

泥水シールド掘進管理への エキスパート・システムの適用

An Application of Expert System to Excavation
Controlling in The Pressurized Slurry
Shield Tunnelling

戸田建設株式会社 樋口 忠
By Tadashi Higuchi

近年、シールド工事を取り巻く環境がシールドの大断面化や大深度化にみられるように非常に厳しいものになってきており、その掘削管理にはち密で信頼性の高いものが望まれている。このようなニーズに応えるため、パソコンによるモニタリングを中心とした従来の掘削管理システムにエキスパート・システムを導入した新たなシステムを開発した。

このシステムの役割はシールド機や泥水輸送設備、泥水処理設備等に設置された各種センサからのプロセスデータと知識ベースに蓄えられた専門家知識を利用して、シールド掘進時における異常発生状況をリアルタイムに推論し、オペレータが適切な操作・対策を施せるようガイダンスすることである。このような運転支援システムで最も重要なリアルタイム推論を実現させるために、システムの開発はプログラミング言語で行った。また知識のユニット化や階層化、推論のモジュール化といった工夫も行っている。

シミュレーションによる評価や一部のフィールドでの使用ではまずまずの成果が得られた。このようなシステムの導入は掘削管理レベルの向上にだけに留まらず、実施工から得られる貴重な経験やノウハウといった専門家知識の周知と伝承を可能とし、管理の標準化や熟練技術者不足問題等に関する大きな効果が期待できる。

【キーワード】 エキスパート・システム、シールド工法、施工管理

1. はじめに

専門家と素人の違いは特定領域の問題に対する解答の出し方にある。専門家は専門的知識やノウハウにより効率よく解答を見つけ出すことができるのに対し、素人はコツがわからないままに試行錯誤を繰り返して解答を得ようとする。当然、素人の出す解答の質や解答を出すのに費やす時間は専門家のそれに遠く及ばない。専門家のもつ問題解決のノウハウやコツを用いて推論ができれば、コンピュータが専門家の代行をすることもできるし、素人がコンピュータを使って専門家並みの仕事をすることも可能となる。これがエキスパート・システムである。最近で

は金融、医療、教育、法律、鉄鋼などのあらゆる分野で多くのエキスパート・システムの導入が検討されたり、研究開発段階から実運用段階に至るまで様々なものが発表されている。建設分野においても工法選定、各種診断、設計支援といった応用例が報告されている¹⁾。

エキスパート・システムは問題解決の種類から

- ①分析・診断型
- ②制御・監視型
- ③設計・計画型

に大きく分けられる。ここで紹介する泥水シールド掘削管理システムは、制御・監視型のエキスパート・システムである。

制御・監視型のエキスパート・システムが扱う問題は本質的には分析・診断型の問題と類似しているが、その問題に時間的連続性が存在するという点で分析・診断型とは異なる。すなわち、問題解決のリアルタイム処理が要求され、AI技術以外の要素も極めて重要となる。本稿ではリアルタイム性の実現方法を中心に、システムの構築方法や機能及び適用例などについて紹介する。

2. エキスパート・システム開発の背景

(1) 掘削管理の現状

密閉型機械シールド工法の登場により、シールド掘削技術は目覚ましい発展を遂げた。とりわけ泥水シールド工法は、わが国特有の複雑多様な地盤への適用性の良さと、高度な自動化による高い施工能率や長年にわたる切羽安定に関する研究により多くの現場で採用されている。

掘削技術の向上に伴って一層厳しい条件下での施工も可能となり、より安全で品質の高い施工を実現することが望まれて来ている。最近ではパソコンを用いたデータのロギング・モニタリング・システムを導入した掘削管理手法を目にする機会が多い。きめ細かな管理を実現させるためである。

泥水シールドにおける掘削管理を司るのは中央監視盤を操作するオペレータである。泥水シールドでは切羽面が密閉されているため、直接切羽を見ることができない。また機器の運転も遠隔操作で行れるので、オペレータはシールド機や泥水輸送設備、泥水処理プラントに設置された各種センサデータの状況を頼りに

