知識ベースによる送水系統運用計画支援法

正員 小澤 純一郎 (三菱電機)

正員 築山 誠 (三菱電機)

1. はじめに

大規模・複雑システムの運用を考えたとき、オペレータが重要な役割を果たしていることがよくわかる。彼らの知的能力を利用するにあたって考えなければならない重要な点は、効果的なマンマシンインタラクションの実現である⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾。特に問題解決過程においては重要である。プラントオペレータの問題解決過程が認知科学の観点から調査されているし⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾、このプロセスを計算機で置き換える試みがなされている。例えば、知識ベース制御システム⁽¹⁾⁽¹¹⁾や自動演えき推論法⁽⁶⁾などであり、オペレータの負荷を軽減することを目的としている。本論文では、このような概念を実際の上下水道送水系統の運用計画システムへ適用した効果的なオペレータサポートシステムを述べる。ただし、これは人間を計算機で置き換える従来の試みではなく、知的能力をもつオペレータの存在は必要不可欠でありその能力をいかにうまく生かすかということが重要であるとの観点から、人間と計算機との協同作業による問題解決を狙ったものである。

送水システムの運用では、経済的かつ安全な運用が望まれる。この目的を達成するために、線形計画法による支援システムや整数計画法による支援システムが構築されている⁽³⁾⁽⁷⁾。しかし、実際には、必ずしも満足されるものにはなっていない。

例えば、数理計画技術が一般に使用されているが、それらは次のような困難さをもっている。

- (1) 経済性と信頼性は相反する目的である。
- (2) ポンプ流量が離散値となるため、組合せ問題となる。
- (3) モデルを詳細にすれば、解くべき問題は現実

的に解くことが不可能となる。

(4) 需要予測誤差のように定式化が困難な要素が存在する。

それと同時に、オペレータは次のような不満ももっている。

(1) 計算機提示解がなぜ最適解であるのか理解できない。

(2) 自分達が考えた案がより良いように思える。

このような不満は主にオペレータの問題解決過程とシステムのそれとの相違によるものである。一方、熟練オペレータは、なじみの問題に対して効果的解決知識をもっているものである。そこで、上記の困難さと不満を軽減させるために、新しいサポートシステムを構築した⁽¹²⁾。それは、数理計画法よりもむしろオペレータの経験的問題解決方法に基づいている。このシステムはオペレータと同じ問題解決過程をたどるので、オペレータとシステムとの効果的な協同問題解決を可能としている。実際、本システムはそれが有望であることを示したし、その知見に基づいて構築され稼働している実システムに対してもオペレータの評判は良い。このシステムは送水系統運用において協同問題解決の容易化をねらった最初の試みであろう。

2. 問題

〈2・1〉 送水系統の運用 図1は送水系統の粗ダイアグラムを示す。水は供給点（浄水場など）から送水ネットワークを介して需要点にポンプ圧送により供給される。

送水系統の運用目的は以下である。

- (i) ポンプ運転コストを最小にすること
- (ii) ポンプ切換回数を最小にすること（送水流量の平均化でピーク電力を低くし契約電力を低減）
- (iii) 調整池の貯水量を最大にすること（異常時における送水停止の回避）

送水系統運用は、朝一番に、その日の予測需要量と

Operation Support System for Water Supply Systems Using Knowledge Based Method. By Junichirou Ozawa, Member & Makoto Tsukiyama, Member (Mitsubishi Electric Corp.).

小澤純一郎：正員，三菱電機(株)制御製作所

築山 誠：正員，三菱電機(株)中央研究所

図 1 送水系統

Fig. 1. Water supply system.

池水位に基づいて一日の運用計画を立てることから始まる。従来システムでは、このために数理計画法が使用されていた。この運用案は、実際の状況に応じて修正されながら実行されていく。この意思決定は、オペレータが自分自身の評価基準と経験をよりどころとして行っていく。

〈2・2〉 解決すべき問題 数理計画法に基づく従来システム⁽⁷⁾の導入はオペレータに最適運用について考えるきっかけを作ったし結果的にポンプ運転コストは改善された。

しかしながら、計画案が1日を4期間として得られるという計画案の時間的粗さ、計算速度の遅さの問題が残っている。また、使いにくいというマン-マシンインタラクションにかかわる別の問題も出てきている。

これらの問題を分析してみると、原因が以下に示す点にあることが明らかになった。

- (1) 実プラントを数理計画法で表すと変数の数が大量になり、また評価関数が実評価を表しきれない。
- (2) サポートシステムがなぜその計画案を提案したのか理由がわからない。
- (3) システムが透明でないために、どのようにして運用案を得たのか知ることができない。
- (4) オペレータ自身が考えた運用案のほうがシステム提案のプランより良いように思える。

