

変圧法を用いた低圧縮量レールガス圧接工法の開発

伊藤 太初* 小納谷 優希*

Rail Gas Pressure Welding of Low Upset Length Using Variable Pressure Method

Hajime ITOH Yuki KONAYA

In order to reduce the bulge of gas pressure weld and finish by grinding only, the authors carried out rail gas pressure welding tests and numerical analysis for reduction of the upset length. In the tests, a new rail gas pressure welding method using the variable pressure method was achieved with a compression of the upset length of about 6 mm, which is 1/4 of the conventional method, with sufficient strength for practical use. As the trimming process is not necessary, the trimming device is not required. This also reduces the weight of the gas pressure rail welding machine.

キーワード：ガス圧接，数値解析，低圧縮量，継手強度，変圧法

1. はじめに

レールガス圧接法は、ガス炎を用いた固相接合法の一種であり、日本国内のレール溶接施工総数の約40%を占める主要なレール溶接法である。ガス圧接法は、テルミット溶接およびエンクローズアーク溶接に比べ継手の信頼性が高く、装置の機動性も比較的良いことから、線路脇に配列されたレールの溶接（二次溶接）に主に用いられている。ガス圧接法の接合原理は、ガス炎による部材外周からの加熱による接合面温度の上昇、および部材軸方向への加圧に伴う接合面の塑性変形により、接合阻害因子（酸化介在物）を分断・微細化し、金属結合を達成させることである。図1にレールガス圧接法の施工手順を示す。レールガス圧接法では、接合時の塑性変形により生じる余盛を圧接直後の熱間状態において専用バイトで押抜くことで、グラインダによる仕上げ加工の労力を低減している。しかしながら、この押抜き作業には専用の油圧ポンプやバイトなどの高重量の機材（TGP-H-A型レールガス圧接機の場合、押抜き装置の総重量：計145kg¹⁾）が必要となる。したがって、昨今の労働人口減少に伴い各種レール溶接法の自動化が求められている中、これらの作業の簡略化は大きな課題の一つである。そこで、本研究ではレールガス圧接施工時の圧縮量の低減による押抜き作業の省略を目標とした。

これまでの知見より、圧縮量は接合強度に大きく影響を及ぼす因子であり、圧縮量の低下は接合強度の低下を招くことが予想された。他方で、先行研究において、ガス圧接施工時の加圧力を変化させる変圧法（初期過程において高加圧力で圧縮変形を早期に開始させた後、圧縮変形開始後ただちに加圧力を低下させることで変形を抑

制しつつ接合面の温度を上昇させる手法）を適用することで、接合面の酸化を抑制しつつ接合温度を上昇しうる手法が提案されている²⁾。したがって、当該手法を適用することで、圧縮量を抑制しつつ接合温度を上昇させ、接合強度を確保することが可能であると考えられる。

上記の考えのもと、定圧法および変圧法を用いた低圧縮量レールガス圧接試験および数値解析を実施すると共に、作製した低圧縮量レールガス圧接試験体に対し、一連の性能評価試験を実施し、実用性能を評価した。これらの結果より、押抜き工程を省略可能な低圧縮量レール



図1 レールガス圧接施工手順

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

ガス圧接工法を提案した。

2. 低圧縮量レールガス圧接試験

2.1 押抜き作業を省略可能な圧縮量の検討

グラインダによる仕上げ時間が現行と同等となる圧縮量を検討するため、予備試験として、圧縮量を変えたレールガス圧接試験体を作製し、仕上げ時間を測定した。試験体は、押抜きを省略した圧縮量 6mm および 10mm、および標準条件である圧縮量 24mm（押抜きを実施）とした。表 1 に、各圧縮量において測定した仕上げ時間を示す。これによると、標準作業の仕上げ時間は約 42 分であり、これと同等の作業労力とするには、6mm 程度（仕上げ時間約 39 分）まで圧縮量を減らす必要がある。そこで、圧縮量を 6mm 程度とする低圧縮量レールガス圧接工法の開発に向けて、定圧法および変圧法を用いて圧縮量を 6mm 程度としたレールガス圧接試験体を作製し、静的曲げ試験にて接合状態を評価した。

