

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  
研究開発計画

平成 30 年 4 月 1 日

内閣府  
政策統括官 (科学技術・イノベーション担当)

## 研究開発計画の概要

### 1. 意義・目標等

我が国の輸出産業の中で工業素材の存在感は向上し、他産業の国際競争力をも牽引するものとなっている。しかし、新興国は猛迫しており、工業素材の国際競争力の強化は、我が国全体の競争力維持に直結する課題である。また、我が国が直面するエネルギー問題においても、エネルギー転換・利用効率向上による省エネルギー、排出ガス削減が求められている。このため、強く、軽く、熱に耐える革新的材料を開発し、輸送機器・発電等産業機器への実機適用を行うとともに、エネルギー転換・利用効率向上をも実現する。また、これら材料技術を基盤に、航空機産業を裾野産業も含め、育成、拡大し、2030年までに部素材の出荷額を2兆円にしてい

### 2. 研究内容

主な研究開発項目を以下に記す。

- (A) 航空機用樹脂の開発とCFRPの開発：航空機機体・ファンケース等のCFRP設計技術の確立
  - (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発：タービンディスク、ブレード等の航空機用エンジン部材等の開発
  - (C) セラミックス基複合材料の開発：航空機エンジン用CMC材料、耐環境性コーティングの開発
  - (D) マテリアルズインテグレーション：材料開発時間を一桁短縮し、構造材料開発を効率化
- 航空機産業、その他の産業の強化に資する課題を適宜取り上げ、研究開発項目に組み入れる。

### 3. 実施体制

岸輝雄プログラムディレクター(以下、「PD」という。)は、研究開発計画の策定や推進を担う。PDを議長、内閣府が事務局を務め、関係省庁や専門家で構成する推進委員会が総合調整を行う。国立研究開発法人科学技術振興機構交付金を活用して公募を実施する。同法人内に選考委員会を設置し、適切な評価のうえ、推進委員会と連携をしながら研究開発計画に基づき、最適な研究課題を臨機応変に選定し、大学、国立研究開発法人、企業等によって構成される研究チームを構成し、研究課題を実施する。同法人のマネジメントにより、各課題の進捗を管理する。

### 4. 知財管理

知財委員会を国立研究開発法人科学技術振興機構に置き、各受託機関で出願される知的財産の動向を把握・管理し、産業利用する際の利便性向上につながるよう、各受託機関と調整を行う。

### 5. 評価

ガバニングボードによる毎年度末の評価前に、研究主体及びPDによる自己点検を実施する。3年をめぐりに研究課題の評価を実施し、必要に応じて研究チームを再編し、高い研究開発レベルが維持できるようにする。

### 6. 出口戦略

出口指向の研究推進として、輸送機器・産業機器等に使われる材料の研究開発を推進し、実機適用を最短で実現する研究開発体制と仕組みを構築する。成果普及に際し、利用される分野に応じた標準化・規格化・安全評価手法および認定手法策定を推進するとともに、規制・基準等による導入促進策の展開を図る

## 1. 意義・目標等

### (1) 背景・国内外の状況

20世紀末において、我が国の国際競争力を牽引してきたのは、自動車に代表される輸送機器、電子・電気・精密機器産業に代表される加工組立型産業が中心であった。特に日本独自の改良を加えた電気製品は、輸出商品として世界市場に浸透していった。しかし新興国の市場参入によるグローバル化により、企業間での覇権争いは激化しており、日本の産業・貿易構造は大きな転換期を向かえている。

また一方で、我が国はエネルギー問題に直面している。特に東日本大震災を機に、我が国でのエネルギーの利用のあり方が多くの国民の関心事項となってきており、また世界的にも二酸化炭素削減とあわせて、重要な課題となっている。今後、エネルギーの転換・利用率の更なる向上は、国を超えて求められる課題となっている。

### (2) 意義・政策的な重要性

日本の工業材料技術は日本全体の産業を支えるために重要な役割を担っており、産業上多くのイノベーションは材料技術の成果を利用してなされている。しかしながら、工業材料分野も新興国は猛追している。工業素材の競争力は、そのまま輸送機器等の他産業の競争力にも直結する課題であり、さらには工業素材の技術革新は、新産業創出に直結するものである。今後、この分野の競争力を維持・向上させるためにも産・学・官の英知を結集させ、技術革新を行うことが強く求められている。

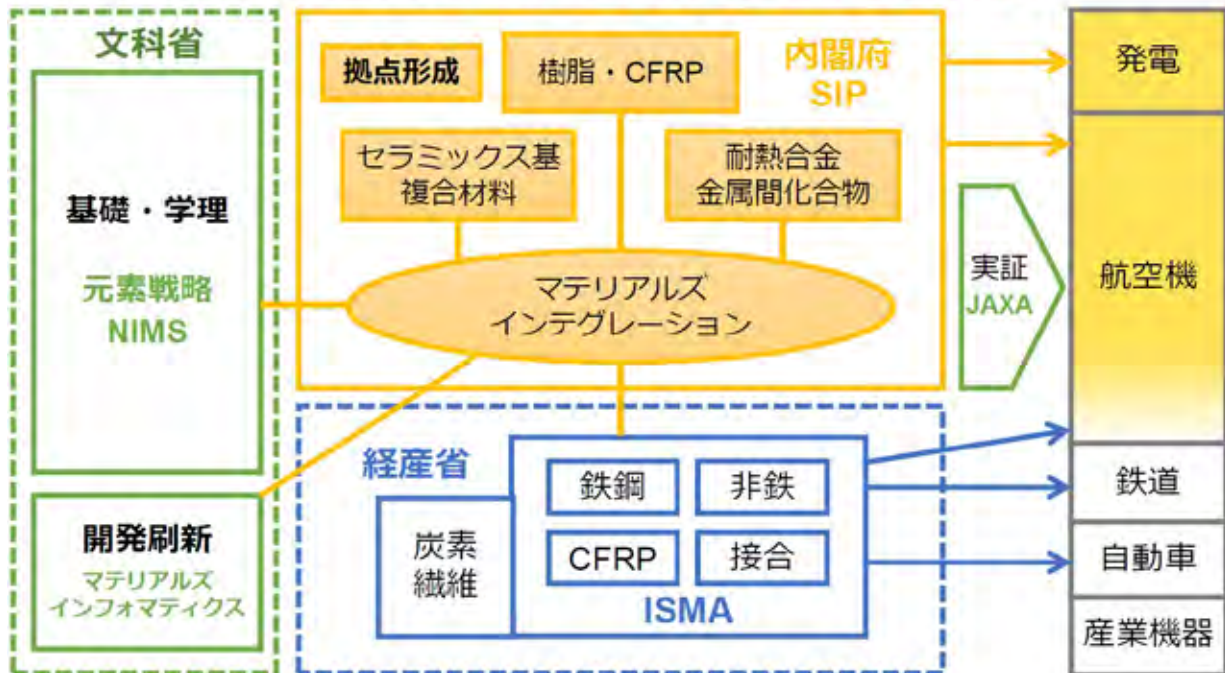
このような工業素材の中でも、我が国が特に強い競争力を有するのが構造材料である。我が国が高い技術力を有するハイテン(高張力鋼)は自動車産業を下支えしているが、今後もこれら競争力を維持していくためにも、競争力のある新たな材料創製は必要不可欠である。特に、我が国が技術力を有するCFRP(炭素繊維強化プラスチック)や、樹脂等での技術革新は、これら構造材料の軽量化に大きく貢献でき、自動車産業、さらには航空機産業の発達に直結する技術となる。また同様にセラミックス基複合材料や耐熱合金・金属間化合物の技術革新は、材料の耐熱性・靱性を向上させ、航空機用エンジン・発電プラントなどのエネルギー転換・効率に大きな革新をもたらすことができる。

これら構造材料に期待されるイノベーションを強力に推進するために、我が国で推進する事業間の連携を図り、重複を避けつつ、効率的に研究開発を進める必要がある。図表1-1に、我が国が推進する革新的構造材料の研究開発全体の構図を示す。革新的構造材料を実現して、国の研究開発を国民の便益に結び付けるためには、我が国の構造材料研究開発全体を統括し、事業間連携と重複を避けた効率的な運用をはかり、各事業から得られた知見を最大限に取り込む体制が必須である。特に、多くの省庁が関与し、開発リスクが高く、安全保障上重要かつ、規制への対応が求められる航空機等の出口分野については、内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主体的に取り組む必要がある。

このように、強く・軽く・熱に耐える革新的材料を創製し、輸送機器、発電等の産業機器等へ実機適用することは、我が国の競争力強化のみならず、各種機器のエネルギー転換・利用効率向上をも実現し、世界的な、省エネルギー、排出ガス削減に大きく貢献するものである。また得られた材料技術を基盤に、航空機産業を裾野産業も含め、育成、拡大することが期待でき、我が国の産業育成にも大きく貢献できる。

# SIPが先導する構造材料関連AP特定施策

各省施策と連携し、**構造材料重要分野を基礎から社会実装まで**



図表1 - 1 . 革新的構造材料研究の全体構想

## (3) 目標・狙い

### 社会的な目標

- ・ 車体及び機体の構造重量を半減可能な材料の開発・実装、及び航空機エンジン・発電機器等への耐熱材料の適用によるエネルギー利用の効率化・省資源化・環境負荷低減の推進
- ・ 新たな構造材料研究拠点・ネットワークを構築し、イノベーションのための国際連携、人材育成の促進、持続的イノベーションを可能にする社会システムの構築

### 産業面の目標

- ・ 材料技術を基盤に、航空機産業を育成(中・小型機を中心に、材料～部材～設計・製造のバリューチェーンを掌握)
- ・ 2030年までに、研究成果を生かし、関連部素材出荷額の2兆円規模への拡大に資する

### 技術的目標

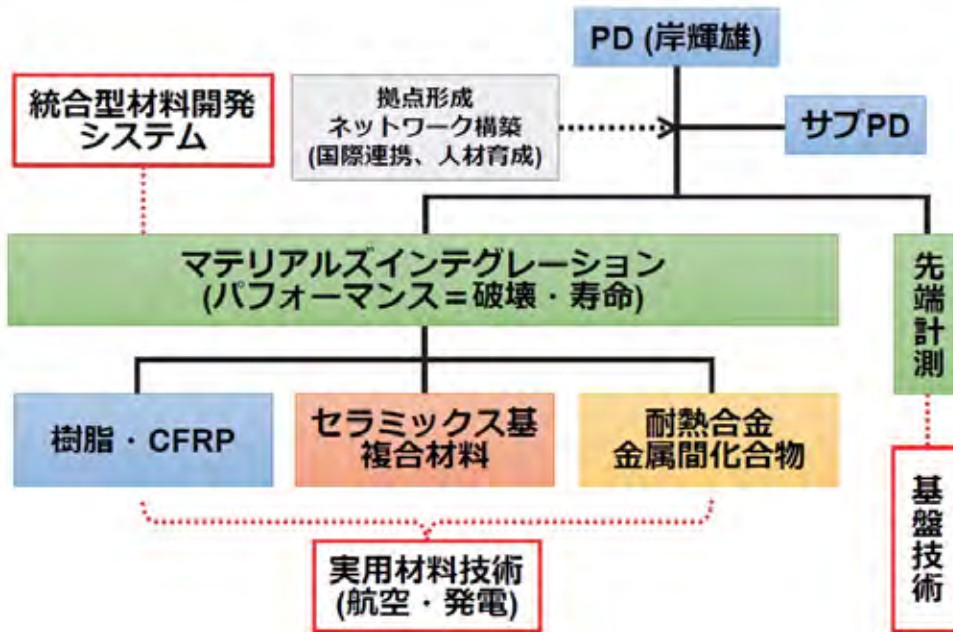
- ・ あらゆる耐熱材料の世界トップレベルかつ費用対効果の高い製品の実現
- ・ 新しい材料を用途に応じて使いこなす革新的構造化技術を実現
- ・ マテリアルズインテグレーションで材料開発期間の一桁短縮を実現

## 2. 研究開発の内容

革新的構造材料における研究開発では、特に、航空機機体・エンジン、発電設備を出口として想定し、新材料技術を利用して、材料技術を通じた持続的イノベーションを可能にする仕組みを構築する。図表2-1は本研究開発で取り組む材料技術について、航空機機体及びエンジンへの適用部位を示している。本研究開発では主にこれらの新材料利用技術に関連する研究開発を短期的視点から検討し、材料技術を通じたイノベーションを目的とすると共に、通常研究開発に長期間を要する構造材料技術に対して日本国内の英知を集結する。これを行うために、図表2-2に示した樹脂・CFRP、耐熱合金・金属間化合物、セラミックス基複合材料、マテリアルズインテグレーション、の4項目に取り組む。そのほか、航空機産業等の強化に資する課題を適時取り上げ、研究開発項目に組み入れる。同時に、先端計測・部材化・構造化技術等の基盤技術や研究開発拠点形成とネットワーキングによる材料情報循環体制の構築も行う。



図表2-1. 航空機用エンジンを対象にした場合の材料適用



図表 2 - 2 . 研究開発の概要

### (A) 航空機用樹脂の開発と CFRP の開発

担当サブPD 田中千秋(イノベーションオフィス田中 代表、元東レ(株)顧問)

領域長 武田 展雄 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)

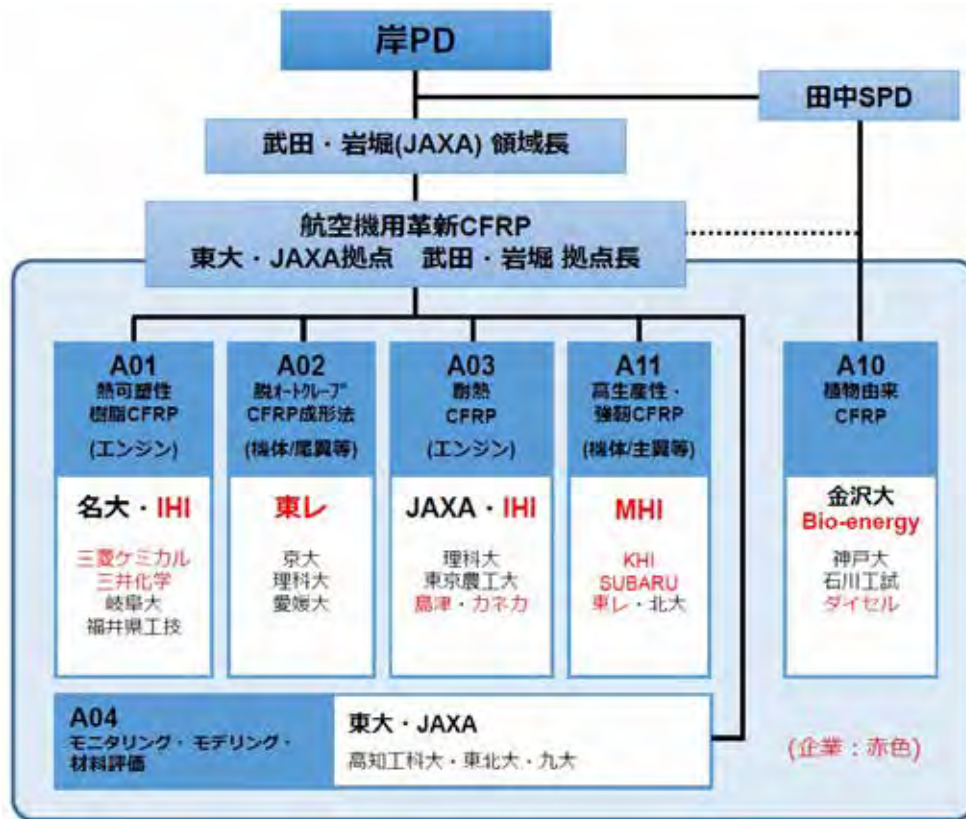
岩堀 豊 (宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 航空・複合材技術研究ユニット ユニット長)

航空機用 CFRP の製造技術の動向としては、熱可塑性樹脂を用いた材料系への転換が国際的に検討されている状況にある。加熱によって軟化する熱可塑性樹脂を用いて CFRP を成形すると、熱硬化性樹脂を用いた CFRP よりも短時間で部材を成形することができる。また、熱可塑性樹脂は衝撃性に優れた特性を持つために CFRP に耐衝撃特性を付与することもできる。今後、熱可塑性樹脂を用いた CFRP は航空機用エンジンのファンケースやファンブレードへの使用が拡大し、燃費低減への貢献が期待できる材料である。同時に、将来の CFRP の大型化や複雑形状に対応できる製造技術として、既存のオートクレーブを用いた技術に替わる CFRP の工業的な製造技術の開発も必要である。

現在、CFRP の成形時間の短縮に関しては国際的に種々の技術開発が行われているが製品の競争力につながるために詳細は明らかにはされていない。また、成形される材料の要求性能をもとに、素材性能と生産性・製造性のトレードオフの関係を打破し、生産性と信頼性を飛躍的に向上させた CFRP 部材成形技術システムの構築を行うことの重要性が指摘されている。

本研究開発では、同時に、これらの開発技術を利用した工業製品の実用化を加速するために、新規樹脂開発、高成形サイクル・低価格成形手法の開発、大型 CFRP 製造技術や関連基盤技術(材料設計・生産/加工技術、品質保証・最先端計測技術、マルチスケール計算科学等を駆使した高生産性・高信頼性の革新的構造材としての樹脂および CFRP 材料等)の構築を目指す。これらの技術開発とともに、CFRP の付加価値を高めるための高分子材料や複合材料周辺技術開発も行う。

本研究開発領域は、拠点テーマ1件、拠点内個別テーマ1件で構成される。図表2 - 3に本領域の研究体制図を示す。



図表2 - 3 . 樹脂・CFRP 領域の研究開発体制

拠点テーマ(A01-04, A11) 航空機用高生産性革新CFRPの製造・品質保証技術の開発

研究責任者: 武田 展雄 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)

岩堀 豊 (宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 航空・複合材技術研究ユニット  
ユニット長)

参画機関: 東京大学、名古屋大学、株式会社IHI、三菱ケミカル株式会社、三井化学株式会社、岐阜大学、  
福井県工業技術センター、東レ株式会社、京都大学、東京理科大、愛媛大学、国立研究開発法人  
宇宙航空研究開発機構、株式会社島津製作所、株式会社カネカ、高知工科大学、東北大学、九州  
大学、東京農工大学、三菱重工業株式会社、川崎重工業株式会社、株式会社SUBARU、北海道大  
学

**概要**

日本の国際競争力を高める、航空機用高生産性革新CFRPの製造・品質保証技術の開発を行うために、以下の5つの課題に取り組む。

(テーマA01)【航空エンジン用途国産熱可塑性樹脂・CFRTP開発】航空エンジンの大型構造部材の更なる軽量化を実現するにあたり、耐衝撃性・耐熱性(150 程度)に優れ、従来より低コストの国産熱可塑性プリプレグならびに、実用性が高い成形技術を実現する。また、耐衝撃性等特性発現機構を構築する。

(テーマA02)【高生産性・高信頼性脱オートクレーブCFRP構造部材の知的生産技術の開発】 革新的プリプレグ真空圧成形技術の開発:真空圧で成形可能で、かつ、航空機一次構造部材に適した層間粒子強化型プリプレグの開発を行うとともに、真空圧成形技術を開発する。併せて、アクティブ成形制御技術の適用による成形サイクルタイムを短縮する。 CFRPモジュール設計とブロッカー体化工法の融合技術の開発:ドライファイバーがほぼ製品となる部分にのみ配置された二次元シート作製技術、及びそのシートを多層積層したニアネットシェイプの三次元プリフォーム作製技術、次いで樹脂含浸成形する三次元ギャップRTM成形技術を確立する。

(テーマA03)【耐熱高分子基複合材の適用技術研究】200 ℃で～250 ℃の耐熱性(耐久性)を有する付加型ポリイミド樹脂などを適用した次世代耐熱CFRPを開発し、その基本成形技術を構築する。また、高温試験方法の確立、試験法の標準化を進める。

(テーマA04)【成形プロセスモニタリング・モデリングと品質評価技術】(テーマA01-03)で開発される新規複合材およびその成形プロセスの確立に向けて、内部ひずみの計測および高精度成形モデリング技術基盤を確立する。また、分子シミュレーションや樹脂流動シミュレーションなどを駆使したマルチスケール成形シミュレーションコードを作成し、品質予測手法を構築する。さらに、軽量効率化のための新規複合材構造を実現するための高精度力学モデリング技術を構築する。

