

X線残留応力測定技術と活用事例

鈴木 宏保*
内山 宗久**

1. はじめに

品質管理の一環として、加工・熱処理（高周波、浸炭）・表面処理など、各種工程管理の中で工程前後の残留応力を測定・管理することにより、「品質保証の強化」「工程改善や効率化」に役立てようとする動きが高まっている。また設計・開発の現場においても、製品の小型・軽量化に伴い、高強度・高品質を維持するため、残留応力を重要なパラメータのひとつとして捉える動きが増えてきている。非破壊・非接触で残留応力を測定する手法のひとつとして、X線回折を用いた測定方法が一般的に用いられている。しかし、従来型の測定装置は、大型設備であること、測定対象物の大きさや形状に制約があることなどの理由により、現場での測定には向かず、研究・開発などの限られた用途で用いられてきた。一方、近年、可搬型の残留応力測定装置が開発され、測定対象物の形状や場所にとらわれず測定ができるようになった。

本技術解説では、まず残留応力の発生過程や疲労特性へ及ぼす影響を概説する。次にX線残留応力測定手法の基本となるX線回折原理やブラッグの法則について述べる。また可搬型残留応力測定装置で採用されているX線回折から応力を求める

ための1つの手法である $\cos\alpha$ 法^{3,4,5)}について概説する。さらに種々な測定対象物を測定するために必要な対応内容を紹介する。最後に熱処理分野での活用事例を紹介する。

2. 残留応力

残留応力とは、外力が作用していないにもかかわらず材料に内在する応力のことをいう。図1は鋼材に外力を加え曲げ加工（塑性変形）する際の応力状態を模式的に示す。曲げ加工時には鋼材の内側の部位には圧縮応力が作用し、一方、外側の部位には引張応力が作用する。ここで外力を取り

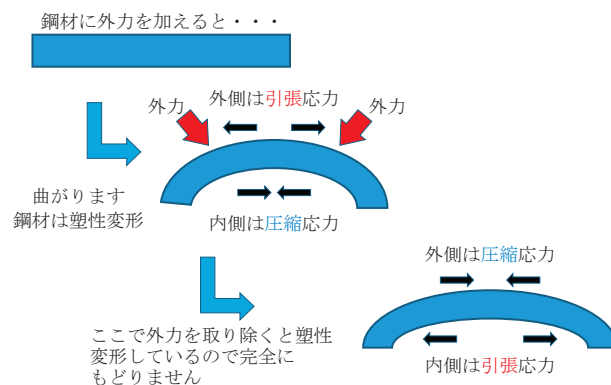


図1 残留応力とは

* パルステック工業株式会社 営業部 主任 H. Suzuki 連絡先 E-Mail : hiroyasu-suzuki@pulstec.co.jp
** 同 技術部 主査 M. Uchiyama

除く（塑性加工後）と鋼材の内側の部位には引張応力が生じ、外側の部位には圧縮応力が生ずる。熱処理においても、鋼材の表面と内部で、熱処理時の温度が異なるため、鋼材の表面と内部で、熱変形量が不均一になり、熱処理後に残留応力が生ずる。図2は残留応力が疲労特性に及ぼす影響を示す。金属が疲労すると表面に微細なき裂が発生する。金属表面に引張応力があると、き裂は広がる方向の力となり、一方、圧縮応力があるときき裂が閉じる方向の力となる。したがって、き裂疲労破壊において加工品の表面は圧縮残留応力を有していることが望ましい。圧縮残留応力はき裂が広がるのを抑制するからである。

