

残留応力と X 線応力測定法

Residual Stresses and X-ray Stress Measurement Method

小栗 泰造*

Taizo Oguri

(2008年6月4日 受理)

キーワード：残留応力, X 線応力測定法, 機械要素, 非破壊検査

1. はじめに

当研究所では、企業から残留応力の測定依頼とこれに関連する技術相談を受けている。これらの技術相談等は、破損トラブルが契機となって寄せられることが多い。相談事案には非常に複雑で高度な内容のものがある一方で、基礎的知識の欠如に起因する破損トラブルが少なからず見受けられる。また、異なる企業から同じような内容の質問を受けることもしばしばである。

本報告は、このような経験に基づいて、残留応力に関する技術相談等の際に頻出した技術的事項とこれに関連する情報を整理してまとめたものである。併せて、著者らが考案した、新規な応力測定技術を紹介するものである。企業技術者との情報共有を図り、製品の品質向上ならびに技術相談等の高度化および円滑化に寄与することを目的としている。

まず、残留応力が機械物理的特性に及ぼす影響、残留応力の発生および緩和/低減、ならびに X 線応力測定法の測定原理について概説する。測定原理については、この分野の専門家以外の技術者にも理解してもらえるよう、数式を使わずに説明することを試みた。次に、当研究所に寄せられた残留応力の測定依頼の中からいくつかの事例を選択し、守秘義務に留意してその概要を紹介する。最後に、著者らが開発した応力測定技術—曲面形状部や複雑形状部品の残留応力を測定する技術—について解説するとともに、残留応力測定

技術の最近の発展動向を紹介する。

2. 残留応力

残留応力とは、外力が作用していないにもかかわらず材料に内在する応力のことをいう。製品の表面および内部には、通常、その製造過程に由来する残留応力が存在する。つまり、外力が作用していなくても、製品は多少なりとも力学的に緊張している。この緊張は製品の機能を左右することがある。製造者には、残留応力の功罪について知り、製品の残留応力を適切に管理することが求められる。

(1) 残留応力の功罪

残留応力は様々な機械物理的特性に影響を及ぼす。

表 1 残留応力の功罪

機械物理的特性	圧縮	引張り
疲労強度 ¹⁾	○	×
応力腐食割れ ²⁾	○	×
寸法安定性 ³⁾	×	×
鋼の耐摩耗性 ⁴⁾	乾燥	×
	潤滑	○
硬質膜の耐摩耗性(乾燥) ⁵⁾	×	×
硬質膜の密着性 ⁶⁾	○	?
丸鋸板の動的安定性 ⁷⁾	×	○
電磁鋼板の鉄損 ⁸⁾	×	○
フェライトの磁気特性 ⁹⁾	×	×
第二高調波の発生効率 ¹⁰⁾	○	×
集積回路の信頼性 ¹¹⁾	×	×

* 機械金属部 金属材料系

表1に残留応力の功罪を例示する。各特性ごとに残留応力が好ましい影響を与える場合に○印を、そうでない場合に×印を付してある。圧縮と引張りの違いによって残留応力の効果が逆転する可能性があることに注意が必要である。

技術相談等を受けることの多い疲労破壊と応力腐食割れに限れば、製品の表面は圧縮残留応力を有していることが望ましい。表面は曲げやねじり荷重が作用したときに応力をもっとも大きくなる場所であり、外界の腐食雰囲気と接する部分だからである。また、圧縮残留応力はき裂の開口と進展を抑制するからである(疲労き裂の発生時期を遅らせる効果の有無については明らかではない)¹²⁾。圧縮残留応力を導入する手段については次節で説明する。

(2) 残留応力の発生

残留応力は、物体内部での「長さの食い違い」に起因して生じる。食い違いとは、一体として存在する物体を仮想的に二つ以上の部材に分割して、部材間相互の拘束を排除した場合において、一体となるべき部材間で長さが異なっていることをいう。食い違いを有する部材がまとまって一体になるには、各部材は相互に力を及ぼしあって長さを揃えなければならない。この内なる力が残留応力である。

食い違いは、①塑性変形、②熱変形、③相変態・固溶原子の拡散、の少なくとも一つが材料内で不均一に起こることによって生じる¹³⁾。このような不均一は、製品の製造時に必然的に生じる。例えば、加工時の塑性変形量や熱処理時の温度は、一般に表面と内部とで異なるからである。表2に、各種加工法と表面に発生する残留応力との関係を示す。この中から、曲げとショットピーニングについて、残留応力の発生機構を説明する。

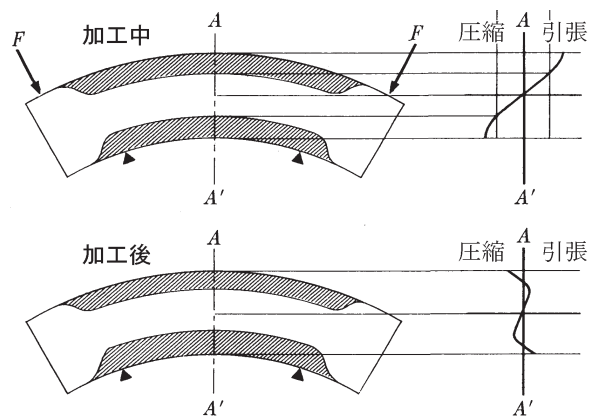


図1 曲げ加工により生じる残留応力¹⁴⁾

図1に、板材を曲げ加工する際の断面と応力状態を模式的に示す。網掛け部は塑性領域を、白地部は弾性領域を表す。塑性変形は板の表層から始まる。曲げ応力は板の表面に近いほど大きいからである。加工時に圧縮応力が作用する部位(A'側)には、加工後に引張残留応力が生じる。これは、圧縮塑性変形した表層は、完全に元に戻らなくてもスプリングバックの分だけ復元すれば応力が解消するが、板厚中心寄りの弾性圧縮状態にある部分は、さらに元の長さまで伸びようとして、表層を伸ばすからである。

