

旋回ベアリングの高周波焼き入れ部品における 焼き入れ深さと内部残留応力測定(II)

Measurement of quenching depth and internal residual stress in
induction hardened parts of swing bearing (II)

小泉 敦裕¹⁾ 大津 成夫¹⁾ 市嶋 好明¹⁾ 西野 創一郎²⁾
Atsuhiko KOIZUMI Naruo OHTSU Yoshiaki ICHIJIMA Souichiro NISHINO

¹⁾株式会社アンテックス ²⁾茨城大学大学院

本研究では、中性子応力測定装置を使った中性子回折実験により、大きな負荷を受ける旋回ベアリング軌道面の下方 45 度方向の表面から深さ 6mm まで（このうち深さ約 3～4mm までが硬化層）の各点で径・周・軸方向の残留応力分布と結晶格子の乱れを反映する回折ピーク幅の分布を求める。

これらの結果と既に実施した鉄鋼組織の硬度や X 線回折法による表面応力の解析結果および 2022B-A03 で実施した第 1 回実験結果を比較検討して、鉄鋼相構造と物性について総合的な評価を行い、焼き入れによるひずみの原因を解明する糸口を得たいと考えている。材料深部での残留応力が非破壊的に求まるならば、製造現場における試作品や不良品の検査に大きなメリットをもたらす。さらに、旋回ベアリングの焼き入れひずみの原因を解明できれば、対応措置と製造工程見直しが可能となり、製品品質の本質的な改善が期待できる。

キーワード：旋回ベアリング、高周波焼き入れ、焼き入れ深さ、内部残留応力

1. 目的

油圧ショベル、クレーン、風力発電装置等は運輸、建築、土木、電力産業において重要な機械や車両であるが、それらの回転部分を構成する旋回ベアリングには作業中に大きな力が働くため、その軌道面（ボール転走面）の性能はとりわけ重要である。

旋回ベアリング専門メーカーであるアンテックスでは、材料切断、ローリング鍛造、熱処理、機械加工、軌道面の高周波焼き入れ等の工程を施して製作しているが、現状の問題点・課題として次の 2 つがある。

- (1) 高周波焼き入れ工程で加工品にひずみが生じ、製品の寸法精度を阻害する。
- (2) 焼き入れ後の硬化層深さ測定を切断面の硬度測定または超音波や電位差法による非破壊測定で実施しているが、それぞれ破壊を伴うことや測定結果にばらつきが生じる課題が残っている。

ひずみの主要因は材料の残留応力であると考え X 線回折法によりリング上端面の 8 方向で表面応力を測定した結果、8 方向間で残留応力の不均一性が存在して製品のひずみと何らかの関係があることが判明したが、高周波焼き入れ面および材料内部残留応力分布を併せて検討する必要性が残った。内部残留応力については中性子回折実験を行う以外に方法は無く、一連の研究によって材料の内部まで 3 方向の残留応力分布を非破壊的に測定し、同時に得られる中性子回折ピークの半値幅解析から焼き入れ深さを非破壊的に測定し、これまで実施してきた金属組織解析結果と比較評価し、旋回ベアリングの 3 次元的な力学バランスと焼き入れ深さを理解する。今回は、前回と焼き入れ方法が異なり加工品ひずみが小さい試料について測定する。

2. 方法

旋回ベアリングの軌道面はアーチ型のため内部にすきまがない場合、軌道面と転動体は 4 点で接触する。この接触点は主に 45 度位置で接触するように設計されている。そこで焼き入れ硬化部から母材部にわたる下方 45 度方向において、残留応力分布と半値幅測定による硬化層深さを解析する。

リング試料として外径 $\phi 472\text{mm}$ の旋回ベアリング内輪を用意した。この大きさであれば、そのままの形で実験装置に設置でき、切断による測定部取り出し工程での内部応力の開放を回避できる。リング試料は高周波焼き入れ前後で真円度を測定し、焼き入れによる変形が最も大きい領域、最も小さい領域（その 1、その 2）の 3 ヶ所でひずみ測定を行った。また、リング試料の測定領域と同等領

