

(論文)

# 内部欠陥閉鎖挙動の予測技術

## Prediction of Closing Internal Voids by Using Numerical Simulation



柿本英樹\*<sup>1</sup>(博士(工学))  
Dr. Hideki KAKIMOTO



有川剛史\*<sup>2</sup>  
Takefumi ARIKAWA



岸本 敦\*<sup>3</sup>  
Atsushi KISHIMOTO

A deformation analysis of the closing behavior of internal voids was conducted by a two-dimensional finite element method (FEM) simulating voids in a steel ingot under compression. A comparison was made between model experiments and analytical results, which confirmed the applicability of the analysis to the behavior of internal voids. This analysis was used to study the relationship between the reduction ratio and the void shape/void position. For a forging process, a model experiment and 3-D FEM were performed to determine a  $Q$  value, an evaluation index of void closure. This value was used to quantify the limit value at which the closure of internal voids begins. As a result, the voids were found to close at a  $Q$  value of 0.21 or greater. In addition, an experiment was carried out using a 30 tonne ingot, and the UT inspection results and calculated  $Q$  values were compared. It was found that the void closure occurs at a  $Q$  value of 0.6 or greater.

まえがき = 近年、製品サイズの大型化に伴って、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。鋼塊が大型化するとザク性欠陥と呼ばれる内部欠陥および偏析が顕著となる。そのため、自由鍛造ではプレス最大の加圧力下でも鋼塊内部を均質化することが困難となる。

従来、理論解析により圧縮工程における大型品での鍛錬効果について研究<sup>1)</sup>されている。また、円柱状プラスチックを用いた圧着の物理的モデルの検討<sup>2)</sup>や、鋼塊表面冷却による内部温度分布の影響が調査<sup>3)</sup>されている。一方、粉末焼結体の密度変化による各種鍛伸方法の影響<sup>4)</sup>などの研究により、静水圧積分パラメータを用いた欠陥の閉鎖挙動の評価が行われている。また、このパラメータを修正した静水圧積分パラメータを圧延におけるザク状欠陥の圧着性評価に適用した事例<sup>5)</sup>が報告されている。このように、静水圧積分パラメータは加工方法によらず欠陥閉鎖の指標に適用可能である。また、欠陥閉鎖を評価できる利点があり、圧縮工程または鍛伸工程単独での適用は広く行われている。しかしながら、鋼塊の凝固時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が、これらを一連の工程として内部欠陥の変形挙動を明らかにされた事例は少ない。このため、これらの工程を一つの工程と考え、内部欠陥の変形挙動を明らかにし、各工程における鍛造条件を適正化する必要がある。

当社ではまず、鋼塊時での内部欠陥を模擬した二次元鍛造シミュレーションを行い、圧縮工程における内部欠陥の閉鎖挙動を調査した。つぎに、鍛伸工程において、モデル実験と三次元鍛造シミュレーション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、実機鋼塊を用いて内部欠陥閉鎖条件と閉鎖挙動確認する実験を行い、適正鍛造条件を算出した。

### 1. 圧縮工程における内部欠陥閉鎖挙動

#### 1.1 鍛造シミュレーションモデルおよびモデル実験結果との比較

圧縮工程では、鋼塊の鑄込み時に発生したザク性内部欠陥の挙動を明確にする必要がある。そのため、初期欠陥の位置やそのサイズに依存した、圧下率による変形後の欠陥サイズの定量的な関係を求めた。そこで、汎用有限要素法(以下、FEMという)解析ソフト(Forge2D)を用いて欠陥位置およびサイズを変更した鍛造シミュレーションを行い、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。鍛造シミュレーションの素材モデルの概略を図1に

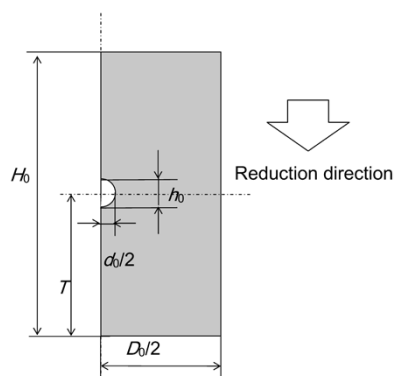


図1 鍛造シミュレーションの素材モデル  
Fig. 1 Analytical model

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 材料研究所 \*<sup>2</sup> 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 \*<sup>3</sup> 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鍛圧部

