

レールの溶接技術の動向と今後の展開

Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach

才田 健 二*
Kenji SAITA狩 峰 健 一
Kenichi KARIMINE上 田 正 治
Masaharu UEDA岩 野 克 也
Katsuya IWANO山 本 剛 士
Takeshi YAMAMOTO廣 口 貴 敏
Kiyoshi HIROGUCHI

抄 録

レール溶接技術は高速旅客鉄道、及び貨物鉄道における列車走行の安全性向上にとって不可欠であり、溶接部にはレール母材と同様の高い品質が要求される。国内外の鉄道においてレールの溶接法として採用されている4種類のレール溶接方法、すなわち(1)フラッシュバット溶接、(2)ガス圧接、(3)テルミット溶接、(4)エンクローズアーク溶接についてその溶接原理、特徴を概説する。さらに、海外貨物鉄道における溶接部の品質課題を抽出し、その改善を目的として導入した新しい溶接機を紹介する。

Abstract

Rail welding technologies are essential for high speed tracks and heavy haul tracks, to achieve safety of their transportation service, and highly reliable rail welds are required for the safety of railways. In this report, we give an outline of the four welding methods used for rails presently in the world, such as (1) flash-butt welding, (2) gas-pressure welding, (3) thermite welding, and (4) enclosed-arc welding. Further, we describe a few quality issues seen in rail welds in overseas heavy-haul freight railways. In the last chapter, we introduce our new flash-butt welder, which we recently installed, in order to discuss the issues.

1. はじめに

レールは鉄道に欠かせない構成部材であり、その性能は鉄道の安全性に直結している。鉄道業界では輸送効率の向上を目的として、旅客鉄道の高速化や貨物鉄道の重積載化といった取り組みが進められている。これに伴いレールの使用環境は過酷化し、より高性能のレールが開発されている^{1,2)}。

一方、レールの継ぎ目はその段差により列車通過時に衝撃を受け、列車の走行安定性に影響を及ぼす。この衝撃を緩和するために、溶接によってレールを連続化するロングレール敷設が世界的に普及している。レール溶接は鉄道の安全性を担う重要な技術となっている。

また、溶接部に対する品質ニーズは鉄道の種類により異なる。旅客鉄道では列車走行の安定性、乗り心地の改善のために、車輪と接触する転がり面において溶接部の高い直線性が求められる。貨物鉄道では車輪からの強い負荷に対し、溶接部に生じる熱影響部(HAZ)の耐摩耗性、耐表面損傷性、及びレール柱部や足部における耐疲労損傷性が求

められる。

本報告ではレールの溶接方法として発展してきた4種類の溶接方法、海外の貨物鉄道において顕在化している溶接部の品質課題の例、その改善を検討する一環として導入した新溶接機を紹介する。

2. レールの溶接方法

本章ではまず、レールが溶接され軌道に敷設されるまでの手順を述べる。次に現在使用されている4種類のレール溶接方法について特徴、原理、施工時間、装置、材質、及び最近の技術動向について述べる。

2.1 レールの溶接と敷設

レールには次のような鋼種がある。国内鉄道向けのレールとして主に直線区間に使用される普通レール(JIS E 1101, C含有量:0.63~0.75wt%, HB250~290)、急曲線区間に使用される硬度を高めた熱処理レール(JIS E 1120, C含有量:0.72~0.82%, HB321~388)がある。これらに加え海外の貨物鉄道向けとして、硬度と含有C量を高め

* 八幡技術研究部 主幹研究員 福岡県北九州市戸畑区飛幡町 1-1 〒 804-8501

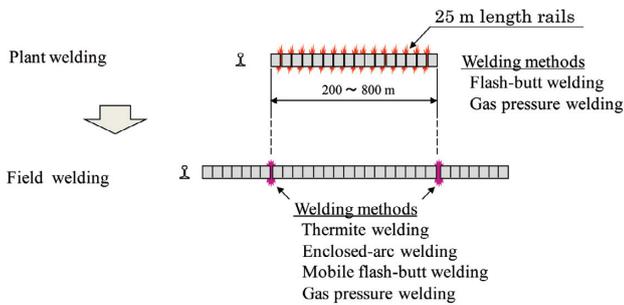


図1 レールの溶接施工
Long rail construction

て耐摩耗性をさらに向上させた過共析成分の熱処理レールもある (C含有量: 0.9 ~ 1.0wt%, HB370 ~ 420)。

レールが鉄鋼メーカーから鉄道会社に納品され、軌道に敷設されるまでの手順を図1に示す。製品レール長さは通常25mで、まず鉄道会社において工場溶接により200m ~ 800mまで連続化される (Plant welding)。その後レール専用貨車で敷設現地まで輸送され、さらに現地溶接により連続化される (Field welding)。海外の貨物鉄道では現地溶接は直接、線路上で行われることが多い。国内の現地溶接は敷設場所の線路脇や側線で最終的な長さまで溶接し、次にレールを交換した後に、線路上で分岐レールなどへ最終的な溶接が行われる。最終的な溶接レール長さは鉄道会社によって異なり、通常は1000m以上である。

海外では工場溶接にはフラッシュバット溶接 (工場フラッシュバット溶接)、現地溶接にはテルミット溶接または、小型化され可搬性のあるモバイルフラッシュバット溶接も採用されている。国内では工場溶接にフラッシュバット溶接およびガス圧接が、現地溶接にはガス圧接、テルミット溶接およびエンクローズアーク溶接が採用されている。

2.2 レール溶接方法とその特徴

2.2.1 フラッシュバット溶接

(1) 特徴

溶接は完全に自動化されており、高品質かつ高能率な溶接法として世界的に普及している。工場フラッシュバット溶接機は大容量の変圧器や大型の油圧装置を備えており、それらを小型軽量化したモバイルフラッシュバット溶接機も海外では普及している。

