

(論文)

大型原子力圧力容器用部材の鍛造技術

Forging Technology for Large Nuclear Pressure Vessel Parts



柿本英樹*¹ (工博)
Dr. Hideki KAKIMOTO



池上智紀*²
Tomonori IKEGAMI

The increasing output of nuclear power generation calls for larger vessels for next-generation nuclear power plants. A vessel with an increased diameter requires increased load for its forging, which can make it difficult to use a conventional solid die. In order to reduce the forging load, a rotary incremental forging method has been applied to hot forging. This method includes pressing and rotating a material in an incremental manner such that a target shape is obtained. This study aimed at improving the accuracy of numerical simulation for the rotary incremental forging to reduce the load when forging large vessels. This has enabled the temperature of the material and flow stress to be precisely predicted; an example of this is reported in the paper. Specifically, the heat transfer coefficient to be used for the numerical simulation had been determined experimentally from a small-scale hot-forging. The reduction of the flow stress associated with incremental forging, had been deduced from a compression test, and the value was applied to the numerical simulation. A preform was designed on the basis of the above simulation to perform a 1/1 size scale experiment. A precision of better than 5% has been confirmed for the shape prediction.

まえがき = 近年の原子力発電プラントの高出力化に伴い、圧力容器に使用される鍛鋼部材は大型化している。当社では過去に、ニアネット金型を用いて成形する型入れ法により、フランジ部とドーム部が一体となったヘッド部材の製造を行った¹⁾。しかしながら、鍛鋼部材の大型化に伴う鍛造荷重増加により、製造できる寸法には限りがあった。

従来、鍛造荷重を低減する方法として回転鍛造が知られている。これは、金型あるいは素材を回転させて部分的に圧下することによる局所成形の繰り返しにより鍛造する方法であり、鍛造品の寸法に比べて小さな荷重で成形できる。ところがこの鍛造方法では、ニアネット金型を用いた1回圧下による成形に比べて鍛造後の形状予測が困難であり、そうした熱間鍛造に対して有限要素法による3次元塑性変形解析を適用できれば工程設計時間の短縮に貢献できる。

そこで当社では、鍛造時間の長さを考慮し、回転鍛造方法に適した3次元熱連成塑性変形解析手法の確立に取り組んだ。回転鍛造方法では、素材の変形箇所を順次移動させながら圧下を繰り返し行うため、型入れ法に比べて鍛造時間が飛躍的に長くなり、素材の中心と表面の温度差が大きくなる。そこで、素材温度の実機測定結果から熱伝達係数を同定し、素材温度を高精度に予測した。さらに、一度圧下した箇所を再度圧下するまでの間に材料は回復・再結晶挙動を示し、変形抵抗が変化する。この回復・再結晶挙動は保持時間により割合が変化する。そこで、圧下間隔による変形抵抗の変化を把握した上で

3次元熱連成塑性変形解析を適用した。

この3次元熱連成塑性変形解析を活用して実機サイズの工程設計を行うとともに、実機実験を行って3次元熱連成塑性変形解析の形状予測精度を確認した。

1. ニアネット金型を用いた型入れ法による鍛造荷重予測

1.1 変形抵抗データ

鍛造荷重がプレス加圧力よりも大きくなると目標圧下量まで圧下することができない。これによって部分的に欠肉が発生するため、鍛造荷重を高精度に予測することは鍛造工程を決定する上で重要である。一般的に、鍛造荷重 P は以下の式(1)で表せる²⁾。

$$P = C \cdot S \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、 C :拘束係数、 S :接触面積、 σ :変形抵抗である。ここで、拘束係数や接触面積は、金型と素材との摩擦係数や接触面形状に依存する値である。一方、変形抵抗は材料によって温度やひずみ、ひずみ速度で大きく変わることが知られており、鍛造荷重を予測するためには変形抵抗を高精度に把握しておく必要がある。

