

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「新世代先端複合材料成型品のための薄層多軸プリプレグシートと  
その成型法の開発」

研究開発成果報告書

平成21年11月

委託者 独立行政法人中小企業基盤整備機構

委託先 財団法人ふくい産業支援センター

## 目 次

第1章 研究開発の概要.....	3
1. 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	3
(1) 研究開発の背景.....	3
(2) 研究の目的及び目標.....	3
① 薄層多軸プリプレグシートの開発.....	4
② 多機能型クイックプレス成形技術の開発.....	4
(3) 研究体制.....	5
① 管理体制.....	5
② 研究体制.....	5
③ 委員会等.....	8
④ 研究開発スケジュール.....	9
(4) 成果概要.....	10
① 薄層多軸プリプレグシートの開発.....	10
② 多機能型クイックプレス成形技術の開発.....	10
(5) 当該研究開発の連絡窓口.....	11
第2章 本論.....	12
1. 薄層多軸プリプレグシートの開発.....	12
(1) 薄層多軸プリプレグシート製造技術の開発.....	12
(2) 短時間硬化用樹脂の開発.....	14
(3) 熱可塑性薄層プリプレグシートの開発.....	15
(4) クイックプレス成型技術の開発.....	17
① クイックプレス成形技術の開発.....	17
② 炭素繊維強化複合材料の切断・後加工技術の開発.....	18
③ 各種プリプレグシート、成型品の評価.....	18
第3章 全体総括.....	23
1. 研究開発成果.....	23
① 薄層多軸プリプレグシートの開発.....	23
② 多機能型クイックプレス成形技術の開発.....	23
2. 成果今後の課題及び事業化展開.....	24
(1) 今後の課題.....	24
(2) 事業化計画.....	24
付録.....	26
1. 参考文献・引用文献.....	26
2. 専門用語の解説.....	26

## 第1章 研究開発の概要

### 1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究開発の背景

自動車用板材は、高強度軽量化をめざして、ハイテンといわれる超高張力鋼板の採用が進んでおり、現在、トヨタ クラウンクラスでは、高張力鋼板が骨格部材の45%を占めていると言われている。しかし、比重が高い金属では、軽金属のアルミを用いても軽量化には限界があるので、さらなる軽量化が見込める新しい高強度軽量素材として炭素繊維強化複合材料を用いた構造部材が求められており、さらにそれを高品質かつ低コストで実現させることが求められている。

強化繊維束の開織技術（福井県特許）によって開発した炭素繊維強化複合材料薄層積層板は、従来のものより損傷が入りにくく信頼性が極めて高いことから、新世代の先端複合材料として航空機・車両等の輸送関連で全世界から注目されている。本研究開発では、これを自動車部材用の高張力鋼板の代替材料として量産するため、中間材料である薄層多軸プリプレグシートの製造技術の開発と、これに対応した高速短時間成形技術の開発を行った。

#### (2) 研究の目的及び目標

ミッドサイズ以上の上級車クラスの自動車のボンネット等外板部材に使用されている高張力鋼板を、新しく開発する炭素繊維強化複合材料擬似等方性薄層積層板で代替・実用化することを目標とする。従来自動車外板部材の強度・弾性率から試算した開発品の仕様と、それを実現するために必要な自動車メーカーが要求する生産速度を基に、新規製造システムの開発目標を設定した。

超軽量自動車用外板部材（ボディ、ルーフ、ドア等）の開発目標

- 超高張力鋼板より軽く、同等の物性を実現開発  
目標：厚さ 0.4mm 以下の薄層多軸 CFRP → 引張強度：980MPa 以上
- 自動車材料を供給できる実用的な生産システムの開発目標  
目標生産量 250 台/日（ミッドサイズ以上）をめざす。
  - ① 薄層多軸プリプレグシート製造装置：厚さ 0.2mm 以下、幅 1m、生産速度 5m/min
  - ② クイックプレス成形装置：成形時間 20min/試料、熱硬化性、熱可塑性の樹脂に対応

## ① 薄層多軸プリプレグシートの開発

### ①-1 薄層多軸プリプレグシート製造技術の開発

- ・ 薄層多軸プリプレグシート製造装置を新規開発（熱硬化・熱可塑性樹脂の両方に対応）
- ・ 4軸で厚さ 0.2mm 以下、繊維体積含有率 50-60%、幅 1m の熱硬化性・熱可塑性薄層多軸プリプレグシートの実現
- ・ 熱硬化性・熱可塑性薄層多軸プリプレグシートの加工速度 5m/min の実現

### ①-2 短時間硬化用樹脂の開発

- ・ 樹脂目付 20~80 g/m<sup>2</sup> の薄層樹脂シートの実現。
- ・ 成形時間 20 分以下が実現可能な高含浸性のクイックプレス成型用熱硬化性樹脂の開発

### ①-3 熱可塑性薄層プリプレグシート製造技術の開発

- ・ 熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置を新規開発
- ・ 汎用性樹脂（ポリアミド樹脂等）を使用した熱可塑性薄層プリプレグシート（一方向、繊維体積含有率 50-60%、層厚さ 0.05mm 以下、幅 1000mm）の実現
- ・ 熱可塑性薄層プリプレグシートの加工速度 10m/min の実現
- ・ 4軸で層厚さ 0.2mm 以下、繊維体積含有率 50-60%、幅 1m の熱可塑性薄層多軸プリプレグシートの実現

## ② 多機能型クイックプレス成形技術の開発

### ②-1 クイックプレス成形技術の開発

- ・ 熱硬化性、熱可塑性の両方の母材樹脂に対応でき、比較的短時間で成形可能なクイックプレス成形装置を新規開発
- ・ 薄層多軸プリプレグシートを用いたクイックプレス成形による 3次元構造体の成形技術の確立
- ・ クイックプレス成形による成形速度 20min/試料の実現

### ②-2 炭素繊維強化複合材料の切断・後加工技術の開発

- ・ 熱可塑性樹脂の摩擦熱による損傷を抑制させた新規の切断技術の開発
- ・ 大きさ 1m×1m の三次元の超軽量構造体のバリ取り等に対応した切断・後加工技術の開発

### ②-3 各種プリプレグシート、成型品の評価

- ・ 薄層多軸プリプレグシートの評価（繊維真直性、樹脂含浸性等）
- ・ 熱硬化性及び熱可塑性多軸薄層積層板の評価（繊維真直性、樹脂含浸性、引張り試験、初期破損強度の測定および層間剥離、衝撃試験、衝撃後圧縮試験等）
- ・ 各種軽量構造体の評価（引張り・曲げ強度、衝撃試験等）

