

## 放射光 X 線を利用した車輪踏面下の残留応力分布計測 Measurement of Residual Stress in a Wheel Using Synchrotron Radiation X-ray

赤坂 幸広<sup>a</sup>, 野中 勇<sup>a</sup>, 市川 裕士<sup>a</sup>, 瀬戸脇 創太<sup>a</sup>, 菖蒲 敬久<sup>b</sup>, 桐山 幸治<sup>b</sup>  
Yukihiro Akasaka<sup>a</sup>, Isamu Nonaka<sup>a</sup>, Yuji Ichikawa<sup>a</sup>, Sota Setowaki<sup>a</sup>, Takahisa Shobu<sup>b</sup>, Koji Kiriyaama<sup>b</sup>

<sup>a</sup>東北大学, <sup>b</sup>(独)日本原子力研究開発機構  
<sup>a</sup>TOHOKU UNIVERSITY, <sup>b</sup>JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

鉄道用車輪は、転がり疲労等で、き裂が進展し、割損等損傷に至るのを防ぐ目的で、製造時に車輪踏面から数ミリメートル下までの円周方向に圧縮残留応力が導入されている。本研究は SPring-8 の高輝度・高エネルギー X 線を生かし、試験用車輪を対象に、従来の計測法では困難であった非破壊による表面から深さ数ミリメートルまでの残留応力分布計測を試みた。測定の結果、試験用車輪表面から深さ 2.0 ミリメートルまでの内部残留応力分布を、非破壊・非接触にて 3 方向測定することに成功した。

キーワード： 残留応力、車輪、ひずみスキャンニング法

### 背景と研究目的：

鉄道は定時性に優れ、他の交通機関と比べ近・中距離における大量輸送に優れている。そのため、我が国のように都市間距離が短い場合には他の交通機関よりも利便性が高いこともあり、鉄道が大きく発展しており、人員輸送や貨物輸送に欠かすことのできない交通機関として重要な役割を担っている。また、単位輸送量当たりの消費エネルギーが他の交通機関と比べ極めて低いため、近年環境に優しい交通システムとして注目されており、他の交通機関から鉄道への移転を行うモーダルシフトにより、輸送分野から排出される CO<sub>2</sub> 削減に大きく寄与すると考えられる。このように社会インフラとして欠く事のできない鉄道の安全性・信頼性の確保は重大な責務である。

鉄道用車輪は運転中に長期間にわたりレールとの接触応力を繰返し受けるため、転がり疲労と呼ばれる損傷が発生することが知られている。このような実働荷重による疲労は、実験室内の疲労試験のような一定振幅荷重の繰返しとは異なり、不規則にその振幅・周期が変動する。特に、鉄道用車輪は長期間高速回転を続ける部材であるため、その疲労蓄積回数は他の部材と比べて非常に多い。また、近年、鉄道は更なる高速化が進められている。それに伴い車輪への負荷、疲労蓄積及びブレーキ使用時にレールと車輪間で発生するすべりに伴う摩擦熱の増大による熱応力の上昇などが考えられるため、厳しい環境下に置かれる車輪の安全性を確保する事が重要な課題であると言える。

一方、鉄道用車輪には、転がり疲労等で、き裂が進展し割損等損傷に至るのを防ぐ目的で、製造時の熱処理によって、レールと接する踏面に圧縮残留応力が導入されている。この手法は長い経験のもとに編み出された手法であり、この熱処理は古くから用いられている製法である。しかし、ヘルツ力と呼ばれる接触応力は、表面ではなく表面直下数ミリメートルの所で大きくなり、き裂は表面下から発生するため、き裂発生を抑えるためには踏面ではなく、その下に圧縮残留応力を付与する方が効果的であると言える。

これまで、実験室 X 線回折法を用いることで材料表面近傍数ミリメートル程度の領域の平均的な残留応力状態は把握する事が可能であった。この方法を応用して、表面を逐次電解研磨する事で、表面下の残留応力分布を知る事ができる。しかし、この方法では表面を除去することにより、残留応力解放による計測精度が低下することが問題となる。正確な残留応力分布を測定するためには、できる限り実機に近い試料を用いて、応力解放による影響を除去して測定する事が求めら

