

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

Proceedings of SIP Symposium on Development of Innovative Forging Process based on
Materials and Processes Database obtained by 1500-tf Forging Simulator

開催日:2018年12月14日(金)

会場:国立研究開発法人物質・材料研究機構 千現地区



国立研究開発法人 **物質・材料研究機構**
National Institute for **Materials Science**

目次

プログラム	P.5
はじめに	P.6
SIP 革新的構造材料 PD 岸 輝雄	
－基調講演－	
講演 1 SIP プロジェクトの成果報告（主に材料研究関係）	P.10
物質・材料研究機構 御手洗 容子	
講演 2 大型プレス鍛造技術の現状と将来展望 － SIP 5万トンプレス鍛造の紹介 －	P.12
日本エアロフォージ 藤田 陽一	
講演 3 1500 トン鍛造シミュレータの紹介	P.14
物質・材料研究機構 黒田 秀治	
講演 4 小型鍛造試験機と 1500 トン鍛造シミュレータによる塑性加工 データベース構築	P.16
岐阜大学 吉田 佳典	
講演 5 Ti-17 の鍛造とその組織・特性予測技術	P.18
神戸製鋼所 逸見 義男, 長田 卓	
講演 6 Ni 基超合金 Alloy718 の実鍛造試作結果	P.20
大同特殊鋼 岡島 琢磨	
講演 7 Ni 基合金鍛造材の組織予測 －予測モジュールの概要とシミュレーション結果－	P.22
名古屋大学 湯川 伸樹	
講演 8 Alloy 720Li の鍛造および耐力予測シミュレーション	P.24
日立金属 石田 俊樹, 青木 宙也	
講演 9 鍛造シミュレータの活用について	P.26
物質・材料研究機構 木村 一弘	
－パネル討論－	
モデレータ ～1500 トン鍛造シミュレータを利用した鍛造プロセス研究 の展開、企業・大学からの要望～	P.28
物質・材料研究機構 村上 秀之	
パネリスト 1 1500 トン鍛造シミュレータの活用について － 低コスト熱間鍛造用金型の設計・製作に向けて －	P.29
日本エアロフォージ 藤田 陽一	
パネリスト 2 チタン大型鍛造における鍛造シミュレータへの期待	P.30
神戸製鋼所 長田 卓	

パネリスト 3	鍛造シミュレータへの期待	P.31
	日立金属 菊池 弘明	
パネリスト 4	1500 トン鍛造シミュレータは耐熱材料と塑性加工の新たな 出会い	P.32
	大同特殊鋼 岡島 琢磨	
パネリスト 5	ディメンションを繋ぐ 1500 トン鍛造シミュレータ	P.33
	東京大学 柳本 潤	
-ポスター講演 1-		
ユニット B21	“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”	
B21-1	大型精密鍛造シミュレータ実験結果の 5 万 t プレスへの適用	P.36
	日本エアロフォージ 川上 正博, 西原 卓郎	
B21-2	Ti-17 合金の鍛造とその組織・特性予測技術	P.37
	神戸製鋼所 逸見 義男	
B21-3	Alloy 720Li の鍛造および耐力予測シミュレーション	P.38
	日立金属 石田 俊樹, 青木 宙也	
B21-4	Ni 基超合金 Alloy718 の実鍛造試作結果	P.39
	大同特殊鋼 西本 孝志, 岡島 琢磨	
B21-5	高精度恒温鍛造を可能にした 1500 トン鍛造シミュレータ	P.40
	物質・材料研究機構 黒田 秀治, 本橋 功会	
B21-6	振動・ねじりモーションを付加した革新鍛造プロセスの基礎技術 開発	P.41
	大阪大学 松本 良	
B21-7	Ti-17 合金のβ域における高温変形挙動とプロセス最適化	P.42
	東北大学 山中 謙太, 千葉 晶彦	
B21-8	小型鍛造試験機と 1500 トン鍛造シミュレータによる塑性加工 データベース構築	P.43
	岐阜大学 吉田 佳典	
B21-9	航空機エンジン用 Ti-17 合金鍛造材の組織予測・材質予測	P.44
	香川大学 松本 洋明	
B21-10	Ti17 の鍛造・時効材の組織評価と組織予測モデル構築	P.45
	東北大学 古原 忠, 宮本 吾郎, Elango Chandiran	
B21-11	Ti 合金鍛造熱処理材の組織形成と引張特性	P.46
	物質・材料研究機構 御手洗 容子, 黒田 秀治, 本橋 功会, 村上 秀之 香川大学 松本 洋明, 東北大学 宮本 吾郎, 岐阜大学 吉田 佳典, 神戸製鋼所 逸見 義男	

- B21-12 Ti-17 のインテリジェント鍛造組織及び溶体化時効組織予測技術
と機械的及び疲労特性 P.47
名城大学 新家 光雄, 赤堀 俊和
- B21-13 加工熱処理シミュレータによる荷重変位曲線取得と荷重におよぼす
冶金現象のモデリング P.48
公立小松大学 朴 亨原, 東京大学 柳本 潤
- B21-14 逆解析による Ni 基耐熱合金の流動応力測定とデータベース化 P.49
東京電機大 柳田 明, 堀越 理子, 東京大学 柳本 潤
- B21-15 Ni 基超合金 718 と 720Li のミクロ組織形成予測 P.50
東北大学 及川 勝成, 上島 伸文, Ruan Jing Jing, Wen Dongxu
- B21-16 Ni 鍛造合金のデータベース作成 P.51
物質・材料研究機構 村上 秀之, 荒木 大輔, 黒田 秀治,
本橋 功会, Sun Fei, Tsao Te-Kang
- B21-17 組織自由エネルギーを用いたニッケル合金の析出遷移過程予測 P.52
物質・材料研究機構 戸田 佳明
- B21-18 タービンディスク用 Ni 基鍛造超合金における特性予測プログラムの
開発 P.53
物質・材料研究機構 長田 俊郎
- B21-19 Ni 基鍛造合金 718 におけるクリープ強度と組織関係の定量評価 P.54
東京工業大学 小林 寛, 竹山 雅夫
- B21-20 Ni 基合金鍛造材の組織予測シミュレーションシステムの開発 P.55
名古屋大学 湯川 伸樹
- B21-21 鍛造用ガラス系潤滑剤の高温トライボロジー特性 P.56
物質・材料研究機構 土佐 正弘, 笠原 章, 後藤 真宏,
佐々木 道子, 本田 博史, 鈴木 裕

－ポスター講演 2－

ユニット B24 “鍛造プロセス基盤”

- B24-1 Ti-6Al-4V 合金の鍛造加工発熱に伴う温度変化の解析と予測 P.58
物質・材料研究機構 北嶋 具教, 黒田 秀治, 本橋 功会,
萩原 益夫, 江村 聡,
大阪大学 松本 良, 岐阜大学 吉田 佳典, 香川大学 松本 洋明,
日本エアロフォーシ 西原 卓郎, 荒木 重臣,
元日本エアロフォーシ 石外 伸也
- B24-2 Ti-17 合金の熱間多方向加工による組織形成と真応力－真ひずみ
曲線 P.59
兵庫県立大学 鳥塚 史郎, 伊東 篤志

- B24-3 Ti合金MI (BD連携) : 大型精密鍛造シミュレータによるTi-6Al-4V
鍛造材の金属組織と疲労特性 P.60
物質・材料研究機構 江村 聡
- B24-4 1500トン鍛造シミュレータで作製したTi-17合金の溶体化時効
処理後の組織と力学的特性の異方性 P.61
近畿大学 仲井 正昭
- B24-5 チタン合金の組織・変形特性に及ぼす侵入型微量添加元素の影響
解明 P.62
筑波大学 金 熙榮, 古谷野 有, 宮崎 修一
- B24-6 Ti-17合金の時効析出挙動に及ぼす軽元素の影響 P.63
東北大学 上田 恭介, 福島 涼太, 板橋 央樹, 成島 尚之,
物質・材料研究機構 北嶋 具教
- B24-7 耐熱チタン合金の高温酸化メカニズムの理論解明 P.64
物質・材料研究機構 佐原 亮二, S. K. Bhattacharya,
東北大学 上田 恭介, 成島 尚之

－ポスター講演 3－

ユニット B26 “高強度 Ni 基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発”

- B26-1 高強度 Ni 基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発 P.66
三菱日立パワーシステムズ 今野 晋也

- 食堂等マップ P.67
- アクセスマップ(NIMS～駅のルート、公共バス乗り場) P.68
- NIMSバス時刻表 (TXつくば駅の乗継ぎ) P.69
- 公共・高速バス時刻表 P.70

プログラム

(NIMS 千現地区 研究本館 1 階 第一会議室)

- 10:00-10:05 開会挨拶 NIMS 理事長 橋本 和仁
- 10:05-10:10 SIP プログラムディレクター挨拶 東京大学名誉教授 岸 輝雄
- 10:10-10:15 来賓挨拶 内閣府大臣官房審議官 黒田 亮
- 10:20-10:40 SIP プロジェクトの成果報告 (主に材料研究関係)
SIP 拠点長/NIMS 御手洗 容子
- 10:40-11:10 大型プレス鍛造技術の現状と将来展望
-SIP 5 万トンプレス鍛造の紹介-
SIP 共同拠点長/日本エアロフォーシ ジ 藤田 陽一
- 11:10-11:30 1500 トン鍛造シミュレータの紹介 NIMS 鍛造 PF 黒田 秀治
- 11:30-12:00 小型鍛造試験機と 1500 トン鍛造シミュレータによる
塑性加工データベース構築 岐阜大学 吉田 佳典
- 12:00-13:10 昼食
- 13:10-13:40 Ti-17 の鍛造とその組織・特性予測技術 神戸製鋼所 逸見 義男
- 13:40-14:00 Ni 基超合金 Alloy718 の実鍛造試作結果 大同特殊鋼 岡島 琢磨
- 14:00-14:20 Ni 基合金鍛造材の組織予測
-予測モジュールの概要とシミュレーション結果-
名古屋大学 湯川 伸樹
- 14:20-14:40 Alloy 720Li の鍛造および耐力予測シミュレーション
日立金属 石田 俊樹
- 14:40-14:55 鍛造シミュレータの活用について NIMS 鍛造 PF 長 木村 一弘
- 14:55-15:10 コーヒーブレイク
- 15:10-16:10 ポスターセッション
- 16:10-17:10 パネル討論
~1500 トン鍛造シミュレータを利用した鍛造プロセス研究の展開
企業・大学からの要望~
モデレーター: NIMS 村上 秀之
パネリスト : 日本エアロフォーシ 藤田 陽一、神戸製鋼所 長田 卓
日立金属 菊池 弘明、大同特殊鋼 岡島 琢磨、東京大学 柳本 潤
NIMS 木村 一弘
- 17:10-17:15 閉会挨拶 NIMS 審議役 岸本 直樹
- (第二会議室へ移動)
- 17:25-19:10 交流会

はじめに

SIP 革新的構造材料 PD 岸 輝雄



本日は、「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-」にご参加いただき、誠にありがとうございます。開催にあたり、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」のプログラムディレクター(PD)として、ご挨拶申し上げます。

SIP は、総合科学技術・イノベーション会議が司令塔機能を発揮して、初めて自らファンディングを行うプログラムであり、2014年4月にスタートしました。その趣旨は、社会的に不可欠で、日本の経済・産業競争力にとって重要なイノベーションを実現すべく、府省連携、産学官連携を以って、基礎研究から実用化・事業化までを見据えて一貫通貫で研究開発を推進することです。「革新的構造材料」はその11ある課題の一つで、構造材料開発の普遍的課題といえる高比強度および耐熱性を追求し、出口戦略として、最も厳しく信頼性が求められる航空機産業にターゲットを絞っています。もう一つ、中小型機を中心とするジェット旅客機の世界需要の今後の大幅な増加を好機とみて、米欧と比べて劣勢である日本の航空機産業を、日本の優れた材料科学・工学のポテンシャルを大いに活用して盛り上げようという意図もあります。

SIP 革新的構造材料は4つの領域から構成されます。それぞれの概要は図にも示しますが、次の通りです。A領域「航空機用樹脂の開発とCFRPの開発」では、室温において比強度が最も高いCFRP、B領域「耐熱合金・金属間化合物の開発」では、代表的エンジン材料のチタン合金、ニッケル基合金および新材料のチタンアルミ金属間化合物、C領域「セラミックス基複合材料の開発」では、耐用温度1400°Cが期待されるSiC/SiCセラミックス基複合材料およびその耐環境コーティング、の開発に取り組んでいます。さらにD領域「マテリアルズインテグレーション」では、理論・実験・計算などの材料科学・工学とデータ科学を組み合わせ、材料の4要素、すなわちプロセス(processing)・構造(structure)・特性(property)・性能(performance)を計算機により一貫通貫で解析し、部材の寿命などを予測する、統合型材料開発システムの開発に取り組んでいます。

SIP 革新的構造材料には、約40の研究開発ユニットが設けられましたが、本シンポジウムの副題でもあるユニットB21「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」は、予算的にも人員的にも最も大きなユニットの一つです。特に1500トン鍛造シミュレータは、日本が有する世界最先端・最大級の5万トン鍛造プレスを最大限に稼働させるシミュレーション技術の構築に不可欠な設備として、関係者が長年切望していたものです。これをコア設備として、競合メーカーも含む産学官の塑性加工・材料分野の研究・技術者が集結し、SIPが目指すオープンイノベーションのドリームチームが実現しました。

ただし、4年半の研究開発は決して順風満帆と言えるものではありませんでした。専門性、立場など様々なギャップが事あるごとに障壁となりました。しかし、研究者たちは辛抱強くそれらを一つ一つ乗り越えて、本日発表される成果を上げてくれました。私自身も、1500トン鍛造シミュレータが無事に稼働した、最初はバラバラだった各研究者の成果の統合の姿が見えてきた、5万トン鍛造プレスによる実証がうまくいった、など節目節目で徐々に成功を確信できるようになりました。このような形でプロジェクトの終盤を迎えられることを、本当に嬉しく思います。

結びになりますが、本シンポジウムの開催にあたり、格別のご尽力をいただきました国立研究開発法人物質・材料研究機構、ユニットB21の参画者ならびにSIP革新的構造材料関係者の皆様に感謝の意を表するとともに、本シンポジウムが皆様にとって実り多いものとなることを祈念して、私の挨拶とさせていただきます。

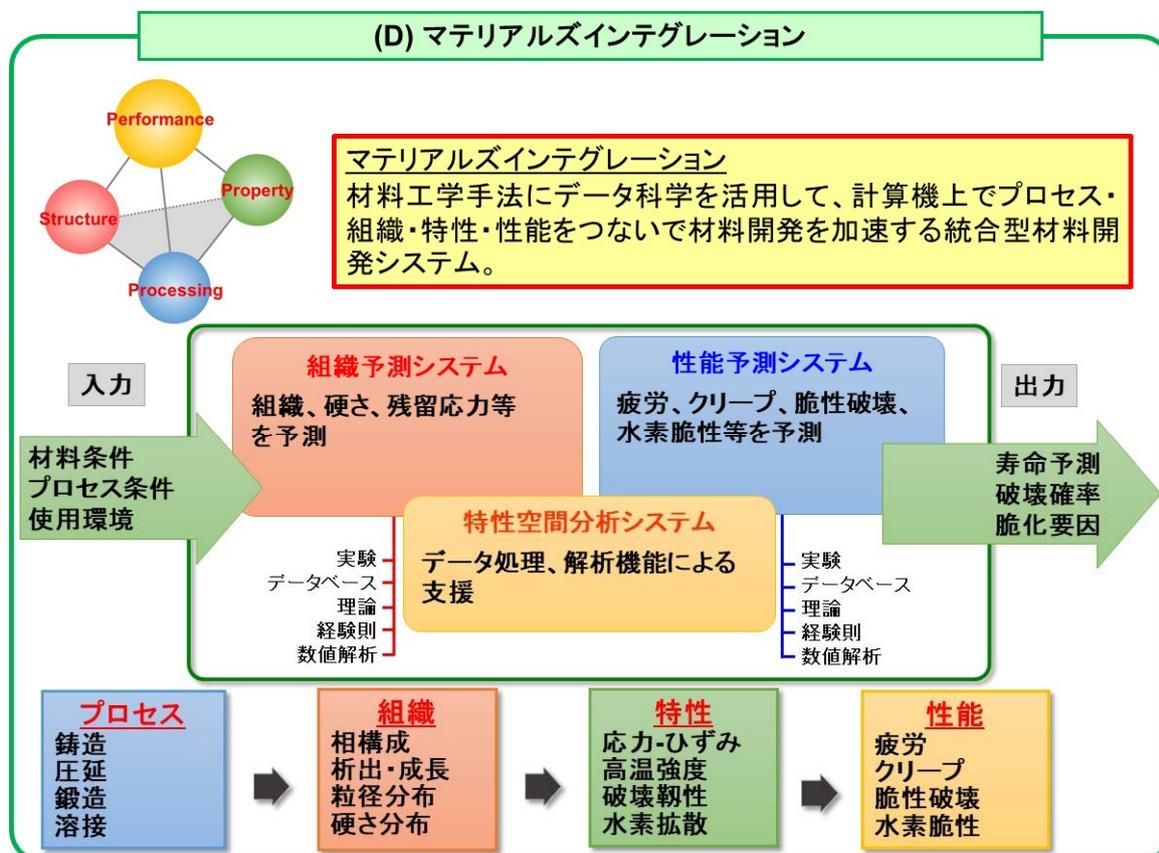
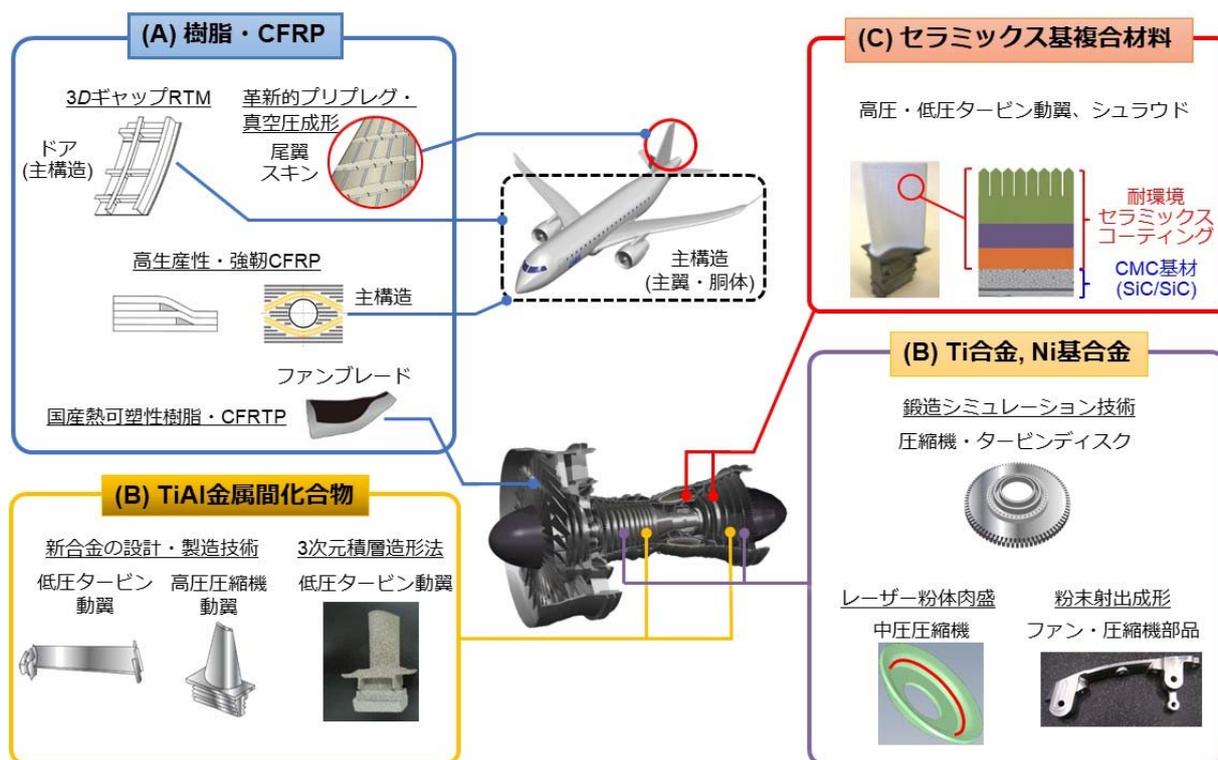


図 SIP 革新的構造材料：各領域の概要

— 基調講演 —

SIP プロジェクトの成果報告 (主に材料研究関係)

物質・材料研究機構 御手洗容子
Email: mitarai.yoko@nims.go.jp



1. 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

「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」は、戦略的イノベーション創造プログラム (Strategic Innovation Promotion Program, SIP)「革新的構造材料」の1テーマとして設定され、2014年10月から研究を開始した。このテーマでは、航空機材料として使われるTi合金やNi基超合金に関する3つの革新的製造技術開発に取り組むが、その中の1つが「**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**」である。このテーマでは、航空機エンジン部材製造技術として鍛造プロセスに着目した。1500t鍛造シミュレータを設置し、これを用いて鍛造条件を考慮した信頼性の高いデータベースを作成し、データベースに裏付けされた塑性加工モデリング技術、組織および力学特性予測モデリング技術を確立することを目的としている。これにより、製造条件から最終製品の特性を予測し、必要とされる特性を最大限に引き出せる製造条件の抽出が可能な材料創製技術の確立を目指す。このテーマには、物質・材料研究機構(NIMS)、日本エアロフォージ、川崎重工業(2015年まで参加)、神戸製鋼所、日立金属、大同特殊鋼、香川大学、岐阜大学、東北大学、名城大学、大阪大学、東京大学、東京電機大学、東京工業大学、名古屋大学、合計14機関(うち企業が4)が参加している。対象とする材料はTi合金(Ti17)、Ni基超合金(Alloy 718、Alloy 720)である。プロジェクトを効率よく推進するために、いくつかのワーキンググループ(WG)に分かれて研究を行なった。材料のデータを取得するための材料別Ti WG、Ni WG、材料を問わず塑性加工に関する共通の課題を検討する塑性加工 WG、新たな鍛造プロセスを開発するためのプロセス開発 WG、鍛造シミュレータの運用計画を立てる鍛造シミュレータ運用 WG の5つである。

2. 1500t 鍛造シミュレータの設置

これまで、大学などの研究機関では、塑性加工の研究は5から25トンレベルの小型鍛造シミュレータを用いて行われてきた。小型鍛造シミュレータでは、素材を試験機中で加熱しながら鍛造を行うため、温度制御やひずみ制御が比較的容易であり、複数の鍛造条件のデータを取得することができる。しかし、鍛造できる素材サイズが小さいため、組織変化の観察はできても、同じ組織を有する力学特性を同時に評価することは難しい。また、小型鍛造シミュレータは多くの場合、高周波加熱による材

料のみの加熱を用いており、鍛造中の材料からジグへの抜熱が起こることから塑性加工シミュレーションを複雑にする。一方、製造現場では、1000トン以上の大型鍛造プレスを使用しており、大型素材の鍛造が可能であるが、多くの場合、鍛造プレスに加熱装置がついておらず、別の炉で加熱した素材を加熱した金型で鍛造するため、鍛造中の温度変化を制御することが難しい。また、金型素材の種類によっては金型温度を大きく上げることが難しく、素材と金型の温度差が大きいこともある。

そこで、このプロジェクトでは、研究機関レベルの小型鍛造プレスと製造レベルの大型鍛造プレスの長所を両方兼ね備えた1500t鍛造シミュレータを設置し、鍛造温度、ひずみ速度、冷却速度を精密に制御した鍛造材から、組織と力学特性評価の試料を同位置から取得し、鍛造条件、組織、特性を結びつけることができる高精度なデータ取得を目指した。

1500t鍛造シミュレータは、プロジェクト開始後すぐに設計を始めたが、設計は2015年3月までかかった。2015年4月から装置の製造を開始した。1500t鍛造シミュレータは総重量130トンであり、これに耐え得る基礎を作るため、まず、NIMS内設置場所の基礎工事を開始した。1500t鍛造シミュレータを支える基礎はもともとNIMS内設置場所に既存の地下ピットを活用し、これを鉄筋コンクリートで固める工事を8ヶ月に渡り行った。基礎工事後半には1500t鍛造シミュレータの設置も同時進行させ、2015年12月末に設置が終了した。その後2016年1から3月の間、装置の動作確認のための検収試験を行い、実に70近い試験を行った。さらに付帯設備の加熱炉や冷却設備を導入し、NIMSのエンジニアがマニピュレータ操作の資格を取得するなどの期間を経て、試行試験を行った後、2016年7月頃から実試験を開始した。

1500t鍛造シミュレータが設置されるまでの間は、小型鍛造シミュレータを用いて、塑性加工データや種々の鍛造条件に対する組織データの取得を行った。

3. 塑性加工データ取得

塑性加工データとしては、まず小型鍛造シミュレータでリング圧縮試験により摩擦係数面圧依存モデルや熱伝達面圧依存モデルを作成した。1500t鍛造シミュレータでも同様に大型リング圧縮試験により摩擦係数や熱伝達係数を同定し、無潤滑時にはどちらも面圧依存モデルが適用でき、潤滑時は摩擦係数は表面積拡大率依存モデル、熱伝達係数は面圧依存モデルで表せることを明らかにした。1500t鍛造シミュレータでは、素材サイズが大きく、

恒温鍛造であることから、小型鍛造シミュレータでは再現できなかった鍛造中の復熱現象を再現することができ、鍛造中の塑性加工シミュレーションをより正確に行うことができるようになった。その結果、Fig. 1 に示すように、それまでのモデルでは鍛造中の温度分布を表すことができなかったが、得られた摩擦係数や熱伝達係数を用いて塑性加工シミュレーションを行うことにより、鍛造中の温度分布を再現することができるようになった。

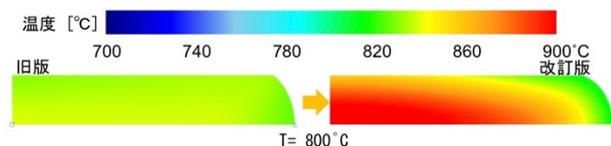


Fig. 1 鍛造中の温度分布シミュレーションの比較(岐阜大)

4.Ti の組織・特性データ取得 (神戸製鋼)

Ti についても、初めは小型鍛造シミュレータを用いて鍛造条件による組織変化について検討し、 β 鍛造および $\alpha + \beta$ 鍛造それぞれにおける活性化エネルギーを算出した。また、 α 相の体積率を鍛造温度の関数で、 α 相のアスペクト比をひずみ速度の関数で、 β 相結晶粒サイズをひずみ速度の関数である Z 因子で構成式を作成した。一方、1500t 鍛造シミュレータにより得られた鍛造組織は、 α 相が冷却中に生成することから、 α 相の体積率やアスペクト比は冷却速度を考慮したモデルを構築した。また、粒界に生成する α 相の量や形態は、旧 β 粒の再結晶化率や粒径に依存するが、1500t 鍛造シミュレータでは、再結晶化率が小型鍛造シミュレータと異なり、粒界近傍でしか起こらないため、導入されるひずみを用いたモデルを構築した。このように、小型鍛造シミュレータで構築したモデルをベースに、1500t 鍛造シミュレータで得られる組織と小型鍛造シミュレータで得られる組織の違いを観察しながら、1500t にふさわしいモデルの構築を行った(香川大)。

鍛造材には溶体化処理と時効処理を施して力学特性評価を行うため、熱処理材の組織予測モデルを構築した。溶体化処理により一次 α 相の体積率が決まり、時効処理により過飽和になった β 相から生成する微細な二次 α 相の体積率が決まるため、熱処理組織については小型鍛造シミュレータで得られたデータを用いてモデルを構築した(東北大)。小型鍛造シミュレータで得られた組織は 1500t 鍛造シミュレータで得られた組織と比較しモデルの検証を行った。

力学特性評価は 1500t 鍛造熱処理材を用いて行った。塑性加工シミュレーションから、最もひずみが安定する D/4 位置(D は鍛造材直径)から引張試験片、疲労試験片を採取し、組織と力学特性の相関を検討し、組織因子から力学特性を予想するモデルを作成した(NIMS、名城大)。これらの組織・特性予測モジュールを塑性加工シミュレーションと合わせることで、例えば Fig.2 に示すよ

うに、力学特性に大きな影響を及ぼす一次 α 相の体積率について、鍛造温度や場所による違いを計算できるようになった。

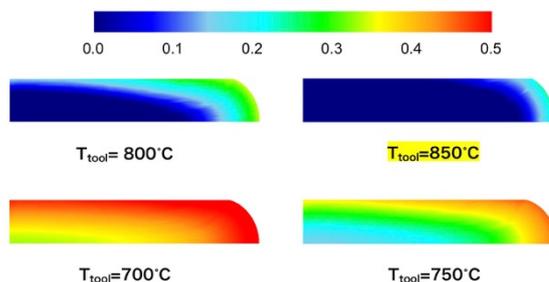


Fig. 2 鍛造温度による一次 α 相の体積率 (岐阜大)

この他に、初期組織が鍛造に及ぼす影響やプロセスマップ作成による適切な鍛造条件の検討も行なっている(東北大)。

5.Ni の組織・特性データ取得 (日立金属・大同特殊鋼)

Ni については小型鍛造シミュレータを用いて流動応力を逆解析により構成式を作成し、塑性加工シミュレーションを行った(東大、電機大)。Ni は Ti よりも組織の温度感受性が低いため、熱伝達や摩擦係数の測定は特に行わず、1500t の実績データより材料表面の温度履歴や鍛造形状を合わせることで、熱伝達係数や摩擦係数を考慮している。

組織予測では、 γ 相の粒径予測が目標であるため、まず小型鍛造シミュレータで得られた組織から、動的再結晶や準動的再結晶モデルを用いて粒径予測式を構築した。その後、1500t 鍛造熱処理材の組織観察から、モデル式のパラメータを 1500t の結果に合うようにフィッティングを行うことにより 1500t のモデル式を構築した(東北大)。このモデルを増分形モデルに変更し、定数パラメータの最適化により、鍛造中に刻一刻と変化する鍛造条件に合わせた組織予測を可能とした(Fig. 3, 名大)。現時点で動的再結晶粒径、分率については概ね予測可能となっている。1500t 鍛造熱処理材の組織 DB を作成するとともに(NIMS)、引張強度(NIMS)、クリープ(東工大)の評価を行い、引張強度に関しては予測モデルを構築する予定である。

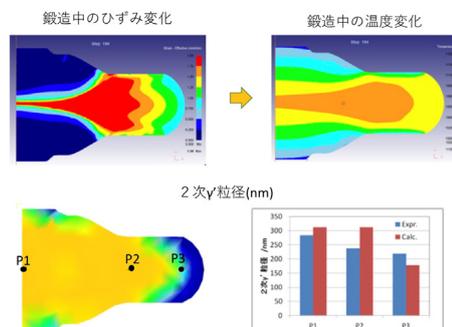


Fig. 3 塑性加工シミュレーションと組織予測 (名大)

6. まとめ

1500t 鍛造材の組織、特性評価から組織・特性データベースを作成した。今後も不足しているデータを取得し、予測モデルの精緻化を行っていく予定である。

大型プレス鍛造技術の現状と将来展望

— S I P 5 万トンプレス鍛造の紹介 —



日本エアロフォージ *藤田陽一 荒木重臣 川上正博 西原卓郎

Email: fujita.yoichi@japan-aeroforge.com, araki.shigeomi@japan-aeroforge.com

kawakami.masahiro@japan-aeroforge.com, nishihara.takuro@japan-aeroforge.com

1. 機関の役割と目的

次世代革新鍛造プロセス技術の開発と Ti-64 薄肉鍛造品のプロセス設計技術開発を行うため、以下の3件の技術開発を実施し、技術確立、検証を実施した。

1) 革新鍛造プロセス技術開発

航空エンジン部材の軽量化、低燃費化ニーズに対応すべく、次世代の革新鍛造プロセス技術と位置づける複動加工モーション付加（振動と回転振りモーション）制御鍛造技術の開発を主導し、シミュレーション精度を向上させ、実用的なプロセス設計技術の確立を図る。更に、実用設備への適用に向けて、実用化設備の設計仕様を明確にする。

2) Ti-64 ブリスク薄肉鍛造品のニアネット鍛造プロセス設計技術の開発

Ti-64 材のニアネット鍛造設計指針を元に、実機鍛造品の鍛造形状とプロセス設計を行い、5 万トンプレス用の金型を製作し、実ブリスク鍛造品の試作を行い、実証する。

3) 鍛造プロセス（塑性加工）及び材料特性のデータベースとモデリング技術の構築

B21 の目的であるシミュレーション精度の向上に対して、データ精度と信頼性を向上させるとともに、成果を実用技術と方向付けて5 万トンプレスによる実証鍛造試験を行って検証を実施。Ti-WG（神戸製鋼）Ni-WG（大同特殊鋼）に実用技術面から協力し、仕上げ鍛造用耐熱材金型及び金型加熱ヒーター装置の開発・製作を行い、実機鍛造により最終的な成果の検証を行う。

2. 研究成果

1) 革新鍛造プロセス技術開発

振動付加鍛造プロセスについては、低荷重での変形の促進および SUS と Ti-64 の材料流動の挙動に差異がある事を確認した（図1）。

回転振り付加鍛造プロセスについては、荷重の低減効果を確認し、更に組織観察結果より、短軸圧縮材との比較において結晶粒の微細化・配向のランダム化が示唆された（図2、図3）。

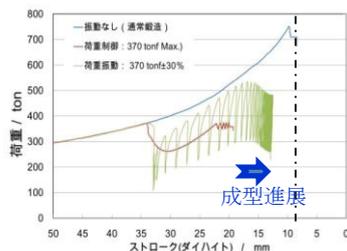


図1 振動モーション付加鍛造

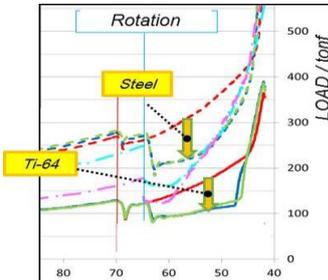


図2 回転振り鍛造

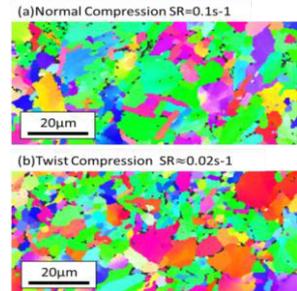


図3 回転振り試験片組織

また、5 万トン級プレス適用時の実用化設備仕様の具体案を作成し、事業化決定がなされた時に仕様確定が可能となるように準備を整えた。

2) Ti-64 ブリスク薄肉鍛造品のニアネット鍛造プロセス設計技術の開発

1500 トン大型鍛造シミュレータ用小型ディスクのモデル設計及び鍛造試験を行う事によりプロセス設計に向けた諸因子の基礎データを採取した（図4）。

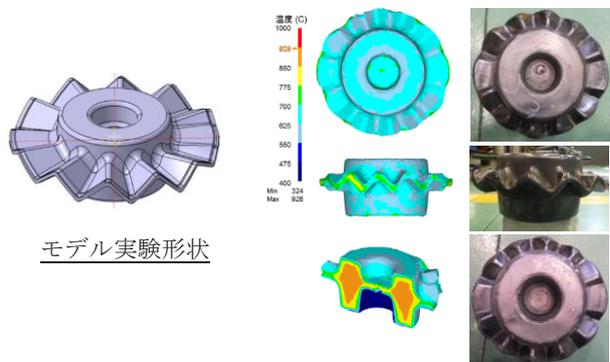


図4 モデル実験形状と温度解析、鍛造材外観

これらのデータを元にして、実機モデル鍛造形状および金型を設計し、5 万トンプレスによる実機試作鍛造を実施した。荒地鍛造、仕上げ鍛造を実施した結果、偏芯なく良好な鍛造材を得る事が出来た。

鍛造プログラムは、鍛造初期段階の加圧速度を速くし、鍛造終盤（ダイハイト 5mm 地点）にて、加圧速度制御から歪速度制御に変更し、0.5s-1 から 0.2s-1 に減速するよう設定した。これらの条件については、鍛造シミュレータ実験から得られたデータ、知見を最大限活用し、5 万トン実機鍛造プロセスを的確かつ迅速に決定する事が出来た。解析結果と実機鍛造結果では、ブレード部の温度分布が若干異なる等の不一致が認められたが、境界条件の最適化により解析精度の更なる向上が期待出来る。

