

## 技術資料

## Technical Data

# マイクロ組織と機械的特性予測のための新たな試験装置「創質加工シミュレータ」の開発

大竹拓至\*<sup>1</sup>, 杉野 敦\*<sup>1</sup>, 岡島琢磨\*<sup>2</sup>

## Development of New Testing Device “Quality Processing Simulator” for Prediction of Microstructures and Mechanical Properties

Takuji OTAKE, Atsushi SUGINO and Takuma OKAJIMA

### Synopsis

When designing the forging and rolling process, a small forging simulator was used to obtain material databases on such characteristics as flow stress and recrystallization behavior. By installing the databases into FE analysis, the microstructure in the actual forging and rolling process was predicted. On the other hand, it has been difficult to predict mechanical properties such as ASTM standards. Therefore, it was desirable to develop a new testing device that could reproduce the microstructure resulting from the complex forging and rolling process of products, and collect test pieces for mechanical properties such as ASTM standards. In this study, a new testing device named “Quality Processing Simulator” was developed. Using this device, tests were conducted to reproduce the temperature and strain history of the free forging process of disk products in Alloy706 and Alloy718, Fe-Ni based superalloys. It was confirmed that the reproducibility of grain size was within  $\pm 1.0$ , and 0.2% proof stress and tensile strength was within  $\pm 5\%$ . Similarly, tests were conducted to reproduce the temperature and strain history of the finishing rolling process of bar products in Alloy718. The reproducibility of microstructures and tensile properties were confirmed to be within  $\pm 1.0$  and  $\pm 5\%$ .

## 1. 緒 言

発電所や航空機のガスタービン用部材の一つとして、耐熱合金が用いられる。その部材の設計強度を満たすため、素材には高度なマイクロ組織制御が必要であり、鍛造工程におけるマイクロ組織変化の過程にも注目する必要がある。近年、それらの部材には燃焼効率を向上させるため、さらなる高い耐熱特性が求められており、鍛造工程においてもますます高度なマイクロ組織制御が求められる<sup>1)</sup>。大同特殊鋼(株)の鍛造工程には、初期の鋼塊から据込・鍛伸・逐次成形など、非常に複雑な加工履歴を伴う自由鍛造が含まれる。

従来、鍛造工程設計には円柱圧縮試験を用いた小型の鍛造シミュレータを用いて、流動応力や再結晶挙動を調査、定式化し有限要素解析へ実装することで、マイクロ組織の予測、鍛造工程設計の最適化をしてきた<sup>2)</sup>。一方、ASTM規格などの機械的特性の予測までは困難であった。また大型鍛造品では、中心部と表層部では温度やひずみなど、加工熱履歴が大きく異なるため、それらもおのおの考慮する必要があった。そこで、各部位の複雑な加工熱履歴の結果によって生じる結晶粒径、析出物の量や形態までおのおの再現した上で、ASTM規格などに適合した機械試験の評価サンプルを採取できる試験装置の開発が望まれた。先行研究事例として、多方向圧縮型

2022年10月7日 受付

\* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

加工熱処理シミュレータ<sup>3)</sup>があるが、試験片サイズが小さいことから JIS や ASTM 規格に対応した機械試験片の採取が困難である。一方、大型の恒温鍛造シミュレータ<sup>4)</sup>はそれらの機械試験片の採取は可能であるが、型鍛造を想定した一軸圧縮であることから、付与できる累積ひずみ量に限度があり、据込・鍛伸・逐次成形などを繰り返し、累積ひずみ量が非常に大きな自由鍛造工程の再現には適さなかった。

そこで本研究では、それらの課題を解決する試験装置として「創質加工シミュレータ」の開発と、実際の自由鍛造工程履歴とマイクロ組織の再現手法確立を目指した<sup>5)</sup>。また、棒鋼圧延製品についても同様の手法を用い、実際の棒鋼圧延工程履歴とマイクロ組織の再現を試みた。

