

# テルミット溶接部に発生した凝固割れの 検知手法と補強方法の開発

軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室  
エキスパートマネージャー 寺下 善弘

# 背景・目的

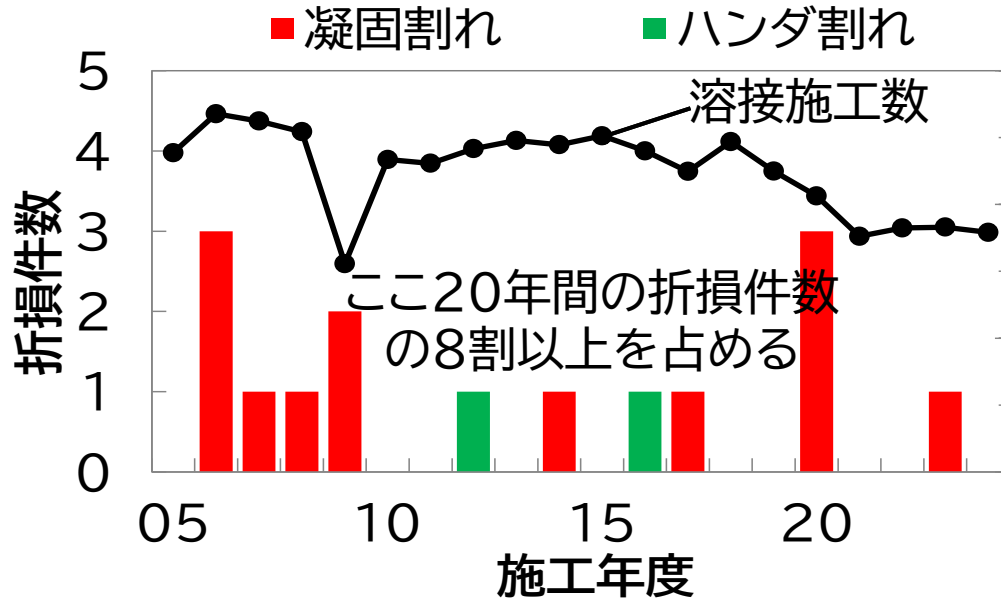
- 他のレール溶接法と比べて曲げ疲労強度が相対的に低い(改良テルミット溶接法を提案済)
  - 施工時に稀に発生する凝固割れ(溶鋼の凝固段階でレールがわずかに外側に動くことで発生する溶接欠陥)を検査で見落とした場合に、早期折損につながるおそれがある
- 輸送障害の影響が大きい新幹線高速区間での採用には慎重な姿勢がとられてきた

