

SIP-SM⁴I MAGAZINE

エスアイピー エスエムフォーアイ マガジン

Vol.5 October
2017

SIPプログラムとは、内閣府主導の下、府省・分野横断的な取り組みであり、産官学連携により出口まで見据えた一気通貫で研究開発を推進しています

Feature

1

この人に聞くー 日本エアロフォージ株式会社 技術本部本部長 石外 伸也
日本の航空機部材産業は、
最先端技術とともにラージで勝負に出る

Feature

2

- ◆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
- ◆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

日本エアロフォージ株式会社
技術本部本部長

石外 伸也

株式会社神戸製鋼所 チタン本部にて、航空機の機体やエンジン用材料、特にTi合金の鍛造品の製造技術に長く携わり、社団法人日本チタン協会、日本塑性加工学会、日本金属学会などでの講演を通じて学協会の活動にも協力。我が国初となる5万トンの最先端大型鍛造プレスの国内設置開発のための準備委員会を数年間リードし、2011年の日本エアロフォージ株式会社の設立に貢献。

航空機エンジンに必要な大型の新材料を創成しているB領域。国際競争の激しい航空機産業の中でも、特に大型航空部材における日本の現状や将来の見通しはどうか？ 我が国初となる5万トンの最先端大型鍛造プレス導入による航空用鍛造事業化に貢献した、日本エアロフォージ株式会社技術本部本部長の石外伸也氏に、世界の大型鍛造部材の状況やSIPへの想いについてお話を聞きました。



5万トン油圧鍛造プレス

日本の航空機部材産業は、最先端技術とともにラージで勝負に出る

◆エンジン部材で競争に勝つ

航空エンジンの大型部材の重要なパーツは鍛造で製造されていますが、従来大型鍛造設備がなかったことから日本製のものは商用化できませんでした。国内の航空機産業の需要家である重工会社では、中・大型の鍛造品は輸入に頼っていました。日本の鍛造には長い歴史と高い技術があり、実際のところ自動車産業向け鋼材製の小型型鍛造品においては我が国の鍛造技術は世界トップです。しかし荷重4万トンを超えるラージ領域の国内産の鍛造品は日本エアロフォージが設立されるまではありませんでした。ちなみにラージというのは、プレス力量で4万トン越え、ミドルは3万～4万トン、スモールはそれ以下のものですね。

私は20年ほど前から世界をまわって航空機産業の動向を調査、見てきましたが、日本が欧米に遅れを取っていることを何度も痛感しました。そんな中、大型プレスの研究会を進めていくと、日本の航空、発電分野の重工会社などのメーカー企業や海外需要家において、ラージつまり大型部材のニーズが相対的に高く重要であることがわかりました。多くの需要家および素材会社から「国内に大型のプレス機がいる」という声が高まり、5万トン級にターゲ

ットを絞って日本初の先端鍛造システムの設置に向けた開発準備を進めることとなりました。そして2011年に日本エアロフォージ株式会社が設立され、5万トンの最新鋭大型鍛造プレス機の導入に至りました。私もはこのプレス機を使って、素材会社から提供された素材から大型鍛造品を製造し、中間加工を経て需要家に提供しています。

近年MRJやホンダジェットのように日本の航空機が世界にどんどん出ていこうとしています。残念ながらエンジン部材は海外メーカーのもです。機体についてはCFRPなどでメイドインジャパンの高品質の部材が作れているし、近年世界でも認められてきています。今後、本当の意味で日本の航空機産業が世界で自立するためには、エンジン部材で競争に勝っていかなければならないと思います。次世代の第一のビジネスターゲットはラージにある、と強く感じています。

◆航空機産業は弱肉強食。欧米の後追いでも地道な研究は必須

大型民間航空機の一般的な寿命は今30年くらいになっていますね。航空機産業では、一旦ビジネスを勝ち取ることができれば、メンテナンスやオーバーホールのサービス込で長年に渡

って仕事のチャンスが広がります。しかし逆に言うと、参入チャンスを逃すと、長期間に渡って実製造ができないということになります。航空機部材メーカーに求められるのは価格に対する競争力だけではなく、部材そのものの耐久性や寿命に関する「信頼」を勝ち取ることです。その信頼は、優れた材料が示す性能の実績データで示すことにより得られます。航空機の特にエンジン部材は設計要件が厳しく高応力での使用になるため、一般には1～2万サイクルが交換時期で、年数にすると10年間もの期間、高い応力と熱に耐え続ける必要があります。エンジン部材でビジネスチャンスを得るためには、使用環境条件で余裕を持って、かつ安定的に適合する材料を供給できること、そしてその材料が十分に他社より優れていることを明確に示さなければなりません。

どうすれば、性能のよい材料を作ることができるのか。アメリカやヨーロッパでも大型部材メーカーは、製造プロセスと材料特性の関係を何年もかけて未だに基礎研究し続けています。航空機産業は弱肉強食です。欧米企業の重要な独自データが公開されることはまずありません。日本は欧米に立ち遅れてはいますが、独自の基礎研究を進める必要がある訳です。私は、日本の鍛造の知識と技術を集結した、緻密な基礎研究の蓄積が不可欠であるとずっと考え

ていましたから、SIPのような国家プロジェクトの中でこの革新的なプロセスを使ったプロセスと材料開発の研究が行われていることを大変うれしく思っています。

◆設備だけあっても競争には勝てない。日本の最先端制御技術がキー

海外でもフランス、中国、アメリカと鍛造用大型プレス機の設備導入競争が続いています。近年、中国で8万トン級の鍛造用大型プレス機も設置されました。しかし、大きなものが他所にできたとしても、我々は負けてはいませんよ。鍛造の世界は、設備だけがあっても優れた特性の鍛造品ができるとは限らないのです。材料って面白いんですよ。鍛造プロセスでは圧力や温度、時間などのファクターとともに、その材料によって変形(材料流動)形態が異なったり、変態、再結晶などの組織変化で個性的な変化と性能特性を見せてくれます。

