

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

Development of Technologies to Improve the Reliability of Rail Flash Butt Welds

猿渡 周雄* 才田 健二 上田 正治
Suo SARUWATARI Kenji SAITA Masaharu UEDA
山本 剛士 園山 恭平
Takeshi YAMAMOTO Kyohei SONOYAMA

抄 録

海外の貨物鉄道では、輸送効率化を目的とした貨車積載重量の増大に伴い、レール頭部での摩耗や損傷の発生が増加している。特に溶接部はレールの最弱部であり、摩耗や損傷の発生が顕在化する。海外の貨物鉄道で広く使用されているフラッシュバット (FB) 溶接では、熱影響部 (HAZ) の軟化によるレール頭部の摩耗やころがり接触疲労損傷、残留応力による腹部水平裂 (HSW) の発生が課題となっており、その対策が望まれている。日本製鉄 (株) では、FB 溶接条件の制御による HAZ 幅低減技術、溶接後熱処理 (PWHT) による残留応力低減技術を開発した。本報告では、これらの開発および実用化の事例を紹介する。

Abstract

In overseas heavy haul railroads, wear and damage of rail heads increase as freight car loads increase for the purpose of transportation efficiency. Rail welds are the weakest part of rails, therefore, these issues are likely to become apparent. Flash butt (FB) welds, which are widely used in overseas heavy haul railroads, are facing problems of wear and rolling contact fatigue at the rail head due to softening in the heat-affected zone (HAZ), and horizontal split web (HSW) due to residual stress, so countermeasures are desired. Nippon Steel Corporation has developed technologies to reduce HAZ width by controlling the FB welding conditions and to reduce residual stress by post weld heat treatment (PWHT). In this report, examples of their development and practical application are presented.

1. 緒 言

貨物鉄道は一度に大量の物資を輸送することが使命である。近年、海外における鉄鉱石や石炭などの資源輸送鉄道では貨車の積載重量を増大させることで輸送の効率化を行ってきている。それに伴って、車輪からレールにかかる荷重が増大し、レール頭部での摩耗やころがり接触疲労損傷が顕在化してきている。この課題に対して、日本製鉄 (株) は耐摩耗性や耐ころがり接触疲労損傷性に優れた高い炭素量を含有する高硬度レールを開発し、実用化してきた¹⁾。

また、レールは溶接して使用されるが、溶接部はレール母材に比べて品質的に劣位であり、摩耗や損傷の発生頻度はさらに高くなっている。海外の貨物鉄道で広く使用されているフラッシュバット (Flash Butt: FB) 溶接部での摩耗および損傷事例を写真 1、写真 2 に示す。写真 1 は FB 溶接

部の熱影響部 (Heat-Affected Zone: HAZ) においてレール頭部で摩耗およびころがり接触疲労損傷が発生した事例である²⁾。写真 2 は腹部水平裂 (Horizontal Split Web: HSW) と呼ばれる損傷の事例である³⁾。これは溶接部を起点としたき裂がレール腹部 (web) に発生し、水平方向に進展した後、折損に至ったものである。このき裂の発生、進展には溶接部の残留応力が大きく影響していると考えられている^{3,4)}。

これらの課題に対応するため、日本製鉄では溶接箇所を低減することができる長尺レールの供給を行ってきた。2014 年には 150m レール (一般的なレール長さは 25m) の製造および出荷体制を構築し、国内外へ供給を開始した⁵⁾。

また、日本製鉄は溶接部そのものの品質向上を目的に、レールの FB 溶接部の信頼性向上技術の開発にも取り組んできた。本報告では、その事例として、FB 溶接条件の制御による HAZ 幅低減技術と溶接後熱処理 (Post Weld Heat

* 鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第二部 高機能ソリューション研究第二室 研究第二課 主任研究員 福岡県北九州市戸畑区飛幡町 1-1 〒804-8501

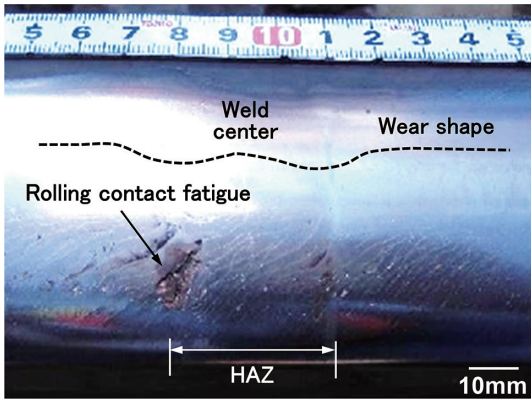


写真1 FB溶接部で発生した摩耗およびころがり接触疲労損傷の事例²⁾
 Example of wear and rolling contact fatigue that occurred at FB welds²⁾

