

S1-1-3. ファジィ推論を用いた鉄道車両の滑走防止制御における
多段ファジィ推論の制御性能評価について

○ 浅野 哲也 (筑波大学) [機] 野中 俊昭 (小田急電鉄) 遠藤 靖典 (筑波大学)
中澤 伸一 (鉄道総合技術研究所) 吉川 広 (三菱電機)

Evaluation of Control Performance of Multi-Stage Fuzzy Reasoning in
Anti-Lock Braking System for Railways Using Fuzzy Reasoning

Tetsuya ASANOME (Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba)
Toshiaki NONAKA, Member (Odakyu Electric Railway Corporation)
Yasunori ENDO (Faculty of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba)
Shinichi NAKAZAWA (Railway Technical Research Institute)
Hiroshi YOSHIKAWA (Mitsubishi Electric Corporation)

Recently, anti-lock braking system (ABS) for railways is put in practical use. One of the ABSs for railways is ABS using multi-stage fuzzy reasoning. In this paper, we propose new types of ABS using one-stage of fuzzy reasoning, and compare the control performances of the proposed ABSs with the present ABSs in respect of braking distance, wheel damages, and the number of times of action of valves through the numerical simulation. Moreover, we show the effect for the prevention of hunting.

キーワード：多段ファジィ推論, ABS, 接線力係数, ブレーキ距離

Keywords: Multi-stage fuzzy reasoning, ABS, Coefficient of traction, Braking distance

1. はじめに

鉄道車両において実用化されている機械ブレーキ用の滑走防止制御 (ABS) の一つに、ファジィ推論を用いた ABS (ファジィ ABS) があり、その有効性は数値シミュレーションや実車試験等で確認されている (例えば [1])。一方、ファジィ ABS については、その構成法・演算の選び方等で検討の余地があり [1]、その中の一つに多段ファジィ推論の制御性能評価が挙げられる。

多段ファジィ推論とは、1 段のファジィ推論からの出力を次のファジィ推論の入力とし、1 段のファジィ推論を何段にも重ね合わせることで推論結果を得るもので、そのような構成上、1 段のみのファジィ推論よりも「曖昧さの増幅」が生じることがわかっており、そのために、1 段のファジィ推論に比べ実用に供されることがあまりない。しかし、多段ファジィ推論を用いたファジィ ABS では、ブレーキ時のハンチング (短時間で給排気を繰り返す現象) 防止に効果があることが経験的にわかっている。

そこで本研究では、数値シミュレーションにより、ブレーキ距離等を定量評価するとともに、制御状態グラフの比較によりハンチング防止に対する効果を確かめることで、ABS における多段ファジィ推論の制御性能を評価する。

2. ファジィ ABS の現状仕様

ファジィ ABS の現状仕様について、以下に制御手順を示す (図 1)。なお、詳細は文献 [1] を参照されたい。

制御手順 1: 各軸速度算出

各車軸の TG より出力される正弦波より各軸速度を算出する (①~④)。

制御手順 2: 基準速度算出

各軸速度から基準速度を算出する (⑤)。

制御手順 3: 速度差、減速度算出

各軸速度と基準速度から、各軸の速度差と減速度を算出する (⑥)。

制御手順 4: 速度差、減速度グレード算出

各軸の速度差と減速度のグレードを算出する (⑦)。

制御手順 5: 滑走度合算出 (ファジィ推論 1 段階)

「速度差 and 減速度 $\Rightarrow$ 滑走度合」より滑走度合を算出する (⑧)。

制御手順 6: AV, RV の動作決定 (ファジィ推論 2 段階)

1. 制御手順 5 で算出された滑走度合を前件部に入力する (図 2)。
2. 「滑走度合 $\Rightarrow$ AV, RV の ON/OFF 時間」より、AV, RV の ON/OFF 時間を算出する。
3. AV, RV の ON/OFF 時間から ON/OFF 動作を決定する (表 1)。

