

ファジイ理論のシールド掘進制御への適用

APPLICATION OF FUZZY REASONING TO THE CONTROL OF SHIELD TUNNELLING

桑原 洋*・原田光男**・背野康英***・竹内幹雄****

By Hiroshi KUWAHARA, Mitsuo HARADA, Yasuhide SENO
and Mikio TAKEUCHI

This paper deals with the construction of the fuzzy controller for shield tunnelling and the result of the field test. The fuzzy controller has two functions. One is controlling shield jack speed and rotation speed of screw conveyer for pressure regulation at a muck chamber, the other is making choice of shield jack patterns for direction control of a shield machine. This fuzzy controller has a parallel circuit structure. By this way it can control complex systems by a few control rules founded on the know-how which skilled operators have obtained through their experiences. The fuzzy controller aims at shield machine control by skilled operators. So the root mean square of the deviation in operation between skilled operators and the fuzzy controller is defined as the performance index. The optimum controller can be obtained when the performance index is minimized.

The field test shows that the fuzzy controller can control shield machine as well as skilled operators.

Keywords : fuzzy theory, shield method, automatic control

1. まえがき^{1)～3)}

最近、産業界において作業環境の多様化あるいは熟練オペレーターの不足等の理由から、従来人間が行ってきた制御をコンピューターにより自動化しようとする動きが高まっている。ところが、人間による制御は経験や勘に基づいた主観的なものであるため、それを自動化するには、人間のもつあいまいな感覚を計算機に取り入れることが必要となり、従来の制御手法では適用しきれない面があった。そういう問題に対応するための1手法として、1964年にL.A. Zadehによって提案されたファジイ理論を応用するものがある。ファジイ理論は人間のもつあいまいさを数量化して取り扱うもので、ファジイ理論を制御に取り入れたファジイ制御は、現在までに地下鉄運転制御や浄水場薬品注入制御等に応用されている。

本論文では、現在でも熟練オペレーターにより制御が行われることの多い土圧式シールド機械の掘進における

切羽制御およびシールド機械の方向制御に対しファジイ理論を適用し、実証試験によりその制御性能を検証した結果を報告する。

2. シールド掘進における切羽制御と方向制御

(1) 切羽制御

切羽制御とは、チャンバー内土圧の変化を観測し、観測値と目標値の偏差を小さくするようにシールドジャッキスピードもしくはスクリューコンベア回転数を調節することである。シールドジャッキスピードを調節することにより掘削土量が、スクリューコンベア回転数を調節することにより排土量がそれぞれ増減し、チャンバー内土圧が制御される。

切羽制御の制御系を図-1に示す。

ここで、制御量はチャンバー内土圧、操作量はシールドジャッキスピードもしくはスクリューコンベア回転数である。

図-1のとおり、切羽制御は、入力がチャンバー内土

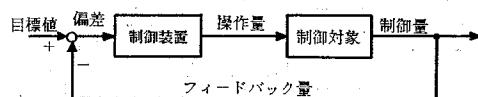


図-1 切羽制御系

* 正会員 東京電力(株)技術研究所
(〒182 調布市西つつじヶ丘2-4-1)

** 正会員 工修 東京電力(株)技術研究所(同上)

*** 正会員 (株)奥村組土木技術部
(〒107 港区元赤坂1-3-10)

**** 正会員 工修 (株)奥村組土木技術部(同上)

ここでは、ファジイコントローラを、熟練オペレーターによる制御を目標として、次式により定義する制御評価関数が最小となるように設計した。

$$\text{制御評価関数} = \sqrt{\sum (U_{\text{ope}} - U_{\text{fuz}})^2 / N} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、

U_{ope} : 熟練オペレーターの操作量

U_{fuz} : ファジイコントローラの出力

N : データ数

もちろん、熟練オペレーターによる制御が最適という保証はないが、制御系が複雑な場合には熟練オペレーターの制御を模範とする設計法も1つの手段であると考えた。

(1) 切羽制御用ファジイコントローラの設計

切羽制御用ファジイコントローラの設計にあたっては、現状の制御方法にあわせて以下に示す3種類のコントローラを作成することにした。

- スクリューコンベア回転数を調節する。
- シールドジャッキスピードを調節する。
- スクリューコンベア回転数およびシールドジャッキスピードを同時に調節する（並行制御）。

コントローラの設計に先立ち、制御対象の応答特性を把握するため実施工データの計測を行い、制御対象の数値モデル（ARモデル: Auto-Regressive Model）を作成した。ここでは、このARモデルを用いて制御規則の作成および数値シミュレーションを行い、コントローラを設計した。切羽制御用ファジイコントローラの設計フローを図-4に示す。

a) スクリューコンベア回転数を調節するコントローラ

i. 制御規則の作成

実測データ（1秒間隔）に基づいて作成したARモデルを式(8)に示す。

$$C_p(t) = 0.7480 * C_p(t-1) - 0.0043 * S_c(t-1) + 0.2760 + e(t) \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

$C_p(t)$: 時刻 t におけるチャンバー内土圧 (kg/cm^2)