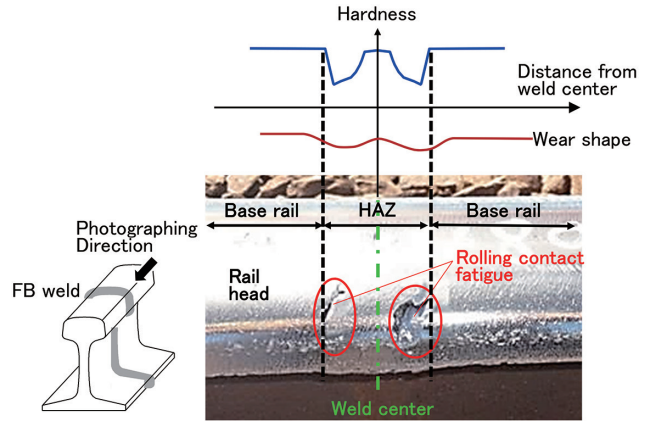


図1 FB溶接部で発生した摩耗・ころがり接触疲労損傷と硬度分布、摩耗状態の模式図
 Example of wear and rolling contact fatigue, and schematic image of hardness distribution and wear profile at FB welds

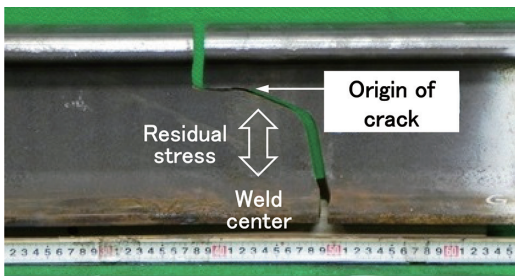


写真2 FB溶接部で発生した腹部水平裂の事例²⁾
 Example of horizontal split web that occurred at FB welds²⁾

Treatment: PWHT) による残留応力低減技術⁹⁾を紹介する。

2. FB溶接条件の制御によるHAZ幅低減技術

2.1 FB溶接部の摩耗・ころがり接触疲労損傷の要因と対策

FB溶接部で発生した摩耗・ころがり接触疲労損傷の事例と硬度分布、摩耗状態の模式図を図1に示す。このようにFB溶接部の摩耗およびころがり接触疲労損傷は、主にHAZの軟化領域で発生する^{2,7)}。レール母材に対して軟化領域は硬度が低いため、摩耗が進みやすく、塑性流動を起因としたころがり接触疲労損傷も生じやすい。したがって、軟化領域を含むHAZ幅を低減することで摩耗やころがり接触疲労損傷を低減できる。

まず、FB溶接工程を図2に示す。FB溶接は(a)予熱工程、(b)フラッシュ工程、(c)アップセット工程から構成される。予熱工程(図2(a))では、レール端面を接触させた状態で通電することによりレール端面を昇温し、アーク放電が発生しやすい状態にする。次のフラッシュ工程(図2(b))では、一定の間隔を離れたレールの両端面に電圧を付加し、アーク放電を繰り返し発生させる。アーク放電によって溶融層の一部が溶接部から外部へ飛散する。この溶損によってレール端面が消耗すると、レール端面間の距離が大きくなりアーク放電が不安定になるため、端面間の距離を一定

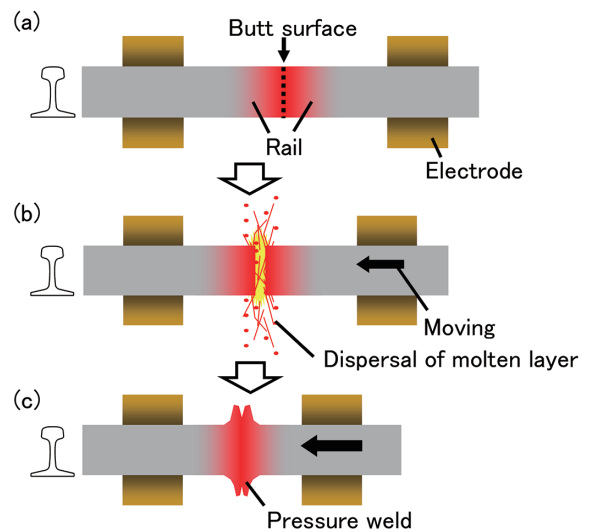


図2 FB溶接工程
 (a) 予熱工程, (b) フラッシュ工程, (c) アプセット工程
 FB welding process: (a) Pre-heating process, (b) Flashing process, (c) Upsetting process

に保つようレールを移動させ、接近させる。このフラッシュ工程における溶接部の温度分布はHAZ幅と軟化領域の大きさに影響する。続くアップセット工程(図2(c))では、突合せ面に圧力を加えてレールを接合する。この際、溶接部の一部は外部へ押し出される。