(2) 原理

突き合わせた被溶接レールの端面間に電圧をかけ、局所的な接触によるアーク放電を次々に発生させレール端面を加熱、溶融する。全面にわたって溶融状態になった時点でレール同士を加圧し (アプセット)、端面を圧接する溶接法である。図2に溶接原理を示す。溶接工程は予熱工程 (Pre-heating)、フラッシュ工程 (Flashing)、アプセット工程 (Upsetting)、剪断工程 (Trimming) からなる。写真1にフラッシュ工程の状況を示す。

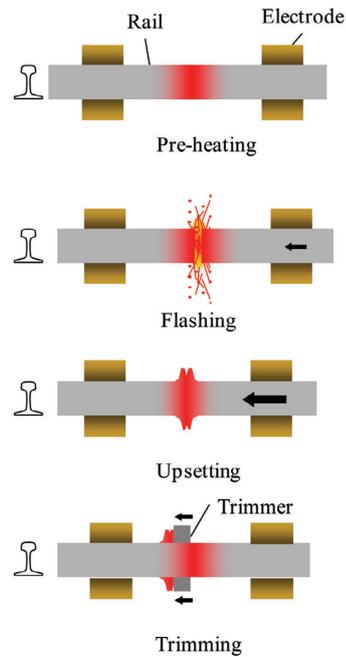


図2 フラッシュバット溶接原理
Principle of flash-butt welding

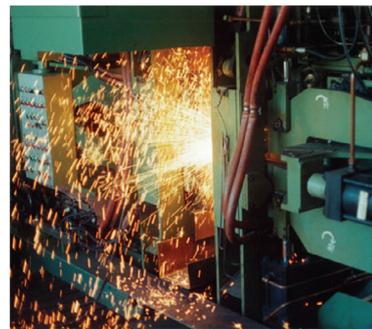


写真1 フラッシュ工程の例 (工場用フラッシュバット溶接機)
Example of flashing process (plant welding)

予熱工程：大容量の変圧器を持つ工場フラッシュバット溶接機で採用されており、レール端面を全面で短絡させて電極 (Electrode) を介して大電流を流す。その結果、溶接部の温度が上昇し、その後のフラッシュ工程で端面が完全に溶融状態に至るまでの時間を短くすることができる。

フラッシュ工程：レール端面間に電圧をかけながらプログラムされた速度でレールを近づけ、レール端面間で局所的なアーク放電を繰り返しながら端面を溶融、加熱する。レールが溶融して生じた溶滴は電磁力によって外部に放出される。レール長手方向への熱伝導により溶接部近傍は高温に加熱される。全面にわたって溶融する時期を見計らってアプセットが行われる。レール端面を近づける速度は0.1 ~ 2.5mm/s、溶融長さは両側のレールそれぞれ10 ~ 20mmである。モバイルフラッシュバット溶接では予熱工程が無い場合、端面を完全に溶融するためにフラッシュ工程の時間は長めに設定される。なお予熱工程とフラッシュ

工程の順番は、予熱工程を先に行う場合と、フラッシュ工程を前段と後段に分け、その間に予熱工程を行う場合がある。

アプセット工程：レール端面間に圧力を加えレールが圧接される。溶鋼が外部に排出され、高温に加熱された端面近傍は塑性変形し膨らみが生じる。加圧の面圧は約 70MPa 程度で、荷重は JIS 60 レール（単重 60kg/m）の場合、500～600kN である。アプセットによってレール長は 15～25mm 収縮する。

剪断工程：油圧で駆動されるレール形状の刃を持つ剪断装置（Trimmer）によって、溶接部に生じた膨らみは熱間で除去される。

(3) 施工時間

溶接時間は 1.5～4 分である。

(4) 装置

変圧器と電極、加圧装置、油圧剪断装置から構成される。溶接機を電圧波形で分類すると交流機と整流回路が組み込まれた直流機³⁾がある。近年導入される工場フラッシュバット溶接機は直流、モバイルフラッシュバット溶接機は交流が主流である。交流の場合、電圧の正負が切り替わる期間にアーク放電が停止するのに対し、直流の場合は常にアーク放電が可能のため、直流の方がフラッシュ工程の安定性が高いと考えられる。直流機には整流回路が必要なため装置の小型化が難しく、モバイルフラッシュバット溶接機には適用が難しい。

また、変圧器容量が小さい工場およびモバイルフラッシュバット溶接機では、効率的に加熱するため、端面において短周期に短絡とフラッシュを繰り返す交流パルスフラッシュ方式が採用されている機種もある。

(5) 材質

熱処理レールの溶接部の長手方向の断面マクロ組織を写真 2 に示す。また、レール長手方向の硬度分布の例を図 3 に示す。

マクロ組織：溶接部には溶接中に完全にオーステナイト温度域に加熱された領域と（濃色部）、その両側に A1 点（約 720℃）以上の 2 相域に加熱された領域がある（白色

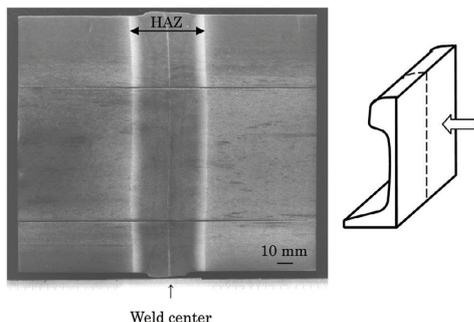


写真 2 フラッシュバット溶接部の長手方向の断面マクロ組織
Longitudinal macro-structure of a section of flash-butt welded rail

