# 卒業論文

# <u>鉄道特殊分岐器の有限要素法による</u> <u>衝撃振動解析</u>



# 目次

目次	•••••		2
図目次	•••••		4
表目次	•••••		6
第1章	戶	序論	7
1.1	研究	帘背景	7
1.2	先行	亍研究 [1]	8
1.3	研究	笼目的	9
1.4	本諸	倫文の構成	9
第2章	£	鉄道分岐器について	10
2.1	緒言	言	. 10
<b>2.2</b>	分岐	支器[2]	. 11
2.3	分岐	支器の種類 [2]	. 12
2.3	.1	普通分岐器	.12
2.3	.2	特殊分岐器	.13
2.4	分岐	皮方式 [2]	, 15
2.4	.1	関節方式	.15
2.4	.2	弹性方式	.15
2.5	転て	てつ装置の仕組み [4]	. 16
2.5	.1	電気転てつ機	.16
2.5	.2	トングレール	.17
2.5	.3	スイッチアジャスタ	.18
2.5	.4	フロントロッド	.18
2.6	ダフ	ブルスリップスイッチについて [5]	. 19
2.7	考察	×	. 21
第3章	有	<b>有限要素法モデリング</b>	22
<b>3.1</b>	緒言	言	. 22
3.2	モラ	デリング方針と境界条件	. 23
3.2	.1	対象分岐器とモデリング方針	.23
3.2	.2	各継目通過時のフロントロッドに与える影響の予測	.26
3.2	.3	後端部モデリング	.28
3.2	.4	密着側トングレールモデリング	.29
3.2	.5	非密着側トングレールモデリング	.31
3.2	.6	接続かんおよびスイッチアジャスタのモデリング	.32
3.2	.7	軸受部モデリング	.33

3.3	荷重	意条件	34
3.3.	.1	入力位置	.34
3.3.	.2	入力波形	.35
3.4	解机	行条件表	36
第4章	角	释析結果	38
4.1	緒言		38
4.2	比較	交対象の分岐器 [1]	39
4.3	直進	進方向通過時の衝撃応答解析	39
4.3.	.1	直進方向通過時の計測位置	.39
4.3.	.2	後端部鉛直方向加速度	.40
4.3.	.3	肘金部加速度	.41
4.3.	.4	フロントロッド軸力	.43
4.4	分屿	とち向通過時の衝撃応答解析	44
4.4.	.1	分岐方向通過時の計測位置	.44
4.4.	.2	後端部鉛直方向加速度	.44
4.4.	.3	肘金部加速度	.45
4.4.	.4	フロントロッド軸力	.47
4.5	軸受	そ部における力学的特性	47
4.6	考察	<u>z</u>	49
第5章	糸	古論	51
5.1	結論	کر ہے۔ م	51
5.2	課題	見と今後必要になるデータおよび実験	51
参考文i	献…		52
謝辞	•••••	エラー! ブックマークが定義されていません	· 0

# 図目次

図 2.1	分岐器全体図	.11
図 2.2	普通分岐器の種類 [3]	13
図 2.3	特殊分岐器の種類 [3]	14
図 2.4	トングレール継目(関節方式)	15
図 2.5	転てつ装置全体図	16
図 2.6	電気転てつ機	17
図 2.7	ロックピース	17
図 2.8	トングレール	18
図 2.9	スイッチアジャスタ	18
図 2.10	) B721 型フロントロッド	19
図 2.11	シングルスリップスイッチ各部の名称 [5]	20
図 2.12	タブルスリップスイッチの位置関係	20
図 2.13	; ダブルスリップスイッチの動作パターン [5]	21
図 3.1	分岐器モデリング範囲概略図	24
図 3.2	解析モデル全体図(上面図)	24
図 3.3	解析モデル全体図(アイソメ図)	25
図 3.4	フロントロッド周辺図	25
図 3.5	直進方向通過時の継目通過	26
図 3.6	分岐方向通過時の継目通過	. 27
図 3.7	後端部モデリング	. 29
図 3.8	トングレールと基本レールの密着 [1]	30
図 3.9	枕木接触部モデリング	30
図 3.10	) 基本レール接触モデリング	31
図 3.11	ボールベアリング	31
図 3.12	ボールベアリングのモデリング	32
図 3.13	: 接続かんおよびスイッチアジャスタのモデリング	33
図 3.14	肘金部接続部分モデリング	33
図 3.15	6 後端部継目の位置	34
図 3.16	<b>6</b> 荷重入力位置	35
図 3.17	'荷重入力波形	36
図 4.1	直進方向通過時計測位置	40
図 4.2	後端部鉛直方向加速度(直進方向通過時)	41
図 4.3	直進方向通過時肘金部鉛直方向加速度	42

4.4	直進方向通過時肘金部軌間内外方向加速度	42
4.5	フロントロッド軸力(直進方向通過時)	43
4.6	分岐方向通過時の計測位置	44
4.7	後端部鉛直方向加速度(分岐方向通過時)	45
4.8	分岐方向通過時肘金部鉛直方向加速度	46
4.9	分岐方向通過時肘金部軌間内外方向加速度	46
4.10	フロントロッド軸力(分岐方向通過時)	47
4.11	軸受部分拡大図	48
4.12	軸受部すべり速度	48
4.13	軸受の面圧	49
4.14	PV 值	49
	$\begin{array}{c} 4.4 \\ 4.5 \\ 4.6 \\ 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \\ 4.13 \\ 4.14 \end{array}$	<ul> <li>4.4 直進方向通過時肘金部軌間内外方向加速度</li> <li>4.5 フロントロッド軸力(直進方向通過時)</li> <li>4.6 分岐方向通過時の計測位置</li></ul>

# 表目次

表 3.1	モデリング対象分岐器条件表	23
表 3.2	直進方向通過時に通過する継目・乗り移り	26
表 3.3	分岐方向通過時に通過する継目・乗り移り	28
表 3.4	解析条件表	37
表 3.5	ばね物性値	37
表 4.1	比較対象分岐器の概要	39

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

鉄道では列車の進路を変更するために分岐器を使用している.分岐器では、トングレール という可動レールを動かすことで列車の進行方向を決定している.トングレールを動かす 機構を転てつ装置と呼ぶ.転てつ装置が転換不能となった場合、設置されている路線の遅延 や運行中止といった大きな影響を与えることになってしまう.

