

### 第29回

# 空転再粘着制御

## 鉄車輪・鉄レール系のけん引の歴史

けん引とは物を引っ張ることであり、物を移動するための手段として古代から用いられてきました。

17世紀に蒸気機関が発明され、1804年、鉄車輪で鉄レール上をけん引走行する蒸気機関車(通称、ペニダーレン号)がRichard Trevithickによって開発されました。当初、滑らかな車輪と滑らかなレールが接触するだけでは、安定したけん引力を確保できないとの恐れから、1812年、けん引力の欠如を防ぐ目的で、歯車でけん引力を伝達するラック・アンド・ピニオン方式を採用したサマランカ号(図1)がJohn Blenkinsopにより開発されました。現在、この方式は山岳鉄道で急こう配区間を走行する車両に利用されています。William Hedley(図2左)は、歯車の必要性を疑い、動輪摩擦実験装置(図2右)を開発して、空転とけん引可能な貨車数や勾配などを調査し、1813年、最初の粘着方式の営業機関車としてパシフィック

ビリー号を開発しました<sup>1)</sup>。

1825年、George Stephensonによって公共鉄道に蒸気機関車が使用されてから、鉄道は瞬く間に世界に広がりました。1900年代前後には、ディーゼル内燃機関や電動機による動力源を持った鉄道車両が開発され、最近では、電気機器や半導体技術の進歩により、数万トンけん引可能な機関車列車や300km/h超の高速電車列車が実現しています。

## 空転現象

鉄道は転がり摩擦が小さく、他の輸送機関に比べて省エネですが、摩擦係数も小さく滑りやすい特性があります。

摩擦係数が小さいと動輪に空転が生じやすくなり、空転によりレールが損傷します。図3の写真は、著者が関わった走行試験で大きな空転(空転速度3~10km/h)が生じたときのレール損傷です。このような傷によりレールに亀裂が入りやすくなり、最悪の場合では折損に至ることもありますので、空転を防止する必要があります。

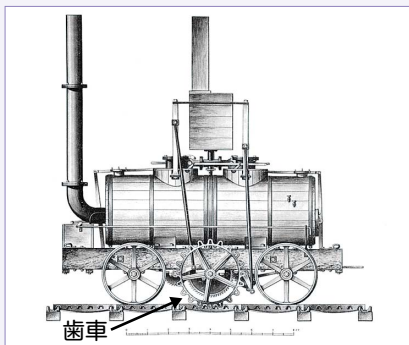


図1 サマランカ号

出典: Public domain, Wikimedia Commons

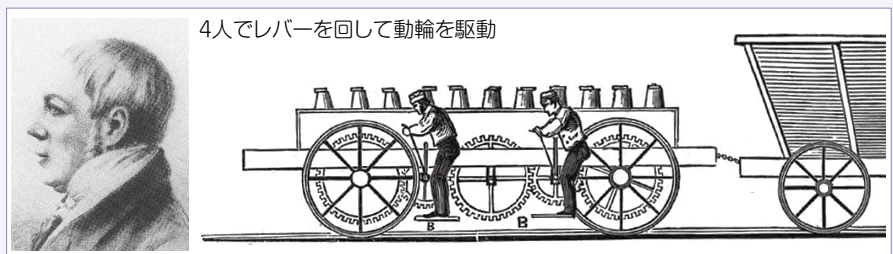


図2 ウィリアム・ヘドレー(左)と動輪摩擦実験装置(右)

出典: (左) Public domain, Wikimedia Commons / (右) Oswald Dodd Hedley, Who Invented the Locomotive Engine?, Ward and Lock, 1858, (画像: Google ブックスより)



図3 空転により生じたレール損傷例

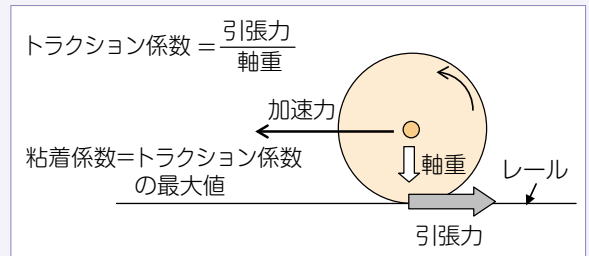
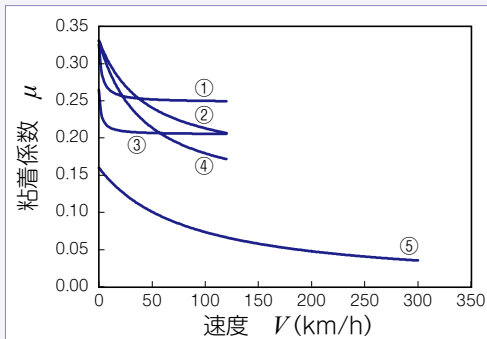


