

鉄道車両ブレーキの課題と開発

Development and Subject of Air Brake for Railway

三原製作所 岡田鉄之助*¹ 勢登利孝*²
 白木原民也*³ 大嶽宏之*³
 技術本部 楠瀬正*⁴

最近、鉄道の高速度化や経済性追求の要求が高度化し、鉄道業界では活発な技術開発が行われている。当社の鉄道車両ブレーキ事業への取組みは、我が国の鉄道の空気ブレーキ化と共にあり、その間、多くの開発に取組み、実用化を図ってきている。このため、当社の取組み方と、今後の課題及び最近の開発について述べ、最近の開発事例として、電空変換システムにおけるファジイ制御方式の開発と油圧ブレーキシステムの開発を紹介する。前者で開発した弁は既に営業車に適用され、順調に使用されている。後者の油圧ブレーキはブレーキシステム全体を一括して開発し、大幅な軽量化を達成した。現在、現車試験が行われており、今後の進展が期待されている。

Recently, the requirements of sophisticated economy and high speed running of railways are increasing intensively. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. has a seventy-years history of supplying brakes to railways and during this period has conducted much technical development. This report explains the latest subject and examples of two developments to railway brakes by MHI. One is the development of an electro-pneumatic converter system with fuzzy logic control. The developed electro-pneumatic valves are already applied to many electric cars, and are successfully in operating service. The other is a development of whole oil hydraulic brake system, cut of the equipment weight has been realized drastically. Now, the oil hydraulic brake system is undergoing field testing, and is expected future extension.

1. ま え が き

ブレーキは安全のかなめであり、保安部品であるので、高い信頼性と実績が求められる。鉄道は安全、頑丈さを重視してきたので、車両寿命も15~30年と長く、新しい開発品を積極的に採用することには慎重な面があるが、当社はユーザとの密接な連携で改良、改善を行い、要望に沿った新製品を提供するとともに、客先での現車試験による長期の評価を経て、実用化している。近年、電子技術を大幅に取入れた電気指令方式ブレーキシステムの開発を三菱電機(株)と共同で行い、実用化された結果、運転操作や保守が簡易となったので、この方式が大幅に普及してきている。

2. ブレーキ取組の歴史

我が国の鉄道は、1872年(明治5年)の開業以来、独自の発達を遂げてきた。その中で、当社の鉄道車両へのかかわりは1910年(明治43年)の鉄道院への客車納入を始めとするが、一時中断の後、1919年(大正8年)以降、タンク車、機関車を多数製造するようになった。当時のブレーキは真空ブレーキや人力ブレーキであって、大きなブレーキ力が得られない、部品が大きく能率が悪いなどの欠点があった。このため当時の鉄道省が慎重に調査・試験を行い、1924年(大正13年)に米国ウエスチングハウスエアーブレーキ社(以下ウ社と記す)の空気ブレーキ方式の採用を国策として決定し、順次取替えが行われることになった。この国策に沿うため、当時の三菱は、神戸の日本エヤーブレーキ社(現ナブコ社)と共に、ウ社と技術提携し、空気ブレーキの国産化に努め、多くのブレーキ部品を製作・納入した。1928年(昭和3年)には、旅客車用に我が国で開発した方式も採用され、1931年(昭和6年)には国鉄の全列車が空気ブレーキとなった。以来、当社は鉄道車両用ブレーキの生産を行ってきた。特に戦後は鉄道の輸送力増強、車両近代化のために高速化、高加速・

高減速が目標となり、これに対してブレーキは、空走時間の短縮、制輪子の速度・摩擦特性に合わせた制御法などの開発でブレーキ距離の短縮が行われ、さらに制御の容易かつ正確であることの課題へと進展してきている。このため当社は、ブレーキの伝達を速くするための電磁自動ブレーキ、電磁直通ブレーキなど、電磁弁を利用する方式や、指令のハンドル角度に応じた圧力を発生させる自動重り(セルフラップ)機構の導入・開発や、きめ細かな圧力制御の行える三圧力式制御弁、荷重の変動に応じてブレーキ力を加減する応荷重装置などの開発・実用化を行ってきた。また、装置を構成する部品には合成ゴムを使用した膜板や弁の開発と実用化を行い、装置のユニット化を進め、性能向上、寿命延長、軽量化に努めてきた。