転てつ装置には、左右トングレール先端部を結ぶフロントロッドと呼ばれる部品が取り 付けられている.分岐器を列車が通過する際に振動が生じ、この振動がトングレールを伝わ ることでフロントロッドの接続部分に用いられている軸受の摩耗を引き起こして転換不能 につながる.

そのため、フロントロッドを含む転てつ装置は定期的に点検・交換が行われてきているが、 その交換周期は明確な根拠に基づいたものではない.最適でない周期で交換されると、交換 基準に達していない部品も交換され、コスト面などでのデメリットが生じてしまう可能性 がある.そこで軸受摩耗量などの実測データに基づいた交換周期を提言する必要がある.

これまでに、普通分岐器において衝撃応答特性を再現した CAE モデルによるフロントロ ッド接続軸受の許容摩耗量に達するまでの日数を算出する手法が提言された[1]. しかし、 普通分岐器に比べて構造が複雑な特殊分岐器においては、軸受摩耗に寄与する衝撃振動の 発生位置と影響を受ける軸受の対応関係、および衝撃応答特性は解明されていない. そこで、 特殊分岐器各所の列車通過時の振動を実測するとともに、先行研究のモデリングを応用し て実測での衝撃応答特性を再現した特殊分岐器の CAE モデルを作成する. そして、衝撃振 動の発生位置に応じた衝撃応答解析を行うことで、特殊分岐器の軸受摩耗に関する定量的 な把握が可能になると考えられる. さらに、列車や軌道の状態など様々な状況に対してこれ らの手法を応用していくことで、様々な種類・条件の分岐器に対して最適な保守計画が提言 できる.

## 1.2 先行研究 [1]

2014 年度における近藤の先行研究 [1]では,普通分岐器の軸受摩耗量の予測に必要な軸 受の物性値および衝撃入力時の応答を把握するために,有限要素法を用いて分岐器モデル の衝撃応答解析や軸受摩耗試験を模擬した解析を行い,許容摩耗量に達する年数算出手法 を提言した.近藤の研究について,その内容を以下に示す.

B821型フロントロッドを用いた 12番分岐器を対象に FEM モデルを作成し,列車振動 を模擬した入力に対する衝撃応答解析を行った.トングレール後端部,フロントロッド肘金 部,フロントロッド軸力に対して解析結果と実測結果の比較を行い,モデリングの妥当性が あることを確認した.このモデルを使用し,衝撃が入力された際のフロントロッド接続軸受 に発生する面圧とすべり速度を算出した.

フロントロッド接続軸受に使用されている型の軸受に,荷重をかけつつ繰り返し回転を 与える摩耗試験をおこない,摩耗量を計測した.また,摩耗試験を模擬した解析を行い,試 験時に軸受に発生する面圧とすべり速度を算出した.これら3つの値からホルムの摩耗式 を参考に軸受の比摩耗量を算出した.

分岐器に衝撃が入力された際のフロントロッド接続軸受に発生する面圧・すべり速度と 軸受の比摩耗量を用いて,衝撃振動1回当たりの軸受の摩耗量を算出した.さらに,1日当 たりの通過列車の本数・両数を考慮することで,軸受の許容摩耗量到達に達するまでの年数 を算出した.

この研究の課題として以下のものが挙げられた.

フロントロッド軸力の低周波振動が再現できず,摩耗量が小さく見積もられている可能 性がある.

衝撃振動部での振動波形は枕木などを模すために使用した代替要素の物性値などのフィ ッティングにより良く再現できたが、これは対象とした分岐器モデルにのみ適用できる値 であり、他の分岐器に応用できるかは未知数である.

許容摩耗量到達年数に対し現行の交換周期は過剰に安全側に設定されているという結論 を得られたものの,実際には安全側に見積もられていると考えられた交換周期に達する前 に許容摩耗量到達につながった事例も存在した.現在確認されているこのような事例にお いて,どのような現場調整状態であったのか,どの箇所の状態が影響を及ぼすのかについて 詳しく考察する必要がある.

### 1.3 研究目的

先行研究により、フロントロッド接続軸受の摩耗に着目した普通分岐器のフロントロッド交換周期の算出手法が提言された.本研究では、特殊分岐器の中でもダブルスリップスイッチと呼ばれる分岐器に着目し、先行研究で提言された手法をダブルスリップスイッチにも応用できる CAE モデルを構築すること、また実測に先立ち、計測に必要な箇所の検討を行うことを目的とする.

そして、将来的にはダブルスリップスイッチを列車が通過する際に生じる衝撃により引き起こされる振動波形を測定する.そして、衝撃が発生する位置と影響を受けるフロントロッド軸受の関係について調べるとともに、実測波形と解析波形を比較し実機の衝撃応答特性を再現できるようにモデルの修正を行う.そして、普通分岐器に対して行われた劣化予測手法を行い、ダブルスリップスイッチの最適な保全計画を作成することを目標とする.さらに、この手法を応用していくことで、あらゆる実在の分岐器の最適保全計画を作成することをJR 東日本との共同研究の最終目標とする.

#### **1.4** 本論文の構成

第1章では研究の背景および目的について述べた.
第2章では鉄道分岐器の機構について説明する.
第3章では分岐器の有限要素法モデリング方針を述べる.
第4章では解析結果を示す.
第5章では本研究の結論と今後の展望を述べる.