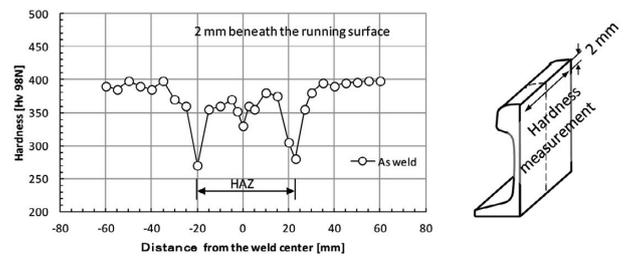


図 3 フラッシュバット溶接部の長手方向の硬度分布
Longitudinal hardness distribution of flash-butt welded rail

部)。両領域を合わせて熱影響部（HAZ）と呼ぶ。HAZ 幅は 30～45mm である。

硬度分布：母材が HV390 程度であるのに対し、溶接中央部近傍の硬度は母材より 20HV 程度低い。母材と同等の硬度を得るために、鉄道会社によってはレール鋼種に応じて溶接部に圧縮空気を吹き付ける加速冷却が適用されている。なお、HAZ の両端は硬度が低下しており、軟化部と呼ばれる。

(6) 最近の技術動向

軌道の分岐部は列車通過時に車輪から強い衝撃を受けるため、耐衝撃性に優れた材料が使われる。分岐部の要となるクロッシングでは高 Mn オーステナイト鋳鋼がよく使用されている。この材料はレール鋼との溶接が難しい。この対策として、フラッシュバット溶接によりいったんマンガンクロッシングとステンレス鋼を溶接し、さらにステンレス鋼にレール鋼を溶接する技術が実用化されている⁴⁾。

また、海外では補修溶接にフラッシュバット溶接を利用する試みがある。通常、レールもしくは溶接部が何らかの損傷を起こした場合、損傷部を含む数 m の長さにならってレールを交換し、その両端が既設レールと溶接される。補修作業時間の削減を目的に、レール自体を交換することなくレール頭部表面の損傷部分を V 字形の溝状に除去し、これに嵌合する鋼材を上方からフラッシュバット溶接する技術が開発されている⁵⁾。この方法により補修作業時間を大幅に削減することができる。

2.2.2 ガス圧接

(1) 特徴

ガス炎によるレール加熱を利用した圧接法であり、信頼性の高いレール溶接法として、国内において工場および現地溶接法として広く普及している。加熱作業は溶接工が行い、その操作には熟練を要する。

(2) 原理

突き合わせたレール端面を加圧しながら接合部周囲をガス加熱して圧接する溶接法である。溶接工程は加圧及び加熱工程（Pressurizing and Heating）、圧接工程（Forging）、剪断工程（Trimming）からなる。図 4 に溶接原理を、写真 3 に加熱工程の例を示す。接合面の密着性が溶接品質に影

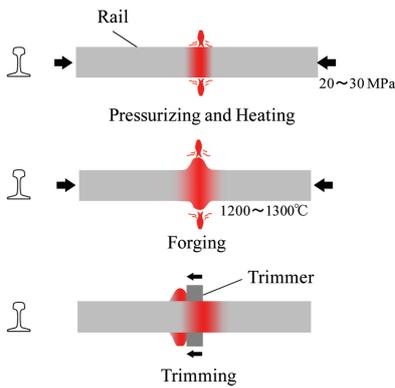


図4 ガス圧接の原理
Principle of gas-pressure welding

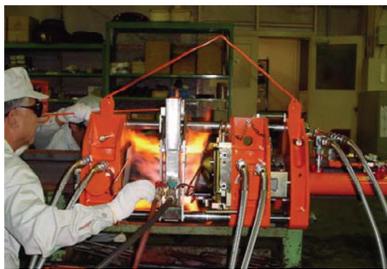


写真3 ガス圧接の加熱工程の例
Example of pressurizing and heating process in the gas-pressure welding

響するため、溶接に先立ち専用のグラインダーで端面研削が行われる。

加圧および加熱工程：レール端面間を加圧しながら加熱を行う。加熱ガスは酸素アセチレンガスが使用され、加熱操作は溶接工により手動で行われる。端面を中心にしてその近傍が高温に加熱され、最終的には端面付近の表面温度は1200～1300℃となる。端面における面圧は全工程を通して通常は一定で20～30MPaである。荷重はJIS60レールの場合約180kNである⁶⁾。

圧接工程：加熱されたレール端面付近が塑性変形により長さ方向に収縮する。同時に断面積が拡大する。この工程でレール端面が圧接される。圧接によるレールの収縮長さは約20～40mm程度である。

剪断工程：油圧で駆動されるレール形状の刃を持つ剪断装置（Trimmer）によって、圧接工程で生じた膨らみが熱間で除去される。

(3) 施工時間

溶接時間はレールの断面形状により異なる。JIS60レールの場合6～7分である。

(4) 装置

ガス加熱装置、加圧装置、油圧剪断装置から構成される。線路脇や側線への装置の搬出入を容易にするために、装置を小型化したガス圧接機が開発されている⁷⁾。

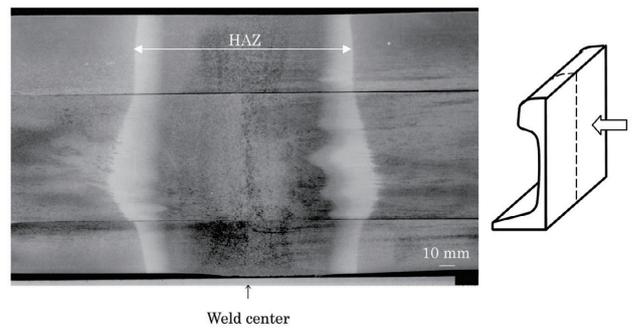


写真4 ガス圧接の長手方向の断面マクロ組織
Longitudinal macro-structure of a section of gas-pressure welded rail