示す。ここでは実際の鋼塊形状を単純化した円柱形状とし、解析では軸対称モデルを仮定して実施した。

まず、鍛造シミュレーションを行う前に、シミュレーション結果を評価できる内部欠陥挙動のモデル実験を実施した。

実験では、変形後の人工欠陥の形状を正確に測定するため、圧縮実験後に断面切断を行わずにX線CTにより欠陥寸法を測定した後、実験材を切断して欠陥形状を測定した。また人工欠陥は、球状などの凹みをあらかじめ付与した部材2個、およびその部材と同一材質の円筒管を1個用意し、凹みを付与した部材を円筒管の中に押し込むことで、所望の位置に所望の形状の人工欠陥ができるようにした。なお、モデル実験材はあらかじめ450℃で3h焼鈍した純アルミニウム1070材を用いた。

モデル実験材は $H_0/D_0=2.0$ とし、欠陥形状 $h_0/d_0=5$ 、欠陥径 $d_0/D_0=0.08$ 、欠陥位置 $T/H_0=1/2$ で、高さ $H_0$ を100mmとした。

鍛造シミュレーションに用いる摩擦係数は、モデル実験での加工後素材の側面バルジ変形状（最大径）がシミュレーション結果と一致するようにクーロン摩擦 $\mu$ を決定し、 $\mu=0.15$ を採用した。さらに、試験材を用いた圧縮試験によって変形抵抗を測定し、変形抵抗式として式(1)を決定した。なお、本変形抵抗式を用いた場合の圧縮荷重の予測値と実験値は3%以内で一致している。

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

圧下率による初期欠陥に対する欠陥径および欠陥高さに関して、モデル実験結果と鍛造シミュレーション結果の比較を図2に示す。また、モデル実験および鍛造シミュレーションで得られた各圧下率における内部欠陥形状の比較を図3に示す。同図から、各圧下率での鍛造シミュレーション結果と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拡張率も精度よく一致している。このことから、FEM解析により内部欠陥閉鎖挙動が明らかにできると考えられる。

### 1.2 欠陥形状・欠陥位置・欠陥サイズの影響

ザク性欠陥は鋳塊の特定部位（最終凝固位置近傍）に発生し、サイズもさまざまである。このため、鋼塊の圧縮工程の評価では、その欠陥サイズや欠陥位置の影響を明らかにすることは重要である。このため、表1に示す

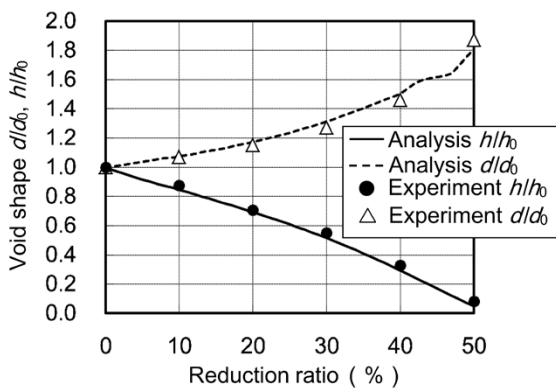


図2 モデル実験および変形解析における圧下率と欠陥径( $d/d_0$ )および欠陥高さ( $h/h_0$ )との関係  
 Fig. 2 Relationship between reduction ratio and void shape ( $d/d_0$  and  $h/h_0$ ) for analytical results and experimental results

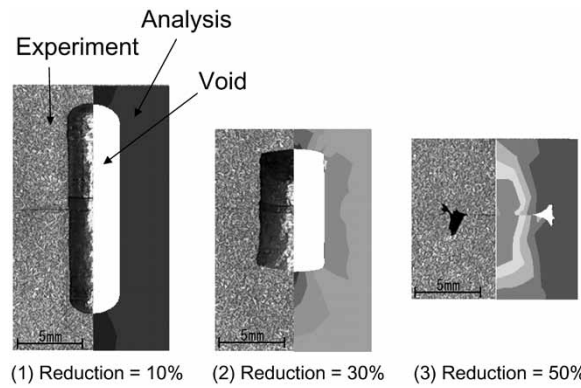


図3 モデル実験および鍛造シミュレーションで得られた各圧下率における内部欠陥形状の比較

Fig. 3 Internal void shape comparison with experimental result (left) and analytical result (right) (equivalent strain distribution)