# 第2章 鉄道分岐器について

## 2.1 緒言

フロントロッドの振動の特性・軸受摩耗の要因を理解するために,分岐器および転てつ装置を理解する必要がある.本章では,分岐器および転てつ装置の仕組みと用語について述べる.

## 2.2 分岐器 [2]

可動レールを用いて線路を分岐させて,列車の進路を変更させる機構を分岐器と呼ぶ.分岐器はポイント部,リード部,クロッシング部の3つの部分から構成されている.分岐器の 全体図を図2.1に示す.

ポイント部とは、トングレールが基本レールに接する部分を表す.クロッシング部とは、 レールが交差する部分を表す.

クロッシング部とは、レールが交差する部分を表す.分岐器の構造上、レールが分断されるため、車輪が進路と異なるレールに乗り上げないようにガードレールが設置されている.

リード部とはポイント部とクロッシング部をつなぐ部分を表す.



図 2.1 分岐器全体図

分岐器には定位と反位と呼ばれる状態が存在する.定位とは通常時に列車を進入させる 方向へ開通している状態で,反位とは定位以外の方向へ列車を進入させる状態である.通常 時に列車を進入させる方向は分岐器ごとに決められている.

## 2.3 分岐器の種類 [2]

分岐器は普通分岐器と特殊分岐器の2種類が存在する. それらについて説明する.

#### 2.3.1 普通分岐器

普通分岐器は鉄道において最も多用されている分岐器である.1本の軌道から2本の軌道 へと分岐させる機構を持っており、その形状や寸法が規格化されている.形状については、 一方の軌道が直線でもう一方の軌道が曲線である片開き分岐器、両方の軌道が左右対称の 曲線として分岐していく両開き分岐器などが存在する.

分岐器の2つの進路の開き具合を番数で表す.例えば、定位と反位の軌道がトングレール先端より10m進んだ位置において1m離れる分岐器のことを10番分岐器と呼ぶ.

普通分岐器は規格化されているために、大量生産やメンテナンスが容易でありコストを
 抑えることができる、という利点がある。一方で、形状や寸法が規格化されたものしかない
 ため、用地の制約や特殊な分岐条件が必要な場所には設置できない、という欠点が存在する。
 普通分岐器の代表的なものを図 2.2 に示す。



図 2.2 普通分岐器の種類 [3]

#### 2.3.2 特殊分岐器

特殊分岐器とは、2 つだけでなく多くの進路を設定できるほか、様々な用途に合わせて用いられている分岐器である.設置場所によって形状や寸法などが異なり、規格化されていないために、用地に合わせた寸法や形状を取ることができるので、用地を有効利用できるほか、普通分岐器では対応できない線路構造の部分にも設置が可能である.

一方で,可動部分が多いために継目や接続個所が多く,耐久力が落ちるため交換頻度が増 やす必要があり,また部品が規格化されていないためにコストが増加してしまうという問 題点が存在する.

特殊分岐器は用途次第で形状が異なるために様々な種類が存在するが、代表的なものを 図 2.3 に示す.



図 2.3 特殊分岐器の種類 [3]

## 2.4 分岐方式 [2]

分岐器におけるトングレールとリードレール間の接続方法は大きく分けて関節方式と弾性方式の2種類がある.

#### 2.4.1 関節方式

関節方式とは、トングレールとリードレールが分割されており、図 2.4 に示されるトング レールがリードレールとの継目を中心に回転することで分岐器の転換が行われる方式のこ とである.転換や列車通過による継目部分での損傷や、列車が継目を通過する際に発生する 振動や騒音が問題となる.



図 2.4 トングレール継目 (関節方式)

#### 2.4.2 弾性方式

弾性方式とは、トングレールとリードレールが連続しており、トングレールをたわませる ことにより先端側を移動させるという方法で転換が行われるという方式である.いわゆる 分岐器用ロングレールであり、継目が存在しないために関節方式に比べて損傷や列車通過 時の騒音が抑えられる.一方で、転換の際にたわませるための大きな負荷がトングレールに かかるという問題もある.

## 2.5 転てつ装置の仕組み [4]

分岐器内の,トングレールを転換することで左右どちらかの基本レールに密着させる装置と,その状態を保持する鎖錠装置のことを総称して転てつ装置と呼ぶ.レールの転換には 非常に大きな力が必要となるので,動力を使用して分岐器を転換するための装置である.こ こで,これらの機能を理解するために一般的な片開き普通分岐器の全体図を図 2.5 に示し, 転てつ装置内の各装置の役割を述べる.



図 2.5 転てつ装置全体図

#### 2.5.1 電気転てつ機

図 2.6 に示す電気転てつ機は、電気の力で分岐器を転換するもので、ほとんどの分岐器に おいて用いられている.転換する際は、動作かんと呼ばれる機器を介してスイッチアジャス タに動力が伝えられる.転換終了後にフロントロッドから延びる接続かんと呼ばれる部品 から鎖錠かんと呼ばれる機器を介して位置情報が送られ、電気転てつ機内部においてロッ クピース(図 2.7)が鎖錠かんの切り欠きにはまることで転換が正常に完了したと判断され る.



図 2.6 電気転てつ機



図 2.7 ロックピース

#### 2.5.2 トングレール

トングレールとは、分岐器内のレールのうち転換を行うために可動となっている部分で ある(図 2.8).後端部が固定されており、先端部に次節以降で説明するスイッチアジャスタ やフロントロッドが取り付けられている。後端部から先端部まで連続的に変化しているの で、基本レールとの滑らかな車輪の受け渡しができる形状となっている。転換時以外は、片 側のレールは電気転てつ機によって基本レールに密着される力が加えられて固定されてい る状態となる.



図 2.8 トングレール

#### 2.5.3 スイッチアジャスタ

スイッチアジャスタとは、図 2.9 において左手から延びる棒によって電気転てつ機からの 移動および固定のための動力をトングレールに伝える装置である.