**目的** 発生した凝固割れを確実に検知し、補強して輸送障害を最小化(徐行なし)する

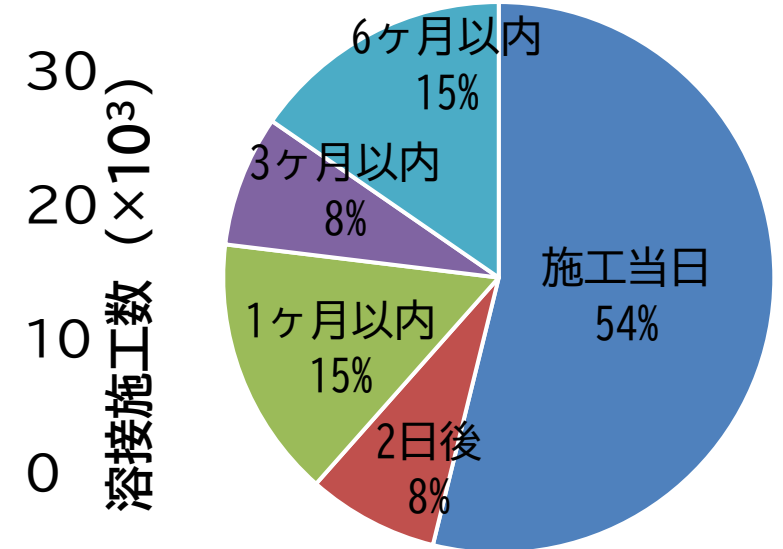
※凝固割れを再現することが難しく、対策を検討するための取り組みが進まなかった



凝固割れの破断面



テルミット溶接部の折損原因の推移

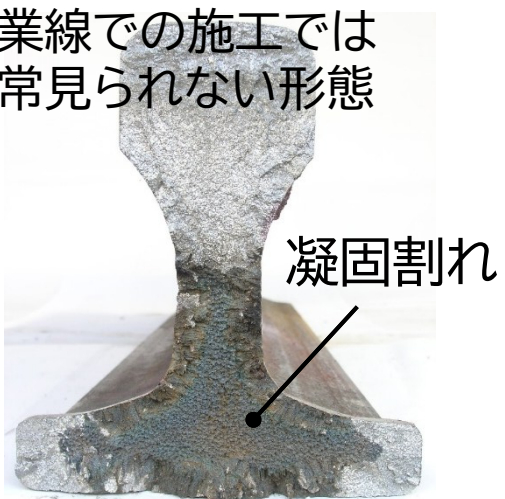


凝固割れから折損に至るまでの期間

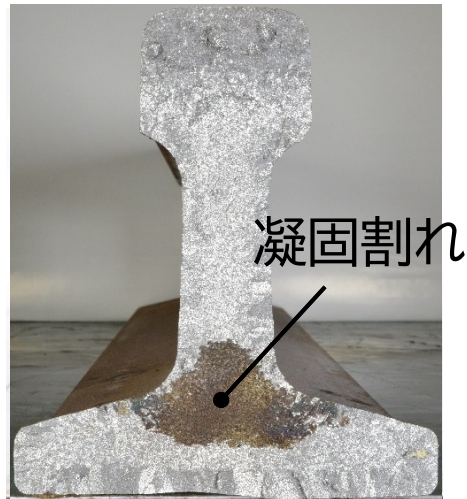
1. 凝固割れを高精度で再現する方法の確立
2. 凝固割れ検知方法の検討
3. 凝固割れ検査補助治具の開発および検知性能の検証
4. 凝固割れ補強治具の検討
5. 凝固割れ補強治具の開発と補強効果の検証
6. まとめと成果の活用

# 1. 凝固割れを高精度で再現する方法の確立

営業線での施工では  
通常見られない形態

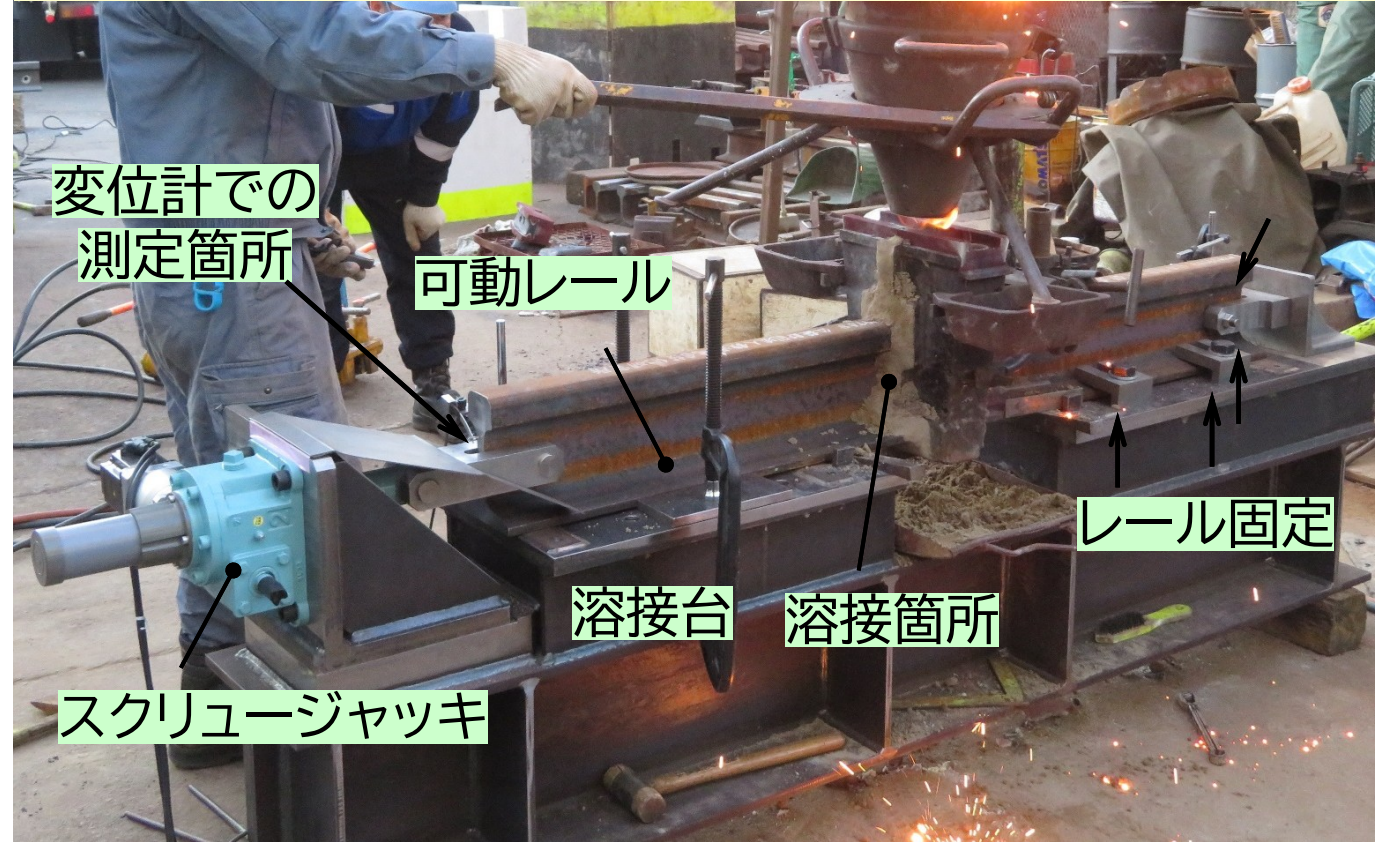
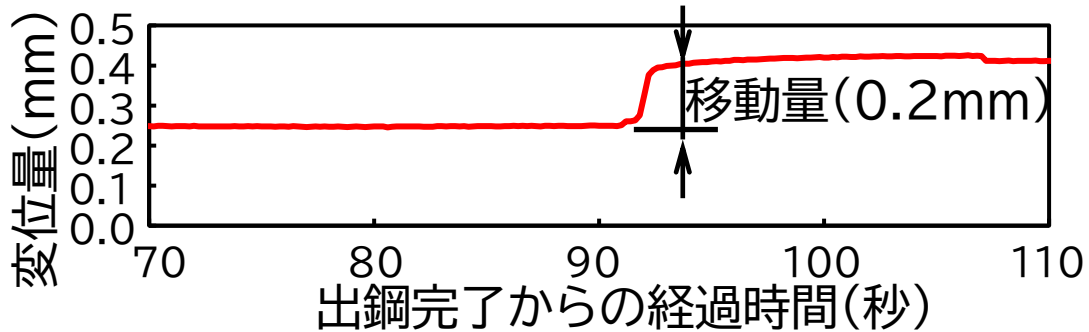


