



量子ビームを利用した応力・ひずみ評価の基礎

横浜国立大学

秋庭 義明 Yoshiaki AKINIWA

1. はじめに

量子ビームといっても聞きなじみのない方もおられるであろうが、近年随所で散見されるようになってきた。文部科学省では平成25年度から29年度の5年にわたり、量子ビーム技術の利用研究と基盤技術開発を目的として「光・量子融合連携研究開発プログラム」が実施され、光子、イオン、電子、中性子、中間子、ニュートリノ等、ビームの一般的総称として量子ビームを定義している。近年これら量子ビームを応力・材料評価に積極的に活用することで新たな展開をはかり、これまで不可能であった応力評価が可能になるとともに、各種現象の理解が深まりつつある。

機械、建築、土木関連の構造物や各種要素部品の新規設計や維持管理において、応力・ひずみの概念なくして具現化することはできない。構成材料が有する強度・抵抗に対して、使用中に作用もしくは作用すると予想される応力・ひずみが信頼性に対して大きく影響する。実際に作用する応力については、材料力学的な検討とともに、

コンピューターを援用して比較的短時間に高精度な応力・ひずみ評価が可能になってきた。複雑な幾何学形状の最適化や拘束条件の変更も容易になり、危険部位(ホットスポット)の同定や危険度を抽出する手法として、部材設計においてなくてはならない技術に発展している。

このように機械構造物の信頼性を確保するためには、構成部材が有する強度と作用応力とのバランスが重要であるが、これだけでは充分でない。実部材には、熱処理・加工・接合等の処理を伴う。この際に導入され、部材内部に存在する応力が残留応力である。残留応力は、作用応力に加算されて構造部材に作用するため、強度解析にあたっては残留応力をいかに高精度に評価することができかが信頼性評価に大きく影響する。残留応力は、熱ひずみ、変態ひずみ、体積ひずみ、塑性ひずみ等が重畳して発現するため、その実態は複雑な場合が多い。これらに対する数値解析技術も発展してきてはいるものの、使用期間中に残留応力が変化することも多く、実測に対する要求は高い。

表1に代表的なひずみ測定法を、注目する物理量との関係としてまとめた。点測定は、注目すべき位置が明確な場合に適用される。危険個所が不明な場合には広領域の測定をもとに最大応力発生位置を同定する必要があり、全視野測定が望ましい。それぞれ長所短所があり、測定可能物理量および測定精度の観点で選択する必要がある。

量子ビームによる回折法では、回折パターンから応力・ひずみ以外にも塑性変形量、転位密度、結晶子寸法など多くの材料特性を抽出することが可能である。本稿では紙面の都合上応力・ひずみ測定に注力して、その基礎的な考え方・測定原理について概説する。個々の手法の詳細および応用例については、本特集号の次稿以降を参照頂きたい。

表1. 代表的なひずみ測定法

	測定法	注目物理量
点測定	回折法	回折面間隔変化
	ひずみゲージ法	ゲージ材の電気抵抗変化
	超音波法 音弾性法	音弾性波の伝ば速度変化
	磁気ひずみ法	透磁率変化
	ラマン分光法	ラマン散乱光の波数変化
全視野測定	回折法	回折面間隔変化
	熱弾性法	吸発熱温度変化
	モアレ法	重ね合わせ格子の縮変化
	光弾性法	偏光複屈折による干渉縮変化
	スペckル法	干渉スペckル模様の変位
	ホログラフィ法	重ね合わせホログラムの縮変化

## 2. 実験室 X 線応力測定法

### 2.1 $\sin^2 \phi$ 法

実験室 X 線による応力測定は古くから行われており、現場技術として広く普及している。日本材料学会では、1973 年にフェライト系鉄鋼材料を対象とした X 線応力測定標準が発刊され、現在 2002 年版の鉄鋼編 [1]、およびセラミックス編 [2] が刊行されている。内容の詳細は省略するが、回折法全般に対する応力・ひずみ測定の基礎であり、他の量子ビーム利用にも関連するため、まずは実験室 X 線について紙面を割く必要がある。