2.2 低圧縮量レールガス圧接工法による試験体作製

事前検討において種々の加圧パターンを用いた数値解析およびレールガス圧接試験を実施し、加熱初期段階において高い加圧力によって早期に接合面を閉口させること、加圧および加熱を維持することによる金属原子の相互拡散を助長させることが接合状態の向上に寄与することを把握した。そこで、本試験では、初期加圧力を 28MPa とし、圧縮量が 1mm に達するまで保持した後、油圧ポンプを停止し、シリンダーの残圧により加熱・加圧を保持する変圧法を採用した。加熱時間は十分な熱量を投入することを目的に、現行手法（圧縮量 24mm）の加熱時間を同等の 420 秒とした。その結果、圧縮量は約 6mm となった。表 2 に各試験体のガス圧接条件、図 2 に各条件における加圧力と圧縮量の測定結果例を示す。試験では、0.75m の JIS60kg 普通レールを準備し、TGP-HA 型レールガス圧接機を用いた。また、現行手法である定圧法は、加圧力を標準条件と同様 22MPa とし、圧縮量が 6mm に達した時点で加熱および加圧を停止した。ガス流量はいずれの条件も酸素 100L/min、アセチレン 110L/min とし、試験体本数は各条件 2 体ずつ、計 4 体とした。また、押抜き工程は省略し、レールガス圧接部の余盛をグラインダにより均した。なお、圧縮量 6mm とすることで、現行法と比較し余盛部分の体積を 60% 減じることが可能となる。また、作製した試験体に対し、レール溶接部の仕上がり検査で実施されている磁粉探傷検査³⁾を実施した結果、いずれの試験体にも欠陥は検出されなかった。

表 1 仕上げ時間の比較

圧縮量	仕上げ時間
6mm	39 分
10mm	59 分
24mm（押抜きあり）	42 分

表 2 低圧縮量レールガス圧接条件

No.	加圧方式	初期加圧力 (MPa)	初期圧縮量 (mm)	加熱時間 (s)	最終圧縮量 (mm)
1-1	定圧法	22	—	310	6
1-2					
2-1	変圧法	28	1	420	6
2-2					

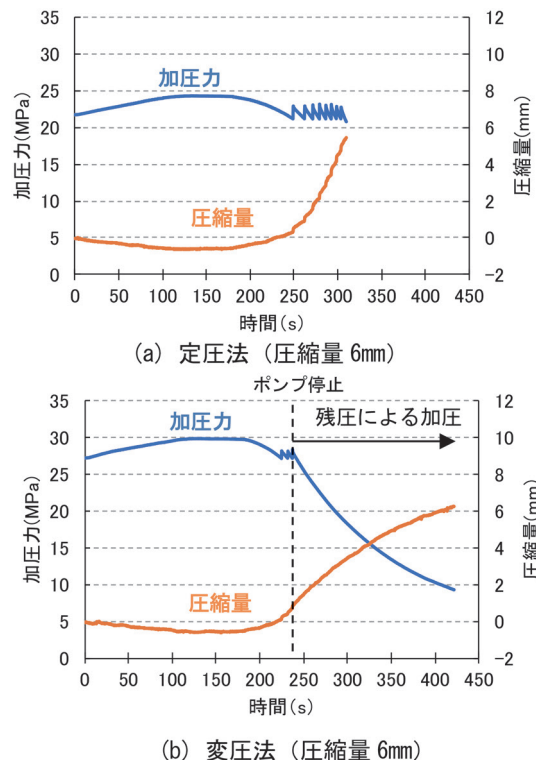


図 2 各条件における加圧力と圧縮量の測定結果例

2.3 静的曲げ試験

作製した試験体に対し、支点間距離 1m 中央集中荷重の 3 点曲げによる静的曲げ試験を実施した。破断姿勢は頭部上向き (HU)、頭部下向き (HD) それぞれ 1 体ずつとした。

