

## Techno Scope

# 鉄道レールの信頼性向上



鉄道輸送において、基本的なインフラストラクチャーである鉄道レールには非常に高い信頼性が求められ、鉄道レールのメンテナンスは重要な課題である。高い精度で製造されている鉄道レールは、日常的にきめ細かな管理が実施されているが、さらに信頼性の向上、耐用期間の延伸を目的とした研究が行われている。また高速化、重荷重化への対応として、疲労や摩耗に強い新しい機能を持った鉄鋼材料の開発も行われている。

## 過酷な環境で求められる高い性能

地球温暖化対策や都市交通の混雑緩和、新興国の経済発展など、様々な要因から世界的に鉄道への関心が高まっている。低コストで大量輸送が可能な鉄道は、都市間の旅客や貨物輸送の他、山間部で採掘された鉱物資源を沿岸部まで輸送するなどの重量物の大量輸送で活用されている。また、旅客輸送ではいっそうの

速度の向上が求められている。

世界各地の鉄道が敷設されている環境は多種多様である。鉄道レールは、雨や雪、寒暖差などの自然条件にさらされることに加え、重量物を積載した車両によって繰り返し荷重をかけられる。そのため、鉄道レールには腐食や疲労、摩耗、損傷などが生じることになる。

鉄道レールの最も基本的な機能は、車両の重量を支持し、車両を案内することである。速

達性、大量性、確実性、効率性等に優れている鉄道輸送であるが、その要ともいえる鉄道レールは冗長性に乏しく、高い信頼性が求められるのである。

車輪と接触する鉄道レールには、耐摩耗性と強度に優れ、炭素量0.60～0.75%のパーライト単相鋼が用いられている。現在、最高速度300km/hで運転されている新幹線の1両当たりの重量（乗客含む）は45 t程度と言われる。車輪は8つなので、1輪当たりで約6tを受けることになり、この重量をわずかに10円硬貨ほどの接触面積で支持していることになる。そのため接触応力が1000MPaを超える場合もあり、鉄道レールに疲労が生じる原因となっている。

また、信号電流が流されている鉄道レールは、信号線としての役割も持っている。万一、鉄道レールにき裂が発生、進展し、破断した場合には、この信号電流が遮断されることにより、鉄道レールの異常を検知できる仕組みである。

このほか鉄道レールには、旅客輸送機関としての安全性確保や乗り心地の向上、路線周辺への騒音問題への対応が求められている。これらの解決策の1つがレールの継目の溶接や耐摩耗性の向上である。

このように様々な機能が要求される鉄道レールであるが、本稿では鉄道レールの信頼性向上、レール損傷への技術的な課題と対策を中心に紹介していく。



日本の国産レールの歴史は1901年官営八幡製鉄所に始まる。現在では年間約50万トンの軌条が生産され、国内、海外で使用されている。



## 高速化を目指してきた鉄道の歴史

最初の商用鉄道がイギリスで建設されたのは1825年で、1863年にはロンドンにおいて蒸気機関車による地下鉄が開業している。我が国で新橋―横浜間で営業鉄道が開通したのはその9年後の1872年であった。このときの列車の速度は約30km/hと言われている。

その後、車両を牽引する動力は蒸気機関から、モータ、ディーゼル機関と発達を遂げ、より高速での輸送が実現されていく。1964年に開業した東海道新幹線は、当時世界最速の210km/hで運転された。現在の新幹線の営業運転速度では、山陽新幹線の時速300km/hが最速である。

鉄道の運転速度への挑戦は世界中で行われており、2007年にはフランスのTGVが574km/hを記録したと報じられた。なお、我が国の磁気浮上式リニアモーターカーは最高速度581km/hを記録している。



2007年に574km/hを記録したフランス・TGV

## 厳しく品質が管理される鉄道レール

信頼性向上という視点から鉄道レールを見る場合、まず着目すべきはその製造技術である。1901年に国産化が可能になった鉄道レールの性能向上には、製造技術の向上が不可欠であった。技術的な課題は大きく2つに分けられる。1つは鉄道レールの形状の高精度化であり、もう1つは鉄道レールの破損や摩耗に対する高強度化である。

形状の高精度化では、圧延技術が大きな役割を担っており、代表的な技術としてカリバー圧延法とユニバーサル圧延法が知られている。レール形状に圧延、整形された後は、耐摩耗性向上のための熱処理が施される。当初はオフラインで行われていた熱処理は、現在はオンラインで行われ、生産性の飛躍的な向上が図られている。その後、製造番号などが刻印され、歪みなどがローラーで矯正される。通常の鉄鋼製品の場合には、この後の一次検査を経て成品として出荷される。

