

技術論文

Technical Paper

Inconel 706 の鍛造プロセスモデリングシステムの開発

櫻井信吾^{*1}, 西澤 聡^{*3}, 八田武士^{*1}, 岡島琢磨^{*2}, 木村利光^{*1}

Development of Forging Process Modeling System of Inconel 706

Shingo Sakurai, Satoshi Nishizawa, Takeshi Hatta, Takuma Okajima, and Toshimitsu Kimura

Synopsis

In order to improve thermal efficiency of a thermal power station, a combined cycle system which combines a steam turbine and a gas turbine has spread rapidly.

The gas turbine tends to be larger to improve a thermal efficiency. Inconel 706 is used widely for gas turbine disks. The specifications, such as tensile strength, toughness and low-cycle fatigue for gas turbine disks are very severe, because they need high durability at elevated temperature. The grain refinement of the disks is required to satisfy the specifications. It's difficult to design the process of a large turbine disk because the deviations of strain and temperature become larger.

We developed a modeling system for predicting the microstructure of Inconel 706 and confirmed that the modeling system works successfully by comparison with the results of trial forging.

In this paper, a micro-structural prediction system of Inconel 706 has been developed newly.

1. 緒 言

近年、エネルギー需要が増大する一方で、地球温暖化抑制のためのCO₂排出量削減が求められており、火力発電の高効率化は喫緊の課題である。高効率化のため、従来の蒸気タービン方式から、蒸気タービンとガスタービンを組み合わせたコンバインドサイクル方式が増加する中で、発電用ガスタービンの需要は増大している。過酷な高温環境下で使用される発電用ガスタービンのタービンディスクには、高温での引張強度、靱性、クリープ強度、低サイクル疲労、亀裂進展防止特性が求められる。これらのタービンディスクの素材には、一般的にニッケル基超耐熱合金が用いられており、Inconel 706はその代表的な鋼種のひとつである。

Inconel 706は母相である γ 相(Ni基固溶体)、および1153 K以下の熱処理で析出する強化相、 γ' 相(Ni₃(Al, Ti))、 γ'' 相(Ni₃Nb)を主要な相としている¹⁾。タービン

ディスクに求められる高温での機械特性を満足するためには、結晶粒度のコントロールが非常に重要であり、適切な鍛造条件の選択が必要となる。

鍛造工程の最適化を行う際に、プロセスモデリング技術は非常に有効であり、これまでにInconel 718の結晶粒度予測など²⁾、鍛造・熱処理工程におけるマイクロ組織変化を可視化する材質予測システムの開発を行ってきた。

今回、新たにInconel 706の鍛造・熱処理工程の最適化を行うため、結晶粒度の変化を予測できる材質予測システムを開発した。また、開発した材質予測システムを用いて、タービンディスクの鍛造・熱処理工程を設計し、実際に試作・マイクロ組織評価を行い、材質予測システムの精度評価を行った。本報告では、Inconel 706の材質予測システムの詳細と、予測精度の評価結果を報告する。

2011年12月9日受付

* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博 (Dr., Eng., Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

2. Inconel 706 の材質予測モジュールの構築

2. 1 試験片と試験方法

一般的に、結晶粒の微細化には相変態を利用する方法と、動的・静的再結晶を利用する方法の2つが挙げられる。しかし、鍛造温度範囲で Inconel 706 は γ 相単相組織であり、相変態を利用した結晶粒微細化は行えず、再結晶が唯一の結晶粒微細化方法となる。再結晶挙動は鍛造・熱処理時の温度、導入されるひずみ量、保持温度に大きく影響される。

再結晶挙動を調査するため、均一圧縮試験を実施した。Table 1 に試験材として用いた Inconel 706 の化学組成を、Fig.1 に試験片形状を示す。この試験では、試験片全体に均一なひずみを付与することができ、ひずみと保持温度・保持時間に対する再結晶の進行挙動、および再結晶粒の成長挙動の調査が可能である。初期粒度は ASTM 結晶粒度 #0 (結晶粒径約 $350 \mu\text{m}$) になるよう、調整した。

