

# 水素ガスを適用したレールガス圧接法の開発

山本 隆一\* 辰巳 光正\* 寺下 善弘\*

## Development of Gas Pressure Welding Method Applying Hydrogen Gas

Ryu-ichi YAMAMOTO Mitsumasa TATSUMI Yoshihiro TERASHITA

Gas pressure welding (GPW) is one of the solid phase welding methods. This method is very commonly adopted for rail welds and steel bar welds in Japan. However, it is worried about that supply of acetylene gas, which is used as fuel gas in GPW system, will be stopped due to reduction of demand. Moreover, a large volume of CO<sub>2</sub> gas is generated in GPW process, because acetylene gas is a kind of hydrocarbon. Therefore, we promoted a study to develop a new GPW method applying hydrogen gas in order to continue 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，アセチレンガス，水素ガス，継手性能評価試験

### 1. はじめに

ガス圧接法は、レール・鉄筋の接合に広く適用されている。この背景には、ガス圧接法による継手強度が素材とほぼ同等であり高い信頼性が保証されていること、および使用機器が比較的小型で現場施工が可能であるという事実がある。しかしながら、現行ガス圧接システム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、将来的なガス価格の高騰あるいは、製造メーカー側の採算状況如何によっては製造中止になる可能性が危惧されている。また、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利用を可能とするため、世の中が水素エネルギー社会へ移行しつつある現状に鑑み、水素ガスを適用したレールガス圧接法の開発を目的に研究を実施した。

### 2. 水素ガス燃焼炎の特徴

水素ガスは燃焼速度が非常に速く、燃焼炎の取扱が難しいという欠点を有する。しかしながら、これまでに実施した研究<sup>1)</sup>により、適量のヘキサン(C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>)を付加することで燃焼炎が安定して形成されることが明らかとなっている。そこで本研究においても、燃焼炎を安定形成させるため、ヘキサンの適用を前提とした。本研究で用いた水素ガス燃焼炎発生システムの概略図を図1に示す。

