

(技術資料)

大型鍛造シミュレータを活用したチタン合金の組織予測技術

逸見義男*・長田 卓・神崎文兵・横地恒平

Prediction Technology of Titanium Alloy Microstructure Utilizing Large Forging Simulator

Yoshio ITSUMI・Takashi CHODA・Bumpei KANZAKI・Kohei YOKOCHI

要旨

チタン合金は比強度や耐食性の良さから航空機部材に広く用いられている。航空機部材として必要な機械的特性とマイクロ組織との間には強い関係性がある。このため、鍛造中および鍛造後の熱処理中のマイクロ組織の変化を知ることが製造上極めて重要である。最近導入された1500トン鍛造シミュレータを用いて、エンジン部材に適用されているニアβチタン合金Ti-17の鍛造中の組織変化を観察した。さらに、モデル化された結果を模擬部品での実機試作結果へ適用して組織予測を試みた。本稿では、これらの結果について紹介する。

Abstract

Titanium alloys are widely used for aircraft parts thanks to their high specific strength and excellent corrosion resistance. Since mechanical properties of the alloys are strongly related to their microstructure, it is extremely important in manufacturing to know the changes in microstructure during forging and during post-forging heat treatment. A recently-introduced 1500-ton forging simulator has been used to observe the microstructural change during the forging of a near-β titanium alloy, Ti-17 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr), which is used for engine parts. In addition, attempts were made to predict the microstructure by applying the modeled results to the actual prototype results of simulated parts. This paper introduces the results.

キーワード

チタン合金, 熱間鍛造, プレス, ミクロ組織, 組織予測, FEM解析, シミュレータ, α相, β相, 引張強度, 航空機部材

まえがき=チタン合金は他の金属素材よりも比強度や耐食性に優れており、航空機の構造部材やエンジン部材に幅広く用いられている。最近の民間航空機では機体の軽量化を図る目的で炭素繊維強化樹脂 (CFRP) が大幅に採用されている。いっぽうチタン合金も、ガルバニック腐食を起こしにくく、また熱膨張率の差が小さいなど、CFRPとの適合性が良いことから締結部位などへの適用が増えている。最近のエアバス社のA350XWBやボーイング社のB787では、CFRPは機体の重量比で50%以上を占め、チタン合金も14~15%程度を占めている。この比率はこれまでの機種に比べると数倍高くなっている¹⁾。チタン合金はまた、ジェットエンジンにおいても低圧・中圧圧縮機のディスクやファン、シャフト、ファンケースなどの多くの部位に適用されている。

当社はこれら民間航空機の機体やジェットエンジン向けにチタン合金の大型鍛造部材を製造している。これらの部材は人命を預かる航空機の重要部品に用いられるため、静的強度はもちろんのこと、疲労強度や破壊じん性などの面においても高い信頼性が求められる。

チタン合金の鍛造材は、製品寸法通りの形に仕上げるのみならず、所望の特性を得るために、鍛造中の温度、ひずみ、ひずみ速度ならびに鍛造後の冷却速度、また熱処理中の温度、時間、冷却速度などを厳密に管理して製造されている。特性と密接な関係にある組織は、鍛

造プロセスによって、大きく変わることが知られている。

一例として図1にエンジンディスクに適用されているニアβチタン合金Ti-6246 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo) の二つの異なる鍛造プロセスで得られたマイクロ組織を示す。チタン合金の鍛造材は鍛造後、調質を目的とする熱処理が通常β変態点以下のα+β2相域の温度範囲で行われる。このため、鍛造中に形成された組織形態のベースは、熱処理後も大きく変化することなく受け継がれ、特性にも大きな影響を及ぼす。図1の左側がβ変態点以下のα+β2相域の温度で鍛造加工(α+β鍛造)して得られるマイクロ組織(等軸バイモダル組織)である。鍛造中に伸長の初析α相が分断されて、再加熱により等軸化が進んだものである。この組織は延性や疲労強度に優れる

