

# 可搬型 X 線回折装置による レール軸力評価に向けた基礎検討

兼松 義一\* 松井 元英\*

Fundamental Study of Rail Axial Force Evaluation by Portable X-ray Diffraction Device

Yoshikazu KANEMATSU Motohide MATSUI

This paper deals with the application of the X-ray stress measurement method to rail axial force evaluation. The X-ray stress measurement method measures the strain of a material having a crystal structure in a non-contact and non-destructive way. When a load is applied to the material, the lattice spacing of the material is changed. The lattice spacing is measured by utilizing the diffraction of X-rays. A simple  $\cos\alpha$  X-ray analysis, developed in Japan, measures the stress within tens of seconds and can be used for field measurement. In this study, a lab test using a tensile testing machine and an actual rail is conducted and the fundamental investigation of the rail axial force evaluation by the simple  $\cos\alpha$  X-ray analysis was conducted.

キーワード：レール，レール軸力，非破壊検査，X 線応力測定，引張-圧縮試験，ひずみゲージ

## 1. はじめに

レールを連続的に溶接して1本の長大レールとするロングレール化は、乗り心地の向上、騒音の低減などの利点があり、広く普及している。ロングレールは大気温の変動に伴い熱膨張によって伸縮するが、レールはまくらぎに締結されているのでその伸縮が抑制される。そのため、伸縮すべき相当量が応力となってレール内部に蓄積する。この熱応力は一般的にレール軸力と呼ばれている<sup>1)</sup>。また、車両の走行状態やレールの締結状態、線路の敷設状態等が相互に関連し合い、軌道長手方向に変位(ふく進)が発生することから、レール軸力は大気温の変化以外の影響も受けることになり、レール敷設方向に沿って均一ではないことが考えられる。

過度な圧縮レール軸力が蓄積された場合には図1に示すような軌道の座屈を発生させ、レールに小さなき裂



図1 軌道座屈試験による座屈再現状況<sup>2)</sup>

があった場合にはこれによる引張応力がレールの折損を助長するため、レール軸力を適切に管理する必要がある。現在の軸力管理方法は、数百メートルの一定区間毎に設置された杭間におけるレールの伸縮量を、あらかじめレールに付けておいた目印を頼りに測定者の手で測定し、軸力に換算する方法である。この方法の場合、測定誤差が大きくなる問題点がある<sup>3)</sup>。また、鉄道の保線作業では、座屈防止に関する施工や、レールを切断し、蓄積した軸力を解放する作業に多大な労力を要していることから、現在の軸力管理手法に代わる手法が望まれている。

近年、非破壊検査手法の一つであるX線応力測定法では、後述の $\cos\alpha$ 法を導入することにより従来の方法に比べて測定時間の短縮、簡便な測定機構のため装置の小型化が実現できる。そのため、実軌道での応力測定が可能となることから、レールの軸力評価への適用が期待できる。この $\cos\alpha$ 法のX線応力測定法によるレール軸力評価について、室内試験機での基礎的な検討を進めている。本報では、一般的な材料試験機である引張試験機および鉄道総研所有のレール曲げ疲労試験機により、実レールに模擬的に圧縮-引張の軸力を負荷させ、負荷応力とX線応力測定結果を比較した結果について述べる。

## 2. X 線応力測定法の概要

### 2.1 測定原理

X線応力測定法は、例えば鋼などのような、結晶構造を有する測定物のひずみを非接触・非破壊で測定し、応力に換算する測定方法である。ここでの応力は、作用し

\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

ている応力（レールの場合、軸力）と残留応力が同時に測定されることになる。測定物に応力が加わると測定物の結晶格子がひずみ、本来の格子間隔より伸びたり縮んだりする。この格子間隔を X 線の回折現象を利用して測定する。

