

# 224 柱状晶を有するAl-Cu合金の弾性係数の測定

埼玉大学 工学部 ○加藤 寛  
吉川敬治

## 1. 緒言

組織上の異方性を有する金属材料は機械的性質にも異方性を示す。本研究では鑄造時に生じ易い柱状晶組織を有するAl-2wt%Cu合金の弾性的異方性に注目し、実験的に弾性係数を求めた。従来、弾性係数の測定は単結晶あるいは巨視的に等方な多結晶材料についてよくなされているが、本研究におけるような異方性を有する多結晶材料については圧延した材料以外に測定された例は少ない。そこで、弾性係数を静的に測定する方法としての引張り試験、ならびに動的測定法としての超音波試験をとりあげ、まず、両測定結果から弾性係数を実験的に決定するための関係式を導出した。両試験で得られた測定結果をこれらの関係式に代入して弾性係数を算出し、比較した。次に、凝固組織中には溶質偏析が存在しており、弾性的性質に影響を及ぼしていると考えられる。この点より、鑄塊を熱処理して偏析を減少させた場合の弾性係数についても測定を行い、溶質偏析などの材料内の不均質性の影響についても調べた。

## 2. 弾性係数の算出

柱状晶組織を有する材料は一般に垂直異方性を示すと考えられる。したがって、図1のように座標系を取った場合の応力-ひずみ関係は、

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & A-2N & F \\ A-2N & A & F \\ F & F & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{pmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

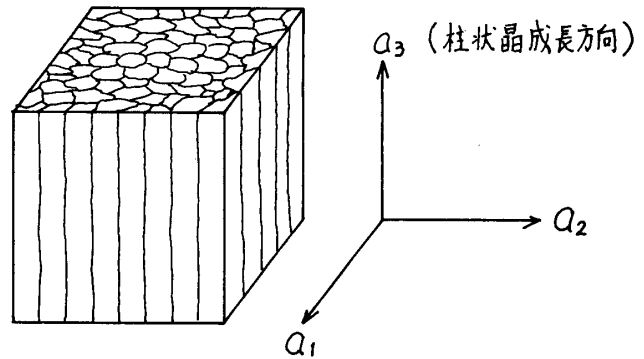


図1 柱状晶組織に関する座標系

### (1) 引張り試験

(1)式の関係に従う材料を図2に示すようにa3軸から角度θだけ傾いた方向に引張るものとする。この場合のヤング率 (E<sub>z</sub> = σ<sub>z</sub> / ε<sub>z</sub>)、ポアソン比 (ν<sub>xz</sub> = ε<sub>x</sub> / ε<sub>z</sub>, ν<sub>yz</sub> = ε<sub>y</sub> / ε<sub>z</sub>) と(1)式中の各弾性係数A, C, F, L, Nとの関係は、

$$E_z = 4 (ACLN - CLN^2 - F^2LN) S^{-1} \quad \text{---- (2)}$$

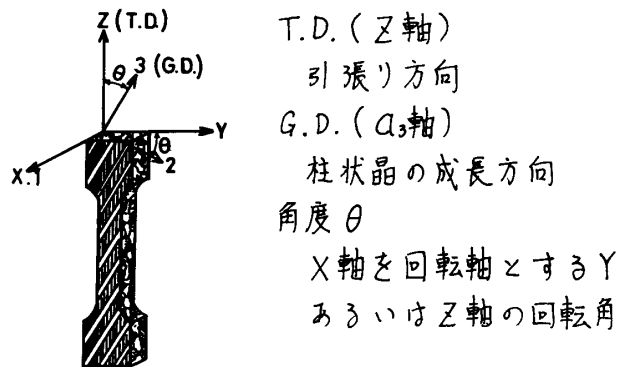


図2 引張り試験片に関する座標系

$$\nu_{xz} = \{ (ACL - F^2L - 2CLN) \sin^2 \theta + 2FLN \cos^2 \theta \} S^{-1} \quad \text{---- (3)}$$

$$\nu_{yz} = \{ (-ACL - 4ALN + 4LN^2 + 4ACN - 4CN^2 - 4F^2N + F^2L - 4FLN) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + 2FLN \} S^{-1} \quad \text{---- (4)}$$

$$S = (ACL - F^2L) \sin^4 \theta + 4(ACN - CN^2 - F^2N - FLN) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + 4(ALN - LN^2) \cos^4 \theta \quad \text{---- (5)}$$

