

# 車輪／トングレールの接触を考慮した 分岐器通過解析

中橋 順一\*

Simulation of Passing a Turnout by Considering Wheel/Tongue Rail Contact

Junichi NAKAHASHI

In passing a turnout, vehicle may vibrate at the time when a wheel shifts a tongue rail from a stock rail. Furthermore, at a tongue rail tip, train running safety may be lowered, since wheel/rail contact points are changed rapidly in the short section, due to the possibility event a rail contacts with a wheel at two points, namely wheel tread and flange. The past accident example that occurred at the tongue rail tip has been reported. A program which can take into consideration the contact state of a wheel tread and a tongue rail in detail was developed, and by using the program, the result analyzed about the action of vehicles and the contact state between a wheel/rail of the No. 8 side track turnout is reported.

キーワード：側線用 8 番分岐器，トングレール，接触点探索，車両運動解析，走行安全性

## 1. はじめに

分岐器とは、軌道を 2 つ以上に分ける軌道構造のことで、ポイント部、リード部、クロッシング部の 3 つの部分から成り、一般的な曲線軌道と比べて複雑な構造である。特にポイント部は、転換により車両の誘導方向を変える役割があり、その中でも車輪踏面と接触するトングレールは、先端の尖った特殊な形状で、進むにつれて断面形状が変化する。そのため、分岐器を対向（トングレール側から進入）で走行する場合には、外軌の車輪が、基本レールからトングレールに乗り移ることになる。この乗り移りに際して、車両が動揺することがある。また、トングレール先端部では、車輪との接触状態が複雑に変化し、レール断面の摩耗や欠損の原因となるため、分岐器の保守作業においてはトングレール先端部の摩耗管理が重要となっている<sup>1)</sup>。さらに、トングレール先端部では車輪の踏面とフランジ先端付近の 2 点で接触する可能性があり、これに伴って車輪／レールの接触点が短い区間で急激に変化するため、走行安全性が低下する懸念がある。過去の脱線事例でもトングレール先端付近で発生したものが報告されている<sup>1)</sup>。

そこで本件では、車輪踏面とトングレールの接触状態を詳細に考慮できるプログラムを作成し、側線用 8 番分岐器を対象として、分岐器を通過する際の輪重・横圧など車両の挙動と車輪／レール間の接触状態について解析した結果について報告する。

## 2. 走行試験による測定結果

### 2.1 側線用 8 番分岐器

図 1 に本件で取り扱う 50kgN レール側線用 8 番片開き分岐器（図面番号：T<sub>50N</sub> 片 8-201，以下、「側線用 8 番分岐器」とする）の略図を示す。側線用 8 番分岐器は分岐器の中でもリード曲線半径が R=100.701m と小さく、トングレールが直線ポイントであり、基本レールに対して入射角（2°4'39"）を持つため、基本レールからトングレールに移る場合には軌道が角折れした状態になっている。さらに、基本レールとトングレールの高さには差があり、トングレールの方が最大 10 mm 高くなっている。この構造的な平面性変位によって、車両の動揺や外軌側の輪重抜けが発生することから、同じ番数の本線用 8 番分岐器よりも脱線に対して厳しい構造である。

### 2.2 構内走行試験での輪重・横圧測定結果

鉄道総研構内の側線用 8 番分岐器での走行試験における輪重 (P)，横圧 (Q) の実測波形を図 2 に示す。走行方向は対向、走行速度は約 15km/h である。波形には変動がわかりやすいように 5Hz のローパスフィルタ処理を行っている。

側線用 8 番分岐器を対向で走行した場合の輪重、横圧波形には以下の特徴がある。まず、トングレール先端部では入射角により、アタック角が大きくなり、横圧、輪重が増加する。その後、ポイント部の構造的な平面性変位によって外軌側の輪重、横圧は一旦減少するが、リード部に進入すると、基本レールとトングレールの高低差