$S_c(t)$: 時刻 t におけるスクリューコンベア回転数 (rpm)

$e(t)$: 時刻 t におけるノイズでARモデルと実測値の差

式(8)を用いて計算した

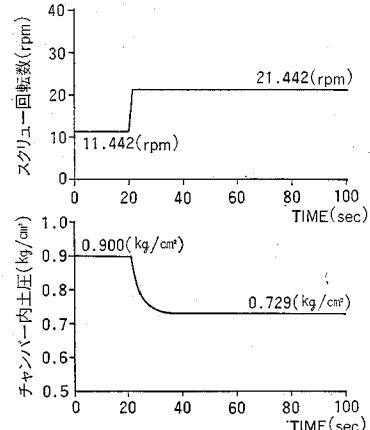
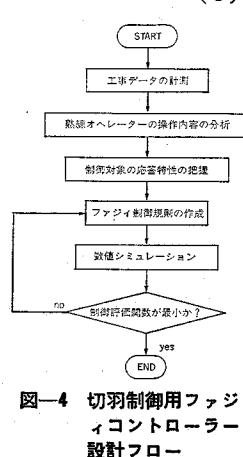


図-5 切羽制御系のステップ応答
(スクリューコンベア回転数調節)

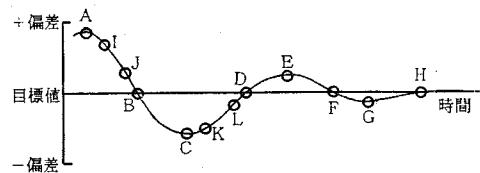


図-6 切羽制御系プロセスの応答の想定図

制御対象のステップ応答を図-5に示す。図-5より、スクリューコンベア回転数によりチャンバー内土圧を制御する場合の制御系は、1次遅れ+無駄時間系であることがわかり、このプロセスの応答を図-6のように想定することができる。制御規則は、図-6に示したプロセスの応答におけるいくつかの状態において、規則を割り当てるにより作成できるが、規則を割り当てる点の個数によって制御規則数は異なる。図-6のA, B, C, DおよびA, B, C, D, E, F, G, Hにおいて規則を割り当てるときの制御規則を式(9), 式(10)に示す。さらに、目標値に収束するまでの時間あるいは行き過ぎ量を少なくする目的で、I, J, K, Lにおいて制御規則を割り当て、式(10)にプラスすることも考えられる。I, J, K, Lに割り当てる制御規則を式(11)に示す。ファジイ変数の個数は、式(9)の場合が3個(NB, ZO, PB), 式(10), 式(11)の場合が5個(NB, NM, ZO, PM, PB)となり、制御規則はおのおの表-1, 表-2, 表-3のようにまとめて記述することができる。

$$\begin{aligned}
 &\text{IF } CP \text{ is PB and } \Delta CP \text{ is ZO THEN } \Delta SC \text{ is PB} \\
 &\text{IF } CP \text{ is ZO and } \Delta CP \text{ is ZO THEN } \Delta SC \text{ is ZO} \\
 &\text{IF } CP \text{ is NB and } \Delta CP \text{ is ZO THEN } \Delta SC \text{ is NB} \\
 &\text{IF } CP \text{ is ZO and } \Delta CP \text{ is PB THEN } \Delta SC \text{ is PB} \\
 &\text{IF } CP \text{ is ZO and } \Delta CP \text{ is NB THEN } \Delta SC \text{ is NB} \\
 &\dots\dots\dots(9)
 \end{aligned}$$

ここに、

CP : チャンバー内土圧の目

標値からの偏差

ΔCP : CP の変化量

ΔSC : 回転数の調節量

NB : 負で大 (回転数減)

ZO : ゼロ

PB : 正で大 (回転数増)

IF CP is PB and ΔCP is ZO THEN ΔSC is PB
 IF CP is PM and ΔCP is ZO THEN ΔSC is PM
 IF CP is ZO and ΔCP is ZO THEN ΔSC is ZO
 IF CP is NM and ΔCP is ZO THEN ΔSC is NM
 IF CP is NB and ΔCP is ZO THEN ΔSC is NB
 IF CP is ZO and ΔCP is PB THEN ΔSC is PB
 IF CP is ZO and ΔCP is PM THEN ΔSC is PM
 IF CP is ZO and ΔCP is NM THEN ΔSC is NM
 IF CP is ZO and ΔCP is NB THEN ΔSC is NB
(10)

ここに、

NM : 負で中位 (回転数少し減)

PM : 正で中位 (回転数少し増)

IF CP is PB and ΔCP is NM THEN ΔSC is PM
 IF CP is PM and ΔCP is NB THEN ΔSC is NM
 IF CP is NM and ΔCP is PB THEN ΔSC is PM
 IF CP is NB and ΔCP is PM THEN ΔSC is NM
(11)

