

アルミニウム合金ダイカストに発生した鑄巣の円形度による評価

金森陽一*, 伊藤恭祐*

Evaluation of Porosity Circularity in Aluminum Alloy Die Casting

Yoichi KANAMORI and Kyosuke ITO

Circularity of porosities occurring in aluminum alloy die casting was measured by a metallic microscope: it varied from 0.1 to 0.9. On the other hand, sphericity of porosities was measured by an X-ray CT apparatus. Then, the correlation of the circularity and sphericity of porosities was analyzed: the correlation coefficient $r=0.73$ (in the case that $N>5$). It was found that solidification shrinkage caused the porosity in case of the circularity of less than 0.65.

Key words: Aluminum Alloy Die Casting, Morphology of Porosity, Circularity, Gas Porosity, Shrinkage Porosity

1. はじめに

アルミニウム合金ダイカスト（以下、「ダイカスト」と記す。）は、複雑形状の薄肉品を高速で製造できることから、自動車部品を中心に多くの部品製造に適用されている。しかし、ダイカストでは、金型内に高速で溶湯を射出するため、金型内などの空気に加え、金型に塗布する離型剤などが分解して生成するガスの巻き込みが避けられない。これらダイカスト品に巻き込まれたガスは、鑄巣（ブローホール）の発生原因となる¹⁾ことが知られている。これに加えて、凝固収縮に伴う鑄巣（引け巣、引け、ざく巣）も発生する²⁾。

発生した鑄巣は、強度を低下させるだけでなく、鑄巣が加工面に現れる外観不良や耐圧不良などの原因となることから、鑄巣低減が強く求められている。鑄巣を低減させるためには、鑄巣の発生原因を特定することが重要である。

現在、一般的には、電子顕微鏡を用いて鑄巣を観察し、鑄巣の形状及び表面の状態（平滑、デンドライトの有無）から鑄巣の発生原因が調べられてい

る。しかし、この方法は、手間がかかるうえに経験が必要である。また、新たな方法として、X線CTを用いて鑄巣の発生原因を特定する方法について検討^{3),4)}が進められているが、ブリストア試験が必要になるなどの課題がある。

当所では、X線CTで得られる鑄巣の3次元形状データ及び金属顕微鏡で得られる鑄巣の2次元形状データを用いて、鑄巣の発生原因を特定する技術の検討を進めてきた。

X線CTを用いる方法では、鑄巣の3次元形状として「球形度」を取り上げ、鑄巣の球形度と鑄巣（ポイド）体積率の関係、鑄巣の球形度と冷却速度の関係などを明らかにした⁵⁾。

金属顕微鏡を用いる方法では、金属顕微鏡から得られる鑄巣の2次元形状として「円形度」を取り上げ、鑄巣の円形度とX線CTを用いて求めた鑄巣の球形度との関係及び、円形度と鑄巣の内部に発生したデンドライトとの関係などを検討した。本報告ではこれらの結果について報告する。

2. 実験方法

2. 1 調査したダイカスト品

* 金属研究室

県内企業 5 社で量産されているダイカスト 19 製品を調査対象とした。これらの製品から、なるべく肉厚変動の少ない箇所を選んで試験片を切り出した。切り出した試験片の数は 54 で、その重量は、約 2~80 g であった。なお、ダイカスト品はすべて ADC12 合金であった。

2. 2 鋳巣の球形度測定

鋳巣の球形度は以下のように求めた。はじめに、X線 CT による欠陥解析の結果に基づいて第 i 番目の鋳巣の体積 V_i と表面積 E_i を計測する。次に、 V_i と同じ体積を有する球の表面積 D_i 、および第 i 鋳巣の球形度 S_i を式(1)(2)により算出した。

$$D_i = \sqrt[3]{\pi(6V_i)^2} \quad (1)$$

$$S_i = \frac{D_i}{E_i} \quad (2)$$

この S_i に対して体積 V_i を重みとした加重平均により試験片全体の球形度 S_a を式(3)により求めた。

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^n S_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (3)$$

