

**Techno Scope**

# 世界の貨物輸送を支える 鉄道レール

環境問題に伴うモーダルシフトや経済発展により、北米をはじめとして海外では貨物鉄道における輸送量が増加している。積載量の増加によりレールにかかる荷重は増大し、特にカーブの多い山間部などはレールの摩耗損傷が激しい。そこで選ばれているのが日本製のレールである。優れた性能を持つことから「プレミアムレール」と呼ばれ、大量輸送を支えている。



長編成の貨物列車がカーブの多い山間部を頻繁に運行する(アメリカ、カリフォルニア州)。

## 積載重量が著しく増大する貨物鉄道

警笛を鳴らしながら、延々と続く長い貨物列車が荒野を駆け抜ける。「マイル・トレイン」と呼ばれる長大編成列車はときに200両以上にもなり、全長は数kmに及ぶ。急なカーブの山道を走行する姿は、長いへびがぐるぐると山に巻き付いているようにも見える。貨物列車のなかにはコンテナを2段積みした列車もあり、これは「ダブルスタックトレイン」と呼ばれる(図1)。トレーのような形をした専用の低床貨車(ダブルスタッカー)を使用して積載時の重心を下げ、安定したコンテナの大量輸送を実現している。

アメリカの貨物輸送の主役は鉄道である。日本のスケールをはるかに超えた規模で、広大な陸地をひっきりなしに貨物列車が往来する。大陸の資源や穀物などを安価に大量輸送する主な輸送手段は鉄道であり、アメリカは世界最大の運行路線長および鉄道輸送量を誇る。

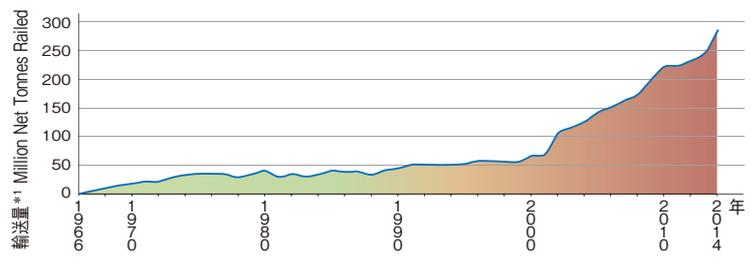
貨物鉄道においては、旅客鉄道のように乗り心地や快適性を追求する必要はなく、輸送効率化が最も強く求められる。そのため一度に大量の物資を輸送することが重要であり、近年、積載重量の増大や車両の長編成化が進んでいる。これは北

米に限らず、鉄鉱石や石炭を運搬するオーストラリアやブラジルの貨物鉄道でも同様の傾向がみられる。特に鉄鉱石や石炭などの資源輸送については中国の旺盛な鉄鋼需要がきっかけとなって、積載重量が著しく増大しており(図2)、1年間に通過する累積貨物重量は200百万トンを超えている。



ダブルスタックトレインは西海岸の港から中西部や東海岸への大量輸送に活躍している(図1)。

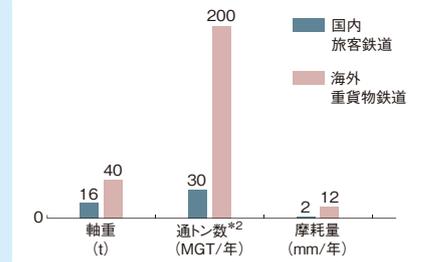
● 鉄鉱石輸送についての推移(図2) (オーストラリア・リオテント社)



\*1 貨物のみの重量であり、レールに作用する重量はこの数字よりさらに大きくなる。

出典:L. Wessels, S. Oswald, D. Welsby, P. Mutton, In Proceedings of the International Heavy Haul Conference, Perth, (2015) 1045-1054

● レール使用環境の比較(図3)



\*2 ある区間を通過した車両の累積トン数

資料提供: JFEスチール(株)

求められる耐摩耗性と耐表面損傷性

積載物が増えることでレールはより過酷な環境におかれる。「軸重」とは車軸1本にかかる荷重であり、左右両輪にかかる荷重(輪重)の和であるが、軸重は最大で40トン近くに達し、これは日本の旅客鉄道の倍以上の荷重となる。大きな荷重がかかった車輪が繰り返し通過することで、レールは著しく摩耗していく。図3のレール使用環境の比較をみると、日本の旅客鉄道が2mm/年の摩耗量に対して、海外の重貨物鉄道は12mm/年の摩耗量となっている。さらに列車に遠心力が加わるカーブ区間の外軌レールや、走行速度が極めて遅い急カーブかつ急勾配区間の内軌レールには過大な荷重がかかる場合があり、直線区間に比べて摩耗が激しい(図4)。最も摩耗が激しい区間では毎年のレール交換を強いられる場合もあり、メンテナンスコストが跳ね上がる。

