

鉄道信号入門：運転曲線と運転時隔

あおいの (Twitter @Local005052)

2021年3月7日

概要

本発表は運転理論と信号設備に基づく最小運転時隔の算出法の紹介を目的とする。運転曲線のうち距離曲線を用いることで設備上の最小運転時隔を決定することができる。この最小運転時隔は想定しているパターンによりいくつかの導出過程があるので、これらについても紹介する。

1 運転曲線

1.1 運転曲線とは

運転曲線は列車の運転における動力性能・軌道環境・操縦条件を基にした、停車場間における列車の位置・時間・速度の相互関係を図示したものである。図1に示すように、この曲線は主軸の取り方によって横軸に列車の位置を取り縦軸に速度及び発車からの経過時間を取るものと、横軸に時間を取り縦軸に速度及び位置を取るものの2種類に大別される。

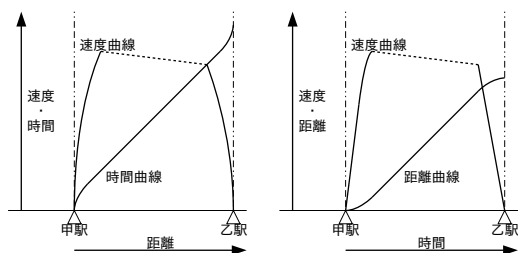


図1 2種類の運転曲線

1.2 距離曲線の作図

運転曲線を作成する最終的な目標の一つが停車場間における運転時分の算出・査定である。また運転曲線のうち発車からの経過時間とその時点での走行

位置を示した曲線を距離曲線といい、本稿の目的である最小運転時隔の算出・査定も距離曲線によって行うことができる。なお、実際の業務では距離を主軸とした速度曲線を作成しそれに基づいて時間曲線を作図するのが普通であるが、本稿では時隔曲線の理解には距離曲線を先に紹介するほうが初学者にも適していること、距離曲線と時間曲線は本質的に同一であることから、まず距離曲線を用いて説明を行う。

列車の加速度を a km/h²、制動による減速度を d km/h²、力行終了点を v_0 km/h、制動開始点を v_1 km/h とすると、理論上加速にかかる時間と距離は $\frac{v_0}{a}$ s 及び $\frac{v_0^2}{7.2a}$ m、制動では $\frac{v_1}{d}$ s 及び $\frac{v_1^2}{7.2d}$ m となる。また力行終了点から制動開始点まで等減速度惰行 c km/h² を行う場合、その所要時間と走行距離は同様に $\frac{v_0 - v_1}{c}$ s 及び $\frac{v_0^2 - v_1^2}{7.2c}$ m となる。

例として電車列車の加減速度 $a = d = 2.5$ 、惰行減速度 $c = 0.1$ 、力行終了点 $v_0 = 87$ とし、駅間距離を 2000 m と定める。このとき加速に必要な時間は 34.8 s で、その間に列車は 420.5 m 走行する。惰行から再加速せずに停車制動へ移行する場合を考えると、惰行距離と制動距離の合計は $\frac{v_0^2 - v_1^2}{7.2c} + \frac{v_1^2}{7.2d} = \frac{v_0^2 d + v_1^2 (c - d)}{7.2cd}$ であり、これが駅間の残距離 1579.5 m となるように制動開始点を求めると、 $v_1 = 81.9$ を得る。この一連の状況をまとめると表1のようになり、距離曲線は図2のように作図できる。

表 1 発車後の経過時間と速度・走行距離の関係

| 時間 [s] | 状況 | 速度 [km/h] | 距離 [m] |
|--------|------|-----------|--------|
| 0.0 | 前駅発車 | 0.0 | 0.0 |
| 10.0 | | 25.0 | 34.7 |
| 20.0 | | 50.0 | 138.9 |
| 30.0 | | 75.0 | 312.5 |
| 34.8 | 力行終了 | 87.0 | 420.5 |
| 40.0 | | 86.5 | 545.8 |
| 50.0 | | 85.5 | 784.6 |
| 60.0 | | 84.5 | 1020.7 |
| 70.0 | | 83.5 | 1254.0 |
| 80.0 | | 82.5 | 1484.5 |
| 86.3 | 制動開始 | 81.9 | 1627.8 |
| 90.0 | | 72.6 | 1707.6 |
| 100.0 | | 47.6 | 1874.4 |
| 110.0 | | 22.6 | 1971.7 |
| 119.0 | 次駅停車 | 0.0 | 2000.0 |

