

ボクセル有限要素解析による鑄造欠陥まわり応力評価と疲労強度予測

Stress Evaluation around Casting Defects and Fatigue Strength Prediction Using Voxel Finite Element Analysis

曾根 大輔(福井大・工) 桑水流 理(福井大・工) 半谷 禎彦(群馬大・工)
宇都宮 登雄(芝浦工大) 吉川 暢宏(東大生研) 北原総一郎(グンダイ株)

Daisuke SONE, Graduate Student, University of Fukui

Osamu KUMAZURU, University of Fukui

Yoshihiko HANGAI, Gunma University

Takao UTSUNOMIYA, Shibaura Institute of Technology

Nobuhiro YOSHIKAWA, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Soichiro KITAHARA, Gundai Co., Ltd.

FAX: 0776-27-9728, Email: sone@csm.npes.u-fukui.ac.jp

Aluminum alloy die castings contain a lot of casting defects of porosity, which reduces the fatigue strength. To clarify the effect of pore on the fatigue strength, the image-based finite element analysis was carried out and the stress around pores was evaluated. But the voxel modeling yields numerical errors due to the step-wise surface shape. Therefore, we carry out the smoothing process on the stress distribution obtained from the voxel finite element analysis, and evaluate the maximum effective stress, which leads to the fatigue crack nucleation. A reasonable radius of influence is examined through the numerical results, and determined to be 5 voxels. Consequently, we found that the smoothing process on the stress was useful for evaluating the effective maximum stress affecting the fatigue fracture.

1. 緒言

アルミニウム合金ダイカストには鑄巣(鑄造欠陥)の混入が不可避で、これにより応力集中が生じ、疲労強度が低下する¹⁾。そのため鑄巣の疲労強度への影響を明らかにするために試験片のX線CT画像を用いて実際の鑄巣の形状を考慮した有限要素解析を行った。しかし、ボクセル解析を用いているため、モデル表面の凹凸による応力評価の誤差から、表面応力を正確に評価することが出来ない。著者らは過去の研究において、鑄巣量の異なる試験片の疲労試験とイメージベース有限要素解析²⁾³⁾を行ったが、ボクセル解析の誤差を大まかに取り除いただけであった。本研究では、ボクセル解析による数値誤差の除去方法として、応力の平滑化処理を導入し、平滑化処理の応力への影響と、最大応力評価の結果および破断位置の推定を試みる。それらの結果を通じて、ボクセル解析による応力評価の妥当性と、疲労強度評価への適用可能性を検証する。

2. ボクセル有限要素解析

2.1 疲労試験データ

本報では、文献(2)の疲労試験結果を流用する。本研究で使う疲労試験片は中央断面直径12mm、応力集中係数1.04の砂時計型試験片で、材料はADC12アルミニウム合金ダイカストである。ただし、疲労試験片を作成する際、鑄造条件を変えることで、鑄巣量の大きく異なる試験片を作成した。この試験片に対して油圧疲労試験機(MTS 810)を用いて、完全両振り(応力比 $R=-1$)の引張・圧縮疲労試験を行った。また、 10^7 または 10^8 サイクルに達した試験片はRun-outとした。

2.2 イメージベース有限要素解析

前述の試験片の中心部、約17mmをX線CT(島津製作所SMX-225CT)により撮像し、3次元画像を取得した。三次元画像処理および有限要素解析にはイメージベース構造解析ソフト(くいとVOXELCON)を用いた。次に、輝度値のヒストグラムから、材料と空隙の間の谷部(輝度の極小点)を閾値として設定した³⁾。CT画像は画素数 512×512 、解像度約 $39 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 、スライスピッチは約 $39 \mu\text{m}$ で、1 voxelが1要素となるようにボク

セル有限要素モデルを作成した。このボクセルモデルに公称応力振幅に相当する引張負荷をかけ、鑄巣まわりの応力評価を行った。

2.3 応力平滑化処理

有限要素ボクセルの凹凸により生じる数値誤差を取り除くために、本研究ではボクセルの各応力成分に対して次式による平滑化処理を行う。

$$\bar{\sigma} = \sum_i w_i \sigma_i / \sum_i w_i \quad (1)$$

i は着目する要素近傍の要素番号、 w_i はボクセル毎の重み係数、 σ_i は任意の応力成分、 $\bar{\sigma}$ は平滑化された応力である。ただし、重み関数 w_i は影響関数 α を用いて次式で定義する。

$$w_i = \int_{V_i} \alpha dV \quad \alpha \equiv \begin{cases} 1 - (r/r_0)^2 & (0 \leq r \leq r_0) \\ 0 & (r > r_0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 V_i は要素 i の体積、 r は平滑化されるボクセル中心からの距離、 r_0 は影響半径である。 r_0 が大きくなると、より遠くの要素の影響を受け、応力分布は平坦となる。

