

車輪との接触でレールに発生する力と熱の影響

辻江 正裕
鉄道力学研究部
(軌道力学 研究員)

森 久史
材料技術研究部
(主任研究員)

松田 博之
前 鉄道力学研究部
(軌道力学 研究員)



つじえ まさひろ



もり ひさし



まつだ ひろゆき

はじめに

鉄道車両は、車輪が転がりながらレールを蹴って前へ進もうとする力で走行します。そこでレールと車輪との接触が重要になります。車輪がレールと接触する面積は親指の爪程度と小さいことが知られており、このような小さな接触面積で車両重量を支えていますので、接触部には高い面圧が作用することになります。また車輪がレールを蹴った際にレール上に作用する力は、雨や潤滑油などの影響を強く受け、雨や油などが接触部に存在すると、車輪がレール上を滑るようになります。このように、厳しい荷重状況や環境などの多くの要因が影響することによって、レールと車輪の間には複雑な現象が生じます。その一つとして、高い荷重条件やすべりとの相互作用によって、レールの車輪と接触する面（以下、「レール頭頂面」とします）の表層部に生成する白色層が挙げられます。この白色層は材料組織が変化したものであり、微小き裂の発生源にもなると考えられるため、その発生要因や対策法などについて検討を進めています。本稿では、レールと車輪との接触によって、レール頭頂面の表層に生成する白色層を取り上げて、白色層の調査に関する取り組みについて紹介いたします。



図1 レールに発生した白色層の外観

レール表層に見られる白色層

レールの表層面にナイトール溶液（硝酸とアルコールを混合した溶液）を塗布することによって、白色層を可視化することができます。図1は、参考のためにレール頭頂面の右半分にナイトール溶液を塗布した時の、表面の状態を示します。図1に示すように、塗布した部分の一部に、白く色の变化した箇所が見られます。この白化した部分が、白色層と呼ばれる部分です。この白色層の部分の硬さを調べると平均硬さは900Hv（Hvはビッカース硬さを表します）です。一方、通常のレールの硬さは約275Hvです。このように白色層の特徴として、硬さが著しく増加していることが挙げられます。このような白色層は、車輪との接触部全体に太く存在するものや、まだらに存在するものが確認され、またレール上に数メートルから数キロメートルの長さで存在していることがわかりました。一般的に白色層は、強い摩擦を生じる工具類あるいは部品などに発生することが確認されており、例えば研削や切削工具、ブレーキ材料などにも見られています。したがってレールと車輪の接触する面においても、強い接触力とすべりの摩擦が生じた場合には、レールや車輪の表面に白色層が発生することが考えられます。

