

調査・研究報告書の要約

書名	平成22年度テキスタイル・プリフォーム高度化による炭素繊維強化複合材料の機械工業分野への適用拡大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 素形材センター				
発行年月	平成23年3月	頁数	236頁	判型	A4

[目次]

序 (会長 伊藤 源嗣)

はしがき (会長 緒方 謙二郎)

委員会名簿

目次

第1章 テキスタイル・プリフォーム(Tex-Pref)および Tex-Pref 複合材料の成形法の技術動向

第2章 Tex-Pref を用いた複合材料部品の適用動向

第3章 欧州現地調査

第4章 米国現地調査

第5章 国内現地調査

第6章 今後取り組むべき技術課題

第7章 調査に基づいた研究課題の提言

[要約]

近年航空機用構造部材は炭素繊維強化複合材料の適用が急速に拡大している。特に低コスト化を狙い、炭素繊維を織物として賦形したテキスタイル・プリフォームを用い、レジソ・トランスファー・モールディング法などにより樹脂を注入する成形方法が注目されている。

本調査報告書はテキスタイル・プリフォーム複合材料の成形法や機械工業分野への適用動向を調査し、今後の技術課題や提言をまとめたものである。

第1章 テキスタイル・プリフォーム(Tex-Pref)および Tex-Pref 複合材料の成形法の技術動向

1. 1 織物、組紐、編物構造の原理、製造装置と要素技術の基礎

近年、先端材料分野において、軽量性と高強度を有し軽量効果の大きな材料を指向して、炭素繊維等の高性能繊維を用いたプリフォーム (織物状強化基材)が活用されている。

プリフォームの構成は最終製品の要求性能を発現すべく決められるが、その繊維配列と組織化は織物、組物、網物、縫合、タフティングなどの技術が共働した工程で行われることが多く、プリフォームの構成及び製法の様式は多種・多様である。

各組織の特徴を次に示す。

織物組織；面状-2軸織：広面形成、織物組織の安定性、

面状-多軸織：広面形成、力学特性の等方性、曲面成形性

立体-多軸織：立体賦形(各種異形断面、円周・半径方向配列)、力学特性の三次元的等方性、耐衝撃性

組物組織：長尺形成、長手方向力学特性の向上、異形断面(H,I形断面等)

編物組織：広面形成、生産性

今後、プリフォーム製造技術は多機能化繊維配列や複数部品一体構造化など、多くの機能を有する高次構造繊維組織体の製造を可能にし、複合材料の高性能化、生産コスト面に寄与することが期待される。

プリフォーム活用上の指標を導くため、各種のプリフォームを形態と繊維配列の軸数及び組織様式によって次のように整理した。

面状、立体に大別したプリフォームについて、ロービング(糸、繊維束)1とロービング2で構成された繊維層をロービング1または2で接合した組織を面状-2軸とし、各層をロービング1、2、と異なる第3のロービングで接合した組織を面状-多軸、また3重以上の組織を多層組織として整理した。更に、立体には、多軸方向のロービングが直交するもの、円周方向、半径方向に配列する環状織物を含めた。通常の組物はそれを展開した場合、面状2軸、面状3軸に相当する組織であるが、製法の特殊性を考え別途の項目とし、それぞれについての特徴と活用例を整理した。

1.1.1 Tex-Pref に用いられる繊維について

Tex-Pref はガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維等を用いて作製される。最も一般的に用いられるのは比較的コストの安いガラス繊維であるが、航空機等の高性能が要求される用途では炭素繊維が多く用いられる。

また、賦形性の高い Tex-Pref を得ることを目的とした不連続な炭素繊維からなる強化織

維が開発されている。例えば、牽切紡を用いた紡績糸や、有機繊維と不連続な炭素繊維からなる繊維が開発されている。

1.1.2 面状－2軸織 1.1.3 面状－多軸織 1.1.4 立体－多軸織

Tex-Pref の分類に沿って伝統的なそれぞれの織りと新たに出てきている立体－多軸織について説明する。面状組織ではそれらの組織を作る際の代表的な織機の主な構成を図で示す。繊維を Tex-Pref として利用するために従来の手法を拡張展開する一方、複雑な形やまた厚みのある構造体をつくる新たな Tex-Pref の組織、製造技術が開発されてきている。