(3) 研究体制

① 管理体制

事業管理者 財団法人ふくい産業支援センター  
〒910-0296 福井県坂井市丸岡町熊堂3号7番地1-16  
財団法人ふくい産業支援センター技術開発部  
〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町61字

氏名	所属・役職	実施内容	備考
安田 博	技術開発部 プロジェクト研究推進室 室長	③	～09.3
岩佐進一	技術開発部 プロジェクト研究推進室 室長	③	09.4～
笹山秀樹	” ” 研究員	③	08.4～
雲竜常宗	” ” 研究員	③	～09.3
林 裕之	” ” 主査	③	～07.5
富田尚裕	” ” 主事	③	07.5～

総括研究代表者（P L）  
福井県工業技術センター・主任研究員 川邊和正

副総括研究代表者（S L）  
株式会社ミツヤ・経営管理部マネージャー 石田吉郎

② 研究体制

株式会社ミツヤ（再委託先）  
〒910-0108 福井県福井市山室町69番地1号

氏名	所属・役職	実施内容	備考
今田都久男	経営管理部新規事業グループ 課長	①-1、①-3	08.1～
石田吉郎	経営管理部マネージャー	①-1、①-3	
榎波宏樹	経営管理部新規事業グループ	①-1、①-3	
佐々木博一	経営管理部新規事業グループ	①-1、①-3	
織田 幸	経営管理部新規事業グループ	①-1	～07.11
富田恵理	経営管理部新規事業グループ	①-1	07.12 ～08.1
池田典彦	経営管理部新規事業グループ	①-1、①-3	08.7～

丸八株式会社（再委託先）

〒910-0276 福井県坂井市丸岡町玄女 12 番地 1 号

氏名	所属・役職	実施内容	備考
菅原寿秀	常務取締役	①-3	
野坂正三	技術顧問	①-3	
中島隆愛	技術顧問	①-3	~08.4
古川順一郎	企画・管理課長	①-3	08.4~
岩下周一	企画・管理課長	①-3	~07.11
田中仁文	複合材料部 評価グループ 統括	①-3	08.12~
小林史武	Composite 課主任	①-3	
小林宏明	Composite 課主任	①-3	
武川和生	Composite課織布主任	①-3	

有限会社 J A S T Y（再委託先）

〒910-2525 福井県今立郡池田町市 21 号 22 番地

氏名	所属・役職	実施内容	備考
山口昌英	代表取締役	①-1、①-3	
浜野正宏	エンジニアリング部主任	①-1、①-3	
五十嵐啓晃	エンジニアリング部	①-1、①-3	

有限会社ミキ・ファイバー（再委託先）

〒911-0815 福井県勝山市下高島 12 番地 18 号-1

氏名	所属・役職	実施内容	備考
西内典男	代表取締役	②-2	
西内俊博	製造部	②-2	
島田直幸	製造部	②-2	~09.3
前田洋平	製造部	②-2	09.4~

カンボウプラス株式会社 福井工場（再委託先）

〒916-0015 福井県鯖江市御幸町 1-11-48

氏名	所属・役職	実施内容	備考
山上 透	開発部門 部門長	①-2	
寺崎嘉和	製品開発部長	①-2	~08.3
山崎健二	開発部門 副部門長	①-2	08.4~
北田和之	製品開発部 製品開発課 係長	①-2	

城山典晋	製品開発部 製品開発課 主任	①-2	
小川典昭	製品開発部 製品開発課	①-2	

フクビ化学工業株式会社（再委託先）08.12～

〒918-8585 福井県福井市三十八社町 33-6

氏名	所属・役職	実施内容	備考
秋田 清	技術本部 本部長	②-1	08.12～
田中敦洋	技術本部 技術開発部 専門課長	②-1	08.12～
橋 央弥	技術本部 技術開発部 主任	②-1	08.12 ～09.3
兼岩秀和	技術本部 技術開発部 主任	②-1	08.12～
高橋圭太	技術本部 技術開発部	②-1	08.12～

福井県工業技術センター（再委託先）

〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10

氏名	所属・役職	実施内容	備考
川邊和正	創造研究部 主任研究員	①-1、①-3、②-3	
増田敦士	化学・繊維部 主任研究員	①-1、①-3、②-3	
村上哲彦	化学・繊維部 主任研究員	①-1、①-3、②-3	
笹山秀樹	創造研究部 研究員	①-1、①-3、②-3	～09.3
土田千尋	創造研究部 主事	①-1、①-3、②-3	08.12 ～09.3

国立大学法人 福井大学（再委託先）

〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 7 番地 1 号

氏名	所属・役職	実施内容	備考
小形信男	大学院工学研究科材料開発工学専攻 教授	②-3	

学校法人 金沢工業大学ものづくり研究所（再委託先）

〒924-0838 石川県白山市八束穂 3 丁目 1 番地

氏名	所属・役職	実施内容	備考
宮野 靖	機械系航空システム工学科 教授	②-3	～08.11
金原 勲	機械系航空システム工学科 教授	②-3	
斉藤 博嗣	ものづくり研究所 研究員	②-3	08.12～

③ 委員会等

研究推進委員会

研究推進委員会委員

氏名	所属・役職	備考
川邊和正	福井県工業技術センター創造研究部主任研究員	総括研究代表者
石田吉郎	(株) ミツヤ経営管理部マネージャー	副総括研究代表者
榎波宏樹	(株) ミツヤ 経営管理部新規事業グループ	
菅原寿秀	丸八 (株) 常務取締役	
山口昌英	(有) J A S T Y代表取締役	
西内典男	(有) ミキ・ファイバー代表取締役	
山上 透	カンボウプラス (株) 取締役 開発部門長	
秋田 清	フクビ化学工業 (株) 技術本部 本部長	08.12～
笹山秀樹	(財) ふくい産業支援センター 技術開発部 研究員	
小形信男	福井大学大学院工学研究科 ファイバーアメニティ専攻 教授	
金原 勲	金沢工業大学機械系航空システム工学科 教授	

アドバイザー

氏名	所属・役職	備考
河村信也	トヨタ自動車 (株) 車両材料技術部有機材料室 グループ長	
秋田 清	フクビ化学工業 (株) 技術本部 本部長	08.8～08.11



