



連 携 記 事

ミクロ組織制御を活用した  
高耐久パーライトレールの開発

Development of High Performance Pearlitic Rail Utilizing  
Microstructural Control

JFEスチール(株)  
西日本製鉄所(福山地区)  
鋼材商品技術部 形鋼室 主任部員

本庄 稔  
Minoru Honjo

JFEスチール(株)  
スチール研究所  
鋼材研究部 主任研究員

安藤佳祐  
Keisuke Ando

1 はじめに

旅客や貨物の輸送を行う鉄道輸送は、バスやトラックなどの車輸送に比べて効率的に輸送可能な手段である。鉄道の輸送量当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、バスに比べて約1/2<sup>1)</sup>、トラックに比べて約1/9<sup>2)</sup>と少なく、地球温暖化や環境汚染の抑制の観点からモーダルシフトが進み、鉄道輸送の重要性はますます高まっている。

鉄道は、新幹線などの旅客鉄道と海外の穀物、鉱物輸送などの貨物輸送に大別される。輸送効率向上を目指し、旅客鉄道では、より早く目的地に到着するために、鉄道の高速化やダイヤの過密化が行われている。一方、貨物鉄道は、一度に大量の貨物を輸送するために、貨車の長大編成化や1車両当たりの積載重量が増加している。特に鉱物運搬を主体とする貨物鉄道では、積載重量が1車両当たり160トンまで増加しており、輸送環境が過酷化している。このような環境下で使用されるレールの寿命は短く、高耐久性を有したレールの開発が求められている。

これまで成分設計やレールのオンライン熱処理(圧延後の加速冷却(On-line Slack Quenching)のこと。以下、SQと略す)によるミクロ組織制御により、高耐久熱処理レールを開発してきた<sup>3,4)</sup>。本報では、レールのミクロ組織制御指針を述

べるとともに、現在、海外の貨物鉄道で主に使用されている、組織微細化を追求した高耐久レール(SP3: Super Pearlite Type 3)の基本性能と使用特性について述べる。

2 レールに要求される特性

表1に海外の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して示す。ここで軸重とは、車軸1本に負荷される荷重である。MGT(Mega Gross Tonnage, 10<sup>6</sup>トン)とは、レールの上を通過した列車重量(車両重量(トン/両)×編成(両)で算出)の積算値であり、ある区間での1年間あたりの通過トン数が年間MGTである。これらは、レールに及ぼすダメージを評価する指標として使用される。海外の貨物鉄道は、国内の旅客鉄道に比べて軸重、年間MGTともに数倍高いため、レールの寿命が短い。例えば、図1に海外の貨物鉄道で使用されたブリネル硬さが370ポイント級の熱処理レールの摩耗状況を示す。使用期間がわずか2年で20mm以上摩耗し、レール交換寿命に達している<sup>5)</sup>。レール交換頻度低減のために、優れた耐摩耗性が要求される。レール表面には車輪との接触により転動疲労層が蓄積し、き裂発生と成長により図2に示す疲労損傷が生じる。この転動疲労層や疲労損傷除去のため、定期的なメンテナンス(レール削正)が必

表1 レールの使用環境

|          | 軸重<br>(トン) | 年間MGT<br>(MGT/年) | 摩耗量<br>(mm/年) | レールの要求特性                     |
|----------|------------|------------------|---------------|------------------------------|
| 旅客鉄道(国内) | ～16        | ～100             | ～2            | 耐疲労損傷性                       |
| 貨物鉄道(海外) | ～40        | 300～             | ～14           | 耐摩耗性<br>耐疲労損傷性<br>高延性、溶接継手特性 |

要となる<sup>6)</sup>。さらに、レールの延性が低いと、き裂がレール内部へ進展し、最終的に折損に至る。メンテナンス軽減やレール交換頻度の観点から優れた耐疲労損傷性や高延性が、更には、溶接されてロングレールとして使用されるため、優れた溶接継手特性も要求されている。