- ①切羽に作用する泥水の状況
- ②土砂の掘削・取り込みおよび輸送状況
- ③掘削土砂の分離処理状況
- ④裏込の充填状況

などを推察しながら掘削管理を行っている。

掘削管理で重要な点は、正確かつ迅速な“状況判断”と適切な“操作”を如何になし得るかということである。パソコンによるデータロギング・モニタリング・システムは、リアルタイムに収集したセンサデータを推移図や分布図などで表示することによ

り、オペレータが迅速に掘削状況を把握することを可能としている。しかし、土質や地下水位、シールド断面といった施工条件が変わる中、定量的な掘削管理を行うことは非常に困難で、オペレータの勘や経験的知識に頼っているのが現実である。

(2) 開発のねらい

ところで昨今におけるシールド工事を取り巻く環境に目ややると、既設の地下構造物が輻輳する中でシールド掘進、悪い地盤でのシールド掘進、東京湾横断道路プロジェクトや大深度地下鉄などで要求されるシールドの大断面化・大深度化等々、施工条件が非常に厳しいものになってきている。このような状況において掘削技術はもちろんのこと、掘削管理技術のさらなるレベルアップは重要な課題となっている。パソコンを用いたデータロギング・モニタリング・システムの導入は掘削管理のレベルを一段と向上させたが、その限界は明らかである。オペレータの経験やノウハウ、勘といった専門家知識の有無がどうしても管理の質に反映されてしまうという問題がある。オペレータの技量に左右されず、どこでも優れた管理を実現させるというのが本システムを開発した理由である。

さらに、

- ①掘削管理技術のレベルアップ
- ②掘削管理技術の標準化と伝承
- ③熟練オペレータ不足の解消
- ④オペレータの負担の軽減

といったことを解消することも開発の狙いである。

3. システムの構成

(1) ハードウェアの構成

本システムはシールド機や泥水輸送設備、泥水処理設備等に設置された各種センサからのプロセスデータと知識ベースに蓄えられた専門家知識を利用して、オンライン／リアルタイムでシールド掘削時における異常発生状況を推論し、オペレータが適切な操作・対策を施せるようにガイダンスする運転支援システムである。

本システムは図-1に示すように、データロギン

グ・モニタリング・システムに接続して使用するよう設計されている。データロガーは、計装システムで得られたプロセスデータを2秒毎にサンプリングし、GP-IBを介してモニタリング・システムとエキスパート・システムの双方にそれを供給する。モニタリングシステムはこれらのデータを時系列的に表示することにより、オペレータのパターン認識による迅速な判断を促している。また、データの保存や各種報告書の作成、グラフの作成も行う。エキスパート・システムでは、これらのデータと知識ベースをもとに異常発生の有無やその原因、対策を実時間で推論する。

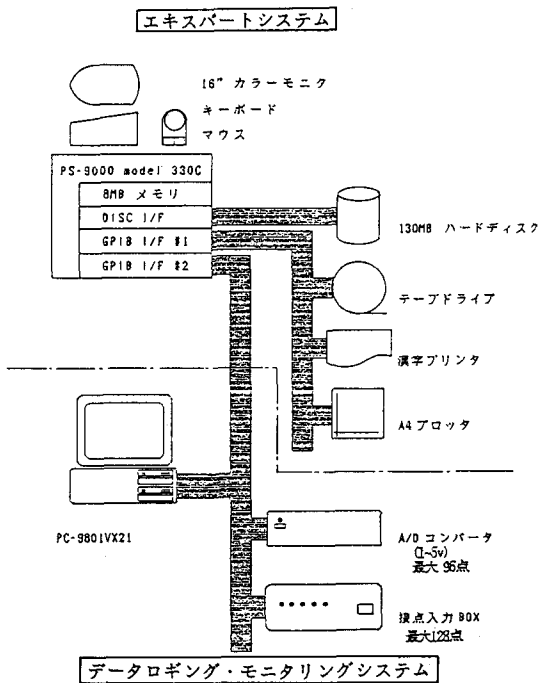


図-1 ハードウェアの構成

(2) ソフトウェアの構成

エキスパート・システムの開発環境としてエキスパート・システム構築支援ツールがある。ユーザは推論メカニズムをプログラムする必要がないので、プログラミングの知識が無くてもエキスパート・システムを構築することができる。そして、エキスパート・システムを開発する場合、このツールを用いるのが一般的である。知識のモデル化の成否がエキスパート・システムの実現に大きく影響する場合、

