

ベイナイトレールにおける 白色層起因シェリングの予防削正周期

辻江 正裕* 兼松 義一** 松井 元英**
浦川 文寛* 名村 明***

Preventive Grinding Method for Rail Squats due to White Etching Layer on Bainitic Rail

Masahiro TSUJIE Yoshikazu KANEMATSU Motohide MATSUI
Fumihiko URAKAWA Akira NAMURA

With respect to a bainitic rail which has been developed as an anti-squats one, it has been found out that some rail squats are generated due to white etching layer (WEL). Grinding the rail surface is effective for the prevention of the occurrence of not only rail squats caused by rolling contact fatigue (RCF) but also those caused by WEL. Because the cost of the bainitic rail is higher than that of the normal grade rail, grinding the bainitic rail by the same method as that for the normal grade rail decreases the effect of the introduction of the bainitic rail. Therefore, we have to consider a new grinding method of the bainitic rail for preventing rail squats caused by WEL.

キーワード：ベイナイトレール，白色層，レール削正，シェリング，車輪・レール高速接触疲労試験装置

1. はじめに

レール頭頂面を起点として発生するシェリングは、軌道保守において非常に重要な問題である。これまで鉄道事業者においては、シェリングの発生を予防するための施策として、レール削正やベイナイトレール¹⁾の投入が行われている。

シェリングには、レール頭頂面において車輪との転がり接触による疲労層に起因するものと、車輪との接触熱がもたらす白色層に起因するものが挙げられる。これまでの研究において、普通レールに対して疲労層起因ならびに白色層起因のシェリング予防削正手法^{2) 3)}が構築されている。一方、ベイナイトレールは、普通レールよりも摩耗を促進させることで、頭頂面の表層における微小き裂や疲労層を自己除去し、シェリングの発生を抑制する効果を図って開発されたレールであり、これまでに疲労層起因シェリングに対して効果を発揮している。

しかし近年、ベイナイトレールにおいて、白色層を起因とするシェリングの発生が確認されている。レール削正は白色層起因シェリングの予防に対しても効果的であるが、普通レールよりも高価なベイナイトレールに対して、普通レールと同様の手法でレール削正を施行すると、ベイナイトレール投入に対する投資効果が薄くなる。そこで本研究では、ベイナイトレールに形成される白色層

の材料特性ならびに発生傾向を調査するとともに、ベイナイトレールにおける白色層起因シェリングを予防するための新たなレール削正基準について検討を行った。

2. 白色層の材料特性

ベイナイトレールにおける白色層の発生状況を調査するうえで、ベイナイトレール材における白色層の材料学的特徴を把握することが重要である。そこで本章では、ベイナイトレール材に白色層を人工的に形成し、その材料学的特徴について調査した。

2.1 白色層の形成

先行研究⁴⁾より、レール表層に白色層を形成する手法として、溶接加工などに用いられるYAGレーザを照射する方法が提案されている。同様の手法をベイナイトレール材に適用するため、ベイナイトレールより切り出した試験片にさまざまな条件（照射時間、出力）でレーザを照射し、白色層を形成した。形成した白色層について、断面観察を行い、その厚さについて調査した。形成された白色層厚さとレーザ出力の関係を図1に示す。また比較のために、普通レール材についても同様にレーザを照射した結果を併せて示す。なお図1に示す白色層は、いずれも50mm/secでレーザを移動させながら照射して形成したものである。

このように、照射するレーザの出力と形成される白色層の厚さの関係は、正の相関があることがわかった。し

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
** 材料技術研究部 摩擦材料研究室
*** 鉄道力学研究部

