## 論文 金属組織分析及び車両走行シミュレーション によるレール波状摩耗の形成機構の推定

西島 悠太<sup>1</sup>·梶原 和博<sup>1</sup>·田中 博文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道管理研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: nishijima.yuta.57@rtri.or.jp, kajihara.kazuhiro.70@rtri.or.jp, tanaka.hirofumi.96@rtri.or.jp

レール波状摩耗は、軌道変位進みの助長や軌道材料の劣化を引き起こすことから、鉄道事業者では、レ ール削正等の保守が実施されている.一方で、波状摩耗の形成機構については、これまで多くの研究が行 われてきたが、根本的な発生要因の解明は十分でない.そこで本論文では、波状摩耗の形成機構の推定の ための金属組織分析及び車両走行シミュレーションを実施した.具体的には、まず営業線から採取した波 状摩耗の発生レールについて金属組織等を分析し、波状摩耗の形成・成長に寄与すると考えられるクリー プカの作用方向等を確認した.さらに、汎用 MBD ツールを用いた車両走行シミュレーションによりクリ ープ力等を計算し、金属組織分析結果との整合性を検討した.最後に、シミュレーション結果を用いて摩 耗則に基づくレール摩耗量を算出し、波状摩耗の形成に与える諸要因及び寄与度について検討した.

# Key Words: wheel / rail contact, rail corrugation, metallographic analysis, plastic flow multi-body dynamics, wear prediction, Archard

## 1. はじめに

軌道は、日々走行する鉄道車両のからの繰り返し 荷重を受けることで、レールが本来あるべき位置か らずれる軌道不整(以下,軌道変位という)や、レ ールや道床等をはじめとした軌道材料の劣化が生じ る.これらは、鉄道車両の走行安全性に影響するた め、適切に検査を行い管理されるべきものである.

軌道の検査における標準的な手法は,2007年に 国土交通省から通達された「鉄道構造物等維持管理 標準(軌道編)<sup>1)</sup>」(以下,維持管理標準という) や,その補足となる「鉄道構造物等維持管理標準 (軌道編)の手引き<sup>2)</sup>」に示されており,鉄道事業 者では,これらに基づき維持管理を行っている.

一方で,維持管理標準において詳細な管理方法の 記載が無い軌道状態が存在し,その1つに,図-1に 示すようなレール頭頂面の長手方向に連続的に発生 する規則的な凹凸である「レール波状摩耗」がある. レール波状摩耗は,車輪/レール間の微小なすべり (以下,クリープという)が発生要因の1つとされ ており,急曲線内軌での発生例が多いが,曲線外軌, 直線区間の左右レール等,様々な区間で発生が確認 されている<sup>3)</sup>.この波状摩耗は,列車走行時の騒音 や振動を発生させるだけでなく,振動による軌道変 位進みの助長や軌道材料の劣化を引き起こすことか ら<sup>4)</sup>,レール削正による除去等の保守が必要となる.

レール波状摩耗の成長要因や形成機構については, これまで様々な研究が進められており,試験機や営





(a)内軌 (b)外軌 図-1 曲線で発生したレール波状摩耗の例

業線等による曲線走行中の車輪/レール間の作用力 測定 <sup>50</sup>や,解析モデルを用いた数値解析 <sup>79</sup>により, 実験的・解析的に波状摩耗の発生・成長要因の検討 が行われてきた.しかし,波状摩耗は車両/軌道の 複雑な相互作用による影響が大きいと考えられる一 方で,それを再現するような実験及び解析例は少な い.ここで,筆者らは,車両/軌道の動的相互作用 を考慮した解析モデルにより,波状摩耗の成長要 因や波長決定メカニズムを検証するとともに,波状 摩耗の進展過程を示し,その妥当性を検証している <sup>10</sup>.しかし,外軌と比べて内軌での発生例が多い原 因等,波状摩耗の根本的な形成機構は十分に解明で きていない.

