

大きな牽引力を伝達して 列車を走らせる

前橋 栄一

鉄道力学研究部
(車両力学 主任研究員)

山下 道寛

総務部
(副主査)



まえばし えいいち



やました みちひろ

モーダルシフトを促進する効率化輸送と機関車列車

地球温暖化防止策として鉄道が世界的に見直されてきています。航空機や自動車に比較して少ないエネルギーで、大量の乗客・物資を輸送できるからです。旅客列車は高速化により大幅な速達化が実現されているのですが、一方の貨物列車では、高速旅客列車と線路を共用する上で、輸送の効率化や高速化が課題となっております。

鉄道はエネルギー効率が高い特徴があり、トラック輸送からの転換（モーダルシフト）が進められています（CO₂排出量はトラックの1/7）。また、これから少子化によりトラックドライバー不足が懸念されているのに対し、貨物列車一編成では、運転士一人で10トントラック約60台分の輸送が可能です。これにより、地球温暖化問題に加えて、原油高騰、少子化などの問題に対する解決策になると言えます。

動力装置を持たない多数の車両を機関車で牽引する「動力集中方式」は動力装置の質量や走行抵抗が小さく、目的地まで駅停車せず直行運転するなどエネルギー効率が高い特徴があり、大量物資輸送を行なう列車に採用されます。一方、編成内に多数の動力車両を配置する「動力分散方式」は、一般の電車や新幹線のように、駅停車が多く、加減速度が高い列車に採用されます。近年はトラック27台分の置き換えが可能なスーパーレールカーゴのような動力分散式の高速度・高加減速貨物車両も登場しており、荷主の要望に対し臨機応変な対応が進んでいます。

粘着と機関車の牽引力

貨物列車では、同一線区を走行する高速列車に影響を与えないような動力性能を満たす必要があります。そのため、重い荷物（貨車）を牽引する機関車では、大きな牽引力を必要としますが、一方、後で述べるようにその牽引反力が牽引力を低下させる場合があります。そのため、牽引性能に影響を及ぼす要素を極力排除し、車両操縦や主回路制御の面からも、牽引性能を低下させないような注意が必要に

なります。

鉄道車両は車輪とレールに作用する粘着力を活用して走行しており、粘着力は粘着係数と軸重又は輪重のように車輪とレールが接触する力に比例します。レール乾燥時の粘着係数は0.3くらいと言われ、例えば軸重100kNでは1軸当たり30kNの粘着力が得られるということになります。理論上は軸重や輪重が大きければ大きな牽引力を得ることが出来ますが、軌道側の許容制限により日本国内では150kN程度の軸重制限を受けるので限度があります。

機関車列車は編成内の駆動軸が少なく、軸重制限の範囲内で有効に牽引力を引き出すためには繊細な動輪周引張力制御が必要となります。駆動力の急激な変化は空転発生による牽引力低下の原因となりますので、蒸気機関車以来様々な工夫が見られます。蒸気機関は機構上の宿命で動輪1回転中に駆動力が大きく変動するため空転を生じやすく、複数の動輪をロッドと言われる棒で連結して回転連動させ、駆動軸数を増して空転防止対策としています。また、走行動揺や軌道からの影響による輪重変化で粘着力や牽引力低下がなるべく起こらないように旧型の機関車では図1に示すような板バネ、天秤やテコを応用した荷重つりあい機構を採用していました。これによって安定した牽引力が得られるように工夫していました。

