

水素・エチレン混合ガスを用いたレールガス圧接法

山本 隆一* 伊藤 太初* 寺下 善弘*
辰巳 光正* 吉田 佳史**

Gas Pressure Welding Method of Rails by Mixed Gas of Hydrogen and Ethylene Gas

Ryu-ichi YAMAMOTO Hajime ITOH Yoshihiro TERASHITA
Mitsumasa TATSUMI Yoshifumi YOSHIDA

Gas pressure welding (GPW) is one of the solid phase welding methods. This method is commonly adopted for rail welding in Japan. However, it is worried about that the supply of acetylene gas, which is used as fuel gas in GPW system, will be stopped due to recent tendency of reduction of demand. Moreover, a large volume of CO₂ gas is generated in GPW process, because acetylene gas is a kind of hydrocarbon. Therefore, we have developed a new GPW method of rails by mixed gas of hydrogen and ethylene gas in order to ensure continuation of the use of GPW in the future. This paper describes this newly developed GPW method.

キーワード：レール，ガス圧接，水素・エチレン混合ガス，継手性能評価試験，環境負荷

1. はじめに

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、テルミット溶接，ガス圧接，フラッシュ溶接，およびエンクローズアーク溶接の4工法が適用されている。図1にJRグループにおける2010年度の各レール溶接法の適用状況を示す。このうち，ガス圧接の適用比率は全体の30%を占めており，軌道メンテナンス体制を維持する上で不可欠なレール溶接法であると言える。一方，現行のレールガス圧接法において燃料ガスとして用いられているアセチレンガスは，産業界における需要減少¹⁾および原材料価格の高騰に伴って生産コストが上昇しており，製造メーカーの採算状況如何によっては，供給が滞る可能性がある。また，アセチレンガスは酸素との燃焼反応に伴い炭酸ガスが発生するため，環境に与える影響が懸念される。そこで，将来においてもガス圧接法の使用を可能とするため，水素ガスのレールガス圧接への適用について検討し，“水素・エチレン混合ガス”を用いたレールガス圧接法を開発するに至った。

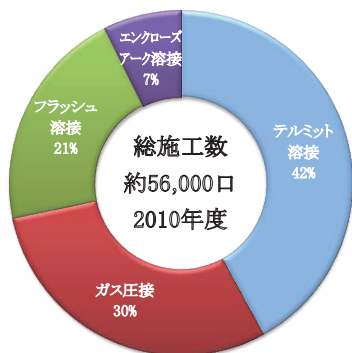


図1 各レール溶接法の適用状況 (JRグループ)

* 軌道技術研究部 レール溶接研究室
** 岩谷瓦斯株式会社 (溶接技術センター)

た。ここでは，当ガス圧接法の開発経緯，当ガス圧接法により作製した継手の性能，および環境負荷低減効果について述べる。

2. 水素ガスによるレールガス圧接法の検討経緯

水素ガスは燃焼速度が非常に速いため，加熱特性に優れた集中性の高い燃焼炎が得られるが，燃焼炎を安定形成させることが困難である。一方，既往の研究により，適量の炭素化合物を水素ガスに混合することで，燃焼炎を安定化できることがわかっている²⁾。そこで，水素ガスに炭素化合物の一種であるヘキサン (C₆H₁₄: 常温で液体) を混合して燃焼炎の安定化を図り，レールガス圧接における適用検討を実施した³⁾。その結果，実用上問題のない継手を作製可能な接合施工条件を提案するに至ったが，当ガス圧接法の場合，水素ガスとヘキサンを施工現場で混合する必要があり，当該作業に手間を要するため，作業性の面で改善の余地があった。

このような状況の中，ガス切断用のアセチレン代替ガスとして，水素ガスとエチレンガス (C₂H₄) を混合しボンベ充填を可能とした“水素・エチレン混合ガス”が開発された (エチレンガス混合比率 40%)。当水素・エチレン混合ガスをレールガス圧接施工に適用できれば，現行法で用いるアセチレンガスボンベを当混合ガスボンベに置き換えることによりガス供給が可能となるため，現行法と同等の作業性を保持できる。

