

「次世代構造部材創製・加工技術開発」基本計画

材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

航空機産業は、国際的な産業競争が激化する状況にある。世界の民間航空機市場は年率約5%で増加する旅客需要を背景に今後20年間の市場規模は、累計約3万から3万5千機(4~5兆ドル程度)となる見通しである。「産業構造ビジョン2010」では、国内航空機産業を2020年迄に2兆円にほぼ倍増させるとともに、2030年には売上高3兆円を達成すると、謳われている。厳しい競争の中で、航空機産業では高度な先進技術開発が進められてきており、これらを他産業分野へ波及させることにより、輸送機器をはじめとした様々な分野における製品の高付加価値化を進める上で、重要な役割を果たすことも期待されている。また、燃費改善、環境適合性等の市場のニーズに応えるため、近年の航空機(機体・エンジン・装備品)では軽量化のために構造部材として複合材及び軽金属等が積極的に導入されており、先進的な素材開発及び加工技術開発等が急務となっている。

国際的な産業競争が激化する状況下、サプライヤービジネスにおいても今後激しい競争にさらされていくことが予想されるため、我が国においても航空機産業の国際競争力を維持・拡大していく必要がある。

②我が国の状況

我が国の航空機産業は、モジュール単位での国際共同開発への参画拡大(例:B787…機体の35%、エンジン(Trent1000、GEnX)の15%)を通じて、生産額も約1.5兆円まで拡大したが、依然主要国より一桁小さい規模である。我が国の強みは、精度の高さと品質管理、納期遵守、複合材等の素材関連技術(例:東レがB787の炭素繊維を独占供給)等であり、高品質を求められる航空機産業(機体・エンジン・装備品)において米・欧とも、日本との更なる協力を模索している。

他方、我が国は、世界と戦える優れた技術を有しているものの、単なる「部品供給・モジュール分担」にとどまっている限りは飛躍的な成長は困難となっている。新興国の追い上げがコスト競争の圧力となっているとともに、強みである複合材分野でも海外の巻き返しに対し、更なる技術革新で優位性を維持・拡大することが必要となっており、今後は、先進的な技術を有することで設計を含めた共同開発に携わることで、欧米の完成機メーカーの戦略的パートナーとなっていくことが不可欠である。

③世界の取組状況

膨大な開発コストかつ投資回収期間が超長期に及ぶことによる投資・生産上のリスクを最小化するため、米・欧主導の国際共同開発がビジネスモデルの趨勢となっている。このため、コアの技術は押さえつつ、モジュール単位で外注する国際分業の中、内外の優れた技術や生産基盤を取り込む競争が激化している。特に、今後の機体、エンジン、装備品開発では、信頼性・安全性を確保した上での燃費改善や環境適合性の向上が技術課題の焦点となっており、主要国は、複合材等の最先端の技術に関し、産学官の連携を含めた戦略的な研究開発を加速させつつある。

他方、新興国の市場参入により、コスト競争力を格段に重視せざるを得ない市場環境になっており、欧米の一次下請企業では、国際的なサプライチェーンを展開し、技術的に一定水準以下の部分については、新興国のコスト競争力を活用しつつ、自らはモジュール単位でのより包括的なシステム統合と中核技術に集中する傾向にある。

④本事業のねらい

航空機の燃費改善、環境適合性向上、整備性向上、安全性向上といった要請に応えるため、複合材料及び軽金属材料等の関連技術開発を両輪として、航空機に必要な信頼性・コスト等の課題を解決するための要素技術を開発する。これにより、航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO₂排出量の削減、整備性向上、安全性の向上並びに我が国の部素材産業及び川下となる加工・製造産業の国際競争力強化を目指す。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

次世代航空機に搭載され、大幅なエネルギー消費量とCO₂排出量の削減に資する先進的な構造材料及び加工技術を確立する。研究開発項目は多岐にわたるため、具体的な開発目標は、別紙の研究開発計画に記載する。

②アウトカム目標

本事業で開発した成果が次世代航空機に搭載され、軽量化とエンジンの高効率化による燃費改善が図られることにより、2030年において、25万tのCO₂削減が期待される。

③アウトカム目標達成に向けての取組

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。)は、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討するとともに、技術推進委員会等において、研究開発の進捗管理や目標の見直しを行う等、細やかなマネジメントを実行することで、社会ニーズに合った研究開発を推進し、確実な実用化へと繋げる。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下のテーマについて、研究開発を行う。

具体的な開発内容は、別紙1の研究開発計画の通りとする。

【委託事業】

- 研究開発項目① 「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発」
- 研究開発項目①-2 「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発(第二期)」
- 研究開発項目② 「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発」
- 研究開発項目②-2 「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)」
- 研究開発項目③ 「航空機用難削材高速切削加工技術開発」
- 研究開発項目③-2 「航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)」
- 研究開発項目④-1 「軽量耐熱複合材CMC技術開発(基盤技術開発)」
- 研究開発項目④-2 「軽量耐熱複合材CMC技術開発(高性能材料開発)」
- 研究開発項目⑤ 「航空機用構造設計シミュレーション技術開発」

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術に対して、産官学の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り、協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。また、開発成果の社会への浸透を図るため、成果の一部は、開発段階に合わせて順次実用化する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

NEDOはプロジェクトマネージャーとして、NEDO材料・ナノテクノロジー部伊藤浩久を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、プロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

本研究開発は、経済産業省が平成23年度(研究開発項目④-1)、平成24年度(研究開発項目③)及び平成25年度(研究開発項目①、②)に企業、大学等の研究機関(委託先から再委託された研究開発実施者を含む)から公募によって委託先を選定し、研究体制を構築して開始したものである。平成27年度よりNEDOが本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、平成26年度までの進捗状況を踏まえて研究開発を実施した。

研究開発項目④-2及び⑤については、NEDOが公募によって研究開発実施者を選定した。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等(以下、「団体」という。)のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独または複数で研究開発に参加するものとした。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとした。

研究開発項目①-2、②-2及び③-2については、平成28年度にNEDOが公募によ

て研究開発実施者を選定する。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独または複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者（プロジェクトリーダー：PL）として東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻青木隆平教授を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。また、技術動向調査の結果及び各研究テーマの進捗を元とした事業化（出口）を見据えた開発戦略（全体の最終目標達成に向けたテーマごとの研究開発ロードマップを含む）を構築し、効率的な研究開発・研究成果の実用化を目指す。

（2）研究開発の運営管理

①研究開発の進捗把握・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、技術推進委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、随時、プロジェクトの進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。また、全体の最終目標の効率的かつ効果的な研究開発の早期達成のため、（新たな課題の対応も含む）関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、実施方針に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。早期実用化が可能と認められた研究開発については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。

②技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

研究開発項目①、②、③及び④－1については、平成27年度の1年間とする。

研究開発項目④－2及び⑤については、平成27年度から平成31年度までの5年間とする。

研究開発項目①－2、②－2及び③－2については、平成28年度から平成31年度までの4年間とする。

なお、研究開発項目④－1は、平成23年度から平成26年度に、研究開発項目③は、平成24年度から平成26年度に、研究開発項目①及び②は、平成25年度から平成26年度に経済産業省で実施し、平成27年度からNEDOが実施している。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、研究開発項目①、②、③及び④－1については事後評価を平成28年度に実施する。研究開発項目④－2及び⑤については中間評価を平成29年度、事後評価を平成32年度に実施する。研究開発項目①－2、②－2及び③－2については必要に応じて中間評価を平成29年度に実施し、事後評価を平成32年度に実施する。当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 成果の普及