しかし、高い安全性と機能を求められている鉄道レールの場合には、一次検査の後、さらに渦流探傷検査、目視検査、超音波探傷検査などの厳しい検査工程を経なければならない。より高速の車両を支持する新幹線用のレールの場合には、さらに車輪と接するレール頭頂部の凹凸の検査（波状測定）が行われている。その寸法精度は、定尺レールの長さである25mで0.1～0.2mmと言われる。

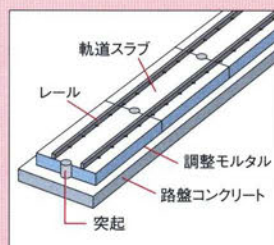
## 鉄道の種類によって異なる軌間

鉄道車両が通行する軌道は、鉄道車両の走行を誘導するレール、レールの間隔を一定に保つまくらぎ、レールおよびまくらぎを支え、走行する車両の重量を路盤に伝える道床から構成されている。2本のレールの間隔を「軌間（ゲージともいう）」と呼び、我が国の旅客鉄道では主として4種類の軌間が用いられている。

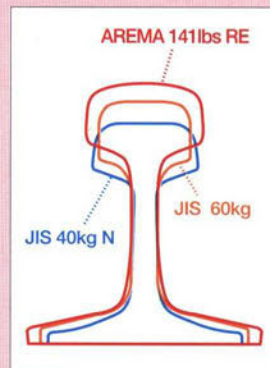
新幹線などで用いられている軌間は、欧米の標準規格であり、「標準軌（1,435mm）」と呼ばれている。標準軌の軌間は古代ローマの馬車の幅に由来すると言う説があるが定かではない。

標準軌より狭い軌間は「狭軌」と総称されるが、東京の一部の私鉄や地下鉄で用いられる軌間（1,372mm）は、「偏軌」または「馬車軌間」とも呼ばれる。馬車軌間の名称は、この軌間が東京の馬車鉄道で使用されていたことによる。また、JRの在来線の多くが採用している軌間は1,067mmで、3ft6inであることからサブロクと呼ばれる。森林鉄道などの軌間には762mmが使われ、これは2ft6inであることからニロク（ニブロク）と呼ばれる。ちなみに鉄道模型の代表的な規格であるNゲージの軌間は9mmで、標準軌の160分の1の縮尺である。

なお、現在の鉄道レールは、1mあたりの重量によって「50kgN」などと表示されている。また、レールの端部の着色によって熱処理の有無などを示している。



板状のコンクリート（スラブ）を用いた軌道は新幹線を中心に広く採用されている。スラブは鉄道レールを固定するまくらぎの役割を担う。



JIS 40kg Nは主としてローカル線に、JIS 60kgは新幹線に利用される。AREMA 141lbs REは輸出用の規格で、鉱山鉄道などで利用される。

このように鉄道レールにおいては、一般の鉄鋼製品と比較して厳しい品質管理が実施されているのである。

## 振動や騒音を低減するロングレール

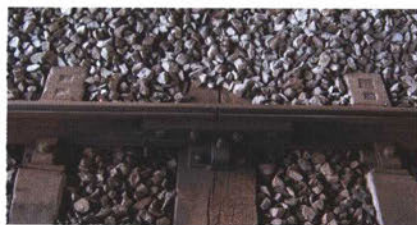
定尺レールと呼ばれる鉄道レールの長さは、通常25mまたは50mである。軌道を敷設する際は、これらをボルトなどで繋いでいく。その際、気温の変動による鉄道レールの伸縮を考慮して、継目には一定の隙間を設ける必要がある。これが「ガタンゴトン」と



いう鉄道独自の揺れと振動、騒音の原因になる。そこで数本のレールを溶接した「ロングレール」を使用することで、軌道全体の継目を減少させ、乗り心地の向上と騒音の低減を実現している。なお、ロングレールの伸縮は、両端部に設置された「伸縮継目」によって吸収されている。レールの継目はレール損傷が生じやすい箇所でもあり、ロングレールは保守作業の省力化の点でも期待できる。

