

粘着引張力を考慮した運転曲線の作成法

○ [電] 熊澤 一将 (鉄道総合技術研究所)

The Method of Preparing Train Performance Curve
Considering Adhesive Tractive Force

○ Kazumasa Kumazawa (Railway Technical Research Institute)

Train performance curve is drawn up on the basis of the theory for efficient train operation. But in some cases, an appropriate train performance curve cannot be drawn up by applying to theory for efficient train operation. The case to prepare the train performance curve for trains which adopt concentrated traction system come under such cases. To result this problem, I suggest adding the concept of adhesive tractive force to the method of preparing train performance curve based on the theory for efficient train operation. By applying this modified method, a more realistic train performance curve can be drawn up.

キーワード: 運転曲線, 運転理論, 粘着, 引張力

Key Words: Train performance curve, Theory for efficient train operation, Adhesion, Tractive force

1. はじめに

鉄道において輸送計画を策定する際、駅間の運転時分が必要となる。その駅間の運転時分を求めるために必要となるのが運転曲線である。この運転曲線の作成は、運転理論を基にして行う。運転曲線の作成においては、以下の点など (参考文献(1)より抜粋) を満足することが条件となる。

- 運転途中のいかなる線路条件の箇所でも、停車しても、退行することなく発車、加速できるけん引重量または編成であること
- 運転途中のいかなる線路条件の箇所でも、必要なブレーキ距離またはブレーキ減速度を確保できること
- 駅間の基準 (計画) 運転時分で必ず運転できること

しかし、現在の運転理論における運転曲線の作成法を用いた場合、上記の条件を満たせない点が存在する。その一例が、機関車けん引による列車、つまり動力集中方式の列車における運転曲線の作成である。

現在、運転理論に基づく運転曲線を作成する場合、その列車が有する最大の性能を用いるという観点から力行時には常に最大ノッチを使用することを前提としている。しかし、動力集中方式の列車の場合、実際の運転場面において、起動時から最大ノッチを使用することは難しい。そのため、運転曲線に示される加速度 (性能) が実現できないため、運転曲線により得られる運転時分では走行できないという問題が生じる。そこで、基準運転時分の算出を算出する際

は、担当者の経験により多めの余裕時分を加算するという調整がなされている。つまり客観的な運転曲線の作図方法が検討されていないのが、現状である。

本稿では、この点を解消するため、粘着引張力という客観的な指標に基づいた運転曲線の作成手法を提案する。

2. 運転曲線の作成法とその課題

2.1 運転曲線の作成

運転曲線は横軸を距離として、列車の速度変化を示す速度曲線と時間変化を示す時間曲線から構成される (図 1)。

運転曲線の作成においては、列車 1 つの質点とし次の運動方程式を基本として用いる。

$$\alpha = \frac{T(v) - R - B(v)}{W} \quad (1)$$

α : 加速度[m/s²] T : 引張力[N] R : 列車抵抗[N]

B : ブレーキ力[N] W : 列車重量[kg]

モータやエンジン等によって決まる引張力 T から、走行する際に生じる抵抗 (列車抵抗) R およびブレーキ力を減じ、これを列車重量 W で除することにより加減速度が得られる。この加減速度をもとにして、運転曲線の一部である速度曲線が作成できる。さらに、以下の積分を用いることによって、得られた速度曲線から駅間走行時分を表す時間曲線を求めることができる。

$$t = \int \frac{1}{v} ds \quad (2)$$

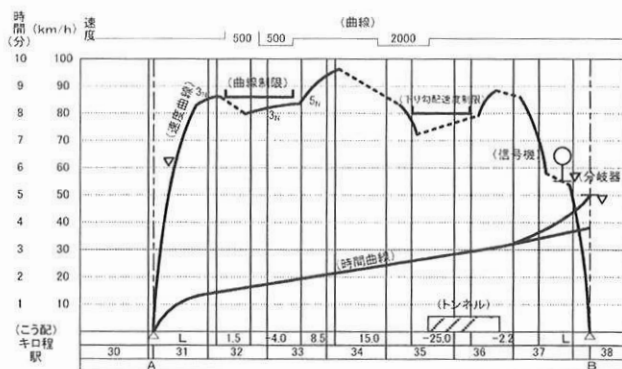


図1 運転曲線

2.2 運転曲線作成における課題

運転曲線の作成において、使用するノッチが複数ある場合は最大ノッチの引張力を用いて作成するのが基本である。ただし、低いノッチを使用した方が速度制限条件等に対して有利な場合は除く。従って、例えば機関車けん引による列車の場合でも、最大ノッチにて運転曲線を作成することになる。