#### (4) 成果概要

##### ① 薄層多軸プリプレグシートの開発

達成目標である熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂の両方に対応できる幅 1,000mm、厚さ 0.2mm 以下の 4 軸の薄層多軸プリプレグシートを実現するため、新規の薄層多軸プリプレグシート製造装置を開発し、幅 1,000mm の広巾の薄層多軸プリプレグシートが実現できるようになった。また、試作では、この装置を用いて、幅 900mm、厚さ 0.172mm 相当（1 層当たり 43 $\mu$ m）の 4 軸 [45/0/-45/90] の連続した熱可塑性薄層多軸プリプレグシートを実現することができた。



開発した薄層多軸プリプレグシート

短時間硬化用樹脂の開発では、硬化時間とポットライフを制御した短時間硬化型エポキシ樹脂による樹脂目付け 23g/m<sup>2</sup>の短時間成型用熱硬化性薄層樹脂シートを開発し、それを用いた Carbon/Epoxy 薄層プリプレグシートの作製試験、およびその擬似等方性積層板の力学試験を行った。その結果、短時間硬化型エポキシ樹脂を用いても、プリプレグシートの層厚さを薄くすることで引張り特性が向上する薄層効果が得られることがわかった。また、比較対照である基本処方エポキシ樹脂については、樹脂目付け 23g/m<sup>2</sup>の薄層樹脂シートを用いて、厚さ約 40 $\mu$ m の Carbon/Epoxy 薄層プリプレグシートを加工速度 10m/min で得ることが可能となった。

熱可塑性薄層プリプレグシート製造技術の開発では、熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の新規開発を行い、ポリアミド 12 (PA12) を母材とした Carbon/PA12 薄層プリプレグシート（一方向、厚さ 0.04~0.05mm、幅 1,000mm）を加工速度 3.5mm/min で得ることが可能となった。（目標値：厚さ 0.05mm 以下、加工速度 10 m/min）

##### ② 多機能型クイックプレス成形技術の開発

各種母材樹脂に応じて比較的短時間で 3 次元成型を可能とする新規方式の多機能型プレス成形装置を導入し、クイックプレス成形技術の研究を行った。420×300×50 mm の 3 次元碗型形状の成型試験を行ったところ、厚さ 43 $\mu$ m 相当の熱可塑性薄層セミプレグシートを 2 軸または 4 軸に積層させたものを最短で約 20 min で成形することが可能となった。

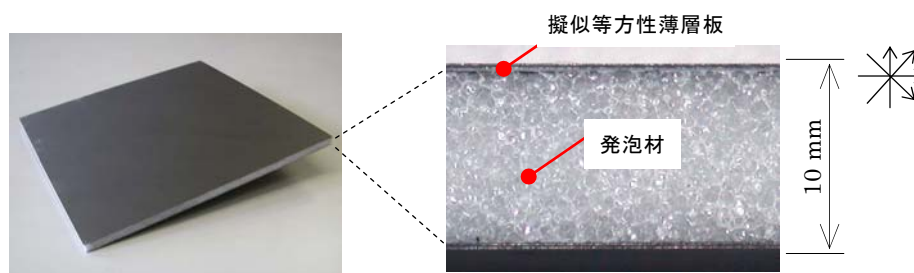


クイックプレス成型品

炭素繊維強化複合材料の切断・後加工技術の開発では、熱可塑性炭素繊維強化複合材料 (CFRTP) の切断・後加工に対応可能な複合材料切断機を新規導入し、融点の低いナイロ

ン等を母材とした CF RTP に対して、円状や多角形の乾式加工試験を実施し、加工性向上を図った。その結果、穴加工にはダイヤモンドコーティングドリル、直線カット加工には特殊ダイヤ電着刃、多角形の加工にはダイヤモンドコーティングエンドミルを使用するとともに、冷却性がよいジグ板を選択することで熱可塑性樹脂を熔融させることなく切断・後加工できた。これにより、加工形状の製作可能範囲を広げることができた。

超軽量構造体の試作では、エポキシ樹脂を母材とした Carbon/Epoxy 擬似等方性薄層積層板を試作し、その基本特性の評価による薄層積層による力学特性の優位性を証明した。また、それをスキン材に、発泡材をコア材に用いた超軽量サンドイッチ材の試作を行い、その力学特性の評価を行った。その結果、板厚約 0.3mm の Carbon/Epoxy 擬似等方性積層板 [45/0/-45/90]<sub>s</sub> は、厚さ 0.7mm の汎用的な自動車用外板に使用される鋼板と同等の引張り強度があることがわかった。これを外板部材に代替すれば、重量を約 1/10 にすることができる。さらに、試作した超軽量サンドイッチ材は、平均密度 0.165~0.199 g/cm<sup>3</sup>、端部方向の圧縮試験による比強度は 12.4~14.9 [10<sup>6</sup> cm] であり、超軽量かつ高強度という面で、十分期待できる材料であるということがわかった。圧縮試験法の問題から、真の圧縮強度は、これ以上であることが予想できるので、試作した超軽量サンドイッチ材は、超軽量かつ高強度という面において十分期待できる材料であるということがわかった。また、擬似等方性薄層積層板の衝撃損傷後の断面観察を行った結果、擬似等方性薄層積層板の衝撃による内部損傷は、特定の層間に層間はく離が集中して板厚方向には広がらないという特徴があることがわかった。さらに、内部損傷の 3D モデルの構築を行い、衝撃損傷のメカニズムが解明された。また、衝撃後圧縮試験により、衝撃に対する薄層積層板の優位性が証明された。



試作した超軽量サンドイッチ材

(5) 当該研究開発の連絡窓口

〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10

財団法人ふくい産業支援センター 技術開発部

プロジェクト研究推進室長 岩佐進一

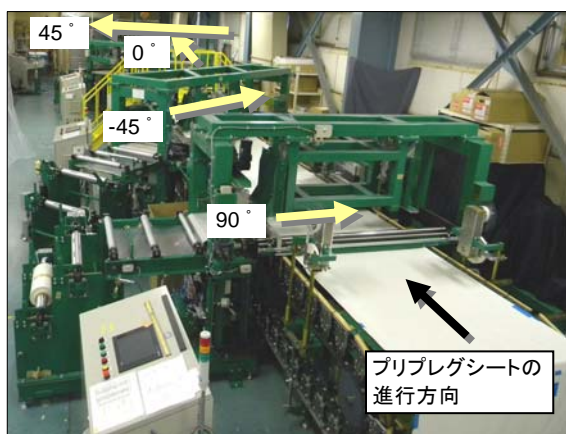
TEL: 0776-55-1555 FAX: 0776-55-1554 E-mail: fstr@fisc.jp