NEDO及び研究開発実施者は、研究成果を広範に導入・普及するように努めるものとする。

② 標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、標準化等との連携を図るため、標準案の提案等を必要に応じて実施する。

③ 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 関係省庁の施策との連携体制の構築

NEDOが実施する「革新的新構造材等研究開発」や内閣府が実施する「戦略的イノベーション創造プログラム:革新的構造材料」の実施体制と緊密に連携する。

(3) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開

発動向、政策動向、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制、新規テーマの追加等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(4) 根拠法

本プロジェクト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法第十五条第一号ニに基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

①平成27年2月、制定。

②平成28年2月、改訂。

- 独立行政法人を国立研究開発法人に変更。
- プロジェクトリーダー、プロジェクトマネージャーの氏名を記載。
- 平成27年度第一回技術推進委員会の審議を踏まえ、研究開発項目①の最終目標値(急凝固KUMADAI マグネシウム合金の引張強度(F_{ty}))を500MPaから400MPaに変更し、伸び(EL)の目標値として、5%以上を追加。
- 研究開発項目④-2のSiC繊維開発及びCMC部材開発を加速するため、中間目標及び最終目標を変更。
- 研究開発項目①の継続テーマとして公募するに際して、①-2を追加。
- 研究開発項目②の継続テーマとして公募するに際して、②-2を追加。
- 研究開発項目③の継続テーマとして公募するに際して、③-2を追加。

(別紙1)研究開発計画

研究開発項目①「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発」

1. 研究開発の必要性

(1)複合材構造部材

燃費改善・環境適合性等に対する要請に応えるため、近年の航空機では軽量化のために構造部材として複合材が積極的に導入されているが、製造に時間がかかる、製造コストが高い等の課題が複合材適用拡大の障害となっている。

複合材を用いた航空機を長期間にわたって安全に運用していくためには、複合材構造の健全性を詳細に把握し、異常が認められた際には、修理、交換を行う必要がある。現在は、目視、非破壊検査等により複合材構造の検査を実施しているが、非常に多くの手間と時間を要し、航空機を運航するエアラインにとって大きな負担となっている。更なる燃費改善の要求によって複合材の適用が拡大する中で、複合材構造健全性を効率的に把握することで整備性の向上が重要となる。

複合材の成形法として、オートクレーブを使わない等、新しい成形法の動きが世界的に加速していることから、高品質な複合材部材の製造技術基盤を確立するため、熱可塑複合材製造プロセスモニタリング技術、光ファイバセンサによる航空機構造の成形モニタリング技術、高生産性・易賦形複合材の開発を実施し、高効率・低コストの複合材及びその成形プロセスを開発することが急務である。

(2)軽金属構造部材

チタン合金は軽量であり複雑形状の部材形成も可能で、複合材と接触しても熱膨張差や局部電池腐食による悪影響もないため、複合材とともに使用量が増大している。しかし、チタン合金は機械加工等の加工性が悪く、加工コストが非常に高いという問題がある。次期民間航空機をターゲットとし、適用可能な接合及び粉体焼結技術等の開発が必要である。

マグネシウム合金に関しては、アルミニウム合金より比重が小さいため、航空機構造用材料への適用が期待されている。しかし、マグネシウム合金には、強度、耐食性の問題があるが、国内でこれらを克服する可能性のある新マグネシウム合金が開発されており、この技術を元に航空機に適用可能なマグネシウム合金の開発、加工法の開発が必要である。

(3)総合調査研究

本分野は、国内外で活発に研究開発が行われており、技術トレンドの動きも早い。そのため、国内外の研究開発動向や政策支援の状況等を調査・分析し、研究開発の方向性や目標レベル等を常に確認し、研究開発を効率的・効果的に推進していく必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 複合材構造部材

航空機の運航に伴う整備、点検作業を効率化して、航空機運用のメンテナンスコストの大幅な低減を実現するために、光ファイバセンサによる診断技術を活用し、実飛行環境でも十分なシステム信頼性を有する複合材構造健全性診断技術を開発する。また、構造健全性診断技術を応用した成形モニタリング技術も活用し、高効率・低コストな複合材及び成形プロセスを開発する。将来的には、成形時から運用まで構造健全性をモニタリングすることで、航空機用複合材部品の寿命全体に渡るライフ・サイクル・モニタリング技術開発につなげていく。研究開発の具体的内容を下記する。

(a) 広域分布歪み計測による航空機構造健全性診断技術の開発

広域分布歪み計測によるモニタリングシステム及びモニタリングセンサの信頼性及び耐久性を向上させるとともに、運用時のシステムの信頼性、耐久性の評価を行う。また、実機や実大構造等を用いたシステム適用性の評価を行う。

(b) 光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム実用化技術の開発

複合材構造の構造健全性診断の一つである光ファイバセンサによる衝撃損傷検知システムの高性能化を図るとともに、信頼性・耐久性の評価、実証を行う。

(c) ラム波を用いた航空機接着構造健全性診断技術の開発

構造中に発生する損傷に起因して様々に変化するラム波を解析することにより、複合材接着構造全般(接着修理を含む)に発生する恐れのある接着剥がれや層間剥離の発生・進展を検知できる診断技術を開発し、実用に耐えうることを実証する。

(d) 熱可塑複合材製造プロセスモニタリング技術開発

ハイサイクル成形が可能な熱可塑複合材の成形技術を開発する。熱可塑複合材の融着、接合による部材の一体化技術を開発し、要素部材製造、評価を通じて強度、剛性、品質、靱性、耐環境特性及び成形性の観点からの成形、接合プロセスの検証及びモニタリング技術の検証を行い、構造、成立性、ライフサイクルコスト低減効果を評価する。

(e) 光ファイバセンサによる航空機構造の成形モニタリング技術の開発

複合材構造の構造健全性診断手法を活用した成形モニタリング技術の開発及び本技術を活用した低圧成形プロセスの開発を行う。共通の光ファイバセンサを用いた成形・運用モニタリング技術の開発を行う。

(f) 高生産性・易賦形複合材の開発

高ビルドレート・複雑形状が要求される次世代小型機構造部材向けに、プリプレグに所定の切込を挿入し、弾性率・強度を保持しながら賦形性を向上できるUACS(Unidirectionally Arrayed Chopped Strands)コンセプトを適用し、繊維層のうねり、ボイド発生を抑制して高強度かつ不良品率の低い複合材を開発する。また、その力学特性、成形性(流動性、形状追従性)について評価し、データベース化する。最終的には、構造部材で特に複雑形状が要求され、実用化の可能性の高い部材を選定し、試作した上で、構造、成形成立性を評価する。

