

## 令和3年度 第7回 SJAC 講演会を開催

(一社)日本航空宇宙工業会(SJAC)は、令和4年3月24日(木)、SJAC革新航空機技術開発センター(革新センター)による技術動向調査研究事業の成果報告を目的として、SJAC講演会を開催した。

尚、本講演会は、新型コロナウイルスの感染状況とその影響を鑑み、オンライン開催とした。

### 1. はじめに

革新センターでは、将来出現が予想される高性能の革新航空機を開発するために必要とされる技術について調査及び実用化研究開発等を推進する活動として、革新航空機技術の動向調査を行い、その成果はSJAC講演会を通じて会員の皆様に広く共有している。

### 2. 講演会の概要

今年度の調査項目として取り組んだ革新航空機技術3テーマについて報告を行った。

演題、講師および講演概要は以下のとおり。

尚、当日は26の会員企業及び団体などから69名が参加した。

#### (1) 「BWB (Blended Wing Body) 機やTBW (Truss Braced Wing) 機などの新しい形態機の構造的課題の調査報告」

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門  
航空環境適合イノベーションハブ

有菌 仁氏

近年、温室効果ガスの排出削減に向けた取り組みが世界中で行われ、Tube & Wingよりも空力的効率の高い航空機の形態が数多く提案されているが、構造的な観点では荷重をどのように受けもつかなど、軽量の構造を実現するには課題が多い。BWB機やTBW機など

の新しい航空機形態の構造的課題の調査結果について報告いただいた。(別紙第1)



有菌 仁氏

#### (2) 「高強度軽量新素材の開発の調査報告」

香川 豊氏 (東京大学名誉教授)

航空機を構成する材料の技術開発においては、その更なる高性能化が期待されている。特にエンジンの軽量化や燃焼温度上昇のために、近年使用され始めた軽くて耐熱性のあるセラミックス複合材料(CMC: Ceramic Matrix Composites)を中心とした高性能材料の開発状況の調査結果について報告いただいた。(別紙第2)



香川 豊氏

(3) 「飛行外部環境検知/予測技術の調査報告」

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門  
航空安全イノベーションハブ長

神田 淳氏

航空機運航を取り巻く外部環境のうち、気象現象は航空事故の半数以上で何らかの主要因あるいは背景要因になっており、安全上の大きな課題である。特に影響の大きい乱気流・火山灰・雷・雪の4種類の気象現象の調査結果について報告いただいた。(別紙第3)



神田 淳氏

3. おわりに

多くの参加者から、「次世代技術の情報を整理し掘り下げた話を聞くことは貴重な機会であった」、「テーマが現在の業務内容と関連があり参考になった」、「幅広い知識、情報を収集できた」等の理由で評価をいただいた。

今後も革新センターの活動を通じて、会員企業の皆様方の事業活動において有益となる情報発信を目指していく。

〔(一社) 日本航空宇宙工業会 技術部部长 松田 圭介〕

## 令和3年度革新センター技術動向調査研究

BWB (Blended Wing Body) 機やTBW (Truss Braced Wing) 機などの  
新しい形態機の構造的課題の調査に関する報告書

## 1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出削減に向けた取り組みが世界中で行われており、航空分野においても、ICAOにおいて燃費効率を毎年2%改善することや2020年以降総排出量を増加させないことなどを定めた目標が策定されている。燃費削減の1つの手段として、機体構造の軽量化が挙げられ、これまでは主に金属材料を複合材料に置き換えることにより軽量化を進めてきたが、材料だけでは軽量化の限界に近づきつつある。一方、航空機の形態としては、1950年代にジェット旅客機が登場して以来、いわゆるTube & Wingと呼ばれる形態が採用されており、これまで大きく変化していない。

新しい航空機の形態については数多く提案されてきたが、近年、Tube & Wingよりも空力的な効率の高いBlended Wing Body (BWB) やTruss-Braced-Wing (TBW) などの研究が進められているが、構造的な観点では、荷重をどのように受けもつかなど、軽量の構造を実現するには課題が多い。