## 第2章 本論

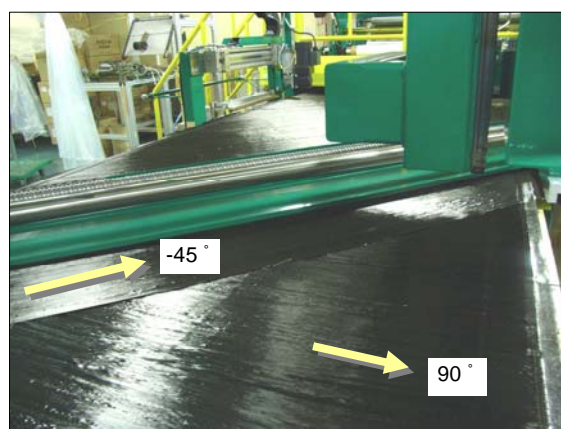
### 1. 薄層多軸プリプレグシートの開発

#### (1) 薄層多軸プリプレグシート製造技術の開発

本研究開発では、厚さ 0.05mm 以下の薄層プリプレグシート（一方向：UD）を用いた 4 軸で厚さ 0.2mm 以下の薄層多軸プリプレグシートを実現するため、新たに薄層多軸プリプレグシート製造装置の開発に取り組んだ。薄層多軸プリプレグシート製造装置は、90°、-45°、0°、45°の各方向から UD シートを挿入、加熱・加圧、巻取りを連動運転させることで薄層多軸プリプレグシートを得るものである。



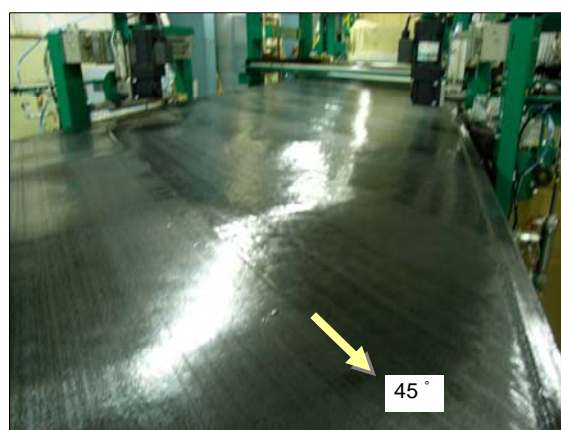
全体



90°、-45° UD シート挿入部



0° UD シート挿入部



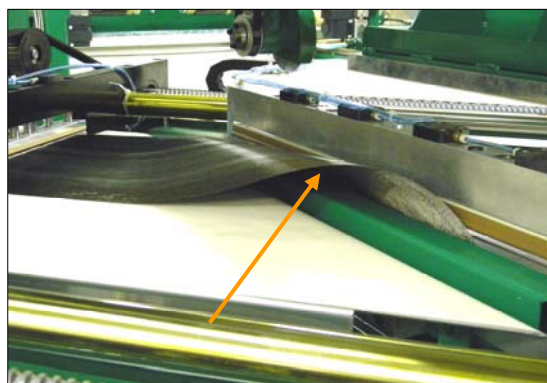
45° UD シート挿入部

開発した薄層多軸プリプレグシート製造装置

連動運転試験においては、巻取張力の異常、積層機構での UD シートのカール、シートのクランプの把持不良などの課題が発生したが、巻取機構の変更やクランプ機構の見直しによって、これらの発生を抑えることができた。



張力異常による波打ち現象



カールの発生

この結果、目標である幅 1,000mm の広巾で、厚さ 0.2mm 以下の熱硬化性・熱可塑性薄層多軸プリプレグシートの製造に対応可能な薄層多軸プリプレグシート製造装置が実現できるようになった。また、この装置を用いて、幅 900mm、厚さ 0.172mm 相当 (1層あたり 43 $\mu$ m) の 4 軸[45/0/-45/90]の連続した熱可塑性薄層多軸プリプレグシートの加工試験を行ったところ、問題なく薄層多軸プリプレグシートを加工することができた。現時点では、加工速度は目標値の 5m/min に届いていないが、原因は装置開発の若干の遅れによるものなので、今後、十分に対応できると考えている。



開発した薄層多軸プリプレグシート

## (2) 短時間硬化用樹脂の開発

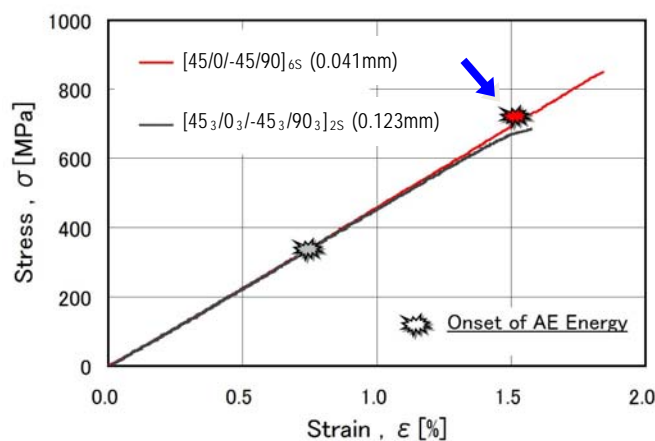
短時間硬化型の熱硬化性樹脂について、各樹脂メーカーのエポキシ樹脂等の調査検討を行い、硬化時間とポットライフを制御した  $150^{\circ}\text{C}\times 5$  分硬化型の短時間硬化型エポキシ樹脂を設計した。

また、厚さ  $0.05\text{mm}$ 以下の薄層プリプレグシートを得るには、この樹脂を離型紙に薄く薄層塗布しなければならないが、薄層塗布については、原液そのままのコーティングでは、工程紙上でハジキが発生して不可能であったため、ハジキ防止のための添加剤を検討し、ハジキを解消した。これにより、ラボ用コーティングマシンにて、工程紙上に樹脂目付け  $20\text{g}/\text{m}^2$ で均一に薄く塗布することが可能となった。また、この樹脂シートを用いて硬化試験を行った結果、 $150^{\circ}\text{C}\times 5$  分で硬化が可能であること、炭素繊維束内への樹脂の含浸性が良好であることが確認された。



試作した薄層樹脂シート  
( $150^{\circ}\text{C}\times 5$  分硬化タイプ)