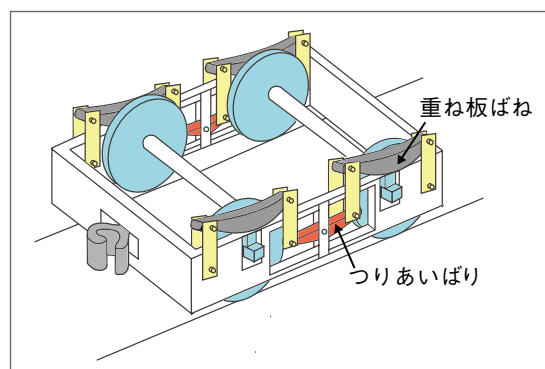


図1 旧型機関車台車のつりあい機構

台車・車体の挙動が 粘着に及ぼす影響

図2と図3に示すように、機関車の起動や加速時には、牽引性能を低下させる要因があります。

まず、動輪周引張力が発生すると、その反力が牽引装置を介して車体に伝わる際、台車内に回転させる力（以下、回転モーメントと称します）が発生します。これにより、各軸の軸重に差が生じ（軸重移動）、軸重が小さくなった軸は滑りやすく、大きくなった軸は滑りにくい現象が発生し、粘着力が有効に活用できなくなります。

また、車体に伝わった牽引力は、連結器を介して貨車を牽引する力となりますが、連結器と牽引装置各々に働く力の作用点のレール面からの高さが異なる場合、車体にも回転モーメントが発生し、台車間に荷重変化が生じます。これを避けるために、軸重変化を起こし難い台車機構を持った動力車両を構築する必要があります。

黎明期（20世紀前半から）の大型電気機関車は、少ない原動機で多数の軸を駆動する方式で、台車・台枠が一体化した構造だったので軸重移動抑制効果が得られましたが、軸重をバランスさせるため、つりあい機構は必須要件でした。図4に示すような小出力の小型電気機関車の一部でも、両台車を直接リンクで結合し、さらに台車端部に連結器を装着し、車体を介さずに直接牽引力を台車から客貨車に伝達していました。この方式により、台車間軸重移動や台車内軸重移動が抑制されてます。

最近では、曲線追従性の良いボギー台車が採用され、電動機出力は大幅に向上したものの、軸重をバランスさせる機構がなくなり、台車内や台車間軸重移動問題が無視できなくなりました。

空転させにくい工夫

粘着係数は常に一定でなく、レール面が濡れていたり油があったりと場所に応じて大きく変化します。例えば、蒸気機関車の場合では、シリンダに供給する蒸気の量を、空転しないように増してゆくことが有効でした。蒸気量を調整する加減弁には細かい「ノッチ」と呼ばれる刻みをつけましたが、現在でも鉄道車両の主幹制御器の取り扱い用語