そこで本論文では,波状摩耗の形成機構の推定を 目的とした,車輪/レール間に生じる作用力の解明 のための金属組織分析及び車両走行シミュレーショ ンを実施した.具体的には,まず営業線から採取し た波状摩耗の発生レールについて金属組織等を分析 し,クリープにより車輪からレールに作用する接線 カ(以下,クリープ力という)等の方向を確認した. さらに,汎用のマルチボディダイナミクス(以下, MBDという)ツールを用いた車両走行シミュレー ションによりクリープ力等を計算し,金属組織分析 結果との整合性を検討した.最後に,シミュレーシ ョン結果を用いて摩耗則に基づくレール摩耗量を算 出し,波状摩耗形成に関わる諸要因及び寄与度につ いて検討した.

## 2. 波状摩耗レールの金属組織分析

本章では、営業線から採取した波状摩耗の発生レ ールを供試レールとして金属組織等を分析し、クリ ープ力の方向等を確認した結果について述べる.

#### (1) 供試レール

供試レールは、年間通トンが約 1800 万トンの線 区の直結系軌道の区間における半径 185m, カント 105mm, スラック 5mm の曲線区間の内外軌から採 取した JIS60kg レールである.供試レール採取時の 内軌は, 直近に実施されたレール削正から1年程度 経過していた. 同様に, 外軌は, 敷設から7年程度 経過していたが、レール削正は実施されていなかっ た. このため、内外軌ともに、波状摩耗が発生して おり,波長及び振幅は表-1の通りであった.なお, これまでの当該区間の波状摩耗測定では、内軌は3 カ月程度,外軌は2年程度で飽和期10)(凹凸振幅が 一定範囲で安定している状態)となる傾向であった ことから、供試レールの波状摩耗の進展過程は、内 外軌ともに飽和期であると考えられる. レール断面 形状 (Greenwood Engineering 社製断面形状計測器 miniprof で測定) は図-2 の通りであり, 外軌に約 13mmの側摩耗が生じていた.

図-3 に、供試レールの金属組織観察位置を示す. 観察位置は、波状摩耗の山部と谷部の2箇所について、それぞれレール長手方向のL断面と、レール断面方向のC断面とした.L断面については、レール 断面中心位置である CL00, レール断面方向中心か らゲージコーナー(以下, GC という)側に 10mm の位置である GC10, レール断面方向中心からフィ ールドコーナー(以下, FC という)側に 10mm の 位置である FC10 の 3 箇所を試料として切り出し, C断面については1断面を試料として切り出した.

#### (2) 分析方法

具体的な分析方法としては、まず、試料を鏡面研 磨した状態で、観察位置における傷の発生状態を目 視および光学顕微鏡で確認した.次に、試料を 5% ナイタール液でエッチングし、金属組織を観察した. その際に、金属組織に明瞭な塑性流動(以下、メタ ルフローという)が確認された試料については、 図-4に示す定義に基づき、深さ、長さ、角度を顕微 鏡上で測定した.この時、同図に示すようにメタル フローの方向にクリープ力が生じていることになる.

図-5に、金属組織分析で確認されたメタルフローの例として、内軌/C断面/山部/FC10の顕微鏡 写真を示す、今回分析したレールには内外軌ともに メタルフローが生じていた.

#### (3) 金属組織分析結果(内軌波状摩耗)

図-6に、内軌波状摩耗レールに発生していたメタ ルフローの観察結果を示す. 同図より、谷部、山部 ともに FC 方向、列車進行逆向きのメタルフローが 顕著に生じており、大きさは 100~500µmであった. したがって、車輪/レール間には FC 方向の横クリ ープ力と、列車進行逆向きの縦クリープ力が作用し ていると考えられる.