表-2 制御規則

ΔSC	ΔCP				
	NB	NM	ZO	PM	PB
-NB			NB		
NM			NM		
CP	NB	NM	ZO	PM	PB
ZO					
PM			PM		
PB			PB		

表-3 制御規則

ΔSC	ΔCP				
	NB	NM	ZO	PM	PB
-NB			NB	NM	
NM			NM	PM	
CP	NB	NM	ZO	PM	PB
ZO					
PM			PM		
PB			PM	PB	

ii. 数値シミュレーション

ファジィコントローラによる制御を、熟練オペレーターに最も近づけるため、数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションは、図-1 に示した制御系において制御対象を AR モデルに、制御装置をファジィコントローラに置き換えることにより行い、 ΔSC のメンバーシップ関数の幅を変えることにより、制御評価関数値を最小とする制御規則数および ΔSC のメンバーシップ関数を求めた。このとき、メンバーシップ関数の形状は図-7、図-8 とし、入力変数のメンバーシップ関数のパラメータ (min, mean, max) は、図-9、図-10 に示した実測データの頻度分布およびチャンバー内土圧の目標値 (0.9) に基づき、表-4 のように定めた。

表-1 制御規則

ΔSC	ΔCP		
	NB	ZO	PB
CP	NB	ZO	NB
ZO	ZO	NB	ZO
PM	PM	PM	PM
PB	PB	PB	PB

表-4 入力変数のメンバーシップ関数のパラメータ

	min	mean	max
C_p (kg/cm ²)	-0.2	0.0	0.2
ΔC_p (kg/cm ² /sec)	-0.15	0.0	0.15

表-5 最終的なメンバーシップ関数のパラメータ

	min	mean	max
C_p (kg/cm ²)	-0.2	0.0	0.2
ΔC_p (kg/cm ² /sec)	-0.15	0.0	0.15
ΔS_c (rpm/sec)	-0.3	0.0	0.3

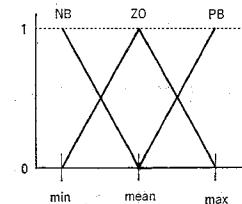


図-7 メンバーシップ関数
(ファジィ変数 3 個)

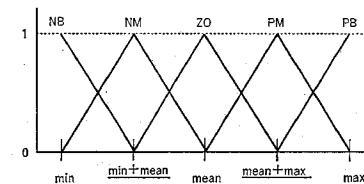


図-8 メンバーシップ関数 (ファジィ変数 5 個)

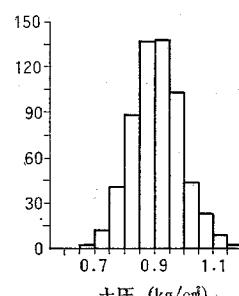


図-9 土圧の頻度分布

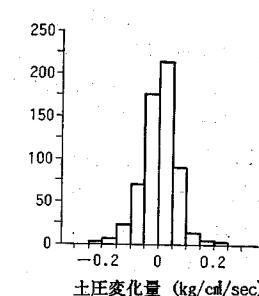


図-10 土圧変化量の頻度分布

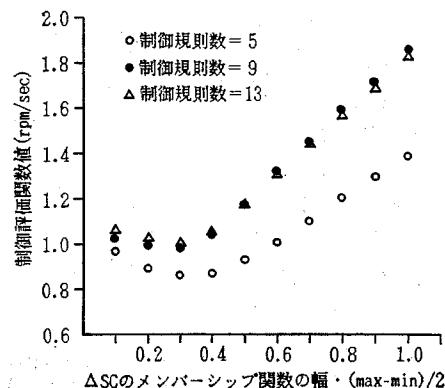


図-11 数値シミュレーション結果

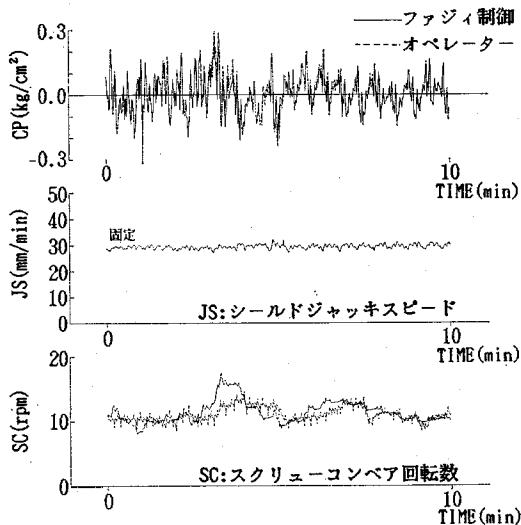


図-12 切羽制御のシミュレーション結果・規則数=5
(スクリューコンベア回転数調節)

数値シミュレーション結果を図-11に示す。数値シミュレーションの結果、制御規則数は5とし、メンバーシップ関数のパラメーターは表-5のように定めた。

このファジイコントローラによる制御結果と熟練オペレーターによる制御結果を、図-12に示す。

b) シールドジャッキスピードを調節するコントローラ

実測データに基づいて作成したARモデルを式(12)に、ステップ応答を図-13に示す。

$$C_p(t) = 0.7239 * C_p(t-1) + 0.0065 * J_s(t-1) + 0.0551 + e(t) \quad \dots \quad (12)$$

ここに、

$C_p(t)$: 時刻 t におけるチャンバー内土圧 (kg/cm^2)

