

第3回

空気ブレーキの制御

はじめに

現在、国内では、1編成で1000人を超す乗客を時速300kmで運ぶ新幹線や、1000tもの貨物を牽引する貨物列車など、鉄道は1本の列車にたくさんの人や物を載せ、わずか数分の間隔で走っています。鉄道がこのような効率の良い輸送手段となるために、ブレーキも大きな役割を果たしてきました。

初期の鉄道では、テコ機構などで増幅した人の力で、木製のブレーキシュー（制輪子）を回転する車輪に押し付けてブレーキ力を得ていました。このように摩擦を利用したブレーキは現在も使われていますが、大量輸送を高密度で行うには、大きなブレーキ力を、効率良く作り出せなくてはなりません。

摩擦によって大きな力を得るには、摩擦係数の高い制輪子と、それを押し付ける大きな力が必要です。ここでは、この制輪子の押付力に圧縮空気を用いる「空気ブレーキ」について、その空気圧の制御方法の変遷に着目したいと思います。

“自動” 空気ブレーキの誕生

先述のように初期の鉄道はブレーキを人力に頼っていたので、運転士の乗った機関車だけがブレーキをかけていました。連結車両を増やしても、ブレーキ装置を備えそれを操



図1 G.Westinghouse (1846-1914)
出典：Arthur Warren 著、
"George Westinghouse 1846-1914"

作する車掌や制動手が乗った車両（車掌車または緩急車）を一定以上の割合で編成内に組み込み、運転士の汽笛の合図に合わせて、ブレーキを操作させていました。

高速化や、編成の長大化のためには、運転士が編成の全ての車両にブレーキをかけられる「貫通式」が求められ、さまざまな試みがなされる中、アメリカのジョージ・ウェスティングハウス（G.Westinghouse、図1）が、1869年に貫通式の直通空気ブレーキ（Straight Air Brake、図2）を、1872年に同じく貫通式の自動空気ブレーキ（Automatic Air Brake、図3）を実用化しました。

直通空気ブレーキは、機関車の空気圧縮機が作る圧縮空気を、編成を引き通した直通管（Straight Air Pipe：SAP）を介して各車のブレーキシリンダに送り、制輪子を車輪に押し付けます。

自動空気ブレーキは、編成を引き通したブレーキ管（Brake Pipe：BP）を一定の圧力で保っておき、これを減圧すると、各車の補助空気タンクからブレーキシリンダに空気が供給され、制輪子を車輪に押し付けます。この補助空気タンクにも、BPを介して空気が供給されます。

直通空気ブレーキは構造が比較的単純で扱いやすい反面、引き通したSAPが切れてしまうと、ブレーキ不能になります。

これに対し自動空気ブレーキは、予め一定の圧力に保ったBPが減圧されたときにブレーキを作用させるため、構造がやや複雑な三動弁（triple valve）と呼ばれる空気の流れを制御する弁が各車に必要になります。しかし、BPの

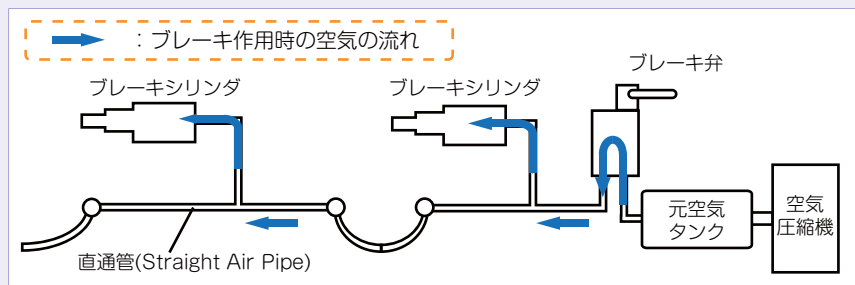


図2 直通空気ブレーキの例

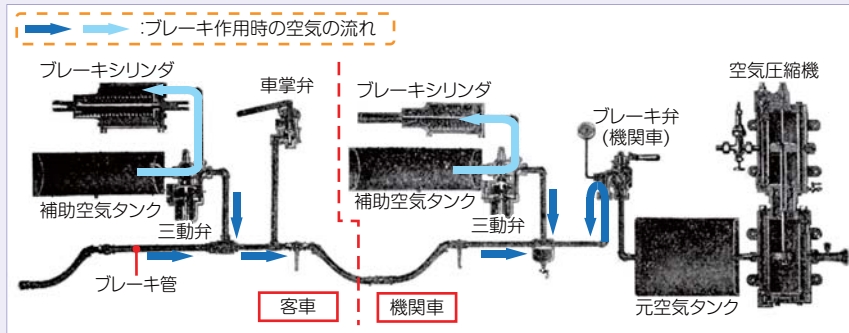


図3 Westinghouseの自動空気ブレーキ(The "Westinghouse" Plain Automatic Air Brake, 1872)に一部加筆
 出典：W.V.Turner, S.W.Dudley著, "Development in Air Brakes for Railroads", 1909)