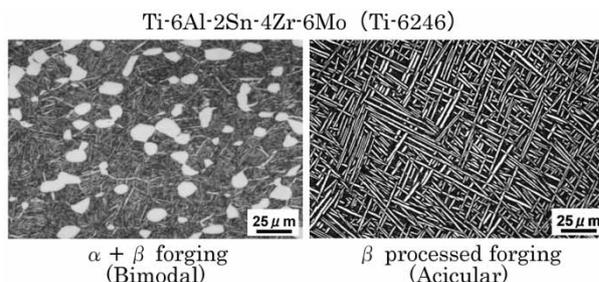


図1 ニアβチタンTi-6246合金の組織例
Fig.1 Microstructures of near β Ti-6246 alloy

* 素形材事業部門 チタンユニット チタン工場 技術部

ものの、き裂伝播速度が速く、破壊じん性値が低い特徴を持つ。

いっぽう、図1の右側が β 変態点より高温域に加熱してから鍛造加工（ β プロセス鍛造）して得られたマイクロ組織（針状組織）である。鍛造中に α 相の析出が少なく、鍛造後の冷却中に α 相が板状に析出するため、その延性はやや低くなるが、高い破壊じん性値が得られる²⁾。つまり、同じ合金であっても組織形態を変えることによって異なる特性を付与することができる。また、 β プロセス鍛造でも鍛造温度やひずみ量などが変われば、得られるマイクロ組織は同じ針状組織であったとしてもサイズや形状、旧 β 粒界からの析出などさまざまな変化があり、特性も変わることが報告されている³⁾。

このため、鍛造材の全断面内にわたって所望の組織・特性を得るためには、鍛造中の温度やひずみ、ひずみ速度などを厳密にコントロールして製品寸法を造るとともに組織を創り込むことが必要となる。すなわち、鍛造形状を造りながら最適な組織形態を創り出すためのプロセス条件を導き出すには、組織を予測する技術が極めて重要となる。

本稿ではTi-6246合金と同じく、航空機ジェットエンジン用部材に適用されているTi-17 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr)合金の β プロセス鍛造を題材に、マイクロ組織の予測技術についての当社における取り組みを紹介する。

1. FEM解析と組織予測の連成化

熱間型鍛造部品は設計どおりの形状に成形され、かつその成形品が要求特性を満足するように製造される。そのためには、鍛造中の変形温度や変形量（塑性ひずみ）に加えて変形速度（ひずみ速度）やメタルフローなどを高度に制御する必要がある。

このような鍛造工程を効率的・効果的に設計するためには、温度と塑性変形を連成させたFEMによる数値解析が欠かせない。このようなFEM解析を行うことにより、鍛造中に材料が流動していく様子やプレス荷重、鍛造材の任意の場所における温度履歴やひずみ履歴を鍛造品内の分布として把握することができる。

いっぽう金属組織に関しては、初析 α 相の体積分率や

サイズ、形態、 β 相の回復率や再結晶率などの組織因子が特性に影響を与えると考えられる。これらの組織因子を、FEM解析で導出される温度やひずみ、ひずみ速度などの関数として表現できれば、鍛造による形状変化と同時に組織因子が変化の様子をFEM解析によって予測可能となる。また、組織因子と明らかに強い相関がある機械的特性の関係式を求めることができれば、特性も同様に計算可能となる。

松本らは^{4), 5)}、Ti-17合金を対象に $\alpha + \beta$ 域から β 域までの温度域において、種々のひずみ速度で高温圧縮試験を行った。その試験鍛造中およびその後の熱処理で得た組織写真から組織因子を数値化し、古典的な物理冶金モデルをベースに関係式を求め、組織因子の予測を行っている。具体的な組織因子は、 β 相の動的再結晶化率、動的再結晶粒径、板状初析 α 相のアスペクト比、 α / β 相量比などで、温度、ひずみ、ひずみ速度の関数として表現されている。

また古原らは^{6), 7)}、鍛造後の調質のために行う溶体化時効処理中の加熱・冷却に伴う組織因子を定量的に評価し、冶金モデルを提案した。求めている組織因子は α 相全量、初析 α 相量、板状初析 α 相の平均厚さ、あるいはそのアスペクト比である。 α / β 相界面の移動は、Moの拡散律速成長に支配されているとし、鍛造後溶体化における溶体化処理後の冷却速度の違いによって初析 α 相量が影響を受けることを定量的に示している。

これらの組織因子を予測する冶金モデルを商用FEM鍛造解析シミュレーションソフトFORGE[®] NxT1.0に組み込み、鍛造解析に連成させて組織因子が計算できるようにした。

2. 1500トン鍛造シミュレータによる組織予測の検証と機械的特性の対応付け

内閣府「総合科学技術・イノベーション会議」が創設した「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」の「革新的構造材料」プロジェクトにおいて「革新的プロセスを用いた航空機エンジン用耐熱材料創製技術開発」を推進するため、2015年に実験装置として1500トン鍛造シミュレータが物質・材料研究機構に設置された。

