特集号

研究論文

AC4B アルミニウム合金円筒鋳物の強さとデンドライト アームスペーシングに及ぼす冷却速度の影響

水野 兼雄*・樊 尔青**・古谷 滋夫***
横田 成昭****・福迫 達一*****

Effect of cooling rate on the mechanical strength
and dendrite arm spacing of AC4B cylindrical aluminum alloy casting

Kaneo MIZUNO*, Erqing FAN**, Sigeo FURUTANI***
Shigeaki YOKOTA**** and Tatsuchi FUKUSAKO*****

A study has been carried out on the cooling rate, dendrite arm spacing and mechanical strength for AC4B cylindrical aluminum alloy castings. The cooling rate of castings becomes smaller with increasing the sectional area and mass of castings because the diameter of cores becomes smaller. The dendrite arm spacing and mechanical strength also change with the cooling rate. The solidification time of the AC4B cylindrical aluminum alloy castings is expressed by a function of the casting's modulus. The calculated n value is 1.5, which is identical with the experimentally obtained n value. Therefore, an equation of $t_f = K(V/S)^{1.5}$ is obtained for the solidification time of castings. Linear relationships on the logarithmic graph are obtained between the casting's modulus (M) and the average cooling rate (V_s) or the dendrite arm spacing (D_s). Assuming that the mechanical strength is closely related to the reciprocal of the casting's modulus, the appropriate equation is obtained. Furthermore, equations describing the relationships between the cooling rate of the AC4B cylindrical aluminum alloy castings and mechanical strength or the dendrite arm spacing are obtained as follows:

$$V_s = (V/S)^{-1.75}, D_s = B(V/S)^{0.5}$$

$$\sigma_B = K_1(V/S)^{-n}, HB = K_2(V/S)^{-n}$$

$$\sigma_B = B_1 V_s^n, HB = B_2 V_s^n, D_s = C V_s^n.$$

Keywords: cooling rate, dendrite arm spacing, solidification time, casting's modulus, mechanical strength

(Received June 30, 1993)

1. 緒 言

アルミニウム合金 AC4B の機械的強度および組織は鋳物の形状および冷却速度の違いによって異なる^{1)~4)}。

この冷却速度を表す因子として広く鋳物モジュラスが用いられている^{5)~9)}。著者らは、素材が鋳鉄鋳物で形状が異なるものや平板鋳物、円筒鋳物などの機械的強度と鋳物モジュラス (V/S) (鋳物の体積 (V) 鋳物の表面積

* 大阪電気通信大学工学部 (寝屋川市)。Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University (Neyagawa-shi, Osaka).

** 大阪電気通信大学大学院 (寝屋川市)。Graduate Student, Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University (Neyagawa-shi, Osaka).

*** 関西女子短期大学 (柏原市)。Kansai Women's Junior College (Kashihara-shi, Osaka).

**** 大阪産業大学工学部 (大東市)。Osaka Sangyo University (Daito-shi, Osaka).

***** 東海大学工学部 (東京都)。Faculty of Engineering, Tokai University (Shinjyuku-ku, Tokyo).

(S) との比) との関係について報告してきた^{10)~13)}。

Brandt¹⁴⁾らは中子の影響について、円筒鋳物の肉厚をすべて 4 in (101.6 mm) として中子の直径を変化させたとき、これら鋳物に対する中子の直径と凝固時間との関係について、また、新山も^{8)~9)}円筒鋳物の凝固冷却速度について報告している。

そこで、本実験では素材は AC4B の円筒鋳物を用い、中子の寸法を変化させて、これら鋳物の冷却速度および鋳物モジュラスが機械的強度並びに Dendrite Arm Spacing (以後 DAS とする) に及ぼす影響について調べ、これらの関係を式に導いて検討した。