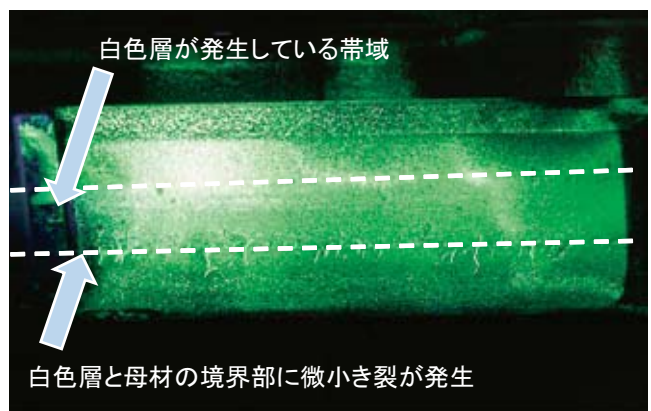


図2 白色層と微小き裂の発生例

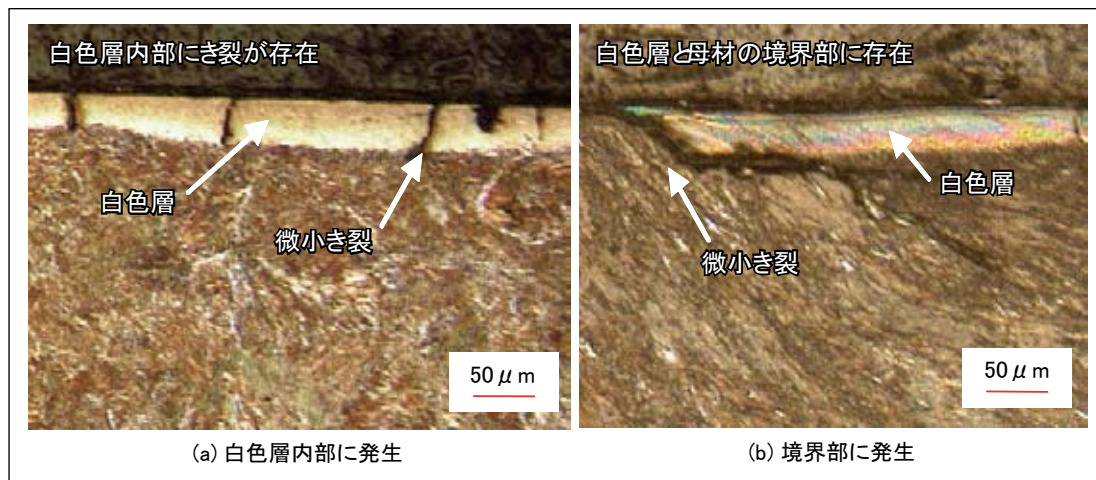


図3 白色層付近のき裂の形態

白色層と微小き裂の関係

レールの損傷形態の一つとして、シェリングと呼ばれる損傷があります。このシェリングは、微小き裂の発生とその進展で生じることがわかっています。そこでシェリング発生の原因となる、微小き裂と白色層との関係について考えました。図1と同様の方法により白色層の生成を確認したレールの頭頂面で、磁粉探傷を行った結果を図2に示します。白色層と白色層が発生していない通常のレール材（以下、「母材」とします）との境界部には、無数の微小き裂が発生していることが確認されました。このことから、白色層の発生に伴う微小き裂が、シェリングの起点となりうる可能性が考えられます。

白色層が認められたレールを、横断面から顕微鏡を用いて観察した結果を図3に示します。このように白色層の発生に伴う微小き裂は、白色層内部に発生するものと、白色層と母材との境界部に発生するものの、主に2つの形態に大別できることがわかりました。白色層内部に発生する微小き裂は、白色層内部にとどまって深部まで進展しない傾向にあります。境界部に発生するき裂は、深部まで進展する可能性があります。

次に、白色層厚さと微小き裂深さの関係を図4に示します。白色層内部に発生する微小き裂は白色層内部にとどまるため、白色層の寸法に依存し、白色層が厚いほどき裂深

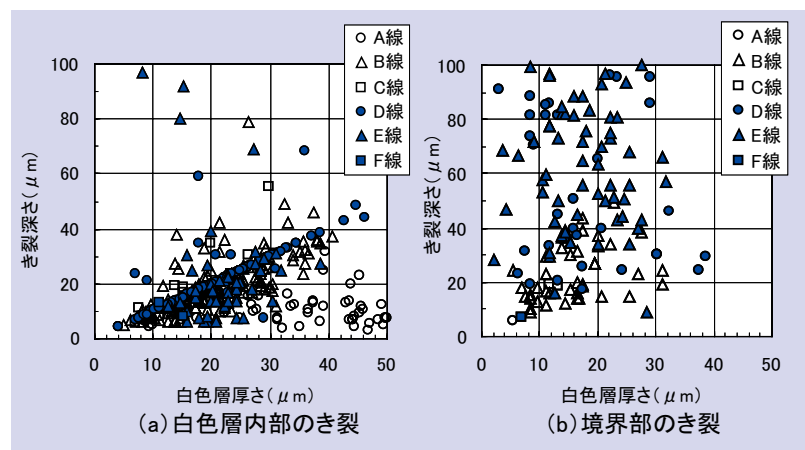


図4 白色層厚さとき裂深さの関係

さも深い傾向にあります。これに対して境界部に発生した微小き裂は、白色層厚さと微小き裂深さに相関が見られません。これは白色層と母材の延性（引き伸ばされる性質）の違いにより境界部にせん断力（ずれを生じさせる力）が働きやすいため、また白色層自体が体積膨張し母材との境界で引張の力が発生することにより、微小き裂が発生しやすいためであると考えられます。そして、その後の車輪通過による繰返し荷重を受けて進展しやすくなり、疲労による破壊が生じると考えられます。以上のことから、白色層と微小き裂との関係では、白色層内部に発生した微小き裂はそこにとどまるために進展は抑制されますが、境界部に発生する微小き裂は進展する可能性が高くなります。

白色層の発生メカニズムの解明

白色層はレール表層および表層の近くに発生するのが特徴です。図5にレール断面における基本的な母材の金属組織と白色層部分の金属組織を示します。レールは本来、図5に示すような層状の形態をした材料組織の状態にあります。しかし白色層の内部を観察すると、白色層内の材料組織は単一の材料組織へと変化し、層状の材料組織から変化していることがわかります。もう一つの材料組織の違いの特徴は、結晶の大きさを表す結晶粒径にあります。レール本来の材料組織から観察した結晶粒の大きさが約 $100\mu\text{m}$ であったのに対して、白色層部分の結晶粒径は約 $10\mu\text{m}$ 以下へと微細化しています。これらのことから、白色層はレール表層部が摩擦を受けて、材料組織が変化したこと（以下、「相変化」とします）によって発生したと考えられます。白色層化する原因となる摩擦挙動では、摩擦によるエネルギーの大半は摩擦熱として放出され、残りが微小な変形（以下、「ひずみ」とします）や結晶レベルの微小な欠陥として材料中に残るようになります。レール鋼のような鉄鋼材料では、ひずみや微小な欠陥を含む材料組織に熱を与えると、相変化あるいは結晶粒径の微細化が生じることが知られています。