金属が疲労すると表面に微細なき裂が発生します

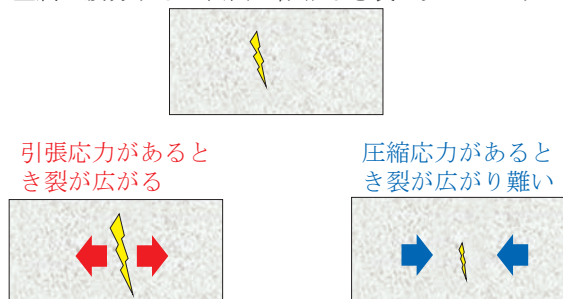


図2 残留応力が金属疲労に及ぼす影響

3. X線残留応力測定原理

3.1 X線回折原理（ブラッグの法則）

X線回折とは、X線が結晶を構成する原子によって散乱されて進行方向を変える現象である。回折X線は図3のような可視光の反射のイメージで表される。結晶構造をもつ物質に、波長 λ のX線を入射すると、原子（図3の赤丸）で散乱したX線が、入射X線と結晶面がなす角 θ で回折する現象を「ブラッグの法則」といい、図4のような式で表される。 λ はX線の波長、 d は格子面間隔、 θ は回折角、 n

ブラッグの条件

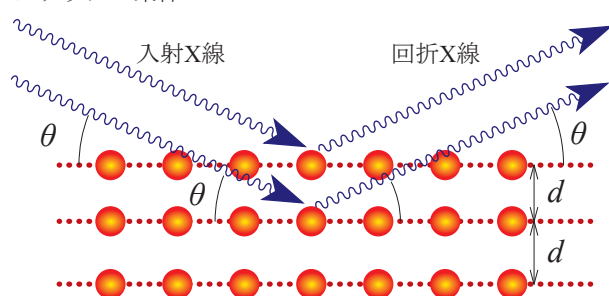


図3 X線回折原理

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (n) \text{ は自然数}$$

図4 ブラッグの法則

は自然数である。格子面間隔 d が応力により伸縮していれば、伸縮前後の回折角 θ の変化から「ひずみ」が求められる。ひずみ率がわかればフックの法則で「応力」に変換できる。

3.2 回折環

図5は鋼材をはじめ一般的な金属材料が有する等方性多結晶構造を示す。この構造とは、結晶軸の方向が定まっていなかった小さい結晶の集合体である。X線の照射径（ $\phi 2\text{mm}$ 前後）に比べ結晶粒のサイズ（例：数十 μm ）は十分に小さい。図6は、等方性結晶構造をもつ金属材料にX線を照射している様子を示す。ブラッグの法則にしたがい、様々な向きの結晶粒によって回折したX線が入射X線の軸を中心に円錐状の回折環となる。

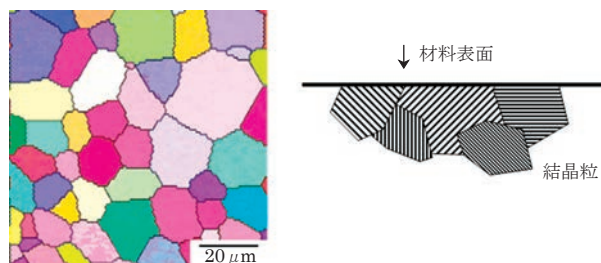


図5 等方性多結晶構造

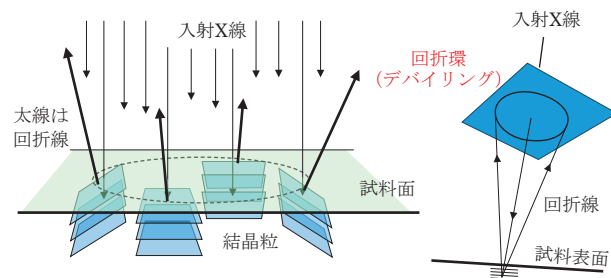


図6 回折環

3.3 $\cos\alpha$ 法

X線残留応力計測法としては $\sin^2\phi$ 法が広く採用されている。 $\sin^2\phi$ 法は、入射X線を走査する機構が必要で、その装置の構造上の制約から計測が難しいケースもある。

一方、 $\cos\alpha$ 法では、入射X線を走査する機構が不要のため、装置の小型・軽量化が可能である。小型・軽量の可搬型の装置の特長を生かし、測定対象物の大きさにとらわれず、現地・現場で自由に測定ができると考えられ、単一入射法である $\cos\alpha$ 法を採用した応力測定装置を開発した。 $\cos\alpha$ 法は2次元検出器を用いて、1回のX線照射

