

[2024105202]

粗大集合組織を持つアルミニウム鋳造合金の中性子応力測定（Ⅱ）

Neutron Stress Measurements of Aluminum Casting Alloy with Coarse Crystal Grains and Texture (II)

西田真之^{A)}, 松英達也^{B)}, 菖蒲敬久^{C)}, 諸岡聡^{C)}, 徐平光^{C)}

Masayuki Nishida^{A)}, Tatsuya Matsue^{B)}, Takahisa Shobu^{C)}, Satoshi Morooka^{C)} and Ping Guang XU^{C)}

^{A)} Kobe City College of Technology

^{B)} National Institute of Technology, Niihama College

^{C)} Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

In neutron stress measurement, the existence of coarse crystal grains poses a significant problem, often hindering accurate measurements. While conventional neutron stress measurement depends on strain measurements in three orthogonal directions, this approach becomes difficult for materials with coarse grains because the required diffraction peaks frequently disappear. In this study, it was evaluated the stress state of flange parts produced by aluminum casting using neutron stress measurement. To enhance measurement accuracy, the oscillation method was employed, aiming to collect data from a large range of sample orientations. Finally, stress components were calculated using a coordinate transformation formula. In this evaluation, it was included not only normal stress but also shear stress. These experimental results were compared with results from a finite element method (FEM) simulation.

Keyword: neutron stress measurement, aluminum casting alloy, coarse crystal grain, Oscillation measurement

1. はじめに

昨年度に引き続き、粗大結晶粒を有するフランジ部品における中性子応力測定に挑戦している。中性子応力測定においては過去より 1) d_0 問題, 2) 集合組織, 3) 粗大結晶粒の 3つの解決すべき重要な問題があり、本研究では、3)の問題を克服することを主な目的としている。通常、中性子応力測定は、直交する 3 方向のひずみを測定し、基本的な弾性論の公式に代入することで簡単に算出可能である。しかしながら、粗大結晶粒を持つ材料の場合、必要な方向の回折ピークが消滅もしくは極めて強度の弱い状態となる場合が多くある。この場合は 3 方向のひずみ測定が不可能となり、結果的に応力値が全く算出できないことになる。このような状況に対応できる測定方法・評価方法の確立に向けての取り組みが本研究の主目的である。

2. 測定の目的

本研究では、これまでの研究成果を踏まえて、以下の 2 点に目的を絞って今回の中性子応力測定を行った。

1) 求める方向のひずみが得られない場合の対応として、従来は強度の大きなピークが出現する方向をロッキングカーブなどの手法を用いて探し出し、狙い撃ちする形で測定を行ってきた。しかしながら、この方法では確かに測定自体は可能となるが、強いピークの発生源となっている粗大結晶粒内部の応力状態に強く影響を受け、全体のバランスから推測される応力状態を必ずしも再現できていない場合がある。この現象は強い集合組織を有する材料の応力評価においても同じ傾向がある。

今回の測定では、あえて強いピークを探し出すことはせずに、測定可能な方向で揺動をかけながら測定する方法を採用し、その有用性を検証した。

2) 従来の測定方法において、直交する 3 方向のひずみ測定から得られる結果は 3 方向の垂直応力であり、せん断応力は算出されない。今回測定するフランジ部材のような複雑形状の製品においては、各部の応力状態が複雑になり、強度設計の観点からせん断応力および主応力方向の評価が重要となる。

今回の測定では、直交 3 方向のひずみが測定できない場合を逆に利用して、6 方向以上のひずみを測定し、測定されたひずみから座標変換式を用いて応力値を計算する。この際に、中性子応力測定では直接測定することが困難なせん断応力も同時に算出することが可能となり、応力評価の精度向上が期待できる。