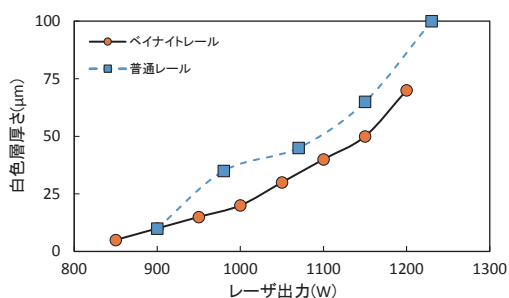


図1 レーザ出力と白色層厚さの関係

たがって照射するレーザーの出力を調整することにより、任意の厚さを有する白色層を形成できると考えられる。

また同じ熱量を加えた場合、ベイナイトレール材に形成される白色層厚さは、普通レール材に形成されるものに比べて、30%程度薄いことがわかる。これはベイナイトレール材の炭素含有量が普通レールに比べて低いため、マルテンサイト化に必要なオーステナイト域に達するまでの温度(γ変態点)が高いことに起因する⁵⁾と考えられる。営業線に敷設されているレールにおいても、車輪との転がりすべりによる摩擦熱が同程度加わった場合、ベイナイトレールに形成される白色層は、普通レールに形成されるものよりも薄くなると考えられる。

したがって、ベイナイトレールは普通レールに比べて白色層が発生しにくい傾向にあることから、白色層起因シェリングの発生を抑制できると考えられる。

2.2 白色層の硬さ

ベイナイトレール材に形成した白色層について、マイクロピッカース硬さ計により、断面方向の硬さ測定を実施した。なお測定の対象としたのは、その硬さを十分に計測することができるように、厚さが160μmの白色層である。レール頭頂面から深さ方向に断面の硬さを測定した結果を図2に示す。

図2からわかるように、ベイナイトレール材に形成された白色層の硬さは650～800HV0.1であり、ベイナ

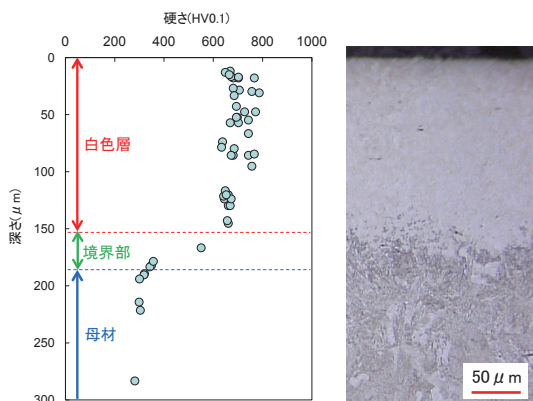


図2 マイクロピッカース硬さ測定結果

イトレール材の母材の値よりかなり高い値を示す結果となった。また、先行研究⁶⁾で示されるように、普通レール材に形成される白色層の硬さが900～1000HV0.1であることから、ベイナイトレール材に形成される白色層は、普通レールに形成されるものほど硬くないことがわかる。最表層の白色層については650HV0.1程度の値が測定され、他の白色層の領域と比べると若干低い結果となった。

一方、厚さが30μm程度の、白色層とベイナイトレール材との境界部においては、ベイナイトレール材と白色層が複雑に入り組んでおり、測定された硬さの値も300～600HV0.1と白色層自体の値よりも低く、幅広い値を示す結果となった。

2.3 白色層の厚さ

2.3.1 白色層厚さ推定手法の構築

営業線に敷設したレールにおいて発生した白色層の厚さを測定するためには、レール交換を行い、発生レールの断面を観察することが求められるが、多大なる労力や費用を要する。また観察できる試料の数も限定される。そこで非破壊により、ベイナイトレールに発生した白色層の厚さを推定する手法について検討した。

レール頭頂面において白色層の硬さを測定すると、形成された白色層の厚さが十分に厚い場合は白色層自体の値が測定される(図3(a))。一方、白色層の厚さが薄い場合、白色層直下にある柔らかいベイナイトレール材の影響を受け、測定される値は低くなると考えられる(図3(b))。そこで、様々な厚さの白色層の表面硬さを測定することにより、硬さ測定結果と白色層厚さの関係について調査した。なお測定に用いたのは、押し込み荷重が3NのUCI法硬さ測定器(以下、「硬さ測定器」とする)である。白色層表面における10回の硬さ測定結果と白色層厚さの関係を図4に示す。

