405 引張変形中の中性子飛行時間法その場測定による 自動車用アルミニウム合金の変形機構と解析

Analysis on deformation mechanisms of aluminum alloy for an automobile part
by in situ TOF neutron diffraction

○ 片柳 和恵 (茨大院) 森田 健介 (茨大院・現フルヤ金属) 塩田 佳徳 (茨大院)
友田 陽 (茨大院) 神山 崇 (高エネ機構) 寺門 一佳 (日製)

Kazue KATAYANAGI, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitati, Ibaraki 316-8511

Kensuke MORITA, Graduate student of Ibaraki Univ, now Furuya metals Co. Yosinori SIOTA, Graduate student of Ibaraki Univ.
Yo TOMOTA, Graduate school of science and engineering. Takasi KAMIYAMA, KEK. Katsuyoshi TERAOKA, Hitati Co.

In a complex-shaped parts, machining is employed before and after heat-treatment. Residual stress is introduced in the production process influenced by various factors, and it might induce several defects in processing or fatigue fracture during service. In-situ neutron diffraction during tensile loading was performed for two kinds of Al-Si alloys, forged-solutioned and die-cast, to determine stress partitioning between Si and Al as well as among [hkl] family grains. Such phase or intergranular stresses are important to evaluate residual stresses in a component.

Key Words: Aluminum alloy, Neutron diffraction, TOF, Solution heat treatment, Forging, Die-casting, Automobile part

1. 緒言

自動車エンジン部品用の2種のアルミニウム合金部品(溶体化処理材(鍛伸材)とダイキャスト材(鑄造材))の健全性を検討した。複雑形状部品では、熱処理前後に切削加工が入るため、製作プロセスにおいて各種要因により残留応力が入り、加工不良を招いたり、疲労破壊などを助長することがある。機械構造物の多くには組み立てや表面処理、溶接による残留応力が内在し、実際に材料に作用する応力は、初期応力と外応力の和となる。見かけ上の外力が作用しない場合でも部材が破壊することもあり、初期応力の評価は重要である。中性子の高い透過能を利用すると、機械部品、構造材料の内部ひずみを直接測定でき、非常に興味深い情報が得られる。よく使われるX線応力測定では外部表面の測定しかできないので、先に中性子回折を用いて内部の応力状態の測定を試みた⁽¹⁾。残留応力を正しく評価するためには、構成相(主としてAl母相と第2相のSi)間の応力分配やAl母相結晶粒の方位による応力状態を把握することが必要であった。そこで本研究では、Si粒子の分散状態やAl母相の組織が異なる鍛造材(溶体化処理)とダイキャスト材を用いて、引張変形中のその場中性子回折により個々の粒内の変形挙動を調べた。

2. 実験方法

2-1. 供試材と熱処理

<溶体化処理材・AHS2> Cu 3.5~5.0%, Si 10.5~12.5%, Mg 0.4~0.8% Fe 0.5%以下のAl合金の鍛造材を用いた。この試料は、日立製作所と昭和電工で熱間鍛造後、溶体化処理した機械部品である。

<ダイキャスト材・ADC12> 上記とほぼ同じ成分のAl合金鑄造材である。機械的特性、鑄造性に優れた高力合金であり、自動車エンジン部品にはよく使われる。

2-2. 組織観察

小型試料を切り出し、観察材とした。表面は、湿式研磨紙を用いて機械研磨を行ったあと、ダイヤモンドスラリーを用いた研磨を行い、鏡面に仕上げた。水酸化ナトリウム溶液を用いてエッチングを行った後、光学顕微鏡、レーザー顕微鏡、SEMで観察した。

2-3. 引張試験

丸棒形状ねじ式の、 $\phi=4\text{mm}$ の試験片を用いて、まず予備実験として、INSTRON 社製デジタル万能材料試験機を用い常温で引張試験を行った。その後、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の中性子散乱施設(KENS)に設置されている高分解能粉

末回折装置(SIRIUS)を用いて、引張変形中その場中性子回折実験を行った。

2-4. 引張変形中その場中性子回折

引張試験機をSIRIUSの試料チャンバーに入れ、減圧下で中性子回折を行った。90° detector bankは、入射ビームから見て右側(R)と左側(L)に設置されていて、試験片の引張方向のひずみはL-bank、垂直方向のひずみはR-bankで同時に測定できるようになっている。R-bankおよびL-bankはそれぞれ3つのbankの回折データを足し合わせて統計精度を上げている。測定手法は、適当な荷重で伸びを一定に保ち、その間に測定を行うというものである。このようにして、まず初期ひずみ d_0 を得るための荷重ゼロ(応力フリー)時の測定を行い、最大2.6kNまで負荷した後、除荷した。