電車列車等においては、上記の前提のもとで運転曲線を作成しても、実際の運転方法と大きな差異は見られない。しかし、貨物列車などの機関車けん引による列車においては、状況が一変する。機関車けん引の列車においては、起動時から最大ノッチを使用することは難しい。粘着の関係から、低いノッチから順に用いていくことになる。そのため、最大ノッチを用いて加速を行う運転理論に基づいた運転曲線作成を行なった場合、実際の最速の運転よりも駅間運転時分が短くなってしまう可能性が存在する。

一方、輸送計画では「駅間の基準（計画）運転時分で必ず運転できる」という点を満たす必要がある。この問題を解決するために、担当者の経験などから多めに余裕時分を持たせる方法や、予め平均加速度を想定して運転曲線を作成する方法などが存在する。しかし、これらは客観的な値や規則によって示された運転曲線の作成方法でない。従って、機関車けん引の列車に対して、適切な運転曲線を作成する手法を検討する必要がある。

3. 運転曲線と粘着引張力

機関車けん引の列車は、列車の動力方式において「動力集中方式」に分類される。まず、この「動力集中方式」の特徴と、列車起動時に影響する「引張力」について検討する。

3.1 列車の動力方式

列車の動力方式には、1両ないし数両の車両に動力を集中する動力集中方式と電車列車のように各車両に動力機構を分散する動力分散方式がある。各動力方式の特徴は、数両の車両に動力を集中するのが動力集中方式、各車に動力機構を分散したものが動力分散方式である。貨物列車は前者であり、1両ないし2両の機関車（動力車）によって編成全体をけん引する。そのため、動力車1両あたりの踏面出力は動力分散方式に比べて大きくなる。

日本においては、動力分散方式の採用が多く、客車列車が減少した昨今においては動力集中方式の採用は貨物列車が中心になっている。しかし、海外においては、その汎用性などから機関車を用いた動力分散方式の客車列車が多々見受けられる。さらに、動力集中方式が主流となる貨物列車の運行も非常に重要な地位を維持している。

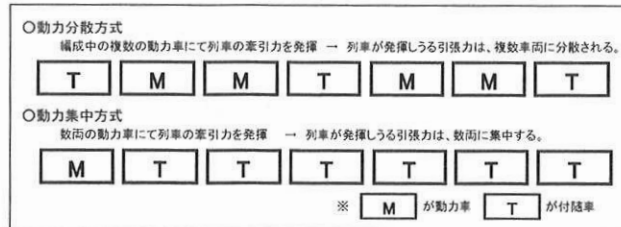


図2 列車の動力方式

3.2 列車の引張力

(1) 引張力

動力機構を有した車両（動力車）が各機構を通して、列車を走行させようと発揮する力が引張力である。電気車の場合は主電動機、ディーゼル車の場合はディーゼル機関（液体変速機を含む）の回転力を動輪に伝えて走行する力が、これに相当する。引張力は、いくつかの制限する因子によって次のように分類される。

- 起動引張力
起動時の起動電流により制限される引張力。抵抗制御車においては、限流値により影響を受ける。
- 特性引張力
主電動機やディーゼル機関における高速度域の特性による引張力。
- 粘着引張力
粘着現象に起因する引張力。

これら起動引張力・特性引張力・粘着引張力の最小値部分が、図3に示す有効な引張力となる。

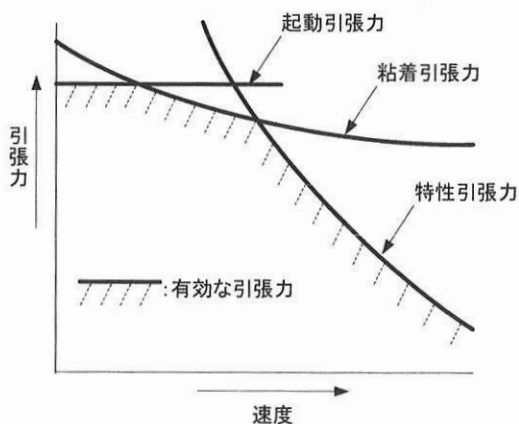


図3 有効な引張力

(2) 引張力曲線

列車における有効な引張力を、横軸を速度として表した図が引張力曲線である。その例を図4に示す。動力車の引張力は、力行時に選択するノッチによって異なる（図中の3～5Nがノッチを表す）。運転士はこのノッチを選択することによって、列車の力行時の挙動を制御することができる。