このように白色層厚さが厚くなるにつれ、硬さ測定結果は高い値を示す結果となった。白色層厚さが40μmを超えると白色層自体の値が測定され、測定値は飽和する結果となった。一方、白色層厚さが10μm以下の場合、白色層直下のベイナイトレール材の影響を大きく受けて、ベイナイトレール材と同程度の値を示す結果となった。

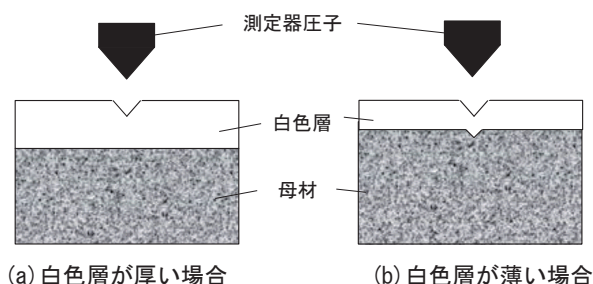


図3 白色層厚さ推定手法の概要

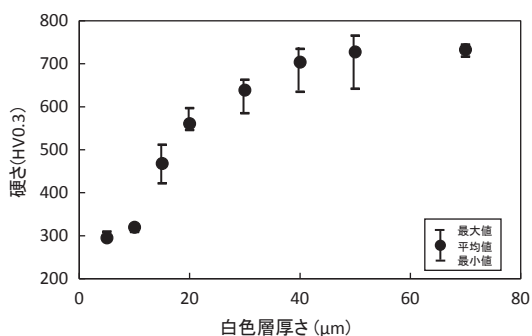


図4 硬さ測定結果と白色層厚さの関係

これらの結果より、白色層厚さが10～40μmの範囲であれば、白色層表面の硬さを測定することにより、白色層厚さを推定できると考えられる。

2.3.2 推定手法の妥当性検証

前節で記述した白色層厚さ推定手法の妥当性を検証するため、営業線に敷設していたベイナイトレール（以下、「分析レール」とする）を用いて、レール頭頂面硬さ測定、ならびに断面観察により白色層厚さを測定（長手方向に0.1mmごとに測定）した。硬さ測定結果を図5に、断面観察より測定した結果を図6に示す。なお硬さ測定は、白色層が発生していない箇所についても測定した。

図5より、白色層が発生している箇所における硬さ測定では、350～400HV0.3程度の値が測定された。白色層の未発生箇所に比べて、高い値が測定されていることがわかる。前節の推定手法より、分析レールにおいて発生した白色層の厚さは12μm程度であると推定される。

一方、断面観察により測定された白色層厚さは図6に

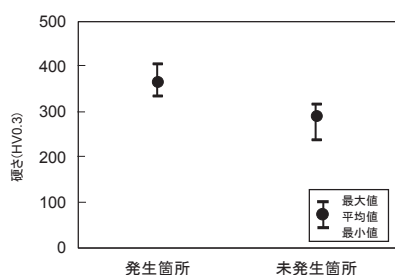


図5 レール頭頂面硬さ測定結果（分析レール）

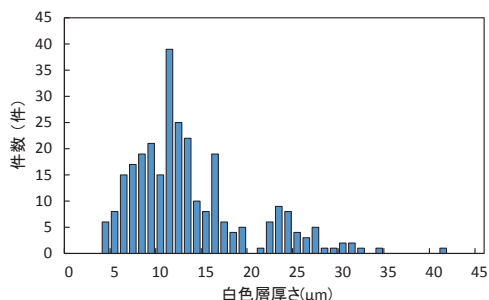


図6 白色層厚さ観察結果（分析レール）

示すような分布となっており、その平均値は13μmであった。以上のように、両手法による結果は同程度であることから、前節で提案した白色層厚さの推定手法は概ね妥当な結果であると言える。

3. ベイナイトレールにおける白色層発生状況

営業線に敷設しているベイナイトレールにおける白色層の発生状況を明らかにするために、現地調査を行った。現地調査は、年間通過トン数が約2700万トンで貨物列車も走行する在来線について、100mごとに測定点を設けて行った。なお、測定箇所の総計は98箇所であり、すべて直線区間である。