で回折環全周を取得し、応力を算出する方法である。図7に応力による回折環の変化の模式図を示す。無応力の状態では回折環は入射X線を中心とした真円となるが、応力があると回折環がシフトする。図8は $\cos\alpha$ 法による応力の解析方法である。回転角が α のときのひずみを ε_α 、それと回転角 π だけ異なる $(\pi+\alpha)$ 方向のひずみ $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $-\alpha$ 方向のひずみ $\varepsilon_{-\alpha}$ 、さらに、 $(\pi-\alpha)$ 方向のひずみ $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ を用いて、式(1)により $\cos\alpha$ と α_1 の関係を線形近似した傾きMを求め、式(2)を用いて応力の算出を行う。ここでEは縦弾性定数、 ν はポアソン比である。

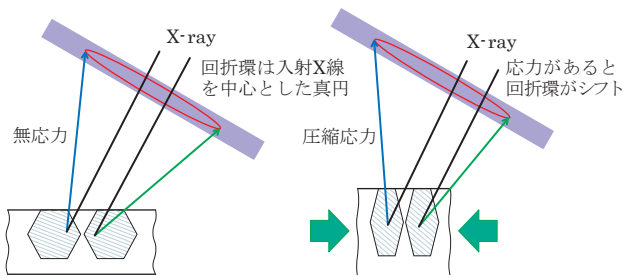


図7 応力による回折環の変化

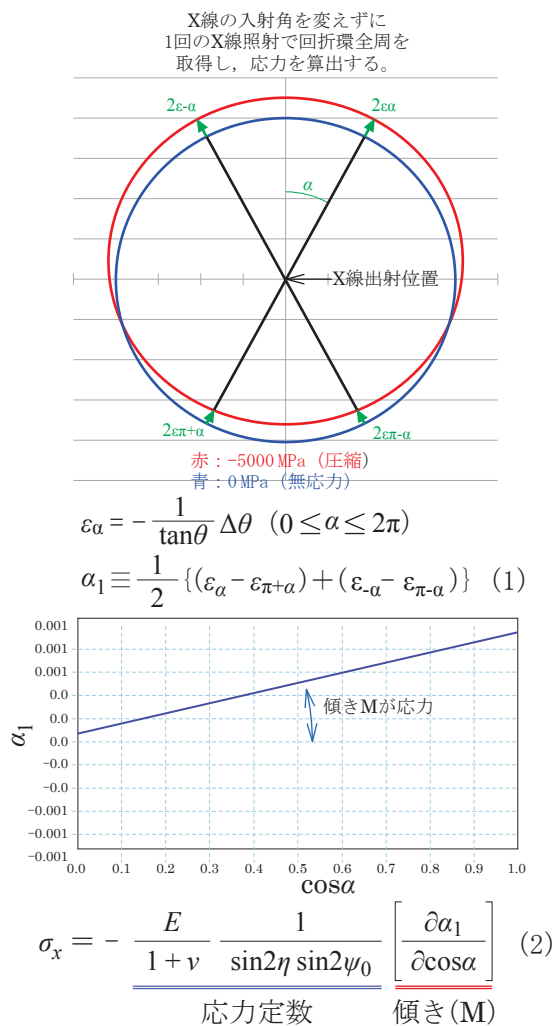


図8 $\cos\alpha$ 法による応力の解析方法

4. X線回折プロファイルの活用技術

4.1 半価幅

回折環のある回転角での回折プロファイルを図9に示す。プロファイルのピークが回折環の中央付近、左右の裾野が回折環の内周の縁付近と外周の縁付近である。半価幅とは、回折プロファイルの半分の高さにおける幅(単位 deg)である。半価幅は、特に鋼では、硬さと良い相関があり、一般的には半価幅が大きい程、硬度が高い傾向がある。

