論文

空隙閉鎖評価因子の検討

— 大型鋼塊の空隙閉鎖に関する研究 第1報 —

毛利 健吾* 有馬 猛*

福谷 理明* 寺崎 俊夫**

Study on Evaluation Factor for Void Closure

— Study on Void Closure of Large Steel Ingot, 1st report —

Kengo MOURI*, Takeshi ARIMA*,

Michiaki FUKUYA* and Toshio TERASAKI**

(Received on April 1, 2014)

In this study, numerical and multivariate statistical analyses are performed for the re-evaluation of each individual factor reported to have an effect on the estimation of the void closure behavior by FEM analysis in past studies. The following results were obtained. 1) True strain in the stroke direction and hydrostatic stress ratio are the most effective factors for evaluating the void closure behavior. Void closure can be predicted using true strain alone with $R^2 = 88\%$ accuracy regardless of void position, and the accuracy can be raised by adding the hydrostatic stress ratio factor to the calculation. 2) A regression equation is obtained from the closure behavior at various positions in a cylinder model under the condition of one stroke upsetting, but the equation can also be applied to other cases such as side upsets and V-die coggings with high accuracy. 3) With the use of the hydrostatic stress ratio, consideration of the difference in deformation resistance is not required for the evaluation of void closure.

Key words: free forging, rigid-plastic FEM, void closure, equivalent strain, integral of hydrostatic, true strain, hydrostatic stress ratio, upsetting, multivariate analysis.

1. 緒言

大型鋼塊は発電機用軸材、船舶用部材、原子力1次系部材等の製造には欠かせないが、その内部にはザクと呼ばれる空隙が不可避免的に発生し、品質に大きく影響する。一例を挙げると、高速回転で使用される大型発電用ロータ軸材は内部に欠陥を伴う場合、それが起点となり破砕する恐れがある。内部欠陥による重大事故を防ぐため、品質には厳しいスペックが課せられている。大型発電用ロータ軸材は、鋼塊を鍛造することにより製造されるが、鍛造は全製造工程で重要な欠陥の一つである空隙(ザク)を除去できる唯一の工程である。本工程にてスペック外の空隙が残留すると製品は廃却となり、多大な廃却損が生じる。一方、空隙を

閉鎖させるために据込や鍛伸を過剰に追加すると、製造コストが大きくなってしまふ。大型鋼塊の鍛造では効果的に空隙を閉鎖させる鍛造方法の検討が行われているが、基本知識として空隙閉鎖挙動の評価技術が必須となる。

鍛造における空隙閉鎖に関する研究は実機の鍛錬効果の調査研究にはじまり^{1), 2)}、粉末焼結体の塑性基礎式を利用した空隙閉鎖の基礎研究^{3), 4)}および空隙圧着因子を実験と有限要素解析で検討した研究^{5), 6)}により大きな進歩を遂げてきた。しかし、未だに空隙閉鎖の問題は十分に解決された段階に達していないと思われる。この原因の一つは1995年以前のコンピュータの能力不足により、数値解析による検討が十分にできなかったことである。一例を挙げれば、有限要素法に使用できる最大要素数の制限により、空隙を十分に表現できなかったことである。

現在ではコンピュータの能力向上に起因した数値解析能力および市販ソフトの急速な進歩により、空隙閉鎖挙動の数値解析をより高精度に取り扱えるようになってきた。

本報告は数値解析で空隙閉鎖挙動を取り扱うこと、すなわちFEM解析ソフトDEFORMを用いた3次元モデル数値

*日本鑄鍛鋼株式会社 技術開発部
〒804-8555 福岡県北九州市戸畑区大字中原先ノ浜 46 番地 59
R&D department, Japan Casting & Forging Corporation
46-59, Sakinohama, Nakabaru, Tobata-ku, Kitakyushu-City, Fukuoka-ken
804-8555, Japan.

**大阪大学 接合科学研究所
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11 番 1 号
Joining and Welding Research Institute, Osaka University
11-1, Mihogaoka, Ibaraki-City, Osaka-fu 567-0047, Japan.