3.1 外観観察

ベイナイトレールにおける白色層の発生状況を可視化するため、レール頭頂面にナイトール（3%硝酸アルコール溶液）を塗布し、外観観察を行った。その結果、ベイナイトレールに発生した白色層は、図7に示すように、連続的に発生した形態と不連続に発生した形態があることを確認した。

本稿では、白色層の発生状況を図8に示すように、発生状況に応じて5段階に分類して整理した。そして、すべての調査箇所における発生状況を線形別にまとめた結果を図9に示す。なお勾配区間や駅構内は、車輪/レール間にすべりが生じやすい箇所として選定している。

図9に示すように、下り勾配区間や駅構内において、高い確率で白色層が発生していることがわかる。特に下り勾配区間においては、帯状の白色層が多く見られた。

なお今回調査した範囲内では、上り勾配区間において15年以上敷設しているレール（累積通過トン数：約450

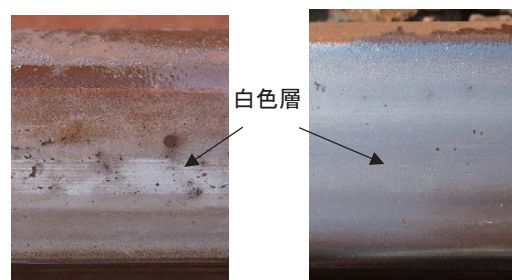


図7 白色層の外観

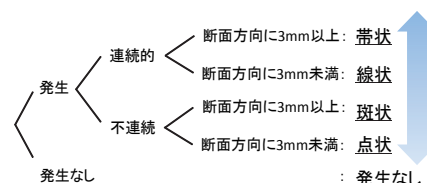


図8 白色層の分類方法

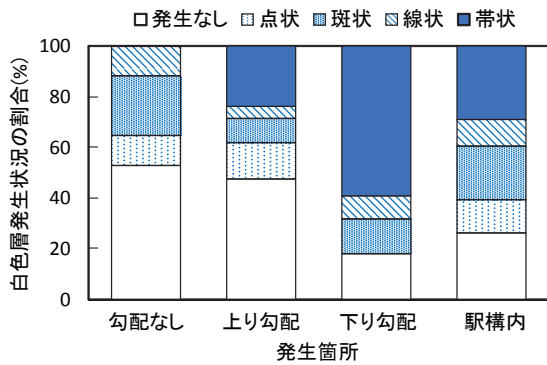


図9 白色層の発生状況

百万トン)に、複数箇所のシェリングの発生が確認できた。一方、下り勾配区間や駅構内に敷設したレールにおいてはシェリングの発生は確認されていないが、これらは敷設年数がまだ浅く、今後シェリングが発生する可能性も考えられる。

以上より、勾配区間や駅構内に敷設しているバイナイトレールについては、白色層の発生頻度が高く、今後、累積通過トン数が増加するにつれてシェリングの発生がより懸念されることから、これらの箇所について優先的に削正を行うことで、より効率的に白色層起因シェリングを予防できると考えられる。

3.2 白色層厚さの推定

2.3節で記載したように、レール頭頂面に発生した白色層表面の硬さを測定することにより、発生した白色層の厚さを推定することができる。そこで、すべての調査箇所において、レール頭頂面に発生した白色層の硬さ測定を実施し、それらの結果から白色層厚さを推定した。その結果を図10に示す。

図10より、現地調査した箇所において発生した白色層の厚さは、10～15 μm に多く分布する結果となった。またごく少数ではあるものの、厚さが約40 μm の白色層も推定された。なお、この推定結果の傾向は、前章の分析レールでの観察結果(図6)と同じである。

