

X線による残留応力測定 - 残留応力の功罪と測定事例 -

1. はじめに

各種産業で生産される製品や部品は、製造工程の中で、機械加工、塑性加工、鋳造、溶接、熱処理、表面コーティングなど、種々の加工が施されます。その際、加工に伴って大なり小なり引張や圧縮の残留応力が生じることはよく知られています。一般に、残留応力は製品の強度や形状精度に悪影響を及ぼすことが多く、好ましいものではありません。そのため、大きな力が作用すると思われる箇所や変形が生じては困る箇所については、残留応力の大きさ、圧縮応力、引張応力、内部への分布状況、存在深さなど生じた残留応力の特徴を知り、トラブルが生じないようにあらかじめ何らかの対策を講じておく必要があります。しかし、実際の製造工程で製造途中や完成後に残留応力を測定することは殆どなく、トラブルが生じてからその原因究明のため測定するというのが実情です。その場合、残留応力の測定方法、対象物の測定の可能性、トラブル原因と測定結果の関係などでお困りの企業が多々見受けられます。そこで、この講座では、残留応力対策の一助になることを願って、非破壊で比較的容易に測定できることから広く利用されているX線応力測定法についてその原理と特徴および残留応力の発生によって製品にもたらすメリット、デメリット（功罪）等を解説するとともに、X線を用いて測定された2、3の残留応力功罪例を紹介します。

2. X線応力測定法

X線応力測定法は、X線回折を利用して多結晶材料の表層部の応力を測定する方法で、その測定原理や測定方法は、日本材料学会X線材料強度部門委員会が発行しているX線応力測定法標準（1997年版）改訂X線応力測定法（養賢堂、1990年）、X線応力測定法の基礎と最近の発展 材料 vol.47 No.11, 1998）などに詳しく述べられています。ここでは、

これらを参考にその要点のみを簡単に説明いたします。

(1) 測定原理

多結晶材料の各結晶粒は、原子が規則正しく配列した結晶格子で構成されています。その結晶粒に応力が作用すると結晶格子面の間隔が変わります。X線応力測定法は、この格子面間隔の変化を測定して応力を求めます。

図1は、試料表面層について、紙面に直交する特有の結晶面を持つ結晶粒を選択して描いたもので

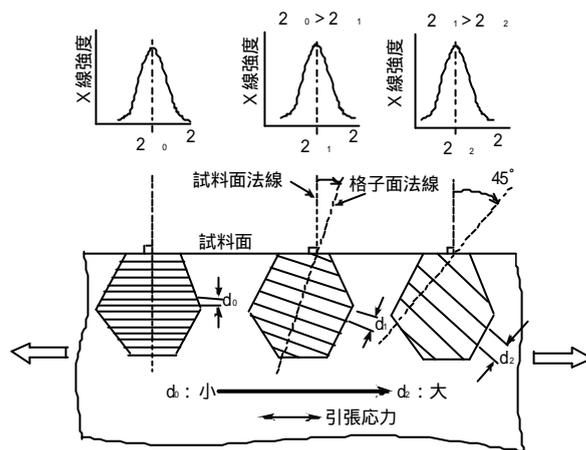


図1 多結晶材料の格子面間隔の変化 (引張応力が作用している場合)

