

鉄道用軌条の歩みと今後の展望

Progress and Prospect of Rail for Railroad

松下 公一郎* 石橋 弘之 園山 恭平
Koichiro MATSUSHITA Hiroyuki ISHIBASHI Kyohei SONOYAMA

抄 録

日本製鉄(株)九州製鉄所の創業1901年より、軌条・形鋼工場では鉄道用軌条の生産を開始し、以降約120年に渡り日本の経済発展とそれに伴う鉄道輸送の“高度化”および“高速化”に対応してきた。一方で海外は貨物輸送が主体で、輸送効率向上の面から“重荷重化”が進展し、耐摩耗性および耐ころがり損傷性向上のニーズが高く、レールの“長寿命化”に対応してきた。軌条・形鋼工場ではそのような顧客のニーズに対応すべく製造プロセスの改良・改善を重ね、150mレールの出荷体制構築や商品の高度化を推進した。本稿ではその内容を報告すると共に、今後の展望を述べた。

Abstract

Since its establishment in 1901, the Kyushu Works of Nippon Steel Corporation have been producing railway tracks at its rail and structural steel plant. Over the past approximately 120 years, it has adapted to the “sophistication” and “speed enhancement” of railway transportation in response to Japan’s economic development. Meanwhile, overseas markets have primarily focused on freight transport, leading to advancements in “heavy load capacity” for improved transport efficiency. There is also a high demand for enhanced wear resistance and resistance to rolling contact fatigue damage, aligning with the goal of extending the lifespan of rails. To meet these customer needs, the rail and structural steel plant has continuously improved its manufacturing processes, established a shipping system for 150-meter rails, and promoted product sophistication. This report outlines these efforts and provides insights into future prospects.

1. 緒 言

1901年に日本製鉄(株)九州製鉄所軌条・形鋼工場(以下軌条工場と略す)において、国産レールの製造を開始した。その後、国内外の鉄道では、列車速度の向上と車両荷重の増大が進むに伴い、軌道に対する安全性・快適性の向上、メンテナンスコスト低減に対するニーズが高まり、レールそのものに対する品質要求も高まってきた。

それに対し、軌条工場では、様々なレール製造に関する技術開発を進め、レールの品質向上、新たなレールの開発に努め、日本のみならず海外における鉄道輸送の高度化に多大な貢献を果たした。また、品質要求に止まらず生産性の向上にも努め、国内外のレール需要に貢献してきた。表1に日本の鉄道におけるメインピックスと日本製鉄のレール開発状況を示す。

表1 日本の鉄道と日本製鉄のレール開発の歴史
Brief history of Japan Railway and development of rail at Nippon Steel

1872年(明治5年)	鉄道創業(新橋-横浜)
1889年(明治22年)	東海道本線全線開通(新橋-神戸)
1901年(明治34年)	八幡製鐵所におけるレール製造開始
1933年(昭和8年)	25mレール製造開始
1954年(昭和29年)	頭部熱処理(HH)レール量産化
1964年(昭和39年)	東海道新幹線開業
1968年(昭和43年)	端頭部熱処理(EH)レール量産化
1970年(昭和45年)	ユニバーサル圧延操業開始
1972年(昭和47年)	新幹線用50mレール生産開始
1975年(昭和50年)	山陽新幹線全線開業
1977年(昭和52年)	新頭部熱処理レール生産開始(NHHレール)
1982年(昭和57年)	東北新幹線・上越新幹線開業
1987年(昭和62年)	DHHレール開発(インライン熱処理)
1994年(平成6年)	ペイナイト鋼レール開発
1999年(平成11年)	重荷重鉄道用過共析(HE)レール量産化
2003年(平成15年)	波状曲がり規格対応レール量産化
2014年(平成26年)	150mレール出荷開始
2019年(令和元年)	中間強度レール生産開始

* 厚板・建材事業部 形鋼・スパイラル鋼管技術部 形鋼技術室長 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