表面まで開口  
(過去の再現試験)



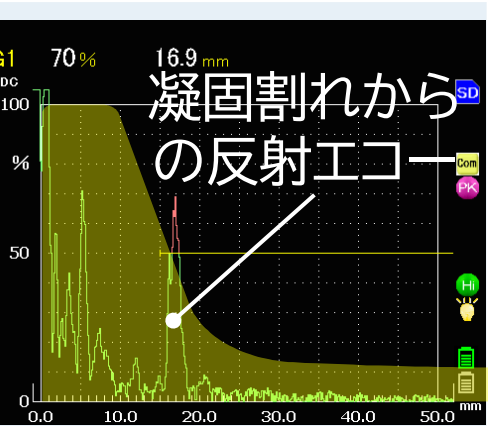
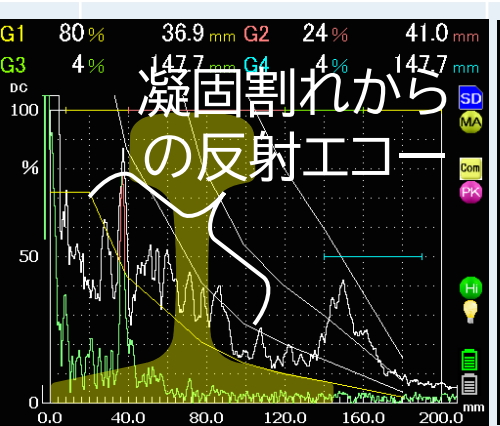
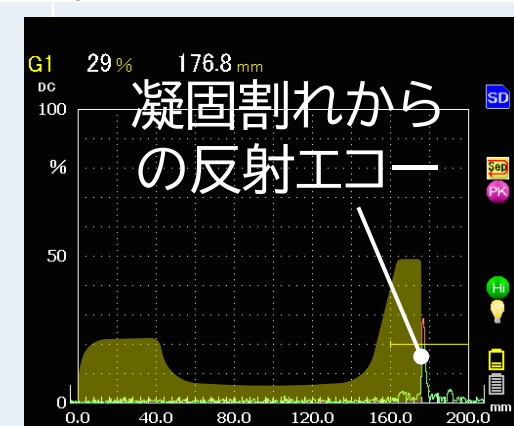
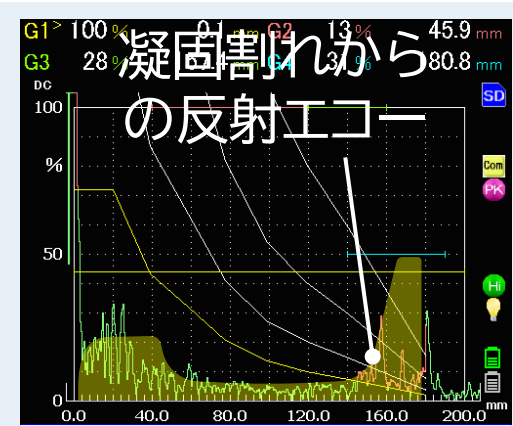
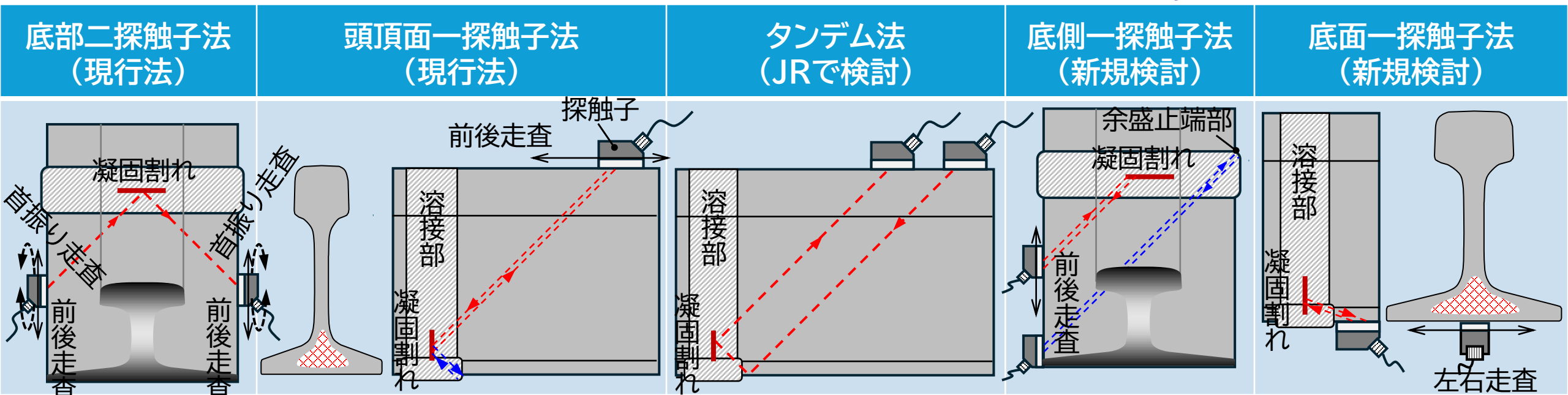
凝固割れ  
再現例

