

第32回

運転曲線作成技術とその応用

運転曲線図とは

列車ダイヤを作成するには、列車が駅間をどのくらいの時間で走ることができるのかを知る必要があります。この駅間の所要時間は、「基準運転時分」、「計画運転時間」などと呼ばれますが、この基準運転時分を算出するためには、距離・速度・時間の関係を表した図を作成することが一般的となっています。この、距離・速度・時間の関係を表した図が運転曲線図(または、「ランカーブ」)です(図1)。

運転曲線図を作成するためには、勾配、曲線、速度制限、編成両数など、さまざまな条件を考慮した上で、列車を走らせる力である「引張力」、それを妨げようとする「列車抵抗」、および減速のための「制動力(ブレーキ)」のそれぞれの力の関係を考えなければなりません。これらの力の作用に関する基本的な理論は「運転理論」¹⁾と呼ばれており、現在の列車運転の基礎理論となっています。

最も利用されている運転曲線図は、列車の速度変化を表す「速度曲線」と所要時間を表す「時間曲線」の2つの曲線(運転曲線)から成り立っています(図1)。横軸は距離を、縦軸は速度と時間を表しており、車両の性能を十分に発揮し、制限速度を守った上で、運転士が無理無く運転できるような方法を図示したものが使われています。

なお、運転曲線図は、基準運転時分の算出以外にも次の用途で用いられています。

- ・ 運転時隔(連続する列車の間に最低限確保しなければならない時間)の算出
- ・ 車両性能の向上、設備改良、新線建設などによる速度向上施策とその効果の把握

- ・ 工事箇所などの通過時刻の把握
- ・ 徐行時の走行時間への影響の把握
- ・ 踏切鳴動開始地点などの設備設置箇所の検討
- ・ 出勤時間帯などの乗車率の違いによる運転時間への影響の把握

運転曲線のはじまり

運転曲線が作られるようになる前は、基準運転時分を算出するためには、経験的に時間を推定し、実際に列車を走行させて確認するという方法が採られていました。基準運転時分の算出に運転曲線が用いられるようになったのは、大正末期頃にさかのぼります。

1924年にドイツの鉄道誌に複数の基準運転時分の計算方法が掲載されており、その中でも最も実用的であるとされたのがストラール氏によって提案された手法とベルツ氏によって提案された手法と言われています。ストラール氏の手法は、横軸を距離として速度や時間の曲線を求めるものであり、ベルツ氏の手法は、横軸を時間として距離や速