本報告では、BWB機やTBW機などの新しく提案されている機体の概要および構造的課題についてまとめる。

## 2. Blended Wing Body機の概要および構造的課題

Blended Wing Body (BWB) 機は、主翼と胴体の境目がなく一体化した航空機形態の1つである。主翼で主に揚力を発生させるTube & Wing機とは異なり、BWBでは胴体でも揚力

を発生させて揚抗比を向上させることができ、燃費を大幅に改善できる可能性のある形態である。また、胴体幅を広く設定可能になるため、Tube & Wing機よりもパイロイドの空間を大きく取ることができるといったメリットがある。

BWB機では、胴体部の上下面の外板がほぼ直線的になるため、平板に近い外板構造で与圧を曲げ荷重として支持することになり、構造効率が大幅に低下する。さらに、主翼や胴体の曲げ荷重が作用するため、複雑な荷重条件においても荷重を効率良く伝達できる構造として設計する必要がある。

BWB機の胴体断面形状としては様々な案が提案されているが、大きく分けて以下の3種類に分類される。

- Integrated Skin & Shell構造：与圧による曲げ荷重を外板構造で支持する方法。従来の設計手法を使えることや胴体内部の空間を有効活用できる点はメリットだが、平板構造で曲げ荷重を取る必要があるため、非常に重量が増える点がデメリットとなる。
- Multi-Bubble構造：円筒形と与圧荷重支持部材で分割する方法。与圧荷重を取る方法としては、最も効果的であるが、与圧荷重支持部材の設計が複雑になる。
- Oval構造：楕円形状で与圧による曲げ荷重を支持する方法。楕円の扁平率が大きくなると構造効率が低下することや、他の形状と比較して内部空間を有効利用できないことなどがデメリットとなる。

### 3. Truss-Braced-Wing機の概要および構造的課題

Truss-Braced-Wing (TBW) 機は、Tube & Wing機の形態で、主翼のアスペクト比を大きくして抵抗を低減することで燃費向上を狙った機体形状で、主翼のアスペクト比が大きくなることによる翼胴結合部の曲げモーメントが大きくなることを防ぐために、ストラットにより荷重を分散させている。

TBW機における構造的課題としては、まず、ストラットの位置および強度設計が重要であると考えられる。また、スパンの増加および翼厚の減少により剛性が低下し、空力弾性特性が悪化すると考えられる。

### 4. その他の新形態航空機の概要および構造的課題

#### 4.1 Double Bubble機の概要と構造的課題

機体形状としては、Tube & Wing機とBWB機の間にあたる機体形状であり、上記で述べたように、Double Bubble機では、胴体の設計が課題であると考えられる。

#### 4.2 水素航空機の概要と構造的課題

近年、世界的に脱炭素化の取り組みが広がっており、航空機においてもこれまでのジェット燃料の代替として水素が注目されている。AirbusやAerospace Technology Instituteにおいて機体形状のコンセプトが発表されている。

水素航空機における構造的課題としては、ジェット燃料と比べてエネルギー当たりの体積が4倍で、マイナス253℃の極低温である液体水素をどのように貯蔵し供給するかが挙げられる。液体水素タンクの設計にあたっては、タンク本体の軽量化、熱設計、内圧の変化、スロッシング等に加えて、機体へどのように搭載するかも含めた多分野統合設計の必

要がある。

### 5. まとめ

本報告では、BWB機、TBW機、Double Bubble機、水素航空機の概要および構造的課題についてまとめた。これまでのTube & Wing機の機体開発では、概念設計から基本設計に進み、空力設計された外形形状に対していかに軽量の構造にできるか、といった観点で既存機の構造様式等を参考にしながら構造設計が進められてきた。しかしながら、新形態の航空機では既存の情報がなく、より高性能な機体とするためには、構造設計のみならず、あらゆる分野が概念設計段階から考案し、設計の初期段階から機体全体を最適化していく必要があると考える。

