

30-4 航空機複合材部品の自動積層技術の動向

1.はじめに

航空機の複合材構造の適用範囲拡大と需要増による生産レート増加に対応するため、複合材料部品の主要工程である積層工程の自動化が重要な研究開発テーマとなっている。本稿では、航空機用複合材部品の自動積層技術について、その動向を解説する。

2.自動積層技術に対する研究開発の背景

2.1 航空機構造への複合材料適用の拡大

炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastic）をはじめとする複合材料は比強度、比剛性に優れることから、航空機の構造材料として 1970 年頃から採用され始め、現在では一次構造材料として用いられている。航空機に複合材料を用いることにより金属を用いる場合に比べて以下のようなメリットがあり、これらの利点を背景に、近年、航空機構造材料として複合材の適用拡大が急速に進んでいる。例えば構造重量に占める複合材料の重量割合は Boeing 787 型機では 50%に、Airbus A350 型機は 53%に達する。(図 2.1-1、図 2.1-2 参照)

(1) 運航上のメリット

- ①比強度が向上するため、構造重量軽減により燃費が向上し、運航コストの低減が期待できる。また、航続距離の増加により長距離路線の設定が容易になる。
- ②耐疲労性・耐腐食性が向上するため、点検・オーバーホールの回数を少なくすることができ、整備コストの低減が期待できる。また、客室内の湿度を高く設定でき、快適な旅客輸送の実現が期待できる。

(2) 製造上のメリット

一体成形が可能なため部品点数を低減でき、組立コストの低減が期待できる。

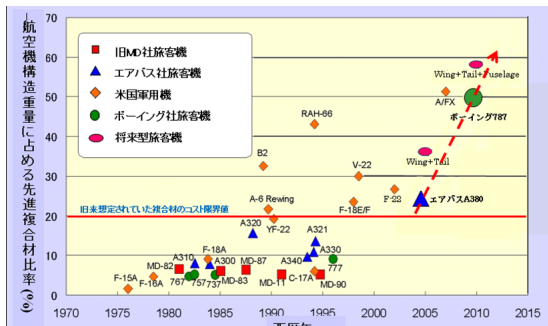


図2.1-1 航空機構造重量に占める複合材料の重量割合の推移¹⁾

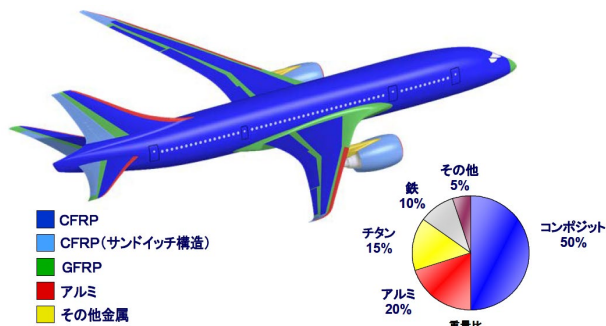


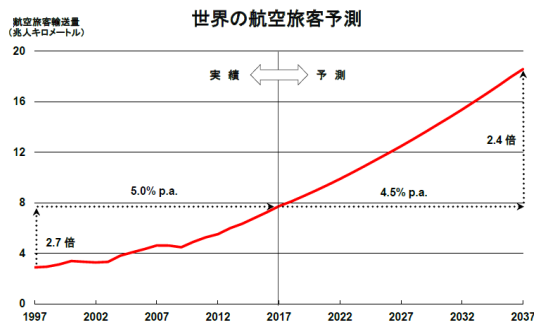
図 2.1-2 787 型機における適用材料の重量割合²⁾

図が小さく読みにくい場合は、必要に応じて拡大して見てください。拡大に耐えられる解像度にしてあります。

また、複合材料の適用範囲は CFRP を中心に今後も更に拡大していくと予測されており、将来的には軍用機：40～50%、大型民間機：25～60%、ビジネス機・ヘリコプター：70～80%まで適用されるとの見方も示されている³⁾。

