

# 損傷したレールの中性子残留応力解析

## (gauge volume を設定した 2D 検出器方式の適用)

佐々木 敏彦\* 高橋 俊一 松山 綾平 (金沢大学)

鈴木 裕士 盛合 敦 森井幸生 (日本原子力研究開発機構)

舘 宏一 水上 寿夫 東 寛士 (西日本旅客鉄道)

### Neutron Residual Stress Analysis of Damaged Rails

#### (Application of Area Detector Type Technique with Gauge Volume Limiting Slit)

Toshihiko Sasaki\*, Shunichi Takahashi and Ryohei Matsuyama (Kanazawa University),

Hiroshi Suzuki, Atsushi Moriai, Yukio Morii (Japan Atomic Energy Agency),

Hiroshi Higashi, Toshio Mizukami and Kohichi Tachi (West Japan Railway Company)

Limiting gauge volume for an area detector type neutron stress measurement was studied in order to apply to measure residual stresses in rails used in service. A conical slit (a slit with circular groove of 1 mm width) was manufactured and used for the experiment. A simulation study was also conducted on this situation and considered on the result of diffracted profile and stresses to be evaluated. It was found from the experiment that the neutron diffracted beams was able to be obtained when the conical slit was used, and their behavior was almost agreed with the simulation study. It was also found from the simulation study that the stress obtained with the X-ray  $\cos\alpha$  method was attenuated if it was applied to neutron diffraction data as well as if the conical slit was used. The method was applied to measurement of shearing stresses in rails used in service.

**Keywords** : Neutron Stress Measurement, Rails, Residual Stress, Rolling Contact Fatigue.

### 1 緒 言

本研究は、損傷したレール踏面の残留応力を中性子応力測定によって明らかにするための基礎的な検討を行ったものである。中性子法は透過能がX線の約1000倍と言われており、比較的内部の状態の解明に適している。また、Braggの回折条件に基づいて結晶の格子面間隔を基準としたひずみを求めることを基礎とするので信頼性が高いとされる<sup>(1)</sup>。

前報において著者らは、レールに中性子を照射したときに発生する中性子回折環の全体を測定できるイメージングプレート(IP)を用いた応力測定の検討を行い、従来の方法における制約の一部が改善することを報告した<sup>(2-6)</sup>。本研究では、この手法(2D検出器方式)を用いて損傷したレールの残留応力状態の解明に適用した。以下にその結果を紹介する。

### 2 測定方法

Braggの条件を用いると、回折環の半径Rから回折角 $\theta$ やひずみ $\epsilon$ が得られる(詳細は文献(7)参照、以下同様)。続いて、Fig.1に示すように回折環における直径上の対称な4点からのひずみ $\epsilon_a, \epsilon_{\pi+a}, \epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\pi-\alpha}$ から次の $a_1 \sim a_2$ を求める。

$$a_1(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_a - \epsilon_{\pi+a}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})] \quad (1)$$

$$a_2(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\epsilon_a - \epsilon_{\pi+a}) - (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})]$$

$\psi_0=0$ の場合、せん断応力 $\tau_{xz}, \tau_{yz}$ が次式より得られる。

$$\tau_{xz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \left( \frac{\partial a_1(\theta)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0=0} \quad (2)$$

$$\tau_{yz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \left( \frac{\partial a_2(\theta)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0=0}$$

$\tau_{xz}, \tau_{yz}$ が得られると、 $\psi_0=30^\circ$ の回折環から $\sigma_x \cdot \sigma_z$ と $\sigma_y \cdot \sigma_z$ が得られる。 $\tau_{xy}$ については式(1)の $a_2$ を用いる。さらに、基礎式から $\sigma_z$ が得られる。こうして $\sigma_z$ と $\sigma_x - \sigma_z, \sigma_y - \sigma_z$ から $\sigma_x$ と $\sigma_y$ が判明し、すべての三軸応力成分が判明する。本方法(以下STSK法と呼ぶ)はX線回折を対象としているため、中性子回折では誤差が生じ、補正が必要である。補正前の応力を $\sigma^{STSK}_{neutron}$ とすると、offset応力(中性子効果項)の発生と、gauge volume制限スリット使用による減衰(スリット効果)が起こり次式のようなになる。

$$\sigma_{true} = \frac{1}{S} \sigma^{STSK}_{neutron}(\sigma) - \Delta_1 \quad (3)$$

ここで、 $S$ はスリット効果による応力の減衰率(スリット係数)、 $\sigma_{true}$ はgauge volume内の応力(弾性項)、 $\Delta_1$ は中性子効果項を表す。

測定試料は、営業線で使用されたレール(長さ200mm)および未使用のレールを焼鈍したもの(長さ60mm)の2種類である。前者は推定16mmのき裂を内部に有していた。レールの種類はJIS E 1101 60kg 普通レールである。gauge

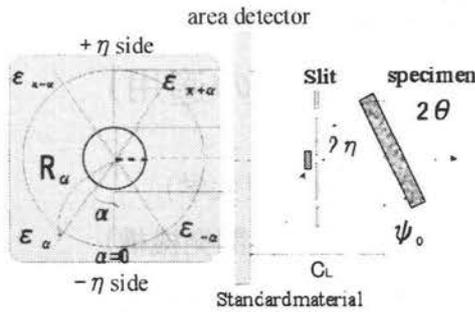


Fig.1 Debye-Scherrer ring and optics used for area detector type X-ray stress measurement and definition of four strains used for stress calculation.

