

令和6年度 第10回 SJAC 講演会を開催

(一社)日本航空宇宙工業会(SJAC)は、令和7年2月25日(火)、SJAC革新航空機技術開発センター(以下、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SJAC会議室を会場として対面式、及びオンライン参加によるハイブリッド形式での開催とした。

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

今年度は、以下の(1)と(2)の革新航空機技術項目について調査研究を実施し、講演会当日は25の会員企業及び関係団体などから100名(対面3名、オンライン97名)の参加を得て、成果報告を行った。

講演に先立ち、SJAC革新センター 所長 河内啓二(東京大学名誉教授)は、「革新航空機技術開発センターは、その時々の新技術やあまり知られていない重要な技術を調査している。今回も調査された先生方に報告いただき、皆様に新たな気づきがあること期待する」と挨拶した。

(1)「水素燃料搭載技術に係る最新動向の調査研究」に関する報告

講演者：東京大学大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻 教授

横関 智弘 氏

(講演概要は、別紙第1を参照願います)



SJAC革新航空機技術開発センター
所長 河内 啓二



東京大学 横関 智弘 氏

(2)「熱可塑性複合材料構造に係る最新動向
の調査研究」に関する報告

講演者：金沢工業大学 教授、
革新複合材料研究開発センター
所長 鶴澤 潔 氏
金沢工業大学 教授、
革新複合材料研究開発センター
顧問 小田切 信之 氏



金沢工業大学 鶴澤 潔 氏



金沢工業大学 小田切 信之 氏

(講演概要は、別紙第2を参照願います)

3. 所感

今回の講演会は、近年注目されている技術の「水素燃料搭載技術」と「熱可塑性複合材料構造」をテーマに選定し、調査研究結果を会員企業に報告した。聴講者からは、文献、展示会、企業ヒアリング等の調査により、最新動向や今後の課題について網羅的に知ることができたと評価いただいた。

今後も革新センターの調査活動を通じて、会員企業の事業活動に有益かつ有意義な情報発信を継続していきたい。

〔(一社) 日本航空宇宙工業会 技術部部长 松田 圭介〕

令和6年度 革新航空機技術開発センター技術動向調査研究 「水素燃料搭載技術」に関する技術調査研究

東京大学

横 関 智 弘

1. 緒言

輸送部門における二酸化炭素排出量は自動車や貨物車が圧倒的であるが、航空機も輸送部門全体の5%以上を占め、航空需要の増大に伴いその比率は年々増加しており、航空機の二酸化炭素削減対策は必須、急務の状況である。2022年にはICAOにて民間航空による温室効果ガスの排出に関する目標が「排出量の抑制」から「排出量の削減」へと変更された。日本における水素関連技術の優位性からも、水素を航空領域へ活用していく意向も強く、国のグリーン成長戦略でも水素航空機向けコア技術の研究開発が明記され、グリーンイノベーション基金でも水素航空機に関連する技術開発が進められている。

世界においても、水素航空機開発は既存航空機メーカーや各研究機関、スタートアップ企業などで多くの研究開発が進められている。例えば、Airbus社は2035年までにゼロエミッションの航空機を市場に投入するに伴い、極低温水素貯蔵タンクの開発も進めている。また、ZeroAvia社（イギリス）は、水素電動推進システムを搭載したドルニエ228の飛行試験を2024年までに12回実施しており、水素電動推進システムの性能確認を行っている。

水素航空機を検討するにあたり、推進システムの中でも特に水素燃料タンクについては注意が必要である。燃料であるケロシンと水素の物性の違いからくるタンク構造、配置や

サイズ、システム要件、燃料取扱いにおける安全性確保の考え方などが大きく異なってくるためである。例えば、液体水素を燃料とした場合、ケロシンと同じエネルギー量を確保しようとする約4倍のタンク容量が必要となる。従って現行の主翼内部のみではまかないきれず、機体内部もしくは外部にタンクを設ける必要がある。さらには、極低温燃料の場合は断熱方式の検討、燃料のベントシステム、搭載量計測技術、爆発防止措置など数多くの課題が想定されている。