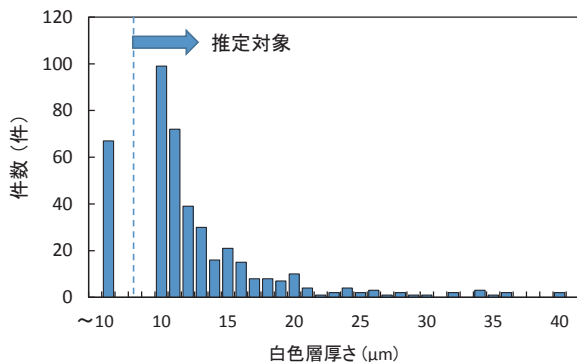


図10 白色層厚さ推定結果 (営業線レール)

これらの結果より、これまで普通レールで実施している深さ0.1mmの削正を施工することにより、白色層自体は除去できると言える。

4. 転動疲労試験

バイナイトレールにおける白色層起因シェリングに対する予防削正手法を提案するためには、実物大の車輪/レール接触を模擬した条件で、白色層を起点とした微小き裂の発生ならびに進展を再現し、それらをもとに検討する必要がある。そこで本章では、先行研究³⁾で行った普通レールにおける白色層起因シェリング予防削正手法の検討に基づき、大型試験装置による転動疲労試験を実施した。

4.1 試験概要

転動疲労試験は、車輪・レール高速接触疲労試験装置⁷⁾を用いて、バイナイトレール材から切り出したレール試験輪と車輪材より切り出した車輪試験輪(以下、それぞれ「レール輪」「車輪」とする)を組み合わせで行った。試験の概要を図11に示す。

本試験装置は、車輪ならびにレール輪を組み合わせる転動疲労試験を実施することができる。試験輪の直径は車輪が500mm、レール輪が350mmである。本試験装置の最大の特徴は、各試験輪がそれぞれ直結したモータにより独立して回転するため、試験輪の接触面において発生するすべりやトルクを制御できることである。

あらかじめレール輪の転動面にレーザを照射して白色層を形成した。前章で記述したように、白色層が連続して発生する形態と不連続に発生する形態があることを考慮し、図12に示す形状の白色層を転動面の中心部にレーザを照射することにより形成した。なお、これらは図8による分類に基づくと、斑状ならびに带状の白色層に分類される。また、形成した白色層の厚さは、図10に示す現地敷設レールにおける発生状況をもとに、10, 20, 35, 50 μm の4パターンとし、試験輪の転動面に一定間隔で形成した。

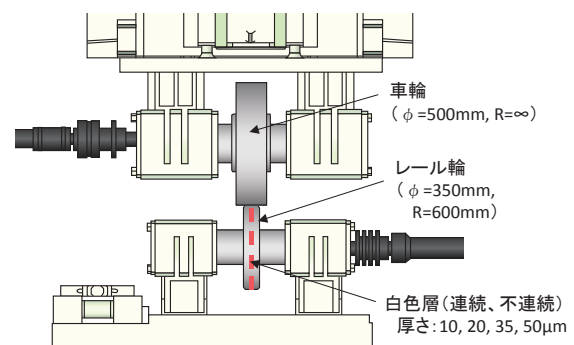


図11 大型転動疲労試験装置の概要

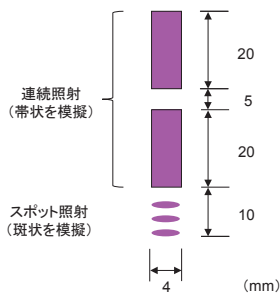


図 12 試験輪に形成した白色層の形状

表 1 転動疲労試験の条件

試番	ラジアル荷重 (kN)	すべり率 (%)	環境	通過トン数 (万トン)
1	22.7*	0	水潤滑	6000
2				7000
3				8000

(*：最大ヘルツ接触圧、約 1075MPa に相当)

その他の試験条件は先行研究^{2) 3)}での荷重条件をもとに、85kNの輪重がレール頭頂面に載荷した際に発生する最大ヘルツ接触圧(約 1075MPa)になるようラジアル荷重を設定し、表 1 に示す条件で試験を行った。また試験輪のすべり率を 0% と設定し、摩耗を抑制するとともに微小き裂の発生や進展を促進するため、試験中は接触部に水(100ml/min)を滴下した。