ショットピーニングは、表面に圧縮残留応力を付与することを主たる目的として、鋼球その他硬質の小片を製品の表面に高速かつ多量に打ち付けるものである。表面は塑性変形して伸びようとするが、下地に拘束されて十分に伸びることができない。ゆえに、表面に圧縮残留応力が生じる。表面の加工硬化と圧縮残留応力が疲労特性を向上させる。

(3) 残留応力の緩和/低減

残留応力は、熱的または機械的方法により低減させ

表2 加工法と表面の残留応力

加工法	表面残留応力の引張・圧縮の別	備考
曲げ ¹⁴⁾	引/圧	曲げの内側→引張, 外側→圧縮
引抜き ¹⁵⁾	引/圧	通常は引張. スキンパス (断面減少率: 小) →圧縮
切削, 研削 ¹⁶⁾	引/圧	以下の要因のいずれが支配的であるかによって変化する: ①せん断破壊しやすい→引張, ②工具の押し込み: 強→圧縮, ③温度上昇: 大→引張, ④相変態→引/圧
ショットピーニング ¹⁷⁾	圧縮	圧縮残留応力の最大値: σ_{max} , 圧縮残留応力層の深さ: CP 投射材寸法: 大→ σ_{max} ↑ CP ↑, 投射速度: 大→ σ_{max} 変化無 CP ↑, 投射時間: 長→ σ_{max} 変化無 CP ↑
溶接 ¹⁸⁾	引/圧	溶接部近辺→引張, 母材部→圧縮 (組み立てに起因する拘束応力が重畳する)
熱処理 ^{19, 20)}	普通	熱応力型(表面: 圧縮) ⇔ 変態応力型(表面: 引張) 変態型を誘起する因子 ①焼入れ性: 良, ②質量: 小, ③比表面積: 大, ④冷媒冷却能: 大
	高周波	急速加熱のため, 残留応力の分布形態は焼入れ前組織の影響を受ける。
	浸炭	残留応力・残留オーステナイトの分布形態は多様で, 実験条件の影響を受けやすい。
めっき ²¹⁾	引/圧	めっき条件によって異なる. 鋼上のめっきが引張残留応力→鋼の疲労耐久性は減少。

表3 残留応力の緩和/低減手法

残留応力の緩和/低減手法		条件	
熱的方法	加熱	炭素鋼	873~973K ²²⁾
	再結晶温度以上	オーステナイト系ステンレス鋼	1073~1173K ²²⁾
	加熱	種々の材料 (寸法安定性が要求される場合)	作業温度より高めの温度 ³⁾
	再結晶温度未満	低温応力除去法の鋼の溶接部	423~473K ²³⁾
		黄銅	473~673K ²⁴⁾
	冷却後加熱	サブゼロ急熱法鋼, アルミ合金	77 or 200K→高速蒸気等 ²⁵⁾
機械的方法	振動法/衝撃法 ²⁶⁾	大型・複雑形状部品にも適用できる	残留応力 + 作用応力 > 耐力
	過ひずみ法 ²⁷⁾	部材断面に一樣な応力が負荷できるような単純形状のものであること	

ることができる。表3に残留応力の緩和/低減手法を示す。

加熱により残留応力が緩和する現象は、次の機構に基づく²⁸⁾：①降伏点と弾性率の低下による塑性変形の容易化、②クリープ、応力弛緩、③回復・再結晶。いずれも高温下で顕著な現象であるから、残留応力低減の効果は、加熱温度が高いほど大きい。しかし、高温過ぎると、製品の自重で変形が進行したり、組織が変化する等の弊害が生じるから、表3に示すような適正範囲がある。なお、高温で処理する場合であっても、均一に冷却できなければ、新たな残留応力が生じ得る。再結晶温度(鉄では623~773 K; 加工度が大きいほど低い)²⁹⁾ 未満の温度では、残留応力の顕著な低減効果は通常望めない。

機械的方法は、外力により残留応力の大きい部分を降伏させて、食い違いを是正するものである。加熱に伴う脱炭、表面酸化や軟化等が起こらない点で有効であるが、残留応力の低減効果は通常限定的である。なお、き裂を有する部材に対して引張りの過負荷を与えると、き裂材の寿命が伸びることが知られている。これは、過負荷でき裂先端に大きな塑性変形領域を形成させた後に除荷すると、当該領域が周囲の弾性変形領域から圧縮応力を受けることとなり、この圧縮応力がその後の通常負荷に対してき裂の開口/進展を抑制する効果を奏するためである³⁰⁾。