1.1.5 組物

組物（組紐）は、三本以上の糸を互いに交錯させて形成される組織である。糸が巻き付けられたボビンはキャリアに搭載され、キャリアは時計回りと反時計回りのホーン・ギヤによって駆動される。ホーン・ギヤ同士が接触するキャリア受渡し位置で、順次、相対するホーン・ギヤに移され、組物組織を形成する。形成された組物は巻き取りシステムによって上部へ引上げられる。

1.1.6 編物

編物は糸のループの組み合わせによって形成される方向によって、たて編、よこ編が定義される。よこ編は、一本のよこ糸が幅方向にループを形成する。たて編は、ループの形成方向がたて方向であり、よこ一列のループが同時に形成される。

1. 2 Tex-Prefに関連する樹脂および層間補強材の基礎と開発動向

1.2.1 Tex-Pref の成形に使用される樹脂の基礎と開発動向

CFRP に最も多く用いられるエポキシ樹脂は、通常、架橋密度を高くすると、弾性率や耐熱性は向上するが靱性は低下するため、それを両立させる技術が検討されている。また、今後、自動車や航空機分野向けの量産技術として、エポキシ樹脂のアニオン重合に連鎖移動剤を組み合わせることにより、硬化反応の初期では粘度上昇効果の大きい高分子量成分の生成を抑えつつ、短時間で硬化反応が完了する技術が開発された。この結果、RTMにて流動可能時間3分、硬化時間5分というハイサイクル成形が達成されている。また、耐熱性が要求される用途については、ポリイミド樹脂、ビスマレイミド樹脂、シアネートエステル樹脂等が検討されている。

1.2.2 Tex-Pref の成形に使用される層間強化材の基礎と開発動向

積層した Tex-Pref の賦型性、ハンドリング性改善のために弱い接着効果のあるタッキファイヤーを部分的に Tex-Pref に付着させる場合が多いが、これにより層間靱性を向上する技術が開発されている。また、熱可塑性樹脂不織布と Tex-Pref を積層してから樹脂を注入する技術、Tex-Pref 表面に高靱性化物質を付着させる技術が開発されている。

1. 3 Tex-Prefを用いる複合材料成形技術

航空宇宙機器用の複合材料製品は、プリプレグシート材の積層、オートクレーブ成形品が現在の主流であるが、近年、リキッドレジンモールドイング成形法が低コスト化につながるものとして注目されている。これは、プリフォームに後から樹脂を含浸硬化する成形手法である。この成形法は、大きく次の3手法に分類することができる。

1) RTM

RTMはプリフォームの全ての面を金型で固定し溶融した樹脂を注入する方法であり、金型の精度で出来上がるため寸法精度は非常に高い。しかし、成形品が大きくなると樹脂注入圧力によって金型自身に変形するため金型の肉厚を厚くして剛性を上げる必要が有る。従って、RTM成形方法はサイズが比較的小さく、形状が複雑な製品の製造に向いている。