### 3 高耐久化のための基礎検討

#### 3.1 耐摩耗性・耐疲労損傷性向上に及ぼすマイクロ組織・硬さの影響<sup>5)</sup>

レールの高寿命化のための最適なマイクロ組織を導出するため、パーライト、ベイナイト、焼戻しマルテンサイトの3種類の組織で、種々の硬さを有する試験片を作製し、2円筒式回転接触試験（西原式摩耗試験）を行った。図3に試験片のブリネル硬さと摩耗量の関係を示す。試験前の試験片の重量と $9.1 \times 10^4$ 回回転接触試験後の試験片の重量の差を摩耗量とした。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。また、同一硬さで組織の差を比較すると、ベイナイト、焼戻しマルテンサイト、パーライトの順で摩耗量は減少し、耐摩耗性はパーライト組織が最も優れていた。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<sup>7)</sup>、初期の硬さが同じでも加工硬化能が高いパーライト組織は、ベイナイトや焼戻しマルテンサイトより優れた耐摩耗性を示す。このように現在のレールの組織は、分岐器の

一部などを除き、耐摩耗性向上の観点からパーライトが主流である。更なる耐摩耗性向上のためには、パーライト組織で高硬度化することが重要である。

図4に西原式摩耗試験後の試験片断面のマイクロ組織を示す。高硬度化により表層の塑性流動は浅くなり、疲労損傷に対しても高硬度化は有効であると判断できる<sup>8)</sup>。

#### 3.2 パーライト組織の高硬度化手法<sup>5)</sup>

パーライト組織は、軟質なフェライトと硬質なセメ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であるブロックで構成される<sup>9)</sup>。パーライト組織の高硬度化の主な手法として、ラメラ間隔の微細化<sup>10)</sup>とセメンタイト量の増加<sup>11)</sup>が知られている。本報では、ラメラ間隔微細化に注目して説明する。

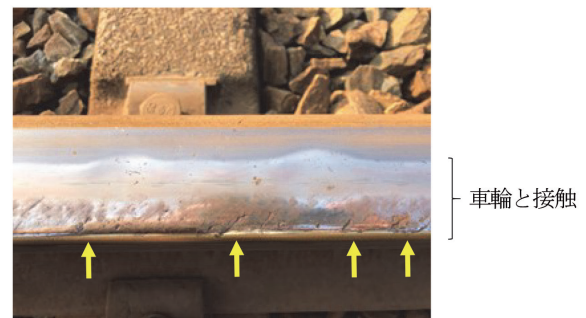


図2 レール表面に発生した疲労損傷の一例

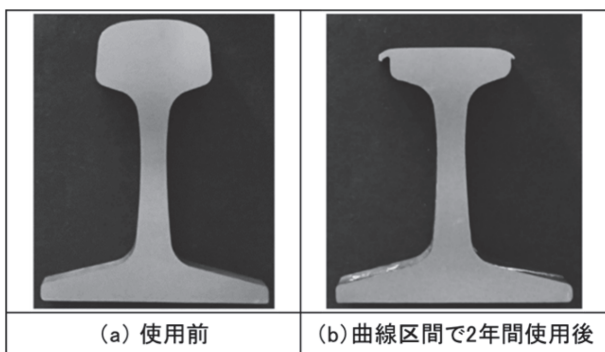


図1 海外の貨物鉄道におけるレールの摩耗状況<sup>5)</sup>

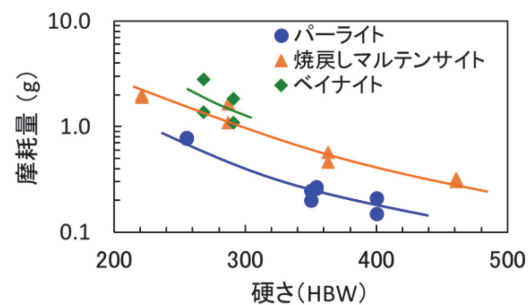


図3 異なるマイクロ組織を有する鋼の硬さと摩耗量の関係<sup>5)</sup>

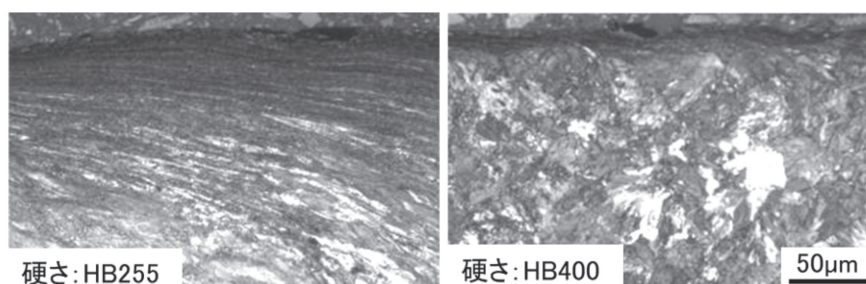


図4 摩耗試験後の断面マイクロ組織

図5に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<sup>12)</sup>、ラメラ間隔を微細化することで硬さを増加させることができる。オーステナイトからパーライトが変態する際、式 (1) に示す変態に伴う体積的な自由エネルギーは減少するが、フェライト/セメンタイトの界面を形成するために、式 (2) に示す界面エネルギーは増加する<sup>13,14)</sup>。