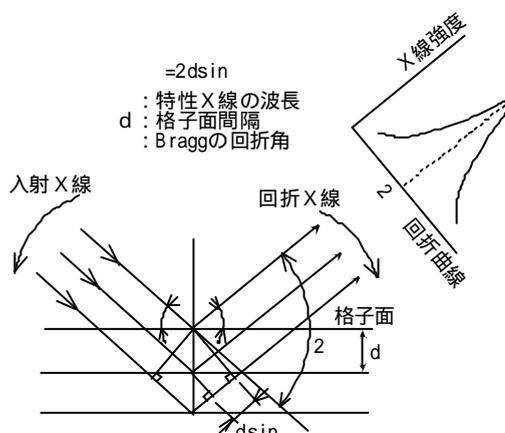


図2 BraggのX線回折

す。X線応力測定法では、図1に示した試料面法線と格子面法線のなす角度を（ブサイ）角といますが、この試料に、図に示すような引張応力が作用するとき、角が大きい結晶粒ほど格子面間隔が広がります。そして、この広がり（ブサイ）角が大きいほど大きくなります。いま、結晶面が試料表面に平行となる結晶粒に注目し、その面に特定の波長のX線（特性X線）が照射されるときX線回折の状況と回折強度曲線を図2に示します。この各結晶面で散乱されるX線の経路差がX線波長の整数倍となると、各面からの散乱X線の位相が一致して強め合い、回折波がつけられます（Braggの法則）。この時の入射X線の延長線と回折X線のなす角度 2θ を回折角とといいます。回折角 2θ は試料へのX線入射角を順次走査して得られるX線回折強度曲線（図2）から求めます。同様に、図1に示すように角の異なる結晶粒についても、それぞれの角だけ傾けてX線を照射すれば、角毎に異なった回折角が求められます。引張応力が作用している場合は、角が大きくなるほど、格子面間隔が広がるため回折角 2θ は小さくなります（図2中のBraggの回折式参照）。圧縮応力が作用する場合は、反対に 2θ は大きくなります。通常は、角として、 0° 、 15° 、 30° 、 45° を選択します。なお、多結晶材料では、図1に示した回折条件を満たす好都合な方向の結晶粒は、粗大結晶粒や優先的な方位の結晶粒がなければ、X線照射領域の中に多数存在します。

次に、この角毎の回折角を、縦軸 2θ 、横軸 \sin^2 のグラフにプロットします（これを 2θ - \sin^2 線図と言います）。この各点を最小二乗法により直線で結びその勾配Mを求めれば、表面層の応力は $\sigma = K \cdot M$ から算出することが出来ます。Kは応力定数といい、被測定材料の弾性定数、ポアソン比、無応力時の回折角から求められます。この方法は \sin^2 法といい、X線応力測定法標準に用いられています。市販のX線応力測定装置では、角毎の回折角の測定、応力の算出が自動的に行われるようになっています。

（2）特徴

X線を用いて応力を求める場合、上述の測定原理を満足するために被測定材料にいくつかの制限が設けられます。この制限事項を含めて、測定法の特徴、

測定上の問題を以下に列記しますと、

応力が非破壊的に測定できる、表面層の応力（X線の侵入深さはせいぜい数十マイクロンで、そのX線侵入深さ内でのX線減衰の重みのかかった平均応力）が求められる、測定対象の面積が小さい（当所の測定装置では4mmから最小0.15mm）、多結晶材料であること、高角度で回折する（ $2\theta=140^\circ\sim 160^\circ$ ）適切な結晶面が存在すること、粗大結晶粒や強い集合組織がないこと、材料の弾性定数、ポアソン比が既知であること、測定対象結晶面の無応力時の回折角が既知であること、被測定材料の履歴（例えば、塑性変形による材料の変形履歴）が明確なこと、被測定材料の表面状態（加工履歴や表面粗さなど）が明確なこと、測定対象結晶面の回折角が他の面の回折角と接近していないこと、X線侵入深さ内が平面応力状態（試料面に直交する方向の応力がない）であること、X線侵入深さ内で急激な応力変化（応力勾配）がないこと、となっています。このように被測定材料に多くの制限がありますが、精度よく測れるかどうかは別として多結晶材料であれば大抵は測定が可能です。

3．残留応力の功罪

残留応力の発生によって、製品や部品の強度に影響を及ぼすことが最も多いようです。また、時には形状変化の原因となることも見受けられます。残留応力が強度や形状に及ぼす影響を正確に把握するに

表1 残留応力の功罪

強度への影響	表面層の圧縮残留応力	表面層の引張残留応力
	↓ 疲労強度の向上	↓ 疲労強度の低下
	<u>圧縮残留応力の積極的利用</u> * 浸炭焼入、窒化 * 高周波焼入 * ショットピーニング	
形状への影響	* 表面層の除去（摩耗、腐食等） 残留応力の再配置 変形 * 外力の作用 外力 + 残留応力 > 降伏応力 変形 熱の作用 熱応力 + 残留応力 > 降伏応力 変形	