2) VaRTM

VaRTMはプリフォームに樹脂を真空圧のみで含浸する成形方法で、オートクレーブ等の高価な設備が不要で、製品の低コスト化に寄与することが期待されている。

近年は航空宇宙機器への適用を目指した研究開発も盛んで、米国のヘリコプタ胴体開発や日本におけるMRJ尾翼構造開発等が研究されている。

3) RFI

RFIはプリフォームに樹脂フィルムを面接触させてバッキングし、加熱することで樹脂を溶融し、プリフォーム内に含浸させた後硬化する手法である。

1. 4 Tex-Prefの技術動向

1.4.1 UD および面状-2軸織 1.4.2 面状-多軸織 1.4.3 立体-多軸織 1.4.4 組物 1.4.5 不織布 に分けて技術動向を説明。

1. 5 Tex-Pref以外の技術動向

Filament Winding (FW) や Automated Fiber Placement(AFP)の技術動向について説明。

1. 6 Tex-Pref開発における研究協力体制

欧州では、航空・自動車・風車などの分野別、あるいは国別か欧州圏共通かの大小レベルの、多種多層のプロジェクトがあり、それらが企業・研究機関・大学間でうまく連携して進められているのが特徴である。この適用分野や開発機関の幅広さが、多様なTex-Pref技術の開発を支え、それがまた新たなニーズ・シーズを生み出す、と言う正のスパイラルに繋がっている。

一方、米国では、開発・研究テーマの性質から、よりコンパクトでクローズなプロジェクトが多く、外部からはその活動の様子が見えにくい。しかしながら、防衛分野のテーマであっても大学や企業との連携は活発であり、さらに言えば、単なる産・官・学の連携で

はなく、大産・中小産・官・学の連携が対等の立場で行われている点が大きな特徴である。大学や企業の研究所で長年研究していた研究者や学者が起業した中小の企業が、設備の揃っている大学と組んで、より早く安く開発・研究をすすめ実用化する、という仕組みができてきている。

欧州の多様性とネットワーク、米国の中小企業を活用したコンパクトなプロジェクト、の違いはあるものの、両者ともに、継続的で長期にわたって **Tex-Pref** 研究を続けている点は共通している。

第2章 **Tex-Pref** を用いた複合材料部品の適用動向

2. 1 航空機

2.1.1 適用部位別の要求される力学特性と生産性

プリフォームは連続した繊維を必要な箇所及び必要な方向に配置することで高い力学特性を得られ、軽量化に寄与できる。又、生産性においては、プリフォームには高価な炭素繊維が用いられるので、自動積層機の適用等による低い加工コストの実現が必要である。

2.1.2 適用例

Tex-pref 技術を用いて量産されている事例として、**B787** では胴体フレーム、ランディングギア レッグ ブレース、窓枠、後方圧力隔壁、**A380** では後方圧力隔壁、**A330/340** ではスポイラなどがある。国内では現在のところ実機適用例はない。

2.1.3 研究開発動向と課題

欧州では、プリフォームの品質と生産性の向上につながる研究が盛んにおこなわれている。一方、米国では、大学や製織メーカーなどで航空機向けの研究が行われているが、軍関係の研究の詳細内容などは公開されにくい様である。国内の研究開発事例としては、防衛省の三次元複合材の開発がある。三菱重工業では、**A-VaRTM(Advanced VaRTM)**技術を開発し、現在、**MRJ** プロジェクトにおいて垂直尾翼の開発が進められている。

Tex-Pref の航空機適用の可能性と将来への適用拡大に向けては、大型化/一体化の潮流の中で、性能とコストに優位性が確保できる **Tex-Pref** を用いた大型構造様式の検討/考案が重要な研究開発の課題といえる。

2. 2 ジェットエンジン

航空機の **FRP** 化による機体重量低減を背景として、ジェットエンジンにも軽量化要求が増している。**FRP** 適用可能部位の部品であるファン動翼やプロペラは比較的小型であるが、エンジン一基に搭載される数量が多い。機体の生産数に合わせることを考えると、生産スピードも開発要素の一つとなることから、**Tex-pref** 技術はジェットエンジンでも欠かせな

いものと言える。現在の適用例としては GEnx エンジンのファンコンテイメントケースや C-130J のプロペラ翼が挙げられる。上記部品ではブレイドプリフォームが適用されている。コンテイメントケースでは三軸ブレイドが用いられるなど、部品に要求される力学特性に合わせてテキスタイルが選定されている。

