

電力系統機器操作手順の自動作成†

林 達 郎†† 伊 能 英 幸††
阿 部 哲 也††† 南 澤 守††††

高信頼度な電力の供給、お客様サービスの向上、新しいニーズへの対応などの一層の的確化を図る上で、電力系統設備の運転・運用はますます高度化が必要である。この具現化策の一環として、従来、電力系統設備の運用目的に従って、変電所運転員が機器の状態、操作時に適した規則、経験等に基づき作成している開閉器の操作手順を、コンピュータシステムを用いて、的確かつ迅速に自動作成することが考えられる。この手法開発にあたり従来の手続き形言語を用いると、莫大なソフト開発と、設備形態の変更、運用方法の変更ごとのソフト変更が必要になる。これに対し、知識工学手法によるアプローチも行われているが、(1)高速処理系の開発、(2)監視・制御システムとのインタフェースの開発、(3)ルールの検証方法の開発等、実用化には多くの課題がある。本論文は、知識工学手法の長所である、知識のデータ化を行い、その知識を用いて、変電設備操作手順を自動作成する方法について報告する。変電設備運用知識の表現方法として、デシジョン・テーブル方式を提案する。さらに、データ化したデシジョン・テーブルを直接参照して、操作手順を作成する方法を示す。本手法は、東京電力(株)の設備総合自動化システム(給電・変電・配電)の、変電システムに適用されており、62年3月より順調に実証試験を続けている。

1. はじめに

開閉器操作は、従来、系統運用を担務する給電所からの操作指令に応じて変電所運転員が操作手順表を、機器状態、操作規則、経験等に基づき作成し、その手順表に従って機器操作が実行されている。

今回、東京電力における設備総合自動化の一環として、この操作手順表をコンピュータシステムにより、自動作成する論理を開発した。

操作手順表の自動作成にあたっては、安全性の確保、およびシステムの標準化の観点から、基本事項を次のとおりとした。

- ① 給電所から伝達される操作指令情報は、操作対象の設備(変圧器など)と操作の目的を示す指令用語(作業停止など)で構成され、コンピュータシステムはこれに基づき操作手順表を自動作成する。
- ② 手順表自動作成の対象としては、東京電力管内にある各種の設備構成、機器特性およびその設

備・機器の運転状態のほぼすべてに対応可能なものとする。

- ③ 作成した操作手順表はプリンタ、CRT に出力するとともに、そのまま、システムからの自動操作に供しうるものとする。
- ④ 操作手順表作成のための専用処理系は持たず、監視制御システムの中で構築する。

以上について、従来のプログラム開発では、膨大な各種運用規則に基づく、すべての組合せを、手続き型言語で記述する手法をとっていた。しかし、この手法では、運用知識、設備の形態判別・状況判別というアルゴリズムがプログラムの中に隠蔽されてしまうため、ソフト開発および開発後のソフト変更に多大な工数が必要となり、ひいては開発したソフトの信頼性低下につながる。

そこで、今回は、アルゴリズムの可視化およびプログラムからの分離を図るため、操作手順表作成上の各種運用規則を知識として表現し、それを利用する手法を採用した。また、知識の表現方法・利用方法としては、監視制御システム内に構築するという観点から、実時間システムに適した手法を用いた。

以下、今回、開発した知識の表現方法、利用方法、および検証方法について報告する。

2. 知識の表現方法^{1)~4)}

ここでは、実時間システムに適した知識の表現方法として、デシジョン・テーブル方式を導く。また、そ

† The Automatic Generation of the Operation Procedure Used the Apparatus Operation of the Electric Power Networks by TATSUO HAYASHI, HIDEYUKI INO (Computer & Communication Research Center, Engineering Research & Development Administration, Tokyo Electric Power Co., Inc.), TETSUYA ABE (Power & Industrial Controls Center, Main Office of Manufacture, Meidensha Corporation) and MAMORU MINAMIZAWA (Computer System Department, Yokohama Works Administration, Nippon Koei Co., Ltd.).

