

# ブレーキ技術発展の工学的検討

—— 高速鉄道車両について ——

野 村 義 夫\*

Technical Survey on Development of Brake System  
—— For High Sped Train ——

Yoshio NOMURA

## Abstract

Brake Technique of high speed train has been developed year and year during 120 years in Europe and the United States of America.

And also in Japan, post World War II, Research and Development of the brake system has advanced quickly.

The paper summerize and discuss these brake techniques, in order to get some suggestions for new techniques in future.

## 1. ま え が き

ブレーキ技術は鉄道車両の複雑化した運転条件を満たすために時代と共に進歩してきたのであるが、欧州および米国で鉄道車両が発達し、ブレーキ技術が開発されてから約 120 年、我が国でも戦後本格的に研究開発が始められてから 50 年を経た今日、その中の可成りの年月を新幹線車両を含めたブレーキの研究開発に携わった筆者は、ここにブレーキ技術発展の経過を辿り、

技術全体を総括して工学的検討を加えることは、将来に対しても意義あることと考えたのである。

## 2. ブレーキシステムの構成概要

ブレーキシステムは列車運転の安全性にとって必要な役割りを持つが、列車の高速化に伴ない重要性は増大する。その構成を列車運転操作の面から図示すると Fig. 1 のようになる。

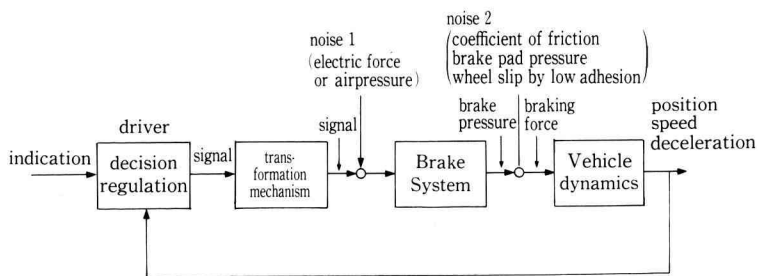


Fig. 1. Brake operation System of Vehicle

1995 年 9 月 5 日受理

\* 元機械工学科

一般にブレーキシステムの構成は、車両の持つ運動エネルギーを吸収し放散するための機構と、ブレーキを制御する機構とに大別できるであろう。

エネルギー放散機構は古くから摩擦ブレーキ機構が用いられており、現在でも基礎構造となっている。そのブレーキ力はブレーキ距離算定のために重要であるので、ブレーキの効果を高めるため摩擦材料の研究開発が長年世界各国で進められてきた。他方駆動用のモーターを発電機として用い発生電力を消費する電気ブレーキの研究開発も近年進められ発展してきた。しかし、いずれもブレーキ力を発生するためには、車輪とレール間の摩擦力、すなわち粘着力が必要であるので、その特性の研究が進められ、それを有効に利用する方法が開発されてきた。

ついで、ブレーキ力を制御する機構は、運転士の意志を電気的あるいは機械的等の信号を利用して列車全体に迅速に伝え、摩擦ブレーキ機構を介して列車速度や減速度を自由に制御するための重要な機構である (Fig.1 参照)。これは従来主として空気ブレーキ機構が基礎となって構成され研究開発されてきた。以下に、これらについて詳述する。

### 3. 摩擦ブレーキと粘着

摩擦ブレーキ機構としては、鉄道車両が運転され始めたごく初期の頃から鑄鉄製の制輪子を車輪に押しつける方法がとられていたが、最初どの程度のブレーキ力が得られるか不明であり、またブレーキ作用時車輪はレール上を滑るのではないかと危懼され実車実験が行われた。これは、英国の Sir. Douglas Strutt Galton と米国の George Westinghouse 両氏による実験<sup>1)</sup> (1878~1879 年)である。その後欧州各国でも実験が行なわれ車両速度と制輪子の摩擦特性、および粘着特性が調べられ実験式も公表されるに至った<sup>2,3)</sup>。しかし更に詳しく実験室で調べたのは、旧ドイツの Metzchow である<sup>4,5)</sup>。これによって摩擦力と粘着力は車両速度の上昇と共に低下することが定量的に明らかになった。

一方我が国では、数多くの実車実験によって制輪子の摩擦係数の実験式<sup>6)</sup>が求められたが適用速度範囲が限られたものであった。一方鉄道省官房研究所の田中正平博士は摩擦面の発生熱を考慮して摩擦係数の理論式を導いた<sup>7)</sup>。その後この理論を基として実車実験のデータを考慮した実験式が導かれ、ブレーキ距離算出法が提案されるに至った<sup>8)</sup>。

制輪子の材質は摩耗が少なく、摩擦係数が一定で、車輪を傷つけないことが望まれる。このため多くの研究開発がなされてきた。我が国では戦時中の資源不足から、一時鉋さい (slug) を使用したことがあったが車輪タイヤを損傷することで問題になった。戦後鑄鉄制輪子の摩耗をへらす研究として鋼製の制輪子と抱合せる方法が考えられ三元摩耗説と云われたが全面的採用には至らなかった。また鑄鉄に燐やクロム、ニッケル、モリブデンなどを添加し、耐摩耗性と耐熱性を高める工夫もなされた。しかし、間もなくレジンなどの樹脂を結合材として種々の材料をモールドした、いわゆる合成制輪子が広く使われるようになった。これは耐摩耗性にすぐれ摩擦係数も比較的広い速度領域で変化が少なかったからである。しかし、タイヤとの接触面に水分が入るような環境では摩擦係数が著しく下るとか、長時間のブレーキ作用でタイヤの一部を削り溝ができるといった欠点もあったので、素材となる材料の成分が配合量と共に数多く検討されてきた。こういった研究開発は今後も改良のため続ける必要があると考えられている。

