

調査・研究報告書の要約

書名	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				
発行機関名	社団法人 日本機械工業連合会・財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会				
発行年月	平成20年3月	頁数	110頁	判型	A4

[目次]

- 序 (金井会長の序)
- まえがき (大橋理事長のまえがき)
- 委員会名簿
- 目次
- 序章
 - 1. 背景と目的
 - 2. 調査研究体制
 - 3. 調査研究項目・スケジュール
- 第1章 素材技術動向(樹脂、プリプレグ等)
- 第2章 複合材料としての材料特性の開発動向
- 第3章 成形技術、製品化技術の動向
- 第4章 不連続繊維熱可塑性複合材料の開発動向
- 第5章 熱硬化性樹脂複合材料と比較した、熱可塑性樹脂複合材料の特徴
- 第6章 熱可塑性樹脂複合材料の機械工業部品への適用動向
- 第7章 海外現地調査結果
- 第8章 課題抽出および産業化への方策

[要約]

近年、樹脂系複合材料が広範囲に適用されているが、その中でも従来からの熱硬化性樹脂複合材料に加えて、大きく異なる特徴を有する熱可塑性樹脂複合材料も従来課題であった製造性等の課題を改善し、適用対象を広げつつある。

本調査研究報告書は、熱可塑性樹脂複合材料の素材から適用対象に至る最近の動向を調査し、今後の研究課題や機械工業部品へのいっそうの適用可能性や適用候補対象への提言、また熱硬化性樹脂複合材料との棲み分けについて提言をまとめたものである。

序章

1. 背景と目的

従来、航空機等の輸送機器に適用される樹脂系複合材料のマトリックス樹脂はプリプレグ製造性、成形性等の理由から主にエポキシ樹脂等の熱硬化性樹脂が使用されていた。しかしながら、近年、高靱性、リサイクル性、量産性等の特長を有すると共に従来の技術課題であったプリプレグ製造性、成形性を改善する技術が開発されつつある熱可塑性樹脂複合材料が注目されている。

そこで、本調査研究では、熱可塑性樹脂複合材料を対象に樹脂、プリプレグ等の材料製造技術、成形技術、材料特性等、本材料の技術ポテンシャルを調査した上で機械工業分野への適用を拡大するための技術課題を明らかにする。さらに、航空機分野、自動車分野を中心に本材料の適用実績を調査すると共に、今後の適用候補対象について提言を行う。

2. 調査研究体制

産学の学識経験者による「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委員会」を設立し、航空機分野、自動車分野を主な対象として、熱可塑性樹脂複合材料について以下の内容に関する技術動向調査を実施した。そして、今後の研究開発課題や将来の機械工業部品への適用の可能性について提言を行った。さらに、熱硬化性樹脂複合材料との棲み分けについて提言した。

3. 調査研究項目・スケジュール

(1) 素材技術動向に関する調査研究

近年、熱可塑性樹脂複合材料の適用拡大を目指して、種々の特性の樹脂が開発されてきた。それとともに、それらの樹脂を繊維とを複合化する技術についても進展がみられる。それら熱可塑性樹脂の開発動向、及びそれらを用いたプリプレグ化等の複合化技術の開発動向について調査した。

(2) 材料特性に関する調査研究

複合材料は樹脂、繊維形態、成形プロセスの違い等によって、その材料特性が変化し適用対象も異なってくる。それらの材料特性について調査した。

また、熱可塑性樹脂複合材料と従来使用されてきた熱硬化性樹脂複合材料の、材料特性の相違を比較検討し、使い分け等を検討した。

(3) 成形技術動向に関する調査研究

熱可塑性樹脂複合材料は、最近成形技術や成形装置が大幅な進展を見せている。また、熱硬化性樹脂複合材料には見られない接合技術も可能で、その適用技術も進展してきた。その他の製品化のための技術も含め、最近の技術動向を調査した。

(4) 機械工業部品への適用動向に関する調査研究

近年種々の分野で、熱可塑性樹脂複合材料適用が拡大している。それらについて、航空機、自動車、ジェットエンジン、船舶等の適用進展動向について調査した。

特に、最近熱可塑性樹脂複合材料の欧州における適用の進展が著しいので、現地で航空機部品や自動車部品等の適用状況の海外調査を Stork Fokker 社、TenCate 社、そして Delft 大学その他を視察することにより実施する。その際あわせて (1) 項および (3) 項に関わる調査も実施した。

(5) スケジュール

半期別・月別 項目	下半期				
	平成 19年 ／ 11	12	平成 20年 ／ 1	2	3
①素材技術動向に関する調査研究				→	
②材料特性に関する調査研究				→	
③成形技術動向に関する調査研究				→	
④機械工業部品への適用動向に関する調査研究				→	
⑤委員会の開催	○	○		○	
⑥報告書の作成・公表					→

第1章 素材技術動向(樹脂、プリプレグ等)