表1 鍛造シミュレーションの条件  
 Table 1 Analytical model (Ingot shape  $H_0/D_0=1.5$ )

$h_0/d_0$	$T/H_0$	$d_0/D_0$
1.0	1/2	0.01
2.0	1/4	0.05
5.0		0.1
		0.2

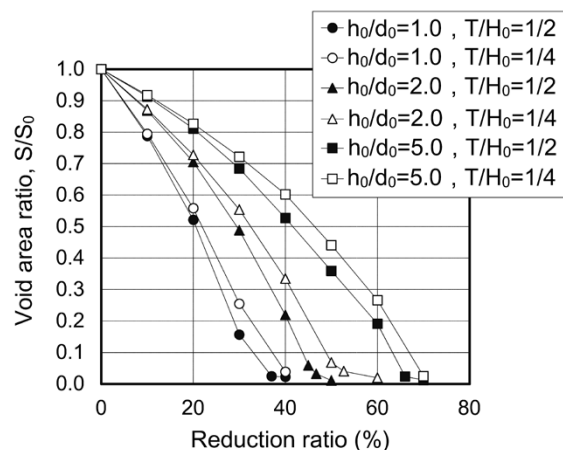


図4 圧下率と内部欠陥面積比( $S/S_0$ )の関係におよぼす欠陥形状および欠陥位置の影響  
 Fig. 4 Effect of void shape and position on the relation between reduction ratio and void area ratio ( $S/S_0$ )

条件に基づいて鍛造シミュレーションを実施した。圧下率と内部欠陥面積比( $S/S_0$ )との関係を図4に示す。本結果より、初期欠陥形状比( $h_0/d_0$ )が大きくなるに伴い、また、欠陥位置( $T/H_0$ )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。

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図5に示す。なお、上記の限界圧下率は空隙部の節点がすべて接触した状態の圧下率とした。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から、実鋳塊で $D_0$ が大きな場合でも本解析が妥当であることがわかる。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。欠陥が閉鎖するには、欠陥形状 $h_0/d_0=$

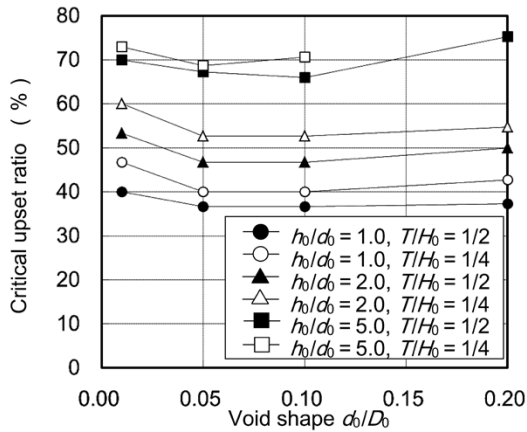


図5 欠陥径/銅塊径 ( $d_0/D_0$ ) と限界圧下率との関係 ( $H_0/D_0=1.5$ )  
 Fig. 5 Relationship between void shape ( $d_0/D_0$ ) and critical upset ratio ( $H_0/D_0=1.5$ )

5以上では75%以上の圧下率が必要であり、欠陥の形状によっては、実機の圧縮工程で完全に閉鎖するのは難しいと考えられる。

### 1.3 鍛伸工程における内部欠陥

上述のように、圧縮工程だけでは欠陥が残存する可能性があるため、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。実験材形状を図6に示す。供試材は熱間鋼の変形と同様の挙動を示す鉛材を用いた。初期形状  $\phi 40\text{mm} \times 36\text{mm}$  の円柱形状 (モデル1) と  $35\text{mm} \times 36\text{mm}$  の角柱形状 (モデル2) の2種類用意した。また、欠陥形状は  $\phi 2\text{mm}$  の貫通孔とした。工具形状の模式図を図7、モデル1およびモデル2の各実験条件を表2に示す。