表 1 にも示したように、回折法では結晶性材料の特定の格子面間隔をゲージ長として、面間隔の変化を回折角の変化として測定することで応力・ひずみを測定する。図 1 のように試料に波長  $\lambda$  の X 線を照射すると、次式の Bragg の条件を満足する回折角度  $\theta$  の方向に回折が生じる。

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

ここで  $d$  は格子面の間隔である。この時、X 線の照射領域内に十分な数の結晶がランダムな方位で分布していると、図 1 のように円錐状に回折が生じ、入射 X 線に垂直なスクリーンで受けると回折環が観察される。試料に応力が存在する場合には、この回折環が  $\phi$  がむため、その変化を角度変化として測定することで試料中の応力・ひずみを評価することができる。対象とする回折面の間隔  $d$  を式 (1) で求めることができれば、次式でひずみが決定できる。

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (2)$$

ここで、 $d_0$  は無ひずみ状態の回折面間隔である。フェライト系鉄鋼材料を対象にする場合、X 線源には Cr の特性 X 線 ( $\lambda = 0.229 \text{ nm}$ ) を用いることが推奨されており、したがって波長  $\lambda$  が一定のもとで、式 (1) の回折角  $\theta$  を測定することによってひずみが決定される。このとき、ゼロ次元検出器 (例えばシンチレーションカウンタ) では、検出器を角度走査させることで回折プロファイルを得るため、この方法を角度分散型測定と称する。近年では、検出器を走査せず固定したままで特定の角度範囲の X 線強度が測定できる一次元検出器もしくは二次元検出器が用いられるようになってきており、極めて短時間でのインライン測定にも応用されている。

ひずみは式 (2) で決定できるが、実験室 X 線では十分な精度が得られないため、式 (2) を直接用いずに、以下のように精度を確保する。図 2 に一般によく用いられる

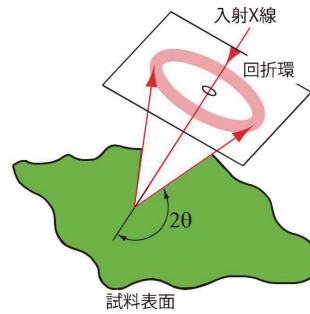


図 1 回折環 (デバイ環)

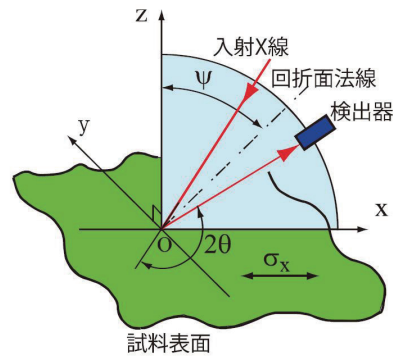


図 2 X 線応力測定の光学系 (並傾法)

光学系を示す。試料表面が  $xy$  平面で、 $x$  は測定したい応力の方向、 $z$  は試料表面の法線方向である。また、一点鎖線は対象とする回折面の法線方向で、角度  $\phi$  は回折面法線と試料面法線とのなす角度である。 $x$  方向の応力が  $\sigma_x$  のとき、回折角  $2\theta$  は次式で与えられる [1,3]。

$$2\theta = -\frac{2(1+\nu)}{E} \tan \theta_0 \cdot \sigma_x \sin^2 \psi + \frac{2\nu}{E} \tan \theta_0 \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + 2\theta_0 \quad (3)$$

式 (3) が X 線応力測定の基礎式であり、 $\sin^2 \phi$  に対する直線の方程式であることに気が付かれよう。ここで  $\phi$  は試料を回転させることで測定者が設定できる角度であり、その設定は任意である (標準では推奨値がある)。すなわち、 $\sin^2 \phi$  は既知で、実験的に得られる回折角  $2\theta$  との関係直線近似することで、次式の傾き  $M$  が決定できる。

$$M = -\frac{2(1+\nu)}{E} \tan \theta_0 \cdot \sigma_x \quad (4)$$

いま求めたいのは、上式右辺の応力  $\sigma_x$  であり、それに乗じられる係数は弾性定数と無ひずみの回折角で、材料定数である。

$$\sigma_x = -\frac{M \cdot E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 = M \cdot K \quad (5)$$

