

# ファジィ制御による油圧ショベル用 自動掘削制御装置の開発

Development of Auto-Digging Controller for Hydraulic  
Excavator by Fuzzy Logic Control

技術本部 田村 学<sup>\*1</sup> 鮫 島 誠<sup>\*2</sup>  
新キャタピラー三菱株式会社 戸澤 祥二<sup>\*3</sup>

油圧ショベルの掘削作業を自動で行う掘削制御装置に熟練オペレータのノウハウを反映できるファジィ制御を適用した。本報では、まず基本的な制御ルールによる掘削状態をリアルタイムシミュレータで評価し、掘削中の負荷に応じてショベルが自動的に深さを調整し掘削できる見通しを得たことを示す。次に実機適用に向けて、制御ルールを“掘削負荷”“バケット角”“掘削深さ”の三つに関するルール群で構成し、さらに掘削過程で上記ルール群に重みを設けた制御方法を示す。上記制御装置による実機試験の結果、熟練オペレータの掘削効率に対して80～90%の性能で自動掘削できることを確認した。

We have constructed a digging controller using fuzzy logic in order to automate digging work with a hydraulic excavator. This controller has a group of control rules according to different digging conditions and a composite output process. In this paper, we describe the control details of this digging controller, the results of evaluation using a real time simulator and test results obtained from field testing of the machine. The use of this controller showed that an automatic digging performance could be realized at nearly the same level as that achieved by skilled operators.

## 1. ま え が き

近年、建設業界においては熟練オペレータ不足に対応していくため、労働環境改善による疲労低減、作業の効率化、低コスト化等が要求されている。このような現状を踏まえ筆者らは土の掘削、積み込み、排土等の作業を行う油圧ショベル（図1に概略構成を示す）の自動化の研究を行っている。

この油圧ショベルによる作業の自動化を実現するためには、油圧ショベル自身の位置認識、掘削作業の自動化、ダンプトラックの位置認識、掘削位置の自動判定等の機能を統合化する必要がある。今回は、上記機能のうちの掘削作業を自動で行う掘削制御装置を開発した。

油圧ショベルの能力を最大限に利用する効率的な自動掘削を実現するためには、熟練オペレータの操作ノウハウを制御に適用する方法が有効であり、上記方法にファジィ制御を採用した。

本制御装置の開発では、まず第一ステップとして、基本的な制御ルールの構築とリアルタイムシミュレータによる評価・確認を

行った。次に第二ステップでは実機に適合した制御装置とするため、掘削領域ごとにファジィ制御のルール群を構成し、実機試験及び熟練オペレータとの比較・評価を行った。本報は上述した開発ステップでの各制御ルールの構築過程・内容及び評価結果に関して述べたものである。

## 2. 基本的制御方法とその評価<sup>(1)</sup>

自動掘削を実現する上で必要と考えられる入力信号は、シリンダ長さの変化量、シリンダの速度、シリンダ圧力等があげられる。

一方、オペレータが掘削中特に注目している状態量は（1）掘削土量、（2）スティックの速度である。操作量に関してはスティックレバーのみがほとんどフル操作状態である場合が多い。特に、過剰量の掘削、過負荷等により掘削の主体となるスティックの速度が低下すると、ブームシリンダの伸び操作により掘削位置を少し上方に逃し、負荷低減を図る。土質に応じた掘削を行う際、特に重要かつ検出可能な状態量は上述のうち（2）である。そこで、本制御装置の入力信号には、各シリンダ（ここでは、バケット、スティックシリンダ）の速度  $V_{bk}$ 、 $V_{st}$  を適用した。なお、ファジィ制御には上記速度をその最大値で無次元化したものを使用した。

掘削制御装置からの出力信号は操作レバーの操作量に相当する、ブーム、スティック、バケットの操作信号  $J_{bm}$ 、 $J_{st}$ 、 $J_{bk}$  である。

### 2.1 基本的制御ルールの概要

制御ルールを構築する上での基本的な考え方をまとめると次のようになる。

- （1）掘削動作の主体はスティックシリンダである。
- （2）ブームシリンダは掘削中、スティック、バケットシリンダの速度が低下した場合の軌道修正のみに使用する。
- （3）掘削中バケットシリンダ速度はスティックシリンダ速度より遅い。

