

# テルミット溶接部の表面きず発生原因とその防止策

寺下 善弘\* 山本 隆一\* 辰巳 光正\*  
伊藤 太初\* 梅内 一行\*\*

## Cause Investigation and Prevention Measures of Surface Defect of Thermit Welds

Yoshihiro TERASHITA Ryu-ichi YAMAMOTO Mitsumasa TATSUMI  
Hajime ITO Kazuyuki UMENAI

Thermit welding method is the most popular rail welding process in Japan. The reliability of the thermit welds is highly evaluated, because the failure rate was only about 0.005% for the last 10 years in Japan. On the other hand, there are many cases where thermit welds are judged to be defective due to surface defects in these days. Surface defects are often observed in case of execution of welding the new rails and the worn rails. From the results of welding test, it is judged that surface defects are caused due to gas generated by the contact of luting sand and molten steel which enters into the gap between welding mold and rail surface.

キーワード：テルミット溶接，表面きず，ブローホール，隙間，目地砂

### 1. はじめに

テルミット溶接法は，良好な施工性と機動性を有し，日本で適用されている4つのレール溶接法の中で最も多く施工されている。図1に示すJRグループにおける過去5年間の施工比率の推移によると，テルミット溶接法は約4割を占めるに至っている。また，ここ10年間のテルミット溶接部の折損率はわずか0.005%程度と低く，その信頼性は高く評価されている。

しかしながら，最近においても図2に示すような表面きず（主にブローホール）で不良判定される事象が多く報告されている。特に新品レールと腐食や摩耗のある経年レールとの溶接施工時の発生事例が散見され，再溶接

を余儀なくされている。また，テルミット溶接部の表面きずの発生原因は，レール表面の錆やモールドとレールの隙間に入り込んだ目地砂からの水分供給によるものと推定されているが，それらの影響についてこれまで検討されたことはなく，表面きず発生の原因を解明し，対策を施すことが課題となっている。

本報告では，表面きずの発生原因を解明するために実施したレールのあご部と底面に段差の生じる新品レールと経年レールとの溶接試験の結果，および表面きずの発生防止策について検討した内容を紹介する。

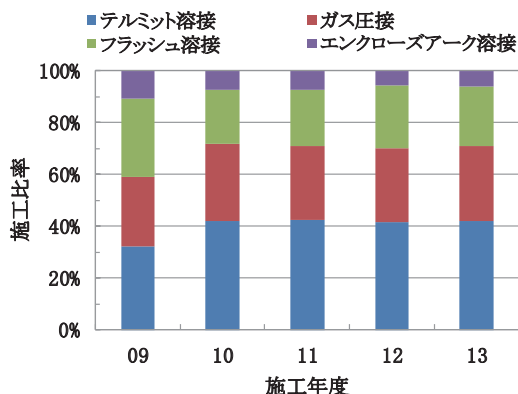
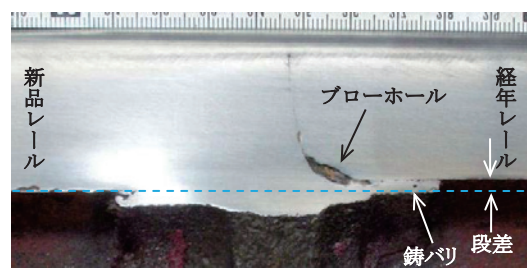
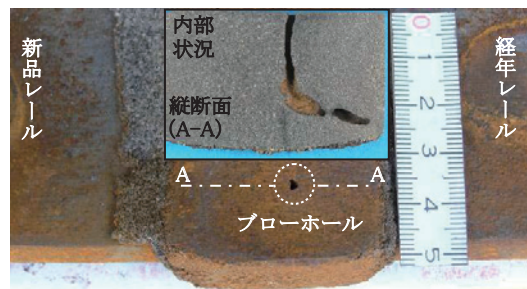


図1 溶接法毎の施工比率の推移

\* 軌道技術研究部 レール溶接研究室  
\*\* 軌道技術研究部 レール溶接研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）



(a) 頭部側面



(b) 底部上面余盛部

図2 表面きずが発生したテルミット溶接部の例

特集：軌道技術

2. 段差レールにおける施工の問題点

テルミット溶接は、主に本線に挿入されたレールの両端を溶接する三次溶接に適用される場合が多く、そのほとんどが新品レールと、敷設されている経年レールとの接合となる。経年レールは少なからず頭部が摩耗しているため、新品レールとの溶接施工では段差が生じ、摩耗量が大きい場合にはモールドの取り付けが困難となる。さらに、経年レールは敷設箇所によっては著しく錆びている場合も多い。

図3にレール高さが約4mm異なる新品レールと経年レールに対して、モールドを取り付け、予熱バーナを設置した状態を示す。普通モールドをそのまま使用する場合、(a)図に示すように予熱バーナを開先中心に設置するためには、頭部の開先に合わせてモールドを取り付ける必要があるが、この場合にはモールドが大きく傾き、モールド底部が開先から大きくずれる。このため、適切な溶け込みが得られず、湯漏れの危険性も考えられる。

(b)図には、段差レールの溶接を行う場合に標準作業として実施されているモールド加工（経年レールの底部上面が接触する部位を研削）を施し、モールドを取り付けた状態を示す。モールドを加工することによって、開先に対して垂直に取り付けることは可能となるが、経年レール側の底面およびあご部には大きな隙間が生じる。この状態で砂詰め作業を行った場合には、その隙間に目

地砂が入り込むことになるため、隙間に厚紙などを詰めて施工することが推奨されている。一方、(d)図に示す段差モールドでは、4mmのレール段差に対応したモールド形状となっているため、モールドがレールに対して垂直に取り付き、隙間は生じない。なお、段差モールドの適用範囲は、レール段差2～6mmとなっている<sup>1)</sup>。

3. 段差レールの溶接試験

図2に示したように、実施工で発生するブローホールの表面きずの大半が、経年レール側に生じたモールドとレールとの隙間から溶接金属中央に向かって凝固方向に形成されている。このことから、これらのブローホールは隙間に入り込んだ溶鋼と局所的な水分（レール表面の錆や目地砂）との接触（反応）により生じたガスが、溶鋼中に侵入して残存したものと推察した。そこで、レール表面の錆やモールドとレールの隙間の影響を調査するため、普通モールドと段差モールドを用いて、新品レールと経年レールとの溶接試験を実施した。

3.1 溶接試験条件

表1に溶接試験の施工条件を示す。初めに段差モールドを用いてレール表面の錆が表面きずの発生に及ぼす影響を確認した後、普通モールドに加工を施し、モールドとレールとの隙間が及ぼす影響を確認した。なお、モー



図3 段差レール溶接施工時におけるモールドの組み立て状態と隙間の状況

表1 溶接試験の施工条件

TPNo.	レール高さ (mm)		モールドとレールの隙間 (mm)				使用 モールド	レール 表面の錆	モールド 加工	隙間へ の対処	目地砂 の量と 水分量
			底面		あご部*1						
	経年	新品	経年	新品	経年	新品					
S-1	150.0	153.6	0.0	0.0	—	—	段差	除去せず	無し	無し	標準
S-2	149.9	153.5	0.0	0.0	1.1	1.4	〃	〃	〃	〃	〃
S-3	149.6	153.7	0.0	0.0	1.0	1.0	〃	〃	〃	〃	〃
S-4	149.9	153.3	0.0	0.0	1.0	1.2	〃	〃	〃	〃	〃
N-1	150.0	153.5	4.5	0.0	4.0	—	普通	〃	底部上面	〃	〃
N-2	149.8	153.3	4.0	0.0	3.5	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-3	150.0	153.3	4.2	0.0	3.5	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-4	149.6	153.5	4.2	0.0	4.0	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-5	149.7	153.3	5.0	0.0	4.0	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-6	149.8	154.0	5.2	0.0	5.0	—	〃	除去	〃	〃	〃
N-7	149.9	153.5	4.0	0.0	3.0	—	〃	除去せず	〃	〃	水分2割増
N-8	149.5	153.6	3.8	0.0	4.0	—	〃	〃	〃	〃	水分4割増
N-9	150.4	153.6	4.4	0.0	—	—	〃	〃	〃	ペースト材*2	標準
N-10	151.7	153.9	2.2	0.0	3.5	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-11	151.4	153.6	3.5	0.0	4.5	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-12	150.1	153.6	3.2	0.0	4.0	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-13	149.7	153.6	3.9	0.0	4.5	—	〃	〃	〃	〃	〃
N-14	150.0	153.8	4.3	0.0	4.5	—	〃	〃	〃	目地用粘土	目地用粘土
N-15	149.8	153.5	4.8	0.0	—	—	〃	〃	〃	目地砂	標準
N-16	149.7	154.2	4.2	0.0	—	—	〃	〃	〃	無し	水分・量割増

\*1「—」は未測定、\*2底面のみ充填：TPNo.N-9、N-10、N-13、あご部と底面に充填：TPNo.N-11、N-12、N-14、N-15

ルド加工には、平均5分程度の作業時間を要した。さらに、表面きず再現の観点から目地砂の水分量などを変化させるとともに、溶鋼と局所的な水分との接触を抑制する目的から、隙間へのペースト材（モールド補修用など）充填による施工を併せて検討した。なお、隙間への厚紙挿入は溶鋼注入段階で燃焼して消失するため、挿入しない場合と大差ないと考え、行わないこととした。また、本試験にはJIS50kgN普通レールの新品レールと営業線から撤去された経年レール（頭頂面水平摩耗約3mm）を使用した。レール高さは、垂直探触子による超音波探傷で測定し、新品レールが153.3～154.2mm、経年レールが149.5～151.7mmであり、溶接試験体毎の段差は2.2～4.5mm（平均：3.6mm）であった。

段差モールドを使用した場合、前述のとおりモールドはレール底面に密着しており、隙間は生じていない。一方、普通モールドを加工した場合には、モールドと経年レール底面には2.2～5.0mmとレールの段差以上の隙間が生じている。また、あご部には段差モールドでも1mm程度の隙間が生じていたが、加工した普通モールドでは図3(c)に示したように、レール底面と同様の大きな隙間が生じている。なお、試験体は、開先間隔および逆ひずみ量とも適正範囲に設定し、予熱作業も酸素手元圧0.45MPa、予熱時間90秒の標準条件で作製した。

### 3.2 作製した試験体の表面きず発生状況

合計20体の試験体を作製したところ、目地砂の水分量を4割増したTPNo.N-8のみに表面きずが発生した。図4にTPNo.N-8の外観を示すように、経年レール側のアゴ部に生じた錆バリから溶接金属内部に向かってブローホール状の表面きずが形成している。

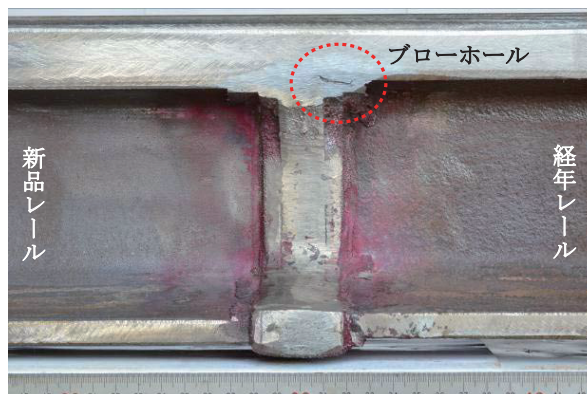


図4 発生した頭部側面のブローホール

### 3.3 作製した試験体に対する超音波探傷試験

表2に各試験体に対し実施した超音波探傷試験の結果を整理する。段差モールドを使用した試験体およびモールドと経年レール底面との隙間にペースト材を充填した試験体のほとんどに底部二探触子法で2～3級となる反

表2 作製した試験体に対する超音波探傷試験結果

TPNo.	頭 部		底 部	
	側面一探	二探	側面一探	二探 <sup>*1</sup>
S-1	無級	無級	1級 (18%)	2級 (25%)
S-2	1級	無級	2級 (21%)	2級 (25%)
S-3	無級	無級	2級 (22%)	無級
S-4	無級	無級	2級 (22%)	2級 (25%)
N-1	無級	無級	2級 (22%)	無級
N-2	無級	無級	1級 (16%)	無級
N-3	無級	無級	2級 (27%)	無級
N-4	無級	無級	1級 (14%)	無級
N-5	無級	無級	1級 (14%)	無級
N-6	無級	無級	2級 (26%)	無級

TPNo.	頭 部		底 部	
	側面一探	二探	側面一探	二探 <sup>*1</sup>
N-7	4級	2級 (32%)	無級	無級
N-8	1級	無級	2級 (17%)	無級
N-9	3級	2級 (28%)	2級 (18%)	無級
N-10	無級	無級	1級 (19%)	無級
N-11	無級	無級	1級 (16%)	2級 (40%)
N-12	無級	無級	無級	2級 (27%)
N-13	無級	無級	無級	3級 (50%)
N-14	2級	1級 (16%)	無級	2級 (23%)
N-15	無級	無級	2級 (25%)	無級
N-16	無級	無級	無級	3級 (51%)

\*1 底部側面の余盛研削前

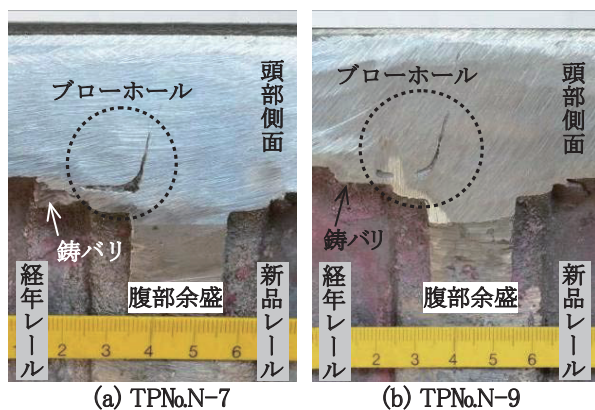


図5 研削で露呈した頭部側面のブローホール

射エコーが検出されたが、これらはきずエコーではなく、探触子の位置から経年レール側の底部余盛からの形状エコーであると判断される。なお、TPNo.N-7およびN-9では、頭部側面からの一探触子法で4級あるいは3級のきずエコーが検出されたため、きずエコー検出部である頭部側面をグラインダ研削した。その結果、図5に示すように経年レール側あご部に生じた鋳バリから溶接金属内部に発生したブローホール状の溶接欠陥が露呈した。

上述のTPNo.N-8と同様、TPNo.N-7は目地砂の水分量を増した施工条件で作製した試験体であり、目地砂の水分は表面きず発生に及ぼす影響が大きいと判断される。

一方、作製した試験体の約8割には、底部二探触子法の探傷不能領域となるライザー除去部付近に、底部側面からの一探触子法で1～2級のきずエコーを検出する特徴的な結果が得られた。図6にきずエコーを検出した探傷画像の一例を示す。また、底部側面からの一探触子法で2級のきずエコーを検出した試験体の内、エコー高が高い試験体 (TPNo.S-2, N-3, N-6) に対して、底部

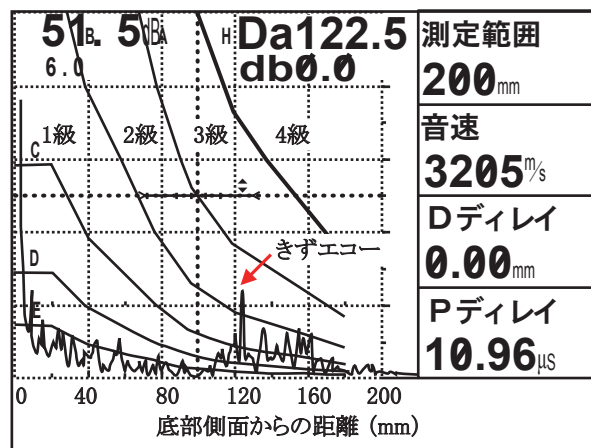


図6 底部側面からの一探触子法で検出したきずエコーの一例 (TPNo.N-6)

側面の余盛をグラインダ研削して底部二探触子法を適用した。その結果、TPNo.N-6のみライザー除去部付近に1級のきずエコーを検出した。

TPNo.N-6で検出したライザー除去部付近の内部欠陥を確認するため、平面研削盤を用いて底部側面から約10mm研削した。その結果、図7に示すように経年レール側底面に生じた鋳バリから溶接金属中央に向かうブローホールが現出した。TPNo.N-6は唯一レール表面の錆をグラインダ研磨したもので、モールドとレールの隙間が最も大きくなった試験体である。このことから、ブローホールの発生にはレール表面の錆ではなく、モールドとレールとの隙間の大きさが影響すると考えられる。また、TPNo.S-2にブローホールは発生しておらず、TPNo.N-3は鋳バリ内の小さなブローホールしか認められなかったことから、底部側面の余盛を研削して探傷不能領域をなくし、底部二探触子法を適用すれば、ライザー除去部付近のブローホールは評価可能と判断される。



図7 底部側面を研削して現出したブローホールの溶接欠陥（底部側面から10mm内部）

### 3.4 横断面におけるブローホール発生状況

図8には、モールドとレールとの隙間に対して対処を施さなかった試験体（TPNo.N-8）、モールドとレールの隙間にペースト材を充填した試験体（TPNo.N-10）および段差モールドを適用した試験体（TPNo.S-3）の余盛付け根部で切断した横断面におけるブローホールの発生状況を示す。いずれの試験体においても隙間の生じない新品レール側には、(a) 図に示すようにブローホールの発生はまったく認められない。しかしながら、(b) 図に示す隙間が生じる試験体では、経年レール側の底面とあご部に複数のブローホールが発生している。一方、ブローホールの発生を防止するため、底面の隙間だけにペースト材を充填した試験体では、(c) 図に示すように底面にブローホールの発生は認められない。また、(d) 図に示した段差モールドを適用した試験体では、底面およびあご部にほとんど隙間が生じないため、ブローホールは発生していない。なお、あご部の隙間にもペースト材を適

用する場合、モールド内（余盛形成領域）まで誤って充填してしまうと、凹みきずを生じることを確認した。

### 3.5 底面の余盛付け根部の状態

図9に試験体レール底面の余盛付け根部の状態を示す。(a) 図の段差モールドを使用した試験体では、鋳バリは認められず余盛の止端形状は良好である。一方、(b) 図に示す加工した普通モールドを用いた場合には、モールドと経年レールとの隙間に溶鋼が流れ込むことでレール底部幅全長に亘って、厚さ5mm程度の鋳バリが生じている。また、(c) 図のモールドと経年レール底面との隙間にペースト材を充填した場合には、鋳バリの形成は認められず、止端形状も概ね良好となった。

## 4. ブローホールが発生したテルミット溶接部の継手性能試験

表面きずが発生したテルミット溶接部の曲げ疲労強度レベルを調査するため、底部上面余盛部にブローホールが発生し（図2（b）など）、営業線から撤去された4体のテルミット溶接部に対して、超音波探傷試験および4点曲げ疲労試験を実施した。

### 4.1 超音波探傷試験

底部上面余盛部のブローホールは、いずれもライザー除去部に生じているため、底部二探触子法では探傷不能領域となり検出できないが、底部側面からの一探触子法で1～2級のきずエコーを検出した。また、底部側面

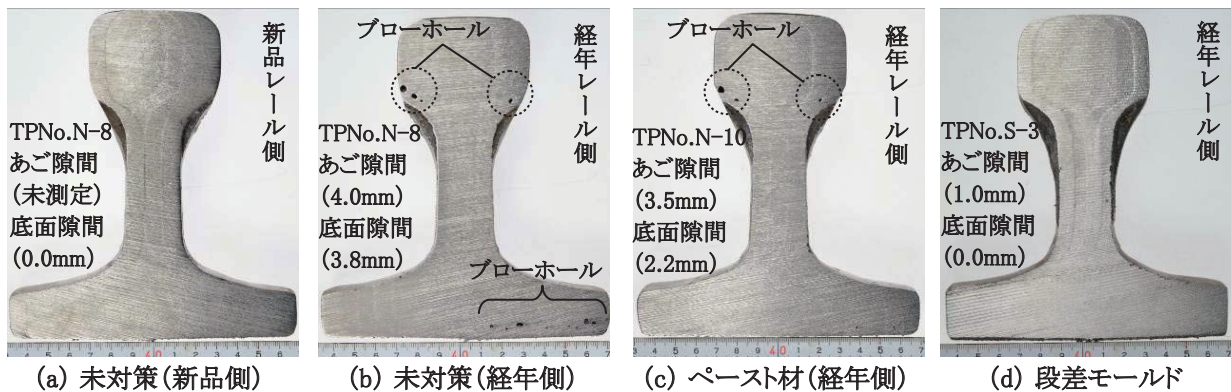


図8 余盛付け根部の横断面で観察したブローホールの発生状況および防止策の効果

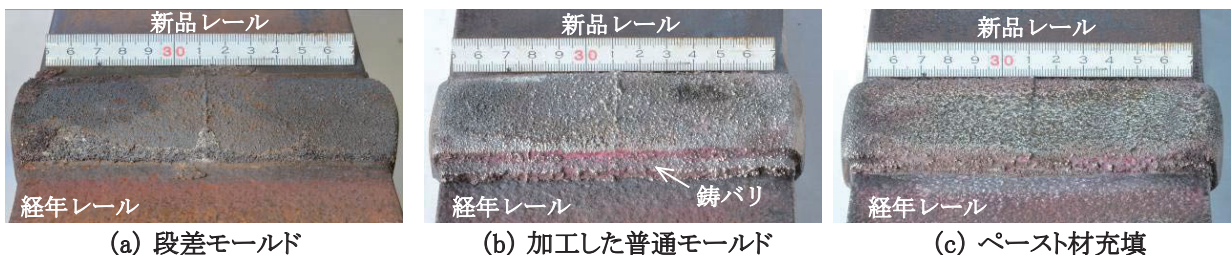


図9 作製した試験体レール底面の余盛付け根部の状態

表3 超音波探傷試験および曲げ疲労試験結果

TPNo.	超音波探傷試験結果*1	応力全振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	荷重範囲 (kN)	繰返し数 (回)	破断の有無
F1	B2:1級 (B1:1級)	180 (210~30)	28.7~200.9	2,000,000	未破断
F2	B2:1級 (B1:2級)	"	"	2,000,000	未破断
F3	B2:1級 (B1:2級)	"	"	2,000,000	未破断
F4	B2:2級 (B1:2級)	"	"	350,000	破断

\*1 B2:底部二探触子法 (底部側面の余盛研削後), B1:底部側面からの一探触子法

の余盛をグラインダ研削して探傷不能領域をなくした結果、底部二探触子法でも1~2級と判定された。

#### 4.2 曲げ疲労試験

底部上面余盛部にブローホールが生じた撤去溶接部に対し、レール底部領域に引張応力の作用する頭部上向き (HU) 姿勢にて、支点間距離 1,300mm, 中央載荷点距離 150mm, 繰返し速度 3Hz 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>, 応力全振幅を営業線で疲労損傷に至る可能性が低いと考えられる 180N/mm<sup>2</sup> とする片振り条件<sup>2)</sup>を採用し、繰返し数 200 万回を限度とした。表3に超音波探傷試験および曲げ疲労試験結果を示す。

曲げ疲労試験の結果、応力全振幅 180N/mm<sup>2</sup> の条件下では、底部二探触子法で1級と判定された撤去溶接部 (TPNo.F1~F3) は、200 万回の繰返し荷重を受けても破断に至らなかった。また、試験前後で実施した超音波探傷試験結果に変化は認められないことから、ブローホールから疲労き裂は進展していないと判断される。一方、底部二探触子法で2級と判定された溶接部 (TPNo.F4) は、35 万回の繰返し数で破断に至っている。

以上のことから、テルミット溶接部の底部領域における良否判定は、表面きずの有無によらず、底部二探触子法による超音波探傷検査 (底部側面の余盛を研削する) で評価することとし、1 級までを合格とすることを提案する。

#### 5. まとめ

新品レールと経年レールとの溶接試験、および底部上面余盛部にブローホールが発生したテルミット溶接部に対する継手性能試験の結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) テルミット溶接部における表面きずの発生は、レー

ル表面の錆ではなく、レールとモールドとの隙間が大きくなる経年レール側のおご部と底面に、入り込んだ溶鋼と目地砂の水分との接触により生じたガスに起因しているものと判断した。

- (2) レールとモールドとの隙間にペースト材を充填した結果、ブローホールの防止効果が認められた。しかしながら、隙間への確実な充填は難しいため、接合するレールに 3mm 以上の段差がある場合には、段差モールドの使用を推奨する。
- (3) 底部領域における仕上り検査では、表面きずの有無によらず、底部二探触子法による超音波探傷検査 (底部側面の余盛を研削する) で評価することとし、1 級までを合格とすることを提案する。

#### 6. おわりに

標準施工条件の遵守および施工直後に実施される仕上り検査技術の向上により、折損に至るテルミット溶接部はほとんど見られなくなった。

本検討によって、ブローホールの表面きず発生を防止するためには、モールドとレールとの隙間を極力小さくすることが重要であることが明らかとなった。また、これを達成するためには、段差モールドの使用が最も有効であることを確認した。したがって、発注元である鉄道事業者が段差モールドの適切な使用を促し、表面きず発生による再溶接施工が皆無になることを期待する。

#### 文献

- 1) 深田康人: レールのテルミット溶接法と最近の技術動向, 鉄道総研報告, Vol.15, No.4, pp.5-8, 2001
- 2) 辰巳光正他: エンクローズアーク溶接部の評価と判定基準, 鉄道総研報告, Vol.14, No.4, pp.37-42, 2000