## 2. 創質加工シミュレータの開発

装置本体は停止位置精度の優れたサーボモータ直動方式プレス機（㈱放電精密加工研究所製：ZENFormer MPS5210DS）とした。本装置で用いる試験片形状を Fig. 1 に示す。試験片の両端のチャック部の形状は、周方向の位置を一定に保つ意図で異形断面とした。本装置内での加工方法の概要を Fig. 2 に示す。試験片を半径方向に圧下、長手方向に鍛伸し、90°回転して同様の動作を繰り返す機構とした。従来の円柱圧縮試験と今回の鍛伸試験における試験片中心部の相当塑性ひずみと圧下率、減面率の関係を Fig. 3 に示す。圧縮試験では一度だけ加工するのに対し、鍛伸試験では方向を変えながら、加工時に発生する張り出し部へ繰り返し加工することで、高い累積ひずみを付与できる。そのため、実製品と同等の複雑なひずみ履歴を再現可能となる。また、加工時に長手方向に試験片が伸びるため、ASTM 規格などに適合した機械試験の評価サンプルを採取できる。繰り返しの鍛伸を安定的に実施できるように、試験片を両側から掴み、回転可能なチャック治具を設置し、試験片の長手方向の伸びに対応するスライド機構を有する構造とした。

試験片の初期加熱は装置外の大気炉で行ったが、装置

内での鍛伸中の加熱・冷却速度は高周波加熱を用いて制御した。また、高周波加熱コイルについては、一軸圧縮などで用いられるソレノイド型では、コイルと試験片や金敷が干渉するため、専用の鞍型コイルを設計し、試験片セット時や加工中にコイルと金敷、試験片が干渉しない構造とした。

試験片の温度制御は、二色温度計により測定した試験片中央の表層温度でのフィードバック制御とし、異形断面となる鍛造形状の加熱温度分布のバラツキを抑制するため、加熱中に試験片を回転させる機構を採用した。

以上の基本設計のもと、プレス機、試験片回転機構、加熱装置を含んだ加工熱処理試験装置「創質加工シミュレータ」を構築した。装置の外観および試験中の様子を Fig. 4 に、基本性能を Table 1 に示す。

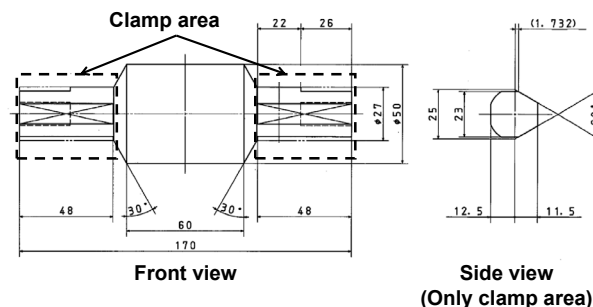


Fig. 1. Shape of test piece.

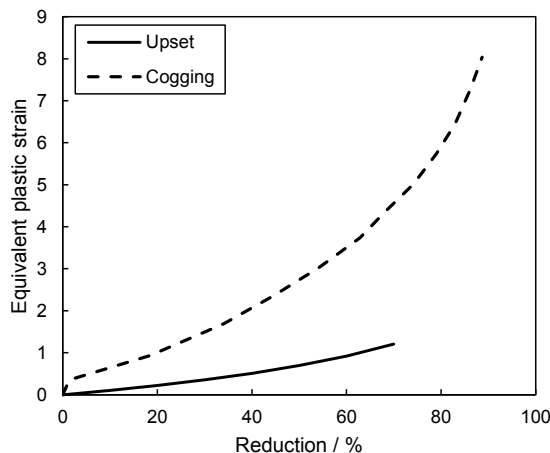


Fig. 3. Relationship between equivalent plastic strain and reduction of test piece.

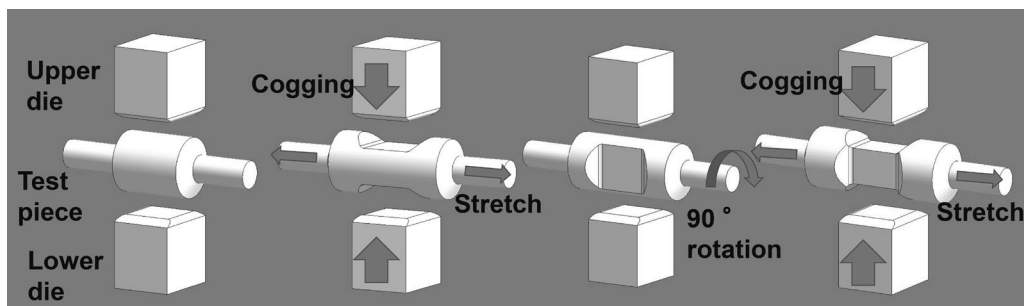
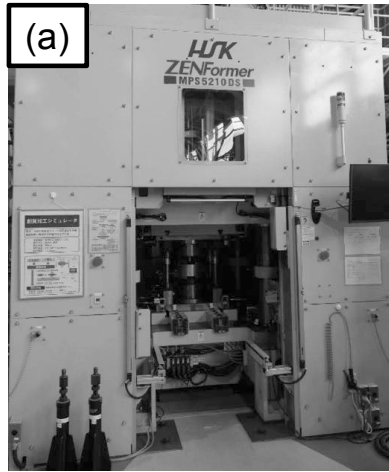
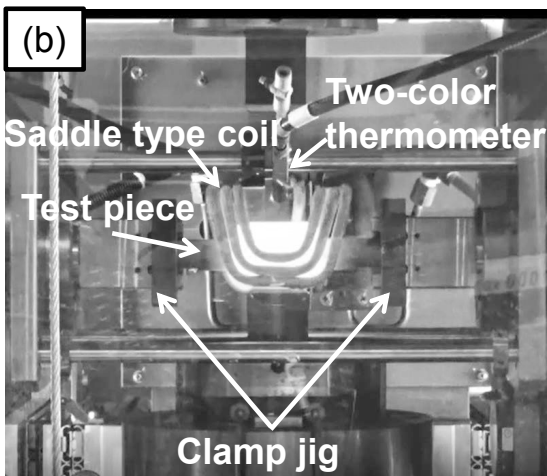