以上のように、水素燃料搭載技術は水素航空機の実現など水素利用技術において重要なテーマであり、近年その需要の高まりを受け多数の研究成果が報告されている。そこで、数年前から今年の間には発表された研究成果の中から最新の研究成果を調査し、報告書の形でまとめた。

2. 水素燃料搭載技術に関する研究の調査

「高圧気体水素の貯蔵タンク構造」、「極低温液体水素の貯蔵タンク構造」、「インテグラルタンク／機体構造との一体化に関する技術」、「水素燃料の補給法」、「安全管理技術」の項目を設定し、近年の数年の論文や学会発表の中から、研究成果を抽出した。

水素タンク構造に着目すると、従来はフィラメントワインディング（以下、FW）製法によるタンク製造が主流であったが、近年は、熱可塑テープの利用、分割成形、非FW

製造法適用などが進められている。液体水素貯蔵は航空機に搭載可能な断熱構造や管理技術に関する課題は未だ解決できる技術は見当

たらない。今後の研究開発の進展が強く望まれる分野である。

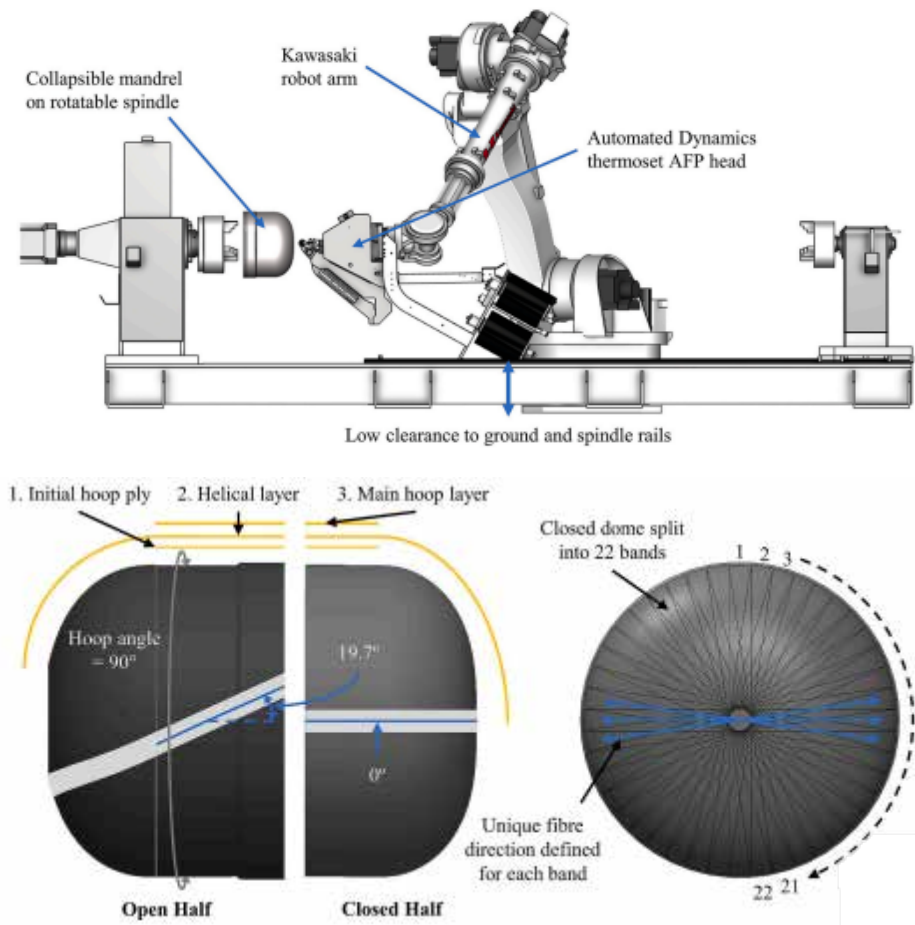


Figure 1 : Manufacturing process for the AFP produced composite pressure vessel..[1]

3. まとめ

水素燃料搭載技術は水素航空機の実現など水素利用技術において重要なテーマであり、近年その需要の高まりを受け多数の研究成果が報告されているものの、水素航空機を実現するための技術課題は未解決なものが多い。一方で地上設備やFC自動車に関する容器については性能向上が図られており、研究開発も盛んであり、タンクの転用や補修性（補修方法や補修後の性能）に関する検討も今後は

必要である。今後も世界各国の研究開発動向を注視していく必要がある。

参考文献

- [1] Air A, Oromiehie E, Prusty BG. Optimisation of a composite pressure vessel dome using non-geodesic tow paths and automated fibre placement manufacturing. *Composites Part B : Engineering* 288 (2025) 111906. doi : 10.1016/j.compositesb.2024.111906.