2. サンプルの準備と測定の方針

本研究において準備した試料は鋳造で製作したアルミニウム製の三叉フランジ継手である。受注生産に対応するため砂型を用いた鋳造法で製作している。材質はアルミニウムであるが、廃材の再利用を前提とするため材質を特定することはできず、実際には様々な種類のアルミ材が混ざり鋳込まれている。このような再利用材料で、かつ、砂型による鋳造においては材質の不均一性からアルミ鋳造材中に巣が生じやすく、また、砂の巻き込みなどの欠陥も発生しやすい。さらに、不均一な冷却速度に起因とする粗大結晶粒も多く存在することが想定され、中性子応力測定においては多くの難関・難問が存在する測定対象である。このような欠陥を含み品質的に不均一な製品では、商業的には価格と信頼性のバランスが重要となることから、破損の主な原因となりえる応

[2024105202]

力の評価、特にせん断応力の評価が重要となる。

Fig.1 にねじり負荷治具を装着したフランジサンプルを示す。今回はフランジの中央パイプにせん断応力を負荷することを目的として、中央パイプのフランジ端にねじりを加えるためのハンドルを装着した。Fig.1(b)にねじり用の治具を装着した様子を示す。図中の矢印方向に上下で負荷ねじを絞ってハンドルを回転させ、ねじり負荷を発生させる。また、Fig.1(c)に示すパイプの上下の2点にひずみゲージを貼付けている。上下のひずみ量が同じになるように負荷ねじを調整し、ねじりはこのひずみ量により評価する。また、ねじりひずみの測定のために、ひずみゲージの貼付け方向はパイプ軸に対して45°の方向となっている。

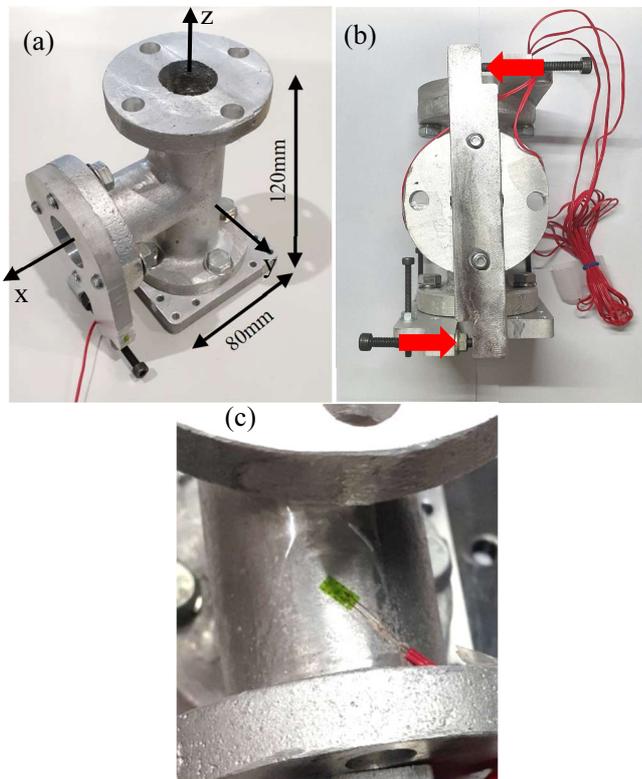


Fig.1 (a) Three-prong flange joint sample, (b) A setup of the handle jig for twisting, (c) A strain gauge attached at a 45-degree angle and is applied to both the top and bottom surfaces.

Fig.2 にオイラークレドール上にフランジサンプルを設置した様子を示す Fig.2(a)において、オイラークレドールは RESA の θ -2 θ 試料台上に設置され、オイラークレドールは χ 軸駆動と ϕ 軸による試料の回転を行う。さらにオイラークレドールの試料台には x-y ステージがセットされ、測定試料の x-y 方向への移動が可能となっているが z 方向への移動はできない。このため、上下の位置調整は Fig.2(b)の図中に矢印で示すフランジサンプルに履かせた台の長尺ねじの調整によりおこなう。これは手作業となるため RESA のプログラムで運転することはできない。

測定ではまず、フランジサンプルの高さを決定し、その後試料を x-y 方向に動かすことで中性子ビームの照射ポイントを決める。試料の位置が決まれば、後は任意の角度で測定プログラムを実行できる。