専門家自身が直接エキスパート・システム上へ知識をインプリメントできるという点でこの方法は有効な手段である。ところが、本システムのような制御・監視型といった外部の動的なデータを対象とするシステムでは、その成否は必ずしも知識のモデル化だけで決定されるものではない。従来の手続き型プログラミングの範ちゅうに入るものも重要な要素となる。

- ①知識のモデル化
- ②計測システムとのインタフェース
- ③数値処理
- ④高速応答性

といったことが全て満足されなくてはならない。

エキスパート・システム構築支援ツールが提供する対話的プログラミング環境は非常に便利ではあるが、これは知識のモデル化といった局面に関してであって、それ以外では満足のいく環境を提供してはくれない。このような理由から本システムの開発はプログラミング言語のCとPrologを用いて行った。推論部分は主にPrologで、その他の部分は主にCで開発した。

ソフトウェアの構成は図-2のようになる。

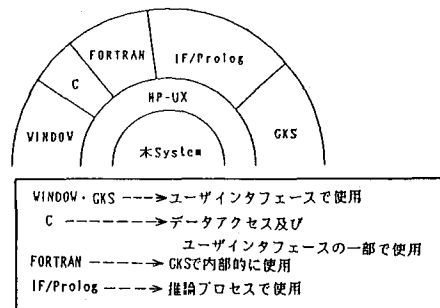


図-2 ソフトウェアの構成

4. リアルタイム・エキスパートシステムの構築

(1) 知識の獲得

専門家の知識を獲得し、モデル化するということはエキスパート・システムを構築するうえで最も重要なことである。本システムのようにシステム構築を支援ツールを用いないでプログラミング言語で行う場合、専門家自身による知識のシステムへの直接

入力が期待できない、それゆえ専門家の思考形態を深く理解しないと知識の獲得には結びつかない。

シールド掘削は図-3のようなプロセスからなる。

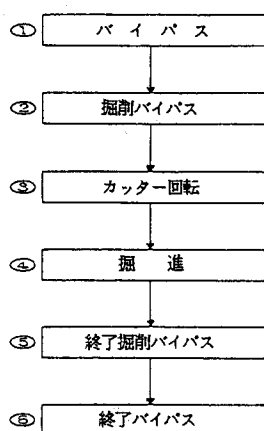


図-3 掘削プロセス

オペレータは各プロセスに関係するセンサの状態を監視して、異常の発生がないかチェックする。異常の発生が認められれば、その原因が何であるかを探り、適切な対策を検討しそれを速やかに施すことで重大事故の防止に努めている。オペレータはこれらの判断を現在の掘削状況、過去の掘削状況、土質やシールドの大きさといった掘削条件、専門家知識などから総合的に行っている。このような図-4に示す。

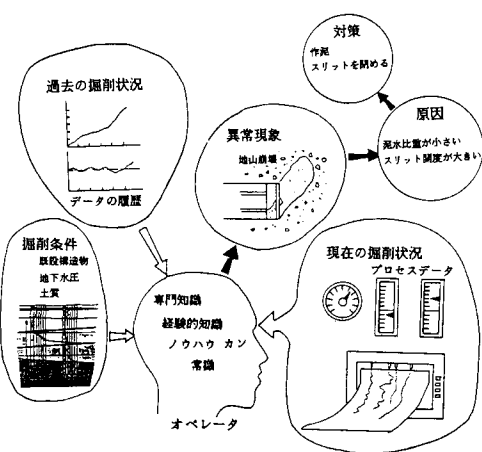


図-4 オペレータの判断

専門家であるオペレータの知識には

①教科書的知識

②経験的知識（ヒューリスティクス）

がある。このうち①はオペレータになるのに必要な基礎的な知識で、その多くは文書化されたりしている。しかし、専門家になるためにはこの知識だけでは不十分である。②の経験的知識、いわゆるノウハウが必要である。一般のエキスパート・システムでは知識全体で①の占める割合がかなりの部分を占めるのだが、本システムが対象とするオペレータの知識には②が占める割合が極めて高い。①を確実に抽出することはいうまでもないが、②の抽出する量と質が重要である。いかに質の良い経験的知識を多く獲得できるかがエキスパート・システムのレベルを左右する。