車両が高速化すると車輪よりも車軸に取りつけたディスクの方が熱容量を大きくできる分有利である。この場合の制輪子としては、セラミックスを主成分とし Fe や Cu や黒鉛を焼結したパット状の制輪子形状とされ、ディスクとしては、Ni, Cr や Mo を含有した熱亀裂に強い特殊鑄鉄製のものが開発され実用化され、東海道新幹線の車両に取りつけられるに至った。摩擦材料は数多く開発されており、その組み合わせは極めて多いので、今後の研究によって勝れた制輪子パッドが発見される可能性があると考えられる。

次に、粘着に関する研究としては、車輪とレール間のところがり接触論から説き起した旧ドイツの Werner Leven の研究<sup>9)</sup>がある。穂坂はこれを拡張し一般化した<sup>10)</sup>。しかし回転車輪の場合、摩擦の方向と大きさに不確定な点が多いので、理論の完成は今後に残されていると云えよう。実用的な研究としては、接触面の粗さや水分など異物の存在を考慮した広範囲な実験的研究が近年大山によって行なわれ<sup>11)</sup>、車両ブレーキ設計の基礎資料として大いに役立っている。筆者は実物車輪とレールに擬えた粘着試験機を組立てて実験を行なった<sup>12)</sup>が、ブレーキ作用時だけでなく、ゆるめの際の車輪回転の回復状態も調べ、車輪滑走を防止する機構の基礎設計資料を得た<sup>13)</sup>。滑走防止機構については従来、機械式や電気式などが考案されているが、計画の基礎

となる車輪の過渡現象については従来殆んど明らかにされていなかったのである。

東海道新幹線車両の計画時、250 km/h までの高速域の粘着係数を予測するための実験的研究が行なわれ、中根は粘着試験機を製作し、数多くの実験によって次に示すような実験式を得た<sup>14)</sup>。

$\mu$  = 粘着係数 (粘着力/軸重), 無次元  
 $V$  = 接触面相対速度 (km/h)

として,

$$\mu = \frac{88}{V+200} \quad (\text{乾燥状態で}) \quad (1)$$

$$\mu = \frac{44}{V+200} \quad (\text{湿潤状態で}) \quad (2)$$

これらの式は定性的に実車のデータと良く合うことが追証されたが、実車では  $\mu$  の値のバラツキが大きく、また (2) 式はむしろ乾燥状態の値に近いことが認められた。現在の新幹線車両では、湿潤状態を考え、またデータのバラツキも勘案して、滑走の危険性を少なくするため、次式が計画の基準とされている。

$$\mu = \frac{13.6}{V+85} \quad (3)$$

#### 4. ブレーキ力の制御と空気ブレーキ機構

安全でしかも円滑な列車運転のためには運転士の意のままにブレーキ力を制御することが必要である。ごく初期の蒸気機関車時代には、機関車に蒸気力を用いた“蒸気ブレーキ”装置が用いられ、牽引される車両ではブレーキマンの腕力による手動ブレーキ操作に依ったと伝えられている。その後、列車全体にブレーキ力を与えるため機関車に真空ポンプを備え、列車に引き通した管 (ブレーキ管) を真空として各車に取りつけた弁を介してブレーキシリンダをゆるめ状態としておき、ブレーキ操作時にはブレーキ管を大気圧としてブレーキ力を生ずるようにした構成の“真空ブレーキ”装置<sup>13)</sup>が実用に至り列車ブレーキの総括制御と列車分離に対する安全性の確保とが可能になったのである。しかしこの方式では圧力差を最大 1 kg/cm<sup>2</sup> しか利用できないため、ブレーキシリンダの寸法が大きくなり、また空気漏れに対する保守が困難という欠点があった。これに代る方法として“空気ブレーキ”装置が考案された。これは機関車に空気圧縮機を備え、列車のブレーキ管に 5 kg/cm<sup>2</sup> (ゲージ) の圧縮空気を送り

各車両に設けた圧力制御弁を介して空気だめに圧縮空気を供給し、ブレーキ操作によるブレーキ管の減圧によって空気だめの空気をブレーキシリンダに送るといった構成である。1869 年に George Westinghouse がこういった圧力制御弁を考案<sup>16)</sup>したことによって、現在でも使われている“空気ブレーキ”装置の基本形態が出来上ったのである。

ブレーキ作用を列車の全車両に伝えるためには、ブレーキ管内の圧力波の伝達をまず解明する必要がある。この問題に関する理論的研究としてはウィーン工科大学の Dr. Karl Kobes 教授を嚆矢<sup>17)</sup>とする。彼の論文によれば、真空ブレーキの場合管内に発生する衝撃波によって音速を超えるブレーキ作用伝達が起こることがわかった。また空気ブレーキの場合は音速を超えることはないが、空気の湿気による影響は比較的小さいことが明らかにされた。

実車のブレーキ管では曲りや分岐があり、また末端があるので、それらの部分での圧力波の反射や減衰をも考慮しなければならない。これらを明らかにするため筆者は多くの実験を行ない、特性曲線法理論の助けを借りて解析を行なった<sup>18,19)</sup>。これらの結果はブレーキ配管設計の基礎となったのである。その後コンピュータの力を借りて解析されるようになったが<sup>20)</sup>、単純な配管についてだけであり、複雑な配管についての解明は今後の問題になっている。