(2) 軽金属構造部材

(a) チタン合金接合技術の航空機への適用研究

難加工性のため製造コストの高いチタン合金を航空機部品製造に適用するための技術を開発する。

- 高品質接合技術の開発
- 接合欠陥の検出技術の開発及び高品位品質保証技術の開発

(b) チタン合金粉体焼結技術の航空機への適用研究

素材使用量と切削加工工程の削減に資する粉体焼結によるチタン合金の複雑形状成形技術を開発する。

- 粉末焼結による複雑形状の成形技術開発
- 粉末焼結部品を用いた設計・品質保証手法の開発

(c) マグネシウム合金の開発と航空機への適用研究

Mg合金を航空機に適用するために、高強度、高耐燃性、高耐食性を有する以下の合金を開発する。

- 航空宇宙機構造用 *KUMADAI* マグネシウム合金開発
- 航空機構造用マグネリチウム合金開発

(3) 総合調査研究

複合材構造及び軽金属構造について、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等についての客観的判断材料を探索する。

3. 達成目標

【最終目標(平成27年度)】

(1) 複合材構造部材

(a) 広域分布歪み計測による航空機構造健全性診断技術の開発

- 広域分布歪み計測技術の信頼性及び耐久性が、航空機複合材構造に適用可能な技術を有する事を実証する。

- 航空機搭載可能な広域分布歪み計測システムを試作し、実機あるいは実大構造を用いた試験を行い、従来計測不可能であった分布歪みを従来の歪みのみを計測する方法と同等レベルで計測できることを実証する。
- 航空機適用に必要な認証システムに合致した設計及び製造プロセスを設定する。

(b) 光ファイバセンサによる航空機構造衝撃損傷検知システム実用化技術の開発

- 今まで試験室環境で実証されてきた衝撃損傷検知システムについて、新たな衝撃損傷検知方法及び各種実証試験を通じて、実飛行環境化においても十分な信頼性/耐久性で衝撃損傷検知が可能となる技術を開発する。
- 今まで試験機以外の量産航空機への搭載に対応していなかった衝撃損傷検知システムについて、各種航空機器の設計技術及び光ファイバセンサ計測線の設計・敷設技術を用いて、航空機搭載に適したシステムを試作する。

(c) ラム波を用いた航空機接着構造健全性診断技術の開発

- 接着剥がれ検知技術について、実構造に応じたセンサ/アクチュエータ配置を検討し、温度等の環境影響がある中でも、検知精度が低下せず、十分な信頼性を有することを、部分構造試験等で実証する。
- 検知範囲拡大に応じて再考したアンプ等の改良を盛り込んで、超音波ラム波計測装置を試作し、実環境下でも、接着剥がれの検知精度に影響を及ぼさない超音波ラム波が計測できることを実証する。

(d) 熱可塑複合材製造プロセスモニタリング技術開発

- 熱可塑複合材の特性(ハイサイクル成形)を活かした部品自動成形を指向した低コスト、高レート製造技術を確立する。一次構造部材にも適用可能な一方向材を用いた部材成形法を技術成熟度TRL4(Technology Readiness Level 4)まで引き上げる。
- 接合(融着、接合等)を用いた部材一体化構造製造技術を確立する。従来、熱可塑複合材の接着が困難であったが、融着、接合技術、新規表面処理技術を用いてTRL4の融着、接合技術を確立する。
- 製造プロセスにおける圧力、温度、残留応力等をモニタし、製造品質を評価する技術を確立する。従来、1次構造材にも適用可能な熱可塑複合材の成形モニタリングは困難であったが、センサ適用成形法を適用してTRL4のモニタリング技術を確立する。

(e) 光ファイバセンサによる航空機構造の成形モニタリング技術の開発

- 今まで測定不能だった複合材部品成型時の内部温度、歪、残量応力等について、新しい光ファイバセンサの埋め込み成形及び計測・分析技術を用いて、成形不具合が検知可能な成形モニタリング技術を開発する。

- 大型サンドイッチ構造に対し、今までは製造時と定期整備時の超音波検査でしか検知できなかった内部損傷に対して、光ファイバセンサを用いた成形モニタリング技術と運用モニタリング技術を組み合わせることで、超音波検査に頼らずに構造強度に重大な影響を与える前に検知可能な技術を開発する。
- 今までオートクレーブの大きさの制約を受けてきた大型複合材構造部品の製造を、光ファイバセンサを活用した低圧成形プロセス技術を用いて、オートクレーブ外でも同等の品質で製造する技術を開発する。

(f) 高生産性・易賦形複合材の開発

- 従来の連続繊維プリプレグ対比、弾性率同等、強度8割保持しながら賦形性を向上させるUACS技術を確立するとともに、部材試作を行い、繊維うねり、ポイドが抑制されることを実証する。また賦形シミュレーションソフトを開発し、部材レベルで精度10%以内を実証する。

(2) 軽金属構造部材

(a) チタン合金接合技術の航空機への適用研究

- 大型チタン部品(板厚5mm程度)を母材並の接合部特性で摩擦攪拌接合(FSW)する接合技術を確立する。
- 接合部微小欠陥(0.3mm)の検査技術を確立する。
- 接合部組織と機械的特性の相関を解明する。
- 従来方法である厚板からの切削加工と比較して、部材製造コストを30%低減できる見通しを得る。

(b) チタン合金粉末焼結技術の航空機への適用研究

- 本技術を実機適用化可能なTRL6とする。
- 冷間静水圧プレスを用いて複雑形状焼結体を成形する技術を確立する。
- Ti-6Al-4V鍛造材以上の静強度、降伏強度、耐食性を達成する。
- 切欠き強度について、Ti-6Al-4V合金鍛造品の水準以上の疲労寿命(250MPaにて 10^5 回)を達成する。
- 従来の製造法(厚板からの削り出し)と比較して、部品製造コストを30%低減できる見通しを得る。

(c) マグネシウム合金の開発と航空機への適用研究

- サイズ: 直径 $\phi 50\text{mm}$ に外接する押出形材
- 引張強度(F_{ty}): 急凝固 *KUMADAI* マグネシウム合金は、400MPa以上
溶解鑄造 *KUMADAI* マグネシウム合金及び超軽量マグネシウムリチウム合金は、350MPa以上
- 伸び(EL): 急凝固 *KUMADAI* マグネシウム合金は、5%以上
- 発火温度: 750°C以上
- 腐食速度: 0.6mm/年 以下
- 重量削減: 現状のアルミニウム合金部品より15%の軽量化

(3) 総合調査研究

- 航空機の材料評価から設計、製造、運航に至るまでの各フェーズにおいて、実用化のために解決すべき課題を整理するとともに、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等に係る開発戦略を明確化する。

研究開発項目①-2「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発(第二期)」

1. 研究開発の必要性

(1) 複合材構造部材

燃費改善・環境適合性等に対する要請に応えるため、近年の航空機では軽量化のために構造部材として複合材が積極的に導入されているが、製造に時間がかかる、製造コストが高い等の課題が複合材適用拡大の障害となっている。

複合材を用いた航空機を長期間にわたって安全に運用していくためには、複合材構造の健全性を詳細に把握し、異常が認められた際には、修理、交換を行う必要がある。現在は、目視、非破壊検査等により複合材構造の検査を実施しているが、非常に多くの手間と時間を要し、航空機を運航するエアラインにとって大きな負担となっている。更なる燃費改善の要求によって複合材の適用が拡大する中で、複合材構造健全性を効率的に把握することで整備性の向上が重要となる。