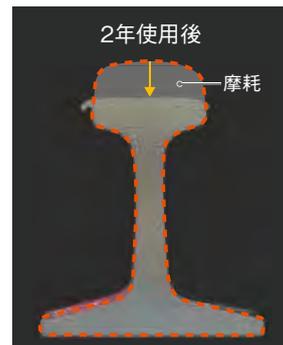
また、車輪と接触するレール頭部(ころがり接触面)は接触面圧が高いため、塑性変形に起因するスポーリングといった表面の疲労損傷も起こる(図5)。この疲労損傷や疲労層を除去し、レールを正常な状態に保つため削正などのメンテナンスが必要となる。このようなことから、耐摩耗性と耐表面損傷性(耐ころがり接触疲労損傷性)は、レールの長寿命化における最も重要な特性となっている。

求められる耐摩耗性や耐表面損傷性は、鉄鋼材料のマイクロ組織構造に大きく影響される。一般的に鉄道レールにはパーライト組織を有する鋼が使用されている。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ンタイトが層をなすラメラ構造となっている。

繰り返し回転数と摩耗量の関係について炭素量が同一のパーライト鋼、焼戻しマルテンサイト鋼、硬質な炭化物の体積分率を高めた球状化炭化物鋼と比較すると、パーライト鋼の摩耗量は著しく少ないことがわかる(図6)。70万回転繰り返し後のころがり面直下の断面SEM組織をみると(図7)、フェライト中に炭化物が分散した球状化炭化物鋼では、ころがり面で最大深さ10μm程度の剥離痕が認められ、さらにころがり面直下においては、基地フェライトと炭化物の界面を伝播したと考えられるき裂の生成が認められた。一方、パーライト鋼はメタルフローに沿ってラメラが層状化し、微細化している。ころがり面においてラメラ構造が微細

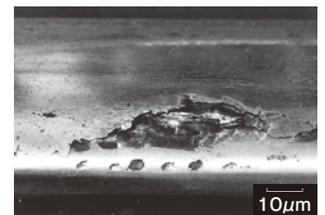
化することによりころがり面の硬さが増加し、さらに塑性変形に伴うマイクロな剥離が抑制されたことが耐摩耗性の向上に関係していると考えられる。

● 北米の重貨物鉄道の曲線区間におけるレールの摩耗状況(図4)



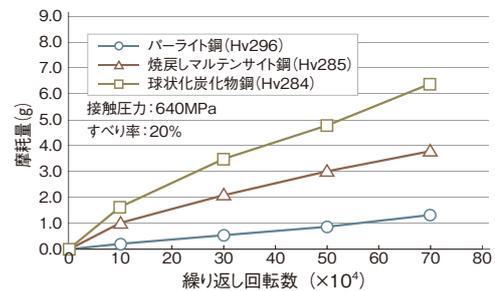
資料提供: JFEスチール(株)

● 表面損傷(図5) (スポーリング)



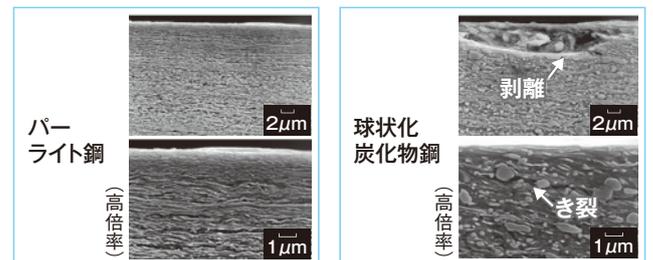
出典: 上田正治、松下公一郎、岩野克也、小林 玲、山本剛士、宮崎照久、高橋 淳、小林由起子: 新日鉄住金技報、第395号(2013) 64-72.

● 高炭素鋼の繰り返し回転数と摩耗量の関係(図6) (二元筒式ころがり接触摩耗試験)



出典: 上田正治、内野耕一、瀬沼武秀: 鉄と鋼、Vol.90(2004)、No. 12、P1027

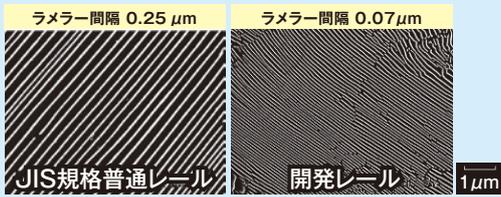
● 70万回転繰り返し後のころがり面直下のマイクロ組織(図7)