他方管内の圧力波の減衰を補償するため、圧力波を増幅して、少なくとも減衰以前の大きさの圧力まで戻す機構が考案された。旧ドイツの Möller の減圧促進弁<sup>21)</sup>や Westinghouse 式圧力制御弁機構内に組み込まれている急ブレーキ機構 (Quick Service Mechanism) や急動機構 (Quick Action Mechanism) などはその例である<sup>22)</sup>。これら急ブレーキ、急動機構による作用はブレーキ管の減圧を感知した後、管内の空気をブレーキシリンダに一部取り込むか、あるいは大気中に放出するように働くもので、列車内各車両のブレーキ作用を迅速に均一化することを狙ったものである。特に急動作用は非常時にブレーキ距離を短縮するのに有効であったのである。

初期の圧力制御弁の一つである単純三動弁 (Plane Trippl Valve) に急動機構を導入した K 形制御弁では米国で 50 両編成の貨物列車の運転を可能にしたと云われている。この時のブレーキ作用伝達速度は約 150 m/sec と推測されている。しかしこの場合、列車内で車両間衝動が激しく起り積荷の破損が甚だしく大き

な問題となったのである。米国では当時輸送量増大の趨勢にあり車両重量が大となり、列車は長大化傾向にあったので衝撃緩和の研究がなされ<sup>23,24)</sup>、新しい制御弁 AB 形が設計された<sup>25,26)</sup>。この制御弁のブレーキ作用伝達速度は約 270 m/sec に達しブレーキ距離短縮に極めて有効であったが、同時に衝撃力緩和のための工夫としてブレーキの初期に僅かな空気をシリンダに入れる、いわゆる inshot と呼ばれる作用と、inshot 後にシリンダ圧力の上昇をやや緩慢にする作用とをもつ機構が導入されたのである。これによって 150 編成の貨物列車の運転が可能になったと云われている。この列車のテストは勾配と曲線の多い山間の線区で行なわれた。これがあとで有名になった Altoona Test である。

欧州でも米国と同じ頃 Kunze-Knorr 式や Hildebrand-Knorr 式などの空気ブレーキシステムが開発され<sup>27)</sup>、独自の発展を遂げた。またソ連邦でもマドロゾフ (Матросов) による M-320 形圧力制御弁やソ連鉄道技研の MT-135 形圧力制御弁が開発され<sup>28)</sup>、シベリヤ鉄道での 4,000~8,000 ton 牽引の長大重量貨物列車の運転に備えられ、車両間の衝撃の研究も行なわれた<sup>29)</sup> が、ブレーキ作用後のゆるめ時の衝撃も問題になっていたようである。この問題は中華人民共和国でもシルクロードの 1,000 km に亘る連続 10% 勾配線での運転時長大貨物列車で同じく問題となり、現在でも研究が進められている。我が国には勾配の大きさと長さおよび貨物輸送単位が比較的小さいので外国程の問題は起っていない。

我が国の空気ブレーキシステムを採用するにあたって、1924 年前後に欧米のシステムが比較検討された。特に Kunze-Knorr 方式と Westinghouse 方式とは実車に取りつけて走行実験が繰り返し行なわれ、最終的に Westinghouse 方式が採用されるに至った。従って貨車用圧力制御弁は米国の K 形が若干改造の上採用となったのである。またこの時期全国一斉に連結器

を緩衝器内蔵の新しいものに取り替えた。これはブレーキ作用時の車両間衝撃力の緩和と、連結作業時の人身事故防止をはかったものであり世界的に特筆すべきことであった<sup>30)</sup>。客車用圧力制御弁は、P 形、M 形、U 形などが導入されたが、日本独自の案として押田安之助が新しい制御弁を提案<sup>31)</sup> し、鉄道省は A 形と名付け昭和 3 年 8 月客車用、また昭和 5 年 5 月電車用として採用した。この弁は極めてすぐれておりごく近年まで広く使用されていた。

圧力制御弁は列車の高速化と長編成化に伴ない客車用にも前述の貨車用と同様、急ブレーキ機構と急動機構を備え、ブレーキ作用の伝達を促進するように構成されているが、保守の比較的容易な客車や電車では各車に電磁弁を持ちブレーキ管減圧を電氣的に行なうことが試みられ、古くは U 形制御弁に併設され<sup>32)</sup>、我が国の A 形制御弁にも取り付けられ AE 形と呼ばれていた。湘南電車ではブレーキ後のゆるめ操作も電磁弁を利用するようにされ特性の向上がはかられた。これによって 15 両編成の電車列車があたかも単車のように運転できたのである。このブレーキ装置は中継弁を利用し小形化されたので ARE 形と呼ばれている<sup>33)</sup>。

## 5. 圧力制御弁機能の改善と近代化

圧力制御弁の基本構造と機能は、前章で概要を述べたが、運転士の制御するブレーキ管圧力に対しあらかじめ圧縮空気の込められた補助空気だめの圧力が比較され、その差圧力によって動かされる滑り弁の働きで空気通路が開閉され、ブレーキシリンダへ圧縮空気を送りこむか、あるいは、そこから空気を大気へ排出するかの働きをするもので、これは通常二圧力制御方式と云われ従来米国および我が国で用いられてきた方式である。ブロック図で示すと Fig. 2 のようになる。ここで  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  は伝達関数を示し、 $P$  は空気圧力、サフィックス BP はブレーキ管、BC はブレーキシリ