3. X線応力測定法

X線応力測定法は、非破壊残留応力測定法の中でもっとも一般的に広く利用されている手法である。「X

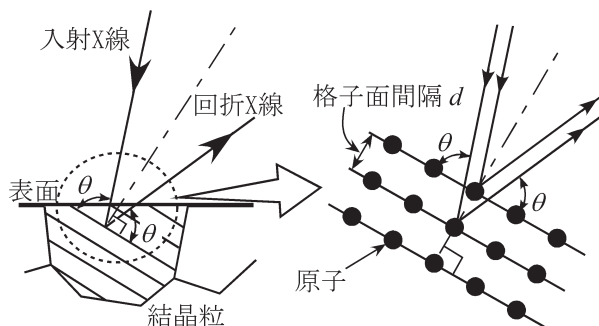


図2 X線回折の模式図

線回折」と「 $\sin^2\psi$ 法」から構成される。X線回折で原子配列の間隔が測定され、 $\sin^2\psi$ 法で応力が求められる。

(1) X線回折

X線回折とは、X線が結晶を構成する原子の核外電子によって散乱されて進行方向を変えることをいう。回折したX線は、図2のように、可視光の反射のイメージで描くことができる。X線はさまざまな方向に散乱するが、干渉の結果、結晶の規則性を反映する特定の角度方向に強く現れるからである。ただし、可視光の反射と異なり、特定の入射角度でのみ回折が起こることに注意を要する。また、X線回折は結晶でのみ起こり、ガラスその他の非晶質材料では起こらない。

X線の反射角^{シーク}(通常「回折角 2θ 」という)は、X線の波長 λ と格子面間隔 d によって決まる。これをブラッグの回折条件³¹⁾という。格子面とは、規則正しく整列した原子がつくる仮定の面のことである。この条件を利用すれば、特性X線と呼ばれる既知波長のX線で測定した回折角から、格子面間隔を求めることができる。格子面間隔が応力により弾性的に伸縮していれば、伸縮前後の回折角の変化から伸縮度(ひずみ)が求められ、弾性力学の法則を介して応力が求められる。

ここで、ひずみまたは応力を得るには、基準となる無ひずみ状態の回折角 $2\theta_0$ または格子面間隔 d_0 の値を要することに気付く。 d_0 は添加元素量によって変化するため、応力測定の試料について実測しなければならない³²⁾。微粉末にすれば残留応力は解放されるので、これについて d_0 を測定すればよい。しかし、これでは破壊測定となり、非破壊測定というX線を用いる最大の利益が失われる。この問題を回避するための巧みな手法が $\sin^2\psi$ 法である。

(2) $\sin^2\psi$ 法

$\sin^2\psi$ 法とは、無ひずみ状態の情報を用いることなく、回折角(格子面間隔)から応力を求めるための理

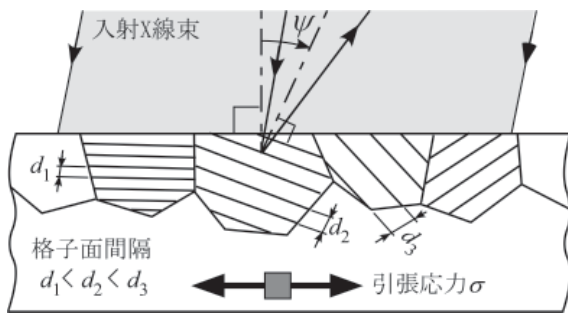


図3 表面に沿って引張応力が作用する多結晶体とX線回折の選択性を示す模式図

論である。 $\sin^2\psi$ 法は、被測定物が次の三条件を満たせば適用できる：①多結晶体，②ランダム配向，③深さ方向に変化しない平面応力状態。各条件の意味については後述する。

図3に上記三条件を満たす材料の断面模式図を示す。引張応力 σ は各結晶粒の格子面間隔を広げるが、その広がり量は結晶粒によって異なる($d_1 < d_2 < d_3$)。応力の作用方向に対する格子面の向きが異なるからである。結晶粒の向きは、試料面法線と格子面法線とのなす角 ψ で表す。

これら多数の結晶粒に一定の入射角度でX線を一括照射すると、照射された結晶粒のうち一部の結晶粒でX線回折が生じる。ブラッグの回折条件を満たす方向を向いた結晶粒のみが回折を起こすからである。X線ビームの大きさが平均結晶粒径よりも十分に大きければ、X線入射角をどのように変化させても必ずX線回折が起こる。条件①および②を具備する限り、ブラッグ条件を満たす方向を向いた結晶粒が必ず存在するからである。これは、X線入射角を変えることにより、回折にあずかる結晶粒が選択できることを意味している。

これより、X線入射角を変化させて(結晶粒を種々選択して)回折角を測定すれば、図4のような、結晶粒の向き(ψ 角)と格子面間隔(回折角)との関係が得られる。この関係には、応力に関する情報が含まれている。格子面間隔が結晶粒の向きによって異なるのは、応力の働きに由来するからである。弾性論によれば、材料が条件①ないし③を満たすとき、格子面間隔(回折角)は $\sin^2\psi$ に比例することが導出される³¹⁾。右上がり(比例係数 $M > 0$)なら圧縮応力、右下がり($M < 0$)なら引張応力である。比例係数の大きさは応力の大きさを反映する。

このように、 $\sin^2\psi$ 法によれば、向きの異なる複数の結晶粒について格子面間隔を測定して、その相対的变化から応力を求めることができるので、無ひずみ状