本システムでは、ガスボンベから得た水素ガスをヘキサン溶液を封入した容器に通すことで、ヘキサンの混

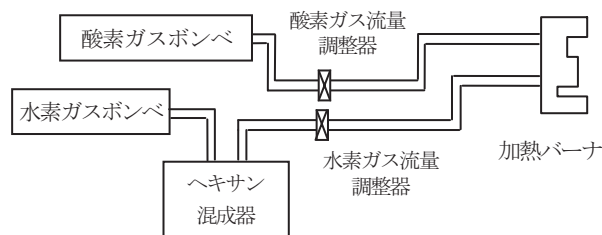


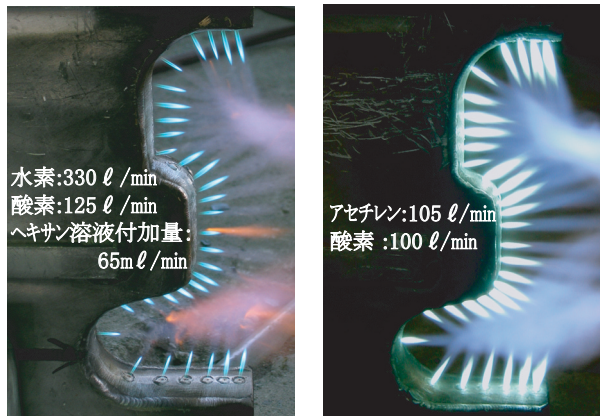
図1 水素ガス燃焼炎発生システム

成を実施する。また、逆火現象の発生に備えヘキサン混成器と水素ガス流量調整器の間に逆火防止装置を設置した。

図2に、当システムで得られる水素ガス燃焼炎の状況を従来のアセチレンガス燃焼炎と比較して示す。使用した加熱バーナは、TGP-T1型レールガス圧接機用であり、水素、酸素およびヘキサン溶液の供給量は、φ50mm丸棒鋼の接合試験<sup>1)</sup>で選定した条件を基にレール断面積を勘案して設定した。両燃焼炎とも燃料ガス量を酸素ガス量よりも若干高めに設定した弱還元炎であるが、水素ガスの燃焼速度がアセチレンガスに比べて高い<sup>2)</sup>ことに起因して、水素ガス燃焼炎の形成領域はアセチレンガス燃焼炎より狭い。したがって、水素ガス燃焼炎は、火炎の集中性は高いが、ガス圧接作業において接合端面の酸化を低減する上で重要となる接合部のシールド性<sup>3)</sup>がアセチレンガス燃焼炎に比べて劣るものと考えられる。すなわち、水素ガスを適用するレールガス圧接法を確立するためには、燃焼炎のシールド範囲を拡張するための方策が不可欠になると判断される。

\* 軌道技術研究部（レール溶接）

特集：軌道技術



(a) 水素ガス燃焼炎 (b) アセチレンガス燃焼炎  
図2 燃焼炎の状況

3. レールガス圧接施工条件の検討

本章では、水素ガスを適用する場合のレールガス圧接施工条件を見出すことを目的に実施した燃焼条件および加熱バーナ構造適正化に関する検討経緯について述べる。なお、本研究では JIS60kg 普通レールを接合対象とした。

3.1 燃焼条件の検討

水素ガスの燃焼条件として表1に示した3条件を設定し、各燃焼条件により試験継手を作製した。燃焼条件Aは図2(a)の燃焼条件であり、燃焼条件BおよびCは、燃焼条件Aに対して水素ガス供給量を段階的に増量し、燃焼炎の還元性を高めたものである。また、燃焼条件を除く他の接合条件は、アセチレンガスを用いる従来法における接合条件と同一とし、ガス圧接機は TGP-T1 型を使用した。図3に試験継手作製作業状況を示すが、当作業では、従来法で問題となる逆火現象が発生せず、ヘキ

表1 設定した燃焼条件

	ガス流量 (ℓ/min)		ヘキサン溶液 付加量 (ml/min)
	水素	酸素	
燃焼条件 A	330	125	65
燃焼条件 B	410	〃	〃
燃焼条件 C	450	〃	〃



図3 試験継手作製作業状況

表2 試験継手作製条件

TPNo.	燃焼条件	加圧力	圧接時間	圧縮量
1	A	165kN	7分03秒	24mm
2	B	〃	6分55秒	〃
3	C	〃	8分12秒	〃

表3 試験継手に対する各種試験結果

TPNo.	外観検査	磁粉探傷 検査	破断試験 (HU 姿勢)※	
			荷重 (kN)	たわみ (mm)
1	良好	微小きずあり	1,105	12
2	〃	〃	1,350	20
3	割れあり	—	—	—

※ JIS60kg 普通レールガス圧接部曲げ破断基準値：1,370kN-25mm

サンを付加した水素ガス燃焼炎は、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。

試験継手作製条件および試験継手を対象に実施した各種試験結果をそれぞれ表2および3に示す。燃焼条件AおよびBでそれぞれ作製したTPNo.1, 2はいずれも圧接時間が7分程度であり、従来法における JIS60kg 普通レール接合時の所要時間と同程度である。一方、設定した燃焼条件中、最も還元度が高い燃焼条件Cを適用したTPNo.3の圧接時間は8分12秒と、TPNo.1および2に比べて著しく延びており、頭頂面から頭部コーナ部に至る部位、および片側の底部端に顕著な押抜き割れが認められた。したがって、燃焼条件Cで得られる燃焼炎は、加熱能力が不十分であり、ガス圧接に適用する燃焼炎として有効でないと判断される。

一方、目視では押抜き割れが観察されなかったTPNo.1および2を対象に磁粉探傷検査および静的曲げ破断試験を実施した。試験継手の全周をグラインダ研削した後に実施した磁粉探傷検査の結果、両継手とも片側の底部端に微小な磁粉模様が認められた。なお、静的曲げ破断試験では、磁粉探傷検査結果を考慮し、レール底部側に引張力の作用する頭部上向 (HU) 姿勢での破断とした。当曲げ破断試験では、表3に示すように両継手とも JIS60kg 普通レールガス圧接部の曲げ破断基準値を下回った。また、破断面観察の結果、両継手とも片側のレール底部端に微小な押抜き割れが認められた。したがって、TPNo.1および2は、レール底部端に存在した微小な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。

