



H. Matsumoto

# 航空機エンジン用 Ti-6246 合金の革新的な 鍛造プロセス・組織制御を実現するための 組織予測モデルの基盤構築

松本 洋明\*

## 1. まえがき

チタン(Ti)合金は軽量で、良好な耐食性、室温強度および高温強度を呈すことから航空機用を中心に実用展開されている。その製造工程では主に熱間加工(700°C~1100°C)で素形材が製造され、用途に応じて適切に加工・熱処理を介し各種での組織制御が施される。Ti合金における鍛造品(例えば航空機エンジン用ディスク・ブレード部品)の一般的な製造工程について、溶製された鋳塊の初めの塑性加工過程では均質化を目的に高温(一般には1000°C以上)でのベータ( $\beta$ , BCC)鍛造でブレイクダウンし、その後に組織形態の制御を目的に分塊鍛造過程で等軸状の組織制御では( $\alpha+\beta$ )2相域の温度で、他方で( $\alpha+\beta$ )相でのラメラ形態の制御では $\beta$ 相域の加工温度で鍛造加工が実施されビレットを製造する。その後、同様に条件を最適化して製品形状への鍛造での成形加工が施される。この組織制御の過程において高い室温強度・疲労特性を要求する部材では等軸組織をベースとした組織制御が施され、とりわけ $\beta$ 加工されたラメラ組織から如何に加工過程で均質な粒状(等軸)組織が得られるかが重要となる( $\alpha$ 相の動的球状化の促進化)。本レポートではこのラメラ形態から等軸形態に組織変化させる作用機構(動的球状化機構)について着目する。例えば、Gaoらの総説<sup>1)</sup>を参照・概説すると、ラメラ組織の( $\alpha+\beta$ )域での塑性加工過程にてラメラが振じれるキンキングが起き、それを起点として粒の分断・球状化が活性化・促進される。加工でのひずみ量の増加とともにこのキンク部の転位壁を起点として $\alpha$ 粒は分離(スプリット)する現象、もしくはこの転位壁より溶質元素が優先的に拡散して形態として丸みを帯びて分断・球状化される現象がある。Ti合金の高温加工・組織変化において、本合金は積層欠陥エネルギーが高く、そのために加工過程で新粒が形成する動的再結晶現象においては連続型(転位網の形成・サブグレインがひずみ量に対して連続的に回転して新粒を生成)で進行するのが一般である<sup>2)</sup>。いずれにせよ、Ti合金の鋳塊およびラメラ形態を呈すビレットから段階的な熱間加工過程にて均質な( $\alpha+\beta$ )等軸組織を得るためには、いかに動的球状化、もしくは連続型の動的再結晶が活性化・促進されるかが重要であり、これを実現するための加工条件(鍛造条件)の最適化が重要となる。

本レポートでは、航空機エンジンに既に使用されている

Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo(Ti-6246)合金をモデル合金として高温加工過程における塑性流動特性および $\alpha$ 相の動的球状化現象を対象とした加工条件と現象論の関係性について体系化、またこの連関的な支配因子について物理モデルと併せて機械学習を援用して明らかとすることを目的とする。また、本稿で紹介する内容は天田財団研究助成の成果(AF-2018026-B3「航空機エンジン用 Ti-6246 合金の革新的な鍛造プロセス・組織制御を実現するための組織予測モデルの基盤構築 -実験・計算の両面から-」)でもあり、加えて詳細は学術論文<sup>3)</sup>でも報告していることから、より詳細な内容ではそちらも併せて参照頂きたい。