そこで、今回対象としている材料であるASME規格のSA508 Grade3(表1)の変形抵抗データを詳細に把握

表1 熱間試験材の化学成分規格
Table 1 Chemical composition of standard hot compression test

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	CA	B	Ti	Al
Min	-	1.20	-	-	-	0.40	-	0.45	-	-	-	-	-	-
Max	0.25	1.50	0.025	0.025	0.40	1.00	0.25	0.60	0.05	0.20	0.015	0.003	0.015	0.025

*¹ 技術開発本部 材料研究所 *² 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部

表2 圧縮試験条件

Table 2 Conditions of compression test

Temperature (°C)	700, 800, 900, 1,000, 1,100, 1,200
Strain rate (/s)	0.0002, 0.002, 0.02, 0.05, 0.2, 2.0

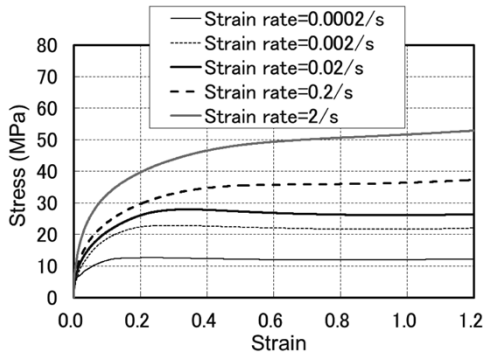


図1 変形抵抗データの一例 (1,200°Cの場合)

Fig. 1 Example of relationship between flow stress and strain (in case of 1,200°C)

することとし、この成分規格内で小型試験材を作製して圧縮試験を行った。圧縮試験では圧下率70%を1回で圧縮して変形抵抗データを採取した。また今回は熱間で鍛造するため、試験条件としては温度を700°Cから1,200°Cまでの間で100°Cごとに変化させ、ひずみ速度はプレス機の降下速度を考慮して $0.0002\sim 2.0s^{-1}$ と比較的広範囲とした(表2)。図1に試験温度が1,200°Cの場合の変形抵抗データを示す。この結果に基づいて変形抵抗を温度・ひずみ・ひずみ速度で定式化し、塑性変形解析に適用した。

1.2 型入れ法における鍛造荷重の予測

今回対象とした大型鍛造部材を包括する荒地形状・金型形状を設計し、塑性変形解析を活用して鍛造荷重を算出した。塑性変形解析ソフトにはFORGE2D (TRANSVALOR社の商標)を使用した。なお、解析対象が軸対称形状のため、ここでは2次元(軸対称)の塑性変形解析を行った。図2に解析モデルを示す。素材温度は1,200°Cとし、圧下速度は10mm/sと50mm/sの2条件とした。図3に解析で得られた鍛造荷重-ストローク線図を示す。同図に示すように、圧下速度が10mm/sの場合、50mm/sに比べて鍛造荷重は低いものの、目標の圧下位置(1,150mm)まで圧下したときの鍛造荷重はプレス機の最大加圧力である130MNを超えており、目標位置まで圧下することができないことがわかる。このため、鍛造荷重を低減させる必要がある。

鍛造荷重を低減させる方法として、式(1)から①変形抵抗を低くする、②接触面積を減らす、の二つが考えられる。変形抵抗を低くするには素材温度を上げる方法が有効である。設備上、1,230°C近くまで加熱炉内の温度を上げることは可能であるが、素材温度を1,200°C以上にすると部分的にオーバーヒートする可能性がある。そこで、素材と金型の接触面積を減らして鍛造荷重を低減する方法を検討した。まず、今回対象としている鍛鋼部材は軸対称形状であり、金型の対称軸を中心に回転させることで所要の形状に鍛造することが可能と考えられる。そこで、内面成形用の金型を目標鍛造形状の内面と同一形状とし、軸対称形状の金型から一断面を切り取っ