図 3 に HU 姿勢および HD 姿勢における各試験体の静的曲げ試験結果を示す。HU 姿勢および HD 姿勢ともに、定圧法による圧縮量 6mm の試験体では JIS60kg 普通レールガス圧接部の破断荷重およびたわみ量の各基準

値をкаろうじて満たす結果であったが、変圧法を用いた圧縮量 6mm の試験体ではいずれも各基準値を大きく上回った。図 4 に HU 姿勢における各条件での破面を示す。定圧法を用いた圧縮量 6mm の試験体では引張応力の作用する領域 (HU: 底部領域, HD: 頭部領域) に平滑な破面形態が認められたが、変圧法を用いた圧縮量 6mm の試験体ではほとんど認められなかった。この平滑面は、へき開破面および微細な球状介在物を内在するディンプル破面が混在したものであり、接合面 (突合せ面) で破断したことを示している。なお、現行条件である圧縮量 24mm のレールガス圧接部における曲げ破面ではこのような平滑面が破面上に表出することが稀に生じる程度であり、多くの場合、凹凸のあるへき開破面形態を呈する²⁾。

以上の結果より、圧縮量 6mm 低圧縮量条件において、提案する変圧法を適用することにより継手強度が基準値を十分に上回り、かつ破面に平滑面が生じないことが判明した。以降、当手法を「低圧縮量レールガス圧接工法」と称する。

3. 数値解析による考察

3.1 解析モデルの詳細

先行研究においてレールガス圧接部の温度分布および変形量を精度よく予測可能なレールガス圧接部の加熱変形解析モデルを構築している⁴⁾。ここでは、当該モデルを用いて、定圧法および変圧法を適用した際のレールガス圧接部の接合面における温度および変形を評価した。

図 5 に本検討で使用したモデルを示す。解析モデルはレールガス圧接部の接合面を中心とした 1/4 対称モデルとし、加熱範囲 (接合面から長手方向に 100mm) として設定した領域に、ガス炎による熱流束分布および放射による境界条件、加熱範囲以外には放射および大気対流による境界条件を設けた。また、熱伝導物性値および材料定数については温度依存性を考慮した。なお、メッシュ形状は 6 面体 (27 節点) とし、接合面から長手方向 100mm を加熱範囲として一辺を約 1mm で分割した。本解析モデルでは、固-液相変態は考慮していない。また、本検討では変位制御とし、ガス圧接試験体作製時に取得した圧縮量の推移を境界条件として、接合面から 750mm 離れたレール端面 (接合面と反対側のレール端面) 上の全接点に入力した。

3.2 解析結果

本検討では、レールガス圧接部の接合面上の変形度の指標として、先行研究で妥当性を検討した相当塑性ひずみを用いた。図 6 に解析モデルで計算された圧縮量 6mm 到達時点における接合面および中央縦断面上の温

