

「ボー」と高らかに汽笛を響かせ、汽車は、郡山駅1番ホームを離れました。市街地の家並みを抜け、岩代熱海まで30分の小さな旅の始まりです。緑の田圃が後ろにすっ飛んでいきます。びっくりしている5歳の自分がそこにいました。

小学校卒業までは、鉄道大好き少年でした。時刻表と首っ引きで急行列車を乗り継ぎ、空想の国巡りをしました。時には入場券をポケットに、駅のホームが遊び場でした。東北線の郡山は、磐越線、水郡線とのターミナル駅で、旧型の機関車が貨物列車の編成作業で、行ったり来たりしていました。

中学2年の理科では、遠心力を習いました。“カーブを曲がる時、重力に加え遠心力が働くが、線路はどんな力を受けるか”がテーマでした。すぐの休み時間に、今は泌尿器のお医者さんをしている秀才のY君が、「汽車は自動車と違って車輪の向きを変えられない。どうして線路に沿って曲がれるか、おまえ、知ってるか？」と質問してきました。答えられないでいると、赤い鼻の頭をそれこそつんと高くして得意げに説明してくれました。彼は電車通学で鉄道に詳しく、お父上が技術屋さんでした。

走っている“乗り物”が向きを変える、これにはいろいろな形態がありあまりやさしくはありませんが、“曲がる”を取っ掛かりにそれではこれから、「車輪の物理」の散歩に出掛けましょう。

先ずは、「曲がる」がテーマです。身近な乗り物から、線路上しか動けない鉄道車両、道路を選んで左右に動ける自動車、水面ならどこでも進める船、さらに、上下が加わる飛行機について考えてみましょう。

「4輪自動車」では、一部に例外がありますが、基本は4輪の位置が固定されていて、前2輪だけが舵取りハンドルの操作で向きを変えられます。前の車輪、後ろの車輪それぞれが回転方向に進もうとします。でも、車輪の向きが違うので無理が生じ、結果、4つの車輪(タイヤ)はそれぞれが微妙に滑って、力が釣り合う方向に向きを変えます。無理がある分、前輪は真っ直ぐ状態に戻ろうとしますから、ハンドルを力ずくで抑え込まないと真っ直ぐ方向に戻ってしまいます。

「船」は優雅にゆったりと向きを変えます。船尾の舵を、「ようそろ、^{おも}面舵一杯、そうれ」です。ちなみに、面

ルールと車輪のお話

技術開発本部
小野塚 正一





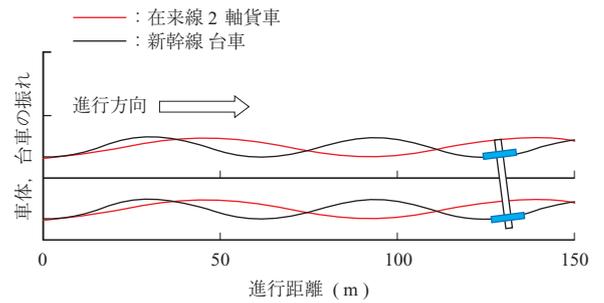
舵は卵面舵で右 90 度方向，取舵は酉舵で左 90 度方向を意味します。舵は流れから揚力を受け，船の重心と舵の位置の関係で回転力が生じ，向きを変え始めます。進む方向と船の向きに違いが出始めると，今度は船そのものが水面に突き立てた翼になり，流れ中の角度をもつ翼になって，船そのものに回転力が生まれ，さらに向きを変えます。その航跡は何とも優雅です。向きを元に戻すときはちょっと難しそうでもあります。

船に比べると上下そして進行軸回りの自由度が加わる「飛行機」の運動はちょっと複雑ですが，基本は船と同じです。舵と自身の翼で向きを変えます。

最後に主題の「鉄道車両」です。先の Y 君いわく。「鉄道車両では左右の車輪が軸で固定され，一体となって回る。車輪の傾斜面でレールを踏む。カーブに差し掛かると，この一体車輪がカーブ円の外側に寄る。その結果，当り位置が変わり，直径の大きな外側車輪が小さな内側車輪に比べ長い距離を進む。カーブの円弧差を，うまい具合になぞってくれるのさ」。何とスマートに良くできた仕組みでしょう。でもねえ，結果がそうなりそうなことは分かるんだけど，本当にそううまい具合にいくんかいなという思いも残ります。ちょっと考えてみましょうか。