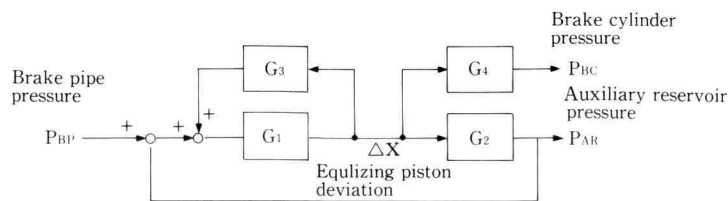


Fig. 2. Block Diagram of two-pressure Control Valve ( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  are transfer functions)

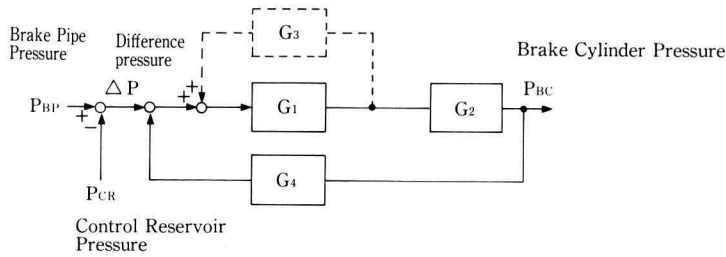


Fig. 3. Block Diagram of three-pressure Control Valve

ンダ、ARは補助空気だめを表わし、 $\Delta X$ は滑り弁の変位の変化分を示す。

この方式に対し、歐洲の圧力制御弁は、何らかの形でブレーキシリンダ圧力をもブレーキ管圧力にフィードバックする方式で、既に知られていた Humphrey の原理<sup>34)</sup>を適用したものであったと云えよう。この方式は三圧力制御方式と云われ、ブロック図で示すと Fig. 3 のようになる。図中の記号は前と同じだが、 $P_{CR}$ は制御空気室の空気圧力を示す。この三圧力制御方式は初期の構造では摩擦摺動部分が多く制御精度と応答特性に問題が多かった。しかし第二次世界大戦後急速に発達した合成ゴムの利用と、新しく考案された押し上げ弁機構の実用化によって広く普及するようになった。スイスの Oelikon 社の Est 形圧力制御弁<sup>35)</sup>や、西ドイツの Knorr 社の KE 形圧力制御弁<sup>36)</sup>などはその例である。

日米両国で長い間使われてきた二圧力式制御弁は、その滑り構造により比較的小形で製作も容易であることから、すぐれた制御弁と見做されてきたが、近年列車運転時のブレーキ操作頻度が多くなるにつれ、特に我が国では、ブレーキ作用後のゆるめ作用が不完全になり列車の運転阻害を起すことが著しく多くなった。これは“緩解不良”と呼ばれ、弁を修繕する現場での大きな問題となり、修繕法の研究がなされたが、一向に解決しなかった。

他方機能面からみると、ARE 形ブレーキ装置にこの緩解不良が多く、さらに従来の AE 形ブレーキ装置のついた車両と混結運転すると、ARE 形ブレーキ装置のついた車両のゆるめ作用が著しく遅くなる現象が観察された。

これらの原因を調べるため筆者は滑り弁構造をもつ二圧力制御弁の動特性を解析し、故障要因を排除する適正な弁構造を明らかにすると共に、二重滑り弁構造は圧力制御の安定化に役立っている程度を定量的に示

した<sup>37,38)</sup>。

圧力制御弁の特性解析にはコンピューターを用いることが有効と考えられ、近年その試みがなされたが<sup>39)</sup>、まだ不十分で緩解不良現象の解明までには至っていない。今後の課題の一つと考えられる。

筆者は得られたこれまでの知識を集約して、新しい圧力制御弁を計画することとし、旧国鉄の技術者の協力を得て、押し上げ弁構造で摺動摩擦部の全くない三圧力制御弁を考案し、さらに微少圧力差によっても緩解不良を起さぬよう小容量の空気だめを導入した弁を試作し、約 10 万回の耐久試験の上実用化に入った。これは KU 形制御弁と名づけられ、今日まで 10 年以上も使用されているが、特に大きな問題は認められていない<sup>40,41,42)</sup>。この新しい弁の設計思想はその後の新しい弁設計にも生きている。

## 6. 電気制御による空気ブレーキシステム

従来のブレーキシステムは、前述のように列車に引き通したブレーキ管がブレーキ圧力の供給源であると同時にブレーキ制御信号の伝送路でもある。このため相互に機能上の制約をうけ満足な性能を発揮出来ないことが多かった。特にブレーキやゆるめの圧力信号伝達では、ブレーキ管の分岐部や管端末での反射と減衰により圧力波が乱され、圧力波形が崩れノイズ中の信号という状態になり、所定の信号を後部車両に正確に伝えることがむづかしくしている。このため各車に電磁弁を設け、ブレーキ管の減圧あるいは増圧を直接電氣的に伝える方法がとられてきた。しかしこの方法は、あくまで補助的手段に過ぎず根本的解決になっていなかった。