この結果より、専門知識オリエンテッドな手法が解決に有効であると判断した。以下の章では、オペレータの問題解決法を調べ、それによる新しい支援システムを提案する。

3. オペレータの問題解決過程

〈3・1〉 問題解決過程の概要 新しい運用支援システムを設計するために、運用に従事しているオペレ

ータに、彼らがどのように運用を行っているかについて聞き取り調査を行った。その結果は以下のとおりである。

(1) オペレータは、馴染みの状態では状況に関連づけられた表層の問題解決法により運用計画を立て、それを修正し、実際の運用を決める。

(2) 運用案の正当性をチェックしたいときには、それを彼ら自身のヒューリスティクスに基づいて導出した運用案と比較する。この場合、オペレータは送水システムのメンタルモデル（正確な物理モデルでないが経験から得た定性的かつ安全なモデル）を使用している。

このような結果は、文献(9)、(10)などが明らかにしているオペレータの情報処理プロセスと一致するものである。

(1)は、いわゆる浅い知識と呼ばれるもので、次に示すのがその典型的知識である。「表層の問題解決知識の例：今日は冬の週日で晴れであるのでポンプAの運転計画は、12,000t/hと14,000t/hの二つの送水量で、その切換えは需要が増加してきたときに一度行えば十分である。」

ほとんどの場合このような知識は良い運用を行うのであるが、12,000や14,000の二つの値、切換え回数が一度などの決定値の正当性を説明することはできない。それを行うためには、彼ら自身のヒューリスティクスとメンタルモデル、すなわち、運用解探索の思考プロセスや評価基準が必要となる。

〈3・2〉 問題解決の思考プロセス (2)の知識、すなわち、問題解決思考プロセスは、次に示すようなものであった。

各ポンプ場について日平均送水量を調べ、平均送水量に近い幾つかの定格値を選び、シミュレーションによって池水位制約を破らないような最小の切換え回数と

なる切換時刻を決める。切換回数と夜間の切換えとの間にはトレードオフがある。つまり、夜間の切換えを行うよりも昼間の切換回数を増やし、夜間の切換えをなくすほうが良い場合もある。望まれる水位変化が得られなければ定格値の選択を修正し、やり直す。このような操作を、下流あるいは上流の池から場合によっては2~3個の池を同時に、あるいは仮想の池に対して行いながら運用計画を立案していく。

4. システム設計

本章では、支援システムにオペレータのヒューリスティクスを適用することにより、オペレータにより理解しやすいシステムにすることを試みる。ヒューリスティクスとそれを計算機で使うための構造化を示す。ヒューリスティクス獲得法は付録に示す。

〈4・1〉 インタラクションの重要性 オペレータの思考の流れの中で、オペレータが必要とする情報をオペレータの思考の流れを中断させることがないように、計算機が提供できることが重要である。そのようなインタラクションが可能になるように、計算機の中にオペレータの問題解決プロセスの知識を構成することが必要である。

〈4・2〉 ヒューリスティクスの構造化 運用計画を得るという問題解決過程を、オペレータが行う部分的評価に関係する幾つかのサブゴールと、それらを順々に達成していくことで最終ゴールに到達するようなゴールの階層木としてとらえ整理する。このようにして、サブゴールは最終運用案のチェックポイントの役割を果たす。各サブゴールを達成することによって

得られた情報（中間情報と呼ぶ）は運用案を評価する材料となる。前章で示した12,000や14,000などの値はこの中間情報によって正当性が言える。言い換えれば、この中間情報をオペレータに適当な形式で示すことによって、計算機により求められる運用案は容易にオペレータに受入れられるようになる。中間情報の例を表1に示す。

この知識整理の結果として、ヒューリスティクスを次の二つのタイプに分ける。

- (1) ゴールとサブゴールの関係を定めるスケルトンフロー（すなわち、概略的計画立案の流れ）。
- (2) スケルトンフローの各ゴールをどのようにして達成するかについての具体的知識群（例、表1）。

図2は知識の構造化を説明している。後者の知識例を次に示す。

「サブゴール達成に関する知識の例：もし、現在の時刻が8時であり、かつ日総需要予測値が昨日のそれと違い、かつポンプAの流量がまだ決定されていない

表 1 中間情報の例

Table 1. Example of intermediate information

天 候
予 測 総 需 要 量
各調整池への平均送水量
各調整池の水位パターン
池Dの下流側地域の総需要予測量はポンプ場Cの1台送水量とBの1台送水量の和より大きい？
各ポンプ流量の候補値

図 2 ヒューリスティクスの例

Fig. 2. Example of heuristics.

