

医療用チタン合金の鍛造条件を探索するためのシミュレーションシステムの開発

機械電子科 是永宗祐 松下五樹* 本多正計

Development of a simulation system to design a forging process for the manufacture of orthopedic implants

KORENAGA Sosuke, MATSUSHITA Itsuki and HONDA Masakazu

Titanium alloys with excellent biocompatibility are widely used in medical devices such as orthopedic implants, and these products are manufactured by hot die forging. In hot die forging, it is important to not only obtain the desired product shape but also control the microstructure because the latter affects the mechanical properties. Therefore, many trials need to be conducted to identify suitable manufacturing conditions, but this leads to increased development costs.

In recent years, forging simulations have been widely used to reduce development costs. However, in a general forging simulator, basic data is not sufficient to allow the accurate prediction of the shape and microstructures of a product. For these reasons, a stress-strain curve for titanium alloy has been acquired to facilitate the accurate prediction of the shape of a product, while a tool for predicting the microstructure (processing map) of a product has also been constructed.

In this report, the above data are incorporated into a forging simulator in order to build a simulation system that enables the shape and microstructure of a product to be predicted. In addition, as an example of how this system can be used, the optimum shape of a raw material is examined. The use of this system enabled the optimum shape of the raw material to be clarified, the volume of the material to be reduced, and the material costs to be reduced by about 10%.

Keywords : titanium, forging, simulation, finite element method, processing map.

整形外科用インプラント等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。これらの製品には高い信頼性が要求されるため、製品形状を得ること以外に、機械的特性に影響を及ぼす金属組織を、目的とする状態に制御する技術も重要となる。そのため、製造条件の探索等に多くの試作や実験が必要となり、開発コストの増大を招いている。

近年は有限要素法による熱間鍛造シミュレーションを用いることにより、開発コストを低減する試みがなされている。しかし、一般的な鍛造シミュレータでは、チタン合金等の生体適合性材料の熱間鍛造を高精度に予測するための材料特性データ（真応力-真ひずみ曲線）が不足していることに加え、金属組織を予測するための機能も十分に備わっていない。

筆者らは、正確なシミュレーションに必要な材料特性データを取得するとともに、金属組織を簡易的に予測するためのツール（processing map）を構築してきた。本研究では、これらのデータを鍛造シミュレータに組み込み、高精度な形状予測と金属組織の簡易的な予測が可能なシミュレーションシステムを構築する。また、本システムの活用事例として、最適な原材料形状を検討した事例を紹介する。原材料形状を検討したことにより、原材料の体積を低減することが可能となり、材料コストを10%程度低減できた。

キーワード：チタン合金、鍛造、シミュレーション、有限要素法、プロセシングマップ

*現 工業技術研究所 機械電子科

1 はじめに

整形外科用インプラント（以下、インプラント）等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。これらの製品には高い信頼性が要求されるため、製品形状を得ること以外に、機械的特性に影響を及ぼす金属組織を、目的とする状態に制御する技術も重要となる。例えば、動的再結晶が生じる条件で製造することにより、結晶粒が微細化され、機械的特性の向上が期待できる¹⁾。しかし、このような最適な製造条件の探索には、多くの試作や実験が必要となり、初期の開発コストが高くなることが問題となる。

近年は有限要素法（FEM）による熱間鍛造シミュレーションを用いることにより、開発コストを低減する試みがなされている²⁾。しかし、一般的な鍛造シミュレータでは、インプラント等に用いられる医療用チタン合金の材料特性データ（真応力-真ひずみ曲線：材料を圧縮したときの力、変形量、変形速度、温度の関係を表したもの）が不足しており、高精度な予測が困難なことに加え、金属組織を予測するための機能も十分に備わっていない。

このような背景から、筆者らは、医療用チタン合金の材料特性データを取得するとともに³⁾、金属組織を簡易的に予測するためのツール（processing map）を構築してきた⁴⁾。本研究では、これらのデータを鍛造シミュレータに組み込むことによって、高精度な形状予測と、簡易的な金属組織の予測が可能なシミュレーションシステムを構築する。また、本システムの活用事例として、最適な原材料形状を検討した事例を報告する。

2 方法

2.1 シミュレーションシステムの構築

既往の研究において、医療用チタン合金（Ti-6Al-4V ELI:ASTM F136）の材料特性データを取得し³⁾、

金属組織を予測するためのツールである processing map を構築した⁴⁾。また、これらのデータは点群データ（離散的なデータ）であるため、データ点間を補間するため、回帰分析や機械学習により近似式で表した⁵⁾。これらの近似式を計算させるためのサブルーチンを作成し、鍛造シミュレータ（DEFORM™:Scientific Forming Technologies Corporation）に組み込んだ。

2.2 シミュレーションシステムの活用事例（最適な原材料形状の検討）

最適な原材料形状を検討することにより、材料歩留まりを向上させ、製造コストの低減が期待できる。原材料の体積が大きい場合は、バリ（廃材となる箇所）が多くなり、材料の無駄が多くなる。一方で、原材料の体積が小さい場合、材料が金型に充填されない箇所が発生し、目的とする形状が得られない。したがって、材料が金型に充填され、かつ、バリが少なくなるような最適な原材料形状を検討することが重要である。