1.3 時間曲線の作図

時間曲線は横軸に駅間での走行位置を、縦軸に発車からの経過時間を取ったもので、距離曲線を反転させたものといえる。先に距離曲線で示した例において、走行距離と速度・経過時間の関係を表すと表 2 のようになり、時間曲線も図 3 のように作図できる。

表 2 走行距離と速度・経過時間の関係

| 距離 [m] | 状況 | 速度 [km/h] | 時間 [s] |
|--------|------|-----------|--------|
| 0.0 | 前駅発車 | 0.0 | 0.0 |
| 200.0 | | 60.0 | 24.0 |
| 400.0 | | 84.9 | 33.9 |
| 420.5 | 力行終了 | 87.0 | 34.8 |
| 600.0 | | 86.3 | 42.3 |
| 800.0 | | 85.4 | 50.6 |
| 1000.0 | | 84.6 | 59.1 |
| 1200.0 | | 83.7 | 67.7 |
| 1400.0 | | 82.8 | 76.3 |
| 1600.0 | | 82.0 | 85.1 |
| 1627.8 | 制動開始 | 81.9 | 86.3 |
| 1800.0 | | 60.0 | 95.0 |
| 2000.0 | 次駅停車 | 0.0 | 119.0 |

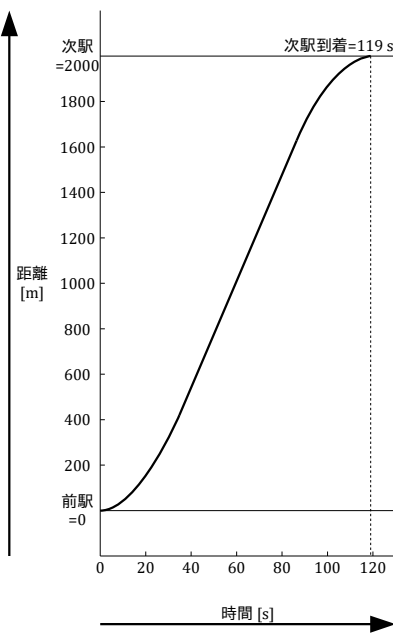


図 2 距離曲線

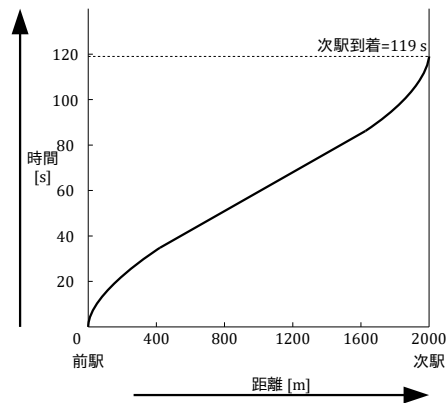


図 3 時間曲線

2 時隔曲線

2.1 時隔曲線とは

時隔曲線は横軸に時間・縦軸に距離を取ったもので、列車1本あたり前端と後端を示す2本の曲線で描画される、距離曲線の特殊な例である。時隔曲線を構成する2本の曲線の組は同じ列車を示すため、同じ距離曲線を転写することで得られる。図4は時隔曲線概念を示したものである。先行列車・後続列車共に列車の前後端において甲駅から乙駅までの距離曲線が与えられており、前端同士あるいは後端同士の距離曲線の間隔が列車の運転時隔となる。時隔曲線に各種設備条件を付与することで、設備上の最小運転時隔を求めることができる。

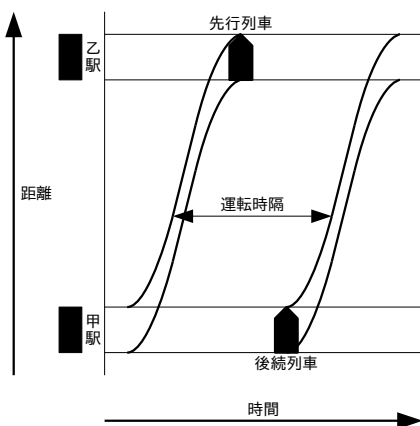


図4 時隔曲線

2.2 時隔曲線の作図

距離曲線から引続き電車列車の例を用いて説明する。電車列車の長さを200m、前駅停止位置から次駅停止位置まで2000mとし、起点を前駅停車中の列車後端とする。すなわち、前駅の停止位置は起点から200m、次駅の停止位置は2200mとなる。さらに、前駅出発信号機を起点から300m、第2閉塞信号機を800m、第1閉塞信号機を1400m、次駅場内信号機を1800mの地点に建植し、それぞれ信号現示確認位置を400m手前とする。

