

複数の車両を安全に止めるために ブレーキをつなぐ技術



中澤 伸一
Shinichi Nakazawa
車両技術研究部
ブレーキシステム研究室長

はじめに

鉄道は、車輪とレールがともに鋼鉄製であるために**転がり抵抗**が小さく一度にたくさんの車両をつなげて（連結して）も高速で走ることができます。そして、レールの案内により、連結した車両が同じ軌跡をたどって安定して走ることができます。さらに、連結する車両数が変わっても、基本的には一人の運転士によって走ることができます。これには、連結車両に操作の指令をいきわたらせ、加速や減速のための力を伝える必要があります。ここでは、車両と車両を「つなぐ」技術の中から、主にブレーキにかかわる技術について紹介します。

つながった車両を止める技術

車両をわたる電気と空気

車両と車両の「連結部」では、「連結器」のほかに、客室間の通路を保護する「ほろ」、複数

の電線をまとめた「ジャンパー連結器」などがつながっています（図1）。連結器は機械的に車両間をつなぐだけでなく、空気管も同時につなぐことができる構造になっているものがあります（図2）。

図1 車両の連結部（電車の例）

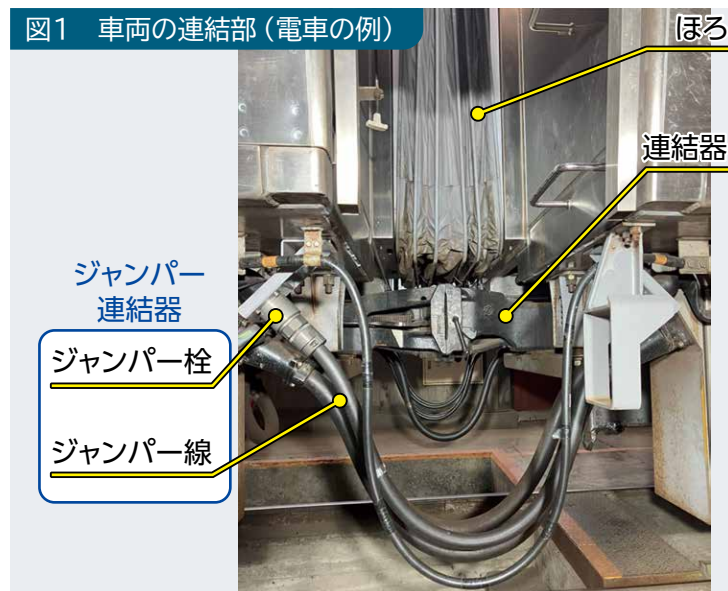
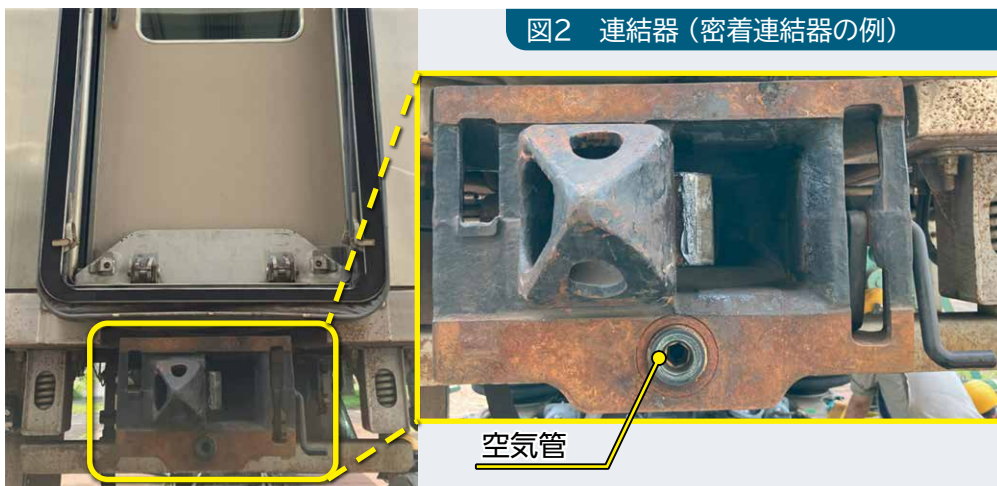