なお、このときの弾性定数は回折面に依存し、一般に機械的に得られる値とは異なるため、回折弾性定数と称さ



は白色透過法での光学系である [10]。回折エネルギー  $U$  の変化から次式でひずみを求める。

$$\varepsilon_{\phi+\chi,\psi} = -\frac{U-U_0}{U} \cong -\frac{U-U_0}{U_0} \quad (8)$$

ここで  $U_0$  は無ひずみでの回折エネルギーである。角度分散法と同様に式 (8) から直接ひずみを求めても十分な精度が得られないため工夫が必要である。図 5 のように光軸に対して  $\chi$  軸回転を利用することで、単軸負荷に対して回折エネルギーと  $\cos^2 \chi$  の直線関係が得られる。

$$U = U_0 - \frac{1+\nu}{E} U_0 \sigma_1 \cos^2 \chi + \frac{\nu}{E} U_0 \sigma_1 \quad (9)$$

すなわち  $\sin^2 \phi$  法と同様に直線の傾きから応力を決定することができる。多軸応力状態の場合は、さらに  $\phi$  軸回転を利用して決定する方法が提案されている [10]。

### 3. 放射光応力測定法

#### 3.1 ひずみスキャンニング法

放射光は実験室 X 線と比較して以下のような特徴がある。(1) 指向性に優れるとともに輝度が極めて高い。そのため、制限スリットでビーム寸法を小さくしても十分な回折強度が得られ、微小部測定が可能である。さらには K-B ミラーによる集光技術を用いることで、ビーム寸法 100 nm も可能である [11]。(2) エネルギー範囲が広く、高エネルギー利用が可能である。すなわち波長(エ

ネルギー) を適宜選択することで、材料内部への X 線侵入深さを制御することができる。

放射光においても前述の実験室 X 線で用いられる測定方法がそのまま適用可能であり、高精度な測定が期待できる。さらに、放射光では高エネルギーの X 線を利用して材料内部の測定ができる点が大きな利点となる。

図 6 は測定対象材料としてアルミニウムと鉄を例にとって材料内部の通過にとまう、X 線強度の減衰割合の変化を示したものである。例えば 60 keV の放射光を用いた場合、鉄では 6 mm 程度でようやくほぼゼロに近い値まで減衰する。一方、アルミニウムでは 10 mm 通過後でもおおよそ半分程度までしか減衰せず、十分な強度が維持され、十分深い領域まで測定できることを意味する。ただし、入射時の強度そのものが十分強いため、鉄鋼材料においてもひずみ成分によっては 10 mm 厚程度までのひずみ測定例が報告されている。

この特性を利用して、材料内部の三次元応力状態を評価することができる。このとき、実験室 X 線法で仮定される平面応力は適用できず、三軸応力を決定する必要があり、少なくとも三つの主軸方向のひずみを決定しなければならないことに注意が必要である。図 7 は、入射側と受光側に制限スリットを設置し、これによって回折にあずかる対象領域(ゲージ体積)を限定している様子を示した図である。放射光の場合は、光の品質に優れるため、式 (2)、(8) を用いて直接ひずみを求めても、ある程度の精度が確保される。この時得られるひずみ成分は、図 7 で示す散乱ベクトル方向である。ステージ上に固定した試料を適宜移動・回転してスキャンすることで、試料全体にわたる 3 次元応力・ひずみ分布を得ることができる。ただし、式 (2)、(8) 中の  $d_0$  もしくは  $U_0$  の値がひずみ評価に極めて大きな影響を及ぼすことに注意が必要である。この  $d_0$  問題は中性子測定も含めて、今でも完