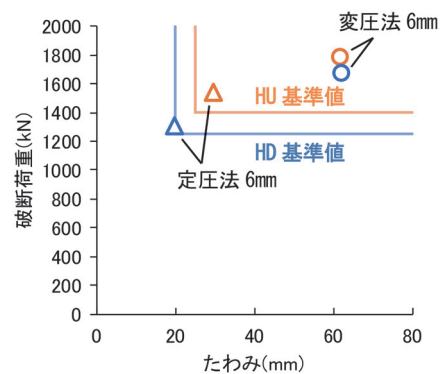


図 3 各試験体の静的曲げ試験結果

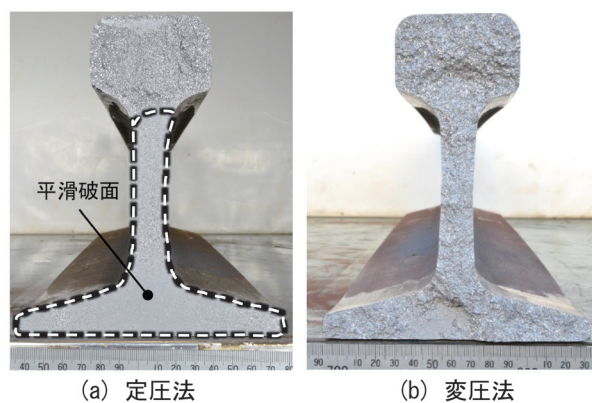


図 4 HU 姿勢 (頭部上向き) における破面

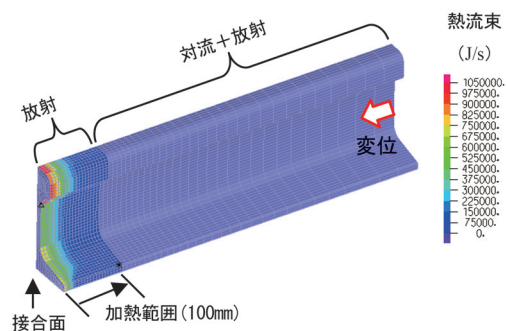


図 5 使用した数値解析モデル

度分布および相当塑性ひずみ分布を示す。解析結果によると、定圧法 (加熱時間 310 秒) と比較し、変圧法 (加熱時間 420 秒) において各部位の温度が 100℃ 程度高くなっており、加熱時間の延長によって接合面の温度が上昇したことがわかる。また、接合面内の各部位の相当塑性ひずみに着目すると、いずれの部位においても相当塑性ひずみが増加している。中央縦断面の相当塑性ひずみ分布を見ると、定圧法と比較し変圧法のひずみが生じている領域がやや狭く、より接合面に近い位置で変形が集中して生じていることがうかがえる。丸棒鋼ガス圧接部における過去の研究結果において、温度分布が相当塑性ひずみ分布に影響を与え、温度勾配が大きいほど接合面

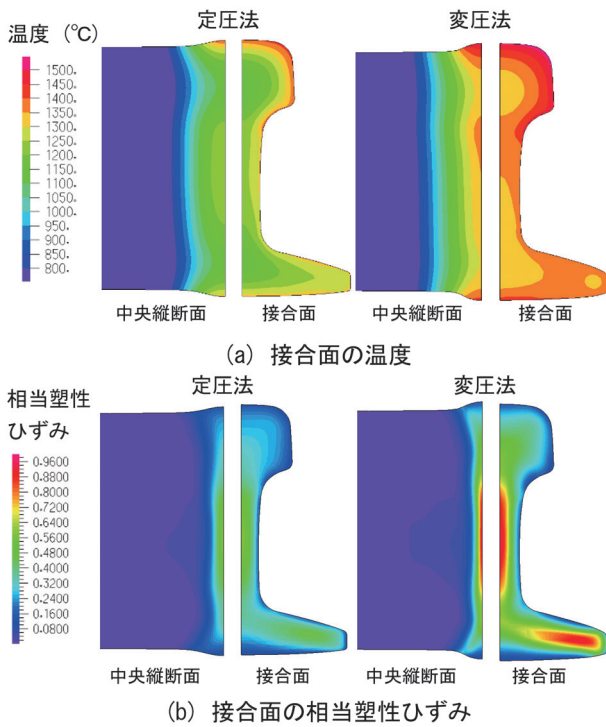


図6 温度および相当塑性ひずみの解析結果

付近の相当塑性ひずみが増加することが判明している⁵⁾。このことから、図6(a)に示すように、定圧法に比べ変圧法における接合面の温度上昇により縦断面方向の温度勾配が大きくなった結果、接合面近傍で集中して変形が生じ、接合面の相当塑性ひずみが増加したものと推定される。

以上の結果より、変圧法を用いることで、温度および変形が増加し、接合面の酸化介在物の分断・微細化に寄与した結果、接合状態が向上したものと考えられる。

4. 性能評価試験

低圧縮量レールガス圧接工法を用いて作製した試験体に対し、各種性能評価試験を実施した。なお、性能評価試験用に作製したすべての試験体において、磁粉探傷試験による欠陥磁粉模様は観察されなかった。