実験にて空隙閉鎖挙動を調査することにより、空隙の体積変化に対し、空隙の無いモデルでの空隙位置の静水圧応力、相当塑性ひずみなど、過去の研究で明らかになった因子の有効性を個別に評価することで、空隙閉鎖に有効な因子の再検討を行った。

2. 検討に用いる FEM の解析精度

本章では検討に用いた FEM 解析精度の確認を行った。まず、現在の FEM 解析技術が過去に比べてどのように向上したかを確認した。次に、実験値との整合性を確認した。

空隙閉鎖に関する研究が盛んに行われていた 1980～2000 年当時に比べて、FEM 解析の精度は格段に向上している。コンピュータの計算能力の向上により、設定できるメッシュ数が多くなり、空隙形状をより細かく表現できるようになったことも解析精度向上の要因の一つである。そこで、数値実験にて空隙形状表現方法の差異における空隙閉鎖挙動を確認した。空隙形状は球状空隙の断面を 8 角形および 32 角形で設定したモデルを用いた。素材は $\phi 50 \times 100$ で、空隙の直径は $\phi 5$ である。なお、8 角形モデルは 1980～2000 年当時のモデルを想定したものである⁵⁾。圧下条件は上下金敷を定盤とし、圧下速度 3mm/s、温度 20℃で実施した。変形抵抗値は鉛の物性値(実験値)を用いた。摩擦係数はせん断摩擦係数 0.9 を用いた。解析に用いた条件を Table 1 に示す。Fig.1 に圧下率 30%における各モデルの空隙閉鎖挙動を示す。32 角形のモデルは 8 角形のモデルに対し、より細かな空隙閉鎖挙動を表現できており、特に空隙端部の挙動を表現する能力が向上していることが分かった。

続いて数値実験と実験の比較を行った。数値実験および実験ともに $\phi 50 \times 100$ の円柱素材の内部に $\phi 10 \times 10$ の円柱状空隙を設けたモデルを用い、上下金敷は定盤、圧下速度は 3mm/s、温度は 1250℃にて実施した。数値実験に用いた変形抵抗値は実験に用いた鋼種(3.5%Ni 鋼)の物性値を使用した。実験に用いた素材は $\phi 50 \times 50$ の円柱素材に $\phi 10 \times 5$ の円柱穴加工を施したものを 2 つ重ね、EB 溶接にて接合して作製した。Fig.2 に圧下率 23%における各モデルの空隙閉鎖挙動を示す。実験結果に対し、数値実験結果は母材および空隙の変形挙動ともに概ね一致した。この結果より、今回使用している FEM 解析は空隙の閉鎖挙動調査において十分な精度を持つことが分かった。

Table 1 Analysis condition

Workpiece temperature	20 °C
Die speed	3 mm·s ⁻¹
Deformation resistance	Physical property of lead
Shear friction coefficient	0.9

Fig. 1 The void deformation behavior in 30% reduction rate in height

Fig. 2 Deformation behavior of experiment and FEM model at 23% reduction rate in height

3. 空隙閉鎖評価因子の検討

3.1 一般的な空隙閉鎖評価因子

空隙閉鎖評価因子を検討するにあたり、過去の研究より一般的に用いられている空隙閉鎖評価因子を調査した。評価因子としては主に、相当ひずみ ϵ_{eq} と式(1)の G_m が報告されている⁴⁾⁻⁶⁾。

$$G_m = \int_0^{\epsilon} (-p/\sigma_{eq}) d\epsilon_{eq} \quad (1)$$

ただし、 p : 静水圧応力、 σ_{eq} : 相当応力、 $-p/\sigma_{eq}$ は静水圧応力比である。

空隙閉鎖評価因子の提案はあるが、これらの因子を個別に確認した報告例は少ない。本報告では、DEFORM を用いた数値実験で得られたデータを元に、空隙閉鎖に対する各因子の有効性を多変量解析により調査した。

3.2 数値実験

適切な空隙閉鎖評価因子の選定は、調査対象となる空隙の閉鎖挙動の種類が多いほど正確となる。本論文では、金敷の摩擦により生じる素材内部のメタルフロー分布を利用し、種々空隙位置での閉鎖挙動を調査対象とした。Fig.3 に $\phi 50 \times 100$ の円柱素材に Table 1 の条件で据込を行った際の内部変形の様子を示す。領域は大別して 3 つの領域に分けられる。図中の Zone(1)は変形が大きい領域、Zone(2)は金敷との摩擦の影響で変形が極端に小さい領域(デッドメタルゾーン)、Zone(3)は均一に変形する領域である。これに Zone(1)～(3)の境界を含めた 4 つの領域に区分し、それぞれの位置に空隙を設けたモデルを用いて FEM 解析にて空隙の閉鎖挙動を計算した。

