

# 押土作業におけるブレードのファジィ制御に関する基礎的研究

深川良一\*・室 達朗\*\*・鈴木貴雄\*\*\*

建設施工の自動化に向けて押土作業時のブレードへのファジィ制御の適用を試みた。ファジィ制御における非ファジィ化の方法、ラベル数など種々の制御条件が結果に与える影響をシミュレーションおよび室内モデル試験により明らかにした。特にファジィ制御を開始し始める最小値の設定については、地盤条件を考慮した適切な制御条件が選択されることにより押土能率を向上できることが明らかになった。

**Keywords** : fuzzy control, bulldozing, bulldozer blade, simulation, model test

## 1. はじめに

昨今、建設機械の自動化が強力に推進されつつある。理由としては、熟練工が減少しつつあるため、自動化により省力化、合理化をはかる必要があることや、建設工事現場においていわゆる3K的な作業をできるだけ減らしていこうという機運が高まってきている等ということを挙げることができよう。

自動制御の方法としては、ここではファジィ制御を用いている。ファジィとは‘あいまい’という意味である。人間は多かれ少なかれ、あいまいに判断し、認識し、推論する。この人間本来の思考法をコンピュータに取り入れて、機械やシステムを制御し、より安全で快適な生活をもたらそうというのがファジィ制御である。建設施工の分野でファジィ制御が用いられた例としてはシールド掘進における方向制御<sup>1)</sup>があるが、著者らの知る限りそれ以外にはあまり報告されていない。ファジィ制御は、人の感覚などのような曖昧な情報にもとづいて制御ができるという利点の他に、(1) 処理速度が速い、(2) 外的作用により多少の誤報が入ってきても致命的な欠陥に至らない、(3) 理解が容易で応用性に富む、等という利点を有する<sup>2)</sup>。

ブルドーザーのブレード制御は、オペレーターがブレードにかかる力および地盤条件を判断して微妙にチルトシリンダー、リフトシリンダーを操作するという作業から成っている。これらのブレード操作を自動化しようと思えば、例えば少なくとも次のような作業、ブレード操作も当然自動化されなければならない。1つは整地作業である。微妙なブレード操作が必要であるため、熟練

したオペレータにとっても消耗する作業である。他の一つは押土(掘削)抵抗が増大したり急変した場合にブレードを上方にシフトさせあるいは前掲させてブレードにかかる負荷を低減させる作業である。高い押土能率を要求されるなら、やはりブレード操作に熟練することが必要となる。前者の整地作業に関しては、従来より自動制御が試みられてきており一定の成果が上がっているが<sup>3)-5)</sup>、昨今の技術革新により一層の精度の向上が期待されている。今回の報告は後者に関するものであり、条件を単純化してブレードにかかる負荷に応じてブレードを上方にシフトさせるという1入力1出力のファジィ制御を試みた。本研究ではまず、ファジィ制御シミュレーションプログラムを作成し、非ファジィ化、ラベル数の変化、最小値の変化等いくつかの基本的制御条件の影響について調査した。次に、実際にファジィコントローラを装着したモデル押土試験装置を設計・製作し、ラベル数及び最小値を変化させて一連の押土実験を行い、押土能率を高めるような適正な制御方法に関して提言を行った。

## 2. ファジィ制御<sup>2),6)</sup>

### (1) ファジィ制御規則

ファジィ制御を実施するためには制御規則の形式を設定する必要がある。本論文で採用した制御規則の形式は、IF~THEN ルールと呼ばれるもので、

IF  $x$  is  $A$  THEN  $y$  is  $B$

ここに、( $x$  is  $A$ )の部分条件部、( $y$  is  $B$ )の部分操作部と称する。 $A$ ,  $B$ は曖昧な言語情報からなるファジィ集合である。

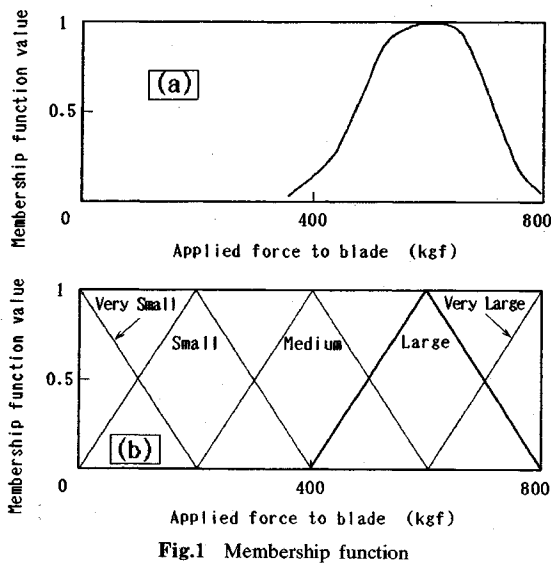
### (2) メンバシップ関数

言語情報の曖昧度を表すのがメンバシップ関数である。 $A$ というファジィな情報に対する変数 $x$ のメンバシップ関数を $m_A(x)$ とする。1例として一般的に図

\* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

\*\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

\*\*\* 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科



に表したのが Fig.1 (a) である。メンバーシップ関数値は0から1の間の値を取るが、もし大きいという言葉に丁度適合するような荷重があればその値は1ということになる。実際ファジィ制御では、処理を簡単にするため Fig.1 (b) のような三角形分布のメンバーシップ関数を仮定する。『大きい』場合に加えて、非常に小さい、小さい、普通、非常に大きい、という言葉（ラベルと称する）に対応するメンバーシップ関数を重ねたものが Fig.1 (b) となる。

(3) ファジィ推論

ファジィ推論による結論の導き方であるが条件部、操作部でそれぞれラベル数が5つの場合を考える (Fig.2)。条件部および操作部における横軸は、ブレードにかかる力およびブレードの鉛直変位である。縦軸は帰属性（メンバーシップ関数の値）である。条件部の5つのラベルに対して、操作部でも5つのラベルが対応する単純な場合を想定する。