図2 連結器（密着連結器の例）



転がり抵抗

路面の上を回転しながら進む車輪に、進行方向と逆向きに生じる抵抗力。車輪や路面が変形しやすいほど大きな抵抗となります。鉄道は車輪とレールがともに鋼鉄製であるため、たくさんの人や荷物を載せても変形しにくく、転がり抵抗も小さくなります。

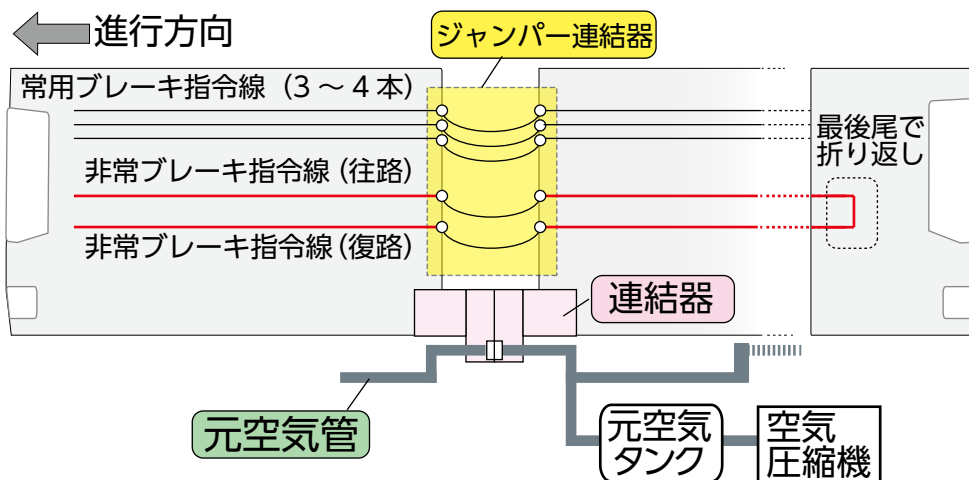
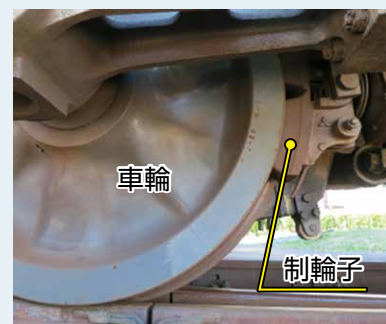


図3 車両間を「つなぐ」ブレーキにかかわる要素



摩擦によってブレーキ力を得るためのしゅう動部品（ブレーキシュー、ブレーキパッドなど）を鉄道では制輪子と呼んでいます。

制輪子

この車両間をわたる空気管の役割は、ブレーキ技術の進歩によって変遷しています。現在では、空気圧縮機が生成し元空気タンクに蓄えられた圧縮空気を各車両に供給する配管として使用され、元空気管（元空気タンク管ともいう）と呼ばれます。ジャンパー連結器には、ブレーキにかかわる電気信号として常用ブレーキや非常ブレーキの指令線などが含まれます（図3）。

最近の電車ではモーターを発電機として利用する「電気ブレーキ」が主流です。しかし、ブレーキのもっとも基本的な構造は、回転する車輪に制輪子を押し付け、摩擦力によってブレーキ力を得る空気ブレーキで、制輪子を押し付けるための圧縮空気と、連結した車両にブレーキ操作を伝えるための指令線が車両間をわたっています。