次に、HAZにて軟化領域が生成するメカニズムについて述べる。図3にFB溶接部におけるフラッシュ工程での温度分布と冷却後の硬度分布を示す。フラッシュ工程において溶接中心部の温度は融点近傍まで上昇し、HAZの一部の金属組織が変化することで軟化領域が発生する。具体的には、 A_1 変態点以上からオーステナイト単相域以下の温度領域(以下、軟化温度域と称す)となる範囲でレールの金属組織であるパーライト中の層状セメンタイトが球状セメンタイトに変化することにより硬度が低下する。つまり、フラッシュ工程における溶接部の温度分布を制御すること

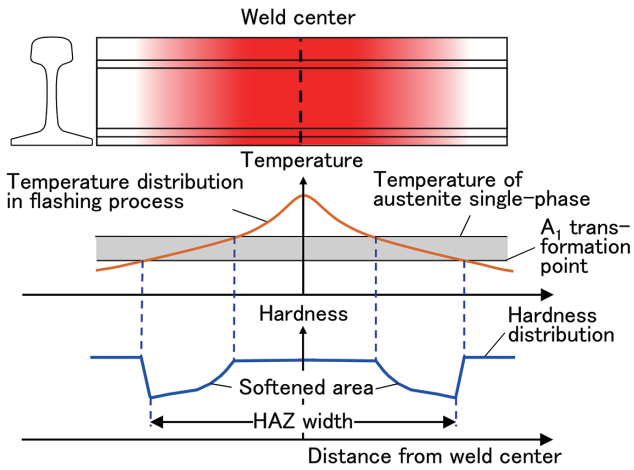


図3 FB溶接部におけるフラッシュ工程での温度分布と冷却後の硬度分布

Schematic image of temperature distribution in flashing process and hardness distribution after cooling at FB welds

で、軟化温度域となる範囲を小さくし、HAZ幅を低減することができる。

2.2 FB溶接部におけるHAZ幅低減の検討

2.2.1 FB溶接部におけるHAZ幅低減方法の考え方

図4にFB溶接部におけるフラッシュ工程での温度分布と冷却後の硬度分布、HAZ幅の関係を示す。図4からわかるように軟化温度域の温度勾配により軟化領域およびHAZ幅が変化する。HAZ幅を低減するには軟化温度域の温度勾配を急峻にすればよいが、その方法として、フラッシュ工程における溶損量を増大させることを検討した。フラッシュ工程では、溶接部の熱の一部は溶損によって外部へ放散され、残存した熱が母材側へ伝達することで、温度勾配が生じる。そのため、フラッシュ工程での溶損量を増大し、溶接部に残存する熱量を小さくすることで溶接部の温度勾配を急峻にすることができる。フラッシュ工程での溶損量を増大させる手段としては、単位時間あたりの溶損量であるレールの移動速度（以下、フラッシュ速度と称す）を増大することや、フラッシュ工程時の総溶損量であるレールの移動距離（以下、フラッシュ距離と称す）を増大することが有効である。そこで、これらの2つのFB溶接条件を変化させ、HAZ幅に及ぼす影響を調査した。

2.2.2 実験方法

供試鋼として用いたレールの成分は、C含有量：0.6～1.0mass%、Si含有量：0.05～1.00mass%、Mn含有量：0.3～2.0mass%である。レール頭部硬度は280～465HBであり、金属組織はパーライトである。レールサイズは海外貨物鉄道で広く使用されている136REとした。

表1にFB溶接条件を示す。FB溶接には、Progress Rail社製の固定式FB溶接機を使用した。フラッシュ速度は0.2

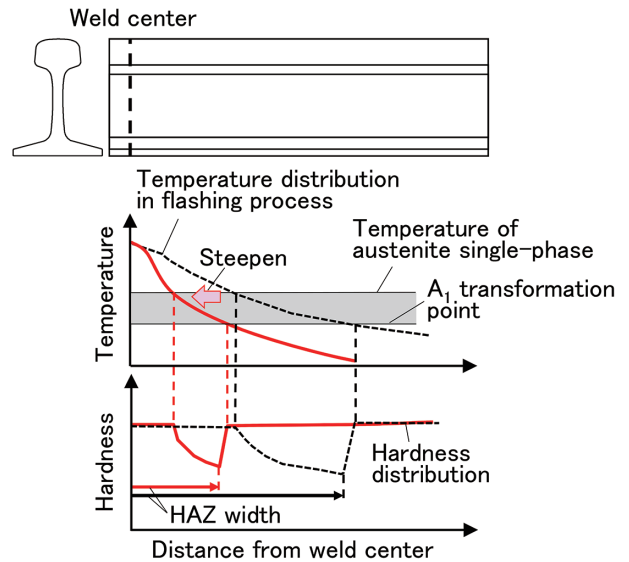


図4 FB溶接部におけるフラッシュ工程での温度分布と冷却後の硬度分布、HAZ幅の関係

Relationship among temperature distribution in flashing process, hardness distribution after cooling and HAZ width at FB welds