## 2. 結果および考察

### 2.1 恒温鍛造と組織(実験)

図1は本研究でのモデル合金であるTi-6246合金のラメラ出発組織を形成するための熱処理条件、および鍛造(圧縮)試験の条件を図示している。加えて熱処理で形成したラメラ組織も示している。この( $\alpha+\beta$ )ラメラ組織を出発組織として多様な条件で鍛造加工を実施し、塑性特性および加工組織(特に $\alpha$ 相の動的球状化現象に着目)を高精度に予測する基盤技術に着目した。図2では750°C、850°Cの試験温度、 $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $1\text{s}^{-1}$ のひずみ速度で試験した真ひずみ-真応力曲線をまとめている。塑性流動の実線部が実験結果で破線部がそれを摩擦・温度補正<sup>4)</sup>した曲線である。これより高速変形ではピーク応力に達した後の加工軟化域が大きく、温度補正の結果、応力値が高くなっていることから加工発熱の影響が強く、それに伴い不均一変形が支配的

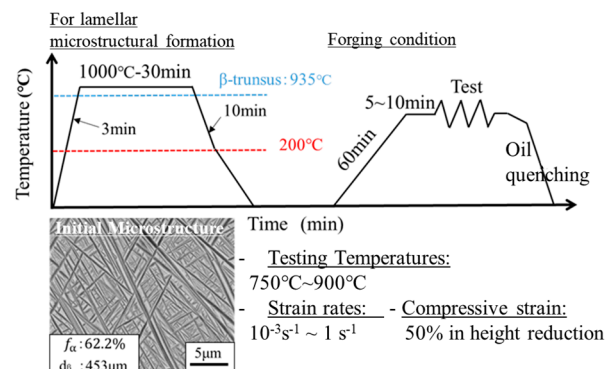


図1 鍛造加工スケジュール

\*香川大学 教授

となる(adiabatic shear banding を引き起こし、局所で加工発熱された箇所からせん断帯が形成・不均一変形が起きる現象である)。他方で低速変形では定常変形の挙動を呈し、動的回復もしくは Ti 合金特有の連続型の動的再結晶が活発に起きていることを示唆している。

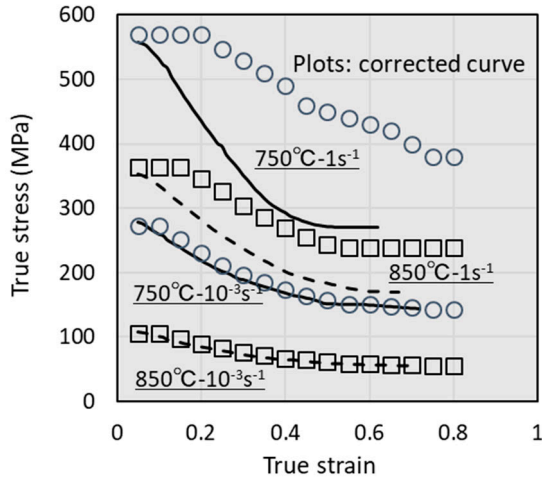


図2 応力-ひずみ曲線

代表的な加工組織を示すために、図3は加工温度850°C、加工速度(10<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>, 1s<sup>-1</sup>)で高温鍛造(高さ比50%)した組織(a1,2 SEM 反射電子像, b1,2 圧縮軸に対するEBSD 方位像(β))を示している。これよりより低速域での加工でα相(SEM像での黒色相)は等軸化(球状化)される様子が観察できる。これは低速域にてα相の動的球状化が促進していることを示唆している。出発組織では粗大な旧β粒中にラメラ状のα相が分布した組織で、加工組織(図3(b1,2))よりランダムな方位を呈す等軸なβ粒が形成されており、低速変形によりβ粒が粗大化されている。これよりα相では動的球状化現象が、他方ではβ相では連続型の動的再結晶が動的復旧過程で起きることが分かる。