均一圧縮試験の試験条件を Fig.2 に示す。熱間での再結晶の進行過程を観察するため、鍛造された試験片は、所定時間保持した後、ただちに水冷を行いマイクロ組織の凍結を行った。平均粒径は、試験片のマイクロ組織を光学顕微鏡で観察し、一定面積内にある粒数から算出した。このとき、光学顕微鏡の観察倍率は、視野内の結晶粒数が 20 ~ 100 個程度となるよう、50 倍 ~ 200 倍の範囲で選択した。

Table 1. Chemical composition of Inconel 706 (mass%).

Fe	Ni	Cr	Nb	Ti	Al
Bal.	40	16	3	1.7	0.2

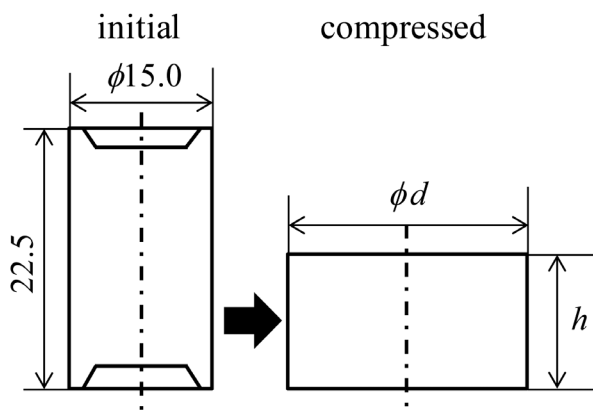


Fig.1. Schematic illustration of specimen for compression test.

2. 2 試験結果

均一圧縮試験後に光学顕微鏡で撮影したマイクロ組織を Fig.3 に示す。圧下率一定の条件下では、鍛造温度が上昇するにつれて、同一の保持時間での再結晶と粒成長の進行が速くなった。特に、1393 K では急速に粒成長が生じ、3600 s 保持後には約 $460 \mu\text{m}$ まで結晶粒が粗大化した一方、1223 K では 3600 s 保持後でも再結晶は完了しなかった。また、1198 K においては、3600 s 保持後においても再結晶は生じていなかった。結晶粒微細化に再結晶を用いる場合、鍛造熱処理温度は 1223 K ~ 1393 K の範囲に設定する必要があることが確認された。

Fig.4 に、ひずみ量と結晶粒度の関係を示す。初期粒度を #1 (結晶粒径約 $500 \mu\text{m}$) に調整した材料に対し、1273 K 一定で、ひずみ量を変化させて圧縮試験を行い、3600 s 保持後の各試験片の平均結晶粒度を測定した。その結果、ひずみ量 ≤ 0.25 では再結晶が全く生じず、ひずみ量 ≥ 0.25 では再結晶が部分的に開始し、ひずみ量 ≥ 0.50 では観察面全てで再結晶が完了した。ここで、再結晶が進行中のひずみ量範囲 (0.25 ~ 0.50) でも、熱処理を長くすることで再結晶は進行、完了させられると考えられる。しかし、再結晶が全く生じなかったひずみ量 ≤ 0.25 では、再結晶の駆動力となるひずみ量が不十分であるため、熱処理を長時間実施しても、再結晶は生じないと考えられる。

上記のとおり、再結晶を用いて結晶粒度を調整するには、鍛造で加えられるひずみ量、および鍛造・熱処理時の保持温度が特に重要であることが分かった。Fig.5, Fig.6 にはそれぞれ、各保持温度について、熱処理保持時間 - 再結晶面積率の関係と、熱処理保持時間 - 再結晶粒径の関係を示す。Fig.5 に示す再結晶面積率の時間変

Induced strain ε / -	0.10~0.69
Temperature T / K	1198~1393
Holding time t / s	0~3600

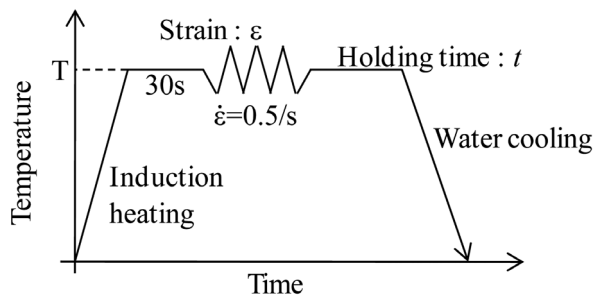


Fig.2. Experimental procedure of compression test.