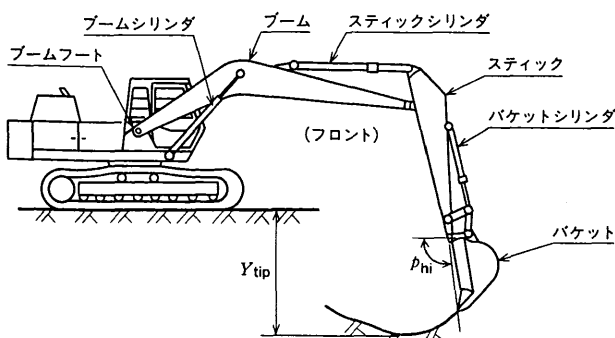


図1 油圧ショベルの概略構成 ブーム、スティック、バケットからなる油圧ショベル全体の構成を示す。  
Construction of hydraulic excavator

\*1 高砂研究所建機研究推進室主務

\*2 高砂研究所建機研究推進室

\*3 油圧ショベル開発本部設計部電装設計課

表1 ファジィ制御のルール  
Rule of fuzzy control

| if~      |          | then~    |          |          | $J_{bk}, J_{st}, J_{bm}$<br>: バケット, スティック,<br>ブーム出力信号 |
|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------------------------------------------|
| $V_{bk}$ | $V_{st}$ | $J_{bk}$ | $J_{st}$ | $J_{bm}$ |                                                       |
| PB       | PB       | PS       | PB       | ZO       | PB : Positive Big                                     |
| PS       | PB       | PB       | PM       | PS       | PM : Positive Medium                                  |
| PB       | PS       | PS       | PM       | PS       | PS : Positive Small                                   |
| PS       | PS       | PB       | PB       | PM       | ZO : Zero                                             |

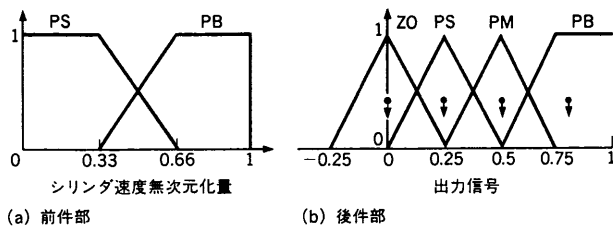


図2 メンバシップ関数 制御ルール前件部、後件部に使用しているファジィラベルのメンバシップ関数。  
Membership functions of fore part and back part in rule

上記考え方を基に作成した4個の制御ルールの一つを次に示す。

if ( $V_{bk}$  is PB) and ( $V_{st}$  is PB) then

( $J_{bk}$  is PS), ( $J_{st}$  is PB), ( $J_{bm}$  is ZO)

PS, PB等はファジィラベルである。制御ルール前件部の入力信号  $V_{bk}$ ,  $V_{st}$  に対するファジィラベルと後件部の各出力信号  $J_{bk}$ ,  $J_{st}$ ,  $J_{bm}$  に対するそれとの関係を表1に示す。

ファジィ制御に適用した演算方法には, “Mamdaniの方法”を用いた<sup>(2)</sup>。

制御ルール前件部及び後件部に使用しているファジィラベルのメンバシップ関数を図2に示す。前件部のメンバシップ関数は, シリンダがその最大速度の約1/3以下であるとき速度がかなり遅い, 約2/3以上であれば十分速いと判断することを示している。

## 2.2 リアルタイムシミュレータによる評価

制御性の評価をリアルタイムシミュレータにて実施した。本シミュレータは油圧ショベルのエンジン, ポンプ, バルブ, シリンダ等からなる油圧システムのモデル, フロント部のモデル及び掘削外力のモデルを内蔵しており, 油圧ショベルの動作をリアルタイムにディスプレイに出力することができる。また同時に各状態量をレコーダに出力できるシステム構成となっている。

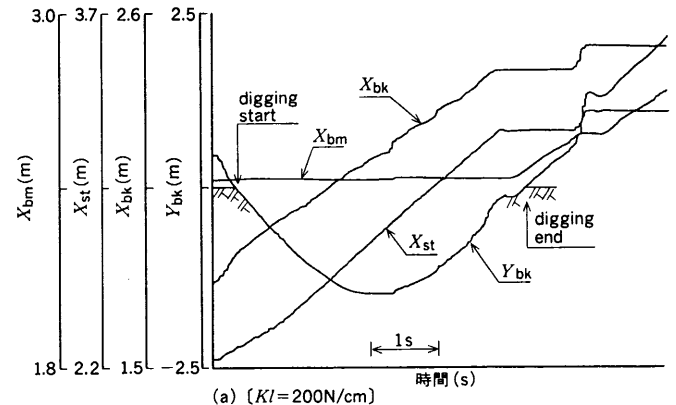
バケットによる掘削はその刃(線)による切削作用であるため, 掘削外力の算出には, 掘削刃線単位長さ当たりの抵抗力すなわち比掘削抵抗  $K_I$  値 (N/cm) を用いた。ここで用いる自然土の土質に対する比掘削抵抗  $K_I$  値は表2のように整理されている<sup>(3)</sup>。