そこで，水素・エチレン混合ガスをレールガス圧接に適用するため，接合条件および加熱バーナ構造に関する検討を実施した。

3. 水素・エチレン混合ガスをレールガス圧接に適用するための検討

3.1 水素・エチレン混合ガス燃焼炎の特性評価

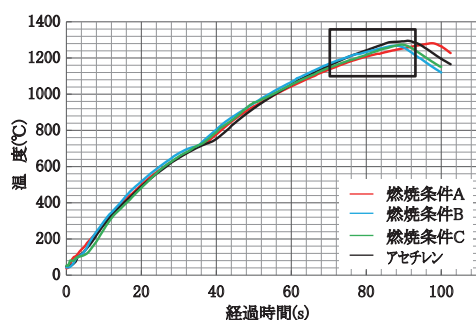
ガス圧接では、燃焼炎の加熱特性および接合端面の酸化を抑制するシールド性⁴⁾が重要となる。そこで、水素・エチレン混合ガス燃焼炎の基本特性を把握するため、S45C-φ25mm丸棒形状材を用いた加熱特性確認試験およびガス圧接試験を実施した。

3.1.1 燃焼条件の加熱特性に及ぼす影響

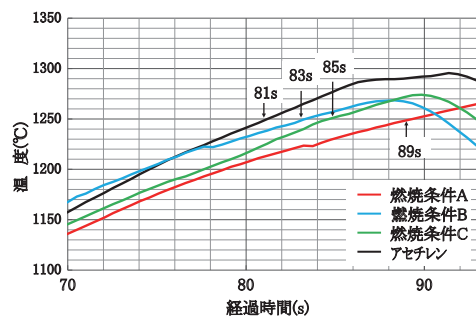
表1に示す、水素・エチレン混合ガス量を段階的に変化した各燃焼条件(A～C)を設定し、丸棒形状材を加熱した際の部材中心部の温度変化、すなわち加熱特性曲線を熱電対により取得した。また、アセチレンガス燃焼炎を比較対象とするため、同丸棒形状材を標準的なアセチレンガス燃焼炎でガス圧接する際の加熱特性曲線も併せて取得した。図2に、各燃焼条件ごとの加熱特性曲線を示す。図2(b)には、各燃焼条件による1250℃への到達時間も示した。図2より、燃焼条件B>C>Aの順に加熱特性に優れており、燃焼条件Bは、標準的なアセチレンガス燃焼炎とほぼ同等の加熱特性を有すると言える。

表1 設定した燃焼条件

| | ガス流量 (ℓ/min) | |
|------------|-------------------------------|------|
| | 水素・エチレン混合ガス | 酸素ガス |
| 燃焼条件 A | 22 | 20 |
| 燃焼条件 B | 25 | " |
| 燃焼条件 C | 28 | " |
| アセチレンガス燃焼炎 | アセチレン :22 ℓ/min, 酸素 :20 ℓ/min | |



(a) 全加熱工程における加熱特性曲線



(b) (a)図枠内の詳細図

図2 各燃焼条件における加熱特性曲線

3.1.2 燃焼炎のシールド性

供試材としてS45C-φ25mm丸棒形状材(200mm長)を準備し、加圧力を20MPaとした状況下で、燃焼条件および圧縮量をパラメータとして試験体を作製した。燃焼条件は、3.1.1で加熱特性を評価した表1中の燃焼条件A～Cとし、圧縮量は20～30mmの範囲で設定した。また、本試験では、圧接工程で生じた膨らみを加熱後に押抜き、試験体全周をグラインダー研削後、JIS Z 2248(金属材料曲げ試験方法)に基づく曲げ試験を実施した。接合状態が不良の場合、膨らみの熱間せん断により、押抜き割れが生じるため、曲げ試験において低強度で破断する。なお、曲げ試験では、曲げ角度90°到達時の載荷荷重が250kN程度であったことから、載荷荷重の上限を250kNとした。

