

# Fuzzy制御方式による自動列車運転装置の開発

札幌市交通局 高速電車部

藤原 純一 俵谷 忠浩

(株)日立製作所 水戸工場

関野 真一 栗原 四郎

清水 朝行

(株)日立製作所 システム開発研究所

安信 誠二

## 1. はじめに

自動列車運転装置(ATO: Automatic Train Operation system)は、マイクロコンピュータなどによって、出発・走行・停止の一連の列車運転制御を自動化するものである。すでに各地の地下鉄等でATOによる自動運転が実用化されているが、熟練運転士による手動運転と比較すると、融通性が少なく、より良い運転を行なおうとした時、その対応性に乏しい面があった。これは、従来の比例制御やPID制御を用いたATOでは、運転士が行なっているような状況判断や多様な目的に対する評価を組み込むことができず、単に予め定めた目標速度への追従のみを制御目標としていたためである。こうした問題を解決するための手法として、定性的な評価を数量化することによって人間の経験やノウハウをアルゴリズムに取り込むことができるFuzzy制御が提案されている。今回、このFuzzy制御方式の基本アルゴリズムを車所制御用マイコンに組み込んだATO装置を開発したので、その概要と、本方式の有効性を検討するために行なった評価試験について報告する。

## 2. Fuzzy制御方式によるATO

Fuzzy制御とは、人間の用いている定性的な表現を数量化して扱うFuzzy集合理論を制御に応用するもので、複数の制御目標に対する評価を人間の経験に基づく制御則によって協調させることができるという長がある。今回ATOに適用した方式は、ある制御によって生じる結果を予測し、その予測内容に対して評価を行なうもので、特に予見Fuzzy制御と呼んでいる。図1は本方式によるATOの論理演算部を機能ブロック図で表わしたものである。ATOの主要な機能である駅間走行制御と定位置停止制御の各々に対応した制御則に従って、制御結果の予測と評価を行ない最適ノッチを出力する。以下、本方式の具体的な内容について述べる。