#### (4) 金属組織分析結果(外軌波状摩耗)

図-7に、外軌波状摩耗レールに発生していたメタ ルフローの観察結果を示す. 同図より、谷部、山部 ともに GC 方向のメタルフローが顕著に生じている ことがわかる. また、GC10 では列車進行逆向き、 FC10 では、列車進行方向のメタルフローが顕著に 生じており、大きさは50~350µmであった. したが

表-	1 供試レー	ルの波状摩耗	の波長及び挑	辰幅 <sup>C断面</sup>		
	レール	波長 (mm)	振幅 (mm)	L断面 GC		FC10/CL/GC10
	内軌	40~120	0.05~0.1	山部、縣市間		
	外軌	110~160	0.1~0.2	谷部	山町面山	C断面 ' ' '
				列車進行方向		
ا国		G	C	図-3 供試レ	ールにおける金属組織	識の観察位置
回位	10		レールに作り		111µm	107µm
н К	20	約13mm	70-	角度 深さ	121μm 49μm	117μm 47μm
<b>「1/-</b>	-30 小小	ኪ		大きさ		
Ł		†断面(60kg) . └──└			50μm	R. C. Land
	-10 0 10 レール左	20 30 40 50 6 右方向位置[m	3070 2070 2011 2011 2011 2011 2011 2011 2		図-5 観察されたメ	タルフローの例
	図-2 供試	レールの断面	''' <b>' 凶-</b> 4 「形状	4 メタルフローの定義 とクリープカの方向	(内軌/C)断面/ absciewant (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内軌/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (内ඛ/C) (日) (内ඛ/C) (日) (内) (日) (内) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日) (日	イ田部/FC10 00 座)
					两示口十1	

FC側



って,車輪/レール間の横クリープ力は GC 方向に, 縦クリープ力は GC 側で列車進行逆向き,FC 側で列 車進行方向に作用していると考えられる.

なお、外軌については波状摩耗が発生していない レールの金属組織分析も実施しているが、メタルフ ローの発生の傾向は波状摩耗が発生している場合と 同じであった. さらに、内外軌ともに、波状摩耗の 山部と谷部における各レール断面位置のメタルフロ ーの方向は同じであったことから、波状摩耗が発生 したレールであっても、車輪/レール間のクリープ 力の方向は一定であると考えられる.

## 3. MBD による車両走行シミュレーション

本章では,汎用 MBD ツールの SIMPACK を用い た車両走行シミュレーションにより,車輪/レール 間の作用力等を計算,分析した結果を述べる.

#### (1) 車両モデル

図-8に、シミュレーションに用いた車両モデル<sup>11)</sup> を示す.車両モデルは、1車体、2台車、4輪軸で構 成された 42 自由度の 1 車両モデルとした.車両諸 元は、**表-2** に示す在来線の通勤形車両(2 章の金属 組織分析において、波状摩耗レールを採取した線区 を主として走行する車両)のものを用いた.

## (2) 軌道モデル及び走行路モデル

軌道モデルは、図-9に示す一般的な狭軌の防振ま くらぎ直結軌道とした.レールは JIS60kg レール (新品断面形状)とし、レール〜まくらぎ〜路盤の 結合要素は、ばね・ダンパ要素でモデル化した.

図-10 に軌道モデルの平面線形を示す.また,表-3 に走行路パラメータを示す.ここで,走行速度は, 各曲線半径においてカント 70mm で均衡カントとな



図-8 車両モデル

表-2 土な単両ハラ	<b>アメータ (</b> 通動形単両)
項目	諸元
軸距	2.1m
台車中心間隔	13.3m
車体質量	14300kg
台車質量	2800kg
輪軸質量	1300kg
左右軸ばね間隔	1.76m
左右空気ばね間隔	1.76m
車輪踏面形状	修正円弧(新品形状)





(進行方向)

る数値とした.よって,カント35mmはカント不足, カント105mmはカント超過となる.評価区間は, 車両の各応答が定常状態となる円曲線中とした.な お,レール凹凸及び軌道変位は付与していない.

- 197 -



	半径	カント	速度			半径	カント	速度	
ケース	R	С	V	備考	ケース	R	С	V	備考
	(m)	(mm)	(km/h)			(m)	(mm)	(km/h)	
C1-1	185	105	39.3	カント 超過	C1-3	185	35	39.3	カント 不足
C2-1	250		45.6		C2-3	250		45.6	
C3-1	300		50.0		C3-3	300		50.0	
C4-1	400		57.7		C4-3	400		57.7	
C5-1	600		70.7		C5-3	600		70.7	
C6-1	1000		91.3		C6-3	1000		91.3	
C7-1	2000		129.1		C7-3	2000		129.1	
C1-2	185		39.3	- 均衡 カント	C1-4		$\sim$	130.0	直線
C2-2	250		45.6						
C3-2	300		50.0						
C4-2	400	70	57.7						
C5-2	600		70.7						
C6-2	1000		91.3						
C7-2	2000		129.1						