(テーマ A11)【高生産性・強靱複合材開発】将来民間航空機の主構造への適用を狙った 低コストかつ強靱なオートクレーブ用プリプレグを開発する。本開発では先行するテーマ A02 の成果を活かしながら、高靱性と短時間硬化の両立を狙った材料を開発する。同時にテーマ A04、及びマテリアルズインテグレーション領域 テーマD66「未活用情報計測技術」と密接に連携し、複合材破壊様相の観察、破壊挙動のモデル化を進め、本テーマ開発材料の破壊則、及び設計法の基礎を確立する。併せて、本テーマ開発材料を航空機構造製造に適用した際のコスト試算、ビジネスモデル検討を行う。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

テーマ A01 【航空エンジン用途国産熱可塑性樹脂・CFRTP 開発】

- ・ 国産熱可塑樹脂プリプレグの基本仕様(繊維・樹脂の構成)が選定されていること  
具体的には、下表に示すような熱可塑性樹脂 CFRP 積層板(平板)を試作し、積層板に対しては下表に示すような評価試験を実施し、到達目標を達成していること

達成済み

表 中間評価時点のマイルストーン

|               |  |
|---------------|--|
| 試験片・試作物の形状寸法  | 平板   |
| 評価試験項目と目標性能数値 | 指定する衝撃試験方法により、層間剥離等がないこと<br>引張り強度:従来材と同等以上であること。 |

- ・ 耐衝撃性等の簡易評価方法が比較検討されていること

達成済み

- ・ プリプレグ低コスト化プロセスの基本プロセスが選定されていること

達成済み

- ・ CFRP 成形方法, 試作方案が選定されていること

達成度 70% (2017 年度末までに達成見込み)



### テーマ A02【高生産性・高信頼性脱オートクレーブ CFRP 構造部材の知的生産技術の開発】

- 革新的プリプレグ真空圧成形技術の開発:0.5m 角の試験板(平板)を用いオートクレーブ法と同等な力学特性(衝撃後残存圧縮強度(CAI) 40ksi 以上、ポイド率 1%以下)を実現しながら、オートクレーブ法対比同等の成形時間達成を目指す。

達成済み

- CFRP モジュール設計とブロック一体化工法の融合技術の開発: 1m×0.5m の湾曲モデル部材において、ドライファイバーのシート化技術(歩留まり 90%以上)、及び三次元ギャップ RTM 成形基本技術確立を目指す。  
達成度 80% (基礎モデル金型(0.5m 角)を用いた技術確立は完了。要素形状(湾曲モデル部材)の成形検討を 2017 年 5 月に実施し、目標達成見込)

### テーマ A03【耐熱高分子基複合材(耐熱 CFRP)の適用技術研究】

- 高温オートクレーブおよび耐熱 CFRP 用プリプレグ試作装置が導入され、稼働していること。

達成済み

- 耐熱 CFRP の一次評価が終了し、候補となる材料が選定されていること。

達成済み

- 耐熱 CFRP 積層板(平板)の基本的な成形プロセスが確立していること。

達成済み

- 合理的で効率のよい高温引張り試験方法および高温圧縮試験方法が提案されていること。

達成済み

- 成形プロセス過程における分析手法が提案されていること。

達成済み

- 繊維/樹脂間の界面特性および CFRP の粘弾性特性のラボでの評価技術が確立していること。

達成済み

### テーマ A04【成形プロセスモニタリング・モデリングと品質評価技術】

- 3つの実用化個別テーマで開発される新規複合材およびその成形プロセスの確立に向けての、内部ひずみの計測および高精度成形モデリング技術基盤の構築

- 3つの実用化個別テーマ各々の製作段階で、不具合、要検討事項などの検討を行う。

達成済み

- 複合材先進一体構造製造プロセスの提案

達成度 90% (模擬構造への運用のみ残されている)

### テーマ A11【高生産性・強靱複合材開発】

- 高生産性・高靱性の両立に向けた開発プリプレグ向け炭素繊維候補を選定し、プリプレグを試作する。

達成済み

- 試作プリプレグを用いたクーポンレベルでの特性評価試験を実施し、目標値に向けた課題を抽出する。

達成済み

- ・ 新構造様式を検討したのちに、シミュレーション結果を踏まえて板厚変化をつけた試作板、空孔を設置した試作板を作成し、評価する。

達成済み

- ・ 試作プリプレグの基礎特性を基に将来民間航空機へ適用した際の重量軽減効果を試算。特性上の課題と改善方向を明確化する。

達成済み

- ・ 試作プリプレグ成形品の破壊様相観察をテーマ A04、及びマテリアルズインテグレーション領域 テーマ D66 「先端計測」と連携し、実施する。

達成済み

- ・ 中間評価(2016 年度)は本テーマ初年度であるため、本ユニット構成メンバが一致共同して上記評価、課題整理を実施する。

達成済み

【最終目標】 (2018年度末時点)

#### テーマ A01【航空エンジン用途国産熱可塑性樹脂・CFRTP 開発】

ファンブレードなど次世代航空機エンジンのファン部品に適用することを目指し、下記目標を設定する。

- ・ 国産熱可塑性樹脂プリプレグの開発を行い、設計用基礎材料データを取得する。  
具体的には、下表に示すような熱可塑性樹脂 CFRP 積層板(平板)が実現できるプリプレグを開発し、積層板の特性に対しては下表に示すような評価試験を実施して到達目標を達成していること。

表 中間評価時点のマイルストーン(熱可塑性樹脂・CFRP(エンジン)ユニット)

|               |   |
|---------------|---|
| 試験片・試作物の形状寸法  | 平板  |
| 評価試験項目と目標性能数値 | 指定する衝撃試験方法・条件により、層間剥離等がないこと<br>引張強度, 圧縮強度, 層間せん断強度, 耐薬・耐油 特性: 従来材と同等以上であること。ファン部品の基本設計に適用可能なデータを取得していること。 |

- ・ ファン部品に適用する素材の 耐衝撃性について簡易に比較できる評価方法の一般化を行う。
- ・ 現工程比 3 割減となるプリプレグ低コスト化プロセス の確立を行う。
- ・ 熱可塑性 CFRP 成形についてファン部品への適用方法の確立をする。

#### テーマ A02【高生産性・高信頼性脱オートクレーブ CFRP 構造部材の知的生産技術の開発】

革新的プリプレグ真空圧成形技術の開発:

- ・ 革新真空圧成形対応プリプレグの最終処方が確立され、その連続試作プロセスが確立されていること
- ・ 最終処方の革新真空圧成形対応プリプレグを使って成形した CFRP 平板成形にて、ボイド率 1% 以下が達成可能な成形プロセスウィンドウが明確となっていること

- ・ 3次元形状を有する模擬構造部材(2m級)の成形が完了しており、その切り出し平板において上記平板成形CFRPと同等の特性を発現すること
- ・ 局所加熱源の独立制御方式によるアクティブ制御成形ツールが開発され、従来の雰囲気加熱成形品に比べ20%以上の寸法誤差抑制が実現できていること

CFRP モジュール設計とブロッカー一体化工法の融合技術の開発:

- ・ 最大 12mm の厚肉部、および曲面形状を含む、3次元複雑形状-模擬航空機部材成形において、3次元ギャップRTM向け3次元プリフォームの作製を材料歩留まり90%以上で実現できていること
- ・ スキン/ストリッパ/フレームを一体成形することにより、部品点数が大幅削減され、また厚肉部においても未含浸なく、良好な品位の一体成形CFRP部材を製造する技術が確立できていること
- ・ 3次元ギャップRTM成形において、成形時間を従来プリプレグ/オートクレーブ法対比 1/5 以下に短縮できていること

#### テーマ A03【耐熱高分子基複合材(耐熱CFRP)の適用技術研究】

- ・ 高温 250 の環境下で 300 時間以上の耐久性(耐熱性)を有する耐熱CFRPの材料技術、及び、構造要素(補強板、曲面形状、厚板部品等)の基本的な成形プロセスが確立していること
- ・ 耐熱CFRPの高温試験方法の妥当性が検証され、ドキュメント化されていること。そのうち少なくとも1つの方法が、JISもしくはISOの新規標準化検討項目として提案されていること
- ・ 耐熱CFRPを適用したエンジン部品の予備設計に必要な基礎材料特性データの取得が終了していること
- ・ 成形プロセス過程における分析技術の有用性が実証されていること
- ・ 繊維/樹脂間の界面特性およびCFRPの粘弾性特性の評価結果が、耐熱CFRPの材料設計もしくは部品設計において有用であることが実証されていること

#### テーマ A04【成形プロセスモニタリング・モデリングと品質評価技術】

- ・ 内部ひずみの計測および高精度成形モデリング技術基盤の確立と実用材への適用
- ・ 複合材先進一体構造製造プロセスのプロトタイプ実証
- ・ 新規複合材成形品質保証技術の実証と航空機用複合材製造認証プロセスの提案

#### テーマ A11【高生産性・強靱複合材開発】

- ・ 低コスト製造プロセスへの適合性を向上させたプリプレグの開発
- ・ ベンチマーク材料比1.5倍の靱性を達成できていること。具体的には破壊じん性値 G1c で3in-lb/in<sup>2</sup>、G2c で15in-lb/in<sup>2</sup>を実現すること
- ・ 複合材構造でアルミ並み価格へのコストダウンを達成するとともに、現在アルミに対して 15%有利な重量比を20%に拡大する。
- ・ 本テーマ開発材料の基本成形プロセスが確立されていること
- ・ 本テーマ開発材料を用いたサブコンポーネントレベルでの設計/製作実証試験および評価を H29 年度より実施し、目標値を達成するとともに、次世代航空機事業へ向けた軽量化、低コスト製造の目論見・評価、要改

### 善事項がされていること

- ・ 本テーマ開発材料を航空機構造製造に適用した際の製造コスト試算、ビジネスモデル検討が実施されていること。試作に当たっては厚板構造、薄板構造に分け、本テーマ構成機体三社(三菱重工、SUBARU、川崎重工)が協力して結果をまとめる。
- ・ 本テーマ開発材料に対する破壊則および設計法の基礎が確立されていること
- ・ マテリアルズインテグレーション領域 テーマD66と連携し、開発複合材の微視的な破壊進展挙動を荷重負荷試験中に観察評価することを高エネルギー加速器研究機構(KEK)のXAFS-CTを駆使して実施、結果を基に開発材料の改善、複合材構造の破壊則確立への目途を立てる。

## 個別テーマA07 高強度・高透明GF - PC複合材料の開発

研究責任者: 山尾 忍 (出光興産(株) 化学事業部機能材料研究所エンブラ基盤技術グループ  
主任研究員)

参画機関: 出光興産(株)、旭ファイバーグラス(株)、東京理科大、滋賀県立大

### 概要

本研究開発では航空機や自動車等の輸送機器の抜本的な軽量化による省エネや二酸化炭素排出量削減に繋がる新規なガラス繊維強化樹脂複合材料を開発する。本開発材料は優れた機械物性・耐熱性を有するポリカーボネート(PC)系樹脂及び強化材であるガラス繊維の光学的性質(屈折率、アッベ数)の近似化を図ることで、ガラス繊維強化樹脂の特長である低コスト、易成形性、高強度な特長に加えて従来不透明な材料を優れた透明性材料に変更した新規なガラス繊維強化樹脂複合材料(新規透明複合材料)である。本開発材料によるガラス部品の樹脂化によって軽量化(ガラス対比50%減)、高強度化(比強度1.5倍)、高断熱化(冷暖房効率の向上)が可能となり省エネや二酸化炭素排出量削減に大きな貢献が期待できる。加えて、射出成形による機器部品形状の自由度の向上による航空機や次世代自動車等の国際競争力強化も期待できる。

### 【中間目標】

3年で終了予定

### 【最終目標】(2016年度【最終年度】末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 材料(複合材料)性能の達成: GF20%強化系において光線透過率88%以上、ヘーズ5以下、曲げ強度100MPa以上(通常GF-PC材料並み強度)の材料性能を達成する  
達成済み
- ・ 材料性能の評価: ガラス代替で課題となる耐候性、耐傷付性、耐加水分解性などについて本材料の性能評価を実施するとともに通常PCで使用されている既存の機能化技術(耐候処方、ハードコート等)の本材料への適用性能を明確にする。  
達成済み
- ・ 材料市場調査: 各種輸送機器窓材料として各研究機関や企業での評価を受け、窓材料として使用可能である商品性を明確にするとともに本材料商品化に必要な用途毎の材料必要要件を明確にする。  
達成済み
- ・ 工業化へ向け、プロセスデータ採取および開発課題の明確化。  
達成済み

**本課題は2016年度で目標を達成し、終了**

## 個別テーマA08 構造部材用テキスタイルコンポジットの開発

研究代表: 山口 定彦 (旭化成(株) レオナ樹脂技術部)

研究責任者: 安田 和治 (旭化成(株) 次世代自動車材料グループ)

参画機関: 旭化成(株)、岐阜大学、本田技術研究所

### 概要

熱可塑性樹脂をマトリックスとした構造部材において、従来のGFクロスなどに熱可塑性樹脂を予め含浸させたプレートからではなく熱可塑性樹脂繊維と強化繊維の混織糸を織り込んだ布帛からFRPを成形する技術を開発する。具体的には、熱可塑性樹脂繊維と強化繊維の合糸(混織糸)から布帛を織り、その布帛を金型内で加熱し熱可塑性樹脂繊維を溶融してプレスし同時に射出成形を実施し複雑形状にも対応する。また、混織糸で編んだ組紐を引き抜きしてパイプを成形する。この混織糸、布帛、組紐の開発及び実用化できる成形技術を開発する。この開発により、車両及び航空機の軽量化、エネルギー削減に貢献する。

### 【中間目標】

3年で終了予定

### 【最終目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 布帛目標物性: 引張強度 450MPa 以上、弾性率 20GPa 以上  
(GF60%複合材としての理想強度から算出)  
達成済み
- ・ 布帛成形サイクル 2分以内  
達成済み
- ・ 組紐目標物性: 弾性率 19.5GPa 以上  
(GF60%、組角度 45度のパイプ複合材としての理想弾性率から算出)  
達成済み
- ・ 組紐成形サイクル 300mm / 分  
達成済み
- ・ 19年量産車両への搭載目途  
達成度 25% (C A E 数値解析結果より部品適用見通し確認済み)

**本課題は2016年度で目標をほぼ達成し、終了**

## 個別テーマ A09 セルロースナノファイバー強化樹脂の開発

研究責任者：中島 康雄（古河電気工業(株) 研究開発本部 コア技術融合研究所 主査）

参画機関：古河電気工業(株)、東京工業大学、首都大学東京

### 概要

環境・エネルギー・資源問題を解決するため、航空機・自動車産業では燃費向上のため高比強度材料による軽量化が取り組まれている。高比強度材料として炭素繊維やガラス繊維による強化樹脂が適用されるが、最近、セルロースナノファイバー（CNF）による強化樹脂に大きな期待がされている。CNFは、鋼の1/5の軽さで5倍の強度を持ち環境に優しく、安価なコストが期待される。しかし、CNFは高い親水性と凝集性のため熱可塑性樹脂への分散が非常に難しいものとなっている。本研究開発では、界面制御技術や樹脂変性技術の理論構築を大学と連携して行うとともに、開発した技術を適用した二軸押出機等により、グラフト等の反応場を利用したCNFの分散技術の開発を行っていく。そして、CNF強化樹脂を構造部材として適用するために大学との連携によるナノ分散複合体の理論強度の解析を行うことで、長期的な信頼性構築を行っていく。

### 【中間目標】（2016年度末時点の達成目標とその達成度）

CNF強化樹脂は、ガラス繊維強化樹脂の代替を目指していきます。CNFの持つ優れた機械的特性をPEやPPといった樹脂中でも発現することができれば、理想的にはCNF添加量10wt%でガラス繊維40wt%添加品と同程度の弾性率を得られることが期待されます。そこで、まずはCNF強化樹脂の理論的な可能性の検証と、CNFをポリオレフィン樹脂に分散させるための混練プロセスの検討を進め、二軸押出機等を用いた試作によって得られたCNF強化樹脂を射出成形機により試験片の作製を進めます。具体的な適用製品としては様々なものが考えられるが、航空機用内装材や自動車用部品への適用を目指す。

航空機や自動車に適用するためには軽量化・小型化・高信頼性が求められる。

以上より、下記項目の達成を目指していく。

- ・ 目的とする特性が本当に得られるのか、シミュレーション等を用いた分散状態と理論強度の把握を行う。

達成済み

- ・ ワンステップでセルロースを解繊（ナノ化）するための混練プロセスを選定する。

達成度 90%

- ・ 射出成形性は、ベース樹脂のポリオレフィンと同等とする。

達成済み

- ・ 射出成形により材料試験片を作製して特性を評価するが、おそらく衝撃強度が課題となると予想されることから、その対策を提案する。

達成済み

- ・ 長期的信頼性（耐疲労特性等）を構築するための劣化メカニズムを推定する。

達成度 75%

**本課題は2017年度以降、他プロジェクトへの移行を検討するために終了**

## 拠点内個別テーマA10 植物由来の炭素繊維複合材料の開発

研究責任者: 仁宮 一章 (金沢大学 新学術創成研究機構 准教授)

参画機関: 金沢大学、神戸大学、Bio-energy(株)、石川県工業試験場、(株)ダイセル

### 概要

CFRP 適用航空機のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量をより削減することを目的として、現在石油から作られている CFRP を植物由来に代替するための技術開発を行う。原料植物として油脂植物を用いる。具体的には、植物油からバイオディーゼル燃料を生産する際の副産物である「グリセロール」、並びに、植物油の搾油残渣の主成分である「リグノセルロース」を原料に用いる。グリセロールから化学反応によりワンステップで PAN 系炭素繊維のモノマーであるアクリロニトリルを製造する。リグノセルロースについては、イオン液体を用いた常温常圧前処理を経て、石油由来では製造が困難な構造を持つ熱可塑性樹脂を製造する。以上から得られる炭素繊維と熱可塑性樹脂から CFRP を製造し、その特性評価を行う。石油由来 CFRP を植物由来に代替した際のライフサイクル CO<sub>2</sub> 削減量は、飛行機 1 機に CFRP を約 40 トン使用した際、約 200 トン/機と推定される。

#### 【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 植物由来の CF 原料のプロトタイプ試作および評価  
植物由来アクリロニトリルの純度 90% 目標コスト¥300/kg  
達成度 40% (2016 年度末時点で純度は 30% であり、手法を改善して 2018 年度に達成予定。コストは約¥2000/kg であり、最終年度までに達成は困難と判断)
- ・ 植物由来の母材樹脂(熱可塑性セルロース誘導体)のプロトタイプ試作と強度評価  
植物由来の母材樹脂 融解温度 250、目標コスト¥300/kg  
達成度 80% (融解温度は計画を達成した。コストは 2016 年度末時点で約¥1000/kg であり、最終年度までに達成は困難と判断)
- ・ 植物由来の CFRP(炭素繊維は石油由来)のプロトタイプ試作と強度評価  
石油由来の CF (¥5,000/kg) + 植物由来の母材樹脂(熱可塑性セルロース誘導体)  
曲げ強度: 600 MPa, 曲げ弾性率: 35 GPa  
達成済み
- ・ 植物由来の CFRP(炭素繊維は石油由来)のラボ・ベンチスケール製造手法の確立  
目標生産量 1kg/日/バッチ、目標コスト: トータル¥30,000/kg  
達成度 20% (計画変更により中止)

#### 【最終目標】 (2018年度末時点)

- ・ 植物由来の CF 原料の作製および評価  
植物由来アクリロニトリルの純度 99%、収率 20%



- ・ 植物由来の母材樹脂(熱可塑性セルロース誘導体)の製造および強度評価  
植物由来の母材樹脂 融解温度 220℃、収率 95%
- ・ 植物由来の CFRP の試作と強度評価  
石油由来の CF + 植物由来の母材樹脂(熱可塑性セルロース誘導体)  
曲げ強度:750 MPa、曲げ弾性率:45 GPa

### (A) 樹脂・CFRP 領域の主要な研究開発目標

【中間目標】(2016年度末時点)

- ・ 新規熱可塑性樹脂及び樹脂を利用したCFRP製造の基本プロセスの完成  
達成度80%(樹脂は達成済み、基本プロセスは2017年度中に達成予定)
- ・ 大型設備投資を必要としない(設備投資が50%以下の)新規FRP製造プロセス技術の技術課題を明確化  
達成後90%(革新プリプレグは達成済み、RTMIは2017年度前半に達成予定)