1. 1 熱可塑性樹脂技術動向

1. 1. 1 熱可塑性樹脂とは

(1)熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂

加熱をすると網状構造となって不溶不融の状態に硬化する合成樹脂が熱硬化性樹脂である。加熱すると熔融して流動性及び可塑性を示し、冷却すれば再び固化し、再び加熱すれば流動性を示す。この様に可逆的に変化し加熱すると可塑性を示す合成樹脂が熱可塑性樹脂である。

(2)熱可塑性樹脂：結晶性樹脂と非晶性樹脂

結晶性樹脂は鎖状高分子が規則正しく配列した部分（結晶相）と無定形の部分（非晶相）からなる。非晶性樹脂は鎖状高分子が無定形の構造をとる部分（非晶相）で構成される。

(3)熱可塑性樹脂の合成反応：付加重合と重縮合

付加重合は単量体が成長鎖末端に付加的に結合する反応を成長過程とする連鎖重合反応をいう。重縮合は二つの分子が反応し水のような比較的小さな分子を分離して結合する縮合反応の繰返しによる重合体生成反応をいう。

1. 1. 2 熱可塑性樹脂の高性能化

(1)高耐熱化

耐熱性を上げるためにポリマー骨格に芳香環を導入すると共に芳香環同士の結合を比較的軟らかいアミド結合やエステル結合から硬いイミド結合やカルボニル結合に換えてきている。ポリイミドや全芳香族ポリエステルで更に耐熱性を向上させる試みが続いているが、熔融成形ができなくなってきており熱可塑性が保てなくなっている。熱可塑性樹脂の耐熱性としては限界のレベルに達してきていると思われる。

(2) 靱性化

熱可塑性樹脂の高靱性化はポリブタジエン等のゴム成分を導入することが一般的である。ABS樹脂は、所謂、コアシェル構造を有しているグラフトゴムをAS樹脂に添加しABS樹脂を製造する。

ABS樹脂と時を同じくして1956年にポリカーボネート（PC）樹脂が工業化されている。ABS樹脂は樹脂を変性して耐衝撃性を向上させているが、ポリカーボネート樹脂では単一樹脂としての高靱性化を達成している。その樹脂自体の優れた塑性変形能力により外力による応力の緩和を図っている。このことは逆に熔融時の流動性の悪さを招いている。

(3) ポリマーアロイ

新しい構造の樹脂の開発がさらに進む一方で、樹脂の変性ではなく樹脂と樹脂を合わせる事によりそれぞれの特徴を生かした改良方法としてポリマーアロイ（polymer alloy）の考え方が生み出された。ミクロ相分離構造の制御こそポリマーアロイ技術の核である。

1.1.3 開発の新しい視点

(1) 精密重合

樹脂の変性や新しい骨格をもつ樹脂の開発が頭打ちとなる中で、従来の樹脂の分子の立体構造を制御することで性能を向上させる方法が検討されている。1997年にシンジオタクチックポリスチレンが工業化された。通常ポリスチレン樹脂は非晶性樹脂に分類されるがシンジオタクチックポリスチレンは結晶性を持ち、融点は270℃を示す。立体構造を制御することで汎用プラスチックがエンジニアリングプラスチックに生まれ変わった。

(2) 植物由来樹脂

二酸化炭素削減、石油資源からの脱却の意識の高まりから、植物由来樹脂の開発気運が高まってきている。現在、工業化されているのはトウモロコシ等から合成されるポリ乳酸である。また、2006年にはヒマ（トウゴマ）の種子から抽出されたひまし油を元に、11-アミノウンデカン酸を生成、これを合成して得られるナイロン11樹脂が製品化されている。研究段階としては微生物が生産するポリ（3-ヒドロキシ酪酸）が挙げられる（融点178℃）。

1.2 代表的な複合材料用熱可塑性樹脂の紹介

以下の樹脂についての特性概要を紹介する。

- ・ナイロン樹脂
 - ・ナイロン6
 - ・ナイロン66
 - ・ナイロン11
 - ・ナイロン12
- ・ポリエステル樹脂
 - ・ポリブチレンテレフタレート（PBT）
 - ・ポリエチレンテレフタレート（PET）
- ・ポリカーボネート（PC）樹脂
- ・PPS樹脂
- ・PEEK樹脂
- ・ポリイミド（PI）樹脂
- ・ポリアミドイミド（PAI）樹脂

- ・ポリエーテルイミド（PEI）樹脂
- ・全芳香族ポリエステル樹脂
- ・ポリプロピレン（PP）樹脂

1. 3 プリプレグの製造技術

連続繊維系熱可塑性樹脂プリプレグの製造方法は、繊維への樹脂含浸方法の種類から、次のような方法に分類される。各々の製造技術の特徴および製造方法について、下記項目でまとめた。