3) 鍛造プロセス（塑性加工）及び材料特性のデータベースとモデリング技術の構築

5万トンプレス実証鍛造用の仕上げ金型は、鍛造シミュレータの金型均熱機構と同様の構造とし、昇温速度の向上、最大 800℃までの均熱性の向上が図られ、量産に適した生産性を有するものが製作出れた。

この金型を用いて Ti-17 合金ディスクの 5万トンプレスによるホットダイ鍛造を実施した、Ti-17 合金ディスクの仕上げ鍛造後の外観を写真 4 に示す。また、写真 5 に設計形状と仕上げ鍛造材の断面形状、図 5 にプレス荷重とストロークの関係、図 6 に形状予測と歪分布を示す。鍛造形状、鍛造荷重は、実機試作結果と解析結果がほぼ一致する事を確認した。組織特性（強度、疲労）については、現在調査中である。



写真 4 仕上げ鍛造後の Ti-17 ディスク

写真 5 仕上げ鍛造ディスクの断面と設計形状

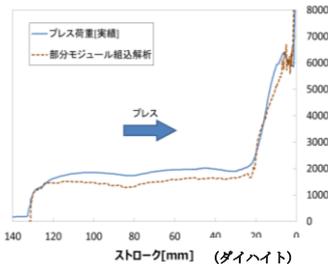


図 5 プレス荷重とストロークの関係

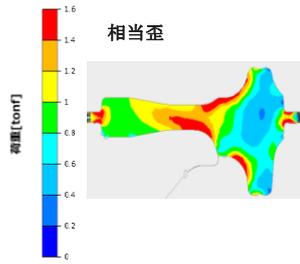


図 6 形状予測と歪分布

写真 6 に Ni718 合金の 5万トンプレスによる実機鍛造材の外観を示す。また、図 7 に鍛造後の組織観察結果を示す。

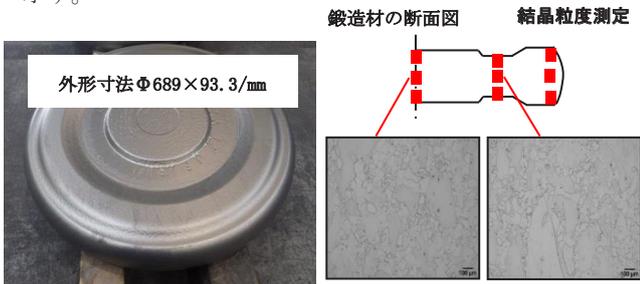
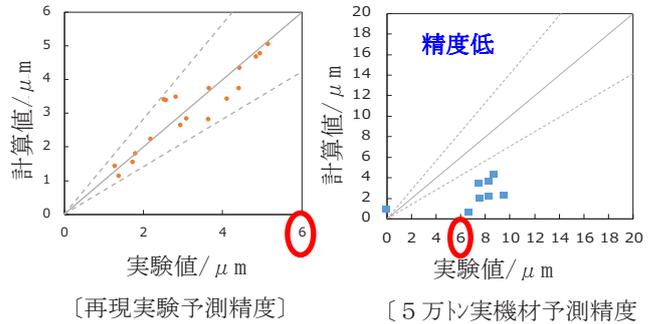


写真 6 鍛造後概観写真

図 7 鍛造後組織観察結果

従来の小型シミュレータのデータベースを使用した場合、実機で発生する結晶粒径の領域を網羅出来ておらず、20 μm 以下の領域でも精度が低かった。大型鍛造シミュレータのデータベースを使用した場合、実機材の広範囲な結晶粒径（～80 μm）にも対応した予測精度を担保出来

るようになった。図 8 および図 9 に、従来の小型シミュレータのデータベースを使用した場合と、大型鍛造シミュレータを使用した場合の結晶粒径予測結果を示す。



〔再現実験予測精度〕 〔5万トン実機材予測精度〕

図 8 従来小型シミュレータのデータベース使用による結晶粒予測結果

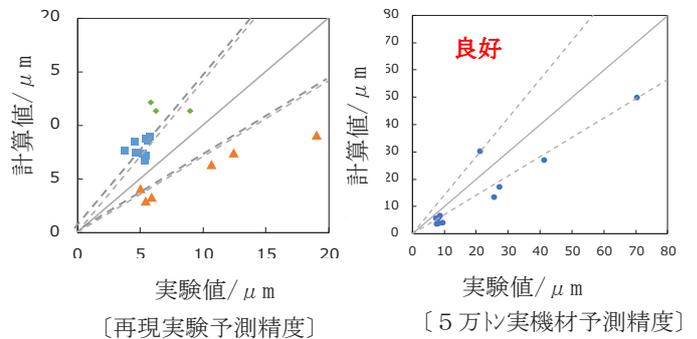


図 9 大型鍛造シミュレータのデータベース使用による結晶粒予測結果

3. 結言

実鍛造でのプロセス条件から材料特性を予測する精緻なシミュレーション技術と信頼性の高いデータベースの構築を可能とする大型鍛造シミュレータは、今後も継続して高機能な鍛造実験を実施するために不可欠と考える。

シミュレータ実験から得られたデータベースを活用し、更にシミュレーション精度向上により、製品実現速度の大幅な改善が期待出来る。基礎実験、鍛造設計期間は半減するとともに、実機試作での品質的中率（形状、材料特性、組織）が向上し、設計変更、再試作の頻度が低減する事により、新規鍛造品の量産化までの期間短縮に大きく寄与するだけでなく、品質・コスト競争力を高める事が可能である。

ホットダイ鍛造による Ti 材、Ni 材のディスク鍛造は、今年度中にそれぞれ追加試作を行い、量産化に対応した鍛造プロセス設計技術の確立及び材料特性のデータベースとモデリング技術を更に高めていく。

また、Ti-64 プリスク薄肉鍛造品のニアネット鍛造についても追加試作を行い、近い将来の実用化を目指して技術確立を図り、国際競争力の強化、鍛造プロセス技術の差別化を図っていきたい。

1500 トン鍛造シミュレータの紹介

国立研究開発法人物質・材料研究機構
構造材料研究拠点 鍛造プラットフォーム 黒田秀治
Email: KURODA.Syuji@nims.go.jp



1. 機関の役割と目的

SIP 革新的構造材料 B21 テーマ「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の構築」のもと、2015年12月末、大型鍛造試験機「1500トン鍛造シミュレータ」が物質・材料研究機構（以下、NIMS）に設置された。1500トン鍛造シミュレータはその装置の規模と制御の精緻さにおいて世界にも類を見ない鍛造試験機であり、新鍛造プロセス開発に必要な、信頼性の高い塑性加工データ・特性データを取得することができる。NIMSの鍛造プラットフォームは、この1500トン鍛造シミュレータの操業を役目として上記のテーマに基づく様々な鍛造試験の実施とデータの提供という役割を担っており、鍛造試験機としての装置のベストパフォーマンスを引き出し、信頼性のある高精度な鍛造試験の実施を目的としている。

2. 研究成果

2.1 1500 トン鍛造シミュレータ概要

1500トン鍛造シミュレータは、Fig.1に示すように1500トン油圧プレス機を中心として、素材加熱炉、予熱・徐冷炉、衝風・ミスト冷却装置、水冷装置、そしてプレス機に付帯する金型加熱炉から構成されている。各装置間は連携しており、マニピュレータによって素材の自動搬送が行われる。素材の加熱から鍛造、冷却までの一連の鍛造プロセスは、プログラム制御される。

日本エアロフォージ

日立金属



Fig. 1 1500 ton Forging Simulator

1500トン鍛造シミュレータは、Ti合金およびNi基超合金の恒温鍛造を”精緻なひずみ・荷重制御”と”高精度な温度制御”の下で行うために開発された。1500トン

鍛造シミュレータによる鍛造試験では、組織や材料特性を制御したプロセスを経て、組織観察と力学的特性の評価が同一材で行えるサイズの鍛造材を得ることができる（Fig.2）。これにより材料データベースの構築と予測シミュレーションの高精度化が可能となる。その精緻な鍛造試験を可能にするため、1500トン鍛造シミュレータを構成する個々の装置は、Fig.1に示すようにB21のテーマに参画している企業の技術と経験をもとに設計・開発されている。鍛造プラットフォームは、参画企業と連携して装置各部の操業ノウハウを蓄積し、それらを集約することで1500トン鍛造シミュレータの基盤技術を確立した。これは産官連携の優れたモデルケースと言える。

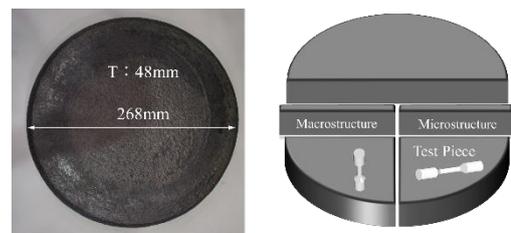


Fig. 2 Dimension of a typical pancake (left), and sampling for microstructure and tensile testing (right)

2.2 1500 トン鍛造シミュレータの性能

1500トン鍛造シミュレータの性能仕様をTable.1に示すとともに、以下に1500トン鍛造シミュレータの主要な装置詳細と高精度な鍛造試験を支える技術要素を説明する。

Table 1 Specifications of the 1500 ton Forging Simulator

Press Capacity	1500 ton
Press Control	Stroke rate 0.01~300mm/s
	Strain rate 0.001~9.99/s
Billet	Diameter ~200mm
	Height ~300mm
	Weight ~25kg
Billet Furnace	~1200°C
Die Temperature	~1100°C
Cooling	Air, Water, Mist, Air Blast and Furnace Cooling

(1) 1500 トン油圧プレス

日本最大の5万トンプレスのノウハウが活かされた本プレス機の加圧機構は、ストローク速度に加え、ひずみ速度での精密制御が可能であり、それぞれ0.01~300mm/s、0.001~9.99/sの広範囲において任意の範囲で可変である。また、加圧中の平衡度制御（ ± 0.2 mm/m）、荷重制限や加圧保持に加え、プレス速度に連動した回転ねじり圧縮や振動圧縮の機能も有している。

Fig.3に Alloy718 の恒温鍛造（ひずみ速度 0.1/s）中のストローク変位と荷重の変化を示す。加圧中においても予定ストロークと（破線）と実際のストローク（実線）の変位が良く一致した軌跡をたどっており、高精度なひずみ速度制御鍛造が実現されていることが分かる。

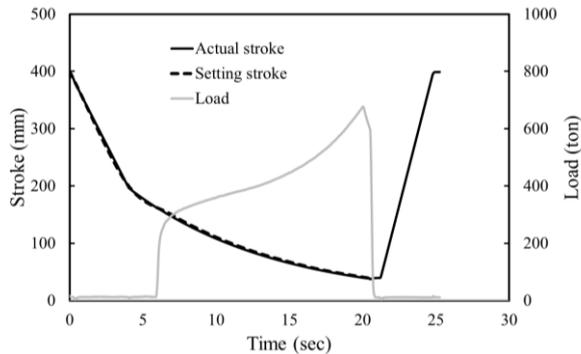


Fig. 3 Stroke displacement and load in strain rate control forging

(2) 金型加熱炉

プレス機に付設している金型加熱炉は最高 1100℃まで金型を加熱することができる。この金型加熱炉を用いて、金型の温度を保持しながら素材加熱炉からの搬送で冷却された素材の温度を均熱化する温度制御技術を確認、鍛造開始時の素材および金型の温度が目標温度の±5℃以内となる高精度な恒温鍛造試験の実施が可能である (Fig.4)。1500 トン鍛造シミュレータの恒温鍛造試験では、温度感受性が高い Ti 合金において組織制御された上下・左右対称の Fig.2 サイズの鍛造材を得ることができる。

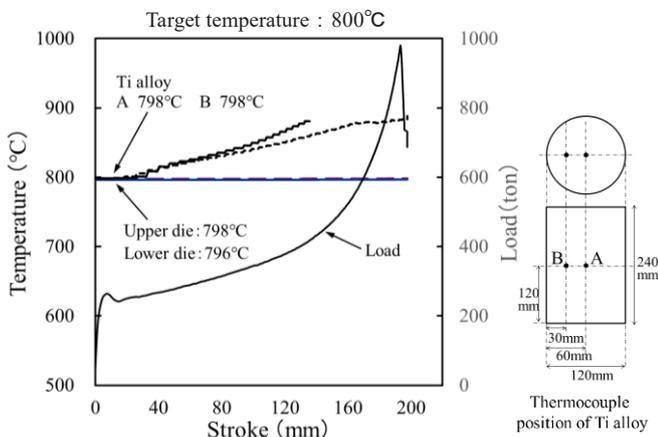


Fig. 4 Temperature variations in isothermal forging

(3) 高温用金型

金型の耐用温度は恒温鍛造の能力を左右する。1500 トン鍛造シミュレータでは金型に耐熱性・耐酸化性の Ni 基金型を使用することによって 1000℃級の恒温鍛造試験を実現している。さらに、より幅広い恒温鍛造試験に対応するため、引き続き金型技術の高度化を進めている。

(4) 徐冷炉、冷却装置

徐冷炉の最高温度は 1200℃、炉冷の冷却速度はブローワーでの調整も可能である。衝風・ミスト冷却装置およ

び攪拌機能を備えた水冷装置があり、幅広い冷却速度で鍛造後の素材の冷却処理を行うことができる。

(5) 鍛造素材への均一な潤滑剤塗布

試験の安定・再現性を高めるという観点から素材の潤滑コーティングの膜厚を制御している。鍛造プラットフォームではオリジナルの自動塗布装置を開発し、膜厚±50 μmの精度での塗布を可能としている。特に摩擦係数の同定試験には必要不可欠な技術となる。

(6) 鍛造素材の測温技術

素材の温度データは鍛造条件と成形および組織との相関性を解析する上で不可欠であり、1500 トン鍛造シミュレータではサーモグラフィ型放射温度計による測温を行っている。生の測定温度信号のままでは背景放射や表面放射率の影響により測定値と実温（熱電対）にズレが生じる。このズレを解消するための最適なパラメータを実験によって導出、高精度な素材温度データの取得を実現している。Fig.5に航空機用 Ti 合金の恒温鍛造において、素材の中心に挿入した熱電対による測定値と熱画像装置による表面温度測定値を示す。

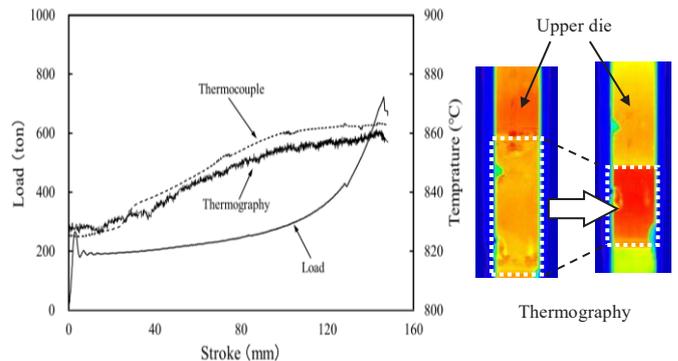


Fig. 5 Temperature measurement by thermocouple and thermography in isothermal forging

(7) 鍛造材および金型の形状評価

高精度三次元座標測定機を用いて鍛造材や金型の形状をデータ化しており、CAD データやシミュレーションによる予測値との比較照合を行っている (Fig.6)。

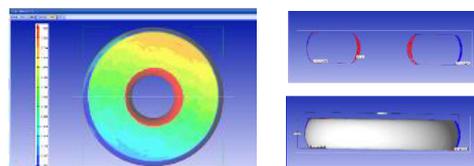


Fig. 6 Shape evaluating by the high accuracy 3D-coordinate measuring machine

以上のように、温度とひずみ速度を精緻に制御できる 1500 トン鍛造シミュレータは、塑性加工シミュレーション、組織・特性予測シミュレーションを高精度化するための強力なツールであり、材料開発から実用化までの時間を短縮する新鍛造プロセス開発に大きく貢献する。NIMS 鍛造プラットフォームでは、高度で安定した鍛造試験を実施し、さらなる技術的発展を担っていく。

小型鍛造試験機と 1500 トン鍛造シミュレータによる 塑性加工データベース構築

岐阜大学 地域連携スマート金型技術研究センター 吉田佳典
Email: yyoshida@gifu-u.ac.jp



1. 機関の役割と目的

岐阜大学は SIP 革新的構造材料「耐熱合金・金属間化合物等の創製技術開発」における研究開発課題「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 (PRISM)」のユニット B21「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 DB 構築」に参画している。Ti-WG においては、有限要素法を用いた熱間鍛造数値解析に必要な不可欠でありながらこれまで必ずしも詳細な検討が行われてこなかった、

- (1) 熱間境界条件すなわち熱伝達係数および熱間摩擦係数のモデル検討および同定技術開発ならびにデータベース (DB) 構築
- (2) 上記 DB と Ti 材組織予測モジュールおよび特性予測モジュールとの統合

を担当した。また塑性加工 WG を設置し、熱間鍛造数値解析に必要な熱間流動応力同定手法の検討、熱伝達係数および熱間摩擦係数のモデル構築と物性値同定技術の開発、加工発熱予測モデル開発手法の検討を担当した。

2. 研究成果

2.1 熱間鍛造再現試験における試験片寸法効果

本プロジェクトの最終ゴールは、50,000 tonf プレスを用いた大型熱間鍛造におけるネットプロパティ/ネットパフォーマンス成形基盤技術の開発である。これは必要な箇所に必要な特性 (硬さや疲労強度など) を発現させる高精度制御鍛造技術であり、有限要素法などの数値解析の応用が重要となる。これを実現するためには解析コード機能の高度化に加えて、①高精度材料物性値 DB、②熱間境界条件 DB、③組織予測・特性予測モジュールの構築が必要不可欠である。通常これらの研究開発は比較的小型な試験片を用いた圧縮試験などを用いて行われる。

Fig. 1 に円柱試験片半径 r と、表面積 S と体積 V の比である S/V の関係を示す。試験片内部の熱は表面を介し

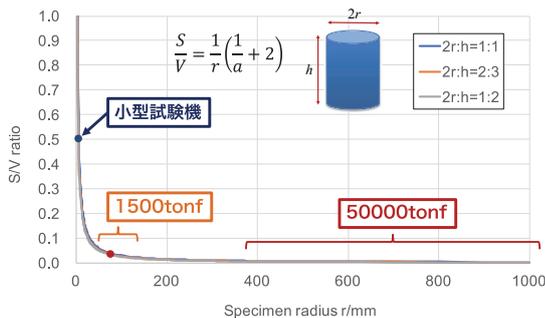


Fig.1 Relationship between S/V ratio and specimen radius.

て金型および大気中へ逃げるため、 S/V 比が大きいほど冷めやすい傾向にあることを表す。例えば直径 10~12 mm 程度の小型試験片では S/V 比が約 0.5 程度であるのに比べ、50,000 tonf 級の素材では 10^{-3} オーダとなり乖離が極めて大きい。これを繋ぐのが 1500 tonf シミュレータであり、その S/V 比は中間の 10^{-2} オーダ (直径 120 mm で約 0.04) となっており、小型試験機と 50,000 tonf とを橋渡しする位置付けの大型試験機となっている。

2.2 小型熱間鍛造再現試験機の開発

熱間鍛造においては一般に、素材温度と金型温度は異なる。またこれらが接触し、界面では熱伝達が生じ、さらに加工とともに摩擦力が変化しながら成形が進行する。これらの境界条件は素材温度および金型温度が個別に制御された環境で実施されるべきである。また大型試験だけでは実験コストが甚大となるため、小型試験で得られる大量の実験結果との組み合わせによって研究を進めることが重要である。

上記のモチベーションから開発された岐阜大学小型熱間鍛造試験機 (G-SAFES) ⁽¹⁾ の外観を Fig. 2 に示す。試験片は 3 本のセラミックス針によって保持され、加熱用の高周波誘導加熱コイルとともに金型上空へと持ち上げられる。金型と非接触の状態での誘導加熱によって昇温する際に放射温度計によって試験片の表面温度を常に計測し、温調機にフィードバックする。目的温度に到達後、温度を保持することで均熱し、所定の時間が経過した後セラミックニードルを退避させて、圧縮を行う。また、上下の金型の中に熱電対が埋め込まれており、試験片から金型への熱伝達挙動を計測することが可能である。

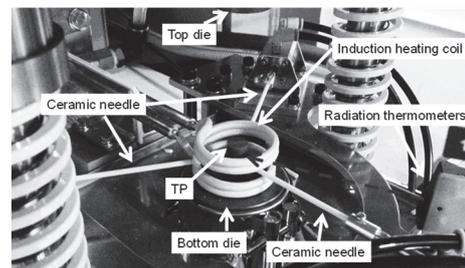


Fig. 2 Gifu university Small Advanced hot Forging Emulating System (G-SAFES).

2.3 熱間せん断摩擦係数・金型-材料間熱伝達係数 DB

(a) 無潤滑における面圧依存モデルの構築 塑性加工における摩擦評価試験の一つにリング圧縮式摩擦試験がある。本プロジェクトにおいてはまず無潤滑における熱間

せん断摩擦係数および金型-材料間熱伝達係数の面圧依存性⁽²⁾を、小型試験機による圧縮試験および有限要素解析を用いることによるモデル化および係数同定を行なった。解析においては試験片初期温度を実験と同様に設定し、リング圧縮試験における圧縮荷重と最小内径縮小率の履歴が一致するように同定した。A5052 リング材（外形 21 mm, 内径 10.5 mm および厚さ 7 mm）を用い、初期温度 250~450°C の範囲で得られた摩擦係数および熱伝達係数の DB をそれぞれ Fig. 3 および 4 に示す。

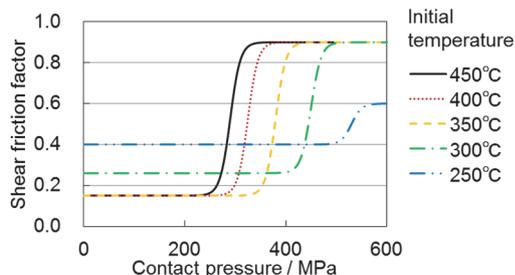


Fig. 3 Influence of contact pressure on shear friction factor.

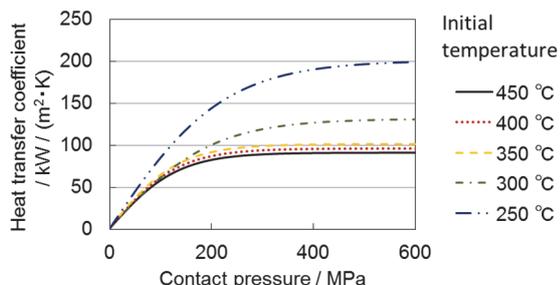


Fig. 4 Influence of contact pressure on heat transfer coefficient.

(b) 1500 tonf シミュレータを用いたガラス潤滑条件における境界条件 DB 構築 外形 120 mm, 高さ 240 mm の Ti17 製の円柱試験片に Fig. 5 で示す 6 箇所熱電対を埋め込み、1500 tonf シミュレータによって軽圧下を加えて面圧を生じさせて、素材内および金型表層温度（表層から 5.5 および 10.5 mm）の履歴を計測した。金型は平行圧盤とし、上型に日立金属製 NIMOWAL および下型に SKD 熱間ダイス鋼を用い、後者については表層に熱電対を埋め込んだ。

素材温度 700°C の場合の実験結果を Fig. 6 に示す。試験片をシミュレータに設置した段階（50 sec 前後）で素材表層の温度低下がみられるが、その速度は圧縮を開始した直後（70 sec 以後）にきわめて早くなっており、ガラス潤滑下での熱伝達の面圧依存性が確認された。一方、

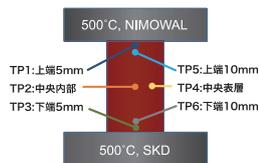


Fig. 5 Temperature evaluation points in large billet.

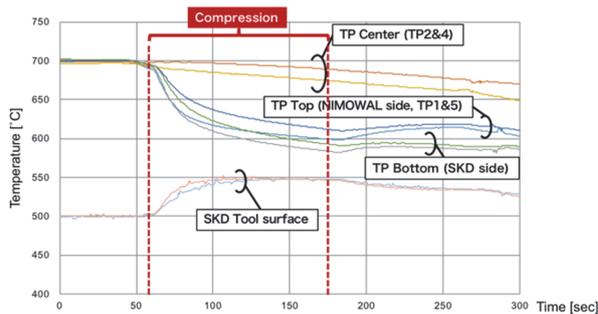


Fig. 6 Time-temperature diagram (billet: 700°C, average pressure: 170 MPa).

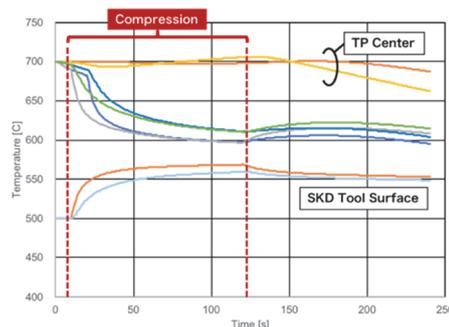


Fig. 7 FEA result of time-temperature diagram (billet: 700°C).

下型表層温度の上昇速度においても相関が見られ、面圧依存性を裏付けており、この原因については今後検討を重ねる。

圧下を停止して端面の面圧を除去した後（170 sec 以後）、素材端部の温度が上昇し、一方で上型表層温度は下降している。これは接触界面における熱伝達係数が下降したために抜熱速度が下がり、素材内部からの熱伝導がこれを上回るいわゆる複熱が見受けられた。これは体積が大きく、熱エネルギーを多く内包する大型試験片ならではの現象である。これらを踏まえて、熱伝達係数の面圧依存モデルおよび摩擦係数の表面積拡大率依存モデルを構築し、これを有限要素解析に組み込み、実証解析を行った結果を Fig. 7 に示す。加圧による熱伝達係数の上昇ならびに素材表面積拡大による潤滑剤の減少を想定した摩擦係数モデルが導入されており、負荷直後の温度低下、除荷後の複熱現象が再現されている。

紙面の関係で省略した大型リング圧縮試験結果（外形 222 mm）などの結果も境界条件 DB には反映されており、今後、高精度熱間鍛造成形解析の高度化に寄与することを目指す。また、小型および大型試験による実験手法の整備および高度化に取り組む所存である。

参考文献

- (1) 吉田佳典・佐藤一平, 材料加熱圧縮試験装置, 特願 2015-146408 (平成 27 年 7 月)。
- (2) Y. Nakazima, T. Ishiguro, E. Abe, N. Yukawa, T. Ishikawa, T. Osada, Journal of JSTP, 55-647 (2013), pp. 1124-1125.

Ti-17の鍛造とその組織・特性予測技術

株式会社神戸製鋼所 逸見 義男、長田 卓
 Email: itsumi.yoshio@kobelco.com, choda.takashi@kobelco.com



1. 機関の役割と目的

航空機エンジンの圧縮機やファンに適用されているチタン合金鍛造部材は、静的力学特性、耐熱性に加えて疲労や靱性など耐破壊特性など様々な特性が高いレベルで要求される。これらの品質を確保するために、鍛造で素材を型にはめて単に形を作るのではなく、鍛造中の温度、ひずみ、ひずみ速度さらに鍛造後の冷却速度をも管理して製造している¹⁾。高品質の部材を高位安定して製造する適正なプロセスを設計する上で、鍛造時の温度・ひずみ履歴から得られる形状や、組織、特性を予測する技術は極めて重要となる。

本報では、航空機エンジン部材に適用されている Ti-17 合金 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo) について、各機関がもつ小型鍛造シミュレータと本研究期間中に独自に設計製作した 1500 トン鍛造シミュレータによる熱間鍛造実験結果に基づき、塑性加工モデルや、組織、特性予測モデルを構築した。さらにこれらのモデルを市販の有限要素法 (FEM) 塑性加工シミュレーションソフトウェアに組み込み、鍛造中のひずみや応力だけでなく組織・特性も可視化できる計算ツールを開発した。さらにエンジンディスクに見立てた実機サイズの鍛造品を世界最大級の 5 万トン油圧鍛造プレス機にて試作し、組織・特性予測モデルとの照合を行った。各機関の分担、体制を図 1 に示す。

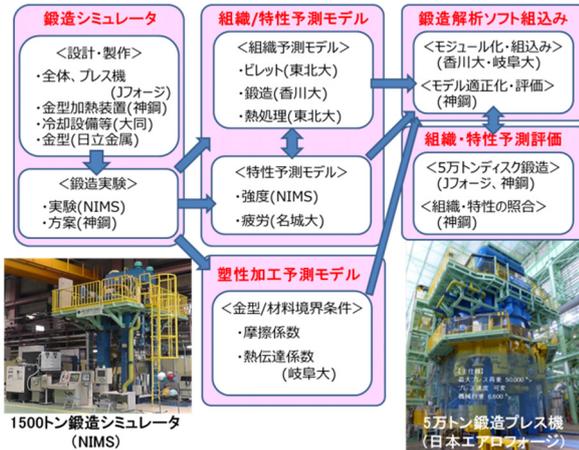


図 1 各機関の役割

2. 成果

2-1 金型-材料間の塑性加工モデル化 (岐阜大)

組織は、材料にひずみと熱が与えられると刻一刻と変化するため組織を予測するためには、FEM 塑性加工シミュレーションにおいて、材料が受ける熱および塑性変形の状態を精度良く再現する必要がある。しかし、型鍛造において金型と材料が潤滑剤を挟んで接触する境界条件、即ち、熱伝達や材料が受ける摩擦など、正確に表現できる DB やモデルがなかった。摩擦係数は、小型鍛造シ

ミュレータ実験にて摩擦係数の表面積拡大率に依存する知見をベースにモデル化し、図 2 に示すように代表的な摩擦係数を同定するリング圧縮試験を鍛造シミュレータにて大型の試験片を用いて行ったところ、リング圧縮の変形挙動(内径変化)はモデル解析とほぼよい一致を示した。

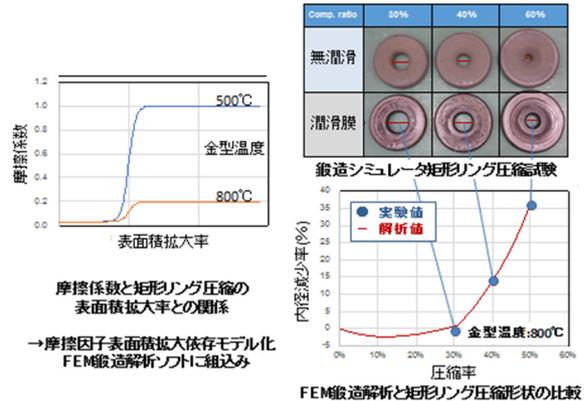


図 2 摩擦係数のモデル化と鍛造シミュレータでの検証

また、金型と材料間の熱伝達についても鍛造シミュレータを用いた試験から熱伝達の面圧依存性を取込んだモデルを構築した。

2-2 組織と特性予測モデル化と可視化

(香川大/東北大/NIMS/名城大)

小型熱間加工シミュレータを用いて熱間加工ならびに熱処理に伴い変化する組織を観察し、 α 、 β 相のサイズや相量など、それぞれの組織を数式化した冶金モデルを作成した。さらに汎用の FEM 鍛造解析ソフト FORGE に組み込み、組織パラメータの可視化を行った。

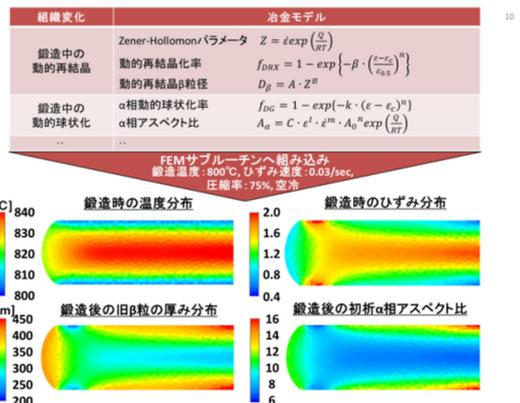


図 3 冶金モデルに基づく組織予測モデルとその可視化

図 3 に鍛造シミュレータにて、円柱試験片 ($\phi 134\text{mm} \times 192\text{mm}$ 高さ) を 800°C にて 75% 圧縮鍛造した直後の温度、累積ひずみ、さらに考案した冶金モデル式から求めた組織パラメータ (旧 β 粒の厚さと針状 α 相のアスペクト比

(長片と短片の比))の断面分布を示す。本ソフトを用いれば、鍛造中や熱処理中に塑性変形の状態や温度に加え組織、特性も机上で確認することが可能となる。図4に示すように、初析 α 相のアスペクト比の冶金モデル式から導いた予測値と鍛造シミュレータの鍛造実験で得た実測値は、概ね1:1の相関を示すことが判る。ビッカース硬度は、左記の組織パラメータよりもばらつくが、一定の相関性は認められた。

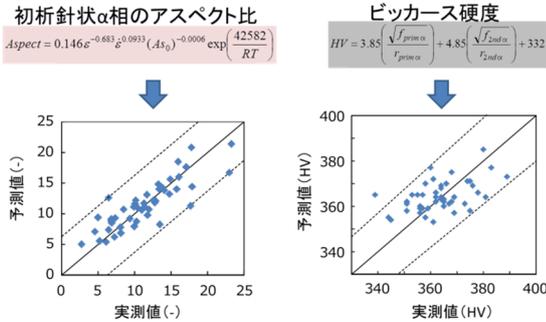


図4 針状 α のアスペクト比と硬度の実測値と予測値の関係

鍛造シミュレータの鍛造試験で得た引張並びに疲労特性と組織パラメータとの相関を図5に示す。引張強度は初析 α 相量および2次 α 相量と、低サイクル疲労特性は初析 α 相量と一定の相関があり、他の組織パラメータとも関係性を調べ、硬度と同様にモデル化を進めている。

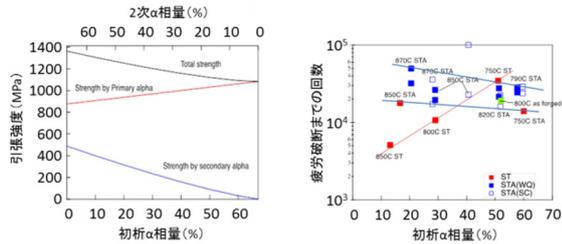


図5 引張強度、疲労強度と α 相諸量との関係

2-4. 5万トンプレスによる検証模擬ディスクと評価

これまでに構築してきた組織予測モデルの検証を行うべく、ジェットエンジンを想定した実機サイズ(外径 ϕ 760mm)のTi-17合金ディスク部材の鍛造試作を行った。日本エアロフォージの5万トンプレス機にて、ホットダイ金型による型鍛造を行った。図6に鍛造後のディスクの概観と設計形状と仕上げ鍛造材の断面形状を示す。また、鍛造中のプレス荷重とストロークの関係、さらに鍛造解析による形状予測と歪分布を示す。鍛造解析は本研究で得たTi-17合金の物性、塑性加工モデルの一部を組み込んだもので、解析のプレス荷重は、実機よりもやや低めであるが、荷重変動とよく一致する結果が得られた。また鍛造形状も解析結果とほぼ一致する結果が得られた。図7に鍛造解析で予測される針状 α 相のアスペクト比の断面分布を示す。断面4か所のマイクロ組織を示す。マイクロ組織から読み取ったアスペクト比のデータは、図4に示した鍛造シミュレータ実験材で作成した実測値 vs

予測値の相関図のばらつき範囲に納まっており、大型部材においても大まかではあるが、組織予測の適用可能であることを示すことができた。

なお、鍛造材の特性(引張特性、硬度、低サイクル疲労など)の調査は完了し、得られた特性の範囲ではエンジンディスクとして要求される特性を満足していることを確認している。特性予測モデルとの相関、評価を進めているところである。

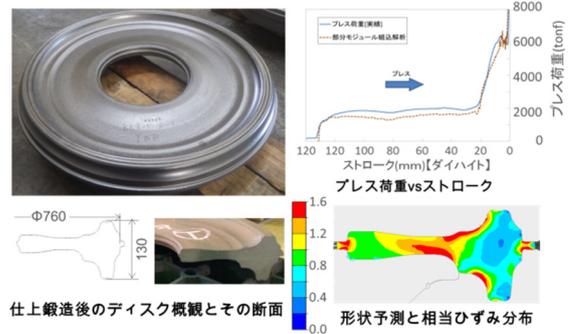


図6 実機サイズの鍛造材の概観と鍛造荷重と形状推移

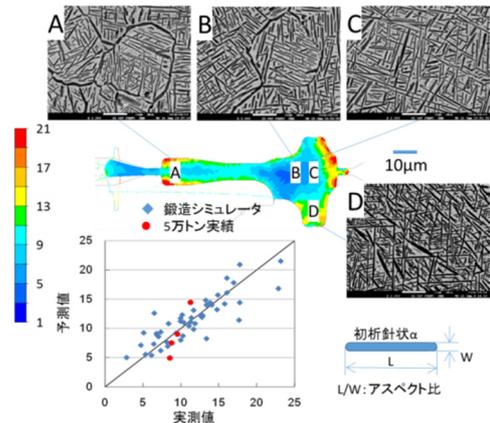


図7 鍛造材の組織(α アスペクト比)の実測値と予測値比較

3. 結言

Ti-17合金を題材に小型鍛造シミュレータ、1500トンプレス機で得た結果を用い、金型/材料間の境界条件のDB取得とそのモデル化による鍛造解析精度の向上を図った。また、組織予測、更にはその組織と特性を結びつけた特性予測をモデル化し、更にはそれらを汎用鍛造解析ソフトに組み込み、組織、特性を可視化するツールを開発した。さらにそのツールを用いて実機レベルの鍛造材において組織予測技術が適用できる可能性があることを示した。今後、特性予測技術も適用できるように評価を行うとともに、更なる予測技術の精度を高めて行く予定である。さらに設定したプロセスから組織や特性を予測する順方向解析から、求めたい組織・特性を得るための適正プロセスを選定できる逆解析の技術開発に展開して行きたい。

参考文献

- 1) 長田ほか：神戸製鋼技報, 64(2014), 28.