近年電気・電子機器の信頼性が高まったことから、もっと積極的に電気技術を導入することが計画された。このため列車に引き通される管は、ブレーキ力の

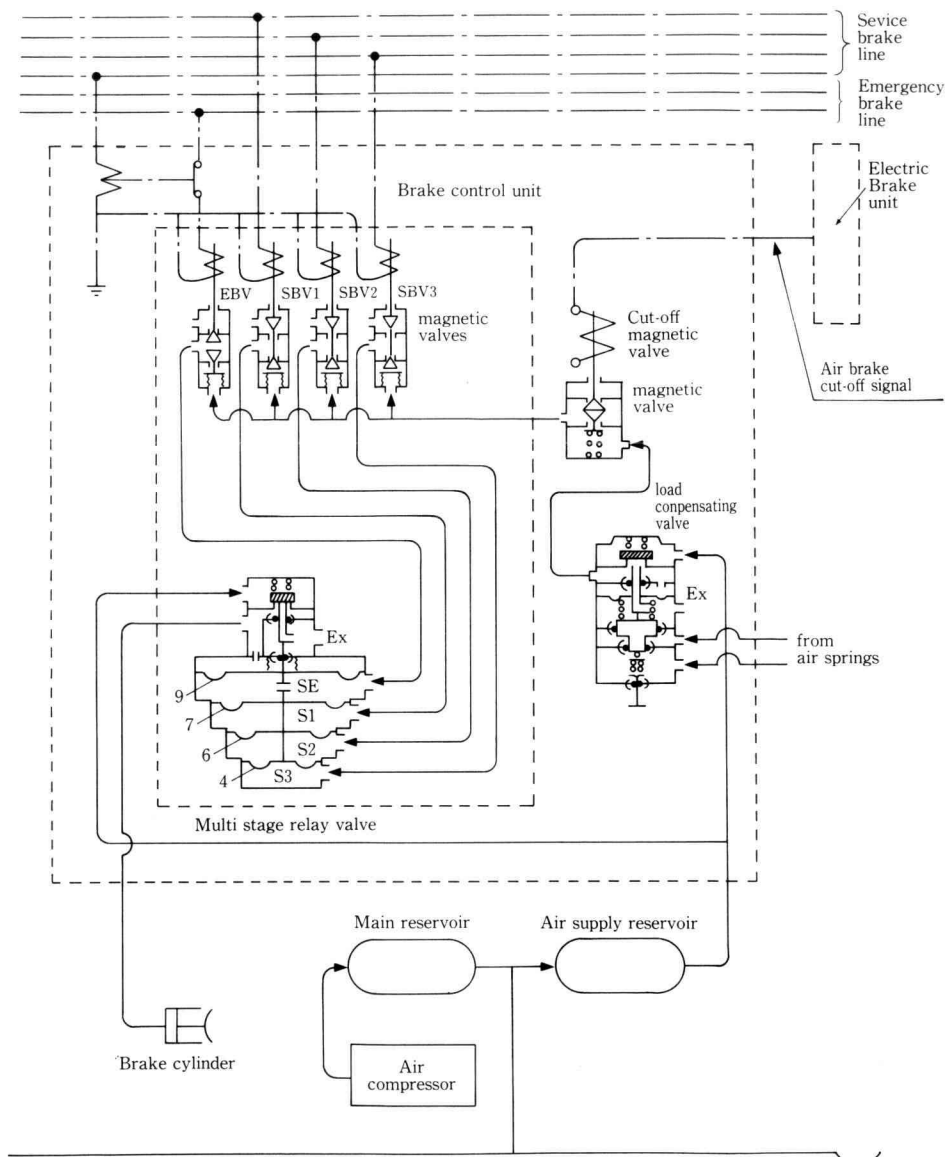


Fig. 4. Schematic Diagram of New Brake System

源となる圧縮空気を送る役割りだけとし、制御指令はすべて電気回路で送るようにし、ブレーキ力は電磁弁、ソレノイド、その他電子機器を用いた電空変換によるよう制御システムを構成したのである。これに関しては多くの試行錯誤の上、いくつか試作され検討が進められた<sup>43,44)</sup>。さらに近年ではデジタル技術の導入が考慮され、新しいブレーキ制御方式が実用されるに

至った<sup>45)</sup>。

電磁弁のオフを0、オンを1に対応させ、3個の電磁弁の組み合わせを考えると、すべてオフの場合を除き7通りの組み合わせが得られるので、3本の引き通し指令電線のオンオフの組み合わせで7段階のブレーキ指令が得られる。そこで、Fig. 4に示すような、それぞれ膜板有効面積比が7:6:4の室をもつ多段式空気中継

Table 1. Brake Steps and Output Forces

Brake Step	Magnet Valves (○...on) (—...off)				Diaphragm chamber	output unit	
	SBV 1	SBV 2	VBV 3	EBV			
Release	—	—	—	○	0		0
Service Brake 1	○	—	—	○	$S_1$	(7-6)	1
"    2	—	○	—	○	$S_2$	(6-4)	2
"    3	○	○	—	○	$S_1 + S_2$	(7-6) + (6-4)	3
"    4	—	—	○	○	$S_3$	4	4
"    5	○	—	○	○	$S_1 + S_3$	(7-6) + 4	5
"    6	—	○	○	○	$S_2 + S_3$	(6-4) + 4	6
"    7	○	○	○	○	$S_1 + S_2 + S_3$	(7-6) + (6-4) + 4	7
Emergency Brake	○	○	○	—	SE	9	9

弁と3個の電磁弁とを組み合わせ7段階の圧力制御の出来る常用ブレーキ作用を得ることが出来る。なお非常ブレーキについては、常時加圧の電線と電磁弁とを別に設け、中継弁の一室に膜板面積比が9の室をつなぎ、消磁によって高圧の空気がブレーキシリンダに得られるようにするのである。

Table 1 には Fig. 4 に示した各電磁弁のオンオフによる出力圧力の大きさを示してある。

この新しいデジタル制御によるブレーキ制御方式は、比較的簡単な構成であるにもかかわらず、すぐれたブレーキ制御システムと云えよう。しかも、車両の積荷あるいは乗客の多寡を示す空気ばね圧力の情報を中継弁を介して反映させることが容易であり、また電気ブレーキ作用中か否かの情報をも電空変換機構を介してブレーキ力の決定に関与させることが出来るので極めて有効なシステムと云えよう。ここで問題は中継弁によるブレーキシリンダ圧力の給排気がオンオフ機構に近い弁でありハンチング現象を起し易いことである。しかし、筆者は実験的検討により、現在使われている供給源空気圧とシリンダ最高圧の範囲の制御では給気と排気の特徴が対称的でないので不安定にならないことを確かめた。