- ・溶融法（ホットメルト法）
- ・溶剤法
- ・パウダー法
 - ・ドライパウダーコーティング法
 - ・パウダーサスペンション法
- ・樹脂フィルム含浸法（フィルムスタッキング法）
- ・混織法（コミングル）法
- ・商品化されている連続繊維系熱可塑性樹脂プリプレグ

現在、市販されている連続繊維系熱可塑性樹脂プリプレグは、溶融法、溶剤法、パウダー法、樹脂フィルム含浸法、混織法（コミングル）法等、製造方法は様々であり、各社の特徴を活かした連続繊維系熱可塑性樹脂プリプレグが製造販売されている。

- ・熱可塑性樹脂プリプレグの製造方法に関する課題

熱硬化性プリプレグと比較し、熱可塑性プリプレグは、プリプレグとしての取扱い性、加工性が極めて悪いのが現状である。これらを改良するため、種々の製造方法が開発され、各社から連続繊維系熱可塑性樹脂プリプレグが上市されている。現状、連続繊維系熱可塑性プリプレグの製造コストは高く、特に炭素繊維を用いたプリプレグには、PEEK、PEI、PPSのような高価な熱可塑性樹脂を用いた高付加価値プリプレグが適用されているに過ぎない。今後の連続繊維系熱可塑性プリプレグの市場拡大には、コンポジット成形プロセスの技術開発が必要であり、その成形プロセスに適した熱可塑性プリプレグが、今後のプリプレグ製造方法のスタンダードになると言えよう。

第2章 複合材料としての材料特性の開発動向

2. 1 熱可塑性樹脂複合材料の開発の歴史

熱可塑性樹脂複合材料は、特に熱硬化性樹脂をマトリックスとする複合材料に対して以下のメリットがあげられる。

- ① 耐衝撃性に優れた複合体が得られやすい。
- ② 成形時間が短く、生産性に優れる。
- ③ 熱融着・熱賦形が可能で、宇宙空間での加工等に適す。
- ④ リサイクル使用が可能である。
- ⑤プリプレグの保存安定性に優れる。（冷凍保存の必要なし）

1970年代にICI社により Tg および融点が高く、かつ溶融時熱安定性が非常に優れた樹脂としてPEEKが開発された。この成果により、熱可塑性樹脂をマトリックスとした複合材料の評価が航空機分野を中心に進められた。

2. 2 複合材料としての材料物性

第一に基本特性として、樹脂韌性の高さについて紹介している。これに伴う、力学特性

について、引張特性には大きな影響を及ぼさないものの、45度引張試験結果においては大きな違いが観察されることを紹介している。また、樹脂靱性が高いことからCAI強度の向上が観察されている。これらの結果、オランダの航空機製造メーカーでは、熱可塑性樹脂複合材料の限界設計歪みを熱硬化性樹脂複合材料の2倍に設定している。

続いて、熱可塑性樹脂複合材料の特性として、樹脂をPEEK、PPS、PAを取り上げ、炭素繊維、AS-4との複合材料の力学特性について紹介している。この結果から、破壊靱性値が比較対象である熱硬化性樹脂複合材料の2倍以上になっていることがわかった。力学特性的にも、極めて良好であることがわかった。

さらに、各樹脂の商品カタログを付随した。

2. 3 熱可塑性樹脂複合材料の規格化

熱可塑性樹脂複合材料の規格化の動向として、航空機製造メーカーの規格化動向を調査した。その結果、ボーイング、エアバス等のスペックで、規格化されていることがわかった。ボーイングはBMS8-353というスペック番号で熱可塑性樹脂としてPEIを使ったものが認定されている。一方、エアバスにおいてもPPS樹脂を使った熱可塑性樹脂複合材料が規格化されている。

最後に、今後の課題提言として、熱硬化性樹脂複合材料に対して樹脂靱性という点で大きなメリットがあることがわかった。しかし、クリープ特性など確認されていない物性もあることからデメリットとなる材料物性の下限を把握することが重要と考える。

第3章 成形技術、製品化技術の動向

3. 1 成形技術

熱可塑性樹脂複合材料は、再加熱することにより再成形できる、プレス成形など単純なプロセスを適用できオートクレーブの必要がないなど、熱硬化性樹脂複合材料とは異なった特徴を有する。熱可塑性樹脂複合材料の材料形態および成形技術について、主として航空機、実機部品に適用されている技術を調査した。

3.1.1 材料形態

熱可塑性樹脂複合材料の部材を成形するための基本的な材料は、プリプレグ、セミプレグ、積層板(RTL)で供給されている。

3.1.2 成形技術

基本的には、熱可塑性樹脂複合材料は、熱硬化性樹脂複合材料と同様の方法でプリプレグやセミプレグの積層により成形される。一定断面部材やチューブの場合は、プルトルージョン(pultrusion)や短繊維によるインジェクションモールディング(injection moulding)なども用いられる。熱可塑性樹脂複合材料に特徴的な成形方法として下記の技術があげられる。

