

平成 25 年度

学位論文

曲線外軌レールの表面損傷に関する研究

瀧川 光伸



# 目次

<b>第 1 章 緒言</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.1.1 車輪とレール間に生じるトライボロジー的課題	1
1.1.2 曲線レールに生じる表面損傷の問題	5
1.1.3 これまでのレール表面損傷	8
1.2 きしみ割れの現状	10
1.2.1 曲線の外軌レールに発生する損傷の種類	10
1.2.2 レール表面疲労損傷（きしみ割れ含む）	
発生数の変化	13
1.2.3 きしみ割れの発生状況（軌道条件、荷重条件）	16
1.2.4 レール表面におけるきしみ割れの発生範囲	22
1.2.5 トンネル区間で発生するきしみ割れの特徴	24
1.3 諸外国におけるきしみ割れの現状	26
1.3.1 ハットフィールド（イギリス）における	
事故の概況	26
1.3.2 諸外国のレール損傷状況	32
1.4 本研究の目的	35
1.5 本研究の構成	36
第 1 章の参考文献	39
<b>第 2 章 レール・車輪間に影響する環境の変化</b>	<b>41</b>
2.1 レール表面損傷の変化	41
2.2 JRになってからの軌道と車両構造の変化	46
2.2.1 軌道構造の変化	49
2.2.2 車両構造の変化	50
2.3 外軌レールへの潤滑手法の変化	55

2.4	本章のまとめ	59
	第2章の参考文献	60
<b>第3章</b>	<b>レールの損傷管理ときしみ割れの関係</b>	<b>61</b>
3.1	超音波によるレール探傷ときしみ割れの関係	61
3.1.1	レール損傷管理の基本	62
3.1.2	レール探傷車の探傷方法	64
3.1.2.1	探触子の構成	64
3.1.2.2	0°探触子の性能	66
3.1.2.3	70°探触子の性能	67
3.1.2.4	レール探傷車によるきしみ割れ探傷	68
3.2	きしみ割れのレール内部き裂状況	69
3.3	新たな検査方法の開発	71
3.3.1	画像によるレール表面き裂の検出	72
3.3.1.1	これまでの画像検出装置	72
3.3.1.2	撮影装置の設計	74
3.3.1.3	レール探傷車による走行試験	76
3.3.2	レールあご下からのレール探傷	79
3.3.2.1	新しい探傷装置のコンセプト	81
3.3.2.2	探触子の検討	82
3.3.2.3	探触子の基本性能試験	84
3.3.2.4	レール試験片による探傷試験	90
3.3.2.5	レール頭部横裂連続探傷器の試作	93
3.4	本章のまとめ	103
	第3章の参考文献	104
<b>第4章</b>	<b>実験によるきしみ割れの発生条件分析</b>	<b>107</b>
4.1	転動試験装置の性能確認試験	107
4.1.1	転動試験装置の概要	107
4.1.2	レールが受ける荷重およびレールと車輪の位置関係	109



4.1.2.1	軌道動的測定試験箇所の概要	109
4.1.2.2	ラジアル荷重とスラスト荷重	110
4.1.2.3	レールと車輪の接触角	113
4.1.2.4	レール長手方向と車輪がなす角度	115
4.1.3	レール・車輪の接触解析	117
4.1.4	転動試験装置による摩耗実験	120
4.1.4.1	摩耗量評価のための実験条件の計算	122
4.1.4.2	摩耗実験の結果	124
4.1.5	営業線におけるレール摩耗量と実験による 摩耗量の評価	126
4.2	きしみ割れ発生箇所（営業線）における軌道動的測定	128
4.2.1	輪重（ラジアル荷重）の測定結果	129
4.2.2	横圧（スラスト荷重）の測定結果	130
4.2.3	小返り角の測定結果	132
4.2.4	アタック角の測定結果	134
4.2.5	きしみ割れ再現実験のための条件設定	135
4.3	きしみ割れの再現実験と発生条件分析	136
4.3.1	レール・車輪の接触解析	136
4.3.2	きしみ割れ再現実験	139
4.3.2.1	きしみ割れ再現条件の選定	139
4.3.2.2	熱処理レール材質によるきしみ割れ再現実験	143
4.4	本章のまとめ	146
	第4章参考文献	148
<b>第5章</b>	<b>きしみ割れ対策手法の検討</b>	<b>149</b>
5.1	レール材質変更によるきしみ割れ対策の検討	150
5.1.1	転動試験装置によるレール材質変更実験	150
5.1.1.1	実験を行ったレール材質	150
5.1.1.2	新しいレール材質による実験結果	152
5.1.1.3	海外におけるきしみ割れ対策レール	158

5.1.2	営業線における試験レールの敷設	160
5.1.2.1	HE370レールの試験敷設結果 (A区間、B区間)	160
5.1.2.2	HE370レール、Test Aレール、 Test Bレールの試験敷設結果 (C区間)	164
5.2	レールと車輪の接触状態改善による きしみ割れ対策の検討	167
5.2.1	これまでのレール削正 (日比谷線脱線事故における削正位置の制限)	168
5.2.2	レール削正範囲の拡大	170
5.2.3	レール削正周期と削正量の最適化	174
5.2.4	レール削正試験による削正量の確認	177
5.2.4.1	試験区間の概況	177
5.2.4.2	試験区間のきしみ割れの状況	181
5.2.4.3	削正量の評価	183
5.2.4.4	レール削正試験結果から考察される きしみ割れに対するレール削正手法	186
5.3	本章のまとめ	188
	第5章の参考文献	190
	<b>第6章 結言</b>	<b>193</b>
6.1	本研究の結論	193
6.2	今後の課題	197
	<b>主論文を構成する論文</b>	<b>199</b>
	<b>謝辞</b>	<b>201</b>

# 第 1 章 緒言

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 車輪とレールの間には生じるトライボロジー的課題

鉄道は土木構造物の一部である「レール(Rail)」の上を車両の一部である「車輪(Wheel)」が走行することで成立している輸送機関である。その土木構造物と車両の関係を図 1.1 に示す。レールは一般的に路盤(Roadbed)上の砕石の上にあるまくらぎ(Sleeper)上に固定されている。そのレールは様々な地形を縫うように敷設されるため、平面的には直線や曲線で構成されている。鉄道の車輪は、輪軸(Wheelset)により左右輪が固定されていることが自動車と異なった特徴となっており、その輪軸は一部の貨車を除き台車(Bogie)を介して車両(Car body)とばね系でつながっている。この中で、土木構造物であるレールは車輪から直接荷重を受ける部材であり、レールが受ける荷重で上下方向のものを「輪重(Wheel load)」、左右方向のものを「横圧(Lateral force)」という。その関係と車輪およびレールの各部分の呼び名を図 1.2 に示す。車輪はレールの上を転がって走行するため、お互いに「摩耗」や「表面損傷」などのトライボロジー的な問題を生じることがある。例えば、車輪踏面(Wheel tread)では、レールとの接触面においてへこむように摩耗する「凹摩(Hollow wear)」やレール上を滑走したことにより「フラット(Flat)」が発生する場合がある(図 1.3)。レール頭頂面(Rail crown)では、車輪との接触面において車輪と同様に摩耗が進むほかに、直線を中心に転がり接触疲労損傷である「シェリング(Squat, 図 1.4)」が発生することがある。

特に曲線に敷設されているレールに対してはトライボロジー的現象が顕著に現れやすい。例えば、図 1.5 に示すよう側摩耗と言われる摩耗現象や細かいき裂が車輪との接触面に生じることが多い。その理由として、曲線を走行する車

輪は、一般的に車両に生じる遠心力などを受けて横圧が発生し、図 1.2 に示すように車輪のフランジ (Flange) をレールの頭側面に押しつけながら走行している。その他、レールと車輪の接触面には、曲線内の左右レールのわずかな経路長の違いや車両と台車による動きの制約により、滑りなどの複雑な力も受けている。そのような影響もあり、曲線に敷設されているレール表面には、直線に敷設されているレールと比べて「摩耗」やき裂などの「表面損傷」が発生しやすくなる。

このように、レールは直線、曲線という線路の敷設状況に関係なく、常に過酷な列車荷重の影響を受けている。そのため摩耗および表面損傷といったトライボロジー的現象は避けることはできない。したがって列車運行に影響をおよぼすような状態に達すると、レールは新しいものに取り換えられその使命を終えることになる。摩耗および損傷といった状態は、定期的な検査により常にその状態を把握し、列車の脱線やレールが折損に至る前に予防的に保全されている。しかしながら、レール折損については、ごくまれにその使用期間中に発生する場合があります。安全運行の観点から列車を止めて技術社員による確認を必要とする。レールが折損した情報は、通常、折損によって開いたレールのところでレール中を流れている信号電流が遮断されることにより、信号が赤表示となることでわかる仕組みとなっている。その結果として列車が止まり、鉄道利用者に対して迷惑をかけることになる。安全の面では、過去の試験からレール折損による開口量が 70 mm 以内であれば、列車が脱線する危険性はないということが判明しており、万が一レールが折損しても開口量として 70 mm 以内に収まるようにレールの保守管理を行っている。とはいえ、レールの折損を無くすことはサービス面から考えても大切なことであり、レール損傷管理における重要な目標の一つとなっている。

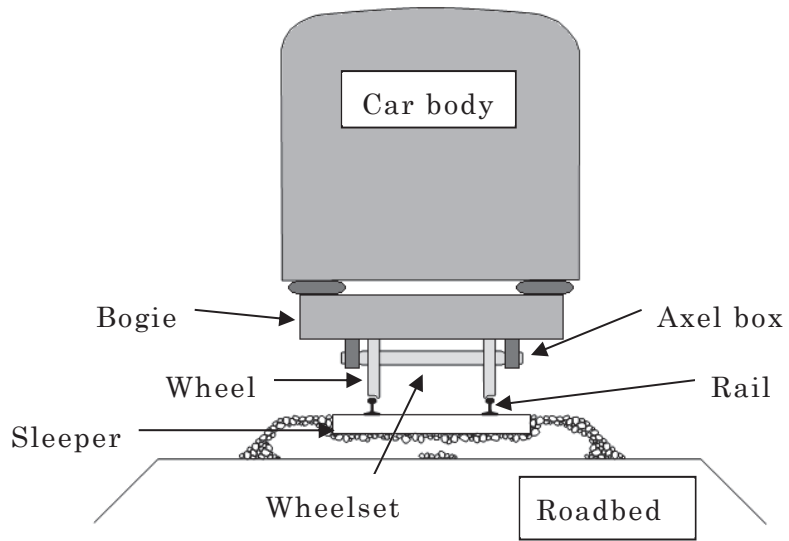


Fig.1.1 Rolling stock and track structure

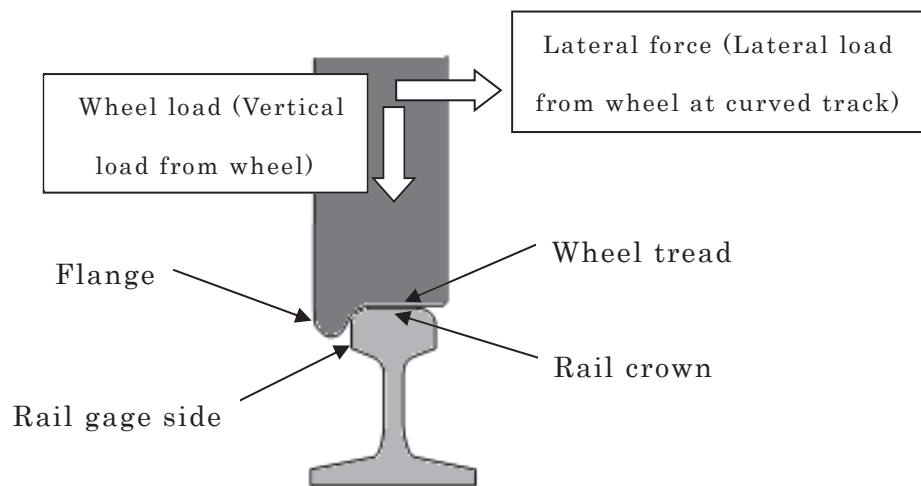


Fig. 1.2 Wheel/rail contact condition

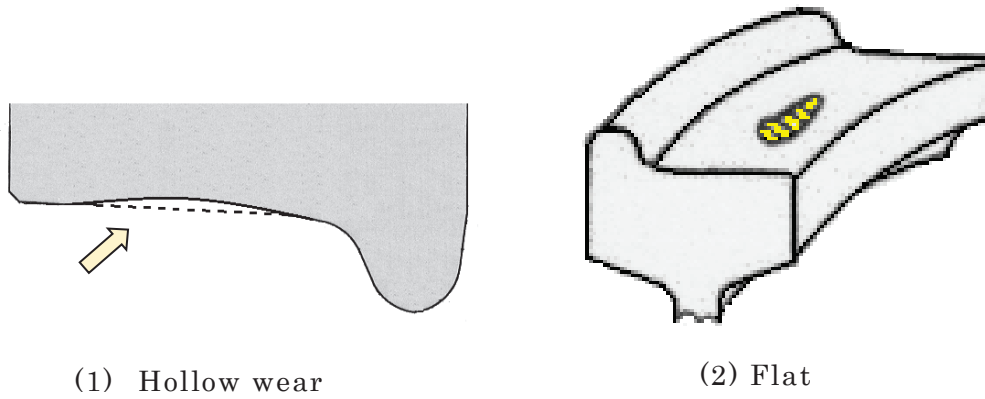


Fig. 1.3 Tribological phenomena on wheel tread

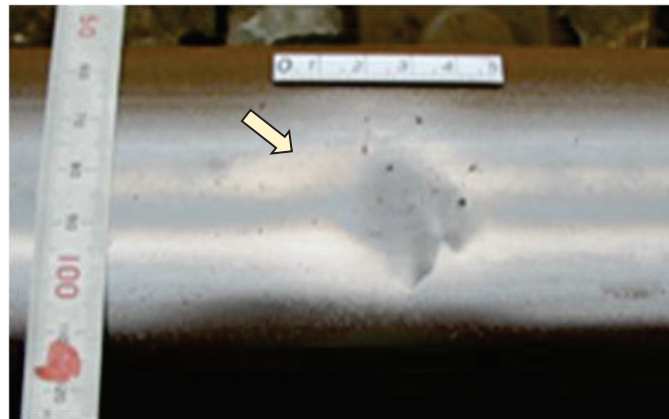


Fig. 1.4 Squat (on rail crown)

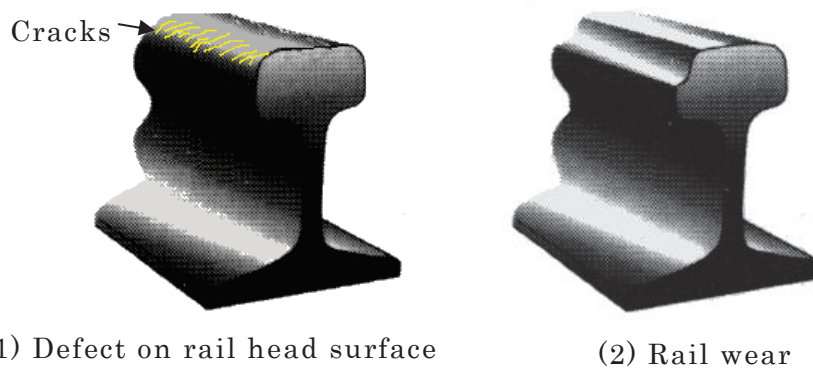


Fig. 1.5 Tribological phenomena on rail at curved track

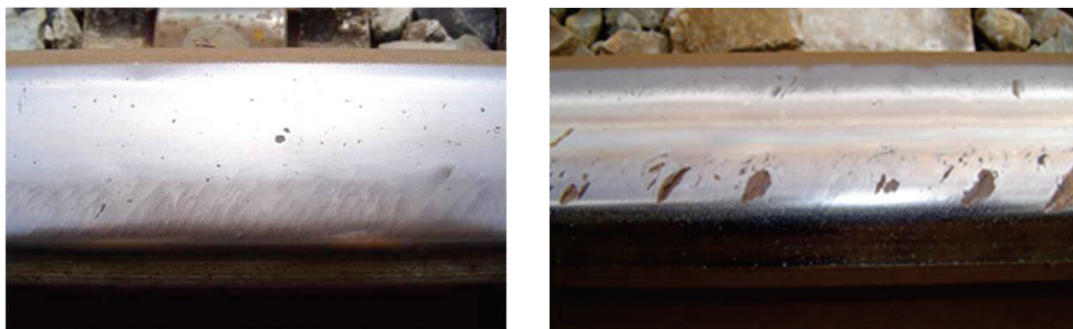
## 1.1.2 曲線レールに生じる表面損傷の問題

曲線区間に敷設されているレールは、外側にあるレールを「外軌(High rail)」, 内側にあるレールを「内軌(Low rail)」と呼んでいる。また、各レールの頭頂面において、車輪フランジが接触する側をゲージコーナー(Gage corner, GC), その反対側をフィールドコーナー(Field corner, FC)と呼んでいる。我々は毎年、現業機関から軌道をメンテナンスしていく上で困っていることや我々の今後の研究に対する要望などについて意見交換する場を設けている。その際に、曲線区間に敷設されている外軌レールのゲージコーナー部に表面損傷が目立つようになり、レール交換が増加しているとの話を2000年頃から聞くようになった。そこで、その表面損傷の発生状況を調べ、その対応策を検討するための研究を始めた。

本研究はその表面損傷の発生に関する実態調査を足掛かりとして2004年から開始することになった。この表面損傷は「きしみ割れ(Head checks, 図1.6)」と呼ばれ、従来からレール損傷管理の対象とされていた。以前のきしみ割れは、図1.6(1)に示すような“き裂(Cracks)のみの状態”が一般的であり、図1.6(2)に見られるような“き裂からのはく離(Flaking)”が生じる現象はほとんどなかった。したがって、2000年より前は、レール表面に現れている“き裂の長さ”のみで管理を行っていれば十分であった。その管理指標を図1.7に示す[1]。この管理指標では、きしみ割れのき裂の長さがレール頭頂面の半分の長さを超えたときに、計画的なレール交換を実施するようになっている。しかしながら、現業機関で困っていたきしみ割れは、き裂長さがレール頭頂面中央を超えないものがほとんどであり、そのき裂長さの範囲内で図1.6(2)に示すような“はく離”を生じてしまう事例が多かった。レール頭頂面中央を超えないき裂長さの場合、図1.7に示す通り注意喚起を行う監視マークのみでレール管理を行うことになっており、レール交換の対象とはならない。しかも、2008年にはきしみ割れの発生している箇所ではレール折損が発生[2],[3]し、確認作業や仮復旧を行うために列車の定時運行に影響を与えてしまった。折損したレール内部の損傷状況を調べると図1.8に示すような横裂(Vertical defect)の存在が認められ、比較的小さな疲労亀裂から折損に至っていたことがわかった。その



際のレール表面上に現れているき裂長さは、レール頭頂面中央を超えておらず、レール表面に現れているき裂長さの管理だけでは、横裂を発生させるきしみ割れについて管理していくことが不十分であると考えられた。今後はきしみ割れの管理方法の変更と抑制対策が、レール管理を行っていく中で重要度を増すことが想定された。



(1) Crack type

(2) Crack and flaking type

Fig. 1.6 Head checks

Code	Contents	Appearance	Inside	Action
	Head checks can be found at gauge corner.			Recording
A	Head checks propagate on the other corner of rail head.			Marking
B	Head checks propagate up to thirds of the breadth of rail head.			Installing fish plates and scheduling replacement
C	A crack of head checks propagates more and comes to be transverse fissure.			Replacing as soon as possible

Fig 1.7 Classification to manage head checks [1]





Fig. 1.8 Vertical defect in rail head

### 1.1.3 これまでのレール表面損傷

それまでのレール表面損傷の代表としては、1973年頃に東海道新幹線で問題となった「シェリング（図 1.2）」であり、古くは 1951 年頃の山陽本線で蒸気機関車の散水を原因とした「黒裂」もその一種と言われている[4],[5]。東海道新幹線のシェリングはその後の全線リフレッシュ工事（レールの重軌条化（50 kg/m→60kg/m））により影をひそめたが、1982年頃から山陽新幹線を中心に再び顕著化した。1987年の JR 発足後以降、在来線においても新幹線と同様のシェリングが直線区間の多くで見られるようになった。図 1.9 に JR 発足後、1994 年から 2008 年までの JR6 社で発生したレール折損数（在来線）とその中でレール表面損傷の代表とされるシェリングときしみ割れの原因による折損数を示す[6]。約 15 年間のレール折損数であるが、年度により 15 件から 25 件程度までの間で件数の増減はあるものの、平均 20 件程度で大きな変化は見られない。しかしながら、レール表面損傷の代表であるシェリングときしみ割れを原因としたレール折損数は 2002 年以降増加する傾向にあり、きしみ割れが問題視され始めた時期とほぼ一致する。さらに、2004 年以降ではきしみ割れを原因とするレール折損も見られるようになっている。

在来線におけるシェリングの対策としては、車輪から受ける作用によりレール頭頂面表層に蓄積される金属疲労を定期的に取り除くことが効果的であることがわかった[7]。そこで、2005 年から JR 東日本管内の首都圏エリアの在来線において、レール頭頂面の表層を回転砥石により削り取るレール削正（図 1.10）という保守作業が、定期的に行われるようになった[8]。最近ではその効果もあって首都圏の在来線では、シェリングを原因とするレール交換数量が減少する傾向にある[2],[9]。文献[9]によるとレール削正を実施しているレールの直線部における損傷の発生率が、1m 当たり 0.030 から 0.005 になったという結果も示されている。しかしながら、きしみ割れを原因としたレール交換数量は逆に増加しており[2],[9]、シェリングの対策が確立された現時点では、きしみ割れの発生抑制、特にき裂からのはく離やレール頭部内における横裂の発生を抑制していかなければならない。

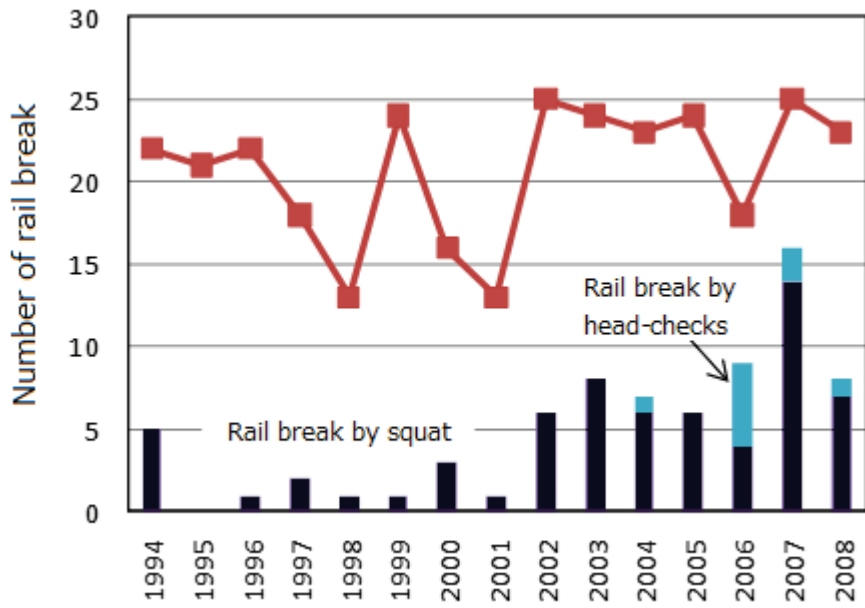


Fig. 1.9 Number of rail break in JR grope

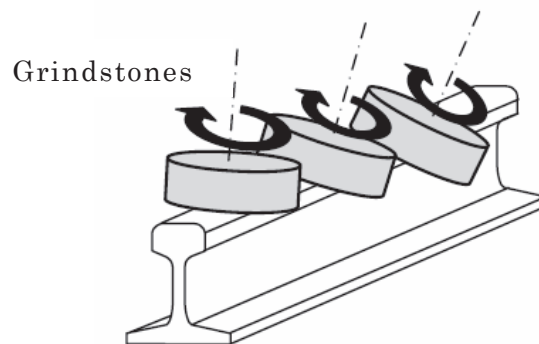


Fig. 1.10 Grind work for rail

## 1.2 きしみ割れの現状

### 1.2.1 曲線の外軌レールに発生する損傷の種類

曲線の外軌レールに発生している損傷は、一般的に“きしみ割れ”として管理をしていた。しかしながら、近年のきしみ割れによるレール交換数量の増加を受けて詳細な調査を行ったところ、きしみ割れとして管理していた損傷は、次の3種類に分類できることが確認された[10]。その3種類の損傷は、発生形態やその状況により「きしみ割れ」「ゲージコーナーき裂(Gage corner cracking)」「ピッチング (Pitting)」と呼ばれている。その外観を図 1.11～図 1.13 に示す。

#### ①きしみ割れ

きしみ割れとは、レールのゲージコーナー部に一定の角度をもって発生するき裂の集合体を示す。きしみ割れのき裂がレール内部でつながることではなく離に至る場合もある。国鉄時代の1980年頃の文献には、きしみ割れのき裂からはく離が生じたものを“フレーキング”と呼んでいた[5]。また、海外ではフレーキング損傷のことを、日本と同様に Flaking もしくは Spalling[11], [12], [13] と呼んでいる。きしみ割れの生成には、車輪から受ける接触力とすべりによる接線力の作用が必要であり、レール金属が塑性変形してその限界値を超えることでき裂が生じる。

#### ②ゲージコーナーき裂

ゲージコーナーき裂とは、レールのゲージコーナー部の頭頂面寄り（きしみ割れの発生位置より頭頂面側）に発生する転がり接触疲労損傷の一種である。きしみ割れと異なった角度で表面き裂（レール頭頂面中心に向かって山形のき裂）が生じ、そのき裂は車輪からのレール断面方向（GC から FC）の接触力を繰り返し受けることによりレール内部（レール頭部表層下）に進展し、いずれは水平裂（図 1.14）となる。外観は水平裂の影響によりレール頭頂面の変色と落

ち込みを伴うことが多い。

### ③ピッチング

ピッチングは、レールや車輪の摩耗を抑制するためにレールのゲージコーナ一部で油潤滑を行っている箇所で主に発生している。レール頭頂面におけるその損傷の発生位置は、ゲージコーナ部の曲率半径の小さな部分（きしみ割れで発生するき裂の頭側部下側）であり、深さ数ミリ程度のはく離を生じることが特徴となっている。海外の重軸重鉄道でも同様の損傷が確認されており、Flaking もしくは Spalling と呼ばれている。日本のように潤滑の有無[14]により損傷名を変えている様子は見られない。

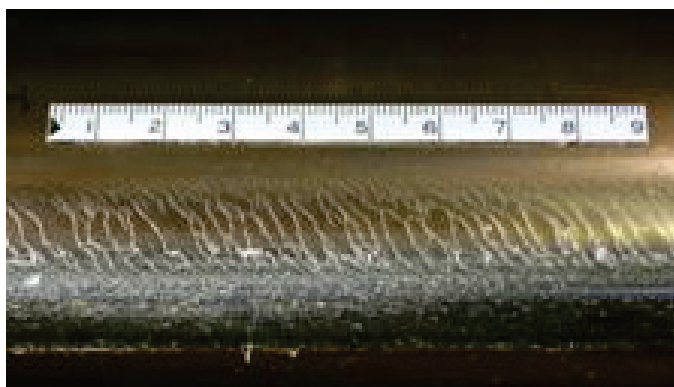


Fig. 1.11 Head checks



Fig. 1.12 Gage corner cracking



Fig. 1.13 Pitting

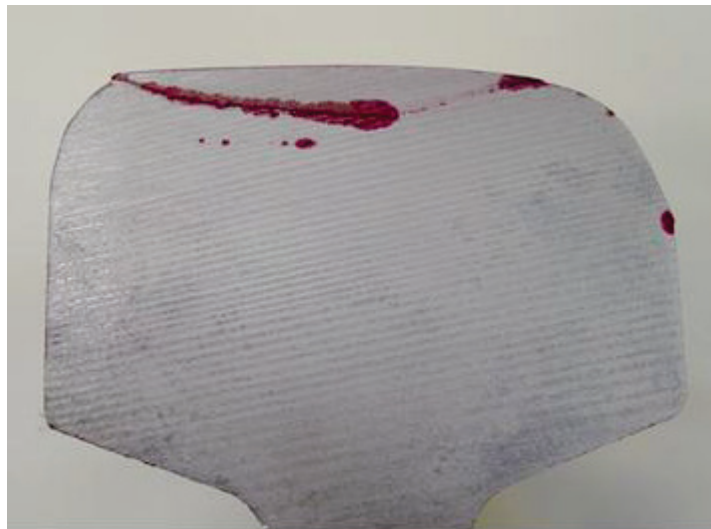


Fig. 1.14 Example of Horizontal crack

## 1.2.2 レール表面疲労損傷（きしみ割れ含む）発生数の変化

国鉄時代の終わりごろにあたる1983年に310件あったレール損傷全体の件数[4]は、1987年のJR民営化以降に実施されたレール探傷車の導入やレール損傷管理の強化により確実に減少している。JR東日本におけるレール損傷数は、1994年から2006年の間において15件から7件の間で推移している[15]。図1.15にJR東日本における1994年度以降のレール折損数に対して、レール表面の疲労損傷が原因となっていた割合を示す。JR発足以降、2000年度ごろまでのレール折損の主な原因は、継目部のある定尺区間では主に継目部付近の破端（図1.16）が多く、継目部のないロングレール区間においては溶接部の内部欠陥を原因とするレール折損が多かった。2002年度以降は、シェリングなどのレール頭部表面に生じる転がり接触疲労損傷に起因するレール折損が見られるようになった。近年、きしみ割れが発生している箇所では最初にレール折損が発生したのは2008年であり、その後もきしみ割れの生じている箇所ではレール折損が発生している。レール溶接部における折損は施工時の品質向上や施工後の探傷を強化することにより予防することが可能であるが、転がり接触疲労き裂を起点とするレール折損は、車輪がレールの上を走行している限り容易に防ぐことができない。そのため、レール材質の改善やきしみ割れを予防する保守方法を状況に応じて検討していくことが重要な取り組みとなる。

2010年までにきしみ割れの発生している箇所においてレール折損が2件発生[16]しており、その発生した場所の軌道条件を整理した。その結果を表1.1に示す。この表で累積通過トン数（Accumulated tonnage）とは、車両の輪軸が通過した回数に軸重（車軸にかかる列車荷重、一般的には車両重量の1/4）を掛けた値（単位：百万トン（million gross tons, MGT））[12]を表し、60kgはJIS E 1101に規定されている1m当たり60kgサイズのレールを示している。また、軌道構造については、バラストが砕石とコンクリートまくらぎで構成された線路構造を示しており、スラブはコンクリートスラブ上にレールを敷設した線路構造を表している。レール折損が発生した箇所の状況はいずれも曲線半径の比較的大きい区間であり、通勤型の電車しか走行しない路線上で発生していた。これらの事象から想定されるのは、貨物列車のような軸重の大きい車両が走行

しない路線が増え，通勤型の電車も国鉄時代に比べ軽くなっていることから，曲線レールの受ける荷重条件も以前と異なった状況になっているのではないかと  
 いうことである．つまり，レールに生じる摩耗と疲労現象の関係が，国鉄時代と比較して変化してきているということである．

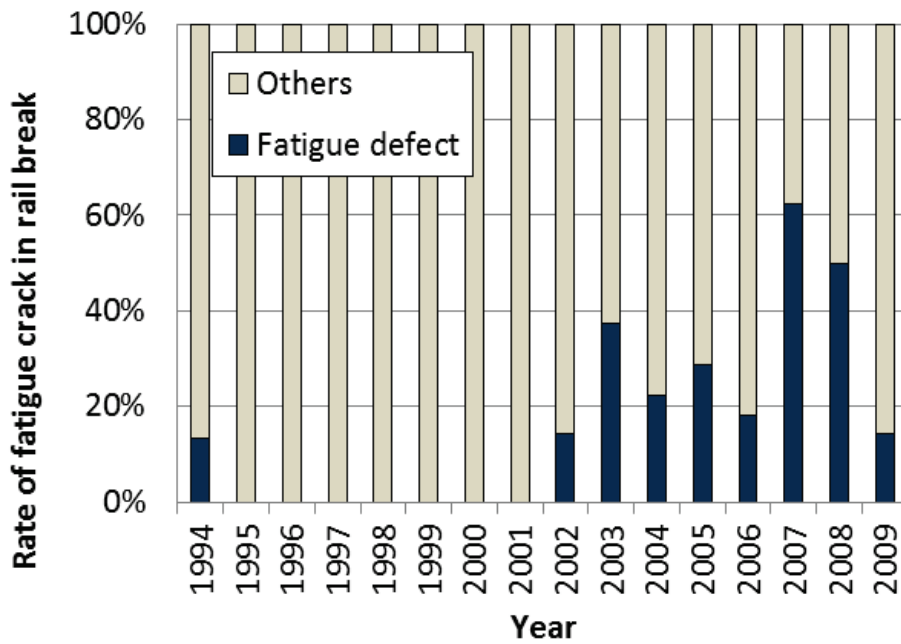


Fig. 1.15 Rate by rolling contact fatigue failure in rail break (JR east)

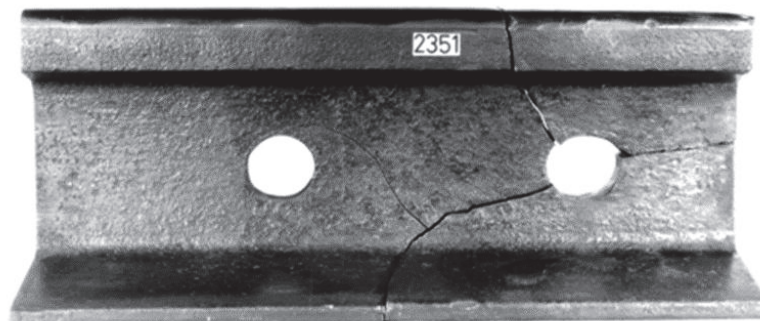


Fig 1.16 Joint hole split



Table 1.1 Track conditions at location that rail break by head checks occurred

	A	B
Curve radius	1000m	800m
Rail type	60kg*	60kg*
Rail material	As-rolled	Head-hardened
Track structure	Concrete slab	Ballast
Accumulated tonnage	410 MGT	260 MGT

\* 60kg : 60kg rail (JIS E 1101)

### 1.2.3 きしみ割れの発生状況（軌道条件，荷重条件）

きしみ割れの発生している軌道条件と横圧を整理するために，首都圏の7路線を対象にきしみ割れの発生している箇所の曲線半径と横圧の大きさを調査した[17],[18]．調査対象とした路線の選定は，現業機関の聞き取り調査をもとにきしみ割れが発生していると予想される路線とした．

きしみ割れの発生箇所は，図 1.17 に示すレール探傷車（Rail flow detection vehicle, RFD）により超音波検査で発見された2年分の損傷データから，きしみ割れと考えられる損傷データを抽出して特定した．きしみ割れが発生している箇所の横圧は，軌道にかかわる検査項目（軌道の不整，輪重，横圧など）を定期的に測定している検査専用列車（軌道検測車（Track inspection train, East-i），図 1.18）のデータを利用して求めた．特に横圧については，きしみ割れが発生している区間を通過する際に得られる連続的な値に対して平均処理をして求めた．調査した路線の曲線数は全部で1139であった．

#### (1) 軌道条件の分析結果

きしみ割れの発生していた箇所を曲線半径別に整理した結果を図 1.19 に示す．横軸は曲線半径，縦軸は調査した曲線半径毎の軌道延長に対するきしみ割れの発生していた延長の割合を示す．図より，曲線半径800m以下の曲線区間できしみ割れが発生しやすく，特に曲線半径700m～800mと400m付近のレールに発生する割合が高いことが確認された．ここで JR 東日本のロングレール（Continuous welded rail, CWR）区間の普通レール（As-rolled steel rail, JIS E 1101）と熱処理レール（Head-hardened rail, JIS E 1120）の使用区分を表 1.2，化学成分と機械的特性を表 1.3 に示す．表 1.2 より，1級線および2級線における曲線半径800m以下の曲線外軌には，熱処理レールを使用することになっている．今回調査対象とした路線は全て1級線と2級線であり，きしみ割れの発生している曲線の多くは熱処理レールを使用している箇所であることがわかった．

この図からきしみ割れの発生条件として，さらに次の2点が読み取れる．1点目は，曲線半径700m～800m以外の400mでもきしみ割れの発生延長が増加し

ていることである。この点については、発生箇所の線形を詳細に分析したところ、きしみ割れの多くが緩和曲線（直線から本曲線にかけて曲率が順次変化している曲線）内で発生していた（図 1.20 参照）。この区間では曲線半径が 400m よりも大きい部分が構造上存在しており、実際にきしみ割れが発生している部分の曲線半径は 400m より大きめであることが明らかになった。2 点目は、きしみ割れの発生延長としては少ないが、普通レールを敷設している曲線半径 1000m 以上の曲線外軌でもその発生が見られたことである。表 1.3 を見ると、熱処理レールは炭素量が多く、硬度的にも高いため、普通レールと比較して摩耗しにくくき裂が生じやすいのではないかと考えられたが、荷重条件によっては普通レールでも摩耗せずき裂を生じてしまうことが判明した。

主にレール交換の対象となるきしみ割れには、はく離を生じているという観点から、その発生時期を知ることは重要であると考え、はく離が発生しはじめの累積通過トン数を調べた。その結果を図 1.21 に示す。図より、はく離は早いもので 100MGT を超えたあたりから発生し、140MGT を超えると急激に増えていることが確認された。

## (2) 横圧の分析 (East-i)

きしみ割れの発生している曲線において、East-i が走行した時の外軌横圧の大きさについて整理した結果を図 1.22 に示す。横圧は普通レールの箇所で発生している横圧と熱処理レールで発生している横圧に分けて表示した。図より、きしみ割れの発生している曲線の横圧の中心は、熱処理レールが 9~12kN、普通レールが熱処理レールの半分程度の大きさである 3~6kN となっていることがわかった。これらの違いは、表 1.3 に示すレールの機械的性質の違いによるものと考えられたが、10kN 程度の横圧でも普通レール対してきしみ割れが発生していることを踏まえると、普通レールが単純な解決策になるとは考えにくかった。

## (3) きしみ割れ発生状況のまとめ

きしみ割れは、曲線半径 800m 以下の熱処理レールが敷設されている曲線で発生しやすく、その時の横圧としては 10kN 前後であることが確認された。ただし、

曲線半径 400m～500m 程度の急曲線と言われる区間でもきしみ割れが発生していたが，その多くは緩和曲線内に存在していた．さらに，きしみ割れのき裂からはく離を生じる累積通過トン数は，早いもので 100MGT を経過した頃となった．山手線の累積通過トン数が年間 40MGT 程度であることを考慮すると，早いところではレール敷設後 3 年程度で，きしみ割れき裂の中にはく離を生じる可能性のあることがわかった．

きしみ割れと同様にレール表面損傷の代表例としては，前述したとおり「シェリング」である．そのシェリングであるが，以前の調査によると東海道新幹線ではレール交換後 10 年程度経過してから，在来線でもレール交換してから 15 年程度経過すると目立つようになったと言われている [19]．シェリングが発生するまでの経過年数と比べても，はく離を伴ったきしみ割れは非常に早く発生する傾向があり，レール保守を考える上でも早急に対策を立ててかなければならないことになる．



Fig. 1.17 Rail flow detection vehicle (RFD)



Fig. 1.18 Track inspection train (East-i)

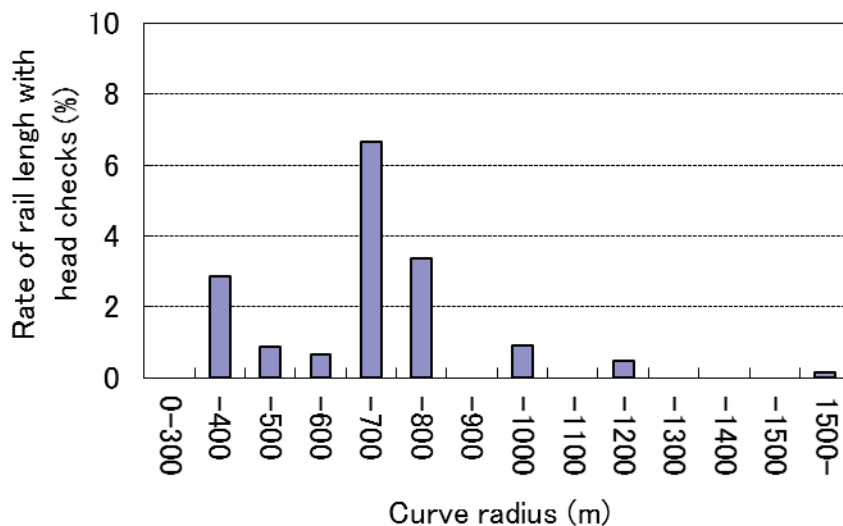


Fig. 1.19 Rate of track length with head checks to curved track length

Table 1.2 Standard to install head-hardened rail (CWR, curved track)  
(As of 2013)

Classification		Low rail	High rail
First class		As-rolled	As-rolled: R>800m
Second class		As-rolled	Head-hardened: R<=800m
Third class		As-rolled	As-rolled: R>500m Head-hardened: R<=500m
Fourth class	>= 3MGT	As-rolled	As-rolled: R>300m Head-hardened: R<=300m
	Others	As-rolled	As-rolled

R: curve radius

Table 1.3 Chemical compositions and material properties

		As-rolled	Head-hardened
Chemical compositions (%)	C	0.63 - 0.75	0.72 - 0.82
	Si	0.15 - 0.30	0.10 - 0.55
	Mn	0.7 - 1.1	0.7 - 1.1
	P	0.03 max.	0.03 max.
	S	0.025 max.	0.020 max.
	Cr	---	0.2 max.
	Mo	---	---
	V	---	0.3 max.*
Material properties	Hardness (HB)	235 min.	319 - 366
	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	800 min.	900 -1050
	Elongation (%)	10 min.	8 min.

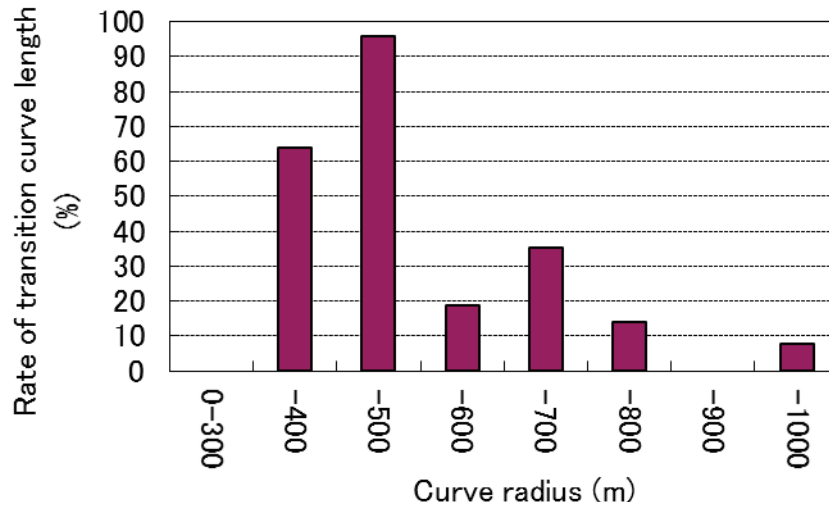


Fig. 1.20 Rate of transition curve length to curved track length with head checks

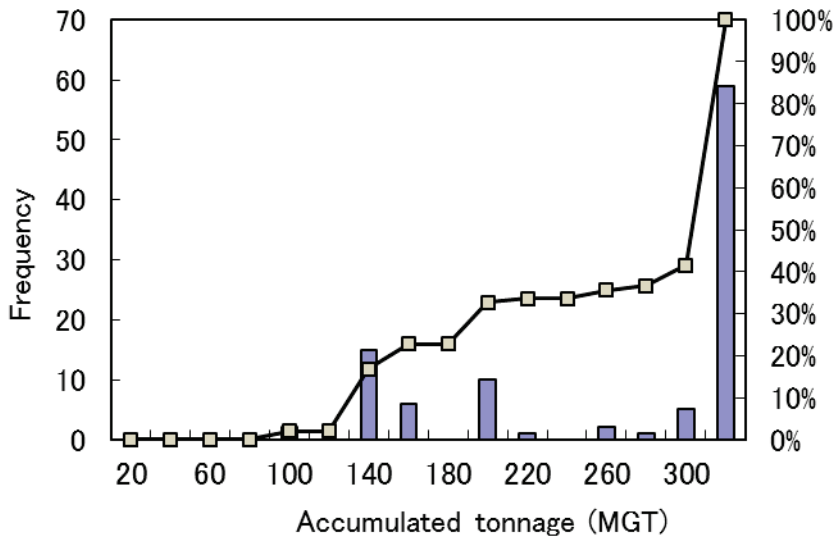


Fig. 1.21 Accumulated tonnage when flaking occurred

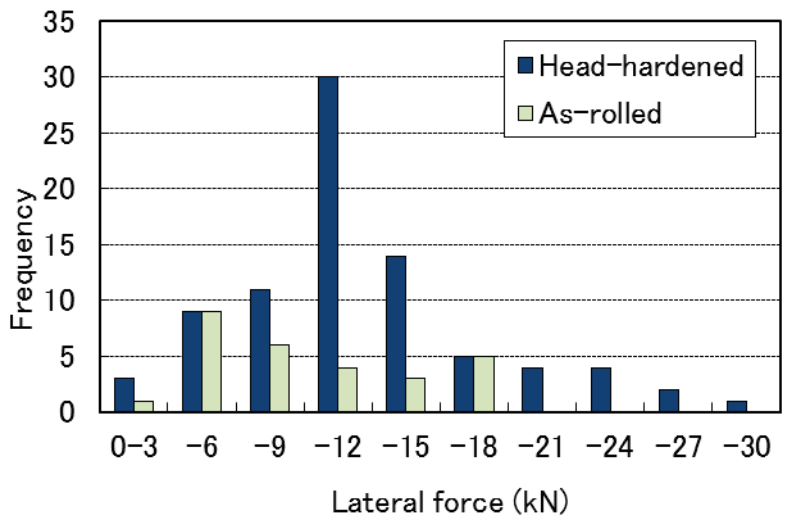


Fig. 1.22 Lateral force at position of rail with head checks

## 1.2.4 レール表面におけるきしみ割れの発生範囲

きしみ割れのき裂について、レール表面上の発生範囲の調査を東京圏の通勤路線内にある曲線 148 箇所で行った[20]. 調査は図 1.23 に示すような定規を利用して行い、き裂の両端の位置をレール頭頂面のフィールドコーナー側からの距離とレール頭頂面からの底部へ向かった距離で記録した. レール頭頂面におけるレール断面方向のき裂の範囲 (FC 側のき裂端と GC 側のき裂端) およびレール高さ方向のき裂の範囲について整理した結果を図 1.24 に示す. 調査したレールは全て 65 mm 幅のレール頭部幅となっているが、摩耗している形状もあることを考慮しなければならない. しかしながら、き裂の多くはレール幅方向で 45 mm よりゲージコーナー側、つまりゲージコーナー側からのき裂長さに換算すると 20mm 以内に発生していることになり、レール頭頂面中央 (32.5 mm) を超えてフィールドコーナー側に伸びているき裂は存在しなかった. また、ゲージコーナー部に発生しているき裂のレール高さ方向の範囲については、ほとんどがレール頭頂面から 8mm 下までの範囲内にあることが確認された.