Ni 基超合金 Alloy718 の実鍛造試作結果

大同特殊鋼(株) *岡島 琢磨 西本 孝志
Email: t-okajima@ac.daido.co.jp



1. 機関の役割と目的

大同特殊鋼(株)は、Ni 基超合金 Alloy718 のモデリングデータベース(以下 DB)構築と鍛造シミュレーションへのモデリング技術適用実装化支援する役割を担っている。具体的には、大型精密鍛造シミュレータを用いた鍛造・熱処理実験を行い共同参画の他機関と連携しながら各種データ収集と特性評価を行って DB 構築から、その DB をモデリング技術の有限要素解析への実装を支援することを目的とする。今年度は、本モデリング技術について結晶粒度の予測精度の実用性を検証するため、5 万トンプレスを用いた実規模鍛造試作を実施した。

2. 研究成果

5 万トンプレス(日本エアロフォージ)実規模鍛造試作に使用した Alloy718 のピレット寸法は 980℃熱間寸法で $\phi 258 \times 549\text{mm}$ である。本材料と 5 万トンプレスを用いて Fig. 1 に示す鍛造工程図と Table 1 に示す鍛造条件で型鍛造を実施した。1100℃は Super-solvus 鍛造、980℃は δ 相が析出した状態における Sub-solvus 鍛造を再現した。従来の研究¹⁾において、球状化が進行した δ 相の析出組織では再結晶粒成長のピンニング効果が発生することが確認されているため、その有無による DB の追従性を検証することも目的とした。各鍛造工程後には大気放冷され、2nd 鍛造開始時には十分な再加熱を実施した。

鍛造後ショットピーニングで表面のスケールを除去した鍛造材の外観写真を Fig. 2 に示す。いずれの鍛造材も表面の割れなどは発生せず良好な鍛造形状であった。

Table 2 に仕上鍛造後の概略寸法、鍛造荷重を示す。鍛造寸法は狙い高さ 100mm に対し、やや低い寸法まで成形された。

Fig.3 に鍛造後と熱処理後のマイクロ観察部位を示す。熱処理は試験片を切り出し後、NIMS 所有の熱処理炉を用いて Fig. 4 に示す熱処理パターンで実施した。

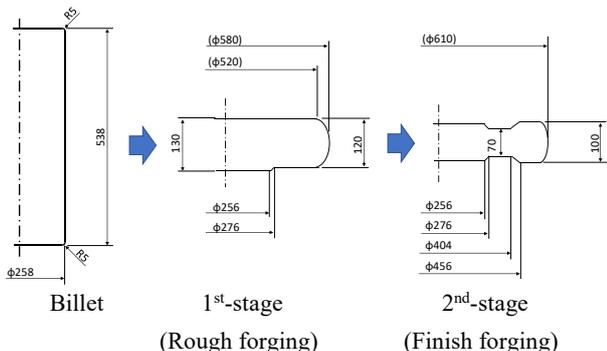


Fig.1 Die forging process using 500MN press

Table 1 Conditions of die forging trial using 500MN press

Initial heating temperature of work-piece	980℃, 1100℃
Die material (Hardness)	DHA-WORLD (45HRC)
Die temperature	450℃
Surface coating	Glass powder
Average strain rate	0.05 sec ⁻¹

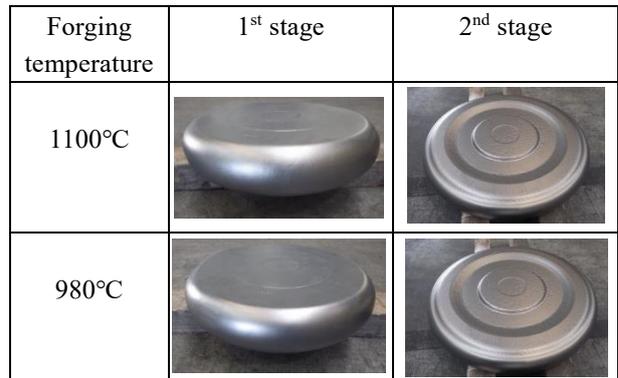


Fig. 2 Outlook of work-piece after forging

Table 2 Size and maximum forging load at 2nd stage

Forging temperature	Size (Diameter×height)	Forging load (Max.)
1100℃	$\phi 689 \times 93.3\text{mm}$	118.3 MN
980℃	$\phi 670 \times 97.7\text{mm}$	129.3 MN

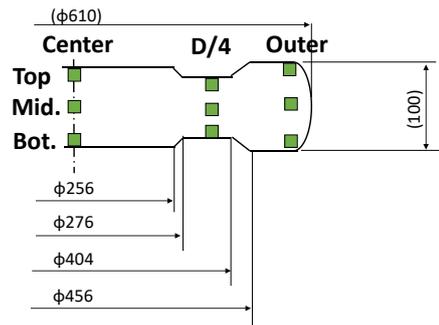


Fig.3 Position of micro-structure observation

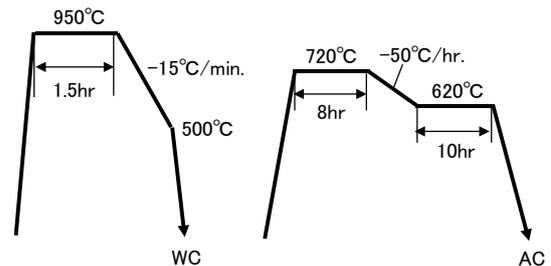
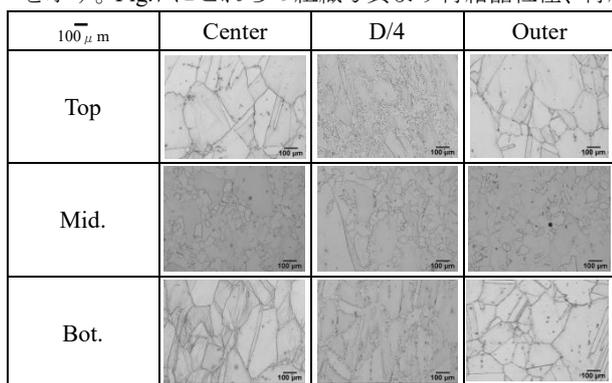
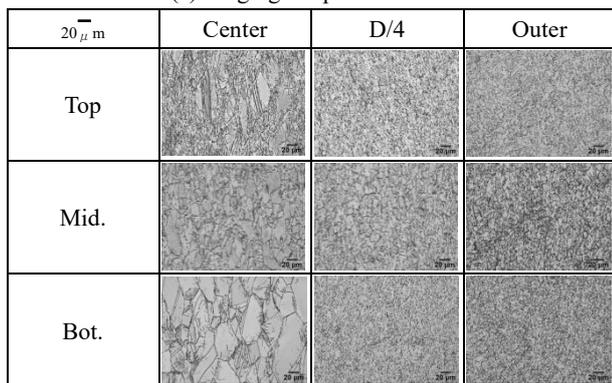


Fig. 4 Heating pattern of solution treatment and ageing

Fig. 5 に仕上鍛造後、Fig. 6 に熱処理後のマイクロ組織写真を示す。Fig.7 にこれらの組織写真より再結晶粒径、再結晶

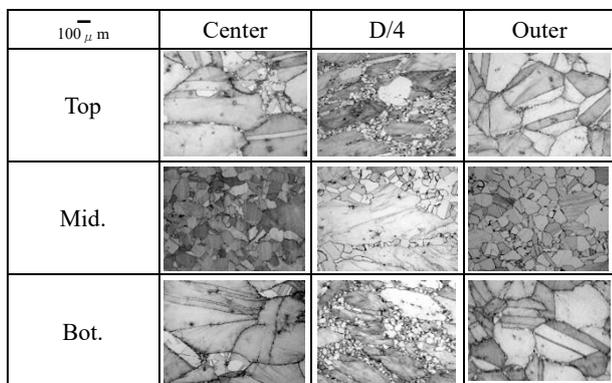


(a) Forging temperature 1100°C

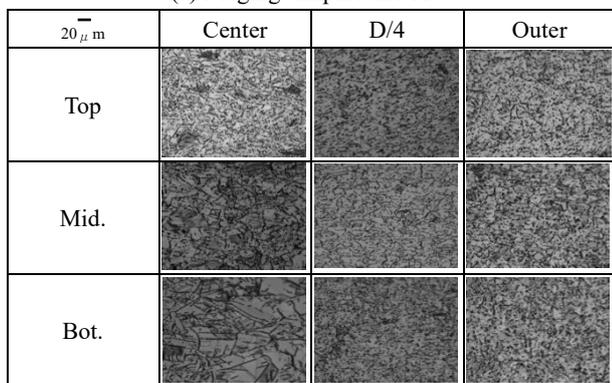


(b) Forging temperature 980°C

Fig. 5 Photo of microstructure after 2nd stage forging



(a) Forging temperature 1100°C



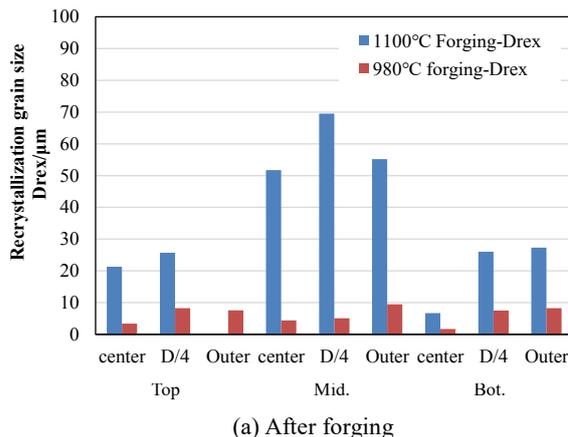
(b) Forging temperature 980°C

Fig. 6 Photo of microstructure after heat treatment

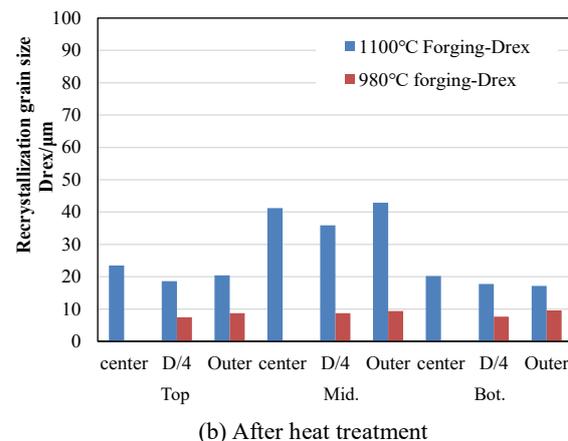
晶分率を定量化した結果を示す。

1000°C鍛造材は鍛造前の初期粒径が大きいことから980°C鍛造材に比べて粗大な未再結晶の残留が確認された。1000°C鍛造材の再結晶粒径はおおよそ20~70 μ m に対し、980°C鍛造材のそれはおおよそ5~8 μ mであった。この顕著な差は再結晶粒成長挙動の単純な温度依存性だけでなく、球状化 δ 相によるピンニング効果も相乗しているものと思われる。

つづいて固溶化熱処理時に再結晶の進行が想定されるが加熱温度が950°Cと鍛造温度より低い温度のため顕著な再結晶組織の変化は確認されなかった。



(a) After forging



(b) After heat treatment

Fig. 7 Result of measurement about recrystallization grain size Drex after forging and heat treatment

以上の実鍛造試作によって、鍛造温度、鍛造材の部位による再結晶分率、再結晶粒径の変化を実製品で想定される条件を網羅して把握することができた。これらの鍛造実績を有限要素シミュレーションへフィードバックし、大型精密鍛造シミュレータで取得されたモデリングDBを用いて再結晶分率と再結晶粒径の予測精度を検証し、本研究の成果を確認する。

参考文献

- (1) Hiroaki Yoshida, Takeshi Hatta, Tomohisa Hironaka, Sachihiro Isogawa, Hideaki Sekiguchi, Numiform2007, pp. 987-992.

Ni 基合金鍛造材の組織予測

—予測モジュールの概要とシミュレーション結果—

名古屋大学 湯川 伸樹 大澤 千紘 阿部 英詞

Email: yukawa@nagoya-u.jp, osawa@p4.numse.nagoya-u.ac.jp

abe.eiji@material.nagoya-u.ac.jp



1. 機関の役割と目的

Ni 基超合金は優れた高温機械特性を有するが、この優れた特性を引き出すには再結晶による結晶粒微細化が必要不可欠であり、そのためには製造工程のプロセスモデリングによる最適化が重要である¹⁾。プロセスモデリングを行うには膨大な実験データとその計算ツールが必要であるが、国内には Ni 基超合金の熱間加工における組織変化やそれによる各種特性の変化に関する実験データベースが少ない事、および鍛造初めから熱処理までの一貫した計算ツールが存在しておらず材料組織を予測することが難しかった。

本研究では Ni 基超合金 Alloy718 および Alloy720Li について、小型鍛造、1500t 鍛造の熱間鍛造実験結果と、各研究期間で構築した予測モデルを元に、それらを統合して FEM 塑性加工シミュレーションソフトウェアに組み込み、組織・特性予測が可能な計算ツールを開発した (Fig. 1)。

この計算ツールを 5 万 t 鍛造実験に適用し、解析精度の検証を行った。

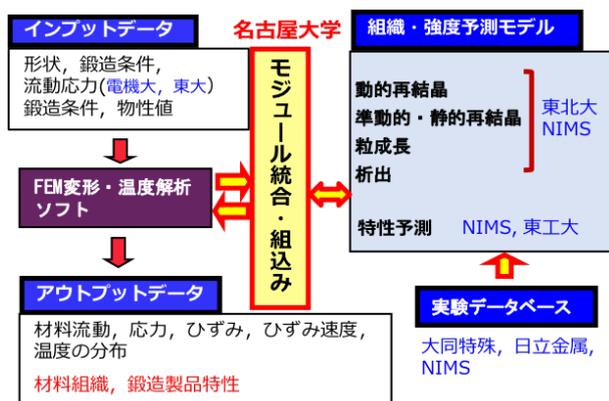


Fig. 1 各機関の役割分担

2. 研究成果

2.1 増分二体予測モデルの構築²⁾

鍛造中・熱処理中は材料のひずみ・ひずみ速度・温度が刻々と変化し、また材料内部の位置によっても異なる。そこで本研究では動的再結晶率・動的再結晶粒径の予測において微小変化を蓄積していく増分形モデルでツールの構築を行った。

Alloy720Li の予測モデルについては動的回復現象も考

慮した。

熱間鍛造の大圧下時には、ひずみの蓄積とともに既に再結晶が生じた領域で再度再結晶が多重に生じる場合がある。本モデルでは再結晶領域と未再結晶領域それぞれにおいて逐次、再結晶率及びその発生核粒径を求めることにより、大圧下時に発生する再結晶領域の中で発生する 2 次以降の再結晶も考慮することが可能である。

2.2 最適パラメータの決定

各予測モデルをユーザーチンとして統合し、二次元有限要素解析ソフトウェア DEFORM-2D に組み込んだ。各モデルおよびそれに使用するパラメータは鍛造実験の結果から決定するが、従来の 10t クラスの小型鍛造実験のみでは体積の違いによる伝熱特性の違い、潤滑の違いによる摩擦特性や熱伝達特性の違いにより、実機レベルの大型鍛造品については高い予測精度は望めなかった。本研究では小型鍛造実験に加え、実際の大型鍛造品に近い鍛造実験が可能な 1500t 鍛造シミュレータを用いた実験結果を活用してモデル、パラメータの決定を行った。

小型鍛造実験では、加熱後鍛造し直後に急冷する“小型 A 試験”、鍛造後 0~60 秒間保持した後に急冷する“小型 B 試験”、1500t 鍛造の温度履歴を模擬して鍛造後 10°C/s で冷却する“小型 C 試験”を行った。1500t 鍛造においては炉で所定温度まで加熱後、ロボット搬送、鍛造後空冷する“1500t 試験”を行った。(Fig.2)

二次元有限要素解析ソフト DEFORM-2D を用いて実験と同じ条件の解析を行い、組織予測に必要な材料内部のひずみ・ひずみ速度・温度を取得し、その解析データを入力データとして、最適解を探索する遺伝アルゴリズムを用いて実験データと計算結果の誤差が最小になるように予測モデルのパラメータを決定した。

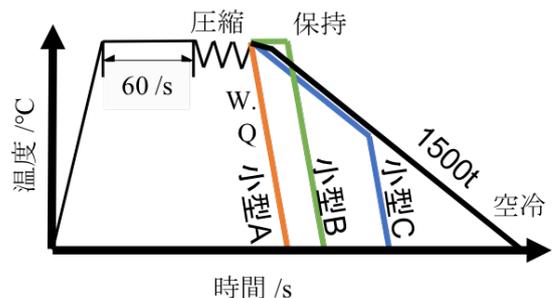


Fig. 2 小型および 1500t 試験条件

2.3 構築した計算ツールの精度検証

これらで得られたパラメータと開発した計算ツールを各試験に適用し、予測精度の検証を行った。

Fig.3 はパラメータを決定するために用いた小型試験および 1500t 試験に適用した場合の再結晶分率および再結晶粒径の事前予測の結果である。再結晶率は±10%、結晶粒径は粒度番号でほぼ±1 の精度で予測可能であることがわかる。

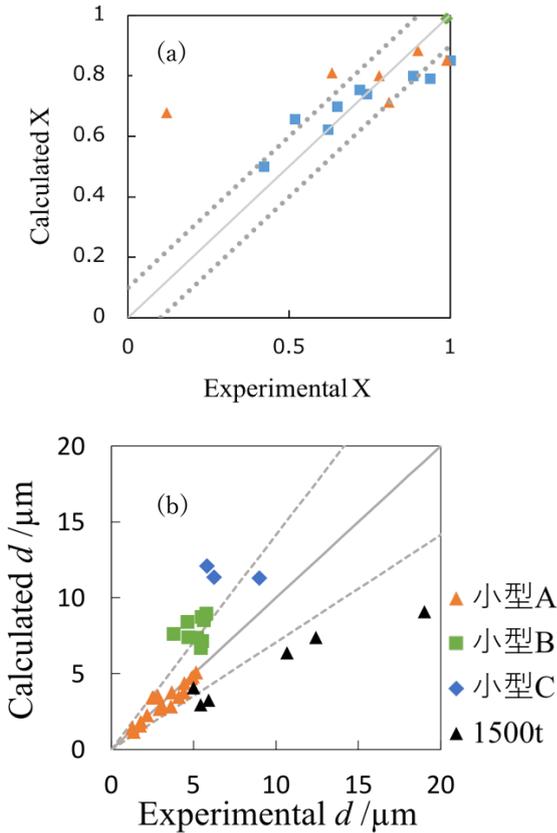


Fig.3 事前予測結果
(a) 再結晶粒率, (b) 平均再結晶粒径

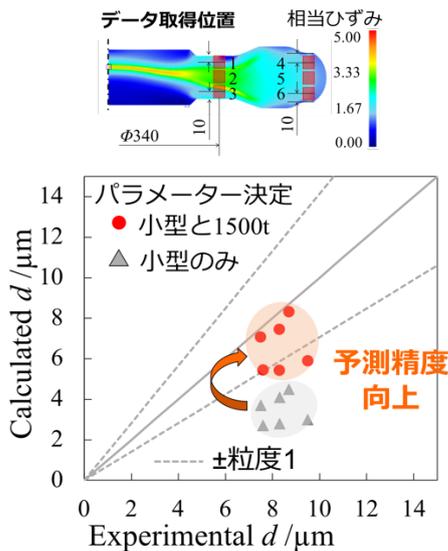


Fig.4 5万t試験の粒径予測結果

次に5万tプレスと直径φ258mm、高さ548mmの円柱試験片を用いた“5万t試験”(Fig.4)に適用し、予測精度の確認を行った。平均結晶粒径の予測結果をFig.4に示す。1500t試験結果も含めパラメータを決定することにより予測精度が大きく向上し、ほぼ粒度番号±1の範囲で予測が可能であることがわかる。

Fig.5はAlloy 720Liについて、直径φ255mm、高さ550mmの試験片を1104°Cで鍛造、冷却した場合の析出した2次γ'の粒径分布を示したものである。各場所の冷却速度の違いが析出分率、析出粒径の違いとなって現れている。Fig.6に示す実際の鍛造品を測定した結果との比較を示す。

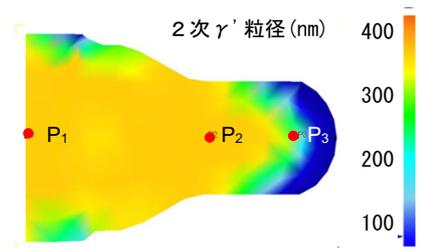


Fig.5 2次γ'粒径分布

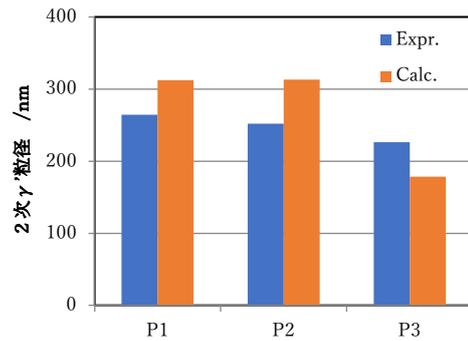


Fig.6 2次γ'粒径の比較

3. まとめ

熱間鍛造試験の結果と各研究機関で構築した予測モデルを元に、それらを統合してFEMをベースとした変形・温度・組織・特性予測計算ツールを開発した。小型鍛造試験に加え1500t鍛造試験の結果を考慮することにより、再結晶粒径の予測の精度が向上し、目標である粒度番号±1の精度で予測がほぼ可能となった。また鍛造、冷却、熱処理条件に応じた析出挙動の予測が可能となった。

今後、不足しているデータの取得を行い、それらをこれまでの実験結果に追加していくことによって、再結晶挙動、析出挙動の予測精度を向上させて行く予定である。

参考文献

- 1) 吉田広明ほか：電気鉄鋼，78(2007)，267.
- 2) T. Yamada et al. :Procedia Manufacturing, 15(2018), 356.

Alloy 720Li の鍛造および耐力予測シミュレーション

日立金属株式会社 冶金研究所 石田 俊樹 青木 宙也
 Email: toshiki.ishida.cq@hitachi-metals.com, chuuya.aoki.vb@hitachi-metals.com



1. 機関の役割と目的

種々存在する超耐熱合金の中でも、Alloy720LiはAl量、Ti量が多く、 γ' 相の占める割合が高い。そのため、他の超耐熱合金より熱間加工の難度が高く、また鍛造後の溶体化処理の冷却速度が材料特性に及ぼす影響も大きい。日立金属では、Alloy720Liについての鍛造シミュレーションによって鍛造組織を予測し、得られた鍛造組織予測を材料の耐力予測シミュレーションへと適用することで、実際の製造プロセスによって得られる耐力特性を、高精度に予測するための解析技術の確立に取り組んでいる。

2. 研究成果

本テーマに使用した Alloy 720Li の組成を Table.1 に示す。はじめに、本素材から直径 8(mm)、高さ 12(mm)の小型試験片を作製し、熱間加工再現試験機で圧縮試験を実施した。試験時は室温から 1100(°C)まで昇温させ、一定時間保持したのち、一定の冷却速度で所定の温度まで下降させてから、圧縮を開始した。圧縮開始前の冷却は、製造プロセスにおける、炉搬出からプレス機までの搬送冷却を模擬するための過程である。

Table 1 Chemical composition of evaluated Alloy720Li wt. %

Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	C	Zr	B
Bal.	16	14.5	3	1.26	2.54	5.0	0.015	0.03	0.015

圧縮試験で得た Alloy 720Li の結果のうち、本材の恒温鍛造条件に相当するひずみ速度 0.001(sec)における流動応力を Fig.2 に示す。図中の実線が圧縮前の冷却速度を 0.1(°C/min)、点線が 1.0(°C/min)の結果を表している。冷却速度の高い 1.0(°C/min)での流動応力の方が、冷却時の γ' 相の析出量が多い分、上昇したものと推測される。

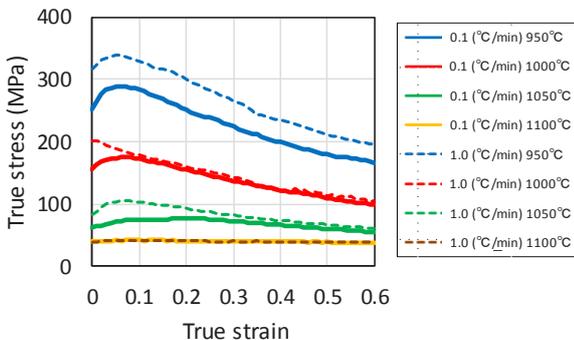


Fig. 1 Flow stress of Alloy720Li

次に、小型圧縮試験片と同様の Table.1 の素材から、直

径 90mm、高さ 160mm のピレットを作製した。このピレットを、本 SIP で NIMS に導入された 1500 トン鍛造シミュレータを用いて、パンケーキ鍛造を実施した。パンケーキ鍛造後、Fig.2 のように 1100(°C)×4(h)の溶体化処理、冷却、時効処理を行った。溶体化処理後の冷却速度が 0.2%耐力に与える影響を調査するため、冷却速度は複数の条件で実施した。熱処理後、鍛造品から小型の試験片を作製し、650(°C)、700(°C)、750(°C)⁽¹⁾の 3 条件で引張試験を実施し、0.2%耐力データを取得した。さらに引張試験後、試験片のネジ部において、SEM による組織観察を行い、1 次、2 次、3 次 γ' 相のサイズを測定した。2 次 γ' 相の SEM 画像を、Fig.3 に示す。これらの結果から、2 次 γ' 相のサイズと 0.2%耐力との関係を整理したものを、Fig.4 に示す。この結果から、Alloy 720Li を用いた製品で 0.2%耐力の特性を確保するためには、2 次 γ' のサイズを適切に微細化する必要があることが解る。

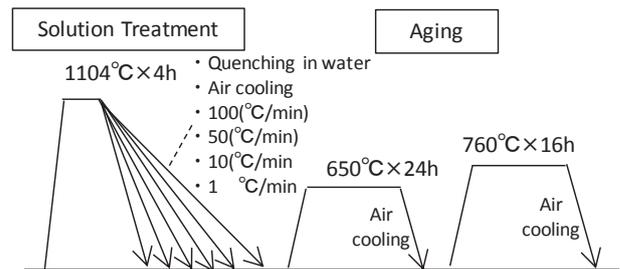


Fig. 2 Conditions of heat treatment after forging

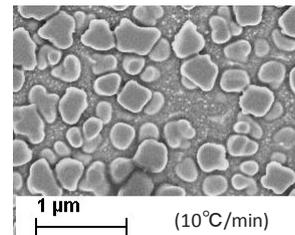


Fig.3 SEM image of secondary γ' after heat treatment

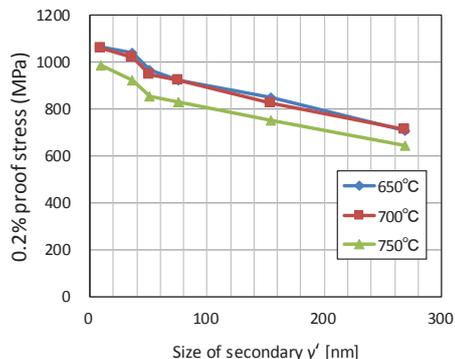


Fig. 4 The dependence of 0.2% proof stress on secondary γ' size

最後に、Table.1 の素材から製品サイズを想定した直径 254(mm)、高さ 520(mm)のピレットを作製し、日立金属の保有する大型の恒温鍛造機を用いて、Fig.5 の形状に鍛造した。この大型鍛造について、名古屋大学 湯川伸樹准教授により塑性加工ソフトウェア DEFORM を用いた鍛造再現シミュレーションが実施された。鍛造再現シミュレーションでは、ひずみや温度の他、本 SIP で開発された組織予測モジュールを活用して、 γ 相の粒径、再結晶率、 γ '相のサイズ分布についても同時解析が可能である。Fig.6 に、ひずみ、温度、2 次 γ '相分布のシミュレーション結果を示す。



Fig. 5 Workpiece after forging by Hitachi-metals

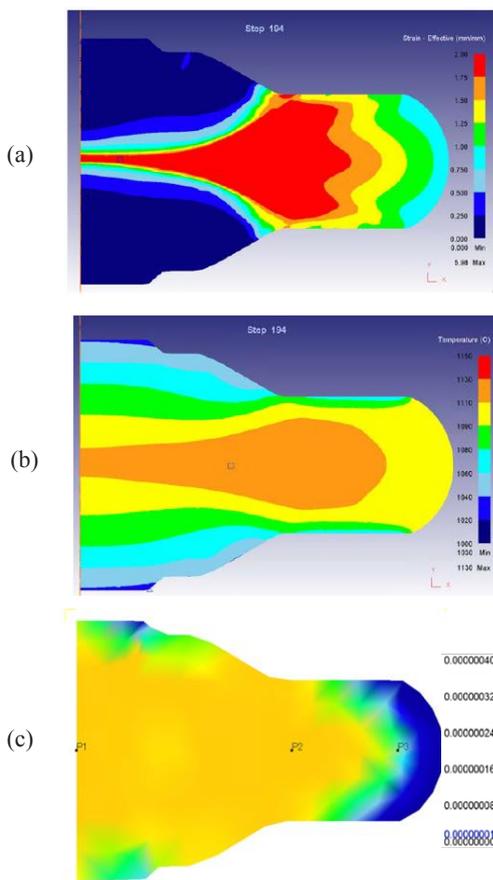


Fig. 6 Results of forging simulation at the final time step
(a)effective strain, (b)temperature, (c)secondary γ '

実機鍛造品の複数の部位から、小型の引張試験片を採取して得た 0.2%耐力と、鍛造再現シミュレーションから得た、引張試験片の各採取位置における溶体化処理後の冷却速度の相関性をプロットしたものを、Fig.7 に示す。これは、Fig.4 における 1500 トン鍛造シミュレータより得られた値と良く一致した。現在、鍛造再現シミュレーションで得たマイクロ組織の情報を、NIMS 開発の耐力予測シミュレーションに入力して、0.2%耐力の予測値を計算中である。本講演では、実機鍛造で得た Fig.7 の 0.2%耐力の特性と、耐力予測シミュレーションとの結果も併せて報告する。

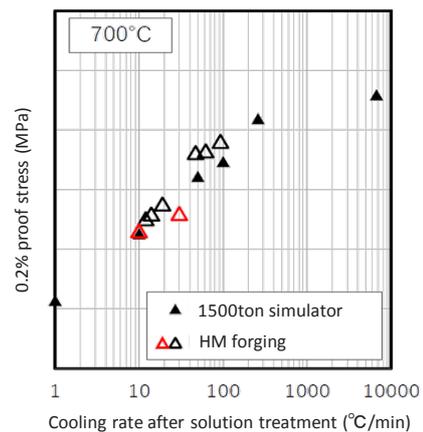


Fig. 7 The dependence of 0.2% proof stress on cooling rate after solution treatment

参考文献

- (1) K. GOPINATH et al. "Tensile Properties of Ni-Based Superalloy 720Li: Temperature and Strain Rate Effects" METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 2008, Volume 39A, Issue 1, Pages 2340-2350

鍛造シミュレータの活用について

国立研究開発法人物質・材料研究機構
構造材料研究拠点 鍛造プラットフォーム 木村一弘
Email: kimura.kazuhiro@nims.go.jp



1. 構造材料研究拠点体制

構造材料研究拠点は2014年10月に設立後、2016年4月からの第4期中長期計画ではインフラ構造材料、輸送機材料、エネルギー構造材料という出口分野と、材料信頼性、構造材料基盤技術、構造材料基礎科学という基礎・基盤分野の6つの研究分野に、構造材料データシート活動を加えた新体制での活動を開始した。“構造材料つくばオープンプラザ (TOPAS)” や拠点シンポジウム、セミナー等を通じた情報発信や設備共用、人材育成活動、企業との組織連携や共同研究等に取り組み、鉄鋼 MOP (Materials Open Platform) を構築する等、我が国の構造材料研究拠点としての機能充実化を目指してきた。

2018年4月には、外部連携を含めた研究活動を有機的に推進するための機動性向上を目的として、それまでの6研究分野を「設計・創造」、「解析・評価」及び「接合・造型」の3研究分野に再編した。2018年12月時点における構造材料研究拠点の体制図を Fig.1 に示す。構造材料試験プラットフォーム (PF) ではクリープ・疲労・腐食・宇宙関連材料強度の構造材料データシートを作成し、構造材料解析 PF では構造材料の諸特性の発現要因及びその組織因子解明を目的とした組織解析を行っており、鍛造シミュレータを運用するための組織として鍛造 PF を設置している。また、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) を円滑に推進するため、「革新的構造材料」と「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の各プロジェクトに参画する研究者が結集 (併任) した SIP ラボを設置している。

2. 鍛造シミュレータの運用

1500 トン鍛造シミュレータの運用実務は、鍛造 PF の鍛造シミュレータグループが担当しているが、鍛造シミュレータの利用者及び業務に従事する職員の安全を確保し、効果的な装置の運用を図るため、2016年10月18日付で、構造材料研究拠点内に鍛造 PF 長を委員長とする「鍛造シミュレータ安全運営委員会」を設置した。本委員会では以下の事項を審議・調査して、構造材料研究拠点長に答申することとしている。

- (1) 鍛造シミュレータの運転計画の技術的検討、及び安全かつ効率的な運営について
- (2) 鍛造シミュレータの運用・整備・管理状況の安全性及び法規性等について
- (3) 職員等の安全衛生の確保について
- (4) 機構自らの研究開発業務遂行に支障を来さないものであることの確認について

本年度は SIP 「革新的構造材料」プロジェクトの最終年度となるが、本プロジェクトで導入した鍛造シミュレータは我が国の今後の鍛造技術発展にとって重要な研究装置であり、本プロジェクト終了後も国内の産業界及び大学等の多くの機関に広く利用されることが大事である。そこで、高い安全性の確保と装置運用のさらなる効率化を実現するための体制の充実と併せて、外部機関との連携に柔軟に対応するための制度設計を検討し、我が国の鍛造技術の発展に貢献することを目指して参りますので、今後とも一層のご指導、ご鞭撻とご支援、ご協力をお願いいたします。

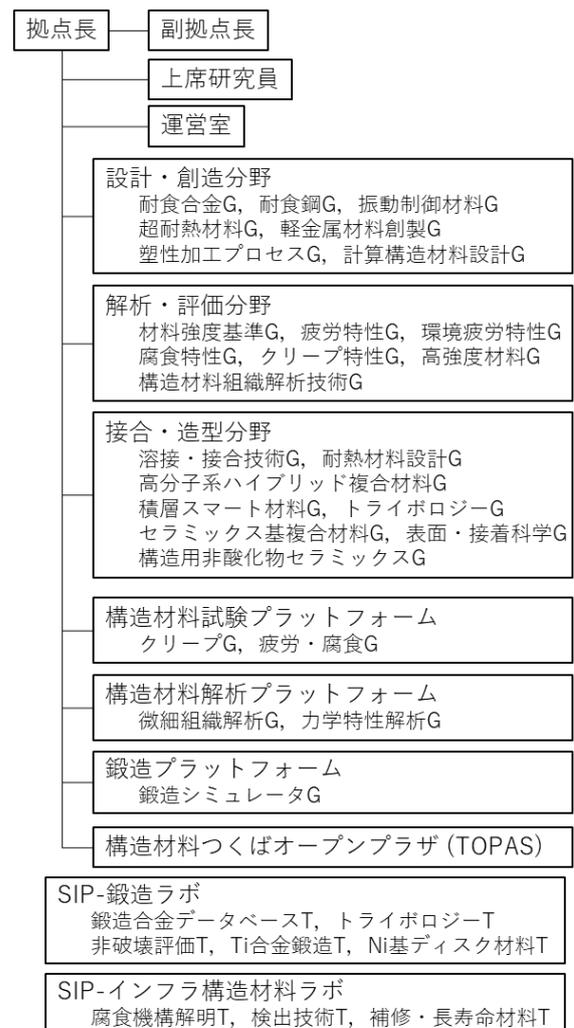


Fig. 1 Organization Chart of Research Center for Structural Materials since April 2018

