

# 航空輸送の脱炭素化へ向けた、 将来機軽量化を実現する先進複合材技術への取組み

Approach to Advanced Composite Material Technology to Reduce the Weight of  
Future Aircraft for the Decarbonization of Air Transportation



菅原 善太\*<sup>1</sup>  
Zenta Sugawara

戸上 健治\*<sup>2</sup>  
Kenji Togami

岡部 良次\*<sup>3</sup>  
Ryoji Okabe

“飛び恥”という言葉に象徴される航空機の環境適合性向上への強い社会的要請がある中、有力な対策とされている SAF (Sustainable Aviation Fuel) や水素を燃料とする将来機では、燃料費の高さや航続距離制約の課題があり、カーボンニュートラル達成に向けたエネルギー需要側の脱炭素化を促進する手段として、燃費改善・航続距離延長につながる機体軽量化の重要度がさらに高まっている。一方、ポストコロナにおいては狭胴機への需要が増加しているが、狭胴機への複合材適用は軽量化・生産高レート化に課題があり、広胴機ほど進んでいない。この状況に対応する取組みとして、三菱重工業株式会社(以下、当社)は、2021年度から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO:New Energy and Industrial Technology Development Organization)のグリーンイノベーション基金事業の助成<sup>(1)</sup>を受け、将来機/狭胴機の軽量化を実現する先進複合材技術の研究開発を進めている。

## 1. はじめに

新型コロナウイルス感染症が世界的に流行する直前、“飛び恥 (flight shame)”という言葉が欧州を中心に聞かれるようになり航空輸送の CO<sub>2</sub> 排出が大きな問題となった。その後、コロナ禍の影響により航空輸送の需要が激減し、結果的に航空輸送の CO<sub>2</sub> 排出量が大幅に減少したが、ワクチン接種の進展などを受けて2024年には航空輸送は2019年水準に回復する(図1)<sup>(2)</sup>と考えられており、CO<sub>2</sub> 排出削減への取組みを本格化させる動きが活発になっている。国際航空運航協会(IATA:International Air Transport Association)は、昨年10月、2050年までに世界の航空輸送によるCO<sub>2</sub> 排出量をネットゼロとする目標を採択した<sup>(3)</sup>。

航空輸送脱炭素化の有力な対策の1つとされるグリーン水素を燃料とする将来機では、水素の体積エネルギー密度の低さから機体に搭載できる燃料エネルギーの総量が限定されるため航続距離に制約がある。よって、この技術を適用した機体は短距離路線中心の運用になると考えられ、当面は狭胴機市場への普及が想定される。

一方、コロナ禍で打撃を受けたエアラインの売り上げ回復は国内線が先行しており、固定費が高い広胴機は旧型機を早期退役させるとともに新型機導入も先延ばしし、狭胴機を優先的に運航再開させている。また格安航空会社(LCC:Low Cost Carrier)の台頭もあり、コロナ禍前から高まりつつあった狭胴機の需要はさらに旺盛になりつつある。このような航空機市場の変化の中で、我が国の航空機産業は広胴機向け Tier1 事業偏重になっており、狭胴機の主要コンポーネント製造に参入できていないのが現状である。

上記のような事業環境の中、当社はこれまでに培ってきた世界レベルの複合材技術を将来機/

\*1 民間機セグメント 事業開拓室 次世代構造技術グループ グループ長

\*2 民間機セグメント 事業開拓室 主席プロジェクト統括 工博 \*3 総合研究所 製造研究部 複合材研究室 主席研究員

狭胴機の主翼構造向けに世界に先駆けて伸長させ社会実装することにより、新たな成長の柱とすることを目指している。

本報では、脱炭素化の観点から航空機軽量化の重要性に着目し、航空輸送の脱炭素化に対して狭胴機複合材化が持つ可能性と、軽量な主翼構造を実現するための複合材適用の課題を考察する。そして、将来機/狭胴機主翼構造の軽量化を実現する先進複合材技術の目指す方向性を展望する。