令和6年度 革新航空機技術開発センター技術動向調査研究 「熱可塑性複合材料構造」に関する技術調査研究

金沢工業大学 革新複合材料研究開発センター (ICC)

鵜澤 潔、小田 切 信 之

1. はじめに

本調査では、航空機の構造部材への適用を目指した熱可塑性複合材料について着目し、

- ・低コスト化、高サイクル化への利用技術、製造コストの低減効果
- ・溶着技術やリサイクル性等の優位性、認証プロセスに係る固有の技術課題
- ・将来の航空機（eVTOL／大型UAV含む）の1次構造適用に向けた研究開発動向

等の観点から、専門雑誌、文献、展示会、インターネットの情報の調査、関連機関・企業の訪問を含めた調査を行った。

2. 熱可塑性複合材料構造の現状分析と調査方針

熱可塑性複合材料全般の動向について、現状分析の元に、

- ・最新の公開情報の収集につとめる事。
- ・比較的情報を公開している欧州地域の情報収集は展示会・講演会から。
- ・北米地域の活動については現地訪問とヒアリングにより情報収集を行う。

以上の方針にて最新情報を得る事とした。

3. 熱可塑性複合材料構造の現状分析

以下の3点から情報収集を行った。

- ①最新の公開情報収集
- ②展示会・講演会から
- ③北米地域の企業・研究機関へのヒアリング

3-1. ①公開情報収集による開発動向分析

ICCが発行する情報冊子「ICC Innovative Edge」の最近2年間（2023年／2024年）のWEBニュースから「熱可塑性樹脂／CFRTP」のキーワードで抽出し、対外発表から見える産業界のアクティビティを分析した。これらのニュースや報告から以下の最新動向が伺える。

- ・ICC Innovative Edgeで取り上げられたWEBニュース全782件中、「熱可塑性樹脂／CFRTP」をキーワードとして検索されたニュース件数は2023年・2024年ともに60件程度で、全体の16%、各分野ともほぼ一定の割合となっている。
- ・材料関連では、PEEKやLM-PAEK等熱可塑性CFプリプレグ製造に関連した帝人・東レの記事が7件あり、航空機構造向けの材料提供にむけた取り組みの動向が伺える。一方で新規の材料開発例の報告は見られない。
- ・成形技術・装置関連では、AFP技術／装置関連よりもパターン積層／コンソリデーション技術などの記事が目立ち、高生産性や実用化を意識している傾向が伺える。
- ・航空機関連では欧州地域の“Clean Sky 2プログラム”関連のニュースが多くを占めている。とくに、MFFD：接合／アッセンブリ技術、WING：スキン／スティフナー一体成形など、製造プロセス／加工技術関連

のニュースが目立つ。

- ・北米地区発のニュースは多くは無いが、材料から製造装置まで広範囲のニュースが散見される。高生産性を目的とした“HiCAMプロジェクト”と関連した動向が伺える。
- ・UAM/eVTOL関連のニュースは少なく、本業界の開発状況を反映していると思われる。
- ・圧力容器／燃料タンク関連で熱可塑性複合材料の関連は、主にタイプVや液体水素貯蔵で、低温特性やリサイクル性に期待している。
- ・特筆すべきはリサイクル関連のニュースであり、23年より24年で急増している。本分野の開発が繊維回収技術から再利用技術へ推移しており、その際、よりサーキュラティ―親和性の高い熱可塑性樹脂の利用を目指している、という動向が伺える。

3-2. 展示会・講演会から

- ・ITHEC 2024@ドイツ、2024年10月9日－10日
- ・ITHECは世界最大の熱可塑性複合材料のカンファレンス／エキシビション。

【技術発表】

- ・“Clean Sky 2プログラム” 関連の報告が多数あり、プロジェクト終了年度からか、実部材の成形や溶着などデモンストレーションに関連する発表が多かった。ATL (Automated Tape Laying) ／AFP (Automated Fiber Placement) や接合技術に関する評価報告では、TRL6を目指したプログラムの中で、自動化技術を含む製造デモンストレーションは達成したもの、In-Situ (その場) コンソリデーションや溶着部の強度確保など、まだ解決すべき課題が残されている事も報告された。