まず事実 (A'), つまりブレードにかかる力のメンバーシップ関数  $m_{A'}(x)$  というものが入力情報として与えられた場合、この事実と各々の条件部 (A) におけるメンバーシップ関数との照合度を調べる。照合度を  $A \cap A'$  の最大値  $\alpha$  と考え、操作部 (B) のメンバーシップ関数を照合度  $\alpha$  で頭切りして推論結果 (B') を得る。具体的には三角形の交点の縦軸の値で両者の照合度を評価する。B' は、Fig.2 の右側の塗りつぶした部分となる。

各々の規則に対して同じことを繰り返し、得られた全てのファジィ制御情報を重ねると、最終的に Fig.2 の最下図のようなになる。この状態ではまだ制御命令はファジィ的な状態で止まっているので、具体的に制御の確定値を得るためには後述するような非ファジィ化 (diffuzification) が必要になってくる。

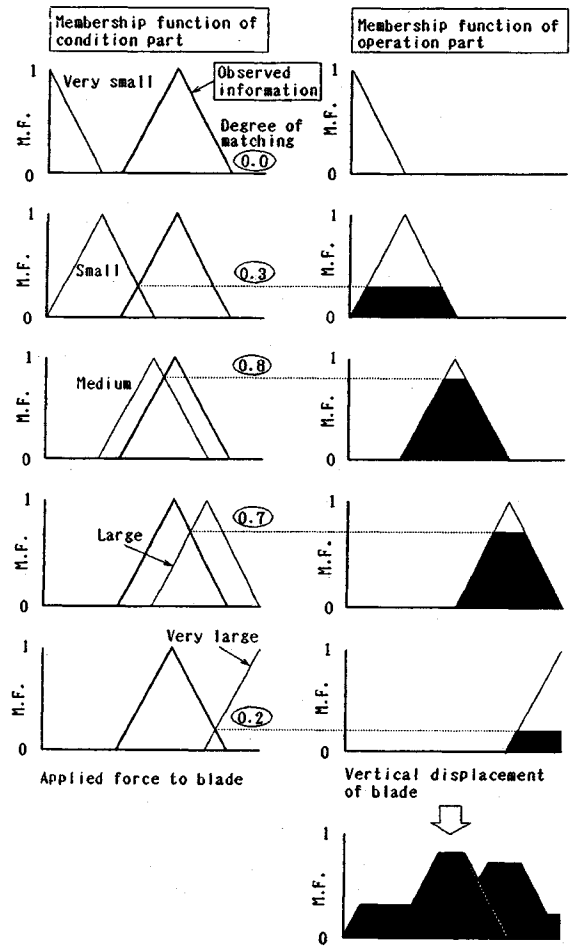


Fig.2 Method of approximate reasoning in a typical example

3. シミュレーションによるファジィ制御結果の検討

(1) メンバーシップ関数の設定

Fig.1 (b) に示すようなそれぞれの曖昧な言葉（非常に大きい、大きいなど）を表している三角形の数をラベル数と呼ぶことにし、3, 5, 7, 9と変化させた。この場合、最大値、最小値は一定とし、また最大値から最小値までの分割は等間隔で行っている。数が増えるほど細かな制御が可能となるが、例えば人間の感覚などに基づいてメンバーシップ関数値を決める場合、あまりに制御ラベルを細かく設定することは困難であり、また現実的でない。それぞれの方法に対して制御時に同一の距離～ブレードにかかる荷重関係を仮定し (Fig.3)、シミュレーションを行った。なおこのシミュレーションにおいては入力データはクリスプな情報として入力している。Fig.2 のケースとは異なるが、同様に各メンバーシップ関数との照合度が容易に求められる。Fig.4 は、ラベル数を変化させた場合のブレードの変位と押土距離の関係を示して

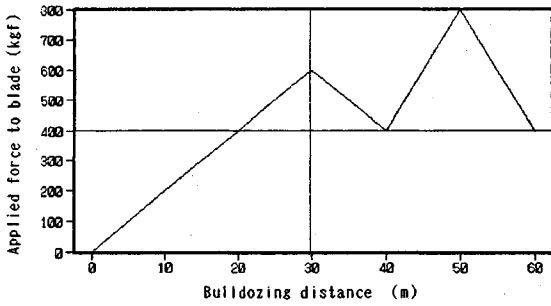


Fig.3 Assumed relationship between the applied force to blade and bulldozing distance (1 kgf=9.8 N)

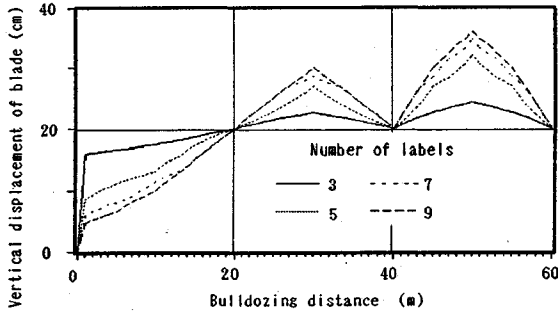


Fig.4 Relation between the vertical displacement of blade and the bulldozing distance when number of labels are varied

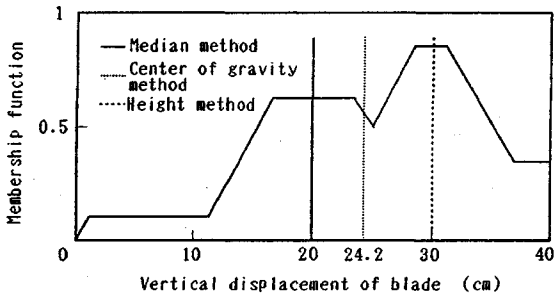


Fig.5 Comparison of defuzzification methods

いる。ラベル数3の場合はブレードにかかる力が増えても、あまりブレードが上がっていないため、結果的にブレードに過大な力のかかる恐れがある。ラベル数が増えるにつれ、ある変位～距離関係に収束していきそうだが、とりあえずラベル数5程度で十分な応答が得られていると判断できる。