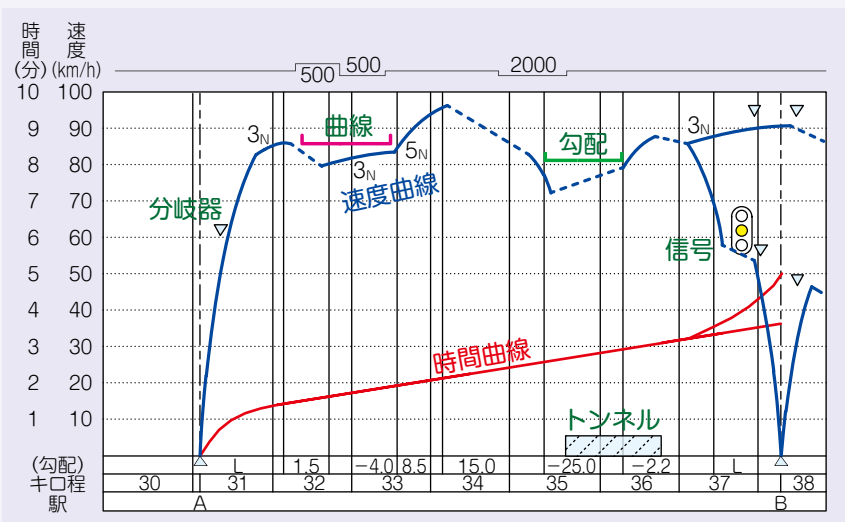


図1 運転曲線図

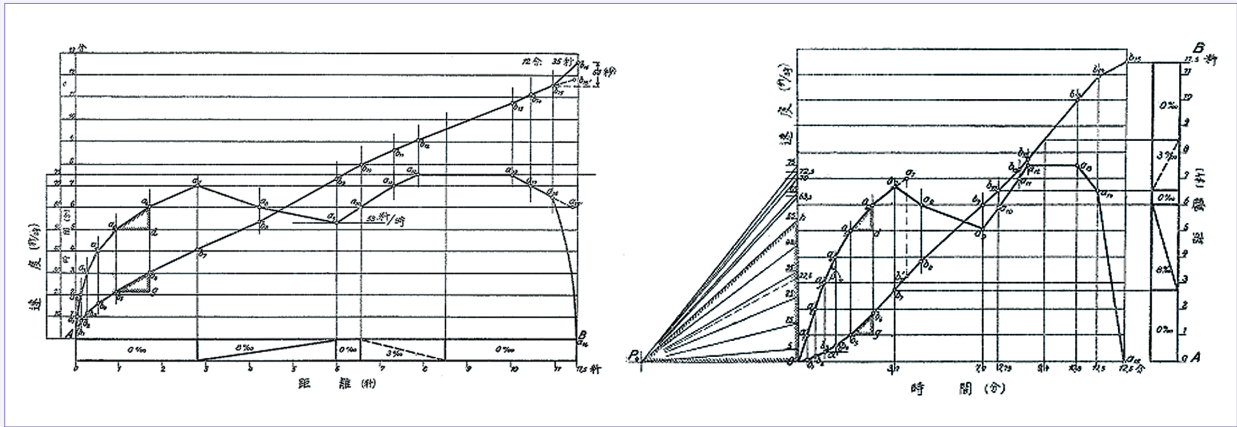


図2 ストラール氏の手法(左)とベルツ氏の手法(右)をもとに描かれた運転曲線
 出典：運輸局運轉課業務研究資料「列車運轉時分計算法」(1924年)



図3 列車シミュレータ(運転曲線計算器)
 出典：JREA, 第1巻, 第4号²⁾

度を求めるものでした(図2)。いずれも、速度と時間と距離の関係を図示することにより、走行時間を求めています。この2人による算出方法が運転曲線のはじまりであったと考えられます。現在、最も一般的に利用されている運転曲線による基準運轉時分の算出は、ストラール氏による手法に基づくものです。

日本でも、1920年代後半には基準運轉時分の算出に広く運転曲線が用いられるようになり、新線検討や新たな車両の導入、電化の計画などを検討する鉄道の管理部門において、運転曲線は欠かすことのできないものとなりました。

運転曲線の作成方法

運転曲線を手描きで作成する方法として、直接画法と間接画法と呼ばれる2通りの方法が知られています。

直接画法は、加速力を表す曲線から幾何学的に運転曲線

を作成する図法で、前述のストラール氏によって提案された手法が広く利用されています。短距離の運転曲線を作成する場合に多く用いられています。

間接画法は、加速力を表す曲線から、あらかじめ勾配別の速度-距離曲線を作成しておき、起点から順にトレースしていくことで運転曲線を作成する方法です。間接画法は、長距離の運転曲線や勾配変化の多い線区の運転曲線を作成する場合に利用されています。

いずれの方法でも、熟練した担当者が1日かけて100km程度分を作成するのが限界だったと言われています。現在でも手描きで作成している鉄道事業者は多くありますが、作業の効率化や担当者の経験による個人差や技術継承の問題もあり、コンピューターを利用して運転曲線の作成を行うことが一般的になっています。

コンピューターによる運転曲線の作成

1950年代前半には、アメリカやフランスでコンピューターによる運転曲線の作成が実用化されていましたが、日本のようなちゅう密な列車密度で、勾配や速度条件が厳しい区間では適用できないものであったとされています。

日本では、1950年頃から運転曲線をコンピューターによって算出するための研究が開始され、1957年には日本初の運転曲線作成システムとなる「列車シミュレータ」が日本国有鉄道で実用化されました(図3)。このシステムは、アナログコンピューターで開発され、自動作成の機能はまだ実現されておらず、ノッチを入れる(加速をするための操作)地点やブレーキをかける地点を人間の手で指定することが必要でした。それでも、ある区間の運転曲線を計算するのに、実際の列車が走行する時間の半分程度の時間で作成することができるなど、作業時間の短縮に貢献しました。

1950年代後半には、イギリスでデジタルコンピューターを用いた運転曲線の作成システムが開発されました。日本でも、1960年に車両設計上必要な基礎資料を取得することを目的として、運転曲線の計算をデジタルコンピューターによって自動化する試みが行われました。このプログラムは、新幹線の車両のモーターや機器容量算定のために実際に利用されましたが、当時のコンピューターの計算能力では、複雑な条件をすべて反映できないことから、運転計画に利用するには性能が不十分であったとされています。

実際に基準運転時分を算出するための運転曲線を自動で作成することができるようになったのは、1964年のことです。より高速なコンピューター上で開発を行うことにより、手描きで作成した運転曲線と比較しても遜色のない運転曲線を自動で計算するシステムが開発されました。このシステムの計算結果の出力は、**図4 (a)**に示すように数値データのみで、グラフとしての運転曲線を見るためには、出力された数値をもとに手作業でプロットする必要がありました。しかし、東京-神戸間を約10分で計算でき、日本の高度経済成長期の輸送力増強を影で支えたシステムとなりました。

