論文

数値シミュレーションを活用した鍛伸工程設計技術の開発

——品質工学を用いた欠陥閉鎖工程設計手法の開発——

柿本 英樹* 有川 剛史* 高橋 洋一**

田中 達也*** 今井田 豊***

Process Design of Extend Forging Process by Numerical Simulation

——Development of Forging Process Design to Close Internal Void by Using Taguchi Method——

Hideki KAKIMOTO*, Takefumi ARIKAWA*, Yoichi TAKAHASHI**,

Tatsuya TANAKA*** and Yutaka IMAIDA***

(Received on May 29, 2008)

In this study, the closing behavior of internal voids was examined by deformation analysis involving the 2-D finite element method (FEM) that imitated voids in steel ingots in the compression process (upset process). In the compression process, a model experiment that uses internal voids is carried out to confirm the accuracy of deformation analysis. By comparing the model experiment with an analytical result, it was confirmed to imitate the internal void behavior by this analysis. The relationship between reduction ratio and void shape/void position was investigated by the analysis. In the forging process, the closing evaluation value of internal voids (Q value) was calculated by a model experiment and 3-D FEM. Using the analysis result, a limited value of the closing behavior of void is quantified, and it is now understood that the void closes at more than $Q = 0.21$. In addition, the forging process of filling the above-mentioned value was designed by the Taguchi method. The predicted Q value in the case of using the Taguchi method almost corresponds to the value calculated by deformation analysis. It was clarified that the process is capable of being designed simply.

Key words: open-die forging, numerical simulation, process design, void behavior.

1. 緒言

近年、製品サイズの大型化に伴い、鍛錬成形比を得るために鋼塊直径を大径化する傾向にある。鋼塊直径が大径化するとザク性欠陥と呼ばれる内部欠陥、偏析および結晶粒粗大化が顕著となる。そのため、自由鍛造ではプレス能力下で鋼塊内部を均質化することが困難となる¹⁾。過去の研究²⁾により、鍛伸工程における応力・ひずみが内部品質に及ぼす影響が調査されている。一方で、内部の健全化のために据え込み（圧縮）・鍛伸が試行錯誤的に2～3回繰り返され、製品に仕上げられている²⁾。特に、鋼塊の鋳込み時に鋼塊上部に発生する内部欠陥は圧縮工程を経て、鍛伸工程へと進むためにその変形挙動を明確化して工程を適正化

する必要がある。

本研究では、鋼塊時での内部欠陥を模擬した二次元変形解析を行い、圧縮工程における内部欠陥の閉鎖挙動を調査した。また、鍛伸工程では、モデル実験と三次元変形解析から内部欠陥閉鎖評価数（ Q 値）を算出し、内部欠陥閉鎖に関する限界値の定量化を行った。さらに、品質工学を用いて容易に鍛造条件を決定する鍛造工程設計手法を考案し、鍛造条件が内部欠陥閉鎖に及ぼす影響について調査した。

2. 圧縮工程における内部欠陥閉鎖挙動

2.1 解析モデルおよびモデル実験結果との比較

圧縮工程では、鋼塊の鋳込み時に発生したザク性内部欠陥の挙動について欠陥位置およびそのサイズと圧下率の関係を明確にする必要がある。そこで、有限要素法による汎用ソフト（Forge2D）を用いて欠陥位置およびサイズを変更した解析を行い、欠陥の閉鎖挙動を調査した。なお、同ソフトは材料間の接触判定およびリメッシュ機能を有しており、内部欠陥閉鎖挙動を調査することが可能である。Fig. 1に解析モデルの概略を示す。本研究では、同図のように

* (株)神戸製鋼所 技術開発本部 〒655-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5
Materials Research Laboratory, KOBE STEEL, LTD.,
1-5-5, Takatsukadai, Nishi-Ku, Kobe 651-2271, JAPAN.

** (株)神戸製鋼所 高砂製作所 〒676-8670 高砂市荒井町新浜 2-3-1
Takasago Works, KOBE STEEL, LTD.,
2-3-1 Shinhami, Arai-Cho, Takasago 676-8670, JAPAN.

