

# 耐熱合金・金属間化合物等の 創製技術開発

Development of Innovative Technology of High Temperature Ti- and Ni-based Alloys and TiAl-Intermetallic Compounds

航空機用耐熱合金の革新的加工技術と  
高機能次世代TiAl金属間化合物の実用化を目指して



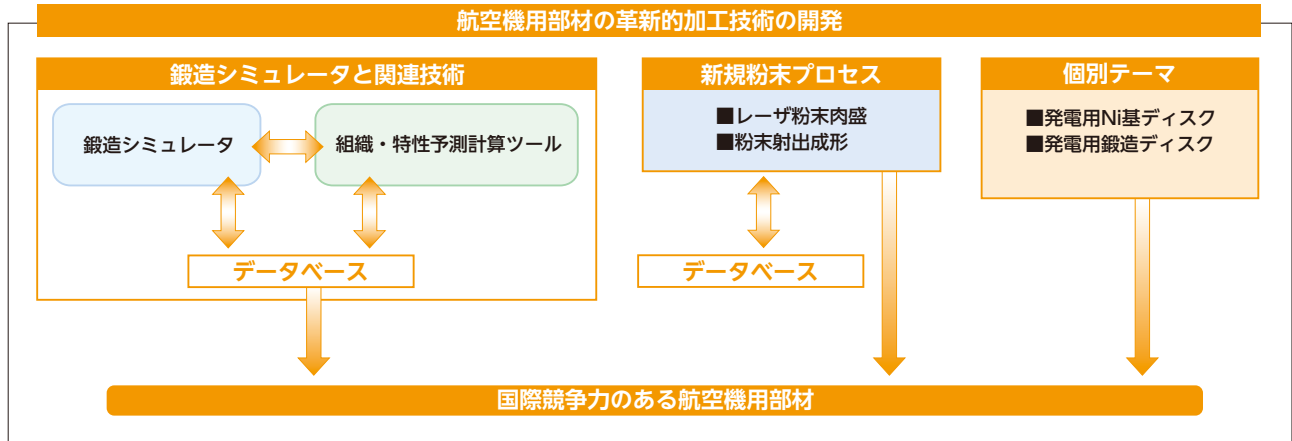
- 耐熱合金のTi合金、Ni基合金に関して、その鍛造技術、レーザ粉体肉盛技術、金属粉末射出成形技術等の加工技術と組織・特性予測計算ツール、これらを支えるデータベースを一体として開発・構築します。
- 航空機用高圧圧縮機や低圧タービン翼、発電用タービン翼に、新材料として注目されるTiAl金属間化合物を応用するために、材料設計、鋳造・鍛造技術、電子ビーム積層造形技術を開発します。

## 革新的構造材料

 戦略的イノベーション創造プログラム  
Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

## コンセプトとアプローチ

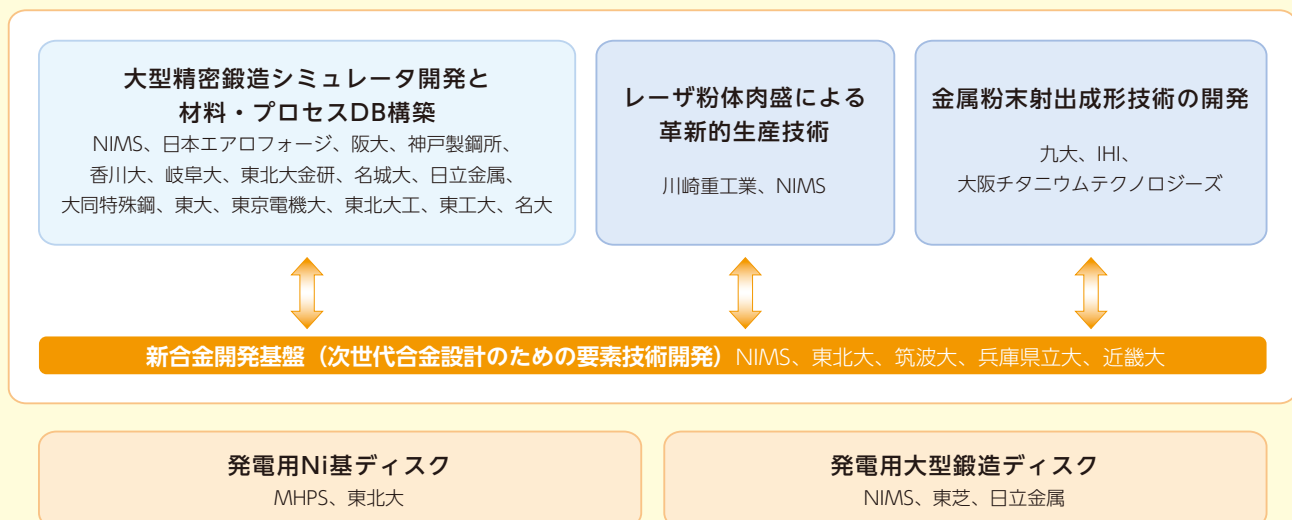
革新的プロセスを用いた航空機エンジン用耐熱材料創製技術開発  
PRISM (Process Innovation for Super-heat resistant Metals)