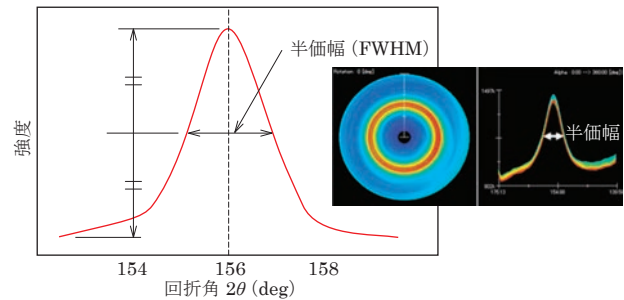


図9 半価幅

4.2 残留オーステナイト量

X線回折を用いて残留オーステナイト量を定量的に測定することができる。残留オーステナイトを計測する場合、回折X線の積分強度を計測する必要がある。回折X線の積分強度は、図10の赤斜線部の面積によって求める。

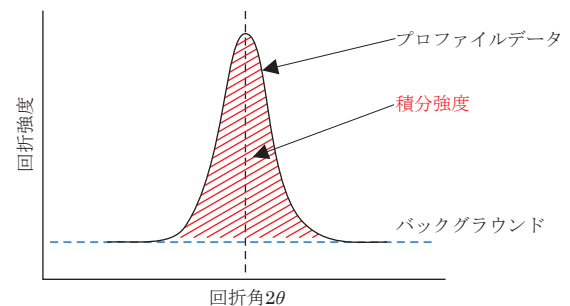


図10 回折X線の積分強度

残留オーステナイト計測を行う場合、図11のように2種類の回折X線を対象としている。マルテンサイト(フェライト) $2\theta = 156.4^\circ$ 付近, オーステナイト $2\theta = 128.8^\circ$ 付近である。

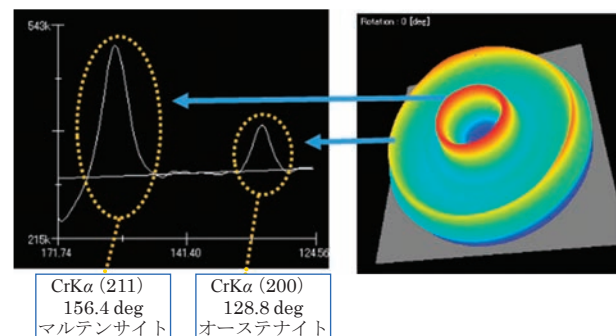


図11 2種類の回折X線

図 12 中の式 (1) で求められる積分強度比を α 角毎に求め、デバイ環全周 (α 角: $0 \sim 360^\circ$) の平均値を残留オーステナイト値としている。

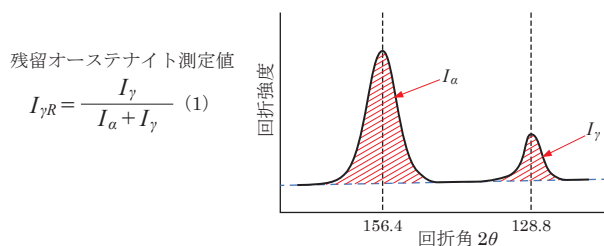


図 12 残留オーステナイト計算方法

5. 様々な測定要望への対応

5.1 測定対象物の種々の形状や材質への対応

写真 1 は遮蔽 BOX 内に可搬型残留応力測定装置を収納した使用例である。インターロック付きで安全に測定できる。また、X 線作業主任者資格も不要である。写真 2 は遮蔽 BOX 外でのオンサイトでの使用例である。可搬型の装置の特長を生かし測定対象物の大きさにとらわれず、現地・現場で自由に測定ができる。

また、種々の材料の測定ができることが求められ、各材料の格子間距離と X 線の波長によって決まる回折角度を把握して、適切な X 線管に交換して測定することが必要である。表 1 は X 線管球の種類と適応する材料の例を示す。写真 3 は管球交換の実施例である。