出鋼完了から90秒程度のタイミングで、瞬間的な移動量を0.2~0.5mm程度に抑えることで営業線で発生する凝固割れが再現可能



- ・溶鋼の凝固段階でレールの引張量と速度を制御可能な再現装置を開発
- ・営業線における実施工で発生する凝固割れを数多く再現(再現率30%→80%以上)

# 2. 凝固割れ検知方法の検討



再現した26本の凝固割れ試験体に対して、各探傷手法を適用し、検知率を評価

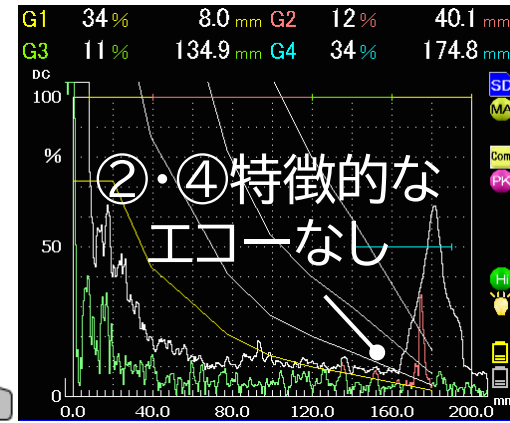
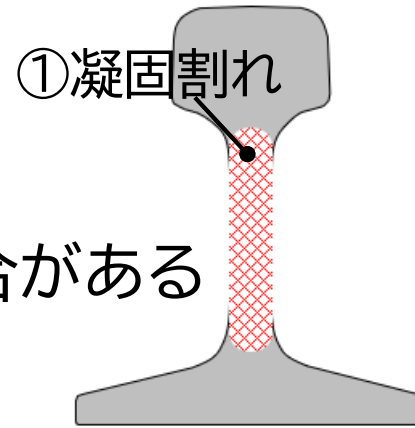
# 2. 凝固割れ検知方法の検討

各探傷方法における凝固割れの検知率

探傷方法	①底部二探	②頭頂面一探	③タンデム	④底部側面一探	⑤底面一探
検知率	96%	85%	68%	65%	92%

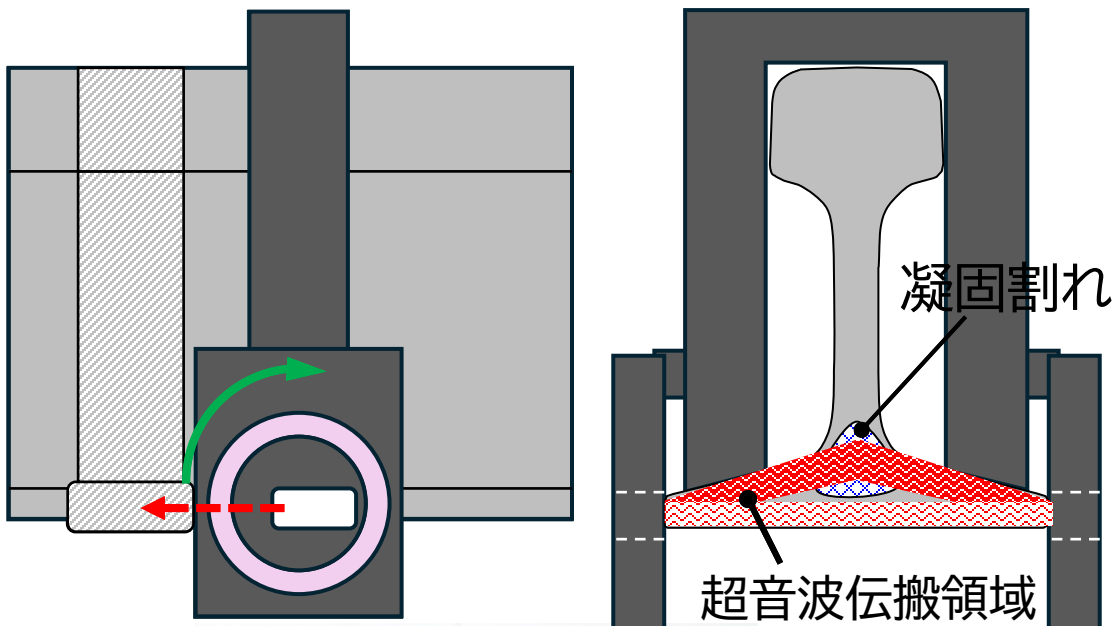
## 探傷手法の特徴

- ①: 腹部の凝固割れは検知できない
- ②: 凝固割れ面の形態により反射エコーが得られない場合がある
- ③: 底部領域の下側に発生した凝固割れは検知できない
- ④: ②と同様、凝固割れ面の形態により反射エコーが得られない
- ⑤: 腹部は検知できない、鑄バリが発生していると除去が必要

