

新しい光源による応力評価

Stress Evaluation by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation

講座「X線応力測定法の基礎と最近の発展」(1998年11月)が連載され、すでに6年が経過した。この間の特筆すべき話題は、シンクロトロン放射光と中性子を新たな光源とした応力評価の発展である。新しい光源による実測は、「百聞は一見に如かず」のごとく計算では得られない貴重な知見を与え、またある場合は既存の結果に確信を与える。

シンクロトロン放射光の高輝度を利用した微小部、薄膜の応力測定、また、高エネルギー放射光および中性子の大きな透過力を利用した内部の応力測定も近年確立しつつある。従来のX線応力では不可能とされた研究が、これらの新しい光源で大きく道を開かれ、表面から内部にいたる3次元の非破壊的応力評価が目前となっている。この成果は、材料研究の新たな進展を助けることであろう。しかし、放射光施設や原子炉という巨大科学施設を使うことで何が明らかにできるか、どのような実験方法を取るべきか、戸惑うことも多い。その一方、未知の手法、かつ利用制限のハードルのために、かけ離れた方法として敬遠される問題もある。

それらの解決のために、本講座では魅力を強調するだけでなく、応力評価を必要とする読者が放射光や中性子の性質を十分に理解し、間違いなくその手法を利用できることを重視した。そして、X線材料強度部門委員会の中性子および放射光小委員会のグループにより試され、確認された成果を中心として記されている。この講座を読み興味を持たれた方は、ぜひX線材料強度部門委員会に入会され、新しい光源を試されることを期待する。

内 容

1. 高エネルギー放射光による内部応力分布測定 鈴木賢治(新潟大学)、田中啓介(名古屋大学)
2. シンクロトロン放射光による薄膜および微小部の応力測定 英 崇夫(徳島大学)、秋田貢一(武蔵工業大学)
3. 中性子回折法による応力測定 秋庭義明(名古屋大学)
4. 中性子応力測定の実機への適用 大城戸忍(日立製作所)、盛合 敦(日本原子力研究所)

1. 高エネルギー放射光による内部応力分布測定[†]

鈴木賢治* 田中啓介**

I : Measurement of Internal Distribution of Residual Stress using High-Energy X-Rays

by

Kenji SUZUKI* and Keisuke TANAKA**

Key words : X-ray stress measurement, Synchrotron, High energy X-rays, Residual stress, Shot peening, Thermal barrier coating, X-ray penetration depth

1 はじめに

実験室でX線管球を使用する方法を本講座では管球法と称する。この管球法は極薄い表面層の応力測定である。また、薄膜および微小領域対象の測定においてはX線源の強度が低く回折を得ることが困難になる場合もあり、高輝度のX線源が切望されている。これらの欠点を補う材料内部の応力の測定法として、新しい光源である放射光および中性子を利用した応力測定が大きく注目されて

いる。本稿では、高エネルギー放射光X線による応力測定について、基礎的事項も含めて紹介する。

X線回折法は、結晶質材料の残留応力の非破壊測定法として広く用いられ、鉄鋼材料の熱処理や表面処理によって導入される残留応力の管理のための現場技術として定着している。しかしながら、通常のX線法ではCrの管球を使用しており、このときのX線の浸入深さは高々10数 μm 程度である。^{1), 2)}そのため、疲労や応力腐

[†] 原稿受理 平成16年8月2日 Received Aug. 2, 2004

* 正会員 新潟大学教育人間科学部生活環境学科 〒950-2181 新潟市五十嵐2の町, Dept. of Tech. and Living Sci., Niigata Univ., Igarashi-2-no-cho, Niigata, 950-2181

** 正会員 名古屋大学工学研究科機械理工学専攻 〒464-8603 名古屋市千種区不老町, Dept. of Mech. Eng., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

食割れの強度向上において重要な表面下数 100 μm 程度の領域に広がる残留応力分布を得るためには、表面層を電解研磨で除去し測定を繰り返す手法が用いられてきた。この逐次表面除去法で測定された残留応力には表面除去の補正が必要であり、かつ時間もかかり、厳密な意味では非破壊的な方法とはいえない。

一方、中性子応力測定法は、X線法と同様、結晶の回折を原理としており、しかも、侵入深さはX線より約1000倍大きく材料内部の測定に適している。³⁾ただし、微小領域からの中性子回折を得るには、中性子束の強度をもっと上げる必要がある。