工場から出荷される際の鉄道レールの長さは25mまたは50m

の定尺である。これを保線基地（レールセンター）の工場内で約200mまで繋げる（一次溶接）。繋げられたレールは敷設する現場まで運ばれ、さらに所定の長さまで溶接される（二次溶接）。ちなみに青函トンネルでは、トンネルの全長（約53km）とほぼ同等にまで長尺化



鉄道レールは、「継目板」と呼ばれる金属板で接続される（写真上）。ロングレールの接続部には端部を斜めに切断した「伸縮継目」が用いられる（写真下）。（写真提供：（財）鉄道総合技術研究所）

された「スーパーロングレール」が用いられている。

工場で大型機械を利用できる一次溶接では、フラッシュ溶接法やガス圧接法が用いられる。これらは鉄道レールの端部を加熱して、圧力をかけて接続する方法である。一方、線路上で行われる溶接には、エンクローズアーク法やテルミット溶接法が用いられる。

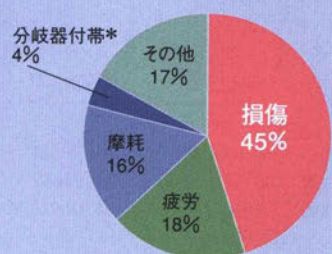
新幹線で採用が始まったロングレールは、「乗り心地」や「騒音」についての対策ひとつとして、在来線などでも採用が進められている。

## 摩耗・疲労・腐食から鉄道レールを守る

鉄道輸送を円滑に行うためには、車両、電気設備、駅、橋やトンネル、そして軌道と多岐に渡るメンテナンスが必須である。鉄道各社はメンテナンスのために、営業費の約30%を費やすともいう。その中でも大きな比重を占めるのが、鉄道レールの修繕費である。そのため、鉄道レールの信頼性向上と寿命延伸は経営上の大きな課題になっている。

鉄道レールのメンテナンスは、「累積通過トン数（通トン）」による管理や、損傷などを発見した都度、修繕する「随時修繕」が主流であった。「通トン」で管理する方法は、レール継目の疲労に基づく基準で、50Nレールの普通継目の場合で4億通トンが目安

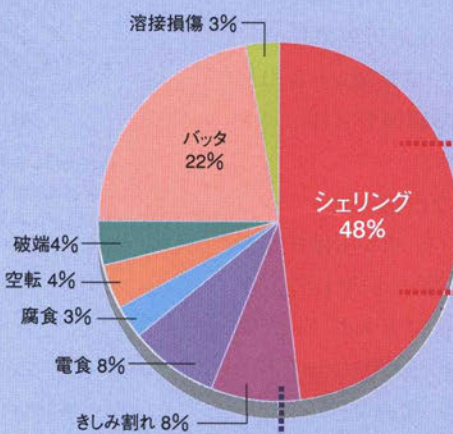
### ■レール交換の要因別比較



\*「分岐器付帯」とは、新品レールと既設レールの断面の連続性を維持するために、交換基準に達していないが交換されたもの。

出典：JR EAST Technical Review No.17

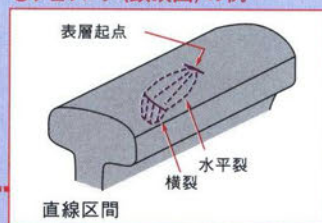
### ■レール損傷の種類



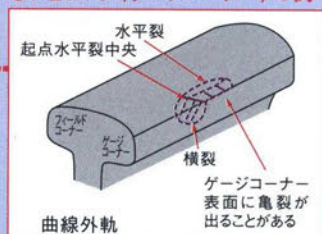
\*「バッタ」とは、レール頭頂面の塑性変形。はく離を生じることある。

最大の損傷原因であるシェリングは、頭頂面とゲージコーナで発生する。頭頂面シェリングが直線区間で発生することに対し、ゲージコーナシェリングやきしみ割れは曲線区間の外軌側で発生する。曲線区間では摩耗防止のため、鉄道レールに塗油する場合もある。

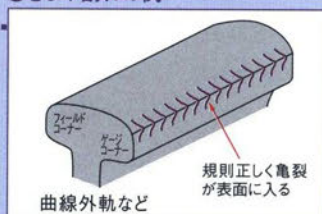
#### ●シェリング（頭頂面）の例



#### ●シェリング（ゲージコーナ）の例



#### ●きしみ割れの例



出典：JR EAST Technical Review No.17



として、国鉄末期に定められている。これを東京の山手線に適用すると、耐用期間は約20年に相当する。かつてはベテランの検査員の徒歩巡回によって損傷を検査していたが、現在は、様々な保守車両が導入されている。例えば、「ドクターイエロー」と呼ばれる新幹線総合試験車は、営業列車と同じ速度で走行しながら、線路、架線、信号などの検査を行うことが可能である。