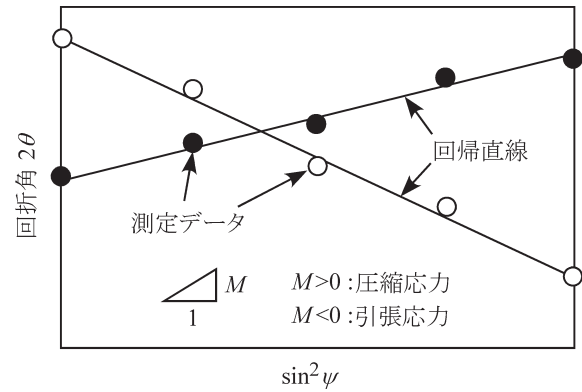


図4 模式的 $2\theta - \sin^2\psi$ 線図

態の情報が必要となり、非破壊測定が可能となる。

三条件の意味を説明する。条件①は「単結晶でない結晶性材料であること」という意味である。実用金属材料のほとんどは本条件を満たす。ただし、結晶粒が大きいまたは照射領域を小さく絞っている場合には、応力測定を行う上で被測定材料は単結晶の様相を呈するようになり、本条件から外れることがある。結晶粒径 $30\ \mu\text{m}$ (照射面積 $14 \times 10\ \text{mm}^2$)がその限界の目安である³¹⁾。

条件②は、「多結晶体を構成する結晶粒の結晶方位が無秩序に分布し、多結晶体を全体として見たときの弾性的性質が均質等方状態にあること」という意味である。例えば、圧延や引抜き等の強い塑性変形を受けた材料は、結晶が特定の滑り面に沿って変形した結果、等方的でなくなっていることがある。

条件③は、「測定面の応力状態が、試料表面に平行な方向に作用する応力のみが存在する“平面応力状態”であって、かつ深さ方向に変化しないこと」という意味である。試料表面は厳密に平面応力状態であり、厚み方向に作用する応力成分は存在しない。試料表面は自由表面であり、厚み方向への変形は拘束されないからである。特性X線が材料内に侵入する深さは、被測定材が金属ならば $10\ \mu\text{m}$ のオーダーであるから、測定領域はおおむね表面に限定されており、そのごく薄い範囲内では、応力は通常ほぼ一定であるとみることができ。ゆえに、条件③は近似的に成立する。

(3) 測定データの意味

残留応力の測定依頼に対し、当研究所では次のデータを提供している：①測定条件と測定結果(応力値)、② $\sin^2\psi$ 線図、③回折強度曲線。

(A) 応力値

測定応力値は「 $-123 \pm 12\ \text{MPa}$ 」のように表示される。 $-123\ \text{MPa}$ が応力値を、 $\pm 12\ \text{MPa}$ が信頼区間を表す。信頼率は68.3%(1標準偏差)である。上の表示は「信

頼率 68.3 % で応力は -111 MPa から -135 MPa の間に「ある」という意味である。一般に、正值は引張の、負値は圧縮の応力を表す。確認しておくべき事項は、照射領域の位置、大きさ、および測定応力成分（応力の方向）である。応力は一般に位置と方向によって異なるからである。なお、測定応力値は、表層（金属の場合で 10 μm 程度）での値であることに留意する必要がある。

(B) $\sin^2\psi$ 線図

測定データの直線性が重要である。直線性から被測定材が前節で説明した三条件を満たしているか否かを概略判別することができる。つまり、図 4 のような直線の分布が得られなかった場合には、被測定材は三条件のうち少なくとも一つを欠いていると判断できる^{34, 35)}。いずれの条件を欠いているかについては、分布形態と回折強度曲線（次項で説明）の特徴から推定できる場合がある。直線的に分布しない測定データが得られた場合、これに対して機械的に回帰直線を引いて応力値を求めることは不可能ではない。しかし、測定法の適用要件を満たしていない以上、意味ある数値にはならない。

(C) 回折強度曲線

図 5 のようなグラフが測定箇所毎に設定 ψ 角の数（通常 5 以上）だけ提示される。二つの着眼点があり、各々から被測定材の状態（組織状態、加工度等）を推定することができる。

①同一試料の同一測定箇所において、 ψ 角によって強度や曲線形状が著しく変動しているか否か。著しい変動は、粗大結晶粒または集合組織の存在を示唆する。

②異なる試料間で、または同一試料の異なる測定箇所の間で、半価幅に顕著な差があるか否か。半価幅とは、回折強度曲線の半分の高さにおける幅のことである（単位：角度 deg）。半価幅は、鋼では、硬さ、塑性変形量や疲労損傷度等と良い相関があり^{36, 37)}、半価幅

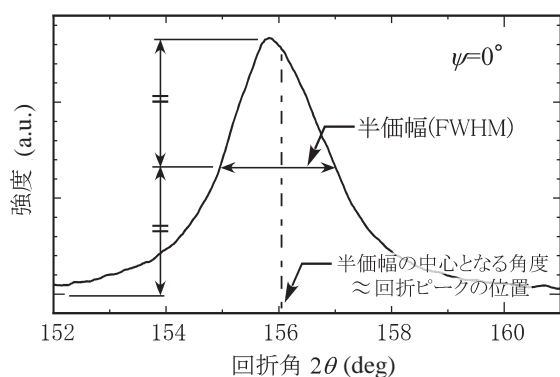


図 5 回折強度曲線の例

に差があれば、これらの量に差があると推定される。

半価幅が広がる主な原因は、微視的残留応力による不均一ひずみである。微視的残留応力とは、結晶粒単位または粒内各部の局所残留応力であり、より広い範囲にわたる平均残留応力からの偏差のことをいう。残留応力は微視的には一様でない。結晶の変形異方性（結晶方位の不均一性や隣接粒による拘束等）や、転移、析出物その他の格子欠陥によってかく乱を受けるためである^{38, 39)}。かく乱の度合いは加工量の増加とともに強められ、半価幅の増大として観察される。