◆世界トップの鍛造技術を目指して

研究はもちろん大事なんですけど、学術的な研究だけでなく、今回は実用化が大事です。弊社のプレスにはまだ使いこなせていない機能があります。使うためには、きちんとした技術的なバックがないと。正確かつ緻密なベース技術的根拠をもって理論構築し、その上に立った技術として5万トンプレスで実用化する。そのためにはシミュレータが必要です。

鍛造プロセスってルートが無数にあります。その中で最適を探すために実機大型プレスで1,000回試すわけにはいきません。そこで1,000～1,500トンぐらいのものがあると、直接そこに結びつくんですよ。はっきり言うと実験機です。5万トンプレスですごいことをやるためには、それを上回る機能をもった、精度の高いものにシミュレータ機能を持たせてデータを取れるようにするというのが一番。本当に愚直にそうしています。

航空機ジェットエンジン用耐熱素材では、エンジン性能向上のためにTi合金、Ni合金のより性能の高い、すなわち難鍛造材料が求められるようになっていきますから、今までよりずっと精密で制御性の高いプロセスが重要となっています。鍛造のプロ

セス中の中身を目で見ることはできませんが、NIMSに設置された大型精密鍛造シミュレータは、プロセスと材料の変化や特性との関連性を明確にし、エンジン部材実用化の距離を縮めてくれる強力なツールなのです。

◆まだ2合目、これからが面白い

特に私が重視したのは、塑性加工。もの作りには、塑性加工が大事なんです。

まだできていないことがいっぱいあって、塑性加工ワーキングのみんなで一生懸命議論していますよ。本当にわからないところがまだまだあって、もっとちゃんとしたデータをとらないとダメだねと。それはこのSIPに限らず、ポストSIPにも限らず、必ず追及してやるんだと。まだまだ、2合目だと。

学術的な研究だけでは実用化は目指せません。実際の現物を扱う素材メーカーが的確なニーズを研究者たちに強く伝えていくことが大切です。違う領域、違う立場の人たちとの情報交換は役に立ちます。強力な民間企業からのサポート、データの上手な管理と共有が優れた成果を上げ、発展させていくために重要です。

リアルな産官学連携のもと、理論と実績を備えた技術者や研究者が力を合わせれば、優れた鍛造材料に最適な条件ファクターや製造プロセスを見出すことができるはずです。プロセスの条件と材料特性の統一的なデータベースを構築することができれば、新たな材料の設計にも貢献し、信頼性の高い優れた材料提供の実用化が可能となります。

近い将来、日本発のエンジン部材が自信をもって海外に提供されていくようになったら、それは革命的ですよ。そのためにも、大型鍛造のデータベースのスタンダードとなる拠点が必要と感じています。日本人のまじめで正確で、何事もこつこつと継続的に進められる国民性こそがラージに求められる、優れた技術の蓄積につながっていくでしょう。

日本にとってまだまだ道のりは長いかもしれませんが、我が国の航空機産業が名実ともに世界のトップになることを心から願っています。

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



拠点長
御手洗 容子

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



拠点長
石外 伸也

日本エアロフォージ株式会社
技術本部

鍛造組織・特性予測ツール開発を知識と技術で支える『NIMS構造材料研究拠点』

我が国では、1960年代以降、自動車産業を中心として精密鍛造技術は目覚ましい発展を遂げた¹⁾。その後も剛塑性の有限要素法(FEM)による工程解析(CAE)の導入によって、ネットシェイプ化等の加工精度向上と開発期間の短縮といった市場からの相反する要請を両立させ、世界をリードしてきた。

当B領域が貢献を目指す航空機産業においては若干状況異なる。基幹となるエンジン用の大型の耐熱合金鍛造品については、CAEを駆使した熾烈な開発競争がこれまで欧米を中心に繰り広げられてきた。近年はサプライチェーンの最適化追求がコストダウンの要として強く意識され、航空機メーカーから川上の部品サプライヤーへと素材、検査等を担う企業群の一括管理が移譲される等の産業構造の劇的な変化が世界的に起こっている²⁾。我が国でも高品質かつ低コストの部品供給を実現するための強固なサプライチェーンを構築

し、ひいては数10年というエンジンの長期ライフサイクルに亘って利益を享受することが国内航空機産業の維持・発展のために急務であった。これまで競争力のある部品メーカーと素材メーカーをつなぐ大型の鍛造品メーカーの欠如が課題であったが、2011年に設立された日本エアロフォージ株式会社において、世界最大級の5万トン鍛造プレス機が導入され、国内勢にとって念願の素材から部品までを一貫生産するための環境が整備された。

その次のステップは、小型の精密鍛造で培われた企業の製造技術と大学や公的研究機関に蓄積された塑性加工の原理や物性データ等を礎にして、その技術優位性を損なうことなく、大型の鍛造品固有の事象に関するデータを積み上げて早期に競争力のあるFEMツールを構築することに尽きる。これが当領域の使命であり、その中心的役割を担うのが、当プロジェクトの2年目(2016年3月)に物質・材料研究機構

(NIMS)へ設置された1500トン級の鍛造試験が可能な“大型鍛造シミュレータ”である(図1)。



図1 大型鍛造シミュレータ

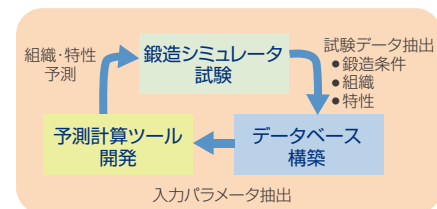


図2 組織・特性予測ツール開発フロー

このシミュレータでは、実験室の数10～100トン級鍛造機では明らかでなかった荷重や被鍛造素材サイズの影響に加え、製造現場では取得困難な鍛造プロセス中の塑性加工データの解析が可能である。試験結果はデータベースとして蓄積され、そこからFEM解析で用いる入力パラメータおよびモデル式の抽出を行う(図2)。

組織・特性予測ツール実現に向けた当領域の要素技術開発は、御手洗・石外両拠点長が統括し、NIMS拠点を中心に行われている。同拠点は、NIMS内の研究組織である構造材料研究拠点によって人的・技術的に支えられている。当領域に参画するNIMS研究者は、構造材料研究拠点に設置されたSIP-鍛造ラボを併任し、NIMS内外にその関与が明確に示されている。