・成形技術

熱間プレス成形(press-forming)や熱間折り曲げ成形(thermo-folding)のような単純で自動化しやすいプロセスでも成形されている。

・融着(welding)

加熱による融着が可能であり、機械的な接合や接着剤を使った接合に対しせん断強度が高く、リベット等の必要がないので、重量軽減、低コスト、再加熱による修理可能などメリットが多い。主な融着方法としては、抵抗融着(resistance welding)、誘導融着(induction welding)、超音波融着(ultrasonic welding)が用いられている。

・コ・コンソリデーション(co-consolidation)

プリプレグやセミプレグを裁断後、積層あるいはプリフォームして、オートクレーブ中でコンソリデーションすると同時に、他の部品を接着して複雑な形状の部品を製造することが可能である。後工程での接合の必要がないのでコスト削減が可能であり、また、リベット等を使用しないので、重量低減効果も大きい。

3. 2 製品化技術

実際に製品として部品を作る場合は、自動化によるコストダウンや成形後の加工処理、検査技術等の製品化技術も重要である。

・成形の自動化技術

フィラメント・ワインディング、ATL(Automated Tape Laying)、および AFP(Automated Fiber Placement)が採用され始めている。

・機械加工技術

熱硬化性樹脂複合材料と同様、NC 加工、ウォータージェットなどで孔開けやトリム加工が行われている。ただし、加工時の発熱により樹脂が熔融するので、適切な刃具の選定や冷却方法を工夫する必要がある。また、金属板金加工のように、シャーやパンチングも使用されている。

・品質保証技術

熱硬化性樹脂複合材料と同様に、主に超音波検査による非破壊検査が行われている。また、X線や熱イメージングなどの適用も検討されている。

第4章 不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料の開発動向

この章に記述する不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料とは、上述の各章に報告された連続繊維とは異なり、繊維長が 12mm から 200mm 程度に短く切断された強化繊維と、熱可塑性樹脂をマトリックスとした複合材料を指すものとする。

連続繊維熱可塑性樹脂複合材料との相違点は、強化繊維の長さが短いため、機械的強度や弾性率などの性能は劣るが、一方深絞り成形や、複雑な形状の成形品を生産することが可能となる。

成形プロセスも、射出成形、圧縮成形、サーモフォーミング、フィラメント・ワインディング、内圧成形などにより、成形コスト低減の可能性が期待されている。

ガラス繊維と P P、ポリプロピレン樹脂による不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料は、1060 年代末に米国で、Stampable シートとして、AZDEL® が生産開始されて今日に至っている。

さらに LFT, Long Fiber Thermoplastics ペレットが 1990 年後半から登場し、徐々に市場シェアが増加している。

また 2000 年に入って、ガラス繊維ロービングと P P 樹脂を直接に混捻し、圧縮プレスまたは射出成形で製品化するシステムが、欧州を中心に開発されて、その導入が進みつつある。

炭素繊維の不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料に就いては、米国 DuPont 社が、1080 年代後半に、LDF® Thermoplastic Composites の研究開発を、航空宇宙用途を目指して推進したが、その後このプロジェクトは中断された。

これに代わって、フランスの Schappe Techniques 社が 2000 年以後に、独自の炭素繊維の不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料 TPFL® を開発し、現在そのマーケティングを進めている。

以下、下記について詳述する。

- ・不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料の素材
 - ・強化繊維
 - ・熱可塑性樹脂マトリックス
 - ・不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料の生産プロセス
- ・不連続繊維熱可塑性樹脂複合材料の材料特性

第5章 熱硬化性樹脂複合材料と比較した、熱可塑性樹脂複合材料の特徴

本章では、主に航空機部品に使用される熱可塑性樹脂複合材料を熱硬化性樹脂複合材料と比較し、その特徴を明らかにする。

5. 1 熱可塑性樹脂複合材料と熱硬化性樹脂複合材料の基礎特性

熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂は、可逆性か非可逆性であるかに最大の特徴がある。

熱可塑性樹脂複合材料の特徴は、熱硬化性樹脂複合材料と比較すると、一般的には靱性、耐衝撃、耐熱特性に優れている。また、冷凍保管が不要で、保管寿命がなく、可逆特性を生かし、不具合発生時に再加工ができる等、有望な材料である。

5. 2 熱可塑性樹脂複合材料の歴史

1990年代、超音速旅客機 SST 等への主翼等主構造へ複合材料を検討する中で、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、熱可塑性ポリイミド (PIXA：三井化学) 等の熱可塑性樹脂に関しての研究が盛んに行われたが、加工温度が高く、製造コストにメリットが出なかったため、実機への適用には至らなかった。

