新しい光源による応力評価

4. 中性子応力測定の実機への適用[†]

大城戸 忍* 盛 合 敦**

Stress Evaluation by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation Ⅳ : Application of Stress Measurement using Neutron Diffraction to Industrial Components

by

Shinobu OHKIDO* and Atsushi MORIAI**

Key words : Neutron diffraction, Residual stress, Industrial component

1 緒 言

中性子を利用した研究は世界中の研究機関で実施されている。それらの多くは、固体構造、相転移、磁気構造等の物理分野の研究が中心であったが、最近、中性子の特徴を生かした様々な産業利用研究が進められている。

物質中の軽元素の位置を同定できる中性子の利点を活用した最近の研究として、タンパク質等の有機物の構造解析がある。この分野はX線による研究が中心であったが、中性子測定はX線と比較してバックグラウンドノイズが小さいこと、明瞭な信号が得られることから、最近、多くの研究成果が報告されている。これらの研究は、医療、創薬、食品等の分野へ応用されている。

X線と比較して侵入深さが極めて大きい中性子の特性を利用した研究として、構造物の残留応力測定や、材料劣化評価がある。特に残留応力測定に関しては、材料内部の3次元的な応力マッピングが可能であることから、構造物の設計支援技術として活用されている。この技術は製品に直結した研究が多く、中性子の産業利用の代表例である。測定対象としては、航空機部品、ガスタービン翼、熱交換チューブ、原子炉材料、配管、熱遮へいコーティング膜、自動車用エンジンなど重電機器や産業機器、自動車に関わるものが主流であるが、最近ではエレクトロニクス産業でも利用され始めている。

このような背景を受け、VAMAS (The Versailles Project on Advanced Materials and Standards) において中性子回折による応力測定法の標準化を目的とした分科会 TWA-20 (Technical Working Areas-20) “Measurement of Residual Stress” が組織され中性子回折法による残留応力測定標準を作成した。日本においても、日本材料学会のX線材料強度部門委員会において中性子応力測定標準を作成中である。

本稿では、国内における中性子残留応力測定装置の現

状、仕様について略述した後、中性子残留応力測定を産業に適用した国内外における応用例を紹介する。

2 国内における中性子残留応力測定装置

中性子回折・散乱測定を行うためには、それに適したエネルギーの中性子を大量に発生する専用の原子炉または加速器のある中性子利用実験施設に出向く必要がある。そのような実験施設は、中性子という特殊事情から、国内外ともに限られており、国内においては日本原子力研究所東海研究所（原研 茨城県東海村）および京都大学原子炉実験所の研究用原子炉（大阪府熊取町）、高エネルギー加速器研究機構（高エネ機構 茨城県つくば市）の陽子加速器に限られている。そのなかでも、残留応力解析専用の装置、あるいは専用装置ではないが応力・ひずみ解析に基づく実用材料開発に利用されている回折装置を併設している施設は、原研および高エネ機構の2施設であり、装置設置台数も併せて2基である。以下にこれらの国内の実験装置について簡単に解説する。

2・1 角度分散型回折装置

角度分散型回折装置とは、研究用原子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角度を検出器走査によって観測する方式の装置である。詳しくは、本講座3あるいは参考文献1), 2), 3)をご覧ください。

上記の国内の中性子利用実験施設において、本方式を利用した残留応力解析専用の装置は、原研の研究用原子炉 JRR-3 (Japan Research Reactor No. 3) に設置されている残留応力解析用中性子回折装置⁴⁾ (Neutron Diffractometer for Residual Stress Analysis, RESA) のみである。図1に本回折装置の写真を示す。装置の基本的仕様として、入射中性子波長は、使用しているモノクロメーター単結晶

[†] 原稿受理 平成16年12月10日 Received Dec. 10, 2004

* 正 会 員 (株)日立製作所材料研究所 〒317-8511 日立市幸町, Mat. Res. Lab., Hitachi Ltd., Saiwai-cho, Hitachi-shi, 317-8511