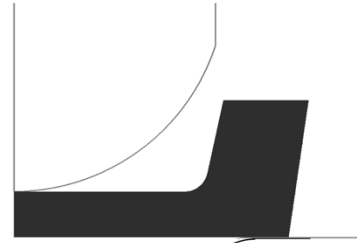


図2 解析モデル

Fig. 2 Analysis model

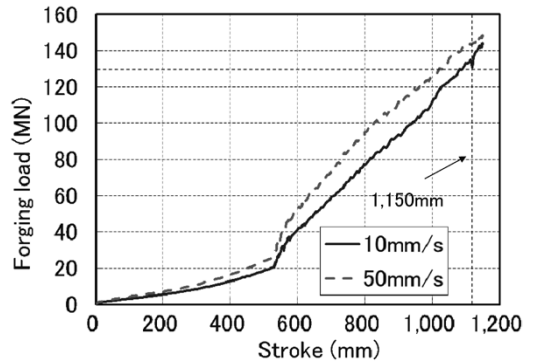


図3 鍛造荷重-ストローク線図

Fig. 3 Forging load-stroke curves

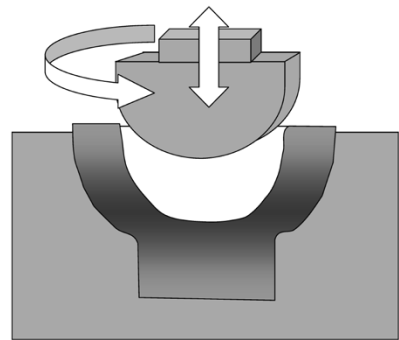


図4 回転鍛造方法の概略図

Fig. 4 Schematic drawing of rotated forging method

た板状にすることで素材と金型の接触面積の低減も可能と考えられる。このような鍛造方法は過去にも実機適用した例が報告されており^{3), 4)}、本稿では回転鍛造方法と呼ぶ。図4に回転鍛造方法の概略図を示す。同図に示すように、1回圧下するごとに金型を上昇・回転させ、圧下する位置を変更して再度圧下する。これらの操作を目標圧下位置まで繰り返し行う鍛造方法である。

2. 鉛材を用いた小型モデル実験による回転鍛造の検討

回転鍛造方法では、上記のように板状金型の上下動による圧下と回転を交互に繰り返すことにより、目標圧下位置まで低荷重で鍛造することが可能である。一方で、板状金型の1回の圧下量を大きくした場合、未圧下部と圧下部で大きな段差が生じ、つぎの圧下サイクルではその段差部分を圧下するため、折れ込み疵(きず)が発生する可能性が高くなる。このため、板状金型の1回あたりの圧下量を比較的小さくする必要があるが、その一方

で圧下量を小さくした場合、素材の変形領域は素材と金型の界面近傍の素材表層のみとなる。したがって、ニアネット金型を一度に押し込む型入れ方法と変形挙動が大きく異なる。

そこで、鉛材を用いた小型モデル実験により、種々の荒地形状から回転鍛造方法を適用して得られる鍛造形状および鍛造荷重について検討した。図5に実験の状況を示す。下部金型の上に素材を置き、板状金型の上下動による圧下と回転を交互に繰り返して鍛造を行った。図6に実験結果の一例を示す。同図に示すように、回転鍛造を用いて軸対称形状に鍛造することが可能であることがわかった。また同時に、鍛造荷重がプレス最大加圧力を超えないことも確認した。

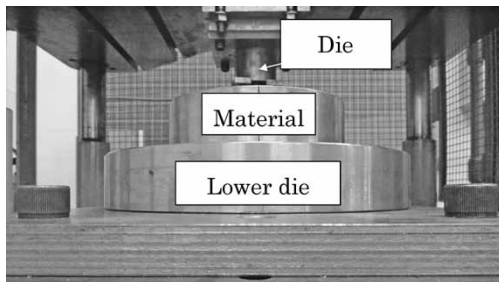


図5 小型モデル実験の状況
Fig. 5 Appearance of experiment using lead material



図6 小型モデル実験結果
Fig. 6 Experimental result

3. 3次元熱連成塑性変形解析技術の開発

前述のように回転鍛造方法では、局所成形を多数回繰り返して鍛造を行うため、鍛造時間が長くなる。熱間鍛造の場合、鍛造中の素材は大気および金型との接触により冷却されるため、鍛造中に温度が低下する。このことから、素材の温度変化と変形に伴う形状変化を同時に考慮しながら変形形状を予測する3次元熱連成塑性変形解析技術が必要となる。