図3に、接合条件と曲げ試験での破断荷重との関係を整理して示す(載荷荷重250kNをクリアした試験体は破断荷重を250kNとした)。この結果より、同一圧縮量の場合、燃焼条件BおよびCで作製した試験体は、燃焼条件Aで作製した試験体に比べて高い破断荷重を呈し、燃焼条件BおよびCの適用下で圧縮量30mmを確保することで、曲げ強度250kNを上回る強度特性を達成できることがわかる。なお、燃焼条件BおよびCで作製した試験体の破断荷重には、有意差がほとんど認められない。一方、従来のアセチレンガス燃焼炎の場合には、圧縮量20mmを確保することで、曲げ強度250kNをクリアできる。

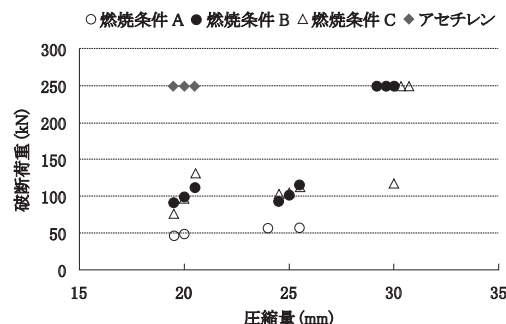


図3 曲げ強度に及ぼす接合条件の影響

本試験で設定した燃焼条件(A～C)では、接合端面に対するシールド性を変化させるべく、段階的に水素・エチレン混合ガス流量を増大させているが、燃焼条件BおよびCで作製した継手の強度特性に有意差は認められない。したがって、酸素ガス流量20ℓ/minの条件下では、水素・エチレン混合ガス流量を25ℓ/minより増大しても、シールド性はほとんど変化しないと判断される。よって、3.1.1で述べた加熱特性を併せて考慮すると、本試験の範囲内では、燃焼条件Bがガス圧接に適用する燃焼条件として最適であると考えられる。

一方、標準的なアセチレンガス燃焼炎の場合には、圧縮量20mmを確保することで曲げ強度250kNを達成できるが、水素・エチレン混合ガスで曲げ強度250kNを達成するためには、標準的なアセチレンガス燃焼炎と同

等の加熱特性を有する燃焼条件 B を適用しても圧縮量を 30mm とする必要がある。

以上より、水素・エチレン混合ガス燃焼炎は、アセチレンガス燃焼炎と同等の加熱特性を設定した場合、アセチレンガス燃焼炎に比べて、シールド性が劣るものと判断される。したがって、作業性を考慮し、現行法と同程度の圧縮量で良好な接合状態を達成するためには、燃焼条件の検討のみでは不十分であり、加熱バーナの火口構造変更により、燃焼炎によるシールド範囲を物理的に拡張する必要があると考えられる。

3.2 レールガス圧接試験による加熱バーナ構造の検討

前項において、燃焼炎のシールド範囲拡張の必要性について示唆した。なお、アセチレンガスを用いる現行法では、燃焼炎によるシールド範囲を拡張し継手品質を向上させる目的から、バーナ火口を密に配置した改良型加熱バーナが開発され⁵⁾、実施工で適用されるに至っている。そこで、当バーナの水素・エチレン混合ガスへの適用性を確認するため、当バーナを用いて作製した JIS60kg 普通レールガス圧接継手の品質を磁粉探傷試験および静的曲げ試験により評価した。試験体作製時の接合条件を表 2 に示す。燃焼条件は、表 1 に示した燃焼条件 B のガス混合比率およびレール断面積を考慮して設定したものであり、加圧力および圧縮量についてはアセチレンガスを用いる現行法で JIS60kg 普通レールを接合する場合と同一条件とした。図 4 に、試験体作製状況を示す。

表 2 レールガス圧接試験での接合条件（一例）

| ガス流量 (ℓ/min) | | 加圧力 (kN) | 圧縮量 (mm) |
|--------------|------|----------|----------|
| 水素・エチレン混合ガス | 酸素ガス | | |
| 155 | 130 | 170 | 24 |