** 正 会 員 日本原子力研究所東海研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方, Tokai Lab., Japan Atomic Energy Inst., Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

図1 日本原子力研究所東海研究所の残留応力解析用中性子回折装置 RESA の外観写真

調整機構とその取り付けスペースの関係上、約 0.208nm 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 (φ50mm) を用いており、検出器のカバー範囲、すなわち、 2θ は $0^\circ \sim 130^\circ$ 程度とることができる。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: $x=y=\pm 100\text{mm}$, $z=0 \sim +100\text{mm}$ 耐荷重: 100kgf) が付属されており、200 ~ 300mm 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 $\pm 30\text{MPa}$ 程度の確からしさを評価することに相当する。測定時間としては、中性子は特性 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走査のうちの 1 ポイントの計数時間は、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 10 分程度を必要とする。

なお、本 RESA 装置は、10 年余り前の JRR-3 の高熱中性子束化に伴う炉心の大規模な改造とほぼ同時期に設置された装置である。これまで原研内部の独自研究および大学や民間企業の開発研究部門との協力・共同研究 (無償) という限定された形態での利用にとどまっていたが、昨年度から有償利用 (共同利用) できる制度を設け、今年度は、年間の全マシンタイムのうち、ほぼ 3 分の 1 に当たる約 60 日間を様々な分野の産業界の方々に利用していただいた。次年度も少なくとも今年度と同程度の共同利用日数となる見込みである。

2・2 エネルギー分散型回折装置

上記角度分散型の装置に対して、エネルギー分散型の残留応力解析専用の装置は、主に加速器中性子源に設置する装置である。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 (Spallation)

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り、原研に設置予定の残留応力測定装置では 0.1 ~ 1.0nm のエネルギー域の中性子を用いる。このため、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およ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。多数の hkl からの回折線を一度に測定できる等、角度分散型の装置にはない多くの利点がある。詳しくは、本講座 3 あるいは参考文献 3), 5), 6) をご覧いただきたい。

エネルギー分散型の残留応力解析専用の装置は、残念ながら国内にはまだない。しかしながら、近年の中性子による残留応力測定の重要性、必要性が次第に理解されるにつれ、角度分散型の回折装置とともに、エネルギー分散型の装置も広く利用されるに至っている。先に紹介した高エネ機構の高分解能粉末回折装置 Sirius⁷⁾はその例である。Sirius 装置は原研 RESA のような残留応力解析専用装置ではないので、試料内部のある特定のゲージ体積の応力・ひずみ測定は現状では難しいが、複合材等の多相材の相間応力の測定、その場観察 (高温中、引張試験中の中性子回折等) 等が行われている。

現在、原研と高エネ機構とのジョイントプロジェクトとして大強度陽子加速器計画 (Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC)⁸⁾が進められており、1MW クラスのパルス中性子源施設 (物質生命科学実験施設) が建設される計画である。前出の研究用原子炉 JRR-3 と比較して熱中性子の強度は 100 倍程度強い中性子が利用できる中性子源である。この施設に設置される中性子ビーム実験装置群の一つとして、わが国最初のエネルギー分散型の残留応力専用中性子回折装置⁹⁾が既にエントリーされており、現在、建設に向けた装置仕様の検討等を行っている最中である。図 2 に本装置の完成予想図を示す。この新装置の設計の基本コンセプトは、大強度中性子が利用できることから、これまで RESA 装置では最低半日

図2 J-PARC に設置を提案している残留応力解析専用飛行時間型中性子回折装置の完成予想図

程は要した 1mm^3 ゲージ体積の測定を1時間程度ででき、かつ、RESAより分解能良く($\sim 0.2\%$)測定できる装置とすることであり、計算機シミュレーションによりこれらの目標性能を達成することを確認している。また、産業利用装置としての役割も鑑み、大形の実機工業製品(1m^3 ・1ton程度)の測定が可能のように、大型の回転試料台を設置する等、性能的にも規模的にもRESAを凌ぐスケールの装置となる。