(2) 非ファジィ化の方法

非ファジィ化の方法として3つの方法を挙げた (Fig.5)。中でも代表的な方法である重心法 (Center of gravity method) は、メンバーシップ関数と横軸で囲まれた図形の重心をとる方法である。図のようなファジィ情報が結果的に得られたとすると、重心法に依ればブレードを24.2cm変位させるという制御命令が出力される。メディアン法 (Median method) は、0でない

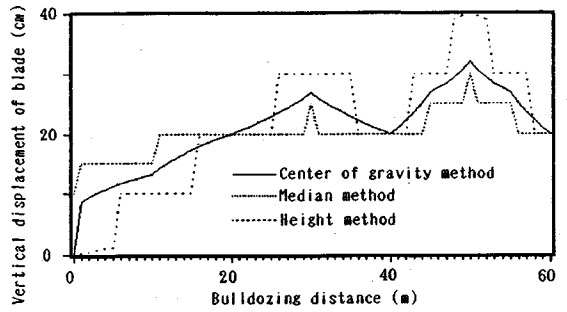


Fig.6 Influence of defuzzification method on fuzzy-controlled performance

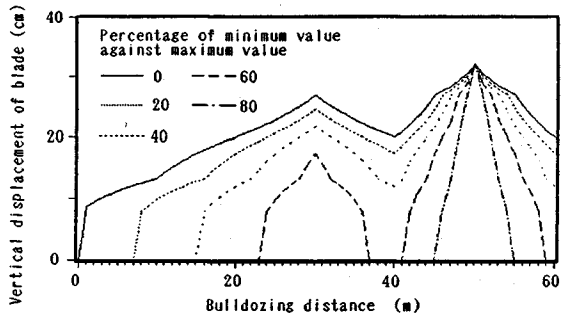


Fig.7 Vertical displacement of blade when minimum values set in simulation analysis are varied

ところの範囲の中央値をとる方法であり、このケースでは20cmの変位を与えるよう指示する。高さ法 (Height method) は、最大値を与える山の中央値をとる方法であり、このケースでは30cmの変位が結果的に生じることになる。

ここでは距離として60m、ブレードにかかる荷重の最大値を800kgf (7.85kN)、ブレードの最大変位を40cmと仮定している。これらの値は必ずしも具体的なブルドーザーを想定して決定されているわけではないが、容易に他のケースに拡張、適用可能である。これらの計算ではラベル数は5、制御命令の最小値を0と仮定している。Fig.6にシミュレーションの結果を示している。縦軸がブレードの鉛直方向の変位、横軸が押し距離である。想定した押し距離～荷重関係に対しては、重心法が最も滑らかなブレードの動きを示すようである。もう少し実際に近い押し距離～荷重関係を仮定してみても、やはり重心法が最も滑らかなブレードの動きを与えることがわかっている。重心法に対して、メディアン法、高さ法は、階段状の荒い制御結果を示しており、またメディアン法は相対的に低めの、高さ法は高めの鉛直変位を与えている。実際のブレード制御は滑らかに行われることが望ましいから、重心法が最も好ましい非ファジィ化手法であることがわかる。これらの結論は既に指摘されているところであるが (例えば参考文献6)) それらを裏

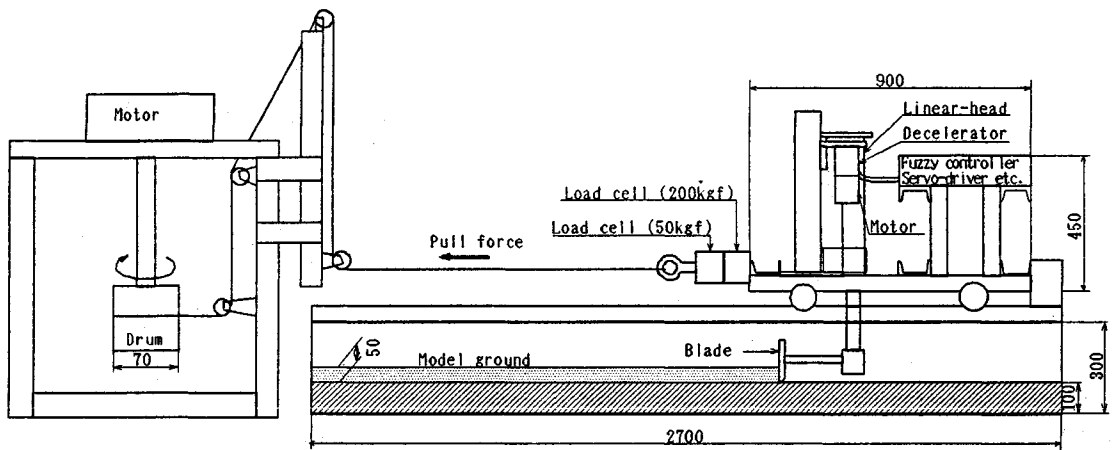


Fig. 8 Testing apparatus

付ける結果である。

(3) 最小値の設定

オペレータは、実際のところある程度ブレードに荷重がかかってからブレードの調整を行っている。したがって、最小値の設定が問題となる。ここでは5通りの最小値、即ち最大値の0, 20, 40, 60, 80%と変化させてブレードの挙動を調べてみた。最大値は一定とし、ラベル数はいずれも5である。

Fig. 7 に得られたブレード変位～距離関係を示す。図より最小値を変化させないときと40%のときを比べてみると、前者は押土開始直後よりブレードが変化しているのに対し、後者はある程度掘進してからブレードが変化し始めている。地表面を掘削しかつ平面として仕上げる場合、ブレードはなるべく一定状態を保ったまま押土ないし掘削が進行する方がよい。最小値の設定により当然ブレードの制御が開始される荷重に差が生じるが、ブレードにあるいは機械本体に過大な力がかからないよう適切に最小値が設定されなければならない。一般的には、履帯の滑りが顕著になり始めるときのブレードにかかる力よりも少し小さい値をとればよいと考えられるが、4章において具体的な実験的検討を試みる。