5. 3 航空機に多く適用されている熱可塑性樹脂複合材料

航空機に多く適用されている熱可塑性樹脂複合材料のマトリックス樹脂としては、主構造部品以外への熱硬化性樹脂複合材料の代替、アルミ合金部品の代替として、ポリフェニレンスルフィド (PEI)、ポリフェニレンスルフィド (PPS) であり、そのメリットは、熱硬化性樹脂複合材料に対し、製造が低コスト。アルミ合金部品に対し軽量化が可能となる点である。

また、近年、PPS に対して耐熱性能に優れ、PEEK に対して材料費の安い、ポリエーテルケトンケトン (PEKK) が出てきた。PEKK をマトリックスとする熱可塑性複合材料は、航空機の設計上重要となる、吸湿後、高温 (82℃) 下での有孔圧縮強度及び衝撃付与 (1500in-lb/in) 後の圧縮強度が、熱硬化性樹脂 (エポキシ) 複合材料と比較しても優れた性能を発揮する。

5. 4 熱可塑性樹脂複合材料と熱硬化性樹脂複合材料の成形方法比較

航空機部品に使用される熱硬化性樹脂複合材料は、プリプレグを積層し、オートクレーブで成形されるケースが多い。熱硬化性樹脂プリプレグ材では、管理 (冷凍保管、保管期間、室温における作業可能時間) が必要であり、硬化時間 (2 時間程度) を要する。成形条件 (温度、圧力、時間) は、熱硬化性樹脂の化学的反応特性を熟知した上で設定する必要がある。熱可塑性樹脂複合材料においても、オートクレーブ成形される場合があるが、成形温度が高いために、製造コスト的にメリットが低くなる。

航空機部品に適用される熱可塑性樹脂複合材料の成形方法としては、ホットプレス成形が一般的である。特徴としては、プリプレグに対し保管期限がなく、室温において保管が

可能である。更に成形時間が短く、不具合の発生時には再成形も可能である。ただし、プリプレグにタック（粘着）力がないので、更に、複雑な形状に対する積層は難しい。

部品と部品の接合に関しては、熱硬化性樹脂複合材料の場合は、フィルム接着剤を用いたオートクレーブによる接着や、ペースト接着剤による接着が実施される。一方、熱可塑性樹脂複合材料の場合、接着剤による接着も可能であるが、熱可塑性樹脂を抵抗加熱、誘導加熱、超音波加熱技術を適用した融着も可能である。

5. 5 期待される熱可塑性樹脂複合材料の将来

航空機に使用される熱可塑性樹脂複合材料の将来に対しては、主構造への適用、自動化、低コスト化が課題である。そのために、自動積層機（ATP）を使用したダイレクトコンソリデーション（In-Situ プロセス）技術や連続成形技術も開発が進められており、今後、熱可塑性樹脂複合材料の適用が拡大されると予想される。

第6章 熱可塑性樹脂複合材料の機械工業部品への適用動向

6. 1 航空機

本稿はArnt Offringa氏（Stork Fokker 社）とJia-Mo Bai 氏（米国Cytec 社）の報告をもとに調査した。

6. 1. 1民間機

1980年代、航空機構造用途にも適用可能な高性能熱可塑性樹脂（PEEK 等）が開発され、複合材料部品の低コスト化を可能とすることから開発が進められた。glass/PEIやcarbon/PEIがFokker 100やGulfstream 450及び550のfloor board等にて試作評価され、carbon/PPSがFokker 50で製のmain landing gear doorの試作・飛行実証試験等に用いられた。そして、今日glass/PPSがA340-500/600とA380のwing fixed leading edge(J-nose)に適用されている。

6. 1. 2軍用機

carbon/PEEK材料がRafale のengine tunnelや、F-22のweapons bay doors、undercarriage doors、forward fuselageに適用された。

6. 1. 3ヘリコプタ

carbon/PEEK材料がEH101のfloor panelsに適用された。

6. 1. 4主たる開発品

試作レベルでは多くの熱可塑性樹脂複合材料が評価されている。主なものでは、Joint Strike Fighter(JSF)のengine access coverやhorizontal tailをstiffeners、spars、ribs とskinを一体成形するco-consolidation technologyが試作評価された。

また、carbon/PEKK材料による大型機のfloor beamも試作評価されている。

6. 1. 5将来展望

熱可塑性樹脂複合材料の将来展望として、rudders、leading/trailing edgesのような部品は、近い将来実用化が可能であり、長期的にはwingやfuselageの主構造を目指すとされている。