X 線の回折現象の概要について図 2 に示す。図 2 は、格子面が試料表面に平行となる結晶粒に注目し、その面に X 線を照射したときの X 線回折の状況と得られる回折強度曲線を模式的に示したものである。この各格子面で散乱される X 線の経路差が X 線波長の整数倍となる時、各面からの散乱 X 線の位相が一致して強め合い、回折波がつくられる（Bragg の法則）。この時の入射 X 線の延長線と回折 X 線のなす角度  $2\theta$  を回折角という。X 線応力測定の本質はこの X 線の回折現象を利用して測定物の格子間隔を求め、応力を算出するものである<sup>4)</sup>。

現在、X 線応力測定法としては、従来法である  $\sin^2\psi$  法とその後確立された  $\cos\alpha$  法などがある。

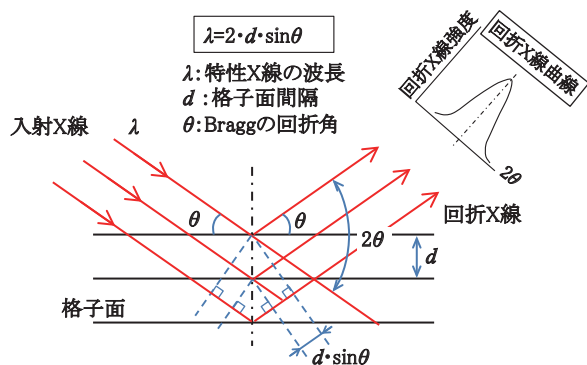


図 2 Bragg の回折条件

2.2  $\sin^2\psi$  法（従来法）

図 3 は、試料表面層について、紙面に直交する特有の結晶面を持つ結晶粒を選択して描いたものである。試料面法線と格子面法線のなす角度を  $\psi$  角と表すと、引張応力が作用するとき、 $\psi$  角が大きい結晶粒ほど格子面間隔が広がる。

同様に、図 3 に示すように  $\psi$  角の異なる結晶粒についても、それぞれの  $\psi$  角だけ傾けて X 線を照射すれば、 $\psi$  角毎に異なった回折角  $2\theta$  が求められる。引張応力が作用している場合は、 $\psi$  角が大きくなるほど、格子面間隔が広がるため回折角  $2\theta$  は小さくなる。圧縮応力が作用する場合は、反対に回折角  $2\theta$  は大きくなる。通常は、 $\psi$  角として、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  を選択するため、複数回の測定が必要となる。次に、この  $\psi$  角毎の回折角を、縦軸  $2\theta$ 、横軸  $\sin^2\psi$  のグラフにプロット ( $2\theta - \sin^2\psi$  線図) し、各点を最小二乗法により直線で結び、その勾配  $M$  を求めれば、表面層の応力  $\sigma$  は  $\sigma = K \cdot M$  から算出することができる。K は応力定数で、被測定材料の弾性定数、ポアソン比、無応力時の回折角から求め

