耐摩耗性，耐損傷性に優れた 高強度パーライトレールの開発

横山 泰康¹⁾ 三田尾眞司²⁾

1. 緒 言

北米における輸送手段として，まず連想されるのは，航空機と自動車である．米国の旅客鉄道輸送システムとして，ワシントン-ニューヨーク-ボストンを結ぶメトロライナー・サービスがよく知られているが，これらの都市間にも航空機によるシャトル便が頻繁に就航しており，北米における鉄道は旅客輸送に関する限り印象が薄い．

しかし，大陸の豊富な地下資源や穀物などの貨物を，安価に，大量に港や消費地へ輸送する唯一の輸送手段は鉄道であり，北米(アメリカ，カナダ)における営業総路線長は約24万 Km(日本の8倍以上)にも達する．北米において鉄道は，特に貨物の輸送を通して産業を支える，極めて重要な役割を果たしている．

鉱物や穀物などの貨物輸送においては，旅客輸送のように「快適な空間」を輸送する必要がなく，大量輸送による高効率化が旅客輸送以上に求められる．北米では，貨物を満載した百両以上の長大編成列車(いわゆる，マイル・トレイン)が大陸を縦横に走り，満載時の貨車の車軸1本当りにかかる荷重(軸重)は，日本の旅客鉄道の約2.5倍の40トン近くに達している．

このような重荷重貨物鉄道においては，レールに要求される特性も厳しく，逆にレールの性能が，貨物の大量輸送化，効率化を左右するひとつの要因である．重荷重貨物鉄道において，レールの寿命を決定する二大因子は，溶接部および母材の疲労損傷と摩耗であり，レール鋼材質の改善は，この二点に絞られるといっても過言ではない．1970～80年代にかけて，2つの大きな技術開発によってこの2点の特性が大幅に改善された．

ひとつは，日本における転炉-真空脱ガス-ブルーム連続製造技術の確立である．これにより鋼中の非金属介在物(特に，高硬度酸化物と粗大窒化物)が極めて少ない清浄鋼が製造され，介在物を起点とする疲労損傷の発生が激減した⁽¹⁾⁽²⁾．

もうひとつは，日本におけるオンライン熱処理技術の開発である．熱間圧延後の鋼の熱容量を利用し，オーステナイト(γ)域から適度な冷却速度で加速冷却(Slack Quenching: SQ)することにより，より深くまで微細パーライト組織が得られ，熱処理レールの耐摩耗性は格段に向上した⁽³⁾⁽⁴⁾．現在，熱処理レールで得られる微細パーライトの層(ラメラ)間隔は約0.1 μm と極めて微細であり，工業的に得られる限界の水準にある⁽⁵⁾．

清浄な高性能熱処理レールの実用化は，1980年代以降，北米におけるレール寿命の延長，メンテナンスコストの削減に大きく寄与した．換言すると，レール材質の大幅な改善は，近年の急激な輸送効率化を促し，レールの使用環境は，以前にも増して苛酷化した．レール鋼には更に優れた耐疲労損傷性，耐摩耗性が求められている．

上述のように，レール鋼の材質開発は，清浄鋼の製造技術，およびオンライン型熱処理技術と，いずれもプロセス技術の開発に支えられた色彩が強く，本格的な合金設計や組織制御を行った鋼が実用化された例は少ない．従来にならぬ過酷な使用環境に十分に耐え得る高性能レールを開発するために，先端のプロセス技術を活用し，さらなる改良へと発展させるための本格的な組織制御，成分設計が，いまや必須である．

近年，C量を過共析レベルの0.9%まで増加させた高耐摩耗レールが開発され⁽⁶⁾，従来の範囲にとらわれない本格的な合金設計，組織制御の時代に入った．しかし，パーライト組織の各組織形態因子と耐摩耗性，耐転動疲労特性との関係について，従来系統的な知見が乏しく，組織制御の方向性が不明確であった．

本開発では，種々の組織形態を有するパーライト鋼の耐転動疲労特性，耐摩耗性を評価し，組織形態とこれらの特性との相関を明らかにした．また，得られた知見をもとに，レール

* NKK

総合技術研究所：1)主任研究員 2)チーム主査
High Strength Pearlritic Steel Rails with Superior Wear and Damage Resistance; Hiroyasu Yokoyama, Shinji Mitao(NKK)
2001年11月5日受理

ル鋼の合金設計およびTMCP (Thermo-mechanical Controlled Process) による本格的な組織制御を行い、耐摩耗性、耐転動疲労特性に優れた高強度パーライトレールを開発した。

2. 耐摩耗性、耐損傷性に優れたレール鋼の開発

パーライト鋼の組織形態因子として、図1に模式的に示すように、コロニーサイズ(D_{PC})、ラメラ間隔(λ)、セメントタイト分率(V_θ)が挙げられる。実験室溶解・圧延により化学成分、圧延条件および圧延後の加速冷却条件を種々変化させ、広範囲の組織形態を有するサンプルを得た。図2にミクロ組織写真の一例を示す。組織形態因子を定量化するとともに、新しく開発した転動疲労・摩耗試験装置⁽⁷⁾による特性評価を行い、耐転動疲労特性、耐摩耗性と各組織形態との相関を整理した。

図3は、組織形態から計算により求めた転動疲労損傷発生時間と実験値とを比較した一例⁽⁸⁾であり、両者間により一致が認められる。これらの結果をもとに組織制御による耐転動疲労損傷特性の改善について整理したのが図4である。

