

日本におけるレールの溶接

公益財団法人鉄道総合技術研究所
軌道技術研究部 レール溶接研究室
山本 隆一

1. はじめに

騒音・振動の低減および列車の乗り心地向上の観点から、レールのつなぎ目（継目部）を溶接により排除したロングレール軌道が、新幹線および都市部の在来線では一般的となっている。また、レール継目部を列車が通過する際には衝撃が発生するため、レールをはじめとする軌道部材は負荷を被る。したがって、ロングレールの適用はメンテナンスコスト削減の観点からも重要である。一方、レール溶接部の折損は列車の走行に悪影響を及ぼすことから、レール溶接部には非常に高い信頼性が要求されている。

日本では、ロングレール化のためのレール溶接方法として、フラッシュ溶接法、ガス圧接法、エンクローズアーク溶接法、テルミット溶接法の4工法が適用されている。本報では、ロングレールの敷設手順、各レール溶接法の特徴等について紹介する。

2. ロングレールの敷設手順

ロングレールは、一般に以下の手順で敷設される。

- (1) レールメーカーより出荷された長さ 25m もしくは 50m のレールをレール溶接工場や現場仮設基地で溶接し、200m 程度の長尺レールとする（一次溶接）。
- (2) 長尺レールを専用貨車で敷設現場に運搬後、線路脇でさらに溶接して所定の長さまで延伸する（二次溶接）。
- (3) 二次溶接されたレールを軌道内に敷設後、その両端を既に敷設されているレール、あるいは伸縮継目*と接合する（三次溶接）。

*温度変化によるレールの伸縮を処理する目的でロングレール端部に設置する継目装置。

上述したロングレールの敷設手順をイメージ化して図1に示す。

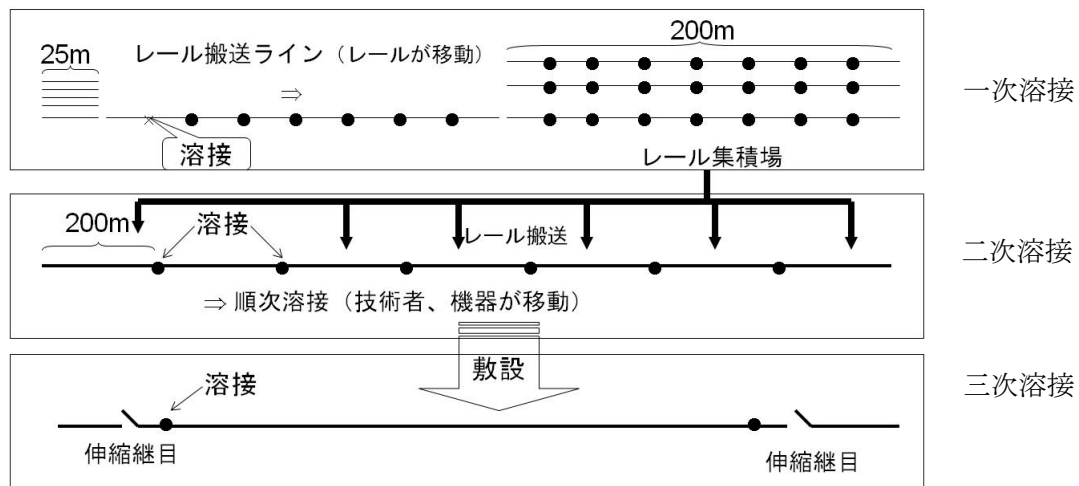


図1 ロングレールの一般的な敷設手順

一次溶接には、生産性が最も高いフラッシュ溶接法が、二次溶接には、生産性と使用機器の機動性のバランスに優れたガス圧接法が主に適用されている。また、三次溶接では、溶接過程においてレール移動を伴わないエンクローズアーク溶接法、テルミット溶接法が主に利用される。図2に、JRグループにおける2010年度の総施工数および各溶接法の適用比率を示す。最近10年間（2001～2010年度）における単年度の平均施工数は約6万口である。