†† 東京電力(株)技術開発本部システム研究所

††† (株)明電舎生産総本部プラント装置工場

†††† 日本工営(株)横浜事業本部コンピュータシステム部

れを用いた知識ベースの構築方法について説明する。

2.1 デシジョン・テーブル方式の導入

知識の表現には、how 型（手続き型）のものと、what 型（宣言型/非手続き型）に分けられる。

how 型は、手順を示すもので、知識の適用順が明示されるので、一般には効率が良い。

what 型は、ランダムな知識の適用順をシステムが推論するので、一般には効率が悪い。

操作手順の作成では、結論としての最終運転状態だけでなく、その運転状態に至る開閉操作の実行順も重要な要素になる。例として電源切り替えの場合、最終形態は同じでも、実際の手順は、停電を起こさないような開閉順が要求される。

また、現在の運転方法を知識としてまとめ上げる場合も、how 型の方が系統立てたアプローチができる。

一方、知識ベースの構築には、一般に次のことが要求される。

- ① 表現能力が高く、書きやすさ、解りやすさを備えていること。
- ② 利用しやすいこと。
- ③ 矛盾、不足、誤り、曖昧を除去、検出しやすいこと。

また、操作手順を自動生成する目的からは、次のことが要求される。

- ④ 設備と指令用語別に記述できること。
- ⑤ ルールの処理順が規定できること。
- ⑥ 結論としての最終形態に達するまでの操作順が規定できること。

そして、監視制御システムの一機能として実現するにあたり、次のことが要求される。

- ⑦ 処理速度が実用に供し得ること。
- ⑧ 専用処理系を必要としないこと。

以上のことから、今回のシステムでは、how 型の知識表現形式として、デシジョン・テーブルを採用した。

2.2 デシジョン・テーブル方式⁵⁾⁻⁷⁾

デシジョン・テーブル（以下 DT と略す）は、図 1 に示すように 4 つの要素でできている。

条件表題欄	条件記入欄
処理表題欄	処理記入欄

図 1 DT の構成

Fig. 1 Configuration of Decision Table.

- ・条件表題欄 確認すべき条件を記入する。

この DT での結論を導くための設備形態、接続状態等の条件を記入。

- ・条件記入欄 条件表題欄に記入した条件の真偽値。Y (真)/N (偽)/- (不問) の形で記入する。
- ・処理表題欄 条件の組合せで得られる結論（操作手順）、または、次に実行すべき DT No. を記入する。
- ・処理記入欄 条件表題欄の条件を満足した場合に、処理表題欄に記述された結論、次に実行すべき DT の実施順を記入する。

今回採用した DT の特徴を次に示す。また、DT の例として、ソースデータで表したものを、図 2 に示す。

- ① 処理記入欄に数値を記入し、結論の導入順を明示した。

結論および、次に実行すべき DT が複数存在する場合、数値がそれらの実施順を表す。これにより、ルールの処理順、結論の導入順が明示できる。

- ② IF 群に対する真偽の組合せすべてを、一つの DT 上に表現した。

DT 上の一行が Production System 等における IF~THEN ルールに対応する。ルール内条件の組合せおよび、それに対する結論が明示できるので、知識の誤り自体の除去はできないまでも、知識ベースの問題点である、ルールの矛盾、不足、曖昧は、構築段階で除去できる。

- ③ 運用知識ごとに DT を定義した。

運用知識が、(設備+指令用語) ごとに分類されており、その形態を崩さずに知識ベースの構築ができる。

- ④ 表現能力が高く、利用しやすい。

関連する情報ごとに、まとめて表現するので、理解しやすく、人間と計算機とのインタフェースとして最適である。

TABLE	(1-4 (1)) ()	
CON	シテイSO01 ノ NODナイ ニ CB アリ	[YYYYYYN]
CON	シ`ョウキCB ハ カイ	[YYYYYN-]
CON	シテイSO01 ノ NODナイ ニ BS02カ`ワ ヒエンセイLS アリ	[YYN--]
CON	シ`ョウカン3 ノ LS ハ カイ	[YNN----
CON	シテイSO01 ハ LSTウニユフロックチュウ	[--YNN--]
EOC		
DSP	¥1-4-1 (1)¥	[1 1]
DSP	ソウシ`ュンキヤクワイバン	[11 1 1]
DSP	テンカイフノフ	[1]
EOD		

図 2 図 4 に対応する DT ソースデータ

Fig. 2 DT Source Data correspond to Fig. 4.

