

展望

中性子の鉄鋼研究への応用-3

中性子および放射光による残留応力測定とその相補利用

Residual Stress Measurements by Diffraction Using Neutron and Synchrotron Radiation and Complementary Use of These Techniques

鈴木裕士
Hiroshi Suzuki

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門
中性子産業利用技術研究ユニット 研究員

菖蒲敬久
Takahisa Shobu

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門
放射光科学研究ユニット 技術開発協力員

はじめに

溶接や加工などによって発生する残留応力は、時として疲労寿命や材料強度といった機械的特性、さらには、き裂進展などの破壊メカニズムに悪影響を及ぼすことが知られている。例えば、国内の原子力発電所の多くが30年を越える運転を続けており、経年変化事象である応力腐食割れ(SCC)による機器・配管材料の事故やトラブルが報告されているが、このSCC問題においては、材料表面に発生する引張残留応力が要因の一つであると言われている。また、き裂発生後におけるき裂進展には、材料内部に生じる残留応力が影響することから、材料表面だけでなく材料内部における残留応力状態を把握することが、構造物の信頼性および健全性の評価のうえで重要である。

残留応力測定技術には、ひずみゲージなどを利用した機械的な計測法のほかに、X線回折法や中性子回折法のように格子面間隔を標点間距離とする物理的な計測法がある¹⁻⁴⁾。特に、後者については、非破壊、非接触で結晶材料の残留応力を測定できる方法として広く知られており、工業分野から研究開発分野に至るまで、さまざまな分野に应用されている。この非破壊・非接触応力測定法には、①実験室におけるX線管球(実験室X線)を用いるX線応力測定法、②シンクロトロン放射光から得られる単色X線を用いる放射光X線応力測定法、③原子炉や核破砕中性子源から得られる熱中性子線を用いる中性子応力測定法などが挙げられる。

X線応力測定法の原理は、1930年代初頭にドイツで発表され、工業界で実用化されるようになったのは、計数管を用いたX線回折装置が開発されて、 $\sin^2\psi$ 法により多結晶材料の応力測定が容易になった1960年代に入ってからである⁵⁾。X線管球を用いた応力測定では、材料の表面層の残留応力測定に限られるが、実験室レベルで容易に応力測定が可能なことから、多くの企業や研究所、大学などで利用されている汎

用の応力測定技術の一つとなっている。現在では、鉄鋼材料やセラミックス材料を対象にしたX線応力測定法が、日本材料学会X線材料強度部門委員会により標準化されており、「X線応力測定法標準—鉄鋼編—」および「X線応力測定法標準—セラミックス編—」としてまとめられている^{2,3)}。最近では、線源をシンクロトロン放射光に広げ、その優れた特徴を生かした新しい応力測定技術の開発が行われている⁶⁻¹⁴⁾。例えば、シンクロトロン放射光からは、高輝度・高平行度のX線が得られるため、応力の実時間測定や、サブミクロンからミクロンオーダーの極微小領域の応力測定が可能となる。さらに、第三世代の放射光から得られる高エネルギーX線を用いれば、試料表面から1mm程度の深さまでの応力を、また、平面応力状態や等二軸応力状態が仮定できる場合には、深さ十数mmまでの応力を非破壊で測定することが可能である。一方、中性子回折法は、中性子線の優れた透過能を生かすことで、試料の数mmから数cm深さまでの残留応力を非破壊で測定することができる唯一の方法であり^{15,16)}、大型構造物や複雑形状の製品に対する応力評価に用いられることが多い。図1に示すように、実験室X線、放射光X線、中性子線

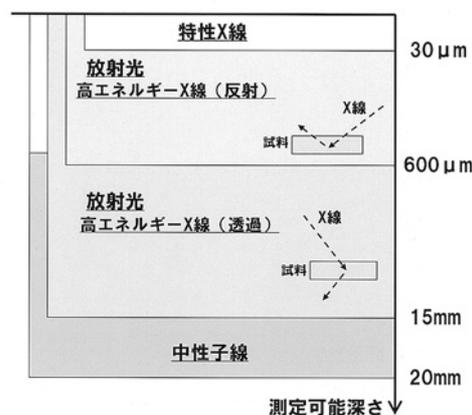


図1 特性X線、放射光X線、中性子線を用いた場合のひずみ測定可能深さ¹³⁾

を用いた応力測定技術には個々に優れた特徴を有しており、これら3種類の線源を目的に応じて使い分けること、また、それぞれの測定技術により得られた結果を総合的に評価し、製品設計や品質保証さらには学術研究に役立てることが重要となる。

そこで本稿では、特に中性子回折法と高エネルギー放射光X線を利用した応力測定技術について、それらの基本原理や測定技術、さらにはそれらの応用例について紹介するとともに、これらの応力測定技術を相補的に利用することの重要性についても述べる。