この短時間硬化型エポキシ樹脂による樹脂目付け  $23\text{g}/\text{m}^2$ の短時間成型用熱硬化性薄層樹脂シートを開発し、それを用いたCarbon/Epoxy薄層プリプレグシートの作製試験、およびその擬似等方性積層板の引張り試験を行った。その結果、短時間硬化型エポキシ樹脂を用いても、プリプレグシートの層厚さを薄くすることで初期破損強度が向上する薄層効果が得られることがわかった。

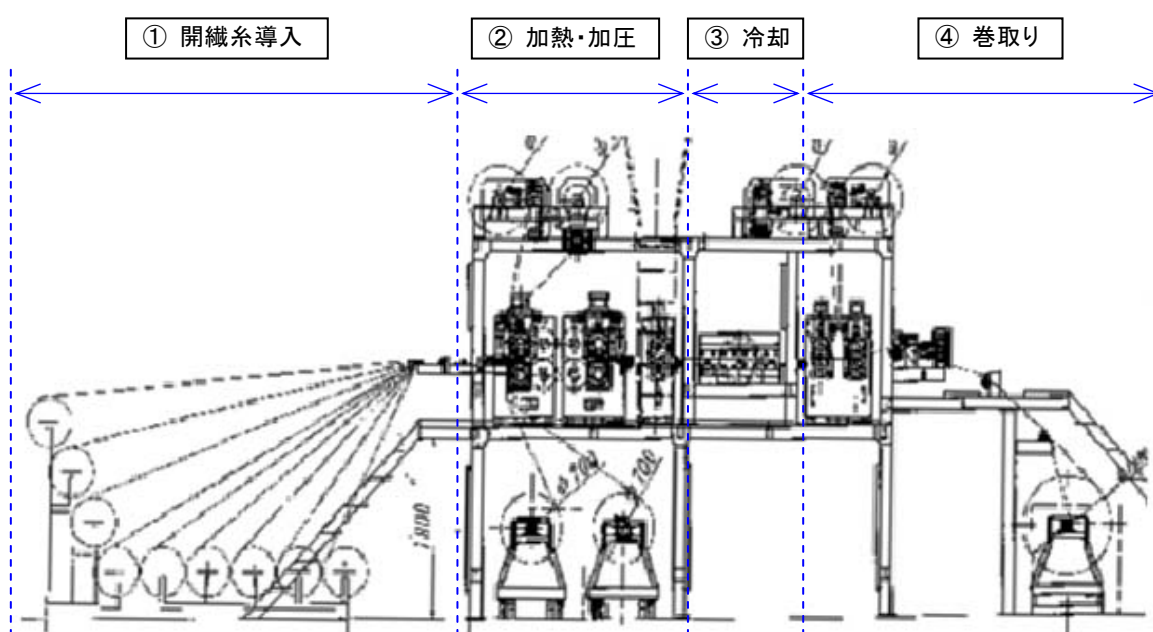


炭素繊維／短時間硬化型エポキシ樹脂による擬似等方性積層板の引張り試験の結果

また、基本処方エポキシ樹脂については、樹脂目付け  $23\text{g}/\text{m}^2$ の薄層樹脂シートを用いて、厚さ約  $40\mu\text{m}$ のCarbon/Epoxy薄層プリプレグシートを加工速度  $10\text{m}/\text{min}$ で得ることが可能となった。

### (3) 熱可塑性薄層プリプレグシートの開発

本研究開発では、厚さ 0.05mm 以下、幅 1,000mm の熱可塑性薄層プリプレグシート（一方向：UD）を実現するため、新規の熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の開発に取り組み、H18年度は、装置開発の基本となる強化繊維の開繊加工工程における開繊加工の効率化、強化繊維の均一分散性の向上とそれらの連続加工での安定性についての研究、H19年度は、熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の開発、H20年度は、均一な薄層プリプレグシートを得るため、副資材の検討と熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の改良を実施した。



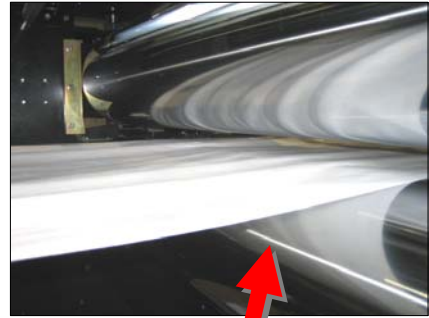
熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の概略図

熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の開発において、厚さ 0.05mm 以下で、幅 1,000mm の熱可塑性薄層プリプレグシートを得るには、薄層プリプレグシートの厚み精度と均一性の確保について問題点が発生したが、使用副資材である離型シート材の検討および加熱・加圧ロールの改良等によりこれら問題を解決した。その結果、ポリアミド 12 (PA12) を母材とした Carbon/PA12 薄層プリプレグシート（一方向、厚さ 0.04~0.05mm、幅 1,000mm）を加工速度 3.5m/min で得ることが可能となった。（目標値：厚さ 0.05mm 以下、加工速度 10 m/min）

開繊糸供給部



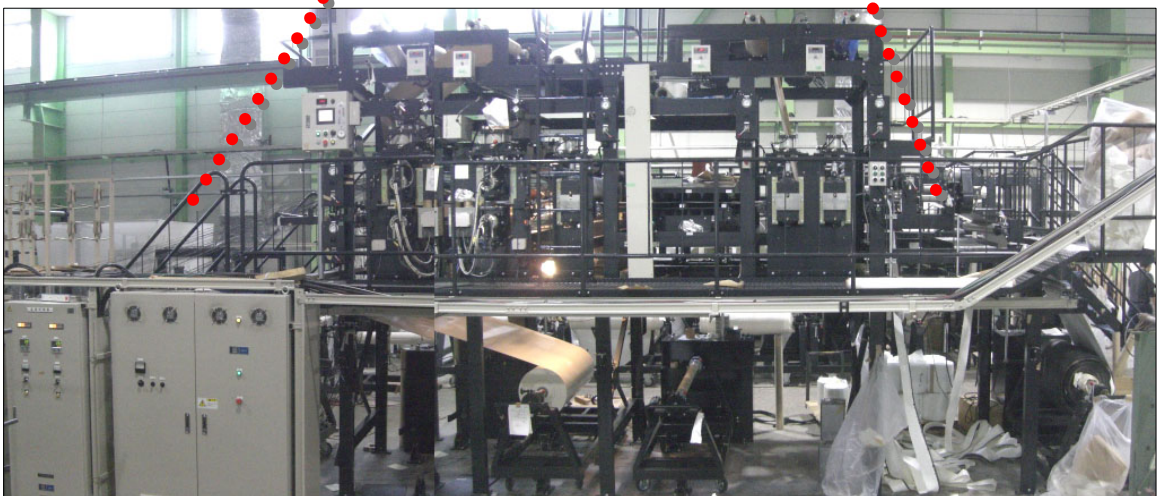
加熱・加圧ロール



(前方部 拡大)