表1 FB溶接条件
FB welding conditions

Parameter	Value
Flashing velocity (mm/sec)	0.2～2.8
Flashing distance (mm)	3～32

～2.8mm/sec、フラッシュ距離は3～32mmの範囲で変化させてHAZ幅との関係を調査した。HAZ幅は長手方向の断面マクロ組織を観察し、溶接部の両側に現れる白色部間の距離とした。また、HAZ幅の異なる溶接部について硬度分布や耐摩耗性を評価した。溶接部の硬度分布はレール頭部表面から5mm深さの位置で硬度を測定し、評価した。耐摩耗性は実物大の車輪とレールを用いた転動疲労試験機で評価した。試験条件は、貨物鉄道と同等の条件として、車輪からレールにかかる鉛直方向荷重を15～20トンとし、累積通過トン数1億トンまでとした。試験後、溶接部におけるころがり接触面の長手方向の形状で耐摩耗性を評価した。

2.2.3 実験結果

図5にFB溶接条件とHAZ幅の関係を示す。図5(a)に示すように、フラッシュ速度の増大に伴いHAZ幅は低減し、フラッシュ速度が2.1mm/sec以上でほぼ一定となった。また、図5(b)に示すように、フラッシュ距離の増大に伴いHAZ幅は低減し、フラッシュ距離が20mm以上でほぼ一定となった。写真3にHAZ幅の異なるFB溶接部の断面マクロ組織を示す⁶⁾。HAZ幅33mmは一般的なFB溶接のHAZ幅（以下、従来HAZと称す）であり、HAZ幅23mmはFB溶接条件の制御により低減したHAZ幅（以下、狭

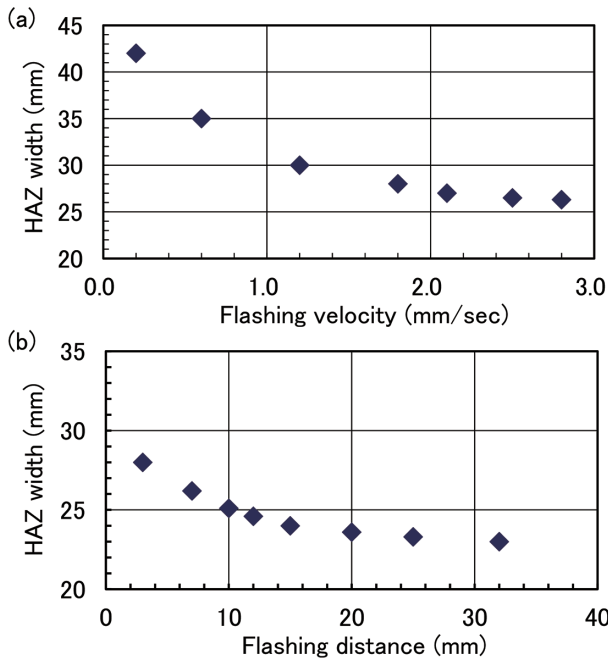


図5 FB溶接条件とHAZ幅の関係

(a) フラッシュ速度, (b) フラッシュ距離

Relationship between FB welding conditions and HAZ width: (a) Flashing velocity, (b) Flashing distance

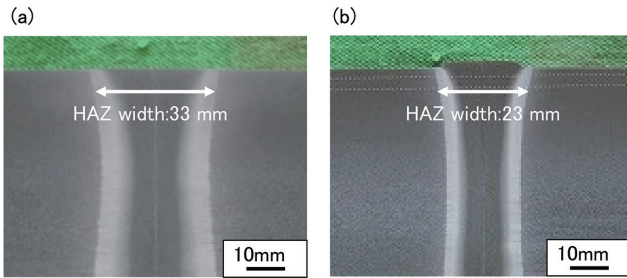


写真3 FB溶接部の断面マクロ写真

(a) 従来 HAZ, (b) 狭 HAZ

Cross-sectional macrostructure of FB welds: (a) Conventional HAZ, (b) Narrowed HAZ

HAZと称す)である。これらのFB溶接部について、硬度分布や耐摩耗性を評価した。図6にFB溶接部の硬度分布を比較した結果を示す⁹⁾。軟化領域は従来HAZで14mmであったのに対し、狭HAZでは8mmとなり、HAZ幅とともに軟化領域も低減していた。図7にFB溶接部のレール頭部表面における耐摩耗性の評価結果を示す⁹⁾。HAZ幅を低減することで、軟化領域から進行した摩耗の長さは116mmから80mmへ低減し、摩耗の最大深さは0.24mmから0.14mmに低減した。このようにFB溶接条件の制御によりHAZ幅を低減することで、耐摩耗性が向上することを確認した。