$J_s(t)$: 時刻 t におけるジャッキスピード (mm/min)

$e(t)$: 時刻 t におけるノイズで AR モデルと実測値の差

これより、シールドジャッキスピードによりチャンバー内土圧を制御する場合の制御系も a) と同様に1次遅れ+無駄時間系プロセスであることがわかる。したがってコントローラは、a) と同様の方法で設計した。

表-6に作成した制御規則を示す。なお、メンバーシップ関数は前掲の図-7のように、パラメーターは表-7のように定めた。

数値シミュレーションにより決定したファジイコントローラの制御結果と熟練オペレーターによる制御結果を図-14に示す。

c) スクリューコンベア回転数およびシールドジャッキスピードを同時に調節するコントローラ

ここでは、a) および b) で設計したファジイコント

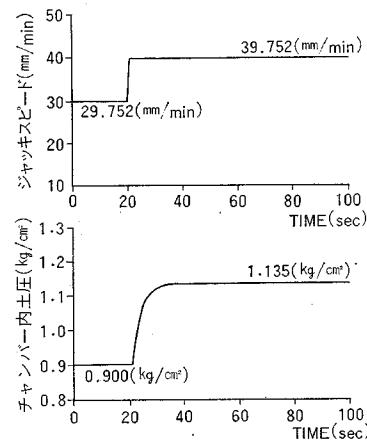


図-13 切羽制御系のステップ応答
(シールドジャッキスピード調節)

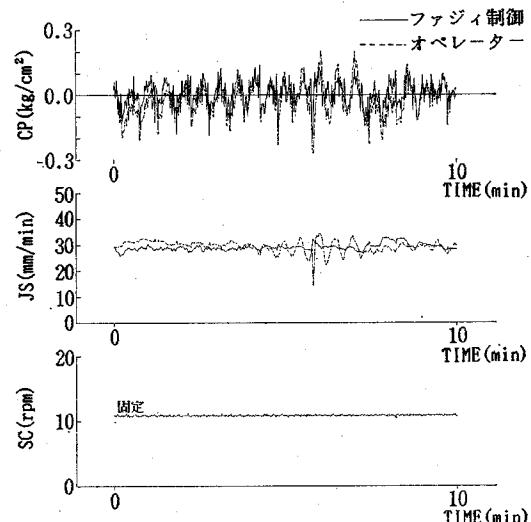


図-14 切羽制御のシミュレーション結果・規則数=5
(シールドジャッキスピード調節)

表-6 制御規則

ΔJS	ΔCP		
	NB	ZO	PB
CP	NB	PB	ZO
ZO	PB	ZO	NB
PB			NB

ΔJS : スピードの調節量
NB: 負で大 (スピード減)
ZO: ゼロ
PB: 正で大 (スピード増)

表-7 メンバーシップ関数のパラメーター

	min	mean	max
C_p (kg/cm^2)	-0.2	0.0	0.2
ΔC_p ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{sec}$)	-0.15	0.0	0.15
ΔJ_s ($\text{mm}/\text{min}/\text{sec}$)	-2.5	0.0	2.5

ローラーを単純に並列させることにより並行制御用ファジイコントローラを作成した。並行制御の制御系を図-15に示す。

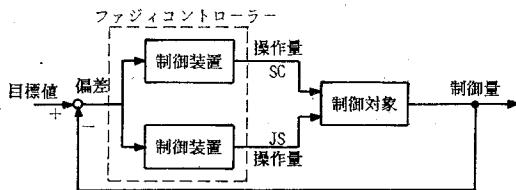


図-15 並行制御の制御系

並行制御は、実工事では行われていないが、次章ではここで作成した並行制御用ファジィコントローラーを用いて実証試験を行い、スクリューコンペアあるいはシールドジャッキスピード単独による制御との比較検討結果を述べる。

(2) 方向制御用ファジィコントローラーの設計

シールド機械の方向制御は、計画掘進線に対するシールド機械の位置・姿勢の情報をもとに、使用するシールドジャッキを熟練オペレーターが選択することにより行われている。この場合、制御系の応答特性を数値モデルで表現することは困難である。この理由は、制御系に含まれる変数の数が多いこと、さらに制御系が機械的なものばかりではなく地盤という大変あいまいなものにより影響されるためである。したがって、方向制御用ファジィコントローラーは、熟練オペレーターに対してヒアリング調査を行い、その結果に基づいて設計した。図-16に方向制御用ファジィコントローラーの設計フローを示す。

なお、ここでは方向制御用ファジィコントローラーを水平方向と上下方向に分けて考え、おののから得られる水平方向片押し度および上下方向片押し度に最も適合度が高いシールドジャッキの使用パターンを選択した。

a) 水平方向制御用ファジィコントローラー

i. コントローラーの構造

熟練オペレーターのヒアリング結果から入出力変数を次のように定めた。

入力変数

水平蛇行量： D_H
蛇行変化量： ΔD_H
方向ずれ角： θ_H
方向ずれ角： $\Delta \theta_H$

出力変数

水平方向片押し度調節量
(ΔE_H)

