

1. はじめに

中国やブラジル，ロシアといった新興国の経済成長とともに，地球規模での物流が拡大している。このようななかで，鉄道輸送は旅客や貨物を大量に効率よく輸送できる手段として早くから確立されており，鉄道輸送の重要性はさらに見直されている。

鉄道輸送では，貨物輸送と旅客輸送とに大きく分類される。さらなる輸送効率向上の観点から，貨物輸送では，積載重量の増大（高軸重化）や貨車の長大化が進んでいる。特に，北米における大陸横断鉄道は代表的な貨物輸送ルートとして挙げられ，

北米での重貨物鉄道向けに試験的に敷設され、優れた性能を発揮しつつある。ここでは、開発した SP3 レールの組織制御指針と基本性能について紹介する。

2. レール耐久性向上の基礎検討

2.1 耐摩耗性に及ぼす

硬さおよびマイクロ組織の影響

図 1 にパーライト組織鋼の硬さと摩耗量の関係を示す。縦軸は 2 円筒式回転接触試験（西原式摩耗試験）による摩耗減量であり、数値が小さいほど耐摩耗性に優れる。硬度上昇にともない耐摩耗性は向上する。また、耐摩耗性は鋼材のマイクロ組織にも依存し、ベイナイト、焼もどしマルテンサイト、パーライトの順に耐摩耗性が向上する³⁾。パーライト組織鋼の摩耗試験後の表層部断面マイクロ組織を写真 1 に示す。硬度増加に対応して表層の塑性流動は浅くなり、表面損傷に対しても高硬度化は有効であると判断できる。

2.2 パーライトラメラの微細化

パーライトは板状のフェライトとセメンタイトからなる層状組織（ラメラ組織）である。このラメラ組織を微細

化することにより高強度化することができる^{4,5)}。オーステナイトからパーライトが生成する際、体積的な自由エネルギーは低下するが、フェライト/セメンタイトの界面を形成するため、ラメラが微細化するほど界面エネルギーの上昇は大きくなり、微細化には限界がある。工業的に得られる微細ラメラの限界は $0.05 \mu\text{m}$ といわれている⁶⁾。

フェライト/セメンタイトの界面エネルギーに費やすことのできるエネルギーは、パーライトの変態駆動力の大きさになるため、化学的な駆動力の大きさはパーライト平衡変態温度 (T_E) からの過冷度 (ΔT) に比例する。したがって、 ΔT を大きくすることによってラメラの微細化を図ることができる⁷⁾。 ΔT を最大化するための考え方を図 2 に示す。成分設計においては、パーライト変態温度および Thermo-Calc[®] による T_E の導出、さらに、圧延後、冷却速度や停止温度などの TMCP 条件を最適化することによって、パーライト変態温度の低温化を図り、 ΔT の最大化を追求した。

より内部まで安定的に微細化する技術を開発した。

3. 高硬度・高硬化深度 SP3 レールの製造

3.1 SP3 レールの化学組成と製造プロセス

開発した

さで 1409 MPa であり、従来熱処理レールよりもおよそ 100 MPa 高強度化している。こうした高強度化にもかかわらず、延性の低下はほとんど見られない。

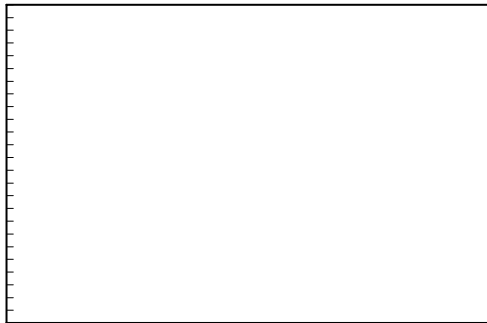
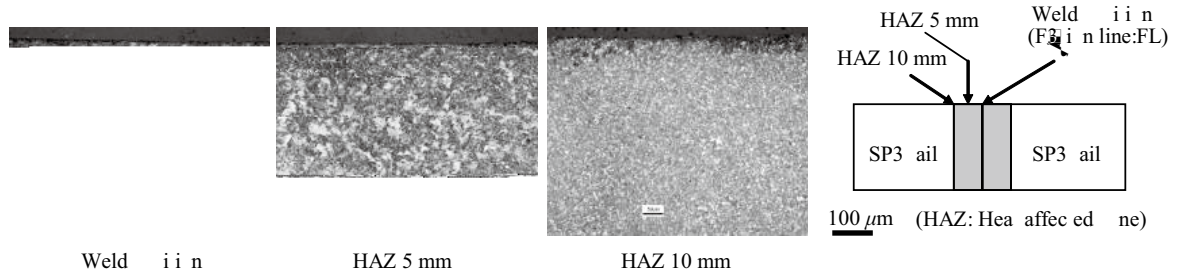
3.2.3 耐摩耗性、耐転動疲労特性