中性子源はパルス中性子源で、白色中性子を用いた波長分散型(エネルギー分散型)の測定法、すなわち飛行時間法(TOF法)がとられる。回折プロファイルは、横軸が d 、縦軸がカウント数となる。

3. 実験結果と解析

3-1. 組織と引張試験

レーザー顕微鏡で観察した試料(AHS2)のミクロ組織やAl-Si状態図から、Alに対するSiの固溶限度は0.05%以下であり、AlマトリックスにSiが析出している。AHS2では鍛造後、溶体化処理を施してあるが、内部と外部にSi粒子の分布が見られた。鍛造時にひずみの分布ができ、その欠陥エネルギーが大きい部分で、多くSiが析出したと思われる。両材を比較すると、構成相、Si形状等、組織が異なる。

また、引張試験より得られた公称応力-ひずみ曲線(Fig. 1)からは、AHS2とADC12では、引張強さは300MPa前後とあまり変わらないが、全伸びはADC12ではだいぶ小さい。

3-2. 中性子回折結果

SIRIUSで測定した引張試験前の、基準となる中性子回折プロファイルをFig. 2に示す。図中に示す7つの回折面(Alの4面とSiの3面)のピークについて、それぞれSingle Peak Fittingを行った。Fig. 2に示すように、強度にL, R-bankの差はほとんど見られず、集合組織は弱い。両材ともAlとSiからなるが、AHS2のプロファイルのAl(111)とSi(111)のピーク間に、金属間化合物の析出によるものと思われるピークがわずかに確認できる。

また、Fig. 3に示すように、ピーク位置は両材とも荷重負荷毎にL-bank(引張方向)では右側へ、R-bankでは左側へ

シフトする。すなわち、引張方向には引張のひずみが、それに垂直な方向には圧縮のひずみが生じた。

3-3. Single peak fitting

TOF 法で得られる回折プロファイルは非対称であるため、ガウス関数のみで表すことができない。そのため本解析では、Pseudo-Voigt 関数・Gauss 関数・Exponential 関数の混合関数として回折データを近似することにより、各ピーク位置を決定した。この時の未知数はピーク位置を含めて8個で、残差二乗和が最小となるようにこれらを決定した。このようにして決定された面間隔 d から格子面ひずみを次式により得る。

$$\varepsilon_{hkl} = (d_{hkl} - d_{hkl}^0) / d_{hkl}^0$$

ここで、基準の面間隔 d_{hkl}^0 は、解析により得られた引張前の面間隔とした。L-bank における格子面ひずみと負荷応力の関係を Fig. 4 に示す。回折弾性係数は Al より Si の方が大きく、弾性変形域の格子面ひずみは Si の方が小さい。塑性域でも Al と Si の応力分配を確認することができる。外力に伴う格子面ひずみの変化から、第2相 Si は母相 Al より強いことが分かる。すなわち、Al 母相が優先的に塑性変形するために Si に大きな応力がかかり、Al 母相の応力は低くなる。測定しているのは弾性ひずみ（格子面ひずみ）なので、Si 粒子が強化相として機能していることがよくわかる。このことは、除荷後の格子面ひずみを整理した結果からもわかるが、さらに両材とも、引張方向では Si が広がった分、Al が圧縮のひずみになっている。ここで、Si に関して、引張方向にも垂直方向にも引張のひずみが生じているのが特徴的である。これは、今回解析できなかった面がその分のひずみを分担しているものと考えられる。

Fig. 1 Nominal stress-strain curves of the Al-Si alloy obtained by tensile test

Fig. 2 Diffraction profile before applying tensile load.
ADC12; a: Longitudinal diffraction, b: Transverse diffraction
AHS2; c: Longitudinal diffraction, d: Transverse diffraction

Fig. 3 An example of peak shift (L-bank)

Fig. 4 Relation between lattice strain and applied stress in longitudinal direction in ADC12(a), and AHS2(b)

4. 結言

ミクロ組織状態の異なる鍛造材とダイキャスト材の Al-Si 系合金を用いて、引張変形中のその場中性子回折実験を行い弾塑性変形挙動を検討した。その結果、母相 Al と第2相 Si 間で、弾性域および弾塑性域で生じる応力分配挙動を明らかにした。この応力分配は、母相 Al 内でも結晶方位によって起こり、製品の残留応力測定で考慮する必要がある。

参考文献

- (1) 森田健介 修士論文, 茨城大学, (2005), 第2部 / 寺門一佳 他 第54期日本材料学会総会 学術講演会論文集, (2005), pp. 165-166