

アルミニウム合金の引張変形時における集合組織の変化

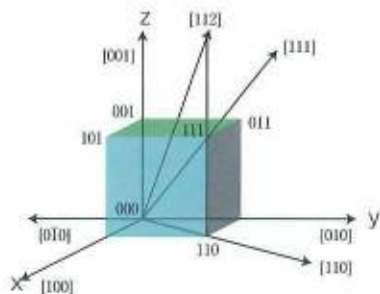
アルミニウムは比重が鉄の約1/3程度と軽く、かつ添加元素や調質などにより強度、延性などの材質制御が可能であることから、各種輸送機部材の鉄鋼代替材料としても注目されている。

アルミニウム合金の機械特性、成形性は集合組織が支配因子であることが多く、すなわちアルミニウム合金を活用するには集合組織の制御が重要な課題となる。

本稿では、アルミニウムの結晶構造と一般的な集合組織の考え方、さらに引張変形を加えた時に生じる集合組織の変化を中心に、代表的な集合組織の概要について紹介する。

アルミニウムの結晶構造 (ミラー指数)

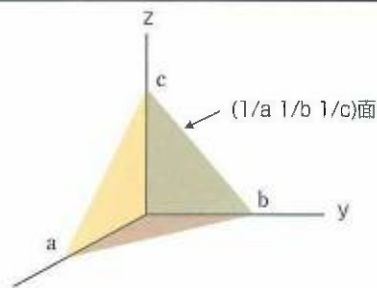
アルミニウムの結晶構造は面心立方格子であり、第1図に示すような3辺の長さが等しく、かつ互いに直交した単位格子が集まったものである。その結晶の面や方向は、ミラー指数をもちいて表示する。原点とX,Y,Z軸上の座標点u,v,wを結ぶ直線の向きを[uvw]方向と表す。



第1図 単純立方格子の代表的な結晶方向

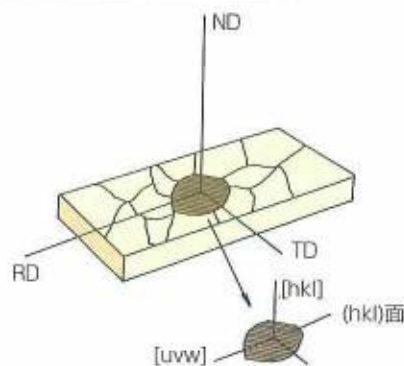
第2図に示すように結晶内のある面が結晶座標軸x,y,zと原点からの距離a,b,cで交わるときその結晶面は(1/a 1/b 1/c)面とし、最小整数比で(hkl)で表す。立方晶の場合(hkl)面の法線方向は[hkl]であるから(hkl)面内に[uvw]方向があれば次式の関係 $hu+kv+lw=0$ が成り立つ。

この式を満たすようにh,k,l およびu,v,wに順番を入れ替えて得られる等価な結晶方位群をまとめて{hkl}<uvw>と表す²⁾。



第2図 結晶面の定義

第3図²⁾に示すように、圧延した板では圧延面法線方向(normal direction)をND、圧延方向(rolling direction)をRD、圧延直角方向(transverse direction)をTDと通常略称して表示される。



第3図 ミラー指数による結晶方位の定義²⁾

1) 小原嗣郎：金属材料概論(1991), p.35-36, 朝倉書店

2) 稲垣裕輔, 鈴木清一：軽金属, 第52巻 第11号 (2002), p.494-499

集合組織とは

われわれが日常目にする多くの工業材料は、多数の結晶粒が集まった多結晶体であり、通常個々の結晶粒の方位はランダムな方向を向いている。しかし、塑性加工や熱処理などの製造工程中に特定の方向にそろう場合がある。この特定な方向を

優先方位と呼び、優先方位を持つ多結晶体のことを、集合組織を持つ材料と呼ぶ。塑性加工による集合組織の形成は、特定の結晶面と結晶方向でのすべりに起因した結晶回転の結果である。

