

# 高軸重用高耐久パーライトレール SP3 の開発

## Development of SP3 Rail with High Wear Resistance and Rolling Contact Fatigue Resistance for Heavy Haul Railways

木村 達己 KIMURA Tatsumi JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員 (課長)  
竹正 峰康 TAKEMASA Mineyasu JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部形鋼室 主任部員 (課長)  
本庄 稔 HONJO Minoru JFE スチール スチール研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員 (副課長)・工博

### 要旨

北米などの高軸重貨物鉄道向けに適用される高軸重用の高硬度・高硬化深度型高耐久レール (SP3) を開発した。開発レールは、耐摩耗性や耐疲労損傷性を向上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衝風冷却条件を最適化させた TMCP (熱処理) により製造した。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 (25.4 mm) 深さも HB370 以上の高い硬度を有する。その結果、耐摩耗性は、HB390 級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レール性能評価試験によって確認した。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。

### Abstract:

JFE Steel has developed high performance pearlitic steel rail (SP3) with excellent wear resistance and rolling contact fatigue (RCF) resistance for heavy haul railways. To obtain excellent wear and RCF resistances, SP3 rail was manufactured by the suitable alloy design and optimum production conditions including the thermo-mechanical controlled process (TMCP). The lamellar spacing of SP3 was extremely fine of  $0.07\ \mu\text{m}$  near the rail surface, with the surface hardness of 420 in Brinell scale (HB420) or higher. In addition, SP3 showed high hardness over HB370 even at 1-inch depth (25.4 mm-depth) from the rail head surface. The excellent wear and RCF resistances of SP3 have been demonstrated by the actual performance tests at heavy haul railway in North America. At approximate 100 mgt from the installation, SP3 showed 10% better wear resistance comparing with the conventional HB390 grade heat treatment rail at the test, without showing any fatigue damage on the rail head surface, such as flaking and shelling.

### 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にともない、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、その積載重量は日本国内の数倍にも及

んでいる。このような輸送環境の苛酷化は、豪州やブラジルなどの鉱山輸送鉄道においても同様である。

一方、国内では、旅客鉄道が主体的で、いっそうの高速化が図られている。

輸送環境の苛酷化にともない、車輪とレール間の接触環境もより厳しくなっており、レール摩耗の増加やシェリング、きしみ割れなどの表面損傷の増加がレール交換やメンテナンスの負担を増大させている。当社では、これまでも合金設計と TMCP (熱処理) を駆使した高性能の熱処理レール (Super Pearlite rail: SP レール) を開発してきた<sup>1,2)</sup>。しかし、レールのいっそうの耐摩耗性および耐表面損傷性向上が求められているなかで、今回さらにパーライトラメラ組織を極限まで微細化させることで高硬度化を図った、高硬度・高硬化深度型の高耐久レール (SP3) を開発した。すでに、

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<sup>3)</sup>。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

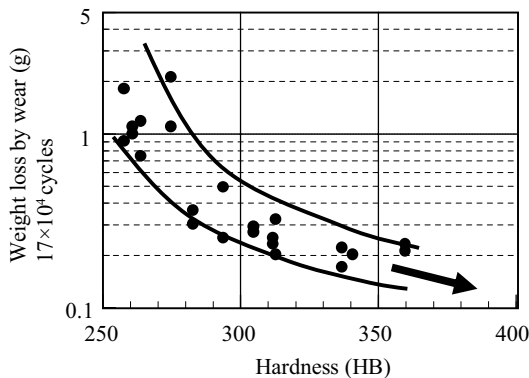
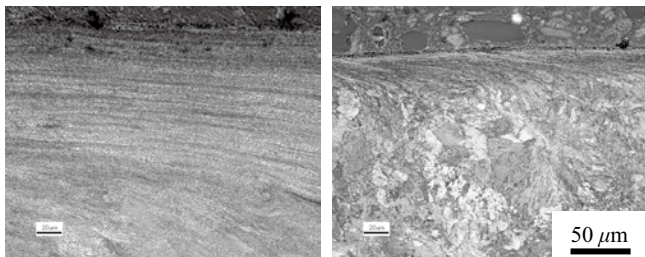