図 2.9 スイッチアジャスタ

#### 2.5.4 フロントロッド

フロントロッドとは、トングレールの先端部に設置され、接続かんを介して位置情報を電 気転てつ機に送るための機器である.電気転てつ機からの動力をトングレールに伝えるも のがスイッチアジャスタであるのに対し、フロントロッドはトングレールに合わせて動き、 電気転てつ機内で物理的に位置の照査を行うだけなので、動力は伝達しない.

接続かんの位置が適切でないと、ロックピースが切り欠きにはまらないので転換完了と 判断できず信号が切り替わらない. 接続かんの位置はフロントロッドの位置で定まるため, フロントロッドは位置決めという点で重要である.

フロントロッドの両端部は、トングレール先端部に締結されている肘金部と呼ばれる部 分と接続されており、その接続要素として軸受が用いられている.フロントロッドの型番に より、肘金部やフロントロッドの形状が異なり、使用される軸受も球面すべり軸受や円筒形 のすべり軸受など異なるものが用いられている.

JR 東日本では、トングレールに締結されている肘金部とフロントロッド、もしくはフロ ントロッドと接続かんの接続部分に用いられている軸受が摩耗し、フロントロッドの位置 不備につながる可能性があると考えられている、本研究では、特殊分岐器の一種である、ダ ブルスリップスイッチという分岐器に使われている、B721型という型番のフロントロッド (図 2.10)をモデリングの対象として、摩耗が生じる部分での力学的な特性を解明するこ ととする.



図 2.10 B721型フロントロッド

## 2.6 ダブルスリップスイッチについて [5]

本研究の研究対象とするダブルスリップスイッチについて述べる.

図 2.3 に示したように、特殊分岐器のうち、2本の線路を交差させる形状をしたものをダ イヤモンドクロッシングと言い、ダイヤモンドクロッシングのうち片側の二線を渡ること が可能な分岐器をシングルスリップスイッチ、両側の二線を渡ることが可能なダブルスリ ップスイッチと言う.シングルスリップスイッチ各部の名称を図 2.11 に示す.シングルス リップスイッチは、線路横断方向の中心線に対して線対称をなしており、中央部を構成する 可動 K 字クロッシング、その両サイドにスリップポイント、さらにその両外側にエンドク ロッシングがある.シングルスリップスイッチは最大6本のレールが並走し、8本のレール が転換する構造で、電気転てつ機も通常の場合では4 台を使用している.これがダブルス リップスイッチになると、さらにスリップレールと基本レールが増えて、最大8本のレー ルが並走し、転換するレールは12本にも及ぶ.



図 2.11 シングルスリップスイッチ各部の名称 [5]

ダブルスリップスイッチのフロントロッドやトングレールの位置関係を図 2.12 に示す. この図において,分岐器に使われているレールの種類によって色分けをしている.図 3.5 の ように,直線基本レールは青色,曲線基本レールは緑色,直線トングレールは赤色,曲線ト ングレールは黄色というようにしている.この色分けはモデリングでも適用する.

ダブルスリップスイッチは、4つの進路を構成することが可能で、各進路における動作パ ターンは図 2.13 に示す通りである.



図 2.12 ダブルスリップスイッチの位置関係



図 2.13 ダブルスリップスイッチの動作パターン [5]

ダブルスリップスイッチは2つの片開き分岐器を背合わせにしたものと同じ機能を持ち, 左側の2方向から来る列車を右側2方向へ自由に割り振ることができる.例えば,10番分 岐器の場合,片開き分岐器1組の全長が25mであるから,これを2組背合わせにすると全 長 50m が必要になる.一方,ダブルスリップスイッチであればおよそ半分の全長27mで 済むため,大幅な用地の節約となる.このため,地価の高い大都市のターミナル駅などでダ ブルスリップスイッチが集中的に使用されている.

#### 2.7 考察

分岐器の用語や仕組みを理解することで,有限要素法解析のためのモデリング方針を打ち立てることができると考えられた.軸受摩耗について評価できる解析モデルを作るために,トングレール後端部からフロントロッドまでなどの振動の伝達経路については詳細なモデリングが必要であると考えられる.一方,本研究の対象とするダブルスリップスイッチは1つの接続かんに2つのフロントロッドが接続しているなど普通分岐器と比べて構造が異なるので,そこに着目したモデリングを行う必要があると考えられた.

# 第3章 有限要素法モデリング

## 3.1 緒言

分岐器の仕組みを把握した上で,有限要素法解析のモデリングと解析条件を決定する.本章では,モデリングの全体的な方針および荷重条件,境界条件の設定とその留意点を具体的に述べる.

#### 3.2 モデリング方針と境界条件

有限要素法解析モデルの対象とする分岐器とそのモデリング方針・解析方針について以 下で説明する.

#### 3.2.1 対象分岐器とモデリング方針

解析モデリング対象とするのは B721 型フロントロッドを使用している分岐器である. 表 3.1 にその諸元を示す.

先行研究の対象であった普通分岐器に対し、本研究が対象とするダブルスリップスイッ チは継目が多く、フロントロッドが複数あるなど構造が複雑であり、衝撃振動の発生からど のような変形を通じて振動が伝わるかという現象は把握できていない.

本研究では先行研究 [1]のモデルを参考にモデリングを行う. 軌間内外方向内側のトング レールは普通分岐器とほぼ同じ構造である一方,外側のトングレールは曲線レールに密着 する形状となっており,普通分岐器に使われているトングレールとは大きく異なっている. そのため,特に外側のトングレールに注目する必要があると考えられる.

モデリングの対象範囲に関しては、先行研究における実機試験や、並行研究として行われ た特殊分岐器の簡易モデルに対する衝撃応答解析の結果により、基本レールは振動をあま り伝達しないと考えられたので、軌道方向半分側のみをモデリング対象とすることにする. モデリング対象範囲の概略図を図 3.1 に示し、有限要素法モデルを図 3.2 に示す.