次に代表的な集合組織について紹介する。

引張変形集合組織

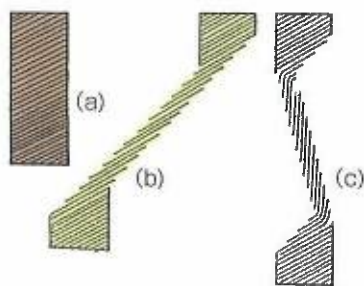
金属材料を引張変形させることにより、塑性変形に対応した結晶粒のすべり変形により結晶回転がおこり引張変形集合組織が形成される。

金属材料を引張変形すると、すべり線が現れ、ある面のある方向に沿ってすべり変形(せん断変形)が集中的におこる。一般にすべり方向は最も

原子密度の高い方向で、すべり面も最も密な面とされている。面心立方晶であるアルミニウムは<110>方向がすべり方向、{111}面がすべり面となる。アルミニウムの単結晶体にせん断応力を加えるとすべり変形のみを生じることから、結晶が第4図³⁾(a)から(b)に示すように結晶方位は変化しない。

3) 長島晋一：集合組織(1984), p.86-87, 丸善

しかし通常の短軸引張では、第4図(c)のような引張軸芯に沿った変形を余儀なくされ、結晶回転をおこす³⁾とされている。



第4図 結晶のすべり変形³⁾

従って、多結晶体については個々の結晶が回転をおこして引張方向に結晶の向きがそろい集合組織が形成する⁴⁾とされている。引張変形集合組織の形成過程を示す事例として、1000系、5000系 (Al-Mg)、6000系 (Al-Mg-Si) 板材を引張試験後、後方散乱電子回折法⁵⁾ (EBSP法) で観察した結果を示す。

観察結果は引張軸方向 (=RD) から見たときの

結晶方位を逆極点図の単位ステレオ三角形で色付けしたマップで示した。

第5図に1000系の観察結果を示す。ランダムな状態から変形とともに結晶回転して青色で示された<111>と、紫色で示された<112>方位をもつ結晶粒が増加しており<111>と<112>を優先方位とする集合組織が形成される様子がわかる。

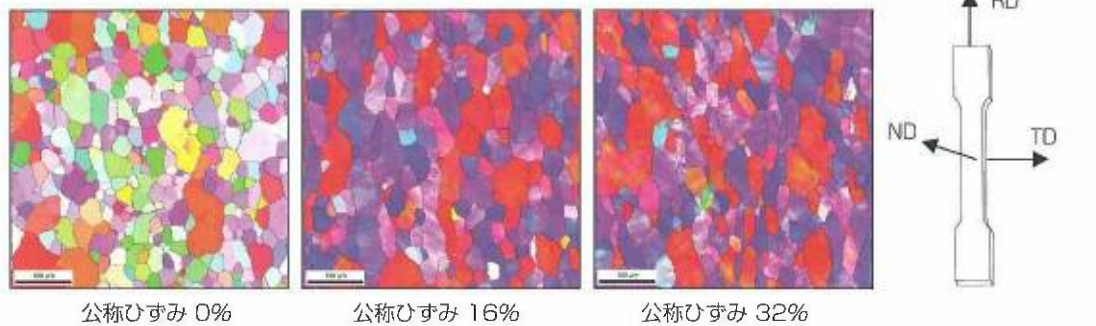
第6図に5000系の観察結果を示す。変形により結晶回転して<111>を優先方位とする集合組織が形成される様子がわかる。

第7図に6000系の観察結果を示す。変形により<111>と、赤色で示された<001>を優先方位とする集合組織が形成される様子がわかる。すなわち、アルミニウム合金は合金系により、固溶・析出形態がさまざまであることから、結晶の変形や回転挙動に違いが生じ、結果的に合金系によって集合組織形成過程が異なってくると考えられる。