(後方部 拡大)



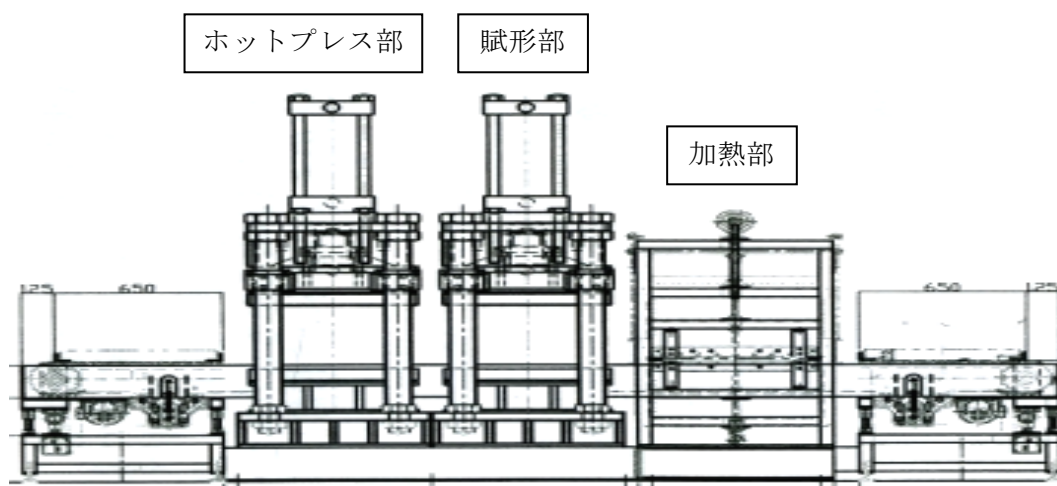
熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置 (全体)

#### (4) クイックプレス成型技術の開発

##### ① クイックプレス成型技術の開発

通常の Carbon/Epoxy による熱硬化性樹脂を母材とした炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の成形は、オートクレーブ成形や RTM (Resin Transfer Molding) 成形によって行われるが、成形に長時間を要することから、低コスト化は難しい。また、長繊維強化の熱可塑性樹脂を母材とした炭素繊維強化複合材料 (CFRTP) は、熱可塑性樹脂の熔融粘度が高いので、炭素繊維束内への樹脂をボイド (空隙) なく含浸させることが難しい、繊維の配列が乱れるなどの問題がある。

本研究開発では、これらを解決するため、プレス成形を基本とした比較的短時間で成形可能な新規のクイックプレス成型技術を用いた多機能型クイックプレス成型装置 (Press Line Equipment ; PLE) の導入および成型品の試作を行った。この装置は、長繊維強化の CFRTP の成形だけでなく、前章で開発を行った短時間硬化型エポキシ樹脂を使用した CFRP の成形にも対応させている。



クイックプレス成型装置の概略図

クイックプレス成型装置による 420×300×50 mm の 3次元碗型形状の成型試験を行った結果、層厚さ 43 $\mu$ m 相当の熱可塑性薄層セミプレグシートを 2軸または 4軸に積層させたものを最短で約 20 min で成形することができた。



クイックプレス成型品

## ② 炭素繊維強化複合材料の切断・後加工技術の開発

炭素繊維強化複合材料の切断・後加工技術の開発では、熱可塑性炭素繊維強化複合材料（CFRTP）の切断・後加工に対応可能な複合材料切断機を新規導入し、融点の低いナイロン等を母材とした CFRTP に対して、円状や多角形の乾式加工試験を実施し、加工性向上を図った。その結果、穴加工にはダイヤモンドコーティングドリル、直線カット加工には特殊ダイヤモンド電着刃、多角形の加工にはダイヤモンドコーティングエンドミルを使用するとともに、冷却性がよいジグ板を選択することで熱可塑性樹脂を熔融させることなく切断・後加工できた。これにより、加工形状の製作可能範囲を広げることが期待される。