まず，軸でつながれた左右の車輪を，真っ直ぐな線路の上を転がすことを考えます。簡単のため，車輪の踏面には直線の傾きを与えます。内側の「つば（フランジ）」は考えません。直角断面のレール側コーナーに車輪のテーパー面を載せるモデルを考えます。

真っ直ぐな線路に少しだけ左を向いて車輪を転がします。少しの回転で車輪は少し左に位置を変えます。踏面が傾いているので当り所が変わり，右車輪の当り直径は小さくなり，逆に左車輪の当り直径は大きくなり左が前に出ます。結果，左向きの姿勢が少しだけ右向きに修正されます。修正が連続して行われるのですが，この変化の様子を式にまとめるとこれが“振動”の式と同じ形です。車輪が左右に首を振る様子が表現されます。国内で使われている車輪の寸法で実際の様子を見てみましょう。昔むかし，長さ 10 m 弱の屋根つき 2 軸有蓋貨車ゆうがいが在来線を走っていました。これと新幹線電車台車の比較です。貨車の軸間は 5.3 m で，輪軸の向きは車体に固定です。新幹線の車両台車は軸間 2.5 m です。軌間は，在来線が狭軌で



車輪の蛇行

1 067 mm (3 ft 6 in)，新幹線は標準軌で 1 435 mm (4 ft 8.5 in) です。軌間はレール間の内寸寸法ですので，接触は軌間より少し広い点で生じます。車輪の直径は，在来線が 810 mm，新幹線は 860 mm です。踏面の勾配は 1/20 と 1/40 としました。

この計算では，輪軸間の距離が振れに影響します。在来線の固定軸貨車は 92 m 進むごとに 1 振れ，一方の新幹線台車（注意：車体ではありません）は，62 m 進むごとに 1 振れという結果になりました。両者では速度が，60 km/h と 300 km/h で 1 桁ほども違います。貨車の 1 振れは 6.6 秒，新幹線台車の 1 振れは 0.75 秒になりました。レールと車輪は忠実に滑ることなく，踏み続けるとする幾何計算です。

実際の運動では“すべり”があるので少しの違いがありますが，このように左右に首を振りながら走るのが基本です。カーブに差し掛かると，“線路の曲がり”という刺激を受けます。レールと車輪の関係では，レールの方向と輪軸の向きの相互関係が少し変わります。左カーブなら，車輪からレールが左に逃げる傾向になり，より小径の左車輪，大径の右車輪が実現されて左コーナーリングという理屈です。常に首を振りながら落ち着くべきところを探しているのがレールと車輪の関係と言えましょうか。分かったような分からない説明で申し訳ありませんが，車輪がその接触位置を線路の曲率に合わせて微妙に自動調整しながら進む結果，線路の曲率に合わせて曲がりながら進むのだとご理解ください。実際の車両では，複数の台車で車両が構成されることが多く，結構な重さ（有限な質量）の車体や乗客，荷物が台車に載り，さらに前後の車両の影響を受けますので，これらの運動のエネルギー（慣性力）や重心位置，台車と車両のリンクを考えないと正確な議論はできません。（74 ページに続く）