2. これまでの取り組み

2.1 日本の鉄道の歴史とレール製造の変遷

日本で初めて鉄道が敷設されたのは1872年5月品川－横浜間であり、その後1889年7月新橋－神戸間600kmの東海道本線が開通している。この他にも全国各地に私鉄が開通し、レール需要の急激な増加が見込まれたため、当時の官営八幡製鐵所第一期工事として、軌条工場が1897年6月に着工、1901年11月に操業を開始した。最初に生産したものは60ポンド30feetレール（重量約30kg/m、長さ9.144m）で、レール圧延としては、日本初のことであり、ドイツより圧延技術者を雇い入れ、圧延に関して全く未知なる当時の関係者はその指導の下に操業を行い、国産のレール製造の幕開けとなった。その後昭和初期には、レールの呼称が60ポンドレールから30kgレール、75ポンドレールから37kgレールに変わり、1945年8月（終戦）までには13サイズまで製造品種を拡大し、レールの大断面化やクレーンレール、ポイントレールの製造が始まった。

第2次世界大戦終戦後の1948年11月より生産を再開し、高度成長による更なる需要増に対応すべく生産能力の拡大を主眼とした設備増強が進められた。

1945年から20年間に4回の工場改造工事を行い着実に生産能力の拡大を図ってきた。また1956年よりレールメーカーである当時の八幡製鐵(株)と富士製鐵(株)およびユーザーである日本国有鉄道との3者間でレール仕様に関する研究会が開催され、レール形状の改善が進められた。その中で、50kgレールや37kgレールの形状改良等が議論され、更には1958年より東海道新幹線に適用するレールの形状に関する議論もなされ、50Tレールや山陽新幹線向けに改良された60kgレール等の生産を開始した。また、レールは25mが最長かつ標準長さであったが、その状態では騒音問題やボルト締結部付近の保守費増加が課題とされたため、メンテナンス省力化を目的として両端を溶接して1.5kmのロングレールに加工する方法が推進された。1970年に長尺レール(50m)の製造が要請され、1972年9月より生産を開始した。

以降、現在に至るまでレールの製造に関する革新的な設備投資を実施した。1970年にレール頭部の鍛錬効果や寸法精度の向上を目的にしてユニバーサル圧延を導入、1987年にレールの高硬度化ニーズ・長寿命化ニーズに応えるため新たな熱処理装置をインラインに設置し、レール頭部の深部まで高硬度が保たれるDHHレールを開発した。このインライン熱処理装置により1994年のベイナイトレール、1999年の過共析レール、そして2019年の中間強度レールの開発および実用化を果たしてきた。また、2014年に長尺150mレールの出荷体制を構築、この長尺化は列車の乗り心地を良くし、軌道の信頼性向上と溶接作業削減に貢献した。これら製造レールの造り込み寸法の高精度化・長寿命

化・長尺化に関して以下にその詳細を述べる。

2.2 レール製造プロセス

現在のレールの一貫製造プロセスを図1に示す。鉄の主原料は、鉄鉱石、石炭である。これらを処理してできる焼結鉱、コークスが高炉に装入され、高温の熱風が吹き込まれることにより、還元反応をおこし、高温の溶けた銑鉄となる。溶けた銑鉄はトビーードカーと呼ばれる特殊車両で次工程である製鋼工場に搬送される。製鋼工場では、まず銑鉄は転炉に移される。高圧の酸素を吹き込むことで酸化反応が生じ、過剰な炭素分などが取り除かれ、銑鉄はより強靱な鋼となる。更に二次精錬工程で最終的な化学成分調整および水素などガス成分の除去が行われ、連続鑄造機で冷やし固めることで、ブルームと呼ばれる矩形の鑄片が作られる。ブルームは軌条工場に送られ、加熱炉に入れ再度加熱したのち、熱間圧延工程に送られる。圧延機には、上下2本あるいは上下左右4本のロールが配置され、それらには孔型(カリバー)と呼ばれる溝が彫られており、この溝の間に材料を通す(圧延)ことにより、段々とレールの形状に伸ばされ、最長150mのレールが製造される。DHHなどの熱処理レールは、空冷装置にて熱処理される。その後、室温近くまで冷却されたレールは、ローラー式の矯正機に

