



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

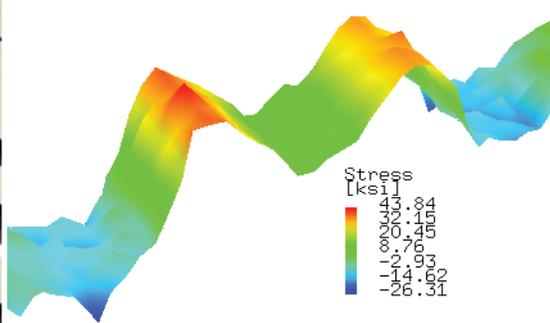
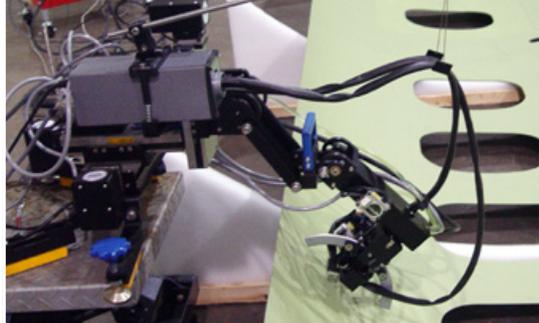
-400MPaの残留応力を持つ材料に外部から500MPaの応力が作用したとします。その状態で材料に働いている応力は、2つの応力の和である+100MPaとなります。残留応力を知ることは材料の真の荷重状態を把握する上で重要なことと言えます。一般的に材料表面に対して圧縮の残留応力を付与することが有益と考えられています。その理由として、疲労強度の向上、疲労寿命や亀裂進展の延伸、環境助長割れ(応力腐食割れ、水素誘起割れ)等の不具合の発生を防ぐことが挙げられます。

一方で材料表面の引っ張り残留応力は、疲労強度を下げ、疲労寿命を短くし、亀裂進展を速め、環境助長割れへの抵抗を小さくするため、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、疲労寿命や亀裂進展の延伸、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耐用年数に大きな影響を与える可能性があります。

残留応力測定の重要性

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



プロト社のワーキング事例 - USAF 及び NASA(参考)

AEROSPACE

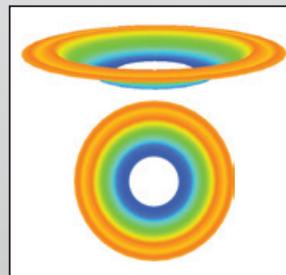
航空宇宙産業における残留応力測定

残留応力は航空宇宙分野の部材評価において重要な役割を果たします。プロトは残留応力測定サービスと測定システムの販売を行い、お客様のラボや屋外での航空・宇宙産業で使われる部材評価に寄与しています。

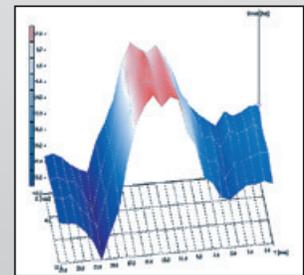
- ・表面 ・尾翼 ・フレーム ・車輪
- ・エンジンサポート・エンジンケーシング
- ・エンジンカウリング

プロトの測定システムが活用された事例

- ・C-141 ・B-2 ・スペースシャトル
- ・ボーイング777 ・ダッシュ7P
- ・ジョイントストライクファイター



冷間拡径口の
応力マップ

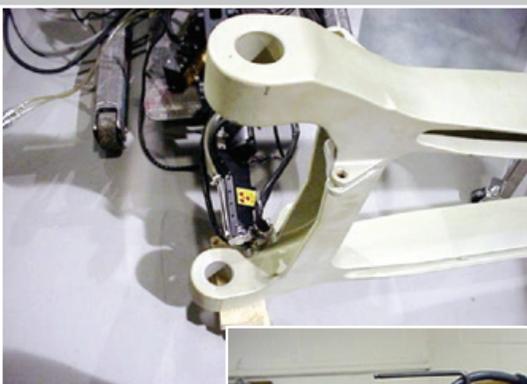


溶接部の
応力マップ

プロトのシステムを使用した問題解決方法

プロトのシステムとサービスを使って解決した航空・宇宙産業で使われる部材の問題:

- ・ひずみ ・金属疲労 ・応力腐食 ・全体の応力(残留+印荷)
- ・溶接部の残留応力分布図 ・ホール-冷間加工の効果
- ・ネジ締め部の応力 ・粗悪なマシニング加工の発見

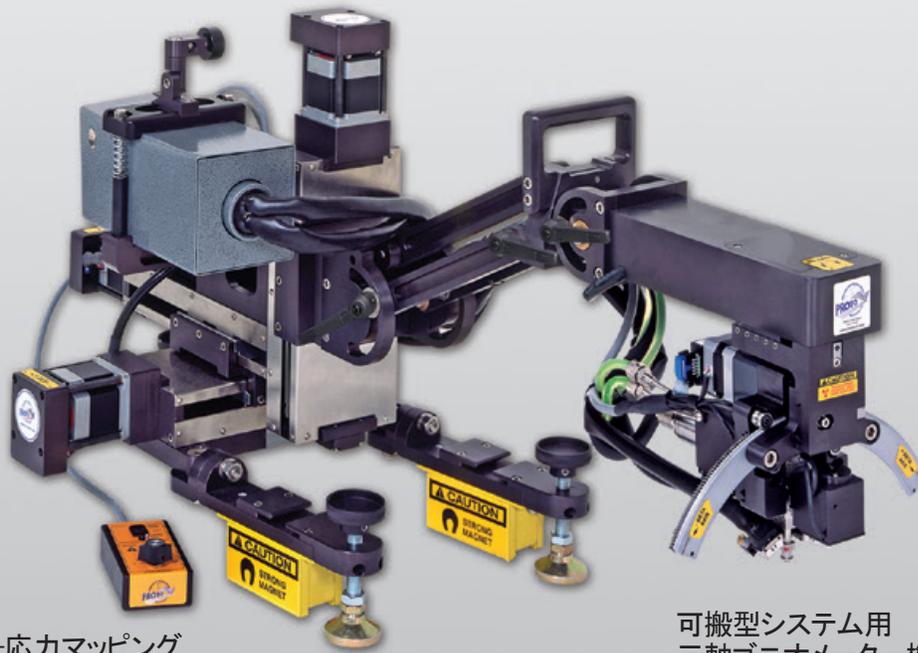


- ・ショットピーニングの評価
- ・LSPおよびLPBの効果
- ・ネジ締め部周辺の応力分布
- ・機械運動に起因したオイルキャニングによる応力分布

プロト特許の自動応力マッピングはサンプルの残留応力の状態を包括的に再現する技術です。溶接部のように表面が曲面状態の場合でも、自動応力マッピングは問題箇所を可視化できるため、設計者やエンジニアの技術開発の場面で活用されています。

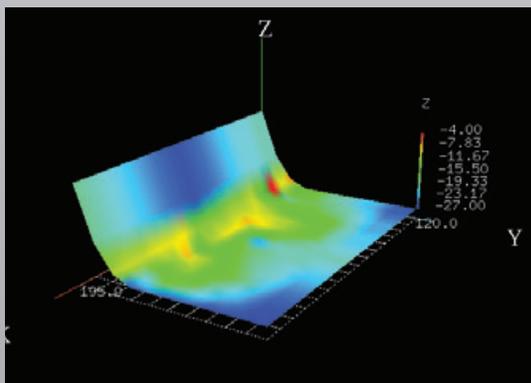


MGR40 - 残留応力測定システム

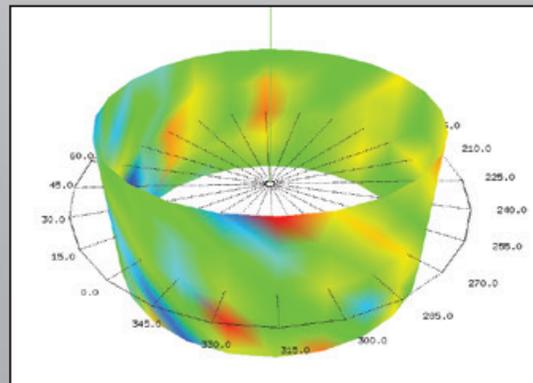


可搬型システム-応力マッピング用のX,Y,Z軸機構(完全自動)