化の計算値は、得られた実験結果をもとに、Avrami 型の式³⁾を用いて定式化した予測式から求めたものである。これらを、式(1)、式(2)に示す。

$$X_{REX} = 1 - \exp\left\{-0.693 \times \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right\} \dots\dots\dots(1)$$

$$t_{0.5} = C_1 \times \varepsilon^{C_2} \times \dot{\varepsilon}^{C_3} \times d_0^{C_4} \times \exp\left(\frac{Q_{REX}}{RT}\right) \dots\dots(2)$$

ここで、 X_{REX} は再結晶面積率、 t は保持時間、 $t_{0.5}$ は再結晶面積率=0.5となる保持時間、 ε はひずみ、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度、 d_0 は初期粒径、 Q_{REX} は再結晶に必要な活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は保持温度、 $C_n(n=1 \sim 4)$ は定数である。

また、Fig.6に示す再結晶粒径の実測結果をもとに、Sellers型の式⁴⁾を用いて定式化した再結晶粒径予測式を式(3)に示す。

$$d_{REX}^{10} = d_{REX(0)}^{10} + C_5 \times t^{C_6} \times \exp\left(-\frac{Q_{grow}}{RT}\right) \dots\dots\dots(3)$$

d_{REX} は再結晶粒径、 t は保持時間、 Q_{grow} は粒成長に必要な活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は保持温度、 $C_n(n=5,6)$ は定数である。再結晶挙動を上記のように温度・時間の連続関数として定式化することにより、任意の温度での再結晶面積率、再結晶粒径を予測することができる。