は、残留応力の形態（大きさ、符号(圧縮、引張)、深さ方向分布状況など）を知ることが重要です。しかし、内部の応力状態を測定することは難しく、また表面層の応力が問題になることが多いことから、ここでは表面層の残留応力にのみ注目します。

表1は、強度と形状に対する表面残留応力の典型的な功罪を整理したものです。まず、強度に対しては、表面が引張残留応力になっていると疲労強度が低下する、あるいは表面残留応力を圧縮応力にすると疲労強度が向上するといわれています。そのほか、引張残留応力の発生は熱処理における焼割れ、研削加工における研削割れ、研削き裂などの原因にもなります。そのため、表面に圧縮残留応力を積極的に生じさせることが試みられています。その方法には、比体積の大きい化合物を生成させる窒化、体積膨張を伴うマルテンサイト変態を起こさせる浸炭焼入や高周波焼入など熱処理による方法があります。そのほか、ショットピーニングによる方法もあります。これは浸炭焼入面に適用される例が多く、歯車の歯面によく利用され効果をあげているようです。このように表面圧縮残留応力の生成は好ましいことが多いですが、材料全体から見た場合、表面で圧縮であれば応力の釣合いから内部のどこかで引張応力となっていることに注意しておかなければなりません。例えば、圧縮残留応力を生じるセラミックス研削加工面では、脆性材料によく見られる残留き裂を生じることが多いのですが、このき裂の先端が内部の引張応力域に達していると強度劣化を招く恐れがあります。

形状への影響で注意しなければならないのは、残留応力の生じている表面層が摩耗や腐食などにより除去され応力バランスが崩れることによる変形です。これを防ぐためには、摩耗や腐食による表面除去による応力変化では変形が生じないように、製品の剛性を十分大きくしておくか小さな残留応力状態しておくことが必要でしょう。その他、強度にも関連することですが、外力や熱応力などが作用し、それが残留応力に重なって材料の持つ降伏応力を超えるようであれば変形を生じる可能性があります。

4．測定事例

残留応力のトラブル事例とそのときのX線を用い

て測定した表面残留応力を紹介します。

まず、焼入した軸受鋼の円筒（外径 80mm × 肉厚 10mm、長さ 70mm）表面に軸方向に応力腐食割れと考えられるき裂が生じた例です。円筒には端面から約 15mm の位置に3箇所半径方向にネジ穴が加工されています。き裂は端面とネジ穴部の間に発生していました。また、この円筒は、使用状態で円筒内面を押し広げる内圧がかかります。原因を調査するため、ネジ穴部の箇所と、と180°反対側（ネジ穴なし）の端面から約8mmの位置において、円周方向および軸方向の表面残留応力を測定しました。図3は、測定位置と測定結果を示しています。き裂は軸方向に伸びていたことから円周方向応力にのみ注目しますと、負荷がかかる前は、では引張応力、では圧縮応力となっています。内圧がかかると、はわずかな圧縮応力ですが、では引張応力となっていました。き裂が生じた原因は、引張残留応力に内圧による引張負荷応力が重なり比較的大きな引張応力になったこと、製造工程中での腐食を生じさせるような溶剤の使用、ネジ穴入り口部の微細な損傷などが関係したものと考えられます。この場合、内圧による引張応力のある程度見積るこ

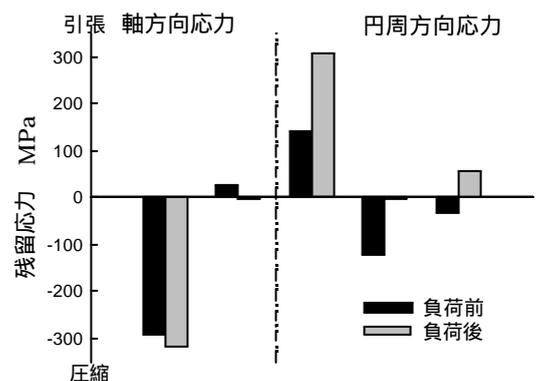
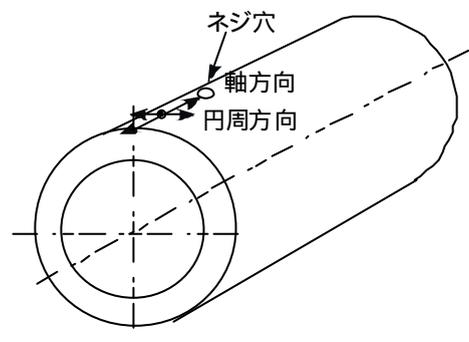