20

10

0

-10

-20

20

10

0

-10

-20

0

0

 $\odot$ 

400

400

曲線半径[m]

(d)後軸/内軌側

S

曲線半径[m]

(b)後軸/外軌側

 $\bigcirc$ 

800

800

・外軌縦クリープカ

後軸·

・内軌縦クリープカ [kN]

後軸

図-12 縦クリープ力と曲線半径の関係

1200

1200

[kN]

均衡カント

○カント超過

△カント不足

800

800

曲線半径[m]

(c)前軸/内軌側

٥

 $\square$ 

曲線半径[m]

(a)前軸/外軌側

20

10

0

-10

-20

20

10

0

-10

-20

0

前軸・内軌縦ク リープカ [kN] 0

400

00000

400

前軸・外軌縦クリープカ

[kN]









#### (3) シミュレーション結果

評価するパラメータは、クリープカ、クリープ率、 輪径差及び車輪/レールの接触位置とした.なお、 前後台車のシミュレーション結果の傾向は同じであ ったことから、ここでは前台車の結果について述べ る.クリープ力及びクリープ率の方向については、 レールの長手方向を縦、断面方向を横とし、シミュ レーション結果の符号の定義は図-11の通りである.

## a) 縦クリープカ及び縦クリープ率

図-12 及び図-13 に,曲線半径 185m~1000m のケ ースにおける前後輪軸・内外軌側の縦クリープ力及 び縦クリープ率のシミュレーション結果を示す.

縦クリープ力は,曲線半径が小さくなる程,後軸 内軌側では列車進行方向逆向き,後軸外軌側では列 車進行に増加傾向にある.

縦クリープ率は,前軸外軌側で列車進行逆向き, 前軸内軌側で列車進行方向に生じている.また,後 軸外軌側では,曲線半径が小さくなる程,列車進行 方向に増加傾向にある.

また、今回の条件においては、縦クリープ力、縦 クリープ率ともにカントの違いによる差は小さい.

#### b) 横クリープカ及び横クリープ率

図-14 及び図-15 に,曲線半径 185m~1000m のケ ースにおける前後輪軸・内外軌側の横クリープ力及 び横クリープ率のシミュレーション結果を示す.

横クリープ力は、縦クリープ力の場合と比較する と、曲線半径による差は小さいが、曲線半径が小さ くなる程、前軸外軌側では GC 方向に、後軸内軌側 では FC 方向に増加傾向にある.また、曲線半径に よらず、前軸内軌側で FC 方向に生じている.

横クリープ率は,曲線半径が小さくなる程,アタ ック角の増加に起因して前軸外軌側では GC 方向に, 前軸内軌側では FC 方向に増加する傾向にある.

また、今回の条件においては、横クリープ力、横 クリープ率ともにカントの違いによる差は小さい.

#### C) 輪径差

図-16に、曲線半径185m~1000mのケースにおける輪軸ごとの輪径差のシミュレーション結果を示す. 曲線半径が小さくなる程,前軸の輪径差が増加傾



図-17 急曲線走行時の車輪/レールの接触位置の例 (ケース: Cl-2)

向にある.これは、曲線走行時に輪軸が外軌側へ移動し、車輪踏面の勾配により外軌側の車輪径が大きく、内軌側の車輪径が小さくなるためと考えられる. 一方、曲線半径が小さくなる程、後軸の輪径差は減少傾向にある.これは、曲線走行時に前軸外軌側がフランジに拘束され、後軸では負のアタック角及び内軌側への横クリープ力が生じることにより後軸が内軌側へ移動するため、輪径差を確保できないためと考えられる.