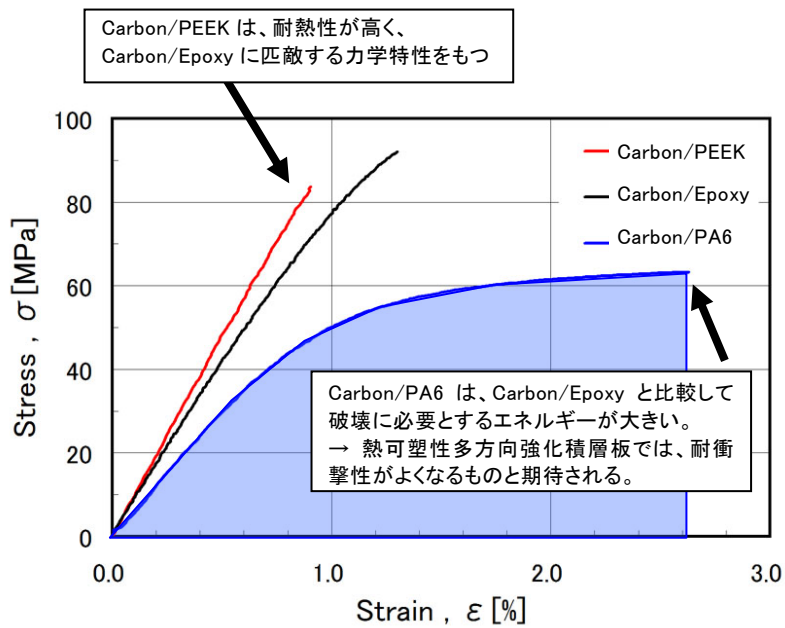


複合材料切断機

## ③ 各種プリプレグシート、成型品の評価

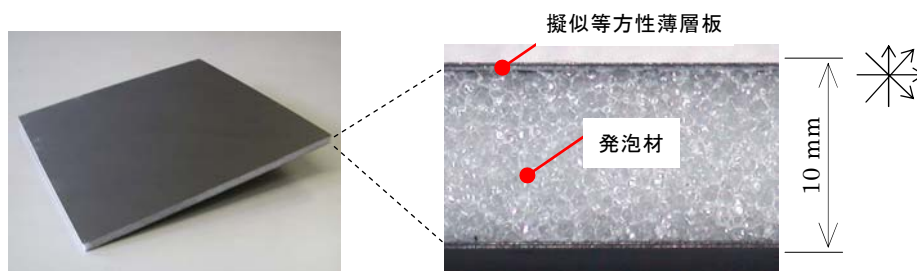
<擬似等方性薄層積層板を用いた超軽量構造体の試作>

熱可塑性薄層プリプレグシートについては、成形性の大きな要素である繊維束内への樹脂含浸性と賦形性を改良することを目的に、高融点で機械的特性が高いスーパーエンジニアリングプラスチックとして PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）樹脂、汎用樹脂として PA6（ナイロン6）を用いた「セミプリプレグシート」をそれぞれ新たに作成した。さらに、これらを用いた一方向積層板をプレス成形し、品質および力学的評価を行った。その結果、どちらの樹脂を用いてもボイド（空隙）がない高品質な積層板が得られるとともに、力学的特性についても、熱硬化性樹脂による Carbon/Epoxy 積層板と比較して遜色のない結果が得られた。また、一方向積層板の 90°引張り試験の結果、Carbon/PA6 の極限引張りひずみは Carbon/Epoxy の 2 倍以上を示し、Carbon/PA6 多軸薄層積層板は、耐衝撃性に優れるのではないかと期待される。



各種一方向積層板の 90° 引張り試験の結果

超軽量構造体の試作では、エポキシ樹脂を母材としたCarbon/Epoxy擬似等方性薄層積層板を試作し、その基本特性の評価により薄層積層による力学特性の優位性を証明した。また、その積層板をスキン材に、発泡材をコア材に用いた超軽量サンドイッチ材の試作を行い、その力学特性の評価を行った。その結果、板厚約 0.3mmのCarbon/Epoxy擬似等方性積層板[45/0/-45/90]<sub>s</sub> は、厚さ 0.7mmの汎用的な自動車用外板に使用される鋼板と同等の引張り強度があることがわかった。これを外板部材に代替すれば、重量を約 1/10 にすることができる。さらに、試作した超軽量サンドイッチ材は、平均密度 0.165~0.199 g/cm<sup>3</sup>、端部方向の圧縮試験による比強度は 12.4~14.9 [10<sup>6</sup> cm] であり、超軽量かつ高強度という面で、十分期待できる材料であるということがわかった。圧縮試験法の問題から、真の圧縮強度は、これ以上であることが予想できるので、試作した超軽量サンドイッチ材は、超軽量かつ高強度という面において十分期待できる材料であるということがわかった。

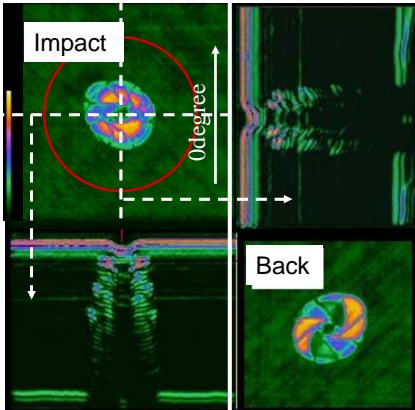


試作した超軽量サンドイッチ材

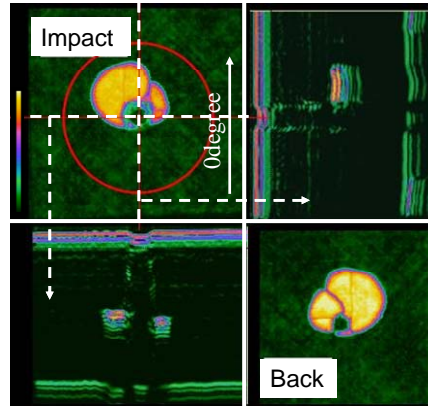
#### < 擬似等方性薄層積層板の衝撃損傷評価 >

通常の厚さ（0.12～0.18mm程度）のプリプレグシートを使用したCarbon/Epoxy擬似等方性積層板の衝撃による内部損傷分布については、層間はく離が、板厚方向に、らせん階段状に分布することがわかっている[1,2]。それに対し、薄層プリプレグシートを使用した擬似等方性薄層積層板の衝撃による内部損傷については、未だ明らかにされていない部分がある。本研究では、通常のプライ厚さの擬似等方性積層板（Thick）と、薄層プリプレグシートを使用した擬似等方性積層板（Thin）についての評価を行った。プライ厚さはThickが 147 $\mu$ m、Thinが 38 $\mu$ m、積層構成はThickが [45/0/-45/90]<sub>3S</sub>、Thinが [45/0/-45/90]<sub>12S</sub>、板厚は双方とも約 3.5mmである。積層板にそれぞれ衝撃を与え、その衝撃によって試験片の内部に生じた損傷の評価を行った。損傷評価は、超音波探傷装置による観察、および試験片の端面と水平な方向に順次研磨しながら損傷発生箇所を 0.5mm間隔で直接、レーザ顕微鏡で観察する方法で行った。また、各断面で観察された損傷箇所を並べ、損傷の分布を 3 次元的に表したモデル図の作成も行った。

超音波探傷観察の結果、Thick では、層間はく離が衝撃点を中心にほぼ円形に広がっていると同時に、衝撃点よりわずかずつ大きくなりながら板厚方向に円柱状に分布しているが、Thin では、層間はく離が衝撃点から大きく偏って生じることがわかった。また、断面観察の結果、Thick では、層間はく離が衝撃点を中心に左右に広がるとともに板厚方向に広く分布するが、Thin では、層間はく離が特定の層間、特に太線で図した板厚中央近傍の層間のみに見られ、それ以外では観察されないことがわかった。さらに、板厚中央部の内部損傷の 3 次元分布モデルを求めた結果、Thick、Thin とも、内部損傷はらせん状に形成されるが、Thin では、特定の層間で、層間はく離が広がる傾向にあることがわかった。これは、Thin ではトランスバースクラックが発生しにくくなることに起因すると考えられる。また、衝撃後圧縮強度（CAI 強度）は、Thin の方が Thick に比べ約 25%高い結果となった。以上から、薄層積層板は耐衝撃性がよいことがわかった。