入力変数に割り当てるファジィ変数の個数は、熟練オ

ペレーターに対するヒアリング結果が記述可能であるよう、以下に示す5種類とした。

PB：正（左）で大 PM：正（左）で中位 ZO：零 NB：負（右）で大 NM：負（右）で中位

5種類のファジィ変数を定めることにより、4入力変数で構成される4次元空間は、625個($=5^4$)にファジィ分割される。つまり、制御規則は625個に及ぶことになる。しかし、実際に熟練オペレーターが制御する際には、これほど多くの規則に基づいて操作しているとは考えられない。また、制御規則の数が多すぎると入力変数と出力変数の因果関係を類推しにくく、コントローラーの制御性能を向上させていくことが困難になる。

そこで、入力変数を“蛇行量と蛇行変化量”“方向ずれ角と方向ずれ角の変化量”に分け、おののについて制御規則を作成し、それぞれの制御規則から得られる操作量を、もう1つ別の結合規則により結合し、最終的な操作量を計算する手法をとった。この手法を用いることにより制御規則数を625個から50個($=5^2+5^2$)に減ずることができ、計算時間もかなり短くすることが可能となつた。この手法による方向制御用ファジィコントローラーの構造を図-17に示す。

ここに、

ΔE_{H1} ： D_H に関する制御規則から求められる調節量

ΔE_{H2} ： θ_H に関する制御規則から求められる調節量

ii. 制御規則の作成

熟練オペレーターに対するヒアリング結果を参考にし

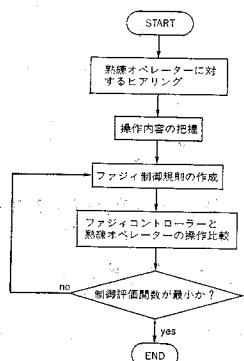


図-16 方向制御用ファジィコントローラー設計フロー

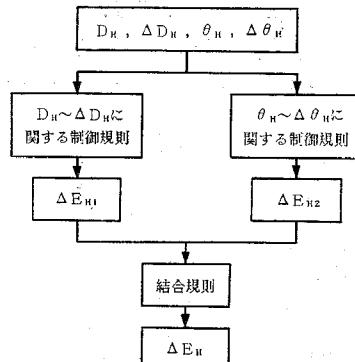


図-17 方向制御用ファジィコントローラーの構造

表-8 $D_H, \Delta D_H$ に関する制御規則表-9 $\theta_H, \Delta \theta_H$ に関する制御規則

ΔE_{H1}	ΔD_H				
	NB	NM	ZO	PM	PB
D_H	NB	NB	NM	ZO	ZO
	NM	NB	NM	ZO	ZO
	ZO	NM	NM	ZO	PM
	PM	ZO	ZO	PM	PM
θ_H	ZO	ZO	PM	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PM	PB

ΔE_{H2}	$\Delta \theta_H$				
	NB	NM	ZO	PM	PB
θ_H	NB	NB	NM	ZO	ZO
	NM	NB	NM	ZO	ZO
	ZO	NM	NM	ZO	PM
	PM	ZO	ZO	PM	PM
$\Delta \theta_H$	ZO	ZO	PM	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PM	PB

て作成した制御規則を表-8, 表-9 に示す。

iii. 2組の制御規則から得られる出力の結合

熟練オペレーターは、蛇行量が大きいときには蛇行量に着目し、そうでないときには方向に着目した制御を優先して行っている。このような制御方法を反映させるため結合係数 α を定義し、式 (13) により 2 つの調節量を結びつける。

二二三

ΔE_H : 最終的な調節量

α : 結合係数 ($0 \leq \alpha \leq 1$)

α を求める推論規則は、熟練オペレーターに対するヒアリング結果に基づいて、表-10に示すように D_H と θ_H からなる領域を 25 個にファジィ分割し、それぞれの領域で設定した。

表-10 における VS (very small), SMAL (small), MEAN (mean), BIG (big), VB (very big) は、結合係数 α に割り当てられるファジィ変数であり、そのメンバーシップ関数は 図-18 のように定義した。

iv. メンバーシップ関数の設定

出入力変数に割当てられるメンバーシップ関数の形状は前掲の図-8とし、パラメーターは表-11のように定めた。

入力変数 (D_H , $4D_H$, θ_H , $4\theta_H$) のメンバーシップ関数

表-10 α の推論規則

α		θ_H				
		NB	NM	ZO	PM	PB
D_H	NB	MEAN	BIG	VB	BIG	MEAN
	NM	SMAL	MEAN	BIG	MEAN	SMAL
	ZO	VS	SMAL	MEAN	SMAL	VS
	PM	SMAL	MEAN	BIG	MEAN	SMAL
	PB	MEAN	BIG	VB	BIG	MEAN

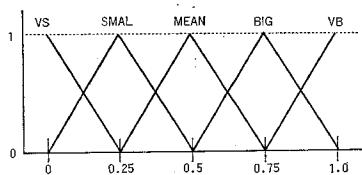


図-18 結合係数 α のメンバーシップ関数

表-11 メンバーシップ関数のパラメーター

	min	mean	max
D _H (mm)	-50	0.0	50
Δ D _H (mm/RING)	-5.0	0.0	5.0
θ _H (度)	-0.08	0.0	0.08
Δ θ _H (度/RING)	-0.08	0.0	0.08
Δ E _H	-0.10	0.0	0.10

