

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「薄層プリプレグシートを用いた航空機構造部品用熱可塑性樹脂

複合材料の成形技術及び工程管理・検査技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 中部経済産業局

補助事業者 公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

目 次（例）

※ 第1章 研究開発の概要	3
※ 1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
※ 1－2 研究体制	9
※ 1－3 成果概要	11
※ 1－4 当該研究開発の連絡窓口	12
※ 第2章 本論一（1）	13
※ 【1】熱可塑性スーパーエンブラと開繊繊維の複合技術への対応	13
※ 【2】成形技術への対応	30
※ 【3】認証取得のための工程管理及び検査技術への対応	40
※ 第3章 本論一（2）	
※ 【1】モデル部品の評価	60
※ 最終章 全体総括	71

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

研究開発の概要

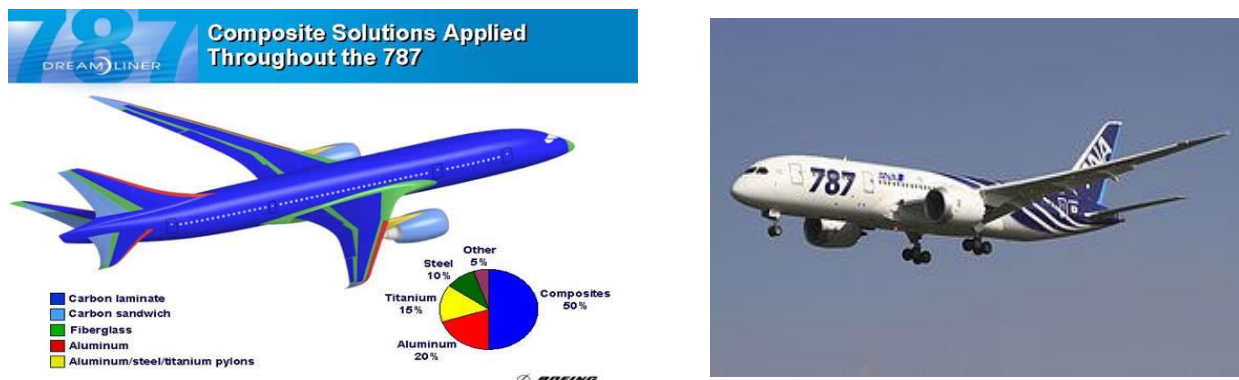


図1 ボーイング787における複合材料の使用比率 及び 飛行するB787

ボーイング787は、図1に示すようにこれまでのアルミ合金主体から、[炭素繊維](#)を使用した熱硬化性樹脂複合材の機体に変え、[複合材料](#)の使用比率を約50%(約35トン)にまで上げた。複合材利用による軽量化により、航続距離や巡航速度は大幅に上回るとともに、燃費も向上し、客室も広くなって、世界のベストセラー機になっている。また、複合材の耐食性により、機内湿度を増加することができ、快適な機内環境になったこともユーザーに喜ばれている。しかし更に、燃費向上、航続距離延長のために軽量化を実現しようと、2次構造部品にも複合材料の利用を進めようとしている。

○従来技術での課題



図2 複合化部品候補例

航空機機体にCFRPを利用するのは、軽量化、燃費向上及び低コスト化などを主目的とすることで共通している。現在、多く使われている樹脂は熱硬化性であるが、2次構造部品には過剰品質、かつ高価であり、適正特性を持った安価な熱可塑性樹脂で代替できる可能性がある。図2は複合材部品の適用される部位のブラケットを示したもので、現在、胴体の強度補強をアルミ合金製ブラケットで行っているが、これをCFRPに変える要望が出ている。

航空機用繊維強化樹脂の製造技術は、熱可塑性樹脂を用いた材料系への転換が国際的に検討されている。表1は

表 1 航空機体 2 次構造部品の適用樹脂

	熱硬化性樹脂	熱可塑性樹脂
使用する炭素繊維	高級繊維	汎用繊維
主たる成形法	VaRTM 法	ホットプレス法
設 備	オートクレーブ 〈主翼用数十億円／台〉	加圧プレス 〈数千万円／台〉
リードタイム	約 50 時間	約 0.5 時間
品 質	過剰品質 〈強度約 1.5 倍〉	適正品質

航空機体 2 次構造部品に対する両樹脂の製造法に関わる諸元を示す。加熱によって軟化する熱可塑性樹脂を用いたものは、熱硬化性樹脂を用いた場合よりも短時間で部品を形成できる。更に、熱硬化性樹脂による CFRP は高価なオートクレーブを利用し、高圧化で長時間電力を消費するなどによりコストが極めて高くなっている。また、熱可塑性樹脂は衝撃性に優れる特性を持つために耐衝撃性を付与できるなどの利点を生かした利用が可能である。このため、世界的に CFRP 製造は新たな脱オートクレーブ（Out of Autoclave、OoA）技術の開発に向かっている。

OoA 技術の一つとして、スーパーエンブラ熱可塑性樹脂を利用する技術開発が主流になっているが、ここでは、航空機機体の 2 次構造部品にスーパーエンブラ熱可塑性樹脂 CFRP を適用する技術及び工程管理・検査技術などを取り上げ、現在の熱硬化性樹脂 CFRP 部品を熱可塑性樹脂に置き換えることを目標とする。

表 2 は両樹脂について、熱硬化性樹脂の課題と熱可塑性樹脂を使用した場合のメリットを示す。ここでは、炭素繊維を開繊して利用するため、一般に使われる繊維束と対比した。軽量化効果はほぼ同様であるが、設備投資、生産性等、顕著に成形品コストが減少することが推察される。

表 2 熱硬化性樹脂の課題及び熱可塑性樹脂の特徴

従来技術	新技術
熱硬化性樹脂 CFRP の課題	熱可塑性樹脂 CFRP の特徴
Tier1 による製造	Tier2 あるいは 3 による製造が可能
設備投資額が大きい	設備投資額が小さい
製造時間が極めて長い	製造時間短く、生産性が高い
炭素繊維束の利用	開繊繊維の利用による薄層部品が可能

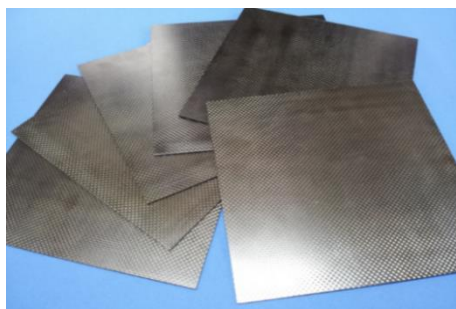
研究開発の背景（これまでの取組みなど）

旭金属工業(株)は主に三菱重工業(株)の下、ほとんどすべてのボーイング社機体部品の表面処理を担当するとともに、B787 の主翼のサブアッセンブリーを担っている。表面処理技術は優れた技術として日本ものづくり大賞（第3回経済産業大臣賞）を受賞しているが、航空機製造分野では特殊工程に分類される技術で、種々の認証を取得する必要がある。機体メーカーの認証のみならず、Nadcap 認証を取得している（Non Destructive Testing, Surface Enhancement, Chemical Processing, Coating の 4 部門）が、複合材料およびその成形工程も特殊工程に分類され、Nadcap の承認事項になっている。ここでは本開発の工程管理及び検査技術について分担し、新たな標準工程書ともいわれる複合材の工程管理手順書（マニュアル）を開発し、認証取得を目指す。

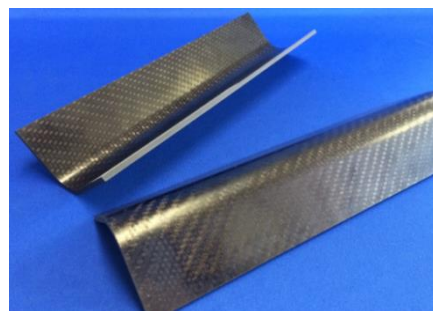
世界的に注目される福井県工業技術センターの開繊技術及びプリプレグ技術についても工程管理者から見た生産管理を提案しながら不良率 0 の製造技術開発に繋げていく。開繊技術は「開繊糸織物の製造方法とその装置」（登録番号 2983531）をはじめ、17 件以上の特許を取得している。本研究では主に「繊維束の開繊方法と、その方法に使用する装置」（登録番号 4740131）を活用する。これらの特許の技術内容は汎用樹脂に対して既に多くの論文

が発表され、企業化例も発表されているが、本開発で対象とするスーパーエンブラに関しては経験が少なく、本プロジェクトで新たな薄層プリプレグの開発を進める。尚、本特許と類似の内容の特許はない。

また、成形を中心に前後工程を分担するスピック㈱は、元々金属のプレス加工を行ってきたが、8年ほど前から熱可塑性 CFRP のホットプレスによる成形を精力的に進めており、国内を調査した範囲内ではスーパーエンブラの代表格である PEEK 及び新しい PEKK の両樹脂のプレス成形を経験しているのはスピック㈱のみであった（図 3）。これらスーパーエンブラの成形は宇宙航空研究開発機構（JAXA）、大学等との共同研究で開発したものであり、研究開発型企業である。認証取得で最も重要と思われる成形工程に関しては旭金属工業㈱が管理及び検査技術に関しての協力し、同社が JIS Q9100 及び機体メーカーの認証を取得出来るように育成する。



プリプレグ



曲げ加工品

図 3 熱可塑性スーパーエンブラのプリプレグ及び曲げ加工品

この 3 機関が一体となって、OoA 戦略として注目されるスーパーエンブラ熱可塑性 CFRP を機体 2 次構造部品に適用するプロジェクト事業に挑戦することにより、スーパーエンブラの熱可塑性 CFRP のプリプレグ製造及び生産性の良い成形技術を開発し、熱硬化性 CFRP あるいは金属構造部品との置換を図り軽量化を実現するとともに、低コスト化を図る。今後毎年 5% 成長で、20 年後に 2 倍の需要が生まれると言われる航空機産業の成長に乗って日本の複合材料成形技術を世界にアピールし、旭金属工業㈱は Tier1 の企業群に参入することを目指す。

当該分野における研究開発動向

本開発では後述のように開繊炭素繊維と熱可塑性樹脂の複合技術を開発し、それをホットプレスで目的の形状に賦形し、各工程の管理技術及び成形品の検査技術を開発するが、熱可塑性 CFRP の利用は軽量化を目指す自動車産業でも鋭意開発がすすめられている。しかし、多くの中・小型部品には炭素繊維は連続したものでなく、樹脂と分断された短繊維を混練して射出成形法にて成形する量産型、短サイクル成形法が主体である。自動車で用いられる熱可塑性樹脂は汎用プラスチック及びその改良品が主体であるが、いずれも航空機用には機械的性質、耐熱性などの点で劣るためにその利用はほとんど不可能である。

一方、熱可塑性樹脂に関しては、機体構造部品への適用例はまだ少なく、未熟である。また、日本で圧倒的に受注量の多い米国ボーイング社の機体は、熱可塑性 CFRP をほとんど使用していない状況にある。熱可塑性樹脂の航空機構造部品への適用は、熱硬化性樹脂の有する特性に近い特性値を示す材料に限られ、スーパーエンジニアリングプラスチック（スーパーエンブラ）に限られる。中でも、従来の複合素材では果しえなかった高強度、高耐熱性のポリエーテルケトン樹脂（PEKK）及びポリエーテルケトン樹脂（PEEK）の 2 種類が注目されている。（PEKK と PEEK は紛らわしいので、本章では PEKK には下線を施すことにする）

表 3 に航空機用部品に対応した熱可塑性樹脂の長所・短所を示す。熱可塑性 CFRP は加工コストが安価であるこ

と及び生産熱サイクルが短いことを示しているが、これは熱硬化性樹脂との比較による表現で、熱硬化性樹脂 CFRP

表 3 熱可塑性樹脂の特徴

長 所	短 所
加工コストが低い	航空機に適用可能な樹脂の種類がない 〈スーパーエンブラに限られる〉
熱サイクルが短い〈量産性〉	価格が高い
耐衝撃特性が良い	加工温度が高い
保管設備が不要	プリプレグが曲げにくい
リサイクル性が良い	耐熱性が低い
リペアが容易	クリープが生じる

(（社）日本機械工業連合会編「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」(平成 21 年 3 月))

はオートクレープで焼成・硬化する工程を含むため、初期投資額及び電気代の高いこと、硬化時間が長く生産性が悪いことなどで高価になる。一方、熱可塑性樹脂は成形時の可塑性を利用して形状を付与し、冷却すれば硬化するために生産性が良く、安価になると表現している。代替しようとする金属部品と比較すれば複合材は高価であり、低コスト化は重要な開発課題である。加えて、樹脂自体の価格は高価であり、トータルとしてコストは大きな課題になり、低コスト化のためには成形工程及び前後工程の自動化技術を取り入れることが求められる。

これまで、わが国の民間航空機産業は米国ボーイング社に依存し、新機体開発には日本の Tier1 企業中心に量的にも質的にも大きな貢献をしてきた。しかし、今回、熱可塑性 CFRP の利用に関しての動きは急であり、2015 年暮れに、Tier2 である旭金属工業(株)に約 40 部品の見積り依頼が出され、状況が一転しようとしている。現時点では、コスト低減策の一つとみているが、Tier1 企業を通しての受・発注中心であった中小企業ビジネスが、初めて Tier1 を通さず Tier2 に直接、発注依頼が来たことになる。簡単形状部品に関して見積りを出そうとしているが、今後の動きを注視し、複合材化がますます進展すると予想される中で次のチャンスには、どのような形状の部品にも対応するため、本事業の提案を行っているところである。

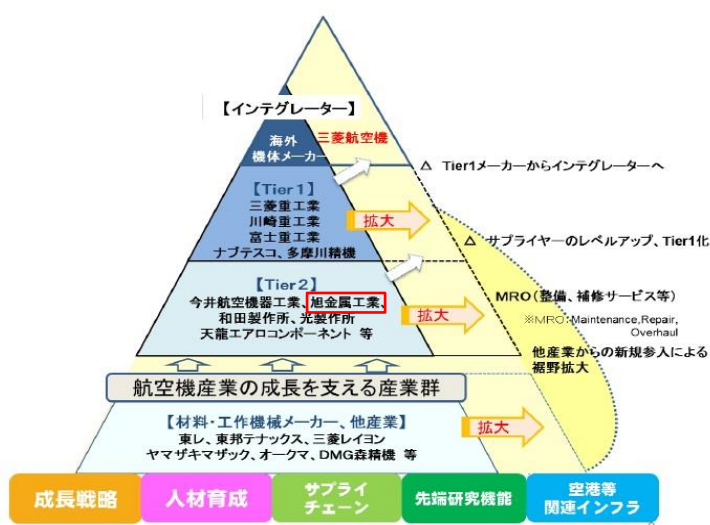


図 4 中部地域の航空機産業の目指す将来像

(「東海産業競争力協議会報告書 TOKAI VISION～世界最強のものづくり先進国を目指して～ 平成 26 年 3 月 東海産業競争力協議会」より抜粋)

図 4 は東海産業競争力会議（中部経済産業局主管）が、中部の産業将来像を検討し、航空機産業に関して設計・開発、製造・販売、保守管理までの一貫体制を構築し、アジア等新興国の追隨を許さない、欧米先進地域と肩を並べる日本で唯一の集積地【アジア No.1 クラスタ】を形成すべきと提案したものである。Tier2 の分類に旭金属工業（株）が記入され、中小企業のリーダーとして活躍していることが示されているが、MRJ に関しては Tier1 に位置付けられている。

「高度化指針」において定める、川下製造事業者等が抱える共通の課題及びニーズ

（九）複合・新機能材料に係る技術に関する事項

1 複合・新機能材料に係る技術において達成すべき高度化目標

（4）川下分野特有の事項

3）航空宇宙分野に関する事項

①川下企業製造業者等の特有の課題及びニーズ

ア. 構造部素材等の軽量化・高性能化・安全性及び耐久性等の向上、高い審美性の追求

燃費向上のために、従来の複合素材では果しえなかった高強度、高耐熱性の炭素繊維／熱可塑性ポリエーテルケトン樹脂〈PEKK〉及びポリエーテルケトン樹脂〈PEEK〉等のスーパーエンブラの熱可塑性 CFRP の製造及び生産性の良い成形技術を開発し、熱硬化性 CFRP あるいは金属構造部品との置換を図り軽量化を実現するとともに、低コスト化を図る。

開発する熱可塑性 CFRP は、代替しようとするアルミ、チタンなどの金属の特性と同等もしくは優れた特性を有し、価格も金属に近いコストであることが求められる。航空機における熱可塑性 CFRP の利用はインテリア部品には使われているものの、機体構造部品としての利用は限られている。最近、某航空機メーカーが熱可塑性樹脂である PEKK をマトリックスとした CFRP の開発を進めるために、旭金属工業（株）に開発を呼びかけてきた。炭素繊維の開発・ビジネスに関しては、日本が主導権を握っているが、炭素繊維を利用した複合素材化及びその成形技術については欧米諸国、特にドイツが先行し、日本は5年の差をあげられているのが一般的見解になっている。しかし、スーパーエンブラの中でも PEKK 樹脂を利用した航空機部品は世界的に実用例がなく、開発段階にあり、本プロジェクトは世界に先駆けて、一早く実現を目指すものである。

そこで、航空機業界において表面処理、機体構造組立などの業務を通じて航空業界の各種認証取得に詳しい旭金属工業（株）が音頭を取って、日本のオリジナル技術として世界的に注目されている福井県工業技術センターの炭素繊維開繊技術を利用して、PEEK、PEKK 樹脂等スーパーエンブラのプリプレグ素材技術を開発し、8 年の CFRP プレス成形の経験を有するスピック（株）がプレス成形技術及び前後工程を含めた自動化技術を担当し、川下機体メーカーの指導を受けながら開発を進める。

（十）材料製造プロセスに係る技術に関する事項

1 材料製造プロセスに係る技術において達成すべき高度化目標

（4）川下分野特有の事項

3）航空宇宙分野に関する事項

①川下企業製造業者等の特有の課題及びニーズ

ア. 信頼性・安全性

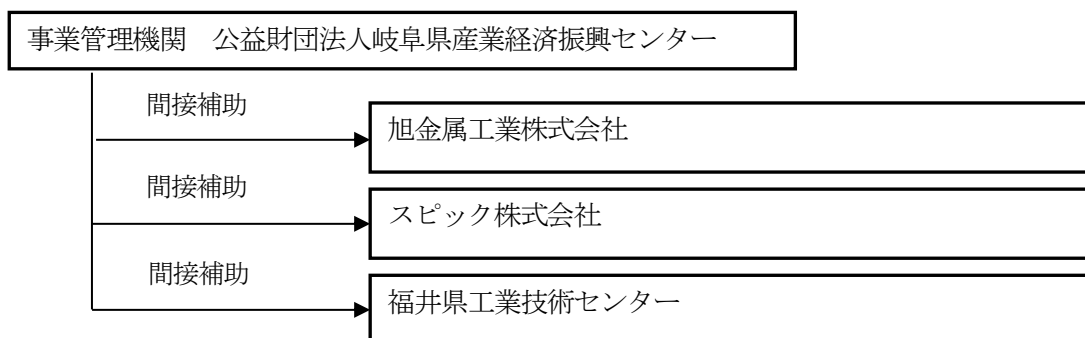
航空機部品は信頼性を厳しく管理し、絶対的な安全性を保証するために、部品サプライヤーには機体メーカーの認証を取得することが義務付けられている。新規開発の素材製造工程、成形工程などには新たな管理・検査技術を確立する必要がある。また、複合材の Nadcap 認証取得に向けた管理技術を構築する。

約300万点の部品から構築される航空機では、部品一つ一つの検査は完璧なものでなければならない。このため、部品の製造に関しては工程及び検査を常に同じ手法で行うことが出来るように、認定を受けた工程管理マニュアルが作成され、製造者はそれに忠実に従って製造しなければならない。本事業のように材料も新しく、製造プロセスも多品種・少量生産を前提とした新しい技術を構築しなければならないような場合には、不良率を0にするために、製造技術のみならず製造工程及び検査の工程を効率よく、かつ適正となるように、管理する手法を開発する必要がある。航空機産業での材料開発は工程管理に長けた企業が参加しないと、開発が成功してもビジネスにならないために、航空機産業特有の工程管理を築けず失敗に終わる危険がある。旭金属工業は1977年にボーイング社の認証を取得し、特殊工程が世界共通のNadcap認証を必要にするようになってから、2004年に日本で最初に取得し4工程のNadcapを保有、また機体構造組立の認証をはじめとして、いくつかの機体及び装備品メーカーあるいは世界共通となる認証を取得してきている。このノウハウをベースに本プロジェクトのCFRP成形部品利用の川下機体メーカー認証を取得できる工程管理技術及び検査体制を確立するとともに、共同研究企業が認証をとれるように、現場での指導を行う。複合材のNadcapの認証取得も目標の一つとする。こうした人材育成のための指導は「航空産業ビジョン」（基幹産業化に向けた航空ビジネス戦略に関する関係省庁会議決定、平成27年12月1日）の「7. 人材育成」においてその必要性が強調されている。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

ア. 履行体制図



イ. 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

管理員

氏 名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
柴田 英明	理事兼産業振興部 部長	【4】
野口 昌良	産業振興部振興課 課長	【4】
小川 誠	産業振興部振興課 統括主査	【4】
戸松 薫	産業振興部振興課 主事	【4】
水野 善介	産業振興部振興課 管理員	【4】
戸崎 康成	産業振興部振興課 管理員	【4】
内田 昌宏	産業振興部振興課 管理員	【4】
平光 己朗	産業振興部振興課 管理員	【4】
杉山 政敏	産業振興部振興課 管理員	【4】
後藤 満	産業振興部振興課 管理員	【4】

【間接補助事業者】

旭金属工業株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
中村 止	専務取締役	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
助定 良臣	品質保証部顧問	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
近藤 靖彦	顧問	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
前川 昭二	顧問	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
松岡 高明	生産本部統括・生産管理部長	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
辻本 克也	表面処理技術課長	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
吉田 崇	表面処理技術課リーダー	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】

高木 陽一	表面処理技術課	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
安田 英里	表面処理技術課	【1-1】、【3-1】、【3-2】
有沢 有	表面処理技術課	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
和田 智和	品質保証部長	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
廣瀬 哲人	安八品質管理チームリーダー	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
水取 佑斗	安八品質管理チーム	【3-1】、【3-2】
加納 健治	非破壊検査課長	【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
岩永雄一郎	安八東工場非破壊検査チームリーダー	【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
小川 敦史	安八西工場表面処理検査チームリーダー	【2-1】、【3-2】
高岡 明弘	安八西工場表面処理検査チーム	【2-1】、【3-2】
佐竹 勝弘	加工検査課長	【2-1】、【3-2】
加納 憲彦	安八300年工場加工検査チーム	【2-1】、【3-2】
小川 隆之	安八西工場加工検査チーム	【2-1】、【3-2】
伊藤 伸二	安八西工場長	【2-1】、【3-2】
木村 直弘	安八西工場特殊塗装チームリーダー	【2-1】、【3-2】
大鐘 雅敬	加工組立技術課長	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
石田 基	加工組立技術課	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】
中西 翔平	加工組立技術課	【1-1】、【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】、【3-2】

スピック株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
齊藤 恵吉	代表取締役	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
齊藤 憲一	取締役工場長	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
荒井 広明	総務部 部長・CFRTP事業部 部長	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
西沢 周子	総務部	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
松波 直貴	製造課 課長	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
北尾 正行	製造課 係長	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
岸 和孝	製造課 係長	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
成岡 洋	品質管理課 課長	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
小田 卓摩	製造課	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
竹ノ内 一夫	製造課	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
桂木 忠	製造課	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】
大津 翔	製造課	【1-2】、【1-3】、【2-1】、【3-1】

福井県工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
川邊 和正	新産業創出研究部 総括研究員	【1-1】、【1-2】、【3-1】
雲竜 常宗	新産業創出研究部 主任研究員	【1-1】、【1-2】、【3-1】
山田 耕平	新産業創出研究部 研究員	【1-1】、【1-2】、【3-1】
近藤 慶一	新産業創出研究部 研究員	【1-1】、【1-2】、【3-1】
伊與 寛史	新産業創出研究部 主事	【1-1】、【1-2】、【3-1】
前川 知一	企画支援室 主任研究員	【1-1】、【1-2】、【3-1】

1-3 成果概要

本プロジェクトは、開発内容が次の3項目に大別される。

- ① 開繊炭素繊維を強化材としたスーパーエンブラ複合材の薄層プリプレグ製造
- ② プリプレグの積層及び成形技術
- ③ 工程管理の標準書の作成及びプリプレグと成形体の特性検査

開発はスーパーエンブラの中でも有力な Out of Autoclave 技術として、世界的航空業界が期待する熱可塑性樹脂、ポリエーテルエーテルケトン (PEKK) を中心に行った。PEKK は耐熱性が高く、ガラス転移温度も高く、耐熱性樹脂としての機能を有し、高強度特性を示すことから熱硬化性樹脂と同等の機能および特性を期待するために注目されている。

薄層プリプレグの製造に関しては福井県工業技術センターの開発したプリプレグ開発装置を用いて、炭素繊維束を約35mmに開繊して、約400℃に加熱したロールで PEKK フィルム（厚さ16μm）の裏と表に侵入させて製作する。この時にできる複合材の厚さは約40μmの厚さで、一般に使用されているプリプレグ厚さの3分の1程度の薄さである。これにより炭素繊維と PEKK の接触面積が大きくなり、炭素繊維の強度特性が生かされることになり、高度化素材を得ることが出来る。薄層プリプレグで課題になったことは、炭素繊維の目付量が小さいことであり、この課題解決のためフィルム厚さを18μmとして薄層プリプレグを製作し、これを複数枚重ねることにより炭素繊維目付量が目的に応じた厚さに制御できることが判明し、試作モデルのプリプレグに適用した。この技術は福井県工業技術センターの独自のものであり、今後の航空機部品の素材として有望視されるので、民間企業に技術移転することにした。

プリプレグは製品厚さに応じた厚さに積層することになるが、炭素繊維の方向性が重視され、一方向の場合 (UD材) にはプリプレグを必要な厚さに積層すればよいが、疑似等方断面にするような場合には炭素繊維の方向性を考慮して切断・積層をする必要がでてくる。歩留まりを大きくする形状に切断し、製品厚さになるようプリプレグの方向性を考慮して積層するノウハウを確立した。自動化については試作品の製造程度の技術は完成したが、量産品への対応はさらなる投資が必要である。

スピック機は自社で100トンのホットプレスを試作し、高温での成形技術を確立した。プラスチック成形は多くの場合200℃以下の温度で成形されているが、高温における加圧成形技術は金型温度コントロールとともに、製品取出しまでの型内保持の間に起きるオイルの粘性低下による加圧力の減少を抑える技術に苦労し、解決した。

また、赤外線加熱によるプリプレグの直接加熱とプレス成形は極めて難しく、断念した。

航空機機体用材料の機械的特性試験法は規定されており、引張、圧縮、せん断の試験を行ったが、強度測定用試験片はオートクレーブ処理を行ったものを所定の形状に機械加工して製作し、測定した。

いずれも、報告されている強度特性を上回り、開繊による高強度化が明らかになった。しかし、高強度であるが故に従来の規定では実施できない試験法があり、測定治具、試験片の接着等について再考を求められている。