\* 車両構造技術研究部 車両運動研究室

特集：車両技術

が減少するにつれて外軌側の輪重、横圧が再び増加する。脱線係数はトングレーल先端部やリード部で大きくなるケースが多かった。

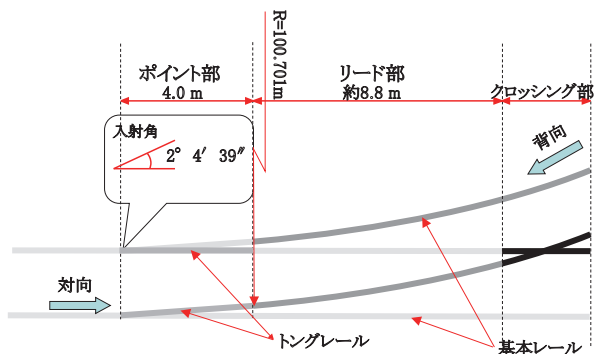


図1 側線用8番分岐器の略図

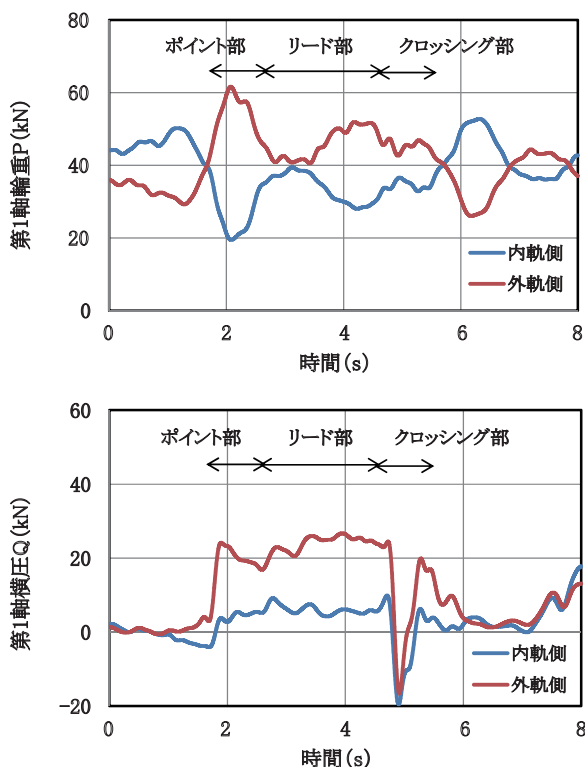


図2 輪重・横圧測定結果(鉄道総研構内, 速度 15km/h)

2.3 感圧紙を用いた接触状態の測定結果

車輪とレールの接触状態を確認するために、ポイント部に感圧紙(圧力が加わることで色が変わる特殊な紙)を貼りつけ、車両を小移動させて進行方向第1軸のみ感圧紙を通過させる実験を行った。

図3に実験で得られた車輪通過後の感圧紙の様子を示す。トングレール先端位置から基本レール頭頂面に沿って感圧した赤線が認められ、さらに先端から400mm付近から基本レールのゲージコーナー側(レールの軌間内側、以下、GC側とする)に2本目の線が表れており、ここでトングレールと接触を開始していることがわかる。

今回行った数回の実験では、走行速度の影響は考慮しておらず、結果にはばらつきが認められたが、おおむね400～600mmの範囲において車輪が基本レールからトングレールに乗り移っていること、基本レール頭頂面とトングレールにおいて2点接触している可能性が示された。

3. 2次元接触点探索手法の分岐器断面への適用

車輪踏面およびレール断面の設計形状や形状測定装置で得られた2次元形状による離散データを用いた車輪/レールの2次元接触点探索は、これまでにも行われている<sup>2)</sup>。ここでは、車輪踏面形状に修正円弧踏面の設計形状、レール断面に側線用8番分岐器の基本レールとトングレールの設計形状の離散データを用いて、2次元接触点探索手法を用いた解析を行った。解析アルゴリズムを以下に示す。

- (1) 車輪踏面、レール断面形状の2次元データをまくりぎ長手方向に等間隔の離散データに変換する。
- (2) 左右の車輪踏面、レール断面形状の離散データを車輪内面間距離や軌間を考慮して、中立位置に配置する。
- (3) 任意の左右変位を与えた輪軸を、レール長手方向を軸として、車軸中心周りにローリング回転させる。
- (4) 左右それぞれの車輪/レール間の上下方向距離の最小値を算出する。両者の差の絶対値が判定値(ここでは1/10000mm以下)の場合に、左右車輪がレール