研究開発項目①「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発」では、

- 接合(融着、接合等)を用いた部材一体化構造製造技術に関し、従来、熱可塑複合材の接着が困難であったが、融着、接合技術、新規表面処理条件を強度特性、品質の観点から適正化を行い、TRL4の融着、接合技術を確立した。
- 次世代小型機構造部材を模擬した段差のあるC型部材の試作を行い、UACSを用いることで、通常プリプレグに比べてシワが抑制されることを実証し、複雑形状成形を可能にした。
- オートクレーブの制約を受けない大型複合材構造部材用の低圧成形プロセスとして光ファイバセンサを活用し、オートクレーブ外でも同等の品質で製造する技術を開発した。
- 複合材構造の構造健全性診断の一つである光ファイバセンサによる衝撃損傷検知システムについて、実飛行環境化でも衝撃損傷検知が可能となる検知方法を開発した。この検知方法の実証として、エアバスと共同で、実際の航空機構造を用いた実証試験を通じて、十分な信頼性/耐久性で衝撃損傷検知が可能であることを確認した。

等の成果を挙げた。

しかし、現状の複合材構造組立においては接着への信頼度が不十分であることから従来の金属部材と同様に、部材同士をボルト締結(チキンファスナ)で補強することを義務づけられており、機体全体で数十万本のボルトで締結されている。その結果、膨大な組立時間、及び重量の増加を余儀なくされている。また、複合材部材製造においても一つの部材を作るのに数多くの工程で人手に依存した製造が行われている。これらの現状が製造プロセスの低生産性/高コスト化、及び複合材使用による重量低減効果が不十分なことの一因となっている。

このため複合材構造組立では接着の信頼性向上、及び現行のアルミニウム合金構造に負

けない複合材構造の高生産性・低コスト生産技術に関する技術的ニーズは非常に高いものとなっており、①-2「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発(第二期)」として、高生産性・低コスト生産技術の研究開発、複合材構造に由来する内部剥離等の検査技術開発、及び複合材本来の特性を生かした軽量化検討を実施して、複合材構造部材のより一層の利用拡大を目指すことが急務である。

(2) 軽金属構造部材

チタン合金は軽量であり複雑形状の部材形成も可能で、複合材と接触しても熱膨張差や局部電池腐食による悪影響もないため、複合材とともに使用量が増大している。しかし、チタン合金は機械加工等の加工性が悪く、加工コストが非常に高いという問題がある。次期民間航空機をターゲットとし、適用可能な接合及び粉体焼結技術等の開発が必要である。

マグネシウム合金に関しては、アルミニウム合金より比重が小さいため、航空機構造用材料への適用が期待されている。しかし、マグネシウム合金には、強度、耐食性の問題があるが、国内でこれらを克服する可能性のある新マグネシウム合金が開発されており、この技術を元に航空機に適用可能なマグネシウム合金の開発、加工法の開発が必要である。

研究開発項目①「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発」では、

- チタン合金粉体焼結技術の技術成熟度がTRL6相当であることを確認し、従来の製造法(厚板からの削り出し)と比較して、部品製造コストを33%低減できる見通しを得た。
- 急冷凝固 KUMADAI マグネシウム合金は昨年度作製した組成の材料で発火温度目標をクリアすることを確認した。
- 急冷凝固 KUMADAI マグネシウム合金製造プロセス開発について、昨年度までの熊本大学の知見と本プロジェクトでの成果から、急冷凝固リボンの熱間プレス条件、押出条件の適正化を行い、直径φ50mmに外接し、現状のアルミニウム合金部品より15%軽量化が可能なZ型押出材を製造した。

等の成果を挙げた。

このような成果により海外の航空機メーカーからも、軽金属合金の中でも特に日本発のマグネシウム合金は注目されてきているが、マグネシウム合金開発は現状では素材開発の域を脱し切れておらず、航空機向け構造材料としてのデータ取得の課題が残されており、研究開発項目①-2「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発(第二期)」としてマグネシウム合金の開発、加工法の開発とその信頼性の向上検討を実施し、マグネシウム合金の航空機用構造材料への適用化開発を世界に先んじて推進していくことが急務である。

(3) 総合調査研究

複合材構造及び軽金属構造について、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等についての客観的判断材料を探索する。

研究開発項目①「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発」では、SHMシステムを航空機に搭載するにあたり、エアバスとの共同試験を計画するなど開発戦略を明確化し、複合材構造では、将来重要となる高生産産について研究開発の方向性を明確化し、また軽金属構造ではチタン接合技術及びチタン粉体焼結技術がコスト削減製造技術として重要度を増していることを確認し、及びマグネシウム合金研究では文献調査及びボーイングとの意見交換を行い、今後の方針などを明確化した等の成果を挙げた。

しかし、本研究開発分野は国内外で活発に研究開発が行われており、技術トレンドの動きも速いので、研究開発項目①-2「次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発（第二期）」として国内外の研究開発動向や政策支援の状況等を調査・分析し、研究開発の方向性や目標レベル等を常に確認し、研究開発を効率的・効果的に推進していくための総合調査を実施することが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 複合材構造部材

アルミニウム合金構造と同等の高生産性・低コスト生産技術の研究開発、複合材構造に由来する内部剥離等の検査技術確立、及び複合材本来の特性を生かした軽量化技術開発を実施する。

(2) 軽金属構造部材

マグネシウム合金の開発、加工法の開発とその信頼性の向上検討を実施し、マグネシウム合金の航空機構造材料への適用技術開発を実施する。

(3) 総合調査研究

国内外の研究開発動向や政策支援の状況、ボーイング、エアバス等OEM、及びエアラインの動向等を調査・分析し、研究開発の方向性や目標レベル等を常に確認し、研究開発を効率的・効果的に推進していくための調査を実施する。

3. 達成目標

【中間目標(平成29年度)】

(1) 複合材構造部材

- アルミ構造と同等の高生産性・低コスト生産技術の要素技術を確立して、技術コンセプトの確認をする(TRL3)。
- 複合材本来の特性を生かした軽量化を可能とする基礎技術を確立して、技術コンセプトの確認をする(TRL3)。
- 複合材構造に由来する内部剥離などの検査技術について、想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。

(2) 軽金属構造部材

- マグネシウム合金の部材適用が判断可能な構造材料データを取得し、航空機の適用部位を明確にして技術コンセプトの確認をする(TRL3)。

(3) 総合調査研究

- 複合材構造及び軽金属構造について、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等についての客観的判断材料を探索する。

【最終目標(平成31年度)】

(1) 複合材構造部材

- 確立した高生産性・低コスト生産技術の要素技術を、航空機の適用部位を明確にして、想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。
- 確立した複合材本来の特性を生かした軽量化を可能とする基礎技術を用いて、航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。
- 複合材由来の欠陥等の検査技術の外部審査によるTRL7を取得する。

(2) 軽金属構造部材

- マグネシウム合金において、明確にした航空機の適用部位に必要な部材としての構造材料データを取得し、構造設計を行い想定使用環境下での実用可能性の妥当性を確認する(TRL5)。

(3) 総合調査研究

- 航空機の材料評価から設計、製造、運航に至るまでの各フェーズにおいて、実用化のために解決すべき課題を整理するとともに、国内外の技術動向や政策支援を調査し、本研究開発の方向性、達成レベル等を明確化する。