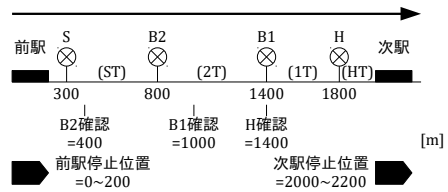


図5 駅間の各種要素位置

以上の設備設定を図示したのが図5となる。表2を用いることで各地点での先行列車の通過時刻を確認することができる。この際、各閉塞区間において前端が通過することで在線を検知し、後端が通過することで解消されることに留意すると、表3のようになる。ここで後続列車が第2閉塞信号機の進行現示を確認して運転することを考える。先行列車の通過後第2閉塞信号機が進行信号を現示するのは2つ先の閉塞区間であるHTに列車が進出し1つ先の1Tから列車が進出したタイミングであるから、先行列車の前駅発車から95s経過した時点である。実際には信号現示の変化および運転士の現示確認にかかる時間を加味し、4sを追加した99s以降に第2閉塞信号機の進行現示を確認できればよいとする。第2閉塞信号機の信号現示確認位置は起点から400m地点であり、後続列車前端が前駅発車からここに到達するまでの所要時間は24sとなる。したがって、第2閉塞信号機に限れば最小運転時隔は $(99 - 24) = 75$ sと算出することができる。

表3 経過時間と列車の位置の関係およびその状況

| 時間 [s] | 前端 [m] | 後端 [m] | 状況 |
|--------|--------|--------|-------|
| 0.0 | 200.0 | 0.0 | 前駅発車 |
| 17.0 | 300.0 | 100.0 | ST 進入 |
| 42.3 | 800.0 | 600.0 | 2T 進入 |
| 50.6 | 1000.0 | 800.0 | ST 進出 |
| 67.7 | 1400.0 | 1200.0 | 1T 進入 |
| 76.3 | 1600.0 | 1400.0 | 2T 進出 |
| 85.1 | 1800.0 | 1600.0 | HT 進入 |
| 95.0 | 2000.0 | 1800.0 | 1T 進出 |
| 119.0 | 2200.0 | 2000.0 | 次駅停車 |

3 最小運転時隔

実際に運転するための最小運転時隔を求めするためには、関連する各要素について最小運転時隔を求め、それらの最大値をとって初めて駅間あるいは路線の最小運転時隔となる。関連する各要素とは先述の信号現示の確認の他にも、駅において先行列車が進出後に進路鎖錠が解錠され、後続列車の場内進路を構成できるようになるまでの時間などが考えられる。ここではいくつかのパターンについて最小運転時隔の算出基準を紹介する。

3.1 駅間続行

時隔曲線の紹介に用いた駅間続行運転について、もう少し掘下げて考える。図6は閉塞割を変えつつ次駅からさらに2閉塞先までの時隔曲線を描画したものである。ここでは駅間の信号機3基について、それぞれ先行列車の位置によって停止現示→注意現示→進行現示と移り変わる様子を示した。実際には先に計算したように信号機の位置ではなくやや外方で信号現示を確認することから、その位置と時間をバツ印で示している。後続列車はこれらのバツ印すべてよりも遅いタイミングで、なおかつその中で最も早いタイミングで運転されることとする。このようにして駅間続行運転における最小運転時隔を求めることができる。

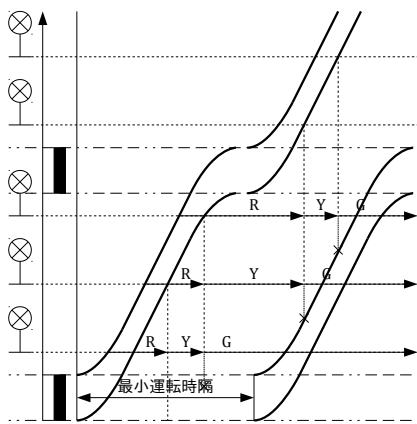


図6 駅間続行運転における最小運転時隔

3.2 「追込時隔」

2線以上ある停車場において先行する停車列車が後続の通過列車を待避する場合、停車時の先行列車の相対的な速度低下が運転時隔にもたらす影響を考える必要がある。図7では向かって左側の副本線に停車列車が進入した後、右側の本線に通過列車が進入するまでの時隔曲線を描画したものである。停車列車が副本線に進入した後、転轍器のある軌道回路を抜けた後一定時間で本線側への進路が開通する。通過列車に対しては出発進路を先引きするのが通例であるため、場内信号機の挙動は停止現示の後進路が構成され次第直ちに進行現示となる。これらに対しても信号現示の確認距離を考慮することで、最小運転時隔を求めることができる。このような待避前における最小運転時隔のことを「追込時隔」と呼称することが多く、また停車場における停車から通過までの最小時隔を「ネック（となる）時隔」と呼ぶこともある。