2. 3 宇宙機（人工衛星、ロケット）

衛星用途では、通信衛星アンテナリフレクタで、メンブレンリフレクタ方式が採用されており、それには平織や三軸織物が用いられている。これは、一方向材よりも少ない積層数で面内擬似等方化が可能であり、メンブレン構造に適しているためである。次に衛星構体については、リチウムイオンバッテリーシャーンに適用した事例が報告されている。従来はアルミ合金から作られているが、高い排熱特性が要求されることから、繊維方向に高い熱伝導率を有する超高弾性炭素繊維 CFRP 化により排熱特性の向上および軽量化が実現できる。また、観測衛星用などに用いられるトラス構造部材を、ブレイディング材の RTM 成形により試作を行った事例もある。衛星以外の宇宙機への適用事例としては、ロケットフェアリングへの VaRTM 成形の適用事例が報告されている。

2. 4 自動車

2.4.1 適用部位別の要求される力学特性と生産性

自動車に求められる要求は、今後、普及が進むと思われる、電気自動車や石油燃料の枯渇を考えると、車体の軽量化は必須となり、大衆車への CFRP の適用拡大は重要な技術となり、その技術は低コストなものでなければならない。

自動車部品への適用に対して要求される力学特性は、現状の車の要求基準を満足することは当然のことであり、CFRP の特徴を考えると、安全性の観点から耐クラッシュ特性は重要である。

2.4.2 適用例

Tex-Pref は、トヨタ自動車のレクサス LFA に採用されている。炭素繊維三次元織物構造の破壊エネルギー吸収特性を利用し、フロントのクラッシュレールに豊田自動織機が開発した三次元織物を用いた RTM 成形 CFRP を採用することにより、軽量化と、優れた安全性を確保した。更に、三次元自動ブレイディングによるルーフサイドレールのネットシェイププリフォーム製造に挑戦し、異型断面連続製織技術が開発された。

2.4.3 課題と開発動向

開発動向としては、東レはダイムラーと提携し、「メルセデス・ベンツの全モデルにおいてホワイトボディ重量を 10%軽量化する」という目標に対して、適材適所の原則に従い、CFRP 部品の適用と対象車種の拡大を積極的に進めている。

課題としては、素材自体が非常に高価な上、材質の異なる部材との結合部設計に高い技術が必要である。従って、コストの低減も期待できるテキスタイル技術、また、その自動化技術、東レが開発したハイサイクルRTM技術のような成形技術開発が課題であり、省エネルギーの観点から、早急に実用化を図る必要がある。更に、CFRPに適した車体構造の研究や、大衆車への普及をはかるための技術開発も必要である。

2. 5 産業用途、スポーツ用途

産業用途とスポーツ用途は、ともに多岐にわたって複合材料が採用されている。その理由は航空機などの用途と同様に、軽量・高強度・高剛性で、かつ信頼性が高い材料を必要としているからである。一方、これらの用途では低コスト化も重要である。風力発電用ブレードでは、今後長大化が見込まれ、追加強度が必要なところへ選択的にCFRPが使用されていく。圧力容器では、ブレード/RTMのようなFWに代わる手法が検討されており、要求性能を満たすことができれば大きなブレークスルーになる。船舶は、大型用途にTex-Prefが採用され始めており、VaRTMやSCRIMPといった成形方法に合わせた材料開発が必要である。スポーツ用途は、ゴルフ・釣り具・テニスに続く市場を開拓するために、より一層の低コスト化に向けた材料と成形技術の開発が課題である。

第3章 欧州現地調査

調査期間：2010年12月5日～12月16日

調査訪問先：Staubli(フランス)、Stuttgart Institute(ドイツ)、CFK Valley Stade(ドイツ)、Herzog(ドイツ)、RWTH Aachen(ドイツ)、Cranfield Univ.(イギリス)、Sigmatex(イギリス)