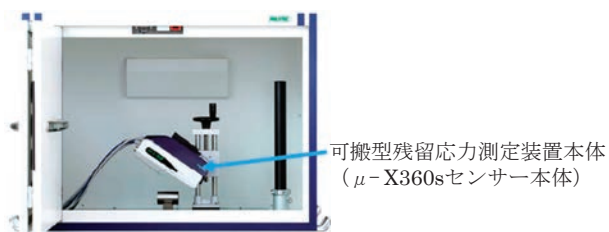


写真 1 遮蔽 BOX 内で使用



写真 2 オンサイトで使用

表 1 X 線管球と被測定材料

X 線管球	材質
Cr	鉄鋼, ステンレス, アルミなど
V	チタン, タングステンカーバイド, 銅など
Mn	オーステナイト系ステンレス, ニッケル基合金など



写真 3 管球交換

5.2 X 線照射面と測定領域

正確な残留応力測定を行うためには、X 線の照射面積と測定領域が相応していることも重要である。

X 線の照射面積を適切に制限することによって、測定部位を精緻に設定することができる。一般的に $\phi 1.0\text{mm}$ のコリメータを用いることが多いが、より微小な領域を測定する場合には、コリメータ径を絞って測定を行う必要がある。最小 $\phi 0.2\text{mm}$ のコリメータを含め数種類のコリメータを準備している。照射位置を示す LED マーカーを測定領域に合わせることで設置が容易である。また、横向きに設置されたカメラ画像から試料距離の調整も簡単にできる。cos α 法の採用により、試料距離マージンも広い ($35 \sim 67\text{mm}$ (フェライトの場合))

5.3 応力分布マッピング

X 線残留応力測定は、X 線ビームのスポット照射によるポイント測定が基本となる。しかし、溶接部近傍や塑性加工後の応力分布を把握したいというニーズも増えている。図 13 は X-Y ステージを用いて、あらかじめプログラムした範囲と間隔で測定を行い、マッピングした事例である。

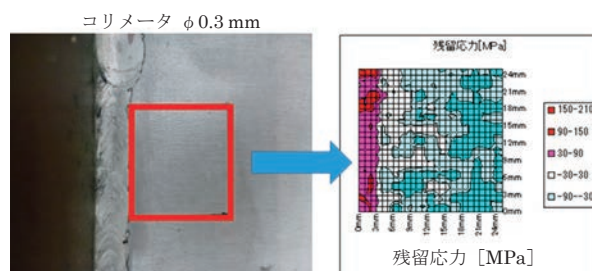


図 13 残留応力マッピング

5.4 電解研磨による深さ方向の応力分布測定

X線残留応力測定装置で用いられるX線の金属への浸入深さは10 μ m程度である。したがって、X線を用いた測定により非破壊測定できるのは、金属などの場合で表面から深さ10 μ m程度の範囲の応力である。深さ方向の応力分布を調べる手段として電解研磨を用いる方法が知られている。電解研磨で表層を除去し、新たに現れた表面について、応力測定をする。電解研磨を行う場合には、測定をしたい位置や範囲に対して、できるだけ均等に研磨することが必要である。研磨時間と深さの関係をリニアに制御するためには、電流制御による研磨方法が有効である。写真4はギア歯面の電解研磨例を示す。電解研磨を行うことにより、深さ方向の応力分布を調べることができる。図14はショットピーニングによる圧縮残留応力の変化量を、深さ方向に測定した事例である。



電解研磨条件

範囲 : ϕ 3 m
電流値 : 1 A
時間 : 210 sec
深さ : 100 μ m

写真4 ギア歯面の電解研磨例

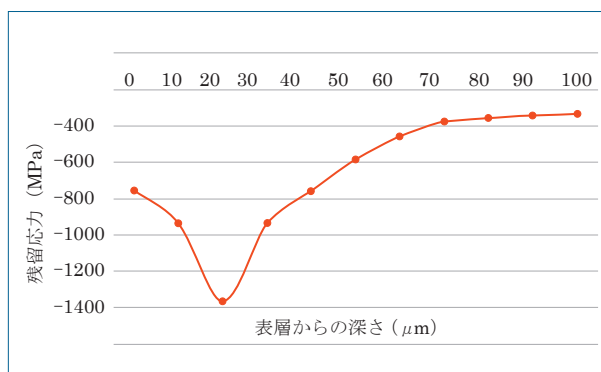


図14 ショットピーニングにおける深さと応力

6. 熱処理関連活用事例

6.1 焼鈍処理における焼鈍効果の確認

図15は部品の溶接部近傍の焼鈍処理前後の残留応力、半価幅の変化を示す。残留応力は、焼鈍前 平均 500 MPa（引張応力）から、焼鈍後 平均

10 MPa へ変化しており、残留応力が焼鈍処理によって解放されていることがわかる。また、半価幅は、焼鈍前 平均 3.64 deg から、焼鈍後 平均 2.51 deg へ減少し、ばらついていた組織が整うことがわかる。X線回折を利用した残留応力測定による焼鈍効果の定量化が可能である。