【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ 開発する樹脂を用いたFRP製造技術が航空機用部品製造に展開可能に
- ・ 従来のFRP製造プロセスをしのぐ簡易プロセス技術により、製造の高速化の達成

### 樹脂・CFRP 所要経費

2014年度 7.370 億円  
2015年度 8.221 億円  
2016年度 8.73 億円  
2017年度 7.54 億円  
2018年度 6.33 億円(見込み)

### (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発

担当サブPD 北岡康夫(大阪大学 教授)

領域長 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 グループリーダー)

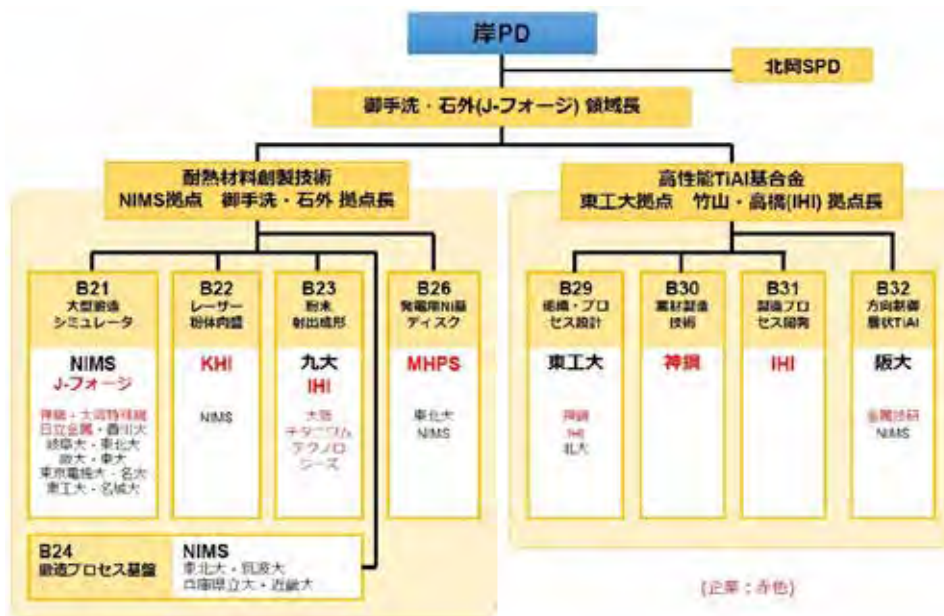
石外 伸也 (日本エアロフォージ株式会社 技術本部 本部長)

金属材料の中でチタン合金は航空機用エンジンの圧縮機部材などの中高温部品、ニッケル基合金はさらに高温の部材用として欠かせない最重要金属材料である。また、軽量で耐熱性のある TiAl 金属間化合物も非常に重要な材料であり、将来の適用部位の拡大が見込まれている。これらの材料を利用するときには、部材形状への成形技術が材料の付加価値を著しく高め、さらに、航空機用エンジンの高性能化に直結する。国内で高性能な素材自体が得られても部材形状に加工する技術が欠けていると実用化には結びつかない。

耐熱合金や金属間化合物の加工には鍛造や鍛造などの技術が必要であり、材料加工技術は部材のコストや信頼性と密接に関連している。近年のコンピュータ制御技術等の発展を背景に、国際的にも常に最新の材料加工技術を導入しようとする潮流が生じている。日本でもエンジン用材料の部材を短時間で精度よく、かつ、製造コストを抑えて作製するための加工プロセス技術の研究開発が必要である。

本研究開発では、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、高機能・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。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。

本研究開発領域は、拠点テーマ2件、拠点内個別テーマ2件で構成される。図表2 - 5に本領域の研究体制図を示す。



図表2 - 5 . 耐熱合金・金属間化合物領域の研究開発体制

拠点テーマB21-24 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

研究責任者：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 グループリーダー）

石外 伸也（日本エアロフォージ株式会社 技術本部 本部長）

参画機関：国立研究開発法人物質・材料研究機構、日本エアロフォージ(株)、川崎重工業(株)、(株)神戸製鋼所、香川大学、岐阜大学、東北大学、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、大同特殊鋼(株)、日立金属(株)、九州大学、(株)IHI、(株)大阪チタニウムテクノロジーズ、筑波大学、名城大学、近畿大学、兵庫県立大

### 概要

省エネルギー、排ガス削減のために、航空機機体等の軽量化やエンジンの高効率化が必要であり、そのための安定した素材製造技術が必要となる。そこで、航空機材料として使われるチタン合金・ニッケル基合金に関する3つの革新的製造技術開発に取り組み、高品質・高生産性・省消費資源・低コストな生産技術を確立すること

を目的とする。

(テーマ B21)【大型鍛造シミュレータ】 鍛造条件を考慮した信頼性の高いデータベース(DB)を作成し、これ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を確立する。

(テーマ B22)【レーザ粉体肉盛技術】 レーザ粉体肉盛技術を航空機エンジン部品に適用するため、肉盛品の材料特性を取得・DB化することにより、製造条件との相関関係を明らかにする。また、取得した材料特性評価データを生かして非破壊検査手法とそのスペック等を策定、評価技術を確立することにより、航空材料の鍛造材規格の材料特性を満足する生産技術を確立する。

(テーマ B23)【金属粉末射出成形(MIM)技術】 寸法精度要求を達成する成形技術の開発と、高い信頼性を保証する材料 DB を構築する。特にチタン合金については、合金基本組成に対して第 3 元素の添加や熱処理および低酸素金属粉の組み合わせ等で、従来の溶製チタン合金を凌駕する静的・動的破壊強度を達成する。

(テーマ B24)【鍛造プロセス基盤】 次世代の鍛造プロセス技術開発を目指して、高精度な変形抵抗測定技術を確立し、鍛造プロセスにおける歪速度と温度制御の最適化に必要なデータ蓄積を行う。また、鍛造材のより効率的な材料設計に結びつけるために、材料の軽元素成分のばらつきが鍛造材の材質分布に与える影響を予測するためのメカニズム解明・データ蓄積を行う。また、組織因子の観点から疲労寿命データ収集を行い、D 領域で開発する疲労寿命予測モジュールの検証にも寄与する。

これらにより、我が国の強みでもある材料技術を基盤に、航空機産業等を裾野産業も含めて育成・拡大し、日本の産業競争力を強化する。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

(テーマ 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】

- ・ 1500 トンの油圧サーボプレスにより、ニッケル基合金は最大で 90 mm、チタン合金は 120 mm の円柱ピレット(高さ 200 mm) を、プレス可能な、鍛造シミュレータを設計・開発する。

達成済み

- ・ 開発した鍛造シミュレータを産学官共同研究拠点となる国立研究開発法人物質・材料研究機構(以下、NIMS) に設置するとともに、実際の運用を可能とするために必要となる周辺設備(ピット整備、電源工事、インゴット保管室、オペレータ室など)を整備し、運用ルールやマニュアルを作成する。

達成済み

- ・ 本鍛造シミュレータを用い、これまで国内に存在しない、認証に資する信頼性が高い DB と鍛造シミュレーション技術を構築する。

達成度 80% (DB 基盤整備については、塑性加工面について流動応力の測定評価法と基本原理も考慮した境界条件データの採取法を、2017 年度中に円柱圧縮試験およびリング圧縮試験の共通標準手法として定めた。鍛造シミュレーション技術については、2017 年度中に鍛造および熱処理の条件から素材内の組織分布を予測し、当該予測結果に基づいて、次年度に行う実プレス鍛造を通じて本シミュレーション技術が産業利用可能なレベルであることを実証できる様、金型形状やプロセス方案の検討を行った。)

- ・ 約 1000 : 安定した高温環境雰囲気を作り出し、鍛造プロセスに類似した高温環境下でのトライボロジー評価が可能な、新たな摩擦測定装置の設計・試作を行う。

達成度 80% (ガラス潤滑剤に印可される面圧を増大させるために高温強度に優れたセラミックスであるアルミナに着目し、アルミナ製の圧子の先端を精密加工して鋭敏化するとともに基板にもアルミナを用いてガラス潤滑剤を塗布することにより、1200 での面圧を GPa レベルまで向上させることができ、実際の高温鍛造潤滑条件をほぼ達成することができた。)

#### (テーマ B22)【航空機エンジン部品用レーザー粉体肉盛による革新的生産技術開発】

- ・ チタン合金製航空エンジン部品の施工性・生産性を満足できる仕様を持ったレーザー粉体肉盛装置を導入する。

達成済み

- ・ 肉盛品の材料特性を取得・データベース化し、プロセス条件との相関関係を明らかにする。

達成済み

- ・ さらに、高生産・高品質チタン合金肉盛に必要なプロセス技術を確立する。

達成済み

- ・ 実機施工を想定した、縮小モデルへの施工を完了する。

達成済み

#### (テーマ B23)【航空機エンジン部品用金属粉末射出成形技術の開発】

- ・ ニッケル基合金 MIM の材料試験と部品試作を行い、航空機エンジン部材用射出成形技術の可能性を検証する。そのために実際に部品を使用する温度域で設計に使用できるレベルの材料データを取得し材料データベースを構築する。また試作レベルで0.3mm以上の欠陥がない密度97%以上の部品を達成する。

達成済み

- ・ チタン合金 MIM については既存 MIM 材の疲労強度 230MPa を上回る特性を得る。

達成済み

#### (テーマ B24)【次世代合金設計のための要素技術開発】

- ・ 製造時に混入する不純物元素(O, N, Fe, Si)の影響シリサイドの影響の2点について着目し、不純物元素(O, N, Fe, Si)やシリサイドが相変態や種々の高温特性に与える影響について明確化し、データベースを作成する。

達成度 80% (2016 年度で中止。B24 では鍛造プロセス基盤研究に注力する。新たな最終目標を設定。

下記参照)

- ・ データベースに基づいて、組織と高温特性の相関を明確化する。

達成度 20% (2016 年度で中止。新たな最終目標を設定。下記参照)

- ・ 鍛造シミュレータのテーマで行う組織予測、特性予測のために、第一原理計算、Phase-Field 及び有限要素法を行う。

達成度 60% (2016 年度で中止。新たな最終目標を設定。下記参照)

【最終目標】 (2018年度末時点)

#### (テーマ 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

作成した DB を用いて、高精度な組織・材質予測のための統合化モデルを構築する。これらを活用して耐熱材

の実鍛造品の最適鍛造プロセス設計を実現する。さらに、当該最適プロセス条件下で実プレス鍛造を行い、参画企業で利用可能なレベルであることを検証することにより、実用化につなげていく。

#### (テーマ B22)【航空機エンジン部品用レーザ粉体肉盛による革新的生産技術開発】

肉盛部の機械的性質に及ぼす、欠陥や金属組織の影響についての調査結果をもとに、品質(欠陥、組織など)を満足する多パス・多層の肉盛でのプロセス条件の許容範囲を設定する。設定した条件をもとに、要求特性を満足した1~2メートルサイズのチタン合金製の航空エンジン実機サイズ部品の製作を完了する。

また、実際の生産を想定して非破壊検査の手法、治具、欠陥判定基準などスペック等を策定し、肉盛部の品質保証技術を確立する。

SIP 終了後、航空エンジン部品への適用に必須の認証を取得するためには、品質を左右するプロセス条件の把握とその許容範囲の設定、その設定範囲に施工条件が入っていることの証明、成形品の検査により健全であることの証明、等が必要となる。今年度の取り組みは に関連する取り組みであり、SIP 終了後の実用化につなげる。

#### (テーマ B23)【航空機エンジン部品用金属粉末射出成形技術の開発】

信頼性と寸法精度に厳しい航空機エンジン部品向けの MIM 製造プロセスを開発し工業的に応用できるレベルへ到達する。そのために量産と同等の工程で0.3mm以上の欠陥のない密度97%以上を達成した航空機エンジン向けの部品で寸法精度 $\pm 0.2$ mmを実現する。

MIM チタン合金については従来の溶製チタン合金を凌駕する静的・動的破壊強度を達成するとともに、実際に部品を使用する温度域で設計に使用できるレベルの材料データを取得し材料データベースを構築する。

#### (テーマ B24)【鍛造プロセス基盤】

次世代鍛造プロセス技術のための鍛造材温度予測の高精度化を行うとともに、大ひずみ域までの高温引張による真応力 真ひずみ曲線取得技術を確立し、次世代技術開発のためのデータ蓄積を行う。また、元素成分(O, C)のばらつきを有する材料の鍛造プロセス中における組織変化メカニズムの解明およびデータ蓄積を行う。鍛造材の各部位による疲労寿命ばらつきデータを収集し、D領域で開発する疲労寿命予測モジュールの検証に活用する。

#### **拠点テーマB29-31 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**

**研究責任者:** 竹山 雅夫 (東京工業大学 物質理工学院 教授)

**高橋 聡 (株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領 材料研究部 次長)**

**参画機関:** 東京工業大学, 北海道大学, (株)神戸製鋼所, (株)IHI

#### **概要**

本プロジェクトでは、東京工業大学を拠点として、東工大、北大、神戸製鋼所、IHI が有機的に連携し、次世代の航空機用ジェットエンジンの低圧タービン(LPT)翼および高圧圧縮機(HPC)翼に搭載可能な高性能鍛造および鋳造 TiAl 金属間化合物基合金の組織設計、製造、成形プロセス技術を開発し、2020 年以降に開発される次期新型機種への適用とその量産体制を築くことを目標に、以下の開発研究を行う。

(テーマ B29)【高性能合金の組織・プロセス設計指導原理の構築】 東工大と北大により 合金設計の基礎となる多元系状態図の構築および多元系特有の相変態を用いた組織制御法の確立、 疲労き裂進展特性の評価と広領域3次元組織解析による特性支配組織因子の解明、 クリープ特性評価と変形支配組織因子の評価、 静的および動的酸化特性の評価・解析と酸化機構の解明による耐酸化性改善手法の提案を行う。 これらの課題を通じて 鋳造 LPT および鍛造 HPC 翼の開発に資する TiAl 基合金の組織設計指導原理を構築し、 成型性に優れた高強度 TiAl 基合金を設計・提案する。

(テーマ B30)【高品位・低コスト素材製造技術開発】 神戸製鋼所は、東工大が設計・提案する合金を目標組成範囲に調整し、且つ、高生産性でインゴットを製造する溶解鋳造プロセス技術の開発を行う。また、スクラップをインゴットの溶解原料として活用する技術開発を行い、高品位化と低コスト化を両立させた競合優位性の高い TiAl 基合金製造技術を確立する。

(テーマ B31)【革新製造プロセス開発/検証】 IHI は、東工大が設計し神戸製鋼所が溶解したインゴットを用いて、既存の設備を最大限利用した LPT および HPC 翼の製造プロセス(鋳造, 鍛造)技術の最適化を図る。また、部品設計に必要な合金特性データベースの整備を行い、実機環境を模擬した部品強度試験によりその特性を評価する。各機関での開発研究にて得られた情報は逐次相互にフィードバックし、産学が密接に連携して現用の Ni 基合金および TiAl 基合金の性能を凌駕する革新的低コスト TiAl 基合金を開発する。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

**【テーマ B29)【高性能合金の組織・プロセス設計指導原理の構築】**

実機環境を模擬した部品強度試験を実施可能なモデル合金を提案する。そのために以下のマイルストーンを達成する。

- ・ 元素を複合添加した多元系状態図の実験的決定およびそれを計算によって再現するためのデータベースの構築  
達成済み
- ・ 高温におけるクリープ変形、き裂進展および酸化挙動を支配する組織因子の解明  
達成済み

**【テーマ B30)【高品位・低コスト素材製造技術開発】**

最終目標(2018 年度)である量産スケール実証に向けて、中間評価時点では小型設備を用いた実験と解析による取組みによって、以下のマイルストーンを到達目標とする。

- ・ 成分変動の少ない高品質鋳塊を高歩留まりで得るための鋳造プロセスの基本設計を確定する。  
達成済み
- ・ 低コスト化を実現するためのスクラップ処理プロセスの基本設計を確定する。  
達成済み

**【テーマ B31)【革新製造プロセス開発/検証】**

- ・ 市場で十分なコスト競争力が確保できる部品製造プロセスの基礎を確立させる。  
達成済み
- ・ モデル合金を用いた翼部品による実機環境を模擬した部品強度試験を実施する。

達成済み

【最終目標】(2018年度末時点)

(テーマ B29)【高性能合金の組織・プロセス設計指導原理の構築】

高品位かつ安価なインゴットの製造と、既存の Ni 基合金および TiAl 合金を凌駕する優れた機械的性質および耐酸化性を有する高性能 TiAl 基合金の製造を実現するプロセス設計指導原理を確立する。そのために以下のことを明らかにする。

東京工業大学

- ・ 合金設計と組織制御に資する多元系状態図データベースの構築
  - ・ 3次元組織解析によるき裂進展機構の解明
  - ・ 機械的性質を最適化する組織制御法の確立
  - ・ より長期的な研究体制の構築を見据えた JET プロジェクト構想に基づくポスト SIP の拠点形成
- 北海道大学
- ・ 実機への適用を目指した耐酸化性向上のための添加元素の最適化、微量添加元素の提案
  - ・ それを可能とするため、引き続き TiAl 基合金の高温酸化挙動を支配する主たる要因の解明

(テーマ B30)【高品位・低コスト素材製造技術開発】

パイロット設備での溶解・鋳造試験によって、中間評価時点にて確立した基本設計の最適化を行い、以下の最終目標を達成する。

- ・ 優れた特性発揮のために必要となる高品質 TiAl インゴットの溶解鋳造技術を確立する。
- ・ 低コスト化のためのスクラップ活用技術を実証する。

(テーマ B31)【革新製造プロセス開発/検証】

- ・ 中間評価時点にて確立した製造プロセスの最適化を行い、優れたコスト競争力を有する生産技術を実証する。
- ・ 開発合金の部品基本設計に必要な合金特性データベースの整備を行うとともに、実機適用された TiAl 合金に対する特性/製造性の優位性を明確化する。

## 拠点内個別テーマB26 高強度ニッケル基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発

研究責任者: 今野 晋也 (三菱日立パワーシステムズ(株) 研究所 火力システム研究部  
火力システム第二研究グループ グループ長)

参画機関: 三菱日立パワーシステムズ(株)、東北大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構

### 概要

精密鋳造動翼材と同等レベルのクリープ強度と 1.5 倍以上の引張特性、疲労強度を有する高強度ニッケル基ディスク材料が開発され、航空機部品への実用化が拡大している。高強度ニッケル基ディスク材料を産業用ガスタービンに適用することで、耐用温度の向上や翼長拡大が見込まれ、ガスタービンの高効率化に寄与できる。ガスタービン適用にあたる課題は、熱間加工性や切削加工性が悪いことである。本グループでは、これら高強度ニッケル基ディスク材料に対して加工時には強化機能を消失させ、製品使用時に再度強度を回復させる組織制御技術を発見した。上記プロセスにより、熱間加工性や切削加工性を向上させるだけでなく、従来不可能とされた冷間加工にも成功している。本研究では、高強度ニッケル基ディスク材料について、加工性を飛躍的に改善する実用的な加工プロセスを開発し、実機部品製造プロセスを提案、最適化することを目的とする。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 相の強化機構を消失させる組織形成と変形メカニズムの解明を行い、この結果に基づき組織制御および加工プロセスを最適化する。

達成済み

- ・ 上記組織制御技術を適用した加工プロセスの要素技術を確立し、実機模擬部品製造プロセスの概略設計を完了する。

達成済み

【最終目標】 (2018年度末時点)

- ・ 鍛造シミュレーションソフトのパラメータ整備により、鍛造組織の予測を可能とし、鍛造条件の最適化を可能とする。
- ・ 実機模擬部品の試作を行い、AD730 と同等以上の強度と 700 級 A-USC 蒸気タービン用ニッケル基鍛造翼と同等レベルの切削加工性および製造コストを達成する。

## 個別テーマB27 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

研究責任者: 木村 一弘 (国立研究開発法人物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門  
材料信頼性評価ユニット ユニット長)

参画機関: 国立研究開発法人物質・材料研究機構、(株)東芝、日立金属

### 概要

火力発電の効率向上と大出力化ならびに地熱発電などの再生可能エネルギーの活用推進は世界的に重要な課題であり、そのための重要な施策として蒸気タービン最終段の長翼化が進められてきている。



