

レール種別による きしみ割れ損傷の 再現試験



小林 潤*



瀧川 光伸**



小関 昌信*

近年、熱処理レールを使用している緩曲線区間の外軌にきしみ割れが多く発生し、レール表面の剥離傷にまで至るケースが多く観察されるようになった。剥離を伴ったきしみ割れは騒音の増大やレール破断を引き起こす原因にもなり、きしみ割れから剥離を生じさせない対策が望まれている。そこで本研究では、レール・車輪間の接触状態を模擬した2円筒の転動試験装置を使用して、レール材質の観点からきしみ割れ対策について検討する実験を行った。その結果、きしみ割れが発生し難く、連続的な剥離傷に至りにくいレール材質として、過共析（Hyper Eutectoid：HE）レールが有効であることがわかった。

●キーワード：熱処理レール、きしみ割れ、剥離損傷、過共析レール、転動試験装置

1. はじめに

近年、緩曲線区間における外軌ゲージコーナー部で、レール・車輪間の転動接触疲労損傷である“きしみ割れ”から剥離に至る傷（図1）が、首都圏を中心に多く観察されるようになった。きしみ割れは以前からレール管理の対象となっているが、表面の長さの管理（表1参照）は行っているものの、剥離に対する管理は対象としていない。例えば図1に示されるような損傷は、き裂長さからランクを適用すると2期の状態であり、看視マークによる管理のみで直ちにレール交換をしなくても良い。しかし、このような状態になった場合は、これまでの調査によるとレール内部にき裂が進展する恐れもあり¹⁾、早めのレール交換が必要であると思われる。



図1 剥離を伴ったレールきしみ割れ

一方、海外では2000年に発生したイギリスのハットフィールドの事故²⁾を契機にきしみ割れに関する研究が盛んに行われるようになり、きしみ割れの破断面調査³⁾、転動試験装置を使ったきしみ割れの発生実験⁴⁾、およびき

しみ割れを予防するためのレール形状に関する研究⁵⁾などの報告がこれまでなされている。

表1 きしみ割れの管理判定

1期		0～ 21.6mm	記録に挙げる
2期		21.7～ 32.5mm	看視マークをつける
3期		32.6～ 43.4mm	補強継目板を取り付けると共に交換計画を立てて交換する
4期		43.5mm 以上	すみやかに交換する

そこで、それらの研究報告を参考に、レール材質の変更によるきしみ割れ対策を検討することとした。レール頭頂面に発生するシェリングに対して有効であるといわれているベイナイト鋼⁶⁾や、高軸重鉄道で使用されている過共析鋼⁷⁾に対してきしみ割れの有効性を確認することにした。本稿では、熱処理レールに対するレール／車輪転動試験装置による剥離を伴ったきしみ割れの再現を目的とした実験と、その条件をもとに上記に挙げた材質の異なるレールに対して行った実験結果について報告する。

2. 転動試験装置によるきしみ割れ再現実験

2.1 レール／車輪転動試験装置

図2に示す転動試験装置を使用して外軌のゲージコー

ナーに発生しているきしみ割れの再現実験を行った。この転動試験装置はレール／車輪間の疲労や摩耗に関する現象を評価するために製作されたものである。今回の実験で使用した車輪試験片の大きさは実際の車輪径の1/2であり、レール試験片も車輪試験片と同径である。

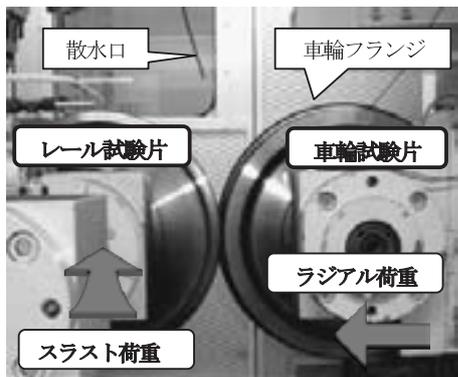


図2 転動試験装置

2.2 実験条件の設定

実際に剥離を伴ったきしみ割れが発生している箇所(表2参照)で実施した地上測定において得られた動的データをもとに、有限要素モデルによる弾性解析を行ない、転動試験装置で実験する荷重条件を決定した¹⁾。

