

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

台車の蛇行動発生条件を解明する

車両の走行安定性を評価するうえで重要な現象として、台車の蛇行動があります。これは、車両がある速度以上で高速走行する際に、台車や輪軸が突然大きく振動する現象です。走行安定性を評価する方法の一つに、レールと同じ断面形状の円盤を回転することで走行状態を模擬できる試験装置を用いた蛇行動試験があります。この蛇行動試験では、試験方法によって蛇行動が発生する速度が異なることが知られています。ここでは、台車の蛇行動が発生する条件を明らかにするとともに、試験方法によって蛇行動が発生する速度が異なる理由を説明します。



山長 雄亮
Yusuke Yamanaga
車両構造技術研究部
走り装置研究室
主任研究員
【専門分野】車両のダイナミクス、走行安定性



渡辺 信行
Nobuyuki Watanabe
車両構造技術研究部
走り装置研究室
室長
【専門分野】走り装置、車両運動

はじめに

図1を用いて、鉄道車両の1輪軸の蛇行動について説明します。一般的な鉄道車両では、左右の車輪が1本の車軸に圧入されてしっかりと固定された一体輪軸(図2)が用いられています。したがって、輪軸がレール上を転がる時、左右の車輪の回転数は等しくなります。また、車輪の形状は、輪軸の中心から外側に向かって、半径が徐々に小さくなっています。とくに円錐形状をした車輪では、その円錐の傾きの

大きさを踏面勾配とよんでいます。この踏面勾配は、曲線をスムーズに曲がるための工夫であり、たとえば進行方向に対して右側にカーブする場合、車輪はまっすぐに進もうとするので、輪

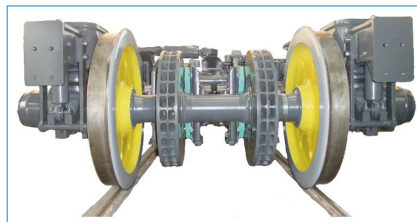


図2 一体輪軸

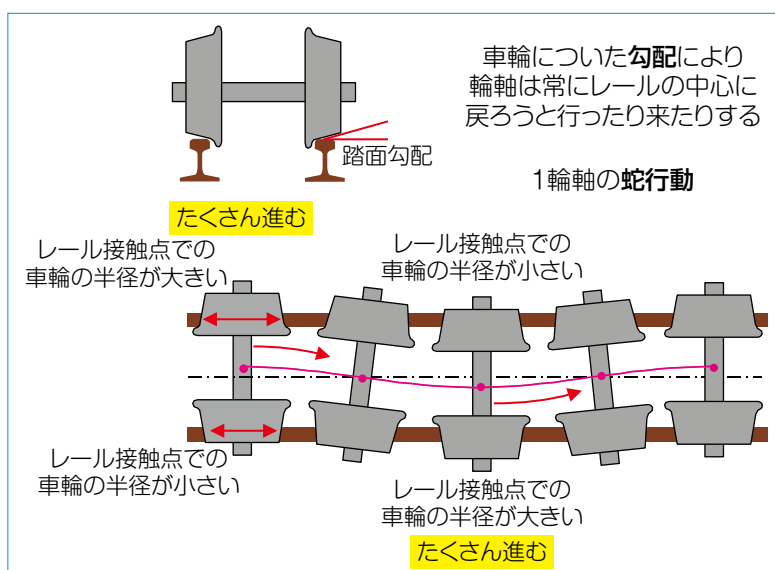


図1 1輪軸の蛇行動の様子

軸はカーブの外側に寄ります。その結果、レールとの接触位置で左車輪の半径が右車輪の半径よりも大きくなります。これにより左車輪の進む距離が右車輪の進む距離よりも多くなるので輪軸が右に旋回し、スムーズに曲線を通過できます。この車輪踏面の幾何学的な特徴から、輪軸はいったん左右にずれた状態で転がり始めると、直線であっても右へ左へと蛇行を繰り返しながら進もうとする性質を持っています。これを一輪軸の蛇行動とよびます。

