アルミニウム合金製自動車エンジンブロックの残留応力[†]

林 眞 琴* 森 井 幸 生** 齋 藤 徹***
鈴木 裕 士**** 盛 合 敦*****

Residual Stress Measurement in Aluminum Engine Block

by

Makoto HAYASHI^{*}, Yukio MORII^{**}, Toru SAITO^{***}, Hiroshi SUZUKI^{****} and Atsushi MORIAI^{*****}

Residual stress distribution at the cylinder block wall in 1500cc class aluminum engine was measured using RESA in JRR-3 of JAEA. In order to increase neutron flux at the gauge volume measured, newly developed vertically focused collimator was employed. Since the grain size in cast aluminum engine block was large, the oscillation method was applied. The residual stresses near the surface layers of cylinder block wall were compressive all in the tangential, the thickness and the cylinder axial directions, but tensile in the middle part of cylinder block wall. This means the residual stress distributions are likely to be hydrostatic. The residual stresses in the tangential direction were not balanced in the cylinder block wall. If the residual stress distribution in the hoop direction is approximated by 2 dimensional power equation, the residual stresses on the cylinder wall surface is estimated as about -140MPa and the mean residual stress in the cylinder wall is 15MPa.

Key words : Residual stress, Neutron diffraction, Aluminum engine, Coarse grain, Oscillation method

1 緒 言

機械構造物や部品の強度信頼性に影響を及ぼす重要な因子として、溶接や機械加工、熱処理、鋳造などによる残留応力がある。強度に影響を及ぼす残留応力は主として材料表面の残留応力であり、従来は表面の応力測定に対して感度の高いX線回折法が適用されてきた。¹⁾一方、例えば、高温ガスタービンでは、耐熱性を向上させるために熱遮へいコーティングを施すが、その界面からき裂が発生することがある。それに対してコーティングを施工したときに発生する残留応力が影響すると指摘されている。²⁾コーティング層の厚さは高々数十 μm であるが、ラボX線では侵入深さが浅いためにコーティング層界面近傍の応力を測定することができない。そのため、エネルギーの高い放射光X線が適用されている。高いエネルギーの放射光を用いると銅でも深さ1.5mm内部の残留応力を測定することが可能で、ひずみスキャン法が開発されている。³⁾

中性子はラボX線や放射光と比較して侵入深さが極めて大きいのが特徴である。この特性を活かしてソケット継手溶接部や厚板溶接部内部の残留応力が測定されている。^{4)~6)}アルミニウムの場合、侵入深さが1,200mmにも達するため、⁷⁾最近では自動車エンジン部品の組立て応力の評価やエンジンブロック周りの鋳造残留応力の評価に

適用する試みもなされている。

自動車は燃費改善のためにさまざまな取組みがなされている。その1つが車体の軽量化である。その中でもエンジンの小型軽量化は大きい効果を有する。エンジンの小型化のためには、エンジンブロックの大きさを1mmでも縮小することが重要である。その場合、最も強度信頼性上重要となるのはシリンダヘッドやシリンダブロック内部の残留応力である。エンジンブロック内部の残留応力測定においては2つの問題点がある。1つはエンジンブロックが全長数百mmもあるため、従来の中性子入射ビームスリットではゲージ体積が大きくなってしまふことである。このため、本研究では入射ビームを縦方向に収束させるラジアルコリメータスリットを開発した。2つ目は、アルミニウムエンジンは鋳造されるため結晶粒が粗大で、かつ、集合組織が強いことが予想され、回折に預かる結晶粒を多くするために試料を揺動させたとしても十分な回折強度を得ることができず、高い精度での応力が期待できないことである。そこで本研究では、アルミニウム合金製のエンジンブロックの中性子回折による残留応力測定技術の確立を目的として、1,500cc級エンジンブロックを用いて測定精度に及ぼす揺動の影響についても検討した。

[†] 原稿受理 平成22年10月8日 Received Oct. 8, 2010 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 茨城県企画部 〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方, Planning Div., Ibaraki Prefecture, Naka-gun, Ibaraki, 319-1106

