

[22044]

小型中性子源 RANS における応力測定評価比較のための系統的精密応力測定 Systematic stress measurement for comparison with RIKEN accelerator-driven compact neutron source RANS

岩本ちひろ ^{#,A)}, 高村正人 ^{A)}, 徐平光 ^{A,B)}, 山本和喜 ^{B)}, 鈴木康介 ^{C)}, 竹谷篤 ^{A)}, 大竹淑恵 ^{A)},
諸岡聡 ^{B)}, 菖蒲敬久 ^{B)},

Chihiro Iwamoto ^{#,A)}, Masato Takamura ^{A)}, Pingguang Xu ^{B)}, Kazuyoshi Yamamoto ^{B)}, Kosuke Suzuki ^{C)}, Atsushi
Taketani ^{A)}, Yoshie Otake ^{A)}, Satoshi Morooka ^{B)}, Takahisa Shobu ^{B)}

^{A)} Neutron Beam Technology Team, RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN

^{B)} Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency

^{C)} Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University

Abstract

Lattice strain measurements of specimens applied to various external compressive stresses loads were performed using the neutron diffractometer for Residual Stress Analysis (RESA) of engineering materials located at the guide hall of the research reactor JRR-3. Compressive stresses in the elastic deformation stage were applied to the cylinder samples of carbon steel S45C and aluminum alloy A6061 through a compressive rig, and the corresponding elastic stress-strain curves were measured. A good linearity in the elastic stress range was confirmed using these two reference specimens even though their Young's moduli of S45C was evident different. These Young's modulus is under consideration through analysis and calibration of the data of the load cell and the strain gage used for monitoring during diffraction measurement. These results will be employed as a valuable reference data for verifying the neutron stress measurement technique based on RIKEN accelerator-driven compact neutron source RANS.

Keyword: neutron diffraction, stress measurement, RANS, RESA, fundamental measurement for technical verification.

1. はじめに

近年、異なる機能を持つ材料を適材適所で利用することで部材の高機能化、軽量化、低コスト化などの実現を目指し、異種材料接合技術の開発及び接合により発生する残留応力評価に関する研究が広く実施されている。これらの研究が実験室単位で日常的に実施できるようになれば、材料開発が飛躍的に発展することが期待される。現在、理化学研究所量子工学研究センター中性子ビーム技術開発チームでは、実験室単位で材料ひずみ評価を可能にするために、加速器型小型中性子源 RANS(RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source) を用いた金属材料内部の応力測定技術開発を行なっている。

これまでに、飛行時間法回折測定により得られる回折線分布の高分解能化およびピーク形状を再現する関数を用いたフィッティング解析より、応力負荷時の結晶格子ひずみ量の測定限界精度を向上させ^[1]、既知応力サンプルに対する測定を実施してきた。また、角度分散法の回折測定により、飛行時間法よりも高分解能ひずみ測定を達成するための開発も始めている^[2]。本研究では、これまでに使用した既知応力サンプルの詳細なベンチマークデータを RESA で取得することにより、RANS におけるひずみ測定の限界を多角的に評価することが目的である。

2. 実験方法

2.1 既知応力サンプル

本実験に使用した、既知応力サンプルの写真を図 1 に示す。直径 8 mm、長さ 40 mm の試験片を 2 枚

の板で挟み込みボルトとナットによって締め上げることにより圧縮荷重を加える構造をしている。荷重は、試験片と板との間に挟んだロードセルを用いてモニターした。また、ひずみゲージをロードセルと反対側の試料側面に 2 つ取り付けてひずみもモニターした。荷重を加える板、ボルト、ナットの材質には、中性子回折を起こす確率が鉄鋼材料に比べて低いチタン合金(Ti-6Al-4V)を用いた。応力を負荷する試料には、炭素鋼 S45C およびアルミニウム A6061 を用いた。これらの試料にそれぞれ圧縮応力を 50 MPa から 500 MPa、および 50MPa から 100MPa まで変化させながら中性子回折線のピークシフトを測定した。

2.2 中性子回折測定による応力測定

中性子回折測定による応力測定は、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 における中性子残留応力解析装置 RESA^[3]で行なった。ウランの核分裂中性子を減速した熱中性子のうち、波長 $\lambda = 0.1685$ nm の中性子ビームを Si400 単結晶モノクロメーターで取り出して試験片に照射した。ビームは、試験片に照射される前に 5 mm×15mm のカドミウム(Cd)スリットで整形した。回折中性子線は、測定するミラー指数に対応する回折角度に設置した中性子検出器で測定した。炭素鋼 S45C の場合は格子面{211}に対して回折角 $2\theta = 92.18$ degree, アルミニウム A6061 の場合は格子面{311}に対して $2\theta = 87.13$ degree にそれぞれ検出器を設置した。検出角度範囲 $420 \approx 7$ degree をカバーする 1 次元検出器の直前には、5mm

[22044]

のラジアルコリメーターを設置し、中性子回折パターンの測定を行った。回折パターンは、試料のロードセル側の端面からの距離 17 mm および 26 mm の 2 か所を、円柱試料の軸方向に圧縮応力を負荷したときの軸方向および径方向の 2 方向に対して測定した。