これからのブレーキは、鉄道の快適性、高速性、安全性、経済性を支える技術が求められており、このためには一層の高応答、高性能、信頼性向上、小型・軽量化、低価格化が望まれている。

次にこれらに関する最近の開発事例の一部を紹介する。

3. ファジイ制御式電空変換システムの開発

上述のように、最近では電気指令方式のブレーキシステムが主流であるが、そのブレーキ制御の中心は、電気指令を空気圧に変換する電空変換弁で、当社が開発したソレノイドを用いたアナログ式が採用されてきた。これは、入出力特性が良く、圧力を連続・無段階に制御できるが、ソレノイド部の重いのが難であった。このため、抜本的な小型・軽量化を目的に、小型電磁弁を用いて、オン・オフで行うシステムの開発に取り組んだ。

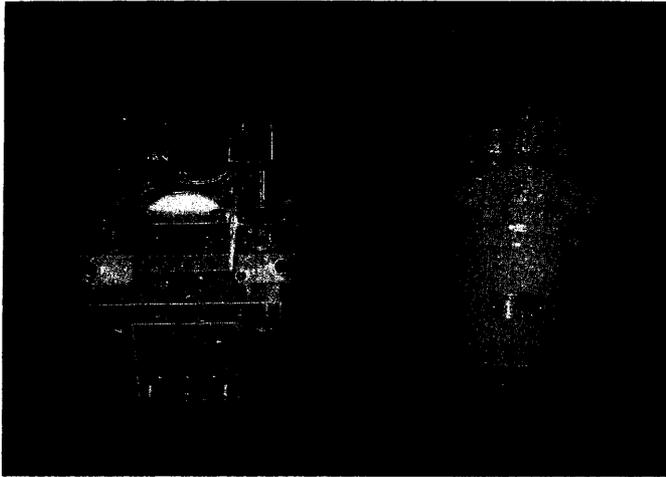
電磁弁をオン・オフさせて、ある容積の圧力(以後AC圧力と呼ぶ)制御⁽¹⁾を行うことは、目新しいことではないが、課題は、電磁弁の動作回数をいかに少なくして寿命を延ばすかである。このため、オン・オフ制御における電磁弁の最適な動作時間をファジイ推論法⁽²⁾を適用して算出することにより、1回のブレーキ操

*1一般機械設計部制御装置設計課長

*3一般機械設計部制御装置設計課

*2一般機械設計部制御装置設計課主務

*4長崎研究所内燃機・油機研究推進室主務



<開発品> 12.0 kg 203×204×263 mm (中継弁を含む)	<従来品> 12.5 kg 133×137×211 mm
---	------------------------------------

図1 電空変換弁 開発品オン・オフ型及び従来品アナログ型の電空変換弁を示す。
Electro-pneumatic converter valves

作当たりの動作回数を軽減することが可能となった。

3.1 電空変換弁とファジィ制御及びコントローラ

開発したオン・オフ型及び従来品のアナログ式ソレノイド型電空変換弁を図1に示す。

オン・オフ型は2個の電磁弁と圧力センサで構成した。電磁弁は小型とするために、ツインモールド型コイルとし、当社三原製作所で内製した。また、圧力センサは当社高砂研究所での開発を基に製作している。

圧力制御の動的挙動は供給の場合について示すと図2(a)のようになる。AC圧力が制御領域(±0.3 kgf/cm²G)になるまで供給電磁弁(以下、AVと略す)は励磁される。このAC圧力は、圧力センサによってA/D変換モジュールを介してコントローラにフィードバックされる。そして、その圧力が制御領域に入ると、設定圧力とAC圧力から圧力偏差及び1サンプリング間(10ms)の圧力偏差の変化分を計算する。

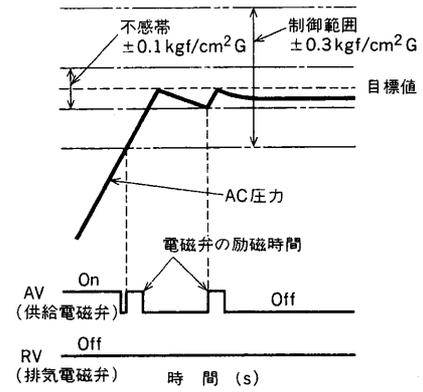
この二つをファジィ変数とし、得られる最適な励磁時間をAVに励磁し、AC圧力が不感帯領域(±0.1 kgf/cm²G)に入るとAVを消磁する。圧縮空気特性上、消磁してから圧力は少し低下する。したがって、AC圧力が再び制御領域に入ると、再度AVを励磁することにより目標設定圧力に近づける。この動作を繰り返すことによりAC圧力を制御する。

