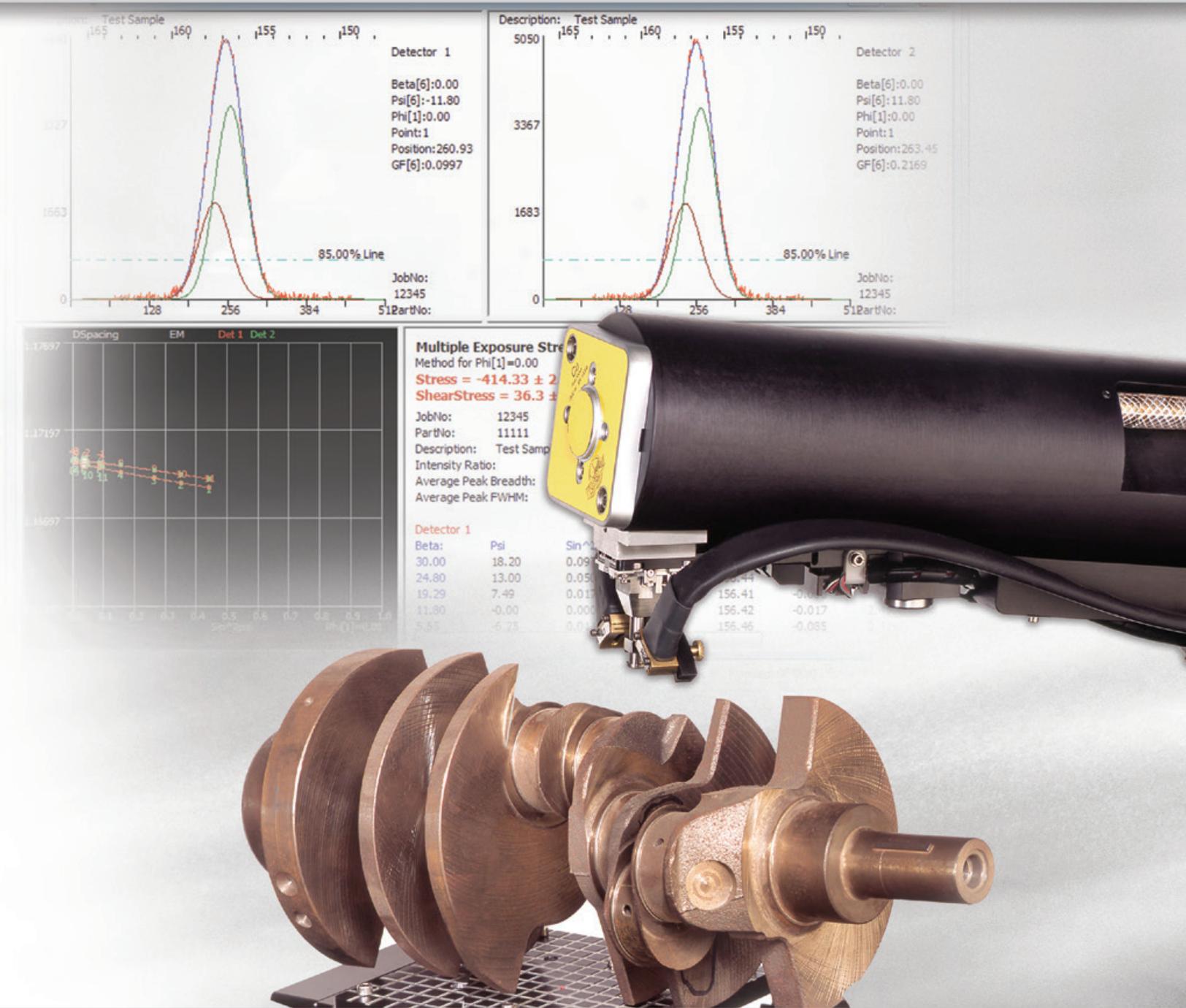


# PROTO MANUFACTURING



自動車

X線回折残留応力測定



X線残留応力測定

## 残留応力とは?

残留応力は“外から作用していた力が全て取り除かれた後に材料や構造物の内部に残存している応力”と定義されます。応力は塑性変形が起きた後、材料が平衡状態に戻ろうとした時に発生します。

## 残留応力と作用応力との比較

作用応力は外部からの荷重によって材料内部に発生します(ひずみゲージで測定されるケースが多い)。残留応力は荷重の有無に関わらず材料内部に残る応力です。材料の中の任意の場所に存在する全応力は、残留応力と外部から作用する応力の和です。