航空機用 CFRP は非破壊試験法により全数検査することが義務づけられる。超音波探傷計測による方法について旭金属工業㈱は資格の取得を目指しながら CFRP の超音波計測技術の開発を行い、プロジェクト終了までに 2 人の担当者がレベル 2 の資格を取得し、試作したモデル部品の内部結果の有無について検査した。その他、CFRP の耐熱性、燃焼試験、作業現場の紫外線被ばく量の検査等を行ってきた。

試作したモデル部品はブラケットモデル及びリーディングエッジモデルの 2 種類で、航空機 2 次構造部品として多用されているものである。これらをパリエアショー、ファンボロエアショー、シンガポールエアショー、ボーイング商談会、エアバス商談会等にて PR を行うと共に、試作品の評価を聞いた。PEKK 複合材ということで大きな関心を抱いていただけ、今後、新造機が提案される折には強力にビジネスを促進する予定であるが、量産技術の開発が必要に迫られてくる。このための対応を検討していく。

1-4 当該研究開発の連絡窓口（_at_を@に変換）

（公財）岐阜県産業経済振興センター 技術開発支援担当 主事 戸松 薫

電話；058-277-1093 Fax；058-273-5691 tomatsu_at_gpc-gifu.or.jp

福井県工業技術センター新産業創出研究部 総括研究員 川邊 和正

電話；0776-55-0664 Fax；0776-55-0665 k-kawabe_at_fklab.fukui.fukui.jp

スピック株式会社 CFRTP 事業部長 荒井 広明

電話；0463-81-2145 Fax；0463-82-2126 arai_at_e-spic.co.jp

旭金属工業株式会社 表面処理技術課 高木 陽一

電話；0584-64-5061 Fax；0584-64-6003 yakagi_at_akg.co.jp

第2章 本論－（１）

（図、表の番号は、この章は独立して表示）

【1】 熱可塑性スーパーエンブラと開繊繊維の複合技術への対応

【1－1】複合化・薄層プリプレグ製造

1. 薄層プリプレグシートの製造装置

本研究では、まず、炭素繊維とPEKK樹脂フィルムによる薄層セミプリプレグシートを製造する加工技術について開発を行った。

薄層セミプリプレグシートを製造するために、福井県工業技術センターが保有する「薄層プリプレグシート製造装置」（図1 参照）を使用した。

本装置の概要は以下のとおりである。

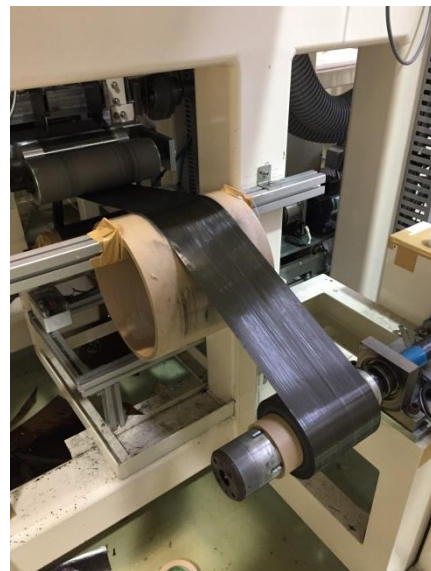
薄層セミプリプレグシートの製造は、まず、「薄層プリプレグシート製造装置」の左右に炭素繊維束原糸を最大5本ずつ並べ、合計最大10本までセットして開繊機構部へ挿入する。このとき、炭素繊維束は開繊幅に応じた間隔をもって挿入され、各々の炭素繊維束は空気開繊部にて同時に幅広く開繊し、幅200mmまでの薄層の開繊系ドライシートに製造されながら次工程に供給される。

次工程では、開繊系ドライシートに熱可塑性樹脂フィルムを連続して半含浸させたシート状態に加工する。「薄層プリプレグシート製造装置」の最上部にある複数本の加熱加圧ロールのそれぞれに開繊系ドライシートを沿わせながら供給するとともに、熱可塑性樹脂フィルムをどちらか一方の開繊系ドライシートの表面に沿わせながら供給し、加熱加圧ロールの加熱温度によって開繊系ドライシートを加熱すると共に熱可塑性樹脂フィルムを溶融させる。そして、一対の加熱加圧ロールの加圧により、溶融した熱可塑性樹脂フィルムが開繊系ドライシートの表面に貼り合わせるるとともに、繊維1本～数本程度の含浸状態となり、セミプリプレグ状態となる。

そして、開繊系ドライシートに溶融した熱可塑性樹脂フィルムが半含浸した状態になった直後に複数本の冷却ロールに接触して走行させ、溶融した熱可塑性樹脂フィルムを固化させて連続したシート状態になった後に、そのシートの端部をスリット加工して、薄層セミプリプレグシートを得て、リール状に巻き取る。



1) 薄層プリプレグシート製造装置外観



2) シートの巻き取り状態

図1 薄層セミプリプレグシート製造装置写真

なお、開繊系ドライシートが加熱加圧ロールに接触し走行する瞬間、開繊系ドライシートと加熱加圧ロールの間

に離型シートを挿入し、複数本の冷却ロールを走行後、離型シートを巻き取る。離型シートを使用することにより、溶融した樹脂が加熱加圧ロールおよび冷却ロールに付着することを防止し、安定した連続生産を実現する。

ここで、開繊方式は、福井県が開発を行ってきた「空気開繊方式」が採用されている。これにより、高速で、幅広い開繊が実現できる。

「空気開繊方式」を実現する装置は、少なくとも空気開繊工程、縦振動付与工程そして横振動付与工程を行う機構が設けられた構成となっており、撓んだ繊維束に一方方向に流れる流体を作用させることで繊維束を幅広く、薄く開繊させ、各開繊繊維束に横振動を付与して隙間のない開繊系シートを得ることができる装置となっている。

図2に「空気開繊方式」を取り入れた装置の概略図を示す。

炭素繊維束を一定張力で巻き出し次工程に供給する巻き出し工程、炭素繊維束中に流体を通過させることで繊維を撓ませながら幅方向に移動させて開繊させる空気開繊工程、走行する炭素繊維束に対して接触部材を接触させながら炭素繊維束の一部を押し込んで緊張状態とした後緊張状態の炭素繊維束からその接触部材を離間させて炭素繊維束を一時的に弛緩状態とする変動動作を繰り返し与える縦振動付与工程、そして、開繊された繊維束を幅方向に往復振動させる横振動付与工程が組み込まれた装置となっている。

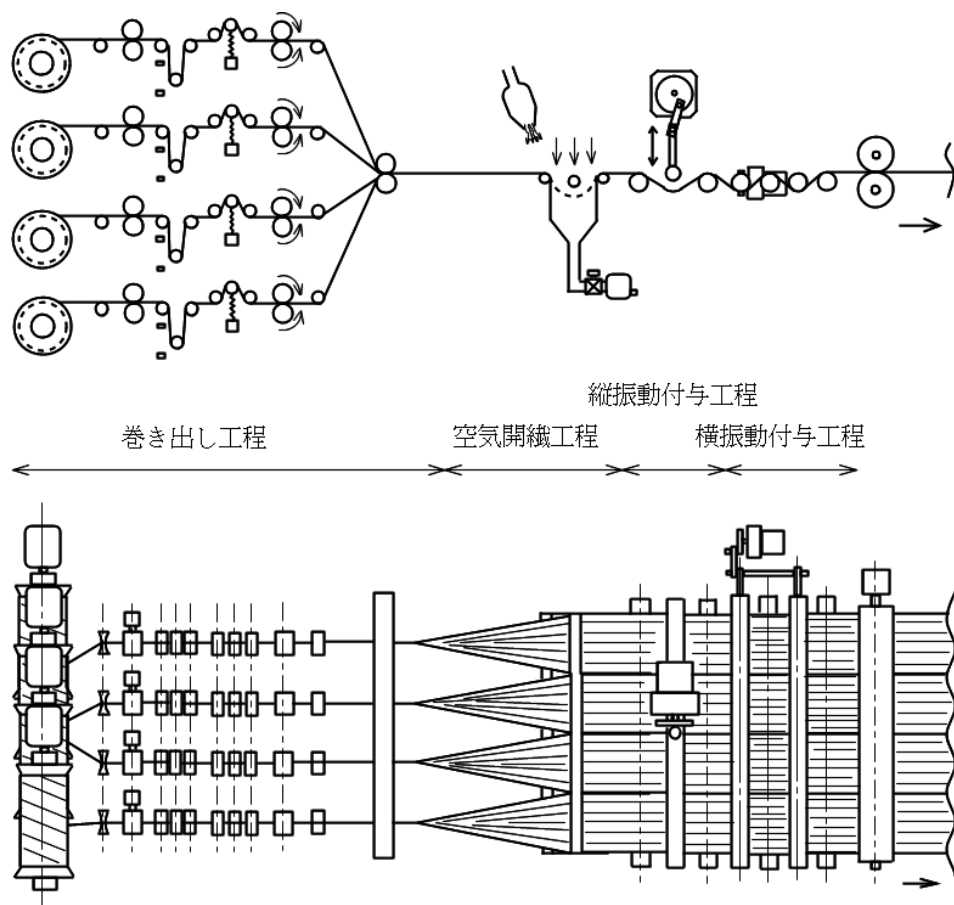


図2 「空気開繊工程」を取り入れた装置の概略図

空気開繊工程と縦振動付与工程は関連しており、縦振動付与工程により炭素繊維束が緊張状態と弛緩状態を繰り返す状態は空気開繊工程にも伝搬し、風洞管内において炭素繊維束の撓み量は時間的に変化する。つまり、風洞管内において、炭素繊維束が緊張すると繊維束の撓み量が小さくなる方向に、炭素繊維束が弛緩すると繊維束の撓み量が大きくなる方向に変化し、このような状態にある炭素繊維束に吸引の空気流が作用することで、各繊維はより

真直な状態で幅方向へ移動することとなり、より幅広で、繊維分散性の良い開繊が実施されることになる。

2. 薄層セミプリプレグシートの試作条件の確立

2. 1 試料

PEKK フィルムを用いた薄層セミプリプレグシートの製造条件を得るための加工実験を実施した。本研究に用いた炭素繊維束、熱可塑性樹脂フィルムは以下のとおりである。

- 炭素繊維束

T700SC-12K-60E (東レ(株))

- 熱可塑性樹脂フィルム

PEKK フィルム

PEKK—品番 7002 番 (アルケマ社 (仏))

T_g (ガラス転移温度) -159 度、 T_m (融点) -340 度

フィルム 幅 160mm×長さ 150m、厚さ 16 μ m

2. 2 薄層セミプリプレグシートの試作結果

炭素繊維束 T700SC-12K-60E を使用し、「薄層プリプレグシート製造装置」の両側にある原糸供給部にそれぞれ炭素繊維束を 5 本セットし、幅 37mm 間隔で開繊機構部に供給した。炭素繊維束はそれぞれ幅 37mm に開繊して幅 185mm の開繊系ドライシートとなり、その開繊系ドライシートを一對となっている加熱加圧ロールの両側から供給するとともに、幅 160mm、厚さ 16 μ m の PEKK フィルムを一方の加熱加圧ロールから供給した。

一定温度に制御された加熱加圧ロールにより、開繊系ドライシートが加熱されるとともに、PEKK フィルムは加熱により熔融状態となり、一對の加熱加圧ロールに挟み込まれて加圧されることによって、開繊系ドライシートに PEKK フィルムが半含浸して、炭素繊維束/PEKK 樹脂/炭素繊維束の構成となったセミプリプレグシートが連続して試作された。

今回の PEKK フィルムは、品番 7002 番の樹脂であり、ガラス転移温度 (T_g) は約 159 度、融点 (T_m) は約 340 度である。加熱加圧ロールの設定温度を知るために、加熱加圧ロール温度を 300 度、310 度、320 度、330 度、340 度、350 度と変化させてシート成形を実施した。なお、一對の加熱加圧ロールの加圧力は 50kgf/cm に設定し、冷却ロールを経て走行する薄層セミプリプレグシートの両端をスリット加工し、幅 140mm にして、3 インチ紙管に巻き取りを行った。加工速度は 20m/min で行った。

試作を行った結果、加熱設定温度が 340 度以上のときは、加熱加圧ロール上で PEKK フィルムが熔融して膨らむような現象が見られ、その状態のまま、加熱加圧ロールで加圧されていた。加熱設定温度が高いほど、その膨らみは大きくなっていた。また、走行する薄層セミプリプレグシートの状態では、走行方向 (縦方向) に繊維蛇行によるしわのようなものが見られ、設定温度が高いほど、その繊維蛇行が多く見られた。このことは、樹脂の融点と関係していると考えられる。PEKK7002 は融点が 340 度である。よって、融点を超えると樹脂フィルムが溶け柔らかくなり、加熱空気の膨張で膨らむのではないかと推察された。加熱設定温度が 330 度以下になると、加熱加圧ロール上で PEKK フィルムは熔融していたが、大きく膨らむようなことはなく、細かい膨らみがかいくつも見られるような状態となった。また、走行する薄層セミプリプレグシートの状態では、繊維が真直に配列しており、繊維蛇行によるしわのようなものは見られなかった (図3参照)。



加熱温度 320 度



加熱温度 330 度



加熱温度 340 度



加熱温度 350 度

図3 加熱加圧ロール上での樹脂フィルム状態

次に、各加熱設定温度から得られた薄層セミプリプレグシートについて、その断面を観察した結果を図4に示す。

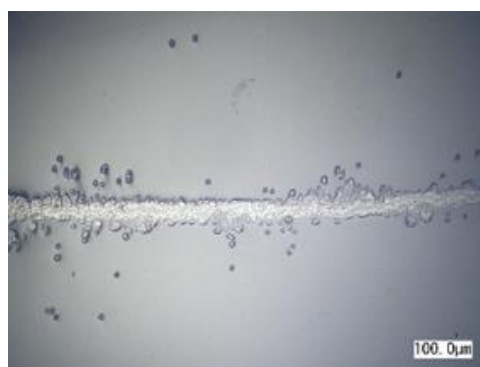
この結果、設定温度が300、310度の範囲で試作した薄層セミプリプレグシートの断面は、繊維がシートから離脱しているものがあることがわかる。逆に、設定温度が340度以上になると、薄層セミプリプレグシートが幅方向でうねっていることがわかる。さらには樹脂フィルムの破れも観察されている。設定温度が320度、330度のときは、樹脂フィルムが幅方向に平らであり、うねりがないことが観察され、さらに両表面に繊維の離脱があまり生じていないことが観察された。炭素繊維1本～2本分の樹脂含浸が見られ、良好な半含浸状態が得られていることが観察された。

この現象は、PEKKフィルムが融点以上で熔融した後は、冷却の過程で幅収縮が生じ、これにより繊維を移動させ蛇行を生じ、しわのようになったと考えられる。設定温度が330度以下のとき、PEKKフィルムが融点を超えていないこともあり、フィルムの幅収縮が抑えられ、繊維蛇行を生じなかったと考えられる。さらに、融点に近い加熱温度により樹脂フィルムの熔融粘度が繊維1～2本の含浸が可能となる程度に下がっていたと考えられる。

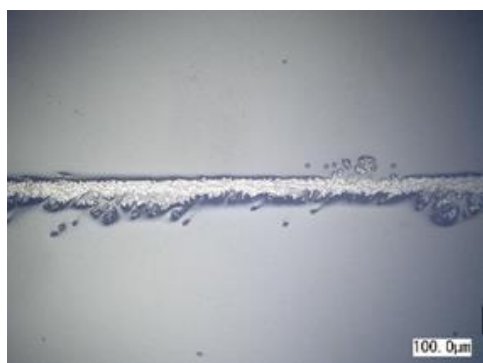
なお、各加熱設定温度で得られた薄層セミプリプレグシートの厚さを測定した結果を図5に示す。このことから、設定温度が320度、330度の時に厚みが最も小さい値を示した。310度以下のときは含浸していない繊維によって、340度以上のときは樹脂フィルムの収縮によるうねりによって、厚さが増していると考えられる。含浸が良好かつ、樹脂フィルムの収縮のない加工条件のとき、薄層セミプリプレグシートも厚さが最小になる。因み



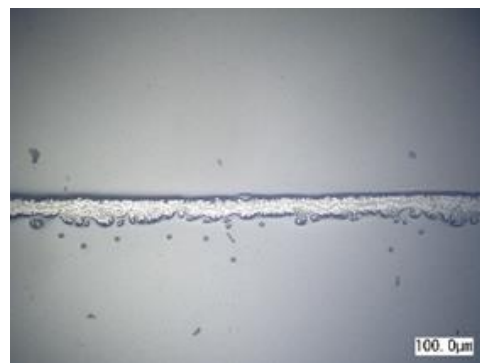
加熱温度 300 度



加熱温度 310 度



加熱温度 320 度



加熱温度 330 度



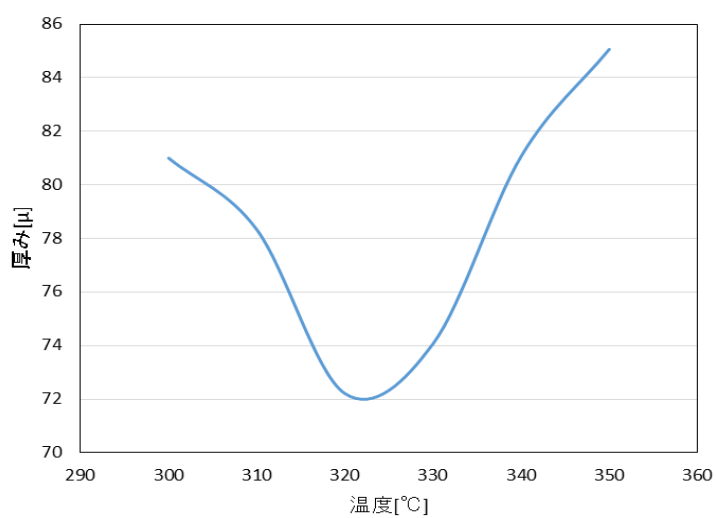
加熱温度 340 度



加熱温度 350 度

図4 各加熱設定温度における薄層セミプリプレグシートの断面写真

図5 各加熱設定温度における
薄層セミプリプレグシートの厚さ



に、繊維束中に樹脂が完全含浸したとするときの厚さは 40μm であるが、設定温度 320 度、330 度のときは

72～74 μm となり、繊維束中の数本に樹脂が含浸していると考えられる。

したがって、PEKK フィルムでの薄層セミプリプレグシートの試作を行う加工条件として、融点以下の設定温度にすることで、PEKK フィルムの幅収縮なく、良好なシートが作成できるといえる。そして、繊維束中への樹脂含浸を進行させたセミプリプレグシートを得るには、融点の 10～20 度程度低い温度に設定すると良いと考えられた。

3. 厚層プリプレグシートの試作方法

本研究では、CF 目付け 145g/m² 前後、樹脂比率 35% (Wm) 前後のプリプレグシートを製造することを目指している。よって、得られた薄層セミプリプレグシートを 3 枚重ねて一体化することで目標のプリプレグシート（厚層プリプレグシートと記載）を得ることが可能となる。

本研究では、「薄層セミプリプレグシート製造装置」を使用して、厚層プリプレグシートを製造する。図 6 に示すように 3 本の薄層セミプリプレグシートを加熱加圧ロールに沿わせながら加熱して挿入し、3 枚重ねた状態で加熱加圧ロールにて線圧を负荷し、連続した含浸、一体化を行った。

加熱加圧ロールの加熱温度は、樹脂の融点以上に設定することで、樹脂を粘度の低い状態に熔融させ、繊維束中への樹脂含浸が十分に行えるようにした。

なお、熔融した樹脂が加熱加圧ロールに付着することを防止するため、耐熱性のある離型シートを薄層セミプリプレグシートの最表面に沿わせて挿入している。

加工実験の様子を図 7 に示す。3 枚の薄層セミプリプレグシートが加熱加圧ロールに沿って走行する状態では、薄層セミプリプレグシートに張力を与えて走行させることで、繊維が真直した状態で加熱加圧ロールに沿って走行していることが確認できた。また、3 枚が重なった製品シートにおいても、繊維の真直性に優れ、かつカールなどのくせもなく、紙管に巻き取ることができていた。

なお、本研究では、3 枚重ねの厚層プリプレグシートの試作を加工速度 10m/min で実施できており、生産性が良い加工方法となっているといえる。

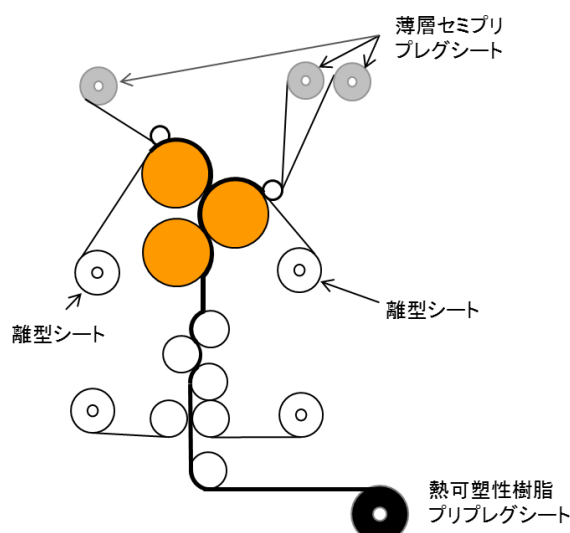


図 6 厚層プリプレグシートの製造方法

4. 厚層プリプレグシートの試作

4. 1 試料

本研究に用いた炭素繊維束、熱可塑性樹脂フィルムは以下のとおりである。

- 炭素繊維束

T700SC-12K-60E（東レ(株)）

- 熱可塑性樹脂フィルム

- ①PEKK フィルム

PEKK—品番 7002 番（アルケマ社（仏））

T_g（ガラス転移温度）－159 度、T_m（融点）－340 度

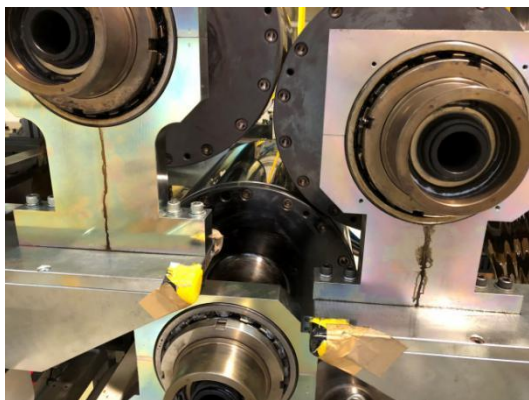
フィルム 幅 160mm×長さ 500m、厚さ平均 18 μm



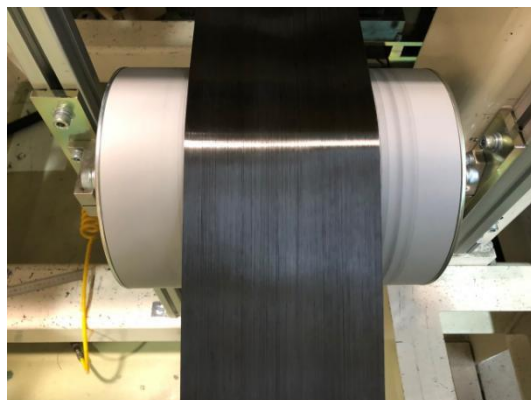
(1) 3 枚挿入の様子



(2) 重ね合わせの様子



(3) 加熱加圧ロールの様子



(4) 巻き取り直前の状態

図7 3 枚重ね合わせによる試作の様子

②PEKK フィルム

PEKK—品番 6002 番（アルケマ社（仏））

T_g （ガラス転移温度） -155 度、 T_m （融点） -307 度

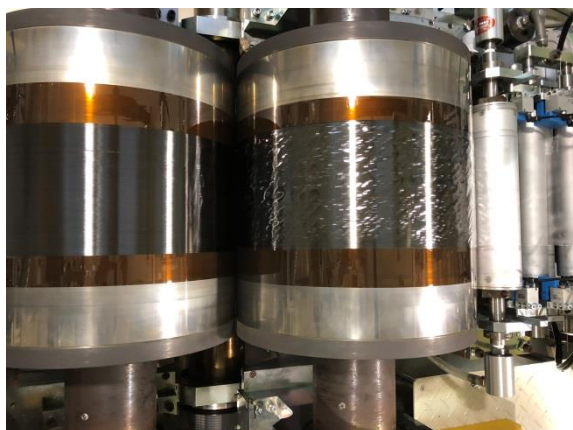
フィルム 幅 160mm×長さ 500m、厚さ平均 $18\mu\text{m}$

4. 2 PEKK7002 番を用いた厚層プリプレグシートの試作結果

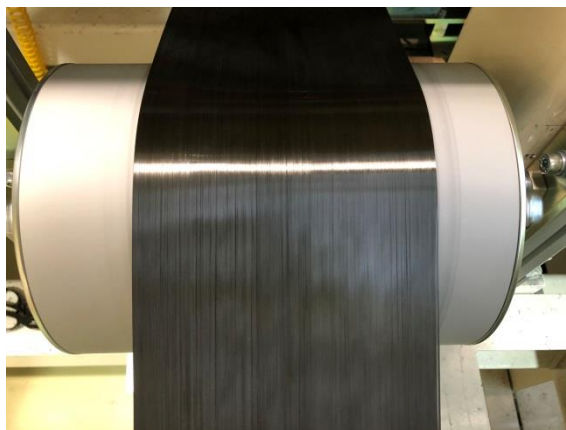
4. 2. 1 薄層セミプリプレグシートの試作結果

炭素繊維束 T700SC-12K-60E を使用し、「薄層プリプレグシート製造装置」の両側にある原糸供給部に炭素繊維束をし、幅 33mm 間隔で開繊機構部に供給した。そして、炭素繊維束は開繊系ドライシートとなり、その開繊系ドライシートを一对の加熱加圧ロールの両側から供給するとともに、幅 160mm、平均厚さ $18\mu\text{m}$ の PEKK フィルムを一方の加熱加圧ロールから供給した。一定温度に制御された加熱加圧ロールにより、開繊系ドライシートが加熱されるとともに、PEKK フィルムは加熱により熔融状態となり、開繊系ドライシートに PEKK フィルムが半含浸して、炭素繊維束/PEKK 樹脂/炭素繊維束の構成となったセミプリプレグシートが連続して試作された。

PEKK フィルムは、品番 7002 番の樹脂であり、ガラス転移温度 (T_g) は約 159 度、融点 (T_m) は約 340 度である。よって、加熱加圧ロールの加熱温度を融点以下の 330 度に設定し、炭素繊維束の開繊系シートと PEKK フィルムのセミプリプレグシートの試作を行った。



(1) 加熱加圧ロール上での状態



(2) 巻き取り直前の状態

図8 薄層セミプリプレグシートの試作状態

なお、冷却ロールを経て走行する薄層セミプリプレグシートの両端をスリット加工し、幅 150mm にして、3 インチ紙管に巻き取りを行った。

試作を行った結果、図8 (1) に示すように、加熱加圧ロール上で PEKK フィルムは熔融し、細かい膨らみが多数みられるが、走行する開繊系シートの状態は繊維が真直に配列していることが確認できた。さらに、巻き取りが行われる直前の薄層セミプリプレグシートの状態 (図8 (2) 参照) では、繊維が真