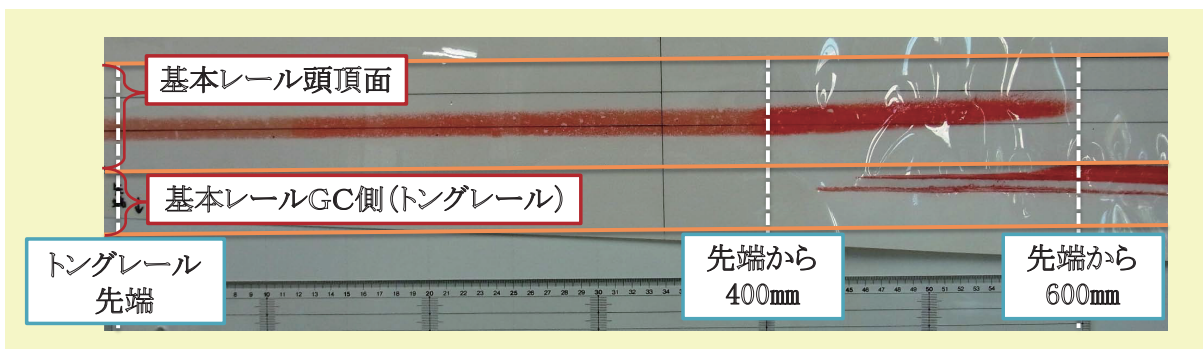


図3 車両通過後の感圧紙の様子

と接触したと判定する。

(5) 判定値を満たさない場合は、(3)に戻り、両者の差が判定値を満たすまで収束計算を続ける。

図4に接触点探索に用いた分岐器レール断面形状を示す。車両が対向に走行する場合に進行方向左側を外軌とした場合のトングレール先端から0～1080mmの範囲のデータである。ここでは基本レール断面を重ねて図示しており、進行方向に進むにしたがってトングレールが厚くなる様子がわかる。内軌には基本レール断面形状(50kgNレール傾斜敷設なしと同一形状)として接触点探索を行った。

図5に輪軸左右変位と探索した接触点における接触角の関係を示す。トングレール先端から180mmの断面による結果で、スラックは23.8mmとした。輪軸左右変位を大きくすると2ヶ所でピークが認められ、トングレールおよび基本レールとのフランジ接触を表している。

この手法により得られる車輪半径、接触角、接触楕円の大きさなどの接触特性からクリープ力を算出し、車両運動解析で用いることとした。

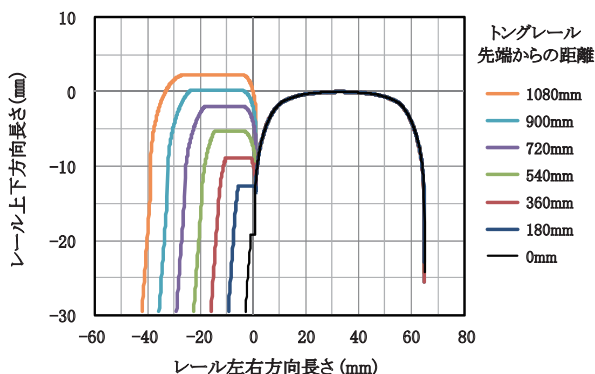


図4 分岐器レール断面形状(先端から90mm間隔)