長翼化や翼の効率化においては、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)性を有する動翼材料のみならず、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る。ローター材は現状、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の採用が進む動翼と比べ、現状材で現状の加工熱処理プロセスではさらなる強靱化が難しい。

そこで本研究開発では、蒸気タービンローターの最終段部位に適用し得る、強度・靱性と耐SCC性に優れた大型の鍛造ディスク部材とその製造プロセスを短期間に開発し、火力発電設備のみならず地熱発電設備も含め、効率向上と大出力化に貢献することを目指す。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

最終目標「現有のローター材に対して靱性、耐SCC性などが同等で、引張強度が1200MPaとなる大型蒸気タービン最終段用の鍛造ディスク部材の開発。」の達成へ向け、中間評価時点(2016年度内)で以下を目標とする。

・ ラボレベルでの材料特性の達成

蒸気タービン低圧ローターあるいは動翼として使用実績のある既存材に対するラボレベルでの加工熱処理による組織制御で以下を達成。

引張強度: 1200MPa以上(熱処理後の室温値)、靱性: Vノッチシャルピー吸収エネルギーが54J以上、耐SCC性: き裂発生までの時間やき裂発生程度が既存ローター材と同等

達成済み

・ 大型ディスク部材の試作方案を決定

ラボレベルでの試験結果とシミュレーション結果等から、大型ディスク部材試作に対しての材料選定と試作方案(溶解、鍛造、熱処理等のプロセス)を決定。

達成済み

**本課題は中間目標を達成し、参加企業における独自開発に移行するため2016年度で終了**

個別テーマ(FS)B28 航空機実装を目指した超急冷マグネシウム合金の製造基盤技術開発

研究責任者: 河村 能人 (熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター センター長)

参画機関: 熊本大学、住友電気工業(株)、国立研究開発法人産業技術総合研究所、

(独)労働安全衛生総合研究所

## 概要

航空機分野では、それまで禁止されていたマグネシウム合金の使用が解禁され、マグネシウム新時代が到来しようとしている。そのような状況で、航空機用のアルミニウム合金の代表格である超々ジュラルミンを凌駕する高強度の超急冷マグネシウム合金が我が国で開発され、航空機業界で注目されている。イノベーションを創出するためには、低コストで実用サイズの超急冷マグネシウム合金を実現して社会実装化する必要がある。

そこで、本研究開発では、従来のアルミニウム合金製ストリングを30%以上軽量化できる超急冷マグネシウム合金の低コスト・量産体制を構築することによって航空機実装化を実現するために、工程数を1/3にできる連続一貫システムを構成する要素技術(超急冷技術、裁断技術、予備成形技術、押出固化成形技術、安全技術)を

開発し、その実証パイロットプラントの設計を行うとともに、量産に適した合金・組織設計と製造条件の確立を行う。

【FS目標】(2015年度末時点)

- ・ 連続一貫システムを構成する要素技術を開発し、実証化パイロットプラントの設計を完了する。
- ・ 材料特性の目標は、降伏強さ439MPa以上、疲労強度239MPa以上、7075-T&同等以上の耐食性、発火温度はFAA燃焼試験合格レベル。

FSにつき2015年度で終了

**拠点内個別テーマB32 方向制御層状TiAlタービン翼の製造技術開発**

**研究責任者：安田 弘行 (大阪大学 大学院工学研究科 教授)**

**参画機関：大阪大学、金属技研(株)、国立研究開発法人物質・材料研究機構**

**概要**

TiAl 金属間化合物は軽量高強度で耐酸化性に優れ、その航空機への適用は機体の軽量化と燃費の向上に繋がる。本課題では、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層状組織を同時制御した TiAl 低圧タービン翼の開発を行う。具体的には、同手法のプロセスパラメーターの最適化により、表面形状、寸法精度、造形密度に優れる TiAl 構造体を高効率に作製する手法を確立する。続いて、積層造形特有の結晶成長を制御し、TiAl 特有の層状組織を制御することで、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。最終的には、得られた知見に基づき、形状ならびに層状組織の同時制御により、力学特性ならびに材料信頼性に優れる TiAl 低圧タービン翼を作製する。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

最終目標である「3D-EBM 法による層状組織制御 TiAl 低圧タービン翼の製造技術の確立」に資することを目的として、中間評価時点までは以下の事項を達成することを目標とする。

- ・ 単純形状(丸棒)の TiAl モデル構造体について、三次元形状と層状組織の同時制御を達成する。具体的には、3D-EBM 条件(ビーム出力、走査速度、走査ピッチ)ならびに熱処理条件(温度、時間)と力学特性ならびに微細組織との相関関係を表すプロセスマップを完成させる。

達成済み

- ・ 得られた知見をもとに、3D-EBM のプロセス条件を最適化することで、寸法誤差 $\pm 0.2\text{mm}$ 以下、造形密度99%以上、室温での降伏応力500MPa以上、延性1%以上を達成した TiAl 丸棒構造体を作製する手法を確立する。

達成済み

- ・ 層状組織の配列制御について、室温における強度の異方性指数1.1以上を達成する。

達成済み

- ・ TiAl を使用する上で重要なクリープ特性について、層状組織を活かした組織制御により、最小クリープ速度の1桁以上の減少(750、100MPa程度の条件)とこれに伴う使用可能温度の向上を達成する。

達成済み

- ・ 前倒して研究開発を進め、形状制御に特化した TiAl タービン翼の試作に成功するとともに、その HIP 処理、表面切削法も確立した。

#### 【最終目標】 (2018年度末時点)

中間評価までに確立した 45°造形法を初めとする 3D-EBM 独特の材質制御技術を活かして、形状・組織を同時制御した高延性 TiAl 低圧タービン翼の製造技術を確立する。具体的には、海外企業・研究機関との国際的なベンチマークを更新しつつ、以下の達成を目標とする。

- ・ タービン翼形状でも 45°造形法が TiAl の延性改善に有効であることを実証するとともに、プロセス条件の最適化により、力学特性、材料信頼性の向上を行う。
- ・ 3D-EBM 後の HIP 処理、表面切削まで含めた製造技術を確立するとともに、生産性向上やコスト低減の FS も行う。
- ・ 最終的には、タービン翼形状の TiAl 構造体について、寸法誤差  $\pm 0.2\text{mm}$  以下、造形密度 99% 以上、室温での降伏応力 500MPa 以上、延性 2% 以上、の数値目標をクリアする。

#### 個別テーマB33 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

研究責任者:佐藤 順 (三菱日立パワーシステムズ(株) 研究所 火力システム研究部 主席研究員)

参画機関: 三菱日立パワーシステムズ(株)、東京工業大学

#### 概要

石炭火力発電プラントの高効率化には蒸気温度の向上が有効であり、650 級プラントの需要が高まっている。これまでロータ素材の耐用温度向上が図られてきたが、フェライト鋼では 600 級での使用が限界であり、700 級 A-USC プラント用に開発されているニッケル基超合金はコスト面で課題がある。本研究では、軽量の TiAl 合金製の蒸気タービン動翼を開発することでロータに作用する応力を大幅に低減し、フェライト鋼ロータの耐用温度を 650 以上に向上させることが目的である。蒸気タービン動翼の必要特性は航空機エンジン動翼よりも低強度、高破壊靱性であるため、航空機エンジン動翼とは異なる組織制御プロセスを確立する。候補材料について動翼を試作し、製造プロセス(鍛造、切削加工)や機械特性(引張、靱性およびクリープ特性)を検証する。また、TiAl 合金を蒸気タービンに適用した例はないので、水蒸気環境中の酸化、クリープ挙動の解明および信頼性を確認する。

#### 【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

候補材料成分候補の選定

- ・ 候補材料による動翼製造プロセス確立  
達成度 70%
- ・ 候補材料成分の  $10^4\text{Hr}$  クラスの実時間クリープ強度評価完了  
達成済み
- ・ 水蒸気環境中の酸化、クリープ損傷挙動の把握  
達成度 90%

本課題に関しては実用化困難と判断し、2016年度で終了

**(B) 耐熱合金・金属間化合物等領域の主要な研究開発の目標**

【中間目標】(2016年度末時点)

- ・ 1500t級大型精密鍛造シミュレータを用いた、鍛造シミュレータデータベースの作製手順の整備  
達成度80% (鍛造シミュレータは完成し順調に稼動、DB基盤整備も2017年度中に達成予定)
- ・ 難加工材料プロセス条件の最適化手法検討及びデータの取得  
達成済み
- ・ 航空機エンジン部材用ニアネットシェープ成形技術及び射出成形技術の可能性検証  
達成済み
- ・ TiAl金属間化合物の部材製造プロセスの基本完成  
達成済み

【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ 精密鍛造シミュレータによる大型航空機用部材成型時の鍛造加工及び加工後の特性を予測可能に。
- ・ 最新の製造技術を利用した部材成形が完成し、工業的に応用できるレベルへの到達。

**耐熱合金・金属間化合物等 所要経費**

2014年度 11.525 億円

2015年度 12.892 億円

2016年度 10.08 億円

2017年度 9.3 億円

2018年度 8.11 億円(見込み)

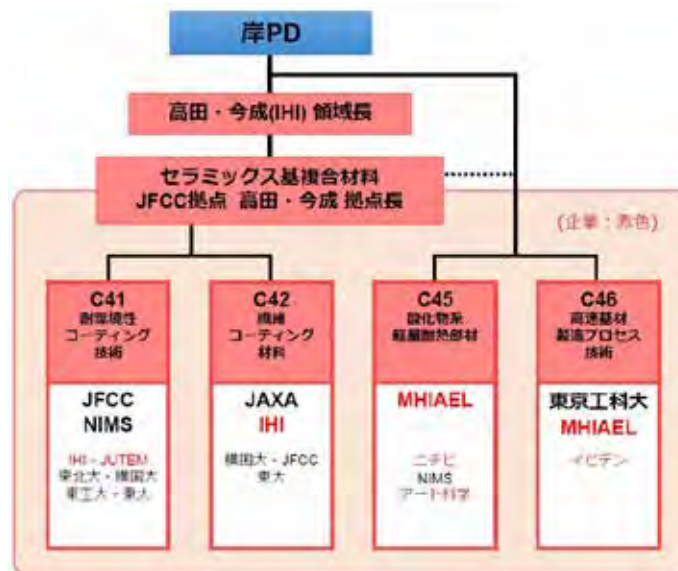
### (C) セラミックス基複合材料の開発

領域長 高田 雅介((一財)ファインセラミックスセンター 材料技術研究所長兼ナノ構造研究所長)  
 今成 邦之 ((株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 副所長)

近い将来の航空機用エンジンへの軽量セラミックス材料部材利用は、より高温で材料を使うことによる高効率燃焼や廃熱を最小限に抑えた熱エネルギーの有効利用という観点からは欠かせない。エンジンの高温部分に実用化が見込まれる軽量セラミックス部材では、使用時の過酷な環境から表面を守り、部材の長時間使用を可能にする技術が、国際的に差別化された軽量セラミックス部材の実現に必要である。

本研究開発では、耐熱・耐環境コーティング(EBC)を開発し、軽量セラミックス部材に適用することにより、航空機エンジン部材のタービン動翼・静翼、シュラウド等の大幅軽量化と使用環境下における部材の耐熱性、耐久性、並びに信頼性の飛躍的向上を可能にすることを目指す。これにより、航空機用エンジン部材の国際商品としての付加価値を高める技術を確立する。国際的に未到達の 1400 級の使用環境下で酸素遮蔽性や水蒸気遮蔽性を最大にすることができる新規セラミックス材料をコーティング材料として使いこなしのための技術を開発し、材料開発だけでとどまることなく、工業材料としての実機適用に速やかにつなげる。

同時に、コーティングと基材の接合の信頼性保証、重要関連技術として、開発するコーティングの使用時性能を最大限に発揮できる基材自体の開発と高性能化も行う。使用時特性を評価し、性能を保証するための研究開発も実施し、本研究開発で実現する新素材を用いて実用的に利用できる高温構造部材を作り出す総合的な技術を開発する。



図表 2 - 7 . セラミックスコーティング領域の研究開発体制

本研究開発領域は、拠点テーマ 2 件、拠点内個別テーマ 1 件で構成される。図表 2 - 7 に本領域の研究体制図を示す。

## 拠点テーマC41-42 耐環境セラミックスコーティングの構造最適化及び信頼性向上

研究責任者:高田 雅介 ((一財)ファインセラミックスセンター 材料技術研究所長兼ナノ構造研究所長)

今成 邦之 ((株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 副所長)

参画機関: (一財)ファインセラミックスセンター、横浜国立大学、東北大学、東京工業大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構、東京大学、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、(株)IHI、(株)超高温材料研究センター

### 概要

航空機エンジンの燃費を改善し CO<sub>2</sub> 排出量を大幅に削減するためには、エンジン部材の“軽量化”と、高温の燃焼ガスに曝される部位の“耐熱性の向上”が不可欠である。特に、高圧タービン部材は高温の水蒸気を含む過酷環境に曝されるため、非常に優れた耐久性が要求される。現用のニッケル基系超合金の耐用温度は約 1100 であるが、さらなる素材改良と空気冷却等の措置を講じたとしても、現在の合金技術の延長では将来的にも 1200 の耐用温度が限界である。

一方、世界最高性能の SiC 繊維(耐用温度は 1400 )を用いて製造した SiC 繊維強化 SiC 複合材(CMC)は、超合金より軽量で耐熱性に優れ、しかも、損傷許容性を有するため、この壁を打ち破る新しい材料として期待されている。しかし、CMC は、約 1100 以上の高温の水蒸気環境において酸化・減肉による部材の劣化が問題となる。したがって、これを高圧タービン部材に適用するためには、部材の表面を守り長期使用を可能にする耐環境性コーティング(EBC: Environmental Barrier Coating)が不可欠である。

本研究では、CMCの耐久性を飛躍的に向上させるために、繊維耐用温度1400 の酸素・水蒸気環境において長期間使用可能なEBCを開発する。また、CMCの損傷許容性に対する耐性を高めるために、繊維表面に繊維劣化防止と損傷許容性発現機能を有する繊維コーティングも合わせて開発する。さらに、これらのコーティング性能を最大限に発現させるため最適構造設計指針を構築するとともに、模擬使用環境下でのEBCの使用限界の把握や、部材使用時の非破壊検査技術を開発する。

その結果、実用的に利用できる世界最高性能のコーティング技術が確立される。また、CMC製造に関する従来技術との融合により、競合材を凌駕する高圧タービン部品の製造基盤技術が構築される。

### 【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ コーティング構成材の酸素・水蒸気透過係数を測定し、酸素・水蒸気遮蔽効果を定量的に評価すると共に、そのデータを基に、1400 の酸素・水蒸気環境下において環境遮蔽性に優れる EBC 構造、繊維コーティング構造を確定する。また、最適コーティング構造開発を開始するために必要な設計指針を確立する。

達成済み

- ・ 電子ビーム PVD 法により、CMC 基板上に環境遮蔽性に優れる EBC の要素プロセス(緻密化)を確立する。

達成済み

- ・ 直径 70mm 以下の平板状の基板に対して、電子ビーム PVD 法により EBC 構成層をコーティングする技術を確立する。

達成済み

- ・ 繊維表面に「繊維劣化防止」機能、「変形 - 破壊過程制御」機能を有する繊維コーティングの要素プロセス（緻密化、き裂伝播経路制御）を確立する。  
達成済み
- ・ EBC の性能低下の支配因子を明らかにする。  
達成済み
- ・ EBC の機械的損傷を定量的に評価するために、界面の破壊靱性値の測定とエネルギー解放率の計算に必要なデータを収集する。  
達成済み
- ・ CMC の非破壊検査法の候補を選定する。  
達成済み

#### 【最終目標】（2018年度末時点）

- ・ 高温の酸素・水蒸気環境下における EBC の環境遮蔽性や、繊維コーティングの損傷許容性発現機能が、ベンチマーク比較材よりも優れることを実証する。
- ・ EBC を 1400 の酸素・水蒸気環境下において長時間曝露後も環境遮蔽性が発現する構造を維持すること、また、繊維コーティングを 1400 曝露後も損傷許容性が発現する構造を持続することを実証する。
- ・ タービン部品形状を模擬した複雑形状基板に対して、電子ビーム PVD 法により EBC をコーティングする技術を確立する。
- ・ EBC に対して熱サイクル試験を実施しても、EBC の剥離や厚さ方向のき裂が進展しないことを実証する。
- ・ EBC の化学的損傷と熱機械的損傷の評価・解析に基づき、使用限界を把握する。
- ・ 2018 年内に最適コーティング構造に関する基本特許を申請する。
- ・ 平板の CMC を用いて非破壊検査条件を設定し、部品形状への適用可能性を検討する。

#### 拠点テーマC46 高速基材製造プロセス技術の開発

研究責任者:高田 雅介 ((一財)ファインセラミックスセンター 材料技術研究所長兼ナノ構造研究所長)

参画機関: 東京工科大学、三菱重工航空エンジン(株)、イビデン(株)

#### 概要

CMCはここ数年で著しい進歩を遂げ、2016年秋からはGEによりCMCを民間航空機エンジンに搭載する計画が発表され、さらに競争が激しくなった。P&Wとロールスロイスは米国内のベンチャー企業を買収し、CMCの製造技術を獲得している。一方、国内のエンジン部材を提供する立場の重工メーカーは独自にCMCの研究開発を行い、近い将来の最重要材料としての位置づけで開発を加速している。全世界で用いられているCMC強化用のSiC繊維は東北大学の発明技術をもとに製造されているものであり、国際的にも国内製造メーカー2社による独擅場であった。具体的には宇部興産と日本カーボンが繊維製造技術を引き継いだ。日本カーボンは同事業について、2012年にGEと仏サフランとの共同経営となる新たな企業(NGSアドバンスファイバー)を設立した。

国内でのSiC繊維調達という優位性を保ちつつ、加工から品質保証までの一連のバリューチェーンを構築し、年率5%で成長する航空機産業の分野で、今後成長が特に見込まれる高性能エンジン部材を製造できる立場を国内に確立することが急務である。CMCの実用化に当たっては、高スペックの材料を開発すればよいという訳で

はなく、適用部位に応じたグレードのCMC材料を適正な価格で提供できるようにすることが重要である。本研究では、低圧タービン動翼への適用を想定し、耐用温度1200 のCMC基材を低価格で高速製造する手法の開発を行う。これを実現するために、1)汎用グレードのSiC繊維を用いる、2)繊維の織り方を簡易なものにする、3)高速溶融含浸(MI)法によりプロセスの高速化(分単位)とSiC繊維の劣化を防ぐ、といった工夫を取り入れる。将来的には、低圧タービン動翼の材料をニッケル基超合金からCMCへと置き換えることで、燃費の向上、CO<sub>2</sub>排出削減を実現する。

【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ CMC 製造技術として、界面形成技術、形状保持技術、高速 MI プロセスの目途付け
- ・ CMC 特性として、タービンブレード設計に必要な強度の発現
- ・ タービンブレード実形状模擬翼根(ダブテール)部分供試体作製と強度試験実施
- ・ タービンブレード実形状模擬供試体作製と回転(スピン)試験実施

#### 拠点内個別テーマC45 酸化物系軽量耐熱部材の開発

研究責任者：牛田 正紀（三菱重工航空エンジン(株) 技術部 部長）

参画機関：三菱重工航空エンジン(株)、NIMS、(株)アート科学、(株)ニチビ

#### 概要

航空機用エンジンにおいて、従来のコーティングは、機能材として酸化防止や水蒸気透過抑止などの役割を担っていた。本研究開発では、コーティングを構造材として捉え、靱性の低いセラミックス材料の靱性向上を目的として、以下の4項目について技術開発を実施する。

低コスト高靱性化材料プロセス技術：安価な酸化物系セラミックス繊維を用いた平板状セラミックス基複合材料をコーティング材料(構造材)としてセラミックス系材料表面に貼り付け高靱性化する。

低コスト耐熱性繊維製造技術：国産酸化物系セラミックス連続繊維の耐熱性を向上する。

耐環境コーティング技術：遮熱・アブレーション性を持ったコーティング施工により実環境での使用能力を向上する。

材料・部品の評価・設計技術：材料特性評価や設計データ取得をするに止まらず、実部品模擬形状を用いた実機環境模擬試験により部材評価を実施する。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