直に配列したシート状態になっており、かつ樹脂フィルムの収縮による繊維蛇行、しわのようなものは見られなかった。このことから、試作は良好に実施できたと判断された。

次に、得られた薄層セミプリプレグシートについて、厚さとその断面を観察した結果を図9に示す。断面観察の結果、樹脂のうねりがないことが確認でき、樹脂フィルムの加熱条件が適切であったと考えられた。

また、得られた薄層セミプリプレグシートの厚さをマイクロメーターを使用して測定したところ、 $68.5\mu\text{m}$ であった。炭素繊維束 12K を 33mm に開繊して樹脂フィルム (平均厚さ $18\mu\text{m}$) の両面に貼り合わせて樹脂を含浸させた状態での厚さとなるが、炭素繊維束に樹脂が完全含浸した場合には $45\mu\text{m}$ となるため、その差は約 $23.5\mu\text{m}$ になる。炭素繊維の直径が $7\mu\text{m}$ であるから約 3 本分の厚さであり、両表面に 1 本～2 本分の未含浸部分がある状態の薄層セミプリプレグシートとして試作できたと考えられた。

試作として作成された薄層セミプレグシートの仕様は以下のとおりであった。

- ・炭素繊維束 T700SC-12K-60E (東レ(株))
- ・熱可塑性樹脂フィルム PEKK フィルム—品番 7002 番、厚さ平均 $18\mu\text{m}$
- ・構成 炭素繊維束 (33mm/本開繊) /PEKK フィルム/炭素繊維束 (33mm/本開繊)
- ・CF 重量 約 48.5gsm
- ・厚さ (マイクロメーター実測) 約 $68.5\mu\text{m}$
(樹脂含浸時の厚さ約 $45\mu\text{m}$)



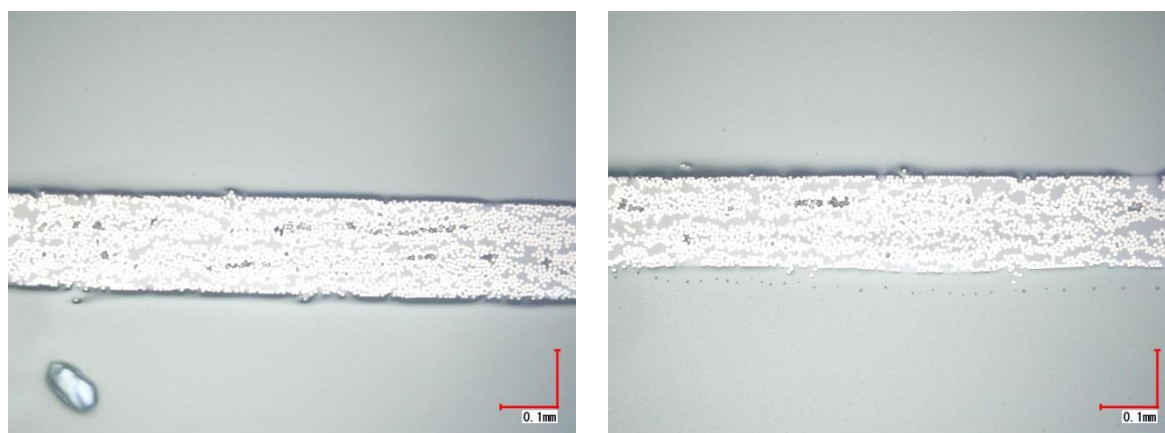
図9 薄層プリプレグシートの断面写真

- 繊維体積含有率 V_f 約 60%、
- 樹脂重量率 W_m 約 32.5%

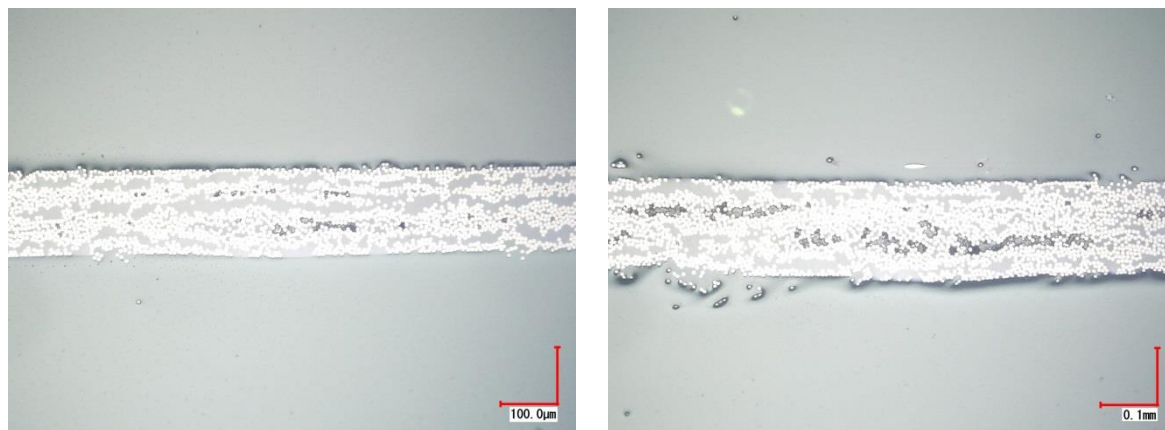
4. 2. 2 厚層プリプレグシートの試作結果

薄層セミプリプレグシートを3枚重ねた厚層プリプレグシートの試作を実施した。

厚層プリプレグシートにするために、薄層プリプレグシート製造装置を使用し、図6に示すように幅 150mm の薄層セミプリプレグシートを 3 枚それぞれ加熱加圧ロールに沿わせながら加熱して挿入し、3枚重ねた状態で加熱加圧ロールにて線圧を負荷し、連続した含浸、一体化を連続して行った。加熱加圧ロールの温度は PEKK7002 番の融点以上である 350 度に設定し、冷却ロールを経て走行する厚層プリプレグシートの両端をスリット加工し、幅 140mm にして、3 インチ紙管に巻き取りを行った。加工速度は 10m/min で行った。



(1) 良い断面状態



(2) 悪い断面状態

図10 CF/PEKK 薄層プリプレグシートを3枚重ねたプリプレグシートの断面観察写真

試作を行った結果、加熱加圧ロール上での薄層セミプリプレグシートの状態は、繊維の蛇行、シートのしわなどが生じることなく、繊維真直性を維持して走行することが確認できた。また、3枚を重ね含浸したシートも連続して状態良く製造できることが確認できた。

試作できた各シートの断面を観察した結果を図10に示す。

断面写真をみると、シートの両表面とも平滑性があり、3枚が一体化していることがわかる。また、繊維の分散

性が良く、かつボイドの少ない場所が存在することが確認できる。一方で、繊維の分散性が悪く、層構成が明確な部分や、ボイドの多い部分も見られた。

3枚重ねて成形した厚層プリプレグシートの厚さをマイクロメーターで測定したところ、約162 μ mであった。完全含浸時の設計厚さは135 μ mであるため、設計値より約27 μ m厚くなっていることがわかる。しかし、薄層セミプリプレグシートの状態で1枚あたり約23.5 μ m厚くなっていることから、3枚重ねた状態で平均約70.5 μ m厚くなるところ、加熱加圧成形により約27 μ mとなり、重ね合わせの工程によりさらに樹脂の含浸が進んだとわかる。

最終的に、PEKK7002番によって、下記仕様のプリプレグシートを試作した。

- ・炭素繊維束 T700SC-12K-60E（東レ(株)）
- ・熱可塑性樹脂フィルム PEKK フィルム—品番 7002 番
- ・構成 厚層プリプレグシート；薄層セミプリプレグシート3枚合わせ
薄層セミプリプレグシート；炭素繊維束（33mm／本開織）／PEKK フィルム（18 μ m）／炭素繊維束（33mm／本開織）
- ・厚層プリプレグシート
 - ・プリプレグシート目付け 211g/m²（測定値、設計 215g/m²）
 - ・CF 目付け 145g/m²（開織幅から計算）
 - ・Vf 61.3%（目付けからの計算値、設計 60%）
 - ・Wm 31.3%（目付けからの計算値）

4. 3 PEKK6002 番を用いた厚層プリプレグシートの試作結果

4. 3. 1 薄層セミプリプレグシートの試作結果

炭素繊維束 T700SC-12K-60E を使用し、「薄層プリプレグシート製造装置」の両側にある原糸供給部にそれぞれ炭素繊維束を5本セットし、幅33mm間隔で開織機構部に供給した。そして、炭素繊維束はそれぞれ幅33mmに開織して幅165mmの開織系ドライシートとなり、その開織系ドライシートを一对の加熱加圧ロールの両側から供給するとともに、幅160mm、平均厚さ18 μ mのPEKKフィルムを一方の加熱加圧ロールから供給した。一定温度に制御された加熱加圧ロールにより、開織系ドライシートが加熱されるとともに、PEKKフィルムは加熱により熔融状態となり、加熱加圧ロールに挟み込まれて2回加圧されることによって、開織系ドライシートにPEKKフィルムが半含浸して、炭素繊維束／PEKK樹脂／炭素繊維束の構成となったセミプリプレグシートが連続して試作された。

PEKKフィルムは、品番6002番の樹脂であり、ガラス転移温度（T_g）は約155度、融点（T_m）は約307度である。今回は、加熱加圧ロール温度を280度に設定し試作を行った。加工速度は20m/minで行った。

なお、冷却ロールを経て走行する薄層セミプリプレグシートの両端をスリット加工し、幅150mmにして、3インチ紙管に巻き取りを行った。

試作を行った結果、図11（1）に示すように、加熱加圧ロール上でPEKKフィルムは熔融し、細かく膨らむ様子が見られるが、走行する開織系シートの状態は繊維が真直に配列していることが確認できた。さらに、巻き取りが行われる直前の薄層セミプリプレグシートの状態（図11（2）参照）では、繊維が真直に配列したシート状態になっており、かつ樹脂フィルムの収縮による繊維蛇行、しわのようなものは見られず良好な状態で試作が行われた。

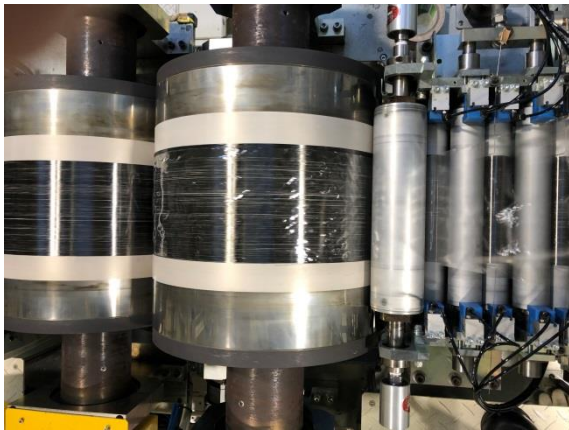


図 1 1 (1) 加熱加圧ロール上での状態

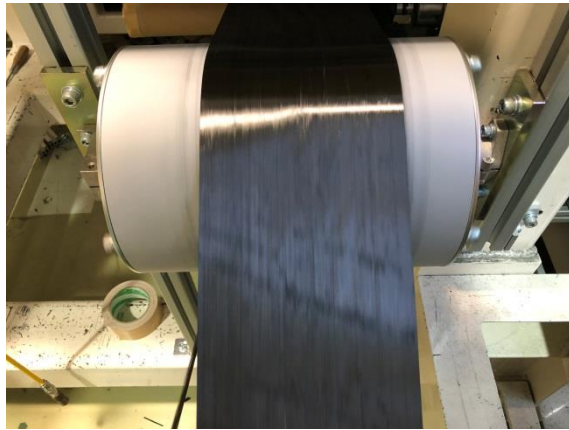


図 1 1 (2) 巻き取り直前の状態

図 1 1 薄層セミプリプレグシートの試作状態

次に、得られた薄層セミプリプレグシートについて、厚さとその断面を観察した結果を図 1 2 に示す。断面観察の結果、樹脂のうねりがほぼないことが確認でき、樹脂フィルムの加熱条件が適切であったと考えられた。得られた薄層セミプリプレグシートの厚さは、マイクロメーターを使用して測定したところ、 $65.4\mu\text{m}$ であった。炭素繊維束 12K を 33mm に開繊して樹脂フィルム(平均厚さ $18\mu\text{m}$) の両面に貼り合わせて樹脂を含浸させた状態での厚さとなるが、炭素繊維束に樹脂が完全含浸した場合には $45\mu\text{m}$ となるため、その差は約 $20.4\mu\text{m}$ になる。4. 2. 1 で実施した PEKK7002 番のデータと比較しても良好な貼り合わせといえる。



図 1 2 薄層プリプレグシートの断面写真

試作として作成された薄層セミプリプレグシートの仕様は以下のとおりであった。

- ・炭素繊維束 T700SC-12K-60E (東レ(株))
- ・熱可塑性樹脂フィルム PEKK フィルム 品番 6002 番、厚さ平均 $18\mu\text{m}$
- ・構成 炭素繊維束 (33mm /本開繊) / PEKK フィルム / 炭素繊維束 (33mm /本開繊)
- ・CF 重量 約 48.5gsm
- ・厚さ (マイクロメーター実測) 約 $65.4\mu\text{m}$
(樹脂含浸時の厚さ約 $45\mu\text{m}$)
- ・繊維体積含有率 V_f 約 60%、
- ・樹脂重量率 W_m 約 32.5%

4. 3. 2 厚層プリプレグシートの試作結果

薄層セミプリプレグシートを 3 枚重ねた厚層プリプレグシートの試作を実施した。

厚層プリプレグシートにするために、薄層プリプレグシート製造装置を使用し、図 6 に示すように幅 150mm の薄層セミプリプレグシートを 3 枚それぞれ加熱加圧ロールに沿わせながら加熱して挿入し、3 枚重ねた状態で加熱加圧ロールにて線圧を負荷し、連続した含浸、一体化を連続して行った。加熱加圧ロールの加熱温度は PEKK6002 番の融点以上である 320 度に設定し、冷却ロールを経て走行する厚層プリプレグシートの両端を

スリット加工し、幅 120mm にして、3 インチ紙管に巻き取りを行った。加工速度は 10m/min で行った。

試作を行った結果、加熱加圧ロール上での薄層セミプリプレグシートの状態は、繊維の蛇行、シートのしわなどが生じることなく、繊維真直性を維持して走行することが確認できた。そして、3 枚を重ね含浸したシートも連続して状態良く製造できることが確認できた。

試作したシートの断面を観察した結果を図 13 に示す。

断面写真をみると、3 枚が一体化していることがわかる。また、繊維の分散性に問題がないことを確認できた。ボイドについては、少ない部分もあるが、多い部分もあり、含浸が完全に行われているとはいえない状態であった。3 枚重ねて成形したプリプレグシートの厚さをマイクロメーターで測定したところ、約 165 μ m であった。完全含浸時の設計厚さは 135 μ m であるため、設計値より約 30 μ m 厚くなっていることがわかる。PEKK7002 番を使用したときと同じような厚さの仕上がりとなった。薄層セミプリプレグシートの状態で 1 枚あたり約 20.4 μ m 厚くなっていることから、3 枚重ねた状態で平均約 61.2 μ m 厚くなると考えられるが、設計値との差は約 30 μ m となっており、加熱加圧成形により樹脂の含浸が進んだと考えられた。この傾向も PEKK7002 番を使用した場合と同様であった。

PEKK6002 番によって、下記仕様のプリプレグシートを試作した。

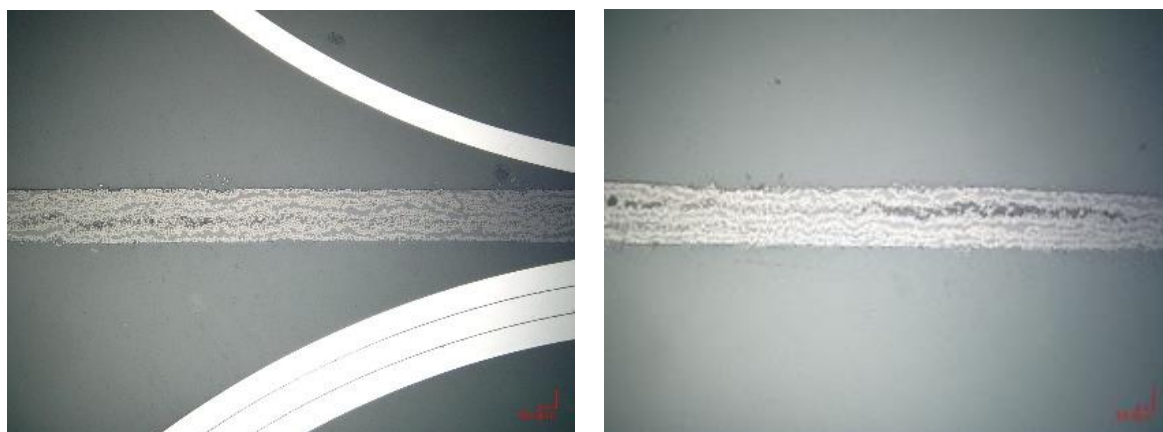


図 13 CF/PEKK 薄層プリプレグシートを 3 枚重ねたプリプレグシートの断面観察写真

- ・炭素繊維束 T700SC-12K-60E (東レ(株))
- ・熱可塑性樹脂フィルム PEKK フィルムー品番 6002 番
- ・構成 厚層プリプレグシート；薄層セミプリプレグシート 3 枚合わせ
薄層セミプリプレグシート；炭素繊維束 (33mm/本開織) / PEKK フィルム (18 μ m) / 炭素繊維束 (33mm/本開織)
- ・厚層プリプレグシート
 - ・プリプレグシート目付け 213g/m² (測定値、設計 215g/m²)
 - ・CF 目付け 145g/m² (開織幅から計算)
 - ・Vf 60.3% (目付けからの計算値、設計 60%)
 - ・Wm 31.9% (目付けからの計算値)

5. まとめ

炭素繊維と PEKK7002 番、PEKK6002 番による厚層プリプレグシートを試作した結果、

まず、薄層セミプリプレグシートを繊維蛇行がない半含浸の状態、加工速度 20m/min にて作成できた。薄

層セミプリプレグシートの試作では加熱温度を低く設定することから、離型ベルトを使用した試作も可能であり、離型シートの長さに影響されない、長尺の薄層セミプリプレグシートを製造できる可能性についても確認できた。

また、その薄層セミプリプレグシートを 3 枚重ねた厚層プリプレグシートを、繊維分散性および樹脂含浸性の度合いがある程度向上した状態で、加工速度 10m/min にて、プリプレグシートを製造できた。厚層プリプレグシートを加工速度 10m/min で製造できることは生産性も向上するため、将来的に低コストなプリプレグシート製造を可能にすると期待できる。

【1-2】ラミネート技術

(図、表の番号は、以降、独立して表示)

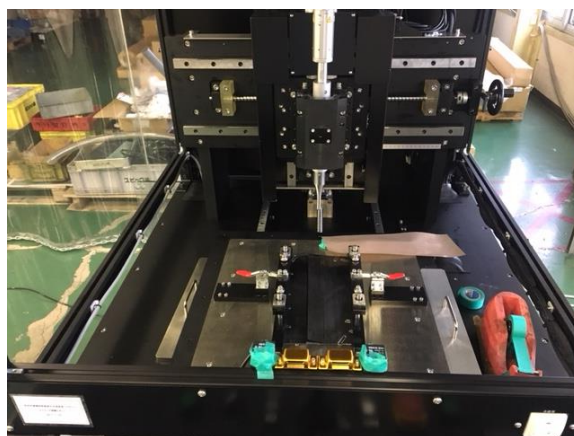
薄層プリプレグ(炭素繊維/PEKK)を用いた 0、45、90、-45 度の 4 方向に擬似等方的に繊維が配向するように積層した 4 層化プリプレグの製作を行った。併せて、4 層プリプレグ完成時に扱いのよい形状(サイズ)にするためにホットプレスにより 4 層プリプレグのトライ成形を行った。これは 90°、45°、-45° に配向するプリプレグを予め 135mm×250mm のサイズに合わせてカットした状態で 4 層プリプレグを成形するものであり、プリプレグをどの時点(1 層時・4 層時)で扱いのよい形状(サイズ)にするかの判断材料として実施した。

次に、炭素繊維/PEKK の一方向連続配列プリプレグを 0、45、90、-45 度の 4 方向(擬似等方)体作成のため、目的のカットサイズをプログラム化した NC プリプレグカッターを用いて連続自動裁断が行えるようにした。プリプレグは薄層(40 μ)、3 枚重ね(120 μ)それぞれの成形条件を模索し適正な条件を確立できた。

カットしたプリプレグを擬似等方に所定の順番に積層していくが、積層のズレ(角度・間隔)を少なくするため、図 1 に示すプリプレグ積層ロボットを用いて各積層間を超音波によりスポット的に仮融着を施し角度 $\pm 2^\circ$ 、間隔 2mm 以内にすることを目的に技術開発を行った。



外 観



積層作業部

図 1 プリプレグ積層ロボット

最初に製作した平板用金型では成形品の寸法にバラツキが出ていたため、再現性に優れた条件を設定できるよう金型の改造を行った。成形時の室内環境に影響されることなく成形加工をするために従来の温調器による温度管理に加え、金型内の温度を測定出来るようにすると共に、更に金型の外側に断熱材を設置することで金型の保持温度を安定させるように改造し(図 2)、外部環境の影響を可能な限り小さくすることによって、良好な積層平板の成

形が可能になった。

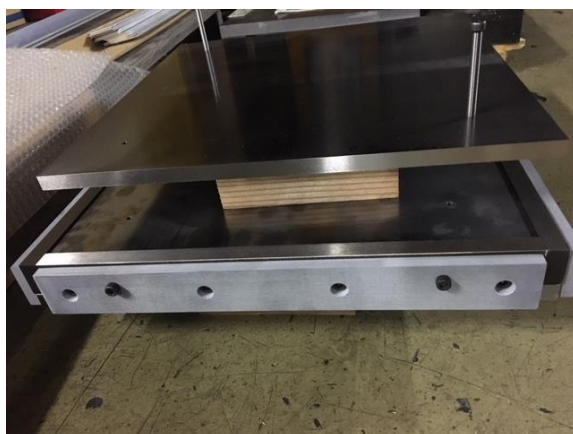
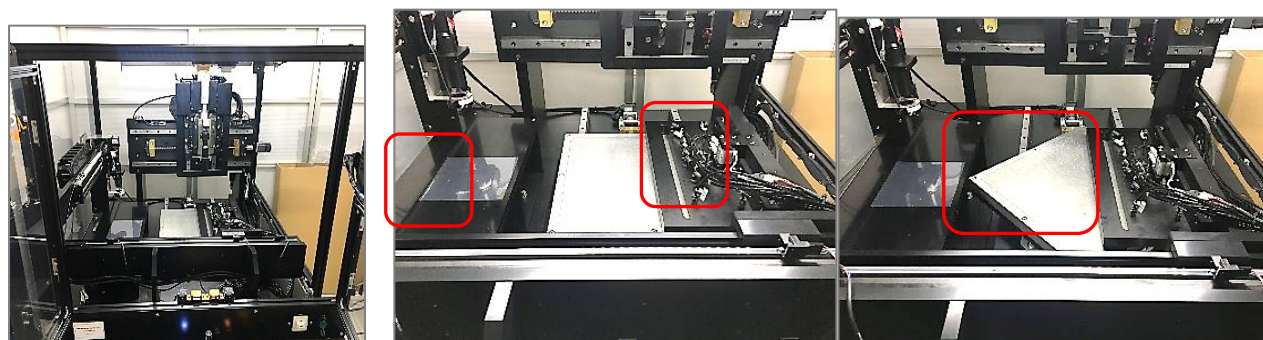


図2 改造した平板用金型

プリプレグ製造装置のプリプレグの幅は160mmであり、成形サイズは140×260mmとして金型製作を行ったが、それ以上の幅が必要になってきた。160mm幅の薄層プリプレグ2枚を接着によって320mmのとして大型部品に対応することにした。そのため、大型部品用の積層プリプレグを製作するために、300×300mm用の金型を製作し、成形した。

プリプレグ積層構成に対し更なる高精度かつバラツキの無い積層を実現させるために図1に示したプリプレグ積層ロボットの可動を図3に示すように、Y軸方向のみからX軸方向の可動を可能にし、テーブルを任意の角度に回転させることで求められる配向に則した対応を可能にした。また、搬送部と超音波発振部にカメラを装備させることにより自動搬送、及び位置決めを自動化するための改造を行った。



外 観

カメラを装備して自動搬送、
位置決めに対応

テーブルを回転させることで
任意の角度に対応

図3 プリプレグ積層ロボットの改造

使用するプリプレグは、炭素繊維/PEKK 一方向薄層プリプレグシート3枚重ねを使用し、積層後の品質向上のため積層時に継ぎ目が重ならず、歩留まりを上げるために、カット位置を複数のパターンにすることとした。図4はリーディングエッジモデル部品用疑似等方パターンを示した。図5は24層に積層する際の、モデル部品用積層構成で、12及び13層の中心からそれぞれ同角度のプリプレグが配置・積層されていることを示し、積層・融着後のプリプレグ積層品の状態である。

このパターンの情報は、NCプリプレグカッターにCADデータを入力することで連続自動裁断が可能であるが、今後の部品では大きいサイズも含まれるため、ロボットの大型化が必要になってくると思われる。

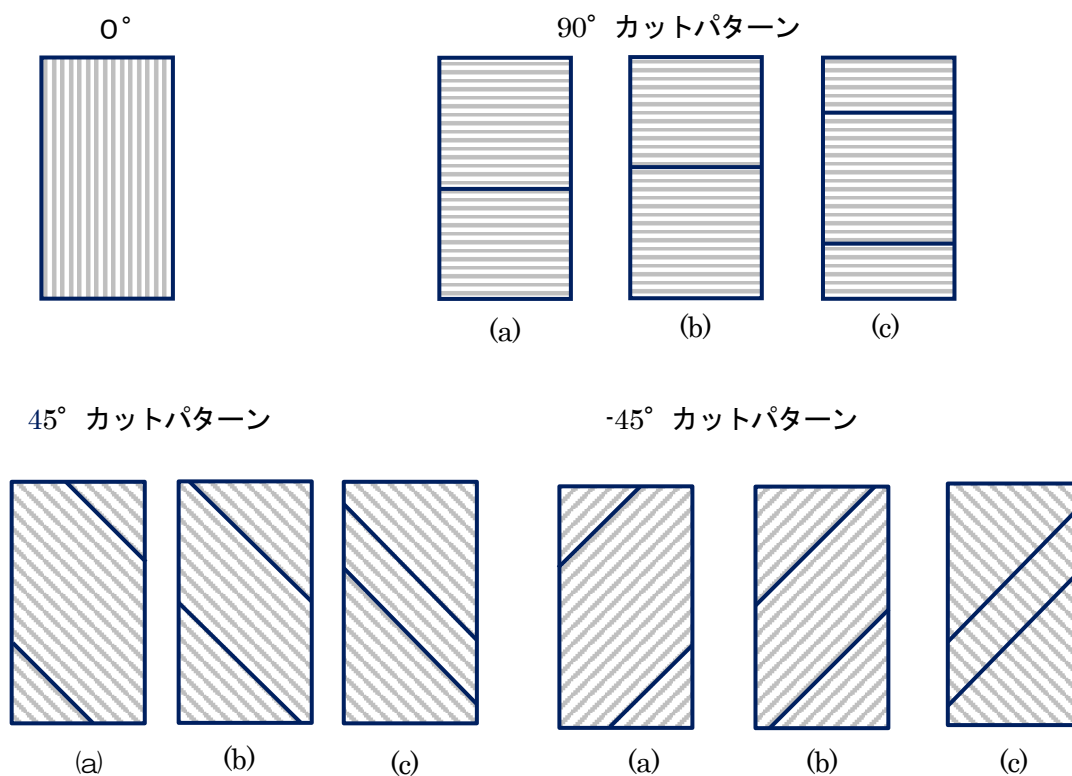


図4 モデル部品用カット位置のパターン

	(45° / 90° / -45° / 0°) ₃ / (0° / -45° / 90° / 45°) ₃
1層目	45°
2層目	90°
3層目	-45°
4層目	0°
5層目	45°
6層目	90°
7層目	-45°
8層目	0°
9層目	45°
10層目	90°
11層目	-45°
12層目	0°
13層目	0°
14層目	-45°
15層目	90°
16層目	45°
17層目	0°
18層目	-45°
19層目	90°
20層目	45°
21層目	0°
22層目	-45°
23層目	90°
24層目	45°

