

鉄道車輪への中性子残留応力測定法の適用に関する研究

Application of residual stress measurement by neutron to railway wheel

加藤 孝憲¹⁾ 牧野 泰三¹⁾ 山本 知明²⁾

佐々木 敏彦³⁾ 高橋 俊一³⁾

鈴木 裕士⁴⁾ 盛合 敦⁴⁾ 森井幸生⁴⁾

Takanori KATO Taizo MAKINO Tomoaki YAMAMOTO

Toshihiko SASAKI Shunnichi TAKAHASHI

Hiroshi SUZUKI Atsushi MORIAI Yukio MORII

¹⁾住友金属工業(株)総合技術研究所

²⁾住友金属工業(株)交通産機品カンパニー製鋼所

³⁾金沢大学

⁴⁾原子力機構

鉄道車輪リム内部の残留応力分布を非破壊的に測定することを目的として、車輪をスライス状に切断した試料を用いて中性子による残留応力測定を行った。その結果、今回用いた試料のサイズでは比較的に実用的な時間で測定が可能であることがわかった。しかしながら、切断による残留応力の解放の影響が避け難いため、高精度な測定を行うにはこのことを考慮した評価が今後必要である。

キーワード : 鉄道 車輪 残留応力 中性子

1. 目的

鉄道車輪のリムと呼ばれるレールとの接触部においては、疲労破壊に対する安全性を確保するため、通常は圧縮の残留応力状態となっている¹⁾。しかしながらこれまで、そのリム内部の残留応力分布を非破壊的に解明した例はなく、残留応力の影響まで考慮した正確な工学的強度予測は現状困難である。このため中性子法²⁾により、その実態が解明できれば、車輪の強度評価に大きく貢献できる可能性があり期待される。そこで本研究の目的を以下のようにした。①鉄道車輪の中性子残留応力測定のための基礎的検討を行う。②鉄道車輪の残留応力分布状態の解明を行う。

2. 方法

試料は、未使用の車輪から切り出した2種類の形状のもの、および、車輪の縮尺を想定した二円筒転がり接触試験片である。いずれも実用車輪と同一の素材である。試料の写真を図1に示す。図2にそれぞれの切り出し位置、形状、寸法を示す。図3に中性子法によるひずみ測定箇所を示す。今回用いた中性子ビームは波長0.22nm、回折は211($2\theta=140.11^\circ$)である。

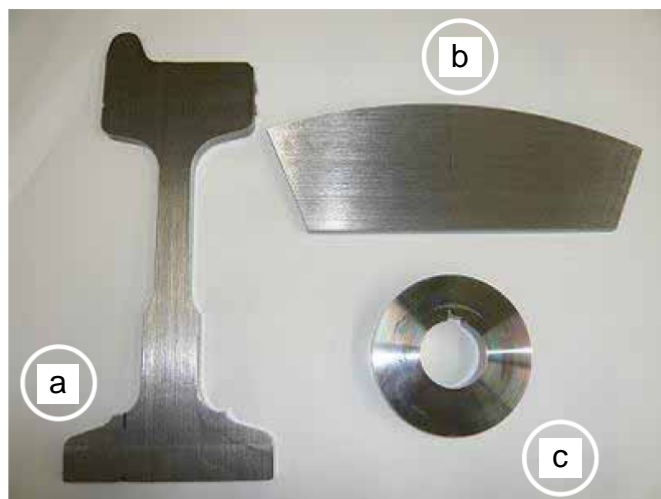


図1. 本研究で使用した鉄道車輪試料(a:試験体1、b:試験体2、c:試験体3)