図4 加速・減速と引張力



実施者	実施年・車種・条件等	計算式
① Kother	1936年までのIchert&Michelの論文などによる結果をまとめたもの	$\mu = \frac{9}{V+42} + 0.116$
② Curtius & Kniffler	1943年、E19型電気機関車で実施 乾燥と湿潤の結果を共に含む	$\mu = \frac{7.5}{V+44} + 0.161$
③ 鉄道技術研究所	1956~1962年、直流および交流電気機関車EF15、EF30、ED61、EF60の結果をまとめたもの	$\mu = 0.265 \frac{1+0.403V}{1+0.522V}$
④ 鉄道技術研究所	1960~1961年、交流電気機関車ED70~ED74、ED46の結果をまとめたもの	$\mu = 0.326 \frac{1+0.279V}{1+0.367V}$
⑤ 鉄道技術研究所	200系新幹線でのブレーキ試験 湿潤レール	(参考) $\mu = \frac{13.6}{V+85}$

図6 粘着係数と速度特性

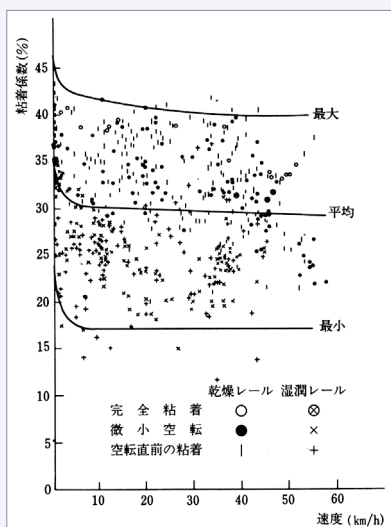


図5 粘着係数とその分布(BB 16500機関車)  
出典：交流電気車両の基礎理論<sup>2)</sup>

図4は原動機により車輪踏面のレール方向に引張力が働き、その反力が車両を加速させる力(加速力)となることを示しています。車輪とレールの間で伝達される力を軸重で除した値をトラクション係数と呼びます。すべり始めるとトラクション係数は小さくなる傾向にあり、最大値を粘着係数と呼びます。

粘着係数はどの線区にどのタイプの機関車を配置するかを決めるために重要な指標です。図5は、1960年に測定されたフランス国鉄電気機関車BB16500で行われた粘着係数測定の結果です。興味深いのは、平均に対して粘着係数のバラつきの分布幅が60%に及んでいることです。日本の機関車などでも同様に調査報告が行われていましたが、ここまでの分布幅はない場合が多いようです。走行場所や天候等によって大きく変わることや、どこで空転したかを判断することが難しく、測定処理方法によっても変わります。捉えることが難しく見えるこの現象のどこを使えば営業走行が可能となるか知る必要があります<sup>2)</sup>。

以前公表された粘着係数特性(粘着係数の近似式)の代表例を図6に示します。速度上昇とともに粘着係数が低下している現象は、車輪やレール間の水膜厚さや、車体や台車振動により軸重が動的に変動するなどの要因が推察され

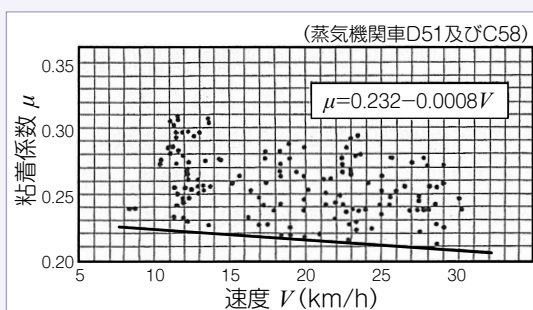


図7 蒸気機関車粘着係数測定結果(レール湿潤時)  
出典：鉄道業務研究資料、第2巻、第21号

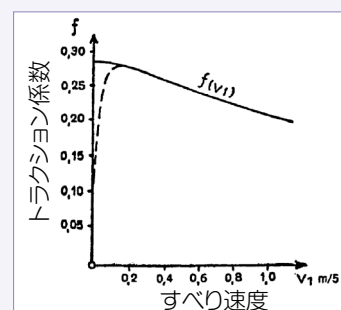


図8 すべり速度とトラクション係数  
出典：Karl Pflanz, Prag.: Rad und Schiene als Reibungsgetriebe, Elektrische Bahnen, HEFT 1/2, Januar-Februar 1944

