

A1 Machining

鋼材への適用研究と測定事例

「半導体型X線装置を用いた残留応力評価」

“Residual Stress Evaluation using Semiconductor-based X-ray Detector”
Research on this Detector Application to Steel Materials and
Case Studies on Measurements

キーワード | 非破壊検査・X線応力測定・残留応力・金属材料
半導体検出器・画像処理

技術開発本部／開発推進部

乾 典規 Noriki Inui

要 旨

X線応力測定法は、X線回折現象を利用して残留応力を定量的に評価する非破壊検査方法の一種である。NACHIでは、X線応力測定法のインライン全数検査適用を目的として、ラインタクト内で応力測定可能な装置を開発してきた。

前稿(NACHI TECHNICAL REPORT Vol.42)では、本測定法の原理について解説した。また、半導体センシング技術を適用した開発機は、測定時間1秒という短時間測定においても、検査用途に十分適用可能な測定精度を有することが明らかとなった。

これまでの基礎研究では、市販の応力標準片を用いて評価を行ってきた。標準片はメーカーにより残留応力値が保証されており、硬度、表面粗さなどの材料状態もX線応力測定に適した、いわば理想状態にある。

一方で、実際の製造部品は機械加工や熱処理の工程を経て、材料状態は多様であり、標準片と同様の条件が成立するとは限らない。そこで本研究では、より実使用に近い材料状態に加工した鋼材試料を測定することで、その測定特性を評価した。

さらに、実際の製造部品への適用検討として、ショットピーニング加工材の有効深さ評価を実施した。

Abstract

X-ray stress measurement is a type of non-destructive inspection method for quantitatively evaluating residual stress using X-ray diffraction. For the purpose of applying X-ray stress measurement to 100% in-line inspection, NACHI has developed a device capable of measuring stress within the line takt time.

In the previous article published in NACHI TECHNICAL REPORT Vol.42, the principle of this measurement method was described. In addition, it was confirmed that the developed device incorporating semiconductor sensing technology achieves sufficient measurement accuracy for inspection applications, even with a short measurement time of one second.

In previous fundamental studies, evaluations have been conducted using commercially available stress standard specimens. The residual stress values of these standard specimens are specified by the manufacturers, and their material conditions, such as hardness and surface roughness, are optimized for X-ray stress measurement, representing an ideal state.

On the other hand, actual production components undergo machining and heat treatment processes, leading to diverse material conditions that do not necessarily correspond to those of standard specimens. Therefore, this study evaluates the measurement characteristics using steel specimens processed to represent material conditions closer to practical applications.

Furthermore, as part of an investigation into applicability to actual manufactured components, the effective depth of shot-peened materials was evaluated.

1. 二次元検出器を用いたX線応力測定法($\cos\alpha$ 法)

本研究ではX線応力測定法として $\cos\alpha$ 法を採用した。詳細な測定原理は前稿で解説したため、本稿では要点のみ述べる。

X線応力測定は、ブラッグの法則に基づくX線回折現象を利用する手法である。特定波長のX線を結晶に入射すると、格子面間隔に応じた角度で回折が生じ、この角度を回折角と呼ぶ。応力によって格子面間隔が変化(ひずみ)すると回折角も変化するため、回折角の変化量を測定することがX線応力測定の基本原理である。

$\cos\alpha$ 法は、二次元検出器を用いて回折X線を撮像することが特徴である。図1は金属などの多結晶体にX線を入射した場合を示しており、円錐状に広がった回折X線の底面を撮像することで回折環を得る。図2は回折環の中心から放射方向の回折X線強度分布(回折プロファイル)である。プロファイルピークの両側を結んだ直線(バックグラウンド)をプロファイルの各点の強度から減算してピーク強度Aおよび、ピーク位置を得る。ピーク位置を回折環の半径として、応力による半径の変化量を回折角変化量に換算し、応力を計算するのが $\cos\alpha$ 法の基本手順である。

