

海外の重貨物鉄道で使われる 高耐摩耗レール

木村達己¹⁾ 本庄 稔¹⁾ 長谷和邦²⁾

1. はじめに

19世紀初めにイギリスで開通して以来、鉄道は人や物資を運搬する重要な輸送手段としての役割を担ってきた。輸送手段が多様化した現在でも、地球温暖化抑制や環境汚染抑制の観点から鉄道輸送の重要性は見直されている。鉄道は旅客鉄道と貨物鉄道に分類され、それぞれの目的に応じて異なる特性が要求される。旅客鉄道では、より早く快適に移動するための高速化、騒音や振動抑制などの乗り心地向上などが求められる。一方、貨物鉄道の場合には、大量に物資を輸送することが重要であり、積載重量の増大(高軸重化)や長編成化(マイルトレイン)が図られている。特に、北米の大陸横断貨物鉄道、鉄鉱石や石炭を運搬するオーストラリアやブラジルの鉱物鉄道ではレールの耐久性向上が求められている。

海外重貨物鉄道におけるレールの使用環境を国内の旅客鉄道と比較表1に示す。軸重とは、車軸一本に負荷される最大荷重を示し、左右両輪にかかる荷重(輪重)の和である。また、1年間当たりの通トン数とは、1年間に通過する累積車両重量のことである。重貨物鉄道では軸重が最大40トン、通トン数も最大200 MGT(百万通トン)であり、国内の旅客鉄道と比較して数倍高い。こうした高軸重化はレールと車輪の接触環境を過酷化させレール摩耗損傷の原因となっている。特に遠心力が付加される曲線区間は直線区間に比べて摩耗が著しく、レール交換頻度やメンテナンスコストを増加させている。図1は北米重貨物鉄道の曲線区間に敷設・供用されたプリネル硬さ(HB)が370級の熱処理レールの摩耗状況である。供用期間がわずか2年と短期間にもかかわらずレ

ール頭頂部が20 mm以上摩耗し、レールの交換寿命に達している。こうした摩耗損傷の著しい環境下で用いられるレールには、特に優れた耐摩耗性が求められる。そのためマイクロ組織最適化による耐摩耗性向上の検討が進められてきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

レールには共析組成(炭素量:0.8 mass%)のパーライト組織を有する鋼が一般的に使われている。さらなる耐摩耗性向上の観点から以下のパーライト組織の高硬度化が行われている。一つ目は炭素量の増加による硬質セメントタイト量の増加であり⁽⁴⁾、炭素量を1%程度まで増加させた過共析レールが開発されている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。二つ目の手法は、ラメラ間隔の微細化である。この手法はセメントタイト量の増加(炭素量の増加)によらず高強度化が図れ、耐摩耗性向上に有効である⁽⁸⁾が、合金設計と製造過程での加工熱処理の最適化が重要となる。

ここでは、重貨物鉄道レールのマイクロ組織の制御指針について述べるとともに、パーライトラメラ組織の微細化を追求した高耐摩耗レール(SP3: Super Pearlite Type 3)を開発⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾したので、その基本性能並びに使用性能について紹介する。

表1 レールの使用環境の比較.

	軸重 (ton)	通トン数 (MGT/年)	摩耗量 (mm/年)
国内旅客鉄道	~16	~30	~2
海外重貨物鉄道	~40	~200	~12

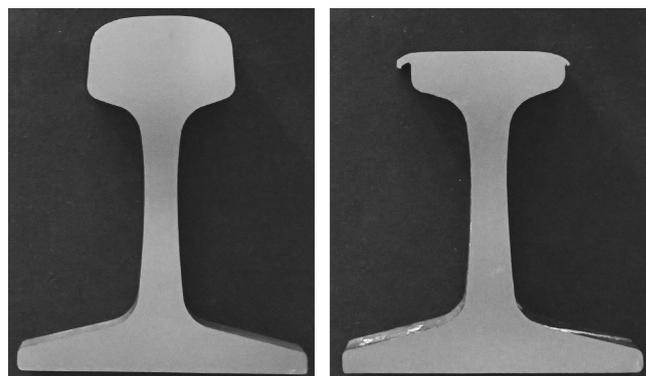


図1 重貨物鉄道におけるレール摩耗状況.

* 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(〒712-8511 倉敷市水島川崎通1丁目)
High Wear Resistance Rail for Heavy Haul Railways; Tatsumi Kimura, Minoru Honjo and Kazukuni Hase(Steel Products Research Department, Steel Research Laboratory, JFE Steel Co., Kurashiki)
Keywords: rail, heavy haul railways, wear, pearlite, eutectoid steel, lamellar spacing, hardness
2016年6月7日受理[doi:10.2320/materia.55.448]



図2 摩耗試験に供したレール鋼のマイクロ組織.