可搬型システム用三軸ゴニオメーター機構



航空機のフレームの応力マップ



トランオン内の残留応力マップ

最適な構成と加工設計

材質の特性を生かすためには各構成部材の残留応力の定量化評価が必要となります。

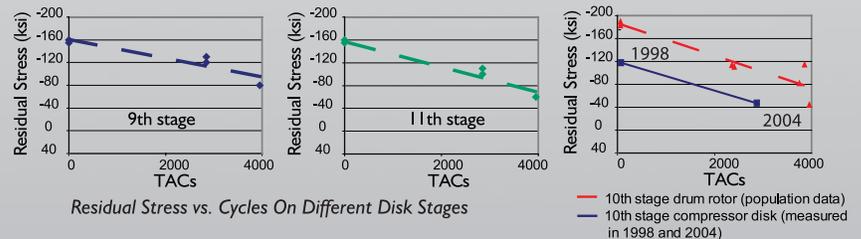
残留応力を「設計」、「コントロール」、「生み出す」ことができれば、部材の重量、耐久年数の延伸、製造やメンテナンスコストの軽減が実現します。タービンブレードの構成部材の合金類の材質の特性を活かすため、製造されたパーツの不具合部の測定や、サービス期間を通じて残留応力のモニタリングを行っていく必要があります。残留応力は有益な残留応力が適切に付与されているのか、あるいは有害な残留応力が除去、抑制されているのかを正確に測定・評価する必要があります。

耐久年数の向上:トラッキングLCF

残留応力は構成部材の耐久年数の指標となります。

過去5年の間、プロトは何百に及ぶタービンエンジンの構成部材の残留応力測定を行う機会がありました。残留応力の情報に関するデータベースはかなり蓄積されており、多くの課題解決のため、このデータ活用が待ち望まれています(定量化された残留応力のデータは非常に貴重であり、近い将来、部材の耐久年数の向上・予想に関わる技術開発に活かされることを多くの研究者が期待しています)。また、残留応力測定はLCF対象の航空エンジン部材の耐用稼働年数の決定する場面において、非破壊で検査測定ができるため、重要な役割を果たすものと考えられています。

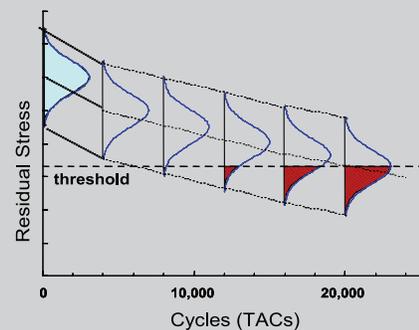
シリアル番号が登録された重要な部材の残留応力値をトラッキングすることによって、全構成部材ではなく、一部の再加工を必要とする部材や廃棄する部材の選別を容易にさせるようなデータの蓄積が可能となりました。



エンジンはオーバーホール期間の適正化のため、似た傾向を持った重要な部材類で構成されます。残留応力値の証明を持った部材によって耐久年数の延伸は実現します。更にそういった情報はリードタイムの延長や、より効率的な部材交換のタイミング予測に繋がります。

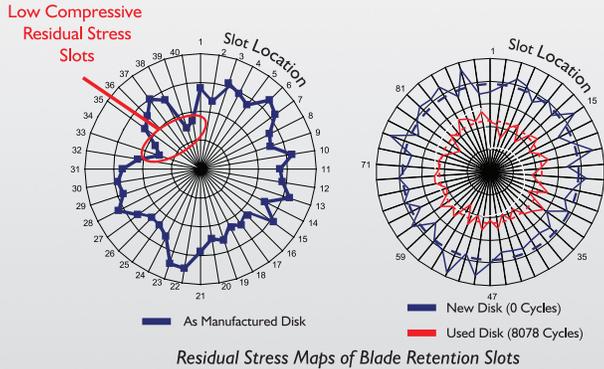
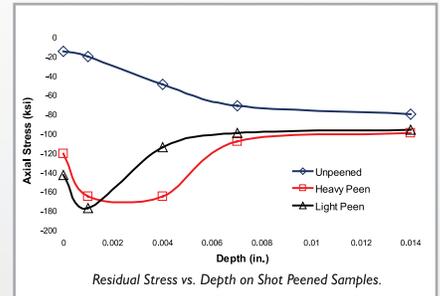
RSM 特許取得済みディスクの耐久年数の延伸:ライセンス交付の適正化

