

ショットピーニング加工部におけるX線回折残留応力測定の定量評価

残留応力の存在はパーツ類や集合材の耐用年数を決める重要な要因となります。プロトは20年以上に亘って残留応力測定の技術開発を行い、世界トップクラスの測定システムの販売と受託測定の実績を積み重ねてきました。

なぜXRDで評価するのか？

X線回折(XRD)は定量的に残留応力値を評価できるため、製造現場で使用されるピーニング加工評価時に活用されています。

XRDは定量評価が必須とされるピーニング加工の場面でXRDのようなシステムは非常に重要な役割を果たします。通常のピーニング/ブラストメディア技術として用いられるキャストショットやカットワイヤー、グラスベッド(特殊加工であるレーザーショックピーニングも含む)のような加工を受けた部材はXRDを使用して、頻繁に定量評価されています。

ピーニングは部材表面あるいは表面近辺の残留応力付与に用いられており、それらの部材のパフォーマンスや耐久年数の大幅な改善に貢献しています。ショットピーニング加工を受けていない部材に対し、ピーニングを付与することにより、部材の保証期間内のトラブル発生回数の減少、耐久年数の延伸という効果をもたらします。

ピーニングは非常に重要な加工方法です。その費用対効果を検証するためにXRDを用いることは非常に有益といえます。

ピーニングを受けた部材の残留応力の評価はエンジニアやメーカーに多くの情報をもたらします。

それらの情報はパーツの生産個数の最適化、疲労強度の向上や金属疲労発生抑制等、高いピーニング技術が要求される場面で活用されています。

ピーニング技術の向上が結果的に開発・製造コストの抑制、部材の軽量化やパフォーマンス向上に繋がっていきます。

XRDの評価方法

X線は金属やセラミックスのような原子が整然と並んだ結晶体に反射します(図1参照)。X線回折角 θ はブラッグの法則($n\lambda = 2d\sin\theta$)で用いられる格子間隔 d に関係しています。

λ は入射X線の波長を表し、 $n=1$ になった場合に初めてX線回折が起きます(図2参照)。X線の波長 λ と回折角 θ を測定することによって、格子間隔 d が分かり、各材質が持つ標準体積から応力値を算出することができます。この応力は弾性理論によって算出されます。

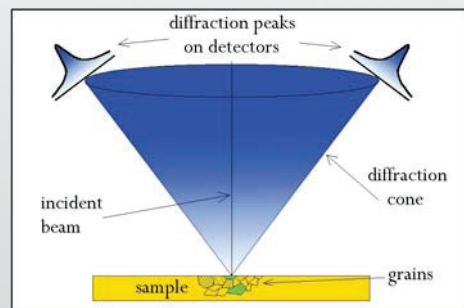


図1: 回折ピーク

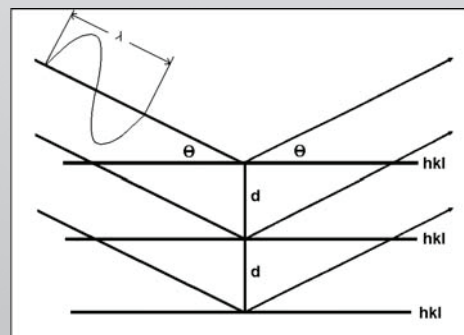


図2: ブラッグの法則



図3: 溶接部のショットピーニングを受けたエリアとカバーで覆われたエリア

プロトマニュファクチュアリングはXRDを使用した残留応力測定分野において20年以上に亘り、世界中のユーザーから数多くの支持を集めてきました。自動車や航空宇宙産業はもちろん、橋梁や船舶、潜水艦、天然ガスのパイプライン等の豊富な残留応力測定実績を持っています。