国際競争力のある航空機部材等を創出する為、耐熱合金の革新的加工技術の開発を行います。

鍛造シミュレータ (大型鍛造プレス機) を用いたTi合金、Ni基合金鍛造材のデータベース (DB) を作成すると共に、信頼性の高い組織・特性予測ツールを構築します。これらを活用することで、求められる特性を有する部材の最適鍛造方案を最短で提供できるシステム、及び拠点を構築します。新規粉末プロセスのレーザ粉体肉盛、粉末射出成形では、構築するDBを活用し、ニアネット成形による高生産性、低コスト化した部材創製法を確立します。個別テーマでは、Ni基合金等の発電用ディスクを独自の加工法により創製する技術を開発します。

## PRISMのユニット構成と役割



大型精密鍛造シミュレータ関連では、産官学の15機関が結集し、航空機エンジン用耐熱材料のTi合金、Ni基合金の鍛造技術、組織・特性予測計算ツールをDB構築と共に開発します。他のユニットでも産学官連携が図られ、実用化に向けた取り組みを行っています。新合金開発基盤にはアドバイザーとして企業が入り、産学連携により製造現場に繋がる基盤研究を行っています。

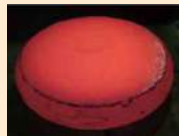
# PRISMの研究開発

## 鍛造シュミレータと関連技術

### NIMS拠点

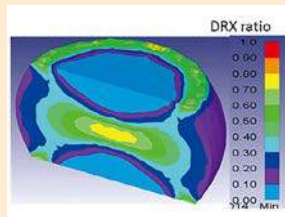


大型鍛造シュミレータ



鍛造材

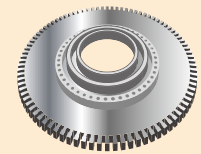
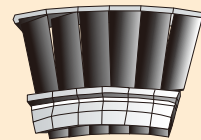
データベース