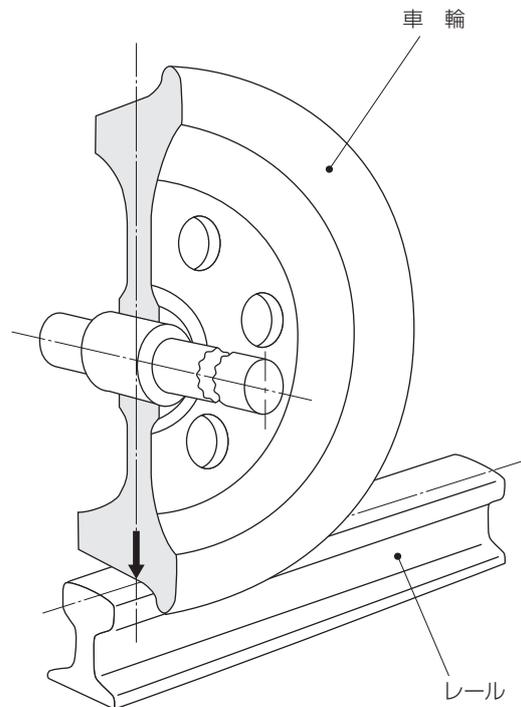
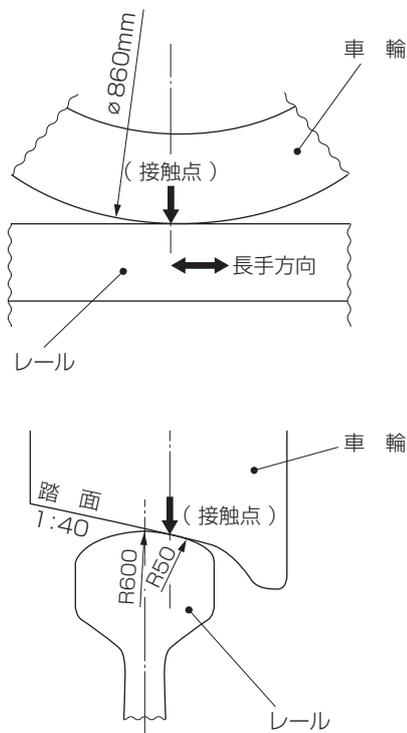
（「レールと車輪のお話」 39 ページから）

レールに載る車輪の接触ではもう一つ、興味深いテーマがあります。踏面が傾斜した車輪は円錐の一部切り出し部分と考えられます。一方でレール頂面は、円柱の一部形態です。両者の接触は、この円錐と円柱の接触ですが、接触部分を拡大すればさらに、丸棒と丸棒の押し付けに簡易化できます。丸棒 2 本を直角に押し当てると幾何の上では、無限に小さい 1 点で接触することになるのですが、無限に小さい点で有限な大きさの力を伝えるとなると無限大の力を考えないといけないことになってしまいます。相手を突き抜けることになるのですが実際にはそんなことはなくて、自動車のゴムタイヤが扁平するように、車輪とレールの場合もある領域がつぶれて、有限な範囲に力を分散して釣り合い状態を作り出し力を支えます。レールの当り部分は窪み、車輪の円弧部分も押しつぶされます。接触部分で同じ位置になるよう接触曲面を形成し、車輪から伝えられる車両の重さをレールが支えます。新幹線車両の重さ（質量）は 43.8 t ですが、8 車輪で等分に支えるとして、車輪直径 860 mm、レール踏面半径 600 mm で接触領域を計算すると、楕円形の当り面が形成されその大きさは、

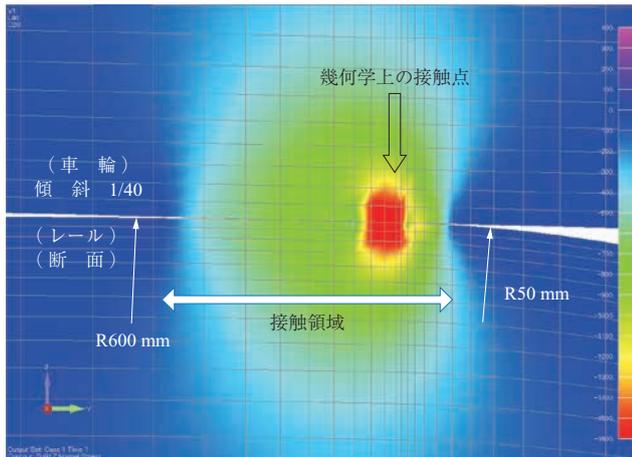
レール長手方向に 10.2 mm、直角方向に 12.6 mm となります。硬い鋼の車輪とレールがこんなにも扁平化するかというのはいかががでしょう。このときの最大押し付け圧力は 800 MPa（82 kgf の力を 1 mm² で支える）となります。車輪とレールの変形そして摩耗を評価するときに基礎とする値です。これに対するレールの踏面の強さは 1 300 MPa ほどです。

