

### 第20回

# レールシェリング対策

## はじめに

レールは、車両を支え安全かつ滑らかに案内するもので、鉄道における最も重要な設備の一つです。このレールには、車輪からの鉛直方向の輪重や曲線走行時の左右方向の横圧、加速・減速時の前後方向の駆動力やブレーキ力、さらにはロングレールにおける温度に依存する軸力などが作用します。そのような作用力により、レールは摩耗し、疲労するため、走行安全性や乗り心地の面から、十分な保安度が求められます。また、効率よく経済的に保守管理することが常に重要な課題となっています。

このレールの「摩耗」と「疲労」という現象は、これまで長く研究されてきているものの、いまだ未解明な点が多く残されています。本稿では、レールに発生する疲労損傷のうち代表的な転がり接触疲労損傷の一つであるレールシェリング（以下、「シェリング」と略称する）に関して、この問題のこれまでの経緯と取り組まれてきた保守対策について解説します。

レール頭頂面の中心付近にき裂の起点がある典型的なシェリングの例を図1に示します。このシェリングという名称は、き裂の成長によりき裂面に形成される疲労破面が貝殻（シェル）状に見えることに由来します。



図1 レールシェリング

## これまでの経緯

このシェリングと呼ばれる転がり接触疲労損傷は、古くは1952年頃の国鉄山陽本線の曲線外軌においてきしみ割れと併発する疲労き裂が発生し、外観上そのき裂周りが黒ずむため当時は黒裂と呼ばれ、その現象解明に向けた研究が進められました<sup>1)</sup>。なお、この黒裂は、主に曲線外軌に発生しましたが、直線にも外観上同様な損傷が発生していました。曲線と直線に発生した当時の黒裂を図2と図3に示します。

参考までに、我が国において普通レールと熱処理レールに発生しているきしみ割れの例を図4と図5に示します。きしみ割れは、曲線の外側レールのゲージコーナーで見られることが多く、このき裂の一部から頭頂面に生じるシェリングに進展する場合、これをゲージコーナーき裂と呼ぶ場合があります。ゲージコーナーき裂の例を図6に示します。一方、頭頂面の中心近くをき裂の起点とするものを頭頂面シェリングと呼びます。

上述のように、当時は黒裂が大きな問題になりましたが、曲線レールの摩耗抑制のために行われていた蒸気機関車からの散水が、電化によりなくなったことによりその発生が減少したため、十分な原因究明に至る前に、問題が鎮静化しました。



図2 黒裂(曲線)

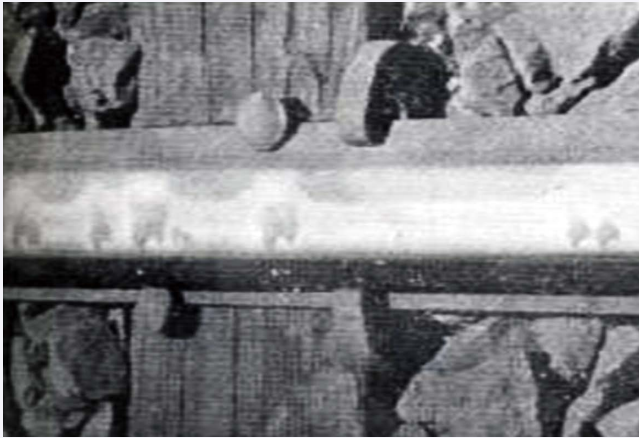


図3 黒裂(直線)

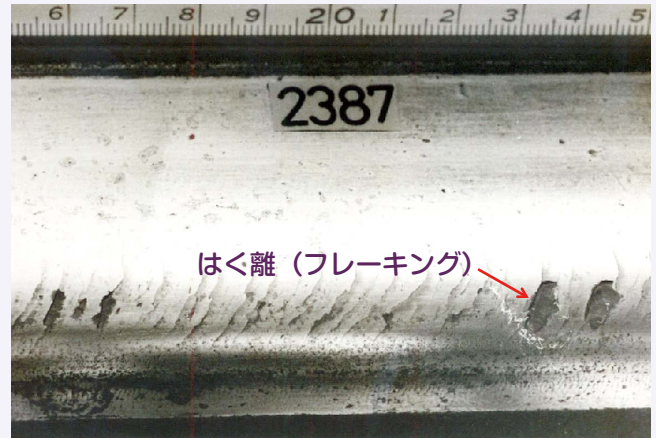


図4 きしみ割れ(普通レール)



