

車輪／レール間の接触位置と横すべりに着目した
乗り上がり脱線に対する評価手法

國行 翔哉* 中野 公彦**

Evaluation Method for Flange-Climb Derailment Focusing on
Contact Position and Transverse Creepage Between Wheel and Rail

Shoya KUNIYUKI Kimihiko NAKANO

This paper proposes a new method for evaluating the running safety of railway vehicles against flange-climb derailment, focusing on the contact conditions between wheel and rail. The method uses two key variables: lateral contact position and normalized transverse creepage, defined as the ratio of transverse creepage to the wheelset angle of attack. Through vehicle dynamics simulations under various running conditions, the relationship between these variables and the running safety was investigated. The results show that the transit domains for the loci of these variables differ significantly between derailment and non-derailment cases. This paper provides fundamental insights into the development of advanced safety assessment techniques for railway operations, taking into account the detailed wheel-rail contact dynamics.

キーワード：走行安全性，接触状態，乗り上がり脱線，クリープ，すべり，アタック角

1. 緒言

走行中の測定が難しい，車輪／レール間の接触に関する状態量を把握する手法が研究されている．例えば，下記の状態量を把握する手法が検討されている．

- ・接触位置^{1) 2) 3)}
- ・アタック角（車輪／レール間の相対的なヨー角）^{4) 5) 6)}
- ・摩擦係数^{7) 8) 9)}

以降，上記状態量，ならびにこれら状態量と接触幾何解析や力学的関係式を用いて関係付く状態量をまとめて「接触状態」と呼ぶ．将来的には，実用的な観点で接触状態の把握が可能になると考える．

現在，車両の乗り上がり脱線に対する走行安全性は，脱線係数を測定して目安値と照査することで，評価しているが，接触状態を勘案することで，精度向上を図れる余地があることが報告されている^{10) ~13)}．上記の研究は，いずれも脱線係数をベースに評価手法を検討したものであるが，脱線係数と切り離して，接触状態単独で走行安全性を議論することで，評価の精度を向上できる可能性があると考えられる．

本研究では，接触状態が既知であることを前提にした場合の走行安全性の評価手法を検討した．先行研究として，乗り上がり脱線が生じ得る脱線係数に対応する輪軸の左右変位と左右速度の関係を考えることで，走行安全性を評価する手法が提案され，直線走行時には適切に評価できることが示されている¹⁴⁾．一方で，先行研究は，アタック角の影響が強く表われる曲線通過時における走行安全性を明瞭に評価できる段階に達していない．先行研究の考え方でアタック角の影響を考慮する場合には，4次元的な領域を考える必要があり，煩雑になる．上記を踏まえ，本研究では，接触状態の中で，横クリープ率をアタック角で除いた値ならびに接触位置を用いた評価手法を検討したので，検討内容と結果を報告する．なお，本稿は，文献15の要部を抜粋し，論旨を変えずに再構成したものである．詳細については文献15を参照されたい．

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 東京大学

2. 走行安全性の評価手法の検討

2.1 乗り上がり脱線に至るまでの段階

本研究では、乗り上がり脱線に至るまでの段階を、図1に示す車輪／レール間の接触位置に対応させた4つに分類して考える。それぞれの段階を以下で説明する。

- ・段階1 踏面接触：図1にて緑色で示した領域で車輪がレールと接触する段階である。本研究では、フランジのど部で接触する場合もこの段階に含める。
- ・段階2 車輪上昇：図1にて紫色で示した領域で車輪がレールと接触する段階である。この段階では、車輪の接触角が最大（フランジ角 α_F ）になり、車輪上昇量が急激に増加していく。
- ・段階3 フランジ乗り上がり：図1にて橙色で示した領域で車輪がレールと接触する段階である。この段階が進むにつれ、車輪の接触角は最大値 α_F から減少していく。
- ・段階4 脱線：図1にて赤点で示した車輪のフランジトップ部でレールと接触している段階である。車輪が完全にレールに乗り上がり、この段階が進行すると最終的に車輪は脱線する。非常に危険な状態であることから、安全側に考え、本研究ではこの段階を脱線が生じたものとして扱う。

2.2 評価指標

本研究では、下記に示す二項目で表わす接触状態を評価指標として考え、現在の走行状態がフランジ乗り上がり段階に到達する恐れがあるかを判別することで、走行安全性を評価できるかを検討する。

- ・指標1：現在の段階から脱線段階に達するまでの幾何的な余裕度を表わす指標
- ・指標2：現在の段階から脱線段階に達するまでの動的な余裕度を表わす指標

それぞれのイメージを図2に示す。また評価指標に関連する輪軸と車輪周りの座標系と変数を図3に示す。紙面の都合上、図3に示した各変数の詳細な説明は文献15を参照されたい。

