

重貨物鉄道用高耐摩耗パーライトレール 「SP3」の開発

木村 達己^{*1)} 本庄 稔^{*1)} 三田尾真司^{*2)}
竹正峰康^{*3)} 石川啓史^{*4)}

1. 緒 言

鉄道輸送は旅客や貨物を大量に効率よく輸送できる重要な輸送手段であり、近年、地球温暖化抑制の観点からもその重要性が見直されている。輸送効率向上等の観点から、旅客鉄道では更なる高速化が、また、貨物鉄道では積載重量の増大が進められている。

特に北米等では、穀物や鉱物等を運搬する貨物輸送において、鉄道は重要な役割を担っており、貨車一両あたりの積載重量は、日本国内の鉄道の数倍にのぼっている。車輪とレール間の摩擦条件も過酷を極め、レールの摩耗や表面疲労損傷が増加し、レール交換をはじめとするメンテナンスコスト増大を招いている。重貨物鉄道用のレールには、一層の耐摩耗性、耐表面疲労損傷性の向上による長寿命化が求められている。

レールは製造プロセスにより普通レールと熱処理レールに分けられる。普通レールは、0.65%程度の炭素を含有する鋼を用い、熱間圧延のままで製造されるが、北米等の重貨物鉄道の曲線部で用いられる高耐摩耗熱処理レールは、通常、0.8%程度の炭素を含有する鋼を熱間圧延後、レール頭部にブローで風を吹付けて加速冷却し、パーライト組織を微細化して高硬度化を図っている。更なる長寿命化に対するニーズに応えるために、過共析化によって耐摩耗性向上させたレール⁽¹⁾や合金設計とTMCP(加工熱処理)を駆使した微細パーライト組織を有する熱処理レールが提案されている⁽²⁾。

今回、新たな成分設計と製造条件の最適化により、パーラ

イトラメラ組織を極限まで微細化させた高耐摩耗レールSP3(Super Pearlite Type 3)を開発した。開発レールは既に北米の重貨物鉄道路線に敷設され、優れた性能を発揮している。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述べる。

2. 開 発 技 術

(1) 耐摩耗性に及ぼす硬さの影響

図1にパーライト組織鋼の引張強さと摩耗量の関係を示す。縦軸は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。引張強度上昇に伴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、同一硬さでは、パーライトが最も耐摩耗性に優れ、焼戻しマルテンサイト、ベイナイトの順に耐摩耗性が劣化する⁽³⁾。

(2) パーライト組織の強化

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)であり、ラメラ間隔の微細化により高強度化される⁽⁴⁾。オーステナイトからパーライトが生成す

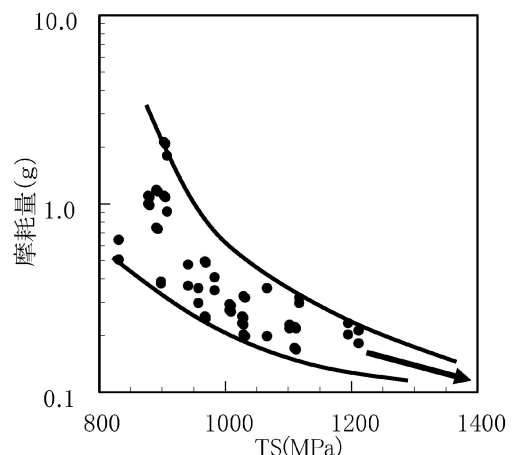


図1 パーライト組織鋼の引張強さと摩耗量の関係。

* JFE スチール株式会社
スチール研究所鋼材研究部 1)主任研究員 2)部長
西日本製鉄所 3)鋼材商品技術部主任部員
4)福山条鋼部副工場長

Development of SP3 Rail with High Wear Resistance and Rolling Contact Fatigue Resistance for Heavy Haul Railways: Tatsumi Kimura, Minoru Honjo, Shinji Mitao, Mineyasu Takemasa, and Hiroshi Ishikawa (JFE Steel Corporation)
2010年10月29日受理

る際、体積的な自由エネルギーは低下するが、ラメラ間隔が微細化するほど、フェライト/セメンタイト界面エネルギーの総和が増大するため、微細化には限界がある。レール鋼におけるラメラ間隔微細化は、工業的には0.05 μmが限界であると言われている⁽⁵⁾。

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依存する。変態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)に比例するので、 ΔT を大きくすることによりラメラの微細化を図ることができる⁽⁶⁾。

ΔT を大きくするための考え方を模式的に図2に示す。 ΔT を大きくするためには、圧延後の加速冷却が不可欠である。但し、マルテンサイトの生成を抑えるために、冷却速度や冷却停止温度等の製造条件最適化が重要である。また、成分設計に関しては、溶接時も含めてマルテンサイトの生成を抑える一方で、 T_E を上昇させることによって、同一変態温度におけるラメラ間隔を微細化できると考えられる。図3は、 T_E に及ぼすCrの影響を熱力学平衡計算ツール「ThermoCalc」⁽⁷⁾で計算した結果である。Cr量の増加にともない