2.3 DT における知識の表現

DT 上に運用知識を表現するにあたり、日本語で表現することは、必須である。

そこで、変電設備の構成を記述するために、その構成要素を名詞句として、6 種類用意した (表 1)。

さらに文章として記述するために、助詞、修飾語を用意した。この名詞、助詞、修飾語の組合せにより、判定・処理の対象となる特定設備を表現することとし、DT 内のすべての文の主語は、これにより表現するようにした。

条件表題欄は、上記によって特定した主語と、判定用語で記述する。

判定用語は、有無判定、等価判定、状態判定の 3 種に分類した。そして、有無判定によって、有りとなった新規の要素集合は、その後実施される、条件、処理で参照することができる。また、有無判定と等価判定、有無判定と状態判定は、複文形式を用いて、一文として記述できる。

処理表題欄は、同様に特定した主語と、処理用語で記述する。または、制御を移す DT No. を記述する。

操作手順作成上のすべての運用知識は、本表現方法により、自然語表現できた。

2.4 知識ベースの構築

運用知識を獲得するにあたり、当システムを適用する地域に存在するか否かにかかわらず、東京電力管内の設備すべてをリストアップし、接続形態別に分類した。その結果、接続形態は約 600 パターンにのぼった。

分類した接続パターンと、運用規定をもとに、送電用変電所、配電用変電所別に、設備と指令用語ごとに

DT を作成した。また、送電用/配電用の区別を必要としない開閉器群に関する操作知識は、共通という形でその目的ごとに DT を作成した。

設備と指令用語で対応付けられるテーブル群を、ファイルという単位で扱うようにした。

今回の、システムで作成した DT のデータ量を表 2 に示す。これにより、東京電力管内のすべての変電所に適用できる標準手順作成ルールを構築することができた。

表 2 デシジョンテーブルのデータ量
Table 2 Data size of Decision Table.

	ファイル数	テーブル数	条件文数 (ライン)	処理文数 (ライン)	データサイズ (Block)
送電用	131	3,269	11,275	12,981	4,459
配電用	309	3,430	11,015	13,397	4,637
共通	15	43	194	192	77
計	455	6,742	22,484	26,570	9,173

3. 知識の利用方法

DT をそのままの形で CPU に入力し、モジュールの駆動、制御用のデータとして直接利用することが、今回の手法のもう一つの特徴である。

ここでは、実際に操作手順を作成する手法とともに、CPU 内 DT の利用方法について説明する。

全体的な処理の流れを、図 3 に示す。

3.1 適用 DT の決定

目的指令の設備、指令用語に対応する DT を選び、読み込む。

DT エントリーは、

表 1 デシジョンテーブル記述要素
Table 1 Description elements of Decision Table.

名 詞	助 詞	修飾語	判 定 用 語		処 理 用 語	
			分類	用 語	分類	用 語
設備 (100 種)	～は	すべて	有無	～は有り/無し	出力	～を計測確認
機器 (61 種)	～の	いずれか	等価	～は単/複		～を設備状態確認
計測点 (6 種)	～に	最も近い		～は一致		～を機器操作
接続子	～と	所属する		～は隣接する		～を状態マスク
経路	～で	隣接する	状態	～は設備種別	制御	～を情報記憶
分岐	～との	接続する		～は機器種別		～を確認
	～への	対となる		～は計測種別		ファイル呼出し
	～または	共通の		～は入り/切り		テーブル呼出し
	～のうち			～は使用/停止		ループ制御
	～以外の			～は接続する		