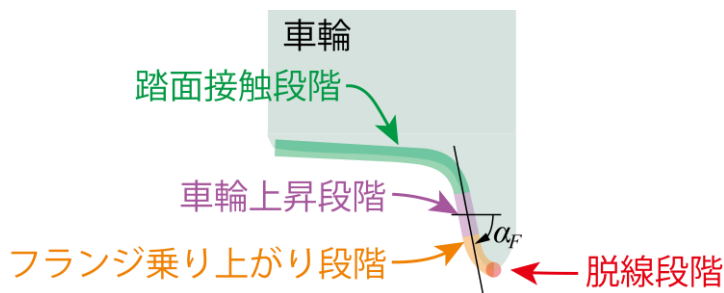


図1 フランジ乗り上がり脱線に至る4つの段階

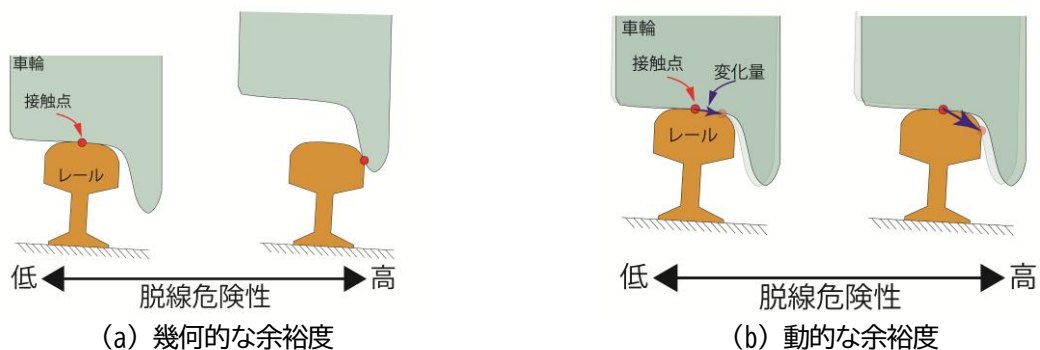


図2 評価指標

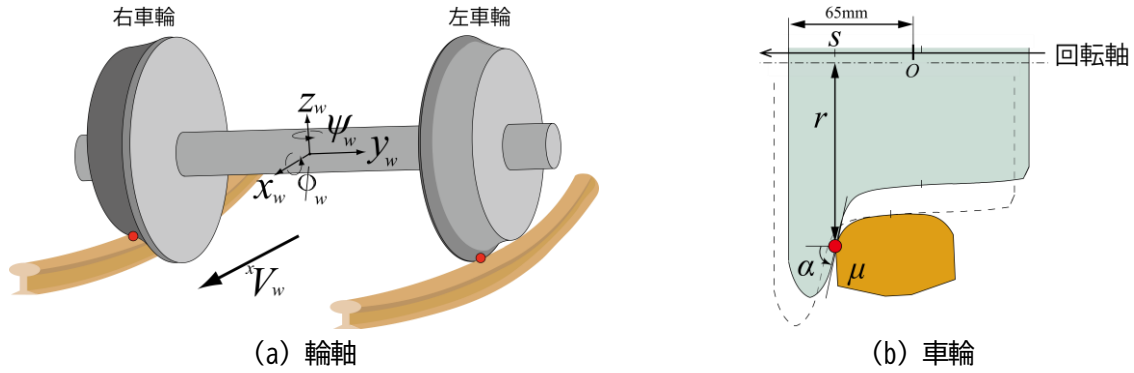


図3 車輪とレールの接触状態を表わす変数と座標系

図2 (a)に示すように、指標1では、現在の接触点がフランジトップに近い領域にある場合に、乗り上がり脱線が発生する危険性が高いと評価する。本研究では、図3 (b)に示す接触位置sを選定した。

図2 (b)に示すように、指標2では、現在の接触点がフランジトップに向かう変化量大きい場合に、乗り上がり脱線が発生する危険性が高いと評価する。これを表わし得るものとして、接触速度sが考えられる。類似する考えとして、輪軸左右変位と輪軸左右速度の領域的關係から走行安全性を評価する手法がある¹⁴⁾。しかし、緒言で述べたように、曲線通過時を想定し、アタック角の影響を考慮すると煩雑化が避けられない。そこで本研究では、sの代わりに、比横クリープ率ξという状態量を新たに定義し、評価指標とした。

2.3 比横クリープ率の定義と特性

比横クリープ率ξは、横クリープ率v_yから計算される。v_yは、車輪/レールからみた接触面の移動速度の差と走行速度より計算される量であり、図3に示す変数を用いて理論的に式(1)で表わせる¹⁶⁾。

$$v_y = -\frac{r}{r_0 \cos \alpha} \psi_w + \frac{\dot{y}_w}{xV_w \cos \alpha} + \frac{r \dot{\phi}_w}{xV_w \cos \alpha} \quad (1)$$

rとαは接触位置での車輪の回転半径と接触角、r₀は左右車輪の平均回転半径である。また、y_w、ψ_w、φ_wおよびxV_wは輪軸の左右変位、アタック角、ロール角、走行速度である。式(1)は左右車輪いずれにおいても成り立つ。

フランジ乗り上がり段階を想定し、アタック角ψ_wがψ_w ≠ 0であると仮定し、式(1)をψ_wで除して標準化した状態量ξを式(2)の通り定義する。本研究では、この状態量ξを比横クリープ率と呼ぶ。

$$\xi := \frac{v_y}{\psi_w} = -\frac{r}{r_0 \cos \alpha} + \frac{\dot{y}_w}{\psi_w xV_w \cos \alpha} + \frac{r \dot{\phi}_w}{\psi_w xV_w \cos \alpha} \quad (2)$$