れる。放射光 X 線同様に車輪踏面下までの残留応力を計測可能な別の新手法である中性子残留応力測定法についても、空間分解能を 1 ミリメートル以下にすることが原理上困難となっており、今回必要な車輪踏面下数ミリメートルまでの残留応力を精度良く計測することは難しい。更に、ひずみゲージを使用した切り取り法による残留応力測定法についても、部材切り取り時の残留応力解放という問題に直面する。SPring-8 の放射光 X 線は、高輝度・高エネルギーという特徴を有し、その特性により車輪のような鉄鋼の表面下数ミリメートルまでにおける局所的な内部残留応力分布を非接触・非破壊にて測定可能であり、これまでの課題を解決できることが期待される。そこで、本研究では試験用鉄道用車輪を対象に、SPring-8 の放射光 X 線を利用し内部残留応力分布を測定することで、今後の製法・設計の改善のための基礎的なデータを入手する事を目的とする。

**実験：**

実験は、BL19B2 第 2 ハッチにて実施した(Fig.1)。測定はひずみスキャンニング法<sup>[1]</sup>を用い試料内部の残留応力ひずみ分布計測を実施した。

○実験条件

- ・エネルギー：単色 X 線，72keV
- ・検出器：CdTe 検出器
- ・スリットサイズ：入射側 0.2×2.0mm<sup>2</sup>，受光側 0.2×3.0mm<sup>2</sup>
- ・回折面： $\alpha$ -Fe(211)， $2\theta_0=8.5795^\circ$
- ・試料：Fig.2 に示すように、試験用車輪(鉄道用をモデル)材料から 2 種類の形状の試料を作製した。寸法は試料 A，B，C 共に 120mm×60mm×5mm。

○測定

Fig.3 に示す試料 A からひずみ $\epsilon_y$ ，試料 B からひずみ $\epsilon_x$ ， $\epsilon_z$  を測定することにより 3 方向の応力を算出するため、自動ステージに設置した試料を xyz 方向に適時走査しながら、内部ひずみ 2 次元マッピングを行った。ここで、焼鈍を施した試料 C(試料 A と同等サイズ)に関しても同様の測定を実施し、以下の式を用いてひずみ $\epsilon$ を求めた。

$$\epsilon = (d - d_0) / d_0 = (\sin\theta - \sin\theta_0) / \sin\theta$$

ここで、 $d$  は試料の格子面間隔、 $d_0$  は焼鈍試料の格子面間隔、 $\theta$  は試料の回折角、 $\theta_0$  は焼鈍試料の回折角である。3 方向の応力は、Webster ら<sup>[2]</sup>と同様に、この 3 方向のひずみよりフックの法則を用いて求めた。測定は、試料表面を 0 として、0~2.0mm 間を 0.1mm 刻みで実施した。

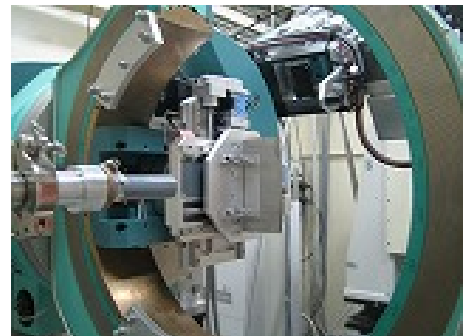


Fig.1 多軸回折計及び測定試料

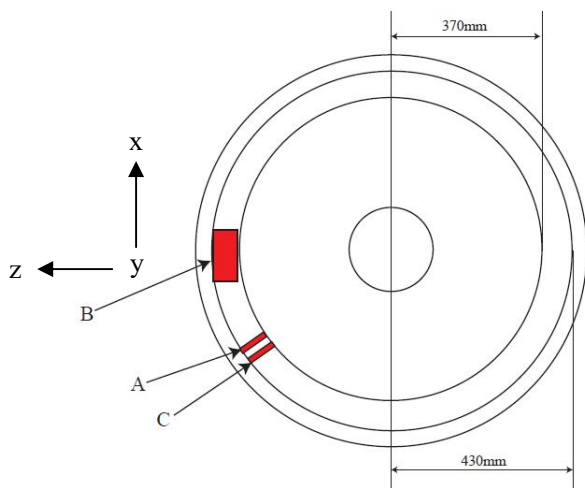
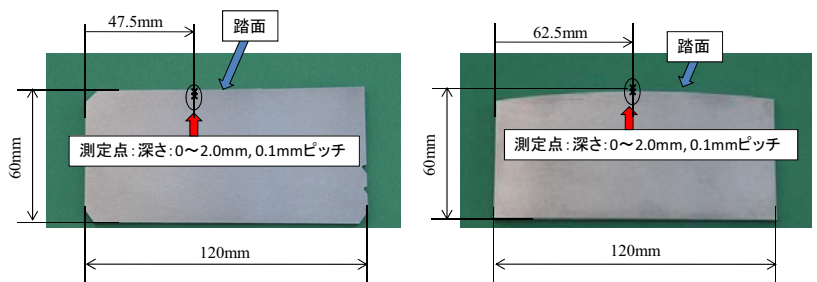