令和3年度革新センター技術動向調査研究  
高強度軽量新素材の開発の調査に関する報告書

## 1. はじめに

航空機に要求される様々な性能を満たすためには数多くのアプローチがあり、実際に行われているものも多種多様である。その中のひとつに、航空機を構成する材料の技術開発がある。本調査報告書では、このような航空機用材料として、近年使用され始めた材料を対象として調査を行なった。特に、セラミックス複合材料（CMC：Ceramic Matrix Composites）に関して詳細な調査を行うとともに、プラスチック系材料についても今後重要となりうるものについて国内外の最近の文献をもとに調査を行った。

## 2. 報告書の構成と内容

CMCに関する章（第2章）ではCMCの概要と研究開発動向（2.1節）、実用化に欠かせない耐環境コーティング（EBC：Environmental Barrier Coatings）（2.2節）、航空機関連における応用技術（2.3節）、新しい技術分野としてのコンピュータシミュレーション技術の動向（2.4節）を調査した結果を示した。さらに、現時点での諸特性を付録にまとめて示した。第3章ではプラスチック系材料に関するいくつかの技術を取り上げた。

作成においては、CMC関連及び取りまとめを東京工科大学・香川豊教授、EBC関連技術を（一財）ファインセラミックスセンター材料技術研究所・北岡諭副所長、コンピュータ関連技術を一橋大学・七丈直弘教授が担当した。プラスチック系材料に関しては、科学技術ライター・時本扶美氏が調査を行った。全体の取りまとめは（一社）日本ファイ

ンセラミックス協会が行った。

## 3. SiC/SiCに関する研究開発

SiC系の繊維の開発では強度とクリープ特性の両立が大きな課題になっている。Sylramic-iBN繊維のような繊維も製造されているが、現在のSiC/SiCに用いられているものはニカロンSiC繊維とチラノSiC繊維が大多数である。ドイツや中国でもSiC繊維の製造が開始されている。

これまでのSiC/SiCの研究開発では、SiCを作製してその諸特性を測定するという研究スタイルが行われてきた。近年では工業的に用いられるSiC/SiCの製造方法のほとんどがRMI法（溶融Si含浸反応法）であるため、それに伴い、SiC/SiC材料の繊維、h-BN界面コーティング、マトリックスがほぼ決定され、繊維構造を除いた標準的な複合化組織が確定されつつある。製造方法に関してはSi合金の利用による含浸温度低減や金属間化合物生成による未反応Siを極力少なくする試みが行われている。

最近の研究開発は、SiC/SiCを使用するときの問題点を調べ解析する方向に移行しており、従来型の単に材料の特性を測定するという研究はCMC先進国では極めて少なくなっている。そのかわりに高温水蒸気雰囲気下での疲労挙動やクリープ挙動に関する研究が進められている。特に、高温水蒸気存在下での損傷と劣化の機構を解明する研究が多くなっている。SiC繊維とSiCマトリックス間のインターフェイズであるh-BNコーティング層の高温水蒸気存在下での耐久性については様々なモデルが提案され、レーザによるSiC/

SiCの加熱に関する研究なども行われるようになった。

#### 4. SiC/SiC以外のCMCに関する研究

SiC/SiC以外のCMCでは①酸化物系繊維を酸化物マトリックスと複合化したOx/Ox、②力学的機能に加えて電気的機能を付与したものがある。

Ox/OxはSiC/SiCと並んで様々な用途が検討されている。SiC/SiCと異なる点は、Ox/Oxは汎用的なCMCとして、ドイツ、イギリス、アメリカなどで製造されているとともに、国内でも古くから開発が行われ、汎用品として入手できる点である。Ox/Oxに用いられる繊維はムライト系のものが一般的になっている。Ox/Oxの特徴としては、高温保持による酸化物系繊維の劣化現象があり、最大使用温度は～1000℃程度に留まっている。1000℃であっても長時間曝露後には酸化物系繊維を形成する結晶粒の増加により力学特性が低下することなどが観察されている。