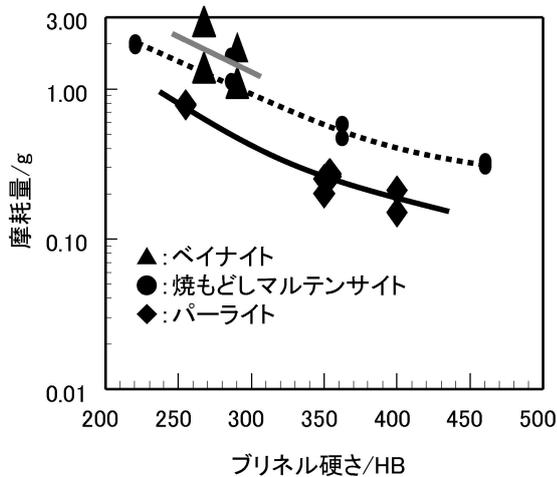


図3 ミクロ組織の異なるレール鋼のブリネル硬さと摩耗量の関係(8.1×10⁴回転後).

2. 耐摩耗性に及ぼすマイクロ組織の影響

レールの最適マイクロ組織を導出するため、図2に示すようにマイクロ組織をパーライト、焼もどしマルテンサイト、ベイナイトと変化させた試験片を作製し、2円筒式のすべり摩耗試験を行った。試験片のブリネル硬さと摩耗量の関係を図3に示す。いずれの組織においても硬さの増加とともに摩耗量は減少した。一方、同一ブリネル硬さで比較した場合、ベイナイト、焼もどしマルテンサイト、パーライトの順で摩耗量は減少し、パーライト組織を有する鋼の耐摩耗性が最も優れていた。レールの耐摩耗性は摩耗試験後の表面硬さと一義的な相関があることが知られており⁽²⁾、初期硬さが同じであっても、摩耗試験中の加工硬化能の高いパーライト組織を有する鋼は、ベイナイトや焼もどしマルテンサイトを有する鋼よりも高い耐摩耗性能を示す。そのため、一層の耐摩耗性向上には、優れた加工硬化特性をもつパーライト組織をさらに硬くすることが重要である。

3. パーライトラメラ微細化による耐摩耗性向上

パーライト組織は、板状の軟質なフェライトと硬質なセメ

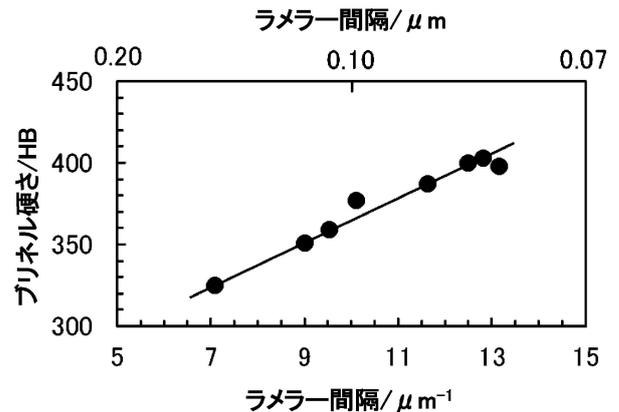


図4 共析鋼の硬さに及ぼすラメラ間隔の影響.

ンタイトが層状をなすラメラ構造であり、ラメラが同一方向であるコロニー、ラメラの方向は異なるがフェライトの結晶方位が同一となるブロックで構成される⁽¹¹⁾。パーライトの硬さを上昇させるための組織因子としては、ラメラ間隔の微細化が有効であることが知られている⁽¹²⁾。図4に共析鋼の硬さに及ぼすラメラ間隔の影響を示す。硬さとラメラ間隔には相関があり⁽¹³⁾、ラメラ間隔を微細化することにより硬さを上昇させることができる。しかしながら、オーステナイトからパーライトが生成する際、変態に伴う体積的な自由エネルギー(式(1))は減少するが、フェライト/セメントタイト界面を形成するために、界面エネルギー(式(2))は増加する⁽¹⁴⁾。

$$\text{体積的な自由エネルギー} : \Delta H \cdot V_M \cdot \left(\frac{T_E - T}{T_E} \right) \cdot \lambda \cdot \delta \cdot dx \quad (1)$$