2014～2016 年度は「材料レベル」の開発を行い、2016 年度には耐環境性セラミックスコーティング材料の確定、材料製造基本プロセス技術の確立、及び材料基本特性の評価を完了し、TRL レベルを2とする。

- ・ 「低コスト高靱性化材料プロセス技術」、及び 「耐環境性コーティング技術」としては基本プロセスの確立、及びプロセス最適化を行う。

達成済み

- ・ 「低コスト耐熱性繊維製造技術」では繊維単体での耐熱性向上の研究を行い、焼成条件の適正化、耐熱性影響因子を明確化し、「低コスト高靱性化材料プロセス技術」へのフィードバックを行う。

達成済み



- ・ 「材料・構造の設計評価技術」にて高靱性化メカニズムの解明(破壊メカニズム同定)、材料基本特性の評価、熱衝撃特性、耐剥離性の評価を行い、  
、  
での成果を元に耐環境性セラミックスコーティング材料の確定を完了させる。

達成済み

- ・ また、部品設計を開始し、燃焼器パネル・タービンシュラウド部品の強度検討を並行して行う。

達成済み

#### 【最終目標】(2018年度末時点)

2017～2018年度は「部品レベル」の開発を行い、2018年度には実部品模擬形状への耐環境性セラミックスコーティング施工技術の確立、耐環境性セラミックスコーティングの耐熱性向上、及びその設計手法の設定を完了し、TRLレベルを3とする。

「低コスト高靱性化材料プロセス技術」、及び(「耐環境性コーティング技術」としてはプロセス最適化を継続し、かつ模擬部品として燃焼器パネル・タービンシュラウド部品の形状試作を行う。「低コスト耐熱性繊維製造技術」では複合化材料評価の特性改良により繊維の耐熱性を100向上させ、「低コスト高靱性化材料プロセス技術」での模擬部品形状試作にフィードバックを行う。「材料・構造の設計評価技術」にて、製造コスト評価、部品模擬形状に対する実環境模擬評価、システム全体として1400級主流温度での耐熱性確保の評価を行い、高靱性化メカニズムに基づく設計手法の設定を完了させる。

### (C) セラミックス基複合材料領域の主要な研究開発目標

【中間目標】 (2016年度末時点)

- ・ 1400 級の耐高温過酷環境機能を持つコーティング材料の確定  
達成済み
- ・ コーティング技術の基本を完成し、効果の検証を完了  
達成済み
- ・ 必要な周辺技術課題の開発方針を明確化  
達成済み
- ・ 最適コーティング構造開発を開始するために必要な設計指針を確立する  
達成済み

【最終目標】 (2018年内)

- ・ 1400 級コーティングが高温過酷雰囲気、部材の点検間隔時間以上機能するための材料及びプロセス技術の完成。
- ・ コーティングを最大限活かすための周辺技術の完成と、応用技術へ速やかに展開を可能に。
- ・ 2018年内に最適コーティング構造に関する基本特許を申請する。

### セラミックスコーティング 所要経費

2014年度 5.230 億円

2015年度 3.326 億円

2016年度 3.67 億円

2017年度 7.0 億円

2018年度 5.40 億円 (見込み)

### (D) マテリアルズインテグレーション

領域長 小関 敏彦(東京大学 大学院工学系研究科 教授)

榎 学 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

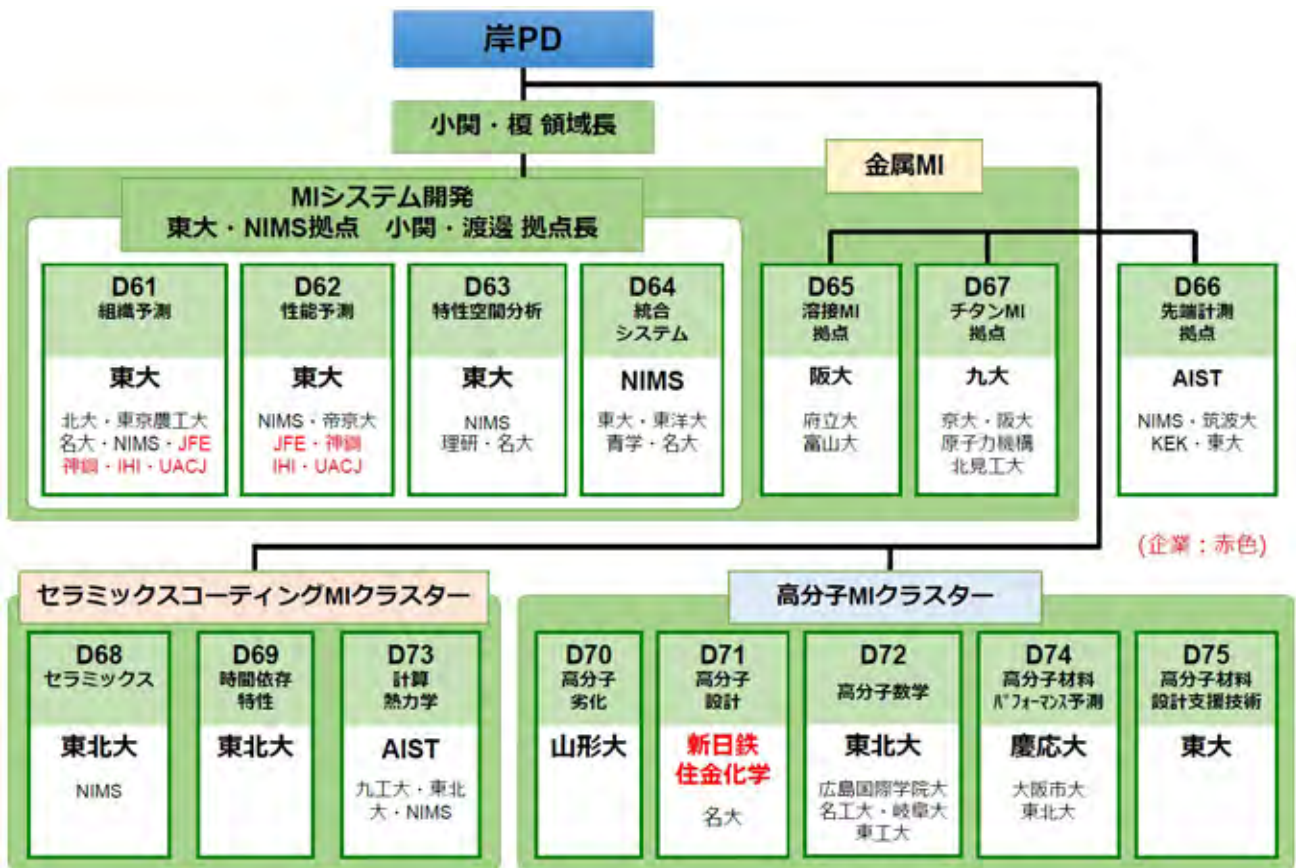
マテリアルズインテグレーションとは材料工学を中心として、既存の理論や実験、シミュレーション等の計算機科学的手法、データベース、マテリアルズ・インフォマティクスなどの情報学などを融合するとともに、不足している知見を俯瞰し、材料使用時のパフォーマンス特性を知るためのツール及びこのツールを開発するために必要な周辺技術であると定義する。構造材料の分野で、継続的にイノベーションを起こすことを目的に、理論、実験、計算科学を駆使し、得られた知見のデータベース化をすすめて、要求された性能の構造材料を短期間に設計・製造する方法論を構築する。構造材料の開発には、多種多様の分野の知識が必要であり、しかも、構造材料が長い時間にわたり用いられることを考慮しなければならない。材料の使用環境下における、長時間後の材料の劣化状態を知ることや、材料の使用時特性としてのパフォーマンスの時間的変化を理解し、研究開発にフィードバックすることは研究開発時間の短縮化に大きく貢献できる。し

かし、シミュレーションのような計算機科学の延長だけでは、限られた範囲のデータから実用化に必要な未知の特性を予測したり、長時間使用した後の特性を予測することは難しい。

将来の航空機産業における国際的な競争の中でいち早く材料から部材までの一貫した開発を行い、早期実用化に結びつけるためには、経験に頼る開発から脱皮し、新しいコンセプトに基づいて、利用加工技術や使用時特性の予測等、材料から構造体に至るまでのパフォーマンスを予測することが役立つ。これを実現するマテリアルズインテグレーションの手法は研究開発時間の短縮に役立つ構造材料の開発ツールになりうるものである。

マテリアルズインテグレーションに類する取り組みが、国際的に盛んになっており、我が国でもこの潮流に乗り遅れることなく取り組む必要がある。マテリアルズインテグレーションを実現するために、近年の計算機科学、ネットワーク技術、データマイニング、数理解析、実験、データベースなどの技術・情報を融合し、構造体の使用環境における性能や性能の時間変化を予測可能とするシステムを開発する。さらに、このシステムを使うことにより、限られた範囲の特性測定から、材料全体の性能が俯瞰できるような計算機を利用した手法を提供する。ここで開発するツールは、航空機産業以外にも利用でき、高度な専門知識がなくても利用できる、ユーザーインターフェース、柔軟なデータ構造を備えるなど、将来の利用形態も考慮して開発を行う。

本研究開発領域は、拠点テーマ4件、2つのクラスターとクラスター内個別テーマ8件で構成される。図表2 - 9に本領域の研究体制図を示す。



図表2 - 9 . マテリアルズインテグレーション領域の研究開発体制

## 拠点テーマD61-64 マテリアルズインテグレーションシステムの開発

研究責任者：小関 敏彦 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

渡邊 誠 (物質・材料研究機構 構造材料研究拠点)

参画機関：東京大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構、北海道大学、東洋大学、青山学院大学、東京農工大学、名古屋大学、国立研究開発法人理化学研究所、JFEスチール(株)、(株)神戸製鋼所、(株)IHI、(株)UACJ、帝京大学

### 概要

本研究開発は、多様な素材、プロセスから製造されて部材や構造体に用いられる構造材料の組織と時間依存の性能の予測を、理論や経験則、数値モデリング、データベースなどの融合(インテグレーション)から可能とするマテリアルズインテグレーションシステム(MI)の構築を目的とする。数値モデルの高度化に加え、データを活用した情報統計工学のアプローチを重畳して複雑系の材料組織・性能の予測を行い、これまで試行錯誤と長期の特性評価を要した材料開発の期間を大幅に短縮し、効率的な開発を可能にするとともに、材料の製造や利用加工のプロセスの最適化、構造体設計における材料選択の最適化、構造体の信頼性予測や診断の精度向上をも可能にする。これによって材料開発や構造体の設計・製造を強力に支援し、それに関わる産業の競争力に寄与する。

この構想するMIシステムを構築するため、実用的にも重要な高強度鋼溶接部の組織予測と、それに基づく疲労、クリープ、脆性破壊、水素脆化の各性能予測を例題として取り上げ、MIシステムの中核コンテンツである「組織予測システム」、「性能予測システム」を、それぞれを構成するモジュール群と併せて開発するとともに、それらの予測をデータベースの構築と情報統計工学から支援する「特性空間分析システム」、さらに以上の3システムを統合しMIシステムとして機能させる「統合システム」を開発する。組織予測、性能予測、特性空間分析のシステム、およびそれぞれが必要とするモジュール群の基本的な開発は当初3年を目途に行い、その後、それらの検証を行いつつ、連結した統合システムの開発を進め、全体を5年で完成させる。また開発したシステムをアルミ合金溶接部へも展開する。ユーザーとの連携を図るため、早い段階で想定されるユーザーへのヒアリングを進めシステム設計に活かす。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

#### テーマ D61【組織予測システムの開発】

- ・ 材料の基本成分系を定め、それに対応する組織予測のモジュール群のプロトタイプを作成し、実際の組織データと比較検証する。

達成済み

#### テーマ D62【性能予測システムの開発】

- ・ 組成、組織、使用条件を入力条件として、材料の疲労・クリープ・水素脆化・脆性破壊を予測するための計算モジュール、データベースモジュールのプロトタイプを作成し、検証する。

達成済み

#### テーマ D63【特性空間分析システムの開発】

- ・ 組織・性能・プロセスデータのデジタル・アーカイブ化と可視化、データ駆動型手法に基づく組織予測・性能予測手法に関するプロトタイプを作成する。

達成済み

#### テーマ D64【統合システムの開発】

- ・ 組織予測、性能予測、特性空間分析、各システムのプラットフォームの基盤を作成する。

達成済み

【最終目標】 (2018年度末時点)

#### テーマ D61【組織予測システムの開発】

- ・ フェーズフィールド法を用いた実用鋼溶接部の組織予測システムを作成し、各システムと統合させる。

#### テーマ D62【性能予測システムの開発】

- ・ 実用鋼溶接部での疲労・クリープ・水素脆化・脆性破壊を予測するための性能予測システムを作成し、各システムと統合させる。航空機用材料(Ti 合金等)の性能予測への応用展開を図る。

#### テーマ D63【特性空間分析システムの開発】

- ・ 実用鋼溶接部での組織予測や性能予測の高精度化をデータ駆動型予測によって支援するシステムを作成し、各システムと統合させる。材料変形予測への応用展開を図る。

#### テーマ D64【統合システムの開発】

- ・ 組織予測、性能予測、特性空間分析、各システムを統合・実装した統合システムを完成する。

【出口戦略の強化に向けた取り組み】

#### (1)社会実装への具体的取組の強化

最終年度であることを踏まえて、MI システムを日本の産業競争力強化に活用してゆくために、MI システムの管理と同時に、人材の育成、各モジュールの充実、改良等の継続的発展を担う拠点構築を目指す。MI に関する戦略的な知財管理と運用を目指し、知財委員会の支援に基づく計画案を作成する。

#### (2) 企業との連携強化

最終年度であることを踏まえて、企業による試用と改良、データベースの充実、組織パラメータから性能予測を可能にする機械学習アルゴリズムの構築と例題集の拡充により、実用的な「統合型材料開発システム」への発展を目指す。

#### **拠点テーマD65 溶接部性能保証のためのシミュレーション技術の開発**

**研究責任者:廣瀬 明夫 (大阪大学 大学院工学研究科 教授)**

**参画機関: 大阪大学、大阪府立大学、富山大学**

#### **概要**

本研究開発では、マテリアルズインテグレーションの具体的課題として、構造物の組立て技術の基幹となる溶接技術を対象とする。溶接部では溶融凝固に伴いマイクロ組織が変化し、欠陥が発生するため、溶接継手性能の保証が課題となっている。そこで、溶接熱源により溶融部が形成される過程、凝固プロセスを経て、割れなどの欠陥が発生する現象、急速な熱サイクルによるマイクロ組織の形成過程、そして最終的に形成される溶接継手の性能を総合的に予測するシミュレーション技術の開発を目的とし、下記の 3 個別テーマを実施して、研究開発を行う。

溶接熱源のモデル化とそれによる溶融池形成予測技術の開発: 熱源モデルと溶融池形成モデルを連成することにより、溶接条件を入力するだけで、3次元空間でのダイナミックな変動を伴う熱源の発生、母材への熱輸送、溶融池形成を時系列に出力する数値シミュレーション技術を開発する。加えて、溶接施工中の溶融池形状をその場で計測できるレーザ超音波による計測システムを開発し、シミュレーションによる溶融池形状の予測と照合する。さらに、大阪大学サイバーメディアセンターを活用したオンライン予測システムを構築し、開発した溶融池形成予測技術の実用性を評価する。

凝固・組織変化を伴う溶接部の特性予測技術の開発: 溶接金属における溶融・凝固現象とその後の冷却過程における組織形成予測技術を開発する。次に、その結果を用いて、それらに起因する溶接部の特性変化を予測するツールを開発するとともに、溶接欠陥(溶接高温割れ)発生を予測するシミュレーション技術も構築する。

溶接継手の性能予測技術の開発: 実溶接継手の性能(静的/動的破壊強度、疲労破壊強度/寿命)を、溶接部の基礎特性から定量的に評価・予測する技術の開発に取り組む。そのため、継手性能を支配する材料特性を明確にし、その情報のみからパラメータ同定可能な材料特性融合型の先進破壊モデリングを提案するとともに、本モデルによるシミュレーションベースの継手性能予測手法を構築し、その妥当性を検証する。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

個別テーマ1

- ・ 1) 電極現象とアークプラズマ現象の相互作用を考慮に入れたアーク熱源モデルの開発(国際的に未踏領域を踏破)

達成済み

- ・ 2) 光のエネルギー束と金属との相互作用を考慮に入れたレーザ熱源モデルの開発

達成済み

- ・ 3) 熱源モデルと溶融池形成モデルの統合化の基本デザイン完了(世界初)

達成済み

個別テーマ2

- ・ 1) 高温割れ発生の冶金因子として、高温割れの組織形成および凝固・偏析シミュレーション技術を開発する。

達成済み

- ・ 2) 高温割れ発生の力学モデルとして、溶接凝固過程の応力・ひずみを解析し、冶金的割れ発生条件とリンクさせて高温割れの発生モデルを構築する。

達成済み

- ・ 3) 溶接熱サイクル過程における組織形成・組織予測シミュレーション技術を開発する。

達成済み

個別テーマ3

- ・ 1) 多層溶接継手の各種性能予測に必要な溶接部材料の機械的特性を提示する(データベース化すべき新たな機械的特性の提示)。

達成済み

- ・ 2) 上記の材料特性からパラメータ同定可能な数理損傷・破壊モデルを構築する。

達成済み

- ・ 3) 多層溶接継手の性能評価・予測シミュレーション法の構築とその妥当性を基礎検証する。

達成済み

- ・ 4) 微小領域の特性評価試験および評価技術を構築する。

達成済み

【最終目標】 (2018年度末時点)

標準材料(SUS304)を用いて以下の個別テーマ1～3を統合して、溶接プロセスから高温割れ、組織形成、継手性能を予測する統合シミュレーションを開発してその妥当性の実験的検証を行う。

個別テーマ1

- ・ 1) 開発モデルを各企業で試用し、実用性の検証
- ・ 2) レーザ超音波法による溶融池形状のインプロセス検証技術の開発(世界初)
- ・ 3) レーザ超音波法等による実験観察とシミュレーション予測とを検証し、本開発を達成(世界初)
- ・ 4) 大阪大学サイバーメディアセンターを活用したオンライン予測システムを構築する。

個別テーマ2

- ・ 1) 構築した冶金+力学融合モデルに基づき、高温割れの発生予測を行うとともに、割れ発生のハザードマップを提示し、それらの妥当性を実験的に評価する。
- ・ 2) 溶接多重熱サイクル過程における組織形成・組織予測シミュレーション結果を可視化して、多層盛溶接部の組織分布を提示する。
- ・ 3) 先進的数理モデルを用いて多層盛溶接部における硬さ、靱性や耐食性などの特性を予測し、特性分布として可視化する。
- ・ 4) シミュレーション技術の統合に向け、凝固・組織変化を伴う溶接部の特性予測システムの汎用化を推進する。

個別テーマ3

- ・ 1) 溶接継手の破壊性能予測シミュレーションのためのモデリング手法を構築し、その妥当性を実験により評価する。
- ・ 2) 破壊性能予測シミュレーション手法を用いて、継手性能と溶接部性状ならびに各部の特性との関係を明示し、継手性能向上のために多層溶接部材料に要求すべき機械的特性の制御指導原理の提示への展開を図る。
- ・ 3) 要求特性を実現する溶接プロセス制御指針提示への展開を図る。

## 拠点テーマD66 構造材料の未活用情報を取得する先端計測技術開発

研究責任者:大久保 雅隆 (国立研究開発法人産業技術総合研究所

エレクトロニクス・製造領域 構造材料ナノ物性計測分析ラボ 研究ラボ長)

参画機関: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構、東京大学

### 概要

先端計測拠点は、材料開発者が多用する形態観察装置では対応できない、未活用情報(材料開発においてまだ活用されていない材料情報)を、ナノテクノロジー分野などで活用されている先端計測装置を用いて取得して、計測分析の立場から革新的構造材料分野におけるイノベーション創出に貢献することを目標として設計されている。TIAオープンイノベーション拠点が有する、世界的にも希な先端計測分析装置と解析技術である、反物質(陽電子)を使った格子欠陥、自由体積計測、超伝導を使った微量軽元素(B, C, N, O)のイメージングと化学結合状態計測、原子から主翼等の部材サイズをカバーするマルチスケールひずみ組織イメージング、イオン加速器による核反応を使った水素イメージング、放射光を使った欠陥、き裂と化学結合の同視野解析などを活用して、従来の構造材料開発で使われてきた計測とは異なる視点から構造材料を見る。例えば、従来、き裂が発生した後の形態観察、破壊した後の材料評価が多用されるのに対して、き裂発生前の前駆段階の検知とそれからの寿命予測、初期の組織構造と疲労寿命やクリープ寿命の関係を明らかにして、劣化メカニズム解明、寿命予測、そしてそれによるパフォーマンス向上に貢献する。

