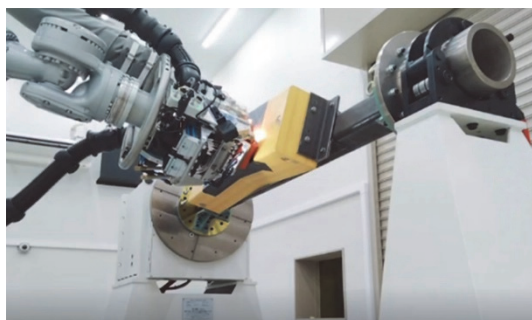


自動積層装置を用いた革新的炭素繊維複合材料積層技術

Innovative Carbon Fiber Composite Lamination Technology Using Automated Fiber Placement



福田 章雄*¹
Akio Fukuda

岡 功介*²
Kosuke Oka

柏木 聖紘*³
Masahiro Kashiwagi

高木 清嘉*⁴
Kiyoka Takagi

阿部 俊夫*⁵
Toshio Abe

杉本 直*⁶
Sunao Sugimoto

高比強度の複合材料は構造軽量化において大きな利点があり、広く航空宇宙製品に適用されてきた。これに伴い、部品の効率的かつ効果的な設計及び製造手法の確立が課題となっている。今回、自動繊維積層装置 (Automated Fiber Placement) を日本国内へ導入し、積層最適化設計手法及び製造プロセスに関する研究を実施した。その結果、手積層体と比べて AFP 積層体の強度はある特定の条件において最大約 18% 減少するが、本報で実施した積層最適化設計により、構造体の強度は約 20% 向上可能で、強度低下を補うことができること、また、AFP の活用は手積層で必要な製造工程を削減可能で、製造効率を向上させることが明らかとなった。

1. はじめに

航空宇宙製品では、経済的にペイロードを運ぶために、軽量化が常に求められている。そのため、高比強度の複合材料は航空機において優れた材料候補として長年注目されている。複合材料は、材料、構造設計、製造方法の各種改善により、航空機への適用比率を高めており、近年、その存在感はますます増している。例えば、三菱重工業株式会社 (以下、当社) が過去に開発を担当した支援戦闘機 F-2 やボーイング 787 の主翼などの大型複合材料製品には、1970 年代からの継続的な複合材料構造に関する研究開発の成果が盛り込まれている。本報では、2010 年代より欧米や中国において導入が盛んに進められている自動繊維積層装置 (Automated Fiber Placement 以下、AFP) の国内導入*に伴って実施した研究活動について報告する。第 2 章では、AFP を用いた製造について述べる。第 3 章では AFP を用いて製造した積層体に内在するギャップ及びラップが強度及び剛性へ与える影響について述べ、第 4 章では最適化設計の概要と最適化設計された有孔平板の強度試験結果について報告する。

*AFP は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP (第 2 期)) “統合型材料開発システムによるマテリアル革命”⁽¹⁾において、当社と国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (以下、JAXA) が連携し、JAXA 調布航空宇宙センター飛行場分室に 2021 年度に導入したものである。プログラム終了後は、JAXA にて研究開発に活用されるとともに、設備等供用制度により機構外の利用も可能となっている。

*1 防衛・宇宙セグメント 航空機・飛昇体事業部 航空機技術部 次長

*2 防衛・宇宙セグメント 航空機・飛昇体事業部 航空無人機技術部

*3 総合研究所 強度・構造研究部 主席チーム統括

*4 防衛・宇宙セグメント 航空機・飛昇体事業部 航空無人機技術部 次長

*5 MHI エアロテクノロジー株式会社 民間機器事業部 民航・産機技術部

*6 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 設備技術研究ユニット ユニット長

2. AFP による製造

2.1 AFP の仕様

導入した AFP は Coriolis 社製で、型番は C1 型及び Csolo 型である。主な特徴として、C1 型は 1/4 インチ幅のテープを 16 列同時に積層することが可能である。一方、Csolo 型は 1/8 インチ、1/4 インチ、1/2 インチ、1 インチ及び 3/2 インチのテープ幅に対応できるが、同時に積層できるテープは 1 列のみである。材料は熱可塑性及び熱硬化性複合材料に対応可能である。以降は C1 型を用いた熱硬化性複合材料の研究に関して述べる。