$$\text{界面エネルギー} : 2\sigma\delta dx \quad (2)$$

ここで、 ΔH はパーライト変態のエントルピー変化、 V_M はパーライトのモル体積、 λ はラメラ間隔、 δ はラメラの厚さ、 dx はパーライトラメラが成長した距離、 $\lambda \cdot \delta \cdot dx$ はパーライト変態を完了した部分の体積(図5)、 σ は単位面積当たりの界面エネルギー、 T_E はパーライト平衡変態温度、 T はパーライト変態温度である。体積的な自由エネルギーよりも界面エネルギーが大きくなると、ラメラは成長しなくなるため、ラメラ間隔の微細化には限界がある⁽¹⁵⁾。

フェライト/セメントタイトの界面エネルギーに費やすこと

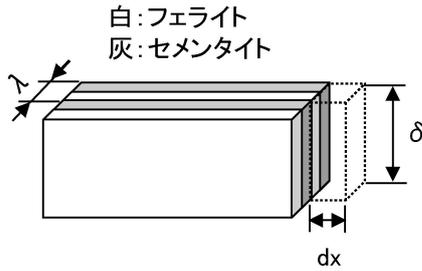


図5 パーライトラメラ成長の模式図.

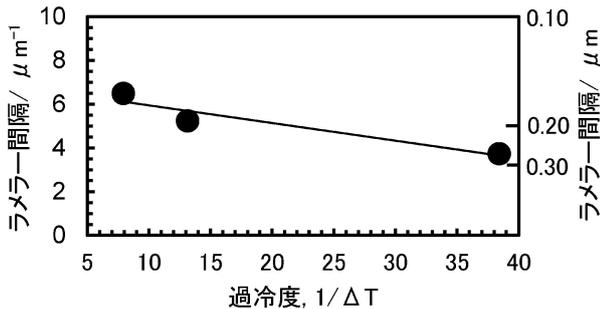


図6 過冷度とパーライトラメラ間隔の関係.

のできるエネルギーは、パーライト変態の駆動力の大きくなる。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。そのため、ラメラ間隔は下記式 (3) で記述できる⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾。

$$\lambda = \frac{2\sigma}{\Delta H \cdot V_M} \left(\frac{T_E}{T_E - T} \right) = \frac{2\sigma}{\Delta H \cdot V_M} \cdot \frac{1}{\Delta T} = a \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (3)$$

式 (3) より、ラメラ間隔を微細化するためには、 ΔT の増加が有効である。過冷度とパーライトラメラ間隔の関係を図6に示す。 $1/\Delta T$ が減少、すなわち ΔT が増加すると、ラメラ間隔は微細化している。このように、ラメラ間隔微細化のためには ΔT の増加が有効である。

次に ΔT を最大化するための考え方を示す。式 (4) に示すように、 ΔT はパーライト平衡変態温度 (T_E) とパーライト変態温度 (T) の関数であるため、 T_E の上昇、もしくは T の低下により ΔT が増加する。

$$\Delta T = \left(\frac{T_E - T}{T_E} \right) = \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_E} \right) \right\} \quad (4)$$

T_E は合金元素に依存するため、 T_E を上昇させる Cr などの合金成分の添加が有効⁽¹⁰⁾⁽¹⁷⁾ である。図7に600°Cおよび650°Cで恒温変態させた共析鋼のパーライトラメラ組織を示す。ラメラ組織は変態温度 T を低下することにより微細化した。

図8に共析鋼の連続冷却変態曲線 (CCT) の模式図を示す。冷却速度が速くなると、パーライト変態温度 T は低下する。そのため ΔT は増加するので、ラメラは微細化する。図9にラメラ組織に及ぼす圧延後の冷却方法の影響を示す。ラメラ組織は熱間圧延後、エア圧力や冷却時間を最適化させた衝風冷却 (Slack quenching) にて加速冷却を行

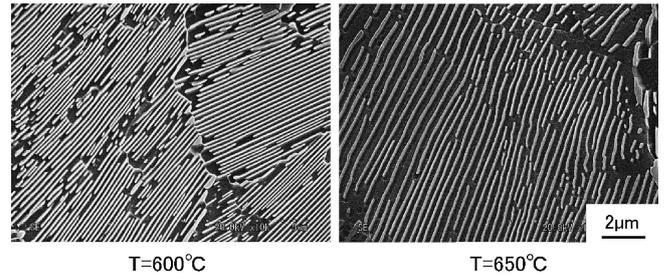


図7 600°Cおよび650°Cで恒温変態させた共析鋼のパーライトラメラ組織.