2 応力測定の基本原則

結晶粒内には、原子が規則正しく整列しており、これら原子は、多数の平行な面に属していると考えられる。これを格子面と呼び、この格子面が多数重なった構造を結晶という。X線や中性子線は個々の原子に当たるとあらゆる方向に散乱されるが、(1)式に示すブラッグの回折条件式を満足する場合に、それらの散乱X線が同一位相になって相互に干渉し回折現象を生じる。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n \text{ は整数で回折次数と呼ばれる。}) \quad (1)$$

ここで、 d を格子面間隔、 λ を入射X線の波長とする。また、 θ はブラッグ角と呼ばれ、格子面間隔と波長により決定される角度である。

図2に示すように材料に引張荷重が作用すると、この格子面間隔 d は引張軸に沿って Δd だけ大きくなる。この d の変

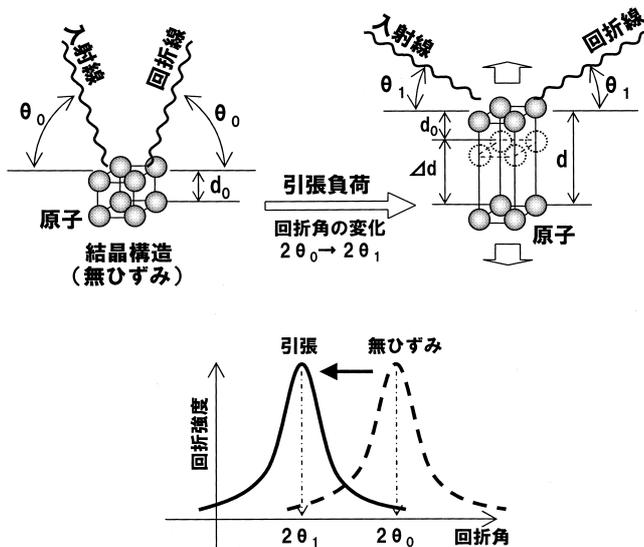


図2 結晶格子の変化と回折角の変化
上図は引張荷重を負荷した場合の格子面間隔変化を示し、下図はその際の回折プロファイルの変化を示している。

化は、(1)式を θ で微分することにより、ブラッグ角の変化に置き換えることが可能であり、その関係式は次式で表される。

$$\frac{\Delta d}{d} = -\Delta \theta \cdot \cot \theta \quad (2)$$

すなわち、 d の変化は回折角 2θ の変化として表せることを意味しており、回折角の変化を測定することで格子ひずみを評価することが可能といえる。この式の格子面間隔 d を無応力状態における格子面間隔 d_0 に置き換え、さらに、ブラッグ角 θ を無応力状態のブラッグ角 θ_0 と置き換えれば、(2)式は残留格子ひずみ ϵ を表していることになる。ある方向の格子面間隔および回折角を d_ψ および $2\theta_\psi$ とすれば、格子ひずみ ϵ_ψ は次式で表すことができる。

$$\epsilon_\psi = \frac{d_\psi - d_0}{d_0} = -\frac{2\theta_\psi - 2\theta_0}{2} \cdot \cot \frac{2\theta_0}{2} \quad (3)$$

(3)式を用いて試料に対する直交三方向の格子ひずみ ϵ_{ii} を測定し、以下の(4)式の右辺に代入することで、直交三方向の応力成分 σ_{ii} を求めることができる。

$$\sigma_{ii} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})} \left\{ \epsilon_{ii} + \frac{\nu_{hkl}}{(1 - 2\nu_{hkl})} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \right\} \quad (4)$$

ここで、 E_{hkl} および ν_{hkl} は回折面 hkl のヤング率およびポアソン比を示す。中性子回折法では、材料深部の三軸応力状態を評価するために、直交三方向の格子ひずみを測定し、 σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} の3つの応力成分を求める必要があるが、平面応力状態を仮定できるような表層の残留応力を測定する場合には、必ずしも3方向の格子ひずみを測定する必要はない。また、測定した三方向が主軸に一致する場合には、(4)式により求めた応力は主応力となるが、主軸が明らかでない試料に対し主応力を求めたい場合には、異なる6方向の格子ひずみから応力を算出する必要がある。一方、実験室X線による応力測定では、従来の $\sin^2\psi$ 法を用いることにより残留応力を測定することが可能である。放射光X線は、エネルギー(波長)可変であるため、低エネルギー側のX線を用いる場合など、平面応力状態を仮定できる条件において $\sin^2\psi$ 法を用いることが可能である。また、高エネルギー側のX線を用いて表面直下あるいは材料内部の応力分布を測定する場合には、中性子応力測定法を基本原理とするひずみスキニング法や侵入深さ一定法が用いられる。