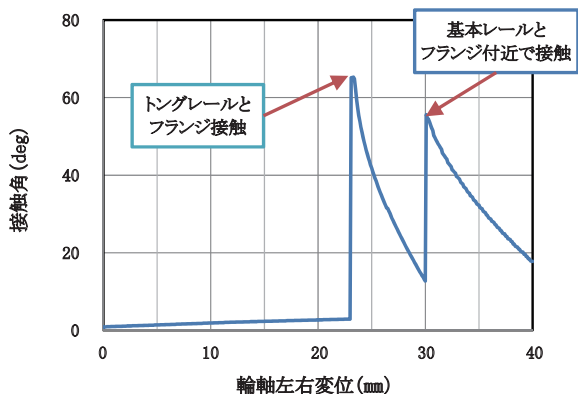


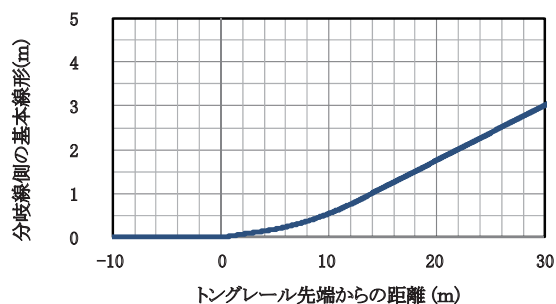
図5 輪軸左右変位と接触角の関係

#### 4. 分岐器通過時の車両運動解析

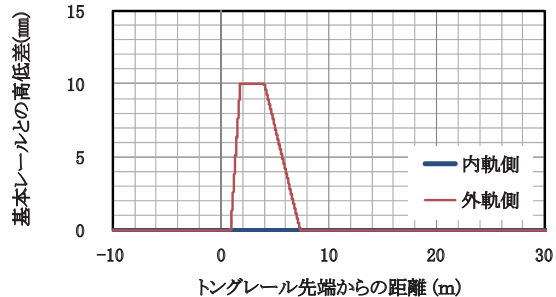
##### 4.1 軌道変位の入力方法

側線用8番分岐器の分岐線側の基本線形は、緩和曲線がなく、曲線長が短いことから、車両運動解析において一般的な曲線を通過する場合と同様の曲線条件の入力ができない。過去の研究<sup>3)</sup>では、半径R=220.634mとR=100.701mの連続する円弧による近似曲線に対する線形と分岐側の基本線形との差を通り変位として入力する方法が用いられているが、本件では、分岐線側の基本線形を通り変位として入力することとした。この方法によれば、実際に敷設してある分岐器の絶対座標を測定することにより、それらの差異を考慮できると考えられる。

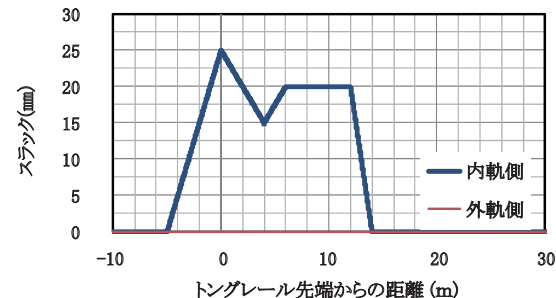
その他に、トングレールと基本レールに生じる高低差は高低変位として、スラックは軌間変位として入力した。図6に分岐線側の基本線形、トングレールと基本レールの高低差およびスラックとトングレール先端からの距離の関係を示す。これ以降で検討する分岐器通過解析では、これらの軌道条件を入力した。



(a) 分岐線側の基本線形



(b) 基本レールとの高低差



(c) スラック

図6 入力した分岐器の軌道変位

特集：車両技術

4.2 レール断面を一様とした場合

まず、レール断面を 50kgN レール設計形状（傾斜敷設なし）の一様断面として、側線用 8 番分岐器における分岐器を通過する車両の挙動について解析を行った。ここでは 3 章の手法で得られる接触特性をあらかじめ接触ファイルとして準備しておき、それを運動解析で参照することとした。車両モデルは一般的通勤型車両とした。

図 7 に第 1 軸の輪重 (P)、横圧 (Q)、脱線係数 (Q/P) および車輪とレールの相対角度で表されるアタック角の解析波形を示す。走行方向は対向で走行速度は 15km/h、車輪／レール間の摩擦係数は 0.3 とした。モデル化されていないクロッシング部における背面横圧などを除いて 2.2 節で示した実測データの特徴を再現できていると考えられる。さらに測定が難しいアタック角についても解析結果から、トングレー先端では約 2deg で入射角と同程度まで立ち上がり、リード部では 1.0 ～ 1.4deg であることがわかった。