ここで「非常ブレーキ指令線」に注目すると、進行方向の先頭から最後尾を経てふたたび先頭に戻るように構成され、復路が各車両の非常電磁弁に接続されます（図4）。非常電磁弁は非通電で流路を開く構造（ノーマル・オープン（N.O.）と呼ばれる）で、非常ブレーキは、「非常ブレーキ指令線がOFFになったとき」に作用します。これにより、急速に停止したいときにブレーキ設定器や非常スイッチなどの操作で作用するほか、車両が正常でない状態になったと

きに自動的に作用する「フェイルセーフ」の役割が与えられています。

非常ブレーキと「列車分離」

「正常でない状態」として、たとえば空気圧縮機の不調などによる元空気管の圧力低下を圧力スイッチで検知します。より重大な事態が「列車分離（車両間の連結が離れること）」で、非常ブレーキ指令線と非常電磁弁の構成により、どこで列車分離が生じても自動的にすべての車両に非常ブレーキが作用します（図5）。列車分離時に元空気管が断たれてもブレーキに必要な圧縮空気は供給空気タンクに蓄えられており、孤立した車両でもブレーキが作用します。万が一、列車が分離したときにも車両が逸走しないよう、操作できる人がいなくても自動的にブレーキが作用する機能が不可欠で、鉄道のブレーキは意図せず分離してしまう場合に備えておくことと法令でも定められています。

ノーマル・オープン（N.O: Normal Open）

通電時に流路を閉じ、非通電時に流路を開く機構を指します。反対の動作（通電時に流路を開く）機構はノーマル・クローズ（N.C: Normal Close）と呼ばれます。

鉄道に関する技術上の基準を定める省令

平成13年国土交通省令第151号¹⁾。鉄道のブレーキの要件として、第69条（ブレーキ装置）の5に「組成した車両が分離したときに自動的に作用すること。」と定められています。