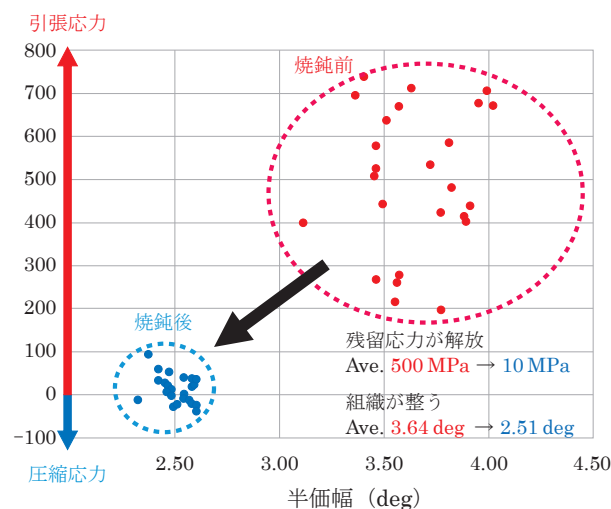


図15 焼鈍処理前後の残留応力 / 半価幅

6.2 サブゼロ処理における残留オーステナイト量の確認

残留オーステナイトは、焼き入れした際に、完全にマルテンサイトにならずに、一部未変態のオーステナイトとして残ったものである。それぞれ回折角度の異なる、 α 鉄と γ 鉄の回折X線を2次元検出器で同時に取得して、 γ 鉄の残留量をパーセント表示することで、残留オーステナイトの割合を測定できる。X線回折を活用した残留オーステナイト測定によるサブゼロ処理硬化の確認が可能である。図16は残留オーステナイト量の確認の実施例である。

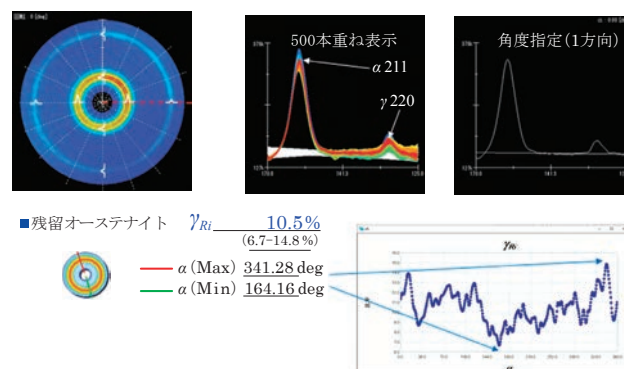


図16 サブゼロ処理における残留オーステナイト量の確認

6.3 X線半価幅による熱処理後の硬度推定

図 17 は、硬さ基準片（山本科学工具研究社製）を用いた、横軸 X 線半価幅 < X-ray FWHM >（単位 deg.）と縦軸 ロックウェル硬度（単位 HRC）の相関図である。X 線半価幅が大きいほど、硬度が高い傾向にある。図 18 に熱処理による半価幅の変化を示す。熱処理前の X 線半価幅 2.62 deg から熱処理後の X 線半価幅 6.71 deg へと大きくなっており、熱処理によって硬度が高くなっていることを示している。X 線半価幅を活用すれば、非接触・非破壊で硬度が推定できる。

