

# レール断面形状がレール凹凸除去効率に与える影響に関する考察

森 健矢\* 田中 博文 梶原 和博 清水 惇 昆野 修平

(鉄道総合技術研究所)

A Study on the Effect of Rail Profile on Removal Efficiency of Rail Surface Roughness

Kenya Mori\*, Hirofumi Tanaka, Kazuhiro Kajihara, Atsushi Shimizu, Shuhei Konno

(Railway Technical Research Institute)

The profile of rail head is one of the major factors that determine the efficiency of rail grinding. To investigate the relationship between them, we proposed an index to identify the flatness of the rail profile. Then we analyzed the relationship between the index and rail surface roughness measured during rail grinding for corrugated rails in commercial lines. As a result, it was implicated that the larger the index of flatness of the rail profile, the more rail surface roughness is likely to remain after rail grinding and the lower the efficiency of rail grinding.

キーワード：レール波状摩耗，レール凹凸，レール断面形状，レール削正，レール凹凸除去効率

(Rail corrugation, rail surface roughness, rail profile, rail grinding, removal efficiency of rail surface roughness)

## 1. はじめに

鉄道事業者では、輪重変動の抑制や騒音対策を目的としたレール削正車によるレール波状摩耗の凹凸除去が行われている。しかし、レール削正車は、レール損傷予防を目的とした疲労層除去にも使用されるため、レール波状摩耗の凹凸除去に充当できるリソースには限りがある。このような現状において、限られたリソースを有効活用するために、効率的なレール削正方法の確立が求められている。

一方で、扁平な断面形状のレールを削正する場合にはレール凹凸の除去効率が低下することが知られている<sup>(1)</sup>。また、レール削正後に凹凸が残存すると経済的な効率性が低下することが明らかにされている<sup>(2)(3)(4)</sup>。このように、レール断面形状とレール波状摩耗の発生状況に応じた適切なレール削正の必要性が指摘されているものの、両者を考慮したレール削正方法が確立されているとは言い難い。

そこで本研究では、効率的なレール削正方法を検討するために、在来線のレール波状摩耗発生箇所においてレール削正時のレールの断面形状及び凹凸データを測定し、レール

断面形状とレール凹凸除去効率の関係を分析した。

## 2. 測定及びレール削正の概要

〈2・1〉 測定区間 測定区間は表 1 に示す 6 区間であり、いずれの区間も内軌に波長 150~190mm 程度の波状摩耗が発生していた。測定区間はすべて同一線区（単線）であり、走行する車両形式は共通している。また、いずれの区間も PC まくらぎが敷設されたバラスト軌道であり、レールは 50kgN の定尺レールである。ここで、区間 C、E については、比較的通トンが少ない在来線区においてしばしば見られる、側摩耗が進行した外軌を内軌として再利用している区間（以下、「振替レール区間」と言う。）である。

〈2・2〉 測定内容 レール断面形状の測定には Greenwood Engineering 社製の MiniProf Rail を使用し、表 1 に示すように各区間 2~3 断面の合計で 16 断面の断面形状を取得した。また、レール凹凸の測定には鉄道総研が開発したレール凹凸連続測定装置<sup>(5)</sup>を使用し、区間全長にわたってレール中心の位置のレール凹凸を取得した。な

表 1 測定区間の概要

区間	A	B	C	D	E	F
曲線半径	360m	300m	300m	300m	300m	300m
カント	100mm	105mm	105mm	105mm	105mm	105mm
スラック	5mm	10mm	10mm	10mm	10mm	10mm
円曲線長	345m	205m	180m	355m	265m	190m
軌道構造	50kgN	50kgN	50kgN	50kgN	50kgN	50kgN
	PCまくらぎ バラスト道床	PCまくらぎ バラスト道床	PCまくらぎ バラスト道床	PCまくらぎ バラスト道床	PCまくらぎ バラスト道床	PCまくらぎ バラスト道床
断面測定箇所	A-1, A-2, A-3	B-1, B-2, B-3	C-1, C-2	D-1, D-2, D-3	E-1, E-2, E-3	F-1, F-2
レール敷設年	1981, 1981, 1981	1989, 1977, 1989	1986, 1986	1994, 1994, 1994	1984, 1984, 1984	1984, 1984
年間通トン	540万トン	540万トン	540万トン	540万トン	510万トン	510万トン
備考			振替レール区間		振替レール区間	

