アルミニウム合金ダイカスト内の鑄巣輪郭線に対する定量的評価

半谷 禎彦*・北原総一郎**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 12 (2008), pp. 639-643

Quantitative evaluation of perimeter of porosity in aluminum alloy die casting

Yoshihiko HANGAI* and Soichiro KITAHARA**

Pore formation in high-pressure die casting is inevitable and pores adversely affect the mechanical properties and pressure tightness. Pores are induced by solidification shrinkage or entrapment of gas. To eliminate pores in die castings in the foundry floor, accurate identification of predominant cause of pores is essential. In this paper, the unbiased quantitative evaluation is proposed so that die casters can take corrective action to reduce pores. We proposed fractal dimension of shape and spatial distribution of porosity perimeter as the quantitative indicator of the identification of pores, namely, shrinkage or gas entrapment. The purpose of the present investigation is to demonstrate the validity of the proposed fractal dimensions by comparing the pores in different regions of die castings, which vary widely in porosity distribution. The proposed fractal dimensions are clearly different from inner region (shrinkage and gas induced pores are mixed) and surface region (only gas induced pores exist) in the die castings.

(Received March 27, 2008 Accepted July 16, 2008)

Keywords: die casting, aluminum alloy, quantitative discrimination, fractal analysis, porosity

1. 緒 言

アルミニウム合金ダイカストは薄肉で複雑形状の製品を安価に製造できることから、自動車部品製造になくはならない製造方法となっている¹⁾。しかし、高速で射出し短時間で凝固するため、製品内部における空洞欠陥（鑄巣）の発生を避けることは困難である¹⁾²⁾。鑄巣は製品の機械的性質の低下や、耐圧性部品の圧漏れを引起す原因となる^{3)~7)}。鑄巣には主にひけ巣とガス欠陥がある²⁾。ひけ巣は溶融金属が凝固収縮する際に、溶融金属補給経路が凝固し遮断されることにより、新たな溶融金属の補給が閉ざされるために発生する⁸⁾。ガス欠陥は溶融金属を金型内に射出する際に、金型内の空気を巻込むことや、金型に塗布した離型剤が溶融金属に接することで気化し溶融金属中に残留することなどにより生じる⁸⁾。ひけ巣とガス欠陥は、その形状や製品内部での分布状態など形態的な特徴が大きく異なり、鑄巣の発生原因と鑄巣の形態には何らかの相関があると考えられる。現状では鑄巣不良が発生した場合、それらの形状を観察しながら見た目の判断により鑄巣低減対策を採っている。しかし、実際にはひけ巣とガス欠陥は複合して発生し、複合的な形態をしていることが多く²⁾⁹⁾、鑄巣をひけ巣とガス欠陥に明確に分別することは困難である。そのため、判断を誤り逆の対策を採用してしまうことも多々あり、鑄巣低減対策は困難な問題である¹⁰⁾。開発期間の短縮や、製造中の不良対策の効率化のためには最適鑄造条件の求解を迅速かつ容易に行うことが重要である。これに対する1つの方策として、鑄巣の形態的特徴を定量化することで、鑄巣発生原因を定量的に評価すること

が考えられる。

鑄巣の定量化と鑄巣発生原因の関係に関する研究はいくつか試みられており、鑄巣の輪郭線形状を用いるもの^{11)~15)}、鑄巣間の第一近接間距離を用いるもの¹⁶⁾、鑄巣面積の空間分布を用いるもの¹⁷⁾¹⁸⁾などが挙げられる。輪郭線形状を用いるものは1つ1つの鑄巣を対象とした評価であるのに対し、第一近接間距離や面積を用いるものは多数の鑄巣が空間上に分布する状態（以後、“空間分布”と称する）を評価するものである。

本研究は輪郭線形状について、偏りが少なく、空間分布の特徴も取入れることが可能な定量的評価手法の構築を試みる。一般にひけの要因の強い鑄巣は複雑な輪郭線形状を有し、ガスの要因の強い鑄巣は比較的滑らかな輪郭線形状を有すると言われており⁸⁾、輪郭線形状を定量化する方法はそのことに着目したものである。この手法は輪郭線形状を正確に抽出する必要があるため、X線CTなど低解像度の鑄巣画像しか得られない観察方法への適用は困難であり、光学顕微鏡観察など高解像度の鑄巣画像が必要であるが、その分精度のよい定量的評価ができることが期待される。