Fig. 3 Metal flow of cylinder model by upsetting

Fig.4 に解析モデルを示す。モデルは $\phi 50 \times 100$ の円柱素材に、Fig.4 に示す位置に $\phi 5$ の球状空隙を設けたものである。P₁ は Zone(1), P₂ は Zone(2), P₃ は Zone(3), P₄ は Zone(2) と Zone(3) の境界位置である。図中には空隙を 4 つ示しているが、実際はそれぞれ個別に数値実験を行った。なお、本論文では空隙に作用するひずみや応力は、空隙が無いモデルにおける空隙の該当位置の値にて代用した。解析条件は Table 1 と同じである。本研究の圧下方向は全て -z として解析した。

Fig. 4 Analysis model used in FEM

空隙の初期体積 V_0 、解析結果である圧下後の空隙体積 V を用いて空隙の体積残留率 V/V_0 を求め、多変量解析にて V/V_0 と各因子の相関を計算した。因子には ε_{eq} , ε_z , G_m および G_m 構成因子の σ_m/σ_{eq} , σ_m , σ_{eq} (ただし, ε_z : 圧下方向の真ひずみ, σ_m は平均垂直応力であり, p の代用として使用) を用いた。本検討で用いた多変量解析は, M.A.Efroymson が提案した段階的回帰手順(Stepwise regression procedure)を基にしたものである⁷⁾。以下にその手順を示す。

〔手順 1〕 応答変数 V/V_0 に対し, 独立変数(ε_{eq} , ε_z , G_m , σ_m/σ_{eq} , σ_m , σ_{eq}) 中から最も相関が高いものを選出する。選ばれた変数が回帰式に有意であるかを評価する(この 1 操作をステージと称する)。

〔手順 2〕 〔手順 1〕 を繰返し, 回帰式に有意な変数を導入していく。このとき, 各ステージにおいて既に選択された変数が有意であるかを再検討し, 有意でないと判定された場合は排除する。

〔手順 3〕 回帰式への導入が有意である変数がなくなるまで計算を繰り返す。

Fig.5 に多変量解析結果を示す。横軸は各ステージで選出された因子, 縦軸は重回帰係数 R^2 である。第 1 ステージで選ばれた因子は ε_z であり, R^2 は約 88% であった。第 2 ステージでは σ_m/σ_{eq} が選出され, ε_z , σ_m/σ_{eq} による R^2 は約 94% であった。第 3 ステージ以降は R^2 の増加はほとんど得られなかった。この結果より, 空隙閉鎖に対し最も有効な因子は ε_z であり, 空隙位置が異なるにも関わらず, 空隙閉鎖挙動を約 88% 説明可能であることがわかった。一方, 一般的な空隙閉鎖評価因子の 1 つである ε_{eq} は一度も選ばれなかった。応力は σ_m/σ_{eq} が ε_z に次いで選ばれたことから, 応力を加味することで空隙閉鎖評価精度の向上が可能であると言える。また, 応力の因子は σ_m/σ_{eq} で十分説明できており, G_m はあまり有効ではなかった。

Fig.6 に多変量解析により得られた第 1 ステージにおける式をプロットしたものを, Fig.7 に第 2 ステージにおける

式をプロットしたものを示す。第 1 および 2 ステージで得られた空隙体積残留率の予測値 $\hat{V}/V_0$ と ε_z および σ_m/σ_{eq} の関係式は,

$$\text{第 1 ステージ: } \hat{V}/V_0 = 1.76\varepsilon_z + 1.00 \quad (2)$$

$$\text{第 2 ステージ: } \hat{V}/V_0 = 1.67\varepsilon_z + 0.29\sigma_m/\sigma_{eq} + 1.11 \quad (3)$$

である。横軸は空隙体積残留率の予測値 $\hat{V}/V_0$, 縦軸は解析値 V/V_0 である。第 1 ステージでは, 空隙閉鎖挙動は概ね説明できているが, デッドメタルゾーン内に位置する P₂ の空隙閉鎖挙動はやや説明できていない。一方, σ_m/σ_{eq} を加味した第 2 ステージでは, P₂ が改善され, P₁~P₄ 位置全ての空隙閉鎖挙動はほとんど説明ができていない。この結果から, 空隙閉鎖は ε_z でほとんど説明可能であるが, デッドメタルゾーンの空隙閉鎖挙動を説明する際は σ_m/σ_{eq} が有効であることがわかった。

Fig. 5 Multiple correlation coefficient R^2 at each stage

Fig. 6 Relation between predicted value $\hat{V}/V_0$ and real value V/V_0 being volume ratio of void in 1st stage

Fig. 7 Relation between predicted value $\hat{V}/V_0$ and real value V/V_0 being volume ratio of void in 2nd stage