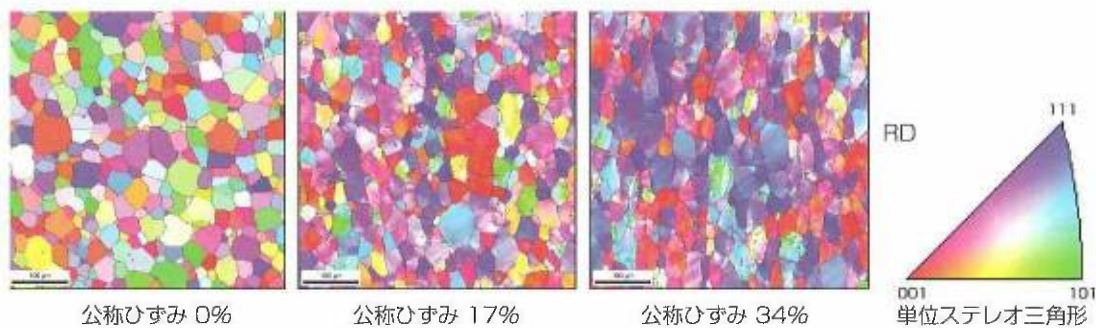
観察結果では、1000系が5000系、6000系と比べ少ないひずみ量で集合組織を形成していることが認められる。従って、材質制御には、材料ごとに集合組織形成過程を把握することが重要である。

4) S.Ohtani, H.Inagaki: Z.Metallked.,第94巻第9号(2003), p.983-992

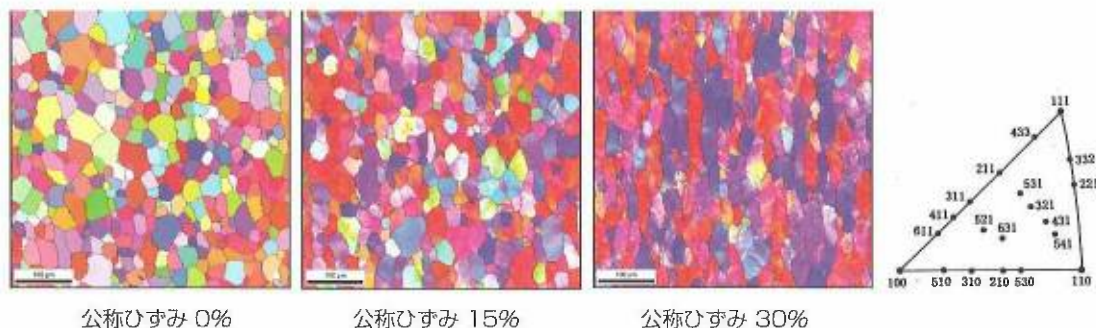
5) 梅沢修:熱処理,第41巻第5号(2001), p.248-257



公称ひずみ 0% 公称ひずみ 16% 公称ひずみ 32%
第5図 1000系Al合金の引張軸方向から見た逆極点図マップ



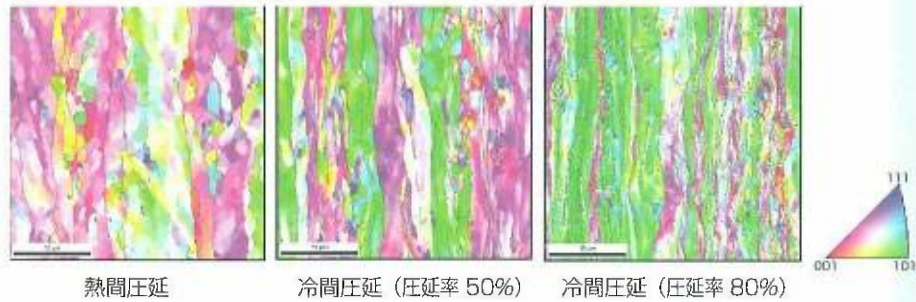
公称ひずみ 0% 公称ひずみ 17% 公称ひずみ 34%
第6図 5000系Al合金の引張軸方向から見た逆極点図マップ