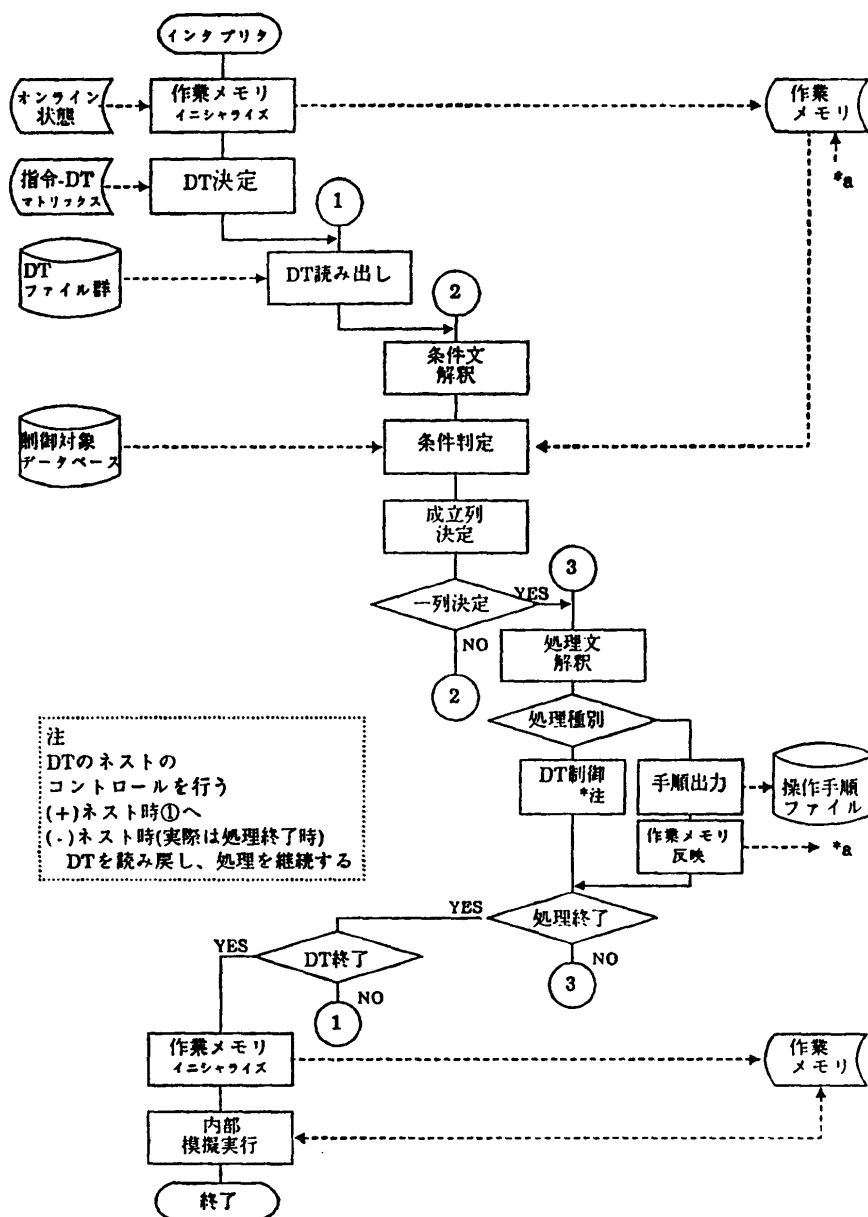


図 3 処理の流れ

Fig. 3 Block diagram of interpreter.