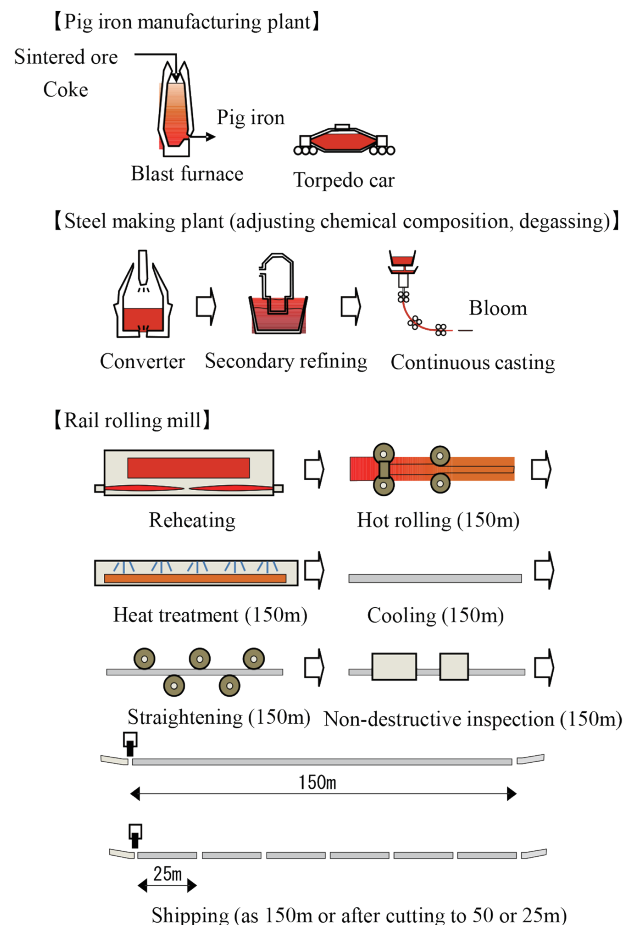


図1 レールの一貫製造プロセス
Integrated rail manufacturing process

より真っ直ぐに矯正され、非破壊検査にて寸法形状、表面性状、内部性状の検査が行われる。そして、150m長さ、または需要家指定の注文長さに切断し、出荷される。

2.3 レール製造技術の革新

2.3.1 レール寸法・形状の高精度化

列車速度の高速度化に伴い、レールの寸法・形状精度への厳格化ニーズが高まってきた。欧州ミルではレールの圧延方法として、従来のカリバー圧延法に変わって、ユニバーサル圧延法が導入された。軌条工場では、フランスのWendel社の技術をベースに独自技術を加えたユニバーサル圧延法の開発に取り組んだ。ユニバーサル圧延法は上下2本のロールに加え、左右2本のロールが配されている。この圧延法の模式図を従来のカリバー圧延法と共に図2に示す。これら4本のロールは微細な位置調整が可能となり、カリバー圧延法と比較して圧延されるレール寸法の細やかな調整が可能となる。加えて、①レール頭部および脚部の厚み方向に直接圧下をかけられ鍛錬効果が大きく、使用上重要な部分である頭部および脚部に優れた材質が得られる、②圧延工程を通じ均等な圧下を加えることができるため、寸法精度に優れる、③有害な表面疵の発生が少ない等の特長を有する。

1970年6月、世界で初めての本格的ユニバーサル圧延法によるレール圧延工場に生まれ変わり、生産能力は70000t/月まで拡大された。1997年には寸法精度を飛躍的に高める高精度ユニバーサル仕上げ圧延機を増設し、更なる高速化へのための寸法精度向上を実現した。その後も国内60レール、50Nレールなどに加え、輸出向けレール(米国規格、欧州規格等)や、分岐器用レールなどにもユニバーサル圧延法の適用範囲を拡大し、レール寸法の高精度化に取り組んでいる。