## 7. 電磁油圧ブレーキ

ブレーキ作動流体として圧縮空気の代りに油圧を用

いる事も出来るので近年油圧ブレーキシステムが研究され、ある範囲で実用されるようになった。この場合、ブレーキの指令および油圧の制御は電気的に行なわれるのが普通である。油圧の制御弁としては、トルクモータとスプールの組み合わせか、ムービングコイルとスプールとを組合わせた機構が研究開発され<sup>46)</sup>、新幹線車両で多くの試験が行なわれ、実用化がはかられた<sup>47)</sup>。この電磁油圧ブレーキシステムは、応答が迅速であり、折点周波数は従来の空気ブレーキが0.1~0.5 Hzであるのに対し1~3 Hz という実験結果が得られている。しかし問題は、長時間使用すると、作動油 (MIL-H-5606A) のコンタミネーションによってスプールの動きが阻害されるようになる。これを防ぐためディザを用いると油の漏れが生じ、長時間ブレーキ油圧を保持することが困難となり車両の勾配運転に支障を起す場合があったのである。このため長い連続勾配のない線区での運転に限定するか、何らかのバックアップを持たなければならないと考えられている。

## 8. 電磁レールブレーキ

車両を高速化した場合、ブレーキ力を強化する方策として、粘着力に依存しないブレーキシステムを持つことが考えられる。その一つとして直接レールにブレーキをかける方法があるが、それには摩擦材をレールに押しつける方法と台車の車軸間に電磁石を配置



し、それを励磁してレール内に生ずる渦電流でブレーキ力を得る方法がある。この渦電流を利用する方法は電磁レールブレーキと云われ、可成り有効である。これは理論解析と模形実験が行なわれ<sup>48)</sup>、新幹線車輛に装備され走行試験の後実用性が確かめられた<sup>49)</sup>。

電磁レールブレーキは欧州各国でも研究されているが、電磁石の吸引力を利用して、レールに摩擦材を押しつける方式が主体である。我が国では渦電流によるブレーキ力を利用し吸引力をなるべく小さくするような電磁石の配置とされている。これは吸引力による台車枠の変形を避けるためであった。また電磁石の下面は約 6.5 mm レール面より離すようにされ、レール面に異物があっても電磁石が損傷を受けないよう考慮された。これはブレーキ力を低下させることになるが、電磁石のアンペア・ターンを適正にすることで、可成り大きいブレーキ力が得られ、従来の車輪に作用させる摩擦ブレーキ力に匹敵することが認められている。しかし、同一場所で繰り返しブレーキがかけられると渦電流の発生熱によりレールの温度が上昇する。したがってレールの緊締方法の検討が必要となってくるのである。

## 9. ブレーキ設計の基礎検討

### 9.1. 乗心地からみた車両減速度

ブレーキシステムを設計する際、どの位のブレーキ力とするのが良いかは人間工学的に検討しておく必要がある。このため筆者らは、車両の減速度と乗客の乗心地との関係を調べた。それにはまず減速度を制御する試験車を設計し製作した<sup>50)</sup>。延べ数十人の被験者について車両の進行方向にむかって座席についてもらう場合と立っている場合、さらに進行方向に背を向けた場合、などにつき精神測定法のうちの評点法<sup>51)</sup>によって、減速度の大きさおよび減速度変化率(Jerk)に対する感覚を被験者に評価してもらって、減速度および Jerk と乗心地との関係を求めた<sup>52)</sup>。これはブレーキ設計の基礎として有効であり、結果は米国運輸者でも評価されている<sup>53)</sup>。

### 9.2. ブレーキの信頼性と安全性

鉄道車両のブレーキシステムは、いかなる運転上の要求に対しても異常なく作動することが望まれるので、信頼性は充分高く、また安全性もすぐれていなければならない。このため、設計のごく初期の頃から、

フェール・セーフや、フール・ブルーフの思想が導入されてきたが、システムの故障の中には解析的に原因説明がむづかしく、多くの不確定要因の競合によって発生するものがある。筆者は、これに対し、故障と修繕の実態を統計的に調べ信頼性理論に基づいて新しい故障対策と保全法とを提案した<sup>54)</sup>。さらに故障の木解析 (FTA) によってブレーキシステムの故障に至るクリティカル・パスを見出し、新しいシステムの提案を行なったのである<sup>55)</sup>。

## 10. ブレーキの応用技術

### 10.1. 自動運転車両のブレーキ

自動化の趨勢に倣い鉄道車両運転の自動化も進められるようになったが、自動運転では、ブレーキによる速度制御と駅停車時の位置の正確さが重要となるので、それぞれについて基礎研究が行なわれた<sup>56,57)</sup>。ブレーキシステムとしては、ブレーキシリンダ圧力を直接電氣的に制御する方法がとられ、車両の速度制御は PID 制御とし、試作の上東海道新幹線車両に取りつけ走行試験が行なわれた<sup>58,59)</sup>。この自動運転は比較的低コストで有効な方法であると認められている。

### 10.2. 勾配運転時のブレーキ制御

貨物列車が長い下り勾配を運行する時、長時間の抑速ブレーキ作用によって鑄鉄制輪子は発熱による摩擦係数の著しい低下を起すので、もしその折緊急事態が起り非常ブレーキ操作を行なってもブレーキが充分には効かずブレーキ距離が異常に長くなることが屢々経験されている。こういった下り勾配運転を安全にするため、筆者はシミュレーションを行い、適正な運転とブレーキ扱い法を示した<sup>60)</sup>。