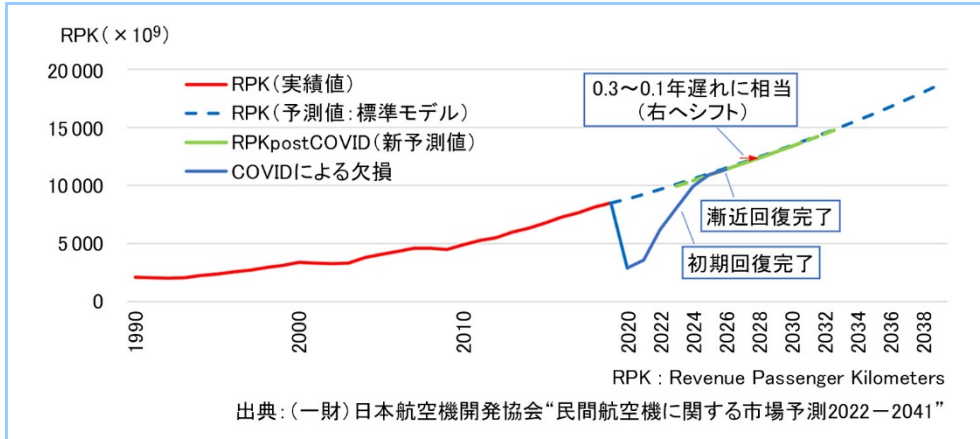


図1 コロナ禍からの航空輸送(RPK)の回復

## 2. 将来機/狭胴機 軽量化の重要性

### 2.1 航空機の LCA モデル

LCA(Life Cycle Assessment)とは製品の一生分(製造から廃棄まで)の環境への影響を評価する手法である。図2は Boeing767 を国内線で運航した場合とそれを複合材により軽量化した場合の LCA 結果<sup>(4)</sup>の比較である。これ見ると、航空機の生涯 CO<sub>2</sub> 排出量のうちの 99%が機体運航時となっているため、航空機のライフサイクル全体で CO<sub>2</sub> を削減するには運航時の燃費改善が非常に重要であり、複合材による機体軽量化がそれに大きく寄与していることが分かる。

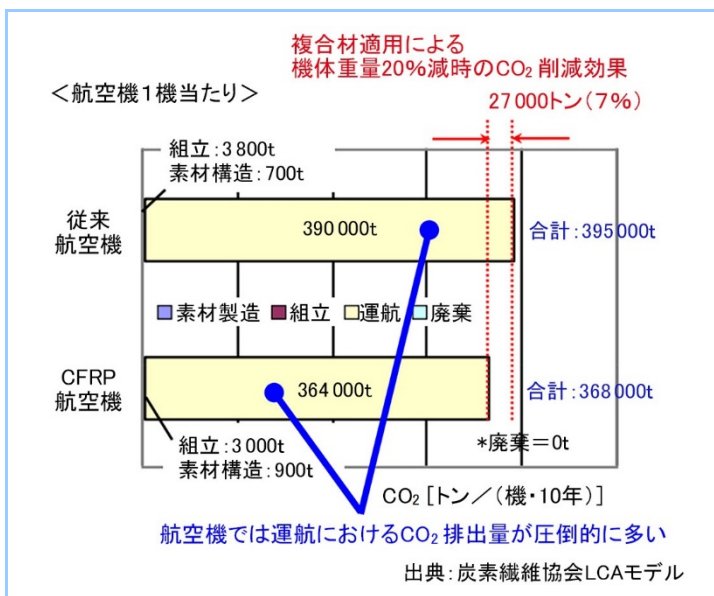


図2 航空機一生分の CO<sub>2</sub> 排出量の例

### 2.2 機体サイズ別将来需要予測

先にポストコロナの近年、狭胴機への需要が増加している旨を述べた。20 年間の長期の需要予測においても、狭胴機への需要の割合は2021年の運航機数比率を維持する予測(図3)<sup>(2)</sup>となっており、狭胴機への旺盛な需要は当面続くと考えられる。よって、狭胴機クラスの市場ボリューム