ガス圧接部の押抜き割れは、酸化介在物の残存量が多く低強度の接合界面が熱間押抜き時の発生応力に耐え切れず開口することで形成される<sup>4)</sup>。図4に、TPNo.1および2の底部端近傍の接合界面状況を示す。観察位置は、いずれも押抜き割れの発生した側の底部端から10mm離れ

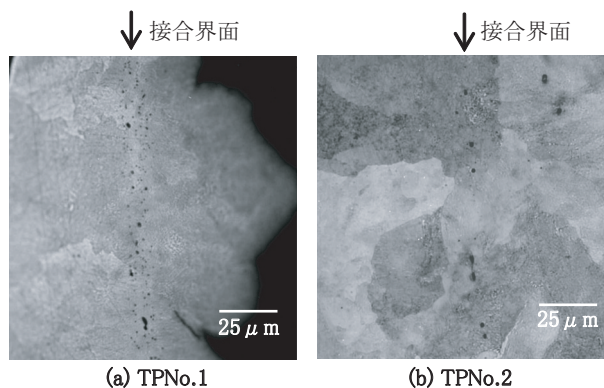


図4 試験継手の接合界面状況

た部位である。TPNo.1の接合界面状況を示す(a)図では、接合界面を中心とした幅 $10\mu\text{m}$ 程度の領域に多量の介在物が分散して存在し、接合状態が粗悪であると判断される。なお、このように多量の介在物が残存する要因として、接合雰囲気中の還元度不足が考えられる。すなわち、接合雰囲気中の還元度不足により、圧接初期過程の接合面に多量の酸化介在物が形成したものと推察される。それに対して、(b)図に示すTPNo.2の接合界面上に観察される介在物量は、TPNo.1に比べて減少している。これは、TPNo.2作製時に適用した表1・燃焼条件Bの還元度がTPNo.1作製時に適用した同表・燃焼条件Aに比べて高いことに起因すると考えられる。また、表2に示したTPNo.2作製時の圧接時間より判断すると、燃焼条件Bによる燃焼炎は必要十分な加熱能力を有していると判断される。その一方で、上述したように、燃焼条件Bよりも還元度をさらに高めた燃焼条件Cの場合、燃焼炎の加熱能力が著しく低下するため、ガス圧接作業での適用は望ましくない。したがって、燃焼炎の加熱特性と還元特性のバランスを考慮すると、燃焼条件Bの適用が概ね妥当であると判断される。

しかしながら、燃焼条件Bを適用したTPNo.2のレール底部端に微小な押抜き割れが生じていることを考慮すると、燃焼条件Bを適用した場合でもレール底部端付近の接合雰囲気における還元度が十分でないと推察される。

以上より、レール底部端の押抜き割れを防止するためには、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を改良することにより、燃焼炎のシールド範囲を拡張する必要があると考えられた。

### 3.2 加熱バーナ火口構造適正化に関する検討

レール底部端付近における燃焼炎のシールド範囲を拡張する方法として、レール底部領域に対応するバーナ火口をできる限り密に配置する手法およびバーナ火口径の拡大によりガス噴出量を増大させる手法が考えられる。なお、アセチレンガスを用いる従来法では、接合部の隙間をある程度許容す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<sup>5)</sup>、実施工で適用される

