

(III-7)

## シールドエキスパートシステムの開発

Development for Shield Expert System

|                |          |
|----------------|----------|
| 佐藤工業(株)        | ○池田 滋*   |
| 佐藤工業(株)        | 飯塚 道明*   |
| 佐藤工業(株)        | 桐谷 祥治**  |
| 佐藤工業(株)        | 志村 和伸**  |
| 日本エシスソフトウェア(株) | 佐久間孝広*** |

By Shigeru IKEDA, Michiaki IIZUKA, Yoshiharu KIRITANI, Kazunobu SHIMURA, Takahiro SAKUMA

シールド工事では、工法とシールド仕様の選定を誤ると、工事の安全性・経済性・工程など全ての面において、大きな問題をもたらすため、施工条件に適合し、切羽の安定を図ることのできる工法・シールド仕様を決めることが非常に重要である。工法とシールド仕様の選定にあたっては、地質・環境条件等を多角的かつ総合的に検討する必要がある、経験豊富な専門技術者の高度な知識が不可欠である。

今後、シールド工事の施工環境は、都市化の進展にともない、近接構造物の輻輳あるいは大深度化等、ますます複雑かつ厳しくなることが予測される。このような中で、シールド工法およびシールド仕様の選定を、正確かつ迅速に行うためのシステムの構築が急務となっている。

これらに対応するため、AI手法を導入して専門家知識の活用を図るとともに、これまでの実績データを有機的に結合することにより、工法選定、シールド仕様選定をはじめとする施工計画策定を効率的に行える支援システムとして、シールドエキスパートシステムを開発した。

【キーワード】エキスパートシステム、シールド、施工計画、実績データ

### 1. はじめに

首都圏をはじめとする大都市圏では、人口の集中による都市の過密化に対応するため、都市機能の整備が求められている。輻輳する都市部において、新たな基盤整備の空間として、地下空間の活用が進められており、都市トンネルの代表的工法であるシールド工法が重要な役割を果たしてきた。

シールド工事では、各工法の特徴を十分に把握し

たうえで、土質条件に適した切羽の安定を図ることのできる工法・シールド仕様を決めることが重要である。さらに、土質条件以外に、計画条件・環境条件・経済性などを考慮した総合的な判断が要求される。選定された工法やシールド仕様が土質・環境条件等に適合していない場合には、工事の進捗に支障をきたすのみならず、切羽崩壊の危険性と、それに伴う地盤沈下や陥没など、社会的に大きな影響を与えると同時に、工事の安全性・経済性・工程など全ての面において大きな問題をもたらすこととなる。

工法とシールド仕様の選定に際しては、先ず土質条件の全体像を把握して、条件を整理・分析し、環境条件・工程・経済性を含めた多角的かつ総合的な

---

\* 管理本部 情報システム部 03-5641-1463  
\*\* 土木本部 技術部 03-3661-4794  
\*\*\* 製造流通統括部 03-5397-5521

検討を行う必要がある。このためには、経験豊富な専門技術者の高度な知識が必要不可欠であった。

今後、都市化の進展とともに、シールド工事をとりまく施工環境はますます厳しく複雑化してゆくものと予測される。このような状況から、シールド工法とシールド仕様の選定はより複雑な条件を加味したうえで、より正確に行う必要性が高まってくるものと想定され、これらの検討を効率的に行うことのできるシステムの構築が急務となっている。

これらに対応するため、専門技術者の知識を体系的に活用できる、AI手法の導入について検討を行った。さらに、シールド工事はすでに多くの実績を有しており、これらの実績データを同時に活用することにより、システムの信頼性の向上が図れるものと判断した。

以上より、実績データと知識ベースを有機的に結合することにより、工法選定・シールド仕様選定をはじめとする、施工計画策定を効率的に行える支援システムとして、シールドエキスパートシステムを開発した。

本文は、今回開発したシールドエキスパートシステムのうち、施工計画支援の主要部分である「シールド工法選定検討」と「シールド仕様選定検討」について報告するものである。