(4) ファジィ制御に対する指針

以上得られたシミュレーション結果に基いて実際のファジィ制御に対する指針を簡単にまとめてみると

a) 実際のブレード制御は滑らかに行われることが望ましいから、非ファジィ化の手法としては、提案されている3法の中では重心法を用いることが好ましい。

b) ラベル数は、数が増えるほど微妙な制御が可能となるが、メンバーシップ関数設定の精度を考えれば、多すぎるのは現実的でない。ラベル数9の場合の結果に対して、ラベル数5位でも余り変化が無いため、実用的には十分な制御が可能であると判断できる。

c) ファジィ制御の際の最小値を適切に設定すること

により、ある荷重まではブレードを水平に保持したまま押土をするという実際のオペレータの制御に近い結果が期待できる。

4. モデル実験によるファジィ制御結果の検討

(1) 実験装置

a) 実験装置の概略

実験装置の概略を Fig. 8 に示す。実験装置は土槽、台車、牽引装置、ブレード及びブレードを上下させるためのモーターよりなる。土槽の大きさは、270 cm×60 cm×30 cm である。牽引装置は、モーターに取り付けた直径7 cm のドラムにワイヤーを巻き取り牽引するものである。本実験で使用するモーターの出力は0.2 kw である。実験で採用した牽引速度は30 cm/min である。ブレード変位の最大速度は16.5 cm/min である。

b) ファジィ制御システム構成

システム構成について Fig. 9 に示す。まず、実験開始前にハードディスクにインストールされたファジィ情報入力用のソフトを用いてメンバーシップ関数などを設定し、その情報をファジィコントローラに通信する。実験が開始されると、ブレードにかかる荷重がロードセルにより検知され、このロードセルからの情報が動歪計で電圧に変換された後、ファジィコントローラに伝達される。その後、ファジィコントローラより一連のファジィ推論実行回路を経て出力されたアナログ速度指令電圧、つまりサーボモータに供給する電圧を制御する信号がサーボドライバに送られ、サーボモータの回転を介してリニアヘッドが伸縮し、ブレードの上下位置制御が実施される。この際サーボモータの回転速度とサーボドライバからの指令電圧が線形関係にあるため、指令電圧が大きいほど回転速度が速くなる、つまりリニアヘッドの変位速度(=ブレードの上昇速度)が速くなる。Fig. 9 中、パワーユニットは交流電源を整流平滑し直流電源をサーボドライ

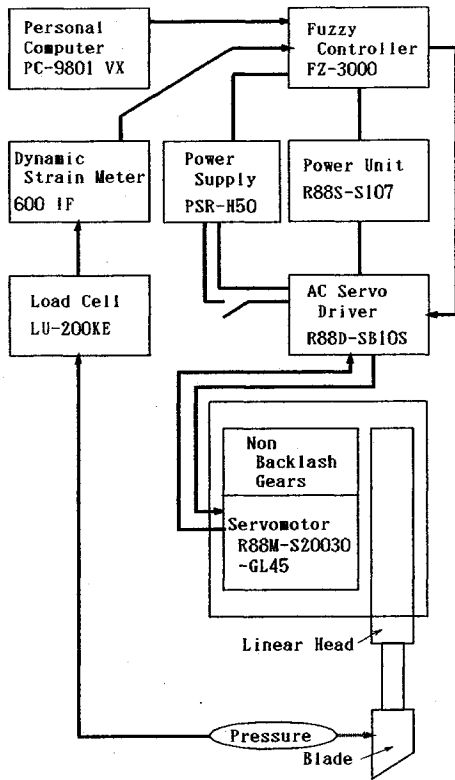


Fig.9 System constitution in fuzzy control

パに供給するためのものである。また、サーボモータは永久磁石を回転子にした電動機である。この中にはホールセンサと呼ばれるモータの回転子の位置を検出しインバータの通信タイミングを制御するセンサー信号を出力するものや、ロータリーエンコーダと呼ばれるモータの回転数、位置制御用を使用するものあるいは減速機が含まれる。また、ファジィコントローラのデジタル制御部の外部供給電源とサーボドライバの速度制御は24Vで設定されているため、パワーサプライを用いて24Vを供給する必要がある。

(2) 実験方法

a) モデル地盤の作成

実験には4.78 mmのふるいで仕分けし気乾燥させた海砂を用いた。試料砂の粒径加積曲線をFig.10に示す。土槽の底面から10 cmの高さまでのモデル地盤については厚さ1 cmおきに70 kgf (686 N)の重りを地盤上高さ30 cmの所より落下させ、基礎地盤とした。盛土部分については、基礎地盤表面から5 cmの高さまで試料砂を緩やかにそそぎ込み作製した。このときの密度は、1.49 g/cm<sup>3</sup>、相対密度はDr=19%である。またブレードの初期状態の位置はFig.8のように基礎地盤表面と接した状態とした。つまりブレードの刃先は基面上にあることになる。以後、盛土部表面を基準面とする。したがっ

