

小口径管渠推進制御システムの開発

Development of Control System of Small-diameter Pipe Jacking Method

磯 陽夫*
Akio Iso

坪井 広美**
Hiromi Tsuboi

渡辺 徹***
Toru Watanabe

石井 正典****
Masanori Ishii

小西 保*****
Tamotsu Konishi

要 約

小口径推進工法において、推進機の計画線からのずれに対する操作判断と方向修正操作は熟練オペレータの経験的技術に頼っているが、熟練を要しなくても高精度推進が行える自動操作制御システムの開発を目的として、熟練オペレータが持つ運転技術（あいまいな運転規則：“もし～ならば……する”）をファジィ理論で表し、これを利用するファジィ方向制御による自動制御の開発を行った。

また、従来の手動による方向修正制御では、現状の油圧系統およびストローク計では精度的にも1mmの方向修正ジャッキストローク差制御は難しいことから、ジャッキ制御として測定精度が±0.05mmである磁歪式ストローク計とマイクロボード内蔵のサーボバルブを採用することによりストロークを、0.1mm単位でPID制御する自動・高精度化システムを採用した。

本システムを実工事に適用し、その推進結果は上下方向±20mm以内、左右方向±10mm以内と所定の成果が得られ、その機能を確認した。

目 次

- §1. まえがき
- §2. ファジィ方向制御システム
- §3. 実証実験
- §4. 今後の問題点
- §5. あとがき

§1. まえがき

近年、都市部におけるライフライン施設の整備に、中でも下水道の面整備に小口径推進工法の採用が急速に延

びている。しかし、熟練オペレータの不足により、工事の効率化、省力化、施工精度の向上を図る必要がある。

そこで、熟練オペレータの経験的技術に頼っている推進中における計画線からの推進機のずれに対する操作判断と方向修正操作を、熟練を要しなくても高精度推進が行える自動制御としてファジィ自動方向制御システムを開発した。ファジィ制御は、人間の感覚の「少し大きく」などのあいまいな判断量をメンバーシップ関数に、あいまいな運転規則：“もし～ならば……する”を制御規則として表現できるファジィ理論を利用している。