表2 地上測定を行った箇所の軌道条件

曲線半径	レール	材質	カト	スタック	累積通トン
800m	50N	熱処理	69mm	0mm	2億t

その解析では、実際のレール設計形状と車輪設計形状の接触で生じる圧縮主応力が、転動試験装置のレール試験片と車輪試験片で生じる圧縮主応力と同じになるようにして実験条件を算出した。一例として、アタック角が0.1°の場合について実車相当の設計断面に関して計算した結果を図3に示す。この計算では、アタック角による主応力の違いは見られたが、レール種別による大きな違いは見られなかった。

以上の解析により得られた実験条件を表3に示す。また、レール試験片の材質は、きしみ割れが多く発生している熱処理レールと同じ材質とし、車輪試験片の踏面形状と材質は、現在、JR東日本の在来線全車種に採用されている修正円弧車輪と同じにした。この条件を参考にきしみ割れの再現実験を行い、きしみ割れ対策を行うための最終的な実験条件を確定した。

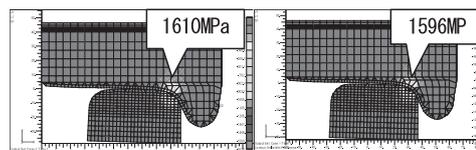


図3 解析結果(横圧10kN, アタック角)

表3 実験条件(1/2モデル)

レール試験片	アタック角	実車横圧	ラジアル荷重(輪重)	スラスト荷重(横圧)	試番	
小返り角: 0.0°	50N	0.0°	10kN	7.7kN	1.5kN	①
		0.1°	10kN	9.9kN	2.0kN	②
接触角: 1.4°	60kg	0.0°	10kN	7.8kN	1.6kN	③
		0.1°	10kN	9.6kN	1.9kN	④

※ 回転速度: 実車の80km/h相当

※ 潤滑条件: 乾燥、散水(約17.5ml/min)

2.3 再現実験の結果

レール試験片にきしみ割れを発生させる実験は、以下の2ステップで実施した。1回目は60kg形状のレール試験片に対しアタック角や潤滑条件を変更させる実験を行い、最終的に表3における④の実験条件で、図4に示す剥離を伴ったきしみ割れを再現することができた¹⁾。



図4 きしみ傷からの剥離

2回目の実験は50N形状のレール試験片に対して、1回目の実験から得られた条件を参考に、表3における②の実験条件(水潤滑)で行った。この実験では1010万回転(累積通過トン数(以下、「通トン」と記す): 1.01億トン)できしみ割れ傷の1本が成長し、最終的には1060万回転(1.06億トン)でレール頭部の部分的脱落が生じた(図5を参照)。以上のように、本試験装置により、きしみ割れを再現することができた。



図5 レール頭部の部分的脱落

3. きしみ割れ対策の検討のための室内実験

3.1 実験条件

耐きしみ割れ性能を比較するため、「普通レール」、「ベイナイトレール」、「過共析レール」の3種類を選定した^{6) 7) 8)}。熱処理レールを含めたレールと車輪の成分を表4に示す。ベイナイト鋼はパーライト鋼のレールより摩耗しやすく、過共析鋼はパーライト組織を微細化して耐摩耗性・耐損傷性を向上させた特性を有している。また炭素量Cが多いほど「硬い」ことを示す。実験条件を表5に示す。レールの断面形状は50Nとし、実験での荷重条件は、きしみ割れ再現実験（熱処理試験片）で剥離を伴ったきしみ割れを試験片に発生させることのできた条件（表3の試番②）とした。潤滑状態としては、再現実験と同じ状態にするため水潤滑とした。

表4 試験したレールと車輪の成分 (%)

	レール				車輪踏面
	普通	熱処理	ベイナイト	過共析	
C	0.63 - 0.75	0.72 - 0.82	0.10 - 0.50	0.85 - 0.95	0.60-0.75
Si	0.15 - 0.30	0.10 - 0.55	0.10 - 0.35	0.1 - 0.6	0.15-0.35
Mn	0.7 - 1.1	0.7 - 1.1	0.3 - 2.0	0.5 - 0.12	0.50-0.90
P	0.03 max.	0.03 max.	0.03 max.	0.03 max.	0.045 max.
S	0.025 max.	0.020 max.	0.025 max.	0.020 max.	0.050 max.
Cr	—	0.2 max.	3.0 max.	0.3 max.	—
Mo	—	—	1.0 max.	—	—
Cu	—	—	—	—	0.30 max.
硬さ (H _B)	235 min.	319 - 366	235 - 285	341-397	250-330