なお、半価幅の中央にあたる角度は、通常、回折ピークの角度として扱われ、 $\sin^2\psi$ 線図の作成に用いられる。

4. 依頼測定事例

残留応力の測定依頼は、破損トラブルの原因究明を目的とするもののほか、破損トラブルに対処するために行う製造工程の修正について、その良否を判断する目的で寄せられることが多い。被測定材料としては、金属、特に鋼が多く、セラミックスも散見される。ここでは、当所に寄せられた測定依頼の一部を、依頼者に対する守秘義務に反しない範囲で紹介する。

(1) 曲げ加工された SUS304 鋼棒の応力腐食割れ

この部品（図 6）は、あまり外力が作用しない状態で海水に触れる環境下で用いられるものである。曲げ加工した状態のまま使用していたところ、破断したものである。調査段階で応力腐食割れの可能性が指摘され、残留応力の測定依頼に至った。

第二章第二節で説明した曲げ加工による残留応力発生機構をあてはめると、B 部は曲げの内側であり、加工時に圧縮応力が作用する部分であるから、加工後には引張残留応力が生じる。事実、未破壊品について B 部の軸方向残留応力を測定したところ、約 200 MPa の引張残留応力であった。応力腐食割れは、オーステナイト系ステンレス鋼が引張応力を受けた状態で腐食環境下に曝された場合に起こるものであるから⁴⁰⁾、本

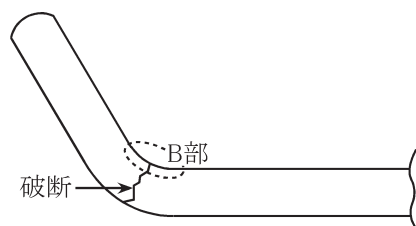


図 6 応力腐食割れを起こした曲げ加工品の概略図

事例の破壊様式は応力腐食割れであると推認された。

応力腐食割れを避けるには、①材料、②環境、③応力のいずれか一つについて対策すれば足りる。例えば、①高 Ni の安定オーステナイト鋼を採用、②物理的に腐食環境を遮断、③曲げ加工後に応力除去焼きなましをする、またはショットピーニングで圧縮残留応力を導入する等が挙げられる⁴⁰⁾。

(2) 曲げ加工された鋼製機械部品の疲労破壊

問題となった部品は、平板状の形状を有し、繰返し荷重を受ける用途の機械部品である。耐久試験時に疲労破壊を起こしたため、測定依頼に至った。この部品は、供用時の性能を高める目的で、部品のごく一部が意図的に面外にわずかに曲げられていた。疲労破壊は、この曲げ加工部で発生した。曲げ加工は熱処理後に行われていた。熱処理時に拘束具を装着する関係で、熱処理前には曲げ加工できなかったためである。

前節と同様に、曲げの内側について残留応力測定を行ったところ、700 MPa 余りの引張残留応力であった。一方、比較目的で用意した曲げ加工省略品では、同一部位の残留応力がおおよそ -400 MPa であった。このことから、曲げによって導入された引張残留応力が疲労耐久性を下げたものと推定され、曲げ加工の後にショットピーニング処理が追加された。これにより問題箇所の残留応力は圧縮の約 -700 MPa となり、疲労強度が改善された。

(3) 溶接された鋼製構造部品の疲労破壊

問題となった部品は、中炭素鋼の素形材を溶接で結合した構造部品である。その用途の性質上、部品には静的荷重に加えて振動荷重が作用する。供用中に溶接部で破断した。原因調査の過程で、溶接残留応力によ

る疲労強度の低下が疑われたため、測定依頼に至った。

溶接部近辺には一般に引張残留応力が生じる。また、ビードに近接する熱影響部の機械的特性は、母材のそれに比べて低下しており、熱影響部の強度が溶接継手全体の強度を支配することが多い(軟鋼や溶接に適した構造用鋼の場合を除く)⁴¹⁾。

そこで、未破壊品について熱影響部の残留応力を数箇所測定したところ、最大で 100 MPa 強の引張残留応力が認められた。これが耐久性に悪影響を及ぼしたものと推定されたことから、溶接後にショットピーニング処理が追加された。これにより、問題箇所の残留応力は圧縮の -300 ~ -500 MPa となり、疲労強度が改善された。

5. 複雑形状物の残留応力測定技術

著者らは、X 線応力測定法を複雑形状物に適用するための新しい応力測定技術について研究してきた。ここでは、その概要を紹介する。

(1) 曲面への適用

第三章で説明した測定原理から明らかなように、従来の X 線応力測定法では、測定しようとする試料の表面は平坦でなければならない。これは、同章第二節で述べたように、結晶粒の向きを特定する ψ 角は試料面法線を基準として定めるので、曲面の広い範囲に X 線を照射するのでは、試料面法線が唯一に定まらないからである。しかし、機械部品等を測定対象とする場合は、曲面に対する測定が必要になることが多い。曲面に対して従来の X 線応力測定法を適用すれば、測定値には曲面形状に起因した測定誤差が含まれることになる。

この種の誤差を軽減するもっとも簡便な解決手段は、照射する X 線ビームを小さく絞ることである。微小領域に着目すれば、曲面であっても平坦とみなすことができるからである。しかし、小さく絞ると回折強度が減少して測定精度の低下を招くおそれがあるほか、対象物の結晶粒度によっては、十分な数の結晶粒を照射領域内に収めることができずに、巨視的等方性の要件を欠くという新たな誤差要因を招くこともある。したがって、測定の目的の範囲内で、かつ曲面の影響が軽微な範囲内で、できる限り X 線ビームは大きくすることが望ましい。