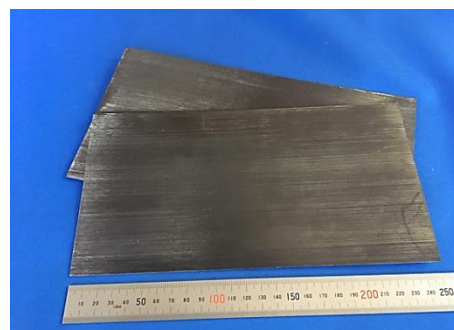


図5 モデル部品用積層構成と
融着後のプリプレグ積層品

【1-3】スーパーエンブラ樹脂と連続繊維強化複合材の積層板を製作

薄層プリプレグ(炭素繊維/PEKK)を使用して積層板の成形トライを行った。幅 140mm のロール状のプリプレグを 135mm×250mm にカットし、厚さ 1.1mm と厚さ 1.7mm の積層板を製作した。プリプレグ 1 枚の厚みを 50 μ m として、成形時は 24 枚を重ねて厚さ 1.1mm、36 枚を重ねて厚さ 1.7mm の積層プリプレグとなる。ここでは試験目的から積層の配向は全て一方向とした。

ここでもプレス成形条件として成形温度、圧力、保持時間をパラメータとして平板を製作した。成形温度は330℃からスタートし400℃まで5℃刻みに行なった。圧力は20 kg/cm²とし、保持時間は20分で固定した。表面の状態と切断面の状態から380、385、390℃の温度で製作した平板がもっとも優れていると判断されたので、強度試験用には385°で成形した平板（図6）を使用することにし、旭金属工業㈱に納入した。

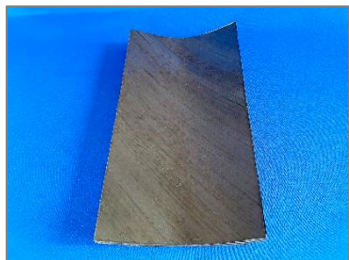


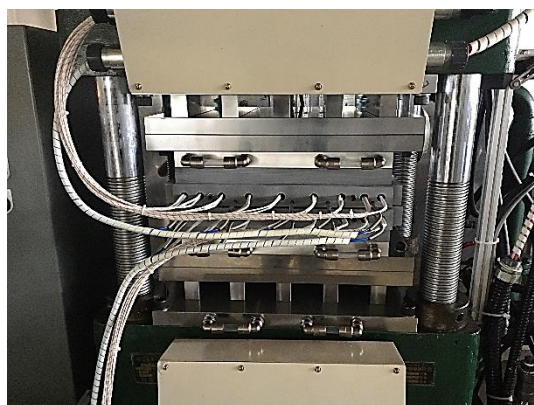
図6 積層プリプレグ（積層板 t1.1mm(24ply), t1.7mm(36ply)）

本事業用に図7に示すように、プレス機の改造を行い、スーパーエンブラ複合材用のホットプレスとして利用することにした。炭素繊維とスーパーエンブラ樹脂（PEKK・PEEK）複合材を成形する場合、加工温度条件が高いうえに高粘度であることから難加工材と云える。

その複合材を成形するためにはプレス機の降下スピードを速め、長時間圧力保持に耐えうる機能を備える改造を行った。本事業で使用する熱可塑性 CFRP の積層板成形用の平板用金型製作し、金型には温調器を接続し、温調器本体とヒーター側の制御ができることを確認した。



プレス機(改造後)



平板用金型



温調器

図7 成形用機器（ホットプレス、金型、温調器）

図8に示すよう、積層板成形に使用する薄層プリプレグを裁断することを目的にプリプレグカッターを導入した。薄層プリプレグを使用してのカットを行い、カット面、精度に問題がないことを確認した。



図8 プリプレグカッター



図9 データロガー

本事業用のホットプレス機、金型、温調器などの設備を使用して、薄層プリプレグによる積層板の成形条件の確立を進めた。まず、トライ成形を行ったが、トライ用機材（炭素繊維クロス）を使用しプレス機の動作、金型の精度、温調器の昇温機能などを確認し、成形に係わる諸条件の基礎を把握した。

その後、プリプレグカッターによりカットした薄層プリプレグを恒温器に投入し、樹脂内部の水分を除去して、所定の厚さに積層し、昇温した平板用の金型にセットして、プレス成形を行った。

平板成形時には金型温度だけでなく、データロガーを使用しプリプレグ積層板内部の温度を測定し、内部温度の確認をするとともに保持時間－加圧力の影響等について調査しつつ、成形条件を明らかにした。

薄層プリプレグ、及び3枚重ねプリプレグを用いて、150×260mm、300×300mmの任意の厚さに積層する成形技術を開発した。また機械的性質（引張、高温圧縮、有孔圧縮及び面内剪断強度）測定のための試験片の製作を行った。これらについては【3－2】項で詳述する。

プレス成形時の温度、圧力、保持時間をパラメータ化し成形条件を整えた。標準的な成形条件は次のようであった。

金型温度：385℃

加圧力：5MPa

保持時間：25min

結晶化処理：210～260℃で3分以上

図10に示すように、金型内部温度をデータロガーにより採取し温度条件を整えた。

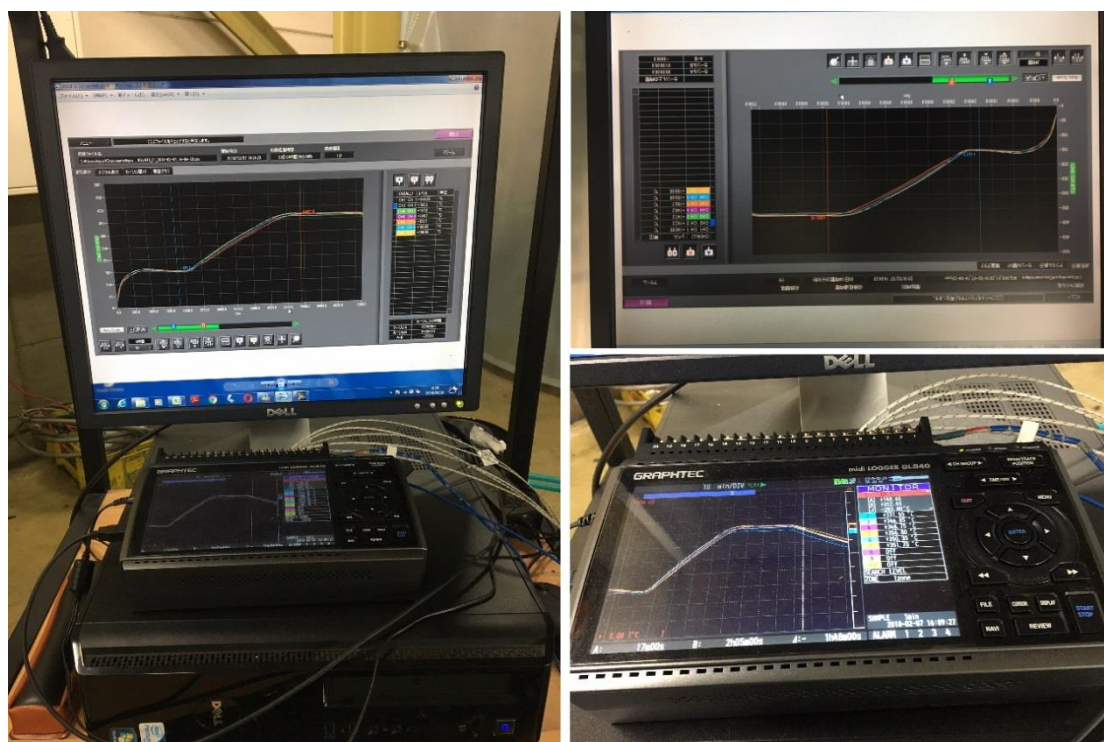


図 10 プレス成形条件の研究時はデータロガーを用いる

今年度製作した平板用金型は、最大長 320mm までの試験片製作に対応した 370×370mm サイズ平板用金型(図 11)を完成させた。これにより下記の試験片用積層板の製作を行った。成形には、改造したホットプレス機、温度調節器を使用し、前年度確立した成形条件をデータロガーを使用して温度管理したうえで積層板の製作を進めた。

平板用金型の構成は、外気の温度干渉を低減するために外側に断熱板を設置し、金型内部温度の測定を可能にした構造となっている。積層板の製作には内部温度分布は±5 度以内の条件を抽出している。



図 11 □370mm 平板用金型及び採取試験片

●強度試験片

引張試験
高温圧縮試験
せん断試験
有孔圧縮試験

●燃焼試験片

煙密度/有毒ガス試験
垂直燃焼試験
発熱試験

【2】 成形技術への対応

【2-1】 プリプレグ積層板の賦形技術、エッジシール及び表面塗装技術

本事業で改造したプレス機を使用してトライ成形を行い、成形条件(高圧力、長時間圧力保持、高温環境)に対応することを確認した。

プレス機に設置した平板用金型に温調機のヒーター側を組み込んであり、温調機の本体側（コントローラー）との連動を確認し、常温から成形温度である 380° までの昇温時間を計測したところ 25～29 分であった。これは弊社通常使用している温調器と比較して約 40%のスピードアップとなった。

●予備加熱装置を用いたハイサイクル成形の可能性を確認するために積層板の昇温速度を計測した。

予備加熱装置の発熱体は図 1 2 に示すように、2 枚からなり、2 枚の間に基材を挿入し、両側から昇温させ、成形温度（380℃）到達時にプレス機にセットされた賦形用金型に移動する。2 枚の発熱体の距離と基材の昇温時間の関係をデータロガーを使用して測った。比較的安定した挙動で温度上昇をすることが認められる。しかし、金型挿入の直前での温度降下が急速であり、ばらつくことが分かり、予備加熱装置のみによる加熱方式には課題が残った。



図 1 2 予備加熱装置

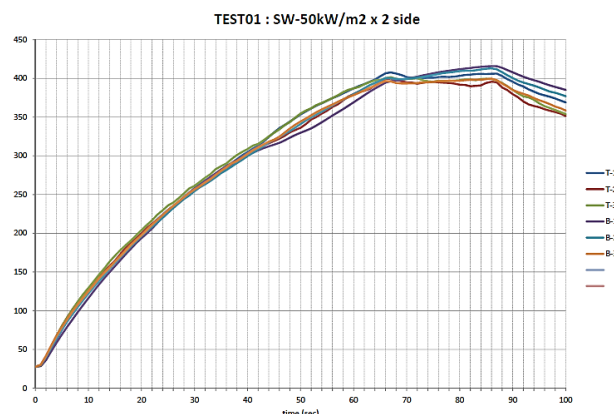


図 1 3 平板の温度上昇例

次に、自社で改造をしたプレス機により、炭素繊維/PEKK の薄層プリプレグ及び 3 枚重ねプリプレグを用い

て成形を進めた。このため新たに平板状とモデル部品用の 2 種の金型製作を行った。

平板状の金型は指定された配向の、厚さが指定された積層数のプリプレグで成形を行った。成形された製品は、機械的性質試験片及び表面塗装用試験片である。

モデル部品用金型は、CATIAV5 で仮想形状、寸法のブラケットタイプのモデルを設計し、それに合わせた金型図面を起こして設計・製作した。このモデルは航空機 2 次構造部品を模した形状で、製作した金型を図 1 4 に示す。試作品は仕上げ加工及び表面塗装を行ってシンガポールエアショーに出展した。

モデル部品のブラケット形状を成形するために図 1 4 の専用の金型を製作したが、金型には金型内でヒート&クールを可能にするためのヒーターと水路を設けており、温調器により金型温度を適切にコントロールすることを可能にした。使用した CFRP プリプレグは厚み 3mm、積層構成は 3 枚重ねプリプレグを 28 枚積層したが、次のように行った。

(45/90/-45/0)3 /90/90/90/90/(0/45/90/-45)3 に配向した。

プリプレグの加工には、NC プリプレグカッター、プリプレグ積層ロボット、恒温器を使用し、プレス成形時にはホットプレス、モデル用金型、温調器、データロガーを使用し、成形条件の適正化を行った。モデル部品のプレス直後の形状は図 1 5 に示すような状態で、プレスではみ出したバリが残存している。これを図 1 6 に示すよう展示に向けて機械加工にてトリミング、穴あけ加工を施し、仕上げ加工を行った。これらの試作品に対して、展示会に出展するために表面塗装を行うと共に、3 次元寸法測定及び非破壊による内部観察を行ったが、検査結果については【3-3】にて説明を行う。

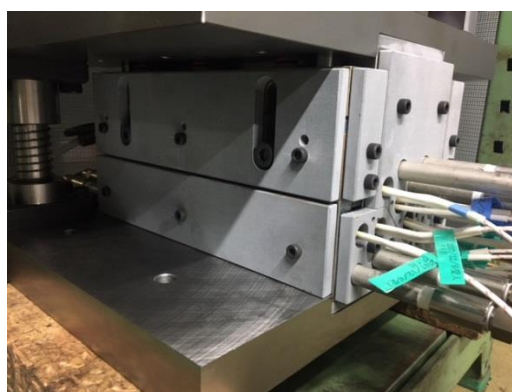
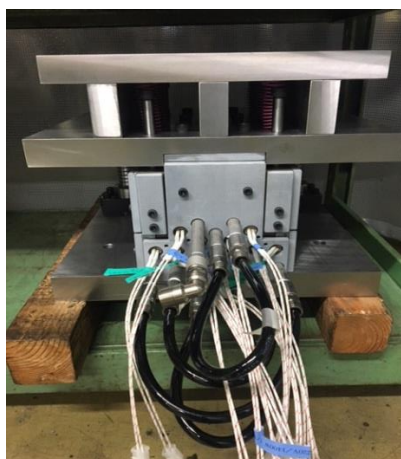


図 14 モデル部品成形用金型



図 15 プレス成形試作品



図 16 切削加工によりトリム、穴あけ加工後

次に、航空機の尾翼のリーディングエッジを想定した形状のモデル部品の試作を行うことにした。これは厚くて加工半径が小さなもので、プレス成形では難度の高い形状である。CATIAV5 で設計したモデル部品の形状を再現するための金型の設計と製作を行いモデル部品用金型は図 17 に示す。炭素繊維/PEKK 薄層プリプレグシートを 3 枚重ねにしたプリプレグの積層条件及びホットプレスによる成形条件の適正化を検討し、プレスによる曲げ加工に必要な材料厚みと加工半径の関係を明らかにするための基礎実験を行い、プリプレグの裏・表でのズレの差を把握し、必要なプリプレグの大きさを決定した。

炭素繊維/PEKK 薄層プリプレグシートを 3 枚重ねしたプリプレグを NC プリプレグカッターにより自動裁断し、プリプレグ積層ロボットを使用して自動積層、及び仮融着をよりバラツキのないプリプレグ積層品の作成し、プレス用素材とした。



金型(上型)



金型(下型)

図 17 モデル部品用金型

本モデル部品は、厚くて小さな半径を持った難形状であるため、プレス前に仮賦形を行いプリプレグの積層ズレを極力防ぎ、繊維の樹脂への含浸性を高めることとした。図 18 が仮賦形用治具とプリプレグを治具にセットした状態と治具から取り出したプリプレグ積層品である。

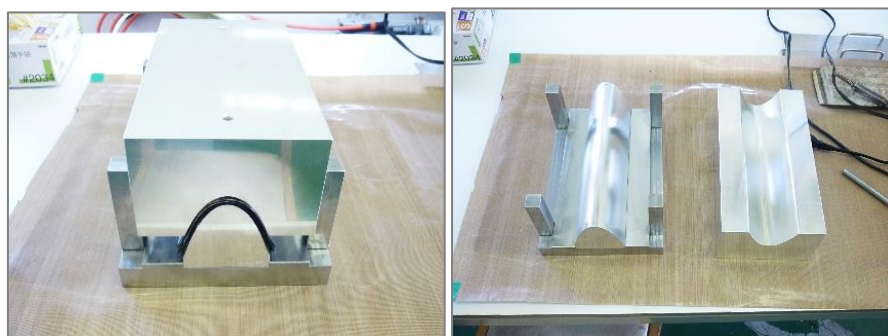


図 18 仮賦形用治具及びプリプレグのセット

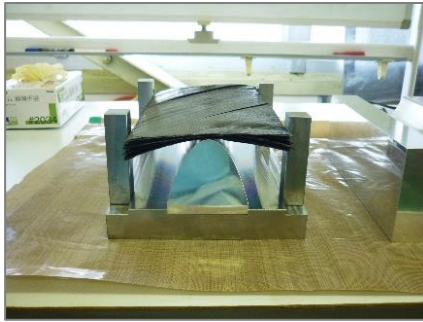


図 19 加圧成形状態及び治具から取り出した積層品

ホットプレス成形は、成形温度、圧力、保持時間をパラメータとし成形条件の研究を行った。前年度のモデル部品成形時の成形条件を参考にし、図 20 の角度と圧力の関係を表したデータに従い圧力の抽出を行った。

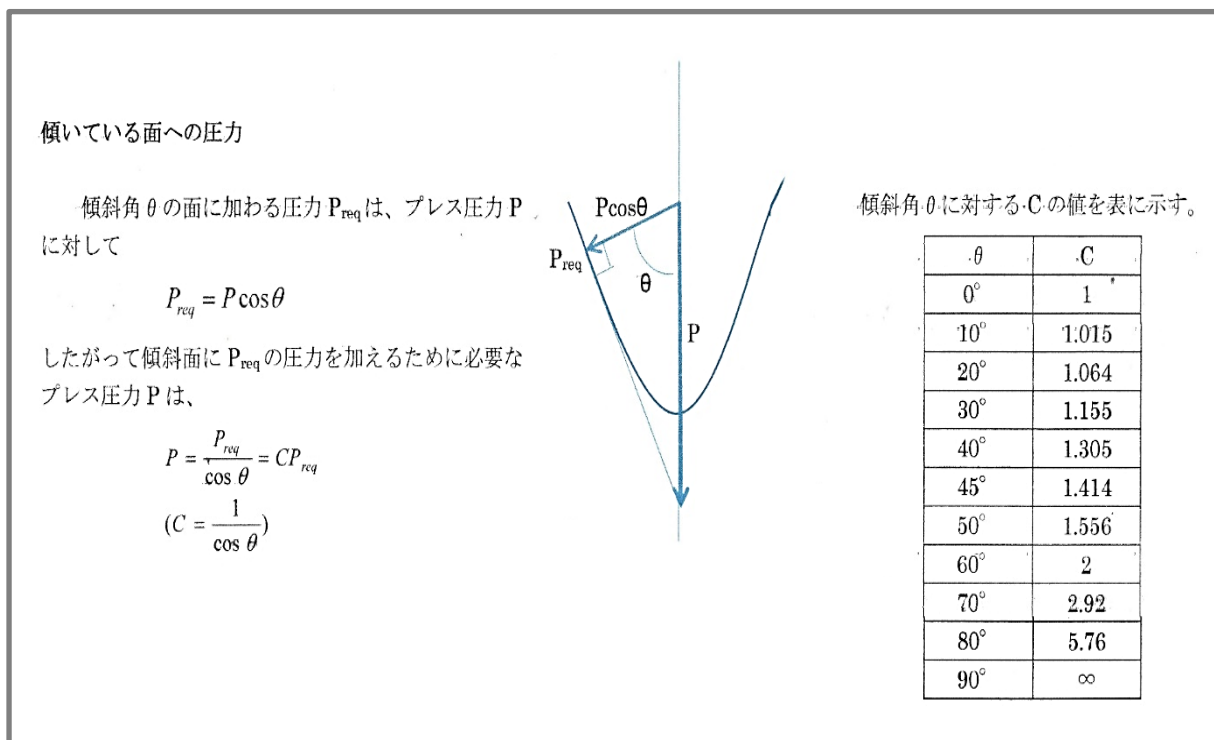


図 20 角度と圧力の関係を表したデータ

プリプレグの厚さが大きく曲げ角度の小さい本モデル部品の成形条件は下記条件で行った。各条件で成形したモデル部品(図 22)。

- ・成形温度：385、395、405 $^{\circ}\text{C}$
- ・成形圧力：37.6～50 ton
- ・保持時間：25、30 min

※冷却時は $210 \sim 260^{\circ}\text{C}$ で 3min 以上保持して PEKK 樹脂 7002 番の結晶化させた。

成形は引き続き継続しているが、現時点では成形温度 385°C 、成形圧力 37.6 ton、保持時間 25min の条件が最適であった。旭金属工業㈱にて次工程及び各種試験を行うためのモデル部品を完成させた。

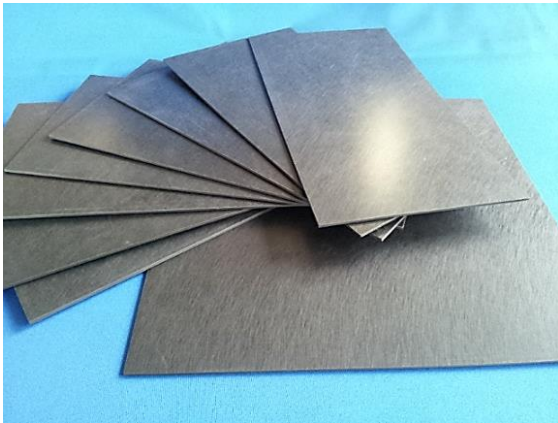


図 21 成形前プリプレグ



図 22 モデル部品

ホットプレス成形後、設計図面通りのモデル部品切り出し、仕上げを行うために切削用治具(図 23)を製作し、マシニングセンターにより切削加工を行いモデル部品(図 24)を完成させた。



図 23 切削用治具

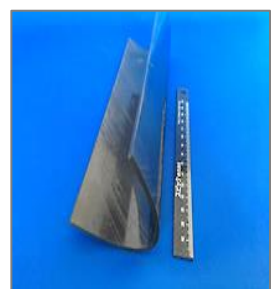
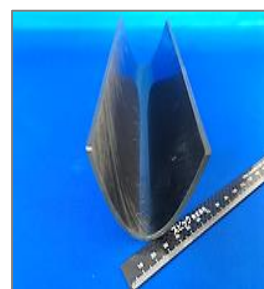
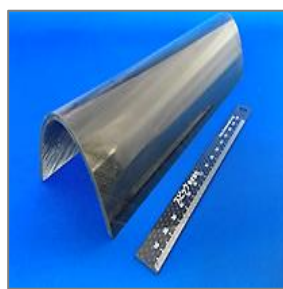
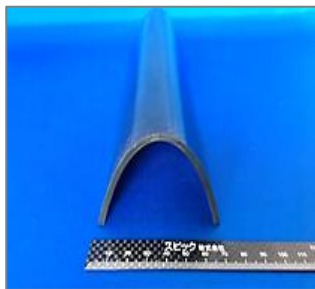


図 24 切削加工後のモデル部品

次に塗装試験及びエッジシールについて述べる。まず、PEKK 複合材への塗装を行った。

PEKK 試験-1

CF(UD)/PEKK t1.1 24ply 塗装試験片に対し、エポキシプライマ(PPG 製、512X310/910X533)を 7.6 ~20.3 μm 狙いでスプレー塗布した。塗装前処理は、MEK による溶剤洗浄→スコッチブライト No.7447 によ

る研磨洗浄→MEKによる溶剤洗浄という手順を行った。塗料の乾燥条件は、自然乾燥 15 分後、強制乾燥 71℃×20 分を採用した。塗装後、外観、膜厚、耐溶剤性、密着性の評価を実施した。外観について、目視による検査を実施し、均一な外観を確認出来た。膜厚について、塗装試験片の横に並べて同時塗装したアルミニウムパネルの塗装膜厚を渦電流式膜厚計にて測定し、規定膜厚であることを確認出来た。耐溶剤性の評価方法は、塗装後 7 日経過した塗装表面を、MEK を浸したチーズクロスにて 15 往復擦り、塗料が剥がれないことを確認する方法を採用した。その結果を図 25 に示すが、塗装直後～塗装後数日までは塗料が剥がれたが、塗装後 7 日経過時点では塗料が剥がれなかったため、良好な耐溶剤性が確認出来た。密着性の評価方法は、図 26 に示すようにドライテーパーテストとウェットテーパーテストの 2 通りの方法を採用した。ドライテーパーテストについては、3M 社 No.#250 テープを塗装表面にしっかりと貼り付け、垂直方向に一気に剥がした結果、塗料の剥がれが無いことを確認出来た。ウェットテーパーテストについては、純水を浸した 4×4 inch のチーズクロスに貼り付け、ポリエチレンシートで覆い、周囲にテープを貼り付け密閉し、20～24 時間放置後、水分をチーズクロスで除去してから前述のドライテーパーテストを実施した結果、塗料の剥がれが無いことを確認出来た。これらの結果から、外観、膜厚、耐溶剤性、密着性の 4 項目全ての検査要求事項を満足する塗装が実施出来た。