J-PARCのような大強度の陽子加速器による新世代中性子源と中性子ビーム実験装置建設の動きは、わが国のみならず、日本に先んじた英国ラザフォード・アップルトン研究所の中性子ビーム実験施設ISISや、J-PARCとほぼ同時期に計画が進められた米国のSNS計画(Spallation Neutron Source Project オークリッジ国立研究所)等のように、世界的な大きな流れである。これらの施設にもやはり残留応力解析専用の回折装置が既に建設あるいは建設が予定されており^{10, 11)}中性子回折による応力解析の分野は、従来の物理学や化学等における物質科学分野と並ぶ、一つの大きな柱となっている。

3 国内における産業利用実施例

3・1 残留応力の再分布挙動評価¹²⁾

溶接部には熱履歴に起因した高い残留応力が発生する場合があります。疲労や応力腐食割れの一因となっている。残留応力場でき裂が進展すると、当該部の残留応力が解放されるため、残留応力が再分布し、き裂進展挙動が変化する。したがって、残留応力場におけるき裂進展挙動を評価するためには、材料内部のき裂先端部で非破壊的に残留応力を測定する必要がある。

図3から図4は、ステンレス製配管の突合せ溶接部においてき裂進展に伴う残留応力分布の再分布挙動を中性子回折評価した結果である。急峻な応力勾配を持つき裂開口部、き裂前縁部においては、測定領域で残留応力が平均化されてしまい、応力分布が緩慢になる傾向がみられるが、開口に伴う残留応力の緩和やき裂先端の残留応力変化の挙動を評価することが可能である。

3・2 自動車部品¹³⁾

自動車は我々個人レベルで最も身近な工業製品のひとつであると同時に、最も過酷な条件下で長期間使用され、かつ、その間の耐久性と安全性が非常に高いレベルで要求される製品でもある。図5は、16年度のRESA装置の共同利用において内部応力測定を実施した、アルミニウ

図4 中性子回折による残留応力の再分布挙動測定結果

図5 アルミニウム合金鋳物製自動車部品の形状および測定部位等模式図

ム合金鋳物製自動車部品の模式図である。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遥かに低い応力、短い期間で不具合が生じ、場合によっては重篤な事故等を引き起こす原因ともなるため、その正確な把握は不可欠である。

本測定では、模式図に示した部品内部のリブ状の部位(2箇所)について、ボルト状の組付けパーツの組付け前の当該部位の内部応力、およびパーツ組付け後の応力変化について観察した。表1に解析結果を示す。パーツの組付け前で既に半径方向および周方向で圧縮の残留応力があること、また、パーツの組付け後で著しく引張りの残留応力に変化することが表の結果から明らかである。このように、中性子を用いることにより、信頼性の高い製品設計や、強度解析をするために、基本的に欠かせない内部応力を直接知ることが可能となる。また、耐疲労強度に対して余裕度のある材料選定やプロセスの選定において重要な情報となる。

表1 アルミニウム合金鋳物製自動車部品の中性子応力測定結果

	組付け前	組付け後
半径方向応力	-15 MPa	+61 MPa
周方向応力	-5 MPa	+59 MPa
軸方向応力	+4 MPa	+54 MPa

図3 溶接4B鋼管試料の形状寸法、中性子測定部位

4 海外における残留応力解析の産業利用

4・1 配管溶接部¹⁴⁾

配管溶接部の健全性評価を目的に、外径 781mm、板厚 15.9mm の配管溶接部近傍の残留応力を評価した。図 6 に供試体の形状を示す。シーム付 SUS316L ステンレス鋼配管を V 開先加工して溶接した後、溶接部を SAW (Submerged Metal Arc) で被覆した。測定は Riso National Laboratory の TAS8 回折装置を用いて軸方向と半径方向は $1 \times 1 \times 20\text{mm}^3$ 、周方向は $2 \times 2 \times 2\text{mm}^3$ の測定領域で 111 回折を測定した。本試験では、供試体の形状が大きいため天井から吊るしながら測定している。測定された残留応力は ABAQUS の解析コードを用いた有限要素解析の結果と比較し、その妥当性を検討している。