図4 A動作弁
 提供：ナブテスコ株

減圧によって動作するので、列車が分離してBPの連結ホースが切れてもブレーキが「自動的に」作用します。当時、空気圧で制輪子を押す手法は他にも既にもありましたが、主に単車運転の列車には構造の簡単な直通空気ブレーキが、長い編成では列車分離に対応できる自動空気ブレーキが、広く普及していきます。

この2つの手法では、編成を引き通した1本の空気管が、押付力の源となる圧縮空気を供給するだけでなく、ブレーキの指令を編成全体に伝える役割があり、現在では「空気指令式」と分類されます。

【 日本の鉄道発祥のころ 】

日本で鉄道が開業したのは1872年です。米国での自動空気ブレーキ(以下、単に「自動ブレーキ」)の登場とはほぼ同時期ですが、当時の日本の車両は空気ブレーキではなく、貫通式でもありませんでした。

その後、全国に鉄道網が広がりますが、ときの明治政府の財政事情のため地域ごとに私鉄が開発を進めたこともあり、車両も多種多様、ブレーキも様々な方式が用いられていました。1906年に鉄道の国有化が決まり、各鉄道会社の車両も引き継がれますが、混在したブレーキ方式で全国的に運用することは望ましくなく、1919年に鉄道院(当時)は、既存車の改造も含め、全車を空気ブレーキとすることを決定します。

この全車空気ブレーキ化は、調査、試験も繰り返し行いながら達成までに10年を要し、初期には海外製を使用することとしてウェスティングハウス・エア・ブレーキ社(Westinghouse Air Brake Company: WABCO)の製品が採用されました。しかし当初から国産化を目指しており、これに応じた三菱電機(株)、(株)神戸製鋼所(その後、日本エヤーブレーキ(株)、(株)ナブコ、現ナブテスコ(株)へと変遷)がWABCOと技術提携をし、開発を進めました。

そして、空気ブレーキ化が進む1928年、日本エヤーブ

レーキ(当時)の開発によるA動作弁(A制御弁、図4)が登場します。

A動作弁は自動ブレーキの三動弁の役割を担うもので、当時WABCOから提案された弁よりも動作が確実である、ゆるめ動作が円滑である、非常ブレーキ作用が迅速であるなどの多くの利点がありました。さらに既に空気ブレーキ化された車両への置き換えが可能で、再改造も含め、客車から電車まで幅広く使われることになりました。

同年に実施されたブレーキ停車試験では、このA動作弁を備えた客車11両を連結し、80km/hからの停止距離が310mであったとの記録が残っています¹⁾。

【 編成の長大化 】

自動ブレーキは、最もシンプルな図3のような形であれば、編成を引き通すBPの1本だけで貫通式の空気ブレーキを構成できます。しかし、編成が長くなると、BPの減圧が最後尾に伝わるまでに時間がかかり、ブレーキ動作が遅くなります。また、ブレーキシリンダには補助空気タンクから空気を供給するので、ブレーキ後には次のブレーキのために補助空気タンクを満たしておく「又込め」と呼ばれる動作が必要で、頻繁なブレーキ操作には不向きでした。

編成を長くする、運転間隔を短くするには、このような自動ブレーキの短所を改善する必要があります。そこで、各車に元空気タンクと引き通しの元空気管(Main Reservoir pipe: MR管)を追加するなどして空気容量の増加が図られます。そして、電磁自動ブレーキと呼ばれる、各車のBPに電磁吐出弁を設置したAE形(A動作弁とElectromagneticの頭文字)、さらに中継弁を追加したARE形(Rは中継弁"Relay valve", 1937年試作)が考案されます。電磁自動ブレーキでは、運転士がブレーキ弁を操作すると、ブレーキ弁からのBP排気に加え、ブレーキ弁に設置した電気接点と編成を引き通した電線とを介した指

令により、各車の電磁弁からも排気します。これによってBP排気を促進し、各車のブレーキ動作を同期させることで、応答性が向上しました。

ARE形は、試作後しばらくは戦争の影響もあって日の目を見ることはありませんでしたが、1950年に登場した通称「湘南電車(国鉄80系)」に採用され、最大16両という長大編成で高速運転が可能な電車列車の実現に貢献することになりました。

電気ブレーキとの協調

戦後の復興とともに、都市圏では輸送力増強のために、複線化や、さらなる連結両数の増加、高密度運転が求められました。

また、沿線の電化も進み、電車が増加します。電車は、そのモーターを発電機とする「電気ブレーキ」が可能で、これを活用すれば制輪子などの摩擦材の消耗を減らすことができます。