シミュレーション評価では, 土の堅さのパラメータ  $K_I$  値に (a) 200 N/cm, (b) 700 N/cm を用いた。それぞれ, 粘土質砂, 乾いた粘土にはほぼ対応している。図3はバケット先端がわずかに地上にある初期姿勢から自動掘削を開始したときのバケット, スティック, ブームシリンダの長さ:  $X_{bk}$ ,  $X_{st}$ ,  $X_{bm}$  及び地面からのバケット先端  $Y$  座標:  $Y_{bk}$  の結果を示したものである。なお, 掘削土量の掘削外力に与える影響は無視している。

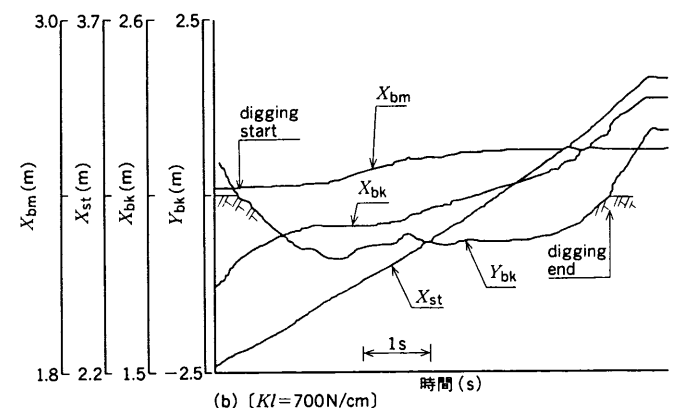
油圧ショベルの持つ掘削能力は掘削力×掘削速度で表すことができるが, 駆動源の限界から上記能力は上限値がある。土が軟らかい(a)の場合, 掘削能力の上限以下で動作可能なため, 掘削中ブームはほとんど停止し, バケットの先端は円弧を描きスムーズな掘削動作となる。一方, 土が堅い(b)の場合, 掘削能力の上限

表2 自然土の比掘削抵抗 (N/cm)  
Specific digging resistance of nature soil

| 土 質   | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|-------|-----|-----|-----|-----|------|
| 粘土質砂  |     |     |     |     |      |
| 湿った粘土 |     |     |     |     |      |
| 乾いた粘土 |     |     |     |     |      |



(a) ( $K_I=200$ N/cm)



(b) ( $K_I=700$ N/cm)

図3 リアルタイムシミュレータによる結果 粘土質砂, 乾いた粘土に相当するパラメータ  $K_I$  値に対するシミュレーション結果。  
Result by real time simulator

に達するため, ブーム上昇により負荷を低減し, 軌道修正を行いながら掘削動作をすることが分かる。

## 3. 実機に適用した掘削制御方法とその評価<sup>(4)</sup>

ここでは前章で示した基本的制御ルールをベースとして実機向けに構築したファジィ制御について示す。

ファジィ理論による掘削制御部は図4に示すように, 大別して3種類のルール群で構成した。

ルール群1は負荷低減を図るものであり, 2章で示した制御ルールと同じものである。

ルール群2は, 掘削終了近傍で積極的にバケットを巻き込み, 土砂を取込む機能を有し, バケット刃先角度  $\phi_{h1}$  (図1参照) を入力信号としている。

ルール群3は, 掘削深さ  $Y_{tip}$  を入力としたものであり, 深い場所を掘削する際, ブームを積極的に上げ, バケットを引上げながら掘削する機能を有する。