【計算式】全応力=残留応力+作用応力

-400MPaの残留応力を持つ材料に外部から500MPaの応力が作用したとします。その状態で材料に働いている応力は、2つの応力の和である+100MPaとなります。

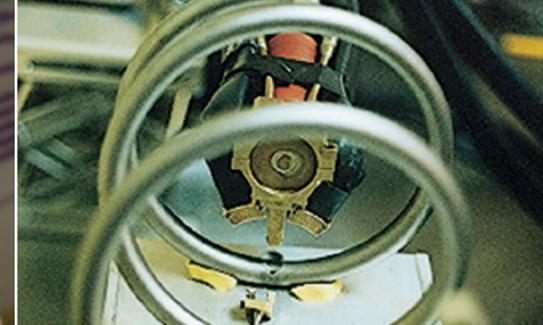
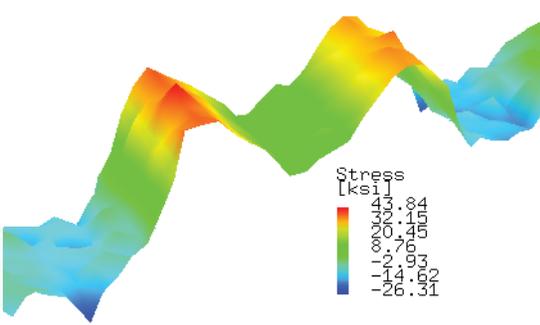
残留応力を知ることは材料の真の荷重状態を把握する上で重要なことと言えます。一般的に材料表面に対して圧縮の残留応力を付与することが有益と考えられています。その理由として、疲労強度の向上、耐久年数や亀裂進展の延伸、環境助長割れ(応力腐食割れ、水素誘起割れ)等の不具合の発生を防ぐことが挙げられます。一方で材料表面の引っ張り残留応力は、疲労強度を下げ、耐久年数を短くし、亀裂進展を速め、環境助長割れへの抵抗を小さくする為、不具合の発生原因の一つとして考えられています。

応力には、材料の面に垂直に作用する垂直応力と、材料の面に平行なせん断応力があります。材料内部のどの点においても全部で6つの独立した応力成分(3つの垂直応力と3つのせん断応力)が存在します。

## 残留応力を引き起こす原因は?

材料に機械的、熱的荷重が加わった場合や、相変態によって塑性変形が生じた後、材料は平衡状態に戻ろうとします。その時に残留応力は発生します。熱加工、機械加工や組織や結晶の変化は構造物への残留応力の付与度合を変化させます。

金属加工	マシニング加工を用いて材料を塑性変形化
熱加工	材料の凝固化の違いで発生(例:鋳造品の冷却)
組織変化	結晶の変化による体積変動 (例:オーステナイトからマルテンサイトへの変化)



X線残留応力測定

## 残留応力のコントロール

有害な残留応力は応力に起因した応力腐食割れ、ひずみ、低サイクル及び高サイクル疲労挙動を発生させる可能性があります。熱処理、冷却、極所加熱等の熱間加工技術は、材料中の残留応力を最小化するため、頻繁に用いられます。

ショットピーニングのような技術は一般的に材料表面に対して圧縮の残留応力を付与するため、有益な加工方法の一つとして認知されています(疲労強度の向上、耐久年数や亀裂進展の延伸、応力腐食割れ、水素誘起割れ等の不具合の発生を防ぐ)。適確な加工技術の選択ために残留応力の知識に必須です。残留応力の小さな変化が構造物の寿命に大きな影響を与える可能性があります。