オペレータの知識を抽出する場合、気を付けなければいけないことは次の2点である。

①管理値など具体的な数値を扱う知識については、できるだけ定性化を図る。

②対象とする問題領域をできるだけ階層化・構造化する。

①は知識の一般化を試みるアプローチである。土質や地下水位、シールドの大きさ、泥水輸送設備、処理設備等の掘削条件が同一のシールド工事はまずない。すなわち、土質やシールド径が少し変わっただけでも、掘削管理の定量的な部分は細部を見れば違うのである。また、熟練オペレータ同士でも個々の経験した環境は異なるため、意見が異なるものも多い。それでも、「～データが急激に上昇すれば～異常である」といったようなあいまい表現をすれば知識の一致がみられる場合が多い。このようにあいまいさを用い定性化を図ることにより、多くの知識を抽出することができる。

②は必要な知識だけをうまく取り込む方法である。専門家であるオペレータが知識を披露する場合、それを理論整然と詳細にしかも矛盾なく提示することはほとんど不可能といってよい。とくにオペレータにしてみれば「常識」と思っている知識が多いからである。このように制限なしに知識を引き出そうとすると必要な知識が得られなかったり、問題の解決とは無関係な知識までが紛れ込む可能性がある。また、知識間の関連が不明確になったり、知識の量が

必要以上に大きくなったりして後々、知識のチェックや更新、処理速度といったものに大きく影響する。このような問題を避けるため機器、センサ、データの評価、異常現象、原因、対策といったように対象を限定して知識の獲得を試みた。これらの知識はそれぞれコンパクトなモジュールとすることができた。

(2) 知識表現

獲得した知識の表現には次の3種類の方法を用いている。

a) フレーム

機器に関する知識、プロセスデータに関する知識など、変化することのない情報、属性をこの方法で表現した。言うなれば辞書を形成している。

b) ルール

異常現象に関する知識、原因や対策に関する知識など、直接推論に係わる知識はこの方法によった。

c) オブジェクト

推論結果の表示方法やシステムの状態など、推論プロセスの中で変化する情報をこの方法で表現した。

これらは実際の知識ベースの中では図-5のようにフレーム型をしている。ルール型知識もスロットとして扱えるように内部で知識の呼び出し方を定義している。このような手法の利点は知識ベースの管理がし易くなることである。

なお、知識ベースの大きさは1500フレームほどである。

(3) リアルタイム推論の実現

推論機能には

①適切な結論の導出

②リアルタイム性

の2点が要求される。この2つは明らかに競合するすなわち、推論の精度を得ようとする、調べようとする知識が多くなり推論速度に影響する。本システムではこの2点を同時に満足させるために次のような方法を採用している。