ところで、三軸応力状態を評価する場合には、(3)式に示した無応力状態の格子面間隔 d_0 を正確に把握することが必要となる。これは、中性子回折法ではもちろんのこと、放射光X線を用いた場合にも、平面応力状態が仮定できない場合には、 d_0 を把握することが必要となる。 d_0 の測定法には種々の方法があるが、例えば、測定対象物と同一ロット材から作

製した粉末試料や焼なまし試料の格子定数を測定し、それを無応力状態の格子定数とする場合や、巨視的な残留応力のみを除去するために、 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ のサイズの小片試料を測定対象物より切り出し、その格子定数を測定する方法が報告されている。中性子応力測定や放射光X線応力測定の信頼性に最も大きな影響を及ぼす因子は、無応力状態における格子面間隔 d_0 であり、これを正確に把握することが高精度応力測定の実現のために重要である。

3 中性子回折法による残留応力測定

中性子回折法は、数mmから数cmオーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することができる唯一の手段として1980年代半ばより注目されるようになった¹⁵⁾。この中性子応力測定法は、大型構造物や複雑形状部品等の三次元的な応力マッピングが非破壊・非接触で可能なことから、機械構造物の設計支援技術として産業界からの利用が増加している¹⁷⁾。このようなバックグラウンドのもと、カナダのチョークリバー研究所では、ANDI (Applied Neutron Diffraction for Industry)、欧州ではFaME38 (Facility for Materials Engineering 38) というプロジェクトが開始しており、世界的に産業利用に対する支援体制が充実し始めている。我が国では、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-3に応力測定専用装置 RESA (Diffractometer for Residual Stress Analysis) が設置されており、2003年度からは成果占有の有償利用 (共同利用) への開放、2006年度からは文部科学省による中性子利用技術移転推進プログラム (通称トライアルユース) の開始に伴い、産業利用も拡大している。主に、原子炉溶接配管や鉄道レール、自動車部品などの大型構造物に対する残留応力測定が行われており¹⁷⁻²⁰⁾、高性能、高信頼性、長寿命化を目指した製品開発に大きく貢献している。一方で、中性子線の優れた透過能を生かした学術研究や技術開発が行われており、多くの成果を挙げている。例えば、残留応力測定精度の向上を目指した中性子応力測定技術の開発や²¹⁻²³⁾、残留応力に基づいたピーニング技術の開発²⁴⁾、また、形状記憶合金における応力誘起変態メカニズムの解明、塑性加工や熱処理に伴うマイクロ組織形成と残留応力発生に関する研究²⁵⁾、冷間圧延による集合組織の発達と第二種ひずみの発生に関する研究など、残留応力測定分野だけでなく金属学的な研究分野においても RESA が利用されている。以下では、中性子応力測定装置について簡単に説明するとともに、RESAを利用して行われた残留応力測定例について紹介する。

3.1 中性子応力測定装置

残留応力解析のための中性子回折装置には、角度分散型の装置とエネルギー分散型の装置がある。角度分散型回折装置とは、研究用原子炉炉心における核分裂連鎖反応により連続して発生する白色の熱中性子 (定常中性子) から、モノクロメーター結晶を利用して単一エネルギー (単一波長) の中性子のみを抽出し、測定試料によって回折される中性子の個数と回折角を検出器走査によって観測する方式の装置である。すなわち、ある回折面 hkl の格子面間隔を d_{hkl} 、入射中性子の波長を λ とすれば、ブラッグの回折条件式 (1) 式により決定される回折角 2θ を測定するための装置である。一方、エネルギー分散型の装置とは、加速器で加速させた陽子を重金属の標的に当て、その際生じる標的原子核の破碎によって放出される中性子を利用する。放出される中性子のスペクトルは定常中性子とは異なり、加速器の周期 (数10Hz) に依存する断続的なパルス状の中性子である。また、広範のエネルギー域の中性子を用いるため、中性子のエネルギー毎に、中性子の発生から試料での回折及び計測までの時間を測定する飛行時間法 (Time-of-Flight method) を測定原理とする。現在、世界的に高出力パルス核破碎中性子源の開発が行われている。国内においても、大強度陽子加速器研究施設 (J-PARC) の建設が進んでおり、この施設内には残留応力測定装置の設置も予定されている。本稿では、日本国内における唯一の角度分散型応力測定用中性子回折装置 RESA について説明する。

図3に RESA の外観写真を示す。現在の RESA の入射中性子線の波長は、約 0.21 nm のほぼ固定波長で使用している。中性子検出器は1本のHe-3ゼロ次元検出器 ($\phi 50\text{ mm}$) を用いており、回折角 2θ は $0^\circ \sim 130^\circ$ 程度の範囲を測定することができる。回転試料台 (ω ステージ) 上には、試料位置決め用のxyzゴニオメーター (可動範囲: $x=y=\pm 100\text{ mm}$ 、