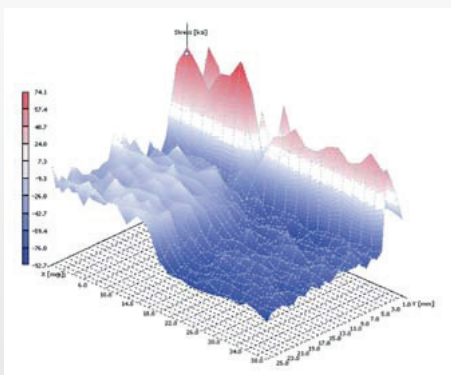


図4: 溶接部における残留応力マッピング

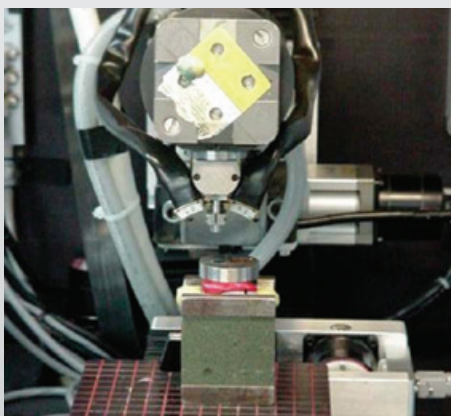


図5: ラボ内でのショットピーニングを受けた部材の残留応力測定

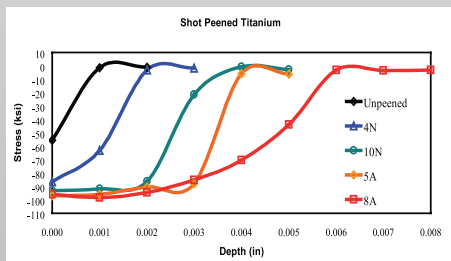


図6: 異なる強度のショットピーニングの比較



図7: 屋外における残留応力測定

XRDとアルメンストリップ試験片の違い

ピーニング効果は通常、アルメン強度とパーセンテージ率によって評価されます。多くの潜在的に異なる残留応力の勾配はアルメンストリップ試験片と同じ回折と観察されたパーセンテージ範囲の結果から生み出されたと思うかもしれません。パーセンテージの範囲はピーニング加工を受けた部材表面の光学的に評価された部分を示しており、一般的に部材表面におけるピーニング付与の均一さを評価するために用いられています。しかしながら、この範囲は常に均一な応力状態を示すわけではありません。

16-18A(強度125%)のCW-28ショットを使って、熱溶接部のショットピーニングを考慮します。ピーニング加工の効果を証明するため、溶接部の一部分を覆ってピーニングを加え、2パターン(ピーニング有り・無し)の比較評価を行います。残留応力は溶接部の一部分と母材の全体部に渡って分布しています。

図4が示す通り、ショットピーニングの技術は溶接部と母材の応力状態に大きな影響を与えています(応力の分布が中心近辺に近づくにつれ、上昇)。応力分布図の左部は”溶接状態”を示す、引っ張り応力を持っており、溶接熱がゾーン(HAZ)に影響を与える一方、母材部は中-高程度の圧縮応力を平均的に持っていることを示しています。

応力分布図の右部はショットピーニングを受けた部分となるため、圧縮の応力を示す一方、母材部の応力値は似たような傾向を示しています。このエリアは溶接部のショットピーニング加工の典型例と言えます(溶接部にショットピーニングを付与しきれなかったため、引っ張り応力が一部残存)。

この情報はショットピーニングが溶接部やHAZの応力除去に如何に有効かを示す一方、母材に圧縮応力が存在することを教えてくれます。このピーニング加工はサンプルの大きさ(体積)を考慮した場合、溶接部とHAZ全体に圧縮応力を付与するまでには至っていません。

この情報は溶接部あるいはHAZに対して、圧縮応力付与の量を増加させるか、熱処理をピーニング加工前に行い、応力除去を行う必要性を示しています。このような詳細な情報はアルメンストリップ試験片やパーセンテージ評価では得ることはできません。

XRDはラボ内で使用可能か?

ラボでは頻繁にXRDを使って、ショットピーニングを受けた部材の応力測定が行われています。ピーニングの変更は部材表面下の残留応力勾配に変化をもたらす可能性があるため、部材内部の残留応力は深さ方向の視点から評価する必要があります。

図5はXRDシステムを使ったチタン合金部材の残留応力測定の風景です。図6はチタン合金の部材に対して数種類のショットピーニング処理を加え、応力対深さ方向の残留応力値を示したものです。

深さ方向の観点から検証した場合、同様の材質であっても、ショットピーニングの強度によっては深さ方向の応力値がかなり異なることが分かります。目的に応じた適切なショットピーニング選択のため、この情報は役立ちます。