鉄道レールを交換する要因にはいくつかのタイプがある。JR東日本研究開発センターの調査によれば、最も大きな要因は、鉄道レールの運用中の「損傷」である。これに加え、レールの継目や溶接部などに繰り返し荷重がかけられることによる「疲労」、車輪との接触による「摩耗」によって、鉄道レールの交換要因の約80%が占められている。その他にも、鉄道レールの腐食・電食などが存在する。

#### ■レール削正の実例



（写真提供：東日本旅客鉄道（株））

#### ■ベイナイト鋼とパーライト鋼の成分例の比較

ベイナイト鋼には、Mo、Nbなどが添加されている。また、パーライト鋼と比較してC量が減少している。

|        | C                 | Si                | Mn                | Cr                | Mo                | Nb                | V                 |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ベイナイト鋼 | 0.20<br>～<br>0.55 | 0.16<br>～<br>0.45 | 0.40<br>～<br>2.10 | 0.00<br>～<br>2.00 | 0.00<br>～<br>2.00 | 0.00<br>～<br>0.15 | 0.00<br>～<br>0.10 |
| パーライト鋼 | 0.63<br>～<br>0.75 | 0.15<br>～<br>0.30 | 0.70<br>～<br>1.10 | —                 | —                 | —                 | —                 |

このうち最大の交換要因である「損傷」のうちでは、「シェリング」が大部分を占めることが分かる。シェリング (shelling) とは、転動接触疲労の1つであり、疲労き裂の成長過程を示す破面の模様が貝殻様であったことから名付けられた日本独自の名称である。車輪とレールの接触面の応力状態と材料特性によって、微小き裂の発生・成長と、レールの摩耗が同時に進行することがシェリングの特徴である。

### 古くて新しい課題「シェリング」

現在のレール損傷の最大の要因である「シェリング」は、古くは蒸気機関車の時代から問題になっていた現象である。しかし、機関車の電化や、新しいレールの導入などがシェリング問題の間接的な解決方法になり、これまで原因究明や根本的な対策がなされていなかった。鉄道レールの品質の向上によるレール内部欠陥の減少や、近年の鉄道輸送量の増大や重量化、高速化が進んだ現在、解決すべき課題として注目が集まっている。

シェリングは、車輪とレールの表面粗さ突起部同士の厳しい接触によるダメージ（疲労）層を起点として微小き裂が発生・進展する場合と、車輪のすべりを伴うブレーキ力等による摩擦熱で表層に形成される白色層（マルテンサイト）を起点として微小き裂が発生・進展する場合があると考えられている。そのため、疲労部分あるいは微小き裂を削り取る「削正（または研削）」によって、レールの寿命の延伸が可能になる。これまでの知見では、新幹線ではシェリングを予防するために、5000万通トンで0.1mm程度を目安にレールの頭頂部を削正することが効果的であることがわかっている。

また、シェリングによる破損を抑制するために、材料側からのアプローチとして「ベイナイトレール」が挙げられる。ベイナイトレールは、普通レールと同程度の引張強度を有し、直線走行時の車輪との接触条件において適度に摩耗して、き裂の起点となる疲労層の成長を抑制し、シェリングの発生を抑制しようとするものである。また、ベイナイトレールでは、炭素鋼にMoやNbなどを添加することにより、白色層の生成を抑制すると同時に、生成した白色層の摩耗を促進させている。これまでの実証実験などでその効果が確認されており、今後の敷設延長の拡大が期待される。

### 「高強度化」へのアプローチ

鉄道レールの耐摩耗性、耐損傷性を向上させるため、様々な高強度化の手法が開発されてきた。パーライトである鉄道レールは、



### 過共析による耐摩耗性の向上 過共析鋼レール

過共析鋼は、転がり接触の繰返し数が10万回程度を超えると、その表層硬さが増加する特徴を持っている。

過共析鋼では、セメント密度が高くなると転がり表層の加工硬化量がある転がり回数以上で大きくなる。それに伴い転がり摩耗量が減少し、パーライトラメラ中のセメント密度が大きいほど耐摩耗性が向上する。加工硬化量が大きくなる理由としては、転がり表層で、車輪との転がり接触による大きな塑性変形によりパーライトラメラ中のフェライトの転位強化が生じることに加え、フェライトの超微細化及びセメントの分解によるフェライトの炭素固溶強化などが生じること、セメント密度の増加によりそれらの効果が大きくなることが挙げられる。