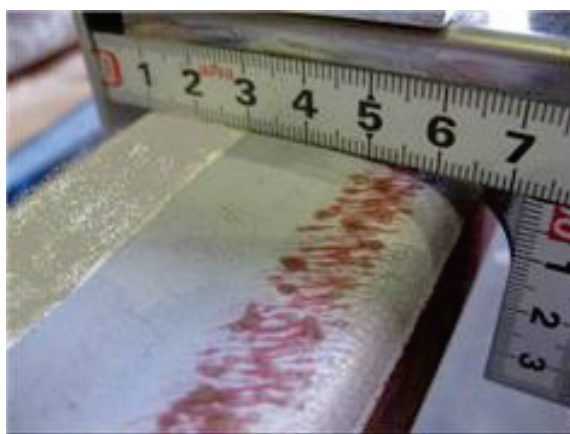
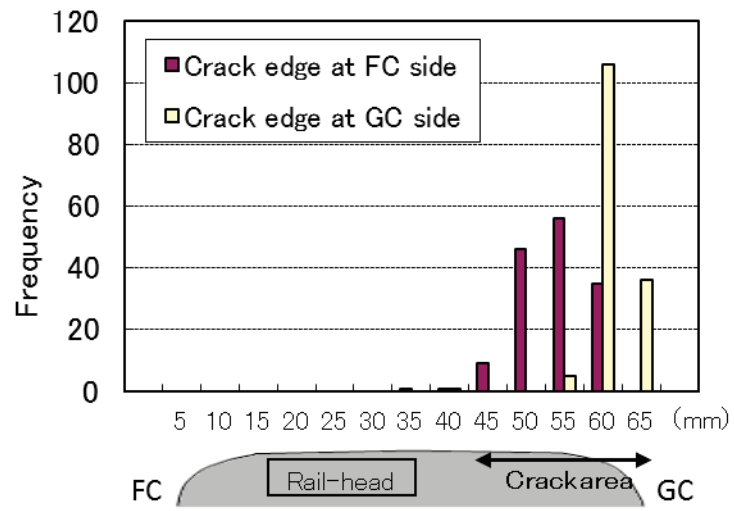
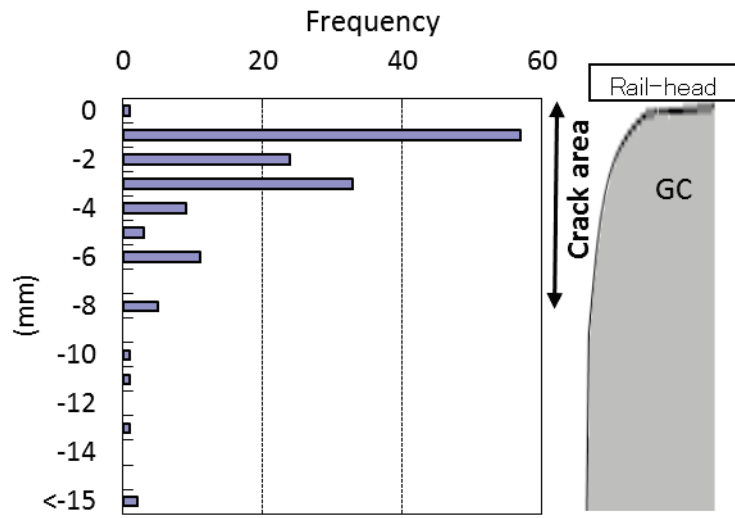


Fig. 1.23 Measurement technique (rail after liquid penetrate test)





(1) Horizontal direction area

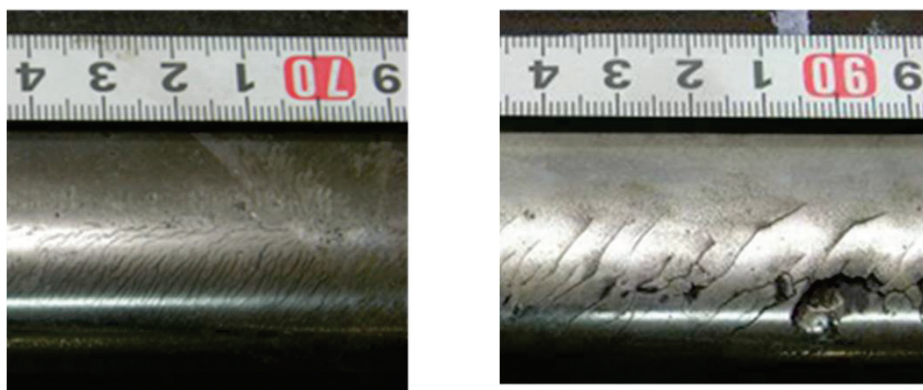


(2) Height direction area

Fig. 1.24 Area of head check cracks on rail surface

## 1.2.5 トンネル区間で発生するきしみ割れの特徴

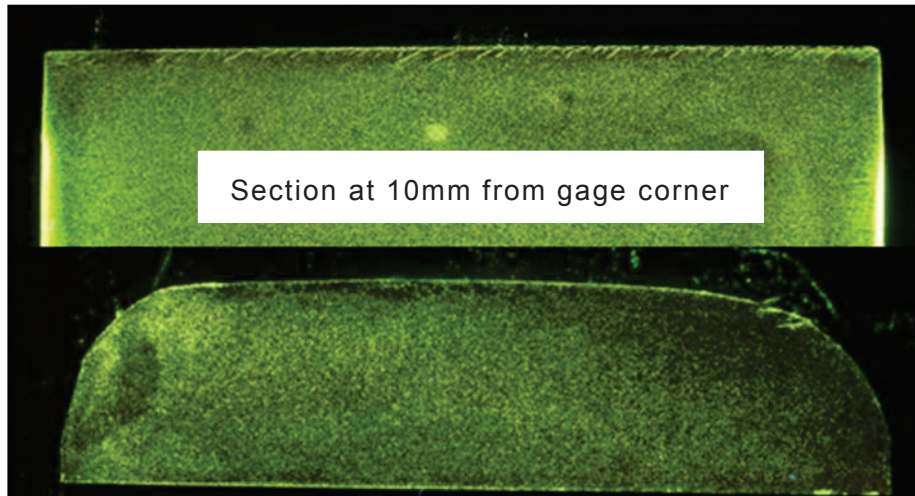
きしみ割れの発生状況を調査していく中で、同じ曲線内の一部がトンネル内に入っている区間があった。その箇所のレール（曲線半径 1200m, 熱処理レール）を調べると、トンネル内のきしみ割れはき裂のみの発生状況であったが、屋外のレールについてはき裂の状況もひどく、至る所ではく離が発生していた。その発生状況の違いを図 1.25（レール表面状態）に示す。図 1.26（レール内部状態）には各レールを切断し、レール内部のき裂状況について調べたものも合わせて示す。図 1.26 より、レール表面のき裂状態が良くない屋外レールは、内部き裂も深くまで進展していることが確認された。この現象から考察できることは、きしみ割れにはく離を生じさせるための必要条件として、雨などの水分の影響が大きく関係している可能性が高いということが判明した。



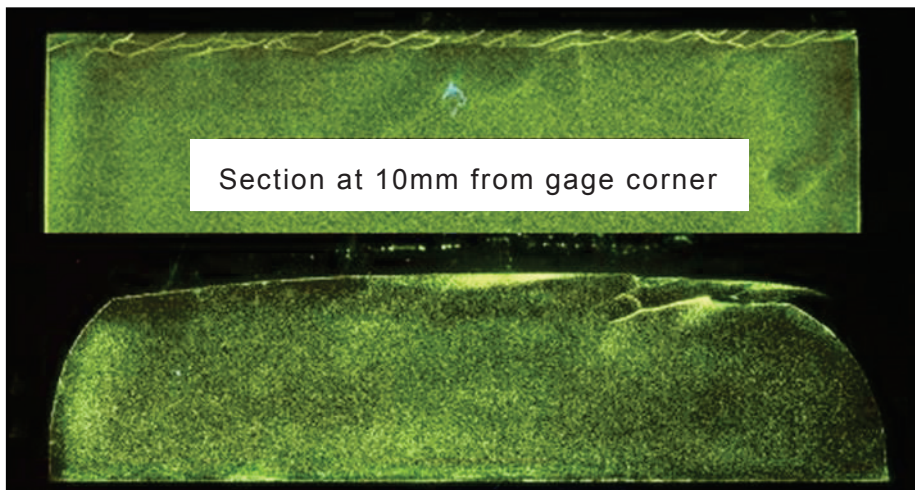
(1) Inside tunnel

(2) Outside tunnel

Fig. 1.25 Head check cracks inside and outside tunnel



(1) Inside tunnel



(2) Outside tunnel

Fig. 1.26 Internal cracks of head checks inside and outside tunnel

## 1.3 諸外国におけるきしみ割れの現状

### 1.3.1 ハットフィールド（イギリス）における事故の概況 [21], [22], [23]

きしみ割れを研究するに当たり忘れてはならない事故が 2000 年 10 月にイギリスのハットフィールドで発生した。これは特急列車（Inter city 225）が脱線し、4 名が死亡、70 名以上が負傷した事故である。この脱線事故の原因は、きしみ割れを起点とする大規模なレール折損であった。その事故以降、きしみ割れに関する研究が欧州で積極的に行われるようになったが、事故が発生する以前のレール損傷管理の中心は、レール頭部内起点の疲労損傷（Tache ovale (Kidney shaped fatigue cracks), 図 1.27) [24]であった。この疲労損傷はレール製造時の欠陥が主な原因とされており、1980 年以前に多く見られた。そのため、欧州でのレール疲労損傷に関する研究はレール頭部内部起点の疲労損傷中心に行われ、レール表面起点の転がり接触疲労損傷についての研究は積極的に行われてこなかった。ところが 1990 年以降、レールを取り巻く環境が変わり、レールの損傷傾向が変化してきたようである。例えば、日本での新幹線輸送の成功を受けて、欧州各地で主要線区における列車の高速化が行われるようになった。さらに、レール製造に関してもグローバル化に伴う競争の激化から、レール自体の品質向上や高強度化が推進されることになった。その結果、レール製造時の欠陥による疲労損傷は減少していき、レール表面を起点とする疲労損傷が増大していったものと想定された。

ここでハットフィールドの事故に関して詳細を紹介する。ハットフィールドの事故は 2000 年 10 月 17 日 12 時 23 分にロンドン・キングスクロス駅から 27km 離れた地点（ハットフィールド駅南 0.8km）で発生した。脱線が発生した箇所  
の軌道条件は、曲線半径 1462m の緩曲線が S 字状に続いている区間（図 1.28）  
で、レールは BS113A の熱処理レールであった。脱線箇所の外軌レールは 2 箇所  
で大きく破壊されており、その延長は 35m と 57m であった。図 1.29 に外軌レール  
が粉々に破壊されている箇所を示す。破壊されたレールの一部（35m）につい

て復元したものを図 1.30 に示す. 約 200 個の破片にわかれていることがわかった. 敷設されていたレールの頭面形状 (設計形状) は, 図 1.31 に示すように  $304.8\text{mm} + 79.37\text{mm} + 12.7\text{mm}$  である [21]. 脱線した特急列車はその緩曲線を  $185\text{km/h}$  で通過中であつた. その車両の車輪踏面形状 (設計形状) は BS P8 という種類の車輪であり, 図 1.32 に示すように  $330\text{mm} + 100\text{mm} + 13\text{mm}$  の円弧踏面 [25] であつた.

脱線事故現場のレールの表面状況を図 1.33~図 1.35, 破断した箇所のレールの破面状況を図 1.36 に示す. 図 1.33 より, きしみ割れのき裂の中にゲージコーナーき裂が連続的に発生していることがわかる. 図 1.34 ではきしみ割れのき裂がはく離 (Flaking もしくは Spalling) をしており, 図 1.35 ではゲージコーナー部から始まった水平裂が頭部全体に進展したため, 頭部表面全体がはく離してしまっている. 図 1.36 より, レール破断面はゲージコーナー部を起点とするき裂が頭部中央に向かって進展し, その後, 疲労き裂としてレール頭部下方に向かって横裂として進んでいったことがわかる. このように水平裂が多く発生している場合, 一般的に行われているレール頭頂部からの超音波探傷では水平裂が邪魔になり, 破断に至ったような大きな横裂を探傷することは難しかったと考えられる. そのため, ドイツでは新たな探傷法として, 水平裂や横裂に進展する前のきしみ割れき裂を確実にとらえることができるように, 渦電流による探傷技術の開発を始めた [26].

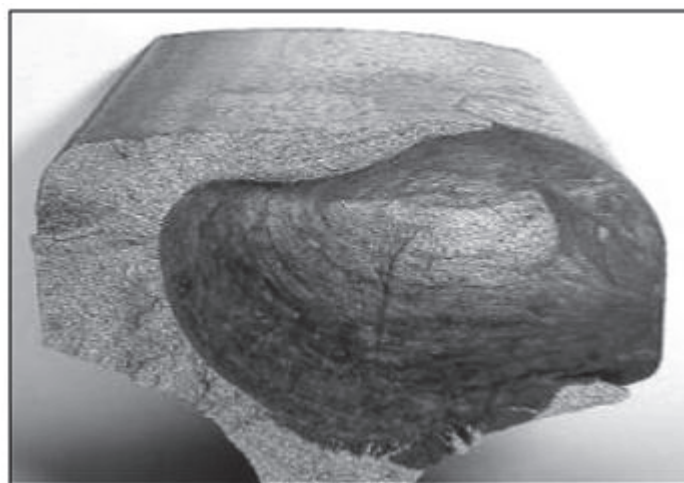


Fig. 1.27 Tache ovale [24]





Fig. 1.28 Derailment accident site at Hatfield [22]



Fig. 1.29 High rail smashed in pieces at the derailment accident [22]

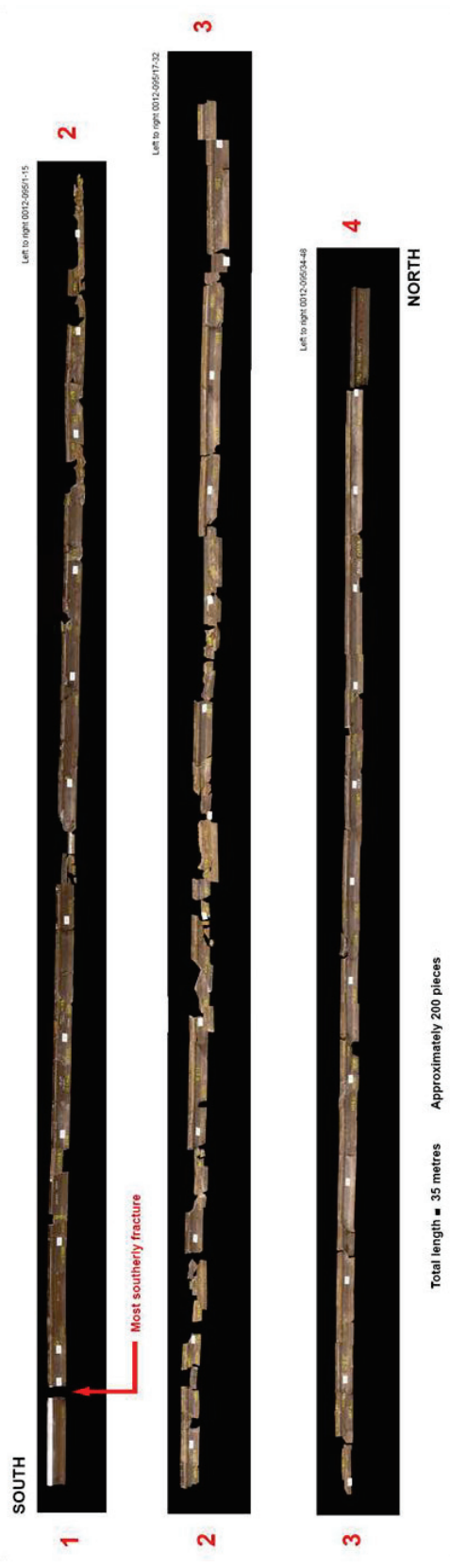


Fig. 1.30 Restored rail pieces [22]

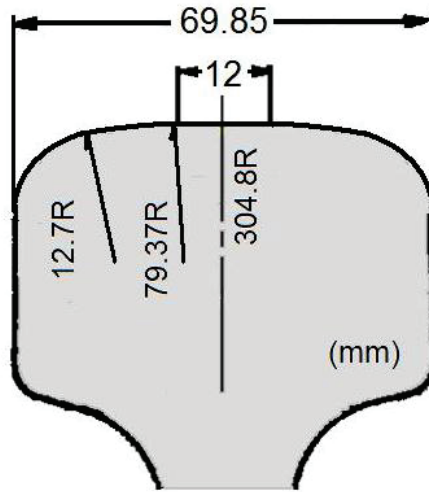


Fig. 1.31 BS 113A rail

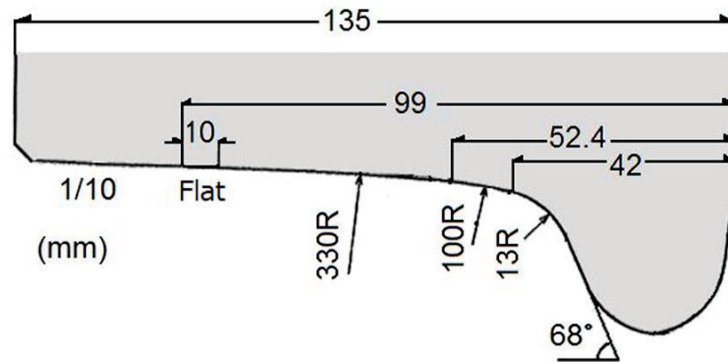


Fig. 1.32 BS P8 wheel [25]



Fig. 1.33 Rail crown surface at the accident point  
(Gage corner cracking) [22]





Fig. 1.34 Rail crown surface at the accident point (Spalling) [22]



Fig. 1.35 Rail crown surface at the accident point  
(Flaking from horizontal defect) [22]



Fig. 1.36 Cross section of rail break at the accident point [22]

### 1.3.2 諸外国のレール損傷状況

ハットフィールドの事故が発生した頃の各国のレール損傷状況を考察するために、欧米、南アフリカ及び日本のレール損傷について調査したデータ[26]をもとに考察を行った。2000年頃の欧米、南アフリカ及びJR東日本におけるレール損傷原因について一覧にしたものを表1.4に示す。レール損傷の名前の定義については各国で若干のばらつきがあるが、レール表面を起点として生じると考えられるシェリングときしみ割れ(Squat, Shell, Head check)に着目すると、イギリス、フランス、ドイツ、日本で損傷原因の上位を占めていることがわかる。フランスについては、きしみ割れ(Head checks)はランク外であるが、その資料から1999年に2.4%の割合で発生していたこともわかっている。これらの国々の路線では軸重の大きい貨物列車を走行させながらも、旅客列車を中心とした運行体系となっており、このような条件下ではレール表面を起点とする疲労損傷が発生しやすいという前述した仮説を裏付ける結果となった。

また、日本のレール折損数について欧米諸国と比較するため、表1.4に示した国の中でレール折損数がわかる国について整理したものを図1.37に示す。グラフは各国の路線延長による影響をなくすため1999年(ドイツ1996年、南アフリカは2000年頃)に発生した折損数を100km当たりの割合に計算しなおして表示している。グラフより、高軸重貨物を運行している南アフリカ(Spoornet)、北米貨物(HH1, HH2)関係については、レール折損数が多めになっていることがわかる。主に旅客線として利用されている路線で比較すると、イギリス(NR)は100km当たり6.1件、フランス(SNCF)は2.6件、北米旅客(HSPC)は0.6件、ドイツ(DB)は4.7件、日本(JRE)は0.2件となり、ヨーロッパ諸国と比較して日本のレール折損数は非常に少ない。これに反し、イギリスの折損数が旅客線の中では突出しており、1999年はハットフィールドの事故が起こる前年であることから、この頃のイギリスではレール損傷を予防するための保守管理がきちんと行われていなかったのではないかと推測された。

Table 1.4 Rail failures in EU, USA and South Africa

Type	Company	Year	First	Second	Third	Fourth
Passenger	Rail track (England)	1999/2000	Squats 21.7%	Vertical transverse 20.1%	Horizontal/longitudinal 12.5%	Bolt holes 9.6%
	SNCF (France)	1999	Squats 23.4%	Internal fatigue 11.8%	Shells 8.4%	Thermite welds 4.7%
	HSPC (USA)	1999	Thermite welds 31.5%	Wheel burns 17.2%	Horizontal spilt webs 13.3%	Bolt holes 11.3%
	NS (Holland)	1997	Insulate joints 59.4%	Transverse defects 18.0%	Thermite welds 15.0%	Fatigue failures 5.2%
	DB (Germany)	1996	Thermite welds 29.0%	Sudden fractures 18.0%	Head checks and shells 16.0%	Electric bonds 4.0%
	JRE (Japan)	Recent	Shells and Squats 63.9%	Head flows 15.8%	Transverse crack 6.7%	Rail end crack 6.1%
Passenger and Heavy haul	Banverket (Sweden)	1998	Transverse fracture 55.1%	Welded joint 32.7%	Horizontal defect 6.1%	Vertical spilt 2.0%
Heavy haul	Spoornet (South Africa)	Recent	Thermite welds 59.2%	Flash welds 17.7%	Head/web horizontal 16.1%	Railhead transverse 7.1
	HH1 (USA)	1999	Vertical split heads 34.7%	Thermite welds 20.3%	Detail fractures 13.1%	Bolt holes 12.2%
	HH2 (USA)	1999	Transverse defects 23.6%	Thermite welds 15.5%	Wheel burns 13.2%	Shells 9.6%

※JRE と Spoornet の正確な調査時期は参考資料からわからないが、参考資料をまとめた

た時期が 2000 年であるため、その頃のデータであると考えられる。

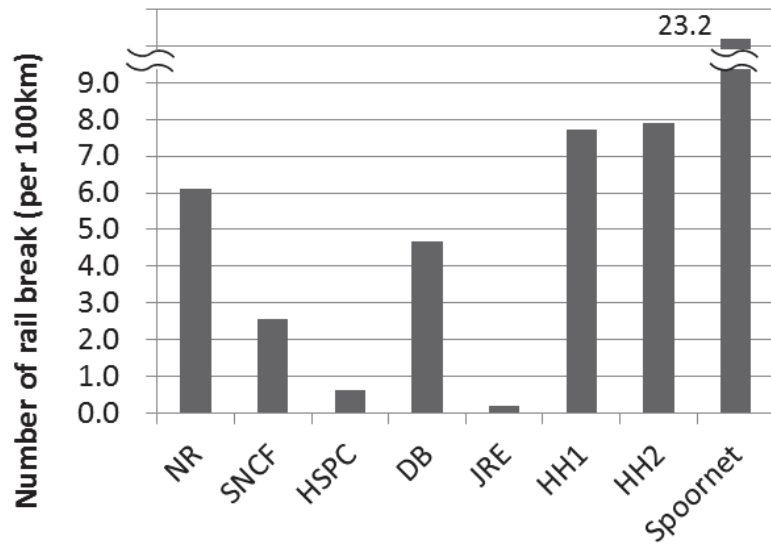


Fig. 1.37 Rate of rail break (1999, DB in 1996, Spoornet in 2000)

## 1.4 本研究の目的

本研究は、2000年頃から首都圏の一部地域で問題となった、はく離を伴ったきしみ割れの発生要因やその対策を検討するために開始された。きしみ割れの発生状況に関する調査では、JR発足以降の1994年からのJR6社におけるレール折損件数の分析から、2002年以降にレール表面損傷（シェリング、きしみ割れ）による原因が多いことを統計的に突き止めた。その中でもきしみ割れによるレール折損が2004年から見られるようになり、近年増加傾向があることも確認できた。首都圏の一部路線で調査したところ、きしみ割れは曲線半径800m以下の緩曲線に存在しており、その多くが熱処理レールの敷設されている箇所であった。きしみ割れ発生箇所における横圧は、East-iの検測データから約10kNとわずかな値であり、応力的には摩耗が進みにくい状況であることもわかった。レール交換に至るきしみ割れの状況としては、レール頭頂面中央を超えないき裂長さの範囲でははく離状態に進展しているものが多く、きしみ割れのき裂長さだけによるレール管理基準だけでは対応に苦慮する場合があります。新たな管理方法や対策を立てる必要があることも理解できた。さらに、きしみ割れは累積通過トン数100MGTを超えるとはく離状態に進展する機会が多くなり、シェリングと比べてレール交換までに至る時間が大変短く、レール管理コストを押し上げる要因になっていた。以上のようなことから、きしみ割れからはく離を未然に防ぐレール材質の研究や予防保全、探傷方法を検討していくことは、レール管理コストの削減、列車の定時運行を確保するうえでも重要な課題であるといえる。

また、海外においても2000年にイギリスのハットフィールドで発生した事故を皮切りに、きしみ割れに関する研究が盛んにおこなわれるようになった。偶然とはいえ、日本と時期を同じくしてきしみ割れに関する研究が世界的に開始されたことは、本研究を進めていく上でも大変参考になった。海外の事例からもきしみ割れを放置しておくことは大きな事故につながりかねないということが再認識でき、本研究を通して鉄道というシステムの安全性を向上させることは、世界的に見ても社会的貢献度は大きいと言える。

## 1.5 本研究の構成

これまで述べてきたように、曲線外軌レールに発生する表面損傷であるきしみ割れに着目をし、その予防策や保守管理の方法について研究を進めていくことは、鉄道輸送の安全・安定性を確保していく上でも大変重要である。本研究の進め方についてまとめたものを図 1.37 に示す。

次の第 2 章では、2000 年以前にはきしみ割れが保守上の問題として挙がっていなかったことを鑑みて、レールや車両の変遷を調査し、その発生要因として考えられる環境変化について考察を行った。

第 3 章では、レールの保守管理方法について紹介し、現在のきしみ割れの発生状況を考慮すると目視によるき裂長さの管理だけでは不十分であり、表面き裂の下に存在する水平裂や横裂に着目しなければならないことに言及する。そこで、特にレール折損に至りやすいきしみ割れのき裂から進展する横裂に対し、現状の探傷方法における課題を整理した上で、表面き裂の影響を受けずに探傷できる手法について取り組んできた内容について述べる。

第 4 章では、きしみ割れの発生条件などについて考察をするために実施された 2 円筒式のレール・車輪転動試験装置を利用した実験について述べる。きしみ割れの発生している曲線区間に敷設されたレール上を列車が走行することによって生じる荷重条件を調査し、きしみ割れの再現実験を通して発生条件等の考察を行った。

第 5 章では、きしみ割れを抑制する対策手法としてレール材質とレール削正という観点から検討を行った。レール材質に関する研究では、レール交換に至るはく離防止という観点から新たなレール材質に着目し、レール・車輪転動試験装置による材料的評価を行ったうえで、新しい材料のレールを営業線に試験敷設した。試験敷設での途中経過では、現行使用されているレールと比較してき裂深さやレール交換までの時間において一定の評価が得られている。また、レール削正に関する研究では、きしみ割れの発生範囲とき裂深さを調査し、その分析結果からレール削正量や削正周期の提案を行う。曲線部におけるレール削正手法については、この研究成果から得られた知見が一部取り入れられてお

り，さらなる充実が求められている．

最後に第 6 章では，これまでに行われてきた研究内容について再整理を行い，今後のきしみ割れに対する保守管理方法についての方向性について提案する．さらに，本研究において新たに発生した課題についても整理し，今後の研究の一助となるようにまとめる．

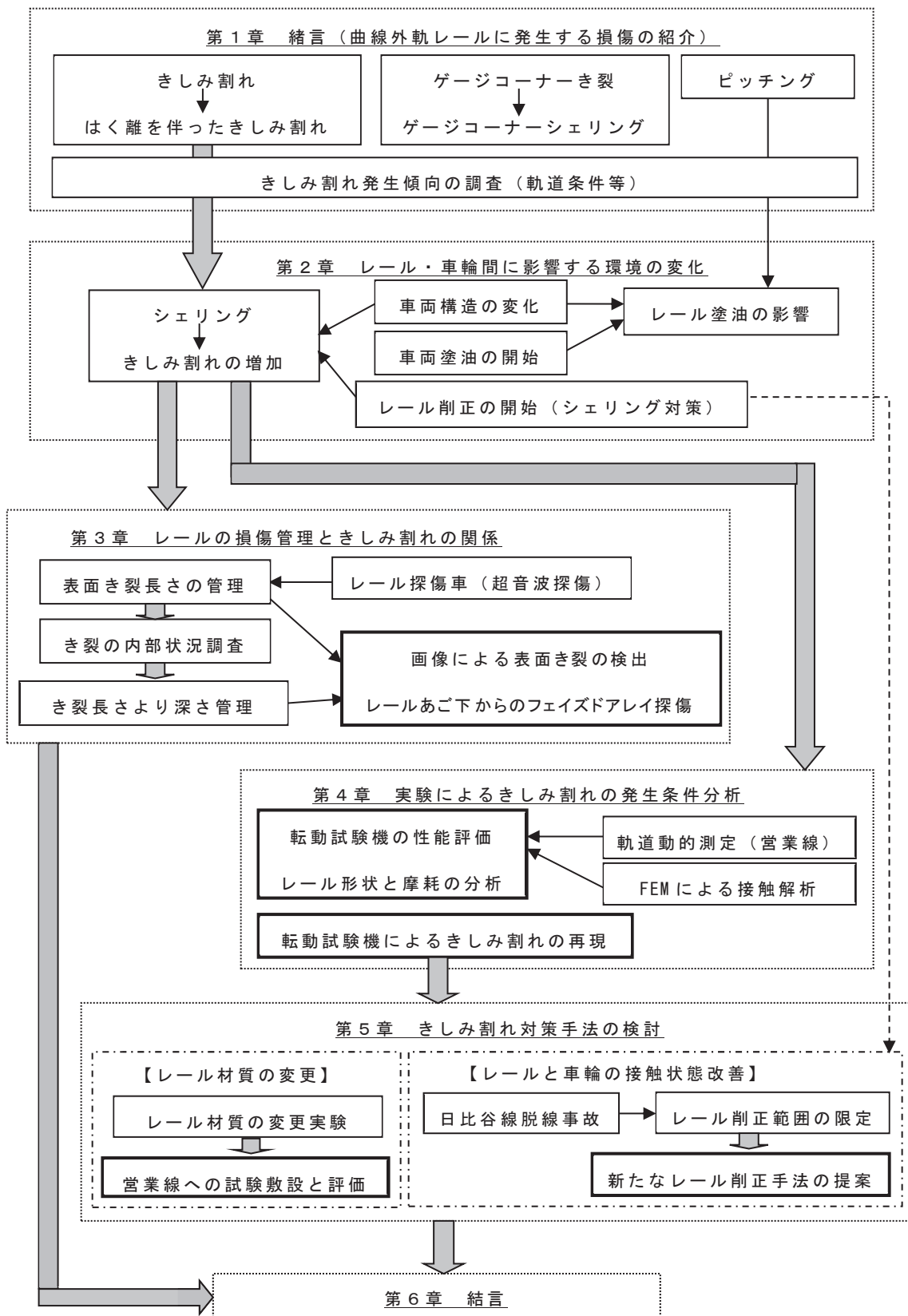


Fig. 1.37 Construction of this treatise



## 第 1 章の参考文献

- [1] 新しい線路, 日本鉄道施設協会, 1997.3
- [2] 奥村, 小林: レール削正及びレール傷管理の効率化に対する取り組み, 新線路, 第 62 巻, 第 12 号, pp.13-15, 2008.12
- [3] 岩澤: JR 東日本におけるレール損傷管理, 新線路, 第 64 巻, 第 7 号, pp.9-11, 2010.7
- [4] 石田: レールの疲労, Railway research review (RRR), Vol.65, No.4, pp.18-21, 2008.4
- [5] 栗原: レール損傷に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.1188 (施設編第 517 号), 1981.10
- [6] 新版軌道材料, 鉄道現業社, 2011.5
- [7] 阿部, 小野寺, 佐藤, 岩淵: 在来線におけるレール疲労層の調査について, 第 11 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2004) 講演論文集, pp.53-54, 2004.12
- [8] 鶴飼, 阿部: レール長寿命化のための効果的なレール削正手法の開発, JREA, pp.34-36, 2006.7
- [9] Aoki, Kurihara, Mimura, Ito: Efect of periodical rail grinding in Japanese conventional line, Conference on railway engineering 2013, London, July 2013
- [10] 松田, 佐藤: 外軌レールの摩耗・疲労損傷に及ぼす油潤滑の影響, 日本施設協会誌, 第 48 巻, 第 2 号, 2010.2
- [11] Burstow, Clark, Eickhoff, Hiensch, Hsu, Kent: Wheel-rail Best Practice Handbook, University of Birmingham Press, 2010.12
- [12] Esveld: Modern Railway Track, MRT-Productions, 1989
- [13] Cannon: An International Cross Reference of Rail Defects, 2nd edition, UIC, June 2003
- [14] レール使用マニュアル, 新日本製鐵株式會社, 1988.11
- [15] 伊藤: JR 東日本におけるレール管理, 延命に対する取組み, 日本施設

- 協会誌, 第 45 巻, 第 11 号, pp.14-16, 2007.11
- [16] 奥村, 穴見: レール傷の現状と今後のレール削正について, 第 65 回土木学会年次学術講演会論文集, pp.615-616, 2010.9
- [17] 瀧川, 小野寺: レールきしみ割れの発生傾向分析, 第 11 回鉄道技術連合シンポジウム (J-rail2004) 講演論文集, pp.421-422, 2004.12
- [18] 瀧川, 入屋: 転動試験機によるレールきしみ割れの再現実験, 第 12 回鉄道技術連合シンポジウム (J-rail2005) 講演論文集, pp.351-354, 2006.1
- [19] 柏谷, 井上, 佐藤: レールの癌・シェリングの医学, Railway research review (RRR), 第 48 巻, 第 9 号, pp.27-32, 1991.9
- [20] 青木, 瀧川, 島津: きしみ割れ除去のためのレール削正手法の開発, 第 65 回土木学会年次学術講演会論文集, pp.619-620, 2010.9
- [21] 平川: 英国高速鉄道ハットフィールド脱線事故の真相, 慧文社, 2008.5
- [22] Train Derailment at Hatfield: A Final Report by Independent Investigation Board, Office of Rail Regulation (ORR), July 2006
- [23] R.A. Smith: The Wheel/Rail Interface Some Recent Accidents, 6<sup>th</sup> International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/wheel Systems (CM2003), pp.423-428, June 2003
- [24] Saurbh Kumar: Study of Rail Breaks: Associated Risks and Maintenance Strategies, Technical Report, Luleå Railway Research Center, Luleå University of Technology, July 2006
- [25] 鉄道車両のダイナミクス (日本機械学会編), 電気車研究会, 1994.12
- [26] R. Krull et al.: Eddy-current Detection of Head Checks on The Gauge Corner of Rails: Recent Results, The World Congress on railway Research (WCRR2001), Oral Presentation No. 165, November 2001
- [27] Rail Failure Assessment for the Office of the Rail Regulator, An assessment of rail track's methods for managing broken and defective rails, TTCI, October 2000

## 第2章 レール・車輪間に影響する環境 の変化

### 2.1 レール表面損傷の変化

曲線の外軌レールに発生するきしみ割れが問題視されるようになったのは、前章で述べたとおり 2000 年頃からである。それまで在来線におけるレール表面損傷の代表としては、「シェリング」であり、レール交換をしてから 15 年程度経過すると発生し、発生状況としては単発で発生していた新幹線と異なり集中多発していた[1]。1987 年の JR 発足後以降は、在来線においても新幹線と同様の単発のシェリングが直線区間の多くで見られるようになった。

ここで、2000 年以前（本研究を始める前）におけるレール交換理由について全社的に調査した結果を図 2.1 および図 2.2 に示す。本調査は前章のレール折損した原因とは異なり、レール探傷などの各種検査から社内ルールとして定められたしきい値を超えたために、レール交換に至った理由について分析した結果である。図 2.1 は、1998 年と 1999 年のレール交換に至った理由を費用の割合で示しており、「損傷 (Defects)」はレール探傷検査などで見つかった欠陥により交換されたレール、「レール寿命 (Rail life)」は経験的に決められたレール寿命で交換したレール、「摩耗 (Wear)」は曲線などで摩耗交換基準により交換されたレール、「分岐付帯レール (Turnout)」は分岐器内のレールにおいてレール傷や摩耗により交換に至ったレールを表している。図 2.2 は、図 2.1 で示した交換理由の「損傷」における内訳を示したものである。「腐食 (電食を含む, Corrosion)」は塩害などによりレール全体が腐食もしくはトンネル内の水はけの悪いところでレールが部分的に腐食したことにより交換したレール、「空転傷 (Wheel burn)」は車輪の空転や滑走によりレール頭部が損傷して交換になったレール、「バッタ (Batter)」は定尺区間 (25m を基本としたレールを継目板で

接続したレールが敷設されている区間)の継目部において、レール頭部の端部が列車の繰り返し衝撃により欠けてしまったことにより交換したレール、「溶接損傷 (Weld defect)」はロングレール区間 (定尺レールを溶接により接続した 200m 以上のレール区間) において、溶接部に発生する内部欠陥により交換したレールを表している。これらの図からわかるように、2000 年以前におけるレール交換の主な理由はシェリングであり、レール交換全体費用のおよそ 1/4 を占めていることがわかった。以上から 2000 年以前では、JR 東日本管内におけるレール交換に至る損傷原因は、シェリングが主な理由であることが再確認された。

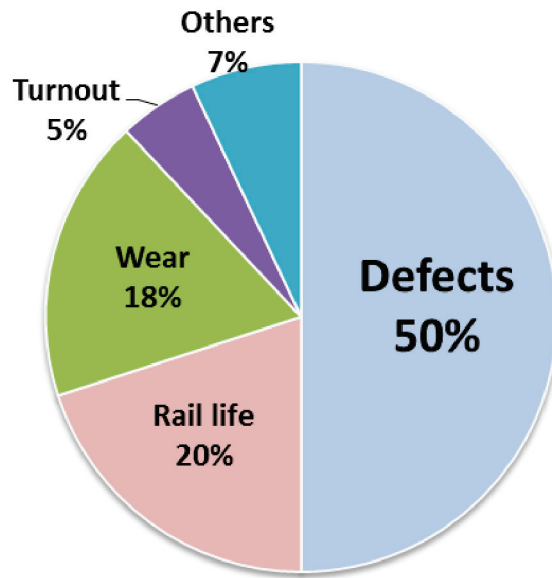


Fig. 2.1 Cause of rail replacement (JR east, average in 1998 and 1999)

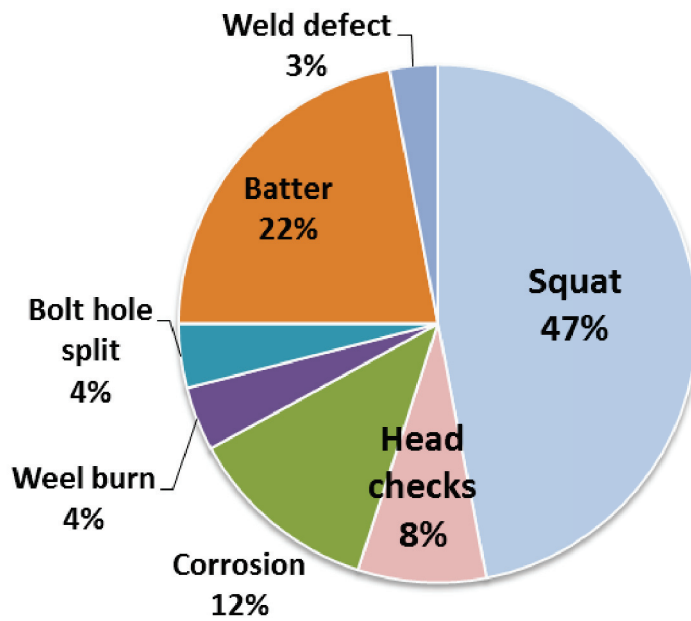
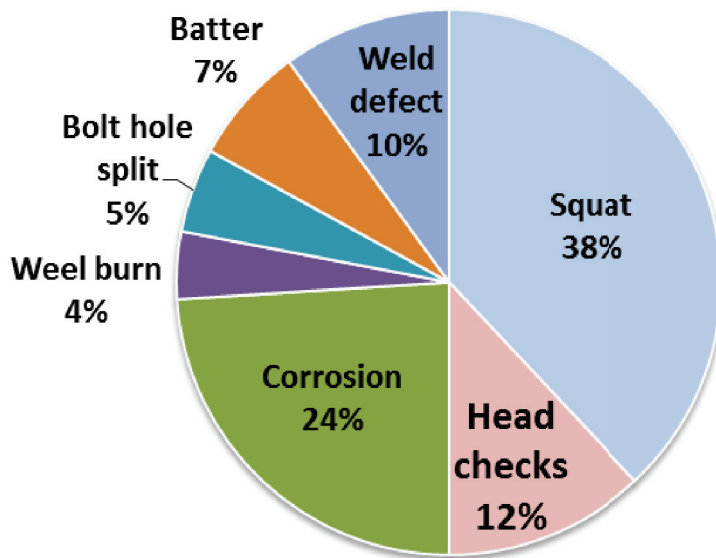


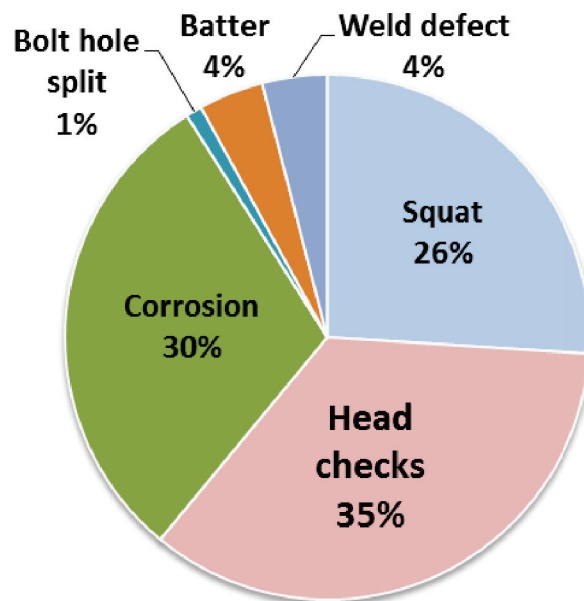
Fig. 2.2 Details of rail replacement caused by defects (JR east, average in 1998 and 1999)

2000年以降、きしみ割れによるレール交換が増加しているとの経験的な意見が首都圏地区を中心に多く聞かれていたため、本研究の開始された2004年以降で損傷によるレール交換費用の割合を調査した。ただし、2005年からJR東日本の首都圏エリアにおいて定期的なレール削正が実施されるようになっていたため[2],[3]、本調査は2006年と2007年のデータを使用した。これは、きしみ割れもレール表面損傷傷の一種であり、レール削正によりきしみ割れが減少していることも考えられたからである。特に首都圏地区できしみ割れによるレール交換が多くなっているということであったため、首都圏でも管内全てでレール削正が行われている東京支社のデータを利用して分析を実施した。あわせて全社的な傾向と同様であったかを確認するために、図2.1および図2.2と同じ年代である1998年と1999年の東京支社のデータについても分析を行った。それらの結果を図2.3に示す[4]。図2.3(1)より、2000年以前の東京支社管内ではシェリング理由によるレール交換が多く、全社的な傾向と同様であることが確認された。ところが図2.3(2)に示されている2006年と2007年のデータでは、きしみ割れ理由によるレール交換が35%とシェリング理由の26%よりも多い。これらの時期において大きくレール交換費用が変化していないことから、2000年以降において、きしみ割れによるレール交換が2000年以前と比較して増加しているという傾向が定量的に証明されたことになる。

これら2つの図から、レール削正によりシェリングによるレール交換が減少している効果も読み取れる。最近の研究[5]では、このレール削正により特に直線区間でシェリングが減少していることとレール残存寿命が統計的に10%程度延伸されているということがわかっている。つまり、2005年時点のレール削正手法ではシェリング予防やレール残存寿命の延伸に対して効果があっても、きしみ割れ予防には特に影響を与えていないことになる。この点について考えられる理由は第5章で述べる。以上のような点を踏まえ、レール材質の変更や新たなレール削正手法を検討しきしみ割れの発生をできるだけ抑制していくことが、レール保守コストを下げる上でも必要な取り組みであることは間違いないと思われる。



(1) Average in 1998 and 1999



(2) Average in 2006 and 2007

Fig. 2.3 Details of rail replacement caused by defects  
(Tokyo branch office)

## 2.2 JR になってからの軌道と車両構造の変化

これまで 2000 年頃を境にしてきしみ割れの発生状況に変化が生じていることを述べてきた。ここでは軌道や車両構造がどのような変遷をたどってきたかを整理する。車輪形状とレール形状の変遷、レールについては新たな熱処理レールの導入時期もあわせて図 2.4 に示す。

車輪形状については円錐踏面 (Cony tread) から円弧踏面 (Arc tread) に変更されている。円弧踏面は変遷の過程で 2 種類のタイプが設計されてきたが、現在は全て修正円弧踏面 (Arc tread (b)) に変更されている。そこで本論文では修正円弧踏面の名称を「円弧踏面」に統一して以後の文章内で述べることにする。ここで円錐踏面と円弧踏面の設計形状を図 2.5 に示す。

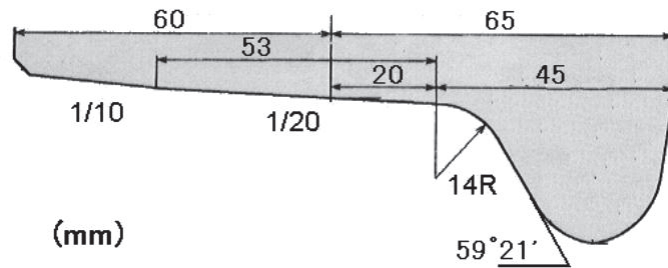
レールについては、現在主に利用されているのが JIS E 1101 に規定されている 50kgN レールと 60kg レールである。図 2.6 にそれらの設計図面を示す。1m 当たりの重さが 50kgN レールは 50.4kg, 60kg レールが 60.8kg と異なっている。さらにレールの頭部形状も異なっており、頭頂面の曲率半径やレールあご下部の形状も異なっている。また図 2.4 に示した新たな熱処理レールとは、製造過程 (スラッククエンチ (Slack quenching) 処理) を一部変更した熱処理レールのことであり、加熱後に空冷していたものを、圧延熱を利用して空冷する方式に変更したレールを示している [6]。新たな熱処理レールについては 1987 年から製造が始まり、JR 東日本では 50kgN および 60kg レールとも 1990 年から全社的に投入を開始している。

本研究においては首都圏全エリアにわたって軌道と車両構造の変化を詳細に調べることが時間的に難しかったため、2000 年頃にきしみ割れの発生が顕著になった路線 (本研究の対象路線) について詳細な調査を実施した。

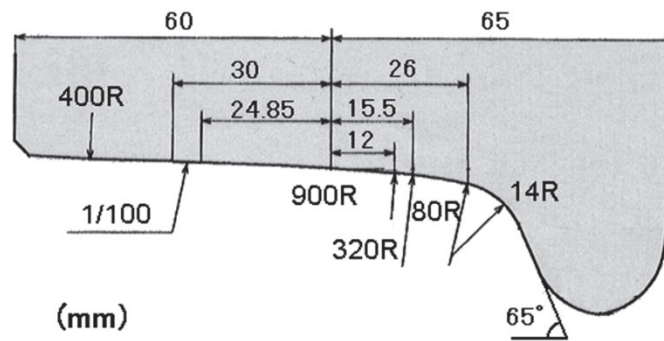


		1970	1980	1990	2000	Now	
Wheel	Cony tread	[Red line from 1970 to 2002]					
	Arc tread (a)			[Orange box: 1985~1987]			
	Arc tread (b)		[Orange box: 1987]	[Red line from 1987 to Now]			
Rail	50kgN	[Red line from 1961~ to Now]					
	60kg		[Orange box: 1974~]	[Red line from 1974~ to Now]			
	Material: New type Head-hardened			[Orange box: 1987~]	[Blue box: 1994: Registration to JIS]		

Fig. 2.4 History of wheel profile and rail profile, and introduction of head-hardened rail

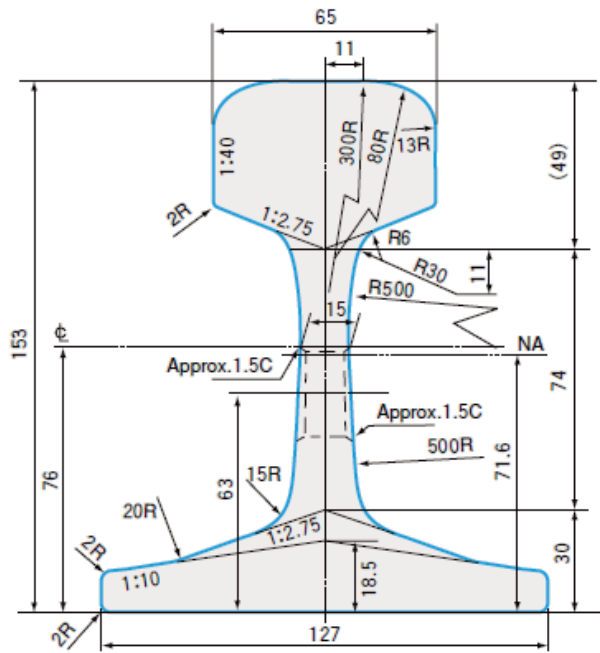


(1) Cony tread

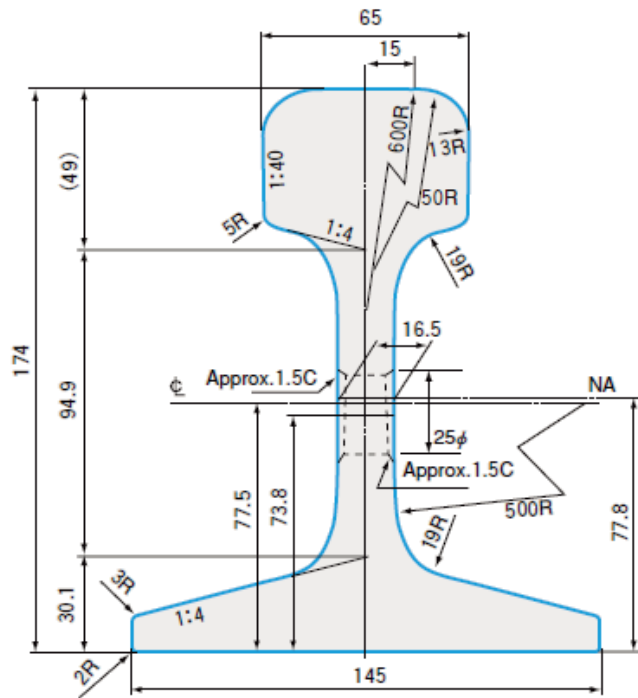


(2) Arc tread

Fig. 2.5 Difference of wheel tread



(1) 50kgN rail



(2) 60kg rail

Fig. 2.6 Design profiles of 50kgN rail and 60kg rail

## 2.2.1 軌道構造の変化

対象路線の軌道構造は、バラスト軌道で一般的なコンクリート製のまくらぎを使用しており、レールも在来線で一般的に使用されている 50kgN レールであった。レールは熱処理レールで 1991 年に敷設されたものであるが、敷設前とサイズや形状などの変更はなかった。ただし、熱処理方法として時期的には 1990 年から採用になった新たなタイプのレールが敷設されていたことになる。現業機関の話によると、そのレールは 2001 年頃からきしみ割れが目立つようになり、2004 年の調査時にはき裂の中にはく離を伴った状態になっていた(図 2.7 参照)。写真からもわかるように摩耗としてはほとんど進んでいない。ここは複線区間で半径 800m の曲線区間であり、上下線ともにはく離を伴ったきしみ割れが発生をしていた。これらの状況から、2000 年前後で軌道構造が大きく変化したという事実は特に得られなかった



Fig. 2.7 Head checks at a research line in 2004

## 2.2.2 車両構造の変化

対象路線の車両構造を調査したところ、きしみ割れが目立ち始める10年ほど前から順次その路線を主に走行する車両の構造が大きく変化していることが分かった[7]。その変遷を表2.1に示す。対比のために前述したレールの状況変化についてもその表に書き記した。表よりこの路線には、きしみ割れが目立ち始める10年ほど前（1991年）に新しい特急列車が導入され、最高速度が10km/h引き上げられるとともに列車本数も増加していた。普通列車は半数以上の本数が、きしみ割れが目立ち始める7年ほど前（1994年）から5年かけて順次新型車両に更新されていた。つまり、きしみ割れが目立ち始める2年ほど前には、その路線を走行する多くの列車が新型車両に置き換わっているということがわかった。この路線の1年間の累積通過トン数から推測すると、多くの車両が新型に更新されてから累積通過トン数30MGT程度の経過できしみ割れが目立ち始めたことになる。

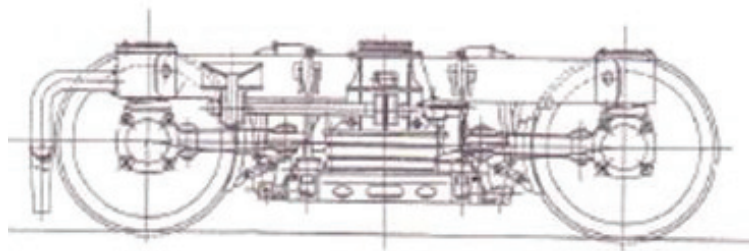
ここで、国鉄時代から使用されていた旧型車両と1990年代に導入された新型車両の構造的な違いをあげると次のようになる。

- ・ 鋼鉄製からステンレス製（一部もしくは全体）の車両になり軽量化が図られている。
- ・ 新型車両は軽量化のため台車構造を変更している。
- ・ 車軸を支える軸ばね構造が変化している。
- ・ 新車導入時は車輪踏面形状が円弧踏面である（2003年までは、導入後最初の車輪転削時に円錐踏面へ修正）。