構造材料研究拠点は、NIMSが第4期中長期計画(2016～2023年度)で掲げた重点研究開発領域の一つ構造材料領域を担当する研究拠点として、“社会インフラ材料、輸送機器材料、エネルギーインフラ材料等、国土強靱化や我が国の国際的産業競争力の強化に資する高性能構造材料開発と構造材料周辺技術の研究開発を行う”ミッションを担っている。また、SIP「革新的構造材料」のD領域に参画するNIMS研究者の多くが所属する統合型材料開発・情報基盤部門(情報統合型物質・材料研究拠点)等との連携テーマとして、製造プロセス条件等の入力パラメータから計算科学によって性能・寿命予測を行う統合的材料設計手法の開発も扱っている。前記計画に従って、6つの研究分野及び3つのプラットフォーム(PF)が設置されている(図3)。

当B領域と深く関わっているのは、NIMS拠点の御手洗拠点長が分野コーディネーターを務める②の耐熱材料、超合金、トライボロジーを始め、①及び③の高強度材料等、さらに④～⑦の非破壊評価技術

No	分野及びプラットフォーム(PF)	研究グループ ※赤字表示グループの研究者の一部がSIP-鍛造ラボに併任
①	社会空間材料分野	耐食合金/耐食鋼/振動制御材料
②	エネルギー構造材料分野	耐熱材料設計/超合金/表面界面キネティクス/トライボロジー/構造用非酸化物セラミックス
③	輸送機材料分野	高強度材料/異材接着材料/高分子系ハイブリッド複合材料
④	材料信頼性分野	疲労特性/腐食特性/クリープ特性/材料強度基準
⑤	構造材料基盤技術分野	積層スマート材料/塑性加工プロセス/溶接・接合技術/軽金属材料創製
⑥	構造材料基礎科学分野	計算構造材料設計/構造材料組織解析技術/表面・接合科学
⑦	鍛造PF	鍛造シミュレータ
⑧	構造材料試験PF	クリープ/疲労・腐食
⑨	構造材料解析PF	微細組織解析/力学特性解析

SIPラボ(併任組織):
⇒SIP-鍛造ラボ
⇒SIPインフラ構造材料ラボ

図3 NIMS構造材料研究拠点の組織体制(2017年9月30日現在)

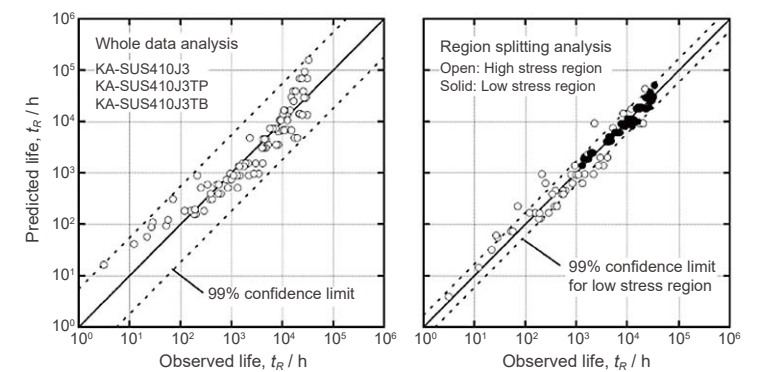


図4 従来解析法(左)と領域分割解析法(右)による寿命予測結果の比較

(積層スマート材料グループ)、計算材料設計、疲労・クリープ・材料強度、そして鍛造技術といった、図3に赤字で示す研究グループである。これらの研究グループに所属する研究者の一部は、SIP-鍛造ラボを併任している。クリープ等の知見及び確立された技術から、計算科学や先進解析等の新たな技術まで、当領域の耐熱材料創製技術開発にあらゆる角度から取り組める理想的な研究ハブ機能を有している。

その長年蓄積された知見や技術の代表例として、クリープ試験が挙げられる。高温用構造材料の規格・基準等に必要な許容引張応力を定めることを目的として、10万時間超の長時間試験が、NIMSの前身：金属材料技術研究所で1966年に開始された。2001年以降はNIMSで引き継がれ、取得結果はクリープデータシートとして発行・公開されている。また、破断試験材の破断特性、微細組織画像、組織の定量評価結果をまとめた金属組織データベースもあ

る。この長年の取組の中で、応力とクリープ破断時間の関係に変曲点があり、その後(高応力域と低応力域)に分割してクリープ強度予測を行うことによって精度が著しく改善する領域分割解析法が見出された³⁾(図4)。また、2011年2月に炭素鋼の試験時間が14,853日となり、世界最長クリープ試験記録を更新したことは良く知られている。

航空機エンジンや発電用タービン向けの耐熱合金も、構造材料研究拠点が誇る経験と実績に裏づけられた技術の一つである。新世紀耐熱材料プロジェクト(第一期1999-2005年度:文部科学省)では、タービン翼用の γ' 析出強化型の単結晶Ni基超合金についてRu添加による γ/γ' 格子定数の不一致が生み出すラフト化(板状)組織と2相界面の微細な転移網によって、競合品と比べて高いクリープ強度を実現した(第4世代合金TMS-138が耐用温度1080℃、第5世代TMS-162等が1100℃⁴⁾)。タービンディ

スク用途では、Ni-Co基超合金（TMW合金）という新たな概念を打ち出し、NIMS合金（TMW-4）では競合品のU720Liと比べて0.2%クリープ時間の約12倍の向上を実現した⁴⁾。これは約50℃の耐用温度向上に相

当する。

耐熱合金に関しては、企業との密接な連携も行っており、2006年6月には共同研究のための「ロールス・ロイス航空宇宙材料センター」がNIMS に設立され、第6世代単

結晶超合金等の研究開発が行われた（現在はセンターの活動終了）。また、2016年7月には「NIMS-日立金属次世代材料開発センター」が設立され、次世代超耐熱合金等の実用化研究を推進している。

航空機部品の厳しい品質保証を意識した評価技術開発

NIMS構造材料研究拠点では、先進的もしくは独自の解析評価装置を取りそろえている。当B領域の大型鍛造シミュレータによって塑性加工された素材から、所望の形状を切り出し、組織解析として電子顕微鏡による微細構造評価や組成・結晶情報等の取得に加え、機械的特性や疲労、クリープ等のパフォーマンス評価も行うことができる。