ξは、接触状態を表わす変数で表現でき、下記に示すように2つの要素に分離できる。

$$\xi = \xi_S + \xi_F \quad (3)$$

$$\xi_S := -\frac{r}{r_0 \cos \alpha} \quad (4)$$

$$\xi_F := \frac{\dot{y}_w}{\psi_w xV_w \cos \alpha} + \frac{r \dot{\phi}_w}{\psi_w xV_w \cos \alpha} \quad (5)$$

式(4)で与える ξ_s は、接触角 α がロール角などに影響されるものの、接触位置 s で概ね定まる状態量であり、本研究では基準比横クリープ率と呼ぶ。式(5)で与える ξ_F は、速度要素によって定まる状態量であり、本研究では変動比横クリープ率と呼ぶ。 ξ_s は、輪軸左右変位を発散させる方向の横クリープ力、 ξ_F は、減速方向の横クリープ力を発生させるすべりに対応する。

車輪の踏面形状が修正円弧踏面の設計形状であり、中立位置での車輪の回転半径が 0.43m の場合における、接触位置 $s > 0$ に対する比横クリープ率 ξ を図 4 に例示する。図 4 では、参考のため車輪の回転半径 r を青線で右軸に示している。図 4 において赤線は、輪軸ロール角 ϕ_w を 0 と近似し、対となる車輪の回転半径を 0.43m とした場合における、基準比横クリープ率 ξ_s を示す。図 4 より分かる、 ξ_s の特性を以下に示す。

- 車輪の踏面領域 (s が約 26mm 以下となる領域) では一定の勾配で減少する。
- 車輪のフランジのど部 (s が約 26.0mm~36.0mm となる領域) に差し掛かると勾配が非線形に変化し、踏面領域よりも急激に減少する。
- 車輪上昇段階であるフランジ直線部で接触している場合 (s が約 36.0mm~40.2mm となる領域) においては、再び一定の勾配となり、なだらかに減少する。
- フランジ乗り上がり段階であるフランジ直線部の出口からフランジトップで接触している場合 (s が約 40.2mm~51mm となる領域) においては、非線形に増加する。

変動比横クリープ率 ξ_F は、輪軸の動的な挙動によって ξ_s (赤線) 周りに示した緑の領域を変動幅とした値を取る。なお、左曲線と右曲線のどちらを走行した場合でも、一般に式(5)の分母と分子の正負が共に入れ替わるため、結果として ξ_F の正負は変わらない。両者の足し合わせである比横クリープ率 ξ は、緑の領域内に存在する。本研究での検討内容は、乗り上がりが生じる恐れがある状態とそうでない状態を s - ξ 平面にプロットした際、両者の描く軌跡に違いが出ると予測し、そこから状態を区別することを試みるものである。

3. 車両運動シミュレーションを用いた検討

検討する状態量と走行安全性の関係を調べるため、乗り上がり脱線を想定した車両運動シミュレーションを実施した。使用したソフトウェアは、様々な曲線・走行条件を容易に設定でき、接触位置などの実験での測定が困難な情報を容易に得られる Simpack (Dassault Systèmes 社, ver.2024x.2) である。

3.1 シミュレーション条件

3.1.1 車両モデル

モデルは一般的な狭軌在来線を想定し、車体、台車枠および輪軸が剛体である1車両モデルとした。車両は、図 5 に示すように、車体1個、台車枠2個、輪軸4個についてそれぞれ6自由度を有する剛体とし、各剛体はばね・減衰要素で結合されたモデルとした。車輪の断面形状は修正円弧踏面の設計形状とした。

3.1.2 軌道モデル

軌道の線形は、図 6 (a)に示すように、左の単曲線として設定した。図 6 (b)に示すように、緩和曲線区間の軌道の曲率は、緩和曲線開始位置からの走行位置に比例して変化する。カントも同様に变化させる。入口側緩和曲線と円曲線の区間長さは 100m で固定する。出口側緩和曲線の区間長さは、図 6 (b)に示す出口側緩和曲線の終端位置 X を後述するカント逡減倍率に応じて、(i)~(iv)の位置で動かし、変化させる。各区間の境界には、計 3m (1.5m ずつ) のスムージングを設定する。レールの断面形状は JIS 50kgN レールの設計形状とし、車輪／レール間のクリープ力の計算には、FASTSIM¹⁷⁾を用いた。なお、内軌側のレールには脱線防止ガードを設置してあり、脱線段階に達すると、内軌側車輪が脱線防止ガードに接触する。この状