ムは将来的にも大きい。一方で、狭胴機では主要コンポーネントの複合材化が進んでいないため、狭胴機への複合材適用による機体軽量化は航空輸送全体の脱炭素化に大きく寄与するポテンシャルを秘めている。

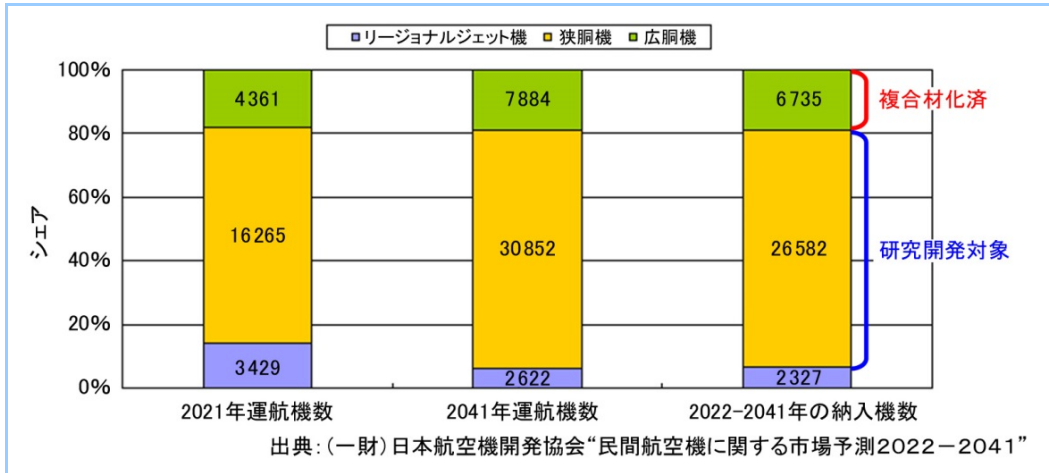


図3 機体サイズ別市場予測

### 2.3 航空輸送産業が目指すカーボンニュートラル社会のゴール

世界の主要な機体メーカー、エンジンメーカー等の企業や IATA 等の団体を構成される航空業界の連合体 Air Transport Action Group (ATAG) は、報告書“Waypoint 2050”<sup>(5)</sup>の中で 2050 年までに世界の航空輸送による CO<sub>2</sub> 排出量をネットゼロとするためのシナリオを3つ提示した。その中で最も航空機の技術向上を見込む野心的な“シナリオ3” (図4) では、CO<sub>2</sub> 削減の 53%を SAF 利用, 34%を狭胴機サイズの航空機を水素航空機化するなどの新技術導入が担うことになっている。

将来、SAF やグリーン水素を燃料とする将来機 (図5)<sup>(6)(7)</sup>では、LCA において運航時の CO<sub>2</sub> 排出量が理論上ゼロ (ニュートラル) になるため、機体軽量化が航空輸送の脱炭素化に直接的には寄与しない。しかしながら SAF や水素は燃料費の高さや航続距離制約の課題があり、燃費改善・航続距離延長につながる機体軽量化が新技術機体の普及に寄与する役割は大きい。よって将来機への複合材適用は、SAF / 水素燃料機体の普及を後押しするという意味で、間接的にも航空輸送の脱炭素化に重要な役割を果たすと考える。