本報ではシステムの概要と、実工事に適用し所定の性能を確認した結果について報告する。

なお本開発は、建設省土木研究所との官民連帯共同研究「小口径管渠推進制御システム」の一環として、昭和63年度から平成2年度にかけて3年間実施した成果である。

*技術研究所土木技術課係長
**技術研究所土木技術課
***技術研究所土木技術課副課長
****機材部機械課
*****機材部機械課副課長

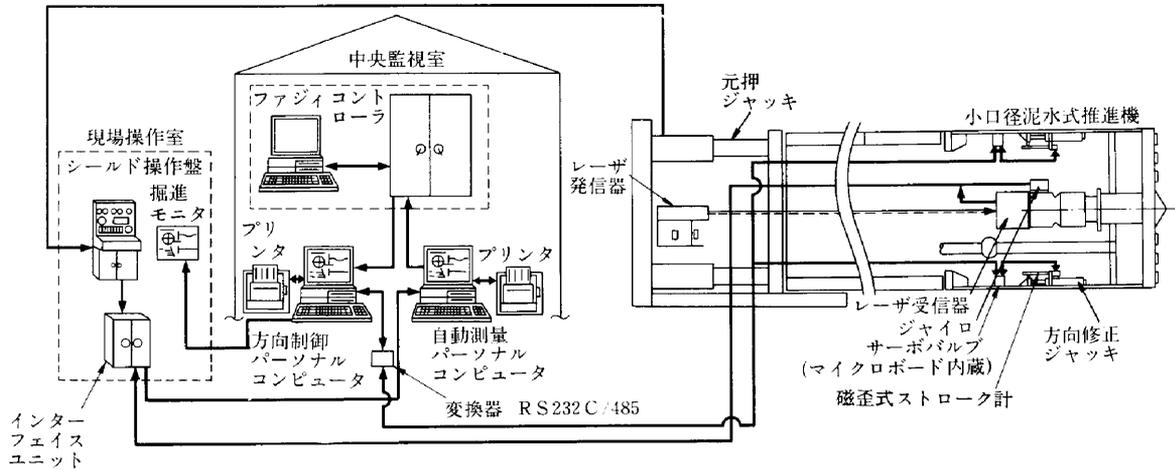


Fig. 1 全体システム

§ 2. ファジィ方向制御システム

2-1 システムの概要

従来の推進工法の推進機は、オペレータが推進機に設けたターゲットまたはインジケータを常時監視しながら方向修正ジャッキを遠隔操作して行っている。本システムは、推進機の位置姿勢測量から方向修正ジャッキ操作を自動化したものである。

システムの構成を Fig. 1 に示す。

全体システムは、推進機位置姿勢自動計測システムとファジィ方向制御システムから成る。Fig. 2 に制御アルゴリズムを示す。

各システム概要を以下に説明する。

1) 推進機位置姿勢自動計測システム

推進機位置姿勢自動計測システムは、推進機の位置を検出するためのレーザートランシットと推進機内に設置したレーザーターゲット、方位角を検出するジャイロコンパス、ピッチ角とロール角を検出する傾斜計および制御用パソコンから構成され、リアルタイムに計測する。また、推進距離は、推進中は元押しジャッキのストローク計からのストローク信号をインターフェイスユニットを介してリアルタイムにパソコンに送り計測され、推進管一本ごとの推進終了時は推進管長が自動入力され累計距離が算出される。

測定されたデータは、10秒ごとかつ推進10cmごとに自動計測用パソコンに送られる。自動計測用パソコンは、あらかじめ入力している計画線データと測量値とによりずれ量、ずれ量の変化量、方向角、方向角変化量を求め、推進10cmごとの情報をファジィコントローラに送る。

2) ファジィ方向制御システム

ファジィ方向制御システムは、ファジィ推論と方向修正ジャッキ操作制御を行う。

ファジィ推論部は、計測システムからのデータによりファジィ推論を行い、その出力結果である修正ジャッキストローク差変化量を自動運転制御用パソコンに送るファジィコントローラとファジィ規則およびメンバーシップ関数を登録・変更するパソコンから成る。

方向修正ジャッキ制御部は、ストローク信号を出力する自動運転制御用パソコンおよびフィードバック制御を行うマイクロボード内蔵のサーボバルブと測定精度が±0.05mmの磁歪式ストローク計から成り、ストロークを0.1mm単位で制御する。

