

熱間鍛造後の金属組織の予測技術の開発

- 動的再結晶粒径の予測手法の検討 -

機械電子科 是永宗祐

Development of prediction technology for microstructure during hot forging

- Predicting the size of grains formed during dynamic recrystallization -

KORENAGA Sosuke

Hot forging is a processing technology that is widely used in the manufacturing of metal parts. In order to enhance the mechanical properties of products, it is necessary to obtain fine-grain structures. In hot forging, it is possible to refine grain size owing to dynamic recrystallization (DRX), and DRX behavior depends on the hot forging condition. Therefore, it is crucial to predict the size of grains that are formed during DRX (DRX grain size) in order to obtain products with enhanced mechanical properties. In this paper, DRX grain size is predicted from a constitutive equation using the Zener-Hollomon parameter combined with finite element analysis. The proposed method is verified via a hot-compression test on Ti-6Al-4V ELI alloy. The predicted and experimental values of DRX grain sizes have been found to be generally consistent with one another. Therefore, the proposed method is expected to be an effective tool for predicting DRX grain sizes.

Keywords: hot forging, titanium alloy, dynamic recrystallization, grain size, finite element analysis

熱間鍛造は、金属製品の製造に広く用いられている。金属製品の機械的特性を向上させる手段のひとつに、金属の結晶粒を微細化させる方法がある。熱間鍛造では、加工中の再結晶（動的再結晶）により結晶粒を微細化させることができるが、動的再結晶後の結晶粒径（動的再結晶粒径）は鍛造条件によって変化する。このため、高い機械的特性を有する製品を製造するためには、熱間鍛造条件から熱間鍛造後の動的再結晶粒径を予測する技術が重要となる。そこで本研究では、有限要素法による鍛造シミュレーションと Zener-Hollomon 因子を用いた動的再結晶粒径の予測式を組み合わせ、鍛造条件から動的再結晶粒径を定量的に予測することを試みた。本手法により、各種条件でチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測した結果は、実測値とほぼ一致した。これより、本手法を用いることでチタン合金の動的再結晶粒径を定量的に予測可能であることが示された。

キーワード：熱間鍛造、チタン合金、動的再結晶、結晶粒径、有限要素法

1 はじめに

整形外科用インプラント等の金属製の医療機器には生体適合性に優れたチタン合金が広く用いられ、熱間鍛造等によって製造される。これらの製品の加工においては、製品形状を得ること以外に、高い機械的特性（強度）の実現が要求される。金属の機械的特性を向上させる手段のひとつに、金属の結晶粒を微細化させる方法がある。熱間鍛造では、加工中の再結晶（動的再結晶）により結晶粒を微細化させることができるが、動的再結晶後の結晶粒径（動的再結晶粒径）は鍛造条件によって変化する。

試行錯誤を繰り返し、微細な結晶粒が得られる鍛造条件を探索する場合には、非常に多くのコストと期間が必要である。熱間鍛造条件から熱間鍛造後の動的再結晶粒径を予測することができれば、微細な結晶粒が得られる鍛造条件の探索に要するコストと期間の削減が期待できる。

動的再結晶粒径を予測する式として、Zener-Hollomon 因子¹⁾（以下、Z 因子）を用いた以下の予測式²⁾が提案されている。

$$d_{DRX} = MZ^N \quad (1)$$

$$Z = (d\epsilon / dt) \exp(Q/RT) \quad (2)$$

d_{DRX} は動的再結晶粒径 (μm)、 Z は Z 因子 (s^{-1})、 $d\varepsilon/dt$ および T は高温変形中のひずみ速度 (s^{-1}) および絶対温度 (K)、 Q は高温変形における見かけの活性化エネルギー (J/mol)、 R は気体定数 ($8.31451\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$)、 M および N は定数である。まず、高温圧縮試験等の実験を行い、定数項 M および N を事前に決定する。その後、熱間鍛造中のひずみ速度 (変形速度) と温度を予測式に入力することで、動的再結晶粒径を予測することができる。

ただし、熱間鍛造中のひずみ速度と温度は、材料の不均一変形や加工発熱の影響により、材料内で均一にはならず、位置によって変化する (ひずみ速度と温度の分布が生じる)。動的再結晶粒径を予測するためには、材料内のひずみ速度と温度の分布を求め、予測位置のひずみ速度と温度を特定する必要がある。しかし、ひずみゲージを用いたひずみ測定や、熱電対による温度測定等では、材料内部の分布を評価することは困難であるため、材料内部のひずみ速度と温度の分布を評価できる有限要素法による鍛造シミュレーションの活用が有効であると考えられる。

そこで本研究では、鍛造シミュレーションと動的再結晶粒径の予測式 (式(1)) を組み合わせ、鍛造条件からチタン合金の動的再結晶粒径を予測することを試みた。

2 方法

2.1 予測式の構築 (予測式中の定数項 M 、 N の決定)