電気的機能を付与するCMCは、主にレドームへの応用を目標にしたものであり、BN繊維やSiO<sub>2</sub>繊維を強化素材として用いたものの報告がある。

#### 5. 耐環境コーティング（EBCs）の研究開発

SiC/SiCを航空機用エンジン部品として使用する場合には、高温水蒸気からSiC/SiCを守る機能を持つ耐環境コーティング（EBCs）が必要になっている。ムライトとBSAS（ $1-x\text{BaO} \cdot x\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ）をコーティング層とし、Siを結合層に用いるものが古くから開発されている。近年では、高温水蒸気に加えてCMAS対策も重要になっている。最近では、Yb<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>、Yb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>、ムライトなどを組み合わせたコーティングが開発されている。

#### 6. SiC/SiC及びOx/Oxの応用技術開発

SiC/SiC及びOx/Oxは民間航空機用エンジン製造企業において様々な用途開発が行われている。GE社やSafran社のSiC/SiCシュラウド、パネル、エクゾーストコーンなどへの応用分野を紹介した。最近では、SiC/SiCの動的部品への適用も考えられるようになっている。アメリカで行われているCLEENプロジェクトにおけるCMC関連のものについても紹介した。

#### 7. コンピュータを利用した新しいCMC研究

CMCの新たな技術分野の展開として、計算機技術の応用がある。ここでは、実際のCMC組織のデジタルモデル化技術、コンピュータシミュレーションを利用したSiC/SiCの力学的挙動（損傷）の評価、コンピュータによる大規模なデータ解析と非破壊検査への応用を紹介した。深層ニューラルネットワーク（DNN：Deep Neural Networks）を用いた学習やデジタル・ツインなどのCMC分野に対する有力なコンピュータ技術についても説明した。

#### 8. プラスチック系注目材料技術

航空機への各種プラスチック系複合材料の適用箇所が広がっている一方で、新しい材料技術としての適用可能性が未だ検討段階にあるものもある。現在、複合材料の軽量化・高性能化を実現するために、国内外において数多くの技術開発がされている。極めて多くの研究報告が行われている分野であるため、プラスチック系複合材料に用いられる新材料技術の中から、①炭素繊維複合材の超臨界（SCF）状態を用いた微細発泡成形技術（MuCell<sup>®</sup>）、②ナノカーボン技術、③PEEK等の新材料、を中心として、新規材料技術のもつポテンシャルについて調査した。

## 令和3年度革新センター技術動向調査研究

## 飛行外部環境検知/予測技術の調査に関する報告書

外部環境の中でも特殊気象が航空機運航に大きく影響し、国際航空運送協会IATA (International Air Transport Association) のReportによれば、2016年～2020年の5年間に発生した航空死亡事故の内、実に53%の事例において何らかの気象現象が事故の主要因あるいは背景要因となっている。また特殊気象は運航効率性においても大きな問題となっており、巡航中の悪天域の回避、離着陸時の悪天候による待機、機材の不具合など、特殊気象は運航へ甚大な影響を与えている。航空機運航に影響する特殊気象として代表的なものに、氷（過冷却水含む）、雪、雷、雨（水を含む）、霧、乱気流、火山灰（砂塵を含む）、電磁波（宇宙線）の8種類が挙げられた。さらに、安全性、効率性（運航、整備）の観点から運航会社が直面している航空機への気象影響が33種類あることがわかった。本調査研究では、飛行外部環境として気象環境に焦点をあてることとし、その中で航空機運航に特に影響の大きい乱気流・火山灰・雷・雪の4種類の気象現象を対象とした。この気象現象に対して発生する問題点、論文等の文献調査に基づいた世界の問題解決に向けた研究開発状況、世界に先駆けJAXAで研究開発を実施している最新技術の概要と実証計画について示す。

乱気流事故は、我が国における大型飛行機の事故（2001-2020年）のうち約3分の2を占めている。機体動揺による客室内事故や、機体姿勢が不安定になりハードランディングするなどが代表的な乱気流事故である。現在、一部の乱気流については搭載気象レーダや、