図 1 に示すように、材料となるテープは紙管に巻き付けられた状態で装置に設置され、マニピュレーター型ロボットのエンドエフェクターへ供給される。供給された材料は、エンドエフェクターのプロセス部分において、ハロゲンランプにより加熱され、材料の粘着性が高められた後、ローラーによって加圧され、プライ同士が板厚方向にしっかりと貼付される。また、回転治具と連動させることで、より複雑な形状の部品を積層することが可能である。

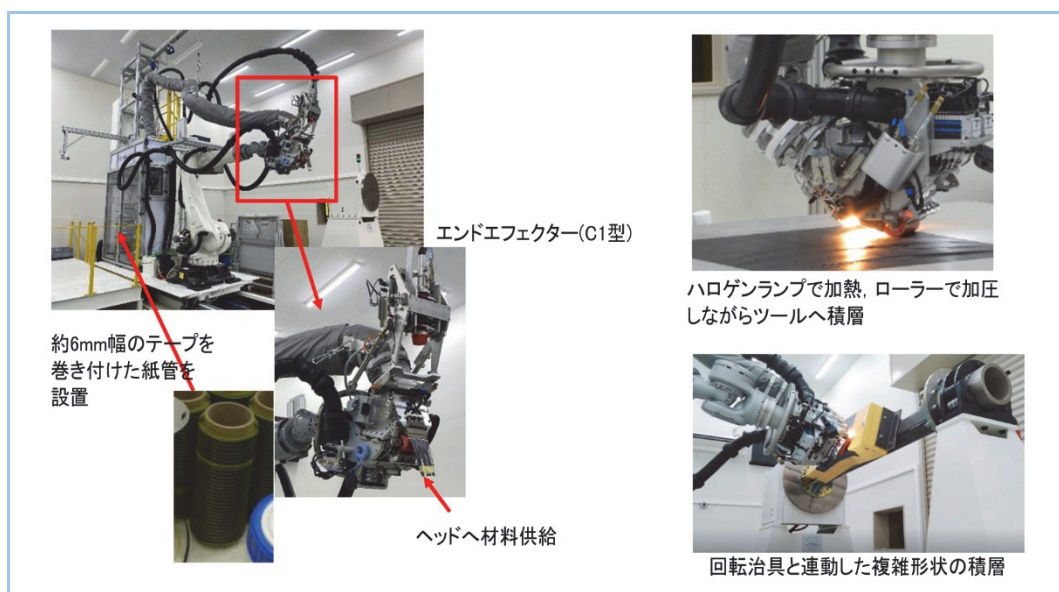


図1 AFP システム

2.2 AFP を用いた製造プロセス

AFP の活用に伴う製造プロセスの変化について述べる。図 2 に示すように、AFP を用いた製造プロセスは、設計者が作成した設計データを入力値として積層パス及び積層プログラムを作成し、これを AFP に読み込ませ、積層を開始する、という流れになる。このプロセスでは、従来の手作業での積層(以下、手積層)に必要であった作業(2D 図面への積層情報記載、3D 形状データの平面展開、材料カッティング等)の省略或いは削減が可能である。今回、試作品の製造を通じて製造プロセス全般の効率化が実現可能であることを確認した。

