

乗り心地向上のための軌道管理

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 ～鉄道車両はなぜ揺れる？～

鉄道における快適性には様々な要素があります。最近では世界的な受動喫煙防止の流れで、多くの駅・列車が喫煙所を除いて全て禁煙となりました。これも一種の快適性です。空調や車内騒音も一種の快適性です。これらの様々な快適性の中で、古来より鉄道技術者を悩ませ、かつ技術開発のターゲットとしてきたのが狭い意味での「乗り心地」、すなわち車両の振動です。適度な車両の揺れは心地良いものでもあり、車内では居眠りをしている方がたくさんいますが、一方で最近は車内でパソコンを扱う方も多く、過度の振動は操作の妨げとなります。

それでは、鉄道車両はなぜ揺れるのでしょうか？

当たり前のことですが、止まっている車両はほとんど揺れません。車両は走行してこそ、振動が生じます。この振動には2種類あり、一つは車両が勝手に揺れる「蛇行動」と呼ばれる現象、もう一つは、走行中に車両になんらかの外乱が作用して生じる振動です。後者の外乱には、空気力や連結器を通じた力などがありますが、軌道(レール)の曲がりによって、車輪の走行位置を強制的に変位させることが、大きな要素の一つです。

前置きが長くなりましたが、本稿では、このレールの曲がり方が車両に与える影響と、この曲がりをつねるための管理方法を紹介します。

軌道変位の種類と測定法

鉄道のレールは一見まっすぐ伸びているように見えますが、よく見ると上下左右に数ミリの曲がりがあります。これを「軌道変位」と呼びます。「軌道狂い」や「軌道不整」と呼ぶこともあります。軌道変位上を車両が走行すると車輪が上下左右に変位し、さらには車両全体が上下左右に振動して乗り心地が悪くなり、最悪の場合は脱線に至ります。これを防ぐために保線技術者は軌道変位を定期的に測定し、必要に応じて保守を行っています。

軌道変位は、一般に以下の5項目について、ミリ単位で管理されます。

- ①高低変位(レールの上下方向の変位)
- ②通り変位(レールの左右方向の変位)
- ③水準変位(左右レールの高さの差)
- ④平面性変位(2本のレールが作る平面のねじれ)
- ⑤軌間変位(左右レールの間隔)

このうち③～⑤は、ある地点における左右レールの相対位置ですので、測定は比較的容易です。一方、高低・通り変位は長手方向の位置であり、一般には図1に示すように10mの長さの糸(弦)をレールに沿って張り、この弦の中央位置でレールとの上下・左右方向離れを測定します。この方法を「10m弦正矢法」と呼びます。

ところで10m弦正矢法による測定データは、レールの長手方向の実形状を表しているわけではありません。これは、図1で弦の長さを変えれば測定値が変わってしまうことから容易に想像ができます。