a) 知識のユニット化

効率的な知識の使い方をするために、知識をユニット化し階層構造にしている。推論エンジンはメタ知識を使って必要な知識ユニットのみを抜き出し、

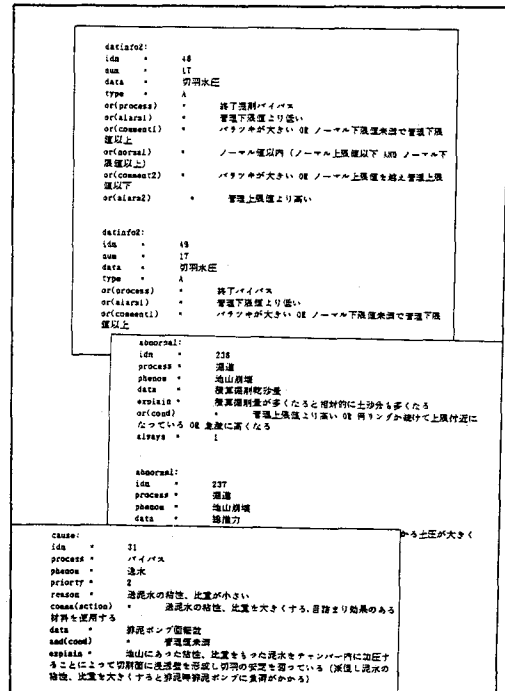


図-5 知識表現

それを使って推論を進める。これにより必要もない知識とのパターン・マッチングを行って時間を浪費するといった無駄を避けることができた。知識のユニット化、階層化には次のような利点がある。

①知識をまとめやすい

②知識のチェック、修正がしやすい

③知識の効率的な使用が可能である

なお、知識ユニット内における判断木はできるだけ浅いものとした。バックトラックを避けるのが理由である。これにより推論を直線的なものとし、推論速度を速めることができた。

b) 推論のモジュール化

異常現象の発生の有無の確認からその原因の究明や適切な対応策を求めるまでを一連に推論しようとする、使用する知識が膨大となりリアルタイム性は得られなくなる。ところでオペレータはプロセスデータを監視し、例外が生じた時に異常現象の発生の有無を確認し、その発生が考えられてはじめてその原因が何であるかを探るといったことを行っている。すなわち、オペレータは異常現象やその原因、対策といったものを同時にではなくタイムラグを置

策といったものを同時にではなくタイムラグを置いて判断している。そこで異常現象、原因、対策といったオペレータが注目する領域に対してそれぞれ別の推論としてオブジェクトを構成させた。これらは図-6に示すような6つの推論モジュールとなった。