ファジィ推論に必要な各パラメータを得るためには、圧縮空気の充てん及び排出に伴う圧力の動的挙動を数式で規定することが必要であり、音速域と亜音速域に分けてシミュレーションを行った。

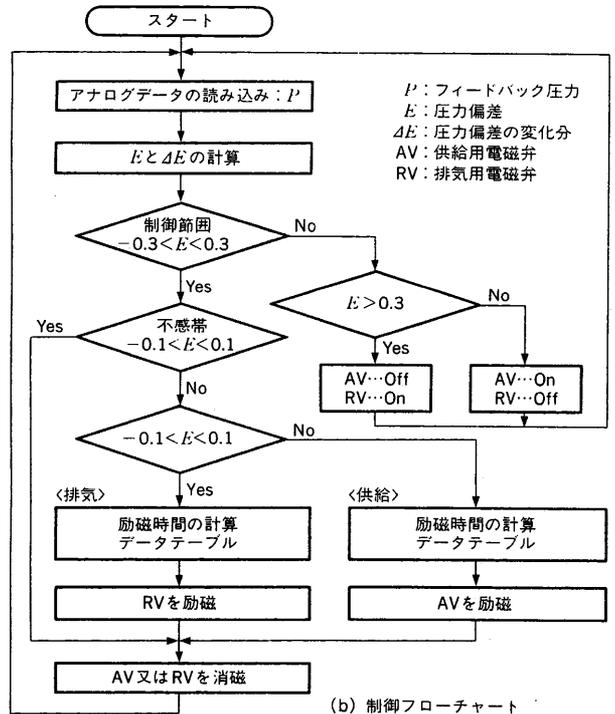
目標圧力が変化した場合、電磁弁の励磁時間を都度計算すると演算処理に時間がかかり負担も多くなるので、ロバスト性を持たせるため、目標圧力が変化しても微小時間Δt経過後の圧力差ΔPが同じになるように最小自乗法による近似を行った。

また、励磁時間の算出には、電磁弁の供給、排気特性及び最低動作励磁時間が必要であるが、これらは実測データを用いた。

電磁弁の励磁時間を決定していくためのファジィ推論としては、プロセスの定性的知識を考慮に入れながら適切と思われる制御出力を求めた。例えば、圧力偏差がゼロでその変化率が正で大きいときは、電磁弁励磁時間を少し減らせばAC圧力が設定値から大



(a) 圧力制御の動的挙動 (供給の場合)



(b) 制御フローチャート

図2 圧力制御の方法 圧力制御における圧縮空気の動的挙動と制御フローチャートについて示す。
Method of pressure control

きく遠ざかるのを阻止できると推定する。このような推定をルールとして35個規定した。これらのルールから推論計算を行い、最終的に励磁時間を求めた。

コントローラの中のメモリ部にファジィ推論により求めた励磁時間をテーブルデータとして記憶させ、指令に対して最適な電磁弁励磁を行わせる。主なフローは図2(b)に示す。

3.2 試験結果

ステップ入力に対するAC圧力の整定状況と電磁弁の動作状況を調べた結果の一例を図3(a)に示す。電磁弁の励磁時間、AC圧力はシミュレーションどおり追従し、電磁弁動作回数5回以内で安定している。参考までに、単なるオン・オフ動作で圧力を制御するものの一例を図3(b)に示す。この場合、圧力が安定するまでに100回程度の動作が認められる。したがって、ファジィ推論を適用した方法は、電磁弁の動作回数の低減に有効であることが確認された。