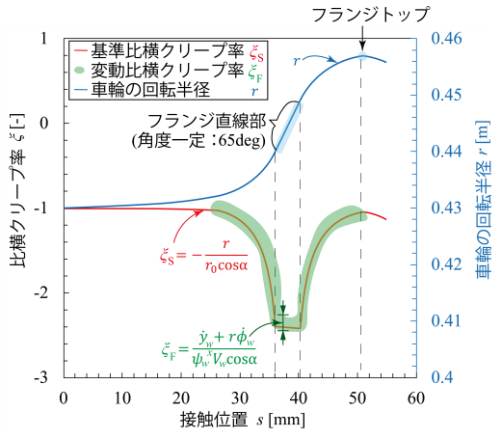


図4 接触位置sと比横クリープ率 ζ の関係

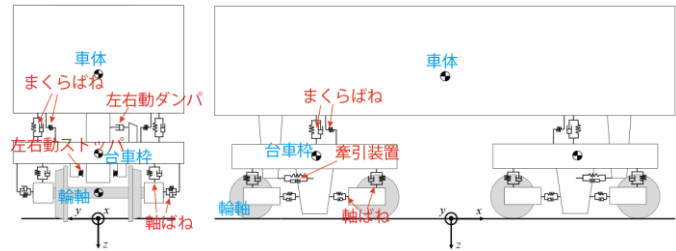


図5 シミュレーションで使した車両モデル

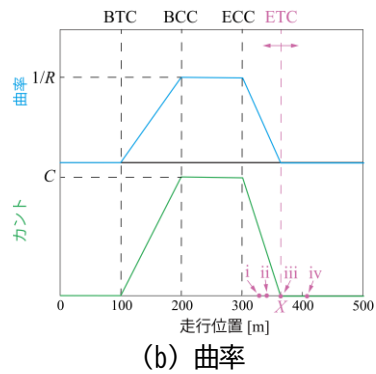
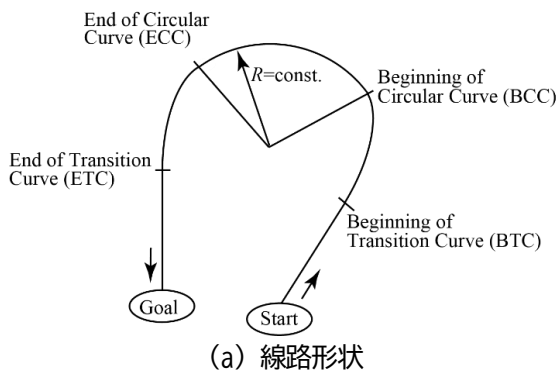


図6 シミュレーションで使した軌道モデル

態は接触点数が増加し、計算負荷が著しく増加するため、脱線防止ガードと車輪が接触した場合は、シミュレーションを停止させ、データ整理上は「脱線した」と取り扱った。

3.1.3 パラメトリックスタディの変数設定

フランジ領域での接触状態が多様になるようにシミュレーション条件を定めた。接触状態を変化させる影響について、静的な影響と動的な影響に分けて考えた。その中で、主な因子を以下に列挙する。静的・動的のどちらにも影響を与えると考えられる一部の因子は、両方に記載した。

- ・ 静的な影響：静止輪重，静止輪重のアンバランス，円曲線半径，カント，スラック，摩擦係数，車輪踏面形状，レール断面形状，軸ばね剛性，まくらばね剛性
- ・ 動的な影響：カント逓減倍率，走行速度，軌道変位，摩擦係数，車輪踏面形状，レール断面形状，軸ばね剛性，まくらばね剛性

本研究では、まずは基本的な特性の理解に努めるため、接触状態を変化させる影響として、上記から以下に示す5つの因子を選定し、パラメトリックスタディの変数とした。

- ① 静止輪重のアンバランス：先頭輪軸の外軌側の静止輪重が0%，15%および30%減少するように設定した。
- ② 円曲線半径R：乗り上がり脱線が発生しやすい急曲線である100mと160mの2つを設定した。
- ③ 摩擦係数 μ ：走行中の内外軌の値を一定かつ同一とし、 $\mu = 0.1 \sim 0.7$ の範囲で設定した。
- ④ カント逓減倍率：出口側の逓減倍率が(i)300，(ii)400，(iii)600および(iv)1000になるように緩和曲線長(図6(b)のX-300m)を設定した。300倍は、軸距が2.1mとなる在来線車両では、最小の倍率となる¹⁶⁾。
- ⑤ 走行速度 v_w ：一定の走行速度を考え、 $R = 100m$ の場合は10km/hと30km/hを、 $R = 160m$ の場合は

10km/h と 40km/h をそれぞれ設定した。

他の因子については、今回は同じ条件で固定した。その内容を以下に示す。

- ・ 静止輪重：一般的な狭軌在来線を想定してモデルを作成した結果、29.8kN となった。
- ・ カント：カントが大きいほど曲線通過時の外軌側輪重が減少し、脱線に対して不利な条件になりやすいことを考慮し、狭軌在来線車両の場合の最大カント量 105mm¹⁶⁾ を設定した。
- ・ スラック：スラックがあると脱線に対して有利な条件になることから、0mm を設定した。
- ・ 軸ばね剛性とまくらばね剛性：一般的な狭軌在来線を想定した諸元を与えた。
- ・ 軌道変位：軌道変位は無いものとした。

3.2 シミュレーション結果

3.2.1 接触位置に対する比横クリープ率の挙動

実施した車両運動シミュレーション結果の一部を対象として、接触位置 s と比横クリープ率 ξ が s - ξ 平面上に描く軌跡を図7に示す。図7の解析条件は、外軌側の静止輪重が30%の減少、円曲線半径が100m、出口側のカント逡減倍率が400、走行速度が10km/h、摩擦係数 μ が0.1~0.7(刻み0.1)である。

図7(a)は、フランジのど部からフランジトップ域までの全体図を示す。摩擦係数 μ が0.3以上の場合、接触点はフランジ直線部入口に達し、さらに μ が0.5以上の場合、接触点はフランジ直線部出口を超え、フランジトップまで至り、脱線段階に達した。図7(b)は、フランジ直線部(接触位置 s がおおよそ $36.0\text{mm} \leq s \leq 40.2\text{mm}$ となる区間)の領域付近で拡大したものを示す。図7(b)を見ると、接触点がフランジ直線部を超え、最終的に脱線段階に達した条件では、比横クリープ率 ξ が常に基準比横クリープ率 ξ_s よりも高い値を取っていた。一方で、フランジ直線部まで到達したものの、フランジ乗り上がり段階・脱線段階に達しなかったシミュレーション条件では、 ξ は s の増加に伴い ξ_s と大小関係が入れ替わった。その後、接触位置は中立位置方向に移動し、その際に輪軸アタック角が0になるため、 ξ は $-\infty$ に近づく応答になった。