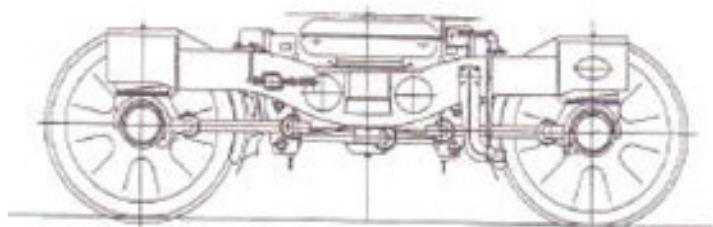
一例として普通列車の新型車両と旧型車両の台車構造の違いを図2.8に示す[8]。「ボルスタ」とは、台車と車体の間にある枕梁のことであり、旧型車両の台車には存在していたが、新型車両ではこの梁を使わない台車構造（ボルスタレス）となっている。これらの図からわかるように台車構造や軸ばね構造が大きく変化していることが見て取れる。これらの状況から推測できることは、軽量化により曲線走行時の輪重が減少するとともに、ボルスタレス構造などの採用により横圧などの値が変化している可能性が大きい。つまり、輪重と横圧の

Table 2.1 History of rail condition and car structure

	Rail condition	Car structure
1990s	- Rail replacement: 1991	- New express train start to run: 1991.3  - Exchange for new local train gradually: 1994.12 – 1999.12
2000s	- Head checks appear: after 2001 (Hearing)	- Introduce new wheel tread profile: 2003.4
In 2004	- Head checks with flaking: about 200MGT	



(1) Old series train (swing-hanger type)



(2) New series train (Bolsterless type)

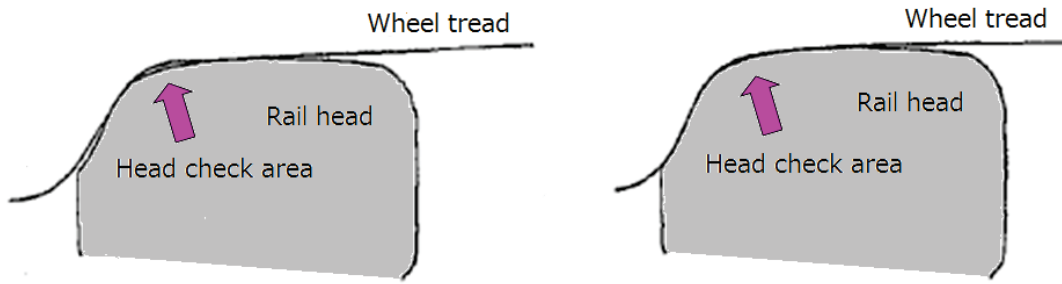
Fig. 2.8 Difference of bogie structure

割合が変化することで、車輪が曲線レールに与えている影響も変化したのではないかということが推測された。

さらに新車導入時だけとはいえ、円弧踏面を持った車両が1991年以降部分的に走行していたことも確認された。その後きしみ割れが目立ち始めた後であるが、2003年には車輪踏面形状の変更があり、この年を境に全車両の踏面形状が円錐踏面から円弧踏面に変化していた。これらの踏面形状の違いはすでに図2.5に示したとおりであり、この踏面形状の変更に合わせてフランジ角度が約60度から65度に変更されている。特に2003年、旧型車両も含め全車両がこの踏面形状に変更した際には、現業機関の聞き取り調査において急曲線で多くの摩耗粉が見られたとの情報があり、レールと車輪の接触位置が急激に変化したものと想定された。歴史的にはこの変化によりはく離が生じたことになるが、時間的な経過によりはく離が生じたことも考えられた。ゆえに、調査箇所におけるきしみ割れの増加が、車両構造の変化を原因として起こったのかを判断するには、レール頭面形状や車輪踏面形状の定量的変化、レールが受けた走行状態に関する情報がなく、推測の域をでることはなかった。

ただし、文献[9]によると、円弧踏面がきしみ割れの接触位置にちょうど確率的に多く接触することを示唆していた。図2.9に摩耗したレール(60kgレール、曲線半径300m、累積通過トン数191MGT)と円錐踏面および円弧踏面が接触している状態を示す。さらに、図2.10には円錐踏面と円弧踏面におけるフランジ角度の変化を示す。図2.9より、円弧踏面の設計形状は、当時の摩耗したレールに対してちょうどきしみ割れの発生している箇所で接触していることがわかる。図2.10からは、フランジ角度の変化は設計時の角度が60°と65°で異なっているにもかかわらず最終的には68°～69°になっており、円弧踏面の方がフランジ角度の変化が小さく、そのばらつきについても小さいことが確認された。つまり、ばらつきが小さいということは、きしみ割れの発生位置に車輪踏面の接触する確率が大きくなることを間接的に表している。

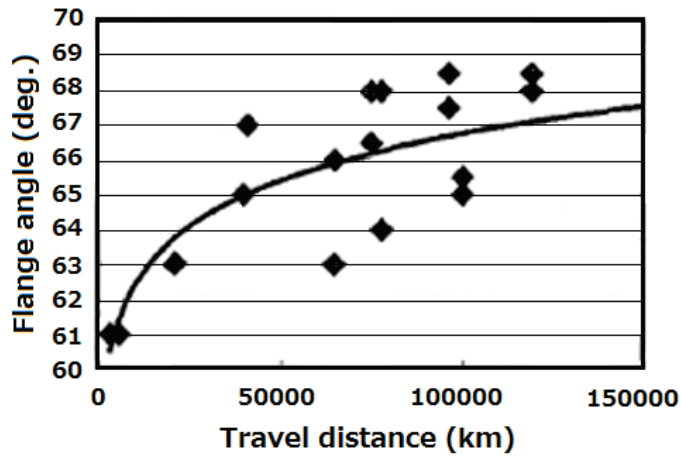
また、文献[10]によると、本研究と同じようにきしみ割れの発生している曲線でレールと車輪の接触位置を調査したところ、車両によって接触位置が異なっていることが確認されている。特に本研究でいう新型車両においては、レールと車輪がきしみ割れき裂の発生している部分で接触しており、円弧踏面が採



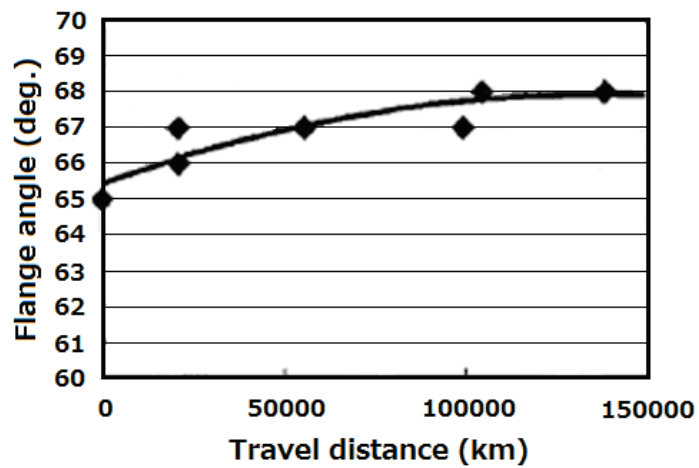
(1) Cony tread

(2) Arc tread

Fig. 2.9 Contact position between worn rail and wheels [8]



(1) Cony tread



(2) Arc tread

Fig. 2.10 Change of flange angle [8]

用されている新型車両は、接触位置の観点で整理するときしみ割れを誘発しやすい組み合わせであることが推定された。

車両構造の変化によるきしみ割れ発生時期およびこの文献[9],[10]による分析結果から、はく離を伴ったきしみ割れが2004年に急激に増加したのは、円弧踏面がきしみ割れの発生しやすい位置に接触しながら走行したことが、きしみ割れのはく離を増加させた原因の一つではないかと状況的には想定された。



## 2.3 外軌レールへの潤滑手法の変化

軌道と車両構造の変化のほかに、レール・車輪間に影響を与える潤滑手法がJRになってから変化してきた。首都圏の路線を中心に通勤車両の老朽による更新にあわせて、新しい車両にレール塗油装置（図 2.11 参照）が搭載されるようになった[11]。これは、車輪のフランジ摩耗を低減させるための施策として実施されたものであり、曲線半径の小さい曲線区間を走行する際に車両からレールのゲージコーナー部を狙って潤滑材（鉱油系）を噴射させる仕組みとなっている。この効果としてはレールゲージコーナー部に潤滑材が付着することから、レール・車輪間の摩擦係数が下がり、急曲線走行時の車輪フランジ摩耗を抑制することができる。それまでは、一般的にレール摩耗の激しい曲線において、地上に設置された塗油装置（図 2.12 参照）からグリース系潤滑材をレールに塗布する潤滑手法が一般的であった。しかしながら、車上式のレール塗油装置が普及するにつれ、地上からのレールに対するグリース系潤滑材の塗布は中止されることになった。車上式のレール塗油装置は、曲線半径の大きさにより塗油する判断を行っている。現在は基本的には、曲線半径 800m 以下（一部の路線では曲線半径 600m 以下）の曲線で塗油する設定になっている。つまり、同じ曲線半径でも列車速度やカント（線路の傾斜）の大きさにより外軌レールにかかる負荷は一律にならないにもかかわらず、設定した曲線半径以下の曲線区間で全般的にレール塗油を行うことになった。その結果、一部の曲線では図 2.12 に示すようなピッチング損傷が生じて新たな課題となっている。ピッチング損傷がきしみ割れのはく離と異なるところは、レール塗油が行われているところで図 2.13 に示すような比較的深いはく離状の損傷が見られる場合と定義されている。



Fig. 2.11 On-board lubricant system for rail



Fig. 2.12 Wayside lubricant system



Fig. 2.13 Pitting at curved track lubricated by on-board system

ピッチング損傷の発生状況について、車両からのレール塗油を実施している19路線を対象に調査した結果を図2.14に示す。図より曲線半径400m未満の曲線では、ピッチング損傷が見られないことがわかる。よって、現行のレールと車輪の組み合わせにおけるレール塗油の最適な曲線半径は曲線半径400m未満ということになる。ピッチング損傷の発生時期については、図2.14から早いと累積通過トン数で約60MGTとなることが明らかになった。列車本数の多い路線の代表である山手線の累積通過トン数は年間40MGT程度であり、山手線の場合は早いと1年半程度でレールゲージコーナー部がはく離状態になってしまうことになる。また、曲線半径の大きいほうに目を向けると、レール塗油を実施するために設定した曲線半径より大きい曲線でもピッチング損傷が発生しており、必要以上にレール塗油が実施されている可能性のあることも判明した。車上式レール塗油装置の曲線半径検知機能は、台車が曲線半径に従って旋回した際に生じる車両との角度により判定する機構になっている。この機構では、軌道のゆがみによる変化を曲線として捉えてしまう恐れがあり、設定よりも大きな曲線半径でレール塗油を行っている可能性が想定された。

以上のような状況を踏まえ、調査対象路線で発生している損傷が外軌レールであったということもあり、そのレールに対する潤滑状況を確認した。その結果、外軌レールに潤滑材の付着している様子は見られず、ピッチング損傷が発生している路線の曲線レールの状況とは全く異なっていた。念のため当時の対象路線を走行している車両について調べたところ、貨物列車の機関車にフランジ塗油器(図2.15参照)が搭載されていることは確認できたが、貨物列車は旅客列車の本数(日中で約4本/時)と比較して極端に少なく、1日に数本しか通過していなかった。また、フランジ塗油器はレール塗油装置と同様に車両搭載式であるが、車輪フランジに直接潤滑材を付着させる手法をとっており、レール塗油器と比較してレールに対する潤滑材の影響は小さくなっている。対象路線のレール状況と走行している車両の調査結果から、当該の損傷がピッチングであるという可能性はほとんどなく、きしみ割れとして研究を進めていっても問題のないことが確認できた。

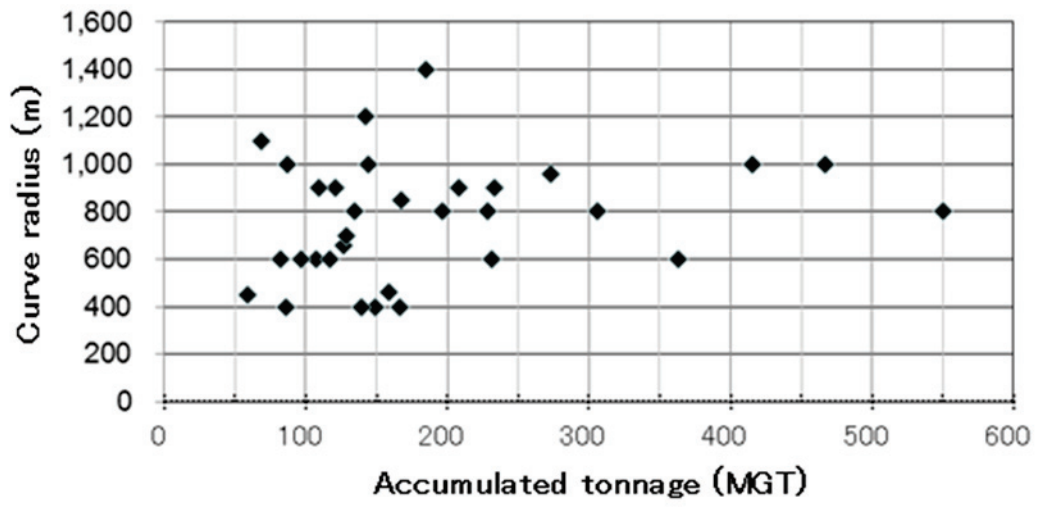


Fig. 2.14 Relation between accumulated tonnage and curve radius of track with pitting (19 lines in Tokyo metropolitan area)



Fig. 2.15 Lubricant system for wheel flange

## 2.4 本章のまとめ

本章では、きしみ割れに関する現業機関各所からの情報をもとに、きしみ割れの発生状況の確認とその発生要因につながると考えられた軌道構造と車両構造の変化について調査を行った。東京支社管内におけるレール交換数量からの統計的分析によると、本研究に取り組み始めるきっかけとなった2000年前後において、きしみ割れ理由によるレール交換数量が増加していることがわかり、現業機関で経験的に感じていたことが定量的に証明された。

次にきしみ割れが顕在化しだした時期の前後における軌道構造と車両構造の変遷について整理した。きしみ割れの発生した時期はレール交換後10年程度経過してからであった。その間に軌道構造の変化は特に見られなかったが、そのレール上を走行する車両については順次軽量車両に置き換わっていることが確認できた。車輪形状についても変更があったが、全車輪が円弧踏面に変更されたのはレール上にきしみ割れが顕在化された後だったので、車輪形状の変化がきしみ割れの増加に直接影響しているという確証は得られなかった。ただし、円弧踏面は新たに導入されるとき調査研究から、きしみ割れの発生している箇所接触する可能性が高く、2004年にはく離が多く生じた原因の一つではないかと考えられた。

ちょうど同時期にほかの路線では、きしみ割れと似たはく離を伴った損傷が発生していた。この損傷はレール塗油を実施している曲線外軌レールのゲージコーナー部に発生していたことがわかり、ピッチングという名称で分類された。本研究で対象としている調査箇所については、レール自体に潤滑材が付着している状況は認められなかったため、潤滑による影響できしみ割れからのはく離が生じているわけではないことが確認できた。

## 第2章の参考文献

- [1] 柏谷, 井上, 佐藤: レールの癌・シェリングの医学, Railway research review (RRR), 第48巻, 第9号, pp.27-32, 1991.9
- [2] 阿部, 小野寺, 佐藤, 岩淵: 在来線におけるレール疲労層の調査について, 第11回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2004) 講演論文集, pp.53-54, 2004.12
- [3] 鵜飼, 阿部: レール長寿命化のための効果的なレール削正手法の開発, JREA, pp.34-36, 2006.7
- [4] 奥村, 小林: レール削正及びレール傷管理の効率化に対する取り組み, 新線路, 第62巻, 第12号, pp.13-15, 2008.12
- [5] Aoki, Kurihara, Mimura, Ito: Effect of periodical rail grinding in Japanese conventional line, Conference on railway engineering 2013, London, July 2013
- [6] 新版軌道材料, 鉄道現業社, 2011.5
- [7] 週刊 歴史でめぐる鉄道全路線 国鉄・JR (総武本線・成田線・鹿島線・東金線), 週刊朝日百科 No.26, 朝日新聞出版, 2011.12
- [8] 鉄道車両のダイナミクス (日本機械学会編), 電気車研究会, 1994.12
- [9] 浅野, 佐々木, 針山, 蔭山, 沼倉, 奥村: 通勤線区に適した車輪踏面形状の開発, 第7回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2000) 講演論文集, pp31-34, 2004.12
- [10] Jin, Aoki, Ishida, Namura: Investigation and analysis of the occurrence of rail head checks, International journal of railway (IJR), Vol.2, No.2, pp.43-49, June 2009
- [11] 萬谷, 村越, 瀧川: 車輪とレールの潤滑手法の研究, JR EAST Technical Review, No.17, pp.59-63, 2006.11

## 第 3 章 レールの損傷管理ときしみ割れの関係

### 3.1 超音波によるレール探傷ときしみ割れの関係

きしみ割れの管理方法としては、第 1 章の図 1.7 に示すようにレール頭部表面に現れている「き裂長さ」によって行われている。しかしながら、最近のきしみ割れのき裂は、第 1 章で述べたとおりレール頭部中央よりゲージコーナー側（車輪フランジ接触側）の範囲内に発生していることが多く、その範囲内のき裂長さではく離を生じてしまう場合が多い。この範囲内のき裂長さであると図 1.7 に示されるとおり A ランクとなり、注意喚起を行う看視マーク（レールへの印付け）により、その後のレール管理を行なっていくことになる。このような状況にあるため、目視検査ではく離を伴ったきしみ割れを見つけたとしても、き裂長さが主な判断基準となっている現状では、この判断基準だけでレール交換を実施することは難しい。また、レール損傷検査については目視検査以外にも、超音波による探傷手法を取り入れたレール探傷車（図 1.17）という検査車両により定期的にも実施されている。そこで、最初にきしみ割れに対する検査という観点で超音波探傷の現状について考察を加える。



### 3.1.1 レール損傷管理の基本

きしみ割れに対する超音波探傷の考察を始める前に、JR東日本のレール損傷管理における超音波探傷の位置づけについて簡単に整理しておく。レール損傷管理の基本は全路線に対して年1回実施される目視検査（定期検査）となる。超音波による探傷検査は、目視検査の補完（臨時検査）として実施されており、レール探傷車を利用して行われている。レール探傷車の検査周期は表3.1に示すように、路線の重要度に応じて細かく分かれている。目視検査はレール表面に現れている欠陥の発見、超音波探傷ではレール内部に発生した欠陥を発見することを目的として行われている。特にレール探傷車により見つけられた欠陥は、図3.1に示すような流れで再検査を実施して、欠陥の大きさを詳細に把握する。一定以上の大きさになった欠陥は、レール継目板が取り付けられ、万が一レールが折損しても車輪がレールから外れない処置を行っている。その後、社内基準に基づいた日数内でレール交換が行えるように工事計画を立てることになる。ただし、超音波探傷では超音波をレール頭頂面から入射してレール内部の欠陥を見つける仕組みとなっているため、きしみ割れに対する探傷は、その探傷性能の観点から何点か課題があることがわかっている。その課題についての詳細は次章で述べる。

Table 3.1 Rail detection cycle by RFD (As of 2013)

Classification	General section	Special section*
First class	Twice a year or once a year	Twice a year or once a year
Second class	Once a year or once in two years	Once a year
Third class	Once in three years or once in four years	Once in two years or once in three years
Fourth class	Once in four years or once in five years	Once in three years

\*Special section: Rail has remarkable wear and defect

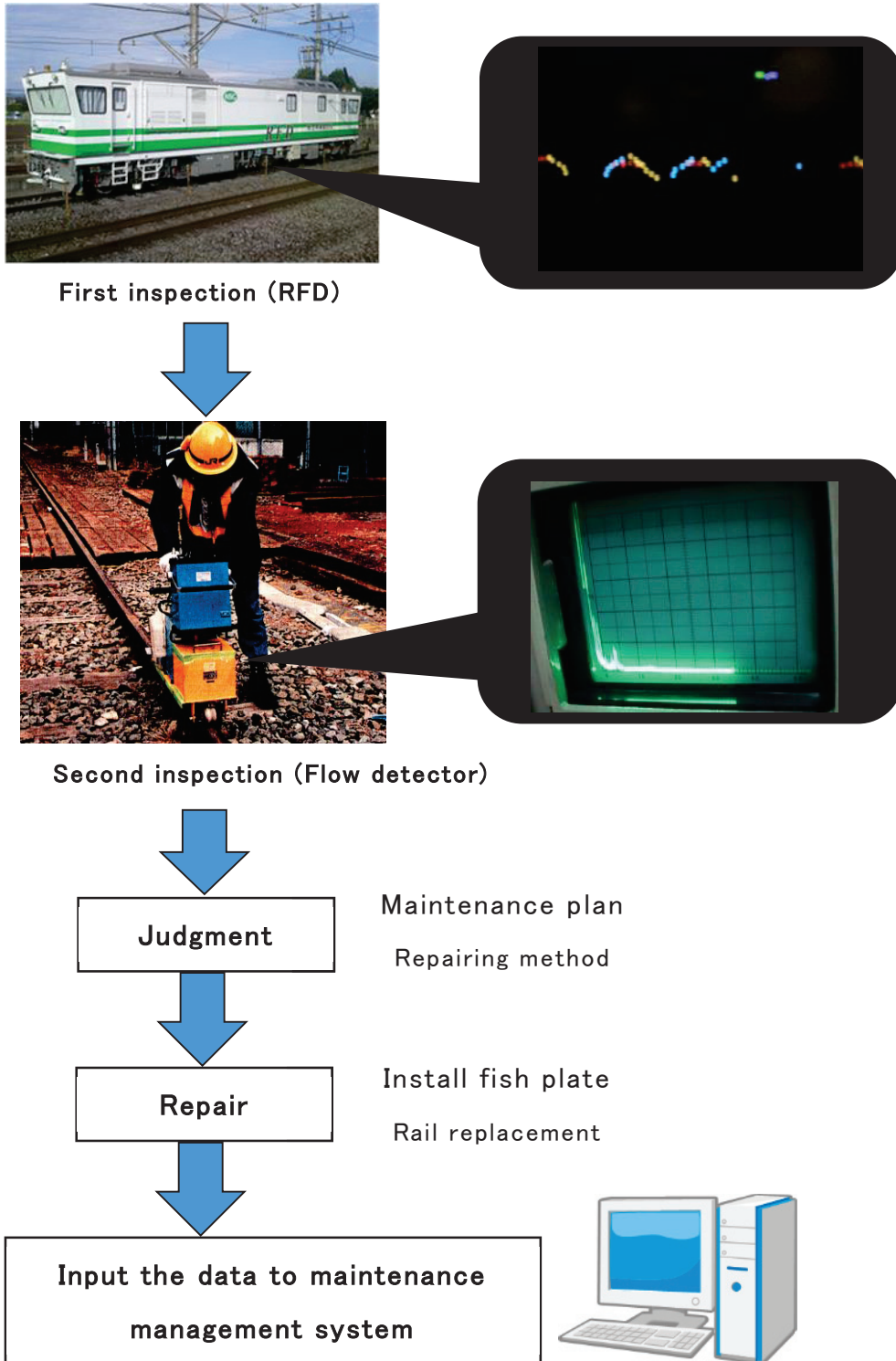


Fig. 3.1 Rail defect management in JR East

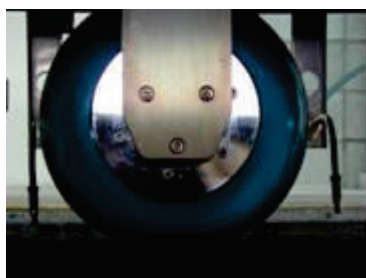
## 3.1.2 レール探傷車の探傷方法

### 3.1.2.1 探触子の構成

鉄道で使用されている超音波式のレール探傷車の探触子には、大きく分類すると摺動式探触子とタイヤ式探触子の2つが採用されている。その違いを図3.2に示す。現在、JR東日本の在来線で使われているレール探傷車の探触子はタイヤ方式が採用されており、その探触子の配置状況を図3.3に示す。超音波を送受信する探触子は媒質で満たされたタイヤの中に配置されており、全部で7つ搭載されている。それぞれの探触子のレールに対する超音波の入射角は $0^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 、 $70^{\circ}$  および $54^{\circ}$  であり、レール内部に発生しやすい傷の角度に合わせて設定されている。これらの探触子が対象としている主な傷の発生位置を図3.4に示す。 $0^{\circ}$  探触子はレール頭部 (Rail head) や腹部 (Rail web) 内に発生する水平裂 (Horizontal split)、 $40^{\circ}$  探触子はレール腹部に発生するボルト穴傷、 $70^{\circ}$  探触子はレール頭部内に発生するシェリングの横裂 (Transverse defect) を主な対象としている。一般的に $0^{\circ}$  の探触子は探傷面に対して垂直に超音波を入射するので垂直探触子と呼び、 $40^{\circ}$  や $70^{\circ}$  の探触子は探傷面に対して超音波を斜めに入射するので斜角探触子と言っている。また、 $54^{\circ}$  探触子はレール頭部内の縦裂を主な対象としている特殊な探触子であり、日本では近年このような傷はほとんど発生していない。これは、このレール探傷車が海外製であり、海外では日本と比較して貨物を主体とした鉄道が発達している国が多く、そのような路線では重荷重の車両が多く走行しており、縦裂が発生しやすいためにこの探触子が搭載されている。

これまでの研究で、きしみ割れはレール表面に発生する連続したき裂とはく離が確認されており、レール折損した場合の損傷形態は横裂が主な原因であった。現在レール探傷車に搭載されている探触子で、それらの損傷を探傷できる可能性のある超音波入射角度は、表面傷に対しては $0^{\circ}$  であり、横裂に対しては $70^{\circ}$  となる。しかしながら、きしみ割れの発生している箇所では連続した水平裂だけの検知や探傷不能となる場合もあり、目視検査に代わってきしみ割れの状態を見極めるには情報量として満足のできるものではなかった。ここで超

音波検査において得られる画像（B スコープ）について図 3.5 に示す。これは試験レールに対して行ったレール傷に対する画像である。きしみ割れは連続的に表面の傷が表れてはいるが、横裂のように見える深さ方向のプロットは多重反射によるエコーである。つまり、はく離や横裂深さの状況まではこの画像からは判断することが難しいことがわかる。そこで、きしみ割れの発生している箇所に対する現在の超音波探傷が満足できる状態になっていない理由について、 $0^\circ$  探触子と  $70^\circ$  探触子の探傷性能の観点から以下に述べる。



(1) Tire probe



(2) Sliding probe

Fig. 3.2 Two different probe structures

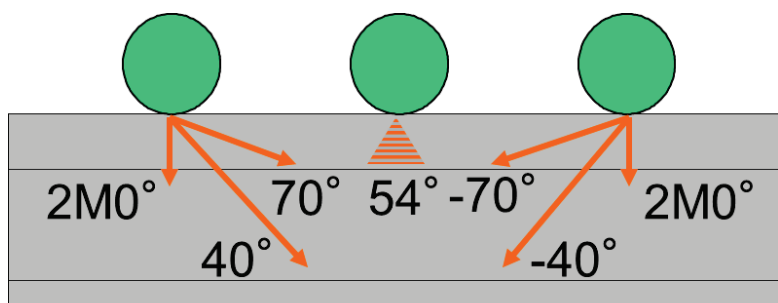


Fig. 3.3 Arrangement of tire probes

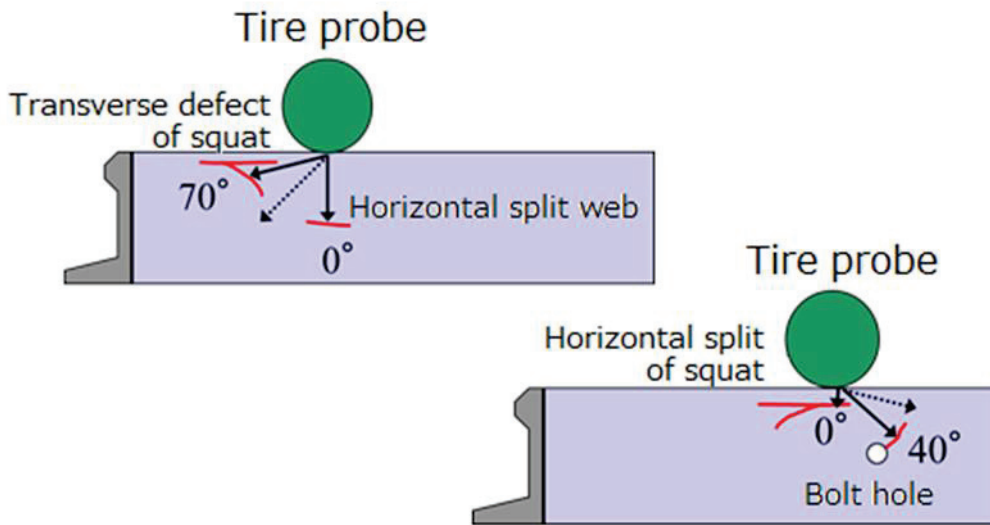


Fig. 3.4 Examples of rail defects detected by tire probes

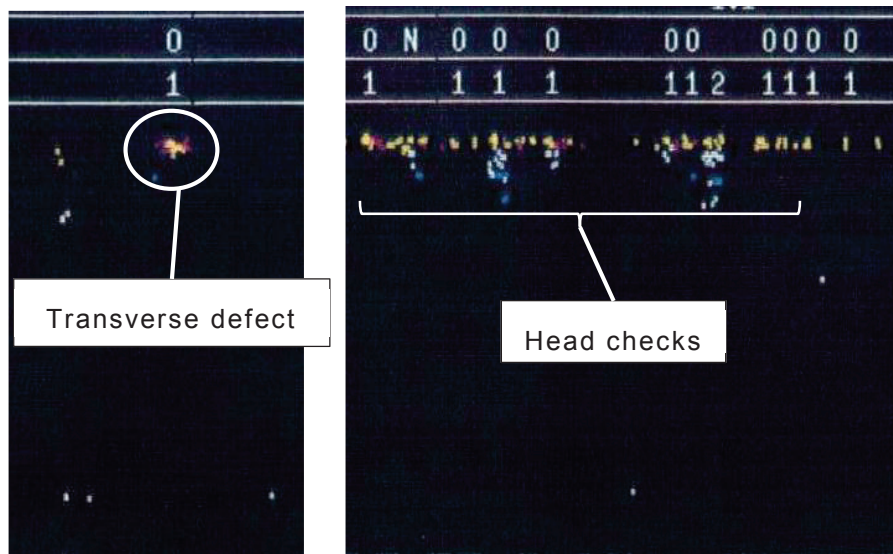


Fig. 3.5 Scope image of a rail defect detected by ultra-sonic wave

### 3.1.2.2 0° 探触子の性能

一般的に金属の表層内部に発生するき裂は 0° 探触子で対応をする。きしみ割れはレール表面に亀裂が発生する損傷形態であり、0° 探触子による探傷が適用可能であると思われるが、探傷不能となってしまう場合がある。その理由と

してはタイヤ探触子の性能が深く関係しているが、あえて探傷不能となりやすいタイヤ探触子を採用しているのは在来線のレール敷設環境も大きい。

超音波探傷では一般的に不感帯[1]というものが存在している。タイヤ式探触子は2MHzの超音波を採用しており、この場合はレール表面から8mm下までが不感帯となり、その範囲内にある損傷を見つけることができない。そのため、以前はできるだけレール表面に近い位置で発生する損傷を発見することが目的で摺動探触子の一部を採用したレール探傷車も開発された[2]。摺動探触子ではレール表面から2mm下までが不感帯であり、きしみ割れのような損傷も比較的発見しやすいことが確認されている。しかしながら、在来線では定尺レールや分岐器が多く、継目部などの隙間（欠線部）の乗り移りを考慮するとタイヤ式が向いているということもあり、現在の在来線で使用しているレール探傷車に摺動探触子は採用されていない。そのため、きしみ割れの表面き裂が現行のレール探傷車において満足できるレベルで検知できていないと考える。

### 3.1.2.3 70° 探触子の性能

シェリングなどに発生する横裂を検知するために使用されているのが、前述したように70°の探触子である。ここで、シェリングのき裂と70°探触子の超音波の入射方向の関係を図3.6に示す。図からわかるように、シェリングは列車進行方向に水平裂が進展し、その下に横裂がまれに発生することがわかっている。その横裂は列車荷重を受けることでき裂が進展し、最終的にはレール折損を引き起こしてしまう[3]。その横裂はレール表面から傾いてレール底部側に進展することが多く、横裂のき裂面に超音波が直接反射しやすいように70°の角度で超音波を入射している。ただし、この図のように水平裂が大きいとその下に横裂が隠れてしまう場合もあり、レール頭頂面以外からの超音波入射によりその横裂を確実にとらえようとする試みも行われている[4]。これまで、きしみ割れの下に発生する横裂についてレール探傷車で検知できた事例はなく、きしみ割れの表面き裂の状態ですら損傷管理をしていたのが実情である。



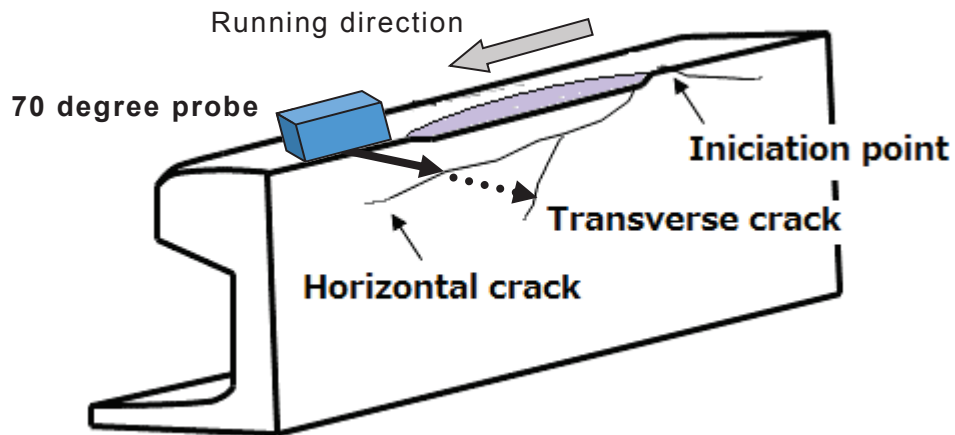


Fig. 3.6 Problem when detecting vertical defect of squat by 70 degrees ultra-sonic wave

### 3.1.2.4 レール探傷車によるきしみ割れ探傷

現行のレール探傷車によるきしみ割れの検査では、表面き裂については超音波の不感帯、横裂については水平裂の影響から、きしみ割れの状態を定量的に把握することができず、探傷不能箇所として報告される場合もある。探傷不能箇所については再検査が必要であり、二次検査として現地に確認に行くときしみ割れが発生していたという事象も散見された。きしみ割れからのレール折損を防ぐためには、シェリングの横裂と同様にきしみ割れの下にできる横裂を早く見つける必要がある。そこで次の章では、きしみ割れのレール内部におけるき裂状況を確認し、現在の超音波探傷とき裂の位置関係を分析することできしみ割れ探傷の課題について考察をした。さらに、その分析結果をもとに、きしみ割れに適用できる新たな探傷法および検査手法について研究・開発を行ったので、その内容について述べる。

## 3.2 きしみ割れのレール内部き裂状況

きしみ割れの内部き裂の状況を調査するために、きしみ割れの発生していたレールについて切断調査を行った。その切断後のき裂状態について撮影した写真を図 3.7 および図 3.8 に示す[5], [6], [7]。図 3.7 に示したレールはきしみ割れにはく離が伴っていない表面き裂のみの内部き裂状態(ゲージコーナー付近)であり、図 3.8 に示したレールはきしみ割れにはく離が生じており、レール頭頂面もシェリングのように凹凸のある状態(レール中央部付近)であった。

図 3.7 より、初期の内部き裂はレール内部に向かって多くの細かいき裂が同じ方向に向かって進んでいることがわかる。このような状態でき裂が発生している場合、タイヤ探触子では不感帯がレール表面から 8 mm であるため、このき裂を検知することは不可能であると想定できる。次に図 3.8 から、レール交換になるようなはく離と表面凹凸を生じたきしみ割れの内部状況は、き裂がレール内部で連続した水平裂のようになっていることが確認された。一部のき裂は、シェリングの横裂のようにレール底部に向かって進展しようとしていることもわかった。レール折損を防ぐためにはこの横裂のようなき裂を探傷検査で検知する必要がある。しかしながら、シェリングの探傷ではすでに述べたように、70° で入射された超音波がきしみ割れき裂から生じた水平裂で遮断されるため、横裂の様相を示しているき裂を検知することはできない。ただし、はく離を伴ったきしみ割れの水平裂は、かなり深い位置(深さ 10 mm 程度)で連続している状態なので、この状態であれば 0° 探触子により水平劣としては十分に検知可能であると考えられる。

以上のようなき裂状態から、現在のレール探傷車で検知できないき裂を別の手法で検査することができれば、今後のきしみ割れに対する損傷管理の信頼性を向上させることが可能となる。



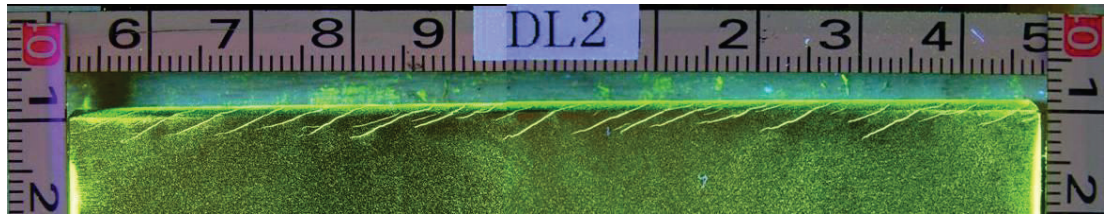


Fig. 3.7 Internal cracks of head checks at gage corner

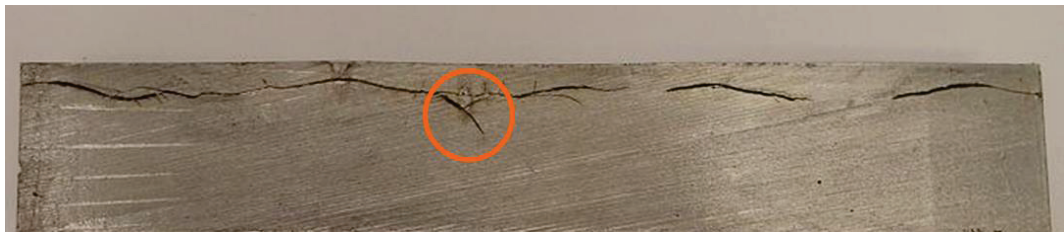


Fig. 3.8 Internal cracks of head checks with severe flaking at center

### 3.3 新たな検査方法の開発

きしみ割れに対する超音波探傷の補助手段として3種類の手法を検討した。最初の手法として、レール頭頂面を撮影してきしみ割れき裂の長さやはく離状況が明確に確認できるレール探傷車搭載型の画像処理に手法について検討を行った。次にきしみ割れのき裂長さや深さを定量的な数値として得ることを目的とした渦流探傷法およびフェイズドアレイによる超音波探傷法について研究を実施した。渦流探傷法はレール探傷車の超音波探傷と同様にレール頭頂面からの探傷であり、フェイズドアレイによる探傷法はレールあご下部から超音波を入射してレール頭部内の水平裂の下に発生する横裂を確実に捉えようとする探傷である。

この3種類の手法のうち渦流探傷法については、本研究において適用し論理がきしみ割れき裂の有無に対しては有効であったが[8],[9]、一番知りたかったき裂深さに対しては自然傷を用いた試験でその深さを正確に捕らえることができなかった。そのため、この渦流探傷法のきしみ割れに対する適用については、2013年時点ですでにヨーロッパで実用化されている探傷器を利用していく方向で検討を始めた。この渦流探傷器はきしみ割れのき裂長さや深さ(2.7mmまで)が定量的に測定することが可能となっている[10],[11],[12],[13]。そこで、本章では画像によるレール表面き裂の検査方法とレールあご下部から探傷法について研究開発した結果について述べる。

### 3.3.1 画像によるレール表面き裂の検出

#### 3.3.1.1 これまでの画像検出装置

これまで、一部のレール探傷車には超音波による探傷を行った際に、車上検査員がレール損傷の判定をする際の補完機能として、レール状態を撮影できる装置が搭載されていた。ただし、フラッシュにより撮影された一枚ごとの写真画像を連続的につなげたものである。レール探傷検査時に得られた写真画像(左右レールの画像)を図 3.9、きしみ割れの発生している箇所の拡大した写真画像を図 3.10 に示す。このシステムにおける写真画像は、フラッシュにより撮影された一枚ごとの写真を連続的につなげた状態になっているため、画像に不連続な点が見られる(図 3.9)。その撮影された画像であるが、きしみ割れの箇所の写真画像(図 3.10)を調べると、きしみ割れらしきものがあるのはわかるが、き裂の発生状態がはっきりしないため、レール表面に見られるき裂長さを計測することができない。また、連続的に写真を1枚1枚撮影しているので、撮影システムの性能上探傷速度が26km/hに制限されてしまっている。そこで、走行速度向上と合わせてきしみ割れのき裂長さがわかるような画像を撮影できるシステムについて開発を行うこととした。



Fig. 3.9 Former image system for rail head surface

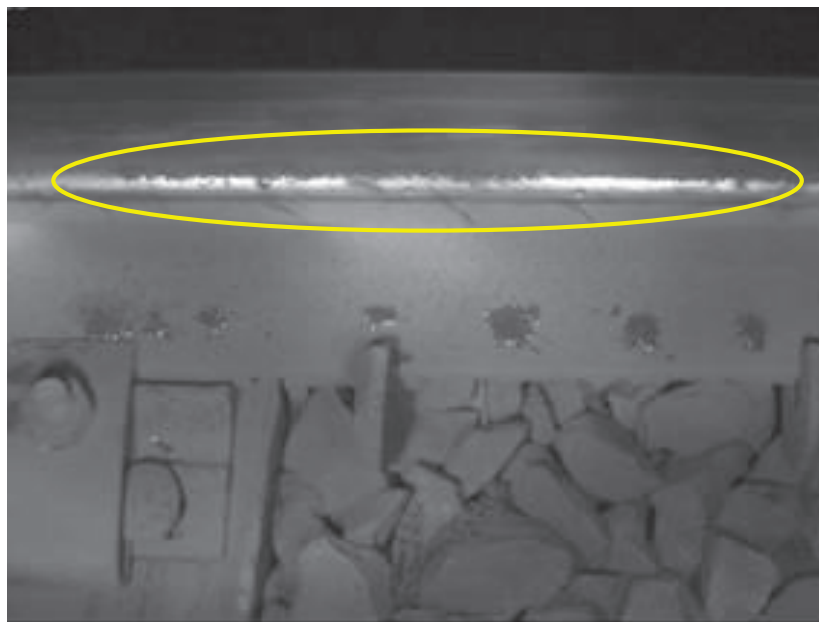


Fig. 3.10 Picture of head checks with former image system

### 3.3.1.2 撮影装置の設計

今回のレール表面画像撮影装置は、きしみ割れ（レール表面損傷）がはっきりと確認でき、その大きさやき裂長さが測定できるシステム構成となるように検討をした。装置構成としてはラインセンサカメラと高輝度 LED ライトを使用して、連続的な撮影が行えるようにした。使用したカメラと LED ライトを図 3.11、使用したラインセンサカメラの性能を表 3.2 に示す。

レール探傷車による走行試験では、その台車部（図 3.12）に本装置を取り付けて実施した。これまでの画像撮影システムはレール探傷車の車体に取り付けていたが、台車部に設置することでカメラのレール表面に対する追随性がよくなることを想定した。画像取得をするためのシステム構成は図 3.13 に示すとおりである。シャッター速度は 50km/h 走行でもきしみ割れのき裂が確認できるように  $18\mu\text{sec}$ 、画像転送速度は 28.4MB/sec で設定をした。また、走行中の位置を正確に把握するためにレール探傷車から距離パルスを取り込むようにした。



Fig. 3.11 Camera and light used under the test

Table 3.2 Performance of the camera

Item	Performance
Link system	Camera link
Image sensor	CCD (14L x 14W $\mu\text{m}$ per pixel)
Pixel count	512 (Direction of rail-head width)
Sampling interval	0.25mm

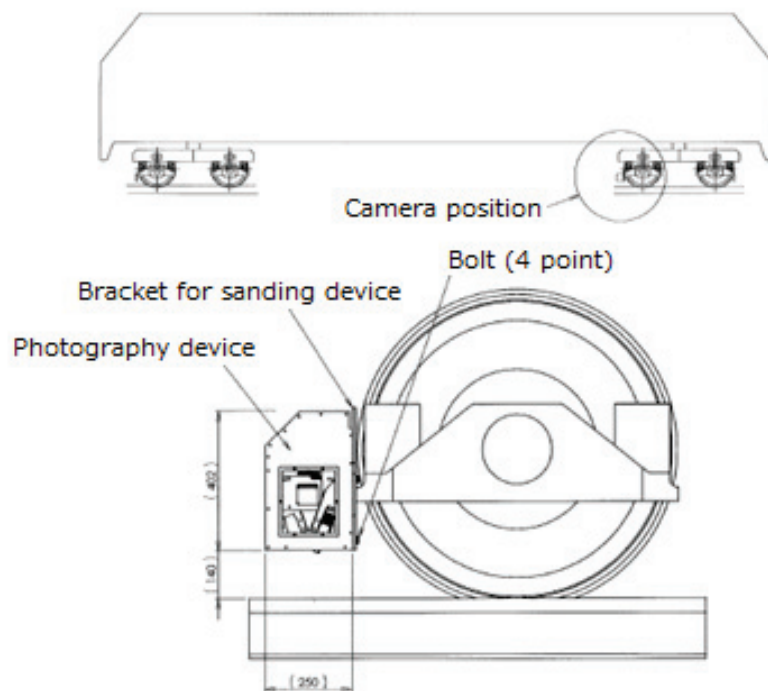


Fig. 3.12 Position in which the photography system was installed

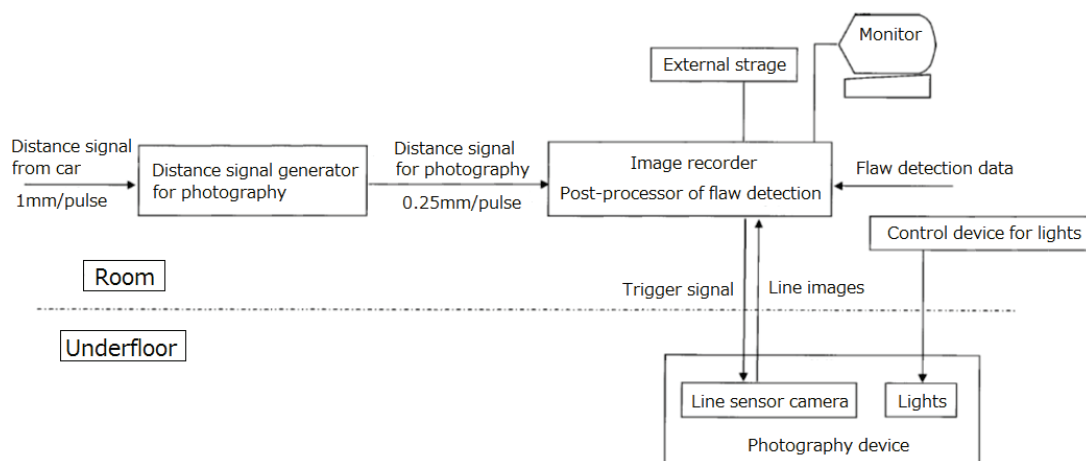


Fig. 3.13 System composition to running tests

### 3.3.1.3 レール探傷車による走行試験

レール探傷車の台車部に設置したカメラを使用して、レール表面の状態を撮影する試験を実施した。走行試験は夜間作業において営業線上で実施し、走行速度 50km/h までのレール表面画像を取得することができた。この走行試験において、きしみ割れの発生しているレールに対して撮影した画像を図 3.14 に示す。図より、きしみ割れのき裂が写真画像にはっきりと写っており、ラインセンサカメラによる連続的な撮影のため、切れ目ない画像となっていることがわかる。さらに、撮影した箇所について現場調査を実施し、実際に発生しているきしみ割れのき裂長さについて測定したレールの状況を図 3.15 に示す。調査したレール表面にはレール探傷車で撮影したカメラ画像と同様のき裂が発生しており、そのき裂長さは 8 mm であった。今回の画像処理では、画面上に現れるレール表面のき裂などを測長できる機能を開発している。図 3.14 に示されているようにパソコンの画面上に表示されているき裂長さも 8 mm であるという結果が得られた。したがって、このレール表面画像撮影システムを利用することで、レール表面に現れている損傷サイズやき裂長さを画像から測定できることが証明された。ただしこの試験においては、記録するデータ量が片側レールで 2GB/km となったため、実際の仕様においては画像処理の状況に応じて画像の解像度を選定していく必要がある。

現在は、この手法を応用した画像撮影システムが在来線のレール探傷車（図 3.16）に搭載されており、超音波探傷で検知しにくいレール表面損傷を判定する際の参考データ（図 3.17）として利用されている。また、今後は新幹線用レール探傷車に同様のシステムが搭載される予定となっている。