組織・特性予測  
計算ツール

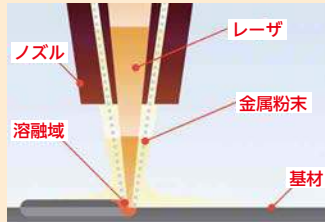
### 実用化目標

航空機エンジン耐熱部材の  
最適鍛造方案の短納期提供

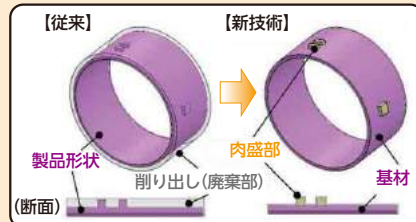


タービンの静翼、ディスク等

## レーザ粉体肉盛（LMD）技術

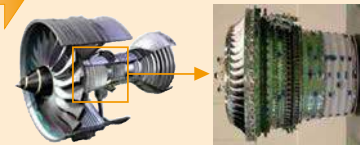


- ニアネット成形による高生産性、低コスト化
- 川崎重工のLMDプロセス開発とNIMSの非破壊検査技術



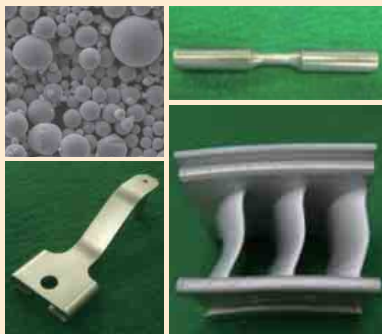
### 実用化目標

大型Ti合金製航空機  
エンジン部品へ適用  
(~2020年)

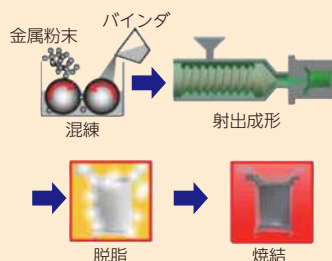


例：IPC(Intermediate Pressure Compressor)

## 金属粉末射出成形（MIM）技術



- MIM部材の高性能化（九大）
- 高品質Ti粉末製造（OTC）
- MIM部品製造技術開発（IHI）



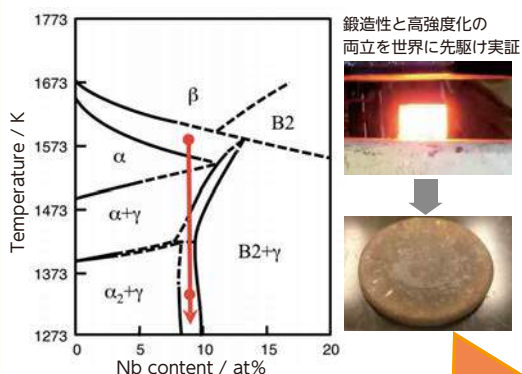
### 実用化目標

航空機エンジン部品向け  
高品質・高精度MIM技術の  
実用化

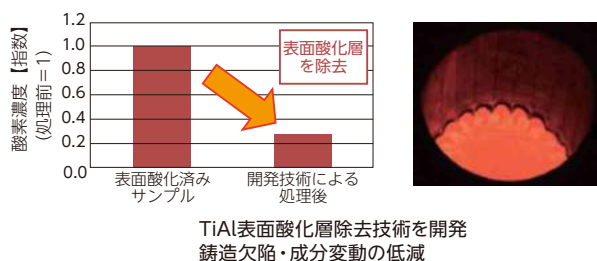
- N基合金MIM：  
データベースを構築し、  
実製品へ適用
- Ti合金MIM：  
動的破壊強度を改善し、  
実用に耐えることを示す

# ジェットエンジン用高性能TiAl基合金の設計・製造技術の開発 東工大拠点の研究開発

## 組織設計指導原理【東工大】

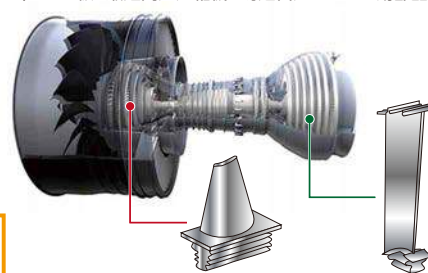


## 低コスト高品位鋳塊製造【神戸製鋼所】

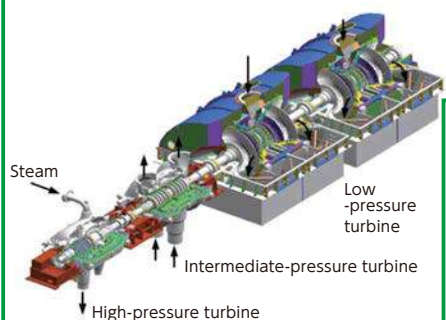


## 圧縮機／タービン部材の特性評価【IHI】

航空機エンジン部材の製造  
(800℃級、鍛造高圧圧縮機、鋳造低圧タービン用部品)