なお、この開発による電空変換弁は、オン・オフ型中継弁として既に営業車などに数多く適用されるようになっており、順調に使用されている。

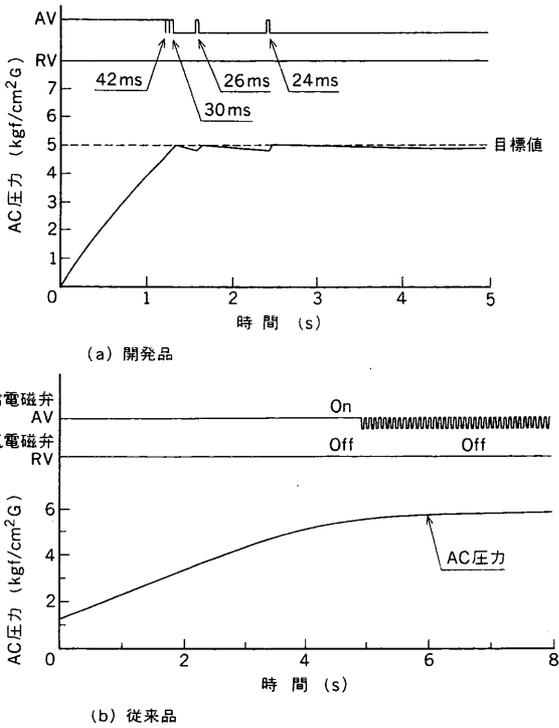


図3 オン・オフ型電空変換弁の過渡特性 開発品と従来品のオン・オフ型電空変換弁のステップ入力に対するAC圧力と電磁弁の挙動を示す。
Transient response of On-Off control

4. 油圧ブレーキの開発

鉄道車両のブレーキは、従来、空気ブレーキが主であり、ブレーキ力の制御は空気で行われ、空油変換方式で油圧を利用するものもあるが、油圧は制輪子を押しつけるアクチュエータの部分のみに使われていたに過ぎなかった。これは鉄道車両の運用上、各車両が連結して使われるので、規制上貫通ブレーキの要求によるものであった。しかし、近年の車両の高速化に対応し、ブレーキシステムの高応答性及び軽量・小型化が不可欠となってきたので、空気に比べ格段にエネルギー密度が高く、高応答性及び軽量・小型化が得られる油圧ブレーキシステムの開発に取り組んだ。

4.1 油圧制御弁

ブレーキは摩擦材を回転している車輪又はディスクに押し当てて、摩擦の力でブレーキ作用を行うが、滑り率を適正範囲に保ち、最大ブレーキ力を得るためにはブレーキ力の高応答化及びきめの細かい制御が不可欠である。鉄道車両は鉄輪走行のため、その適正滑り率の範囲が狭く、かつ滑り率が大きくなると車輪の異常摩擦が生じやすく、この意味でゴムタイヤで走行する自動車などに較べて厳しいと言える。このブレーキのかなめは制御弁である。

自動車及び航空機においては既に油圧ブレーキが使用されているが、その制御弁は自動車においてはポペットタイプのOn-Off弁であり、航空機においてはスプールタイプの圧力制御弁が主流である。鉄道車両においては運用上、無電源時の長時間のブレーキ力の保持、及び油圧ポンプ休止時の数回以上のブレーキ回数の確保が要求され、このため、制御弁として漏れの少ないことが不可欠の条件となってくる。また車両の高速化に対応し、きめの細かい制御も不可欠である。これらのことから、ポペットタイプでかつリニア制御が可能な下記の制御弁を開発することとした。

図4に製作した制御弁の断面を示す。

(1) 主弁はポペットとし、これを位置制御することにより、漏れ

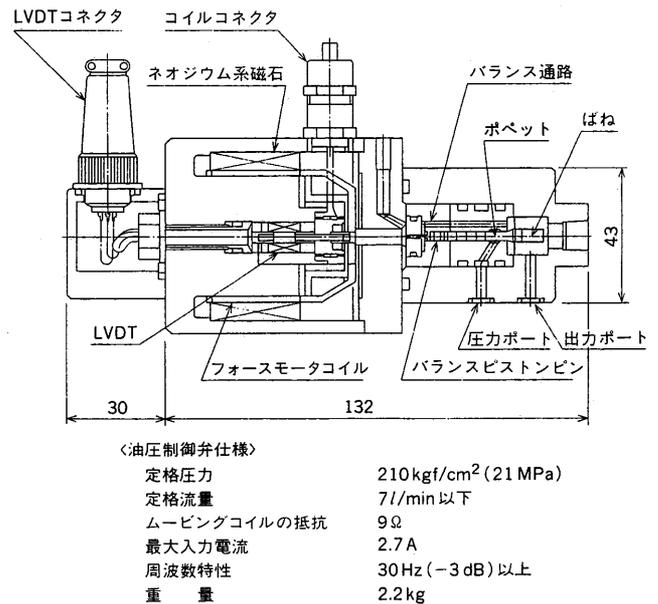


図4 油圧制御弁の断面図 ポペット弁部にバランスピストンを有することで開発した油圧制御弁を示す。
Cross section of oil hydraulic control valve