現在までの研究では、1つの鑄巣に着目しその輪郭線形状に対して定量化を行っていたため、空間分布の特徴を評価することができなかった。例えば、Fig. 1 (a) はダイカストに発生した鑄巣の光学顕微鏡画像であり、Fig. 1 (b) は2.1節で後述するように鑄巣とアルミニウム合金を二値化により分離し、鑄巣の輪郭線を強調した画像である。矢印の鑄巣の輪郭線の定量化にはFig. 1 (c) のように周囲の鑄巣を除去するため、隣接した鑄巣との関係の評価が欠落していた。また個々

* 群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)。Department of Mechanical System Engineering, Graduate School of Engineering, Gunma University (1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma 376-8515).

** グンダイ(株) (伊勢崎市)。Gundai Co., Ltd. (Isesaki-shi, Gunma).

Fig. 1 Schematic illustration of fractal analysis method of earlier study. (a) Micrograph image of the pores in die casting. (b) Binarized and emphasized image of the perimeter of pores. (c) Extraction of the target porosity.

の鑄巣を対象とするため、観察しやすい鑄巣を抽出してしまうといった任意性が生じ偏った評価になる可能性があることが問題であった。

そこで本研究では、Fig. 1 (b) のような画像上に存在するすべての鑄巣の輪郭線に対してフラクタル解析^{19)~21)}を行うことにより、空間的な分布の特徴も考慮でき、かつ偏りの少ない定量的評価を試みる。フラクタルは、図形の一部を拡大しても同じ図形が繰返される自己相似性という大きな特徴を持っている。このような性質を持つものは自然界の中に数多く見られ、海岸線や雲の輪郭線¹⁹⁾、宇宙の質量分布²⁰⁾、腫瘍細胞の輪郭線形状や細胞核の空間分布²²⁾などに対してフラクタル性が確認されている。ダイカスト内部に発生する鑄巣輪郭線の形状や空間分布においても、同様にフラクタル性を持つものと期待される。自己相似性という特徴を有すれば、顕微鏡などの倍率によらない評価が可能となる。またフラクタルは、フラクタル性を有する形態の複雑性をフラクタル次元により定量化できるという特徴も有している。フラクタル解析により鑄巣発生原因の異なる鑄巣を定量的に評価できるものと期待される。すでに1つの鑄巣の輪郭線形状^{12)~15)}や鑄巣面積の空間分布^{17),18)}がフラクタル性を有し、フラクタル次元により定量的な評価が可能であることが示されている。それらの評価間の相関関係の有無や物理的な意味は不明であるが、すべて鑄巣形態の特徴を表す量として鑄巣の定量的評価に有効であると考えられ、今後更なる調査検討が必要である。

本研究では、まず画像全体に存在するすべての鑄巣輪郭線を対象としたフラクタル解析手法を構築する。次にダイカスト製品の表層部（主にガス欠陥が観察される領域）に発生した鑄巣と内層部（ガス欠陥とひけ巣が混在して観察される領域）に発生した鑄巣を、本手法により定量的に評価を行う。関心領域全体における鑄巣輪郭線の形状や空間分布といった鑄巣形態の特徴を定量的に評価可能であるか検討する。

2. 実験方法

2.1 鑄巣観察方法

鑄巣観察は、Fig. 2 に示すような実際に自動車製品として用いられているカーエアコン用コンプレッサのA領域断面について行った。製品はアルミニウム合金ダイカストADC12²³⁾で大気開放ダイカストにより製造した。Fig. 2中のA領域は鑄巣が多く観察され、後加工により鑄巣が露出し圧漏れが問題となっている領域である。A領域の製品表層部と製品内層

Fig. 2 Schematic illustration of the cross section of the housing of a car air conditioner compressor made by ADC12 die casting aluminum alloy, which is used in this investigation. Optical microscopy observation was carried out for the surface region and inner region of area A.