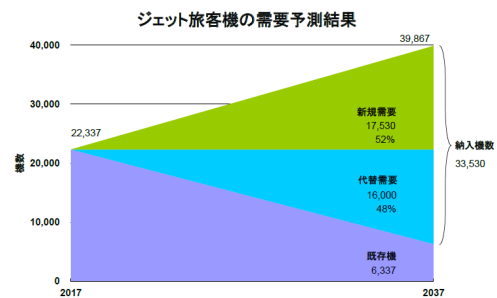
2.2 航空機需要の増大と生産レートの増加について

一般財団法人 日本航空機開発協会 (JADC) の予測によると、1997 年から 2017 年の 20 年間で航空旅客輸送量は 2.7 倍に拡大し、2017 年から今後 2037 年までの 20 年間で 2.4 倍に拡大すると予測されている。これに伴い、ジェット旅客機の需要も今後 20 年間で 33,530 機の需要があるものと予測されている⁴⁾ (図 2.2-1、図 2.2-2 参照)。



出所：(一財) 日本航空機開発協会

図 2.2-1 世界の航空旅客予測⁴⁾



出所：(一財) 日本航空機開発協会

図 2.2-2 ジェット旅客機の需要予測⁴⁾

例えば、現状での一次構造への複合材の適用は限定的であるが、A320 型機について Airbus 社では 2016 年の月産 42 機を 2019 年中ごろに 60 機に引き上げるとされている⁵⁾。また、Boeing 社でも 737 型機について、2014 年の月産 42 機を 2017 年に 47 機に、2018 年には 52 機に増加するとされている。

以上を背景として、高い生産レートに対応可能な航空機構造用複合材料の製造技術が今後ますます求められると考えられる。

3. 航空機構造用複合材部品の製造方法

3.1 複合材適用の機体構造について

複合材が構造重量の半分近くを占めるような旅客機では、主翼構造はもちろんのこと、胴体、尾翼、動翼類の構造に至るまで、各箇所に複合材が使用されている。このような航空機に使用される複合材は、主として CFRP であり、主にスキン・ストリング構造として用いられる。また、表面板に CFRP を用いてハニカムコアへ接着しハニカムサンドイッチパネルとして用いられる場合もある。

3.2 航空機構造に使用する複合材部品の製造方法について

一般的な航空機用 CFRP 部品の製造方法は、高強度を確保するために、プリプレグ (Pre-preg、Pre-impregnated の簡略表現) と呼ばれる、炭素繊維に未硬化の樹脂 (エポキシ樹脂が一般的に用いられる) が含浸された中間基材を積層後、その積層物をナイロン

バッグ等でバギングを行い、オートクレーブという温度と圧力を同時に付与することが可能な設備にて樹脂を硬化させる手法をとっている。硬化後、部品寸法に外周トリムを実施し超音波探傷等の非破壊検査を行う。

3.3 航空機構造に使用する複合材部品の自動積層について

プリプレグの積層工程は従来、作業による手作業に依存し、部品製造の中で比較的大きな作業時間の割合を要していた。そのため、1970年代から積層の自動化が研究されてきており、787型機やA350型機の製造においては、胴体、主翼等多くの部位に適用されるようになった。自動積層技術を適用することにより、プリプレグのカット、カットしたシートとの並べ替え、及び積層作業等を装置による自動積層に置き換えることが可能となり、成形品品質の安定化、及び、加工費用の低減が図られている。

ここで、航空機構造に使用する複合材の代表的な自動積層の方法として、FW(Filament Winding)法、ATL(Automatic Tape Lay-up)法、AFP(Automated Fiber Placement)法が挙げられる。それぞれの方法について概要を以下に示す。

(1) FW 法

強化繊維をマンドレル（巻付け型）に巻き付けて成形する方法をいうが、繊維の巻き付け直前で樹脂を含浸させる方法、予め樹脂を含浸させた長繊維プリプレグを用いる方法、及び、繊維巻き付け後に樹脂を含浸する方法がある。