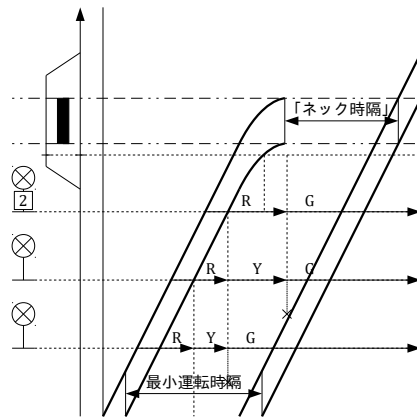


図7 停車列車の待避前における最小運転時隔

3.3 「後追時隔」

追込時隔とは逆に、通過列車の待避後に停車列車が発車する時隔、「後追時隔」についても考える。図8では図7の後、副本線から停車列車が発車するまでの時隔曲線を描画した。通過列車が進出側の転轍器を含む軌道回路を抜けたタイミングで進路鎖錠が解錠され停車列車の出発進路を構成する準備が整うが、この時点ではまだ進行を指示する信号は現示さ

れない。実際には2つ先の閉塞区間に通過列車が進入したタイミングで停車列車に対する出発信号が進行現示となる。実務を考えると出発信号を確認した後に発車合図・発車の一連の動作があるため、ある程度の余裕を持たせることが必要となる。このようにして待避後の最小運転時隔が求まり、やはり通過から発車までの最小時隔をネック時隔と呼ぶ。

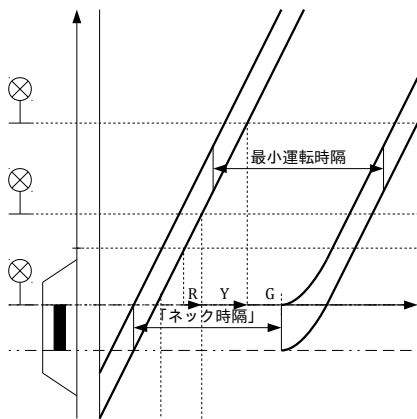


図8 停車列車の待避後における最小運転時隔

3.4 終端駅での折返し

最後に、終端駅での折返しにおける最小運転時隔を考える。図9は2線で折返し列車を捌く際の時隔曲線を示したものである。停車場に進入した列車が停車場直前の転轍器を含む軌道回路から進出し、反対側の線路に停車中の列車の出発進路を構成できるようになる。これは進行方向こそ違えど後追時隔の例で見た通りである。続いて停車場から進出した列車も同様に転轍器を含む軌道回路を抜け、進路鎖錠が解錠されると続いて停車場に進入する列車の場内進路が構成されるようになる。この場合は追込時隔で見たような計算を行えばよい。場内信号機が注意信号を現示することに伴い第1閉塞信号機は進行信号を現示し、これを確認するのに必要な離隔を取れば、後続列車の時隔曲線を描画できる。この場合は最小運転時隔がネック時隔相当となる。また、折返しではなく2線交互着発を行う停車場の時隔曲線を作図したい場合、進出列車の進行方向を変えずに時隔曲線を描画することで達成できる。

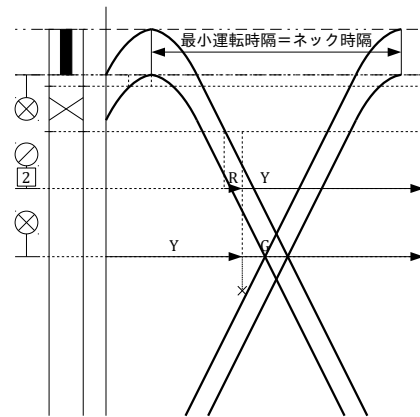


図9 列車の折返しにおける最小運転時隔

参考文献

- [1] 運転理論研究会 (2010)『運転理論 (再改訂版)』: 日本鉄道運転協会.
- [2] 吉武勇 (2006)『鉄道の運転保安設備』: 日本鉄道運転協会.