図4はZener-Hollomon(Z)因子と動的球状化率(出発状態でのα相のアスペクト比24が加工後で4以下になったα相の頻度で計測)の関係性およびα粒径(もしくはラメラα粒の幅径)を示している。Z因子は以下の(1)式で表され、熱活性化過程に寄与するひずみ速度εおよび加工温度Tを一元的な変数で現象論を議論することができる。

$$Z = \epsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

Rはガス定数(8.31 J/mol・K)、Qは見掛けの変形の活性化エネルギー(483.6 kJ/mol)である。これよりZ因子と球状化率およびα粒径にてある程度良い線形的な相関性(図4)があり、動的球状化現象および粒径変化の現象論がそれぞれで同様な熱活性化過程で支配されていることを示唆している。つまりは低Z側(熱活性化過程が強くなる高温・低速域)で動的球状化と拡散が活性化された粒成長が促進する。この動的球状化の現象論について概説すると加工でα-

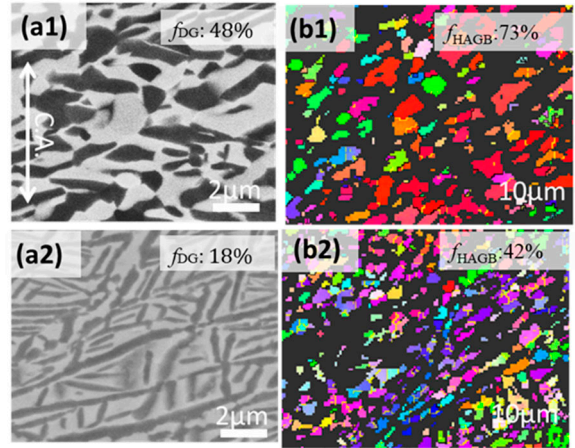


図3 鍛造組織(SEM, EBSD)

(a1, b1) 850°C-10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>, (a2, b2) 850°C- 1 s<sup>-1</sup>

ラメラが振じれるキンキングが起き、そのキンク部を起点として粒の分断と球状化が活性化される。熱間加工にて低ひずみ量ではキンク部およびラメラ域内では不均一に転位が集積した転位壁が形成され、ひずみ量の増加とともに、この転位壁から粒がスプリットする現象、もしくはこの転位壁付近のラメラの窪みから溶質元素が優先的に拡散・進行して、丸みを帯びた形態となり粒が分断され、αラメラが等軸化・球状化される現象が起き、動的球状化が活性化される。このTi合金の動的球状化現象・作用機構についてはGaoらにより詳細にレビュー<sup>1)</sup>されていることから詳細はそちらを参照頂きたい。

以上のように高温塑性およびそれに付随する動的復旧機構(動的球状化、動的再結晶化、粒成長機構など)は熱活性化過程に支配され、とりわけ3つの加工条件(温度、ひずみ速度、ひずみ量)に影響される。図4では同様なひずみ量の状態での結果であり、この場合Z因子で良く相間・整理できるものの、ひずみ量を変数として考慮(追加)した場合には塑性流動特性(応力値)および動的復旧機構が複雑化しZ因子のみでは一様には整理することができない。

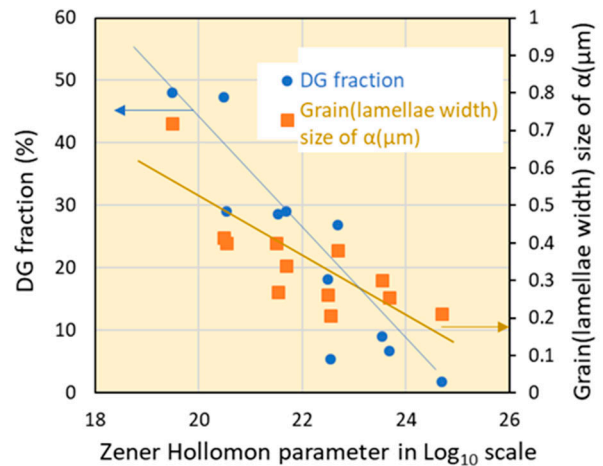


図4 Z因子と動的球状化率およびα粒径の関係

3つの加工条件(温度, ひずみ速度, ひずみ量)を変量とした塑性特性および組織変化に及ぼす連関性を定量的に議論(現象論の体系化と支配因子の解明)するため, 次節では一般的な物理冶金モデルとともに機械学習を援用した現象論の解析・高精度な現象論モデルの構築を行った.