第3世代の放射光では、高輝度、高指向性でしかも任意波長の高エネルギーX線が得られる。X線のエネルギーが高くなるほど、波長が短くなり、X線の侵入深さは大きくなる。表Iには強度が37%に減衰する深さを示す。^{4), 5)}同時に比較として、中性子およびCu-K α 線の場合も示す。エネルギーが40 keV程度以上を高エネルギーX線と称するが、高エネルギー応力測定法は、従来の管球法と中性子法の中間の侵入深さを有しており、相補的な測定法と位置づけられる。第3世代の放射光施設は現在世界で3箇所にある。フランスのグルノーブルのESRF (European Synchrotron Radiation Facility, 6 GeV, 1994年から利用開始)、米国アルゴンヌのAPS (Advanced Photon Source, 7 GeV, 1996年から利用開始)、それに我国のSPring-8 (8 GeV, 1997年から利用開始)であり、いずれにおいても、産業利用のための中心的課題として応力測定が活発に行われている。本講座では、高エネルギー放射光を利用した材料内部の応力分布測定に焦点を絞り述べる。

2 高エネルギー放射光による応力評価

放射光はX線光源として、従来の管球法に比較して、次の特徴を有している。

- 高輝度
- 高指向性、平行性
- 広範囲のエネルギーレベル (0.3 keV から 300 keV, 波長では 4.1 から 0.0041 nm)
- 任意の波長を抽出可能
- 波長の高分解能 (K α_2 線がない)

X線の検出器で角度分散型は次の3種類に分類される。0次元検出器 (シンチレーションカウンタなど)、1次元検出器 (位置敏感型検出器PSPCなど)、2次元検出器 (イメージングプレート: IP, 2次元PSPC, CCDカメラなど)であり、放射光においてもこれらが使用されて

表I 中性子、放射光およびX線の侵入深さ

光源 (keV)	対象材料中への減衰距離 (mm)				
	Al	Ti	Fe	Ni	Cu
放射光 (150)	27	13	6	5	5
放射光 (70)	15.4	3.8	1.4	1.0	1.3
放射光 (40)	6.5	1.0	0.35	0.24	0.23
Cu-K α (8)	0.074	0.011	0.004	0.023	0.022
熱中性子	1230	50	85	40	53

いる。一方、エネルギー分散型は通常0次元検出器のSSDやエネルギー分光器が使用される。なお、この代わりにアナライザーを使用することも考えられる。SPring-8では、これまでビームラインBL02B1, BL09XU, BL13XU, BL19B2, BL46XUにおいて8 keVから73 keVのエネルギーのX線で0次元検出器を用いた角度分散形の応力測定が行われてきた。⁶⁾一方、ESRFでは、ビームラインBM16 (40 keV), ID11 (60 keV), ID15 (150 keV)などを使用して応力測定が行われている。なお、波長 λ (nm)とX線エネルギー E (keV)については、

$$\lambda = \frac{1.2398}{E} \quad (1)$$

の関係を用いて換算する。

高エネルギーX線によるひずみの計測は、原則として侵入深さが深いだけで従来の管球法と全く同一である。すなわち、応力測定にはブラッグの回折条件

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

を利用する。ただし、 λ はX線波長、 d は回折格子面間隔および θ は回折角である。侵入深さの計算については、文献⁷⁾の付録に詳細な算出方法があるので参考にされたい。測定ひずみから応力を算出するとき、平面応力状態では $\sin^2\psi$ 法²⁾が適用できるが、大きな侵入深さによる材料内部で面外応力成分が生じる場合は、3軸応力を考慮する必要もある。測定する対象の特徴や応力の形態により、応力の測定方法、計算方法が工夫されている。