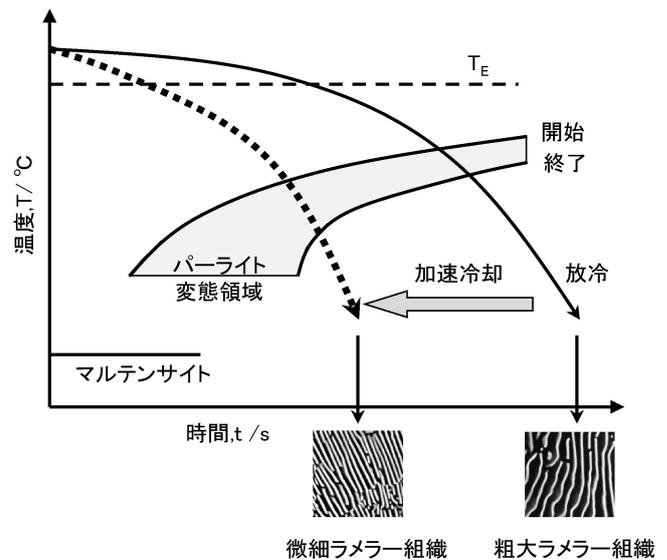


図8 共析鋼の連続冷却変態曲線 (CCT) の模式図.

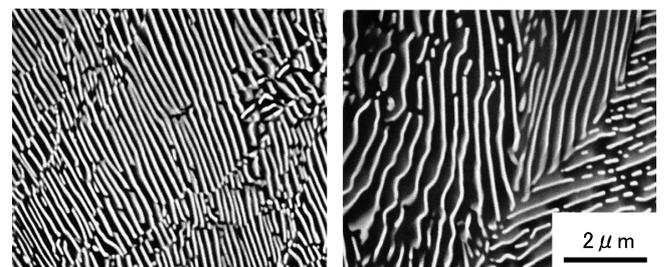


図9 ラメラ組織に及ぼす圧延後の冷却方法の影響.

うことにより微細化できる。

以上述べたように、レールの ΔT を最大化する Cr などの成分設計と熱間圧延後、加速冷却を行うことで、微細パーライトラメラ組織を有する高耐摩耗レールを開発した。

4. 微細ラメラ組織を有する高耐摩耗レール (SP3)

開発レールのマイクロ組織を図10に示す。開発レールは微細なパーライト組織であり、そのパーライトラメラ間隔は表面でおよそ $0.07 \mu\text{m}$ である。これは重貨物鉄道で主に使わ

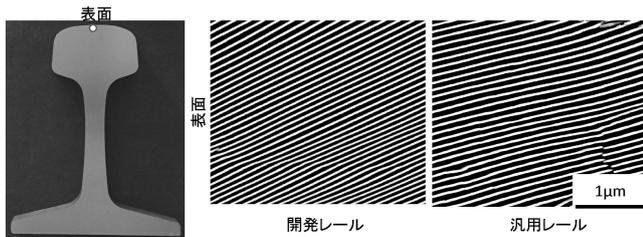


図10 パーライトラメラ組織の比較.

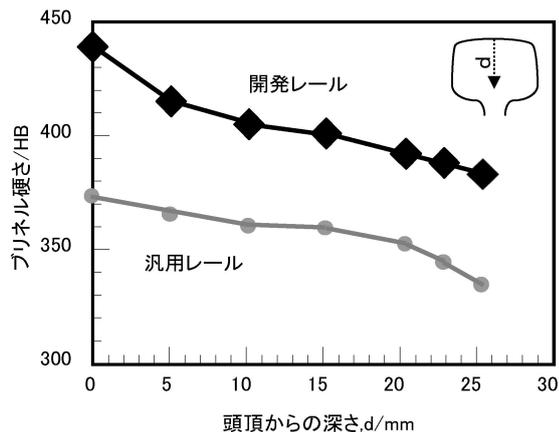


図11 開発鋼の硬さ分布.

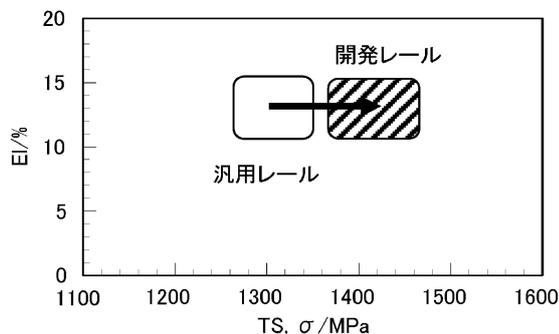


図12 開発鋼の強度と延性.