そのためには、積層の自動化、接合技術等、熱可塑性固有の周辺技術を含めた技術確立が必要である。

6. 1. 6実用化に向けた技術課題

・材料技術

材料／加工技術／設計技術が蜜に連携して、開発を進めることが重要である。中でも材料の国産化が大きなポイントである。

・専用設備の開発導入

熱硬化性樹脂複合材料との棲み分けを明確し、コストとパフォーマンスが両立できる優れた熱可塑性樹脂複合材料用専用設備の開発導入が不可欠である。

・データの蓄積

構造部材としての信頼性、安定性を高めていくため、材料・加工技術と共に長期耐久性評価等基盤的な評価のデータ蓄積を図る必要がある。

6. 2 自動車

6.2.1 自動車における熱可塑性樹脂複合材料利用の概況

量産性・リサイクル性等から熱可塑性樹脂複合材料の期待は大きい、一方、材料・成形費のコスト要求は厳しい。現在は、不連続長繊維 (glass) と安価なPPの組み合わせにより、ドア&ルーフインナー、フロントラジエーターフレーム等の比較的大型な複雑部材のプレス成形を中心に適用が進められている。シャーシ等主構造部材やエクステリア部材に適用するため、連続繊維の取り扱いやクラスA成形技術の研究が進められている。

6. 3 その他

6.3.1 航空エンジン・ガスタービン

ジェットエンジンは部位によって使用温度が大きく異なり、耐熱要求の制約から、現在ファンブレード廻りにのみ熱硬化性樹脂複合材料が適用されている。しかし、ドイツのDLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) のチタン基複合材料とPEEKによるデザインコンセプトの提案など、本分野への適用研究は進められている。

また、エアバス社のA380のエンジン部の空気取り入れ口にはTenCate社の熱可塑性樹脂複合材料 (CETEX) が用いられているという報告もある。

6.3.2 船舶

船体は、建造コストの制約が大きく、ワンオフ・少数生産、開発・設計期間が短い等から、小型舟艇を除き、複合材料の利用は大きく制約されている。リアクションタイプ樹脂などによる低温・常温一体成形、熱融着などの二次組立技術が船体主構造への熱可塑性樹脂複合材料適用のキーであろう。

第7章 海外現地調査結果

7. 1 現地出張調査概要

出張期間：2008年1月12日～1月20日

視察先：

TenCate	； Campbellweg 30 7443 PV Nijverdal, The Netherlands
Stork Fokker	； Edisonstraat 1 7903 AN Hoogeveen The Netherlands
DTC	； Pascallaan 15a 8218 NJ Lelystad The Netherlands
TU Delft (TUD)	； Kluyverweg 1 2629 HS Delft The Netherlands
CFK	； Airbus-Str. 1, 21684 Stade, Germany
IWW	； Erwin-Schrödinger-Straße, Gebäude 58 67663 Kaiserslautern Germany

出張者：

鶴沢 潔(東京大学)、中山良博(川崎重工業株)、山口晃司(東レ株)、
榎本清志((財)次世代金属・複合材料研究開発協会)、古挽彰(榊IHI)
飯塚健治(飯塚テクノシステム(有))

7. 2 調査先概要

熱可塑性樹脂複合材料の材料開発を進めるTenCate社からファブrikレーターのStork Fokker社とDTC社、また本分野の研究を精力的に進めているデルフト工業大学(TUD)とIVW、さらには航空機への本格的適用を目指してECの研究・開発ネットワークを具体的な形にしたCFKと、熱可塑性樹脂複合材料分野のほぼ全ての分野におけるトップランナーを視察した。

TenCate社では、Airbus A340. A380など多数の部品に採用されている積層ラミネート材の成形工場を見学し、さらに今後の展開・開発方針を聞くことが出来た。TenCate社は一次構造部材への展開を図るため、CFUD材の供給と新規樹脂開発を進めている。

Stork Fokker社とDTC社にて、実際にビジネス展開している様子を視察した。DTC社は概して長さ1 m以下のスティフナーなど単純な小部品、Stork Fokker社はA380のJ-ノーズアッシーのような大型・組み立て構造、の違いはあるものの、両者とも航空機部材を主として製造している。

DTC社は、主にTenCate社の積層ラミネート材を購入し、プレス成形機によるフォーミングのみを行っている。Stork Fokker社は同様にTenCate社の材料を、J-ノーズのリブ材は積層ラミネート材の曲げ加工、外板はセミプレグ材によるオートクレーブ成形と使い分けている。

熱可塑性樹脂複合材料を精力的に研究している機関としてTUDとIVWを訪問し、将来に向けた研究の様子を確認した。TUDの研究は主に航空機構造に限られるのに対して、IVWは自動車関連も目標にしており、GMTなど非連続繊維コンポジットや溶接技術にも力を入れている。最新、TUDはリアクションタイプ樹脂+VaRTM成形を目指し、IVWは自動化技術によるUD材の成形と三次元形状に適合した溶接を研究している。これらは共に一次構造部材への取り組みである。

CFK Valley Stadeでは航空機主構造部材に複合材料を適用するための最新の取り組みを視察した。今回はCTCで、熱可塑性樹脂複合材料の自動成形機の研究・開発の様子を見学した。これは熱可塑性CFUDをIn-Situ成形するもので、装置の全体構成は熱硬化性のFPやATLと同様であるが、ヘッド部分が熱可塑性樹脂専用となっている。CFKでは、大型3次元パネルの成形を通して航空機部材としての構造研究や、装置の実用レベルを検証している。