また、図-16 には、理論上左右の車輪がすべるこ となく転動する「パーフェクトローリング」に必要 な左右の車輪間における輪径差を示している.パー フェクトローリングに必要な輪径差は式(1)で求め られる<sup>12)</sup>.

$$\Delta r_e = (r / R) \cdot G \tag{1}$$

 $\Delta r_e$ : パーフェクトローリングの輪径差[mm],

r: 車輪径[mm], G: 軌間[mm],

## R:曲線半径[m]

図-16 より,前軸については,輪径差がΔreに対して著大であることがわかる.この輪径差によって 内外軌で生じるクリープが,クリープ力及びクリー プ率の発生・増加の要因と考えられる.後軸につい ては,曲線半径 400m 以下で輪径差がΔreに対して 不足していることがわかる.この輪径差不足によっ て内外軌で生じるクリープが,クリープ力及びクリ ープ率の発生・増加の要因と考えられる.

#### d) 車輪/レールの接触位置

図-17に,表-3に示すケースのうちC1-2における 前後軸・内外軌の車輪/レール接触位置を示す.前 軸については,円曲線走行時に自己操舵機能が低下 し,輪軸が外軌側に向かって進むことから,外軌側 車輪が GC に近い位置でレールと接触している.そ れ以外の車輪についてはレール頭頂面付近で車輪と 接触していることがわかる.

## 4. 組織分析結果とシミュレーション結果比較

本章では、2章の金属組織分析で確認したメタル フローの方向から想定されるクリープ力の方向と、 3 章のシミュレーションで得られたクリープ力の方 向を比較し,両者の整合性を検証する.なお,金属 組織分析の供試レールは,飽和期の波状摩耗が生じ ていたのに対し,シミュレーションの軌道モデルの レールには凹凸を付与していないという違いがある. しかし,2章で述べたように,波状摩耗が発生した レールであっても,車輪/レール間のクリープ力の 方向は一定であると考えられることから,クリープ 力の方向による整合性の検証には問題ないと考えら れる.

## (1) 内軌に生じるクリープカ及び波状摩耗

シミュレーション結果より,急曲線内軌では前軸 による FC 方向の横クリープ力及び横クリープ率が 大きい.これは,FC 方向のメタルフローが生じて おり,FC 方向の横クリープ力が作用していた金属 組織分析の結果と一致する.

また、シミュレーション結果より、急曲線内軌で は後軸による列車進行逆向きの縦クリープ力が大き い.これは、列車進行逆向きのメタルフローが生じ ており、列車進行逆向きの縦クリープ力が作用して いた金属組織分析結果と一致する.

以上のことから,内軌については金属組織分析と シミュレーション結果に整合性があると考えられ, 後軸の縦クリープ力及び前軸の横クリープ力により メタルフローが生じていると考えられる.

#### (2) 外軌に生じるクリープカ及び波状摩耗

シミュレーション結果より,急曲線外軌では前軸 による GC 方向の横クリープ力及び横クリープ率が 大きい.これは,GC 方向のメタルフローが生じて おり,GC 方向の横クリープ力が作用していた金属 組織分析の結果と一致する.

また、シミュレーション結果より、急曲線外軌で は、前軸により列車進行逆向きの縦クリープ力が、 後軸により列車進行方向の縦クリープ力が作用して いる.さらに、図-17より、前軸外軌側ではGC付 近で、後軸外軌側では頭頂面付近で車輪とレールが 接触していることから、外軌についてはGC側にお いて列車進行逆向きの縦クリープ力が作用し、FC 側に向かうに従い縦クリープ力の向きが変わり、列 車進行方向の縦クリープ力が作用すると考えられる. これは、GC側で列車進行逆向き、FC側で列車進行 方向のメタルフローが生じており、それらと同じ方 向の縦クリープ力が作用していた金属組織分析結果 と一致する.

以上のことから,外軌についても,金属組織分析 とシミュレーション結果には概ね整合性があると考 えられ,後軸の縦クリープ力及び前軸の横クリープ 力によりメタルフローが生じていると考えられる.