所定の通過トン数まで試験輪を転動させた後、レール輪を転動方向と平行に切断し、白色層とその周辺について断面観察を行った。

4.2 試験結果

各試番において観察した微小き裂のうち、最も大きく進展していたものの深さについてまとめた結果を、白色層の形状別に表 2 ならびに表 3 に示す。

このように、累積通過トン数が 6000 万トンまで転動させた試番 1 においては、斑状の白色層で 40 μ m 程度、带状の白色層で 50 μ m 程度まで微小き裂が進展する結果となった。また累積通過トン数が 7000 万トンまで転動させた試番 2 においては、斑状の白色層で 30 μ m 程度、带状の白色層で 70 μ m 程度まで微小き裂が進展している

表 2 発生した微小き裂の最大深さ(斑状) [単位： μ m]

試番	通過トン数 (万トン)	形成した白色層の厚さ			
		10	20	35	50
1	6000	16	35	36	38
2	7000	17	25	32	32
3	8000	31	62	29	36

表 3 発生した微小き裂の最大深さ(带状) [単位： μ m]

試番	通過トン数 (万トン)	形成した白色層の厚さ			
		10	20	35	50
1	6000	36	45	49	52
2	7000	36	65	60	68
3	8000	37	234	157	443

ことが確認できた。さらに累積通過トン数が 8000 万トンまで転動させた試番 3 においては、斑状の白色層で最大 62 μ m、带状の白色層で 440 μ m 以上にまで大きく進展する結果となった。また全体的な傾向として、斑状に形成した白色層よりも、带状に形成した白色層のほうが微小き裂の進展に大きな影響を与えていることがわかる。特に試番 3 においては、带状に形成した白色層周辺に発生した微小き裂が、通常の削正深さである 0.1mm を大きく上回る深さまで進展していた。

4.3 考察

前節で記載したように、微小き裂の発生ならびに進展を促進させるため、また転動接触による摩耗進展を抑制するため、本試験は水潤滑環境下にて実施した。いずれの試番においても、試験終了後における試験輪の断面観察において、厚さが 10 μ m となるように形成した白色層は摩滅することなく、10 μ m 程度の厚さで存在していた。したがって本試験では、転動接触による摩耗進展はほとんどなかったものと考えられる。

試番 1 ならびに試番 2 において観察された微小き裂は、いずれも深さが 0.1mm 以下であること、ならびに現地敷設レールにおいて発生する白色層の厚さは最大でも 40 μ m 程度であったことから、少なくとも 7000 万トンの周期で深さ 0.1mm の削正を実施すれば、白色層や白色層を起点として発生ならびに進展した微小き裂を除去することができると考えられる。一方、試番 3 においては带状の白色層において、観察された微小き裂の最大深さは 440 μ m 以上にまで達しており、その後に深さ 0.1mm の削正を施しても、微小き裂を完全に除去することはできない。

前節の転動疲労試験条件における特筆すべき点として、以下の 3 点が挙げられる。

- ① 本試験は、85kN の輪重をレールに載荷した条件で行っている。これは機関車と同程度の輪重に相当することから、3 章に示すような通勤型電車や特急車両が主に走行する線区の例を考えると、過大な荷重条件となる。
- ② 本試験は、水潤滑環境下で試験を行った。したがって、本試験は営業線に敷設しているペイナイトレールと比較すると摩耗進展が抑制されており、さらに微小

特集：軌道技術

き裂の発生ならびに進展が促進された条件での結果である。

- ③ 本試験では、白色層を形成した状態から転動疲労試験を行った。したがって、レール敷設から白色層が発生するまでの時間を考慮すると、実際の営業線において敷設されたベイナイトレールについては、さらなる時間的余裕（通過トン数）があると見込まれる。