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

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

ここで、 $\Delta H$ は変態潜熱、 $\lambda$ はラメラ間隔、 $\delta$ はラメラの厚さ、 $dx$ はラメラが成長した距離、 $T_e$ はパーライトの平衡変態温度、 $T$ はパーライトの変態温度、 $\rho$ は密度、 $\sigma$ は単位面積当たりの界面エネルギーである。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。そのため、ラメラ間隔の微細化には限界もある<sup>15)</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、パーライト変態の駆動力の大きさになる。化学的な駆動力の大きさは、式 (3) で記述されるパーライトの平衡変態温度 ( $T_e$ ) からの過冷度 ( $\Delta T$ ) と関係がある。過冷度については次節で詳細に説明する。

$$\Delta T = \frac{T_e - T}{T_e} = 1 - \frac{T}{T_e} \dots\dots\dots (3)$$

式 (1)、式 (2) および式 (3) より、ラメラ間隔 ( $\lambda$ ) は式 (4) で記述できる<sup>14,15)</sup>。

$$\lambda = \frac{2\sigma}{\Delta H \cdot \rho} \left( \frac{T_e}{T_e - T} \right) = \frac{2\sigma}{\Delta H \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\Delta T} \dots\dots\dots (4)$$

一般に、 $\lambda$ は $1/\Delta T$ に比例すると報告されており、ラメラ間隔微細化のためには、 $\Delta T$ の増加が有効である<sup>13,16)</sup>。

### 3.3 過冷度 ( $\Delta T$ ) 増加の考え方<sup>5)</sup>

$\Delta T$ は前述した式 (3) に示すように、パーライトの平衡変態温度 ( $T_e$ ) とパーライトの変態温度 ( $T$ ) の関数であり、 $T_e$

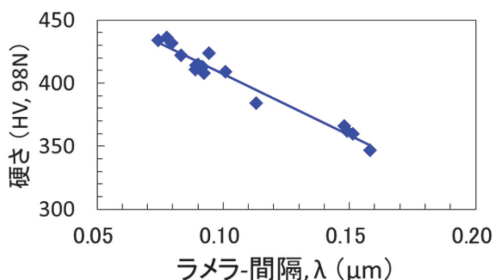


図5 硬さに及ぼすラメラ間隔の影響

の上昇、 $T$ の低下により増加する。

初めに  $T_e$  の上昇のための考え方を説明する。図6に  $T_e$  に及ぼす合金元素の影響を示す。 $T_e$  はThermo-Calc<sup>17)</sup> を用いて、Fe-0.8% C鋼をベースに計算した。Si量やCr量の増加、Mn量の減少により  $T_e$  が上昇した。1000℃に加熱後、650℃で等温変態したFe-0.8% C鋼とCr添加鋼のラメラ間隔を図7に示す。同じ温度でパーライト変態したにも関わらず、Cr添加鋼のラメラ間隔は微細である。これはCrの添加により  $T_e$  が上昇し、その結果、 $\Delta T$ が増加したことに起因する。このように  $T_e$  の上昇のためには、Si量やCr量の増加、Mn量の減少などが有効である。

次に  $T$  の低下のための考え方を説明する。図8に共析炭素鋼の連続冷却変態線図の模式図を示す。冷却速度を増加し、冷却曲線を (1) から (2) に移動させることによって  $T$  は低下