3. 解析結果と考察

3.1 平滑化の影響

文献(4)より、平滑化の影響半径 r_0 は5 voxel ($195 \mu\text{m}$)以上で最大主応力点の位置の変化が安定した。このとき、表面の数値誤差が除去でき、応力分布が安定したと判断し、5 voxelの平滑化半径を採用する。例として5 voxelの平滑化を適用する前後での、鑄巣まわりミーゼス応力分布の比較を図1に示す。平滑化前は1つのボクセルに極端に高い

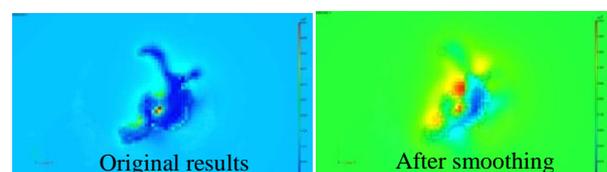


Fig 1 Effect of smoothing on stress distribution.

応力が表れているが、平滑化後は極端なピークは無くなり、空孔まわりのなだらかな応力集中が見える。

3.2 局所応力振幅

解析領域内の 5 voxel 平滑化を行った後の最大主応力 σ_{1max} を局所応力振幅 σ_{local} と定義する。局所応力振幅と破断寿命の関係を図 2 に示す。ただし、鑄巣の影響だけを見るため、破断チルを起点として破断したものは除外した。なお、本研究で用いた X 線 CT では、破断チルを撮像できないので、有限要素モデルには破断チルを反映できない。また、図 2 に矢印で示した 10^7 サイクルで Run-out した試験片は、局所応力振幅が全体の傾向より高い。これらの応力集中源を詳しく調べたところ、単独の鑄巣であるが、複雑な形状をしており、応力集中の領域も比較的広がった。よって、これらの試験片には高い局所応力振幅が作用した可能性が高く、約 7×10^7 サイクルで破断した試験片があったことも勘案すれば、少なくとも 10^8 サイクルまでには、破断する可能性が高いと言える。

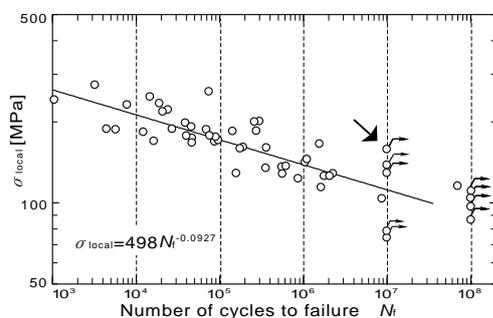


Fig. 2 Modified S-N data

3.3 破断位置

最大応力位置と破断面との関係を調べるため、最大応力発生位置の中心軸(z軸)座標と、破断面のz座標をCT画像から計測した。破断面の座標は、破断後の試験片をCT撮像し、その画像から破面位置を特定した。き裂発生起点の明らかなものはその点を、不明なものは破面の山と谷の範囲で求めた。最大応力点が破面の範囲に存在した場合、一致とし、それ以外は不一致とした。比較結果を破断起点の位置(表面か内部)により分類し、表 1 に示す。

Table 1 Comparison of maximum stress point and fracture point

Crack initiation	Surface	Not clear	Internal
Score	0/12 (0%)	2/8 (25%)	9/21 (43%)