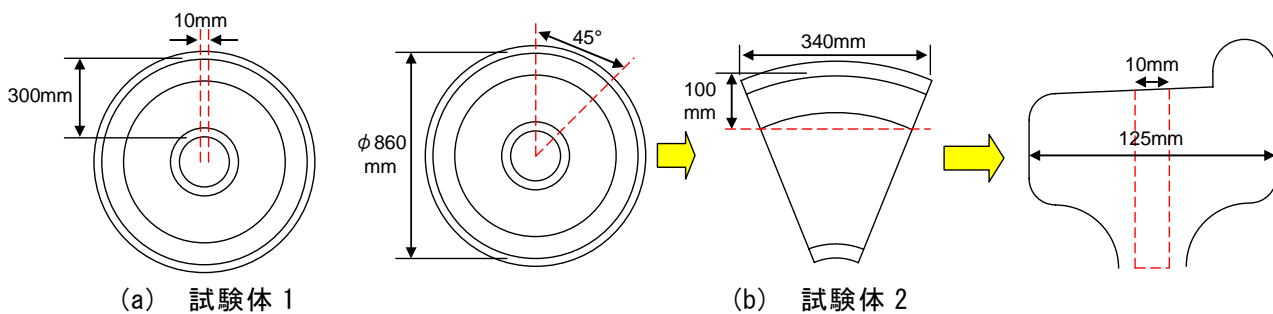


図2 試料の切出し位置・形状・寸法

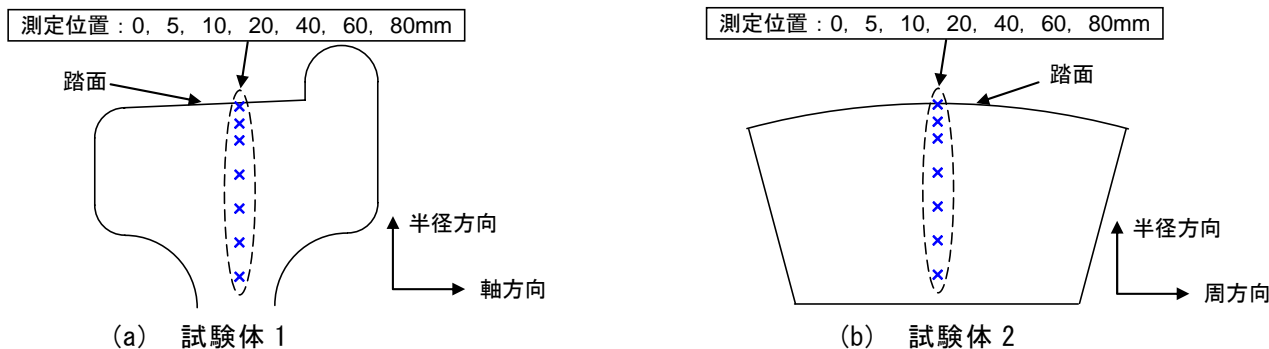
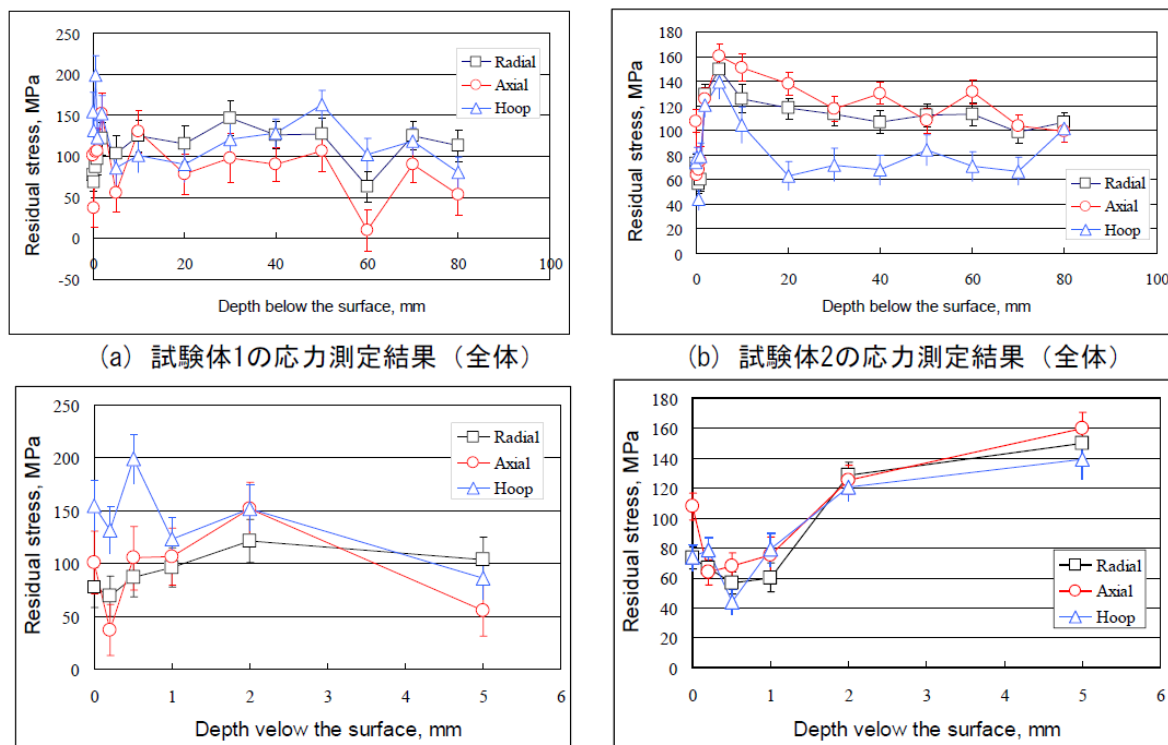