## 650℃級蒸気タービンローター材への応用【MHPS・東工大】



## 電子ビーム積層造形技術【大阪大・金属技研・NIMS】



## 東工大拠点のユニット構成と役割

高性能合金の組織・プロセス設計指導原理の構築  
東工大

ジェットエンジン用高性能TiAl基合金の  
設計・製造技術の開発

高品位・低コスト素材製造技術開発  
神戸製鋼所

革新製造プロセス開発／検証  
IHI

方向制御層状TiAlタービン翼の  
製造技術開発  
大阪大学・金属技研・NIMS

火力発電蒸気タービンプラント用  
TiAl鍛造合金動翼の開発  
三菱日立パワーシステムズ・東工大

比強度と耐熱性に優れた高機能次世代TiAl金属間化合物の、組織設計指導原理を東工大で構築します。その原理に基づいて提案された開発合金の溶解製造プロセス技術を神戸製鋼所で、ジェットエンジン翼の精密鋳造・鍛造によるものづくりプロセス開発をIHIで行い、産学が密接に連携して、2020年の実機適用をめざします。その他に、TiAl金属間化合物の電子ビーム積層造形技術、および発電用蒸気タービンへの応用研究を個別テーマで行います。



国立研究開発法人  
科学技術振興機構  
Japan Science and Technology Agency

イノベーション拠点推進部 SIPグループ  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町  
<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/index.html>

## 耐熱合金・金属間化合物等の創製技術開発 研究者紹介

耐熱合金・金属間化合物等の  
創製技術開発への期待岸 輝雄 TERUO KISHI  
SIP革新的構造材料PD

本研究開発により、実部品製造時の鍛造技術、組織や特性予測等のシミュレーション技術などを駆使して、高性能・高強度・高信頼性な大型耐熱部材を鍛造で高精度に作り込むための塑性加工法を確立し、新素材の早期利用技術を促進することが期待されています。また、新たな製造技術として、大型化・量産化につながる革新的金属材料加工技術の開発を産学官の連携の場を構築し達成することを期待しています。

領域長／拠点長  
御手洗 容子 YOKO MITARAI  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

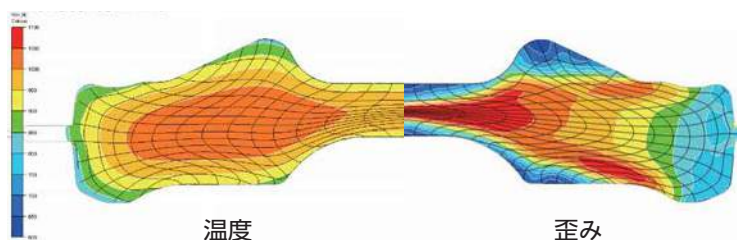
本拠点では航空機部材を中心に個々の部材ではなく、それらを創製する為の革新的加工技術を研究開発します。鍛造技術では、NIMSに導入した大型鍛造シミュレータを用いたDBや予測計算ツールを構築し、企業での競争力ある鍛造部材創製に生かします。レーザ粉体肉盛、粉末射出成形では、従来の削り出し法から直接成形法により、大幅な工数・原材料削減を実現します。個別テーマでも独自成形・加工技術による従来技術の革新を狙っています。

## 鍛造シミュレータと関連・基盤要素技術

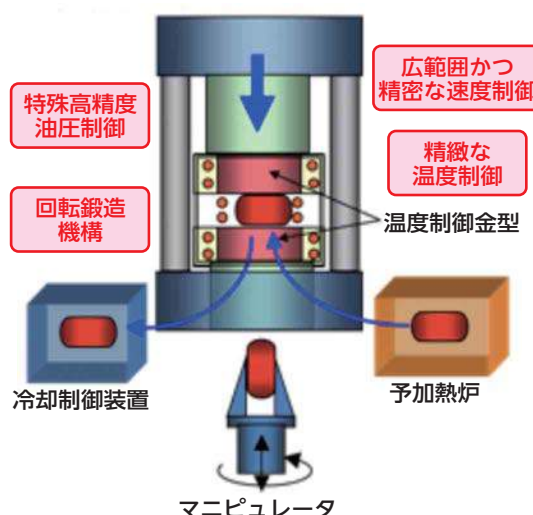
キーワード：Ti合金、Ni合金、鍛造技術

御手洗 容子 YOKO MITARAI  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
構造材料研究拠点耐熱材料設計グループ石外 伸也 SHINYA ISHIGAI  
日本エアロフォージ株式会社 技術本部