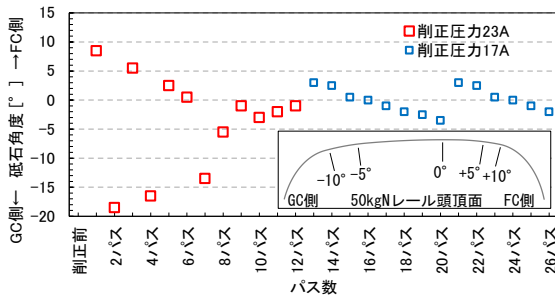


図 1 削正時の砥石角度及び削正圧力

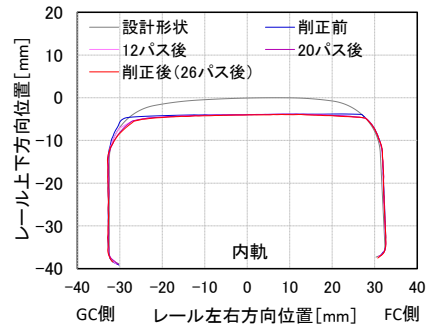
お、いずれの測定も内軌を対象としており、後述するレール削正車のパスパターンを踏まえ、削正前、12パス後、20パス後、削正後に測定した。

〈2・3〉 レール削正 レール削正は SPENO 社製の 8 頭式レール削正車 (MINI8) によって実施された。削正パスパターンは、全ての区間において同じものが用いられ、総パス数は 26 パスであった。図 1 に、削正時の砥石角度及び削正圧力を示す。同図において、砥石角度が±5°より大きいパスは、レール断面形状の復元を目的としたパス(以下、「断面修復パス」と言う。)である。砥石角度が±5°以下のパスはレール凹凸除去を目的としたパス(以下、「凹凸除去パス」と言う。)である。12パスまでは、断面形状の修復により以降のパスの凹凸除去効率を向上させる効果と、MINI8の標準削正圧力 19A に対して削正圧力が高いことからレール凹凸を粗めに除去する効果が期待される。13パス以降は、凹凸除去効果と、標準削正圧力に対して削正圧力が低いことから削正後の削正痕を低減する効果が期待される。

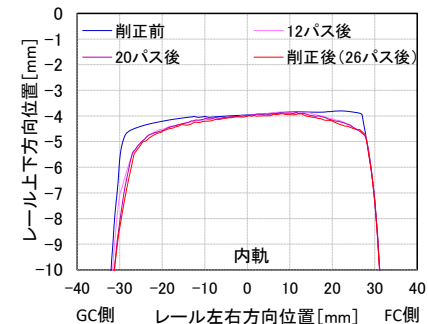
3. 測定データの分析

〈3・1〉 レール断面形状の分析 図 2 及び図 3 に、断面 B-2 と断面 C-1 のレール断面形状をそれぞれ例示する。断面 B-2 については、図 2(a)より、削正前の形状が非常に扁平であることがわかる。また、図 2(b)より、レール削正を行っても、頭頂面中央部がほとんど削正されていないことがわかる。振替レール区間である断面 C-1 については、図 3(a)より、FC 側に外軌として敷設されていた期間に生じた側摩耗が確認できる。断面 C-1 のような断面形状は、レール削正車の砥石とレール表面の接触面積が小さくなって、両者の接触圧力が高くなるため、削正によるレール凹凸除去の観点では有利であると考えられる。なお、図 2(b)及び図 3(b)より、いずれの断面においても、断面修復パスを含む 12 パスまでは FC 部付近、GC 部付近が多く削正されていることがわかる。

〈3・2〉 レール凹凸の分析 図 4 に、区間 B、C における削正に伴うレール凹凸波形の推移を例示する。同図より、区間 C ではパス数の増加とともにレール凹凸の振幅が