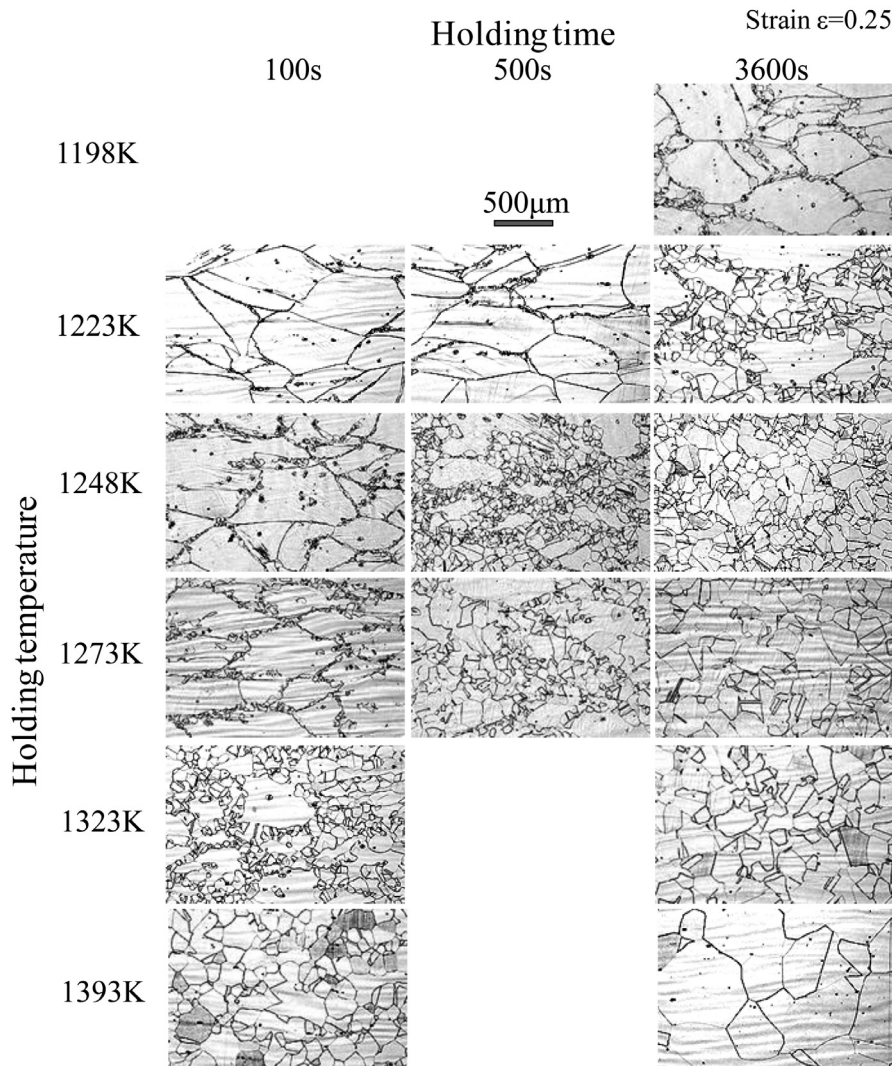


Fig.3. Microstructures after compression test.

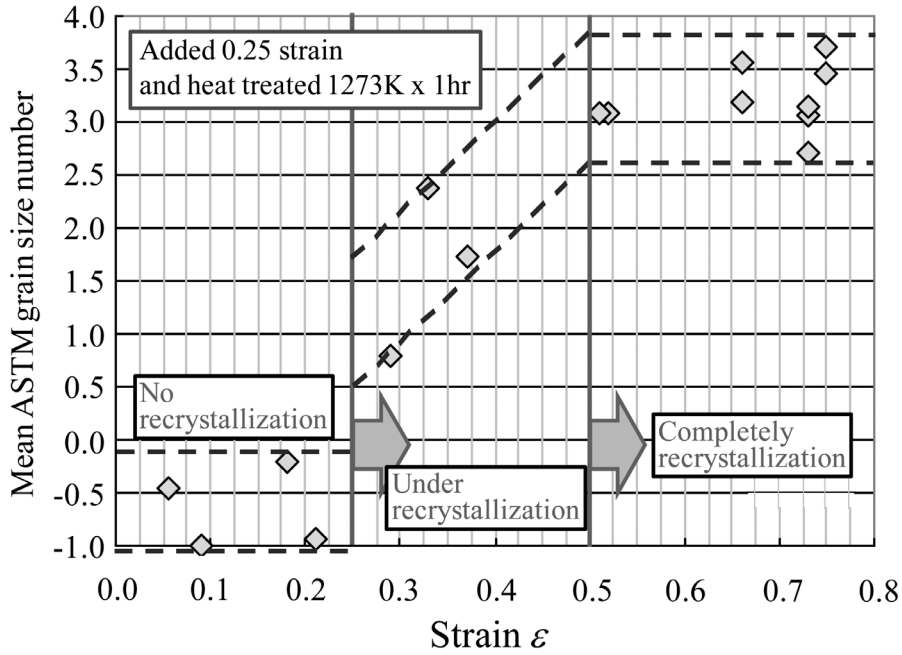


Fig.4. Relation between mean ASTM grain size number and strain.

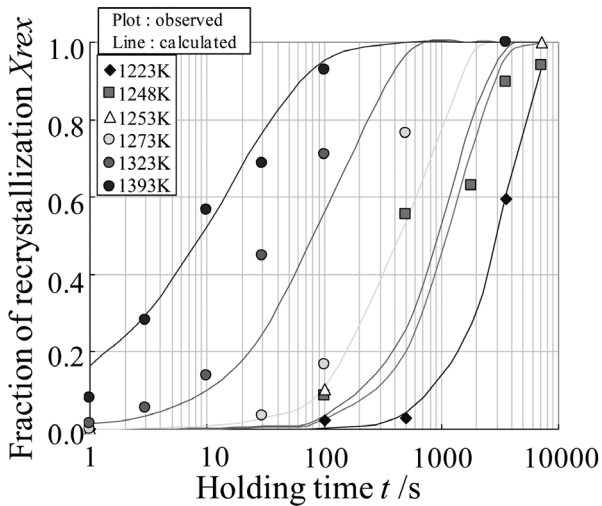


Fig.5. Recrystallization behavior.