本研究では、図1に示した骨接合プレートの形状を模した試作品の原材料形状を検討するため、原材料形状を変化させながら熱間鍛造シミュレーションを実施した。

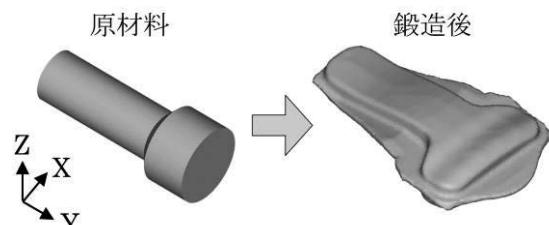


図1 骨接合プレートの試作形状

3 結果および考察

3.1 構築したシミュレーションシステムの概略

構築したシミュレーションシステムの概略を図2に示す。材料特性データや processing map を独自に取得し³⁻⁵⁾、鍛造シミュレータに組み込んできたことで、高精度な形状予測と金属組織の予測が可能となった。

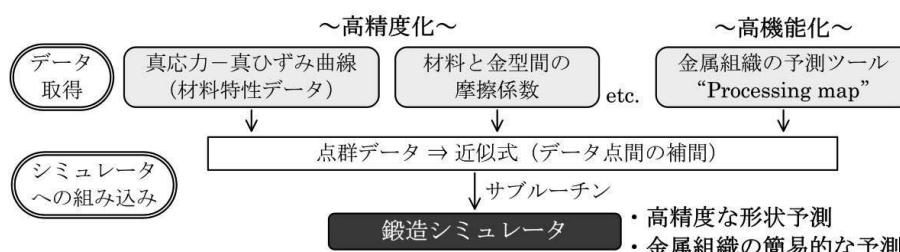


図2 構築したシミュレーションシステムの概略

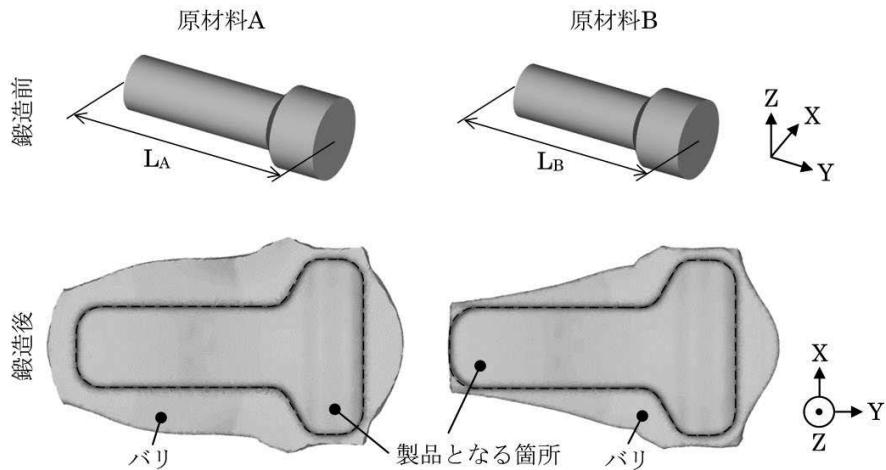


図3 最適な原材料形状の検討

3.2 シミュレーションシステムの活用事例（最適な原材料形状の検討）

形状が異なる2種類の原材料 A 及び B で熱間鍛造シミュレーションを実施した結果を図3に示す。図3に示すように、原材料 A 及び B は、軸方向の長さ L_A 及び L_B が異なっており、 L_A は L_B に比べて長い。図3中の破線の内側が製品となる箇所であり、破線の外側がバリ（廃材となる箇所）である。原材料 A では、バリが多く、材料の無駄が多いことがわかる。原材料形状を変化させながら、最適な原材料形状（材料が金型に充填し、かつ、バリが少なくなる原材料形状）を検討した結果、最終的に原材料 B が得られた。原材料 B では、原材料 A に比べて鍛造後のバリが少なくなっている、原材料の体積は 10% 程度低減された。したがって、原材料 A から B に変更することにより、材料コストを 10% 程度低減できると期待される。

今後は、上記のような形状の予測だけでなく、金属組織の予測についても有効性を検証していく予定である。以上より、開発したシミュレーションシステムを用いることにより、製造コストを低減又は品質を向上できる製造条件を低コストかつ短期間に導き出すことができる期待される。

4 まとめ

インプラント等の医療機器の製造条件を短期間かつ低コストで探索するための鍛造シミュレーションシステムを構築した。正確なシミュレーションに必要なチタン合

金の材料特性データ（真応力－真ひずみ曲線）や、金属組織を簡易的に予測するためのツール（processing map）を鍛造シミュレータに組み込むことにより、製品形状と金属組織の同時予測を実現した。

また、本シミュレーションシステムの活用事例として、最適な原材料形状の検討を行った。この事例では、原材料の体積を低減することが可能となり、材料コストを 10% 程度低減できた。

以上より、開発したシミュレーションシステムを用いることにより、製造コストを低減又は品質を向上できる製造条件を導き出すことができると期待される。

参考文献

- 1) 李云平 他: 生体用 Co-29Cr-6Mo-0.16N 合金の高温圧縮試験における摩擦／加工発熱補正と高精度 Processing Map の構築 . 塑性と加工 , 51 (590), 221-226 (2010).
- 2) 石川孝司: 鍛造における数値シミュレーション技術の現状と動向 . 電気製鋼 , 73 (3), 169-175 (2002).
- 3) 是永宗祐 他: 生体適合性材料（チタン合金）の高温圧縮試験による材料特性データの取得 . 静岡県工業技術研究所研究報告 , 12, 66-67 (2019).
- 4) 是永宗祐 他: 医療用チタン合金の最適鍛造条件探索のためのシミュレーションシステムの構築 . 型技術 , 35 (12), 108-109 (2020).
- 5) 松下五樹 他 : 鍛造シミュレーションの高度化—進化的計算手法と機械学習の活用—. 型技術 , 35 (12), 114-115 (2020).