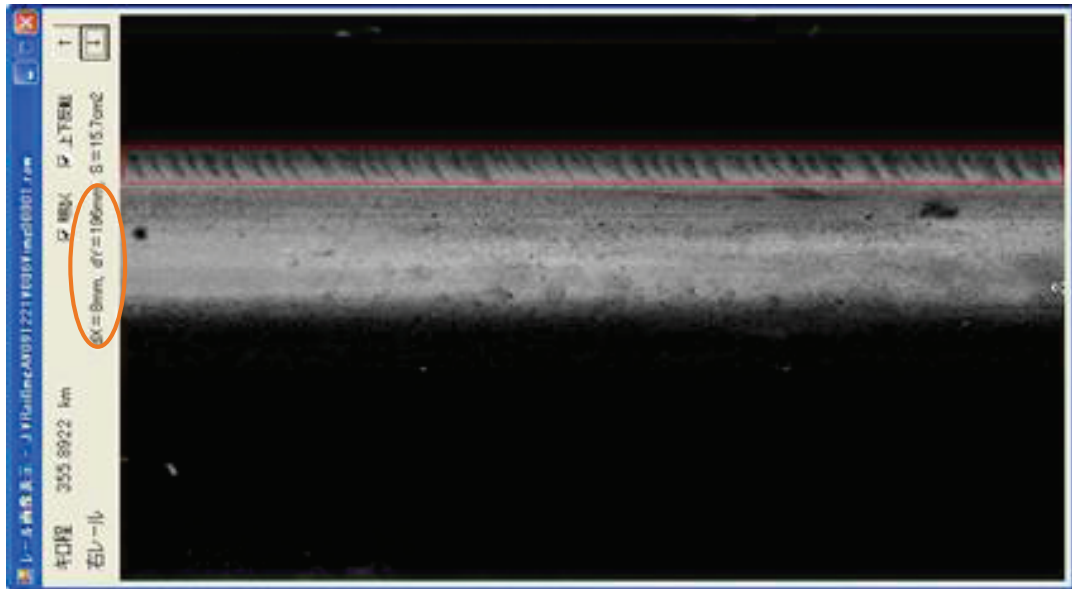


Fig. 3.14 Picture of head checks taken with new image system at test

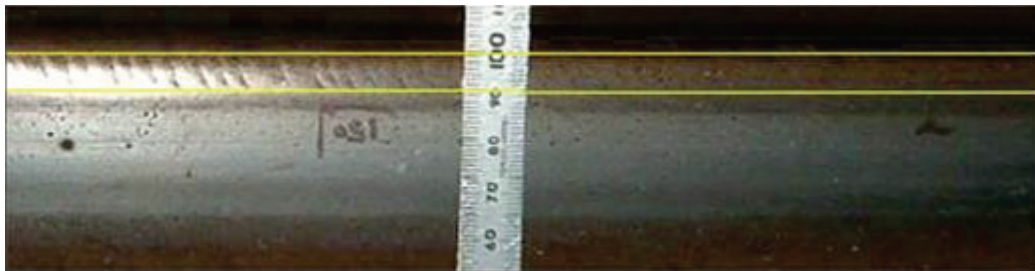


Fig. 3.15 Picture of head checks taken on site





Fig. 3.16 Image system installed on the newest rail flow detecting car



Fig. 3.17 Picture of head checks taken with new image system

### 3.3.2 レールあご下からのレール探傷

図 3.6 に示したとおり，レール表面からの超音波探傷については，きしみ割れのき裂から進展した水平裂が存在している場合，レール折損に至る確率の高い横裂を確実に検出することは難しかった．直線に多く発生するシェリングの場合は，レール側面から 2 つの探触子を利用した透過法による超音波探傷器が開発され，製品化もされている [4]．その探傷原理を図 3.18 に示す．この探傷方法は一つの探触子から超音波をレールに入射し，もう一方の探触子で超音波を受信する仕組み（透過法）となっている．途中に横裂がある場合はその入射された超音波が横裂のところで反射してしまうため，もう一方の探触子には超音波が届かない性質を利用して横裂の存在を検知することができる．

しかしながら，きしみ割れに対してはこの探傷方法を利用できない場合が多い．その理由として，きしみ割れは曲線外軌レールのゲージコーナー部に発生するため，探傷したいレールは摩耗により頭側部形状が変化している場合が多い．図 3.19 に示すように，レール頭側部に設置する探触子では安定して超音波を入射することが難しい．さらに，きしみ割れはシェリングと異なりレール表面上に連続的に発生しており，そのき裂がレール内部に進展して水平裂になった場合は，図 3.8 に示すように連続的な水平裂のどこから横裂が発生するかわからない．そこで，水平裂の影響を受けないようにレールあご下部（レール頭部と腹部の付け根部分，図 3.20 参照）から探傷し，連続的に探傷できる装置を開発することにした [14], [15], [16]．レールあご下からの探傷については，図 3.21 に示すような定置式のタイプがすでに製品化されている [17]．今回の開発ではこの原理を応用しつつフェイズドアレイという新しいアイデアを導入することで連続的に探傷できることを狙った．以下にその開発内容について述べる．

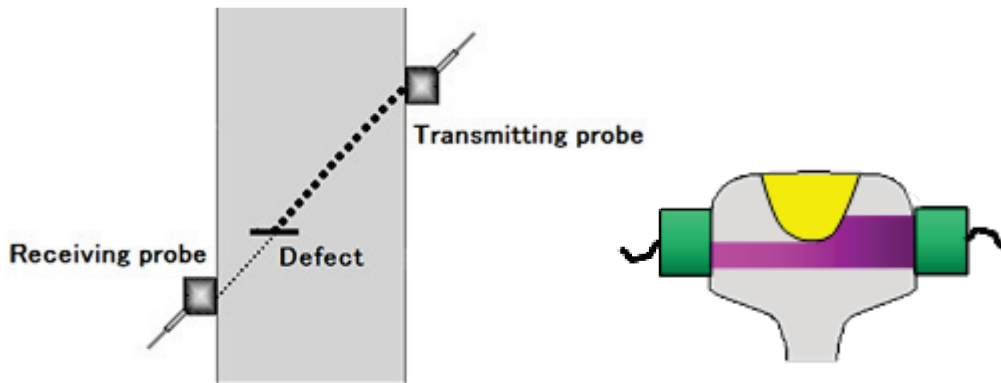


Fig. 3.18 Detection method by double probe technique from both rail-head sides

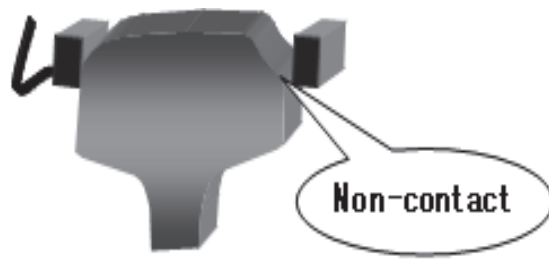


Fig. 3.19 Problem of detection by double probe technique for worn rail

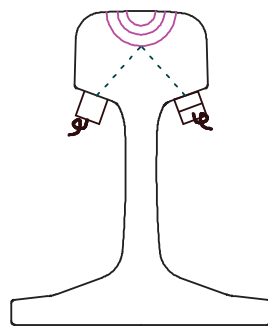


Fig. 3.20 Detection methods from upper fishing surface



Fig. 3.21 Ultrasonic flow detector detecting vertical crack  
from upper fishing surface of rail head

### 3.3.2.1 新しい探傷装置のコンセプト

きしみ割れのレール内部き裂は、初期の場合、図 3.7 に示すように数mm程度の小さなクラックがたくさん生じているが、そのまま放置しておくと図 3.8 に示すように、き裂とき裂がつながって水平裂が連続的に生じているような様相を呈するようになる。このき裂の一部がまれに水平裂の下に横裂として進展することになり、いずれはレール折損につながる。レール探傷車のようにレール頭頂面からの探傷だけでは、水平裂の影響によりこの横裂を見つけることが難しいというのは前述したとおりである。これまで水平裂の下に生じる横裂を探傷する手法の一つとして、定置式の探傷器によるレールあご下からの探傷法が試験レベルで行われていたが、レール検査において検査員が容易に取り扱えるレベルの探傷器にはなっていなかった。そこで、同じあご下からのコンセプトはそのまま、きしみ割れが発生しているレール全長を検査員が容易に連続的に探傷できる手法として、フェイズドアレイ探傷法を採用することにした。フェイズドアレイ探傷とは探触子の振動子を小さく分割し、その振動子から時間

差を与えて超音波を発信することで、対象とするき裂を全体像として捉えることができる探傷法である。その原理を図 3.22 に示す。

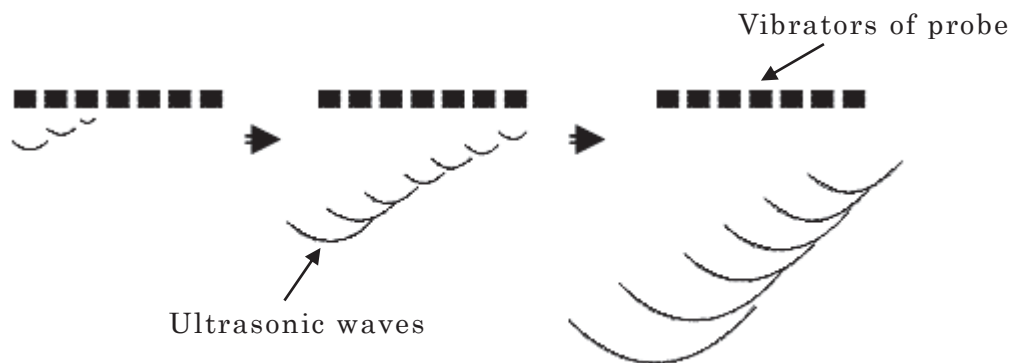


Fig. 3.22 Principal of phased array system

### 3.3.2.2 探触子の検討

アレイ探触子を設計するにあたり、探触子とレール表面の密着性をよくするために、レールあご下部の形状が重要となる。現在、営業線で主に使用されているレールは 60kg と 50kgN の 2 種類となっているが、これらのレールは設計思想の違い[18]からあご下部の形状が異なっている（図 2.6 を参照）。そこで探触子は 60kg 用と 50kgN 用の 2 種類について製作することにした。また今回の探触子の特徴として扇状に超音波を送信するセクターキャンという手法を取り入れ、横裂の先端を確実にとらえられるように設計を行った。その模式図を図 3.23 に示す。この模式図ではわかりやすくするために発信ビームを 1 点で表している。

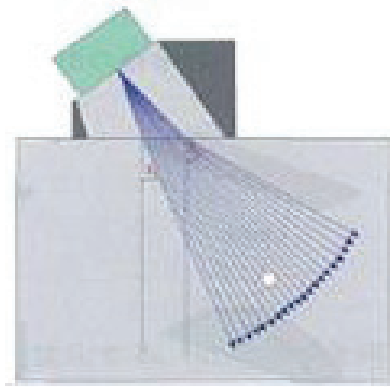


Fig. 3.23 Principal of sector scan by phased array system

探触子の設計についてはレールあご下部の形状が異なっていることから，探触子とレールの接触面について 50kgN 用は平らに，60kg 用は曲率を持った形状としている．超音波の発信範囲は，レール頭部全体が探傷できるように両探触子とも  $60^\circ$  の範囲をスキャンすることができる．これらの探触子をレールあご下の両側に設置して，片側の探触子から斜角  $60^\circ$  で超音波を発信させ，もう一方の探触子で横裂のような欠陥からの反射波を受信させる．レール内部に欠陥が存在しない場合は反射波が発生しないので，送信した超音波を受信側で検出することはできない．50kgN 用と 60kg 用のアレイ探触子の概要を図 3.24，設計仕様を表 3.3 に示す．

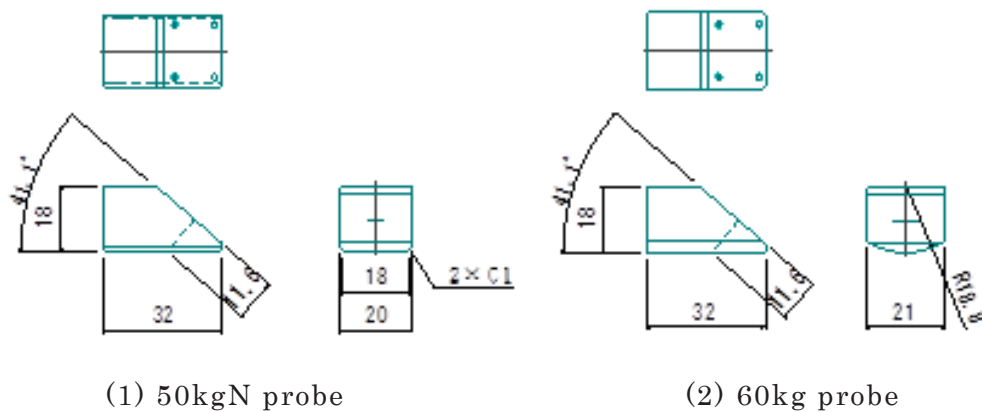


Fig. 3.24 Phased array probes

Table 3.3 Specification of array probes

Item	Specification
Frequency	3 MHz
Vibrator material	Composite
Number of vibrating element	16
Vibrating element size	L 10 mm x W 0.6 mm
Interval	0.7 mm
Gap	0.1 mm
Refractive angle	60 degrees
Array probe size	L 25 mm x W 17.5 mm

### 3.3.2.3 探触子の基本性能試験

製作した探触子を使用して、レール頭部内における探傷範囲を確認するために、探傷の基本性能を評価する試験を実施した。準備した探傷システムは16ch型パルサーレーザとパソコンから構成されており、超音波送受信の細かい制御はそのパソコンにより行った。本試験で利用する超音波の周波数帯域は100kHz~10MHzとした。この探傷システムの特徴としては、レール頭部の内部を全体的に探傷できるように、60°の範囲で探傷可能な左右セクター走査（アレイ斜角探触子にある複数の素子のタイミングや方向を制御すること）を採用していることである。その探傷範囲を図3.25に示す。一般的にセクター走査は深さ方向を対象としており、左右セクター走査を採用している探傷装置は少ない。そのため、左右セクター走査での基本的な探傷性能を確認するために以下の3つの試験を実施した。ここではJIS Z 2350 [19]に合わせて探傷ビームの特性を確認した。

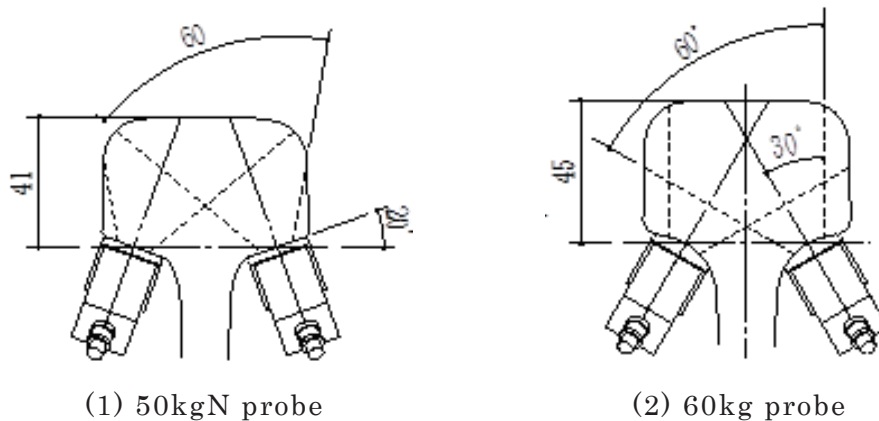


Fig. 3.25 Detection area by phased array system

(1) 円弧配列縦孔試験片による一探触子の基本性能確認試験

最初に、探触子の左右セクター走査による探傷範囲を確認するための試験を実施した。準備した試験片（円弧配列縦孔試験片）を図 3.26 に示す。試験片には半径 50mm、 $15^\circ$  ピッチで  $\phi 3\text{mm}$  の縦孔を配列してある。超音波ビームの経路が板厚と平行になるように加工されており、縦孔からのエコーを測定することで左右セクター走査時の感度分布を見ることができる。この試験により得られた結果を図 3.27 に示す。縦軸は各セクター角度のピークエコー高さが得られたときのゲイン値を 80%エコー高さに換算した値を示している。換算式は式 3.1 に示すとおりである。

$$\text{dB 換算式: } \Delta = 20 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3.1)$$

$P_1, P_2$ : 比較するエコー高さ(%)

図 3.27 より、50kgN 用探触子の感度としては、左右  $15^\circ$  のエコー高さが  $0^\circ$  方向に対して 1dB 以内の低下であったが、左右  $30^\circ$  となると左側で 5.6dB、右側で 7.5dB の低下となっており効率が大きく低下した。60kg 用探触子では、左右  $15^\circ$  でのエコー高さが  $0^\circ$  方向に対して 0.5dB 以内の低下、左右  $30^\circ$  では約 3.0dB の低下となっており、50kgN 用と比較して感度的には良いことが確認された。



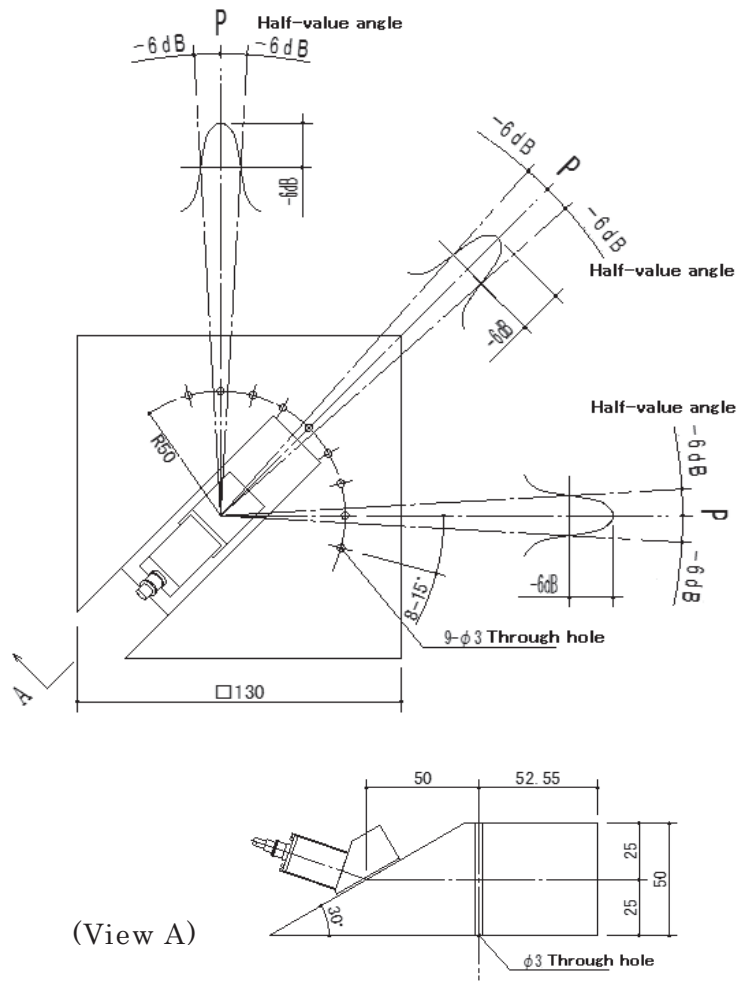


Fig. 3.26 Test piece for performance test to evaluate phased array probes

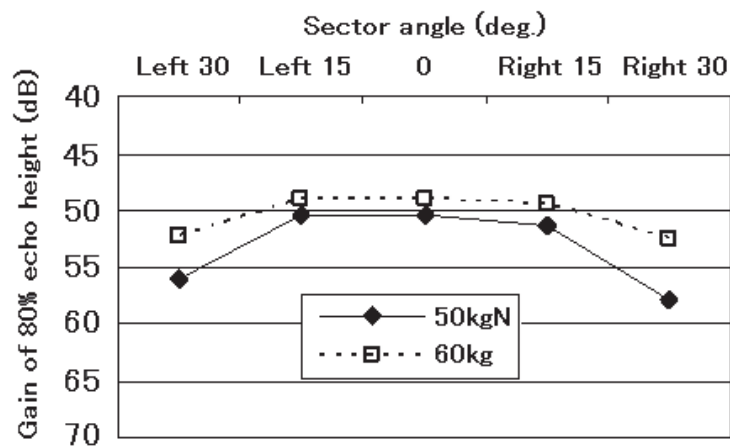


Fig. 3.27 Relation between sector angles and gain of 80% echo height

(2) 斜め孔試験片による一探触子の基本性能確認試験

次に探傷ビームの距離振幅特性を把握するため、斜め孔試験片を利用した性能確認試験を実施した。その試験片を図 3.28、試験方法を図 3.29 に示す。横孔の深さは探傷面から 25, 30, 35, 40mm となっている。レールあご下部から一探触子法によって探傷した場合の距離振幅特性について確認した結果を図 3.30 に示す。50kgN 用ではビーム路程 49.5~75.0 mm において 7.3dB の減衰があり、60 kg 用では同様の位置で 6.4dB の減衰となった。

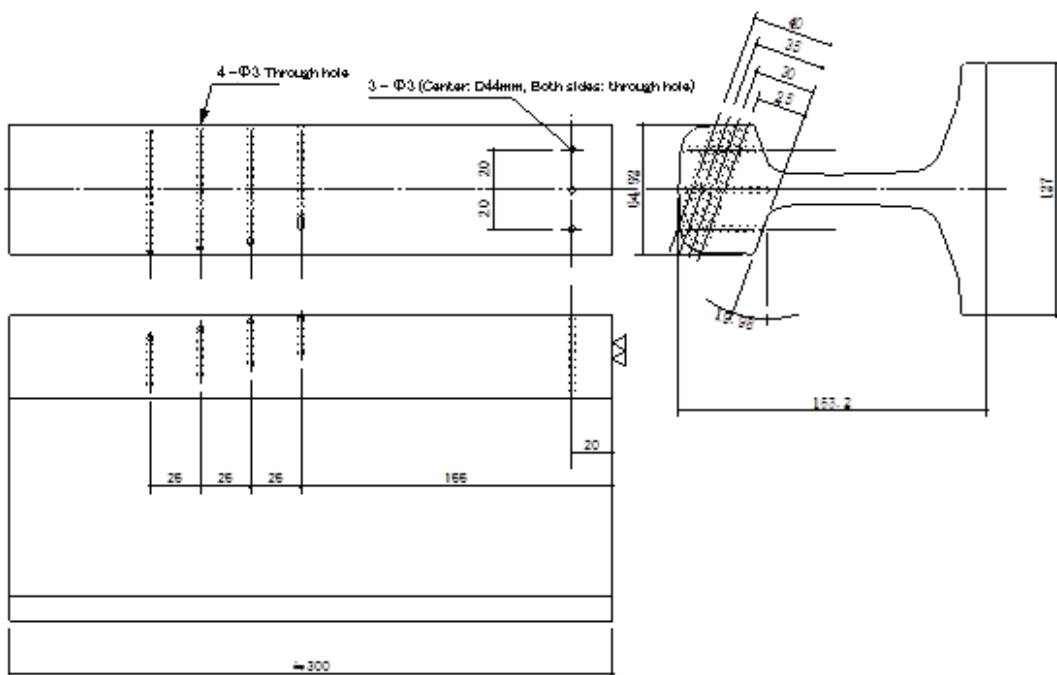


Fig. 3.28 Rail piece for performance test to evaluate phased array probes

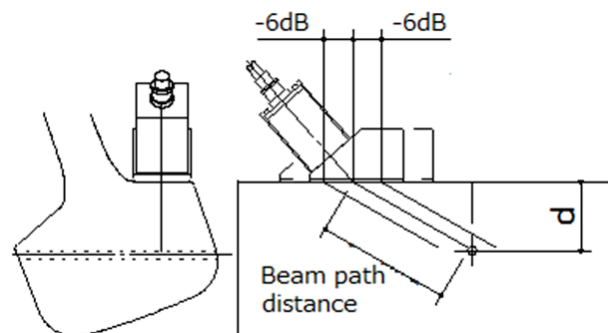
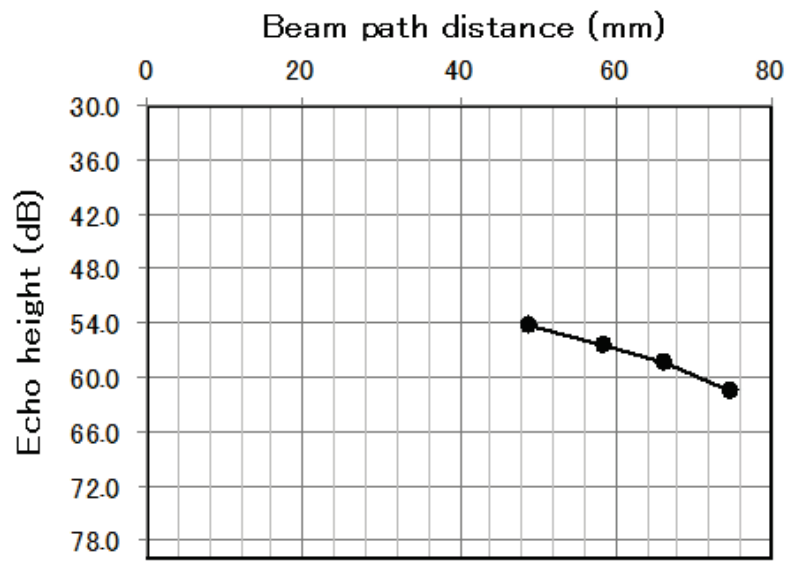
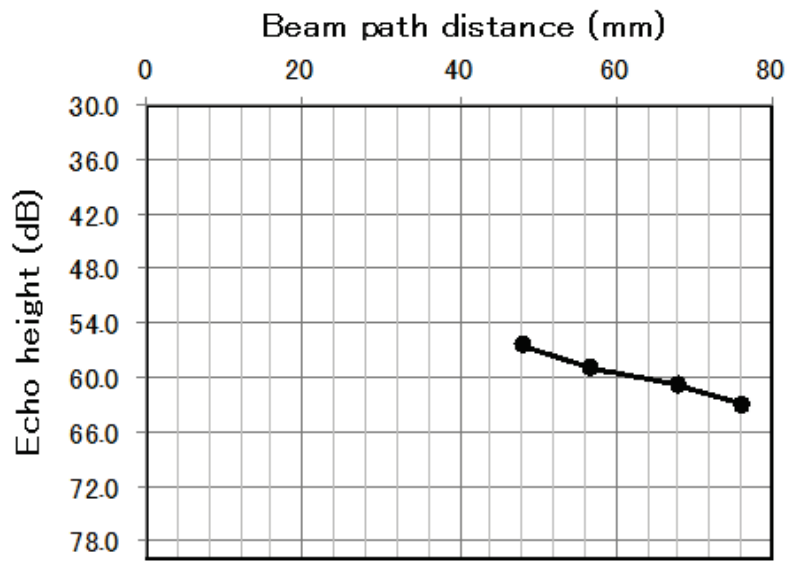


Fig. 3.29 Performance test method



(1) 50kgN probe



(2) 60kg probe

Fig. 3.30 Distance amplitude characteristic curve for each probe

(3) 二探触子 V 走査法での横孔試験片による基本性能確認試験

最後に、レールあご下からの二探触子による走査法（V 走査法）における探傷ビーム距離振幅特性を確認するために、レール頭部を貫通する横孔を加工した試験片を用いた性能確認試験を実施した。その試験方法を図 3.31 に示す。使用した試験片には、横孔が探傷面から深さ方向に 12.5mm, 17.5 mm, 22.5mm, 27.5mm および 32.5mm の位置で加工してある。この試験により得られた距離振幅特性を図 3.32 に示す。50kgN 用ではビーム路程 45.5～78.5 mm の範囲で 6.3dB の低下、60 kg 用ではビーム路程 48.6～79.8 mm の範囲で 5.8dB のゲイン低下が見られた。

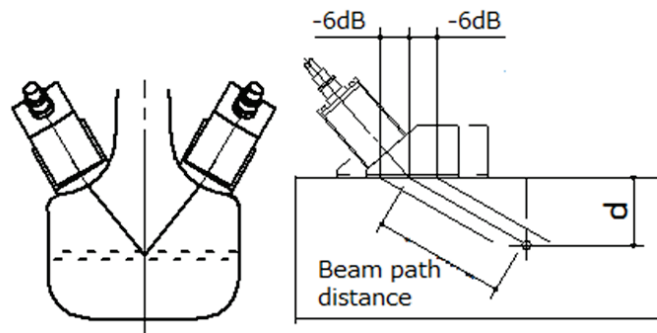


Fig. 3.31 Performance test method

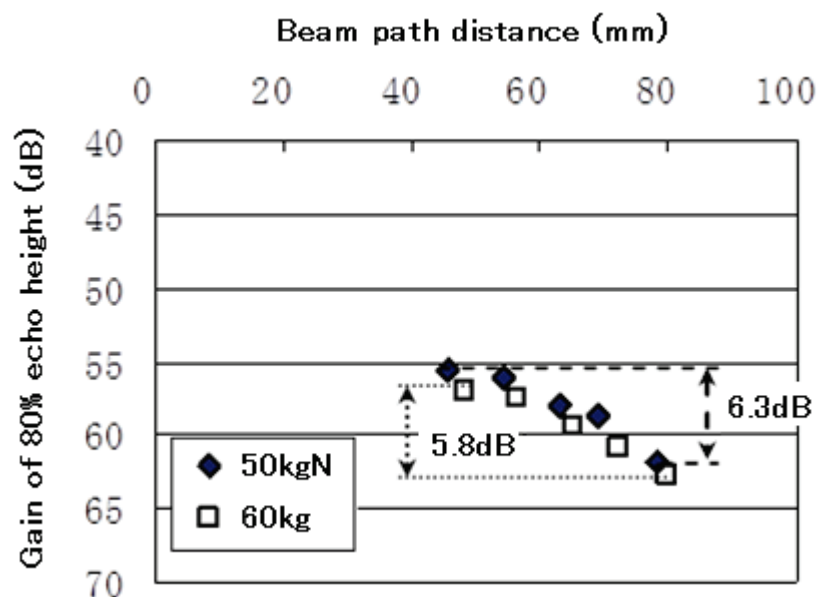
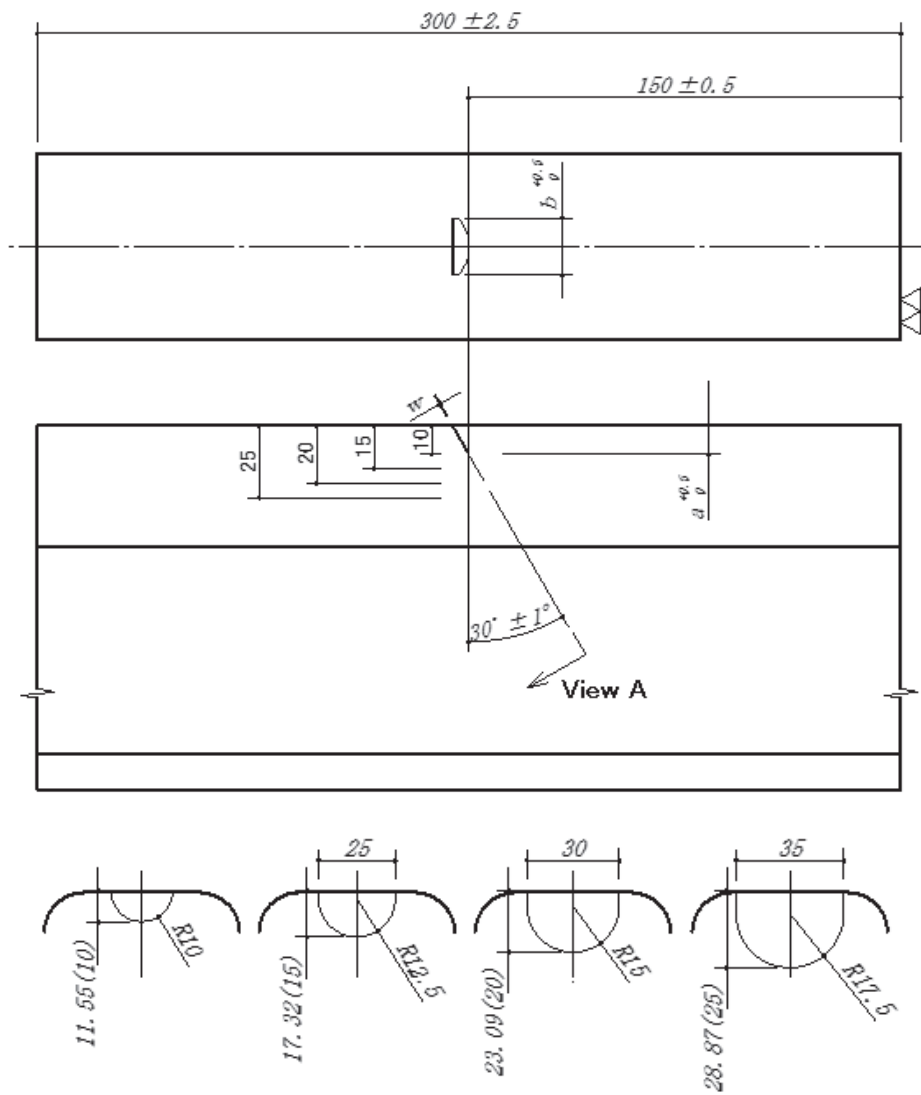


Fig. 3.32 Distance amplitude characteristic curve by double probe

### 3.3.2.4 レール試験片による探傷試験

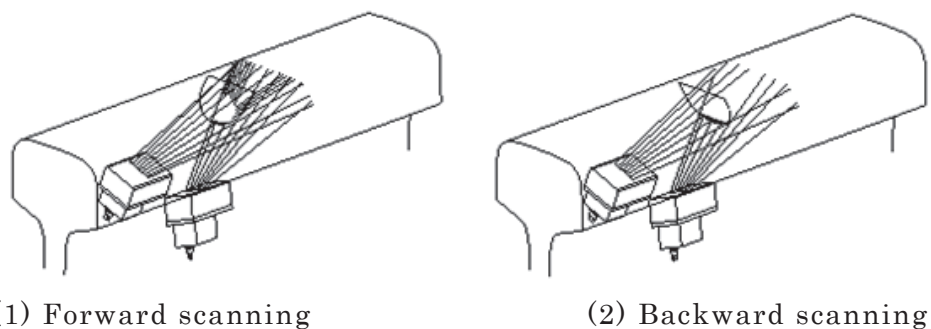
横裂に対する探傷性能を確認するために、レールに横裂を模擬した人工傷を加工した試験片（50kgN レール，60kg レール）を製作し探傷試験を実施した。製作した試験片を図 3.33 に示す。レール頭部中央に鉛直方向に対し  $30^\circ$  の角度をもった深さ 10 mm，15 mm，20 mm，25mm の円弧形状の人工傷を加工した。このレール試験片を使用して、人工横裂傷の検出状況の把握と角度を持った横裂に対する探傷方向を判断した。探傷方向を決めるために、傾いている傷の先端があるレールあご下部からの探傷（前方探傷）とその反対側からの探傷（後方探傷）の 2 種類の方向で試験を実施した。その探傷方向について示したものを図 3.34 に示す。

これら 2 方向から探傷した結果は、50kgN レール試験片と 60kg レール試験片に対する探傷とも同じ傾向を示したので、例として 50kgN に対する結果を図 3.35 に示す。黒丸の部分が人工傷に対して反射エコーを検出できた箇所である。前方探傷では傷先端の把握が容易であり、後方探傷では傷の面の把握が容易であるという特徴がわかった。しかしながら、前方探傷では傷の面から得られるエコーが弱すぎて傷面全体の検出が困難であり、後方探傷では傷の面からのエコーが逆に強すぎ傷先端のエコーが隠れてしまうことも確認できた。最終的な探傷器のコンセプトである連続的な探傷を行うことを想定した場合、探傷ピッチが大きいと前方探傷ではしきい値を超えるエコーを検出できない恐れがあった。よって、営業線で試験を行う試作器においては後方探傷を基本として行えるように設計をした。



View A: Defect profile, ( ): Depth (a)

Fig. 3.33 Rail piece for performance test to evaluate phased array system with double probe technique



(1) Forward scanning

(2) Backward scanning

Fig. 3.34 Scanning direction by phased array system

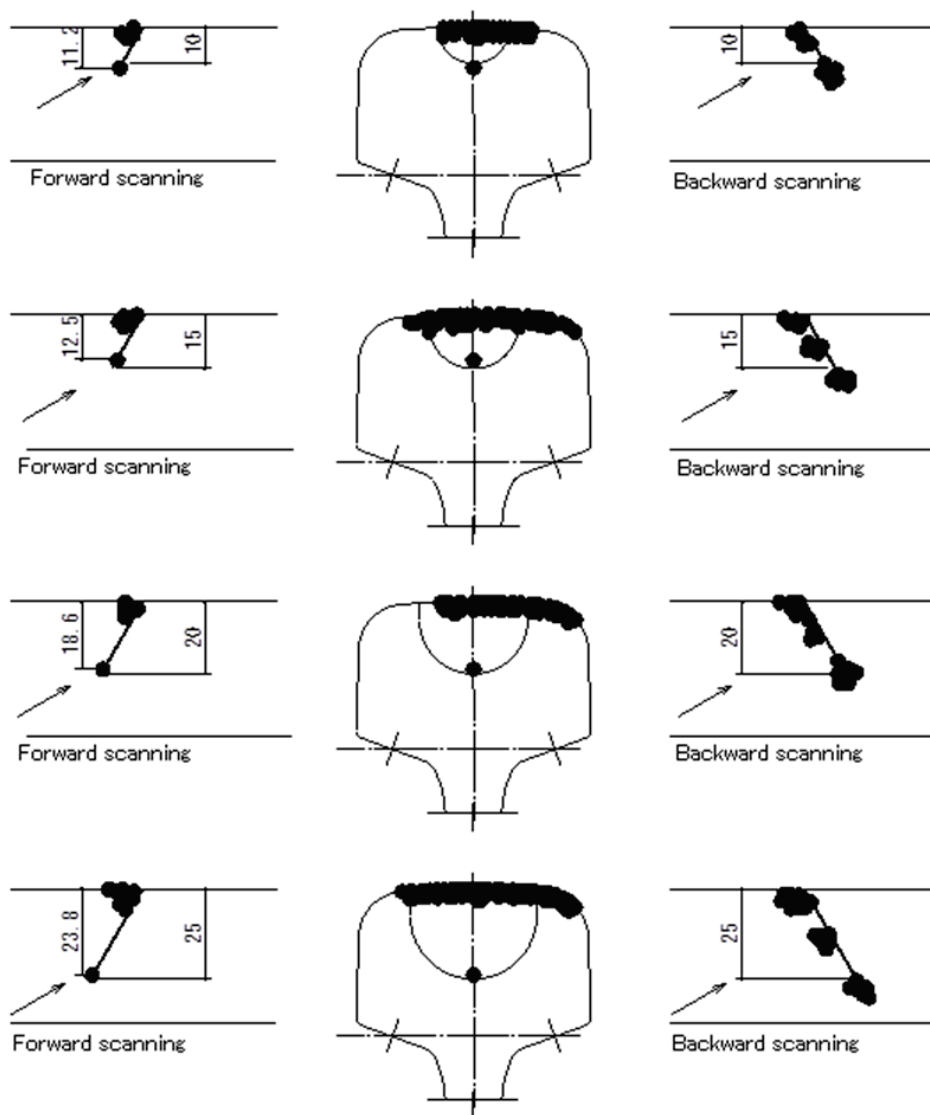


Fig. 3.35 Detecting results by forward and backward scanning

### 3.3.2.5 レール頭部横裂連続探傷器の試作

レール頭部横裂連続探傷器の基本的な設計仕様は、前章の基本性能を踏まえ次のとおりとした。さらに試作探傷器に採用されたアレイ探触子の仕様を表3.4に示す。

- ・ レールあご下へ探触子を設置する際の容易さと探傷器本体のコストダウンの観点から、探触子の素子数を16素子から10素子に低減した。（扇状の探傷範囲60°は同じ）
- ・ レール頭部内の超音波のビーム路程を短くするために入射角を60°から50°に変更した。
- ・ 探傷速度は、フェイズドアレイ探傷の送受信制御の処理速度に依存するため、横裂を見つけるだけの一次探傷と横裂深さを特定する二次探傷の2種類のモードを設定した。
- ・ 探傷方向は速度の速い一次探傷を考慮し、横裂の損傷面全体を捉えられる後方探傷を基本とした。

Table 3.4 Specification of array probes for pilot device

Item	Specification
Frequency	3 MHz
Vibrator material	Composite
Number of vibrating element	10
Vibrating element size	L 10 mm x W 0.6 mm
Interval	0.7 mm
Gap	0.1 mm
Refractive angle	50 degrees
Array probe size	L 40 mm x W 20 mm

試作した探傷器の全体図を図3.36に示す。横裂探傷はこの探傷器をレールの上に設置して検査員が支えながら実施する。架台下部に設置されている探傷装置には駆動輪があり、一次探傷および二次探傷でそれぞれ一定の速度で探傷す



ることができる。この探傷装置部分は着脱可能な構造となっており、装置単独での探傷も可能である。架台の上部には操作用のパソコン、架台内部にはパルスレーザ本体、電源、接触媒質のタンクを搭載している。レール頭側部を抑えるガイドローラーと走行用車輪は架台本体に設置されている。

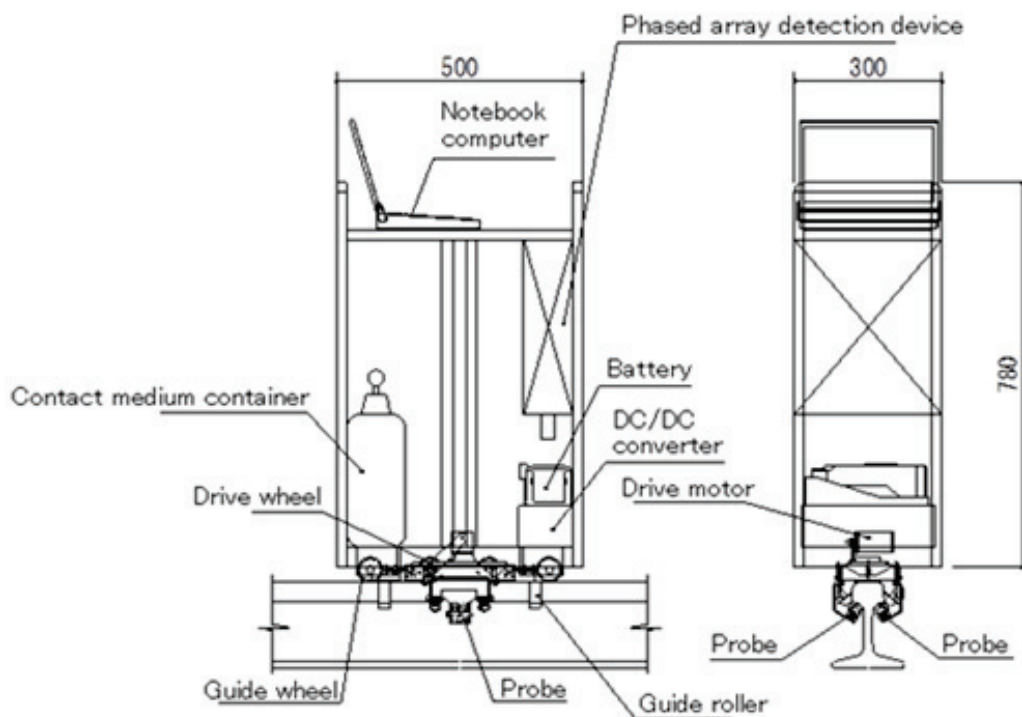


Fig. 3.36 Phased array detection device with double probe system

一次探傷として横裂の有無を確認する探傷モードでの走行速度は、0.5km/h、1.0km/h および 2.0km/h の 3 種類となっている。フェイズドアレイ探傷を行う間隔（セクタースキャン）は、速度によらず 5mm となっている。二次探傷として横裂深さを詳細に調べる場合に使用する二次探傷モードでの走行速度は、1mm/sec、2mm/sec および 5mm/sec の 3 種類となっている。このモードの場合、セクタースキャンは毎秒実施するため、遅い速度を選択すれば短い間隔での探傷を行うことができる。

次に、この探傷器で探傷できる範囲を図 3.37 に示す。50kgN レール用と 60kg レール用では、探傷できる範囲が異なっており、探触子の設置角度も異なっている。これは前述しているとおりレールあご下部の形状が異なっていることが大きな理由である。



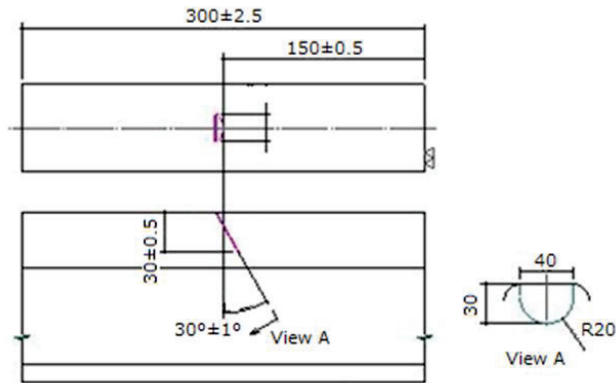
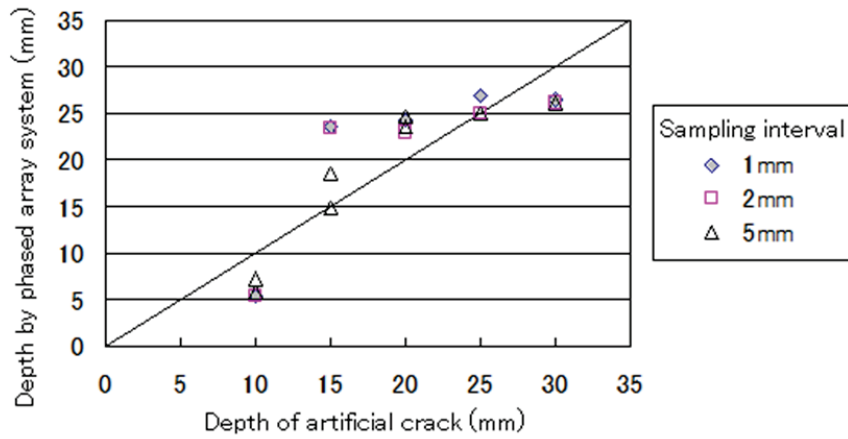
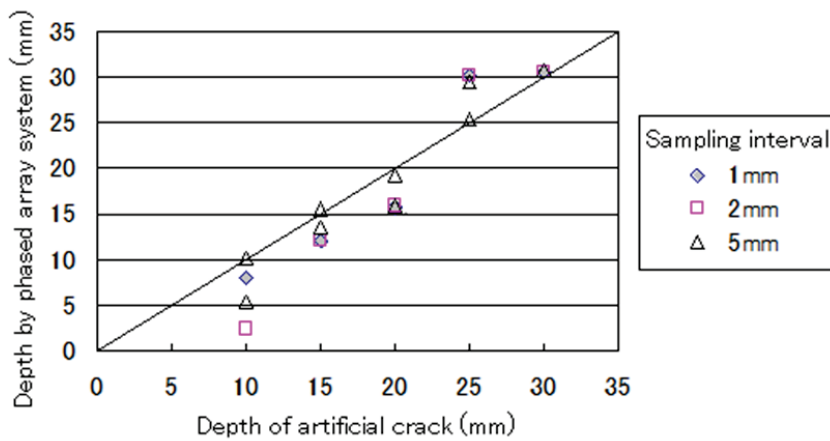


Fig. 3.38 Additional rail piece for performance test to evaluate phased array system with double probe technique



(1) 50kgN rail



(2) 60kg rail

Fig. 3.39 Relation between depth of artificial crack and detected depth

(2) シェリングが発生したレールに対する探傷結果

次にこの試作探傷器により実際のシェリングが発生しているレール（レール交換により発生したレール）について探傷した結果の一例を図 3.40 および図 3.41 に示す．図 3.40 は探傷器のパソコン画面に現れる探傷モニターで，レールに横裂が存在していることを示している．図 3.41 の上図は試験探傷で使用した実際のレールを切断した写真であり，下図はそのき裂をスケッチした図となっている．図より，この探傷器では水平裂を捉えることはできないが，横裂深さを確実に捉えていることが確認できた．図 3.41 より，頭部摩耗分を含んだ傷の最深部は 10.2mm（頭部摩耗量 2 mm を考慮すると約 8mm）であり，図 3.40 に示されている探傷器で得られた横裂深さ 10 mm と一致した（試作探傷器はあご下から測定しているため頭部摩耗分を考慮しない）．このき裂は水平裂と比較して下に向かって約 30° で進展しており，横裂として捉えることができたものと考えられる．

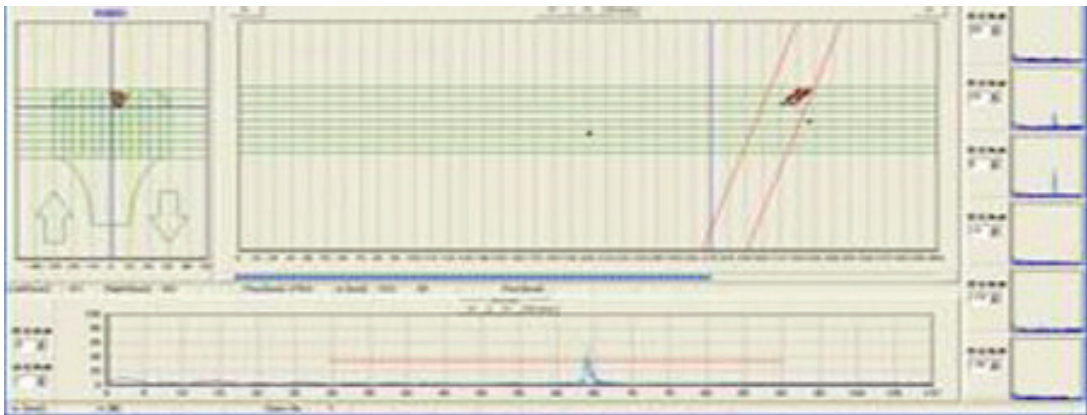


Fig. 3.40 Monitor of detection system when vertical defect was detected

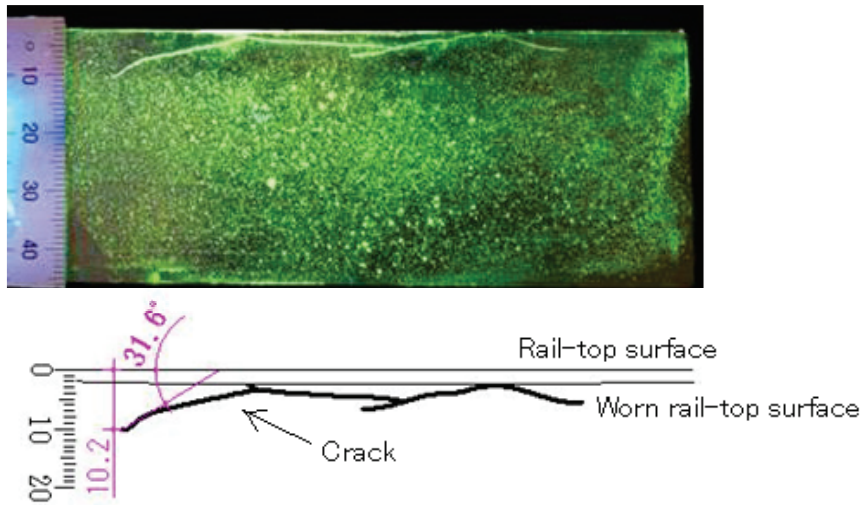


Fig. 3.41 Photo and sketch of internal crack detected by phased array system

(3) ゲージコーナー部に発生する横裂に対する探傷評価

これまではレール頭部中央に発生する横裂に対しての評価を実施してきたが、きしみ割れからの横裂は、ゲージコーナー部から進展することがわかっている。例えばすでに図 1.8 で示した横裂は、ゲージコーナー部の方に偏った形をしている。しかもゲージコーナー部に発生する横裂の傾向としては、斜めの角度をもたずにレール頭頂面に対して  $90^\circ$  で発生する場合もある。このような点を踏まえて、ゲージコーナー部に  $90^\circ$  で加工した人工傷（垂直スリット傷）に対する探傷性能の評価試験を実施した。試験片に加工した傷の形状と大きさを図 3.42 に示す。また二探触子法として探触子の受信側と送信側の設置方法により探傷状況が大きく変わるため、図 3.43 に示すように 2 パターンの探傷方法で評価試験を実施することにした。