普通レールの典型的な組織形態($D_{PC}=150\mu\text{m}$, $\lambda=0.35\mu\text{m}$, $V_\theta=41\%$)をベースとして、コロニーサイズ(D_{PC})を $150\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ に微細化すると、転動疲労損傷発生寿命が18%延びる。またラメラ間隔(λ)を $0.35\mu\text{m}$ から熱処理

図1 パーライトの組織形態因子(模式図)。

図2 実験室検討材のミクロ組織の例。
P1: $D_{PC}=150\mu\text{m}$, $\lambda=0.35\mu\text{m}$, P2: $D_{PC}=80\mu\text{m}$, $\lambda=0.15\mu\text{m}$, P3: $D_{PC}=80\mu\text{m}$, $\lambda=0.33\mu\text{m}$, P4: $D_{PC}=50\mu\text{m}$, $\lambda=0.11\mu\text{m}$

レール並の $0.10\mu\text{m}$ に微細化すると29%もの大幅な改善が、セメントタイト分率を41→50%に増大させると6.5%の向上がそれぞれ見込まれる。但し、現状以上の λ の微細化は工業的には困難である。同様に耐摩耗性についても組織形態因子との関係が得られた(図5)。従来、あまり着目されていなかった「コロニーサイズ」の微細化が、耐転動疲労損傷特性、耐摩耗性の双方の改善に非常に効果的であるという結果は、注目すべき知見である。

3. 開発したレールの特性

合金成分設計、およびTMCPにより、微細コロニーを有するレールを実機試作した。表1に開発レールの引張特性例を示す⁽⁹⁾。図6は、開発レール頭頂下の硬さ分布を、従来の

図3 転動疲労損傷発生時間の実験値と計算値の比較⁽⁸⁾。

図4 組織制御による転動疲労損傷発生寿命の改善。

図5 組織制御による耐摩耗性の改善。

表1 開発レールの引張特性例.

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
開発レール	896	1340	14.5
従来熱処理レール	903	1302	11.5

図6 開発レールの頭頂下硬さ分布の例.

図7 開発レールと従来レールの耐摩耗性の比較.

熱処理レールと比較した例⁽⁹⁾で、従来熱処理レールに比べ、開発レールはより深くまで高硬度が維持されている。

開発レールから転動疲労および摩耗試験用 disk 試験片を採取し、それぞれの特性を評価した。図7に、乾燥条件下での回転数と摩耗減量との関係を示す⁽⁹⁾。従来レールを100とすると、開発レールは75から80で推移し、20~25%の耐摩耗性向上が認められる。また、例えば、摩耗減量1.25 gに達する回転数(時間、寿命と関連)を比較すると、開発レールは従来レールの約2倍となり、摩耗寿命が大幅に改善されている。

図8は、油潤滑条件下における転動疲労損傷発生時間について、開発レールと従来レールを比較したもので、耐転動疲労損傷性も約30%向上している。

従来レールと開発レールの摩耗試験後の断面ミクロ組織を図9に示す。従来熱処理レールでは、試験片内部に多数の微小亀裂の発生が認められるのに対し、開発レールではほとんど認められない。写真中、矢印の箇所において明らかにわかるように、亀裂はコロニー境界に沿って伝播している。ラメラ組織は、ラメラの方向に依存して塑性変形挙動に著しい異方性を示すため、塑性変形においてラメラ境界には高い応力集中が生じ、微小亀裂の発生・伝播サイトとなる。コ

図8 開発レールと従来レールの耐損傷性の比較.

図9 摩耗試験後サンプルの断面ミクロ組織.
(a) 従来レール, (b) 開発レール.

ロニーサイズの微細化により、応力集中が分散して微小亀裂の発生が抑えられ、耐摩耗性、耐疲労損傷性が向上するものと考えられる。

4. 実用化および将来性

開発した高強度パーライト鋼レールは、北米における実線敷設試験において良好な特性を発揮しつつあり、既に北米に納入され始めている。パーライト鋼の組織形態因子と耐摩耗性、耐転動疲労損傷特性に関する系統的な知見をもとに、本格的な合金設計とTMCPによる組織制御を行った本開発レールの優れた特性は、今後、時間の経過とともに認識が深まり、継続的に導入が拡大するものと期待される。

5. 特 許

特開2000-129397, 特開2000-345297, 特開2001-181737
他海外にも5件出願。

文 献

- (1) Y. Kataoka, *et al.*: 1992 RAIL STEEL SYMPOSIUM PROCEEDINGS, (1992), 11.
- (2) H. Schmiedders, *et al.*: *ibid.*, 35.
- (3) K. Fukuda, *et al.*: The Fourth International Heavy Haul Railway Conference, Brisbane, (1989), 51.
- (4) K. Sugino, *et al.*: *ibid.*, 41.
- (5) 山本定弘: 第161・162回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1996), 215.
- (6) M. Ueda, *et al.*: 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town, (1997), 355.
- (7) H. Yokoyama, S. Mitao, S. Yamamoto and M. Fujikake: Proc. of CM2000 (Tokyo), (2000), 154.
- (8) H. Yokoyama, *et al.*: 7th International Heavy Haul Conference, Brisbane, (2001), 551.
- (9) 横山泰康ら: NKK 技報(投稿中), (2001).