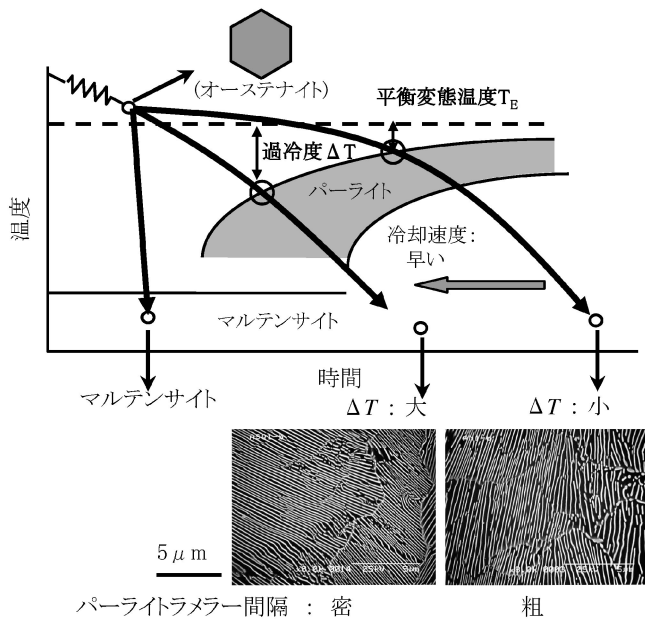


図2 ΔT を大きくするための成分設計，製造条件の考え方。

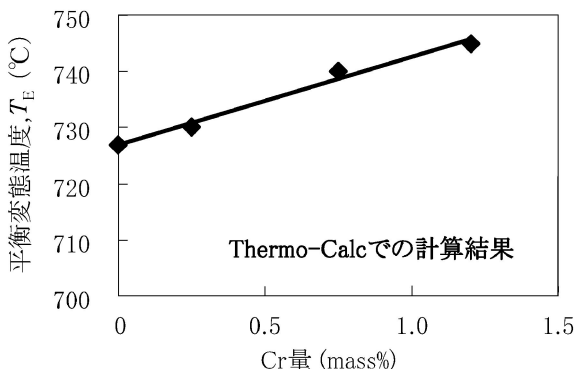


図3 Cr量と T_E に関する計算結果 (Fe0.8% C系)。

T_E が上昇し、同一変態温度におけるラメラ間隔の微細化に有効であると考えられる。

ラメラ間隔の極限の微細化に向けて、成分設計と製造条件最適化の両面から開発に取り組み、パーライトレール鋼として従来にない高い表面硬度を達成するとともに、レールの内部まで安定的にラメラ間隔を微細化する技術を確立した。

3. 開発商品(SP3レール)の製造

SP3レールの代表化学組成を表1に示す。レール頭部から内部まで高硬度化するために、 ΔT を最大化させる成分設計を行うとともに、熱間圧延後、最適化した衝風冷却(Slack Quenching)を施し、レールを製造した。

(1) ミクロ組織および硬度特性

SP3レールのミクロ組織を国内の普通レールと比較して図4に示す。普通レールのラメラ間隔が約0.25 μmであるのに対し、SP3レールのラメラ間隔は約0.07 μmであり、工業的な限界といわれる0.05 μm近くまでの微細化が達成されている。

表1 開発レール(SP3)の代表化学組成。(mass%)

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

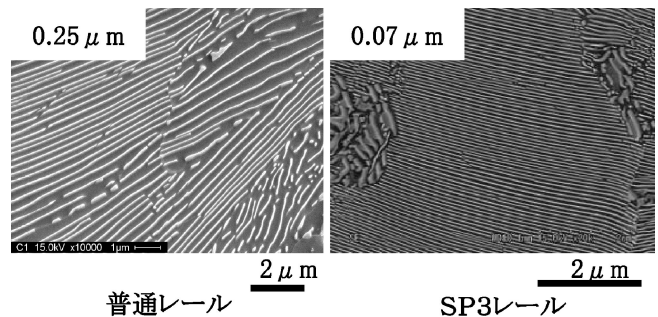


図4 普通レールと SP3レールのミクロ組織(SEM像)。

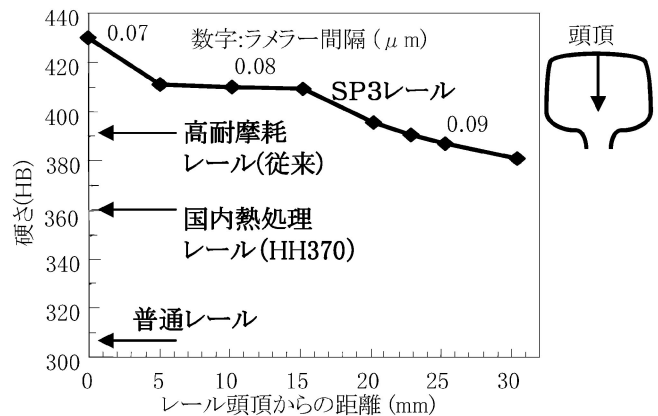


図5 SP3レールの頭部硬さ分布と、従来レールとの表面硬さの比較。

表2 SP3 レールの引張特性と従来レールの比較.