制御手順 7: 制御開始速度差

一定の速度差が生じるまで弁を動作させないよう、制御開始速度差を設定する (⑩)。

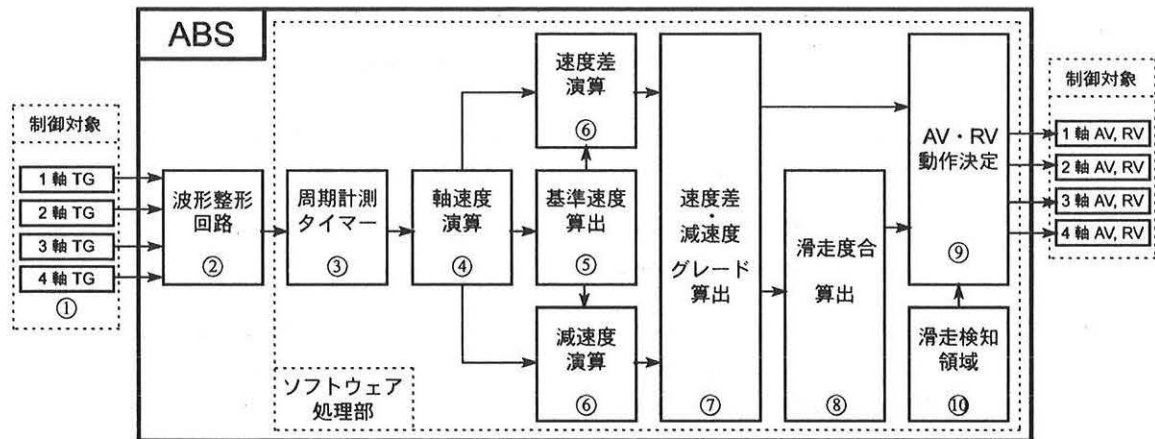


図 1: 多段ファジィ推論を用いた ABS ブロック図

表 1: AV, RV の ON/OFF 動作決定方法後半部

入力				出力	
前回	ON 時間	OFF 時間	カウンタ	今回	カウンタ
-	-	0	-	ON	0
-	0	-	-	OFF	0
ON	-	-	> 0	ON	MAX(MIN(ON 時間, カウンタ)- 演算周期, 0)
ON	-	-	= 0	OFF	OFF 時間
OFF	-	-	> 0	OFF	MAX(MIN(OFF 時間, カウンタ)- 演算周期, 0)
OFF	-	-	= 0	ON	ON 時間

但し、前回の '-' は任意の ON/OFF, 残りの '-' は任意の正值とする。

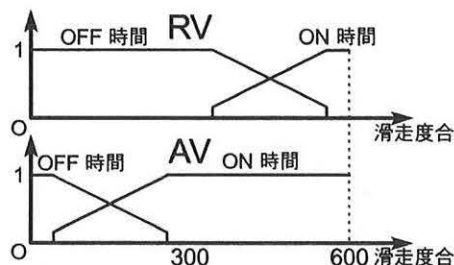


図 2: AV, RV の ON/OFF 動作決定方法前半部

3. 現状仕様の課題と改善方法

〈3.1〉 現状仕様の課題

現状仕様における課題を以下に述べる。

課題 1: AV, RV の ON/OFF 時間の有効性

現状仕様では、滑走度合から ON/OFF 時間を算出した後、AV, RV の ON/OFF 動作を決定しているが、ON/OFF 時間を算出せずに、ON/OFF 動作を決定する方法が検討されていない。

課題 2: 多段ファジィ推論の有効性

現状仕様では、ハンチングを軽減させるために多段ファジィ推論を採用しているが、弁の動作回数、ブレーキ距離等における検証が十分になされていない。

以上の課題 1,2 について、以下で述べる新仕様 1, 2 を提案する。

〈3.2〉 新仕様 1

「滑走度合 ⇒ AV, RV の動作決定」において、ファジィ推論を用いずに、条件分岐により AV, RV の動作を決定する。

制御手順 1~5, 7:

現状仕様と同じ (①~⑧, ⑩)。

制御手順 6: AV, RV の ON/OFF 動作決定 (⑨)

以下の式より、AV, RV の動作を決定する。

$$(AV, RV) = \begin{cases} (OFF, OFF); & \begin{cases} 0 \leq S \leq V_A - D, \\ dS \leq 0 \text{ \& } |S - V_A| < D \end{cases} \\ (ON, OFF); & \begin{cases} dS > 0 \text{ \& } |S - V_A| < D, \\ V_A + D \leq S \leq V_R - D, \\ dS \leq 0 \text{ \& } |S - V_R| < D \end{cases} \\ (ON, ON); & \begin{cases} dS > 0 \text{ \& } |S - V_R| < D, \\ V_R + D \leq S \leq 600 \end{cases} \end{cases}$$