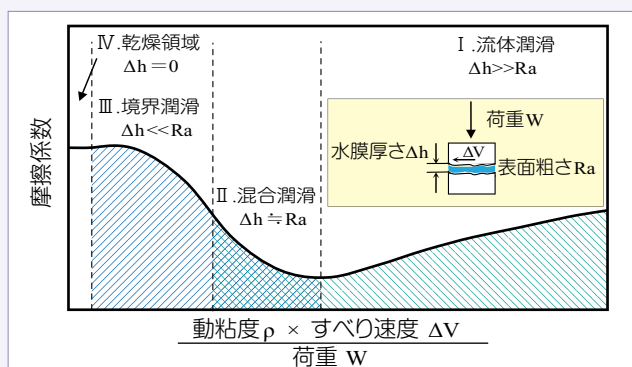


図9 ストライベック曲線

ます。一方、速度に依存しない場合もいくつか報告されています。ヨーロッパの粘着係数の実験式がいずれも平均値に対して求められているのに対し、日本では下限値に着目して実験式が求められています(図7)<sup>2)3)4)</sup>。

1944年、PflanzはMetzkowの行った走行試験のチャート进行分析し、すべり速度に対するトラクション係数の変化をおそらく初めてグラフ化(図8)<sup>3)</sup>し、すべり速度が大きくなるとトラクション係数が低下する現象を示しました。

一般に相対運動する二面間の潤滑状態と摩擦係数を説明するために、ストライベック曲線(図9)が使われます。車輪レール接触に関しては、表面粗さ、水の粘度、水膜厚さ、すべり速度、軸重の因子が摩擦係数に影響します。雨天時では車輪・レール間は「III.境界潤滑」領域にあります。

摩擦係数を向上させて高いけん引力を得るには、車輪

とレールの接触面の粗さを確保し、軸重（荷重）を大きく、すべり速度を小さくすることが有効です。

### 列車抵抗と加速力

列車を起動するとき、列車の出発抵抗や勾配抵抗に打ち勝つ引張力が必要です。引張力から列車抵抗を引いた力が加速力になるからです（図10）。出発抵抗は軸受の油膜形成状況に起因し、軸受内が金属接触している起動直後（速度ゼロ）が最も大きく、油膜が形成される速度2～3km/hで最小となります。編成が長くなるほど出発抵抗は大きくなるため、起動直後に最も大きな引張力が必要となり、繊細に引張力を制御することが重要となります。

蒸気機関車では、シリンダーに供給する蒸気の量を調整する加減弁に細かな刻みがあり、シリンダー圧力を細かく調整できます。電気車では、主電動機印加電圧を細かく制御し、引張力を滑らかに調整するように工夫されています。

また、前述しましたが粘着係数は走行速度が増加するとともに低下する傾向があります。高速域で速度300km/hを超える高速列車の場合には、雨天などの悪天候で期待できる粘着係数は約0.03となります。機関車の起動直後と比較すると約1/10（図5中の平均値は約0.3）ほどです。強風の中で、氷の上を滑らないようにそろりそろり踏みしめて歩いているようなイメージです。

機関車列車は起動時のけん引力確保が、立ち往生せずに確実に起動するために重要です。高速列車では、ダイヤを守るため、引張力が空気抵抗が支配的となる列車抵抗に打ち勝って、巡航速度を維持することが重要です。

### 空転防止・空転再粘着制御

蒸気機関車では、大きな空転を発生させてしまうと、火室に大きな通風を生じさせ、火床を壊してしまつて走行不能になる場合があります。そのため、機関士が目で「動輪

の動き」、耳で「プラスト音」などから空転を感知したら通風口を閉め、加減弁を調整しつつ動輪に砂をまき、素早く空転を抑える操作をしていました。砂をまくことで粘着係数向上が期待でき、現在の鉄道車両でもけん引力（ブレーキ力）の向上に用いられています。