られる。 $\sin^2\psi$  法は現在標準的な X 線応力測定法として活用されている。

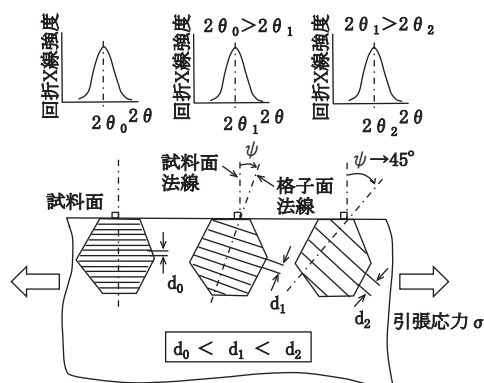


図 3 格子面間隔の変化（引張応力作用時）

2.3  $\cos\alpha$  法<sup>5), 6)</sup>

多結晶体に特定の波長を有する X 線が入射された際、Bragg の回折条件で回折される X 線の集合体として、回折環が得られる。 $\sin^2\psi$  法では、この回折環の一部のみを使用した測定手法であるため、回折 X 線強度を得るために点検出器（0次元検出器）をラインスキャンする、あるいは線検出器（1次元検出器）で回折 X 線を検出している。図 4 に  $\cos\alpha$  法の光学系座標系の模式図を示す。 $\cos\alpha$  法は平面検出器（2次元検出器）を用い、図 5 に示すように回折環のすべての情報を元に応力を算出する手法であり、式 (1) および式 (2) の基本式により図 6 に示すようなグラフを作成し、近似直線の傾き（測定対象物と無ひずみの標準試料の両回折環の X 線入射中心に対する半径方向の距離差）から材料の格子ひずみを求め、弾性定数により応力値に換算する方法である。そのため、 $\sin^2\psi$  法のように複数回の X 線照射が不要となり、単一 X 線入射によって測定が可能であることから、測定時間が短くなる。さらに、精密な角度検出が不必要で、測定機構も簡素化できることから、可搬性が高くなる。

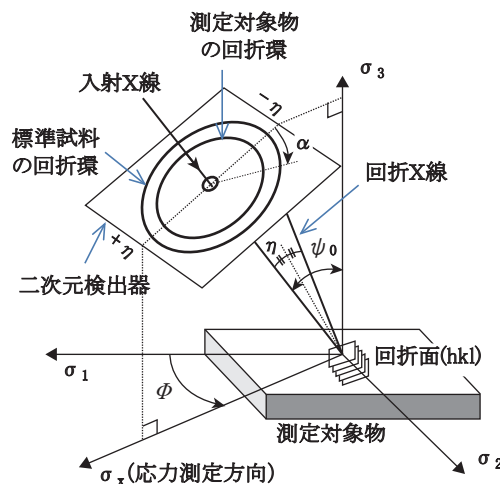


図 4  $\cos\alpha$  法の光学系模式図

$$a_1 = \frac{1}{2} \{ (\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha}) \} \quad (1)$$

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{\sin 2\eta} \cdot \frac{1}{\sin 2\psi_0} \cdot \left( \frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (2)$$

$\sigma_x$  : 測定応力  
 $\psi_0$  : X線入射方向と試験片表面法線間のなす角  
 $\eta$  : 入射X線と回折面法線間のなす角  
 $E$  : 回折面のX線の弾性定数 (縦弾性係数)  
 $\nu$  : 回折面のX線の弾性定数 (ポアソン比)  
 $\varepsilon_\alpha$  :  $-\eta$  から時計回りに  $\alpha$  の角度方向のひずみ

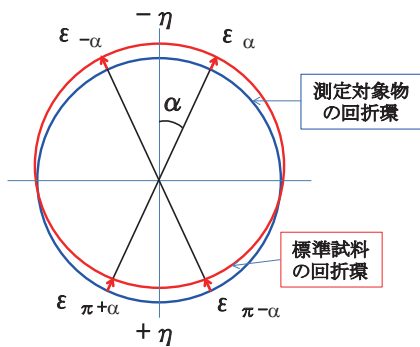


図5 回折環の模式図

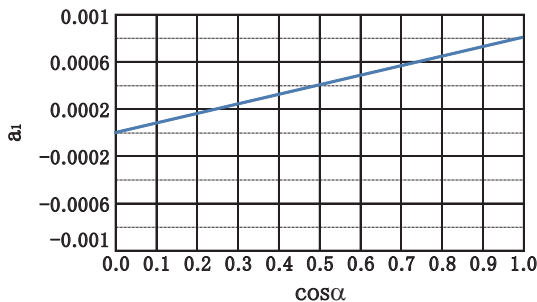


図6 cos alpha 線図の例

### 3. 室内試験機による基礎試験

#### 3.1 引張試験機による段階的負荷時のX線応力測定

X線応力測定法のレール軸評価への適用を検討する基礎実験として、レールから採取した試験片について引張

試験によって段階的に負荷を与え、その都度ひずみゲージの値の計測および  $\cos \alpha$  法による X 線応力測定を行い、両者の比較を行った。

#### 3.1.1 試験片

本試験で使用した引張試験片は、JIS E 1101 に規定されるレールの引張試験採取位置から、JIS14A 号板状引張試験片を採取した。なお、レール鋼種は普通レールである。図7に、引張試験片の形状、外観写真および引張試験片平行部の中央部におけるひずみゲージの貼付け位置および X 線応力測定位置の模式図を示す。