実際のレール上では、繰り返しの列車通過により大きな力がレールに加わることで、レール表面にはひずみが生じ、さらに空転や滑走のように車輪とレールの間に大きなすべりが起こると熱が発生するため、レール表面に熱やひずみがもたらされ、それらによって白色層が発生すると考えられます。

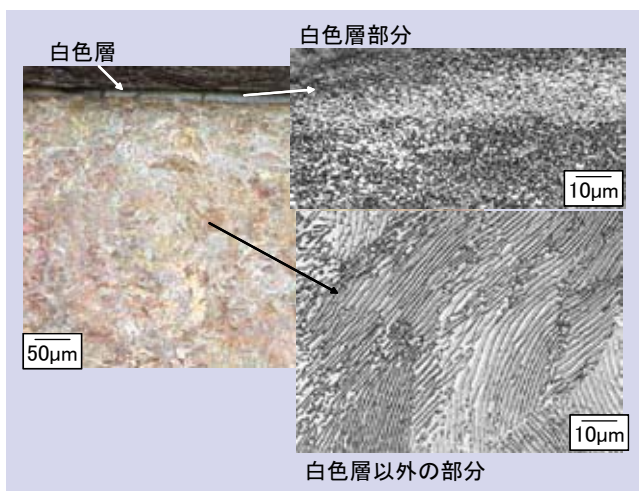


図5 白色層と通常のレールの金属組織

白色層の再現試験

前節より、白色層の発生要因として、レールと車輪の接触による摩擦熱とひずみが挙げられます。そこで、摩擦熱とひずみによって白色層が発生するかどうかを検証するために、小型試験片を用いて白色層の再現試験を行いました。空転、滑走、純転がり接触では、それぞれレール表面にもたらされる熱およびひずみ量が異なることがわかっています。そこで図6のとおり、最も摩擦の発熱の大きい空転、発熱量の低い純転がり接触、その中間の滑走を模擬した条件の下で表1の試験条件を設定し、図7に示す2円筒転がり接触疲労試験機を用いて試験を行いました。空転や滑走は、表1に示した試験方法で説明しますと、片方の試験輪を固定し、もう一方のみを回転させています。また純転がり接触では表面に油を塗布して油潤滑することで接触部の摩擦と発熱を抑制し、試験輪の表面にひずみのみを与えるように工夫しています。そのため純転がり接触は、高いひずみが加わった状態にあります（以下、「強加工」として説明します）。試験後の材料組織を、試験片の断面から観察した結果を図8に示します。図8の(a)は空転、(b)は滑走、(c)は強加工状態で試験を行った後に観察した結果を示します。いずれの条件においても、接触面に白色層が形成されていることが確認できます。また白色層近傍の金属組織は、流れるように塑性変形していることが確認できます。このことから、白色層は強いひずみと熱で発生し、またそれが表層に限られることが分かりました。その他の特徴として、滑走を模擬した試験片では、白色層の近くに微小き裂の発生が見られます。一方、強加工のみでは白色層

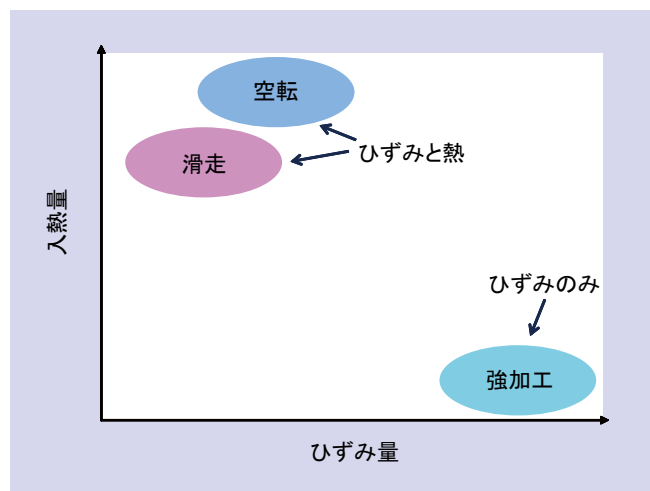


図6 再現試験におけるひずみ量と熱量のイメージ

表1 白色層再現試験の条件

	接触圧 (Mpa)	すべり率 (%)	回転回数
空転	760	100 (レール輪固定)	100
滑走	760	100 (車輪固定)	100
強加工	1500	0	300万