第8章 課題抽出および産業化への方策

軽量化要求の厳しい航空宇宙分野だけでなく、自動車をはじめとする種々の機械工業分野において樹脂系複合材料は急激に適用対象を拡大している。そしてそれぞれの分野の要求に応じて、樹脂系複合材料は、技術的に発展し適用形態を変えつつ浸透していつている。

具体的には、樹脂系複合材料はマトリックス樹脂によって大きく熱硬化性樹脂複合材料と熱可塑性樹脂複合材料に大別でき、従来から複合材料が適用されてきた航空機などの重要機械分野では、熱硬化性樹脂複合材料がほとんどであった。しかし複合材料がその他の分野へ適用展開され、また航空機分野でもエアバス A380 やボーイング 787 のように大幅な適用拡大がなされる中で、熱硬化性だけでなく熱可塑性樹脂複合材料も着実に適用領域を広げてきつつある。

今回の熱可塑性樹脂複合材料の適用動向調査を通して、特に欧州における適用技術の大幅な進展が確認された。その顕著な事例としてはエアバス社の主翼リーディングエッジ、A380 エンジンカウルがある。そして欧州は、現在も強力な開発体制で適用研究と関連技術開発を推進しつつある。また、熱硬化性、熱可塑性の両者を棲み分けさせて適切に活用し、両者あわせて複合材料全体の適用拡大を図ろうとする検討の中で、両者それぞれの適用上の課題も相互比較によって明確になった。

まず、熱硬化性樹脂複合材料の課題を以下に示す。

- ① 高コスト（炭素繊維が低コスト化されても熱硬化性樹脂が依然高価であり、熱硬化性樹脂プリプレグの冷凍保管や大型の成形設備に多額の投資と運転資金が必要となる。これに対し、熱可塑性樹脂プリプレグは常温で保管可能で、経年劣化の心配がないなど、付帯設備の低コスト化が期待できる。）
- ② 成形に時間がかかる（ただし、日本では NEDO で炭素繊維強化熱硬化性樹脂の迅速成形プロジェクト（2003fy-2007fy）が行われ、注目されている。）
- ③ 成形に大規模設備が必要（世界的に、航空機以外はオートクレーブ成形から RTM や真空アシスト RTM によるニアネットシェイプ成形にシフトしているが、熱硬化性樹脂は二次加工が困難であるため製品の最終形状に近い大きなものを一体成形する必要があり、やはり成形設備は大型にならざるを得ない。）
- ④ 二次加工性・賦形性が悪い（金属材料のように汎用素材を深絞り加工したり、部材を溶接して製品や構造体を組立・成形できれば、大規模成形設備を持たない中小企業でも社会のニーズに応じた様々な製品を企画・生産可能となる。）
- ⑤ 補修・リサイクルが困難（図 8-1 は鉄鋼と炭素繊維強化熱硬化性樹脂（CFRTS）と炭素繊維強化熱可塑性樹脂（CFRTP）の処女材による部品とリサイクル材による部品の製造エネルギーを比較したもので、炭素繊維強化複合材料はリサイクルが環境負荷の面でも極めて効果的であることを示している。しかしながら、熱硬化性樹脂は加熱しても軟化せず、補修やリサイクルが技術的に困難であって、ライフサイクルコストで考えると不利である。）

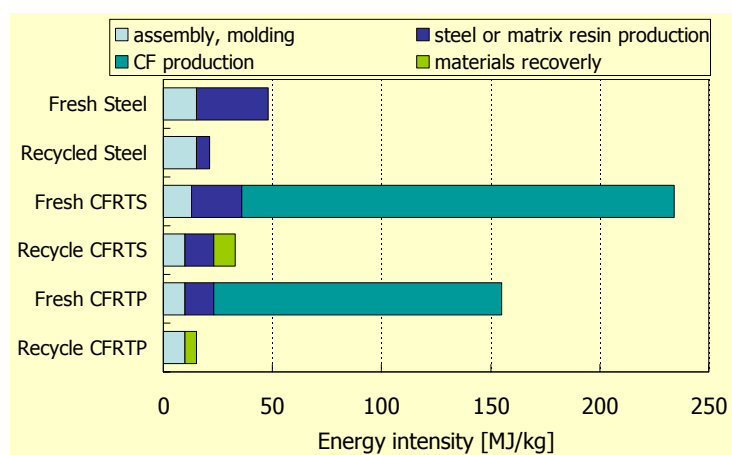


図 8-1 炭素繊維強化複合材料におけるリサイクルの効果

一方、熱可塑性樹脂は一般に低コストで迅速成形性に優れ、加工性・リサイクル性・耐衝撃性が良く、上記の熱硬化性樹脂複合材料での問題を一気に解決できる可能性が高い一方で、本調査を通して、繊維強化された場合の次のような課題が抽出された。

① 繊維（繊維と樹脂の界面）関連：

熱可塑性樹脂は一般に炭素繊維との接着性が悪いため、炭素繊維表面の物理的・化学的改質による樹脂との界面接着性の改善が必要と考えられる。樹脂側への官能基の導入も界面接着性向上に効果的と考えられるが、吸湿劣化や靱性低下等の要因ともなるため、目的に応じた開発が必要となるであろう。

② 樹脂関連：

二次加工性・リサイクル性・耐衝撃性の良さは熱可塑性樹脂の魅力的な特徴であるが、この熱可塑性という性質は耐熱性とは相反する特性であり、耐熱性を有する熱可塑性樹脂の開発は限界に達してきているのではないか。また、一次構造に適用していくためにはクリープ特性などの長期耐久性データの蓄積が必要となるであろう。

③ 中間基材・成形方法関連：

射出成形による低体積含有率・不連続繊維・低力学特性の用途では問題とならない（不連続繊維の場合の研究開発動向は本報告書第4章参照のこと）が、高体積含有率・連続繊維・厚肉・高力学特性の用途では目的に応じた成形方法とそれに適した中間基材の開発が不可欠であろう（航空機二次構造部材と一次構造部材に分けた技術開発動向と課題の整理は本報告書第3章参照のこと）。

すなわち、熱可塑性樹脂は分子量が大きいため炭素繊維束への含浸が困難である。よって、樹脂が予め含浸されたシートであるプリプレグを作成するにあたっては、樹脂によっては高圧含浸設備が必要であったり、溶剤を用いる必要があったりして、一般に費用も環境負荷も高くなる。

また、熱可塑性樹脂によるプリプレグは、常温では硬くてドレープ性がなく、タックも低く、プリプレグとしての取扱い性、加工性が極めて悪いため、樹脂未含浸のセミプレグの形態もあるが、最終成形物の力学特性を確保するためには、プリプレグ以上に高度な成形技術が必要と考えられる。

以上のように、熱可塑性樹脂複合材料は未解決課題も多い材料ではあるが、熱硬化性樹脂複合材料の持つ課題を補完する特長を持ち、棲み分けての相互連携適用により、構造体のさらなる軽量化や安全性向上への寄与が期待できる。

なお、熱可塑性樹脂複合材料として一部実用化されているものもあるが、真にそのポテンシャルを発揮させるためには、樹脂開発、繊維開発、中間基材開発、成形手法開発の連携が不可欠であろう。その意味において、欧州の開発体制では、炭素繊維メーカーが欠けており十分な体制とはいえない。

一方、炭素繊維というコア技術とその誕生から現在まで40年間育成し世界のトップシェアを維持し続け、かつ世界の航空機に炭素繊維強化複合材料を供給してきた我が国でこそ、この分野における組織的・系統的・抜本的な研究開発を行うべきであり、例えば、以下のような研究項目が考えられる。

① 炭素繊維強化熱可塑性樹脂中間基材の開発

- 我が国の樹脂系ナノテク技術を結集し、炭素繊維との接着性・含浸性はもちろん、加工性・リサイクル性と耐熱性・耐候性・耐衝撃性等を両立させるマトリックス樹脂を開発する。
- 上記樹脂との界面特性を最適化させた炭素繊維により、各種成形方法に適した中間基材を開発する。

② 炭素繊維強化熱可塑性樹脂の成形・加工技術の開発

- 航空機等の高信頼性を求められる一次構造部材・二次構造部材を高速・低コストに製造する熱可塑性樹脂ならではの設計指針を策定し、プレス成形・溶着・ステッチング等を組み合わせた成形・加工技術を開発する。
- 熱可塑性樹脂ならではの自動化による品質向上・コスト削減の指針策定と必要な技術開発を行う。
- 炭素繊維強化熱硬化性樹脂との適材適所での使い分けも考慮した、コストとリスクの極小化の考え方を確立するとともに、炭素繊維強化熱硬化性樹脂とのハイブリッド化の可能性も追求する。

③ 熱可塑性樹脂複合材料構造のライフサイクルマネジメント技術の開発

- 3R性の向上によるライフサイクルコストの極小化を追求し、二次加工性の良い熱可塑性樹脂複合材料ならではの合理的設計(すなわち材料使用量の極小化)技術、ならびに性能低下の小さいリペア・リサイクル技術を開発する。
- 材料・設計データベースの高効率な蓄積や検査・品質管理の高度化のためのIDタグの利用など、新しいライフサイクルマネジメントの方法論と技術を開発する。

なお、以上の項目は、それぞれを単なる要素技術として研究するのではなく、ターゲットを明確にした構造実現化の中で、総合的に研究開発・評価を進める必要がある。そのためには、具体的な開発目標・構造を定め、フィージビリティスタディや開発プロジェクト等を通して、産官学各分野の参加による総合的な研究開発を行うことが効果的であろう。



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