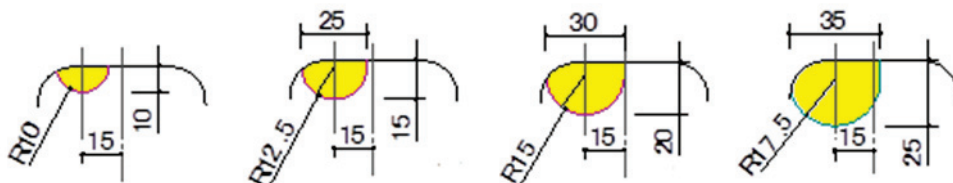


Fig. 3.42 Test pieces to evaluate performance to detect gage corner defect

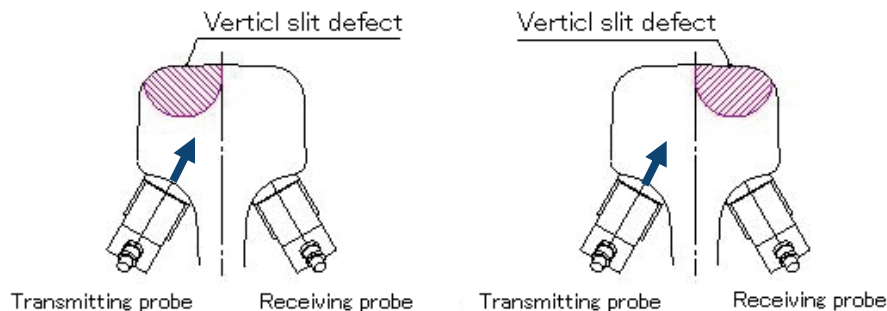
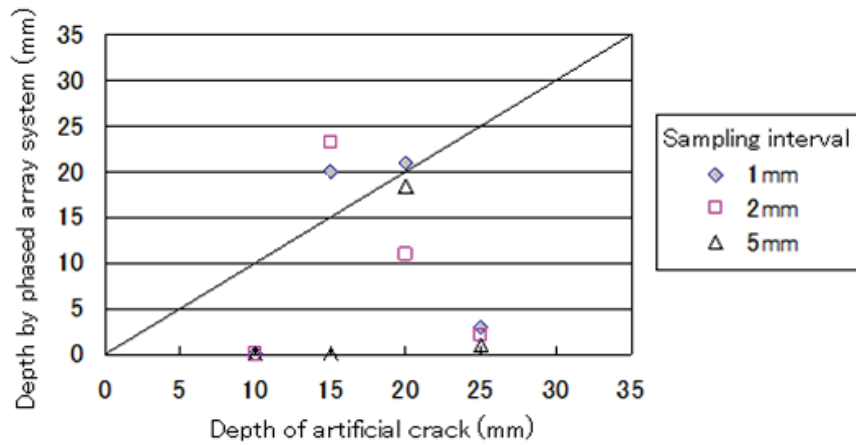


Fig. 3.43 Setting position of two probes with double probe system

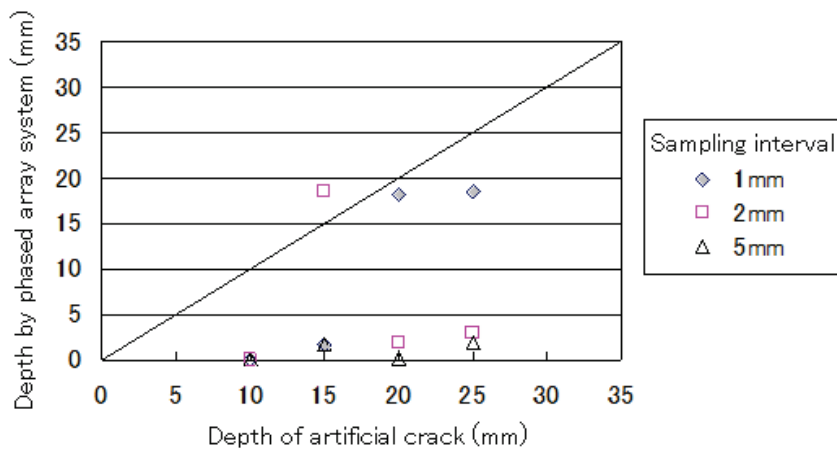
ゲージコーナー側に発生する人工傷を加工した50kgNレールと60kgレールに対して探傷した結果をそれぞれ図3.44と図3.45に示す。図より、両レールとも10mm深さの人工傷は検出することができなかった。15mm深さの傷では、測定値が合わないものの傷の有無を検出することは可能であった。傷の深さが20mm以上になると探傷間隔にもよるが傷の深さを検出することが可能になった。送受信探触子と傷の位置関係では、傷が存在する側に送信探触子を設置して探傷を行った方が有利であることも確認できた。

検出される傷の深さが実際の傷深さと異なる理由として、レール頭部中央に発生する横裂を感度良く検知できる仕組みとした設計思想が影響していると考えられた。つまり、レール頭部中央に存在する横裂下端部と送受信探触子を結ぶ経路が“正三角形”となるように探触子の配置設計をしており、横裂がレール頭部中央に発生した場合は超音波もその伝達経路を経由することになるため損失が小さくなる。しかしながら横裂がゲージコーナー側にある場合は、その伝達経路が正三角形にならないことが幾何学的にも理解でき、超音波の損失が大きくなると想定され、検出される傷深さが実際の深さと異なってしまうと考えられた。また、探傷感度が小さくなる別の理由として、試作探傷器は探触子の機構上、傷の角度によってレール頭部内での探傷感度が悪くなる範囲をもっている。このアレイ探触子から入射する超音波の角度は $50^\circ$ であるため、傷のき裂角度がレール長手方向に対して垂直に近い場合（例えば今回の人工傷で準備した角度）、傷での反射エコーの割合が小さくなるため、受信探触子で捉えることのできる反射エコーのエネルギーも小さくなる。さらに、このアレイ

探触子の検出感度は、セクター角度が大きくなると小さくなるのが基本性能試験でわかっている。つまり、横裂がゲージコーナー側に寄っている場合、傷の中心を捉えられる超音波ビームはセクター角度が  $0^\circ$  ではなく角度を持ったビームで捉えることになり、検出精度が低下しているものと想定された。



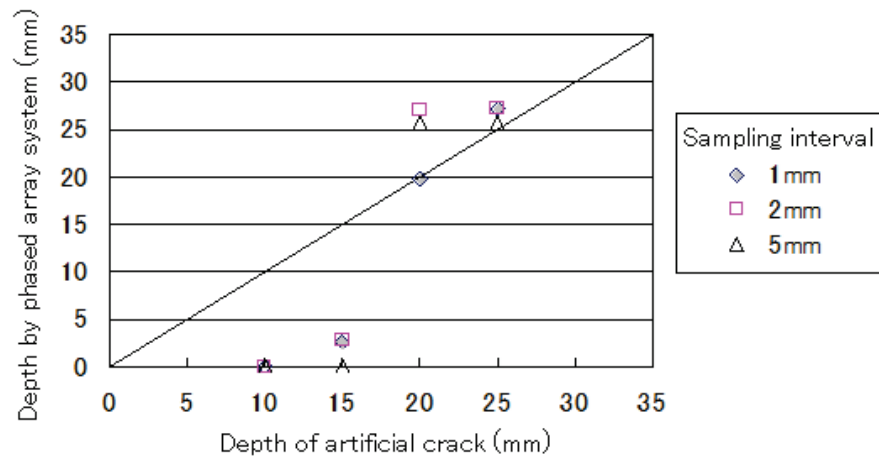
(1) Transmitting probe on upper fish plate of defect side



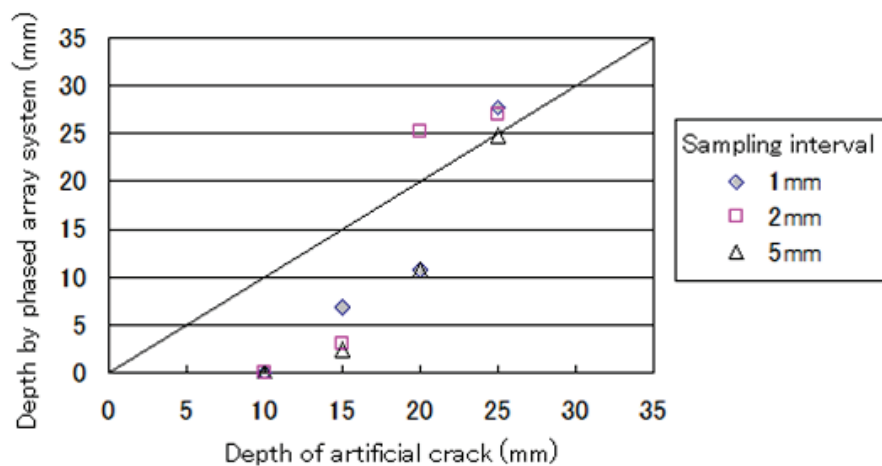
(2) Receiving probe on upper fish plate of defect side

Fig. 3.44 Relation between depth of artificial crack and detected depth  
(50kgN rail)





(1) Transmitting probe on upper fish plate of defect side



(2) Receiving probe on upper fish plate of defect side

Fig. 3.45 Relation between depth of artificial crack and detected depth  
(60kg rail)

以上の考察も含め、本試作探傷器ではゲージコーナー部の垂直横裂を発見する可能性については、2 mm間隔のサンプリングで、20 mm以上の大きさになったき裂であれば、確実に検知できることが確認された。つまり、ゲージコーナー側から発生する横裂についても、そのき裂が大きくなればレール頭部中央付近にき裂範囲が広がってくることになり、この探傷器で検知できることが可能となる。ただし、ゲージコーナー部の横裂、特に小さな横裂を検知するためには



この試作探傷器の性能上難しく，探触子の配置や別の手法を再度検討しなければいけないということが課題として残った．

## 3.4 本章のまとめ

きしみ割れの管理においては，これまでき裂長さによる管理を中心に行われてきたが，レール交換に至ったきしみ割れを調べるとはく離を生じたり，表面き裂からレール内部に進展したき裂がまれに横裂に発展したりする場合があった．そのため，レール損傷管理の信頼性を向上するために，はく離やレール内部に進展した横裂の大きさをできるだけ精度高く把握する手法を取り入れる必要があった．そこで，レール表面画像撮影によるレール表面に現れているき裂長さやはく離状態について定量的に管理を行うための画像撮影法と画像処理方法の研究，レールあご下部からのフェイズドアレイ探傷による横裂深さを検出できる探傷器の開発を行った．

レール表面画像撮影法については，レール探傷車にラインセンサ方式の画像撮影装置を取り付けることにより，レール表面のきしみ割れの状態とき裂やはく離サイズをmm単位で正確に検出できることを確認した．この撮影法の原理については新しいレール探傷車にすでに搭載されている．さらにレールあご下からのフェイズドアレイ探傷法については，本研究を通じて開発されたレール頭部横裂連続探傷器がすでに各支社に1台ずつ配備されることが決定され，今後のレール損傷管理に活用される予定である．ただし，現行のレール頭部横裂連続探傷器では，レール頭部内中央部に拡がった横裂は検知できるが，ゲージコーナー側にとどまる小さな横裂については検出が不十分となる課題が残った．

### 第3章の参考文献

- [1] 加藤：非破壊検査のおはなし，日本規格協会，1995.4
- [2] 瀧川，本，尾高：レール探傷車の探傷能力向上，Technical Review (JR EAST) No.2, pp.35-39, Winter 2003
- [3] 細田，片岡，小谷，弟子丸：レール頭部横裂の進展予測手法の構築，鉄道総研報告，Vol.26, No.2, pp.31-36, 2012.2
- [4] 寺下，設楽：レール等に潜む損傷の検査法，Railway research review (RRR), pp.12-25, 2008.5
- [5] Kobayashi：Experimental study on gauge corner crack of high rail in gentle curves, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, September 2009
- [6] 瀧川，入屋：実験によるレールきしみ割れとはく離の発生要因分析，鉄道力学論文集，Vol.10, pp.43-48, 2006.7
- [7] 瀧川：レールきしみ割れの現状と試験機による再現実験，鉄道施設協会誌，第44巻，第9号，pp.16-19, 2006.9
- [8] 瀧川，日比野，藤本，斎藤，小松：渦流探傷試験によるレールきしみ割れの検出，第10回表面探傷シンポジウム講演論文集，pp.23-28, 2007.1
- [9] 瀧川，斎藤，日比野，藤本，小松：レールきしみ割れに対する渦電流探傷試験，非破壊検査，Vol.57, No.7, pp.306-310, 2008.7
- [10] H. M. Thomas, M. Junger, R. Pohl, S. Ruhe: Eddy current detection of head-checks on the gauge corner of rails: recent result, Conference on railway engineering 2003, London, April 2003
- [11] H. M. Thomas, T. Heckel, E. Hanspach: Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains, ECNDT 2006 conference, Wed. 4.5.3, Berlin, September 2006
- [12] R. Pohl, R. Krull, R. Meierhoffer: A new eddy current instrument in a grinding train, ECNDT 2006 Conference, Poster 178, Berlin, September 2006

- [13] Rail Inspection Technologies, INNOTRACK, Project No. TIP5-CT-2006-031415, November 2008
- [14] 安藤, 瀧川, 坂代, 田中: フェイズドアレイ技術を用いたレール横裂探傷の基礎試験, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 2011.8
- [15] 安藤, 瀧川: レール頭部横裂連続探傷器の開発, 鉄道施設協会誌, 第 50 巻, 第 9 号, pp.39-42, 2012.9
- [16] 安藤, 青木, 瀧川, 小関: レール頭部横裂連続探傷法の開発, Technical Review (JR EAST), No.39, pp.47-50, Spring 2012
- [17] 青木, 小関, 坂代, 田中: レール頭部の精密な探傷方法の開発, 第 63 回土木学会年次学術講演会, pp.105-106, 2008.9
- [18] 新版 軌道材料 (新版軌道材料編集委員会編): 鉄道現業社, pp.31-32, 2001
- [19] 日本工業規格 JIS Z 2350 (2002)



# 第4章 実験によるきしみ割れの発生 条件分析

## 4.1 転動試験装置の性能確認試験

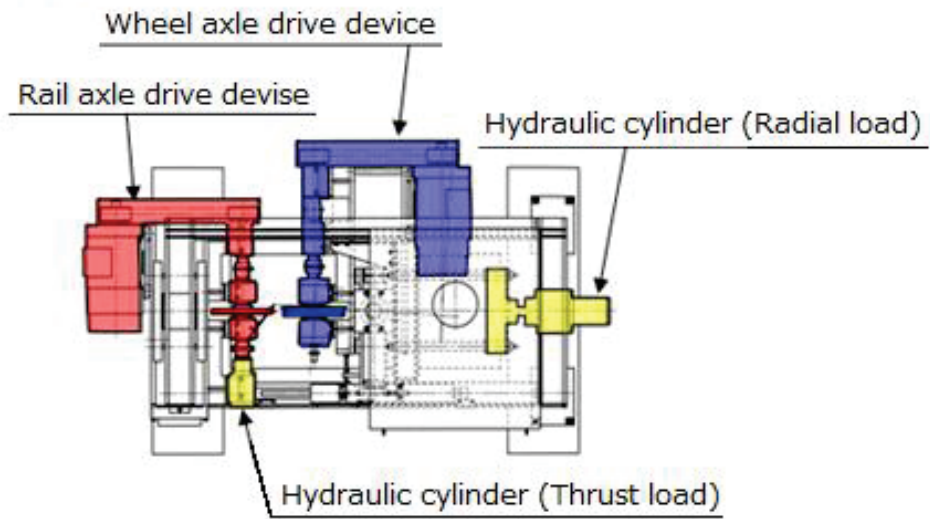
### 4.1.1 転動試験装置の概要

きしみ割れの発生条件の研究については，レール側が円筒のレール・車輪を模擬した転動試験装置（以下，転動試験装置）を用いて行うことにした．転動試験装置の詳細を図4.1に示す．さらに，この試験装置の主な仕様は表4.1のとおりである．きしみ割れの再現実験では，実際の車両で使われている車輪の1/2サイズ車輪試験片（D=430mm）を使用した．ただし，きしみ割れの再現実験を行う前に，この転動試験装置の有効性を確認する必要があるため，レールに生じる摩耗量を指標とした転動試験装置本体の性能確認実験を行った．最初にその実験内容と評価結果について述べる．

Table 4.1 Test machine performances

Rotation speed	100 - 2,000 rpm
Load	Radial: max. 100 kN, min. 2.0 kN Thrust: max. 40 kN, min. 1.0 kN
Angle of attack	-0.3 - +0.3 deg.
Contact angle	0.0 - 3.0 deg.
Atmosphere	Dry, lubricant (oil, water)
Disk	Wheel: D=215 mm, 430mm Rail: D=215mm, 430mm

【Top view】



【Elevation view】

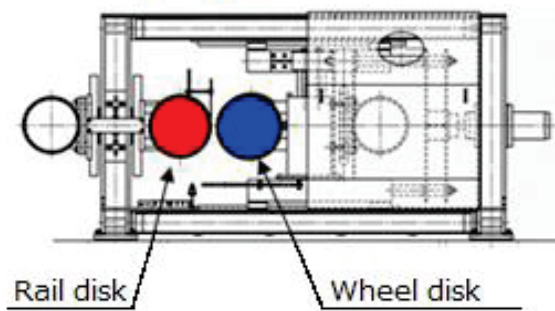


Fig. 4.1 Twin-disk test machine (Schematic diagram)

## 4.1.2 レールが受ける荷重およびレールと車輪の位置関係

### 4.1.2.1 軌道動的測定試験箇所の概要

転動試験装置の性能を評価する摩耗実験においては、実際の車両で使われている車輪の1/4サイズ車輪試験片(D=215mm)を使用した。この実験を行うに際して、荷重条件等を見極める必要があったため、実際の列車が走行している営業線において軌道動特性測定試験を実施した。測定した箇所の軌道条件は表4.2に示すとおりであり、あわせて軌道構造の各部位の名称を図4.2に示す。ここでカント(Cant)とは、列車が曲線を通る際の遠心力を緩和するために設けられた左右レールの高低差を表している。測定箇所は複線区間でコンクリート製のまくらぎ(Sleeper)と砕石(Ballast)から構成される一般的な軌道構造である。曲線半径(Curve radius)は急曲線の分類に入る400mであり、カントが105mmである。列車速度とカントの関係は式4.1で表すことができる[1]ため、カント105mmにおける均衡速度は70km/hとなる。つまり、70km/hで列車が通過する際には、理論的には左右の車輪にかかる荷重(輪重; Wheel load)がバランスすることになる。

$$C = 8.4 \times \frac{V^2}{R} \quad (4.1)$$

C: カント (mm)

V: 速度 (km/h)

R: 曲線半径 (m)

Table 4.2 Track conditions at measurement point

Curve radius	400 m
Cant	105 mm
Rail head profile (Weight: 60kg/m)	Inbound: 50kgN rail Outbound: 60kg rail
Track structures	Ballast, Concrete sleeper



この測定試験では、下り線に 60kg レール、上り線に 50kgN のレール形状を持った 60kg/m のレールを敷設した。これら 2 種類のレールのレール頭頂面形状の違いを図 4.3 に示す。ゲージコーナー部の形状曲率半径は 13 mm で同じであるが、レール肩部と頭頂面はそれぞれ形状曲率半径が異なっている。この測定では、評価実験として外側にあるレール（外軌レール；High rail）の摩耗を対象として行う予定であったため、センサー類は曲線内の外軌レールに設置した。そのセンサーを設置したレール上を列車が通過する際に、レールが受ける応力や変位を測定できる仕組みとなっている。

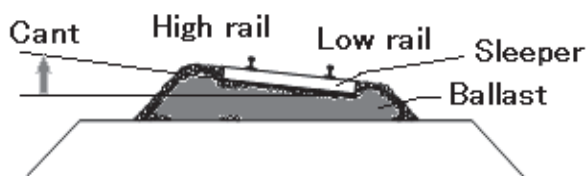


Fig. 4.2 Track structure terminology

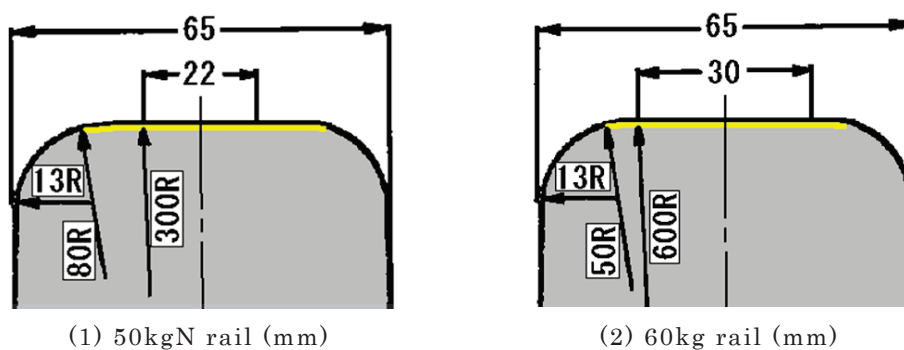


Fig. 4.3 Rail-head profiles

#### 4.1.2.2 ラジアル荷重とスラスト荷重

軌道上で得られる荷重は輪重（鉛直方向の荷重）と横圧（水平方向の荷重）であり、試験装置においてはそれぞれラジアル荷重とスラスト荷重に換算することになる。その測定箇所を通過する代表的な編成（通勤車両）について、各曲線内 2 箇所を測定をした。測定方法は図 4.4 に示すようにひずみゲージをレールの腹部と底部に貼り、事前に検定器（図 4.5）によるひずみと荷重の関係

を求めたうえで、列車通過時の輪重と横圧を求めた。

それらの荷重について測定した結果の一例を図 4.6 (輪重) および図 4.7 (横圧) に示す。これらの図の横軸は輪軸 (Wheelset) を表しており、この例では 10 両編成分の 40 軸 (1-1 軸~10-4 軸) が示されている。一車両には車軸が 4 軸あり、特に横圧はそれぞれの軸で大きく異なった挙動を示している。そのため実験条件を決める荷重については、列車が曲線内を通過する際の各軸の挙動が車両構造により大きく異なっていることから [2], [3], 比較的同じ挙動を示す各車両の先頭軸となる 1 軸目の値を平均して、各編成の代表値として利用することにした。

当該の曲線を一般的に通過する列車 (通勤列車と優等列車) について、輪重と横圧の各編成の代表値について整理した結果を図 4.8 および図 4.9 に示す。これらの図より、輪重はどちらのレール形状においても 40~80kN で同じような値を示しており、横圧も輪重と同様に 5~20kN の間でレール形状の違いによる値の変化はみられなかった。これらの値と後述するレール・車輪の接触解析結果を参考に、室内実験で使用するラジアル荷重とスラスト荷重を決定した。

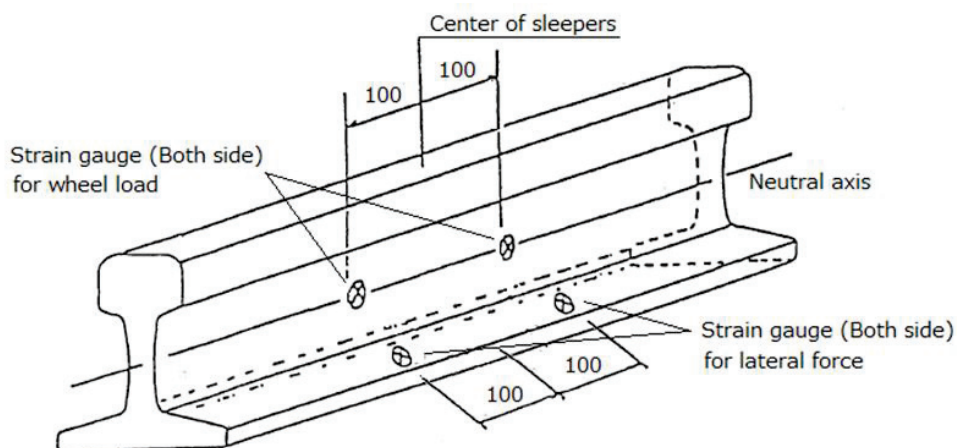


Fig. 4.4 Strain gauge for wheel load and lateral force

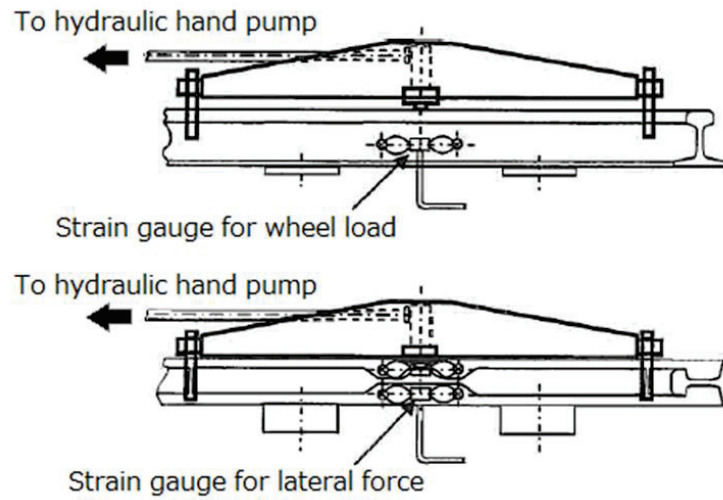


Fig. 4.5 Load calibration device for wheel load and lateral force

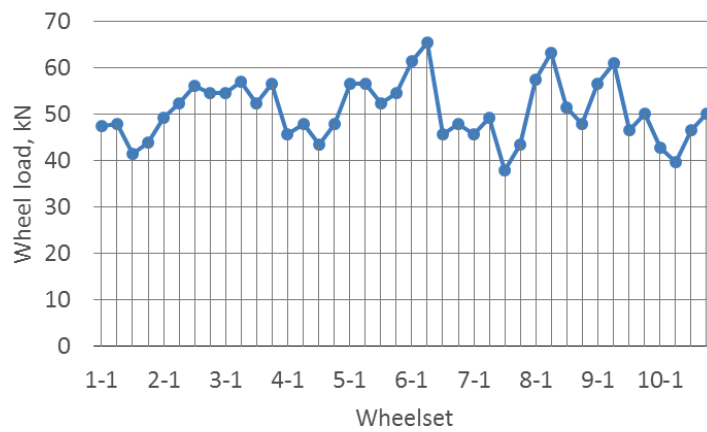


Fig. 4.6 Wheel load of a commuter train

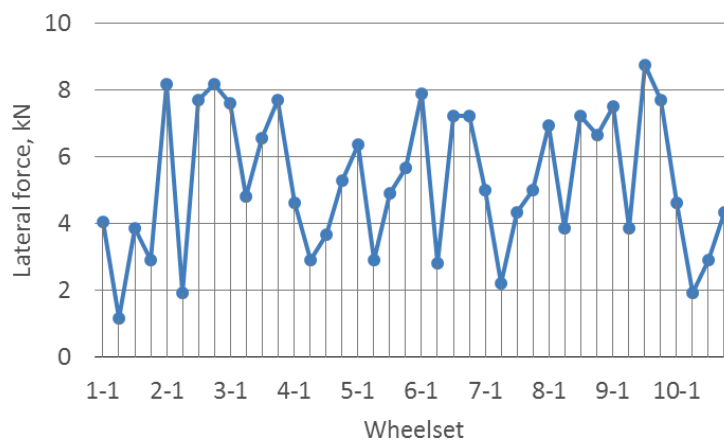


Fig. 4.7 Lateral force of a commuter train

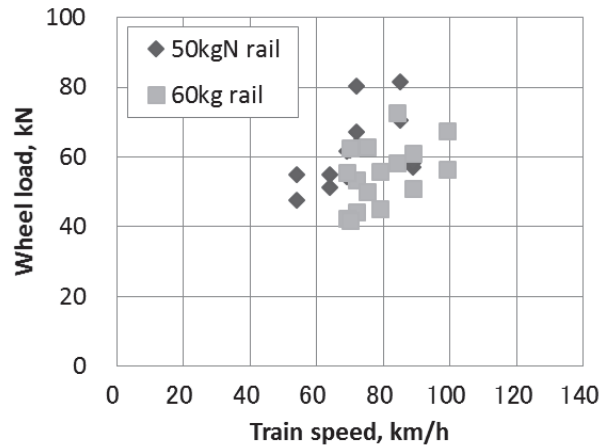


Fig. 4.8 Measurement result of wheel load

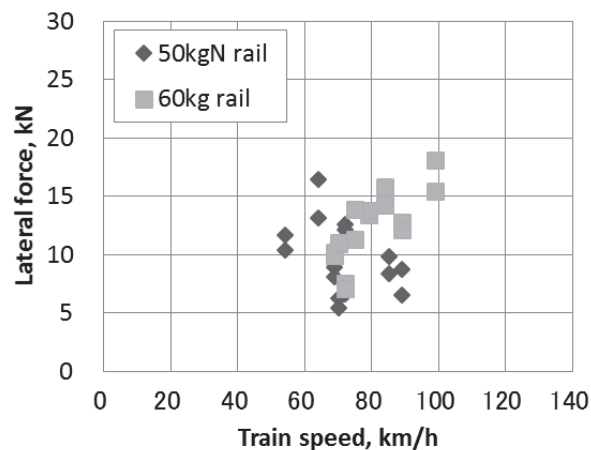


Fig. 4.9 Measurement result of lateral Force

### 4.1.2.3 レールと車輪の接触角

レールは軌間 (Track gage) の内側に向かって  $1.4^\circ$  の角度で傾斜して敷設されており、レール敷設勾配 (Rail inclined angle) と呼ばれている (図 4.10)。一方、曲線通過時に列車の横圧で軌間外側に向かって横圧がかかる場合、レールが外側に傾斜することが想定され、その角度 (レール小返り角; Rail tilting angle) を把握しておく必要がある (図 4.10)。測定は図 4.11 に示すように渦電流式の変位計をレールの頭部と底部に設置して行った。小返り角はレール頭

部と底部の変位から求めており，変位計の間隔が 150 mm あるので，式 4.2 から求めることができる．

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{R_h - R_b}{150}\right) \quad (4.2)$$

$\theta_r$  : 小返り角 (rad)

$R_h$  : レール頭部変位 (mm)

$R_b$  : レール底部変位 (mm)

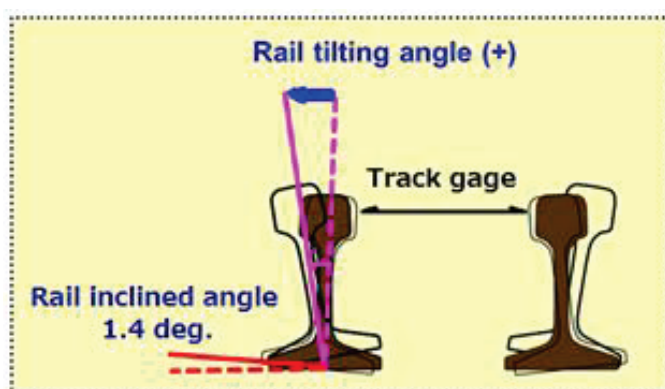


Fig. 4.10 Definition of Rail inclined angle and tilting angle

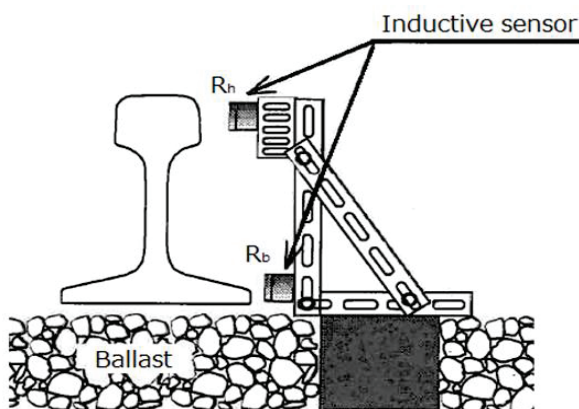


Fig. 4.11 Inductive sensors to measure displacement of rail head and bottom

その小返り角を測定した結果を図 4.12 に示す．グラフでは縦軸をラジアンから度に変換して示している．この図より 50kgN および 60kg レールともレール小返り角について大きな違いはなく，その角度は  $\pm 0.04^\circ$  以内とわずかであることが確認できた．この敷設勾配と小返り角の合計が実験装置における接触角 (Inclination angle) となる．

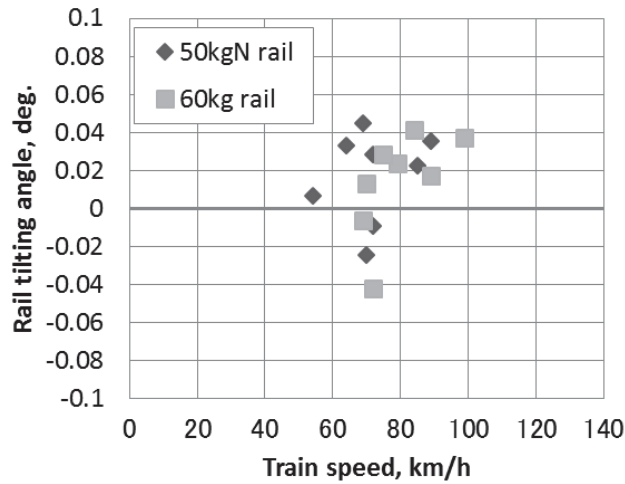


Fig. 4.12 Measurement result of rail tilting angle

#### 4.1.2.4 レール長手方向と車輪がなす角度

曲線を通過するとき車輪は、曲線レールの接線方向に対して外側に角度をもって進もうとする。その角度をアタック角 (Angle of attack, 図 4.13) という。測定は図 4.14 に示すようにレーザー変位計 2 台をレール頭部より若干上側になるように設置し、車輪通過時にレーザー変位計からの光線が車輪下側に同時に当たるように行なった。2 台のレーザー変位計の間隔は 300 mm としたので、アタック角は下記の式 4.3 で求められる。

$$\theta_w = \arctan\left(\frac{L_1 - L_2}{300}\right) \quad (4.3)$$

$\theta_w$  : アタック角 (rad)

$L_1$  : 車輪リム左側離れ (mm)

$L_2$  : 車輪リム右側離れ (mm)

上下線でアタック角の測定を行なったが、下り線で取得できたデータが少なかつたため、上り線で測定した結果について正規分布化したグラフを図 4.15 に示す。グラフでは横軸をラジアンから度に換算して示している。この図より、アタック角は  $0.05^\circ$  を平均として標準偏差  $0.2^\circ$  で広がる分布を示している。一般的に摩耗に影響するのは正のアタック角と考えられており、これまでの知見

[4], [5]も参考にして, 実験で利用するアタック角は  $1\sigma$  である  $0.3^\circ$  とした.

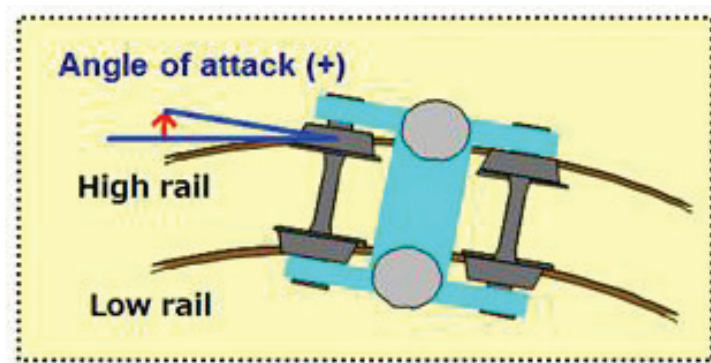


Fig. 4.13 Definition of angle of attack

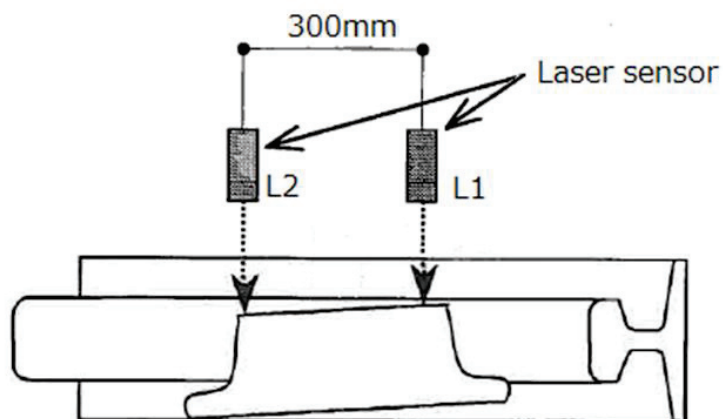


Fig. 4.14 Laser sensors to measure angle of attack

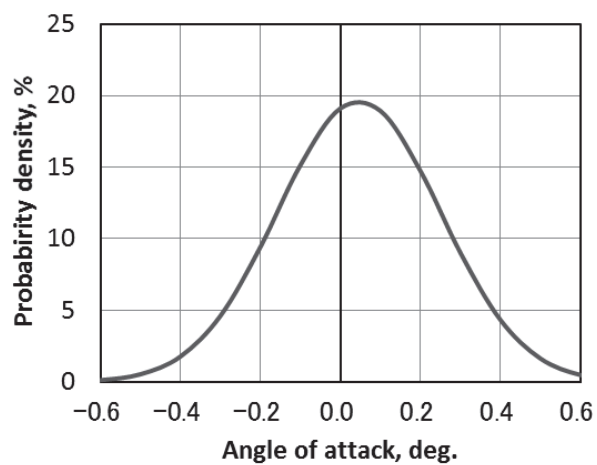


Fig. 4.15 Measurement result of angle of attack (Inbound)

### 4.1.3 レール・車輪の接触解析

車輪とレールの最大圧縮主応力が、レール頭面形状の変化により受ける影響を調べるため、FEMの弾塑性解析により検討を行った[5]。本解析は一般的な構造解析プログラムのNASTRANを使用しており、作成したモデルを図4.16に示す。モデルのエレメントサイズはレールと車輪の接触位置は2.5mm、そのほかの部分については5.0mmとした。レールは弾塑性体、車輪は弾性体としている。この解析ではレール・車輪間を不連続でモデル化し、変位制御により計算を行っている。輪重を先に負荷し、レール頭頂面の摩擦により横圧を受けている状態を想定した。材料特性としては加工硬化を考慮することとし、フォンミーゼスの相当応力に基づき降伏応力を511MPa、完全塑性応力を1,081MPaとした。計算で利用した応力-ひずみ曲線を図4.17に示す。ヤング率はこの曲線の $\epsilon=0.002$ までの勾配から求めることとし、その値を $2.56 \times 10^5$ MPaとした。ポアソン比は0.3とした。さらに、レール・車輪間の摩擦係数は静摩擦係数0.5、動摩擦係数0.3として摩擦力を計算することとした。

計算条件として、輪重は最高速度の列車荷重が67kNであったため、その値を参考に65kNとした。横圧は図4.9には示されていないが、機関車の平均が約40kNであったため、横圧の影響を計算に最大限活かせるようにするためにその値そのまま採用した。レール小返り角は図4.12からレール敷設傾斜角である $1.4^\circ$ に対して小さい値であったため、考慮せずに計算を行った。アタック角は図4.15から $0.3^\circ$ とした。以上から計算条件をまとめると表4.3のようになる。

この条件により得られた最大圧縮主応力の結果の一例(50kgNレールの場合)を図4.18に示す。あわせて60kgと50kgNレールについて最大圧縮主応力を求めた結果を図4.19に示す。既往の研究[7]による接触解析では、荷重条件とアタック角が異なっているが、60kgレールと円弧踏面で最大圧縮主応力がおよそ1,100~1,300MPaとなっており、本解析で得られた約1,500MPaであれば問題ない値といえる。図4.19より、レールおよび車輪とも設計断面の場合、最大圧縮主応力は50kgNレール形状の方が大きな値を示していた。この結果はレール敷設直後の初期摩耗に関して、50kgNレール形状の方が早く進む可能性のあることを示唆している。



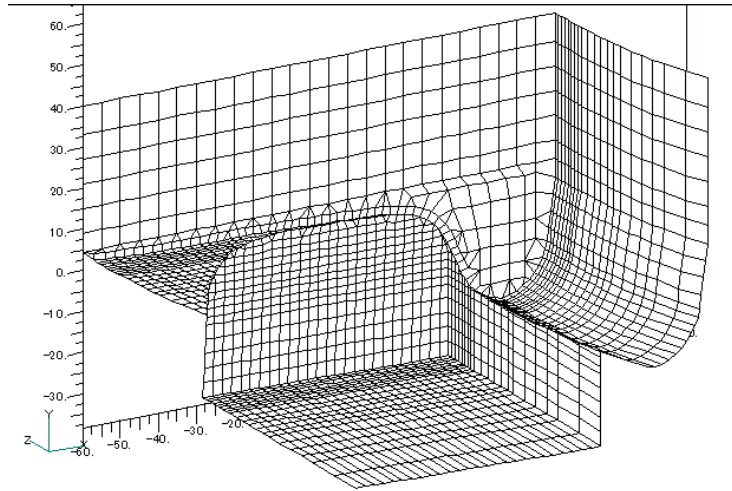


Fig. 4.16 FEM model

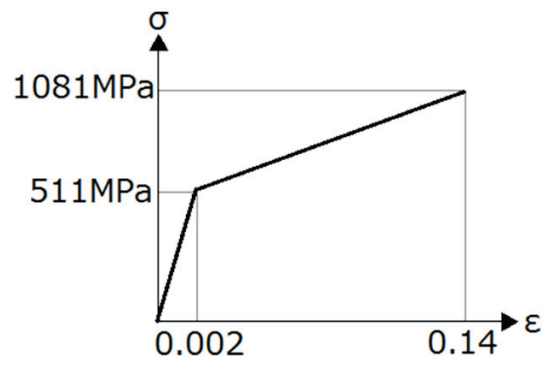


Fig. 4.17 Stress-strain curve to contact analysis between rail and wheel

Table 4.3 Calculation parameters for contact analysis

Wheel	Arc wheel tread
Rail	50kgN, 60kg
Wheel load	65 kN
lateral force	40 kN
Rail tilting angle	0.0 deg.
Rail inclined angle	1.4 deg.
Angle of attack	0.3 deg.

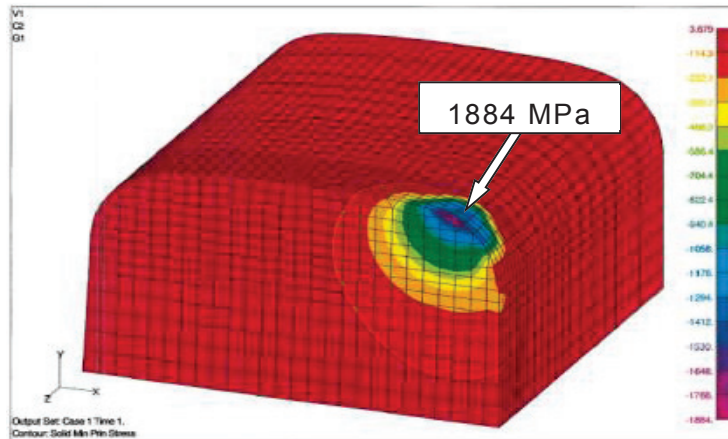


Fig. 4.18 Stress contour of 50kgN rail contacting arc wheel tread

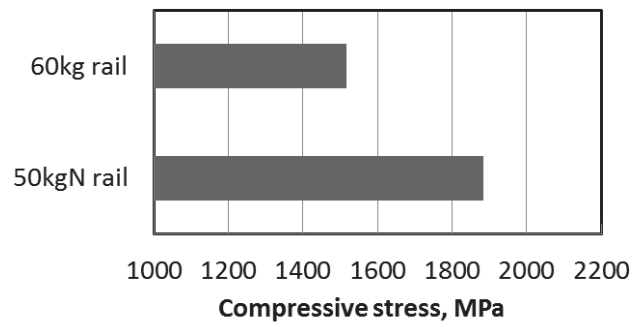


Fig. 4.19 Calculation result of maximum principal stress between rail and Wheel

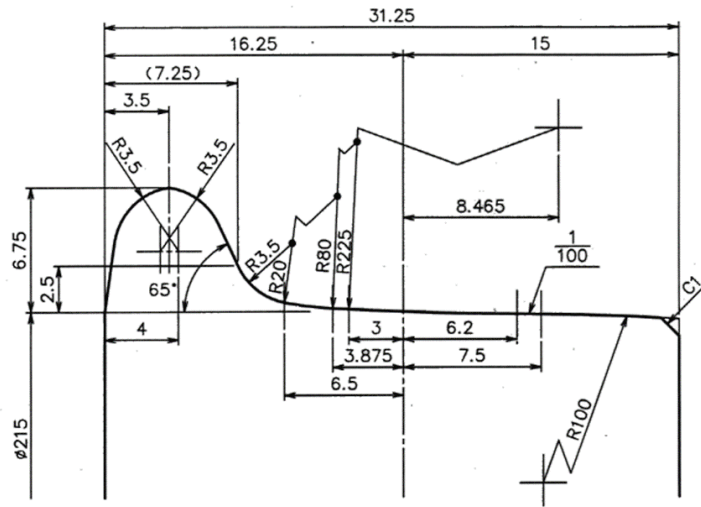
#### 4.1.4 転動試験装置による摩耗実験

これまで得られたデータをもとに，図 4.1 に示した転動試験装置を使用して摩耗実験を行った．摩耗実験で使用した試験論は表 4.4 と図 4.20 に示すように，実際の車輪とレールの 1/4 サイズで設計をした．車輪とレール試験片の接触部分に当たる形状についても，実際のレール頭頂面や車輪踏面の形状曲率半径の 1/4 となるように設計をした．1/4 サイズの試験輪を使用した場合のレール試験片と車輪試験片の接触状況を図 4.21 に示す．実験条件としては軌道動特性の測定結果（図 4.8，4.9，4.12，4.15）を参考に決定した．回転速度は最高速度の 99km/h を参考に 100km/h 相当，輪重は最高速度の列車で発生していた 67kN を参考に 65kN，横圧は最高速度の列車で発生した 18kN を参考に 20kN とした．アタック角は本測定とこれまでの知見を参考に  $0.3^\circ$ ，接触角はわずかな値であったレール小返り角を考慮せず，レール敷設傾斜角である  $1.4^\circ$  とした．レール試験片の材質は，現地測定を行った箇所が半径 400m の曲線で熱処理レールを使用していたため，熱処理したものを準備した．

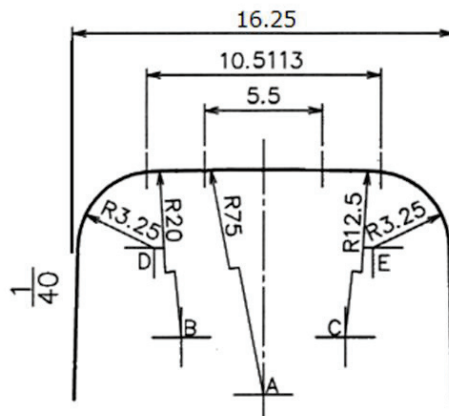
以上から，半径 400m の曲線区間のレール摩耗を評価するために決定した条件をまとめると表 4.5 のとおりとなる．

Table 4.4 Comparison with real rail and wheel profiles and profiles of disks

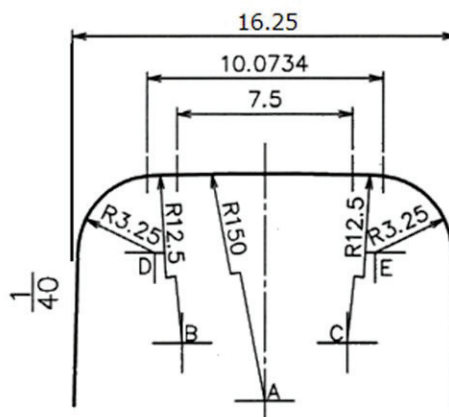
		Real rail and wheel	Rail and wheel disks
Rail	Diameter	$\infty$	215 mm
	Rail-head profile	60kg: R13-R50-R600 50kgN: R13-R80-R300	60kg: R3.25-R12.5-R150 50kgN: R3.25-R20-R7.5
wheel	Diameter	860 mm	215 mm
	Wheel-tread profile	Arc tread R14-R80-R320-R900	Arc tread R3.5-R20-R80-R225



(1) Wheel disk



(2) 50kgN rail disk



(3) 60kg rail disk

Fig. 4.20 Profiles of wheel disk and rail disks (1/4 size)

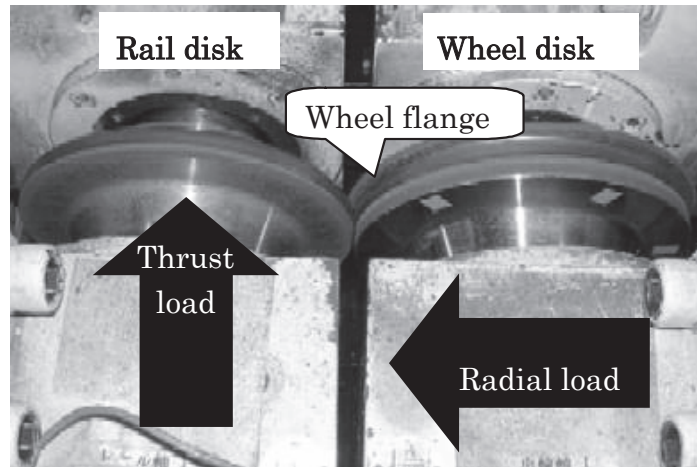


Fig. 4.21 Twin-disk test machine (Contact situation of disks)

Table 4.5 Track and wheel conditions for laboratory experiment

Wheel tread	Arc wheel tread
Rail material	Heat treated rail
Rail crown profile	50kgN and 60kg
Train speed	100 km/h
Wheel load	65 kN
lateral force	20 kN
Angle of attack	0.3 deg.
Rail tilting angle	0.0 deg.
Rail inclined angle	1.4 deg.

#### 4.1.4.1 摩耗量評価のための実験条件の計算

実験での荷重は、試験片が実際の形状の 1/4 となっているため、図 4.16 で紹介したモデルを利用して、実際の円弧踏面形状と実際の 60kg および 50kgN レール形状が接触したときと同じ最大圧縮主応力になるようにして求めた。実車輪と実レールの最大圧縮主応力は、表 4.3 に示した条件（輪重：65kN，横圧：40kN，レール接触角（レール敷設角＋小返り角）：1.4°，アタック角：0.3°）で得られており、1/4 形状の実験に必要な荷重条件はその応力から逆算して導き出し

た. その計算結果を表 4.6 に示す.

表 4.6 から試験輪に対する荷重は, 60kg および 50kgN レール形状とも大きな違いがなかった. そこで今回の実験では, ラジアル荷重 2.9kN, スラスト荷重 1.9kN を計算結果の荷重として, 表 4.5 における営業線の荷重条件(輪重:65kN, 横圧 20kN) に合わせることにした. ラジアル荷重は計算結果の値である 2.9kN を採用した. スラスト荷重は, 接触解析ですでに得られている値が横圧 40kN から計算された 1.9kN であったため, 20kN に合わせるために 1.9kN の半分の値となる 1.0kN とした. 回転速度は約 100km/h の速度に合わせるために 600rpm とした. 転動試験装置での設定条件をまとめると表 4.7 のとおりとなる. ラジアル荷重とスラスト荷重はこの実験装置で制御できる下限値もしくは下限値に近く, 当初の予備の実験においては安定した荷重条件を維持することが難しかった. そのため, 荷重制御に使用されているスプリングを一部変更して本実験を開始した.