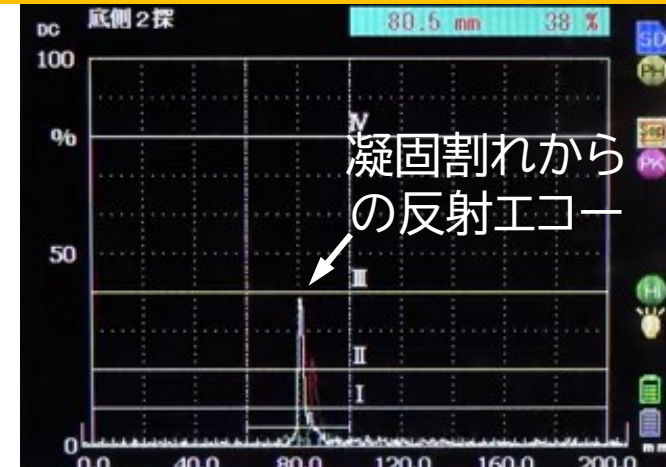


・ 現行の底部二探触子法が最も検知率が高く、有効なことを確認  
 ・ 探触子の前後走査だけでなく、超音波の入射点を底部側面の中心より下側から外れることなく首振り走査するための熟練技量が必要

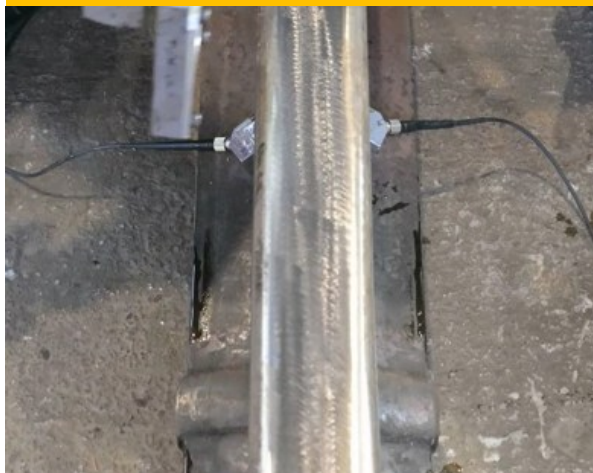
# 3. 凝固割れ検査補助治具の開発



## ○手探傷(現行の底部二探触子法)



## ○検査補助治具



凝固割れに特化した探触子走査により数秒で割れを検知

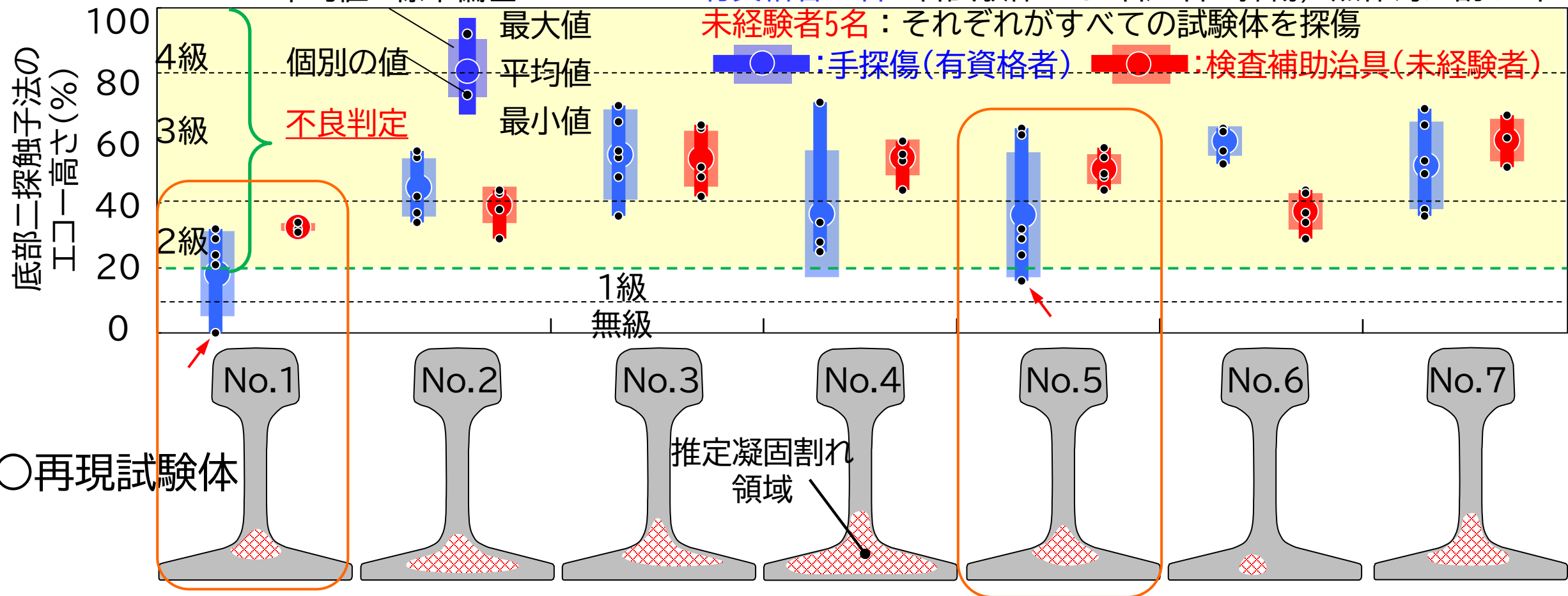
# 3. 検査補助治具の性能検証

平均値±標準偏差

有資格者29名：各試験体とも5名/6名が探傷，無作為に割り当て

未経験者5名：それぞれがすべての試験体を探傷

○：手探傷(有資格者)    ●：検査補助治具(未経験者)



