

機関車のけん引力を向上する

山下 道寛

車両制御技術研究部(駆動制御研究室 主任研究員)



やました みちひろ

はじめに

鉄車輪と鉄レールを用いて走行する鉄道車両は、省エネルギーの観点から有効な輸送手段として世界的に見直されてきています。それは、鉄と鉄の転がり接触による伝達力(粘着力)を利用した駆動方式を採用しているため、走行する時の抵抗(転がり摩擦)が小さく、他の輸送機関に比べて少ないエネルギーで大量の乗客や物資を運ぶことができるからです。一方、鉄車輪と鉄レールのデメリットとしては、摩擦係数が小さく車輪が滑りやすいということが挙げられます。鉄道車両の場合には、車両重量当たりの駆動力の比は、乾燥状態で0.2~0.3、雨天時では0.1~0.2程度となります。自動車などのゴムタイヤとアスファルト路面では乾燥時で0.5~0.7、雨天時で0.4~0.6が期待できます。鉄道は自動車と比較すると、単位重量当たりで得られる駆動力が半分以下であることが分かります。そのため、駆動力・制動力の確保は安定輸送の要となります。

国内の旅客列車では、編成内の50%以上が動力車両で構成(動力分散方式)され、大幅な駆動力と制動力の確保が実現されています。一方、貨物列車では、営業最大26両の貨車を1両か2両の機関車でけん引(動力集中方式)するため、悪天候やレール上の落ち葉などにより空転が頻発した場合、編成列車の加速力が低下し、遅延や最悪の場合には勾配上で起動不能となる恐れも生じます。動力分散方

式よりも輸送に必要とされるコストが低く優れた特性がありますが、より確実に駆動力を得るための方策が必須です。

ここでは、電気機関車のけん引力向上を目指した、最近の鉄道総研の取り組みについて紹介します。

駆動力

主電動機により車輪踏面のレール方向に加える力「動輪周引張力」と、車両を加速させる力「粘着引張力」の関係を図1に示します。粘着引張力(以下「引張力」)は、主電動機トルクにより車輪踏面の接線方向に発生する「動輪周引張力」から、駆動系慣性(車輪軸、大歯車、小歯車、主電動機回転子)を回転させるための力を減じた値となります。

車輪周速度と列車速度との差を「すべり速度」とすると、「すべり速度」と駆動力の間には、一般的に図2に示すような特性があります。図2では、引張力を軸重で除した値を「引張力/軸重」 μ とし、 μ の最大点は粘着係数と呼ばれます。また、すべり速度によって、微小すべり領域(クリープ領域とも言う)と巨視すべり領域の二つの領域に分けられます。微小すべり領域では、すべり速度にほぼ比例した引張力が得られます。一般的に、この点を越える巨視すべ