航空機部品の受注に至るまでには、標準機関及び顧客からの品質認証、開発段階で想定しうるエラーに対する工程規格等による保証、これに関連して最近ではFEMシミュレーションによる製造プロセスの妥当性説明などいくつものゲートが設けられている。また受注後も、不具合品のスクリーニングのため、厳格な検査工程の整備が要求される。当B領域では、このような厳しい品質保証をあらかじめ考慮して、研究開発段階から多角的に材料特性をとらえられる様、優先利用可能な疲労、クリープ試験装置を確保している。また、硬さ、引張試験、破壊靱性試験等の一般的な機械特性評価も行える用意をしている。さらにはNIMS研究者が責任をもって個々の装置を管理し、当領域で扱っているTi合金及びNi基合金に応じた評価技術の開発に日々たずさわっている。

検査工程を意識した評価技術開発としては、近年注目されている付加製造技術（Additive Manufacturing）へ対応するため、X線CTスキャン（図6）や超音波を利用して、レーザー粉末肉盛された基材と肉盛部の界面近傍におけるボイドの高分解能・高感度計測技術を開発している。

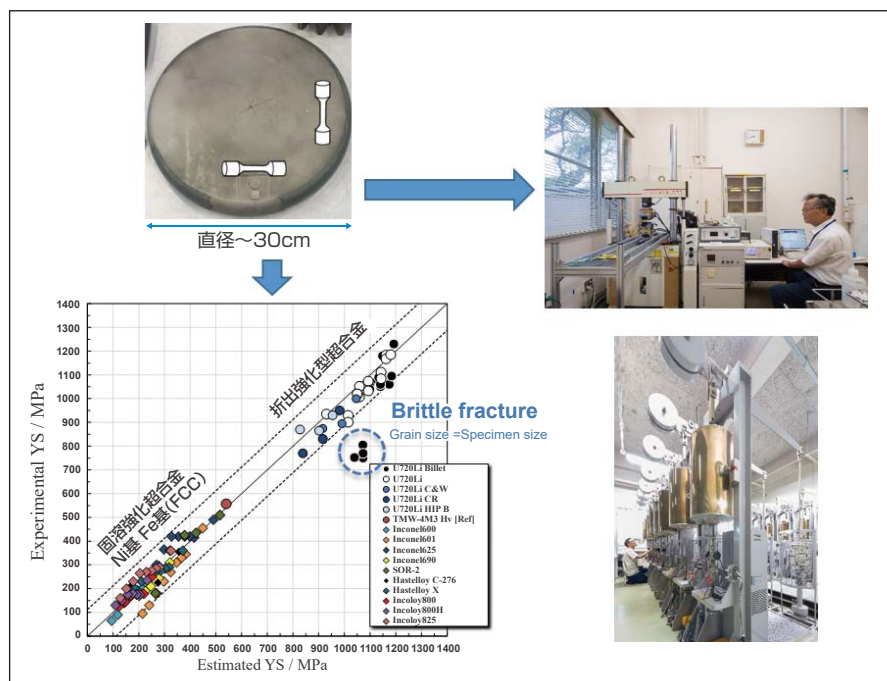


図5 鍛造品の機械的特性(左下:降伏強度)及びパフォーマンス(右上:疲労、右下:クリープ)の評価



図6 X線CTスキャン装置

参考文献：

- 1) “素形材技術戦略ーものづくり基盤を支える素形材技術の羅針盤ー,” 平成 20 年 11 月, 経済産業省 財団法人 素形材センター.
- 2) “欧州の航空機産業における技術開発・サプライチェーンの動向,” 2015 年 4 月, 日本貿易振興機構バリエーション事務所.
- 3) 木村一弘, 日本金属学会誌, 第73 巻, 第5 号 (2009) p.323.
- 4) 原田広史, 横川忠晴, 佐藤彰洋, 川岸京子, 谷月峰, 高温学会誌, 第33巻, 第5号 (2007年9月), p.237.

膨大な最新実データにふれる喜び

国立大学法人岐阜大学
次世代金型技術研究センター 副センター長・准教授

吉田 佳典

平成10年名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻 助手、平成19年同大学 助教、平成21年岐阜大学工学部機械工学科 准教授、現職。平成23年ドルトムント工科大学 客員研究員。

今号は、B領域のB21ユニット「大型鍛造シミュレーター」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」に参画されている岐阜大学 吉田佳典准教授にお話を伺いました。

——材料試験からシミュレーション環境の構築へ

私の専門は塑性加工という材料に力を加えて変形させて製品形状を得る技術の研究で、大きなものでは航空機の構造体、小さなものでは例えばICのリードフレームなどに使われています。SIPでは主に塑性加工の数値シミュレーションと材料試験方法の開発という役割を担っています。

PCの中のバーチャル環境下で金型をつくり、材料を加熱し、そしてプレスして変形させる。その結果、どのような形状、強度、機能が発現するか予測できるツールをつくらうとしています。具体的には、シミュレーションソフトウェアに（1）力と変形の関係、（2）摩擦係数、（3）材料と金型・材料と大気との熱のやりとり、さらには（4）材料内の加工発熱に関するデータを入力します。これらのデータは実際の材料試験でとるわけですが、簡単ではありません。ISOやJISのようなお手本もないので、試験方法や装置の開発から始める必要があります。既存データを集めてくる手法もあるのですが、せっかくSIPでやるからには、世界のどこに出しても恥ずかしくない最新データを自前で集積し、それをもとにシミュレーション環境を整えようとしています。もちろん私一人では無理で、B21ユニットの中で（1）～（4）に関する4

チームをつくり、それぞれの大学や企業が連携して実施しています。そして最終的に、5万トンプレス機での熱間鍛造用のシミュレーションツールを開発することを目標にしています。

——装置開発が特許申請につながる

塑性加工の数値シミュレーションに必要な境界条件には、その測定法が標準化されておらず、経験や文献値に頼る場面が少なからずありました。「やっぱり材料試験をして、きちんと測定しなければダメだ」という思いがずっと燦っていました。SIPに参画して各分野の研究者がそれぞれの所属機関でとられた実データを集約することができ、なおかつ自身も材料試験ができる環境には本当に満足しており、SIPというプログラムに感謝しています。

