

中性子回折法による車両部品の内部残留応力測定

Internal Residual Stress Measurement using Neutron diffraction

利用者 久保 純、石田 圭太郎、久保田 悠美

Jun KUBO, Keitaro ISHIDA, Yumi KUBOTA

所属 日産自動車株式会社

キーワード 中性子回折、ひずみ測定、アルミニウム合金、揺動、結晶粒

1. 目的

日産自動車では低燃費車両開発の一環として、部品の軽量化技術開発を行っている。エンジンや車体部品の材料には軽量素材としてアルミ合金の採用が進められてきたが、軽量素材においては部品の耐久性性能保証はより難しいものとなるため、部品の疲労強度を左右する残留応力を把握することは重要である。今後さらに軽量化を進めていくためには、従来の計測手法であるひずみゲージによる表面残留応力測定だけでなく、部品内部の残留応力も詳細に把握することが必要となるため、中性子回折法による内部残留応力測定への適用が求められている。

そこで今回、エンジンや車体部品の材料となるアルミニウム鋳物およびアルミニウム展伸材において、中性子回折法の測定精度検証実験を行った。

2. 実験方法

4点曲げ試験によりAl合金製試験片内部にひずみ勾配を発生させ、中性子回折法とひずみゲージとの比較により測定精度検証を行った。

【試験片】

- ・材質：AC2A-T6（鋳物）、A5083-O（展伸材）
- ・寸法：20mm×20mm×140mm
- ・ひずみゲージ：上下面に各2～3枚、一方の側面に3枚。
中性子による測定値との比較用。
グリッド部寸法 5mm×1.4mm
- ・ひずみ測定方向：試験片の長手方向

【測定条件】

- ・波長： $\lambda = 2.22 \text{ \AA}$
- ・ゲージ体積：入射側に 3mm×3mmスリット、
検出器側に横3mm収束のラジアルコリメータ。
- ・回折面：Al 111 ($2\theta \sim 56.5^\circ$)

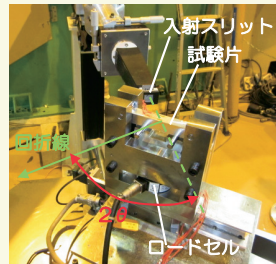


図1 実験の様子 (@RESA-2)

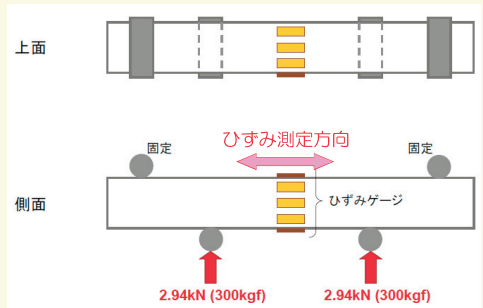


図2 4点曲げ試験片

【4点曲げ試験の方法】

図1の写真に示す専用治具を用いて、試験片に下部から曲げ荷重を加えた。治具下部のボルトを締めることにより荷重が治具内部に伝達し、最終的には図2のように、試験片下部の2ヶ所から均等に半分ずつの荷重が加えられる。今回は、荷重を加えていない状態を基準 (d_0) とし、このときの回折角 2θ と、試験片下部から2.94kN (300kgf) ずつの荷重を加えたときの 2θ から、ひずみを算出した。

3. 実験結果

3-1. 回折プロファイルについて

図3はAC2A材試験片のArea1-①測定点 (図6参照) にて試験片長手方向およびそこから 6.5° ずれた方向で得られた2分間の111回折プロファイルである。同じ測定時間であるが、強度は著しく異なる。これはAC2Aの結晶粒が大きく、この部位では長手方向に回折条件を満たす結晶粒がほとんどないもの、 6.5° ずれた方向には条件を満たす結晶粒が存在しているためだと考えられる。今回使用したAC2A試験片の平均結晶粒径は $300 \mu\text{m}$ 程度であり、A5083材試験片の $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度と比較して粗大である。そこで今回、AC2A材については試験片長手方向を中心に θ 角を $\pm 15^\circ$ の範囲で回転させる“揺動”操作を行いながらプロファイルを取得することで、回折強度を増加させた。