FW法は筒形状部材の成形に適し、航空宇宙用途としてはエンジンナセル、ロケットモーター等、産業用途としては高圧容器やパイプ（配管）が主な対象製品である。

(2) ATL 法

ATL法は3インチ～12インチ幅のプリプレグテープ材を平面状に積層する手法である。1970年代から開発され、比較的単純な形状の部材の積層に用いられ、平面状に積層する部材においては特に高い生産性を達成する。

また、ATLで平面積層した硬化前の積層材を所望の形状に切り出し、ホットドレープ法等により平面とは異なる形状に賦形する成形方法が知られる。ATLは1960年代にVought、Grumman、General Dynamicsといった会社により開発された技術に端を発するとされる。その後、Cincinnati-Milacron、Ingersoll Milling Machine、Vectronix、Goldsworthyといった会社によりさまざまな仕様の装置が開発された⁶⁾。現在の主なメーカーとしてはFives Cincinnati社、Forest Line社、Mtorres社等がある。

(3) AFP 法

AFP法は、プリプレグを繊維方向にテープ状に切断したスリットテーププリプレグ（一般に1/8インチ～1/2インチ幅、トウと呼ばれる）を複数本並べて積層する手法であり、3次元曲面を有する部品でも積層出来る。そのため、航空機胴体など比較的曲面の多い部品を製作することに適している。また、プリプレグの廃材率を小さく抑えることができるため、近年多用される方法となってきた。国内でも川崎重工業㈱が787型機胴体スキンの積層に海外製のAFP装置を適用している実例が挙げられる。

主な AFP 装置メーカーとしては Fives Cincinnati 社、Ingersoll 社、Electroimpact 社、Mtorres 社等がある。なお、最新の AFP 装置の中には、ハニカムコア上への直接プリプレグ積層に対応できるものもある。AFP 法は 1980 年代から研究されてきて現在はまだ発展の余地があり、典型的な航空宇宙部品には AFP がより適していると考えられている⁷⁾。

4. 近年の自動積層技術の動向について

これまで見てきたとおり、航空宇宙分野における自動積層技術としては AFP 法が着目されている。

AFP 装置については、海外メーカーによる開発が先行しており、大型部品を対象とした熱硬化性樹脂プリプレグの積層に対し、787 型機や A350 型機用の自動積層装置として適用されているが、生産性の向上や関連する工程の改良など、さらなる発展の余地があり、複数社が開発に鎬を削っている。

(1) 自動積層装置の改良

装置の改良による生産性向上の一例として、チェンジャブルヘッド型の AFP 装置が挙げられる。AFP 装置は運用中に積層ヘッドの清掃及び材料交換のために装置を停止させる必要が生じる。このような作業をオフラインで実施することにより積層工程の所要時間を短縮することが可能となる。そのために、複数台の積層ヘッドを用意し、1 台のヘッドで積層中にオフラインで別のヘッドの材料交換等を実施することが可能な装置が開発されている。このような装置では、ヘッドの交換を実施できるよう積層ヘッドに材料を把持させる機構となっている。

さらに、1 台の装置で異なる材料の積層（テープとトウ、異なる幅のトウ等）も可能となり、ATL ヘッドと AFP ヘッドを交換可能とした装置も見られる。

(2) 積層検査の自動化

通常、航空機用複合材の自動積層においては、成形品品質を確保するため、1 層積層するごとに積層検査を実施する。この検査時間が AFP 工程の所要時間の 20%以上を占めるとされ、その時間短縮のために検査工程の自動化の研究がなされている⁸⁾。具体的には、レーザー光により積層したトウのラップ・ギャップ（積層したトウ同士の重なりや隙間）を計測するものなどが考案されている。

(3) プリプレグ-オートクレーブ工法以外のプロセスへの適用

生産レートの向上及び製造コスト削減を目的に、脱オートクレーブの動きが見られ、この動きに対応するための自動積層技術の開発も進められている。例えば、自動積層の対象材料として、これまでの熱硬化性樹脂プリプレグだけでなくドライ材料や熱可塑性樹脂プリプレグを対象とした自動積層技術の研究開発や一部実用化がなされている。