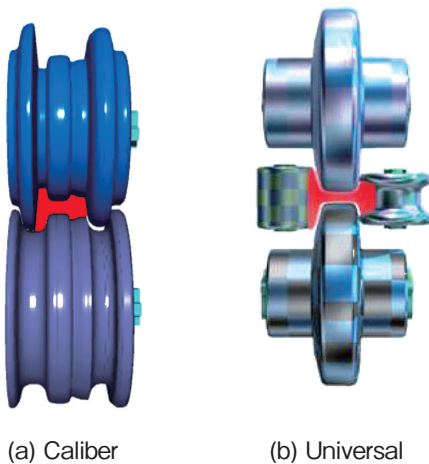


図2 レール圧延方式
Method of rail rolling

2.3.2 敷設環境に適したレールの開発

(1) インライン熱処理レールの製造

軌条工場では、1950年代より、高強度化のニーズに応えるため、熱処理レールの開発を行ってきた。初期においては、頭部を誘導加熱により加熱した後、水による焼き入れ、焼き戻しを行うプロセス(オフライン熱処理)に始まり、1987年には新たな熱処理として、圧延直後の熱を利用し、再加熱することなくそのまま空気による熱処理を行う“インライン熱処理プロセス”を採用した熱処理レールの製造が開始された。インライン熱処理レールは、レール頭部の深部まで高硬度が保たれるためDHH(Deep Head Hardened)レールと呼ばれるものである^{1,2)}。レール圧延後長さは、150mであり、当時はホットソーにて製品長さに切断余裕度を付与した状態で熱間鋸断を行い、25mでの熱処理を実施していた。2002年には、熱間での鋸断は行わず圧延長さ150mでの熱処理を可能とする設備改造を実施した。

(2) 重荷重鉄道向け耐摩耗性レールの開発/HEレール™

重荷重鉄道のニーズを捉え更なる耐摩耗性向上のため、上述の熱処理技術に加えて材質開発に取り組み、HEレール™を開発し^{3,5)}、1999年に量産を開始した。HEとはHyper Eutectoid(過共析鋼;0.85%以上の炭素鋼)の略称で、約0.9%の炭素量を有している(国内向け熱処理の主流HH340は約0.8%の炭素量)。図3に硬度と摩耗量および炭素量の関係を示す。硬くなるほど、摩耗量が小さくなっていく。また、同じ硬さでも、炭素量が多い方が摩耗量は小さく、耐摩耗性を有している。また、高硬度化により車輪とのころがり接触面の耐損傷性も向上する。この耐摩耗性および耐表面損傷性の向上により、HEレールは主に海外の貨物鉄道で高い評価を得ており、特に軸重の大きい貨物鉄道では、約1.0%の炭素を含むレールも使用されている。なお、高炭素化、高硬度化による耐摩耗向上やころがり接触疲労損傷発生メカニズムについては、本技報“高硬度パーライト鋼の摩耗、ころがり接触疲労損傷特性”等⁶⁾を参照されたい。

(3) 旅客鉄道向けレール開発/ベイナイト・中間強度

レールは、車輪との繰り返しの接触により、表面に疲労

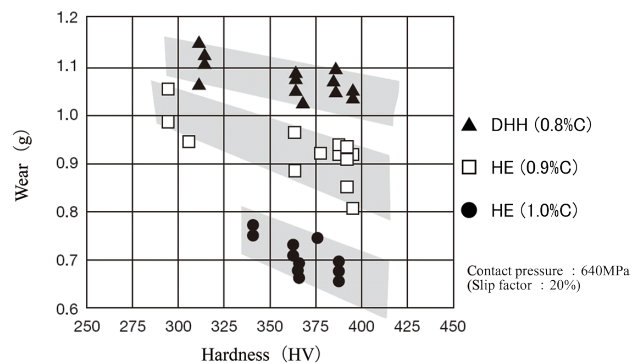


図3 硬度と摩耗の関係
Relation between hardness, wear, and carbon content

損傷（シェリング）が生じることがある。シェリングは高速運転の直線区間に発生し、レール頭部の落ち込みや剥離に至ることがある。このようなシェリング発生の効果的な対策として、レール削正が実施されていた。レール削正量に相当する分量だけレール摩耗を促進することで、シェリング発生を抑制することをコンセプトにして1994年にバイナイトレールを開発、実用化した。バイナイトレールは、強度などの基本的な性質は普通レール（JIS E 1101）のレベルを満足しながら、適度な摩耗の促進によりシェリング損傷の起点となるレール頭頂面の金属疲労層を自己除去すると共に、白色層起点型のシェリング損傷に対する耐性を兼ね備えたレールであり、主に直線区間での適用が進んでいる⁷⁾。