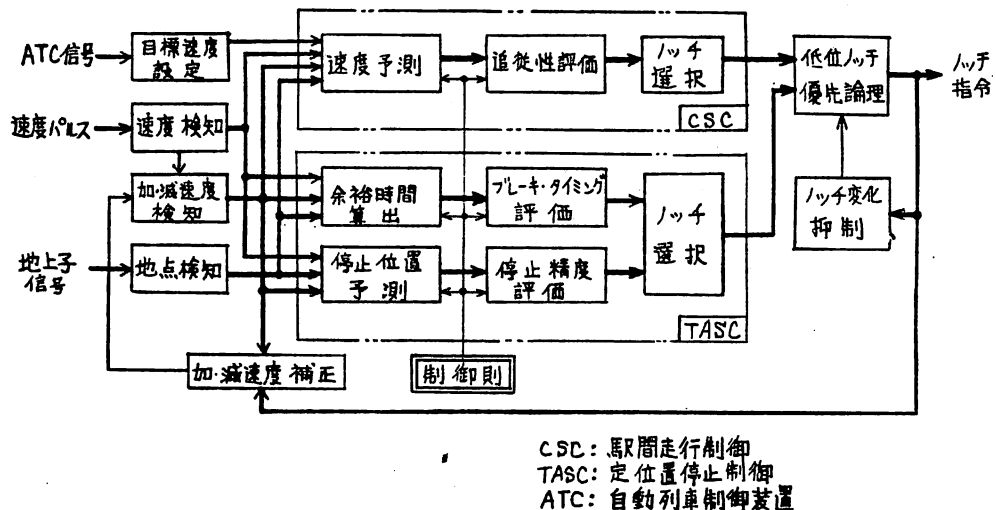


図1. Fuzzy制御方式ATOの機能ブロック図

## 2.1 駅間走行制御

駅を出発後、制限速度を守って走行する制御である。

表1は、ここで用いた制御則を示すもので、

①：現在のノッチのまま、目標速度に「うまく追従」できそうな時は、ノッチを変更しない。

②～⑧：あるノッチに変更して、目標速度に「正確に追従」できそうな時は、そのノッチに変更する。

という、人間の評価を表現している。制御則の評価を行なう手順は以下の通りである。

- (1) 制御則に指定されているノッチを出力した場合の一定時間( $T_p$ )後の列車速度を予測する。(図2)
- (2) 予測した速度と目標速度との速度偏差を求める。
- (3) 制御則に指定されている評価内容を表わすFuzzy評価関数により、求めた速度偏差の値に対応する評価値を算出する。ここでFuzzy評価関数は、図3に示すように、ある速度偏差に対して、例えば「うまく追従する。」という評価を満足する割合を数値として与えるものである。

こうして各制御則の評価値を求め、最も評価の高い制御則に指定されているノッチを駅間走行制御の最適ノッチとして出力する。

## 2.2 定位置停止制御

次駅の停止目標に精度よく列車を停止させる制御であり、停止精度を評価する停止制御と、駅間走行制御から停止制御に乗り移るタイミングを評価する移行制御とに分けられる。

### 2.2.1 移行制御

駅間走行中に第1地上子( $P_1$ )を検出すると移行制御を開始する。表2に示す制御則は、停止制御を開始するまでの時間余裕に応じて次のような判断を行なうことを表わしている。

- ①：余裕が十分大きい間は、目標速度への追従を続ける。
- ②：余裕がやや大きい間は、目標速度への追従を続ける。但し力行ノッチは4ノッチ以内に制限する。
- ③：余裕が中位の時は、力行ノッチをオフする。
- ④：余裕がやや小さくなら弱めのブレーキ(2ノッチ)をかける。
- ⑤：余裕が小さくなら、ブレーキを強め(4ノッチ)にして停止制御に乗り移る。

表1. 駅間走行制御の制御則

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
ノッチ	±0	P7	+4	+2	+1	-1	-2	-4
評価内容	うまく追従	正確に追従	正確に追従	正確に追従	正確に追従	正確に追従	正確に追従	正確に追従

注) ノッチの符号は 現在ノッチからの相対変化を表わす。  
(+:力行側, -:ブレーキ側)

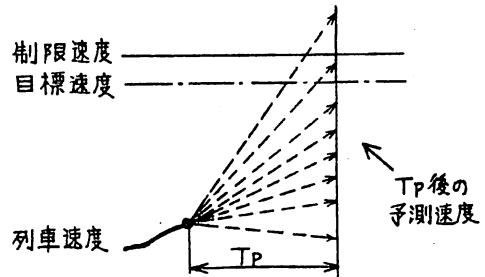


図2. 列車速度の予測

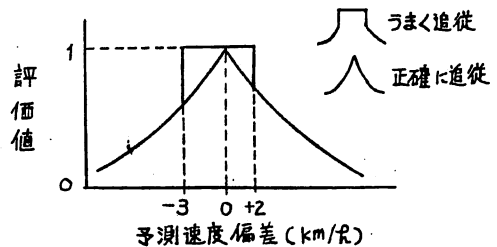


図3. 駅間走行制御のFuzzy評価関数

表2. 移行制御の制御則

No.	①	②	③	④	⑤
ノッチ	P7	P4	P.B0	B2	B4
評価内容	余裕大	余裕やや大	余裕中位	余裕やや小	余裕小

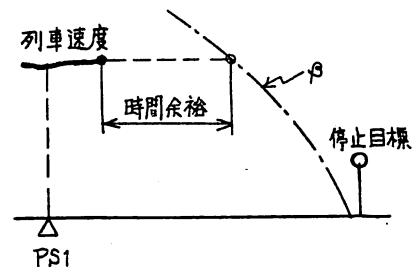


図4. 時間余裕の算出

余裕時間は、図4に示すように、一定減速度 $\beta$ の停止パターンを仮定し、現在の列車速度でこのパターンに到達するまでの時間として算出する。また、求めた余裕時間に対して適用する評価関数を図5に示す。列車の走行に従って制御則のから制御則⑥までの評価値が順次高くなるため、一定のタイミングでノッチがブレーキ側に変更されてゆきスムーズに停止制御に移行する。