出典: 上田正治、内野耕一、瀬沼武秀: 鉄と鋼、Vol.90(2004)、No. 12、P1027

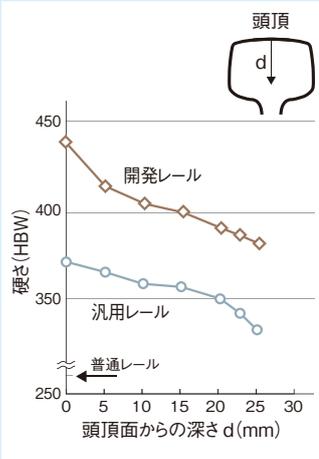
● 微細パーライト組織をもつ高耐久熱処理レールの開発(図8)

■ 普通レールと開発レールのマイクロ組織 (SEM)

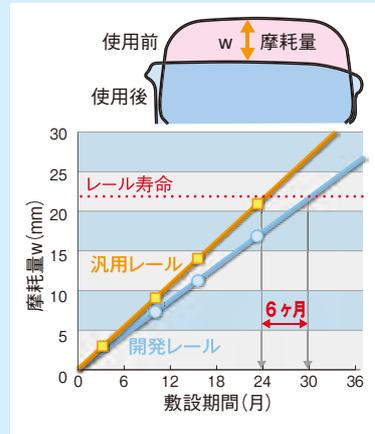


海外の重貨物鉄道で使用されている開発レールと敷設場所の一例

■ 開発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



■ カーブ区間(曲線半径約240m)における開発レールと汎用レールとのレール頭頂の摩耗の比較



資料提供:JFEスチール(株)

ラメラ間隔の微細化により耐摩耗性の向上を実現

耐摩耗性を向上させるには、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有効であるが、その反面、延性の低下が生じる。レールには耐摩耗性、耐表面損傷性の他に、延性も必要となる。車輪がレールに当たる部分(頭部)は強い力がかかり、収縮するが、これとは逆にレールが地面と接する部分(足部)は伸びるため、延性の必要性が訴えられている。また延性が低いと、疲労き裂がレール内部に進展し、折損に至る場合もある。北米のレール規格等では、頭部における引張試験の全伸び値10%以上が定められている。硬さと延性を両立する一つの手法としてラメラ間隔の微細化が有効であることが知られている。1980年代から添加元素の最適化や熱処理によって、ラメラ間隔の微細化が各材料メーカーにより行われてきた。そしてさらなるラメラ間隔微細化を図ったレールの開発が2007年から始まった。

普通レールのラメラ間隔は約0.25 μmとなっているが、平成30年度の大河内賞を受賞した開発レールは、表面でラメラ間隔およそ0.07 μmを達成し、優れた耐摩耗性、耐表面損傷性、延性を有することから注目されている(図8)。同レールは0.8%程度の炭素を含有する鋼をベースにSiやMn、Cr、V等の微量元素が添加されているが、特にSiやCr量の増加、Mn量の減少など、微量添加元素の最適化によってラメラ間隔の微細化を図っている。さらに、熱間圧延後にエア圧力や冷却時間を最適化させた衝風冷却(Slack quenching)にて加速冷却を行うことでパーライト組織をより微細化している。

開発レールは北米の重貨物鉄道に敷設され、実環境において試験されたが、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6か月(24か月から30か月に)延びた。レール鋼におけるラメラ間隔の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が、今後はこの限界値にさらに近づけるよう微細化を図っていくという。

溶接継手特性を確保するために

レールは溶接して使用されるため、溶接継手特性も考慮する必要がある。溶接して長尺化することで、継ぎ目部の管理やメンテナンスを軽減できるため、ロングレール化が進んでいる。海外の貨物鉄道では、工場溶接としてフラッシュバット溶接が、現地溶接としてテルミット溶接等が主に行われている。

継ぎ手性能の評価は、静的曲げ試験、曲げ疲労試験等があり、各材料メーカーは規格に準拠した試験を実施し、求められる溶接継手特性は確保されている。

特にパーライト鋼の炭素量が増すと、延性や靱性が低下し、欠陥に対する感受性が増す。溶接部に発生する摩耗や表面損傷はHAZ(Heat-Affected Zone, 熱影響部)の軟化が、また溶接部に起こる折損(図9)は引張残留応力が影響していると考えられている。そこでHAZ幅を低減するフラッシュバット溶接技術や溶接部の残留応力を低減させる後熱処理技術が開発されている(日本製鉄(株)の取り組み)。これらの技術はアメリカやオーストラリアの鉄道会社で実用化され、溶接部の耐久性や安全性の向上に貢献している。

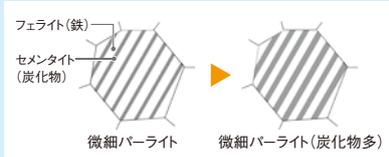


溶接部の折損(図9)