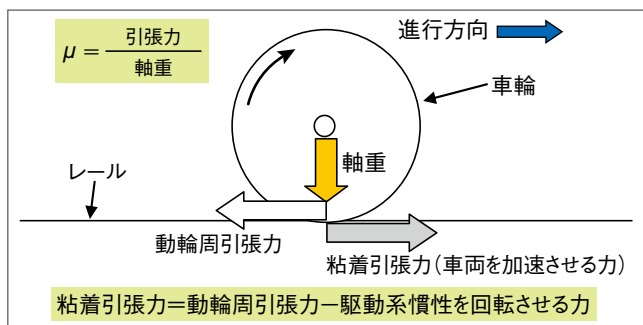


図1 車輪・レール間の引張力

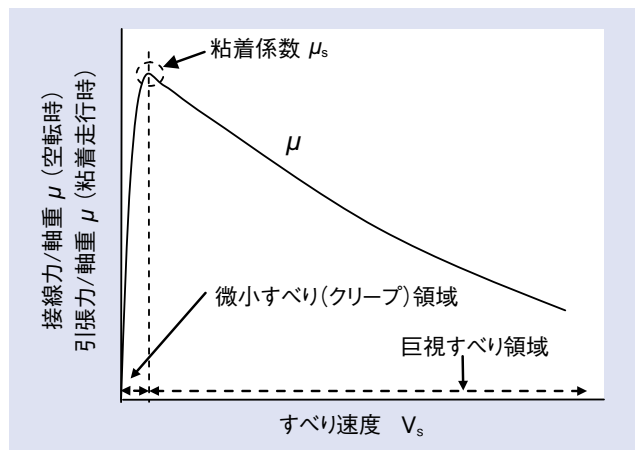


図2 すべり速度- μ 特性

り領域では、すべり速度の増加につれてレールへの伝達力が小さくなります。微小すべり領域の引張力は、車輪に加えた力に応じて変化しますが、巨視すべり領域では動輪周引張力とは直接的な関係なしにレールへの伝達力が決まってしまう。そのため空転時には、この伝達力を引張力とは区別する必要がある、「接線力/軸重」 μ と呼びます。

「引張力/軸重」 μ の値が大きいと粘着力を有効に利用できていると言えますが、粘着係数值に近づくため空転しやすくなるともいえます。粘着係数を超えて引張力を得ることは不可能ですので、粘着係数ぎりぎり引張力を得ることができれば理想的です。しかし、滑るか滑らないかの状態では空転する確率は高くなります。空転するとレールから得られる駆動力は小さくなり(図2)、そのまま何もしなければ動輪回転速度は急上昇しますので、空転と判断したら速やかに動輪周引張力を低下させ、再粘着させる必要があります。これを再粘着制御といいます。

駆動時に生じる軸重移動

駆動時には、引張力によりけん引装置にけん引反力が生じ、これにより台車・車体に回転モーメントが発生します(図3)。そのため各軸の軸重が変化します。ただし、全軸の軸重の合計値は静止時と変わりません。一般的には先頭軸、第2軸・・・最後尾軸の順に軸重の値が大きくなります。この影響により、各軸に同じ電動機トルクを与えても「引張力/軸重」 μ は異なります。

最近のインバータ機関車を例にして起動時の各軸の軸重移動量を考慮した「引張力/軸重」 μ を図4に示します。

各軸とも粘着係数が同じ場合には、前軸がすべり易く、最後尾軸はすべり難いと言えます。最後尾軸の粘着力については、まだ活用の余地があることとなります。各軸の「引張力/軸重」 μ が図4の青い点線のように均等となれば、各軸の滑り易さが均等化し粘着力を有効に活用できます。

従来の軸重移動補償¹⁾

けん引力が大きな電気機関車では、軸重移動量が大きく、従来から軸重移動を補償する方策が用いられてきました。

駆動時の各軸の滑りやすさに差が生じる状態を補償するため、従来から軸重移動補償として機械的補償と電気的補償が行われてきました。機械的軸重移動補償には、台車内の回転モーメントを打ち消すように機械的なリンク機構を構成するジャックマン軸方式(ED75形)や(図5)、1台の