【KEYNOTE 1】

「Tenacity in Thermoplastic Composites – Paving the Way for Large-Scale Adoption」, Steve Cease (Global CTO/U.S. Managing Director, Toray Advanced Composites)

- ・航空機分野において、熱可塑性複合材料開発は、幾つかの実アプリケーションへの採用の積み重ねによって進められてきた。
- ・特に航空機用、大型熱可塑性複合材料構造の開発はいくつかのデモンストレータプロジェクトによって進められて来た。
- ・成形技術関連でキイとなるのは、Laser加熱、超音波積層、部材一体化／溶着技術。
- ・今後にむけて、政府、公試／研究機関、大学、企業間の協業が必要。

【KEYNOTE 2】

「Technology Development for Hi-Rate Composite Aircraft Manufacturing (HiCAM)」, Michael van Tooren (Senior Technical Fellow, Collins Aerospace)

- ・2030年代初頭の輸送機を対象とし、複合材料で毎月80機の航空機製造を実現する。
- ・熱可塑性複合材料の使用、硬化時間を数分に短縮 (OOAの利用も)、組み立て時間の短縮 (硬化前の縫合も)、現場検査、等の技術開発が検討されている。
- ・フェーズ1にてパネルスケールで実証 (TRL/MFL4) する。フェーズ2技術実証は2025年に開始予定。
- ・熱可塑性複合材料では、LASER加熱AFP、Stamp Forming、Welding/Co-Fusion Assembly、Continuous Compression Molding等の成形技術や、塗装技術など
- ・溶着接合による一体化において、プロセス管理と品質保証技術の確立は重要なキイ技術。(欧州／エアバス社の取り組みと異なり、北米／ボーイング社は製造プロセスで品質を管理する概念であり、一次成形され

た部材の再加熱を伴う二次加工／一体化という製造プロセスをどう解釈し保障するか?)

【展示】

- ・航空機分野では、初期の抵抗加熱溶着技術（エアバスJノーズ等）や電磁誘導加熱溶着（Fokker社）から、近年は、超音波加熱を利用した溶着（Clean SKY 2）とそのバリエーションが拡大しているが、超音波溶着の実用化はまだ多くの技術開発が必要。
- ・電磁誘導加熱や超音波加熱の基礎研究は近年も継続的に取り組まれており、とくに超音波加熱技術は移動式連続加熱装置やパネル加熱装置など、新規の技術開発が盛んな印象を受けた。
- ・JEC World 2025@フランス、2025年3月4日－6日
- ・JEC Innovation Awardsでは、選出されたFinalistsから最新の開発状況や市場動向を知ることができる。
- ・2024年より前は、内装やシート、成形プロセス技術が多かったが、2025年ではより具体的な構造／適用品に関連する案件が見られた。

【MFFD】

- ・航空機分野部門から、Clean Sky 2の熱可塑性複合材によるMFFD（Airbus社）がアワードを受賞した。
- ・MFFDは、8m × 4m の大きさを持つ熱可塑性複合材料で作られた世界初かつ最大のR&Tプラットフォームとして、熱可塑性の利点である溶着／接合技術によるダストレス接合技術がトライされている。
 - 材料はLM-PAEK/CFを適用。
 - 上部胴体はドイツ側の連携が、下部胴体はオランダ側の連携が、担当。
 - 上部胴体スキンの成形にはIn-Situ（その場）コンソリデーション（AFPT（Automated

Fiber Placement Technology）製の熱可塑性テープ用AFPによる）が適用された。

- スキン／ストリンガー間の接合には超音波連続溶着（上部胴体）。
- リングフレームの接合には抵抗溶着（上部胴体）と、射出成形クリップを用いた超音波溶着（下部胴体）。
- 上下胴体のアッセンブリは、超音波溶着（胴体右側）と、接合用ストラップのレーザー加熱溶着（胴体左側）による。