さらに、ピーク強度Aが半分になるときのプロファイルの幅を半価幅と呼び、転位密度(原子配列の乱れの量)の影響により増減する。半価幅は材料の硬度とも比例があるといわれており、品質管理などの実用において硬度の指標として用いられている。

したがって、 $\cos\alpha$ 法の測定を行なうことで、残留応力と同時に材料硬度の推定が可能である。

2. 鋼材試料の測定特性評価

実際の製造部品は、機械加工や熱処理などの工程によって材料状態が変化し、その影響は回折環形状の変化として現れる。

本章では、代表的な材料状態として、硬度と表面粗さを変化させた鋼材を製作し、四点曲げひずみゲージ法を用いた測定精度検証を行なうことで、種々の材料状態における測定特性を評価した。

1) 測定試料と評価方法

製作した試料の材料状態を表1に示す。鋼種は軸受鋼SUJ2とし、機械加工によって表面粗さを仕上げ、熱処理によって硬度を付与した。

製作した実鋼材試料は、表面の残留応力状態が既知でないため、X線測定値の精度を確認するための指標が必要となる。そこで本研究では、評価方法として図3に示す四点曲げひずみゲージ法を利用した。(a)は四点曲げ試験の模式図であり、短冊状の試料の裏面に

ひずみゲージを貼付し、表面側をX線で測定する構成である。(b)は四点曲げ荷重で生じる応力分布の模式図を示しており、理論上、弾性域においては中立軸を挟んで表裏の応力方向が反転し、絶対値は等しくなる。

したがって、ひずみゲージで得られた応力の絶対値とX線測定値を比較することで、実鋼材試料における測定精度を評価することができる。

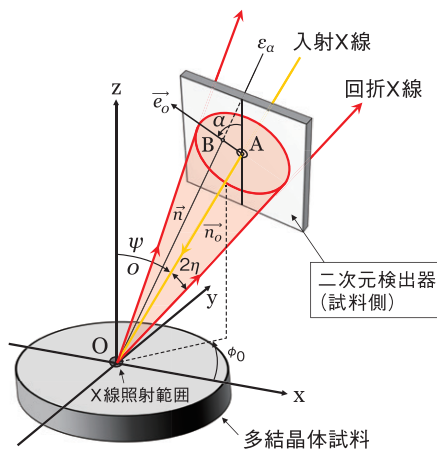


図1 cosa法の光学系¹⁾

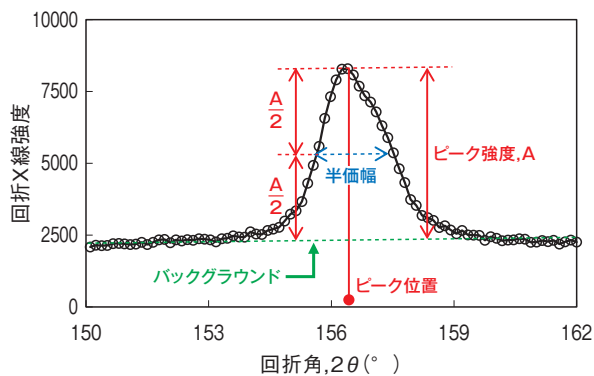
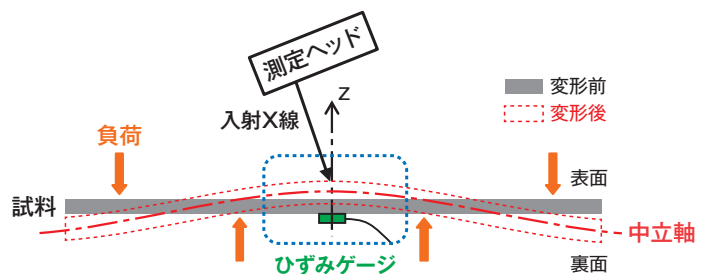