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、図7および表2に示すように、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, すなわち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。実験後、平工具中央部で断面切断を行い、貫通孔部分を楕円形状と仮定し、長径・短径を測定して内部欠陥の面積を算出した。圧下率 (= (初期高さ - 圧下後高さ) / 初期高さ  $\times 100$ ) と変形前後の内部欠陥面積比の関係を図8に示す。本結果より、モデル1およびモデル2ともに初期のピレット形状に依存するが、圧下率に関しては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のがわかる。このことから、本稿において対象としている空隙閉鎖はひずみが支配的であると考えられる。

### 1.4 鍛造シミュレーションによる内部欠陥閉鎖評価値の算出

内部欠陥の閉鎖を狙った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。そこでここでは、従来提案されている大矢根の式を活用した内部欠陥閉鎖評価値  $Q^4$  を活用して定量化を行った。なお、内部欠陥閉鎖評価値 (以下、 $Q$ 値という) は以下の式で

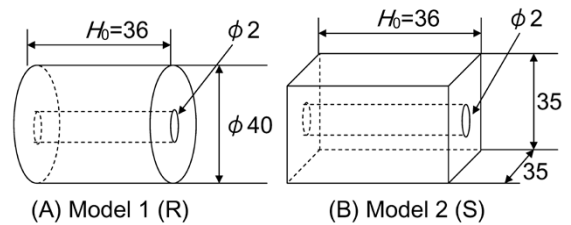


図6 実験材形状  
 Fig. 6 Shapes of experimental material

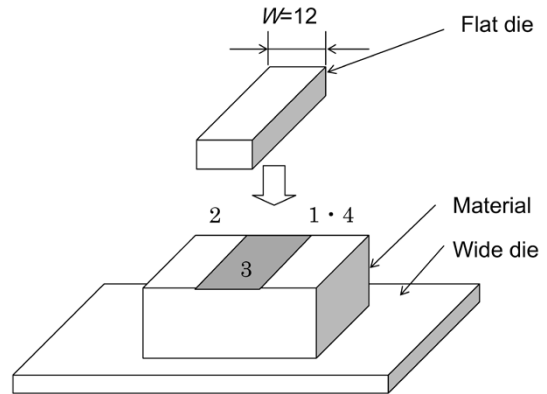


図7 工具形状の模式図  
 Fig. 7 Appearance of forging method

表2 モデル1およびモデル2の各実験条件  
 Table 2 Experimental conditions

No.	Reduction ratio / %				Press place	
	1	2	3	4		
Model1	R-1	5	5	10	5	Upper
	R-2	10	10	20	10	Upper
	R-3	7.5	7.5	15	7.5	Upper
	R-4	15	15	15	-	Upper and lower
Model2	S-1	5.7	5.7	11.4	5.7	Upper
	S-2	11.4	11.4	22.9	11.4	Upper

定義されている。

$$Q = \int_0^{\varepsilon_f} (-\sigma_m / \sigma_{eq}) d\varepsilon_{eq} = \sum_{i=1}^n (-\sigma_m / \sigma_{eq})^i \Delta \varepsilon_{eq}^i \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\sigma_m$  : 静水圧応力、 $\sigma_{eq}$  : 相当応力、 $\varepsilon_{eq}$  : 相当ひずみである。当社では、 $Q$ 値を算出するためにモデル実験と同一条件の鍛造シミュレーションを行った。なお、素材モデルは1/2対称として貫通孔がある状態で欠陥形状を求めるとともに、 $Q$ 値を計算するために貫通孔がない状態で、上記式 (2) を用いて各要素について計算された応力成分・ひずみ成分から求めた。鍛造シミュレーションに用いた摩擦係数および変形抵抗を表3に示す。これらの値は過去の文献<sup>6)</sup> から得られた値である。