** 正 会 員 日立市テクノセンター 〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方, Hitachi-Naka Techno Center, Naka-gun, Ibaraki, 319-1106

*** 正 会 員 神戸工業試験場 〒319-1231 日立市留町, Kobe Materials Testing Lab., Tome-cho, Hitachi, 319-1231

**** 正 会 員 日本原子力研究開発機構 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根, Japan Atomic Energy Agency, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

***** 日本原子力研究開発機構 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根, Japan Atomic Energy Agency, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

2 実験方法

日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 の残留応力測定装置 RESA-1 ではベント型非対称モノクロメータにより単色化した入射ビームを最終的には矩形形状の Cd スリットでゲージ体積を設定している。しかし、この方法ではスリットから収束点までの距離 $L1$ が長いと、Fig. 1 上図に示すように入射ビームの発散により、試料位置におけるビーム高さはスリットサイズに比べて大きく広がり、中性子束密度が低下するという問題がある。本研究の対象である、アルミニウム合金製のエンジンブロックは結晶粒径 0.1mm オーダーで、一般構造用炭素鋼の $20\mu\text{m}$ 程度と比較すると数倍大きい。通常の測定法では精度よく残留応力を測定することができない。そこで、新しく入射中性子ビーム強度を低下させることなく、スリット-試料間距離を大きく取れる鉛直面内集光型のラジアルコリメータを世界で初めて開発した。Fig. 1 下部にその構造概念図を示す。両面に中性子吸収材である Gd_2O_3 を塗布した厚さ $30\mu\text{m}$ の 2 軸延伸ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを試料位置に向かって収束するように扇の状に配置し、中性子の入射方向を絞って試料位置におけるビーム高さを所定のサイズに集光するというものである。ラジアルコリメータの設計としては、1) 収束距離を 500mm 、2) ひずみ測定位置におけるビーム高さを 5mm 、3) ラジアルコリメータの全長は約 400mm 、4) 収束ラジアルコリメータの分割数は 10ch とした。

この考えに基づいて設計、製作した入射スリットの断面構造を Fig. 2 に示す。スリットの全長は 384mm 、入り口側の幅は 44.146mm で、コリメータの間隔は 4.36mm である。出口側の幅は 24.99mm で、コリメータの間隔は 2.444mm である。

Fig. 2 Cross section of vertical radial collimator for incident neutron beam.

Fig. 3 に開発した縦収束ラジアルコリメータを用いて測定した距離 $L1$ を変えたときのビーム強度を示す。設計点 $L1 = 500\text{mm}$ においてビーム強度が最大となっていることが分かる。

Fig. 4 には距離 $L1$ を変えたときのビーム形状を中性子イメージングプレート (NIP) を用いて測定した結果を示す。 $L1 = 500\text{mm}$ においてビーム高さの半値幅 H_{FWHM} が 5mm と最小値を示すとともに、設計値通りとなっていることが分かる。

検出器には受光面積が $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の韓国原子力研究所 (KAERI) 製の一次元検出器を用い、検出器の前方にはラジアルコリメータを配置した。測定対象であるアルミニウム合金製エンジンブロックは粗大結晶粒であるため、エンジンブロックを 2θ 方向に最大で $\pm 5\text{deg}$ 揺動させた。具体的には $\omega = -5\text{deg}$ から $\omega = +5\text{deg}$ まで $\Delta\omega = 0.5\text{deg}$ 間隔で回折プロファイルを測定し、揺動角度範囲に応じて積分した。

無ひずみ状態の格子定数 d_0 は、エンジンブロックから約 2cc ヤスリで削った粉末にひずみ取り焼鈍 (SR) として $200^\circ\text{C} \times 30\text{min}$ の熱処理を施したもので測定した。

ゲージ体積は縦収束コリメータの出口に幅方向スリッ

Fig. 3 Incident beam intensity change for distance $L1$ between collimator and gauge volume.

Fig. 4 Configuration of incident neutron beam squeezed by vertical radial collimator.