但し、AV, RV の閾値をそれぞれ V_A, V_R 、閾値からの一定距離を D 、滑走度合を S 、滑走度合差分 (= 滑走度合の今回演算値 - 前回演算値) を dS 、AND を '&', OR を '|' と表記する。

〈3.3〉 新仕様 2

現状仕様の滑走度合の算出 (⑧) を省き、「速度差 and 減速度 ⇒ AV, RV の ON/OFF 動作 (⑦→⑨)」とすることで、全体で 1 段のファジィ推論を構成する。

制御手順 1~4, 6(現状仕様では 7 に相当):

現状仕様と同じ (①~⑦, ⑩)。

表 2: 制御規則 (新仕様 2)

減速度 速度差	Bnb	Bnm	Bns	Bzo	Bps	Bpm	Bpb
Vzo	3	3	3/2*	2	2	2	2
Vps	3	3	3/2*	2	2	2	1
Vpm	3	3/2*	2	2	2	2/1*	1
Vpb	3/2*	2	2	2	2	1	1

モード: 3(給気), 2(保ち), 1(排気)

*: 高速域 ($\geq 57.0\text{km/h}$) / 中・低速域 ($< 57.0\text{km/h}$)

制御手順 5: AV, RV の ON/OFF 動作決定 (⑨)

1. ファジィ演算 and に代数和を用いる。
2. 後件部がシングルトン (ON/OFF 動作) であるため、後件部では、各モード (表 2 参照) のグレードが代数和の総和として算出される。
3. 最後に、グレードが最大となるモードを採択し、ON/OFF 動作を決定する。

4. 数値シミュレーション

(4.1) 方法および結果

現状仕様と新仕様 1, 2 で数値シミュレーションを行った条件について、制御条件を表 3 に示す。表 3 は実際の在来線車両や実験値に則したものとされている。

また、図 3 に示す接線力係数モデルは、これまでの実車試験や実験から定性的にわかっている事柄について考慮している。更に、車輪動揺による輪重変動、接触面の粗さ、汚れ等を考慮して、ノイズも加えてある。

図 3 の接線力係数モデルに対する数値シミュレーション結果を図 6 に、また、ブレーキ距離、車輪損傷評価量 [2]、ならびに AV, RV の動作回数 (全軸の合計) の比較を表 4 に示す。ここで、図 6 上部のパルス波形は、上から順に 4 軸 RV, 4 軸 AV, ..., 1 軸 AV の ON/OFF を示している。なお、接線力係数モデルを他に 3 つ用意し、それぞれに対して同様の数値シミュレーションを行っており、ほぼ同様の結果が得られている。詳細は紙面の都合により割愛する。

(4.2) 考察

現状仕様と比べて、新仕様 1 では約 2.5~3m (平均で 2.7m) ブレーキ距離が短くなった。一方、車輪損傷評価量については、約 31~90kN・m (平均で 48kN・m) 増加した。これらは、設計思想の違いが原因と考えられる。現状仕様では、固着防止を徹底するために一つの滑走時間を短くすることを優先しているのに対し、新仕様 1 では、 $(V_A, V_R) = (272, 410)$ とすることで滑走を許容している。この結果、新仕様 1 ではブレーキ距離が短縮された一方で、車輪損傷評価量が増加したものとと思われる。また、図 6 から、新仕様 1 ではハンチングが多発しており、この点では、現状仕様における多段ファジィ推論の有効性が確認できる。

一方、新仕様 2 ではブレーキ距離に関しては、大差ないが、車輪損傷評価量については、約 52~172kN・m (平均で 126kN・m) 減少している。この理由として考えられるのは、排気中に保ちを挟むか否か、ということが挙げられる。つまり、モデル 1 を例にして考えると、ブレーキ開始約 2