Fig. 2. Overview of testing method of "Quality Processing Simulator".



(a) Exterior of equipment.



(b) Test piece during heating.

Fig. 4. Exterior of “Quality Processing Simulator”.

Table 1. Specifications of “Quality Processing Simulator”.

Drive system	Servo motor
Maximum load	200 tf
Maximum temperature	1200 °C (Induction heating)
Pressing speed	0.001 mm/s – 65 mm/s
Stopping accuracy	±0.01 mm
Minimum time between blows	30 s
Maximum number of blows	10
Rotation angle of test piece	0, 90, 180, 270 °
Shape of test piece	φ50 × 170L → □15 × 270L (Maximum cogging size)
Example of supported tests	Tensile test (ASTM A370) Creep test (ASTM E292)

### 3. Fe-Ni 基超合金の自由鍛造工程履歴の再現手法確立

#### 3. 1 実験条件

供試材として、Fe-Ni 基超合金 Alloy706, Alloy718 を用いた。供試材の化学成分を Table 2 に示す。

創質加工シミュレータを用いた実鍛造工程再現手法のイメージを Fig. 5 に示す。今回は Fe-Ni 基超合金 Alloy706, Alloy718 のディスク鍛造品の表層部の加工履歴を創質加工シミュレータで再現し、マイクロ組織と ASTM 規格の室温と高温の引張特性を実製品と比較した。

初めに有限要素法を用いた実鍛造工程の数値シミュレーションを実施し、再現部位の温度、ひずみ履歴を求めた。そして創質加工シミュレータにてその温度、ひずみ履歴を再現するように加熱温度、冷却速度、加工打撃数、圧下量、再加熱回数を決定した。加工後は実製品の再現部位と同様の条件で溶体化処理と時効処理を実施した。その後、鍛造試験片の中心部より機械試験片 (ASTM A370 φ6.25 mm) を切り出し、マイクロ組織観察と機械的特性の評価を実施した。

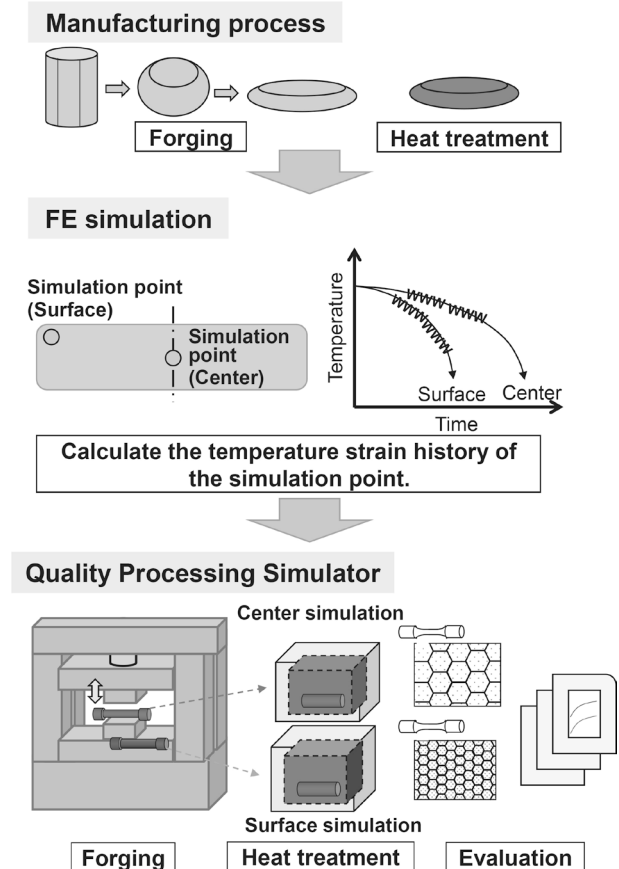


Fig. 5. Schematic illustration of test methods for reproducing manufacturing process.