なお、欧米諸国では、レール溶接法として、フラッシュ溶接法およびテルミット溶接法の2工法が主に用いられている。

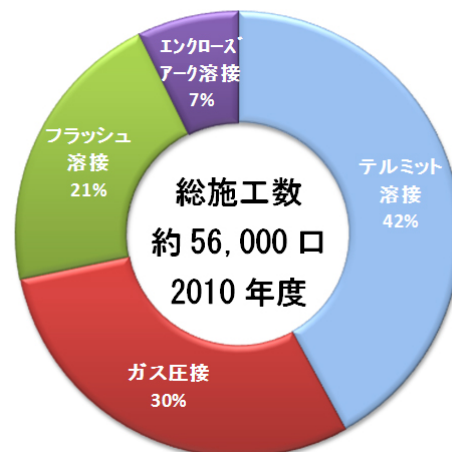
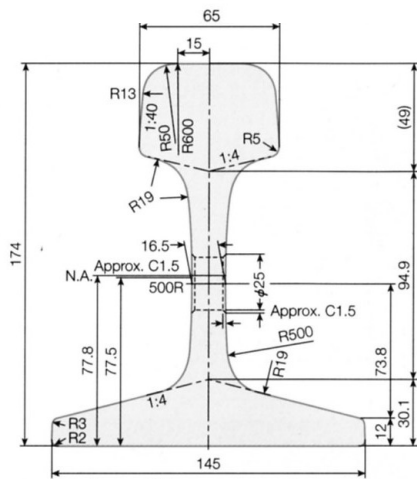


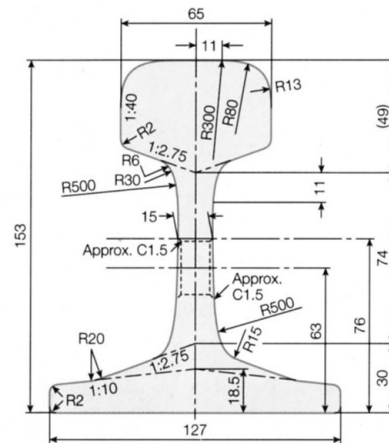
図2 各溶接法の適用状況 (JRグループ)

3. レール鋼の特性

日本では、主に、長さ1m当りの重量が60kgおよび50kgのレールが用いられており、それぞれ、60kgレール、50kgNレールと称される。図3¹⁾に各レールの断面形状を示すが、さらに、材料面から、普通レール (JIS E 1101) と熱処理レール (JIS E 1120) に大別される。表1に普通レールと代表的な熱処理レールであるHH340レールの化学成分および機械的特性を示す。レール鋼は、普通レールでも0.7mass%程度の炭素を含有しており、高炭素鋼に分類される。



(a) 60kg レール



(b) 50kgN レール

図3 主要レールの断面形状¹⁾

表1 レールの化学成分および機械的特性

	化学成分 (mass %)						機械的特性	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	引張強度 (N/mm ²)	伸び(%)
普通レール	0.63-0.75	0.15-0.30	0.70-1.10	0.030 max	0.025 max	-	800 min	10 min
熱処理レール (HH340)	0.72-0.82	0.10-0.55	0.70-1.10	0.030 max	0.020 max	0.20 max	1080 min	8 min

4. 各レール溶接法の特徴

4.1 フラッシュ溶接法

フラッシュ溶接法は接合部の信頼性が高く、さらに、生産性が高い（溶接時間：1.5～3分）ことから、レール溶接工場内での溶接施工に適した溶接法である。現在、JRグループでは、溶接工場内で実施する一次溶接のほとんどをフラッシュ溶接法で行っている。図4に、溶接工場内でのフラッシュ溶接状況を示す。

一方、フラッシュ溶接法は、使用する機器が大きく、大容量の溶接電源が必要なことから他の溶接法に比べて機動性が劣る。しかしながら、小型化したフラッシュ溶接機を搭載したレール溶接車（軌道と道路の両方を走行可能な車両）を導入し、秋田および山形両新幹線建設時に使用した実績がある²⁾。レール溶接車による溶接施工では、配列されたレール上を溶接車が順次移動しながら作業が行われる。図5に、軌道上におけるフラッシュ溶接状況を示す。