トを設けることにより r , θ 方向ひずみ測定では $2 \times 2 \times 5\text{mm}^3$ とした. このときの波長は $\lambda = 0.17307\text{nm}$ である. また, z ひずみ方向ひずみ測定では $2.6 \times 2.6 \times 2.4\text{mm}^3$ とした. このときの波長は $\lambda = 0.17304\text{nm}$ である.

エンジンを小型化するためにはシリンダブロック隔壁を薄くすることが必要である. そのため, シリンダ隔壁における残留応力分布を測定した. 測定状況を Fig. 5 に示す. 入射ビームスリット先端にあるのが縦収束ラジアルコリメータである. 縦収束コリメータを用いたため, コリメータ先端からエンジンブロックまでは十分な空間を確保することができ, 従来のように, 2 軸方向のひずみを測定するために, 入射ビームスリット位置を動かして再設定する必要がなくなり, 2 軸方向のひずみを連続して測定できるようになった.

シリンダ隔壁における測定位置とゲージ形状を Fig. 6 に示す. 本研究では全長が約 500mm の 1,500cc 級エンジンブロックの中央のシリンダ隔壁を対象とした. 図中に示したように座標系としては, シリンダを基準とし, エンジンのクランク軸方向を r , ピストン方向を z , シリンダの周方向を θ とした. シリンダ隔壁の厚さは $t = 8.2\text{mm}$ である. ゲージ幅が 2mm であるため厚さ方向で 5 箇所測定した. 測定中心はシリンダ表面から $r = 1, 2.6, 4.1, 5.6, 7.2\text{mm}$ である. なお, ゲージ体積が測定試料から

外れた場合には見かけのピークシフトが生じることがあるが, Fig. 6 に示したように, 表面に近い測定点においてゲージ体積から外れる試料体積は小さいこと, また, 回折角度が $2\theta = 90\text{deg}$ に近いために見かけのピークシフトは小さいものとして評価した.

参考のためにシリンダブロックの金属組織写真を Fig. 7 に示す. 平均結晶粒径は約 $15\mu\text{m}$ である. 前述したように RESA-2 での予備測定では回折強度が得られず, 結晶粒径が大きいものと推定していたが, 図に示すように結晶粒はアルミニウム鑄造材としてはむしろ小さい. これは, シリンダ隔壁は鑄造時に中子に挟まれているために冷却速度が速く, 結晶粒径が小さくなったものと推定される.

3 実験結果

無ひずみ状態の格子定数 d_0 を測定した SR 処理を施したヤスリ掛け粉末の 311 回折プロファイルを Fig. 8 に示す. 回折ピーク位置は $2\theta_0 = 90.3601\text{deg}$ であり, 半値幅は $\text{FWHM} = 0.450\text{deg}$ である. この回折ピークから無ひずみ状態の d_0 は 0.1219856nm で, 格子定数は $a_0 = 0.40458\text{nm}$ となる.

エンジンブロック隔壁の表面から $r = 2.6\text{mm}$ (測定位置 #2) で測定した回折プロファイルを Fig. 9 に示す. ダブルピークが得られており, 測定対象の 311 回折以外に,

Fig. 5 Appearance of residual stress measurement in aluminum engine block at RESA-1 of JRR-3.

Fig. 7 Micro-structure of engine cylinder block.

Fig. 6 Strain measurement area in r , θ directions in cylinder wall.

Fig. 8 Diffraction profile of annealed aluminum powder.

Fig. 9 Diffraction profile obtained at position #2.

$2\theta = 89.408\text{deg}$ の回折ピークが認められる。Fig. 10 にはシリンダ隔壁中心 $r = 4.1\text{mm}$ (測定位置 #3) の回折プロファイルを示す。ここではほぼ単一ピークとみなせる。Fig. 8 に示した $2\theta = 89.408\text{deg}$ の回折ピークはシリンダ隔壁の表面に近いほど強く現れているが、アルミニウム合金 (ADC12Z) で想定される相のいずれにも認められないものであり、現在のところ解明できていない。

