

鉄道車両の走行と曲線通過のダイナミクス

秋田県立大学 機械工学科 応用機械設計(動的設計) 富岡研究室

鉄道車両は、鉄レール上を鉄製の車輪が転走し、自動車のようにステアリング(車輪の向きを変える)機構を持たずにスムーズに曲線を通過することができる、といった興味深い特徴を持つ。その仕組みについて解説する。

鉄レール-鉄車輪による走行

日本で鉄道が開通して145年経つが、鉄レール上を鉄製の左右車輪が一体になった輪軸を持つ車両が走行する、という基本的な構成は変わっていない。

鉄レールと鉄車輪の組合せの利点として、大きな荷重を支持できること、転がり抵抗が小さいことが挙げられる。前者について、例えば1輪軸あたりの荷重(軸重)は貨物機関車で最大170kN(約17tf)程度、新幹線で100kN(約10tf)以上であり、海外では軸重300kN(約30tf)の機関車もあるが、このような大荷重を支えて高速走行することはゴムタイヤでは難しい。後者については、運送用自動車の場合、転がり抵抗は車重1tあたり80kN程度⁽¹⁾だが、在来線電車では車重1tあたり20~30kN程度である。

一方、鉄レールと鉄車輪の組合せは滑りやすいのが弱点で、急勾配の坂は登れず、加速や減速の際に空転を起こしやすい。



図1 鉄道車両の車輪とレール

輪軸の自己操舵機能

鉄道車両の輪軸は1本の車軸に2枚の車輪を圧入して構成され(図2)、左右の車輪は一体でレール上を転走する。車輪のレールに接する部分を踏面とよぶが、図2のように踏面は外側が半径が小さくなるような勾配(踏面勾配)を持つ。このような構造により輪軸は自動車のようなステアリング機構なしに曲線ではレールに沿って曲がり、直線では片側のレールに偏ることなく車両を案内して走行する。このような輪軸の性質を自己操舵機能という。曲線の通過しやすさや後述の蛇行動波長は、踏面勾配に大きく依存する。

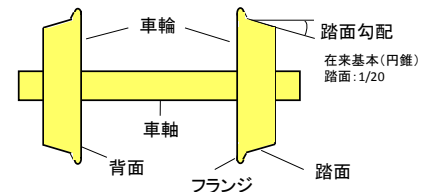


図2 鉄道車両の輪軸

輪軸が半径 R の曲線を走行する状況を考える。右カーブの場合、輪軸はレール中心より左(外軌側)に寄って走行することになり、左車輪がレールと接触する点の車輪半径(転がり半径)は右車輪のものより大きくなる。左右車輪の回転速度は同じであるから、転がり半径が大きい左車輪は右車輪より速く進むことになり、輪軸は右向きに旋回する。

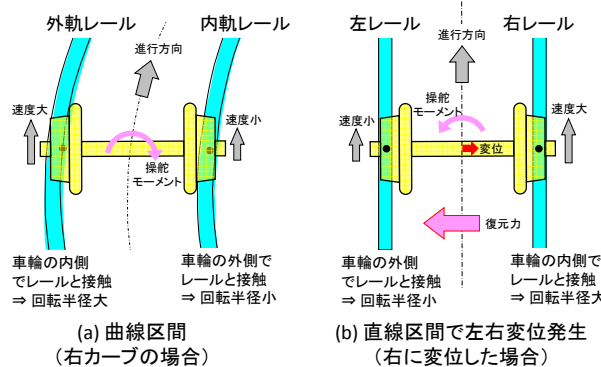


図3 輪軸の自己操舵機能

直線走行中の輪軸が横方向にずれた場合も同様で、左右車輪半径差が生じることによって2本のレールの中央に戻ろうとする復元力が作用しどちらかに偏ることなく走行することができる。

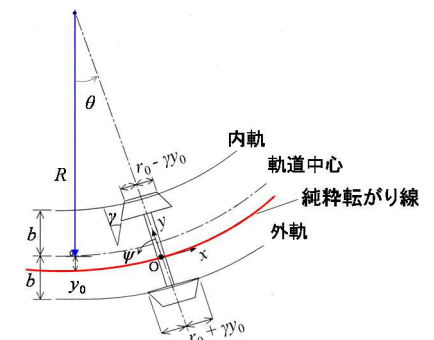


図4 輪軸の曲線旋回と純粋転がり線

左右の車輪の半径差だけで曲線を理想的に転がる時の輪軸中心位置が進む軌跡を純粋転がり線という(図4)。輪軸が走行する曲線が純粋転がり線となるための条件を求めると、車輪の左右接触点位置間隔の1/2を b 、踏面勾配を γ 、輪軸が滑らずに半径 R の曲線上を転がるのに必要な車輪半径差を確保するための外軌側への変位を y_0 として、 $R=(r_0 b)/(\gamma y_0)$ の関係がある。

輪軸の蛇行動

輪軸は自己操舵特性に起因して蛇行動とよばれる不安定な左右振動を起こす性質を持つ。蛇行動が発生すると、車両の左右振動が大きくなって乗り心地が悪くなるだけでなく、フランジがレールに当たって軌道にダメージを与え、ひどくなると脱線の危険もある。

蛇行動が全く発生しないようにすることは困難だが、営業速度領域で生じないように台車を設計することはできる。すなわち蛇行動波長を長くすることが蛇行動が発生する速度を高めることになるが、例えば、車輪半径や踏面勾配のほか輪軸を前後・左右方向に台車枠に支持する軸箱支持剛性などが蛇行動波長に影響する。一般に蛇行動波長を長くすると曲線通過性能が悪化する(半径の小さい急な曲線を通過しにくくなる)といった相反する特性があるため、車両が使われる線区の条件に応じて注意深く設計し、完成した車両が使用条件の範囲で蛇行動が発生しないことを十分に確認してから営業に使うことが必要である。

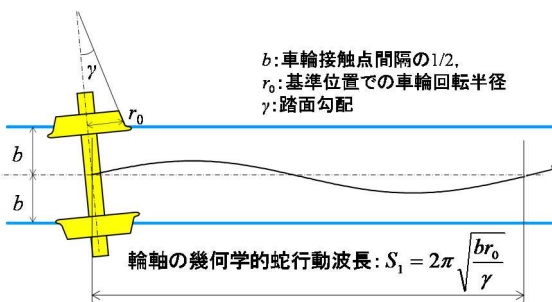


図5 輪軸の幾何学的蛇行動

表1 蛇行動特性と曲線通過性能の相反性⁽²⁾

	蛇行動安定性重視	曲線通過性能重視
踏面勾配	小	大
軸箱支持剛性	ある程度大	小
台車回転抵抗	大	小
軸間距離	大	小

参考文献:(1) 陸田ほか、ディーゼル重量車のJE05モードの計算法に基づく走行抵抗値と実測値の違いについて、東京都環境科学研究所年報、2012、pp.63-66。
(2) 宮本昌幸、ここまで来た! 鉄道車両、テクノライフ新書(オーム社)、1997、p.96。