Table 2. Chemical composition (mass%).

Alloy	Ni	Fe	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	C
Alloy706	40	Bal.	16	-	3	1.6	0.3	0.01
Alloy718	53	Bal.	20	3	5	1.0	0.5	0.01

### 3. 2 結果と考察

実製品と再現試験材のマイクロ組織と結晶粒度番号の比較を Fig. 6 に示す。Alloy706, Alloy718 ともに実製品と本再現試験で結晶粒度 ± #1.0 以内の予測誤差に収まることを確認した。Alloy706 と比べて Alloy718 の結晶粒径は小さいが、これは δ 相 (Ni<sub>3</sub>Nb) 固溶温度以下で鍛造することによって生じる、δ 相のピンニング効果<sup>6)</sup>によるものと考えられる。本再現試験において δ 相の球状化といった析出形態も実製品と同様に再現できることも確認した。実製品と本再現試験の引張試験結果比較を Fig. 7 に示す。Alloy706, Alloy718 において室温、高温条件の 0.2% 耐力、引張強度ともに、すべての項目で実製品強度に対する相対比が 0.95 ~ 1.05 となっており、± 5% 以内の誤差で再現可能な手法を確立した。

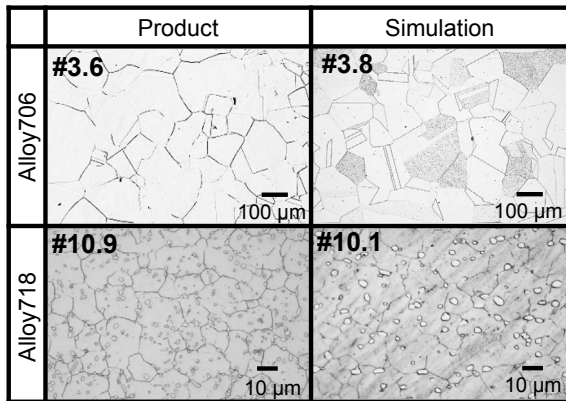


Fig. 6. Comparison of forging microstructure between product and simulation results.

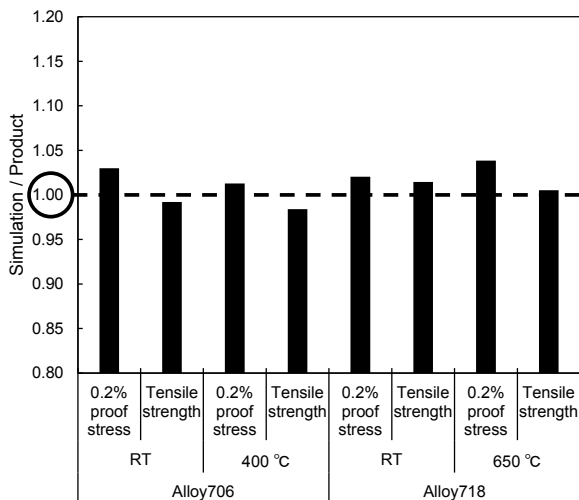


Fig. 7. Comparison of forging 0.2% proof stress and tensile strength between product and simulation results.

## 4. Fe-Ni 基超合金の棒鋼圧延工程履歴の再現手法確立

材料部位ごとの温度ひずみ履歴を再現することで加工後の材料マイクロ組織や機械的特性を評価する手法は、前述の鍛造工程のみならず圧延工程にも適用できる可能性がある。そこで、Fe-Ni 基超合金 Alloy718 を用いて鍛造材と同様の手法で、棒鋼圧延材のマイクロ組織観察と機械的特性の評価を実施した。棒鋼圧延材は製品径により温度ひずみ履歴が異なり、マイクロ組織や機械的特性が変化するため、本研究では細丸材、太丸材それぞれについて中心部の再現を試みた。製造工程としては溶解凝固 - 拡散焼きなまし - 分塊鍛造 - 仕上圧延 - 溶体化処理 - 時効処理となるが、加工後のマイクロ組織および機械的特性に与える影響が大きい最終仕上圧延 - 溶体化処理 - 時効処理を再現対象とした。

