

安全で快適に曲がるための曲線線形

古川 敦

軌道技術研究部(軌道管理 研究室長)



ふるかわ あつし

はじめに

鉄道車両にはハンドルがありません。カーブではレールに沿って走行します。行き先はレールに聞いてくれというわけです。それでは、レールを針金のように自由自在に曲げれば、車両はいかようにでも走れるのでしょうか？残念ながら、乗客を安全装置でがんじがらめにしたジェットコースターならいざしらず、大勢の乗客が立っている鉄道車両の場合はそうはいきません。では車両がスムーズに曲がっていくためには、どのようなことを考慮すれば良いのでしょうか？本稿では、曲線線形を決めるにあたって検討すべき事項を紹介します。

曲線中で車両が受ける制約

車両が曲線を走行する場合は、直線の場合と比較して次のような制約を受けます。

- ①車両を案内するために、レールに大きな力がかかる。
- ②遠心力によって、車両に曲線外向きの力がかかる。
- ③軌道面が傾いているために、車両に曲線内向きの力がかかる。
- ④軌道面を徐々に傾けるために、曲線の入口、出口で軌道面にねじれが生じる。
- ⑤軌道の中心線と車両の中心線にずれが生じる。

これらの制約の程度は曲線線形と車両諸元の組み合わせによって決まります。曲線線形を決める際には、鉄道用地の広さや車両の諸元、走行速度を考慮しながら、これらの制約が走行安全性や乗り心地に悪影響を及ぼさないようにする必要があります。逆にいえば、①～⑤の制約の程度が小さく、かつ車両が安全で快適に走行できるのであれば、曲線線形は自由に決めて良いことになります。以下、安全・快適な曲線走行のための、具体的な検討事項を紹介します。

曲線線形の指標

(1)半径

曲線線形を特徴づける最も大きな指標が半径です。前述した曲線中での制約のうち①、②、⑤の程度は、半径によって決まります。これらのうち、②の遠心力は③と合わせて次のカントの項で紹介することとし、ここでは①と⑤について述べます。

曲線走行時に発生する力

冒頭に述べたように、鉄道車両にはハンドルがありません。したがって曲線では、車輪はレールに沿って走行します。ただし、単純に車輪のフランジ(つば)がレールと接触して案内されているわけではありません。これをもう少し詳しくみてみましょう。

図1は、直線と曲線での輪軸とレールの位置関係を示したものです。直線走行時には図1(a)のように、輪軸は軌道のほぼ中央を走行します。これに対し曲線走行時には、車輪が曲線の外側に寄ります。車輪の断面形状は円弧状ですので、輪軸が片側に寄った場合の車輪の回転半径は、曲線外側と内側で異なります。

ところで、例えば半径400mの曲線といった場合、これは軌道中心での値であり、曲線外側と内側のレールの厳密な半径は1.067m異なります(狭軌線の場合)。半径が約1m異なるということは、仮に山手線のような環状線一周を考えた場合、内外のレールの長さは約6.3m(円周率

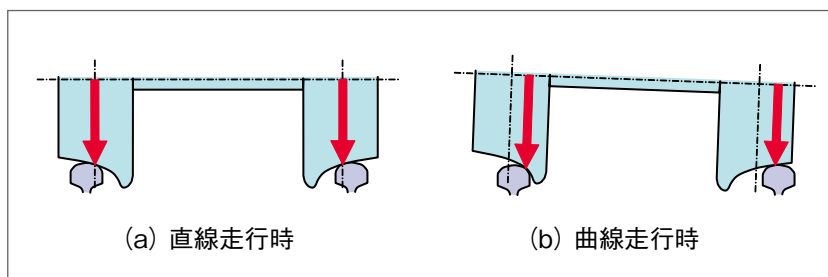


図1 車輪とレールの位置関係

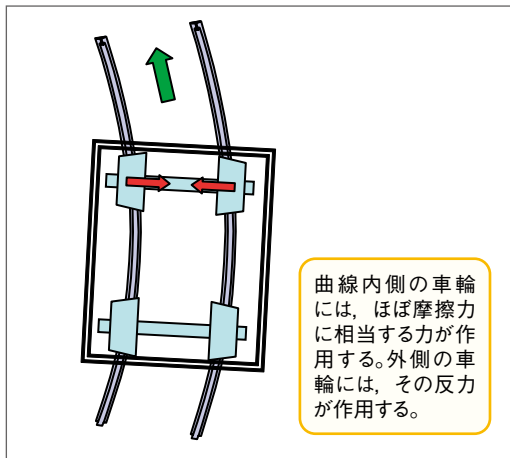


図2 曲線走行時に前軸に作用する左右方向の力

3.14の約2倍)異なることとなります。ところが、前述のように曲線内外の車輪の回転半径もわずかに異なりますので、輪軸が一回転したときに進む距離もわずかに異なります。この差が環状線を一周したときに前述の6.3mとなれば、車輪は曲線をスムーズに走行できることとなります。このように、曲線をスムーズに走行するためには、車輪とレールの断面形状の組み合わせに工夫が必要です。