調査訪問先概要

Tex-Pref技術のCFRPへの適用に関連した、織機メーカーStaubli社とHERZOG社、それらの機器を用いてテキスタイル材を製造しているSigmatex社、また、また本分野の研究を精力的に進めているStuttgart大学、RWTH Aachen大学およびCranfield Univ、更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 Valley Stadeと、Tex-Pref分野のほぼ全ての分野におけるトップランナーを調査することができた。

第4章 米国現地調査

調査期間：2011年1月8日～1月17日

調査訪問先：NCC、Dayton大学、A&P Technology、Bally Ribbon Mills、Delaware大学、Ingersoll、東レUSA

調査訪問先概要

Tex-Pref技術に関連した複合材料の研究を精力的に行っているNCC、Dayton大学とDelaware大学、Tex-Pref材の試作・製造メーカーであるA&P Technology社とBally

Ribbon Mills 社、および航空機用成形装置メーカーである Ingersoll 社まで、Tex-Pref 技術の炭素繊維強化複合材料への適用を進めている米国のトップランナーを視察することができた。また、東レ USA にて、米国の研究・開発状況についても情報収集を行った。

国内現地調査

調査訪問日、調査訪問先

- (1) 2010年11月29日①東研：X線を利用した最先端の検査技術調査
 - ②多摩テクノプラザ：Staubli社製のジャガード編機の調査
- (2) 2010年11月30日③村田機械（株）：組物関連技術調査
 - ④サカセ・アドテック：3軸織物関連技術調査
- (3) 2010年12月27日⑤福井ファイバーテック（株）：LIBAの機械調査
 - ⑥東海工業マシン：補強材ステッチ機械調査

調査訪問先概要

複合材料内部の炭素繊維の状態を詳細に把握できる技術を持つ東研、海外メーカーの機械を使用する上で独自のノウハウを蓄積している福井ファイバーテック、国内で装置を製作している村田機械、東海工業マシン、3軸織物でユニークな技術を有するサカセ・アドテックなど日本の Tex-Pref 技術動向を欧米と比較して把握できた。

第6章今後取り組むべき技術課題

航空機において、従来のアルミ構造から CFRP 構造（プリプレグとオートクレーブを用いる場合）に変更することにより、部品点数が 70%、コストが 10%低下するという報告例もある。TexPref ではさらなる部品点数の低減が期待されるため、TexPref 技術は航空機構造において、コストを含めた競争力を維持し高めるために、極めて重要な技術と位置づけられる。一方、自動車への利用に関しては、地球温暖化の観点からきわめて注目すべき技術ではあるが、将来的な大規模の採用と、当面の高級車や重要部位における限定的な使用に分けて、技術開発を検討すべきと考えられる。また、それぞれの生産性に合わせた構造と製造法の検討も必要である。

複合材料においては、従来材料で比較的独立している、①材料形成過程、②素形材（部材）形成過程、③構造設計・運用管理過程が同時に起こることが特徴であり、特に TexPref においてはその連携が強い。そのため、材料・流体・熱力学、機械力学、計測制御工学はもとより、化学、物理学の各分野の密接な連携による「異分野融合工学」を取り入れ、従来経験に頼っていた成形過程に学術的基礎と多層的連携を与えることによって、初めて優れた技術開発が可能になる。

今後の研究開発には、①先行開発研究と②基礎・萌芽研究を重視するとともに、その相

互の連携を強め、「製品化を念頭に置いた基礎からの自由な発想の育成」に注力すべきと考える。また、分野毎の壁を越えて融合・学際的に多くの分野が重なり合って成果を目指す「オープンイノベーション」への移行が重要である。

開発すべき技術の要素として、製織、樹脂設計、成形プロセス、軽量化構造設計技術と、これらの装置開発、品質保証のための評価技術、および、その基礎となるマイクロメカニクスとシミュレーション技術、低コスト化のための自動化技術などが重要である。TexPref 製造に関しては、繊維特性劣化やクリンプを抑制する技術、大型化、自動化が重要である。さらに、その基礎となる基材製造装置の開発と生産性向上技術が必要である。樹脂に関して、樹脂含浸から硬化までの成形プロセスの設計を同時に行うことが必要である。