3 表面処理材の表面下の残留応力分布

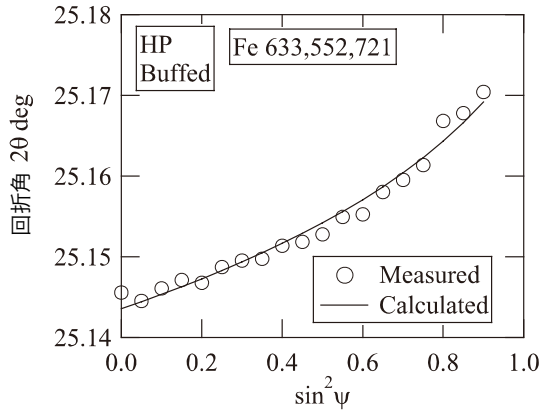
3.1 $\sin^2\psi$ 線図の非線形解析

表面改質あるいは機械加工した表面近傍には残留応力が存在し、しかも内部方向に分布を有する。疲労や応力腐食割れの進行の予測には、表面の残留応力ばかりでなく、内部の分布形状が重要となる。この残留応力分布の非破壊測定に、高エネルギーX線が利用されている。高エネルギーX線を使用すると、強い回折は低角しか起こらない。そのためひずみ変化に対する回折角の変化が小さくひずみ感が悪いが、X線の光源の平行度が高いことおよびゴニオメータの角度の測定精度が10000分の1度と高いことのため、管球法による場合と同様の高精度の応力測定が可能である。

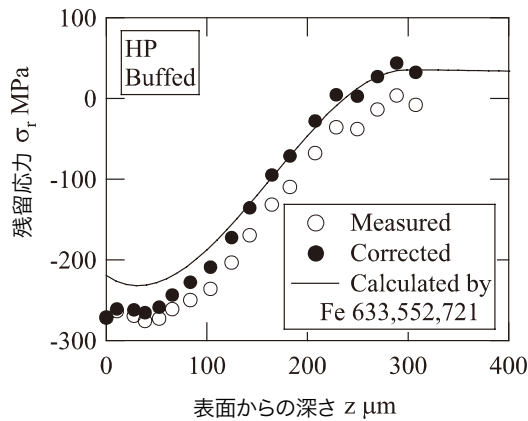
図1にショットピーニングされたS45Cの $\sin^2\psi$ 線図および残留応力分布を示す。⁸⁾図1(a)に示すように、 $\sin^2\psi$ の変化に伴いX線侵入深さが変化し、深さ方向に残留応力の変化があるために $\sin^2\psi$ 線図が非線形を示す。これは波長約72 keVの高エネルギーX線を利用して測定されているために起こる現象であり、鉄に対して633, 552, 721回折は同じ回折角 2θ で 25° となり、このときの垂直入射での侵入深さは $T_0 = 186 \mu\text{m}$ となる。

この非線形は、測定される回折角 2θ がX線侵入深さの重み付き平均的回折角 $\langle 2\theta_\psi \rangle$ によるものであり、次式で表される。

$$\langle 2\theta_\psi \rangle = 2\theta_0 - \frac{2(1+\nu_X)}{E_X} \tan \theta_0 \langle \sigma \rangle \sin^2 \psi + \frac{4\nu_X}{E_X} \tan \theta_0 \langle \sigma \rangle \quad (3)$$



(a) $\sin^2\psi$ 線図



(b) 残留応力分布

図1 ショットピーニングされた鋼の $\sin^2\psi$ 線図と残留応力分布

ただし、 E_X および ν_X は X 線の弾性定数であり、 θ_0 は無ひずみの回折角である。深さ方向 z の応力分布 $\sigma(z)$ の重み付き平均応力 $\langle\sigma\rangle$ は、X 線侵入深さを T として次式となる。

$$\langle\sigma\rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma(z) e^{-z/T} dz \quad (4)$$

測定した $\sin^2\psi$ 線図の誤差を最小になるように $\langle\sigma\rangle$ を 3 次関数にて近似した結果が図 1 (a) 中に示す曲線である。逐次研磨して管球法により X 線応力測定を繰り返し応力分布を求め、表面除去による再分布の補正をした結果が、図 1 (b) のプロットである。図 1 (a) の結果得られた $\langle\sigma\rangle$ の 3 次関数を同様に図 (b) の曲線で示した。深さ方向の残留応力分布測定と非線形解析の結果はよく対応している。

3・2 侵入深さ一定法

前節で述べたように、試料面の法線と回折中心のなす角 ψ により X 線侵入深さが変化し、 $2\theta\sin^2\psi$ 線図に非線形を生じる。しかし、ゴニオメータの軸を制御することで、 ψ 軸が変化しても X 線侵入深さを一定に保つように設定する方法があり、これを侵入深さ一定法という。⁸⁾ 図 2 のようにゴニオメータ軸を決めたとき、X 線侵入深さ T は次式となる。