## 2. 開発の背景と開発方針

### (1) 現状分析

シールド工法の適用にあたっては、シールド各工法の特徴を十分把握したうえで、土質・環境条件などを精査し、切羽の安定が図れる、安全で、経済的な最も適した工法を選定することが重要である。ここで、最も留意すべきことは切羽の安定が図れることであるが、立坑用地や近隣の重要構造物、障害物を含めた環境条件・安全性・経済性などを十分検討したうえで、総合的な判断により選定することである。

シールドの仕様については、そのシールドが施工区間で遭遇する複雑多岐にわたる諸条件を、調査資料に基づき検討し、これに十分適応した構造および装備能力の検討が行われている。

工法やシールド仕様の選定を誤ることは、工事の

進捗に支障をきたすのみならず、切羽崩壊の危険性と、それに伴う地盤沈下や陥没など、工事の安全性・経済性・工程など全ての面において、大きな問題をもたらすこととなる。

そこで、これらの検討に際しては、経験豊富な専門技術者により、土質条件の全体像の把握から、条件の整理、各種試験結果をもとにした検討と、環境条件等の諸条件を考慮した多角的かつ総合的な検討を要求されている。このため、経験豊富な専門技術者にとっても、シールド工法、仕様を選定する事は、非常に困難を伴う検討事項とされていた。

たとえば、土質条件を整理する場合は、現位置試験をもとに作成されている地質縦断面図を見て、シールド路線での地盤条件を整理するとともに、各種試験結果からの情報の分析を行ったうえで、各土層の土質物性の整理が行われている。このとき、地質縦断面図は、一次元情報である現位置試験から二次元に拡大して表現したものであるため、専門技術者は地質縦断面図の不確定性を認識したうえで、これら多くの検討を行わなければならない。

今後は都市化の進展に伴い、地下空間の輻輳化あるいは、シールド工事の大深度化・長距離化・大断面化とともに、周辺重要構造物との近接施工が増大する傾向にあり、施工条件はより複雑化していくことが予想される。これに伴って、工法やシールド仕様の選定は困難さが増す一方で、より一層の正確性が求められることになる。

### (2) 開発方針

このような状況から、AI手法を導入し、経験豊富な専門技術者の知識を、知識ベースとして集約、高水準化し、活用を図ることとした。さらに、専門技術者の知識は、これまでの知識と経験に加えて、過去の実績データを多分に参照しているところがあることから、これまで蓄積されてきた膨大な実績データを取り込み、知識ベースと関連付けて、有機的に活用できるシステムの開発を目指した。

また、前述のように、土質条件、環境条件等は、ある幅をもった不確定性を含んだものとしてとらえることができる。コンピュータを利用する場合は、一般にこれらの条件は固定されたデータとして入力されることとなり、不確定を表現することが難しい。

そこで、入力データ（条件）を対話形式で変更しながら、種々の角度から推論できる機能の実現を図った。

さらに、これらの推論を実行するためには、多くのデータを入力する必要があるが、グラフィック機能を活用することにより、正確かつ迅速に入力できることに重点を置いて開発にあたった。

### 3. システムの特徴

本システムの構成概念図を図1に示す。本システムは、専門技術者の知識・経験を記述した知識ベースと、これまでに蓄積されてきた施工実績を集大成した実績データベースからなる。この知識ベースと実績データベースにより、施工計画検討の支援を行うものである。

以下に本システムの特徴を述べる。

#### （1）知識ベースと実績データベースの有機活用

##### a) 知識ベース

エキスパートシステムを構築するうえで最も重要なものは、専門技術者の知識を、いかに体系づけて整理し、知識ベースを作成するかである。

知識獲得方法は、構造化技法の一つであるDFD手法（Data Flow Diagram）を採用した。この手法は、データに関わる「検討項目」を図形で、「項目関連」を矢印で表現するため、全体の見通しが良く、推論の流れをコンパクトに表現できる特徴を持っている。