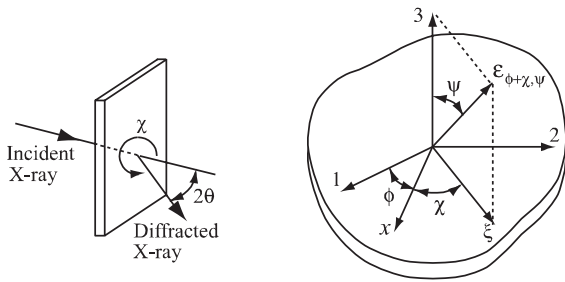


図 5 白色 X 線透過法の光学系

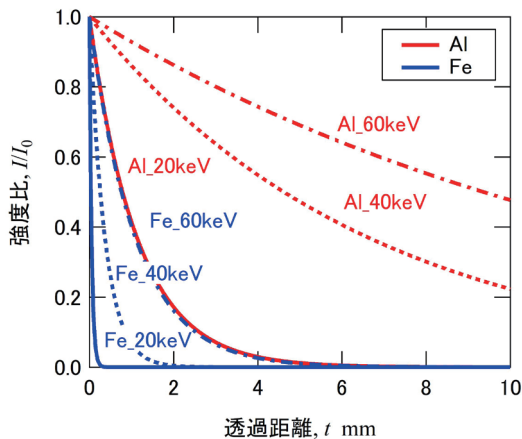


図 6 透過距離と X 線強度の減衰割合

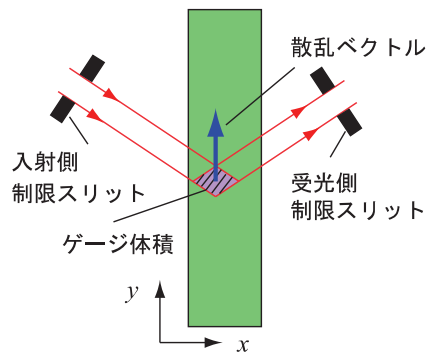


図 7 ひずみスキャンニング法



全に解決されたとはいえない。

主軸が明確でない場合は、未知のひずみ成分 6 個を決定しなければならないため、同一個所において少なくとも 6 方向のひずみを測定する必要がある。高エネルギー放射光を用いる場合（すなわち波長の短い X 線を用いる場合）には経路長が長くなり、必要とされる方向のひずみ成分が測定できないこともあるため注意が必要である。

### 3.2 侵入深さ一定法

表層から内部に向けて急峻な応力勾配がある場合には内部方向に対して高空間分解能が要求される。このような場合には、材料中での X 線の減衰特性を積極的に利用した方法が提案されている [12]。前述の  $\sin^2 \psi$  法の並傾法と側傾法を組み合わせることで、 $\psi$  角を変化させても侵入深さが一定のまま応力を測定できる方法であり侵入深さ一定法と称される。この方法では、ミクロン単位で侵入深さを制御しながら高精度測定が可能である。ただし、測定される応力は重み付き応力であるため、実際の応力分布を得るためには補正が必要である [13]。図 8 はショットピーニング材の残留応力分布で、放射光で非破壊測定を実施し、三次曲線の応力分布を仮定した結果と、実験室 X 線による逐次研磨の結果がほぼ一致することが示されている。あらかじめ適当な応力分布形がわかっている場合は、それを用いて最適化処理で係数を決定すればよく、より精度の良い評価が可能であろう。

### 3.3 ひずみトモグラフィ法

前述までの測定法は表 1 の点測定法に分類され、測定位置を指定してその領域の平均的な応力・ひずみが測定される。これに対して、回折法を利用した全視野測定も試みられている。Oddershede ら [14] は、平均粒径  $100 \mu\text{m}$  の IF 鋼に対して  $150 \mu\text{m} \times 1.5 \text{mm}$  の放射光

ビームを用いて 3D-XRD 測定を実施し、個々の結晶の平均応力(第 2 種の微視的応力)を求めることに成功している。さらに最近では Hayashi ら [15] によって、平均粒径  $20 \mu\text{m}$  の低炭素鋼に対して個々の結晶内の応力(第 3 種の微視的応力)測定が可能であることが示されており、今後の材料科学研究における有力なツールになるものと期待される。