#### 3.1.2 試験方法

使用した試験機は MTS 製の疲労試験機 (最大負荷 10tonf) である。引張速度は 10MPa/sec とし、レール鋼の弾性限近傍の 400 MPa まで 100 MPa (10kN) 毎に載荷を停止し、ひずみゲージの計測および X 線応力測定を実施した。

#### 3.1.3 ひずみゲージの計測

使用したひずみゲージは 2 軸弾性ゲージ (FCA-2-11-3L, GL=2mm) で、試験片表裏両面の平行部中央に貼付け、測定方向は L 方向を試験片長手方向、C 方向を試験片長手方向と垂直な方向とした。なお、ひずみ計測値は表裏両面の平均値とした。ひずみゲージの計測値から下記の式 (3) を用いて、換算応力を算出した。

ここでの  $\sigma_L$  は L 方向 (長手方向) の換算応力 (MPa)、 $E$  は供試材のヤング率 (210GPa)、 $\nu$  は供試材のポアソン比 (0.28)、 $\varepsilon_L$  は L 方向のひずみ計測値、 $\varepsilon_C$  は C 方向のひずみ計測値である。

$$\sigma_L = -E \cdot \frac{(\varepsilon_L + \nu \cdot \varepsilon_C)}{(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

#### 3.1.4 X線応力測定

使用した X 線応力測定装置は、パルステック社製の可搬型 X 線回折装置  $\mu$ -X360 であり、表 1 に示す測定条件で測定を行った。測定位置は試験片平行部中央の板厚面 1 箇所である。試験片加工時の機械加工の影響を取り除くため、X 線照射領域を含む  $\phi 5\text{mm}$  程度を約  $100\mu\text{m}$  の電解研磨を施した。図 8 に X 線応力測定状況を示す。

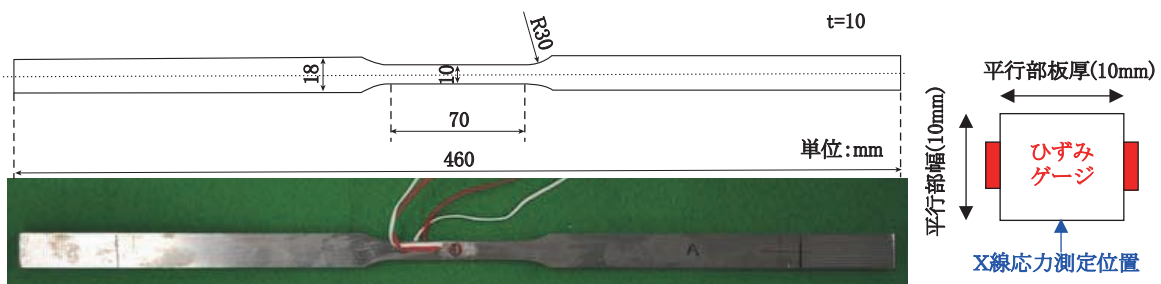


図7 引張試験片形状 (JIS 14A 号試験片準拠) および試験片平行部中央断面概略

表1 X線応力測定条件

X線管球	Cr	
X線管電圧	30kV	
X線管電流	1.0mA	
照射時間	30秒	
コリメータ径	φ 1.0mm	
照射径	約φ 2.0mm	
ピーク位置決定法	ローレンツ近似法	
入射角	35度	
使用波長	Cr K α	
回折面	211	
X線の弾性定数	設定ヤング率	224GPa
	設定ポアソン比	0.28