## 2.2 高温塑性(鍛造)と組織変化(物理冶金モデルおよび機械学習)

### 2.2.1 塑性流動特性

高温加工では, 熱活性化過程の程度に依存して塑性機構および組織変化機構(動的復旧機構)が複雑に連関するために現象論を統一的に解釈することは困難である. 加えて, 出発組織の影響もあり, 加工条件のみならず多様な影響因子を考慮する必要がある. ここではラメラ組織を出発組織とした Ti-6246 合金の高温塑性(塑性流動特性・応力値)および  $\alpha$  ラメラの動的球状化現象について物理冶金式に基づいた予測, および機械学習を援用した予測を試み, 特に影響因子(ここでは加工条件)の定量的解釈を試みた.

まずは塑性流動特性・応力値の計算結果について紹介する. 塑性流動・応力値での物理冶金式では簡易的に以下(2)式の Norton-Hoff(NH)モデルから予測式を構築した. ここではすべての試験条件(750°C~900°C,  $10^{-3}\text{s}^{-1}\sim 1\text{s}^{-1}$ )の塑性特性から非線形回帰分析から各種材料定数を最適化し(2)式の計算式を構築した. 最適化した定数項は式(2)に併せて示している.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 - \varepsilon)^n \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$K=36.02, m=0.134, n=-0.997, \varepsilon_0=0.804, Q=22621 \text{ J/mol}$

またここでは機械学習による回帰も実施した. 多様な機械学習アルゴリズムの中からここでは汎用なニューラルネットワーク(NN)を採用し, 流動応力値を予測した. 計算ではオープンソースコードである Python-Scikit learn (v. 0.24.1)ライブラリを使用して機械学習を実施している. 図5(a)はNNのアーキテクチャーで, 加工条件(温度, ひずみ速度, ひずみ)を入力因子として1層の中間層と6個のニューロンを配置して回帰を実施した. 計算結果の一例として図5(b)に  $850^\circ\text{C}\cdot 1\text{s}^{-1}$  の条件で鍛造した塑性流動特性を示している. これよりいずれの計算結果(NH, NN)も高速変形特有の加工軟化現象が観察されるものの(表現できているものの), 応力値では物理モデルである NH との誤差が大きく, これについて他の加工条件でも同様に NH との誤差が観察されており, 精緻に塑性流動特性(実験値)を予測することが出来ていない. 他方で NN の回帰結果はより実験値と近く, 他の加工条件でも同様に精度よく塑性流動特性を表すことができてきている. このように, 機械学習で最適化した回帰モデルの方がより塑性流動特性を精度よく表すことができていくことが分かるものの, 機械学習による予測では統計的・近似的な解釈であり, 物理的意味を持たないために(ブラックボックス化されている), 得られた回帰モデルから現象論を議論することができない. 一方で適切に特徴量解析を実施することで影響因子(ここでは複数の加工条件)を定量的に解析・比較することができ, 目的となる物理現象において(目的変数)どのような役割を担うのか定量的に明らかにすることが出来る. より具体的には次節での動的球状化現象の予測・回帰において紹介する.