表面起点の場合、破断位置は最大応力位置と整合せず、内部起点の場合は、約半数が最大応力点と一致した。特に鑄肌を残した試験片が表面起点となったが、鑄肌にはマイクロポアが密集することがあり、それが起点となることがある⁶⁾。本研究の X 線 CT では、解像度が不足したため、鑄肌のマイクロポアを検出できず、解析と実験結果が整合しなかったと考えられる。また、内部が破断起点のもので、最大応力点と破断面が一致しなかったものについては、引け巣クラスター⁷⁾が原因としてあげられる。鑄巣量の多い試験片で内部起点が多く、鑄巣量の多い試験片は、引け巣クラスターが発生し易い。引け巣クラスターは微小な引け巣の集合体であるため、本研究の X 線 CT では鑄巣の詳細形状を解像出来ず、引け巣クラスター領域が中間的な輝度のぼやけた画像になり、有限要素モデルでは稠密な材料とみなされている。よって、本研究のボクセル有限要素解析で

は、引け巣クラスターが考慮されていない。また、き裂の進展はき裂同士の合体により急激に成長することもあるので、必ずしも最大主応力の発生している鑄巣から最終破断に至るとは限らないことも、最大応力点と破断面が一致しない原因といえる。

3.4 応力集中係数

局所応力振幅 σ_{local} を公称応力振幅 σ_n で割ったものを、局所応力集中係数 K_{local} と定義する。鑄巣体積率 p と局所応力集中係数の関係を図 4 に示す。ただし、鑄巣体積率が 0 になると局所応力集中係数は 1 に収束する傾向が出たため、縦軸は $K_{local}-1$ とし、両対数プロットした。このプロットを直線で最小二乗近似することにより、次式の関係が得られた。

$$K_{local} = 1 + 1.24 p^{0.345} \quad (3)$$

図 3 に矢印で示したデータのように、式(3)の近似直線から大きく離れ、高い局所応力集中係数を示すものもある。その要因として、図 2 の矢印のデータのように、複雑な鑄巣の形状による応力集中があるが、図 3 の矢印のデータは、図 4(a)に示すように鑄巣の偏りが生じ、局所的に鑄巣体積率が高かったためであった。一方、図 4(b)のように、ほぼ同じ鑄巣体積率でも、ほぼ均一な鑄巣分布の試験片は、局所応力集中係数が低くなった。よって、ほぼ均一な鑄巣の配置が仮定できれば、式(3)による鑄巣体積率からの局所応力集中係数予測は有効であると言える。式(3)と図 2 のマスターカーブを用いれば、鑄巣体積率を用いて容易に疲労寿命予測が可能となる。

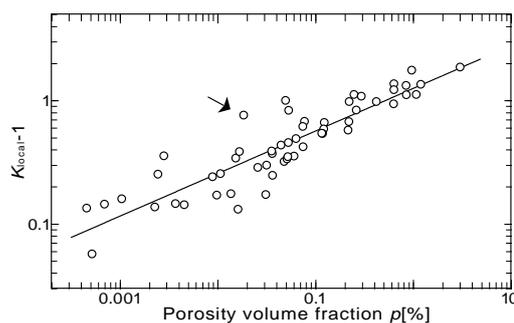
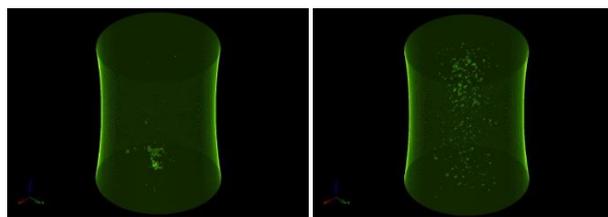


Fig. 3 Relationship between stress concentration factor and porosity volume fraction



(a) $p = 0.02\%$, $K_{local} = 1.75$ (b) $p = 0.03\%$, $K_{local} = 1.17$

Fig 4 Comparison of pore distributions

参考文献

- 小林俊郎, アルミニウム合金の強度, 2011, 内田老鶴圃.
- 桑水流理, 他 8 名, 日本機械学会論文集, 77, pp. 39-47, 2011.
- 桑水流理, 他 8 名, 日本機械学会論文集, 77, pp. 48-57, 2011.
- 桑水流理, 曾根大輔, 他 4 名, 日本鑄造工学会第 159 回全国講演大会講演概要集, p. 95, 2011.
- O. Kuwazuru, Y. Murata, et al., *J. Solid Mech. Mat. Eng.*, 2, pp. 1220-1231, 2008.
- 増田翔太郎, 戸田裕之, 他 4 名, 鑄造工学, 81, pp. 475-481, 2009.
- 桑水流理, 矢野貴之, 他 5 名, 日本機械学会論文集, 77, pp. 40-44, 2011.