蛇行動試験と蛇行動限界速度

このような輪軸の特性があるにもかかわらず、通常の走行条件では蛇行動は発生しません。それは、実際の鉄道車両では、輪軸だけが単独で転がることのないからです。輪軸は台車枠とよばれるフレームに組み込まれて台車を構成し、台車は車体を支えています(図3)。台車の種類にもよりますが、現在一般的に使われている台車では、輪軸はゴムやコイルばねなどのばね要素を介して台車枠に固定されています。このように、輪軸には拘束する力がはたらくので、ある一定の速度以下では、輪軸がレールに対して左右方向にずれた状態で転がり始めても、輪軸は左右に揺動しながら、やがて収束してまっすぐに進みます。

しかし、ある速度を超えた瞬間に、まっすぐに転がっていた輪軸が突然左右に激しく振動し始めます。このときの速度を蛇行動限界速度とよびます。外から周期的な力を与えていないにもかかわらず輪軸が周期的に振動するような現象は、より一般的には、自励振動(☞参照)とよばれています。

蛇行動は大きな振動をとまなうので、乗り心地や安全面から好ましくありません。そこで、新しく製作した台車が、目標とする走行速度まで蛇行動が発生

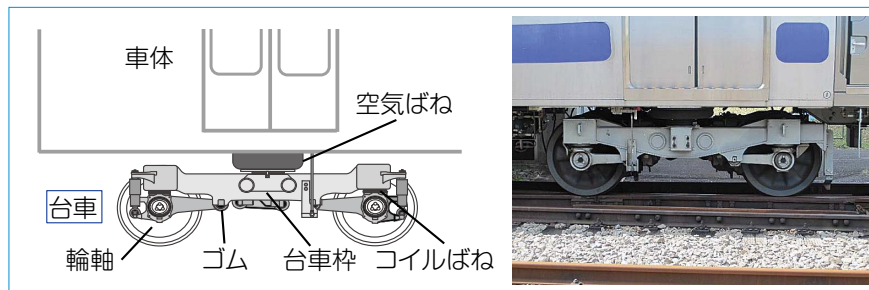


図3 鉄道車両の構成

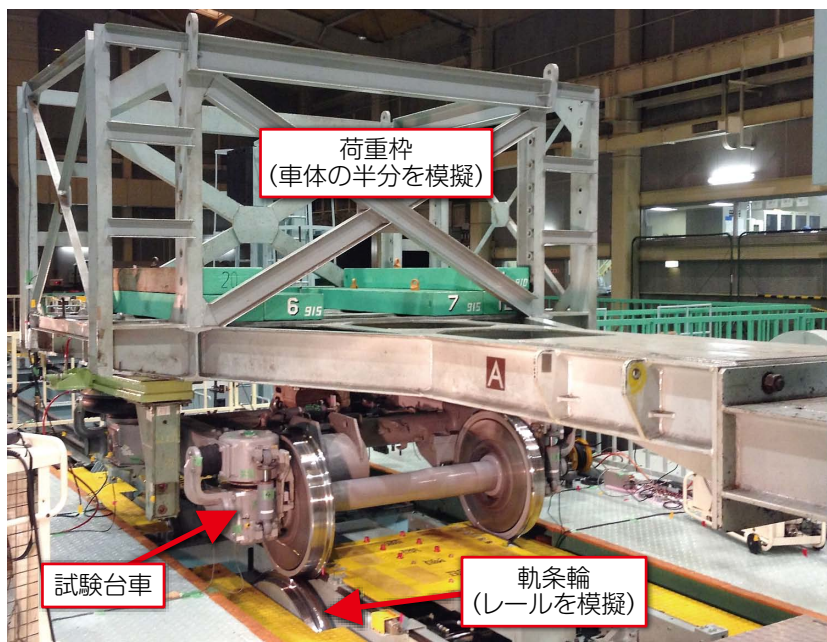


図4 車両試験装置上での蛇行動試験の様子

しないことを調べるために、室内で実験することがあります。これを蛇行動試験といい、車両試験装置とよばれる装置を使って行います。鉄道総研が所有する車両試験装置で蛇行動試験を実施している様子を図4に示します。断面の形状がレールの形をした軌条輪とよばれる円盤状の回転装置を高速で回転させることで、まっすぐなレールの上を高速で走行する状態を模擬できま