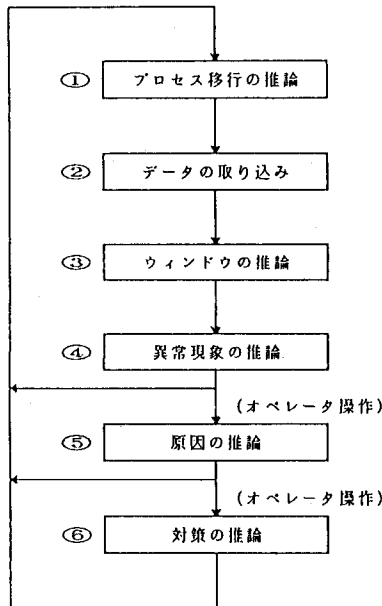


図-6 推論モジュール

それぞれの推論モジュールの機能は以下のとおりである。

①プロセス移行の推論

「バイパス」から「終了バイパス」までの掘削プロセスの中で、現在のプロセスが何であるかを推論する。

②データの取り込み

プロセス毎に予め用意されているメタ知識を用いて、現在のプロセスの推論に必要なデータのみを取り込む。

③ウィンドウの推論

取り込んだデータを知識ベースと照合し、前向き推論により評価する。評価は正常、注意、異常の3レベルである。

④異常現象の推論

③での評価をもとに、現在発生している、あるいは発生しつつある異常現象を後向きに推論

する。対象となる異常現象すべてについて重要度の高い順に行われる。推論結果は確信度を用いて正常、注意、異常の3レベルに評価される。この推論は③と並行して行われる。

⑤異常原因の推論

異常現象の推論と同様に後向き推論で行われる。この推論の起動はオペレータの要求により行われ、一回の要求で一つの異常現象に関する原因の推論が実行される。

⑥対策の推論

⑤と同様で一つの原因に対して対策が推論される。

表-1 異常現象の種類

プロセス = バイパス		
排水管閉塞	送水管閉塞	送水ポンプ能力限界
排水ポンプ能力限界	送・排水管漏水	急水
送水水性状異常		
プロセス = 掘削バイパス		
排水管閉塞	送水管閉塞	送・排水管漏水
急水	送水水性状異常	土砂取り込み
チャンバー内増積		
プロセス = カッター回転		
排水管閉塞	送水管閉塞	送・排水管漏水
急水	送水水性状異常	土砂取り込み
地山崩壊	チャンバー内増積	チャンバー内異物進入
カッター回転不能		
プロセス = 掘削		
排水管閉塞	送水管閉塞	送・排水管漏水
急水	送水水性状異常	土砂取り込み
地山崩壊	チャンバー内増積	チャンバー内付着
チャンバー内異物進入	排水ポンプ能力限界	カッタースリット付着
障害物出現	シールド外周部高圧付着	高圧部り込み
チャンバー内土砂増積	増山圧密	カッタービット摩耗
土質変化		
プロセス = 終了掘削バイパス		
排水管閉塞	送水管閉塞	送・排水管漏水
急水	送水水性状異常	土砂取り込み
チャンバー内増積	チャンバー内異物進入	
プロセス = 終了バイパス		
排水管閉塞	送水管閉塞	送・排水管漏水
急水	送水水性状異常	

5. システムの評価と動作例

(1) シミュレーションによる機能の評価

システムを現場へ適用する前に知識の妥当性やシステムの機能をシミュレーションにより評価した。シミュレーション用のデータは実際施工をしている現場から採取した生データをもとに作成した。

シミュレーションの結果

①若干の知識の修正が必要だったが、推論で得

られた結果は十分満足いくものだった。

②肝心なリアルタイム性については、全ての異常現象の判定に要する時間は最大でも2.5秒以内であり、掘削監視の性格からみて十分にリアルタイム性があると判断された。

これにより、当初考えていた時間制限による推論の切り替えや打ち切りをしなくて済むことがわかった。

(2) 動作例

写真-1は実施工の場で本システムを使用しているところである。

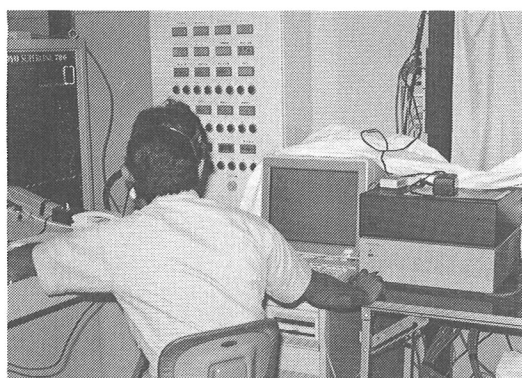


写真-1 フィールドでの使用

この工事はφ3500mmほどの中規模なシールドである。掘削地盤は洪積砂質土と粘性土の互層となっており軟弱かつゆるい地盤である。さらに地下水位が高く砂質土の透水性も高いので、地下水位の流入や切羽の崩壊等の危険が大きく、切羽の安定には細心の注意を払って掘削管理をする必要があった。

異常の発生が認められると、システムはその状況を警報と説明文によりディスプレイに表示する(写真-2、写真-3)。異常現象の原因と対策がつかめない場合、オペレータはシステムに原因と対策の推論を要求する(写真-4)。オペレータは推論結果にもとづき最終判断を行いチューニングをする。チューニングした結果、異常現象が解消されればそのまま運転を続行する。チューニングしても異常現象が解消されなければ再度原因と対策を求め、場合によっては運転モードの切り替え等を行い、トラブルの解消に努める。