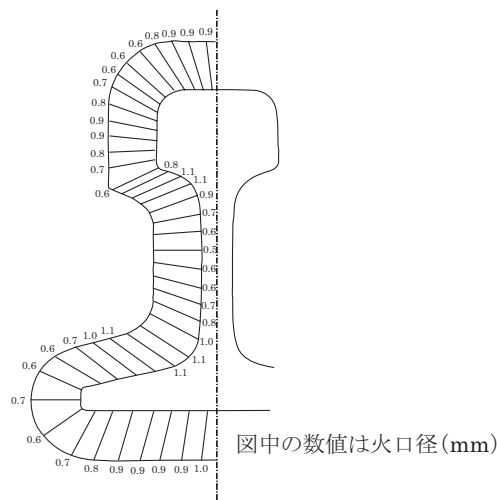


図5 適正化した加熱バーナ火口構造

に至っている。そこで、当改良型バーナの火口構造をベースに火口径パターン適正化に関する検討を実施することとした。なお、具体的には、3.1節で加熱特性と還元特性のバランスに優れると判断された燃焼条件B(表1)の下、複数の火口径パターンを設定し、各パターン毎に作製した試験継手の品質を評価することで、適正な加熱バーナ火口構造を探索した。

本検討の結果、図5に示す火口構造パターンが適正であるとの結論が得られ、当該火口構造を有する加熱バーナの適用により、後述するように、押抜き割れの存在しない、かつ曲げ破断試験においても基準値を十分に上回る継手を作製できた。

### 3.3 水素ガスを用いるレールガス圧接法の標準仕様

継手強度に大きな影響を及ぼす押抜き割れの発生防止を目標に燃焼条件および加熱バーナ構造の検討を行い、押抜き割れの生じない施工条件を見出した。以上の検討結果より提案される水素ガスを主ガスとして用いるレール

表4 水素ガスを主ガスとして用いるレールガス圧接法の標準仕様 (JIS60kg 普通レール)

1. 使用燃料				
水素ガス, 酸素ガス, ヘキサン溶液				
2. 使用機器				
加圧装置, 押抜き装置: 従来法と同一機器を適用				
加熱バーナ: 図5に示す火口構造を適用				
3. 接合条件				
付表1に示す接合条件を適用				
付表1 接合条件				
燃焼条件			加圧力 (kN)	圧縮量 (mm)
ガス流量 (ℓ/min)		ヘキサン溶液付加量 (mℓ/min)		
水素	酸素		65	165

特集：軌道技術

ルガス圧接法の標準仕様を表4に示す。

4. 試験継手の性能評価試験

4.1 性能評価試験項目

表4に示した標準仕様に沿って作製した合計10本の試験継手に対し、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) 静的曲げ破断試験 (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

4.2 性能評価試験結果

4.2.1 外観検査および磁粉探傷検査

作製した継手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。

4.2.2 頭頂面硬さ試験

図6に、試験継手頭頂面中央部のブリネル硬さ分布を示す。測定間隔は、5mmである。当硬度分布では、従来法による普通レールガス圧接部と同様に、接合部近傍の硬さがレール母材よりやや高くなっており、また、熱影響域境界において、幅10mm程度の軟化域が認められる。

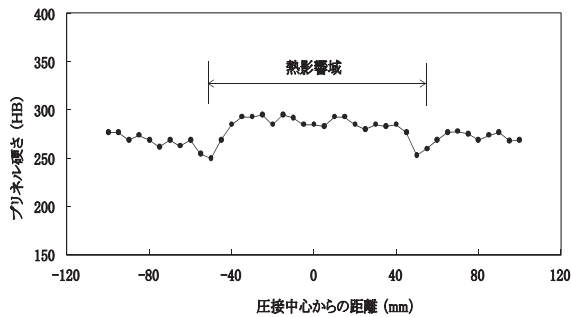


図6 頭頂面硬さ分布

4.2.3 静的曲げ破断試験

試験継手6本に対し、支点間距離1m, 中央集中荷重による試験継手の静的曲げ破断試験を実施した。破断姿勢

表5 試験継手に対する曲げ破断試験結果

TPNo.	破断姿勢	破断荷重 (kN)	たわみ量 (mm)
E-1	HU (頭部上向)	1,670	40
E-2	"	1,585	34
E-3	"	1,905	70
E-4	HD (頭部下向)	1,600	38
E-5	"	1,720	66
E-6	"	1,690	50
JIS60kg 普通レールガス圧接部曲げ破断基準値			
	HU	1,370	25
	HD	1,230	20