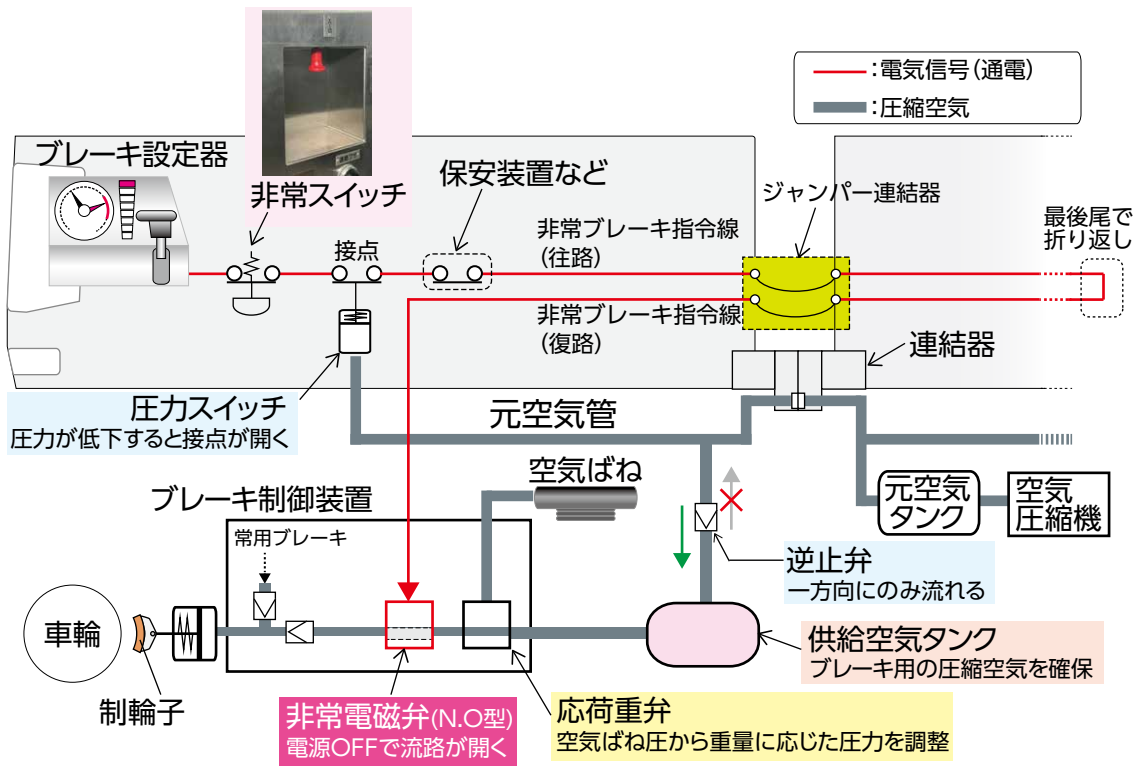


図4 非常ブレーキの構成 (在来線電車の例)

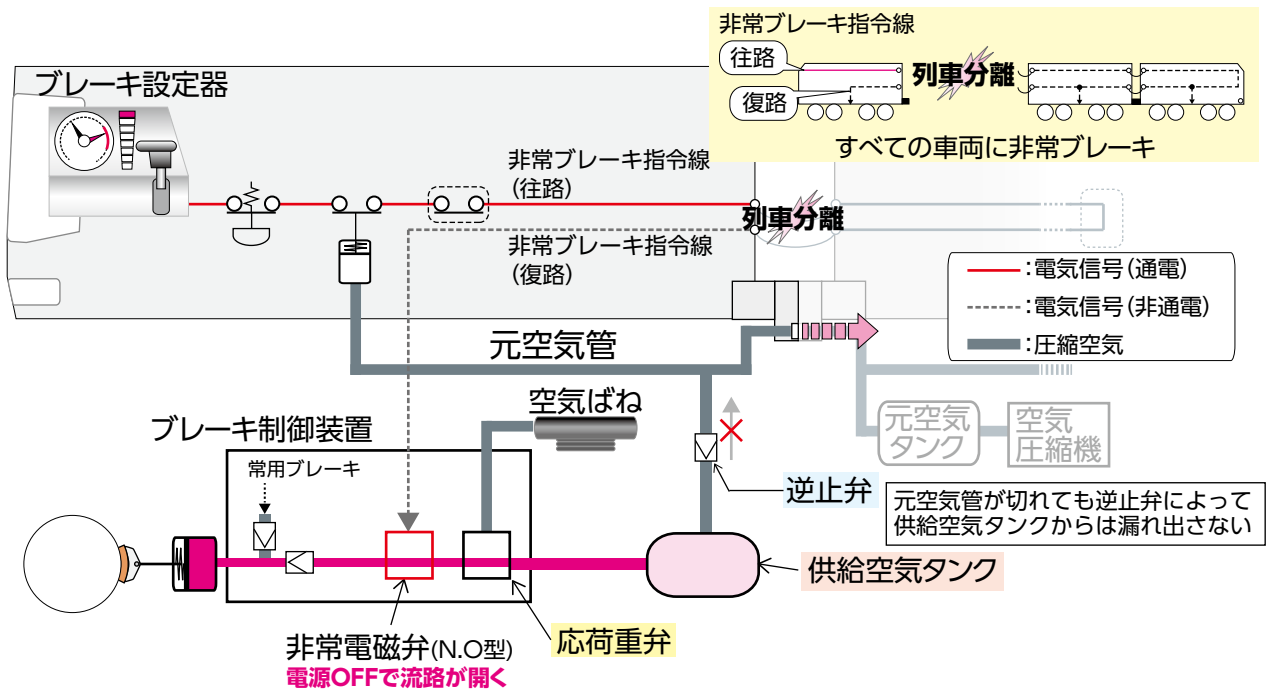


図5 列車分離時の非常ブレーキ

列車のブレーキに求められるもの

このように電気信号でブレーキ指令を伝達する「電気指令式」が現在の主流ですが、導入されたのは1960年代以降です。ここでは、それまでの歴史から「つながって走る車両」のブレーキに求められるものを考えてみます。

ブレーキは機関車のみだった

レールの上を走る車両の起源はもっと古い(16世紀の初頭には、木製レールの上を木製車輪で走っていた例がある)とされていますが、大きな加速力を発揮できる蒸気機関車が19世紀に登場して多くの車両を連結できるようにな



A "PICNIC."

