

# 高速用分岐器における新たな軌道変位整備基準値の提案

塩田 勝利\* 宮下 綾乃\*

Proposal of New Maintenance Standard Values of Track Irregularity for High-speed Type Turnout

Katsutoshi SHIOTA Ayano MIYASHITA

Maintenance standard values for track irregularity at high-speed type turnouts where trains pass through the main line of the turnout at a speed of 120 km/h on a conventional line, are managed with stricter values than those for general turnouts. These values were empirically determined from past running tests. In this study, we constructed turnout running simulation models which enable us to quantitatively evaluate the effects of track irregularity on turnout component damage and vehicle dynamics, in order to establish new maintenance values on the basis of mechanical evidence. Furthermore, we carried out various studies on track irregularity using each constructed simulation model and proposed new maintenance standard values.  
キーワード：高速用分岐器，軌道変位，FEM，MBD，分岐器部材の損傷，車両運動

## 1. はじめに

旧日本国有鉄道（以下、「旧国鉄」という）において、在来線の分岐器における基準線側の通過速度は1968年に最高速度100km/hに引き上げられたが、その後、速度向上のニーズが高まり、1981年に120km/hでの走行試験が実施された。その結果、一部の分岐器内において著大横圧（本研究では、60kN以上をいう）の発生が確認された。その要因として継目部の目違いおよびクロッシングの軌間が大きいこと、バックゲージが小さいことが挙げられた。また、これらの箇所でも横圧が大きくなる要因の一つとして分岐器内の軌道変位（高低、通り、水準）も影響しているとされ、分岐器の高速通過にあたっては、これらの箇所への各種対策が必要であるとの見解が示された<sup>1)</sup>。これを受け、旧国鉄では、継目部の目違い、クロッシングの軌間、バックゲージの管理値を一般分岐器よりも厳しくするとともに、軌道変位（高低、通り、水準）は一般区間の最上級線区の最も厳しい整備目標値を準用するといったことが行われた。これらの対策を行った上で、再度走行試験を実施した結果、著大横圧が確認されなかったことから最高速度120km/hで基準線側を通過する分岐器（以下、「高速用分岐器」という）では、表1に従って管理することが決められた。

これらの値は旧国鉄の民営化後も一部の鉄道事業者で高速用分岐器の整備基準値として用いられているが、著大横圧の発生原因である継目部やクロッシング部は表1で示す個別の厳しい対策が行われているこ

表1 高速用分岐器および一般分岐器の管理項目

管理項目	高速用分岐器	一般分岐器*
高低変位	13(7)	23(15)
通り変位	13(7)	23(15)
水準変位	11(7)	平面性 23(18)
クロッシング軌間変位	+3, -3	+5, -3
バックゲージ	1023~1030	1022~1030
接着	3	4
継目部目違い	1	2
ガードフランジウェー幅	56	なし

※括弧内は静的値 \*最上級線区における整備基準値 単位：mm

\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

とを鑑みると、設定された軌道変位（高低、通り、水準）の整備基準値は必要以上に厳しい値が設定されている可能性がある。そのため、力学的根拠に基づいた軌道変位の整備基準値を新たに設定することが望ましいと考えられるが、それには高速用分岐器における軌道変位が分岐器部材の損傷や車両運動に与える影響を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、軌道変位がこれらに与える影響を定量的に評価することを目的に、3次元の動的有限要素法（以下、「動的FEM」という）およびマルチボディダイナミクス（以下、「MBD」という）を用いた分岐器走行シミュレーションモデルを構築した。さらに、構築したシミュレーションモデルを用いて、軌道変位をパラメータとした走行シミュレーションを実施し、高速用分岐器における軌道変位の影響を明らかにした。

## 2. 分岐器走行シミュレーションモデル

本研究では、分岐器部材の損傷評価と車両運動の評価について、動的FEMとMBDの2つの解析手法を組み合わせることで検討を行った。一般的に、動的FEMを用いることで部材の損傷評価と車両運動の評価を同時に実施することは可能であるが、計算負荷が非常に大きく、解析に多くの時間を要する。一方、MBDは車両の力学的挙動の評価に特化しており、分岐器を構成する部材の応答は算定できないものの、計算負荷が小さく、短時間で高精度の評価を行うことが可能である。そこで本研究では、両手法の特徴を生かし、分岐器部材の損傷評価には動的FEMを、車両運動の評価にはMBDを用いたシミュレーションモデルを適用し、目的に応じて評価モデルを使い分けた。

構築した各モデルを図1に、主な解析諸元を表2に示す。両モデルとも、車両は1個の車体、2個の台車、4個の輪軸を剛体でモデル化し、各質点をばね・ダンパ要素で結合したものである。

動的FEMモデルでは、軌道についてレール・まくらぎ・下部構造を梁要素とばね要素でモデル化し、評価対象の分岐器部材についてはソリッド要素を用いてモデル化することで応力等を算定可能とした。また、

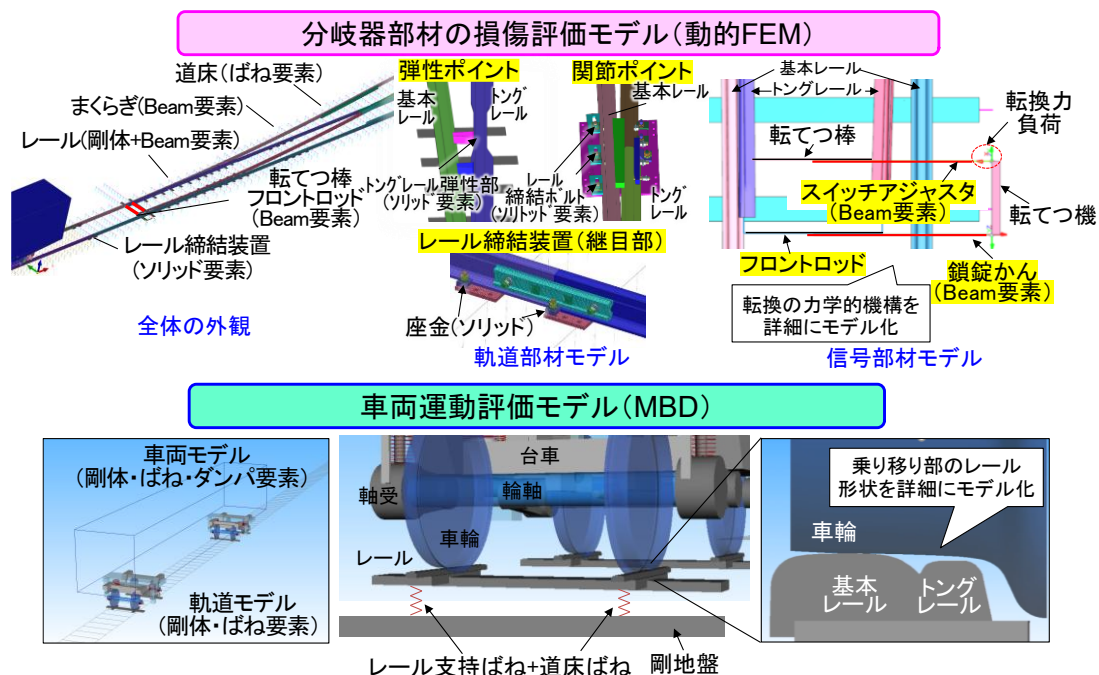


図1 分岐器走行シミュレーションモデルの概要

表 2 主な解析諸元

項目	諸元
分岐器番数	10 番片開き (弾性ポイント)
レール種別	JIS 50N
軌間	1067mm
スラック	5mm
ヤング率 (レール)	$2.1 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup>
ポアソン比 (レール)	0.3
車両形式	特急車両 (ボルスタレス台車)
台車間距離	14.15 m
軸距	2.1 m
車輪/レール間摩擦係数	0.3
台車質量	$2.83 \times 10^4$ kg/台車
輪軸質量	$1.52 \times 10^3$ kg/輪軸

車両通過時のレールの動的挙動や転てつ装置の動的挙動を精緻に模擬するため、ポイント部材の載荷試験や転換試験を行い、各部材の非線形応答をモデルに反映させた<sup>2)</sup>。

MBD モデルにおいて、軌道はレール・まくらぎを輪軸直下に追従する質量とし、それらの間をばねとダンパで結合したモデルである。また、基本レール・トングレール間の乗り移り部における車両運動を高精度に評価できるよう、乗り移り部のそれぞれのレール形状を精緻にモデル化した。構築した各モデルの妥当性については、車両走行試験結果と比較を行い、検証している<sup>2) 3)</sup>。

### 3. 軌道変位が分岐器部材の損傷および車両運動に与える影響の評価

#### 3.1 評価項目

高速用分岐器における軌道変位が分岐器部材の損傷および車両運動に与える影響を評価することを目的として、構築したモデルを用いて分岐器走行シミュレーションを実施した。

評価項目およびその限度値を表 3 に示す。これらの内容は、在来線運転速度向上マニュアル<sup>4)</sup>（以下、「速度向上マニュアル」という）で定められる項目を参考に設定した。

分岐器部材のうち、軌道部材については、トングレール弾性部の発生応力、レール締結装置の発生応力および関節ポイントヒール部のレール締結ボルトの発生応力を評価した。なお、分岐器内のレール締結装置の発生応力に対しては、継目部通過時の衝撃荷重が最も厳しいものと考え、ポイントの継目部を対象とした。

信号部材については、転てつ装置の鎖錠かん変位、スイッチアジャスタの発生応力およびフロントロッドの発生応力を評価項目とした。なお、速度向上マニュアルでは上記の評価項目の他に、ガードレールの

表 3 評価項目および限度値

評価対象		評価項目	限度値
分岐器部材	軌道部材	トングレール弾性部応力	137 N/mm <sup>2</sup>
		レール締結装置応力	115 N/mm <sup>2</sup>
		関節ポイントヒール部レール締結ボルト応力	240 N/mm <sup>2</sup>
	信号部材	鎖錠かん変位	1.5 mm
		スイッチアジャスタ応力	240 N/mm <sup>2</sup>
車両運動	走行安全性	フロントロッド応力	240 N/mm <sup>2</sup>
		脱線係数目安値超過時間	15 msec
	車両動揺	上下動揺	0.5 G
		左右動揺	0.4 G

背面横圧も確認することが示されている。ただし、ガードレールの背面横圧については、クロッシングの軌間およびバックゲージに関する個別対策（表1）により、軌道変位の影響を受けにくく、構造設計上、高速走行に対応している<sup>5)</sup>ことから検討の対象外とした。

次に、車両運動については、走行安全性と車両動揺を評価項目とし、走行安全性は脱線係数0.8を継続して超過する時間<sup>6)</sup>（以下、「脱線係数目安値超過時間」という）を、車両動揺は上下・左右動揺を確認した。

また、分岐器内における評価位置はポイント、リード、クロッシングのうち、部材への影響が最も厳しいと考えられるポイントを対象とした。ここで、過去の走行試験において著大横圧の発生原因となったクロッシングでは、軌間およびバックゲージが一般分岐器に比べ厳しく管理されており、これが著大横圧の対策となっていることから、軌道変位による影響は小さいことがわかっている<sup>5)</sup>。また、リードについては、事前の検討により、軌道変位が部材損傷および車両運動に与える影響は小さいことが確認されている<sup>7)</sup>。

### 3.2 解析条件

解析条件を表4に示す。対象とする軌道変位は、現行の高速用分岐器の整備基準値で厳しく管理されている高低変位、通り変位、水準変位とし、各軌道変位の影響を定量的に評価するため単独で存在する状況を設定した。設定する軌道変位の波形（図2）は、コサイン波1波、波長は10mとし、振幅をパラメータとした。高速用分岐器の整備基準値は、高低変位および通り変位が13mm、水準変位が11mmであるが、本研究では軌道変位の影響の限度を確認するため、これらの整備基準値よりも大きな値を設定したケーススタディを実施した。軌道変位の向きは輪重、横圧が大きくなる条件として、高低変位は下に凸、通り変位は車輪が乗り移るレール側に向かって凸、水準変位は車輪が乗り移る方のトングレール側が下に凸となるよう設定した。また、各軌道変位の設定位置は、事前の解析により輪重および横圧が最大となる箇所とした。車両の走行速度は120km/h、走行方向は輪重、横圧の変動が大きくなる条件である対向走行とした。なお、トングレール弾性部の応力評価は、動的解析では解析負荷が非常に大きいことから、MBDで算定した輪重、横圧を荷重として静的に加える解析により評価を行った。

表4 解析条件

項目	解析条件
対象軌道変位	高低変位・通り変位・水準変位
軌道変位波形	コサイン1波（図2）
軌道変位波長	10 m
軌道変位振幅	5 mm ~ 25 mm
車両走行速度	120 km/h
車両走行方向	対向走行

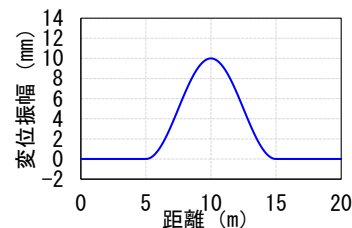


図2 設定する軌道変位の波形例

### 3.3 軌道変位が分岐器部材の損傷に与える影響の評価

#### 3.3.1 軌道部材に関する評価結果

軌道変位が軌道部材の損傷に与える影響について解析した結果を図3に示す。現行の整備基準値以下の範囲では、全ての評価項目において、応力の限度値を十分に下回っていた。次に、軌道変位が整備基準値より大きくなった場合について、高低変位および水準変位に関しては、全ケースで応力の限度値を下回った。一方、通り変位に関しては、整備基準値より8mm大きい21mmの場合に、ヒール部のレール締結ボルト応力が限度値を超過する結果となった。ここで、図4(a)に、レール締結ボルト応力に関する通り変位と横圧の関係を示す。通り変位が18mmまでは横圧は小さいが、19mm以降は、横圧が大きく増加していることが確認される。この傾向は、図3(c)で示したレール締結ボルト応力の増加傾向と一致している。この横圧の増加

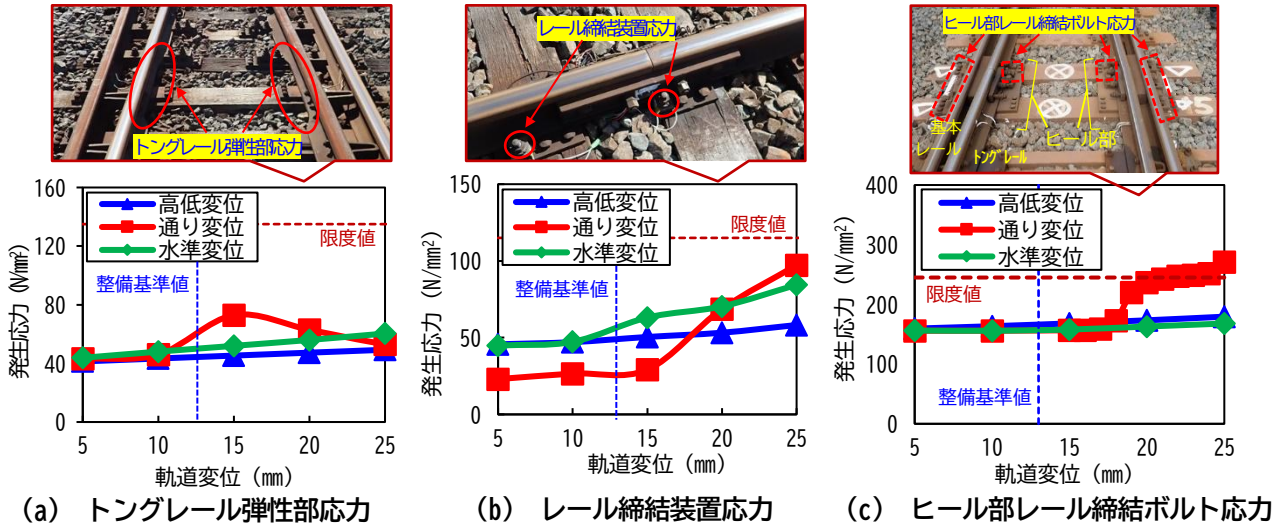


図3 軌道変位が軌道部材の損傷に与える影響の解析結果

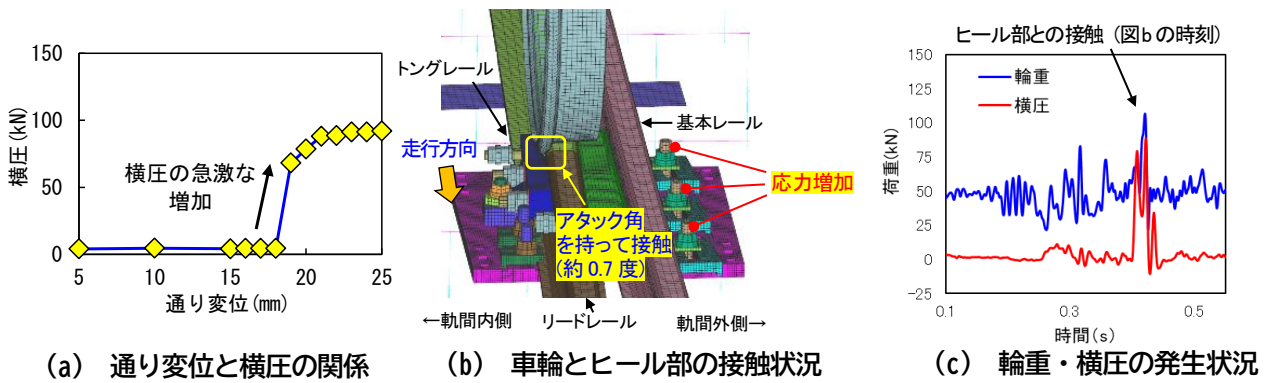


図4 ヒール部のレール締結ボルト応力の増加メカニズム

については、ヒール部の手前に存在する通り変位の発生箇所を車両が高速で通過すると、その影響により車両が左右方向に変位し、19mmを超えると車輪フランジが約0.7度のアタック角を持ってヒール部と接触するためである(図4(b),(c))。この横圧増加の影響を受け、ヒール部を固定するヒール部ボルトに大きな負荷が生じたものと考えられる。

### 3.3.2 信号部材に関する評価結果

軌道変位が信号部材の損傷に与える影響について解析した結果を図5に示す。現行の整備基準値以下の範囲では、全ての評価項目において、応力および変位の限度値を十分に下回っていた。次に、軌道変位が整備基準値より大きくなった場合について、高低変位および水準変位に関しては、全ケースで限度値を下回るものであった。一方、通り変位に関しては、整備基準値より5mm大きい18mmの場合に、鎖錠かん変位が限度値を超過する結果となった。ここで、図6(a)に鎖錠かん変位が限度値を超過する前の通り変位17mmの場合と限度値を超過した後の18mmの場合の輪重、横圧の波形を比較したものを示す。波形から、通り変位が18mmになると輪重、横圧が大きく増加していることが確認される。これは、分岐器前端に存在する通り変位の発生箇所を車両が高速で通過すると、その影響により車両が左右方向に変位し、通り変位が18mmを超えると、図6(b)に示すように車輪フランジの下部がトングレール先端部で接触するようになる。この車輪フランジ下部とトングレール先端部との接触により大きな横圧が発生し、その反動によりトングレール先端が開くことで鎖錠かん変位が大きく増加したものと考えられる。

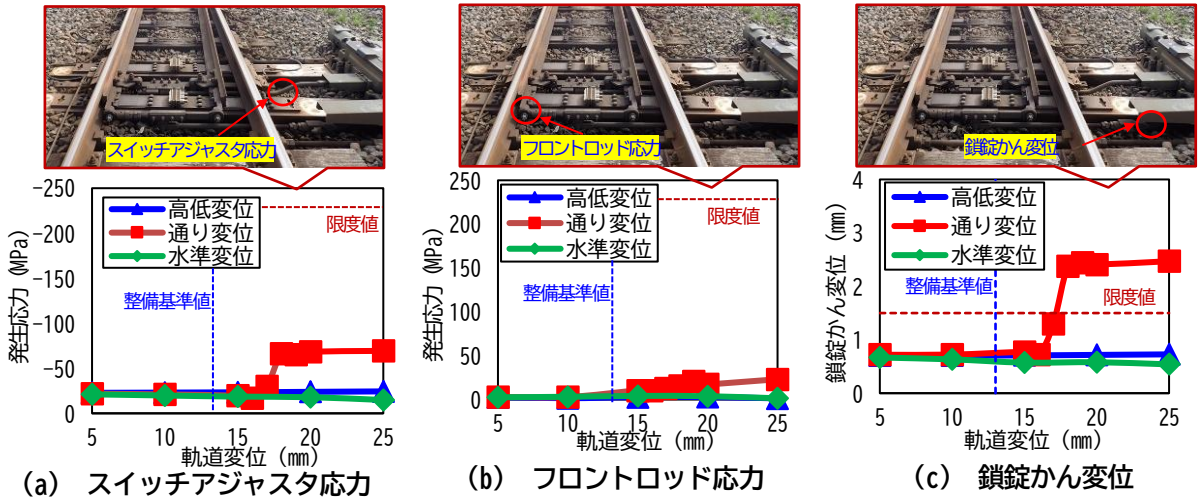


図5 軌道変位が信号部材の損傷に与える影響の解析結果

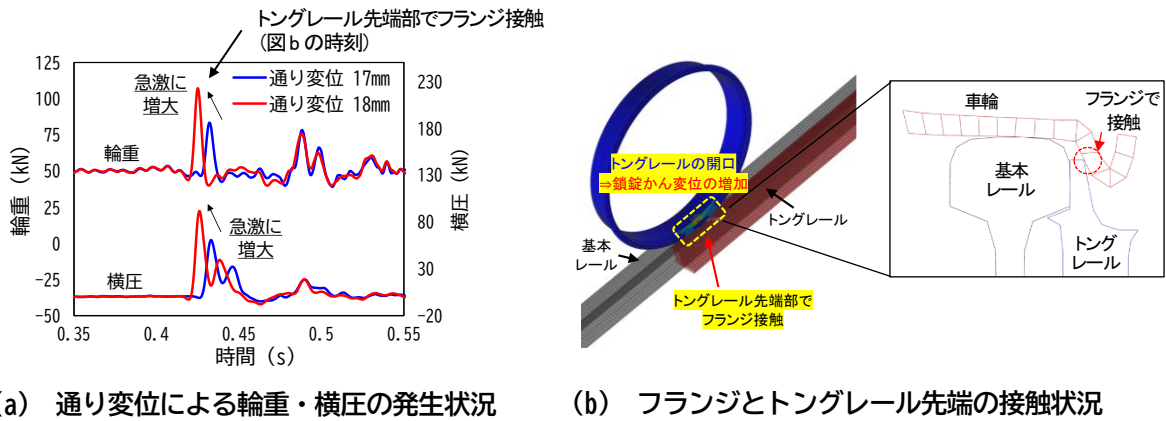


図6 通り変位の影響による鎖錠かん変位増加のメカニズム

### 3.4 軌道変位が車両運動に与える影響の評価

軌道変位が車両運動に与える影響について解析した結果を図7に示す。現行の整備基準値以下の範囲では、全ての評価項目において、限度値を十分に下回っていた。次に、軌道変位が整備基準値より大きくなった場合について、高低変位および水準変位に関しては、全ケースで限度値を下回るものであった。ただし、通り変位に関しては、整備基準値より5mm大きい18mmの場合に脱線係数目安値超過時間が限度値を超えた。また、9mm大きい22mmの場合に左右動揺が限度値を超過する結果となった。脱線係数目安値超過時間の限度値超過については、3.3.2項の鎖錠かん変位が限度値を超過したメカニズムと同様に、通り変位の

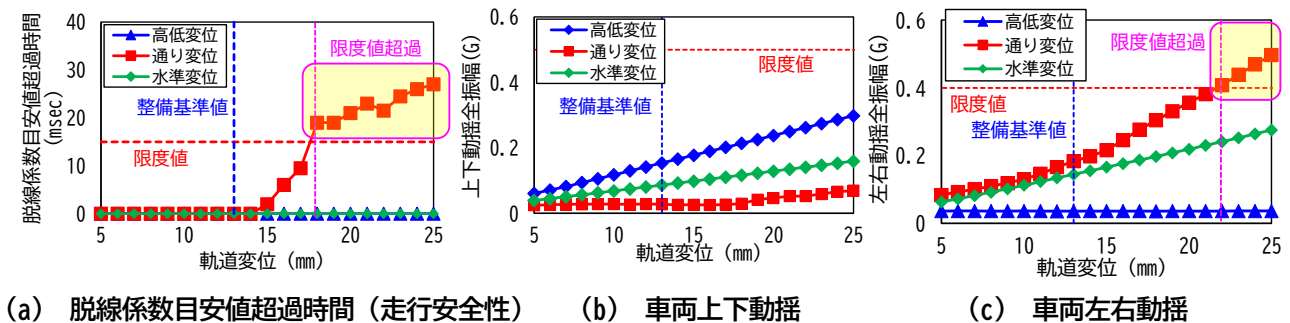


図7 軌道変位が車両運動に与える影響の評価結果

影響により、車両が左右に振られ、車輪フランジがトングレーール先端部と接触したことにより、著大な横圧が生じたためと考えられる。また、左右動揺の限度値超過については、通り変位の増加に比例して、左右動揺も増加する傾向がみられることから、車両の高速通過時における通り変位の増加に伴い車両の左右方向への加速度が大きくなったためと考えられる。

### 3.5 軌道変位が複合的に発生する場合に関する検討

前節までの検討で高低変位、通り変位および水準変位が単独で存在する状況下において、現行の整備基準値以下であれば各軌道変位が分岐器部材の損傷および車両運動に与える影響は小さいことを確認した。また、高低変位および水準変位については、現行の整備基準値よりも大きな値を許容した場合においても各限度値を下回る結果であった。以上の結果を踏まえると、通り変位については影響が大きいことから現行の整備基準値で管理することが望ましいが、高低変位と水準変位については影響が小さいことから整備基準値を緩和できる可能性がある。ただし、これまでの検討は、各軌道変位が単独で存在する状況を対象としたものであった。そのため、通り変位が現行の整備基準値内であっても他の軌道変位と組み合わせり、複合的に発生する場合は部材の応力・変位および車両運動に与える影響が大きくなることも考えられる。そこで、本節では軌道変位が複合的に発生する状況を想定したケーススタディを実施した。一般的に、通り変位と水準変位が逆位相で複合的に存在する状況下では、輪重減少と横圧増加が同時に生じ、走行安全性に影響を及ぼすことから、その管理に注意が必要とされている<sup>8)</sup>。また、通り変位と水準変位の交互作用についても先行研究にて検討されており、その中においても通り変位と水準変位が逆位相で発生する場合に、部材損傷に影響を及ぼす横圧が最も大きくなることが確認されている<sup>9)</sup>。そこで、本研究でも通り変位と水準変位が逆位相で発生する軌道変位を設定し、部材の応力・変位および車両運動に及ぼす影響について評価した。なお、高低変位と通り変位の組み合わせについて、高低変位は車両のローリングを生じさせないため、走行安全性への影響は小さいと考えられる。また、ローリングが生じないことで車両の左右方向への変位も生じず、横圧の増加も発生しないことから、部材損傷への影響も小さいと考えられる。以上を踏まえ、高低変位については検討の対象外とした。

設定する軌道変位の波長は 10m、通り変位は前節までの検討において各評価項目の応答値が限度値内であった現行の整備基準値の 13mm とし、水準変位は 5mm～25mm の範囲で設定した。車両の走行速度は 120km/h、軌道変位の向きおよび設定位置は、前節の検討と同じとした。

軌道部材の損傷に与える影響の解析結果を図 8 に、信号部材の損傷に与える影響の解析結果を図 9 に示す。全ての条件において、発生応力や変位は限度値を下回った。ただし、軌道部材のトングレーール弾性部応力、レール締結装置応力、ヒール部ボルト応力については水準変位が大きくなるにつれ、増加傾向であった。特に、図 8(b)、(c)のレール締結装置応力およびヒール部ボルト応力については、水準変位が 20mm を超えると大きく増加している。どちらも継目部を対象としているが、20mm を超えると車両のローリングとアタック角がより大きくなり、車輪フランジが継目部に接触することで横圧が増加したためと考えられる。信号部材については水準変位の増加による発生応力、変位の増加はみられなかった。信号部材の応力および変位の増加については 3.3.2 項で上述したように、通り変位の影響により、車両が左右方向に変位し、車輪フランジの下部がトングレーール先端部と接触して著大な横圧が発生することが要因となっている。一方、本解析では、通り変位は現行の整備基準値の 13mm で固定していることから通り変位の影響は小さく、水準変位が増加した場合でも車輪フランジとトングレーール先端部の接触はみられなかった。このため、信号部材の応力や変位に与える影響は小さかったものと考えられる。

次に、車両運動の評価に関する解析結果を図 10 に示す。走行安全性に関わる脱線係数目安値超過時間(図

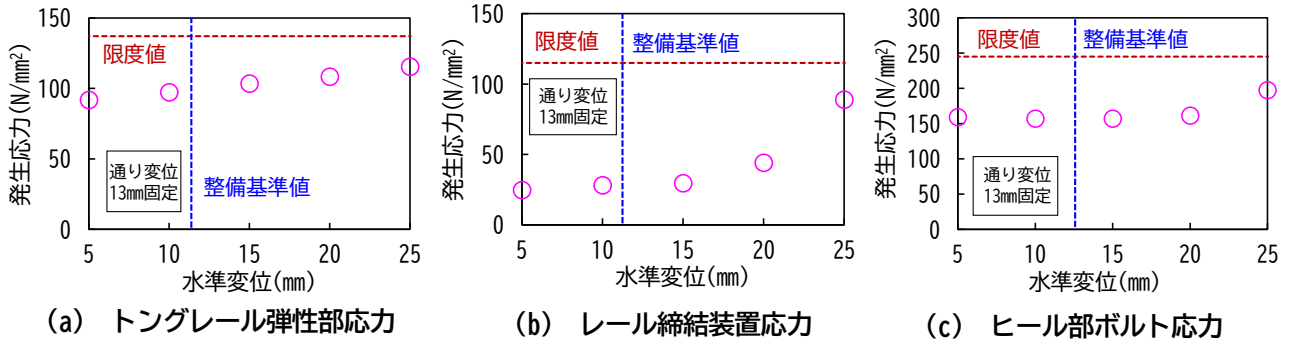


図8 複合的に発生する軌道変位が軌道部材の損傷に与える影響の評価結果

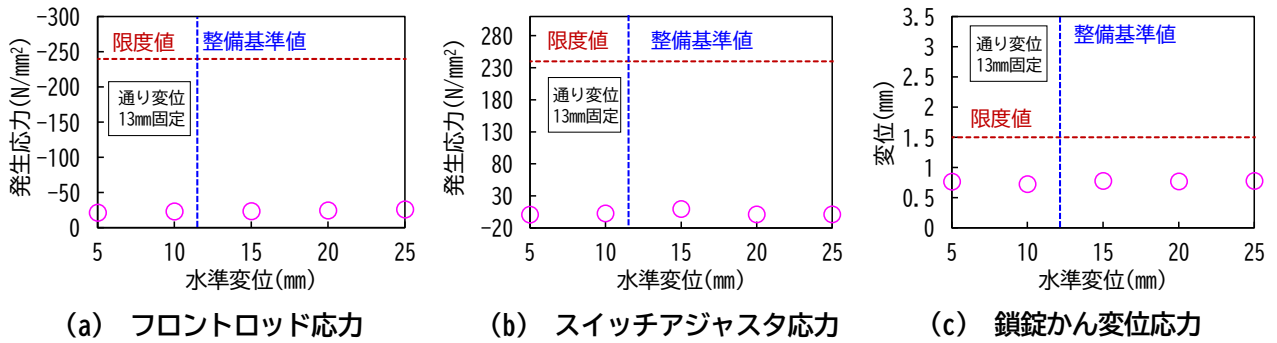


図9 複合的に発生する軌道変位が信号部材の損傷に与える影響の評価結果

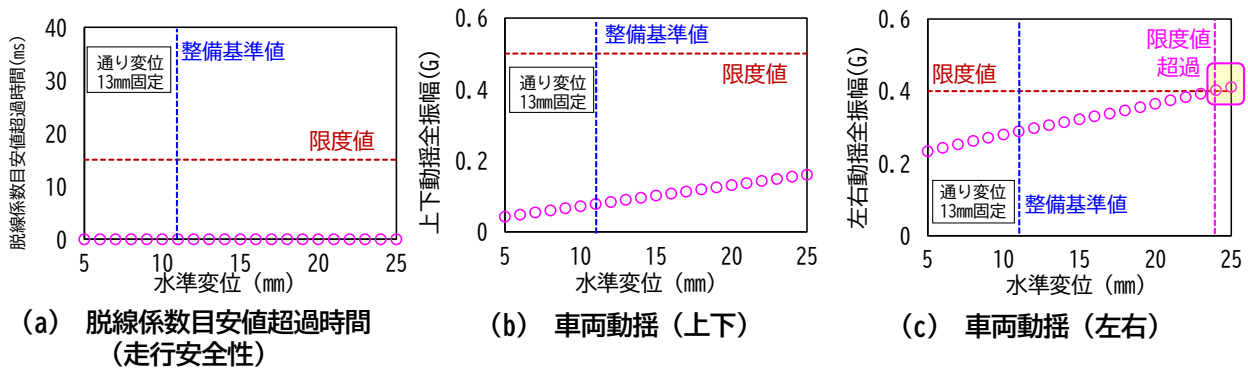


図10 複合的に発生する軌道変位が車両運動に与える影響の評価結果

10(a) については全ての条件において 0ms であった。車両上下動揺 (図 10(b)) については、水準変位の増加に伴い、増加傾向であったが水準変位が 25mm の場合でも 0.16G と限度値の 0.5G の 32%であり、十分に小さいものであった。車両左右動揺 (図 10(c)) については、水準変位が 24mm になった場合に 0.41G となり、限度値を超過する結果となった。これは、通り変位箇所的高速通過に伴い、車両が左右に振られた状態で水準変位箇所を通過し、さらに車両のローリングが重なることで、左右方向の動揺が増加するためと考えられる。ただし、一般分岐器における水準変位の整備基準値は 23mm であり、その値までは限度値内であることがわかった。

### 3.6 考察

本検討における評価結果の一覧を表 5 に示す。現行の整備基準値 (高低変位 13mm, 通り変位 13mm, 水準変位 11mm) 以下の場合においては、全ての評価項目で限度値を下回っており、分岐器部材の損傷および

表5 評価結果一覧

評価対象	評価項目	評価指標	評価結果			
			高低変位*	通り変位*	水準変位*	通り&水準変位**
分岐器部材	軌道部材	トゲール弾性部応力	超過なし	超過なし	超過なし	超過なし
		レール締結装置応力				
		ヒール部ボルト応力		振幅21mmで超過		
	信号部材	鎖錠かん変位	超過なし	振幅18mmで超過	超過なし	超過なし
		スイッチギア応力		超過なし		
		ポイント応力				
車両運動	走行安全性	脱線係数超過時間	超過なし	振幅18mmで超過	超過なし	超過なし
	車両動揺	上下動揺		超過なし		
		左右動揺		振幅22mmで超過		

\*：各軌道変位は振幅5～25mmの範囲で評価

\*\*：通り変位は13mmで、水準変位を5～25mmの間で変化させ、評価

車両運動に与える影響は小さいことがわかった。また、高低変位および水準変位については、整備基準値よりもさらに大きい25mmの場合でも、各評価項目の限度値を下回っており、影響は小さいことが確認された。一方、通り変位については、現行の整備基準値より5mm大きくなった18mmの場合に信号部材の鎖錠かん変位および走行安全性に関する脱線係数目安値超過時間が限度値を超過した。また、8mm大きくなった21mmの場合に軌道部材のヒール部ボルト応力が限度値を超過した。さらに、9mm大きくなった22mmの場合に車両の左右動揺が限度値を超過した。この結果を踏まえると、通り変位については、整備基準値より大きくなった場合に部材損傷や車両運動に影響を与えることから、現行の整備基準値以下で管理することが望ましいと考えられる。

また、軌道変位が複合的に発生する状況を想定し、通り変位を現行の整備基準値13mmで、水準変位を5mm～25mmの範囲で組み合わせた検討を行った結果、水準変位が24mmとなると車両の左右動揺が限度値を超過することが確認された。ただし、一般分岐器における水準変位の整備基準値である23mmまでは限度値を下回るものであった。また、その他の部材損傷や車両運動の項目においては、全ての条件で限度値を下回ることを確認した。

以上の結果を踏まえると、本研究で検討した条件下において、高速用分岐器における高低変位および水準変位の整備基準値は、高速用分岐器ではない一般分岐器の整備基準値と同じ23mmまで許容できるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、高速用分岐器における軌道変位が分岐器部材の損傷および車両運動に与える影響を評価することを目的に、分岐器走行シミュレーションモデルを構築した。さらに、構築したモデルを用いて軌道変位をパラメータとした分岐器走行シミュレーションを実施し、高速用分岐器における軌道変位が分岐器部材および車両運動に与える影響を定量的に評価した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 現行の高速用分岐器の整備基準値である高低変位13mm、通り変位13mm、水準変位11mm以下であれば、分岐器部材および車両運動に関する評価項目の限度値を下回ることを確認した。
- (2) 許容できる軌道変位の限度を確認するため、整備基準値よりも大きな値を設定した場合のケース

スタディを実施した。その結果、高低変位および水準変位に関しては、25mm の条件でも各評価項目の限度値を下回ることを確認した。一方、通り変位に関しては18mm 以上になると部材の応力や変位、車両運動に関する限度値の超過が確認された。

- (3) 通り変位と水準変位が逆位相で複合的に発生する軌道変位を想定し、通り変位は整備基準値の13mm に固定し、水準変位をパラメータとした走行解析を実施した。その結果、分岐器部材に関する評価項目、脱線係数目安値超過時間、車両上下動揺については、すべてのケースで限度値を下回ることを確認した。一方、水準変位が24mm 以上となる場合には、車両の左右動揺が限度値を超過することが確認された。
- (4) 以上の結果より、本研究にて検討した条件下において、通り変位は現行の整備基準値以下で管理することが望ましいものの、高低変位および水準変位の整備基準値は一般分岐器の整備基準値と同じ23mm まで許容しても問題ないことを確認した。

## 文 献

- 1) 日本鉄道技術協会：新しい軌道管理手法の研究，pp.89-93，1982
- 2) 塩田勝利，園田佳巨：高速用分岐器における軌道変位が軌道部材の損傷に与える影響の評価，第31回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2024），No. SS2-8-4，2024
- 3) 塩田勝利，宮下綾乃，園田佳巨：分岐器の高速通過時において軌道変位が車両運動に及ぼす影響に関する検討，鉄道工学シンポジウム論文集，第28巻，第1号，pp.108-115，2024
- 4) 鉄道総合技術研究所：在来鉄道運転速度向上マニュアル，pp.61-101，1993
- 5) 保線工学編集委員会編：保線工学（上），pp.383-386，2016
- 6) 石田弘明，松尾雅樹，藤岡健彦：鉄道車両の高周波，輪重変動下における走行安全性評価に関する研究，日本機械学会論文集（C編），第71巻，第702号，pp.454-461，2005
- 7) 塩田勝利，中橋順一：分岐器における軌道変位が走行安全性および軌道部材の強度に及ぼす影響の基礎検討，鉄道工学シンポジウム論文集，第27巻，第1号，pp.147-154，2023
- 8) 保線工学編集委員会編，保線工学（上），pp.206-208，2016
- 9) 塩田勝利，潮見俊輔，園田佳巨：高速用分岐器における軌道変位が分岐器部材の損傷に与える影響の検討，日本機械学会論文集，第94巻，第951号，2025