い、それならば、明日7時において池Aの下流側のすべての池の水位が上限水位の80%水位になるような総送水量を計算で求めなさい。」

すなわち、タイプ1の知識はサブゴールが何で、それらはどのように連結されているかを示し、タイプ2の知識は各サブゴールはどのようにして達成されるかを教える。これらの知識はオペレータ個人に依存していることが多いので、後述するシミュレーションにより整理確認する必要がある。

〈4・3〉 知識の記述 知識ベースの構造を図3に示す。これは、〈4・2〉節で提案された知識の構造化に基づいている。スケルトンフローは全体構造を形づくる。タイプ2の知識は対応するサブゴールごとにまとめられている。各知識グループは、サブゴールが達成されない場合には何の処理がなされるかについての知識ももっている。

知識は次のプロダクションルールの形式で整理記述できる。

IF (状態)

THEN (OPERATOR により状態を変化させる)

状態は、属性と値の対で定義される。すなわち、

{ (属性1 値) (属性2 値) …

… , 属性N 値) }

である。属性の例を表2に示す。推論の開始時点では属性の値はNILであり、サブゴールを達成していくに従って適当な値が与えられていく。OPERATORには次の種類のものがある。

(i) 属性に値を割りあてる。

(ii) データベースにアクセスする。

(iii) シミュレーションを実行する。

(iv) 数値ツールを走らせる。

OPERATORが数値計算を必要とするとき、それは自動的に数理的ツール内の対応するプログラムを走らせる。

これらの数理的プログラムには明確なアルゴリズムだけで、ヒューリスティクスは一切含まれていないことに注意しておく必要がある。これは、すべてのヒューリスティクスは知識ベースに集められるべきであるからである。このことはヒューリスティクスの明確化のために重要である。

〈4・4〉 システム構成 全体のシステムは、知識ベース、推論エンジン、作業エリア、データベース、数理的ツール、推論履歴記録エリア、から構成される⁽¹²⁾。本システムの検証のため、知識ベースに対してOPS5を、数理ツールに対してFORTRANを使用した(直、実システムでは従来のプロセスコンピュ

表2 属性の例

Table 2. Example of attributes.

曜 日
現 在 時 刻
過去24時間の各需要点の時間あたり需要量
各需要点の次の朝6時までの時間あたり予測需要量
日間全予測需要量
天候 (昨日, 現在, 予報)

図3 知識の構造

Fig. 3. Knowledge structure.

ータのため、すべて FORTRAN で記述した)。知識ベースには、〈4・2〉節で示した知識が格納される。数理的ツールには、送水システムのシミュレータや需要予測プログラムなどのツールが含まれている。推論エンジンはシステム全体を動かす。

〈4・5〉 支援過程 図4は一日の運用計画案を作成していく途中結果を説明している。運用案作成は図2のスケルトンフローに従って進む。図に示されるように、まず第一のサブゴールは必要な情報を確認し作業エリアにもってくることである。第二のゴールは全域総需要の時刻ごとの需要を予測することである。このサブゴールを達成させるために知識は需要予測プログラムを走らせ、作業エリアのデータに基づき結果を得る。そして、その予測結果、それは一つの間情報であるが、それをオペレータに示す。もし、オペレータがその結果に不満ならば、値を修正する。

ポンプ送水量を得るサブゴールでも、推論過程は基本的に同じである。そのサブゴールに関係する知識を使用することによって、システムはポンプの送水量変化曲線を与え、池の水位曲線などと共にオペレータに示す。オペレータがその結果に不満なとき、システムに代替案を求めるように要請し、結果としてより好ましい案を得る。このポンプ送水量の選択はオペレータの評価基準に基づいて行われる。もし、満足いく解が発見できなければ、すなわちそのサブゴールが達成できなければ、推論エンジンは知識に従って、以前のサブゴールに戻り、やり直しを行う。

日運用案は1日に一度立てられる。この運用案は実行時の毎時刻ごとにチェックされる。普通は実状態は

```

..... スタート

..... サブゴール 1
  天気予報      : 晴
  曜 日         : 水
  OK ?          : イエス
..... サブゴール 2
  全 需 要 量    : 1100000
  OK ?          : ノー
  全 需 要 量    : 1200000

..... サブゴール 10
  池 D の水位バターン : グラフ表示
  OK ?          : ノー
..... サブゴール 8
  ポンプ場 B の最大許容切換回数 : 2
  OK ?          : イエス

..... ゴール
  運 転 計 画      : グラフ表示
  OK ?          : イエス
..... ストップ
  
```

図 4 立案プロセス

Fig. 4. Plan generating process.