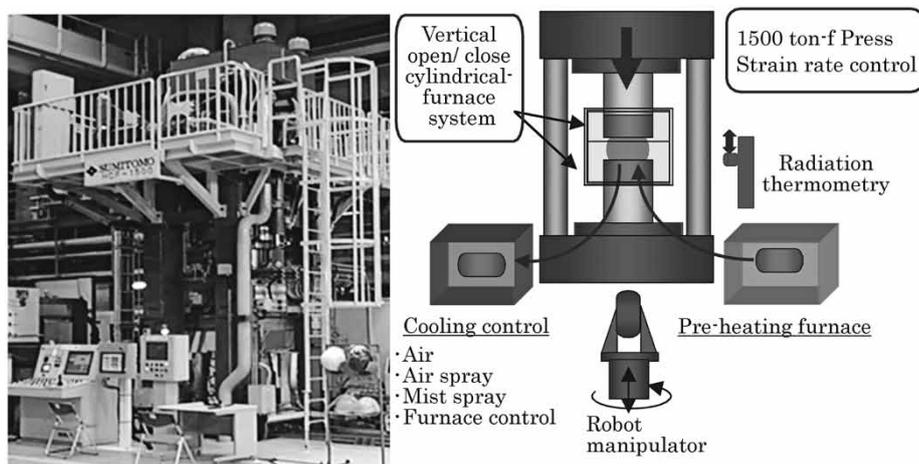


図2 1500トン鍛造シミュレータの外観とその概念図

Fig.2 Appearance and conceptual scheme of 1500-ton forging press simulator

図2にその外観写真と概念図を示す。本装置は、鍛造素材を予備加熱する素材加熱炉のほか、金型および素材を加熱保持する金型加熱炉、その炉内で圧縮変形を与える1500トン油圧プレス機、および変形後にさまざまな様式で冷却する冷却装置群からなる。また、それぞれの装置間における鍛造素材の移動は、ロボットマネージャにて行う。

実験では、予備加熱した鍛造素材は金型加熱炉内に移されて所定の温度に加熱・保持される。続いて所定の圧縮速度と圧縮量で鍛造された後、冷却装置に搬送される。素材の加熱、鍛造、冷却に至るまでプログラム制御され、鍛造履歴として記録される。鍛造材は引張などの試験片が十分に採れるサイズ（素材は最大で直径200mm、高さ300mm）である。このため、鍛造材の任意の箇所における組織と機械的特性、プロセスとを直接対応づけるデータが採取できる。なお本装置については、御手洗りの解説に詳細が記載されている⁸⁾。

鍛造シミュレータを用いた本検証においては β プロセス鍛造を想定し、 β 相域の930℃にあらかじめ加熱したTi-17合金円柱素材を金型加熱炉内で $\alpha + \beta$ 域温度域に

冷却均熱後、ひずみ速度一定で恒温鍛造した。この時のプレス荷重とストロークの関係を図3(左)に示す。 $\alpha + \beta$ 域の温度は750℃、800℃および850℃の3条件とし、実際に鍛造した時の実績荷重とFEM解析で得られた計算荷重の結果とを合わせて示している。プレス初期では計算荷重が実績よりもやや高い傾向にあることを除いて、プレス終了までの荷重変化はいずれの温度条件でも実績荷重とおおむね一致している。

また、800℃鍛造後の鍛造材の断面（マクロ組織）と計算で得た断面形状（相当ひずみ分布を合わせて表示）を図3(右)に示す。鍛造後の端部のバルジ形状が解析結果とほぼ一致している結果が得られており、鍛造解析における各部位での温度・ひずみ履歴がおおむね再現できていることが期待される。

鍛造後の鍛造材断面における旧 β 粒の厚さおよび初析 α のアスペクト比（初析 α の長片と短片の長さ比）のFEM解析による計算結果を図4に示す。あわせて、組織写真から読み取ったそれぞれの組織因子の実測値と計算値の関係を示す。いずれの分布も図3に示す相当ひずみの分布に対応しており、相当ひずみがこれら組織に強