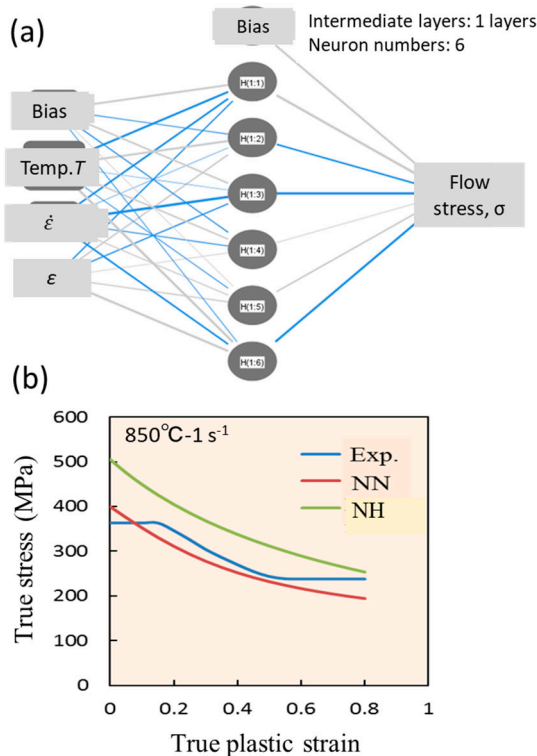


図5 (a) NN アーキテクチャー, (b) 塑性流動特性 実験値・計算値

### 2.2.2 動的球状化現象

動的復旧過程における動的球状化現象も同様に加工条件(温度, ひずみ速度, ひずみ量)と関係して現象論が変化する. 以下では, この関係性における作用機構において現象論的な物理冶金(PM)モデルとともに機械学習を援用した解析結果について報告する. ここで PM モデルでは, 動的球状化率  $f_{DG}$  について Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK)則(以下の(3-1)式)を適用して計算する. また非定常な加工条件の変化に対応するために, 逐次的に変化する温度・ひずみ速度・ひずみ量から JMAK 則について全微分(以下の(3-2)式)を行い, 非定常な加工状態については逐次的に加算して計算する(以下の(3-3)式).

$$f_{DG} = 1 - \exp[-k \times (\varepsilon - \varepsilon_c)^n] \quad (3-1)$$

$$\varepsilon_P = (5.5 \times 10^{-3}) \cdot Z^{0.0778}, \quad \varepsilon_c = 0.8 \cdot \varepsilon_P,$$



$$k = k_0 \varepsilon^{m1} \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right)$$

$$d(f_{DG})^n = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_c} d\varepsilon_c + \frac{\partial f}{\partial k} dk \quad (3-2),$$

$$f_{DG}^{n+1} = f_{DG}^n + d(f_{DG})^n \quad (3-3)$$

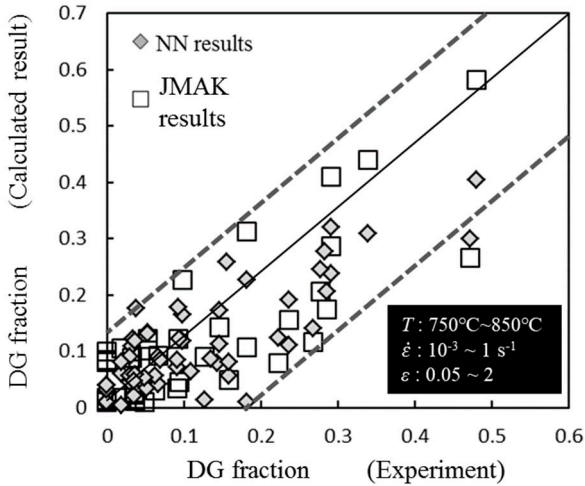


図6 動的球状化率の実験値・計算値の相関性

機械学習では様々なアルゴリズムから加工条件・動的球状化率の関係からクラスタリング(Ward法), および加工条件と動的球状化率をリンクするための回帰手法としてNNを採用して機械学習(Python-Scikit learn (v. 0.24.1))を実施している。機械学習アルゴリズムおよび使用したソースコードの概要については例えば文献5)を参照されたい。また, 以下の機械学習では, 加工温度(750°C~950°C), ひずみ速度(0.001s<sup>-1</sup>~1s<sup>-1</sup>), 相当ひずみ量(0.56~2.2)の範囲の条件で実験的に計測された動的球状化率との関係からデータセットを構築・機械学習を実施している。本研究でのNN解析では, 加工条件である温度, ひずみ速度, ひずみ量を入力変数(説明変数)として, また動的球状化率を出力変数(目的変数)としてバイアス含め4つのユニットを入力変数としてシンプルに1層の中間層(入力変数と同数のユニット)を配置して回帰を実施している。