3.1 素材温度変化

熱連成塑性変形解析によって素材温度を精度よく予測するためには、素材表面における熱伝達係数を同定する必要がある。そこで、製品の縮小サイズの素材を用いて実プレス機にて熱間鍛造実験を行い、素材表面の温度変化を測定した。素材表面温度はサーモレーサTH9100WB（株NEC三栄社製）にて測定した。図7に縮小モデルによる小型実験の様子を示す。また、図8に鍛造実験中の素材をサーモレーサにて測定した素材表面温度分布の一例を示す。同図の実プレス機を用いた実

験から得られた結果を基に、素材の上面と側面における時間変化に伴う温度変化が3次元熱連成塑性変形解析と一致するよう熱伝達係数を決定した（表3）。この値を用いて3次元熱連成塑性変形解析を行い、得られた温度変化と実際の温度変化を比較した（図9）。ここで、図9に示す初期の800秒までは加熱炉からプレス内に素材が運搬されるため、実測していない。また、800秒以降に鍛造を開始するが、800秒から1,200秒までは酸化スケールの影響で表面温度が低い状態となっている。一方、1,200秒以降では表面の酸化スケールが剥離し、素材温度が1,200秒以前に比べて高くなっている。同図に示すように、表面に素材が現れる1,200秒以降で3次元熱連



図7 小型実験の様子
Fig. 7 Appearance of workpieces for small scale actual press

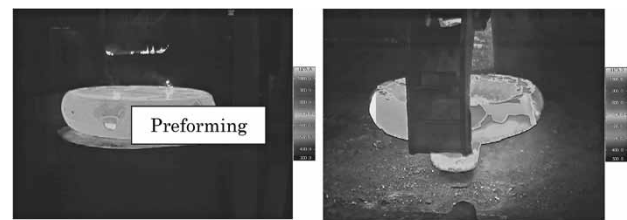


図8 素材温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of material

表3 熱伝達係数（側面中央部）

Table 3 Heat transfer coefficient (center part of side surface)

Temperature (°C)	Heat transfer coefficient (W/m ² · K)
600	153
700	180
800	180
1,000	180
1,250	180

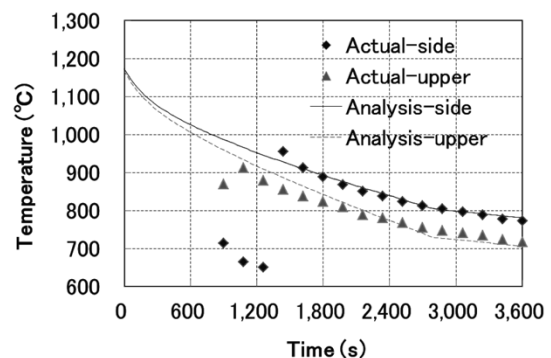


図9 実測結果と数値シミュレーションの温度変化
Fig. 9 Comparison of temperature change between actual measurement and numerical simulation result

成塑性変形解析による温度と実機の温度が精度よく一致することを確認した。

3.2 変形抵抗

回転鍛造では、一度圧下した部位を再度圧下するまでに金型が半周する。この間、素材は変形を受けない状態である。ところで、熱間多スタンド圧延などではスタンド間で板材が通過中に回復・再結晶が進行し、変形抵抗が変わる⁵⁾ことが知られている。そのため、本稿での回転鍛造においても同様に、一度圧下した後、再度圧下するまでに変形抵抗値が変化すると考えられる。