また, それぞれのルール群が同じアクチュエータに対して指令値を出力しているため, 重み関数  $\gamma$  による出力合成処理を適用している。

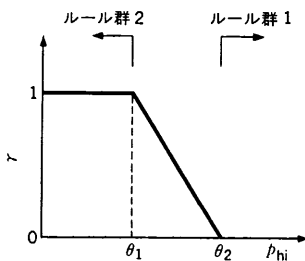
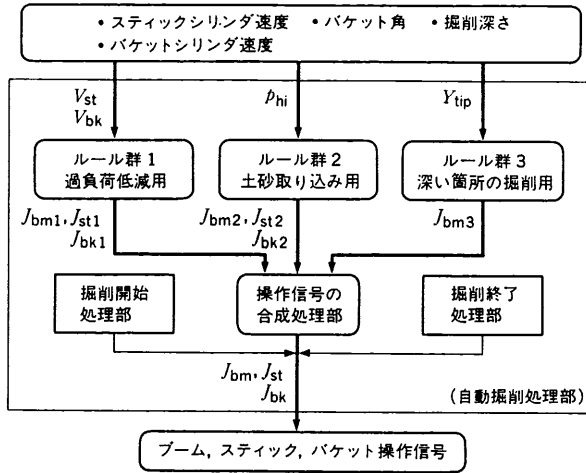


図4 自動掘削制御部の構成と重み関数  $\gamma$  3種類のルール群と重み関数  $\gamma$  による出力合成処理を適用し、各操作信号を出力とする。  
Construction of auto-digging controller and weight function  $\gamma$

表3 各ルール群の内容

Rule of fuzzy control for each group

| (a) ルール群1 |          |           |           |           |  | (b) ルール群2   |    |           |           |           |  |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|--|-------------|----|-----------|-----------|-----------|--|
| if~       |          | then~     |           |           |  | if~         |    | then~     |           |           |  |
| $V_{bk}$  | $V_{st}$ | $J_{bk1}$ | $J_{st1}$ | $J_{bm1}$ |  | $\rho_{hi}$ |    | $J_{bk2}$ | $J_{st2}$ | $J_{bm2}$ |  |
| PB        | PB       | PS        | PB        | ZO        |  | PB          | PS | PB        | ZO        |           |  |
| PS        | PB       | PB        | PM        | PS        |  | PS          | PB | PS        | PS        |           |  |
| PB        | PS       | PS        | PM        | PS        |  |             |    |           |           |           |  |
| PS        | PS       | PB        | PB        | PM        |  |             |    |           |           |           |  |

| (c) ルール群3 |           |                                        |  |  |  |
|-----------|-----------|----------------------------------------|--|--|--|
| if~       | then~     | $J_{bki}, J_{sti}, J_{bmi} (i=1\sim3)$ |  |  |  |
|           |           | : バケット, スティック, ブーム出力信号                 |  |  |  |
| $Y_{tip}$ | $J_{bm3}$ | PB: Positive Big                       |  |  |  |
| PB        | PS        | PM: Positive Medium                    |  |  |  |
| PS        | ZO        | PS: Positive Small                     |  |  |  |
|           |           | ZO: Zero                               |  |  |  |

### 3.1 実機適用向け制御方法

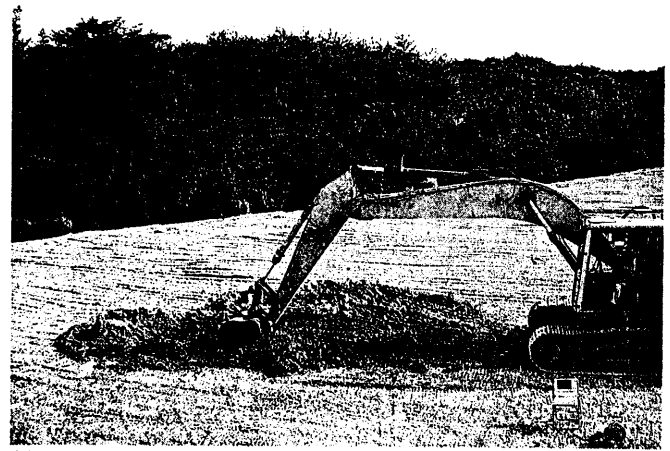
表3は上述のルール群1~3に適用した制御ルールである。なお操作指令が正のときは対応するシリンダを伸ばすことを意味している。

出力合成処理は掘削開始から掘削終了の過程において、各ルール群の出力を連続的に推移させることを目的としており、図4の下側に示すバケット刃先角  $\rho_{hi}$  に関する重み関数  $\gamma$  を適用した。また、式(1)は上記関数値による出力合成式である。

$$\left. \begin{aligned} J_{bm} &= (1-\gamma) \times \text{MAX}(J_{bm1}, J_{bm3}) + \gamma \times J_{bm2} \\ J_{st} &= (1-\gamma) \times J_{st1} + \gamma \times J_{st2} \\ J_{bk} &= (1-\gamma) \times J_{bk1} + \gamma \times J_{bk2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに添え字 1, 2, 3 はルール群の番号を意味している。