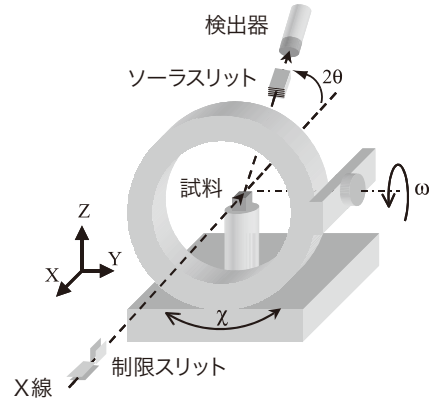


図2 ゴニオメータ軸と光学系

$$T = \frac{\cos\chi \sin\omega}{\mu} \frac{\sin(2\theta - \omega)}{\sin\omega + \sin(2\theta - \omega)} \quad (5)$$

ただし、 μ は線吸収係数である。 χ および ω 軸と ψ 角の関係は、

$$\cos\psi = \cos\chi \cos(\theta - \omega) \quad (6)$$

となり、式 (5) の侵入深さが一定になるように ψ と χ に対応する ω を決定することで、侵入深さ一定法のもとで応力測定が実現できる。

図 3 は侵入深さ一定法による残留応力測定によりショットピーニングした面の応力測定を行った結果である。⁸⁾ 表面除去した結果から得られた X 線侵入深さに対応する残留応力の値を図中に曲線で示した。侵入深さ一定法による測定結果と曲線の挙動はよく対応している。なお、侵入深さ一定法による $2\theta\sin^2\psi$ 線図はきれいに直線関係となる。

侵入深さ一定法を用いて薄膜や多層膜の界面近傍の残留応力分布が求められている。この方法は秋庭らによって提案された方法⁸⁾で、従来の $\sin^2\psi$ 線図の非線形性の解析から応力分布を求める方法に比較して簡単かつ精度が高い。この方法では、広い範囲の $\sin^2\psi$ でデータをとるためには回折角が低角であることが必要であり、高エネルギー放射光に適した手法である。また、応力分布が等 2 軸でない場合にもこの手法が拡張されている。

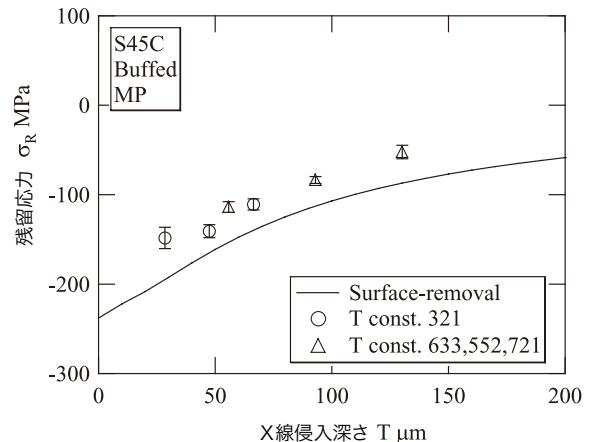


図3 侵入深さ一定法による残留応力測定

4 セラミックコーティング材の残留応力分布

これまで、コーティング下層の応力評価はシミュレーション法に頼っていたが、高エネルギー放射光の大きな侵入深さを利用することで、深部の応力を非破壊的に実測することも試みられている。図4は、73 keVのX線をトップコート層の上から照射したときの遮熱コーティング(TBC)の回折プロフィールである。図より明らかなように40μmの厚さのトップコートを経て、ボンドコート層のNi₃Alの回折が十分な強度で計測できる。この回折を利用して温度変化に伴うボンドコートの応力測定した例⁷⁾を図5に示す。室温から高温になるに従い引張りの残留応力が緩和し、1173 Kを超える温度ではボンドコートの軟化が生じている様子がわかる。放射光のビームラインは強いX線源に留まらず、実験ハッチの規模も大きく、かつ大型のゴニオメータが用意されているので、高温装置やジグなどを装着した実験の自由度も高い長所もある。