— パネル討論 —

パネル討論

～1500 トン鍛造シミュレータを利用した鍛造プロセス研究の 展開、企業・大学からの要望～

(モデレータ) NIMS 構造材料研究拠点 村上 秀之

Email: murakami.hideyuki@nims.go.jp



戦略的イノベーション創造プログラム (Strategic Innovation Promotion Program, SIP) の一つのテーマとして、2014 年度に始まった「革新的構造材料」プログラムでは、材料技術を基盤とし、航空機産業の育成、拡大へと展開していくことを目標とした研究開発を進めてきました。その大きな柱の一つとして、「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」が立ち上がり、物質・材料研究機構に 1500t 鍛造シミュレータが導入されることになりました。実際に試験が開始されたのは 2016 年 7 月で、実質 2 年の運用でジェットエンジンのディスク材として用いられる Ni 基合金、またファンやコンプレッサ一部位に使用される Ti 合金を対象にしたデータベースの構築、またこれに基づいた塑性加工パラメータと組織特性を紐付けるモデリング手法の開発を進めてきました。本プロジェクトも最終年度となり、成果の見極めを行うとともに、本分野の研究開発をどう進めるべきか。1500 トンシミュレータをどう活用すべきかについてしっかりと議論しておくことが必要です。そこでこの機会に、この分野の第一線で活躍されている産学の先生方に忌憚な

い意見を頂くべくパネル討論を企画しました。以下のテーマについて討論を進めていく予定です。

- ① 鍛造プロセス技術に関する日本の立ち位置
材料科学分野では日本が世界をリードしているという認識はありますが、鍛造プロセスについて日本の立ち位置はどうか。もし遅れている部分があるとすればそれは何か、どうすれば追いつくのかについてご意見を伺います。
- ② 1500 トンシミュレータの役割
NIMS に導入された 1500 トンシミュレータでは温度や圧下プロセスの制御を可能な限り精密に行う工夫や、複雑鍛造プロセスへの対応が可能となっておりますが、実用大型部材の鍛造は困難です。このようなシミュレータが鍛造プロセス技術進展のためにどのような役割を担っているのか。あるいは担うべきかについて議論頂きます。
- ③ 今後の展開
今後 1500 トンシミュレータを用いてなにを進めて行くべきか、どのような体制作りが必要か、産学からのご意見を伺います。

1500 トン鍛造シミュレータの活用について

— 低コスト熱間鍛造用金型の設計・製作に向けて —

日本エアロフォージ 藤田陽一

Email:fujita.yoichi@japan-aeroforge.com



SIPにより導入された1500トン鍛造シミュレータは、これまでの小型試験機にない機能と大型プレス実機鍛造を模擬した試験が出来るという事で、今後もその活用による研究開発成果に大きな期待が寄せられている。

大型航空機用鍛造品を安定的に製造し、世界の鍛造メーカーに抜きんでて品質およびコスト競争力を堅持するためには、材質予測、鍛造プロセス設計等の開発の他にも、まだまだ解決すべき課題が多くある。

その一例として、**低コスト熱間鍛造用金型の設計・製作**がある。大型のチタン合金、ニッケル基合金の鍛造用金型は、使用する熱間鍛造用金型素材の重量が大きく、熱処理、機械加工等を含めると高額なものになる。また、鍛造時の金型にかかる応力が大きく、その応力値が金型素材の高温耐力値に近い場合は金型寿命の低下を招き、金型の破損につながる事がある。

そこで、出来る限り金型寿命を伸ばし、1セットの金型での鍛造個数を最大化する事が金型コスト低減には必須と

なる。そのため、以下のような技術的検討が必要になる。

- ① 鍛造時の金型にかかる応力を出来る限り低減させるような金型彫刻面形状（鍛造形状）を検討する。
- ② 金型の彫刻面部分と母材外殻部分を分割した構造とし、摩耗による手入れ・リシンク・交換部分の重量を軽減する。
- ③ 高い応力がかかる部分、摩耗の激しい部分のみへの耐熱高強度材料のライニング技術や入れ子構造を検討する。
- ④ より高温強度の高い金型材質を開発する。

これらの検討においては、実機サイズでの金型を製作し、鍛造実験による検証を行うことは金型製作費用および素材の製作費用が高額になる。また、小型試験機では実機レベルに近い金型寿命評価が出来ない。1500トン鍛造シミュレータを使用した実験規模であれば、実機での金型寿命評価が可能であり、種々の確認実験が実施できると考える。

チタン大型鍛造における鍛造シミュレータへの期待

株式会社神戸製鋼所 長田 卓
Email: choda.takashi@kobelco.com



日本エアロフォージ株式会社において 2013 年より世界最大級の 5 万トンプレスが稼動したことにより、我が国において航空機向けチタン大型鍛造品を一貫製造するための設備面が整った。しかしながら、欧米先行国においては、これまでに官民共同での大型プロジェクトを始めとした多額の開発投資、および、永年に渡る豊富な経験・実績により技術・データ面で先行しており、これに我が国が追い付き、更に競争力を有すためには、鍛造材料のデータベースならびに鍛造工程設計技術のソフト面での体制整備が必要となっていた。

そこで、SIP において 1500 トン大型鍛造シミュレータを立ち上げ、参画機関保有の小型シミュレータとも組み合わせて活用することで、塑性加工、材料組織・特性のデータベースの取得ならびに数値解析予測モデル化のための仕組みを構築した。1500 トン鍛造シミュレータには Ti・Ni 合金の高温での鍛造における温度・歪を精緻に再現可能とするために、プレス圧下、素材・金型の加熱、鍛造後の冷却制御等、参画機関の創意工夫が集約されたものとなっている。

SIP (第 1 期) の期間においては、開発対象として取り上げた Ti-17 合金 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo) において、一通りのデータ取得～予測モデル構築～実機 5 万トンプレスでの検証が可能となった。

ただ、これは航空機等に適用される数ある合金の中の代表的な 1 つについて、目標としたプロセスにおけるデータ取得・モデル化が完了したに過ぎない。今後、当初の狙いに掲げた大型鍛造品市場において国際的な競争力・優位性を獲得していくためには、引き続き、適用対象合金・プロセス範囲の汎用拡大、予測モデル (塑性加工、組織・材質) の更なる高精度化、予測技術から鍛造工程設計技術への進展を図っていくことが必要不可欠である。

そのためにも、1500 トン鍛造シミュレータは核となる設備であり、SIP (第 1 期) 終了後も、素材・鍛造メーカーが大学等の研究機関と共同で必要なデータを引き続き、取得していくことが可能となる運営・管理を期待したい。

鍛造シミュレータへの期待

日立金属株式会社 特殊鋼カンパニー 菊池弘明
hiroaki.kikuchi.vz@hitachi-metals.com



日本は航空機や発電用ガスタービンに用いられる高性能の金属材料分野では国際的にも高いレベルにあり、特に航空機産業の活況から国内外からの期待も高まっている。また、各社の継続的な活動により重要な部材の実績もつきつつある。

一方で、素材に求められる要求性能は年々高度化しており、クリチカルな性能を決める溶解工程に加え、合金そのものの特性を最大限に引き出すと共に高い次元で特性の最適化を図る鍛造工程の確立が従来にも増して重要な要素となっている。

鍛造工程の重要な要件のひとつであるプロセス設計は、急速に進歩しつつある CAE 技術により高い精度でその適否の確認が出来るようになってきているが、前述の要求の高度化により、工業的な「ばらつき」を勘案したプロセスウインドウは必然的に狭くなり、最適なパラメータの設定には CAE 技術では限界があり、実規模での検証により決められている。

しかしながら実規模での検証には多額の費用と時間を要するため、これを最小限に抑える手法の検討と確立はベースの競争力を高めていく上で有益と考えられる。

また、実績を重視する航空機産業では現行プロセスの踏襲を強く求められるが、欧米の後追いビジネスの世界で生き残るためには、許容される差別化技術の適用が重要なポイントとなる。差別化技術の開発・実用には、既存のプロセスとの違いを、実際に起こり得る「ばらつき」の各要素に分解して同等性を示し、かつ製造パラメータの「ばらつき」の影響を定量的に管理することが必須の要件となる。

鍛造シミュレータは、これらの「ばらつき」管理のデータベース構築に有用なツールとして活用できる可能性があり、開発合金の基礎データの取得と併せ国内の産業界が活用できるデータベースを構築することには意義があると考えられる。

1500 トン鍛造シミュレータは耐熱材料と塑性加工の新たな出会い

大同特殊鋼株式会社 岡島 琢磨
Email: t-okajima@ac.daido.co.jp



航空機業界の材料の実用化開発で先行する欧米の学会の状況を調査してみると、材料の成分設計、製造プロセスの実用化から特性評価、部品設計、組立て後の構造解析まで一貫したモデリングシステムの構築を積極的に押し進め、近年では計算機の性能向上の環境も加えてより加速的に実用化を意識した研究が進行している印象を受ける。SIP の活動はまさにその方向性に則ったものであり、NIMS に導入された 1500 トン鍛造シミュレータが耐熱材料と塑性加工学の連携のハブとして新たな研究成果と開拓しつづけることが望まれる。

1500 トン鍛造シミュレータの最大の魅力は、従来の塑性加工用小型試験機では設備能力の制約で、鉄鋼材料に比べて硬く、組織制御の面で温度感受性の強いチタン合金、Ni 基超合金を思いのままに実験できなかつた研究環境の問題を解決し、実体の加工熱履歴を模擬した組織制御、特性評価まで一貫した研究を実現できるようになったことである。プレス加圧力が実験装置として巨大な 1500 トン、大型設備であるにも関わらず、精密な温度管理とプレス動作、アイソサーマル環境が魅力的である。

このように、従来の塑性加工の領域でなかなか研究対象として扱いづらかつたチタン合金、Ni 基超合金の熱間鍛造について、研究環境が整い、SIP 活動の 5 年間で各種の塑性加工要素技術を多数の専門家で分担して様々な研究成果が出てきたことは画期的であった。

チタン合金や Ni 基超合金は鉄鋼材料と比べて、例えば合金成分由来で材料と金型の熱間接触時の現象ひとつを取り上げても同一ではなく、その要因を解明するだけでも非常に興味深い研究成果が出てくるものと期待できる。

これらの成果をすべて積み重ね、材料開発、組織制御、特性評価より実製造プロセスの最適化を合理的に説明できることで学术界、産業界の開発競争力が高まることが期待できる。これは本プロジェクト立ち上げ当初の「理念」や「思い」であったと思う。これを忘れることなく鍛造シミュレータを中心に国内の材料・塑性加工の第一線の研究者の知恵が広く結集しやすくするため、様々な研究者が継続的に利用しやすい仕組みの拠点化が望まれる。

ディメンションを繋ぐ 1500 トン鍛造シミュレータ

東京大学 大学院工学系研究科 柳本 潤
Email: jun.52074.yanagimoto@cem.t.u-tokyo.ac.jp



1500 トン鍛造シミュレータが物質・材料研究機構に建設され、運用が開始されてから、鍛造時の組織変化、鍛造品の力学特性、等の貴重なデータが得られてきたことはまことに喜ばしい。今後も 1500 トン鍛造シミュレータを利用した、航空機用材料の研究・開発や、部材の鍛造プロセスの研究・開発が進み、展開して社会に成果として還元されることを、念じている。

今まで加工熱処理の研究、開発、材料の開発は、1960 年～70 年代以後に、30 トン程度までの小型シミュレータが担ってきた。その成果は大きいものがあるが、実際の部材とのディメンション（寸法）の差が大きい場合には、以下の二つの課題が指摘できる。

①温度には相似則が成立しない

熱伝導方程式は拡散方程式の一種で寸法依存性がある。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

（応力の空間勾配で書かれる釣合い式は、力/volume の次元を持ち体積を乗ずるとディメンションが消え、変形は寸法に依存しない。）温度はこのことと対照的である。

②小型シミュレータでは、鍛造後部材の機械特性試験のためのサンプル採取ができない。

実機 50000 トンプレスでの試験は非現実的で、30 トンレベルの小型シミュレータによる試験では、越えがたいディメンションの差がある。1500 トン鍛造シミュレータは、小型シミュレータでは不可避のディメンション限界を緩和する。さらに温度保持（調整）機構を利用して 50000 トンプレスと近い温度特性を物理的にシミュレーションすることもできる。1500 トン鍛造シミュレータは、鍛造後部材の機械的特性試験のためのサンプル取得ができ、疲労やクリープのための部材製造に威力を発揮する。

私の研究室には、5 トンと 15 トンの小型シミュレータがあり、今年で 18 歳と 14 歳となったが今でも立派に現役で、毎年数多くの試験を行い、多くのデータは民間企業様にも喜んで使っていただいている。鍛造機や熱間圧縮試験機の寿命は長い。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ていることはまことに意義深い。これからも、産業界はもちろんのこと、国の研究機関や大学にも、この設備を使いこなし革新的成果を生み出していくことを大いに期待したい。

— ポスター講演 1 —

ユニット B21

“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”

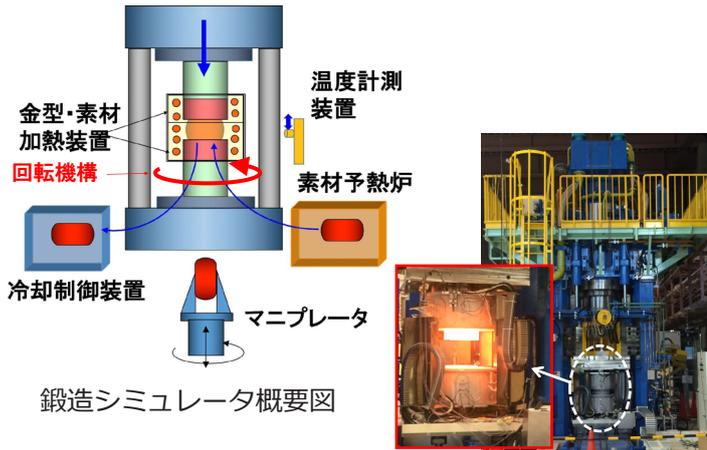
大型精密鍛造シミュレータ実験結果の5万tプレスへの適用

事業目的・研究概要

革新鍛造プロセス技術開発に必要な基礎データを取得するために、1,500t鍛造シミュレータを新規に設計・製作し、B21全体の研究課題である材料データベース構築、及びトライボロジー基礎研究成果も加えながらシミュレーション解析精度を向上させ、実用的なプロセス設計技術開発の確立を図る。

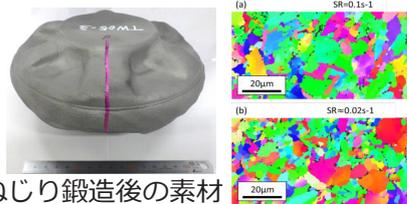
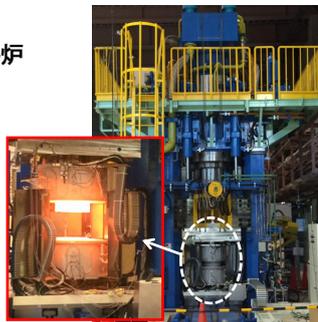
また、プロセス開発WGの共同研究開発機関（大阪大、岐阜大、香川大）と連携して、航空エンジン部材の軽量化、低燃費化につながるプリスク（ディスクとブレードの一体品）鍛造品開発や次世代鍛造プロセス技術と位置付ける複動加工モーション付加（振動付加と回転ねじりモーション付加）制御鍛造技術の開発を主導する。

1500t鍛造シミュレータ実験結果



- 正確な温度制御が可能な金型・素材加熱装置
⇒ 5万tプレスホットダイ鍛造に適用
- ひずみ速度の精緻な制御
⇒ 5万tプレスに適用
- 小型プリスク*モデル鍛造による鍛造条件明確化
⇒ 5万tプレスに適用
- 振動付加鍛造、ねじり付加鍛造試験の実施
⇒ 実機適用時の設備仕様・課題の明確化

*プリスク (Blisk) : ディスクとブレードの一体形状。Bladed Disk.

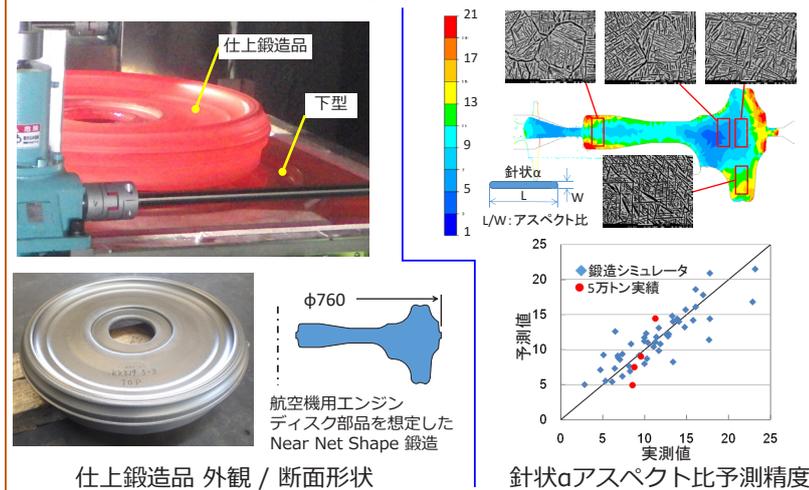


←回転ねじり材の
マイクロ組織観察
上：単軸圧縮材
下：回転ねじり材

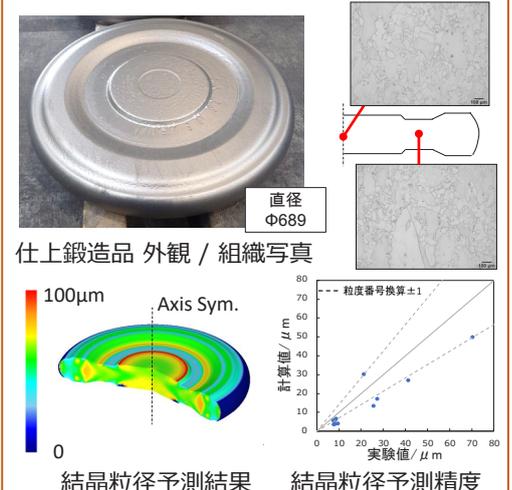
5万tプレス 実証ディスク鍛造

- ・ホットダイ鍛造によるTi-17材特性評価 ⇒ ディスクの破壊寿命を決める針状アスペクト比を精度よく予測できた。
- ・従来鍛造によるInconel718材特性評価 ⇒ 機械特性（強度・疲労）に影響する結晶粒径を精度よく予測できた。
- ・従来鍛造によるプリスク鍛造を実施 ⇒ ディスク部外周の薄肉ブレード部までを鍛造により成形することができた。

ホットダイ鍛造 (Ti-17材)



従来鍛造 (Inconel718材)



今後の展望

- コンピュータシミュレーション解析の高精度化による鍛造設計・金型設計の最適化
- ホットダイ鍛造法の実機量産への適用
- プリスク鍛造の実機量産への適用

所属・名前 日本エアロフォージ株式会社 川上正博、西原卓郎
代表者のメールアドレス kawakami.masahiro@japan-aeroforge.com



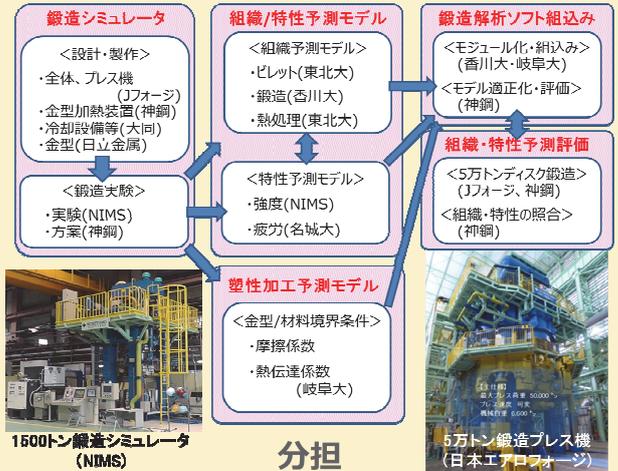
Ti-17合金の鍛造とその組織・特性予測技術

逸見 義男 (神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン研究開発室)

目的・分担

航空機向けチタン大型鍛造部材に求められる優れた高温強度や耐破壊特性等を引き出すためには、鍛造条件等により変化する諸特性を緻密に制御し、作り上げる鍛造工程設計技術が重要。諸特性とそれに連動する金属組織の予測技術の構築を目指す。

- 鍛造シミュレータの開発
 - <Ti-17合金>
- 塑性加工、組織、機械的特性等のデータ取得
- 塑性加工モデリングと組織・特性予測モデリング
- 鍛造解析ソフトに組み込み、可視化ツール
- 実機サイズ鍛造試作によるツールの適用検証



組織・特性予測モデル

香川大/東北大

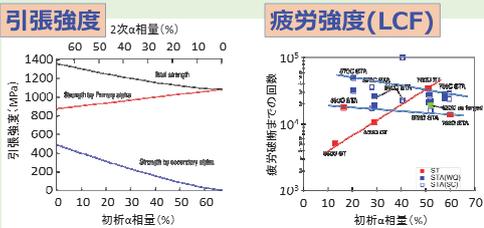
組織変化	冶金モデル
鍛造中の動的再結晶	Zener-Hollomonパラメータ $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$ 動的再結晶化率 $f_{DRX} = 1 - \exp\left[-\beta \cdot \left(\frac{Z - Z_0}{Z_0}\right)^n\right]$ 動的再結晶粒径 $D_{DRX} = A \cdot Z^B$
鍛造中の動的球状化	α 相動的球状化率 $f_{DG} = 1 - \exp\left[-k \cdot (\epsilon - \epsilon_0)^n\right]$ α 相アスペクト比 $A_{\alpha} = C \cdot \epsilon^l \cdot \epsilon^{m'} \cdot A_0^n \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$
..	..

溶体化処理後の

初析 α 幅 粒界 α 幅 初析 α 、2次 α 相量 他

組織パラメータの冶金モデル化

NIMS/名城大



特性vs組織パラメータの関係把握

モデル化/モジュール化

香川大 岐阜大

FEM変形・温度解析ソフト (DEFORM)

塑性加工予測モデル

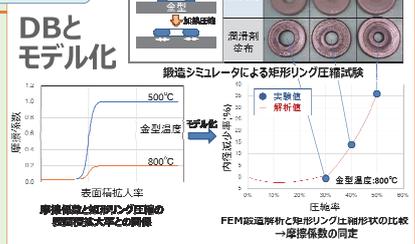
境界条件 摩擦係数

境界条件 熱伝達係数

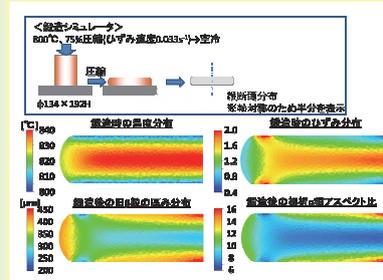
流動応力 応力-歪曲線

熱物性 (比熱等)

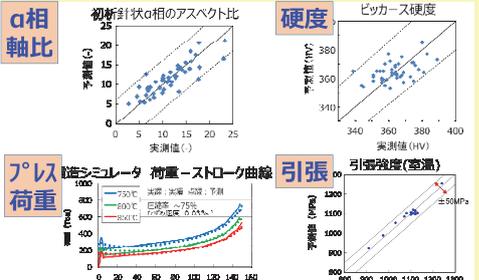
岐阜大



可視化と鍛造シミュレータでの検証



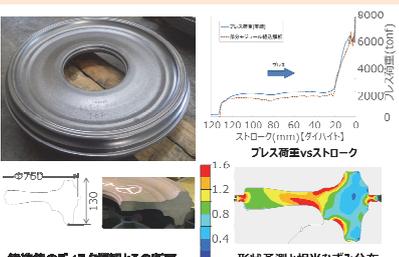
鍛造シミュレータ鍛造後の温度ひずみ、組織因子の断面分布



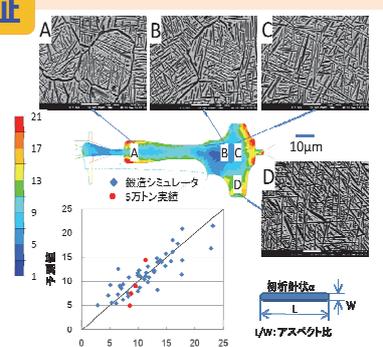
鍛造シミュレータでの各種解析予測値と実測値の比較

5万トンプレス鍛造による検証

神鋼/日本エアロフォージ



Ti-17実機サイズディスク鍛造外観と断面形状とプレス荷重解析



鍛造ディスクにおける針状 α アスペクト比の予測値と実測値の比較

今後の展望

- ◆ 5万トン鍛造ディスクでの特性予測の検証
- ◆ 予測モデル (塑性加工、組織・特性) の更なる高精度化
- ◆ 適用対象合金の拡大
- ◆ 実機への適用
- ◆ 予測技術から鍛造工程設計技術への進展



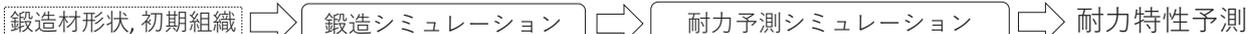
Alloy 720Liの鍛造および耐力予測シミュレーション

日立金属株式会社 石田俊樹、青木宙也

本研究の目的および役割

- Alloy720Liは超耐熱合金の中でもAl量、Ti量が多く、 γ 相の占める割合が高い
- 熱間加工の難度が高く、鍛造後の溶体化処理の冷却速度が材料特性に及ぼす影響が大きい。

高精度な解析技術の確立



研究成果

小型圧縮試験 (素材サイズ: 直径8 (mm), 高さ12 (mm))

- Alloy720Liの流動応力データを取得

試験条件

- 1100 (°C)加熱保持→冷却→圧縮
- 冷却速度: 0.1(°C/min)、1.0(°C/min)
- 圧縮温度: 950 (°C)~1100 (°C)

- 冷却速度高→ γ' 析出量多→流動応力大の傾向

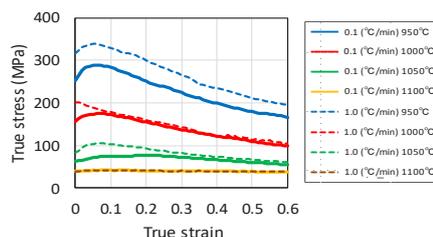


図1 $\dot{\epsilon} = 0.001$ (/sec)の流動応力

NIMS 1500トン鍛造シミュレーター (素材サイズ: 直径90 (mm), 高さ160 (mm))

- パンケーキ鍛造 → 溶体化、冷却、時効処理 → SEM観察 → γ' 測定
引張試験 → 0.2%耐力測定
- 0.2%耐力の特性を確保するためには、2次 γ' サイズの適切な微細化が必要

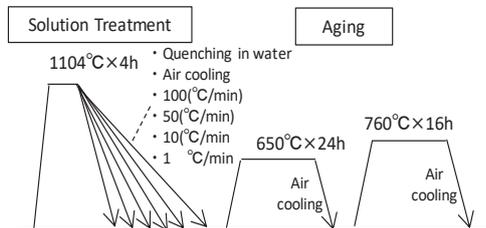


図2 熱処理条件

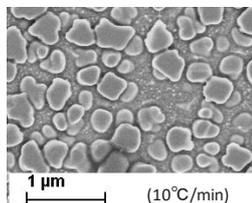


図3 2次 γ' のSEM像

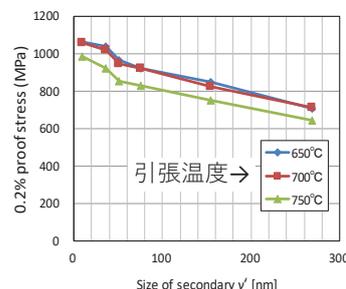


図4 2次 γ' サイズと0.2%耐力の関係

大型恒温鍛造 (素材サイズ: 製品サイズ想定 - 直径254 (mm), 高さ520 (mm))

- 恒温鍛造機による試作→溶体化、冷却、時効処理→引張試験 → 0.2%耐力測定
- 鍛造および組織予測シミュレーション結果と上記測定の0.2%耐力比較



図5 恒温鍛造試作後の素材

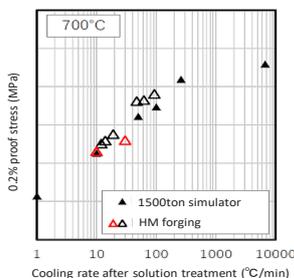


図6 実機試作品における0.2%耐力

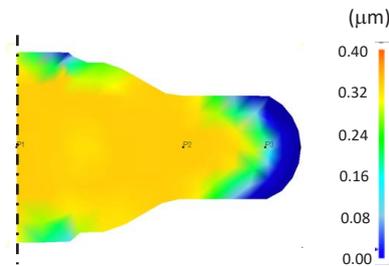


図7 鍛造シミュレーションにおける2次 γ' サイズ分布

今後の展望

本解析手法の利便性、解析精度の向上 / 類似鋼種への水平展開

所属・名前 日立金属株式会社 冶金研究所 ものづくりグループ 石田俊樹
メールアドレス toshiki.ishida.cq@hitachi-metals.com



Ni基超合金Alloy718の実鍛造試作結果

西本孝志 岡島琢磨 (大同特殊鋼)

機関の役割と目的

大同特殊鋼(株)はNi基超合金Alloy718のモデリングデータベース(以下DB)構築と鍛造シミュレーションへのモデリング技術適用実装化を支援する役割を担っている。

大型精密鍛造シミュレータを用いた鍛造・熱処理実験を行い共同参画の他機関と連携しながら各種データ収集と特性評価を行ってDB構築を行い、そのDBをモデリング技術の有限要素解析への実装を支援することを目的とする。

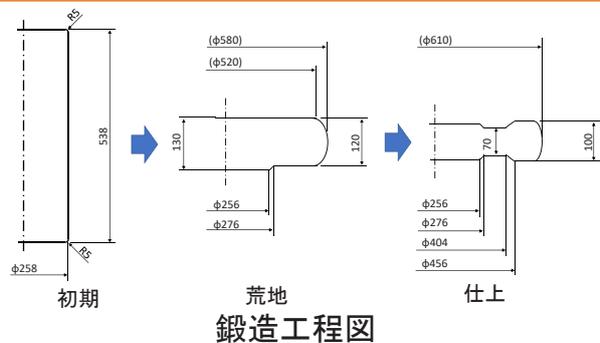
今年度は、本モデリング技術について結晶粒度の予測精度の実用性を検証するため、5万トンプレスを用いた実規模サイズの鍛造試作を実施した。

研究成果

実機試作条件(5万トンプレス)

鍛造条件

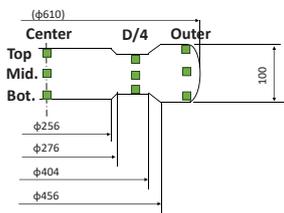
項目	条件
ワーク加熱温度	980°C, 1100°C
金型材料(硬さ)	DHA-WORLD(45HRC)
金型温度	450°C
ワーク表面処理	ガラス系粉末
平均ひずみ速度	0.05 sec ⁻¹



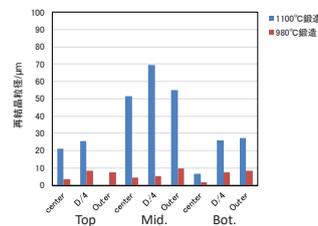
実機試作結(5万トンプレス)



鍛造後外観写真(1100°C鍛造)



組織観察位置(横断面)



鍛造温度	観察位置	1000°C鍛造			980°C鍛造		
		Center	D/4	Outer	Center	D/4	Outer
1100°C	Top						
	Mid						
	Bot.						