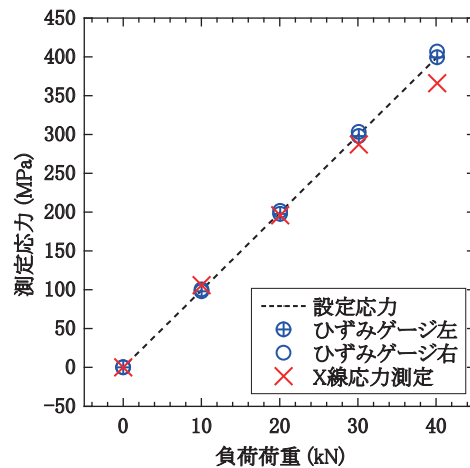


図9 引張試験結果

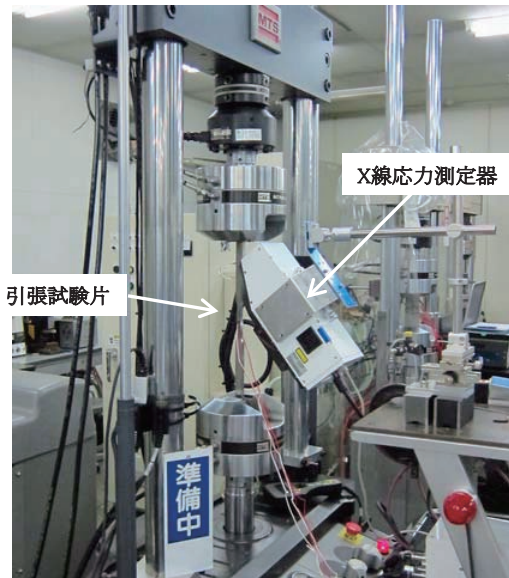


図8 引張試験時のX線応力測定状況

### 3.1.5 試験結果

X線応力測定値は、設定負荷が0MPaの段階においても載荷1回目では37MPaの引張応力、研磨紙による研磨後の載荷2回目では363MPaの圧縮応力が測定された。これらは、試験片表面の残留応力値である。X線応力測定の結果は、負荷荷重0kN時点の測定値（残留応力値）をオフセットし、負荷荷重に対する変動のみを表記している。図9にX線応力測定値およびひずみゲージからの換算応力値を示す。X線応力測定値およびひずみゲージからの換算応力値はいずれも、試験機による負荷応力とともに増加する傾向にあり、その増加の割合は両者とも概ね同様の傾向にあることから、これまでレールの軸力評価に実績のあるひずみゲージ法<sup>7) 8)</sup>と同程度の精度で評価できると考えられる。さらに、検討しているX線応力測定器は可搬型であることから、任意の場所を短時間で測定でき、ひずみゲージ法よりも自由度が高い。

一方で今回の試験では設定負荷が大きくなるにつれてX線応力測定値が、設定負荷の応力と比べると約30MPa低く（負荷荷重40kN時）なる傾向にあった。この傾向の原因としてX線照射位置のずれが関係しているものと考えられる。設定負荷が大きくなるにつれてストローク量も大きくなる。X線応力測定器の設置位置は引張試験とは関係なく、一定の位置を保持している。今回の測定条件では、X線照射面積はおよそφ2mmであるのに対し、設定負荷400MPa時のストローク量は0.7mmであり、負荷を大きくすることによりX線照射位置がずれていったと推測される。

### 3.2 引張 - 圧縮試験機による実レールの段階的負荷時のX線応力測定

実レールにレール軸力を模擬した引張-圧縮負荷が可能な試験機を用いて、段階的に負荷を与え、その都度ひずみゲージの値の計測および $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定を行い、両者の比較を行った。

#### 3.2.1 試験片

本試験で使用した試験片は、JIS E 1101「普通レール及び分岐器類用特殊レール」に規定される60kg普通レール（長さ1.5m）である。試験片両端からそれぞれ0.75mの中央位置でレール頭頂面、レール頭側面、レール腹部、レール底部に直行二軸のひずみゲージ（TOKYOSOKKI製FCA-3-11-3LT）を貼付した。