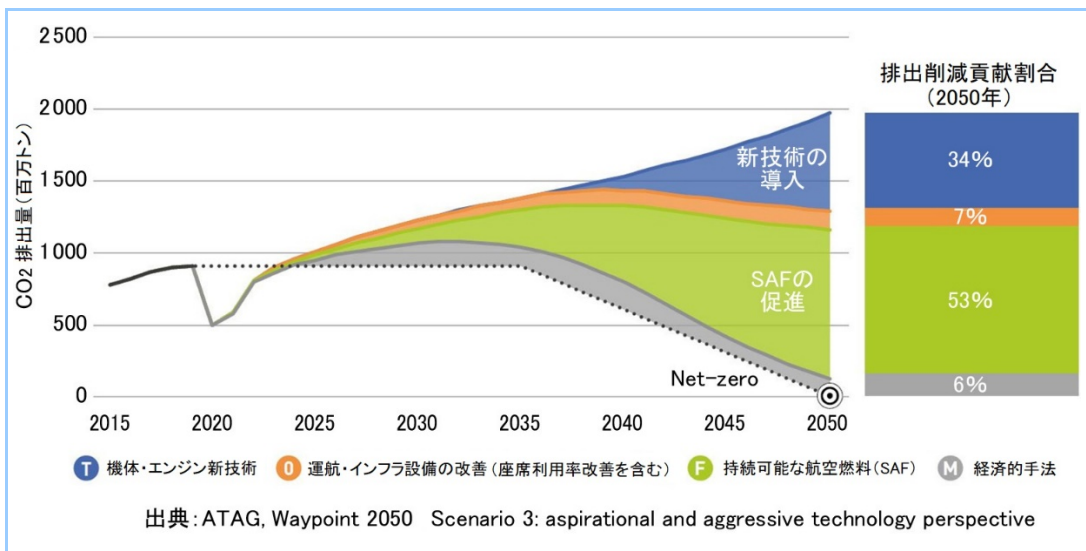


図4 航空輸送産業が目指すカーボンニュートラル社会のゴール



図5 機体 OEM 各社の将来高効率機体の構想

以上より、狭胴機向けの複合材技術を開発し機体を軽量化することは、将来機の普及を後押しすることにもなり、目の脱炭素化に対してはもちろんのこと、2050年の航空輸送のカーボンニュートラル達成へ向けても重要なテーマとなっている。

### 3. 将来機/狭胴機 主翼構造への複合材適用の課題

これまでに述べた通り、将来機/狭胴機への複合材適用により機体を軽量化することは航空輸送の脱炭素化にとって有効な手段になりうるということが分かっているが、現時点では多くの機種で実現に至っていない。その理由として、従来製法(プリプレグ+オートクレーブ製法)では解決が困難な2つの課題がある。これらを以降で説明する。

#### 3.1 機体形状による軽量化への制約

ここでは将来機/狭胴機主翼へプリプレグを適用する場合の機体形状による軽量化への制約を述べる。

プリプレグとはカーボン等の繊維にあらかじめ熱硬化性樹脂を含浸させた中間材で、粘着性のあるシート状になっている。プリプレグを一旦積層すると、この粘着性により層間スライドが起こりにくくなることで曲げたときの周長差を吸収できなくなり、突っ張って形状に馴染みづらいという特徴がある。

狭胴機では広胴機に比べて機体サイズが小さくなることから、設計上、どうしても強度上必要な最小板厚の変化が急峻になったり、主翼形状の曲率半径が小さくなったりしやすい。そのような部位にプリプレグ積層を無理やり適用すると欠陥(繊維しわ)が発生し強度低下を招く要因となる。そのような欠陥を避けるために、以下のような対策が必要になり、重量増の要因となる。

- 板厚の変化に対しては、必要板厚の薄い部分に強度上必要とされている以上の板厚を適用することで単位長さ当たりの板厚変化率を緩和する。
- 小さな曲率半径に対しては、繊維の突っ張りが発生しそうな層の繊維をカットすることで繊維しわ発生を防止する。繊維をカットした分、強度が低下するので、それを補う層を追加して補強する。

この結果、狭胴機は広胴機に比べ複合材化による重量軽減効果が薄れることになる。

将来機では空力性能上より燃費効率の良い機体形状を追求した結果、機体形状がより複雑になる(図5)。その結果、狭胴機で顕在化しているプリプレグ適用の課題がさらに大きくなると予想される。