もう少し詳しく見ていくと、10m弦正矢法で理想的な正弦波(サイン波)状の軌道変位を測定した場合、その波

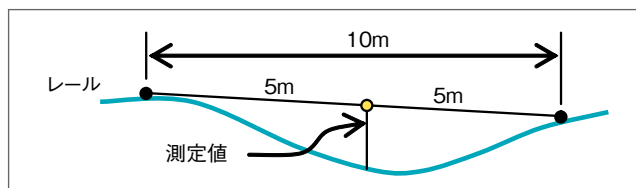


図1 10m弦正矢法

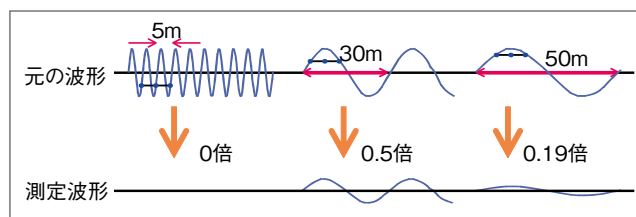


図2 10m弦正矢法による測定倍率

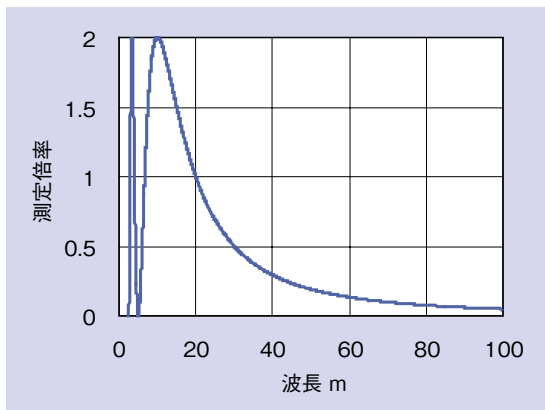


図3 10m弦正矢法における波長と測定倍率との関係

長によって振幅の測定倍率が変化します。具体的には図2に示すように、波長30mの正弦波では元の振幅の0.5倍に、波長50mでは0.19倍となります。また波長5mの正弦波を10m弦正矢法で測定すると、振幅はいたるところで0と測定されます。このような、波長と測定倍率との関係は図3のようになります。10m弦正矢法では、波長が6.67m～20mの範囲で測定倍率が1より大きくなり、実際の軌道変位よりも振幅が大きく測定されます。

このように、実形状を測っているわけではないのに10m弦正矢法が用いられるのはもちろん理由があります。その理由を次に述べます。

車両の運動特性と10m弦正矢法

一般的な鉄道車両は、車体に2つの台車に取り付けられ、各台車に2本の輪軸(4つの車輪)が取り付けられた構造となっています。各々の間にはばねとダンパが取り付けられており、適度に振動を吸収しています。一般に、ばねと質点が連結された系は、特定の周波数(1秒間に揺らされる回数)の外力を受けた場合に振動が非常に大きくなります。このときの周波数を「固有振動数」と呼びます。鉄道車両の固有振動数は多くの場合1.0～1.5Hzの間にあります。したがって、例えば秒速25m(=90km/h)で走行する車両は、軌道側に波長25mの変位があるとちょうど1秒周期で揺らされるため、同じ振幅で波長10mの軌道変位がある場合(この場合、1秒間に $25/10 = 2.5$ 回=2.5Hzで揺らされる)よりも揺れが大きくなります。列車の揺れを抑えるためにはこの固有振動数に相当する波長に着目し、振幅を小さくする必要があります。

列車のスピード、軌道変位の波長と車両を加振する周波数との関係を図4に示します。速度に応じた曲線と網掛け部分の交わる範囲が、車両が揺れやすい波長となります。例えば、時速130km/hの場合、波長25mから36mの軌道

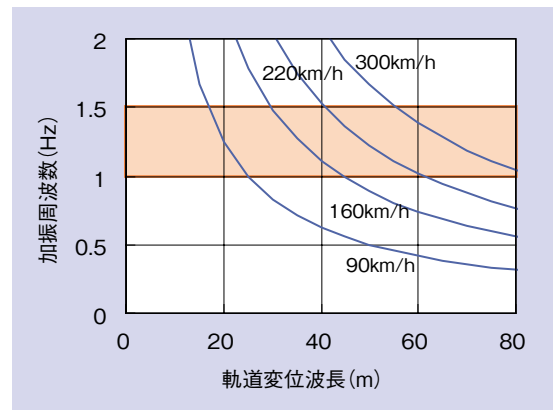


図4 軌道変位の波長と車両が揺れやすい周波数との関係

変位が固有振動数に相当します。

図3と図4を比較すると、在来線で一般的な速度90km/hの場合、車両が揺れやすい周波数に相当する波長と、10m弦正矢法で測定倍率が大きい波長がほぼ一致していることがわかります。すなわち、10m弦正矢法は、車両が揺れやすい波長の軌道変位を増幅して測定する手法といえます。これが、10m弦正矢法が利用される大きな理由です。在来線の高速線区や新幹線では、速度に応じて20m弦正矢や40m弦正矢が用いられます。