表 3: ABS の制御条件

項目	値	単位
初速度	100	km/h
演算周期	0.02	s
輪重	4000	kg
制輪子摩擦力/軸	11000	N
制輪子摩擦係数	一定	
車輪直径	0.86	m
慣性モーメント/軸	60	kg・m ²
BC 圧の無駄時間	0.05	s
BC 圧の時定数	0.8	s
制御軸数	4 軸/両	
車両数	1 両	

秒後に接線力係数が低下したために、大きな滑走が生じている。このとき、現状仕様では、排気中に一旦保ちに移行し、滑走の改善が見られないため、再び排気を行っているのがわかる。一方、新仕様 2 では、保ちに移行することなく排気し続け、現状仕様よりも早く滑走が改善している。このような事態が続いたために、車輪損傷評価量に差が出たと思われる。また、図 6 から、新仕様 2 でもハンチングが発生しており、新仕様 1 の場合と同じく、現状仕様における多段ファジィ推論の有効性が確認できる。

従って、「ブレーキ距離の短縮」には新仕様 1 が、「車輪損傷の低減」には新仕様 2 が、また、「ハンチングの防止」には、多段ファジィ推論を用いた現状仕様が有効である。これは、2004 年 2 月に小田急電鉄 3000 形を用いて行った実車試験による出力チャート例 (図 4,5) から確認できる。また、図 4,5 の出力チャートは、上から、AV, RV の動作、各軸の速度、滑走度合、BC 圧を表している。

5. おわりに

本研究では現状のファジィ ABS に対して、多段ファジィ推論の 2 段階にあたる AV, RV の ON/OFF 動作決定方法を考察した。その結果、ブレーキ距離の短縮や車輪損傷評価量の低減で現状の ABS よりも有効な新仕様を構成することができた。一方、ハンチングの防止という観点からは、現状仕様で用いる多段ファジィ推論の有効性が確認された。

今後は、多段ファジィ推論の持つ曖昧さが如何にして、ハンチングの防止に効果を上げているかを理論的に考察していく。

参考文献

- [1] 野中俊昭, 遠藤靖典, 吉川広: “ファジィ推論を用いた鉄道車両に対する滑走防止制御の制御性能向上”, 日本知能情報ファジィ学会論文誌 Vol.16, No.5 (印刷中)。
- [2] 野中俊昭, 大山忠夫, 遠藤靖典, 吉川広: “編成としての鉄道車両における滑走防止制御 (第 1 報)”, 日本機械学会論文集 C 編 (投稿中)。

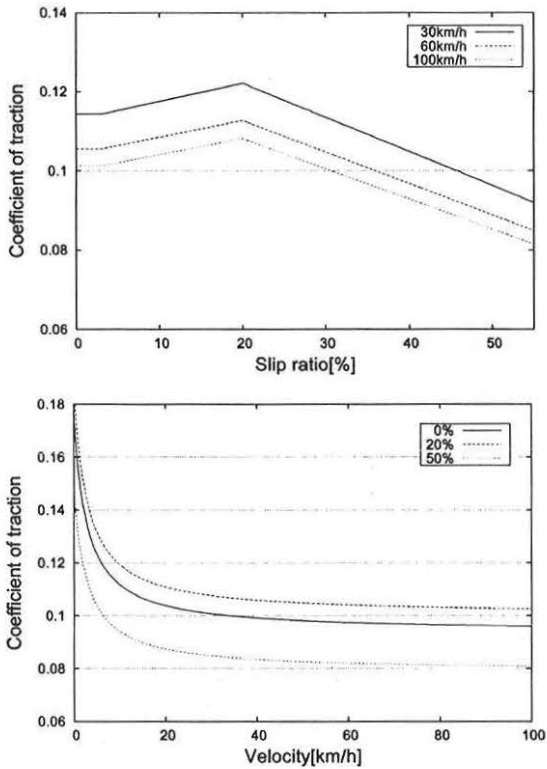


図 3: 接線力係数モデル

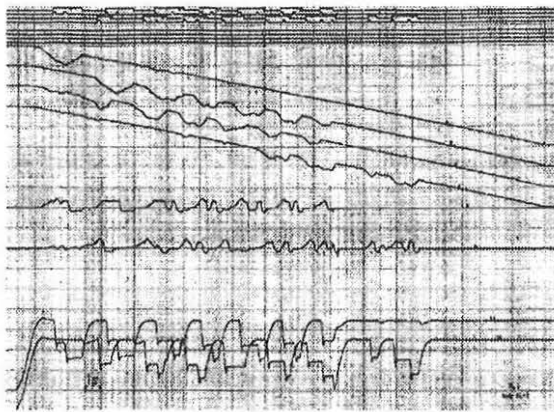


図 4: 実車試験における出力チャート (現状仕様)