直径 8mm、高さ 12mm の円柱形状のチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を表 1 に示す条件で高さ 6mm まで圧縮する高温圧縮試験を実施した。高温圧縮試験には、熱間加工再現試験機 Thermecmaster-Z (富士電波工機(株)製) を用いた。圧縮後、図 1 に示す位置 A および B の金属組織を観察し、動的再結晶粒径の実測値を求めた。金属組織の観察および動的再結晶粒径の算出は、電子後方散乱回折により行い、TSL OIM Data Collection/Analysis system Ver. 7.3 (EDAX 製) を用いた。

つぎに、有限要素法による鍛造シミュレーションソフト DEFORM™-2D Ver. 11.3 (Scientific Forming Technologies Corporation 製) を用いて、上記の高温圧縮試験をシミュレートした。高温圧縮試験では、表 1 に示す条件を試験機に入力しているが、実際には不均一変形や加工発熱の影響により、

ひずみ速度と温度は試料内部で均一にならず、試料内部でひずみ速度と温度の分布が生じる。そこで、有限要素法により試料内部のひずみ速度と温度の分布を解析し、図 1 に示す位置 A および B におけるひずみ速度と温度を求めた。

動的再結晶粒径の実測値と鍛造シミュレーションにより求めたひずみ速度と温度から、予測式 (式(1)) 中の定数 M および N の値を求めた。

表 1 試験条件

加熱温度 ($^{\circ}\text{C}$)	ひずみ速度 (s^{-1})	圧縮条件の表記方法
700	10^{-1}	$700^{\circ}\text{C}-10^{-1}\text{s}^{-1}$
700	10^{-2}	$700^{\circ}\text{C}-10^{-2}\text{s}^{-1}$
700	10^{-3}	$700^{\circ}\text{C}-10^{-3}\text{s}^{-1}$
800	10^{-1}	$800^{\circ}\text{C}-10^{-1}\text{s}^{-1}$
800	10^{-2}	$800^{\circ}\text{C}-10^{-2}\text{s}^{-1}$
900	10^{-1}	$900^{\circ}\text{C}-10^{-1}\text{s}^{-1}$

高温圧縮試験後の試料

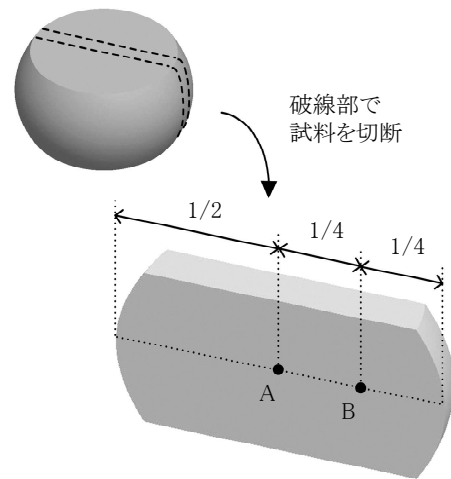


図 1 金属組織観察位置

A および B の 2 箇所金属組織を観察。

2.2 予測手法の妥当性検証

表 1 に示す各種条件で高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測し、予測値と実測値を比較した。予測値は、鍛造シミュレーションにより求めたひずみ速度と温度を予測式 (式(1)) に入力することで求めた。予測位置は、図 1 中の位置 A および B の 2 箇所とした。

3 結果および考察

3.1 予測式の構築 (予測式中の定数項 M、N の決定)

高温圧縮試験後の金属組織の観察結果の一例を図2に示す。図2は、700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮した試料の位置Aにおける金属組織を示したもので、結晶方位の差が15°以上の粒界(高角度粒界)を黒線で示している。伸長された結晶粒と、動的再結晶により生じたと考えられる微細な等軸状(円形状)の結晶粒が観察された。本研究では、微細な等軸状の結晶粒の全てが、動的再結晶により生じた動的再結晶粒であると仮定し、動的再結晶粒のみを抽出して、動的再結晶粒径を面積平均で算出した。表1に示した他の条件についても、同様の解析方法により、位置AおよびBの動的再結晶粒径を求めた。

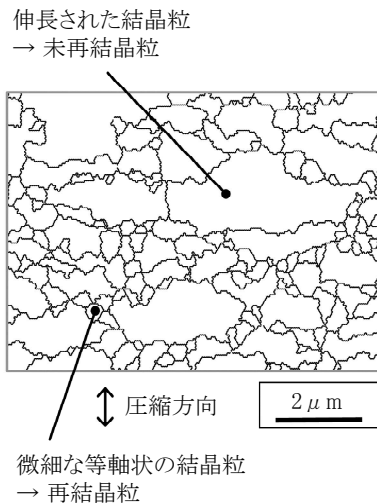


図2 高温圧縮試験後の金属組織

700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮した試料の位置Aにおける金属組織。微細な等軸状(円形状)の結晶粒を抽出し、動的再結晶粒径を算出。