鍛造後の組織写真、再結晶粒径と再結晶分率測定結果

まとめ

- ★ 実鍛造試作により鍛造温度、部位による再結晶粒径、再結晶分率の変化を実部材で起こりえる範囲を網羅して再現した。
- ★ 1500t精密鍛造シミュレータを活用して構築したDBとモデリングの予測精度を検証する対象として十分な役割を果たしている。

今後の展望

1500t精密鍛造シミュレータで取得したDBを用いて結晶粒度予測精度±1以内の実証(名大連携)



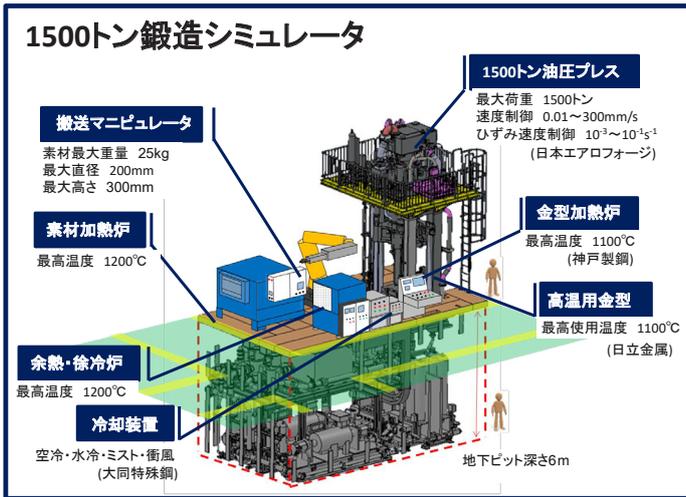
高精度恒温鍛造を可能にした1500トン鍛造シミュレータ

黒田秀治、本橋功会（物質・材料研究機構 鍛造プラットフォーム）

B21ユニット内での役割

1500トン鍛造シミュレータは塑性加工シミュレーションや組織・特性予測シミュレーションを高精度化するための強力なツールであり、新たな鍛造プロセスの技術開発を大きく後押しする。NIMS鍛造プラットフォームでは、1500トン鍛造シミュレータを操業し材料やプロセスの解析・開発に必要なデータを取得するための様々な鍛造試験を実施し、鍛造材と試験データの提供を行っている。

1500トン鍛造シミュレータ概要



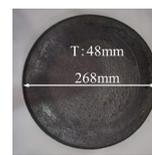
参画企業の技術・ノウハウを集約、NIMSで基盤技術を確立

●特徴

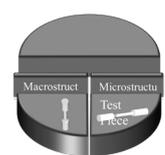
- 素材の加熱から鍛造、冷却までの鍛造プロセスをプログラム制御
- ひずみ速度の精緻な制御
- 高精度な温度制御下での恒温鍛造試験
- 鍛造後の広範な冷却速度制御
- 回転ねじり圧縮、振動圧縮などの付加機能
- 鍛造材が十分大きく、同じ部位の組織解析と力学特性評価が可能→正確な組織と特性の評価



鍛造素材例
Φ120×240H



鍛造材例
Φ268×48t



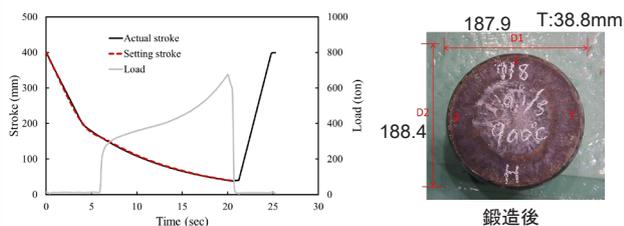
試験片の採取

1500トン鍛造シミュレータによる鍛造試験

●ひずみ速度制御圧縮試験

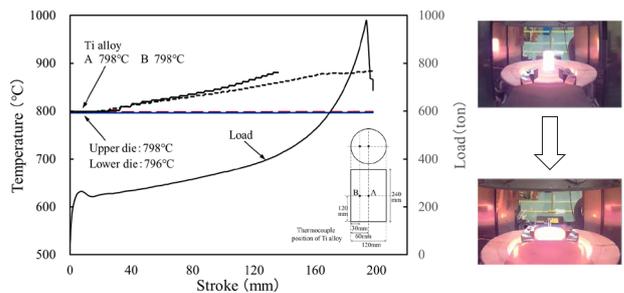
鍛造条件

- ・素材: Alloy718
- ・寸法: Φ90mm、160mmH
- ・素材温度: 900°C
- ・金型温度: 900°C
- ・ひずみ速度: $0.1 s^{-1}$
- ・圧縮率: 56%

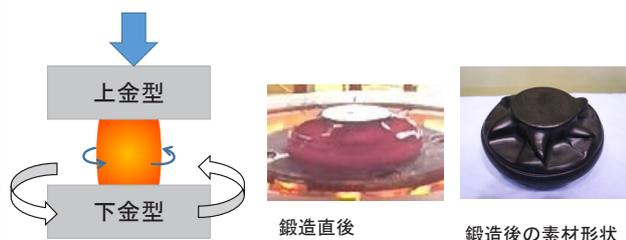


●恒温鍛造試験

目標温度: 素材および金型ともに800°C

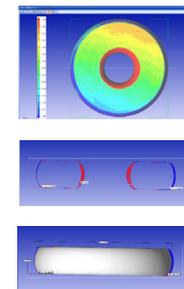


●ニアネットプロセス開発のための模擬鍛造



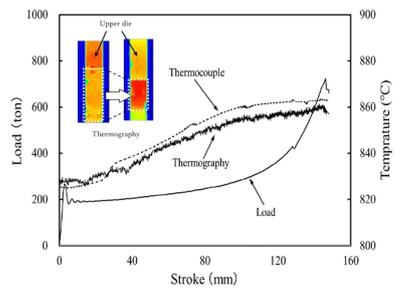
圧縮にねじりを付与することで特性向上+成形(ネットシェイプ)

●形状評価



比較照合(イメージ)

●鍛造時の素材测温



振動・ねじりモーションを付加した 革新鍛造プロセスの基礎技術開発

分担・役割

革新鍛造プロセスの基礎技術開発を担当している。実験室レベルの小型試験機・小型サーボプレスでの鍛造実験およびコンピュータシミュレーション解析を主体として、鍛造プロセス中の加工モーション制御(振動モーションおよびねじり(回転)モーション)により、10%以上の鍛造荷重の低減を実現するとともに、加工機構や加工現象の解明に取り組んでいる。

また小型試験機・小型サーボプレスで得られた知見の有効性について、Jフォージ(株)と連携して、1500 tonf鍛造シミュレータによる鍛造プロセスで加工モーション制御の効果を検証し、さらに5万tonf級プレスでの鍛造を想定した大型部材の鍛造プロセスへの展開を検討している。

振動モーション付加鍛造

- 評価・試験方法の考案(図2)(阪大, Jフォージ)
- 除荷率100%の振動付加により、熱間鍛造でのガラス潤滑の液体潤滑領域を約30%拡大(図3), 鍛造荷重を約5~10%低減(図4)(阪大)。

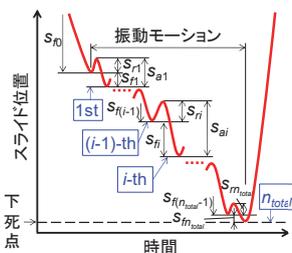


図1 振動モーション

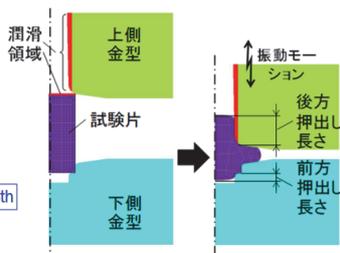


図2 振動効果評価鍛造試験

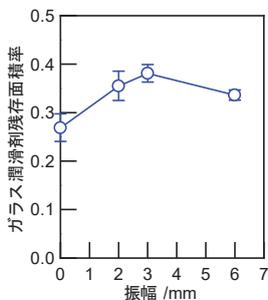


図3 振動熱間鍛造での潤滑領域

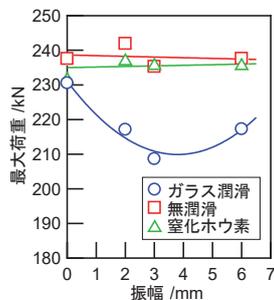


図4 振動熱間鍛造での鍛造荷重

主な外部公表

- R. Matsumoto et al.: Lubrication in hot forging with pulsed ram motion, *Key Eng. Mater.*, 767(2018), pp. 149-156.
- R. Matsumoto and H. Utsunomiya: Application of pulsed ram motion control to lubrication in hot/warm forging process, *Proc. 51st Int. Cold Forging Group Plenary Meeting (ICFG 2018)*, (2018), pp. 167-176.

ねじり(回転)モーション付加鍛造

- 小型ねじり(回転)鍛造試験装置の設計・製作(図5)(阪大)。
- 軸方向荷重の低減原理を力学理論に基づき解明(図6)(阪大)。
- ねじり振幅10°, ねじり速度/軸方向速度 30°/mmのねじり付加により軸方向荷重を, Alの冷間鍛造では約75%低減, Tiの熱間鍛造では約20%低減(図7)(阪大)。

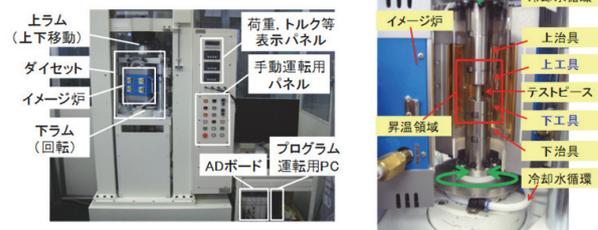


図5 設計・製作した小型ねじり鍛造試験装置

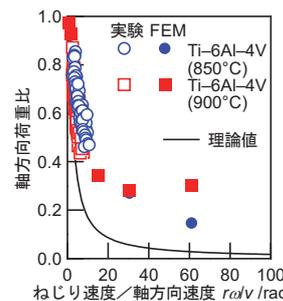


図6 ねじり鍛造での力学理論による軸方向荷重低減

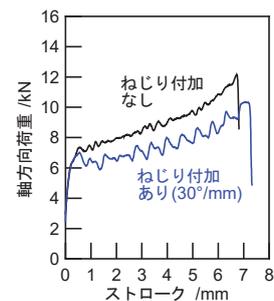


図7 ねじり熱間鍛造での軸方向荷重

主な外部公表

- R. Matsumoto et al.: Reduction in axial forging load by low-frequency torsional oscillation in cold upsetting, *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 93-1-4(2017), pp. 933-943.

今後の展望

- コンピュータシミュレーション解析の高精度化による振動・ねじり(回転)モーションの最適化
- ねじり(回転)モーション付加について、荷重低減以外の効果(ひずみ付与, 材料流動)の探索
- 実部材を想定した大型部材の鍛造プロセスへの展開



Ti-17合金のβ域における高温変形挙動とプロセス最適化

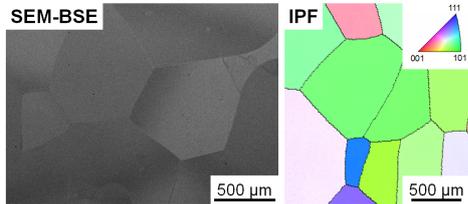
研究概要

高強度かつ破壊靱性に優れるニアβ型チタン合金であるTi-17合金は航空エンジンのファンや圧縮機用ディスクに使用されている。本合金の部材製造工程はα+β域およびβ域における熱間鍛造と溶体化・時効処理からなり、各工程における組織予測とプロセス最適化が必要である。本研究では、これまで報告のほとんどない鑄塊からピレットを製造する分塊鍛造を模擬したβ域における熱間圧縮試験を行い、プロセスマップを用いた最適加工条件の決定に取り組んだ。また、構成方程式による高温変形挙動のモデリングを行い、組織形成メカニズムについて検討した。

β域における高温変形挙動

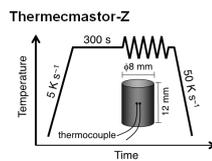
● 供試材

- 900°C/3hの条件にて真空焼鈍を行い、Ar冷却。
- 粗大な等軸β単相組織 (d = 811 μm) を作製。

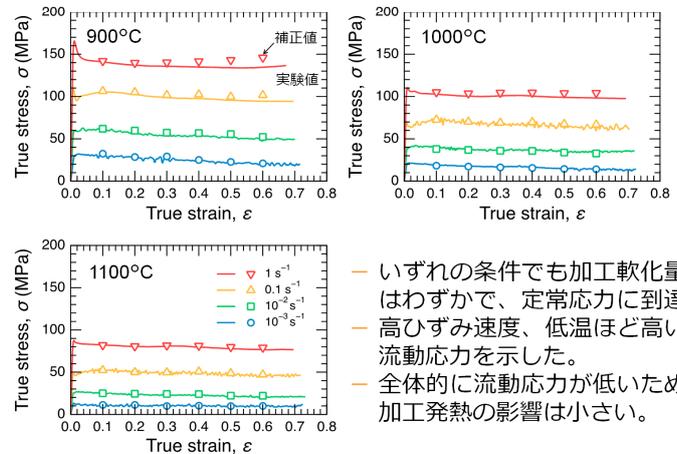


● 熱間圧縮試験

- 温度: 900–1100°C
- ひずみ速度: 10⁻³–1.0 s⁻¹
- 圧縮率: 50%
- 得られた流動応力に対して加工発熱補正を行った。



● 応力-ひずみ曲線



- いずれの条件でも加工軟化量はわずかで、定常応力に到達。
- 高ひずみ速度、低温ほど高い流動応力を示した。
- 全体的に流動応力が低いため、加工発熱の影響は小さい。

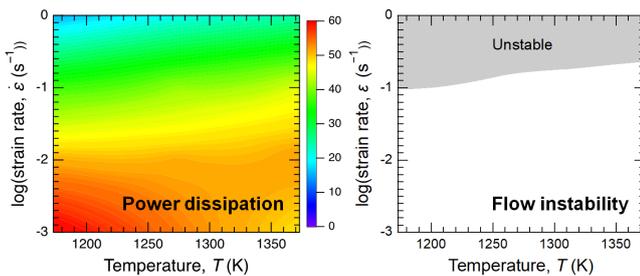
プロセスマップ

Power dissipation

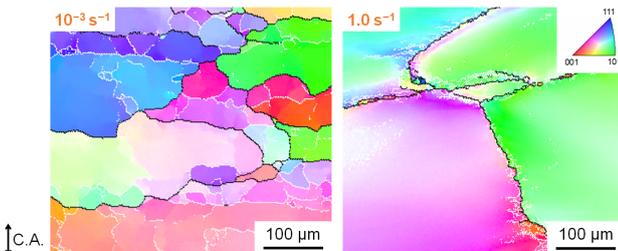
$$\eta(\dot{\epsilon}) = \frac{2m}{m+1} \dot{\epsilon} \text{ strain rate, } m \text{ strain rate sensitivity}$$

Flow instability

$$\zeta(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(m/1+m)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0$$



EBSDによる検証



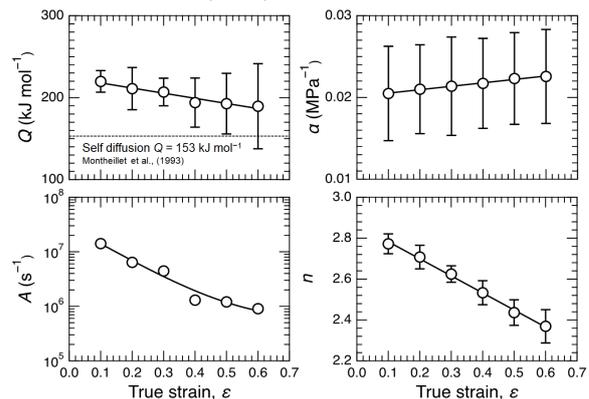
- エネルギー分散効率が高いほど動的回復が顕著。
- 塑性不安定は高ひずみ速度域のみに存在。
- 最適加工条件: βトランザス直上の低ひずみ速度条件。

構成方程式

Hyperbolic law

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

A, α constant, σ flow stress;
n stress exponent (= 1/m);
Q apparent activation energy;
R gas constant, T deformation temperature



- Hyperbolic lawを用いて流動応力を整理し、構成方程式を付加ひずみ量の関数として決定。
- 高温変形の活性化エネルギーは付加ひずみ量とともに減少し、自己拡散の活性化エネルギーの値に近付いた。

今後の展望

- 実験のスケールアップによる解析結果の検証と5万トンプレスへの適用。
- 特性を決定づけるβプロセスへの展開に向けた降温中の熱間圧縮試験の実施と組織・流動応力データベースの構築。



小型鍛造試験機と1500トン鍛造シミュレータによる塑性加工データベース構築

吉田 佳典 (岐阜大学 地域連携スマート金型技術研究センター)

Ti-WGでの役割

有限要素法を用いた熱間鍛造数値解析に必要な不可欠でありながら、これまで必ずしも詳細な検討が行われてこなかった解析条件の同定技術の構築と、それらを用いた組織・特性予測に取り組む。

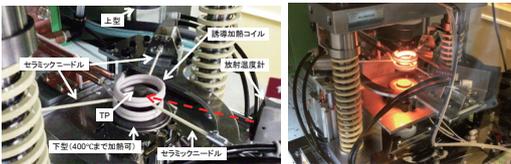
- (1) 熱間境界条件すなわち熱伝達係数および熱間摩擦係数のモデル検討および同定技術の開発ならびDB構築
- (2) 上記DBとTi材組織予測モジュールおよび特性予測モジュールとの統合

塑性加工WGでの役割

塑性加工WGを設置し、プロセス解析において材料によらない共通的に取り扱うべき要素技術について検討した。

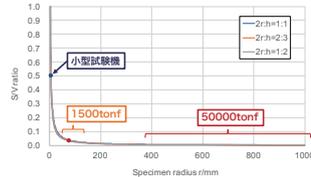
- (1) 熱間鍛造数値解析に必要な熱間流動応力同定手法の検討
- (2) 熱伝達係数および熱間摩擦係数のモデル構築と物性値同定技術の開発
- (3) 加工発熱予測モデル開発手法の検討

小型と大型：寸法効果の検討



$$\frac{S}{V} = \frac{1}{r} \left(\frac{1}{\alpha} + 2 \right)$$

$\phi 10 \times 15 \rightarrow S/V = 0.53$
 $\phi 12 \times 18 \rightarrow S/V = 0.44$
 $\phi 20 \times 180 \rightarrow S/V = 0.044$



1500 tonf シミュレータ

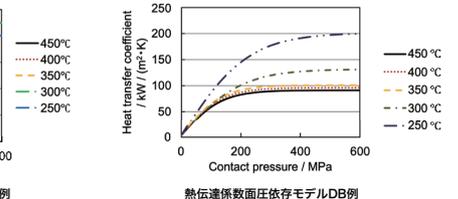
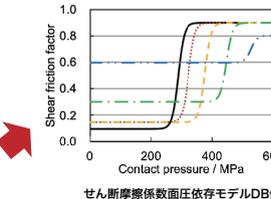
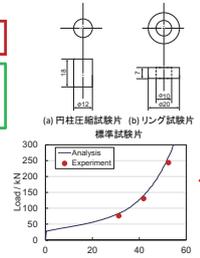
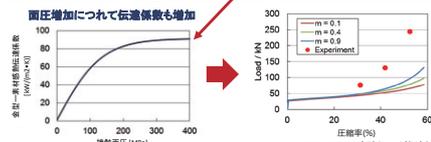
素材と金型を独立して温度制御→均熱後、速やかに圧縮
試験片の疑似空中加熱技術を構築し、材料温度・金型温度を独立かつ高精度に制御可能な小型熱間鍛造シミュレータを構築した。

円柱試験片半径rと、表面積Sと体積Vの比であるS/Vの関係を示す。試験片内部の熱は表面を介して金型および大気へ逃げるため、S/V比が大きいほど冷めやすい傾向にあることを表す。

小型試験機による熱伝達係数と摩擦係数モデルの構築

小型熱間鍛造シミュレータを活用した。境界条件同定法を開発した。またこれを利用して熱間境界条件DBの構築に着手した。

- ① 素材一次閉熱伝達係数の同定 (→空中加熱→空中冷却実験)
- ② 素材一金型閉熱伝達係数の同定 (→空中加熱→金型接触冷却実験: 面圧0)
- ③ 素材一金型閉熱伝達係数および摩擦定数の面圧依存モデルの構築



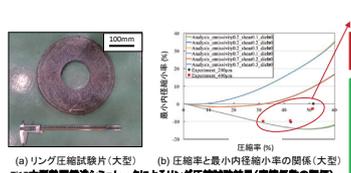
せん断摩擦係数面圧依存モデルDB例

熱伝達係数面圧依存モデルDB例

せん断摩擦係数が素材の初期温度および金型との接触面圧に依存して変化する面圧依存モデルを検討し、モデル式中の材料物性値を小型試験によって同定する手法を構築した。

リング圧縮式摩擦試験で得られる荷重-圧縮率曲線と最小内径縮小率-圧縮率曲線が、解析結果と一致するようにモデルングを推進した。

大型シミュレータによる熱伝達係数と摩擦係数DBの構築



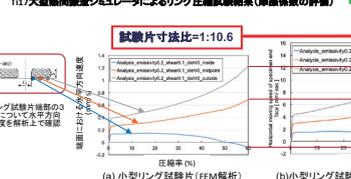
実験結果: 急激な摩擦力の増加

小型シミュレータで構築した材料試験方法を大型シミュレータに適用し、相似則の破れの確認ならびに手法の改善を検討した。

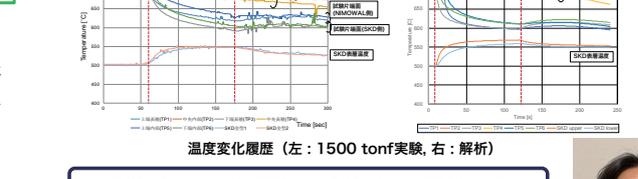
得られた知見・課題

- ① 小型試験との比較による寸法効果 (相違) の発現を確認。
- ② 圧縮試験進行に伴う摩擦係数の変化を確認 (非定常)。
- ③ 摺動速度・潤滑剤温度が摩擦に及ぼす影響を考慮すべき。
- ④ これらを考慮した材料試験の実施とDB構築が必要。
- ⑤ 今後、素材温度、金型温度を種々変化させてDB取得。

外形120 mm、高さ240 mmのTi17製の円柱試験片に内部6箇所に熱電対を埋め込み、1500 tonfシミュレータによって軽圧下を加えて面圧を生じさせ、素材内および金型表面温度 (表層から5.5および10.5 mm) の履歴を計測した。金型は平行圧縮とし、上型に日立金属製NIMONALおよび下型にSKD熱間ダイス鋼を用い、後者については表層に熱電対を埋め込んだ。加圧による熱伝達係数の上昇ならびに素材表面積拡大による潤滑剤の減少を想定した摩擦係数モデルを構築して解析を行った結果、良い一致を得た。



大気への熱伝達を考慮し、小型および大型リング圧縮のFEM解析を実施
摺動速度→相似則の破れを確認
実験における摺動速度、金型温度を適切に設定した小型・大型リング圧縮試験の実施を計画



温度変化履歴 (左: 1500 tonf実験, 右: 解析)

せん断摩擦係数の表面積拡大率依存モデル、熱伝達係数の面圧依存モデルを構築した。



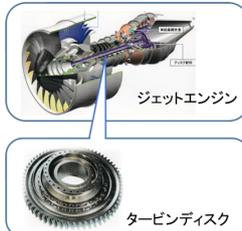
航空機エンジン用Ti-17合金鍛造材の組織予測・材質予測

■ B21 松本洋明 (香川大学 創造工学部)

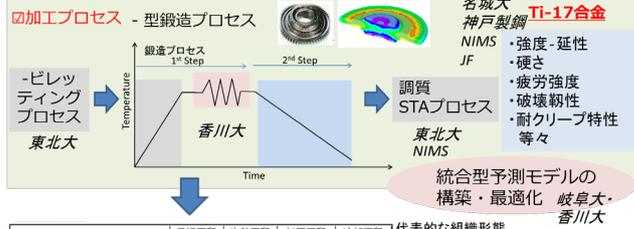
はじめに

Ti-17合金: (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo) wt%

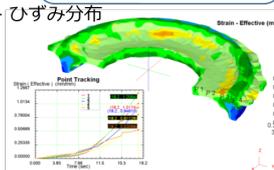
- ・疲労強度、耐クリープ特性のバランスに優れる
- ・中間温度での強度・靱性に優れる
- ・ファン、コンプレッサーディスクに応用



B21-Ti WG役割分担



*製造加工(鍛造)過程での素材内部の特性(ひずみ、温度、ひずみ速度等)の不均質性
→組織の不均質性、材質の不均質性
☑組織形成予測・材質予測技術の進展



	昇温工程	均熱工程	加工工程	冷却工程	代表的な組織形態
回復モデル					
再結晶・粒成長モデル					
転位硬化モデル					
動的再結晶モデル(不連続・連続)					
静的回復モデル					
変態モデル					
抽出モデル					

*組織形成過程: 組織形成 $M-f, T, d, \dot{\epsilon}$
*加工特性(クラックの発生、塑性安定性) → Zieglerモデル(塑性不安定因子パラメータ)

本研究の目的

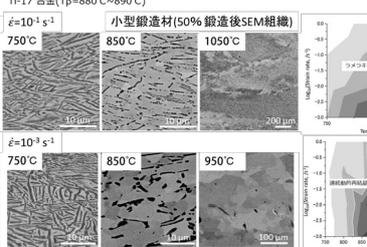
高精度なTi-17合金の加工過程の組織・材質予測モデルの構築を目指して

- 小型試験片鍛造 → Ti-17合金の型鍛造プロセスにおける組織形成モデルの構築
- 1500℃鍛造シミュレータ材のデータベース
- 材質データ(硬さ・強度特性)

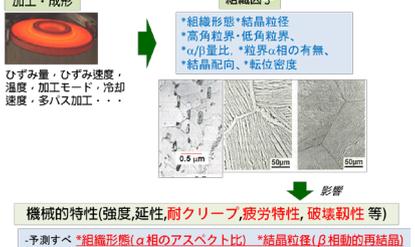


- 組織予測・材質予測モデルの構築・修正・最適化
- 鍛造過程 組織予測モデル
- 冷却過程 相変態・組織変化モデル
- 鍛造材 材質予測(硬さ・靱性)

実験結果(熱間加工(鍛造)と組織変化)

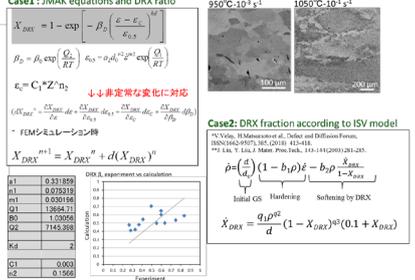


組織因子と機械的特性

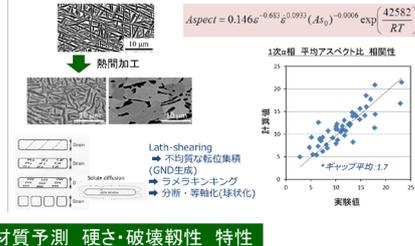


構成モデルの構築とシミュレーションへの展開

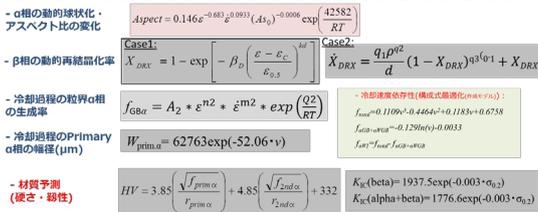
β相の動的再結晶



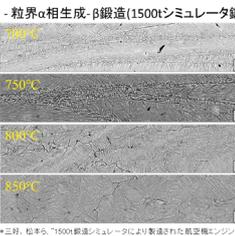
α相の動的球状化・アスペクト比の変化



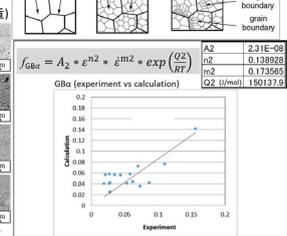
組織予測・材質予測モデルの構築・修正・最適化(一例)



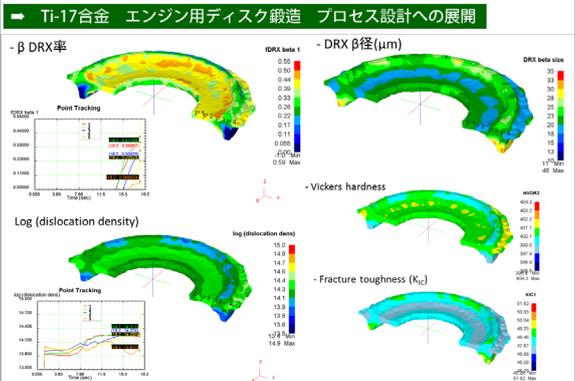
粒界α相(冷却過程)の生成



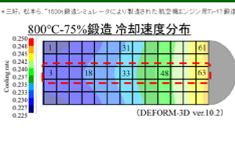
材質予測 硬さ・破壊靱性 特性



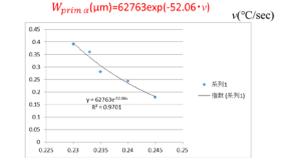
現在の取り組み・展開



Primary α相(冷却過程)の幅径



β鍛造-冷却



ある程度良い相関性を示すモデルの作成可(トップダウン式)(1st モジュール完成)
今後: より物理冶金現象を考慮した深化とより広範囲なケース(様々な出発組織に対応)に展開できる統一的構成モデルの構築が必要



Ti17の鍛造・時効材の組織評価と組織予測モデル構築

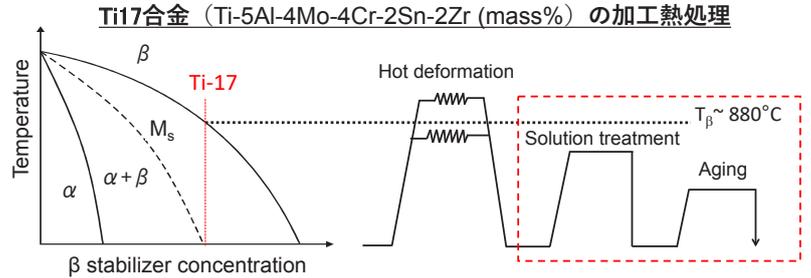
東北大学金属材料研究所 金属組織制御学研究部門 古原 忠、宮本吾郎、Elango Chandiran

(研究担当項目)

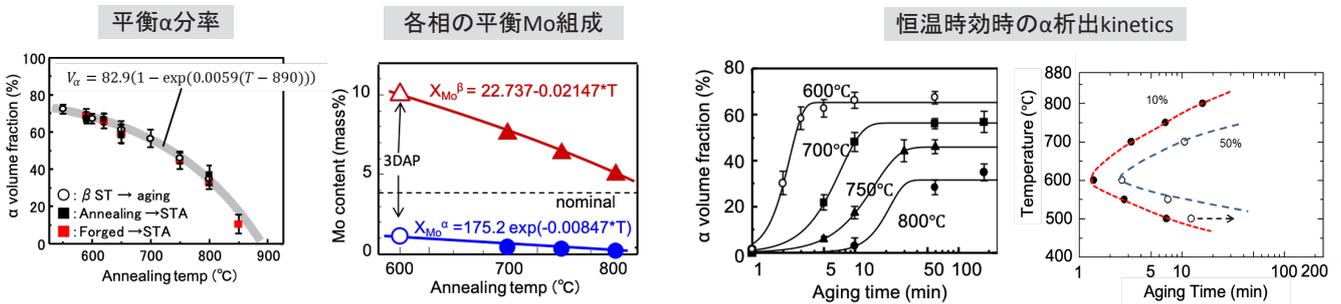
- Ti17合金鍛造材における溶体化後時効α析出組織の定量評価・DB作成
- 時効α析出組織予測モデルの構築



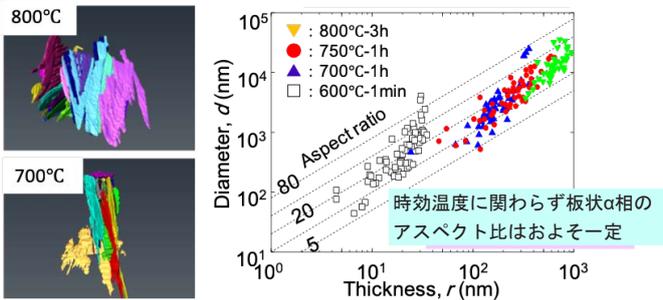
鍛造シミュレータを用いたチタン合金の組織・特性制御技術の構築に貢献。



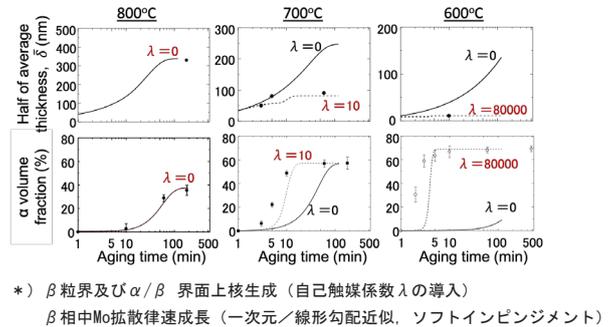
溶体化時効における析出組織形成の定量評価および析出モデリング



三次元組織解析法確立とα形態定量化

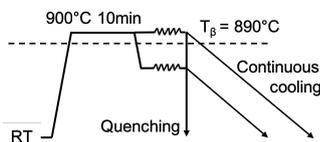


時効α析出モデリング

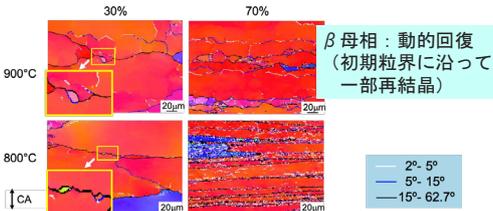


モデル構築用の基礎物理データを取得して、定式化 → 核生成/成長を考慮した析出モジュール構築を達成

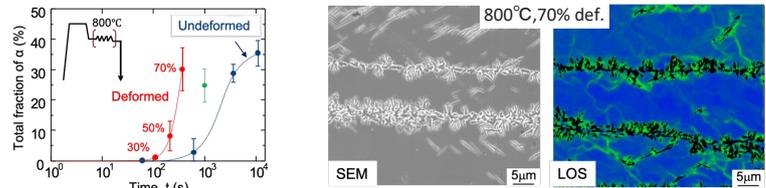
鍛造材の溶体化時効析出組織の定量評価



β 相の熱間変形組織



熱間加工後のPrimary α組織形成



- 二相域熱間加工によるα相析出の促進
- 高歪み加工時のWα析出の顕著な増加

現在Secondary α析出も含めてモデリングへの反映を検討中

所属・名前 東北大学金属材料研究所 金属組織制御学研究部門 古原 忠
代表者のメールアドレス furuhara@imr.tohoku.ac.jp



Ti合金鍛造熱処理材の組織形成と引張特性

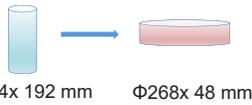
NIMS 御手洗容子、黒田秀治、本橋功会、村上秀之、香川大 松本洋明、東北大 宮本吾郎、岐阜大 吉田佳典、神戸製鋼 逸見義男

研究概要

Ti17合金について、1500t 鍛造熱処理材の組織観察を行い、組織因子（ β 結晶粒径、1次 α 相の体積率・長さ・幅、2次 α 相の体積率、粒界 α 相の体積率、形状）をデータベース化した。また、室温、450、600℃における引張試験を行い、引張強度、伸びについて、上記組織因子との相関を調べ、引張強度、伸びの予測モデルを構築した。

実験方法

- Ti17: Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo, wt%
- ビレットから切り出し: $\Phi 134 \times 192$ mm素材



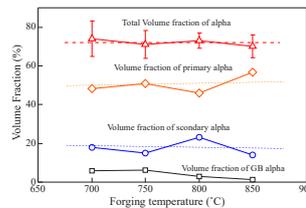
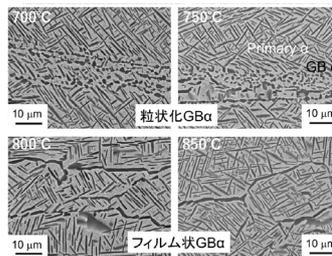
- 熱処理材のD/4位置から引張試験片 $\Phi 6 \times 25$ mm, $\Phi 4 \times 16$ mm 取得,
- RT, 450, 600℃で引張試験
- SEMIによる組織観察
- 組織因子解析
1次 α 、GB α の体積率、サイズ: EBSD
2次 α 体積率: X線回折

鍛造熱処理条件

熱処理条件	ST無	750°CST	800°CST	850°CST
鍛造温度		620°C	620°C	620°C
700°C			○	
750°C			○	
800°C	○	○	○	○
850°C			○	

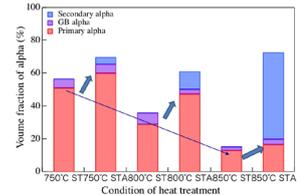
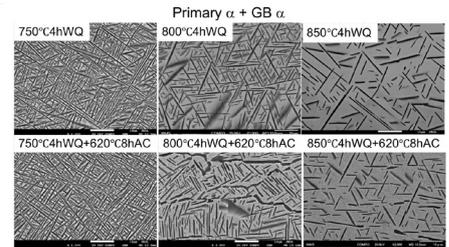
鍛造熱処理条件による組織の違い

鍛造温度による影響



- 鍛造温度で α 総量は変わらない。
- Primary α 、Secondary α の体積率は鍛造温度に関わらず熱処理温度で決まる。
- GB α の体積率は鍛造温度が高いと低い傾向にある。

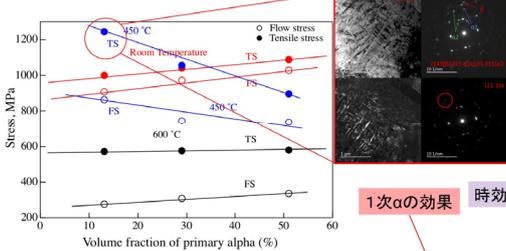
熱処理温度による影響



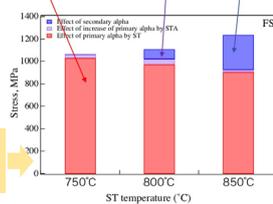
- Primary α はST温度が上昇すると減少
- Primary α はAgingでも増加。
- GB α はSTAで大きな変化はない。
- Secondary α はPrimary α が少ないほど増加

引張特性と組織因子の相関

1次 α のみによる影響

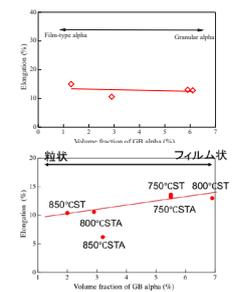
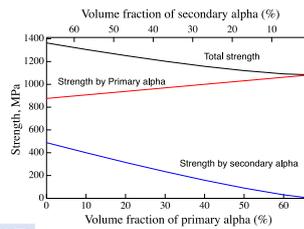


- 強度は1次 α の体積率に比例
- 450℃では試験温度で微細な α 相の析出を確認
- 溶体化温度上昇により、1次 α 量が減少→時効により2次 α 量が増加。
- これにより強度が上昇

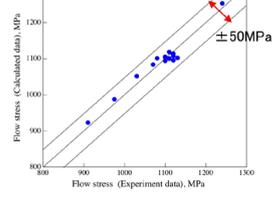


組織因子から強度を計算することにより、鍛造部材の力学特性予測を可能にする。

各組織因子による強度予測モデル構築 伸びに対する組織因子の影響



- 溶体化温度が上がると、伸びは減少。
- 溶体化温度が鍛造温度より高いと粒界 α は溶解・分断。
- 粒界 α がフィルム状に粒界を覆っている条件下で延性良い。
- 2次 α は延性を下げる。



予測と実測値の相関

まとめ

1500t鍛造シミュレータを用いて鍛造熱処理材の組織観察、組織因子解析を行った。また、組織因子と引張強度の相関から引張強度予測式を構築し、50MPa以下のばらつきで強度の予測が可能となった。