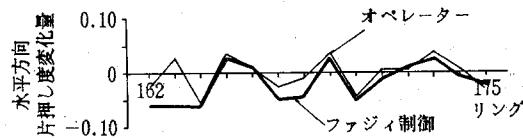


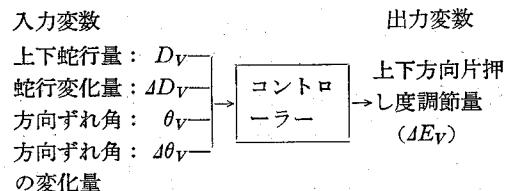
図-19 水平方向制御のシミュレーション結果

数は、現場の管理幅、実測データ、ヒアリング結果より求めた。また、出力変数 (AE_H) のメンバーシップ関数は、式(7)に示した制御評価関数が最小となるように定義した。ただし、方向制御の場合、制御対象の数値モデルが得られていないため、各リングごとに入力変数の実測データに対するファジィ制御による調節量を求め、熟練オペレーターによる調節量と比較し、制御評価関数を計算した。

図-19 にファジィコントローラによるシミュレーション結果と熟練オペレーターによる制御結果を示す。

b) 上下方向制御用ファジィコントローラー

上下方向制御用ファジィコントローラーの構造は図一
17に示した水平方向制御用 ファジィコントローラーの
構造と全く同じものである。ただし、入出力変数は次の
ようになる。



作成した制御規則を表-12、表-13に示す。また、メンバーシップ関数は前掲の図-8とし、パラメーターは表-14のように定めた。

表-12 D_V , ΔD_V に関する 制御規則 表-13 θ_V , $\Delta \theta_V$ に関する 制御規則

ΔE_{Vi}		ΔD_V					ΔE_{Vz}		$\Delta \theta_V$				
		NB	NM	ZO	PM	PB			NB	NM	ZO	PM	PB
D_V	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO	θ_V	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
	NM	NB	NM	NM	ZO	ZO		NM	NB	NM	NM	ZO	ZO
	ZO	NM	NM	ZO	PM	PM		ZO	NM	NM	ZO	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PM	PM	PB		PM	ZO	ZO	PM	PM	PB
	PR	ZO	ZO	PM	PR	PR		PB	ZO	ZO	PM	PB	PB

表-14 メンバーシップ関数のパラメータ

	min	mean	max
D _v (mm)	-10	0.0	10
Δ D _v (mm/RING)	-7.0	0.0	7.0
θ _v (度)	-0.06	0.0	0.06
Δ θ _v (度/RING)	-0.07	0.0	0.07
Δ E _v	-0.15	0.0	0.15