2014-2016年のステージ1では、材料開発とシミュレーション領域から従来測定できずに困っているという顕在化している計測ニーズに対応してきた(顕在化未活用情報の取得)。未活用情報を提供し、材料開発と予測技術構築に貢献してきた。

2016-2018年のステージ2では、A,B,C,D 各領域との連携を深化させ、開発した先端計測技術を軸に材料研究サイドとは異なる発想と視点から、パフォーマンス向上のための新たなパラメータの発見にチャレンジしていく(非顕在化未活用情報の発見)。COP21目標達成のために超軽量と耐熱構造材料が取り上げられており、先端計測分析が革新的構造材料イノベーションのトリガーになることを目標とする。先端計測技術を材料開発基盤として国際連携を促進し、国内だけでなく海外市場で必要とされているパフォーマンスの把握や、それを実現するための手法を提案し、世界シェア拡大に貢献する。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

樹脂、セラミックス、金属といった幅広い材料から構成される構造材料の計測において、拠点体制構築と、計測ボトルネックとなっている変位(応力)と亀裂、微量軽元素と添加元素、異相界面と基材組織、空孔欠陥において、新たに以下の手法を確立する。

### 共通テーマ: 多面的総合計測体制の構築

- ・ 本 SIP 最先端計測施設、他事業の共用機器、受託分析を総合的に活用して、顕在化している未活用情報を取得、あるいは顕在化していない未活用情報を発見できる拠点体制を構築する。国際会議を主催して、材料開発、計測分野におけるハブ機能を発揮する。

達成度 100%。国内連携に加えて、エアバス、フラウンホーファー研究機構、デルフト大、トゥウェンテ大学



などとの共同研究に発展し、海外から構造材料計測ニーズが集まりつつある。

#### 個別テーマ1：残留応力と亀裂の計測手法の確立の開発

- ・ サンプルングモアレ法を用いて、周期パターンの1/1000の精度:1 nm – 1 mm、空間分解能:1 μm – 1 mmを有する変位(応力)計測手法を確立する。また、CFRP破壊過程において、20 μsの時間分解能で応力分布変化観察を可能にする。50 nmの空間分解能での3次元形態と化学状態イメージング(X線吸収分光コンピュータ断層撮影法: XAFS-CT)とX線イメージング拡大装置を組み合わせ、マクロとミクロをつないだマルチスケールでの解析を実施する。

達成度 100%。XAFS-CT装置を整備し、マイクロき裂発生初期過程観察を可能にした。マルチスケールイメージングに加えて、時間軸を加えて多次元イメージングを実現した。

#### 個別テーマ2：軽元素と微量添加元素の計測手法の確立

- ・ イオンビームを使用して、アルミ、鉄鋼材料中の水素イメージングを実現する。微量軽元素(B, C, N, O)のイメージングのために、粒子線励起X線(PIXE)マイクロビームラインを完成させるとともに、放射光やイオンビームと超伝導X線検出器を組み合わせ、微量軽元素の多元素同時定量分析ができることを実証する。

達成度 80%。定性分析は可能なレベルにあるが、定量分析には達していない。

#### 個別テーマ3：異相界面と基材組織の計測手法の確立

- ・ 集束イオンビーム走査型電子顕微鏡(FIB)、3次元アトムプローブ、高温・変形その場透過型電子顕微鏡などを組み合わせたナノスケールの3次元イメージング手法を確立する。

達成度 100%。セラミックスファイバー、耐熱合金中軽元素のナノイメージングを可能にしている。

#### 個別テーマ4：空孔欠陥計測手法の確立

- ・ 電子の反粒子である陽電子を使って、1000 μmまで空孔欠陥のサイズ、濃度測定が可能な欠陥計測手法を確立する。

達成度 90%。高温での測定ニーズが顕在化しなかったが、CFRP疲労寿命と分子鎖間のサブナノギャップ(自由体積)変化との関係を明らかにするなど、樹脂の寿命予測に貢献している。

#### 個別テーマ5：層間剥離計測技術の確立

- ・ CFRP部材に、1~20MHzの超音波を発生させる小型堅牢な中赤外レーザー光源(パルス幅:約10ns、波長:約3.2 μm、パルスエネルギー:5mJ以上)を実現します。解析技術として、CFRP積層材に対するレーザー照射による励起超音波の波動伝播シミュレーション技術を確立する。

達成度 90%。レーザー技術開発は完了し、シミュレーション技術と実験による実サンプル適用を図っている。

【最終目標】(2018年度末時点)

#### 共通テーマ：多面的総合計測体制の構築

- ・ 下記個別テーマの先端計測手法を統合的に活用して多面的解析を行い、構造材料イノベーション創出を可

能にする非顕在化未活用情報を発見する。日本国内に加えて海外からも革新的構造材料がつくばに集まる体制を構築し、構造材料開発の総合大学病院として機能させる。

#### 個別テーマ1：残留応力と亀裂の計測手法の確立の開発

- ・ 構造材料の寿命、破壊、強度の大きな支配因子である残留応力と亀裂を計測し、ポイド生成 亀裂発生・進展 破壊にいたるプロセスの制御に必要な計測技術として、nm から m のマルチスケールに対応するモアレ法、応力発光法によるひずみ計測技術を確立する。ナノスケールの 3 次元形態に加えて化学状態まで 3 次元イメージングできる X 線吸収分光 CT(XAFS-CT)装置で CFRP やセラミックスコーティング等の複合材料の性能を飛躍的に向上させるために必要な亀裂等の欠陥や界面についての詳細な情報を取得するための計測手法を確立し、CFRP,セラミックコーティングの開発に貢献する。

#### 個別テーマ2：軽元素と微量添加元素の計測手法の確立

- ・ 構造材料の亀裂発生、強度変化に大きく影響する水素などの軽元素や微量添加元素について、イオン加速器、軽元素用超伝導検出器等を用いた元素イメージング、炭素繊維/樹脂界面等の化学結合イメージングを確立する。多元素同時マッピング(空間分解能:500 nm から数 mm)と、放射光と超伝導を活用して、微量添加軽元素側から見た化学状態分析手法を確立する。

#### 個別テーマ3：異相界面と基材組織の計測手法の確立

- ・ 従来の電子顕微鏡観察技術は、構造材料表面や薄片の観察のみ(2次元、断面観察)であり、空間的に入り組んだ3次元形状が不可能である。種々のナノ先端観察手法を駆使し、nmレベルの空間分解能で、材料組織と元素の3次元イメージング技術を確立する。

#### 個別テーマ4：空孔欠陥計測手法の確立

- ・ 実用構造材料において、き裂発生前の前駆段階から劣化進展に伴う空孔欠陥の変化を計測する手法を確立し、劣化進展度、破断寿命と空孔との相関関係を明らかにし、寿命予測を可能にする。
- ・ 構造材料の生産プロセス最適化のために、製造プロセス条件とナノ空隙との関係を解明する陽電子計測手法を確立する。

#### 個別テーマ5：層間剥離計測技術の確立

- ・ 新開発の中赤外レーザー光源を組み込んだCFRP部材用のレーザー超音波システムを構築し、従来のレーザー光源を利用した場合と比較し、5倍以上の検出精度向上を実現する。CFRP層間やCFRP/異材接合界面の剥離やウィークボンドなどの原因となる欠陥、インパクトダメージに有効であることを実証する。

## 拠点テーマD67「界面」を通じた、構造材料における未解決課題克服のための技術構築

研究責任者：津崎 兼彰（九州大学工学研究院 教授）

辻 伸泰（京都大学工学研究院 教授）

参画機関：九州大学、北見工業大学、京都大学、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、大阪大学

### 概要

我が国の材料科学・工学は高い国際競争力を有しており、学術および産業の両面で世界をリードする立場にある。構造材料の革新は社会を大きく前進させる。そして環境問題など新たに生起する社会からの要請に応えるため、構造材料には特性改善の厳しい要求が絶え間なく突きつけられている。しかし、構造材料と一言でいってもその種類は多岐にわたり、幅広い学問分野にまたがっている。本研究開発は、マテリアルズインテグレーションの機能の一部を担うことを目的とし、「界面」をキーワードにいくつかの先端的研究を実施して、SIP・革新的構造材料の成功に貢献しようとするものである。

本研究開発では、次の5つの研究課題(個別テーマ)を、SIP・革新的構造材料の成功に欠かせない具体的テーマとして取り上げ研究する。

疲労と破壊の科学

界面組織形成と力学特性の科学

鋳造と凝固の科学

第一原理からの水素脆性メカニズム解明

大規模計算科学による高温セラミックス材料の基礎特性の解明

これらは凝固、相変態、変形、再結晶、粒成長を通じた構造材料の組織形成と、疲労、クリープ、水素脆化、破壊という材料の性能支配因子に関連するものである。本課題は、例題としての個別テーマを解決するだけでなく、様々な構造材料に汎用的に適用可能で材料開発を加速できるような基礎基盤ツールと汎用的データを提供し、材質予測理論の構築によって、画期的材料の設計、材料特性・パフォーマンスの予測と開発期間の大幅短縮に資することを目的としている。また文部科学省や経済産業省などで実施されている様々な構造材料プロジェクトとSIPを連携する「界面」の役割も果たす。本課題の成果は、材料に関する学問そのものを鍛えとともに、国の財産となる構造材料の持続的イノベーション基盤を強化し、社会に大きく貢献する。

このように D67 ユニットでは、中長期的な我が国の構造材料研究の発展を見据え、産のニーズを十分に事前調査した上で、今後の材料研究を切り拓く先端的研究手法の確立と、種々の航空機用材料についての信頼できるデータの獲得を前半3年間の成果目標とし、着実に成果を積み上げてきた。この成果を活かしつつ、研究開発短縮というSIPプロジェクトの目標達成に確実に結びつけるために、2017年度からは拠点の対象材料をチタン合金に絞り込んで、D領域およびB領域への貢献に重点を置いた研究開発を推進する。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

実用展開を担う企業との継続的な討議を行い、目標スペックと求められる基礎データを精査し、開発加速に必要な材質予測のための基礎データを確実に取得する。

各個別テーマのマイルストーンは以下のとおりである。

- ・ 「疲労と破壊の科学 / 多種・多数界面とき裂の相互作用シミュレーション」

評価手法の確立とともに + チタン合金およびモデル合金のき裂進展と界面の関係を解明する。さらに疲労に対する最弱組織、最強組織、最適組織を明確化する。

達成済み

- ・ 「界面組織形成と力学特性の科学 / + チタン合金の粒径・形態・界面組織の制御と基礎力学特性解明」  
+ チタン合金における高温加工(鍛造)時の組織形成機構と粒界・界面構造の解明を達成する。さらに室温力学特性と高温クリープ特性にとって好ましい材料組織パラメータを定量的に提示する。

達成済み

- ・ 「鑄造と凝固の科学 / 単結晶ニッケル基超合金の凝固現象の基礎解明と単結晶鑄造モデル構築へのデータ提供」

単結晶ニッケル基超合金の溶質元素の分配・密度変化について放射光 X 線イメージングを利用した測定手法の開発する。さらに X 線イメージングを利用し、鑄造欠陥の予測に利用できる実合金の液相透過率を評価する。

達成済み

- ・ 「第一原理からの水素脆性メカニズム解明」  
鉄鋼材料の水素誘起粒界割れに関して、割れ発生限界水素濃度の存在の妥当性を検証する。

達成済み

- ・ 「大規模計算科学手法による高温セラミックス材料の基礎特性の解明」  
大規模計算科学的手法により、実験グループとの高温セラミックスコーティング材料の基礎物性データの相互的提供する。さらに基礎物性面からの 1400 級高温セラミックス部材の最適化の検討を行う。

達成済み

#### 【最終目標】(2018年度末時点)

様々な構造材料に汎用的に適用可能で材料開発を加速できるような基礎基盤ツールと汎用的データを提供し、組織予測・材質予測手法の構築によって、画期的材料の設計、材料特性・パフォーマンスの予測と開発期間の大幅短縮に資する。

各個別テーマにおける最終目標は次のとおりである。

- ・ 「疲労と破壊の科学 / 多種・多数界面とき裂の相互作用シミュレーション」  
チタン合金の疲労寿命のばらつきについて、結晶塑性論、転位論、破壊力学に基づく統一的理解を達成する。それに基づき、チタン合金におけるき裂進展速度と不均一マイクロ組織の関係、さらに使用条件(温度、周波数、部材形状)を取り込んだ低サイクル疲労に関する寿命予測モデルを構築する。さらに B-D 連携の下で、走査型電子顕微鏡を用いた疲労き裂進展のその場観察を分担して、鍛造チタン合金の疲労寿命予測 MI モジュール化を達成する。
- ・ 「界面組織形成と力学特性の科学 / + チタン合金の粒径・形態・界面組織の制御と基礎力学特性解明」  
+ チタン合金において形成される種々の複雑なマイクロ組織の成り立ちと特徴を定量的に解明し、室温力学特性と低サイクル疲労特性、クリープ特性向上のためにそれぞれ最適な(および好ましくない)組織および粒界・界面構造を特定する。その上で、熱間加工による材質制御理論を構築し、モデル化・データベース化する。また、新しい先端実験手法として、中性子回折および放射光 CT 法を用いた高温加工・熱処理時

の相変態・組織形成のその場解析手法を構築する。さらに B-D 連携の下で、B 領域からの要請に応じてチタン合金の加工・熱処理中の相変態 kinetics 等のその場中性子回折などを行い、データを提供するなどして鍛造チタン合金の組織予測に貢献する。

- ・ 「界面ダイナミクスと組織形成の科学」[旧・鋳造と凝固の科学]
  - + チタン合金の組織形成過程を時間分解・その場観察により明らかにし、ex-situ による SEM/TEM 観察では獲得できない時間発展データを獲得する。その上で、マイクロ組織と力学特性を理解するための補完データを個別テーマ へ提供する。
- ・ 「第一原理からの界面破壊メカニズム解明」 [旧・第一原理からの水素脆性メカニズム解明]  
疲労き裂進展予測モデルの構築(個別テーマ )及び材質制御理論構築(個別テーマ )に対し、変形・破壊において重要な基礎物性である界面エネルギーやパイエルスポテンシャル等に関する知見、それに対する合金元素の影響を、原子電子論レベルからの計算科学により提供する。
- ・ 「大規模計算科学による多層 EBC システム材料特性の解明」[旧・大規模計算科学による高温セラミックス材料の基礎特性の解明]  
大規模計算科学的手法による基礎物性計算を併用し、1400 級高温セラミックス部材開発を高効率化するとともに、更なる製品開発サイクル加速の為に計算科学面からの普遍的知識・応用手法を獲得する。

#### クラスター内個別テーマD68 高温物質移動および組織の時間依存挙動のシミュレーション技術開発

研究責任者: 松原 秀彰 (東北大学 大学院環境科学研究科 教授)

参画機関: 東北大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構

#### 概要

ジェットエンジン用のセラミックスコーティング膜の組織形成(多孔質構造など)、組織変化挙動(気孔や空隙の消滅、焼結、粒成長など)、気孔・空隙消滅(収縮)によるひずみの発生のシミュレーション技術確立する。それらをもとにセラミックス膜の特性変化(機械的性質、熱伝導率など)、さらには膜の損傷、剥離(コーティング寿命)の予測、性能の最適化を可能とする設計技術開発を行う。そして、次世代のジェットエンジンのコーティング技術である耐環境コーティング(EBC)の構造最適化等を効率化するツール(モジュール)に発展させる。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ セラミックスコーティングの多孔質構造形成のシミュレーション技術を開発する。また、気孔消滅、焼結ひずみなどの構造(組織)変化のシミュレーション技術を開発する。  
達成度100%。

【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ セラミックスコーティングの損傷・剥離、寿命予測技術としてのシミュレーション技術確立する。また、実験的および理論的観点からのシミュレーションの検証を行うことにより、耐環境コーティング(EBC)等のセラミックスコーティングの研究開発を効率化させるツール(モジュール)に発展させる。

## クラスター内個別テーマD69 計算機を用いた材料支援技術への時間依存特性導入技術

研究責任者:毛利 哲夫 (東北大学 金属材料研究所 教授)

参画機関: 東北大学、東北大学金属材料研究所

### 概要

構造材料の強度は、ミクロスケールにおける電子の挙動や原子間結合に起因し、メソスケールにおける内部組織や欠陥挙動によって支配されるマルチスケール現象である。強度を対象にした従来のマルチスケール計算は空間スケールに集中しており、時間のマルチスケール性を陽に取り扱ってはいない。変形、破壊等は全て時間依存の現象であり、さらに材料中の析出、再結晶、回復等の相変態現象も安定平衡状態への時間発展過程である。本研究では、セラミックス材料を対象に、フェーズフィールド法を始めとする内部組織の時間発展過程を記述する方程式に現れる時定数や、拡散係数、緩和係数等の時係数を、電子構造に基づいて原子スケールから記述する手法を開発する。そして材料の動的現象に関わる実験の解析や計算の実行に必要な時定数、時係数の算出の汎用的ソフトウェアを提供し、マテリアルズインテグレーションのインフラ確立に寄与する。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

モデル系酸化物を対象に、材料設計・開発に必要な、熱力学量(相平衡)および kinetics パラメータの計算手法を確立する。具体的には次の3つを行うことで、セラミックス材料群へ手法の汎用化を図り、フェーズフィールド法へのマッピング手法の開発を行う。

- ・ 第一原理からの相平衡の計算を行う。  
達成度 80% (2017 年度前半に達成予定)
- ・ 原子移動の際の活性化エネルギーと試行振動数を電子状態計算とフォノン計算から算出して拡散係数を求める。  
達成度 80% (2017 年度前半に達成予定)
- ・ 以上を経路確率法に導入して第一原理から kinetics の計算を行う。  
達成度 80% (2017 年度前半に達成予定)

【最終目標】 (2018年度末時点)

高温用耐熱部材を対象にして、セラミックスを中心にした相平衡と kinetics パラメータの計算ツールとデータ(ベース)を提供する。特に、通常の実験では容易にアクセスできない熱力学量や kinetics パラメータを高精度で求めることに重点を置く。中間評価時点では、これらの熱力学データや kinetics パラメータの導出手法の確立に焦点を置いたが、研究開発終了時には、個々の計算の系統化による MI への効率的な寄与を目指す。特に、D69 の開発成果を個々に提供する方法の開発と、他の D のユニットや MI クラスターとの連携の中で、MI の大きなシステムの中に整合し得るようなモジュール化の双方を目指す。又、国際ベンチマークに関しては現在、格子振動の計算で連携を行っている米国の CalTech のチーム、クラスター変分法やクラスター展開法で共同研究を行った米国 U. Texas, Austin を考えており、研究開発の進め方の改善を促進する。

## クラスター内個別テーマD73 構造材料開発に利用する計算熱力学に関する技術基盤構築

研究責任者: 菅蒲 一久 (国立研究開発法人産業技術総合研究所 製造技術研究部門 客員研究員)

参画機関：国立研究開発法人産業技術総合研究所、九州工業大学、東北大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構

## 概要

計算熱力学は実用性が高いことに特徴があり、本来の熱力学解析や状態図解析での利用の他、非平衡現象の数値モデリングのベースとして、また、実材料の物性パラメータの高精度推算法として、マルチスケールシミュレーションにおけるキーテクノロジーの1つとなっている。しかし、既存の関連技術はほとんどが外国製で、主要部分は秘匿・暗号化されている。そのため、実利用で必須の修正や拡張は勿論、独自の改良も不可能であるなど問題が多く、国産の技術開発が喫緊の課題となっている。そこで本研究では国産のデータベースとソフトウェアの開発を行い、計算熱力学に関する独自の技術基盤を構築する。具体的にはセラミックスコーティングの時間依存の熱化学的劣化挙動の解析を目的として熱力学データベースと非平衡反応シミュレータの開発を行うとともに、詳細な解析を行うことでその開発に貢献する。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 個別課題1「国産データベースの開発」においては、汎用の金属系、及びセラミックス系の熱力学データベースの第1版を開発公開する。