4. 応力因子 σ_m/σ_{eq} の有効性検討

空隙閉鎖は ε_z で 90% 近く説明可能である。空隙閉鎖は ε_z が主要因子であり、応力は補助的因子である。Fig. 5 では応力因子として σ_m/σ_{eq} が選出されたが、以降のステージでほとんど数値変化が無いことから応力項を σ_m/σ_{eq} と断定できたと言ひ難い。そこで、本章では応力が空隙閉鎖に対してどのように作用するかを検討した。

Fig. 8 に本検討で用いた解析モデルを示す。本モデルは側面を拘束しており、空隙部におけるひずみ ($\varepsilon_z, \varepsilon_{eq}$) がほとんど得られず、応力のみが変化する拘束モデルである。素材形状は一辺 50mm の立方体中心に $\phi 15$ の球状空隙を設けたものである。空隙部に作用する応力の影響を調査するため、変形抵抗値は 10MPa および 20MPa 一定の 2 水準で解析を行った。その他の解析条件は Table 1 と同じである。

Fig. 9 に σ_m と空隙の体積残留率 V/V_0 の関係を示す。一般的に、 σ_m は空隙の体積変化に寄与することが分かっている。Fig. 9 でも、 σ_m の絶対値が大きくなると V/V_0 は小さくなっており、 σ_m は空隙の体積減少に寄与していると言える。しかし、本結果は σ_m と V/V_0 の関係が変形抵抗値により変化しており、 σ_m の値では V/V_0 変化を直接説明することはできない。

Fig. 8 Analysis model used in FEM (1/8 model)

Fig. 9 Relation between σ_m and V/V_0

空隙は閉鎖する際に塑性変形を伴っているため、 σ_m による体積減少は降伏応力 σ_Y との関連が大きいと考える。そこで、 σ_m/σ_{eq} を用いて先と同様の整理を行った。 σ_{eq} で除した理由は、本来は σ_Y を用いるべきであるが、 σ_{eq} が DEFORM の出力で簡単に算出可能、かつ塑性状態では σ_Y と概略は同じであり、代用可能と判断したためである。Fig. 10 に σ_m/σ_{eq} と空隙の体積残留率 V/V_0 の関係を示す。 σ_m と同様に、 σ_m/σ_{eq} の絶対値が大きくなると V/V_0 は小さくなっている。さらに、変形抵抗値によらず V/V_0 を説明できていることから、空隙の体積変化は σ_m/σ_{eq} で説明可能であると考えられる。

Fig. 3 のように、金敷の摩擦による不均一変形により、素材内部のひずみ速度も分布を持つこととなる。ひずみ速度が異なると変形抵抗値も変化するため、 $P_1 \sim P_4$ 位置の空隙に作用するひずみ速度および変形抵抗値はそれぞれ異なる値となる。前述のように、Fig. 9 の結果から σ_m が増加すると V/V_0 は減少するため相対評価は可能であるが、変形抵抗値が異なるもの同士の σ_m の値で V/V_0 の値を予測することはできないと言える。一方で、Fig. 5 で σ_m を $\sigma_{eq} (= \sigma_Y)$ で除した σ_m/σ_{eq} が選ばれたことが、変形抵抗値の差は空隙閉鎖に影響がないことを裏付けている。また、 σ_m/σ_{eq} による評価を行うと、異なる素材でも成立つことが予想される。

Fig. 10 Relation between σ_m/σ_{eq} and V/V_0

5. 空隙閉鎖評価因子の有効性確認

据込における空隙位置 $P_1 \sim P_4$ で得られた回帰式が妥当であれば、異なる鍛造方法においても空隙閉鎖を説明できるはずである。そこで、据込、横据込、V金敷鍛伸における空隙閉鎖挙動に先の検討で得られた回帰式を適用することでその妥当性を検討した。

Fig.11 に解析モデルを示す。素材、空隙および金敷形状は文献にあるモデル⁹⁾を参考にした。素材は $\phi 14.5 \times 20$ の中心に $\phi 3$ の球状空隙を設けたものを用いた。据込および横据込に用いた金敷は定盤、V金敷鍛伸に用いた金敷は 120° のV型金敷とした。その他条件はTable 1と同じにした。式(3)を上記解析結果に適用した結果を**Fig.12**に示す。Fig.7ほどの精度は得られなかったものの、回帰式の適用範囲外の鍛造方法における空隙閉鎖挙動を評価したにも関わらず、 $\hat{V}/V_o$ と V/V_o は概ね良好な関係が得られた。このように、空隙位置 $P_1 \sim P_4$ から算出した予測式(3)は適用範囲外においても概ね高い精度で空隙閉鎖を評価できており、式に用いた評価因子の妥当性が確認された。