① ドライ材料の自動積層

ドライ材料を用いた製法は RTM(Resin Transfer Molding)成形法や VaRTM(Vacuum assisted RTM)成形法により低コスト化を図る製法であり、ドライ材料のプリフォームの作成に自動積層を適用する例が見られる。ロシアの Irkut MS-21 の複合材主翼の製造に

Mtorres 社製の自動積層装置が適用されている。

②熱可塑性樹脂複合材の自動積層

短時間成形・溶着組立が可能な熱可塑性複合材を航空機に適用する研究も進められている。その一環として、欧州の Clean Sky プロジェクト等を通じて熱可塑性樹脂複合材を自動積層する技術も産・官・学を挙げて研究されている⁹⁾。

また、熱可塑性樹脂複合材料特有の技術としては、ダイレクトコンソリデーションと呼ばれる、積層中に熱可塑性樹脂プリプレグを急速加熱軟化、加圧することで積層と同時に成形まで実施する技術も研究されている。ダイレクトコンソリデーションを適用することにより、オートクレーブ作業が省略出来るため、製造サイクル及びコストの削減を目標として欧米を中心に研究開発がなされている。ただし、現状では成形品品質を確保する技術的難易度の高さ及び生産性（積層・成形速度）の低さがネックとなり、航空宇宙分野での量産部品への適用には至っていない。

5.まとめ

航空機の複合材料構造の適用範囲拡大と需要増による生産レート増加に対応するため、複合材料の自動積層が重要な研究テーマになっている。本稿では、この産業界の課題に対応するための航空機用複合材部品の自動積層技術について国内外の動向を解説した。

航空機の複合材部品の製造に適する自動積層技術として、近年、特に AFP 法が着目され、787 型機への量産適用により AFP 装置を用いた自動積層技術が急速に進展し、A350 型機の量産にも適用されている。

現在では、AFP 装置のチェンジャブルヘッド化等の自動積層装置そのものの生産性の向上に加え、積層検査の自動化等の自動積層工程全体における生産性の向上も研究されている。また、ドライ材料や熱可塑性樹脂複合材料といった適用材料・プロセスの拡大による、更なる生産性向上や低コスト化も研究されている。

このように自動積層技術は複合材部品製造の中核を成す技術・装置であり、将来に向け日本でも研究開発を強力に推進する必要があると考える。

参考資料

- 1) 公益財団法人航空機国際共同開発促進基金，【解説概要 23-2】「複合材の航空機適用への課題と国際競争力強化」，P.2 より元図抜粋
- 2) 公益財団法人航空機国際共同開発促進基金，【解説概要 19-2】「航空機材料としての炭素繊維適用の動向について」，P.5 より元図抜粋
- 3) 一般社団法人日本航空宇宙工業会，平成 30 年版 日本の航空宇宙工業，P216～P212
- 4) 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 2018-2037」
- 5) Airbus 社 Web ページ（2015 年 10 月 30 日）
<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2015/10/airbus-to-boost-a320-production-to-60-a-month-in-mid-2019.html>
- 6) "Advanced Composites Manufacturing", 1997, Gutowski
- 7) Composites: Part B 43(2012)997-1009 "The engineering aspects of automated

▶ 解説概要一覧に戻る

この解説概要に対するアンケートにご協力ください。

▶ アンケート開始

prepreg layup: History, present and future", Dirk H.-J.A. Lukaszewicz, Carwyn Ward, Kevin D. Potter

- 8) "Automated In-Process Inspection System for AFP Machines", SAE International 2015-01-2608, Joshua Cemenska, Todd Rudberg, and Michael Henscheid, Electroimpact Inc.
<https://pdfs.semanticscholar.org/5329/3de9f20f954345fb69fbd512b05d712a7a00.pdf>
- 9) Composite World Web サイト
<https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composite-demonstrators-eu-roadmap-for-future-airframes>