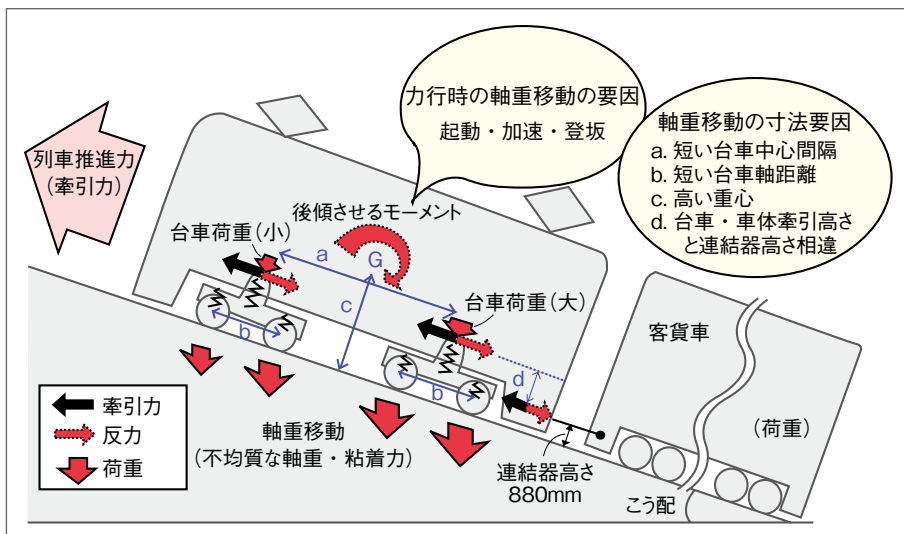


図2 牽引起動時・勾配上の車両挙動

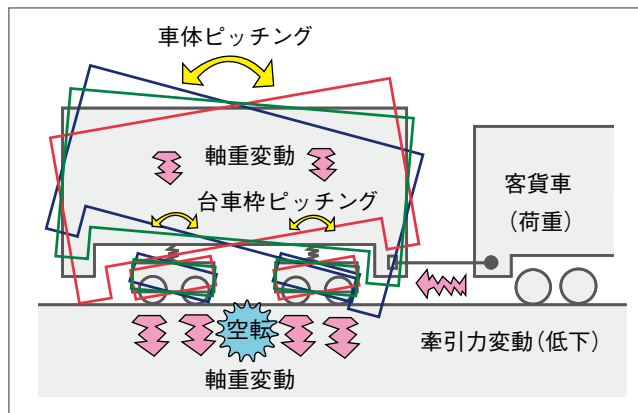


図3 牽引走行中の車両挙動

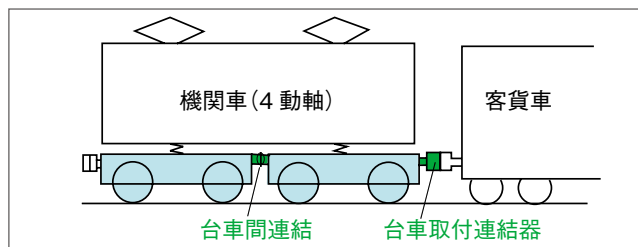


図4 ED級小型旧型機関車の牽引構造

として定着して使われています。

電気機関車は出力調整時の電力供給変化を細かく行なう必要から、操作や制御装置が工夫されていますが、一定の引張力で走行している場合においても空転が発生する場合があります。空転時に動輪周引張力を減少させて「再粘着」させる必要が生じます。

電気機関車の力行運転時には、主電動機に印加される電

圧変化に起因する電動機トルク変化が発生し、空転発生原因となることも無視できません。初期の電気制御装置で電動機の数が少ない時代には、主幹制御装置の制御ノッチの段階を多くできず、加速時には引張力の変動を伴う粗い制御方式とならざるを得ませんでした。このように、空転に不利な制御方式であったにも関わらず、勾配線区で活躍出来た背景には、台車結合構造や連結器高さなど機構面の工夫が奏功していたのではないかと考えられます。

空転防止を考慮した主回路システム

電気駆動車両の電動機を並列回路構成とすれば、空転が発散することを抑制できることが知られています。しかし、抵抗を組み合わせた主回路制御方式では、起動時や低速時には極力低電圧にしないと電動機が焼損したり空転が生じるため、低速時のみ電動機を直列結線にしています。この場合は、並列接続に切り替える時に、引張力が不連続に変化します。このため、抵抗段を多くして滑らかな引張力制御ができるよう設計されました。

架線から交流を整流・電圧制御して直流電動機を用いる交流区間用機関車等では、制御装置の電圧制御範囲を大きくして全速度域を並列結線のままとして空転抑制にも有利な構造としている車両（ED75、79等）もあります。

牽引力は動輪半径に動輪の回転トルクを掛け合わせたものですが、トルク変化を滑らかにして空転を抑制する運転制御を運転士の熟練によって行なう方式から、制御機器が自動で行なう方法に進化しており、ノッチ戻し、出力カットや出力絞りも行なえるようになりました。例えば、抵抗制御の直流電気車両では、制御回路構成の特徴から電動機と直列にした抵抗を短絡したり、複数の電動機を直列から並列につなぎ替えて電圧が変化させる時などには大きなトルク変動が発生して空転を生ずることがあり、抵抗をさらに小刻みに短絡してゆくパーニヤ制御や起動時の界磁弱めを行う方法等で空転を最小限とするよう工夫されています。また、交流電化区間用機関車（ED79等）では、交流から直流に整流する半導体による連続位相制御を実施して電圧上昇を細かくして急激な牽引力変化が起こりにくい制御をしているものがあり、同じ直流電動機を使う抵抗制御の直流電気機関車よりも空転に有利な構成となっています。