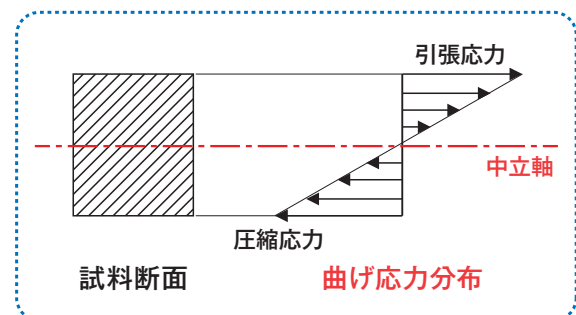
図2 回折X線プロファイル

表1 製作した測定試料

	パラメータ	備考
材質	SUJ2	
表面粗さ	Ra 6.3,12.5,25	計3段階
硬度	HRC 30,35,40,45	計4段階



(a) 四点曲げ試験



(b) 試料表裏の応力分布

図3 四点曲げひずみゲージ法

2) 回折環撮像条件と測定装置

本装置の回折環撮像の標準条件を表2に示す。鉄鋼に最適なCrターゲットX線管を使用することで、X線照射1秒で応力値を測定できる。以降、本稿の測定結果は、特記のない限り、この条件に準拠して取得した。

測定レイアウトを図4に示す。卓上四点曲げ試験機に試料を設置し、ハンドル操作により試料に応力を負荷した。試料裏面に貼付したひずみゲージの出力は、動ひずみ計(共和電業製、DPM-913B)で読み取り、フックの法則に基づいて負荷応力に換算した。

3) 無負荷状態の評価

四点曲げ試験では、弾性域において試料表裏の応力絶対値が一致するが、塑性域に入ると成立するとは限らない。そのため、負荷前に存在する残留応力と負荷応力の総和が弾性域内に収まる条件で試験する必要がある。そこで、負荷応力上限値を設定するため、試験前の無負荷状態で各試料の応力測定を行なった。

測定結果を図5に示す。(a) 試料の製造過程で発生した残留応力は±100MPaの範囲内であった。また、硬度や表面粗さと応力の間に関連は見られなかった。さらに、各測定値の標準偏差(エラーバー)は硬度の増加に伴って大きくなる傾向を示した。この標準偏差の増大は、硬度が高い領域で半価幅が広がり、回折ピーク位置の決定精度が低下したためと考えられる。

(b) 半価幅は硬度の上昇に伴って増大する傾向を示しており、(a)で述べたピーク決定精度の低下を裏付けている。また、HRC45～50の増加量に比べてHRC50以降の増加が顕著であることから、半価幅は硬度に対して単純な比例関係ではなく、非線形的な応答を示すことが分かる。

これらの結果から、本研究の負荷応力上限値を250MPaに設定した。

表2 回折環撮像の標準条件

項目	パラメータ	
入射X線	ターゲット材質	Cr
	回折面	(2 1 1)
	電圧 (kV)	30
	電流 (mA)	4
	デューティ比 (%)	50% (30×4×0.5=60W)
光学系	コリメータ (mm)	1.5
	X線照射径 (mm)	2.4
	カメラ長 (mm)	15.5
	入射角 ψ_0 (deg)	35
測定時間 (秒)		1秒 (100ミリ秒×10枚)