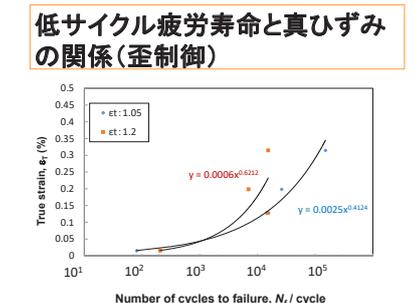
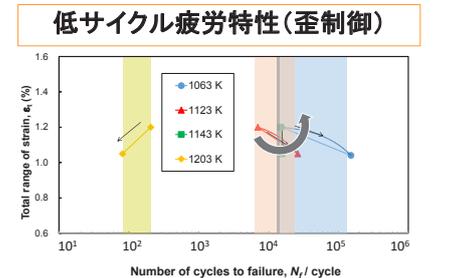
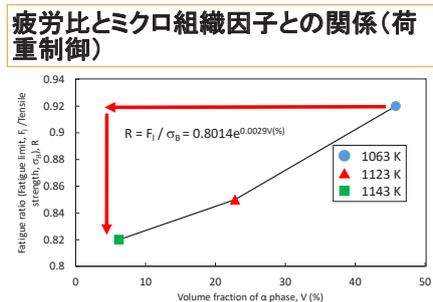
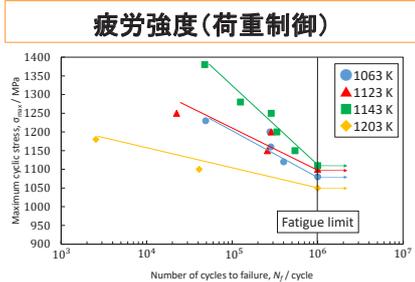
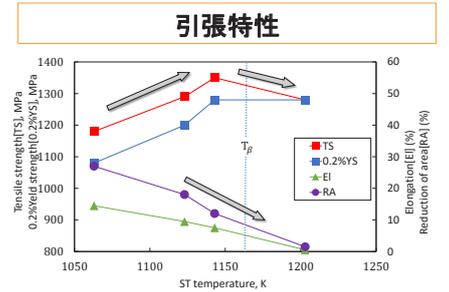
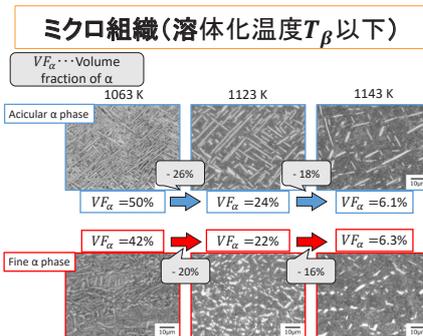
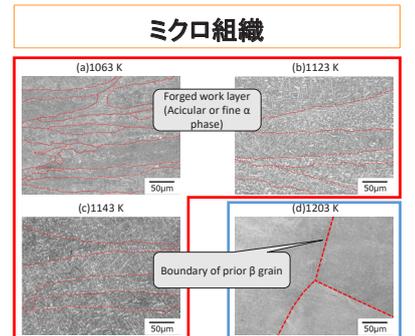
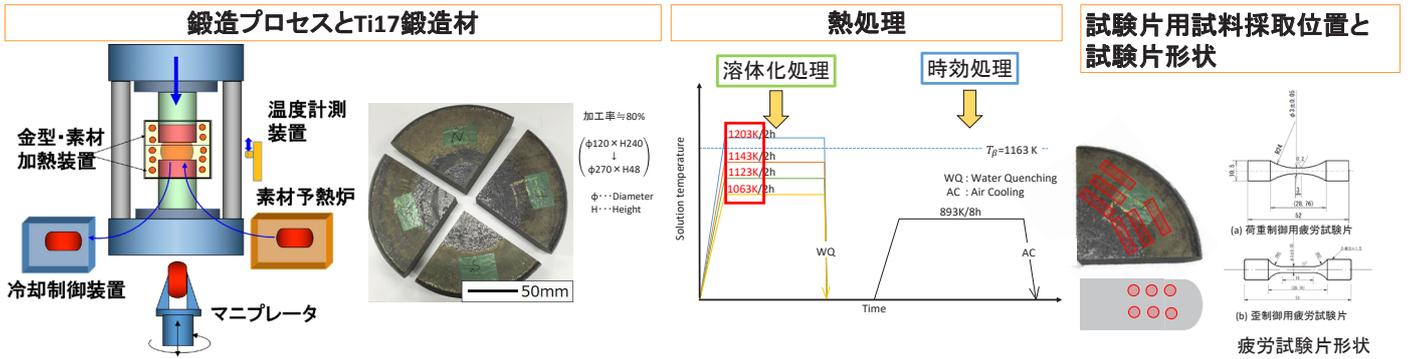
Ti-17のインテリジェント鍛造組織及び溶体化時効組織予測技術と機械的及び疲労特性

■ユニット 新家光雄（代表）、赤堀俊和（名城大学）

事業目的・研究概要

航空エンジン用ディスク等の大型部材として使用されるチタンやニッケル合金は高温強度やクリープ特性に優れる一方、鍛造条件で変化する特性制御が難しく、要求性能を出すために長期間の試行期間が必要である。本プロジェクトでは、チタンやニッケル合金を鍛造する能力がある1500トン鍛造シミュレータを開発し、製造現場では取得が難しい鍛造プロセス中の塑性加工データを取得することにより、高精度な塑性加工モデリングと鍛造材の組織予測・モデリングを行う。本ユニットでは、Ti-17合金鍛造材のマイクロ組織と低サイクル歪制御および荷重制御疲労特性との関係の明確化および両者を関連付けるモデルの構築を行うことを目的としている。疲労強度および疲労寿命とマイクロ組織因子との関係をモデル化する。最終的に、疲労寿命（疲労き裂発生および伝播寿命）を改善するためのマイクロ組織を構築する。

種々の溶体化処理を施したTi-17時効材のマイクロ組織と疲労寿命の関係



役割に対する研究成果

- 針状α相および微細α相を含めた体積率と疲労比（ここで疲労比とは、疲労強度を引張強度で除した値である）の関係において、ST温度が上昇するとα相の体積率が減少し、それに伴い疲労比が減少していることがわかった。
- 疲労比とα相の体積率の関係式として、実験式を得た。
- α相の体積率をマイクロ組織より測定することで、疲労限および引張強度を予測可能であることが見出された。
- 低サイクル疲労寿命は真ひずみ（延性）に強い相関性があると示唆された。

今後の展望

種々の条件下にて鍛造プロセス後、溶体化時効処理を施したTi17の疲労特性とマイクロ組織との関係をモデル化することを主に担当し、その結果を各プロセスでのマイクロ組織変化に対応する疲労特性および強度特性変化を上記グループにフィードバックさせることにより、高疲労寿命を達成するためのプロセス制御によるマイクロ組織の最適化を促進させる。



所属・名前 名城大学理工学部・新家光雄
 代表者のメールアドレス niinomi@imr.tohoku.ac.jp

逆解析によるNi基耐熱合金の流動応力測定とデータベース化

■ユニット (A1) 柳田明 (東京電機大), 堀越理子 (東京電機大), 共同研究者 柳本潤(東京大学)

解析精度を確保するためには、温度と変形速度(ひずみ速度)をパラメータとした高精度な流動応力式が必要である。そのためには、熱間圧縮試験での荷重曲線データの取得し、荷重曲線をもとにした逆解析による流動応力曲線の同定とデータベース化を行わねばならない。東京大学に設置されている高ひずみ速度付与試験設備(15トン)(以下小型試験機)によって、ニッケル基耐熱合金(Alloy718, 720Li)の熱間圧縮試験を行いデータベースを構築する。

事業目的・研究概要

Ni基合金は高い降伏応力を示した後に加工硬化し、さらに急激に加工軟化をするなど特異な流動応力曲線となる。それらに適用するために、これまでに提案した応力構成式に変更を加えた。また逆解析には、誘導加熱を再現するために熱物性だけでなく、磁気特性、電気抵抗が必要となり、これらを新規に測定するとともに、小型試験機における摩擦係数や工具と試験片の熱伝達係数についても検討を行った。上記をもとに(Alloy718, 720Li)の広範囲な温度、ひずみ速度における流動応力を測定しデータベース化した。また、均熱加熱を実現するために加熱補助金型による試験法を考案した。温度、変形に不均一性があっても5%程度の範囲で逆解析により真の値に近い結果が得られていることが確認された。

流動応力の逆解析(解析荷重と実験荷重が一致するように応力式パラメータを同定)

変形-温度-磁場-連成解析 試験片サイズ H=12mm, D=8mm

解析対象 1/4領域

熱伝達係数定

摩擦係数

変形解析 温度解析 磁場解析

解析に用いた要素分割と物性値

熱伝導率、比熱、密度: 温度解析
電気伝導率、透磁率: 磁場解析

5変数モデルへの変更

応力構成式に ϵ_0 を導入

$$\bar{\sigma} = F_1 (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (\bar{\epsilon} \leq \epsilon_c)$$

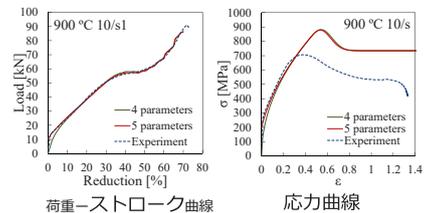
$$\bar{\sigma} = F_2 \exp[a(\bar{\epsilon} - \epsilon_{max})^2] + F_3 \quad (\bar{\epsilon} \geq \epsilon_c)$$

5パラメータ $F_1, n, \epsilon_c, \epsilon_{max}, \epsilon_0$

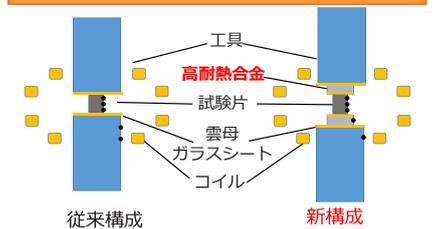
流動応力

加工硬化
加工硬化+動的回復
加工硬化+動的回復+動的再結晶

真ひずみ



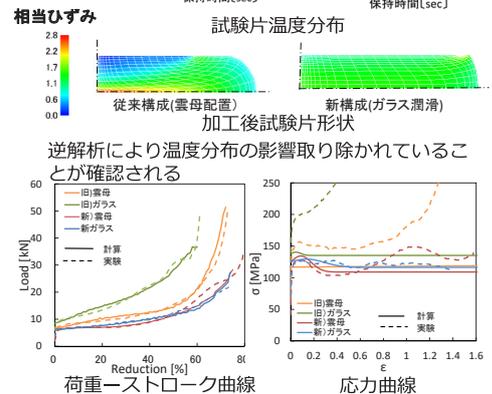
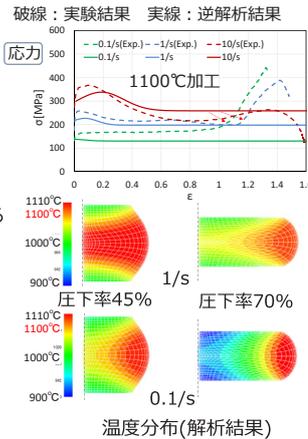
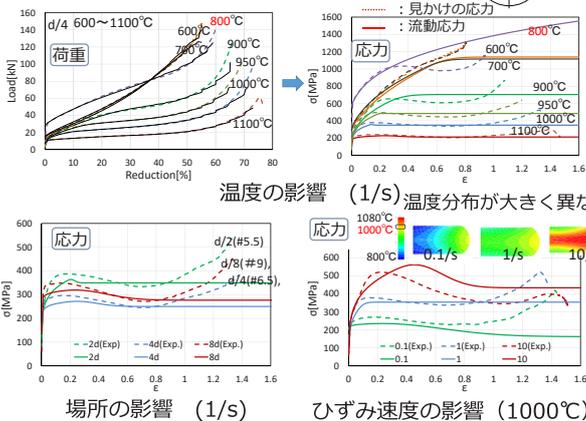
均熱試験



取得データの一例(従来構成)

718合金 ひずみ速度 0.1, 1, 10/s ピレット切り出し位置 d/4
温度 900, 1000, 1100°C (粒度)

720Li合金 ひずみ速度 0.1, 1, 10/s
ST処理 温度 900, 1000, 1050, 1100°C
1104°C 4h ピレット切り出し位置: d/4のみ



出口戦略・将来展開・応用分野等

- > 析出物、粒径を考慮した流動応力の定式化
- > 変形-組織モデルの強連成化
- > 熱間圧縮試験の規格化
- > プロジェクト対象外の材料への展開
- > データ同化による応力のパラメータ同定

目標達成のための課題

- > 補助金型による均熱試験の安定化
- > 同一試験条件でのデータのバラツキの低減
- > 変形-組織の強連成パラメータによる流動応力の逆解析モデルの構築



Ni基超合金718と720Liのミクロ組織形成予測

東北大学大学院工学研究科 及川勝成、上島伸文、Ruan Jing Jing、Wen Dongxu

B21の中での役割

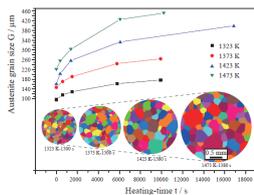
東北大では718、720Li合金の組織予測モデルの構築を担当した。B21ユニット全体の中での役割としては、東大で構築された流動応力予測モデルと、それを利用した有限要素法解析から得られる温度・ひずみ履歴を受け取り、組織予測を行うモジュールを構築した。得られたデータはNIMSで構築された強度予測モジュールへ受け渡され、特性予測に活用される。

具体的内容としては、鍛造材の組織DBの構築、粒成長モデル、再結晶モデルのパラメータ取得、析出物予測モデルの構築を担当した。

組織予測モデル・DB構築

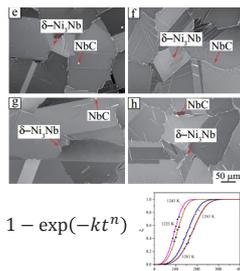
718合金

粒成長モデル



$$D_1^m - D_0^m = kt$$

δ相析出モデル



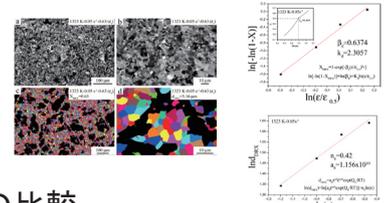
J. Alloys Compd. 737 (2018) 83

動的再結晶パラメータの決定

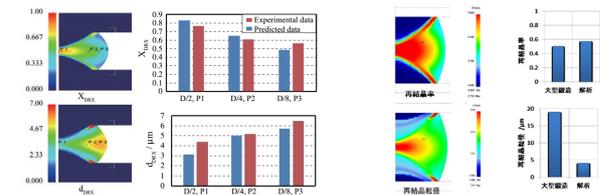
$$X_{DRX} = 1 - \exp\left[-\beta_d \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}}\right)^{k_d}\right]$$

$$\epsilon_{0.5} = a_5 \epsilon^{m_5} \exp\left(\frac{Q_5}{RT}\right)$$

$$d_{DRX} = a_8 \epsilon^{n_8} \dot{\epsilon}^{m_8} \exp\left(\frac{Q_8}{RT}\right)$$



小型・1500t鍛造材との比較

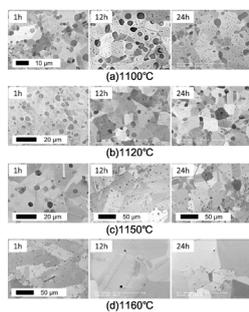


- ・小型鍛造材はほぼ予測可
- ・1500tでの差は静的再結晶や初期粒径依存性を取ることで対応

720Li合金

γ'相の析出挙動

観察結果

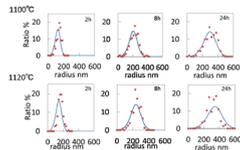


KWNモデルによる予測

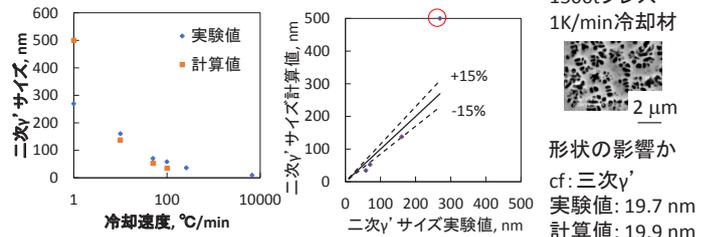
$$J = Z\beta^* N_0 \exp\left(-\frac{4G^*}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D}{r} \frac{c^m - c^i(r)}{c^p - c^i(r)}$$

$$c^i(r) = c^i(\infty) \exp\left(\frac{2\gamma V_a^p}{rkT}\right)$$



計算結果 (γ=0.15 J/m²)



γ' サイズ分布を予測可能なモデルを構築した

今後の展望

- ・5万トプレスへ適用し718、720Li合金の組織予測パラメータの高精度化
- ・他合金への展開

所属・名前 東北大学大学院工学研究科 金属フロンティア工学専攻 及川勝成
 代表者のメールアドレス k-oikawa@material.tohoku.ac.jp



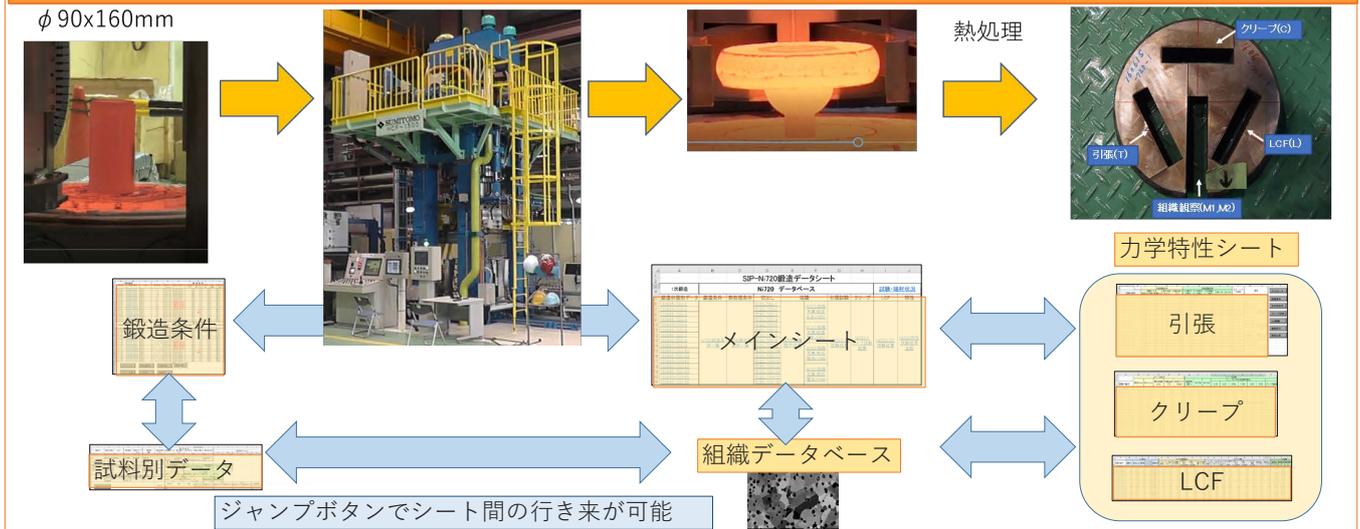
Ni鍛造合金のデータベース作成

NIMS 村上秀之、荒木大輔、黒田秀治、本橋功会、Sun Fei、 Tsao Te-Kang

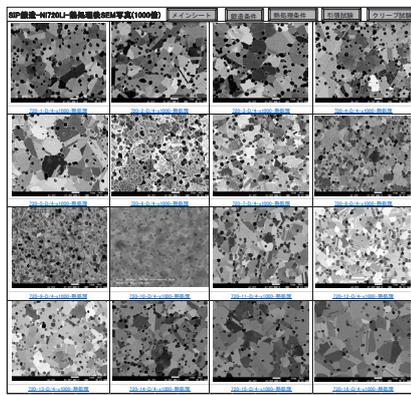
研究概要

1500t 鍛造シミュレータを用いて行ったNi基合金 (Alloy718, 720) について鍛造条件、組織、力学特性のデータを簡単に参照できるようなデータシートを構築、また、鍛造後の組織解析を進めることによりプロセス⇔組織⇔特性相関を検証するための基盤とした。

データシート構築の流れ

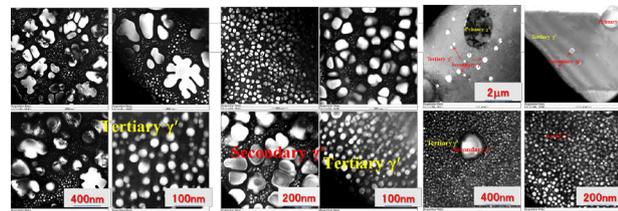


組織データベースと力学特性

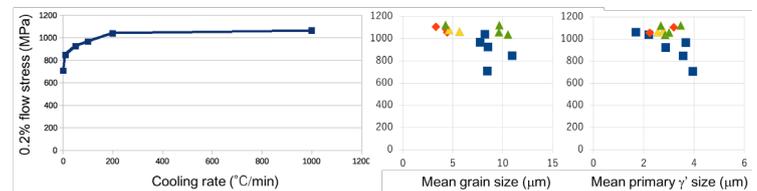


組織データベース (SEM)

- > Alloy720: 結晶粒径、1次、2次 γ' の粒径と体積率をSEMで解析
- > 3次 γ' はTEMIによる解析
- > データシートに格納、各パラメータと力学特性との相関を簡単にグラフ化



組織データベース (TEM)



熱処理後の冷却速度と引張強度の相関

組織因子と引張強度の相関

- > 1次熱処理後の冷却速度と引張強度は正の相関
- > 結晶粒径と強度の相関は観察できない、
- > 1次 γ' 粒径、(2次 γ' 粒径)が強度因子に影響を及ぼしている
- > 上記の様なグラフが鍛造データシートから簡単に得られる

まとめ及び今後の展開

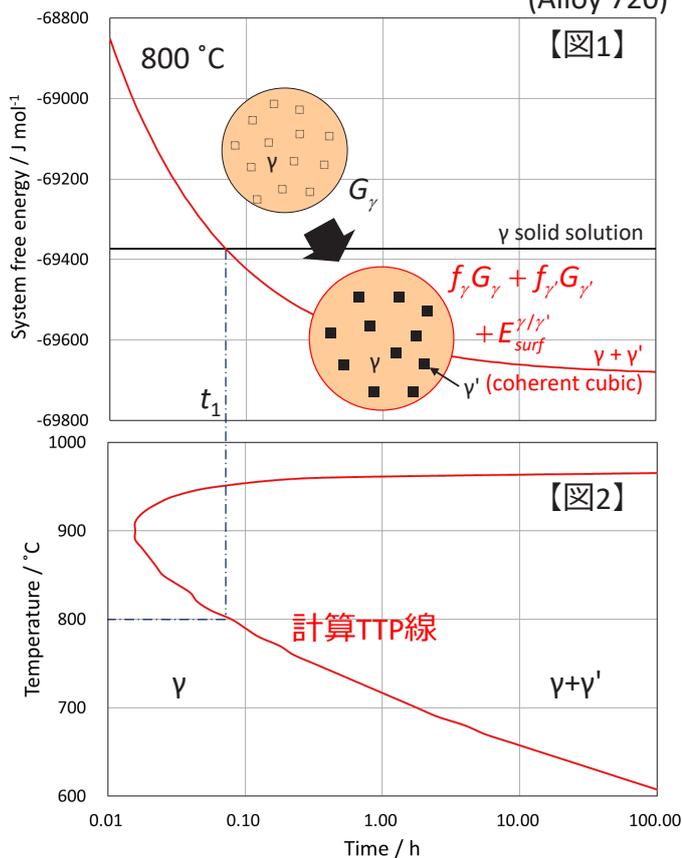
1500t鍛造シミュレータにおけるNi合金鍛造データシートを構築、鍛造熱処理条件と組織特性との相関を簡単に参照できるようにした。得られた組織情報をモデリンググループに提供、モデルの高精度化への指針として利用。今後、得られたデータベースの一部をD領域へ提供→汎用データベースへの展開



組織自由エネルギーを用いた ニッケル合金の析出遷移過程予測

【緒言】 耐熱材料の評価や開発には、高温での内部組織の形成・遷移過程を知ることが重要である。本研究では、多元系の実用ニッケル耐熱合金の広範囲な組成・温度・時間における複雑な析出・遷移過程を、必要最小限の入力パラメータとエネルギー論（および簡易な速度論）で予測する手法を提案する。

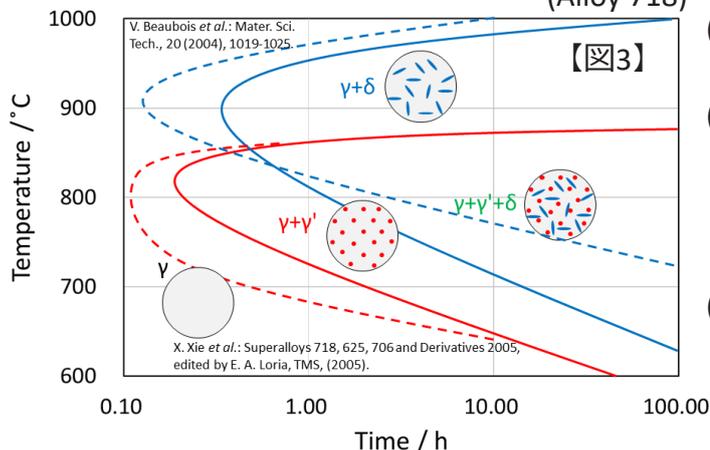
Ni-0.009C-16.5Cr-1.25W-3.0Mo-14.5Co-2.55Al-5.0Ti
(Alloy 720)



【計算方法】

- ① γ 相過飽和固溶体から平衡相の γ' 相が析出する場合を計算する。
- ② γ 母相と γ' 析出相の二相共存状態にある系全体のエネルギーを、各相の化学的自由エネルギー G_i と体積分率 f_i 、および界面エネルギー E_{surf} の和で表す。
- ③ G_i と E_{surf} は個別に評価するのではなく、和が最小になるように、両者の変数である二相の組成をNewton-Raphson法により最適化する。
- ④ 二相共存のエネルギー和を、時間（ \propto 拡散距離または析出粒子サイズ）を変化させて計算し（図1赤線）、 β 過飽和固溶体のエネルギーよりも低くなる時点（図1の t_1 ）を析出開始時間とする。
- ⑤ 温度を変えて同じ計算を行い、 t_1 の軌跡から析出開始線が予測できる。
(図2は実用ニッケル合金Alloy 720の γ' 相析出開始線を予測した結果。使用したパラメータは8種。)

Fe-0.025C-52.5Ni-19.0Cr-3.0Mo-0.5Al-0.9Ti-5.1Nb
(Alloy 718)



【長所】

- (1) エネルギーの加減のみの比較的簡単な計算で予測できる。
- (2) 長時間、かつより複雑な析出現象にも応用できる。
(図3は実用ニッケル合金Alloy 718の γ' 相(赤点線)と δ 相(青点線)の析出を予測した例。実線は実験により求めた析出開始線。)
- (3) 新規開発材料の添加元素や組成のスクリーニングに活用したい。



所属・名前 NIMS 構造材料研究拠点 耐熱材料設計グループ 戸田 佳明
代表者のメールアドレス TODA.Yoshiaki@nims.go.jp

タービンディスク用Ni基鍛造超合金における特性予測プログラムの開発

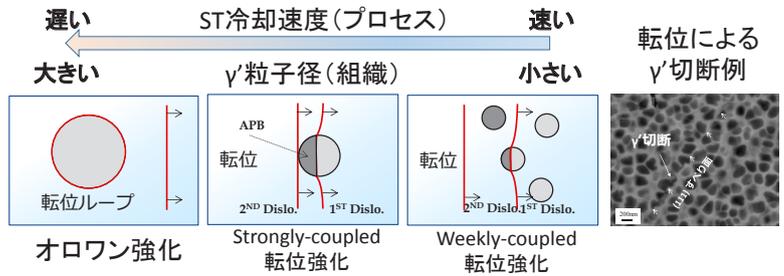
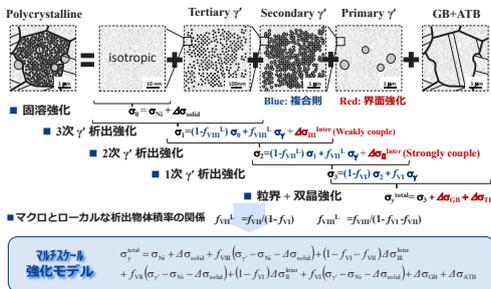
■ 研究分担者 長田俊郎 (物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 超耐熱材料グループ)

1500トンの大型精密鍛造シミュレータの導入により、これまで困難であったプロセス-組織-特性データのひも付けが可能となった。NIMSでは様々なプロセスにより形成される組織をインプットデータとし、0.2%耐力 (UTS 及びクリープ破断寿命) を高精度に予測可能な超合金特性予測プログラムの開発に着手している。特性予測が可能となればエンジンメーカーの要求に応えるために必要な組織、更にはプロセスの最適化にかかる試行錯誤期間を大幅に短縮できると期待できる。

事業目的・研究概要

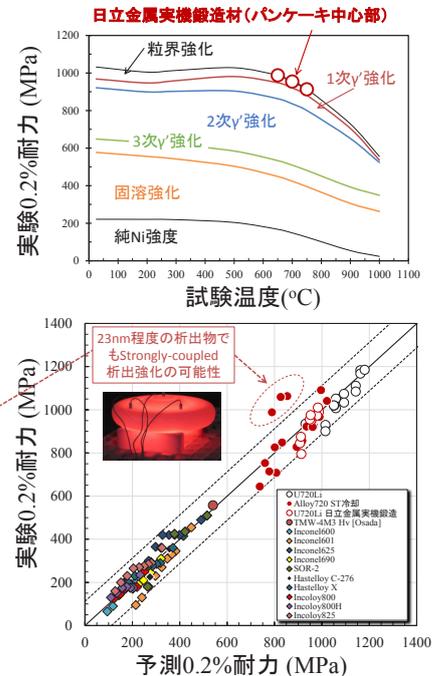
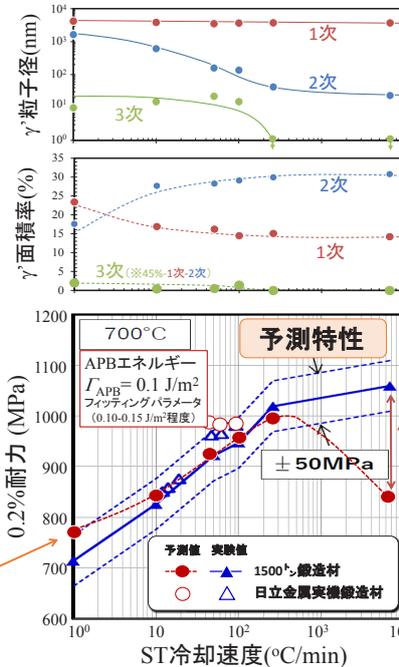
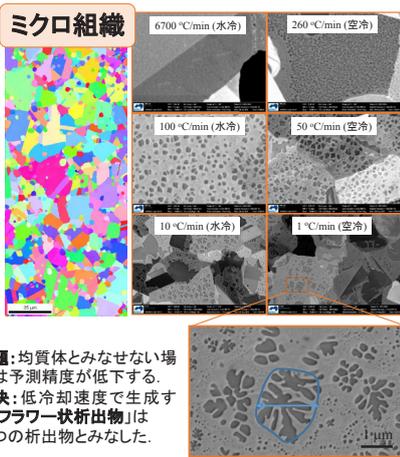
タービンディスク用Ni基鍛造超合金の実用化は、純国産航空機エンジン開発の最後の砦であり、産学官を上げ取り組むべき戦略的課題である。本プロジェクトでは、航空機用途として高い品質要求が求められると共に、他の超合金に比べ鍛造難易度が極めて高いとされるAlloy720Liを対象とした。本合金の予測技術が構築できれば、最新の超合金鍛造に対する極めて有用なベンチマークとなるだろう。また、本合金は γ 析出型超合金であり、粒界強化、1次・2次・3次 γ 析出強化、固溶強化による複数の強化機構が階層的にNiを強化することで要求性能を満たしている。本プロジェクトではこれら強化機構を個別に整理し、将来のクリープやLCF予測において最重要と考えられる0.2%耐力 (UTS) の予測にチャレンジした。

1500トンの鍛造シミュレータを用いたプロセス・組織・特性予測の検証



プロセス条件 → ミクロ組織 (析出物) → 特性予測 (1500トンの実機鍛造)

1500トンのプレス鍛造: 1100°C
 溶体化: 1104°C × 4時間
 ST冷却: 6700 ~ 1°C/min
 標準時効: 650°C × 24h + 760°C × 16h



出口戦略・将来展開・応用分野等

- > 特性 (重工メーカー) と組織 (素材メーカー) を橋渡しし、新材料実用化を加速化。
- > 特性予測モジュールを用い組織・プロセスの最適化、強化機構の見える化。
- > 理論強化モデルの活用により、フィッティングパラメータ数の最小化
- > タービンディスク用TMWやTMP合金等、NIMS開発の新材料にも適用可能。

目標達成のための課題

- > 取得済みの単結晶モデル合金データを用い、予測精度±100MPaから±50MPaへ
- > 微細ミクロ組織 (3次 γ 相) 体積率の高精度取得手法開発が急務
- > マルチスケールの組織を「正確に」「大量に」「高速で」取得する実験技術開発が急務
- > フィッティングパラメータであるAPBエネルギーの予測技術が必須。



所属・名前: NIMS 構造材料研究拠点 設計・創造分野 超耐熱材料グループ 長田俊郎
 メールアドレス OSADA.Toshio@nims.go.jp

Ni基鍛造合金718におけるクリープ強度と組織関係の定量評価

小林覚、竹山雅夫（東京工業大学）

B21では鍛造シミュレータを用いて鍛造条件、組織、特性（引張強度、クリープ、疲労）に関するデータを精度よく取得し、信頼性の高いデータベースを作成する。さらにこのデータベースを用いて、組織、特性予測モデルを構築し、必要な特性を有する部材を効率よく生産するための技術を開発する。当該機関は、形成された組織とクリープ特性の関係付けを担当し、全体としてプロセスから特性を定量的に結びつけるDBの構築に貢献する。

研究概要

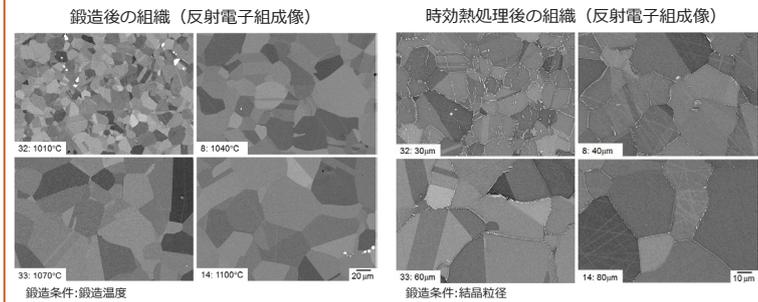
平成29年度までに実施したNi基合金単軸鍛造材(718合金)のクリープ試験により、同合金の比較的高応力条件下におけるクリープ強度は母相の結晶粒径に依存するが、その依存性は鍛造後の熱処理プロセスによって変化することを見出した。本年度は、同鍛造材のクリープ試験の追加・検証試験を実施すると共に、粒内及び粒界の組織因子の評価に基づいてクリープ強度、組織、プロセス因子の関連性を検討し、高応力クリープ強度(0.2%クリープ歪み寿命)の組織因子による定式化を試みる。

実験方法

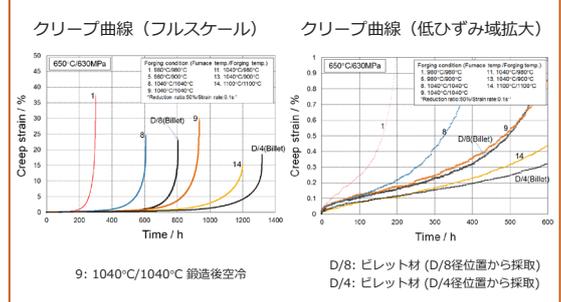
-鍛造* （予備加熱温度/鍛造温度） -1: 980°C/980°C -32: 1010°C/1010°C -8: 1040°C/1040°C -33: 1070°C/1070°C -14: 1100°C/1100°C *圧下率: 50%, 歪み速度: 0.1s ⁻¹ , 鍛造後除冷	-熱処理 -溶体化処理(SS) S1: 950°C/1.5h→15°C/minで500°Cまで徐冷 S2: 950°C/1.5h→120°C/minで500°Cまで徐冷 -時効処理 A1: 720°Cx8h→50°C/hで徐冷→620°Cx10h保持→空冷 A2: 760°Cx10h→50°C/hで徐冷→650°Cx8h保持→空冷	-クリープ試験 -650°C/630MPa -丸棒試験片 (ASTM規格: E139) (平行部: 6.38mmφx31.8mm) -組織評価 -FESEM
--	---	---