航空機ジェットエンジン用耐熱素材としてTi合金、Ni合金が益々使われるようになり、国際的に競争力のある部材を創出することは喫緊の課題です。このテーマでは、特に、その鍛造加工に関して、求められる特性を満たす部材を得る最適鍛造方案を迅速に生産企業に提供する為、高精度多機能大型鍛造シミュレータと鍛造部材の組織・特性を予測する計算ツール、これらを支えるデータベース（DB）を一体として開発・構築します。鍛造シミュレータ、計算ツール、DBを拠点として運用して行くことで、DBや計算ツールのさらなる高度化を図ります。これらの高度化に資する為、計算手法や合金不純物などの基盤要素的な研究も合わせて行っており、将来的にこれらの成果を反映する予定にしています。



## 高精度多機能大型鍛造シミュレータ



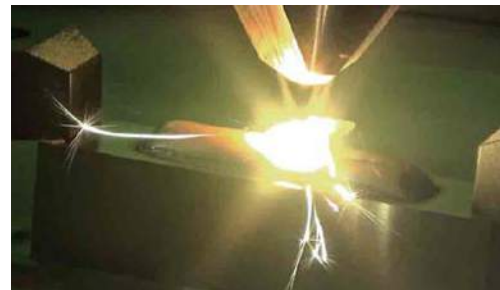
## 航空エンジン部品の低コスト・高レート生産に向けた レーザ粉体肉盛による革新的生産技術開発

キーワード：Ti合金、ニアネットシェイプ、レーザ粉体

井頭 賢一郎 KENICHIRO IGASHIRA  
川崎重工株式会社 技術開発本部 技術研究所



航空エンジン部品には、軽量かつ高強度なTi合金が多く使用されています。その製造は大きな鍛造素材からの削り出しが一般的となっており、現状では、削り部の無駄が多く発生しています。このため、素材費・機械加工費の低減が求められています。これらの課題を解決する為に、ニアネットシェイプ成形技術としてレーザ粉体肉盛法に着目しています。肉盛品質には、レーザ出力、スポット径、その他多くのプロセス条件が複雑に関係します。Ti合金のレーザ粉体肉盛品の材料特性データを取得し、プロセス条件と関連付けてデータベース化することで、レーザ粉体肉盛に最適なプロセス条件を確立します。航空エンジン部品の品質基準に対する評価技術も確立することにより、1~2メートルサイズの航空エンジン部品への適用を目指します。



## Ti合金MIM材の 動的破壊強度の 飛躍的改善

三浦 秀士 HIDESHI MIURA  
九州大学大学院  
工学研究院機械工学部門



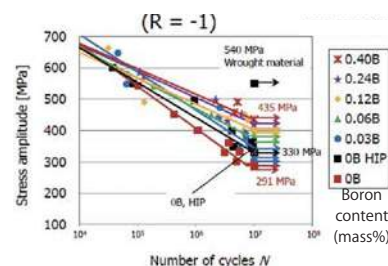
## 航空機 エンジン部品用の高品質、 高精度MIM技術開発

黒木 博史 HIROSHI KUROKI  
株式会社IHI  
航空宇宙事業本部



キーワード：航空エンジン、粉末冶金、射出成形、焼結、Ni合金、Ti合金、第3元素添加

九州大学はTi合金の緻密化と組織の微細化により、静的、動的破壊強度の大幅な向上を図ります。TiB<sub>2</sub>の粉末添加による疲労強度向上を確認しました。更に、溶製材の強度向上に有効なCr、Moなどを検討します。これらの元素の添加量や熱処理等の強度特性に及ぼす影響を明らかにし、強度向上のメカニズムについても解明します。IHIはNi系耐熱合金、Ti合金のMIM材の材料データを整備し、大型MIM材の高精度な製造技術を開発することで、ジェットエンジン部品への適用を目指します。