- ・有資格者でも不良判定できなかつた下首部の凝固割れを未経験者全員が確実に検知
- ・手探傷と同等以上の結果を安定して得られ、探傷者によるばらつきも大幅に低減

# 4. 凝固割れ補強治具の検討

122kN(底面100MPa)

・GS用補強継目板  
(既存)

・補強治具(案1)

・補強治具(案2)

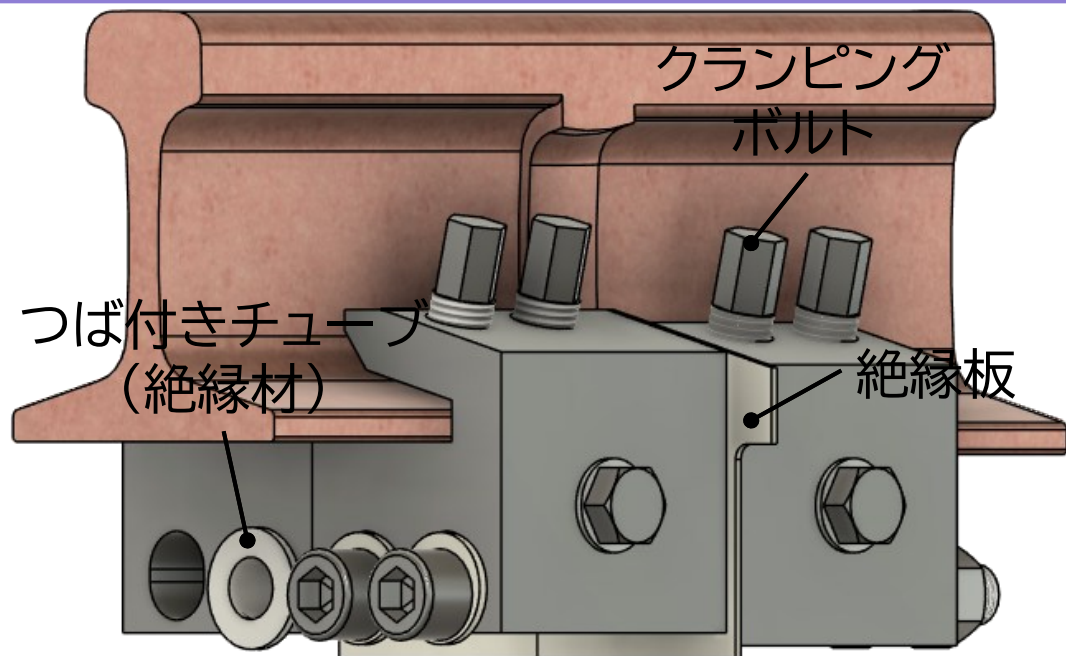
応力測定位置  
(底部側面)

FEM解析結果と静的曲げ試験の結果比較

補強種別	FEM解析		静的曲げ試験	
	応力 MPa	低減率 %	応力 MPa	低減率 %
無補強	86.1		82.4	
GS用 継目板	71.1	17.4	68.8	16.5
補強治具 (案1)	47.7	44.6		
補強治具 (案2)	59.1	31.4	40.2	48.8

FEM解析により効果的な治具の形状を検討し、レール底部に生じる応力が5割程度に低減できる補強治具を開発した

# 5. 凝固割れ補強治具の開発



静的曲げ試験による発生応力測定結果

補強種別	静的曲げ試験(4mm段差)	
	応力(MPa)	低減率(%)
無補強	103.1	—
補強治具(4分割)	64.2	37.6

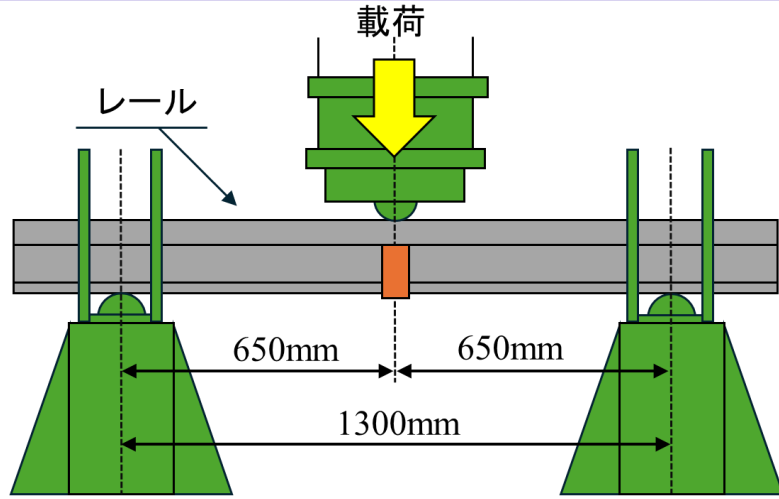
絶縁抵抗試験結果

測定箇所	乾燥状態	浸水後
レール間	100MΩ以上	0.05MΩ以下
レール/ボルト間	100MΩ以上	0.05MΩ以下
接着絶縁レールの基準値(参考)	5MΩ以上	0.5MΩ以上