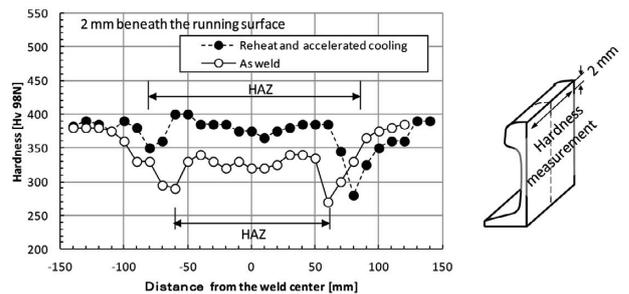


図5 ガス圧接部の長手方向の硬度分布
Longitudinal hardness distribution of gas-pressure welded rail

(5) 材質

熱処理レールの溶接部の長手方向断面のマクロ組織を写真4に示す。また、レール長手方向に測定した硬度分布の例を図5に示す。

マクロ組織：ガス圧接のHAZ幅は100mm前後で、フラッシュバット溶接のHAZ幅と比較して広い。ガス圧接は加熱エネルギーが小さい燃焼ガスを用いるため加熱に長時間を要す。一方、フラッシュバット溶接は電気的エネルギーを利用するため加熱時間が短い。このため、ガス圧接ではフラッシュバット溶接と比較して溶接部からレール母材方向への熱伝導の量が多く、HAZ幅が広がる。

硬度分布：母材硬度はHV390程度であるのに対し、溶接ままではHAZ部の硬度はHV330程度である。また、HAZが広いと軟化部の範囲も広い。このため熱処理レールの場合、レール母材と同等の硬度を得るために、オーステナイト域に再加熱し、圧縮空気を用いて加速冷却する方法が採用されている。

(6) 最近の技術動向

加熱および加圧工程での接合面の密着状態が悪い場合などに酸化物系の溶接欠陥が生じることがある。その防止策を検討するために、欠陥生成過程を明らかにする詳細な研究がなされている⁸⁾⁹⁾。また、CO₂ガスの削減などを目的として、水素を加熱ガスとして用いる圧接方法の検討が行われている¹⁰⁾。

2.2.3 テルミット溶接

(1) 特徴

装置が簡便で機動性が高く、熟練技能を必要としない。また、フラッシュバット溶接やガス圧接などの圧接法と異なり、溶接によるレール長の変化がないため、レール敷設の最終工程における現地溶接方法として世界的に普及している。フラッシュバット溶接やガス圧接では溶接部の全周の膨らみが除去されて使用されるが、この溶接法では頭部以外は膨らみ（余盛り）がついたままの状態で使用される。

(2) 原理

酸化鉄と金属アルミの化学反応（テルミット反応）により生成する溶鋼を溶接部に注入してレールを溶接する方法である。図6に溶接原理を示す。溶接工程はテルミット反応工程（Thermite reaction）、注入及び凝固工程（Tapping and solidification）、剪断工程（Trimming）の順に進められる。写真5にテルミット反応工程の例を示す。

溶接に先立ち、突き合わせた2本のレール端面の間に約25mmのI形開先を設け、その開先部を鑄型（Mold）で取り囲む。鑄型は珪砂を用いた砂型が用いられる。また、鑄型やレールの付着水による気泡の発生を防止し、溶接面の溶融を確実にするためにプロパン-酸素ガスなどによって予熱を施す。

テルミット反応工程：テルミット反応はテルミット溶材

（Thermite mixture）と呼ばれる粉末混合物を用いて行われる。テルミット溶材は反応要素である酸化鉄と金属アルミのほか、フェロマンガンの合金添加材が配合されており、溶接金属部の組成がレールに近くなるように調整されている。テルミット溶材は鑄型の上部にセットされたつぼ（Crucible）に入れられ、花火状の着火材により反応が開始される。反応時間は15～30秒である。生成物である溶鋼（Molten metal）とアルミナスラグ（Molten slag）は反応熱によって2000℃以上の熔融状態となり¹⁴⁾、比重差によるつぼ内で上下に分離する。なおテルミット反応はアルミニウムによる酸化鉄の還元反応で、(1)式、(2)式で示される。



注入及び凝固工程（Tapping and solidification）：生成した溶鋼が溶接部に注入される。注入はつぼの底部充填物（酸化鉄など）が反応生成物の熱によって溶融することにより自動的に行われる。溶鋼の注入によりレール端面が溶融する。注入された溶鋼と溶融したレール端面が凝固し、両側のレールが溶接される。溶鋼の注入から凝固までには4分程度を要する。また、凝固割れと呼ばれる溶接欠陥を防止するためにレールが動かないように配慮される。

剪断工程：油圧式の剪断装置（Trimmer）で頭部の余剰金属が除去される。

(3) 施工時間

溶接所要時間は30分程度である。

(4) 装置

予熱バーナー、反応つぼ、鑄型、油圧剪断装置などがある。これらはいずれも小型の機材であり、線路内に容易に持ち込むことができる。

(5) 材質

熱処理レールの溶接部の長手方向の断面マクロ組織を写真6に示す。また、レール長手方向に測定した硬度分布の例を図7に示す。

マクロ組織：レールと溶接金属の化学成分がほぼ同一のため、溶接金属（Weld metal）とHAZの境界は明確ではない。写真上に境界線を示したように溶接金属の幅は頭頂部