ところで、車両が曲線に進入すると輪軸は自然に図1(b)のような姿勢をとります。自然になるというのは、力がかからないということではありません。輪軸がこの姿勢を保ち続けるには相応の力が必要です。この力は、曲線内側の車輪とレールとの間に作用する横方向の摩擦力で近似できます。図1(b)でいえば、右側のレール車輪間の横方向の摩擦力が輪軸を支えていることとなります。すなわち、車輪は、フランジがレールに案内されているというよりも、図2のように内側の車輪に支えられながら曲線を巡回しているのです。

軌道の中心線と車両の中心線のずれ

鉄道車両を上から見ると長方形をしています。したがって、曲線中では図3のように車体の両端は曲線外側に、車体中央は曲線内側に寄って走行します。線路の回りに何も無ければ特に問題ありませんが、駅のホーム部のように何らかの建造物を設置する場合は、接触しないよう位置を決めなければなりません。そのためには、ホームとレールと

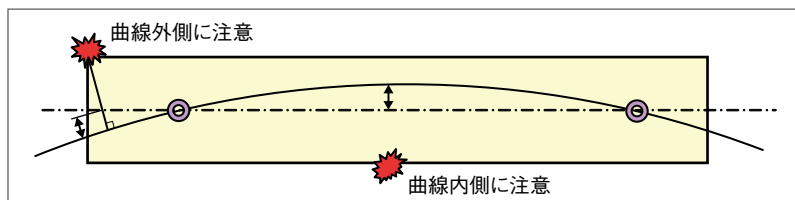


図3 曲線中での車体走行位置の偏り

の距離を離せば良いのですが、あまりホームを離し過ぎると、車体とホームとの間に大きな隙間が空いてしまいます。健常者ならなんとか乗り降りできるでしょうが、松葉杖の方や車椅子の方、あるいは小さい子供などは乗降の際に怪我をするかもしれません。したがって、隙間があまり大きくなならないよう、ホームに沿った曲線は半径をある程度大きくする必要があります。

なお、現実の曲線線形は常に設計値どおりとは限りません。レールやまくらぎはバラスト(砂利)の上に乗っています。このバラストは車両の走行によって少しずつ形が崩れていきます。したがって、曲線線形も長い時間をかけて少しずつ設計値からずれてしまいます。ホームに沿った曲線でこのずれが大きくなると、車体がホームに接触してしまいます。このため、曲線中ではホームとレールとの間隔を正確に管理する必要もあります。

(2)カント

曲線を走行する車両を遠くから見ると、車体が内側に傾いています。これは、外側のレールを内側よりも高くしているためです。この高さの差を「カント」といいます。曲線中では遠心力によって車両に外向きの力が作用します。これが大きくなりすぎると乗り心地が悪くなり、場合によっては走行安全性にも影響します。これに対し、図4のように、遠心力と重力の合力がちょうど車体の床面に直角であれば、車内の乗客にとって横方向の力が作用しません。これがカントをつける理由です。

カントを大きくすれば、曲線をいくらかでも速く走行できるように思えますが、それは車輪がレールを抱え込んでいるジェットコースターの場合です。鉄道では、運転の都合

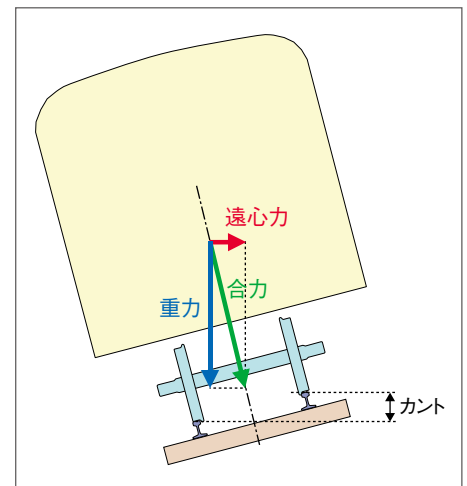


図4 カントと遠心力

上曲線中で止まることがあります。このとき、カントが大きすぎると、車体が曲線内側に倒れてしまいます。そこまですらなくても、満員電車が傾いて止まったら、中で立っている乗客には相当な力がかかります。車内販売の売り子さんはワゴンを押せなくなるでしょう。また、ホームに沿った曲線のカントが大きすぎると、車椅子の方は乗降に不自由を感じるかもしれません。これらの理由から、カントには上限値があります。日本では、狭軌(軌間1.067m)の場合は105mm、標準軌(軌間1.435m)の場合は、200mmが上限とされています。