専門技術者からの知識獲得は、第1ステップとして複数の専門技術者の討議により対象となる検討項目を洗い出し、各項目間の関連・思考の流れを矢印で示したDFD図の作成を行った。次に、作成したDFD図を利用し、再度専門技術者による討議あるいは、専門技術者へのインタビュー方式による知識獲得を行うと同時に、DFD図の修正をおこなった。これを、繰り返すことにより、専門技術者の思考の流れを具体的に表現すると同時に、専門家知識の整理を行った。また、専門技術者の施工体験が、各々異なっていて、統一した知識として表現できないケースも発生した。この場合は、いずれも重要な専門家知識であると判断し、アドバイスルール（アドバイスを記述したルール）という形で知識ベースに取

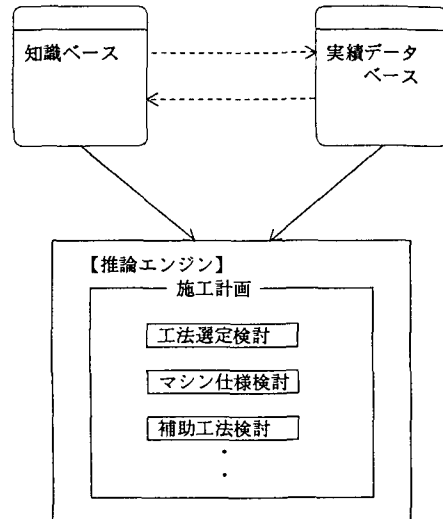


図1 シールドエキスパートシステム構成概念図

り込んだ。

##### b) 実績データベース

これまで多くの実績データが蓄積されてきたが、これらのデータには、専門技術者の経験した事実、判断した結果が記述されていると考えることができる。また、多くの専門技術者は、これまでの知識と経験のみではなく、過去の実績を参照し、自分の施工体験以外の情報も用いて、様々な判断を行っている。しかしながら、経験豊富な専門技術者であっても、参照できる実績データには限界がある。

そこで、本システムの開発においては、膨大な実績データをどのように利用し、実績から得られる情報を、どのように表現すれば有効に利用できるかについて検討を加えシステム化を図っている。

#### （2）条件変更によるシミュレーション機能

土質条件・環境条件等の入力データは、不確実性が含まれているにもかかわらず、コンピュータに入力されると、条件が固定化されてしまう。このため、入力されたデータ（条件）に不確実性（幅）を持たせて推論を行わせるシステムの構築が重要となる。

本システムでは、入力データを対話形式で変更するとともに、複数の推論結果を比較できる機能を装備することにより、広範囲の条件下での推論を可能とした。

ここでは、土質に関する一例を取り上げてみる。実施工では、土質条件は三次元の広がりをもっている。しかしながら、ボーリングデータはあくまでも、ある1地点のデータにすぎず、ボーリング地点以外は、近接するボーリングデータから推定することになる。

以下に、専門技術者が行う複層地盤でのボーリング間の層状態の検討を例に、本システムのシミュレーション機能を紹介する。ここでは、層状態を修正するために、仮想ボーリングデータを設定することにより対応している。

図2(A)は、仮想ボーリングデータを設定する前の状態であり、ボーリングデータ間の層を直線で結んでいる。図2(B)は、中間に仮想ボーリングデータを設定し、シールドの通過する土質である砂層の上端深さを修正したものである。図2(C)は、礫層がさらに上方に位置していると予想した場合である。このような処理を施した後の、それぞれの図の中間位置のシールド通過断面は、以下のようにになる。

- ①断面上半部にシルト層、下半部に砂層が出現
- ②断面全体が砂層で構成される
- ③断面上半部に砂層、下半部に礫層が出現

システムでは、それぞれのケースに対して全体粒度組成の再計算を含め、様々な検討を短時間の内に処理し、結果を検討資料として出力する。

このようにして種々の条件に対して得られた推論結果は、専門技術者の最終判断にとって貴重な情報になるものと考えられる。

### (3) 正確かつ迅速な入力機構

シールド工事の専門技術者が、工法およびシールドの仕様を決めるにあたっては、土質条件・周辺環境・工事基地条件を多岐にわたって検証し、総合的な判断を下している。このように、多くの専門技術者が多