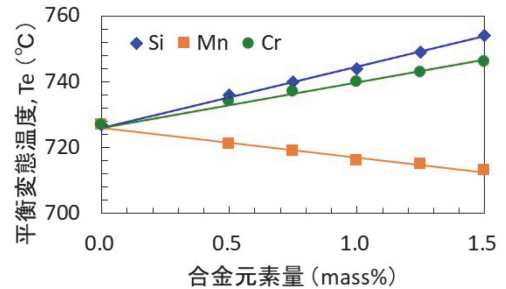


図6 パーライト平衡変態温度に及ぼす合金元素の影響

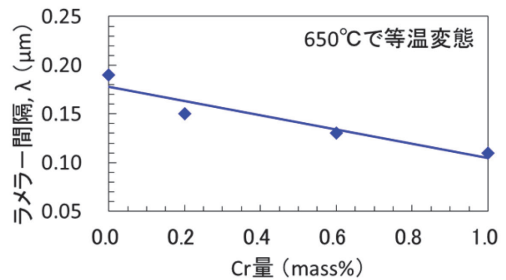


図7 Cr量の変化によるラメラ間隔の変化

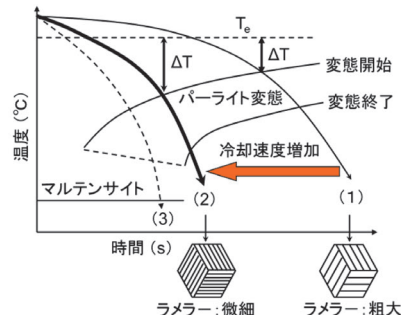


図8 共析炭素鋼の連続冷却変態線図の模式図



する。図9にラメラ組織に及ぼすレール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、エアー冷却条件 (SQ 条件) を最適化することで微細化できる。しかし、図8の冷却曲線 (3) に示すように、過度に冷却速度を増加させると、パーライト以外の組織も生成する。 $\Delta T$ を最大化させるため、 $T$ を制御する高度な熱処理技術が必要である。

以上述べたように、 $\Delta T$ を最大化する合金設計とSQ条件の最適化により、微細なラメラ組織を有した高耐久レール (SP3) を開発し、現在、海外の貨物・鉱山鉄道で使用されている。

## 4 高耐久レール (SP3) の基本性能と使用特性

### 4.1 SP3レールの化学成分と機械的特性

SP3レールの代表的な化学成分を表2に示す。比較レールは、海外の貨物鉄道で使用されているブリネル硬さが370ポイント級の熱処理レール (以下、従来レールと略す) である。SP3レールは、レール頭部表層から内部まで高硬度化することを目的に、上記検討結果を基に合金成分ならびにSQ条件の最適化を行い、 $\Delta T$ を最大化している。表3に代表的な引

張特性および米国鉄道工学 & 保線協会 (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association、以下、AREMA規格と略す) に記載の規格値を示す。SP3レールの0.2%耐力は987MPa、引張強さは1410MPaであり、AREMA規格を十分に満足している。また、SP3レールは従来レールに比べて約100MPaの高強度化も達成している。一般に、高強度化すると脆くなると考えられるが、SP3レールの伸びは従来レールと同等以上であり、高延性化が得られている。

図10にSP3レールの頭部断面の硬度分布の一例を従来レールと比較して示す。SP3レールは従来レールに比べて、ブリネル硬さで40ポイント以上高硬度化している。更に、従来レールの表層硬さとSP3レールの25.4mm深さの硬さがほぼ同等であり、SP3レールはレール頭部内部まで高硬度を有している。

図11にレール表層とレール頭部内部25.4mm位置のミクロ組織を示す。SP3レールのラメラ間隔は表層で74nmであり、従来レールのラメラ間隔に比べてかなり微細である。SP3レールの頭部内部25.4mm位置のラメラ間隔は、従来レールの表層のラメラ間隔とほぼ同等であり、レール頭部内部までラメラ微細化が実現されている。

