

第 6 章 耐転動疲労損傷特性に優れたベイナイトレール鋼の開発

本章では、前章までに得られた知見に基づいて、実際に試作した高軸重鉄道向けおよび旅客鉄道向けのベイナイト鋼レールについて、その諸特性を示す。

6.1. 緒言

第 1 章で述べたように、鋼の清浄性の向上により、介在物起因のレール損傷が激減し、C 量の増加・高硬度化による耐摩耗性の向上が実施され、レールの交換理由の上位に転動疲労損傷が挙がるようになってから、レールの研究開発は、耐転動疲労損傷性の向上に重点が置かれるようになってきた。

しかし、従来のパーライト鋼レールの延長で成分、強度特性を変化させたレールでは、耐転動疲労損傷性の向上は得られず、第 3 章から第 5 章で示したように、レールとしての基本特性は満足しつつ、組織形態を、これまでレール鋼では使用されていなかったベイナイト鋼とすることにより、大幅な転動疲労損傷性の向上が期待できることが明らかとなった。

本章では、前章までに得られた知見に基づき、高軸重貨物鉄道向け、および旅客鉄道向けに成分設計したベイナイト鋼レールについて、実機試作材の諸特性および実用性について述べる。

6.2. 高軸重鉄道向け耐フレーキングレールの基本特性

前章までに得られた基礎的知見を基に、熱処理型パーライトレールと同等の耐摩耗性と、2 倍以上の耐転動疲労損傷性を有するため、目標引張強度を 1400MPa とした高強度ベイナイトレールの合金設計を行い、実機で圧延して 136 RE 形状のレールとした。レール頭部の機械試験値を熱処理型パーライトレールと比較して表 6-1 に示す。降伏強度、引張強度、疲労強度いずれも、高強度ベイナイト鋼レールの方が従来の熱処理型パーライ

ト鋼レールよりも 100MPa 以上高い。一方で、伸びは 15%以上であり、常温における破壊靱性、u-ノッチシャルピー衝撃吸収エネルギーともに高強度ベイナイト鋼レールの方が従来の熱処理型パーライト鋼レールの 2 倍近く高い値を示している。耐摩耗性はほぼ同等であり、高軸重貨物鉄道で必要とされる特性を十分に満足している¹⁾。

さらに、実機試作材からサンプルを採取し、第 5 章で示した小型評価試験により、転動疲労寿命を調べた。実験室検討材と同様、実機試作材は、熱処理型パーライトレール鋼の 2 倍以上の転動疲労寿命を示した。

写真 6-1 に北米における実敷設試験状況を示す。従来の熱処理型パーライト鋼は、敷設後半年で表面にき裂が発生しているのに対し、高強度ベイナイト鋼には、き裂の発生は認められず、優れた耐転動疲労損傷性を呈している。

表 6-1 開発した耐フレーキング型高強度ベイナイトレールの諸特性

	TS (MPa)	Elongation (%)	KIC (MPa ^{1/2} m)	Absorbed energy (20 [°]) (J)	Fatigue strength (MPa)	The amount of wear (g/2h)
The developed bainitic steel rail	1420	15.5	98	39	870	0.77
The premium pearlitic steel rail	1300	13.5	43	20	750	0.76

* evaluated by the test method described in the present paper.

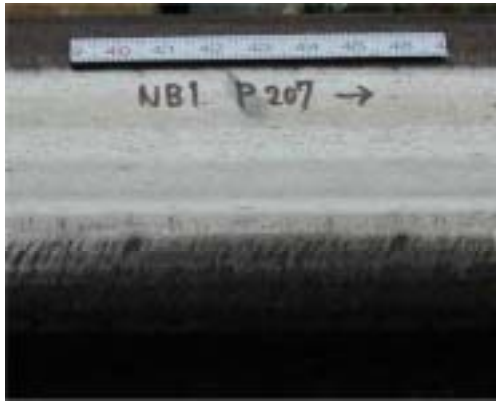


写真 6-1 高強度ベイナイト鋼と熱処理型パーライト鋼の敷設試験状況
(左：高強度ベイナイト鋼、 右：熱処理型パーライト鋼)