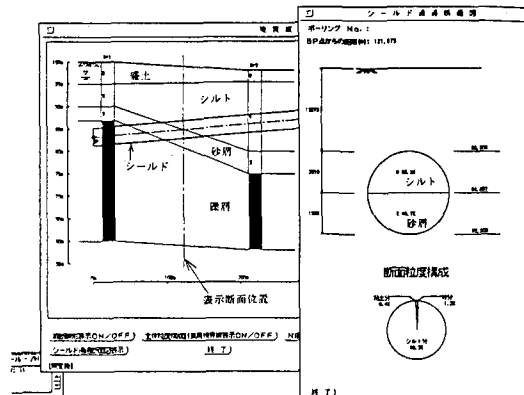


図2(A) シミュレーション説明図

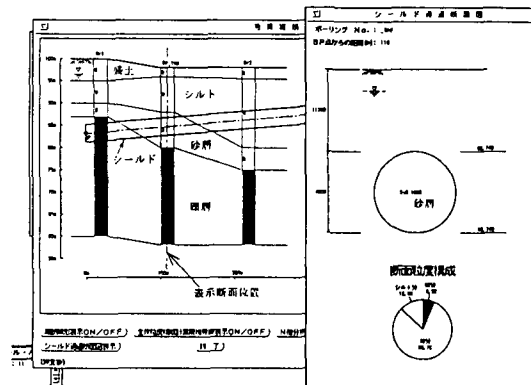


図2(B) シミュレーション説明図

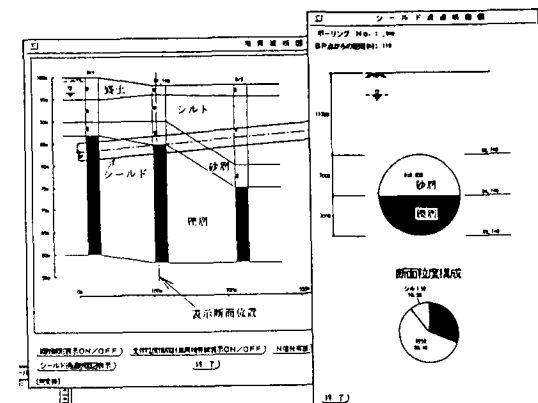


図2(C) シミュレーション説明図

くの情報をもとに検討していることから、システムへの入力情報も多大なものとなってくる。そこで、これらの大量のデータ（情報）を、入力ミス犯すことなく、正確かつ迅速に入力できる配慮が必要となる。

本システムでは、これらの要件に対応するため、

#### ① 入力の手簡略化

- ・入力項目をテーブル化し、マウスによる選択入力を多用する。

#### ② 入力データのVisual化による入力ミスの低減

- ・入力データを、数値の一覧だけでなく、入力と同時にグラフ、図を表示する。

#### ③ 入力データの整合性チェック

- ・大量のデータ入力となることから、データのグラフ・図だけでは、データの整合性の確認が不十分である。そこで、整合性チェックをシステム化し、結果を理解しやすい表現で利用者に提示する。

などの配慮が施されている。

図3に、入力ミスを低減することを目的とした機能の1つである、N値の入力画面を示す。ここでは、N値の入力と同時に、入力値一覧と分布図が更新される。これにより、利用者は手元の現位置試験結果と、画面上の分布図を比較し、入力ミスを視覚的に発見し、早期に修正することができる。

### 4. システム構成

#### (1) ハードウェア

本システムの開発には、核となる32ビットワークステーション（USモデル70-GX19）と、実績データを管理するパーソナルコンピュータ、シールドの図面作成と、写真の取り込みやカラー出力を支援するワークステーションで構成されている。