XRDは屋外でも使用可能か？

XRDは屋外での使用はもちろん、屋内にある大型部材に対しても測定が可能です。

ショットピーニング処理が複数点に渡って行われた大型ピニオンギアの残留応力測定にも有効です(図7, 8を参照)。

残留応力対深さ方向の結果はピーニング強度とショットサイズ、ショット硬度が深さ方向の応力において如何に影響を与えているかを示しています(図9参照)。

ショットピーニング加工を受けた部材内部にある実際の残留応力値を測定することは、ピーニング加工の正確な評価のため必須です。これはアルメンストリップ試験片の厚みがアルメン強度に影響を与えることに起因します。

つまり、より急で強度が高い圧縮応力をもった勾配は、強度が高くない圧縮応力の勾配ではなく、より深い部分に届いたアルメンストリップ試験片の歪みと明らかに同じと言えます。

更にX線回折ピークの幅/広がりにはサンプル体積の転位密度に関係しています。つまり深い部分でのピーニング効果を得るため、サンプル体積におけるネットワークハードニングの存在を基準とする必要があります(図10参照)

XRDはインラインや測定試験場でも使用可能か？

X線検出器とコンピューターの大幅な進歩によって、XRDによる限りなくリアルタイムで正確な残留応力測定を実現しました。部材の構造や加工に関わらず、深さ方向の残留応力測定が可能となったこともあり(表面の測定の場合では100%非破壊で測定)、インラインや品質管理部門でXRDは現在頻繁に活用されています。

XRDが部材表面を非破壊で測定可能なため、a)各製造段階における同一箇所の残留応力値を正確にトラッキング、b)残留応力値を定量値でモニタリング、c)品質証明の発行等を行えるようになりました。つまり、XRDは部材内部に潜む有害な残留応力への処置を容易にしてくれたと言えます。(その処置自体の効果を評価、実行、モニタリングする際もXRDは活躍します。)

XRDを如何に活用するか？

XRDはオーバーピーニングを受けたエリアを特定する際に役立ちます(オーバーピーニングを受けた部材は耐久年数が短くなる傾向にある)。

XRDは狭い測定エリアでも活用できます。XRDとは逆に金属疲労試験はコストがかかり、測定時間を要します。XRDは屋内外問わず(測定試験場や工場のインライン)使用されており、品質保証や加工評価には最適なツールと言えます。

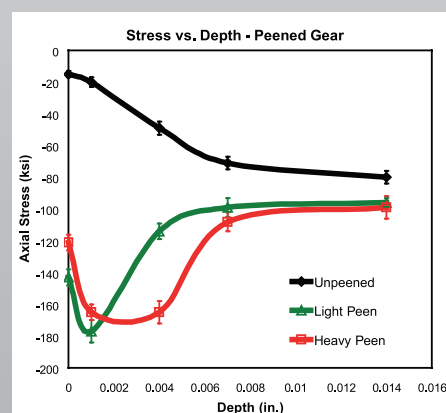


図9: 異なる強度のショットピーニングを用いた対深さ方向の応力分布図

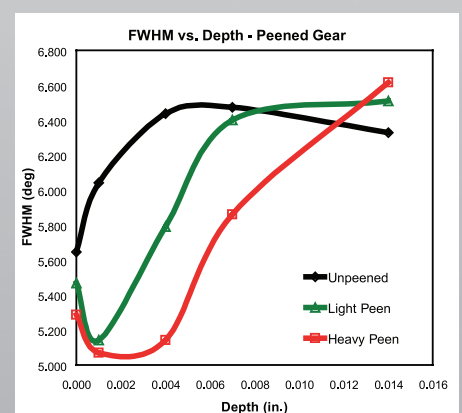


図10: 異なる強度のショットピーニングを用いたFWHM(半値幅)図

図8 (左): 屋外における残留応力測定

The image displays two different models of ultrasonic welding equipment. On the left is a large, black, portable ultrasonic welding machine with a blue handle and a yellow base. It features a warning label that reads "CAUTION" and "ULTRASONIC WELDING". On the right is a smaller, white, desktop ultrasonic welding machine with a black handle and a control knob. Both machines are shown against a plain white background.

www.protoxd.jp