実際のレールはもう少し複雑な形をしています。新幹線のレールは 1 m 当り 60 kg の太いレールです。頂点部分は半径 600 mm の円弧になっていますが、ちょうど車輪のテーパ部分の傾斜 1/40 になる位置で半径 50 mm の円弧に切り替わります。こうなるときれいな式で算定するのは難しいので、例の通り、道具を使って無理やり計算してみました。次ページの図で赤い部分に上下方向の大きな力が働いています。一部が小さな円弧（R50 mm 領域）で当り、同じ力を狭い領域で支えないといけないので、接触直下ではその分大きな力が働いています。

この 2 体の物質が接触する状況は、Hertz の接触問題として弾性学の教科書に載っています。電磁物理学分野で



レールと車輪の接触



レールと車輪の接触部に働く大きな力

高名な Heinrich Hertz 先生が、1881 年、曲面レンズを押し付けるときに観察される縞模様（Newton 環）の間隔を計算する解法として考え出されました。ガラスの球を 2 個押し付ける様子をイメージ頂くと考えやすいです。すべての当り点で、同じ変形量、押込力の釣り合いで計算します。物理光学の精密化が目的でしたが、実用機械に多くの具体機構があり、有用な理論式として重用されています。接触の物理として今現在も研究が進められていますが、狭い領域の複雑な応力分布と変形の問題である上に、機構の動きや材料の細かな性質が関係するので、難しい分野の一つです。

Hertz 先生は、周波数の単位にその名誉を記録されました。相対論以前の物理学者で不幸にして 37 歳で早逝されましたが、先生の生涯を知るとき、Helmholtz, Kirchhoff, Planck など、物理学の教科書に名を連ねる多くの巨匠がその周囲を彩っている当時のドイツ物理学界に仰天させられます。

機械工学の粹「鉄道の物理」にはこのほかにも興味深い話題がたくさんありますが、そちらは専門の方々にお任せすることにしてここでは、「物理の散歩」から「線路の旅」に出掛けましょう。ローカルなお誘いで恐縮ですが、中央線各駅停車の旅はいかがでしょう。多摩川、相模川、富士川、天竜川の谷間をたどり、最後に信濃川上流松本までの電車の旅です。思い切って早起きして、春の桜花、夏の緑、秋の紅葉、そして冬なら朝日で真紅に染まる真っ白なお山にご挨拶です。富士のお山を左手に、南アル

プス、八ヶ岳の麓を走り、北アルプスにご面会です。高尾を発車した郊外電車は、小仏トンネルを抜け、相模川の谷間を下ります。相模湖をなぞり大月を過ぎて、「力餅」の笹子峠を目指します。かつて、初狩、笹子は、本線から離れたスイッチバックの平らな駅でした。小さな出力の蒸気機関車では、急傾斜の線路から発進できませんでしたので、平らな線路からの発進を準備しました。遊び客には心楽しい仕組みでしたが、大出力の電車に切り替わるとすぐに廃止されてしまいました。中央線のいくつかの駅には今でもその線路が残ります。笹子トンネルを抜けると武田氏ゆかりの甲斐大和です。「初鹿野」という素敵な名前でしたがなぜか変えられてしまいました。ぶどうの里勝沼に近づくと目の前一杯に甲府盆地と南アルプス、富士のお山が広がります。しばらく甲府盆地の広がりを楽しみ、富士川の支流釜無川に沿い鳳凰山、八ヶ岳の麓をめぐる。信濃境を過ぎると次は諏訪湖にご対面です。塩尻峠を横にトンネルを抜けると、松本盆地を下に北アルプスにご挨拶して終点です。日本百名山のうち 20 余座が見えるはずですが、頂を確認するのはなかなか難しいです。

新幹線、「スーパーあずさ」の快適と便利もよろしいですが、のんびりと、一度、各駅停車の旅を試してごらんになりませんか。時間もかかり、とっても疲れますが、「レールと車輪の物理」でした。



車窓から望む甲斐駒ヶ岳（小淵沢付近 4 月）