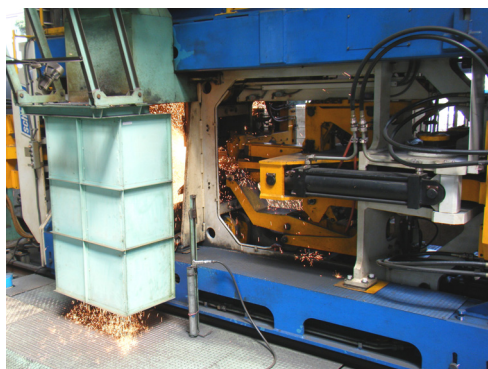


図4 溶接工場内でのフラッシュ溶接状況



図5 軌道上におけるフラッシュ溶接状況

4.2 ガス圧接法

ガス圧接法は、レール母材どうしを直接接合するため、フラッシュ溶接法と同様に信頼性の高い接合部を作製できる。

日本における初期のレールガス圧接機は定置式³⁾と呼ばれるもので、レール腹部をカム状の駒でクランプし、油圧によりレールを加圧しながら、レール断面と相似形の循環水冷式の一体構造アルミ合金鋳物製バーナーによりレールを加熱する。しかしながら、当定置式ガス圧接機は、重量が約 3t あり、機動性に劣るといった問題点があった。また、従来、圧接工程で形成した膨らみはガススカーフイングにより除去していたが、1975 年、作業能率の向上を目的に、圧接直後にレール全周の膨らみを除去する押抜きせん断機を装備した TGP-I 型、II 型ガス圧接機（重量約 500kg）が開発された³⁾。その後、ガス圧接機のさらなる小型化も進められ、1986 年、押抜きせん断機を組み込んだ TGP-HA 型小型ガス圧接機（本体重量 95kg、押抜きせん断機重量 65kg）が開発された。当ガス圧接機は、現在使われているものとしては最軽量であり、現場への搬入が容易なことから、図 6 に示すような線路脇での接合作業（二次溶接）が実施可能となった。

現在のレールのガス圧接作業では、加圧方式として、圧接開始から終了まで一定の加圧力を保持する定圧方式が、また、加熱にはアセチレンガス燃焼炎が使用されている。図 7 に TGP-II 型レールガス圧接機を用いたレールガス圧接作業状況を示す。作業工程は、以下のとおりである。

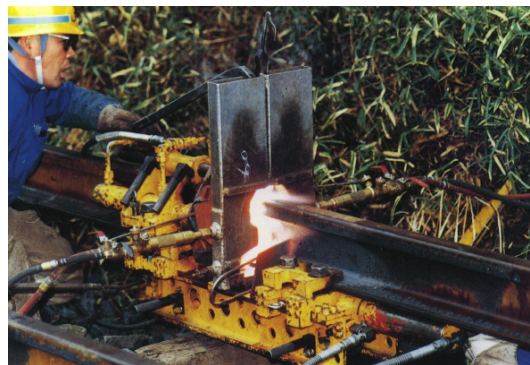


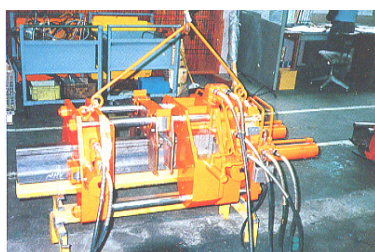
図6 TGP-HA 型による線路脇でのガス圧接

- ① 接合レール端面を専用グラインダで研削し、錆や油等の付着物を除去するとともに、突合せ時に隙間のできないように直角に仕上げる ((a)図)。
- ② 接合レールを突合せた後、ガス圧接機をつり降ろし、レール頭頂面にセットする ((b)図)。
- ③ 油圧操作盤のクランプ用油圧バルブを操作してレール腹部をクランプする。

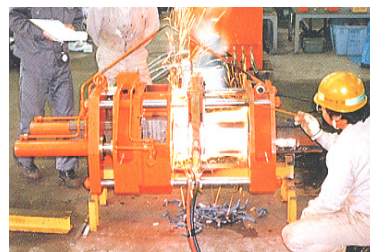
- ④ レール加圧用油圧バルブを操作し、所定の加圧力を加えるとともに、圧縮量指示計を所定の値にセットする。
- ⑤ 予めガスの流量調整をした加熱バーナー(二分割型多孔式)をレールの両側からセットし、バーナーに点火して突合せ部を加熱しながら圧接を行う ((c)図)。
- ⑥ 圧縮量が所定の値に到達したら、バーナーを消火する ((d)図)。
- ⑦ 加圧を一旦停止し、ただちに可動側のクランプを緩めた後、ガス圧接部の膨らみを熱間で押抜く ((e)図)。
- ⑧ 熱間押抜き終了後、加圧を止め、クランプを解放し、バーナー、ガス圧接機を取外す ((f)図)。
- ⑨ 接合部の曲りを熱間で矯正する。
- ⑩ 接合部の仕上げ作業を行い、仕上り検査を実施する。