研究開発項目②「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発」

1. 研究開発の必要性

民間航空機の構造部材においては、複合材料の適用が拡大し、ボーイング787型機では、機体重量の約5割に適用されるまでになっている。しかし、一般的に、複合材料は繊維に樹脂を含浸させたプリプレグを積層することで成形し、金属材料に比べると成形過程が複雑であり手間がかかる。この問題を解決し、複合材料部材の適用を拡大させるには、製造効率の改善が必要であり、自動積層装置の導入が必須の要件となってくる。現状では自動積層装置の製造技術は欧米メーカーに依存しており、国内での自動積層装置の製造技術開発が急務となっている。

2. 研究開発の具体的内容

民間航空機の中小型複雑形状部材に対応可能な小型タイプ自動積層装置による航空機用複合材料の積層技術を開発する。

(1) 小型タイプ自動積層装置の開発・実用化

安価で汎用性・量産性を持った装置として、小型タイプ自動積層装置の開発・実用化を目指す。

(2) 中小型複雑形状部材の設計・製造技術を確立

将来の複合材部材製造の低コスト化や高レート生産に向け、小型タイプ自動積層装置による中小型複雑形状部材の設計・製造技術を確立する。

3. 達成目標

【最終目標(平成27年度)】

(1) 小型タイプ自動積層装置の開発・実用化

- 装置の機能・機構を、中小型複雑形状部材の自動積層に適したものとすることで、低コスト化・高レート生産に寄与可能な積層品質を実現する小型タイプ自動積層装置を開発する。

(2) 中小型複雑形状部材の設計・製造技術を確立

- 開発した小型タイプ自動積層装置を用いて部材の試作を実施し、従来の製造手法である手積層の場合とも比較しながら品質評価を行い、複雑形状積層に対する設計・製造技術を習得して、航空機向け次世代構造材製造の真にクリティカルな技術とする。

研究開発項目②-2「航空機用複合材料の複雑形状積層技術開発(第二期)」

1. 研究開発の必要性

民間航空機の構造部材においては、複合材料の適用が拡大し、ボーイング787型機では、機体重量の約5割に適用されるまでになっている。しかし、一般的に、複合材料は繊維に樹脂を含浸させたプリプレグを積層することで成形し、金属材料に比べると成形過程が複雑であり手間がかかる。この問題を解決し、複合材料部材の適用を拡大させるには、製造効率の改善が必要であり、自動積層装置の導入が必須の要件となってくる。現状では自動積層装置の製造技術は欧米メーカーに依存しており、国内での自動積層装置の製造技術開発が急務となっている。

研究開発項目②「航空機用複合材の複雑形状積層技術開発」では積層における軌跡精度の向上を達成し、複数本トウの同時積層が可能なプロトタイプの自動積層装置を完成させた。製造適用への課題としては、積層速度の高速化等が明らかになり、より複雑な実機部材への効率的で精密な積層を可能とする研究開発を継続して実施し、基本運転システムを作り込むことが、自動積層装置の製造適用のためには必須である。

2. 研究開発の具体的内容

民間航空機の中小型複雑形状部材の製造に適用可能な小型タイプ自動積層装置による、航空機用複合材の積層技術を開発する。

(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発

小型タイプ自動積層装置について、その製造適用に向け、障壁となる技術課題を要素技術の深化・成熟化を通して解決し、複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な安価で汎用性・量産性を持った装置を開発する。

(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発

小型タイプ自動積層装置による中小型複雑形状部材の設計・製造技術について、適用部材拡大を念頭に置き、実機部材形状に適用可能な設計・製造技術を開発する。

3. 達成目標

【中間目標(平成29年度)】

(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発

- 中小型複雑形状部材の積層に対し、将来の複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な積層速度で、連続積層可能な小型タイプ自動積層装置を開発し、作業による手積層と同等の品質を確認する。

(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発

- 開発した小型タイプ自動積層装置を用いて中小型複雑形状部材の試作を実施し、その品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の妥当性を確認する。

【最終目標(平成31年度)】

(1) 小型タイプ自動積層装置の製造適用に向けた開発

- 種々の複雑形状の積層に対し、作業者による手積層と同等の品質を確認する。
- 将来の複合材部材製造の高生産性・低コスト生産に対応可能な積層速度で、連続積層可能で、製造適用に必要な易操作性、易メンテナンス性を有し、汎用性を持つ安価小型タイプ自動積層装置を開発して装置仕様を決定する。

(2) 実機部材形状に適用可能な設計・製造技術の開発

- 種々の複雑形状に対し、開発した装置を用いて部材の試作を実施し、その品質評価により、製造適用に向けて高度化した設計・製造技術の確立を確認する。

研究開発項目③「航空機用難削材高速切削加工技術開発」

1. 研究開発の必要性

高強度な先進材料の導入によって航空機の軽量化が図られ、次世代航空機に向けた開発が進められている。一方、炭素繊維複合材やチタン合金、アルミリチウム合金等の先進材料は、従来の材料と比べて加工が困難であり、加工に係るエネルギー使用の合理化及び加工時間の短縮、加工品質の向上を図るために必要な技術の開発が期待されている。例えば、炭素繊維複合材を大量に利用したB787機では、比強度の高いチタン合金の使用割合も従来機種に比べ急激に増加して15%に達し、約100トンのチタン素材が使用されるが、その内約90トンを切りくずとして除去しなくてはならない。そこで本事業では、航空機用難削材材料の高速切削加工技術、さらには、高品位加工技術の開発による後工程の削減、他の加工技術との組み合わせによる工程転換を実現することによって加工時間の短縮を図るとともに、消費電力が少なく、切削油の使用量を削減した環境対応型切削技術を開発する。

2. 研究開発の具体的内容

本高速加工技術の開発では、加工時間の短縮と加工に係わるエネルギー使用の合理化、加工品位の向上についても留意し、航空機用難削材材料の総合的な切削加工技術の高度化を実現する。以下具体的に記述する。

(1) チタン合金の切削加工技術開発

(a) 手仕上げ不要な仕上げ加工技術の実部品形状への適用

チタン合金製の航空機機体部品の多くは、ポケット形状に切削する加工が非常に多く、その際に、ミスマッチ(手磨きの必要な加工段差等)と呼ばれる各工程間の繋ぎ目や微小段差等の加工不良が発生し、手仕上げ(磨き)の修正を経て部品が完成する。加工時間とコストの削減のため、広範な航空機部品への適用を目指して、様々なポケット形状に対応した手仕上げ不要な切削加工を実現する切削条件及び工具経路生成法等について検討するとともに、それらが加工面性状に与える影響についても検討を加える。

(b) 環境対応切削における高能率化の検討

チタン合金の切削においては、大径の工具を用い、大量の切削液を高圧クーラント装置で供給することが世界的な動向となっている。こうした技術の他に、生分解性ミストクーラントによるMQL(最小量潤滑)切削や冷却能力の高いOOW(Oil on Water)切削法の条件を最適化することにより、チタン合金の高効率な環境対応切削加工の実現とそれによるコスト削減を目指す。