6.3. 溶接部評価試験

図 6-1 に、試作したレールのフラッシュバット溶接継手の曲げ特性を示す。継手として、高強度ベイナイト鋼レール／高強度ベイナイト鋼レール、高強度ベイナイト鋼レール／熱処理型パーライト鋼レール、また、比較として、熱処理型パーライト鋼レール／熱処理型パーライト鋼レールの3種類を準備し、3点曲げにより頭部側から負荷をかけ、破断に至るまでのたわみと破断応力を測定した。高強度ベイナイト鋼レール／高強度ベイナイト鋼レール、高強度ベイナイト鋼レール／熱処理型パーライト鋼レールの継手ともに、北米で要求されるスペックを十分に満足する特性を示しており、特にたわみ量は熱処理型パーライト鋼レール／熱処理型パーライト鋼レールの継手よりも多く、極めて良好な特性である。

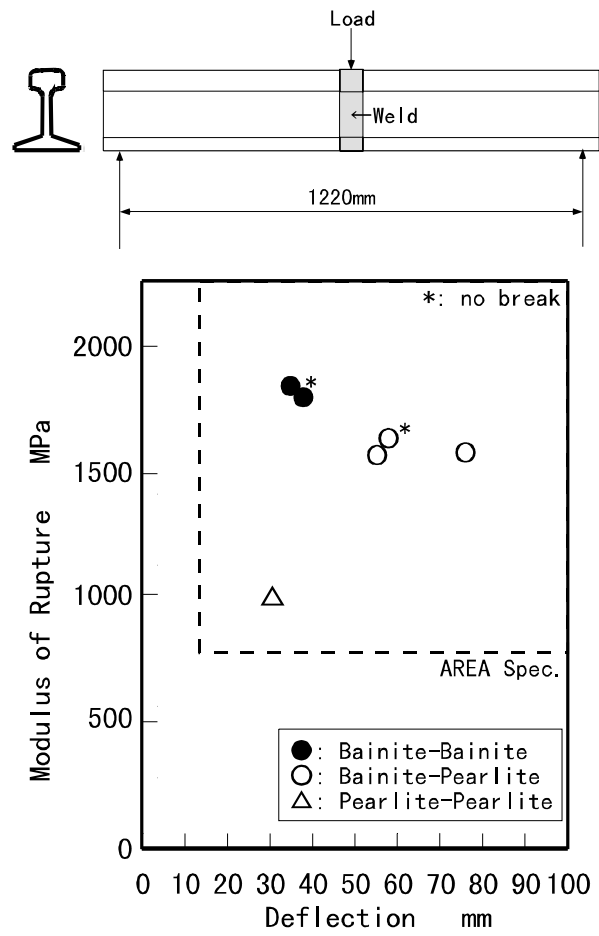


図 6-1 高強度ベイナイト鋼レールのフラッシュバット溶接部特性

6.4. 旅客鉄道向け耐シェリングレールの基本特性

旅客鉄道向けの耐転動疲労損傷性に優れたレールとして、前章までに得られた知見、特に摩耗による疲労損傷層の除去効果が最大限得られるように、成分設計を行い、JIS 普通レールの引張強度(TS 800MPa)を満たすベイナイト鋼レールを試作した(表 6-2, 6-3)²⁾。ミクロ組織を従来のパーライトレール鋼と比較して写真 6-2 に示す。C 量として、(i) 0.2%以下では、強度確保のために熱処理あるいは多量の合金元素(Mn, Cr, Mo など)が必要となり、製造コスト低減の観点から好ましくないこと、(ii) 0.4%を超えると高硬度のマルテンサイトが生成しやすくなること、から 0.3%を選択した。試作した旅客鉄道向けベイナイト鋼レールから採取したサンプルを用い、在来線の接触状態を再現した条件で転動疲労試験を実施した。試験片外観を写真 6-3 に示す。パーライト鋼では、第 5 章において示したように試験開始後 200 時間で著しい損傷の発生が認められるのに対し、開発したベイナイト鋼レール試作材では、実験室検討材と同様、400 時間経過後(累積通トン換算で 5 億通トン)でも全く損傷が認められない。