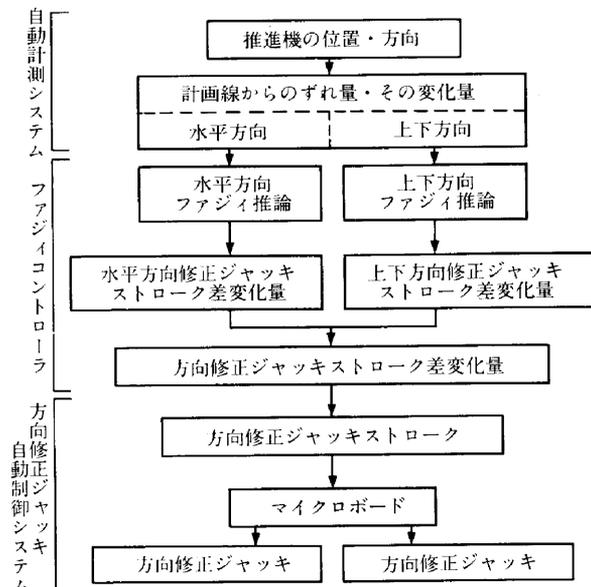


Fig. 2 ファジィ方向制御フロー

2-2 ファジィコントローラの設計

1) 熟練オペレータへのヒアリング

入・出力変数とファジィ規則および入・出力変数のメンバーシップ関数は、熟練オペレータに対してヒアリングを行い、その結果から設定した。

2) 入力変数および出力変数

入力変数は、Fig. 3 に示すように推進機の水平および上下方向の「蛇行量および蛇行変化量」、「方向蛇行量および

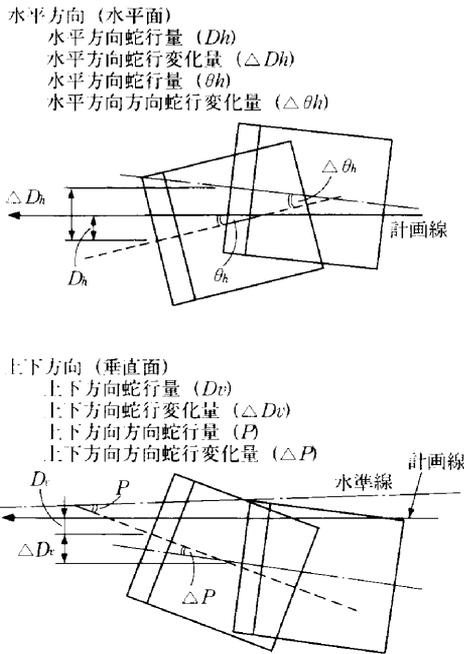


Fig. 3 入力変数

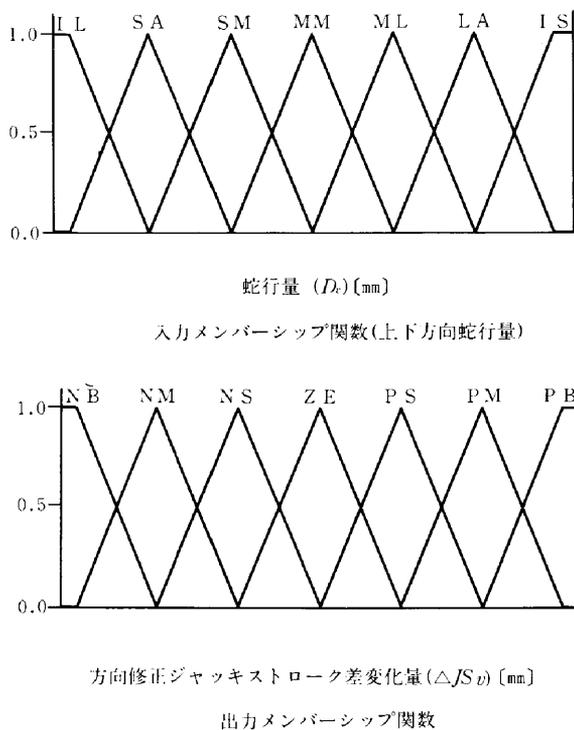


Fig. 4 入・出力変数メンバーシップ関数 (掘進上下方向)

び方向蛇行変化量」のそれぞれ4変数とした。

入力変数のメンバーシップ関数の形状は Fig. 4 とし、入力変数のファジィ変数は、IL (INVERSE LARGE), SA (SMALL), SM (SMALL MEDIUM), MM (MEDIUM), ML (MEDIUM LARGE), LA (LARGE), IS (INVERSE SMALL) の7種類である。それぞれに属する割合 (所属度) は、0~1の数値で表され、1に近ければファジィ変数に属する度合いが高いことを意味する。

推論結果である出力変数は、「方向修正ジャッキストローク差変化量」である。メンバーシップ関数の形状・所属度を示す値は、入力変数と同様だが、ファジィ変数は、NB (NEGATIVE BIG), NM (NEGATIVE MEDIUM), NS (NEGATIVE SMALL), ZE (ZERO), PS (POSITIVE SMALL), PM (POSITIVE MEDIUM), PB (POSITIVE BIG) の7種類である。