振動加速度と乗り心地レベル

ここでちょっと話が変わりますが、そもそも乗り心地は何で評価すれば良いのでしょうか？軌道変位の振幅がそのまま乗り心地を表していると考えて良いのでしょうか？

冒頭に述べたように、狭義の乗り心地とは車両の揺れを指します。揺れ方を表す物理量として一般には変位、速度、加速度が用いられますが、乗り心地の評価には加速度を用います。これは、ニュートンの力学の法則により、車両の揺れによって車内の乗客が受ける力は、その人の体重(正確には質量)と加速度を掛けたものとなるためです。車両の揺れによる不快感は乗客が受ける力に比例すると考えられるので、乗り心地を良くするには加速度を小さくすれば良いことになります。

乗り心地の評価には、加速度の大きさそのものが用いられることが多いですが、振動するのがヒトですので、鉄道車両の場合と同様に、人体が揺れやすい周波数に着目した評価が行われることもあります。この場合の評価指標には、大きく分けて以下の2つがあります。

(1) 乗り心地係数

乗り心地係数とは、アメリカ自動車協会のJanewayが提案した自動車に関する乗り心地基準を参考に、旧国鉄が作成した乗り心地の評価指標です。

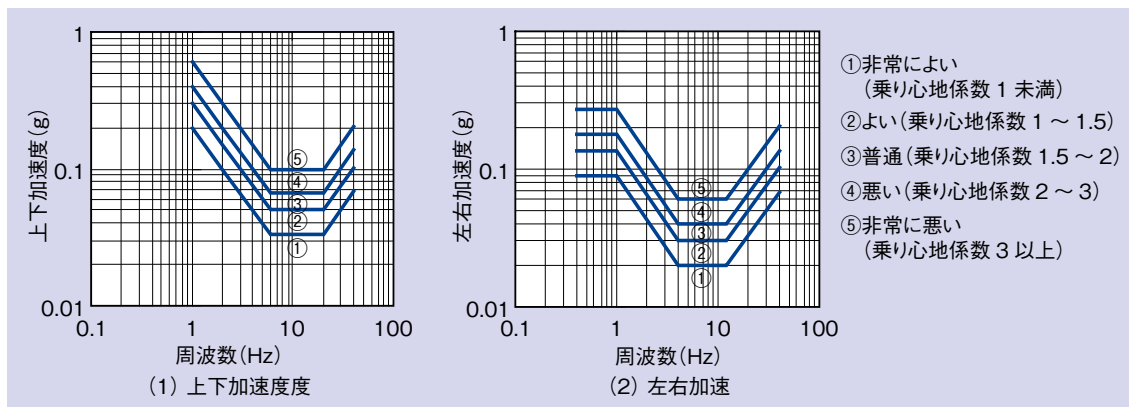


図5 乗り心地基準 (加速度は片振幅)