3. PWHTによる残留応力低減技術

3.1 FB溶接部のHSWの要因と対策

HSWには、FB溶接部に発生する鉛直方向の引張残留応力が影響する^{3,4)}。そのため、FB溶接部の引張残留応力を

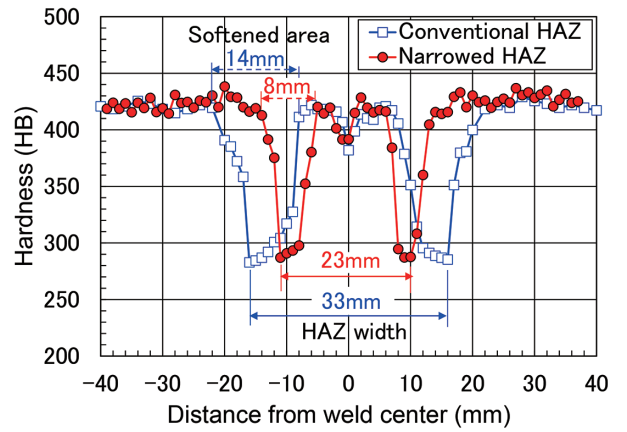


図6 FB溶接部の硬度分布
Hardness distribution at FB welds

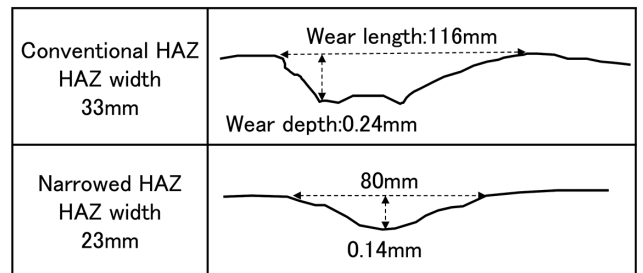


図7 累積通過トン数1億トン経過後のFB溶接部のレール頭部表面における長手方向の摩耗プロファイル
Longitudinal wear profiles at rail head surface of FB welds after 100million gross tons

低減することで、HSWの発生を抑制することができる。まず、FB溶接部における残留応力発生メカニズムについて述べる。FB溶接部では、溶接後の冷却過程で生じようとする収縮と周囲の母材による拘束によって残留応力が発生する。図8にFB溶接部の長手方向における溶接直後の温度分布、冷却過程で生じようとする収縮と冷却後の残留応力分布を示す⁹⁾。周囲に比べて温度が高くなる溶接中心部では、冷却過程で生じようとする収縮は大きくなるが、実際には周囲の母材によって収縮が拘束されるため、鉛直方向に大きな引張残留応力が発生する。一方、周囲の母材では溶接中心部の収縮を拘束するため、圧縮残留応力が生じる。溶接部全体でみるとFB溶接後の残留応力は、図8(c)に示すように溶接中心部から離れるにつれて、引張から圧縮に変化し、さらに離れると0に漸近するような分布となる。そこで、FB溶接部を再度、加熱するPWHTによって溶接とは異なる温度分布を付与し、FB溶接後の残留応力分布を変化させることを検討した。

3.2 FB溶接部における残留応力低減の検討

3.2.1 FB溶接部における残留応力低減方法の考え方

FB溶接部のPWHTに用いた装置の外観を写真4に示す⁹⁾。これは溶接後に溶接中心部から離れた2箇所を誘導加熱(Induction Heat: IH)にて加熱する装置である。PWHT

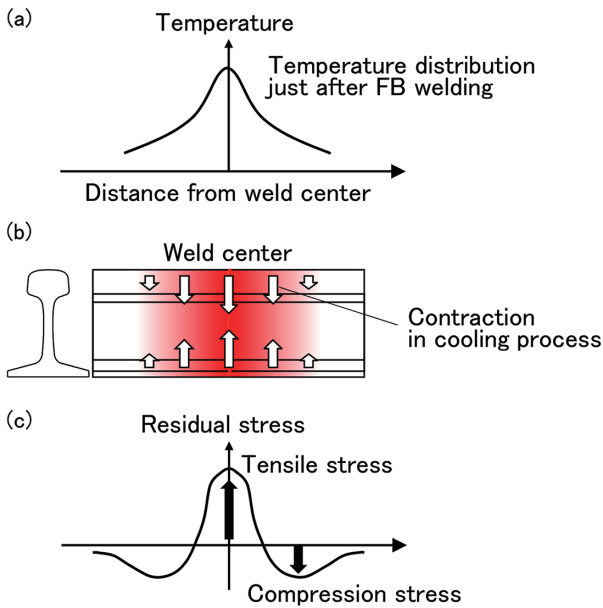


図8 FB 溶接部の長手方向における各種分布
 (a) FB 溶接直後の温度, (b) 冷却過程で生じようとする収縮,
 (c) 冷却後の残留応力
 Various distributions in the longitudinal direction of FB welds: (a) Temperature just after FB welding, (b) Contraction in cooling process, (c) Residual stress after cooling