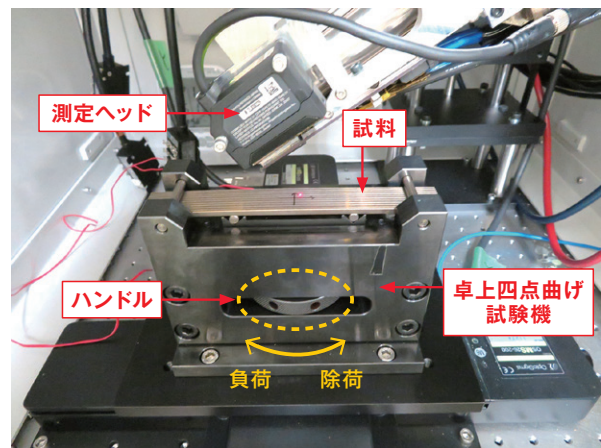
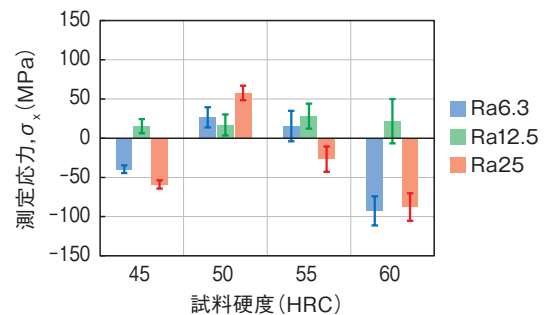
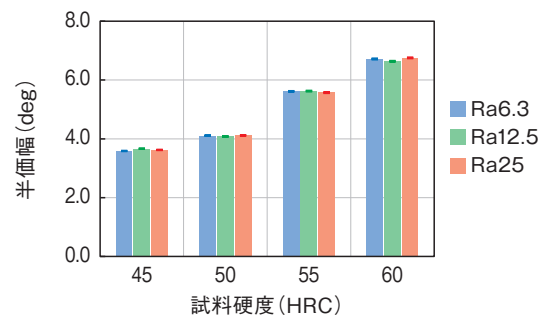


図4 測定レイアウト



(a) 硬度と応力の関係



(b) 硬度と半価幅の関係

図5 無負荷状態の測定結果

4) 四点曲げ試験結果

本節では、四点曲げ試験の結果を示す。試験において、負荷応力0～数MPa程度の低応力域では荷重が十分に安定しないため、本研究では50MPa負荷時の測定応力および、負荷応力を基準(ゼロ点)として設定し、そこからの変化量を用いて測定特性を評価した。

図6はRa6.3、HRC60の試料に対する四点曲げ試験結果である。負荷応力変化量($\Delta\sigma_A$)と測定応力変化量($\Delta\sigma_x$)を一次関数で近似した場合、試料表裏の応力絶対値が等しいことから、直線近似傾きは理論上1.00になる。この傾きは、負荷応力に対する測定応力の応答性を表わしている。しかしながら、校正前の応答性は0.87であった。これは、本試料の同等製品の検査において、X線測定値が残留応力の真値に対して87%の値として出力されることを意味する。

応答性低下の主要因は、X線ひずみを応力へ換算する際に用いる応力定数(X線の弾性定数)に標準値を用いたためと推定する。

X線の弾性定数は四点曲げ試験で得た一次関数から算出できる。そこで、校正前の一次関数を用いてX線の弾性定数の校正を行ない、校正後の弾性定数を用いて再度同じ測定を行なったところ、応答性は0.99まで向上した。

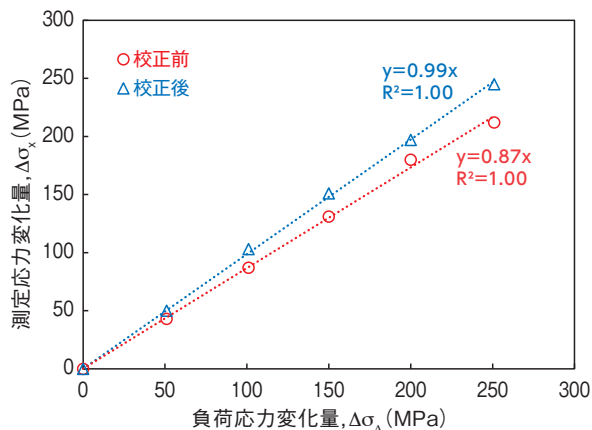


図6 四点曲げ試験結果の一例 (Ra6.3 HRC60)