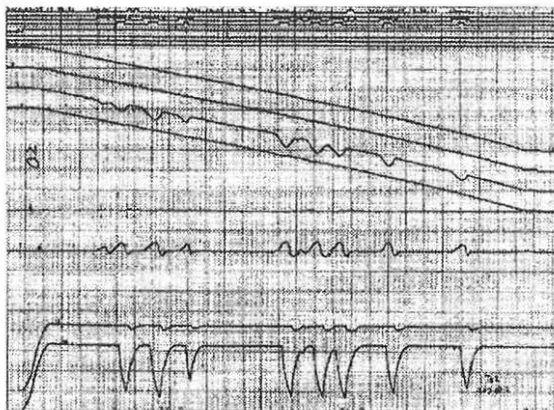


図 5: 実車試験における出力チャート (新仕様 1)

表 4: 数値シミュレーションによる仕様の比較

項目	現状仕様	新仕様 1	新仕様 2
ブレーキ距離 [m]	326.37	323.77	328.03
車輪損傷評価量 [kN・m]	482.69	572.55	431.18
AV の動作回数 (回)	34	44	36
RV の動作回数 (回)	32	24	30

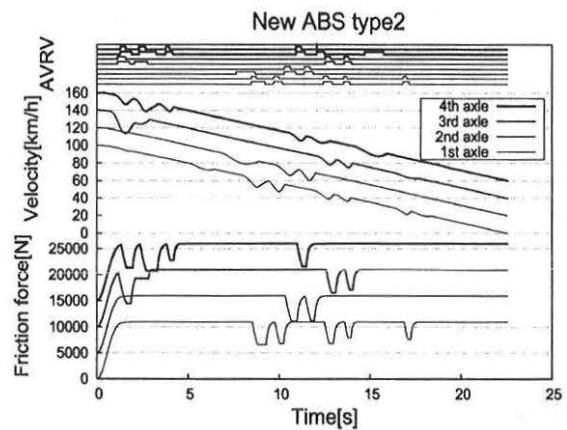
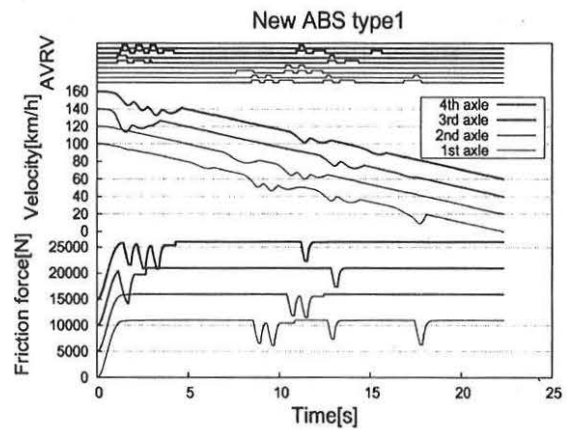
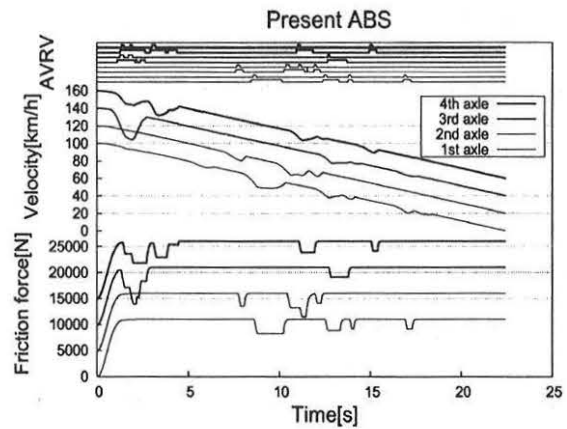


図 6: 各仕様における制御状態グラフ