

3D CADと3Dプリンタを用いた鉄道車両の輪軸モデルの設計製作

システム科学技術学部 機械知能システム学科
 2年 捧 勇気
 2年 石澤 光
 2年 照井 駿磨
 指導教員 システム科学技術学部 機械工学科
 教授 富岡 隆弘

1. はじめに

鉄道は現代の交通手段として、陸上における大規模輸送を担っている。その活動範囲は軌条が敷かれた場所に限定されており、車軸を用いてその上を移動している。車軸の設計で特に車両の軌道に関連するのが車軸の踏面勾配であり、それによって自己操舵機能を与えられた車両は軌条上を脱線することなく進んでいるのである。自己操舵機能は踏面勾配によるだ行同波長によって決定され、蛇行道波長の純粋転がり線が軌条のカーブをはみ出さないように設計されている。これを満たさないと直接的に車両の脱線の原因となるからだ。

以上のことから輪軸を設計するうえでだ行動波長と純粋転がり線の公式は特に重要である。しかしながら現実に理論値を満たしているはずの車両で、軌条から脱線することもある。そこで私たちは、輪軸の設計に焦点を絞った実験と検証を行う。そのために、文献調査による輪軸を定める要素、検証のためにどの要素に変化を与えるべきかを調べる。また試験用コースを製作し、3Dプリンタを用いて車輪モデルを製作する。その後、走行性能の検証、画像解析によるだ行動波長の測定を行う。

2. 輪軸の曲線通過と輪軸のだ行動の原理

2-1 輪軸の曲線通過

図は輪軸が曲線通過している時を示す。曲線では外軌側と内軌側の車輪は踏面勾配の為、接地面の半径 r が異なる。それによって円の回転速度式 $v = r\omega$ より車輪の回転速度も変わってくる。

このことから外軌側の車輪の方が速くなり、それに伴って内軌側の車輪は速く進もうとする。この繰り返しのより自ら軌道中心方向に向かって転がる性質を自己操舵機能という。

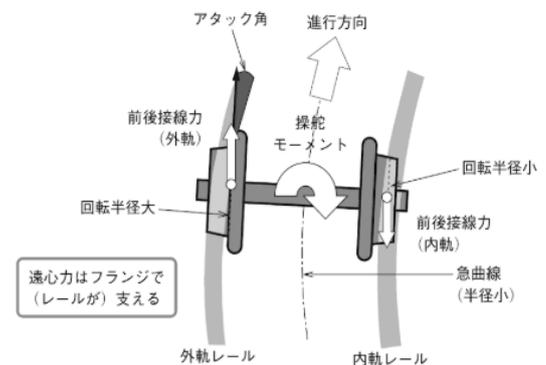


図1 輪軸の操舵機能 (曲線)

(鉄道車両技術入門：近藤 圭一郎著，オーム社)

円の回転速度式 $v = r\omega$ より図2の内軌側の車輪速度を v_L , 外軌側の車輪速度を v_R とすると, 純粋転がり変位 y_0 は次のように導出できる.

$$\begin{aligned} v_L &= (R - b)\dot{\psi} = (r_0 - \gamma y_0)\Omega \\ v_R &= (R + b)\dot{\psi} = (r_0 + \gamma y_0)\Omega \\ v_L : v_R &= (R + b) : (R - b) \\ v_L(R + b) &= v_R(R - b) \\ (r_0 - \gamma y_0)\Omega \times (R + b) &= (r_0 + \gamma y_0)\Omega \times (R - b) \\ -2R\gamma y_0 &= -2r_0 b \\ \therefore y_0 &= \frac{br_0}{R\gamma} \dots (1) \end{aligned}$$

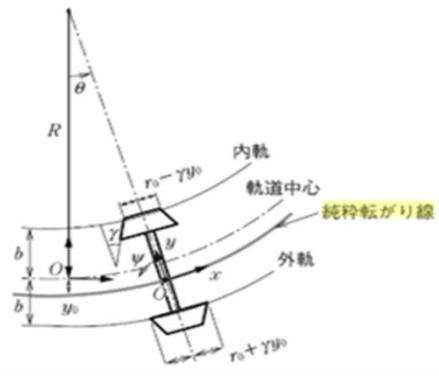


図2 曲線通過中の輪軸

R : 曲線半径, Ω : 車輪の転がり角速度,
 b : 接点間距離の半分, r_0 : 車輪半径
 (鉄道車両技術入門: 近藤 圭一郎著, オーム社)

純粋転がり変位は, 曲線を走行する輪軸の左右運動の平行点である. この純粋転がり変位の軌跡を純粋転がり線という.