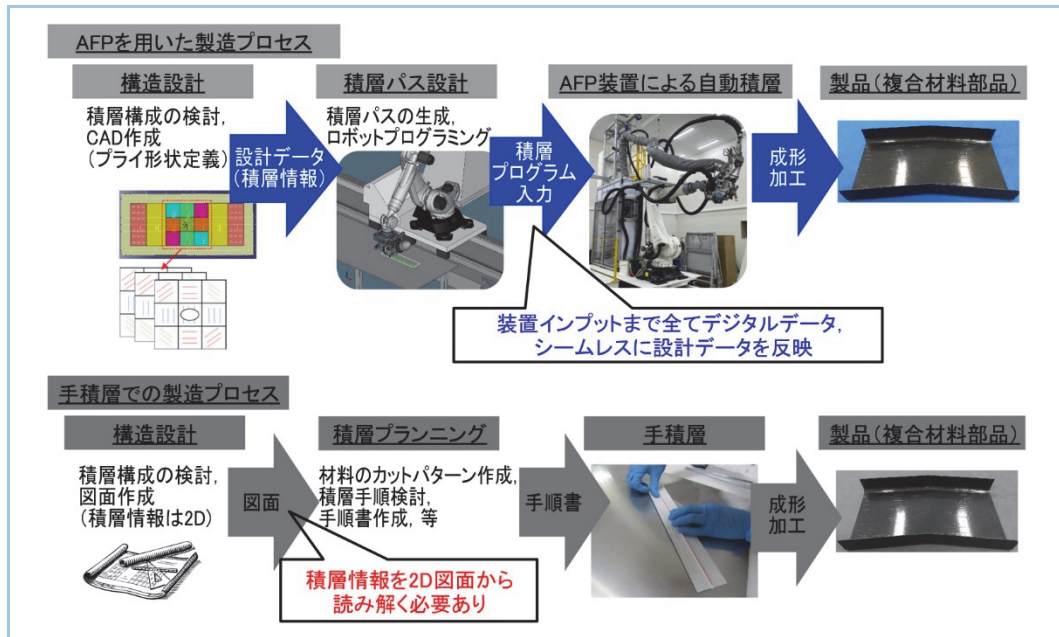


図2 AFP 及び手積層での製造プロセス

2.3 AFP を用いた積層体の欠陥

AFP 積層体の欠陥について, その一例を示す。AFP は複雑形状への積層能力は高いものの, 形状の曲率が厳しい部分については, ローラー圧力が不均一となったり, テープが繊維方向に伸縮しないことから, 周長差によりテープにしわが発生したり, 剥離が生じたりすることがある(図 3)。比較的複雑な形状を有する試験片を製造する際は, 専用ソフトを用いて, テープの貼付方向に対して曲率が厳しい箇所を洗い出し, 積層パスの修正を行うなどの対策を講じながら, 試作品の製造を進めた。

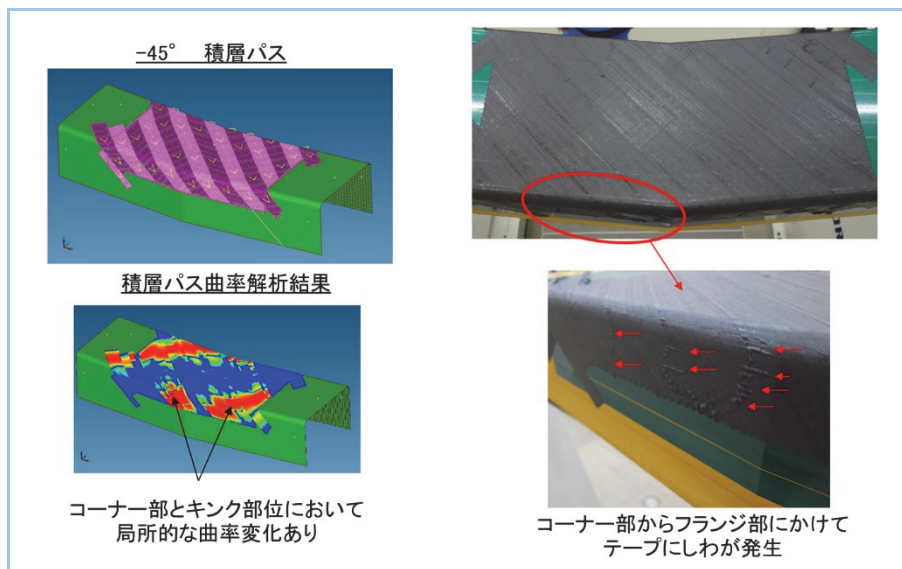


図3 AFP を用いた積層体の品質

3. AFP 積層体の強度及び剛性特性

図 4 に示すように, C1 型では同時に複数のテープを貼付することができ, 一度に貼付するテープをまとめて“コース”と呼ぶ。隣接するテープ間の隙間を“レーン間ギャップ”, コース同士の隙間を“コース間ギャップ”と呼ぶ。レーン間ギャップはほぼ一定で変更するものではないが, コース間ギャップは装置側で任意に設定することが可能である。コース間ギャップが負の場合を“ラップ”と呼び, 正の場合を“ギャップ”と呼ぶ。AFP 積層体にはラップ或いはギャップが内在する。ラップ