モデル1およびモデル2の実験および鍛造シミュレーションで得られた断面形状の代表例を図9に示す。実験および鍛造シミュレーションで得られた同一圧下率での内部欠陥面積比の比較を図10に示す。これらの結果から、欠陥形状および面積比が実験と鍛造シミュレーションでよく一致していることがわかる。鍛造シミュレーションより得られた $Q$ 値と実験より得られた内部欠陥面積比の関係を図11に示す。この結果より、鍛伸工程で内

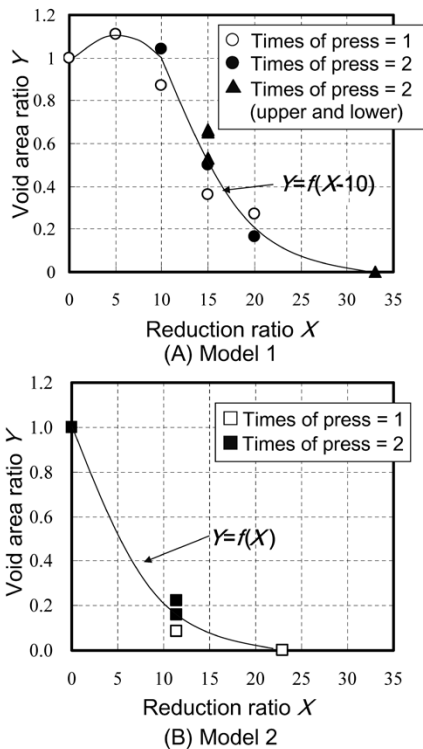


図8 圧下率と内部欠陥面積比の関係

Fig. 8 Relationship between reduction ratio and void area ratio

表3 摩擦係数および変形抵抗  
Table 3 Analytical conditions

Friction coefficient $\mu$	0.30
Flow stress $\sigma$ (MPa)	$\sigma = 46.2 \cdot \varepsilon^{0.194} \cdot \dot{\varepsilon}^{0.026}$

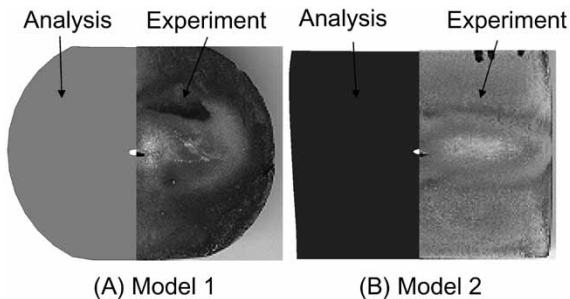


図9 実験および鍛造シミュレーションで得られた断面形状の代表例  
Fig. 9 Cross section shapes of experimental results and analytical results

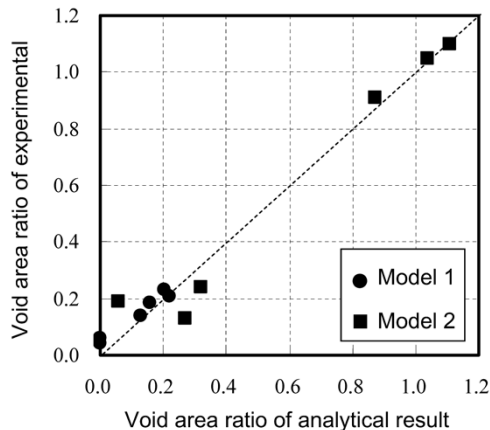


図10 実験および鍛造シミュレーションで得られた内部欠陥面積比の比較  
Fig. 10 Comparison in void area ratio between analytical and experimental results

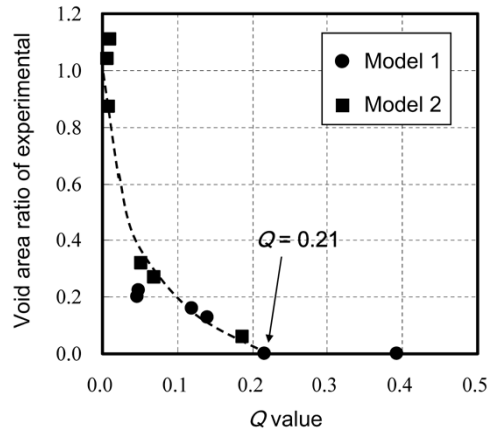


図11 Q値と実験より得られた内部欠陥面積比の関係  
Fig. 11 Relationship between Q value and void area ratio of experimental result