1966年になってグラフ形式で出力されるシステムが開発されました。この頃は、紙への出力はコンピューターとプリンターの双方の処理能力から描画に時間がかかりすぎるため、簡易的な運転曲線図の出力とせざるを得ず、ラインプリンターと呼ばれる1行単位で印刷するプリンターによって出力されるものでした(**図4 (b)**)。手描きで描かれた運転曲線図とは見た目が大きく異なるため、必要に応じて手描きで写し直す作業も頻繁に行われていました。

手描きで作成した運転曲線図と同様の形式での出力ができるようになったのは、1973年になってからです(**図4 (c)**)。この頃には、500kmの運転曲線の計算は2分

半でできるようになっていましたが、出力に15分以上かかっていました。

その後は、コンピューター技術の発展とともに、改良を重ねられ、現在では、数百km分の運転曲線もたったの1秒で計算でき、グラフとしての運転曲線図も一瞬で表示できるようになりました。

運転曲線の広まり

運転曲線図をコンピューターで容易に作成できるようになっただけでなく、計算結果を数値データとして取得することができるようになりました。そのため、基準運転時分を求める目的以外にも、幅広く運転曲線図が用いられるようになり、用途に応じた運転曲線図が描かれています(**表1**)。

ここでは、運転曲線の応用例として鉄道総研で行っている研究を2つ紹介します。

運転曲線の応用例：省エネルギー運転

運転曲線を読み取ると、どのような運転方法が行われているかを把握でき、消費エネルギーを計算することができます(**図5**)。

運転曲線を用いて省エネルギーとなる運転方法を得ようとする取り組みは、1960年代半ば頃から考えられており、その結果、理論的には最大加速度で加速して、動力を切った状態で走行(惰行)し、最大の力でブレーキをかけることが最も省エネルギーな運転方法であるとされています。

しかし、実際の線路上では、速度制限や勾配変化があるため、このような運転方法を実現できる区間が限られます。また、従来の理論では回生ブレーキを使用した場合の影響が考慮されていませんでした。

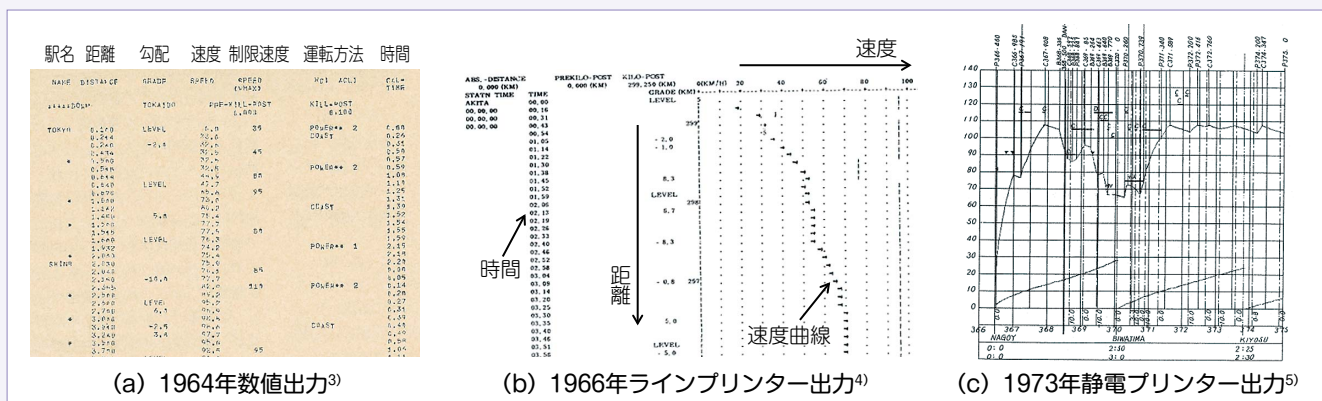


図4 運転曲線のコンピューター出力の推移

出典：(a) 運転協会誌，第6巻，第11号³⁾ / (b) 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集1966⁴⁾ / (c) 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集1973⁵⁾

表1 運転曲線の用途別の分類

種類	特徴・用途
計画運転曲線	基準運転時分を求めるために作成される運転曲線。不自然な運転操作がない範囲で最短の走行時間になる運転方法で走行した状況を示す。
指導運転曲線	ダイヤ構成上の理由や頑健性の向上のために付加された余裕時間を有効に活用するための運転方法を示した運転曲線。試験列車などの検討にも用いる。
実績運転曲線	運転実態の把握や、計画運転曲線の確認などを目的として実際の走行状態を運転曲線として表したものの