達成済み

- ・ セラミックスコーティングに関するものを含め、専用データベースも第1版を開発公開することを目標とする。

達成済み

- ・ 物性データベースも主に密度・体積を主とした第1版を開発公開する。

達成済み

- ・ 個別課題2「国産ソフトウェアの開発」においては、データベース開発機能を装備した計算熱力学ソフトの開発と市販公開を行う。

達成済み

- ・ 反応シミュレータとともに、インターフェース機能、物性推算機能の基本装備を完了させ、第1版として公開する。

それぞれ、達成済み、70% (計画変更により中止)、達成済み

- ・ 具体的応用として、セラミックスコーティングの使用環境下での劣化の問題への適用を検討する。

達成済み

【最終目標】 (2018年度末時点)

- ・ 個別課題1「国産データベースの開発」においては、セラミックスコーティングの構成要素であるコーティング候補材料、拡散バリア材、基材間などの長時間反応性や水蒸気、CMAS 異物などの反応性を検討するため、 $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系、 $\text{SiAlON}(\text{Si-Al-O-N})$ 系、 $\text{CMAS}(\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2)$ 系などの部分系を統合して多元系専用熱力学データベースを開発する。
- ・ 個別課題2「国産ソフトウェアの開発」においては、非平衡拡散反応シミュレータのツールとしての完成度を高め、セラミックスコーティング専用モジュールとして開発公開する。さらに、セラミックスコーティングの使用環境下での経時変化シミュレーションを行い、コーティング材料開発に貢献する。

## クラスター内個別テーマD70 高性能高分子材料の長期時間依存特性の予測技術の開発

研究責任者: 栗山 卓 (山形大学 大学院理工学研究科 教授)

参画機関: 山形大学

### 概要

高性能高分子材料開発はおもに短期的性能の向上を目指し、その後に長期耐久試験が行われる。この間に性能低下が著しい場合、再度材料設計の変更が要求される。したがって、高性能材料開発の期間短縮には信頼できる人工促進試験が不可欠なものとなるが、現在の促進試験の多くは外環境因子の負荷を加速させるだけであり、実環境使用で形成される材料損傷が再現されていない問題がある。本開発では、これらを解決するため、新たな長期時間依存特性の予測技術を開発する。すなわち、長期の使用環境による高分子材料の経時的不均一構造を、マルチスケール解析から構造形成パラメータを抽出し、マクロな物理化学機構と新たに開発する不均一場数表現を接続させ、計算機上もしくは促進試験機上で損傷構造を再現させる。さらに、そのとき力学物性値(弾性率, 降伏強度, 破壊強靱性値等)を他のユニットで提案されるシステムとのリンクさせて予測を行う。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 損傷構造形成速度構成式を決定しそれらを予測できる数理手法を提案する。  
達成度50% (2018年度前期達成予定)
- ・ 実験室促進試験による損傷構造制御方法を確立する。  
達成度50% (2017年度後期達成予定)
- ・ 熱硬化性樹脂の強靱性発現モデルを確立する。  
達成度50% (2017年度後期達成予定)

【最終目標】 (2018年度末時点)

- ・ 屋外劣化損傷を含めた高分子材料の経時的な不均一構造形成モデルの構成則を構築する。
- ・ の構成則から促進試験もしくは機計算機シミュレーションにより、屋外劣化損傷と同様な構造形成予測をする。
- ・ で得られた構造から、力学物性値(弾性率, 降伏強度, 破壊強靱性値等)を予測する。

## クラスター内個別テーマD71 構造用高分子材料の実用型最適設計・総合評価支援ツールの開発

研究責任者: 藤元 伸悦 (新日鉄住金化学(株) 総合研究所 主任研究員)

参画機関: 新日鉄住金化学(株)、名古屋大学

### 概要

高分子系複合材料開発を対象とし、使用特性・性能における最高性能を実現させるための、解析技術とシミュレーション技術を融合させた最適設計および総合評価を支援する実用型のツールを開発する。開発するツールにより、樹脂マトリックスならびにフィラーとの新生界面での硬化反応挙動を明確にすることを通して、研究開



発期間の短縮、エポキシ樹脂の最大性能を発現させると同時に複合材料の最高性能の実現、簡易プロセスでの製造の高速化に寄与することを可能にすることを目指す。

具体的には、CFRP 樹脂マトリックスおよび界面層での硬化反応シミュレーションモジュールの開発に取り組み、高分子材料の持つ共有結合性を最大限に活用できる技術(プロセス技術)の開発に繋げる。

【中間目標】(2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 硬化反応過程に関するシミュレーションモジュールのプロトタイプを完成させる。  
達成済み

【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ 硬化物の不均一性が物性値に及ぼす影響を明らかにし、シミュレーションモジュールを完成させるとともに硬化実験と解析の結果をデータベース化し、これらを統合させたツールとして完成させる。CFRP 構成樹脂材料開発への適用に必要な主要技術が全て整備され、応用が速やかに行える状況にする。

#### クラスター内個別テーマD72 マテリアルズインテグレーションへの数学的アプローチ技術開発

研究責任者:西浦 廉政(東北大学 材料科学高等研究所 特任教授)

参画機関: 東北大学、広島国際学院大学、九州大学、岐阜大学、名古屋工業大学、東京工業大学

#### 概要

本課題では、新たなデータ駆動型数理解析手法として、幾何学的マテリアルズインテグレーションを提唱し、最先端計測との連携を通じて高分子、アモルファス、金属などに現れる劣化・破壊・亀裂現象の統一的解明に取り組む。特に、計算ホモロジー・フェーズフィールド法・離散幾何を融合させたマルチスケール幾何解析法を構築し、実験データに内在する幾何構造の階層性やそれらの時間発展を抽出する手法を開発する。さらに、ここで提案される手法を融合させたトポロジカル材料開発シミュレータを開発する。パーシステントホモロジーに代表される計算ホモロジーを、フェーズフィールド法やMDシミュレーションといった従来の数理解析手法と連携させ、さらに実験データの解析へ応用する本課題は、非常に独創的な新手法を材料科学の分野に提案するものであり、材料科学全般への広い波及効果が期待される。2017年度からは上記研究課題に加えて統計・機械学習といったAI的手法の導入にも取り掛かる。昨今AI的手法を材料科学へ応用する試みが世界的に急速に進んでいるが、我々のグループの強みはSIP高分子グループ内でトポロジーを用いた実用的な記述子開発を進めている点である。この最先端の材料構造記述子へAI手法を融合させることで世界に類を見ないマテリアルズインフォマティクス基盤を構築する。

【中間目標】(2016年度末時点)

- ・ 「個別テーマ1」  
到達目標: 高精度計測データに基づく高分子材料系に対するマイクロマクロ連関による劣化・破壊予測のため

の粗視化数理モデルのプロトタイプ作成を実施する。

- ・ 研究題目：マイクロマクロ連関による劣化・破壊予測の数理的手法の開発  
到達目標：マイクロレベルでの複数の異なる高精度計測データに基づき、高分子系を対象にその劣化に関わる幾何学的変形の数理的特徴付けを行う。それらをメゾ、マクロのレベルへ連関させるためにトポロジー的手法の知見を援用しつつ粗視化数理モデルのプロトタイプの作成を行う。材料劣化に対する計測可能な物性変数によるフェーズフィールドモデルを用いた数理モデルを構築する。さらに、このモデルの解析のために数値シミュレーションコードを開発し、計測結果から得られた知見との整合性を検討する。  
達成度 80% (粗視化数理モデルのプロトタイプについては検討を行い、達成済み。数値シミュレーションコードの基盤は完成。2017 年度前半に達成予定)
- ・ 研究題目：時空間計算ホモロジー理論構築とアルゴリズム開発  
到達目標：通常のパーシステント図に対する高速計算法を、レベルセットパーシステント図や時系列データに対するパーシステント図に対する高速計算法へ拡張する。特に方体複体 PD 理論構築と計算法の開発を行う。  
達成済み
- ・ 研究題目：数理解析と連動した高分子の劣化・破壊現象のナノスケール観測  
到達目標：ナノ触診原子間力顕微鏡 (AFM) を活用し、プラスチック材料の応力下におけるクレイズ発生前後の力学物性変化を捉え、データ同化型粗視化シミュレーションモデルとの連携を目指す。また多数クレイズネットワークデータ (ナノ触診 AFM 画像) を数理解析グループに提供し、パーシステントホモロジーを適用する新たな数学解析方法の導入に資する。  
達成済み
- ・ 研究題目：蛍光 X 線ホログラフィー法とオングストローム電子線回折法を連携させた構造材料の劣化メカニズムの解明  
到達目標：合金系に対して、蛍光 X 線ホログラフィー法から得られる局所構造の情報を 2 ~ 3nm の範囲まで拡大し、オングストローム電子線回折法からは欠陥構造の空間分布の情報が得られるようにする。  
達成度 80% (計画変更により中止。ただし、すでに得られた知見は高分子材料を対象とする構造不均一性や劣化の解析にて活用可能)
- ・ 「個別テーマ 2」  
到達目標：材料劣化実験データやエポキシ樹脂等の MD シミュレーションデータに計算ホモロジー法を適用し、劣化・破壊に伴う構造変化を明らかにする。
- ・ 研究題目：粗視化シミュレーションモデルの構築と計算ホモロジー法  
到達目標：主にエポキシ樹脂を念頭に、破壊現象を定性的に再現する粗視化シミュレーションモデルを開発

する。これに計算ホモロジー法を適用し、材料の劣化・破壊に伴う材料の原子配置の時系列変化を明らかにする。

達成度 80% (2017 年度前半に達成予定)

【最終目標】 (2018年度末時点)

・ 「個別テーマ1」

到達目標： 高精度計測データに基づく高分子材料系に対するマイクロマクロ連関による劣化・破壊の数理的記述と予兆予測のための基盤となる「トポロジカル材料解析シミュレータ」を開発し、高精度計測/シミュレーションデータを活用できるソフトウェア・モジュール群の形でプロトタイプ実装する。

・ 研究題目： ミクロマクロ連関による劣化・破壊予測の数理的手法の開発

到達目標： 高分子材料系の劣化・破壊の予兆を数理的特徴付けのため、計算ホモロジーの応用法を体系化し、マイクロ・マクロ連関に注目して高精度計測データのとシミュレーションデータの双方を活用した解析法をモジュール群の形で提供する。同時に得られた知見をフェーズフィールド型の数理モデルに組み込み、劣化・破壊の予兆を予測するシステムの構築が可能であるか検証する。

・ 研究題目： 時空間計算ホモロジー理論構築とアルゴリズム開発

到達目標： 時系列データに対する時空間パーシステント図の定式化とその高速計算法を開発する。また本研究課題の出口としての「トポロジカル材料解析シミュレータ」を開発し一般公開する。さらに機械学習の手法の導入も積極的に進める。

#### クラスター内個別テーマD74 非線形解析を用いた高分子材料のパフォーマンス技術

研究責任者： 志澤 一之 (慶應義塾大学 理工学部 教授)

参画機関： 慶應義塾大学、大阪市立大学、東北大学

#### 概要

輸送機器、特に航空機および自動車の軽量化のために、金属材料から繊維強化樹脂(FRP)への代替は極めて有効な手段と認められている。しかし、FRP の力学的パフォーマンスに関しては未解明の部分が多く残されているのが実状である。そこで本課題では、研究責任者らが過去に提案した分子鎖の挙動に立脚したマルチスケール非線形有限要素(FEM)解析手法を用いて、熱硬化性樹脂の時間に依存した損傷進展、疲労挙動および炭素繊維充填による複合材としての変形特性など、熱硬化性樹脂の局所的大変形現象に起因する特性を効率よく予測する技術を開発する。これにより例えば、構造材料として望ましいパフォーマンスを発現するための、マトリックス部分の化学架橋特性や炭素繊維の体積分率など、材料設計のための情報を短時間に獲得することが可能となる。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 分子鎖塑性モデルに必要な材料定数を同定する。  
90% (高サイクル疲労用の定数が一部未定、2018年度前半に達成予定)
- ・ メソスケールでの損傷解析を実施する。  
達成済み
- ・ 紫外線劣化挙動のモデル化を行う。  
5% (計画変更のため中止)
- ・ 繰返し負荷特性を再現する。  
85% (上記のとおり高サイクル疲労用定数を2018年度前半に達成予定)
- ・ 損傷挙動の均質化法による二次元マルチスケール解析を行う。  
95% (繰返し負荷を除いて達成済み、2018年度前半に達成予定、劣化は中止)
- ・ 分子鎖網目モデルに基づき、材料性能を微視的な架橋構造と関連づけて予測するための構成式を構築する。  
達成済み
- ・ 分子鎖網目モデルの材料パラメータを同定する。  
90% (複数の実施例を公表済み、引き続き精度向上を検討)
- ・ 温度依存性モデルへと拡張する。  
80% (2018年度前半に達成予定)

【最終目標】 (2018年度末時点)

- ・ 分子鎖塑性モデルおよび分子網目モデルの各々に基づく熱硬化性樹脂用の三次元マルチスケール構造解析システムを統合し、化学架橋密度、絡み点間距離、配向特性、強化繊維密度などの材料設計条件を入力すると、損傷進展、き裂進展、破壊靱性、疲労寿命などのパフォーマンスが短時間で予測できるシステムを構築する。

クラスター内個別テーマD75 原子・分子レベルからのアプローチによる高分子材料設計支援技術

研究責任者：山下雄史 (東京大学 先端科学技術研究センター 特任准教授)

参画機関：東京大学

概要

近年、物質の性質の多くが、原子・分子レベルでの現象に起因していることが明らかになっている。原子・分子レベルのモデリング・解析は材料設計に革新的な効率化・合理化をもたらすポテンシャルを秘めている。一方、生命科学では、タンパク質機能は原子レベルでのメカニズムから理解することが常識となり、研究責任者らはこの分野において高精度分子動力学(MD)計算・大規模 MD 計算を実施してきた。タンパク質は複雑高分子の一種と見なすことができ、生命科学で培われたノウハウは材料科学にも十分適用できるものである。本課題では、MD 計算に加え、分子形状・エナジェティクス形状解析、粗視化モデル計算も導入し、原子・分子レベルの解析に基づく材料設計支援技術の開発を行う。

【中間目標】 (2016年度末時点の達成目標とその達成度)

- ・ 熱硬化性樹脂向けの全原子レベルの力場モデルの開発・検証を重点的に行い、高精度MD計算の基盤を確立する。

#### 達成済み

- ・ 熱硬化性樹脂向けの粗視化モデルの開発・検証を行い、高速計算技術の基盤を確立する。また、化学結合の開裂プロセスも含んだ引張試験のシミュレーションを可能にする。

#### 達成済み

- ・ 複数のモデル分子を取り扱うことにより、ひずみモードの場合分け、各モードのエネルギーへの寄与の割合・特徴を明らかにし、分子形状からの分子系エナジェティクス高精度計算手法の開発のめどをつける。

#### 達成済み

- ・ エポキシ樹脂劣化につながる要因となる、水分子が浸入しやすい高分子内空隙についての解析 達成済み
- ・ 電子状態計算に基づくエポキシ樹脂の硬化反応素過程の解析 達成済み

#### 【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ 熱硬化性樹脂向けの力場モデルの開発・検証を継続しておこなうと同時に、高精度MD計算から物理量・概念を導く新規解析法を開発する。これにより、他チームと共有して、実際の材料設計スキームの中に組み込めるようにする。
- ・ 様々な分子に対応可能な汎用性の高い分子形状定量評価ツール、分子系エネルギー評価ツールを開発する。また、マテリアルズインフォマティクスなどの要素も取り込み、低コストなど、より実用的なエネルギー計算手法を確立する。
- ・ エポキシ樹脂への水分子の攻撃とその遷移状態エネルギーを評価し、エポキシ樹脂の劣化に関する分子科学的メカニズムを明らかにする。
- ・ SIP成果を実用へと着実に結びつけるため、高分子MIでも中心的な役割を果たしている新日鉄住金化学(株)との連携をさらに緊密にし、ツールの整備と開発を発展的に継続させる。
- ・ SIP終了後も見据えた長期的・戦略的な視点で、高分子MIの連携を継続させる体制を整える。
- ・ ワークショップ・ウェブコンテンツなどを活用し、成果を広く告知し波及させる。

#### (D)マテリアルズインテグレーション領域の主要な研究開発目標

##### 【中間目標】(2016年度末時点)

- ・ マテリアルズインテグレーションのプロトタイプの完成と限定公開

##### 達成済み

- ・ システムを金属加工プロセスに応用する手法の確定

##### 達成済み

- ・ 重要構造材料分野での拠点を設立

達成度80%(金属系は達成、セラミックス・高分子系も2017年度中に達成予定)

##### 【最終目標】(2018年度末時点)

- ・ マテリアルズインテグレーションシステムを完成し公開運用開始。構造材料開発の時間を一桁(開発時間を90%短縮)短縮するのに役立つことを証明。
- ・ インテグレーションシステムを利用するための周辺技術の整備及び国内拠点を中心とした持続的イノベーションが行える体制の完成。

## マテリアルズインテグレーション 所要経費

2014年度 11.190 億円

2015年度 12.934 億円

2016年度 13.77 億円

2017年度 14.6 億円(見込み)

図表2 - 11 . 各研究開発項目に対する2017年度の所要経費(単位:億円)

| 研究開発項目              | 2014年度 | 2015年度 | 2016年度 | 2017年度 | 2018年度<br>見込み |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 航空機用樹脂の開発とFRPの開発    | 7.370  | 8.221  | 8.73   | 7.5    | 6.3           |
| 耐熱合金・金属間化合物等の開発     | 11.525 | 12.892 | 10.08  | 9.3    | 8.1           |
| 耐環境性セラミックスコーティングの開発 | 5.230  | 3.326  | 3.67   | 7.0    | 5.4           |
| マテリアルズインテグレーション     | 11.190 | 12.934 | 13.77  | 14.6   | 12.6          |
| 事務支援経費(拠点形成費等含む)    | 0.765  | 1.467  | 1.33   | 2.0    | 1.6           |
|                     | 36.080 | 38.840 | 37.58  | 40.4   | 34            |

### 3. 実施体制

#### (1) 国立研究開発法人科学技術振興機構の活用

本件は、国立研究開発法人科学技術振興機構(以下、「JST」という。)への交付金を活用し、図表3 - 1のような体制で実施する。JST は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO」という。)の協力を得て、PD や推進委員会を補佐し、研究開発の進捗管理、自己点検の事務の支援、評価用資料の作成、関連する調査・分析などを行う。

#### (2) 研究責任者の選定

JST は、本計画に基づき、研究課題、および研究課題を実施する研究責任者を公募により選定する。選考に当たっての審査基準や審査員等の審査の進め方は、NEDO の協力を得て、JST が PD 及び内閣府及び推進委員会と相談したうえで、決定する。審査には原則として PD 及び内閣府の担当官、外部有識者が参加する。応募課題に参加する研究者の利害関係者は当該課題の審査には参加しない。利害関係者の定義は JST が定める公募要領に明記するものとする。選考により研究課題が決まった後、本計画に研究課題、および研究主体、研究参加者を記載する。