図7 試験継手の破断面状況 (TPNo. E-3)

は、頭部上向 (HU), 頭部下向 (HD) それぞれ3本ずつとした。表5に結果を示すが、全継手の破断荷重、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。また、破断面観察の結果、いずれの試験継手においても、問題となるような溶接欠陥は認められなかった。図7に試験継手の破断面状況を示す。

4.2.4 縦断面マクロおよびマイクロ組織試験

図8は、試験継手の中央縦断面マクロ組織を示したものである。頭頂面および底面の熱影響幅はともに110mm程度であり、従来法によるJIS60kg普通レールガス圧接部と同程度であるが、腹部中央の熱影響幅が150mmと従来法によるガス圧接部(130mm程度)に比べてやや広い。

図9は、図8の中央縦断面上で観察した代表位置のマイクロ組織である。観察位置は、頭頂面下5mm位置の接合界面近傍, HAZ中央部, HAZ細粒部, HAZ近接母材, および母材部である。接合界面近傍では、結晶粒が粗大化しており、接合工程において高温まで到達したこと

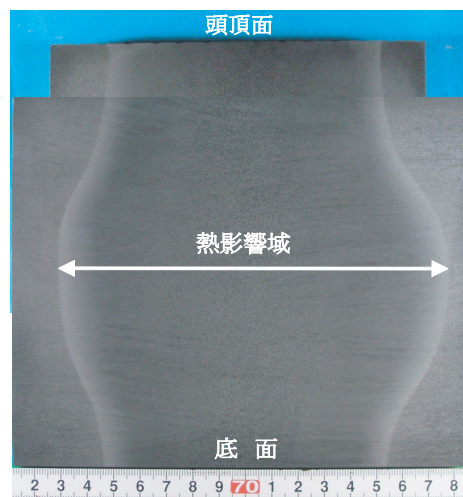


図8 中央縦断面マクロ組織

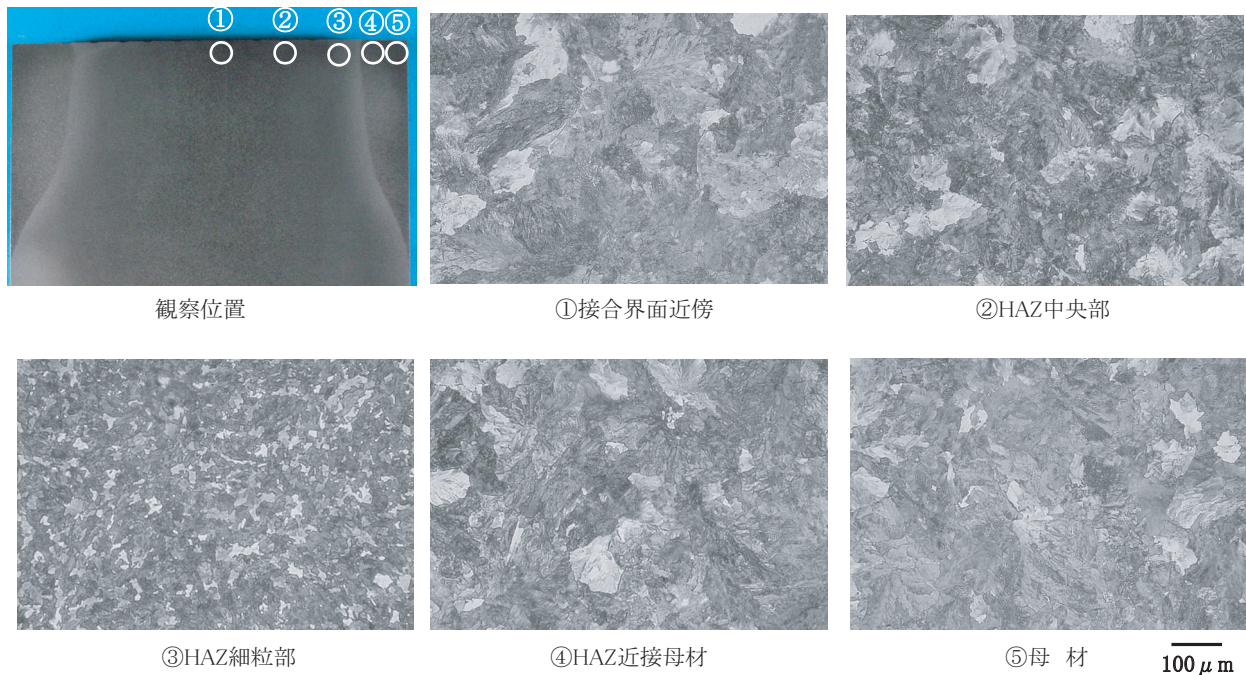