送電用変電所用 設備種別 49・指令用語 35

配電用変電所用 設備種別 42・指令用語 37

のマトリックス上に、記述している。

受信データ内の、設備と指令用語に対応するエリアより、DT エントリーを得、最初に実行すべき DT を読み出す。

3.2 解釈方法

DT に記述された条件文、処理文の解釈は、DT 知識ベースと、制御対象を記述したデータ・ベース、そ

して、現地開閉器の ON/OFF 状態（作業メモリにコピー後使用）を入力して行う。制御対象データ・ベースは、設備、開閉器等の構成要素自身の情報、相互関連の情報で構成する。

DT の実行を開始する時点で、確定している変数は、目的となる設備または開閉器のみである。

DT を実行していく段階で、データ相互関連を参照することにより、判断に必要な構成要素を求める。

これを繰り返すことにより、順次、変数を実際の構

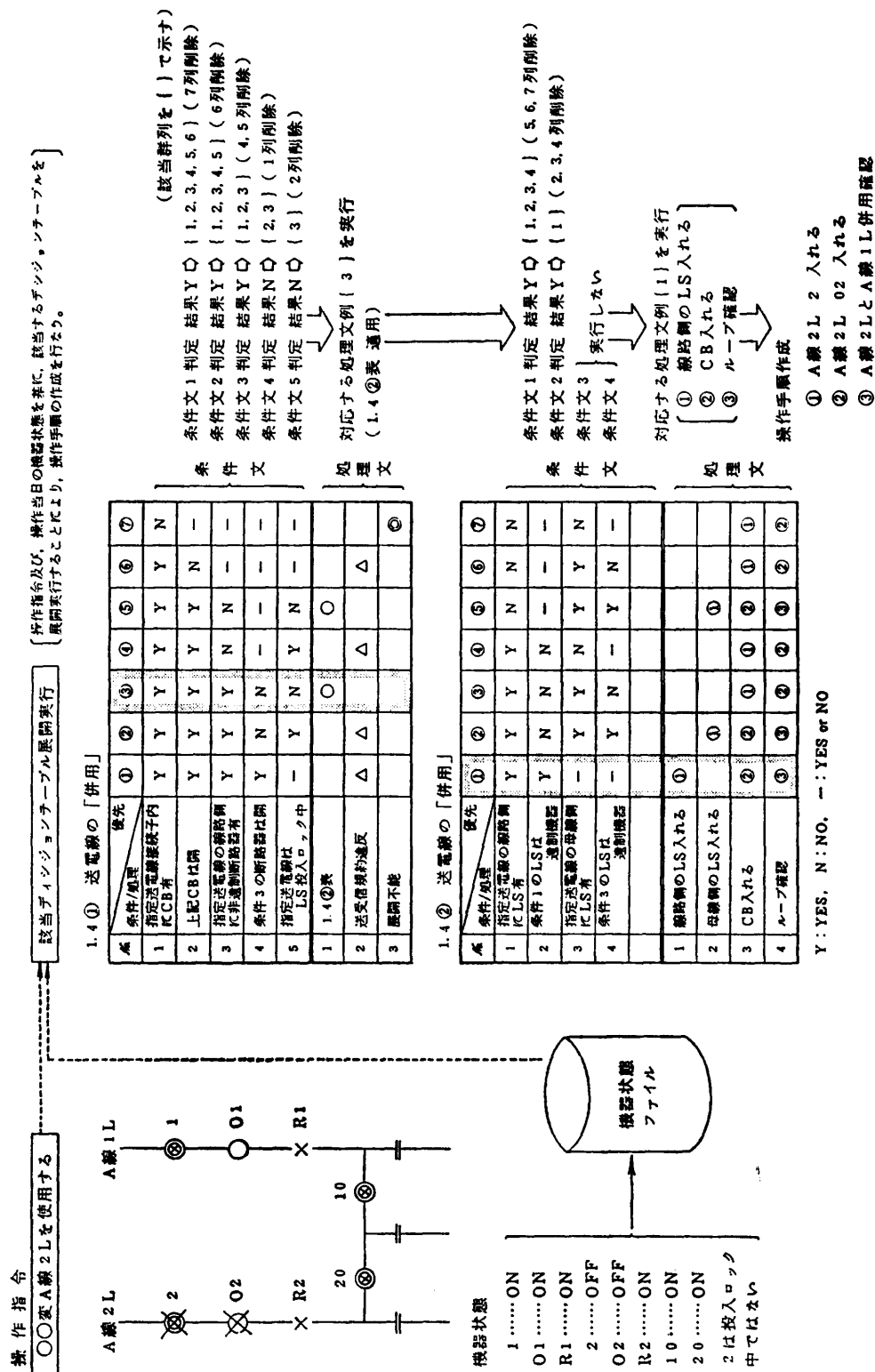


図 4 操作指令展開例
Fig. 4 Example of automatically development.