出典:「重荷重鉄道用耐摩耗・耐損傷レール (HEレール) の開発」、上田ら、新日鉄技報、375、pp150-155、2001

### 微細組織化による耐摩耗性の向上 微細組織パーライトレール

熱処理レールのラメラ間隔は約 $0.1\mu\text{m}$ であり、工業的に得られる限界値に近いと言われている。微細組織パーライト鋼では、従来、着目されていなかったコロニーサイズの微細化により、耐摩耗性の向上を実現している。

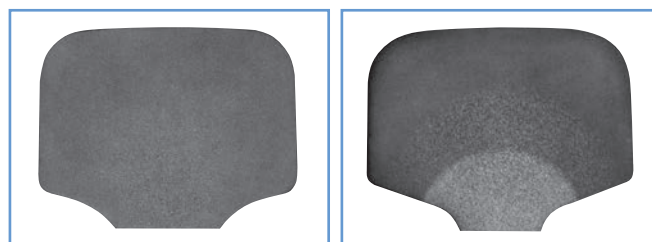
熱処理レールでは、クラックがコロニー境界に沿って発生・伝播することが知られている。ラメラ組織では、ラメラの方向によって塑性変形挙動が異なるため、コロニー境界に応力集中が生じる原因となる。これに対して、微細組織パーライト鋼では、微細化されたコロニーが応力集中を妨げているものと推測される。

出典:「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)」横山ら、NKK技報、176、pp59-64、2002

熱処理によりその組織を微細化することで高強度化を実現できる。1970年代には、オフラインで加熱・加速冷却を行うオフライン型熱処理レールが開発され、実用化された。さらに、1980年代後半には熱間圧延後のレールを加速冷却するオンライン型の熱処理レールが開発され、実用化されている。

オンライン型熱処理レールは、オフライン型熱処理レールと比較して、短納期化が図れるばかりではなく、レール頭頂面からより深い部分まで高硬度化できるという特長がある。現在、我が国で製造されている熱処理レールは、全てオンライン型熱処理レールである。

また、熱処理をオンライン化することにより、制御圧延と加速冷却を組み合わせた熱加工制御 (TMCP) を、レール鋼にも適用することが可能になった。レール鋼の組織制御により熱処理レールのいっそうの高性能化が可能になっている。例えば、C量を従来の上限の0.85%から0.9%に増加させ、引張強さを1420MPaの高強度としつつ、TMCPの適用により十分な伸びを確保した、耐摩耗性・耐損傷性に優れた「過共析鋼レール」や、マイクロアロイとTMCPの適用により、パーライト組織単位を微細化して、耐摩耗性、耐損傷



オンライン熱処理レール (左) とオフライン熱処理レール (右) の断面。オンライン熱処理レールの頭部は均一なマクロ組織を形成している。(写真提供: JFEスチール (株))

性を向上させた「微細組織パーライトレール」が開発されている。

これらの高強度化レールは、すでに海外でマイル・トレインのレールとして採用され、高く評価されている。マイル・トレインとは、鉱物や穀物などを輸送する100両以上の車両を連結した長大編成列車のことで、満載時の貨車重量は100 tを超える場合も少なくない。これは我が国の旅客鉄道の車両重量の2倍以上の重量に相当する。

このように、最近の鉄道レールの技術開発は、上記のマイル・トレイン (長大編成列車) に代表される貨物鉄道の重荷重化への対応と、新幹線などの旅客鉄道の「高速化」へのニーズに応える形で行われてきた。さらに近年、世界的に環境問題への関心が高まっており、自動車や航空機と比較してCO<sub>2</sub>排出量の少ない鉄道に注目が集まっている。ヨーロッパでは、EU内の国際旅客鉄道の運行を2010年に自由化する計画である。また、中国やアジアでは鉄道や新幹線の計画・建設が進められている。世界的な「モーダルシフト」の潮流は、鉄道レールに対して、よりいっそうの高性能化、高精度化を求めている。摩耗・損傷の生じない、メンテナンスフリーの「究極のレール」を目指して、今後の研究の深化が期待されるところである。

- 取材協力 (財) 鉄道総合技術研究所、東日本旅客鉄道 (株)、新日本製鐵 (株)、JFEスチール (株)
- 文 杉山 香里