（図4 ハードウェア構成図参照）

#### (2) ソフトウェア

シールドエキスパートシステムでは、以下のよう

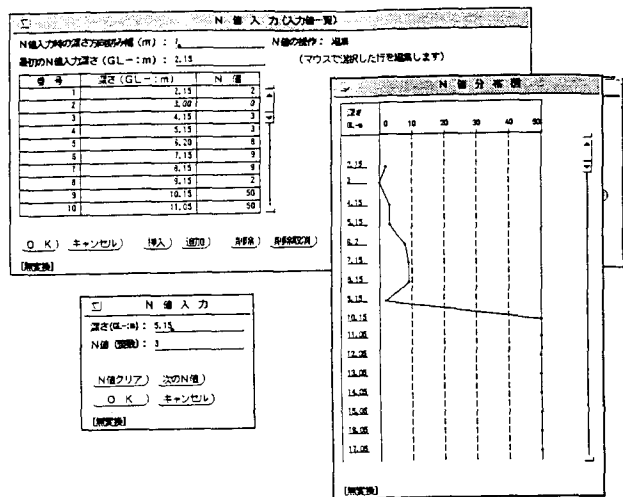


図3 N値入力画面図

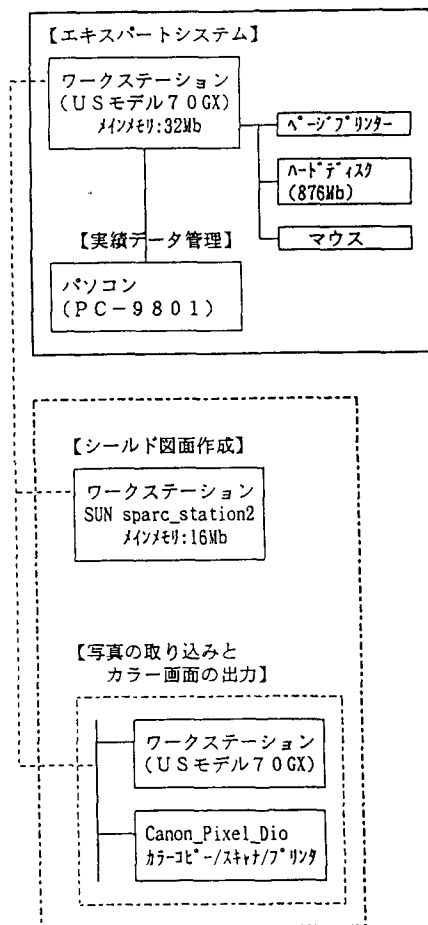


図4 ハードウェア構成図

なソフトウェアを利用している。

#### ①エキスパートシステム構築ツール

GNOSISⅡ：推論エンジン、ルールの作成  
TIPPLER：ES入出力作成ツール

#### ②実績データ管理ツール（リレーションD/B）

R：BASE PRO  
dBASEⅢ PLUS

#### ③図面作成、写真取り込み、カラー出力支援ツール

Advance\_CAD：シールド図面作成  
CLCscan：シールド写真取り込み  
CLCprint：カラー画面出力

## 5. 出力結果の利用例

本システムは単に推論結果を提示するだけではなく、入力された施工条件から想定される施工計画・施工管理上の問題点、およびそれらに対する主な対応策を提示する。利用者がこの出力結果を確認することで、再度施工計画および施工管理の検討に反映できるよう、出力様式・出力内容に配慮を施している。