## 残留応力測定的重要性

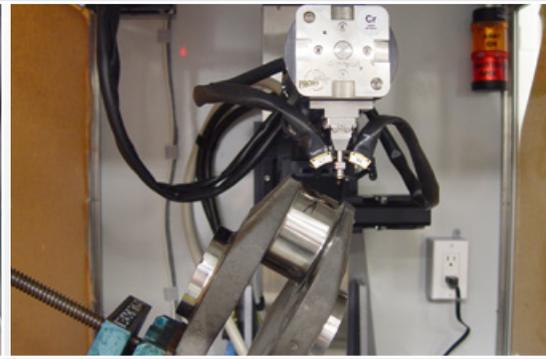
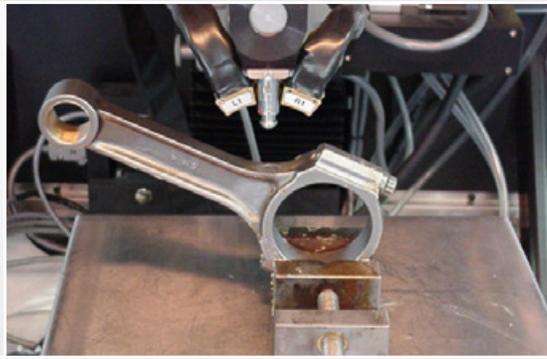
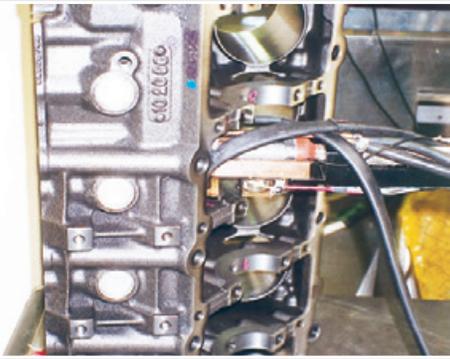
残留応力は次の様な現象に影響を与えます:

- 低サイクル及び高サイクル疲労挙動
- ひずみ
- ピーニング成形
- フレツティング
- 応力腐食割れ(SCC)と水素誘起割れ(HIC)
- 亀裂の初生と進展



## 残留応力の測定 及び モニタリングの利点

- 局所的な部位におけるピーニング効果を検証するなど、工程パラメータの最適化が図れる
- 残留応力の定量的な基準の策定が可能。製品仕様に対する合否を迅速に判断
- 製品の品質を改善、供給元品質を立証し、Engineering Source Approval(ESA)を可能とする
- 安全性を高め、不具合の発生を抑える
- 圧縮残留応力を検証することで機器構造物の寿命の延伸を実現
- 補修箇所の修復度合を定量的に実証
- 材料に存在する残留応力の正確な分布領域を把握。その結果、定量的な観点からの廃棄(あるいは応力の除去)の判断を下すことが可能となる
- 残留応力のデータを他の非破壊検査技術に活用

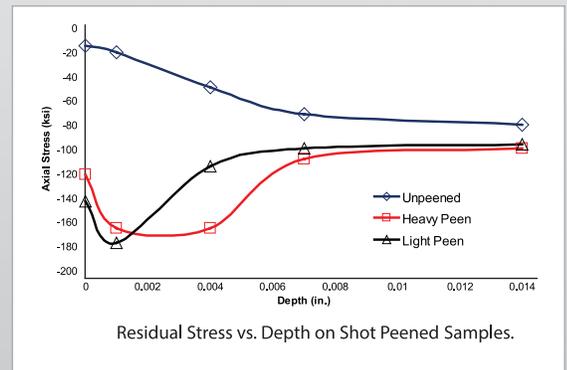


## 自動車部品における残留応力測定

X線回折は自動車部品における残留応力測定の工業産業規格となっています(北米地域)。加工方法の最適化、設計の改善、不具合の発生原因の調査の際に欠かせないツールの一つです。

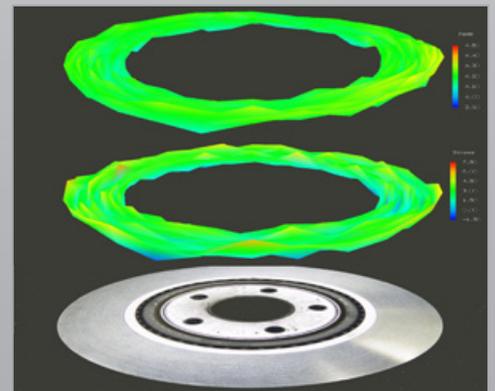
## 表面強度の確認

自動車部品の耐久年数はショットピーニングのような冷間加工技術によって延伸することが可能です。XRD残留応力測定は加工箇所の残留応力値が要求レベルまで達しているのかを確認するために用いられます。残留応力値の基準を一度確立すれば、エンジニアリングや加工処理のドキュメント類に一つの指標として明記することができます。



## マシニング加工

過度なマシニング加工は亀裂発生及び進展の原因となる、引っ張り応力を発生させます。



ブレーキローターの応力マップ



## 有限要素モデルの確認

残留応力測定は有限要素モデルがパーツ内部の残留応力値を適切に予想できているのかを確認するために用いられます。有限要素モデルが不適切な場合、既知の残留応力がFEAモデルの改善に用いられます。