また、近年、曲線半径500–800mの曲線区間に敷設されたHH340レールの外軌に“ゲージコーナー亀裂”と呼ばれる損傷が発生し、摩耗交換あるいは通トン交換基準に達する前に交換に至るケースが増えていることが報告されている。発生原因は、シェリングと同じ車輪との繰り返しこすり接触であることから、疲労蓄積と摩耗のバランスを考慮した中間強度レールを開発、敷設試験を実施し、亀裂の改善が確認されており⁸⁾、2019年に出荷を開始した。

2.3.3 長尺150mレール出荷体制の構築

レールとレールの継目は乗り心地阻害や騒音・振動の要因の一つであり、また軌道保守上の弱点であるため、鉄道事業者では、レール継目を溶接してロングレール化するなどの改善を各社ごとに行っている。しかし、溶接施工では施工上の不備等により、有害な溶接欠陥が発生し、レール溶接部が損傷に至る場合もある。2014年4月、150mレールの取扱いを可能とする、精整ヤード、クレーン等の設備対策を実施し、世界最長となる鉄道用150mレールの製造・出荷体制を確立した（図4）⁹⁾。これにより、レール溶接数削減による軌道信頼性向上に加え溶接作業削減や保守作業軽減に貢献できるものと考えている。

実現に当たっては、レール置き場への搬送対策と保管作業の効率化を行った。25m長さのレールを搬送する場合は、キャリアパレット等の荷台にレールを載せて搬送するのが一般的であるが、150mレールの長さに対応するキャリアパレット等の準備が困難となる。加えて、レール置場を製造工場から離れた場所とする必要があったため、湾曲搬送路に沿ってレールを搬送させる必要が生じた。そこで、搬送ローラーとレールの側面を押して湾曲搬送路に誘導することを特徴とする湾曲搬送機構を導入した。また、レールは鉛直方向に積み上げた状態で保管される。レール同士を直接積み重ねると、軌条が傷ついたり、軌条の種類や形状によっては積み上げにくかったりするため、厘金（りんがね）と呼ばれる緩衝材を軌条間に配置する。厘金は、作業員によって軌条の長手方向に適宜間隔をあけて配置される。1

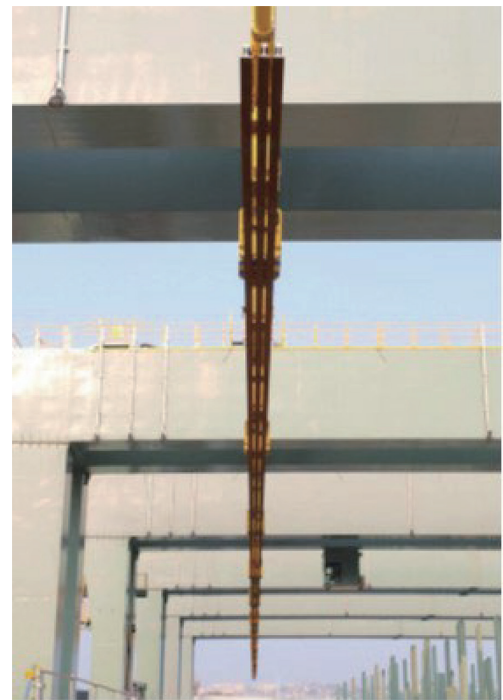


図4 150mレールのハンドリング状況
Handling situation of long rail

人の作業員でレールの積み重ねと厘金の配置を可能とするシステムを考案することで作業時間短縮と省力化を行った^{10,11)}。

3. 今後の取り組み

3.1 溶接品質の向上

鉄道事業者にとって軌道溶接部における損傷抑制・折損防止のニーズは根強くあり、軌条工場は溶接部の信頼性向上に向けて取り組んできた。海外の重荷重鉄道で主流となっているフラッシュバット溶接では、熱影響部の軟化部で発生するレール頭部の表面損傷や溶接部の残留応力に起因する腹部亀裂から折損、脱線にいたる事例も発生している。これに対して、日本製鉄は熱影響部縮小技術やIHを活用した残留応力低減技術を開発、権利化してきており、今後、鉄道事業者への拡大を図っていくこととしている。なお、詳細は、本技報“レールのフラッシュバット溶接部の信頼性向上技術の開発”を参照されたい。