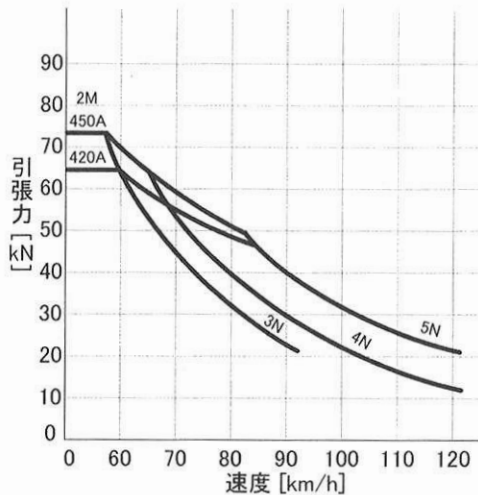


図 4 引張力曲線

3.3 引張力特性における粘着引張力

前述の引張力の中で、動力集中方式の列車の走行に大きく影響するのは、粘着引張力である。

(1) 粘着引張力

粘着引張力とは、列車が空転せずに加速が可能な最大上限の引張力のことである。つまり、列車はこの粘着引張力を超える引張力を出力することは不可能である。粘着引張力は、次の(3)式で表すことができる。

$$T_a = 9.8 \times 10^3 \times \mu \times W_d \quad (3)$$

粘着引張力の単位は[N]であり、 μ は粘着係数である。また、 W_d は動輪上重量(粘着重量)であり、この単位は[ton]である。

(2) 粘着係数

上記の粘着引張力を大きく左右させるのが、粘着係数である。粘着係数は、レールと車輪間の状態によって変化する。また、気温や運転速度によっても変化する。

運転計画における粘着係数は、現車試験から得られたデータに基づいて処理し、(4)式に示す粘着係数式としている。尚、JRにおいては、一般的に表1に示す係数値が用いられる。

<基本式>

$$\mu = K \times \frac{1 + a \times v}{1 + b \times v}$$

※新幹線電車は以下の式を用いる。

$$\mu = \frac{13.6}{v + 85}$$

表 1 各車種における係数値

車種	K	a	b
直流及び交直流電気機関車	0.265	0.403	0.552
交流電気機関車	0.326	0.279	0.367
ディーゼル機関車・気動車	0.285	0.114	0.150
電車	0.245	0.050	0.100

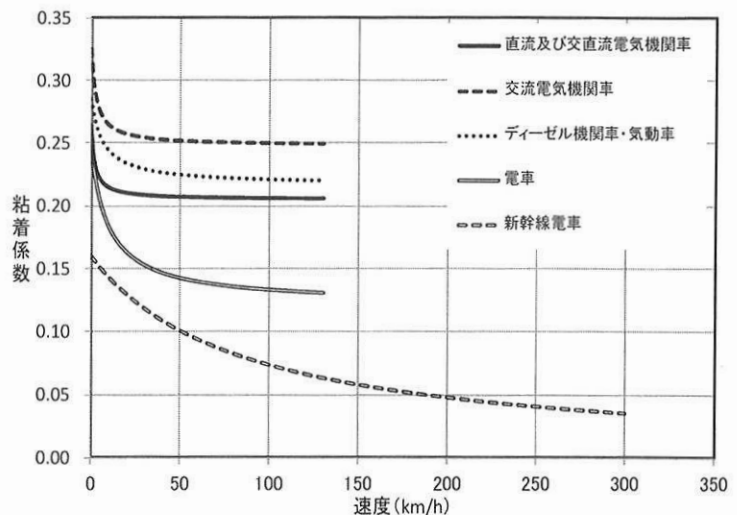


図 5 粘着係数の変化

4. 粘着引張力による引張力曲線の検証

輸送計画に用いる運転曲線は、本来、起動引張力等の条件を満たした引張力曲線により作成される。しかし、動力集中方式の列車においては、図4に示すような引張力曲線をもとに運転曲線を作成すると、実際の運転にそぐわない。そこで、動力集中方式の列車において、特に大きな影響を及ぼす粘着引張力と引張力の関係を検討する。