Table 4.6 Results Calculated by arc wheel tread

(Wheel load: 65 kN, lateral force: 40 kN)

60kg profile disk	Radial load: 2.9 kN Thrust load: 1.8 kN
50kgN profile disk	Radial load: 2.8 kN Thrust load: 1.9 kN

Table 4.7 Laboratory experiment parameter for wear test

Wheel disk	Arc wheel tread
Rail disk	60kg and 50kgN crown profile
Radial load	2.9 kN
Thrust load	1.0 kN
Angle of attack	0.3 deg.
Contact angle	1.4 deg.
Rotation speed	600 rpm

#### 4.1.4.2 摩耗実験の結果

今回の実験では、実験前の試験装置の性能を確認するために実施した乾燥条件での予備実験中に、車輪試験片の異常摩耗やはく離が発生した。そのため、この実験では接触部に一定の間隔で水滴をたらし(基本滴下量:12.5 ml/min)、適度な湿潤を与えて異常な摩耗等が発生しないようにした。実験中の試験片頭部の温度は、摩耗状態を確認するために試験輪を停止した際に非接触式温度計で測定したところ、50~60℃程度となっていた。この温度状態は、夏場の日中に屋外に敷設されたレールに直接太陽光が当たっている状態とほぼ同じである。さらに、実際のレールは夜間、雨天などの多様な環境条件下に敷設されていることもあり、滴下状態で一定の湿潤を与えても評価上は問題ないと判断をして本実験を開始した。

実験により得られた45°摩耗量(図4.22)について測定した結果を図4.23に示す。レール試験片の摩耗量については、60kg、50kgN形状とも大きな差は見られなかった。回転数230万回転の摩耗量は1.1~1.3mmであった。レールと車輪が設計断面同士で接触した場合の最大圧縮主応力は、図4.19より50kgNレール形状の方が大きく、今回の摩耗実験でも150万回転までの摩耗進みは、回帰線によるとわずかであるが50kgNレール形状の方が早く、この解析結果を裏付ける実験結果となった。

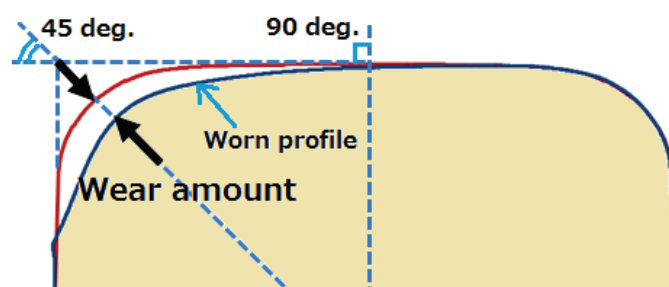


Fig. 4.22 Position of wear measurement

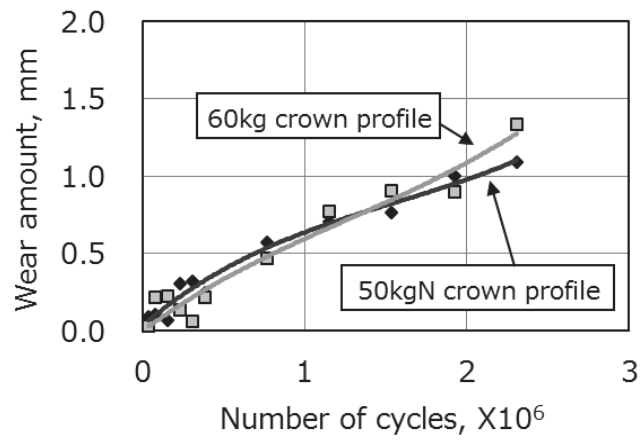


Fig. 4.23 Wear amount of 60kg and 50kgN



### 4.1.5 営業線におけるレール摩耗量と実験による摩耗量の評価

転動試験装置における摩耗実験の精度を検証するために、軌道動特性測定試験を行った箇所においてレール摩耗の追跡調査を実施した。複線となっている曲線区間（表 4.2 参照）の上下線にそれぞれ敷設された 50kgN および 60kg レール形状をもった外軌レールの 45° 摩耗量（図 4.22 参照）の推移を図 4.24 に示す。この図における横軸は、レールの受ける荷重歴を表す列車の累積通過トン数  $Q$  (Tonnage borne) という指標であり、次の式 4.4 で求められる。

$$Q = 2 \times \frac{W}{9.8} \times N_w \quad (4.4)$$

$Q$ ：累積通過トン数 (t)

$W$ ：輪重 (kN)

$N_w$ ：通過車軸数

$Q$  の単位は t であるが、一般的に百万トン単位で表され、MGT (Million gross tons:  $\times 10^6 t$ ) で示される [8]。

図 4.24 より測定箇所の摩耗量は、20MGT 程度まで 50kgN レール形状の方がわずかに大きかったが、その後は 60kg レール形状の方がわずかに大きくなる傾向が見られた。ただしその差は 0.5mm 以下であり、2 つの形状の違いによる摩耗量の大きな差はないと評価できる。ここで、実際のレール摩耗量と実験装置の摩耗量の相対的な評価を行うため、累積通過トン数  $Q$  を実験装置の回転数に換算する必要がある。累積通過トン数と回転数の関係は以下の式 4.5 で表すことができる。

$$Q = 2 \times \frac{W'}{9.8} \times N_r \quad (4.5)$$

$Q$ ：累積通過トン数 (t)

$W'$ ：ラジアル荷重に対する換算輪重 (kN)

$N_r$ ：試験輪の回転数

今回の実験では、ラジアル荷重としての輪重が 65kN 相当、回転数が 230 万回転までの実験を行ったので、式 4.5 より累積通過トン数は 30.5MGT に相当する。図 4.23 より営業線で観察された 30MGT における摩耗量はおよそ 1.3mm となり、実験で得られた結果とほぼ同じになる。また、実験における 50kgN レールの摩耗進みが早い期間は 150 万回転であり、累積通過トン数に換算すると 19.9MGT となることから、営業線における 50kgN レールの摩耗進みの早い期間(約 20MGT)とも一致していた。

以上から、きしみ割れについても本研究で試みた実験条件を求める手法を用いることで、実際の営業線に生じているき裂状況をレール試験輪に生じさせる見通しを得ることができた。

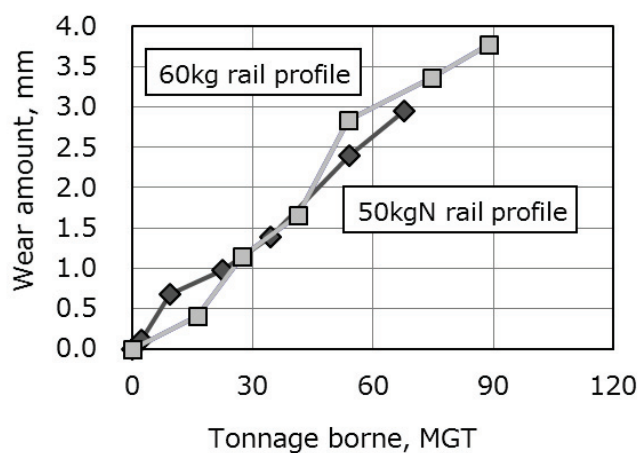


Fig. 4.24 Rail wear on service

## 4.2 きしみ割れ発生箇所（営業線）における軌道動的測定

これまでの摩耗実験で転動試験装置の有効性が確認されたため、きしみ割れの再現実験を行うにあたっては、同じようなステップを踏んで荷重条件を決める必要があった。最初にきしみ割れの発生している曲線区間を選定し、そこで軌道動的測定試験を実施した。測定箇所の軌道構造と走行している車両の条件は表 4.8 に示すとおりである。測定場所には典型的なきしみ割れが発生しており、曲線半径 800m の曲線で外軌レールに熱処理レールを敷設している区間である。走行する車両は、第 2 章ですでに紹介した車両が混在して走行しており、車両重量や台車構造の異なった車両が 4 種類走行している区間である。ここでの車両における旧型車両と新型車両の定義は、ボルスタ構造の台車を採用している車両とボルスタレス台車を採用している車両とした。測定方法はレール小振り角を求める変位計を除き、すでに 4.1 章で説明したものと一部を除き同じセンサー類を使用して行った。

Table 4.8 Track conditions and trains running on the track

Curve radius	800 m
Cant	69 mm
Rail type	50kgN rail (Head-hardened rail)
Track structures	Ballast, Concrete sleeper
Train type and classification	Old type (bolster bogie): Local train, Express train New type (bolsterless bogie): Local train, Express train

## 4.2.1 輪重（ラジアル荷重）の測定結果

当該の曲線区間を通過する優等列車（70km/h と 110km/h）の輪重を図 4.25 に示す。走行速度が速くなると輪重も大きくなっていることがわかる。これは遠心力により、列車の荷重が外軌側に寄ったために起きた現象と解釈できる。この様子から一般的に言われている曲線区間の車両挙動と異なるため、各台車の前軸の値を平均して各編成の代表値とした[9]。各編成について当該曲線区間を通過した際の輪重を図 4.26 に示す。このグラフから新しい車両のほうが、全体的に輪重が軽くなっている傾向が読み取れる。新型車両は旧型車両と比べ、車両重量を軽量化する傾向にある。本測定結果はその事実を裏付けていることが測定データから明らかになった。

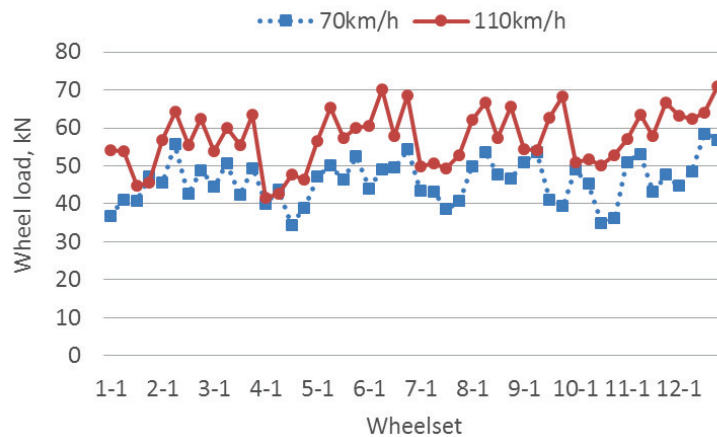


Fig. 4.25 Wheel loads of an express train

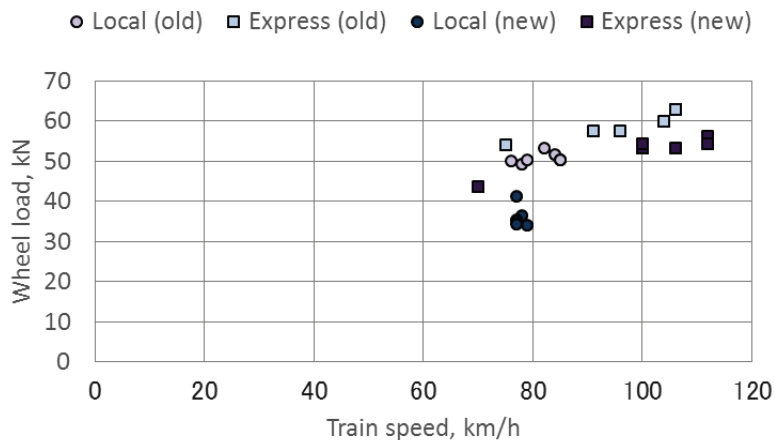


Fig. 4.26 Result of wheel load

## 4.2.2 横圧（スラスト荷重）の測定結果

当該の曲線区間を通過する優等列車（70km/h と 110km/h）の横圧を図 4.27 に示す。輪重と同様に走行速度が速くなると横圧も大きくなる傾向は見られるが、一般的に言われている各車両の 1 軸目の横圧が大きくなる [2], [10], [11] という傾向が見られない。例えば図 4.7 に示したように、曲線半径 400m の外軌レールにおいては、各車両の 1 軸目（○-1 軸）の横圧は 2 軸目、3 軸目および 4 軸目と比較しても大きくなる傾向を示している。しかしながら図 4.27 ではその傾向が見られない。これは、これまで調査されてきた曲線よりも曲線半径が大きく、台車自体が車輪の持っている特性により旋回しているためと考えられた。そのため、この曲線で発生している横圧については、各車両（4 軸）の中で最大値を示している値を編成毎に平均したものを代表値として整理した。その結果を図 4.28 に示す。速度が遅いときには、旧型車両の横圧が小さくなる傾向がみられるが、列車速度が速くなるとその差は小さくなることが確認できた。ここで、この曲線における列車速度とカントが釣り合う速度（均衡カント）は、この曲線のカントが 69mm であることから、式 4.1 より 81km/h となる。つまり、カント不足の状態（遠心力の影響が大きい場合）で列車が走行している場合、横圧の大きさについては車両構造の違いによる影響を受けにくいことが測定結果から読み取れた。

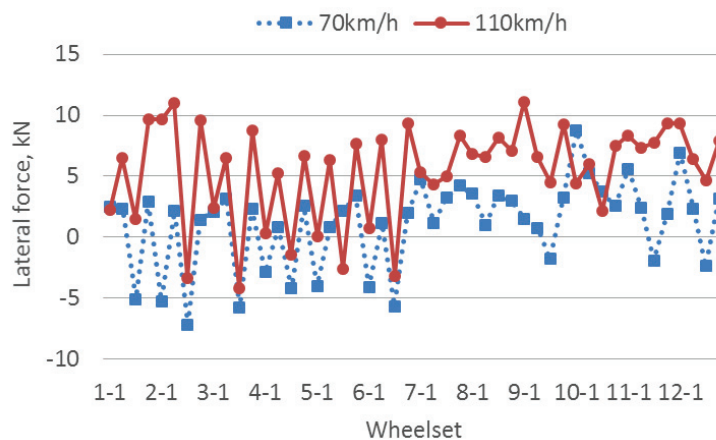


Fig. 4.27 Lateral force of an express train

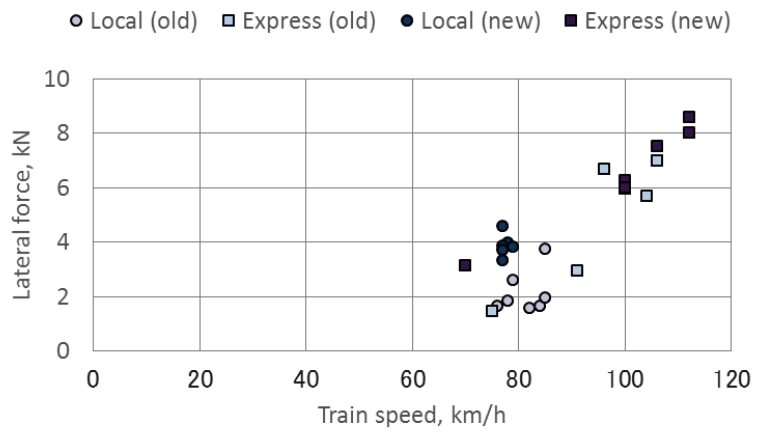


Fig. 4.28 Result of lateral force

### 4.2.3 小返り角の測定結果

小返り角の測定は，摩耗実験時の軌道動的測定の分析結果から，測定時に必要なサンプリング周波数が低くても測定データには影響しないことが確認された．そのため摩耗実験時に採用した渦電流センサーでなく，カンチレーバー式の変位計により測定を行った．その測定方法を図 4.29 に示す．小返り角はレール頭部と底部に設置した変位計から得られる変位から式 4.6 を用いて角度を求めた．

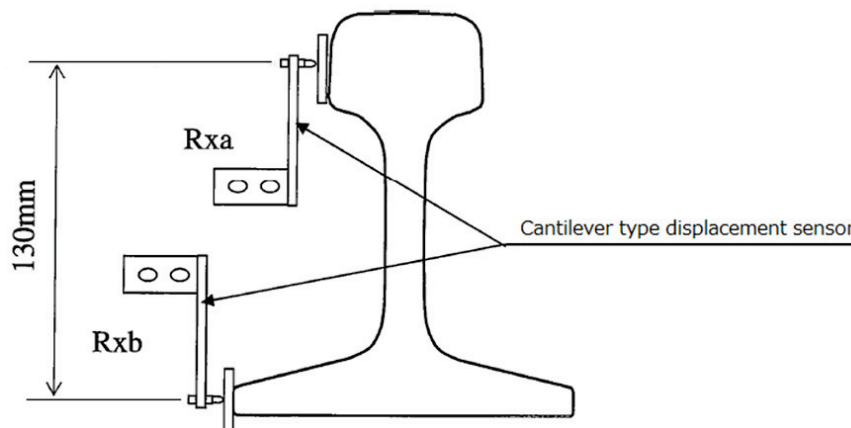


Fig. 4.29 Cantilever type sensors to measure displacement of rail head and bottom

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{R_{Xa} - R_{Xb}}{130}\right) \quad (4.6)$$

$\theta_r$  : 小返り角 (rad)

$R_{Xa}$  : レール頭部変位 (mm)

$R_{Xb}$  : レール底部変位 (mm)

当該の曲線区間を通過する優等列車(70km/hと110km/h)の小返り角を図 4.30 に示す．グラフでは縦軸をラジアンから度に換算して表示している．列車速度が速くなると全体的に小返りが正側（レール頭部が外側へ傾く）に移動することがわかる．これは速度が速くなると横圧が大きくなるため，その影響でレールが外側へ傾きやすくなるためと考えられる．小返り角の大きさとしては最大  $0.1^\circ$  程度であり，転動試験機に接触角として与えるレール敷設角の  $1.4^\circ$  と比

較しても十分に小さかった。全編成の評価としては輪重と同じ前軸の平均値により行うこととし、その結果を図 4.31 に示す。図より、旧型車両と新型車両の間に大きな違いはないことがわかる。ここで、設定カントが 69mm であるこの曲線の均衡速度は式 4.1 より 81km/h となる。小返り角の傾向としては、この均衡速度より大きくなると全般的に正側の値が多く見られた。均衡速度より速い速度域では遠心力が曲線外側に向かって働くため、このグラフに現れている傾向は理論と一致していることになる。

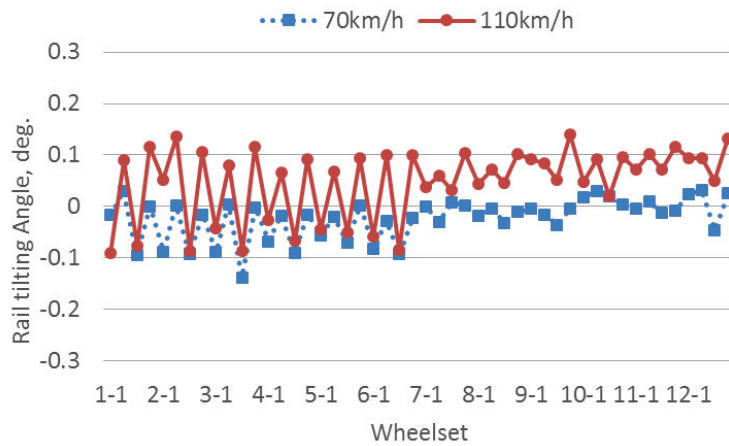


Fig. 4.30 Rail tilting angle of express

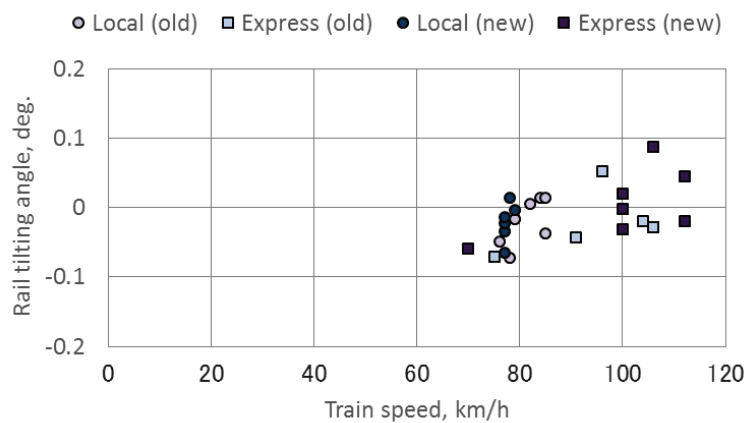


Fig. 4.31 Result of rail tilting angle



## 4.2.4 アタック角の測定結果

当該の曲線区間を通過する優等列車（70km/h と 110km/h）のアタック角を図 4.32 に示す。アタック角の大きさはあまり速度に依存しない傾向が見られた。また、前軸のアタック角が大きい傾向が見られたため、前軸の平均値を各編成の代表値として整理した。その結果を図 4.33 に示す。旧型車両と新型車両に大きな違いは見られず、速度依存性もあまり見られなかった。曲線半径が 800m 程度の曲線軌道では、アタック角は大きくても  $0.1^{\circ}$  程度であることが確認できた。

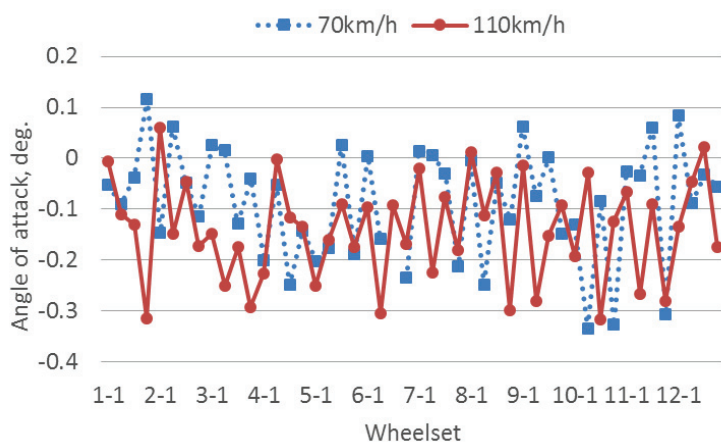


Fig. 4.32 Angle of attack of express

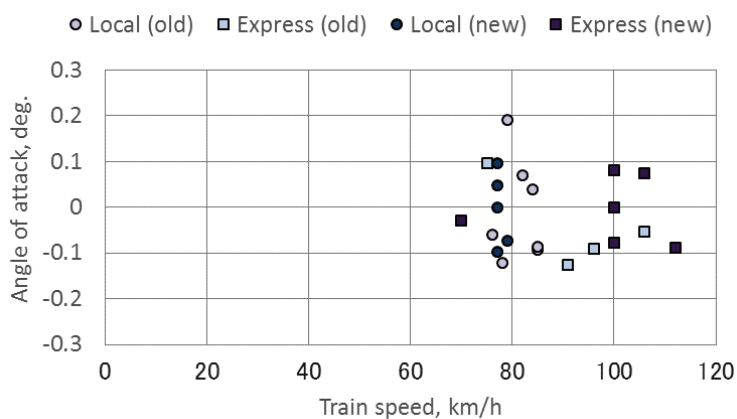


Fig. 4.33 Result of angle of attack

#### 4.2.5 きしみ割れ再現実験のための条件設定

これまでの軌道動特性測定試験の結果から，転動試験装置で利用する荷重とレールと車輪の接触関係は表 4.9 で示す条件とした．今回の実験では曲線走行時を再現することになるので，横圧とアタック角が重要な因子となることが考えられたため 2 条件を設定し，それぞれ 5kN と 10kN および  $0.0^\circ$  と  $0.1^\circ$  とした．輪重は全体的な平均値である 50kN とし，レール小返り角はレール敷設角  $1.4^\circ$  に対して十分小さかったので考慮しなかった．

Table 4.9 Track conditions and trains running on the track

Wheel load (kN)	Lateral force (kN)	Rail tilting angle (deg.)	Angle of attack (deg.)
50	5, 10	0.0	0.0, 0.1

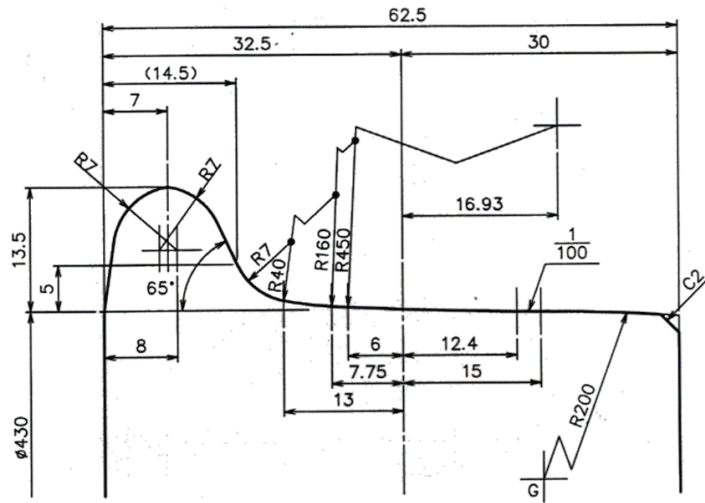
## 4.3 きしみ割れの再現実験と発生条件分析

### 4.3.1 レール・車輪の接触解析

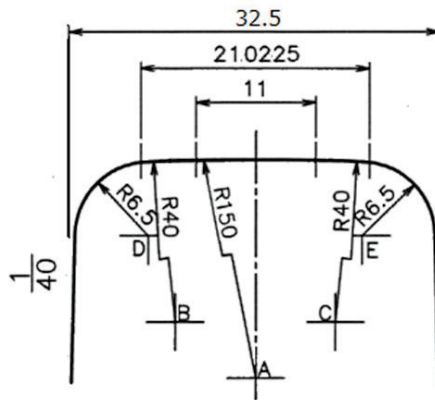
転動試験装置において再現実験を行うにあたり，営業線から求められたきしみ割れ発生箇所の諸条件を実験装置に合わせた条件に換算しなおす必要がある．この手法は4.1章で行ったものと同じ計算手法で行った．ただし，本解析では普通レール等も対象としているため，ヤング率は一般的な硬鋼の値である $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ を用いることにした．図4.16に示されているFEMモデルにより実際のレールと車輪の接触部における最大圧縮主応力を求め，その接触応力と同じになるようにレール試験片と車輪試験片の実験荷重条件を導き出した．車輪試験片の大きさは，摩耗実験で明らかになった荷重制御の安定性およびき裂の評価を行う必要性を考慮して，1/2サイズのものを採用した．実際のレール頭部形状と車輪踏面形状に対して各試験片の形状は，その形状曲率半径が1/2となるように設計をした．その違いを整理したものを表4.10と図4.34に示す．

Table 4.10 Comparison with real rail and wheel profiles and profiles of disks

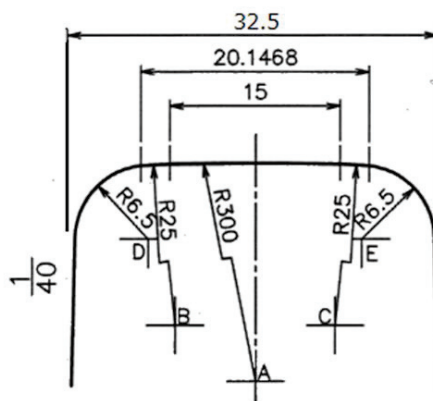
		Real rail and wheel	Rail and wheel disks
Rail	Diameter	$\infty$	430 mm
	Rail-head profile	60kg: R13-R50-R600 50kgN: R13-R80-R300	60kg: R6.5-R25-R300 50kgN: R6.5-R40-R150
wheel	Diameter	860 mm	430 mm
	Wheel-tread profile	Arc tread R14-R80-R320-R900	Arc tread R7-R40-R160-R450



(1) Wheel disk



(2) 50kgN rail disk



(3) 60kg rail disk

Fig. 4.34 Profiles of wheel disk and rail disks (1/2 size)

本接触解析では、レール形状の違いがきしみ割れの発生に影響するかを考察するため、同じ荷重条件で 60kg 形状に対しても計算を行った。その結果を図 4.35 に示す。曲線半径 800m の曲線では、わずかであるが 50kgN レールの方が大きい傾向となり、図 4.19 と同様の関係が見られた。しかしながらその大きさはほんのわずかであり、レール形状の違いによって接触面の最大圧縮主応力が大きく異なることはなかった。この計算結果から、レール頭部形状の違いがきしみ割れの発生に影響する可能性は小さいことが示唆された。

図 4.35 で示された最大圧縮主応力をもとに転動試験装置で行う荷重条件を計算した。その結果を表 4.11 に示す。この条件を基本にしてきしみ割れの再現実験を行った。

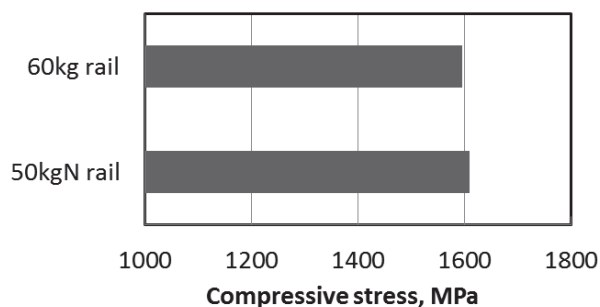


Fig. 4.35 Calculation result of maximum principal stress between rail

Table 4.11 Experimental conditions for twin-disk test machine

Rail disk type	Angle of attack (deg.)	Lateral force (kN)	Radial load (kN)	Thrust load (kN)	Test No.
<u>50kgN</u> Wheel load: 50 kN	0.0	5	7.7	0.8	(1)
		10	7.7	1.5	(2)
	0.1	5	8.9	0.9	(3)
		10	9.9	2.0	(4)
<u>60kg</u> Wheel load: 50 kN	0.0	5	7.9	0.8	(5)
		10	7.8	1.6	(6)
	0.1	5	8.9	0.9	(7)
		10	9.6	1.9	(8)

## 4.3.2 きしみ割れ再現実験

### 4.3.2.1 きしみ割れ再現条件の選定

表 4.11 に示す実験条件をもとにきしみ割れの再現実験を行った。レール試験片は頭部形状として 50kgN と 60kg の 2 種類とした。試験片の材質はきしみ割れの発生しているレールが熱処理レールに多いことを考慮して熱処理を施した試験片を準備した。再現実験を行う順番としては、今後のきしみ割れ対策に関する評価実験を 50kgN 形状で行うことを考えていたため、最初に 60kg 形状（熱処理材質）を使用して行うことにした。また、車輪試験片の踏面形状は実際の車両に合わせて円弧踏面とした。

転動試験装置に 1/2 モデルの試験片を取り付けた状態を図 4.36 に示す。輪重に相当するラジアル荷重および接触角は車輪試験片側、横圧に相当するスラスト荷重およびアタック角はレール試験片側の装置で制御する。駆動するのは車輪試験片のみでレール試験片は従動状態で回転をさせた。散水は水滴状態により転動試験装置の上部側のノズルからレール試験片に向かって行った。散水量も制御することが可能で、今回の実験では実験状況を見ながら必要に応じて 10～20ml/min の水量で潤滑した。

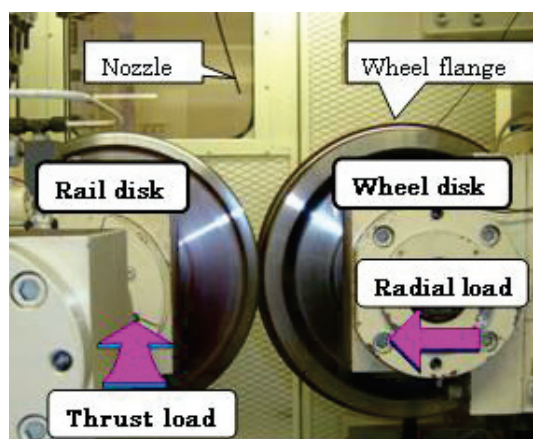


Fig. 4.36 Experimental situation of the test machine which set 1/2 size disks

この再現実験は試行錯誤の実験となったため、結果的には表 4.12 に示すように実験条件を適宜変更しながら実施した。また、この実験ではき裂がいつ発生するかわからなかったため、10 万回転から 15 万回転の間で適宜停止させ、き裂の有無や状態の確認を行いながら進めた。

スラスト荷重は実験中の荷重安定性も考慮して、横圧として 10 kN の条件から実験を開始した。アタック角と潤滑条件は試験輪の状況を確認しながら実験途中で変更をした。アタック角は最初に  $0.0^{\circ}$  (表 4.11 の試番(6)), 続けて  $0.1^{\circ}$  (表 4.11 の試番(8)) で設定した。潤滑条件としては乾燥と水潤滑の 2 条件を順次変更した。これは車輪試験片およびレール試験片の踏面にできる波状摩耗の状態を観察しながら調整をしたためである。1 枚目の車輪試験片は踏面の波状摩耗がひどくなったため、935 万回転で 2 枚目に交換をした。すべり率は従動運転で行ったため、試験片温度、雰囲気の状態および試験片に発生する波状摩耗の状態が大きく変動し、最大で 2% 程度にまでなる場合もあった。この実験から確認できたことまとめると以下のとおりとなる。

- ・ アタック角がない場合、きしみ傷はほとんど発生しなかった。発生状況の違いを図 4.37 に示す。
- ・ アタック角を  $0.1^{\circ}$  に設定した後 180 万回転できしみ傷が発生した。ただし、途中で車輪試験片を交換している。
- ・ アタック角を  $0.1^{\circ}$  に変更後 260 万回転できしみ傷の一部にはく離が発生した。ただし、レール試験片はトータルで 1060 万回転経過していた。はく離が発生した際の状況写真とその時の摩耗形状を図 4.38 に示す。
- ・ はく離が発生したときのレール輪の表面硬さは新品時と変わらず約 340HV であった。

Table 4.12 Experimental conditions until head checks with flaking occur

Test order	1st	2nd	3rd	4th	5th
Rotation number	0 – 4 million	4 – 8 million	8 – 8.15 million	8.15 – 9.35 million	9.35 – 10.7 million
Wheel disk	First disk	→	→	→	Second disk
Drive condition	Wheel disk: drive, Rail disk: follower				
Radial load	7.8 kN	→	9.6 kN	→	→
Thrust load	1.6 kN	→	1.9 kN	→	→
Angle of attack	0.0 deg.	→	0.1 deg.	→	→
Contact angle	1.4 deg.	→	→	→	→
Lubrication	Water	Dry	→	Water	→

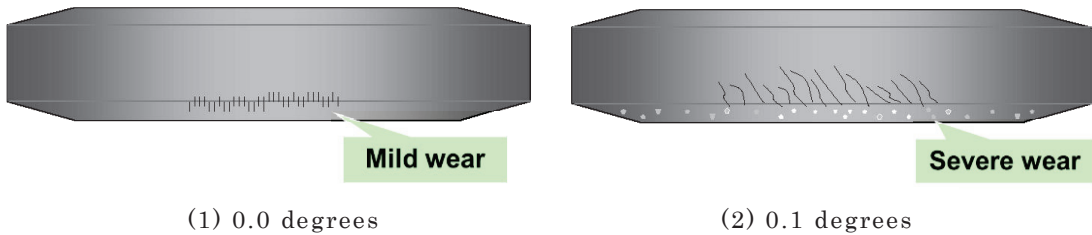


Fig. 4.37 Difference of head check cracks in different angle of attack

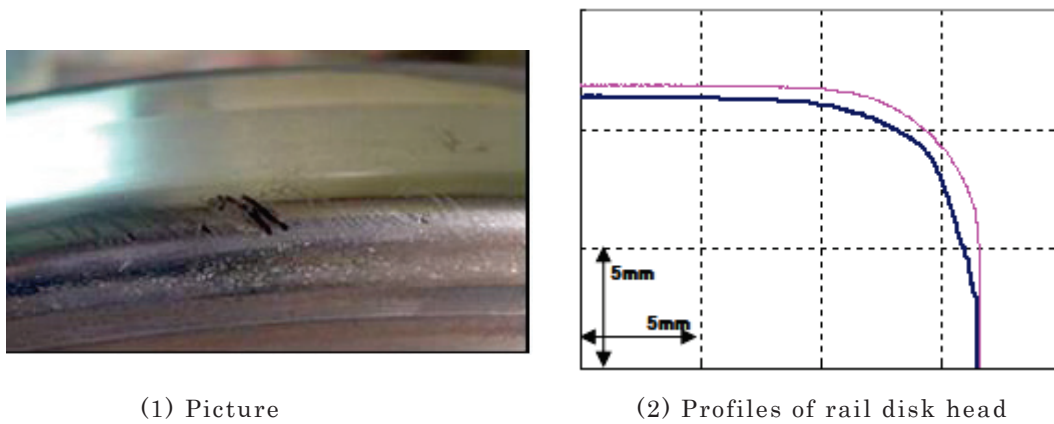


Fig. 4.38 Situation of rail disk head after 10.6 million rotations



きしみ割れのようなき裂は、アタック角による条件変更後 180 万回転で発生した。今回の実験では、実際の列車荷重から算出した実験荷重により実験を行っているため、式 4.5 からレールの荷重履歴に相当する累積通過トン数に換算することができる。180 万回転から求められる累積通過トン数は 18MGT となる。第 1 章で分析したレール探傷車のデータによると、営業線できしみ割れとして最も早く検知された事象は 11MGT のレールであることから、実験においても条件がそろえば、実際の場合と同様に 10MGT 代できしみ割れき裂を発生させることができるという確証を得ることができた。さらに、最終的な目的であったきしみ割れからのはく離現象についても本実験の中で再現することができた。回転数としては 1060 万回転を経過しており、はく離現象の発生には一定の時間経過が必要になると考えられた。つまり、レール試験片の頭部表層付近には繰り返し荷重による金属疲労の蓄積があったのではないかということである。したがって、実際のレールにおいてもはく離現象が生じるまでには、一定の時間経過が必要になるということが想定された。

以上の実験を通じて、転動試験装置を利用してきしみ割れの再現実験を行える見通しを得ることができた。きしみ割れの再現実験を行うにあたり、設定する荷重条件を整理すると表 4.13 のようになる。以後の実験では基本的にこの荷重条件にて行うことになる。

Table 4.13 Experimental condition to evaluate head check with flaking

Rail disk type		Radial load	Thrust load	Angle of attack	Contact angle
50kgN	Wheel load: 50 kN Lateral force: 10 kN	9.9 kN	2.0 kN	0.1 deg.	1.4 deg.
60kg	Wheel load: 50 kN Lateral force: 10 kN	9.6 kN	1.9 kN	0.1 deg.	1.4 deg.

### 4.3.2.2 熱処理レール材質によるきしみ割れ再現実験

今後のレール材質変更によるきしみ割れ発生状況を評価することを念頭に、第2回目の実験を実施した。この実験では、きしみ割れの発生していた営業線を想定して、熱処理材質で50kgN形状を模擬したレール試験片を使用して行った。この実験ではレール試験片が新品の状態から実験を開始し、きしみ割れのき裂やはく離がどの程度の時間で発生するかを確認することが主目的となる。実験中の条件は表4.14に示すとおりであり、潤滑状況としては12.5~17.5 ml/minの水滴による水潤滑を行った。実験中のすべり率は従動運転のため-0.5~-3.0%の間で変動をしていた。

Table 4.14 Experimental conditions with 50kgN rail disk of head-hardened

Test order	1st	2nd
Rotation number	0 - 5.9 million	5.9 - 10.7 million
Wheel disk	First disk	Second disk
Drive condition	Wheel disk: drive, Rail disk: follower	
Radial load	9.9 kN	→
Thrust load	2.0 kN	→
Angle of attack	0.1 deg.	→
Contact angle	1.4 deg.	→
Lubrication	Water	→

この条件により実験を行った際のレール試験片表面変化の状況を図4.39~図4.41, 780万回転以降におけるきしみ割れのき裂長さの変化を図4.42に示す。図4.39は85万回転後のき裂発生状況, 図4.40は780万回転後におけるき裂部分に生じた小さなはく離の状況, 図4.41は1,060万回転後における1本のき裂が試験片内部に進展して、大きな金属片が脱落した後の状況を示している。このき裂が急伸するのに要した時間は100万回転（累積通過トン数で10MGT）程度であった。実験経過をまとめると以下のとおりとなる。

- ・ 65万回転できしみ割れが発生した（図4.39参照）。
- ・ 780万回転で1回目の実験で生じたようなはく離が生じた。その時点でのレール輪表面硬さは約400HVであり、加工硬化が見られた（図4.40参照）。
- ・ はく離が生じた以降、耳障りなきしり音が生じた。

- 1010 万回転できしみ割れき裂の 1 本が成長し、GC から 12mm の長さになった。他のきしみ割れき裂は 7.5mm 程度であった。
- 1060 万回転で成長したきしみ割れき裂から大きなはく離が生じた（図 4.41 参照）。その時点でのき裂長さは 17mm，レール輪表面硬さは 440HV であり，さらなる加工硬化が見られた。



Fig. 4.39 Situation of rail disk head after 0.85 million rotations



Fig. 4.40 Situation of rail disk head after 7.8 million rotations



Fig. 4.41 Situation of rail disk head after 10.6 million rotations

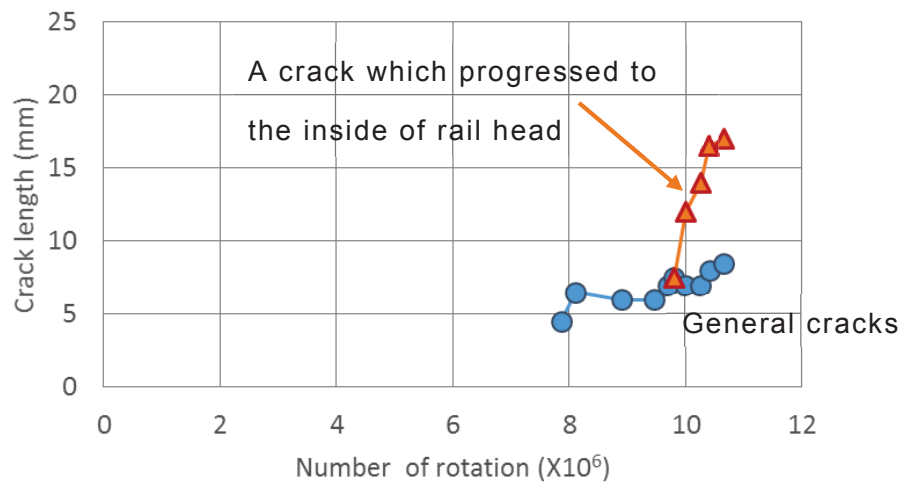


Fig. 4.42 Progress of head check cracks after 7.8 million rotations

## 4.4 本章のまとめ

きしみ割れの発生を再現する実験を行うにあたり、転動試験装置の性能確認を行うため、レール試験輪の摩耗実験による評価を行った。実験条件は曲線半径 400m の曲線で得られた軌道動特性測定試験による結果を利用した。測定項目は輪重、横圧、小返り角およびアタック角である。実験による荷重条件はレールと車輪の接触状態を模擬した三次元 FEM モデルに軌道動特性測定試験で得られた値を入力し、最大圧縮主応力が同じになるように計算を実施することで求めた。転動試験装置による実験では実際の車輪サイズの 1/4 となる試験輪を用いて行い、実際のレール摩耗と同じ状況を表現することができた。さらに、50kgN および 60kg レールの頭頂面形状の違いが摩耗進みに及ぼす影響は小さいことも明らかになった。この摩耗実験を通じて転動試験装置によりレールと車輪間で生じている諸現象を再現できる見通しを得ることができた。

そこで、本転動試験装置を用いてきしみ割れの再現実験を行った。摩耗実験と同様に実際にきしみ割れの発生している曲線半径 800m の曲線で得られた輪重、横圧などの測定値から導かれた実験条件をもとに実験を進めた。最終的には実際のきしみ割れと同じ状態のき裂とはく離をレール試験輪上に発生させることができた。この実験から、きしみ割れのき裂は 65 万回転で発生し、き裂からの初期はく離が生じるのは 780 万回転であることが確認された。この実験ではく離が生じた 780 万回転を累積通過トン数に換算すると 78MGT となる。き裂がレール頭部内に進展して、はく離が発生するまでには一定の時間経過が必要であり、シェリングで得られている知見から考察すると金属疲労のレール頭部内への蓄積が関係しているのではないかということが想定された。本研究で調査した営業線では、はく離を伴ったきしみ割れの発生していたレールは、累積通過トン数がすでに 200MGT 程度経過したものであった。

また、2 回目の実験ではき裂長さが 17mm になった時に、列車走行に影響を与えそうな大きな金属片の脱落があった（図 4.41 を参照）。実際のレール状況に換算すると 34mm となり、きしみ割れ管理表（図 1.7）から B ランク相当となる。B ランクの対処方法としては補強継目板を取り付けて計画交換することになっ

ており、き裂長さをこまめに観察できるのであれば現状のき裂長さ管理でも問題ないことが証明された。ただしそのき裂が急伸に要したし時間は100万回転（累積通過トン数で10MGT）程度であった。現状の外観検査周期が1年に1回となっていることから、さらなる安全を目指すためには表面に現れているき裂長さだけでなく内部き裂の管理手法についても充実させていく必要性を改めて認識させられた。第3章で開発された新しい検査手法を確実に活用していくことが望まれる。また、このようなレール交換に至るようなきしみ割れ状態になる期間は約1000万回転（累積通過トン数で約100MGT）となることが想定された。この期間は、シェリングでレール交換に至る期間が早くて300MGT程度[12]、[13]であるということと比較しても大変短い時間であり、きしみ割れがレール管理コストに与える影響は大きいということが、この実験をとおして推定することができた。

今回の摩耗実験および2回にわたるきしみ割れの再現実験をとおして、本転動試験装置がレールと車輪間に生じる諸現象を再現するのに適した実験装置であると評価できた。特に、レールきしみ割れの発生している箇所の軌道動的測定データを参照すれば、きしみ割れのき裂とはく離を再現することもできるという確証を得ることができた。つまり、きしみ割れに対する新材質レールの評価については、本転動試験装置を利用して実施しても問題ないという見込みを得たことになる。

## 第4章の参考文献

- [1] 佐藤・梅原：線路工学，日本鉄道施設協会，pp.246，1887
- [2] 村越・瀧川・陸：車両形式の違いによる急曲線通過挙動への影響，第11回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集(J-rail2004)，pp.81-82，2004.12
- [3] 青木・石田・瀧川：車輪／レールの動的応答に与えるレール側摩耗の影響，鉄道力学シンポジウム論文集，Vol.7，pp.55-60，2003.7
- [4] 金・名村・石田：レール頭部の摩耗形状予測手法，鉄道総研報告，第23巻，第2号，pp.5-10，2009.2
- [5] 金・石田：レール側摩耗に与える車輪／レール接触条件の影響，鉄道総研報告，第15巻，第4号，pp.47-52，2001.4
- [6] レール・車輪断面プロジェクト研究報告書，土木学会構造工学委員会鉄道力学小委員会・レール車輪断面プロジェクト研究会，pp45-89，2001.3
- [7] 石田・金・青木：レールの側摩耗に与える荷重とすべりの影響，鉄道総研報告，第17巻，第2号，pp.47-52，2003.2
- [8] C. Esvelde: Modern Railway Track, MRT-Productions, pp.299, 1989
- [9] 内田・高井・村松・石田：輪重・横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価，鉄道総研報告，第15巻，第4号，pp.15-20，2001.4
- [10] 石田：JR線における波状摩耗の実情，鉄道車両と技術，第10巻，第4号，pp.34-40，2004.4
- [11] 都市鉄道におけるレール波状摩耗の発生メカニズムと防止対策，鉄道車両と技術，第10巻，第4号，pp.41-51，2004.4
- [12] 瀧川，佐藤，山本：レールシェリングに対する予防削正についての検討，第53回土木学会年次学術講演会論文集，pp.882-883，1998.10
- [13] 坂，楠田，前田：レール寿命延伸について，日本鉄道施設協会誌，第40巻，第3号，pp.17-20，2000.10



## 第5章 きしみ割れ対策手法の検討

これまでの研究で現在のきしみ割れの発生状況を分析し、現行のきしみ割れ管理手法の課題について整理を行い、その管理手法の改善につながる探傷手法の開発および転動試験装置によるきしみ割れの発生条件を評価してきた。本章では、これまでの分析や実験から得られた情報をもとに、レール交換に至ってしまう“はく離を生じたきしみ割れ”を予防する観点からの対策手法について2つのアプローチで論じる。第一点目はレール材質変更の観点から、第二点目はレールと車輪の接触状況の改善という観点から考察し、新たなきしみ割れ対策手法を提案する。



## 5.1 レール材質変更によるきしみ割れ対策の検討

### 5.1.1 転動試験装置によるレール材質変更実験

第4章で行った転動試験装置を利用したきしみ割れ再現実験により，実際の熱処理レール（Head-hardened rail（HH340））上に発生しているきしみ割れと同様のき裂やはく離を再現できる見通しを得た．そこで，本章ではその実験条件を利用して，各種レール材質のきしみ割れに対する抑制効果を評価するための転動試験装置による実験を行った．この実験ではこれまでの熱処理レールの実験経過を基本とすることで，他のレール材質と同条件での相対的な比較を行うことができる．以下にその実験内容について述べる．

#### 5.1.1.1 実験を行ったレール材質

今回の実験で使用したレール材質は，すでに国内他社や海外で使用実績のあるレール材質と新たに検討して製作されたレール材質の2つのグループに分けることができる．使用実績のあるレールは，直線など一般的に使用されている普通レール（As-rolled steel rail（Standard）），直線に発生しやすいシェリング（図1.4）損傷対策として開発されたベイナイトレール（Bainitic steel rail（Bainite））[1],[2],[3]，海外の高軸重鉄道用に開発された過共析レール（Hyper-eutectoid steel rail（HE370 rail））[4],[5]の3種類となる．海外高軸重鉄道用レールでは，高強度パーライトレール（High strength pearlitic steel rail（SP rail））[6]も販売されていたが，JIS基準を満たしておらず日本の鉄道に敷設できる見込みがなかったため，実験対象から除外することにした．新たに検討したレールについては，HH340レールと普通レールの中間的な強度をもつ材質（Test A rail）とHH340レールより高強度な材質（Test B rail）の2種類とした．以上のレール材質の特徴をHH340レールとあわせてまとめる

と表 5.1 のようになる。

実験用の車輪材については，一般的な電車に利用されている圧延車輪（JIS E5402-1）と同じ材質（JIS-SSW-Q1S）のものを利用して製作し，熱処理（JIS-SQ（Slack quench））方法も一般車輪と同様とした[7]．この車輪試験片と実験で使用したレール試験片の炭素量と硬度について比較したものを図 5.1 に示す．

Table 5.1 Experimental rail materials

Material	Characteristics
HH340	Head hardened rail, C: 0.72-0.82 %, 319-366 HB
Standard	As-rolled steel rail, C: 0.63-0.75 %, Over 250 HB
HE370	Hyper-eutectoid steel rail C: 0.85-0.95 %, 341-397 HB
Bainite	Bainitic steel rail, C: 0.10-0.50 %, 235-285 HB
Test A	New concept rail, C:0.63-0.75 %, Over 270 HB
Test B	New concept rail, C: 0.75-0.82 %, 350-388 HB