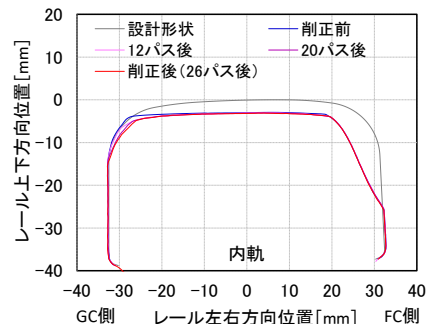


(a) 頭部全体図

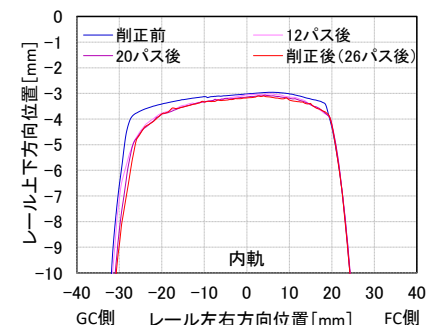


(b) 頭頂面拡大図

図 2 断面 B-2 のレール断面形状



(a) 頭部全体図



(b) 頭頂面拡大図

図 3 断面 C-1 のレール断面形状

減少するのが確認できるが、区間 B では 12 パス以降の振幅の減少がほぼ確認できない。そこで、このようなレール凹凸の推移を分析するために、一定区間のレール凹凸の振幅の評価指標として平均レール凹凸を用いる。平均レール凹凸とは、レール凹凸波形を理想的な正弦波と仮定して、

波形の標準偏差を $2\sqrt{2}$ 倍して算出した値である。なお、継目部の影響を除外するために、継目前後 1.5m を除いたレール中央部を 1 ロットとして、レール断面形状測定箇所 (表 1) を含む 16 ロットの平均レール凹凸を算出した。

図 5 に、削正時の平均レール凹凸の推移を示す。いずれのロットも削正圧力が高い 12 パスまでに平均レール凹凸が大きく減少しているが、13 パス以降は減少傾向にばらつきが見られる。例えば、区間 C のロットは 13 パス以降に平均レール凹凸が減少しているが、区間 B のロットはほとんど減少していない。区間 B のように 13 パス以降の平均レール凹凸の減少が小さい場合、断面修復パスの不足により砥石接触時の面圧低下が生じ、凹凸除去パスの効率が低下していると推察される。なお、ロット C-1 及び区間 E のロットは、削正後の平均レール凹凸が 0.02mm 程度まで減少しており、ほぼ下限値 (以下、「削正限界」と言う。) に達していると考えられる。

#### 4. レール断面形状とレール凹凸除去効率に関する分析

**〈4.1〉 レール断面形状の評価指標** レール断面形状の評価指標として曲率半径を用いるのが一般的だが、レール表面の凹凸等により局所的に大きく値が変動する場合がある。そこで本研究では、図 6 に示す考え方でレール断面形状の評価指標 (以下、「設計差分面積比」と言う。) を定義する。まず、レール断面の測定形状と設計形状の y 座標の最大値を揃えた上で、両者の y 軸方向の差 ( $\Delta y$ ) を、x 軸方向に積分して得られる面積 (図中、青色部の面積) を設計差分面積と定義する。ただし、測定形状の y 座標が設計形状の y 座標を上回る場合 ( $\Delta y < 0$ ) は設計差分面積に計上しない。設計差分面積は測定形状が扁平なほど増加し、頭頂面が x 軸に平行な直線である場合に最大値 (図中、赤枠内の面積) となる。この定義上の最大値で設計差分面積を除いた値を設計差分面積比と定義し、レール断面形状を定量的に表す指標として用いる。なお本研究では、レール中心から $\pm 27.5\text{mm}$ を積分範囲とした。

図 7 に、各断面測定箇所における削正前の設計差分面積比の算出結果を示す。図 2 に例示した、扁平な断面形状を持つ断面 B-2 の設計差分面積比は 0.80 であり、1.0 に近い値となっていることから、扁平度のある程度適切に表していると考えられる。また、B-2 と同様にレール断面形状が比較的扁平であった区間 A、B、D、F の各断面においても、設計差分面積比は 0.7 以上であった。一方、振替レール区間である区間 C、E については、FC 側の過去の側摩耗による影響により 0.4~0.6 の範囲内にあり、その他の区間より小さい値となっていた。