図 4 レールガス圧接試験体の作製状況

試験体の全周をグラインダー研削した後に実施した磁粉探傷試験の結果、片側のレール底部端に長さ 3mm の磁粉模様が発見された。一方、静的曲げ試験は、磁粉探傷試験結果を考慮し、レール底部側に引張力の作用する頭部上向 (HU) 姿勢で実施した。その結果、表 3 に示

表 3 ガス圧接試験体に対する各種試験結果

| 磁粉探傷試験 | 破断試験 (HU 姿勢) * | |
|------------------|----------------|----------|
| | 荷重 (kN) | たわみ (mm) |
| 底部端に 3mm の磁粉模様検出 | 1,180 | 13 |

*JIS60kg 普通レールガス圧接部曲げ基準値：1,370kN-25mm



図 5 レールガス圧接試験体の破断面状況（底部端）

すように JIS60kg 普通レールガス圧接部の曲げ基準値を下回り、また、破断面観察により、レール底部端に押抜き割れが認められた。よって、当試験体は、レール底部端に存在した押抜き割れに起因し、低荷重で破断に至ったものと判断される。図 5 に、破断面におけるレール底部端付近の状況を示す。

ガス圧接部の押抜き割れは、燃焼炎によるシールド性が不十分である等の理由で接合阻害因子である酸化介在物が接合界面に相当量残存した場合に、加熱直後に実施される膨らみ熱間押し抜き時の発生応力によって接合界面が開くことで形成される⁶⁾。上述したように、本試験で作製した試験体においては、レール底部端に押抜き割れが認められた。したがって、水素・エチレン混合ガス適用下では、現行法で使用されている改良型バーナを用いても、レール底部端付近のシールド性が不十分であると考えられる。

そこで、レール底部領域の火口径を拡大し、当該領域のシールド範囲拡張を図ることとした。具体的には、レール底部領域における各バーナ火口の直径を段階的に拡大した複数の火口径パターンを設定し、各パターンで作製した試験継手の押抜き割れ発生状況を詳細に調べることで、火口径パターンの適正化を図った。なお、バーナの火口径を局部的に拡大することで、その領域のシールド性を向上することは可能であるが、ガス噴出量が大幅に増加した場合、レール表面が過剰溶解し、作業性が低下する等の問題が生じる。よって、本検討過程では、レール表面溶解を回避すべく、表 2 に示した接合条件のうち燃焼条件を系統的に変化させて適正な火口径パターンを探索した。

一方、一連のレールガス圧接試験では、アセチレンガスを用いる現行法で問題となっている逆火現象が発生しなかった。したがって、水素・エチレン混合ガス燃焼炎は、作業安全上、アセチレンガス燃焼炎に比べて優れていると判断される。

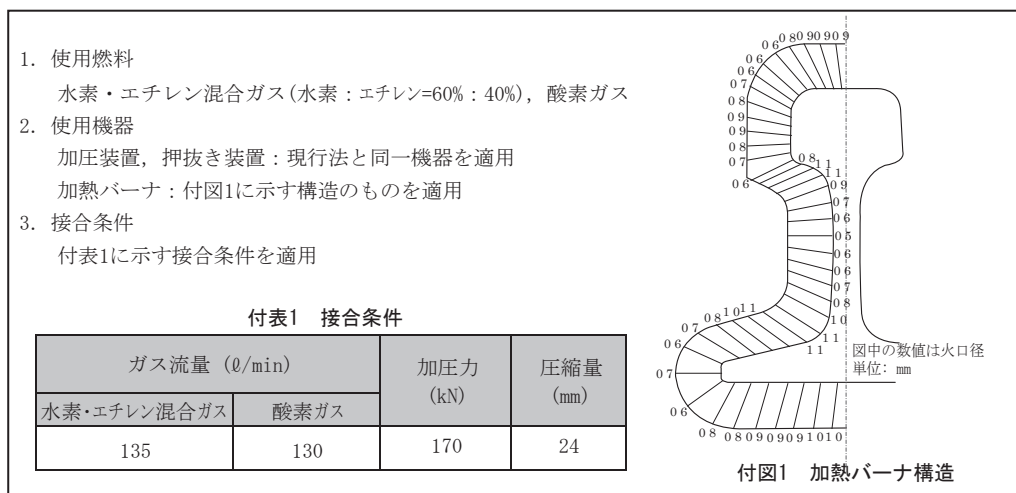


図6 水素・エチレン混合ガスを用いるレールガス圧接法の標準仕様 (JIS60kg 普通レール)