#### 3.2 生産レートの問題

図3に示すとおり、狭胴機は市場ボリュームが大きいいため月産50機以上の高い生産レートに対応する必要があるが、現行の広胴機向け複合材主翼はプリプレグ+オートクレーブ製法であり、生産レートは月産10機程度である。従来製法(プリプレグ+オートクレーブ製法)のまま狭胴機並みの5倍の生産レートアップに対応する場合、オートクレーブ等の大型設備を含んだ製造ラインを複数用意する必要があり、初期コスト・維持費が非常に大きくなるうえ、広い敷地が必要になるため現実的ではない。よって、狭胴機へ複合材を適用するのであれば、別の発想で生産高レート化に取り組んでいく必要がある。

将来機についても1章で述べたとおり、当面は狭胴機市場での普及が予想されており、生産高レート化への需要は高まっていくと思われる。

#### 4. 先進複合材技術の目指す方向性

当社は過去に経験した複合材主翼・尾翼の技術確立の過程で、複合材開発で求められる顧客ニーズ(従来課題・品質レベル)を習得している。

最初のステップとして、今後はこの知見をもとに顧客ニーズを先読みし、次世代狭胴機主翼向けの技術を伸長させる方針である。2.2 節で述べた通り、狭胴機はカーボンニュートラルの観点からも複合材適用のフロンティアとしてうってつけであり、先に述べた当社の現行複合材技術(主翼・尾翼)との親和性も考慮すると狭胴機主翼をターゲットにするのが最適と判断している。そのためには3章で述べた狭胴機主翼特有の課題を克服し、軽量化・生産高レート化を実現する技術が必要となる。

また次のステップとして、水素航空機等、将来機への適用も視野に入れた息の長い技術とすべく、将来機特有の複雑形状にも対応できる技術を目指そうとしている。

本章ではその詳細を説明する。

##### (1) 機体軽量化

まず、3章で述べた機体形状による軽量化への制約を解消するため、賦形性(成型型への形状追従性)の良い材質・製法を選定し、広胴機で実現している対金属機体で20%軽量化の効果を狭胴機でも確保する。それに加えて、構造部材のさらなる減肉を実現するために、飛行機構造に加わる荷重に対して発生しても良い作用歪レベル、すなわち設計歪を向上させる。設計歪の向上目標は既存複合材構造に対して+10%とし、対金属機体でトータル30%の軽量化を目指す。

従来複合材構造で設計歪を決める要因としては、

- ① 部品同士組立てに用いるファスナ、もしくは接着構造のフェイルセーフ用に設けるファスナの穿孔部強度
- ② 複合材部材に内在する繊維しわやボイドなどの欠陥
- ③ 実施数に限度がある強度試験をベースに設定する安全側の設計許容歪