4.3 トングレー断面形状を考慮した場合

4.2 節のようにレール断面形状を一様とした場合でも、分岐器線形を入力することで、輪重や横圧など車両の挙動は実測結果と符合した。しかしこの手法では 2.3 節で示したトングレーへの乗り移りのような現象は解析できない。また、実際にはトングレーを含む断面形状は進行方向に沿って変化しており、断面形状に応じて接触点ファイルを準備することは困難である。したがって運動解析の刻み時間ごとに決定された断面形状に対して接

触点探索を行う必要がある。

ここでは、3 章で示した 2 次元探索手法を車両運動解析に取り入れることとした。具体的には時間刻み (1/10000 秒) ごとに得られる各軸の走行距離に応じて作成した左右のレール断面形状を、スラックを考慮して配置し、そこに車両運動解析から算出した車輪／レール間の相対左右変位に応じて輪軸をまくらぎ方向に移動させて、車輪／レールの接触点探索を行った。

図 8 に第 1 軸の輪重、横圧、脱線係数およびアタック角の解析波形を示す。トングレー断面形状の変化を考慮し、運動解析の時間刻みごとに接触点探索した以外は 4.2 節と同じモデルである。図中には点線で一様断面の結果も併せて示している。入力レール断面条件で比較すると、輪重やアタック角には違いは認められなかったが、横圧や脱線係数には明確な差異が認められ、分岐器のレール断面を入力した場合にトングレー先端やリード曲線において変動が大きかった。しかし、平均的な挙動やそれ以外の区間ではおおむね一致していることから、この変動は車輪と分岐器レール断面との接触状態に起因するものと推定される。そこで、本解析における分岐器通過時の外軌側車輪の接触特性を確認した。図 9 (a) が接触位置における車輪半径、図 9 (b) が接触角である。接触点の変動が大きかったトングレー先端部とリード部では、車輪半径が急激に大きくなり、接触角が 65deg まで達しており、フランジ直線部まで接触点が移動していることがわかる。また、接触点がフランジのど部との間で変動しており、2 点接触の可能性が考えられる。