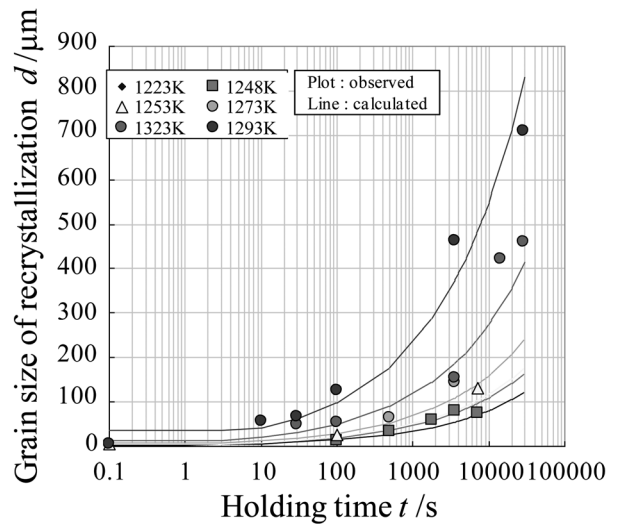


Fig.6. Grain growth behavior.

2. 3 材質予測モジュールの構築

筆者らは、塑性加工プロセス設計において、型寿命や強度分布など、目的とする設計値を定量的に得ることができる、総合的なデジタル・エンジニアリングシステム DAINUS[®](DAIdo NUmerical process engineering System)の開発を行ってきた^{5),6)}。DAINUS[®]は、割れ予測、材質予測、金型損傷、インゴットのボイドの封孔予測を可能とする4つの予測モジュールを搭載した有限要素(FE)解析システムであり、汎用FE解析コードMSC/Supformのユーザーサブルーチン機能により、各

予測モジュールを統合化している。各予測モジュールには、実験結果を理論的な現象論に基づいて構築した予測式を用いている。DAINUS[®]の構成をFig.7に示す。

今回、Inconel 706の材質予測を行うにあたり、DAINUS[®]の材質予測モジュールであるDAINUS[®]-grainを用いた。DAINUS[®]-grainで材質予測を行う際のフローチャートをFig.8に示す。

DAINUS[®]-grainでは、予測式に増分化手法を用いることにより、全ての位置要素と時間要素について、連続的に計算を行うことができる。各時間要素では、再結晶領域と未再結晶領域の面積分率・結晶粒径は個別に

DAINUS: DAIdo NUmerical process engineering System

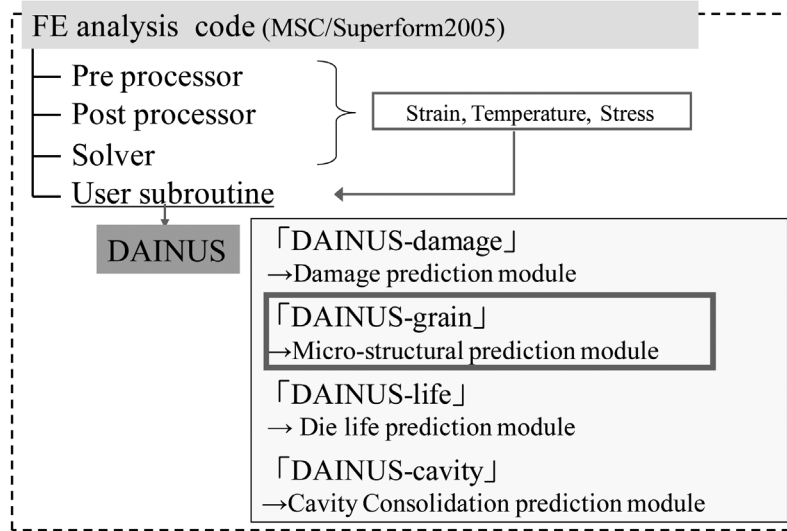


Fig.7. System construction of DAINUS®.