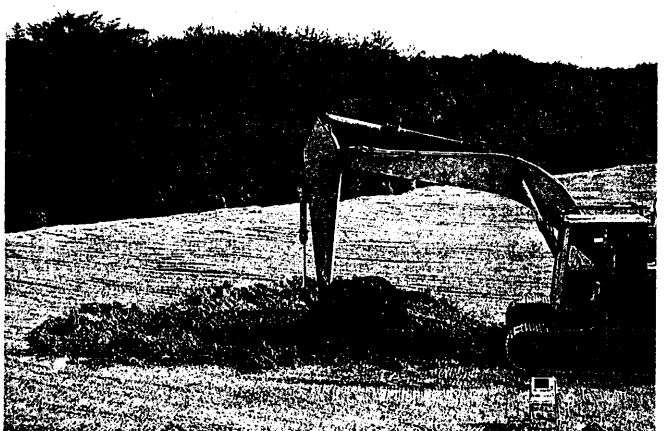
上記重み関数により、バケット刃先角  $\rho_{hi} \geq \theta_2$  の場合 ( $\gamma=0$ ) ルール群1の出力値を、 $\rho_{hi} \leq \theta_1$  の場合 ( $\gamma=1$ ) ルール群2の出



(a)



(b)



(c)

図5 自動掘削状態 (a)~(c) は本制御装置による自動掘削の様子を示した写真。オペレータはレバー操作していない。  
Situation of auto-digging

力値を完全適用するように推移する。また、 $\text{MAX}(J_{bm1}, J_{bm3})$  とは、ルール群3の出力が適用可能となることを意味している。

### 3.2 試験結果及び評価

制御性の評価は、式(2)で示す時間当たりの掘削土量を評価指数として用いた。

上記指数は、掘削効率に相当するため、値が最大となるときの制御ルール前件部、後件部のメンバーシップ関数を最適とし、以下の試験を行った。

$$\text{評価指数} = \frac{\text{掘削土量 (重量)}}{\text{(掘削効率) 1回の掘削に要した時間 (s)}} \quad (2)$$

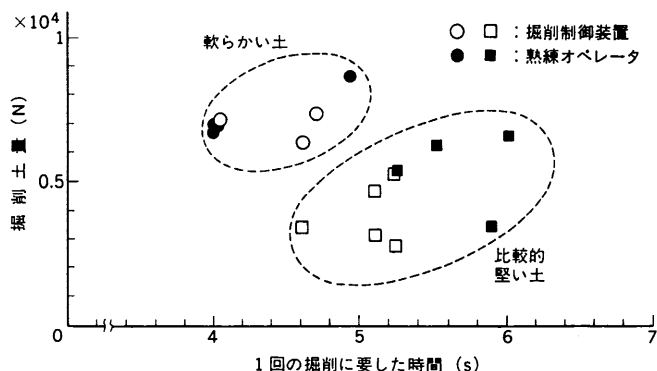


図6 掘削時間と掘削土量 本制御装置(図中○, □)と熟練オペレータ(図中●, ■)との結果を比較したもの。  
Digging time and quantity of soil digged

表4 掘削制御装置の到達率

Achievement rate of auto-digging controller

| 地山表面掘削時の土質条件 | 到達率  |
|--------------|------|
| 軟らかい土        | 約91% |
| 比較的堅い土       | 約80% |

今回の試験では土質が軟らかい土、比較的堅い土の地山表面の掘削を対象とし、本装置と熟練オペレータとの掘削の比較・評価を行った。また、熟練オペレータに対する掘削効率の到達率を式(3)で定義した。

$$\text{到達率 (\%)} = \frac{\text{自動制御による評価指数の平均}}{\text{熟練オペによる評価指数の平均}} \times 100 \quad (3)$$

図5(a)~(c)は本制御装置による自動掘削の様子を示したものである(オペレータが乗っているがレバー操作はしていない)。

図6は横軸に1回の掘削に要した時間に対する掘削土量を表したものであり、本装置(図中○, □)と熟練オペレータ(図中●, ■)との結果を比較したものである。表4は図6のデータから本装置の到達率をまとめた[式(3)中の分母、分子の平均値はそれぞれ図6中のデータから求めた]ものであり、ファジィ制御による自動掘削の性能が熟練オペレータにほぼ近いことが確認できた。