また、逐次研磨によりCr管球で測定したTBCの残留応力の分布を図6(a)に示す。¹⁰⁾管球法による応力測定はX線侵入深さが浅く、平面応力状態(σ₃ = 0)を仮定でき、次式の関係が成立する。

$$\sigma_1 = \sigma_{x-ray} \quad (7)$$

管球法による応力σ_{x-ray}は、面内応力σ₁に相当する。一方、応力測定的一般式からは、

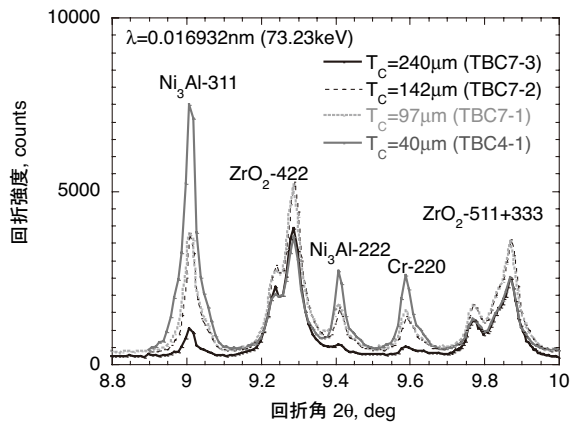


図4 高エネルギーX線により得られたTBCの回折曲線

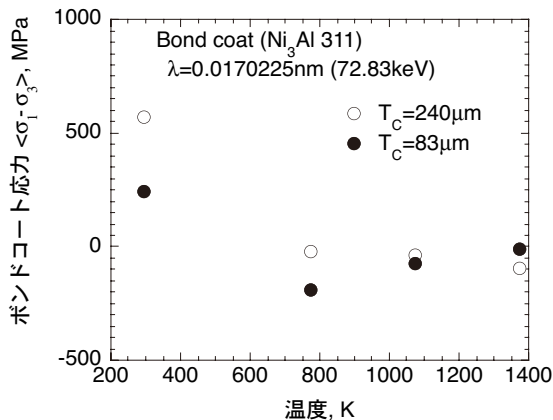


図5 温度変化に伴うボンドコートの内部応力

$$2\theta = 2\theta_0 - \frac{2(1+\nu_X)}{E_X} \tan \theta_0 (\sigma_1 - \sigma_3) \sin^2 \psi - \frac{2}{E_X} \tan \theta_0 \sigma_3 + \frac{2\nu_X}{E_X} \tan \theta_0 (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (8)$$

が導かれ、侵入深さが大きくσ₃が存在する場合は、それを無視できないので高エネルギー放射光を用いたsin²ψ法による応力σ_{syn}は、

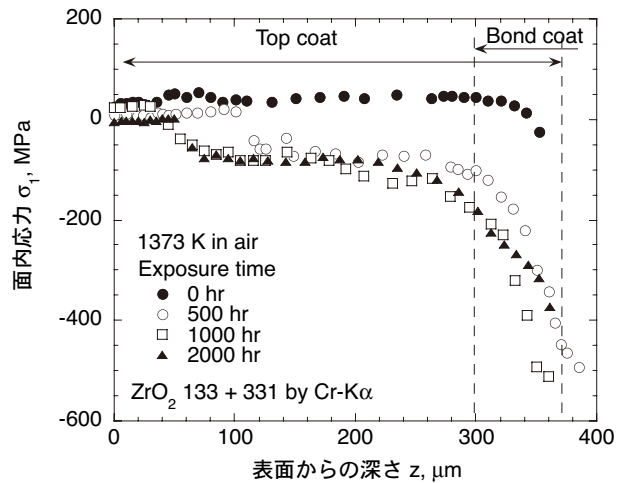
$$\sigma_{syn} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (9)$$

に相当する。式(7)および(9)の関係よりはく離応力σ₃は

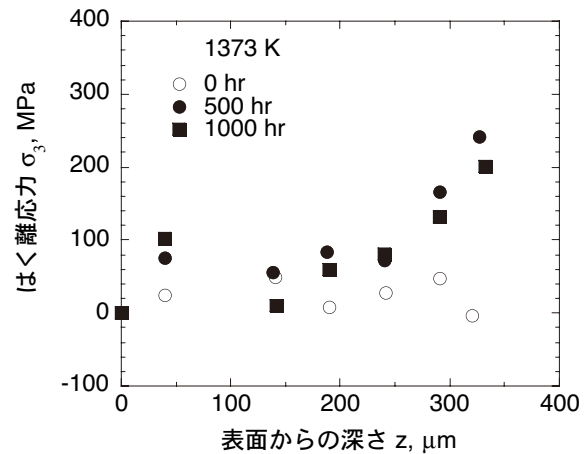
$$\sigma_3 = \sigma_{x-ray} - \sigma_{syn} \quad (10)$$