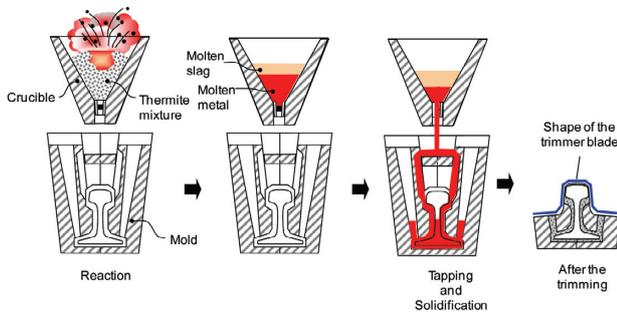


図6 テルミット溶接の原理
Principle of thermite welding



写真5 テルミット溶接の反応工程の例
Example of thermite reaction process

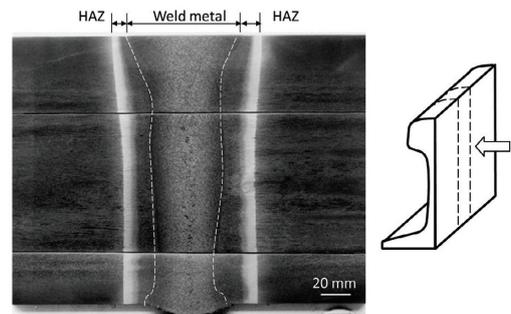


写真6 テルミット溶接の長手方向の断面マクロ組織
Longitudinal macro-structure of a section of thermite welded rail

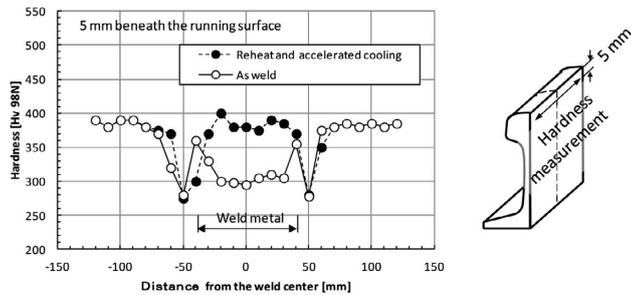


図7 テルミット溶接部の長手方向の硬度分布
Longitudinal hardness distribution of thermite welded rail

で約 70mm, HAZ 幅は片側で約 20mm である。

硬度分布：母材硬度が HV390 であるのに対して溶接ままの HAZ 硬度は HV300 程度と低い。また, HAZ の両端には軟化部が存在する。高強度の熱処理レールの場合には, 溶接金属部が母材と同等の硬度となるように, 溶接後に溶接金属部をオーステナイト域に再加熱し, 圧縮空気を用いて加速冷却する方法が適用されてきた。

(6) 最近の技術動向

熱処理レールに対する再加熱, 加速冷却の作業を省略するために, レールと同等の溶接金属の硬度が溶接ままで得られるように成分調整されたテルミット溶材が実用化されている¹²⁾。これにより施工時間が短縮されている。

また, フラッシュバット溶接法と同様に, テルミット溶接法を補修溶接に利用する検討が進められている。国内外でワイドギャップ法と呼ばれるテルミット溶接を用いた補修溶接法が実用化されている。この方法は損傷部位を長さ約 75mm に切除し, この部分を幅広の鋳型で取り囲みテルミット溶接を行う¹³⁾。また, 海外ではレール頭部に表面損傷が生じた部分を U 字型に切除し, テルミット反応によって生成した溶鋼を注入して補修する技術も検討されている¹⁴⁾。

2.2.4 エンクローズアーク溶接

(1) 特徴

エンクローズアーク溶接は東海道新幹線建設時に開発された日本特有の現地溶接法で, 高い技能が必要な被覆アーク溶接法である。テルミット溶接と同様, 溶接に伴う長さ変化が生じない熔融溶接法である。機材が簡便で機動性に優れており, 新幹線の現地溶接法および分岐器周辺などの作業空間が狭い現地溶接に適用されている。レール柱部から頭部にかけて, 銅当て金 (Copper shoes) とレール端面に取り囲まれた狭い空間を溶接していくことからエンクローズアーク溶接と呼ばれている。

(2) 原理

図8に溶接原理を示す。溶接施工は足部裏波溶接, 多層溶接工程 (Multi-pass welding), 柱部から頭部の連続溶接工程 (Continuous welding), 頭頂部多層溶接工程 (Multi-pass

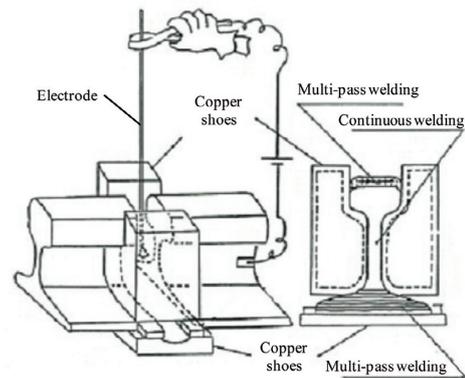


図8 エンクローズアーク溶接の原理
Principle of enclosed-arc welding



写真7 エンクローズアーク溶接の連続溶接工程の例
Example of continuous welding process in the enclosed-arc welding

welding) からなる。写真7に柱部から頭部の連続溶接工程の例を示す。開先は約 17mm の I 型に設定され, 溶接に先立って低温割れ防止のためにレール足部に対して 500℃ の予熱を施す。

足部多層溶接工程：第一層を銅裏当て金を用いて裏波溶接し, 引き続いて足部全体が多層溶接される。積層方法は 1 層 1 パスで, 1 層ごとにスラグが除去される。

柱部から頭部連続溶接工程：水冷銅板を開先側面に装着し, 溶接棒の交換を行いながらスラグ除去なしに溶接する。

頭頂部多層溶接工程：レール頭頂部の深さ 10 ~ 15mm を多層溶接する。

溶接棒は普通レールに対しては 800 ~ 1100MPa 級の溶接棒が適用される。この溶接棒は C 含有量が低いため, 溶接金属はベイナイト組織となる。高強度レールにおける溶接金属部の耐摩耗性を向上するために, 溶接金属組織をパーライト組織とする高 C 溶接棒を新日鐵住金(株)が開発し, 国内で適用されている¹⁵⁻¹⁷⁾。