測定分岐器	A 分岐器	
分岐器種類	10 番ダブルスリップスイッチ	
分岐方式	関節方式	
フロントロッド	(外側)B721型,(内側)B823型	

表 3.1 モデリング対象分岐器条件表



図 3.1 分岐器モデリング範囲概略図



図 3.2 解析モデル全体図(上面図)

このモデルにおいて,図 3.2 の x 軸方向を軌間内外方向(トングレール非密着側が正), y 軸方向を軌間平行方向(トングレール先端側を正), z 軸方向を鉛直方向(鉛直上向きが 正)となるように取った.

分岐器全体の有限要素法モデルを図 3.3 に示し、フロントロッド周辺の転てつ装置モデル を図 3.4 に示す.



図 3.3 解析モデル全体図 (アイソメ図)



図 3.4 フロントロッド周辺図

#### 3.2.2 各継目通過時のフロントロッドに与える影響の予測

分岐器内には、基本レールとトングレール間の乗り移り部分(以下、乗り移りと呼ぶ)や 継目が多数存在する.これらのうちどの継目や乗り移りを列車が通過する際に発生する衝 撃振動がフロントロッドに大きく影響するかを、先行研究において行われた実地試験等の 結果を元に考える.

分岐器に対し列車が直進する場合,図 3.5 のように,継目や乗り移りを合計で18箇所通 過する.通過する各継目や乗り移りの種類,およびフロントロッドへの影響の有無を表 3.2 にまとめる.



図 3.5 直進方向通過時の継目通過

継目・乗り移りの位置	継目・乗り移りの種類	フロントロッドへの影響
1), 2), 4), 5), 14), 15), 17), 18	基本レール同士の継目	なし
3, 16	クロッシング部	なし
10, 13	トングレールから基本レ ールへの乗り移り	なし
6, 9	基本レールからトングレ ールへの乗り移り	不明
7, 12	トングレールから基本レ ールへの継目	不明
(8), (1)	基本レールからトングレ ールへの継目	あり

表 3.2 直進方向通過時に通過する継目・乗り移り

この 18 箇所のうち, ①, ②, ④, ⑤, ⑭, ⑮, ⑰, ⑱は基本レール同士の継目であり, これらを通過する際に生じる衝撃はフロントロッドに影響を与えないと考えられる.

③, ⑩はクロッシング部, ⑩, ⑬はトングレールから基本レールへの乗り移りであり、こ

の部分を通過する際に発生する程度の衝撃ならばフロントロッドには影響を与えないと考 えられる.

⑥, ⑨は基本レールからトングレールへの乗り移り, ⑦, ⑫はトングレールから基本レールへの継目である.この部分を列車が通過する際に生じる衝撃がフロントロッドに影響を与える可能性はあるが,普通分岐器における実測で対向方向通過時の測定はされていないため,実測データが必要となる.本研究ではこれらの部分を通過する際に生じる衝撃振動は研究の対象外とする.

⑧, ⑪は基本レールからトングレールへの継目であり, 普通分岐器での実測データにより この部分を通過する際の衝撃は、それぞれの列車通過方向に位置するトングレールに付随 するフロントロッドに影響を与えると考えられる。

以上の結果および今回のモデルで内側のトングレールを省略したことより,分岐器直進 方向通過時に関しては⑪の継目を通過する際の衝撃振動についてを考えることにする.

次に、分岐方向通過時についても同様に考える.列車が分岐方向に通過する場合、図 3.6 のように、 継目および乗り移りを合計で 14 箇所通過する.通過する各継目や乗り移りの 種類、およびフロントロッドへの影響の有無を表 3.3 にまとめる.



#### 図 3.6 分岐方向通過時の継目通過

継目・乗り移りの位置	継目・乗り移りの種類	フロントロッドへの影響
1), 2), 4), 5), 10), 11), 13), 14	基本レール同士の継目	なし
3, 12	クロッシング部	なし
9	トングレールから基本レ ールへの乗り移り	なし
6	基本レールからトングレ ールへの乗り移り	不明
(T)	トングレールから基本レ ールへの継目	不明
8	基本レールからトングレ ールへの継目	あり

表 3.3 分岐方向通過時に通過する継目・乗り移り

直進方向と同様に考えると、基本レールからトングレールへの継目でフロントロッドに 影響する衝撃振動が発生すると考えられるので、分岐方向通過時は⑧の継目を通過する際 の衝撃振動についてを考えることにする.

#### 3.2.3 後端部モデリング

図 3.7 は後端部モデリングである. 荷重入力箇所の形状は衝撃応答特性に大きく関係する 可能性があるので,後端部付近に関してはトングレールだけでなく基本レール,間隔材など も詳細に再現する.



図 3.7 後端部モデリング

#### 3.2.4 密着側トングレールモデリング

基本レールへ密着側のトングレールについては,枕木の上に置かれたような状態になっ ており,さらに基本レールに押し付けられる形となっているために,鉛直方向にも軌間内外 方向にも変位が拘束されていると考えられる.

枕木やバラスト形状の詳細なモデリングは複雑となるため、高い剛性と粘性係数を持つ 等価なばね要素として表現する.これは MBD などでの軌道モデリングではよく用いられ ている手法であり、それらの文献値を参考に数値オーダーを定めた. [6] [7] [8] [9] [10]

トングレールに関しては、後端部が枕木に固定されているものの、他の部分では枕木の上 に置かれているため、鉛直方向下向き(図 3.8 での下向き)に枕木を押し込む方向に変位が 生じるときには反力がかかり、反対方向の変位が生じるときには反力は生じないという条 件を与える.



図 3.8 トングレールと基本レールの密着 [1]

基本レールとの密着側については、図 3.9 のようにレール下端にばね要素を設置する.ト ングレールに不要なねじりが生じないように枕木平行方向に 2 点を拘束することで枕木を 模擬する.