が挙げられ、設計歪を向上させるにはこれらを解決する必要がある、設計・認証技術及び生産技術の2つのアプローチを合わせて解決する(図6)。

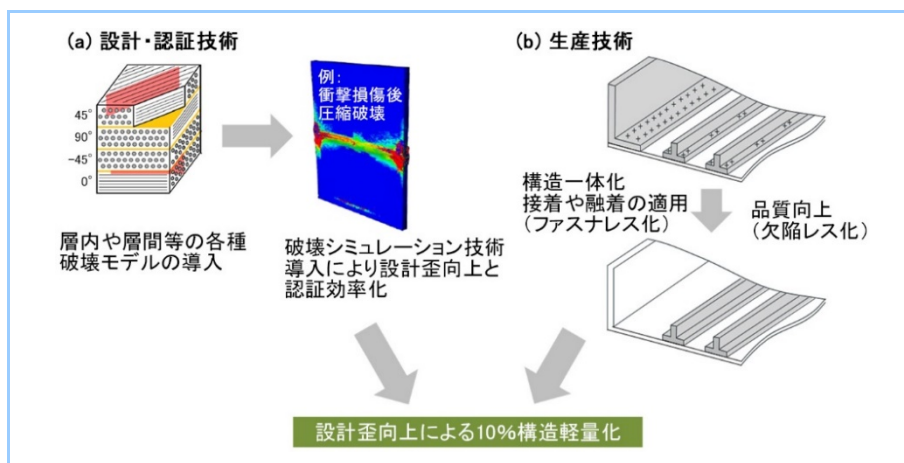


図6 機体軽量化のための一体化成形技術と設計歪の向上

設計・認証技術の観点からは、①を改善するためのファスナレス構造の性能・品質保証方法、及び③を改善するための各々の破壊モードを試験に裏付けされた数値シミュレーションで予測する破壊シミュレーションによる強度証明について、航空当局との議論を通じ認証方法を提案する。破壊シミュレーション技術については世界最先端の複合材破壊解析技術を有する

東北大学・東京大学との産学連携で研究開発を進める。

生産技術の観点からは、①を改善するために従来分割・機械結合されていた部品一体化を可能とする複合材製造技術(一体成形, 接着, 融着)を開発, ②を改善するために材料の性能を最大限活かして繊維しわやボイドなどの強度低下要因(内部欠陥)を抑制する技術を開発する。

### (2) 生産高レート化

生産高レート化を達成するには、複合材部品製造の各工程の高能率化が必要となる(図7)。積層, 成形, 硬化, 検査などの複合材部品製造の各工程を, 高効率に熟付与するためのAM(Additive Manufacturing:3D プリンタ)製治具や, AI 検査適用等の過去手法に捕らわれない革新的なアイデアでDX化(機械化, 自動化)を図り, サイクルタイムを従来の1/5とする。本研究開発では, 生産高レート化を実現するための設備仕様を設定し, シミュレーションや導入装置により検証する。

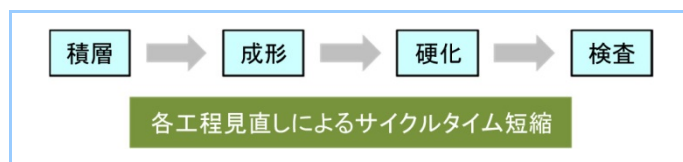


図7 複合材適用拡大のための生産高レート化

### (3) 複雑形状化

部品の複雑形状化を達成するには、曲率半径の小さい形状やねじられた形状の部品を繊維しわやボイド等の内部欠陥を発生させずに成形する製造技術が必要となる。部品形状の代表的パラメータである曲率半径を指標として設定し, 曲率半径従来比 1/4 以下を目標値とする(図8)。

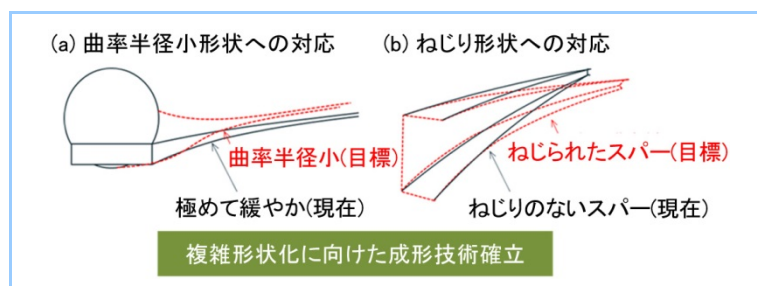


図8 将来機に必要な部品の複雑形状化

上記3つの目標を達成するための主翼大型部品(スキン・スパー等)の製造プロセスとしては, 樹脂含浸された粘着性の強いプリプレグ材を積層しオートクレーブで高圧加熱硬化する従来手法ではなく, 粘着性が小さく賦形性の良いドライ繊維基材を積層したのちに樹脂を含浸し, 通常大気圧下で加熱硬化させる Resin Transfer Molding (RTM) 製造プロセスを採用する。

RTM 採用の主な理由を以下の通り整理する。

#### ① 機体軽量化の観点

- ドライ繊維基材はプリプレグ材と比較して粘着性が小さく, 立体形状賦形時の繊維動き代が大きいことから立体形状へ馴染みややすく賦形性がよいため, 部品一体化と内部欠陥(繊維しわ)抑制の両立の観点で有利
- 当社は, 過去の開発や社内研究を通じ RTM 工法の課題と対策方法, 及びファスナレス実現のための課題について, 当局との調整経験を有す