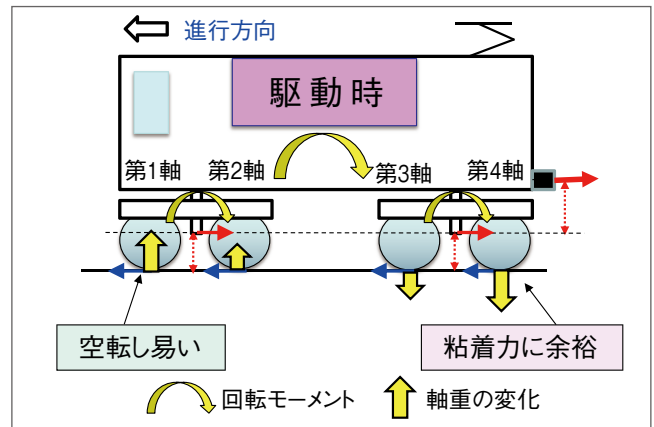


図3 駆動時の各軸軸重の傾向

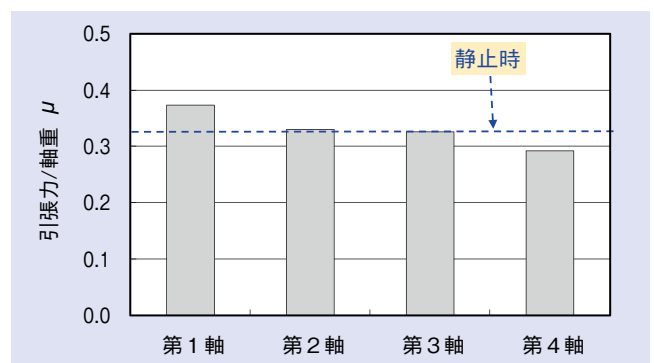


図4 各軸の「引張力/軸重」

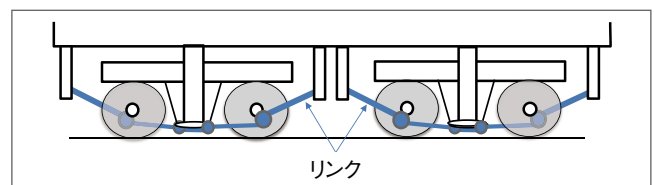


図5 機械的リンク機構の構成例

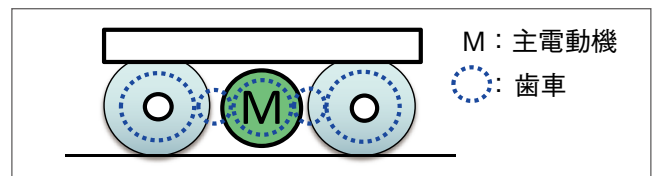


図6 1電動機多軸駆動方式

台車に1台の電動機を装荷して、2軸を連結駆動する方式(EF30形やEF80形)が知られています(図6)。従来、これらの機械的補償方法が用いられてきましたが、メンテナンスが増加する傾向にあるため、最近ではあまり用いられていません。

最近のインバータ機関車では、メンテナンス軽減の観点から電気的補償が主流となっています。電気的補償では、各軸の電動機トルクを個別に設定できる場合、各軸の軸重

移動の傾向に合わせて経験的に各軸の引張力を調整します。予め、軸重が減少する軸の引張力を若干低めに設定し、軸重が増加する軸の引張力を若干高めに設定することで、できるだけ各軸の滑りやすさを均等化させます。この方法は各軸個別電動機制御方式の電気機関車で用いられています。

空転時に生じる軸重移動

ある軸の空転が、空転していない他軸の空転を誘発させながら加速している様子（以下、空転誘発と呼びます）を図7に示します。特に、電気機関車のように少ない駆動軸数で大きな引張力を必要とする場合には、このような現象が多発すると安定した引張力が得られないため、車両加速の低下や貨物けん引トン数に影響を及ぼします。

この現象について説明するため、図8に第1軸に空転が発生したときの各軸の軸重移動の傾向を示します。まず、軸重の軽い第1軸のみが空転を開始し、その空転が検知されると、電動機トルクを低下させる再粘着制御が動作します。これにより、今まで台車と車体に働いていた回転モーメントが減少します。このため、第2軸、第3軸、第4軸の軸重が減少して「引張力／軸重」が大きくなり、粘着係数に一致すると空転が誘発されることとなります。

空転頻度を低減させる^{2),3)}

上述した駆動力に及ぼす現象を踏まえ、機関車の空転頻度を低減する空転抑制アルゴリズムを開発しました。その

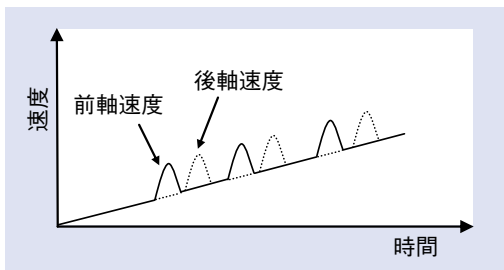


図7 ある軸の空転が他軸の空転を誘発させる様子

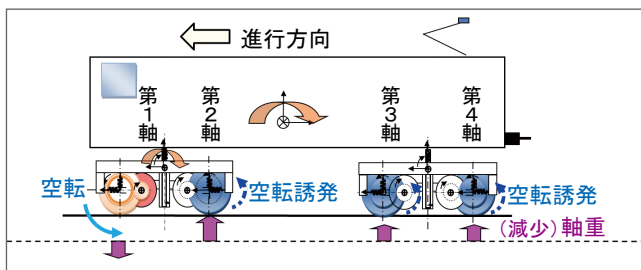


図8 一車両モデルにおける空転時の軸重移動例

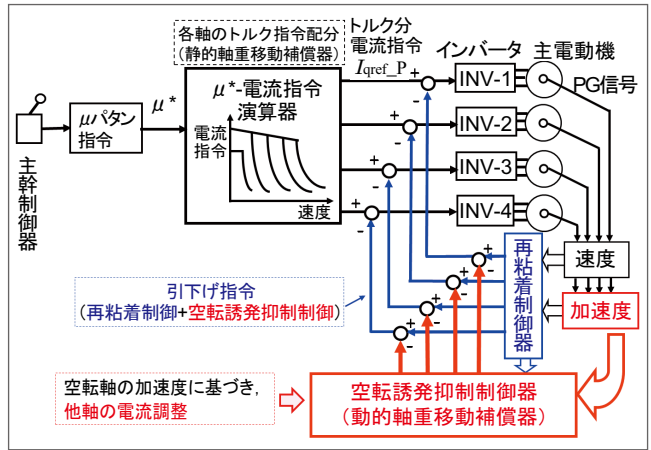


図9 軸重移動を考慮した再粘着制御システム

概要を説明します。

まず、各軸の滑りやすさを均等化するため、軸重移動補償（静的）を行います。「 μ^* -電流指令演算器」は、静的な軸重移動を電氣的に補償する電動機トルク指令演算器です。ノッチ指令に応じて、予め設定した各軸の「引張力／軸重」指令（ μ^* ）が「 μ^* -電流指令演算器」に入力されます。演算器では、これまでの“経験的に決める方式”とは異なり、台車・車体モデルによる軸重移動量計算式に基づいて、各軸トルクに比例した電動機トルク分電流指令 I_{qref_P} が自動的に決定されます。

併せて、空転時の軸重移動による空転誘発を抑制するため、動的な軸重移動に対応した空転誘発抑制制御（動的軸重移動補償）を織り込みます。前述したように空転再粘着制御のトルク引下げによって、回転モーメントが低下し、そのトルクの引下げ量に応じて軸重が変化します。その引下げ量は空転発生時の車輪の回転加速度に比例する傾向にあります。これは、動輪周引張力と接線力（レールが車輪を押し力）の差が、駆動系慣性を回転させる力となるためです。この差が大きいと空転時の車輪の回転加速度が大きくなります。そのため、車輪の回転加速度に応じて、後ろ軸の電動機トルクを微減することで、動的（空転時）な軸重移動による影響を補償し、空転誘発抑制に効果があると考えられます。なお、空転による車輪の回転加速度は、厳密には車輪加速度から車両加速度を減じた値を用いることが望ましいのですが、機関車のように1,000ton以上の貨車をけん引する場合には、空転時の車輪加速度が編成列車の加速度に比較して大きくなるため、車輪加速度を空転度の指標として用いても差し支えありません。上記で述べた提案方法を反映させた再粘着制御アルゴリズムを図9に示します。

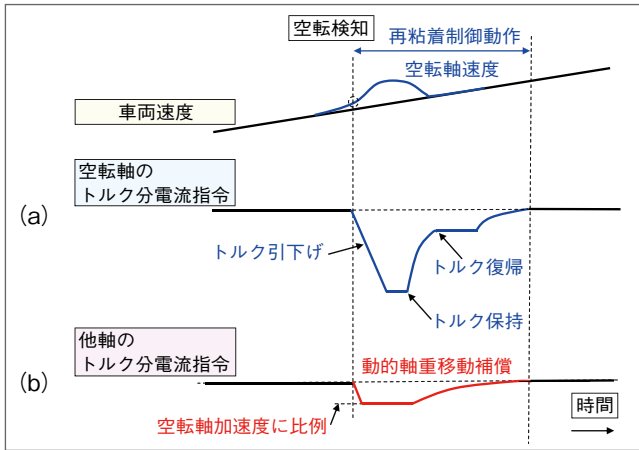


図10 空転時の各軸のトルク分電流指令

車輪の速度と加速度情報は、電動機の回転に応じて電圧パルスが発生するPGセンサ信号に基づいて算出し、「再粘着制御器」に入力されます。再粘着制御器の基本動作としては、車輪の速度差と加速度により空転を検知し、それらの値に応じて電動機トルクの引下げ、保持、復帰を行います(図10(a))。また、図10の各トルク分電流指令動作に示されるように、再粘着制御と空転誘発抑制制御が同時に行われます。なお、図9の「空転誘発抑制制御器」からは、空転した軸の加速度に応じた空転誘発抑制制御用の引下げ指令が出力され、「再粘着制御器」からの引下げ指令と加算されて、トルク分電流指令から減算されます(図10(b))。

日本貨物鉄道株式会社の協力を得て、高崎操車場構内の着発線において走行試験を実施しました。

試験車両としてEH200形式直流電気機関車(図11)を用い、駆動軸は前側一車体の4軸分としました。構内走行時の試験車両編成を図12に示します。試験走行時には、負荷となる貨車を模擬するため負荷用機関車EF64を2両連結しました。そして負荷用機関車に踏面ブレーキによるブレーキ力を与えて負荷(貨車650ton相当)を模擬しました。また、走行時には、雨天時の車輪・レール条件に近づけるために、各駆動軸の車輪前方に散水ノズルを仮設し、車上から1車輪あたり毎分約0.5リットルを散水しました。

その結果、従来の再粘着制御に空転誘発抑制制御を併用することで、空転再粘着制御の実施回数は約20%減少し、平均けん引力は約4%増大することが確認できました(図13)。

おわりに

機関車のけん引力を向上するために従来の方策を紹介し、最近の各軸主電動機を個別に制御できる機関車に適した新



図11 試験車両EH200形式直流電気機関車



図12 試験車両編成

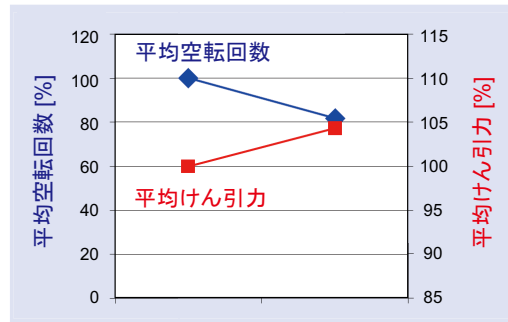


図13 平均空転回数と平均けん引力

しい電氣的軸重移動補償制御を提案しました。今後、さらなる輸送安定化に貢献するため、複数の主電動機を一括で制御する電気車への適用も検討中です。

最後に、実車試験を行うに当たりご協力を頂いた日本貨物鉄道株式会社、株式会社東芝府中事業所交通ドライブシステム部の関係各位に感謝申し上げます。RRR

文献

- 1) 前橋, 山下: 大きなけん引力を伝達して列車を走らせる, RRR, Vol65, No.8, pp.14, 2008
- 2) 山下: 動的軸重移動補償を用いた空転頻度低減制御, 第231回鉄道総研月例発表会, 2009.2
- 3) 山下, 添田: 電気機関車の軸重移動を考慮した空転再粘着制御法の開発, 鉄道総研報告, Vol24, No.6, pp.41, 2010