図6は全加工条件に対して動的球状化率を予測したJMAK則およびNNでの最適化した結果であり, 実験値と予測値の相関性をまとめている。ここでの実験値および予測値は図中に示した式から規格値を導出して, それを値として表示しているため直接的に動的球状化率の値ではないことは留意されたい。この図6よりJMAK則およびNNの結果ともにおおよそ良好な正の相関性が観察されるもののバラツキも大きく, 予測精度も悪いことがわかる。先述した塑性流動特性の結果とは異なり, NNにおいても予測精度が悪い。これはすべての加工条件を包括的に取扱い, 一様に動的球状化の現象論を議論しようとしたためで支配因子が加工条件毎で異なる可能性を無視していること

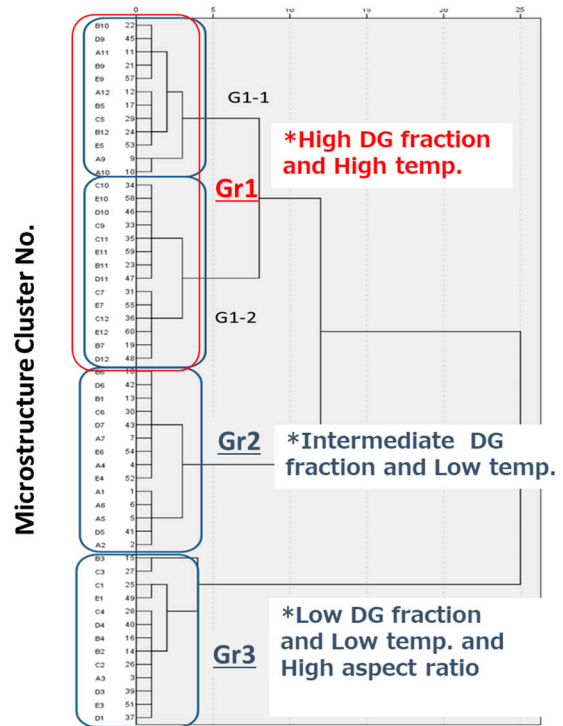


図7 クラスタ分析(Ward法) デンドログラム図

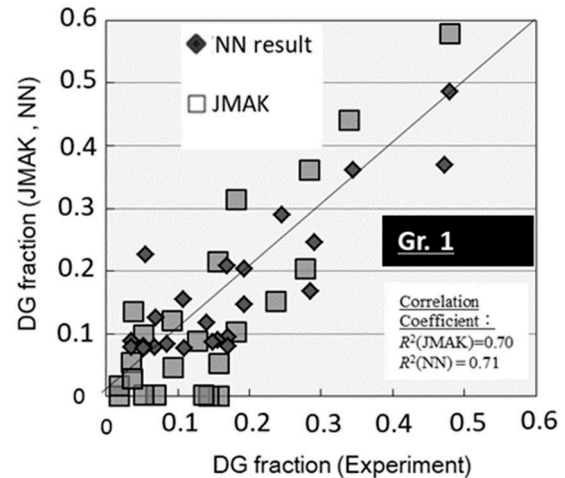


図8 動的球状化率 実験値・計算値の相関性 (Gr. 1)