れている HB370級熱処理レール(汎用レール)のラメラ間隔よりも細かい. その結果, 図11にレールの頭部表面から深さ方向のブリネル硬さ分布を示すように, 開発レールは汎用レールと比較して HB50ポイント硬さが上昇した. 強度と延性の関係を図12に示す. 開発レールは汎用レールと比べて引張強さが 100 MPa 上昇したが伸びの低下は見られなかった.

北米の重貨物鉄道に開発レールを敷設し, 実環境でレールの摩耗量をモニターした結果を図13に示す. 開発レールの摩耗量は汎用レールよりも少なく, レール寿命は25%(6か月)向上した⁽¹⁰⁾. 北米の運輸技術センター(TTCI: Transportation Technology Center, Inc.)が保有するプエブロ実験線にて行われた敷設試験においても, 開発レールは優れた耐摩耗性を示した⁽¹⁸⁾. 開発レールは, 既に重貨物鉄道用高耐摩耗レールとして実用に供されており, 適用拡大を進めている.

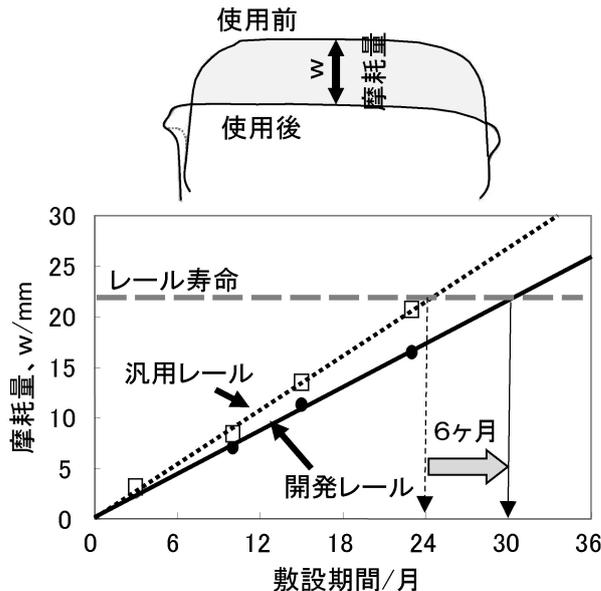


図13 実使用環境におけるレール摩耗量の比較.

5. まとめ

海外の重貨物鉄道に用いられるレールは, 高軸重の過酷な使用環境で用いられるため, 優れた耐摩耗性が求められる. そこで, レールの耐摩耗性に焦点を当て, パーライトラメラの微細化を追求した高耐摩耗レールを開発し, その基本性能並びに使用性能について研究開発の一端を紹介した.

レールには耐摩耗性以外に転動疲労特性(Rolling Contact Fatigue: RCF)や腐食耐食性など使用される環境に応じて要求される性能は様々である.

今後, 積載重量の増大(高軸重化)や長編成化により, レールの使用環境はますます厳しくなることが想定され, より安全で耐久性に優れたレールの開発が必要である.

文 献

- (1) Y. Kataoka, J. Furukawa, M. Ueda, T. Horita and H. Yamanaka: 1992 Rail Steels Symposium Proceedings, (1992), 11-16.
- (2) 杉野和男, 榎本引毅, 西田新一, 浦島親行, 影山英明, 服部正善: 製鉄研究, **303**(1980), 23-38.
- (3) 横山泰康, 三田尾真司, 酒井潤一, 山本定弘: 鉄と鋼, **86**(2000), 417-424.
- (4) 上田正治, 内野耕一, 瀬沼武秀: 鉄と鋼, **90**(2004) 1023-1030.
- (5) 上田正治, 佐藤琢也, 山本剛士, 狩峰健一: ふえらむ, **17**(2012), 40-45.
- (6) 上田正治, 松下公一郎, 岩野克也, 小林 玲, 山本剛士, 宮崎照久, 高橋 淳, 小林由起子: 新日鉄住金技報, **395**(2013), 64-72.
- (7) A. Joerg, B. Eisenkolb, J. Goriupp, A. Zlatnik, R. Hochfellner, S. Scheriau and H. P. Brantner: 11th International Heavy Haul Association Conference, (2015), 710-717.
- (8) P. Clayton and D. Danks: Wear, **135**(1990), 369-389.
- (9) 木村達己, 竹正峰康, 本庄 稔: JFE 技報, No. 26, (2010年8月), 11-16.