が極小でかつリニア制御を可能とした。

- (2) ポペット駆動部はフォースモータとし、ムービングコイルとネオジウム磁石を採用して高応答化を図った。
- (3) 負荷圧がポペットに作用しないバランス構造とし、精度アップ及び駆動力低減を図った。小型とするために各部の寸法は限界を狙って設計し、当社三原製作所で内製した。

4.2 油圧ブレーキ制御装置と制御概要

油圧ブレーキ制御装置は、基本的な機能（常用、非常、保安の各ブレーキ）を果たす弁をそれぞれ配し、台車ごとに車体装架ユニットとしてまとめた。常用・非常のブレーキには、上記の油圧制御弁をそれぞれ対にして用い、供給・緩めの作用を行わせた。制御ブロック図を図5(a)に、油圧ブレーキ装置の外観を図6に示す。既存の空気ブレーキ制御装置に比べ、基本的な構成、すなわち、弁を弁取付体（管座パネル）に前面から取付け、後述の受量器、油圧制御器のプリントカードをラックに入れて配置し、覆いで覆う方法は類似であるが、これは、車体床下装架での使用に便利な方式である。ブレーキのエネルギー源として、空気ブレーキでは、空気圧縮機と大きな空気だめが別置きされるのに対し、油ポンプ、油だめ、アキュムレータを各台車ごとに配置したが、油漏れの少ない制御弁と、それぞれの部品が小型なので、ユニットに組んで、小型・軽量化が実現できた。既存の空圧ブレーキとの比較を表1に示す。

ブレーキの電氣的制御は、運転士のハンドル指令と荷重状態や速度の情報を取込んで、電気ブレーキとの演算を行い、所要の油圧ブレーキ量を指示する制御装置（これを受量器と呼ぶ）と、この受量器の指令で油圧制御を駆動するための油圧制御器で行う。これらはプリントカード6枚で構成させた。受量器の部分は電気指令式空気ブレーキとほぼ同じである。