## 耐久年数と応力の集中

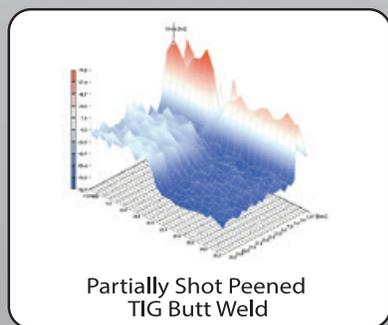
自動車部品内部の残留応力の状態を把握することは非常に重要です。応力が集中したパーツは作用荷重の影響を増大させる可能性があるため、不具合の発生に繋がる可能性があります。有害な引っ張り応力単体、あるいは引っ張り応力と応力の集中が同時に発生することにより、疲労亀裂の発生、進展が起こる場合があります。

## 熱処理加工

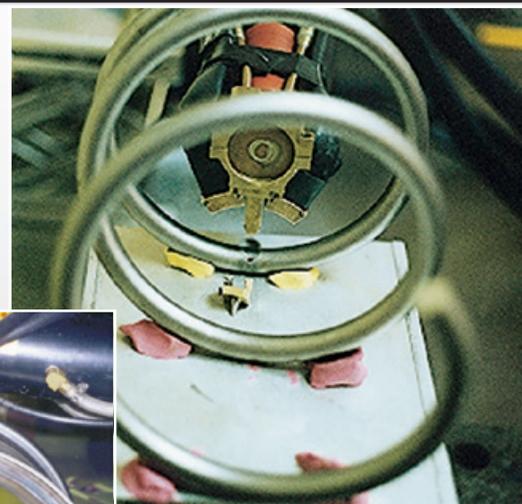
熱処理加工は一般的に自動車部品内の残留応力除去のために用いられます。残留応力測定は熱処理加工が適切に行われているのか、有害な残留応力が要求レベルまで除去できているのかを確認するために用いられます。

## 溶接部における残留応力測定

溶接加工時に発生する引っ張り応力は亀裂発生原因の一つです。溶接部のショットピーニング処理の効果確認のために残留応力測定を行い、評価することは非常に有益です。



溶接部に対するショットピーニング処理後の応力マップ例



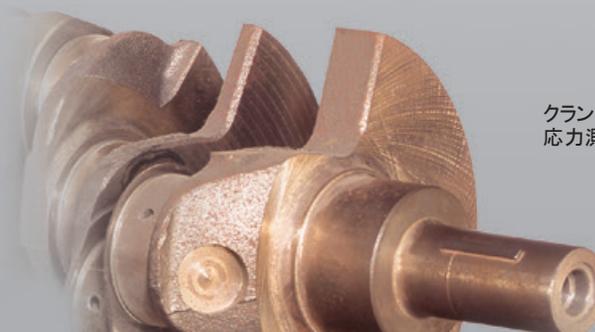
上: スプリングの  
残留応力測定

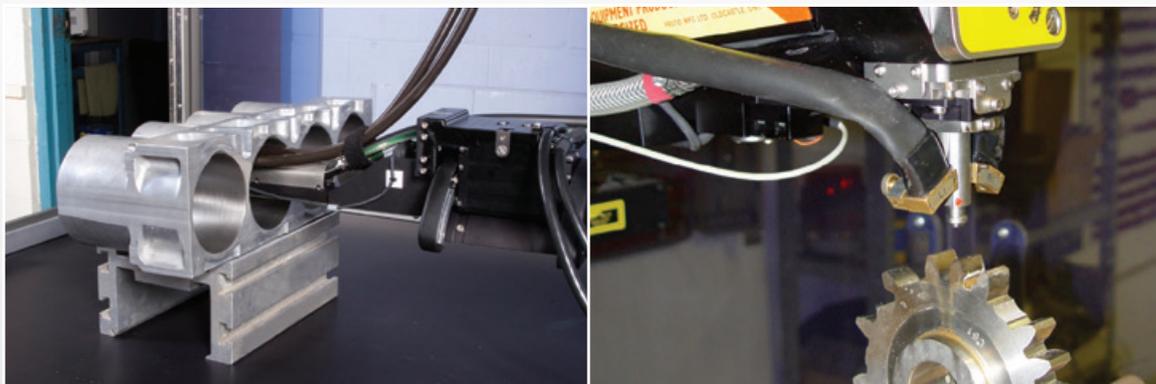


左: ホイールの残留  
応力測定



クランクシャフトの残留  
応力測定





## 残留応力を「設計」・「コントロール」・「生み出す」

残留応力を「設計」・「コントロール」・「生み出す」ことにより、よりパワフルでモダンな自動車部品の設計が実現します。材料内部の残留応力に細心の注意を払うことによって、今日の製造現場環境の大幅な改善や可能性を拓げることに繋がります。