SIPでのわかりやすい成果の一つあげるとしたら、「疑似空中加熱」で材料—金型間の温度差、摺動速度、面圧を高精度に制御できる熱間小型試験機（G-SAFES）を開発し、その装置により高温環境下での摩擦係数や熱伝達率を測定できるようになったことです。以前は、炉で加熱する場合、材料は炉から出した途端に冷めていくために均熱状態が維持できず、理想状態での試験ができませんでした。G-SAFESでは、セラミックの細いニードルで3方から試験片を支えて金型の直上で保持して誘導加熱し、材料と金型両方が設定温度

になった瞬間にニードルを外し、理想状態でプレスすることができます。この機構は特許申請につながりました。

また、5万トンプレス機への適用を目指すシミュレーションツールについても充実してきており、実際の製品に近い複雑形状のシミュレーションへの適用が可能な段階にまできています。

——シミュレーションの壁を越えていく

SIPでの残りの期間、小型試験機で効率良く最新データを取り、NIMS熱間鍛造シミュレータでの大型試験で補完して計算式をさらに充実させ、5万トンプレス機での成形シミュレーションを実現します。さらに、材料試験については、「どうやって計測するか?」「どんなセンサーを使えばいいか?」「どんな手順、温度設定で試験を行うか?」といったことを考慮して、標準的な試験手法を構築したいと思っています。

SIPが終了した後は、原子レベルのミクロなスケールの理論と数十cmの合金塊の挙動を再現するマクロな解析をとと思っています。現状では膨大な計算時間が必要であり、温度変化などの複雑な現象の影響を完全には再現できていないのが現状です。一方で、ミクロスケール理論を駆使することで、SIPでやった膨大な材料試験の規模を縮小したい。この壁をなんとか越えていきたいですね。

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



拠点長
竹山 雅夫

国立大学法人 東京工業大学
物質理工学院 材料系
教授 工学博士



拠点長
高橋 聡

株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領域
技術開発センター 材料技術部 次長

2020年代での実機エンジン搭載を目指して

Boeingの試算によると、2032年までに約35,000機の航空機が製造され、その産業規模は約500兆円にもなる。近年、世界の航空機ジェットエンジンにおいては、軽量化による燃費低減や騒音低減による環境負荷低減が志向されており、エンジン用材料としてのTiAl合金の採用が拡大しつつある。TiAl合金は、米国GE社が製造合金(4822)を、独MTU社が鍛造合金(TNM)を、航空機エンジン低圧タービンの最終段動翼向けに開発し、既に実用化されている。さらに、今後開発される全ての中・大型エンジンへの本合金の搭載が予定されており、その産業規模は急速に拡大し、鋳塊および部材の生産が追いつかないことが予想される。

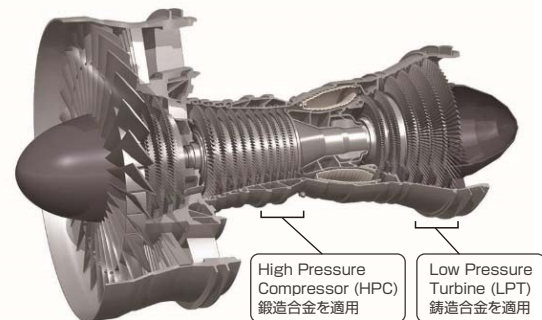
20数年前、本拠点の竹山拠点長は世界に先駆け、状態図に基づいた鍛造TiAl合金の組織・プロセス設計指針を提案したが、本格的な航空機エンジンメーカーがなかった日本では実用化には至らず、ヨーロッパで実用化が進むという残念な結果に終

わった。しかし、当拠点にはTiAlに関する豊富なデータとノウハウが蓄積されており、TiAl合金への期待が高まっている今が、再び航空機エンジン材料に挑戦し、欧米勢を巻き返す絶好の機会といえる。このチャンスを逃さないためには、国内で合金設計から鋳造・部品成型までを一貫して行う体制構築に産学官一体となって取り組む必要がある。

当拠点の目標は、2025年頃の実機搭載プログラム提案を見据えて、既存合金を凌駕する優れた機械的性質・耐酸化性の実現と、高品位かつ安価な鋳塊製造とを両立できるTiAlの組織・プロセス設計指導原理を構築することである。これに向けて、東工大が合金組織設計、神戸製鋼所が溶解プロセス、IHIが成形(鋳造、鍛造)・試験プロセスを担い、3機関が垂直統合のもと、スピード感をもって課題に取り組む体制

を構築した。

本拠点では、2020年代に、独自の鍛造TiAl製高圧圧縮機(HPC)動翼および鋳造TiAl製低圧タービン(LPT)動翼を次世代航空機エンジンに適用するという挑戦的な目標のもと、平成26年～平成28年までに得られた知見をSIPが終了する残り2年間に於いてさらに進化させ、既存の合金を凌駕する高性能TiAl基合金開発に資する合金設計からリサイクルまでの一連のプロセスを全て国内で行う技術の構築と実証を行う。