図9 試験継手のマイクロ組織（レール頭頂面下5mm位置）

が示唆される。また、いずれの部位においても、マルテンサイト等の異常組織は認められない。

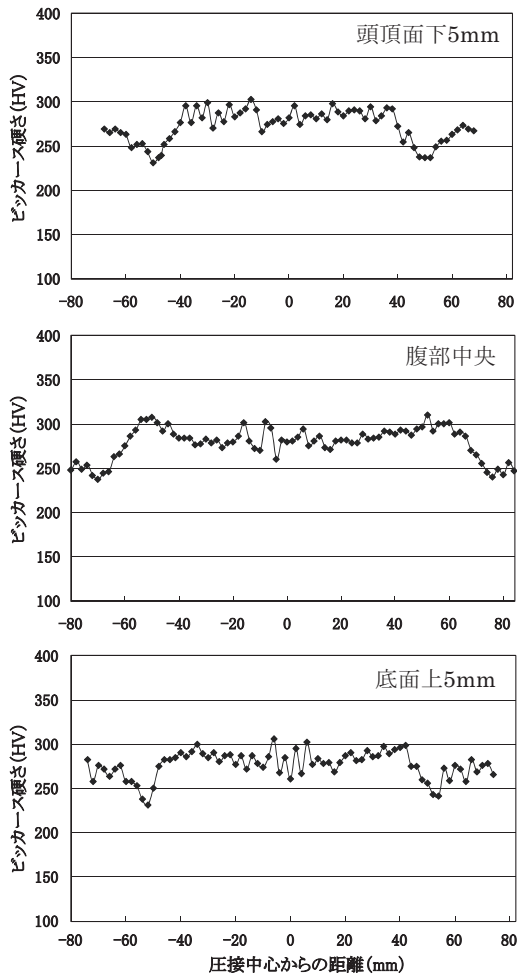


図10 試験継手の縦断面上における硬度分布

#### 4.2.5 縦断面硬さ試験

図10に中央縦断面上で測定したビッカース硬さ分布を示す。測定位置は、頭頂面下5mm、腹部中央および底面上5mmの各部位である。なお、測定間隔は2mmピッチ、载荷荷重は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若干高く、また、熱影響域境界に幅10mm程度の軟化域が認められる。また、腹部中央、底面上5mm位置の硬度分布も頭頂面下5mm位置とほぼ同様の傾向を呈しており、いずれも、従来法による普通レールガス圧接部と同等であると判断される。

#### 4.2.6 曲げ疲労試験

試験継手3本に対し、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、中央载荷点距離150mm、繰り返し速度2Hzの4点曲げ疲労試験を実施した。試験では、最小応力を30N/mm<sup>2</sup>とする片振り条件を採用し、繰り返し数200万回を限度とした。曲げ疲