図 1 硬さと摩耗量の関係

Fig. 1 Relationships between hardness and wear resistance



(a) HB275

(b) HB337

写真 1 摩耗試験後の表層部のマイクロ組織変化

Photo 1 Cross sectional microstructures near wear surface after the wear tests (Hardness (HB) of sample: (a) HB275 and (b) HB337)

化することにより高強度化することができる<sup>4,5)</sup>。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<sup>6)</sup>。

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 ( $\Delta T$ ) に比例する。したがって、 $\Delta T$  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<sup>7)</sup>。 $\Delta T$  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<sup>®</sup> 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、 $\Delta T$  の最大化を追求した。このようなレールの成分設計と TMCP 条件の最適化を通して、写真 2 に示すような開発レールのラメラ間隔をレール表層から

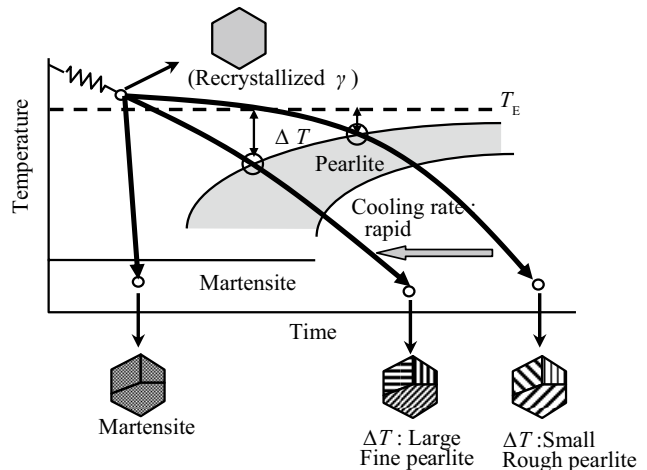
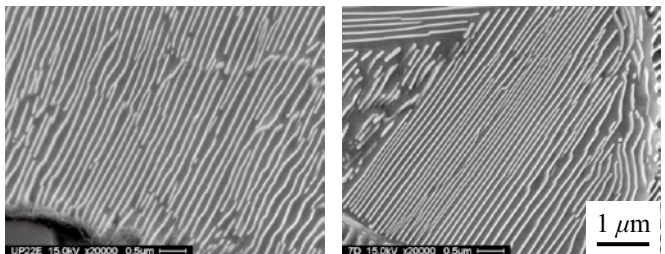


図 2 過冷度 ( $\Delta T$ ) を最大化するための模式図

Fig. 2 Schematic illustration showing maximum super cooling ( $\Delta T$ ) for formation of fine pearlite microstructure



(a) Conventional heat treatment rail

(b) Developed rail

写真 2 開発レールと従来熱処理レールのラメラ組織の比較

Photo 2 Pearlite lamellar structures of (a) Conventional heat treatment rail and (b) Developed rail

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 SP3 レールの代表化学組成を表 1 に示す。C 量は 0.81% であり、レール頭部から内部まで高硬度化するために、 $\Delta T$  を最大化させる成分設計となっている。転炉-RH 脱ガス後、連続鋳造で鋼片にした後、熱間圧延した。熱間圧延後、エア圧力や冷却時間を最適化させた衝風空冷条件にて加速冷却 (Slack quenching) を行う TMCP を施し、141 ポンド (約 70 kg) サイズのレールを製造した。

#### 3.2 母材性能

##### 3.2.1 ミクロ組織および清浄度

開発した SP3 レールの代表的なミクロ組織を写真 3 に示す。

表 1 開発した SP3レールの代表化学組成

Table 1 Typical chemical composition of developed SP3 rail (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Others
SP3	0.81	0.55	0.55	0.014	0.005	Cr, V

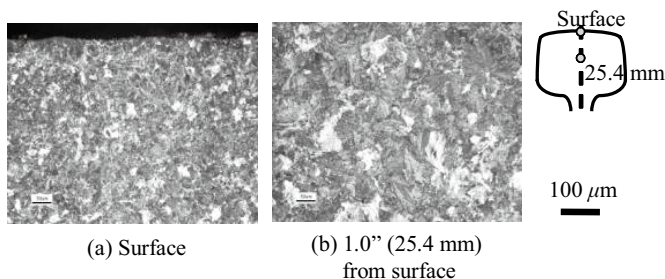


写真 3 SP3レールのミクロ組織

Photo 3 Microstructures of SP3 rail; (a) surface and (b) 1.0" (25.4 mm) from surface