4.1 静的曲げ試験

2章での試験と同様に支点間距離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およびHD姿勢としてそれぞれ2体ずつ実施した。図7に静的曲げ試験結果を示す。すべての試験体がJIS60kg普通レールの曲げ破断基準値 (HU: 1400kN-24mm, HD: 1250kN-20mm) を上回った。また、破面は、2章の静的曲げ試験結果と同様、割れ等の溶接欠陥や平滑面は認められず良好であった。

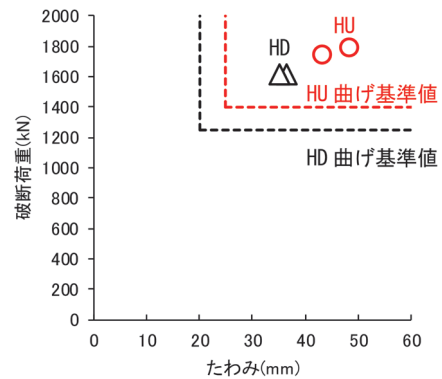


図7 静的曲げ試験結果

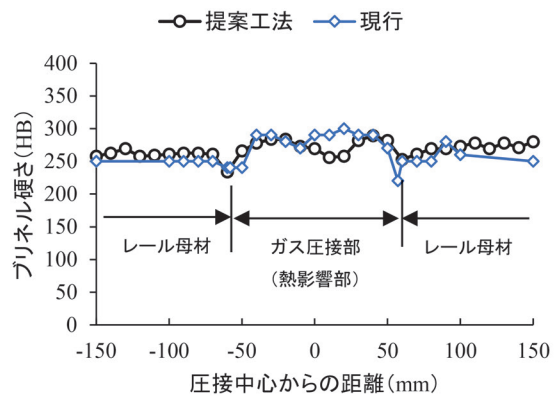


図8 頭頂面のブリネル硬さ分布

4.2 頭頂面硬さ測定試験

低圧縮量レールガス圧接試験体の硬度分布を調査するため、頭頂面のブリネル硬さ (HB) を測定した。測定箇所は接合面を中心として300mmの範囲とし、測定間隔は10mmとした。図8に提案工法の頭頂面のブリネル硬さ分布を現行法と併せて示す。熱影響部 (A₁ 変態点 (723°C) を超えて加熱された部位) の硬さがレール母材に比べやや高くなっており、熱影響境界部には約10mm幅の軟化域が認められる。これらは現行のレールガス圧接部と同様の硬さ分布であり、実使用上、局部落込み等の問題を生じることはないと考えられる。

4.3 曲げ疲労試験

レール底部領域に引張応力の作用するHU姿勢にて疲労試験を実施した。なお、熱影響部を含むガス圧接部全域の疲労強度を評価するため、支点間距離1300mm、中央載荷点距離150mmの4点曲げを採用した。試験では、最小応力を30MPa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。なお、レール底面をグラインダにより滑らかに研磨することで、錆肌を起点としたレール底面からの疲労破壊を防止し、ガス圧接部のみの疲労強度を評価した。図9に曲げ疲労試験の状況、表3に曲げ疲労試験結果を示す。はじめに、標



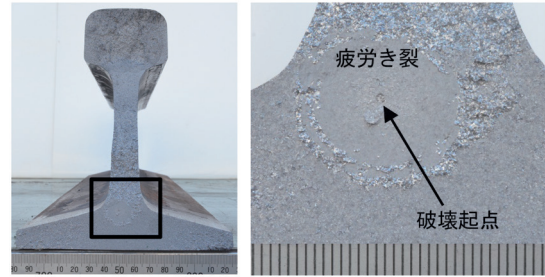
図9 曲げ疲労試験状況

表3 曲げ疲労試験条件と試験結果

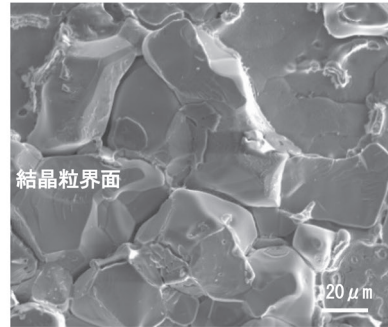
No.	応力 (MPa)			繰返し数
	最大	最小	全応力振幅	
1	350	30	320	2,000,000
2	350	30	320	1,298,000 (破断)
3	330	30	300	2,000,000
4	330	30	300	2,000,000