## 5. 摩耗則を用いたレール摩耗量の算出

既往の研究<sup>10)</sup>で示されている波状摩耗の進展過程 では、単位輪重当たりのレール摩耗量が大きい程, 波状摩耗が形成されやすいと仮定しており,実際の 波状摩耗の進展傾向と高い適合度を示すことが確認 されている.そこで,本章では SIMPACK によるシ ミュレーション結果及び摩耗則を用いてレール摩耗 量を算出し,各輪軸におけるレール摩耗量が増加す る要因を検証することで,波状摩耗の形成要因及び 寄与度を分析した.

#### (1) 摩耗則

摩耗理論に基づき摩耗量を算出する摩耗則には, Archard 則<sup>13)</sup>や Lewis 則<sup>14)</sup>等様々なものがあるが, 車輪/レールの接触により生じる摩耗は,主に凝着 摩耗であることが示されていることから<sup>15)</sup>,凝着摩 耗を表し,既往の研究においてもレール摩耗予測に 用いられている実績のある<sup>16)</sup>Archard 則を適用した. Archard 則は,式(2)により表される<sup>13)</sup>.

$$w = k \cdot F \cdot s / H \tag{2}$$

w[*m*<sup>3</sup>]: 摩耗体積, *k*: 摩耗係数,

*F*[*N*]:接触荷重,*s*[*m*]:すべり距離,

 $H[N/m^2]$ :接触する物体のうち柔らかい方の材料 硬さ(ここではレール材のビッカーズ硬さ[Hv])

ここで、今回用いたシミュレーションモデルでは、 車輪とレールは1点で接触していることから、式(2) より、シミュレーションモデルの接触点における摩 耗量は式(3)で与えられる.

$$d = k \cdot P \cdot \delta / H \tag{3}$$

d[m]: 摩耗深さ, P[N/m<sup>2</sup>]: 接触面圧, $<math>\delta[m]: 単位長さ当たりすべり距離(クリープ率)$ 

摩耗係数 kについては、種々の条件下での値をま とめた資料 <sup>17)</sup>があるが、摩耗形態等による変化が極 めて大きいことから、摩耗試験等で得られる値を用 いることも多い.ここでは、車輪・レール高速接触 疲労試験装置 <sup>18)</sup>を用いた室内摩耗試験で得られた結 果 <sup>19)</sup>のうち、定常摩耗状態の値である 7.75×10<sup>-5</sup>を 用いた.

レール材のビッカーズ硬さ*H*については,普通レ ールに相当する値である 270*Hv*を用いた.

接触面圧 Pについては、図-18に示すように、3章 のシミュレーションで得られる接触荷重 F(車輪か らレールへの荷重)と車輪/レール接触面積 Aを用 いて、接触荷重 Fを接触面積 A で除して算出した.

単位長さ当たりすべり距離δについては、縦すべりと横すべりの摩耗への寄与度は等価とみなし、図





-19 に示すように、3 章のシミュレーションで得られる縦クリープ率と横クリープ率をベクトル合成した総すべり距離<sup>10</sup>を用いた.

## (2) レール摩耗量の算出結果

図-20に、式(3)を用いて算出した摩耗量を示す. 摩耗量が最も大きいのは前軸外軌側であり、曲線半 径が小さくなる程、摩耗量が増加している.これは、 曲線半径が小さくなる程、外軌側への遠心力が増加 することで輪重及び横圧が増加することや、前述の ように、急曲線外軌で前軸の横クリープ率が増加す ることが要因として考えられる.

同様に,前軸内軌側についても曲線半径が小さく なる程,摩耗量が増加している.これは,急曲線内 軌で前軸の横クリープ率が増加することが要因とし て考えられる.

以上のことから、レール摩耗は内外軌ともに前軸 の横クリープ率が主要因であると考えられる.また、 図-17 に示した車輪/レールの接触位置より、前軸 外軌側の横クリープ率による摩耗は主にレール側摩 耗であり、前軸内軌側の横クリープ率による摩耗は 主にレール頭頂面摩耗であると考えられる.

#### 6. レール波状摩耗の形成機構の推定

本章では,波状摩耗の成長要因及び進展過程<sup>10</sup>に 基づき,金属組織分析結果とシミュレーション結果 から推定できる,レール波状摩耗の形成の諸要因及 びその寄与度について検討した.