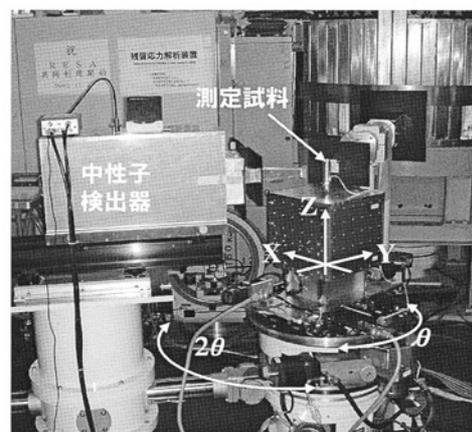


図3 日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-3のガイドホールに設置されている残留応力解析用中性子回折装置 (RESA)

$z=0\sim+100\text{ mm}$ 耐荷重: 100 kgf) が付属されており、 $200\sim300\text{ mm}$ 角程度のサイズの試料を搭載可能である。回転試料台を挟んだ入射中性子飛行管と中性子検出器中性子飛行管先端には、試料内のゲージ体積を規定するための種々の開口サイズのカドミウム製のマスクを装着するようになっている。装置の分解能は 0.3% 程度で、これは鉄鋼材料を試料とした場合、応力は $\pm 30\text{ MPa}$ 程度の確からしきで評価できることに相当する。測定時間としては、中性子線のフラックスは特性X線や放射光X線に比べて極めて弱く、一つの hkl からの回折プロファイルの計数時間は、選択するゲージ体積、試料の中性子吸収の違い等にもよるが、概ね数分から数時間程度(場合によっては数十時間)を必要とする。応力を求めるためには、直交3方向の回折プロファイルを測定する必要があるため、1箇所の測定に数十分から十数時間(場合によっては数日)を要する。なお、現在、RESAの高度化が計画されており、将来的には中性子強度の増強および一次元検出器の利用を検討している。この場合、実質測定効率は一桁から二桁程度上がると考えられ、応力測定の高効率化が期待できる。

3.2 中性子応力測定法の適用例

3.2.1 突合せ溶接試料の残留応力分布測定^{22, 23)}

溶接試料の残留応力測定の要望は多く、RESAにおいては突合せ溶接試料や溶接配管などの応力分布測定が良く行われている。ここでは、SNC631鋼およびSUS304鋼で製作したX開先突合せ溶接試料の残留応力分布測定結果について紹介する。試験片はTIG溶接法により接合した $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ のX開先突合せ溶接試料である。格子定数測定用の標準試料は、溶接試験片から切り出した $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ の小片試料とし、その標準試料について格子定数を測定した。図4に両試験片の残留応力分布を示す。本測定では、突合せ溶接試験片の表面から 5 mm 深さにおける残留応力分布を測定した。各測定点に示すエラーバーは標準誤差を示しているが、 $\pm 10\text{ MPa}$ から $\pm 40\text{ MPa}$ 程度であり、比較的信頼性の高い応力評価が可能であった。SNC631鋼、SUS304鋼ともにほぼ同様な残留応力分布を示している。溶接線平行方向の最大引張残留応力は両試料とも引張で 300 MPa 程度であり、さらに、その残留応力分布は試験片全体でおおよそバランスしている。この残留応力分布は、これまでに発表された突合せ溶接材の残留応力分布によく似た結果である。以上のように、中性子回折法により溶接構造物の内部に発生した残留応力を正確に測定することが可能である。

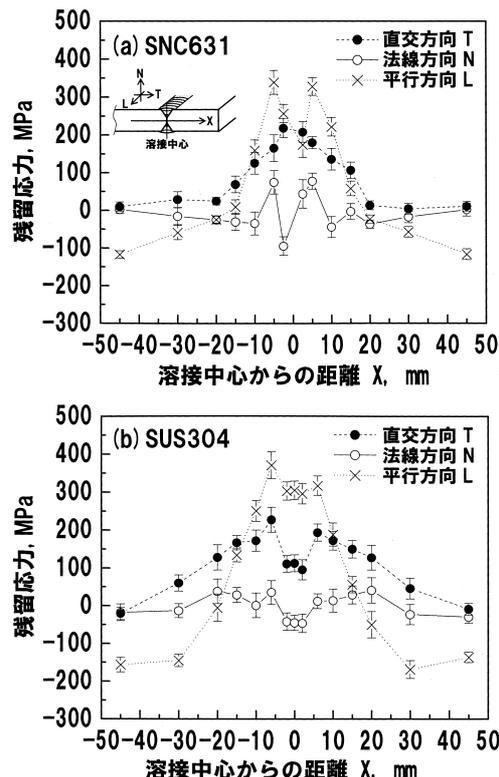


図4 中性子応力測定法を用いて測定した突合せ溶接試料の残留応力分布
上図(a)はSNC631鋼の残留応力分布を示し、下図(b)はSUS304鋼の残留応力分布を示している。