図5 きしみ割れ(熱処理レール)

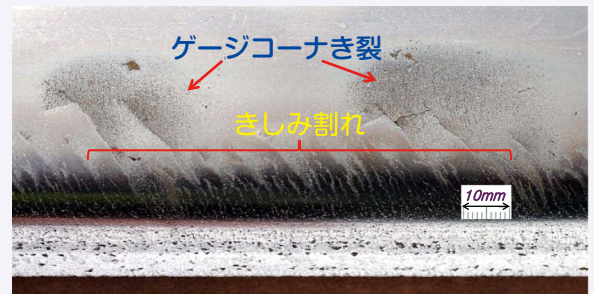


図6 ゲージコーナき裂ときしみ割れ

その後、1964年10月に開業した東海道新幹線においては、主として溶接部(50kgTレールのテルミット溶接)を中心にレール損傷が発生しましたが、1973年頃から溶接部以外のレール中間部において頭頂面シェリングの発生が顕著になりました。ただし、このシェリングの問題も、1977年頃から始まった軌道保守量を低減するための50kgTレールから60kgレール(新たに設計された曲げ剛性が大きく、重量化されたレール)への計画的な交換により、レール溶接部および中間部とも損傷部分が交換され、見かけ上問題が消滅しました。しかし、1972年10月に開業した山陽新幹線大阪・岡山間でも累積通過トン数が1.5億トンを超える頃から、頭頂面シェリングが発生し始め、2億トンを超える1982年頃からその増加傾向が顕著になりました<sup>2)</sup>。

一方、海外の鉄道においてもシェリング(英国で言うスクワット)は古くからの問題であり、その発生機構の解明についても長年取り組まれてきました。欧州では1997年～2000年にかけて、ICON(Integrated study of rolling

CONtact fatigue)という転がり接触疲労の統括的な研究プロジェクトが実施されました。ICONは、欧州連合(EU)のプロジェクトとして、かつて国際鉄道連合(UIC)に属して現在では解散している欧州鉄道研究所(European Rail Research Institute:通称ERRI)がプロジェクトリーダーを務め、欧州の鉄道関連の主要な6大学が参加して実施されました。

その後2000年10月に英国・ハットフィールドにおいて、レールの転がり接触疲労損傷によるレール折損が原因で脱線事故<sup>3),4)</sup>が起きました。そして、改めて転がり接触疲労の問題が大きく取り上げられました。事故後の2006年～2009年にかけて、当事者である英国を中心に、EUプロジェクトINNOTRACK(INNOvative TRACK systems)が実施されました。UICを幹事に11カ国から産官学合計36の組織が参加してきしみ割れやゲージコーナ部のき裂の発生機構と対策も含めた幅広い研究が実施され、興味深い成果が得られています<sup>5)</sup>。シェリング発生の実情に関する鉄道事

業者からの詳しい報告はあまり目にすることはありませんが、保守担当者らとの議論の中で、TGVやICEといった高速鉄道の開業による輸送量の増大とともに、我が国の新幹線同様に、シェリングは大きな問題になっているようです。

### シェリング発生機構

シェリングの発生機構については、いまだ未解明な点が残されていますが、ある部分の塑性変形が材料の破壊限度を超えてき裂が発生し、そのき裂が応力の繰返しにより進展する疲労損傷であると考えられます。

ところで、車輪とレールの接触圧力は極めて大きく、平滑面を仮定するヘルツ理論においても輪重と横圧が作用する場合、接触部とその周りの部分には塑性変形が生じることが考えられます。しかし、仮に塑性変形が生じても、それが進まなければ直ちに破壊に至ることはありません。ジョンソンはこれを検討するために、シェイクダウン理論を車輪とレールの接触到適用しました<sup>6)</sup>。

このシェイクダウン理論を簡単に説明します。材料が繰り返し転がり荷重を受ける場合、現在作用している荷重による応力とすでに生じている残留応力の合応力が弾性限度を超えない範囲に収まる場合、塑性変形が進まないと考えられます。この状態を(弾性)シェイクダウンと呼び、この状態を考慮することで、合理的な設計が可能な場合があります。