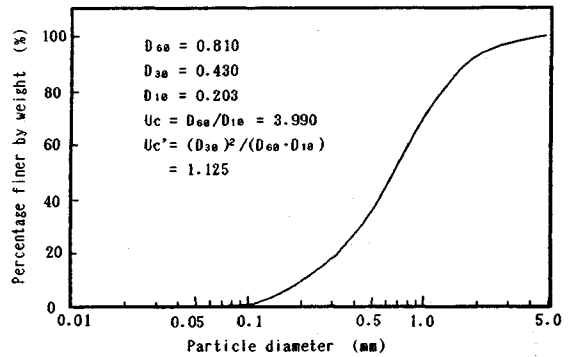


Fig.10 Percentage finer by weight of tested sand

て基礎地盤表面は-5 cmの高さとなる。

b) 計測機器

計測機器として、牽引力を計る50 kgf (490 N)容量のロードセル、モデル車両の初期変位を決定するための変位計、ブレードの変位を計る超音波変位計がそれぞれデジタルレコーダに接続される。また、ブレードにかかる力をファジィコントローラ(オムロン製FZ-3000)に伝えるため、200 kgf (1.96 kN)容量のロードセルが動歪計に接続してある。実験は、パソコンから制御命令の通信を行い、モータへのスイッチを入れることによって開始される。データの処理はデジタルレコーダに読み込んだデータを等間隔で、押土距離に直すとおよそ3 cmおきに、34個拾いだし解析を行った。

c) ブレードにかかる力の補正

ブレードにかかる力を引張り力で換算するが、その引張り力の中には、モデル車両車輪の転がり摩擦などが含まれている。それらブレードにかかる力以外の摩擦力を評価するために、ブレードに荷重がかからないようにして計測を行った。2回行いその平均値を出すと1.73 kgf (17.0 N)となった。実際はさらに地盤と土槽側面(内面)との摩擦を正確に評価しなければ、平面歪み状態でのブレードにかかる力を正しく把握できない。しかしこうした側面摩擦がファジィ制御の成否に質的に影響を与えることはないから、ここでは特に考慮していない。

d) メンバシップ関数の設定

初期設定としてブレードにかかる力の最大値を50 kgf (490 N)、ブレードの最大変位を40 cmとした。この値は許容範囲内なら基本的にどのようにでも設定することが可能である。ファジィソフトでのメンバシップ関数の設定方法をFig.11に示した。ファジィソフトの設定では最大5V、最小-5Vまで出力することができる。この間であればどのようなメンバシップ関数でも想定できる。つまり、代入する数字は目安であり任意に決定できるのである。また0Vに近いほど動作は遅く、±5Vに近いほど動作は早くなる。入力に関しては、ロードセルに即していえば、-5~0Vに引張り力が、0~+

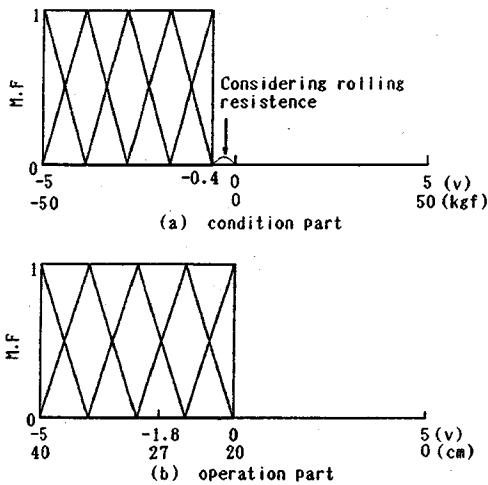


Fig.11 Setting of membership function in fuzzy-controlled tests

5 V に圧縮力が対応する。Fig.11 (a) に示すように、-5 V に 50 kgf (490 N) の引張り力を対応させた。ブレードにかかる力を入力データは、牽引力からロードセルを介して入力されるため、例えば転がり摩擦等の影響も入っている。このような場合、入力側のメンバーシップ関数を作る際、Fig.11 (a) のように摩擦力の影響部分を差し引かねばならない。本実験では 0.4 V が転がり抵抗に相当する電位差となった。また、出力に関しては、-5~0 V の範囲がブレードを上げるという動作であり、0~+5 V の範囲がブレードを下げるという動作である。今回の実験では、上げるという動作のみを考えたので、設定されたメンバーシップ関数は Fig.11 (b) に示すようなものとなった。

(3) 実験結果および考察

a) 最小値の影響

実験結果を Fig.12 に示す。Fig.12 はラベル数 5 の場合であり、Fig.12 (a) には最小値が最大値のそれぞれ 0, 20, 40, 60, 80% になるように設定された場合のブレードの鉛直変位と押土距離の関係が示してある。また Fig.12 (b) には、ブレードにかかる力と押土距離の関係を同様に示している。最小値が 0% の場合、シミュレーション結果と同じように車両が動き始めると同時にブレードが変位し始める。また設定最小値 20, 40, 60, 80% に対してそれぞれ 11~12 kgf (108~118 N), 20~21 kgf (196~206 N), 29~30 kgf (284~294 N), 38 kgf (373 N) の荷重がブレードにかかったときに制御が始まっている。これは最大値を 50 kgf (490 N) とした場合の最小値の設定の値とほぼ等しいから、設定通り制御が実施されていることが分かる。また、掘進が進むにつれ図よりブレードにかかる力はある一定値におさまってきている。これは、設定最小値の近傍のみで制御が行われていることを表している。制御がかなりの速度で成さ

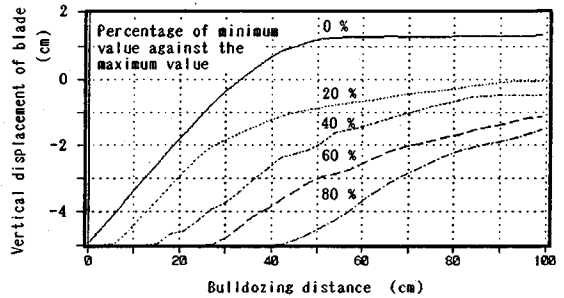


Fig.12 (a) Fuzzy-controlled performance of blade (The number of labels is 5)

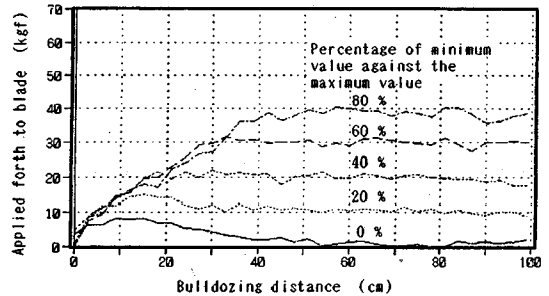


Fig.12 (b) Fuzzy-controlled performance of blade (The number of labels is 5 and 1kgf=9.8 N)