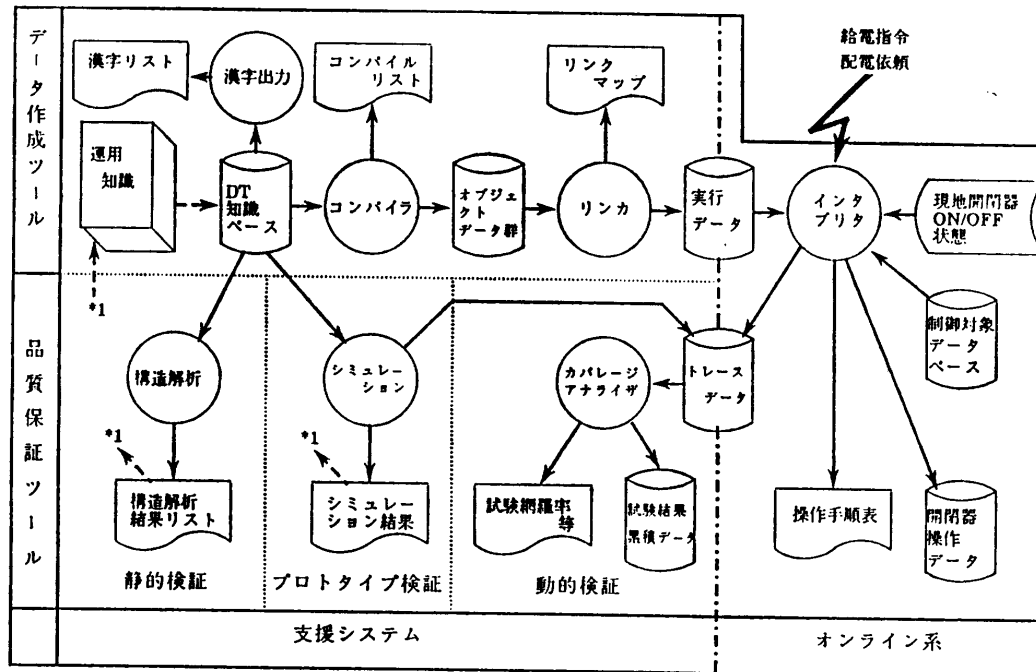


図 6 支援システム

Fig. 6 Integrated development and analysis system.

送電線併用 (1)

1-4 (1)

NO	条件 / 処理	NO	1	2	3	4	5	6	7
1	指定送電線の接続子内にCB有		Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
2	上記CBは開		Y	Y	Y	Y	Y	N	-
3	指定送電線の接続子内に母線側非遮断LS有		Y	Y	Y	N	N	-	-
4	条件3のLSは開		Y	N	N	-	-	-	-
5	指定送電線はLS投入ロック中		-	Y	N	Y	N	-	-
=====									
1	1-4-1 (1)				1		1		
2	送受信規約違反		1	1		1		1	
3	開閉不能								1

図 7 漢字出力した DT

Fig. 7 DT output by JIS-6226-Cord.

る一貫した支援システムの構築が不可欠となった。

図 6 に、今回開発した支援システムを示す。以下、支援システムを構成する各ツールとその内容を報告する。

4.1 データ作成ツール

(1) 漢字出力

DT 知識ベース (JIS 8 単位コードで記述) を読みやすいドキュメントとして、保守性を向上させるため、漢字出力できるようにした。漢字出力した DT 例を、図 7 に示す。

(2) コンパイラ

日本語で記述された DT を、機械語に翻訳する。データが圧縮され、処理しやすいコードになるので、高速処理が可能になる。文法チェックも、この時行い、コーディングミスなどを除去する。