図3 焼入軸受鋼円筒の表面残留応力

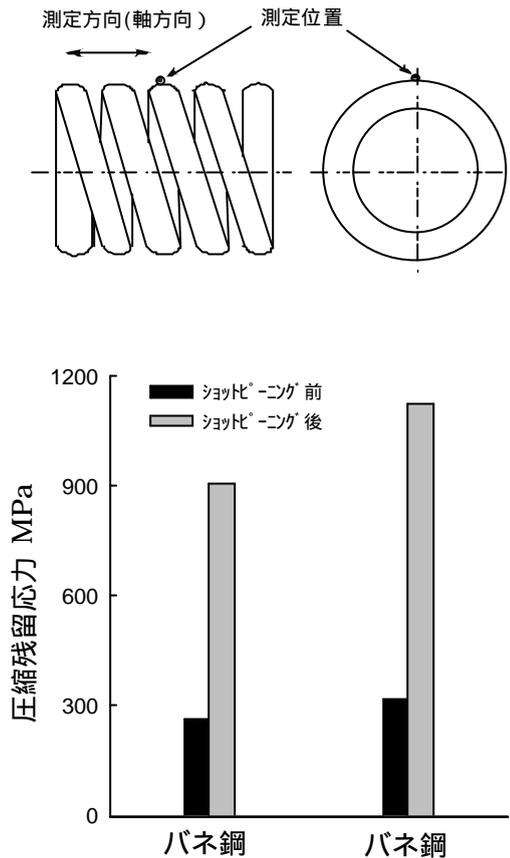


図4 ショットピーニング効果(1)

とが可能ですから、応力腐食割れを防ぐためには、円筒外周表面は少なくともそれより大きな値の圧縮応力となるようにしておく必要があります。

もう一つは、ショットピーニング効果の例です。

図4は2種類のバネ鋼で作られたコイルバネ表面にショットピーニングを施したときの残留応力の変化を測定したものです。どちらの材料もショットピーニング前に比べて、圧縮残留応力は3倍強の増加となっており、ショットピーニングの有効性を示しています。一方、図5は、クロムモリブデン鋼の歯車歯面にショットピーニングを施して逆に損傷が生じた時の残留応力測定例です。ショットピーニング前の歯車歯面は、浸炭焼入後に研削加工をしていま

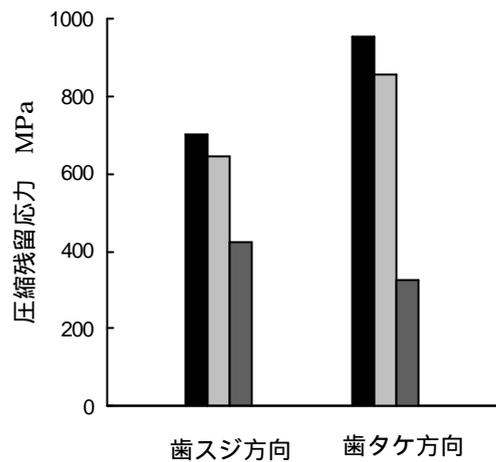


図5 ショットピーニング効果(2)

す。ショットピーニング前()、軽度のショットピーニング()、通常条件のショットピーニング()となるほど圧縮残留応力は小さくなり、の状態です。実際に使用したところ、歯面剥離が生じたといわれています。この原因は不明ですが、ショットピーニングを施して圧縮残留応力が低下することもあるということは知っておくべきでしょう。

5. おわりに

破壊や損傷、変形などのトラブルでは、残留応力が関係していると思われることがよくあり、原因究明には、残留応力の発生状況を把握することが不可欠です。その場合、非破壊で比較的迅速に測定ができるX線応力測定が有効です。当研究所では、微小な部品の残留応力や構造物の残留応力測定が可能なX線応力測定装置を設置していますので、残留応力のトラブルでお困りの場合には、お気軽に当研究所をご利用ください。

(生産技術部 精密機械グループ 村田一夫)