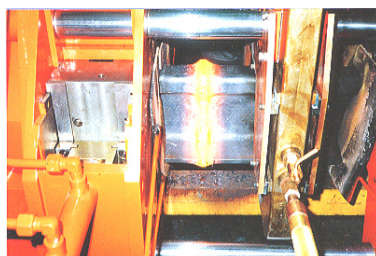
(a) 端面研削



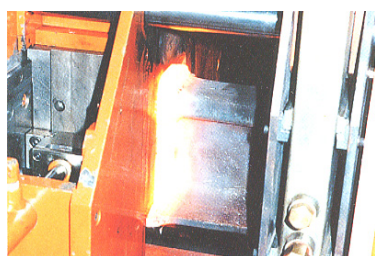
(b) ガス圧接機のセット



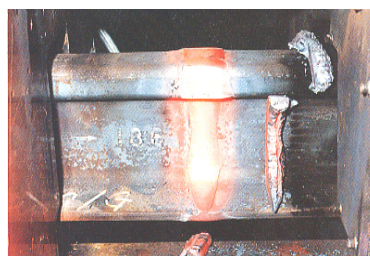
(c) ガス圧接作業



(d) 加熱・加圧終了



(e) 膨らみの熱間押抜き



(f) ガス圧接作業後の外観状況

図7 TGP-II型によるレールガス圧接施工状況

本工法による JIS60kg 普通レールの接合時間は6～7分であり、レール頭部中心部の温度は約 1250℃ に達する。

一方、熱処理レールの場合には、クロム等の合金元素が接合を阻害するため、普通レールよりも圧縮量を増大させる。また、熱処理レールガス圧接部では、圧接作業に伴い接合部付近の硬度が低下する。よって、列車通過に伴う落ち込みの発生を防止する目的から、圧接終了後に再加熱・強制空冷の後熱処理を実施する。

4.3 エンクローズアーク溶接法

エンクローズアーク溶接法は、東海道新幹線の建設におけるロングレールの現地溶接法として開発されたもので、レールに適当な間隔を設けてI型開先の状態に突合せ、低水素系被覆アーク溶接棒を用いて下向姿勢で手動にて溶接する方法である⁴⁾。なお、レール腹部および頭部の溶接時に接合部をレール形状に合わせた銅ブロックでとり囲むことから“エンクローズ”アーク溶接法と呼ばれている。本溶接法では、溶接施工に際して、フラッシュ溶接法やガス圧接法のようにレールを加圧・圧縮する必要がないため、後述するテルミット溶接法と同様にレールを軌道上に敷設した状態で溶接施工が可能である。普通レールの溶接施工は以下の手順で実施されるが、溶接施工において高度な溶接技量が必要とされる。なお、**図8**に普通レールを接合する場合の標準的な積層例を示す。

- ① 17mm 程度の間隔を設けてレールをセットし、レール底面に銅製の裏当金を配置する。
- ② レール底部の開先両側 150mm の範囲を 500℃程度に予熱する。
- ③ レール底部から溶接を開始する。この過程では、780N/mm² 級高張力鋼用低水素系溶接棒を用い、2 パスで底部第 1 層の溶接を行う。
- ④ 第 1 層の溶接で形成したスラグを除去した後、第 1 層とは逆向きに第 2 層の溶接を行う。なお、第 2 層以降は、1 層 1 パスで一方の底部端から他方の底部端まで溶接を行うが、この多層溶接過程では各層の溶接毎にスラグを除去する。
- ⑤ レール底部の多層溶接後、レール底部から頭部のレール形状にほぼ合致した水冷式銅当金で取り囲み、エンクローズアーク溶接を実施する。この過程では、生成するスラグを外側に排除しながら連続的に溶接を行う。
- ⑥ 頭頂部の約 10～15mm を残してエンクローズアーク溶接を中断し、スラグ除去を行った後、頭頂部を硬化肉盛棒で多層溶接する。
- ⑦ 底部上面の仕上げ溶接を行う。
- ⑧ 接合部の仕上げ作業を行い、冷却後、仕上がり検査を実施する。