なお、一次関数のあてはまりの良さを示す決定係数 R^2 は校正前後ともに1.00を示し、極めて良好な線形性であった。

X線の弾性定数の校正前(標準値)の応答性を表3に整理し、硬度・表面粗さに対する応答性の変化を評価した。その結果、HRC50、Ra12.5の試料で応答性が最もよく、硬度あるいは表面粗さがこの条件から増減すると、いずれの場合においても応答性が低下することが明らかとなった。

各試料で校正を行ない、再測定した応答性を表4に示す。校正前は0.87～1.00の範囲であったのに対し、校正後は0.97～1.02に改善した。なお、X線強度の統計変動などに起因する不可避な測定誤差により、校正後であっても1.00には完全に一致しない。

これらの結果は、材料の組織状態(硬度や表面粗さに影響する微視構造)がX線の弾性定数に影響することを示唆している。したがって、応力の絶対値を部品検査へ適用する際には、材料状態に応じた適切な弾性定数を使用することが不可欠である。

表3 校正前の測定値応答性

		表面粗さ(Ra)		
		6.3	12.5	25
硬度 (HRC)	45	0.90	0.99	0.94
	50	0.99	1.00	0.98
	55	0.96	0.97	0.96
	60	0.87	0.95	0.90

表4 校正後の測定値応答性

		表面粗さ(Ra)		
		6.3	12.5	25
硬度 (HRC)	45	1.00	1.02	0.99
	50	0.98	1.01	0.97
	55	0.98	1.02	1.02
	60	0.99	0.99	0.98

3. 測定事例～ショットピーニング有効深さの評価～

本節では、より実使用に近い状態での評価を行なうため、ショットピーニング加工した鋼材の測定検証を行なった。その際、電解研磨とX線応力測定を組みあわせることで、ショットピーニング加工の有効深さを評価した。

1) ショットピーニング加工

ショットピーニング加工は、ショット、メディア、カットワイヤ、ビーズなどと呼ばれる球状の投射材を被加工物に高速で衝突させることで、加工面に圧縮残留応力と表面硬化を付与し、部材の強度を向上させる表面改質技術である。その原理を図7に示す。硬度が被加工物より高いショットを無数に投射すると、加工面はショットの形状(球状)に沿って局所的に塑性変形し、その後の弾性回復により、変形方向と逆向きに応力が発生して圧縮残留応力が形成される。また、塑性変形によって金属内部の転位密度が増加し、転位同士が互いに干渉することで変形が困難になり、結果として表面硬度が向上する。

一般的に、ショットピーニングによって形成される圧縮残留応力や加工硬化の有効深さは、表面から約0.1～1.0mmの範囲におよび、それ以深では徐々に母材の残留応力や硬度に近づいていく。また、有効深さや効果は、ショットの材質、投射エネルギー、投射時間、さらに、被加工面の硬度や応力状態などの要因によって変動する。

ショットピーニングの品質管理にはアルメン法と呼ばれる手法が一般的に用いられる。これは、短冊状の基準片に工程条件に基づいたショットピーニング処理を施し、基準片の反り量や被膜率を評価する手法である。したがって、アルメン法や加工条件の管理は「狙い通りの応力が付与されたか」を間接的に推定する方法と位置づけられる。一方、X線応力測定法は圧縮残留応力を直接的に定量化でき、電解研磨との組み合わせにより有効深さの評価も可能であることから、ショットピーニングの品質保証において極めて重要な役割を果たしている。

2) 測定試料と測定条件

測定試料には、図8に示すNACHIにて開発された工具用特殊鋼材であるMDS7Eを使用した。試料は熱処理により硬化させ、そのビッカース硬さは約HV800であった。これに対し、TP1には5秒間、TP2には10秒間のショットピーニング加工を施し、加工後の表面硬度はいずれも約HV1000であった。