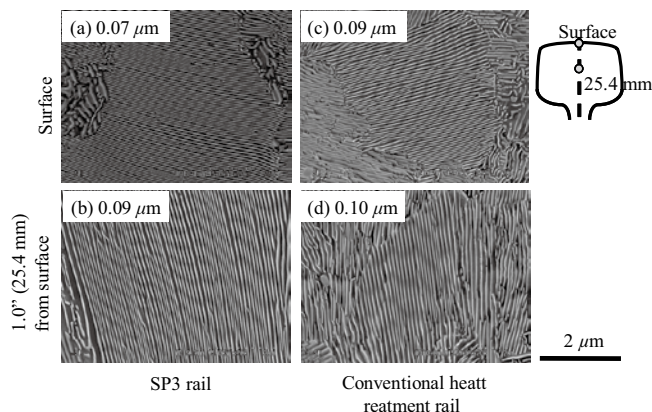


写真 4 パーライトラメラ組織の比較

Photo 4 Pearlite lamellar structures of surface and 1.0" (25.4 mm) from surface ((a), (b): SP3 rail, and (c), (d): Conventional heat treatment rail)

す。ミクロ組織はフルパーライト組織であり、マルテンサイトの生成は見られなかった。SP3 レールのパーライトラメラを HB390 級の従来熱処理レール (以下、従来熱処理レール) と比較して写真 4 に示す。SP3 レールのラメラ間隔は極めて微細であり、表面で  $0.07 \mu\text{m}$ 、1 インチ (25.4 mm) 深さでも  $0.09 \mu\text{m}$  であった。従来熱処理レールのそれは、表面部が  $0.09 \mu\text{m}$  であることから、開発したレールがより内部まで緻密なパーライトラメラ構造を維持していることが分かる。

SP3 レールの清浄度を AREMA\*規格に準拠して調べた結果を表 2 に示す。非金属介在物は十分に少なく、AREMA 規格を満足している。

##### 3.2.2 硬度特性と機械的性質

SP3 レールの硬度特性を従来熱処理レールと比較して図 4 に示す。SP3 レールの硬さは、従来熱処理レールと比べて表面で HB40 ポイント、1 インチ (25.4 mm) 深さにおいてもおよそ HB20 ポイント上昇しており、1 インチ (25.4 mm) 深さの硬さは HB390 以上となっている。SP3 レールの代表的な引張特性を表 3 に示す。0.2% 耐力で 967 MPa、引張強

表 2 SP3 レールの清浄度

Table 2 Metallurgical cleanliness test results of SP3 rail

(According to ASTM E45-Method A)

	Type A		Type B		Type C		Type D	
	Thin	Heavy	Thin	Heavy	Thin	Heavy	Thin	Heavy
Developed SP3 rail	0.5	0.5	0	0	0.5	0	0.5	0
Conventional heat treatment rail	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	0	0.5	0
AREMA Spec.	Average $\leq 2$ Individual $\leq 3$		Average $\leq 2$ Individual $\leq 3$		Average $\leq 2$ Individual $\leq 3$		Average $\leq 2$ Individual $\leq 3$	

A: MnS B: Chain of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and/or TiN C:  $\text{SiO}_2$  D: Grain of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and/or TiN

\* AREMA: 米国の鉄道関連の協会, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association の略

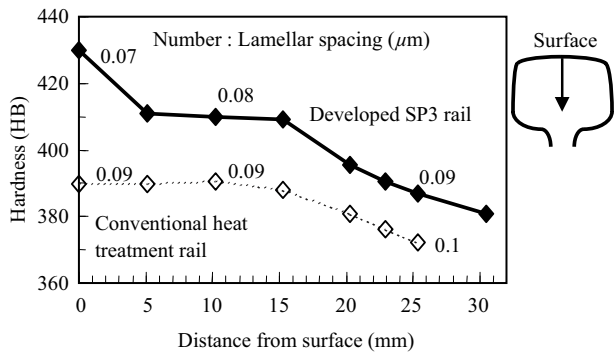


図4 レールの硬さ分布の比較

Fig. 4 Hardness distributions of SP3 rail in rail head comparing with conventional heat treatment rail

