航空機機体の製造技術*

Manufacturing Technology of Aircraft Airframe Structure

中島正憲**

Masanori NAKAJIMA

Key words CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics), drill

1. はじめに

近年、航空機は環境適合性および高性能化の要求にともない、これまで主要材料として適用されてきたアルミ合金に比べ、比強度（重量当りの強度）/比弾性率（重量当りの弾性率）の高い炭素繊維樹脂強化複合材 CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）の使用率が、増加の一途をたどっている。また、CFRP の使用率の増加にともない、チタン合金の使用比率も上がっている。しかしながら、CFRP とチタン合金のいずれも、材料自体が高価であるとともに難削材である。

本解説では、航空機に使われている材料の変遷および代表的な複合材部品の製造方法を紹介するとともに、難削材である CFRP に対する、穿孔技術について紹介する。

2. 航空機に使用される材料の変遷

航空機において、複合材料 CFRP の使用率が増加しており、その割合は、現在開発中の Boeing787 型機において、構造重量の 50% にも達している（図 1）。また、エアバス社が開発中の A350XWB においても同様に高い CFRP 化が計画されている。図 2 に現在運用中の民間航空機に使用される材料割合を示す。CFRP の使用率の増加は、年代ごとに増加傾向を示し、これは、航空機に求められる性能向上に対し、機体軽量化が必要不可欠であることを意味している。近年、特に省燃費化を実現するために CFRP の適用は重要な技術となっている。CFRP の特徴である、比強度/比弾性率の材料比較データを図 3 に示す。

航空機に使用される材料の変遷を振り返ると、古くは、

木材、羽布貼り、鋼管材等、さまざまな構造様式、工夫によって、性能向上への挑戦がなされていた。その後、アルミ合金であるジュラルミンの発明以降、アルミ合金の材料特性の向上は、航空機の発展に大きく貢献してきた。アルミ合金は加工性に優れ、多くの加工法が開発され、航空機の製造に適用されている。近年では、CFRP の使用率の増加に伴い、チタン合金の使用率も増加している。これは、アルミ合金と CFRP を接触させると局部電池を形成してプラス側のアルミ合金がイオン化し腐食を促進してしまう等、相性が悪いためである。しかしながら、チタン合金

図 1 Boeing787 型機における材料の構成割合

図 2 民間航空機に使用される複合材料の割合

*原稿受付 平成 21 年 6 月 10 日

**富士重工業株式会社航空宇宙カンパニー研究部材料研究課（栃木県宇都宮市陽南 1-1-11）

中島正憲

1989 年豊橋技術科学大学大学院生産システム工学課程修士課程修了。同年富士重工業株式会社入社。現在、航空宇宙カンパニー研究部材料研究課課長として、航空機全般の材料、プロセスの開発総括に従事。

は、高価でかつ難削材であるために、加工法や切削工具の開発が盛んに行われている¹⁾。将来的には、航空機の高速度化、宇宙往還機等への適用を考えると、耐熱材料や遮熱/断熱システムの開発が期待されている。

3. 複合材部品の製造方法

一般的な複合材 CFRP 部品の製造方法は、高品質を確保するために、プリプレグと呼ばれる、炭素繊維に未硬化の樹脂（エポキシ樹脂が一般的）が含浸された中間基材を、作業者が手作業で積層、もしくは、自動積層装置（Automated Tape Laying Machine, Automated Tape Placement Machine）で積層後、その積層物を副資材と呼ばれる CFRP 部品の製造を補助する材料であるナイロンフィルム等で真空バギングを行い、オートクレーブという圧力と温度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、超音波検査等の非破壊検査を実施し、部品が健全であることの保証を経て、航空機の部品として使用可能となる。複合材 CFRP 部品の製造工程概要を図 4、真空バギング例を図 5 に示す。

プリプレグの積層工程は、従来、作業者の手作業に頼っていたが、近年の自動積層装置は、高速化と複雑形状への対応が可能となり、Boeing787 型機の製造において、胴体、主翼等多くの部位に適用されている。自動積層装置は、Cincinnati 社、M. Torres 社、Forest-Line 社等にて製造されている。

硬化後の積層物（CFRP）は、難削材であるために、そのトリムにおいては、電着ダイヤモンドビット工具や超高圧水に研磨材を混入させ噴射するウォータージェット切断機を使用している。

その他の複合材 CFRP 部品の製造プロセスとしては、オートクレーブを用いず、炭素繊維織物等を型にセットし、その型に樹脂を流し込み、部品を製造する RTM

図 3 比強度/比弾性率の材料比較

図 5 真空バギング例

図 4 複合材 CFRP 部品の製造工程概要

(Resin Transfer Molding), VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) という製造方法が検討されている²⁾。また、現状使用されているエポキシ樹脂等の熱硬化性樹脂と比較し、高靱性、リサイクル性、量産性等の特徴を有する熱可塑性樹脂複合材 CFRP が注目されている³⁾⁴⁾。熱可塑性樹脂複合材は、樹脂の可逆性変化を利用し、金属板金加工と同様なスタンプ成形が可能であり、金属材料溶接のように抵抗融着接合が可能である。Airbus 社では、「TAPAS」と呼ばれるオランダ航空宇宙産業会との共同プロジェクトにおいて、熱可塑性樹脂 CFRP の使用率拡大を検討している。