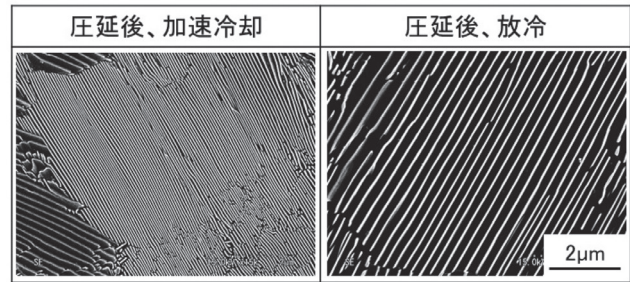


図9 ラメラ組織に及ぼす冷却方法の影響

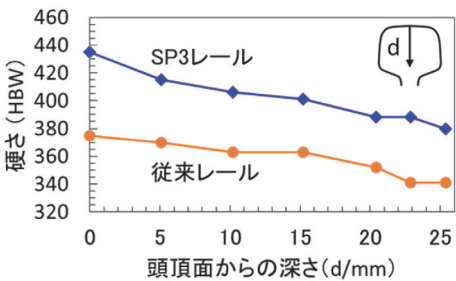


図10 レール頭部の硬度分布

表2 SP3レールの代表的な化学成分

| (mass%) |      |      |      |       |       |        |
|---------|------|------|------|-------|-------|--------|
|         | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Others |
| SP3レール  | 0.82 | 0.52 | 0.56 | 0.014 | 0.004 | Cr, V  |
| 従来レール   | 0.81 | 0.29 | 1.10 | 0.014 | 0.005 | Cr     |

表3 SP3レールの代表的な引張特性

|               | 0.2%耐力              | 引張強さ                 | 伸び    |
|---------------|---------------------|----------------------|-------|
| SP3レール        | 987MPa              | 1410MPa              | 13.4% |
| 従来レール         | 866MPa              | 1306MPa              | 12.2% |
| AREMA規格 (高強度) | ≥ 827MPa (120.0ksi) | ≥ 1179MPa (171.0ksi) | ≥ 10% |

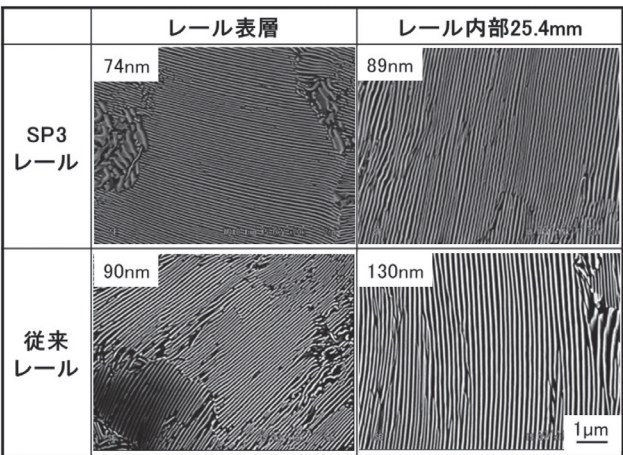


図11 パーライトラメラ組織の比較

4.2 SP3レールの溶接継手特性

レールは継目の管理、メンテナンス性などの観点から、溶接によりロングレール化されるため、優れた溶接継手特性も要求される。海外の貨物鉄道では、フラッシュバット溶接<sup>18,19)</sup>やテルミット溶接<sup>19)</sup>が適用されている。ここでは、フラッシュバット溶接とテルミット溶接の溶接継手特性について一例を紹介する。

図12にSP3レールの溶接部のマクロ写真を示す。溶接

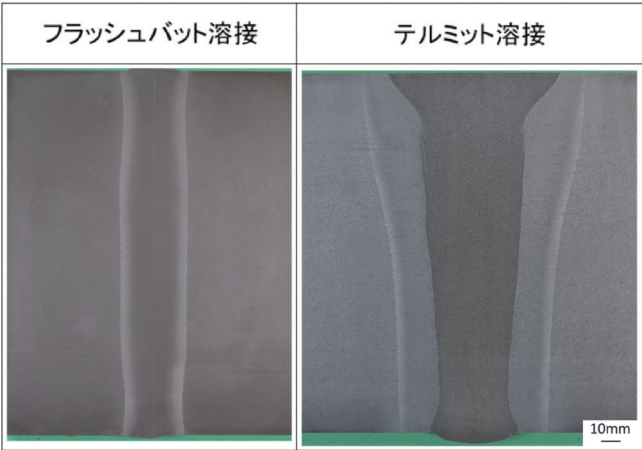


図12 溶接継手部のマクロ組織

部には割れや未接合などの欠陥は認められず、ミクロ組織はフルパーライトであった。図13、図14にSP3レールの頭部2.5mm位置の硬さ分布を従来レールと比較して示す。SP3レールの溶接部の硬さは、従来レールよりも硬く、従来レールと同様に良好な継手硬さ分布を示している。表4にAREMA規格に準拠した静的4点曲げ試験を行った結果を示す。破壊強度、たわみ量ともにAREMA規格を十分に満足しており、優れた溶接継手特性を有している。