3.2.2 自動車部品の応力評価¹⁷⁾

自動車は我々の社会生活において非常に身近な工業製品であるが、その自動車に使用される各種部品は高温環境や振動環境など、極めて過酷な環境下で使用されることが多いため、それらの耐久性や安全性を向上させるための努力が日々行われている。近年では、自動車産業でも新しい応力測定ツールの一つとして、中性子応力測定に注目し始めており、日本国内でも自動車部品に関連したいくつかの測定を実施している。

図5は自動車用アルミニウム鋳造部品の残留応力測定を実施した例である。引張残留応力が製品中に存在すると、疲労強度特性を大きく低下させ、設計予測した限界の応力よりも低い応力、短い期間で不具合を生じる場合がある。そのため、それらの残留応力状態を正確に把握することが必要となる。本測定では、部品内部のリブ状の部分について、組付け部品の組付け前後における残留応力変化を測定した。図5に示したように、組付け前の残留応力はほぼ無応力に近い状態であったが、部品を組付けることにより 60 MPa 程度の引張残留応力が発生している様子が確認できる。このような内部応力の情報は、製品設計の材料・プロセス設計において、特に強度信頼性を考える上で非常に重要である。他にも、自動車エンジン本体の残留応力測定を実施した例もあり、自動車部

品の設計支援技術として、中性子応力測定技術が多く使用されている。

4 放射光X線回折法による残留応力測定

放射光を用いた残留応力測定は歴史は浅く20年程度である。当初は高強度、高分解能に注目が集まり、実験室X線の延長として表面近傍の微小領域の残留応力測定に利用されていた。しかしながら第3世代の放射光施設 (European Synchrotron Radiation Facility : ESRF、Advanced Photon Source : APS、Super Photon Ring、8 GeV : SPring-8) の出現によりその位置づけは大きく変貌した。

第3世代の放射光の特性は、これまでの放射光の特性に加え、高輝度かつ広いエネルギー範囲という特性を含んでいる。高輝度なX線は数百 μm^2 以下にビームサイズを小さくすることを可能にし、広いエネルギー範囲は材料の表面ばかりでなく、実験室X線による応力測定や中性子による応力測定では測定が困難である表面から数百 μm の深さにおける応力測定を可能にした。最近では、集光技術の向上により数 μm^2 以下にビームサイズを絞った微小部応力測定や、鉄鋼材10 mm厚の内部ひずみ測定も行われている。さらに従来の特性を組み合わせることにより、その場観察測定も可能である。測定方法には、①一般的にX線回折法で用いられている $\sin^2\psi$ 法²⁾、② $\sin^2\psi$ 法を高エネルギー放射光へ適用するために改良を加えた侵入深さ一定法⁸⁾、③中性子応力測定法を改良したひずみスキャンニング法¹¹⁾の3つがある。これらを相補的に用いることで、表面から数十 μm 、数百 μm 、数mm

の深さまでの応力分布を、それぞれ数 μm 以下、数十 μm 以下、数百 μm 以下の分解能で実施することができる。また、最近では、測定時間の短縮化のための2次元検出器を用いた応力測定技術開発や高エネルギー白色X線を用いた応力測定技術開発などのほか、材料内部に発生したき裂のイメージング測定も行われている。

これまでに放射光を用いた応力測定としては、国内では、薄膜²⁶⁾、表面き裂近傍²⁷⁾、遮熱コーティング²⁸⁾、固体酸化物型燃料電池²⁹⁾などがある。国外における放射光応力測定では、鉄道レール³⁰⁾や溶接内部³¹⁾などの応力測定も行われている。以下では、SPring-8で行われた2つの応力測定例を紹介する。

4.1 放射光X線応力測定法の適用例

4.1.1 ショットピーニングを施した材料表面から内部の残留応力分布¹⁰⁾

材料の表面から数百 μm の残留応力を測定した例として、表面にショットピーニングを施した中炭素鋼 (JIS S45C) の残留応力分布を図6に示す。測定はひずみスキャンニング法で行っている。測定された残留応力 (黒丸) から、表面部より若干深いところに350 MPaの最も大きい圧縮応力が発生し、それより深いところでは徐々に応力は緩和し、0.3 mmの深さで応力がほぼ0になっていることがわかる。白丸は表面を少しずつ研磨しながら実験室X線で測定した残留応力であり、放射光を用いて測定した結果はそれとほぼ一致している。このような表面からある深さまでの応力測定に関しては、さまざまな表面加工を施した材料の残留応力や、遮熱コーティング材料のように異なる2層以上の材料間の熱収縮の違いによるはく離応力などを調べる場合にも利用されている。