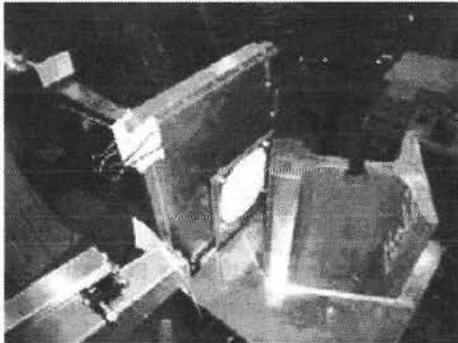


Fig.2 Experimental set-up for area detector type neutron stress measurement..

volume制限スリットを試作して検討した。中性子ビームは、波長約0.22nm, ビーム径5mm (円形), 回折は211回折(フェライト相,  $2\theta=140.11^\circ$ )である。Fig.2に本研究で使用した2D検出器方式の測定装置の外観写真を示す。試作したスリットに対するgauge volumeの深さ方向距離と入射ビーム径の関係を検討した結果、本実験ではgauge volumeの深さ方向の長さは約7.6mmとなる。測定に用いた中性子IPは、寸法250mm×200mm, ピクセルの1辺100 $\mu$ m (設定上), 画像容量10MB, 輝度分解能16bitである。IPとの比較およびgauge volumeの位置の特定のため1次元検出器による測定も併せて実施した。

3 実験結果

レールの頭頂面中央部について、スリットを用いてgauge volumeの深さを变化させた場合、および、比較のためスリットを使用しない場合について検討した。まず、垂直入射に対する中性子回折環を測定し、STSK法を適用してせん断応力 ( $\tau_{xz}$ および $\tau_{yz}$ )を解析した。画像解析を経て回折環から格子ひずみ $\epsilon_\alpha$ を中心角 $\alpha$ が $1^\circ$ 間隔で全周に対して求め、次いで $a_1$ 線図および $a_2$ 線図を求めた。それぞれのグラフの傾きからせん断応力 $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ が決定できる。求められたせん断応力をスリット位置(IP-cs)に対して図示した結果をFig.5に示す。同図は、深さに対するせん断残留応力の分布を表している。IP-cs=44mmにピークが見られる。これはHertzの接触応力に関するせん断応力と類似した傾向である。

次いで、レール中央からGC側に10mm離れた位置およびFC側に10mm離れた位置において、スリットを使用して表

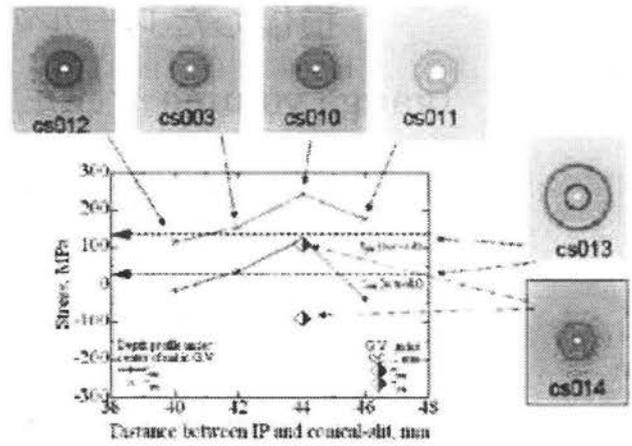


Fig.5 Depth profiles of shearing stresses (under the center of the rail at the surface of rail crown).

面から3mmの深さにgauge volumeの最表面側が位置する場合 (IP-cs=44mm), および、スリットを使用しない場合についてそれぞれせん断応力を測定した。測定されたせん断応力 $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ をレール頭頂面の幅方向に対して図示した結果、次の傾向が見られた。スリットを使用しない場合の測定応力は試料表面から約5mmまで (中性子侵入深さに相当) の領域の平均応力(Laplace応力<sup>(8)</sup>)である。レールの中心からFC側の間はほぼ同様なせん断応力を示したが、GC側では圧縮側に変化していた。GC側には車輪との接触面が存在するのでより大きな接触応力の影響を受けていることと対応している。なお、深さ方向の応力分布がレールの幅方向によって変化している可能性が見受けられた。また、ここでは省略したが $a_1$ 線図および $a_2$ 線図において、スリットを使用した場合に比べ、スリット未使用の場合では曲線状となっている傾向が見られ、深さ方向の応力勾配の影響が考えられる。

5 結 言

レール鋼の211回折 (フェライト相) を用い、スリットによるgauge volumeを限定した中性子回折をIPを用いて測定した。その結果、鮮明な回折データが得られ、標準法と比べても遜色の無い位置分解能が実現可能となる見通しが得られた。これにより、 $d_0$ に関係した測定精度面の改善、試料寸法の自由度、せん断応力測定の有効性などの特長が今後期待できる。

本報では、損傷を受けたレールの頭頂面の残留応力測定に適用し、せん断応力分布の測定結果について述べた。レールの転動接触において重要なせん断応力の解明は、従来、中性子応力測定分野では進んでいなかったが、本2D検出器法の適用によってその改善が期待できる。

終わりに、鉄道レール問題に関して鉄道相技術研究所の石田誠部長, 岩淵研吾室長, 佐藤幸雄主任研究員よりご教示, ご支援を頂いたことを記し, ここに感謝します。なお, 本研究は科学研究費補助金交付 (基盤研究 (c), 課題番号19560138) の支援を受けたものである。

(紙面の都合により参考文献省略)