予備測定の結果からは、エンジンブロックの結晶粒径がかなり大きいことが想定されたため、エンジンブロックを最大で $\pm 5\text{deg}$ 揺動させた。その結果得られた格子定数と揺動角度との関係を Fig. 11 に示す。測定位置 #1 ($r = 1.0\text{mm}$) では多少変動しているが、他の 4 箇所では揺動角度が $\pm 1.0\text{deg}$ ないし $\pm 1.5\text{deg}$ でほぼ回折ピーク角度は安定している。これは RESA-2 を用いた予備測定の結果からは予想されなかったことであり、RESA-1 の本来の入射ビーム強度が高いこと、あるいは、縦収束入射コリメータにより入射ビーム強度が高くなったこと、さらには、Fig. 7 に示したように初期の予想と異なり、結晶粒径が $15\mu\text{m}$ と小さかったことが影響したものと考えられる。以下では揺動角度 $\omega = \pm 5.0\text{deg}$ の結果を用いて議論する。

アルミニウム合金の 311 回折から得られたシリンダ隔壁の板厚方向 r (エンジンの長手方向) における残留ひ

Fig. 10 Diffraction profile obtained at position #3.

Fig. 11 Effect on oscillation angle on diffraction peak position.

ずみ分布を Fig. 12 に示す。測定のエラーバーを図中に示したが、表面層ではアルミニウム合金の 311 回折よりも不明の相の回折強度が高く、311 回折で得られたひずみの測定精度はよくない。

Fig. 13 に Fig. 12 のひずみ分布から得られたシリンダ隔壁における残留応力分布を示す。傾向としてはいずれの方向の残留応力も、表面層が圧縮応力で、板厚中央部が引張応力という静水圧的な分布である。周方向応力は板厚方向でほぼ対称の分布となっているが、シリンダ半径方向と軸方向の応力は若干非対称である。

シリンダブロックの強度上で重要となるのは周方向応力であるが、それは表面近傍では約 40MPa の圧縮応力で、板厚中央部では $65 \sim 90\text{MPa}$ の引張応力である。

4 考 察

入射ビームスリットと測定試料の距離を大きくとりつつ、入射ビーム強度を高くするために、縦方向収束ラジアルコリメータを設計製作した。今回開発した仕様はスリット試料間距離 $L1 = 500\text{mm}$ で、ゲージ位置でのビーム高さ 5mm である。Fig. 3 と Fig. 4 に示したように、ゲージ位置での入射ビーム強度は最大となり、ビーム高さも最小の 5mm となり、設計通りの結果を得ることができた。このように入射側に縦方向収束コリメータを設ける

Fig. 12 Residual strain distribution in cylinder wall.

Fig. 13 Residual stress distribution in cylinder wall.

と、スリット-試料間距離を長く取ることができるので、2軸方向ひずみを測定するために入射ビームスリットの位置変えが不要となり、測定効率が向上する。また、入射ビーム強度も高くなるため、ゲージ体積を小さくしたり、測定時間を短縮できるというメリットがある。今後、ゲージ位置でのビーム高さを変えたコリメータを数個設計製作する計画である。

シリンダ隔壁における残留応力の分布は、周方向、板厚方向、シリンダ軸方向ともに、表面層においては圧縮応力で、隔壁中央部では引張応力であり、静水圧的な分布である。周方向応力は隔壁板厚方向で対称になるはずであるが、測定した結果は対称になっていない。これはFig. 5に測定状況を示したように、入射ビームと回折ビームがエンジンブロック内で複雑な経路をたどるために測定誤差が大きかったことなどが考えられる。

周方向の残留応力は隔壁板厚方向でバランスするものと仮定して、補正すると、表面では約70MPaの圧縮応力となった。

シリンダ隔壁表面は鋳造時には中子に接しており、先に凝固し、隔壁中央部が後から凝固する。そのため表面層は圧縮応力となる。一方、シリンダ内面には鋼製のライナーが挿入されている。外径がシリンダ内径よりも僅かに大きいライナーをかしめる状態で挿入するため、アルミニウム合金隔壁が全体として引張応力になると思われる。ただし、ライナーは非常に薄いために、応力分布への影響は小さいと思われ、残留応力の大半は鋳造工程により導入されたものと考えられる。いずれにしても、強度上、重要となるシリンダ内面側の周方向の残留応力は約70MPaの圧縮応力と見積もられる。

上述のシリンダ表面の応力というのは、飽くまで表面から $r = 1.0\text{mm}$ 内部のゲージ体積での平均の応力である。シリンダ隔壁内の応力分布は2次式で近似できると仮定して、シリンダ壁表面での周方向残留応力を推定した。その結果をFig. 14に示す。灰色四角が測定された周方向残留応力で、2次式で近似したものが実線である。これからシリンダ壁表面における残留応力として $-131 \sim -142\text{MPa}$ が得られる。また、図中にも示したが、平均の

Fig. 14 Modified residual stress distribution in cylinder wall.