部について顕微鏡観察を行った。まずカーエアコン用コンプレッサ製品3個について、ほぼ同じ箇所からA領域が入るようにファインカッターで切出し観察用試験片とした。次に観察用試験片を樹脂埋めし、SiC耐水研磨紙 #2400 までの粗研磨、およびアルミナ1 μmの精研磨後、画像を光学顕微鏡に取付けたCCDカメラでパソコンに取込んだ。Fig. 3 に画像例を示す。Fig. 3 (a) は内層部、Fig. 3 (b) は表層部のものである。灰色と白色の混在する部分がアルミニウム合金、黒色の部分が鑄巣である。取込んだ画像の大きさは約1.2 mm×0.9 mm、ピクセル数は640ピクセル×480ピクセルである。次に取込んだ画像に対して二値化処理を施した。この際、アルミニウム合金を白、鑄巣を黒と分離するような閾値を適用することで、鑄巣のみの画像を作成することができる。その後、鑄巣の輪郭線を検出した。Fig. 3 (a), (b) で示した画像は、それぞれFig. 3 (c), (d) のようになる。最後に得られた鑄巣輪郭線画像に対して、ボックスカウンティング法^{20),21)}によるフラクタル解析を行い、フラクタル次元 D_p を算出した。1製品の表層部、内層部それぞれの領域について11~15か所から画像を取込み、表層部、内層部それぞれ合計39画像、35画像について解析を行った。画像枚数が表層部の方が多いのは、表層部においては鑄巣が極端に少なくフラクタル解析が行えない場合があることを考慮したためである。

2.2 フラクタル解析方法^{20),21)}

ボックスカウンティング法はコンピュータ処理によりフラクタル解析を簡便に行うことが可能な手法の1つである。Fig. 4 (a) に示す例のように、鑄巣の輪郭線を検出した画像に対して、一辺が d の正方形（ボックス）で画像全体を被覆

Fig. 3 Sample images of pores and their fractal dimension D_p . (a) Micrograph image of the inner region scanned by a CCD camera. (b) Micrograph image of the surface region scanned by a CCD camera. (c) Binarized image of pores of (a). (d) Binarized image of pores of (b).

し、輪郭線を含むボックスの個数 $N(d)$ を求める。 d を様々に変化させて、Fig. 4 (b) に示すように d を横軸、 $N(d)$ を縦軸にとり両対数でプロットする。このプロットしたものがおおそ線形近似できればフラクタル性を有し、その傾きの絶対値をフラクタル次元 D_p とする。Fig. 4 の例においてもプロットしたものが線形近似できることから、本研究で対象とするような鑄巣輪郭線形状はフラクタル性を有していることがわかり、そのフラクタル次元は $D_p=1.406$ となる。

本研究では Fig. 5 に示すように、まず輪郭線を抽出した Fig. 3 (c), (d) のような画像の一部を一辺が 128 ピクセルの正方形で囲い、その正方形の内部に対して、ボックスの一辺を 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1 と変化させてボックスカウンティング法を適用する。次にこの一辺が 128 ピクセルの正方形を縦と横それぞれ独立に 1 ピクセルずつ移動させ、合計 $(640-128) \times (480-128)$ か所についてそれぞれ D_p を算出する。その中から 1 以上の D_p すべてについての平均をとり、その値を対象とする画像の D_p とする。画像全体を一気にフラクタル解析せず、一辺が 128 ピクセルの正方形で被覆しそれを移動させたのは、Fig. 6 (a) に示すように画像上にほとんど鑄巣が表れない表層部において一辺が 256 ピクセルの正方形で被覆した場合や正方形内で鑄巣に偏りがある場合、Fig. 6 (b) に示すように大きなボックスサイズ d のところで $\log N(d)$ に 0 が続き、フラクタル性が破られフラクタル次元を正確に算出することができない場合があるためである。このように鑄巣が疎に分布する場合には、被覆する正方形の大きさや、被覆位置の調節が必要である。本研究では、今までの経験から 128 ピクセルの正方形で被覆することにし、その被覆する正方形を 1 ピクセルごと移動させてフラクタル解析をすることで、フラクタル性を有し正確にフラクタル次元を算出できるものを探索した。また、フラクタル次元が 1 以上の D_p のみを採用したのは、Fig. 6 (b) に示すようにフラクタル性が破られフラクタル解析がうまくいかない場合、 D_p が 1 以

Fig. 4 Schematic illustration of box-counting method. (a) The shaded boxes are counted. (b) Relationship between box size d and number of boxes $N(d)$. The absolute value of the gradient of linearly approximated curve gives the fractal dimension D_p .