"A Picnic," engraving by Peckwell, published on the cover of The Railroad Conductor, vol. 7, no. 15 (Aug. 1, 1890).

図6 制動手²⁾ (Brakeman, アメリカ)

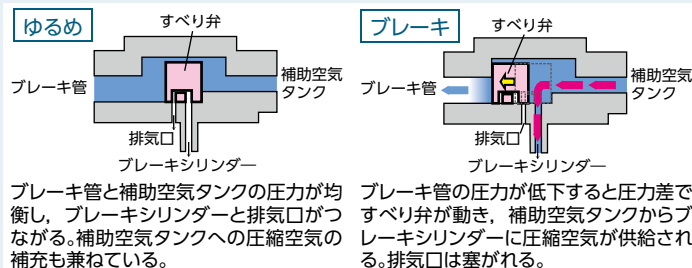
り、安全のためにブレーキの能力向上も求められました。ブレーキの基本構造はいまと変わらず車輪と制輪子の摩擦によるもので、もともと人員が乗る機関車は良いのですが、連結した車両にブレーキを作用させるには、車両にブレーキ装置を備え、それを操作する人が必要でした。アメリカなどでは、車両の屋根上に設置された通路を飛び移りながら車端にあるハンドルを回してブレーキを操作する「制動手」というたいへん危険な仕事もありました(図6)。

直通ブレーキと自動ブレーキ

1869年にジョージ・ウェスティングハウスによる「直通ブレーキ」が登場します(図7)。直通ブレーキは編成に引き通した空気管を「直通管」と呼んで使用します。機関車でブレーキ弁を操作することで、空気圧縮機で生成した圧縮空気を直通管を介して各車両のブレーキシリンダーに送りブレーキを作用させます。圧縮空気によって人力よりも大きな力で制輪子を押すことができるうえ、機関車でのブレーキ操作を連結した車両にも伝えることができる画期的な発明でした。

しかし、直通ブレーキは、列車分離すると直

ブレーキ管と補助空気タンクとの圧力のバランスによってブレーキシリンダーへ供給する圧縮空気を調整する弁。



自動ブレーキの制御弁 (三動弁)

元空気管・直通管・ブレーキ管

編成に引き通した空気管である点では同じですが機能がそれぞれ異なります。直通ブレーキの直通管と自動ブレーキのブレーキ管は、圧縮空気の供給に加えてブレーキをかける・ゆるめるという指令を伝達する役割も担っています。指令が電気信号となった現在では、圧縮空気を供給する役割のみを担う「元空気管」として引き通されています。

自動ブレーキの改良

編成が長くなると、空気管で伝達するブレーキ指令が後方に届くまで時間を要します。これを改善するため、ブレーキ指令(=ブレーキ管の排気または給気)を電気信号で送り出し、空気管に接続した電磁弁を動作させる「電磁自動ブレーキ」があります(直通ブレーキでも同様に電磁弁を利用した「電磁直通ブレーキ」があります)。電磁自動ブレーキと区別するために、電磁弁を使用しない元来の自動ブレーキを「純自動ブレーキ」と呼ぶことがあります。

通管の引き通しが断たれ、機関車を含むすべての車両がブレーキ不能になるため、ウェスティングハウスは自らこの欠点を改善した「自動ブレーキ」を1872年に発明します(図8)。自動ブレーキでは、編成に引き通した空気管を「ブレーキ管」と呼んで利用します。各車両には、制御弁(三動弁とも呼ばれた)とブレーキのための圧縮空気を貯蔵する「補助空気タンク」が搭載され、ブレーキ管を一定の圧力に高めるとブレーキが「ゆるめ」となります。そして、ブレーキ管を減圧すると、制御弁の動作によって補助空気タンクからブレーキシリンダーに圧縮空気が供給され、ブレーキが作用します。列車分離時にもブレーキ管が減圧されてすべての車両で自動的にブレーキが作用するため「自動ブレーキ」と名付けられ、安全に連結車両を増やせるようになりました。