ここでは、出力例の一部を紹介する。

|                              |                |                                                           |                                                                  |                                                                                         |
|------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 推論結果の提示                      |                |                                                           |                                                                  |                                                                                         |
| 工法選定                         |                | 工法比較表（今回の推論結果）                                            |                                                                  |                                                                                         |
| 工法比較表 地盤係数2号地下水補給下水道管工事（その2） |                |                                                           |                                                                  |                                                                                         |
| マシン                          | 工法名            | 泥水式                                                       | 土圧式                                                              | 泥土圧                                                                                     |
| 施工計画                         | 総合評価           | ◎                                                         | ×                                                                | ○                                                                                       |
|                              | 切羽の安定評価        | ・泥水の漏れにより、土圧および水圧に付着する。<br>・切羽面に不透水性の泥漿を形成し、泥水圧を有効に作用させる。 | ・切羽面に充満した掘削土の圧力により、土圧および水圧に付着する（充填される土は、付着する（充填される土は）            | ・切羽面に充満した掘削土の圧力により、土圧および水圧に付着する（充填される土は）                                                |
|                              | 切羽の安定（地盤への掘削性） | ・切羽面からある地盤に掘削して、掘削性を与える以上の3つの相互関係による。                     | ・切羽面に充満した掘削土の圧力により、土圧および水圧に付着する（充填される土は、付着する（充填される土は）            | ・切羽面に充満した掘削土の圧力により、土圧および水圧に付着する（充填される土は）                                                |
| 工法比較表 地盤係数2号地下水補給下水道管工事（その2） |                |                                                           |                                                                  |                                                                                         |
| マシン                          | 工法名            | 泥水式                                                       | 土圧式                                                              | 泥土圧                                                                                     |
| 施工計画                         | 総合評価           | ○                                                         | ×                                                                | ◎                                                                                       |
|                              | 切羽の安定評価        | ・泥水の漏れにより、土圧および水圧に付着する。<br>・切羽面に不透水性の泥漿を形成し、泥水圧を有効に作用させる。 | ・切羽面に充満した掘削土の圧力により、土圧および水圧に付着する（充填される土は、付着する（充填される土は）            | ・切羽面に充満した掘削土の圧力により、土圧および水圧に付着する（充填される土は）                                                |
|                              | 切羽の安定（地盤への掘削性） | ・切羽面からある地盤に掘削して、掘削性を与える以上の3つの相互関係による。                     | ・シールド、掘削土、砂質シルト層には最適である。<br>・砂質シルト層は掘削土のチャンバー内で流動化を確信することが不可となる。 | ・粘性土層から掘削まであらゆる土層に対応できる。チャンバー内土砂の流動化や土圧の確保が掘削土の流入により掘削に続くことができるが、高地下水圧下での止水壁について検討を要する。 |

図5 工法比較表

### （1）工法選定検討

シールド工法は、地盤条件・施工環境に応じて種々の工法が開発され採用されてきた。このうち、複雑な地盤条件においても、切羽の安定を確保できる密閉型シールドの施工実績が、近年飛躍的に増加し、全体実績の9割弱を占めるに至っている。

本システムではこの施工実績を重視して、工法選定検討の対象を、密閉型工法である泥水式シールド・土圧式シールド・泥土圧シールドとした。

これら3工法の切羽の安定性・後続処理設備・坑内作業の安全性・経済性等の項目について比較検討を行い、総合評価を下している。

図5に、工法選定検討の結果として得られる「工

法比較表」を示す。この工法比較表には、検討項目について、次の出力コメントを用意している。

- ①検討項目ごとの評価結果の根拠
- ②当該工法を採用した場合の問題点
- ③提示した問題点に対する主な対応策

このように、この比較表は単に工法の適否を示すだけでなく、各工法に対する施工計画・施工管理上の問題点を利用者へ提示するとともに、推論結果を他の施工計画の推論に反映させている。

また、工法選定では推論の過程において、複数の検討結果を保持できるシステムを用いている。これにより、前述の様に利用者は入力条件を適宜修正し、

その都度修正された推論結果を確認しながら検討を進めることができる。

## (2) シールド仕様検討

シールド仕様は知識ベースと当社の施工実績、およびシールドメーカーから獲得した施工実績から推論・検索して、その推論結果をシールド仕様書として出力する。この出力された数値については、推論根拠として整理された実績データの分布図や標準値テーブル等もあわせて提示する。

また、種々の施工条件下において用いられたシールドの姿図（写真）と、シールド組立図（CAD図）をシステムに登録しているため、推論結果によって施工条件に適応したシールドを提示することができる（図6 シールド姿図、シールド組立図参照）。

図7には、セグメント幅900mm、中折れ装置有り、テールシール2段のシールド外径と機長の関係の推論結果を示している。図中の縦線は当該外径を示しており、この縦線上にプロットされている点が推論により得られた機長となる。また、同じく図中に示したセグメント幅は入力値であるが、シールド外径、テールシール段数、中折れ装置は推論結果に基づいたものである。なお、図中の斜め線は上述の条件に適合する実績データの一次回帰直線であり、 $r$ は相関係数を示している。前述したように、シールド仕様は知識ベースと当社の施工実績、およびシールドメーカーから獲得した施工実績から、施工条件である入力データに応じて推論・検索される。この推