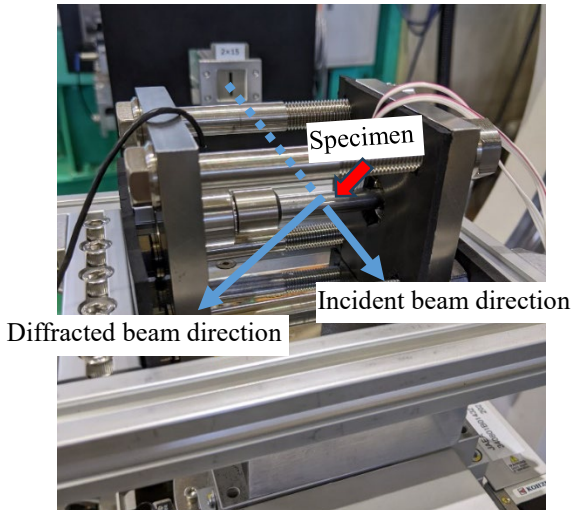


Figure 1. On-line view of the dedicated compressive loading gage of cylindrical specimen during neutron experiment at RESA

3. 実験結果

Fig. 2 に、S45C 試験片へ 100MPa および 500MPa の圧縮応力を負荷したときに測定したロードセル側の端面より 26 mm の位置における軸方向回折中性子プロファイルを示す。測定時間はそれぞれの荷重に対して 90 分で、回折線ピーク中央値を評価するには十分な回折強度であるデータが得られた。Fig. 3 に、ロードセルによりモニターしながら負荷した圧縮応力の公称値に対する中性子回折により算出した格子ひずみのグラフを示す。測定位置およびひずみの方向は Fig. 2 と同じである。ここで、ひずみは試料に 100 MPa を負荷したときを基準とし、回折線のピークシフトから求めたものである。S45C について、弾性域である 50 MPa から 500 MPa の間の負荷応力に対してひずみの直線性が得られ、また、S45C に比べてヤング率が小さい A6061 については、傾きが S45C よりも大きく得られていることから、正しい傾向が得られているといえる。この応力ひずみ曲線から S45C および A6061 のヤング率は、それぞれ 380 GPa および 72 GPa と算出できる。A6061 については、文献値から計算される X 線弾性係数 69.307 GPa^[4,5]とおおむね一致する結果であった一方で、S45C については、文献値から計算される X 線弾性係数 223.45 GPa^[4,6]と一致する結果が得られなかった。これについては、モニターに使用していたロードセルとひずみゲージのデータの解析および再較正を行ないな

が原因を考察中である。

今後、応力ひずみ曲線の試料位置依存性やひずみ方向の違いも解析し、本既知応力サンプルで想定通りの応力とひずみの関係が測定できることを確認したうえで、小型中性子源 RANS による応力測定結果と比較し RANS の応力測定精度の議論を進める。

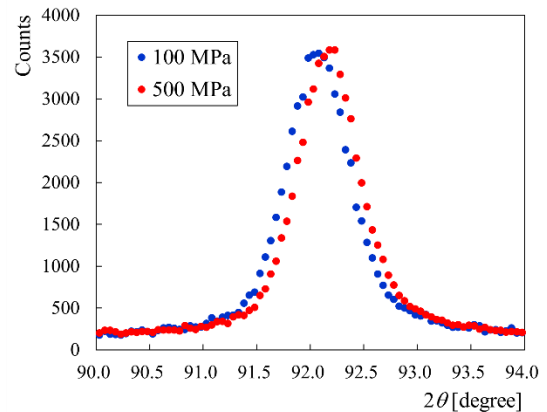


Figure 2. Diffraction peak of {211} reflection of S45C specimen.

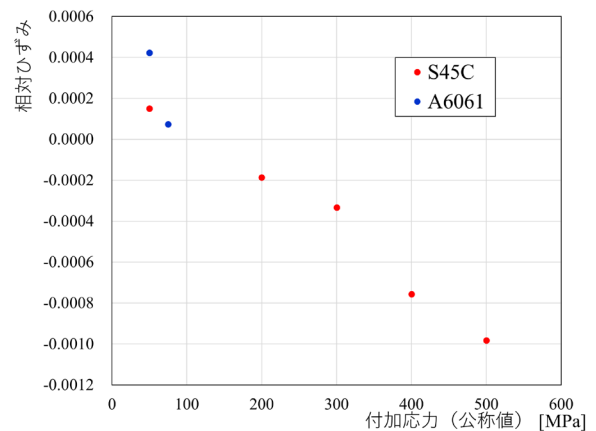


Figure 3. Axial lattice strain of cylindrical specimens measured by the neutron diffraction as a function of nominal values of applied compressive stress.

参考文献

- [1] C. Iwamoto, et al., "Improvement of Neutron Diffraction at Compact Accelerator-driven Neutron Source RANS Using Peak Profile Deconvolution and Delayed Neutron Reduction for Stress Measurements", *ISIJ International*, Vol. 62 (2022), No. 5, pp. 1013–1022.
- [2] 岩本ちひろ等：“小型中性子源を用いた角度分散法中性子回折による高分解能残留応力測定法の開発”，材料とプロセス（CAMP-ISIJ）日本鉄鋼協会 第 179 回春季講演大会 3 月(2020).
- [3] 諸岡聡、徐平光：中性子応力測定装置 RESA-1、波紋、Vol.31、(2021)、pp.9-10.

[22044]

[4] https://x-ray.jsms.jp/kroner/kroner_c.html

[5] G.N. Kamm and G.A. Alers, J. Appl. Phys., 35, 327
(1964).

[6] A.E. Lord, Jr and D.N. Beshers, J. Appl. Phys., 36, 1620
(1965).