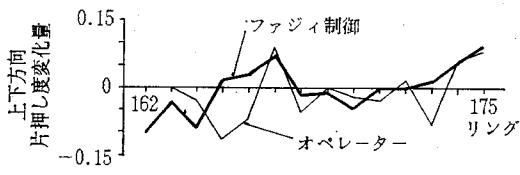


図-20 上下方向制御のシミュレーション結果

ション結果と熟練オペレーターによる制御結果を示す。

4. 実証試験結果と評価

本章では 3. で設計した切羽制御用および方向制御用ファジィコントローラーを用いて実証試験を行い、その制御性能、有用性について評価した。

実証試験を行った工事の概略は次に示すとおりである。

施工法：泥土加圧式シールド

施工延長：1165 m

土被り：約 7.5 m

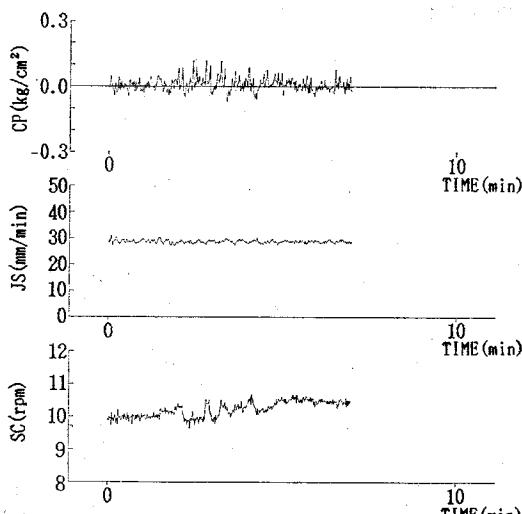
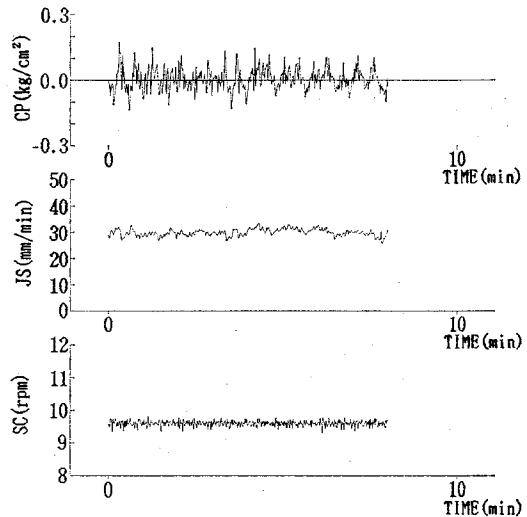
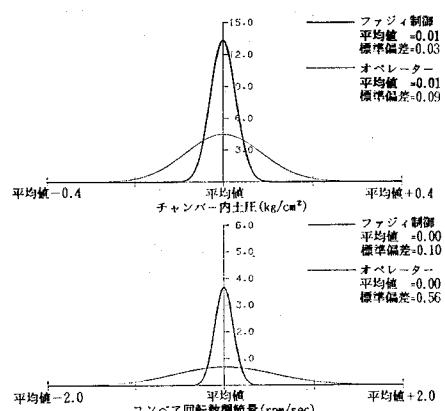
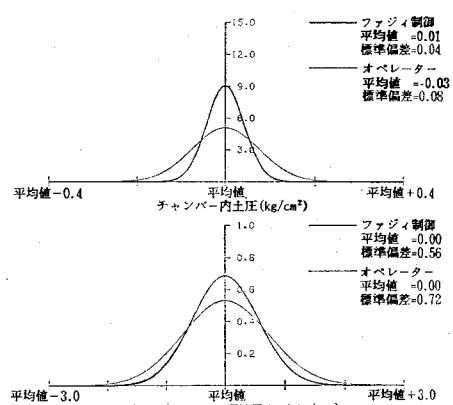
地下水位：GL -1.4 m

地質：洪積砂層 N 値 20~30、均等係数 2~3

透水係数 = $\times 10^{-3}$ cm/s

(1) 切羽制御

切羽制御用ファジィコントローラーの実証試験結果の一例を図-21、図-22 に示す。図-21 はスクリューコンベアによる制御結果、図-22 はシールドジャッキによる制御結果である。またそれぞれの場合について、チャンバー内土圧の目標値からの偏差の平均値と標準偏差および調節量の平均値と標準偏差を熟練オペレーターによる制御結果と比較して、図-23、図-24 に示す。図中の曲線は、チャンバー内土圧の目標値からの偏差と調節量

図-21 切羽制御実証試験結果
(スクリューコンベア回転数調節)図-22 切羽制御実証試験結果
(シールドジャッキスピード調節)図-23 ファジィ制御と熟練オペレーターの比較
(スクリューコンベア回転数調節・678 リング)図-24 ファジィ制御と熟練オペレーターの比較
(シールドジャッキスピード調節・680 リング)

の分布を正規分布と仮定してプロットしたものである。以上の実証試験結果から、切羽制御用ファジイコントローラーの性能を評価すると次のようなになる。

- ① ファジイコントローラによって制御した結果、チャンバー内土圧の変動は熟練オペレーターによる制御よりも小さくなってしまっており、実用上十分な制御性能を有していると判断される。
- ② ファジイコントローラによって制御した結果、チャンバー内土圧の目標値からの偏差の平均値は、熟練オペレーターによる制御とほぼ同等であり、良好な制御を行っている。
- ③ ファジイコントローラによって制御した結果は、調節量の変動が熟練オペレーターによる制御よりも小さくなってしまっており、よりスマーズな操作内容と判断される。

次に並行制御用ファジイコントローラと単独制御用ファジイコントローラの制御性能を比較する。

並行制御用ファジイコントローラの実証試験結果の一例を図-25に示す。また並行制御と単独制御におけるチャンバー内土圧の目標値からの偏差と調節量の平均値および標準偏差を図-26に示す。

これらの結果から次のことがいえる。

- ① 並行制御用コントローラーは単独制御用のコントローラを単純に組み合わせて作成したものであるが、単独制御用のコントローラーと比較すると、ほぼ同等の調節量でチャンバー内土圧の変動を小さく押えた制御を実現している。
- ② このことから、熟練オペレーターが行っていない並行制御により、さらに制御性能のよい優れた制御が可能であることがうかがえる。