しかし、電気ブレーキだけではブレーキ力が不足する、あるいは電気ブレーキが効かない場合を想定して、空気ブレーキが役割を失うことはなく、むしろ電気ブレーキ(当初は発電ブレーキ)との協調のために、より高度な制御が求められました。

そこで、繰り返しブレーキが掛けられ、ブレーキシリンダ圧力を調整しやすい直通ブレーキが使われるようになります。ただし先述のように、直通ブレーキだけでは列車分離時にブレーキ不能になるので、自動ブレーキ(または同等の機能をもつ装備)をバックアップとして併用する方式がとられ、編成列車にはMR管、SAP、BPの3本の空気配管が引き通されました。

1954年の帝都高速度交通営団(当時)丸ノ内線300形のSMEE形(Straight air brake, Motor car Emergency valve Electric, Westinghouse製)、1955年の小田急電鉄2200形のHSC-D形(High Speed Control, Dynamic brake, 三菱電機製)に続き、国鉄も1957年にモハ90形

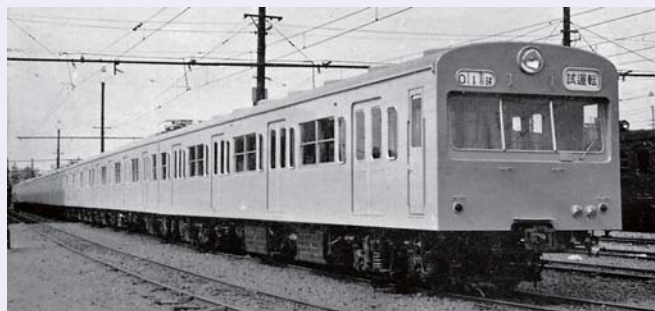


図5 モハ90(後に101系と改称)
出典：モハ90形電車詳解

(図5)にHSC-Dとほぼ同等のSELD形(Straight air brake, Electro-pneumatic：電磁直通, variable Load device：応荷重装置, Dynamic brake：発電ブレーキ)を採用します。

これらは、総じて発電ブレーキ併用電磁直通ブレーキ方式と呼ばれ、運転台で作り出した空気圧をSAPを介して各車のブレーキシリンダに供給するという直通ブレーキの原理は変わりませんが、自動ブレーキの発達の過程で得られた流量増幅の工夫や電磁弁の併用によって、応答性の向上が図られています。

また、モハ90形では、空気ブレーキの圧力制御に用いる制御弁や中継弁を集中させて配置した「ブレーキ制御装置」(図6, C1A形, CはControl deviceの頭文字)を初めて採用し、バックアップの自動ブレーキ用にA動作弁も引き続き用いられました。

電磁直通ブレーキは、その後も東京～大阪間を6時間50分で結んだビジネス特急「こだま(151系)」などにも派生し、1985年の205系、211系らの登場まで、国鉄車両のほとんどで使用されていました。

1964年に開業した東海道新幹線を走行する0系新幹線も、重量軽減のためにBPに代わり往復引き通し電線による列車分離時のブレーキ動作、ATCの導入などを加えつつも、信頼性を重視して電磁直通ブレーキが採用されました(SEA形, SE：電磁直通, ATC)。

電気指令式空気ブレーキ

新幹線開業と同じころ、私鉄を中心に、電気ブレーキとして発電ブレーキに代わり回生ブレーキが採用され始めます。回生ブレーキは、モーターの発電電流を架線に返し、その電流を他車の力行に再利用しようとするものですが、架線電圧によってブレーキ力が変動するため、発電ブレーキとの併用よりもさらにきめ細かい空気圧制御が求められました。また、地下鉄などでもATCが採用され、さらなる応答性の向上が求められ、運転台からのブレーキ指令