3) ファジィ規則

ファジィ規則は、2つの入力変数メンバーシップ関数と出力変数メンバーシップ関数との操作の関係を表したものである。ヒアリングの結果から、水平および上下方向それぞれで推進機の位置または方向のどちらか一方に注目しているため、位置に注目した規則と方向に注目した規則に分けて作成した。そのうち上下方向のファジィ規則を Fig. 5 に示す。この表で、蛇行量に注目した部分の第1列第1行は、「 D_v (蛇行量)がILで、かつ ΔP_v (蛇行変化量)がILならば、 ΔJ_s (上下方向の修正ジャッキストローク差変化量)はNBである」ことを意味する。

4) 推論

推論は、Max-Product法を用いて、水平、上下方向ごとにファジィ規則により行う。操作量は重心法によって決定する。推論の概要を Fig. 6 に示す。

入力の計測値は、メンバーシップ関数からファジィ変数とそれぞれの所属度が求められる。ファジィ規則から2つの入力変数間のファジィ変数の規則を選びだし、出力の修正ジャッキストローク差変化量のファジィ変数と入力部の所属度に相当する出力部の所属度を求める。この所属度の求め方は、2つの入力部のうち小さい方の所属度を採る。操作量は、各規則ごとの所属度を頂点とする三角形のファジィ集合を合計し、その重心が求めるジャッキストローク差変化量となる。

ファジィ推論、修正ジャッキストローク操作は、推進10cmごとに実施することとした。

ΔJsv		蛇行変化量(ΔDv)						
		IL	SA	SM	MM	ML	LA	IS
蛇 行 量 (Dv)	IL	NB	NB	NB	NB	NB	NB	ZE
	SA	NB	NM	NM	NS	NB	NS	ZE
	SM	NM	NM	NS	NS	NB	NS	PS
	MM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	ML	NS	PS	PB	PS	PS	PM	PM
	LA	ZE	PS	PB	PS	PM	PM	PB
	IS	ZE	PB	PB	PB	PB	PB	PB

ΔJsv		ピッチング変化量(ΔP)						
		IL	SA	SM	MM	ML	LA	IS
ピ チ ン グ (P)	IL	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
	SA	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	SM	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	MM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	ML	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	LA	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	IS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Fig. 5 ファジィ規則 (掘進上下方向)

