

中性子線回折法による航空機部品用素材の残留応力測定

Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress in Aircraft Parts Materials

坂井 紀夫¹⁾ 鈴木 博²⁾ 大久保 喜正³⁾ 箕田 正⁴⁾ 宮崎 悟⁵⁾

Norio SAKAI Hiroshi SUZUKI Yoshimasa OKUBO Tadashi MINODA Satoshi MIYAZAKI

¹⁾ アイコアルファ株式会社 ²⁾ 中部大学 ³⁾ 株式会社 UACJ 鋳鍛 ^{4,5)} 株式会社 UACJ

水焼き入れされた A7050 アルミニウム合金素材の深さ 100 mm まで（材料厚さは 200 mm）の格子定数分布を非破壊的に測定し、同素材の d0 クーポンとの差より RD, TD, ND 方向のひずみ分布を導出する。フックの法則を用いて RD, TD, ND 方向の残留応力分布を得て、通常用いる DHD 法による結果との比較検討を行う。

キーワード： 残留応力, 中性子回折法, アルミニウム合金,

1. 目的

航空機機械部品は構造上重要な部品であり高い精度が求められているが、部品の大型化、薄肉化に伴い加工歪が大きく出やすく、精度確保のために多大な工数と労力を要している。そのため加工歪の出にくい素材や加工法等が求められている。加工歪に影響を及ぼす素材の残留応力を測定し残留応力と加工歪の相関を求め、更に、残留応力の低減および適切な加工方法を実験と数値解析により見つけ、歪を最小化する指針、手がかりを作る。

本中性子回折実験研究により深度 100 mm 程度までの測定精度が保証されれば、航空機製造現場で用いられている深穴穿孔法（以下 DHD 法）との比較検討により、板厚 200 mm 程度までの素材における今後の航空機機械部品の工程設計に大きく寄与すると期待できる。

2. 方法

JRR-3 ガイドホール T2-1 ポートの中性子応力測定装置 (RESA) を使用した。JRR-3 熱出力は 20MW、使用した中性子波長は 1.675 Å、回折面は 311 を利用した。応力測定試料の形状は、300mm (RD 方向)、200mm (TD 方向)、100mm (ND 方向) の直方体であり、試料は RESA 装置に図 1（概念図）のように設置される。右下方の原子炉からガイド管を通して白色中性子が来る。単結晶モノクロメーター (Si400) によって、単色波長 (1.675 Å) が回折されて試料（水色）に照射され、約 87 度の 2θ 方向に出てくる 311 回折ビームを扇型のラジアルコリメーターを通して 2 次元中性子検出器で計測する。

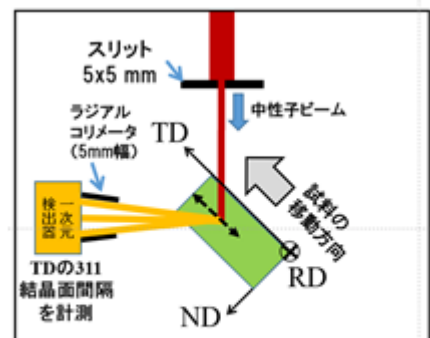
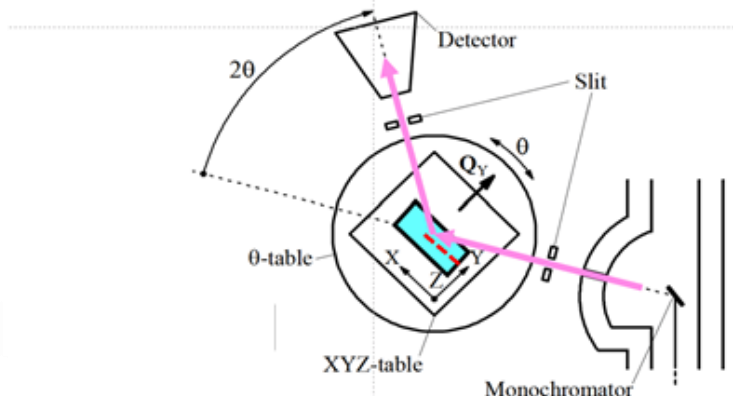