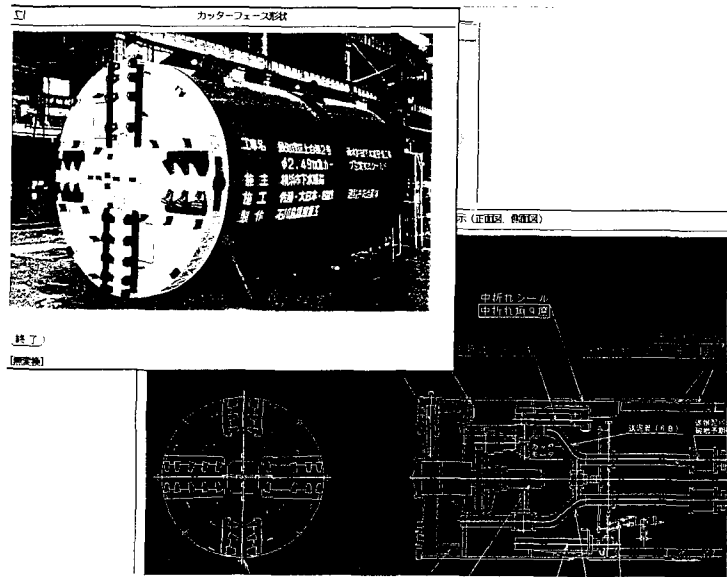


図6 シールド姿図、シールド組立図

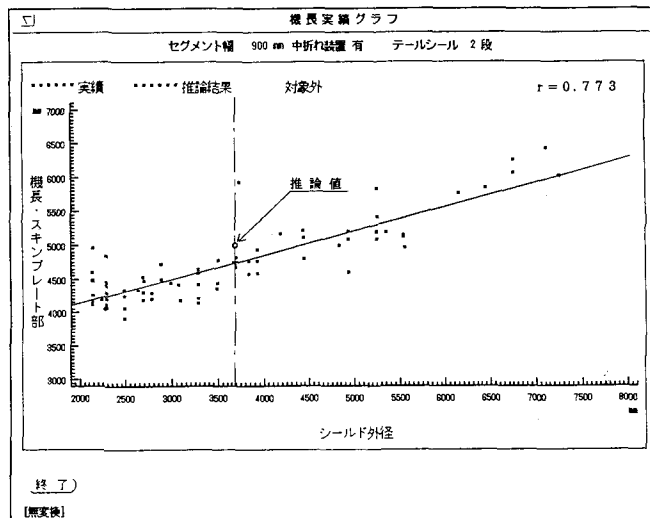


図7 シールド機長実績グラフ

論結果を図7に示す様に、これまでの実績データの分布と対比することで推論結果の位置付けと、その適否を確認することができる。

## 6. おわりに

シールドエキスパートシステムは工法選定、シールド仕様選定をはじめとする施工計画策定を、効率的に行える支援システムとして開発した。

開発後、まだ間もないため適用例が少なく、その有用性については十分に判断するには至っていない。しかしながら、専門技術者にとって有益な推論結果を提供できることが確認されている。

今後さらに多くの工事に適用することにより、専門家知識の見直し、および獲得を図るとともに、実績データを充実させてゆく予定である。

本文が同様のシステム開発者にとって参考となれば幸いである。

## 〔参考文献〕

- 1)宮田弘之介：シールド工事の施工計画、鹿島出版会
- 2)飯塚道明, 志村和伸：シールドエキスパートシステムの開発、  
土木学会論文集
- 3)A I で描く未来（土木A I 進化論）：土木学会
- 4)小林重信、寺野隆雄：知識システムハンドブック、オーム社
- 5)トンネル標準示方書（シールド編）・同解説、土木学会
- 6)遠藤浩三、佐々木道雄：  
土圧系シールド工法、鹿島出版会
- 7)中村秀治、寺野隆雄：  
土木構造物エキスパートシステム、オーム社
- 8)安部憲広、滝 寛和：  
エキスパートシステム入門、共立出版株式会社
- 9)藤田昌一：シールドトンネルの新技術、トンネルと地下
- 10)シールド工法入門：土質工学会