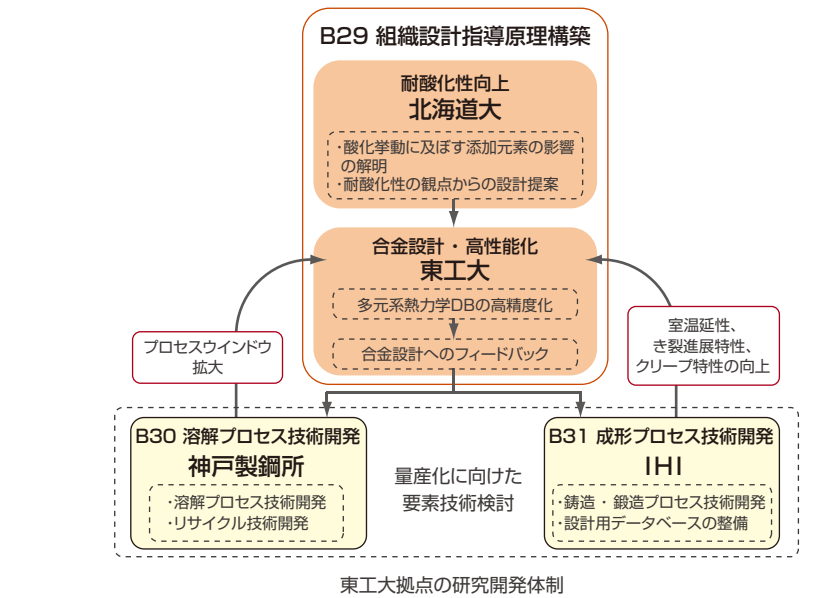


本研究開発にてターゲットとする適用範囲

航空機エンジン材料に挑む

前述した「高性能合金の組織・プロセス設計指導原理の構築」という全体目標を実現するため、本拠点では中間評価までの3年間(平成26～28年度)、東工大が多元系状態図に基づく候補合金の設計・提案とその特性評価を、神戸製鋼所およびIHIがそれら候補合金の製造性の評価を行ってきた。また、それら候補合金から量産化技術の基本指針を得るための合金を選定し、鋳造プロセス・スクラップ処理プロセスの検討、実環境を模擬した部品強度試験を実施した。

今後はSIPの出口に向けて、これまでに得られた特性(機械的性質、耐酸化特性)と製造性(プロセスウインドウ)とを両立させるための組織設計指導原理の構築を、北海道大を加えた4機関のさらなる連携のもと進めていく。そのためには、相変態を利用して製造時・使用時それぞれに求められる特性を付与する必要がある、東工大は、その相変態による組織制御の羅針盤となる状態図の知見を実験・計算両面からさ



らに深化させる。また、神戸製鋼所では今年度で新規導入したCCIMパイロット設備を用いて量産スケールでの溶解鋳造条件の確立を、IHIでは鍛造・鋳造プロセスの最適化と特性データベースの整備を行う。加えて、北海道大で得られた耐酸化特性およ

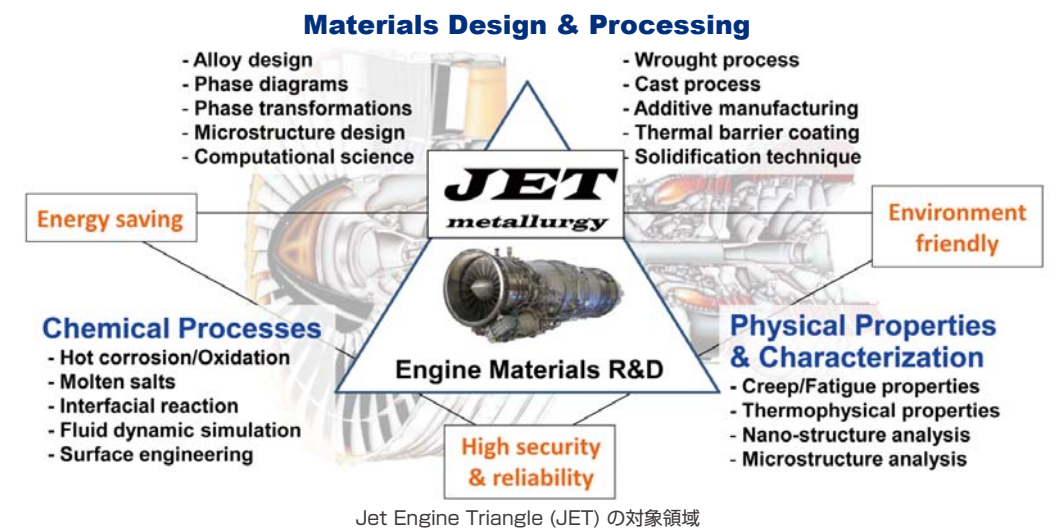
び神戸製鋼所、IHI両機関で得られた製造性評価の結果をフィードバックさせた改良合金を既に設計しており、それら合金の組織設計指針の確立と評価も進めていく。

ジェットエンジン用材料研究開発拠点形成にむけて — JETプロジェクト —

実機搭載に向けた高性能TiAl基合金の設計・製造技術の構築と実証が本拠点におけるSIP最終年度の目標であるが、これをビジネスとして成立させるためにはSIP終了後も4機関による連携体制を維持・発展させていく必要がある。そこで昨年度、実用化まで開発研究を推進するための拠点形成の基礎となるJet Engine Triangles (JETプロジェクト)を東工大に立ち上げた。この拠点には現在、金属分野の研究に携わる38名の教員が参加している。今後は4機関のみならず、ジェットエンジンに関わる全ての素材メーカー、部品メーカー、エンジンメーカー、認証機関、エアキャリアに門戸を開放し、大学の学理と企業のノウハウを融合させ、実用化に向け

た課題解決のみならず将来的には国産エンジン開発まで視野にいれる。そのキックオフとして本年3月にはOpen Possibility Seminarを開催した。十数社の参加企業からは今後の活動に大いに期待するとの意見が多数得られ、この活動および連携を

さらに強化するために同様のセミナーを半年に一度開催する、また、欧米の大学およびビックスリー(GE, RR, P&W)の研究者および技術者を同セミナーに招聘し、世界の最新情報を共有し、連携を図る準備も進めている。





構造材料分野は今が攻めどき

株式会社 IHI 航空・宇宙・防衛事業領域
技術開発センター 材料技術部 次長

高橋 聡

株式会社IHI入社後、研究部門に所属し、航空・宇宙エンジンや自動車の過給機を中心とした耐熱材料の製造プロセスと強度評価の研究開発に従事。TiAl合金を、10年以上扱ってきた。

世界最高性能のTiAlによる部材開発を目指す東京工業大学拠点のB31ユニットリーダーであるIHIの高橋氏を訪ね、拠点の強みとこれまでの成果、さらにはSIPへの思いをお聞きしました。