組織とクリープデータ評価

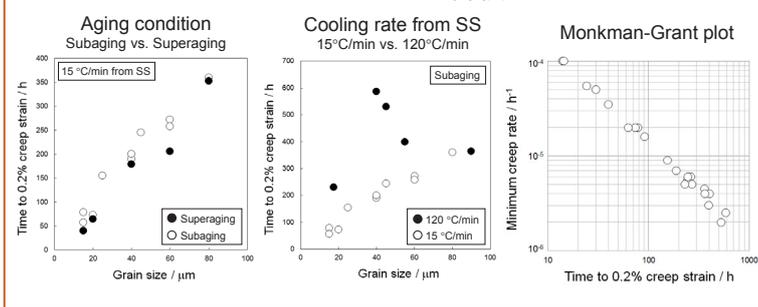
初期組織



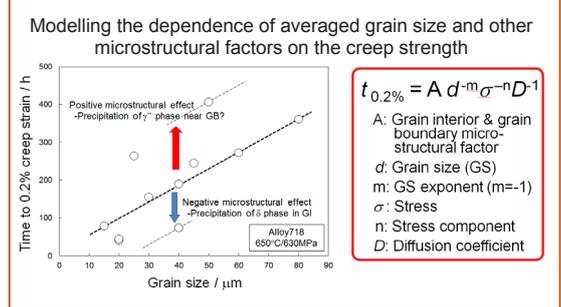
クリープ曲線



クリープデータ評価



モデリング



出口戦略・将来展開・応用分野等

- SIPIにおける取り組みでは航空機エンジン用途が想定されているため、比較的高応力（短時間）条件下におけるクリープ特性（クリープ強度）が重要であったが、発電用ガスタービン用途を想定した場合には、比較的低応力（長時間）条件下のクリープ特性（破断強度）が重要となる。この場合には、クリープ前の初期組織はクリープ変形中に大きく変化し、その組織変化がクリープ破断強度に強く影響を及ぼすため、その効果を寿命予測法に組み込む必要がある。
- 本取り組みにおいて汎用Ni基鍛造合金718を用いて構築する短時間クリープ寿命の予測法が、他のNi基鍛造合金に適用できるかどうかの検証ならびにクリープ寿命を支配する組織因子を改良した新たな高強度鍛造合金の設計・開発の展開が考えられる。

所属・名前 東京工業大学 物質理工学院 材料系 小林覚
 代表者のメールアドレス kobayashi.s@mtl.titech.ac.jp

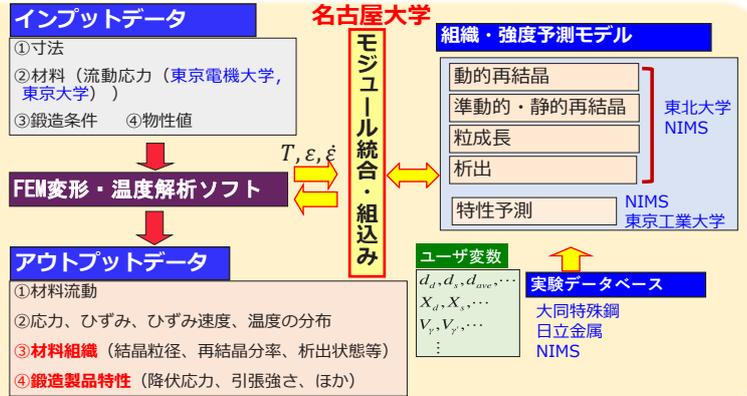


Ni基合金鍛造材の組織予測シミュレーションシステムの開発

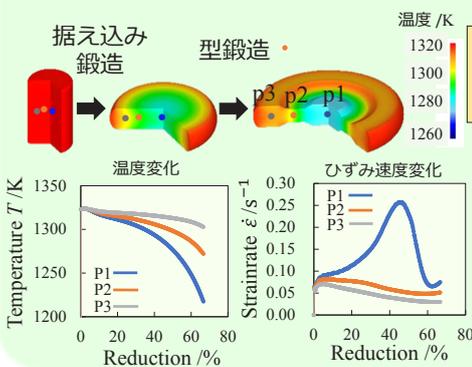
全体の中での役割

組織・特性の予測モデルをモジュール化して統合、組み込みを行い、塑性加工モデリングから組織・特性予測が可能な計算ツールを開発する。

この計算ツールを5万トンプレスに適用し、組織予測の検証を行う。



増分形予測モデルとパラメータ



鍛造開始からの微小変化を蓄積する増分形で計算



動的再結晶率

$$X_{dyn}^{n+1} = X_{dyn}^n + d(X_{dyn}^n)$$

$$\ast d(X_{dyn}^n) = \frac{\partial X}{\partial \dot{\epsilon}} d\dot{\epsilon} + \frac{\partial X}{\partial \epsilon_{0.5}} d\epsilon_{0.5} + \frac{\partial X}{\partial \epsilon_c} d\epsilon_c$$

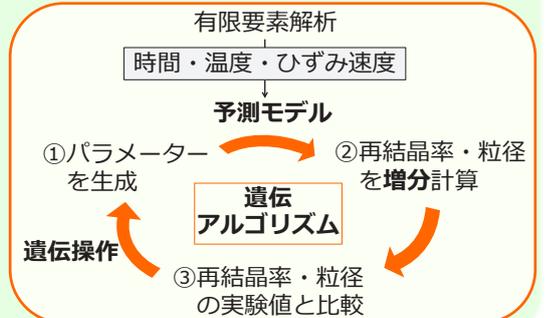
$$\epsilon_{0.5} = a_1 \cdot L^{-n_1} \cdot Z^{m_1}$$

$$\epsilon_c = k \cdot \dot{\epsilon}_p$$

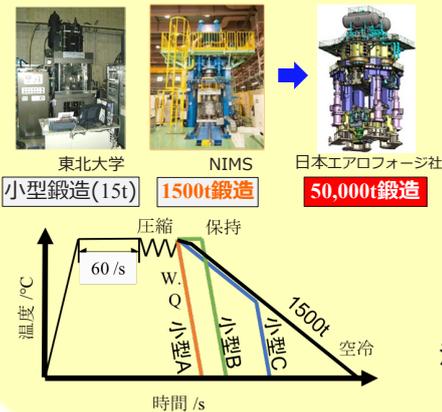
$$\dot{\epsilon}_p = a_2 \cdot L^{-n_2} \cdot Z^{m_2}$$

パラメーターの最適化が必要

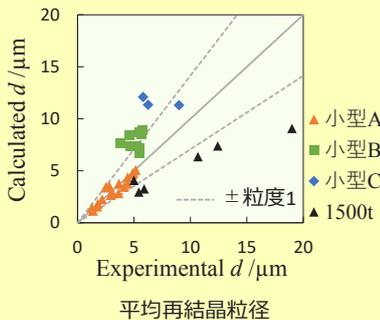
実験データ → パラメータの決定 → 検証



鍛造試験



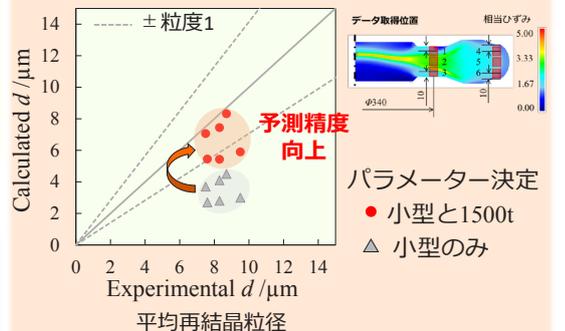
事前予測結果



温度・ひずみ速度の異なる条件下で平均再結晶粒径の予測が可能

5万t鍛造による検証

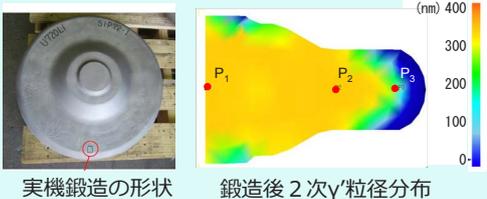
Alloy 718, 980°C鍛造



各測定位置における平均再結晶粒径は±粒度1に近い範囲で予測可能

析出予測結果

Alloy 720Li, φ258x550mm, 1104°C鍛造



鍛造用ガラス系潤滑剤の高温トライボロジー特性

土佐 正弘 笠原 章 後藤 真宏 佐々木 道子 本田 博史 鈴木 裕 (物質・材料研究機構)

鍛造プロセスに用いられるガラス系潤滑剤の高温トライボロジー特性、特に、諸条件での摩擦データを計測して蓄積し鍛造シミュレータに展開することにより鍛造プロセスの省エネ化や最適化をはかり高品質な鍛造製品製造に資する。

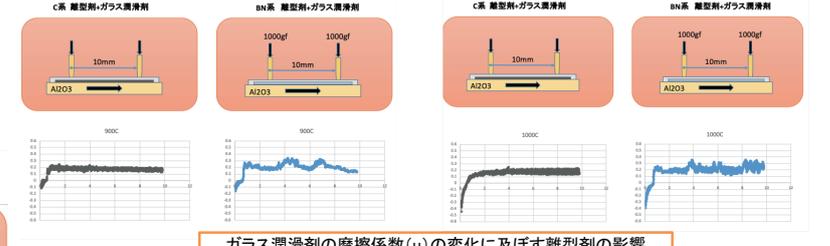
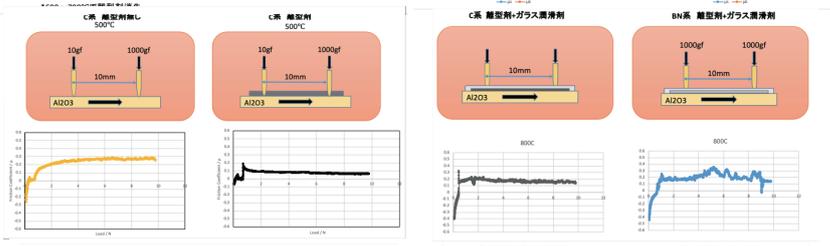
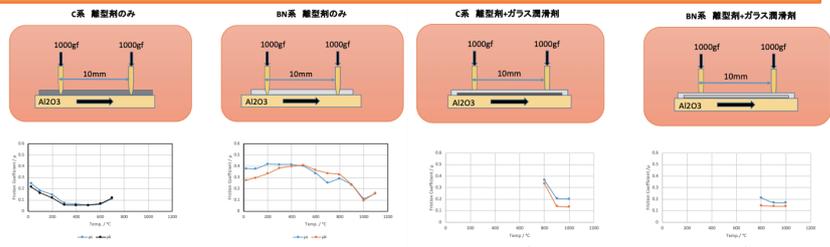
研究概要

航空機用ジェットエンジン燃焼系機械部品製造に用いられるチタン基合金やニッケル基合金の高温型鍛造プロセスには、ガラス系固体潤滑剤のような常温では固体であるが、高温では溶融するガラス潤滑剤が一般的に用いられており、ガラス潤滑剤の高温溶融体トライボロジー特性は、鍛造プロセスの安定化、効率性や省エネ化のみならず、合金の成形性、表面平滑性や鍛造材品質を左右する非常に重要なパラメータの一つである。しかしながら、鍛造時の面圧は数から数千tを上回るなど非常に高荷重環境の極限プロセスであり、この面圧を実験室レベルで発生させることは難しい。そこで、高温での材料強度物性に優れたセラミックスであるアルミナに着目してアルミナで圧子を作製しこの圧子を用いてアルミナ基板に高面圧で潤滑溶融体の摩擦係数測定ができる高温摩擦試験器を試作するとともに、さらに、ガラス系潤滑剤の高温摩擦係数(μ)に及ぼす加熱温度や面圧、熱履歴等プロセスパラメータの影響を評価することを試みた。

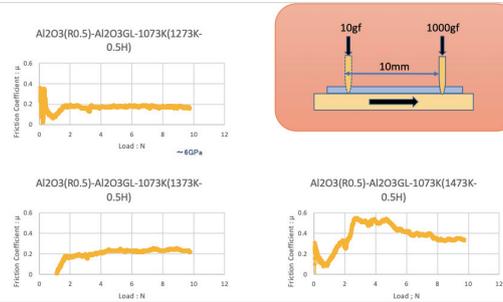
高温摩擦係数に及ぼす各種プロセス条件の影響



ガラス潤滑剤塗布の有無による摩擦係数(μ)の温度変化

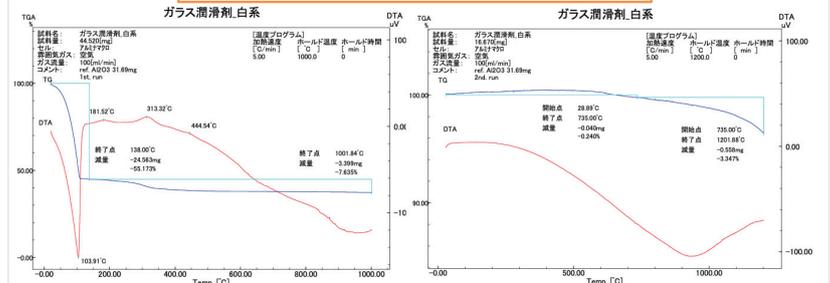


ガラス潤滑剤塗布の有無による800°Cにおける荷重変動下の摩擦係数(μ)の変化



ガラス潤滑剤の800°Cにおける荷重変動下の摩擦係数(μ)の変化に及ぼす予備加熱温度の影響

ガラス潤滑剤の摩擦係数(μ)の変化に及ぼす離型剤の影響



ガラス潤滑剤の熱分析結果(初期加熱時および2回加熱時)

まとめ

- 鍛造用ガラス系潤滑剤の高温摩擦測定を行うことができる摩擦試験機を整備した。
- 加熱温度や熱履歴等プロセスパラメータは摩擦係数に影響することが示された。
- ガラス系潤滑剤は初期加熱温度により水分蒸発や反応等組織変化が観察された。

今後の展望

- 鍛造用ガラス系潤滑剤のトライボロジー特性のデータベース化
- 鍛造プロセスにおける最適パラメータの提案
- 高品質な鍛造技術の推進



— ポスター講演 2 —

ユニット B24

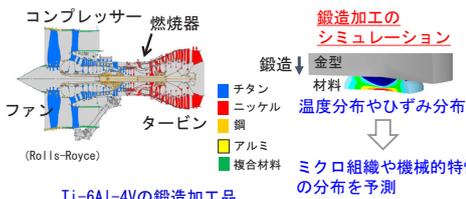
“鍛造プロセス基盤”

Ti-6Al-4V合金の鍛造加工発熱に伴う 温度変化の解析と予測

研究概要

Ti-6Al-4V (Ti-64) は航空エンジン用コンプレッサー部品に使用されており、航空機用Ti合金の中で使用される割合は高い。Ti-64のブリスク等の複雑形状へのニアネットシェイプ化を目指して、1500トン鍛造シミュレータにより部品の低コスト化と高機能化に資するTi-64のデータと知見を蓄積し、新たな革新的鍛造プロセス開発につなげる。具体的には、温度とひずみ速度を制御しながら材料流動させる薄い肉厚部のニアネットシェイプ化のための最適プロセス設計技術の基礎となるデータ構築と温度予測高精度化を目指す。B21と連携しながら、1500トン鍛造シミュレータを使用し、Ti-64の荷重-変位曲線、加工発熱のデータを収集した。有限要素解析を活用し、真応力-真ひずみ曲線と素材/金型間の熱伝達係数を逆解析的に求め、これらを用いることで鍛造加工中における素材の温度変化の予測精度を向上させた。また、鍛造材と同じ素材から物性値を求めることで温度因子の精度が向上し、比熱の精度は予測温度への影響が大きいことを示した。さらに、熱容量が大きい試料を用いることで加工発熱係数にひずみ速度依存性を付与せずとも、実測値に近い温度を予測できることを示した。

チタン・チタン合金鍛造品と温度予測



Ti-6Al-4Vの鍛造加工品
例：コンプレッサーディスク

鍛造プロセス設計技術において
温度の予測精度は重要！

熱伝導方程式、境界条件と温度因子

軸対称熱伝導方程式

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

T: 温度, λ: 熱伝導率, c: 比熱, ρ: 密度,
t: 時間, Q: 単位体積当たりの発熱量,
r: 半径方向座標, z: 軸方向座標

境界条件 (素材/金型, 素材/大気)

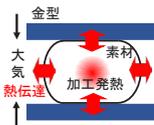
$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} l_r + \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right) + h(T - T_a) = 0$$

h: 熱伝達係数, T_a: 素材が接触している金型もしくは大気温度, l_r: r, l_z: z方向余弦

加工発熱による温度上昇

$$\Delta T = \frac{\rho c_p \int_0^t \dot{Q} dt}{\rho c_p}$$

η: 加工発熱係数, σ: 応力, ε: ひずみ,
ε_f: 最終的な塑性ひずみ (真応力-真ひずみ曲線)



温度予測の高精度化
において
入力パラメータの高
精度化は必須！

従来の解析と圧縮試験の課題

- 解析では計算ソフトウェアのデータやパラメータの出所が不明。
- 実験室レベルの圧縮試験では試料の熱容量が小さく、金型/素材間や金型/大気間の熱伝達の影響を受けやすい。
- 従来の小型鍛造シミュレータ (高周波コイル式) ではダイ (SiC等) は加熱されておらず、試料中の温度勾配が大きい。

本研究の目的

- 熱物性値を鍛造材と同じ素材から求める。
- 1500トン鍛造シミュレータを使用して、熱容量が大きい素材の恒温鍛造中の温度変化を測定する。
- 真応力-真ひずみ曲線を求め、温度変化を予測する。
- 温度因子の鍛造中の温度変化に及ぼす影響を調査する。

有限要素解析

- ソフトウェアDEFORM-2Dを使用
- 2次元軸対称問題、1/4モデルで解析
- 金型: 剛体、円柱材: 弾塑性体

物性値・パラメータ取得方法

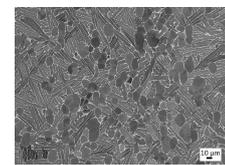
- 密度以外、鍛造材と同じ素材を使用
- 温度依存の密度: 文献値
- 温度依存の比熱: DSC法 (JIS規格準用)
- 温度依存の熱拡散率: レーザーフラッシュ法 (JIS規格準用)
- 熱伝導率=密度×比熱×熱拡散率
- 金型/素材間せん断摩擦係数: リング圧縮試験
- 摩擦による応力負荷、加工発熱による温度上昇を補正した真応力-真ひずみ曲線、素材/金型間の熱伝達係数 → 鍛造時の荷重-変位曲線と熱電対の温度変化の実験データを用いて逆解析的に算出

Ti-6Al-4V鍛造材と鍛造プレス機

受け取りTi-6Al-4V丸棒鍛造材の化学組成 (wt%)

Al	V	H	O	N	C	Fe
6.21	4.21	0.002	0.17	0.004	0.011	0.20

βトランザスT_β: 985±5°C

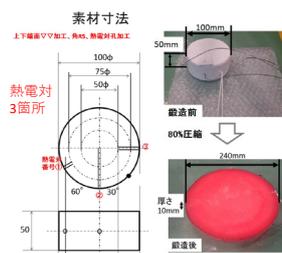


受け取り材のマイクロ組織
(ハイモデル組織)



1500トン鍛造シミュレータ
@NIMSで鍛造

実験方法

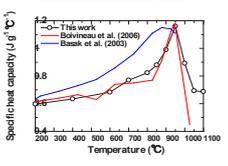


- ガラス潤滑剤は試料表面に200μmの厚さで塗布
- 素材は金型上にセットして昇温&均熱
- 圧縮率: 80% (50t→10t)
- 冷却: 空冷

素材温度、金型温度、加工ひずみ速度

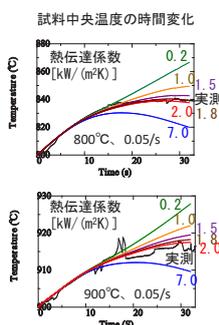
素材温度 (°C)	金型温度 (°C)	ひずみ速度 (s ⁻¹)
950°C	900°C	1.0
		0.5
		0.05
900°C	900°C	1.0
		0.5
		0.05
800°C	800°C	1.0
		0.5
		0.05
750°C	750°C	1.0
		0.5
		0.05

比熱の温度依存性

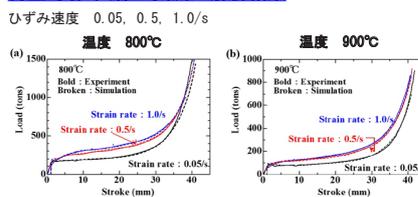


T_βは酸素濃度など規格の成分範囲内でも変化
→ 比熱はT_β近傍で大きく変化
→ 使用する比熱のデータはT_β近傍鍛造時の温度変化予測の精度に影響

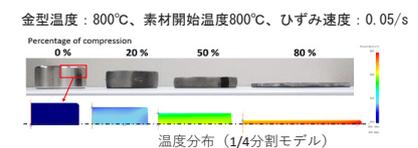
素材/金型間の熱伝達係数の同定



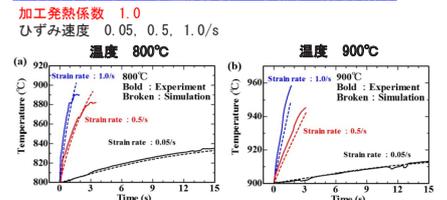
荷重-変位曲線の実測と解析結果



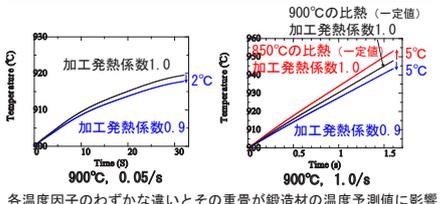
鍛造試験片の外観と温度分布の解析結果



試料中央における温度変化の実測と解析結果



比熱、加工発熱係数の試料中央温度に及ぼす影響



各温度因子のわずかな違いとその重畳が鍛造材の温度予測値に影響

B24ユニットの研究経緯

B24ユニットは平成29年度から鍛造プロセス研究を重点化し、ユニット名を「鍛造プロセス基盤」に変更した。NIMSにおいても、Ti-64合金の鍛造プロセス研究 (本研究) を開始した。平成28年度までは「基礎学理の活用による次世代合金設計・製造に関わる要素技術」について研究を実施した。

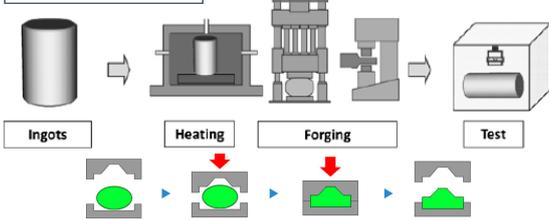
まとめ

1500トン鍛造シミュレータによりTi-64材の据え込み鍛造を行い、恒温鍛造中の温度変化を測定した。荷重-変位曲線と熱電対の温度変化から真応力-真ひずみ曲線、素材/金型間熱伝達係数を逆解析的に求めた。比熱と加工発熱係数が温度変化に与える影響を示した。特に、比熱はβ変態点近傍で大きく変化し、またβ変態点は素材成分の影響を受けるため、温度予測高精度化のためには鍛造材の比熱データを使用の方がよいことを提案した。過去に報告されている加工発熱係数はひずみ速度依存性も報告されているが、本研究では各因子の取得に熱容量が大きい試料を用いたことにより、各因子の精度が向上していると考えられ、加工発熱係数にひずみ速度依存性を付与せずとも、実測値に近い温度を予測できることを示した。



Ti-17合金の熱間多方向加工による組織形成と真応力-真ひずみ曲線

背景



実際の加工工程は、**大ひずみ** かつ **多方向加工** である。今までの**単方向加工**で得られた組織図は**鍛造(多方向)加工**に適用できるかどうかは**疑問**である。

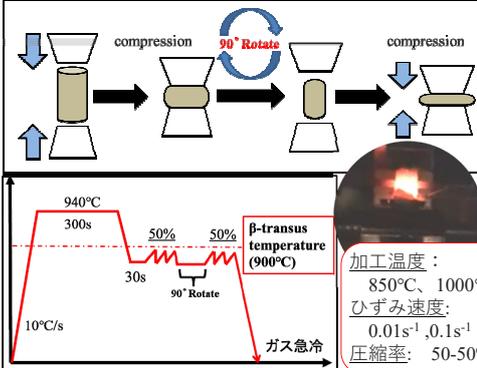
目的

- (1) 高温での多方向加工が組織変化にどのような影響を与えるのか
- (2) 高温の大ひずみ域までの真応力-真ひずみ曲線を得ることを目的とすることを全体の中の役割とした。

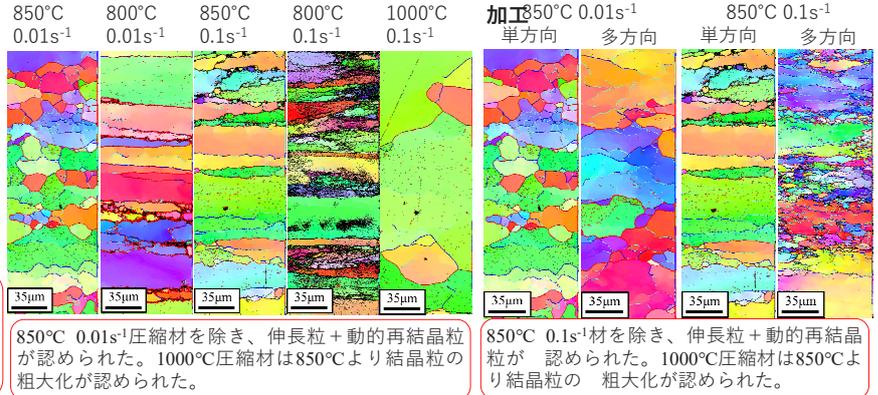
Ti-17合金の熱間多方向加工による組織形成

□ 実験方法(多方向加工)

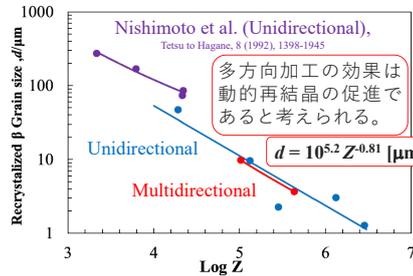
供試材: Ti-17合金、試験片: 直径8mm、高さ12mm円柱



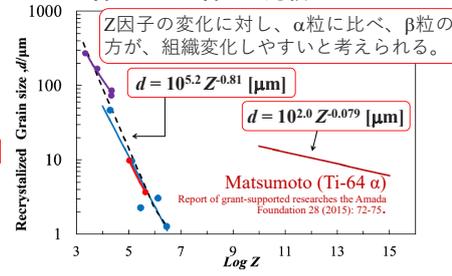
□ 実験結果



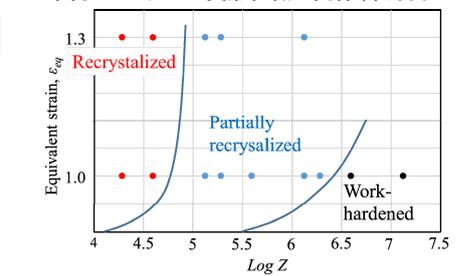
□ Z因子と平均結晶粒径の関係



□ Ti-17合金とTi64合金の比較



□ Z因子とひずみと変形組織の関係(単方向加工)

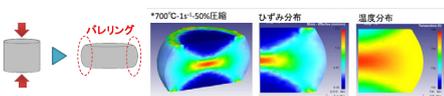


画像計測引張試験法を用いたTi合金の大ひずみ域までの高温真応力-真ひずみ曲線

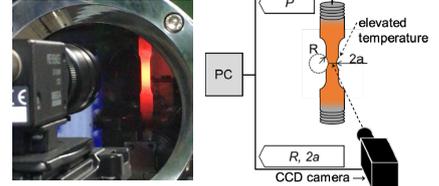
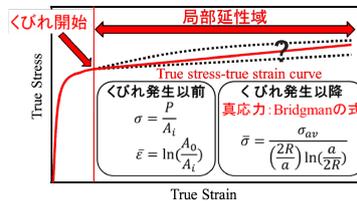
▶ 高温における鍛造性の評価は、一般的には圧縮試験が用いられる。

▶ 引張試験は圧縮より均一なひずみ分布であるが、くびれ(局所変形)が発生する。

▶ 画像計測引張試験法

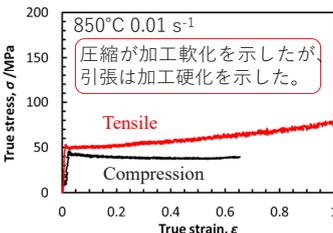


- 大ひずみ域までの応力-ひずみ曲線の取得
- × 試験片内の不均一なひずみ分布

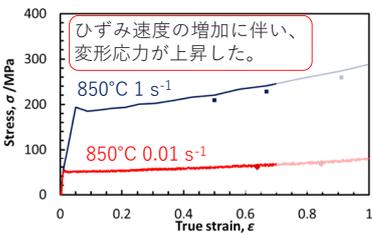


□ 実験結果

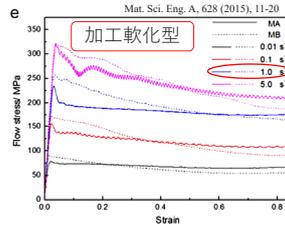
▶ 圧縮試験と引張試験の比較



▶ ひずみ速度が変化した時の引張試験結果



▶ L. Liらの圧縮試験結果



今後の展望:
多方向加工による組織変化と高温の大ひずみ域までの真応力-真ひずみ曲線を実機製造に生かす。



Ti合金MI (B-D連携) : 大型精密鍛造シミュレータによるTi-6Al-4V鍛造材の金属組織と疲労特性

事業目的・研究概要

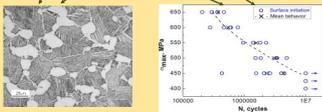
Ti合金鍛造材の疲労特性は航空機エンジン用ディスク材の重要な特性の一つである。Ti合金鍛造材の疲労寿命を予測するためには、疲労き裂発生および疲労き裂伝播の機構を把握することが不可欠である。また、Ti合金では疲労寿命予測だけでなく、寿命のばらつきも実用上問題となっている。本研究ではディスク材に用いられるバイモーダル組織を有するTi-6Al-4V合金鍛造材を対象に、鍛造、熱処理後のマイクロ組織やそのばらつきについて鍛造プロセス、熱履歴を踏まえながら定量的に把握した上で、疲労寿命およびそのばらつき、疲労き裂発生・進展挙動についてマイクロ組織因子と関連づけてデータベース化する。得られたデータをチタン合金の疲労寿命予測モジュールの構築・検証に用いるとともに、疲労寿命のばらつきの原因となる組織因子を明確化する。

B領域 (B21, B24) とD領域 (D62, D67) の連携体制

B24 NIMS Ti合金MI B-D連携の取りまとめ

B24 NIMS Ti-6Al-4V鍛造材の“疲労寿命ばらつきDB”構築

- 定量解析により取得されたマイクロ組織不均一性データ
- 各部位の疲労特性測定データ



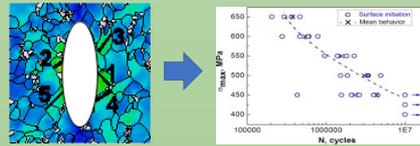
- 素材の購入、鍛造、連携各機関への配布

↑ 企業アドバイザーとの連携
↓ 鍛造条件の検討等

B21 神戸製鋼

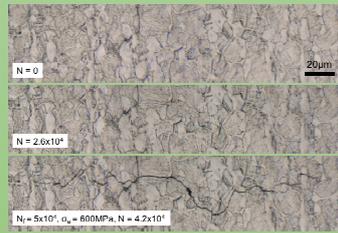
D62 東京大学 疲労特性予測モジュールの開発

- Ti-6Al-4V微視組織の数値解析モデルの構築
- 疲労き裂の発生・進展を区別した解析モデル構築



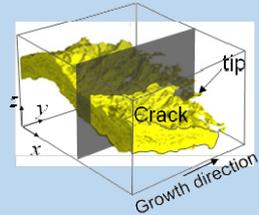
D62 NIMS 微小疲労き裂発生・進展寿命DB

- モデルのチューニングに資する疲労き裂発生・進展を区別した疲労DB

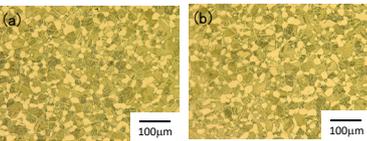
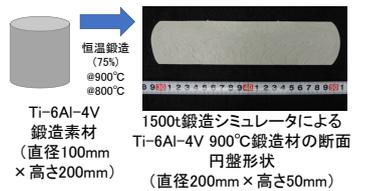


D67 九州大学 疲労き裂発生・進展メカニズムの解明

- 疲労き裂進展その場観察
- 組織・変形の基本情報の取得



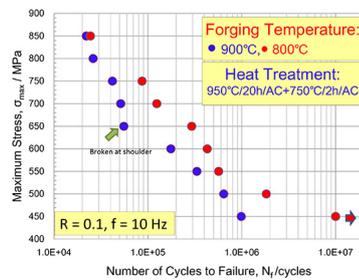
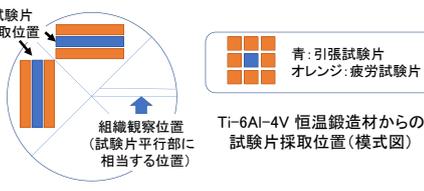
B24の成果例: 室温疲労特性のばらつきに及ぼす鍛造温度の影響



950°C/20h/AC+750°C/2h/AC後のTi-6Al-4V鍛造材の金属組織 (試験片引張方向に垂直な面)
(a)鍛造温度900°C、(b)鍛造温度800°C

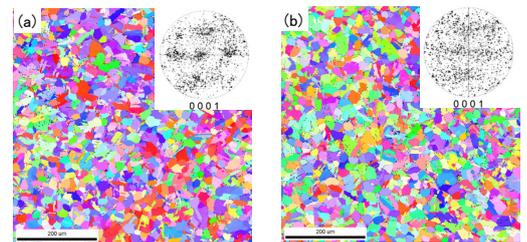
鍛造温度	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	絞り (%)
900°C	860	940	17	47
800°C	870	950	15	44

Ti-6Al-4V鍛造材の室温引張特性 (鍛造温度による影響なし)



Ti-6Al-4V鍛造材の室温疲労特性に及ぼす鍛造温度の影響

鍛造温度が低い方が疲労寿命が長い傾向



Ti-6Al-4V鍛造材のEBSDによるIPFマップと極点図 (インサート) (試験片引張方向に垂直な面) (a)鍛造温度900°C、(b)鍛造温度800°C
集合組織の違いが疲労寿命に影響している可能性

今後の展開

- さらなる組織観察及び疲労試験 (多くの鍛造材、同一鍛造材中のいろいろな場所、方向等)
- 組織因子と疲労寿命の相関の明確化
- 疲労寿命およびそのばらつきのデータベース化
- D領域開発のチタン合金疲労寿命予測モジュールの検証
- 疲労寿命のばらつきの原因となる組織因子の明確化



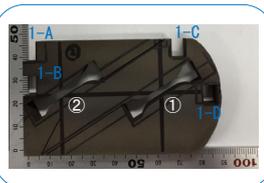
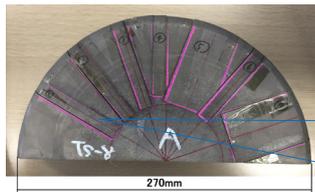
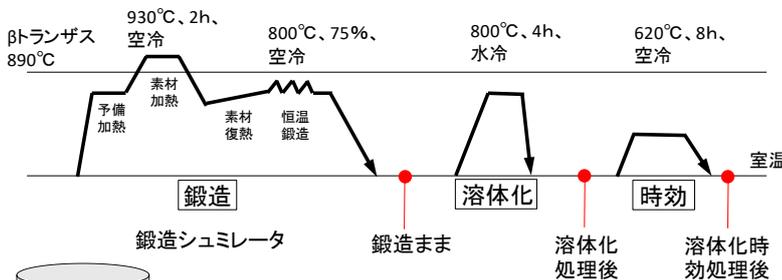
1500トン鍛造シミュレータで作製したTi-17合金の溶体化時効処理後の組織と力学的特性の異方性