及びギャップが積層体の強度及び剛性に与える影響を調べるために、ラップ及びギャップを手積層で仕込んだ試験片(材料:東レ T800S/3900-2B, 積層構成:[45/0/-45/90]3s, クーポン中央部の90°層にギャップ及びラップを模擬)に対して強度試験を実施した。試験片の硬化後の断面状態を図5に示す。本断面図より、カウルプレート(硬化時に治具面とは反対側に設置し、試験片を抑える為の治具)を用いて硬化させた場合、ギャップ及びラップに起因する繊維うねりはカウルプレート無しの場合と比較して軽減されていることが分かる。次に、本試験片を用いて引張及び圧縮試験を実施した。その結果を図6に示す。縦軸はギャップ及びラップを有さず、かつカウルプレートを用いて硬化した試験片の強度及び剛性で規格化している。本図より、ラップを有しカウルプレート無しで硬化させた積層体は、強度が、最大で18%低下していることが分かる。この場合、剛性は増加し、強度は低下している。剛性が増加する理由は、ラップの分だけ断面積が増加することに起因する。一方で、強度が低下する理由は、板厚中央の90°層ラップ部において樹脂破壊が生じ、その近傍の0°層において応力集中が発生、ここが起点となって早期に破断する為である。これは、FEM解析により確認した。ギャップ及びラップは、内部欠陥のように働くため、強度及び剛性は基本的に低下するが、カウルプレートを用いた場合、繊維うねりが抑制され、カウルプレート無しの場合と比較して、強度及び剛性の低下は抑制されることが分かる。