域で、軌道面の表面から下方 45 度方向の 3x6x16mm 小片を 2 枚放電加工で切り出し、それぞれにスリットを入れ、無ひずみ試料を製作した（機械加工ひずみは解放されるが、相変態ひずみは残る）。

中性子回折実験は JRR-3 に設置されている中性子応力測定装置 (RESA) を使い実施した。JRR-3 熱出力は 20MW、使用した中性子波長は 1.55382 Å、利用した回折面は 110 であった。試料は RESA 装置に図 1（概念図）のように設置した。右下方の原子炉からガイド管を通して白色中性子が来る。湾曲型単結晶モノクロメーターによって、単色波長 (1.55382 Å) が回折されて試料リングに照射され、約 45 度の 2θ 方向に出てくる 110 回折ビームを扇型のラジアルコリメーターを通して 2 次元中性子検出器で計測する。

実際の測定ではリング試料を治具により 45 度傾け、まず最大変形領域において周 (r') 方向の 110 格子面間隔の測定を行った。測定点は前回同様に軌道面表面から 1, 2, 3, 4, 5, 6mm の 6 点とした。続いて、径 (θ) 方向の測定を自動で継続した。軸 (l') 方向の測定は試料リングを垂直に立て直して行った。最大変形領域と同様の方法で、最小変形領域（その 1, その 2）において測定した。次に無ひずみ試料について、リング試料と同じ方向性を保ちながら、径 (r') 方向、周 (θ) 方向、軸 (l') 方向の順序で 110 格子面間隔を測定した。

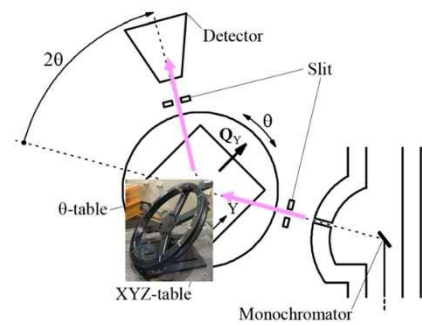


図1 応力測定用リング試料設置概念図

3. 結果及び考察

無ひずみ試料の回折ピークを図 2 に示す。軌道面表面から深さ 1mm 位置では明らかに主ピークの幅が大きい。深さ 6mm 位置ではシャープな主ピークのみである。これにより、深さ 6mm ではフェライト相の単相であるが、深さ 1mm では高周波焼入れによる炭素原子の α 鉄への侵入によりマルテンサイト相 (BCC 相格子の乱れと Tetragonal 相の混在) があることを示している。この結果は前回と同様である。

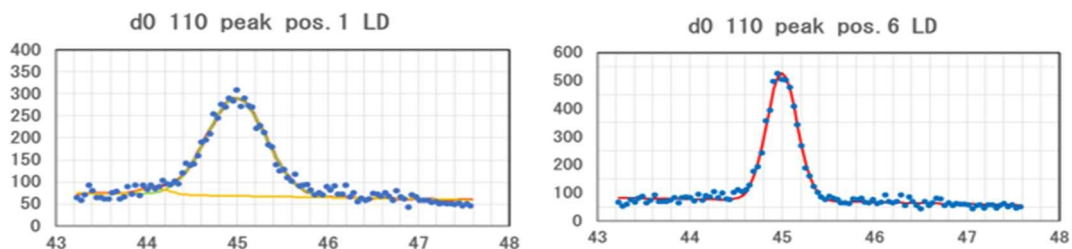


図2 無ひずみ試料の深さ 1mm(左図), 6mm(右図)における軸(LD)方向測定時のFe110

次に、無ひずみ試料の 3 方向の 110 格子面間隔と半値幅を図 3 に示す。表面より浅い位置 (1~3mm 位置) のマルテンサイト相では深さと共に格子面間隔、半値幅が共に減少している。高周波焼入れ速度が大きい表面においてより多くの炭素が BCC 格子に侵入し、結晶性の低下が大きくなっていると見られる。一方、表面より深い位置 (4~6mm 位置) のフェライト相では格子面間隔、半値幅共にほぼ一定であり、フェライト相に焼き入れの効果が及んでいないことを示している。従って、高周波焼き入れの効果は 3~4mm 程度まで及んでいないと判断できる。この結果は前回と同様であり、これまでアンテックスで行ってきた切断後の表面観