*** 同志社大学 理工学部 〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3
Doshisha University Faculty of Engineering and Science,
1-3 Tataramiyakodani, Kyotanabe 610-0321, JAPAN.

鋼塊形状を簡略化して 1/2 軸対称モデルとした。

はじめに、変形解析における内部欠陥挙動についてモデル実験を用いて確認した。ここでは、圧下率を変化させた実験材について断面切断を行わずに X 線 CT により欠陥寸法を測定し、その後、切断して欠陥形状を解析結果と比較した。なお、X 線 CT による寸法測定のために予め 450°C で 3hr 焼鈍した純アルミニウム 1070 材を用いた。モデル実験材の H_0/D_0 は、実験材の中央部にひずみが付与されない状態から付与される状態までを観察するために $H_0/D_0 = 2.0$ とし、欠陥形状 $h_0/d_0 = 5$ 、欠陥径 $d_0/D_0 = 0.08$ 、欠陥位置 $T/H_0 = 1/2$ とした。一方、変形解析の摩擦係数は、モデル実験により得られた最大径が一致するようにクーロン摩擦 μ を決定し、本研究では $\mu = 0.15$ を用いた。また、試験材を用いた圧縮試験を行い、変形抵抗データを採取し、解析に用いる材料データとした。式 (1) に変形抵抗式を示す。なお、実験による圧縮荷重と解析結果が 3%以内で一致していることは別途確認済みである。

$$\sigma = 91.1 \times \varepsilon^{0.287} \quad (1)$$

Fig. 2 にモデル実験および変形解析を行った場合の圧下率と欠陥径および欠陥高さとの関係を示し、Fig. 3 にモデル実験および変形解析で得られた各圧下率における内部欠陥形状の比較を示す。同図から、各圧下率での解析結果および実験結果で得られた欠陥形状はよく一致しており、欠陥の高さ減少率および欠陥の拡張率が精度よく一致しており、変形解析を用いることで内部欠陥閉鎖挙動が明らかになると考えられる。

Fig. 2 Relationship between reduction ratio and void shape (d/d_0 and h/h_0) in the case of analytical result and experimental result

(1) Reduction = 10% (2) Reduction = 30% (3) Reduction = 50%
Fig. 3 Internal void shape comparison with experimental result (left) and analytical result (right) (equivalent strain distribution)

2.2 欠陥形状・欠陥位置・欠陥サイズの影響

本研究では、鋼塊形状は $H_0/D_0 = 1.5$ と一定とし、Fig. 1 に示す欠陥形状 (径: d_0 , 高さ: h_0) および欠陥中心位置 T を変化させた。Table 1 に解析条件を示す。同表に示すように、全部で 24 ($3 \times 2 \times 4$) ケースの計算を行い、各圧下率による内部欠陥の閉鎖挙動および内部欠陥面積が 0 となる圧下率 (以降、限界圧下率と呼ぶ) を算出した。

Table 1 Analytical model (Ingot shape $H_0/D_0=1.5$)

h_0/d_0	T/H_0	d_0/D_0
1	1/2	0.01
2	1/4	0.05
5	1/4	0.1
		0.2

Fig. 4 に欠陥形状および欠陥位置を変化させた場合の圧下率と内部欠陥面積比 (S/S_0) との関係を示す。同結果より、欠陥形状 (h_0/d_0) の縦横比が大きくなるに伴い、また、欠陥位置が中心から離れるに伴い欠陥が閉鎖しにくい傾向となることがわかった。

Fig. 4 Relationship between reduction ratio and void area ratio in case of changing void shape and position

Fig. 5 に鋼塊形状 $H_0/D_0 = 1.5$ において欠陥形状 (h_0/d_0) と位置 (T/H_0) が異なる場合の欠陥径/鋼塊径 (d_0/D_0) と内

部欠陥が閉鎖した限界圧下率との関係を示す。同図より、欠陥径 (d_0/D_0) が変化しても限界圧下率が大きく変わらないことがわかった。一方で、欠陥形状 (h_0/d_0) が大きくなるに伴い、圧縮方向と同一方向に欠陥が長くなるために限界圧下率が大きくなる。同図より欠陥が閉鎖するには、欠陥形状 $h_0/d_0 = 5$ 以下では 75% 以上の圧下率が必要であると言え、圧縮工程で欠陥が完全に閉鎖すると可能性は少ないと考えられる。