【その他航空機部門のFinalists】

- ・熱可塑性複合材製エンジンExit Guide Vane（Competence Center CHASE GmbH（オーストリア））
- ・誘導溶着された熱可塑性トーションボックス（DAHER（仏））
- ・CFRTP製胴体表面パネルの革新的プロセス（川崎重工業（日））

【2024年以前のその他航空機部門のFinalists】

- ・Thermoplastic Composite EBAY DOORアッシー（2024）、ASPERA Welded Thermoplastic Composite Demonstrator（2024）、Integrally stiffened TP primary structure（2023）、Hydrostatic Membrane Press Technology（2023）

【展示会場から】

- ・熱可塑性複合材料に関連する展示としては、以下の動向が伺える。
 - 航空機関連の展示としては、適用品の展示（GKN：MFFD、DAHER：熱可塑性トーションボックス、等）が増えた印象。
 - 自動車分野の展示からは、熱可塑性複合材料のオーバーモールドイング技術に代表される適用技術の熟成が進んでいる様子が確認できる。
 - 水素貯蔵タンクの展示は近年増加している中で、熱可塑性材を用いた展示も増加している。理由はリサイクル性から。

- リサイクル関連の展示は、繊維回収技術よりも回収繊維の加工技術関連が多く、さらに熱可塑性複合材料として利用／製品化を目指している例が多かった。

3-3. 北米地域の企業・研究機関へのヒアリング

- ・ 2025 Transformative Vertical Flight meeting@北米、2025年2月4日－6日
- ・ eVTOLやUAV等の垂直浮上機に関する世界的規模のカンファレンスであり、本カンファレンス参加を通して、UAM/AAM業界における熱可塑性複合材料の動向につき調査した。
- ・ 業界構造の特徴と動向については、
 - UAM/AAM分野に大手からスタートアップまでが参入し、一時は500社とも800社ともいわれるメーカーが発足した。現在も400社／1000モデル程度が存在するが、ペーパーカンパニーも多く、実際に生き残って開発を進めているのは現在60社前後と見られる。
 - 機体構造にCFRPを適用することは自明とされているが、殆どが熱硬化性複合材料で設計・試作を開始しており早期TC取得を目指している。需要が拡大し、100機／年を越え、1,000機／年レベルになると熱硬化のサイクルタイムでは対応できず、熱可塑性複合材料に転ずると見込まれる。
- ・ GKN Aerospace (@ITHEC 2024)、Joby Aviation (河村氏より)
 - ・ UAMメーカーのなかで、最も先頭を走っているのは米国のJoby Aviation。将来の量産時の生産速度を睨んで既に熱可塑性複合材料構造を取り入れている。
 - ・ 軽量化を狙い、オートクレーブを使わない成形法をGKN Aerospaceと提携し、2023年6月に開発推進に着手した。
- ・ 米国Wichita大NIAR (National Institute for Aviation Research) に設立されたATLAS (Advanced Technologies Lab for Aerospace Systems) では、JOBYのTip Ribを対象とした熱可塑性部材成形プロセス検討を開始している。Hybrid-Thermoforming, Injection overmoldingを適用し、完全自動化を目指している。現行品はアルミからの削り出しで成形に100時間かかっているが、これを2分に短縮するという。
- ・ 北米地区 (ワシントン大、Boeing BR&T SC、Toray Advanced Composite 等)
 - ・ 北米地区 (カルフォルニア州、サウスカロライナ州、ワシントン州にて、現地大学／企業の研究開発の従事者にヒアリングを行い、以下の情報を得た。
 - ・ 米国Toray Advanced Composite社がUAM向けに紹介した製品群は、汎用のPP、PAから耐熱レベルの高いPEEK、LM-PAEKまでが揃ってきた。成形性を容易にするための流動性向上にも進歩が認められる。また、内装材への展開も狙ってPESU樹脂も提案されている。
 - ・ 民間航空機レベルまでを対象に、有識者から後の展望と課題をヒアリングした。
 - 大型の民間航空機では、まずは胴体frameのような小型複雑形状の適用が有力
 - 未解決課題はWarping (そり)、Finishing (表面塗装) といった実装時の実用的なpain point。
 - 熱可塑性樹脂の大きなメリットは溶着接合ができること。接着剤やリベットでの締結より大幅に工程を短縮できる。しかし溶着の結果が「接着」になるか「材料の一部」になるのかでは大きな違いがある。「接着」ではその良否を判断する必要があるが生じ、requirementが膨大になる。一方、「材料の一部」になるのであれば、接合