先行機のPIREP (Pilot Weather Report)、主要空港周辺ではドップラーレーダによる乱気流の検知・観測が行われている。米国や欧州では航空機搭載用のライダー開発を行っていたが、実用化には至っていない。JAXAで開発した乱気流検知用ドップラーライダーは、小型光アンプをレーザ光の増幅に用いて搭載性向上を目指したもので、2002年に飛行試験を開始し、2018年には、SafeAvioプロジェクトで開発したドップラーライダーを大型ジェット機（ボーイング777F型機）に搭載して実証している。さらにドップラーライダーをベースとする乱気流検知と突風応答軽減制御を組み合わせた機体動揺低減技術の飛行実証に取り組んでいる。

火山灰がジェットエンジンの熱で溶解し内部で粘着することによりエンジンが全発停止する事故が発生するなど、火山灰はエンジン推力低下・喪失につながる要因となる。現在、電波を用いたレーダ、光波を用いたライダーによって噴出量推定を行い、拡散予測モデルによって測定火山灰の移動予測を行っている。研究としては、後方散乱係数を用いた火山灰濃度推定が行われているほか、観測対象の球形性に依存して特性が出る偏光解消度を用いた火山灰検知、多波長を用いることによってその精度を高める試みが行われている。衛星から見える最上層にある火山灰を対象に、1000km以上にわたって流れていく火山灰の特性・成分分析を、衛星の赤外チャネルデータから行う試みも行われている。しかし、離着陸を行う経路や、圏界面より下層の航空路における飛行可否を、火山灰濃度の観

測値により判断するには、ライダーによる観測が必要となる。JAXAでは航空路の火山灰濃度観測にむけて、火山灰からの後方散乱強度および偏光成分を計測するための航空機搭載用火山灰観測機器の研究開発を進めており、2022年度には鹿児島県桜島周辺で火山灰検知ライダーの機能確認飛行試験を行う予定である。

航空機被雷が発生すると、検査および応急修理によって、次便に遅延が生じることがしばしばある。新しい航空機では炭素繊維複合材の使用率が高くなっており、損傷部分がアルミ材に比べて広がる傾向があることが知られている。また炭素繊維複合材は、複雑な構造をしているため、修理に要する工数や時間が多くなる問題がある。

航空機被雷に対する現状の対策としては、気象庁が配備するLIDENによる観測情報、LIDENなどの観測情報と数値気象モデルによる予測情報を用いた雷ナウキャストが広く用いられている。米国においては、航空機運用のための発雷検知装置として、USPLNやNLDNが用いられている。また雲放電に伴い放射される電磁波をLF帯やVHF帯の受信機で捉える装置が開発されており、米国では一部すでに現業で使用され始めている。さらに数値気象モデル内において電荷分離を模擬し、雲内の電荷分布を直接算出する試みがおこなわれている。JAXAでは、自然雷と異なり航空機自身が誘雷する現象に着目し、空港周辺で利用可能な観測装置によって得られた観測データに基づいて、数キロメートルの空間分解能を有する被雷危険性予測情報を生成する手法の研究開発を実施している。

滑走路上の雪氷は運航上の大きな問題となる。必要滑走路長に対し滑走路長が足りない場合は、ダイバート（目的地変更）や欠航になるため、運航効率が大きく低下する。また

着陸が可能であった場合でも、滑走路が局所的に非常に滑りやすい状態になる状況では、オーバーランなどのインシデントが発生する可能性もある。現在、運航会社は人手によって得られた雪氷情報に基づいて運航方針を決定している。雪氷情報を定量的に得ることが必要とされており、その取得方法や研究が機体メーカーを中心に行われているが、いずれも着陸した機体の運動状況から滑走路状態を推測するものである。一方で、雪氷状態（雪氷厚さや雪質）を直接計測するセンサは無い。JAXAでは、レーザの雪氷内散乱光画像をAIで解析し滑走路上の雪氷状態（雪質・雪厚）をリアルタイムに同定する、埋設型の雪氷モニタリングセンサの開発に取り組んでいる。