4. 水素・エチレン混合ガスを用いるレールガス圧接法の接合施工条件

上述した燃焼条件および火口径パターン適正化に関する検討の結果，接合工程においてレール表面が過剰溶解せず，かつ押抜き割れの存在しない健全な継手を作製し得る接合施工条件を見出すに至った。当接合施工条件を水素・エチレン混合ガスを用いるレールガス圧接法の標準仕様として図6に示す。加圧力および圧縮量は，いずれも現行法でJIS60kg普通レールを接合する場合の標準条件と同一であり，加熱関連機器以外については，現行法での使用機器をそのまま適用できる。

5. 試験継手の性能評価試験

5.1 性能評価試験項目

当レールガス圧接法により作製した継手の性能を評価するため，図6に示した標準仕様に基づいて作製した計8本の試験体に対し，以下の試験を実施した。

- (1) 外観検査，磁粉探傷検査 (2) 頭頂面硬さ試験
- (3) 静的曲げ試験 (4) 縦断面マクロおよびマイクロ組織試験
- (5) 縦断面硬さ試験 (6) 曲げ疲労試験

5.2 性能評価試験結果

5.2.1 外観検査および磁粉探傷検査

作製した試験体全数を対象にレール溶接部非破壊検査要領に基づいた外観検査および磁粉探傷検査を実施した。その結果，外観上問題となる異常は認められず，また，磁粉探傷検査においても磁粉模様は観察されなかった。