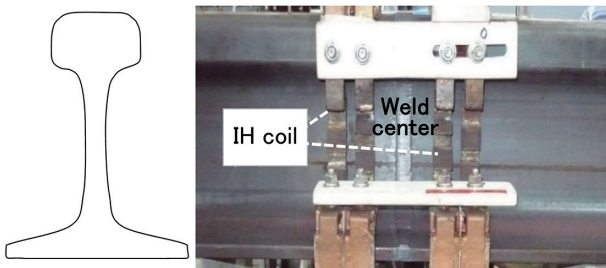


写真4 PWHT 装置の外観 (IH 加熱)
 Appearance of the PWHT equipment (IH)

による FB 溶接部の加熱後の温度分布, 冷却過程で生じようとする収縮と圧縮応力の関係を図9に示す⁹⁾。高温となる加熱部では引張残留応力が発生し, 加熱部から離れた部位では圧縮残留応力が発生すると考えられる。このような温度分布に伴う残留応力発生メカニズムに基づいて, 溶接中心部から離れた位置を加熱することで, 溶接中心部に圧縮応力を付与し, FB 溶接で溶接中心部に発生した引張残留応力を低減することを検討した。PWHTにおける溶接中心部から加熱中心部までの加熱距離や加熱温度, 加熱幅によって温度分布が変化することに起因して, 残留応力も変化すると考えられる。そこで, これらのPWHT条件を変化させて, 溶接部の残留応力に及ぼす影響を調査した。

3.2.2 実験方法

2章の従来 HAZ の FB 溶接継手を用いて, PWHT を実施した。表2にPWHT条件を示す。加熱距離は12~160 mm, 加熱温度は400~750℃, 加熱幅は12~170 mm で変

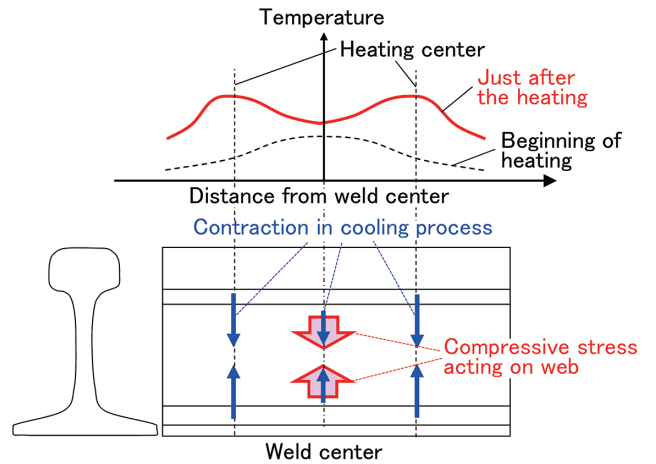
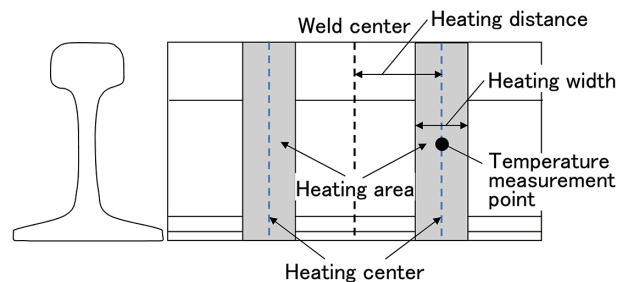


図9 PWHTによるFB 溶接部の温度分布と冷却過程で生じようとする収縮, 圧縮応力の関係
 Relationship among distribution of temperature, contraction in cooling process and compressive stress at FB welds by PWHT

表2 PWHT 条件
 PWHT conditions

Parameter	Value
Heating distance (mm)	12 - 160
Heating temperature at web (°C)	400 - 750
Heating width (mm)	12 - 170



化させて溶接部の残留応力との関係を調査した。溶接部の残留応力は溶接中心線の柱中央部にひずみゲージを貼り付け, ひずみゲージを中心として縦15mm×横15mm×厚み10mmの大きさのサンプルをレールから切り出し, 切り出し前後のひずみ変化量を測定することで算出した。