Fig. 5 Relationship between void shape (d_0/D_0) and critical upset ratio ($H_0/D_0 = 1.5$)

3. 鍛伸工程における内部欠陥閉鎖挙動

3.1 モデル実験による内部欠陥閉鎖実験

上記のように圧縮工程では欠陥サイズが大きい場合、初期内部欠陥面積に対して 35%~45% 程度の面積を持った状態で欠陥が残存する可能性がある。これを次工程以降の鍛伸工程で確実に閉鎖させる必要がある。はじめに、鍛伸工程における内部欠陥閉鎖挙動を明確化するためのモデル実験を行った³⁾。Fig. 6 に実験材形状を示す。材質は熱間鋼の変形と同様の挙動を示す鉛材を用いた。なお、本研究では、圧縮後すぐに鍛伸工程とした場合と予備成形を加えて断面形状を変化させた場合について考え、初期形状 $\phi 40 \times L36$ の円柱形状 (モデル 1) と $\square 35 \times L36$ と角柱形状 (モデル 2) の 2 種類用意した。また、本研究では、圧縮工程後の欠陥形状を $d_0/D_0 = 0.05$ とし、欠陥形状は $\phi 2$ の貫通孔とした。Fig. 7 に工具形状の模式図を示し、Table 2 にモデル 1 およびモデル 2 の各実験条件を示す。

Fig. 6 Experimental material shape

Fig. 7 Appearance of forging method

Table 2 Experimental conditions

	Press place
	1	2	3	4	
No.	Redution ratio /%				
Model 1					
R-1	5	5	10	5	
R-2	10	10	20	10	
R-3	7.5	7.5	15	7.5	
R-4	15	15	15	-	Upper and lower
Model 2					
S-1	5.7	5.7	11.4	5.7	Upper
S-2	11.4	11.4	22.9	11.4	Upper

Fig. 8 Relationship between reduction ratio and void area ratio

工具は上部に平工具、下部に実験材よりも大きな広幅工具を用いた。圧下順序は両端 (1, 2) を圧下した後に中央部 (3) を圧下し、さらに、一端 (4 : 1 と同一部位) を圧下した。これにより、同一圧下率で圧下回数が異なる部位 (2 と 4) と同一圧下回数で圧下率が異なる部位 (3 と 4)

が得られる。なお、実験後、平工具中央部で断面切断を行い、貫通孔部分を楕円として長径・短径を測定して内部欠陥の面積を算出した。Fig. 8 に圧下率と変形前後の内部欠陥面積比の関係を示す。同結果より、モデル 1 およびモデル 2 とともに総圧下率が同一であれば圧下回数に関係なく、ほぼ同一の欠陥面積比となることがわかる。これより、本研究における空隙閉鎖ではひずみが支配的であるためと考えられる。また、Fig. 8 (B) のモデル 2 の実験から圧下率と内部欠陥面積比の関係を最小二乗法から求めた 2 次近似式は以下となる。なお、このときの相関係数は 0.986 である。

$$Y = 0.0027X^2 - 0.1044X + 1 \quad (2)$$

ここで、 X : 圧下率, Y : 内部欠陥面積比で、 $X \leq 0.21$ の範囲内である。一方、モデル 1 の実験結果について上記式を圧下率の増加する方向に平行移動した式を Fig. 8 (A) に示す。同結果よりモデル 1 の場合、初期圧下率の約 10% は中心部に影響を及ぼさず、逆に内部欠陥が大きくなる。これは、軽圧下のために中心部に引張応力が作用するためと考えられる。また、その部分を除外した後の内部欠陥面積比の挙動はモデル 2 と同様の挙動を示しており、これは圧下率が大きくなるに伴い、工具と素材の接触長さが長くなったためと考えられる。