2. 実験

2.1 研究目的

Chvorinov⁵⁾は鋼の砂型鋳物から凝固時間と鋳物モジュラスとの関係を次式で示している。

$$t_f = 1/g^2 (V/S)^2 = K(V/S)^2$$

t_f : 凝固時間, V : 鋳物の体積, S : 鋳物の表面積

V/S : 鋳物モジュラス, g および k : 係数

この式から、凝固時間および冷却速度は鋳物モジュラスの関数になることから機械的強度および DAS も鋳物モジュラスの関係になるものと思われる。

そこで、素材は AC4B の円筒鋳物を用いて、その冷却速度と DAS および機械的強度との関係を鋳物モジュラスの n 乗から求めた実験式について検討した。

2.2 供試材料および試験片

素材は通常使用されている AC4B に相当するものでこれを用いて試料を作製した。これらの化学成分を Table 1 に示す。Fig. 1 は円筒鋳物の形状および寸法を示す。鋳物の寸法は、外径をすべて 80 mm とし、内径 (中子直径) の寸法はそれぞれ 0 (中実), 20, 40, 50, 60, 70 mm の 6 種類とし、高さは、いずれも 50, 100, 200 mm と変化させた。素材に対する冷却速度の測定は ϕ 0.5 mm クロメル-アルメル熱電対を石英保護管に入れ、その先端を露出させたもので、この熱電対は直接素材の測定位置に挿入して、鋳込み温度 993 K から約 673 K までの区間をペンレコーダで記録した¹⁶⁾。また、鋳物の冷却速度の測定位置はそれぞれ肉厚の中心位置とし、高さは 1/2 になるところとした。鋳造後、これら素材について引張強さ、硬さおよび DAS の測定を行った。

引張強さ測定用試験片は、素材の中心位置から切出し、その平行部の寸法は、内径 60 mm のものは ϕ 3 mm 長さ 15 mm、内径 40 mm のものは ϕ 6 mm 長さ 22 mm、内径 20 mm および中実のものは ϕ 6 mm 長さ 22 mm および ϕ 12.5 mm 長さ 25 mm として作製した。また、DAS の測定方法は、上述の素材の中心位置を試料と同一方向に切削した試験片をエメリ紙によって表面を研磨

Table 1 Chemical composition of sample (mass%)

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti
2.35	8.45	0.30	0.61	0.69	0.18	0.03	0.04

outside diameter D (mm)	80
inside diameter d (mm)	0, 20, 40, 50, 60, 70
height H (mm)	50, 100, 200

Fig. 1 Form and size of casting.

Fig. 2 Relation between thickness with various diameters and the average cooling rate of casting.

した後パフ研磨を施し、その試験片は 1% のふっ化水素水溶液でエッチングをしたもので行った。この試験片を 25 倍の金属顕微鏡で写真撮影を行った後、DAS を測定した。

3. 実験結果

3.1 鋳物の冷却速度に及ぼす肉厚と質量の影響

高さ別の鋳物に対する肉厚と平均冷却速度との関係を Fig. 2 に示す。このときの平均冷却速度 (V_s) は、晶出温度→共晶凝固域に相当する 893 K→823 K 区間に要する時間とした。この図から平均冷却速度は肉厚および質量の変化によって異なり、その速さは肉厚および質量が小さいほど大きい。その順位は、肉厚では内径が 0 (中実), 20, 40, 50, 60, 70 mm の順に、質量では高さが

Fig. 3 Relation between the casting's modulus and the average cooling rate of casting.

Fig. 4 Relation between tensile strength, hardness and thickness for casting with various heights.

200, 100, 50 mm の順に、いずれもしだいに大きくなっている。これらの鋳物の関係は、双曲線を示している。さらに平均冷却速度は鋳物モジュラスの関数になると考えられるので、この関係を Fig. 3 に示した。この図は Fig. 2 と同じような傾向を示している。これは鋳物モジュラスが肉厚（質量効果）と密接に関係しているためと思われる。

3.2 肉厚の変化と機械的強度との関連性

肉厚および高さの変化とそれらの引張強さおよび硬さとの関係を Fig. 4 に示す。この図から、高さ 50 mm に対する引張強さは、最も小さい肉厚 5 mm では 196 MPa の値が得られたが、肉厚の増加とともにしだいに低下して、最も大きい肉厚（中実）では 113.7 MPa の値を示している。また高さ 100 mm および 200 mm の鋳物の引張強さは高さ 50 mm の場合のそれと同じ傾向を示し、質量が大きくなるほど減少している。その減少率

Fig. 5 Relation between the thickness with various diameters and the dendrite arm spacing of casting.

Fig. 6 Relation between the casting's modulus and the solidifying cooling rate of castings.

は、高さ 50 mm の鋳物に対して高さ 100 mm のものは約 5 %、高さ 200 mm のものは約 10 % の値を示している。硬さもそれぞれ引張強さと同じような傾向を示している。

3.3 鋳物の DAS に及ぼす肉厚および質量の影響

DAS は冷却速度の関数になると考えられる。そこで、Fig. 5 は高さ別の鋳物に対する肉厚の変化と DAS の関係を示す。この図から DAS は肉厚および質量が大きくなるに従って増加する傾向にある。この DAS は平均的に高さ 50 mm の鋳物に対して、高さ 100 mm のものは約 8 %、高さ 200 mm のものでは約 16 % 長くなっている。したがって、これらの鋳物の DAS の長さは質量が大きくなるほどしだいに大きくなる傾向を示している。

4. 考 察

4.1 円筒鋳物の凝固時間

Fig. 6 には、高さ別の素材に対する凝固時間と鋳物モジュラスの関係を示す。この図から両者の関係は直線関

Fig. 7 Relation between the casting's modulus and the solidifying time for $H=100$ mm.

係が得られ、その実験式は次式のように導かれた。

$$H=200 \text{ mm のとき } t_f=14(V/S)^{1.5}$$

$$H=100 \text{ mm のとき } t_f=10(V/S)^{1.5}$$

$$H=50 \text{ mm のとき } t_f=9(V/S)^{1.5}$$

以上の結果、凝固時間と鋳物モジュラスの関係式は次式が導かれた。

$$t_f=k(V/S)^{1.5}$$

Fig. 7 には、高さ100 mm の円筒鋳物に対する鋳物モジュラスと凝固時間との関係を示す。図中には実験値（実線）と計算値（一点鎖線）とが併記してある。計算値の凝固時間 t_f は^{17)~19)} 次式を用いて数値計算したものである。

$$t_f=\{R/A_1(1+\sqrt{1+A_2})\}$$

$$\text{ただし, } A_1=2\bar{b}(\theta_i-\theta_0)/\sqrt{\pi} Q'$$

$$A_2=\pi Q'/4C(\theta_i-\theta_0)$$

$$R: \text{鋳物の半径 (cm)} \quad Q'=\rho_i c_i (\theta_0-\theta_i)+\rho_s L+\rho_s c_s (\theta_i-\theta_0)$$

$$\bar{b}: \text{鋳物の見かけの熱拡散率 } \sqrt{\lambda \psi} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$\lambda: \text{熱伝導率 (W/m} \cdot \text{K)}$$

$$\bar{C}_p: \text{見かけの比熱 (J/kg} \cdot \text{K)}$$

$$\rho_i, \rho_s: \text{液体, 固体金属の密度 (kg/m}^3\text{)}$$

$$C_i, C_s: \text{液体, 固体金属の比熱 (J/kg} \cdot \text{K)}$$

$$L: \text{鋳造金属の凝固潜熱 (J/kg)}$$

$$\theta_0: \text{鋳込み温度 (K)}$$

$$\theta_i: \text{固相線温度 (K)}$$

$$\theta_s: \text{液相線温度 (K)}$$

この数値計算の結果から、 n の値は $n=1.5$ になる。また、実験結果からも指数 n の値は1.5が得られた。これら二つの n の値はほぼ $n \approx 1.5$ になることから、凝固時間に関して次式が成り立つと思われる。

$$t_f=k(V/S)^{1.5} \quad (1)$$

このことから、円筒鋳物に対する機械的強度および平均冷却速度並びに DAS は、鋳物モジュラスの n 乗の関数になると考えられる。中子直径が小さい20 mm の場合、

Fig. 8 Relation between average cooling rate and the casting's modulus for casting with various heights.

鋳物内壁温度よりも中子中心温度が高く、最高温度（熱中心）は中子中心部に存在するが、中子直径が40 mm と大きくなると、熱中心が中子鋳物界面近くの中子内へ移動する。さらに、中子直径が60 mm と大きくなると、鋳物内に熱中心が移る。それぞれの場合について鋳物の凝固時間は2.59 s, 6.51 s, 8.31 s が得られ、大きい中子ほど凝固時間が長くなっている。20 mm および40 mm 中子では、いずれも中子が熱飽和している。この場合、鋳物の最終凝固位置は中子鋳物界面に存在する。また、中子を持つ円筒鋳物内の凝固完了時における温度分布について、文献値^{18),19)}を用いて数値解析したところ、計算値は実験値とほぼ近似した値が得られ同じ傾向を示している。

4.2 冷却速度と機械的強度との関連性

高さ別の鋳物モジュラスの n 乗と平均冷却速度との関係は、これを両対数で表すといずれも直線が得られ、Fig. 8 のようになる。これらの結果、両者の関係は次式で示される。

$$V_s=A(V/S)^{-n} \quad (2)$$

V_s : 一定温度範囲の冷却速度

(893 K→823 K) [K/min]

A : 係数, $M(=V/S)$: 鋳物モジュラス (mm)

H : 鋳物の高さ

$$\left. \begin{aligned} H=200 \text{ mm} \quad V_s &= 1970(V/S)^{-1.70} \\ H=100 \text{ mm} \quad V_s &= 2100(V/S)^{-1.74} \\ H=50 \text{ mm} \quad V_s &= 3600(V/S)^{-1.78} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$V_s=A(V/S)^{-1.75} \quad (4)$$

そこで、Fig. 9 は平均冷却速度と機械的強度との関係を両対数で示す。この図から両者の関係は次式で示される。

$$\sigma_B=B_1 V_s^n, \text{ HB}=B_2 V_s^n \quad (5)$$

Fig. 9 Relation between tensile strength, hardness and the average cooling rate of casting.

Fig. 10 Relation between tensile strength, hardness and the casting's modulus.

σ_B : 引張強さ (MPa), HB: ブリネル硬さ

B_1 および B_2 : 係数

この(4)式から高さ別の鋳物に対する式を導くと(6)式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{200} &= 56 V_s^{0.2} & HB_{200} &= 51 V_s^{0.04} \\ \sigma_{100} &= 55 V_s^{0.2} & HB_{100} &= 53 V_s^{0.04} \\ \sigma_{50} &= 50 V_s^{0.2} & HB_{50} &= 55 V_s^{0.04} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(ここで添字200, 100, 50は鋳物の高さを表す。)

以上の結果, 鋳物の機械的強度は平均冷却速度の関数となり, 両者は同じ肉厚でも質量が増加するに従って低下することがわかる。したがって質量効果が認められる。

4.3 質量の違いによる機械的強度の差

Fig. 10は, 高さ別の鋳物モジュラスの n 乗と機械的強度との関係を両対数で表したものである。両者の関係は図に示すように直線関係になっている。この図から, これらは次式で示される。

$$\sigma_B = k_1 (V/S)^{-n} \quad HB = k_2 (V/S)^{-n} \quad (7)$$

k_1 および k_2 : 係数

これから, 機械的強度は鋳物モジュラスの逆数の n 乗の関係と考えられる。

この関係から, 鋳物に対する機械的強度の実験式はこの(7)式の係数 k_1, k_2 および n を求めると, 次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{200} &= 260 (V/S)^{-0.34} & HB_{200} &= 72 (V/S)^{-0.08} \\ \sigma_{100} &= 270 (V/S)^{-0.35} & HB_{100} &= 74 (V/S)^{-0.08} \\ \sigma_{50} &= 300 (V/S)^{-0.39} & HB_{50} &= 78 (V/S)^{-0.08} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

この結果, 一般実験式は次のように導かれる。

$$\sigma_B = k_1 (V/S)^{-0.4} \quad HB = k_2 (V/S)^{-0.08} \quad (9)$$

以上の結果 k の値は, 形状が同じでも体積および表面積が異なると, それに伴って変化するが, n の値は形状が同じであると, ほぼ σ_B の場合 $n=0.4$, HBの場合

Fig. 11 Relation between the average cooling rate and dendrite arm spacing for casting with various heights.

$n=0.08$ が得られる。したがって, 機械的強度は鋳物モジュラスの逆数となって, 両者は比例関係が成立すると思われる。

4.4 冷却速度とDASとの関係

DASは冷却速度の関数と考えられ, また冷却速度は近似的に肉厚の関数と考えられるので, これについて調べた。

Fig. 11は高さ別の鋳物に対する平均冷却速度とDASの長さとの関係を両対数で示した。この図から両者の関係は直線関係が得られ, その式は次式のようになる。

$$D_s = C V_s^{-n} \quad (10)$$

D_s : DAS C : 係数

(10)式から高さ別の鋳物に対して次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} D_{s200} &= 6.2 V_s^{-0.3} \\ D_{s100} &= 5.3 V_s^{-0.3} \\ D_{s50} &= 4.6 V_s^{-0.3} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Fig. 12 Relation between the dendrite arm spacing and the casting's modulus for various heights.

以上の結果、DASは冷却速度が小さくなるほど増加することがわかる。これは熱量および熱放出速度に起因しているものと思われる。

4.5 質量の違いによる DAS の長さ

Fig. 12 は高さ別の鋳物に対する鋳物モジュラスの n 乗と DAS との関係を示す。この図から、DAS は鋳物モジュラスの n 乗の値が大きくなるほど増加し、両者はいずれも直線関係が成り立っている。

これらの関係は式で示すと次式が得られる。

$$D_i = D(V/S)^n \quad (12)$$

D : 係数

この結果から鋳物に対する DAS の実験式を次式のように導いてみた。

$$\left. \begin{aligned} D_{200} &= 0.64 (V/S)^{0.5} \\ D_{100} &= 0.63 (V/S)^{0.5} \\ D_{50} &= 0.53 (V/S)^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

したがって一般式 $D_i = B(V/S)^{0.5}$ が得られた。以上の結果、DAS は鋳物モジュラスの 0.5 乗に比例すると考えられる。

4.6 DAS の長さと機械的強度との関係

Fig. 13 は、高さ別の鋳物に対する DAS と引張強さおよび硬さとの関係を両対数で示したものである。この関係から両者の関係は次式で示される。

$$\sigma_B = B_1 D_i^n \quad HB = E_2 D_i \quad (14)$$

E_1 および E_2 : 係数

この(14)式から高さ別の鋳物に対する式は、次式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{200} &= 188 D_i^{-0.66} & HB_{200} &= 67 D_i^{-0.14} \\ \sigma_{100} &= 200 D_i^{-0.78} & HB_{100} &= 69 D_i^{-0.14} \\ \sigma_{50} &= 210 D_i^{-0.79} & HB_{50} &= 73 D_i^{-0.19} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

これらから、機械的強度は肉厚および質量変化を伴う DAS と対応関係になることが認められた。DAS の変化は、いずれの鋳物でも肉厚および質量が大きくなるほど

Fig. 13 Relation between the dendrite arm spacing and the tensile strength, hardness for castings with various heights.

粗大化しその数値は増加しているのが観察された。これらの傾向は、鋳物の冷却速度および機械的速度との相違とよく一致している。

5. 結 言

本研究は AC4B アルミニウム合金の円筒鋳物に対する冷却速度および鋳物モジュラスと機械的強度並びに DAS との関連性について検討した。その結果、次の結論を得た。

(1) 円筒鋳物に対する鋳物の凝固時間は、鋳物モジュラスの n 乗の関数になる。このとき、指数 n の値は、実験値では $n=1.5$ 、数値計算で求めた場合、 $n=1.5$ が得られ、両者とも n の値は $n=1.5$ ではほぼ近似する。この結果、鋳物の凝固時間として、 $t_f = k(V/S)^{1.5}$ の式が得られ、実験値と計算値とはよく近似している。

(2) 円筒鋳物に対する鋳物モジュラスの n 乗と平均冷却速度および DAS の関係は、両対数で直線関係になっている。これを一般式で示すと $V_i = A(V/S)^{-n}$ が得られる。ここで n の値は $n=1.75$

(3) 鋳物の機械的強度は鋳物モジュラスの逆数に密接に関連しているものと考え、これに合う式を求めた。その結果、 $\sigma_B = k_1 (V/S)^{-n}$ の式が得られた。この式中の k_1 の値は質量によって変化する。

(4) 鋳物の冷却速度と機械的強度および DAS の関係として $\sigma_B = B_1 V_i^n$ 、 $D_i = C V_i^n$ が得られた。

(5) また、機械的強度と DAS の関係では $\sigma_B = E_1 D_i^{-n}$ 、 $HB = E_2 D_i^{-n}$ が得られた。したがって、これらを一般式で示すと次式のようにになると考えられる。 $Y = aX^b$

参 考 文 献

- 1) 梶山正孝：非鉄金属材料，コロナ社，(1968)，p. 157.
- 2) 北岡山治：軽金属，**41** (1991)，365.
- 3) 梶山正孝，梅田高照，加藤 寛：軽金属，**24** (1974)，263.
- 4) T. F. Bower, H. D. Brody and M. C. Flemings: Trans. AIME, 236 (1966), 624.
- 5) N. Chvorinov: Gisserei, **27** (1970), 10, 177, 201.
- 6) C. M. Adams: Trans. A. F. S., 65 (1957), 170.
- 7) W. S. Pellini: Trans. A. F. S., 61 (1953), 603.
- 8) 新山英輔：鋳物，**42** (1970)，1006.
- 9) 新山英輔：鋳物，**48** (1976)，78.
- 10) 水野兼雄，福迫達一：鋳物，**52** (1980)，523.
- 11) 水野兼雄，赤星通次，福迫達一：材料，**28** (1978)，314, 1, 130.
- 12) K. Mizuno and T. Fukusako: Proc, 23th. Jpn Congr, Mater. Res. (1980), 62.
- 13) K. Mizuno and T. Fukusako: Proc, 24th. Jpn Congr, Mater. Res. (1981), 55.
- 14) F. A. Brandt, H. F. Bishop and W. S. Pellini: Trans, AFS, 61 (1953), 451.
- 15) 新山英輔：鋳物，**47** (1975)，778.
- 16) 水野兼雄，福迫達一：鋳物，**52** (1980)，523.
- 17) 新山英輔：鋳物，**47** (1975)，778.
- 18) 福迫達一，久保公雄，大中逸雄：鋳物，**51** (1979)，82.
- 19) 久保公雄，水内 潔，大中逸雄，福迫達一：鋳物，**53** (1981)，311.