実製品と再現試験材のマイクロ組織と結晶粒度番号の比較を Fig. 8 に示す。細丸材、太丸材それぞれについて実製品と本再現試験で結晶粒度 ± #1.0 以内の予測誤差に収まることを確認した。実製品と再現試験ともに太丸材が細丸材と対比し、粗大な結晶粒である傾向が得られた。材料径が大きいものは加工中の温度低下がしにくく、中心部の加工温度が高くなったため、熱間加工時の再結晶、粒成長により粒度差が発生したと考えられる。実製品と本再現試験材の引張試験結果比較を Fig. 9 に示す。細丸材、太丸材それぞれについて室温、高温条件の 0.2% 耐力、引張強度ともに、すべての項目で実製品強度に対する相対比で 0.95 ~ 1.05 となっており、± 5% 以内の誤差で再現可能な手法を確立した。

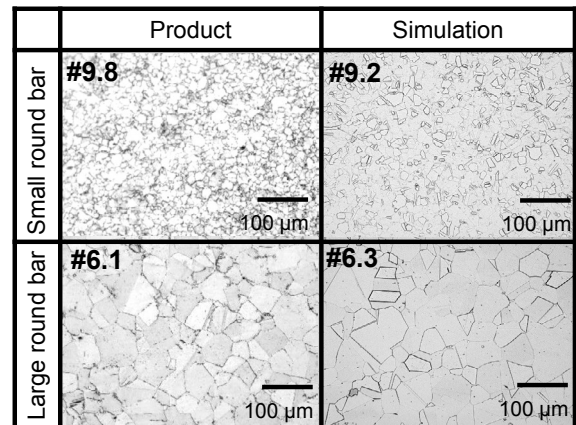


Fig. 8. Comparison of rolling microstructure between product and simulation results.

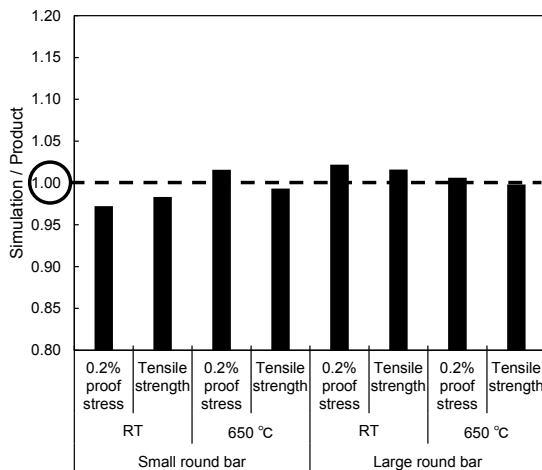


Fig. 9. Comparison of rolling 0.2% proof stress and tensile strength between product and simulation results.

## 5. 結 言

本研究では実製品の高い累積ひずみ量と複雑な加工熱履歴を再現し、ASTMなどの規格に準拠した機械試験片を採取できる、新たな試験装置「創質加工シミュレータ」を開発した。この装置を用いて、Fe-Ni基超合金Alloy706、Alloy718ディスク製品の自由鍛造工程における、温度ひずみ履歴を再現した試験を実施した結果、結晶粒度の再現誤差は $\pm 1.0$ 以内、0.2%耐力と引張強度の再現誤差は $\pm 5\%$ 以内でミクロ組織と引張特性を再現可能な手法を確立した。また同様にAlloy718棒鋼製品の仕上圧延工程における、温度ひずみ履歴を再現した試験を実施した結果、細丸材、太丸材それぞれについて、結晶粒度の再現誤差は $\pm 1.0$ 以内、0.2%耐力と引張強度の再現誤差は $\pm 5\%$ 以内でミクロ組織と引張特性を再現可能な手法を確立した。

(文 献)

- 1) 三浦信祐: 電気製鋼, 83(2012), 35.
- 2) 吉田広明, 岡島琢磨, 八田武士, 藤原正尚, 伊藤樹一: 電気製鋼, 78(2007), 267.
- 3) 鳥塚史郎, 井上忠信, 長井寿: 鉄と鋼, 86(2000), 801.
- 4) 本橋功会, 黒田秀治, 勝矢良雄, 仲邦彰: ぶらすとす, 4(2021), 751.
- 5) 大竹拓至, 杉野敦, 岡島琢磨: 塑性加工春季講演会講演論文集, (2022), 193.
- 6) 大竹拓至, 岡島琢磨: 電気製鋼, 90(2019), 115.



大竹拓至



杉野 敦



岡島琢磨