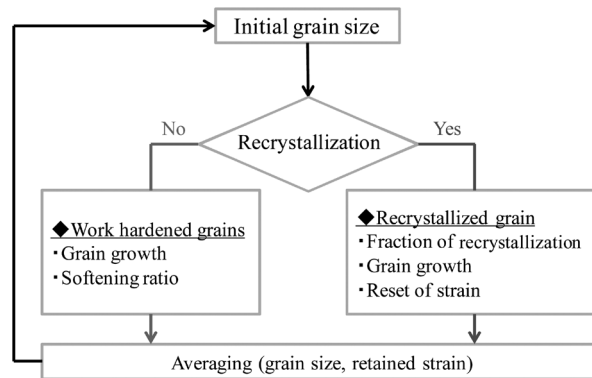


Fig.8. Flow chart of micro-structural prediction system DAINUS®-grain.

計算され、全体の平均粒径はそれらを平均化することで計算される⁷⁾。

2. 4 タービンディスク鍛造試作による DAINUS®-grain の材質予測精度調査

DAINUS®-grain を用いて Inconel 706 タービンディスクの試作を行い、Inconel 706 鍛造・熱処理時の材質予測精度を検証した。試作には 70MN 油圧プレスを用いた。

鍛造工程の詳細について述べる。円柱形状のインゴットを、鍛伸により多角柱形状に成形し、その後、ディスク形状へと鍛造した。鍛造後の材料を空冷で室温まで冷却後、溶体化処理を行った。最終目標組織は、ASTM 結晶粒度 $\geq \#3$ (平均結晶粒径 $\leq 125 \mu m$) とした。目標

とするマイクロ組織を得るため、鍛造温度は鍛造中の加工発熱や大気・金型への抜熱を考慮して 1253 K 以下、鍛造時の各パスのひずみ量は再結晶が発生する 0.25 以上とした。また、ディスク形状への鍛造工程では、ディスク全体の再結晶完了を目的として、リヒートを含んだ複数パスによる圧下を行い、ひずみ量は全パスの合計で 0.50 以上とした。この工程の詳細は DAINUS®-grain を用いて設計した。また、設計した工程で得られる結晶粒度を DAINUS®-grain により予測し、事前評価を行った。計算により予測された粒度分布を Fig.9 に示す。予測された粒度分布では、ディスクの全部位で ASTM 結晶粒度 $\geq \#3$ を満たすことを確認した。

設計した工程にて実際に鍛造・熱処理の試作を実施したディスク材内部のマイクロ組織、断面中の観察位置

を Fig.10 に示す。観察されたマイクロ組織はいずれも ASTM 結晶粒度 \geq #3 を満たした。粒度予測結果とディスク材の粒度測定結果の比較を Fig.11 に示す。