図3 中性子測定箇所の概要図

3. 研究成果

図4に、試料から測定された残留応力分布を示す。(a)(c)が試験体1、(b)(d)が試験体2の結果である。両図ともに横軸は踏面からの距離（深さ）を取っている。(c)(d)は(a)(b)の表面部分（深さ0～5mm）の拡大図である。



(c) 試験体1の応力測定結果（表面から5mmまで） (d) 試験体2の応力測定結果（表面から5mmまで）

図4. 中性子法による車輪試験片の残留応力測定結果

上記の結果より、試験体 1 では、測定を行った踏面から 80mm の範囲において概ね 100MPa±50MPa の範囲に測定結果が含まれることがわかる。応力成分同士の関係に関しては、最表面部においては Hoop>Axial>Radial、それ以降の領域では Radial>Hoop>Axial の関係が見られるが、一部、大小関係の変化もある。試験体 2 では、表面から約 20mm までの領域において応力の深さ方向に対する変化が比較的明確に見られ、それより深部では 70~130MPa の応力範囲でほぼ安定している。また、表面域では垂直応力成分同士が互いに同様な値を示しており、擬静水圧応力状態である。内部では Axial>Radial>Hoop の関係が見られる。

4. 結論・考察

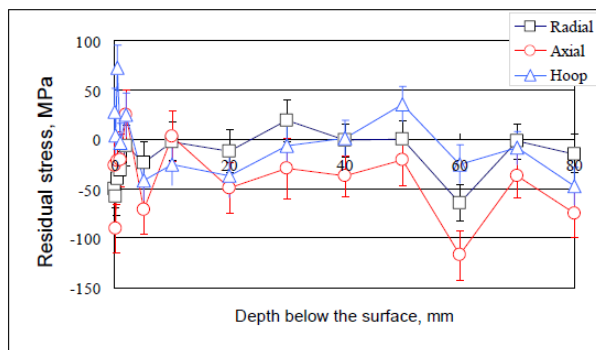
Webster ら³⁾は、レールの中性子応力測定において、スライスした面と直交する方向の垂直応力の解放を考慮して互いに直交する 2 種類のスライス方向の試料を用いている。このように 2 種類のスライスにすることで、互いの応力解放成分を補うことができるとしている。Webster らの考えに従えば、本実験の場合、試験体 1 では厚さが少ない Hoop 応力が主に解放され、試験体 2 では Axial 応力が解放されると考えられる。これに対して、図 4 ではこれらの応力がいずれも引張応力であり比較的高い応力となっている。このような原因の解明については今後の検討が必要であるが、中性子応力測定で課題とされている d_0 (無応力状態の格子面間隔) の影響が原因の一つとして考えられる。すなわち、今回用いた中性子応力測定法 (標準法) では、次式のようにひずみの絶対値を用いて応力を決定するため、格子面間隔 d (あるいは Bragg の式によって d と関係する回折角 2θ) について高精度の測定が必要である。

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = (\theta_0 - \theta) \cot \theta_0 \quad (1)$$

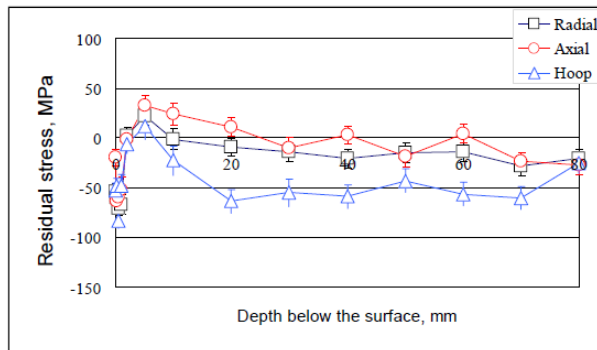
$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 θ_0 は無ひずみ状態における θ 、 E は縦弾性定数、 ν はポアソン比、 $\sigma_x \sim \sigma_z$ は垂直応力成分、 $\varepsilon_x \sim \varepsilon_z$ は式 (1) を用いて中性子回折の結果から決定できる縦ひずみである。 θ の測定精度を考慮して、 d_0 を 1.00015 倍した値を用いた場合の残留応力計算結果を図 5 に示す。用いた倍数 1.00015 は応力の解放を考慮して試験体 1 の Hoop 応力および試験体 2 の Axial 応力がほぼ 0 となる値を手作業で選んだ概略値である。本設定値 1.00015 のとき、試験体 1 および試験体 2 は共に応力の解放が予想される成分が図 5 に示すようにほぼ 0 を示した。図 5 における残留応力分布の特徴は以下のとおりである。