4・2 熱処理とショットピーニング¹⁵⁾

航空機エンジンで使用されている材料は、材料そのものの特性を把握するのはもちろんのこと、あらゆる損傷を考慮した材料評価が必要である。特に疲労損傷が問題になるような部品では、残留応力や表面状態を評価することが必要である。疲労特性改善を目的に、ガスタービン翼では溶接後熱処理 (PWHT) により残留応力を低減し、さらにショットピーニング (SP) により圧縮の残留応力を付与している。そこで、一連の表面処理後の残留応力を中性子回折法で評価した。図 9 に高圧圧縮機の断面図を示す。

この中のブレード材 (Ni 基合金) に対して PWHT 処理した後、SP 処理を施した。測定は ILL (Institute of Laue Langevin) の D1A 装置を用いて Ni の 311 回折を測定した。測定領域は $1 \times 1 \times 20\text{mm}^3$ である。板厚方向の残留応力測定結果を図 10 に示す。表面近傍の残留応力は SP の効果により約 1000MPa の圧縮である。中性子回折曲線の半値幅から評価した塑性域寸法は 0.5mm であり、SP の効果は少なくとも 0.5mm 以上であると評価している。

4・3 曲げ塑性変形配管¹⁶⁾

ボイラー、熱交換器、過熱器で使用されているバイメタル配管の冷間加工技術の開発を目的に、冷間加工により発生する板厚方向の残留応力を評価した。図 11 に供

図 6 中性子応力測定に供した溶接配管 (SUS316L) のモックアップ試験体

図 7 表面近傍の中性子残留応力測定結果と FEM (ABAQUS) 解析結果との比較

図 8 溶接熱影響部の中性子残留応力測定結果と FEM (ABAQUS) 解析結果との比較

試体の形状を示す。直配管を 180° 曲げ冷間加工した内面がフェライト鋼 T11、外面がオーステナイト鋼 TP347H のバイメタルである。測定位置は肉厚が最も薄くなる A 部と最も厚くなる B 部、曲げ加工されていない直管部 D 部である。Studsvik の REST 回折装置を用いて 3mm^3 の測定領域でフェライト鋼 T11 は 211 回折を、オーステナイト鋼 TP347H は 220, 311 回折を測定した。図 12 に各位置における測定結果を示す。

図9 ジェットエンジンの断面図

図10 PWHT処理とSP処理されたタービン翼の板厚内残留応力測定結果

図12 測定部位Aの応力解析結果

図13 中性子応力測定に供した高圧力用自緊処理銅管の形状寸法

図11 バイメタル供試材の模式図

配管の断面の残留応力を測定し、フェライト鋼／オーステナイト鋼境界の応力状態を明らかにした。一部加工誘起マルテンサイト変態が発生していることが確認されたが設計上は問題なく、本配管の健全性を確認している。

4・4 高圧用配管¹⁷⁾

Bourke らは、管内圧の繰返しによるき裂の発生と伝ぱを抑制するため自緊処理 (autofrettage treatment) が施された高圧力用銅管 (低合金銅管 AISI4333M4) 内部の残留応力分布を、フランス Laue Langevin 研究所の粉末回折装置 D1A を用い測定し、き裂導入の有無による応力分布の変化を調査している。図13に供試材の寸法等を示す。図のように供試材は、管内面から管厚の