4.3 SP3レールの実敷設による評価試験

SP3レールと従来レールは、実際に海外の貨物鉄道の曲線区間に交互敷設（SP3レールー従来レールーSP3レールー従来レールのように交互に敷設）され、摩耗挙動やレール表面の疲労損傷発生状況について継続的な観察も実施した。図15に約170MGT経過後（レール削正を実施してから約90MGT通過後）のレールの表面状態を示す。SP3レールには有害な疲労損傷の発生は認められず、優れた耐疲労損傷性を有していた。図16にSP3レールの摩耗挙動を従来レールと比較して示す。レール頭部表面から22.2mm摩耗すると寿命となり、レール交換が行われる。そのため、摩耗量が22.2mmにおいてSP3レールと従来レールの寿命を比較すると、従来レール

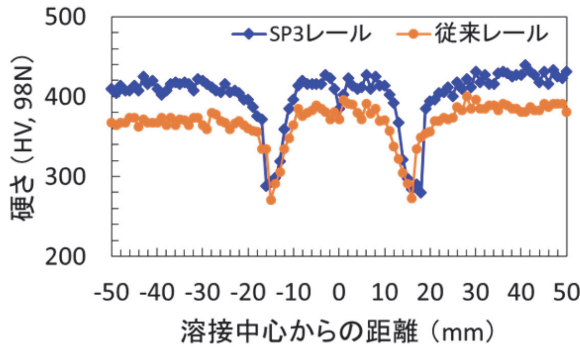


図13 フラッシュバット溶接継手部の硬度分布

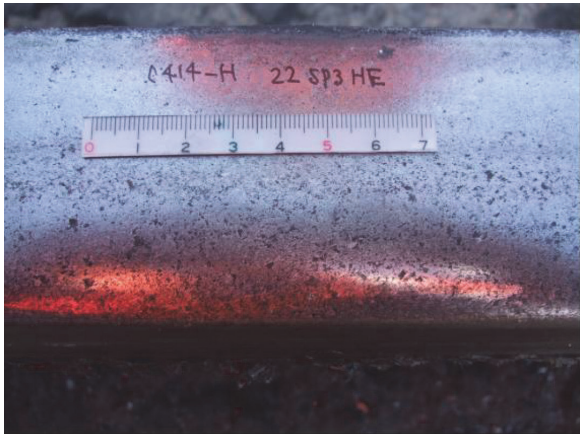


図15 実敷設レールの表面状態

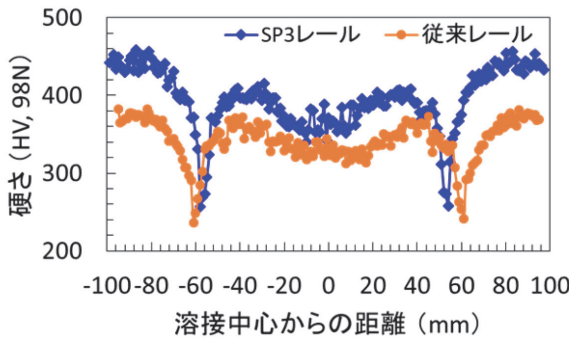


図14 テルミット溶接継手部の硬度分布

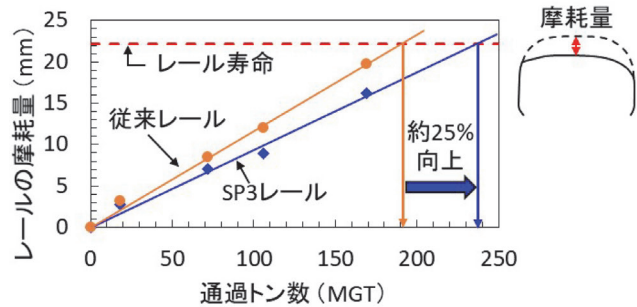


図16 実敷設によるレール摩耗量の変化



表4 SP3レールの溶接後の静的4点曲げ試験結果

|                   | フラッシュバット溶接                                    |                    | テルミット溶接                                       |                    |
|-------------------|-----------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|--------------------|
|                   | 破断荷重<br>( $\times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ )     | たわみ量<br>(mm)       | 破断荷重<br>( $\times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ )     | たわみ量<br>(mm)       |
| SP3レール            | 14.5<br>13.2                                  | 48.0<br>35.7       | 10.9<br>11.0                                  | 23.1<br>19.6       |
| AREMA規格<br>(Min.) | 8.8<br>( $1.25 \times 10^5 \text{lbs/in}^2$ ) | 19.1<br>(0.75 in.) | 8.4<br>( $1.20 \times 10^5 \text{lbs/in}^2$ ) | 15.2<br>(0.60 in.) |