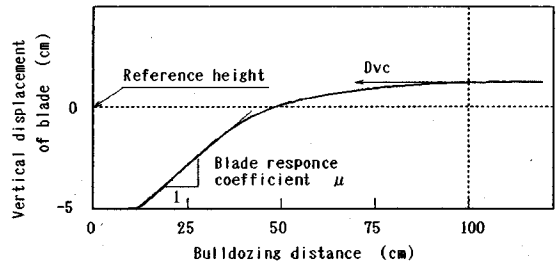


Fig.13 Definition of blade response coefficient

れていることが分かる。

掘進に伴うブレードの応答を表現するためにブレード応答係数  $\mu$  (グラフでの変位の傾き、つまり単位押土距離当たりのブレードの上昇の程度) を Fig.13 のように定義した。これは、ブレードに力がかかり始めてからの反応の度合いを示している。具体的には立上がり部のほぼ直線と見なせる部分の勾配から  $\mu$  を決定している。ブレードの応答曲線は、最終的にある値  $D_{vc}$  に収束する傾向を示すが、 $\mu$  が小さいほど、また  $D_{vc}$  が小さいほど押土能率は良好であると判断できる。ここに押土能率  $E_b$  を単位時間当たり掘削土量と定義する。即ち、

$$E_b = \frac{V_e}{t_e}$$

である。  $V_e$  : 押土土量、  $t_e$  : 押土に要した時間である。 Fig.14 に  $\mu \sim D_{vc}$  関係を示す。  $D_{vc}$  については明確に収束値として決定困難な場合があったため、押土距離 100

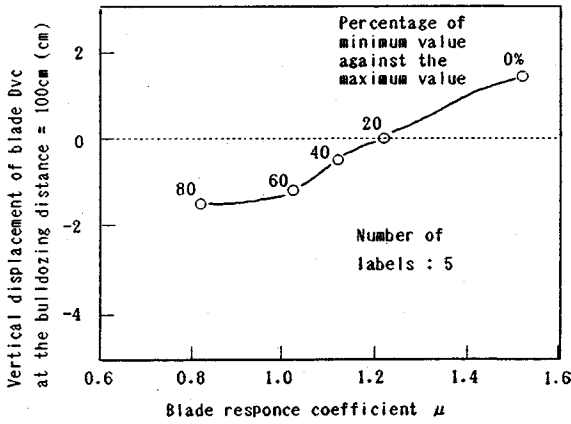


Fig.14  $\mu \sim D_{vc}$  relations

cmの時点でのブレードの変位として決定した。この図より  $\mu$  と  $D_{vc}$  はほぼ1対1の対応関係があり、 $\mu$  が小さいほど  $D_{vc}$  も小さいことが分かる。つまり、 $\mu$ 、 $D_{vc}$  は押土能率を判定する上で有効な示標となることが分かる。また、Fig.15に設定最小値とブレード応答係数  $\mu$  の関係を示した。最小値の設定が小さいほどブレード応答係数が大きいことが分かる。Fig.15にはラベル数5の場合のみでなく、ラベル数3, 7の場合についても示している。ラベル数3, 7両方の場合でも、最小値の設定が大きいほどブレード応答係数  $\mu$  は小さくなる傾向を示す。既に述べたように  $\mu$  が小さいほど押土能率は良好であるが、実際に押土作業を行う場合はブレードにかかる力が増えるに従い、履帯がスリップし、押土に要する時間が増えると予想される。このことは押土能率  $E_b$  の低下を招来する。したがって、Fig.15の結果は後にスリップ率を考慮して修正されることになる。

b) ラベル数の影響

ラベル数をそれぞれ3, 5, 7と変えて実験を行ったが、いずれの場合もそれぞれの最小値の設定でブレードが変位し始めるときの荷重は同じであった。ラベル数とブレード応答係数  $\mu$  の関係を Fig.16 に示している。この図より最小値の設定に関係なくラベル数が増えるにつれブレード応答係数は小さくなってきている。ただし  $\mu$  の減少の程度はラベル数及び設定最小値によって若干異なっている。ラベル数3→5に比べて5→7では減少の程度はかなり鈍化していることがわかるが、これは先のシミュレーションの結果とも整合する結果である。また、設定最小値が20~80%では、ラベル数3→5→7に対応する  $\mu$  の減少はそれほど顕著なものではない。ともかくブレード応答係数が小さいほどより大量の運土が可能であることを意味するから、この意味においてはラベル数が多いほど有利であることになる。また、以上の結果は、非ファジィ化で重心法を用いていることにも1因がありそうである。ラベル数が少ない場合、入力側の情報

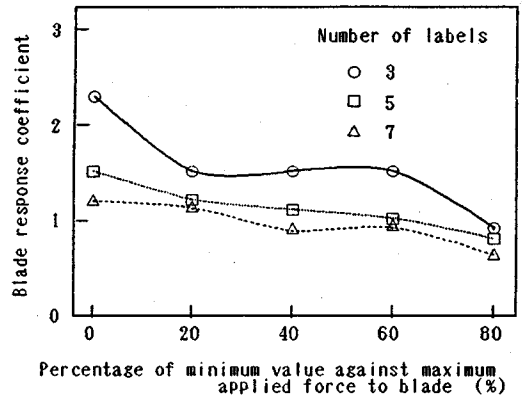


Fig.15 Effect of minimum value setting against maximum applied force to blade on blade response coefficient