3.2.3 実験結果

図10にPWHT条件とFB 溶接部の残留応力の関係を示す⁹⁾。図10(a)に示すように加熱距離が約65mmまでは, 加熱距離の増大に伴って残留応力は低減し, それ以上では残留応力は増大した。このことは, PWHTによる残留応力変化において, 圧縮残留応力が最も高くなる加熱距離が65mmであったことを示唆する。図10(b)に示すように, 加熱温度を上昇させることで残留応力は低減した。しかし, 加熱温度を高くし過ぎると, 加熱部や周辺の母材が軟化して耐摩耗性や耐ころがり接触疲労損傷性が劣化するため, 加熱温度の上限を見極めることが重要である。また, 図10(c)に示すように, 加熱幅を大きくさせると残留応力は低減し,

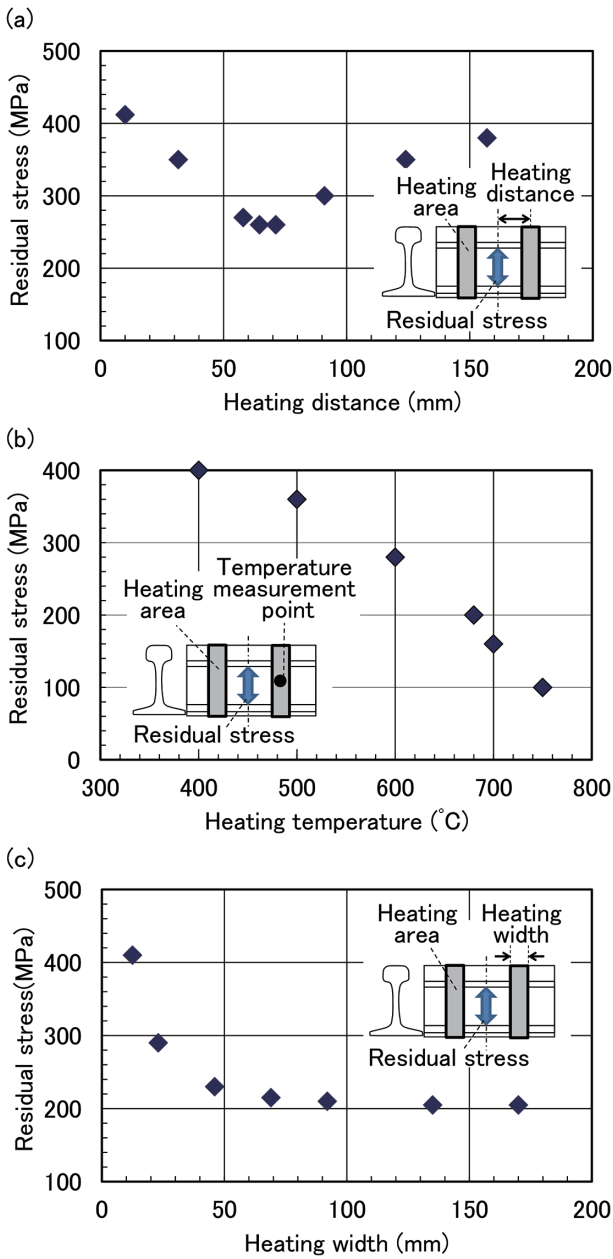


図10 PWHT条件とFB溶接部の残留応力の関係

(a)加熱距離, (b)加熱温度, (c)加熱幅

Relationship between PWHT conditions and residual stress at FB welds: (a) Heating distance, (b) Heating temperature, (c) Heating width

50mm以上で残留応力はほぼ一定となった。これらの実験結果により溶接中心部の残留応力低減効果が大きいPWHTの条件を選定した。

4. FB溶接部の信頼性向上技術の開発と今後の展開

4.1 FB溶接部の信頼性向上技術の開発

FB溶接条件の制御によるHAZ幅低減技術とPWHTによる残留応力低減技術の組合せ効果を検証するため、HAZ幅を変化させたFB溶接部にPWHTを行い、HAZ幅と残留応力の関係を調査した。具体的なHAZ幅は従来HAZのHAZ幅33mmと狭HAZのHAZ幅23mmである。図11

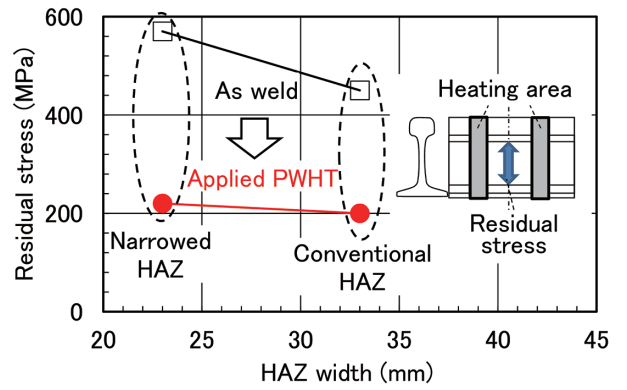


図11 FB溶接部におけるHAZ幅と残留応力の関係とPWHTによる残留応力低減

Relationship between HAZ width and residual stress at FB welds, and reduction of residual stress by PWHT