となる。そのため, 加工条件を適切にクラスタ化・分類する必要があるものの, 現象論から推定して適切な線引きをすることが出来ない。そのためここでは, 機械学習としてWard法で階層型クラスタ分析を実施した。図7はその結果であり, デンドログラム図にて分析結果をまとめている。ここでクラスタ分析においては加工後組織の特徴量に対してWard法でクラスタ化している。図7より, 大きく3つの条件域でクラスタ化され特徴量をまとめるとGr.1のクラスタでは高温・高動的球状化率に相当, Gr.2のクラスタでは低温・中動的球状化率に相当, またGr.3のクラスタでは低温・低動的球状化率に相当している。このように傾向として大きく3つの加工条件域で大別することができる。次にそれぞれのクラスタ

表 1 各クラスター(Gr.1,2,3)での NN 重要度解析結果

	Gr. 1	Gr.2	Gr.3
Temp.	0.18	0.03	0.46
Strain rate	0.14	0.56	0.42
Strain	0.68	0.4	0.13

一毎(加工条件を 3 つのクラスターに大別)で再度, JMAK 則および NN で計算・回帰を実施した. 代表的に図 8 は Gr.1 の加工条件でのみ JMAK 計算および NN した実験値と計算値の関係性を示している. これより両者の計算結果で良い相関性が観察され, 明らかに図 6 で示した全データの相関性と比較しても著しく相関性が改善されていることがわかる. 加えて, ここでは図示していないが Ward 法で区分けされたクラスター 2, 3 の加工条件においても同様に良い相関性が確認されている. すなわち, 加工条件・加工組織に依存して(図 7 の区分けの通り)動的球状化を支配する作用機構が異なり, そのため図 6 で示した通り, 全加工条件を包括的に計算・回帰した場合には低い相関性を示したものと推察される(すなわち全加工条件で動的再結晶の支配的な作用機構は同一ではないことを意味している). 次にそれぞれのクラスター毎で動的球状化に及ぼす加工条件の影響度を定量解析した. 表 1 は各クラスターで NN を実施した際の重要度解析を実施した結果である. ここでは数値が高い方が動的再結晶化に寄与する影響度が高いことを示しており, 興味深いことに各加工条件域(クラスター毎)で影響度合いが異なることに気付く. すなわち動的球状化に及ぼす支配因子として熱活性過程の影響が弱い Gr. 3 の条件では温度およびひずみ速度が強く影響し, 他方で熱活性化過程が強い Gr. 1 の条件ではひずみ量が影響因子として強く作用する. 逆に Gr. 2 の加工条件ではひずみ速度が影響因子として強い影響を及ぼす. このように, 機械学習を適切に援用する事で加工条件毎にて作用する現象論の支配因子を区分けする事が可能であり, それぞれの条件で動的球状化の現象論を解明・深化する上で極めて有用な情報となる.

### 3. まとめ

本稿では, 航空機エンジンディスク材で実用化されている Ti-6246 合金をモデル合金として鍛造過程における塑性流動特性および組織変化(ここでは  $\alpha$  相の動的球状化現象に着眼)の加工条件(加工温度, ひずみ速度, ひずみ量)との関係性を定量的に明らかとした(支配因子の定量化). ここでは物理モデルのみならず機械学習も援用して回帰を実施し, 支配因子について明らかとした.

### 謝 辞

本研究は, 公益財団法人天田財団からの一般研究助成(AF-2018026)により実施した研究に基づいていることを付記するとともに, 同財団に感謝いたします.

### 参考文献

- 1) P. Gao, M. Fu, M. Zhan, Z. Lei and Y. Li, *J. Mater. Sci. Tech.*, 39, (2020), 56-73.
- 2) F. Humphreys, and M. Hatherly: *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Oxford: Elsevier; 2004.
- 3) H. Matsumoto, *ISIJ Int.*, 61 (2021) 1011-1021.
- 4) Y. Li, E. Onodera, H. Matsumoto, Y. Koizumi, S. Yu and A. Chiba: *ISIJ Int.*, 51 (2011), 782.
- 5) S. Raschka, and V. Mirjalili: *Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2 (Third edition)*, Published by Packt Publishing Ltd. 2019.