レール表層には、レール製造時に形成される酸化物やレール敷設後の環境腐食によって錆層が形成される。使用する特性X線のレールへの侵入深さは数十μm程度であるため、正確な測定値を得るためには表層の酸化物を除去する必要がある。除去方法には、機械的研磨、化学研磨、電解研磨が挙げられる。実軌道への適用する上で、表面仕上げにかかる作業量を極力少なくするために、機械的研磨および化学研磨が有効と考えられたため、本試験ではこの2つの手法の表面仕上げを検討した。

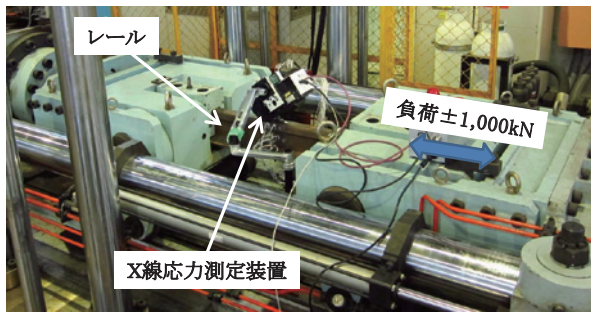


図 10 実レールの引張-圧縮荷重試験状況

3.2.2 試験方法

使用した試験機は鉄道総研所有のレール曲げ疲労試験機である。本試験機は、レールの軸力に相当するレール長さ方向に引張および圧縮荷重（最大荷重± 1,000kN）を負荷することができる。試験機の都合により本試験では負荷荷重の範囲は -750kN（圧縮）から 750 kN（引張）とし、その間で段階的に荷重を載荷し、ひずみゲージによる計測（静ひずみ測定器 TOKYOSOKKI 製 TDS-630）および X 線応力測定を実施した。図 10 に試験状況を示す。

使用した X 線応力測定装置は、パルステック社製  $\mu$ -X360 であり、表 1 に示す測定条件で測定を行った。測定位置はひずみゲージ貼付け位置のレール長手方向の直近とした。

3.2.3 試験結果

(1) 機械的研磨と化学研磨の違いによる測定結果の検証

本項では、レール測定表面の仕上げ状態の違いによる測定結果を検証する。図 11 には、錆肌のまま、化学研磨仕上げ面および機械的研磨仕上げ面について X 線応力測定を実施した結果を示す。測定は各仕上げ面のレール頭頂面についてレール長手方向に約 1mm ずつずらして、計 3 点を負荷段階毎に実施した。また、負荷は、錆肌のままでは引張側に 5 条件、化学研磨仕上げおよび機

械的研磨仕上げでは 9 条件とした。

錆肌のままの X 線応力測定結果は X 線侵入深さに対して酸化膜の厚みが多いことに起因するばらつきが大きく、錆肌のままではレール軸力評価への適用は難しいと考えられる。また、化学研磨仕上げ面においても、X 線応力測定結果にはばらつきが大きかった。これは、表面の酸化膜は一樣に除去されたように見えるが、酸化膜除去にムラが生じているためと考えられる。機械的研磨仕上げ面では、研磨実施によって残留応力が付与されるが、試験機の負荷応力との相関は最も高く、測定誤差も小さい。そのため、精度良くレール軸力を評価するためには、現時点では機械的研磨による表面仕上げが有効であると考えられる。

(2) レール測定部位の違いによる測定結果の検証

本手法を実軌道に適用することを想定した場合、代表的な測定部位としてレール頭頂面、レール頭側面、レール腹部およびレール底部上面が挙げられる。そこで、各部位について X 線応力測定を実施した。表面仕上げはいずれも機械的研磨仕上げである。図 12 に、代表例としてレール頭頂面の X 線応力測定結果を示す。また、図には併せてひずみゲージから算出した応力値をプロットしている。なお、負荷応力値と測定応力値の関係を見やすくするため、負荷ゼロ時の残留応力値を各負荷段階の測定応力値からオフセットして表示した。