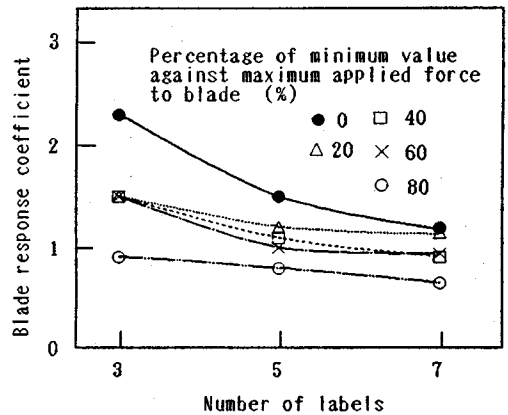


Fig.16 Effect of minimum value setting against maximum applied force to blade on blade response coefficient

として最大値, 最小値に近い値が入力された場合, 非ファジィ化における重心の位置はラベル数が多い場合に比べて中央に寄ってくるため結果的に出力の範囲が狭まることになる。

c) 押土能率を考慮した適正な最小値の設定

スリップ率を考慮しないとき、能率が良いのはどんなに荷重がかかってもブレードを変位させずに押し進んで行く場合である。しかし、実際は限界近くになると履帯がスリップして押土能率が悪くなる。この際のスリップ率と押土能率の関係は、地盤条件によって変化するものだろう。そこでスリップ率を考慮した押土能率について考えてみた。まずスリップ率と牽引力の関係を Janosi and Hanamoto (1961) の提案したせん断力とスリップ量関係式に基き、次式のように仮定した。

$$D_b = D_{pmax} \{1 - \exp(-a \cdot i)\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $D_b$ : 牽引力(kgf)、 $D_{pmax}$ : 牽引力の最大値(kgf)、 $a$ : 地盤特性を表現する定数、 $i$ : スリップ率である。上式の基礎とした経験式は基本的に粘土地盤に対して適用されたものであるが、今回試験に用いた緩い砂地盤でも

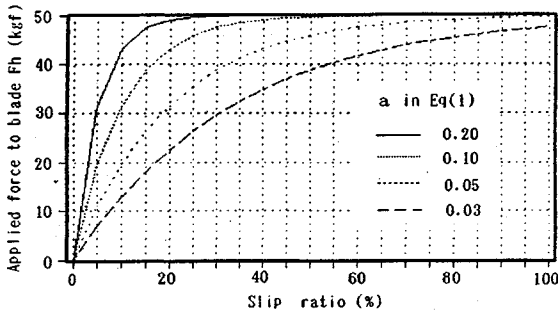


Fig.17 Assumption of the relations between applied force to blade and slip ratio (1 kgf=9.8 N)

同様に適用可能であると判断される。  $D_{pmax}$  としては 50 kgf (490 N) を入力している。  $a$  は地盤特性を表現する係数であるが、砂地盤における係数  $a$  をいくつか変化させて計算に用いた。想定したスリップ率とブレードにかかる力の関係を Fig.17 に示した。係数  $a$  が大きいほど曲線の初期の立ち上がりが急になり、また 50 kgf (490 N) 前後でスリップ率が急変する可能性が高くなる。係数  $a$  が小さいときは、ある牽引力を發揮するのに必要なスリップ率がかなり大きくなければならないが、いわゆる限界状態まで急激なスリップ率の変化は起らない。

式 (1) よりスリップ率  $i$  は、

$$i = \frac{1}{a} \ln \left( 1 - \frac{D_p}{D_{pmax}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここでスリップ率  $i$  は駆動時

$$i = \frac{v_w - v_c}{v_w} \dots \dots \dots (3)$$

である。ここに、 $v_w$  : 履帯の周速度、 $v_c$  : 車両速度である。今距離  $d$  を走行するのに時間  $t$  だけかかったとすると次式が得られる。

$$d = v_c t \dots \dots \dots (4)$$

式 (3), (4) より

$$d = v_w (1 - i) t \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) より  $v_w =$ 一定で、 $i=0$  のとき  $d$  を走行するのに  $t_0$  かかったとすると、

$$d = v_w t_0 \dots \dots \dots (6)$$

式 (5), (6) より

$$t = \frac{t_0}{1 - i} \dots \dots \dots (7)$$

結局式 (2) を代入して

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{a} \ln \left( 1 - \frac{D_p}{D_{pmax}} \right)} \dots \dots \dots (8)$$

だけ  $d$  を走行するのにかかることになる。

ここでの計算において、ブレードにかかる力が変化すると、それに応じてスリップ率が変化し (式 (2)), ひいては押土に要する時間が変化することになる (式 (8))。押土算定の基準とした押土距離は 90 cm とし

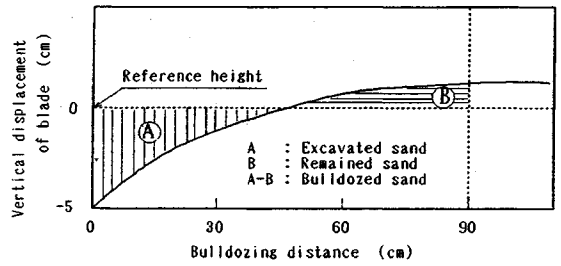


Fig.18 Calculation of bulldozed sand volume

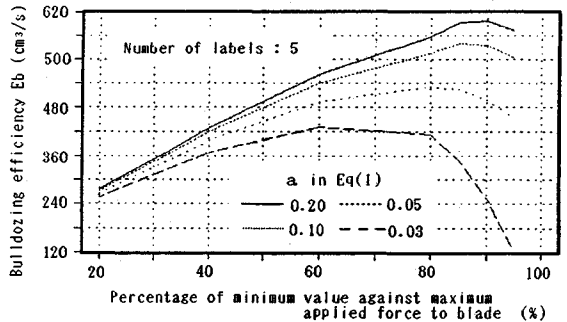


Fig.19 Bulldozing efficiency in considering slip effect

(Fig.18 参照), 最終的な押土量は同図の A-B とした。A は掘削した土量であり、B は押し残した土量である。なお今回のケースでは B が存在するのは設定最小値が 0% に近い場合のみであった。計算に際しては 90 cm を 3 cm ずつに分割し、それぞれの分割域において平均的なブレードにかかる力を読みとり、式 (8) より基準時間  $t_0$  に対する所要時間  $t$  の比  $t/t_0$  を計算した。この場合基準時間  $t_0$  は具体的には  $i=0$  の状態で 3 cm 押土するのに要した時間 (6 sec) ということになる。式 (8) 中の  $a$  は  $a=0.03, 0.05, 0.10, 0.20$  と仮定した。最終的に A-B を押土するのに必要な時間比  $T/t_0$  は、

$$\frac{T}{t_0} = \sum_{i=1}^{30} \left( \frac{t}{t_0} \right)_i \dots \dots \dots (10)$$