にFB溶接部におけるHAZ幅と残留応力の関係とPWHTによる残留応力の変化を示す⁶⁾。HAZ幅を低減すると溶接ままの残留応力は450MPaから570MPaに増大した。しかし、PWHTを行うことにより、HAZ幅に関係なく、残留応力は200~220MPaまで低減した。HAZ幅を低減すると、耐摩耗性は向上するが、溶接ままの残留応力が高くなり、HSWの発生が懸念される。しかしながら、適切なPWHTを実施することにより、HAZ幅低減に伴う残留応力の増大を抑制できた。つまり、本技術を適用することでFB溶接部の摩耗・ころがり接触疲労損傷およびHSWの発生を低減できると考えられる。

4.2 開発技術の適用事例

本開発技術は特許を取得しており⁸⁻¹⁰⁾、FB溶接を適用している顧客に対し、FB溶接部の信頼性を向上する溶接ソリューション技術として提供している。その一例として、Union Pacific Railroad社の事例を紹介する⁶⁾。2015年に同社のStocktonにある溶接工場に対し、HAZ幅低減技術と残留応力低減技術を適用した。これにより、HAZ幅は33mmから27mmに低減し、残留応力は570MPaから290MPaまで低減した。

4.3 今後の展開

国内外の鉄道会社では、レール溶接工場で使用される固定式FB溶接機に加えて、レール敷設現地で使用される可搬式FB溶接機が普及してきている。このような顧客動向を受け、日本製鉄では2020年にPlasser & Thurer社製の可搬式FB溶接機(写真5)を導入した。今後、固定式FB溶接機と併せて可搬式FB溶接機も活用して顧客の溶接課題を解決し、FB溶接部のさらなる信頼性向上に取り組む。

5. 結 言

レールのFB溶接部の信頼性向上技術の開発事例として、FB溶接条件の制御によるHAZ幅低減技術とPWHTによ

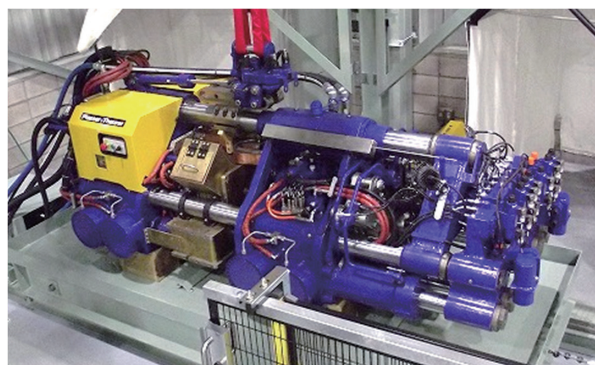


写真5 可搬式FB溶接機の外観
Appearance of mobile FB welding equipment

る残留応力低減技術を紹介した。レールの使用環境は、今後も過酷化していくと予想され、レール溶接部のさらなる品質向上が求められると考えられる。今後もレール溶接部の課題に対応した溶接技術の開発に取り組み、安全・安心な鉄道輸送の発展に貢献していく。

参照文献

- 1) 上田正治 ほか：新日鉄住金技報. (395), 64 (2013)
- 2) 上田正治 ほか：ふえらむ. 25 (10), 610 (2020)
- 3) Skyttebol, A. et al.: Engineering Fracture Mechanics. 72, 271 (2005)
- 4) Salehi, I. et al.: International Journal of Fatigue. 33, 1324 (2011)
- 5) 前田優介：日本鉄道施設協会誌. 57 (11), 797 (2019)
- 6) Saita, K. et al.: 11th International Heavy Haul Conference, Cape Town, 2017, IHHA
- 7) Mutton, P. et al.: Wear. 366-367, 368 (2016)
- 8) 国際特許出願公開 WO2011/052562. 2011年5月5日
- 9) 国際特許出願公開 WO2012/161207. 2012年11月29日
- 10) 国際特許出願公開 WO2014/077140. 2014年5月22日



猿渡周雄 Suo SARUWATARI
鉄鋼研究所 鋼材ソリューション研究第二部
高機能ソリューション研究第二室 研究第二課
主任研究員
福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501



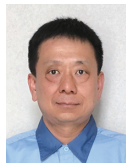
山本剛士 Takeshi YAMAMOTO
九州製鉄所 品質管理部 上席主幹



才田健二 Kenji SAITA
日鉄テクノロジー(株)
九州事業所 主幹



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



上田正治 Masaharu UEDA
九州製鉄所 形鋼部 部長代理
博士(工学)