・無効電力運用計画用エキスパートシステム，電気学会電力技術研究会，PE-86-135(昭61-7)
- 9) 吉田，外：知識工学の変電所機器レイアウトCADへの応用，日立評論，57，12，971～974(昭60-12)
- 10) 武藤，外：知識工学的手法を応用した変電所レイアウト設計支援システム，電気学会論文誌C，108，6，385～392(昭63-6)