#### (3) 研究体制を最適化する工夫

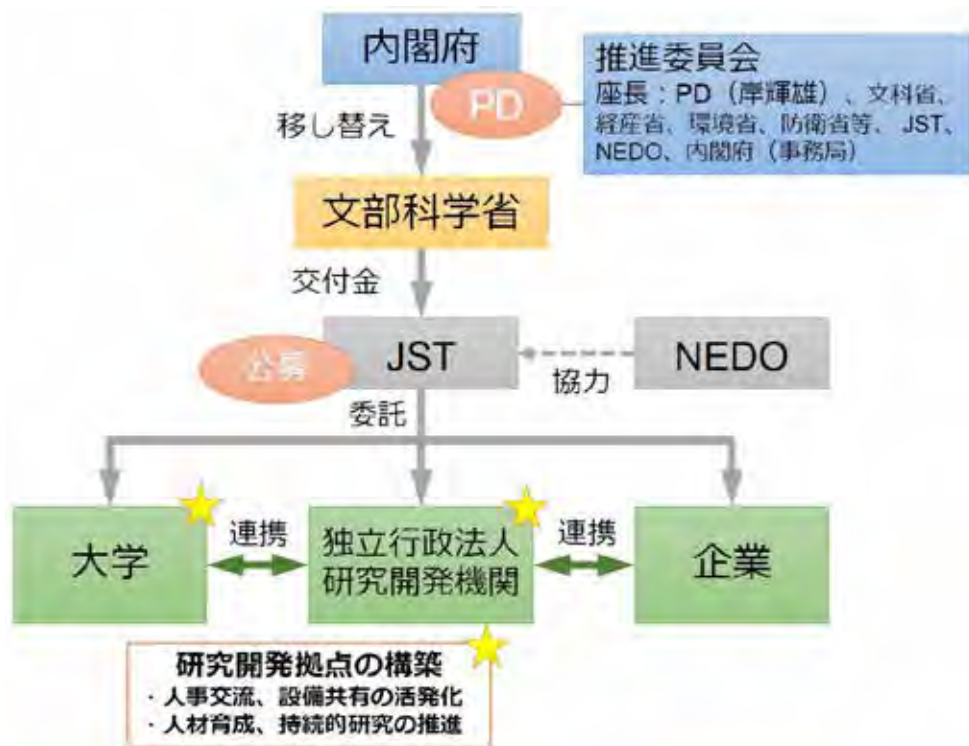
内閣府は、研究課題の進捗状況、および関係機関等で実施する技術調査等の調査結果や、社会情勢の変化に応じ、PD の判断で柔軟に研究体制を変化、対応させていく。具体的には、研究課題の変更、追加、研究責任者の入れ替え、追加等を検討していく。人事交流、設備共有の活発化、人材育成、持続的研究の推進を図るために、大学、国立研究開発法人、企業等が連携するための研究開発拠点を構築する。

図表3 - 2に運営体制図を示す。サブPD は、出口・知財戦略、材料科学、府省・産学官連携についてPD を補佐するとともに、担当研究開発項目領域における研究開発の推進につき PD を補佐する。サブPD 及び担当内容は以下のとおりである。

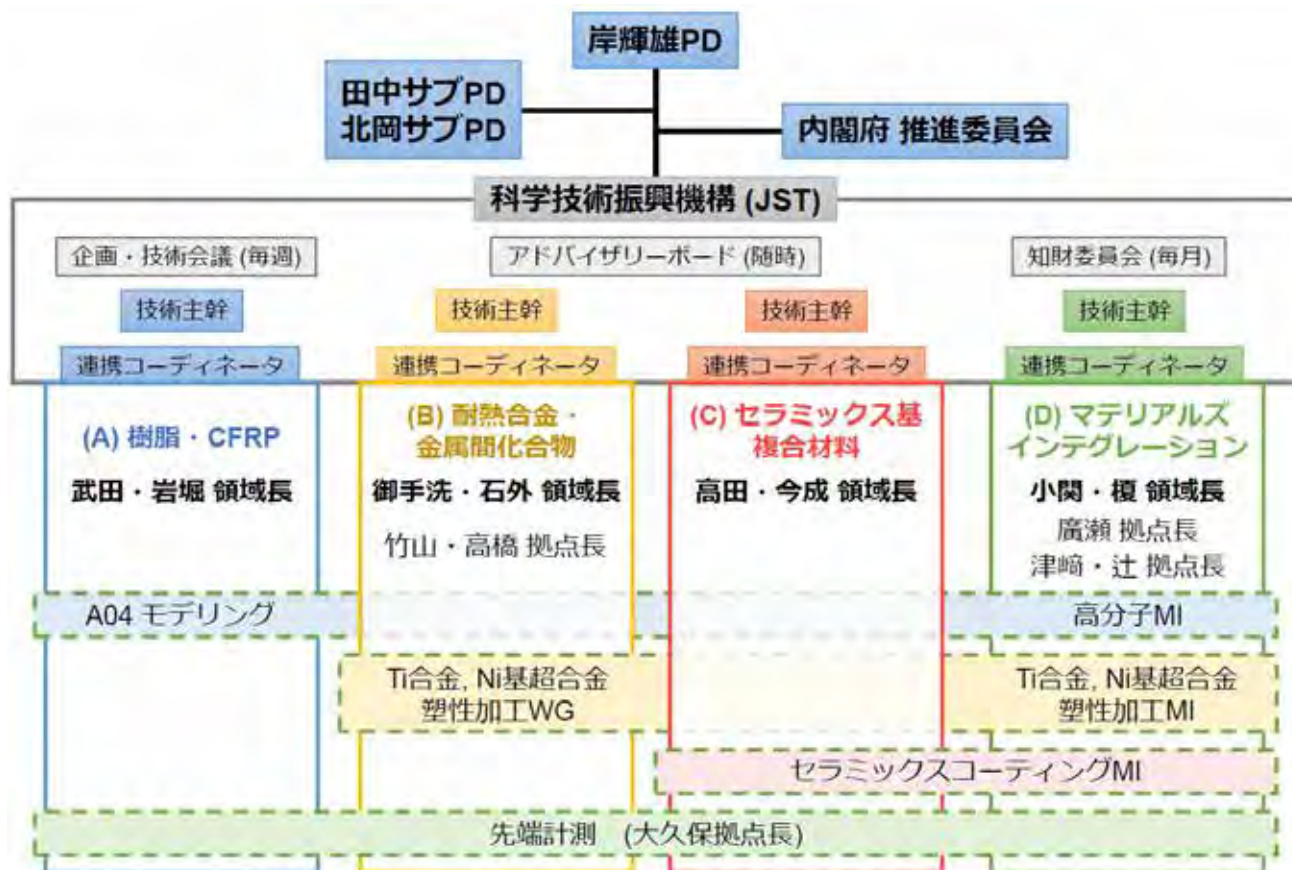
- ・ 田中千秋サブPD(イノベーションオフィス田中 代表、元 東レ(株)顧問)
  - 担当内容: 出口・知財戦略
  - 担当領域: (A)樹脂・FRP
- ・ 北岡康夫サブPD(大阪大学 教授)
  - 担当内容: 府省・産学官連携
  - 担当領域: (B)耐熱合金・金属間化合物等

なお、2016 年度末で退任する香川豊サブPD に変わり、(C)領域、(D)領域はPD が直接担当する。

また、各研究開発領域に領域長を設置し、領域内外の連携を図り、シンポジウム開催等を通じて、領域の活動を発信する。JST は、拠点形成・ネットワーク事務局を設置して、各領域に連携コーディネータを派遣し、領域長の活動を支援するとともに、参画機関のネットワーク構築を図る。



図表3-1 実施体制



図表3-2 運営体制図



## 4. 知財に関する事項

### (1) 知財委員会

JST 内に PD または PD の代理人、主要な関係者、専門家等から構成される知財委員会を設置する。併せて、研究課題に関する共同研究契約ごとに、その知財戦略に関する最終決定機関として、研究機関の代表者から構成される知財部会を設置する。知財部会は、外部公表、知財権出願等の可否及び知財権の実施許諾、維持管理等について協議し、その内容を知財委員会に定期的に報告する。知財委員会は知財部会の報告内容等を受けて、必要に応じて助言や指導を行う。知財委員会、各知財部会は自ら運営方法の詳細を定める。

知財委員会、各知財部会は自ら運営方法の詳細を定める。その際、SIP の各種規程に定めなき事項、およびこれら規程の解釈に疑義が生じたときは、法令の規定に従うほか、研究開発実施者は誠意をもって協議し、解決するものとする。

### (2) 知財権に関する取り決め

JST は、秘密保持、バックグラウンド知財権(研究責任者やその所属機関等が、プログラム参加する前から保有していた知財権及びプログラム参加後に SIP の事業費によらず取得した知財権)、フォアグラウンド知財権(プログラムで発生した知財権)の扱い等について、予め委託先との契約等により定めておく。

### (3) バックグラウンド知財権の実施許諾

本研究開発を適切に推進するために、他のプログラム参加者へのバックグラウンド知財権の実施許諾は、当該知財権者が定める条件に従い、知財権者が許諾可能とする。

当該条件などの知財権者の対応が、SIP の推進(研究開発のみならず、成果の実用化・事業化を含む)に支障を及ぼすおそれがある場合、知財委員会において調整し、合理的な解決策を得る。

### (4) フォアグラウンド知財権の取扱い

フォアグラウンド知財権は、原則として産業技術力強化法第 19 条第 1 項を適用し、発明者である研究責任者の所属機関(委託先)に帰属させる。

再委託先等が発明し、再委託先等に知財権を帰属させる時は、知財委員会による承諾を必要とする。その際、知財委員会は条件を付すことができる。

知財権者に事業化の意志が乏しい場合、知財委員会は、積極的に事業化を目指す者による知財権の保有、積極的に事業化を目指す者への実施権の設定を推奨する。

参加期間中に脱退する者は、当該参加期間中に SIP の事業費により得た成果(複数年度参加していた場合には、参加当初からの全ての成果)の全部または一部に関して、脱退時に JST に無償譲渡させること及び実施権を設定できることとする。

知財権の出願・維持等にかかる費用は、原則として知財権者による負担とする。共同出願の場合は、持ち分比率、費用負担は、共同出願者による協議によって定める。

### (5) フォアグラウンド知財権の実施許諾

他のプログラム参加者へのフォアグラウンド知財権の実施許諾は、知財権者が定める条件に従い、知財権者が許諾可能とする。

第三者へのフォアグラウンド知財権の実施許諾は、プログラム参加者よりも有利な条件にはしない範囲で知財権者が定める条件に従い、知財権者が許諾可能とする。

当該条件などの知財権者の対応が、SIP の推進(研究開発のみならず、成果の実用化・事業化を含む)に支障を及ぼすおそれがある場合、知財委員会において調整し、合理的な解決策を得る。

#### **(6) フォアグラウンド知財権の移転、専用実施権の設定・移転の承諾について**

産業技術力強化法第 19 条第 1 項第 4 号を準拠し、フォアグラウンド知財権の移転、専用実施権の設定・移転の承諾には、合併・分割により移転する場合や子会社・親会社に知財権の移転、専用実施権の設定・移転の承諾をする場合等(以下、「合併等に伴う知財権の移転等の場合等」という。)を除き、JST の承認を必要とする。

合併等に伴う知財権の移転等の場合等には、知財権者は JST との契約に基づき、JST の承認を必要とする。

移転等の後であっても当該実施権を JST に対して設定可能とする。当該条件を受け入れられない場合、移転を認めない。

#### **(7) 終了時の知財権取扱いについて**

研究開発終了時に、保有希望者がいない知財権等については、知財委員会において対応(放棄、あるいは、JST 等による承継)を協議する。

#### **(8) 国外機関等(外国籍の企業、大学、研究者等)の参加について**

当該国外機関の参加が課題推進上必要な場合、参加を可能とする。

適切な執行管理の観点から、研究開発の受託等にかかる事務処理が可能な窓口または代理人が国内に存在することを原則とする。

国外機関等については産業技術力強化法第 19 条第 1 項を適用せず、知財権は JST と外国機関等の共有とする。

## 5. 評価に関する事項

### (1) 評価主体

PD と JST 等が行う自己点検結果の報告を参考に、ガバニングボードが外部の専門家等を招いて行う。この際、ガバニングボードは分野または課題ごとに開催することもできる。

### (2) 実施時期

事前評価、毎年度末の評価、最終評価とする。

終了後、一定の時間(原則として3年)が経過した後、必要に応じて追跡評価を行う。

上記のほか、必要に応じて年度途中等に評価を行うことも可能とする。

### (3) 評価項目・評価基準

「国の研究開発評価に関する大綱的指針(平成24年12月6日、内閣総理大臣決定)」を踏まえ、必要性、効率性、有効性等を評価する観点から、評価項目・評価基準は以下のとおりとする。評価は、達成・未達の判定のみに終わらず、その原因・要因等の分析や改善方策の提案等も行う。

意義の重要性、SIPの制度の目的との整合性。

目標(特にアウトカム目標)の妥当性、目標達成に向けた工程表の達成度合い。

適切なマネジメントがなされているか。特に府省連携の効果がどのように発揮されているか。

実用化・事業化への戦略性、達成度合い。

最終評価の際には、見込まれる効果あるいは波及効果。終了後のフォローアップの方法等が適切かつ明確に設定されているか。

### (4) 評価結果の反映方法

事前評価は、次年度以降の計画に関して行い、次年度以降の計画等に反映させる。

年度末の評価は、当該年度までの実績と次年度以降の計画等に関して行い、次年度以降の計画等に反映させる。

最終評価は、最終年度までの実績に関して行い、終了後のフォローアップ等に反映させる。

追跡評価は、各課題の成果の実用化・事業化の進捗に関して行い、改善方策の提案等を行う。

### (5) 結果の公開

評価結果は原則として公開する。

評価を行うガバニングボードは、非公開の研究開発情報等も扱うため、非公開とする。

### (6) 自己点検

#### 研究責任者による自己点検

PD が自己点検を行う研究責任者を選定する(原則として、各研究項目の主要な研究者・研究機関を選定)。

選定された研究責任者は、5.(3)の評価項目・評価基準を準用し、前回の評価後の実績及び今後の計

画の双方について点検を行い、達成・未達の判定のみならず、その原因・要因等の分析や改善方策等を取りまとめる。

### PD による自己点検

PD が研究責任者による自己点検の結果を見ながら、かつ、必要に応じて第三者や専門家の意見を参考にしつつ、5.(3)の評価項目・評価基準を準用し、PD 自身、JST 及び各研究責任者の実績及び今後の計画の双方に関して点検を行い、達成・未達の判定のみならず、その原因・要因等の分析や改善方策等を取りまとめる。その結果をもって各研究主体等の研究継続の是非等を決めるとともに、研究責任者等に対して必要な助言を与える。これにより、自律的にも改善可能な体制とする。

これらの結果を基に、PD は JST の支援を得て、ガバニングボードに向けた資料を作成する。

### JST による自己点検

JST による自己点検は、予算執行上の事務手続を適正に実施しているかどうか等について行う。

## 6. 出口戦略

### 出口指向の研究推進

輸送機器・産業機器等に使われる材料の研究開発を推進

- ・ 材料技術の基盤から設計・製造を含めた航空機のバリューチェーン掌握を視野に開発を推進
  - ・ 新規材料利用を促進するための周辺技術である、接合・加工・安全についても研究開発を実施
- 研究開発段階から実機適用を最短で実現する研究開発体制と仕組みを構築
- ・ マテリアルズインテグレーション構築による構造材料の実機適用の迅速化
  - ・ 産-産および産-学-官連携による拠点・ネットワークの形成、国際連携による長期イノベーション戦略の構築

### 普及のための方策

航空機分野および波及が期待される分野に応じ、標準化・規格化・安全評価手法やその認定手法の策定、認証取得等を推進し、開発素材の利用を促進

分野に応じた燃費規制、トップランナー基準等によるユーザーサイドでの適切な導入を促進

今後の社会動向に合わせて、中長期的に産業界で求められる構造材料のあり方を展望し、必要に応じて研究課題の変更等を実施

- ・ メーカーや、有識者へのヒアリング、内外の技術動向の調査等を行い、最適な研究が実施されるようなマネジメントを遂行

### 自治体、公的機関の参画（拠点形成）

- ・ 「革新的構造材料」では基礎から応用研究まで展開可能な体製造りを重視し、企業と大学・国研のダブル領域長制を採用し研究当初より拠点形成を行ってきた。拠点は参画する（約 20 の）地方大学などと連携して、構造材料研究の全国ネットワークを維持・発展させ、それを土台にして研究開発、人材育成、国際連携などを推進するものである。

## 7. その他の重要事項

### (1) 根拠法令等

本件は、内閣府設置法(平成 11 年法律第 89 号)第 4 条第 3 項第 7 号の 3、科学技術イノベーション創造振興費に関する基本方針(平成 26 年 5 月 23 日、総合科学技術・イノベーション会議)、科学技術イノベーション創造振興費に関する実施方針(平成 26 年 5 月 23 日、総合科学技術・イノベーション会議)、戦略的イノベーション創造プログラム運用指針(平成 26 年 5 月 23 日、総合科学技術・イノベーション会議ガバニングボード)に基づき実施する。

### (2) 弾力的な計画変更及び計画変更の履歴

本計画は、成果を最速かつ最大化させる観点から、臨機応変に見直すこととする。これまでの変更の履歴(変更日時と主な変更内容)は以下のとおり。

- 2014 年 5 月 23 日 総合科学技術・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画を承認。内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)において決定。
- 2014 年 11 月 6 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。
- 2015 年 5 月 21 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。2015 年度所要経費追記及び各テーマの概要、中間目標、最終目標の詳細を記載。
- 2016 年 6 月 16 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。2016 年度所要経費追記及び各テーマの概要、中間目標、最終目標の詳細を記載。
- 2016 年 10 月 20 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。
- 2017 年 3 月 30 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。2017 年度所要経費追記及び各テーマの概要、中間目標の達成度、最終目標の詳細を記載。
- 2017 年 9 月 28 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。
- 2018 年 3 月 30 日 総合科学技術会議・イノベーション会議ガバニングボードにおいて、研究開発計画の修正を承認。

### (3) PD 及び担当の履歴

#### PD



岸 輝雄 (2014年6月～)

準備段階(2013年12月～2014年5月)では政策参与。

#### 担当参事官(企画官)



西尾 匡弘  
(2013年10月  
～2016年7月)



千嶋 博  
(2016年8月～)

#### 担当



色川 芳宏  
(2013年10月  
～2014年3月)



出村 雅彦  
(2014年4月  
～2015年9月)



角谷 正友  
(2015年7月  
～2016年7月)



夏目 穰  
(2016年4月  
～2018年3月)



池田 太一  
(2016年7月  
～2017年6月)



細田 奈麻絵  
(2017年7月～)

2013年10月～2014年5月までは準備期間。

## 添付資料 積算(千円)

### 2014年度 総額 3,608,000

(内訳)

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 1. 研究費等(一般管理費・間接経費を含む)  | 3,531,500 |
| (研究開発項目毎内訳)             |           |
| (A) 航空機用樹脂の開発とFRPの開発    | 737,000   |
| (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発     | 1,152,500 |
| (C) 耐環境性セラミックスコーティングの開発 | 523,000   |
| (D) マテリアルズインテグレーション     | 1,119,000 |
| 2. 事業推進費(人件費、評価費、会議費等)  | 76,500    |
| 計                       | 3,608,000 |

### 2015年度 総額 3,884,000

(内訳)

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 1. 研究費等(一般管理費・間接経費を含む)  | 3,737,300 |
| (研究開発項目毎内訳)             |           |
| (A) 航空機用樹脂の開発とFRPの開発    | 822,100   |
| (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発     | 1,289,200 |
| (C) 耐環境性セラミックスコーティングの開発 | 332,600   |
| (D) マテリアルズインテグレーション     | 1,239,400 |
| 2. 事業推進費(人件費、評価費、会議費等)  | 146,700   |
| 計                       | 3,884,000 |

### 2016年度 総額 3,758,000

(内訳)

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 1. 研究費等(一般管理費・間接経費を含む)  | 3,625,000 |
| (研究開発項目毎内訳)             |           |
| (A) 航空機用樹脂の開発とFRPの開発    | 873,000   |
| (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発     | 1,008,000 |
| (C) 耐環境性セラミックスコーティングの開発 | 367,000   |
| (D) マテリアルズインテグレーション     | 1,377,000 |
| 2. 事業推進費(人件費、評価費、会議費等)  | 133,000   |
| 計                       | 3,758,000 |

**2017 年度 総額 4,040,000**

(内訳)

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 1. 研究費等 (一般管理費・間接経費を含む) | 3,800,000 |
| (研究開発項目毎内訳)             |           |
| (A) 航空機用樹脂の開発と FRP の開発  | 755,000   |
| (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発     | 929,000   |
| (C) セラミックス基複合材料         | 700,000   |
| (D) マテリアルズインテグレーション     | 1,456,000 |
| 2. 事業推進費 (人件費、評価費、会議費等) | 200,000   |
| 計                       | 4,040,000 |

**2018 年度 総額 3,400,000**

(内訳)

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 1. 研究費等 (一般管理費・間接経費を含む) | 3,240,000 |
| (研究開発項目毎内訳)             |           |
| (A) 航空機用樹脂の開発と FRP の開発  | 633,033   |
| (B) 耐熱合金・金属間化合物等の開発     | 811,100   |
| (C) セラミックス基複合材料         | 540,000   |
| (D) マテリアルズインテグレーション     | 1,255,867 |
| 2. 事業推進費 (人件費、評価費、会議費等) | 160,000   |
| 計                       | 3,240,000 |