**〈4.2〉 設計差分面積比と平均レール凹凸の関係** 図 8 に削正前の設計差分面積比と削正後の平均レール凹凸の

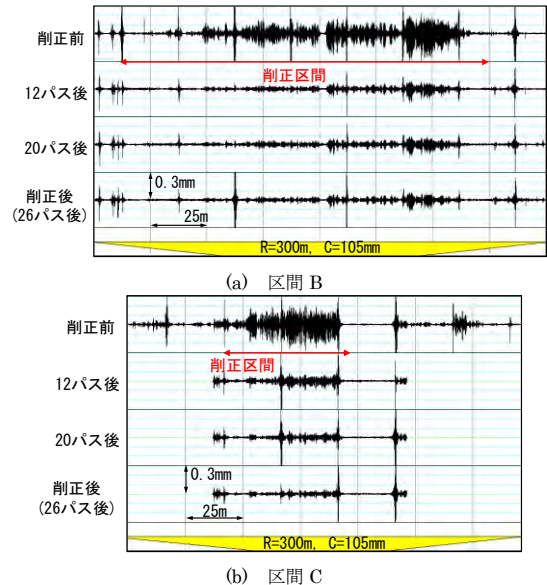


図 4 レール凹凸波形の推移

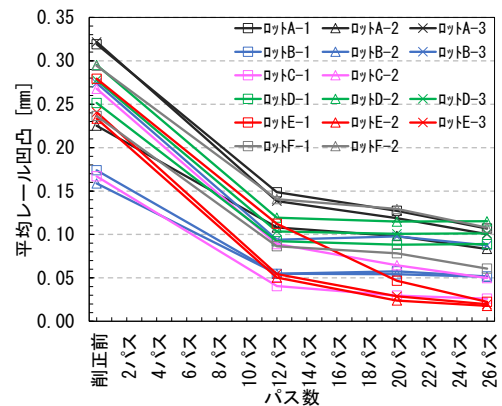


図 5 平均レール凹凸の推移

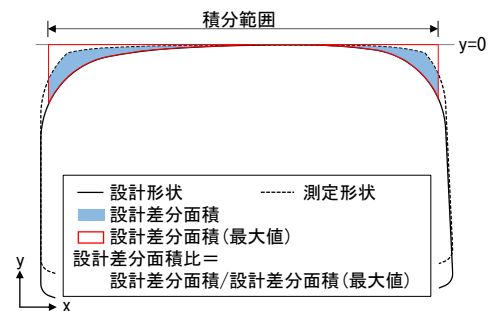


図 6 設計差分面積比の算出方法

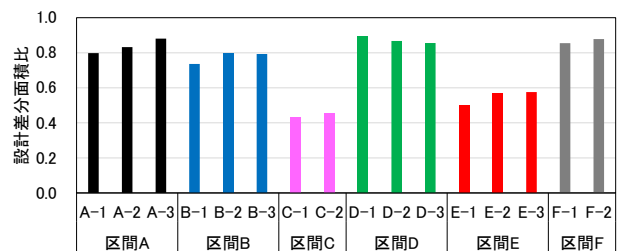


図 7 削正前の設計差分面積比の算出結果

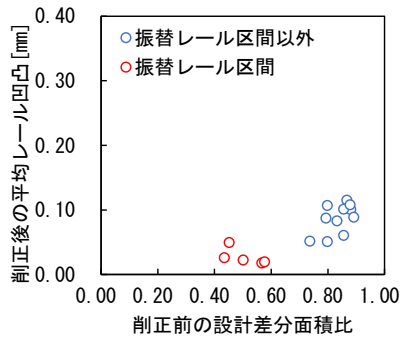


図 8 削正前の設計差分面積比と削正後の平均レール凹凸の関係

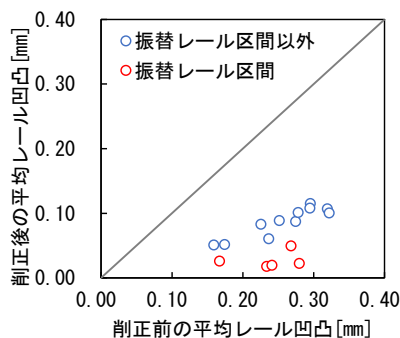


図 9 削正前の平均レール凹凸と削正後の平均レール凹凸の関係

関係を、図 9 に削正前後の平均レール凹凸の関係を示す。図 8 より、振替レール区間を含む全ロットを対象とした場合、設計差分面積比が大きくなるほど削正後の平均レール凹凸が大きくなる傾向が見られる。また図 9 より、振替レール区間以外では、削正前の平均レール凹凸が大きいかほど削正後の平均レール凹凸が大きくなる傾向が見られる。