直流電動機を用いた交流電気機関車は、変圧器タップ切り替えやサイリスタ連続位相（電圧連続）制御により、起動直後から細かく電圧制御でき、主電動機回路を直列・並列に組み替える必要がなく、直流電気車（抵抗制御）よりも、平均粘着力を高く維持できます。さらに主電動機電流を平滑化させる平滑リアクトルが挿入されているため、空転時の主電動機電流を遅らせる時素的要素として用いることで、自己再粘着特性が得られます。電氣的時定数と駆動系慣性の機械的時定数の関係を適切に選べば、空転が発生してもけん引力は大きく低下せず、自動的に再粘着が期待できます（図11）<sup>2)</sup>。

直流電動機を用いた直流電気車では、架線電圧を抵抗制御や主電動機の直並列の組み合わせを変えることで、端子電圧を段階的に制御していましたが、この手法だと再粘着性は期待できず抵抗や主電動機回路の切り替え時に電流が急変するため、そのピークに粘着限界が来るように設計しなくてはなりません。そのため、平均電流値が交流電気車に比べて小さく、けん引力を有効に活用できません（図12）。

空転が発散しやすい場合には、空転を検知して、強制的に再粘着させる必要があります。空転検知方法としては、主電動機毎の端子電圧や電流の差や変化率により空転を判別する方法があります。再粘着させる方法としては、ノッチ進段停止やノッチ戻し、砂まき動作（増粘着）、電機子分路による電機子電流低減法、空気ブレーキを押し当てる再粘着ブレーキがあります。交流機関車のけん引性能はもともと良いので強制再粘着は必要ないと思われませんが、重連走行時の後位機関車（総括運転）の空転は、運転士が気付きにくいので、これら機能を併用していました。