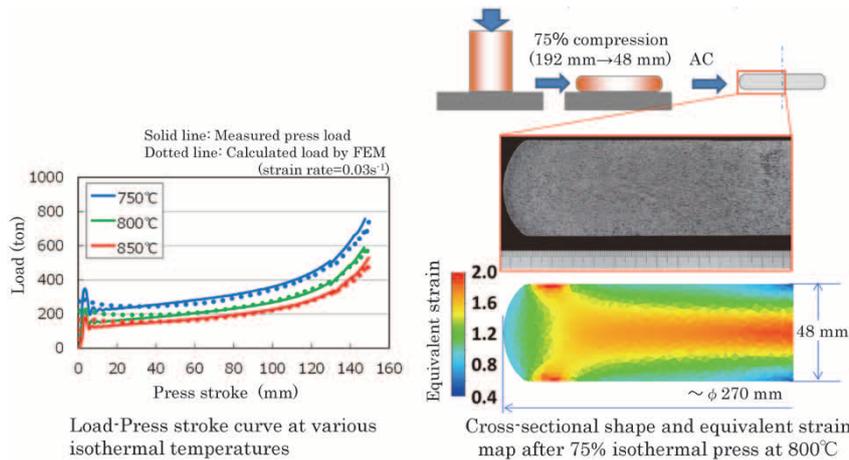


図3 75%圧縮した鍛造材の形状およびプレス荷重の実測値とFEM解析結果との比較

Fig.3 Comparison of shape and press load of 75% compressed forgings between measured values and analytical results of FEM

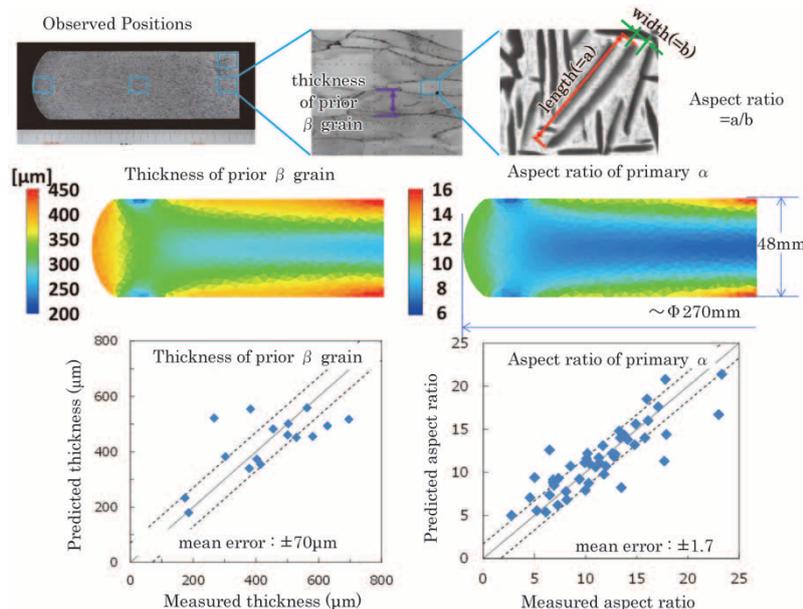


図4 鍛造シミュレータで鍛造したTi-17合金における旧 β 粒厚さおよび初析 α アスペクト比の実績とFEM解析との比較

Fig.4 Comparison of microstructural parameter between measurement values and analytical results of FEM

い影響を与えていることが分かる。また実測値と計算値は、ばらつきは見られるものの大まかに1:1の相関があることが分かる。

御手洗らは⁹⁾、鍛造シミュレータで鍛造してさまざまな温度条件で溶体化時効処理した鍛造材を用いて引張試験を行った。また、引張部に相当する箇所組織観察を行い、初析 α 相量に加えて2次 α 相量と粒界 α 相量の三つの組織因子を独自に定義し、これらの因子と強度特性との相関を求めて数式化した。ここで、これら α 相に関する組織因子は古原らが提案した冶金モデル⁶⁾により求めることができる。

鍛造シミュレータで得た鍛造材の実測強度と計算値は、 ± 50 MPaの範囲内で一致していることが報告されている⁹⁾。なお、ここで予測する強度特性は組織因子を変数に用いた数式から導出されており、組織予測の精度が強度予測の精度を支配することになる。

3. 模擬ディスクによる組織・機械的特性の予測技術の検証

2章で述べた組織予測技術が実機レベルの大型鍛造品に対しても適用可能かどうかの検証を行った¹⁰⁾。模擬材はTi-17合金を用いたエンジンディスクとし、日本エアロフォージ株式会社が保有する5万トン油圧鍛造プレスを使用して作製した。ディスクの大きさは、実機サイズ相当の直径760 mm、最大厚さ130 mmとし、 β プロセス鍛造にて試作した。鍛造後のディスク外観と断面形状を図5に示す。金型への充満もできており、設計したおりの鍛造形状が得られている。ディスク断面内の種々の箇所から試験片を採取し、組織観察と周方向の引張特性を調査した。