なお、X線 CT による欠陥解析では、マイクロフォーカス型の X線 CT を用い、 $50 \mu\text{m}^3/\text{ボクセル}$ の条件で CT 画像を取得（最大画像取得範囲は $51.2 \times 51.2 \text{ mm}$ ）し、8 ボクセル以上の鋳巣について、鋳巣の個数、個々の鋳巣の体積 V_i 、表面積 E_i を求めた。この球形度はボクセルが無限小の時には真球で 1、それ以外、球から遠ざかるほど 1 より小さくなり、その極限は厚さ 1 ボクセルの平面で略 0 となる。なお、球形度は鋳巣のボクセル数が小さいときには、最大値に上限が生じる。具体的には、最小のボクセル数、8 ボクセルでは、縦横高さ、それぞれ 2 ボクセルの配置が最も球に近いが、その場合の球形度は約 0.8 である。

2. 3 鋳巣の円形度測定

鋳巣の円形度は以下のように求めた。はじめに、金属顕微鏡により得られた鋳巣画像の解析結果に基づいて第 i 番目の鋳巣の面積 G_i と周囲長 L_i を計測する。次に、第 i 鋳巣の円形度 C_i を式(4)により算出した。

$$C_i = \frac{4\pi G_i}{L_i^2} \quad (4)$$

この C_i に対して面積 A_i を重みとした加重平均によ

り試験片全体の円形度 C_a を式(5)により求めた。

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

なお、鋳巣の円形度測定用試験片については、X線 CT による欠陥解析を行った試験片から切り出した。試験片切り出し後、 $0.25 \mu\text{m}$ ダイヤモンドまで研磨、金属顕微鏡による鋳巣画像の取得、画像解析を行った。金属顕微鏡による画像の取得については、 $2.72 \mu\text{m}^2/\text{ピクセル}$ の条件で鋳巣のマイクロ組織画像を取得した。なお、画像取得範囲は $4.36 \times 3.27 \text{ mm}$ である。画像解析については、鋳巣の面積： 0.00785 mm^2 以上（ $\phi 100 \mu\text{m}$ 以上の鋳巣）について、鋳巣の個数、個々の鋳巣の面積 G_i 、周囲長 L_i を求めた。

2. 4 鋳巣の内部に発生したデンドライトの観察

鋳巣の内部に発生したデンドライトの観察には電子顕微鏡を用いた。デンドライトの観察に用いた試料は、鋳巣の円形度測定後の試料とした。デンドライトの観察の倍率は 40~1,000 倍であった。

3. 実験結果と考察

3. 1 金属顕微鏡により得られた鋳巣のマイクロ組織と円形度

図 1 に、金属顕微鏡により得られた鋳巣のマイクロ組織写真を示す。図 1(a)は円形度が大きな鋳巣、図 1(b)は円形度が小さな鋳巣のマイクロ組織写真である。図 1(a)、(b)ともに、金属顕微鏡は焦点深度が浅いため、鋳巣内部の形状は観察されず、鋳巣は黒く観察された。図 1(a)で測定された鋳巣の数は 12 個（白色の矢印）、図 1(b)で測定された鋳巣の数は 6 個（白色の矢印）で、鋳巣①と②の円形度は 0.69 と 0.27 であった。

3. 2 鋳巣の円形度と球形度の関係

図 2 に、測定したすべての試験片について、鋳巣の円形度と球形度をプロットした図を示す。図 2 から、鋳巣の円形度は 0.1~0.9 の範囲、鋳巣の球形度は 0.2~0.6 の範囲にあり、円形度と球形度を比べると球形度の方が測定値の範囲が狭いことがわかる。この結果は、取得画像の解像度に関係すると考えられる。実験方法 2.2 節と 2.3 節のとおり、取得画像の解像度は、鋳巣の円形度（金属顕微鏡）： $2.72 \mu\text{m}^2/\text{ピクセル}$ に対して、鋳巣の球形度（X線