#### (1) 曲線内軌に生じる波状摩耗

金属組織分析結果とシミュレーション結果より, 曲線内軌では,前軸における FC 方向の横クリープ 率の増加及び後軸における列車進行逆向きの縦クリ ープ力が生じていた.さらに,レール摩耗量算出結 果より,曲線半径が小さくなる程,前軸での横クリ ープ率によるレール頭頂面摩耗量の増加が顕著であ り,後軸の摩耗量についても若干増加傾向にあるこ とがわかった.

以上のことから、単位輪重当たりのレール摩耗量 が大きい程,波状摩耗が形成されやすいという仮定 においては、前軸の横すべりが、図-1(a)のような 周期的なレール頭頂面摩耗を形成している主要因で あると考えられる.

#### (2) 曲線外軌に生じる波状摩耗

金属組織分析結果とシミュレーション結果より, 曲線外軌では,前軸における GC 方向の横クリープ 率の増加及び列車進行逆向きの縦クリープ力が作用 していた.さらに,レール摩耗量算出結果より,曲 線半径が小さくなる程,前軸での横すべりによるレ ール側摩耗の増加が顕著であり,後軸の摩耗量につ いては若干増加傾向にあった.

以上のことから、内軌と同様に、単位輪重当たり のレール摩耗量が大きい程、波状摩耗が形成されや すいという仮定においては、前軸の横すべりが、図 -1(b)のような周期的なレール側摩耗を形成する主 要因であると考えられる.

一方で、外軌については、急曲線走行時には GC 付近で車輪フランジの曲率が大きい箇所と接触する ことから、輪重や振動等の変動成分が内軌より少な いと考えられるため、周期的なレール摩耗を形成す ることは、内軌と比較して少ないと考えられる.

## 7. まとめ

本論文では、営業線から採取した波状摩耗の発生 レールについて金属組織等を分析し、波状摩耗の形 成・成長に寄与すると考えられるクリープの方向等 を確認した.さらに、汎用 MBD ツールを用いた車 両走行シミュレーションによりクリープ力等を計算 し、金属組織分析結果との整合性を検討した.最後 に、シミュレーション結果を用いて摩耗則に基づく レール摩耗量等を算出し、波状摩耗の形成に関わる 諸要因及び寄与度について検討した.以下に、得ら れた知見を示す.

(1)営業線に敷設されており波状摩耗が発生してい るレールについて金属組織分析を実施した.そ の結果,内軌については波状摩耗の谷部,山部 ともに FC 方向,列車進行逆向きのメタルフロー が生じていた.外軌については波状摩耗の谷部, 山部ともに GC 方向のメタルフローが生じており, FC 側では列車進行方向,GC 側では列車進行逆向 きのメタルフローが生じていた.波状摩耗の山 部と谷部における各レール断面位置のメタルフ ローの向きは同じであったことから,波状摩耗 が発生したレールであっても、車輪/レール間 のクリープ力の方向は一定であると考えられる. また、汎用 MBD ツールを用いた車両走行シミュ レーションにより得られた車輪/レール間のク リープ力の向きは、金属組織分析結果と一致し ていた.以上のことから、車輪/レール間の作 用力及び金属組織分析結果とシミュレーション 結果の整合性を確認した.

- (2)汎用 MBD ツールを用いた車両走行シミュレーションにより算出したクリープ率と Archard の摩耗 則を用いてレール摩耗量を算出した.その結果, 内外軌ともに前軸の横クリープ率による摩耗量 が顕著であった.内軌の摩耗については,レー ル頭頂面付近で車輪と接触していることからレ ール頭頂面摩耗であり,外軌の摩耗については GC 付近で車輪と接触していることから,レール 側摩耗であると考えられる.
- (3)以上のことから,波状摩耗の進展過程における, 単位輪重当たりのレール摩耗量が大きい程,波 状摩耗が形成されやすいという仮定においては, 内外軌ともに前軸の横クリープ率によるレール 摩耗が,波状摩耗を形成している主要因である と考えられる. なお,外軌については車輪フラ ンジの曲率が大きい箇所でレールと接触するこ とから,輪重や振動等の変動成分が少なく,周 期的なレール側摩耗を形成することは内軌と比 較して少ないと考えられる.