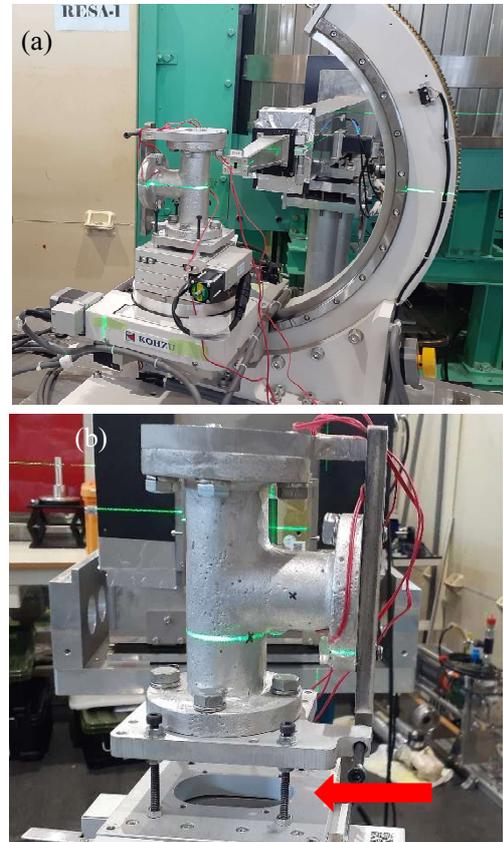


Fig.2 Setting on the Euler cradle for RESA system.

Fig.3 は RESA システムの回転軸を示す図である。オイラークレドールによる χ 軸駆動と ϕ 軸回転に加えて、今回 RESA 試料台の S_2 軸も利用した。

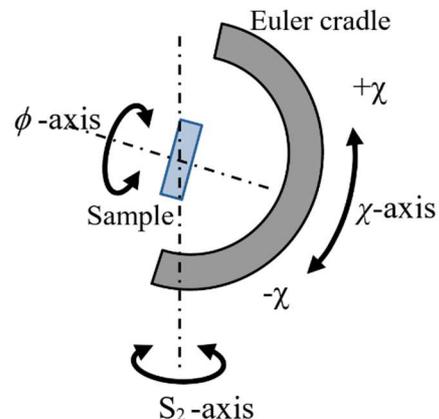


Fig.3 Schematic diagram of driving axes in RESA system.

[2024105202]

χ 軸駆動と ϕ 軸を決定したのちに S_2 軸の回転で測定面内における方向を選択できるようにした。これは χ 軸駆動と ϕ 軸回転だけでは測定方向が限られた方向になるためであり、 S_2 軸の回転を採用することで測定方向の選択肢が増えることになる。

Fig.4(a) に今回の測定方向を表す概念図を示す。 S_2 軸を使用することで広い走査面内で測定が可能となっている。また、Fig.4(b) に示すように、測定では $\pm 5^\circ$ の揺動をかけながら測定を行い、走査面内で 30° 毎に 5 方向の測定が可能となった。