計画されたものとは異なる。その主な原因は、需要の予測誤差である。システムは実際の状態を初期状態として運用案のシミュレーションを行い、結果をオペレータに提示する。オペレータがその結果を受入れれば、その計画が実行される。もし、満足されなければ、あるサブゴールの状態を再設定し（これも知識に従ってなされる）、上述と同様にして現在時刻以降に対して新しい計画を作る。

ここに示されたように、良い運用計画を得るオペレータと支援システムの協同作業は、オペレータと支援システムが同じ問題解決方法をとる場合においてのみ可能となる。またこの方法によって、問題解決過程途中で得られた中間情報は、計画をチェックしたり、修正したりするのにも有効となる。

5. 支援システムの評価

支援システムの評価は、計画案の評価関数に基づく最適性とオペレータの使いやすさ、理解しやすさの二面から行われる。計画案は知識ベース内のヒューリスティクスに依存しているため、客観性をもった最適性は保証されていない。このため、最適性を評価するには、それを実際のシステムで試みるほかに手はない。また、オペレータとの親和性についてはオペレータの主観的評価しかない。本章では、実送水系統のオペレータから獲得したヒューリスティクス知識による本支援システムの結果とオペレータの評価を述べる。

本支援システムの実用性を確認するため、いろいろな条件で運用計画案を作成し、その計画案をシミュレータ上で実行した。ここでは特に運用の難しい A～D を示す。図5はその1ケースを示す。また、表3に送水系統の諸元を示す。実験結果は表4にまとめられている。これから、すべてのケース（冬-8 ケース、春-8 ケース、夏-6 ケース）について、ポンプ切換回数は十分少ないし、調整池の水位変化曲線も満足ゆく範囲内に入っているし、ポンプ運転コストも小さいことが結論づけられた。

次に、この結果をこれまで使用されていた数理計画法による従来システムによる結果と比較しよう。従来システムのモデルは、1日を4期間（6時間一定）として定式化していた。これは、計算機のメモリー容量と数理計画問題の解探索時間の制約によるものである。一方、新しいシステムでは1日を24期間としてモデル化しているので、求まる解の実行可能領域は広く実用的解が求まる。その比較を表5にまとめる。新しいシステムによって作成された運用計画案はオペレータの知識に基づくのでオペレータ自身の計画案と違

図 5 実験結果の一例
Fig. 5. An example of test results.

表 3 送水系統の諸元
Table 3. Variables of water supply network.

配水池・ポンプ場	池面積 (m ²)	上限水位 (m)	下限水位 (m)	定格ポンプ流量 (m ³ /h)
A	6,980	6.6	4.1	10,500, 11,500, 15,300, 18,000, 18,500, 21,000, 24,000, 26,000, 27,000, 28,000
B	4,800	6.0	4.0	2,200, 4,500, 6,600, 9,000, 11,100, 13,100
C	7,040	5.8	1.5	9,200, 17,500
D	15,040	4.7	1.5	

表 4 結果のまとめ
Table 4. Test result summary.

検証ケース	ポンプ場	ポンプ 切 換 回 数				水位変化パターン		
		0回	1回	2回	3回	ポンプ場	容認できる	できない
冬	8	S	8			A	8	0
		A	8			B	8	0
		B	4	4		C	8	0
		C	8			D	8	0
春	8	S	8			A	8	0
		A	2	5	1	B	8	0
		B	6	2		C	8	0
		C	8			D	8	0
夏	6	S	6			A	6	0
		A	2	4		B	6	0
		B	5	1		C	6	0
		C	6			D	6	0

S, A, B, C: 図1のポンプ場名

表 5 ヒューリスティック法(H)と数理計画法(M)との比較

Table 5. Comparison between heuristic approach (H) and mathematical programming approach (M) on the same computer.