(3) 施工時間

溶接時間はレールの断面形状により異なる。JIS60 レールの場合には 60 分以上を要する。多層溶接, 連続溶接に時間を要すること, 予熱及びパス間の温度管理を行うこと, 多層溶接時のパス間のスラグ除去を行うこと等が施工時間

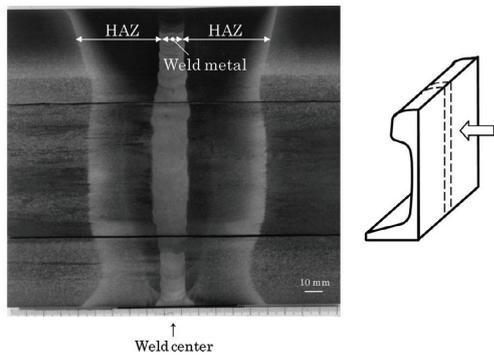


写真8 エンクローズアーク溶接の長手方向の断面マクロ組織
Longitudinal macro-structure of a section of enclosed-arc welded rail

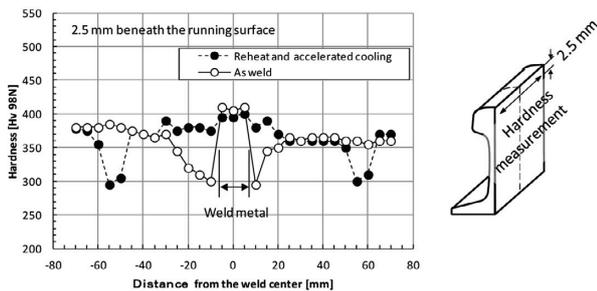


図9 エンクローズアーク溶接部の長手方向の硬度分布
Longitudinal hardness distribution of enclosed-arc welded rail

の増加要因となっている。

(4) 装置

溶接機材として予熱バーナー、エンジン溶接機、銅当て金が使用される。

(5) 材質

熱処理レールに高C溶接棒を用いた溶接部の断面マクロ組織を写真8に示す。レール長手方向に測定した硬度分布の例を図9に示す。なお、本継ぎ手は溶接部の品質向上を目的としてオーステナイト域に再加熱し、レール頭部を加速冷却している。

マクロ組織：溶接金属の幅は約20mm前後、HAZ幅は片側で約50mmである。ここで認められるHAZは再加熱によるものである。

硬度分布：母材硬度がHV390に対し、溶接ままでも溶接金属の硬度はほぼそれに近い。再加熱、加速冷却を施した場合は、溶接金属及びHAZ部の硬度はより均一化している。また、溶接ままでは溶接金属に隣接して軟化部が存在する。一方、再加熱、加速冷却材では溶接中心から離れた位置に軟化部が存在する。

(6) 最近の技術動向

課題は施工に60分以上を要する点である。溶接時間を短縮する目的で半自動溶接が開発され、30分間短縮できるとの報告がある^{18,19)}。

表1 各種溶接方法の比較
Comparison of four rail welding methods

Welding methods	Welding time (min)	Equipment		Operators's skill	Quality of the weld
		Initial investment	Mobility		
Flash-butt welding	2 - 4	Expensive	Low	Not required	Excellent
Gas pressure welding	5 - 7	Expensive	Medium	Required	Excellent
Enclosed-arc welding	60	Not expensive	High	Required	Good
Thermite welding	30	Not expensive	High	Not required	Good

2.3 溶接法の比較

各種レール溶接方法の技術的な比較と施工実績を以下に示す。

4種類の溶接法について溶接時間、装置の初期投資、装置の機動性、熟練技能の要否、溶接品質を表1に示す通り整理した。

溶接時間：フラッシュバット溶接が最も短く、次いでガス圧接、テルミット溶接、エンクローズアーク溶接の順で長くなる。保線作業時間として利用できる列車運休時間が4～5時間と短い大都市近郊ではエンクローズアーク溶接の施工が難しい場合がある。

装置の初期投資：大容量の変圧器、大型の油圧装置を持つフラッシュバット溶接が最も初期投資が高い。ガス圧接は加熱源がガスに変わることによってフラッシュバット溶接に比較すると初期投資が低い。テルミット溶接は剪断が頭部だけのため油圧装置が小型であり初期投資が低い。また、エンクローズアーク溶接はエンジン溶接機が必要であるが、剪断工程が無く油圧装置が不要であり初期投資は低い。

装置の機動性：フラッシュバット溶接、ガス圧接は大型の加圧装置等を備えているため機動性は劣る。このため前述したように小型化の試みが検討されている。一方、テルミット溶接、エンクローズアーク溶接は装置が簡便であり、機動性に優れている。特にエンクローズアーク溶接は溶接部周囲で使用する器材は銅当て金程度で、分岐器周りのレール間隔の狭い場所でも施工することができる利点がある。

熟練技能：フラッシュバット溶接は完全に自動化されているため技能は要求されない。また、テルミット溶接は作業が比較的容易なため熟練技能は要求されない。一方、ガス圧接の加熱工程には熟練技能が要求される。また、エンクローズアーク溶接には高度に熟練したアーク溶接技能が要求される。

溶接品質：テルミット溶接やエンクローズアーク溶接は溶融溶接法であり、溶接金属中の微少な気泡、スラグなどの溶接欠陥を完全に回避するのは困難である。一方、フラッ

シュバット溶接，ガス圧接は溶接金属を介さずにレール母材同士を圧接する方法であり欠陥が生じ難い。フラッシュバット溶接，ガス圧接の折損率が，テルミット溶接やエンクローズアーク溶接に比較して低いとの報告がある⁷⁾。