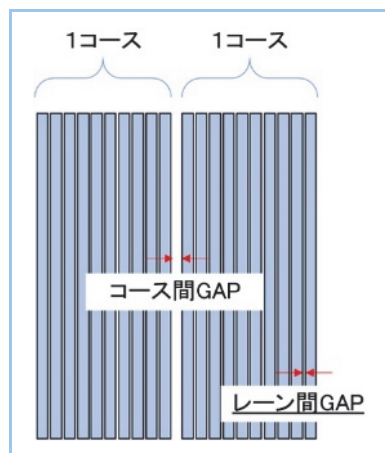


図4 ギャップの定義

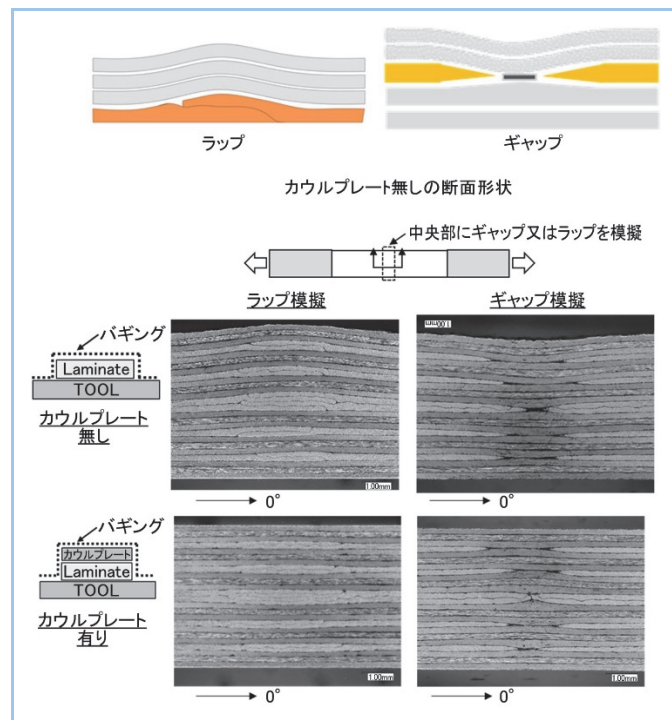


図5 AFPを用いた積層体の硬化後断面図

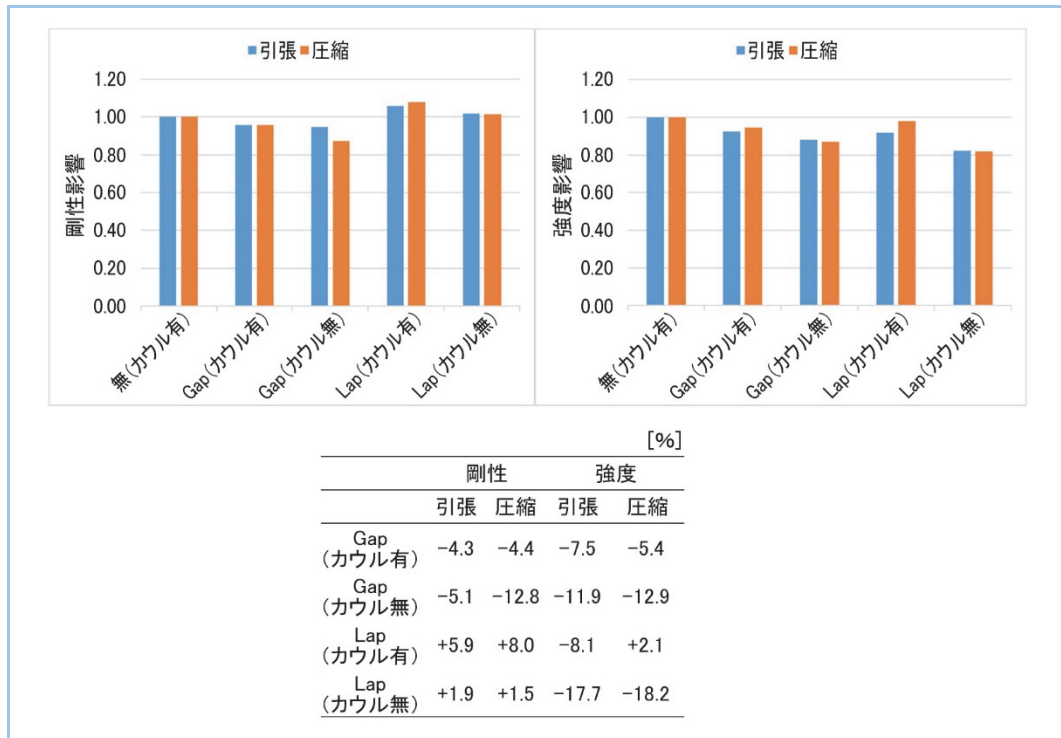


図6 ギャップ及びラップを有する積層体の強度及び剛性

4. 多目的最適化設計と強度評価試験

第3章で述べたように、ギャップ及びラップを有する積層体は、従来の手積層体と比較し、強度が特定の条件下で最大18%低下する。一方で、AFPは複雑な積層パターンを持つ積層体に対しても正確で素早い積層が可能であるため、手積層では製造効率の観点から不採用とされた複雑な積層パターンを有する積層最適化設計案を採用することで、ギャップ及びラップによる強度低下を補うことができる可能性がある。ここでは、積層最適化設計プロセス及び試験片製造プロセス概要とその試験結果の一例を示す。図7に示すように、積層最適化設計プロセスにおいては、まず、有孔平板に対して境界条件及び領域区分を設定する。次に、多目的最適化解析を用いて複数の積層最適設計案を得た後、この中から設計案を選択する⁽²⁾。この際、有孔平板の各領域に対し、積層構成分布、板厚分布、剛性分布を得ることができる。これをもとに自動積層の製造性を考慮したプライ形状を定め、有孔平板の積層設計をおこない、AFPでこれを製造した。次に、本試験片を用いて、引張試験を実施した。その結果、図8に示すように、手積層での標準的な試験片と比較して、初期破壊荷重が約16%向上することが確認された。また、孔回りパッドアップ部の板厚遷移域に対する積層最適化により、約5%の強度向上が確認されており、全体として約20%の強度向上が可能である見込みを得た。このように、ギャップ及びラップによる強度の低下というデメリットを、積層設計の工夫によって補うという考え方が有効であることが示された。