3.2.2 ECC 進入後の乗り上がりの発生有無が異なる軌跡の通過領域

今回設定した条件では、ECC 進入後に乗り上がりが生じた結果が多かった¹⁵⁾。そこで、以降では出口側緩和曲線区間に焦点を当てる。乗り上がり発生の有無でデータを分け、接触位置 s と比横クリープ率 ξ が s - ξ 平面上に描く、種々の条件で変わる軌跡の通過領域を調べた。結果に対して、 ξ を s に対する関数 $\xi = \xi(s)$ とみなし、ECC 進入直後から s が最大値に達するまでのデータを用いて $\xi(s)$ を作成した。その後、各々のデー

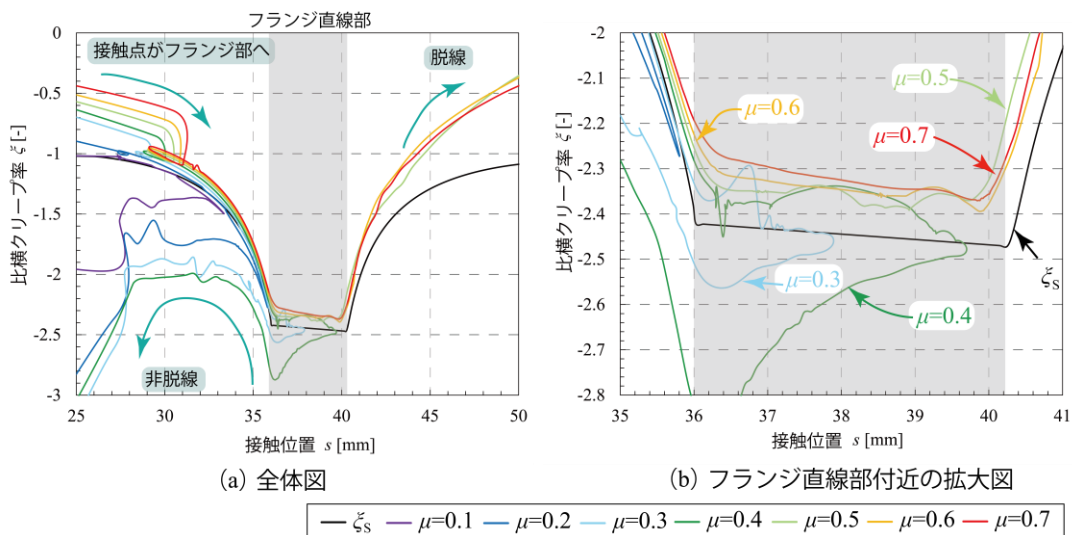


図7 接触位置 s と比横クリープ率 ξ の関係

タ群において、 s に対する ξ の最大値 $\xi_{\max}(s)$ と最小値 $\xi_{\min}(s)$ を求め、通過領域とした。

得られた結果を図8に示す。図8では、赤色の領域が脱線段階に達したデータ（以下、「脱線データ」）の通過領域、橙色の領域がフランジ乗り上がり段階に達したデータ（以下、「フランジ乗り上がりデータ」）の通過領域、青色の領域がフランジ乗り上がり段階に達しなかったデータ（以下、「非フランジ乗り上がりデータ」）の通過領域を示す。図8より得られた結果を以下に記す。

- ・脱線データの通過領域は、接触位置 s が $s \geq 37.3\text{mm}$ の場合に存在していた。その下限の境界線は、フランジ直線部（およそ $37.3\text{mm} \leq s \leq 40.0\text{mm}$ ）で概ね一定であった。
- ・フランジ乗り上がりデータの通過領域は、 $s \geq 36.9\text{mm}$ の場合に存在していた。その下限の境界線は、フランジ直線部の中央付近（およそ $36.9\text{mm} \leq s \leq 39.5\text{mm}$ ）で概ね一定であるが、 s が 39.5mm を超えると ξ に対して下に広がった。
- ・各領域下限の境界線は、非フランジ乗り上がりデータの方が脱線データとフランジ乗り上がりデータよりも下側に存在しており、 ξ に対して領域の幅が広がった。
- ・非フランジ乗り上がり状態の通過領域の下限の境界線は、フランジ直線部出口付近（およそ $40.0\text{mm} \leq s \leq 40.2\text{mm}$ ）を除くほとんどの位置で、基準比横クリープ率 ξ_s を下回っていた。
- ・3つの領域で重複している箇所があった。

3.3 比横クリープ率と乗り上がり発生に関する考察

式(2)～式(5)より、図8において、比横クリープ率 ξ と基準比横クリープ率 ξ_s の差は、変動比横クリープ率 ξ_F に等しい。 ξ_F は、アタック角に対する速度影響を含んだ横クリープの程度を示し、 ξ が ξ_s よりも大きいほど、輪軸は軌間外へ向かう速度を有し、結果として速度を逆転させて輪軸の重心位置を軌道中心側に戻す横クリープ力が作用しようとする（以降では、この横クリープ力を「復元横クリープ力」と呼ぶ。）。