3.2 変形解析による内部欠陥閉鎖評価数の算出

内部欠陥閉鎖のための工程設計を行うためには内部欠陥閉鎖挙動を定量的に把握する必要がある。従来から、大矢根の式を活用した内部欠陥閉鎖評価数 Q が提案されており⁴⁾、同式を活用して定量化を行った。なお、内部欠陥閉鎖評価数 (これ以降、 Q 値と呼ぶ) は以下の式で定義されている。

$$Q = \int_0^{\varepsilon_f} (-\sigma_m / \sigma_{eq}) d\varepsilon_{eq} = \sum_{i=1}^n (-\sigma_m / \sigma_{eq})^i \Delta \varepsilon_{eq}^i \quad (3)$$

ここで、 σ_m : 静水圧応力, σ_{eq} : 相当応力, ε_{eq} : 相当ひずみである。本研究では、 Q 値を算出するためにモデル実験と同一条件の解析を行った。Fig. 9 に解析モデルを示す。なお、解析モデルは 1/2 対称として貫通孔がある状態で欠陥形状を比較し、貫通穴がない状態で式 (3) を用いて各ステップおよび各要素に対し、応力成分・ひずみ成分を積算した。Table 3 に解析に用いた摩擦係数および変形抵抗を示す。これらの値は過去の文献⁵⁾に記載された値を用いた。

Fig. 9 Analytical model

Table 3 Analytical conditions

Friction coefficient μ	0.30
Flow stress σ /MPa	$\sigma = 46.2 \cdot \varepsilon^{0.194} \cdot \dot{\varepsilon}^{0.026}$

Fig. 10 にモデル 1 およびモデル 2 の実験および解析で得られた断面形状の代表例を示し、Fig. 11 に実験結果および解析結果から得られた内部欠陥面積比の比較を示す。同結果から欠陥形状および面積比がよく一致していることがわかる。Fig. 12 に解析より得られた Q 値と実験より得られた内部欠陥面積比の関係を示す。同結果より、鍛伸工程で内部欠陥が閉鎖する Q 値は初期断面形状に関係なく 0.21 以上であることがわかった。

Fig. 10 Cross section shape comparison with experimental result and analytical result

Fig. 11 Void area ratio comparison with analytical result and experimental result

Fig. 12 Relationship between Q value and void area ratio of experimental result

3.3 鍛伸工程における工程設計手法

鍛伸工程ではプレスオペレータが指示書に基づいた作業を行うため、素材の初期状態を考慮できない。しかし、実際には、素材の初期状態、特に、素材温度分布などは加熱停止から鍛造開始までの時間により大きく異なる。そこで、素材の状況に合わせた鍛造条件を設定することにより内部欠陥を閉鎖させることが効率的と考えられる。しかし、逐一素材温度条件を変更して変形解析を行うことは困難であるため本研究では、効率的に鍛造条件を得られる手法として品質工学⁶⁾を活用した。

上記から $Q=0.21$ 以上で内部欠陥が閉鎖すると考えられる。一方で、この内部欠陥閉鎖評価数は相当ひずみ・相当応力・静水圧応力の関数のため、素材形状・素材温度分布・工具形状・圧下率が大きく影響を及ぼす。そのため、これらの鍛造条件と内部欠陥閉鎖評価数との関係を定量的に明らかにすることが必要である。本研究では、品質工学の手法を適用して各因子が内部欠陥閉鎖評価数に及ぼす影響を定量的に把握し、それを用いた工程設計手法を構築した。

はじめに、内部欠陥閉鎖に影響を及ぼす因子を4項目3水準選定し、直交表(L9)に基づいて変形解析を行った。その後、感度を算出して影響度合いを調査した。Table 4に4種類の因子とその水準を示す。

Table 4 Factors and levels for Taguchi method

Control factor		Level 1	Level 2	Level 3
A : Cross section shape		1.00	1.25	1.50
B : Dies shape	Upper	Flat1	Flat1	Flat2
	Lower	Flat1	Wide	Flat2
C : Reduction /%		10%×2	15%×2	20%×2
D : Temp. distribution /°C		1200 const.	1200-1000	1200-900