表3 SP3レールの引張特性

Table 3 Typical tensile properties of SP3 rail

	0.2% YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)
Developed SP3 rail	967	1 409	14	37

YS: Yield strength TS: Tensile strength  
El: Elongation RA: Reduction of area

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<sup>8)</sup>が寄与したものと考えられる。

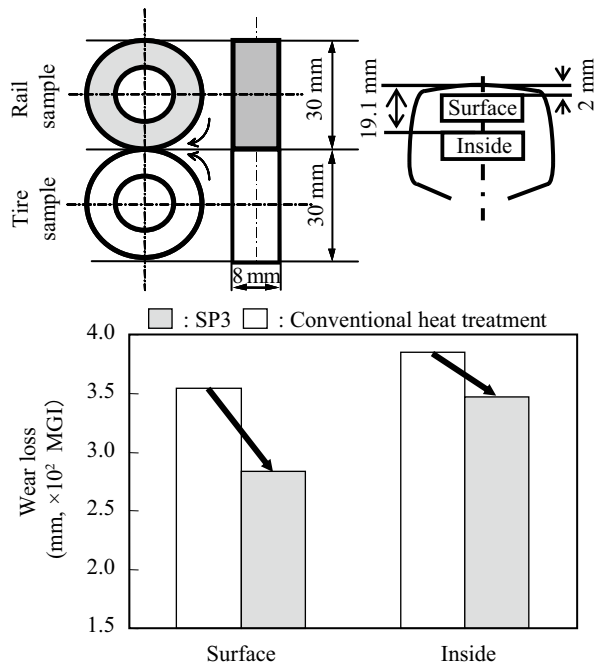


図5 摩耗試験結果

Fig. 5 Wear resistance of SP3 rail comparing with conventional heat treatment rail

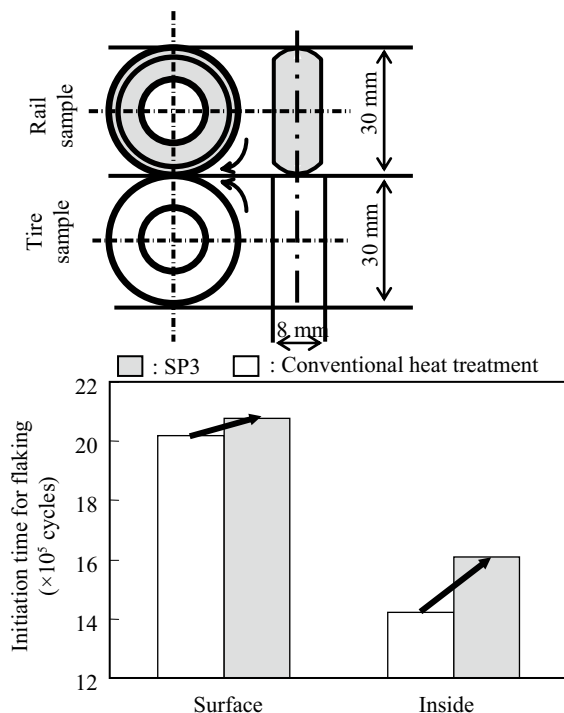


図6 転動疲労試験結果

Fig. 6 Rolling contact fatigue test results of SP3 rail comparing with conventional heat treatment rail

### 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た。頭部



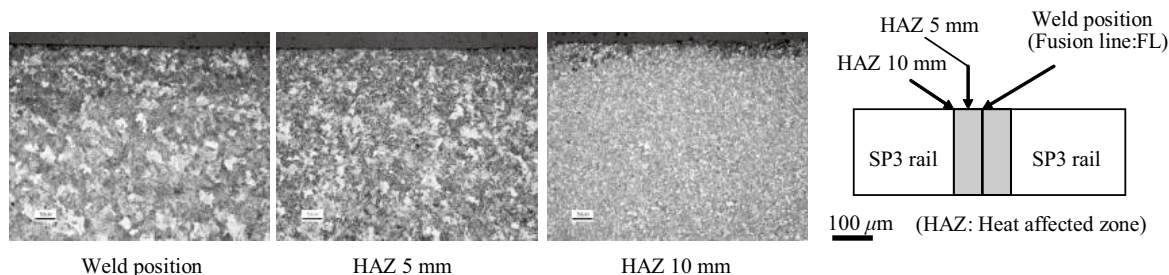


写真5 SP3レールのフラッシュバット溶接部のミクロ組織  
Photo 5 Microstructures of flush butt welds in SP3 rail

