

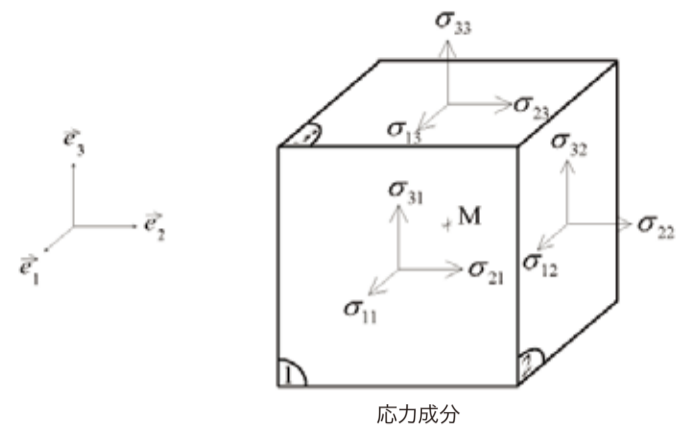
●残留応力の定義

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。

圧縮残留応力は材料を押しつけ合うように作用します。一方、引っ張り残留応力は材料と材料を引き離すように作用します。数学的にいえば、圧縮応力は負(-)、引っ張り応力は正(+){}です。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。

参考文献(広辞苑・第5版より)

応力とは、物体が荷重を受けた時、荷重に応じて物体内部に生じる抵抗力。その強さは物体内部にとった、任意の単位面積を通して両側の部分がお互いに及ぼしあう力で表される。現れ方により、圧力・張力・ずれ応力などがある。内力。歪力(わいりょく)



応力成分

●応力の単位

日本:MPa(メガパスカル)

北米:ksi(キロ・パウンド・フォース・パー・スクエア・インチ)

【参考値】 6.895 MPa = 1 ksi

●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。材料の稼働中(運動中)に同様の作用が加わった場合も、内部の残留応力が変化することがあります。

●材料に働く全応力とは?

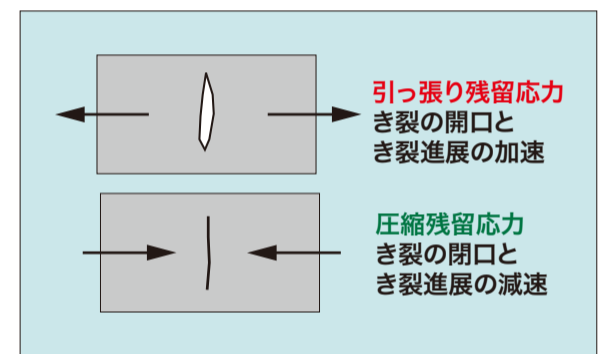
材料の中の任意の場所に存在する全応力は、残留応力と外部から作用する応力の和です。

【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為、不具合の発生原因の一つとして考えられています。



●残留応力の種類

残留応力の種類は、材料内でのスケール(どの程度存在しているのか)によって分類されます。材料の中でかなりの大きな領域にわたって生じる応力を巨視的応力と呼びます。局所的(例えば結晶間あるいは結晶の中)にのみ存在する応力を微視的応力と呼びます。材料の中の任意の場所に存在する全残留応力は3つのタイプの応力の和となります。

タイプI:材料中で多くの結晶粒に渡るほどのスケールで生じる巨視的応力

タイプII:材料のマイクロ組織の違いにより生じ、結晶粒径程度のスケールで生じる微視的応力。単一相の材料ではそれぞれの結晶の方位が一様でないため、異方性によって生じる。また、多相材料では異なった相の存在によって生じる

タイプIII:不完全な結晶化によって生じる応力

●残留応力の重要性

残留応力は次の様な現象に影響します。

- 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
- フレットニング
- 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



LXRD MICRO AREA
ラボ用残留応力測定システム

X-ray Diffraction Residual Stress Measurement

●残留応力のコントロール

残留応力を導入し、制御する方法は多岐に渡ります。冷間加工技術、ショットピーニング、超音波ピーニング、レーザーピーニング、ならし、ハンマリング、研磨、低塑性バニシ仕上げ、圧延、極印表面処理や分割スリーブ拡大法 (split sleeve expanding) は圧縮の残留応力を発生させることができます。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為、頻繁に用いられます。また、クーポンやアルメンストリップ試験片はプロセス制御によく用いられます。

しかし、それらの加工方法は実際の材料に生じた残留応力の変化に関するデータをもたらすことはできません。例えばアルメンストリップ試験片を用いたピーニングにおいて、そのピーニングプロセスに関する詳細なデータは得ることができますが、その部分に実際に生じる残留応力そのものについては把握することができません。更にアルメンストリップ試験片は高度なプロセスで形成された残留応力の評価や、複雑な形状や相変態にも対応することができません。

●X線応力測定法

X線回折は、ひずみゲージの様に結晶格子面間の距離 (格子間隔 d) を測定して残量応力を算出します。材料が引っ張り状態になると格子間隔 d は広がります。一方、圧縮応力では格子間隔 d は縮まります。ブラッグの法則: $n\lambda = 2d\sin\theta$ の角度 2θ が分かれば結晶体からのX線回折によって測定された格子間隔 d により応力を決定することができます。