40% 程度 (13mm) の領域について自緊処理が施され、疲労き裂導入のための切欠き (2.5mm 長さ) を施工し、最終的に長さ 16mm (切欠き含む) のき裂が導入されたものである。図14は供試材のき裂が導入された側と、その反対のき裂が導入されていない側の管周方向 (hoop direction) の残留応力解析結果である。両側とも管内面から 6mm 程度まで、同程度の圧縮の残留応力が存在し

図14 疲労き裂有無による供試材周方向残留応力分布の比較

ているが、これは自緊処理によるもので共通した応力分布を呈するが、6mm 以降から両側で大きな違いが図のように見られるようになる。彼らは、この中性子による実測のほか、境界要素法による解析を実施しており、き裂導入側の周方向についての両方法による結果を比較し、応力値の定量的な違いがあるものの、分布変化の傾向等、定性的に良い一致を示す結果が得られていると報告している。

5 ま と め

製品の設計、品質保証、材料特性改善等、中性子回折法による残留応力測定の研究が広く産業分野に浸透してきていることは疑いの余地がない。VAMAS や材料学会の X 線材料強度部門委員会が進めている中性子応力測定標準作成は、さらに産業界での残留応力評価技術の活用寄予すると考えられる。しかし、集合組織を有する材料への適用性、表面近傍の残留応力評価、微小領域の応力測定への適用等、中性子回折法の課題は多々あり、基礎的な研究も欠かせない状況である。また、測定環境も限られているため、動的挙動の in-situ 測定、大型構造物用の測定系等の開発が期待されるところである。

日本における J-PARC 計画は中性子利用に拍車をかけるものであり、今後ますます広く利用されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 星埜禎男, 国富信彦, 渋谷 巖, 浜口由和, “実験物理学講座 22 「中性子回折」”, p.65 (1976) 共立出版.
- 2) 星埜禎男, “新物理学進歩シリーズ 5 「中性子回折」” (1961) 槇書店.
- 3) M. T. Hutchings and A. D. Krawitz (ed.), “Measurement of Residual and Applied Stress using Neutron Diffraction, NATO ASI Series Applied Sciences Vol.216” (1992) Kluwer Academic Publisher
- 4) 例えば, <http://nsrc.tokai.jaeri.go.jp/>
- 5) M. E. Fitzpatrick and A. Lodini, “Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation” (2003) Taylor & Francis.
- 6) C. G. Windsor, “Pulsed Neutron Scattering” (1981) Halsted Press.
- 7) 例えば, <http://neutron-www.kek.jp/>
- 8) 例えば, http://jkj.tokai.jaeri.go.jp/index_j.html
- 9) 盛合 敦, 鳥居周輝, 鈴木裕士, 森井幸生, 皆川宣明, 鈴木徹也, 友田 陽, 秋田貢一, 秋庭義明, 新井正敏, 第 39 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 164 (2004).
- 10) 例えば, <http://www.isis.rl.ac.uk/engineering/>
- 11) 例えば, http://www.sns.gov/users/instrument_systems/
- 12) S. Okido, M. Hayashi, Y. Morii and N. Minakawa, MSRI, **1**, 435 (2001).
- 13) 鈴木裕士, 川崎 泰, 盛合 敦, 私信.
- 14) P. J. Bouchard, MT Hutchings and PJ Withers, Proc. ICRS-6, 1333 (2000).
- 15) A. N. Ezeilo, P. S. Webster, G. A. Webster and P. J. Webster, “Measurement of Residual and Applied Stress using Neutron Diffraction”, p.535 (1992) Kluwer Academic Publisher.
- 16) C. R. Borlado, F. J. Mompean, Ru Lin, J. Izquierdo, M. A. Roman and V. Lopez Serrano, Mat. Sci. Eng., A288 (2000).
- 17) M. A. Bourke, H. J. MacGillivray, G. A. Webster and P. J. Webster, “Measurement of Residual and Applied Stress using Neutron Diffraction”, p.481 (1992) Kluwer Academic Publisher.