図1 応力測定用 A7050 ブロック (100x200x150mm³) の設置概念図

図2 TD 方向測定時の試料配置概念図

実際の測定では、まず、応力測定試料の TD 方向の 311 格子面間隔を測る測定を TD 面からの深さ

が 2.5mm から 42.5mm までは 5.0mm 毎に 9 点、42.5mm から 92.5mm までは 10.0mm 毎に 5 点行い、最後は深さ 100.0mm の測定とし、合計 15 点で行った。試料配置概念図を図 2 に示す。また、図 3 は TD 方向の測定を行うために試料の位置調整を行っている様子を示した写真である。次に同試料での ND 方向、d0 試料の RD, ND, TD 方向、応力測定試料の RD 方向、追加的な TD 方向測定を実施した。

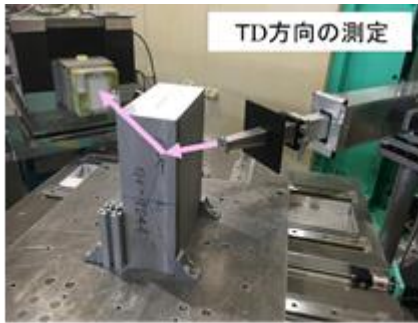


図3 TD方向測定の試料位置調整状況
(矢印は中性子ビーム経路予測)

3. 結果及び考察

多結晶試料の結晶配向を等方的と仮定すると、実験にて測定されたデータは正規分布であると考えられる。従って A7050-T74 試料のある方向 (例えば TD 方向) の 311 面の配向は、式 (1) のようにガウス関数+リニア関数+バックグラウンドで表現できて、それが 311 回折強度として観測される。

$$I(2\theta) = A \exp(-(2\theta - B)^2 / C) + D(2\theta - B) + E \quad (1)$$

測定データ $I(2\theta)$ を Microsoft Excel のソルバー機能を利用し (1) の関数に最小 2 乗誤差法でフィッティングして、ピーク強度 A、ピーク位置 B、正規分布標準偏差 $\sigma = \sqrt{C/2}$ 、半値全幅 $2.35\sigma = 2.35\sqrt{C/2}$ 、リニア関数の傾き D、バックグラウンド E 等を求めた。例えば、ND 方向測定的位置 100mm (試料の中心位置) において 120 分間測定したときの回折ピークは図 4 のようになった。実験値を (1) 式でフィッティングした計算値が赤線である。ピーク位置 B は 87.3662° 、ピーク強度 A は 417.5 カウント、ピークの半値全幅 FWHM は 0.4559° と求まっている。

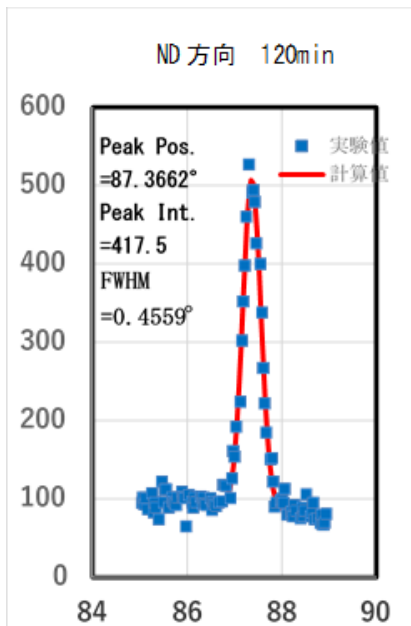


図4 応力試料の ND 方向回折ピーク強度 $I(2\theta)$
(測定位置は 100mm で、試料ブロック中心)

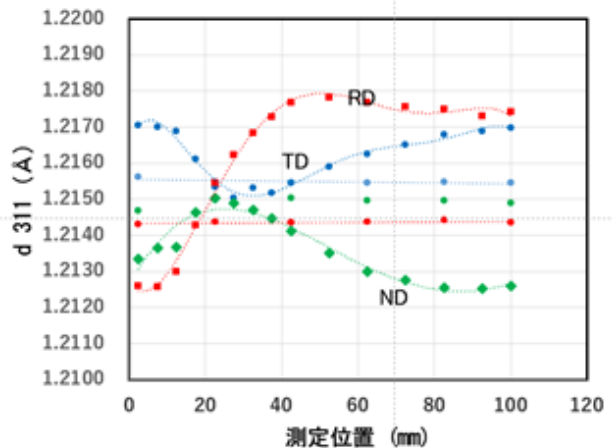


図5 応力試料、d0(無歪)試料の 311 格子面

同様に、応力試料についての測定データ 45 個についてフィッティングを行い、ピーク位置 B より 311 格子面間隔 $d_{311} (= 1.675/2\sin(B/2))$ を求めた。その値を図 5 に示した。図 5 における点線は単なる guide to the eye である。応力試料の各方向の 311 面間隔の振る舞いは、非常に大雑把に言えば、TD 面近傍の領域 (0~60mm) では熱処理効果や圧延効果によって大きく変化し、深さ 60mm 以上では大きな変化は無くなっているといえる。一方、 d_0 (無歪試料) 値は夫々の方向でほぼ一定値であったので、ひずみ計算の際には測定の平均値を用いた。