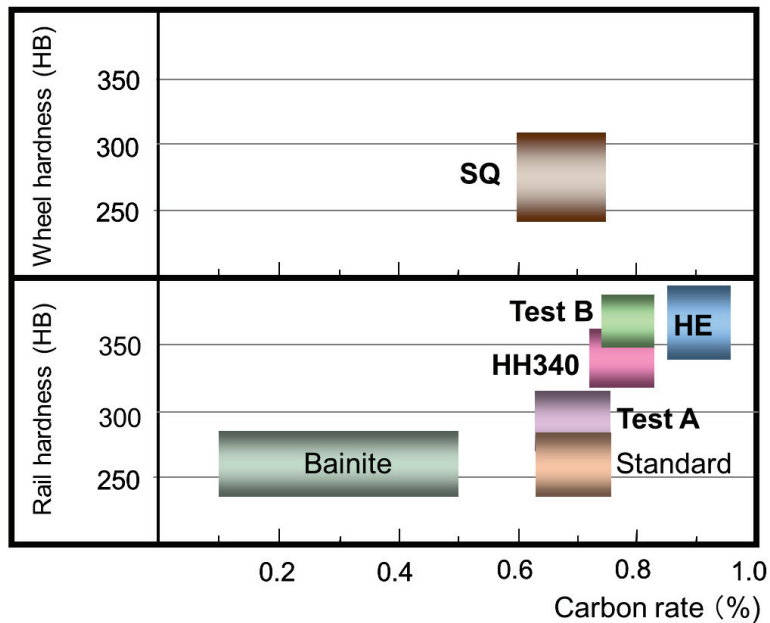


Fig. 5.1 Carbon rate and hardness on wheel and rail disks

### 5.1.1.2 新しいレール材質による実験結果

表 5.1 に示された 5 種類のレール材質について、第 4 章の実験結果からはく離を生じると想定される 1000 万回転超えを目標に順次実験を実施した。試験片のサイズは実際の車輪の 1/2 である  $\phi = 430 \text{ mm}$  で、車輪の踏面形状は円弧、レール頭頂面形状は 50kgN を模擬したもの（表 4.10 および図 4.34 を参照）とした。荷重条件は HH340 レール材質できしみ割れを再現することのできた条件（表 4.13 参照）とした。実験はき裂の変化を把握する必要があるため、10 万から 20 万回転ごとに転動試験装置を停止してき裂の状況を確認した。その実験経過について整理したものを表 5.2、きしみ割れなき裂発生時、1000 万回転以下におけるはく離発生時、約 1050 万回転時および最終段階（1100 万回転以上）におけるレール試験片の状況を図 5.2～5.5 に示す。

表よりきしみ割れなき裂の発生は、HE370 材質を除き 60 万～70 万回転で発生することが確認できた。ただし、HE370 材質についても 240 万回転できしみ割れなき裂が発生しており、これらの材質では、き裂を発生させないことは難しいことが判明した。その後、普通レール材質やベイナイト材質では、はく離が生じるまでの間はき裂が消滅したり発生したりを繰り返した。最初の小さなはく離は、Test A と test B 材質を除き 700 万～900 万回転の間で発生した。その後 1100 万回転を超えたところで大きなはく離に進展したのは、普通レール材質だけであり、ベイナイトは摩耗しつつはく離が小さくなり、HE370 材質は小さなはく離は残ったが大きな変化は見られなかった。

Table 5.2 Experimental results

Rail type	Crack occurrence (million rotations)	Crack state at 3 million rotations	Flaking occurrence (million rotations)	Flaking state over 11 million rotations
HH340	0.65	Clear	7.8	Severe
Standard	0.65	Not clear	8.9	Severe
Bainite	0.70	Not clear	7.1	No
HE370	2.40	Clear	7.6	Not severe
Test A	0.65	Clear	No	No
Test B	0.60	Clear	11.0	Not severe

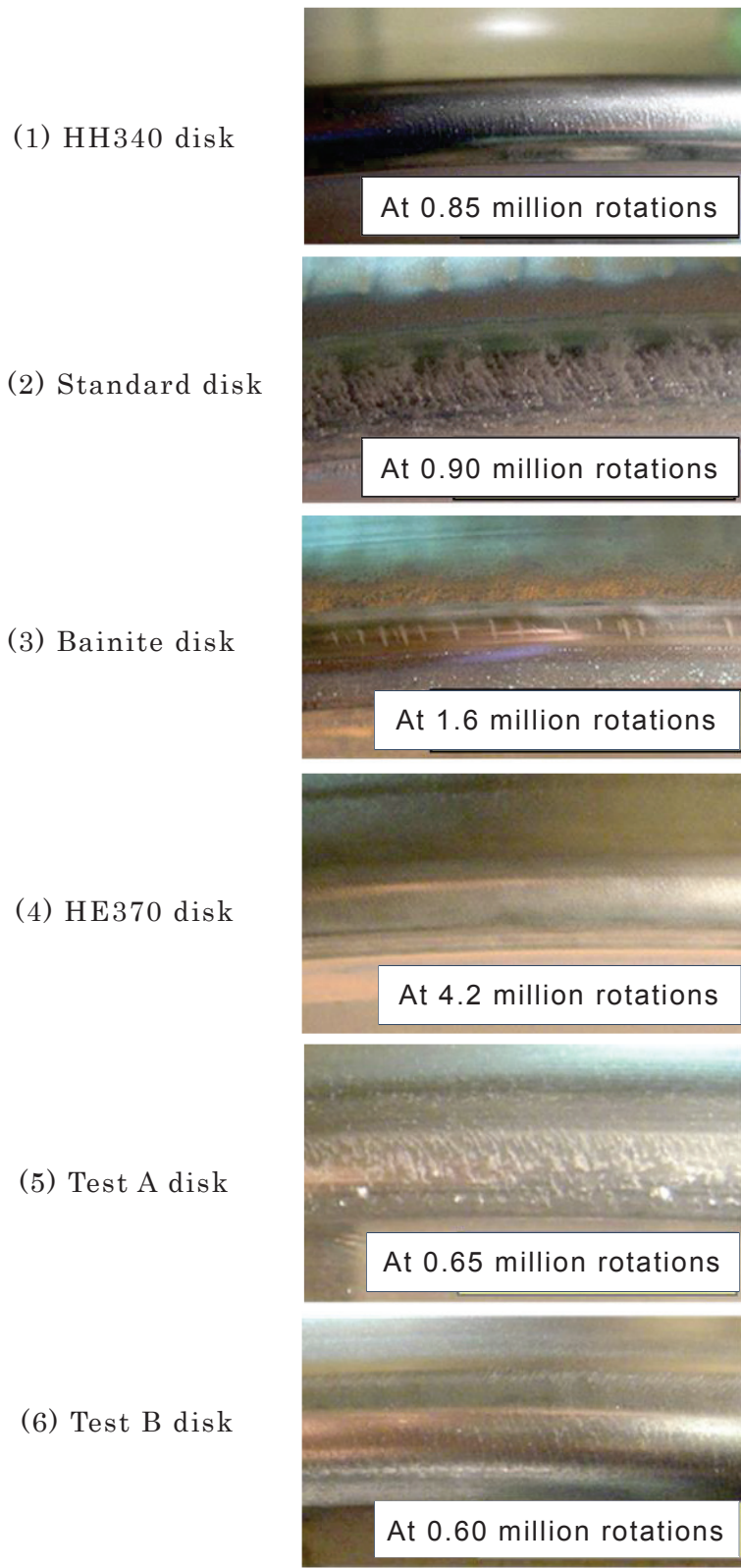
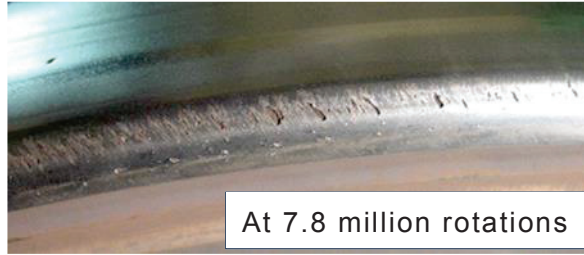
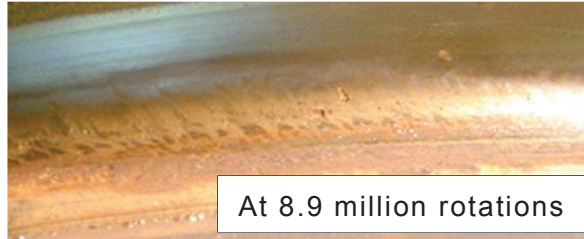


Fig. 5.2 Situation of rail disk head when cracks appeared

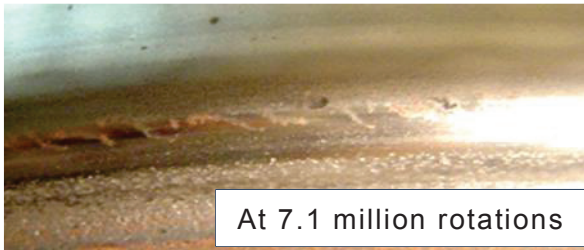
(1) HH340 disk



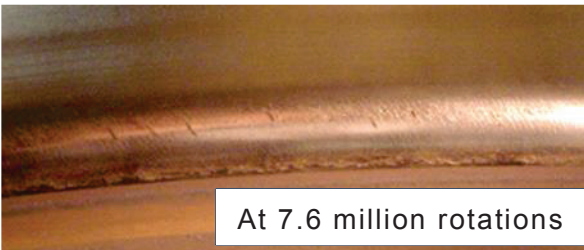
(2) Standard disk



(3) Bainite disk



(4) HE370 disk



(5) Test A disk



(6) Test B disk

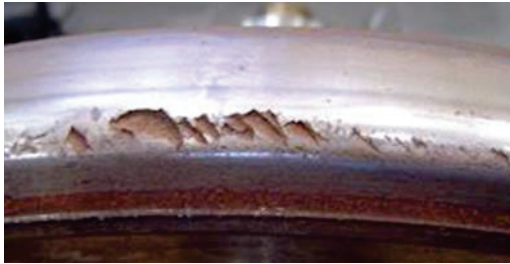


Fig. 5.3 Situation of rail disk head when first tiny flaking appeared before 10 million rotatons

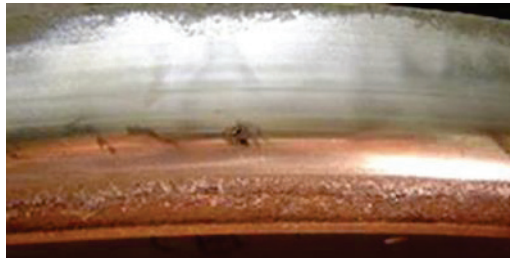
(1) HH340 disk



(2) Standard disk



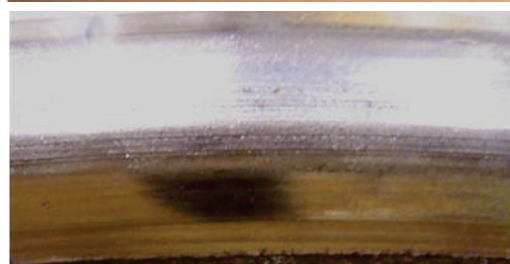
(3) Bainite disk



(4) HE370 disk



(5) Test A disk



(6) Test B disk



Fig. 5.4 Situation of rail disk head at 10.5 million rotations



(1) HH340 disk

**Finished**

(2) Standard disk

**Finished**

(3) Bainite disk

At 13.7 million rotations



(4) HE370 disk

At 13.0 million rotations



(5) Test A disk

**Same situation  
At 10.5 million rotations**

(6) Test B disk

At 11.0 million rotations



Fig. 5.5 Situation of rail disk head over 11 million rotations



これらのレール材質は曲線に敷設することを前提としていたため、摩耗量についても比較を行った。その結果を図 5.6 に示す。摩耗の評価方法は図 4.22 に示した 45° 摩耗量を 100 万回転当たりの摩耗率で表した。HH340 材質より硬度の小さい普通レール材質とベイナイト材質は、摩耗量が HH340 材質の約 2 倍と大きく、曲線半径 800m では敷設が難しいと評価した。

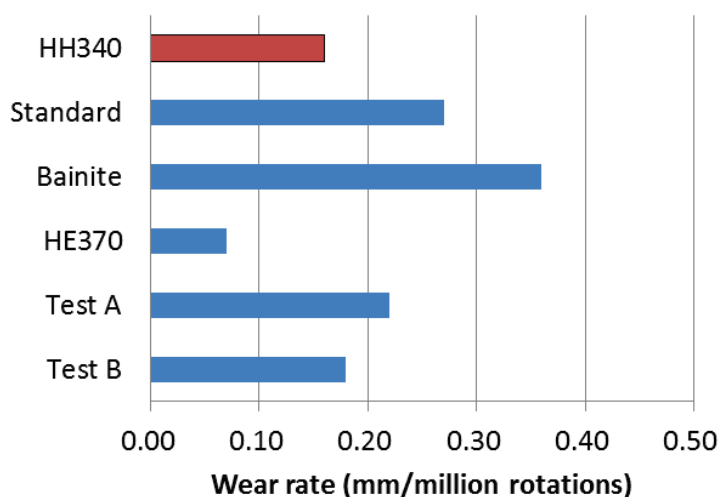


Fig. 5.6 Wear rate of rail disks

### 5.1.1.3 海外におけるきしみ割れ対策レール

海外、特にヨーロッパにおいて 2000 年のハットフィールドの脱線事故以降、きしみ割れを予防するためのレールの開発が盛んである [8], [9], [10], [11], [12]。日本では一般的に高強度のレールは摩耗しにくく、き裂が発生しやすいと言われているが、ヨーロッパではきしみ割れ対策として高強度のレールを敷設する試験を行っている。今回の実験でも HE370 レールと Test B レールは高強度の部類に入るため、高強度レールが日本の環境や鉄道運行状況に合うか試験を実施する価値は十分にあると考える。

以上の結果から、営業線に敷設をして試験を行うレール材質は HE370, Test A および Test B 材質の 3 種類とした。これらの実験では、Test A 材質と Test B 材質の仕様検討に時間がかかったため、その他の試験レール材質とあわせて都

合 7 年程度の期間を費やしている。きしみ割れ対策としてはできるだけ早く営業線に試験レールを敷設して評価を確定させる必要があったため、先に転動試験装置による実験が終了して HH340 と比較して評価の高かった HE370 レールを先行して試験敷設した。その後、準備した全てのレール材質の実験が終了した時点で改めて相対的な評価を行い、HE370 レール、Test A レールおよび Test B レールを先行して敷設した路線とは別の路線に試験敷設した。試験箇所状況やレール敷設状況などの詳細については次の章で述べる。

## 5.1.2 営業線における試験レールの敷設

営業線への試験レールの敷設については、前述したとおり転動試験装置の実験時期との関係から3箇所で開催された。最初にレール調達が容易なHE370とHH340の評価を5年程度かけて実施した（A区間、B区間）。その評価期間中に新材質となるTest AレールとTest Bレールについても転動試験装置による実験での評価が確定したので、別の場所に敷設して評価試験を実施している（C区間）。それぞれレールが敷設されている箇所の軌道条件をまとめると表5.3のとおりとなる。いずれの箇所もレール交換前にはきしみ割れが発生していた曲線である。

Table 5.3 Track characteristic of field test sections

	Test rail	Track alignment
Section A	HH340, HE370	Radius: 800 m, Cant: 69 mm
Section B	HE370	Radius: 800 m, Cant: 72 mm
Section C	HH340, HE370, Test A, Test B	Radius: 800 m, Cant: 95 mm

### 5.1.2.1 HE370レールの試験敷設結果（A区間、B区間）

営業線におけるHE370レールの最初の評価試験は、図5.7に示すような形でレールを敷設してHH340レールとの比較を行った。A区間は複線の曲線軌道（曲線半径800m）の上下線外軌にそれぞれHE370レールとHH340レールを敷設した。図に示されたキロ程はその路線の位置を表しており、試験延長として600m弱となっている。いずれの区間もBCC（Beginning of circular curve）より左側とECC（End of circular curve）より右側は緩和曲線区間となる。B区間はA区間と別の区間になるが、複線の曲線軌道（曲線半径800m）の上り線外軌に、踏切部分を除いてHEレールを敷設した。敷設延長は約550mとなっている。ここで、A区間における累積通過トン数32MGTにおけるきしみ割れのき裂状況を図5.8に示す。HH340レールおよびHE370レールともきしみ割れのき裂は発生しており、HE370レールの方が細かいき裂となっていた。特に表面的な観察からは、2種類のレールに大きな違いは見られなかった。32MGTは転動試験機の回転数で

表すと 320 万回転相当であり，表 5.2 の結果と比較しても妥当な状況となっていた。

試験敷設において，表面的な観察からだけではき裂の状況が詳細につかめなかったので，約 82MGT の累積通過トン数になった時点で A 区間の上り線に敷設されていた HH340 レールと HE370 レールを一部取り外し，レール内部のき裂状況も含めて詳細に調査を行った．その結果を図 5.9 と表 5.4 に示す．HE370 レールは H340 レールと比べて表面き裂の長さが 3 割減，内部き裂の長さも 2 割減となっており，表面及び内部き裂とも進展しにくかった。

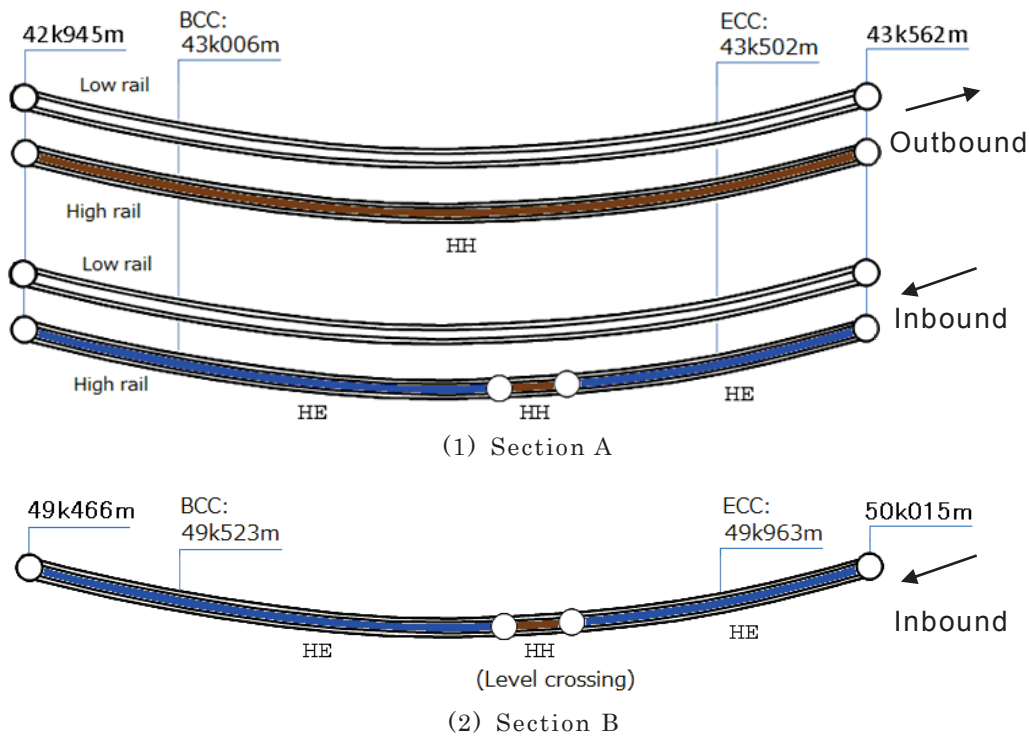
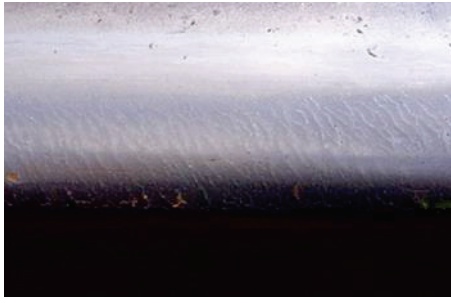
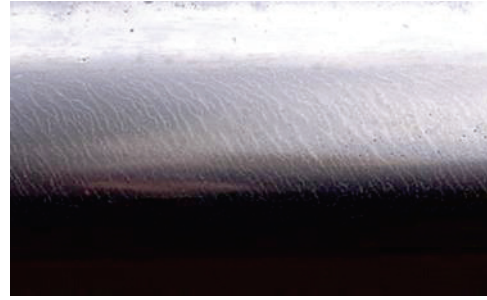


Fig. 5.7 Test site for HE370

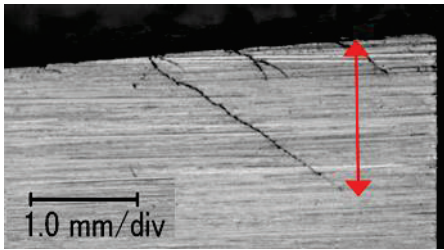


(1) HH340

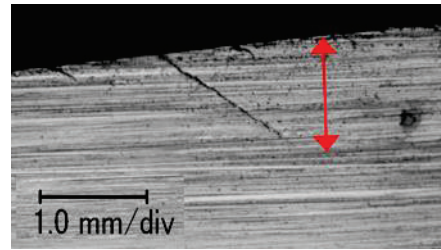


(2) HE370

Fig. 5.8 Head check cracks at 32 MGT



(1) HH340



(2) HE370

Fig. 5.9 Internal and surface head check cracks at 82 MGT

Table 5.4 Length of head check cracks

	Surface cracks	Internal cracks
HH340	17.0 mm on average	1.12 mm on average
HE370	13.7 mm on average	0.78 mm on average

その後、A 区間、B 区間に敷設してあった HH340 レール、HE370 レールとも、すでにきしみ割れのき裂起点と思われるシェリング（図 5.10）が発生し、レール交換を行った。両レールとも累積通過トン数 110 MGT までは、図 5.11 に示すようにわずかなはく離が観察されたただけであったが、その後一部のき裂がゲージコーナーシェリングに発展したものである。ゲージコーナーシェリングは、定期的に行われているレール探傷車（図 3.16）の検査で検出されると大きさによってはレール交換することになっており、今回の試験敷設では、両レールとも当初想定していた“はく離”という現象よりは“シェリング”が原因でレール交換に至ってしまった。HH340 レールと HE370 レールがレール交換になるまでの累積通過トン数を比較すると図 5.12 のようになる。HE370 レールはき裂進展では HH340 レールより有効性が認められたが、シェリングに対する有効性は特に認められなかったことになる。

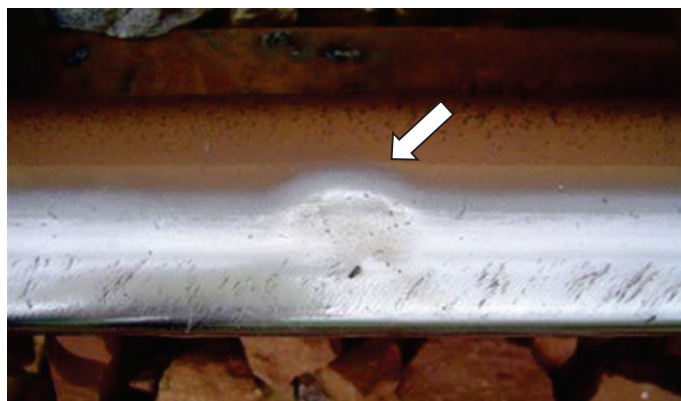


Fig. 5.10 Shelling from head checks (HE370)

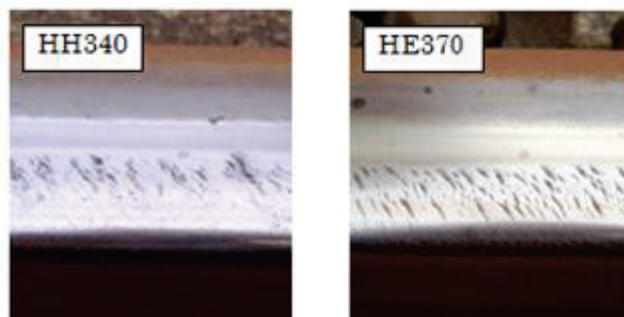


Fig. 5.11 Head checks of HH340 and HH370 in section A at 110 MGT

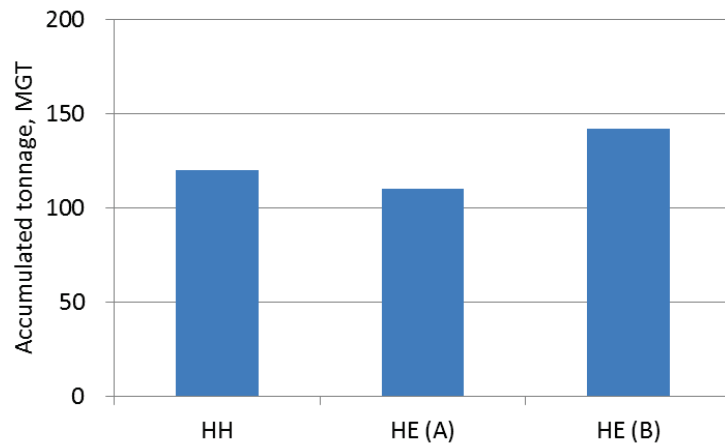


Fig. 5.12 Accumulated tonnage when rails were replaced

### 5.1.2.2 HE370 レール, Test A レール, Test B レールの試験敷設結果 (C 区間)

C 区間については, A 区間と B 区間に比べて敷設時期は遅くなったが, これまでと同じく曲線半径 800m の曲線外軌に図 5.13 に示すような配列により, HH340 レールを含めて 4 種類のレールを敷設した. この図において, BCC より左側と ECC より右側は緩和曲線区間となっている. これまで累積通過トン数 52 MGT までの経過観察を行っており, この時点で 4 種類のレールには全てきしみ割れのき裂が発生していた. その時のきしみ割れき裂の状態を図 5.14, 52MGT までのき裂長さの変化を図 5.15 に示す. レール表面から観察した限りではきしみ割れき裂の状態に違いは見られず, き裂長さについてもほぼ同程度の 15~17 mm の間にあった. さらに, 図 5.16 に 45° 摩耗量の変化について測定した結果を示す. レール摩耗量はレール硬度に従って違いが見られた. HH340 レールより硬度の大きい HE370 レールと Test B レールは摩耗量が相対的に小さく, 硬度の小さい Test A レールは摩耗量が一番大きかった.

以上から, 転動試験装置の結果もあわせてきしみ割れのはく離抑制という観点で評価をすると, 現時点では Test A レールか Test B レールが相対的に有利であるという結果が得られたことになる. しかしながら, 後述するレール削正



という保守方法を取り入れた場合は、別の観点での検討が必要になると考える。  
 今後もきしみ割れの状況について観察を続けていく予定である。

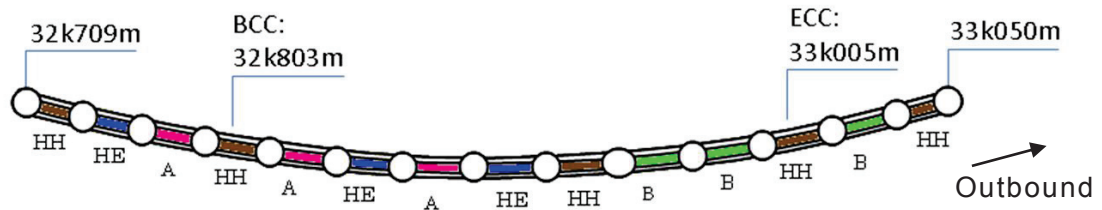
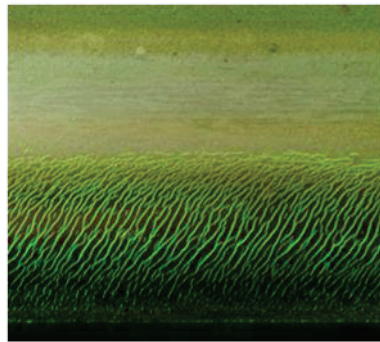
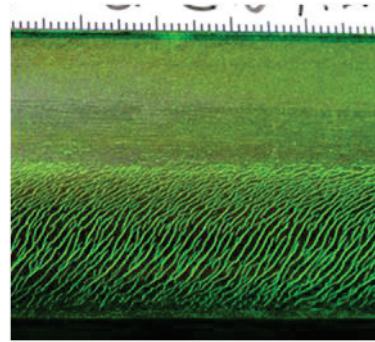


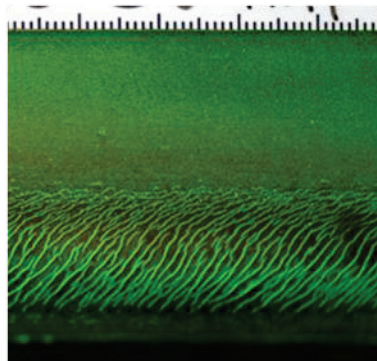
Fig. 5.13 Test site for HE370, Test A and Test B (Section C)



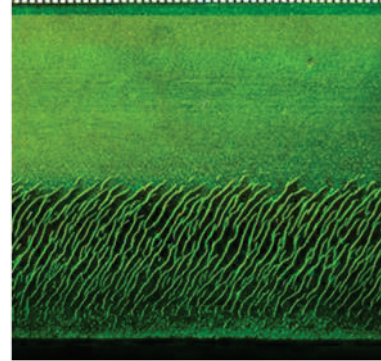
(1) HH340



(2) HE370



(3) Test A



(4) Test B

Fig. 5.14 Head checks of HH340, HH370, Test A and Test B in section C at 52 MGT



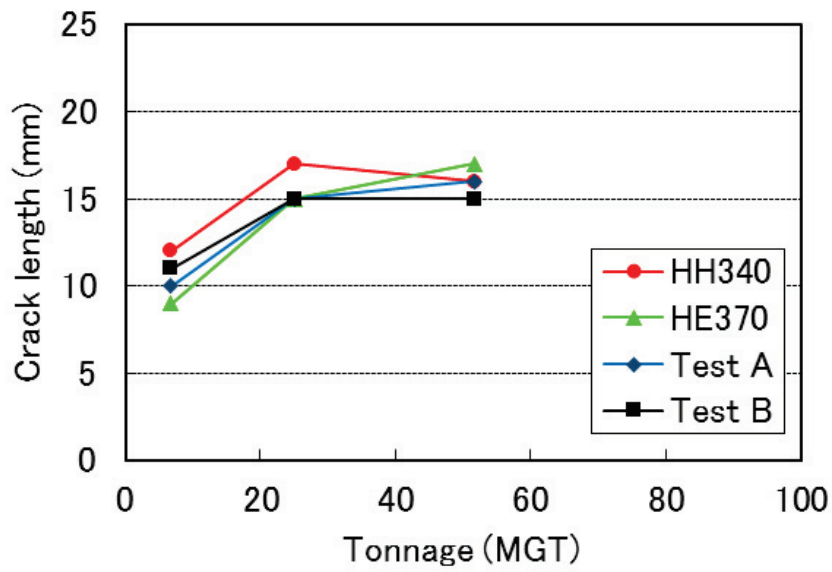


Fig. 5.15 Crack length of head checks

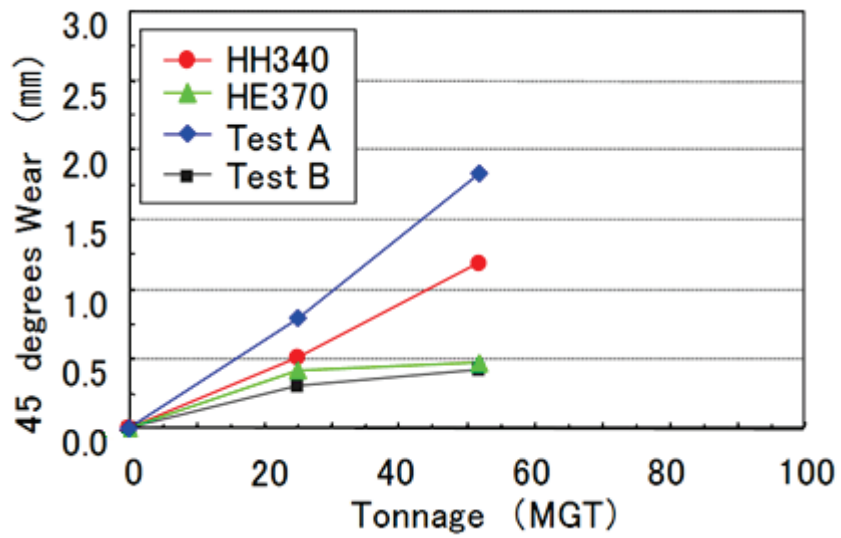


Fig. 5.16 Wear amount at 45 degrees

## 5.2 レールと車輪の接触状態改善によるきしみ 割れ対策の検討

HE370 レールの営業線敷設試験では，HH340 レールおよび HE370 レールとも，きしみ割れき裂を起点とするシェリングによりレール交換に至った可能性が高いことがわかった．き裂進展に対する優位性が見られた HE370 レールであったが，ゲージコーナースェリングに対しては特に優位性が見られなかった．そのため直線区間で発生しているシェリング対策としてすでに保守作業の中に取り入れられて，その効果が確認されているレール削正による予防策を検討することにした[13]，[14]．以下にその研究内容について述べる．

## 5.2.1 これまでのレール削正（日比谷線脱線事故による削正位置の制限）

2000年3月に発生した日比谷線脱線事故[15], [16], [17]の原因の一つとして、レール削正後のレール断面形状が挙げられた。そのレール断面形状とは、レール頭部のゲージコーナー部を削り込んだ形の形状となっており、車輪がレール頭部を乗り上がる距離が一般のレール形状よりも2mm程度短くなっていたことが国土交通省の報告書で指摘された。そのため下記に示す国土交通省からの指導（図5.17）が行われ、レール頭部のゲージコーナー部はレール削正施工後のレール断面形状として、設計形状に復さない場合はレール頭頂部から5mm下までの削正しかできないようになった。その結果、JR東日本管内のレール削正では、2000年12月から図5.18に示すように、レール頭頂面を中心とした削正範囲（ゲージコーナー側は砥石の角度が $-6^{\circ}$ まで）しか砥石を当てることができないようになった。

### ※国土交通省による指導

#### レール研削形状の適正化（図5.17）

1. 急曲線において外軌の研削を行う場合には、可能な限り新品のレール断面形状に復する。
2. 上記によれない場合は、レール頭帳面から5mm以下を削正しない。
3. やむを得ずゲージコーナー部を削正する場合はフランジ角度よりも緩やかな角度としない。

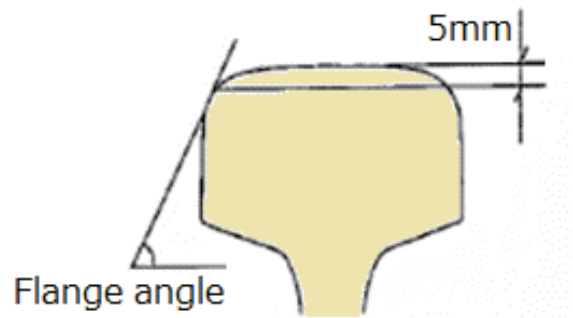


Fig. 5.17 Rail grinding rule by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport

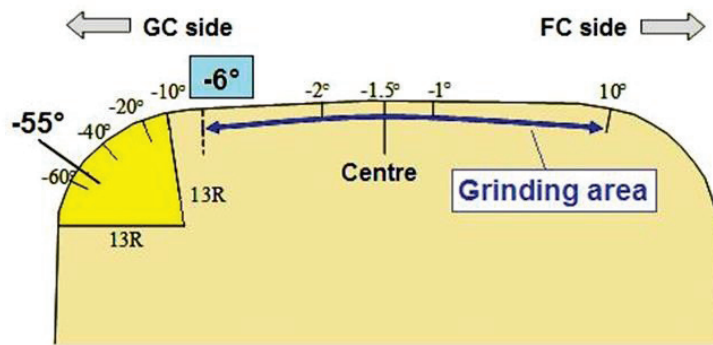


Fig. 5.18 Rail grinding area after 2000

## 5.2.2 レール削正範囲の拡大

2000年以降、 $-6^\circ$ までの砥石角度でしかレール削正が施工できなかったが、きしみ割れき裂をレール削正により除去するためにはゲージコーナー部の削正が不可欠であった。そこで、最初に図5.19に示すようレール頭頂部から5mm下までのレール削正が行えるように削正範囲の拡大を行った。ここでは300箇所分の摩耗レール形状から5mm下になる位置のゲージコーナー部の接線角度 $\theta$ を分析し、その角度を削正砥石の限度値として求めた。45°の摩耗量と摩耗角度について分析した結果を図5.20に示す。レール摩耗形状で5mm下となる位置の接線角度で一番浅い角度は $30^\circ$ ということが確認されたため、2008年から砥石角度を $-30^\circ$ まで設定してレール削正を行えるようにした。

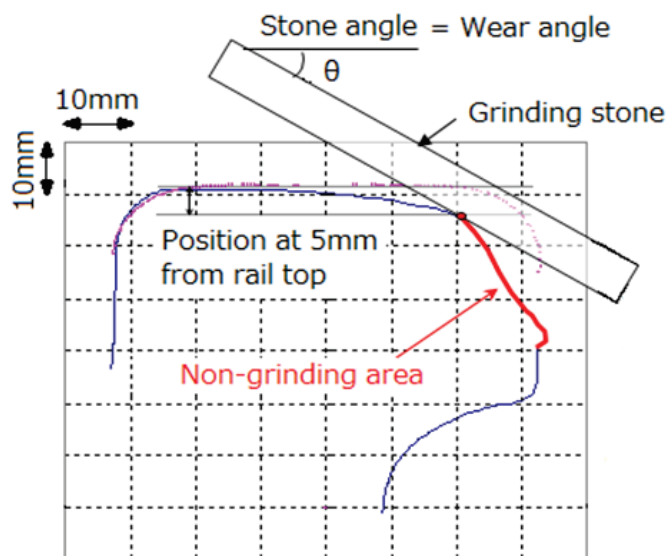


Fig. 5.19 Position at 5mm from rail top and angle of rail wear

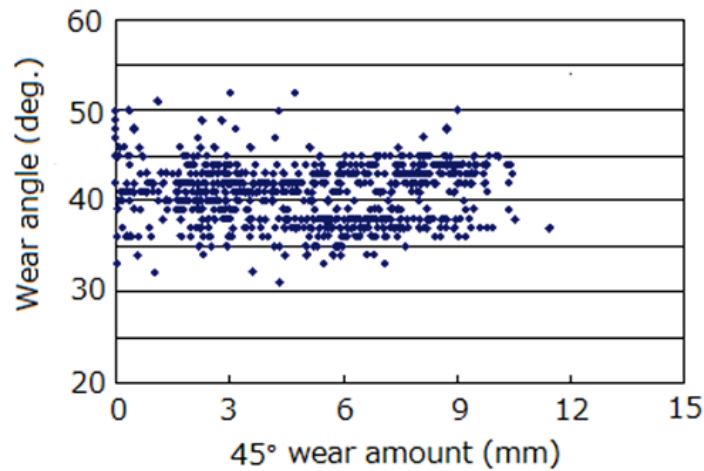


Fig. 5.20 Analysis result on angle of rail wear

しかしながら、第1章でまとめたようにきしみ割れのき裂発生範囲としては、レール頭頂部5mm下では全てをカバーできないことがわかった。そこで改めてきしみ割れき裂について、首都圏エリアにおける任意に選定した曲線内1348箇所[18]のゲージコーナー側のき裂開始点を整理した。そのうちきしみ割れの存在が確認されたのは965箇所であり、その中でき裂下端位置が調査できたのは940箇所であった。調査箇所の軌道諸元は表5.5のとおりである。曲線半径は多様であり、レール種別も50kgNと60kgレール、曲線中の位置も緩和曲線を含めて調査している。調査方法は図5.21に示すようにフィールドコーナー側を起点として、専用の測定定規によりき裂の発生位置（レール頭部幅方向と高さ方向）を測定した。そのき裂下端位置について分析した結果を図5.22に示す。図示されているレール形状（50kgNレール設計形状）の内外側にき裂開始点が見られるのは、調査したレールが多様であり水平摩耗や側摩耗が進んだレール形状になっていたためである。これらのき裂開始点のうち8mm下まで範囲内にあったのは930箇所であり、全数からの割合で示すと98.9%となった。この調査結果から8mm下までに削正砥石を当てることができれば、ほとんどのきしみ割れき裂をレール削正により取り除くことが可能となる。

Table 5.5 Track characteristic at investigation point on head check cracks

Curve radius	300m – 1200m
Curve type	Circular curve and transition curve
Rail type	50kgN rail and 60kg rail
Accumulated tonnage	2.1MGT – 535MGT

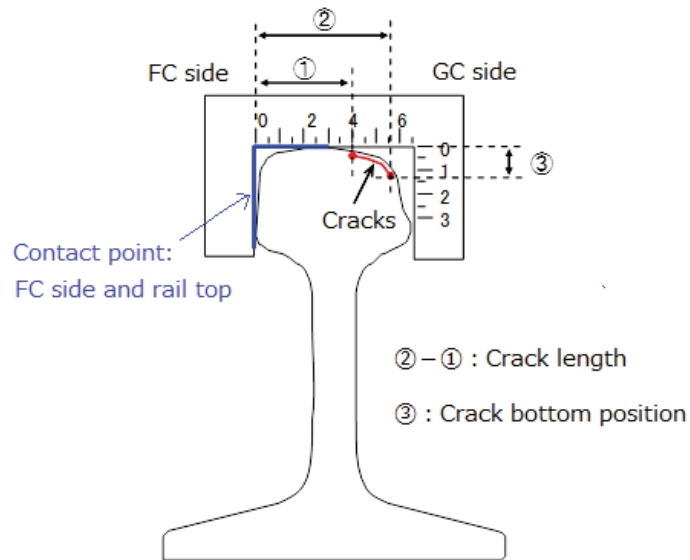


Fig. 5.21 Investigation technique on head check cracks

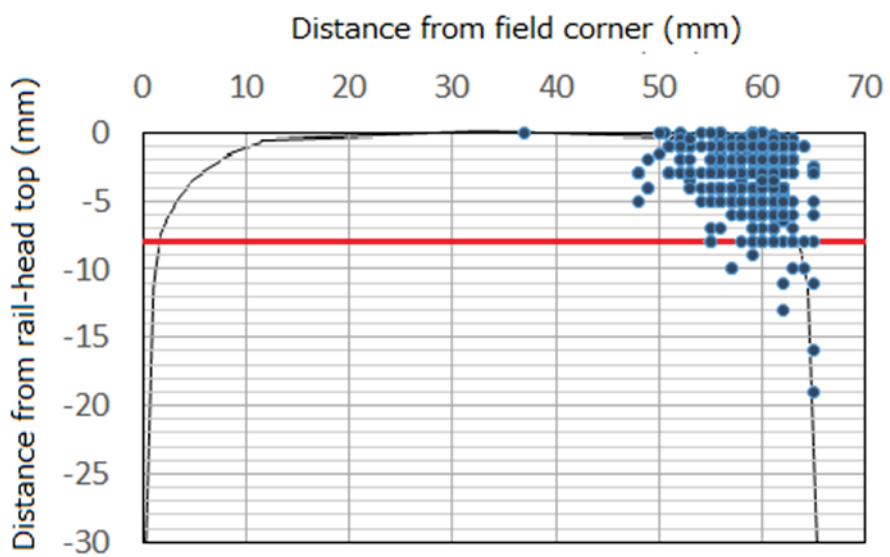


Fig. 5.22 Initiation point of head check crack from gage corner

レール頭頂部から 8 mm 下の範囲に削正砥石を当てるためには  $-55^\circ$  までの可動範囲で削正砥石の角度制御を行えば良いことが既往の研究[19]で判明している。ただし、全ての曲線半径においてこの範囲で砥石を当てて削正を行うわけではなく、(財) 鉄道総合技術研究所のシミュレーションモデルを用いて、車輪が乗り上がりをしていない曲線半径として 400m という制限が加えられている。この研究成果をもとに、2009 年から図 5.23 に示す範囲でレール削正が行えるようにルールが改正されており、現在は直線を含む曲線半径 400m 以上の曲線であればレール頭頂部から 8 mm 下までの範囲でレール削正を行えるようになった。よって、幾何学的にはきしみ割れで発生するようなゲージコーナー部のき裂やゲージコーナーシェリングにつながる金属疲労層について、レール削正により除去することが可能となる環境が整えられた。

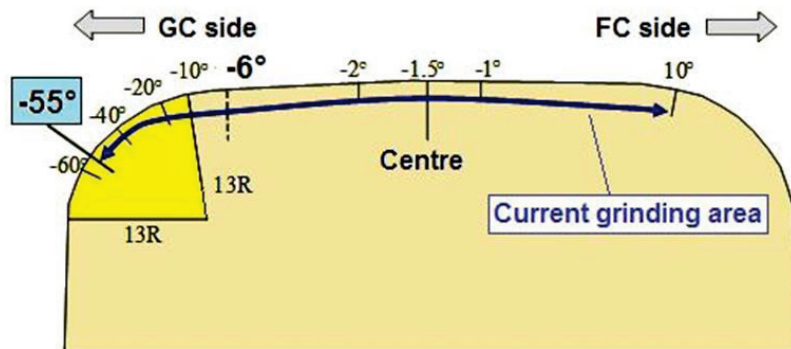


Fig. 5.23 Rail grinding area after 2006



### 5.2.3 レール削正周期と削正量の最適化

転動試験装置の結果や営業線での調査から、きしみ割れのき裂は累積通過トン数 10MGT 未満（回転数 100 万回相当以下）で発生することが今回の研究を通して確認されている。そのき裂の進展を抑制するための削正量や削正周期を求めるには、レール内部に進展したき裂深さが重要であり、その分析を効率的に行うために、表面き裂の長さや内部き裂の深さについての関連性を調査した。前章で調べた 965 箇所のレールについて、表面に現れているき裂長さと累積通過トン数の関係を分析した。対象としたき裂は、これまでの調査できしみ割れの多かった曲線半径 600m から 800m の本曲線に発生していたものである（251 箇所）。その分析結果を図 5.24 に示す。ここでのき裂長さは図に示す L の部分となる。表面に現れているき裂長さは、70MGT を超えるとほとんど進展せず、き裂の多くは最大で 30 mm を超えることはないことが確認できた。また、対数による近似式は式 5.1 のとおりとなる。

$$L_{600-800} = 2.8079 \ln(T) + 3.9494 \quad (5.1)$$

$L$ : 表面き裂長さ (mm)

$T$ : 累積通過トン数 (MGT)

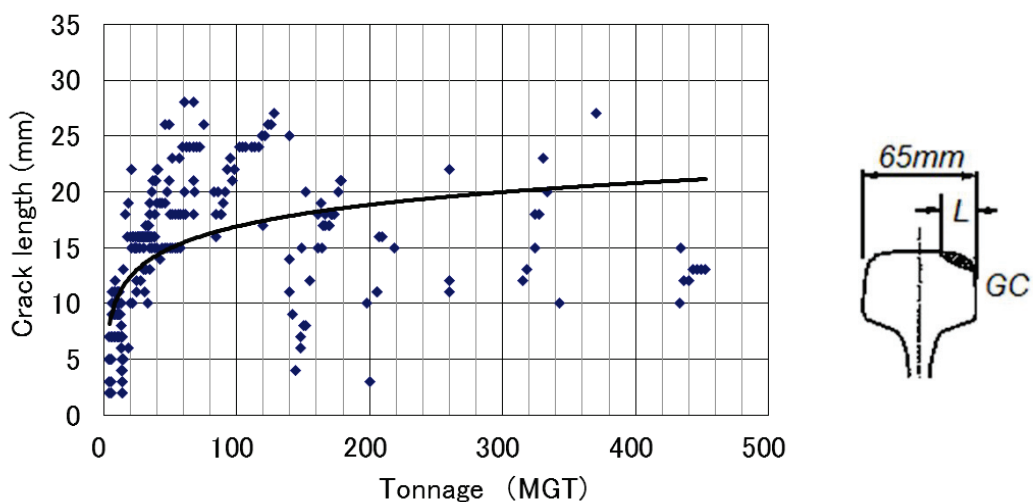


Fig. 5.24 Relation between Crack length of head checks and accumulated tonnage (Curve radius: 600 - 800m)

次に表 5.6 に示す新幹線および在来線のレール交換で発生したきしみ割れの生じているレール（19箇所）についてレール内部のき裂状況を調査した。累積通過トン数は 7.3MGT から 376MGT の間のレールである。切断したレールの一例を図 5.25 に示す。上側の表面写真における白線のところで切断した時のレール内部のき裂状態が下側に示されている。これらの写真からレール表面に現れているき裂長さとレール内部のき裂長さの関係を分析した。その結果を図 5.26 に示す。この図より平均的には、レール表面のき裂長さが 20 mm 程度になれば HH340 レールで平均 2 mm 程度のき裂深さになっていることが推定できる。HH340 レールの累乗による近似式を式 5.2 に示す。

$$d_{HH340} = 0.00001L^{4.0349} \quad (5.2)$$

$d$  : き裂深さ (mm)

$L$  : 表面き裂長さ (MGT)

式 5.1 および式 5.2 から、累積通過トン数 50MGT におけるき裂深さは、表面き裂長さが 15.0 mm となるので、平均 0.56 mm 程度となることがわかる。

Table 5.6 Specifications of Analyzed rail to inside crack and surface crack

Line	Type	Material	Curve radius (m)	Tonnage (MGT)
Shinkansen	60kg	HH340	1200	58.0
Shinkansen	60kg	HH340	1200	58.0
Shinkansen	60kg	HH340	1200	58.0
Shinkansen	60kg	HH340	1200	58.0
Shinkansen	60kg	HH340	800	58.0
Shinkansen	60kg	HH340	T700	58.0
Conventional	60kg	Standard	1000	7.3
Conventional	50kgN	Standard	1000	251.5
Conventional	50kgN	Standard	1000	251.5
Conventional	50kgN	Standard	1000	251.5
Conventional	50kgN	Standard	1000	251.5
Conventional	60kg	HH340	500	232.7
Conventional	60kg	HH340	500	89.6
Conventional	60kg	HH340	500	232.7
Conventional	60kg	HH340	500	52.5
Conventional	50kgN	HH340	800	365.0
Shinkansen	60kg	HH340	500	96.0
Shinkansen	60kg	Standard	4000	374.0
Shinkansen	60kg	Standard	4000	376.0

(T: Transition curve)