5.2.2 頭頂面硬さ試験

図7に，試験体頭頂面中央部のブリネル硬さ分布を示す。測定間隔は，5mmとした。当硬さ分布では，現行法による普通レールガス圧接部と同様に，接合部近傍の硬

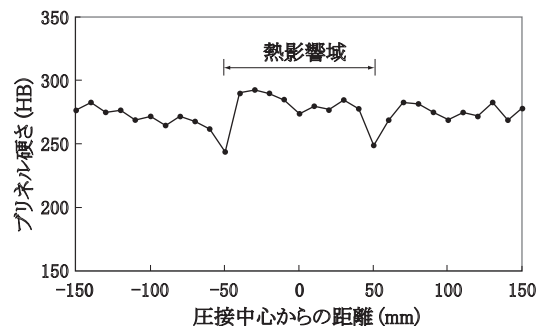


図7 頭頂面硬さ分布

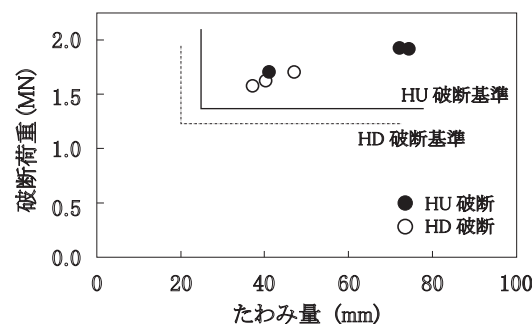


図8 静的曲げ試験結果

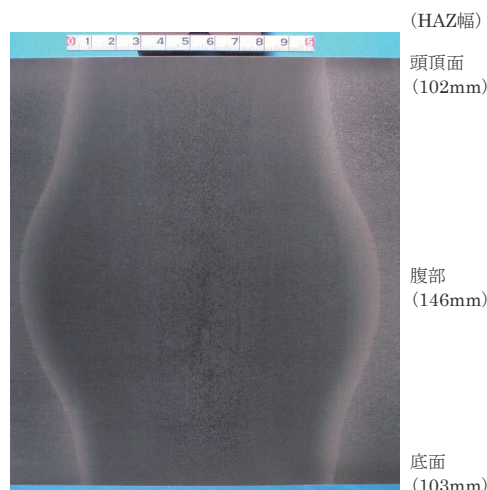


図9 中央縦断面マクロ組織

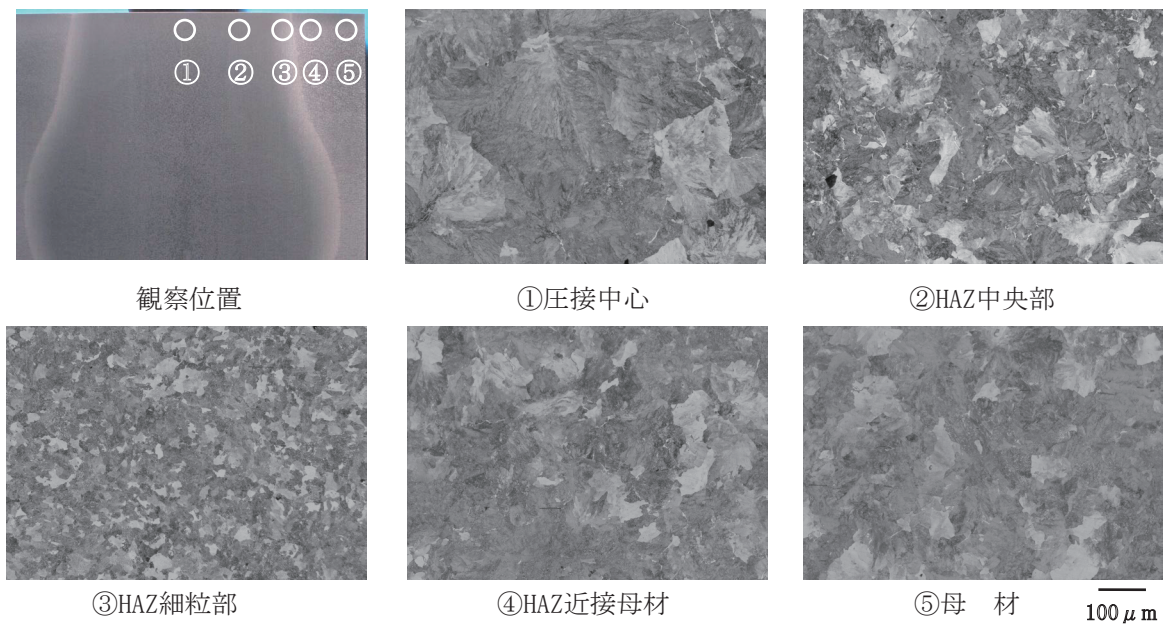


図 10 試験継手のマイクロ組織（レール頭頂面下 5mm 位置）

さがレール母材よりやや高くなっており、また、熱影響域 (HAZ) 境界において幅 10mm 程度の軟化域が認められる。

5.2.3 静的曲げ試験

6本の試験体に対し、支点間距離 1m、中央集中荷重による静的曲げ試験を実施した。破断姿勢は、HU、HD（頭部下向）それぞれ3本ずつとした。結果を図8に示すが、全試験体の破断荷重、たわみ量とも、JIS60kg 普通レールガス圧接部の曲げ破断基準値を上回っている。

5.2.4 縦断面マクロおよびマイクロ組織試験

図9に、試験体の中央縦断面マクロ組織を示す。現行法によるレールガス圧接部と同様、レール腹部で HAZ 幅が広がる形態を呈している。

図10に、図9に示した中央縦断面上で観察したマイクロ組織を示す。観察位置は、頭頂面下 5mm 位置の圧接中心、HAZ 中央部、HAZ 細粒部、HAZ 近接母材、および母材である。各位置とも、現行法によるレールガス圧接部と同様の組織形態を呈しており、マルテンサイト組織等の異常組織は認められない。