予測結果は観察結果と良い整合性が得られた。以上より、DAINUS[®]-grain による材質予測精度は十分であることが確認できた。

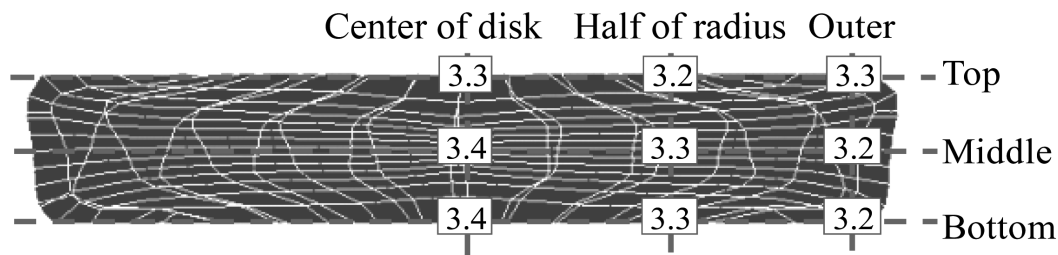
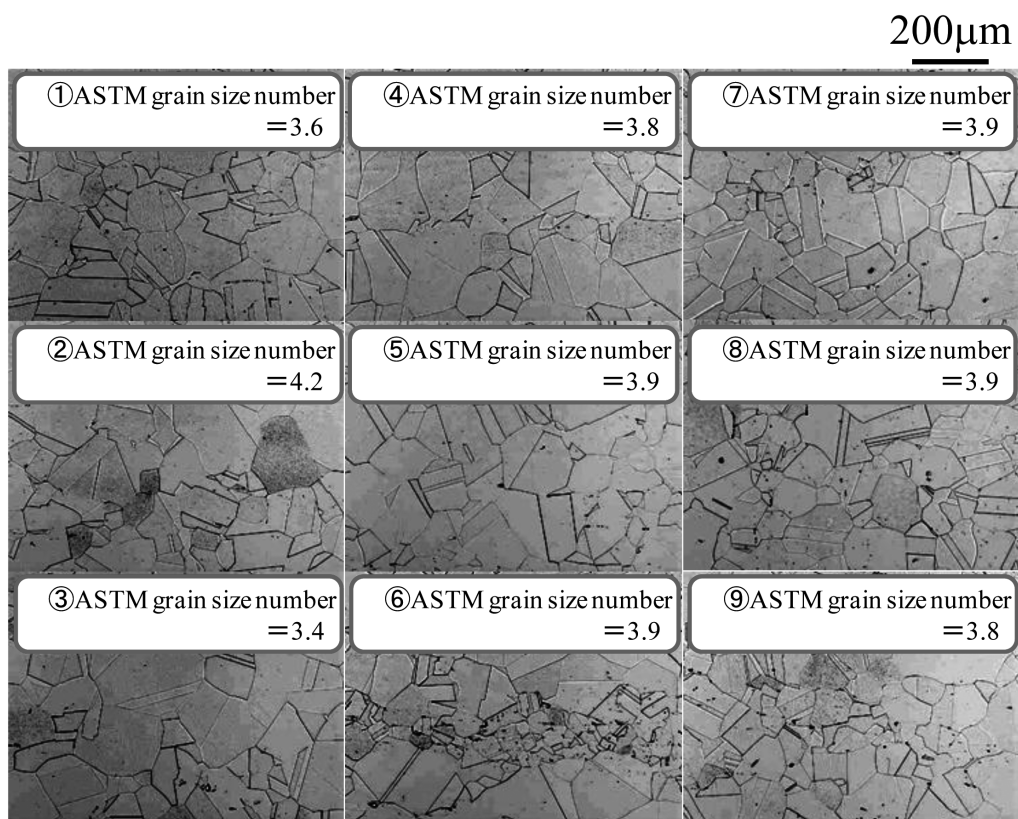
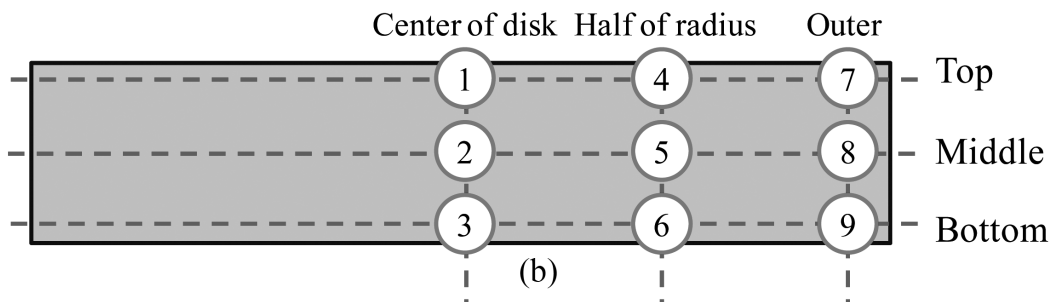


Fig.9. Predicted distribution of ASTM grain size number in forged disk.