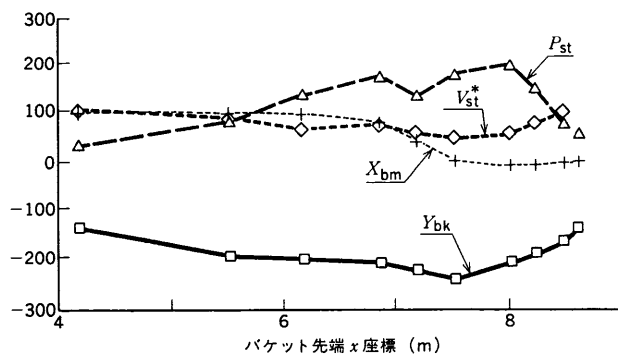
図7(a), (b)は、それぞれ軟らかい土における本制御装置とオペレータの掘削状態をバケット先端x座標を横軸に示したものである(掘削状態は図中x座標の右側から左側に推移する)。

掘削開始後バケット先端x座標が6.5~7.5mの範囲において、スティックシリンダ速度が低下すると、ブーム上げ操作して負荷を低減させている点は、自動掘削、オペレータとも同様な傾向を示している。

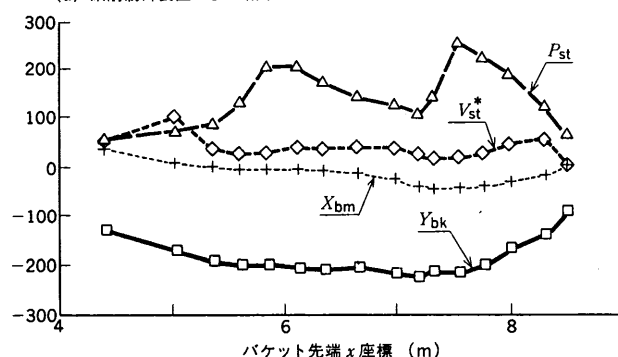
比較的堅い土の表面掘削の場合(図示せず)、オペレータはブームシリンダの伸び変化量を抑える、あるいはシリンダを縮めることによりスティック圧を常時高く保ちながら掘削している点が本装置より掘削効率が上回っている要因の一つであると考えられる。

#### 4. あとがき

油圧ショベルの掘削の自動化に熟練オペレータのノウハウを反映できるファジィ制御を適用し、次の結果を得た。



(a) 掘削制御装置による結果



(b) 熟練オペレータによる結果

$P_{st}$  : スティックシリンダ圧 ( $\times 10^5$  Pa)  
 $V_{st}^*$  : スティックシリンダ速度比 (%)  
 $X_{bm}$  : ブームシリンダ長さの変化量 ( $10^{-3}$  m)  
 $Y_{bk}$  : バケット先端y座標 ( $\times 10^{-2}$  m)

図7 掘削制御装置及び熟練オペレータによる掘削状態 掘削状態は図中x座標の右側から左側に推移する。軟らかい土のときの掘削。  
Digging states by auto-digging controller and skilled operator

- (1) 基本的な制御ルールで、土の土質及び油圧ショベル自身の持つ掘削能力に応じた制御が可能となることをリアルタイムシミュレータで評価し実現可能な見通しを得た。
- (2) 三つのルール群から成る制御方法で実機試験を行い、制御装置の掘削性能が熟練オペレータの掘削効率に80~90%到達できたことを確認した。

今後、広範囲の土質でも熟練オペレータの効率に90%以上到達できるよう制御ルールの拡充が必要である。特にシリンダ伸び方向の制御ルールだけでなく、シリンダ縮みの制御ルールを付加する必要があると考える。

#### 参考文献

- (1) 鮫島ほか、ファジィ制御による建設機械用掘削制御装置の基礎研究、日本機械学会第68期全国大会講演会講演論文集 No.900-59 (1990-9) p.384
- (2) 菅野道夫、ファジィ制御、日刊工業新聞社 (1988) p.67
- (3) 青木ほか、建設機械と土質〈機械土工理論の基礎と発展〉、日本工業出版 (1976)
- (4) 鮫島ほか、ファジィ制御による建設機械用自動掘削制御装置の開発、日本機械学会第70期全国大会講演会講演論文集 No.920-78 (1992-9) p.473