(2) 先進アルミ合金の切削加工技術開発

(a) アルミリチウム長尺部材の高精度加工技術開発

アルミリチウム合金製の長尺部材を加工後に外すと、残留応力により部材の変形が全体

的に生じる。変形の大きさは部材内の残留応力に依存するが、アルミニウム板材の圧延時に生じた残留応力と切削加工により仕上げ面内に生ずる残留応力の両者を考慮する必要がある。フライス削りにおける残留応力と部材の変形を予測するための解析技術を確立する。刃形や工具経路等が切削温度や仕上げ面残留応力に及ぼす影響を明らかにする。最終的に実験結果と解析結果を総合し、残留応力を制御するための、切削工程や刃形、切削速度、切削液やMQL、空気による冷却条件、長尺材表面に貼付した保護フィルムの厚さ等について検討する。解析の適用範囲を拡大するため、有限要素モデルの信頼性を高め、歪み量を見込んだ余剰板厚の削減と切削加工時間の短縮、歪み矯正の手作業時間の削減、製造工程の安定化、製造コストの削減を図る。

(b) 手仕上げ不要なアルミ合金の切削加工技術の開発

チタン合金の高速切削加工技術の成果である「手仕上げ不要なポケット切削加工技術」をアルミニウム合金のポケット加工に適用し、大きな切り込みにおいてもびびりを生じない手仕上げ不要なポケット切削技術を開発する。切削抵抗に基づいた適用範囲の検討、工具摩耗が進行した際の加工面の品質評価、工具－主軸系の振動解析理論に基づいた適切な主軸回転速度の検討等を行い、より安定した高速切削の実現を目指す。

(3) 炭素繊維複合材の切削加工技術開発

(a) 炭素繊維複合材のドリル加工における切削力、切削温度、工具摩耗の予測技術開発

本研究開発では、ドリル出口での積層剥離と切削力(特に、スラスト力)との関係を実験的に調査し、積層剥離を精度よく予測する技術を確立する。炭素繊維の剥離に関する予測精度を高めるため、エネルギー最小理論に基づくマクロな切削解析技術と繊維レベルでの微視的モデルに基づいた有限要素シミュレーションツールを開発・融合し、切削条件の選定、ドリル形状の設計に利用する。

(b) 炭素繊維複合材－チタン合金重積材の切削予測技術開発

炭素繊維複合材とチタン合金のファスナー部では、両材料を同時に穿孔する必要がある。工具形状や切削条件の最適化にはより高度な技術が必要となる。炭素繊維複合材に対して開発した穿孔過程の予測技術を重積材に適用し、切削力と切りくず流出方向を解析し、シミュレーションモデルの適用性とその解析精度を確認する。

(c) 重積材に対するドリル形状の設計

重積材の穴加工における炭素繊維複合材層の穴内面の損傷を回避するためには、チタン合金の切りくず流出方向の制御が重要となる。チタン合金のドリル切削において、ドリルの先端角が切削力と切りくず流出方向に及ぼす影響をシミュレーションと切削試験によって明らかにし、新しいドリルの設計開発に利用する。

(4) チタン合金の熱間ストレッチ成形(成形・切削一貫プロセス)技術開発

大型で曲率を有する航空機部品は、厚いプレート等から削りだした場合、素材の90%以上が切り屑となる。機械加工により内部応力が開放され、反りが発生するため応力除去プロセスが必要となる。熱間ストレッチ成形は、素材を機械加工前に部品形状に合わせて成形する工法であり、成形・切削一貫プロセスによるニアネット化により機械加工量を削減できるのみならず、材料購入時に内在している内部応力を最小限にできることが期待される。熱間ストレッチ成形の特性を把握し、プロセス条件(成形温度、金型の形、曲率、加熱ツール、冷却速度及びその分布等)が材料特性に及ぼすメカニズムを明確化することで、厚板に内在する大きな残留応力を最小限にするプロセスを開発する。

(5) 切削ロボットシステムによる柔軟性の高い切削加工技術開発

多種多様な航空機部品の加工にロボットを適用し、柔軟に加工システムを構築することが期待されており、比較的手近なロボットでこのシステムを構築することができれば、その波及効果は極めて大きい。本研究開発では、切削条件や工具等の最適化を行い、コンパクトな加工計測システムを導入することにより、ロボットを本格的に利用した切削加工技術を実現する。

3. 達成目標

【最終目標(平成27年度)】

(1) チタン合金の切削加工技術開発

(a) 手仕上げ不要な仕上げ加工技術の実部品形状への適用

- ミスマッチの無い高速ポケット加工技術を確立する。チタン合金のための仕上げ加工用の革新的工具(エンドミル)の開発と新しいコーナ加工技術の開発により、標準モデルに対し、平成24年度当初比で、仕上げ加工時間を30%以上短縮する。
- エンドミルによる荒加工のための革新的高圧クーラント利用技術の適用可能性を検証し、実用化のための必要な技術課題を明確化する。最重要課題のひとつである工具については、高圧クーラント用のエンドミルを開発し、工具形状、クーラントノズル位置等の最適化を図り、荒加工時間を10~20%短縮する。

(b) 環境対応切削における高能率化の検討

- OOWのミストを用いる切削法を開発して、上記目標と合わせて手仕上げ不要のチタン合金の高速切削を達成し、標準モデルの荒加工から手仕上げまでを含む総コストを、平成24年度当初比で、30%以上削減する。

(2) 先進アルミ合金の切削加工技術開発

(a) アルミリチウム長尺部材の高精度加工技術開発

- 制御パラメータ(工具・切削条件、切削工程・工具経路、クーラント)を検討して、アルミリチウム合金加工後部品の変形(ひずみ)を、20~30%軽減する。
- 有限要素解析による残留応力の予測技術を確立する。

(b) 手仕上げ不要なアルミ合金の切削加工技術の開発

- ミスマッチの無い高速ポケット加工技術を確立する。アルミ合金のための仕上げ加工用の新工具の開発と新しいコーナ加工技術(コーナの新しい加工法はチタン合金と同じ)により、標準モデルに対し、平成24年度当初比で、仕上げ加工時間を30%以上短縮する。
- エンドミルによる荒加工のための革新的な高圧クーラント利用技術の適用可能性を検証し、実用化のための必要な技術課題を明確化する。最重要課題のひとつである工具については、高圧クーラント用の革新的な工具(チタン合金用とは工具材種や形状が全く異なる)を開発し、工具形状、クーラントノズル位置等の最適化を図り、荒加工時間を10~20%短縮する。

(3) 炭素繊維複合材の切削加工技術開発

(a) 炭素繊維複合材のドリル加工における切削力、切削温度、工具摩耗の予測技術開発

- 数値解析により航空機用複合材の切削力、切削温度、工具摩耗、切り屑流出方向の予測技術を確立し、厚さや直径の異なる部位に最適なドリルを設計・選択するための世界初の支援システム・シミュレーションシステムを構築する。これにより、工具の異常摩耗、高切削温度による炭素繊維複合材の劣化、許容レベル以上大きな剥離が発生しない工具の選択並びに切削条件を導き出す。

(b) 炭素繊維複合材-チタン合金重積材の切削予測技術開発

- 最大級の加工穴径のための最適な重積材用のドリル形状並びに加工条件を明確にし、新しいドリル設計開発に利用可能なシミュレーション技術を開発する。

(c) 重積材に対するドリル形状の設計

- 上記の予測技術を活用し、最大級の加工穴径のための革新的な形状のドリルを開発し、得られた結果をベースに実用化の目処を得る。

(4) チタン合金の熱間ストレッチ成形技術開発

- 標準試験片に対し熱間ストレッチ成形を用いて適切な組織制御を行い、残留応力制御を可能とする世界初の技術を確立する。これにより将来的な切り屑量(部品形状によるが、