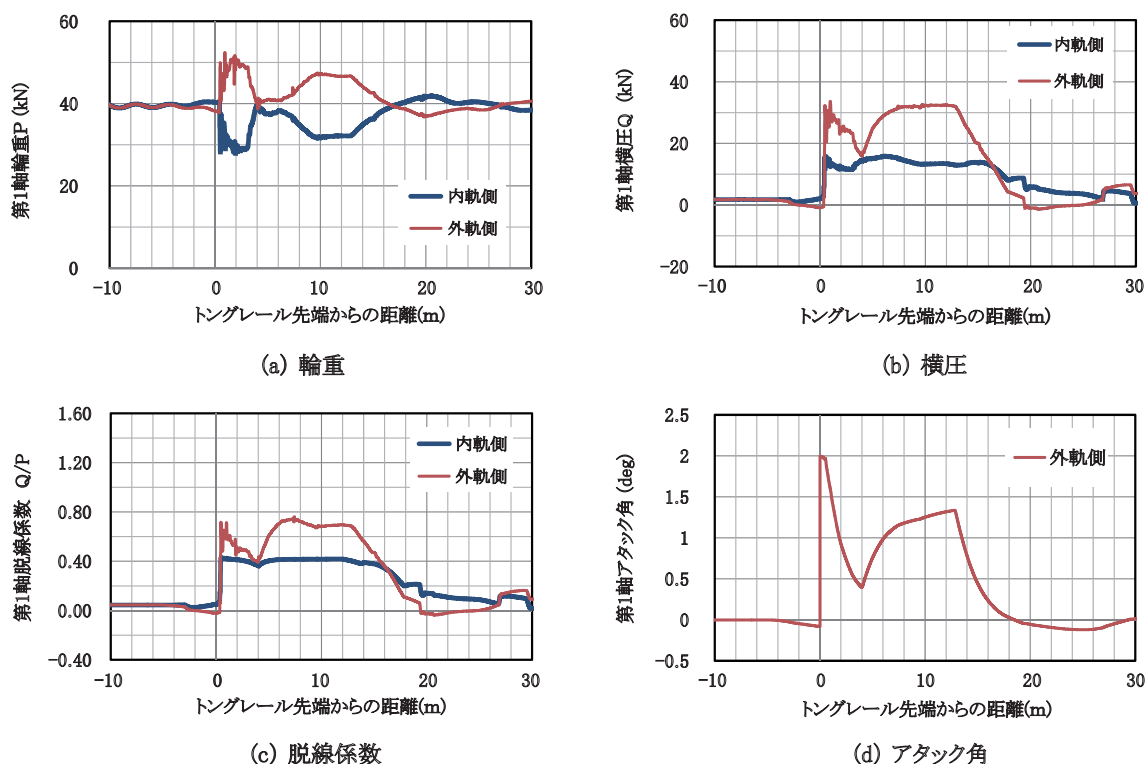


図 7 分岐器通過解析結果（レール断面を一様とした場合）

しかしながら、実測横圧波形では変動は認められないことから、フランジ直線部とトングレー先端部におけるクリープ力特性については今後検討する必要がある。

### 5. 解析による車輪／レールの接触点の推移

逐次解析により得られた分岐器通過時の車輪／レールの接触点の推移を図10に示す。図中の点線は、GC側およびフィールドコーナー側（レールの軌間外側、以下、FC側とする）における、レール頭頂部から14mm下の位置で、この2つの線によりレールの幅を示している。各図の縦軸は軌道中心からの距離であり、外軌はほぼ直線として、内軌はスラックに応じて曲がった形状として図示されている。赤で示した車輪とレールの接触点

は、内軌側ではスラックや分岐線側の基本線形の影響で、まくらぎ方向に移動しているものの、おおむねレール頭頂面上を走行している。一方、外軌側ではトングレー進入後から接触点がFC側に移動し、トングレー先端から400mm付近でGC側に移動するのが認められる。外軌側ポイント先端付近における車輪／レールの接触点の推移を拡大したものを図11に示す。トングレー先端から400～600mmの間では接触点の変動しており、レール中央部に沿う線とトングレー側に現れる線の2本の線が認められる。この結果は2.3節の実験結果と符合しており、トングレー形状を詳細に考慮することで、車輪が基本レールからトングレーへ乗り移る現象を再現できたと考えられる。また、車輪／レール間の接触点の推移や接触特性の解析結果から、トングレー先端や