4.1 粘着引張力とノッチ選択

(1) 引張力曲線と粘着引張力の矛盾

引張力は、粘着引張力より低くなくてはならない。そこで、実際に機関車における引張力と粘着引張力との関係を調査する。ここでは、DF200形機関車を例として、その引張力曲線と粘着引張力を比較する。粘着係数を算出する際に用いるパラメータは、運転理論におけるディーゼル機関車のものを基本とした(6)式を用いる。また、DF200形機関車における粘着重量は、96[ton]である。これより、(7)式から粘着引張力を得る。図6に比較結果を示す。

<粘着係数の算出>

$$\mu = 0.285 \times \frac{1 + 0.114 \times v}{1 + 0.150 \times v} \quad (6)$$

<粘着引張力の算出>

$$T_a = 9.8 \times 10^3 \times \mu \times 96 \quad (7)$$

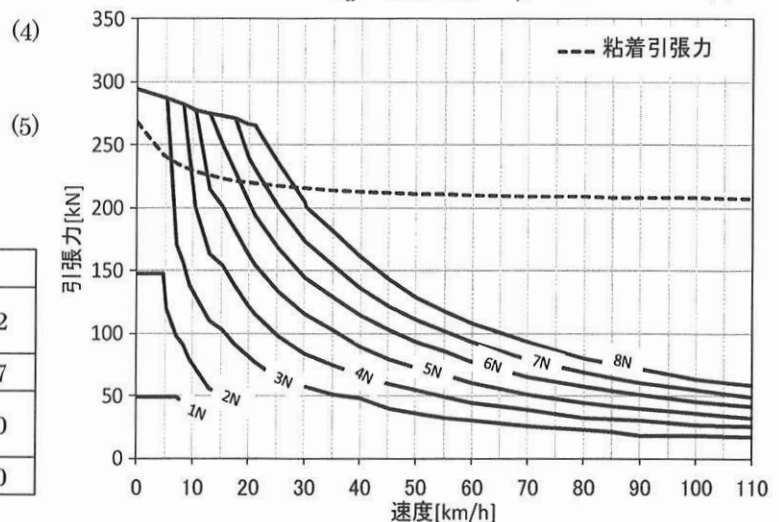


図 6 引張力曲線と粘着引張力 (DF200 形)

図 6 より、起動時に 8 ノッチ (DF200 形における最大ノッチ) が使用できないことは明白である。図 6 からは、発揮しうる引張力の値が粘着引張力以下となり、使用可能なノッチが徐々に増えていく状態が確認できる。これは、実際の機関車の運転と同様である。本来、運転曲線作成時には、引張力曲線の最大ノッチを用いる。しかし、実際に粘着引張力を再検討すると、用いる引張力曲線の示す値が発揮し得ない力であるという矛盾点がみられる。

(2) 粘着引張力とノッチ選択

実走行可能な運転曲線を作成するためには、粘着引張力を考慮した以下のノッチ選択ロジックを適用することが適切であると考えられる。

<粘着引張力を考慮したノッチ選択>

Step 1: 引張力が粘着引張力以下のノッチを選択する。

Step 2: Step1 で選択したノッチを一定時間保持する。

Step 3: (速度上昇に伴い) 粘着引張力以下となって選択可能なノッチが新たに現れる。

以下、Step 1 から Step 3 を繰り返す。尚、Step2 は実際の運転において、瞬時にノッチ操作ができない点を考慮している。

4.2 粘着引張力を考慮した運転曲線の作成

粘着引張力を考慮して運転曲線を作成した場合の結果を示す。まず、前述の DF200 形のデータを用い、粘着引張力を考慮した引張力曲線を作成する (図 7)。なお、ここでは実際の運転操作を考慮した Step2 を適用していない。この引張力曲線を用いて、仮想的な 2 つの線路に対して運転曲線を作成すると図 8・図 9 のようになり、既存の運転理論による手法より、明らかに時分を要することがわかる (表 2)。また、上りこう配が存在する場合はその差がより顕著になる。これは、実際の運転における結果とも一致する。

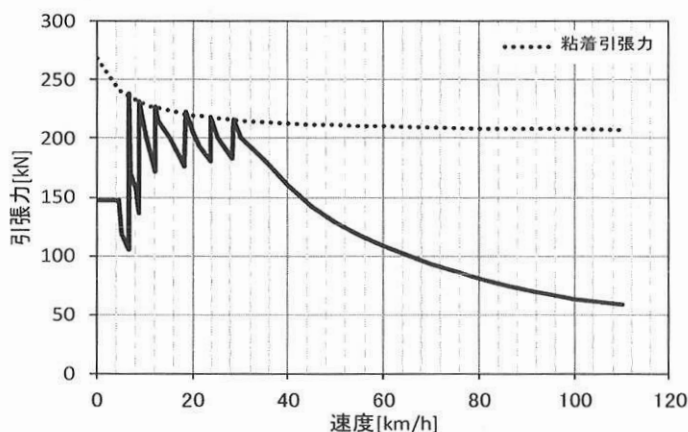


図 7 粘着引張力を考慮した引張力曲線 (DF200 形)