#### ② 生産高レート化の観点

- RTM 製造プロセスの繊維・樹脂材料, 設備, 加工調達先は従来プリプレグ材による

プロセスの材料、設備、加工調達先と共通のメーカーが多く、これまでの当社の広胴機主翼の量産経験で構築したサプライチェーンを活かせることや中量産品製造知見とのシナジー効果で、月産レート増強、コストダウン活動の推進が可能

- オートクレーブ不要、すなわち製造設備が小規模でコスト面・工場立地面で自由度が高くなるため、生産高レート化に際し、サイクルタイムを補うためのバックアップ手段として生産ライン並列化のポテンシャルが高い

#### ③ 複雑形状化の観点

- ドライ繊維基材は賦形性が良いため、複雑形状化と内部欠陥（繊維しわ）抑制の両立の観点で有利（①の部品一体化の延長線の技術伸長で対処できる）
- 当社は、過去の開発や社内研究の複合材構造開発において RTM 曲面部品の欠陥を最小化する工法・設計法を確立しており、将来高効率機体の複雑形状部品は本技術をベースに研究開発を進めることができる

#### ④ その他の理由

- 熱可塑成形では熱硬化より成形温度が高温化するため、主翼大型部品で必要とされる厚板を高温で安定的に成形するのは技術難度が高く、また、内部欠陥が発生しやすく許容応力・歪が低いため主翼スキンパネルのような高強度部品には熱硬化材が適している

一方、主翼小型部品（リブ・固定前後縁構造）等については複雑形状や高強度が求められる要素は比較的小さいことから、熱可塑複合材の高速成形と融着による一体化技術の適用も視野に入れた要素開発を進める。

## 5. まとめ

本研究開発では当社が過去に経験した複合材主翼・尾翼の技術確立の過程で培った世界レベルの複合材技術をさらに技術伸長し、新たな市場を開拓することを目指している。

先に述べたように、航空輸送の脱炭素化を進めるためには将来機/狭胴機の複合材化が有力な手段になる。そのなかでも主翼構造の複合材化を実現するためには、狭胴機特有の急峻な形状変化と生産機数の多さに対応することが必須であり、今後の技術伸長が必要である。また、その延長線上でさらに技術を伸長させることが水素航空機等の次々世代の航空機への複合材適用拡大にもつながる。

今後、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）グリーンイノベーション基金事業の助成支援を受けるとともに、東北大学・東京大学による最先端解析技術の知見を借りながら、将来機/狭胴機主翼構造向けの先進複合材技術の研究開発をさらに進めて行く。並行して海外主要 OEM 向けへの働きかけを適宜行い、社会実装に向け、次世代狭胴機の主翼コンポーネント受注を目指していく。

## 参考文献

- (1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、グリーンイノベーション基金事業で、次世代航空機に関する研究開発事業に着手、(2021)  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101488.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101488.html)
- (2) 一般財団法人日本航空機開発協会、民間航空機に関する市場予測 2022-2041、(2022)  
[http://www.jadc.jp/files/topics/174\\_ext\\_01\\_0.pdf](http://www.jadc.jp/files/topics/174_ext_01_0.pdf)
- (3) IATA, Net-Zero Carbon Emissions by 2050, (2021)  
<https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>
- (4) 炭素繊維協会、炭素繊維協会 LCA モデル  
<https://www.carbonfiber.gr.jp/tech/lca.html>
- (5) ATAG, Waypoint 2050, (2021)  
<https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>
- (6) Boeing, Spreading our wings: Boeing unveils new Transonic Truss-Braced Wing, (2019)

---

<https://www.boeing.com/features/2019/01/spreading-our-wings-01-19.page>

(7) Airbus, Airbus reveals new zero-emission concept aircraft, (2020)

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft>