

分岐器と転てつ装置の運動解析による異物検知機能の評価手法

潮見 俊輔* 押味 良和* 沼田 紘司*

Evaluation Method of Object Detection Function by Means of the Dynamic Analysis of Turnouts and Switch Mechanisms

Shunsuke SHIOMI Yoshikazu OSHIMI Koji NUMATA

The object detection function of the turnout and the switch mechanism is one of the important functions for keeping the safety of the railway system. An object between a tongue rail and a stock rail on the turnout is detected by a lock mechanism of the switching machine and circuit controllers. So far, designers of the switch mechanism have checked their detecting function design by experiments, which have been the sole way to check it, using a real turnout and a switch mechanism. Therefore, the designing work of detection devices has a problem in that needs a large amount of time and money. To solve this problem, we developed a method of simulating the motion of tongue rails and switch mechanisms by means of flexible multi-body, so that we can estimate the output of the detectors when an object is inserted into the gap between the tongue rail and the stock rail. We confirmed that the method enabled us to estimate the gap of the rails and the outputs of the detectors by comparison between the simulation results and experiment results. Moreover, it was also confirmed by means of the method proposed, we could simulate the detection section, the data of which are necessary for deciding the positions and the number of detectors.

キーワード：転てつ装置，電気転てつ機，異物検知，鎖錠かん，接着照査器，マルチボディダイナミクス

1. はじめに

分岐器の可動部を動作，保持する信号設備である転てつ装置において，トングレール等の可動部と基本レールとの間に介在する一定以上の厚さの異物を検知する機能は重要な機能の一つである。この機能は，分岐器の設計要素である転てつ棒の位置や数量，転てつ装置の設計要素である異物検知装置の位置や数量，電気転てつ機のクラッチ特性の影響を受けることが経験的に知られていた。しかし，異物介在を検知する機能を確認する手段は現状では実機を用いた試験のみであるため，検証用の設備の試作や試験の実施等の必要がありコスト面に課題がある。

鉄道総研では，これまでに転てつ装置と分岐器の運動解析により，転換動作機能の評価に必要な分岐器転換負荷の推定手法を提案した¹⁾。また，分岐器に異物を介在させた状態を初期状態として，車輪を通過させたときのレールおよび車両の運動解析を行う手法の提案²⁾や，車両通過時の衝撃振動による転てつ付属装置の軸受け部の摩耗解析³⁾も行われている。しかし，異物介在による転てつ装置転換動作後のレールの変形量を推定する解析はこれまでに行われていない。

そこで，マルチボディダイナミクスを適用した分岐器および転てつ装置の運動解析により，異物介在による転

てつ装置動作後のレール変形量を推定する手法を開発した。本稿では，レール変形量を推定するために柔軟多体系 (Flexible multi-body system)⁴⁾を適用した運動モデルについて紹介し，これを用いた解析結果と実測結果の比較を示す。また，解析結果から転てつ装置の異物検知範囲や検知感度を推定する手法と，試算結果を紹介する。更に，提案手法を適用し，電気転てつ機のクラッチ特性や密着力の調整状態を例に，転てつ装置の設計や調整が異物検知性能に与える影響を試算した結果について紹介する。

2. 異物検知機能と従来の評価法

転てつ装置 (図1) は，分岐器が所定の開通方向にあり，かつ走行の支障となる異物がない状態であることを照査して連動装置に通知する機能を有する信号設備である。この機能は電気転てつ機の鎖錠かんが担い，その変位がロックピースと鎖錠かん切り欠きの寸法差 (最大 3.0mm) 以下であれば支障がないと判定する。また，高速走行を行う新幹線等では，回路制御器 (接着照査用) (以降，CC) を併用し，第1転てつ棒より後端側の異物に対しても異物検知を行う。異物検知機能を持つ装置の設置位置や設置数量は，トングレール先端から分岐器上の車両走行の安全性に基づき定められる任意の位置までの検知区間において，一定以上の厚さ (例えば 5mm 以上)

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

特集：信号通信技術

の異物が検知できるよう決定される。

異物検知機能に影響を与える分岐器や転てつ装置の構造変更にあたって、CCの配置や数量に対して所定の検知機能を有するか否かの検討は試験が唯一の手段である。一般的な実施手順を図2に示す。はじめに、任意の位置において評価用の異物を介在させ、介在時のレールの変形量の測定を繰り返し実施し、異物介在位置毎のレールの変形量とCCの検知出力を得る。次に、鎖錠かんとCCの検出範囲を得る。この結果に基づき、所定の検出区間の任意の位置で、CCや鎖錠かんに5mm以上の異物を検出できることを確認する。従来の実験的な評価法では、製作と試験が必要である。そのため、設計段階では異物検知範囲を評価できず、転てつ装置の新規設計の難易度を高め、検証コストを必要としていることが課題であった。

3. 転てつ装置と分岐器の運動のモデル化

3.1 分岐器の変形

弾性分岐器のトングレールは、リード側の端部が締結装置により固定される一方、先端側では転てつ棒が電気転てつ機の動作かんにより、まくらぎと平行する方向に強制変位を受ける構造である。先端部から後端部に向かって断面二次モーメントが増加するが、転換動作時には固定端から先端側の全体で変形する。

トングレールの断面に着目すると、上部（頭頂部）が基本レールと接し、腹部および底部は基本レールとの間に空間を有する。異物を上部に介在させた場合、非介在

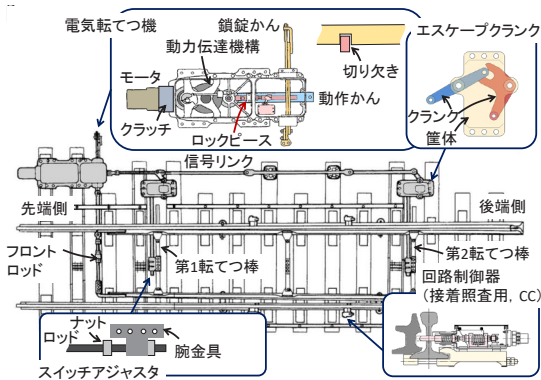


図1 転てつ装置と分岐器（新幹線用）

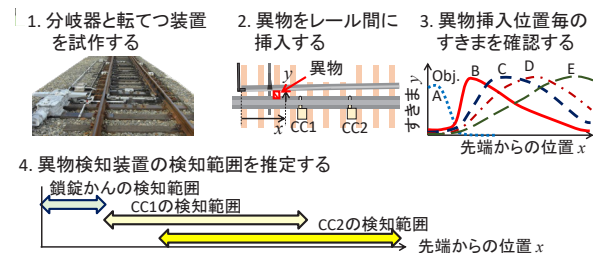


図2 異物検知装置の配置検討手順の一例

時を基準とするトングレール上部の変形量は腹部に比べて大きく、かつ、異物介在位置に近いほど頭部が軌道中心側に向かい傾くことが実験により確認された（図3）。

異物の介在に伴う検知性能の評価は、特に異物検知装置から離れた位置に介在する異物に対する出力の評価が重要であるが、この位置関係においてはトングレール頭部と腹部の変形量の差が小さい傾向があることが確認された。本研究ではこれに着目し、トングレールの変形について断面方向の変形を考慮しない、分岐器を上部から俯瞰した2次元平面上の問題として扱うこととした。これにより、設計評価に用いる上で必要な計算時間の短縮を目指した。

3.2 トングレールの2次元柔軟多体モデル

トングレールの変形について、変位を算出する節点(Node)の間を短い弾性梁要素(Body)でつなぎ合わせて構成した、柔軟多体系(Flexible multi-body system)としてモデル化した(図4)。2本のトングレールを接続する、フロントロッドや転てつ棒は接続する節点相互の加速度が等しいという拘束条件を仮定して扱った。柔軟多体系の運動方程式は浮動基準法、増分有限要素法、絶対節点座標法(ANC法)があるが、本研究では、既存の転換鎖錠装置の運動解析¹⁾に適用した拡大法の運動方程式との連成が容易なANC法を採用した。ANC法によるレールの節点加速度ベクトル \dot{q}_i は式(1)により示される。

$$M_i \dot{q}_i = Q_{fi} - (Q_{pi} + Q_{ri}) \quad (1)$$

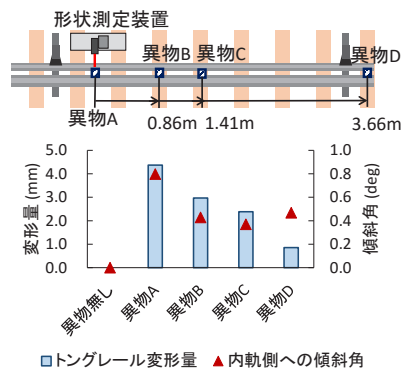


図3 異物介在時のトングレール変形量と傾斜角

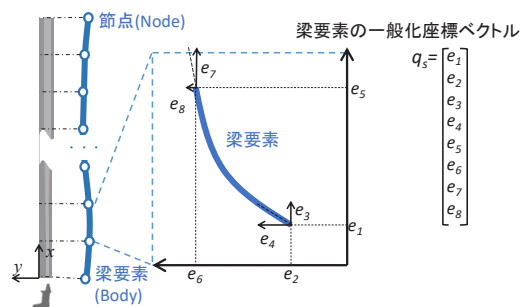


図4 トングレールの2次元柔軟多体モデル

ここで、 M_i は慣性マトリクスである。 Q_{fi} は外力、 Q_{li} は梁要素の伸び変形の剛性マトリクス、 Q_{li} は梁要素の曲げ変形の剛性マトリクスである。剛性マトリクスは、変形が微小と仮定し、軸方向と曲げ方向のひずみエネルギーの式をそれぞれ節点座標ベクトルで偏微分して導出する方法を適用した⁴⁾。各マトリクスは、単位長さあたりのレール重量、断面積、断面二次モーメントなどの設計図から得られるパラメータと、梁要素の初期長、現在のタイムステップの梁要素の現在長により得られる。

3.3 トングレールに作用する外力

トングレールに作用する外力は、床板との間に作用する摩擦力と、基本レールと接触した場合に作用する接触力の2つである。これらは、床板や基本レールと接する節点に運動方程式の外力項として付与している。摩擦力は、スティックスリップを防ぐため図5に示すモデルを適用し、一定以下の速度の場合の摩擦力は、速度に対して比例すると仮定した。接触力の算出にはペナルティ法を適用し、トングレールの節点の基本レールまたは挿入した異物の内側に侵入した場合に、節点を表面上に押し出すための反力を侵入深さに比例するばね力として与えた(図6)。トングレールと基本レールとの間には、異物介在時には数kN～10kN程度の接触力が作用することが想定されるため、侵入量がレールの変形状態に与える影響が小さくなるようにばね定数の設定を行った。ただし、ばね定数と積分計算のステップ時間はトレードオフの関係があることを踏まえ、異物の挿入箇所以外では高い接触力が作用した場合には誤差の発生を許容する設定を行った。

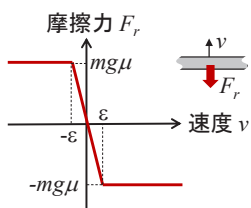


図5 トングレールに作用する摩擦力のモデル

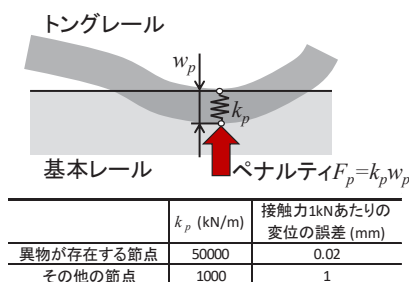


図6 基本レールとトングレールの接触力のモデル

3.4 転てつ装置の運動方程式

転てつ装置については、既存の運動解析用のモデルを適用した¹⁾。信号リンクやスイッチアジャスタロッドなど、弾性変形の影響が無視できない用品については減衰性能を弾性体として定義し、外力項にその作用を定義した。

また、動作かんを駆動させる電気転てつ機は、異物介在等により動作が妨害された場合に、モータや動力伝達機構、スイッチアジャスタ等を保護するため、すべりを生じてトルクの伝達を制限するクラッチを内蔵している。本研究では、スイッチアジャスタから転てつ棒に作用する外力 F_{sa} について、スイッチアジャスタの弾性変形力 F'_{sa} がクラッチのすべりを模擬した限度値 F_{max} を超過する場合に限度値 F_{max} に制限することで、クラッチによるすべりを模擬した(図7)。電気転てつ機内部の動力伝達機構の種類によって F_{max} の特性は異なる。以下、カム機構の特性モデルA、直動機構の特性をモデルB、クラッチがない場合の特性をモデルCとする。

4. 異物検知性能の評価

4.1 評価手順

転てつ装置および分岐器の運動方程式を用いて、電気転てつ機の動作かんの動作を強制変位として入力したときの転換鎖錠装置とトングレールの動作を計算し、転換終了時のトングレール変形量を得た。手順を図8に示す。分岐器の各部寸法や異物の介在位置、転換鎖錠装置の構成をモデルに対する入力としている。計算条件を表1に示す。基準線側開通から分岐線側開通に転換する片道転換を含む8秒間を計算時間とし、分岐器や転換鎖錠装置の設計図から得たパラメータと、異物の挿入位置および厚さを入力として与えた。

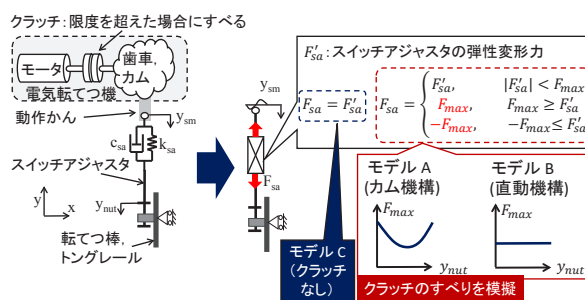


図7 伝達機構の簡易モデル

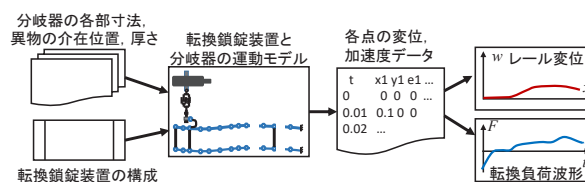


図8 トングレール変形量の計算手順

特集：信号通信技術

異物挿入条件毎の電気転てつ機の鎖錠かんやCCの検知出力と、検知装置の出力が一定以上となる介在位置(検知範囲)は、図9に示す手順により、異物介在位置毎のレール変形量の計算結果と異物検知装置の設置位置を入力として算出した。

4.2 異物介在時の変形量の推定と実測との比較

在来線12番弾性分岐器(351形式、左分岐)を対象として、右側トングレールと基本レールの間の3箇所(トングレール先端、先端から0.8m地点、先端から2.0m地点)のうち1箇所に、5mm厚の異物を介在させた場合のトングレール変形量を計算した。また、鉄道総研所内の同一形式の分岐器を用いて、同一の条件で介在させた場合のトングレール基本レール間のすきまの測定を行った。トングレール変形量をトングレールと基本レール間のすきまとして示した計算および実験結果を図10に示す。

トングレール先端に異物を挿入した場合、実験で使用したNS形電気転てつ機と同様のカム機構の特性を模擬した計算結果が、最も実験結果と一致した。また、トングレールから2.0m付近に異物を挿入した場合のクラッチ特性の違いによるレール変形量の差異は小さいことを確認した。

また、転てつ棒に近い0.8m地点に異物を介在させた場合は、クラッチの特性より得られる変形量が異なる計算結果となった。ストローク終端のすべりトルクが低い直動機構や、カム機構の場合でもクラッチのトルクを低く設定した場合は、実験結果に近い結果が得られた。これは、クラッチのすべりの影響によると推定する。

以上より、提案する手法により異物介在時のトングレール変形量が得られることを確認した。また、レール変形量は電気転てつ機のクラッチや転換機構の特性により影響を受け、特にクラッチの滑りが発生する転てつ棒付近に異物が介在した場合はこれらの特性の影響が大きいが示された。

表1 計算条件

名称	単位	値
積分ステップ時間	(μ s)	2.0
シミュレーション時間	(s)	8.0
トングレール長	(m)	9.4
トングレール重量	(kg/m)	70.0
微少梁分割数	(個)	47
断面積	(m^2)	0.0057 ~ 0.0092
縦弾性係数	(GPa)	206
スイッチアジャスタ弾性係数	(kN/mm)	2.0
スイッチアジャスタ減衰係数	(N·s/m)	200.0
腕金具接触ペナルティ	(kN/mm)	200.0

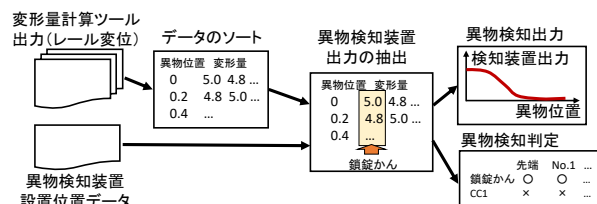


図9 異物介在位置の計算手順

4.3 異物検知範囲の推定

4.2節と同様の分岐器を対象として、5mm厚の異物挿入位置に対する電気転てつ機の鎖錠かん、およびトングレール先端から3.0m地点にCCを設置した場合の検知出力の計算結果と、同箇所のレール間すきまと異物介在位置の関係についての試験結果を図11に示す。試験で用いたNS-A形電気転てつ機と同一のカム機構の転換機構のモデル(モデルA)で、クラッチのすべりトルクに相当する転換歯車の最大トルクを0.2kN·mに設定した場合の計算結果は、実測値に対して概ね一致する結果が得られた。一方、転換歯車の最大トルクを0.36kN·mに設定した場合の計算結果は、転てつ棒付近に異物を挿入した場合において、実験結果との乖離が認められた。

実際の転換鎖錠装置の設計では、CCは転てつ棒に近い位置に設けられる事例が多い。そのため、検知範囲の

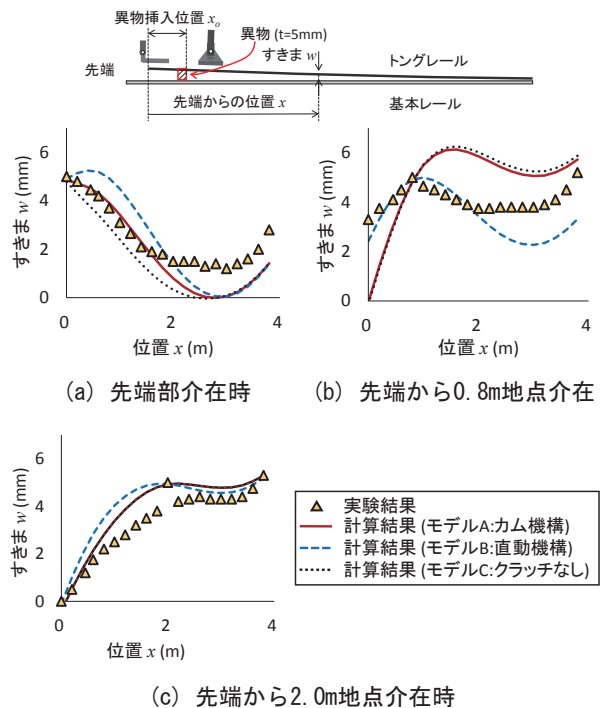


図10 異物介在時のトングレール基本レール間すきま

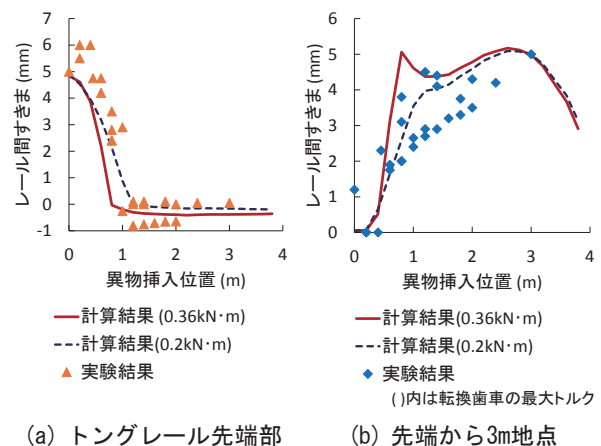


図11 レール間のすきまと異物介在位置

評価では、転てつ棒から遠い地点での異物検知が可能か、また、隣接する2台のCCが共に検知する区間が存在するかが重要となることが多い。したがって、実用上、提案手法は異物検知装置の配置に対して評価可能と考える。ただし、CCを転てつ棒から遠い箇所に設ける場合の結果については、適用するクラッチの特性に影響を受けることに留意する必要がある。

また、提案手法を用いて異物検知範囲が連続する条件下で検知区間が最長となる箇所を総当たり式に試算した結果を図12に示す。試算では鎖錠かんに加えて、トングレール先端から2.0m地点にCCを設けることで、トングレール先端から2.8m地点までに介在する5mm以上の異物を検知できる結果が得られた。なお、計算の所要時間と実験時間を同条件（異物検知装置を10回移設し、25箇所に異物を介在させた場合）で比較した結果を表2に示す。試算は、実験のための試作に要する時間を除いた結果であるにも関わらず、提案手法による検証時間は実験的手法に比べて約40%短縮できる結果が得られた。

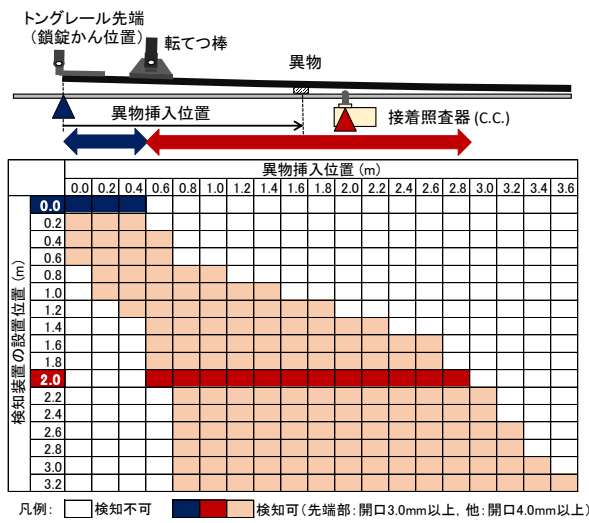


図12 異物検知装置の設置位置と検知範囲

表2 異物検知範囲の推定所要時間

提案手法	所要時間 (min)	回数 (回)
データ作成	80	1
変形量計算	17	25
配置支援計算	1	1
合計	506	
試験による検証	所要時間 (min)	回数 (回)
測定準備	180	1
位置変更	15	10
転換試験、測定	2	250
合計	830	

5. 設計および調整が検知機能に与える影響

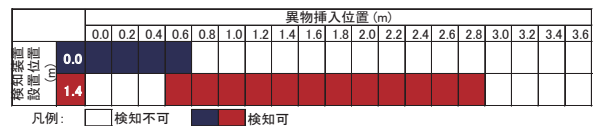
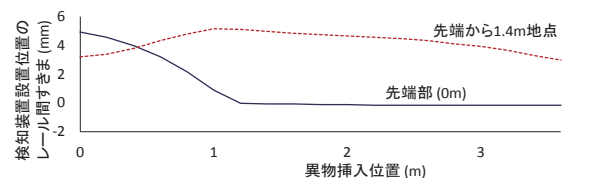
5.1 クラッチトルク特性の影響推定

電気転てつ機のクラッチのすべりトルクは、クラッチのトルク伝達の方式（摩擦力、電磁力等）や設定（摩擦

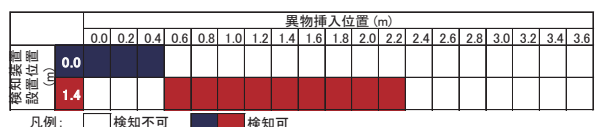
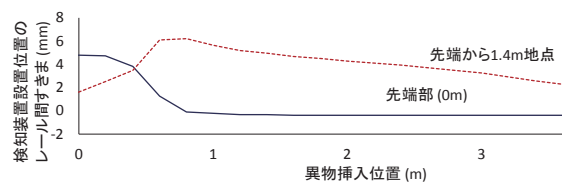
板の面圧）等によって異なる。特に在来線用電気転てつ機では、トングレール先端から転てつ棒までの区間で異物を検知することが必要とされるため、新たなクラッチを設計する場面においては検知性能を確認することが重要である。提案手法を用い、転換機構とクラッチのすべりトルクの設定を変化させた場合の異物検知範囲への影響について推定した。

モデルA（カム機構）についてすべりトルクに対応した外力の限度値 F_{max} を設定し、トングレール先端部に鎖錠かんを、トングレール先端から1.4m地点に接着照査器を設置した場合の異物検知範囲を計算した。計算結果を図13に示す。トングレール先端部については、設定したすべりトルクの設定にかかわらず、転てつ棒付近までに介在した異物に対してトングレールの開口量が3.0mm以上となることが示された。したがって、先端から転てつ棒位置（先端から0.4m）までの範囲の異物検知に対しては、設定した何れのトルクにおいても検出可能である結果が示された。また、先端から1.4m地点に設置したCCについては、すべりトルクを低く設定した場合に異物検知範囲が長くなる傾向が示された。一方、異物介在時のスイッチアジャスタ部に作用する密着力の推定結果は、表3に示すようにクラッチのすべりトルクが大きいものは介在時の力が強いことが示された。