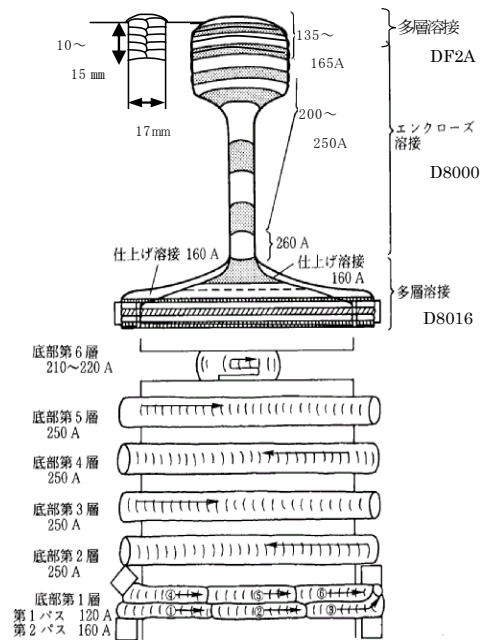


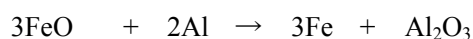
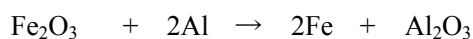
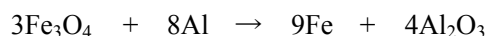
図8 エンクローズアーク溶接法における積層例（普通レール）

エンクローズアーク溶接法は溶接施工時間が長く、例えば JIS60kg 普通レールを溶接する場合、溶接時間だけで約 60 分を要する。なお、近年、被覆アーク溶接棒の代わりに連続供給可能な溶接ワイヤを使用し、炭酸ガス雰囲気中で溶接施工を行う半自動エンクローズ溶接法⁵⁾が一部適用され、当工法で JIS60kg 普通レールを溶接する場合には、溶接時間が約 30 分に短縮される。

4.4 テルミット溶接法

テルミット溶接法とは、酸化金属とアルミニウム間の酸化還元反応、いわゆるテルミット反応を溶接に応用したものである⁶⁾。

レールのテルミット溶接では、以下に示す酸化鉄とアルミニウムによるテルミット反応によって得られる溶鋼(Feが主成分)を接合レール間に設置したモールド(鋳型)に流し込む。



この反応は非常に激しく、溶鋼の温度は2100~2400℃程度といわれる⁶⁾。しかし、反応自体は爆発的ではなく、また反応開始に1200℃程度の温度を必要とするため、その取扱いは比較的安全である。実用に供されるレール用テルミット溶剤は、上述の酸化鉄およびアルミニウム粉末を主成分とし、生成物の温度を制御し溶接金属の機械的性質を使用目的に適合させるため、鋼片、合金鉄、グラファイトなどが添加されている。

テルミット溶接法は、使用する機器が簡便であり、また溶接時間が比較的短いことから、列車運行時間外に実施される線路内容接の手段として適している。現在日本では、1979年にドイツより導入された短時間予熱による迅速テルミット溶接法(呼称:ゴールドサミット溶接法)が主に適用されている。当法でJIS60kg普通レールを溶接する際の作業工程は以下のとおりである。

- ① レールを切断した後、25mm程度の間隔を設けてレールをセットする。
- ② レールにルツボ(反応容器)および予熱バーナー設置用のジグを取り付ける。
- ③ レールにモールドを取り付け、砂詰めを行う。
- ④ ルツボをモールド上部に設置した後、ルツボ内へテルミット溶剤を装填する。
- ⑤ モールド内に予熱バーナーを差し込み、予熱作業を実施する(2分間)。
- ⑥ 予熱作業後、モールド上部にプラグを差し込む。その後、ルツボ内のテルミット溶剤に着火することでテルミット反応を開始させ、溶鋼をモールド内へ注入する(図9)。
- ⑦ 溶鋼注入から4分程度静置した後、モールド上部を倒し、レール上方の溶接金属を押抜きせん断機で除去する。
- ⑧ レール頭部の仕上げ作業を行い、溶接部の冷却後、仕上り検査を実施する。