(a)



(b)

Fig.10. Microstructure and grain size in forged disk (a) and observed points (b).

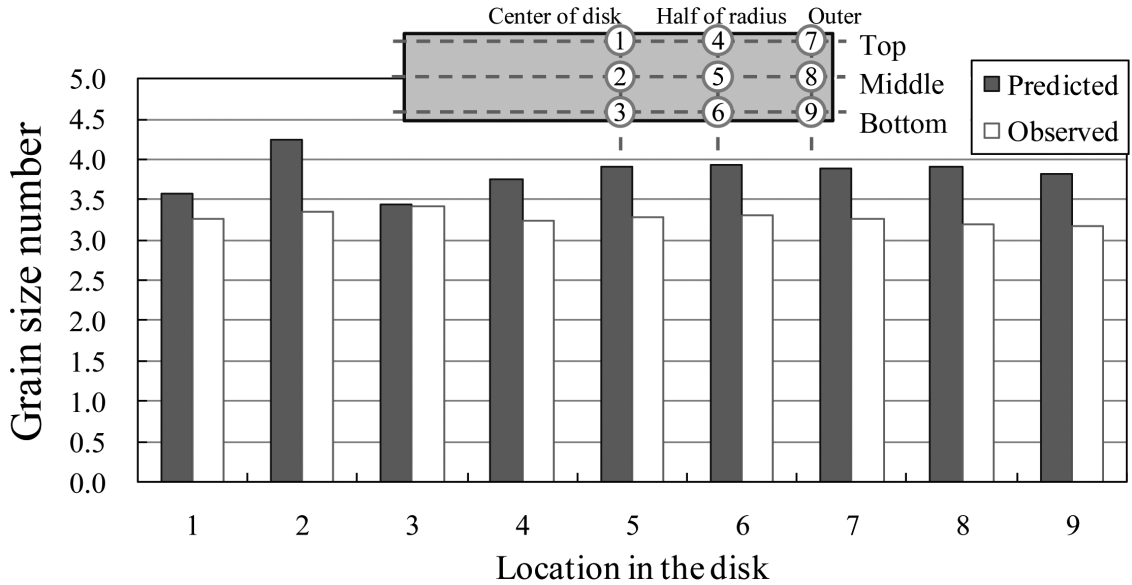


Fig.11. Comparison of predicted ASTM grain size number with observed ones.

3. まとめ

1) Inconel 706 鍛造品の鍛造・熱処理プロセスにおける結晶粒度について、種々の条件で実験を行い、得られた結果を定式化した。定式化した結果を材質予測システム DAINUS[®]-grain に、予測モジュールとして新たに組み入れた。

2) DAINUS[®]-grain を用いて、ASTM 結晶粒度 \geq #3 を満たす Inconel 706 タービンディスクの鍛造・熱処理工程を設計し、70MN プレスで実行した。鍛造したタービンディスクの ASTM 結晶粒度は全体で #3 以上となり、DAINUS[®]-grain の材質予測精度が高く、実際の製品に適用可能であることが確認できた。

(文 献)

- 1) G. D. Smith and S. J. Patel: Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives, Warrendale, 2005, 135.
- 2) 八田武士, 廣中智久, 吉田広明, 五十川幸宏, 益永敦郎: 電気製鋼, 78 (2007), 215.
- 3) C. M. Sellars : Int. Conf. Hot Working and Forming Process, Metal Society, 1980, 3.
- 4) D. R. Barraclough and C. M. Sellars : Met. Sci. 13 (1979), 257.
- 5) 八田武士, 吉田広明: 塑性と加工, 52 (2011), 970.

- 6) 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.
- 7) T.Hatta, T.Hironaka, H.Yoshida, S.Isogawa, H.Sekiguchi : Int. Conf. IFM2008, 2008, 472.