さらに、実際の車輪とレールもその接触面は平滑ではなく粗さ(微小突起)を有しています。そのためその粗さ突起部の接触によっては、接触面近傍でサイズは小さいもの

の大きなダメージを受けると考えられます。そのため、き裂の発生は車輪とレールの接触面におけるサブミクロンオーダーの表面粗さや分子間力まで十分に考慮したき裂発生モデルで検討するのが理想ですが、そのモデル化は容易ではありません。そこで、2次元ではあるものの平滑面同士とした場合とミクロンオーダーの表面粗さを考慮した場合について弾性理論を用いて解析を行なっています。フォン・ミーゼス応力で表現したレール表面下の応力状態を図7に示します<sup>7)</sup>。この値がせん断降伏応力を超えると降伏します(レール鋼の場合250MPa程度)。図7(b)より、粗さを考慮する場合、接触部の表面および表面下近傍が大きなダメージ(塑性変形)を受けることが理解できます。

### シェリング対策

シェリング対策については、1975年頃から図8に示すようなレール表層のダメージを削正により除去し、シェリングの発生を予防する試みが行われてきました。特に、1980年から5年間程度続けられた東海道新幹線米原地区における削正試験の結果、結晶学的にみて特定のすべり面の方向が揃う(塑性変形に対応する)ことが明らかにされるなどの研究成果が得られ<sup>8)</sup>、これを基に、いつ、どの程度削正するのが効果的であるのかが実験的に求められました。その予防削正の効果を図9に示します<sup>9)</sup>。この図は、削正周期を通過トン数0.5億トンとした場合、例えば削正深さを約0.1mmとすれば、平均的(破壊確率50%)には累積通過トン数で8億トンを超えるまでシェリングの発生を抑制できることを示します。

