

室内試験による転がり接触疲労を受けた鉄道用レール鋼の残留応力変化  
Accumulation of Rolling Contact Fatigue and Residual Stresses  
in Railway Rail Steel by Laboratory Tests

鉄道総研（正）\*兼松 義一

Yoshikazu Kanematsu\*

\*Railway Technical Research Institute

1. はじめに

鉄道レールが果たす主たる役割は、車両を安全かつ円滑に走行させることにあり、レールは鉄道を構成する重要な部材のひとつである。レールを使用する上で問題となる事象の一つに転がり接触疲労損傷の一種のシェリングがある。シェリングは、車輪との繰り返し接触によってレール表層に微小き裂が形成され、一部のき裂が進展すると考えられている。シェリングが進展するとレール破断に至る場合があるため、レール削正等の保守管理が行われている<sup>2)</sup>。

佐々木らは、回折 X 線を用いた三軸応力測定法により、実験されたレールの測定を先行して実施<sup>3)</sup>している。敷設されたレールの残留三軸応力解析の結果から照面（車輪との接触による金属光沢部）の位置によっては残留せん断応力が変化すること、シェリング形成部では残留せん断応力が解放する傾向があることが報告されている。しかし、残留せん断応力値とシェリングに至る可能性のある微小き裂形成等の関係を整理するまでには至っていない。そこで、転がり接触疲労による微小き裂と、残留応力値の間に相関関係を見出し、微小き裂の定量的な評価が可能になれば、効率的なレール削正のメンテナンスへの活用の可能性があると考えた。

本研究では、車輪とレールの接触を模擬した二円筒試験機を用いて、すべり接触等のレールが受ける転がり接触状態別に、繰り返し回転数毎の残留応力の変化を基礎的に把握することを目的に実施した。

2. 二円筒転がり疲労試験

鉄道総研が所有するクリープ領域内転動疲労試験機は、二つのリング状試料（ $\phi 50\text{mm}$ ）を任意の負荷（ばね機構）を与えて接触させ、ギア比によって設定した異なる速度で回転させることにより、転がりすべり接触状態を模擬している。試験機の外観を Fig.1 に示す。

本試験では、試験片は JIS E 1101 に規定される普通レールから試験輪を採取した。相手材には、JIS E 5402 に規定される SSW- QS 実車輪から採取した。互いの断面形状の両端の直径に  $\pm 0.05\text{mm}$  程度の勾配をつけており、レール輪および相手材の直径差によってすべりを付与する形状とした。試験片の直径差で付与されるすべり率は約  $\pm 0.18\%$  である。

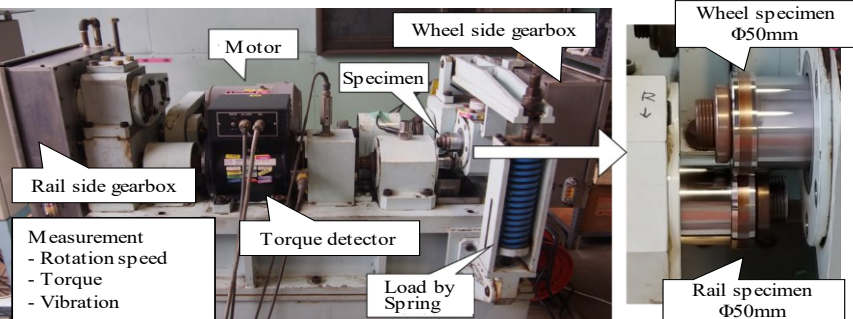


Fig. 1 Twin-disc rolling contact fatigue tester

Table 1 Test conditions

Contact pressure	0.86 GPa	
Lubrication	Dry	
Slip rate by gear ratio	0%	-0.22%
Assumed slip rate: Gear + Diameter		
Small diameter side (49.95mm)	-0.18%	-0.40%
Center (50mm)	0%	-0.22%
Large diameter side (50.05mm)	0.18%	-0.04%
Rotation number of X-ray measurements	0, 100, 500, 1000, 3000, 5000, 10000, 30000, 50000, 100000, 300000	

Table 1 に試験条件を示す。接触面圧は、在来線車両相当の輪重の面圧  $0.86\text{GPa}$  とした。潤滑条件はいずれも乾燥状態で、ギア比による設定すべり率は  $0\%$  と  $-0.22\%$ （マイナスはレールがすべりを受ける方向）の 2 水準とした。上述した試験片の接触面の勾配形状から、6 水準のすべりが生じていると想定される（以降、想定すべり率と呼ぶ）。X 線測定を実施した回転数は  $100 \sim 30$  万回である。

3. X 線三軸残留応力測定

X 線残留応力測定は、レール輪の転走面について、直径差がない部分（中央部）、直径差が小さい部分（小径部）、直径が大きい部分（大径部）の三箇所を測定点とした。Fig. 2 に X 線応力測定時の座標系を示す。本測定は、パルステック社製  $\mu$ -X360s の計測装置を用いて、二次元検出器による X 線残留応力測定法（ビーム径約  $2\text{mm}$ ）を用い、二次元検出器で得られた回折情報に佐々木の三軸応力測定法<sup>4)</sup>を適用して三軸残留応力を測定した。

測定した残留応力（垂直応力，せん断応力）のうち，特徴的な傾向が見られたせん断応力  $\tau_{zy}$  の測定結果を Fig. 3 に示す．せん断応力  $\tau_{zy}$  は，Fig. 2 の座標系で示すように，回転軸断面（X 軸）における回転方向と深さ方向に働くせん断応力である．今回の試験結果における，残留せん断応力  $\tau_{zy}$  の特徴を記す．