開発した SP3 レールと従来熱処理レールの頭部より試験片を採取し、耐摩耗性と耐転動疲労特性について次に調べた。まず、直径 30 mm (内径 16 mm)、厚さ 8 mm の円筒形の摩耗試験片をレール表面および 0.75 インチ (19.1 mm) 深さから採取し、摩耗試験を行った。車輪模擬材にはピッカース硬さ HV370 の調質鋼を用い、西原式摩耗試験機により接触応力：1.5 GPa、回転数：800 rpm、すべり率：- 10%、無潤滑環境下で摩耗試験を行った。その結果を図 5 に示す。縦軸は試験片の重量変化を 1 億通トン (MGT) 当たりのレールの摩耗深さ (mm) に換算して現しており、数値の小さいほうが耐摩耗性は良好であることを示す。開発レールにおいては、従来熱処理レールと比較して表面、内部ともに 10% 以上の耐摩耗性向上効果が確認された。

また、耐転動疲労特性についても評価を行った。試験片は、同様の部位から接触面に曲率を持つ円筒形試験片を採取し、接触圧力 2.2 GPa、回転速度：800 rpm、すべり率：- 20%、油潤滑環境下で転動疲労試験を行った。その結果を図 6 に示す。表層および 0.75 インチ (19.1 mm) 深さともに 3 ~ 13% の耐転動疲労特性の向上効果が確認された。これには、高強度化や非金属介在物の軽減⁸⁾が寄与したものと考えられる。

3.3 溶接継手性能

SP3 レールの代表的なフラッシュバット溶接部のマイクロ組織を写真 5 に示す。溶接部には割れや未接合などの欠陥は見られず、マイクロ組織はパーライト組織を呈している。車輪とレールの接合部は、溶接部と異なり、溶接部とは異なる組織を呈している。



Flush butt weld joint	Modulus of rupture ($\times 10^5$ lbs/in ²)	Deflection (inch)
Developed SP3	1.97	1.2
	(1.39×10^4 kg/cm ²)	(3.0 cm)
	2.07	1.7
	(1.46×10^4 kg/cm ²)	(4.3 cm)
AREMA spec.	Min. 1.25	Min. 0.75
	(8.8×10^3 kg/cm ²)	(1.9 cm)

5 mm 深さの硬さ分布を図7に示す。従来熱処理レールと同様に良好な継手硬さ分布を示している。AREMA 規格に準拠した静的4点曲げ試験を行った結果、表4に示すように破壊強度、たわみ量ともに規格を十分に満足する健全な継手曲げ性能を有している。

3.4 実路線における評価試験

SP3 レールはすでに北米の高軸重環境の貨物鉄道レール曲線部に実際に敷設され、使用にともなう摩耗挙動ならびに表面疲労損傷発生の有無などを観察している。図8はレール摩耗プロファイルから求めたSP3 レールの耐摩耗性を従来熱処理レールと比較して示したものである。従来熱処理

レールの摩耗量を100とした場合、SP3 レールの比摩耗量は10%以上減少した。この効果は、二円筒式摩耗試験の結果とおおむね同等であり、実使用環境においても十分な効果が確認された。さらに、レール表面にはきしみ割れ、剥離なども見られず、良好な耐疲労損傷性も得られている。

4 おわりに

北米などの高軸重の貨物鉄道向けに適用される高硬度・高硬化深度型高耐久レール (SP3) を開発した。開発レールは、パーライトラメラ間隔を極限まで微細化させることを目的に、レールの成分設計を行うとともに、圧延後のTMCP条件を最適化させた。開発したSP3レールのパーライトラメラ間隔は $0.07 \mu\text{m}$ と極めて微細であり、表面硬度HB420ポイント以上、1インチ(25.4mm)深さもHB370以上の高い硬度を有する。その結果、耐摩耗性は、従来熱処理レールに比べ10%以上向上することを実験室での試験ならびに実敷設による性能確認試験によって確認した。開発レールの溶接継手性能は従来レールと同等であり、良好な硬さ分布および静的曲げ試験性能を有している。

今後、SP3レールを高軸重の重貨物鉄道向けに提供する

ことで、レール長寿命化が期待できることから、お客様におけるレールメンテナンスコストの低減に大きく寄与するものと考えられる。

開発した SP3 レールの性能確認試験は、北米有数の鉄道会社である BNSF 鉄道殿のご協力により行われました。その結果、開発レールの実使用環境における貴重なデータを数多く採取することができました。に。は ùヤ乔扁るえ