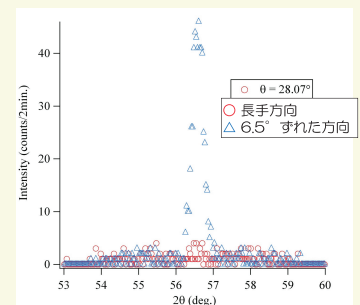


図3 AC2A試験片の方位による回折強度の違い。測定時間は各2分。

図4は、AC2A試験片のArea1-①測定点で $\pm 15^\circ$ の揺動操作を行った結果の回折プロファイルである。揺動を行うことにより回折強度は増大し、ピークが明確に現れた。このピークはガウス分布関数で近似できる。また、A5083試験片については揺動操作を行わなくても、短時間で図5のような十分な強度の111回折プロファイルが得られた。

尚、図4のプロファイルは図5と比較してバックグラウンド強度が大きくなっているが、これは鋳物の測定時間を展伸材の6倍に設定しているためである。

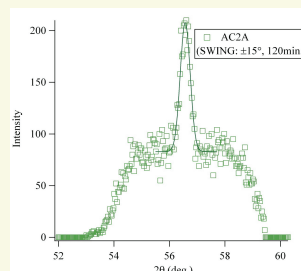


図4 AC2A試験片の回折プロファイル。測定時間は120分。

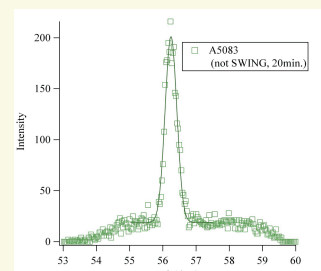


図5 A5083材の回折プロファイル。測定時間は20分。

3-2. 4点曲げ測定結果

図7および図8は、それぞれAC2A材とA5083材に試験片下部2ヶ所から2.94kN (300kgf) の荷重を加えた際のひずみ測定結果を示している。ひずみ ε については、回折プロファイルをガウス関数でフィットしてピーク角度 2θ を求めた上で、以下の式を用いて算出した。

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (\text{Braggの式})$$

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}$$

ここで、 d および d_0 はそれぞれ荷重を加えたときおよび加えていないときの111格子面間隔である。両材料ともひずみゲージはシミュレーション計算値とほぼ一致しており、想定通りの曲げ荷重が加えられているものと考えられる。

<AC2A試験片測定結果>

Area1-②やArea3-③では、ひずみゲージおよび計算値から最大で250 $\mu\varepsilon$ 程度のずれが生じている。このずれは、結晶粒が粗大であるために回折強度が不足しガウスフィット精度が悪化している、もしくは回折強度の大きい粗大結晶粒の重心とゲージ体積の重心とがずれているために幾何学的なピークシフトが起こっていることが原因と思われる。実際、ガウスフィット精度が最も悪かったArea1-②では、 d_0 測定時のピーク強度が60カウント未満であり、図4のArea1-①プロファイルの半分程度であった。測定精度をさらに向上させるためには、以下のような対策が考えられる。

- (1) 測定時間を増やし、回折ピーク強度を大きくする。これによりガウスフィット精度が改善できる。
- (2) 粗大結晶粒によるピークシフトを回避するため、試験片を中性子の散乱面内で180°回転させて裏側から回折プロファイルを測定し、表裏の平均値を採用する。

<A5083試験片測定結果>

A5083のように圧延や押し出しによって加工される材料では、結晶の方位が配向して集合組織を形成する。このような材料では、集合組織が成長している回折面では回折強度が非常に大きくなるが、その他の回折面では測定が困難となる。今回、A5083試験片長手方向については図5のように111回折の十分な強度が得られている。

4点曲げによるひずみ測定の結果は、どの測定点も一様にひずみゲージ・計算値よりも小さい値となった。ひずみゲージからのずれは、最も大きい場所で400 $\mu\varepsilon$ 程度であり、粗大結晶粒を有するAC2Aよりも大きい。ひずみ測定値がすべて圧縮側へシフトする原因は不明であるが、類似した成分組成であるAC2Aではこのような現象が見られないことから、結晶の集合組織化が測定精度に影響していると考えられる。