図 3.9 枕木接触部モデリング

列車通過の際は片輪のみがトングレール後端部継目を通過するが、これは常に基本レールに密着しているトングレール側となる.したがって、振動がトングレールを伝わる際にこの基本レールとの接触はフロントロッドの振動に大きく影響すると考えられる.そこで、基本レールの形状を作成し、図 3.10 のように接触モデリングを行った.トングレールはスイッチアジャスタより押し付け力が加えられるため、摩擦により変形しにくい状態となるこ

とを接触により再現した.



図 3.10 基本レール接触モデリング

#### 3.2.5 非密着側トングレールモデリング

基本レールに密着していないトングレールは転換を滑らかに行うために,図 3.11 のよう なボールベアリングが設置されているため,先端がわずかに浮いている様子が見られる.し たがって,非密着側のトングレールについては後端部およびボールベアリング接触部のみ で鉛直方向の拘束を受けていると考える.また,密着側とは違い,後端部以外では軌間内外 方向の拘束を受けていない.ボールベアリング接触部のモデリングを図 3.12 に示す.



図 3.11 ボールベアリング



図 3.12 ボールベアリングのモデリング

#### 3.2.6 接続かんおよびスイッチアジャスタのモデリング

トングレールの振動を考える際に、スイッチアジャスタや接続かんも拘束となる上に質量体として固有振動数等に関わってくると考えられるので、これらについてもモデリングを行った.接続かん、動作かんのモデリングは転てつ機内の拘束を考慮し、図3.13のように一方の端はばねを介して完全拘束と接続をした.このばねとの接続部に x 軸負方向に1.57kNの力を加えている.その力が動作かんとスイッチアジャスタとの接触およびスイッチアジャスタと連結版との接触を介してトングレールに伝わり、基本レールとの接触力が生じる.



図 3.13 接続かんおよびスイッチアジャスタのモデリング

### 3.2.7 軸受部モデリング

フロントロッドのモデルにおいて、1つのフロントロッドにつき2箇所存在する肘金部と ロッドの接続部分を図3.14に示す.この2箇所両方に関して軸受を模したモデルを作成す る.このモデルにおいては、肘金部とジョーピンを接触要素により表現する.



図 3.14 肘金部接続部分モデリング

#### 3.3 荷重条件

車輪がトングレール後端部継目を通過する際に生じる荷重について,解析における荷重 条件を述べる.

#### 3.3.1 入力位置

車輪がトングレール後端部継目を通過するのは片輪だけであり、反対側では振動は生じ ない.したがって、車輪が通過する密着側トングレールの後端部のみを荷重の入力位置とし、 反対側では衝撃振動は生じないとした.

次に,継目通過時の荷重の入力位置は車輪が継目を通過して初めてトングレールに当たった瞬間の位置であると考えられる.分岐器モデルにおいて後端部継目は図 3.15 に示すように 4 箇所存在する.これらのうち,直進方向通過時には①の継目を,分岐方向通過時には ②の継目を通過することになる.したがって,図 3.16 に示す位置を荷重入力位置とした.



図 3.15 後端部継目の位置



図 3.16 荷重入力位置

#### 3.3.2 入力波形

解析における荷重値および入力波形を考える.

列車が継目を通過する際に、衝撃力および輪重による力が現象として考えられる.これ らを再現するために、まずは衝撃力として周波数700Hzの正弦波1周期分を衝撃荷重と して与える.この衝撃波形の大きさは、列車速度と継目段違い量より継目通過衝撃力を推 定した文献の値を参考に250kNと定める.輪重としては、1車輪にかかる重量を約6tで あるとして、60kNの波形を考える.これは衝撃荷重に比べると低周波な波形となるため に、立ち上がりを400Hz、衝撃波形後を60Hzと定めて波形を確定させた.以上より、図 3.17に示すグラフを鉛直方向の入力波形としてz軸負方向に与える.



図 3.17 荷重入力波形

また,他の軸方向に関しても仮定をおいて荷重値を定める.入力波形は共通として,軌 道平行方向には x 軸負方向に鉛直方向荷重値の 0.05 倍,軌間内外方向には y 軸正方向に 鉛直方向荷重値の 0.01 倍の荷重値を定めた.

## 3.4 解析条件表

解析条件とばね要素の各軸方向ばね定数や減衰係数をそれぞれ表 3.4,表 3.5 にまとめる

御振いつし	Hyper Works Radioss Block 120		
	陽解法		
単位系	[ton] [mm] [MPa]		
要素	3 次元 Solid 要素, Spring 要素		
	密度	$7.86 imes10^{-9}$ ton/mm $^3$	
材料物性值	ヤング率	$2.05\! imes\!10^5\mathrm{MPa}$	
	ポアソン比	0.3	
要素数	325436		
解析時間	0.1s		
最大タイムステップ	$1.0  imes 10^{-7}  m s$		

表 3.4 解析条件表

表 3.5 ばね物性値

動士向	15. *kr	1、	トングレー	接続かん/動
単田ノノ「「」			ル枕木	作かん
	ばね[kN/mm]	10	-	10*
X	減衰[Ns/mm]	10	-	0.0
	ばね[kN/mm]	10	-	10
У	減衰[Ns/mm]	30	-	1.0
	ばね[kN/mm]	10	3.0*	10
Z	減衰[Ns/mm]	50	1.0	1.0

\*付きのばねは 3.2.4 で述べた非線形ばねであり、荷重が生じる変位に関しては表 3.3 に示す係数となる.