TiB<sub>2</sub>添加によるチタンMIM材疲労強度の変化

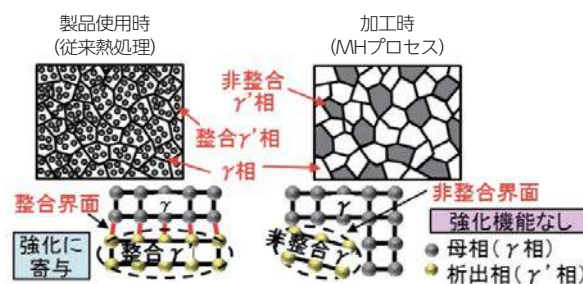
## 高強度Ni 基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発

キーワード：Ni基鍛造合金、合金設計、組織制御

今野 晋也 SHINYA IMANO  
三菱日立パワーシステムズ株式会社 研究所 火力システム研究部



航空機向けに開発が進められている高強度鍛造Ni基合金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します。担当研究者は、高強度Ni基合金の母相(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ました(以下MHプロセスと称します)。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ます。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います。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、実機部品製造プロセスの最適化をはかります。



MHプロセスによる材料軟化メカニズム

## 耐熱合金・金属間化合物等の創製技術開発 研究者紹介

## 発電用蒸気タービン向けの高強度大型鍛造ディスク部材の開発

キーワード：蒸気タービン、鍛造ディスク、組織制御、強度・靱性

木村 一弘 KAZUHIRO KIMURA

国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
構造材料研究拠点構造材料試験プラットフォーム

蒸気タービン最終段の長翼化や高効率翼の採用においては、タービンの高速回転による遠心力に耐え、かつ優れた耐SCC（応力腐食割れ）性を有する軽量・高強度・高靱性な動翼材料に加え、その動翼を支持できる強度・靱性と耐SCC性を有するローター材が必要となります。ローター材には現状、比較的安価な低合金鋼が用いられており、高合金鋼やチタン合金が用いられる動翼に対して、さらなる高強度化が難しい状況です。そこで、強度・靱性と耐SCC性に優れた大型の鍛造ディスク部材を開発し、ローターの最終段に適用することにより、火力発電および地熱発電設備の効率向上と大出力化を達成し、温室効果ガスの排出抑制と電力価格の低減を通して、我が国の産業競争力強化と経済発展に貢献します。

中村 和夫  
KAZUO NAKAMURA  
連携コーディネータ

耐熱合金をテーマとするPRISMは個別テーマも含めると29機関（11企業、15大学、3公的機関）で構成され、中でも鍛造シミュレータを扱うユニットは単独で15機関（4企業、10大学、1公的機関）が参加しています。効率的な研究開発を行う為、複数のワーキンググループを構築し、テーマ毎に活動すると同時に、その成果をユニット全体で共有するようにしています。また機関数が多い為、メール審議やWeb会議など

も活用して各機関の連携を図っています。大型鍛造シミュレータはSIP革新的構造材料での最大の投資案件で、DBや組織・特性予測計算ツールと三位一体で国際競争力のある鍛造技術を開発すると共に、SIP後も脱み、鍛造技術開発に関する産学官連携の一大拠点としていく予定です。