(3) リンカ

翻訳したデータ群を 1 ファイルに連結する。この時、相対レコード番号を、絶対レコード番号に変換し、テーブル間、ファイル間の相互呼び出しを可能にする。

4.2 品質保証ツール

(1) 構造解析

DT 知識ベースに記述された文章を解析し、文章構造、文節構造、単語それぞれに対し、種類、使用回数等を自動集計し出力する。

構造解析結果はコンパイラおよび、オンラインの文

章・文節・単語解釈モジュールの設計に使用した。

また、記述された判定内容(Y/N/-) 過不足チェック、テーブル相互関連チェックなど、基本的なチェックを行い、DT 記述の誤りを除去するために用いた。

(2) シミュレーション

DT 知識ベースを会話形式で直接実行し、DT に記述された論理、制御構造のシミュレートを行う。本来、制御対象データベース、作業メモリから得る情報を、ターミナルから入力する

ことにより、逐次実行し、その結果得た手順を出力する。論理の正当性を実際の手順に近い形式で判定できるため、事前確認や模擬システムでの論理の確認に使用した。

(3) カバレッジアナライザ

シミュレーションおよび、オンライン処理において、手順作成を行った時の、DT の実行履歴をトレースし、処理過程の解析を行う。実行履歴には、通過テーブル、条件文、判定結果、処理文を記録する。

実行履歴を累積保存することにより、未通過テーブル、未成立列などが明らかになり、試験漏れの有無を定量的に把握した。

5. 効 果

操作手順作成のプログラム量を、従来の手法で開発した場合と、DT 手法による場合の比較を行った。

DT 処理部に対応するステップ数の想定方法を、図 8 に示す。DT の表現に対応する手続き型言語のステップ数は、条件呼出し文数、列分割用 IF 文数、処理呼出し文数という、DT の構造から得られる値で推測できる。

条件呼出し文数=22,484……DT 条件文数(表 2)

列分割用 IF 文数=26,878……必要 IF 文数(表 3)

処理呼出し文数=26,570……DT 処理文数(表 2)

合計=75,932

条件呼出し文数とは、条件の真偽を得るために、条件判定モジュールを呼び出す手続きの数を示す。

必要 IF 文数とは、列数分に分岐するために必要な、2 値分岐の数である(表 3 参照)。

条件 A	Y	Y	N
条件 B	Y	N	-
処理 X	1		2
処理 Y		1	1

```

CALL A
IF (A.EQ.TRUE) THEN
  CALL B
  IF (B.EQ.TRUE) THEN
    CALL X
  ELSE
    CALL Y
  END IF
ELSE
  CALL Y
  CALL X
END IF

```

条件呼出し文1
列分割用IF文1
条件呼出し文2
列分割用IF文2
処理呼出し文1
処理呼出し文2
処理呼出し文3
処理呼出し文4

条件呼出し文数=2 ……条件文数=2に一致
列分割用IF文数=2 ……列数-1(3-1=2)に一致
処理呼出し文数=4 ……処理文数=2と想定

図 8 DT とステップ数の対応

Fig. 8 Statements of FORTRAN correspond to DT.

表 3 DT に対応する IF 文数
Table 3 Number of IF statements of Decision Table.

列 数	列数に対応する IF 文の数	テーブル数	必要 IF 文数
2	1	1,206	1,206
3	2	1,223	2,446
4	3	1,416	4,248
5	4	555	2,220
6	5	772	3,860
7	6	382	2,292
8	7	404	2,828
9	8	176	1,408
10	9	182	1,638
11	10	101	1,010
12	11	184	2,024
13~26	15	141	2,115
合 計		6,742	26,878

表 4 手順表処理プログラムステップ数
Table 4 Statements of this method comparison with customary.