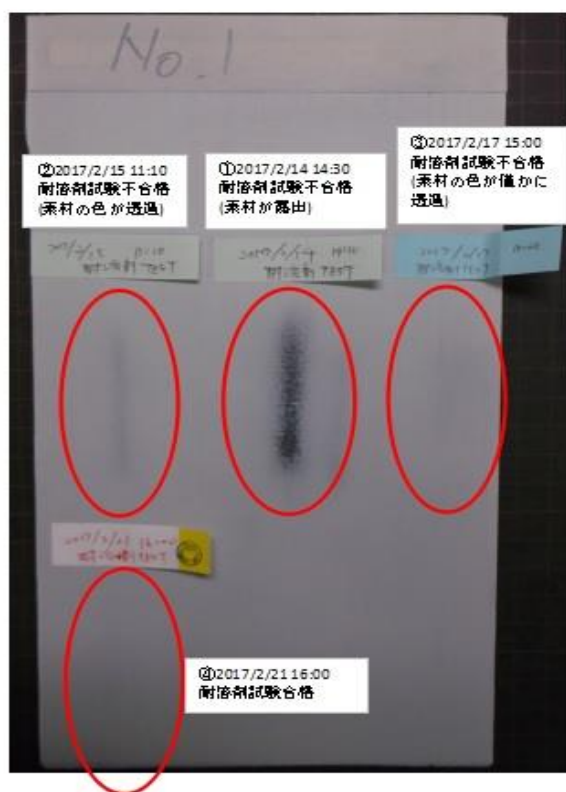


図 25 塗装膜の耐溶剤性試験結果

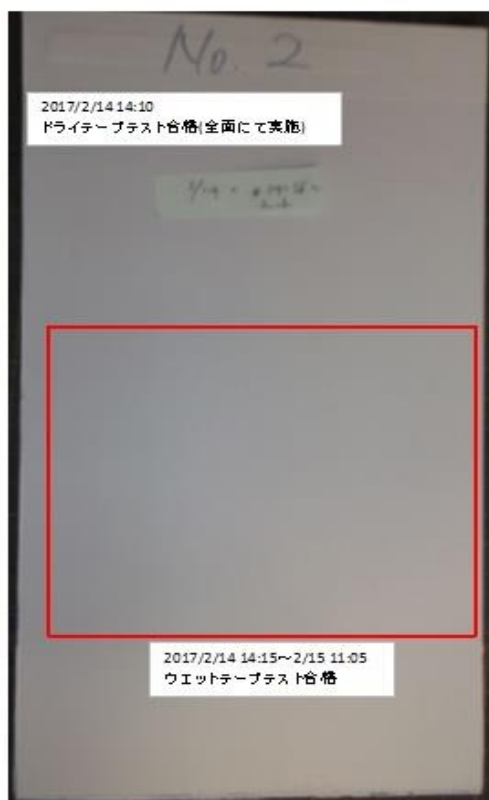


図 26 塗装膜の密着性試験結果

PEKK 試験-2

試験-1 で実施した塗装前処理の内、研磨洗浄を省略して溶剤洗浄のみの前処理にて塗装を実施し、外観と密着性に違いが無いかが調べた。膜厚や乾燥条件は試験-1 と同条件にて試験を実施した。その結果、密着性に関してはドライテーパーテストとウェットテーパーテストの両方に合格したが、外観に関しては、巣穴、複合材の繊維の筋のようなものが観察された。外観に関しては不合格であったため、研磨洗浄が必要であることが確認出来た。

PEKK 試験-3

試験-1 と同条件にて塗装した試験片に関し、塗料の剥離方法を検討した。結果を図 27 に示すが、図中左側の #180 アルミナによるドライブラストを適用した結果、良好な外観が確認出来た。図中中央 #400 アルミナ研磨紙によるサンディングを適用した場合にも、良好な外観が確認出来た。図中右側の剥離液(CEE BEE A-202)を適用した結果、部分的にしか剥離出来なかったことに加え、剥離液と複合材表面が反応し、反応した面が凹面になるように試験片が反ってしまった。これらの結果より、CFRTP に塗装したものに対する剥離方法としては、物理的な剥離方法が適していることが分かった。



図 27 塗装膜の剥離試験結果

PEKK 試験-4

上記 3 種類の塗装試験片は、成形時の離型フィルムに PTFE を用いたプリプレグであったが、離型フィルムにポリイミドを使用して成形したプリプレグの方が表面が滑らかであった為、離型フィルムにポリイミドを使用して成形した塗装試験片に対して、試験-2 と同様の研磨洗浄を省略した評価を実施して、外観に違いが無いか調べた。その結果、離型フィルムに PTFE を用いた試験片と比べて、巣穴は観察されなくなり、数は少なくなったものの複合材の繊維の筋のようなものは依然観察された。従って、離型フィルムにポリイミドを使用して成形したプリプレグに関しても研磨洗浄が必要なことが分かった。

CF(UD)/PEEK 積層材へのプライマー塗装試験

顧客スペックでは、PEEK 材に対して、プライマー密着性向上を目的とした Primer-Surfacer の塗装がプライマー塗装前に要求されている為、CF(UD)/PEEK 積層材に対して、Primer-Surfacer の有無で密着性に影響があるか確認することを試験目的とした。

積層材への塗装は以下の方法で実施した。最初に MEK による手拭き溶剤で洗浄した後、#320 相当の酸化アルミニウム研磨パッドにてサンディングを行い、サンディング残渣を MEK による手拭き溶剤洗浄にて除去した。Primer-Surfacer を適用する積層材に対しては、前処理後の積層材に、乾燥膜厚が 25.4~50.8 μm になるように Primer-Surfacer をスプレー塗装し、15 分以上自然乾燥後、乾燥機を用いて約 50°C で 30 分強制乾燥させる工程を追加した。その後、プライマー塗装を実施した。

密着性評価は、ドライテープテストとウエットテープテストの 2 通りの方法で実施し、7.06N/cm の接着力のゴム系粘着剤テープを使用した。ドライテープテストは、テープ自身のロールを用いてプライマー面にテープを強

く押し付けて接着させ、プライマー面に対して垂直に持ち上げるようにテープを一気に剥がすことにより、塗料の剥がれが無いかなどを検査をする試験方法である。ウェットテープテストは、脱イオン水に浸した約 100×100mm のチーズクロスプライマー面に貼り付け、ポリエチレンシートでカバーして縁をテープで固定・密閉し、20～24 時間経過した段階でチーズクロス及び水分を除去後、ドライテープテストをする試験方法である。密着性評価の結果、Primer-Surfacer の有無に関わらず、ドライテープテストもウェットテープテストも合格した為、CF(UD)/PEEK 積層材に対するプライマーの密着性が良好なことが判明した。



図 28 CF(UD)/PEEK 積層材表面



図 29 凹みや繊維の筋が残っているプライマー塗装表面

しかし、CF(UD)/PEEK 積層材表面には成形時に無数の凹みや繊維の筋が特に端部付近に集中的に生じており(図 28)、そのまま塗装すると、プライマー塗装表面にも凹みや繊維の筋が残ってしまう状態であった(図 29)。そこで、Primer-Surfacer をスプレー塗装し、15 分以上自然乾燥後、乾燥機を用いて約 60℃で 4 時間強制乾燥させた後、#320 のシリコンカーバイド研磨紙で Primer-Surfacer 表面をサンディングし、再度 Primer-Surfacer をスプレー塗装するという工程を、塗装後に凹みや繊維の筋が残らなくなるまで繰り返した。その結果、Primer-Surfacer 塗装を計 3～4 回繰り返すことにより、欠陥部分に Primer-Surfacer が十分に入り込み、凹みや繊維の筋の無い平滑な Primer-Surfacer 塗装表面を得ることが出来た(図 30)。



図 30 平滑な Primer-Surfacer 塗装表面と Primer-Surfacer サンディング後の表面

シンガポールエアショー出展用モデル部品(A)に対するプライマー塗装を実施した。CF(UD)/PEEK 積層材に対する塗装試験は昨年度実施済みであり、確立された工程で塗装を実施した。その結果、穴周りや端部に、繊維方向に沿った塗料の剥がれが部分的に発生した。これは、アングル材の最外層の繊維方向が 45° 方向であることに起因し、加工時の刃の送り方向と繊維方向の関係で、繊維が捲り上げるような状態になったことが原因として考えられる。2 つ目のアングル材塗装においては、サンディング工程に細心の注意を払い、端部や穴周りを重点的にサンディングし、目視だけでなく指触確認も行い、凹凸が存在しないことを確認してから塗装した所、良好な外観に仕上がった(図 31)。



図31 モデル部品 (A) 塗装表面 (両面)

エッジシーリング作業工程を確立する目的で、120×20mm に加工した CF (UD)/PEKK t2.1, 45ply のプリプレグ端面に、エッジシーリング剤(3M 製、EC-2216 B/A GRAY)を塗布する試験を実施した。

試験-1

2 ounce/kit のチューブの荷姿のエッジシーリング剤をステンレス板の上で混合し、MEK による溶剤洗浄→スコッチブライト No.7447 による研磨洗浄→MEK による溶剤洗浄という手順で前処理を実施したプリプレグ端面に、ステンレス製の薬さじ及び樹脂製のへらを用いてエッジシーリング剤を塗布し、形を整えた。膜厚を 762 μm 以下にする必要があり、膜厚測定は、塗布したエッジシーリング剤が乾燥する前に、ウエットフィルムゲージにて実施した。ウエットフィルムゲージはくし型とロータリー型の 2 種類があり、今回試験したエッジは厚さが 2.1mm であった為、くし型ゲージを用いて膜厚測定を実施した。膜厚オーバーしている箇所は、塗布したエッジシーリング剤を除去し、規定膜厚に調整した。幅の広いエッジにおいてはロータリー型のゲージを使用出来る為、本試験片の 120×20mm の面にエッジシーリング剤を塗布し、ロータリー型ゲージにて膜厚測定し、くし型との作業性の違いを比較検討した。その結果、ロータリー型よりもくし型の方が作業性が良いことが分かった。エッジシーリングの塗布が終わった後は、一晩自然乾燥し、硬化後の状態を確認したことを以って、エッジシーリングの一連の作業の流れを確認出来た (図 32)。

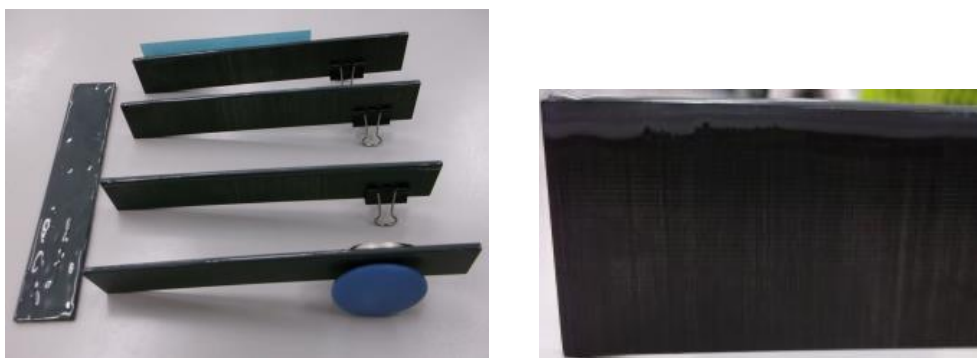


図 32 エッジシーリング試験

試験-2

43 mL/kit duo-pak cartridge の荷姿のエッジシーリング剤を、専用ガン(3M 製、Scotch-Weld EPX Plus II Applicator)を用いて塗布し、チューブ製のエッジシーリング剤との作業性の比較を実施した。その結果、専用ガンを用いる作業の方が効率が良いことが分かった。チューブ製の場合、混合工程と塗布工程があるのに対し、専用ガンを用いる場合、ガンのグリップを握りエッジシーリング剤を押し出す際に、ガンの先端に取り付けたノズル内部で自動で混合されて塗布出来るので、通常だと「混合」と「塗布」の 2 工程の所を「塗布」の 1 工程のみで済み、とても作業性が良いことが分かった。また、塗布工程だけで考えても、ノズル先端から出てくる分を試験片端面に直接連続的に塗布出来るので、ステンレス製の薬さじ及び樹脂製のへらで小分けで塗布するのに比べ、作業

性が良いことが分かった。また、エッジシーリング剤は混合すると時間経過と共に徐々に硬化していくが、専用ガンを用いた場合、先端のノズル部分で混合されて押し出されるので、混合直後に塗布することが可能で、一定の粘度で作業出来るというメリットがあることも分かった。

【2-2】自動化システムとサイクルタイムの短縮

プリプレグのカットには本事業で購入したプリプレグカッターを使用し切断工程のハイサイクル化を検討した。また、カットしたプリプレグを積層した後に積層のズレの発生を無くすため融着ロボット（機械化）による仮止めについて適正条件を確立すると共に、仮止め後の積層板の積層状態について目視検査を行った。

本事業で製作した平板用金型と温調機は高温での成形が必要なスーパーエンブラ樹脂をターゲットに構造設計をしており、完成した金型は昇温時間を短縮する設計となっている。

賦形については、図 33 に示すように予備加熱装置を使用し短時間でプリプレグ過熱を行い、ハイサイクルのプレス成形を行うための研究を行った。しかし、搬送過程での温度低下が激しく、金型にセットした時点では成形温度を下回るため、予備加熱温度について更なる検討を行う必要がある。

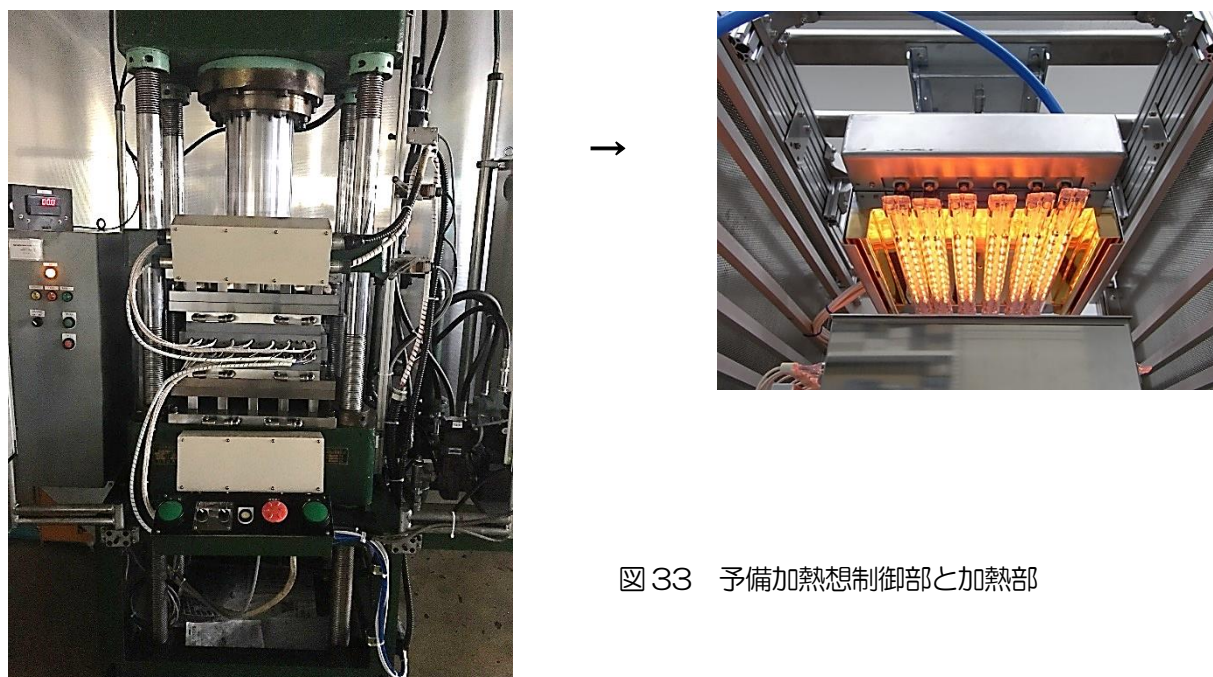


図 33 予備加熱制御部と加熱部

プリプレグのカットは、NC プリプレグカッターにより薄層品・3 枚重ね品とも任意の角度のカットを自動で順次カットすることで自動化、及び時間短縮が実現した。

プリプレグの積層はハンドレイアップで行い、プレス成形までのハンドリングにおいて積層のズレ（角度・間隔）が起きやすく、その対策としてプリプレグ積層ロボットを使用することで、航空機部品製作において必須である精度（角度公差・積層間隔）と時間短縮を可能にした。

図 33 の予備加熱装置の改造により、プリプレグの昇温時間が格段に速くなりサイクルタイムの短縮が実現した。しかし、成形品の状態には成形温度の低下により、課題が多く、成形条件の確立には時間が掛かるため、モデル部品の成形では、予備加熱装置を使わず、金型内での加熱ヒート&クール成形で進めた。

成形する積層板のサイズ、配向に則した薄層プリプレグのカットは CAD データと NC プリプレグカッターを連動させることで連続自動裁断を可能にした。最終年度に改造を加えたプリプレグ積層ロボットは、超音波発振部

の×軸可動に加えＹ軸可動を可能にし、更にワークステージを任意の角度に回転させることであらゆる配向角度に対応することを可能にした。この改造により、一層の自動化と安定したタクトタイムによりサイクルタイムの短縮を進めることが出来た。

【３】 認証取得のための工程管理及び検査技術への対応

【３－１】 工程管理技術

成形プロセスを担当するスピック㈱は、機体メーカーの認証取得には、先ず JIS Q 9100 を取得する必要がある、旭金属工業㈱の支援を受け、社内一丸になって取得する体制を整備するとともに、取得スケジュールを作成し、取得に向けた活動を行ってきた。

また、各種の認証取得の講演会、セミナー等の座学を行ってきたが、表 4 に示すイベントに参加し、その情報を社内で共有化してきた。

表 4 実施した教育

- ・ 航空機部品胸腔システム研究会第 22 回定例講習会
「Tier1 がサプライヤーに求める生産管理と品質保証能力」受講(17/8/21)
- ・ JISQ9100(航空、宇宙、防衛産業向け品質マネジメント)入門セミナー 受講(17/11/29)
- ・ JIS 取得に向けてコンサルタント会社、及び取得機関と打ち合わせ・相談を開始した。
(17/12/25, 18/1/18)
- ・ 旭金属工業殿より定期的に教育を受けており、文章規定素案、不適合管理規定の作成を行っている。
- ・ SMBC 航空産業セミナー2018 東京 受講(18/3/28)

当初予定を 1 年繰り上げて、平成 32 年度内に JIS Q 9100 を取得するために、図 34 に示すスケジュールでトップダウンで推し進める。経費支援に関しては、今後とも中部経済産業局航空宇宙産業化を通して関東経済産業局の支援をお願いする。

	平成 30 年度	平成 31 年度	平成 32 年度
認証取得チーム構築準備	←→		
対応適合状況調査及び構築支援		←→	
マネジメントシステム運用支援		↔	
最終準備及び審査対応		←→	
認証取得			★

図 34 JIS Q 9100 取得スケジュール

これまでに作成した工程、作業、検査に関する基準書、の代表例を表 5 に示すが、ほかにも工程に係る基準

書を作成しているが、各種のスペックが示されており、本プロジェクトのオリジナルの総括的工程基準書を立案し、機体メーカーに提案していく予定である。

表5 作成した文書の代表例

区分	番号	名称
工程基準書	FI-120	繊維強化熱可塑性樹脂の成形要領
工程基準書	FI-110	製造中の複合材部品および二次燃料遮蔽材の紫外線劣化防止管理要領
工程基準書	SL-180	アルミニウム構造物に隣接する複合材のエッジシーリング
検査基準書	ATS-1910	超音波探傷検査
検査基準書	ATS-3024	ポリマー基複合材の有孔圧縮試験
検査基準書	ATS-4019	シーリング検査

【3-2】検査技術

1. 非破壊検査

航空機機体部品の内部欠陥テストは、主に超音波探傷計が利用されている。これは、非破壊で製品検査のできる特徴を生かしているが、その解析には計測図形の高度な解析能力が必要とされ、公的検査は資格を有した技術者が行わねばならないと定められている。

プリプレグは板状 CFRP の積層構造で製作されており、板と板の間が完全密着していなければならない、密着していないものは成形用素材としては使えない。成形は素材の融点近傍の高温で加圧成形されるが、空気の巻き込み、内部気泡の発生などによりボイドの発生が懸念され、機械的強度低下の原因になる。これらは欠陥として、早期に見出さなければならない。超音波探傷計は試験片を水中に置いて、計測するのが正規の方法であるが、生産現場で簡単に測定する技術が必要となる。水中計測は装置が大型化し、高価であり、本開発ではぎふ技術革新センターの設備(日本クラウトクレマー社製、全没水浸パルス反射法)で進め、現場では今回購入したポータブルな装置(GE センシング&インスペクション・テクノロジー社製、直接接触式パルス反射)を使った。このため、両者の測定画像あるいは周波数、波形解析などに、相関性を確立し、ポータブルな装置でも精度を高めた測定ができるように調整を行った。

また、確認のためプリプレグ成形用素材の層間剥離およびボイドについて、X線 CT スキャンによる非破壊観察を行った。超音波探傷試験に使用した試験片は、PEKK 樹脂複合材の45層積層板(厚さ2.1mm)であった。



図34 ポータブル探傷計による測定例

1) 全没水浸パルス反射法による測定及びX線CTスキャンによる内部組織の検証

探傷条件は走査速度 150 mm/s、サンプリングピッチ 0.1 mm×0.25 mm、水深 30mm で行い、周波数を 5～10 MHz の範囲で走査したが、5 MHz でも欠陥の検出を妨げるような超音波の散乱や減衰は発生しないが、精度を上げるために 10 MHz の周波数で測定したが明確な内部欠陥として識別される部分は認められなかった。従って、5 MHz の周波数で測定するした。X線CTスキャンにより、UD プリプレグ内部の組織観察の検証を行ったが、各断面および平面のいずれにおいても剥離あるいはボイドに起因する欠陥のないことが確認され、超音波探傷の測定結果は妥当であると判断した。

2) 直接接触式パルス反射法

本プロジェクトで購入したポータブル方式の探傷計(重量 3kg)であり、測定したい場所で測定ができ、試験片と超音波端子の接触界面の接触媒質としては水でよい。

上記と同じ試験片を使い、空气中で試験片に水を介して直接接触して測定する。

図 34 (1) は探傷前のディスプレイ表示例で、図 34 (2) は 5 MHz での測定結果、図 34 (3) は 3.5 MHz での測定結果である。両周波数とも欠陥の検出を妨げるような超音波の散乱や減衰は、いずれの周波数に対しても発生しないことが確認できた。内部に明確に欠陥として識別される部分は見つからなかった。

3) 対比試験片の作成と評価

超音波検査用の標準試験片的機能を有する対比試験片を作成し、超音波 C スキャン及びマイクロフォーカス X 線透視により内部検査を行い、人工欠陥の状態及び自然欠陥の有無について確認し、対比試験片の評価を行った。

対比試験片は 3 枚重ねのプリプレグを 25 枚重ねて 2.5 mm 厚さになるようにすると共に人工欠陥として真鍮(厚さ 25 μ m)を埋め込んだ。

25 枚の一方向配列プリプレグは (45/0/-45/90)₃/90/ (0/45/90/-45)₃に積層した。

探傷は図 35 に示すように、全没水浸パルス反射法-C スキャンで、5 MHz の周波数で行った。対比試験片音速は 2800m/s、接触媒質(水)音速は 1480m/s、探傷感度は 29dB、32dB であった。

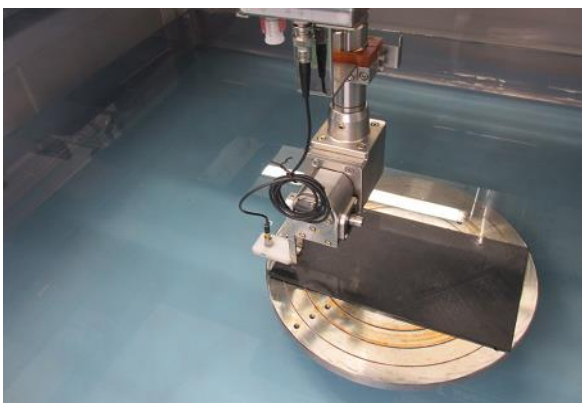


図 35 試験片取り付け状態 (C スキャン)

人工欠陥からの超音波反射はほぼ 100%であり、ボイドの模擬としては問題ない。しかし、平面の人工欠陥位置は図 36 に示すように、C スキャン及び X 線透過画像でズレが確認された。

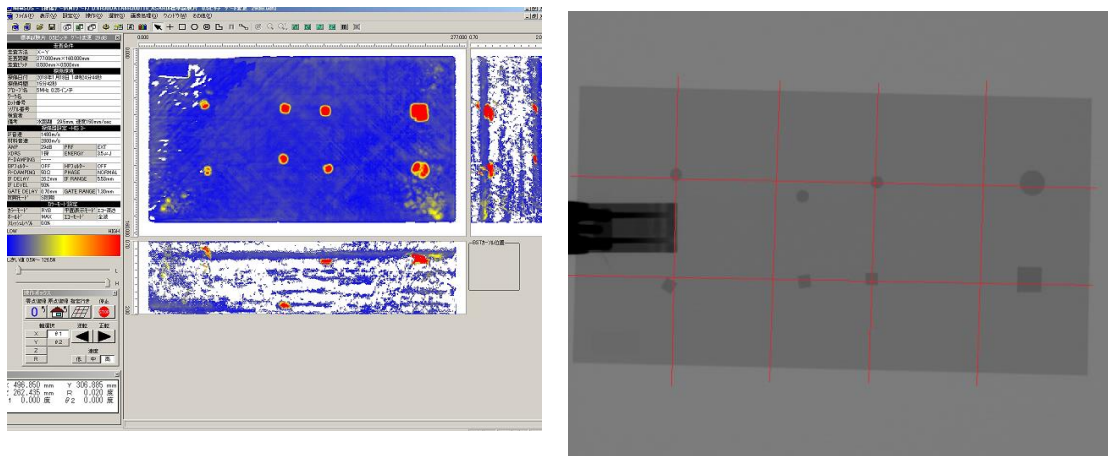


図 36 探傷結果（左）及びX線透視画像（右、赤線の交点が正しい位置）

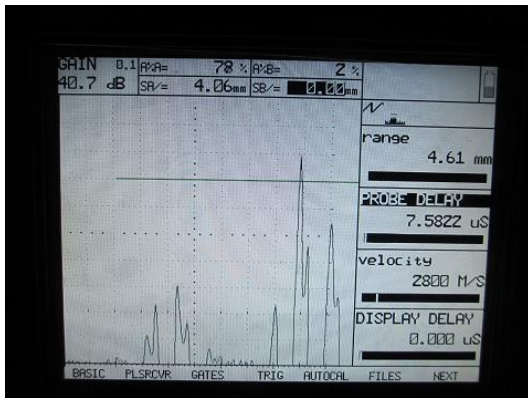
深さ方向での欠陥位置は表面付近（6 層目、19 層目）については表面エコーとの分離も出来ており特に問題はない。中央（12 層目）については板厚 2.5 mm に対して底面側から 1.5 mm の一に検出された。一方、健全部では超音波対比試験片としての使用に妨げとなるような自然欠陥又は著しい不均一部は発生していなかった。

以上から、人工欠陥の設置位置にズレが発生していることは問題であるが、その他に関しては使用可能な状態にあると判断する。

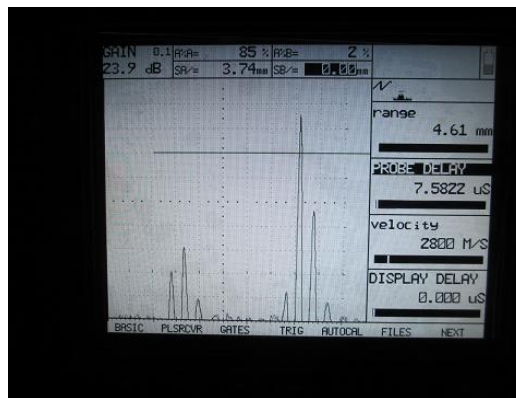
4) 超音波探触子適用試験

2) で説明した直接接触式パルス反射法に基づく超音波探傷試験装置を基準として、購入した探触子について、対比試験片を操作した時の操作性（波形の見やすさ、超音波散乱／減衰の程度等）を確認した。図 37 は各探触子の測定結果である。