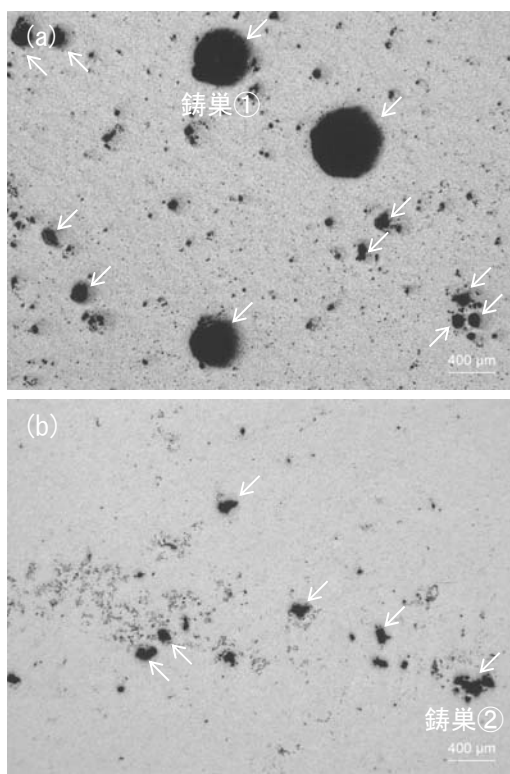


図1 金属顕微鏡により得られた鑄巣の
マイクロ組織写真
(a) 円形度が大きな鑄巣
(b) 円形度が小さな鑄巣
(図中の矢印は測定対象となった鑄巣)

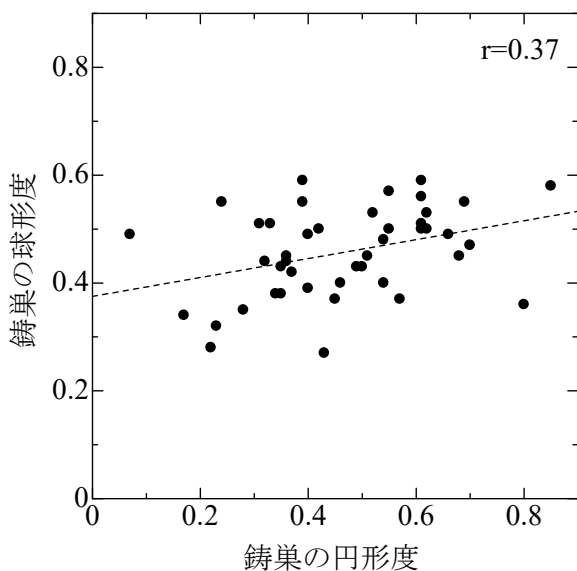


図2 鑄巣の円形度と球形度の関係

CT) : $50 \mu\text{m}^3$ /ボクセルであり、円形度の解像度は、球形度の解像度に比べ約18倍高い。取得画像の解像度が高いほど、より鑄巣の形状を正確に取得できることから、図2において、鑄巣の円形度の測定

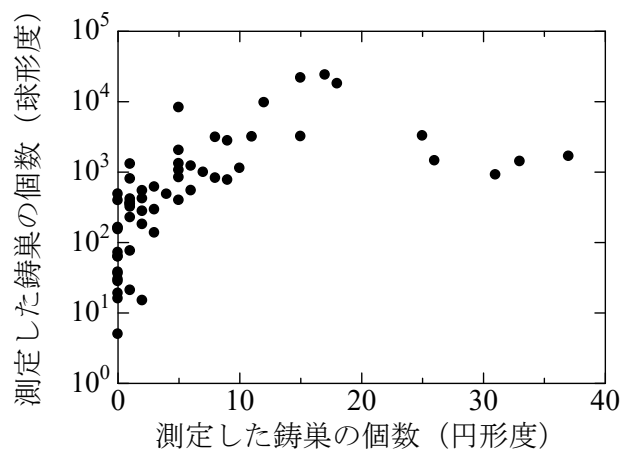


図3 測定した鑄巣の個数(円形度と球形度)

値の範囲が広がったと考えられる。

また、図2から、鑄巣の円形度と球形度の相関を求めたところ、ばらつきが大きいこともあり、相関係数は0.37で弱い相関が認められたに過ぎなかった。このばらつきは、測定した鑄巣の個数に関係すると考えられる。図3は、測定した鑄巣の個数について、縦軸に鑄巣の球形度、横軸に鑄巣の円形度の結果をプロットしたものである。図3から、球形度を測定した鑄巣の個数は100個程度でも、円形度を測定した鑄巣の個数は数個(5個以下)で非常に少ない条件があることがわかる。そこで、円形度を測定した鑄巣の個数が少ない条件において、ばらつきが大きくなったと考え、円形度を測定した鑄巣の個数が5個未満の結果を除外し、5個以上の結果のみに対して円形度と球形度の結果を再整理