- 残留応力測定と金属疲労サイクル(TACs)の間にはデータベースのトラッキングが関係
- 統計群の中で自身のメリットにおけるディスクの良好状態と関係性を評価
- 次のサービス保証期間内で“threshold”以下の残留応力値になった時ディスクに亀裂が発生するリスクを持つため除去
- “threshold”以上の残留応力を持ったディスクをサービスに返却



製品の品質：非破壊および定量化

残留応力測定は粗悪なマシニング加工を発見する等、工場内部における製品・品質管理のために使用されています。



熱処理加工の評価

XRDは熱処理が適切に行われているかを評価するために使われています。XRDによる熱処理後の部材の残留応力評価はマシニング加工や冷間加工中に発生するひずみのような問題を抑制するため、正しく取扱われる必要があります。

表面加工の証明

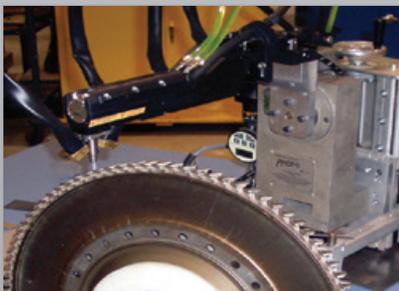
タービンはショットピーニングや他の加工を施された複雑な部材によって構成されています。XRD残留応力測定はそれらの部材は適切な応力レベルまで達しているかを証明するために使われています。残留応力の基準が一度決定すれば、エンジニアリングや加工ドキュメントへの明示が容易になります。そのため、エンジニアのXRD残留応力測定に対する評価(価値)はアルメンストリップのナンバー指定よりも高いものになります。

粗悪なマシニング加工を特定

マシニング加工はタービンエンジンの部材内部の最終的な残留応力の状態において、重要な変化を引き起こす可能性があります。XRDは加工面が過度な摩耗や冷間加工の不足の状態なのか、あるいは過度なマシニング加工を受けている状態なのかを判断するときに使用されます。粗悪なマシニング加工は引っ張り応力を生み出し、亀裂発生・進展の原因となりえます。

メンテナンスの改善

オーバーホール中のディスクの過剰なピーニング付与は避けなければなりません。メンテナンス中のディスクはオーバーホールの期間にショットピーニングを与えられる等して、耐久度の回復が試みられています。一方、こういった処理を受ける前のディスクの残留応力値は通常把握されておらず、このことが各々のディスクに有害な影響を及ぼす可能性があります(ディスクへの過度なピーニング付与時には、特にこの問題が起こりえます)。残留応力測定がメンテナンススタッフのディスク再加工処理や管理能力向上の機会を提供します。



ブレードリテンスロットの
残留応力測定



ボルトホール内部の
残留応力測定



内径の残留応力測定



事務所

アメリカ

Proto Manufacturing Inc.
12350 Universal Drive
Taylor, Michigan
48180-4070
Tel 1-313-965-2900
info@Protoxrd.com

カナダ

Proto Manufacturing Ltd.
2175 Solar Crescent
Oldcastle, Ontario
NOR 1L0
Tel 1-519-737-6330
Protocanada@Protoxrd.com

日本

プロトマニュファクチュアリング
株式会社
〒492-8239
愛知県稲沢市奥田中切町82
TEL: 0587-81-6531
info@protoxrd.jp

販売・サービス拠点

中国

EPCO Test Tech LTD
B2301 Tomson Center
188 Zhangyang Rd.
Pudong, Shanghai, 200120
Tel +86 21 38870960
sales@epco.com.cn

インド

Elico Marketing PVT. LTD
57, Phase-V, Near Telephone Exchange
KPHB, Kukatpally, Hyderabad
500 072
Tel +91 40 2315 3322, 2315 3388
info@elicomarketing.com

欧州

METLAB
al. Jaworowa 42/2 Wroclaw,
Poland 53-123
Tel +48 (885) 200 993
Protoeurope@Protoxrd.com

A WORLD OF SOLUTIONS

www.protoxrd.jp