著者らが丸棒について照射寸法と残留応力測定値との関係を調べた結果によれば、一定応力状態の曲面上で周方向の照射寸法を大きくすると、図 7 に示すように、周方向応力および軸方向応力の測定値は、いずれ

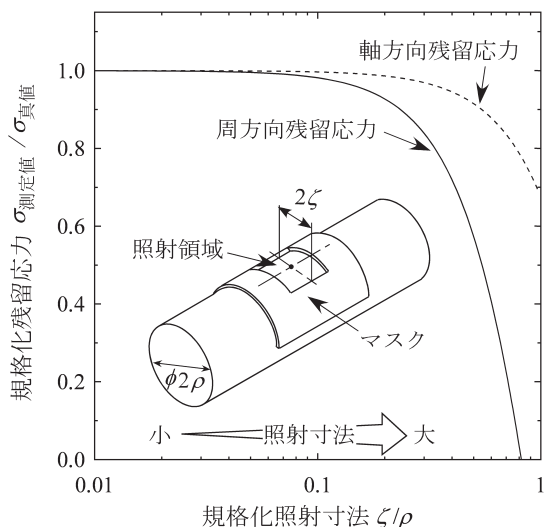


図 7 丸棒上の照射寸法の大きさと残留応力測定値との関係⁴²⁾

もその絶対値が減少する⁴²⁾。すなわち、実在する残留応力より小さく測定される。減少の程度は周方向応力の方が顕著である。

図7によれば、照射寸法を測定面の曲率半径の40% ($2\zeta/\rho \leq 0.4$) 以下に止めれば、曲面に起因する誤差は実在する周方向応力の10%以下 ($1-\sigma_{\text{測定値}}/\sigma_{\text{真値}} \leq 0.1$) になる。10%という量は、平板試料に対するX線応力測定においても通常生じ得る誤差であるから、そのような照射寸法下での測定であれば、平坦面と同様の扱いが許されると考えられる。これを当研究所が有している微小部X線応力測定装置にあてはめると、X線ビームサイズの最小径が $\phi 0.15\text{ mm}$ であるから、平坦面として扱い得る許容範囲は曲率半径約 0.4 mm までとなる。

(2) 狭隘部への適用

歯車の歯元や歯面等、奥まった箇所^{ロー}の残留応力を $\sin^2\psi$ 法で測定することは一般に難しい。隣接歯や、その他測定箇所^{ロー}に近接する部材が障害となって、X線を要求する位置に必要な入射角度で当てられない場合や、当てられたとしても回折X線が遮られる場合があるためである。

この問題に対するもっとも直接的な解決手段は、障害となっている部材を除去してしまうことである。しかし、それでは非破壊測定にならないし、除去加工によって残留応力状態がわずかなりとも変化することから、残留応力値が測定できたとしても、それが直ちに除去前の状態の残留応力とは言えないという問題も生じる。

著者らは、このような状況下でも部材除去をせずに使える応力測定技術を開発した：①歯元のような奥

まった箇所にある曲面に対する応力測定技術「擬似 ψ 角変化法⁴³⁾」、②歯面のような奥まった箇所にある傾斜面に対する応力測定技術「二軸傾斜法⁴⁴⁾」である。いずれもX線回折を利用する点において従来のX線応力測定法と共通しているが、前者がX線入射角を変化させずに照射位置を変える点、後者がX線入射角の変化を与える回転軸を従来法よりも一軸多く用いる点で異なっている。以下、両手法を簡単に紹介する。

(A) 擬似 ψ 角変化法⁴³⁾

図8に本手法でラック歯元の歯型方向応力を測定する場合の模式図を示す。従来のX線応力測定法であれば、隣接歯の方向に入射X線を傾ける必要があるが、隣接歯が障害となって十分に傾けられない。

本手法では、X線は隣接歯の影響を受けないよう、歯幅方向に平行な鉛直面内で照射する。X線の入射方向を一定に保ったまま、照射位置(P)を歯元の円弧部に沿って逐次移動させ、各位置毎にX線の回折角を測定する。X線入射角は意図的には変化させないが、照射位置の移動により入射角の実質的変化が生じる。測定部が円弧形状であるため、位置によって角度 Ω が異なるからである。この実質的入射角変化により、回折ピーク角度が変化する。なお、本手法では、X線ビームが円弧面の広い範囲に照射される場合であっても、測定領域内で応力が一様であれば、X線ビームサイズは測定結果に影響しない。

図8のプロットは、歯元をサンドブラスト処理した鋼製ラックに本手法を適用した結果である。円弧内の複数箇所について回折角を測定し、X線経路面に対する照射面の角度(Ω)と回折角との関係をグラフに表したものである。回帰直線の傾きを求めて応力定数を乗