から得ることができる。すなわち、面内応力分布を研磨除去により測定し、これを高エネルギー放射光測定した応力と併せて面外応力σ₃を得る。この方法は鈴木らによって提案された方法¹¹⁾でハイブリッド法と称され、面外応力の一つの測定法として利用できる。

図6(a)の面内応力分布と高エネルギー放射光応力測定から得られた結果を基にハイブリッド法により測定したはく離応力分布を図6(b)に示す。図から明らかなように、高温酸化によりトップコートとボンドコートの界面に高温酸化物が形成され、トップコートに大きなはく離応力が発生する。



(a) 面内応力の分布



(b) はく離応力の分布

図6 高温酸化されたTBCの深さ方向の残留応力の分布

表面に薄膜あるいは厚膜のコーティングを行う高機能化がよく行われている。このときの被覆材の機能性や強度は膜中の残留応力に大きく支配されている。特に厚膜の場合、内部の応力を非破壊で測定することが必要となる。高エネルギーのX線により内部のひずみ分布の測定は、上記TBCのほか、各種のセラミックコーティング厚膜に利用されている。土屋らは¹²⁾多層膜の膜中の残留応力の分布を測定している。さらに、矢加部ら¹³⁾は固体酸化燃料電池(SOFC)のユニットセル中の電解質の残留応力分布を測定している。また、CofinoらによりTi-6Al-4V合金の上にハイドロキシアパタイトを100 μm厚さでプラズマコーティングした場合、面垂直方向のひずみの分布が求められている。¹⁴⁾

5 ひずみスキャンニング法によるマッピング

前章までは、 $\sin^2\psi$ 法を基にした高エネルギー放射光の応力測定について述べた。高エネルギー放射光の透過力を利用した測定方法としてひずみスキャンニング法がある。ひずみスキャンニング法は図7に示すように、入射X線のスリットおよび受光側スリットにて制限された領域をゲージ体積とし、そのゲージ体積を試料の表面から内部に走査して、格子面間隔 d の変化を連続的に測定する方法である。図に示す反射法では ϵ_z が、透過法では ϵ_x が求まる。この方法で、3軸方向のひずみ ϵ_i ($i = 1 \sim 3$)を測定する。式(2)のブラッグ条件と測定された回折角 θ の関係を用いて格子面間隔 d を求め、ひずみ ϵ_i は、

$$\epsilon_i = \frac{d_i - d_0}{d_0} \quad (11)$$

から得られる。このような方法は、すでに中性子応力測定法の基礎的方法となっている²⁾が、中性子法と比較して高輝度放射光のためにゲージ体積を極めて小さくできる利点がある。また、表Iに示すX線侵入深さの関係から、表面下から数mmの鉄鋼材料の残留応力分布測定が可能であり、Al, Tiなどの軽合金であれば、さらに厚い部材の測定ができる。

ひずみスキャンニング法による応力測定については、ゲージ体積と試料表面とが干渉する場合には、ゲージ体積の幾何学的中心と回折に参与するゲージ体積の中心が異なるために回折角が移動する問題(表面効果)がある。この表面効果による回折角の移動する様子は図8のプロットで示される。焼なまし材であり、深さ方向に残留応力がないので、回折角は水平になるはずである。このような表面効果は受光スリット側の発散による影響で生じる。これを解決する方法には、GeやSiのようなアナライザーを用いて厳密なコリメーションを得ることにより解決する方法がある。⁴⁾ただし、アナライザーによる回折強度の損