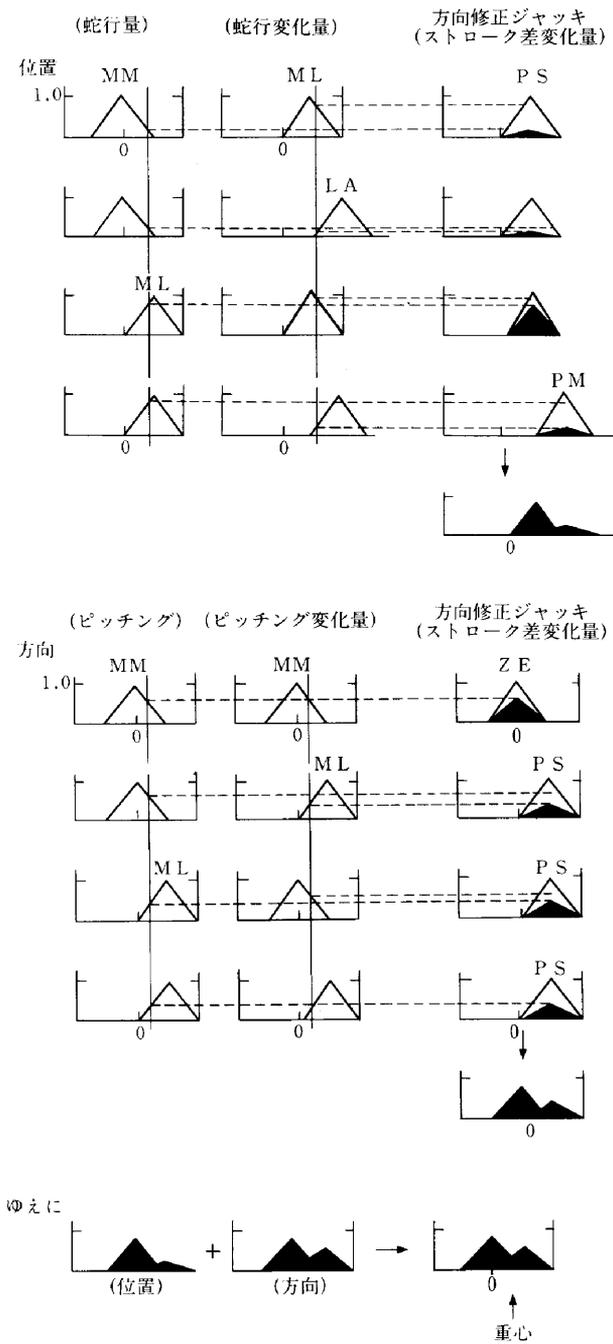


Fig. 6 推論方法

2-3 ジャッキストローク制御

小口径推進機の方角制御は、方向修正ジャッキにストローク差をつけることにより行っている。従来の手動操作ではオペレータが、方向修正ジャッキに取付けたストローク計(ワイヤー式)を見ながら油圧バルブを開閉し1~3mm程度のストローク調整を行っているが、現状の油圧系統およびストローク計の精度では1mmのストローク差制御は難しいといえる。

本システムではファジィ推論に対応する自動化および高精度化として、マイクロボード内蔵のサーボバルブと測定精度が±0.05mmの磁歪式ストローク計を採用した。各方向修正ジャッキのサーボバルブに内蔵しているマイクロボードは、姿勢制御用パソコンから送られたストローク差信号、磁歪式ストローク計からのストローク信号をフィードバックしながら、0.1mm単位で方向修正ジャッキをPID制御する。

§ 3. 実証実験

3-1 工事および地質概要

実証実験は、下水道推進工事(4スパン)のうち1スパンで行った。下水道推進工事の概要を次に示す。

- 発注者：愛媛県宇和島市
- 工事場所：愛媛県宇和島市文京町
- 工事名：城南第4污水管工事
- 工事内容：管径、管種：管内径φ800mm、ヒューム管
- 工法：泥水式推進工法
- 推進延長：398.7m(4スパン)
- 土被り：7.4~7.6m
- 平面線形：直進
- 勾配：0.9‰
- 発進立坑：2カ所、到達立坑：3カ所

実験位置をFig.7に示す。本システムを適用して施工した区間は、立坑No.2~No.3の推進スパン107.9mである。

各立坑付近の調査ボーリング結果による地質柱状図を Fig. 8 に示し、土質条件を Table 1 に示す。

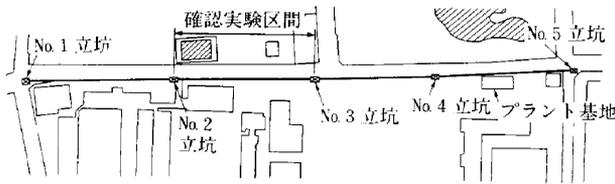


Fig. 7 実験位置図

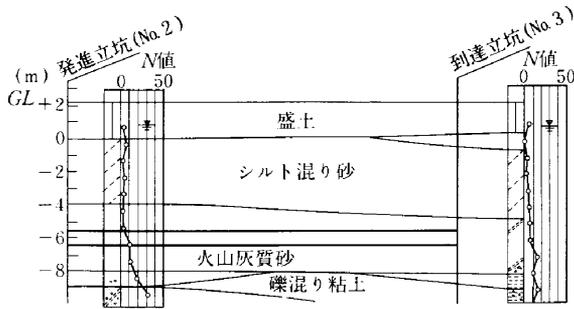


Fig. 8 土質柱状図

Table 1 土質条件

土粒子の真比重	G_s	2.430
地山の含水比	w	63.20%
地山の見掛け比重	γ_t	1.564
粒度構成	レキ	0%
	砂	28%
	シルト	54%
	粘土	18%