また、オペレータは推論過程をトレースすること

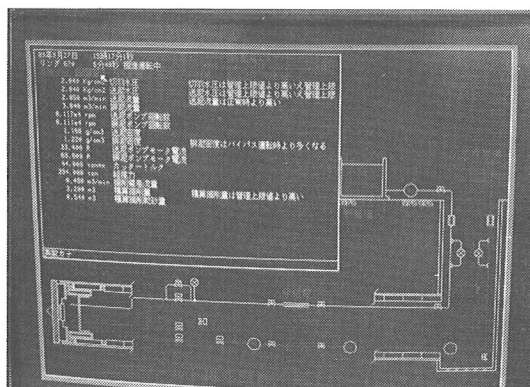


写真-2 モニタ画面

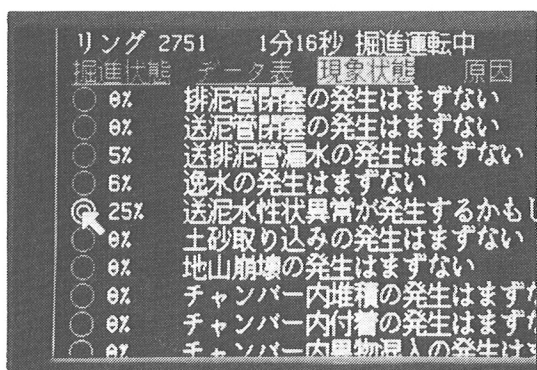


写真-3 異常現象の推論

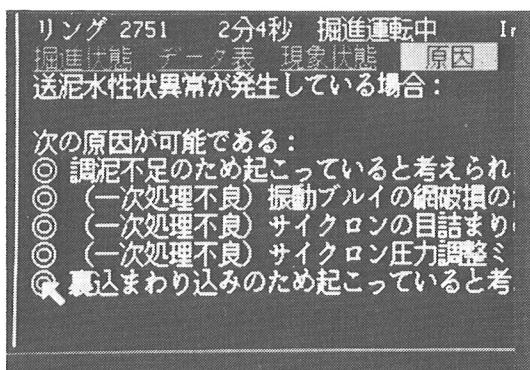


写真-4 原因の推論

により、どのようにして結論が導かれたかを知ることができる(写真-5)。この機能はオペレータのトレーニングや知識のチェックに役立つ。実施工における新たな経験は知識の変更や追加というかたちでシステムに取り込まなくてはならない。そのような作業をする上で必要欠くべからざる機能である。

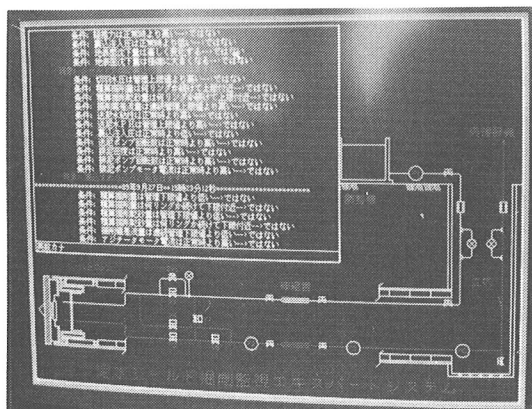


写真-5 推論のトレース

フィールドで使用したときの本システムの推論性能は、最大推論時間で約25秒、平均推論時間で約18秒であった。また、同じような土質条件の隣接する2つの工区では、数度にわたり切羽崩壊を起こして地盤を大きく変形させていたが、当工区ではそのようなトラブルを発生させずに済んでいる。

6. おわりに

最近では、都市の過密化や地価の高騰で利用できる地上空間が限られてきている。そうした環境のもと、地下空間を有効に利用しようという気運が高まりつつある。大断面、大深度といった高度な施工技術や管理を必要とするシールド・トンネルの需要はますます高まっていくものと予想される。そのようなシールドにおいては、ひとたび切羽崩壊などの重大なトラブルが発生すれば、その影響により社会生活にもたらされる損害は莫大なものになるであろうことは容易に想像できる。そのような事態になることは是が非でも防がなくてはならない。経験と多くの情報を活かしたち密な管理が必要である。これを可能とするのは一部のベテラン技術者だけである。このような状況を鑑みると、エキスパート・システム導入により得られる効果は非常に大きいものと期待できる。

本システムは完成されたものではない。シミュレーションや一部のフィールド適用での評価がまずま

ずであったとはいえ、知識の内容やシステムの機能等まだまだ不満な点が多いはずである。今後はフィールドでの適用を積極的に進め、知識の修正や追加、ユーザインタフェース等の機能の充実を図って、実運用システムとして完成させたいと考えている。さらに土圧式シールド等への展開も考えていきたい。

【参考文献】

- 1) 例えば、日経AI別冊：エキスパート・システム最前線、日経BP社、(1988)