5.2.5 縦断面硬さ試験

図11に、試験体の中央縦断面上で測定したビッカース硬さ (HV) 分布を示す。測定位置は、頭頂面下 5mm、腹部中央および底面上 5mm であり、測定間隔は 2mm ピッチ、載荷荷重は 98N とした。

頭頂面下 5mm 位置では、接合部近傍の硬さがレール母材よりやや高く、また、HAZ 境界に幅 10mm 程度の軟化域が認められる。なお、当硬さ分布は、5.2.2 に示した頭頂面ブリネル硬さ分布と同様に、現行法による標準的なレールガス圧接部と同形態である。また、腹部中央および底面上 5mm 位置の硬さ分布も頭頂面下 5mm 位置とほぼ同様の形態を呈している。

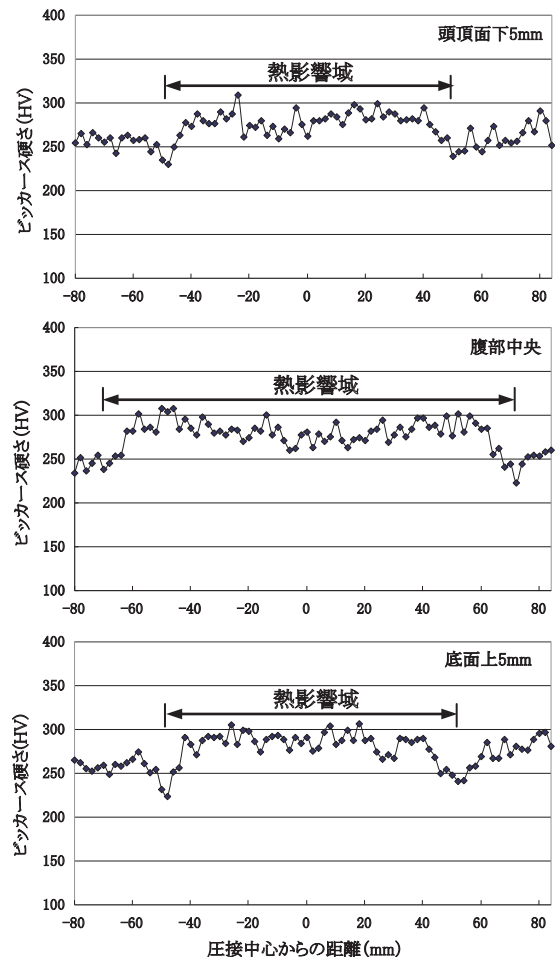


図 11 縦断面上の硬さ分布

5.2.6 曲げ疲労試験

1本のレールガス圧接試験体に対し、レール底部領域に引張応力の作用する HU 姿勢にて、支点間距離 1300mm、中央載荷点距離 150mm の 4 点曲げ疲労試験



図 12 曲げ疲労試験状況

を実施した。試験では、最小応力を 30N/mm^2 とする片振り条件を採用し、現行法によるレールガス圧接部が有する疲労強度レベルと同等の 320N/mm^2 (全応力振幅) を負荷した。なお、繰り返し数については 200 万回を限度とした。曲げ疲労試験の実施状況を図 12 に示す。

試験結果は表 4 に示すように、全応力振幅 320N/mm^2 の下、繰り返し数 200 万回で未破断であった。したがって、当試験体は、現行法によるレールガス圧接部と同等の疲労強度レベルを有していると判断される。

表 4 試験継手に対する曲げ疲労試験結果

| 応力 (N/mm^2) | | | 繰り返し数 ($\times 10^6$) | 破断の有無 |
|------------------------|-----|-------|----------------------------|-------|
| 最小 | 最大 | 全応力振幅 | | |
| 30 | 350 | 320 | 2.00 | 未破断 |

5.3 当レールガス圧接法による継手の適用性

以上に述べた試験継手に対する性能評価試験の結果、当レールガス圧接法により作製した継手は、現行法による継手と同等の性能を有しており、実用に供しても問題ないと判断される。