因子は、(A) 素材断面形状(幅/高さ)、(B) 工具形状、(C) 圧下率および(D) 温度分布とした。同表に示すように、工具形状は平工具を2種類用いており、平工具2は平工具1に比べ、工具長さが素材の軸方向に1.6倍大きい。圧下方法は、素材上下面から圧下を加えて軸方向に鍛造し、その後、上下反転させ同様に鍛造する。素材断面内の温度分布は、1200°C均熱の場合、中心温度1200°C表層中心部1000°Cおよび900°Cの場合として、変形解析で得られた素材中心部軸方向において最小の Q 値を算出した。Fig. 13に断面内素材温度分布を示す。同図に示すように解析モデルは1/2左右対称とした。

Fig. 13 Cross sectional temperature distribution of material (Cross section shape = 1.00)

変形解析に使用した変形抵抗 σ はひずみ速度感受性指数 m を用いた以下の式を用いた。

$$\sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (4)$$

ここで、 K : 温度・材質に関する定数、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度である。 K および m は800°Cから1300°Cまで100°C毎の6条件においてひずみ速度を0.02, 0.2および2の3条件で圧縮試験を行った結果から決定した。なお、変形解析では近似式を内外挿した。Table 5に圧縮試験により得られた K および m の値の一例を示す。また、摩擦係数は鍛伸加工実験より得られたクーロン摩擦係数 $\mu=0.15$ ⁷⁾を用いた。

Table 5 Example of K and m in case of 1300°C

Strain rate	K	m
0.02	15.02	0.143
0.2	31.99	0.206
2	40.44	0.208

Fig. 14に解析で得られた Q 値に関する感度の要因効果図を示し、Table 6に感度に関する分散分析表を示す。同結果より、(B) 工具形状、(C) 圧下率および(D) 素材温度分布の影響が大きいことがわかる。また、品質工学では交互作用がないと仮定して感度を算出している。この時、予測される傾向と一致すれば交互作用がないと言える。逆に交互作用がある場合、予測される結果と大きく異なる⁶⁾。Fig. 14から本研究で選択した水準において(B) 工具形状では、上下非対称工具>平工具2>平工具1の順に、(C) 圧下率は大きくなるに伴って、さらに、(D) 素材温度分布の差が付与されるに伴い Q 値に及ぼす影響は大きい。一方、(A) 素材形状の差が Q 値に及ぼす影響は小さい。同結果は、想定される予測結果と一致しており、今回抽出した因子には交互作用がないと言える。

Fig. 14 Sensitivity for Q value

Table 6 Analysis of variance table

Factor	F	S	V	S'	ρ /%
A	2	22.330	11.165	22.330	4.74
B	2	234.876	117.438	234.876	49.85
C	2	157.474	78.737	157.474	33.42
D	2	56.510	28.255	56.510	11.99
e	0	0	0	0	0
Total	8	471.189	-	471.189	100

また、(B) 工具形状、(C) 圧下率、(D) 素材温度分布、
(A) 素材形状の順に感度の幅が小さくなっており、 Q 値に影響を及ぼす度合いが低くなることからわかる。工具形状では従来から言われているように上下非対称工具が Q 値に及ぼす影響が大きく、次に、上下対称工具では工具長さの長い方が Q 値に及ぼす影響が大きいためとわかる。一般的に、工具長さの長い方が素材は平面ひずみ状態に近づくため、素材内部の相当ひずみが高くなり、かつ、静水圧応力も高くなる。さらに、非対称工具の場合では、工具と素材の接触面積の差により非対称変形となり、相当ひずみが高くなる。本研究で用いた工具形状では、感度の値が Fig.14 となったが、工具形状の長さを変更することにより、種々変化すると考えられる。圧下率については、その増加に伴ってほぼ線形に感度が増加傾向にある。すなわち、圧下率は軽圧下の場合、表層近傍のみ変形して内部までひずみが付加されないが、圧下率が高くなると相当ひずみが高くなる。素材温度分布については、表層が低下するに伴い Q 値が上昇する傾向にあることがわかり、表層温度低下により変形抵抗に差が生じ、幅方向への変形が抑制され、素材内部への静水圧応力が高くなるためであると言える。最後に、素材形状については幅/高さが大きくなるに伴い、 Q 値が上昇する傾向にある。これは、素材の幅が広い場合、工具と素材との摩擦による拘束力が影響し、幅広がりしにくく素材内部への静水圧応力が高くなるためと考えられる。