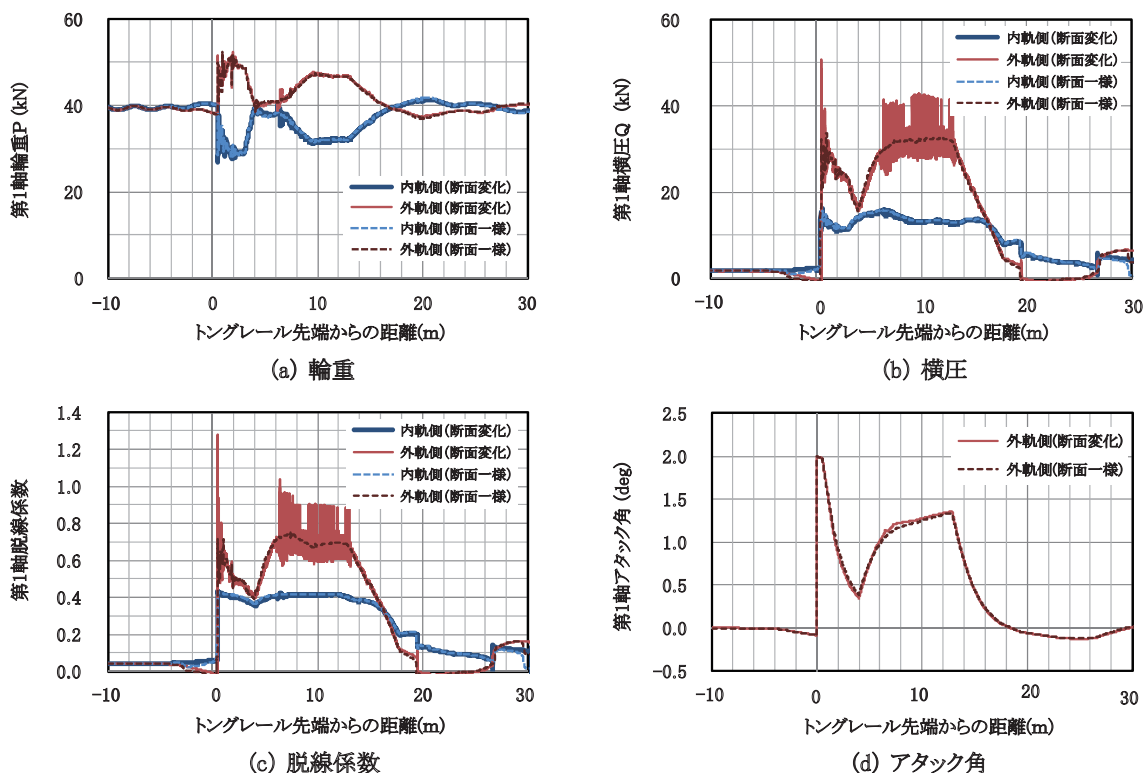


図8 分岐器通過解析結果（トングレー形状変化を考慮した場合）

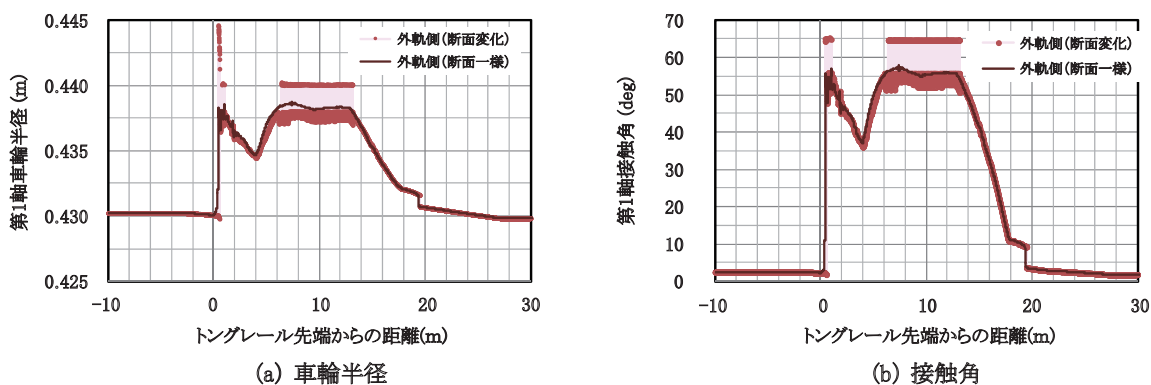


図9 分岐器通過時の外軌側車輪の接触特性

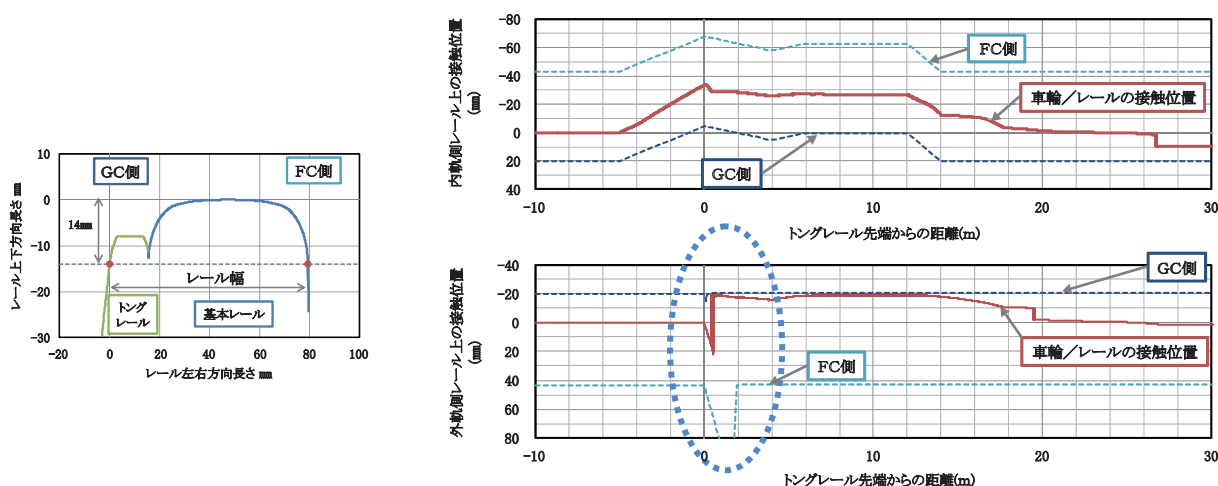


図 10 逐次解析により得られた車輪/レールの接触点の推移

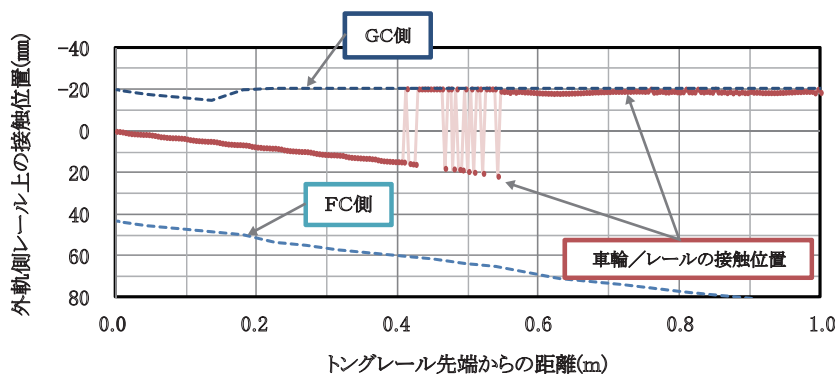


図 11 外軌ポイント先端付近における車輪/レールの接触点の推移 (図 10 の青丸部を拡大)

リード曲線は、車輪フランジ直線部まで接触点が移動しており、乗り上がりが発生しやすい区間であることが確認できた。

ランジ直線部まで接触点が移動しており、乗り上がりが発生しやすい区間であることが確認できた。

## 6. まとめ

本件では、車輪踏面とトングレールの接触状態を詳細に考慮できるプログラムを作成し、側線用 8 番分岐器を対象に分岐器を通過する車両の挙動と車輪/レール間の接触状態について解析した。結果を以下にまとめる。

- (1) 2次元接触点探索手法を分岐器レール断面へ適用し、輪軸の左右変位による車輪/トングレールの接触特性を得ることができた。