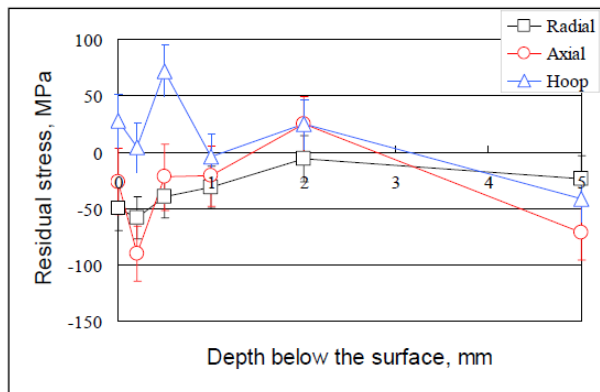
- ・試験体 1 では、切断による応力の解放の影響が少ないと推定される Radial、Axial において、共に表面直下から深さ 1, 2mm までの範囲に数 10MPa の圧縮残留応力を示し、その後 0 から -50MPa の範囲に落ち着いている。表面から 5mm までの範囲では応力成分間に差が少ないが、それより深部においては Radial が 0 応力付近の小さい応力を示し、Axial は一部を除き 50MPa 以下の圧縮応力となっている。
- ・試験体 2 では、表面直下から深さ約 20mm の範囲にやや明瞭で特徴のある応力分布が見られる。この部分では、深さ 0.5 から 1.0mm 付近に圧縮応力のピークを持ち、その後、10 から 30MPa 程度の小さな引張応力のピーク (-60~-80MPa) を示した後、深さ 20mm から 30mm 付近まで圧縮応力側に下がった後、80mm 付近までほぼ一定の応力を示している。Radial は -10 から -30MPa 程度の非常に小さな圧縮応力であり、僅かな応力勾配を持ちながら圧縮応力側に漸減している。Hoop は -50MPa 付近でほぼ一定の応力値を示している。深さ 2mm 付近までは静水圧的な応力状態が見られている。また、この領域では Axial 成分も他の応力と同様な応力分布を示している。



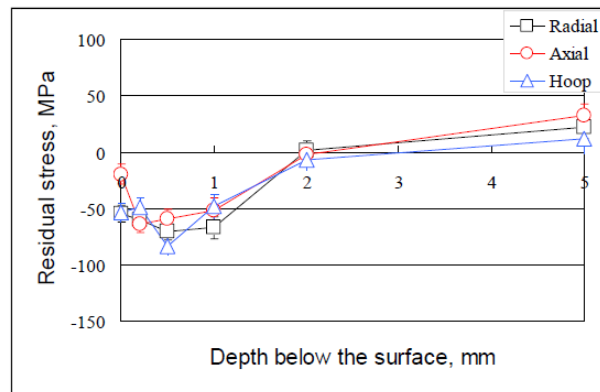
(a) 試験体1の応力測定結果 (全体)



(b) 試験体2の応力測定結果 (全体)



(c) 試験体1の応力測定結果 (表面から5mmまで)



(d) 試験体2の応力測定結果 (表面から5mmまで)

図5. 中性子法による車輪試験片の残留応力測定結果 (d0を修正した場合)

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 車輪をスライス状に切断した結果、比較的短い測定時間によって車輪踏面の深さ 80mm までの残留応力分布が容易に得られることが判明した。一方、今回測定された残留応力分布は、全体的に値が小さく、その主原因として切断により応力が解放されたためと推定される。
- (2) 車輪の同一部分で互いに直交するスライス状の試料を準備し、それぞれに対して応力を測定した結果、試験体 2 の方が特徴的な残留応力分布を得ることができた。このことから、応力の解放は形状による影響とともに、初期残留応力の要因となる熱応力の発生領域とそれを解放する方向の違いが考えられる。例えば、車輪熱処理時の熱膨張が拘束されることによって初期の残留応力分布が形成されるのに対して、車輪を切断することでこの拘束が消失し残留応力が開放される。その際、切断方向によって拘束状態に差が生じ、それが今回用いた 2 種類のスライス状試料の残留応力の差に現れたと考えられる。このような観点から、車輪にとって重要な Hoop 応力を評価するには、それが解放され難い方向にスライスした試料 (試験体 2) を用いるのが有効である。ただし、試験体 2 では切断するときの中心角が Hoop 応力の解放に影響すると考えられるので、今後適正な切断角度の検討が必要である。
- (3) このような切断の影響については、切断を要しない IP 方式の中性子応力測定法による検証が有効となる可能性が考えられる。IP 方式の適用によって、頭頂面の深さ数 mm (中性子侵入深さ範囲) の平均応力を非破壊で測定することが可能である。

以上

5. 引用(参照)文献等

- 1) 西村, 森田, 時政, 機論, 40-334, pp.1554-1562(1974)
- 2) 日本材料学会 X線材料強度部門委員会 “中性子応力測定標準”
- 3) 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)