	サンプリング タイム	必要メモリー (KB)	計算時間 (min)	得られた 運用案
M	6時間	64	30	修正が必要
H	1時間	32	10	実用的

和感がなく、オペレータに高く評価され、そのまま受入れられた。その、理解しやすさと適切さのためである。一方、従来システムによる運用案は、モデルと評価関数の実際とのズレや計算機の制約のため、実際に運用するときに大きく修正される必要がある。これらが示すところをまとめると、この新しい支援システムは十分効果があると言える。

現在、某都市の支援システムは従来の数理計画に基づくものから本方式に基づく新しい支援システムに置き換えられている。そのシステムは、オペレータからより理解しやすく、使いやすいたとの評価を得ている。

6. 議 論

推論エンジンと知識が分離されたシステムを知識システムと呼ぶならば、本システムの実用化版は知識システムではない（実用化時は従来のプロセスコンピュータを使用したため推論エンジンはのせていない）。本システムは、LISP, PROLOG, OPS 5などで実現

したというようなプログラミング方式の点で新規性を問うものではない。

オペレータの思考プロセスを計算機の上に実現することによってオペレータと親和性の高いシステムにするという点に新しい試みがある。従来にもヒューリスティック手法というものはあった。それは、数理計画問題として定式化される問題で許容時間内で解けないものを、ヒューリスティックな解法により解くものである。そのヒューリスティックスは対象の構造や数理的特徴に着目されて構築されたものであり、計算機による解法を人間の思考プロセスに合せるという視点はもっていない。

7. 終りに

本論文では、オペレータのヒューリスティックな問題解決方法に基づくオペレータ支援システムを述べた。

本研究を通して、この概念は大変望みのある問題解決法を与え、オペレータに理解しやすく効果的なサポートシステムを実現できることを明らかにした。一方、このシステムの効果は知識の質に依存する。知識の限界を明らかにすることも重要である。これについては、一層の研究が必要である。

(昭和63年2月29日受付, 同63年11月14日再受付)

文 献

- (1) K. J. Astrom, J. J. Anton & K. E. Arzen: *Expert Control. Automatica*, 22-3, 276 (1986)
- (2) M. M. Burroughs: "An Investigation of Mental Coding Mechanism and Heuristics used in Electronics Trouble-Shooting", University of Oklahoma, D. Thesis (1979)
- (3) B. Coulbeck & C. H. Orr: "Optimized Pumping in Water Supply Systems", Proc. IFAC 9th World Congress, p. 3175 (1985)
- (4) G. Johannsen, J. E. Rijnsdorp & A. P. Sage: "Human System Interface Cognitions in Support System", *Automatica*, 19, No. 6 (1983)
- (5) A. Knaeuper & W. B. Rouse: "A Rule Based Model of Human Problem Solving Behavior in Dynamic Environments", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybernetics.*, 15, No. 6 (1985)
- (6) E. L. Lusk & R. Stratton: "Automated Reasoning in Man-Machine Control Systems", Proc. 9th Advanced Control Conference, p. 41 (1983)
- (7) I. Nakahori, I. Sakaguchi & J. Ozawa: "An Optimum

Operation of Pump and Reservoir in Water Supply System", 8th IFIP Conf. on Optimization Techniques (1979)

- (8) R. W. Pew & S. Baron: "Perspective on Human Performance Modelling", *Automatica*, 19, No. 6 (1983)
- (9) J. Rasmussen: *The Human as a System Component, Human Interaction with Computers* (1980) Academic Press
- (10) W. B. Rouse: "Models of Human Problem Solving: Detection, Diagnosis, and Compensation for System Failures", *Automatica*, 19, No. 6 (1983)
- (11) M. Tsukiyama & T. Fukuda: "An Application of Knowledge Base to Plant Control Systems", Proc. of International Conference on Cybernetics and Society (1981)
- (12) 小松原・太田・天野・河野・築山・小澤・斉藤: 「知識ベースによる送水系統運用計画システムの検討」, SICE 第11回システムシンポジウム, p. 1 (昭60)

付 録

知識の獲得

オペレータは構造化された形で彼らのヒューリスティックスをもっていないので、それを獲得し、相互に関係するように整理する必要がある。知識獲得のためにインタビューを行った。しかし、獲得された知識によるシミュレーション結果をオペレータにフィードバックすることが重要であった。このサイクルを繰返すことにより、よく整理された形でより少ない誤りで知識を獲得することができる。更に、オペレータに自分自身の知識を意識して日ごろの運用を行ってもらう期間をとることは、結果をより信頼できるものにする。

知識獲得も最初は試行錯誤的であったが、<4・2>節に示す知識構造化法を確立するに従い、以下に示す方法となった。

まず、スケルトンフローの知識を取出す。これは粗いが、ヒューリスティックスの全体構造を表す。そのために、このプロセスはオペレータに彼らが日ごろ行っていることを考えさせ、そのヒューリスティックスを論理的形式に表現してもらうことに役に立つ。

次に、サブゴールレベルのヒューリスティックスの取出しを行う。この場合、得られた知識はすぐに計算機化される。そして、それを試験しそれがどのような結果を導くかをみる。

プロトタイプシステムでは、知識の獲得に約3週間かかった。また、その体系化と整理には約1箇月を要した。