このように、本研究で行った転動疲労試験は、限られた観察範囲内の結果ではあるものの、営業線における車輪・レール接触状態よりもかなり厳しい条件で行ったものである。その条件で累積通過トン数7000万トンまで転動させた試験においても、観察された微小き裂は最大でも70 μ m程度であった。深さ0.1mmの削正を実施することを踏まえると、ベイナイトレールにおいては、通過トン数7000万トンごとに0.1mm削正することで、白色層起因シェリングを予防することが期待できる。

5. まとめ

本研究では、ベイナイトレールにおける白色層起因シェリングの予防削正手法を提案することを目的とし、ベイナイトレール材における白色層の形成、現地調査による白色層発生状況調査、そして現地敷設レールにおいて発生した白色層を模擬した試験輪を用いて転動疲労試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) レール材表面にレーザーを照射し白色層を人工的に形成したところ、同じ熱量が加わった場合に形成される白色層は、普通レール材に形成されるものよりもベイナイトレール材に形成されるもののほうが、厚さは30%程度薄いことがわかった。したがってベイナイトレールは普通レールに比べて、白色層ならびに白色層起因シェリングの発生を抑制できると考えられる。
- (2) レール頭頂面の硬さを測定することにより、発生した白色層の厚さを推定する手法を確立した。本手法を営業線に敷設しているレールに適用した結果、発生した白色層の厚さは10～20 μ m程度に多く分布し、最も厚いものでも40 μ m程度であった。したがって、深さ0.1mmの削正を施工することにより、発生した白色層自体は除去できると考えられる。
- (3) 営業線に敷設されたベイナイトレールを調査した結果、勾配区間や駅構内において、高い確率で白色層が発生していることを確認した。また15年以上敷設したレールにおいては、複数箇所シェリング

の発生を確認した。したがって、現時点ではまだシェリングの発生が確認できないベイナイトレールにおいても、白色層の発生が認められる場合には、今後、通過トン数が増加するにつれて、シェリングが発生する可能性がある。これらの理由により、白色層の発生が顕著であった、勾配区間や駅構内に敷設されたベイナイトレールについては、優先的に削正を実施することが望ましいと考えられる。

- (4) 営業線で確認された白色層の発生形態をもとに、白色層を形成したベイナイトレール材試験輪を用いて転動疲労試験を実施した。その結果、通過トン数7000万トンまでの転動により、微小き裂は深さ70 μ m程度まで進展していた。一方、通過トン数8000万トンまで転動させた場合、微小き裂は440 μ mまで進展していた。本試験は実際の車輪／レール接触よりも厳しい条件で行っていることや、削正する深さ0.1mmまで余裕があることから、ベイナイトレールに対しては、通過トン数7000万トンごとに0.1mm削正することで、白色層起因シェリングを予防できるとの見通しを得た。

文献

- 1) 佐藤幸雄, 辰巳光正, 柏谷賢治, 上田正治, 横山泰康: 耐シェリング用ベイナイトレールの開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.10, pp.15-20, 1998
- 2) 石田誠, 阿部則次: 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, Vol.9, No.12, pp.19-24, 1995
- 3) 辻江正裕, 松田博之, 中村崇, 名村昭, 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, Vol.23, No.10, pp.53-58, 2009
- 4) 加藤孝憲, 菅田淳, 牧田太郎, 元屋敷靖子, 山本幸三, 中山英介: 白色層を起点とした鉄道車輪鋼の転がり接触下における疲労損傷評価, 材料, Vol.56, No.12, pp.1150-1155, 2007
- 5) 横山泰靖, 三田尾眞司, 酒井潤一, 山本定弘: パーライト鋼とベイナイト鋼における摩耗および転動疲労挙動, 鉄と鋼, Vol.86, No.6, pp.417-424, 2000
- 6) 中村崇, 名村明, 金鷹, 辻江正裕: レール白層特性評価と診断手法, 日本トライボロジー学会, トライボロジー会議予稿集 (佐賀2007), pp.37-38, 2007
- 7) 名村明, 石田誠: レール損傷の発生メカニズムを探る, RRR, Vol.68, No.9, pp.6-9, 2011