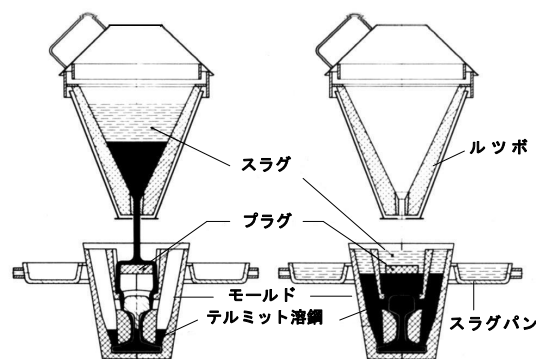


図9 テルミット溶鋼の注入

テルミット溶接法では、溶接工程において比較的大きい余盛(コブ)を形成させるが、レール腹・底部については余盛をそのまま残した状態で実用に供するため、疲労強度が他の溶接部に比べて劣っている。

5. レール溶接部の仕上り検査

レール溶接部の損傷は、鉄道の安定輸送に多大な影響を及ぼす。したがって、日本では、レール溶接部の信頼性を確保するため、溶接部全数を対象に仕上り検査が実施される。なお、適用検査項目は、**表 2** に示すように各溶接部ごとに定められている。

表 2 溶接種別による適用検査項目

検査項目	溶接種別	フラッシュ溶接部 ガス圧接部	エンクローズアーク溶接部 テルミット溶接部
	外観検査		○
磁粉探傷検査		○	—
浸透探傷検査		—	○
超音波探傷検査		—	○

外観検査と浸透探傷検査あるいは磁粉探傷検査の表面検査は、全溶接種別において実施されるが、超音波探傷検査は有害な内部欠陥の発生する可能性のあるエンクローズアーク溶接部およびテルミット溶接部に対して適用されている。超音波探傷検査では、屈折角 45° の斜角探触子を一つ使用する一探触子法と二つ使用する二探触子法が用いられる。なお、一探触子法の場合、融合不良のような溶接面に平行な平面欠陥の検出が困難なため、現在ではレール頭部側面および底部側面からの二探触子法(**図 10**)を重視した検査が実施されている。さらに、二探触子法による欠陥等級分類(エコー高さ)と溶接部の強度特性との関係が明らかになっており⁷⁾、これらを基に超音波探傷検査での判定基準が定められている。



**図 10 二探触子法による超音波探傷検査
(テルミット溶接部)**

6. おわりに

レール溶接技術は、ロングレール化を達成する上で不可欠な要素技術である。なお、本文中でも述べたように、レール溶接部は、列車荷重が直接作用する過酷な環境下で使用されるため、非常に高い信頼性が要求される。今後も溶接欠陥防止および探傷技術向上に関する取り組みを継続し、レール溶接部の信頼性確保により一層尽力したい。

参考文献

- 1) 例えば、新日鐵レールカタログ
- 2) 北條：レール溶接車の導入、日本鉄道施設協会誌、Vol.33、No.2、(1995)、p118-119.
- 3) 滝本、大石橋：レールの溶接方法、鉄道線路、Vol.25、No.10、(1977)、p581-589.
- 4) 森：60kg レールのエンクローズアーク溶接、鉄道技術研究資料、28-3(1971)、p26-27.
- 5) 中西、三井、中野渡：レールの半自動エンクローズアーク溶接工法、日本鉄道施設協会誌、Vol.38、No.11、(2000)、p23-25.
- 6) 溶接学会編：第2版 溶接・接合便覧、丸善(2003)、p348.
- 7) 辰巳、上山、山本、工藤：レール溶融溶接部折損防止のための超音波探傷検査、鉄道総研報告、Vol.9、No.12、(1995)、p43-48.

<略歴>

1993年 大阪大学工学研究科 生産加工工学専攻 修了

1993年 鉄道総合技術研究所 入社

2012年 博士（工学）取得

2012年 軌道技術研究部 レール溶接研究室 研究室長

現在に至る