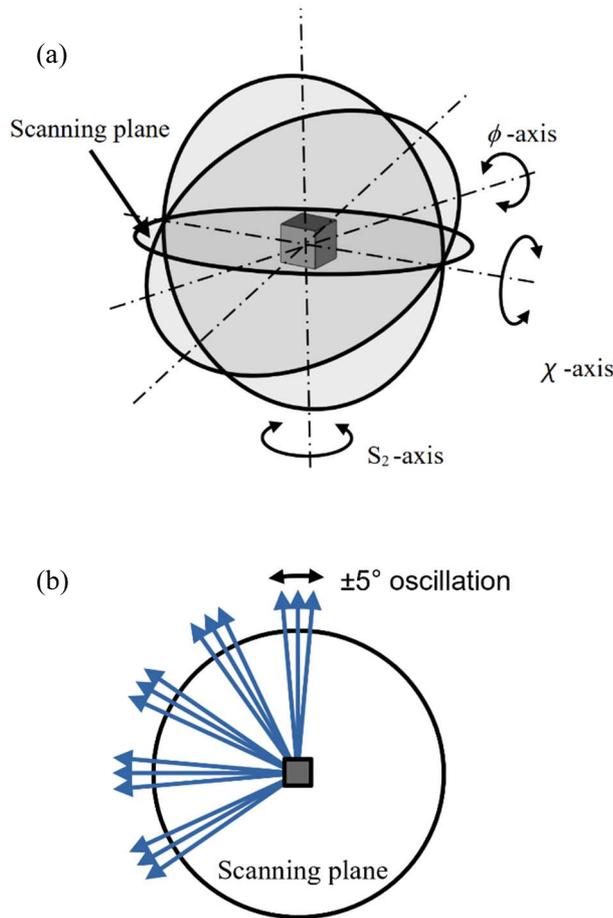


Fig.4 Schematic diagram of; (a) scan axes and scanning plane, (b) measurement directions and oscillation.

3. 座標系とひずみの座標変換式

通常、中性子応力測定では 3 方向の垂直ひずみから Hooke の式(1) を使用して応力値を算出する。しかしながら、粗大結晶を含む材料では計算に必要と

する方向に回折線ピークが出現しない場合がある。1 方向でもひずみの値が不明な場合は 3 つの応力値がすべて計算できなくなる。また、同様の理由から 3 方向の測定ができた場合でも、1 方向でもひずみの値が不正確な場合は 3 方向の応力に大きな影響(誤差)が出るということが知られている。

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{(1-2\nu)}{\nu} \varepsilon_x\} \\ \sigma_y = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{(1-2\nu)}{\nu} \varepsilon_y\} \\ \sigma_z = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{(1-2\nu)}{\nu} \varepsilon_z\} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x - y - z 軸からなる直交座標系が x' - y' - z' 軸の直交座標系に回転する変換を考える。Fig.5 は代表例として x 軸が x' 軸に回転した場合に元の x - y - z 各軸とのなす角度 (α, β, γ) を定義した座標系である。ここで単位ベクトルを考えて l, m, n をそれぞれの角度 α, β, γ の方向余弦とするとひずみの座標変換は式 (2) となる。

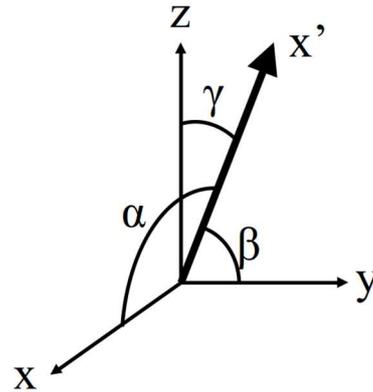


Fig.5 Schematic definition of the coordinate conversion.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x'} = & l^2 \varepsilon_x + m^2 \varepsilon_y + n^2 \varepsilon_z \\ & + 2(lm \gamma_{xy} + mn \gamma_{yz} + ln \gamma_{zx}). \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $l = \cos\alpha$, $m = \cos\beta$, $n = \cos\gamma$ である。また、他の直交方向のひずみも式(2)と同様に導出されるが、式(2)だけを用いれば十分である。実際の測定では x - y - z 軸を試料座標系とし、 x' - y' - z' 軸の装置座標系の回転で得られる少なくとも 6 方向の垂直ひずみが測定できれば、その方向余弦をパラメーターとして試料座標系におけるひずみを計算することができる。ここで求められた試料座標系のひずみは式(1)に代入することで応力値の算出が可能となる。さらに、6 方向以上の測定データが得られれば重回帰分析を行うことで精度の向上が期待できる。

各角度の関係については、オイラークレードルの中心軸が χ 軸、回転試料台の回転軸が ϕ 軸、さらに

[2024105202]

RESA 試料台の回転軸が S_2 軸である。座標変換の手順としては以下の通りとなる。まず、初期段階では Fig.1(a) で示す装置座標系と試料座標系は一致している。その後、 χ 軸回転により試料座標の y 軸回転が行われ、続いて S_2 軸回転により研究室座標の z 軸回転となる。この回転による座標変換は式(3)となり、方向余弦はマトリクスの第 1 行の $l=\cos\theta \cos\chi$, $m=-\sin\theta$, $n=\cos\theta \sin\chi$ となる。ここで S_2 軸の回転角度は θ で表現している。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos\chi & -\sin\theta & \cos\theta \sin\chi \\ \sin\theta \cos\chi & \cos\theta & \sin\theta \sin\chi \\ -\sin\chi & 0 & \cos\chi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (3)$$

本測定実験における測定条件を Table1 に示す。中性子回折装置の RESA を使用し、ピーク強度が 200 カウント以上になるように中性子の照射時間を調整している。

Table 1 Conditions of neutron stress measurement by RESA.