自動ブレーキは、最小の構成としてブレーキ管の1本のみを引き通せば、連結する車両を組み替えてもブレーキ指令を伝達でき列車分離にも対応できます。これが大きな利点であり、さまざまな改良を加えながら、現在でも貨物列車などの機関車けん引列車を中心に世界中で使

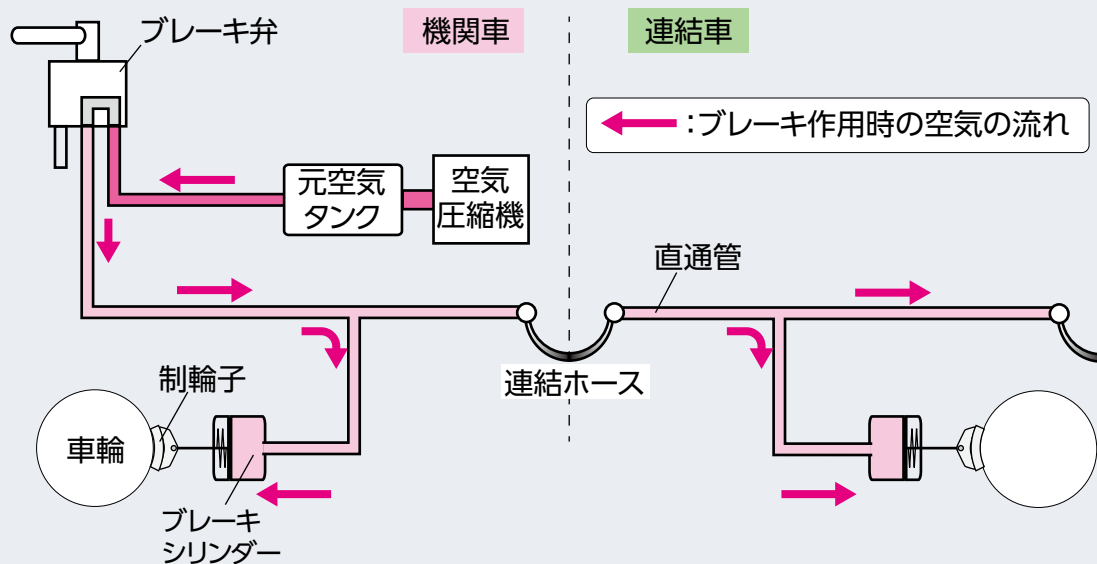


図7 直通ブレーキ

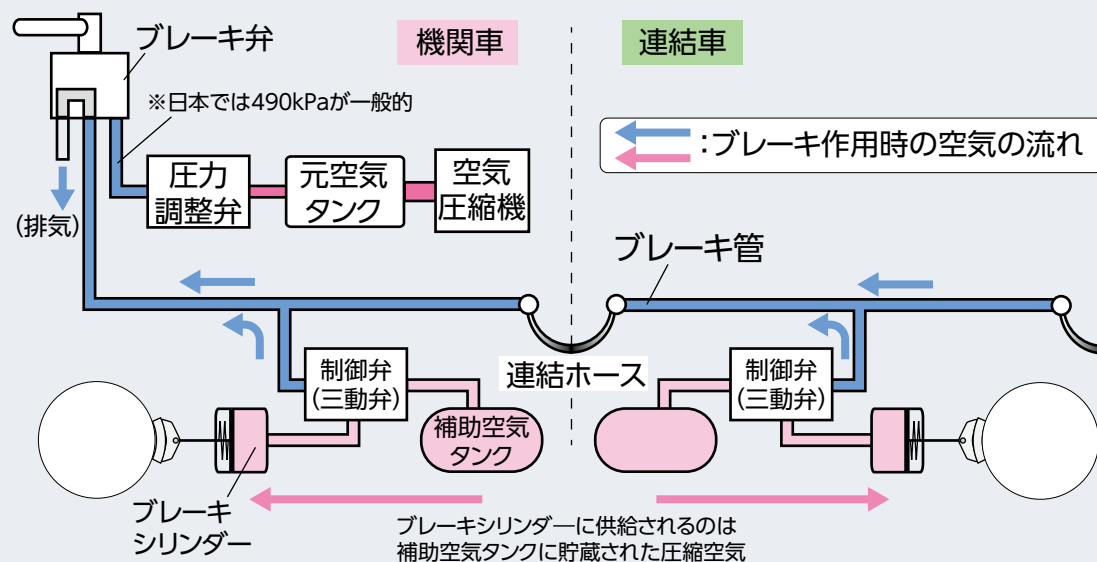


図8 自動ブレーキ

用されています。また、国内にも救援時に自動ブレーキを利用する旅客車もあります。

直通ブレーキにも、自動ブレーキに比べて応答が良く操作しやすいなどの利点があり、常用ブレーキに直通ブレーキを使用し、列車分離に備えて自動ブレーキも併用する形で長らく使用されました。

現在では当然のように思えますが、つながった車両にブレーキ指令をいきわたらせ、分離した場合に備える機能の確立が鉄道の実用には欠かせない技術でした。

最近のブレーキ技術・ 定点停止制御と自動ブレーキ

鉄道総研では、シミュレーション技術を活用して、圧縮空気を利用するブレーキシステムの機能や性能の向上を図る研究開発に取り組んでおり³⁾⁴⁾、これまで電気指令式を対象に進めてきた研究開発の成果を自動ブレーキにも応用することを目指しています。

図9は、機関車が重量の異なる10両の車両を連結し自動ブレーキを使用する列車をモデル化し、速度80km/hから1.2km先の定点に停止させることを制御目標として自動制御（定点停止