さらに、スポット溶接により故意に白色層を生成させた試験片を用いて転動疲労試験を行った結果、パーライト鋼では試験開始後 40 時間後に、主に白色層と母材との界面におびただしい割れの発生が認められたのに対し、ベイナイト鋼では 80 時間経過後も亀裂の発生は認められなかった。

現用のパーライトレールに対しては、JIS の引張強さ、硬さ(HB 235)以外にも、固有抵抗値(21.1 ~ 23.7 $\mu \cdot \text{cm}$)、溶接継手特性(静的曲げ破断試験による最大荷重、たわみ量)が規定されており、ベイナイトレールに対しても同様の特性が要求される。一般にベイナイト鋼は固有抵抗値が高いが、第 3 章で得られた結果に基づき、Si, Cr 添加量を抑制し、Mn, Mo を加えることでベイナイト組織を得易くする等の、合金元素の選択によって規定の範囲内の値に調整した。また、溶接継手特性も普通レールと同等以上であることを確認済みである。

表 6-2 旅客鉄道向けベイナイト鋼レールとパーライト鋼レールの化学成分

レール種別	C	Si	Mn	P	S	Others
ベイナイトレール	0.30	0.17	0.88	0.012	0.006	Cr,Mo,Nb,V
普通レール	0.68	0.27	0.91	0.018	0.007	-

表 6-3 旅客鉄道向けベイナイト鋼レールとパーライト鋼レールの諸特性

レール種別	0.2%PS	TS	EI	HB	固有抵抗
ベイナイトレール	666MPa	811MPa	19.2%	255	21.5 $\mu \cdot \text{cm}$
普通レール	421MPa	855MPa	15.3%	265	21.9 $\mu \cdot \text{cm}$

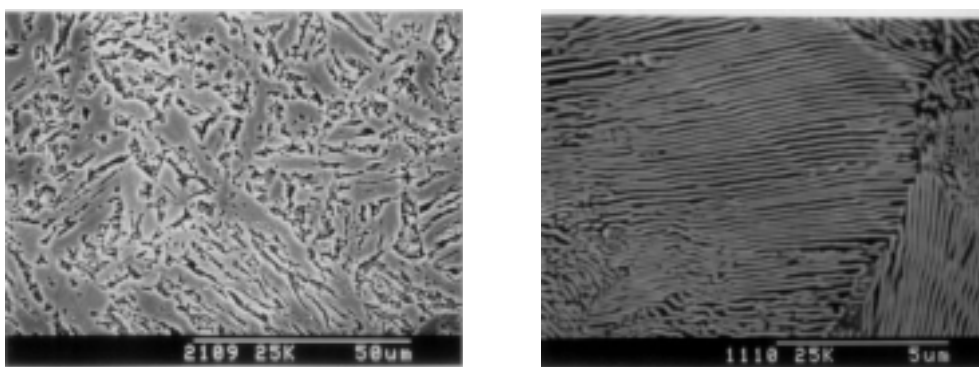


写真 6-2 ミクロ組織 (a)開発鋼 (b)従来鋼



写真 6-3 転動疲労試験後の外観

- (a) ベイナイト鋼(400 時間後)
- (b) パーライト鋼(200 時間後)

6.5. 実線敷設試験結果

開発した旅客鉄道向けベイナイト鋼レール(耐シェリングレール)は、(財)鉄道総合技術研究所殿のご指導のもと、実敷設試験に供し、表面状態の変化と摩耗量を観察している。摩耗量測定結果(図 6-2)から明らかなように、ベイナイトレールは、普通レールの1.2倍以上の摩耗量を示している²⁾。また、表面性状も極めて良好であり、予想通りの損傷抑制効果が得られており、今後、その実用化が確実視されている。