各位置での各方向の弾性ひずみは (2) 式、残留応力はフックの法則を適用した (3) 式

$$\varepsilon = (d-d_0)/d_0 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^P &= \frac{E_{hkl}}{(1+\nu_{hkl})} \left\{ \varepsilon_{11}^P + \frac{\nu_{hkl}}{(1-2\nu_{hkl})} (\varepsilon_{11}^P + \varepsilon_{22}^P + \varepsilon_{33}^P) \right\} && \text{P}_1 \text{方向の応力} \\ \sigma_{22}^P &= \frac{E_{hkl}}{(1+\nu_{hkl})} \left\{ \varepsilon_{22}^P + \frac{\nu_{hkl}}{(1-2\nu_{hkl})} (\varepsilon_{11}^P + \varepsilon_{22}^P + \varepsilon_{33}^P) \right\} && \text{P}_2 \text{方向の応力} \\ \sigma_{33}^P &= \frac{E_{hkl}}{(1+\nu_{hkl})} \left\{ \varepsilon_{33}^P + \frac{\nu_{hkl}}{(1-2\nu_{hkl})} (\varepsilon_{11}^P + \varepsilon_{22}^P + \varepsilon_{33}^P) \right\} && \text{P}_3 \text{方向の応力} \end{aligned} \tag{3}$$

で導出できる。ここで、P1 は例えば TD、P2 は ND、P3 は RD 方向を表し、 E_{hkl} 、 ν_{hkl} は、311 回折の際の弾性定数 E_{311} とポアソン比 ν_{311} である。これらの値については、日本材料学会 X 線委員会のガイドラインに従い、先ず純アルミニウムの E_{311} と ν_{311} を求め、それと準アルミニウムのマクロな E と ν との関係を用いて今回の A7050-T74 水焼入材ブロック試料にも適用して、実測値の E と ν から $E_{311} = 69.54 \text{ GPa}$ と $\nu_{311} = 0.3315$ を求めた。式 (2)、(3) を使って計算したひずみの値を図示したものが図 6 である。試料端では、RD、ND 方向は縮んでおり、TD 方向は伸びている。ひずみの測定位置に関する変化の様子は、格子面間隔で認めた特徴と同様と認められる。すなわち、非常に大雑把に言えば、ひずみは TD 面 (試料端) 近傍の領域 (0~80mm) では熱処理効果や圧延効果によって大きく変化し、深さ 80mm 以上では大きな変化は無くなって、試料端の影響が及んでいない。

また、残留応力を図示したものが図 7 である。ブロック試料の TD 面 (測定位置 0mm) 近傍では、TD 方向の応力 (表面応力) がほぼ 0 MPa と測定されており、この測定法の正しさを示している。一方、RD、ND 方向には約 150 MPa の圧縮応力が残っている。ND 方向の残留応力は、20~60 mm の範囲で引張応力を持った後に、70mm 以上の領域ではほぼゼロの応力値をとる。