表5 対策のための実験条件

項目	条件
レール試験片の形状	JIS 50N
材質	再現実験:熱処理 対策実験:普通、ベイナイト、過共析
列車速度	80 km/h
軸重	50 kN
荷重	10 kN
レール小運り角	0.0°
アタック角	0.1°
接触角	1.4°
潤滑状態	水

3.2 室内実験によるきしみ割れの発生状況

各レール材質での実験の結果、きしみ割れや剥離の発生時期に違いが見られた（表6参照）。実験は最終的に約1300万回転（約1.3億トン）まで行った。

表6 レール材質を変更させて行った実験結果

現象	熱処理	普通	ベイナイト	過共析
きしみ割れの発生	65万回転 (650万トン)	65万回転 (650万トン)	70万回転 (700万トン)	240万回転 (2400万トン)
		発生と消滅の繰り返し		
はく離の発生	780万回転 (7800万トン)	890万回転 (8900万トン)	710万回転 (7100万トン)	760万回転 (7600万トン)
		発生と消滅の繰り返し	発生と消滅の繰り返し	
連続的なはく離	あり	あり	なし (1.3億トンまで)	なし (1.3億トンまで)

普通レール鋼試験片はきしみ傷の発生後、消滅と発生を繰り返し、剥離の発生は熱処理試験片より遅かったが、最終的には連続的な剥離傷が発生した。ベイナイト試験片では、きしみ割れや剥離傷の発生時期は熱処理試験片と大きく変わらなかったが、連続的な剥離傷は発生しなかった。しかもきしみ割れ、剥離傷とも熱処理試験片に比べ発生数はわずかであった。過共析試験片では、きしみ割れの発生時期が熱処理試験片に比べて遅かったが、剥離傷の発生時期はあまり変わらなかった。しかし、連続的な剥離傷までには進展せず、傷の深さも浅いことがわかった。各試験片の剥離発生時の状態と1060万回転（1.06億トン）時点の状態を図6に示す。

ベイナイト試験片と過共析試験片は、熱処理試験片に比べて剥離傷が生じにくいことがわかったため、最終的には1300万回転（1.3億トン）を超えるまで実験を続けた。その時の試験片の状態を図7に示す。図より、ベイナイト試験片はきしみ傷の消滅と発生が繰り返されることが確認され、過共析試験片は剥離が生じ始めると傷の消滅はないが、き裂の一つひとつが小さく剥離するだけで、熱処理試験片のような連続的な剥離傷になりにくいことがわかった。

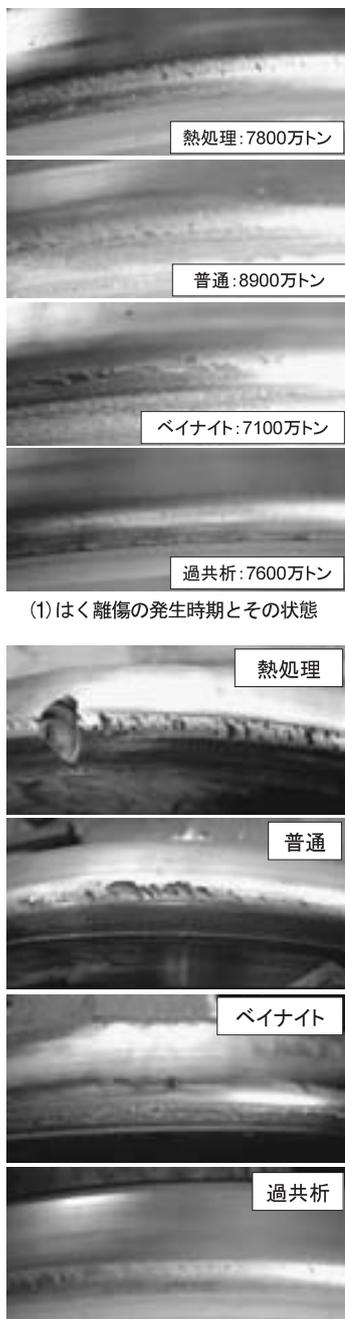
さらに、過共析レールについて、2回目の試験輪を同じ試験条件で行っている。2回目では過共析レールが連続的な剥離損傷に至るまで実験を継続中であるが、通トン2億トン分が経過しても細かいきしみ割れが発生と消滅を繰り返し、剥離損傷はほとんど発生していない。予定では約3億トンまで試験を継続する予定である。