## 第4章 解析結果

## 4.1 緒言

本章においては、衝撃応答解析の結果を示すとともに、普通分岐器に対して行った衝撃応 答解析との比較を行い、普通分岐器との振動特性の違いの把握及びモデルの妥当性の確認 を行う.衝撃応答解析において、モデリング対象とした分岐器の実測波形データが無いため に、結果の比較に用いるものは異なる分岐器に対するデータを使用することになる.それぞ れで形状が異なるために単純な比較はできないが、共通している部分も多いので、定性的な 現象は一致しているものとみなして扱う.

## 4.2 比較対象の分岐器 [1]

本研究における解析において比較対象とする分岐器について述べる.

本研究では,近藤の先行研究 [1]に用いられた普通分岐器を比較対象として用いる.この 普通分岐器の概要を表 4.1 に示す.本研究対象分岐器とフロントロッドの型番が異なっている.

測定分岐器	B 分岐器	
分岐器種類	片開き 12 番普通分岐器	
分岐方式	関節方式	
フロントロッド	B821 型	

表 4.1 比較対象分岐器の概要

## 4.3 直進方向通過時の衝撃応答解析

直進方向通過時の衝撃応答解析の結果を述べる.

#### 4.3.1 直進方向通過時の計測位置

直進方向通過時の計測位置を述べる.

直進方向通過時には,図 3.2 における軌間内外方向外側の密着側トングレールを車輪が通 過する.よって,この密着側トングレールに付随するフロントロッド肘金部およびこのフロ ントロッドの軸力を計測する.測定位置を図 4.1 に示す.



図 4.1 直進方向通過時計測位置

#### 4.3.2 後端部鉛直方向加速度

まず、トングレール後端部鉛直方向加速度についての比較を行う、図 4.2 にその波形を示す. 周波数が高い上にすぐ減衰するため 0.02s までの結果で比較する.

普通分岐器における結果に対し,最大値や周波数といった点で概ね一致していることがわかる.特殊分岐器の方が正方向への跳ね返りがやや大きくなるが,その後の減衰傾向はよく一致していることがわかる.



4.3.3 肘金部加速度

密着側トングレール肘金部について,解析結果における代表的な各方向加速度波形を図 4.3,図4.4に示す.それぞれについて,普通分岐器における対応する箇所との比較を行う. なお,これらの波形には高周波成分が含まれていて比較が難しいために,2000Hzのローパ スフィルタをかけている.比較的すぐに減衰する傾向が見られたので,0.05sまでの結果で 比較をする.

直進方向通過時の結果は,普通分岐器での結果と比べ,周波数や減衰の様子といった点で は同様の傾向が見られたものの,いずれの方向でも大きな高周波振動が発生しており,最大 振幅は普通分岐器における結果よりもかなり大きくなった.







#### 4.3.4 フロントロッド軸力

解析結果におけるフロントロッド軸力波形を図 4.5 に示す.

肘金部軌間内外方向の加速度が大きくなったのでフロントロッド軸力も増加すると考え られたが,普通分岐器での結果と比べてフロントロッド軸力の最大振幅は小さな値を取っ た.また,周波数や減衰の様子といった点では同様の傾向が見られたが,低周波振動の再現 はできなかった.



## 4.4 分岐方向通過時の衝撃応答解析

直進方向通過時と同様にして、分岐方向通過時の衝撃応答解析の結果を述べる.

#### 4.4.1 分岐方向通過時の計測位置

分岐方向通過時の計測位置を述べる.

直進方向通過時には,図 3.2 における軌間内外方向内側の密着側トングレールを車輪が通 過する.よって,この密着側トングレールに付随するフロントロッド肘金部およびこのフロ ントロッドの軸力を計測する.分岐方向通過時の計測位置を図 4.6 に示す.



図 4.6 分岐方向通過時の計測位置

#### 4.4.2 後端部鉛直方向加速度

直進方向通過時と同様に、まずトングレール後端部鉛直方向加速度についての比較を行う,図 4.7 にその波形を示す.周波数が高い上にすぐ減衰するため 0.02s までの結果で比較する.

直進方向通過時と同様に,普通分岐器における結果に対し,最大値や周波数といった点で 概ね一致していることがわかる.特殊分岐器の方が正方向への跳ね返りがやや大きくなる



が、その後の減衰傾向はよく一致していることがわかる.

図 4.7 後端部鉛直方向加速度(分岐方向通過時)

#### 4.4.3 肘金部加速度

密着側トングレール肘金部について,解析結果における代表的な各方向加速度波形を図 4.8,図4.9に示す.それぞれについて,普通分岐器における対応する箇所との比較を行う. なお,これらの波形には高周波成分が含まれていて比較が難しいために,2000Hzのローパ スフィルタをかけている.比較的すぐに減衰する傾向が見られたので,0.05sまでの結果で 比較をする.

分岐方向通過時の結果は直進方向通過時と同様に,普通分岐器での結果と比べ,周波数や 減衰の様子といった点では同様の傾向が見られたものの,いずれの方向でも大きな高周波 振動が発生しており,最大振幅は普通分岐器における結果よりも大きくなった.







#### 4.4.4 フロントロッド軸力

解析結果におけるフロントロッド軸力波形を図 4.10 に示す.

直進方向通過時と同様,普通分岐器での結果と比べてフロントロッド軸力の最大振幅は 小さな値を取った.また,周波数や減衰の様子といった点では同様の傾向が見られたが,低 周波振動の再現はできなかった.

![](_page_46_Figure_3.jpeg)

## 4.5 軸受部における力学的特性

軸受部における力学的特性を調べる.軸受摩耗に関わるパラメータとしては,軸受にかかる面圧およびすべり速度が考えられる.したがって,この2つのパラメータについて定量的・定性的な把握を行う.

軸受の力学的特性を把握するために,直進方向通過時に通過する密着側トングレールに 付随するフロントロッドの肘金部とロッドとの軸受に関して,接触面圧 P,およびすべり速 度 V,およびそれらの積を求め,累積 PV 値を求める.これは,密着側トングレール肘金部 の軸受の方が振動入力に近く摩耗量が大きいと考えられるからである.