ショットピーニング加工において、加工影響が表層からどの程度の深さまで及ぶかを把握することは重要である。そこで本研究では、加工面を段階的に電解研磨し、その都度X線応力測定を行なうことで、深さ方向の残留応力分布を測定し、有効深さを評価した。なお、高硬度材では降伏応力が高く、塑性変形が生じにくいいため、加工の影響は比較的浅い領域に限定されると考えられる。このため、本測定では深さ60 μ m以下の領域に着目して評価を行なった。

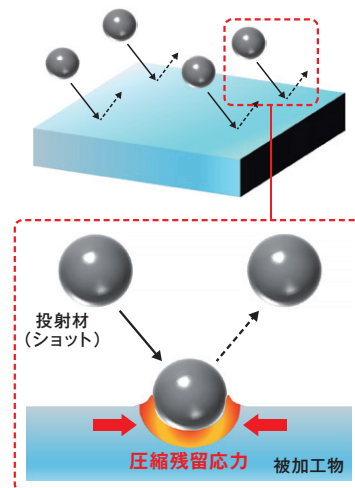


図7 ショットピーニング加工

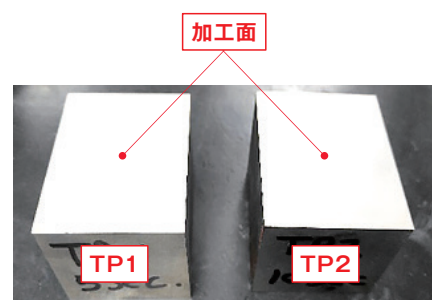


図8 ショットピーニング試料

3) 測定結果

深さ方向の圧縮応力分布を図9に示す。TP1および、TP2のいずれにおいても、表面における圧縮残留応力が最大であり、その値はほぼ同等であった。圧縮残留応力は深さの増加に伴って減少し、TP1では深さ30 μm 付近で、TP2では40 μm 付近でそれぞれ約-100MPaまで低下した。この結果から、ショットピーニングの投射時間が長いほど、圧縮残留応力が及ぶ有効深さが深くなることが明らかとなった。

本研究で測定した回折X線の半価幅分布および、TP1と同等の加工を施した試料(TP1相当品)のピッカース硬度分布を図10に示す。TP1では深さ6 μm 、TP2では深さ10 μm 付近で半価幅が最小となり、その後、深さの増加に伴って増大する傾向が確認された。一方、TP1相当品の硬度分布は、深さ10 μm 付近で最大となり、その後減少する傾向を示した。

前節にて、半価幅は硬度の増加に伴って非線形的に増加する傾向を示したが、本節では両値の増減が背反する傾向を示した。これは、硬度付与過程の違いが反映されたものと考えられる。すなわち、前節の鋼材試料は熱処理による結晶構造の変化で硬度が付与されたのに対し、ショットピーニングでは外力に起因する塑性変形により硬度が付与され、その過程で転位の移動や再配列、動的回復が生じてミクロな格子ひずみのばらつきが低減し、結果として高硬度領域で半価幅が減少する挙動が現れた。

したがって、半価幅を硬度の指標として検査に利用する場合には、対象となる加工方法によりその関係性が変化する可能性があることに留意する必要がある。

以上の結果から、TP1のX線測定値とTP1相当品の硬度分布はいずれも、深さ30 μm 以深で変化量が小さくなる傾向を示した。これは、圧縮残留応力および、硬度の変化が同程度の深さで収束していることを意味しており、本装置を用いることでショットピーニングによる加工影響の有効深さを評価可能であることを示している。