2-2 輪軸の蛇行動

前項では自己操舵機能が曲線通過の際に作用して安定に走行できることを示したが, 直線区間を走行する輪軸にもこの自己操舵機能が作用する. その結果, 左右に振動し蛇の動きような軌跡を示すことから“蛇行動”と呼び, 輪軸がレール上を滑らないことを前提に考えた場合の蛇行動を幾何学的蛇行動という. y_w は輪軸重心の左右変位である. これを微分していくと,

$$\begin{aligned} y_w &= A & \text{時間 } t \text{ で 1 回微分} & \quad y'_w = A \left(\sqrt{\frac{\gamma}{b_0 r_0}} v \right) \cos \left(\sqrt{\frac{\gamma}{b_0 r_0}} vt \right) \\ & & \text{時間 } t \text{ で 2 回微分} & \quad y''_w = -A \left(\sqrt{\frac{\gamma}{b_0 r_0}} v \right)^2 \sin \left(\sqrt{\frac{\gamma}{b_0 r_0}} vt \right) \end{aligned}$$

$a = -\omega^2 A \sin(\omega t + \phi)$: 単振動の加速度
 $y = A \sin(\omega t + \phi)$: 正弦波の一般式 v

上記の正弦波の一般式と比較すると, $\sqrt{\frac{\gamma}{b_0 r_0}} v = \omega$ よって, 周期 T は $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{v} \sqrt{\frac{b_0 r_0}{\gamma}}$

以上から $v = f\lambda$ より波長 S_1 [m] は

$$\begin{aligned} S_1 &= \lambda = \frac{1}{f} v = Tv \\ \therefore S_1 &= Tv = 2\pi \sqrt{\frac{b_0 r_0}{\gamma}} \dots (2) \end{aligned}$$

この波長 S_1 [m] を幾何学的蛇行動波長という. v は走行速度を表す. (2) を見ると, 踏面勾配 γ の値が大きいほど波長が短くなり, 高い振動数の蛇行動となる.

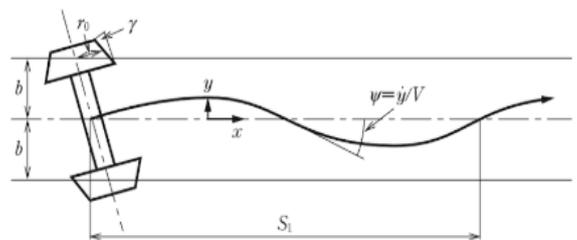


図3 輪軸の幾何学的蛇行動波長

(鉄道車両技術入門: 近藤 圭一郎著, オーム社)

3. 実験方法

以下2つの公式に関する実験を行う。

実験1. 輪軸の曲線通過（純粹転がり線の公式（式(1)））

- (1) 異なる2つの曲線半径を持つコースを作成する。
- (2) 3種類（1,000mm, 1,500mm, 2,000mm）の異なる純粹転がり線を持つ輪軸を(1)のコースで転がす。
- (3) 転がし半径と輪軸の組み合わせによる違いを測定する。

実験2. 幾何学的蛇行動波長の測定（幾何学的蛇行動波長の公式（式(2)））

- (1) 測定用の直線コースを作成する。
- (2) 3種類（1,000mm, 1,500mm, 2,000mm）の異なる蛇行同波長を持つ輪軸を転がす。
- (3) (2)の軌跡を動画にて撮影する。
- (4) 撮影した動画を画像処理ソフト ImageJ にて画像解析を行い、それを測定結果とする。

[輪軸の作製]

式(1)を用いて、各曲線を通過できるものを設計する。純粹転がり線変位 y_0 を考慮したうえで厚さを決め、以下のように値を設定する。

R2,000型は $r_0=54.60\text{mm}$, $\gamma=0.27$. 併用型 (R1,500mm) は $r_0=52.80\text{mm}$, $\gamma=0.36$. R1,000型は $r_0=49.20\text{mm}$, $\gamma=0.54$.

上記の数値を決めたうえで3次元・CADソフトウェア (SOLIDWORKS) を用いて図面及び3次元モデルを設計。軸の部分には硬鋼 (S45C 相当), ステンレス鋼 (SUS304) を用い、車輪側にナットを埋め込むかたちで固定。車輪は識別のため3色に色分けした。

[測定用レールの作製]

実験1.