そこで、回転鍛造用の変形抵抗データを採取し、従来の変形抵抗データと比較した。表4および図10に変形抵抗データ測定のための試験条件を示す。試験方法は、加工フォーマスタを用いて素材高さに対し5%ずつ14回圧縮、または10%ずつ7回圧縮し、合計70%の圧縮を行った。また、圧下と圧下の間隔(圧下間隔)は10秒、100秒、1,000秒の3水準で行った。図11に1回圧縮と5%×14回圧縮した場合の変形抵抗データの比較例を示す。同図に示すように、1回圧縮の変形抵抗に対し、100秒間隔で5%圧縮を14回繰り返した試験の変形抵抗は低くなる傾向にあることがわかった。この原因は以下のように考えることができる。図12に回転鍛造時に生じる材料の組織変化を示す。熱間で回転鍛造を行った場合、鍛造終了後、はじめに材料は回復して再結晶が開始する。さらに、再結晶の途中あるいは完了時に再度塑性変形を受け、鍛造ごとに回復～再結晶が繰り返される。このため、軟化して1回圧縮試験で得られる変形抵抗よりも低くなる。また、再結晶の割合により軟化の程度が異なる。

そこで、圧下間隔の差による変形抵抗の差を調査した。図13に同一温度で圧下間隔を変化させた場合の変形抵抗データを示す。同図に示すように、圧下間隔が長くなるに伴って変形抵抗が低下していることがわかった。とくに、ひずみが高い領域ではより軟化が顕著であることがわかった。このことから、回転鍛造に3次元熱連成塑性変形解析を適用する場合には、変形抵抗を高精度に予測する必要がある、そのためには圧下間隔を考慮する必要がある。

一般的な変形抵抗式は以下の式(2)に示される。

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

ここで、 σ : 変形抵抗, A : 係数, ε : ひずみ, $\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度, Q : 活性化エネルギー, R : ガス定数, T : 温度である。この変形抵抗式における定数 A に対し、圧下間隔を考慮した関係式を新たに適用した。すなわち、各温度・ひずみ・ひずみ速度について1回圧縮時の変形抵抗値と比較し、変形抵抗の低下率を算出するとともに、その低下率を圧下間隔の関数 $A(s)$ で表記することとした。これを式(3)に示す。

$$\sigma = A(s) \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

ここで、 $A(s)$ に関して、圧下間隔との関係を調査した。図14に圧下間隔と $A(s)$ との関係の一例を示す。同図は、

表4 実験条件
Table 4 Experimental conditions

Deformation Temperature (°C)	700, 800, 900, 1,000, 1,100
Strain rate (/s)	0.002, 0.02, 0.2
Reduction (%)	5, 10
Interval of press (s)	10, 100, 1,000

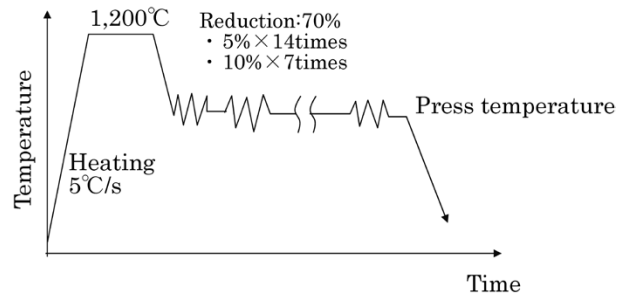


図10 圧縮試験方法

Fig.10 Experimental procedure for compression press

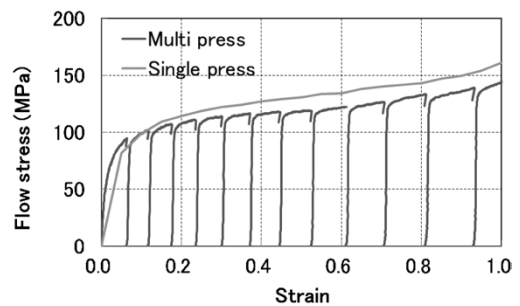


図11 1回圧下と複数回圧下の変形抵抗比較 (800°C, 圧下間隔100秒, ひずみ速度0.002)