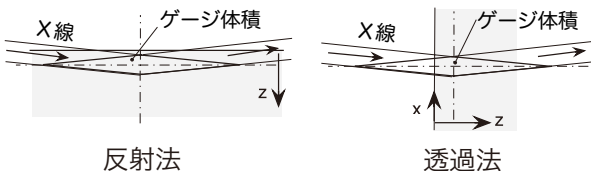


図7 ひずみスキャンニング法

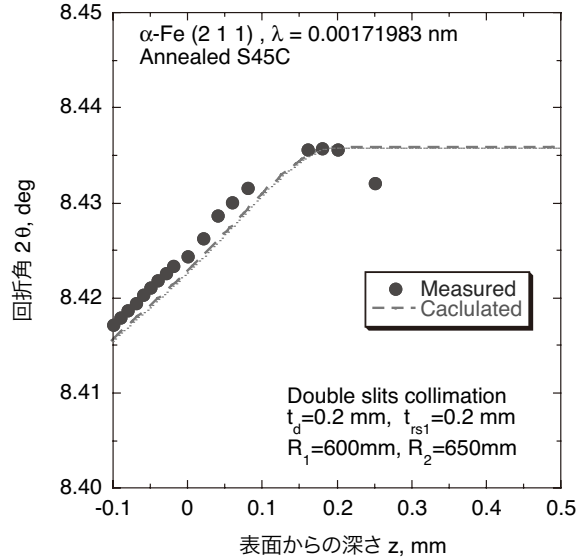


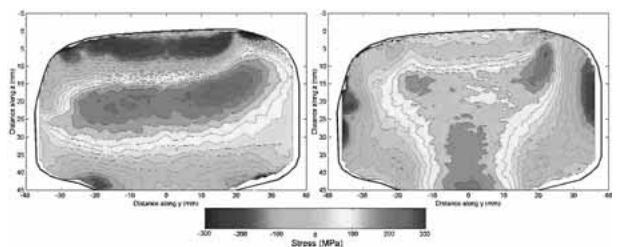
図8 表面効果による回折角の移動

失があるので、アンジュレータまたはウィングラによる強い光源であることが望ましい。

一方、受光スリット側の発散を考慮して表面効果を解析的に補正する方法もある。図中の破線は表面効果を解析的に計算した結果であり、¹⁵⁾実験結果を解析的に補正できる。この場合は、ダブルスリット法によるので回折強度の減衰はない。なお、ひずみスキャンニング法は、表面からのひずみの相対的变化を測定するので、正確な応力値を得るためには、表面の応力を管球法などによるX線応力と一致するように無ひずみの格子面間隔 d_0 を与えればよい。

また、Websterらによる使用した鉄道レールの残留応力分布を高エネルギーX線(60 keV)を使用して測定した結果を図9に示す。¹⁶⁾75 × 45 mm²の断面のレール頭を4 mm厚さに切断し、横方向(y方向)と上下方向(z方向)のひずみを測定し、厚さ方向の応力はゼロとして、横方向(y方向)と上下方向(z方向)の応力を求めた。測定は、Fe 211面、回折角 $2\theta = 9.94^\circ$ で、測定体積は0.5 × 5.8 mm²で、1 mmから2 mmのピッチで、一点10 secで6000点の測定を行った。図9に示すように引張応力の最高値は300 MPaくらいである。横方向の応力は踏面から10 mmくらいのところまで広がっており、それより下は引張りとなる。

軽金属の内部の残留応力の測定も試されており、45



(a) レール横方向 (b) レール縦方向

図9 レールの残留応力マップ

keVのX線で測定された板厚7mmの7150アルミ合金のプラズマアーク溶接部のひずみマップが求められている。¹⁷⁾ その実験では、試料の向きを変えて、 ε_1 , ε_2 , ε_3 の成分を測定し、応力状態を決定している。さらに、 $\sin^2\psi$ 法も併用し、測定結果との対比も行っている。

6 その他の応力評価方法

6・1 2次元検出器の利用

測定領域が微小になってくると、揺動法を使用しても連続リングを得ることが困難になる。このとき、2次元検出器が利用される。^{18)~21)} また、同時に集合組織の測定も可能である。Withersら^{19)~20)}は一本のSiC長繊維を含むTi-6Al-4Vのモデル試験片に軸引張りを負荷したときの繊維およびマトリックスのひずみ分布を測定した。50 keVのX線で長手方向に50 μm 、横方向に150 μm のスポットサイズとして、CCDカメラにより回折像を記録し、負荷による繊維ひずみの一様増加、破断による繊維ひずみの解放のプロセスをとらえた。さらに、X線トモグラフィにより繊維の破断も検出している。高エネルギーのX線トモグラフィも複合材料の破壊研究の有力な武器となる。²⁰⁾

6・2 白色X線によるエネルギー分散法

白色X線を使用したときにはエネルギー分散法を使用する。この場合、式(2)と

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (12)$$

の関係から対象のエネルギー値 E^{hkl} を測定し、 (hkl) の回折格子面間隔 d^{hkl} は、次式により得られる。

$$d^{hkl} = \frac{hc}{2 \sin \theta E^{hkl}} = \text{const.} \frac{1}{E^{hkl}} \quad (13)$$