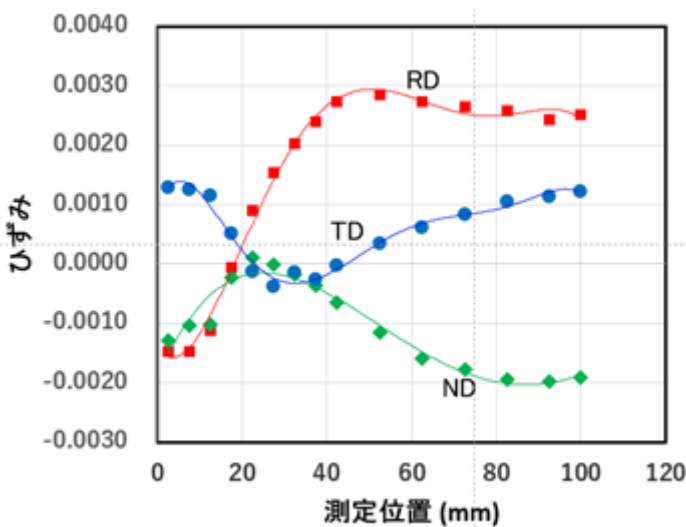


図 6 TD, ND, RD 方向のひずみ分布

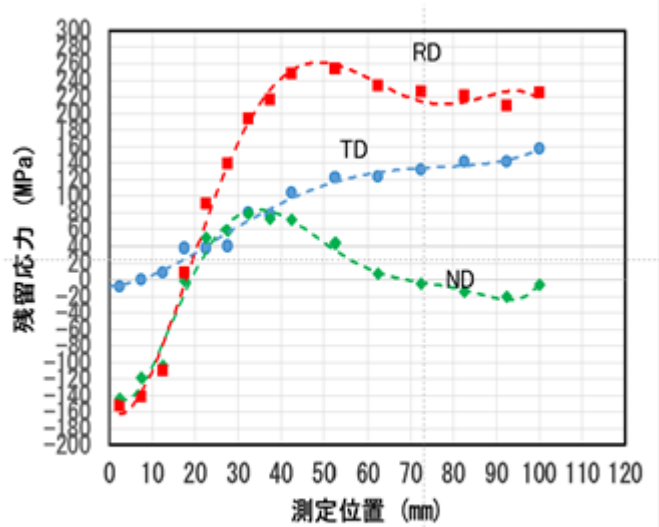


図 7 TD, ND, RD 方向の残留応力分布

TD 方向と RD 方向の残留応力は 0~60 mm の位置領域で増加し、70mm 以上の領域ではほぼ同じ値を持って

いる。残留応力においても 70~100mm 領域では試料端影響が無くなっている。ブロック試料中心点で RD 方向と TD 方向の残留応力はそれぞれ 224MPa, 157MPa で、67 MPa の違いがある

今回の試料と全く同等の A7050-T74 水焼入材ブロックについて UACJ 社で実施された ND 面から穿孔する DHD 法による残留応力測定位置のいくつか、中性子回折法による測定位置と合致しており、その結果は同様の値を示しているとの情報もたらされた。DHD 法による残留応力測定データから、中性子回折法による結果と比較できる測定結果は位置 30mm と 100mm での TD, RD 方向の残留応力 (4 データ) であり、その結果は表 1 に纏められている。この値を今回の測定結果に中抜き四角印で追加したものが図 8 である。TD 方向の測定結果は DHD 法と中性子回折法で極めて良い一致を見ている。一方、RD 方向については、DHD 法の値は中性子回折法の値より約 20% 小さい。この違いの原因を調べるために、ひずみ・残留応力導出過程を何度か検証したが、問題点は見いだせなかった。従って、この違いの原因は現在明らかにできていない。このような状況、即ち、一部に若干の絶対値の違いはあるものの、当社および関連社において、身近な DHD 法によって残留応力を測定すれば、破壊的手法にもかかわらず、非破壊的な中性子回折法とほぼ同じ測定結果が得られることが判った。

表 1 DHD 法による残留応力

DHD法測定結果 (UACJ R&D)		
Dir.	STRESS (MPa) @ 30mm	STRESS (MPa) @ 100mm
TD	68	158
RD	124	175

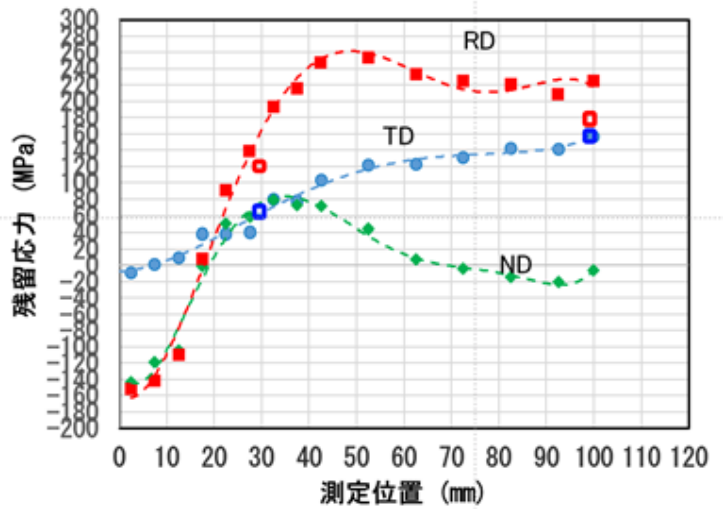


図 8 DHD法と中性子回折法との比較

(表 1 の DHD 法測定結果を TD, RD 方向に夫々青、赤の中抜き四角印で示す)

4. 謝辞

本実験にご協力頂いた日本原子力研究開発機構 物質科学研究センターの諸岡聡氏、放射線利用振興協会 中性子利用技術部の森井幸生氏に感謝申し上げます