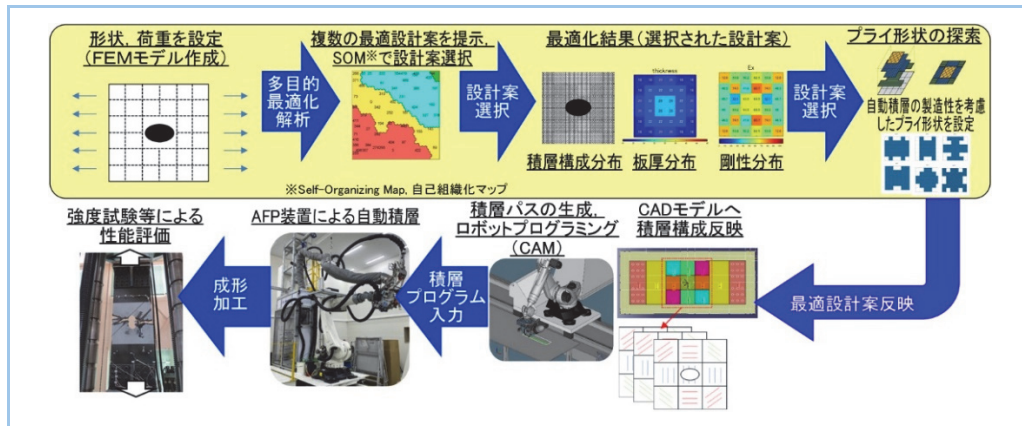


図7 AFP 自動積層向け積層最適設計及び試験片製造と強度試験

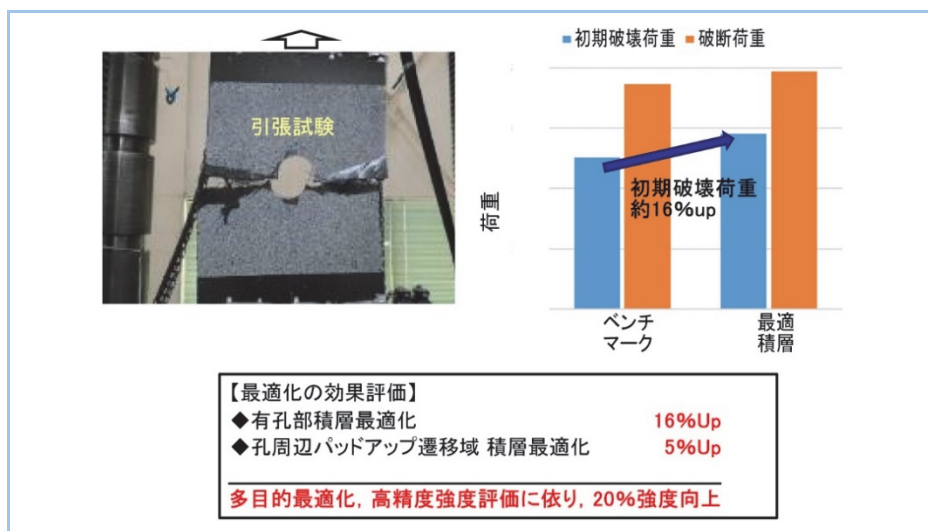


図8 有孔平板の引張試験結果

5. まとめ

本報では、従来の手積層から AFP による自動積層への製造手法変更に伴い、部品の効率的かつ効果的な設計及び製造手法の確立に向けた取組みを述べた。AFP を活用することで、複雑な積層パターンや複曲面を有する部品に対しても自動積層が可能となり、設計情報をデジタルデータのまま直接生産へ繋げ、手積層に付帯する工程を削減することができる。結果として製造効率が向上することを示した。また、AFP 積層体に内在するギャップ及びラップの影響で、手積層体と比べて AFP 積層体の強度は特定の条件下で最大約 18% 減少することが確認された。一方、積層最適化設計を適用することで、構造体の強度は約 20% 向上可能で、強度低下を補うことができることを明らかにした。今後も、複合材料部品に対する性能、コスト、製造スピードの更なる向上を目指し、積層最適化設計や製造自動化に関する研究を進めていく予定である。

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP(第 2 期))“統合型材料開発システムによるマテリアル革命”(管理法人:JST(国立研究開発法人科学技術振興機構))によって実施されました。

参考文献

- (1) 内閣府, 戦略的イノベーション創造プログラム, <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- (2) 花谷孔明ほか, AFP による製造を想定した複合材構造の自己組織化マップを用いた多目的設計探査, Dynamics and Design Conference 2021