図8において、同じ接触位置 s で脱線データ、フランジ乗り上がりデータと非フランジ乗り上がりデータの通過領域で ξ の広さが異なったのは、乗り上がりが発生しないデータが、発生したデータよりも相対的に走行条件が厳しくないため、その分領域下限の境界線が下に広がったことが理由であると考えられる。 ξ_F が大きくなるにもかかわらず、乗り上がりないし脱線に至ってしまうのは、以下が関係していると考えられる。

- ・フランジ直線部で車輪とレールが接触しているため、大きなスピנקリープが発生しており、復元横クリープ力が作用しない。

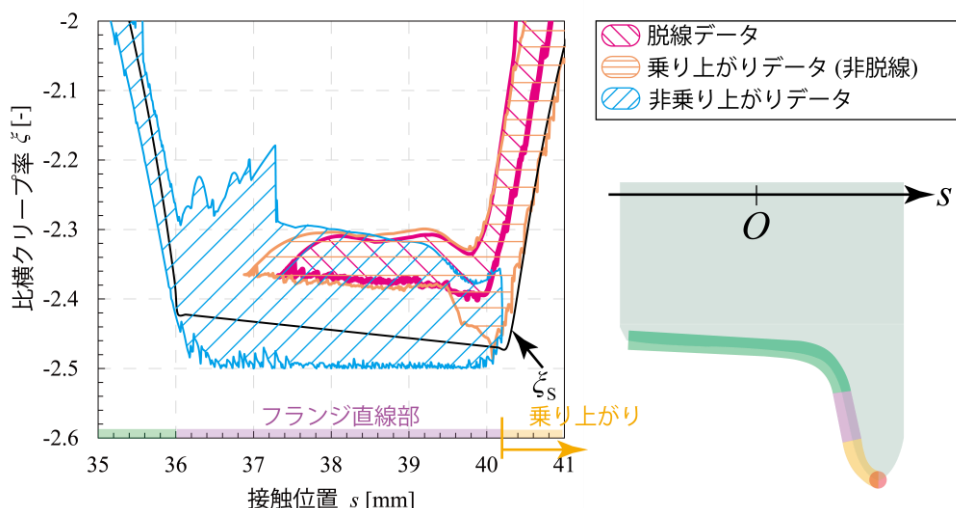


図8 出口側緩和曲線区間における接触位置 s と比横クリープ率 ξ の通過領域

- ・ 輪軸左右方向の加速度の向きが軌間外側に向いており、左右方向の減速が間に合わず、フランジ乗り上がり段階や脱線段階に到達する。

紙面の都合上、これらの詳細な考察は文献 15 を参照されたい。

4. 本手法の活用例

本検討手法を活用して走行安全性を評価する例を述べる。評価には、図 9 に示す安全判定図を使用する。図 9 は、接触位置 s と比横クリープ率 ξ の状態 $[s, \xi]^T$ を安全領域 D_S と危険領域 D_D の二つの領域に分けるものである。参考のため、図 9 では、図 8 で得られた領域を併せて示している。提案する活用法は、状態 $[s, \xi]^T$ がどちらの領域に存在するかで、走行安全性を評価するものである。

二つの領域は、前項までの結果を踏まえて、以下のコンセプトで設定する。

- ・ 接触点が車輪のフランジ部よりも、踏面側に存在する場合（接触位置 $s < 36.0\text{mm}$ ）：
車輪とレールがフランジ接触していないことから、安全領域 D_S とする。
- ・ 接触点がフランジ直線部に存在する場合（ $36.0\text{mm} \leq s < 40.2\text{mm}$ ）：
比横クリープ率 ξ が基準比横クリープ率 ξ_S を下回る場合、その後の運動で接触点が踏面側に移動する状態であるため、安全領域 D_S とする。反対に ξ が ξ_S を上回る場合、その後の運動でフランジ乗り上がり段階に達する可能性があることから、危険領域 D_D とする。
- ・ 接触点がフランジ直線部を超えた場所に存在する場合（ $s \geq 40.2\text{mm}$ ）：
フランジ乗り上がり段階に達していることから、 ξ の値によらず危険領域 D_D とする。

なお、例では、区間 $36.0\text{mm} \leq s < 40.2\text{mm}$ において、 ξ_S を境界線に設定しているが、前章では、 $\xi > \xi_S$ の場合でも、フランジ乗り上がり段階・脱線段階に到達しない状態があるという結果が得られた。また、 s が約 36.8mm を下回っていれば、フランジ乗り上がり段階・脱線段階に到達しない結果も得られている。そのため、この区間においては、境界線を ξ_S の線よりも上側に設定できる可能性がある。これについては、今後さらなる検討を実施し、深度化していく予定である。