となる。ここで、 $n$ 方向 ( $n \geq 3$ ) の各角度 ( $\theta_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ) におけるヤング率 ( $E_i^z$ ), ポアソン比 ( $\nu_{xz}^i$ ,  $\nu_{yz}^i$ ) が測定されると, 最小二乗法により得られる次の関係により,  $x_j, y_k, z_k$  ( $j = 1 \sim 3, k = 1, 2$ ) が求められる。

$$\begin{bmatrix} S_3 & S_6 C_2 & S_4 C_4 \\ S_6 C_2 & S_4 C_4 & S_2 C_6 \\ S_4 C_4 & S_2 C_6 & C_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E S_4 \\ E S_2 C_2 \\ E C_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} S_4 & S_2 C_2 \\ S_2 C_2 & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x S_2 \\ P_x C_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} S_4 C_4 & S_2 C_2 \\ S_2 C_2 & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_y S_2 C_2 \\ P_y \end{bmatrix}$$

$$\text{ただし, } S_p C_q = \sum_{i=1}^n (\sin \theta_i)^p (\cos \theta_i)^q, \quad E S_p C_q = \sum_{i=1}^n (1/E_i^z) (\sin \theta_i)^p (\cos \theta_i)^q$$

$$P_r S_p C_q = \sum_{i=1}^n (\nu_{rz}^i / E_i^z) (\sin \theta_i)^p (\cos \theta_i)^q$$

これらの値を以下の式に代入することにより, 弾性係数  $A, c, F, L, N$  が求められる。

$$N = \frac{1}{4(ac - cn - f^2)l}, \quad A = \frac{aN}{n}, \quad c = \frac{cN}{n}, \quad F = \frac{fN}{n}, \quad L = \frac{lN}{n}$$

ただし,

$$n = \left( \frac{\alpha^2 - \beta x_3 / 4}{r(\beta - x_1)} \right)^{1/3}, \quad l = rn, \quad f = \frac{\alpha}{ln}, \quad c = \frac{\beta}{ln}, \quad a = n + \frac{x_3}{4ln}$$

$$\alpha = (y_2 + z_2) / 4, \quad \beta = (x_1 - y_1) / 2, \quad r = (x_1 - \beta) / (x_2 / 4 + \alpha)$$

## (2) 超音波試験

柱状晶組織中を伝播する弾性波の速度と弾性係数との関係は, 六方晶格子を有する結晶内を伝播する弾性波の場合と同一である。したがって, 前述の  $a_1$  軸,  $a_3$  軸の各方向, および  $a_3$  軸から 45 度傾いた方向への縦波および横波の伝播速度を測定することにより弾性係数が全て求められる。

## 3. 実験方法

実験には, 方向性凝固により柱状晶成長させた Al-2wt% Cu 合金を用いた。合金錠塊より, 断面 10mm × 10mm, 平行部長さ約 54mm の引張り試験片を切り出した。この際, 引張り軸と柱状晶成長方向とのなす角度  $\theta$  を, 0 度から 90 度まで 15 度ごとに変えた。なお, この切り出しの際に, 各試験片の中央部が錠塊下端から 70mm と一定になるように注意し, 各試験片中央部近傍の結晶粒径その他の組織が一致するようにした。作製した試験片の四面全てに直交 2 軸ひずみゲージを貼り, 測定を行った。測定は, クロスヘッド速度  $8.3 \times 10^{-3} \text{ mm/sec}$  の低速度で行った。1 本の試験片につき数回の測定を行い, その結果からヤング率  $E_z$  およびポアソン比  $\nu_{xz}$ ,  $\nu_{yz}$  を求めた。これらの測定値より材料の弾性係数  $A, c, F, L, N$  を算出した。