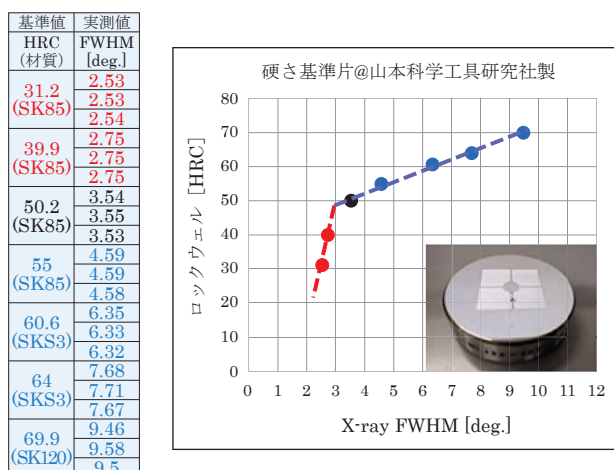


図 17 X線半価幅とロックウェル硬度相関図

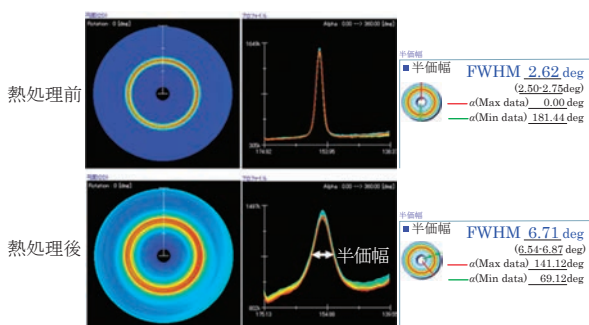


図 18 熱処理による半価幅の変化

6.4 歯車の残留応力測定

従来、歯車の X 線残留応力測定では、隣の歯を切断し測定することが一般的であったが、2 次元検出器を活用することで、歯車の非破壊残留応力測定が可能になっている。

写真 5 に歯車の歯面部の残留応力測定例を示す。赤ラインで示す方向に入射 X 線が歯面に照射される。回折 X 線は入射 X 線の軸（赤ライン）を中心に円錐状に反射されるが、ここでは代表的な 2 つの回折 X 線（黄ライン）を示す。左側の垂直方向に反射される回折 X 線は、隣の上の歯面によっ

てさえぎられてしまう。一方、右斜め方向の回折 X 線はさえぎられることなく、残留応力測定装置の 2 次元検出器に入る。

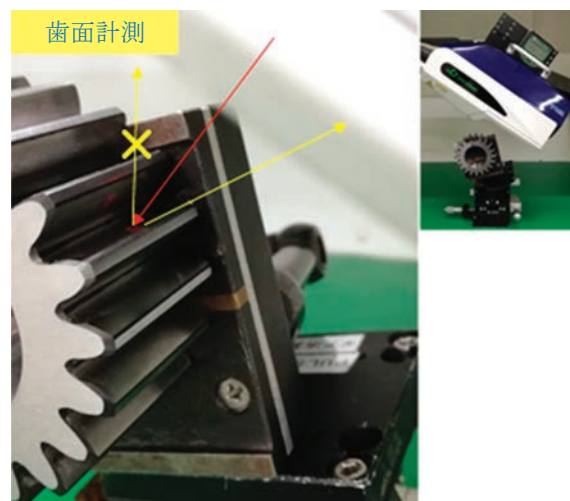
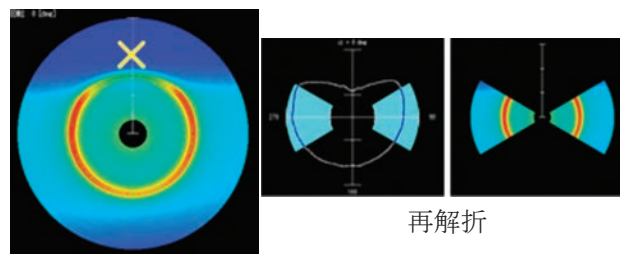


写真 5 歯車歯面の残留応力測定

図 19 は 2 次元検出器で検出された歯面からの回折環を示す。上の歯の影響で回折 X 線が全周取得できていないが、上下の回折 X 線は無効化して、有効な左右の回折 X 線のみを利用して応力算出して正しい計測が可能である。写真 6 に歯底部の残留応力測定例を示す。回折 X 線（黄ライン）が隣