- (2) レール断面形状を一樣とした場合でも、分岐器線形などを入力することで、輪重や横圧など車両の挙動は実測結果と符合した。
- (3) 車輪/レールの接触点を考慮した分岐器を走行する車両の運動解析を実施した結果、車輪が基本レールからトングレールへ乗り移る現象を再現できた。
- (4) 車輪/レール間の接触点の推移や接触特性の解析結果から、フランジ先端部やリード部では、車輪フ

本手法は分岐器における脱線原因の推定や走行安全に関わるトングレール先端部の摩耗形状に対する管理手法の提案などへ展開できるものと考えられる。また、本件では分岐器通過シミュレーションでの接触点探索に2次元接触探索手法を用いたが、3次元接触探索手法<sup>4)</sup>や2点接触およびトングレールの挙動を考慮することなどについて今後検討する必要がある。

## 文献

- 1) 上村康夫ほか：各社報告 ポイント先端部の管理，日本鉄道施設協会誌，Vol.32，No.3，pp.50-51，1994
- 2) 足立雅和ほか：車輪とレールの摩耗を考慮した接触状態解析手法の開発，鉄道総研報告，Vol.20，No.6，pp.17-22，2006
- 3) 藤本裕，石田弘明：側線 8 番分岐器通過時の車両運動解析，鉄道総研報告，Vol.9，No.8，pp.37-42，1995
- 4) 中橋順一ほか：車輪/レール接触位置の 3 次元探索手法，鉄道総研報告，Vol.25，No.1，pp.21-26，2011