Fig. 5 Schematic illustration of calculating fractal dimension D_p of targeted binarized and emphasized image of the perimeter of pores.

下となる場合が多いからである。直線の場合 $D_p=1$ であり、鑄巣の輪郭線は単純な直線よりも複雑であることから妥当な閾値であると考えられる。

ただし、内層部についてはこのように鑄巣が疎になる部分

Fig. 6 Schematic illustration of fractal analysis which cannot calculate the fractal dimension D_p precisely. (a) Binarized and emphasized image of the perimeter of pores which contains a small amount of pores. (b) Relationship between box size d and number of boxes $N(d)$ of (a).

は非常に稀であり、どの領域を採ってもほぼ鑄巣が存在するため、囲う正方形の大きさを大きくし移動させる必要がなく、正確かつ簡便にフラクタル解析を行えるものと思われる。通常、ダイカストメカなどで実際に使用する場合には、鑄巣が多く発生した場合がターゲットになるため簡便に行うことが可能であり、鑄巣画像さえあればコンピュータ処理によりすべて自動で、しかも計算時間はほとんどかからずに D_p を算出することができる。

3. 実験結果

鑄巣輪郭線の形状が複雑であればあるほど、また鑄巣輪郭線が観察断面に占める割合が高ければ高いほど、フラクタル次元 D_p は高い値を示す。例えば Fig. 3 の場合、内層部は $D_p=1.168$ 、表層部は $D_p=1.043$ となり、一見して複雑な輪郭線の形状や空間分布を示している内層部の方が高い D_p を示している。**Fig. 7** に内層部、表層部それぞれにおける D_p とその頻度を示す。内層部は 35 画像、表層部は 31 画像についてのものである。表層部については、鑄巣画像中の鑄巣が極端に少なく D_p が算出できないものもあり、それらを除いたものである。表層部では $1 < D_p \leq 1.04$ にピークがあり、80% 以

Fig. 7 Distribution of fractal dimension D_p in surface region and inner region.

Fig. 8 SEM images of pores. (a) Pore in the surface region. (b) Pore in the inner region, in which dendrites clearly appear.

上の画像が $1 < D_p \leq 1.08$ の値を示した。それに対し、内層部では $1.12 < D_p \leq 1.16$ にピークがあり、表層部に比べて広い範囲に分布している。

現実のダイカスト製品においては、一般に熔融金属は金型に接した部分から冷却凝固するため、内層部は最後まで凝固せずひけ巣が発生しやすい。一方ガス欠陥はダイカスト全体に分布している¹⁰⁾。そのため、表層部ではひけの要因が少なくガスが主要因となる傾向にあり、内層部ではひけの要因とガスの要因が混在、あるいはひけが主要因となる傾向にある。本研究で用いた試験片を対象に、SEMによる観察結果を**Fig. 8**に示す。表層部ではFig. 8(a)に示すように、デンドライト形状がほとんど観察されない鑄巣が主であり、しかも輪郭

線形状は滑らかであった。一方、内層部では Fig. 8 (b) に示すように、鑄巣壁にデンドライトが存在する鑄巣が多く観察され、しかも輪郭線形状は複雑で密集して存在していた。また、表層部で観察されたようなデンドライト形状がほとんど観察されない鑄巣も存在した。これらのことを考慮すると、表層部で低い D_p を示し、内層部で高い D_p を示したのは、現実のダイカスト製品内の鑄巣の状況に対応しているものと考えられる。また、内層部では領域がわずかに変化しただけでひけ巣の量が大きく変化するため、内層部において D_p が広い範囲に分布しているものと考えられる。すなわち、 D_p はひけの要因の強さを定量的に表現しているものと考えられる。