Fig.11 Comparison of flow stress between single press and multiple press (deformation temperature : 800°C, interval of press : 100s, strain rate : 0.002)

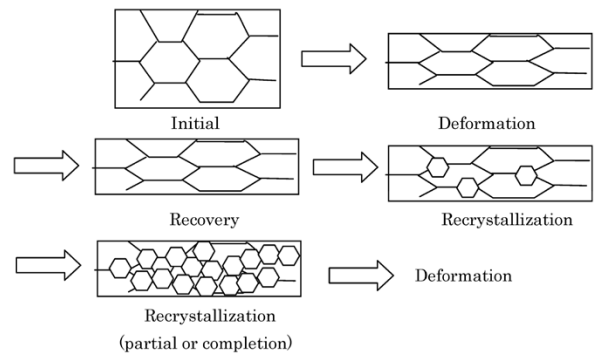


図12 圧下間での組織変化の模式図

Fig.12 Schematic diagram of inter-press microstructure change

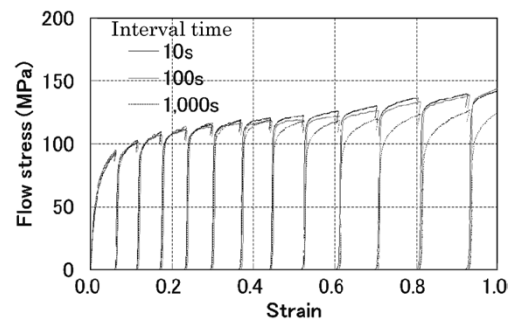


図13 同一温度で圧下間隔を変化させた場合の変形抵抗データ (800°C, ひずみ速度0.002)

Fig.13 Influence of press interval time on flow stress (Press temperature : 800°C, Strain rate : 0.002)

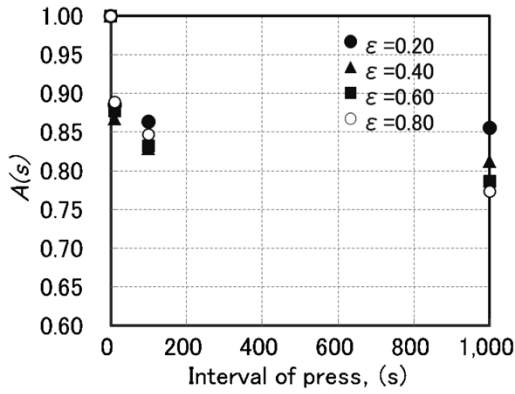


図14 压下間隔と $A(s)$ との関係の一例 (800℃)

Fig.14 An example of Relationship between interval of press and $A(s)$ (Press temperature : 800℃)

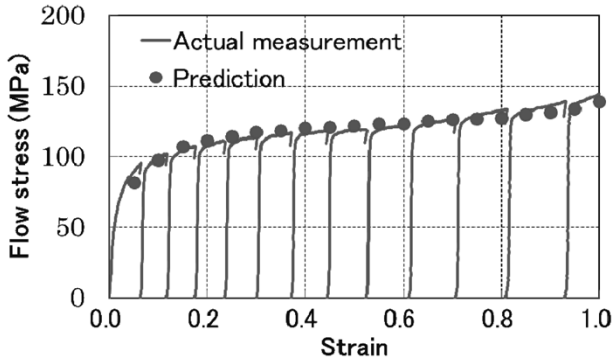


図15 変形抵抗データの予測値と実測値の比較

Fig.15 Flow stress comparison between prediction and actual measurement

800℃におけるデータである。同図に示すように、压下間隔が長くなると $A(s)$ が低下する傾向にあり、また、ひずみが大きいほど $A(s)$ が大きく低下することがわかる。

