研究論文 AC4B アルミニウム合金平板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鋳物モジュラスの影響

水野 兼雄* · 古谷 重雄**
横田 成昭*** · 福迫 達一****

Effect of casting modulus on mechanical strength and dendrite arm spacing of AC4B flat aluminum alloy castings

Kaneo MIZUNO*, Shigeo FURUTANI**

Shigeaki YOKOTA*** and Tatsuchi FUKUSAKO****

The average cooling rate, dendrite arm spacing (DAS), tensile strength and hardness of AC4B aluminum alloy castings were investigated. The average cooling rate decreases with increasing thickness of the casting and increasing casting mass. The DAS increases and tensile strength and hardness decrease with increasing thickness of the casting. The solidification time, t_f of the casting was represented by $t_f = K(M)^n$, using casting modulus, $M = V/S$ (V : volume of a casting, S : surface area of a casting) as proposed by Chvorinov. In the present work, $n = 1.8$ and $K = 138$ were experimentally determined. The relationship between the n -th power of the casting modulus (M), and the average cooling rate (V_s), DAS (D_s), tensile strength (σ_B) and hardness (HV) were linear on a logarithmic scale. The following equations were obtained in the present experiment for the casting modulus, the average cooling rate, dendrite arm spacing, tensile strength and hardness; $V_s = 360(M)^{-0.1}$, $D_s = 1.4(M)^{-0.6}$, $\sigma_B = 200(M)^{-0.24}$, $HV = 40(M)^{-0.24}$, $\sigma_B = 4800 V_s^{-2.0}$, $HV = 3000 V_s^{-2.0}$, $D_s = 20 V_s^{-0.6}$.

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

(Received December 26, 1994)

1. 緒 言

AC4B アルミニウム合金平板鋳物の機械的強度および組織は形状および肉厚差によって生じる冷却速度の違いに大きく影響される^{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ある^{5)~10)}。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式を次式で導いている。

$$t_f = 1/q^2 (V/S)^2 = K (V/S)^2 \quad (1)$$

t_f : 凝固時間, V : 鋳物の体積, S : 鋳物の表面,

V/S : 鋳物モジュラス (M), q 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から機械的強度およびデンドライトアームスペーシング (Dendrite Arm Spacing, DAS) も鋳物モジュラスの関数になる。著者らは鋳鉄鋳物で平板鋳物や円筒鋳物、さらに形状の異なる鋳物などの機械的強度と鋳物モジュラス (V/S) との関係について報告してきた^{11)~15)}。また前報¹⁵⁾では、アルミニウム合金の円筒鋳物について報告した。平板鋳物についても凝固時間は

形状および肉厚の違いにより異なることも知られており^{12)~14)}、これらの研究から AC4B 鋳物の機械的強度および DAS は、鋳物モジュラスの n 乗の関数になることがわかった。そこで本研究では、素材は前報¹⁵⁾と同じ AC4B を用い、形状は平板で肉厚は前報の円筒鋳物と同じ寸法とした平板鋳物を鋳造した。これら鋳物の冷却速度を測定し、鋳物の冷却速度および鋳物モジュラスが機械的強度ならびに DAS^{16)~18)}に及ぼす影響について調べ、これらの間の関係式を導き検討した。

2. 実 験

2.1 供試材料および試験片

平板鋳物は通常使用されている AC4B アルミニウム合金を鋳込み温度 993 K で生砂型に鋳込んで作製した。その形状および寸法を Fig. 1 に示す。その化学成分を Table 1 に示す。平板鋳物の寸法は幅 65 mm, 長さ 400 mm, 肉厚をそれぞれ 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 および 40 mm の 7 段階に変化させた。押湯の寸法は底部の直径を 65 mm, 上部の直径を 75 mm とし、鋳物の短部から 100

* 大阪電気通信大学 (寝屋川市)。Osaka Electro-Communication University (Neyagawa-shi, Osaka).

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

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

**** 東海大学 (平塚市)。Tokai University (Hiratsuka-shi, Kanagawa).

Fig. 1 Shape and size of castings.

Table 1 Chemical composition of the alloy used (mass%)

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

mm の位置に設定することとした。機械的強度および DAS の測定は、これら鋳物から長さ40 mm の間を20 mm 間隔で切断した試料を用い、引張試験片は鋳物から切出した平板状試料から作製した。その寸法は肉厚が5 mm のものは平行部を $\phi 3$ mm $\times$ 長さ15 mm、肉厚が7.5, 10.0, 15.0 mm のものは平行部を $\phi 6$ mm $\times$ 長さ22 mm、肉厚が20.0, 30.0および40.0 mm のものは平行部を $\phi 12.5$ mm $\times$ 長さ25 mm のような肉厚によって変えた。また DAS の測定方法はそれぞれの鋳物から切出した平板状試験片を研磨し、1%のふっ化水素水溶液でエッチングをした後25倍の顕微鏡写真から測定した。鋳物の冷却速度の測定は、熱電対を Fig. 1 に示すように肉厚の中心位置に挿入し、 $\phi 0.5$ mm のクロメル-アルメル熱電対の先端を石英保護管から露出させて直接鋳物の温度を測定することによって行い、鋳込み温度993 K から約673 K の区間をペンレコーダで記録した。

3. 実験結果

3.1 鋳物の冷却速度に及ぼす肉厚の影響

Fig. 2 に平板鋳物の肉厚と平均冷却速度との関係を示す。平均冷却速度 (V_s) は晶出温度893 K から共晶凝固終了温度823 K の間に要する時間とした。この図から平均冷却速度は肉厚が大きくなるほど小さくなる。平均冷却速度は肉厚の差すなわち質量によって変化することがわかる。

Fig. 3 に平均冷却速度と鋳物モジュラスとの関係を示す。鋳物モジュラスは鋳物の体積と鋳物の表面積との比を表し、肉厚と鋳物モジュラスとは相関関係にあり肉厚が大きくなると鋳物モジュラスも大きくなる。平均冷却速度は鋳物モジュラスが大きくなると減少する。この図から平均冷却速度は鋳物モジュラスの指数関数になると

Fig. 2 Relation between thickness and average cooling rate in castings.

Fig. 3 Relation between casting modulus and average cooling rate in castings.

考えられる。

3.2 鋳物肉厚の変化と機械的強度の関連性

Fig. 4 は鋳物肉厚の変化と機械的強度の関係を示す。引張強さは肉厚が最も小さい5 mm のとき176.4 MPa を示し、肉厚の最も大きい40 mm のときは118.6 MPa を得た。同じ形状の平板で肉厚が大きくなると、質量もそれに比例して大きくなる。したがって引張強さは肉厚(質量)が増大するとともに減少する。これは肉厚が増すと平均冷却速度が減少し、Fig. 5 に示すように DAS が大きくなって組織がより粗大となるためである。また硬さも引張強さと同様な傾向を示している。

Fig. 4 Relation between tensile strength, hardness and thickness in castings.

Fig. 5 Relation between dendrite arm spacing (DAS) and thickness (T) in castings.

3.3 鋳物の肉厚の DAS に及ぼす影響

Fig. 5 に DAS と鋳物の肉厚との関係を示す。この図から DAS は肉厚が 5 mm のとき 0.45 mm で、肉厚が増すとともにしだいに増加し、肉厚が 40 mm のとき 1.2 mm になる。

Fig. 6 に平均冷却速度と DAS との関係を示す。DAS は平均冷却速度が大きい 346 K/s のとき 0.45 mm と小さく、平均冷却速度が小さい 284 K/s のとき 1.2 mm になる。DAS は平均冷却速度が 284 K/s のとき (肉厚 40 mm) の値を 100 とすると平均冷却速度が 285 K/s (肉厚 30 mm) では 8 %, 平均冷却速度が 289 K/s (肉厚 20 mm), 295 K/s (肉厚 15 mm), 304 K/s (肉厚 10 mm), 317 K/s (肉厚 7.5 mm), 346 K/s (肉厚 5 mm) のとき、それぞれ 17 %, 35 %, 43 %, 53 %, 62 % 減少している。DAS は鋳物の肉厚 (質量) が大きくなるにつれて成長して粗く、形状は大きくなる。

Fig. 6 Relation between dendrite arm spacing and average cooling rate in castings.

Fig. 7 Relation between casting modulus and solidification time.

4. 考 察

4.1 平板鋳物の凝固時間

Fig. 7 に肉厚別の平板鋳物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係が得られ、その実験式は次のように導かれた。

$$t_f = 138 (V/S)^{1.8} \quad (2)$$

Chvorinov⁹⁾ は鋼の砂型鋳物の凝固時間が鋳物モジュラス (V/S) の 2 乗に比例すると報告している。新山^{8),9)}、岡本¹⁰⁾ らは、鋳物の種類や形状が変わると凝固時間は鋳物と鋳型との境界面に熱抵抗が生じ変化するが、鋳物から鋳型への伝熱量は等しく鋳物モジュラス V/S は成立すると報告している。鋳物モジュラスの係数

Fig. 8 Relation between casting modulus and average cooling rate in castings.

Fig. 9 Relation between tensile strength, hardness and average cooling rate in castings.

は鋳物の形状によって変化する。これは形状によって曲面効率を表す係数が異なるためである。鋳物内の熱抵抗は無視できるから、アルミニウムや銅の砂型鋳物では n の値は $n=2.0$ を用いている。Fig. 7 は福迫らによる数値計算法^{8), 10), 19), 20)}の凝固計算に基づいた計算値（一点鎖線）と本研究での実験値（実線）とを併記したものである。

$$\text{凝固時間 } t_f = (M/q)^2 = 1/q^2 (M)^2 \quad (3)$$

M : 鋳物モジュラス

q : 係数

$$q = \frac{2b_m(T_i - T_{m0})}{\sqrt{\pi} \rho_s L + \rho_L C_{PL}(T_P - T_i)} \quad (4)$$

b_m : 砂型の熱吸収能 $b_m = \sqrt{(\lambda \rho C_P)_m}$

λ : 砂型の熱伝導率 C_P : 砂型の比熱

ρ : 砂型の密度 T_i : 砂型/鋳物境界面温度

T_{m0} : 鋳型の初期温度 $\rho_s = \rho_L$: 鋳物の密度

C_{PL} : 鋳物の比熱 T_P : 鋳込み温度

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

T_f : 凝固温度

Chvorinov は係数 $1/q^2$ の値は 127 s/cm^2 , Pellini は 151 s/cm^2 と修正している。凝固時間は数値計算法によるものと実験から求めたものでは係数の値が前者では $1/q^2 = K = 150 \text{ s/cm}^2$, 後者では $1/q^2 = K = 138 \text{ s/cm}^2$ が得られた。この結果両者の係数 K の値はほぼ近似していることがわかった。鋳物モジュラスが同じで肉厚 5 mm のとき数値計算の K の値は 7.246 , 実験値でのそれは 7.847 で両者の係数 K は両者にあまり差が生じていない。これらの結果、凝固時間は実験式(2)式および計算式(3)と(4)のいずれを用いても導かれることがわかった。このことから凝固時間と密接に関連する平均冷却速度ならびに冷却速度によって変化する DAS はいずれも鋳物モジュラスの n 乗の関数になると考えられる。

4.2 平均冷却速度と鋳物モジュラスとの関係

Fig. 8 に AC4B 平板鋳物に対する鋳物モジュラスと平均冷却速度との関係を示す。平均冷却速度は前述したように 893 K から 823 K の冷却に要する時間とした。この図から両者には直線関係があるから、一般式では次式のようになる。

$$V_s = A(V/S)^{-n} \quad (5)$$

A : 係数

Fig. 8 の直線関係から A は 360 , n は 0.1 となり(6)式が導かれる。

$$V_s = 360(V/S)^{-0.1} \quad (6)$$

この結果、平均冷却速度は鋳物モジュラスの -0.1 乗に比例する。

4.3 機械的強度と平均冷却速度との関連性

機械的強度と平均冷却速度との関係は両対数で示すと

Fig. 11 Relation between dendrite arm spacing and average cooling rate in castings.

Fig. 12 Relation between casting modulus and dendrite arm spacing in castings.

Fig. 9 のように直線関係が得られる。この図から引張強さと平均冷却速度および硬さと平均冷却速度の関係はそれぞれ一般に(7)式および(8)式で表される。

$$\sigma_B = B_1 V_s^{-n} \quad (7)$$

$$HV = B_2 V_s^{-n} \quad (8)$$

B_1, B_2 : 係数

実験式で求めた係数および指数の値を入れると(9)式および(10)式となる。

$$\sigma_B = 4800 V_s^{-2.0} \quad (9)$$

$$HV = 3000 V_s^{-2.0} \quad (10)$$

以上の結果、AC4Bの平板鋳物の機械的強度は平均冷却速度の -2.0 乗に比例する。

4.4 機械的強度と鋳物モジュラスとの関連性

式(1)から凝固時間は鋳物モジュラスの n 乗の関数になり、また(5)式から平均冷却速度の $-n$ 乗の関数になるとすれば、機械的強度は鋳物モジュラスの n 乗の関数になると考えられる。さらにFig. 10に機械的強度と鋳

Fig. 13 Relation between tensile strength, hardness and dendrite arm spacing in castings.

物モジュラスとの関係を示す。この図から引張強さと鋳物モジュラスおよび硬さと鋳物モジュラスとの関係はそれぞれ一般に次式で示された。

$$\sigma_B = K_1 (V/S)^{-n} \quad (11)$$

$$HV = K_2 (V/S)^{-n} \quad (12)$$

K_1, K_2 : 係数

実験式から求めた係数および指数の値を入れると(13)式および(14)式となる。

$$\sigma_B = 200 (V/S)^{-0.24} \quad (13)$$

$$HV = 40 (V/S)^{-0.24} \quad (14)$$

この結果、機械的強度は鋳物モジュラスの -0.24 乗に比例する。

4.5 平均冷却速度とDASとの関係

DASは平均冷却速度の関数と考えられ、また冷却速度は肉厚の関数と考えられるため、これらについて調べてみた。Fig. 11に平均冷却速度とDASとの関係を両対数で示した。この図から両者の間には直線関係が得られ、一般式は次式で表される。

$$D_s = C V_s^{-0.6} \quad (15)$$

D_s : DAS C : 係数

実験式から求めた係数 $C=20$ 、指数 $n=-0.6$ を入れると(16)式が導かれる。

$$D_s = 20 V_s^{-0.6} \quad (16)$$

この結果DASは平均冷却速度の -0.6 乗に比例する。

4.6 鋳物モジュラスとDASとの関係

Fig. 12に鋳物モジュラスの n 乗とDASの関係を示す。この図からDASは鋳物モジュラスの -0.6 乗に比例して大きくなる。両者の関係は一般に次式のようになる。

$$D_s = D (V/S)^{-n} \quad (17)$$

D : 係数

実験式から求めた係数 $D=1.4$, $n=-0.6$ の値を入れると (18) 式となる。

$$D_s = 1.4(V/S)^{-0.6} \quad (18)$$

以上の結果, DAS は鋳物モジュラスの -0.6 乗に比例する。

4.7 DAS と機械的強度との関係

Fig. 13 は AC4B の平板鋳物に対する 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。この図から引張強さと DAS および硬さと DAS との関係は一般 (19) 式および (20) 式で示される。

$$\sigma_B = E_1 D_s^n \quad (19)$$

$$HV = E_2 D_s^n \quad (20)$$

E_1, E_2 : 係数

実験で求めた係数および指数の値を入れると (21) 式および (22) 式となる。

$$\sigma_B = 130 D_s^{-0.35} \quad (21)$$

$$HV = 70 D_s^{-0.25} \quad (22)$$

これから, 引張強さおよびビッカース硬さは DAS の -0.35 乗および DAS の -0.25 乗に比例する。

DAS は鋳物の肉厚および質量が大きくなるほど, すなわち冷却速度が小さくなるほど増大することを示し, 強度や硬さを減少させる。

5. 結 言

本研究は AC4B アルミニウム合金の平板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ならびに 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) 平板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。このときの指数 n の値は実験値では $n=1.8$ が求められ, AC4B 平板鋳物の凝固時間は $t_f = 138(V/S)^{1.8}$ の実験式が得られた。数値計算は $n=2.0$ として $t_f = 1/q^2(V/S)^{2.0}$ から求められたものと両者はほぼ一致している。凝固時間は実験式の方が数値計算式で凝固係数を求めるよりも簡単に求められる。この結果, AC4B 平板鋳物の一般式は $t_f = K(V/S)^{1.8}$ で, このときの係数 K の値は $K=138$ が得られた。

(2) 平板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 の関係は両対数で示すと直線関係になっており, これを一般式で示すとそれぞれ $D_s = CV_s^n$, $D_s = D(V/S)^{-n}$ が得られる。 n の値は前者では $n=-0.6$

で, 後者でも $n=-0.6$ になる。また係数は, それぞれ $C \approx 20$, $D=1.4$ が得られた。

(3) 鋳物の機械的強度は鋳物モジュラスの逆数の n 乗に密接に関連していると考え, これに合う式を求めた。その結果一般式は, $\sigma_B = K_1(V/S)^{-n}$, $HV = K_2(V/S)^{-n}$, の式が得られた。また, n の値は両者とも $n=0.24$ になり, 係数は, $K_1=200$, $K_2=40$ が求められた。

(4) 鋳物の冷却速度と機械的強度および DAS との関係は $\sigma_B = B_1 V_s^{-n}$, $HV = B_2 V_s^{-n}$ が得られ σ_B , HV のいずれも n の値は $n \approx 2.0$, 係数は $B_1 \approx 4800$, $B_2 \approx 3000$ が得られた。

(5) 機械的強度と DAS の関係は $\sigma_B = E_1 D_s^{-n}$, $HV = E_2 D_s^{-n}$ が得られた。 n と E_1 および E_2 の値は, σ_B は $n \approx -0.35$, HV は $n \approx -0.25$, $E_1=130$, $E_2=70$ が得られた。

参 考 文 献

- 1) 梶山正孝: 非鉄金属材料, コロナ社, (1968), 263.
- 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. E. Flemings: Trans. AIME, 236 (1966), 624.
- 5) N. Chvorinov: Gessorei, 27 (1970), 10, 177, 201.
- 6) C. M. Adams: TRANS. J of Metals, 17 (1963), 561.
- 7) W. S. Pellini: Trans. AFS, 61 (1953), 603.
- 8) 新山英輔: 鋳物, 42 (1970), 1006.
- 9) 新山英輔: 鋳物, 48 (1976), 624.
- 10) 岡本 平: 鋳物, 49 (1977), 10.
- 11) 水野兼雄, 福迫達一: 鋳物, 52 (1980), 523.
- 12) 水野兼雄, 赤星通次郎: 材料, 28 (1978), 314.
- 13) K. Mizuno and T. Fukusako: Proc, 23th, JPN Congr, Moter. Res, (1980), 62.
- 14) K. Mizuno and T. Fukusako: Proc, 74th, JPN Congr, Moter. Res, (1980), 62.
- 15) 水野兼雄, 古谷重雄, 横田成昭, 福迫達一: 軽金属, 43 (1993), 618.
- 16) 新山英輔: 鋳物, 44 (1972), 1048.
- 17) K. J. Oswalt, M. S. Misra: Trans. AFS, 80 (1972), 845.
- 18) 軽金属学会編: 軽金属学会研究部会報告書 No. 20, (1988), 40.
- 19) 福迫達一, 久保公雄, 大中逸雄: 鋳物, 51 (1979), 82.
- 20) 久保公雄, 水内 潔, 大中逸雄, 福迫達一: 鋳物, 53 (1981), 311.