それでは、カントの上限値によって遠心力を打ち消せないほど曲線通過速度を上げたい場合はどうすればよいでしょうか？この場合、車体の方を傾けてしまいます。車体と台車との間にコロのような回転体を挟み、遠心力が作用すると振りのようにひとりでに車体を傾ける、そのような仕組みを持つ車両が日本では1973年から使用され、急曲線の多い在来線の到達時分短縮に貢献しています。

(3) 緩和曲線

緩和曲線とは、直線から円曲線への移り変わり部に設けられる、曲線半径が徐々に変化する区間のことをいいます。緩和曲線が必要な理由は、直線から直接円曲線に進入すると、遠心力の急激な変化により車体に大きな揺れが発生してしまうためです。緩和曲線は鉄道だけではなく高速道路にも設けられています。自動車の場合、直線と円曲線を直接接続すると、円曲線進入時に急ハンドルを切らなければなりません。これに対し、ドライバーがハンドルを一定速度でゆっくり回せばスムーズに円曲線に進入できるよう、緩和曲線線形が設計されています。

鉄道の場合、曲線半径とともに緩和曲線中でカントが徐々に変化します。実はこのカントの変化がくせもので、緩和曲線の線形(長さ)は、このカントの変化をいかに緩やかにするかで決まります。それでは、緩和曲線の長さを決める3つの要素を紹介します。

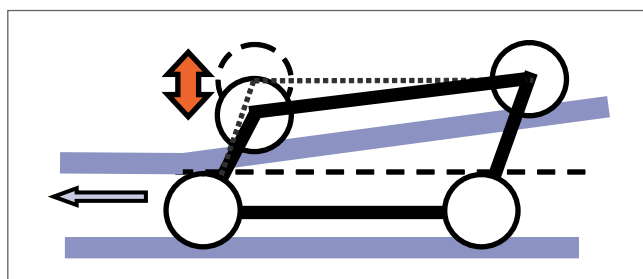


図5 カントの変化による台車の3点支持

台車の3点支持

鉄道車両の台車には4つの車輪があります。この台車を、カントが徐々に変化する緩和曲線中に置くと、図5のように一つの車輪が浮き上がります。4本足のテーブルをねじれた床面に置くと、足のうち1つが浮くのと同じことです。実際には車輪にばねがついていますので、車輪そのものが浮くのではなくばねが伸び縮みしますが、このばねが固かったり、カントの変化が急激であったりすると、浮いた車輪がそのまま脱線してしまうことがあります。したがって、カントの変化率は走行安全上非常に重要であり、地形上許される範囲で、カントの変化はなるべく緩やかにするのが望ましいです。

日本では、地形等でやむを得ない場合を除いて、緩和曲線の長さはカントの600倍以上とすることとしています。例えばカント100mmの場合、緩和曲線の長さは $600 \times 100\text{mm} = 60,000\text{mm} = 60\text{m}$ 以上とすることとしています。さらに最近では、車両の重さやばねの硬さ、半径・カントの大きさや緩和曲線の長さをもとに車輪が浮き上がるかどうかを評価し、浮き上がりに対する余裕が少ない場合は、脱線防止ガード等を敷設するよう決められています。

車体の回転速度

カントが徐々に変化すると、図6のように、車両は進行方向の軸回りに回転します。この回転が速すぎると、車内の乗客、特に立っている乗客は足元がすくわれるような力を受けて、転んでしまいます。鉄道車両にとっても同じことで、回転速度が高すぎると勢いあまって外側の車輪が浮き上がってしまいます。したがって、カントによる回転速度が一定値以下となるように緩和曲線の長さが決められています。日本の場合、乗り心地を考慮した回転速度の目安は5度/secとされていますが、規程上は多くの事業者が

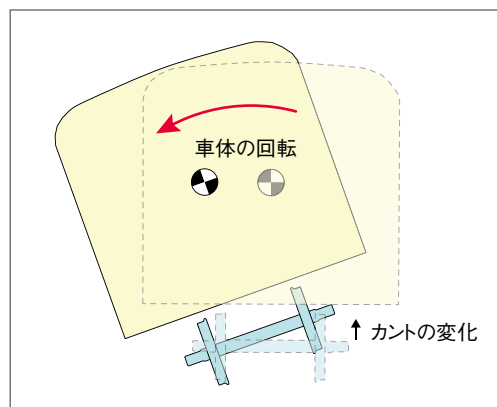


図6 カントの変化による車体の回転

8度/sec程度を採用しています。

遠心力の時間変化率

カントがちょうど遠心力を打ち消すように設定されていれば良いのですが、カントの項で述べたように、カントには上限値があります。したがって、曲線の通過速度が高く、カントで打ち消される以上の遠心力が発生する場合、遠心力の一部が車両に作用します。このようなカントでは打ち消せない遠心力を、「超過遠心力」と呼びます。