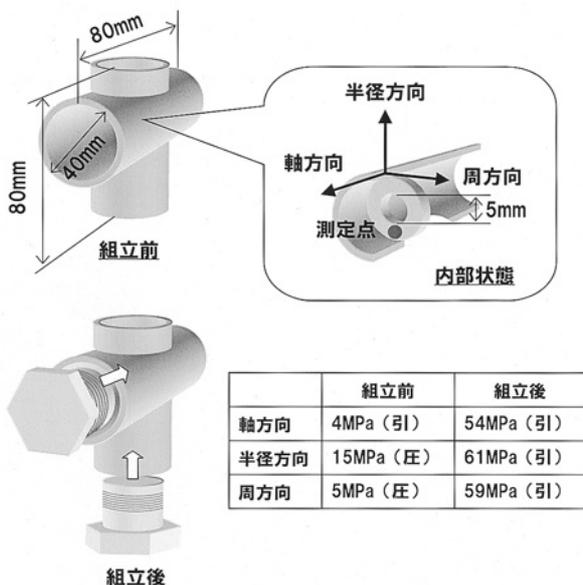


図5 中性子応力測定法を用いて測定した、組付け部品の組付け前後における自動車用アルミニウム鋳造部品の残留応力変化

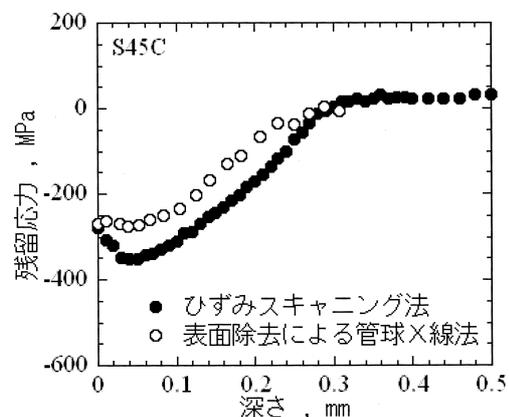


図6 放射光によるひずみスキャンニング法を用いて測定したショットピーニング材 (S45C) の残留応力分布

4.1.2 レーザショックピーニングを施した材料表面から内部の残留応力分布³²⁾

表面にレーザショックピーニングを施したチタン材 (Ti6Al4V) の残留応力分布および半価幅を図7に示す。測定は4.1.1節同様ひずみスキャニング法で行っている。レーザショックピーニングを受けた表面では、圧縮で500 MPa近い残留応力が発生しており、その圧縮残留応力層の深さも約1.8 mmとなり、レーザショックピーニングは、チタン合金に対して深く大きな圧縮残留応力層を形成することができる。図中の実点線は、残留応力の力による厚さ方向のバランスを求めた結果で-35.4 MPaであった。本来は0 MPaであるバランス応力に対して、本結果は若干ずれているが、測定の精度としては十分と考えられる。

X線回折線の広がり、結晶の塑性変形量に対応している。図中の半価幅に注目すると、レーザショックピーニング面付近では大きく、塑性変形層を過ぎると急激に減少する。レーザショックピーニングによる変形層は表面下約1.8 mmまで達しており、この領域は表面下の圧縮残留応力が存在する領域と一致している。以上から、放射光応力測定において、レーザショックピーニングによる塑性変形の影響層が十分に評価でき、表面処理層の非破壊評価方法としても利用できることがわかった。

5 中性子回折法およびX線回折法の相補利用

ここまでは、放射光X線および中性子線を用いた応力測定技術とその応用例について述べ、実験室X線では数 μm 深さ程度、放射光X線では1 mm深さ程度、中性子線では1 mm深さから数cm深さ程度までの残留応力状態を評価することができるなど、それぞれの測定技術には個々に優れた特徴を有していることを示した。しかし、これら全ての特徴を満足