3.3 きしみ割れの進展

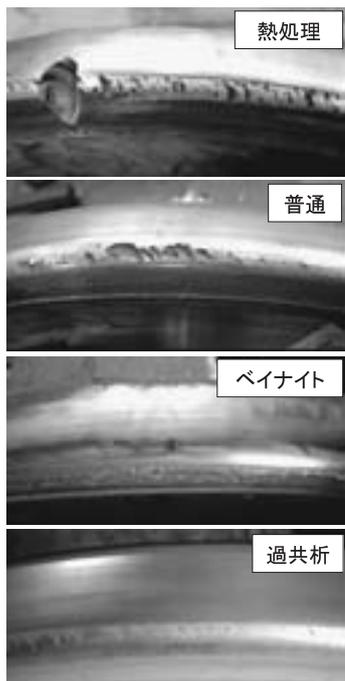
各試験片に対する摩耗量を含んだきしみ割れの進みを、通トンとの関係で表したものを図8に示す。熱処理試験片は1000万回転（1億トン）できしみ割れの1本が急激に進展し、17mmで図5に示したような傷に至った。ベイナイト試験片はきしみ割れが常に存在していたわけではないため、発生したときの傷の長さを表示している。摩耗量の大きかったベイナイト試験片と普通レール鋼試験片は、傷の進みとして同様の傾向を示し、摩耗量の小さかった熱処理試験片（大きく進展した傷を除く）と過共析試験片は、1000万回転（1億トン）経過後に進みの傾きが異なる傾向を示した。即ち、過共析レールの方が耐摩耗性の面でも優位性を示した。

3.4 レール試験片の摩耗と硬さの変化

曲線区間のレール保守を行っていく上では損傷の管理だけでなく、摩耗についても管理していかなければならない。そこでレール試験片の摩耗量と表面硬さの変化について分析した結果を図9および図10に示す。摩耗量は1000万回転（1億トン）時点での値から、ゲージコーナ一部45度の100万回転（1000万トン）当たりの摩耗量で整理した。硬さについてはゲージコーナー部の上部側の平均的なビッカース硬さについて実験前と1060万回転（1.06億トン）時点で測定した結果を示している。



(1) はく離傷の発生時期とその状態



(2) 1060万回転（1.06億トン）の状態

図6 試験片の剥離傷の状態

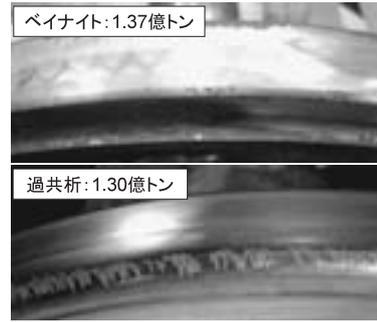


図7 1.3億トン時点のレール試験片状態

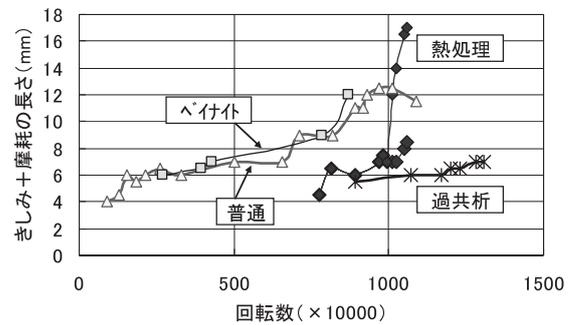


図8 通トンときしみ傷の関係

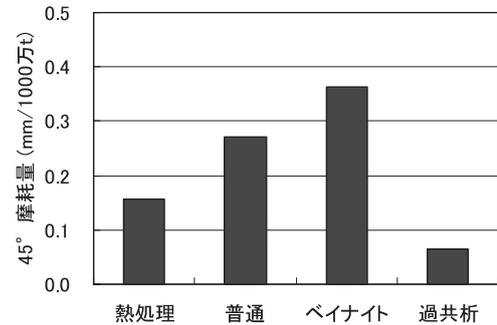


図9 試験片の摩耗量比較

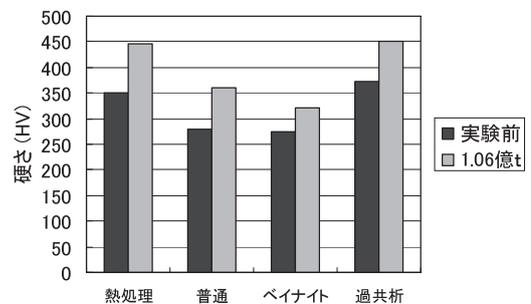


図10 試験片の硬さ変化の比較

摩耗量としてはベイナイト試験片が一番大きく、過共析試験片が一番小さいことがわかった。硬さの変化としてはベイナイト試験片が一番小さく、熱処理試験片が大きいことがわかった。