残留応力は15MPaで非常に低いことが分かった。なお、残留応力分布がシリンダ隔壁内において板厚方向で対称であると仮定して補正した結果では、シリンダ壁表面の残留応力は -152MPa が得られた。いずれにしても、シリンダ壁表面における残留応力は約 -140MPa 程度とかなり高い圧縮応力であり、強度上は安全側にあるといえる。

なお、測定に供したエンジンブロックは新品ではなく、約5年使用されたものである。このことは、逆に経年したとしてもアルミニウム合金としては十分に高い圧縮残留応力がシリンダ隔壁に保持されていることを示しており、信頼性が高いことを示していると言える。今後可能であれば、新品のエンジンブロックの測定を行い、経年後の残留応力との比較を行いたいと考える。

5 結 言

本研究では、アルミニウム合金製のエンジンブロックシリンダ隔壁の残留応力分布を中性子により測定する技術を確認するために、入射ビーム側に縦方向集光ラジアルコリメータを設計製作し、1,500cc級エンジンに適用した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 鉛直面内集光型入射スリットは有効で、入射中性子強度を低下させることなく、スリット-ゲージ体積中心間距離を500mmと大きくとることができる。これにより、2軸方向のひずみを入射スリット位置を変えることなく、連続で測定可能である。

(2) 全長が約600mmの1500cc級アルミニウムエンジンブロック中央部のシリンダ隔壁内における残留応力を非破壊で測定できた。

(3) シリンダ隔壁表面の周方向残留応力は測定した結果からは -70MPa と見込まれる。周方向残留応力が板厚内で2次式で近似できるものと仮定すると、シリンダ壁表面の残留応力は約 -140MPa と十分に高い圧縮応力であると推定される。

本研究における縦方向収束ラジアルコリメータの開発に当たってはJ-PARCセンターの鈴木淳市氏と篠原武尚氏に構造設計で協力していただいた。また、製作に当たっては、茨城県商工労働部の中性子関連産業応用事業のご支援をいただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) The Society for Materials Science, Japan, "Standard method for X-ray stress measurement", Committee on X-ray Materials Strength, (2002), JSMS (in Japanese).
- 2) K. Suzuki, K. Wada, H. Matsubara, T. Shobu, M. Kawamura and K. Tanaka, "Residual stress in zirconia coating by EB-PVD method", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.7, pp.588-593 (2007).
- 3) T. Shobu, J. Mizuki, K. Suzuki, Y. Akiniwa and K. Tanaka, "Correction of surface aberration in strain scanning method with analyzer", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.1, pp.101-108 (2006).
- 4) M. Hayashi, M. Ishiwata, N. Minakawa and S. Funahashi, "Residual stress measurements in socket welded joints by neutron diffraction", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.44, No.12, pp.1464-1469 (1995).
- 5) M. Hayashi, M. Ishiwata, Y. Morii, N. Minakawa and J. H. Root, "Residual stress distribution in carbon steel pipe welded joint measured by neutron diffraction", Materials Science Research International, Vol.6, No.4, pp.287-294 (2000).
- 6) H. Suzuki and T. M. Holden, "Neutron diffraction measurements of stress in an austenitic butt weld", Journal of Strain Analysis, Vol.41, No.8, pp.575-582 (2006).
- 7) K. Tanaka and Y. Akiniwa, "Diffraction measurements of residual macrostress and microstress using X-rays synchrotron and neutrons", Japan Society for Mechanical Engineers International Journal, Series A, Vol.47, No.3 pp.252-263 (2004).