### 2.2.2 停止制御

停止制御では、各ブレーキノッチに対応する停止位置を予測し、停止誤差の値を評価する。表3に示す停止制御の制御則は、次のような人間の評価を表現したものである。

- ①：現在のノッチのまま、**「うまく停止」**できその時は、ノッチを変更しない。
- ②～⑦：あるノッチに変更して、**「正確に停止」**できその時は、そのノッチに変更する。

ここで評価の対象となる停止誤差は、図6のように、その時点での列車速度、各ノッチによって得られる減速度、及び停止目標までの距離を用いて算出する。また、「うまく停止」、「正確に停止」という評価は図7に示すFUZZY評価関数を用いて行ない、各時点で最も高い評価値を得た制御則の指定ノッチが選択される。

### 2.3 加・減速度の補正

Fuzzy制御では、上述のように速度や停止位置の予測を行なうため、あるノッチ出力に対して得られる加速度・減速度の値を用いる。この値は列車の速度や荷重条件、路線条件、ブレーキの状態などによって複雑に変化するため、定数として扱おうと予測の誤差が増大する。そこで、ここでは、速度パルスの値を用いて現在出力中のノッチに対する車両の実際の加・減速度を算出し、ノッチ当りの加減速度を補正する方法を採った。

## 3. ATO制御プログラム

以上に述べたFUZZY制御のアルゴリズムを実現するため、制御プログラムを開発し、ATO装置の論理演算部に組み込んだ。図8に、今回開発したATO制御プログラムの概略処理フローを示す。ATO論理演算部は、車両制御用マイクロコンピュータを用いて構成されており、このプログラムを100ms周期で起動し、各時点でのノッチ指令を決定する。

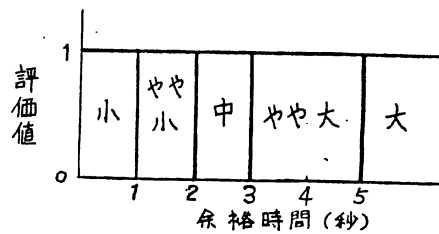


図5. 移行制御の評価関数

表3. 停止制御の制御則

No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ノッチ	±0	-3	-2	-1	+1	+2	+3
評価内容	うまく停止	正確に停止	正確に停止	正確に停止	正確に停止	正確に停止	正確に停止

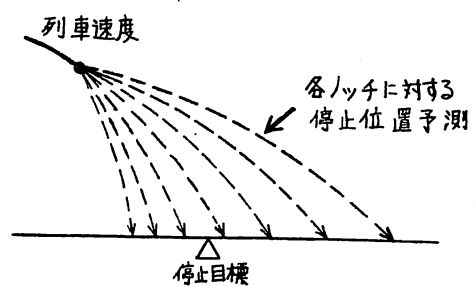


図6. 停止位置の予測

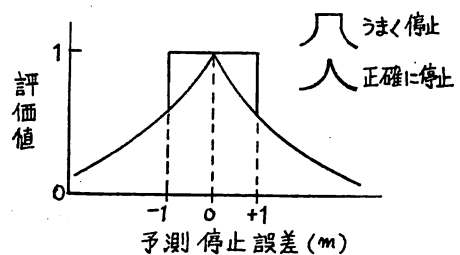


図7. 停止制御のFuzzy評価関数

#### 4. Fuzzy 制御方式ATOの特長

Fuzzy 制御をATO制御に適用することによる特長として次のような点が挙げられる。

- (1) 人間の多様な評価指標を直接評価する制御が実現できる。
- (2) 各時点での状況に基づいて制御結果を予測した上で制御指令を決定するため、外乱に対する適応性が高い。
- (3) 制御則の形式が、人間の判断の形式に適合しており、経験やノウハウを取り入れやすく変更も容易である。