準的なガス圧接部の200万回疲労強度である全応力振幅320MPaの条件下で試験体2体に対して試験を実施した結果、1体の試験体は繰返し数200万回で未破断であったが、1体の試験体は繰返し数約130万回で破断した。そのため、全応力振幅を300MPaに下げた条件下で試験体2体に対して試験を実施した結果、いずれも繰返し数200万回で未破断であった。

図10に応力振幅320MPaで破断したNo.2試験体の破面写真および起点部の拡大観察結果を示す。破面をみると、下首部領域に疲労き裂進展を示す円状の平滑破面が認められ、その中心を拡大観察すると、図10(c)に示すような結晶粒界面を呈する粒界割れ破面が認められた。粒界割れはレール母材の旧オーステナイト粒界が溶融することで生じる高温割れであり、フラッシュ溶接やエンクローズアーク溶接などで内部に生じる欠陥形態である。また、通常のレールガス圧接部では入熱過多により接合面近傍の表面に生じることがあるが、加圧により圧縮されるため、内部にこのような欠陥は生じない。本工法では、加圧力を低減させているため、残存したものと推定される。なお、応力振幅320MPaの試験条件は実使用条件下に生じるレール応力と比較すると極めて大きいいため、当該欠陥が疲労破壊の起点となったが、実使用条件下では上述の通り経年による錆肌を起点としてレール底面から疲労破壊に至る⁶⁾ことから、実使用条件下において当該欠陥が疲労破壊の起点となるものではな



(a) No. 2 破面 (b) 左図口拡大



(c) 破壊起点部 (粒界割れ)

図10 No.2試験体の破面観察結果

いと考えられる。

以上の結果から、提案工法は無欠陥のエンクローズアーク溶接部(疲労強度280MPa)を上回る応力振幅300MPaの200万回疲労強度を有していると判断される。

4.4 金属組織観察

作製した1体の試験体について、ガス圧接部を中央縦断面で切断し、マクロ組織を観察した。図11にエッチング処理を施した圧接部の縦断面を示す。熱影響部の幅を測定すると、頭部、腹部、底部領域でいずれも現行の圧縮量24mm以上のレールガス圧接部に比べ20mm程度熱影響範囲が広い⁷⁾ことが分かった。これは投入熱量が変わらず、圧縮量のみが少ないためと考えられる。また腹部は頭部、底部に比べ断面の幅が小さく熱の影響をより大きく受けるため、熱影響幅は大きくなっているが、この傾向は現行のレールガス圧接部と同様である。

図12に圧接部の中央縦断面上で光学顕微鏡により観察したミクロ組織を示す。観察位置は頭頂面下5mm位置の①圧接中心、②熱影響中央、③熱影響境界、④熱影響近接母材、⑤母材の5か所である。より最高到達温度の高い圧接部中心付近では大きい結晶粒が、熱影響境界付近では微細な結晶粒が観察された。いずれの観察箇所でもマルテンサイト等の異常組織は認められず、一般的なガス圧接部と同様の金属組織であると言える。

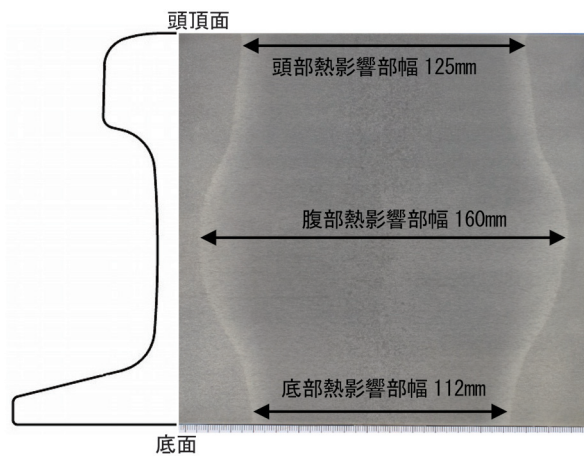


図 11 縦断面マクロ組織

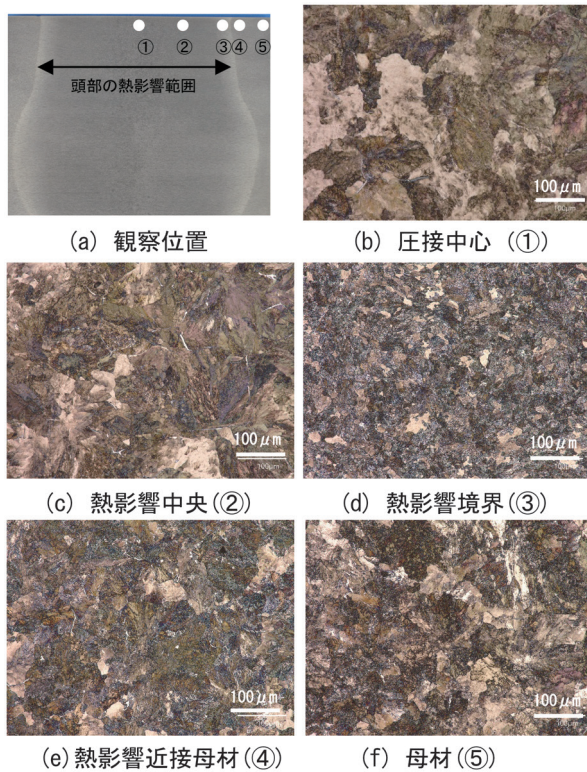


図 12 縦断面ミクロ組織観察結果

5. まとめ

本研究では、圧縮量の低減による押抜き工程の省略を目的として、レールガス圧接試験および数値解析により各種検討を実施した。結果は以下の通りである。

- (1) 変圧法を用いることで、圧縮量 6mm とし押抜き工程を省略可能な低圧縮量レールガス圧接工法を提案した。本工法は、静的曲げ試験および曲げ疲労試験において、現行のレールガス圧接部の荷重・たわみ基準値を上回る曲げ強度および、応力振幅 300MPa 以上の曲げ疲労強度を有していることを確認した。
 - (2) レールガス圧接部の加熱変形解析モデルを用いて、定圧法および変圧法を適用した際のレールガス圧接部の接合温度および変形を評価した。その結果、加熱時間の延長により変圧法における各部位の温度が定圧法と比べ 100℃ 程度上昇した。また、接合面の温度増加により接合面近傍で変形が集中して生じ、相当塑性ひずみが増加した。これらにより、接合面の酸化介在物の分断・微細化に寄与した結果、接合状態が向上したものと考えられる。
- なお、提案工法を用いることで、作業員 2 人（従来は 3 人）で圧接作業を実施することができるため、施工コストの削減が期待される。

文 献

- 1) 白山商事株式会社 レールガス圧接機：http://www.hakusan-shoji.co.jp/products/gas_assetsu/index.html（参照日：2024 年 10 月 11 日）
- 2) 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変更，鉄道総研報告，Vol.13，No.5，pp.27-32，1999
- 3) JR 東日本：レール溶接工事標準示方書，本設第 728 号，2007
- 4) 伊藤太初，山本隆一，相澤宏行，井筒宏樹，岩崎幹大：レールガス圧接の加熱変形解析手法の構築：鉄道総研報告，Vol.36，No.3，pp.47-52，2022
- 5) 伊藤太初，山本隆一，佐々木朋裕：有限要素法を用いた丸棒鋼ガス圧接部の加熱変形解析，溶接学会論文集，Vol.38，No.4，pp.418-428，2020
- 6) 弟子丸将，片岡宏夫，阿部則次，大野宗伸：経年ロングレールの疲労寿命推定，鉄道総研報告，Vol.20，No.4，pp.5-10，2006
- 7) 山本隆一，伊藤太初，寺下善弘，辰巳光正，吉田佳史：水素・エチレン混合ガスを用いたレールガス圧接法，鉄道総研報告，Vol.27，No.4，pp.47-52，2013