公称ひずみ 0% 公称ひずみ 15% 公称ひずみ 30%
第7図 6000系Al合金の引張軸方向から見た逆極点図マップ

圧延集合組織

圧延加工により形成される集合組織は、熱間圧延、温間圧延、冷間圧延した場合でそれぞれ異なり、また板厚方向で不均一を生じる場合もある。アルミニウム合金を熱間圧延した場合に形成される熱間圧延集合組織は、一般に圧延面に平行に $\{110\}$ 面、圧延方向に $\langle 112 \rangle$ 方向を向いた $\{110\}\langle 112 \rangle$ (Brass方位) 方位が発達する。これは、 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 方位は再結晶しにくく、熱間圧延後も残留しやすいためである。また、冷間圧延した場合には α -fiber、 β -fiberと呼ばれる優先方位群が形成されるとされており、 α -fiberには $\{110\}\langle 001 \rangle$ (Goss方位) $\sim \{110\}\langle 112 \rangle$ までの方位が属し、 β -fiberには $\{110\}\langle 112 \rangle \sim \{123\}\langle 634 \rangle$ (S方位) $\sim \{112\}\langle 111 \rangle$ (Copper) 方位までが属する。



第8図 Al合金の熱間圧延組織および冷間圧延組織

一般に圧延率が60%以下の場合では圧延率の増加とともに α -fiber、 β -fiberが共に強く発達し、高圧延率では、 α -fiberが弱くなり β -fiberが強く発達するとされている。

第8図に熱延板を圧延率80%まで冷間圧延したアルミニウム合金板のEBSP観察結果を示す。第8図から圧延率80%において黄緑色で示された圧延組織が観察され $\{110\}\langle 112 \rangle$ 方位を優先方位とする集合組織が形成されていることがわかる。

再結晶集合組織

金属の再結晶後に観察される集合組織を再結晶集合組織とよび、一般に冷間圧延後、焼鈍したアルミニウム合金板は $\{100\}\langle 001 \rangle$ (cube方位) 方位と $\{123\}\langle 634 \rangle$ (R方位) 方位が優先的に配向するとされている。第9図に第8図の圧延率50%材を焼鈍し、EBSP観察した結果を示す。第9図から赤色で示された結晶粒が観察され $\{100\}\langle 001 \rangle$ 方位が優先的に配向している様子がわかる。

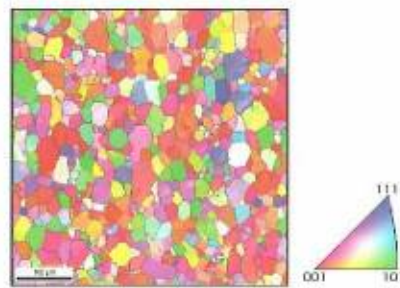
再結晶集合組織の形成機構には一般に以下の3通りの説がある。

- 1) 優先方位核生成説(Oriented nucleation theory): ある方位の圧延組織からは、ある方位の再結晶粒しか生まれてこないとする説。
- 2) 選択方位成長説(Oriented growth theory): 生成する再結晶核の方位はランダムであるが、その中で特定の有利な方位関係にある再結晶核が他の方位の結晶核を吸収し、急速成長して再結晶集

合組織の主要方位となるとする説。

3) Oriented nucleation and Oriented growth theory: (1)と(2)の説をまとめた説。

一般に再結晶核の生成領域は、圧延変形時に生成された局所的に歪の高い領域であり、この領域に生成した加工組織であるセル組織は焼鈍中に内部の転位が減少し、セル壁でも転位の整理(相互消滅や同符号転位の整列)が進んでサブグレインを形成するとされている。



第9図 Al合金の再結晶組織

集合組織解析

次に集合組織の評価方法について紹介する。従来、集合組織の解析はX線回折法⁶⁾をもちいて正極点図、逆極点図、結晶方位分布関数(ODF)を求めてきたが、最近の集合組織解析には電子回折法によるEBSP法も、もちいられるようになってきた。

この背景にはEBSP法は、X線回折法と比較すると比較的短時間で測定、解析ができること、個々の結晶粒の方位を識別できることが挙げられる。しかしEBSP法は試料に対する測定領域が狭く、

得られる情報は試料の局所的な情報であることに注意する必要がある。

アルミニウム合金を活用するには集合組織制御が重要であり、集合組織の定量的解析評価は不可欠である。当社の圧延・熱処理から機械・成形試験・組織解析までの一連の試作・評価技術で、お客様のニーズに応じた材料開発を支援してゆきたいと考えている。

[加古川事業所 技術室 大谷茂生]

6) 軽金属学会編:アルミニウムの組織と性質 (1991), p.534-645