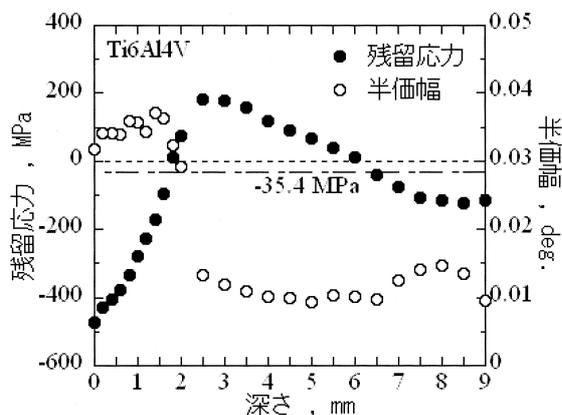


図7 放射光によるひずみスキャニング法を用いて測定したレーザショックピーニング材 (Ti6Al4V) の残留応力分布および半価幅

する万能な非破壊応力測定技術は現在のところ存在しないため、材料内部に発生している残留応力分布を詳細かつ正確に把握するには、これら3種類の応力測定技術を相補的に利用することが必要となる。著者らは、3.3.1節で紹介したSNC631鋼の突合せ溶接試料を用いて、実験室X線、放射光X線、中性子線の3種類の線源により、試料表面から内部にかけての残留応力分布を測定している³³⁾。それぞれの線源で使用する光学系が全く異なるため、回折装置のアライメント誤差や試料の設置誤差に起因する系統誤差を極力抑えることで、測定試料の残留応力の絶対値を正確に把握することが重要となる。この実験では、格子定数が既知の標準粉末試料を用いて波長の校正を行ったほか、無応力状態が明らかである粉末試料のゼロ応力を実測により確認するなどして、各回折装置の系統誤差を抑えることを試みた。実験室X線ではCr-K α 線を用いた従来の $\sin^2\psi$ 法、放射光X線では約66 keVの高エネルギーX線を用いた侵入深さ一定法により表面近傍の残留応力分布を評価した。その結果、図8に示す残留応力分布が得られ、それぞれの線源により測定した残留応力に大きな差が存在すること、すなわち溶接部近傍においては深さ方向に急峻な応力勾配が存在することを明らかとした。

このように、3種類の測定技術を相補的に用いることで、表面から材料深部にかけての応力分布を把握することが可能となる。今回の測定例のように、単純な突合せ溶接試料といえども内部の残留応力状態は複雑であるため、表面あるいは内部だけの応力測定では、材料の破壊メカニズムの本質的理解には不十分ということがわかる。したがって、試料表面から内部にかけての残留応力状態を系統的に評価し、その構造物における危険箇所を正確に予測することが重要である。

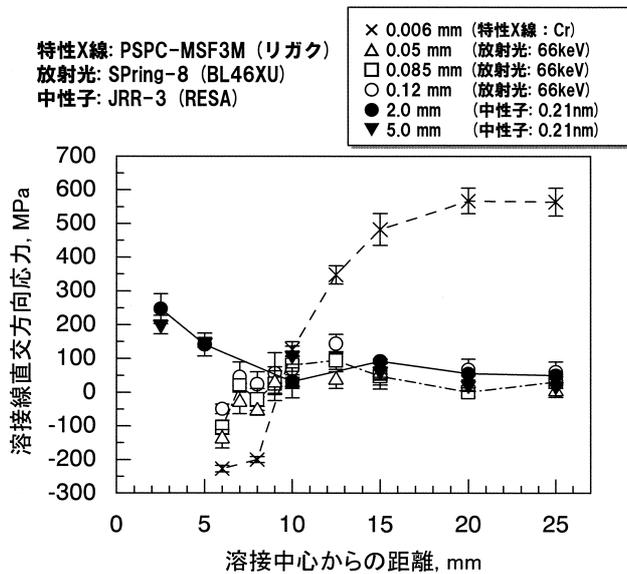


図8 実験室X線、放射光X線、中性子線の3種類の線源により測定したSNC631鋼突合せ溶接試料の残留応力分布

6 おわりに

本稿では、高エネルギーX線および中性子線による残留応力測定技術について、その基本原理といくつかの応用例について解説した。これまでは、従来の実験室X線を含め、それぞれの残留応力測定技術は個々に技術開発が行われ、それぞれ目的に応じた利用がなされてきた。最近では、これら応力測定技術の確立に伴い国内外で測定標準化が進んでおり、国内においては日本材料学会よりX線応力測定標準^{2,3)}ならびに中性子応力測定標準⁴⁾がまとめられ、世界的にもVAMAS - TWA20 (The Versailles Project on Advanced Materials and Standards - Technical Working Areas 20) による各々の測定技術の国際標準化が進んでいる³⁴⁾。このような応力測定技術の標準化により、残留応力測定の信頼性も確実に向上しており、世界的にその能力が認識され始めている。現在日本には、中性子実験施設だけでなく大型放射光施設の両施設が存在しており、国内にいながらにして中性子および放射光の両者を用いた実験、測定が可能な環境が整っている。このように世界的にも数少ない恵まれた環境を生かし、これらの残留応力測定技術を目的に応じて使い分けること、さらには、それぞれに得られた結果を総合的に評価し、製品設計や品質保証さらには学術研究に役立てていくことが重要である。最後に、本稿をお読み頂いた皆様がX線や中性子応力測定技術に興味を持って頂き、さらに、この測定技術が皆様の研究開発や製品管理に役立たれることを希望している。