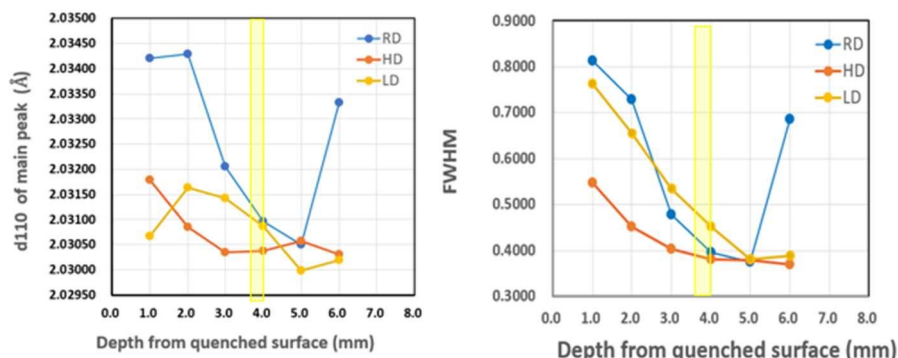


図3 無ひずみ試料の 110 格子面間隔（上図）と半値幅（下図）

察や硬さ試験結果と同じ結果を、非破壊的に取得できたことを示している。

3方向の残留応力はフックの法則を適用し導出した。最大変形部と最小変形部（その1, その2）を比べると図4となる。その特徴は①焼き入れ領域の残留応力は、3方向共に圧縮応力であり、表面近くではほぼ同程度（-600~-900MPa）の圧縮応力である。②最大変形部では、焼入相（深さ3mm以下）においてLD, HD方向の圧縮応力が最小その1, その2変形部に比べて若干（100MPa程度）大きいだけである。③この小さな不均衡がリングの最小マクロ変形をもたらしていると推測される。

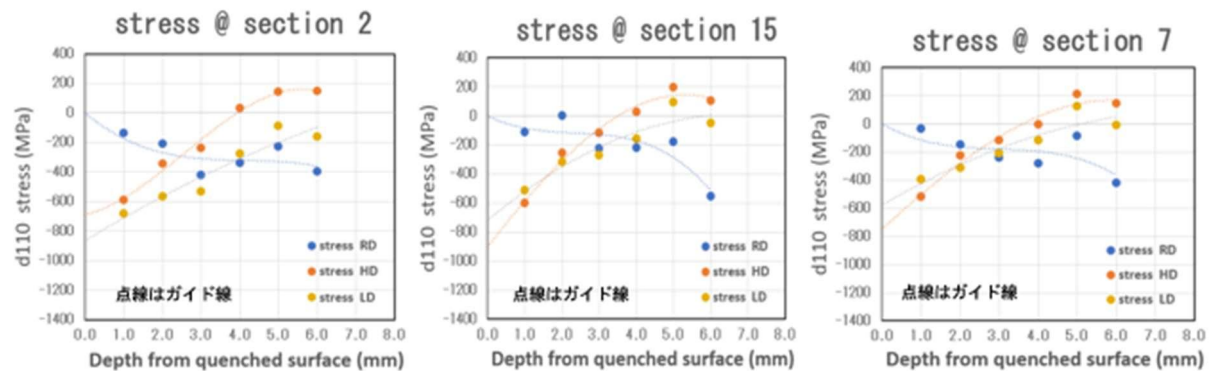


図4 最大変形部(section2)及び最小変形部(section 15 & 7)での残留応力分布

4. 謝辞

本研究の遂行にあたり、実験装置担当の菖蒲様、柴山様、鈴木賢治新潟大名誉教授より懇切丁寧な事前研究指導を頂くと共に、実験期間中は時間を問わず実験遂行の支援を頂き心より感謝いたします。

関係者の皆様に、この場を借りて改めて深く御礼申し上げます。