超過遠心力そのものは円曲線中で一定の力ですが、このような力が短い時間で作用すると、車両には大きな振動が発生します。したがって、緩和曲線の長さがある程度長くして、超過遠心力が徐々に作用するようにしています。日本では、超過遠心力(加速度)の変化率が概ね $0.4\text{m/s}^2/\text{s}$ 以下となるように、緩和曲線長を定めています。

これら3種類の緩和曲線長決定要因と速度との関係の例を図7に示します。速度が低い場合は台車の3点支持が、速度が高くなるにつれて超過遠心力の時間変化率が緩和曲線長の決定要因となります。曲線通過速度を上げたくて、しかし緩和曲線長が図7の長さに満たない場合は、地形上許される範囲で緩和曲線を延ばす工夫をします。

分岐器の線形

「揺れますのでご注意ください。」普通列車が特急の通過待ちをするために、いつもとは違うホームに進入する際に車掌から放送があります。初めから揺れるとわかっているのなら、なんとかならないのかと思われたことはありませんか？この揺れは、駅の待避線に入るために分岐器を通過する際に発生します。

分岐器は、車両の進路を切り替えるために駅の前や車両基地に敷設されています。一般的な分岐器は片開きといって、一方の線が直線、他方の線が曲線となっています(図8)。短い区間に車両の進路を切り替える必要があるため、分岐側の曲線線形に以下の特徴があります。

- ・緩和曲線が無い。
- ・一般に、カントが無い。
- ・曲線半径が小さい。
- ・曲線長が短い。

特に最初の「緩和曲線が無い」ことの影響は大きく、これとカントが無いことが相まって大きな遠心力が短い時間で作用するので、先ほどの車内放送となるわけです。

分岐器には様々なタイプのものがあります。日本で最も大きい分岐器は、上越新幹線下り線と北陸新幹線の分岐点

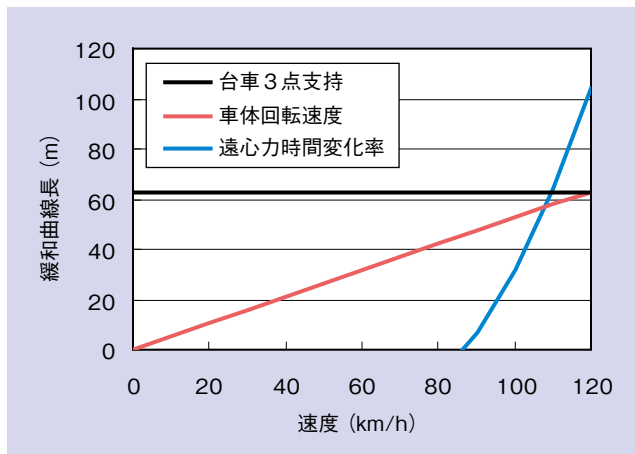


図7 速度と緩和曲線長の関係の例
(狭軌、半径600m、カント105mmの例)

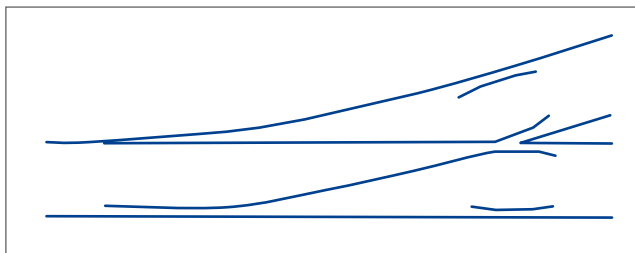


図8 片開き分岐器

にあるもので、曲線半径は4000mと8000mの組み合わせで、最高速度160km/hでの走行が可能です。逆に、JR在来線の本線(車両基地等以外)で用いられている最も小さい分岐器の半径は約120m、速度は25km/hに制限されています。

おわりに

日本は山河が多いため、明治時代に建設された在来線の多くは、架橋技術やトンネル掘削技術が未熟であったこともあり、山裾を縫った曲線が多い線形となっています。「在来線を高速化して時間短縮ができないのか？」という質問をよくいただきますが、車両の性能を上げて直線をいくら高速で走ったとしても、曲線による速度制限が大きなネックとなって、所要時間そのものはなかなか短縮できないのが実情です。かといって現在の経済情勢では、トンネルを新しく掘り、橋を架けて在来線をショートカットするのも困難です。日本では、車体傾斜車両の開発や軌道の整備等を通じて、曲線と上手につきあっていくしかなさそうです。

RRR