すべり速度は図 4.11 において軸受①側の接点と軸受②側の接点との相対速度として求め

る. この軸受において, x 方向正側(軌間内外方向内側)の場所において測定をした. 結果 は図 4.12 のような波形となった. 周波数が高いために局所的な値ではあるが,最大でおよ そ340mm/sのすべり速度が見られ,肘金部加速度等と同様に減衰していく様子が見られる. また,軸受部の面圧の平均値を図 4.13 に,それらから算出した PV 値を図 4.14 に示す. PV 値は 0.06 秒付近で最大となった.また,衝撃入力後の累積 PV 値は 0.963[N/mm]となった. 先行研究ではフロントロッド中央部軸受を測定対象箇所としており,本研究での測定位置 と異なるために単純な比較はできないが,普通分岐器の軸受部の PV 値の平均は 1.443[N/mm]であったので,この値よりもやや小さくなった. [1]

![](_page_47_Figure_1.jpeg)

図 4.11 軸受部分拡大図

![](_page_47_Figure_3.jpeg)

図 4.12 軸受部すべり速度

![](_page_48_Figure_0.jpeg)

図 4.13 軸受の面圧

![](_page_48_Figure_2.jpeg)

## 4.6 考察

特殊分岐器の一種であるダブルスリップスイッチのモデルを作成するという目的に対し ては、衝撃応答解析の結果より、普通分岐器に対する結果と比較し、定性的な挙動は同様の 傾向が見られたが、定量的な挙動は普通分岐器と同様の傾向が見られなかった部分が多く 存在した.本研究では軸受モデリング等を一部簡略化して解析を行ったので,これら軸受モ デリングの再現や,枕木ばねなどの粘性係数を変更してあわせこめることにより再現性が 高められると考えられる.

加速度波形,フロントロッド軸力波形共に,普通分岐器のモデルに比べて振幅や周波数な どの傾向の一致が見られなかった箇所があった.特に,加速度振幅に関しては普通分岐器の ものよりもかなり大きくなった.この原因として,ダブルスリップスイッチの構造として, 2 つのフロントロッドやスイッチアジャスタがそれぞれ 1 つの接続かんや動作かんで接続 されており,そのかんの長さが大きな振動に影響したことが考えられた.他にもダブルスリ ップスイッチの構造に起因する原因やモデリングそのものに関わる問題が存在する可能性 もある.これらに関しては実測データとの比較を行い,さらなる検証が必要であると考えら れる.

## 第5章 結論

### 5.1 結論

フロントロッドにおける肘金部とロッドの接続部分の摩耗は,列車の分岐器通過に起因 して生じる振動が影響していると考えられる.本研究においては,トングレール後端部継 目部分を通過する際に生じる衝撃振動に着目し,特殊分岐器の一種であるダブルスリップ スイッチの転てつ器全体のモデルを作成し,衝撃応答解析を行った.この解析を通して, 先行研究における普通分岐器に対する衝撃応答解析との比較およびモデルの妥当性を確認 した.また,解析の結果,軸受部分のさらなる詳細なモデリングの必要性があることがわ かった.

#### 5.2 課題と今後必要になるデータおよび実験

本研究において、モデリングの妥当性を確認するために用いたデータは、先行研究が対 象とした普通分岐器のものであり、本研究の対象とする特殊分岐器とは大きく異なるもの であった.同一分岐器での測定値を用いることがモデルの再現性の向上につながると考え られるので、それらのデータを測定し比較する必要がある.また、本研究が対象としたの は背向方向通過時に生じる衝撃のみであるが、実際には対向方向通過時にもフロントロッ ドに影響を与える衝撃が生じている可能性があるので、対向方向通過時の測定データも必 要となる.

先行研究からの課題である、フロントロッド軸力の低周波振動の再現ができなかった. 実測データとも照らし合わせ、モデリングの改善を行っていく必要があると考えられる.

今回のモデリングにおいて用いた数値の中には,各種寸法,ばね物性値など,推定によるものも多かった.したがって,JR 東日本の基準として用いられている値,または実線での実測値を参考とした値を用いることが望ましい.

接続部要素である軸受部分を詳細にモデリングできなかった.実際には軸受部分により 波形が大きく変わる可能性がある.軸受部分以外でも,必要に応じてより詳細なモデルを 作る必要があると考えられる.

## 参考文献

1. 近藤祐樹. 修士論文:列車通過時振動による分岐器付属部品の摩耗予測のための有限要素 法解析. 2015.

2. JR 東日本社内講座教本·施設技術入門-.

3. JR 東日本社内説明資料.

4. 近藤祐樹. 卒業論文:有限要素法を用いた鉄道分岐器モデルにおける衝撃応答解析. 2013.
5. 小尾実, 堀雄一郎. 新宿駅構内に見る特殊分岐器.:鉄道ジャーナル, 36巻, 5号, pp.48-52, 2002.

6. 鈴木貴洋,名村明,石田誠. 軌道構造変化箇所における輪重変動メカニズムの検討.:土 木学会第59回年次学術講演会後援論文,pp.49-50, 2004.

7. 桃谷尚嗣, 堀池高広. 車輪走行によるレール継目部の衝撃荷重の評価.:鉄道総研報告, Vol.19, No.2, pp.29-34, 2005.

8. 紅露一寛,阿部和久,石田誠,鈴木貴洋.レール継目部の衝撃応答解析における道床・路 盤部のモデル化の影響.:応用力学論文集, Vol.7, pp.1-11, 2004.

9. 紅露一寛, 阿部和久, 石田誠, 鈴木貴洋. レール継目部列車走行試験の有限要素法シミュレーションとその再現性.:応用力学論文集, Vol.8, pp.1-12, 2005.

10. 西本正人,山口剛志.列車荷重の継目部衝撃成分推定に関する検討.:第 20 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, pp.5-8, 2013.