出典:PeterMutton et al., Proceedings of the 2011 International Heavy Haul Association Conference

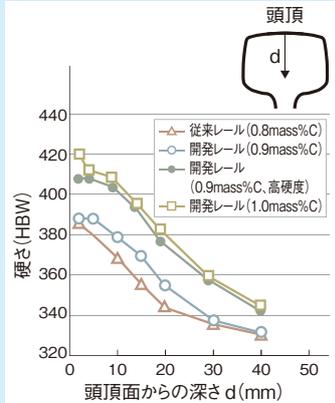
● 過共析鋼レールの開発(図10)

■ 新しい材料開発の考え方



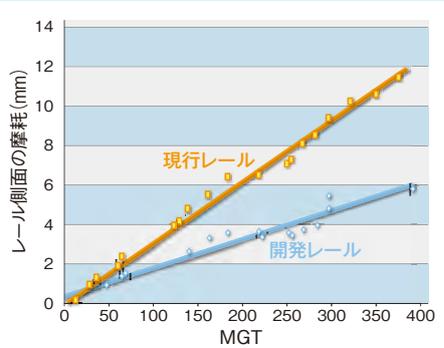
熱間圧延条件、熱処理条件の最適化により、求められる延性を確保している

■ 頭部断面硬度分布の比較



出典：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、第395号(2013) 64-72.

■ カーブ区間(曲線半径582m)における過共析鋼レールと現行レールとのレール側面の摩耗の比較



出典：P. Mutton, D. Welsby, E. Alvarez, In Proceedings of 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, (2009)

資料提供：日本製鉄(株)

さらなる性能向上を目指して開発された 過共析鋼レール

さらなる耐摩耗性、耐表面損傷性を目指し、炭素量の増加によって硬質セメンタイトを増加させる手法も検討され、炭素量を1%程度にまで増加させた過共析鋼レールが開発されている(図10)。

一般的に炭素量を増やすと硬くなるが、増やし過ぎると脆くなると考えられてきた。そのため炭素の含有量はアメリカのレール規格で約0.8%と定められていた。新型レールの開発は1995年に始まったが、0.8~1.0%に炭素の含有量を変えたパーライト鋼を用いて検証したところ、パーライト鋼では炭素量を増加させた試験片の方がころがり接触面の硬さが上昇し、その結果、ころがり接触面での摩耗が抑制され耐摩耗性が向上することが明らかになった。さらに、耐表面損傷性についても、炭素量が多い方がころがり面の剥離が大幅に減少することがわかった。またころがり面直下のき裂伝播挙動を見ると、炭素量の高い鋼ではき裂の生成範囲が小さくなることも確認された。

一方で高炭素化によってパーライト鋼の脆化組織である初析セメンタイト組織が生成しやすくなり、延性が低下することが課題となった。初析セメンタイト組織の生成防止には冷却速度の制御が重要となる。またパーライト鋼の延性を向上させるためにはパーライトブロックの微細化が有効であり、これは主に変態前のオーステナイト粒の微細化によって実現される。そのため熱間圧延条件の最適化によりオーステナイト粒の微細化を行い、さらに熱処理条件の最適化により、初析セメンタイト組織の生成を抑制し、求め

られる延性を確保することに成功している。

海外の貨物鉄道に敷設された過共析鋼レールは、従来の高強度レールと比べて摩耗量が少なく、約38%のレール使用寿命の改善が認められた。また剥離損傷の発生はなく、表面損傷の抑制効果が確認された。この製品は平成23年度文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞している。

オーストラリアのモナッシュ大学らの報告(レール接触問題の国際会議(2009年)資料)では、過共析鋼レールについて評価を行い、特にカーブ区間は遠心力によりレール側面が摩耗しやすいが、現行レールとの比較で、大きく摩耗量が低減していることを認めている(図10)。

これまで過共析鋼レールは約300万t以上が北米、豪州および南米の鉄道会社に出荷された(図11)。これは軌道の距離に換算すると2.3万kmとなり、地球を約1/2周した距離となる。

他国の汎用レールと比較すれば日本製レールは高価だが、それでも、はるばる海を越えて日本製品を求めるのには理由がある。北米をはじめとして貨物輸送の要となる鉄道は「止めてはならない」という強い使命感があるという。日本製プレミアムレールはその優れた性能でレール交換頻度やメンテナンスコストを抑え、貨物鉄道の使命を力強く支えているのである。



製造されたレールが搬送される様子。日本製レールは海外へ多く出荷されている(図11)

資料提供：日本製鉄(株)

●取材協力：日本製鉄(株)、JFEスチール(株) ●文：藤井 美穂