す。なお、図4で示しているのは、半車両試験とよばれる試験で、車体の半分の質量や大きさなどの特性を模擬した荷重枠を使って行います。

単純回転試験と加振試験

軌条輪を単純回転し、その回転速度を上昇させて蛇行動限界速度を調べる試験をとくに単純回転試験といいます。蛇行動試験には、単純回転試験のほか

☞ 共振現象と自励振動の違い

振動系に外から周期的な外力が作用する場合、通常はその周期と同じリズムで振動します。また、振動系自身が元々有する振動の固有の周期(軽く揺すったり、ハンマーなどで軽くたたいたりしたときに起こる振動の周期)に外力の周期が近づくと、大きく振動します。これを共振現象といいます。

自励振動の場合、周期的でないエネルギーが流入し、振動系内部の特性で振動をうながすエネルギーに変換されて振動が成長し、大きな定常振動となります。蛇行動の場合、車輪とレールとの接触面で生じる滑りによって発生する摩擦力(クリープ力)が、自励振動を発生させるエネルギー源となります。

に加振試験があります。加振方法は車両試験装置の設備によりさまざまです。輪軸や台車枠を直接揺する方法や、荷重枠をワイヤーで引っ張ってから突き放す方法、軌条輪を揺することで輪軸を加振する方法などがあります。明確な外乱を与える加振試験では、単純回転試験での蛇行動限界速度より低い速度で蛇

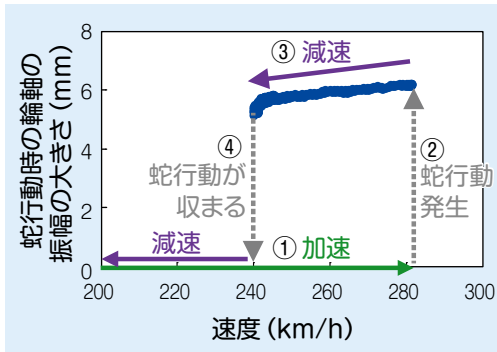


図5 蛇行動の発生から収束までの様子

行動が発生します。ただし、その外乱の与え方(大きさや周波数など)が変わると、蛇行動限界速度が変わる場合があることがさまざまな試験で明らかになっています。試験方法によって蛇行動限界速度がばらつくので、同じ試験方法を用いないと比較ができません。この制約は台車の走行安定性を評価する上で好ましくありません。蛇行動発生条件を解明することができれば、ばらつきのない走行安定性評価につながることが期待できます。そこで、単純回転試験での蛇行動限界速度以下では、どのような条件で蛇行動が発生するのか調査しました¹⁾。

蛇行動の発生条件

蛇行動は、いったん発生すると持続し続け、ある程度まで減速しないと振動が収束しないことは経験的に知られています。最初に、単純回転試験において蛇行動が発生してから減速して収束するまでの様子を調べました。

図5に、軌条輪の回転速度を徐々に上げて、蛇行動が発生してから、減速して蛇行動が収まるまでの経過を示します。図の線は、蛇行動が起こっている時の輪軸の左右振動の振幅の大きさを表しています。図5の例では、282km/hまでは何も起こらずまっすぐに走行していますが(①)、282km/hになった途端に大振幅の蛇行動に至っています(②)。そのあと、

軌条輪を少しずつ減速していきますが、振幅はほとんど変わらず、蛇行動が持続していることがわかります(③)。最終的には、軌条輪を240km/hまで減速すると振動は一気に収まっています(④)。再現性を確認するため、同じ試験を何度か繰り返しましたが、どの試験でも図5とほぼ同じ経過をたどりました。

このことから、単純回転試験で蛇行動が発生する速度より低い速度でも、ある一定の範囲内では蛇行動の状態が存在しうること、また、その範囲は、単純回転で蛇行動が発生する速度と減速して蛇行動が収まる速度で挟まれた領域であることが推定できます。この領域内では、蛇行動発生の有無を分ける条件が存在すると考えました。