——構造材料に力を入れるべき時期にSIPがスタートした

私が所属するIHIは、航空エンジンや過給機、圧縮機などの回転体を設計する技術に強みをもっています。うまく回すためには優れた材料が必要です。材料技術はIHIの事業を支える基盤技術の一つです。そんな環境のもと、私は入社以来、耐熱材料の研究開発に携わっており、その流れでSIPに参画させていただくことになりました。そのとき一番感じたのは「いいタイミングだ」ということ。近年、構造材料関係の研究を目指す若いひとが減少しており、欧米でもこの分野の研究者の数が減って技術力が落ちてきていました。つまり、合金設計やモノづくりといった材料技術に強い日本にとって、まさに「攻めどき」に構造材料を扱うSIPが走り出したわけです。

——絶妙なチーム編成と明確なビジョン

SIPの東工大拠点に参画させていただいてまず感心したことは、構成メンバーである東工大、神戸製鋼、IHIという組み合わせの妙。大学、素材メーカー、ユーザー（エンジンメーカー）がそれぞれ、合金設計、合金製造、部材製造・評価という役割を担っており、重複する部分がないので仕事が非常にやり易い。素材メーカーが2者あるいはユーザーが2者だったりすると、「競合しているから、こ

れ以上は言えません」とか、なかなか難しいところがあります。加えて、東工大の竹山先生は私の師匠であり、お互い気兼ねなく言いたいことを言い合えますし、頻繁に行っている研究会を通してIHIと神戸製鋼とも胸襟を開いて話すことができますと感じています。

もう一つは、ビジョンや評価基準がはっきりしていること。我々の拠点は「世界を凌駕する材料を開発し、それで部材をつくる」という明確な目標があります。そして最終的には産業化を目指すプログラムですので、レビュアーの方に評価を受ける際には、研究成果がどれだけ産業界の役に立つのかということをよく問われます。そういうところに重きをおいているので、企業として非常に取り組みやすいテーマだと感じました。産業化を目指す、どこまで国の予算でやって、どこから企業の資金でやるかという問題が出てきます。そのあたりの線引きには、なかなか難しいところがあるのですが、それを乗り越えようと思うだけの意義をこのプログラムには感じています。

——世界トップクラス強度のTiAl部材が見えてきた

我々が求めているのは「部材の形状をつくりやすく、強度は世界最高レベルのTiAl合金」。強度が高いということは加

工しにくいということですが、それを両立させようとしています。もちろん完全に両立させることは難しいのですが、ここは譲れる、ここは譲れない、というポイントをユーザーの立場から東工大にフィードバックし、新たな合金を設計してもらっています。そして、神戸製鋼も合金中の微量成分（不純物）をできるだけ低いレベルに抑え、かつ安価につくる研究を続けてきています。その結果、世界最高強度レベルの合金で、部材の形状にまで持っていけるようになり、今はさらに特性調整に向けた合金組成の微調整に取り組んでいます。SIP終了までの1年半の間に、世界トップクラス強度のTiAl合金で部材試作と特性評価まで進める手応えは感じています。

実は欧米と同様に日本でも、構造材料研究の分野に若い人がなかなか入ってこないという課題を抱えています。産業界の基盤技術としては非常に重要な分野なのですが、地味で泥臭い分野という印象が強いみたいです。こういった分野に予算がついて、日の当たる場所で研究開発ができるというのは、国・大学・企業の全てにとって非常にいいことだと思います。今後、我々がきっちり成果をあげることで、構造材料研究の分野に若い人がどんどん入ってきて欲しいです。

RESEARCH TOPICS

A 航空機用樹脂の開発とCFRPの開発

本田 真也

北海道大学大学院工学研究院
人間機械システムデザイン部門 准教授

2009年北海道大学大学院工学研究科博士課程終了後、同大学院工学研究院の助教として勤務。2013-2014年にチューリッヒ工科大学(ETH)にて客員研究員、帰国後、同准教授



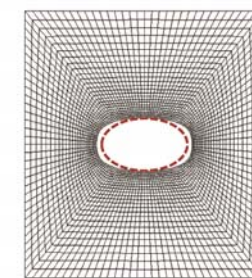
メタヒューリスティクスの援用による複合材構造要素の最適設計

航空機の複合材構造では因習的な積層・設計方針が採用され、擬似等方積層が基本の設計ルールとなっており、複合材の利点を最大限に活かした設計が行われてない。本研究では複合材構造の孔周辺部板厚補強（Pad-up）部に着目し、孔形状およびPad-up形状とその積層構成を最適に設計することを目的としている。設計手法には遺伝的アルゴリズムに代表される各種メタヒューリスティクス手法を採用し、これまでの慣習に囚われない設計案の提案を目指している。

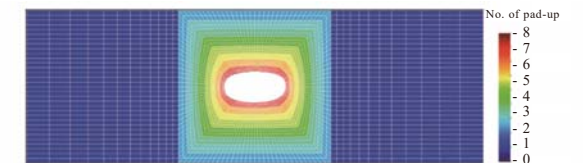
主翼下板の検査孔補強部について最適化した例を図に示す。(a)は孔の形状のみを最適化した結果であり、点線の楕円状