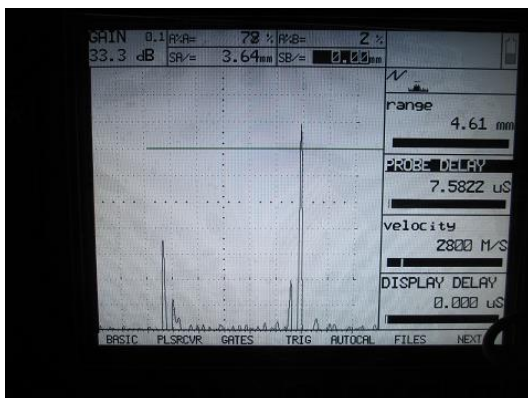
図によれば、2.25MHz は波形がやや粗く、薄板には適さないこと、10.0MHz の波形はシャープであり、減衰も小さい。15MHz の場合は波形がシャープであるが、やや減衰がみられる。従って、10 及び 15MHz の探触子は板厚 3 mm 程度の薄板の検査に適しているが、2.25MHz 及びディレイラインのない探触子は板厚の大きな成形品の検査に適していることが判明した。



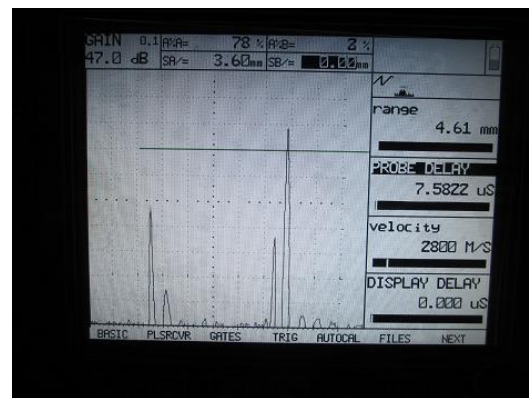
2.25MHz（ディレイ付き）波



5.0MHz（ディレイ付き）波



10.0MHz（ディレイ付き）波



15.0MHz（ディレイ付き）波

図 37 各探触子の測定結果

5) 超音波探傷用試験片および超音波射角探傷子の活用

超音波標準試験片を導入し、装置セットアップの習熟に活用した。検査訓練用の模擬試験片を導入し、欠陥検出トレーニングを行い、検査員の技能向上に活用した。斜角探触子を導入し、超音波検査の基本手法の一つである斜角探傷の技能向上に活用した。

6) 超音波探傷検査技能習得

超音波探傷検査について、基礎知識向上のために日本非破壊検査協会発行のテキストおよび技術講習会にて学習し、超音波探傷試験レベル 2 技能認定試験を受験した。その結果、一時および二次試験に合格し、2 名がレベル 2 検査員の資格を取得できた。

2. 機械的特性検査

1) PEKK プリプレグ材の性能評価

製作した PEKK 基材の連続繊維プリプレグに使用されている樹脂は、ARKEMA 社製 PEKK 6000 系（非晶出）及び 7000 系（結晶化）を使用した。しかし、客先規格のプリプレグ品質要求にはプリプレグ単体での強度要求に加え、結晶化度の成形後の保証を要求する項目が含まれている。新プリプレグの強度要求を確認するための試験片を作成するにあたり、ARKEMA 社の公表している資料（図 38）を調査したところ、結晶化が半分完了する時間は、すでに公表されている 7000 系樹脂を使用したプリプレグの成形サイクルで確保できる保持時間では不足することが明らかであった。

しかし、上記結晶化度の要求を満足する成形サイクルを設定するためには、プリプレグに加工された PEKK6000 系樹脂がどの程度の時間で要求される結晶化度を実現できるが明確にする必要があった。そこで、上記 ARKEMA 社の資料に基づき最短の結晶化時間が得られる温度において、DSC 分析装置を用いて結晶化完了までの時間の計測を（株）日東分析センターに依頼し実施した。この際、プリプレグを溶融温度まで加熱後、急冷し、250℃で等温保持しながら結晶化時間の計測を行った。溶融温度から 250℃までの冷却し低温保持した結果、図 31 に示すように、結晶化によるものと考えられる発熱反応が完了するまでの時間は約 13 分であった。

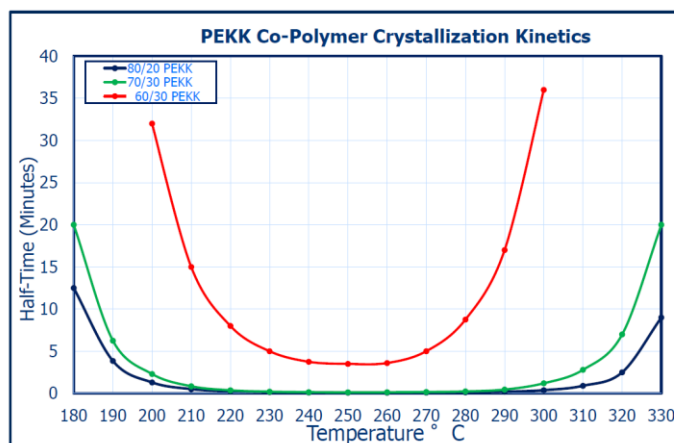
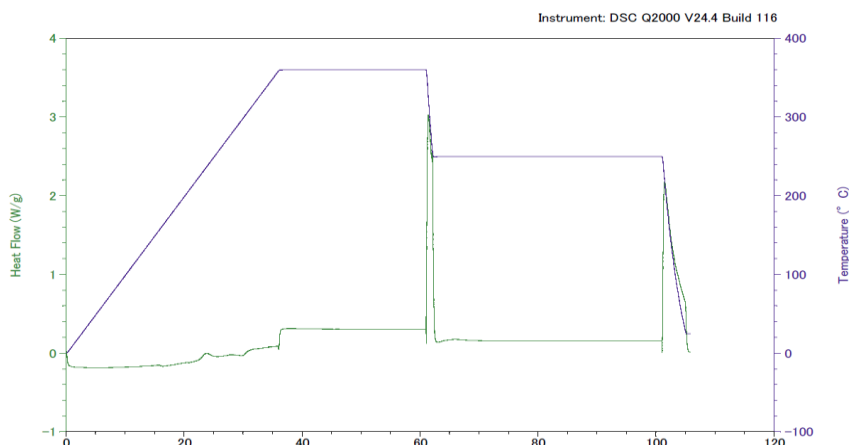
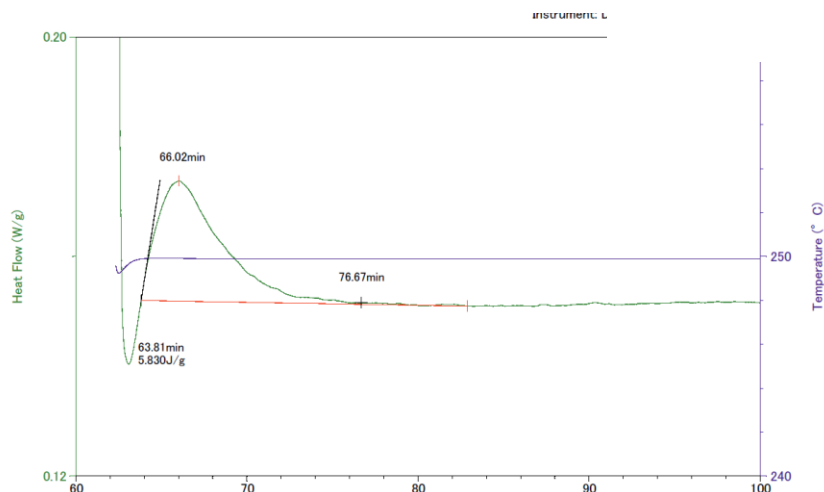


図 38 ARKEMA 社の PEKK 結晶化条件に関する温度と時間の関係



(1)
DSC による結晶化時間
の計測：温度変化



(2)
DSC による結晶化間時の
計測：吸発熱反応記録

図 39 DSC による結晶化時間の計測

DSC による結晶化時間の結果を元に、完全に結晶化が完了する条件を確保するため図 40 に示すオートクレーブによる成形サイクルを設定し、(株)UCHIDA に試験片用プレートの成形を委託した。

オートクレーブによる試験片用プレートの積層は、繊維方向を 0° とし引張強度試験片は 24 層、圧縮試験片用プレートは 36 層の積層数とした。この積層数は、客先規格から求めた厚さを今回製作したプリプレグで成形することができるものとした。

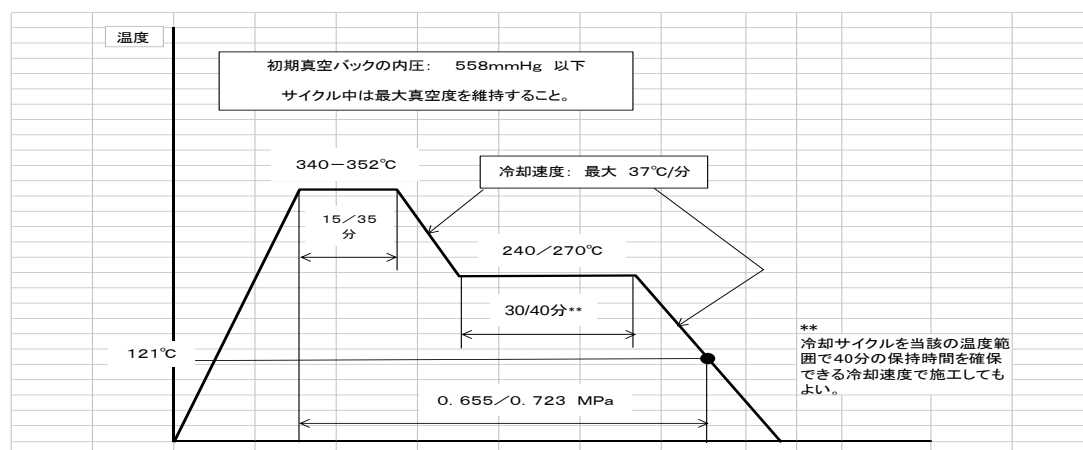


図 40 プリプレグのオートクレーブ成形条件

② プリプレグ評価用強度試験片の製作

プリプレグを用いた製品の評価ではなく、プリプレグとしての評価は客先要求では①項のようにプリプレグ単体強度の要求がある。そこで、本件度は PEKK6000 系樹脂を使用したプリプレグの基本的な強度として、引張強度と圧縮強度を選定し、オートクレーブでの成形パネルと規格のためスピック(株)の製作したプレスによる成形パネルから試験片を製作し、オートクレーブ製品との比較を行った。

強度試験片は、複合材評価法として規定されている、引張強度用 ASTM D3039、圧縮試験用 SACMA-1R に従って製作した。オートクレーブによる成形試験片の加工は成形と同じく(株)UCHIDA に委託し、また、福井県工業技術センターで素材を作り、スピック(株)で成形した UD 積層板プレスによる試験片の加工は(株)フタバモデル製作所に委託した。ASTM ならびに SACMA による試験片寸法及び加工した試験片を図 41 (引張)、図 42 (圧縮) に示す。引張強度試験及び圧縮強度試験は、(株)神戸工業試験場で実施した。

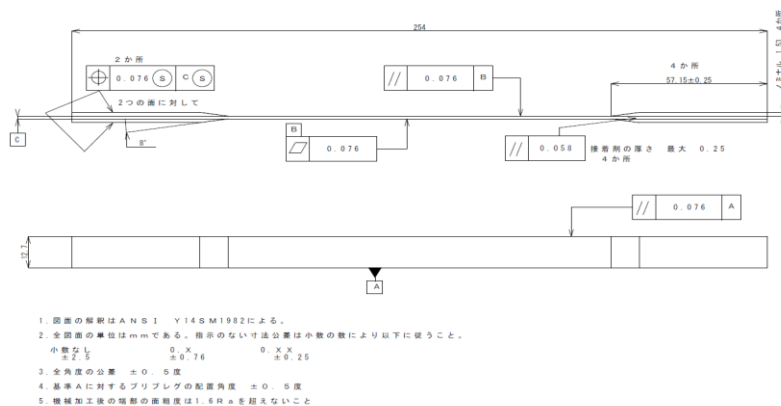


図 41
引張強度試験片寸法および試験片

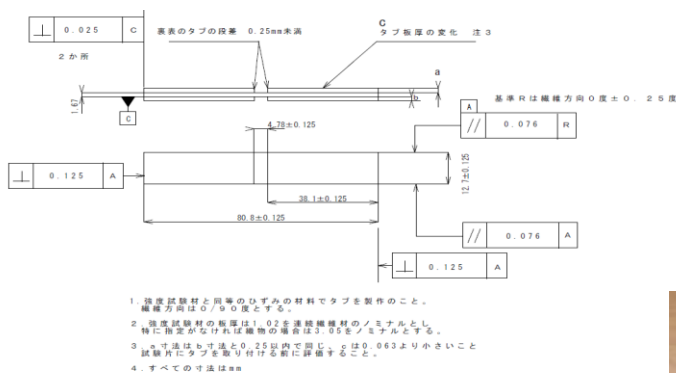


図 42
圧縮強度試験片寸法および試験片



③ 機械的性質の測定結果

PEKK プリプレグ材の機械的性質の評価として、ASTM D3039 による引張強度試験及びSACMA SRM1 による圧縮強度試験を実施した。

要求元スペック

	要求事項 ksi(kgf/cm ²)	1ksi=70.4kgf/cm ² とする
	平均値の最低値	単体での最低値
引張強度要求	330(2.33×10 ⁴) 以上であること	270 (1.91×10 ⁴)以上であること
圧縮強度要求	145(1.03×10 ⁴) 以上であること	85 (6.0×10 ³)以上であること

③-1 引張強度試験

測定条件；

規格：ASTM D3039

試験速度：2mm/min

試験片：プレス成形加工×3 個、 オートクレーブ成形加工×5 個

引張強度試験に関して、測定結果を表6に示すが、オートクレーブ成形品は客先の要求を満たす強度を確認できた。しかし、本研究開発によるプレス成形加工品では、オートクレーブ成形品の 6 割程度の強度しか示していない。今後、内部構造等をチェックして強度の出ない要因を探るとともに、複合化工程、プレス成形プロセス等の諸工程の最適化を検討し、ベンチマークであるオートクレーブ成形品の強度に近づけていく必要がある。

表6 引張強度測定結果

試験片	引張強度 MPa(kgf/cm ²) 1MPa=10.2kgf/cm ² とする	
	オートクレーブ 成形品	プレス加工成形品
1	2520.1(2.56×10 ⁴)	1650.8(1.68×10 ⁴)
2	2695.1(2.74×10 ⁴)	1653.1(1.68×10 ⁴)
3	2384.7(2.43×10 ⁴)	1327.5(1.35×10 ⁴)
4	2194.1(2.23×10 ⁴)	
5	2476.1(2.52×10 ⁴)	
平均値	2454.0(2.50×10 ⁴)	1543.8(1.57×10 ⁴)

③-2 圧縮強度試験

測定条件：

規格：SACMA SRM1

試験速度：1mm/min

試験片：プレス成形加工×2 個、 オートクレーブ成形加工×2 個

表7 圧縮強度測定結果

試験片	圧縮強度 MPa(kgf/cm ²) 1MPa=10.2kgf/cm ² とする	
	オートクレーブ 成形品	プレス加工成形品
1	1178.0(1.2×10 ⁴)	623.9(6.36×10 ³)
2	1380.7(1.4×10 ⁴)	588.1(5.99×10 ³)
平均値	1279.4(1.30×10 ⁴)	606.0(6.17×10 ³)

圧縮試験強度に関して、測定結果を表7に示すが、オートクレーブ成形品の 5 割程度の強度であり、著しく低い。これは図 4.3 に示すように、測定部位である試験片中央部で破断が発生せずに、試験片端部（つかみ部）で破損してしまうという現象が見られた。これは試験法自体にも問題があると推察され、試験片形状を含めた試験方法の再検討と、タブでの接着剤の変更等の検討を行っていく。

航空機材料は安全性の観点から厳しい試験法と強度値の管理を求めている。ここでは、種々の強度管理値を調査して、より厳しい管理値を設定し PEKK 及び PEEK 各複合材料を評価することにした。航空機部品用の複合材料特性はプレス成形をした UD プリプレグ複合材をオートクレーブ炉で再焼成して、結晶化を促進したものを材料規定にのっとり試験片を加工して試験することになっている。実部品のベンチマーク的な強度値を目標値として定めている。目標値は機体メーカーが指定するが、本開発では機体メーカーの定める目標値の 7.5%高い値を目標値として設定し、機体メーカーへの対応の自由度を広げることにした。

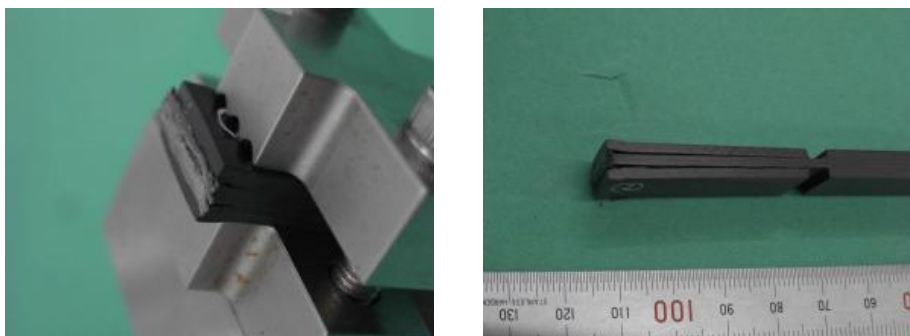


図 4.3 圧縮試験片の異常破壊例

各強度試験は下記に示す ASTM あるいは SACMA の規定に従って行い、試験片への負荷速度は次のようであった。

常温引張強度試験 (ASTM D3039、試験速度 2mm/min)、引張弾性率

高温圧縮強度試験 (SACMA SRM1、試験速度 1mm/min)

面内剪断強度試験 (ASTM D3518、試験速度 2mm/min)、剪断弾性率

有孔圧縮強度試験 (ASTM D6484、試験速度 2mm/min)

3 枚重ねプリプレグについては、モデル部品の強度を提示する必要があることから、オートクレーブ再焼成試料とホットプレス試料の両試験片の強度測定を行った。

引張強度測定例を表 8 に示す。一つの材料について 5 本の試験片を加工し、測定したが、強度目標値は 5 本の平均値と個々の試験片の最低目標値を達成することになっており、本開発では個々の目標値 2000MPa、平均値を 2450MPa に設定した（一般的な目標値より約 7.5% 高値）。また引張弾性率の目標値は個々の試験片のクリアすべき範囲（125～160MPa）で示される。表 9 によれば PEKK 樹脂の結晶化度の異なる 6000 番及び 7000 番とも目標値を達成し、かつバラツキが小さくなっている。しかし、結晶化度の低い 6000 番の方が高結晶化度より高強度になるという興味深い結果になっており、破壊モードも異なっていることを考えると、基礎的な手法により樹脂と繊維の界面の接着状態を解明すると新たな知見が得られると思われる。PEEK 材は個々の強度目標値をクリアしているが、平均値でわずかにクリアできなかった。

PEEK 樹脂と PEKK 樹脂の比較では、当初の予想通り PEKK 材の方が高強度で、耐熱性にも優れることから、PEKK 樹脂はスーパーエンブラの中でも最強の材料であり、航空機用材料として炭素繊維強化 PEKK 複合材料は極めて有望であることが確認出来た。

表 8 スーパーエンブラ複合材料の引張強度測定例

		引張強度 MPa		引張弾性率 GPa		破壊モード
		測定値	目標値	測定値	目標値	
PEKK6000 薄層	A1	2846	2000	129	125 ~ 160	縦割れ タブ近傍 上端
	A2	2942		138		縦割れ 評価部 中間部
	A3	2654		135		同 上
	A4	2920		135		同 上
	A5	2485		129		同 上
	平均値	2769	2450	133		
PEKK7000 薄層	C1	2659	2000	142	125 ~ 160	飛散的 評価部 中間部
	C2	2566		137		同 上
	C3	2413		137		同 上
	C4	2434		140		同 上
	C5	2725		143		同 上
	平均値	2559	2450	140		
PEEK 薄層	B1	2236	2000	117	125 ~ 160	飛散的 評価部 中間部
	B2	2316		116		同 上
	B3	2464		131		同 上
	B4	2405		121		同 上
	B5	2355		124		同 上
	平均値	2355	2450	122		

表9は、今回行った機械的性質の測定値の一覧表である。それによれば次のようなことが分かった。

表9 PEKK-CFRP 及び PEEK-CFRP 機械的性質

試験項目 要求値 規格	引張強度 2450MPa ASTM D3039	高温圧縮 1075MPa SACMA SRM1	有孔圧縮 296MPa ASTM D6484	面内剪断 48.2MPa ASTM D3518	引張弾性率 130~167GPa ASTM D3039	剪断弾性率 4.9~6.4GPa ASTM D3518
PEKK6002 薄層、UD オートクレーブ	2769	1041 1038	(H30FY)	(H30FY)	133	(H30FY)
PEKK7002 薄層、UD オートクレーブ	2559	946 940	331	52.8	140	5.42
PEKK7002 3枚重ね、UD オートクレーブ	2606	1070	316	45.7	135	5.69
PEKK7002 3枚重ね、UD ホットプレス	2748	(H30FY)	(H30FY)	(H30FY)	139	(H30FY)
*TenCate PEKK-UD テープ 炭素繊維 AS-4D	2300	1222	332	50.5	139	5.2
*Cytec PEKK-UD テープ 炭素繊維 IM7	2463	1288	324	52.4	139	5.5

	引張強度	高温圧縮			引張弾性率
PEEK 薄層 UD オートクレーブ	2355	314.2			122

① 概ね、各強度とも要求値をクリアしているが、高温圧縮強度は、破断部分が安定せず問題が残っている。
図4.4は、試験片の評定部の破壊はなく、多くの場合、写真のように両端部で座屈してしまうといった破壊になり、圧縮強度の測定が出来ていないことが分かる。



図4.4 高温圧縮試験：許容されない破壊モード

高温圧縮強度試験は試験法として定評のある SACMA SRM1 で行ったが、航空業界での要求板厚(1.68mm)を用いたため、評定部が破断する前に端部破壊に至ったものが出ている。これは、本材料が高強度であるために破壊しないと推察されるので、来年度は同規定の薄いほうの板厚(1.02mm)で試験を行うことを検討する。

② 上述のように PEKK6002 の方が引張強度は PEKK7002 より強く、弾性率は PEKK7002 の方が強い。尚、PEKK を製造している ARKEMA 社は、結晶化度と成形温度の観点から、複合材には PEKK7002 系が適していると推奨している。

③ 薄層積層と 3 枚重ね積層では引張強度は 3 枚重ねの方が強いが、弾性率は薄層の方が上。剪断強度は薄層の方が強く、弾性率は 3 枚重ねの方が上。これらは熱物性試験の結果に示されるようにプリプレグの繊維含有率がばらついており、その結果が現れたものと考えられる。

④ 3 枚重ねでは、オートクレーブ成形したものより、ホットプレス成形試験片の方が引張強さ及び弾性率とも高くなっている。しかし、その差は小さいので、これもプリプレグの繊維目付のばらつきが原因かもしれない。ただしプレス成形により樹脂が繊維の間により含浸した結果の可能性もあり、今後の評価を継続する必要がある。

⑤ 本開発に用いた複合材料原料のスーパーエンブラ及び炭素繊維は次のような特性を示す。すなわち、PEKK の 6002 番の引張強度 88MPa、7002 番は 110MPa であり、ここに炭素繊維 (T700SC-12K-60E、引張強度 4900MPa) の連続繊維を一方向に配列した材料の強度が表 9 及び 10 に示したもので、PEKK 樹脂が炭素繊維により約 20 倍以上強化されたことを示す。表 10 には *TenCate 社および *Cytec 社の PEKK 複合材料の特性も併記したが、引張強度は本開発の方が優れていることが明確に示される。これは、開発当初、炭素繊維を開織することによる高強度化を予測したが、その通りの結果と思われる。高温圧縮強度は前述のように未だ正確な強度が得られていないが、他の強度については概ね近似している。

【参考データ】複合材原料の特性値

素材強度	引張強度	常温圧縮強度	引張弾性率
(樹脂)	MPa	MPa	GPa
PEKK6002	88	108	2.9
PEKK7002	110	149	3.8
(炭素繊維)			
T700SC-12K-60E	4900		230
IM-7	5170		276
AS-4	3447		228

⑥ *TenCate 社 (オランダ、CFRP の世界的供給企業、エアバスとの関係が強い、2018 年東レ買収を発表) が 2017 年度の新製品として販売を開始した PEKK 複合材 (日本の代理店極東貿易㈱ではまだ扱っていない) の特性を PEEK 複合材と比較して表 10 に示した。後述する熱物性も示してある。

PEEK は熔融温度が高く、加工温度が PEKK より 20℃高いにもかかわらず、コンポジットとしての使用温度はガラス転移温度に依存して PEKK の方が約 20℃高いことが示され、耐熱性の高いことが確認できる。また、

機械的特性も PEKK 複合材の方が高く、特に衝撃後の圧縮強度の高いことが特徴的である。

表 10 TenCate の PEEK と PEKK の一方向テープ (UD テープ) の性能

(出典：Arkema プレゼンテーション資料、元資料は TenCate Advanced Composites 、使用 CF：AS-4)

製品名称	Cetex TC 1200	Cetex TC 1320
材料	PEEK	PEKK
特性	最低～最高	最低～最高
ガラス転移温度	143℃	162℃
溶融温度	343℃	332℃
使用温度(コンポジット)	128℃	147℃
連続使用温度(樹脂)	250℃～260℃	260℃
加工温度(コンポジット)	380℃～400℃	360℃～380℃
限界酸素指数(樹脂のみ)	24%～35%	35%～40%
オープンホール強度(室温)	387MPa	393MPa
オープンホール圧縮(室温)	320MPa	328MPa
衝撃後の圧縮強度	265MPa	308MPa

最終年度は引き続き、表 11 に示すように引張試験、高温圧縮試験、面内せん断試験、有孔圧縮試験の 4 種類の試験を実施した。また社内スペックにより要求されるオートクレーブ成形による試験片に加えて、実際の部品の製造に適用されるホットプレス成形による試験片を作成し、両プロセスによる比較を行った。前回、実施した強度試験の結果、強度に優れるとされる PEKK7000 系よりも 6000 系の方が成績が良かったことを踏まえ、初年度に製作した PEKK6000 系薄層プリプレグおよび今年度製作した PEKK6000 系 3 枚重ねプリプレグを用いた試験片を作成し、両者の比較を行うこととした。またホットプレス試験片の一部は規格に沿った UD 材ではなく擬似等方材により作成し、顧客のための設計支援データの取得を図った。

表 11 最終年度試験を行った強度試験片一覧

試験片群	試験名	規格	プリプレグ	成形法	本数	積層構成
21-1	引張	ASTM D3039	PEKK7000 系 3 枚重ね	オート クレープ	5 本	UD
21-2	高温圧縮	SACMA SRM-1			12 本	UD
21-3	面内せん断	ASTM D3518			5 本	±45°
21-4	有孔圧縮	ASTM D6484			5 本	擬似等方
41-1	引張	ASTM D3039 ※		ホット プレス	5 本	擬似等方
41-2	高温圧縮	SACMA SRM-1 ※			12 本	擬似等方
41-3	面内せん断	ASTM D3518			5 本	±45°
41-4	有孔圧縮	ASTM D6484			5 本	擬似等方
43-1	引張	ASTM D3039			5 本	UD
51-3	面内せん断	ASTM D3518	PEKK6000 系 薄層	オート クレープ	5 本	±45°
81-1	引張	ASTM D3039	PEKK6000 系 3 枚重ね	ホット プレス	5 本	UD