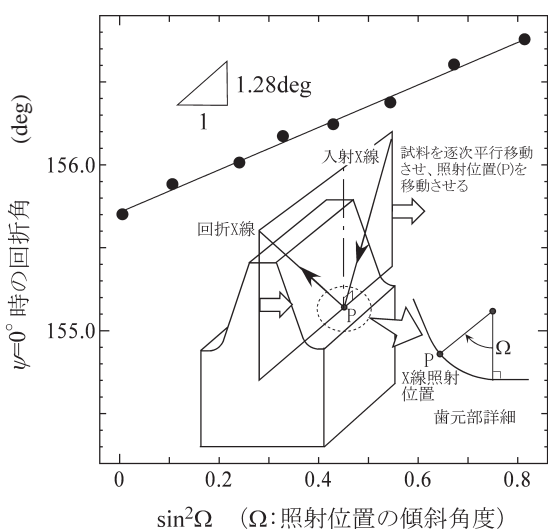


図8 擬似 ψ 角変化法によるラック歯元の歯型方向残留応力測定の模式図と測定結果⁴³⁾

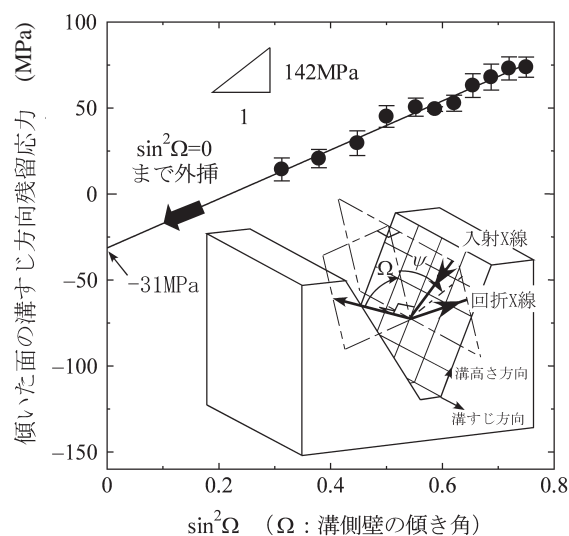


図9 二軸傾斜法によるV溝側壁の応力測定法の模式図と平板模擬試料に対する測定結果⁴⁴⁾

じれば、歯元の歯たけ方向残留応力が得られる。本図の場合、傾きが 1.28 deg, 応力定数 -318 MPa/deg なので、歯たけ方向残留応力は -407 MPa と求められる。

(B) 二軸傾斜法⁴⁴⁾

図9に本手法でV溝側壁の溝すじ方向応力を測定する場合の模式図を示す。従来のX線応力測定法であれば、側壁面の法線と溝すじを含む面内でX線を入射させる必要があるが、対向する側壁がそれを妨害する。

本手法では、対向側壁の影響を受けないよう、溝すじ方向に平行な平面(ただし、側壁面法線から Ω だけ傾斜した面)内でX線を照射する。この照射条件の下で、X線入射角度の指標である ψ 角を溝すじ方向に変化させて、通常の応力測定を行う。ただし、この測定では、測定面が Ω だけ傾いているので、測定される応力値は求めるべき「溝すじ方向応力」ではなく、「傾いた面の溝すじ方向応力」となる。この測定を可能な範囲で幾通りかの傾斜角度 Ω について行い、図9のような、傾斜角度 Ω と「傾いた面の溝すじ方向応力」との関係のグラフを作成する。

図9のプロットは、機械的手段により一軸応力を負荷した鋼板模擬試料に本手法を適用した結果である。回帰直線の傾きと y 切片を求めれば、傾きの符号を反転させたものが溝高さ方向残留応力に、 y 切片が溝すじ方向残留応力にそれぞれ相当する量となる。本図の場合、傾きが 142 MPa, y 切片が -31 MPa なので、前者が -142 MPa, 後者が -31 MPa と求められる。

6. 残留応力測定技術の発展動向

当研究所では、特性X線を用いた応力測定を実施している。この手法により非破壊測定できるのは、金属の場合で表面から深さ 10 μm 程度の範囲の応力である。さらに深い内部の残留応力を非破壊で知りたいという要求には応えられない。破壊的方法 — 電解研磨で表層を除去し、新たに現れた表面について応力測定を行う方法 — によるほかはない。

近年、表面下 1 mm 以上の深内部における残留応力を非破壊で測定できる、放射光や中性子を用いた応力測定法が注目されている。X線応力測定法と同様、回折現象を利用する測定法であるが、特性X線よりも透過能力が高いことを利用したものである。対象物が鉄である場合の侵入深さは、放射光で 6 mm, 中性子で 85 mm に及ぶ⁴⁵⁾。軽金属であればさらに深くまで測定可能である。

線源の特殊性から、実施可能な施設は限られてい

る。代表的な施設には、高輝度光科学研究センターのSPring-8(兵庫県)、日本原子力研究開発機構(JAEA)の研究用原子炉JRR-3(茨城県)や、JAEAと高エネルギー加速器研究機構が共同で運営する大強度陽子加速器施設J-PARC(茨城県;平成20年度末共用予定)がある。

いずれの施設においても、産業利用を促進するための取り組みを行っており、一般企業も課題/利用申請をして承認されれば利用可能である^{46,47)}。ただし、当研究所で行っているような依頼測定とは異なり、申請者自らが実験を行わなければならない。スタッフの支援は受けられる。SPring-8では、スタッフによる測定代行制度が試行されている。試行の対象に残留応力測定は含まれていないが、需要が多ければ代行が検討される可能性はあるだろう。利用料金は、実験成果を専有しない場合には減額される。

7. おわりに

X線応力測定法と残留応力に関する技術的事項のうち、技術相談等の経験から需要が高いと思われたものを、できる限り平易に解説するよう努めた。測定事例の選択は、守秘義務の要請に基づく事例の抽象化を行っても、なお第三者に知識として伝達すべき情報性を有しているか否かの観点から行った。しかし、依頼者に対する聞き取り調査が不足していた等の理由で記録が不十分なものが多く、情報性の高い事例を示すことができなかった。