現状比40-50%減)、切削時間(部品形状によるが、現状比30-40%減)の削減の目途を得る。

(5) 切削ロボットシステムによる柔軟性の高い切削加工技術開発

- ロボットの最適姿勢を明らかにし、革新的な金属切削ロボットシステムを確立する。
- アルミリチウム合金のスキンカット(ポケット加工)に適用し、従来加工機同等以上の加工仕上がりを達成する。

研究開発項目③-2「航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)」

1. 研究開発の必要性

炭素繊維複合材やチタン合金、アルミニウム合金等の先進材料の導入によって、航空機の軽量化が図られ、次世代航空機に向けた開発が進められている。一方、これらの材料は、従来材料と比べて加工が困難であるため、加工に要するエネルギーの削減、加工時間の短縮、加工品質の向上、加工コスト低減を図るための技術開発が期待されている。炭素繊維複合材を50%、チタン合金を15%使用するボーイング787については、機体製造の35%を日本の三菱重工が受け持つようになり、以来、我が国での難削材の切削加工が急増している。機体の切削では、ポケット加工に代表されるように、素材の大部分を切りくずとして排出するため、加工能率の向上は製造コスト、ひいては、国際競争力に直接影響する。このことから、航空機用難削材の高品位かつ高能率な加工技術の向上に対する、ボーイング等のOEMからの要求はとどまることがない。

研究開発項目③「航空機用難削材高速切削加工技術開発」では、炭素繊維複合材のドリル加工シミュレータを開発して高性能切削加工技術を確立し、チタン合金とアルミ合金の高速仕上げ加工技術を開発して加工時間の大幅な短縮を実現する等の成果を得たが、これらの成果を踏まえつつ、さらなる技術開発を継続して実施し、上記要求に答えていくことが重要である。

航空機の部品加工は、超多品種少量生産であり、工作機械の数値制御プログラムひとつをとっても、膨大な種類のプログラムが必要となるだけでなく、生産量に対する加工前準備の負荷が非常に大きい。そこで、非効率な試行錯誤を何度も繰り返すことなく切削条件の設定や切削トラブルの解消を実現するため、切削状態の予測技術の開発が必須となってきた。今後、ロボットを用いた難削材の切削技術開発が求められているが、世界的にも実績が少ないため、切削の予測技術がますます重要になってきた。また、切削加工の高速化を図りつつ、切削加工と効率的かつ部分的な金属ディポジションを適宜組合せることにより、接合部などの特定の部位だけを、優れた特性を有する難削材に置き換え、難削材の切削量と切削時間を大幅に短縮することも重要である。この複合加工では、切削状態の予測技術の他に、金属ディポジションのプロセスと加熱冷却に伴う熱応力の予測が高能率な加工を実現する上で必要となる。

このような革新的な高速切削加工技術開発を、研究開発項目③-2「航空機用難削材高速切削加工技術開発(第二期)」として実施することが、国内航空機産業の国際競争力向上のためには重要である。

2. 研究開発の具体的内容

航空機用難削材の高速切削、ロボット切削、並びに、切削・金属ディポジション複合加工において、予測が必要なものは、加工力、工具や工作物の温度、仕上げ面残留応力、工具摩耗、炭素繊維複合材の剥離寸法、クーラントの流れ、熱応力などであるが、難削材の種類や

加工プロセスによって、最低限必要なものが異なる。加工プロセスの予測には多大な時間とコストが必要となるため、各プロセスの最適化や高性能な工具の開発にあたっては、最低限必要な物理量を効率的に求められるよう、有限要素法や有限体積法に基づくシミュレーション技術及び切削理論に基づくコンパクトでかつ高度な解析技術を開発する。これにより、予測技術をベースとしたスマートな航空機難削材高速切削加工技術の高度化を図り、革新的な切削加工技術開発を促進する。

3. 達成目標

【中間目標(平成29年度)】

- 炭素繊維複合材、チタン合金、先進アルミ合金の高速切削高性能工具の作製するための予測技術のプロトタイプを開発する。
- 切削・金属ディポジション複合加工を実現するため、加工条件の設定に適用可能な予測技術のプロトタイプを開発する。

【最終目標(平成31年度)】

- 予測技術の精緻化を図り、発展させて、加工費あるいは加工時間を30%以上削減する高性能加工技術を確立する。

研究開発項目④-1「軽量耐熱複合材CMC技術開発(基盤技術開発)」

1. 研究開発の必要性

航空機に対しては、近年のエアラインの競争激化等を受け、コスト低減、省エネルギー化の要請が高まっていると同時に、特性上、安全性や信頼性についても航空機は引き続き最高度の水準を満たす必要がある。そのため、運輸部門(航空機)でのエネルギー使用合理化の推進をしつつ、かつ、軽量・高強度な先進材料の構造体への導入を早期に、そして効率的に実現するため、航空機エンジンへの複合材料適用を可能とする革新的な部材創製・技術開発が求められている。特に、航空機エンジン用部材の使用温度がニッケル基合金の耐熱限界に近づいているが、今後その耐熱温度を大幅に上昇させることは困難なため、新しい材料の開発が喫緊の課題となっている。新材料の候補として有望なCMC(Ceramic Matrix Composites:セラミックス基複合材)は、軽量耐熱材であるとともに、基材のセラミックス繊維を日本が独占する等、炭素繊維複合材に続く日本の優位性を確保できる技術として期待できるが、欧米の航空エンジンメーカーでも精力的に研究開発が行われており、我が国でも一層の研究の加速が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

耐熱性に優れ、金属材料よりも軽量の部材として開発が期待されているCMCの実用化を加速し、その普及拡大による低炭素・省エネルギー社会の実現に寄与するため、CMCの実用化にとって課題となっている基盤技術を開発することを目的とする。セラミックス(SiC)繊維を織物状に加工した基材に、気相、固相、液層の順にセラミックスを含浸させて、所望の形状にCMCを作成する製造プロセスにおいて、本事業での開発内容を以下具体的に記述する。

(1) CMC損傷許容評価技術開発

CMCは損傷を許容することが必須であり、全く新しい設計手法の確立、データの取得、試験での実証が必要である。CMCに求められる主要な特性として、引張、疲労、クリープの材料データを取得し、損傷パラメータと強度、非破壊検査結果の関係を把握する。高温疲労試験における損傷の破壊メカニズムを解明する。

(2) CVI(Chemical Vapor Infiltration: 化学的気相含浸法)プロセス最適化

(a) CVI反応条件の最適化

CVI反応条件の最適値を設定し、実際の工業的な構造をした炉での検証実験を行う。織物を用いたCVI実験を行い、反応メカニズム解析の精度を向上する。

副生成物の発生抑制方法については、副生成物が安定に分解できることを実証する。

(b) CVIシミュレーション技術開発

織物含浸率の予測を可能とするCVIシミュレーション技術を開発する。工業的な構造のCVI炉におけるシミュレーションの主要な課題を解決する。

(3)コーティング技術開発

CMCは新材料であり修理方法も確立しておくことが実用化に向けて必須である。コーティング材料及びCMC表面の改良を行い、安価に施工できるコーティング技術の確立を目指す。高温でのエロージョン試験結果を予測できるシミュレーションモデルを構築する。