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。

## 2. 実鋼塊を利用した鍛造実機試験

### 2.1 実機実験条件

鋼塊を所定の温度で加熱し、自由鍛造プレスを用いて断面積を段階的に減少させるように鍛造した。その際に、その都度内部欠陥を超音波探傷試験で調査して、内部欠陥の変化を測定した。鍛造後、超音波の透過度を向上させるための焼鈍を実施した後、表面の酸化スケールを除去して超音波探傷試験を実施した。

供試材はJIS SF590A相当で、鋼塊の重量は30t、鋼塊形状は押湯部を除いて $\phi 1,380\text{mm}$ 、高さ2,180mmである。

各パスの目標断面形状を表4に示す。使用した金数は幅 $W=800$ および $500\text{mm}$ の上下同一幅を有する2種類の平金敷 (Flat die) を使用した。

探傷位置を図12に示す。S/N比2:1として同図に示すA面およびB面のMDDS (最小検出欠陥径: Minimum Detectable Defect Size) を算出した。

### 2.2 実鋼塊における内部欠陥閉鎖挙動

前節で述べた実験条件において測定した平底穴換算値 (FBH) と鍛造シミュレーションにより計算した当該位置における内部欠陥閉鎖評価数 $Q$ の計算結果を図13に示す。ここで、被検査材のMDDSはおよそ $1.0\text{mm}$ 前後であることから、 $Q$ 値は0.4以上で欠陥検出以下となり、外挿を行うと $Q$ 値は0.6以上で超音波探傷試験による欠陥はなくなると考えられる。このため、欠陥の閉鎖には $Q \geq 0.6$ が必要であると判断した。上記から欠陥閉鎖に必要な $Q$ 値について、貫通孔を設けた小型実験では $Q \geq 0.21$ に対し、実欠陥では $Q \geq 0.6$ と大きな差が生じている。これは、小型モデル実験の欠陥形状が貫通孔であること、また、実鋼塊の欠陥は分布を持っていることなどが原因と考えられる。

一方、図13の $Q < 0.21$ の領域を見ると、FBHと $Q$ 値はほぼ線形に変化している。このことから、欠陥サイズが大きい場合では、線形に欠陥が小さくなると考えられる。一方、欠陥が小さくなると、それに伴って、数値シミュレーションのメッシュサイズを小さくする必要があ

表4 目標断面形状  
Table 4 Target size for each pass

(1) W=800mm flat die

Pass No	Before forging		After forging	
	Ho	Wo	H'	W'
1	Ingot		1115	1282-1731
2	1282-1731	1115	1120	1189-1398
3	1189-1398	1120	1120	1134
4	1134	1120	1090	1137
5	1137	1090	1100	1115
6	1115	1100	1110	1106
7	1106	1110	854	1218
8	1218	854	949	934

(2) W=500mm flat die

Pass No	Before forging		After forging	
	Ho	Wo	H'	W'
1	Ingot		1115	1285-1657
2	1285-1657	1115	1128	1146-1280
3	1146-1280	1128	1120	1120
4	1120	1120	1090	1132
5	1132	1090	1100	1103
6	1103	1100	1100	1103
7	1103	1100	854	1155
8	1155	854	949	914

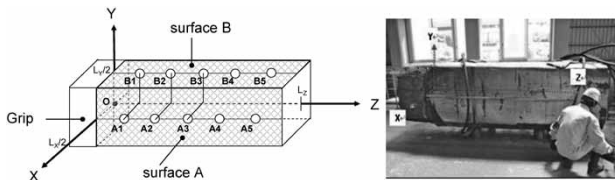


図12 探傷位置  
Fig.12 Position of ultra-sonic test

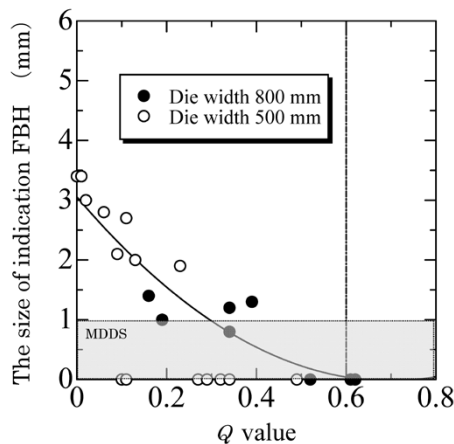


図13 Q値とF.B.H.の関係  
Fig.13 Relationship between Q value and F.B.H.