参考文献

- 1) X線応力測定法, 日本材料学会編, 養賢堂, (1990)
- 2) X線応力測定法標準—鉄鋼編—, 日本材料学会, JSMS-SD-5-02 (2002)
- 3) X線応力測定法標準—セラミックス編—, 日本材料学会, JSMS-SD-1-00 (2002)
- 4) 中性子応力測定法標準, 日本材料学会X線材料強度部門委員会, (2005)
- 5) X線材料強度史, 日本材料学会X線材料強度部門委員会, X線材料強度史小委員会, (1996), 10.
- 6) 鈴木裕士, 秋田貢一, 吉岡靖夫, 三沢啓志: 材料, 50 (2001) 7, 783.
- 7) 秋田貢一, 吉岡靖夫, 鈴木裕士, 佐々木敏彦: 材料, 49, (2000) 7, 748.
- 8) 秋庭義明, 田中啓介, 鈴木賢治, 柳瀬悦也, 西尾光司, 楠見之博, 尾角英毅, 新井和夫, 材料: 52 (2003) 7, 764.
- 9) 町屋修太郎, 秋庭義明, 鈴木賢治, 田中啓介: 日本機械学会論文集, A71 (2005) 711, 1530.
- 10) 菖蒲敬久, 水木純一郎, 鈴木賢治, 秋庭義明, 田中啓介: 材料, 55 (2006) 1, 101.
- 11) P.J. Webster, G.B.M. VAughar, G. Mills and W.P. Kan: Mater. Sci. Forum, 278-281 (1998), 323.
- 12) P.J. Webster: Analysis of Residual Stress by diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, Edited. by M.E. Fitzpatrick and A. Londini, Taylor & Fancis, (2003), 209.
- 13) A. Pyzalla and W. Reimers: Analysis of Residual Stress by diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, ed. by M.E. Fitzpatrick and A. Londini, Taylor & Fancis, (2003), 219.
- 14) C. Riekel: Analysis of Residual Stress by diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, ed. by M.E. Fitzpatrick and A. Londini, Taylor & Fancis, (2003), 28.
- 15) A.J. Allen, M.T. Hutchings and C.G. Windsor: Adv. in Physics, 34 (1985), 445.
- 16) C.H. de Novion: Analysis of Residual Stress by diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, ed. by M.E. Fitzpatrick and A. Londini, Taylor & Fancis, (2003), 3.
- 17) 大城戸忍, 盛合 敦: 材料, 54 (2005) 8, 895.
- 18) 林 真琴, 大城戸忍, 皆川宣明, 森井幸生: 材料, 47 (1998) 4, 420.
- 19) 大城戸忍, 林 真琴, 皆川宣明, 森井幸生, 安藤柱: 圧力技術, 43 (2005) 4, 208.
- 20) M. Matsushima, X.J. Jin, Y. Shiota, Y. Tomota, H. Suzuki and A. Moriai: Solid State Phenomena, 118 (2006), 425.
- 21) 鈴木裕士, 盛合 敦, 皆川宣明, 森井幸生: 材料, 54 (2005) 3, 339.
- 22) 鈴木裕士, T.M. Holden, 盛合 敦, 皆川宣明, 森井幸生: 材料, 54 (2005) 7, 685.
- 23) H. Suzuki and T.M. Holden: J. Strain Anal., to be published.
- 24) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara: Proc. Int. Symp. Adv. Fluid / Solid Sci. and Tech in Exp. Mech., to be published.
- 25) T. Suzuki, Y. Tomota, M. Isaka, A. Moriai, N. Minakawa and Y. Morii: ISIJ Int., 44, (2004), 1426.
- 26) T. Hanabusa, K. Kusaka and O. Sakata: Thin Solid Films, 459, (2004), 245.

- 27) 坂井田喜久, 田中啓介, 秋庭義明, 沢木洋三: 材料, 52 (2003) 10, 1225.
- 28) 鈴木賢治, 田中啓介, 秋庭義明, 川村昌志, 西尾光司, 尾角英毅: 日本機械学会論文集, A70 (2004) 693, 724.
- 29) 鷺見裕史, 水谷安伸, 土肥宜悠, 秋庭義明, 田中啓介: 材料, 54 (2005) 4, 440.
- 30) P.J. Webster, D.J. Hughes, G. Mills and G.B.M. Vaughan: Material Science Forum, 404-407 (2002), 767.
- 31) V. Strelmukh, L. Edwards and S. Gangjly: Texture and Microstructure, 35 (2003), 175.
- 32) 鈴木賢治, 菖蒲敬久, 田中啓介: 材料, 投稿中.
- 33) 盛合 敦, 鈴木裕士, 菖蒲敬久, 旗谷充彦, 水木純一郎, 森井幸生, 塚田 隆, 皆川宣明, 佐藤真直: 日本機械学会2004年度年次大会講演論文集 (1), (2004), 253.
- 34) Technical Specification, ISO/TS 21432:2005 (E).

(2006年8月7日受付)