大きなけん引力を出力する車両では、各軸の軸重に10%以上の増減が生じ、各軸のすべりやすさに違いが生じま

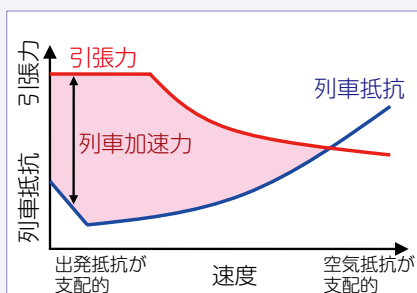


図10 列車抵抗とけん引力の関係

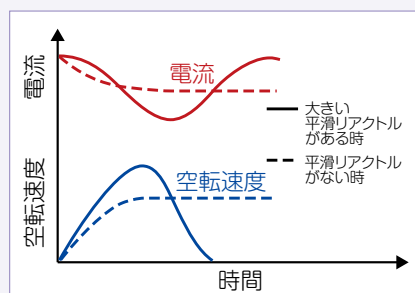


図11 交流電気車の再粘着現象

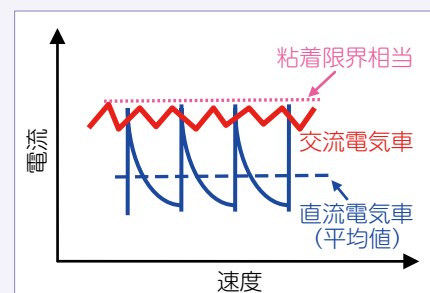


図12 交流電気車と直流電気車の電流挙動例

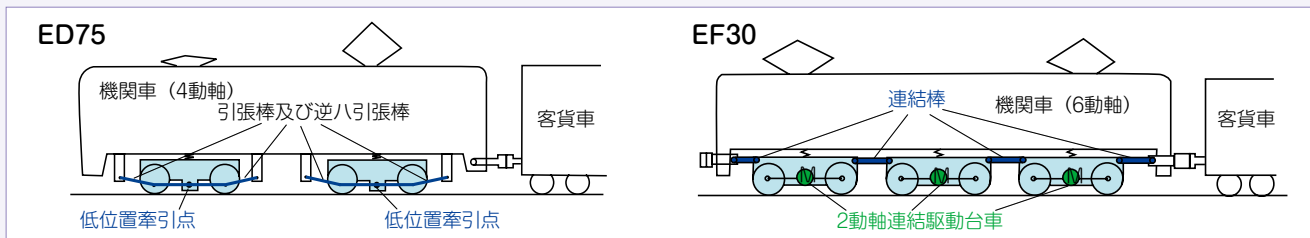


図13 機械的軸重移動補償法

す。これにより、けん引力は低下しやすくなります。これを防止するために軸重移動補償法があります。機械的補償法と電氣的補償法があり、機械的補償法は、引張力により発生する台車内や台車間の回転モーメントを打ち消すようなリンク機構が構成されています(図13左, ED75)。また、台車と車体のけん引高さと連結器高さを一致させることで、回転モーメントが最小となります。さらに、主電動機1台で台車内2軸を連結駆動するため(図13右, EF30)、蒸気機関車のロッドでつながった動輪と同じ効果が期待できます。電氣的補償法は各主電動機トルクを軸重移動量に合わせ<sup>あんぶん</sup>て按分し、けん引力低下を防止します<sup>5)</sup>。

上述した主回路特性や軸重移動補償により、交流電気機関車ED75などは、動輪6軸の直流機関車と同程度の性能が得られていたと言われています。しかし、これらの機械的補償法は、メンテナンスが増加することから、最近の電気車には用いられていません。

1980年代では、主電動機に交流電動機を用いるインバーター制御電気車が登場し、現在のスタンダードとなっています。交流電動機の使用は、ブラシや整流子等の機械的接触部品が低減されるためメンテナンス上有利です。

インバーター制御では、主電動機トルクを高速に制御できるベクトル制御が実現されています。しかし、トルク一定制御を行うため、空転が発生すると強制再粘着させなければ大空転に至る恐れがあります。インバーター制御車では、主電動機回転子軸端に装備されたパルスジェネレーターにより、速度や加速度を演算し、主電動機制御と空転再粘着制御などに用いられています。また、高速制御演算が可能になったため、回転加速度情報などからトラクション係数をリアルタイムに把握でき、粘着力推定演算を用いた高度な再粘着制御方法が登場しています。最近では、さらに速度センサーを用いずに、主電動機端子電圧や電流情報などから空転速度を推定する方法も実用化されています<sup>6)</sup>。

すべりやすい状況では、大空転を防止しつつ、ある程度のすべり速度を許容することで、摩擦熱によって車輪とレール間の水の粘性が低下し、けん引力が向上する場合があります。日本でも検討されていますが、ヨーロッパでは、少しでも大きなけん引力を得るために、すべらせたまま走

行する方法が実用化されています。ただし、すべらせることで車輪とレールの損耗や、走行エネルギー損失の観点に留意する必要があります。

【 おわりに 】

蒸気機関車が誕生してから、鉄レールと鉄車輪でのけん引力向上の成果は、車両技術者の飽くなき挑戦の賜物です。最近の半導体技術の進歩は著しく、高速に、そして思い通りに主電動機トルクが制御できるようになり、再粘着制御性能は格段の進歩を遂げています。2012年、TGV-POSが走行試験で鉄車輪とレールで世界最高速度574.8km/hを達成し、360km/hで営業可能なAGV高速電車がイタリアで実用化しています。日本でもE5系新幹線が320km/hで営業走行を開始しました。

粘着係数が速度とともに低下するのは、軸重が変動することや水膜厚さによる影響が主な要因と言われています。粘着係数を高くするために、車輪の振動をいかに抑えるか、車輪踏面粗さをいかに確保するか、という点に着目することで、さらなる高速化への実現可能性が見えます。

一方、車内伝送・通信技術やGPS技術が車両制御に活用され始めてきました。引通し線を用いる制御信号などが車内伝送で行えるようになりつつあるようです。もう少し先のことになると思いますが、これらを利用することで、地点情報や編成内各軸の空転状況を把握し、車両のメカニカルな運動も考慮した車両制御をすることで、さらなるけん引力向上や、空転・滑走が発生した際の乗り心地を改善する取り組みに弾みがつきます。

(山下道寛／車両制御技術研究部 駆動制御研究室)

文献

- 1) 水島とほる：蒸気機関車誕生物語，グランプリ出版，2004
- 2) 入江則公：交流電気車両の基礎理論，1984
- 3) 渡邊朝紀：空転・滑走検知，再粘着制御研究の内外の歴史と最近の動向，電学誌，122巻9号，2002
- 4) 速度定数業務必携，日本国有鉄道，運輸局，1984
- 5) 前橋栄一，山下道寛：大きな牽引力を伝達して列車を走らせる，RRR，Vol.65，No.8，pp.14-17，2008
- 6) 山下道寛：空転再粘着制御の技術動向，RRR，Vol.62，No.8，pp.10-13，2005