そこで、表 2 に、削正後の平均レール凹凸を被説明変数、削正前の平均レール凹凸と設計差分面積比を説明変数として回帰分析を行った結果を示す。表 2(a)に示すように、全ロットを対象とした分析結果を見ると、削正前の平均レール凹凸と設計差分面積比のいずれについても 1%水準で有意な正の係数が検出されており、これらの指標が大きいかほど残存するレール凹凸が大きくなると言える。この結果は、設計差分面積比が大きいかほど凹凸除去効率が低下することを示していると考えられる。なお、振替レール区間のロットには削正限界に達しているものが含まれるため、設計差分面積比の寄与を過小評価している可能性がある点には注意が必要である。

一方で、表 2(b)に示すように、振替レール区間を除いた分析では、設計差分面積比は削正後の平均レール凹凸に影響を与えない結果となった。この結果については、振替レール区間以外はレールの扁平度が高く、設計差分面積比のばらつきが小さいことが要因と考えられる。

以上より、設計差分面積比が大きいかほど、すなわちレ

表 2 回帰分析の結果

(a) 全ロットを対象とした分析

説明変数	係数	標準誤差	P値
削正前の設計差分面積比	0.149	0.026	0.000 **
削正前の平均レール凹凸	0.260	0.086	0.010 **
定数項	-0.106	0.024	0.001 **
被説明変数: 削正後の平均レール凹凸			
N=16, R <sup>2</sup> =0.814, **:1%水準で有意			

(b) 振替レール区間以外を対象とした分析

説明変数	係数	標準誤差	P値
削正前の設計差分面積比	0.052	0.081	0.542
削正前の平均レール凹凸	0.358	0.072	0.001 **
定数項	-0.048	0.060	0.440
被説明変数: 削正後の平均レール凹凸			
N=10, R <sup>2</sup> =0.838, **:1%水準で有意			

ル断面形状が扁平なほどレール凹凸が残存しやすく、凹凸除去効率が低下することが示唆された。ただし、振替レール区間の断面形状の特殊性を考慮すると、サンプル数を増やしてより精緻な分析を行う必要があると考えられる。

### 5. まとめ

本研究では、より効率的なレール削正方法を検討するために、在来線のレール波状摩耗発生箇所において、レール削正時のレールの断面形状及び凹凸データを測定した。そして、レール凹凸を評価する指標として平均レール凹凸を、レール断面形状を評価する指標として設計差分面積比を算出し、両者の関係を分析した。その結果、設計差分面積比が大きいかほど削正後にレール凹凸が残存しやすく、凹凸除去効率が低下することが示唆された。

今後は、比較的レールの扁平化が進行していない区間においても測定を実施し、レール断面形状とレール凹凸除去効率に関して、より精緻な分析を行う予定である。また、レールの扁平度に応じたパスパターンについても検討していく予定である。

### 文 献

- (1) 日本スベノ社:「特集 車輪とレール/レール削正「スベノ社のレール削正技術」, 鉄道車両と技術, Vol.9, No.85 pp.14-20 (2003)
- (2) 田中博文, 梶原和博, 三和雅史:「レール波状摩耗の進展過程を考慮した効率的な削正時期の検討」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), JSCM-2-1, pp.138-141 (2019)
- (3) 田中博文, 梶原和博, 三和雅史:「レール削正による波状摩耗の進展過程を考慮した効率的なレール削正方法」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), No.3204 (2018)
- (4) 田中博文, 梶原和博, 三和雅史:「レール削正による波状摩耗の凹凸除去モデルの構築とレール削正効率の試算」, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-524 (2019)
- (5) 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)