空転対策と軸重移動補償、防止策

従来から行われていた軸重移動を補償する方法としては、大きく二つに分けて電氣的軸重移動補償方法と機械的軸重移動補償方法があります。前者は、各軸の軸重移動量に合わせて、各軸の電動機トルクを調節します。たとえば、駆動時には前軸の軸重が減少するため、初期トルク指令を基準値よりも -5% とし、後軸の軸重は増加するため $+5\%$ とするなどして、各軸の滑りやすさを均等化させることで、粘着力の有効利用を目指しています。

機械的軸重移動方法では、次に述べる三つの方式がよく知られています。

一つ目として、台車内軸重移動を低減させるために、台車牽引装置を極力レール面に近づける方法があります。

二つ目として、機械的なリンク機構を台車内に構成し、台車枠に加わる回転モーメントを打ち消すようにリンク機構が働くことで、仮想的な牽引伝達点（合成着力点と呼ぶ）をレール面上に持って行く方式のような、たとえば、図5に示すような引張棒連結式牽引装置（ジャックマン軸方式）などを採用して台車・車体間の牽引高さを極力下げ、さらに「逆ハ引張棒」の傾きを加えて見かけ上の牽引力作用点を車輪レールの接触点に一致させ、牽引反力による台車の軸重減少が最小限になるよう工夫したものなどがあります。

一方、台車間軸重移動の他に、車体内の回転モーメントにより台車間軸重移動も発生するため、これらの補償も講

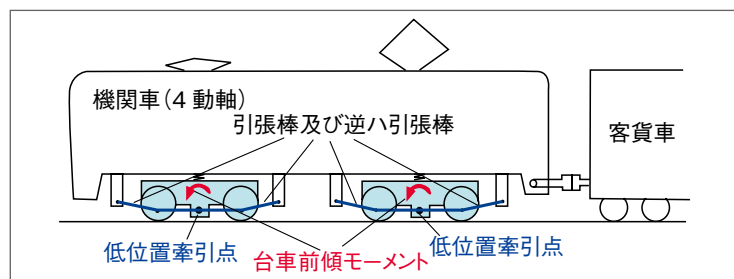


図5 ED75等の引張棒連結式牽引装置

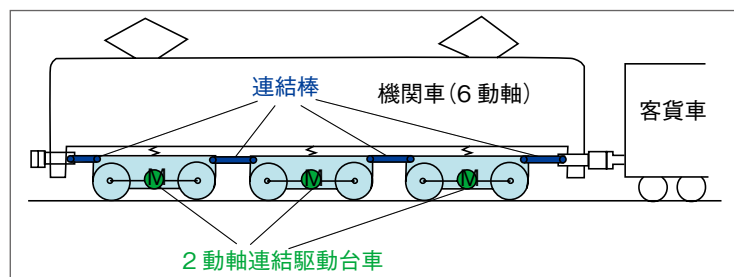


図6 EF30の牽引構造

じる必要があります。台車間軸重移動は台車と車体の牽引高さや連結器高さの差により生じます。前述のように、起動時には前台車の荷重が小さくなり、後台車の荷重が大きくなります。

この台車間軸重移動は台車と車体の牽引高さや連結器高さが一致した場合に最小となり、これを活用した対策が図4の台車間結合や台車枠装着連結器であり、さらに発展させた図6に示すEF30の台車間・連結器間連結棒連結方式です。台車の牽引力は車体を経ずに直接連結器高さで台車や連結器間に伝達されるため、長い車体と相乗して車体を後傾させるモーメントによる軸重移動が生じにくい利点があります。台車内軸重移動の抑制には長い台車軸距離が有利ですが、曲線区間におけるレールや車輪フランジ摩耗に影響の出ない範囲にする必要があります。

三つ目としては、図6のように1台車内に1台の電動機を装荷して2軸を連結駆動する方式があります。これにより、台車内の軸重移動を補償できます。しかし、機構が複雑となるため、歯車数の増加や継ぎ手の構成を慎重に行う必要があります。