6. 炭酸ガス排出量の試算

水素ガスの適用により期待される環境負荷低減効果を評価するため、当レールガス圧接法を JIS60kg 普通レールの接合に適用した場合の炭酸ガス排出量を試算し、現行法における排出量と比較した。表 5 に試算結果を示すが、当ガス圧接法の適用により、炭酸ガス排出量を現行法のおよそ 1/3 程度に削減できることがわかる。

表 5 炭酸ガス排出量の試算結果
(JIS 60kg 普通レール接合時)

| | 当ガス圧接法 | 現行法 |
|----------|--|---|
| 燃料ガス消費量 | 水素・エチレン混合ガス：135 ℓ/min | アセチレンガス：105 ℓ/min |
| 圧接所要時間 | 7.5min | 7min |
| 炭酸ガス排出量* | $0.135\text{m}^3/\text{min} \times 0.4$ (エチレンガスの比率) $\times 7.5\text{min} \times 2.34\text{kg}/\text{m}^3$ (排出係数) = 0.95 kg | $0.105\text{m}^3/\text{min} \times 7\text{min} \times 1.17\text{kg}/\text{m}^3$ (アセチレンガスのガス密度) $\times 3.4\text{kg}/\text{kg}$ (排出係数) = 2.92kg |

* 環境省発表の「燃料の使用に関する排出係数」を用いて算出

7. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に列挙する。

- (1) 水素・エチレン混合ガス燃焼炎は、接合端面の酸化を防止する上で重要となる接合部のシールド性が、現行法で用いられているアセチレンガス燃焼炎に比べて劣ると判断された。
- (2) 水素・エチレン混合ガスを用いた一連のレールガス圧接試験では、アセチレンガスを用いる現行法で問題となっている逆火現象が発生せず、水素・エチレン混合ガス燃焼炎は、作業安全上、アセチレンガス燃焼炎に比べて優れていると判断された。
- (3) 水素・エチレン混合ガスを適用する場合の接合条件および加熱バーナ構造に関する検討を実施し、JIS60kg 普通レールの接合施工条件を提案した。
- (4) JIS60kg 普通レール試験継手を対象に実施した性能評価試験の結果、当レールガス圧接法により作製した継手は、現行法による継手と同等の性能を有しており、実用に供しても問題ないと判断された。
- (5) 当該レールガス圧接法により JIS60kg 普通レールを接合する場合の炭酸ガス排出量を試算した結果、現行法における炭酸ガス排出量のおよそ 1/3 程度に削減できることがわかった。

8. おわりに

主要なレール溶接法の一つであるガス圧接技術を将来に継承するため、水素・エチレン混合ガスを用いるレールガス圧接法の開発に取り組み、実用上問題のない継手を作製し得る接合施工条件を提案するに至った。当ガス圧接法は、現行法に比べて炭酸ガス排出量を大幅に削減でき、さらに、現行のアセチレンガスボンベを水素・エチレン混合ガスボンベに置き換えるだけでガス供給が可能となるため、現行法と同等の作業性を確保できる。

文献

- 1) 日本産業・医療ガス協会 溶解アセチレン分科会：溶解アセチレン生産実績 (2006～2010 年度)
- 2) 山本隆一, 深田康人, 寺下善弘：低 CO_2 型ガス圧接法に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol 15, No 10, pp.51-56, 2001
- 3) 山本隆一, 辰巳光正, 寺下善弘：水素ガスを適用したレールガス圧接法の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.8, pp.45-50, 2008
- 4) 日本圧接協会編：建設技術者のための圧接工学ハンドブック, p.111, 1984
- 5) 辰巳光正, 深田康人, 上山且芳, 山本隆一：レールガス圧接における加熱バーナの改良と加圧方式の検討, 鉄道総研報告, Vol.13, No.5, pp.27-32, 1999
- 6) 大石橋宏次, 上山且芳：熱間せん断による品質評価メカニズムの検討, 溶接学会論文集, Vol.14, No.2, pp.422-428, 1996