	DT 方式	従来方式
入出力制御部	3,048	3,048
初期設定など	4,942	4,942
主回路外手順作成	6,330	6,330
出力データ作成模擬実行	6,369	6,369
共通ライブラリ	4,966	4,966
主回路手順作成	3,434	75,932*
文章処理モジュール	15,669	15,669
主回路ライブラリ	12,233	12,233
支援システム	13,248	0
合 計	70,239	129,489*

* 想定値

処理呼出し文数とは、指定された出力を行うために、処理実行モジュールを呼び出す手続きの数を示す。

なお、DT 処理部以外の部分のステップ数は、同一とした。表 4 に、今回の開発ステップ数と、想定ステップ数の比較を示す。

これにより、DT を使用することにより、操作手順作成に関するプログラム開発量は約 1/2 に削減できたと、想定できる。プログラム量が減ったことは、開発期間のみならず、相対的な信頼性の向上にも寄与した。

汎用性としては、共通の論理で 4 箇所（都心系 2 箇所、周辺系 2 箇所）に適用できたことにより、東京電力管内のすべてに対応するという、当初の目的を満足した。

メンテナンス性も、論理の可視化により向上したと考える。今後のライフサイクルにおける保守、改造に、大きな効果を生むものと思う。

6. む す び

今回の開発により「システムに対し、人間の判断など非手続き的な事項を手続き型言語へ変換する」という、プログラム開発における不連続点を、繋ぎ合わせることができた。

また、今回の開発は、単なる手法開発にとどまらず、東京電力(株)設備総合自動化システムの変電システムに実装して、実用に供しており、実用工学の見地からも、意義深いものであった。さらに、将来にわたるメンテナンスによって、補強、追加されたノウハウが、常に取り出せる形で蓄積できることで、DT に記述された知識は、次世代のシステムに遺す貴重な財産になるものと思う。

参 考 文 献

- 1) 上野晴樹：知識工学入門，オーム社，東京（1985）。
- 2) 後藤，遠山，田中，水鳥，秋田：知識工学の変電所操作手順自動作成への適用，第 35 回情報処理学会全国大会論文集，No. 2，pp. 1849-1850（1987）。
- 3) 泥堂，松木：電力系統事故復旧エキスパートシステム，第 25 回，sice 学術講演会予稿集，pp. 215-216（1987）。
- 4) Brodsky, S.J. and Tyle, N.: Knowledge-based Expert Systems for Power Engineering,

Modeling Simulation, Vol. 15, No. Pt 4, pp. 1535-1539 (1984).

- 5) Hull, K. and Griffin, H.: Real-time Multiparameter Pulse Processing with Decision Tables, *Nucl. Instrum Methods Phys. Res. Sect. A*, Vol. 242, No. 3, pp. 450-454 (1986).
- 6) Ercoli, P.: Decision Tables—Applications to Microprocessors and Some New Implementation Methods, *Microprocess Syst.*, pp. 135-145 (1980).
- 7) 齊藤，平松：デシジョンテーブルが表わす論理の形式化とその応用，第 25 回情報処理学会全国大会論文集，No. 1，pp. 15-16（1982）。

（昭和 63 年 1 月 5 日受付）

（昭和 63 年 3 月 9 日採録）



林 達郎（正会員）

昭和 12 年生。昭和 36 年慶応大学電気工学科卒業。同年東京電力(株)入社。現在、技術開発本部システム研究所制御研究室長。電力系統・設備自動化システムの開発に従事。電気学会会員。



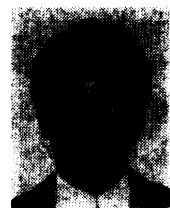
伊能 英幸（正会員）

昭和 23 年生。昭和 42 年墨田工業高等学校電気科卒業。同年東京電力(株)入社。現在、技術開発本部システム研究所制御研究室に勤務。電力系統・設備自動化システムの開発に従事。電気学会会員。



阿部 哲也

昭和 30 年生。昭和 53 年東京理科大学理工学部機械工学科卒業。同年(株)明電舎入社。プラント装置工場電力自動化システム部に所属。電力系統制御用システムの開発業務に従事。



南澤 守

昭和 25 年生。昭和 50 年千葉工業大学電気工学科卒業。同年日本工営(株)入社。同社横浜工場で総合制御所変電システムの開発・設計に従事。電気学会会員。