- ① 想定すべりの方向，すなわち想定すべり率がプラス値とマイナス値によって残留せん断応力  $\tau_{zy}$  の符号が反転していた．
- ② 想定すべり率 0% では，残留せん断応力  $\tau_{zy}$  はゼロに近い値で推移していた．
- ③ 接触面の勾配による試験片直径差に起因したすべりが付与された部分では，回転数の増加に伴い絶対値が増加する傾向がみられた．ただし，想定すべり率 -0.22% および -0.40% では回転数 10 万回以上では変化が見られなかった．

#### 4. 金属組織観察

繰り返し回転数が 30 万回に達したレール輪について，金属組織観察を行った．Fig. 4 に想定すべり率 +0.18% と -0.18% のレール輪の回転軸断面を 5% ナイタルで腐食した金属組織を示す．転走面表層には，塑性流動が形成されているが，すべりの方向（符号）によって，塑性流動の向きが反転していることがわかる．Table 2 には，各想定すべり率のレール輪の円周 1/4 の観察領域におけるき裂個数および塑性流動深さを示す．想定すべり率が大きいほどき裂個数が多く，塑性流動が深くなる傾向が見られた．

#### 5. 考察

##### 5.1 塑性流動層と残留せん断応力 $\tau_{zy}$ の関係

想定すべり率がマイナスでは， $\tau_{zy}$  は負の値となり，プラスでは  $\tau_{zy}$  は正の値となっていた．また，塑性流動の向きとも対応しており，残留せん断応力  $\tau_{zy}$  の符号はレールが受けたすべりの方向に対応していると考えられる．

##### 5.2 残留せん断応力 $\tau_{zy}$ と塑性流動に起因したき裂

想定すべり率が -0.22% および -0.40% では，き裂が顕在化していた．また，両方とも塑性流動層深さは約 70  $\mu\text{m}$  であり，残留せん断応力  $\tau_{zy}$  は 150 MPa であった．一方，想定すべり率が -0.18% 以下では，き裂や塑性流動は上記位置と比較すると軽微であり， $\tau_{zy}$  は 100 MPa 以下であった．これらより，今回の試験条件では  $\tau_{zy}$  は，すべりに起因した塑性流動やき裂の形成の程度を評価する指標として使用できる可能性が考えられる．

#### 6. おわりに

二円筒転がり接触疲労試験を用いて転がり疲労試験を行い，回折 X 線による残留応力測定を行った．また 30 万回後の試験片の金属組織観察（塑性流動・き裂の形成）の結果から，今回の試験条件では  $\tau_{zy}$  は，すべりに起因した塑性流動やき裂の形成の程度を評価する指標として使用できる可能性があると考えられる．

#### 文献

- 1) Grassie SL: Squats and squat-type defects in rails; the understanding to date, Proc Inst Mech Eng F: J Rail Rapid Transit (2011).
- 2) 小関・片岡：レールの信頼性向上を目的とした研究科初について，JR EAST Technical Review, No.17 (2006).
- 3) 竹橋・佐々木・青木・高橋・鷹合：シェリング損傷レールの X 線三軸応力測定，第 43 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集 (2008) 167.
- 4) 佐々木，広瀬：イメージングプレートによる二次元検出回折像を用いた X 線三軸応力解析，日本機械学会論文集 (A 編)，61 巻，590 号 (1995).

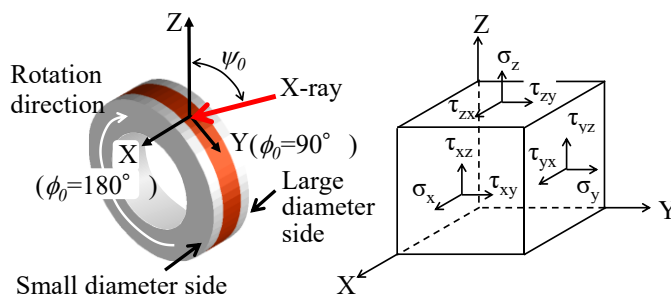


Fig. 2 Coordinate system of X-ray stress measurement

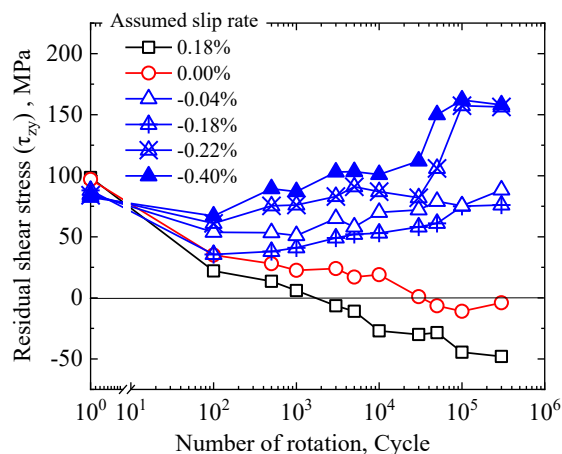


Fig. 3 Results of residual shear stress measurement

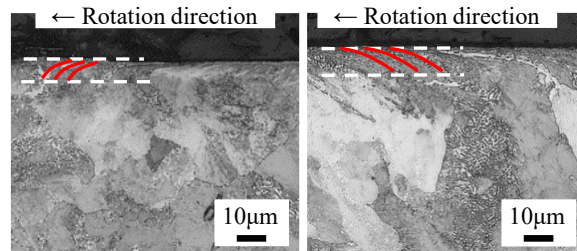


Fig. 4 metallographic observation (Etching)  
Assumed slip rate +0.18(Left), -0.18(Right)

Table 2 Observed cracks and plastic flow depth

Assumed slip rate	Number of cracks	Depth of plastic flow ( $\mu\text{m}$ )
+0.18%	1	8
0%	1	0
-0.04%	3	28
-0.18%	3	12
-0.22%	11	68
-0.40%	31	71