4. 考察

転がり接触疲労により発生する損傷は、一般的に摩耗により金属疲労が蓄積されなければ生じないと言われている。今回のきしみ割れが増加している理由は、これまでの実験から摩耗の進み具合の影響だけではなく、レール材質によって左右されている可能性のあることが示唆された。さらに、レールの累積通トンも大きく影響していることが考えられた。そこで、これらの実験の信頼性やレール材質と傷の関係を検証するための考察を行った。

4.1 レール損傷と摩耗量の関係

普通レールについては、以前は、剥離を伴ったきしみ割れに対する有効な対策と考えられていた。その理由として、熱処理レールよりは硬度が小さく摩耗が進みやすいからである。しかし、実験では摩耗量が熱処理試験片より大きいにもかかわらず、結局は連続的な剥離を伴ったきしみ割れが発生し、きしみ割れ対策としては適切ではないことがわかった。

ベイナイト試験片は、剥離傷の発生がほとんど無いものの、図9に示すように熱処理試験片の2倍以上の速さで摩耗することがわかった。この理由として図10から、加工硬化が小さく材質として柔らかさが保たれているため、摩耗量が大きくなったと考えられる。

過共析試験片は、一部剥離が生じているものの連続的な剥離傷には進展せず、図9より摩耗量も小さいことが確認された。加工硬化は熱処理レールとほぼ同じであるため、材質の違いが剥離の仕方に大きく影響していると思われる。

4.2 実際のレール摩耗量との比較

この実験を実際の保守管理に活かすための検証として、今回の実験条件を決定するために地上測定を行った箇所の外軌摩耗量と熱処理試験片の摩耗量を比較した。その結果を図11に示す。図より、実際のレールの方が3割程度摩耗量の小さいことがわかった。この理由の1つとして地上測定箇所における列車通過時の輪重・横圧測定チャート（PQチャート）の一例を図12に示す。図より実際に横圧の発生している軸が各台車の前軸か後軸のどちらかになる場合があり、この状態が実験装置では再現できないためと考えられた。つまり、実験装置で再現しているのは、常に全ての軸において横圧とアタック角が生じてい

る状態を模擬しているため、その結果、摩耗量が大きくなったと思われる。きしみ割れを発生させる条件として横圧とアタック角が必要なことがこれまでの実験で判明しているため¹⁾、きしみ割れが発生するまでの時間は、実験より若干長くなる可能性がある。

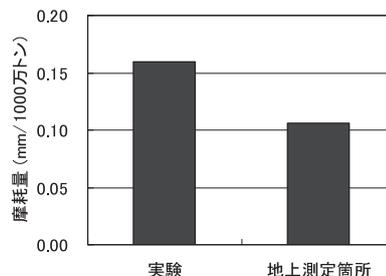


図11 地上測定箇所との摩耗量の比較



図12 地上測定におけるPQチャート

4.3 きしみ割れ対策用レールの敷設試験

この実験に基づいてきしみ割れの発生している区間に、対策用レールとしてベイナイトレールと過共析レールを試験敷設し、経過を観察中である。敷設後の累積通トンは、現在過共析レールおよび比較の熱処理レール共、最大で約6000万トンとなっている。

ベイナイトレールは緩和曲線（本曲線R=800m）の一部にきしみ割れが発生しているが、ほとんどの区間できしみ割れの発生は見られなかった。ただし、ベイナイトの摩耗しやすい特性により、本曲線内の一部区間で大きな摩耗が見られた。摩耗進みとしては一般的なベイナイトの摩耗区間の3倍もあったことから、ベイナイトレールは緩和曲線の外軌には必ずしも適してはいないと考えられ、当初の目的の通り、シェリング予防対策として主に直線区間への敷設が適していると考えられる。一方、過共析レールは曲線区間全体にわたってきしみ割れが発生していたが、浸透探傷の状況から、熱処理レールよりはき裂の深さが浅い傾向が見られた。それらのレール頭頂面（浸透探傷後）の状態を図13に示す。