ひずみゲージの値および X 線応力測定結果の値は負荷応力と対応して増減している。また、図中の破線は試験機で設定した負荷から算出した負荷応力を示す。ひずみゲージの値および X 線応力測定結果の値は、負荷が大きくなるにつれて破線からのずれが大きくなっている。これは、レールに引張圧縮負荷を付与したがレール断面に一樣に負荷が付与されず、曲げが発生していたものと考えられ、図中の負荷応力が実際の値と異なっていることが考えられる。なお、レール頭頂面以外のいずれの測定

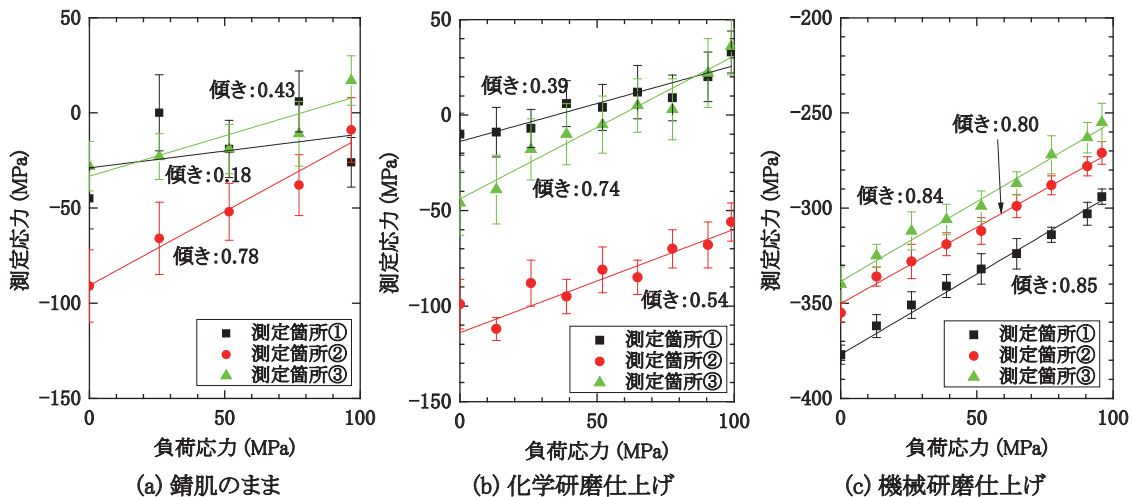


図 11 表面仕上げ方法と X 線応力測定結果

特集：材料技術

部位においても図12と同様の傾向であることを確認した。

ひずみゲージの値とX線応力測定結果の値を比較すると、ほぼ同等の値を示しているが、一部ひずみゲージとの差が認められた。これらひずみゲージとの差が認められた原因は、次のように考えられる。図13は、機械的研磨面について5mm×5mmの範囲を1mm間隔ずつ、計25ポイントに対して残留応力測定を行った結果である。残留応力分布図より機械研磨面には付与される残留応力値が最大約40MPa程度異なっていることが確認できる。このため今回の測定では、負荷前後の測定でX線応力測定器の設置位置が正確に同じにならなかった箇所、ひずみゲージとの誤差が大きくなったと考えられる。