	0.2%YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
SP3 レール	967	1409	14
高耐摩耗従来レール	876	1312	16
熱処理 HH340 レール	857	1213	13
普通レール	656	909	14

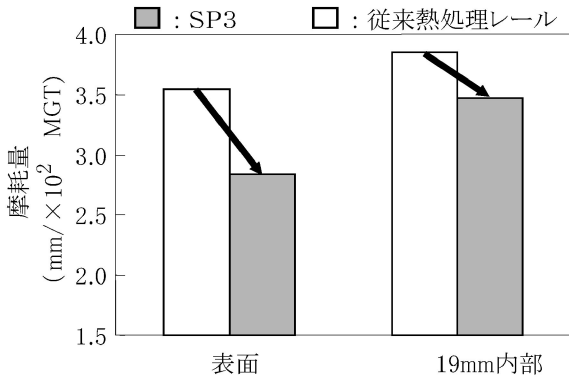


図6 西原式摩耗試験結果.

SP3 レール頭部の硬度分布を図5に示す. SP3 レールの表面ブリネル硬さ(HB)はHB430であり, 従来の高耐摩耗レールに対して, ブリネル硬さで30ポイント以上の高硬度が得られている. また, 25.4 mm 深さにおいてもHB390以上の高硬度を維持している.

(2) 引張特性

SP3 レールの代表的な引張特性を表2に示す. 0.2%耐力で967 MPa, 引張強さで1409 MPaの高強度を示す. このような高強度にもかかわらず, 良好な延性が得られている.

(3) 耐摩耗性

SP3 レールと従来の高耐摩耗レールの頭部表面および19.1 mm 深さより, 直径30 mm (内径16 mm), 厚さ8 mm の円筒形の摩耗試験片を採取し, 西原式摩耗試験により耐摩耗性を評価した. 車輪模擬材にはビッカース硬さHV370の調質鋼を用いた. 試験条件は, 接触応力: 1.5 GPa, 回転数: 800 rpm, すべり率: -10%, 無潤滑環境下である. 結果を図6に示す. 縦軸は, 試験片の摩耗重量減を1億トン(MGT)当たりのレールの摩耗深さ(mm)に換算して表しており, 数値の小さい方が良好な耐摩耗性を示す. SP3 レールは, 従来の高耐摩耗レールよりも, 表面, 内部ともに耐摩耗性が10%以上向上していることが確認された.

(4) 耐転動疲労特性

西原式摩耗試験機を用い, 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

表3 実敷設試験による耐摩耗性の比較.

レール	比摩耗量
従来高耐摩耗レール	100
SP3 レール	89

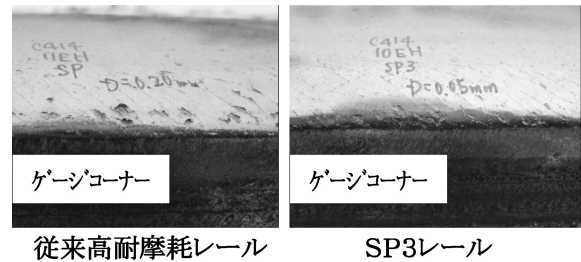


図7 実敷設レールの表面状態の比較.

を行った. その結果, 表層および19.1 mm 深さとともに, 3~13%の耐転動疲労特性の向上が確認された. これには, 高強度化や非金属介在物の軽減が寄与していると考えられる.

4. 実用化状況

SP3 レールは, 2008年より北米重貨物鉄道路線の曲線区間に実際に敷設され, 摩耗挙動や表面疲労損傷の生成状況について継続的に観察した. その結果, 従来の高耐摩耗レールと比較して10%以上の耐摩耗性向上が確認された(表3). また, レール表面の転動疲労損傷も軽微であり, 良好な耐疲労損傷性が得られている(図7). 溶接性も従来レールと同等であり, 2010年より実用化を進めている.

5. 特許

本技術に関しては特許4390004号公報, 特開2009-108396号公報, 特開2009-235515号公報など5件の特許提案をしており, 海外にも出願している.

文 献

- (1) 上田正治, 内野耕一, 松下公一郎, 小林 玲: 新日鉄技報, **375**(2001), 150-155.
- (2) 横山泰康, 三田尾真司: まてりあ, **41**(2002), 129-131.
- (3) Y. Kataoka, J. Furukawa, M. Ueda, T. Horita and H. Yamanka: 1992 Rail Steels Symposium Proceedings, (1992), 11-16.
- (4) 古川直宏ら: 変形特性の予測と制御, 日本鉄鋼協会(1994).
- (5) 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), 217-239.
- (6) C. Zener: Trans. Metall. Soc. AIME, **167**(1946), 550-595.
- (7) B. Jansson, M. Schalin, M. Selleby and B. Sundman: Computer Software in Chemical and Extractive Metallurgy, ed. by C. W. Bale *et al.*, (The Metall. Soc. CIM, Quebec, 1993), 57-71.