つぎに、鍛造シミュレーションで試料のひずみ速度および温度の分布を解析した結果の一例を図3に示す。図3は、700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮した試料の結果であり、図3中のAおよびBは、図1に示した金属組織の評価位置AおよびBとそれぞれ対応している。このように、高温圧縮後の試料では、内部のひずみ速度と温度が不均一になっているため、本研究では有限要素法による鍛造シミュレーションを活用し、位置AおよびBにおけるひずみ速度と温度の値を求めた。表1に示した他の条件についても、同様の方法でひずみ速度と温度を解析した。得られた

ひずみ速度と温度を式(2)に入力し、高温変形における見かけの活性化エネルギーに $Q=240\text{kJ/mol}^{(3)}$ を用いて、Z因子を算出した。

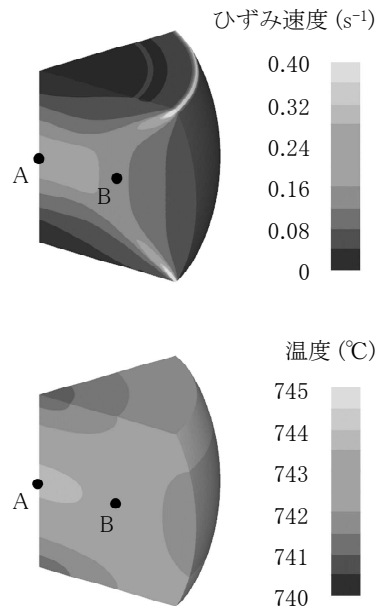


図3 試料内部のひずみ速度と温度の分布

700°C-10⁻¹s⁻¹で圧縮したときの解析結果。位置AおよびBのひずみ速度と温度を式(2)に入力し、Z因子を算出。

金属組織観察から実測した動的再結晶粒径とZ因子の関係を図4に示す。回帰分析により、予測式(1)中の定数項MおよびNを算出した結果、それぞれ71.84、-0.1636となった。

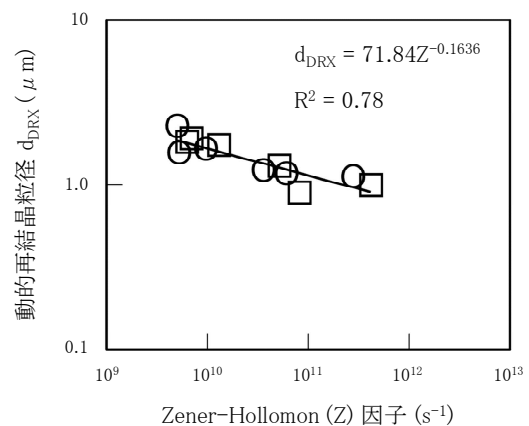


図4 動的再結晶粒径とZ因子の関係

□ : 位置A、○位置B
式(1)で回帰し、式(1)中の定数項MおよびNを算出。M=71.84、N=-0.1636

3.2 予測手法の妥当性検証

表 1 に示す各種条件で高温圧縮した後の動的再結晶粒径の実測値と予測値の関係を図 5 に示す。予測値は実測値と概ね一致し、本手法でチタン合金を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測できることが示された。

equiaxed ($\alpha + \beta$) preform of Ti-6Al-4V: commercial vs. ELI grade, Journal of Materials Processing Technology, 108, 320-327 (2001).

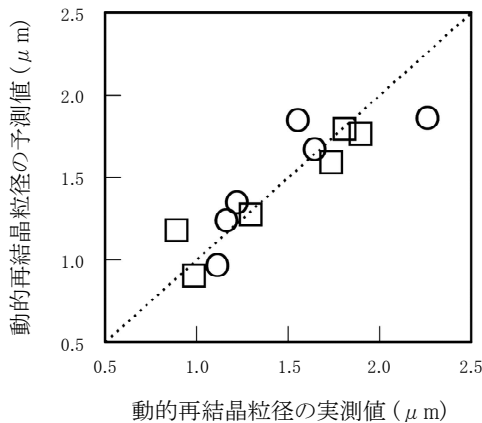


図 5 動的再結晶粒の予測値と実測値の関係

□ : 位置 A、○位置 B

予測値と実測値は概ね一致。

チタン合金を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測できることが示唆。

4 まとめ

本研究では、有限要素法による鍛造シミュレーションと Z 因子を用いた動的再結晶粒径の予測式を組み合わせ、鍛造条件から動的再結晶粒径を定量的に予測した。本手法により、各種条件でチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) を高温圧縮した後の動的再結晶粒径を予測した結果は、実測値とほぼ一致した。これより、本手法を用いることでチタン合金の動的再結晶粒径を定量的に予測可能であることが示された。

参考文献

- 1) Zener C. : Effect of strain rate upon plastic flow of steel, Journal of Applied Physics, 15, 22-32 (1944).
- 2) Sellars C. M. : Modelling microstructural development during hot rolling, Materials Science and Technology, 6, 1072-1081 (1990).
- 3) Prasad Y.V.R.K. et al. : Influence of oxygen content on the forging response of