## 4. 中性子応力測定法

### 4.1 ひずみスキニング法

中性子源には研究炉および加速器が用いられ、角度分散およびエネルギー分散(飛行時間法)いずれの測定も可能である。基本的な測定法は放射光法と全く同じであるものの、中性子法の特徴は高い透過能にあり、材料深部のひずみ評価が可能である。鉄の場合  $70\text{keV}$  の放射光と比較すると、約 60 倍深くまで減衰が少なく、内部測定プローブとしての優位性が高い。近年では入射強度の増加に伴って、空間分解能の向上も見込めるが、ゲージ体積が  $1 \times 1 \times 1 \text{mm}^3$  が一般的であり、表面近傍の急峻な応力勾配評価には工夫が必要である。

### 4.2 中性子法によるその他の測定法

白色透過中性子を利用して減衰率が急変するエネルギー(回折面間隔に対応)の変化から板厚方向のひずみを求めることができるのがブラッグエッジ法である [16]。また、放射光同様にひずみトモグラフィも活発に行われ、ひずみスキニング法と同様の結果を得ることができる [17]。

## 5. 電子線応力測定法

電子線も応力測定の回折プローブとして利用できる。結晶方位解析に用いられる電子線後方散乱 (EBSD) で測定される菊池パターンから結晶格子のひずみをとらえる [18]。試料として走査型電子顕微鏡 (SEM) 内に設置できる寸法・重量にしなければならない制約があるものの、電界放射型 SEM を用いれば、電子ビーム寸法  $20 \text{nm}$  程度の分解能が達成でき、MEMS 等の評価に威力を発揮する。3%Si 鉄での測定精度はおおよそ  $\pm 100 \text{MPa}$  程度であることが報告されている [19]。

## 6. おわりに

本稿では実験室 X 線、放射光、中性子、電子線を取り上げ、応力・ひずみ測定について概説した。材料は結晶性材料を対象として述べたが、近年では非晶質金属 [20] や非晶質高分子材料 [21] への展開もはかられ、今

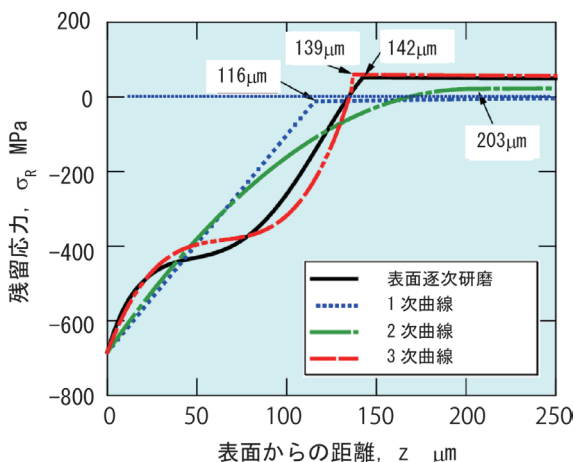


図 8 ショットピーニング残留応力

後の発展が期待できる。

放射光、中性子の場合は施設利用のための申請がハードルと考えがちであるが、利用相談の窓口も整備されており気軽に問合せることができる。もちろん、本特集号に触れられたのも縁、各執筆者に直接連絡すれば適切なアドバイスが得られること確実で、これを機会に一考されることをお勧めする。新たな展開が拓けること請け合いです。