【ブラッグの法則】

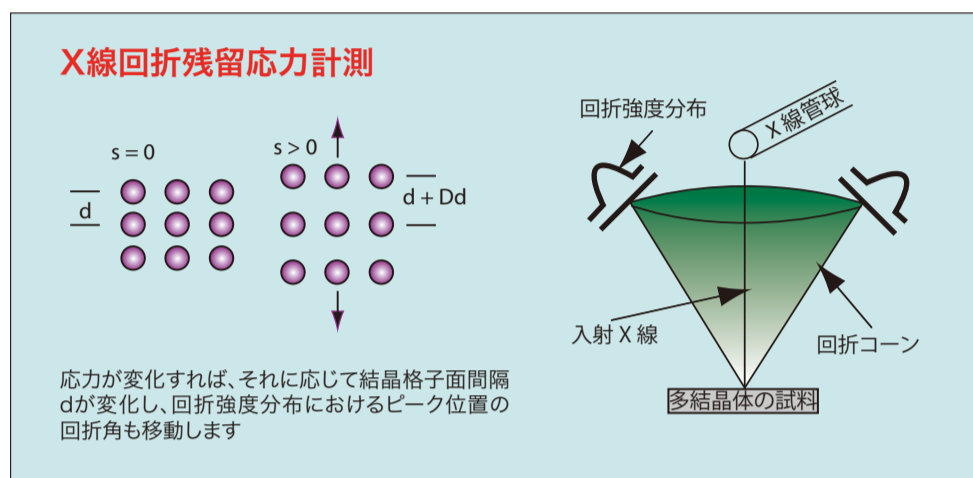
$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

n = 回折の次数

λ = X線の波長

d = 材料の内部の結晶格子面間隔

θ = 回折角



●X線回折による残留応力測定の利点

残留応力は多種多様な方法で測定出来ます。一方で定量的に応力値を出す方法は限られています。現状ではX線回折だけが重要な領域における残留応力の分布を把握する性能を持っています。

- 金属、セラミックス等、全ての結晶体からなる材料の測定が可能
- 高空間の分解能を備える
- 表面及び内部の応力測定が可能
- 高速測定が可能。工場内 (ライン上) でも測定可能
- 非破壊で測定が可能
- 定量値で結果を算出。容易に判定
- 1点あたりの測定が低コスト
- 転位密度の測定が可能
- 特定の相の測定が可能
- 装置の持運びが可能



iXRD ポータブルシステムによる飛行機の残留応力測定

●材料表面と内部における残留応力

- ① 疲労亀裂は通常、材料の表面に発生します。従って、表面の残留応力は亀裂の発生と初期の亀裂進展が起きうるか否かの決定的な要因となります。材料内部での亀裂発生は内部に欠陥や介在物が存在した場合にのみ生じます
- ② 表面の応力は内部の亀裂進展にも強く影響を及ぼすことがあります
- ③ 表面から内部に至る応力勾配のデータはショットピーニング、機械加工あるいはその他の改善処理の効果がどれほどであったかを知る上で重要なものとなります
- ④ 機械加工や他の表面改善処理が上手く施されている様な場合、表面の残留応力値は加工の品質の指標として使用できます

●残留応力と設計

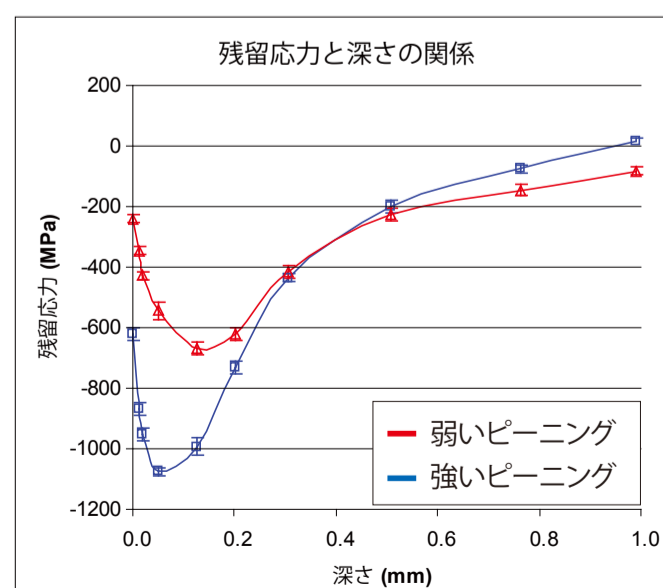
破壊力学的設計及び寿命評価において、材料内部に亀裂が発生する事を前提にした場合、過度な設計に陥りがちです。

例) 材料の表面及び表面近傍の応力分布を考慮せず、深部だけに大きな応力を付与する等

一般的に材料の表面 (表面近傍を含む) 及び内部にかかる全応力が疲労亀裂の進展を検証する上で重要な要因になると考えられています。亀裂の存在を前提にした場合、材料にかかる全方位の応力を設計時に考慮する必要があります。

参考文献

- SAE J784a -RS measurement
- ASTM E915 -RS measurement
- ASTM E1426 -4 pt bend XEC
- ASM Handbook Vol.11 -General guidelines



ピーニングした時の残留応力と深さの関係