いっぽう、このエンジンディスクの鍛造加工シミュレーションを行い、鍛造後の組織因子を計算した。図6にシミュレーションで得たディスク断面における初析 α 相のアスペクト比の分布と、A~Dで示す位置でのマイクロ組織写真を示す。あわせて、初析 α 相のアスペクト比の

実測値と予測値との相関を示す。図中には2章で示した鍛造シミュレータの実験で得た点(青菱形)と、鍛造ディスク断面のA~Dの部位で得た点(赤丸)を示している。

実機相当の大型鍛造における実測値と予測値との相関性は、鍛造シミュレータで得られた相関のばらつき範囲内に収まっていることが分かる。

つぎに、初析 α 相量や2次 α 相量などを組織予測した結果から導き出した耐力および引張強度についても図6と同様に図7に示す。御手洗らが示した⁹⁾ ± 50 MPaの範囲内で、実測値と予測値が一致していることが分かる。

$\alpha + \beta$ 型チタン合金の溶体化時効では、溶体化処理後の水冷で凍結された不安定な β 相から、微細な2次 α 相が時効によって析出することで強化される。溶体化処理後の冷却が緩やかになるほど、初析 α 相は冷却中に多く析出する。このため、後に時効で析出する2次 α 相の量が減ることとなる。すなわち、溶体化処理後の冷却が緩やかな部位での強度は低下する。反して、ディスクの肉厚の薄い部位や表層付近の部位は冷却速度が大きくなるため強度が高くなることが予想される。図7に示すとおり、強度の絶対値や試験片採取箇所による強度の変化量



図5 β プロセス鍛造後のディスク概観とその断面
Fig.5 Appearance of disk after β process forging and its cross section

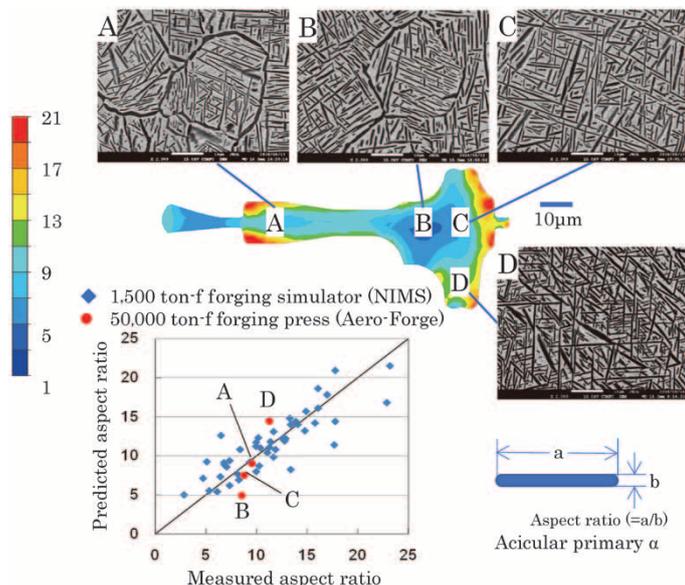


図6 初析 α 相アスペクト比の鍛造シミュレータと5万トン鍛造プレス機実績の相関図

Fig.6 Correlation of aspect ratio of acicular primary α between results of forging simulator and actual values of 50,000-ton forging press