一般に鑄巣の発生原因をガス由来か、ひけ由来か明確に識別することは困難である。しかし、 D_p が高い値を示せば金型温度の調節や湯口速度の増加、鑄造圧力の増加などといったひけ巣対策、 D_p が低い値を示せばガス抜き位置や大きさの変更、鑄造圧力や射出速度の変更といったガス欠陥対策を文献^{8),10)}などを参考にして迅速かつ正確に行えるものと思われる。

4. 結 言

本研究では、ダイカスト製品に発生した鑄巣の発生原因を定量的に識別するために、鑄巣の輪郭線の形状や空間分布に対して、偏りの少ない定量的評価を試みた。以下に得られた結果を示す。

(1) 鑄巣の光学顕微鏡画像上に存在するすべての鑄巣の輪郭線を用いたフラクタル解析を行い、鑄巣輪郭線の形状や空間分布がフラクタル性を持つことがわかった。すなわち本提案手法により、特定の鑄巣の抽出による任意性を排除するとともに、鑄巣の空間分布をも評価することが可能であることがわかった。

(2) ダイカストにおいて、ガスの要因が強い表層部とひけの要因の強い内層部で、明確なフラクタル次元の差が現れた。すなわち、鑄巣輪郭線の形状や空間分布のフラクタル解析により、関心領域全体における鑄巣形態の特徴を定量的に評価することが可能となり、鑄巣対策の指針となる可能性があることが示された。

本研究の遂行に当たり、東京大学生産技術研究所の吉川暢宏教授、福井大学大学院工学研究科 桑水流理准教授には有益なご助言を賜った。ここに厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 社団法人日本ダイカスト協会：ダイカストって何？—DIE CASTING—，社団法人日本ダイカスト協会，(2003)。
- 2) D. F. Allsop and D. Kennedy: Pressure Diecasting, Part 2: The Technology of the Casting and the Die, Pergamon Press, Ltd., (1983), pp. 6–7.
- 3) E. J. Vinarcik: High Integrity Die Casting Process, John Wiley & Sons, (2003)。
- 4) M. Avalle, G. Belingardi, M. P. Cavatorta and R. Doglione: International Journal of Fatigue, **24** (2002), 1–9.
- 5) S. G. Lee, G. R. Patel, A. M. Gokhale, A. Sreeranganathan and M. F. Horstemeyer: Scripta Materialia, **53** (2005), 851–856.
- 6) J. Linder, A. Arvidsson and J. Kron: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, **29** (2006), 357–363.
- 7) P. T. E. Gebhard: Die Casting Engineer, **47** (2003), 54–56.
- 8) 社団法人日本鑄造工学会ダイカスト研究部会：ダイカストの鑄造欠陥・不良及び対策事例集，社団法人日本鑄造工学会，(2000)。
- 9) S. G. Lee and A. M. Gokhale: Scripta Materialia, **55** (2006), 387–390.
- 10) D. L. Cocks: Die Casting Engineer, **33** (1989), 26–28.
- 11) 西 直美，駒崎 徹：鑄物講演大会講演概要集，125 (1994)，6。
- 12) Bo-Tao Lee, Shu-Zu Lu and A. Hellawell: TMS Annual Meeting, Cast Shop Technology, (1997)。
- 13) P. Hairry: Fonderie Fondeur Aujourd'hui, 265 (2007), 12–25.
- 14) 半谷禎彦，吉田俊介，北原総一郎，天田重庚：日本金属学会誌，**70** (2006)，568–571。
- 15) Y. Hangai and S. Kitahara: Mater Trans., **49** (2008)，782–786.
- 16) A. Tewari, M. Dighe and A. M. Gokhale: Materials Characterization, **40** (1998), 119–132.
- 17) 半谷禎彦，北原総一郎：日本金属学会誌，**71** (2007)，688–692.
- 18) 半谷禎彦，北原総一郎，桑水流理，吉川暢宏：鑄造工学，**80** (2008)，284–289.
- 19) Mandelbrot Benoit: The Fractal Geometry of Nature, W H Freeman & Co., (1982)。
- 20) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，(1986)。
- 21) 松下 貢：フラクタルの物理 (I) 基礎編，裳華房，(2002)。
- 22) 高安秀樹，佐藤 隆，横山俊朗：MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, **15** (1997)，587–591.
- 23) JIS 規格：JIS H 5302，財団法人日本規格協会，(2006)。