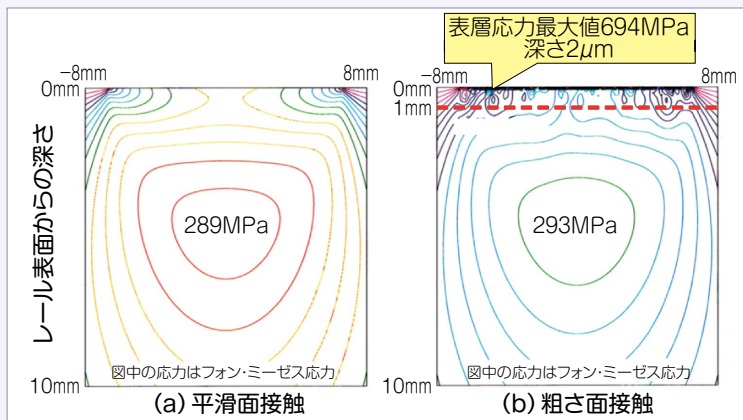


図7 車輪/レール接触応力(フォン・ミーゼス応力)における表面粗さの影響

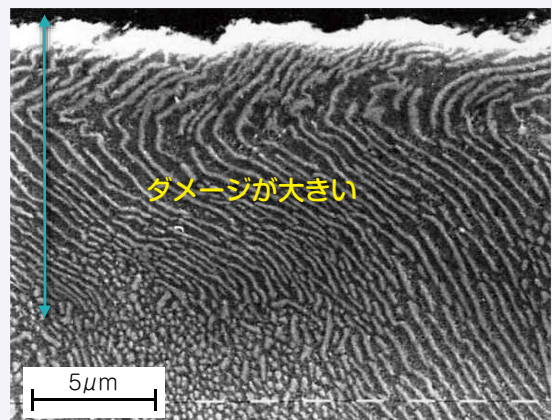


図8 レール表層の塑性変形

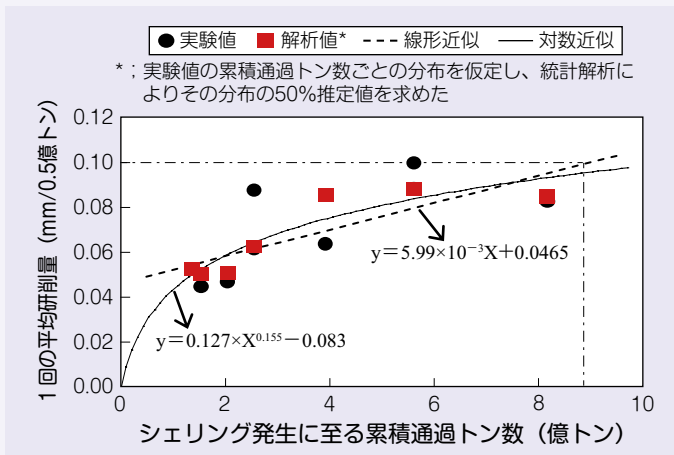


図9 予防削正によるシエリング発生抑制効果

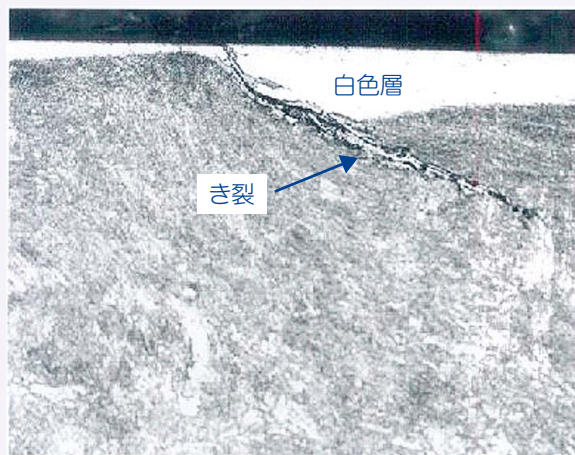


図10 白色層を起点とするき裂

一方、レール頭頂面には、車輪の空転・滑走などに伴う車輪／レール間の大きなすべりにより摩擦熱が発生します。この摩擦熱の作用に起因してレール表層に図10に示す白色層と呼ばれる熱変態組織（マルテンサイト）が形成され、その白色層を起点とするき裂によりレールが折損する場合があります<sup>10)</sup>。白色層の厚さは、我が国においては厚く形成されても0.05～0.1mm程度です。

このき裂は、その発生に関しては通常の転がり接触疲労と異なると考えられるものの、その成長に関しては車輪からの転動荷重の繰り返しによることから、我が国ではシエリングに分類しています。ただし、この白色層とき裂発生の関係は、まだ十分に定量的な知見が得られていないため、現在、白色層とそれを含むレール表層の残留応力、塑性流動およびき裂の発生状況との関係を明らかにすることなどが課題となっています。しかしながら、差し当たり、シエリングの予防削正の基本である通過トン数0.5億トンで0.1mmの削正で、白色層が起因となるシエリングの発生もある程度予防でき、き裂の成長の抑制も期待できるという知見が得られています<sup>11)</sup>。したがって、シエリングの予防削正が実施可能な線区は白色層起因のシエリングも概ね予防可能と考えられますが、予防削正が実施されない線区では、白色層を検知して必要に応じて削正作業により白色層を除去することが重要です。また、この白色層の検知を必要とする線区では、確実にかつ効率よく、さらに安価な検知システムが望まれます。

一方、摩耗により転がり接触疲労を防ぐというコンセプト

トに基づき、従来のパーライト鋼組織ではなくベイナイト鋼組織のレールが開発され、現地敷設試験を経て本格投入に向けて検討が進められています<sup>12)</sup>。

(石田誠／前 鉄道力学研究部)

## 文献

- 1) 中村林二郎, 大和久重雄, 榎本信助: レール黒裂に関する総合報告書, 鉄道技術研究報告, No.379, 1963
- 2) T102グループ研究班: レール・シエリング対策—グループ研究班T102昭和60年度研究報告書一, 鉄道技術研究所速報, A-87-81, 1987
- 3) Smith R.A.: Rolling Contact Fatigue of Rail: Suggestions for Future Work, Imperial College, London, Report for Railway Safety April, 2002
- 4) 平川賢爾: 英国高速鉄道ハットフィールド脱線の真相, 慧文社, 2008
- 5) www.innotrack.eu
- 6) Johnson, K. L.: Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985
- 7) 石田誠, 陳樟, Franklin, F.: 粗さ接触から見たシエリング予防削正効果, 日本鉄道施設協会誌, 38-2, pp.49-52, 2000
- 8) 井上靖男: シエリング発生機構の解明, 日本鉄道協会誌, pp.430-433, 1994
- 9) Ishida, M., Abe, N. and Moto, T.: The effect of preventive grinding on rail surface shellings, Quarterly Report of RTRI, 39-3, pp.136-141, 1998
- 10) 金鷹, 石田誠: レール表面に生じる白色層の実態分析, 鉄道総研報告19-9, pp.17-22, 2005
- 11) 辻江正裕, 松田博之, 中村崇, 名村明, 金鷹, 森久史: 白色層に起因するレール微小き裂の進展挙動と削正法の検討, 鉄道総研報告23-10, pp.53-58, 2009
- 12) 佐藤幸雄, 辰己光正, 上田正治, 三田尾眞司: ベイナイトレール長期耐久試験による耐シエリング性の評価, 鉄道総研報告22-4, pp.29-34, 2008