るが、今回は欠陥サイズ変化によるメッシュサイズの変更は行っていないため、実際よりも小さなQ値で欠陥が閉鎖したと考えられる。

### 3. 内部品質を重視した鍛伸工程設計

前章から、鍛伸工程では $Q \geq 0.6$ を満たすことにより内部欠陥が閉鎖することがわかった。このため、鍛伸工程設計には、Q値を高くするような設計が必要である。図13からもわかるようにQ値は、金敷幅が500mmのときより800mmのときの方がより高い値を持っている。これは、金敷幅が大きいことにより、長手方向の材料変形が

表5 鍛造パススケジュールの設計例  
Table 5 Example of forging process design

Pass No	Forging ratio S	Pass Schedule W=500 mm		W=500 Q	Forging ratio S	Pass Schedule W=800		W=800 Q
		Cross section	Dimension			Cross section	Dimension	
0	1.0		1525 Dia.	0	1.0		1525 Dia.	0
1	-		1115×1657	0.07	-		1115×1731	0.15
2	1.3		1128×1280	0.06	1.2		1120×1398	0.20
3	1.5		1090×1137	0.06	1.4		1120×1134	0.29
4	1.5		1120×1120	0.06	1.5		1090×1137	0.31
5	1.5		1090×1132	0.06	1.5		1100×1115	0.34
6	1.5		1100×1103	0.06	1.5		1110×1106	0.34
7	1.9		854×1155	0.18	1.8		854×1218	0.52
8	2.1		949×914	0.18	2.1		949×934	0.62
Evaluation				not consolidated	consolidated			

拘束されるためである。そこで、同じ鍛錬成形比となるようなパススケジュールで金敷幅800mm、500mmの2条件で鍛造を行い、欠陥の有無を調査した。

鍛造パススケジュールを表5に示す。これは、金敷による幅広がりも考慮して目標形状とするパススケジュール設計を行っている。実際に、このパススケジュールにて鍛造した結果、幅500mmの場合では $Q < 0.6$ となり、欠陥が検出されたが、幅800mmの場合では $Q \geq 0.6$ となり欠陥が検出されなかった。

本結果から、あらかじめQ値を算出し、 $Q \geq 0.6$ となるように鍛造パススケジュールを設計することで、欠陥が発生しない条件を決定することが可能となった。

**むすび** = 鍛造シミュレーションを活用して、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) 圧縮工程の鍛造シミュレーションから欠陥の形状・サイズ・位置と圧下率の関係を調査した結果、圧縮工程だけで欠陥閉鎖を行うためには75%以上の圧下が必要である。
- 2) 人工欠陥によるモデル実験および三次元鍛造シミュレーション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ことがわかった。
- 3) 実鋼塊を用いた実験において欠陥が閉鎖する鍛造条件は、 $Q=0.6$ 以上であることがわかった。
- 4) 欠陥閉塞の閾値(いきち)を考慮することにより、実機鍛造に有益な鍛造パススケジュールを算出可能であることを検証した。

### 参考文献

- 1) Kopp, R et al. Starl Eisen. 1982, Vol.102, No.23, p.1177-1182.
- 2) Bondnar, R et al. Mech Work Steel Process. 1987, Vol.24, p.237-256.
- 3) Park, C et al. J Mater Process Technol. 1997, Vol.67, No.1-3, p.195-200.
- 4) 荒木重臣ほか. 昭61塑加春季講演会. 1986, p.383-386.
- 5) Nakasaki M et al. J Mater Process Technol. 2006, Vol.177, No.1-3, p.521-524.
- 6) 田浦良治ほか. 32回塑加連講論. 1981, p.207-210.