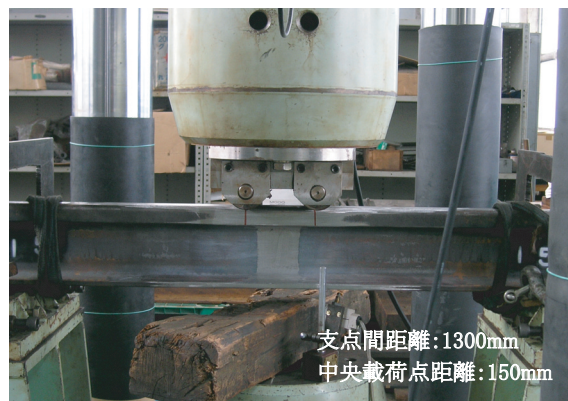


図11 曲げ疲労試験状況

特集：軌道技術

表6 試験継手に対する曲げ疲労試験結果

TPNo.	応力 (N/mm <sup>2</sup> )			繰り返し数 (× 10 <sup>6</sup> )	破断の有無
	最小	最大	全応力振幅		
E-7	30	350	320	2.00	未破断
E-8	30	350	320	1.34	母材破断
E-9	30	350	320	2.00	未破断

疲労試験状況を図11に、試験結果を表6にそれぞれ示す。  
全応力振幅320N/mm<sup>2</sup>の下、TPNo.E-7およびE-9は繰り返し数200万回で未破断であったが、TPNo.E-8は繰り返し数134万回で破断した。なお、TPNo.E-8の破壊起点は圧接中心より約70mm離れた熱影響部外側のレール母材底面部であった。以上より、当該試験継手は、従来法によるレールガス圧接部が有する320N/mm<sup>2</sup> (全応力振幅)の疲労強度レベルを確保していると判断される。

4.3 性能評価試験のまとめ

以上に述べた試験継手に対する性能評価試験の結果、本研究で提案した水素を主ガスとして用いるレールガス圧接法により作製した継手は、従来法による継手と比べて遜色のない性能を有しており、実用に供しても問題ないと判断される。

5. 炭酸ガス発生量の試算

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、当該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発生量を試算し、従来法における発生量と比較した。表7に試算結果を示すが、当該法の適用により、炭酸ガス発生量が従来法のおよそ1/3程度に削減できることがわかる。

表7 炭酸ガス発生量の試算結果  
(JIS 60kg 普通レール接合時)

	当該法	従来法
燃焼条件	水素量：410 ℓ/min 酸素量：125 ℓ/min ヘキサン溶液量：65m ℓ/min (11.3 ℓ/min*)	アセチレン量：105 ℓ/min 酸素量：100 ℓ/min
燃焼反応式	・ H <sub>2</sub> + 0.5O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O ・ C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> + 9.5O <sub>2</sub> → 6CO <sub>2</sub> + 7H <sub>2</sub> O	・ C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + 2.5O <sub>2</sub> → 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O
圧接時間	7 min	7 min
炭酸ガス発生量	11.3 ℓ/min × 6 × 7 min = <b>474 ℓ</b>	105 ℓ/min × 2 × 7min = <b>1470 ℓ</b>

\*消費されたヘキサン溶液が全て気化したと想定した場合の体積量

6. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に列挙する。

- (1) 水素ガス燃焼炎は燃焼速度が高いため、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従来のアセチレンガス燃焼炎に比べて劣ると判断された。
- (2) 本研究における試験継手作製試験では、アセチレンガスを用いる従来法で問題となっている逆火現象が発生せず、ヘキサンを付加した水素ガス燃焼炎は、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) 水素ガスを適用する場合の燃焼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、本研究で提案したレールガス圧接法により作製した継手は、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発生量を試算した結果、従来法における炭酸ガス発生量のおよそ1/3程度に削減できることがわかった。

7. おわりに

レールを接合するための主要な手法の一つであるレールガス圧接技術を将来にわたり継承・維持していくため、水素ガスを主ガスとして用いるレールガス圧接法を提案した。当レールガス圧接法では、圧縮ボンベによる水素ガス供給方式の適用、さらに、既存レールガス圧接機器の転用・改造を前提としており、実用化に要するコストは必要最低限に収まると判断される。

文献

- 1) 山本隆一, 深田康人, 寺下善弘: 低CO<sub>2</sub>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
- 2) 日本化学会編: 化学便覧 基礎編II, 丸善, p.408, 1984
- 3) 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
- 4) 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
- 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