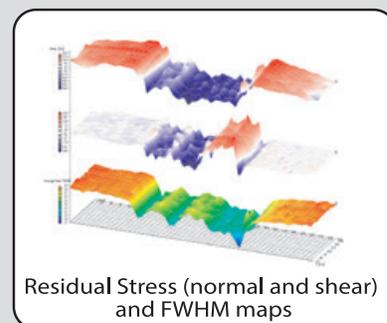
有害な残留応力がマシニングによって発生・進展しないようにするため、マシニング加工はモニタリングすることが可能です。修理が必要となる前の段階で不具合パーツを取り除き、パーツのスクラップ化率を減らすためにマシニングを最適化する等、このモニタリング情報はあらゆる場面で活用されます。熱処理のような応力除去方法の場合、熱処理前後の応力値を定量化し、進展具合を評価することができます。不十分な熱処理の場合は、再度熱処理を加える必要があるため、この評価が結果的に時間やコストの削減に繋がる可能性があります。

ショットピーニングは残留応力を付与して溶接部等の加工部を改善する大変有益なツールです。このショットピーニングを使って部品に適切な応力を付与するため、その値を定量化して評価・分析する必要があります。

これらの加工処理で得られた残留応力値が社内での評価基準として使用され続ければ、部品サプライヤーが変更になった場合でも、一定の応力値の基準があるため、常に安定した品質の製品供給を受けることができます。

## 残留応力マッピング

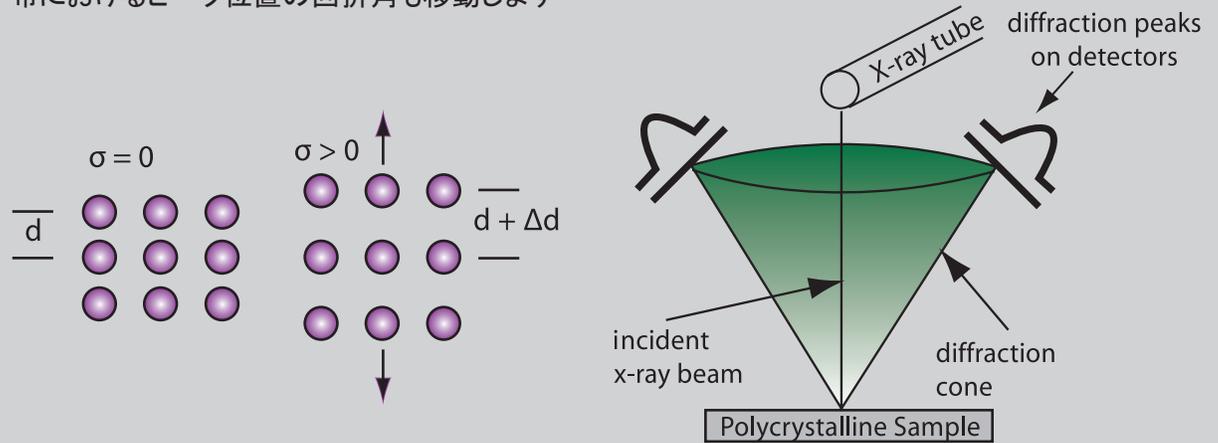
プロト特許の自動残留応力マッピングの技術はサンプルの残留応力の状態をマッピングとして再現することができます。自動応力マッピングは溶接のような曲面部に対しても対応可能であり、設計エンジニアに問題点の可視化や応力コントロールに関する情報を提供します。



残留応力、せん断応力、FWHMを示した応力マップの例

## X線回折残留応力測定

応力が変化すれば、それに応じて結晶格子面間隔 $d$ が変化し、回折強度分布におけるピーク位置の回折角も移動します



25年以上に亘り、プロトの測定ラボは幅広いサービスを産業界に提供してきました。  
 当社の ISO 17025準拠したラボは最高品質の測定環境を有しています。  
 20機種を超える専用XRDシステムで、迅速かつ正確で効率のよいサービスを提供。お客様の多種多様なご要望にお応えいたします。