再解折

上の歯の影響で回折 X 線が全周取得できない上下の回折 X 線は無効化し再解折

図 19 歯面からの回折環

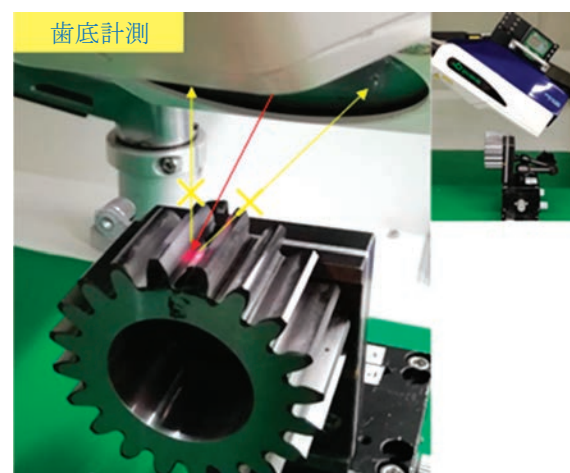
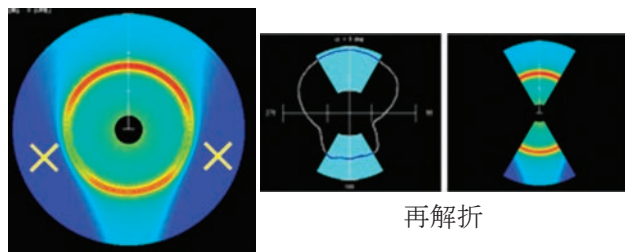


写真 6 歯車歯底の残留応力測定

り合う左右の隣の歯面でさえぎられている。図 20 は 2 次元検出器で検出された歯底からの回折環を示す。横の歯の影響で回折 X 線が全周取得できていないが、左右の回折 X 線が無効化して、有効な上下の回折 X 線のみを利用して応力算出して正しい計測が可能である。



横の歯の影響で回折X線が全周取得できない
左右の回折X線が無効化し再解折

図 20 歯底からの回折環

7. まとめ

ここまで可搬型 X 線残留応力測定装置で採用されている 2 次元検出器を活用した X 線残留応力測定原理、種々な測定対象物を測定するために必要な対応内容、熱処理分野における活用事例の紹介をした。熱処理は自動車部品や工作機械などの多くの金属部品の強度や耐摩耗性の向上に欠くことができない工程である。残留応力値や残留オーステナイト値は、強度や耐摩耗性に密接に関連していると考えられているため、それらの測定技術は、熱処理の工程改善、品質保証を支援するツールとして活用いただけるとものと期待している。残留応力測定装置は、金属部品の形状、材質、用途に合わせて種々な対応が要求される。弊社は長年にわたり、多くのユーザの要求に応じてきた。ご紹介した可搬型 X 線残留応力測定装置 μ -X360s は自動車関連メーカーを中心に様々な分野でご使用いただいている。熱処理関連の分野でも益々ご活用いただけると幸いである。

— 参考文献 —

- 1) 小栗泰造：残留応力と X 線応力測定法；大阪府立産業技術総合研究所報告（No22, 2008）
- 2) 鈴木章司：X 線残留応力測定の技術動向と多様化する測定ニーズへの取り組み；日本塑性加工学会 会報誌 Vol.1 no.11（2018-11）
- 3) huji. Taira, Keisuke. Tanaka, Toshiharu. Yamasaki, “A Method of X-Ray Microbeam Measurement of Local Stress and Its Application to Fatigue Crack Growth Problems”, Journal of the society of materials science, Japan Vol. 27, p. 251(1978)
- 4) Toshihiko. Sasaki, Yukio. Hirose, “Single Incidence X-ray Stress Measurement for All Plane Stress Components Using Imaging Plate of Two-Dimensional X-ray Detector”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.44, No 504, pp. 1138-1143（1995）
- 5) Keisuke Tanaka, “The cos method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector” Bulletin of the JSME, Vol.6, No.1,（2019）