表 2 運転曲線作成における走行条件および結果

	Case 1		Case 2	
粘着引張力の考慮	なし	あり	なし	あり
駅間距離[m]	500			
けん引量[ton]	500			
こう配量[‰]	0		10	
走行時分[s]	93.5	101.6	96.7	111.2
駅間最高速度[km/h]	35.27	34.18	35.9	34.02

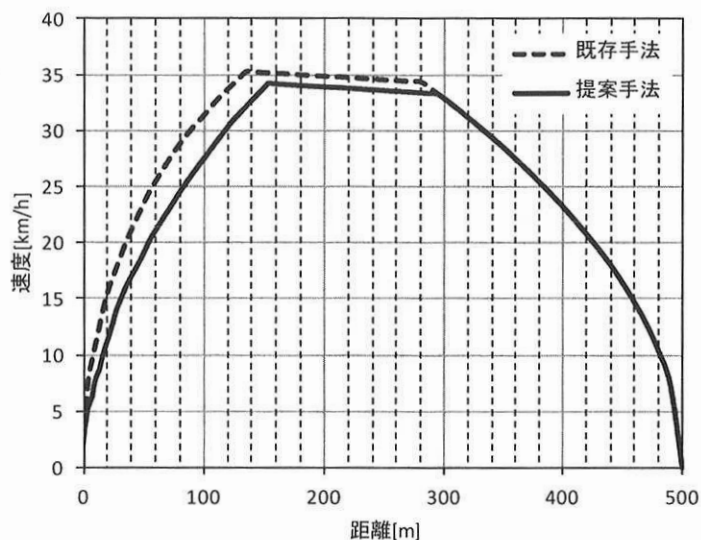


図 8 運転曲線の比較 (勾配なし)

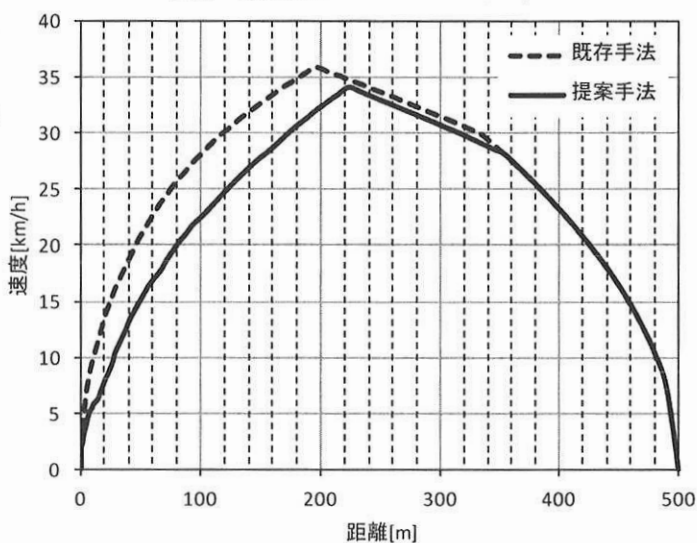


図 9 運転曲線の比較 (勾配あり)

5. まとめ

本稿では引張力と粘着引張力との関係を再検討することにより、動力集中方式の列車に対応した運転曲線作成手法を提案した。さらに、実車のデータを用いた検証において、妥当な結果が得られた。

今後は、運転記録装置などから得られる実際の運転結果などと比較することによって、本手法の妥当性を検討していく。

参考文献

- 1) 運転理論研究会：運転理論 (改訂版)，社団法人日本運転協会，2002。
- 2) 今川由一，木村和久ほか：貨物輸送で活躍する運転士さんのよもやま話，運転協会誌，No.615，pp.31-40，2010.9
- 3) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック，コロナ社，2007。
- 4) 社団法人電気学会電気鉄道における教育調査専門委員会：最新 電気鉄道工学，コロナ社，2000。
- 5) 西澤寛：DF200 形電気式ディーゼル機関車の概要，車両技術，No.198，pp.3-13，1992。