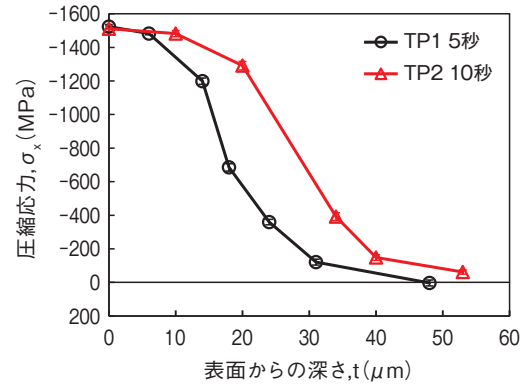


図9 深さ方向の圧縮応力分布

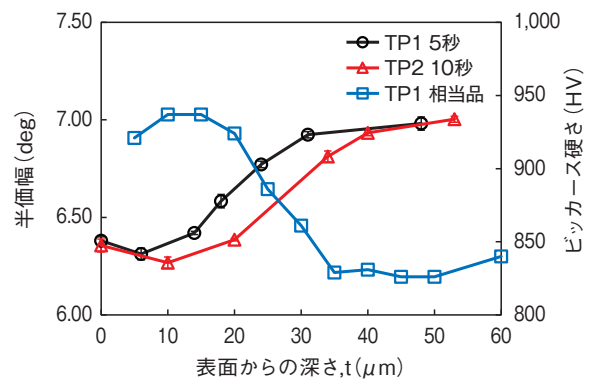


図10 半価幅分布および同等品の硬度分布

4. まとめ

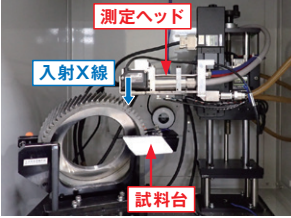
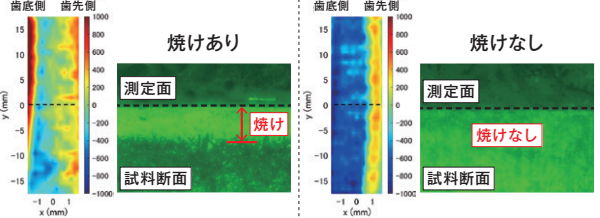
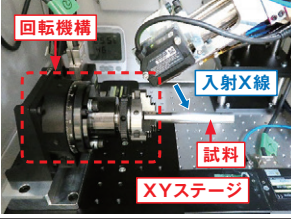
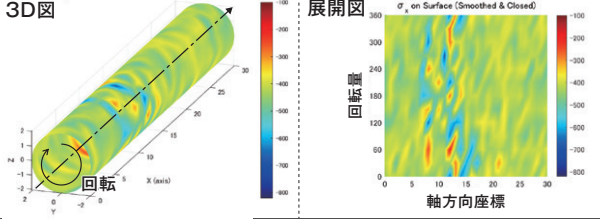
本稿では、これまでの理想的な試料による基礎研究から、より実際に近い鋼材試料への適用研究に発展させた。その結果、試料の残留応力真値に対する応答性は材料状態により変動するため、真値の正確な測定にはX線の弾性定数の校正が必要である。

さらに、測定適用事例としてショットピーニング加工の有効深さ評価を紹介した。その際、試料への硬度付与の方法によって、半価幅と硬度の相関が変わることが明らかとなり、半価幅を硬度の指標とする場合に注意が必要である。

NACHIでは、世界的な潮流をふまえ、AI技術を適用した革新的な技術の開発をめざしており、本装置もインライン全数検査とAI技術を複合した、独自の検査技術を開発していく。

最後に、NACHIでは表5のように様々な加工品の分析に本測定を適用してきた。X線測定に関するご質問・ご依頼に関しては、別途問合せされたい。

表5 測定適用事例

測定目的	材質	測定風景／内容	測定結果
1 歯車歯面の研削焼け評価	SCM鋼		
2 線材研削面の応力分布調査	合金鋼		
3 溶接部の接合評価	Al/Cu	接合部の応力を評価し、接合強度との相関を検証	
4 被膜厚測定	合金鋼	コーティングされた基材の回折X線から膜厚を推定	
5 疲労度分析	SUJ2	疲労試験前後のX線データとAIを適用し、疲労度を評価	

参考文献

- 1) 乾典規:半導体型X線残留応力測定装置の開発
～X線応力測定法と基礎評価～,
NACHI TECHNICAL REPORT, Vol.42, pp.45-52,(2025)