地質は、上部より盛土層、沖積の第1砂質土層、沖積の火山灰質砂層、沖積の第2粘性土層、沖積の第2砂質土層となっている。推進対象地盤は、宇和島市の臨海部付近に分布している火山灰質砂である。砂は微砂を主体とし粒子は均一であり、 ϕ 2~5mm程度の細礫が点在している。N値は10~20を示し、部分的に10以下を示している。

3-2 実験の概要

推進1スパン目の立坑No.4~5区間で、従来の手動操作による推進を行い、蛇行量、制御操作量などデータを推進距離10cmごとに記録した。この収集したデータをもとに、オペレータによる推進機の計画線へのすり付け修正区間を選びだし、ファジィ推論によるシミュレーションを行い、オペレータ操作と比較し各メンバーシップ関数およびファジィ規則の適正を確認した。シミュレーション結果を Fig. 9 に示す。

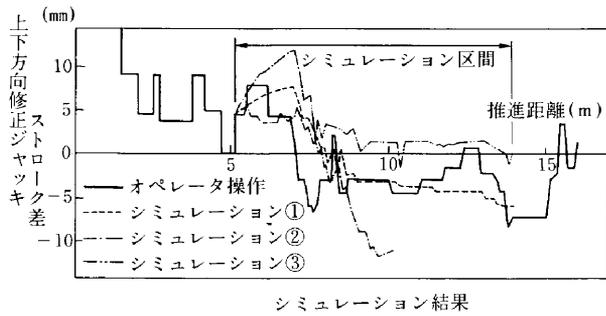
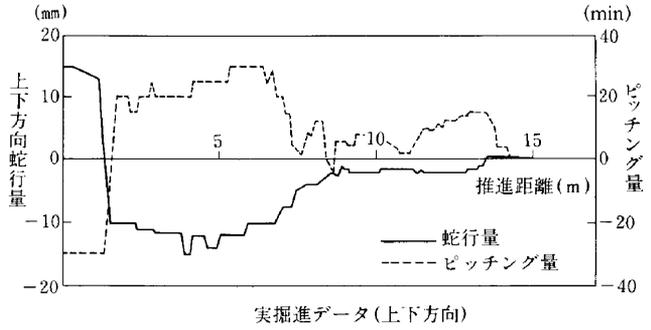


Fig. 9 シミュレーション結果

推進3スパン目の立坑No.2~3区間で、ファジィ自動方向制御システムによる推進を行った。計測システム機器(レーザターゲットおよびジャイロユニット)を Photo 1 に示すように推進機内に取り付けている。また、ファジィコントローラと各制御用パソコンは、地上の作業基地内の中央監視室に配置した (Photo 2)。

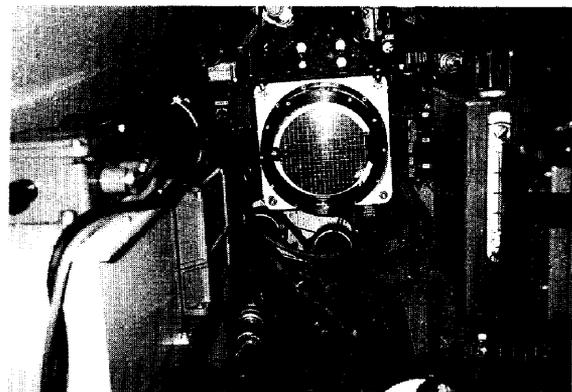


Photo 1 計測システム推進機内取付状況



Photo 2 中央管理室制御パソコン設置

3-3 実験結果

ファジィ自動姿勢制御による推進結果を Fig. 10 に示す。蛇行量のトレンド結果は、開発目標値として設定した施工計画線からの偏位管理基準値「上下±30mm, 左右±50mm」に対し、上下方向は±20mm以内, 左右方向は±10mm以内と、熟練オペレータと同等の良好な制御推進結果が得られた。

18日目～24日目の区間で、蛇行とファジィ推論結果である修正ジャッキストローク差をみると、蛇行の修正に修正ジャッキをこまめに変更し、計画線に戻している。なお、蛇行修正の場合、上下方向での推進機の動きは、重量の影響か上方から下方への移動は容易であり、計画線に対しオーバーシュートしやすい結果となった。