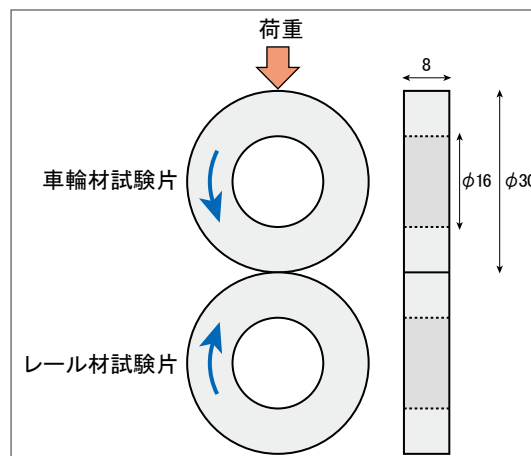


図7 二元筒転がり接触疲労試験機

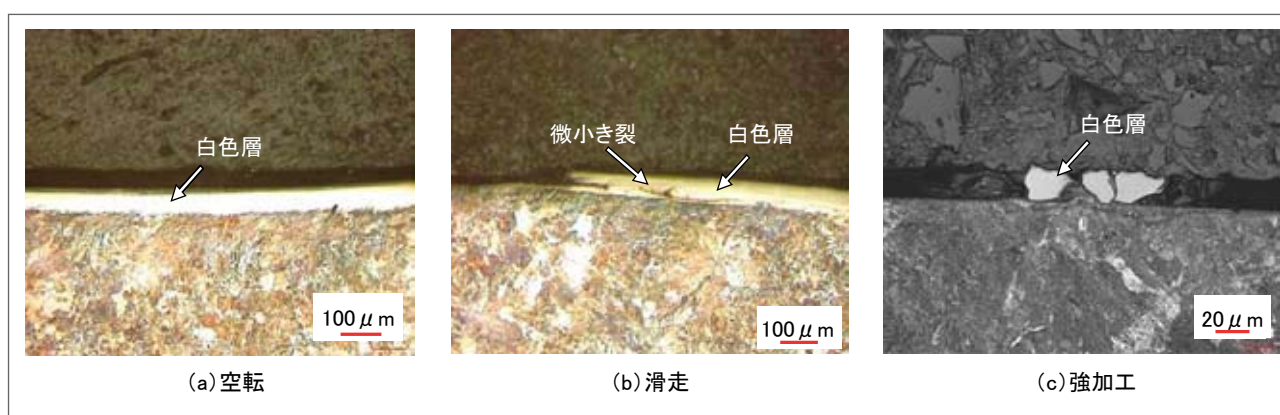


図8 白色層再現試験結果

が不連続的にしか発生しておらず、発生した白色層の厚さも他の条件のものに比べて薄いことがわかります。

今回の実験条件は、空転や滑走においては完全すべりを模擬し、また強加工においては実車輪／レールの2倍に近い大きな面圧を負荷しているため、通常のレール／車輪転がり接触状態よりも厳しい状況を再現していることとなります。したがって、1列車がレール上を通過することで今回のように白色層が発生する可能性は低いですが、繰り返しの列車通過に起因して、特に空転あるいは滑走が生じた箇所において、レール表層に白色層が発生することが考えられます。

おわりに

本稿では、レールと車輪の間に発生する現象として、レール白色層を取り上げ、白色層の調査に関する取り組みについて紹介しました。繰り返しの列車通過により大きな力がレールに加わると、レール表面にひずみが生じます。また、空転や滑走などのような、車輪とレールとの間に大きな摩

擦が生じることで、熱が発生します。このことからレール表面にひずみや熱がもたらされ、白色層は、それらが原因となって、材料組織が変質した箇所であると考えられます。白色層は、レールの表層および表層の近くに限られた材料組織の変質であり、硬さが著しく増加している特徴があります。また、白色層からは、繰り返しの荷重負荷によって、微小き裂を発生させる可能性もあることが分かりました。このような白色層の発生に対し、白色層自体が表層に限られ、また発生厚が薄いことから、白色層に対する適切な対処法として、レール表層を削り取る、レール削正が考えられます。また白色層が材料組織の変質として考えられることから、相変化に対して安定となるレールなどの適用も考えられます。今回は白色層に限って報告致しましたが、この白色層の発生は古くから指摘されているものの、レールと車輪との間に発生する未解決の現象の1つであると考えられます。今後も研究を深度化させていきたいと考えています。[RRR]