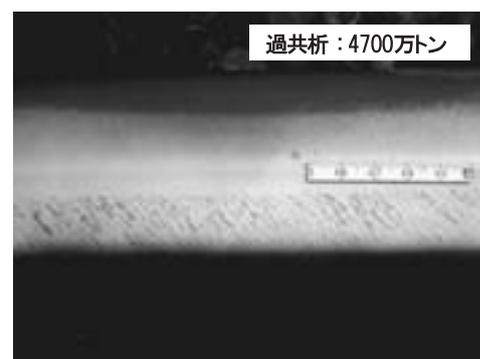
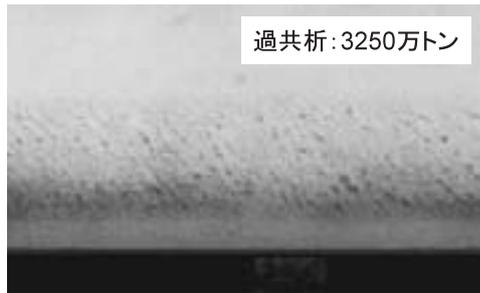
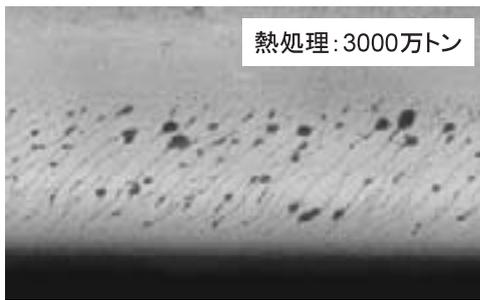


図13 熱処理・過共析レールの敷設状況

5. おわりに

剥離を伴ったレールきしみ割れの対策レールを決定するために、レール／車輪転動試験装置を用いてきしみ割れの再現実験と対策のための実験を行った。その結果、普通レール鋼試験片では熱処理試験片と同様の剥離傷が発生することがわかり、対策として敷設できるレールはベイナイトか過共析のレール材質になることを確認した。現在、それらのレールを試験敷設して経過を観察してい

るが、ベイナイトレールでは通常の摩耗量と比較して3倍になるゲージコーナー部摩耗が確認され、きしみ割れは発生しにくい、緩曲線外軌への敷設は適さず、このレールの本来の開発目的の通り、シェリング予防を目的として直線に敷設するのが最も適切であると考えられる。また、過共析レールでは重荷重鉄道の条件でなくても耐摩耗性に優れ、なおかつ、剥離を伴ったきしみ割れが発生しにくいことが実験から確認された。過共析レールの特徴としてはき裂が微小のままとどまる傾向にあり、きしみ割れとして深いき裂に進展しにくいと認められた。この結果、剥離を伴ったきしみ割れ対策（曲線半径800m以下）として、現時点で最適と思われるレール材質は過共析と考えている。

さらに、レール／車輪転動試験装置を使用した今回の実験結果から、水潤滑やアタック角の条件により実際の営業線で発生しているきしみ割れの再現を行うことができ、きしみ割れの進展や剥離への進展に関する促進実験が有効であることが確認された。今後は、この装置を用いて異なる材質やアタック角などの試験条件を変更した場合のきしみ割れの発生状況や発生要因についても研究していく予定である。

参考文献

- 1) 瀧川光伸、入屋義博：実験によるレールきしみ割れの発生と剥離の要因分析、鉄道力学論文集、第10号、pp. 43-48, 2006.
- 2) Smith, R. A. : The Wheel/Rail Interface Some Recent Accidents, CM2003, pp. 423-428, 2003.
- 3) Grohman, H-D. Schnitzer, T. Edel, K-O. : Head Checks - and Further Damages, CM2003, pp. 99-104, 2003.
- 4) Ullrich, D. Luke, M. : Simulating Rolling-Contact Fatigue and Wear on a Wheel/Rail Simulation Test Rig, WCRR2001, Session 2. 3. 1, 2001.
- 5) Smulders, J.Hiensch, M.Bontekoe, T. : RCF Management and Research Program in The Netherlands : Approach and Solutions to control The Wheel-Rail Interface to Reduce RCF Damage, WCRR2003, pp. 381-391, 2003.
- 6) 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.
- 7) Yokoyama, H.Mitao, S.Yamamoto, S. Kataoka, Y.Sugiyama, T. : High Strength Bainitic Steel Rail for Heavy Haul Railways with Superior Damage Resistance, NKK Technical Review, No. 84, pp. 44-51, 2001.
- 8) 横山泰康、三田尾真司、竹正峰康：耐摩耗性・耐損傷性に優れた高強度パーライトレール、NKK技報、No. 176, pp. 59-64, 2002.