またこれとは別に、車両運動に関し、ブレーキ操作量と温度上昇とに制限のある最適運転制御問題として捉え、解析的に最適運転法を求めることも市川邦彦<sup>61)</sup>らによって検討された。

この問題は列車衝撃とも絡めて今後更に検討する必要があると考える。

## 11. む す び

鉄道車両は近年ますます高速化し、高密度運転されるようになった。このための厳しい条件を満たすような高性能のブレーキシステムの開発が進められてきた



のであるが、東海道新幹線完成後にも高速車両システムのあり方を決める検討会で新しいブレーキが検討された<sup>62)</sup>。今後も時代の要請に応じた研究開発を進めるべきであると考ええる。

この論文は過去から現在に至るまでのブレーキ技術を振り返り、総括して工学的検討を加え将来の発展の指針を得ようとしたものであり、ある程度の成果は得られたと思っている。

本文をまとめるに当たり多くの文献を通して先人の偉大な業績に触れ、参照させていただいた事に深く感謝している。

なお電気ブレーキについては、ここでは省略した。

## 文 献

- 1) "Galton-Westinghouse Tests", Air Brake Tests 1904, Westinghouse Air Brake Co. 発行.
- 2) Metzkow, "Ergebnisse der Vessuche für die Ermittlung des Reibungswertes zwischen Rad und Bremsklotz", Organ der Deutschen Maschinentechnischen Gesellschaft, Berlin 1926. Band 99 Heft 11.
- 3) Metzkow, "untersuchung der Haftungsverhältnisse zwischen Rad und Schiene beim Bremsvorgang", Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, Berlin 1934, 89 Jahrgang, Heft 13.
- 4) Kother, "Verlauf und Ausnutzung des Haftwertes zwischen Rad und Schiene bei elektrischen Triebfahrzeugen", Elektrischen Bahnen, 1940, XVI Jahrgang, Heft 12.
- 5) Kother, "Verlauf und Ausnutzung des Reibwertes zwischen Rad und Bremsklotz", Elektrische Bahnen, 1941, XVII Jahrgang, Heft 2.
- 6) 大塚誠之, "鉄道車両—研究資料", 昭和32年日刊工業新聞社.
- 7) 田中正平, "鉄道車両の制動作用に就いて", 鉄道業務研究資料第12巻第12号, 大正13年12月.
- 8) 中村良蔵, "列車制動距離の算定に就いて", 鉄道業務研究資料, 第15巻3号, 昭和2年3月.
- 9) W. Leven, "Die Reibung zwrschen Rad und Schiene", Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, 96 Jahrgan, Heft 22, 15, Nov 1941; Heft 21, 1, Nov. 1941.
- 10) 穂坂 衛, "ころがり接触について", 第1報, 機械学会論文集第17巻61号; 第2報, 機械学会論文集17巻61号.
- 11) 大山忠夫, "高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力におよぼす接触条件の影響と粘着力向上に関する研究", 鉄道総研報告, 第1巻2号, 1987年10月.
- 12) 野村義夫, "ブレーキによる滑りを伴う回転車輪の接触摩擦(粘着特性)", 幾徳工大研究報告, B理工学編12号, 昭和63年.
- 13) 野村義夫, "粘着力を受ける制動車輪の動特性", 神奈川工科大学研究報告, B理工学編17号, 平成5年.
- 14) 中根之夫, 他, "粘着限界の実験的研究", 東海道新幹線に関する研究(第1冊各論)昭和35年4月, 鉄道技術研究所.
- 15) G.H. Marsk, "The development of Railway Brakes", The Railway Engineering Journal, 1973.
- 16) G. Westinghouse, "米国特許", 1869年4月.
- 17) K. Kobes, "Die Durchshlags-geschwindigkeit bei den Luftsaug- und Druckluft-Bremsen", Zeitschrift des Österr Ingenieur und Architekten Vereins, No. 35, 1910.
- 18) 野村義夫 "ブレーキ伝達の促進", 鉄道技術研究報告 No. 705, 鉄道技術研究所 1970年3月.
- 19) G. Rudinger, "Wave Diagrams for Nonsteady Flow in Ducts", 1955, D. Van Nostrand Co.
- 20) 田中 宏, "長大管内の圧縮空気の減圧特性に関する研究" 第2報 機械学会論文集52-481, 昭和61年.
- 21) E. Möller, "Bremsbeschleuniger für Druckluftbremsen Einfach beschleuniger und Koppelbeschleuniger", Glasers Annalen 1937.
- 22) W.V. Turner, "The Development of the Electro-pneumatic Brake", a lecture delivered at the 24st annual convention of the air brake association, Detroit May 7, 1914.
- 23) O.R. Wikander, "Draft Gear Action in Long Trains", Trans. of ASME, Vol. 57, 1935, PR57-1.
- 24) L.H. Donnell, "Longtudinal Wave Transmission and Impact", Trans. of ASME, 1930 June, semi-annual meeting APM-52-14.
- 25) "The AB Freight Brake Equipment", Westinghouse Air Brake Co. Dec. 1945.
- 26) "An Advance in Freight Braking", Railway Age Feb. 28. 1955.