これらの機械的な軸重移動補償方法は、メンテナンスが増加する傾向にあることから、最近の電気機関車には用いられていません。

最近の鉄道総研での取り組み

鉄道総研では、更なる粘着力有効利用に関し、電動機制御系と台車・車体機械系を含めた総合的な基礎的研究を実施しています。最近では、実車での現象把握を行うために図7のような8.4分の1電気車ミニモデルを開発し、様々な角度から台車・車体が粘着に及ぼす影響を調査しています。

ミニモデル車両を用いて得られた成果を図8に簡単に紹介します。速度ゼロから車両起動直後に発生した第1軸の空転が第2軸の空転を誘発し、両軸とも空転が収束しなくなる現象(連れ回り空転)が再現されました。これは、台車・車体振動によるものです。15秒後に動的な軸重移動を考慮した空転誘発を抑制するトルク制御を行うと、その5秒後以降では、第2軸は大きな空転には至らず、連れ回りをほぼ抑制できました。また、35秒時点で通常制御に戻すと連れ回り空転が再発しました。これらの基礎的な試験結果より、動的な軸重移動補償を電气的に行える可能性を示しました。

車両振動による連れ回りを抑制し、粘着係数を1%向上

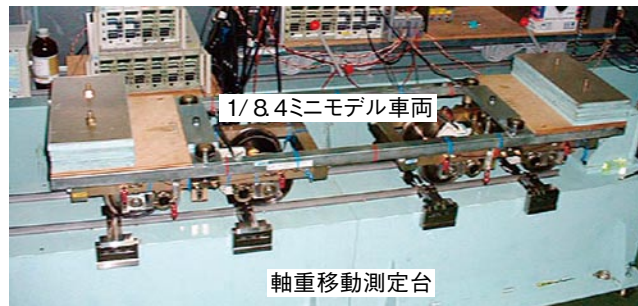


図7 1/8.4ミニモデル電気車

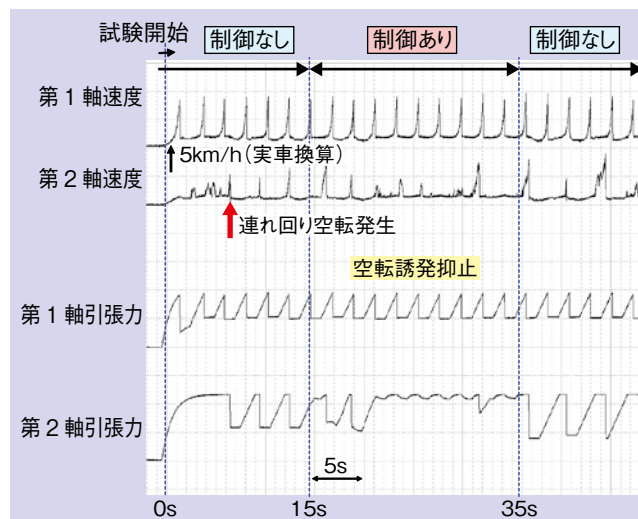


図8 1/8.4ミニモデル実験結果例

できれば(現状の平均利用粘着係数 $\mu = 20\%$ の場合に約5%のアップに相当)、例えば、20両の編成貨物列車に対し、1両加えた21両に輸送力増強が可能となります。また、悪天候時にもより安定した輸送に寄与できます。

軸重許容条件が厳しい国内の機関車では、台車や車体の機構の工夫と、車両の挙動をリアルタイムに予測できる制御装置との組合せが、牽引伝達力の有効利用に効果的です。走行中の勾配や曲線、軌道の変状に起因する自車の動的挙動を把握できるモニタリングやフィードバック制御系の構築も可能となるでしょう。

おわりに

大きな牽引力をうまく伝達するための、先人の開発した手法をひもとき、その発想を紹介してきました。一方、現代の省保守ニーズから機械部品の簡素化が図られる中、新たな手法を模索していくことは、鉄道固有技術のさらなる発展のために有効と考えています。RRR