絶縁機能の評価については、絶縁抵抗試験(JIS E 1125 接着絶縁レール)に準じて、乾燥状態、浸水状態で試験

- ・補強治具の形状を4分割とし、絶縁部材を追加することで、絶縁性能を確保
- ・レール段差があっても凝固割れを補強可能な補強治具を開発(発生応力3割減)

# 5. 補強効果の検証



凝固割れ再現試験体の曲げ疲労試験結果

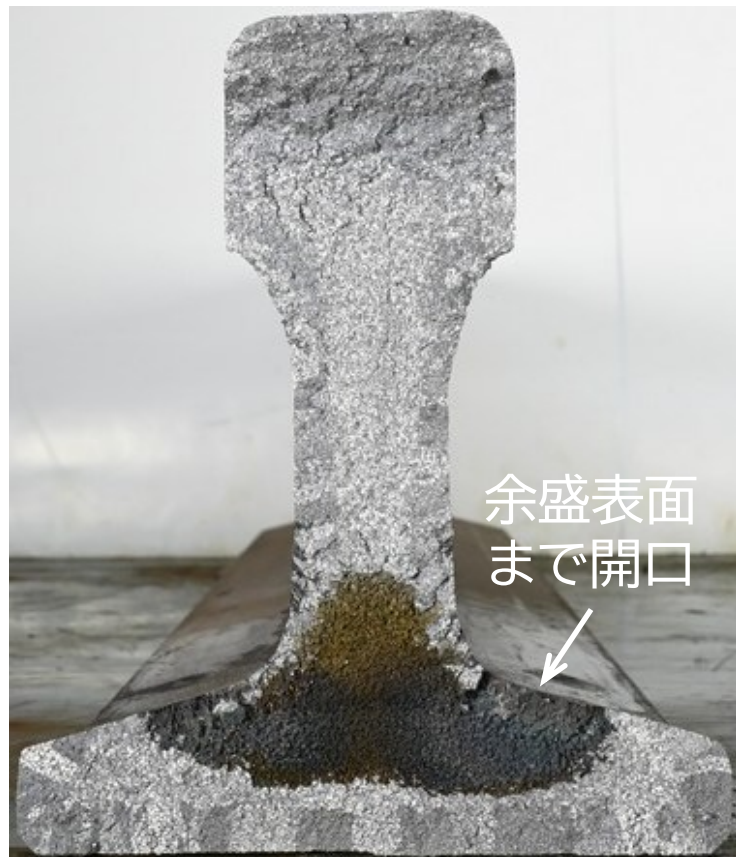
試験体 No.	A (4級) 1400mm <sup>2</sup>	B (3級) 1820mm <sup>2</sup>	C (3級) 2515mm <sup>2</sup>	D (3級) 3150mm <sup>2</sup>
補強治具	20,000回 未破断	20,000回 未破断	6940回 破断	1799回 破断
補強なし	6,453回 破断	1,557回 破断	—	—
破断面				

応力振幅(MPa)	載荷荷重(kN)
150(96-246)	116-300
<ul style="list-style-type: none"> <li>・支点間隔1.3m(3点曲げ)</li> <li>・軸力742kN 設定温度-40°C相当</li> <li>・IJ継目板に生じる最大応力相当</li> <li>・載荷回数20,000回 (16両編成約560本走行相当)</li> </ul>	

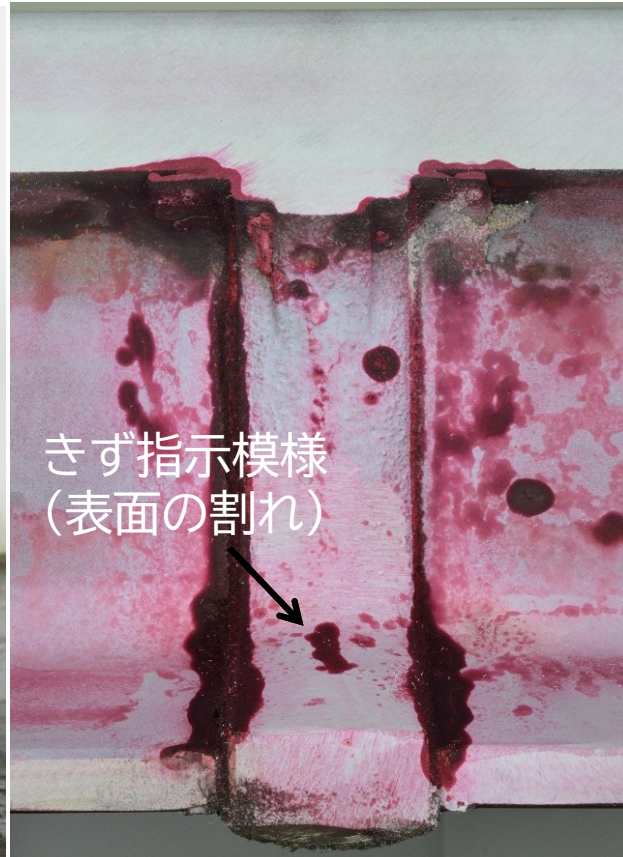
・凝固割れが内部に留まる形態であれば、1日間通常走行相当で破断しないことを確認  
 ・余盛表面まで達しているか否かが補強の可否の判断基準とできることを明らかとした