特に、(1)(2)の特長を活かして、定位置停止制御における停止減速度を高くすることができる。従来のPID制御方式では、固定的な停止減速パターンに速度追従させるため、大きな制御余裕を与えておく必要があった。これに対してFuzzy 制御方式では、各時点で減速能力を補正した上で停止位置を直接評価するため、制御余裕を必要最小限にすることができ、停止制御の開始を遅らせて停止減速度を高くすることが可能となる。停止減速度を高めると、走行時分を短縮でき、また生じた時間余裕を利用して惰行を行えば省エネルギーになるという利点がある。

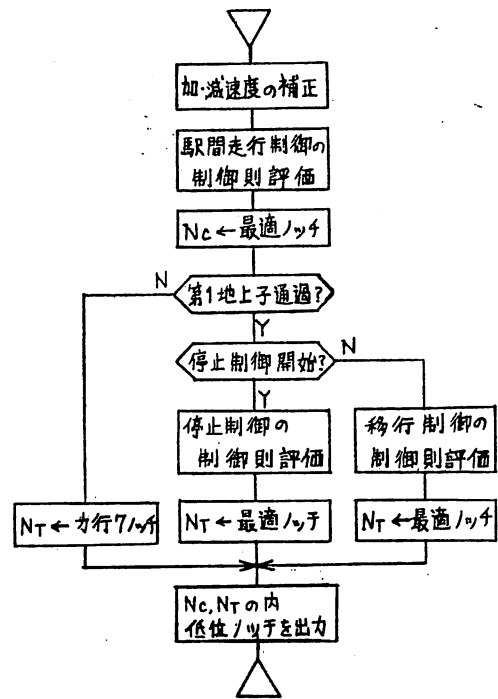


図8. ATO 制御プログラムの処理フロー

#### 5. シミュレーションによる評価

前項に述べたFuzzy 制御方式の特長を確認し、実用性を検討するため、開発したATO装置を走行シミュレータに接続して評価試験を行った。

シミュレータに設定した路線データは、札幌市地下鉄東西線の路線条件（琴似 - 新札幌16区間、片道17.305 km）を、また車両データは、同線を走行している6両編成のゴムタイヤ車両の条件（表4参照）を用いた。さらに、停止減速度については、従来のPID制御方式では2.8 km/R/sであったのに対し、手動運転とほぼ同等な3.7 km/R/sとした。

シミュレーションは(a) Fuzzy 制御方式（停止減速度3.7 km/R/s）による走行、(b) PID 制御方式（停止減速度2.8 km/R/s）による走行、(c) Fuzzy 制御方式で、一定速度到達後惰行を行なう走行、の3ケースについて実行した。この結果、Fuzzy 制御を適用して高減速度化を行なうことにより、従来のPID制御による通常走行に比べて各駅間で平均3.5秒の走行時分短縮が可能であることがわかった。また、惰行を行なって走行時分を従来のPID制御と同等にした場合は、消費電力が約11%減少するという結果が得られた。図9(a)~(c)は上記3ケースのシミュレーションによって得られた走行曲線の1例である。Fuzzy 制御方式はPID制御方式に比べてノッチの変更が少なく、人間の運転士に近い運転を行なっている。

表4. 車両パラメータ

列車編成	3M3T
列車長	108.0 m
列車重量	144.5 t
荷重	空車
ノッチ段数	力行:7, ブレーキ:7
定格最大加速度	3.5 km/R/s
定格最大減速度	4.0 km/R/s