電気転てつ機のクラッチのすべりトルクは、最大転換力にも影響するため、一概に低く設定することが適正とは言いがたい。しかし、すべりトルクの設定は異物検知



(a) 転換歯車トルク 200N·m



(b) 転換歯車トルク 500N·m

図13 転換機構およびクラッチ特性と異物検知範囲

特集：信号通信技術

性能に影響を与えることに加えて、異物存在時の力や、スイッチアジャスタ等の付属装置の応力に影響を与えることが本結果からもわかる。したがって、電気転てつ機のクラッチの特性変更にあたっては、これらに対する影響を確認することが重要といえる。

5.2 密着力の影響推定

トンダレールを基本レールに接するためにトンダレールに作用させる密着力は、スイッチアジャスタのナットの位置により調整される。この調整位置が異物検知性能に与える影響を、提案手法を用いて検討した。

在来線用関節分岐器において、ナットの調整により設定した密着力に対する異物検知範囲の試算結果を表4に示す。異物存在によりクラッチにすべりが発生する場合は、密着力の設定状態にかかわらず、スイッチアジャスタからトンダレールに作用する力は変わらない。そのため、異物存在時のレール間のすきまに密着力の設定状態が影響しないことが示された。また、クラッチのすべりが発生しない状態においては、密着力の増加に伴い、転てつ棒位置のすきまが縮小する傾向が認められた。しかし、異物検知装置の出力に注目すると、転てつ棒より後端側に異物を存在させた場合に鎖錠かんにより検知ができない点で相違はない。したがって、密着力が異物検知性能に与える影響は少ないため、高い密着力の設定が検知性能の向上につながらないこと、ひいては安全性向上には繋がらないことが示された。加えて、一般的に高密着力の状態は、電気転てつ機内部の摩耗や付属装置類への高い応力の作用など、耐久性に関して悪影響を与えることから、この観点からも高密着力での使用は望ましい状態であるとはいいがたい。

表3 異物存在時の密着力とクラッチ特性

すべりトルク (転換歯車トルク) (N・m)	100	200	300	356	500
転てつ棒異物存在時の 密着力の推定値 (kN)	2.19	4.39	6.58	7.86	11.0

表4 異物検知性能に対する密着力の影響(試算)

異物検知装置 設置位置	密着力 (相対)	異物存在位置			
		先端	転てつ棒	転てつ棒 付近(後端)	後端 遠方
トンダレール 先端	高	+	+	-	-
	低	+	+	-	-
転てつ棒 後端側(2.0m)	高	-	-	++	+
	低	--	-	+	+

検知可能：+, ++ (検知出力が相対的に大)

検知不能：-, -- (出力が相対的に小)

6. おわりに

本稿では、マルチボディダイナミクスを適用した分岐器および転てつ装置の運動解析により、転てつ装置の動作後に存在する異物によるレール変形量を推定する手法と、これを適用した異物検知性能の評価手法について述べた。提案手法は、原理上、異物を存在させた位置に近い箇所のレール変形量には課題があるが、評価において必要とされる、異物検知装置から離れた位置におけるレール変形量と、異物存在時の検知出力の推定には適用可能であることを確認した。

また、異物検知装置の設置位置の検討のほか、クラッチの特性や密着力等の調整状態が異物検知性能に与える影響の推定に適用できることを示した。

今後は、電気転てつ機のモータの負荷に対する電気的特性を含めた総合的な分岐器-転てつ装置系のモデリング環境を構築し、状態監視データからの状態推定や転てつ装置の設計評価への展開を図る。

文献

- 1) 潮見 俊輔, 五十嵐 義信: マルチボディダイナミクスを用いた新幹線用転換鎖錠装置の転換負荷力解析, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, Vol. 19, pp.239-242, 2010
- 2) 塩田 勝利, 及川 祐也, 清水 紗希: 分岐器ポイント部の異物存在時におけるトンダレールの変形状予測について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 71, pp.639-640, 2016
- 3) 近藤 祐樹, 島本 琢磨, 波田野 明日可, 泉 聡志, 酒井 信介, 樋口 博俊, 鈴木 雅彦, 加藤 尚志: 車両通過時の衝撃振動による分岐器のフロントロッド摩耗予測のための有限要素モデリング, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 832, 2015
- 4) 日本機械学会 編: マルチボディダイナミクス (2) - 数値解析と実際 -, コロナ社, 2007