3. 達成目標

【最終目標(平成27年度)】

(1)CMC損傷許容評価技術開発

- 主要な要求特性である疲労、クリープ試験における寿命、損傷パラメータ及び非破壊検査結果の関係から、運用時に安全に材料を使用できる非破壊検査の判定基準を決める手法を設定する。
- 損傷の発生、進展を予測する手法を設定し、設計ツールを開発する。開発した設計ツールによりあらかじめ損傷を予測し、供試体を用いて実証実験を行う。試験結果と最終的な比較・評価を行い、設計ツールの妥当性を確認する。

(2)CVI(Chemical Vapor Infiltration: 化学的気相含浸法)プロセス最適化

(a)CVI反応条件の最適化

- 気相反応及び表面反応の寄与を定量的に明らかにして、CVIの含浸効率を従来比で50%以上改善する。
- 副生成物の組成を解析して副生成物を半減する方法を確立する。

(b)CVIシミュレーション技術開発

- 工業的な構造のCVI炉におけるシミュレーション精度を確認し、CVI反応器設計を可能とするシミュレーション手法を確立する。

(3)コーティング技術開発

- CMCの損傷(マトリクス割れ)に対して、修理可能なコーティング技術を確立する。コーティングの耐久性で課題となるサンドエロージョンに対し、精度の高いシミュレーション等を活用した加速評価の手法を提案する。

研究開発項目④-2「軽量耐熱複合材CMC技術開発(高性能材料開発)」

1. 研究開発の必要性

低圧タービン向けCMC部材では耐熱温度1100°Cが達成されつつある。しかし、航空機エンジンの高圧系、特に高圧タービンは環境温度が非常に高くなるため、耐熱性や強度の観点から、CMCの適用が最も難しい部位である。一方、その厳しい環境下に晒されることから、交換頻度が高く、利益率の高い部材でもある。現在、高圧系部材は、欧米のエンジンメーカーに抑えられてしまっているが、我が国としては、強みを有するSiC繊維の更なる高性能化とCMC部材への適用を進めることで、更なる軽量化を実現し、当該分野での競争力を高めていく必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

耐熱性に優れ、金属材料よりも軽量な部材として開発が期待されているCMCの実用化を加速し、その普及拡大による低炭素・省エネルギー社会の実現に寄与するため、CMC材料及び高性能SiC繊維を開発する。

(1) CMC材料の開発

耐熱温度1400°Cを達成する第3世代SiC繊維の生産技術を確立するとともに、CMC材料を開発する。

(2) 高性能SiC繊維の開発

応力負荷が大きく環境条件の厳しい部材に適用可能な高性能SiC繊維を開発する。開発したSiC繊維を用いてCMC材料の適用可能性を検証する。

3. 達成目標

【中間目標(平成29年度)】

(1) CMC材料の開発

- 1400°C×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を製造可能な、引張強度2.0GPa以上のSiC繊維を安定的に200kg/年供給できるバッチ焼結技術を確立し、繊維の供給を実施する。
- 第3世代SiC繊維の三次元プリフォームを製造可能とする条件を設定し、繊維体積割合30%以上の織物を試作する。
- 1400°Cの耐熱性を持つ安定したマトリクス含浸方法を開発する。

(2) 高性能SiC繊維の開発

- 引張強度3.0GPa以上で高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発する。
- 繊維評価技術(クリープ特性)を開発する。
- 材料のマイクロ組織を模擬した解析手法を設定する。

- 高性能SiC繊維によるプリフォーム製造方法を開発する。
- 高性能SiC繊維に適合したCMC部材の初回製造プロセス方案を決定する。

【最終目標(平成31年度)】

(1) CMC材料の開発

- 1400°C×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を製造可能な、引張強度2.0GPa以上のSiC繊維の低コスト量産プロセスを確立する。
- 室温引張強度200MPa以上、1400°C×400Hr曝露後強度低下20%以下を満足するCMC材料を開発する。

(2) 高性能SiC繊維の開発

- 引張強度3.0GPa以上で高温クリープ特性に優れるSiC繊維を開発、さらに試作条件を確立し、CMC部材評価用試料を供給する。
- 高性能SiC繊維における三次元プリフォームの量産を可能とするプロセスを開発し、繊維体積割合30%以上のプリフォームを試作する。
- 開発したSiC繊維が、CMC材料に適用可能であることを確認する。

研究開発項目⑤「航空機用構造設計シミュレーション技術開発」

1. 研究開発の必要性

新型旅客機ボーイング787の炭素繊維を東レが独占供給し、製造全体の35%までを日本の三重工(三菱重工業、川崎重工業、富士重工業)が受け持つ等、日本の航空業界は現在、成長・拡大期を迎えている。また、三菱航空機はYS-11以来およそ50年ぶりの国産旅客機MRJの開発を進めており、今後、自主開発等による自立的な成長が可能となることが予想される。昨今の計算機性能の向上に伴いCAE(Computer Aided Engineering の略)には大きな期待がかけられており、ボーイング、エアバスは、数値シミュレーションに集中投資をしている状況である。2社では、空力・設計・材料・生産までが非常にタイトに関係づけられたCAEを通じて体系化されており、これにより不要な人件費も実験も削れ、費用対効果の高い筋肉質な枠組みになっている。一方、我が国では、異なる分野間において別々に検討し、設計を収斂させるらせん型の設計方式が採用されており、分野間での情報伝達不備を生じやすく、開発期間の遅延等による開発コスト増加を引き起こしやすい現状がある。

CAEを援用することで我が国では経験の少ない全機設計を高度化することが可能となり、設計の初期段階から密な擦り合わせを行うことで、後工程での戻り作業を最小化することが可能となる。また、航空機構造認証プロセスでは、ビルディングブロック方式が採用されており、材料試験から始まり構造試験に至るまで膨大な実験が必要となる。複合材等の新規素材を採用した時には、一からすべての認証を実施する必要があり、多大なコストを要するが、CAEを援用することで実験数削減、期間短縮等が可能となり、構造認証にかかるコスト削減の一助となる。この様に、低コスト機体開発を実現するための数値シミュレーション技術開発は、新規素材の適用による軽量化を実現し、航空機産業の国際競争力を維持・拡大していくためには、必要不可欠な技術である。

2. 研究開発の具体的内容

設計初期段階から空力と構造及び強度解析をシームレスに連成することで、高い次元での多目的最適設計が可能なシミュレーターを開発する。具体的には、構造解析能力を高めることで、材料・設計データ量を減らし、実試験量を減らす検討を行う。複合材構造衝撃損傷解析については、構造試験(構造要素から実大構造)の試験ケース数削減を可能にし、かつ、衝撃損傷に強い構造を設計可能なシミュレーション技術を開発する。

3. 達成目標

【中間目標(平成29年度)】

- 開発上の必要なツールの選定、シミュレーション技術及び解析ツールを開発し、低コスト機体開発を実現するための数値シミュレーションツールを設計する。

【最終目標(平成31年度)】

- 解析検証を終了し、数値シミュレーションの実用性を確認する。
- 数値シミュレーションツールをソフトウェア化し、最適設計技術として確立する。

(別紙2) 研究開発スケジュール