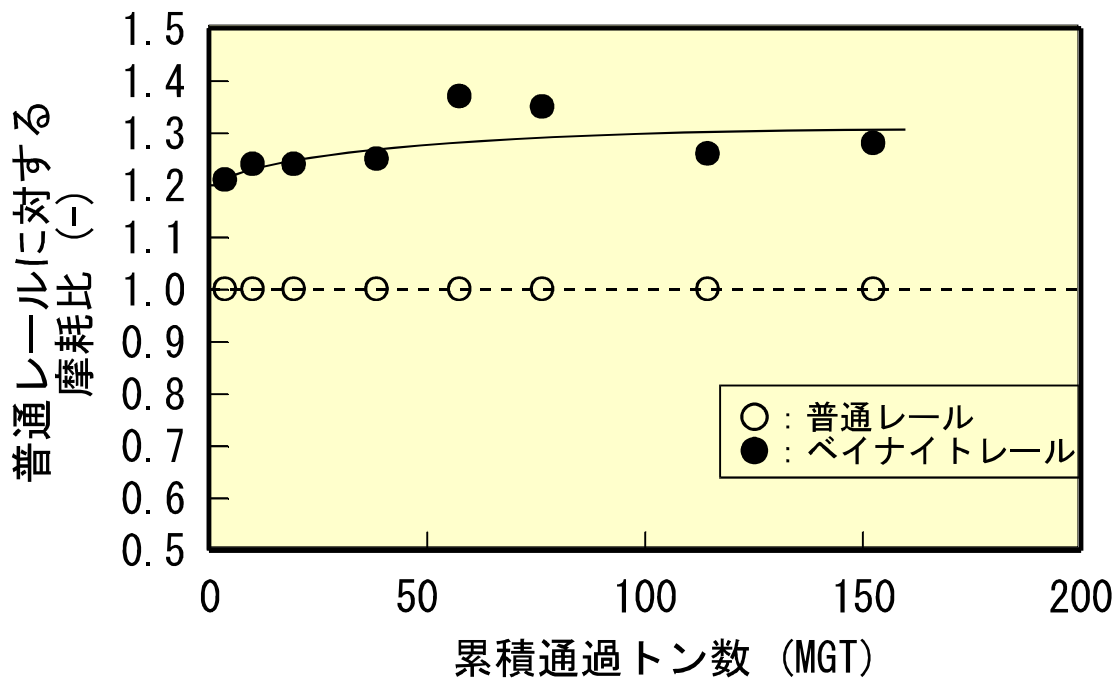


図 6-2 レールの摩耗量に及ぼす累積通トン、組織の影響

6.6. 結論

本章では、第3、4、5章の結論を受けて開発した耐転動疲労特性に優れたレールとして、高軸重貨物鉄道向けの耐フレーキングベイナイトレールについて、その基本特性、溶接部特性を示した。さらに、旅客鉄道向けの耐シェリングベイナイトレールについて、基本特性を示すとともに、実敷設試験の結果について示した。

高軸重貨物鉄道向けには、引張強さ 1400MPa 級の高強度ベイナイトレールを試作した。本レールは、海外で主に使用されている溶接手法により、問題なく接合できることが確認されており、実敷設試験に供されている。

旅客鉄道向けベイナイト鋼レールは、引張強さ 800MPa 級として、第4章、第5章で得られた従来のパーライト鋼よりも摩耗量が多いこと、摩耗量の増加により、表面の接触面を除去し、疲労層の削除を図ることを目的とした成分設計を行い、実際の鉄道において使用されるに十分な母材特性、溶接部特性が得られた。試作レールは、現在 JR の実路線に敷設されており、これまでの所、従来のパーライト型レールと比較して摩耗が進んでいることが現地調査により確認されている。この結果は、摩耗による疲労損傷部の除去効果が得られているものと判断されている。

第 6 章の参考文献

- 1) 横山泰康、三田尾眞司、山本定弘、片岡譲、杉山亨：NKK 技報 ,169(2000) ,
17
- 2) 横山泰康、三田尾眞司、山本定弘：まてりあ , 38(1999) , 157