以上から、内部欠陥を閉鎖させるためには、相当ひずみおよび静水圧応力を高くする必要がある。鍛造条件は素材断面形状を幅方向に広い矩形とし、できるだけ平面ひずみ状態となるように工具形状をできるだけ長くして素材温度分布を付与した状態で、圧下率を高くすることが望ましい。一方で、プレス能力など設備制約ですべてを満足させることは難しいため、上記より得られた Q 値の限界値を満足させる鍛造条件の適正化が必要である。

品質工学では、 Q 値の推定値を Q_e 、感度を m および感度の総平均値を m_a とすると、 Q_e 、 m は以下の式で求めることができる。なお、 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i は各因子における各水準の感度の値を示している。

$$Q_e = 10^{m/20} \quad (5)$$

$$m = A_i + B_i + C_i + D_i - 3 \times m_a \quad (6)$$

なお、 $i=1, 2, 3$ は水準を表す。ここで、上式において推定値 Q_e を目標値に各因子の水準を選択することにより鍛造工程設計が可能と考えられる。そこで、工具形状・素材形状・温度分布の水準を Table 4 から選択し、設定した目標値を満足する圧下率を算出した。

本研究では、鍛伸工程でのモデル実験より得られた $Q = 0.21$ を目標値 $Q_e = 0.21$ とし、各因子の選択については実鍛造工程を考慮し、素材形状は一般的な断面形状である水準 1 (A_1) を、工具形状は上下平工具である水準 3 (B_3) を選択した。さらに、温度分布は通常の操業状態である水準 2 (D_2) とした。これらを式 (4)、(5) に代入し、圧下率の感度を算出した結果、 -15.45 となり、圧下率は $16.0\% \times 2$ 回が得られる。なお、感度の値から圧下率を決定する際に

は、水準間の比例配分により求めた。上記した内部欠陥閉鎖評価数の予測値について、上記の条件にて変形解析を行い、検証した。

Fig. 15 に変形解析により得られた Q 値分布を示す。なお、同図の横軸は軸方向に対して端部を除いた全長の $0.1 \sim 0.9$ 間を示す。同結果より、解析で得られる Q 値の最小値が感度を使った計算値とほぼ一致し、感度の値から Q 値を予測することが可能であると言える。以上から、Fig. 13 で得られた結果を活用することで $Q = 0.21$ を満足させる工程設計が容易にできると考えられる。

Fig. 15 Q value distribution at the material center

4. ま と め

変形解析を活用して、内部欠陥閉鎖挙動について検討した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 圧縮工程の変形解析から欠陥の形状・サイズ・位置と圧下率の関係を調査した結果、圧縮工程での欠陥閉鎖のためには 75%以上の圧下が必要である。
- 2) モデル実験および三次元変形解析を用いて内部欠陥閉鎖評価数の定量化を行った結果、鍛伸工程において内部欠陥閉鎖評価数 $Q = 0.21$ 以上で欠陥が閉鎖する。
- 3) 品質工学を活用して、鍛造工程設計手法を検討した結果、素材形状、工具形状、圧下率および温度分布の欠陥閉鎖に対する影響度合いを定量的に明らかにし、目標値を満足させる鍛造工程設計が可能となった。

参 考 文 献

- 1) 小野信市・南克之・落合朋之・岩館忠雄・中田進一：機論 C, **61**-585, (1995), 387-392.
- 2) 渡辺和夫：九州共立大研究報告, **26** (2002), 13-18.
- 3) 柿本英樹・長田卓・高橋洋一・森啓之：平 16 塑加春講論, (2004), 237-238.
- 4) 小野信市・南克之・村井悦夫・岩館忠雄：平 5 塑加春講論, (1993), 693-696.
- 5) 田浦良治・飯伏順一・塚本穎彦：32 回塑加連講論, (1981), 207-210.
- 6) 田口玄一：品質工学の数理, (1999), 日本規格協会.
- 7) 柿本英樹・高橋洋一・高森秀樹：塑性と加工, **49**-568 (2008), 403-408.