式(3)を用いて予測した変形抵抗データと実測データとを比較し、精度検証を行ったところ(図15)、10%以下の精度で予測可能であることがわかった。

4. 実機実験

3.1節および3.2節で述べた熱伝達係数および変形抵抗データを基に、3次元熱連成塑性変形解析技術を活用して鍛造の工程設計を行い、その結果に基づいて実機サイズの熱間鍛造実験を行った。今回適用した鍛造部材は第3世代型+原子炉(Westinghouse社製AP1000)の蒸気発生器に使用されるヘッド部材で、鍛造後の最大直径は約6,000mmである。図16に鍛造後の形状を示す。また、



図16 鍛造品の外観

Fig.16 Appearance of forged workpiece

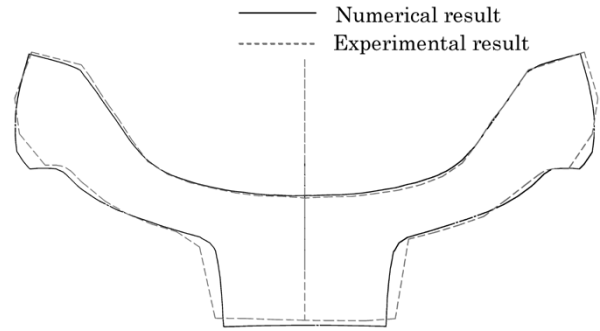


図17 数値シミュレーション結果(実線)と実機形状(破線)の比較
Fig.17 Comparison of forging shape between numerical simulation (broken line) and mill scale experiment result(solid line)

実機実験で作成した荒地形状をモデル化し、3次元熱連成塑性変形解析を行い、実機形状と比較した。図17に3次元熱連成塑性変形解析結果と実機形状の比較を示す。図中の実線が3次元熱連成塑性変形解析結果で、破線が実機形状測定結果である。同図から、寸法差5%以内で精度よく一致し、目標どおりの形状が得られることを確認した。

むすび=大型の鍛造部材を製造するために、回転鍛造方法の3次元熱連成塑性変形解析技術を開発した。以下に得られた結果を示す。

- ・3次元熱連成塑性変形解析での素材温度変化を高精度に予測するため、実機縮小実験を行って熱伝達係数を決定した。
- ・回転鍛造用3次元熱連成塑性変形解析に適用するため、压下間隔による軟化傾向を表現できる変形抵抗モデル式を考案し、10%以内の精度で予測可能であることを確認した。
- ・これらの結果を用いて実機サイズの鍛造工程を決定し、実機実験を行った。その結果、所要の形状が得られるとともに、3次元熱連成塑性変形解析によって鍛造形状を精度5%以内で予測可能であることを明らかにした。

参考文献

- 1) M. Kiguchi et al. FORGING DESIGN AND MANUFACTURING PROCESS OF INTEGRAL TYPE CLOSURE HEAD FOR REACTOR VESSEL. Proceedings of IFM2000, Germany, 2000-9/3/8. International Forgemasters Meeting, 2000, p.65-72.
- 2) 加藤健三. 金属塑性加工学. p.49-54.
- 3) H. Tsukada et al. "CURRENT FORGING AND THEIR PROPERTIES FOR STEAM GENERATOR OF NUCLEAR PLANT. Proceedings of IFM1997. Korea. 1997-10-12/16. International Forgemasters Meeting, 1997, p.141-149.
- 4) T. Sasaki et al. MANUFACTURING AND PROPERTIES OF CLOSURE HEAD FORGING INTEGRATED WITH FLANGE FOR PWR REACTOR PRESSURE VESSEL. Proceedings of IFM2003, Japan. 2003-10-26/29. International Forgemasters Meeting, 2003, p.440-447.
- 5) 日本塑性加工学会. 板圧延. p.202-210.