そこで、蛇行動発生の有無を分ける条件として、台車を揺すった時の最初の振幅の大きさに着目しました。今回、台車を揺すする方法として、軌条輪を左右に1度だけ動かす方法を用いました。図6に示すように、軌条輪を動かす量を段階的に大きくすることで、揺すった直後に発生する輪軸の振動の最初の1波の振幅を少しずつ大きくしました。

その結果、振幅がある一定の大きさを超えたときに、蛇行動が発生することがわかりました。蛇行動の発生有無を分ける境目となる振幅の大きさは、繰り返し試験を実施してもほぼ同じ結果となりました。この試験をさまざま

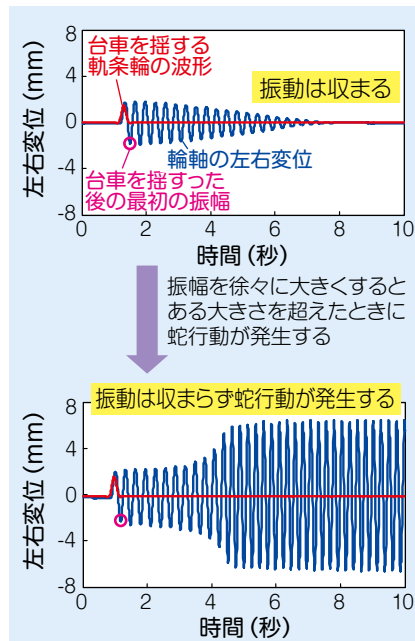


図6 最初の輪軸の振幅に依存してその後収束する場合と蛇行動に至る場合の例

な速度条件で実施した結果を図7に示します。図中の○印はその後収束したことを、×印はその後蛇行動に至ったことを示しています。どの速度においても、蛇行動が発生するかどうか、輪軸の振幅の大きさに明確な境界があることがわかります。また、その境界は走行速度に対して連続的につながっていることもわかりました。

加振方法と蛇行動限界速度の差

単純回転試験での蛇行動限界速度以下でも、台車を揺することによって生じる輪軸の最初の振幅の大きさが、ある一定の境界線を越えたときに、蛇行動が発生することがわかりました。以降、この境界線を蛇行動限界曲線とよぶことにします。

ここからは、蛇行動限界曲線を用いて、加振方法によって蛇行動限界速度に差が生じる理由を検証します。加振方法はさまざまにありますが、今回は軌条輪を揺すする方法を用いました。軌条輪の揺すり方(波形)は、代表的な例として三つの波形を取り上げまし