- 27) Hildebrand, "Die Entwicklung der selbsttätigen Einkammer Druckluft Bremse bei den europäischen Vollbahnen", Verlag Julius Springer, 1927.
- 28) ПРОФ.Б.Л.КАРВАЦКИЙ, "АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТОРМОЗА", МОСКВА, 1953.
- 29) ВАГОНЫ, "IV ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ ТОЕЗДАПРИ ТОРМОЖЕНИИ", МОСКВА, 1961.
- 30) 大月武一, "国有鉄道における空気制動機の採用に就て", 業務研究資料第22巻4号.
- 31) 押田安之助, "流体圧力式列車制動機用圧力流体制御装置", 日本国特許 No. 82541, 昭和4年7月.
- 32) 既出22) 参照.
- 33) 木藤孝三, "電磁連動付 ARE 空気ブレーキ装置試験報告", 鉄道技術研究所速報 No. 58-207, 昭和33年9月.
- 34) "Humphrey の原理", 英国特許, Bri. Pat. 3167, 1892年.
- 35) S. Keller, "Die Ölikon-Bremse für Vollbahnen", Wirtschaft und Technik im Transport, 18 Jahr. No. 11/12, 1949.
- 36) E. Möller, "Die neue Eisenbahn-Druckluftbremse mit dem KE-Einheits ventil" VDI, 1954, Nr. 11/12.
- 37) 野村義夫, "ブレーキ圧力制御機構における二重滑り弁の特性", 幾徳工大研究報告 B 理工学編第8号, 昭和58年.
- 38) 野村義夫, "滑り弁式圧力制御弁の適正構造", 幾徳工大研究報告, B 理工学編, 第7号, 昭和57年.
- 39) M.N. Vallidis, "Pneumatic Transmission Line Theory applied to an Analysis of Transients in a Railroad Air Brake System", Doctoral Dissertation Feb. 1969, Carnegie Inst. of Technology.
- 40) 野村義夫他, "三圧式ブレーキ制御装置", 日本国特許 No. 696092, 昭和48年7月.
- 41) 野村義夫他, "急ブレーキ作用を付加した急動装置", 日本国特許 No. 69601, 昭和48年7月.
- 42) 野村義夫, "新形圧力制御弁の試作(特性実験)" 鉄研速報 No. 68-1021, 昭和43年10月, 鉄道技術研究所.
- 43) 長野泰昌他, "電気指令によるブレーキ制御方式の開発", 鉄道技術研究所速報, その1; No. 73-242, 昭和48年12月, その2; No. 74-36, 昭和49年5月, その3; No. 74-63, 昭和49年5月; その4; No. 75-145, 昭和50年9月, 鉄道技術研究所.
- 44) ブレーキ研究会編, "わかり易い電気指令式ブレーキ", 交友社, 平成2年9月.
- 45) G.C. Marsh, "The Development of Railway Brakes Part-II", Railway Engineering Journal, 1973年3月.
- 46) 野村義夫, "車両用ブレーキにみる油圧, 空気圧の得失" 油圧化設計第7巻3号, 日刊工業新聞社.
- 47) 津守 晋他 "951 形新幹線電車の油圧ブレーキに関する現車試験", 鉄道技術研究所速報 No. 70-35, 鉄道技術研究所, 昭和45年3月.
- 48) 曾小川久和, "電磁レール渦流ブレーキの模形実験", 東海道新幹線に関する研究第1冊 各論 [4]-[5], 鉄道技術研究所, 昭和35年4月.
- 49) 曾小川久和, 他 "新幹線試作電車に取り付けた渦電流式レールブレーキの走行試験", 鉄道技術研究所速報 No. 70-1016, 鉄道技術研究所, 昭和45年11月.
- 50) 野村義夫, "車両用減速度制御装置の試作", 鉄道技術研究報告 No. 533, 鉄道技術研究所, 昭和41年5月.
- 51) J.P. Gelford, "Psychometric Methods", 1954. McGrawhill Book Inc.
- 52) 卜部舜一, 野村義夫, "列車の減速時乗心地の評価", 鉄道技術研究報告 No. 341, 鉄道技術研究所, 昭和38年3月.
- 53) "High-Speed Ground Transportation Systems Engineering Study—Multimodal Systems", Report No. PRA-RT-70-39, ref. 5-20, Page 5-16, 5-38, PB192507, Feb. 1970, US Department of Transportation.
- 54) 野村義夫, "ブレーキ圧力制御弁の故障分析と修繕回帰", 鉄道技術研究報告, No. 471, 鉄道技術研究所, 昭和40年4月.
- 55) 野村義夫, "ブレーキシステムの信頼性と安全性", 「地上輸送機関のブレーキに関する諸問題」の第5章, 幾徳工大研究報告, B 理工学編第6号, 昭和56年.
- 56) 野村義夫, "列車運転の自動化", 制御工学 Vol. 6. No. 6, 1962年.
- 57) 伊藤俊彦, "列車の自動運転に関する研究", 鉄道技術研究報告 No. 568. 鉄道技術研究所, 1967年1月.
- 58) 野村義夫, "鉄道車両のPID制御運転", 神奈川工科大学研究報告, B 理工学編第16号, 平成4年.
- 59) 河辺 一, 伊藤喜久治, 野村義夫, "PID 列車自動運転装置試験", 鉄道技研速報 No. 64-34, 鉄道技術研究所, 1964年2月.

- 60) 野村義夫, “摩擦ブレーキ機構に関する諸問題”, 「地上輸送機関のブレーキに関する諸問題」の第3章, 幾徳工大研究報告, B 理工学編第6号, 昭和56年.
- 61) 市川邦彦, 他 “状態変数に制限を設けた最適制御問題の解法”, 制御工学第12巻5号, 1968年.
- 62) 車両設計事務所編, “高速車両研究会資料”, 日本国有鉄道, 昭和51年3月.

[完]