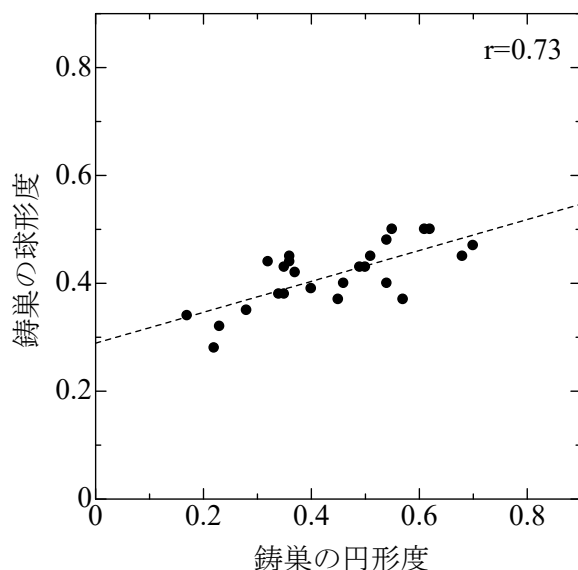


図4 鑄巣の円形度と球形度の関係
(鑄巣: 5個以上)

し、図 4 に示す。図 4 は図 2 に比べ、相関係数が 0.37 から 0.73 に大幅に向上し、円形度と球形度にかなり強い正の相関があることが確認される。この結果から、測定した鑄巣の個数が 5 個以上であれば、比較的簡易な金属顕微鏡による 2 次元的な円形度、鑄巣本来の 3 次元的な形状を測る球形度によく整合していることが確認できた。特に、円形度は値域が 0.1 から 0.9 までほぼ全域にわたっており、鑄巣の形状の評価に適していると考えられる。

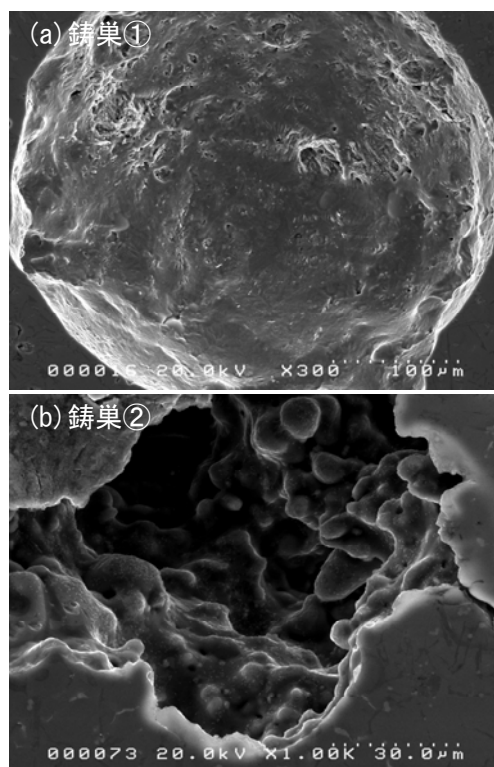


図 5 鑄巣の電子顕微鏡組織写真

3.3 鑄巣の円形度と鑄巣内部に発生したデンドライトの関係

図 5(a)に図 1(a)の鑄巣① (円形度: 0.69) の電子顕微鏡組織写真を、図 5(b)に図 1(b)の鑄巣② (円形度: 0.27) の電子顕微鏡組織写真を示す。図 5(a)、(b)ともに、電子顕微鏡は焦点深度が深いことから、鑄巣内部の凹凸が観察された。図 5(a)では、鑄巣内部は平滑でデンドライトが見受けられない。他方、図 5(b)では、鑄巣内部にデンドライトが確認される。一般的に鑄巣の発生原因を特定する場合、鑄巣内部にデンドライトがあると凝固収縮由来の鑄巣と判定される。一方、デンドライトがないとガス由来の鑄巣と判定される。したがって、図 1(a)の鑄巣①はガス由来の鑄巣、図 1(b)の鑄巣②は凝固収縮由来の鑄巣であると判定される。