#### 参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局:通達鉄道構造物等維持管理標準 の制定について,国鉄技第73号,2007.
- 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等維持管理標準 (軌道編)の手引き,2007.
- Suda Y, Hanawa M, Okumura M and Iwasa T: Study on rail corrugation in sharp curves of commuter line, Wear, Vol.253, pp.193-198, 2002.
- 4) 田中博文,清水惇:効率的な波状摩耗管理のための 可搬型レール凹凸連続測定装置の開発と活用法,鉄 道工学シンポジウム論文集, Vol.17, pp.19-26, 2013.
- 5) 松本陽,佐藤安弘,藤井雅子,谷本益久,康琦:曲 線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに

関する研究(第1報,接触ばね系振動を考慮した縦方 向スティック・スリップ・モデル),日本機械学会 論文集 C 編, Vol.62, No.597, pp. 49-57, 1996.

- 田中博文,松田博之,輪田朝亮:急曲線外軌波状摩 耗発生区間のレール/車輪間の接触力学に関する考 察,鉄道力学論文集,Vol.13, pp.43-50, 2009.
- 7) 角知憲,松本嘉司,村尾光弘,佐々木英之:急曲線
  区間における波状摩耗の生成機構について,土木学
  会論文集,No.425/IV-14, pp.99-106, 1991.
- Manabe K, A hypothesis on a wavelength fixing mechanism of rail corrugation, Proc.IMechE, Part F, Vol.214, pp.21-26, 2000.
- 9) 松浦章夫,内田忠之,福田拓也:急曲線における内 軌レールの波状摩耗発生メカニズムに関する研究, 土木学会論文集,No.773/I-69, pp.125-135, 2004.
- 10) 網干光雄,田中博文:レール波状摩耗の進展過程に 関するシミュレーション解析,日本機械学会論文集, 第85巻,第878号,19-00051,2019.
- 田中博文,細田充:マルチボディダイナミクスを用いた外軌波状摩耗の発生に軌道支持剛性が与える影響の評価,鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp.29-36, 2016.
- 松本陽,佐藤安弘,谷本益久,康琦,古田勝:急曲 線通過中における台車/車軸姿勢の実態把握につい て,第3回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'94)論 文集,pp.192-202,1994.
- Archard ,J,F : Contact and rubbing of flat surface, Journal of Applies Physics, Vol.24, pp.981-988, 1953.
- F.Braghin and R.Lewis, et al : A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear, Wear 261, pp.1253-1264, 2006.
- 15) J.Kalousek and A.E.Bethune : Rail wear under heavy traffic conditions, STP644, pp.63-79, 1978.
- 金鷹,名村明,石田誠:レール頭部の摩耗形状予測
  手法,鉄道総研報告,Vol.23, No.2, pp.5-10, 2009.
- 日本トライボロジー学会:トライボロジーハンドブ ック, p.21, 2001.
- 名村明,石田誠:レール損傷の発生メカニズムを探る,RRR, Vol.68, No.9, pp.6-9, 2011.
- 19) 辻江正裕,吉岡亜陸,水谷祐貴,曄道佳明:マルチ ボディダイナミクスによるレール摩耗形状予測モデ ルの構築と妥当性の検証,日本機械学会論文集,第 83巻,第854号,17-00074,2017.

(2020.4.3 受付)

## ESTIMATION OF GENERATION MECHANISM OF RAIL CORRUGATION BY METALLOGRAPHIC ANALYSIS AND RUNNING SIMULATION

## Yuta NISHIJIMA, Kazuhiro KAJIHARA and Hirofumi TANAKA

In this study, we estimated mechanism of generating rail corrugation by metallographic analysis and vehicle running simulation. Specifically, direction of the creep force acting on rail was confirmed by metallographic analysis of the corrugation rail. Next, we calculated creep force and creepage by MBD simulation, and confirmed consistency between simulation and analysis results. In addition, we investigated the mechanism of generating rail corrugation by using the results of the metallographic analysis and the MBD simulation result.