そこで、鉄道総研では、コンピューターによる運転曲線計算と最適化の手法と組み合わせ、回生ブレーキも考慮し、走行区間の状況に応じた省エネルギーな運転方法を理論的に計算する手法の研究を進めており、一定の省エネ効果を確認しています。

運転曲線の応用例：列車運行シミュレーター

列車相互の間隔が狭くなった場合に、減速したり、駅間での停止が行われることがあります。その場合に走行時間や後続の列車にどのような影響があるのかを運転曲線を利用して調査することができます(図6)。

これまで、列車遅延の分析や列車運行のシミュレーションは列車ダイヤで考えられてきましたが、これを運転曲線のレベルまで考慮することにより、より精緻な分析やシミュレーションができるようになるというものです。

先行列車の運転曲線を基に、信号現示が変化する時間推移を計算することで、後続の列車が減速しなければならない地点や時間を求めることができます。これらの条件を加味した後続列車の運転曲線を描くことで、遅延の伝ばやダイヤの回復の様子をシミュレーションすることができるようになりました。

おわりに

運転曲線作成技術の歴史を簡単に振り返ってみました。手描きで作成する以外の方法がなかった時代から現在まで、車両や規程の変更、列車制御方式による違いはあるものの運転理論の基礎的な部分は何も変わっていません。

そのような点では、今後も運転曲線の作成方法が抜本的に変化するということは考えにくいと思われます。しかし、今後も鉄道環境の変化や運転曲線の応用のニーズの広まり

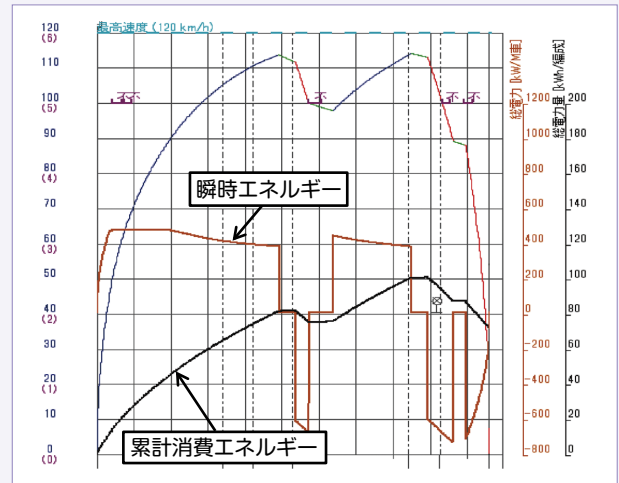


図5 運転曲線を用いたエネルギー計算の例

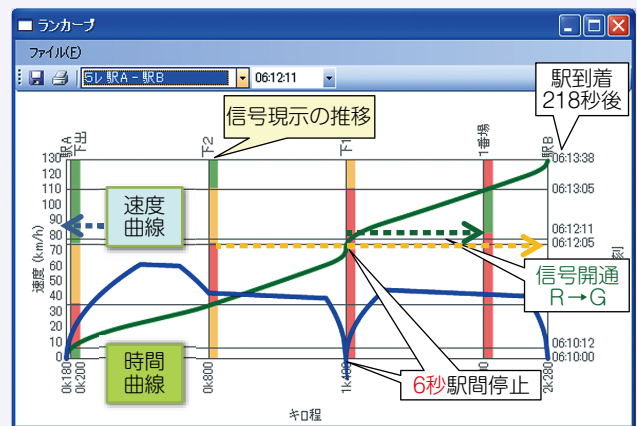


図6 運行シミュレーターの画面例

に応じた作成システムの機能向上は図られていくでしょう。

鉄道総研でも、SPEEDYという名称の運転曲線作成システムを開発していますが、さまざまな研究開発に運転曲線を活かすとともに、時代の流れに応じた機能向上を図っていく予定です。

(田中峻一/信号・情報技術研究部 運転システム研究室)

文献

- 1) 運転理論研究会：運転曲線(再改訂版)－基礎知識と応用実務－，一般社団法人日本鉄道運転協会，2010
- 2) 稲田伸一：運転曲線計算機(列車シミュレータ)，JREA，第1巻，第4号，pp.177-180，1958
- 3) 稲田伸一，海老原浩一：デジタル計算機による運転曲線計算の実用化，運転協会誌，第6巻，第11号，pp.442-445，1964
- 4) 稲田伸一，平野利雄，石井康祐，古賀澄夫，海老原浩一，岡部俊男，高橋金吾：運転曲線計算自動化の現状と最近の進展，鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集，pp.416-421，1966
- 5) 日高秀登，河田譲次，稲田伸一，吉賀澄夫：運転曲線計算システムの開発，鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集，pp.182-187，1973