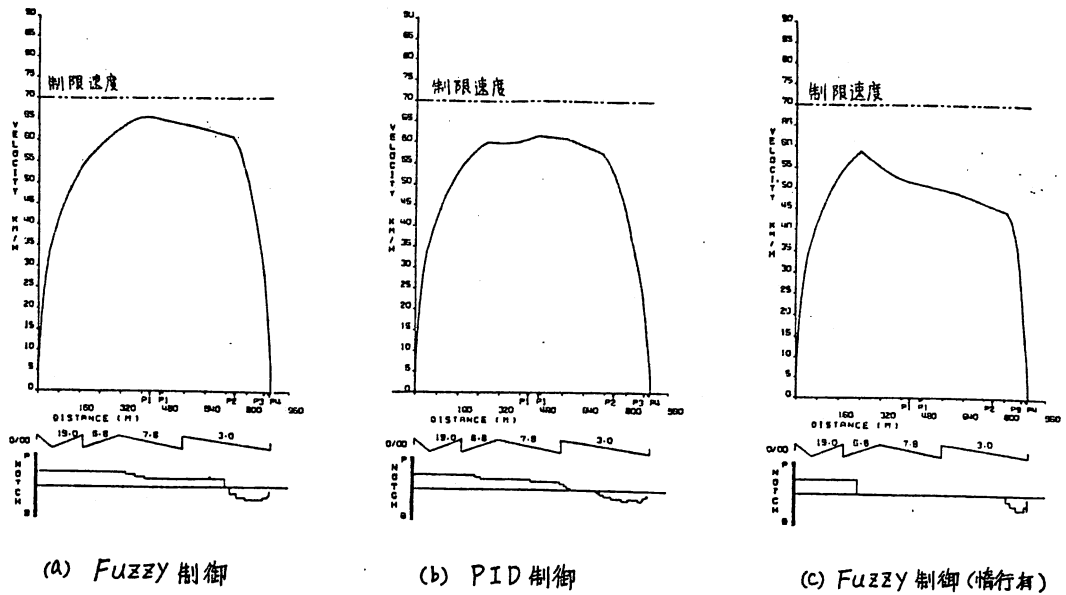


図9. シミュレーションによる走行曲線

## 6. 現車走行試験

シミュレーションの結果をひきまゝ、58年7月、札幌市地下鉄東西線において現車走行試験を実施した。設定条件および試験内容は、先のシミュレーションと同じである。ただし、プログラムの関係上、惰行を行なったのは往復32区間中13区間である。この13区間における各ケースの試験結果の比較を表5に示す。走行時分の短縮は区間平均約4.1秒、消費電力の減少は約13.8%という結果が得られた。また、走行特性についてもシミュレーション結果とほぼ一致しており、ノッチ変化が少なく手動運転に近い運転を行なうことを確認した。

表5. 現車走行試験結果

ケース	(a)	(b)	(c)
制御方式	Fuzzy制御	PID制御	Fuzzy制御
走行モード	N走行	N走行	N走行(惰行有)
停止減速度	3.7 km/R/s	2.8 km/R/s	3.7 km/R/s
走行時分	16' 18" (-58")	17' 16" (±0")	17' 07" (+9")
消費電力	45.6 kWh (104.8%)	43.5 kWh (100%)	37.5 kWh (86.2%)

## 7. おわりに

本報告では、Fuzzy制御を適用した新方式の自動列車運転装置について、その制御方式の概要を述べた。本方式の特長を活かして、停止減速度を上げることが可能となり、走行時分の短縮による遅延回復能力の向上と、通常走行時の省電力化が実現できる。開発したATO装置を用いた試験により、従来のPID制御方式に比べて走行時分は区間当たり平均約4.1秒短縮でき、またこの時間を惰行に利用すれば消費電力を約13.8%減少できるという結果が得られた。さらに走行特性についても、ノッチの変更が少なく、人間の運転士に近い運転を実現できることを確認した。

- 【参考文献】 (1) 菅野: あいまい集合と論理の制御への応用, 計測と制御, 18-2, 150/160, (1979)  
 (2) 安信他: Fuzzy理論による列車自動運転制御, 第20回SICE学術講演会予稿集, 467/468 (1981)  
 (3) 安信他: 予見Fuzzy制御方式の開発と列車自動運転への適用, 第20回鉄道サイバネ, (1983)