4. まとめ

2種類のAl合金材料について、4点曲げ試験により中性子回折法のひずみ測定精度を検証した結果、以下の知見を得た。

- (1) 粗大結晶粒を有するAl鋳物のひずみ測定では、揺動操作が不可欠である。今回は $\pm 15^\circ$ の揺動を行ったが、実際の車両部品はそれぞれ求められる機能・性能が異なるために様々な結晶粒径のものが存在するので、測定する部品により揺動角度を再検討する必要がある。
- (2) AC2A材の4点曲げ測定の結果、111回折による測定値のひずみゲージからのずれは最大で250 $\mu\varepsilon$ 程度であった。測定時間の追加や表裏回折ピークの平均値をとるなどの対策により、さらに精度を向上できる見込みがある。
- (3) A5083材では、111回折による測定値は最大で400 $\mu\varepsilon$ 程度のひずみゲージからのずれが生じた。中性子回折による測定結果がすべて圧縮ひずみ側へシフトすることについては、今後原因の解明に取り組む。

5. 参考文献

- (1) 齊藤 徹、鈴木 裕土、石橋 寿啓、友田 陽、日本機械学会論文集 (A編), 74巻 744号 (2008), pp.1128-1125
- (2) 山下 彩、齊藤 徹、鈴木 裕土 ほか、自動車技術会2008秋季大会前刷集, 137-08 (2008), pp.7-10

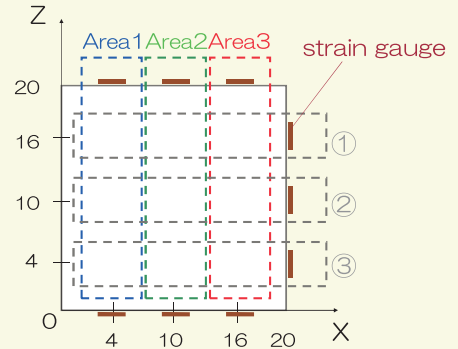


図6 測定位置の識別。試験片長手方向中央部の断面上を測定した。

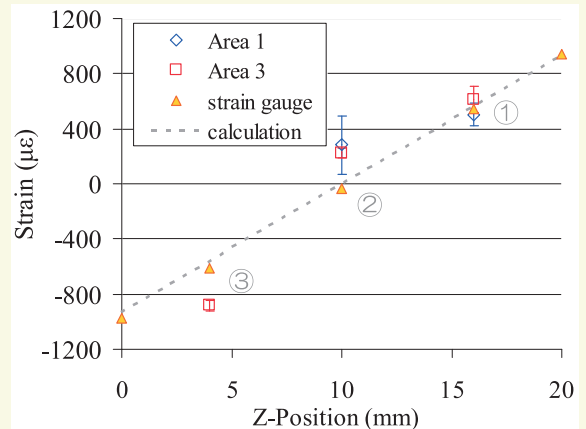


図7 AC2A材の測定結果。エラーバーは、ガウスフィットによりピーク角度を求めた際のエラー値を示す。

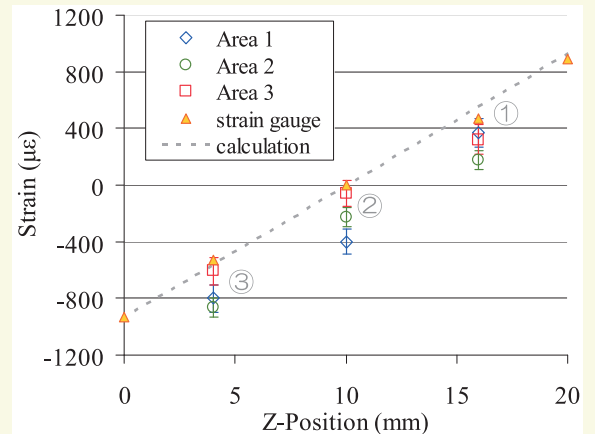


図8 A5083材の測定結果。