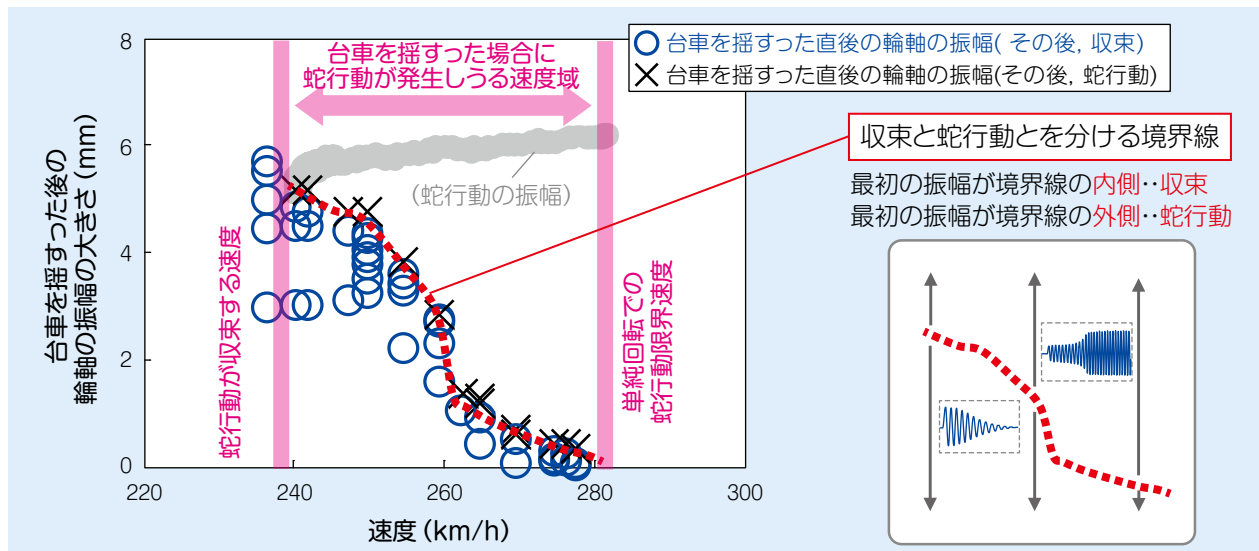


図7 蛇行動発生有無を分ける振幅の境界線

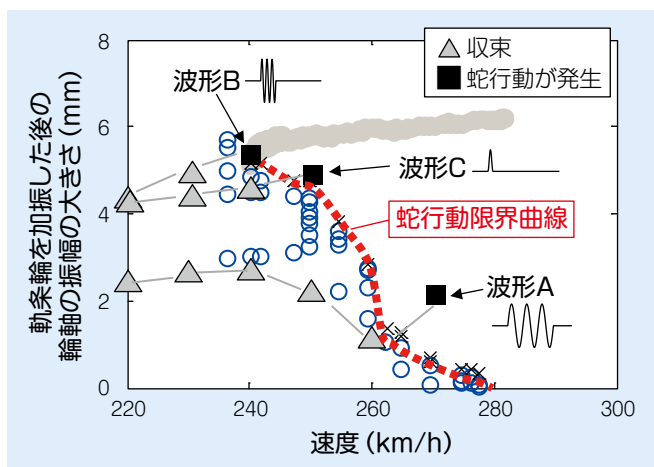


図8 加振方法と蛇行動限界速度の関係

表1 加振波形と蛇行動限界速度

	波形A	波形B	波形C
加振波形			
周波数	1Hz	幾何学的台車 蛇行動周波数 (台車が揺れやすい周波数)	幾何学的台車 蛇行動周波数 (台車が揺れやすい周波数)
蛇行動 限界速度	270km/h	240km/h	250km/h

おわりに

蛇行動発生の有無が、走行速度と外乱を与えたときの輪軸の最初の振幅の大きさという二つの条件で決定されることがわかりました。また、加振方法が異なると蛇行動限界速度に差が生じる原因が、それぞれの加振方法によって生じる輪軸の振動の最初の振幅の大きさの違いであることがわかりました。

今後は、実験的に得られた蛇行動の発生有無を分ける境界線を、シミュレーションによって再現し、境界線の形状に影響を与える要因を探っていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 山長雄亮, 木戸和哉: 蛇行動限界速度評価における加振条件の影響, 鉄道総研報告, Vol.32, No.8, pp.35-40, 2018

た。一つ目は、周波数が1Hzで片振幅3mmの正弦波連続3波の波形(波形A)、二つ目は、波形Aと概形は同じで、周波数を台車が揺れやすい周波数(幾何学的台車蛇行動周波数)とした波形(波形B)、三つ目は、波形Bの谷から次の谷まで1波分だけ取り出して全体の高さを3mmに調整した波形(波形C)としました。これら三つの加振方法の波形概形とその時の蛇行動限界速度を表1に示します。試験は回転速度を10km/hずつ上昇させながら段階的に行いました。表に示すとおり、加振方法により蛇行動限界速度が異なることがわかります。これらの加振試験についても、軌条輪の加振によって台車を

揺すった直後の、輪軸の振幅の大きさを調べました。図7で示した蛇行動限界曲線の線図上に、それぞれの加振試験での軌条輪加振後の最初の振幅を重ねた結果を図8に示します。図中の△印はその後収束したことを、■印はその後蛇行動に至ったことを示しています。図より、いずれの加振方法を用いた場合であっても、軌条輪加振直後の振幅の大きさが蛇行動限界曲線を超えた場合に、蛇行動が発生していることがわかりました。今回用いた加振例以外にもさまざまな加振方法が考えられますが、それらの差異は、加振によって生じる最初の振幅の大きさの差にあると考えられます。