上記のようにフラッシュバット溶接は装置が大型で初期投資が大きく機動性に劣るが，溶接時間が短く，熟練技能を必要とせず，高品質の溶接部が得られるため，工場溶接法として世界的に採用されている。ガス圧接は溶接品質が高く，フラッシュバット溶接に次いで溶接時間が短い。また，フラッシュバット溶接に比較して初期投資が低いことから国内において広く適用されている。テルミット溶接は溶接時間がやや長いものの，初期投資が低く，軽量で機動性が高く，作業技術の習得が容易なため，現地溶接法として世界的に普及している。エンクローズアーク溶接は溶接時間が長く熟練技能を要するものの，装置が簡便で機動性に優れ，特に溶接部周囲で使用する器材が小さいことから作業空間の狭い分岐器周りの現地溶接に活用されている。

海外でガス圧接及びエンクローズアーク溶接は普及していない。その理由はこれらが熟練技能を要し，その習得に時間を要すること，溶接時間がそれぞれフラッシュバット溶接，テルミット溶接より長いためと考えられる。

参考までに各溶接法の施工比率について説明する。海外では，前述の通り工場溶接にはフラッシュバット溶接，現地溶接にはテルミット溶接が主に適用されている。施工比率はフラッシュバット溶接による工場溶接の溶接長によってほぼ決まる。例えば溶接長が200mの場合はフラッシュバット溶接87.5%，テルミット溶接12.5%となる。テルミット溶接を溶接品質の高いモバイルフラッシュバット溶接へ移行させつつある貨物鉄道会社が増えている。

表2 国内における溶接施工実績（1988-2007FY）
Welding application numbers in JR (FY1988-FY2007)

Welding method	Number	Ratio
Flash-butt welding	140 000	23%
Gas pressure welding	173 000	29%
Thermite welding	242 000	40%
Enclosed-arc welding	49 000	8%
Total	604 000	

一方，国内における4種類の溶接方法の施工実績を表2に示す²⁰⁾。国内ではテルミット溶接が最も多用されており，以下，ガス圧接，フラッシュバット溶接，エンクローズアーク溶接の順となっている。ガス圧接の使用比率はフラッシュバット溶接より高い。その理由は，ガス圧接がフラッシュバット溶接と同様に溶接時間が短く，高品質の溶接部が比較的低い初期投資で得られるためと考える。

3. 海外の貨物鉄道における溶接部の課題と今後の取り組み

本章では海外の貨物鉄道の重積載化に伴って顕在化している溶接部の損傷事例について述べる。また，溶接部の信頼性向上のため新日鐵住金(株)が新しく導入したフラッシュバット溶接機を紹介する。

3.1 溶接部の課題

海外の貨物鉄道では，輸送効率の向上を目的に重積載化が進んでいる。その結果レールの使用環境は過酷になり，溶接部に損傷が発生している。図10に海外の貨物鉄道におけるフラッシュバット溶接部，テルミット溶接部に生じ

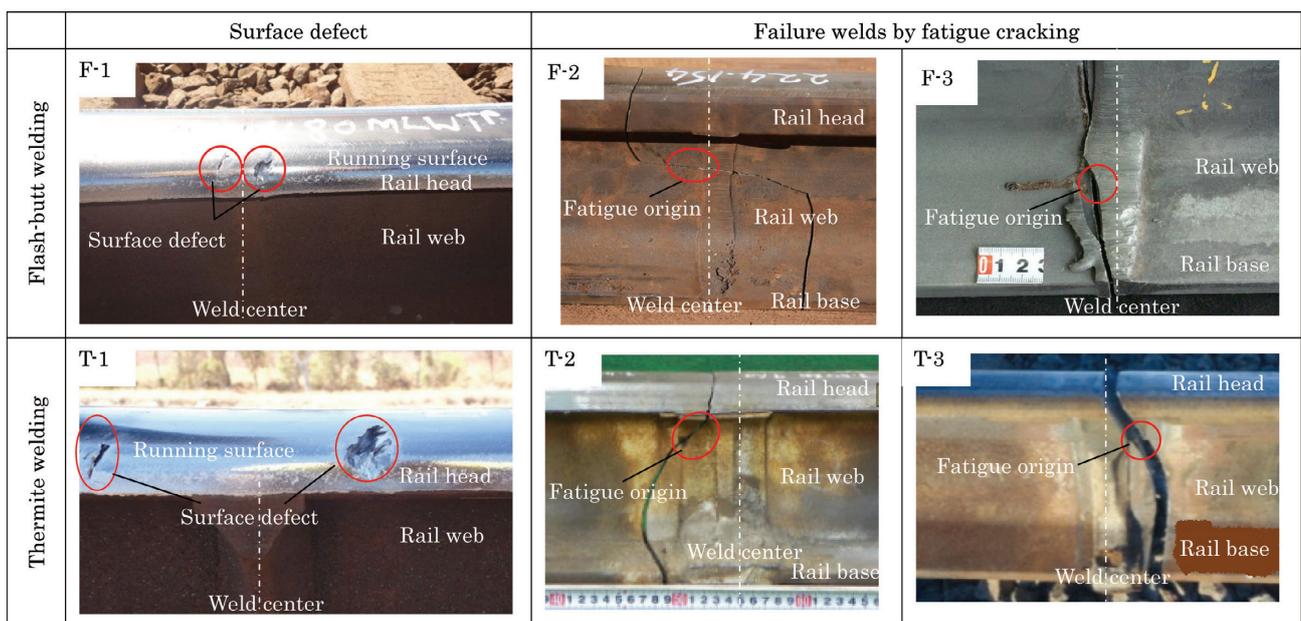


図10 海外貨物鉄道における溶接部の損傷事例
Defect rails at welds in overseas heavy haul track

た剥離を伴う表面損傷、及び疲労損傷の例を示す。

剥離を伴う表面損傷：フラッシュバット溶接方法、テルミット溶接方法のいずれの例も (F-1, T-1)、発生位置は溶接中央線に対しレール長手方向に対称で、図3、図7で示す硬度が最も低下している範囲とほぼ一致する。このことから硬度の低下が剥離を伴う表面損傷の発生原因と考えられる。