注：※印は積層構成が規格に沿ったものではないため参考とする。

強度試験の結果は表 12 の通りであり、参考のためこれまでの測定結果及び他社のカタログ値も示した。

表 12 によると、引張試験はオートクレープ試験片、ホットプレス試験片共に目標値を上回る結果となった。高温圧縮試験は初年度より異常破壊により有効なデータが取得できない状態が続いており、今年度は試験片の板厚を薄くすることにより評定部の破壊が起こりやすくなることを狙ったが、正常に破壊したのは 12 本中 1 本にとどまった。擬似等方材により作成したものは強度が低いため、12 本中 10 本が正常に破壊した。圧縮試験に用いた SACMA SRM-1 規格は社内スペックで指定したものであるが、今後スペック改善を進めるにあたり、試験片製作プロセスの改善により試験の成功率を高める努力をするか、または ASTM 等の他の試験規格を用いるかについては検討の必要がある。有孔圧縮試験は昨年度と同様に安定して試験を実施できており、試験結果も良好であった。面内せん断試験に関しては、ホットプレス成形による試験片の弾性率が過大となり不合格になった。

また、TenCate、Cytec 両社の測定結果と比較して高強度であり、開繊による高強度化が明確に表れている。

引っ張り試験については材料や成形方法の違いにより多くのデータが集まっており、図 45～図 48 でそれらの比較を行った。H29 年度に PEKK6000 系が 7000 系よりも高い強度を示したため、今年度も新たに 6000 系 3 枚重ねプリプレグを製造し、試験を行ったが、結果は 7000 系よりも低くなった(図 45)。オートクレープ

とホットプレス成形方法による強度比較も、昨年度と本年度では結果が逆転した(図 46)。擬似等方材は UD 材の 1/3 程度の強度となった(図 47)。薄層プリプレグと 3 枚重ねプリプレグでは 3 枚重ねプリプレグの方が強度が高い結果となったが、3 枚重ねプリプレグは 3 枚重ねにする段階で再度圧力が加わっており、含浸率が向上していることが考えられる(図 48)。

表 12 PEKK-CFRP 機械的性質

試験項目 目標値	引張強度 2275MPa	高温圧縮 1000MPa	有孔圧縮 276MPa	面内剪断 44.8MPa	引張弾性率 121~155GPa	剪断弾性率 4.56~5.92GPa
PEKK6000 薄層、オートクレーブ	2769	1041	—	41.2	133	5.10
PEKK6000 3 枚重ね、ホットプレス	2509	—	—	—	—	138.4
PEKK7000 薄層、オートクレーブ	2559	944	331	52.8	140	5.42
PEKK7000 3 枚重ね、オートクレーブ	2606 2717	1070 1070	316 335	45.7 45.8	135 136.1	5.69 5.79
PEKK7000 3 枚重ね、ホットプレス	2748 2650	—	333	50.4	139 138.5	6.10
PEKK7000 3 枚重ね、ホットプレス 擬似等方材	949	535			50.5	
*TenCate PEKK-UD テープ 炭素繊維 AS-4D	2300	1222	332	50.5	139	5.2
*Cytec PEKK-UD テープ 炭素繊維 IM7	2463	1288	324	52.4	139	5.5

※赤字は今年度実施の試験結果を示す。

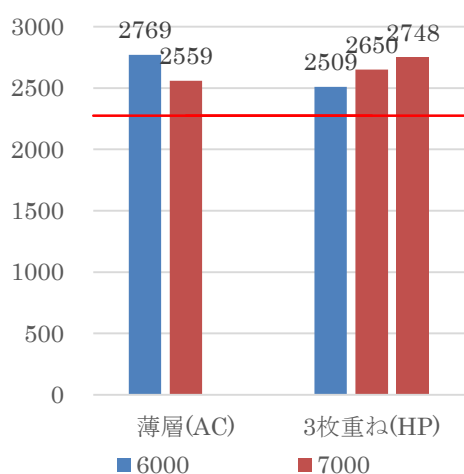


図 45 PEKK6000 系・7000 系引張強度

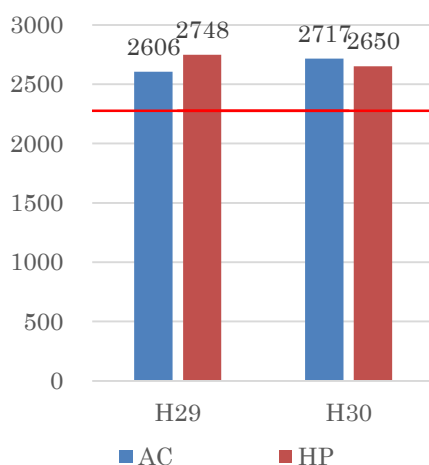


図 46 成形方法による引張強度比較

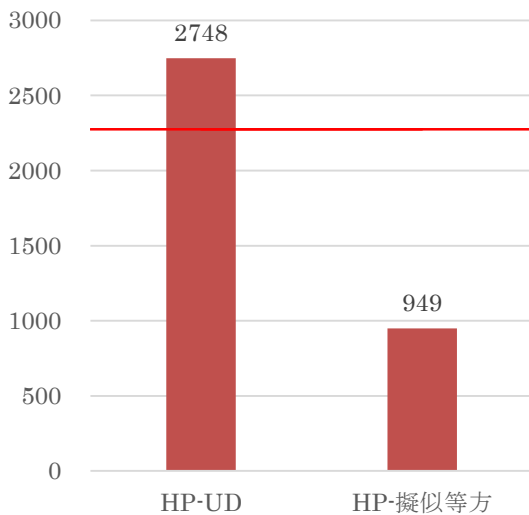


図 47 積層構成による引張強度比較
PEKK7000 系 3 枚重ね°リ°リ°

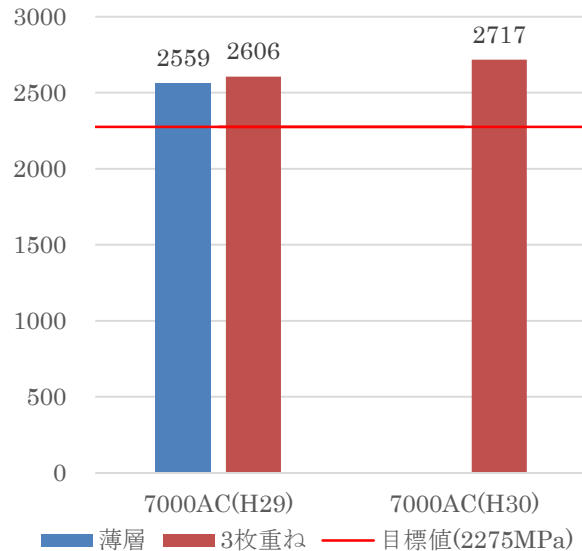


図 48 薄層・3 枚重ね°リ°リ°、引張強度比較

3. 物性試験

1) 樹脂含有率および繊維体積含有率測定

引張強度試験片の残余分を用いて、成形後の樹脂質量含有率および繊維体積含有率を算出した。結果は表 13 のとおりである。昨年度および本年度作成した試験片を用いて同様に試験を行ったが、本年度の試験片は昨年度のものより繊維体積含有率が若干低く、60%未満にとどまった。繊維体積含有率は CFRP の強度に直接的に影響するとされているが、オートクレーブ試験片については繊維体積含有率が昨年より低下したにもかかわらず、実際の引張強度は増加するという結果になった。繊維体積含有率低下の原因としては、フィルムの厚みがバラついていることが考えられる。試作工程ではバラつきは出易いようであり、量産段階では安定するそうである。熱可塑複合材で理論強度の 80%以上(最大 94%)が達成されているのは強みとできるものと考えられる。CF と PEKK の界面適合性が良好であることが示されている。

表 13 引張強度試験片の樹脂質量含有率および繊維体積含有率

試験片	樹脂質量 含有率(%)	繊維体積 含有率(%)	理論引張 強度(MPa)※	実測引張 強度(MPa)	強度 達成率※
PEKK6000 系薄層 オートクレーブ(H29)	32.3	59.4	2945	2769	94.0%
PEKK6000 系 3 枚重ね ホットプレス(H30)	28.4	64.0	3167	2509	79.2%
PEKK7000 系 3 枚重ね オートクレーブ(H29)	29.3	61.2	3039	2606	85.8%
PEKK7000 系 3 枚重ね オートクレーブ(H30)	33.2	58.7	2919	2717	93.1%
PEKK7000 系 3 枚重ね ホットプレス(H29)	29.6	63.0	3130	2748	85.8%
PEKK7000 系 3 枚重ね ホットプレス(H30)	32.4	59.9	2978	2650	89.0%

※理論引張強度は、各材料の引張強度を炭素繊維 T700 は 4900MPa、PEKK6000 系は 88MPa、PEKK7000 系は 110MPa として体積含有率をもとに計算した。強度達成率は理論強度に対する実測値の割合を示す。

2) DSC 測定

本年度作製した PEKK7000 系プリプレグの DSC 測定を、ASTM D3418 に従って実施した。結果を表 14 に示す。

表 14 プリプレグの DSC 測定結果

試料番号	融点(°C)	結晶化温度(°C)	ガラス転移点(°C)
①	328.68	268.52	161.14
②	330.93	270.01	160.83
③	328.07	266.63	160.63
平均値	329.23	268.39	160.87
(参考) PEKK 単体 メーカー公称値	331 ^{※注}	-	162

※注 PEKK 単体のメーカー公称値の融点測定時の昇温速度は 20°C/min であり、
ASTM D3418 における昇温速度は 10°C/min である。

4. 耐火性試験

プリプレグの耐火性については、ホットプレス成形により供試体を製作し、顧客指定の規格に従って 60 秒垂直燃焼試験、煙濃度試験、有毒ガス分析および OSU 放熱試験を行った。結果は表 15 のとおりである。いずれの試験についても顧客の要求する数値を満足しており、耐火性に問題のないことが確認された。

表15 耐火性試験結果

試験	評価項目	要求	結果	判定
60 秒 垂直燃焼試験	消火時間	15 秒以内	0 秒	合格
	ドリップ燃焼時間	3 秒以内	0 秒 (ドリップ無し)	
	燃焼長さ	6 インチ以内	0.5 インチ	
煙濃度試験	最大煙濃度 (4 分間)	200 未満	0.7	合格
有毒ガス分析	HF	200 ppm 以内	0 ppm	合格
	HCl	500 ppm 以内	0 ppm	
	HCN	150 ppm 以内	0 ppm	
	SO ₂	100 ppm 以内	0 ppm	
	NO _x (NO/NO ₂)	100 ppm 以内	2 ppm	
	CO	3500 ppm 以内	25 ppm	
OSU 放熱試験	ピーク放熱率	65kW/m ² 以内	15.1kW/m ²	合格
	2 分間累積放熱量	65kW・min/m ² 以内	11.6kW・min/m ²	

5. コスト検討

本プロジェクトの事業化へ向けて、本年度製作したモデル部品を対象として製造コストの見積を行ったが、材料費と製造費それぞれについて課題が明らかとなった。

材料費は、PEKK 樹脂が 1kg 当たり約 20,000 円と高額であることが問題である。樹脂の調達価格を 1kg 当たり 8,000 円程度に抑えることができれば、プリプレグ価格を 1kg 当たり 15,000-20,000 円程度に下げることができる見込みである。

製造費については、プリプレグのロール幅を広げることで製造レートを上げることが可能とみられるが、具体的な価格については今後調査検討する。

6. 紫外線による環境評価

成形後の CFRP 部品について、紫外線の被曝量を管理することを要求される場合があるため、紫外線被ばく線量計を用いて各職場の線量測定を行った。結果を表16に示す。

表16 各職場の紫外線量

測定箇所		測定日	基準被ばく量(kJ/m ² ・hour)
旭金属工業(株)	加工検査室	6/25	0.08
		10/22	0.08
	塗装前処理用 集塵機	6/25	0.08
		10/22	0.09
	汎用検査室	6/25	0.14
		10/22	0.14
	特殊塗装 待機エリア	6/25	0.01
		10/22	0.004
	特殊塗装 塗装ブース	6/25	0.08
		10/22	0.07
スピック(株)	2F プリブレグ切断エリア	8/10	0.08
	1F 成形エリア	8/10	0.03
	2F 検査エリア	8/10	0.08

上記の基準被ばく量は、各職場で5分間の紫外線量測定を行い、この結果を1時間あたりの被ばく量に換算したものである。実際の部品の被ばく量は、各工程の基準被ばく量に作業時間を乗じたものの合計になる。社内スペックでは被ばく量の制限値を100kJ/m²としており、保管中に適切な遮蔽物をかけることにより制限を遵守することは可能と考えられる。

第3章 本論－（２）

（図、表の番号は、この章は独立して表示）

【１】モデル部品の評価

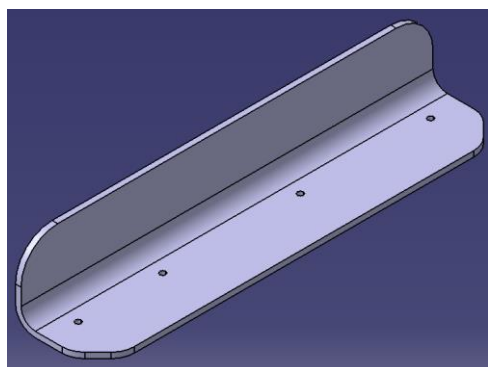
本プロジェクトでは 2 つの航空機部品想定モデル部品の試作を行い、国際的なエアショーやボーイング、エアバス
の主催するイベントに参加しモデル部品の展示あるいは商談を行ってきた。PEKK 複合材の航空機部品への適用例が
少ない現状において大きな反響を呼び、関心の高いことを感じてきた。その折に必要なことは PEKK 複合材の
機械的性質、耐火性等の特性とともに、寸法精度及び部品内部での欠陥の有無であった。これらの点について以下に説
明する。

1. ブラケット状モデル部品（A）

平成 29 年度、L 字型のブラケット形状のモデル部品を CATIAV5 にて 3 次元像を設計し、それをベースに金
型設計図面を完成し、金型の設計を行った。金型によるプレス成形はすでに述べてきたが、成形後端面のトリミン
グ加工及び穴あけ加工を行った。これらの部品について 3 次元計測器により寸法精度を行った。更に、内部にお
ける空洞、プリプレグ界面での剥離などの欠陥について超音波探傷計測機による非破壊検査を実施した。

1-1. 3 次元寸法測定

図 1 の①はモデル部品 A の CATIA3 次元モデルであり、このデータをもとに金型の設計を行い、製造した。
②は金型により成形し、仕上加工をしたもので、これをベースに寸法測定を行った。



① モデル部品形状（CATIAV5 モデル）



② 機械加工後のモデル部品（A）

図 1 試作モデル部品（A）

機械加工仕上げしたモデル部品を 3 次元測定機により図 2 の各位置で寸法測定を行った。図 3 は測定例で、基
準値に対してどの程度大きくなったり（赤色）、小さくなった（紫色）かを数値で示すと共に、色で変化の程度を
見ることが出来る。

表 1 は図 2 で示した各位置での測定結果を一覧にしたものであり、3 次元測定機による形状測定結果と、ノギス
等による寸法測定結果をまとめたものである。赤字になっている箇所は、設定された公差に収まらなかったことを
示す。

表1 モデル成形品の寸法精度表

項目	平面度		垂直度			輪郭度	
	データム A		データム B	データム C		平面D	
公称値	0.5		0.5	0.25		0.5	
測定値	0.30		0.63	0.06		0.42	

項目	寸法						
	①	②左	②右	③左	③右	④	⑤
公称値	228	31		14.7		45.7	40.6
測定値	228.02	31.24	31.22	14.67	14.66	45.76~45.92	40.75~40.91

項目	寸法						
	⑦				⑧左	⑧右	⑨
公称値	R12.7				R20.3		R10.9
測定値	12.7	12.7	12.7	12.7	20.4	20.4	11.0

項目	位置度				穴径			
	穴a	穴b	穴c	穴d	穴a	穴b	穴c	穴d
公称値	$\phi 0.35$				$\phi 3.3$			
測定値	0.32	0.37	0.43	0.45	3.30	3.29	3.30	3.30

反りや歪みはプレス時に発生するため、平面度を向上させるにはプレス時の加工条件を見直す必要がある。さらに、モデル部品の製作に使用した 3 枚重ねプリプレグは試作品であり、厚みにムラが見られたことも影響を与えている可能性があるため、プリプレグ製造の条件も再検討を要する。また、曲線部の半径等の機械加工部については、加工治具を改修することにより加工精度の向上を図る必要がある。このような結果に対応する改善技術の検討を行った。

1-2 非破壊検査による内部組織観察

超音波探傷法によりモデル部品の内部組織検査を行い、マイクロフォーカス X 線 CT スキャンにて妥当性の確認をお行った。モデル部品 (A) は次のような素材と積層により構成されている。

CF(UD) / PEKK 7002 3 層 (薄層)

28ply (45/0/-45/90) 3/90/90/90/90/ (0/45/90/-45) 3 厚さ t=3.0mm



図4 平面-1 のC スキャン結果

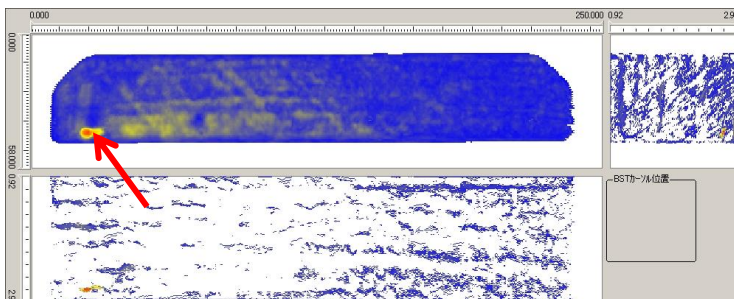


図4はモデル部品の機械加工によりドリル穴をあけた平面でのC スキャンによる探傷結果である。それによると、矢印で示した左側、深さ 2.5 mmの位置に 10.0 mm×3.5 mmのインジケーションのあることが分かった。

図5はモデル部品の平滑平面でのC スキャンによる探傷結果で、右側矢印部、深さ 2.5 mmの位置に 3.5 mm×

3.0 mmのインジケーションが存在する。



図5 平面-2 のC スキャン結果

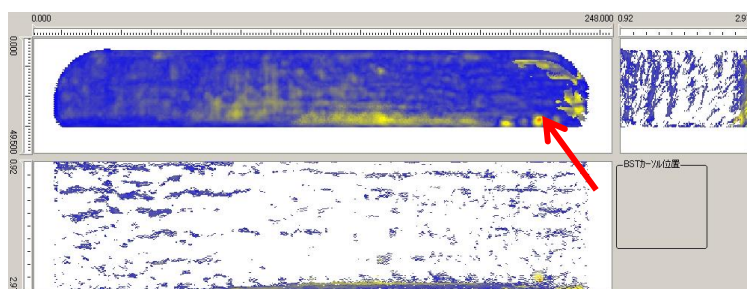


図6はモデル部品の曲げ加工を行ったコーナー部での C スキャン探傷結果である。矢印で示したようなインジケーション（赤い点）が深さ 2.0～2.5 mmの位置に複数存在することが分かった。このインジケーションは直径が約 3 mmで、直線的に整列している。これは、プリプレグの積層時に超音波融着装置でスポット融着した部分と一致しており、欠陥ではなく、高密度に圧接された結果と思われる、今後の対策が必要である。

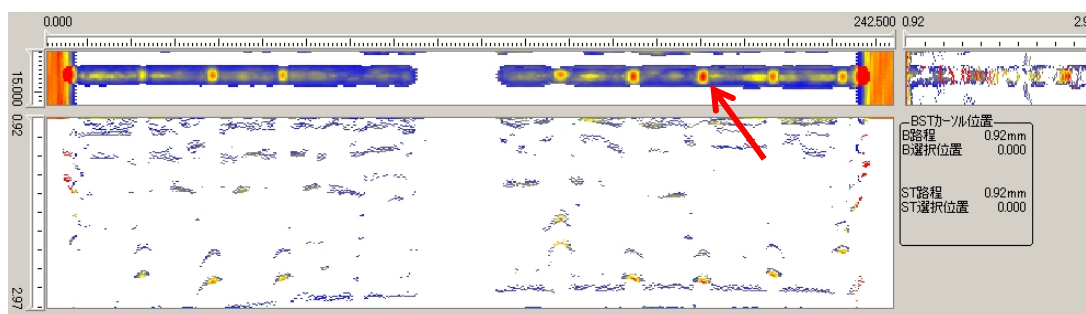
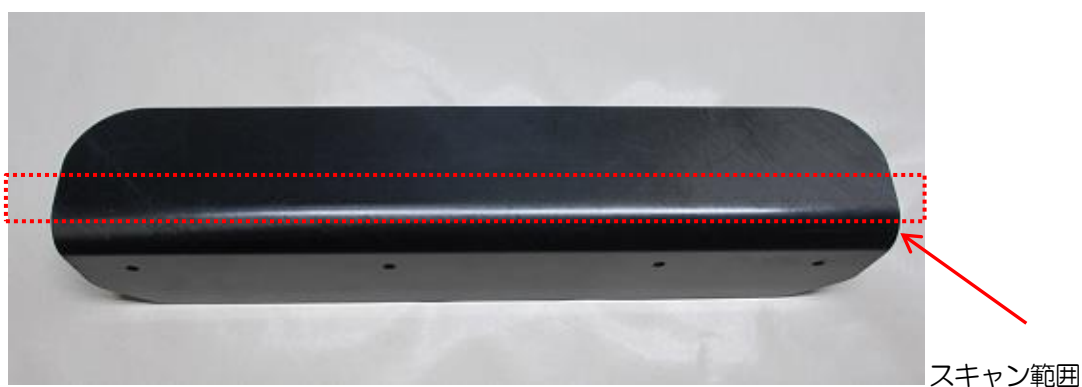
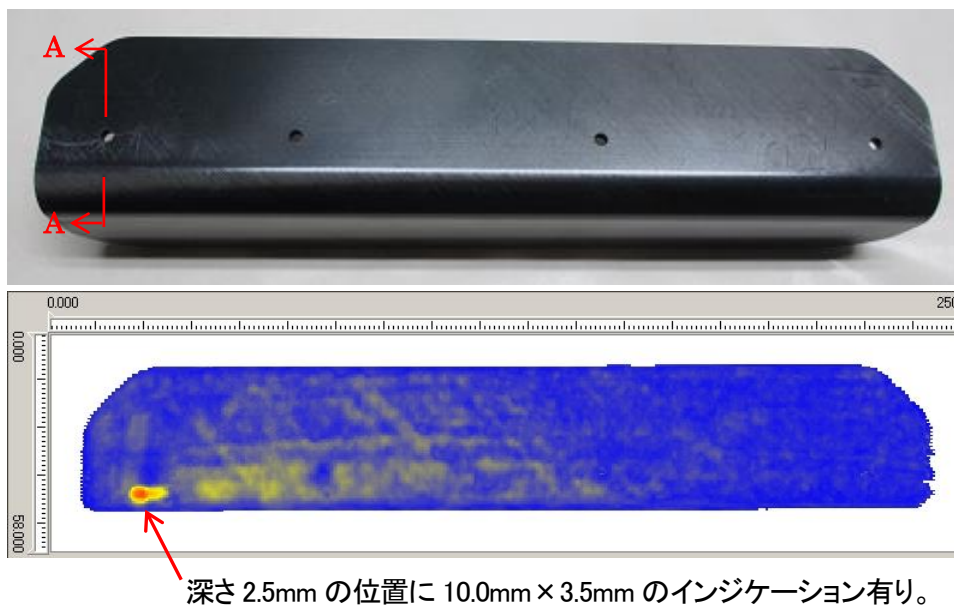


図6 コーナー部のC スキャン結果

超音波探傷により検出された各インジケーションの性状（剥離、材質の不均一性等）の特定が出来ていないため、アングル成形品の超音波探傷試験で検出されたインジケーションにつき、図 7 に示す該当部位の断面観察を行った。



この部位を実体顕微鏡により拡大観察
矢視 A-A

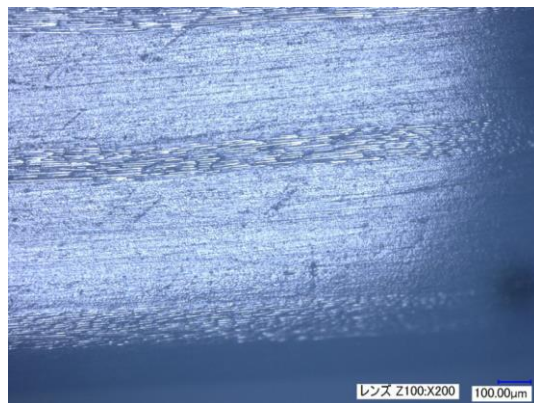
図 7 観察部位

図 7 によると、超音波 C スキャン時に検出されたインジケーション発生部に該当すると思われる部位には、空洞やその他の超音波反射源となりうるような異常は観察されなかったが、更に、光学顕微鏡にて観察したが、異常部は観察されなかった。C スキャン時にインジケーションが記録された原因として以下が推定される。

- (1) 材料内に、外観では特定できない超音波特性（密度や音速）に対するムラが発生している。
- (2) 装置セットアップの不備により、当該部で底面エコー付近のノイズを拾って記録していた。



超音波反射源の推定位置 穴周囲、下側表面から 0.5mm の深さ位置



推定位置を 200 倍に拡大して観察

図 8 インジケーション発生部の光学顕微鏡観察

図9はマイクロフォーカスX線CTによる探傷結果で、超音波検査結果に対応する部位にインジケーションは検出されなかった。これは前述のように、超音波融着装置によるスポット部での組織の密度の高いことによる画像と推定される。しかし、曲げ加工のコーナー付近に異物と思われるインジケーションが検出された（約 1mm の直径で、超音波探傷では確認出来ていない）。

超音波及びX線それぞれでインジケーションが検出されたものの、サイズおよび発生頻度は、航空機体の部品として許容される可能性の高い程度のものであった。

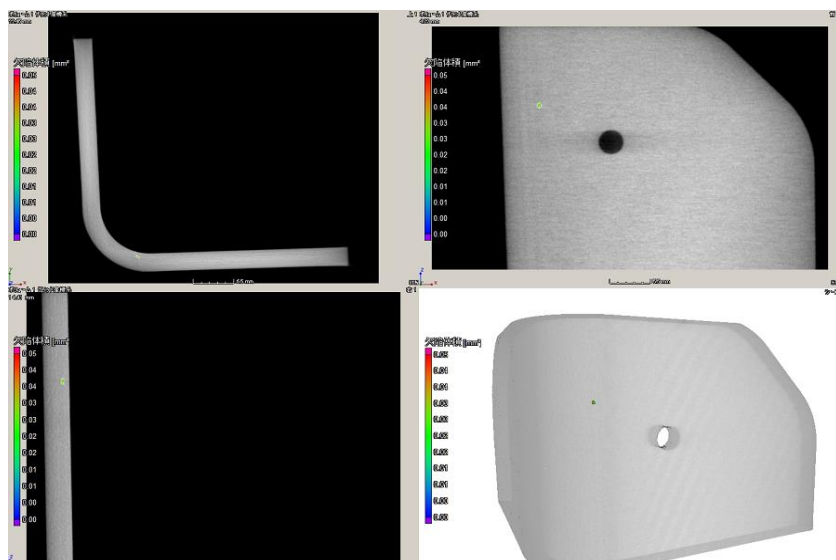
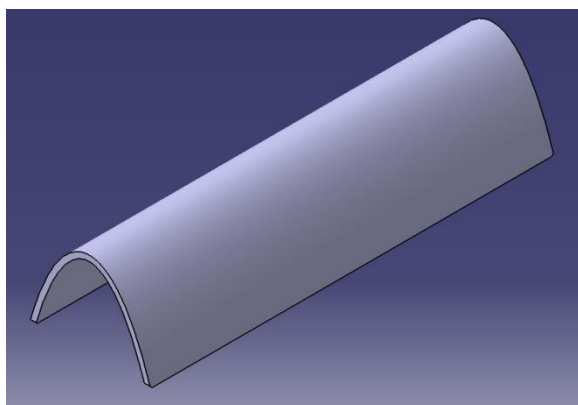