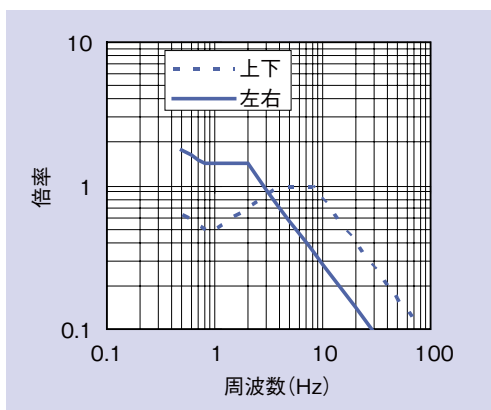


図6 乗り心地フィルタ

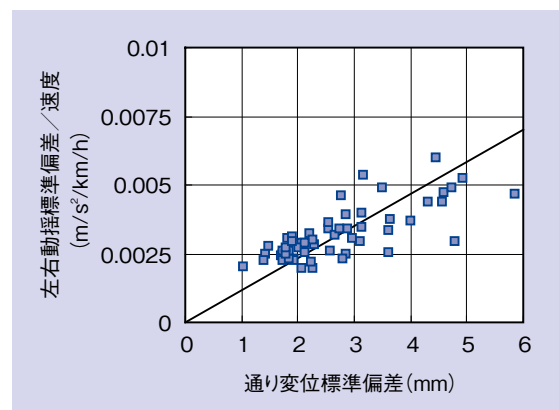


図7 通り変位の標準偏差と左右動の標準偏差の関係

乗り心地係数による乗り心地の評価では、発生した加速度を図5に示す上下・左右各4本の線によって5段階に区分します。各線の縦軸の値は、乗り心地がほぼ等価であることを表しています。例えば上下加速度の一番下の線の場合、1.0Hzで0.2g(≒2.0m/s²)の加速度と、10Hzで0.033gの加速度はほぼ等しいということです。すなわち、図5で線の高さが低い周波数は、人体が敏感に感じる=重要視すべき周波数ということになります。

(2) 乗り心地レベル

乗り心地レベルは、国際標準化機構(ISO)が提案した「全身振動暴露に関する評価指針」(ISO2631)を参考に国鉄の「乗り心地管理基準に関する研究委員会」が提案したものです。これは加速度に、図6に示す乗り心地フィルタによる重みづけをし、さらにその時間平均を算出しデシベル値に変換したものです。

図5の各線と図6の線は上下が反転したように見えますが、図5で縦軸の値が小さい周波数は小さい加速度でも重要視することを、図6で縦軸の値が大きい周波数は、加速度に大きい倍率をかけて重要視することを表しており、周波数毎の重み付けの意味は同じです。ただし、重要視すべき周波数は、乗り心地係数と乗り心地レベルで異なってい

ます。現在では、前者は主に速度向上試験の際に発生した著大振動の評価などに、後者は数分間程度の区間評価に用いられています。ただし、乗り心地レベルを軌道の保守に用いる場合は、ある程度短い区間の平均値を用いる方が使い勝手が良いので、評価時間を2秒程度としています。

乗り心地評価指標と軌道変位

さて、ここまで前半は軌道変位の測定原理とその意味を、後半で乗り心地の評価方法について述べました。ここでは両者を結びつける方法を考えます。

車体の振動加速度は、加速度計を用いれば比較的容易に測定できます。しかし加速度は車両の個体差や走行速度によって値が変化しますので、測定値の再現性が高く、かつ現場ですぐに測定できる軌道変位を用いて乗り心地を評価できると都合が良いです。

最も簡単な方法は、軌道変位の振幅そのものを評価指標とすることです。前述したように、在来線の速度域では、10m弦正矢法は車両が揺れやすい波長の軌道変位を増幅して出力する性質を持っていますので、軌道変位の振幅が大きい地点は加速度も大きい地点となります。10m弦正矢通り変位の100mごとの標準偏差と左右振動加速度の標