## 参考文献

- [1] 日本材料学会, “X線応力測定法標準—鉄鋼編—”, JSMS-SD-5-02, (2002).
- [2] 日本材料学会, “X線応力測定法標準—セラミックス編—”, JSMS-SD-1-00, (2000)
- [3] 田中啓介, 鈴木賢治, 秋庭義明: “残留応力のX線評価—基礎と応用—”, 養賢堂, 東京, pp.99-120 (2006)
- [4] 栗村隆之, 秋庭義明: “溶接残留応力とX線残留応力測定”, 材料, Vol. 58, No. 10, pp. 873-878 (2009).
- [5] 平修二, 田中啓介, 山崎利春: “細束X線応力測定の一方法とその疲労き裂伝ば問題への応用”, 材料, Vol. 27, No. 294, pp.251-256 (1978).
- [6] 佐々木敏彦, 広瀬幸雄: “2次元X線検出器イメージングプレートを用いた全平面応力成分の単一入射X線応力測定”, 材料, Vol.44, No. 504, pp. 1138-1143 (1995).
- [7] 鈴木賢治, 西川聡, 秋庭義明, 内山宗久, 大城戸忍, 橋本匡史, 三浦靖史, 湯村友亮: “2次元検出器によるX線応力測定”, 養賢堂、東京, pp.11-19 (2015)
- [8] K. Tanaka: “The  $\cos \alpha$  method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector”, Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Reviews, Vol. 6, No.1, pp.1-15(2019)
- [9] 長尾真人, 楠本韶: “白色X線応力測定法”, 材料, Vol.26, No.285, pp.576-583 (1977)
- [10] 秋庭義明, 平村太郎: “透過白色X線によるオーステナイト系ステンレス鋼薄板の応力測定”, 材料, Vol. 60, No. 7, pp. 598-603 (2011).
- [11] J. Keckes et al.: “X-ray nanodiffraction reveals strain and microstructure evolution in nanocrystalline thin films”, Scripta Materialia, Vol.67, pp.748–751(2012)
- [12] 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: “放射光によるショットピーニング材の残留応力分布評価”, 材料, Vol.52, No. 7, pp. 764-769 (2003).
- [13] Y. Akiniwa, H. Kimura: “Determination of residual stress distribution in severe surface deformed steel by shot peening” Mater. Sci. Forum, Vols. 571–572, pp. 15–20 (2008).
- [14] J. Oddershede et al.: “Determining grain resolved stresses in polycrystalline materials using three-dimensional X-ray diffraction”, Journal of Applied Crystallography, Vol. 43, Part 3, pp.539-549(2010)
- [15] Y. Hayashi, D. Setoyama, Y. Hirose, T. Yoshida, H. Kimura.: “Intragranular three-dimensional stress tensor fields in plastically deformed polycrystals”, Science, Vol. 366, pp. 1492–1496 (2019)
- [16] J. R. Santisteban, L. Edwards, A. Steuwer, P. J. Withers: “Time-of-flight neutron transmission diffraction”, Journal of Applied Crystallography, Vol.34, pp.289-297 (2001)
- [17] A.W.T. Gregg, J.N. Hendriks, C.M. Wensrich, V. Luzin, A.Wills: “Neutron diffraction strain tomography: Demonstration and proof-of-concept”, Review of Scientific Instruments, Vol. 91, No.1, pp.(2020)
- [18] A.J. Wilkinson, “Measurement of elastic strains and small lattice rotations using electron back scatter diffraction”, Ultramicroscopy, Vol. 62, pp.237–247(1996)
- [19] 秋庭義明, 萩原寿喜, 木村英彦, 小島由梨, 古迫誠司, 岩田圭司, “EBSD法による3%Si鉄の切欠き近傍の応力ひずみ評価”, 材料, Vol. 64, No. 7, pp. 542-547(2015)
- [20] H.F. Poulsen, J.A. Wert, J. Neuefeind, V. Honkimaki, M. Daymond, “Measuring strain distributions in amorphous materials”, Nature Materials, Vol.4, pp.33-36(2005) [21]
- [21] 竹澤遼, 秋庭義明: “X線法による非晶質ポリカーボネートの応力評価”, 日本材料学会第53回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp.29-32 (2019)

(2020年2月10日)

## 著者紹介

著者: 秋庭 義明  
 所属: 横浜国立大学大学院  
 工学研究院 システムの創生部門  
 専門分野: 材料強度, 応力・ひずみ評価