## 問い合わせ先

e-mail/NAKAMURA.Kazuo@nims.go.jp

## 耐熱合金・金属間化合物等の創製技術開発 研究者紹介

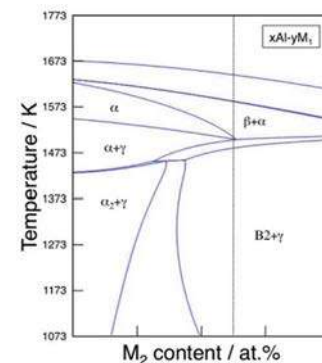
## 高性能TiAl基合金の組織・プロセス設計指導原理の構築

キーワード：多元系状態図、組織制御、クリープ強度、耐酸化性

竹山 雅夫 MASAO TAKEYAMA

東京工業大学 物質理工学院

本プロジェクトでは、高性能TiAl基合金の2020年の量産化を目標に、東京工業大学を拠点として、神戸製鋼所、IHIの3機関が有機的に連携し、次世代航空機用ジェットエンジンの低圧タービン（LPT）翼及び高圧圧縮機（HPC）翼に搭載可能な高性能鋳造及び鍛造TiAl基合金の組織設計、製造、成型プロセス技術を開発する。本ユニットの役割は、LPT及びHPC翼に求められる特性を満たし、既存のNi基合金を凌駕する多元系TiAl基合金の開発に資する組織設計指導原理を、状態図、機械的性質、耐酸化性に基づいて構築することである。これまでに、組織設計の基礎となる多元系状態図の構築を行い（右図）、それに基づいて種々の相変態を利用すると、自在な組織制御が可能であることを明らかにした。また、組織制御した合金のクリープ強度と耐酸化性を向上させた。得られた知見から、中間目標に向けた翼形状の機械試験に供するPrototypeの鍛造および鋳造合金を設計・提案した。



Ti-Al系多元系状態図

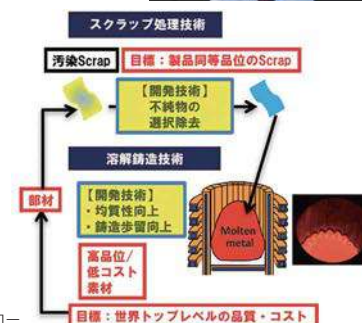
## 高品位・低コスト素材製造技術開発

キーワード：溶解鋳造、均質性、鋳造歩留、スクラップ、不純物除去

坂本 浩一 KOICHI SAKAMOTO

株式会社神戸製鋼所 技術開発本部

東工大が設計・提案する合金を目標組成範囲に調整でき、かつ生産性の高い溶解鋳造プロセスの開発を行う。また、溶解原料としてスクラップを活用し、高品位と低コストを両立させた競合優位性の高いTiAl基合金製造技術を確認する（右図）。これまでの成果として、溶解鋳造プロセスでは、溶湯成分を狭幅制御可能な溶解技術を確認し、インゴット内成分変動を低減可能な鋳造条件を明確化して、鋳造歩留まりを改善した。また、スクラップ活用についても、ハイドフラックス法による表面酸化物除去効果の原理的有効性を確認し、酸素の選択除去が可能な最適処理条件（フラックス組成）を明確化した。今後は、量産スケールでの実証に向けて、プロセス条件の最適化を進める。



TiAl基合金製造プロセスフロー

## 革新製造プロセス開発／検証

キーワード：耐熱性、精密鋳造、ニアネットシェイプ、鍛造

高橋 聡 SATOSHI TAKAHASHI

株式会社IHI 基盤技術研究所

TiAl合金は本格的な研究が開始されて四半世紀が経ち、近年、航空機エンジンに搭載されたが、エンジンの高温化に伴い、さらに耐熱性の高い合金が求められている。一方で、競合材料であるNi基超合金と比較し、鋳造性・鍛造性が劣ることから強度のみならず製造性も鑑みた合金開発が必要である。本研究では製造性の観点から得られた知見を合金設計、素材製造にフィードバックすることで合金開発を進めている。現在までに開発合金強度評価用の丸棒鋳造、パンケーキ鍛造（右図）を実施し、強度目標を上回る合金が得られてきている。さらにこれまで社内に蓄積してきたTiAlの鋳造・鍛造技術を進化させ、開発合金に適したニアネット鋳造技術、鍛造技術の開発・実証を行う。