油圧制御器は、ブレーキシリンダの油圧と油圧制御弁の弁変位のフィードバックを受けて、適正な弁駆動ができるようにしている。油圧制御ブロック図を図5(b)に示す。

4.3 試験結果

制御弁単体試験でその静特性試験を実施した結果、ポペット変

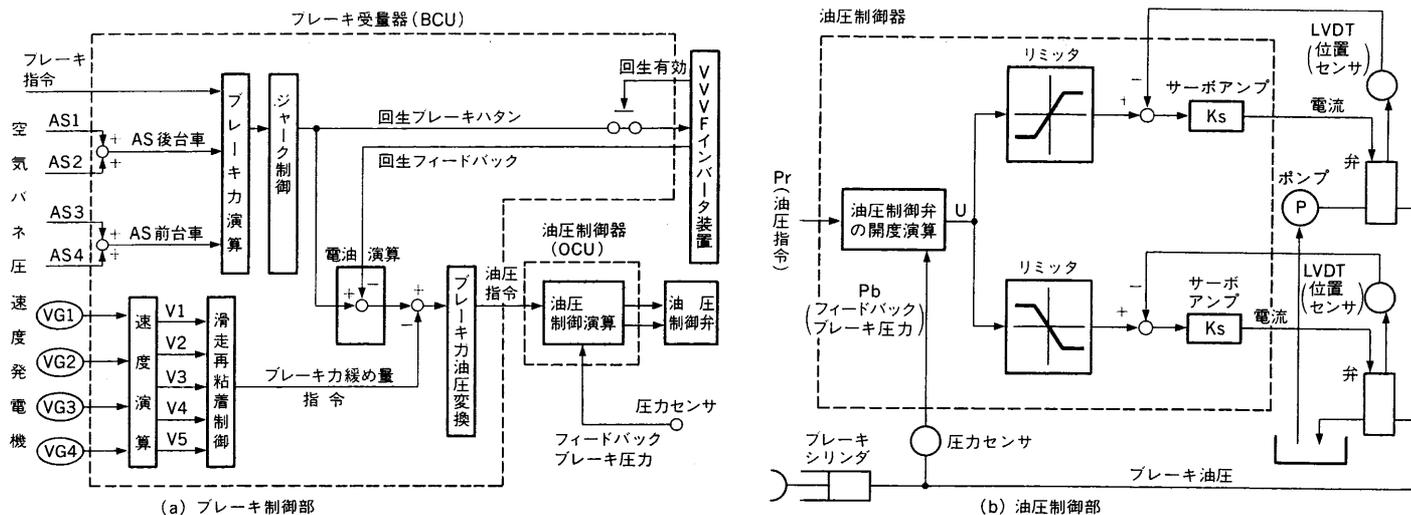


図5 制御ブロック図 油圧制御を行うブレーキ受量器の制御ブロック図を示す。
Block diagram of brake control unit

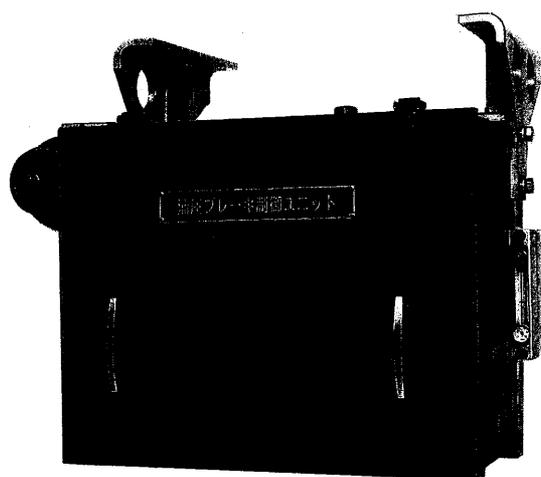


図6 油圧ブレーキ制御ユニット 油圧ブレーキ制御に用いられる制御ユニットの外観。
Out view of oil hydraulic pressure brake control unit

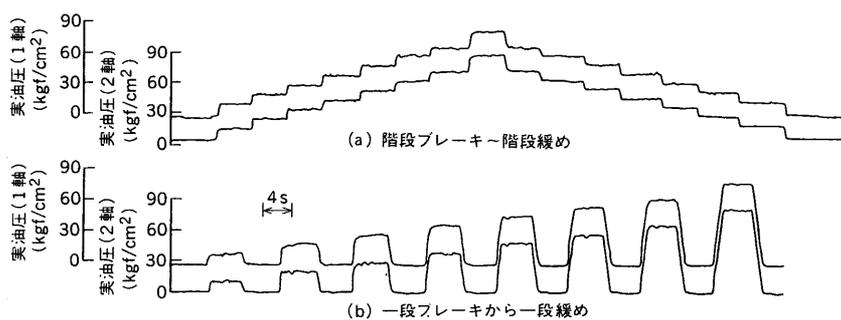


図7 圧力波形 一段ブレーキと階段ブレーキの圧力波形を示す。
Oil pressure time chart

レーキの圧力波形を図7に示す。油圧の立ち上がりは急しゅんで、乗心地を考えると実用上は立ち上がりこう配を緩やかにするジャーク制御の付与が必要である。

この油圧ブレーキ制御装置は、試験電車に取付けられて、試験が行われている。この試験は、今後3年間行われる予定である。

表1 油圧ブレーキと空圧ブレーキの比較
Comparison of oil hydraulic brake and pneumatic brake

		油圧ブレーキ	空圧ブレーキ
小型化	制御ユニット (mm)	724×450×578	786×460×651
	駆動源 (mm)	油圧ポンプ 100×100×200	コンプレッサ 300×500×800
	タンク (l)	オイルタンク 7	空気だめ 100
軽量化	装置重量 (kgf/両)	253	969
高速化	立ち上り時間 (s)	0.3	1.2

位及び流量ともヒステリシスのない良好な特性を示した。単体の周波数特性も90°の位相遅れは200 Hzであり、システムとして十分な応答性であった。また、210kgf/cm²G加圧時の漏れは2.5 cm³/minであり、目標値を満足している。一段ブレーキと階段ブ

参考文献

- (1) 田中ほか, オンオフ制御による電空協調式, 鉄道技術研究所, A-84-159, (1984) p.1~19
- (2) Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, Information and Control, University of California Berkeley, 278, (1984) p.338~353