以上、実証試験結果から切羽制御用ファジイコントローラーの有用性が確認された。

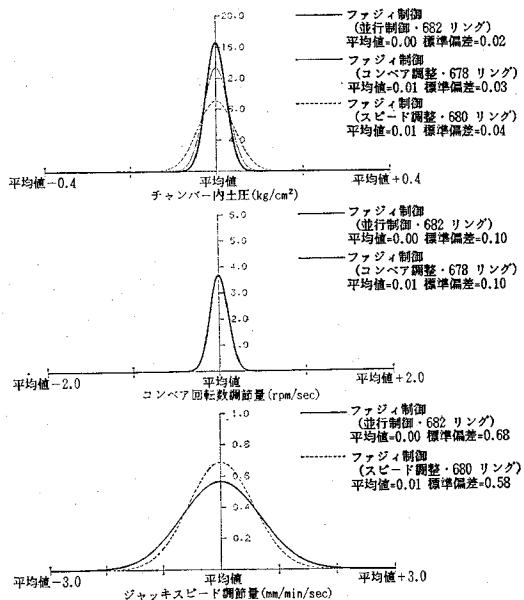


図-26 並行制御と単独制御の比較

(2) 方向制御

方向制御用コントローラの実証試験結果を図-27、図-28に示す。図中の「」はシールド機械前面の位置と向きを示し、———はシールド機長と方向を示す。

評価にあたっては、図-27、図-28を概観し、ヒアリング結果から求められた熟練オペレーターの制御ルールと矛盾しないかを検討した。

- ① 熟練オペレーターのヒアリング結果から、方向制御ルールとして
 - ・蛇行量があまり大きくなきときは、シールド機械の蛇行量を小さくしようと意識せず、シールド機

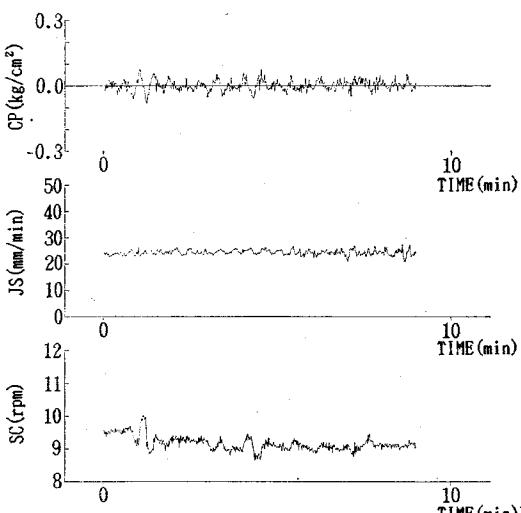


図-25 切羽制御実証試験結果（並行制御）

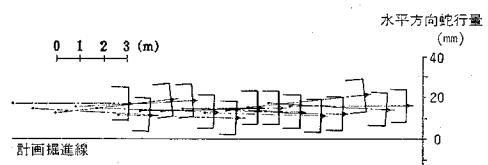


図-27 水平方向制御実証試験結果

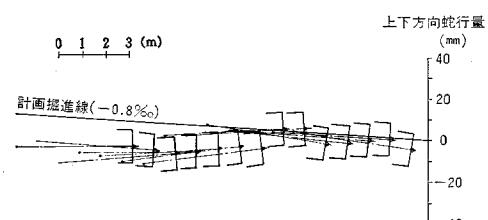


図-28 下上方向制御実証試験結果

械の方向が計画掘進線と一致するようにジャッキ選択を行う。

- ・蛇行量が大きいか否かは水平方向で 50 mm, 上下方向で 10 mm 程度が基準となる。

等が得られたが、実証試験結果には、これらの制御ルールに反する点は見当たらない。

② 水平方向制御については、蛇行量が 10~20 mm 程度で比較的小さい。このため、ファジィコントローラーは、蛇行量を小さくするよりも、機械の方向を計画掘進線に合わせることを重視して方向制御を行っている。

③ 上下方向の制御については、10~20 mm の蛇行量を“大きい”と判断し、それを小さくするようなジャッキ選択を行っている。

④ これらのことから、熟練オペレーターが奇異に感じるような出力結果とはなっていないと判断された。

以上、実証試験結果から方向制御用ファジィコントローラーの有用性が確認された。

5. あとがき

本論文ではシールド掘進制御用ファジィコントローラーを設計し、実証試験を行った。その結果、ファジィコントローラーの制御性能は十分実施工に適用可能であることが確認された。すなわち、ファジィコントローラーは、人間のもつ経験や勘を積極的に取り入れ、作成され

た制御装置であるが、人間より小さい時間間隔で制御しているため、人間では十分に対応できないような小さな偏差に対しても反応できることから、人間による操作以上のスムーズな制御が期待できるといえる。

ファジィ理論は、事象のもつあいまいさを積極的に評価し、数学的に取り扱う理論であるが、本論文の成果がファジィ理論のシステム制御への適用をはかる際の参考資料となれば幸いである。

最後に、本研究を進める過程で多大なご協力を頂いた関係各位に感謝の意を表する。また、本文のとりまとめにあたって、(株) 奥村組・浅野剛氏の多大なご協力を頂いた。あわせて感謝するものである。

参 考 文 献

- 1) Zadeh, L.A. : Fuzzy Sets, Information and Control, 8, pp. 338~353, 1965.
- 2) 安信誠二・宮本捷二・井原廣一：予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転、システムと制御, Vol. 28, No. 10, pp. 605~613, 1984.
- 3) 柳下 修・伊藤 修・菅野道夫：ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用、システムと制御, Vol. 28, No. 10, pp. 597~604, 1984.
- 4) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫編：ファジィシステム入門、オーム社, pp. 17~66, pp. 149~158, 1987.
- 5) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社, 1972.
- 6) Zadeh, L.A. : 実用化が始まったファジィ理論、日経エレクトロニクス, 12-3, pp. 166~182, 1974.

(1987.11.11・受付)