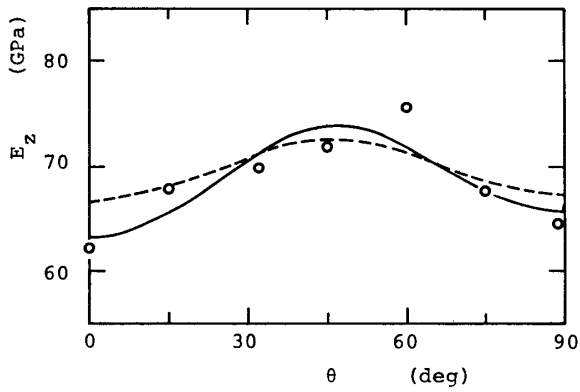


図3(a) ヤング率  $E_z$  の角度依存性

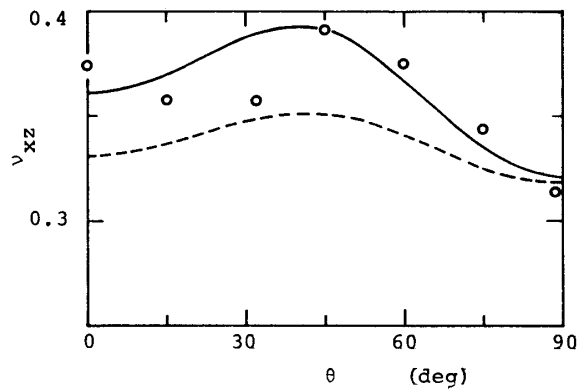


図3(b) ポアソン比  $\nu_{xz}$  の角度依存性

次に、鋳塊より  $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 15\text{mm}$  の板状試験片を切り出し、超音波試験を行った。試験片の板厚方向を前述の3方向に一致させて切り出し、伝播速度を測定した。測定周波数は  $2.25\text{MHz}$  とした。また、材料の密度としては実測値  $2.725\text{g/cm}^3$  を用いた。

#### 4. 実験結果

##### (1) 鋳造材料の弾性係数

鋳造したままの試験片についての引張り

試験結果を図3(a)~(c)に示す。図中の○印が各方向に引張った際の実測値である。これらの実測値より前述の関係を用いて弾性係数を算出した。表1に結果を示す。また、表1の各係数値を用いてヤング率などの角度依存性を求めた結果を図3中の実線を示す。弾性波伝播速度の測定結果から弾性係数を算出し、表1の結果を得た。この値を用いてヤング率などの角度依存性を求めた結果を図3中の破線を示す。

##### (2) 熱処理した材料の弾性係数

鋳造された材料を溶体化処理 ( $820\text{K} \times 24\text{hr}$ , 水冷) 後、時効処理 ( $470\text{K} \times 48\text{hr}$ , 空冷) した。この状態における弾性係数の測定結果を表1に示す。なお、弾性波伝播速度の測定は短時間に行なわれるので、溶体化処理後の状態においても測定を行った。

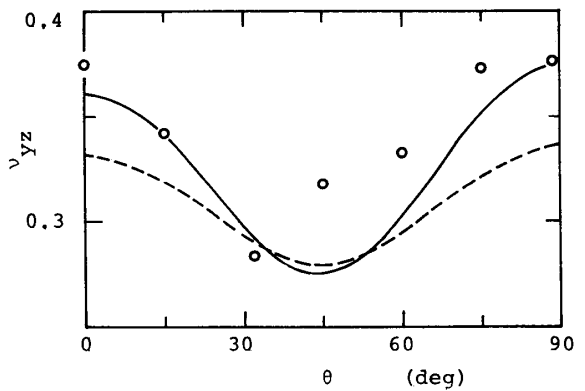


図3(c) ポアソン比  $\nu_{yz}$  の角度依存性

材料の状態	測定方法*	A	C	F	L	N
鋳造のまま	T	105.2	105.2	58.0	29.0	24.8
	U	99.1	99.0	48.7	28.3	25.6
溶体化処理	U	96.2	95.1	46.5	28.4	25.5
時効処理	T	106.9	107.4	59.0	29.4	26.0
	U	98.1	96.3	46.9	28.7	25.7

表1 弾性係数の測定結果 (GPa)

\* T: 引張り試験  
U: 超音波試験