B24の中での当機関の役割

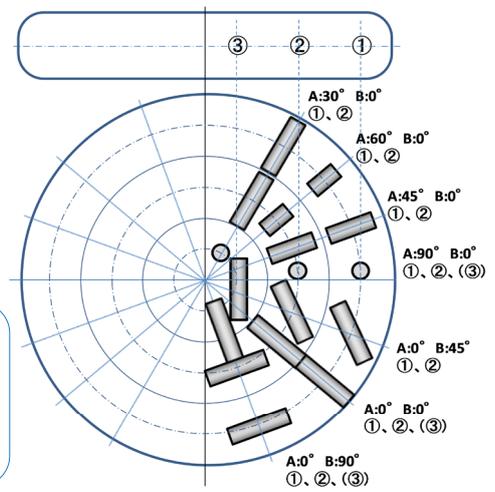
B21で進められているTi-17合金鍛造材の強度予測のさらなる精度向上のための組織および力学的特性に関する実験データの取得を担当する。特に、鍛造中の材料内の温度分布やひずみ分布は不均一であり、塑性流動の向きや程度も位置によって異なることから、実際の鍛造材中に形成する組織は不均一であり、力学的特性には少なからず異方性が存在すると考えられる。そこで、当機関では、1500トン鍛造シミュレータで作製した鍛造材に存在する力学的特性の異方性を明確にし、異方性の起源となる組織因子に着目して検討を進める。

実験方法

試料の製造プロセス



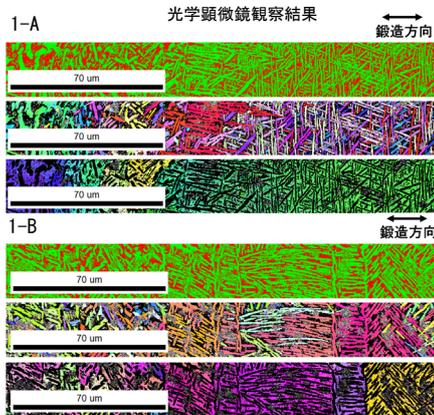
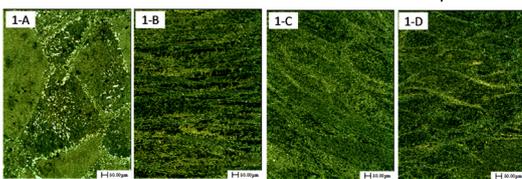
試験片の切り出し方



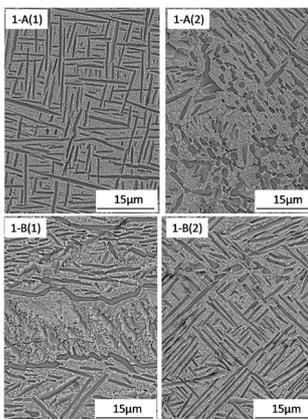
円周方向に対して0°、45°および90°方向に固定し、中央部側と端部側の2箇所において鉛直方向に対して0°、30°、45°、60°および90°と系統的に変化させて試験片を切り出した。

実験結果

組織

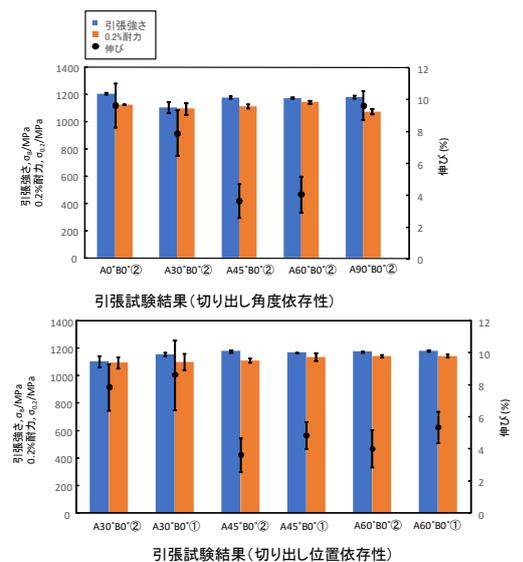


1-A部：鍛造によるひずみが印加されていないと考えられる形状の旧β粒が存在。
1-B部：鍛造方向に対して垂直方向に伸長した扁平率の高い形状の旧β粒が形成
1-C部および1-D部：1-B部ほど高い扁平率でなく、伸長方向も鍛造方向に対して垂直方向でない。



1-B部：アスペクト比の高いα相からなるラメラ組織が形成。観察場所によっては、粒界に沿って連続的に成長した粒界αが形成。

力学的特性



強度の切り出し角度依存性は強くないが、伸びは切り出し角度に強く依存し、45~60°において低下する。

所属・名前 近畿大学 理工学部 仲井正昭
代表者のメールアドレス nakai@mech.kindai.ac.jp



チタン合金の組織・変形特性に及ぼす 侵入型微量添加元素の影響解明

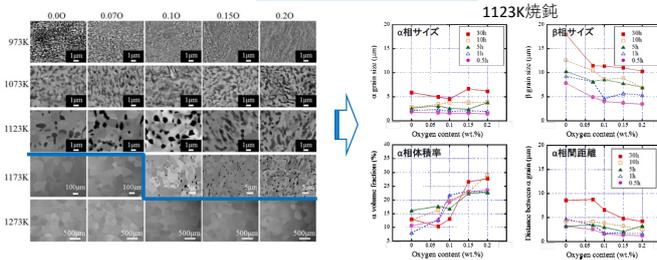
研究機関：筑波大学（宮崎修一、金 熙榮、古谷野有）

研究概要・役割

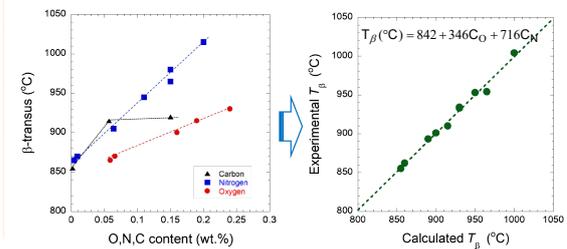
少量にもかかわらず特性に大きな影響を及ぼす、酸素、窒素、炭素などの侵入型微量添加元素がTi-17合金の組織および力学特性に及ぼす影響を定量化・DB化する研究を担当する。侵入型微量添加元素・βトランスス・温度・保持時間・歪み速度・流動応力の関係を明確化し、侵入型元素を考慮したプロセッシングマップを構築する。

微細組織・力学特性に及ぼす侵入型元素の影響

組織の定量化(○の例)



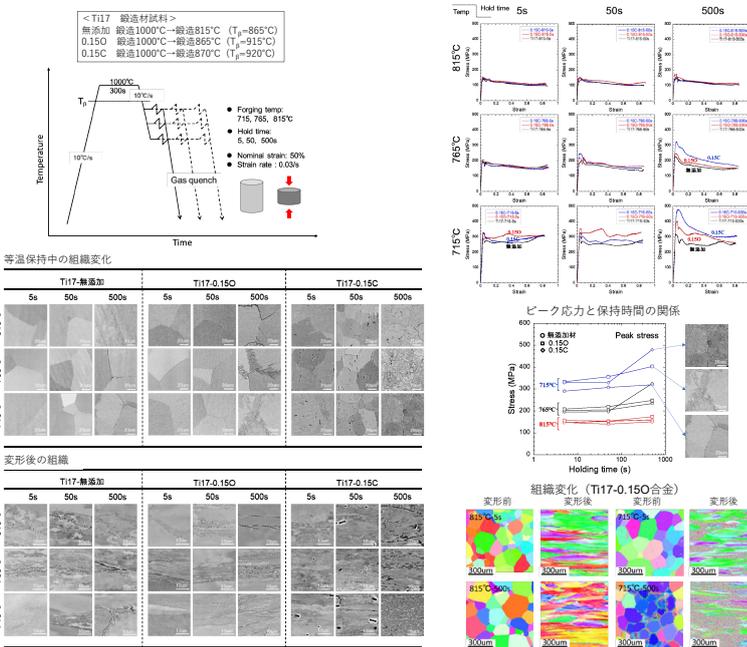
βトランスス温度の定式化



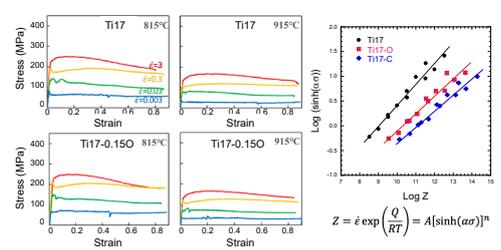
- 組織因子（βトランスス、結晶粒径、α/β相割合、サイズ、形態）と力学特性の関係を定量化・データベース化
- 侵入型微量添加元素（O, N, C）-組織-力学特性の関係から力学特性を支配する因子を明確化

高温変形特性に及ぼす侵入型元素の影響

変形温度・保持時間の影響

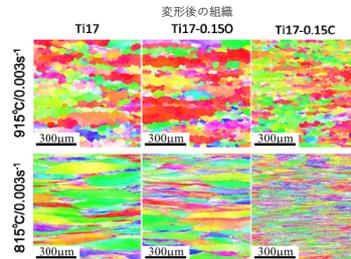


変形温度・歪み速度の影響



定常状態での材料パラメータ

	A	α	n	Q(kJ/mol)
Ti17	1.216×10 ⁹	0.0214	2.287	251.2
Ti17-0.15O	2.186×10 ¹⁰	0.0174	2.704	274.5
Ti17-0.15C	1.184×10 ¹¹	0.0163	3.020	287.7



- 侵入型元素・変形温度・保持時間・歪み速度を変数としたSS曲線のデータベース化
- 侵入型元素（酸素、炭素）が組織形成に与える影響および鍛造中のα相析出が高温変形挙動に及ぼす影響の解明

今後の展望

- 理論的組織予測や特性予測の実験データとして活用
- 侵入型微量添加元素がチタン合金の組織と物性に与える普遍的な原理・原則の解明を推進
- 侵入型元素を最適化し侵入型元素制御による組織制御指針を明確化
- 侵入型元素を積極的に利用する新たな合金開発基盤の構築

所属・名前 筑波大学 数理物質系 物質工学域 金 熙榮
代表者のメールアドレス heeykim@ims.tsukuba.ac.jp



Ti-17合金の時効析出挙動に及ぼす軽元素の影響

東北大学 ○上田恭介、福島涼太、板橋央樹、成島尚之
物質・材料研究機構 北嶋具教

本課題の役割

航空機エンジン用ディスク素材であるTi-17合金(Ti-5Al-2Sn-4Mo-4Cr)製造プロセスのうち、βプロセスにおける相変態挙動に着目し、熱処理温度および時間とα相生成の関係に及ぼす軽元素の影響を明らかにし、Ti-17合金の相変態に関するデータベースの構築を行う。

Ti-17合金製部材の製造プロセス

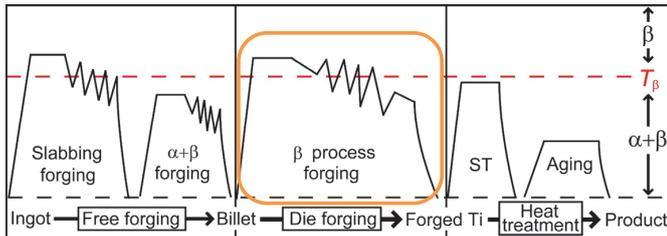


Fig. 1 Thermo-mechanical treatment of Ti-17 alloy.

熱間型鍛造材の組織
→製品の微細組織・特性に影響

Ti中の軽元素(酸素, 炭素)

- α相安定化元素 = T_β を上昇
- 強度の増加, 延性の低下
- インゴット中不純物元素, 不均一な分布(酸素)
- TiCの溶解・析出による組織制御(炭素)

実験方法

供試材: 酸素添加Ti-17合金

(B24内での共通試料 NIMS 北嶋氏より提供)

Notation	Oxygen content (mass%)	β transus, T_β / K
0.06O	0.064	1138
0.12O	0.118	1163
0.21O	0.214	1188

熱処理: 溶体化処理(ST) + 時効(Aging)

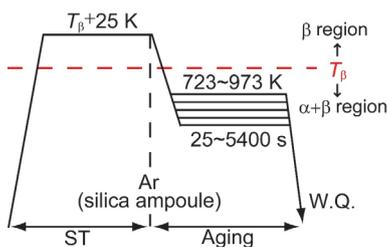


Fig. 2 Schematics of heat treatment cycle.

- 分析
- 微細組織: OM
 - 構成相: XRD
 - 硬さ: ビッカース

α相析出面積分率

$$f_\alpha = \frac{S_\alpha}{S_{total}} \times 100$$

S_α : Area of α phase
 S_{total} : Area of OM image

結果と考察

0.12O材の時効組織 * α相: 暗色部分、β相: 明色部分

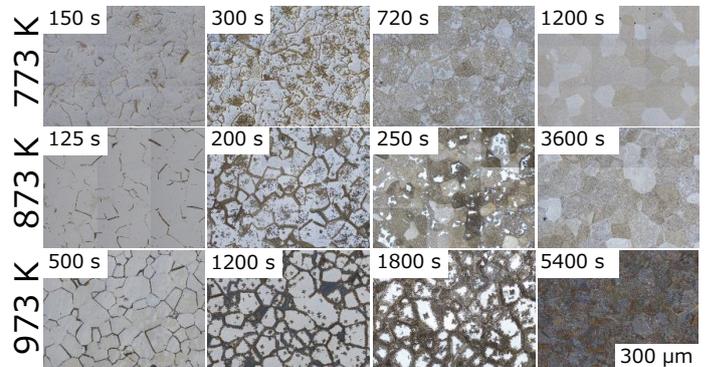


Fig. 2 OM images of the 0.12O alloys after aging at 773-973 K for various times.

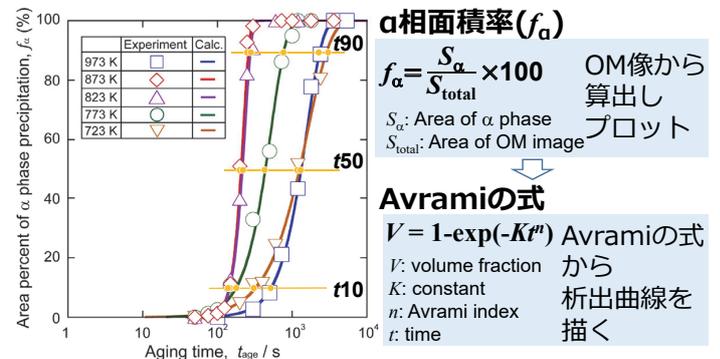
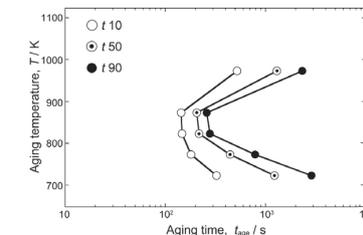


Fig. 3 Change in area percent of α phase precipitation of 0.12O alloy with aging time.



TTT図

$f_\alpha = 10\%$ (t_{10}), 50% (t_{50}), 90% (t_{90})における時効時間からTTT図を作成

OM像からTTT図を作成することができた

Fig. 4 TTT diagram of 0.12O alloy determined by OM images.

α相析出に及ぼす酸素の影響

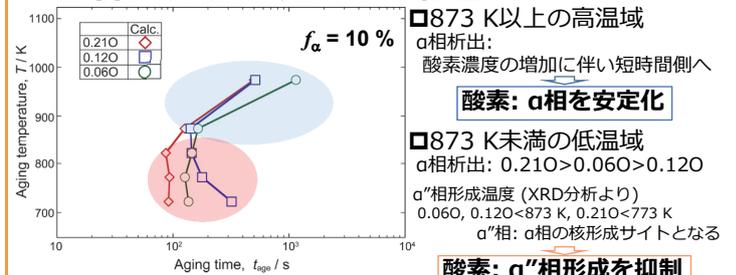


Fig. 12 TTT diagram of 0.06O, 0.12O and 0.21O alloys: $f_\alpha = 10\%$.

今後の展望

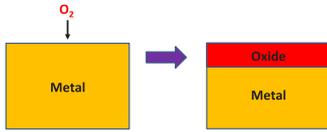
- Ti-17合金の析出挙動に及ぼす炭素の影響解明
- 組織データをデータベースへ搭載するための共通化整理
- 組織予測モデルの構築



耐熱チタン合金の高温酸化メカニズムの理論解明

佐原亮二、S. K. Bhattacharya (物質・材料研究機構)、上田恭介、成島尚之 (東北大工)

チタンの高温酸化



チタンの表面酸化:

1. 表面における酸化物形成
2. 酸素のチタン固体内への拡散と α -ケース形成

- チタン、チタン合金において、酸化メカニズム解明とその制御は重要な問題である。
- 高温において酸化は促進され、チタン、チタン合金の機械的特性は劣化する。

チタンの高温酸化実験(成島らによる)

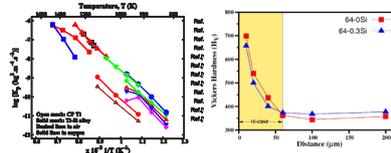


図: CP TiとTi-Si合金の酸化速度定数のアレニウスプロット

図: 64-0Siと64-0.3Si合金における973Kでの α -caseでのヒックス硬度分布

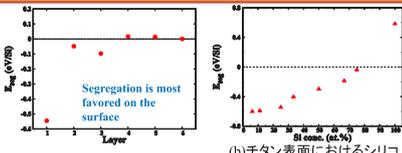
本研究

α -Ti (0001) スラブモデル

α -Ti (0001)表面における酸化の第一原理計算により、酸化メカニズムとそのシリコン添加の効果の解明する。

- 第一原理MD @ 973K
- (NVT) const.
- 酸素を連続的に供給
- 10ps毎に4分子、最大50psのシミュレーション
- シリコン添加の効果
- Pure Ti
- 18.75 at.%Si - Ti

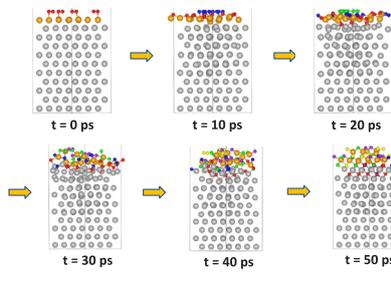
チタンへのシリコン添加の安定性解析



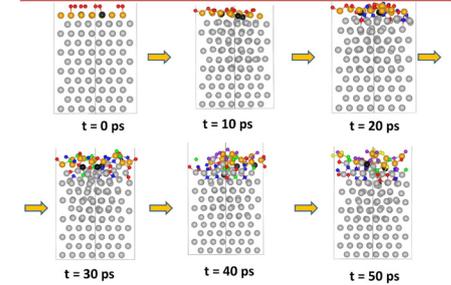
(a) シリコン偏析エネルギーのレイヤー依存性
(b) チタン表面におけるシリコン偏析エネルギーのシリコン濃度依存性
(α -Ti固体内Si溶解度 ≤ 0.6 wt.%)

- (a) $E_{seg} = [E[Si \text{ in a layer of Slab}] - E[Si \text{ in bulk region of Slab}]]/N$
- (b) $E_{seg} = [E[Si \text{ in a surface of Slab}] - E[Si \text{ in bulk region of Slab}]]/N$
18.75 at.%Si 表面偏析-Tiを導入

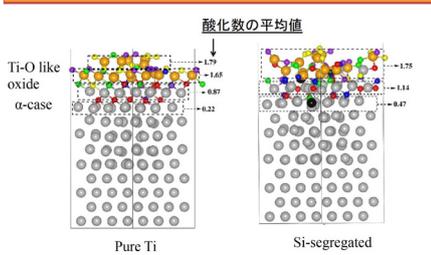
MDスナップショット (pure Ti) @973K



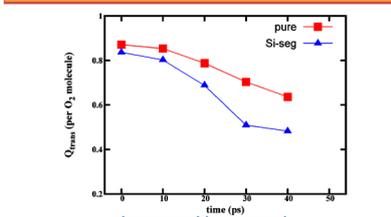
MDスナップショット (Si-Seg. Ti) @973K



50psにおける酸化状態の比較



TiからO₂への電荷移動量解析



I. 表面におけるTiからO₂への電荷移動と解離
II. 原子状酸素の固体内への拡散

酸化メカニズム模式図

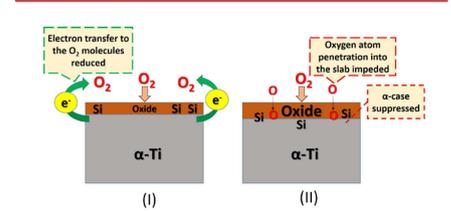


図: 酸化メカニズムとシリコン添加の効果

本研究に基づく耐酸化性に優れたTi, Ti合金の提案



まとめ

- 純チタンおよびシリコンがチタン表面に偏析したチタンの、表面酸化のメカニズムを解明するため、実用温度領域(973K)における第一原理MDを行った。
- チタン表面の初期酸化メカニズムが二つの素過程に分けられる事を示した。
- シリコン添加により、チタンから酸素への電荷移動と、酸素の固体内拡散の両者が抑制される事が分かった。
- 本研究結果に基づき、耐酸化性に優れた合金を提案した。

図: 本研究に基づいて提案する耐酸化性に優れたTi, Ti合金。Ti-Si合金のコーティングにより表面酸化と酸素の固体内拡散を抑制。

論文リスト

> S. K. Bhattacharya, R. Sahara, T. Kitashima, K. Ueda, and T. Narushima, Jpn. J. Appl. Phys. **56** (2017) 125701.
 > W. Zhou, R. Sahara, and K. Tsuchiya, J. Alloys Compd. **727** (2017) 579.
 > S. K. Bhattacharya, R. Sahara, K. Ueda, and T. Narushima, Sci. Tech. Adv. Mat. **18** (2017) 998.
 > S. K. Bhattacharya, R. Sahara, S. Suzuki, K. Ueda, and T. Narushima, Appl. Surf. Sci. **463** (2019) 686.
 > K. Maeda, S. Suzuki, K. Ueda, T. Kitashima, S. K. Bhattacharya, R. Sahara, and T. Narushima, accepted to J. Alloys Compd. (2019).



— ポスター講演 3 —

ユニット B26

“高強度 Ni 基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発”

高強度Ni基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発

本研究では航空機用Ni基ディスク材(AD730, TMW合金等)について、加工性を飛躍的に改善する革新的なプロセスを開発し、実機部品の製造プロセスを提案、最適化することを目的とする。これにより、火力発電の発電コスト低減、国内タービンメーカーの競争力向上、二酸化炭素排出量の削減に寄与するだけでなく、国内素材メーカーや航空機エンジンメーカーの競争力向上にも貢献可能。

事業目的・研究概要

航空機用Ni基ディスク材の加工性を大幅に向上させ、発電用ガスタービンへの適用を目指す。高強度Ni合金の母相(γ 相)と析出強化相(γ' 相)の整合界面を熱間鍛造と熱処理による組織制御を行い、非整合化することで強化能力を消失させ、加工性を大幅に向上できることを見出した(以下MHプロセスと称する)。

本研究では、加工性を向上させる組織の最適化のために、組織形成メカニズムの解明を行っている。また、実機部品製造プロセスの概略設計を行い、実機模擬部品の試作を通してコストと加工性の評価を行う。さらにMHプロセス特有の組織形態における鍛造シミュレーション(DEFORM)の最適モデルの検討とパラメータの評価・検証を実施することで、超高強度鍛造Ni基鍛造材のガスタービン適用を目指す。

■技術の特徴

(MHプロセス:特許第5869624号, 出願人MHPS)
高強度Ni合金の母相(γ 相)と析出強化相(γ' 相)の整合界面を熱間鍛造と熱処理による組織制御を行い、非整合化することで強化能力を消失させ、加工性を大幅に向上できることを見出した。

■成果

- 1) γ' 相の非整合化メカニズム解明
 γ 相の再結晶により、整合析出した γ' 相の周囲が新たな γ 相の再結晶粒によって囲まれることで、 γ/γ' 相界面が非整合化することが明らかになった。
- 2) 熱間・冷間・切削加工性の大幅な向上
 γ 相と非整合 γ' 相とからなる加工性の良い組織形成の熱処理条件を検討し、延性の大幅な向上を確認。
MHプロセス適用AD730の冷間圧延を実施し、焼鈍無しで40%の圧延に成功し、実用上十分な冷間圧延特性(量産可能)を有することを確認。
切削加工によりMHプロセス適用AD730の鍛造翼を試作。700℃級蒸気タービン材料と同等の切削コストかつ、再硬化熱処理による強度回復および寸法変化に問題がないことを確認した。
MHプロセス適用AD730の型鍛造試験を行い、低ひずみ速度の超塑性加工を利用することなく、920℃で良好な熱間加工性が得られることを確認した。

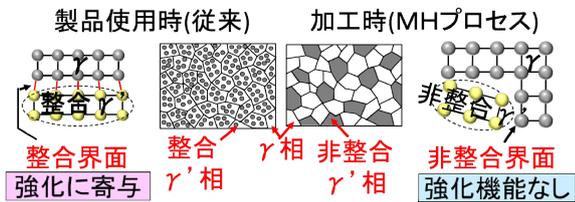
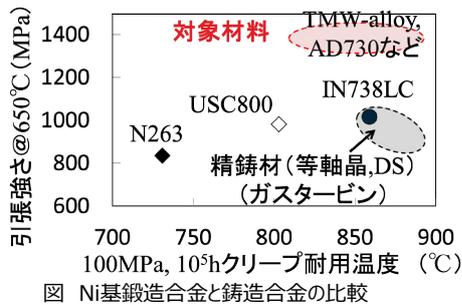
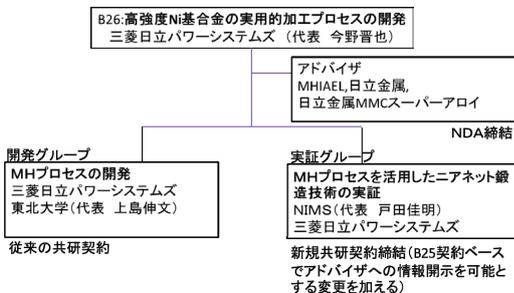


図 MHプロセスのメカニズム概要

■体制

MHPS) 実機製造プロセスの高度化および実機模擬部品試作
東北大) 鍛造シミュレーション技術開発において、組織変化のモデリング
NIMS) 鍛造シミュレータの操作、製造性実証



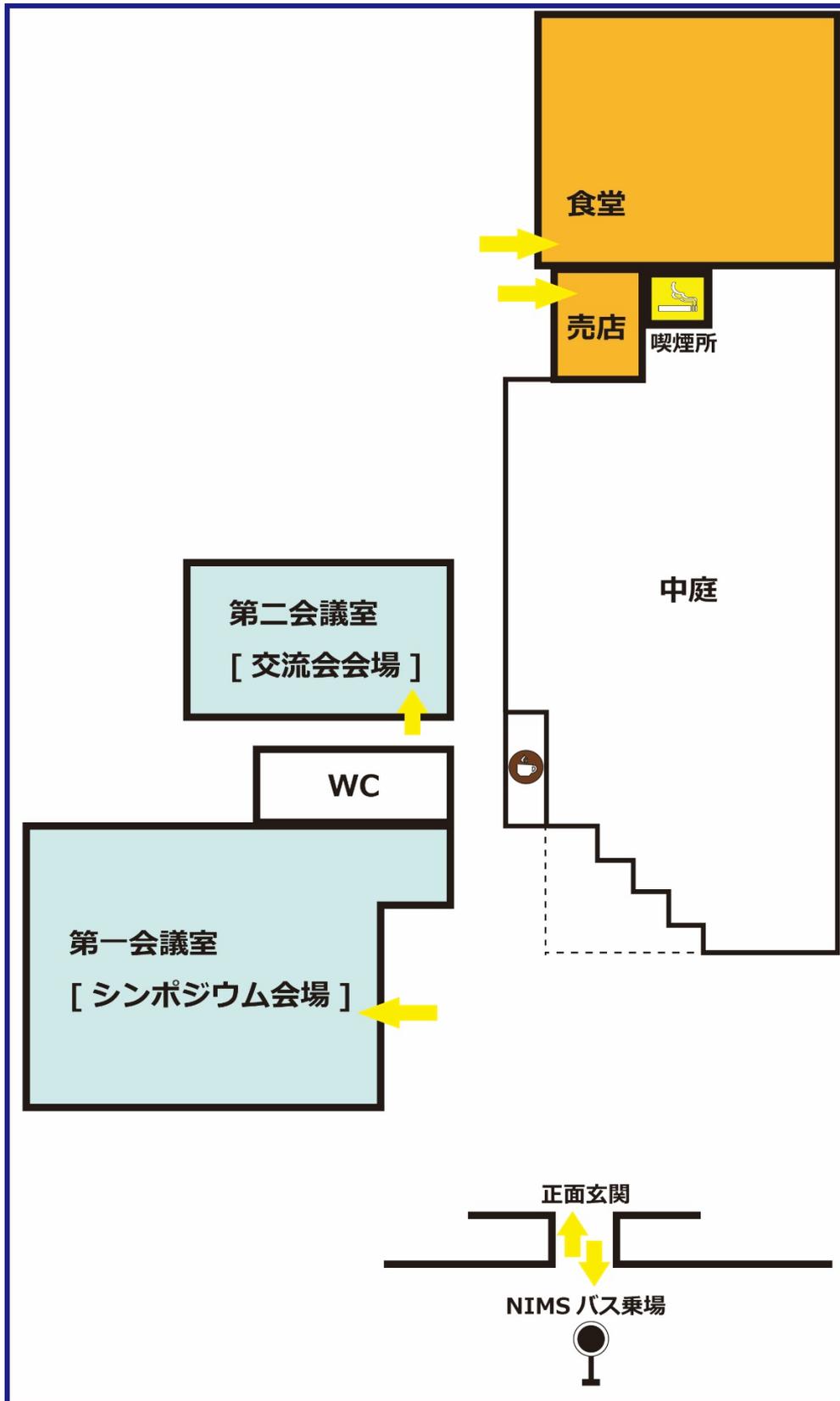
出口戦略・将来展開・応用分野等

本研究終了後、本研究で得られた成果、選定した材料により、実機部品の試作、実機における実証試験を計画する。実証試験完了後、燃焼部品、タービン動翼、タービンディスクに適用できる可能性が高く、三菱日立パワーシステムズが事業化検討を行う。
産業用ガスタービンでは、認証、規格を必要としないため、航空機部品への適用と比較して、実用化が容易である。

所属・名前 三菱日立パワーシステムズ株式会社 今野晋也
代表者のメールアドレス shinya_imano@mhps.com

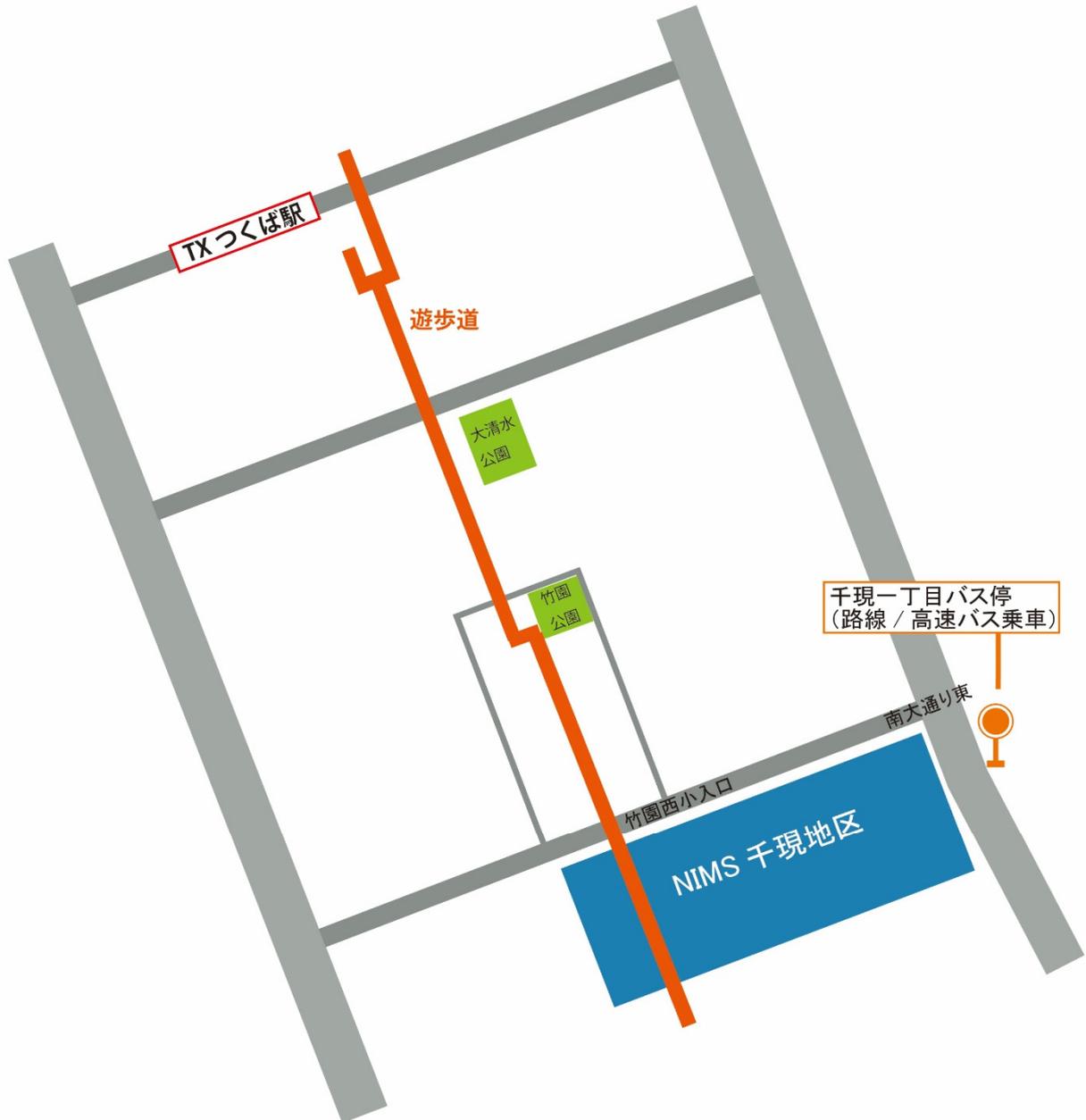


食堂等マップ



アクセスマップ

(NIMS～駅のルート, 公共バス乗り場)



NIMS バス時刻表 (TX つくば駅の乗継ぎ)

千 現 発 定 期 便 運 行 表

各発車時間は目安であり、道路状況により多少変動します。
また、各停車場所では基本的に停車時間をほとんど設定しておりませんので、ご注意ください。

TXつくば駅時刻表 (平日) Tsukuba Express Schedule		定期便時刻表 1号車 (赤字) 2号車 (青字) 3号車 (緑字)	
快速 (赤字) 通勤快速 (オレンジ) 区間快速 (青字) 普通 (黒字)		千現発	つくば駅着
15	03 11 20 33 41 50	15:23	15:30
		15:53	16:00
16	03 11 20 31 41 50	16:03	16:10
		16:23	16:30
		16:36	16:43
		16:53	17:00
		17:03	17:10
17	02 11 22 33 42 50	17:08	17:15
		17:23	17:30
		17:38	17:45
		17:53	18:00
		18:03	18:10
18	02 10 18 29 31 41 51	18:08	18:15
		18:23	18:30
		18:48	18:55
		19:03	19:10
19	00 02 11 19 30 32 41 49		

公共・高速バス時刻表

1) 公共バス (関東鉄道)

千現一丁目バス停 荒川沖駅西口行時刻表			
15	25	55	
16	22	55	
17	29	32	47
18	10	32	55
19	20	37	
20	02	25	52

2) 高速バス (関東鉄道/JR)

[高速バス]千現一丁目→東京駅行時刻表			
15	03	23	43
16	03	23	43
17	03	23	43
18	03	23	43
19	03	23	43
20	03	23	43

SIP シンポジウム 講演概要集

－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－

発行 2018年12月14日
国立研究開発法人物質・材料研究機構
National Institute for Materials Science
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
<https://www.nims.go.jp>

DOI 10.11503/sip-symp-20181214

編者 SIP シンポジウム組織委員会 (順不同)

御手洗 容子 (NIMS), 藤田 陽一 (日本エアロフォーシ), 長田 卓 (神戸製鋼所),
岡島 琢磨 (大同特殊鋼), 青木 宙也 (日立金属), 柳本 潤 (東大), 柳田 明 (電機大),
吉田 佳典 (岐阜大), 松本 洋明 (香川大), 松本 良 (阪大), 古原 忠 (東北大金材研),
及川 勝成 (東北大), 新家 光雄 (名城大), 小林 覚 (東工大), 湯川 伸樹 (名大)

事務局 川島 義也, 岸本 直樹 (以上 NIMS)

印刷 前田印刷株式会社 筑波支店
〒305-0836 茨城県つくば市山中 152-4

©2018 National Institute for Materials Science (NIMS)

編者及び著者の許可なく本概要集の全部もしくは一部を転載あるいは複製することを禁じます。