§ 4. 今後の問題点

今回開発したファジィ自動方向制御システムは、所定の推進性能を得られたが、今後の課題としては、完全自動化に向けて種々の土質に適用できるようにメンバーシップ関数を自動的に変更する学習機能を有する必要がある。

しかし、今回採用したファジィコントローラはプログラム化したものでなく、共同研究において推進方式にかかわらずファジィ制御システムの推論方式を共通化するために市販品を採用したもので、機能的に学習機能の取付けが不可能である。また、作業環境の関係から中央監視室などの設置に制約を受けることが考えられ、機器は必要最小限にする必要がある。そこで、当社では福岡地下鉄のシールド工事において実用化した方向制御自動化システム³⁾と同様に、学習機能を有するファジィ推論を運転制御プログラムの一部とする必要があり、データの蓄積なども必要である。

§ 5. あとがき

推進工の自動化として、運転制御における「ちょっと、もう少し」などの熟練オペレータの経験と勘をファジィ理論を用いて取入れたファジィ自動制御システムを開発し、実工事推進に適用し良好な制御結果が得られ、有効性が確認できた。

今後は熟練オペレータや技能労働者の不足への対応や施工精度の確保などの対策のために自動化施工の必要性が増加していくものと考えられ、さらに研究開発を進めていく所存である。

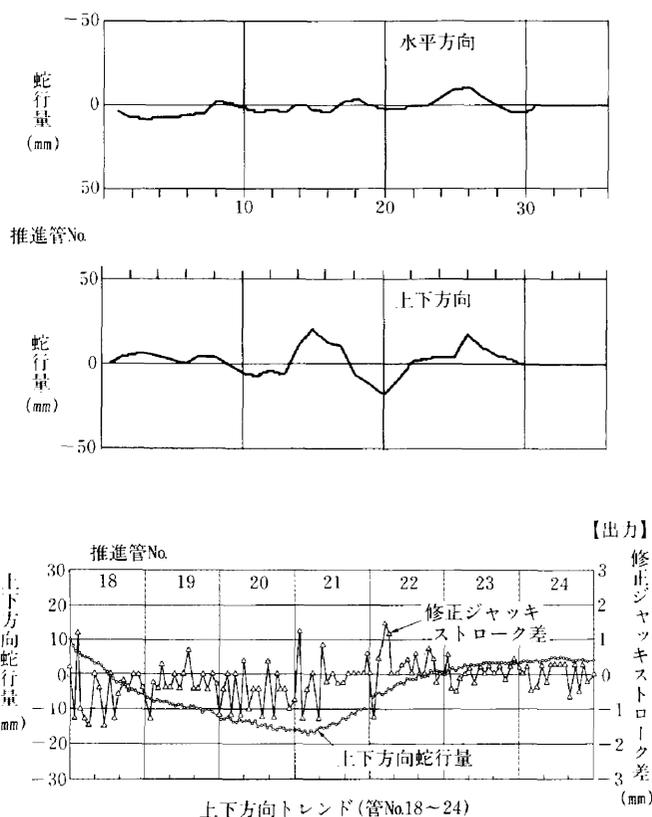


Fig. 10 推進ヒストリカルトレンド

最後に、実証実験にあたり、ご協力をいただいた四国支店をはじめ、現場を提供していただいた藤江出張所長など皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 杉山 篤ほか：小口径推進機ファジィ方向制御システムの開発, アーバンインフラ・テクノロジー推進会議第2回技術研究発表論文集, pp.399~404, 平成2年10月。
- 2) 坪井広美ほか：小口径推進機ファジィ方向制御システムの開発, 土木学会第46回年次学術講演会, 第VI部, pp.198~199, 平成3年9月。
- 3) 倉岡 豊：ファジィ自動方向制御による大口径泥水シールドの掘進福岡市高速鉄道1号線延伸部, トンネルと地下, vol.22, No.5, pp.27~34, 1991。