疲労損傷：フラッシュバット溶接の柱部の疲労亀裂 (F-2) は、溶接時の剪断工程で除去された膨らみの端部 (ビード端部) を起点に水平方向に発生している。柱部にはレールの上下方向に強い引張残留応力が存在する。このことが亀裂発生に影響していると言われている²¹⁾。また、足部の疲労亀裂 (F-3) はビード端部が起点となっている。レール足部には列車通過時に曲げ応力が働き、剪断除去時の形状不良部に応力集中が生じる。これらが疲労損傷の原因と考えられる。テルミット溶接の場合は余盛りの端部から疲労亀裂が生じている (T-2, T-3)。テルミット溶接は余盛り端の断面の変化が大きい。そのため、その端部での応力集中が疲労損傷の原因と考えられる。

3.2 新フラッシュバット溶接機の導入と今後の取り組み

前章で述べた通り、海外の貨物鉄道で最も使用比率の高い溶接方法はフラッシュバット溶接である。その溶接部には溶接金属が存在せず、品質はレール母材の性能が影響する。そのため、新日鐵住金(株)では母材と同様にフラッシュバット溶接部の信頼性の向上を検討している。その一環として、鉄道会社が所有する溶接機のうち、設備能力が最大級の工場用フラッシュバット溶接機 (米国 CHEMETRON 社製) を新たに導入した。写真9にその外観を示す。新溶接機では変圧器容量が大きいため、予熱工程に大電流を適用する溶接が可能になった。またアプセット荷重も高く、今後レール断面積が増加した場合にも対応が可能である。さらに溶接条件の変更も容易に行うことができる。今後は当該溶接機を活用し、溶接部の信頼性向上に取り組んでいく。



写真9 新フラッシュバット溶接機の装置外観
Overview of our new flash-butt welder

4. まとめ

溶接はレールを敷設するうえで必須の技術である。溶接方法は4種あり、海外ではフラッシュバット溶接とテルミット溶接が採用されている。国内ではこれらに加え、ガス圧接及びエンクローズアーク溶接が採用されている。

海外の貨物鉄道では、重積載化に伴い溶接部の使用環境は国内と比較し苛酷である。そのため、表面損傷や疲労損傷が発生する場合がある。そこで新日鐵住金(株)ではフラッシュバット溶接部の品質に着目し、鉄道会社が所有する種々の溶接機のうち、最も設備能力の高い工場用フラッシュバット溶接機を新たに導入した。今後は当該溶接機を活用し、溶接部の信頼性向上に取り組んでいく。

謝 辞

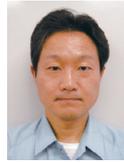
本報告において、高Cエンクローズアーク溶接技術は公益法人鉄道総合技術研究所との共同研究の成果を概説したものである。また本報告の作成に当たり東日本旅客鉄道(株)、(株)峰製作所、白山商事(株)には溶接に関する情報、写真を提供して頂いた。関係各位に対しお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 影山英明 ほか：製鉄研究. (329), 7 (1988)
- 2) 上田正治 ほか：まてりあ. 39 (3), 281 (2000)
- 3) Nobel, Klaus: Railroad Rail Welding. North Field, Railway System & Management Association, 1983, p. 76
- 4) 栗原巧：新線路. (9), 9 (2012)
- 5) Workman, David: AREMA 2011 Annual Conference, Minneapolis 2011, AREMA
- 6) 山本隆一：溶接学会誌. 81 (8), 641 (2012)
- 7) 上山且芳：RRR. (3), 34 (2008)
- 8) 山本隆一 ほか：溶接学会論文集. 28 (2), 137 (2008)
- 9) 山本隆一 ほか：溶接学会論文集. 29 (4), 258 (2009)
- 10) 山本隆一 ほか：鉄道総研報告. 22 (8), 2008
- 11) 溶接学会編：溶接・接合便欄. 第2版. 丸善, 2003, p. 348
- 12) 深田康人：鉄道総研報告. 15 (4), 5 (2001)
- 13) 上山且芳 ほか：溶接学会論文集. 21 (1), 87 (2003)
- 14) Railway Track & Structure. (7), 19 (2009)
- 15) 内野耕一 ほか：溶接学会論文集. 10 (1), 65 (1992)
- 16) 内野耕一 ほか：溶接学会論文集. 10 (1), 74 (1992)
- 17) 狩峰健一 ほか：溶接学会論文集. 14 (3), 578 (1996)
- 18) 中西延仁 ほか：日本鉄道敷設協会誌. 38 (11), 23 (2000)
- 19) 辰巳光正：鉄道総研月例発表会講演要旨. (3), (2008)
- 20) 新版軌道材料. 東京, 鉄道現業社, 2011, p. 77
- 21) Mutton, P. et al.: Proceedings 2011 International Heavy Haul Association Conference. Calgary, 2011-6



才田健二 Kenji SAITA
八幡技術研究部 主幹研究員
福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501



岩野克也 Katsuya IWANO
八幡製鐵所 形鋼部 軌条技術・管理室
上席主幹



狩峰健一 Kenichi KARIMINE
八幡技術研究部 主幹研究員



山本剛士 Takeshi YAMAMOTO
八幡製鐵所 形鋼部 軌条技術・管理室
主幹



上田正治 Masaharu UEDA
八幡技術研究部 主幹研究員



廣口貴敏 Kiyoshi HIROGUCHI
建材事業部 建材営業部
形鋼・スパイラル鋼管技術室長