図9 マイクロフォーカスX線CTによる探傷

2. リーディングエッジ状モデル部品 (B)

2-1 3次元寸法測定

リーディングエッジ状モデル部品 (B) を前述のように CATIA V5 により作製した。本部品は全面が曲面で構成されており、また部品の曲がり具合が大きいことからプレス荷重方向と部品表面とのなす角が小さくなるため、昨年度製作したブラケット形状よりも技術的難易度が高くなっている。また本部品の形状は航空機の尾翼前縁形状を模しており、二次構造部品としての適用範囲拡大につなげることを意図した。



モデル部品形状(CATIA V5 モデル)



モデル部品 (B))

図10 CATIA 設計モデル及び試作部品モデル (B)

完成したモデル部品は三次元測定機等の機器を用いた検査のほか、デジタルマイクロスコープにより表面状態の観察を行った。図 11 は測定部位を示す。

測定結果は表 2 の通りである。曲面の輪郭度については、三次元測定の基準としたエッジ部が反っており、測定に悪影響を及ぼしている。部品の両端へ行くにつれて曲がりが増えるような状態であり、プレス時の残留応力が原因であると考えられる。また、板厚は当初予定の 3.24mm に対して、部品の頂部では 2.65~2.75mm、周辺部では 3.04~3.05mm と若干薄くなった。頂部はプレス時の荷重に対して垂直となるため特に薄くなった

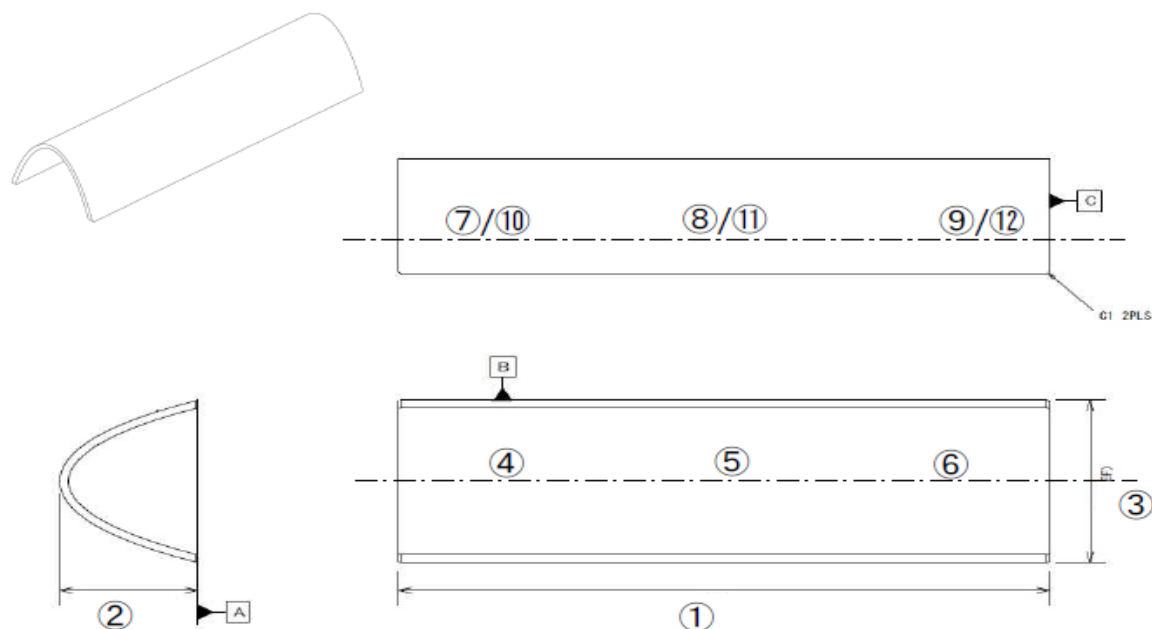


図 1 1 モデル部品 (B) の測定部位

表 2 モデル部品 (B) 寸法測定結果

項目	平面度(mm)	垂直度(mm)	輪郭度(mm)	
	DATUM A	DATUM C	凸面	凹面
目標値	0.106	0.106	1.524	1.524
測定値	0.22	0.04	1.921	2.747

項目	寸法(mm)											
	①	②	③	板厚④	板厚⑤	板厚⑥	板厚⑦	板厚⑧	板厚⑨	板厚⑩	板厚⑪	板厚⑫
目標値	240	51	70	3.24 (REF)								
測定値	240.06	50.92	69.90	2.76	2.65	2.75	3.05	3.05	3.05	3.04	3.05	3.04

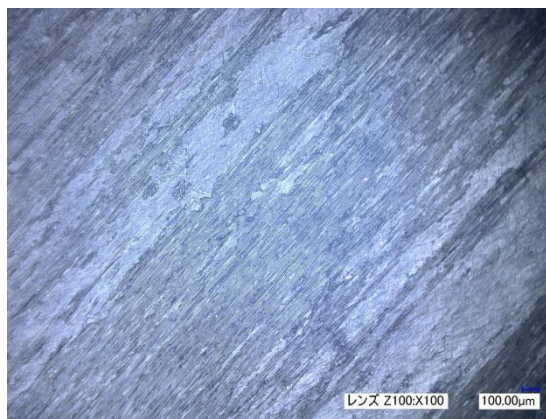
項目	面粗度 (μm Ra)			
	表面①	表面②	裏面①	裏面②
目標値	3.175	3.175	3.175	3.175
測定値	0.79	2.24	0.63	1.94

と考えられる。表面粗さについては、凸面、凹面それぞれについて、光沢のある箇所とない箇所をそれぞれ測定したが、どの箇所でも航空機部品に対して一般的に要求される数値を満足していた。

デジタルマイクロスコープの観察結果を図 12 に示す。光沢のない箇所は表面の樹脂が不足しており、繊維が露出していることがわかる。改善のためにはプレス時の条件見直しが必要と思われる。



モデル部品表面(光沢部)



モデル部品表面(非光沢部)

図 12 モデル部品 (B) の表面状態

2-2 非破壊検査による内部組織観察

モデル部品 (B) の素材は、CF(UD)/PEKK 7002 で、積層は疑似等方組織に 24ply(45/90/-45/0)₃/(0/-45/90/45)₃であった。厚さは 3.0mm

① A スキャン超音波探傷条件

- ・ 探傷方法：直接接触/パルス反射法-A スキャン
- ・ 探傷器：USN60 SW ND (GESIT 製)
- ・ 周波数：5MHz (φ0.25”、ディレイ付き)
- ・ 探傷条件：接触媒質：水
- ・ 探傷感度：対比試験片 UT-REF-1 人工欠陥 0.25” × 0.25” 部底面エコー 50%+6dB

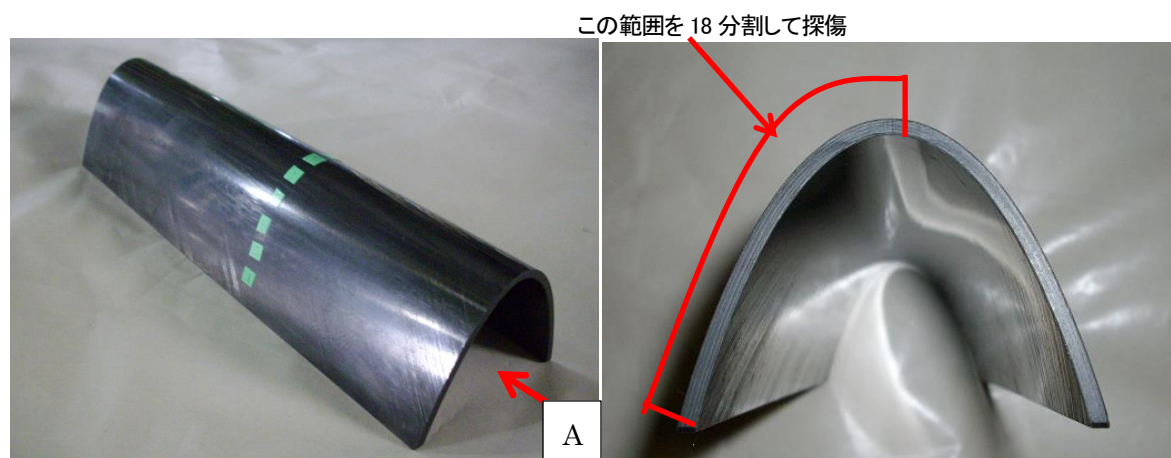
② C スキャン超音波探傷条件

- ・ 探傷方法：全没水浸/パルス反射法-C スキャン
(走査速度 50mm/s、サンプリングピッチ 0.5mm×0.5mm、水距離 21.5mm)
- ・ 探傷器：SDS-Win 6600RAM (日本クラウトクレマー製)
- ・ 周波数：5MHz (φ0.25”、フラット)
- ・ 探傷条件：試験品音速：2800m/s
接触媒質(水) 音速：1480m/s
探傷モード：一探
探傷感度：27dB

A スキャン超音波探傷によりモデル部品全面についてスキャンを行った結果、検出基準とした 0.25” × 0.25” を超える欠陥は検出されなかった。

C スキャン超音波探傷により、図 13 に示すようなモデル部品 18 部位についてスキャンを行った。その結果

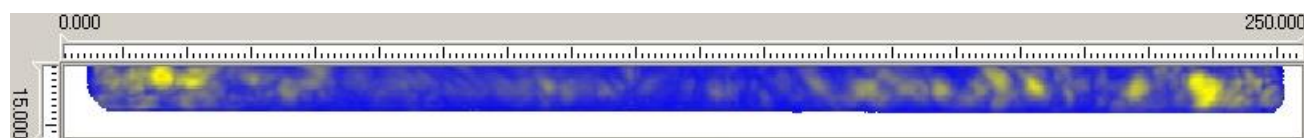
を図 14 に示すが、内部欠陥として評価すべきインジケーションは検出されなかった。図 13 の反対曲面 31 部位についてもスキャンしたが内部欠陥は検出されなかった。



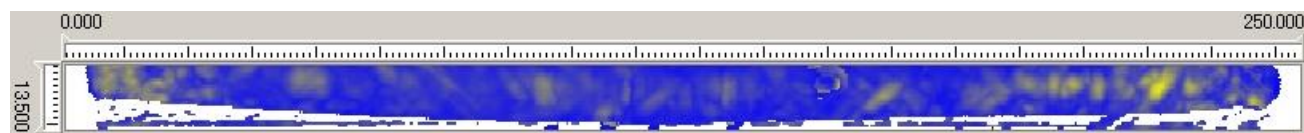
モデル部品外観

矢視 A

図 13 モデル部品 (B) の C スキャン部位



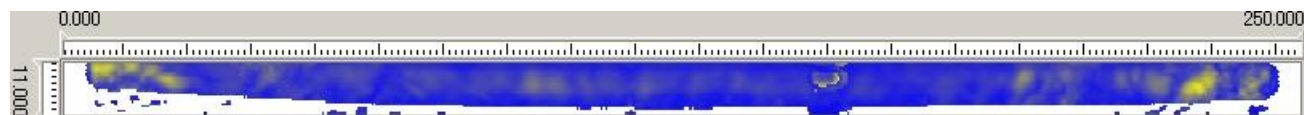
分割 2



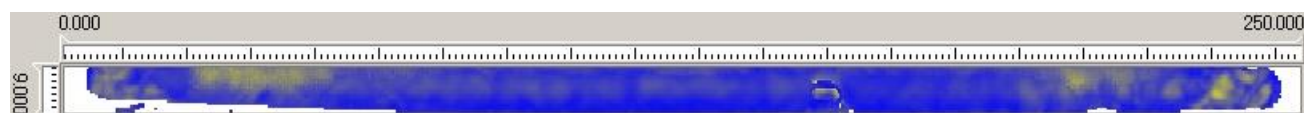
分割 3



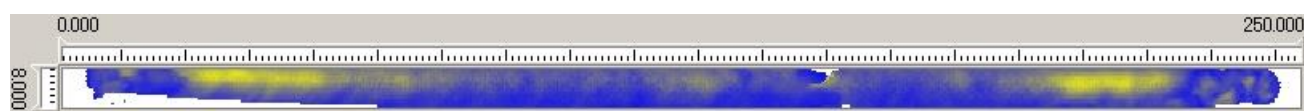
分割 4



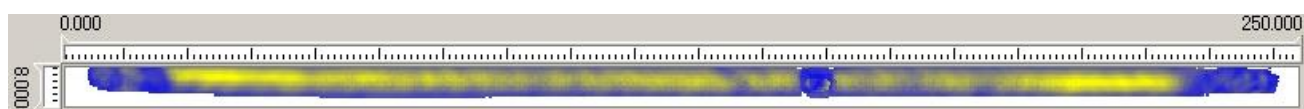
分割 5



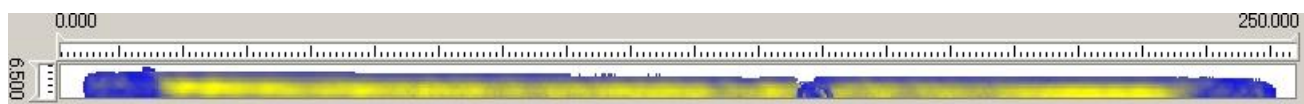
分割 6



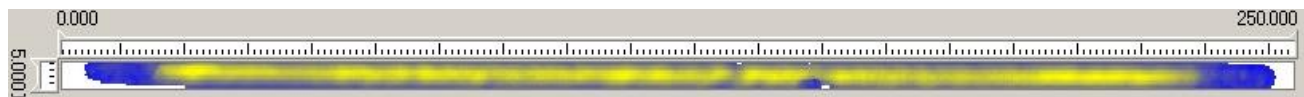
分割 7



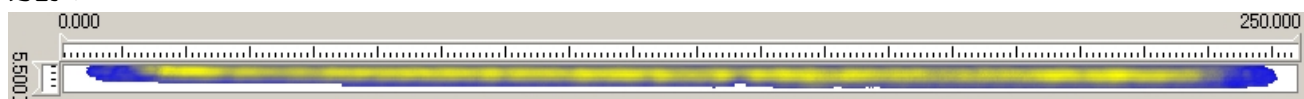
分割 8



分割 9



分割 10



分割 11



分割 12



分割 13



分割 14



分割 15



分割 16



分割 17



分割 18 (頂点側)

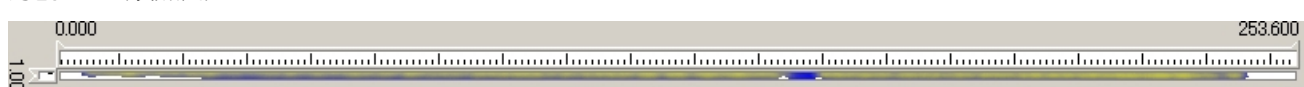


図 14 図 13 の 18 部位におけるスキャン画像

曲面を持った形状の影響により、反射エコーを一定レベルで検出するためにはスキャン範囲の細分化が必要となり、検査時間が長くなった（全面完了に 8 時間を要した。A スキャンは 1 時間程度）。生産に向けては、スキャナーの 3 次元走査や、超音波透過法の採用等により時間短縮を検討していく必要がある。

最終章 全体総括

本事業は機体メーカーの最も高いニーズである、機体 2 次構造部品への熱可塑性樹脂複合材料の適用とそれにより軽量化実現に対応したものである。ニーズの根本は機体の軽量化にあり、そのために大きな課題を一步步実現化していかなければならないが、熱硬化樹脂複合材により第 1 弾の利用に成功し、さらなる軽量化の手段としてコスト減を前提とした複合材料に焦点を絞り、オートクレーブに依存しない製法（Out of Autoclave、OoA 技術）による複合材料の早急な開発が求められるようになった。OoA 技術の一環としてスーパーエンブラの利用が考えられ、耐熱性、高強度などに優れた熱可塑性樹脂の利用を試みてきた。航空機機体材料への熱可塑性樹脂複合材の利用は歴史的に欧州の先導により進められてきた。複合材料開発は伝統的のみならず文化的にも欧州に根付いており、長い間にわたって地道な研究開発が続けられており、既に先導する実力が十分にある。日本は炭素繊維の開発には大きな力を発揮し、世界の生産高の 7 割を占めるほど、その生産力は優れた力を示すが、その利用と周辺技術のに関しては残念ながら遅れを取っている。今後の航空機がますます軽量化を目指した新機体の開発に代わろうとしている中で、少しでも早く炭素繊維複合材料の製品開発に係わるプロジェクトを進め、欧米に肩を並べるようにならないと、日本のものづくりは廃れることになる恐れがある。本プロジェクトの一員である旭金属工業(株)は航空機部品の表面処理を中核業務としてこれまで続けてきたが、将来を展望した時、金属の表面処理だけでは成長がないとの判断から、金属にとって代わろうとしている CFRP も、自らの業務に取り込むことを決断し、熱硬化樹脂複合材と競合しうる熱可塑性樹脂に属するスーパーエンブラをベースとした複合材料の開発に着手し、プリプレグ技術には福井県工業技術センターが開発した炭素繊維の開繊による薄層プリプレグに目を付け、高強度化を実現させようと考えた。スーパーエンブラの融点は 300℃を超え、従来の熱可塑性樹脂複合材料とは全く異なった高度な成形技術が求められるが、プレス技術に優れた能力を保有するスピック(株)（神奈川県）の成形能力を利用して航空機部品化を実現することを目指し、プロジェクトの推進を行ってきた。福井県、神奈川県、岐阜県の 3 県にまたがったプロジェクトチームは経済局も近畿、関東、中部の 3 局にまたがることになり、中部経済産業局の指導の下に進めることになった。プロジェクトの推進には、遠距離の課題を小さくして、チーム構成員がコミュニケーションする場をセットして、それぞれのチームが今、何を、どのように進めているのか、そして、次はどのような局面を迎えるかを何時でも、みんなが分かるように留意した。合意されたスケジュール表をベースに個別検討会議を組織し、初年度は毎月開催、2 年度目からは隔月で開催してきた。また、プロジェクト推進中に発生した課題については、我が国複合材料のオーソリティと評価される方々にアドバイザーに就任していただくと共に、技術コンサルタントとして、我が国航空機 CFRP 化のパイオニア的技術者であり、MHI の OB、ボーイング社の機体設計顧問 小笠原和夫氏及び金沢工業大学 斉藤義弘氏にお願いして、指導を受けてきた。

この 3 年間で航空業界は成長の基本線は変わらないが、新機種の出現はなく、若干の変化はあったものの大きな変化は認められないが、我々が目指した PEKK/CFRP の航空機部品へのビジネス化は確実に地上に芽を出し、大きく成長すると確信をしている。しかし、複合材に伝統的に強い欧州勢が先んじてビジネス化に成功している。現在、B797 の開発が始まろうとしているが、この機体にはかなり大幅な CFRP 部品の増加が予想されていると言われている。このような状況において、2018 年 3 月、東レ(株)はオランダの複合材の元祖ともいわれる TenCate 社を買収し、炭素繊維をプリプレグにした商品及びその購入先の技術をビジネスターゲットにした。その狙いには航空機機

体部品に加えて小型航空機、空飛ぶクルマなども視野に入れていると思われる。CFRP の利用はますます増加する方向にあり、競合する企業も増加すると予想されるが、独自技術（開繊技術）による高強度 CFRP により、厳しい競争に参加していく所存である。

PEKK 樹脂の利用技術はまだ発展途上にあり、生産量も少ない状況にあるが、需要が供給を上回りだしている。量産による売値のダウンを期待しているが、需要の方が強くなりだしてコストダウンを期待できない状況になっている。我々はフランスの ARKEMA 社の KEPSTAN PEKK を利用してきたが、中国の山東凱盛新材料なる企業が新たに PEKK 製造をし、KSTONE PEKK を商品名としている。安価であるとの話であるが、その特性が未知であり、今後注目してるところである。PEKK は CFRP 用スーパーエンブラとしての利用のみならず 3D 成形用材料としても利用されるようになり、かなり強気の商売に転じていて、我々利用者としてはプライスが極めて気にかかるころである。現在 1.5 万円から 2 万円ぐらいが相場であるが、1 万円を切るようにならないと、航空機での利用は厳しいものになりそうである。

本プロジェクトの技術開発は大きく 3 つの技術課題を担当して進めてきた。上流の材料創製は福井県工業技術センターが担当し、中流のプリプレグの積層及び成形はスピック(株)が、また下流の旭金属工業(株)は成形品検査及び各工程の標準化に係わる認定対応を担当してきた。

材料創製では、福井県工業技術センターの開発した炭素繊維の開繊技術を利用したプリプレグの製造を担い、世界的に最も薄いといわれる厚さ $40\mu\text{m}$ のプリプレグ製造に成功した。スーパーエンブラは 300°C 以上の融点であり、炭素繊維とスーパーエンブラフィルムの複合化には、高温加熱ローラーを用いて粘性が高く複合化しにくい材料の複合化に成功し、一方向に繊維が連続した (UD) 薄層プリプレグを創生した。スーパーエンブラの内、PEKK 樹脂が航空機機体部品の特性に適合するとの判断から、PEKK 樹脂複合材に絞った開発となり、繊維開繊の度合い、炭素繊維と樹脂の界面挙動・含侵性、厚さの均一分布、炭素繊維の構成割合などの課題に対応した技術を開発してきた。また、炭素繊維の構成割合を目的に応じて変化させる制御が出来、次工程の積層の簡素化にも対応した技術として、薄層プリプレグを 3 枚重ねたプリプレグの製造に成功し、航空機機体のモデル部品の試作にはこのプリプレグを使用した。

また、プロジェクト終了後 PEKK/CFRP プリプレグの供給は公的機関であるため不可能になるため、商品化を前提とした供給ルートの確立を進めている。

積層及び成形についてはスピック(株)が担当した。まず、自社で保有するプレス機械 2 台をベースに、新たな高温プレス加工のできるプレスに改造した。成形温度が約 400°C になるため、加圧に用いる油圧オイルの温度依存性、金型の操作（温度制御、加圧速度、離型剤等）等に留意した改造を加えたが、金型のデザインがポイントであった。積層は繊維が一方向配列した UD 材、UD 材を 4 方向に疑似等方的に配列したプリプレグを得るひつようがある。わずか $40\mu\text{m}$ の厚さの薄層プリプレグを積層するにはハンドレイアップに頼らざるを得なかったが、裁断-積層-仮止の工程を一連で行えるようにして、自動化できる工程の自動化を行った。

成形は予備加熱器により融点直近までプリプレグを予熱し、直ちに金型に装てん・加圧する技術の開発に挑戦したが、成形するには至らなかった。 400°C 近いプリプレグのハンドリングは困難であり、自動化を考える必要がある。試作したプレスに金型をセットし、構築したデータロガーで温度及び時間を制御しながら PEKK プリプレグを加圧

した。成形品は主に機械的特性用の試験片素材とモデル部品の成形であるが、それぞれの金型温度、加圧力、成形品の型内保持時間の最適な成形条件の決定を行った。これにより成形することは可能になったが、あくまで試作であり、ビジネス化にもっていくには設備の規模を拡大する必要がある。しかも、ライバルはCFRPに関して伝統的に生産を続けている欧州勢になる。欧州企業の設備規模はおおよそ3～10億円相当と思われ、対等に勝負するには資金力が必要になる。

開発した技術を駆使して航空機部品モデルをCATIA V5で3次元化し、それをベースに図面寸法を出して金型の設計図を作成し、金型を製作し、成形を行った。モデル(A)はL字型のブラケットを想定したもので、モデル(B)は尾翼リーディングエッジを想定した、3次元曲面を持った形状である。試作品は形状的には満足でき、内部欠陥もなく、完成度の高いものと判断したが、寸法精度検査、塗装等で問題点が現れ、対応できないものについては、ビジネス化に向けての量産化を検討する段階で解決すべき課題とした。本試作品は下記のような各種国際的イベントに出展し、PRをするとともに、客先の指摘事項を真摯に受け止め、今後の量産技術の確立を進めたい。

平成29年 6月22～24日：パリエアショー出展

9月26～28日：AEROMART2017 名古屋 出展

11月29日～12月1日：先端材料技術展2017出展（東京ビッグサイト）

平成30年 2月6～9日：シンガポールエアショー

3月26～28日：Aerospace & Defense Suppliers Summit in Seattle（ボーイング主催）

7月17～19日：ファンボローエアショー出展

11月28-30日：Japan International Aerospace Exhibition 2018出展

（国際航空宇宙展2018東京）

12月4～6日：Aeromart Toulouse 2018（エアバス主催）

これらのイベントへの参加で、ボーイング社は旭金属工業㈱が表面処理に加えてCFRP産業にも進出することに驚くと共に、今後のビジネスに期待すると表明された。現在、旭金属工業㈱はボーイング787の主翼のサブアセンブルを行っているが、この事業を起点に新たな部品に対応していくこととし、本プロジェクトのCFRP成形に係わる成果を活用する。しかし、CFRP分野での知名度の低いことが大きな障壁になっている。

そこで、新たな部品あるいは装備品を受注するのに必要な、自社独自の材料スペックを保有し、高強度材料の利点を訴えることのできるツールとしたい。そのためプロジェクト終了後、約半年かけて信頼度の高い「材料スペック」の構築を進めて、機体メーカーに強くアピールしていく。

今後も引き続きプロジェクト参加3機関は、課題解決に向けた取り組みを続けると共に、各種イベントへの出展で受注が成功した場合、試作あるいは多品種少量生産の注文であれば、現時点でも対応していく。一方、量産型受注については、新たな設備投資が必要となり、その対応には時間がかかる。新たな企業の参加を含めることも考えて、3年後を目標に量産設備を整え、いかなる注文にも対応していきたいと考えている。

さらに、複合材料のNadcap認証取得、機体メーカーの認証取得を視野に入れたJISQ9000の取得も1年前倒しで実現する。また、航空機部品は部品全数の非破壊検査が義務付けられているため、レベル3を目指した技術力の

向上を目指す。

（謝辞）

最後に、本プロジェクトを推進するにあたって、中部経済産業局地域経済部産業技術課には、終始ご指導を賜り厚くお礼を申し上げます。また、プロジェクトのアドバイザーの皆様には3年間にわたって技術的課題について適切なご助言をいただきましたことにお礼を申し上げます。