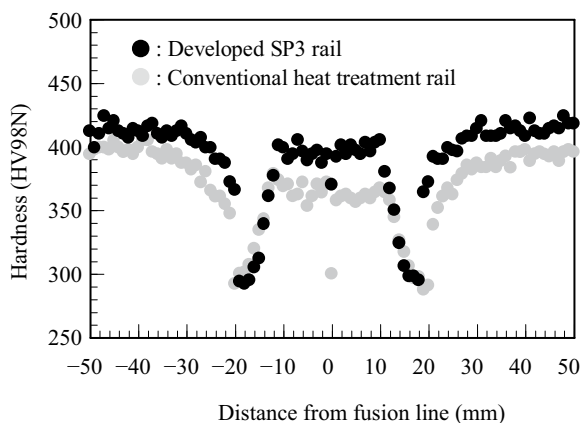


図7 フラッシュバット溶接部の硬度分布

Fig. 7 Hardness distributions of flush butt weld joints in SP3 rail and conventional heat treatment rail

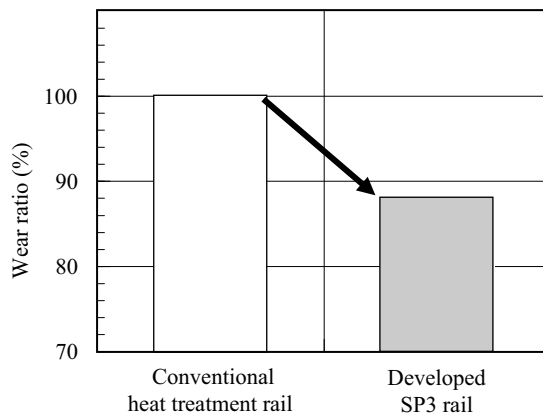


図8 実敷設によるレール耐摩耗性評価

Fig. 8 Comparison of wear resistance in actual track in service, between the conventional heat treatment rail and SP3 rail, taking 100 for wear loss in the conventional rail

表4 SP3レール溶接部の静的4点曲げ試験結果

Table 4 Slow bend test results of weld portion for developed SP3 rail

Flush butt weld joint	Modulus of rupture ( $\times 10^5$ lbs/in <sup>2</sup> )	Deflection (inch)
Developed SP3	1.97	1.2
	( $1.39 \times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	(3.0 cm)
	2.07	1.7
	( $1.46 \times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	(4.3 cm)
AREMA spec.	Min. 1.25 ( $8.8 \times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	Min. 0.75 (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 (25.4 mm) 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。ここに、多大なご協力をいただきました関係者に対しまして、心から感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 横山泰康, 三田尾眞司. まてりあ, 2002, vol. 41, no. 2, p. 129.
- 2) 横山泰康, 三田尾眞司, 竹正峰康. NKK 技報. 2002-03, no. 176, p. 59.
- 3) Kataoka, Y.; Furukawa, J.; Ueda, M.; Horita, T.; Yamanaka, H. 1992 Rail

Steels Symposium Proceedings. p. 11.

- 4) 古川直宏ら. 変形特性の予測と制御. 日本鉄鋼協会. 1994.
- 5) 田代均, 佐藤洋. 日本金属学会誌. 1991, vol. 55, p. 1078.
- 6) 山本定弘. 第 161, 162 回西山記念講座. 組織制御による鋼の耐摩耗性向上技術. 1996, p. 232.
- 7) C. Zener. Trans. Metall. Soc. AIME. 1946, vol. 167, p. 550.
- 8) 横山康弘, 山本定弘, 山中秀行. 材料とプロセス. 1995, vol. 8, p. 686.



木村 達己



竹正 峰康



本庄 稔