ルは約190MGT (2年) と短期間であるのに対し、SP3レールの寿命は約25% (約45MGT) 向上し、優れた耐摩耗性を有していた。交互敷設の場合、レールのメンテナンスは特性の低いレールにあわせて実施されるため、メンテナンス時期ではないレールもメンテナンスが実施される。そこでSP3レールのみを敷設して試験を実施すると、レールの寿命が約80% (約150MGT) 向上する結果も得られており、メンテナンス軽減やレールの高寿命化による交換頻度低減にも寄与している。北米の運輸技術センター (TTCI: Transportation Technology Center, Inc.) で行われた敷設試験においても、SP3レールは優れた耐摩耗性を示した<sup>20)</sup>。

## 5 おわりに

本報では、レールのマイクロ組織制御指針と開発したSP3レールの基本性能および使用特性について紹介した。SP3レールは紹介した敷設試験以外でも、優れた耐摩耗性や耐疲労損傷性を有することが確認されている。既に、北米、南米、オーストラリアの貨物・鉱山鉄道で広く採用され、レールの交換頻度低減やメンテナンス軽減に寄与している。今後も輸送効率向上の観点から、レールの使用環境はますます過酷化すると想定され、更なる高耐久レールの開発が必要になると考えられる。

開発したSP3レールは、平成23年に「日本金属学会技術開発賞」を受賞、平成30年には「大河内記念技術賞」を受賞し、高い評価を得ている。海外の鉄道会社様、溶接会社様をはじめ、関係各位の皆様のご協力があり実用化に至っており、この場をお借りして御礼申し上げたい。

### 参考文献

- 1) 石渡健吾, 青木辰夫, 丸山美帆, 六川和歌子, 荒川奈美, 遠藤瞳, 檜垣達郎: 早稲田社会科学総合研究 別冊, 2015年度学生論文集, (2016), 167.
- 2) 翟碩: 近畿大学商学研究, 16 (2017) 1, 91.
- 3) Y.Kataoka, J.Furukawa, M.Ueda, T.Horita and H.Yamanaka: 1992 Rail Steels Symposium Proceedings,

- (1992), 11.
- 4) 横山泰康, 三田尾眞司, 酒井潤一, 山本定弘: 鉄と鋼, 86 (2000) 6, 417.
- 5) 木村達己, 本庄稔, 長谷和邦: まてりあ, 55 (2016) 10, 448.
- 6) 野本耕一: 新線路, 72 (2018) 7, 50.
- 7) 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.
- 8) M.Ueda and K.Matsuda: Wear, 444-445 (2020), 203120.
- 9) 高橋稔彦, 南雲道彦, 浅野厳之: 日本金属学会誌, 42 (1978) 7, 708.
- 10) 田代均, 佐藤洋: 日本金属学会誌, 55 (1991) 10, 1078.
- 11) 上田正治, 佐藤琢也, 山本剛志, 狩峰健一: ふえらむ, 17 (2012) 6, 380.
- 12) P.Clayton and D.Danks: Wear, 135 (1990) 2, 369.
- 13) C.Zener: Trans. AIME, 167 (1946), 550.
- 14) H.K.D.H.Bhadeshia and S.R.Honeycombe: Steels (Third Edition), Elsevier, Butterworth-Heinemann, UK, (2006), 53.
- 15) 山本定弘: 第161・162回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1996), 215.
- 16) 高木節雄, 津崎兼彰: 材料組織学, 朝倉書店, (2000), 57.
- 17) 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.
- 18) 藤井充, 中野渡弘昌, 成合潔: JFE技報, 34 (2014), 109.
- 19) 山本隆一: 溶接学会誌, 81 (2012) 8, 641.
- 20) D.Szablewski, D.Glitscher, J.LoPresti and S.Kalay: 10th International Heavy Haul Association Conference, (2013), 43.

(2020年6月30日受付)