4. CFRP の穿孔技術

4.1 CFRP の穿孔に対する注意事項

CFRP は金属に対して大きく異なる性質を有する難削材であり、近年の CFRP 自体の高強度化、高靱性化に伴い、さらに加工性が悪化してきていることから、CFRP の穿孔は、一般的な注意事項に加え、下記 3 項目の課題に対する配慮を十分に行うことが必要である。

① 炭素繊維のほつれ（以下デラミネーションと呼ぶ）

穿孔時に発生する切削荷重、特にスラスト方向の切削荷重は、炭素繊維同士を剥離させる方向に作用し、デラミネーション（図 6）を発生させる要因となる。また、炭素繊維は硬く加工性が悪いため、ドリル切刃を著しく磨耗させ、この切刃の磨耗の進展がデラミネーションの発生を助長する。

② 孔内面の面粗度

積層されている炭素繊維の配列方向は、設計仕様に従い各積層で異なっている場合が多く、特に炭素繊維の配列方向に対してドリル切刃の切削方向の角度が比較的鋭角となる箇所は、ドリル切刃の円周方向の切削力により炭素繊維を孔円周方向に引き剥がす方向に作用し、「むしれ」（図 7）を発生させる要因となる。その結果、孔内面の面粗度

図 6 穿孔による CFRP のデラミネーション例

悪化につながり、また、ドリル切刃の磨耗は、むしろ発生を助長する。

③ 穿孔時の加工温度

CFRP は金属材料に比べ熱伝導率が低い（表 1）ため、穿孔時の切削熱は刃先に蓄積する傾向が大きく、切削熱により高温となったドリルが穿孔時にワークへ接触することで CFRP の樹脂が軟化する。穿孔時、ドリルに蓄積された切削熱による CFRP の樹脂劣化と、軟化した樹脂がドリル溝に付着することを防止するため加工温度を一定値以下とすることが必要である。

4.2 新形状ドリルの開発⁶⁾

富士重工株式会社航空宇宙カンパニーは、上述した CFRP の穿孔特性を踏まえ、新形状ドリル（以下、R ドリルと呼ぶ）の開発を行った。R ドリルの概略図を図 8 に示す。

R ドリルは形状的な特徴から下記のような効果が得られる。

① ドリル角部の切削負荷分散によるドリル耐久性の向上
従来のドリルでは、ドリル切刃角部に切削負荷が集中するため耐チップング性が低いが、R ドリルでは先端部以外に角が存在しないため、切削負荷集中が起らず耐チップング性が高い。そのため、ドリル切刃の偏磨耗を抑制でき、ドリル材質をより硬い（靱性の低い）ものとすることも可能となりドリル耐久性を高めることができる。

② ドリル切刃長増加に伴うドリル寿命の向上

R ドリルは従来のドリルに比べドリル切刃長を長く設定することができるため、ドリル切刃に作用する切削負荷の平均値を低く抑え、ドリル切刃の磨耗進行を抑制しドリルの耐久性を向上することができる。

③ CFRP のデラミネーション防止

R ドリルは先端部以外に角が存在しない滑らかなドリル切刃を形成していることから、CFRP のデラミネーションの発生を抑制することができる。

さらに、R ドリルは先端角および逃げ角がドリル中心部

図 7 孔内面の面粗度

表 1 熱伝導率⁵⁾

材料名	熱伝導率 [W/m・K]	備考
CFRP	3.5~4.1	
ステンレス	15.0	SUS304
チタン合金	7.9	Ti-6Al-4V
アルミ合金	116.3	A5052

図8 Rドリルの概略図

から最大径部に向けて連続的に減少する形状としたので、ドリル中心部付近はドリルの形状、最大径部に向け連続的にリーマ的形状へと変化するもので、ドリリング（孔あけ）からリーミング（リーマ仕上げ）までを1回の穿孔作業で行うことができる（図9）。

上述のRドリルをベースに、富士重工株式会社航空宇宙カンパニーとマコトロイ株式会社で開発した最新のドリルは、従来の多結晶ダイヤモンドドリルと比較して、5倍

図9 Rドリルの特徴

の切削速度で、加工長さ換算で工具寿命6倍の穿孔が可能となる。

5. おわりに

将来の航空機を考えると、さらなる環境適合性の向上および高性能化が求められる。その要求を満たす材料の開発およびプロセスの開発が期待されるが、要求が高ければ高いほど、今回紹介した、CFRPの穿孔技術のように、2次加工の難易度も高くなるため、今後は、2次加工の方法、工具等の開発に対しても力を入れる必要がある。

参考文献

- 1) 平畑雅芳:「MAG/T4」によるチタン部品の高能率加工, 機械と工具, 5 (2009) 23.
- 2) 長山和樹: CFRPの特性と航空機部品への適用, 機械と工具, 5 (2009) 18.
- 3) 社団法人日本機械工業連合会: 平成19年度 熱可塑性樹脂複合材料の機械工業分野への適用に関する調査報告書, 日機連19先端—12 (2008).
- 4) 社団法人日本機械工業連合会: 平成20年度 熱可塑性樹脂複合材料の航空機分野への適用に関する調査報告書, 日機連20高度化—11 (2009).
- 5) 株式会社三協製作所ホームページ, <http://www.sankyo-ss.co.jp/cfrp/>
- 6) 斎藤学, 高橋秀治, 中畑達雄, 細井正則: CFRP用ドリル (Rドリル) の開発—スバル技報, 36 (2009).