Fig.13 に、文献 6)に記載された回帰式

$$R_v = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} C_{ij} \varepsilon_{eq}^i G_m^j \quad (4)$$

ただし、 R_v は体積残留率、係数 C_{ij} をTable 2に示す。

を用いて、文献 6)に記載された据込、横据込、V金敷鍛伸における空隙閉鎖挙動を評価した $\hat{V}/V_o$ と V/V_o の関係を示す。各鍛造における各因子の数値は文献 6)から抜粋した。本回帰式は据込、横据込、V金敷鍛伸の結果を重回帰して得られたものであり、非常に高い精度で空隙閉鎖挙動を予測している。

Fig. 11 Analysis model used in FEM

Fig. 12 Relation between predicted value $\hat{V}/V_o$ and real value V/V_o being volume ratio of void by equation (3) in upsetting, side upsetting and V-die cogg

Table 2 Coefficients C_{ij} for equation (4)

$i \backslash j$	0	1	2	3
0	0.001	3.930	-67.50	-
1	-0.445	33.00	-	-
2	-	54.75	-	-
3	-18.88	-	-	-

Fig. 13 Relation between predicted value $\hat{V}/V_o$ and real value V/V_o being volume ratio of void by equation (4) in upsetting, side upsetting and V-die cogg

Fig.14 は式(4)の回帰式を $P_1 \sim P_4$ から得られた Fig.4 の解析結果に適用した際の $\hat{V}/V_o$ と V/V_o の関係を示す。 P_1, P_3 は閉鎖挙動を概ね予測できているが、応力が高い P_2, P_4 では予測値と解析値が大きく外れる結果となった。この理由は、式(4)の回帰式は Fig.11 に示す据込、横据込、V 金敷鍛伸の空隙から得られた式であり、デッドメタルゾーンは適用範囲外であったためと考えられる。本論文で提案した式ではデッドメタルゾーンを検討に入れ、適切な評価因子を選択したため、適用が難しかったデッドメタルゾーンの空隙閉鎖挙動を精度良く評価することが可能となった。

以上より、 ε_z および σ_m/σ_{eq} を用いることで空隙閉鎖挙動は精度良く評価可能である。特に、これらの因子は空隙位置および素材の種類(変形抵抗値)によらず用いることができるため、非常に重要である。

Fig. 14 Relation between predicted value $\hat{V}/V_o$ and real value V/V_o being volume ratio of void by equation (4) in P_1, P_2, P_3 and P_4

6. 結 言

本論文では、球状空隙内在モデルを用いた数値実験および多変量解析から、空隙閉鎖を評価するための有効な因子を明らかにした。本検討により得られた結果を以下に示す。

- (1) 空隙閉鎖評価因子は ε_z , σ_m/σ_{eq} であり、 ε_z で空隙位置によらず、閉鎖を約 88% 説明可能である。デッドメタルゾーン内の空隙は σ_m/σ_{eq} を加味することで閉鎖予測精度をさらに向上させることができる。
- (2) 本検討で得られた回帰式は据込 1 圧下における種々空隙位置の閉鎖挙動から得られたものであるが、横据込や V 金敷鍛伸といった適用範囲外でも精度良く空隙閉鎖挙動を評価可能である。
- (3) 応力の因子は空隙の体積変化に作用する σ_m を σ_{eq} ($\equiv \sigma_Y$) で除した σ_m/σ_{eq} が妥当である。 σ_m/σ_{eq} を用いることで、空隙閉鎖挙動を評価する際に変形抵抗値の差の考慮が不要となる。

参 考 文 献

- 1) 館野万吉・鹿野昭一: 塑性と加工, 7-65 (1966), 299-308.
- 2) 中島浩衛・渡辺和夫・渡辺司郎・田村至・中田和広: 塑性と加工, 23-256 (1982), 403-409.
- 3) 大矢根守哉・川上隆・島進: 粉体および粉末冶金, 20-5 (1973), 142-146.
- 4) 荒木重臣・津田統・松下富春・佐藤隆夫・落敏行: 塑性加工春季講演会, (1986-5), 383-386.
- 5) 田中光之・小野信市・常野誠: 塑性と加工, 27-306 (1986), 852-859.
- 6) 小野信市・南克之・落合朋之・岩館忠雄・中田進一: 日本機械学会論文集(C 編), 61-585 (1995), 387-392.
- 7) N. ドレーパー・H. スミス原著・中村慶一訳: 応用回帰分析, (1968), 171-172, 森北出版.