ただし、 h はプランク定数、 ν は振動数、 c は光速である。このとき、回折角が低角であることは精度に影響しないため放射光に適した手法ともいえる。白色X線による応力測定は、ESRF^{22)~24)}およびAPS^{25)~26)}において行われている。強力なX線源から透過した回折を測定できる利点があるが、ひずみ測定にはエネルギー分散の検出器(SSD)の分解能・精度の向上が望まれる。この手法では、多くの回折面からの情報が一回の測定で得られる利点がある。

7 ま と め

高エネルギー放射光による応力評価は新しい測定法であり、今後の発展が期待できる分野である。強い透過力を生かした測定方法が確立しつつある。しかし、応力評価、材料強度のユーザは、放射光の利用者の中で少数派であることも否めない。EUでは、FaME38プロジェクト²⁷⁾により、放射光・中性子などの光源を材料開発に積極的に利用する取り組みが進められている。日本でも、産業利用の進展が期待されている。また、2次元検出器、白色X線の応力測定もさらに進展することを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 日本材料学会編, “改著X線応力測定法”, p.45 (1981) 養賢堂.
- 2) 日本材料学会, X線応力測定法標準—鉄鋼編—, JSMS-SD-5-02 (2002).
- 3) K. Tanaka, Y. Akiniwa and M. Hayashi, Materials Science Research Inter., **8**, 165 (2002).
- 4) 田中啓介, 秋庭義明, 材料, **52**, 1435 (2003).
- 5) K. Tanaka and Y. Akiniwa, JSME Inter. J., Ser. A, **47**, 252 (2004).
- 6) 古池治孝, 日本機械学会放射光応力評価研究分科会 (P-SC327) 成果報告書, 1 (2003).
- 7) 鈴木賢治, 田中啓介, 秋庭義明, 川村昌志, 西尾光司, 尾角英毅, 材料, **52**, 756 (2003).
- 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**, 764 (2003).
- 9) 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, A-**70**, 724 (2004).
- 10) 鈴木賢治, 久保貴博, 田中啓介, 秋庭義明, 尾角英毅, 材料, **53**, 734 (2004).
- 11) K. Suzuki and K. Tanaka, Texture and Microstructure, **35**, 207 (2003).
- 12) 土屋 新, 大鹿高歳, 阿川 智, 日本機械学会分科会 (P-SC327) 成果報告書, 26 (2003).
- 13) 矢加部久孝, 日本機械学会分科会 (P-SC327) 成果報告書, 53 (2003).
- 14) B. Cofino, C. Braham, P. Millet and A. Lodini, J. Neutron Res., **9**, 243 (2001).
- 15) 鈴木賢治, 日本機械学会第4回放射光応力評価実用化に関する研究会報告 (A-TS03-20) (2004).
- 16) P. J. Websters, D. J. Hughes, G. Mills and G. B. M. Vaughan, Materials Science Forum, **404-407**, 767 (2002).
- 17) V. Strelmukh, L. Edwards and S. Ganguly, Texture and Microstructure, **35**, 175 (2003).
- 18) R. V. Martins, U. Lienert, L. Margulies and A. Pyzalla, Materials Science Forum, **404-407**, 115 (2002).
- 19) G. Rauchs, M. Preuss and P. J. Withers, Acta Mat., **50**, 2477 (2002).
- 20) M. Preuss, P. J. Withers, E. Maire and J.-Y. Buffiere, Acta Mat., **50**, 3175 (2002).
- 21) H. R. Lee, D. Kupperman, W. Yun, Z. Cal and W. Rodrigues, Review Sci. Instrument, **70**, 175 (1989).
- 22) W. Reimer, M. Broda, G. Bruschi, D. Danz, K.-D. Liss, A. Pyzalla, T. Schmackers and T. Tschentscher, J. Nondestructive Eval., **17**, 129 (1998).
- 23) D. Dantz, C. Genzel, W. Reimers and K.-D. Liss, ICRS-6, 717 (2001).
- 24) A. Carrado, J. M. Sprauel, L. Barrallier and A. Lodini, Materials Science Forum, **404-407**, 335 (2002).
- 25) T. G. Herold, D. R. Haefner, H. J. Prask and J. Matejcek, ICRS-6, 751 (2001).
- 26) Y. Xiao, M. Lee, D. E. Wittmer, T. Graber, J. Gebhardt, P. J. Viccaro, S. M. Mini, J. Linton and M. Beno, Review Sci. Instrument, **73**, 1390 (2002).
- 27) <http://www.ill.fr/FaME38/>