そこで、種々の円形度の鑄巣について、電子顕微鏡で鑄巣内部の凹凸の状態を観察し、円形度と鑄巣内部に発生したデンドライトの関係を調べた。図 6 に、鑄巣の円形度と鑄巣内部に発生したデンドライトの関係を示す。図 6 の縦軸は鑄巣の面積、横軸は鑄巣の円形度である。図 6 から、鑄巣の面積によらず、鑄巣の円形度が約 0.65 より小さいと鑄巣内部にデンドライトが観察され、鑄巣の円形度が約 0.65 より大きいと鑄巣内部は平滑であったことがわかる。つまり、鑄巣の面積ではなく、円形度を測定することで、鑄巣の円形度から鑄巣の発生原因が凝固収縮かガスかを推定することが可能であると考えられる。

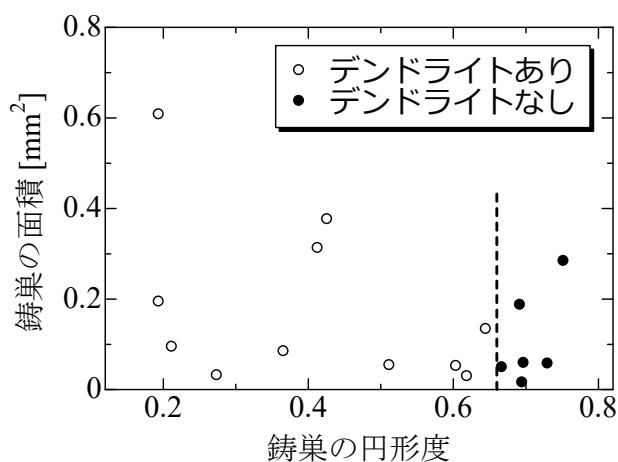


図 6 鑄巣の円形度とデンドライトの関係

4. 結論

金属顕微鏡から得られる鑄巣の 2 次元形状として「円形度」を取り上げ、鑄巣の円形度と X 線 CT を用いて求めた鑄巣の球形度の関係及び、鑄巣の円形度と鑄巣内部に発生したデンドライトの関係などを調べた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 鑄巣の円形度は 0.1~0.9 の範囲、鑄巣の球形度は 0.2~0.6 の範囲にあり、円形度と球形度を比べると球形度の方が測定値の範囲が狭い。
- 2) 鑄巣の円形度と球形度には正の相関が認められる。測定した鑄巣の個数が 5 個以上では、鑄巣の円形度と球形度には、相関係数: 0.73 の強い正の相関がある。
- 3) 鑄巣の円形度が約 0.65 より小さいと鑄巣内部にデンドライトが観察され、鑄巣の円形度が約 0.65 より大きいと鑄巣内部は平滑であった。鑄

巢の円形度から鑄巣の発生原因が凝固収縮かガスかを推定することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 西直美：“ガス欠陥の形態と品質に及ぼす影響”. 日本鑄造工学会 研究報告, 74, p32-34 (1996)
- 2) 西直美：“引け欠陥の形態と品質への影響”. 日本鑄造工学会 研究報告, 74, p140-142 (1996)
- 3) 半谷禎彦ほか：“ダイカストの収縮巣, ガス欠陥の定量的な特徴付けの試み”. 日本鑄造工学会 研究報告, 106, p7-9 (2008)
- 4) 田中栄人ほか：“X線 CT 画像を用いたアルミニウム合金ダイカストの鑄巣欠陥判別システムの開発”. 日本鑄造工学会, 88, p85-91 (2016)
- 5) 金森陽一ほか：“アルミニウム合金ダイカストの鑄巣形状に及ぼす冷却速度, 鑄造圧力及びガス量の影響”. 三重県工業研究所研究報告, 42, p24-28 (2018)

(本研究は, 法人県民税の超過課税を財源としています.)