本手法を用いた走行安全性を評価するフローチャートを図 10 に示す。図 10 では、以下の 2 つの活用法を示している。

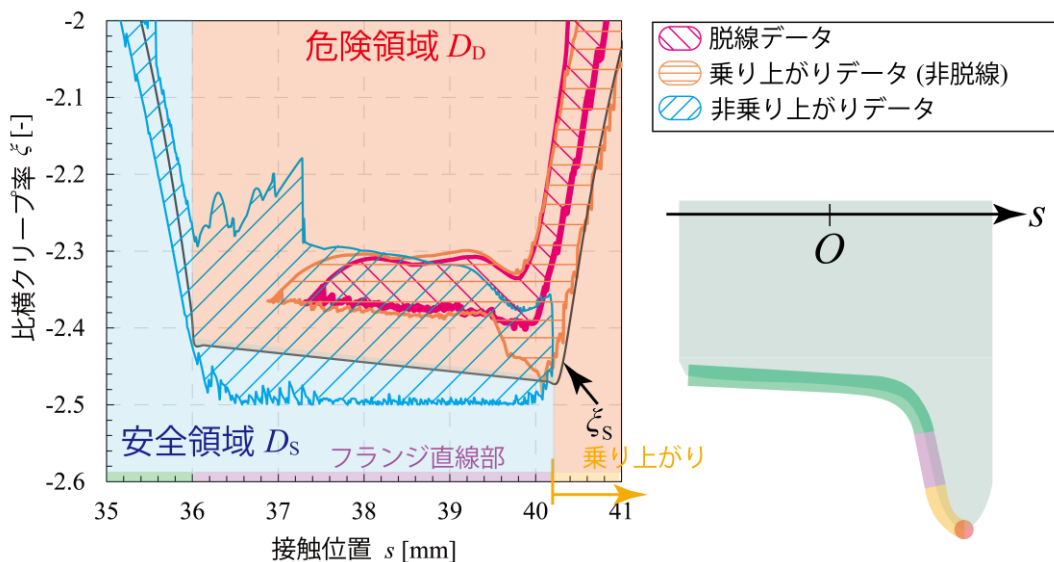


図 9 提案する乗り上がり脱線に対する安全判定領域

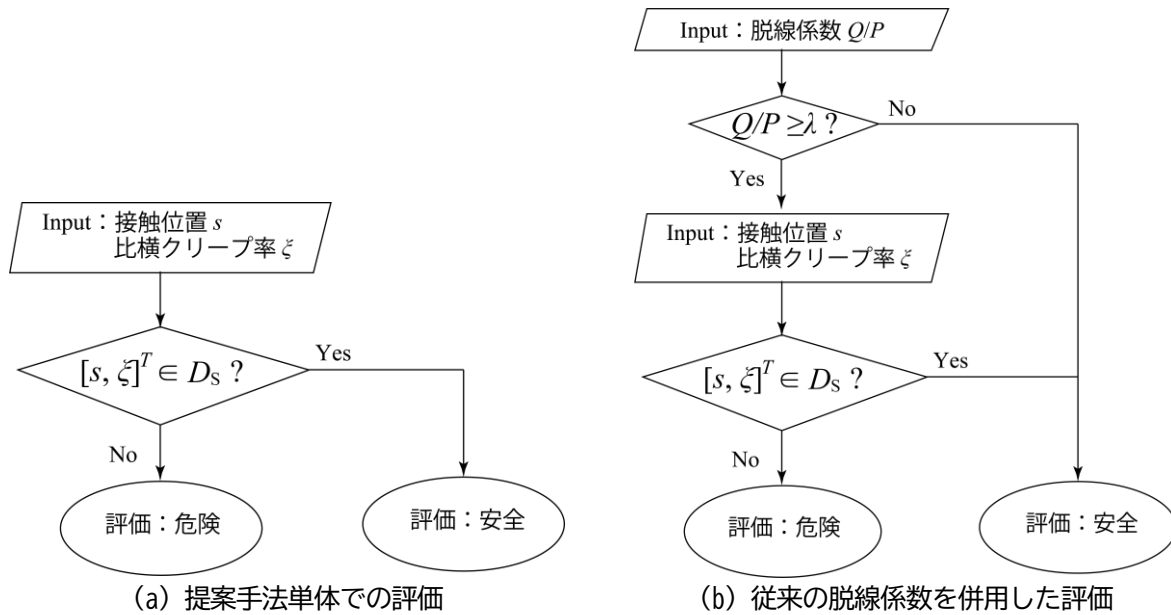


図 10 提案手法による走行安全性の評価フローチャート

・ 1. 本手法単体での評価 (図 10 (a))

走行安全性を従来とは別の観点で評価するものである。状態 $[s, \xi]^T$ が安全領域 D_s に含まれる場合を走行安全性の観点で「安全」、そうでない場合を「危険」と評価する。

・ 2. 従来の評価手法と組み合わせた評価 (図 10 (b))

提案手法を補助的に使用し、従来の手法と組み合わせることで、走行安全性の評価の高精度化を図るものである。まず、脱線係数 Q/P が目安値 λ を超過するかを照査し、走行安全性の観点で安全であるかを従来の手法に基づいて評価する。このとき、 Q/P が λ を超過した場合は、提案手法により状態 $[s, \xi]^T$ が安全領域 D_s に含まれるかを確認する。含まれる場合は、走行安全性の観点で「安全」と評価することができる。なお、 Q/P が λ を下回った場合に「安全」と評価する事自体は、これまでの運用で問題が発生していないことから、提案手法による評価は行なわない。

以上のように、当検討手法を用いて走行安全性を評価する事が可能であるが、上述したように、例として与えた図9の領域の設定が妥当であるかについては、さらに詳細な検証が必要であると考えられる。