Fig.2 試験用車輪と試料切り出し箇所概念図



(a) A,C 試料

(b) B 試料

Fig.3 試料と測定点

## 結果および考察：

### ○無ひずみの格子面間隔 $d_0$ の決定

ひずみの算出には、無ひずみの格子面間隔  $d_0$  が必要であり、この値が測定精度を大きく左右すると言える。本研究では、 $d_0$  決定のため焼鈍した試料 C を用い、試料表面から深さ 2.0mm までの回折角をひずみスキニング法により実測する方法を選択した。無ひずみ試料から得た回折角の測定結果を Fig.4 に示す。Fig.4 より表面から深さ 0.5mm までの測定において回折角が増減し、それ以降の深さではほぼ一定の値を示した。ここで表面部の回折角度シフトの原因は、光学系により幾何学的に発生する表面効果、および焼鈍時間の不足があげられる。従って本研究における  $d_0$  は、深さ 0.5mm~2.0mm までの回折角の平均値  $d_0 = 0.11692[\text{nm}]$  を採用することとした。

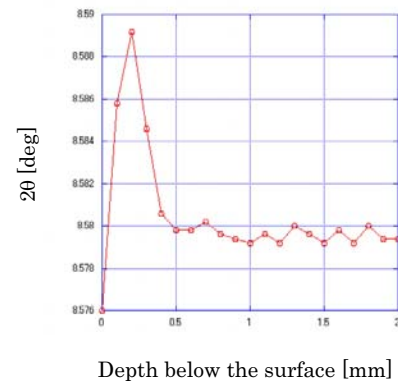


Fig.4 無ひずみ試料の回折角測定結果

### ○残留応力分布

無ひずみ試料と同様に、試料 A,B の各測定点で回折角測定を実施した後、ブラッグの条件よりひずみを算出し、残留応力に換算した結果を Fig.5 に示す。本測定においても表面効果の影響が表れたため、表面は計測していない。深さ 0.1~0.2mm の位置では、 $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  で約-10~-90MPa の圧縮残留応力、また  $\sigma_x$  は 100~150MPa 程度の引張残留応力となった。従って y,z 方向については、製造時の熱処理行程により導入された圧縮残留応力を捉えたものと考えられる。また、いずれの方向についても、深さ 0.2mm~2.0mm の位置では、徐々に残留応力が 0MPa に近づいていくことも確認した。

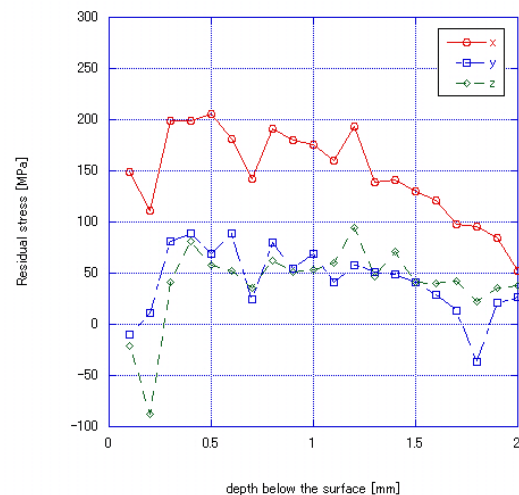


Fig.5 残留応力測定結果

今回の測定により、試験用車輪の表面から深さ 2.0mm までの内部残留応力分布を、非破壊・非接触にて 3 方向測定することに成功した。また鉄鋼材厚 5mm 程度であれば、十分に透過法による内部ひずみ分布測定ができることを明らかにした。本計測で得られた結果については、今後従来法との比較等による詳細な検証を行っていく予定である。

## 今後の課題：

- (1) 実験室 X 線による測定結果の検証。
- (2) 試料表面下の組織観察(SEM, 結晶方位等)により、残留応力と結晶状態に関する検証。
- (3) 表面近傍の測定、および残留応力開放を避けるための肉厚をより厚くした試験片による応力評価を実施するために、高エネルギー、もしくは高輝度な X 線が利用できるビームラインにおける再測定の必要性を検討。

## 参考文献：

- [1] 田中, 鈴木, 秋庭, “残留応力の X 線評価” (2006)
- [2] P.J.Webster,D.J.Hughes,G.Mills and G.B.M.Vaughan, ”Synchrotron X-Ray Measurements of Residual Stress in a Worm Railway Rail” Mater.Sci.Forum,pp.404-407(2002)