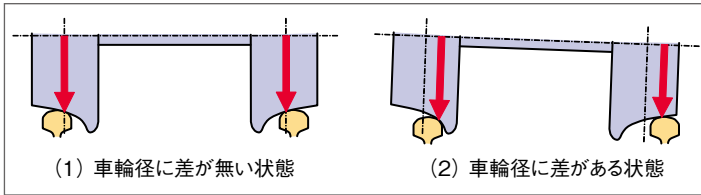


図8 輪軸とレールの接触状態

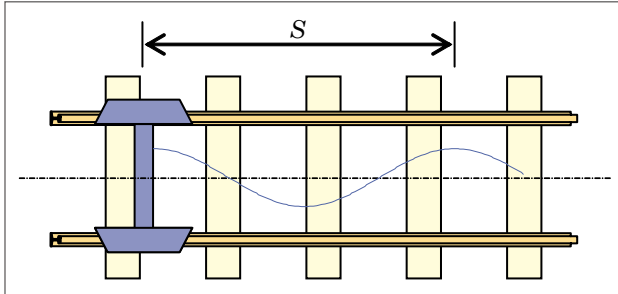


図9 輪軸蛇行動波長

準偏差を比較したものを図7に示します。ばらつきは大きいですが、速度が等しければ、左右動は通り変位にほぼ比例して大きくなるのがわかります。

一方、図7のばらつきの程度からわかるように、実際の車両の挙動は軌道変位ときれいに比例しているといえるほど単純ではなく、また左右動の場合、通り変位と水準変位の双方の影響を受けます。このようなことを考慮して、軌道変位の測定データから車両の加速度をシミュレーションで求めることが考えられます。この方法であれば、加速度を測定する場合と比較して、測定時の速度や車両の個体差の影響を受けにくく、安定した結果が得られます。さらに、シミュレーション結果から前述した乗り心地レベルを計算できるので、より人間の感覚に近い評価結果が得られるという利点があります。

ただし、いずれの方法にせよ、これらの評価指標からわかるのは、どこの地点がどの程度乗り心地が良いか(悪いか)ということだけであり、どのように保守すれば乗り心地が改善されるか、ということにはわかりません。乗り心地の改善のためには、軌道変位を小さくする保守方法も考える必要がありますが、紙面の都合上ここでは省略します。

蛇行動と軌道

次に、特に外乱が無くても車両が勝手に揺れ出す「蛇行動」について考えます。

車輪とレールの位置関係を図8に示します。直線では、輪軸は軌間の真ん中を走行します(図8(1))。走行位置が左右のいずれかにずれた場合、一方の車輪径は大きくなり、他方の車輪径は小さくなります(図8(2))。径の大きい車輪は径の小さい車輪より長い距離を進もうとしますが、左

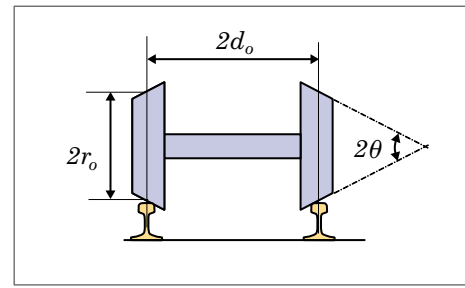


図10 輪軸と車輪との位置関係

右の車輪は車軸でつながっているの、図9のように、輪軸は左右に運動します。このように輪軸が進行方向に対しS字状に繰り返し振動することを、蛇の運動に例えて「蛇行動」といいます。

蛇行動において、輪軸が行って戻ってくるまでの距離(図9のS)を「(輪軸)蛇行動波長」と言います。蛇行動波長は、図10に示す車輪の半径 r_0 、レールと車輪の接触面の角度 θ 、およびレールと車輪の接触点間隔 $2d_0$ から、式(1)で表されます。

$$S = 2\pi \sqrt{\frac{d_0 r_0}{\tan \theta}} \dots\dots\dots (1)$$

車両の設計の際には、台車や輪軸を支持するばねの剛性や減衰係数を適切に設定することで、輪軸の固有振動数が蛇行動波長に対応する周波数(≒秒速/蛇行動波長)よりも高くなるようにします。ただし、車輪が摩耗したりばねが劣化したりすると、営業速度の範囲で蛇行動が発生することがあります。軌道との関係でいうと、車輪やレールの摩耗によって θ が大きくなると、式(1)からSが短くなり蛇行動が起きやすくなります。この場合、車輪やレールを削り直すことで蛇行動は抑制されます。また、最近の車輪は図8のように断面形状が円弧となっていますので、軌間が狭いと θ が大きくなり、蛇行動が発生することがあります。このような場合は、軌間を広げ、 θ が小さい箇所では車輪とレールが接触するようにすると蛇行動が抑制されます。

おわりに

本稿で紹介した内容のうち、軌道管理の面ではこれまで前半の軌道変位管理に重きがおかれ、後半の蛇行動は車両単独の性能とされてきました。しかし最近になって、レールの断面形状や軌間変位を起点とする蛇行動が新幹線・在来線とも発生しており、対策に苦労しています。このように、今後の乗り心地向上のためには、これまであまり考慮されていなかったレールと車輪との接触状態の管理が必要となるため、これに対応すべく測定法、評価法などの技術開発を行っていききたいと思います。RRR