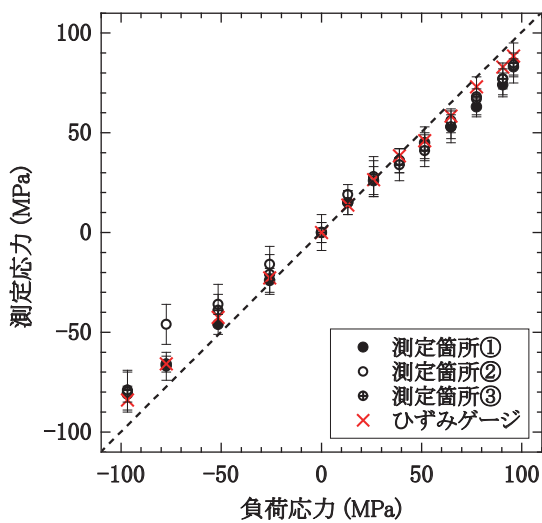


図12 レール頭頂面の測定結果

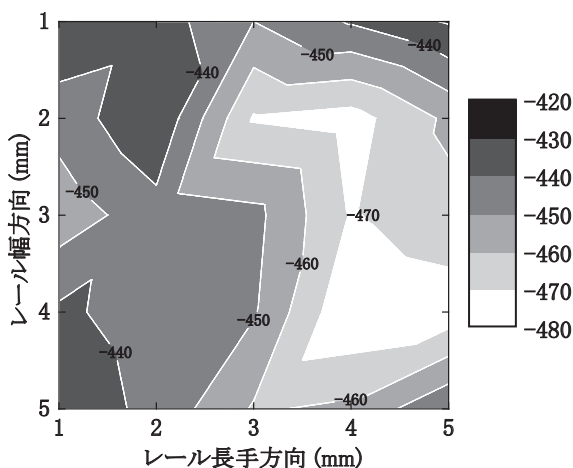


図13 機械的研磨面の残留応力分布 (単位:MPa)

4. まとめ

X線応力測定法のレール軸力評価への適用を検討する基礎実験として、レールから採取した試験片について引

張試験および実レールに段階的に負荷を与え、その都度ひずみゲージの値の計測および $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定を行い、両者の比較を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) X線応力測定値およびひずみゲージからの換算応力値はいずれも、試験機による負荷応力に対応して増減する傾向にあり、その増加の割合は両者とも概ね同様の傾向にあることから、これまでレールの軸力評価に実績のあるひずみゲージ法と同程度の精度で評価できる見通しである。
- (2) 試験片表面の残留応力が不均一であるため、わずかなX線照射位置のずれによって測定結果にも影響すると考えられる。
- (3) 錆肌のまま、化学研磨仕上げ面および機械的研磨仕上げ面についてX線応力測定を実施した結果、機械的研磨による表面仕上げがもっとも精度良く測定できる仕上げ方法であった。しかし、今回実施した機械的研磨面の残留応力分布が約40MPa程度異なっていることが確認された。
- (4) レール頭頂面、頭側面、腹部および底部上面などについてX線応力測定を行った結果、いずれの箇所においても同程度の測定結果が得られた。ただし、実レールのふく進あるいは熱応力によるレール断面中の負荷が不均一であれば、適した測定位置を検討する必要がある。
- (5) X線応力測定器を用いたレール軸力評価を軌道保守に適用するにあたり、同一箇所を繰り返し測定することが課題である。専用ジグなどを用い、機器設置の再現性を高めることに加え、研磨面が均一に残留応力付与されるような機械的研磨の手法をさらに検討する必要がある。

文献

- 1) 佐藤吉彦：線路工学，日本鉄道施設協会，1987
- 2) 柳川秀明，片岡宏夫：ロングレールの座屈安全性解析を探る，RRR，Vol.57，No.11，2000
- 3) 小関昌信，片岡慶太：レールの信頼性向上を目的とした研究開発について，JR EAST Technical Review，No.17，2006
- 4) 日本材料学会：X線応力測定法，1990
- 5) 佐々木敏彦：二次元検出器による次世代X線応力測定( $\cos\alpha$ 法)，トライボロジスト Vol.57，No.7，2012
- 6) 田中啓介：残留応力のX線評価，養賢堂，2006
- 7) 福田徹：ロングレール状態監視装置の開発，土木学会第60回年次学術講演会，4-135，2005
- 8) 小木曾清高：レール軸力センサーを用いたロングレール管理の検討，第18回鉄道工学シンポジウム講演集，No.13，2014