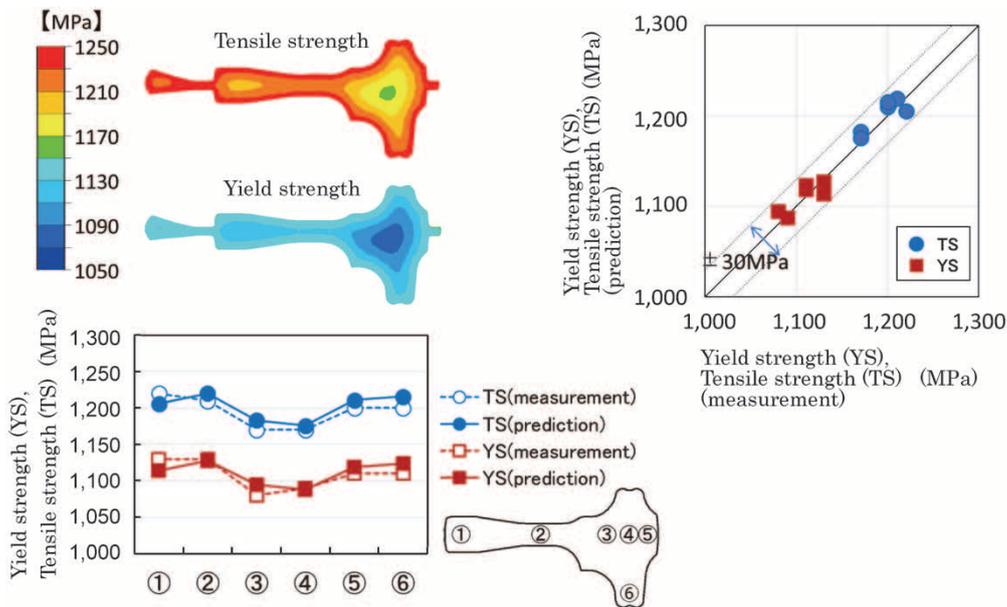


図7 引張強度および耐力の鍛造シミュレータ結果と5万トン鍛造プレスによる実測値の対比

Fig.7 Correlation of tensile strength and yield strength between results of forging simulator and actual values of 50,000-ton forging press

においても実測値と予測値がおおむね合致することが示されている。

むすび = 本稿では航空機向け大型チタン合金部材の鍛造プロセスにおける組織予測技術の取り組みについて紹介した。

Ti-17合金のエンジンディスクを対象に、実機製造と変わらないプロセスで製造した鍛造材において、鍛造解析ソフトを活用した組織予測技術がおおむね適用できることを示した。

日本国内では、日本エアロフォージ株式会社が保有する世界最大級の5万トン油圧鍛造プレス機が立ち上がり、民間航空機の機体やエンジン向けの大型チタン合金鍛造材の生産がようやく本格化しつつある。先行する欧米フォージに伍して大型鍛造品の生産を拡大していくためには、製品の形を作り込むだけでなく、組織や材料特性までを高位で安定して作り出せる信頼性の高いものづくりが期待されている。本技術のさらなる精度向上のほか、そのベースとなるFEM解析技術そのものの精度向上も必要であり、予測可能な特性の拡充や他のチタン合金への展開が望まれる。

また、AIなどを活用して最終的な鍛造材の組織や特性を予測するいわゆる「順方向の予測技術」、適正な組織や特性が得られる最適なプロセスを求める「逆解析」などの技術の進展にも期待したい。

本稿の内容の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的プロセスを用いた航空機エンジン用耐熱材料創製技術開発」（管理法人：JST）によって行われた。そのなかで、組織予測モデルを導出し、ご提供をいただいた香川大学の松本洋明教授、東北大学の古原忠教授と宮本吾郎准教授、および物質・材料研究機構の御手洗容子副拠点長に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 平 博仁. 軽金属. 2015, Vol.65, No.9, p.426-431.
- 2) 長田 卓. ぶらすとす. 2019, Vol.2, No.22, p.634-638.
- 3) 石外伸也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.52-56.
- 4) H. Matsumoto et al. Sci. Tech. Adv. Mater. 2017, Vol.18, No.1, p.893-904.
- 5) 山根 玄ほか. 日本金属学会誌. 2017, Vol.81, No.2, p.60-65.
- 6) 古原 忠. SIPシンポジウム「大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスリボンデータベース構築」講演概要集. 2018, p.45.
- 7) Y. Nagata et al. Proc. 9th Pacific Rim Int. Conf. on Adv. Mater. Process. (PRICM9). 2016, p.654-657.
- 8) 御手洗容子ほか. チタン. 2018, Vol.66, No.3, p.160-163.
- 9) 御手洗容子. SIPシンポジウム「大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスデータベース構築」講演概要集. 2018, p.46.
- 10) 逸見義男. SIPシンポジウム「大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスデータベース構築」講演概要集. 2018, p.18-19.



逸見義男

素形材事業部門 チタンユニット
チタン工場 技術部



長田 卓

素形材事業部門 チタンユニット
チタン工場 技術部



神崎文兵

素形材事業部門 チタンユニット
チタン工場 製造部



横地恒平

素形材事業部門 チタンユニット
チタン工場 技術部