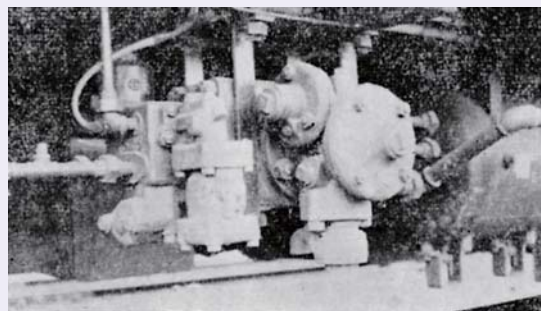


図6 モハ90に搭載されたC1Aブレーキ制御装置
出典：モハ90形電車詳解

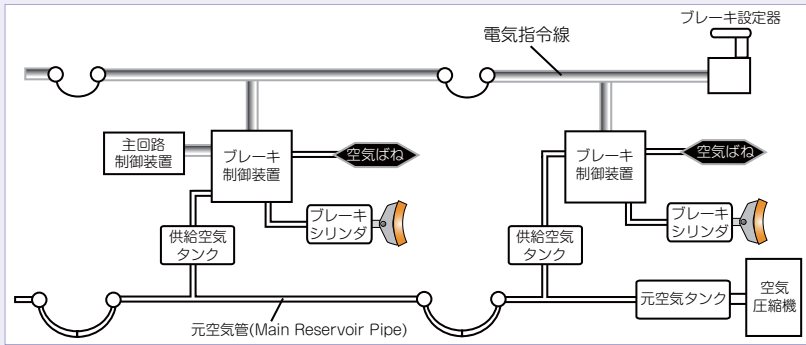


図7 電気指令式空気ブレーキの構成例

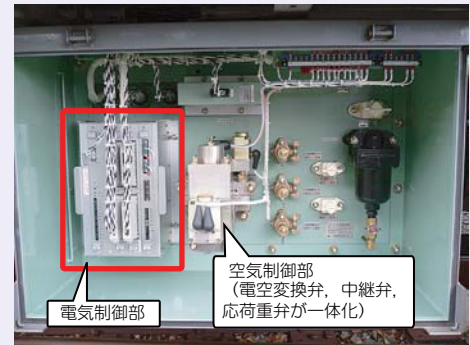


図8 最近のブレーキ制御装置の例 (鉄道総研所有R291試験電車)

をすべて電気信号とする電気指令式空気ブレーキ(図7)が登場します。

電気指令式は、1960年代初頭にトロント地下鉄に初めて採用されていましたが、日本では三菱電機、三菱重工の独自設計による電気指令式が開発され、1968年、大阪市交通局の7000、8000系に搭載されました。

電気指令式とすることで、運転台の空気配管が不要になり、ブレーキ操作を行う装置も「ブレーキ弁」ではなく「ブレーキ設定器」などと呼ばれるようになりました。また、力行とブレーキを1つのハンドルで操作できるワンハンドルマスコンも可能になりました。

電気指令から空気圧への変換には、多段式中継弁、電空変換弁(EP弁)などの制御弁が使われます。さらに、回生ブレーキの性能向上に伴い、編成として電気ブレーキをできるだけ有効に使う遅れ込め制御など、空気圧の制御が複雑になっていき、ブレーキ制御装置には、空気を制御する弁類だけでなく、ブレーキ受量器などと呼ばれる電気的な演算・制御機能を司る部分も含まれるようになりました(図8)。

この回生ブレーキ併用電気指令式空気ブレーキは省エネルギー、省メンテナンスの効果も大きく、新幹線でも300系(1992年)から採用されています。

最近では、これら制御演算を行う電子機器類の性能や、機器間の信号授受に関わる通信技術の発展が目覚ましく、制御弁類の進歩と合わせてブレーキ制御装置も小型化し、車体ぎ装の面でもメリットを発揮しています(図9、図10)。

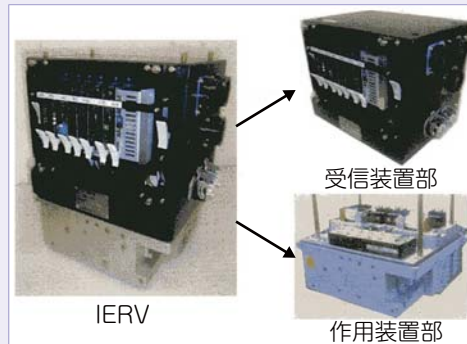


図9 開発中の小型ブレーキ制御装置の例(1) 出典：サイバネティクス, Vol. 15, No.3, 2010



図10 開発中の小型ブレーキ制御装置の例(2) 提供：ナプテスコ(株)

用する機械ブレーキにおいて、押付力に圧縮空気を用いる「空気ブレーキ」の歴史について電車を中心に簡単に触れてみました。

歴史を振り返ると、コンピュータが身近となった現在にも通じる複雑なブレーキ制御が、ずっと以前から空気だけを使って実現できていたこと、それを維持する高い技術力が積み上げられてきたことがわかります。また同時に、新しい技術に対して、導入までにいかに安全性・信頼性を重視した検討がなされていたかを感じることができます。

ここでは触れませんが、空気ブレーキの発達には、その駆動源である圧縮空気を作り出す空気圧縮機や除湿装置、制輪子などの摩擦材、制御弁や基礎ブレーキ装置など、周辺分野の相互の進歩を欠くことはできません。それぞれに先人達の多くの知恵と工夫が込められ、失敗もあっただろうと思います。

しかし、当時の失敗も現代の技術と組み合わせることで、全く別の新しい芽になる可能性もあります。新しい技術にばかり目を奪われることなく、歴史を受け継いでいきたいと思っています。

(中澤伸一/車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室)

【 おわりに 】

ここでは、制輪子と車輪(またはディスク)の摩擦を利

文献

1) 日本国有鉄道：鉄道技術発達史第4編(車両と機械), 1958