強度評価用鍛造/パンケーキ

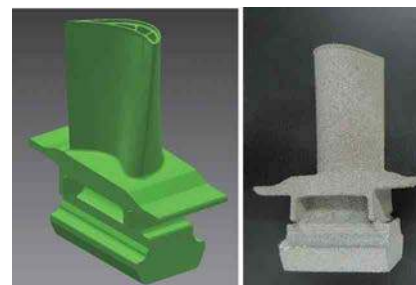
## 方向制御層状TiAlタービン翼の製造技術開発

キーワード：TiAl合金、タービン翼、3Dプリンタ、積層造形、組織制御

安田 弘行 HIROYUKI YASUDA  
大阪大学 大学院工学研究科



航空機用ジェットエンジンの高効率化に資することを目的として、電子ビーム三次元積層造形法により形状ならびに結晶配向を同時に制御したTiAl低圧タービン翼の開発を行う。具体的には、同手法のプロセス条件の最適化により、表面形状、寸法精度、造形密度に優れたTiAl構造体を高効率に作製する手法を確立する。続いて、TiAl合金の組織制御に関するノウハウを総動員して、微細組織ならびに結晶配向の制御によりTiAl構造体の高強度化、高延性化、クリープ特性向上を達成する。現在までに、TiAl特有の微細組織の形成過程を解明するとともに、右図のように、タービン翼形状のTiAl構造体を作製することに成功している。



CADデータとタービン翼

## 火力発電蒸気タービンプラント用TiAl鍛造合金動翼の開発

キーワード：TiAl合金、組織制御、鍛造プロセス、計算状態図

三菱日立パワーシステムズ株式会社 火力システム研究部

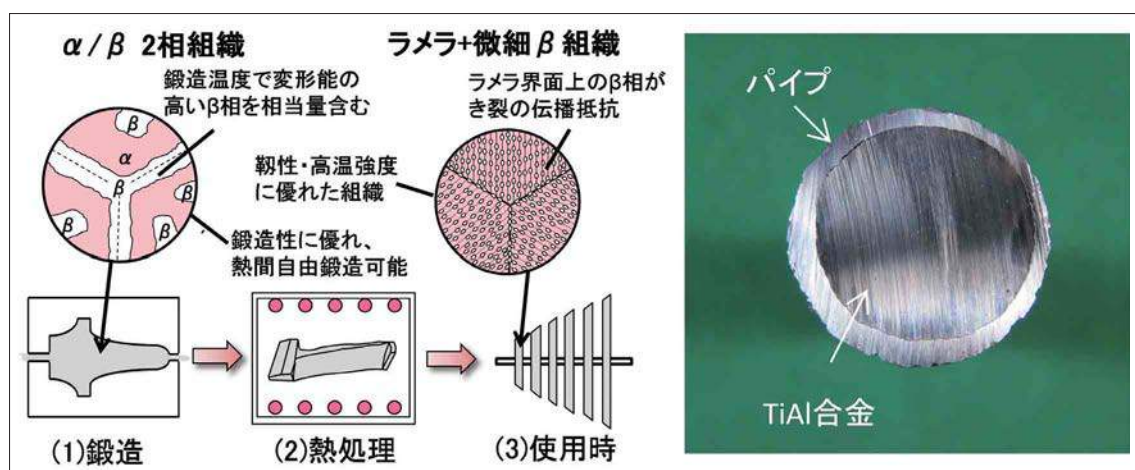


佐藤 順  
JUN SATO



及川 慎司  
SHINJI OIKAWA

火力プラント高効率化の為650℃級蒸気タービンの需要が増加しているがロータ材としてフェライト鋼は600℃級が限界で700℃級A-USC用Ni基合金はコストが課題である。軽量のTiAl合金を動翼に適用できればロータへの作用応力が低減されフェライト鋼ロータの耐用温度を650℃級にできる。本研究では東工大竹山らが提案するβ相を活用した組織制御とMHPSがプラントメーカーとして有するノウハウ・製造設備を用い動翼に適した高靱性・高強度な材料・プロセスを開発し実翼試作により検証する。図はβ相を活用した製造プロセス概念図で、本プロセスにより問題無く鍛造できることを確認している。水蒸気中のTiAl合金の使用例はないため水蒸気酸化・クリープ挙動評価も行う。



β相を活用した動翼製造プロセスおよび鍛造材の断面