5. 結言

今後の研究開発が進み、車輪/レール間の接触状態が簡便に把握できるようになることを見込み、接触状態を勘案して乗り上がり脱線に対する走行安全性を評価する方法について検討した。本研究では、接触状態の中で横クリープ率を輪軸アタック角で除して標準化した比横クリープ率と接触位置を評価指標にした。車両運動シミュレーションを用いて、それらが同一平面上に描く、種々のシミュレーション条件で変わる軌跡の通過領域と走行安全性の関係について検討した。結果、出口側緩和曲線の進入後にフランジ乗り上がりが発生するかについてデータを区分すると、通過領域に違いが生じることが分かった。具体的には、接触点がフランジ直線部にある場合には、比横クリープ率が大きいほど(0に近いほど)、フランジ乗り上がり・脱線しやすい状態であった。したがって、接触位置がフランジ直線部に存在しても、比横クリープ率がある値を下回れば安全と判定できる可能性があると考えられる。すなわち従来の脱線係数による走行安全性の評価では危険と判定される場合においても、当検討手法により安全と評価できる場合が存在する可能性

があると考える。

一方で、本研究で検討した範囲では、下記に示す内容とそれに付随する影響を確認できない。

- ・ 軌道変位を考慮していないため、実際の走行条件とは異なる可能性があること。
- ・ 車輪とレールの形状は、修正円弧踏面と 50kgN レールの設計形状を想定しており、それ以外の形状・組み合わせは考慮しておらず、車両諸元も 1 種類だけを対象に検討していること。
- ・ 各シミュレーションの試行で摩擦係数を内外軌で同一の値としていること。また、摩擦調整剤などで摩擦係数が急激に変化するような場合を考慮せず、摩擦係数を一定の値にしており、多様な接触状態を網羅したシミュレーションを実施できていない可能性があること。

したがって、これらのことから、評価に使用する領域について、安全マージンを考慮した具体的な境界線の設定法についても検討できていない。これらの点は、今後の研究課題として検討する。さらに、実車を用いた走行試験を行ない、より詳細な検討を進める予定である。

文 献

- 1) D. Yamamoto: "Improvement of method for locating position of wheel /rail contact by means of thermal imaging," Quarterly Report of RTRI, Vol. 60, No. 1, pp. 65-71, 2019.
- 2) 本堂貴敏, 國行翔哉, 土井久代: 曲げ・せん断ひずみを活用した PQ 輪軸における周波数解析に基づく接触位置情報抽出処理手法, 日本機械学会論文集, Vol. 88, No. 915, 2021
- 3) 野口芳直, 錦織大幸: ひずみゲージによる車輪／レール接触位置の連続測定手法の検討, 日本機械学会論文集, Vol. 90, No. 935, 2024
- 4) 片折暁伸, 土井賢一, 飯島仁ほか: アタック角連続測定装置の開発と測定結果, JR EAST Technical Review, No. 35, pp. 50-53, 2011
- 5) Z. Yang, Z. G. Lu, X. C. Wang, et al.: "Wheelset states estimation using unscented Kalman filter," Proceedings of the 25th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Chapter 89, 2017.
- 6) S. Kuniyuki, T. Hondo, M. Suzuki, et al.: "Improvement of estimation accuracy for wheelset angle of attack using a single-wheel creep-force model by taking into account contact phase difference and lateral contact position," Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Paper. 31.22, 2022.
- 7) A. Matsumoto, Y. Michitsuji, Y. Ichyanagi, et al.: "Safety measures against flange-climb derailment in sharp curve-considering friction coefficient between wheel and rail-," Wear, Vol. 432-433, pp. 1-10, 2019.
- 8) Y. Zhao, L. Shen, Z. Jiang, et al.: "Real-time wheel-rail friction coefficient estimation and its application," Vehicle System Dynamics, Vol. 61, No. 10, pp. 2598-2612, 2023.
- 9) 國行翔哉, 本堂貴敏, 鈴木貢ほか: PQ 輪軸を装着した鉄道車両における単一車輪クリープ力モデルによる輪軸の運動状態と車輪／レール間の摩擦係数の推定法, 日本機械学会論文集, Vol. 90, No. 933, 2024
- 10) J. Elkins and H. Wu: "New criteria for flange climb derailment," Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint Railroad Conference, pp. 1-7, 2000.
- 11) R. S. Barbosa: "A 3D contact force safety criterion for flange climb derailment of a railway wheel," Vehicle System Dynamics, Vol. 42, No. 5, pp. 289-300, 2004.
- 12) H. Weinstock: "Wheel climb derailment criteria for evaluation of rail vehicle safety," Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Paper. 84-WA/RT-1, 1984.
- 13) 中橋順一, 三宮大輝, 福村将彦: 車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線評価手法, 鉄道総研報告, Vol. 33, No. 3, pp. 5-10, 2019
- 14) M. Durali, M. M. Jalili and X. Jin: "A new criterion for assessment of train derailment risk," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, Vol. 224, No. 1, pp. 83-101, 2010.
- 15) 國行翔哉, 中野公彦: 鉄道車両の車輪／レール間の接触位置と横すべりに着目した乗り上がり脱線に対する評価手法, 日本機械学会論文集, Vol. 91, No. 942, 2025
- 16) 日本機械学会編: 鉄道車両のダイナミクスとモデリング, 丸善出版, pp. 16-18, 37, 2017
- 17) J. J. Kalker: "Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact," Kluwer Academic Publishers, pp. 117-119, 1990.