3.2 カーボンニュートラルへの対応

鉄鋼業においてカーボンニュートラルの取り組みの重要性は年々増してきており、日本製鉄は、今後のレールに求められる特性は高品質、高性能であることに加えて、この“カーボンニュートラル”という新たな価値が付与されるものと考えている。そうした中、2050年に向けた取り組みとして、“高炉水素還元”“水素による還元鉄製造”“大型電炉での高級鋼製造”の3つの超革新的技術を行っていくこととしている。その中で、九州製鉄所においては、大型電炉による高級鋼製造に向けた検討に着手した。また、先駆

けて、マスバランス方式を適用したグリーンスチール“NSCarbolex® Neutral”の提供開始や、軌条のエコリーフ宣言 (EPD 認証取得) など、カーボンニュートラルに向けた対応を着実に進めている。

4. おわりに

敷設環境に適したレール開発、利用技術の改善に向けた取り組みを推進してきた。今後も、レールの高強度化、高寸法精度化の方向は変わらないと考えるが、その根底にあるのはJRをはじめとする事業者との緊密な関係にあると考えており、製造者としての製造技術革新、新商品投入などの不断の努力と事業者からのニーズ提供が相俟ってレールが進歩していくものと確信している。

今後も鉄道事業者をはじめとした関係各位と連携し、鉄道の安全性・快適性の向上、更にはメンテナンスコスト削減やモーダルシフトを通じて製造のみならず鉄道業界のカーボンニュートラル活動に貢献し続けていきたいと考えている。

参考文献

1) Sugino, K., Kageyama, H., Suzuki, T., Fukuda, K., Yoshitake, H., Makino, Y., Ishii, M.: Development of In-Line Heat Treated DHH Rails. The Fourth International Heavy Haul Railway Conference

1989. Brisbane, 1989, p. 42-45
 2) 影山英明, 杉野和男, 阿部健次, 吉井秀雄: 耐内部疲労損傷性に優れた DHH レールの開発. 新日鉄技報. (343), 77-85 (1992)
 3) 上田正治, 内野耕一, 影山英明, 小林玲: 重荷重鉄道用過共析鋼レールの開発. あたりあ. 39 (3), 281-283 (2000)
 4) 上田正治, 内野耕一, 松下公一郎, 小林玲: 重荷重鉄道用耐摩耗・耐損傷レール (HE レール) の開発. 新日鉄技報. (375), 150-155 (2001)
 5) 上田正治, 内野耕一, 瀬沼武秀: パーライト鋼のころがり接触摩耗に及ぼす硬さと炭素量の影響. 鉄と鋼. 87, 32-39 (2001)
 6) Ueda, M. et al.: Wear. 444-445, 203120 (2020)
 7) 佐藤幸雄, 辰巳光正, 上田正治, 三田尾眞司: ペイナイトレールの長期耐久試験による耐シェリング性の評価. 鉄道総研報告. 22 (4), 29-34 (2008)
 8) 兼松義一, 松井元秀: 新型熱処理レールの現地敷設試験の経過, 日本鉄道施設協会誌. 2019年8月号
 9) 前田優介: レールの製造方法とこれまでの技術革新, 日本鉄道施設協会誌. 2019年11月号
 10) 野田俊輔, 石橋弘之, 矢野政文: 長尺レールの湾曲搬送機, 特許第 6711226 号
 11) 森啓, 佐藤琢也, 佐伯和彦, 小林玲: 軌条置場及び軌条保管方法, 特許第 6657936 号



松下公一郎 Koichiro MATSUSHITA
 厚板・建材事業部
 形鋼・スパイラル鋼管技術部 形鋼技術室長
 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



園山恭平 Kyohei SONOYAMA
 九州製鉄所 品質管理部 軌条・形鋼管理室
 首席主幹



石橋弘之 Hiroyuki ISHIBASHI
 九州製鉄所 形鋼部 軌条・形鋼技術室長