## 5.2.4 レール削正試験による削正量の確認

### 5.2.4.1 試験区間の概況

図 5.23 に示した削正範囲を削正するパターンを設計し、現在使用されている 2 種類のレール削正車（図 5.27）にその削正パターンを適用して、削正量を確認する現地試験を実施した。ここで削正パターンについて説明する。レールを削る際はレール削正車が同じ場所を数回往復することになるが、その際の砥石角度の設定を毎回変更することにより、目標の削正量や削正形状になるように施工を行っている。その砥石の設定方法のことを削正パターンと言っている。2 種類のレール削正車は Harsco type と Speno type であり、Harsco type は左右レールを削る砥石をあわせて 10 個、Speno type は 16 個搭載している。この 2 種類のレール削正車について、ゲージコーナー側 55° までの新しい削正パターンを設計し、きしみ割れき裂に対する削正効果を確認した。レール削正試験を行った曲線の条件を表 5.7、新たに設計された削正パターンを図 5.28（Speno）および図 5.29（Harasco）に示す。横軸の数値は削正砥石の角度とレール頭頂面のおおよその砥石接触位置、縦軸の数値は削正パス数（削正作業区間を一往復すると 2 パスとして表す）を表している。図からは、削正砥石がレール頭頂面上のどの位置に当たっているかが読み取れるようになっている。

削正作業を行った曲線半径であるが、保守作業との関係もあったため、曲線半径では 600～2000m となり、レール材質的には普通レール（Standard）と熱処理レール（HH340）の 2 種類の区間となった。削正パターンについては、削正量に影響する砥石の数が Harsco type と Speno type では異なっているため、削正パス数が車種により異なっている。さらに、Harsco type のみになるが、I、J 区間については以前のゲージコーナー側 6° までの削正パターン（図 5.18）により削正作業を行い、削正量の比較評価も行った。



(1) Harsco type

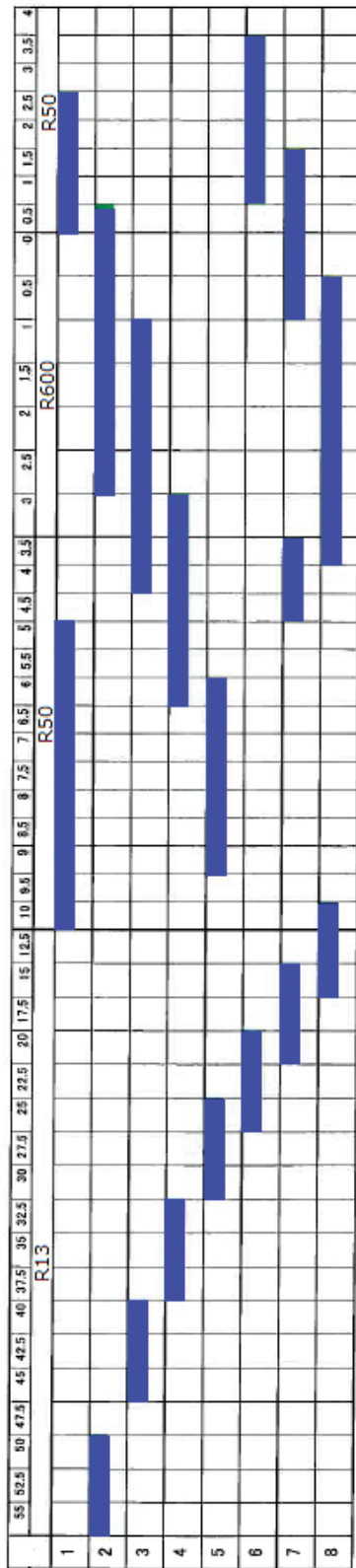


(2) Speno type

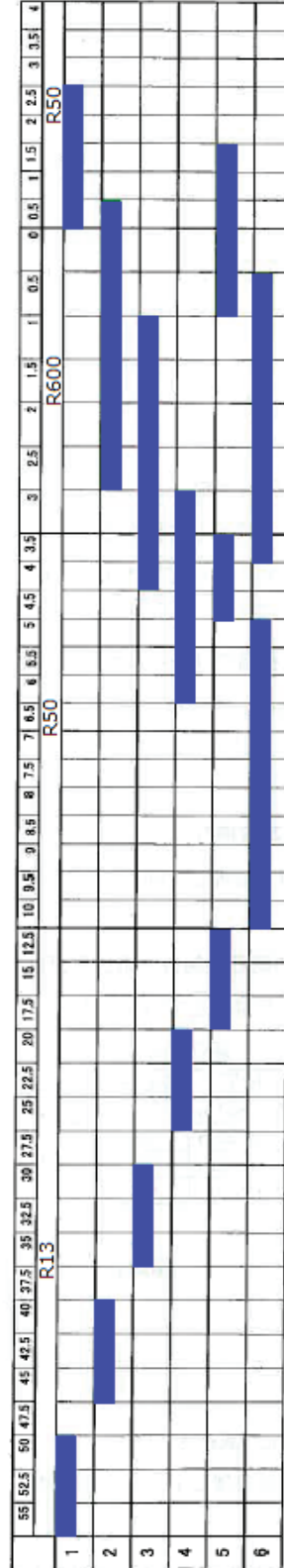
Fig. 5.27 Rail grinding cars

Table 5.7 Performance of rail grinding cars

Test	Type	Curve radius	Rail	Grinding pattern
A	Speno	600m	HH340	55°,6 passes
B	Speno	600m	HH340	55°,8 passes
C	Speno	1000m	Standard	55°,6 passes
D	Speno	1000m	Standard	55°,8 passes
E (A)	Harsco	800m	HH340	55°,14 passes
F (B)	Harsco	1000m	Standard	55°,12 passes
G (D)	Harsco	1800m	Standard	55°,14 passes
H (E)	Harsco	800m	HH340	55°,12 passes
I (C)	Harsco	2000m	Standard	6°,10 passes
J (F)	Harsco	1600m	Standard	6°,10 passes



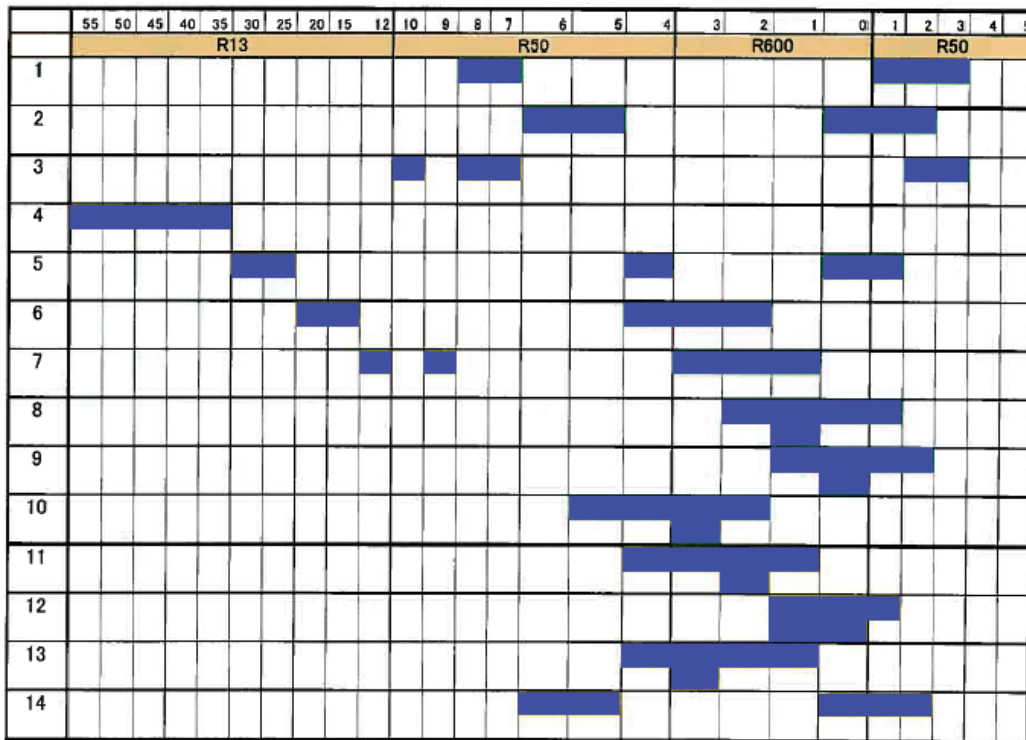
(1) 55 deg., 8 passes



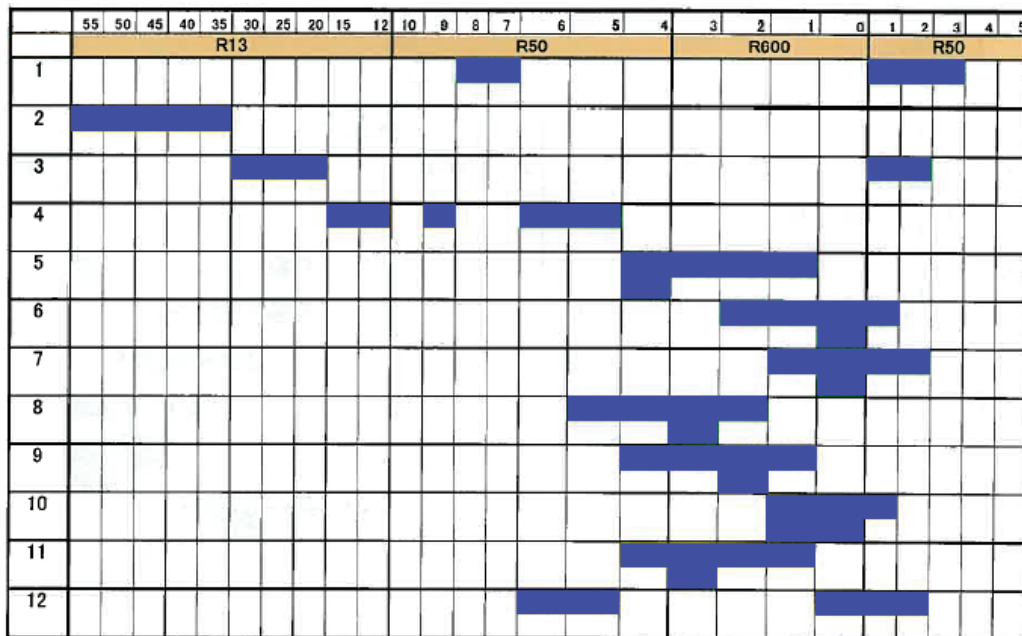
(2) 55 deg., 6 passes

Fig. 5.28 Grinding pattern for Speno

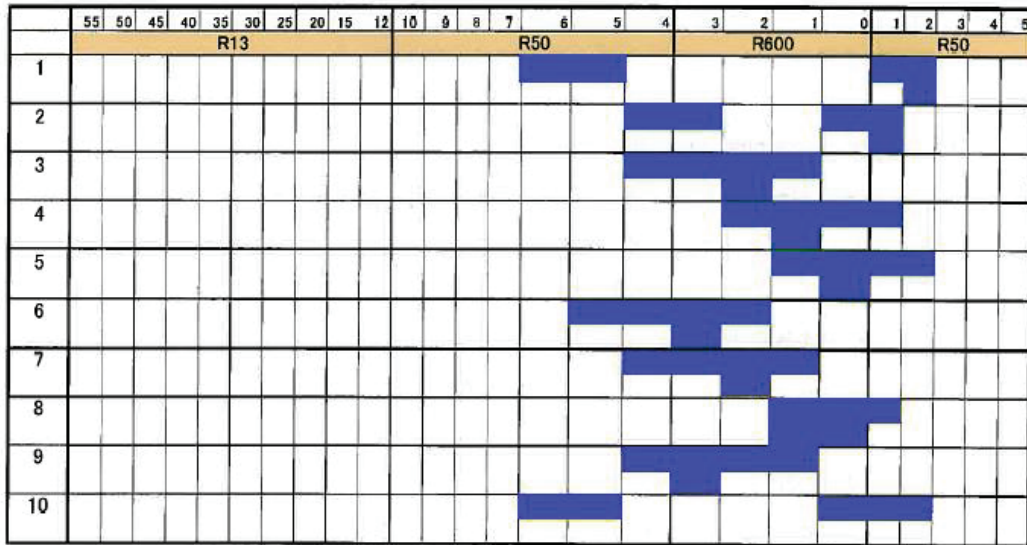




(1) 55 deg., 14 passes



(2) 55 deg., 12 passes



(3) 6 deg., 10 passes

Fig. 5.29 Grinding pattern for Harsco

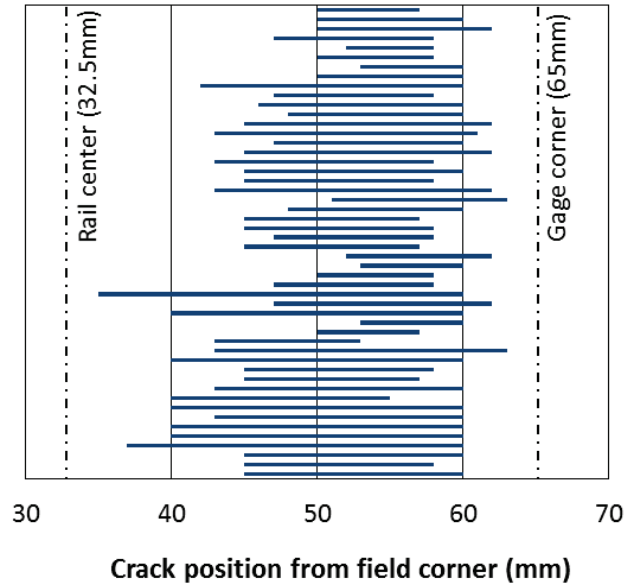
### 5.2.4.2 試験区間のきしみ割れの状況

この削正試験を行うにあたり試験区間のきしみ割れ状況を確認した。A 区間から J 区間までのきしみ割れき裂の発生範囲を図 5.30 (レール幅方向) および図 5.31 (レール高さ方向) に示す。両図ともレール種別ごと (曲線半径では 800m 以下と 800m より大きい曲線に分類) に分けて表示している。図 5.30 の横軸はフィールドコーナーからの位置を示しており、ゲージコーナーは 65mm (レール頭部幅) の位置となる。図 5.31 については、き裂を調べたレールの累積通過トン数を横軸に取り、ゲージコーナー部におけるき裂の下端の位置との関係を散布図で表している。

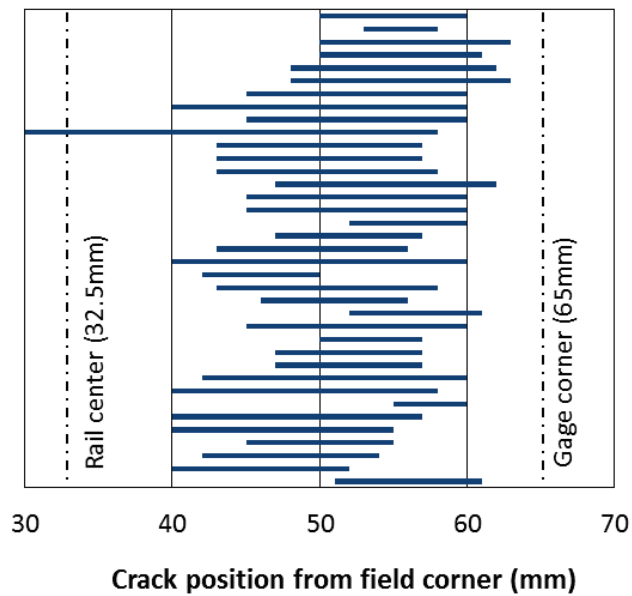
図 5.30 より、レール頭頂面のきしみ割れき裂の発生範囲は、普通レール、熱処理レールともあまり変わらず、フィールドコーナー側から 40~60mm の範囲がほとんどであった。き裂としてレール中央部を超えているものはほとんどなく、これまでの知見通りの結果が得られている。さらに図 5.31 から、ゲージコーナー側のき裂下端部はレール頭頂部から 8 mm 下までの位置にあり、ほとんどが 6 mm 下までの範囲で収まっていた。この調査結果からもレール頭頂部から 8 mm 下



までのレール削正を行うことで、きしみ割れなき裂を理論上除去することが可能であることが確認できた。



(1) HH340 rail section (curve radius: 800m and less than 800m)



(2) Standard rail section (curve radius: over 800m)

Fig. 5.30 Area of head check cracks on Rail crown

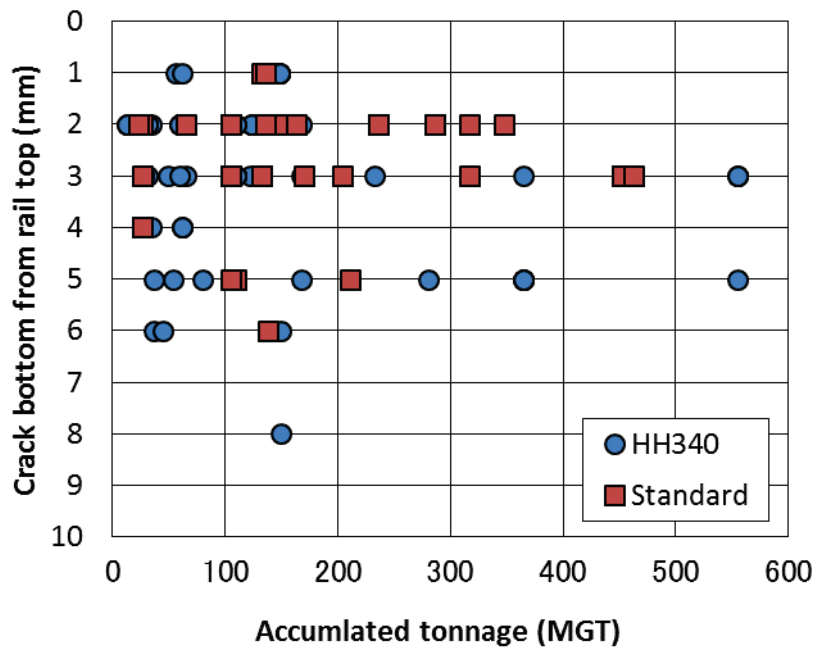


Fig. 5.31 Bottom of Head check cracks at GC side

### 5.2.4.3 削正量の評価

レール削正試験を行った区間はきしみ割れの発生状況を調査したところ、これまでの研究で得られた知見と一致した区間であり、この区間はきしみ割れの発生している区間の一般的な曲線を表しているということになる。レールの削正量 (Metal removal) について、表 5.7 に示した削正パターンで削正作業を行った結果を図 5.32 に示す。以前の削正範囲 ( $-6^\circ$  まで) による削正パターン (I, J 区間) と比較して、削正量は大幅に改善されており、Speno type で約 0.3~0.9mm, Harsco type で約 0.1~1.0mm の削正量になるということがわかった。Speno type の削正量は比較的安定しているが、Harsco type は削正区間によって削正量にばらつきがあったため、E 区間と H 区間についての削正前後における削正形状について詳細な分析を行った。レール形状とレール頭頂面全体の削正量を表したグラフを図 5.33 に示す。これらの図からわかることは、ゲージコーナー部があまり摩耗していない場合は、レール削正量が小さくなる可能性のあることが示唆された。

また、 $-55^{\circ}$  までの砥石角度により削正範囲をゲージコーナー部の方へ拡大した効果を確認するため、図 5.30 のき裂範囲からゲージコーナー側き裂端が多く集まっていると推定されるゲージコーナー部から 7.5 mm の位置（フィールドコーナーから 57.5 mm の位置）における削正量について一覧にしたものを表 5.8 に示す。Spenco type (A~D 区間) の削正量は 0.34~0.45 mm で平均 0.40 mm, Harsco type (E~H 区間) の削正量は 0.18~0.65 mm で平均 0.42 mm となった。ちなみに  $-6^{\circ}$  までの削正範囲にとどめた I 区間と J 区間の削正平均量は 0.12 mm であり、削正パターンを改善したゲージコーナー部の削正量は、以前と比べて 4 倍の削正量となっていることが確認された。

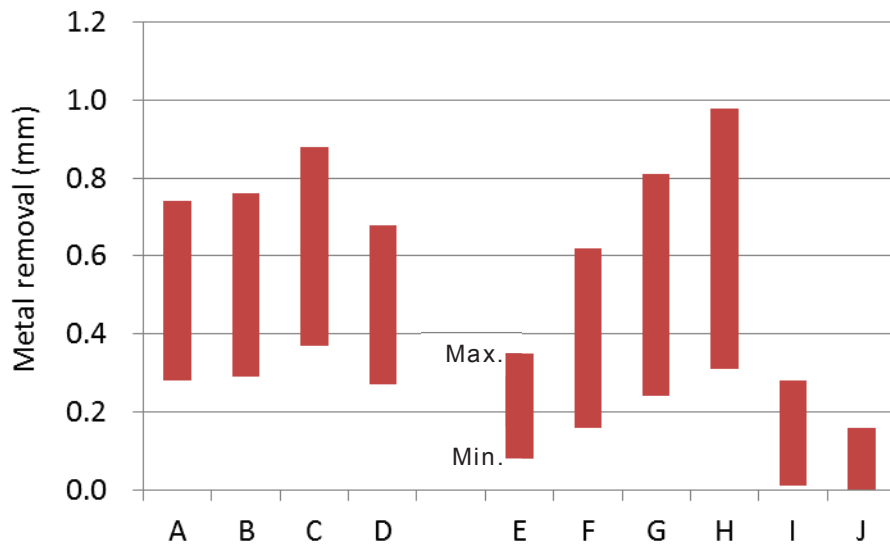
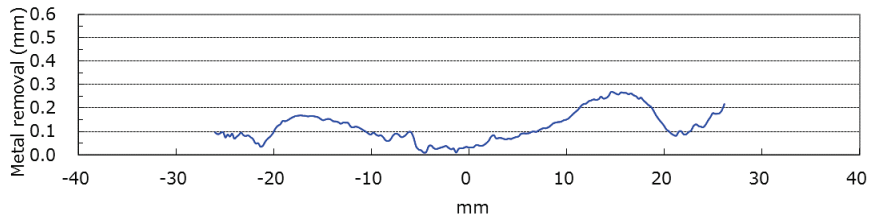
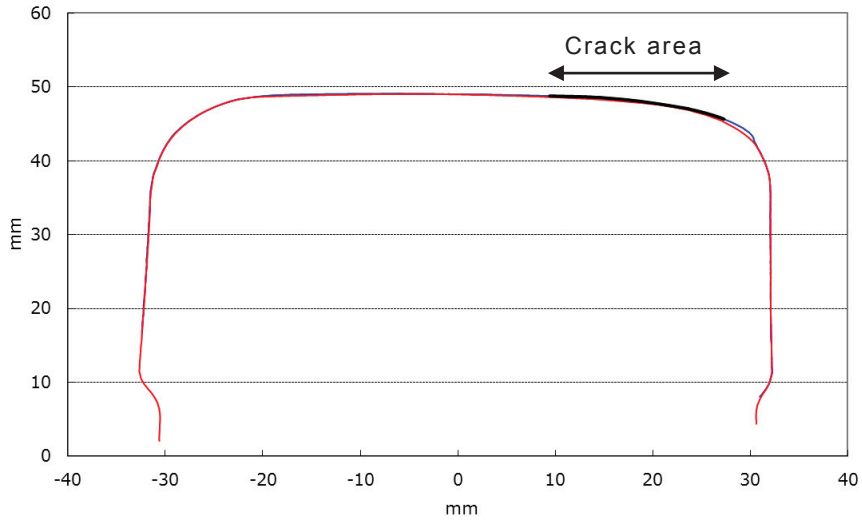
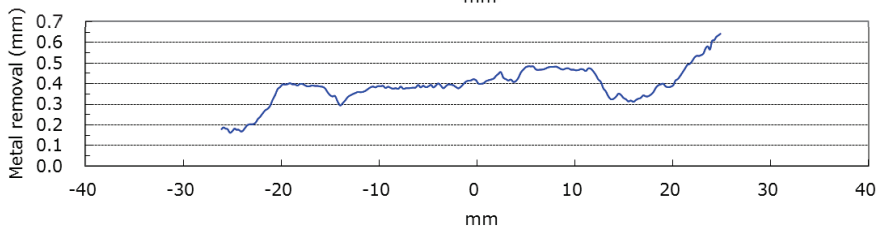
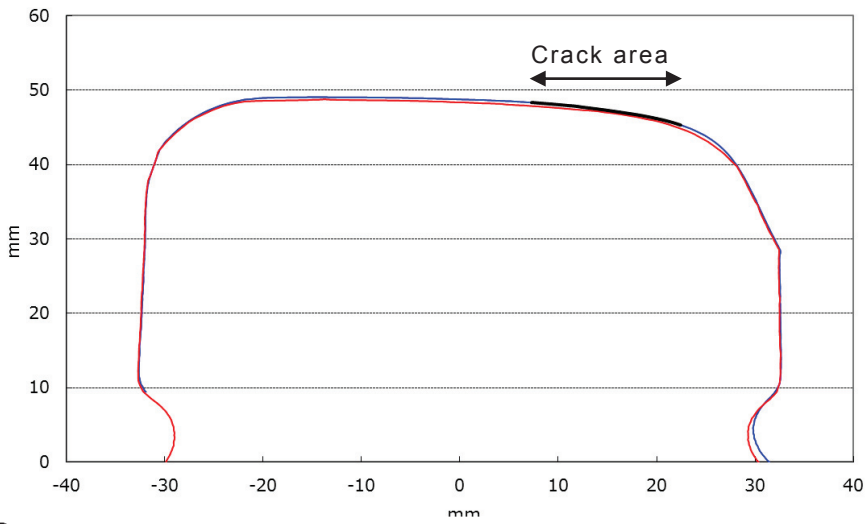


Fig. 5.32 Metal removal



(1) E section



(2) H section

Fig. 5.33 Metal removal and rail profile at E and H section

Table 5.8 Metal removal at 57.5mm from FC side (mm)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
0.37	0.45	0.44	0.34	0.18	0.31	0.52	0.65	0.10	0.14

#### 5.2.4.4 レール削正試験結果から考察されるきしみ割れに対するレール削正手法

現在、シェリング予防に対するレール削正周期は 50MGT を基本に行っており、5.2.3 章の分析結果からすると、きしみ割れの表面き裂長さは図 5.24 より平均で 15.0 mm，最大でも 26.0 mm 程度になるため、き裂深さとしては式 5.2 より平均で 0.56 mm，最大で 5.12 mm 程度になると想定される。現行のレール削正作業は、5.2.4 章のレール削正試験の結果から示されるように、1 回の施工でゲージコーナー部の削正量が平均 0.4mm，最大でも 1 mm 程度であることが確認された。つまり、現行のパス数と削正周期のままでは、一部のきしみ割れき裂について完全に取り除くことが難しいことがわかった。

今回のきしみ割れき裂のレール内部進展調査は HH340 レールを対象として行っている。そこで、レール削正によりきしみ割れを効率的に除去するためには、パス数の増加はもちろんのこと、き裂進展を HH340 レールより抑えることができる HE370 レールを利用するなど、工夫が必要となる。レール削正によりきしみ割れの発生を抑制するためには、レールき裂の進展速さと削正量を調整しながらパス数を決めていく必要がある。ただし、内部き裂をすべて取りきることができなくても、レール削正を実施することでき裂長さは確実に短くなり、レール表層に蓄積された金属疲労層も除去することが可能となるため、はく離を生じさせるリスクを小さくしていることは間違いない。きしみ割れき裂の長さが大きくなる前、つまりできるだけ早い時期からレール削正を開始し、定期的にレール削正を行っていくことが重要となる。

きしみ割れき裂は、主に直線区間に発生するシェリングに比べき裂の進展が早いことが本研究で明らかになっている。そのため、効率的にレール削正を行

っていくためには、できるだけき裂進展を抑制して、き裂が浅い位置で留まっている状態のレールを少ないパス数で削正していくことが必となる。その手法としては、5.1 章でき裂進展の遅いことが確認されている新材質レールを投入し、周期的なレール削正と合わせてきしみ割れの抑制を行っていくことが重要ではないかと考える。また、ヨーロッパではきしみ割れの発生を遅らせるためのレール頭頂面形状の研究がすでに実施されている[9],[20]。ヨーロッパで検討されているレール頭頂面形状の一例を図 5.34 に示す。これまでの UIC レール (E1) と比較して、レール肩部がなで肩になっていることがわかる。日本でもレール頭頂面から 8 mm 下までという制約条件はあるが、車輪踏面との接触位置を考慮した新たなレール頭頂面形状 (Anti-head check profile: AHC) を提案し、レール削正によりそのレール頭頂面形状に修正することで、きしみ割れき裂の発生を遅らせることが可能になると思われる。

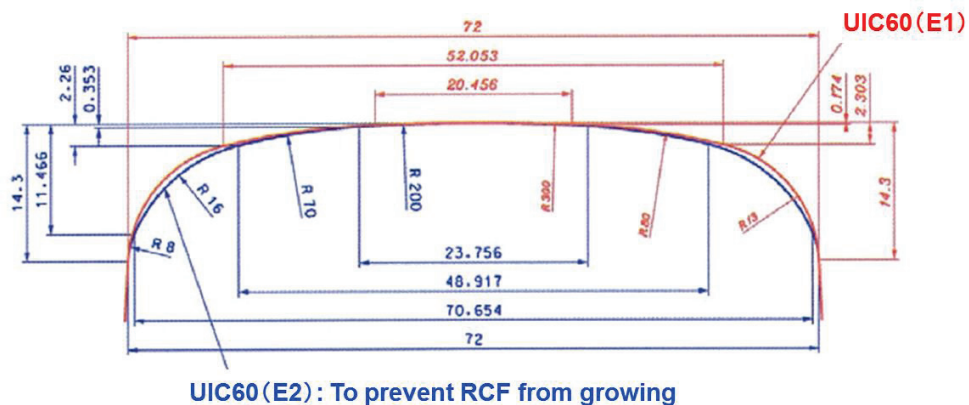


Fig. 5.34 Rail profile to prevent head checks from growing [9]

## 5.3 本章のまとめ

はく離を伴ったきしみ割れを予防するために、レール材質の変更とレール削正という観点で研究を実施した。レール材質の変更については、きしみ割れ発生の条件を適用した転動試験装置の実験により、はく離が生じにくく、摩耗も普通レールよりも小さかった HE370 レールと Test B レール、実験でははく離がほとんど生じなかった Test A レールの 3 種類に絞って試験敷設を行った。先に試験敷設を始めていた HE370 レールについては、き裂の進展は HH340 レールと比較して遅いことが確認されたが、ゲージコーナーシェリングになる時期は HH340 レールと変わらないことが判明した。現在、別の箇所でも上記新材質レール 3 種類と HH340 レールを含めた 4 種類のレールを同じ曲線に敷設して経過を観察中である。累積通過トン数 50MGT までの経過では、きしみ割れき裂の発生は全てのレール材質で観察されている。ただし、その表面き裂を観察した限りでは大きな違いは見られない。

転動試験装置による実験や営業線における試験敷設を通じて、レール材質の変更によりはく離の発生を遅らせることができる可能性は得られた。しかしながら、きしみ割れき裂の成長とそこから生じるゲージコーナーシェリングを完全に予防することは難しかった。そのため、はく離につながるき裂とゲージコーナーシェリングの予防を考えていくためには、レール削正を適正な周期で実施していく必要があると考える。現時点でレール削正を考慮しない場合は、Test A レールと Test B レールがきしみ割れはく離に対しては有利であるが、ゲージコーナーシェリングの発生時期については未評価であるため、この点に関して今後の経過観察の結果を待つ必要がある。

現在、首都圏では 50MGT ごとに定期的なレール削正を行っており、その延長線上で曲線区間のレール削正も実施している。以前はシェリング予防の観点から効率性を考えて、直線におけるレール頭頂面を確実に 0.1mm 除去[21],[22]することが可能な削正パターンを適用していたが、現在はきしみ割れ予防を考えた削正パターン（砥石角度 $-55^{\circ}$  まで）を取り入れている。しかしながら、現行の削正パターンのままでは、レール頭部内に進展したき裂を完全に除去する

削正量にはなっていない可能性が高い。その理由として、きしみ割れき裂は50MGT程度の時間が経過すると、場合によっては表面き裂長さが最大26mmになり、その時のき裂深さも5mm程度になっている可能性が否定できないからである。つまり、最大でも1mm程度の削正量となっている現行の削正パターンでは、表面き裂長さが大きいきしみ割れについては内部き裂を完全に除去できていないことが想定される。今後は、きしみ割れ発生範囲にさらに砥石を当てる削正パターンを新たに設計して削正量を増やしていく必要がある。

今後の課題として、きしみ割れに対する効率的なレール削正を行っていくためには、き裂自体の進展を抑制していくことも並行して考えなければならない。本研究の結果からは新材質レールによるきしみ割れき裂の進展抑制、海外事例を参考としたきしみ割れの発生しにくいレール頭頂面形状(AHC)の適用が考えられる。このような対応策とレール削正を組み合わせることで、きしみ割れからのはく離やゲージコーナージェリング発生による早期のレール交換は削減できるものとする。



## 第5章の参考文献

- [1] 佐藤, 辰巳, 柏谷, 上田, 横山: 耐シェリング用ベイナイトレールの開発, 鉄道総研報告, 第12巻, 第10号, pp.15-20, 1998.10
- [2] Yokoyama, Mitao, Yamamoto, Kataoka, Sugiyama: High Strength Bainitic Steel Rail for Heavy Haul Railways with Superior Damage Resistance, NKK Technical Review, No.84, pp.44-51, July 2001
- [3] 佐藤, 辰巳, 柏谷, 上田, 横山: 耐シェリング用ベイナイトレール, 日本鉄道施設協会誌, 第37巻, 第4巻, pp.258-261, 1999.4
- [4] 上田, 内野, 松下, 小林: 重荷重鉄道用耐摩耗・耐損傷レール (HEレール) の開発, 新日鉄技報, No.375, pp.150-155, 2001.11
- [5] 佐伯, 岩野: 鉄道用軌条の歩みと今後の展望, 新日鉄住金技報, No.395, pp.19-25, 2013.3
- [6] 横山, 三田尾, 竹正: 耐摩耗性・耐損傷性に優れた高強度パーライトレール (SPレール), NKK技報, No.176, pp.59-64, 2002.
- [7] 名村: 車輪レール系の境界技術, 第21回鉄道総研講演会要旨, pp.41-50, 2008.11
- [8] Smith: Developing maintenance-free rails, International railway journal (IRJ), pp.18-20, November 2012
- [9] Schmid, Burstow, Clark, Eickhoff, Hiensch, Hsu, Kent: Best Practice in Wheel-Rail Interface Management for Mixed Traffic Railways, University of Birmingham Press, Chapter 2, 2010
- [10] Definitive guidelines on the use of different rail grades, INNOTRACK Concluding technical reports, D4.1.5GL, 2008
- [11] Heyder, Girsch: Testing of HSH® rails in high-speed tracks to minimize rail damage, Wear 258, pp.1014-1021, 2005
- [12] Heyder, Brehmer: Empirical Studies of Head Check Propagation, The 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2012), Chengdu, August 2012

- [13] 瀧川, 元好: JR 東日本におけるレール表面損傷抑制の取り組み, トライボロジー会議 2012 春予稿集, 東京, 2012.5
- [14] Aoki, Kurihara, Mimura, Ito: Effect of periodical Rail Grinding in Japanese Conventional Line, Conference on Railway Engineering 2013, London, July 2013
- [15] 内田: 営団地下鉄日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査(中間報告)の概要, 日本鉄道施設協会誌, 第 38 巻, 第 10 号, pp. 49-52, 2000.10
- [16] 瀧川: 車輪・レール形状問題解決への期待: 第 13 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RRAIL 2006) 講演論文集, pp. 73-76, 2006.12
- [17] 高井: 保線の常識! 非常識?, 鉄道現業社, pp122, 2009
- [18] 篠田, 瀧川, 斎藤: きしみ割れ発生箇所のレール削正及び深さ検出方法について, 第 65 回土木学会年次学術講演会論文集, pp. 559-560, 2010.9
- [19] 奥村, 穴見: レール傷の現状と今後のレール削正について, 第 65 回土木学会年次学術講演会論文集, pp. 615-616, 2010.9
- [20] Guideline for management of Rail grinding, INNOTRACK Concluding technical reports, D4.5.5, 2008
- [21] 石田, 阿部: レールシェリング予防削正効果に関する実験的研究, 鉄道総研報告, 第 9 巻, 第 12 号, pp19-24, 1995.12
- [22] 名村, 石田: レール損傷の発生メカニズムを探る, Railway research review (RRR), 第 68 巻, 第 9 号, pp. 6-9, 2011.9



## 第 6 章 結言

### 6.1 本研究の結論

本研究は、曲線軌道の外軌レールに発生する表面損傷に対する予防策を検討するために実施された。その多くは緩曲線区間に発生するきしみ割れと呼ばれている損傷形態であり、日本では 2000 年前後にその課題が全国的に顕在化してきていることが確認された。さらに、2000 年にイギリスのハットフィールドにおいて、きしみ割れに起因した列車脱線事故が発生し、偶然にも日本と同時期にヨーロッパでもきしみ割れの研究が盛んに行われるようになった。日本における研究開始当時のきしみ割れの発生状況を整理すると次のようになる。

JR 発足以降の 1994 年からの JR6 社におけるレール折損件数の分析から、2002 年以降にレール表面損傷（シェリング、きしみ割れ）を原因としたレール折損が多いことを統計的に突き止めた。その中でもきしみ割れによるレール折損が 2004 年から見られるようになり、近年増加傾向にあることも確認できた。首都圏の一部路線で調査したところ、きしみ割れは曲線半径 800m 以下の緩曲線に多く存在しており、その区間には熱処理（HH340）レールが敷設されていた。きしみ割れ発生箇所における横圧は、軌道検測車（East-i）の検測データから約 10kN とわずかな値であり、応力的には摩耗が進みにくい状況であることもわかった。レール交換に至るきしみ割れの状況としては、レール頭頂面中心を超えないき裂長さの範囲ではく離状態に進展しているものが多く、きしみ割れのき裂長さだけによるレール管理手法だけでは対応に苦慮する場合があった。そのため新たな管理手法や対応策を立てていく必要があることも理解できた。さらに、きしみ割れがはく離に進展するためには、トンネル区間の曲線の調査から水の影響が大きいことも明らかになった。また、きしみ割れき裂のはく離は、累積通過トン数で 100MGT を超えると増加する傾向にあり、シェリングと比べ

てレール交換までに至る時間が大変短く、レール管理コストを押し上げる要因になっていることが判明した。

以上のようなことから、はく離状態に至るきしみ割れを未然に防ぐレール材質の研究や予防保全、探傷方法を検討していくことは、レール管理コストの削減、列車の定時運行を確保するうえでも重要な課題であり、本研究を取組むきっかけとなった。以下、第2章では、はく離を伴ったきしみ割れが顕在化してきた時期と環境条件の変化について整理した。次に第3章ではきしみ割れの損傷管理における信頼性を高めるための方策について取り組み、各種検査機器の開発を行った。さらに、第4章ではきしみ割れの予防策としてレール材質の改善に取り組むために、2円筒式の転動試験装置の有効性を確認した。最後に第5章では転動試験装置を活用して新しいレール材質に対する実験を行い、相対的な評価を行った。その後、選ばれたレールについては営業線に敷設され、経過を観察している。さらにレール材質改善だけではきしみ割れの発生を完全に予防することは難しいことがわかったため、レール削正との組み合わせできしみ割れの予防を行うことを検討した。以下にこれらの研究成果についてまとめる。

最初に第2章では、きしみ割れに関する現業機関からの情報をもとに、きしみ割れの発生状況の確認とその発生要因につながると考えられた軌道構造と車両構造の変化について調査を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 首都圏をエリアとする支社のレール交換数量について統計的分析を行った結果、本研究に取り組み始めた2000年前後において、きしみ割れ理由によるレール交換数量が増加していることがわかり、現業機関で経験的に感じていたことが定量的に証明された。

(2) 首都圏の一路線できしみ割れの発生した時期と環境条件について詳細に調査したところ、軌道構造の変化は特に見られなかったが、そのレール上を走行する車両については順次新しい車両に置き換わっていることが確認された。車両構造の大きな変化は車体の軽量化、台車構造の変更、車輪形状の変更の3点であった。とくに車輪形状の変更が完全に実施されたのは、レール上にきしみ割れが顕在化した後であったが、円錐踏面に比べて円弧踏面はきしみ割れ発

生している部分に接触しやすいという研究成果がすでにまとめられており、きしみ割れからはく離が生じた原因のひとつではないかと考えられた。

(3) 同時期にほかの路線では、曲線区間においてきしみ割れの発生範囲と同じ場所にはく離を伴った損傷が発生していた。この損傷は、レール塗油を実施している箇所が発生していることがわかり、ピッチングという名称で分類された。本研究で主体的に調査している箇所は、レール自体に潤滑材の付着している状況は確認されなかったため、潤滑に関係した要因できしみ割れからはく離が生じているわけではないことが判明した。

第3章では、きしみ割れ管理における信頼性向上を目的とした検査装置の開発についてまとめた。きしみ割れの管理においては、これまでき裂長さによる管理を中心に行われてきたが、レール交換に至ったきしみ割れを調べるとはく離を生じたり、表面き裂からレール内部に進展したき裂がまれに横裂に発展したりする場合があった。そのため、はく離やレール内部に進展したき裂を確実に把握する手法を取り入れる必要があった。そこで、レール表面画像撮影によるき裂長さやはく離状態について定量的に管理を行うための画像撮影法と画像処理方法の研究、レールあご下部からのフェイズドアレイ探傷による横裂深さを検出できる探傷器の開発を行った。

(1) レール表面画像撮影法については、レール探傷車にラインセンサ方式の画像撮影装置を取り付けることにより、レール表面のきしみ割れの状態とき裂やはく離サイズをmm単位で正確に検出できるようになった。この撮影手法については新しいレール探傷車にすでに搭載されている。

(2) レールあご下部からのフェイズドアレイ探傷法により、きしみ割れから生じる水平裂や摩耗したレール形状の影響を受けずに、きしみ割れから成長した横裂深さを非破壊で検査できるようになった。この探傷法を採用した「レール頭部横裂連続探傷器」は作業の効率性を考えて連続的に探傷できる機構としていることも特徴である。この探傷器は各支社に1台ずつ配備されることが予定されている。

第4章では転動試験装置を利用してきしみ割れの再現実験を行うために取り組んだ研究内容についてまとめた。転動試験装置の実験から判明したことは以下のとおりである。

(1) 営業線における軌道動的測定データを参考に、FEM解析によりレール・車輪間の接触位置における圧縮主応力から転動試験装置に負荷する荷重条件を導き出すことでレール摩耗およびきしみ割れのき裂とはく離を再現する手法を確立した。

(2) 転動試験装置の性能評価を行うためのレール摩耗実験において、レール形状の違い(50kgNと60kgレール)は摩耗量に与える影響が小さいことが確認された。

(3) 転動試験装置の実験から、現在敷設されている熱処理(HH340)レールの材質では、きしみ割れのき裂が65万回転(累積通過トン数換算で6.5MGT)で発生し、き裂からの初期の小さなはく離が生じるのは780万回転(累積通過トン数換算で78MGT)であることが確認された。1000万回転(累積通過トン数換算で100MGT)を超えるとレール交換に至るような連続的なはく離を生じることも判明した。

(4) きしみ割れき裂がレール内部に進展して、レール交換を必要とする状態になるまでには一定の時間経過(100MGT以上)が必要であった。ただしこの期間は、シェリングでレール交換を必要とする状態になるまでの時間(300MGT程度)と比べても短いことが明らかになった。

最後に第5章のまとめとして、はく離を生じたきしみ割れを予防するために実施した2つの研究について述べる。第一のアプローチはレール材質の変更によりはく離を伴ったきしみ割れを予防する研究である。きしみ割れ発生の条件を適用した転動試験装置を利用して5種類のレール材質について相対的な評価を行った。さらに、本研究を通してレール材質の変更だけでは、きしみ割れのき裂を予防することは難しく、ゲージコーナースェリングを抑制できる確率も小さいことがわかった。そこで、き裂発生とシェリング抑制対策としてレール削正によるアプローチが可能かの検討も行った。以下にその研究成果についてまとめる。

(1) 現行の熱処理レールよりはく離が生じにくく、摩耗についても普通レールより小さかった HE レール，Test A（中間強度）レール，Test B（高強度）レールの 3 種類を選定し、営業線の試験敷設を行った。

(2) 先行して試験敷設を始めていた HE レールについては、き裂の進展は HH340 レールと比較して遅いことを確認した。ただし、シェリング（水平裂）が生じる時期は、HH340 レールと変わらないことが営業線の敷設試験から明らかになった。

(3) 現在、上記箇所とは別に新材質レール 3 種類（HE レール，Test A（中間強度）レール，Test B（高強度）レール）と HH340 レールを同じ曲線内に敷設して経過を観察中である。累積通過トン数 52MGT における調査では、すべてのレールにきしみ割れき裂が発生している。ただし、表面き裂を観察した限りではき裂状態に大きな違いは見られない。

(4) きしみ割れ予防を考えたレール削正手法として、レール頭頂面に当てる砥石角度を $-6^{\circ}$  から $-55^{\circ}$  に順次拡大した。その結果、削正砥石がきしみ割れき裂の発生範囲の 99%に当たるようになった。

(5) 現在、首都圏では 50MGT ごとに定期的なレール削正を行っているが、現行の削正パターンと周期ではきしみ割れき裂を完全に除去することは難しいことがわかった。50MGT を経過したレールはレール内部のき裂調査から、その深さも最大で 5 mm 程度になる可能性があり、本研究の試験結果から得られた削正量（最大 1 mm 程度）では不十分のため、削正パス数をさらに増加させる必要がある。

## 6.2 今後の課題

本研究を通して新たな課題が生じたので、以下にまとめる。

第 3 章においてレール頭部横裂連続探傷器の開発を行ったが、この探傷器は、レール頭部内中央部に広がった横裂を効率よく検知できるように設計されていたため、ゲージコーナー側にとどまる小さな横裂については検出が不十分とな



った。ゲージコーナー側に広がる小さな横裂を検知するためには探触子の再配置などを行い、フェイズドアレイ探傷の制御方法についても新たに考える必要がある。

第5章において、きしみ割れを予防するためにレール材質の変更とゲージコーナー部のレール削正という2つのアプローチによる保守方法を検討したが、きしみ割れを完全に予防するには至っていない。そのため、きしみ割れを予防していくためにはレール削正を保守作業の基本として、きしみ割れき裂の進展速度をできるだけ小さくしていくことを考える必要がある。その手法としては次の2点が挙げられる。一点目はレール材質の変更により表面き裂から内部に進展するき裂の進展速度を低減する。二点目は海外事例を参考としたきしみ割れの発生しにくいレール頭頂面形状(AHC)を日本のレール形状に対しても適用し、レール削正によりその形状を再現する。以上の手法が導入されれば、現行のレール削正周期と削正延長を維持しながらきしみ割れを予防していくことが可能になると考える。

## 主論文を構成する論文

(1) 実験によるレールきしみ割れの発生とはく離の要因分析

瀧川光伸, 入屋義博

鉄道力学論文集, Vol. 10, pp43-48, 平成 18 年 7 月

(2) 転動試験機によるレールきしみ割れ対策の研究

瀧川光伸, 入屋義博

鉄道力学論文集, Vol. 11, pp39-44, 平成 19 年 7 月

(3) Laboratory simulations with twin-disc machine on head check

M. Takikawa, Y. Iriya

WEAR, Vol. 265, pp1300-1308, October 2008

(4) 曲線部の外軌レール摩耗に与えるレール頭面形状の影響

瀧川光伸, 野口昭治

トライボロジスト, vol. 59, No. 1, pp46-56, 平成 26 年 1 月



## 謝辞

本研究は、東京理科大学 理工学部 野口 昭治 教授のご指導のもと行われたものであり、約2年半にわたり多くの助言と励ましをいただきましたことをこの場を借りて心より御礼申し上げます。野口教授には会社における業務を行いながら学位論文をまとめるにあたり、心構えやスケジュール管理など多くの面で学ばせていただきました。さらに、査読論文投稿や学位論文審査会における適切な指導と助言をしていただき、短い期間で研究成果をまとめることができたのも野口教授のお力添えがあったからこそと感じております。

また、東京理科大学 理工学部 溝口 博 教授、荻原 慎二 教授、東京理科大学 基礎工学部 向後 保雄 教授、東京理科大学 工学部 佐々木 信也 教授には、学位論文審査会において様々な助言と指導をいただきました。お忙しい中、貴重な時間を割いていただき心より感謝いたします。

本論文はきしみ割れに対する本格的な研究に入る前の事前検討段階も含めると、平成25年（2003年）から約10年にわたり実施されてきた研究内容になります。この研究を開始または途中段階での方向修正にあたり、研究計画の立て方や研究の考え方について、活発な議論と熱心な指導のもと貴重な助言をいただいた尾高達男氏、鶴飼毅彦氏、小野寺孝行氏には大変感謝をしております。この研究の中で大きなウエイトを占めるレールと車輪を模擬した転動試験装置を利用した実験では、多くの方に支援をいただきました。レール摩耗の評価に当たっては村越史明氏、きしみ割れの再現実験と材料評価においては、入屋義博氏、小林潤氏、元好茂氏の長年にわたる継続的な実験で協力をいただきました。特に入屋義博氏には実験装置の試験片交換や故障時など不定期に発生する事象に対して、忙しい中快く対応していただき深く感謝しております。また、小林潤氏と元好茂氏には、私が現業機関に在籍している間も本研究の趣旨を理解していただき、実験を継続していただいたことに大変感謝しております。本

論文にこの実験内容を成果としてまとめられたのも皆様のご支援の賜物と実感しております。

さらに、きしみ割れに対する検査手法の研究では、松田博之氏、安藤洋介氏の協力があり論文としてまとめることができました。この研究を進めるにあたり、多くの議論と助言をしていただいたことに心から御礼申し上げます。レール削正にかかわる研究では、青木宣頼氏や篠田勝己氏に協力をいただきながら調査やデータ分析を進めました。研究中に多くの助言をいただき深く感謝しております。また、長年の研究を体系的にまとめるにあたり、常に励ましをいただき多くの面で支援していただいた横山淳氏、杉浦芳光氏、堀山功氏、小関昌信氏には心から御礼申し上げます。

本研究においては、(公財)鉄道総合技術研究所の多くの方々に助言をいただきながら進めてきました。営業線における軌道動的測定やレール・車輪間の接触解析に当たっては、石田誠氏(現日本工営株式会社)、名村明氏、金鷹氏(現青島宏達賽耐爾科技有限公司)にデータの分析法やパラメーターの考え方について助言をいただき深く感謝しております。きしみ割れ対策用の新材質レールの製作やきしみ割れの現場調査においては、佐藤幸雄氏(現新日鉄住金株式会社)、兼松義一氏に多くの助言と支援をいただき心から御礼申し上げます。また、本研究に関連する論文投稿に当たっては陳樺氏に多くの助言をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

なお、本研究は上記以外の方にも多くの方々の支援と協力のもと実施されました。この研究に携わってきた関係諸氏に改めて感謝いたします。

最後に、本研究をまとめるにあたり暖かく見守ってくれた妻の千晶、娘のかおりに深く感謝をし、本論文の最後を締めたいと思います。

平成 26 年 1 月

瀧川 光伸