最後に、本解説が破損トラブルの解決と予防に役立つば、望外の喜びである。

参考文献

- 1) 日本材料学会疲労部門委員会：初心者のための疲労設計法(2004)p.22.
- 2) 大谷隆一、駒井謙次郎：総合材料強度学講座7 環境・高温強度学、オーム社(1984)p.7.
- 3) 藤原晴夫：材料、27(1978)p.1129.
- 4) 遠藤吉郎、福田嘉雄、井上源之助、高宮脩武：精密機械、37(1971)p.20.
- 5) 石神逸男、三浦健一、星野英光、水越朋之、浦谷文博、小川倉一：真空、43(2000)p.524.
- 6) 山野隆章、三好良夫、小倉敬二：技苑、97(1998)p.9.
- 7) 大山 啓、升田雅博、岩田 弘、橋本治二、大久保和男：精密工学会誌、68(2002)p.108.
- 8) 鈴木裕士、秋田貢一、三沢啓志、今福宗行：材料、51(2002)p.730.
- 9) 米沢武敏、横山和夫、伊藤 昇：National technical report、25(1979)p.6.
- 10) 松崎俊彦、宮下幸雄、許 金泉、武藤睦治、小松高行：

- 第33回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, (2002) p.169.
- 11) 太田裕之, 石塚典男: 日本材料学会 第134回X線材料強度部門委員会研究討論会資料, (2001) p.12.
 - 12) 中村 宏, 恒成利康, 堀川 武, 岡崎省三: 機械の疲労寿命設計, 養賢堂 (1983) p.18.
 - 13) 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明: 残留応力のX線評価, 養賢堂 (2006) p.27.
 - 14) カリティ: 新版X線回折要論, 松村源太郎訳, アグネ (1980) p.414.
 - 15) 訓谷法仁, 浅川基男: 塑性と加工, **38** (1997) p.147.
 - 16) 村田一夫, 山口勝己, 足立和俊, 本田索郎: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.15 (2001) p.27.
 - 17) 渡邊吉弘, 長谷川典彦, 松村義和: 材料, **44** (1995) p.110
 - 18) 溶接学会編: 新版 溶接便覧, 丸善 (1966) p.1075.
 - 19) 須藤 一: 残留応力とゆがみ, 内田老鶴圃 (1988) p.136.
 - 20) 米谷 茂: 機械の研究, **23** (1971) p.53.
 - 21) 米谷 茂: 金属表面技術, **37** (1986) p.21.
 - 22) 吉田 亨: 非破壊検査, **18** (1969) p.261.
 - 23) 内木虎蔵: 熱処理, **13** (1973) p.254.
 - 24) 三坂克彦: 熱処理, **13** (1973) p.261.
 - 25) 大和久重雄: 熱処理, **13** (1973) p.224.
 - 26) 中桐明和, 前田春興: 技苑, **35** (1983) p.46.
 - 27) 溶接学会編: 新版 溶接便覧, 丸善 (1966) p.1104.
 - 28) 渡辺正紀, 佐藤邦彦: 溶接力学とその応用, 朝倉書店 (1965) p.481.
 - 29) 矢島悦次郎, 市川理衛, 古沢浩一: 若い技術者のための機械・金属材料—増補版—, 丸善 (1979) p.62.
 - 30) 寺田博之: わかりやすい構造破壊の防止技術, 養賢堂 (2006) p.61.
 - 31) 後藤 徹, 大谷真一: 材料, **47** (1998) p.1188.
 - 32) カリティ: 新版X線回折要論, 松村源太郎訳, アグネ (1980) p.418.
 - 33) 日本材料学会: X線応力測定法標準 (2002年版)—鉄鋼編一, (2002) p.48.
 - 34) 日本材料学会: X線応力測定法標準 (2002年版)—鉄鋼編一, (2002) p.32.
 - 35) 関口晴男, 田中康信, 川辺泰嗣, 桐山貞夫, 阿倍野信行: 島津評論, **36** (1979) p.143.
 - 36) 後藤徹: 材料, **37** (1988) p.1118.
 - 37) 日本材料学会: 改著X線応力測定法, 養賢堂, (1990) p.186.
 - 38) カリティ: 新版X線回折要論, 松村源太郎訳, アグネ (1980) p.260.
 - 39) 日本材料学会: 改著X線応力測定法, 養賢堂, (1990) p.158.
 - 40) 矢島悦次郎, 市川理衛, 古沢浩一: 若い技術者のための機械・金属材料—増補版—, 丸善 (1979) p.202.
 - 41) 溶接学会編: 溶接・接合便覧, 丸善 (1990) p.42.
 - 42) 小栗泰造, 村田一夫, 佐藤嘉洋: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.18 (2004) p.57.
 - 43) 小栗泰造, 村田一夫, 山口勝己: 材料, **54** (2005) p.1307.
 - 44) 小栗泰造, 村田一夫, 山口勝己: 材料, **56** (2007) p.641.
 - 45) 鈴木賢治, 田中啓介: 材料, **54** (2005) p.553.
 - 46) 高輝度光科学研究センター: URL <http://www.spring8.or.jp/ja/>
 - 47) 日本原子力研究開発機構: URL <http://sangaku.jaea.go.jp/3-facility/>