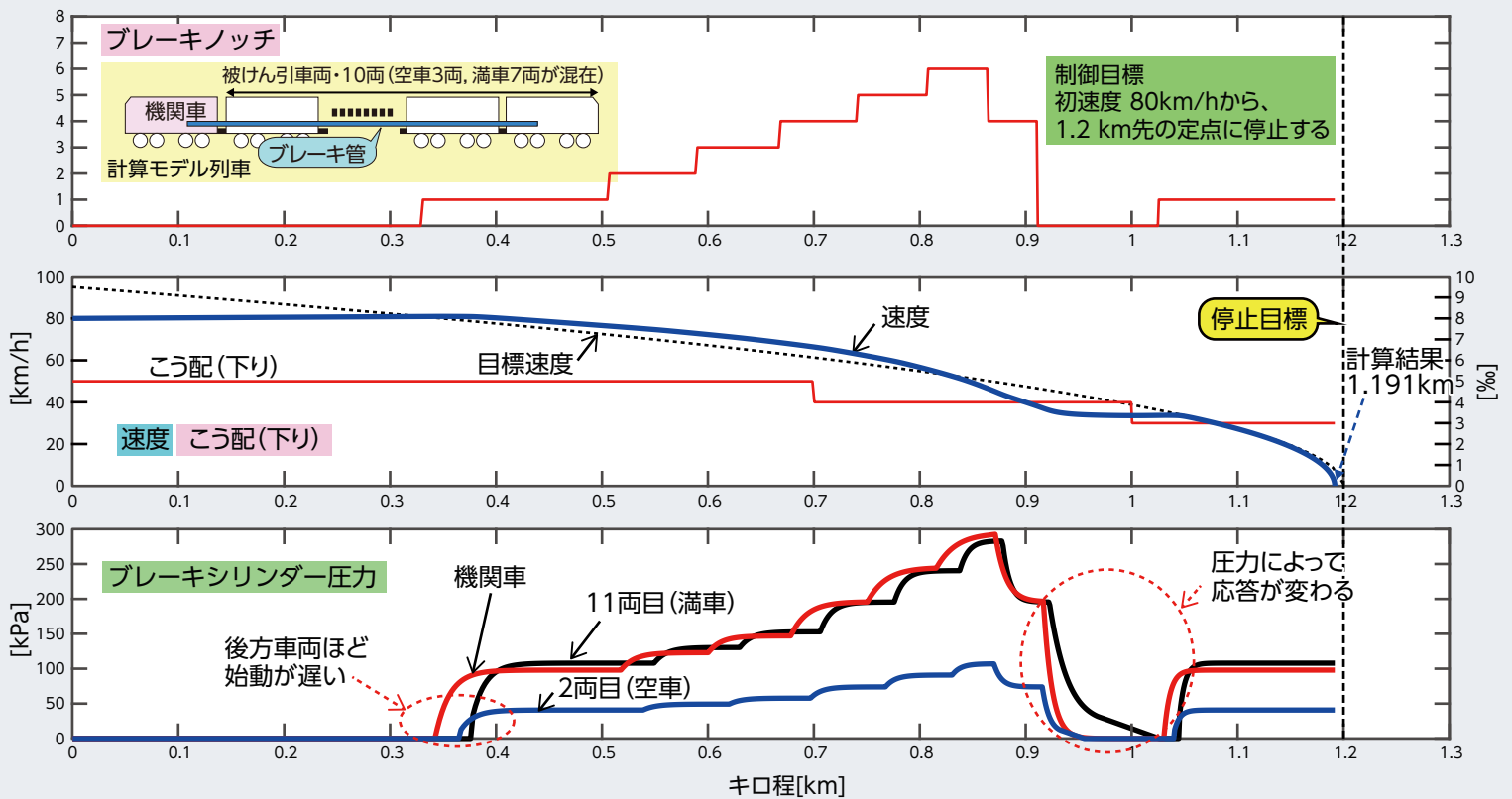


図9 自動ブレーキの機能向上・定点停止制御シミュレーション結果の例

制御)を適用したシミュレーション結果の一例です。機関車からのブレーキ操作の指令が連結した車両(被けん引車両)に伝わる時にブレーキ管の長さに比例して後方車両ほど遅れが大きくなる状況や、車両ごとの重量に比例するブレーキシリンダー圧力の給気・排気の応答の違いなどを計算によって模擬しています。制輪子の摩擦係数の特性や、線路のこう配条件などを計算に盛り込むことも可能です。このようなシミュレーションを活用し、現在の主流である「電気指令式」の車両に比べて応答が遅い自動ブレーキにも有効な制御手法の構築を目指しています。

おわりに

比較的簡素な構成で「つながって走る車両」の安全を担保できる自動ブレーキは、鉄道のブレーキシステムの一つとして、今後も一定の役割を果たしていくものと考えます。

自動ブレーキは基本的に急峻な操作には不向きな特性があることに加え、指令の伝達の時間差によって車両ごとに挙動が異なる状態になりやすく、車両間にはたらく力の作用も注意深く観察する必要があります。その一方で、世界中で使用実績が長く、たくさんの知見やノウハウが蓄積された技術でもあります。これらを有効に活用するとともに、改めて実機の現象把握に取り組みシミュレーションにも反映することで、自動ブレーキの機能向上を果たす制御手法について検討を深めていきます。 [RRR](#)

文献

- 1) e-Gov法令検索：鉄道に関する技術上の基準を定める省令(平成十三年国土交通省令第百五十一号), <https://laws.e-gov.go.jp/law/413M60000800151> (入手日:2024年10月29日)
- 2) Wikipedia: Brakeman, <https://en.wikipedia.org/wiki/Brakeman> (入手日:2024年10月30日)
- 3) 土方大輔: 列車ブレーキ時の滑走制御性能を評価する, RRR, Vol.79, No.1, pp.16-19, 2022
- 4) 中澤伸一: 鉄道車両のブレーキを制御して停止位置精度を向上する, RRR, Vol.79, No.4, pp.20-25, 2022