Wave length	1.554 Å
Slit size	5 × 5 mm
<i>hkl</i> plane	311
2θ angle	79.04°
Oscillation	±5° (2.5° step)
Fixed time	70-130 min. (over 200 counts)
Detector	1D (256ch.) 2θ=75°-86°

4. 実験結果と考察

今回の測定は±5°の揺動測定を行っている。揺動の方式は 2.5° ステップで目標角度を含む 5 回の測定を行い、得られた 5 つの回折線ピークを積算してピーク位置を求めている。Fig.6 に揺動で得られた 5 つのピークと積算したピークの一例を示す。

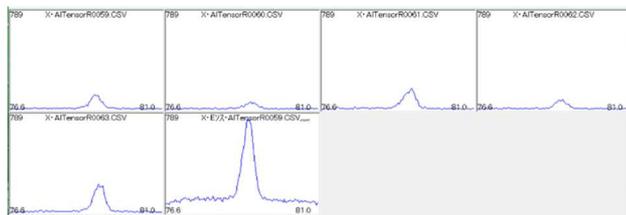


Fig.6 Peak profile of the oscillation measurement.

左上から 5 つが揺動による各ポジションでのピークプロファイルであり、最後のピークが積算されたピークである。積算ピークの強度が大きく、ピーク形状も安定していることが確認できる。また、揺動で測定された各ピークを確認すると、ポジションごとに強度が異なり粗大結晶粒の影響が出ていると考えられる。このような測定ポジションごとにピーク強

度が異なる現象は他の測定点においても同様の傾向が確認されている。

Fig.7 は有限要素法で解析した、フランジ継ぎ手の付け根部分におけるせん断応力の応力集中を示したものである。一般的にフランジ継ぎ手はこの根元部分からの破損が多いことから実測値との比較が必要である。特に、中性子応力測定でせん断応力を評価した例は少ないことから、せん断応力に起因する破壊を考察する上で重要な情報となる。

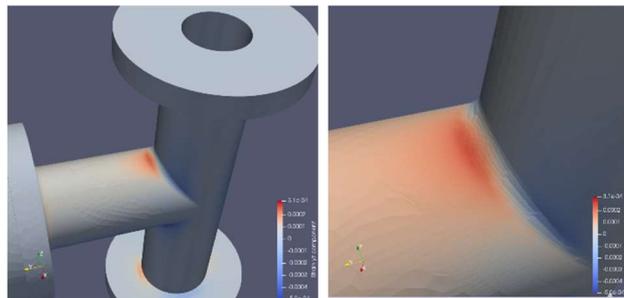


Fig.7 Results of shear stress analysis at the flange root using the Finite Element Method.

なお、今回中性子で測定した結果から応力/ひずみの計算を進めているが、少し疑問な点が出てきたことから急ぎ再度解析中である。最終的な結果は 2025 年 7 月 24 日(木)、25 日(金)に開催される、第 59 回 X 線材料強度に関するシンポジウムで報告予定である。今回の報告に間に合わなかったことをお詫びします。

4. 結言

粗大結晶を有するアルミ鋳造材の応力評価を行うことを目的として中性子応力測定を行い、以下の結果を得た。

1) 揺動法を用いた測定を採用し、十分な回折強度が得られる 6 方向以上のひずみデータを得ることができた。現在、せん断応力を含む 6 成分の応力値を計算中である。

2) 実際の測定結果と有限要素法による計算結果とを今後詳細に比較し解析方法の検討を行う予定である。