よりも膨らんだ形状にすることで、孔部周辺のひずみ集中を14%軽減できることが数値実験及び実証実験からわかった。また（b）はPad-up形状および積層構成を

最適化した結果であり、比較対象（右上図）よりも最適化結果（右下図）は同程度のひずみ集中を保ちつつ、大幅に重量を低減できることがわかった。



(a) 孔形状最適化結果



(b) Pad-up形状最適化結果

D マテリアルズインテグレーション

長尾 大道

東京大学地震研究所
大学院情報理工学系研究科 准教授

京大学理学研究科 博士課程修了後、海洋研究開発機構、統計数理研究所等を経て、2013年より現職

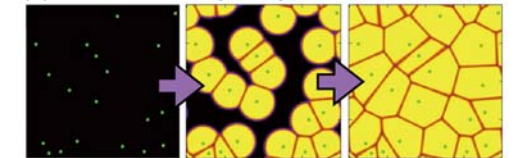


構造材料科学に資するデータ同化の開発

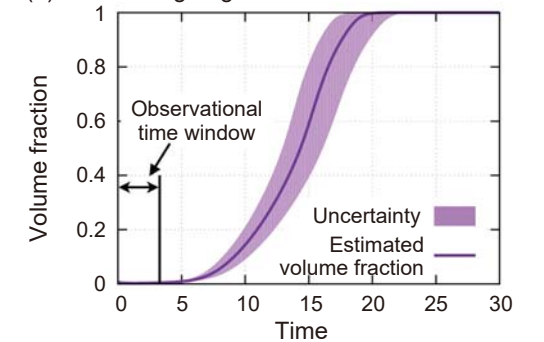
高効率な材料開発の実現のためには、数値シミュレーションのみ、あるいは実験・観測データのみに基づくアプローチでは不十分であり、その両者を最大限に活かした材料組織の時間発展予測手法が必要不可欠である。我々は、実験・観測データと数値シミュレーションモデルをベイズ統計学の枠組みで融合し、観測不能な材料内部の状態や各種物性パラメータの推定を可能にするデータ同化の開発を行なっている。天気予報でも用いられている4次元変分法は、大自由度モデルに対するデータ同化手法であり、フェーズフィールド法などに基づく材料の内部構造シミュレーションにおいても有効で

あるが、推定された状態やパラメータの不確実性評価が原理的に不可能であるという問題があった。そこで我々は、不確実性評価を可能にする新しい4次元変分法を開発した上で、その不確実性が状態の将来予測へ及ぼす影響を定量的に評価する手法を提案した。これを母相中の核成長によって組織を形成するシミュレーションモデルに適用したところ、限られたデータからでも、組織の体積分率の時間発展予測だけでなく、その予測不確実性も評価することが可能となった。

(a) Time series of grain growth



(b) Forecasting of grain volume fraction



(a): 母相中の核成長による結晶粒組織形成の時間発展。(b): 粒組織の体積分率の時間発展予測とその予測不確実性。

第21回国際複合材料会議(ICCM21)

第21回国際複合材料会議(21st International Conference on Composite Materials ; ICCM21)が8月20日～25日、中国の西安国際会議センターで開催されました。ICCMは隔年で開催される規模と伝統を誇る複合材料の国際会議で、今回も48カ国から約1800人(日本から約100人)の参加がありました。会議は34件の特別講演と約1400件の一般講演、240件のポスター発表からなり22室パラレルで行われました。発表の多くは樹脂系複合材料に関するものですが、ナノ材料やグラフェンに関する発表も多く、金属系複合材料(MMC)、セラミックス系複合材料(CMC)のセッションもありました。参加者の半数近くは学生とのことで、中国国内で複合材料を学ぶ多数の学生の参加があり、世界各地で複合材料の研究開発に関わっている多数の中国出身の研究者、留学生による里帰り講演の情



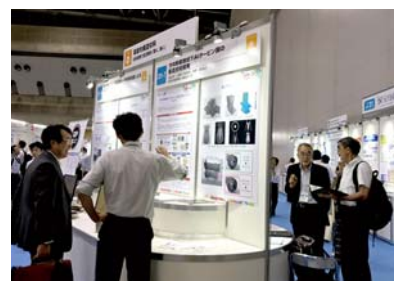
景が多数見受けられました。23日夕刻にはInternational Committee on Composite MaterialsのPresidentである東京大学武田展雄教授の議長のもと総会が行われ、次々会の開催場所の投票では北アイルランドのBelfastが選ばれました。次回は2019年にメルボルンで開催されます。

JSTフェア2017に共同出展

8月31日(木)～9月1日(金)の2日間、東京ビッグサイトで開催された「JSTフェア2017—科学技術による未来の産業創造展—」に、JSTが管理法人を勤めるSIP5課題(構造材料、インフラ、防災、エネルギー、燃焼)で共同出展を行いました。

「革新的構造材料」では「CFRPモジュール設計とブロッカー体化工法の融合技術」(東レ)、「大型鍛造シミュレータを用いた新鍛造技術」(NIMS)、「レーザー粉体肉盛りによる生産技術」(川崎重工)、「マテリアルインテグレーションシステム」(東大—NIMS)がポスターや、動画、サンプルの展示によって、多くの方に興味を持っていただけました。

当日は、台風の接近に伴う悪天候にも関わらず、JSTフェアに文部科学大臣をはじめ17名の国会議員に加え、海外や企業・地方自治体などのVIP9組が視察にお越しいただきました。また総来場者数は、2日間合計で1万5千名以上となり、科学技術への期待の大きさを実感できる2日間でした。



日本金属学会2017年秋期講演大会公募シンポジウム「S9 マテリアルズ・インテグレーション」開催報告

日本金属学会2017年秋期講演大会公募シンポジウム「マテリアルズ・インテグレーション」が3日間にわたり開催され、SIP「革新的構造材料」からは小関勉点長(東大)をはじめ、SIP「革新的構造材料」MIのメンバーにより37件(全体で40件)の発表がありました。連日プロジェクトメンバー以外の聴講者も多数おられ、MIへの世間の関

■開催日時：2017年9月6日—8日
■会場：北海道大学(札幌市)

心の高さが実感されました。SIP「革新的構造材料」MIの成果を集中的に報告することにより、多くの方にMIプロジェクトの目指すところと進捗状況を理解して頂き、更にこの分野の重要性を改めて認識していただく良い機会になったと思います。

SIP「革新的構造材料」成果報告会開催

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)が司令塔機能を発揮し、科学技術イノベーションを実現するものとして創設されました。その課題の一つが「革新的構造材料」です。平成26年度に発足した本課題では、昨年、5カ年プロジェクトの中間年度として中間評価を実施しました。そこでは、ユニットの終了、新設を含む研究体制の再構築を行ったうえで、後半の研究開発を開始しています。今回の成果報告会では、講演、およびポスター発表により最新の研究成果を多くの方々に知って頂くと同時に、これらの発表を基にして、実用化・出口、拠点形成を意識した議論を進める予

定です。奮ってご参加いただきますようお願いいたします。

詳細：<http://www.jst.go.jp/sip/event/k03/20171128/index.html>

- 開催日時：2017年11月28日(火)
10:00～18:00
- 会場：イイノホール
(東京都千代田区内幸町2-1-1)
- アクセス：
東京メトロ日比谷線・千代田線
「霞ヶ関」駅C4出口直結
- 問い合わせ先：
sip_structuralmaterial@jst.go.jp