で得られる。

最小値の設定と押土能率の関係について Fig.19 に示す。Fig.19 の結果はラベル数 5 という条件で実施された制御結果に基づいている。Fig.16 よりラベル数が多いほど良好な制御能率が得られる可能性はあるが、5 以上のラベル数に対応する押土能率の増加の程度は次第に鈍化してくることが予想されるため、ここではラベル数 5 を選択している。Fig.19 より係数  $a$  の値に関わらず、最小値の設定を増やしていくと、最初のうちは能率が良くなっていくがある値から能率が落ちていく。よって、ここで採用した係数  $a$  に対応するような地盤条件では、ブレードにかかる力がある値を越えると押土能率が悪くなるのがわかる。また、最適最小値と係数との関係を Fig.20 に示した。ブレードにかかる力



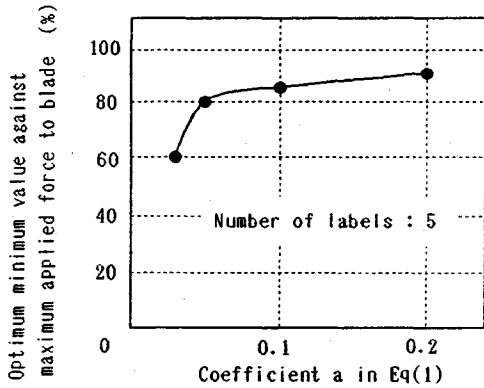


Fig.20 Optimum minimum value setting against maximum applied force to blade in considering slip effect

の最大値をあらかじめ決めた場合、地盤条件に対応した最小値をスリップ率に応じて設定してやれば有効な押土能率が期待できる。係数  $a$  が小さいほど軟弱な地盤であると予想され、こうした地盤ではやはりブレードにかかる力が少ないほうつまり最適最小値が小さい方が有利である。

### 5. 結 論

得られた主要な結果を列挙すると以下の様になる。先ず一連のシミュレーション解析により、

(1) 実際のブレード制御は滑らかに行われることが望ましいから、非ファジィ化の手法としては、提案されている3法の中では重心法を用いることが好ましい。

(2) ラベル数は、数が増えるほど微妙な制御が可能となるが、メンバーシップ関数設定の精度を考えれば、多すぎるのは現実的でない。ラベル数9の場合の結果に対して、ラベル数5位でも余り変化が無いため、実用的には十分な制御が可能であると判断できる。

(3) ファジィ制御の際の最小値を適切に設定することにより、ある荷重まではブレードを水平に保持したまま押土をするという実際のオペレータの制御に近い結果が期待できる。

ということが判明した。

次に、ファジィコントローラを装着した試験車両による実験を実施した結果、

(4) 最小値の設定については、設定荷重に到達するまでブレードは変位しないという点でシミュレーションと同じ結果が得られた。また、最小値の設定が小さいほど、ラベル数が少ないほど、ブレード応答係数  $\mu$  は大きくなることが判明した。ただし、 $\mu$  の増減の程度は設定最小値、ラベル数の影響を微妙に受ける。ここにブレード応答係数  $\mu$  は単位押土距離当たりのブレードの上昇の程度を表す係数で、 $\mu$  が小さいほどより大量の運土が可能であることを意味する。

(5) 実験結果に基づいた数値シミュレーションにより、ブレードにかかる力の最大値をあらかじめ決めた場合、地盤条件に対応した最小値をスリップ率に応じて設定してやれば有効な押土能率が期待できることが判明した。

### 参 考 文 献

- (1) 桑原洋・原田光男・背野康英・竹内幹雄：ファジィ理論のシールド掘進制御への応用，土木学会論文集，第391号/VI-8, pp.169-178, 1988.
- (2) 山川烈：fuzzy コンピュータの発想，講談社，1988.
- (3) 越崎祐司・後藤幸一：レーザによるブルドーザのブレード制御装置，小松技報，第22巻，第4号，pp.260-266, 1976.
- (4) 河内政隆・松崎淳：ブルドーザによる平面掘削の自動化，日本機械学会論文集，第43巻，367号，pp.1148-1155, 1977.
- (5) Ito, N.: Bulldozer blade control, Jour. of Terramechanics, Vol.28, No.1, pp.65-78, 1991.
- (6) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫：応用ファジィシステム入門，オーム社，1989.
- (7) Janosi, Z. and Hanamoto, B.: The analytical determination of drawbar pull as a function of slip, for tracked vehicles, Proc. of 1st Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems, Torino, 1961.

(1991. 8. 22 受付)

## A STUDY ON FUZZY CONTROL OF BULLDOZER BLADE

Ryoichi FUKAGAWA, Tatsuro MURO and Takao SUZUKI

Construction works should be automated and rationalized in order to decrease the pain of workers and to increase the safety of works. In this paper, fuzzy control was applied to the action of bulldozer blade. This paper is a basic research for making up automated bulldozing system. The effects of some kinds of control conditions including dif-fuzification methods and the number of labels etc. were investigated with use of simulation anlysis and model tests. As the results, it was made clear that the correct choice of the control condition, especially in considering ground condition, improved bulldozing efficiency.