輪軸の設計に合わせ b (接点間距離の半分) は 45mm, 曲線半径 R を2種類用意し、それぞれ 1,000mm, 2,000mm とした。図4に実際に作製したコースの全体写真を示す。枠組み部分にアルミフレーム、レール部分にカブセ (モール) を使用した。

試験走行の際、硬質 PVC のカブセと作成した試験用車輪の素材である ABS の組み合わせでは摩擦が小さくなりどの輪軸も通過できなかつたため、輪軸との接触部にあたるカブセの位置にビニールテープを施した。以降各輪軸は良好な走行性を示すようになった。

実験2.

式(2)を用いて各輪軸のだ行動波長 S の計算値を出し、実験で得られた実測値と比較する。図5にだ行動波長を測定するための直線コースを示す。実験1. のコースと同じく輪軸に合わせ b は 45mm, 直線のためカブセは使用せずにアルミフレームのみで作製した。

だ行動する様子をデジタルスチルカメラ

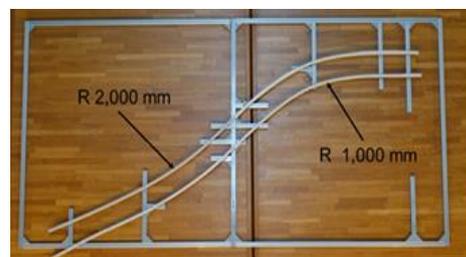


図4 曲線コース全体図



図5 直線コース全体図

(SONY 製, RX100V) で撮影し, 撮影した動画を ImageJ という画像処理ソフトウェアを用いて波長を調べる.

4. 測定結果

実験1. 輪軸の曲線通過

図4の試験コースで各輪軸が設計した通りに曲線を通過するか観察する.

R2,000型輪軸はR1,000付近で脱線. R1,000型輪軸と併用型輪軸は, 両曲線を通線せずに走行した. テーパーのない直線型はすぐに脱線した.

実験2 幾何学的蛇行動波長の測定

実際にImageJにて動画の画像解析を行ったが測定方法を確立するまでに多大な時間を要してしまい, 確実なデータ(値)を得られなかった. 最終的にフレーム毎に画像を分割し, その一枚一枚に手作業で点描し, 改めてその画像群を解析するとい

う手法をとった. なお, 滑らかな曲線データを 図6 ImageJ による解析結果 得るために7点移動平均をとった. 結果, 各型1回ずつしか波長が確認できるデータが得られなかった. 図6のグラフからR2,000型の平均波長は486.52mm, 併用型の平均波長は469.51mm, R1,000型は測定することができなかった.

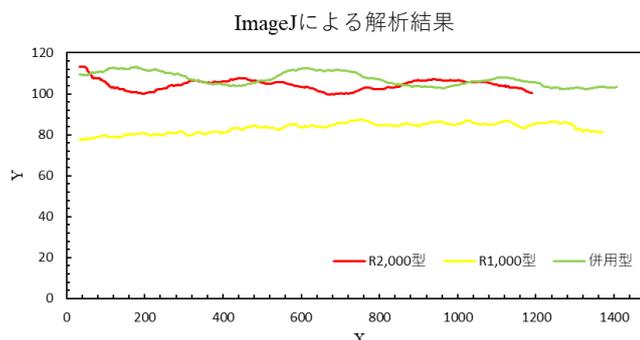


図6 ImageJ による解析結果

5. 考察・まとめ

輪軸の曲線通過の実験において当初 R1,000 型は R2,000mm の曲線を通過できないと考えていたが, 結果的には両曲線を通過できた. これは, 純粋転がり変位が R2,000 型では R1,000mm の曲線走行時には $y_0=9.1\text{mm}$ となり, R2,000mm の曲線では $y_0=4.55\text{mm}$ となるのに対し, R1,000mm 型では, $y_0=4.1\text{mm}$ (R1,000mm 時), $y_0=2.05\text{mm}$ (R2,000mm 時) になるので, R2,000 型の純粋転がり変位 $y_0=9.1\text{mm}$ が R1,000 型の曲線走行時に比べ大きいことが影響しているかと考えられる. R1,000 型の設計時に設定した各パラメータが誤差範囲内だったと捉えられる.

幾何学的蛇行動波長の実験は, 実験方法の模索に時間を要してしまいデータを得ることができなかった. 解析結果を増やし, 波長の平均をとり本当に公式通りになっているのかを探るのが今後の課題である.

この実験では車輪を PLA で作製し, また材料の重量比が実車とは異なる. そのためカブセ (PVC) をレールとして輪軸を走行させたときには難なく通過し波長も容易に確認することができたが, アルミフレームをレールとして走行させたときに摩擦や車輪の出力方向 (目の向き) の違いにより脱線する問題も生じた. このことから輪軸とレールの材料による相性の違いによる走行性能の変化が発生し, 実車においても車体と車軸の関連性があることが考察できる.