航空機においては、一体成形のためのニアネットシェイプ製織技術、高強度でかつ高じん性な複合材料を実現するための TexPref および樹脂技術が重要である。自動車においては、TexPref に要求される技術の航空機との相違点を明確にし、相互の波及効果および必要となる技術開発項目を設定することが重要である。特に、電気自動車等、今後従来と基本が異なる構造の発展が見込まれ、ここでの可能性を精査することが必要である。

最後に、TexPref およびその複合材料の品質保証技術の手法とその確立も重要である。製織の信頼性確率、特に繊維形態、繊維の損傷検出、織構造の欠陥、異物混入に対する非破壊検査技術の確立、TexPref 複合材料のマイクロメカニクスの確立と品質保証技術の連携、認証手法の確立に取り組むことが必要である。

第7章 調査に基づいた研究課題の提言

TexPref の研究の融合工学的立場と基礎研究から先行開発研究までの階層を考慮し、多層のかつ具体的な研究課題を実施する必要がある。その中で、目的と目標を明確にするため、具体的な複合材料構造モデルを、航空機と自動車でそれぞれ試作するプロジェクトの提案が適切である。併せて、開発研究と基礎・萌芽的研究をつなぐプロジェクトと、品質保証と認証技術を確認するプロジェクトを併設する必要がある。また、部分的に海外の技術や基材を導入することにより海外の後追い研究に陥ることを避けたい。

航空機構造について、複雑形状部、板厚が大きく変化する部分、大量生産と部品点数削減によるコスト削減により、TexPref の優位性を発揮するべきである。特に国際的に先行した開発研究を実施するためには、現在複合材料化が困難な場所に対して、わが国が有する立体一多軸組織製造技術を活用し、欧米に対して優位に立つべきである。また、適合性と品質保証技術の確立が不可欠である。

自動車に関しては、既存のエンジンを搭載した自動車と、従来の設計にとらわれない構造の実現も可能な燃料電池車や電気自動車に分けられる。重量物でかつ剛性の大きなエン

ジンは、収納場所が極めて限定される。これに対して、電池はフロア部などにも収納が可能で、サンドイッチや箱状の複雑形状など、TexPref が得意とする構造になる。

日本の炭素繊維産業の優位性を持続的に維持するためには、繊維の製造のみを担当する現在の産業・技術分担の構図は危険であり、複合材料および TexPref の融合的分野を考えた組織、すなわち、ハード的な入れ物とそれを運営する組織が必要である。大学、国立系研究所および企業がオープンイノベーションに基づいて参加し融合工学を実現する体制とその意思統一、リーダーシップが必要である。

期間と予算について、基礎的な構造材料の開発における時間の流れ方が機能性材料とは根本的に異なることを明確にする必要がある。短期間の継続性のないプロジェクトでは、投資され設置された装置が短期間で利用されなくなり、融合工学の各分野での連携に結びつかないなど、投資効率が悪い。1 ステージを最低5年とし、数ステージが継続する息の長い国の支援によるプロジェクトによる組織と人材の育て方が重要である。また、基礎研究～萌芽的研究と1-10億円／年規模の先行開発研究を並行して進めることが重要である。

TexPref はより多くの分野を融合した技術に基づく。また、材料の性格上、「航空機」「自動車」など用途を限定した開発ではその総合力は不足し、まず航空機で先端分野の開発を行うとともに、その裾野および直近の応用分野として、自動車分野で並行しての開発研究が必要である。したがって、今後継続して製造業における日本の地位を保ち、かつ、日本生まれの炭素繊維とその国際競争力を維持し、さらに、我が国が環境対策に貢献するため、これまで述べた国家プロジェクトの支援とともに、国の支援による複合材料センターの設立が必須である。



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>