部分には材料特性そのままが適用されるので、良否の判断に要するrequirementは少ない。依然としてこの議論に決着はついていない。

- ・2025年1月、米国ワシントン州／アイダホ州にまたがる地域に「Spokane-Coeur d'Alene Aerospace Tech Hub」が誕生し、連邦政府から予算（\$48M）がついた。熱可塑性複合材料の世界トップクラスの製造テストベッドを構築（含トレーニング・センター）し、大規模・高性能な装置で、高速製造を実現するというもの。TRL7-9の成熟度領域が対象。製造の海外下請けへの流れを逆転させ、外国の技術と製造能力への依存度を下げ、世界トップの航空宇宙部品サプライヤーとしての米国の地位を取り戻す、を掲げている。今後が注目される。

4. まとめ

①専門誌／WEBニュースによる公開情報から、

- ・材料や製造技術、航空機・自動車・压力容器、およびリサイクル関連等、様々な分野に一定の割合（16%程度）で熱可塑性複合材料に関する情報が発信されている。
- ・航空機向けの熱可塑性樹脂系材料としては、新規材料の出現はなく、主構造用材料としては、PEEK、PEKK及びPAEKの3種類が検討されている。近年はLM-PAEK材料によるプリプレグ製造が拡大しているが、AFP等の自動積層技術関連の情報は見られず、欧州地域の「Clean Sky 2プログラム」関連のニュースが多くを占めている。
- ・リサイクル関連の情報が急増しており、その傾向はJECの展示からも確認できる。

②低コスト化・高サイクル化への利用技術、製造コストの低減効果

- ・熱可塑性樹脂プリプレグのAFP積層による高

レート製造は実現していない。（In-Situ（その場）コンソリデーションが後工程不要な技術として期待されていたが、結晶化速度の問題等から高スピード積層ができないため、積層後の後工程でコンソリデーションを行うプロセスを用いている。）

- ・Clean Sky 2プロジェクトでは、溶着によるダストレス接合による組み立技術の開発が、HiCAMプロジェクトでは、熱可塑性材料の連続プレス成形やスタンププレス成形および溶着接合により月産80機の実現を目指している。

③溶着技術やリサイクル性等の優位性、認証プロセスに係る固有の技術課題

- ・溶着技術は、熱可塑性複合材料の特徴を生かす技術であり、接着剤やリベットでの締結に比べて大幅に工程短縮ができる、とのコメントを得た。しかしながら、Clean Sky 2プロジェクトで検証された接合技術の多くは、実用化以前の段階にある。特に一次成形された部材の再加熱を伴う二次加工／一体化という製造プロセスをどの様に保障するのか？その認証プロセスへの取り組みは、今後の課題となっている。

④将来の航空機（eVTOL／大型 UAV 含む）の1次構造適用に向けた研究開発動向

- ・「Clean Sky 2プログラム」および「HiCAMプロジェクト」ともに、単列通路のナローボディ旅客機を想定している。とくに「HiCAMプロジェクト」は、熱硬／熱可塑両面から「Affordable, high-rate composite manufacturing tech」の開発に取り組んでいる。
- ・eVTOL／UAV分野について、
- 機体構造にCFRPを適用することは自明とされているが、殆どが熱硬化性複合材料で設計・試作を開始しており早期TC取得を目指している。

- 需要が拡大し、100機／年を越え、1,000機／年レベルになると熱硬化のサイクルタイムでは対応できず、熱可塑性複合材料に転ずると見込まれる。
- Joby Aviation、Jaunt Air Mobilityなど僅かが、認定取得／量産立ち上げ時の生産数をサポートする生産速度を睨んで熱可塑性複合材構造を取り入れている。

参考文献／記事

- Composites World
- SAMPE JOURNAL
- JEC Composites Magazine 等
- ITHEC2024：Conference Proceedings
- JEC WORLD 2025：展示会・INNOVATION AWARDS