# 5. 補強可否の判断基準と施工マニュアルの作成

## 凝固割れ用検査補助治具および凝固割れ補強治具の施工マニュアル



補強不可な凝固割れ



浸透探傷検査結果

補強不可の場合: 補強継目板を装着し、徐行運転の措置を行うことを想定

### 付属資料 凝固割れ用検査補助治具および凝固割れ補強治具の施工マニュアル

#### 1. はじめに

本マニュアルは、凝固割れが生じたテルミット溶接部に対する超音波探傷用の検査補助治具の使用手順および補強可否の判定方法ならびに補強治具の施工方法を示したものである。

#### 2. 凝固割れ検査補助治具の概要および使用手順

図1に、凝固割れ検査補助治具を含む超音波探傷検査装置の構成要素を示す。

以下に凝固割れ検査補助治具を用いた超音波探傷検査の手順を示す。

##### 【手順①】 治具の取り付け

レールに凝固割れ検査補助治具を取り付ける。なお、余盛端部に治具が確実に接触することを確認する。ポイント: 余盛端部に治具が接触していない場合、実際に接触させる。特に、底部側面に錆バリが存在するため、錆バリの有無を事前に確認し、必要に応じて

##### 【手順②】 探触子の挿入

探触子に接触媒質(ソニックコート、機械油等)を塗布する。ポイント: 探触子の挿入孔は左右で非対称形状とする。

##### 【手順③】 探傷の実施

基準感度に設定された底部二探触子法の探傷条件を設定する。ポイント: 探傷条件を設定する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順④】 探傷結果の確認

探傷結果を確認する。ポイント: 探傷結果を確認する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑤】 探傷結果の記録

探傷結果を記録する。ポイント: 探傷結果を記録する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑥】 探傷結果の報告

探傷結果を報告する。ポイント: 探傷結果を報告する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑦】 探傷結果の整理

探傷結果を整理する。ポイント: 探傷結果を整理する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑧】 探傷結果の保存

探傷結果を保存する。ポイント: 探傷結果を保存する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑨】 探傷結果の削除

探傷結果を削除する。ポイント: 探傷結果を削除する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

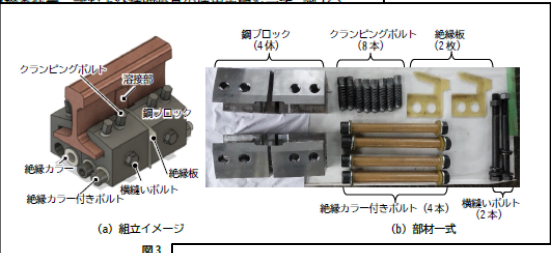


図3 凝固割れ補強治具の組立イメージおよび部材一式

#### 5. 凝固割れ補強治具の取り付け方法

##### 【手順①】 治具の取付け

レールに凝固割れ補強治具を取り付ける。ポイント: 余盛端部に治具が確実に接触することを確認する。

##### 【手順②】 探触子の挿入

探触子に接触媒質(ソニックコート、機械油等)を塗布する。ポイント: 探触子の挿入孔は左右で非対称形状とする。

##### 【手順③】 探傷の実施

探傷結果を確認する。ポイント: 探傷結果を確認する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順④】 探傷結果の記録

探傷結果を記録する。ポイント: 探傷結果を記録する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑤】 探傷結果の報告

探傷結果を報告する。ポイント: 探傷結果を報告する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。

##### 【手順⑥】 探傷結果の整理

探傷結果を整理する。ポイント: 探傷結果を整理する際は、探傷結果を正確に反映させるため、探傷速度を適切に設定する。



図4 凝固割れ補強治具の取付け手順



図5 補強の有無の確認

# 6. まとめ

## 凝固割れの確実な検知

- 高度な探触子の走査技量を必要とせず、**現行の50%以下の探傷時間**で凝固割れを検知可能な**検査補助治具を開発**
- **検査補助治具を用いて、未経験者が数秒で有資格者並みの凝固割れ検出精度を達成できることを確認**

## 凝固割れの補強(輸送障害の最小化)

- FEM解析および曲げ疲労試験により、**レール底面応力150MPa(加えて設定温度から40℃低下した軸力)**相当の荷重下で1日間の車輪通過回数までレールを折損させない**絶縁性能を有した補強治具を開発**
- 曲げ疲労試験により、**凝固割れが余盛表面まで達しているか否か**が補強の可否の判断基準とできることを明らかとした(浸透探傷検査を適用)。なお、浸透探傷検査により補強できないと判定した場合は、**現行の補強継目板を装着し、徐行運転の措置を行うことを想定**

## 6. 成果の活用

- **検査補助治具/補強治具**は商品化を予定しており、施工現場で稀に発生する凝固割れからの折損防止策として提供でき、輸送障害の最小化が期待できる。
- 検査補助治具の取り扱い、補強の可否の判定方法並びに補強治具の取り付け手順を示した**施工マニュアル**を作成しており、凝固割れからの折損対策の習得支援に活用できる。

- 検査補助治具

寺下善弘:テルミット溶接部の凝固割れ検査補助治具の開発, 新線路, Vol.80, No.2, pp.37-39, 2026

- 補強治具

寺下善弘, 伊藤太初:有限要素解析によるテルミット溶接部用補強治具の検討, 日本鉄道施設協会誌, Vol.64, No.3, pp.54-57, 2026