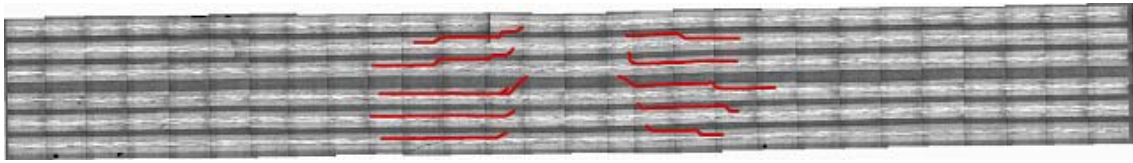


( a ) Thick

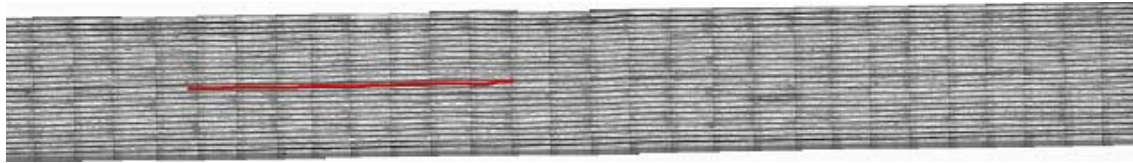


( b ) Thin

通常層厚および薄層 CFRP 積層板の超音波探傷画像

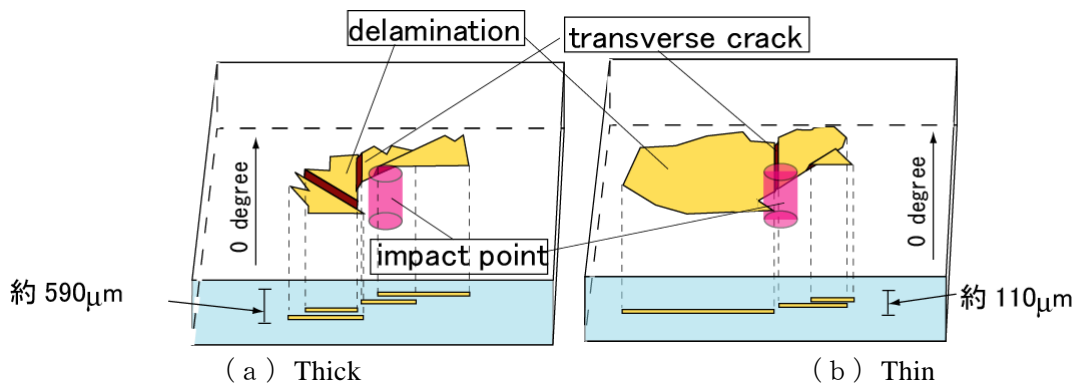


(a) Thick



(b) Thin

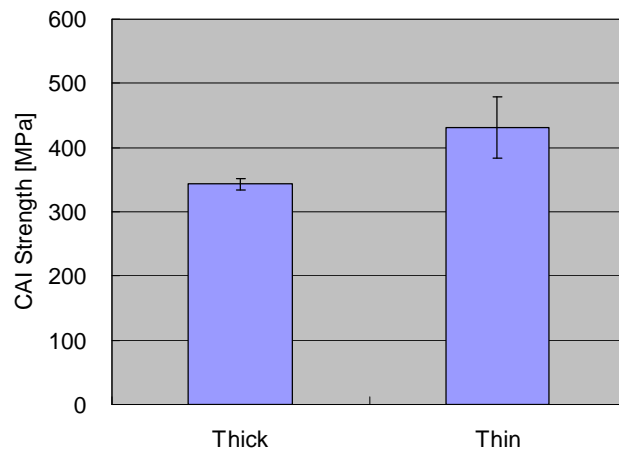
通常層厚および薄層 CFRP 積層板の断面観察写真



(a) Thick

(b) Thin

内部損傷の3次元的な分布モデル (板厚中央部のみ)



CAI 強度

### 第3章 全体総括

本研究開発では、厚さ 0.2mm 以下の薄層多軸プリプレグシートの開発およびこれを使った短時間成型加工技術の開発、各種プリプレグシートとそれらの成型品の評価を行い、次のような成果を得ることができた。

#### 1. 研究開発成果

##### ① 薄層多軸プリプレグシートの開発

薄層多軸プリプレグシートの開発では、母材樹脂に熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂の両方が適応可能な新規の薄層多軸プリプレグシート製造装置を開発し、目標である幅 1000mm、厚さ 0.2mm 以下の 4 軸の薄層多軸プリプレグシートが実現できるようになった。また、この装置を用いて、幅 900mm、厚さ 0.172mm 相当(1層当たり 43 $\mu$ m)の 4 軸[45/0/-45/90]の連続した熱可塑性薄層多軸プリプレグシートが実現できた。現時点では、加工速度は目標値の 5m/min には届いてないが、装置開発の若干の遅れが原因なので、今後、速度アップは十分可能である。

短時間硬化用樹脂の開発では、硬化時間とポットライフを制御した短時間硬化型エポキシ樹脂による樹脂目付け 23g/m<sup>2</sup>の短時間成型用熱硬化性薄層樹脂シートを開発した。また、それを用いた Carbon/Epoxy 薄層プリプレグシートの作製試験、およびその擬似等方性積層板の力学試験を行い、その優位性が確認された。

熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置の開発では、熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置を開発し、ポリアミド 12 (PA12) を母材とした幅 1,000mm、厚さ 0.04~0.05mm の Carbon/PA12 薄層プリプレグシートを加工速度 3.5m/min で得ることが可能となった(目標値:厚さ 0.05mm 以下、加工速度 10 m/min)。加工速度については、目標値を下回ったが、プリプレグシートの幅方向の厚さムラを制御する改造に時間がかかったことが原因であるので、今後のスピードアップは期待できる。

##### ② 多機能型クイックプレス成形技術の開発

クイックプレス成形技術の開発では、各種母材樹脂に応じて比較的短時間で 3 次元成型を可能とする新規成形方式の多機能型プレス成形装置を導入し、厚さ 43 $\mu$ m 相当の Carbon/PA6 薄層セミプレグシートを 2 軸あるいは 4 軸に積層させたものを 420×300×50 mm の 3 次元椀型形状に最短約 20 min で成形することが可能となった。開発したクイックプレス成形技術は、薄層多軸プリプレグシートの時点で繊維と樹脂が一体化されており、RTM (Resin Transfer Molding) 成形のような繊維基材の積層、樹脂注入の時間は必要としないので、十分に速い成形速度が実現できたと考えている。しかし、量産を考慮すると、さらなる成形速度のアップと成形品質の向上に努める必要があるだろう。

炭素繊維強化複合材料の切断・後加工技術の開発では、融点の低いナイロン等を母材とした熱可塑性炭素繊維強化複合材料 (CFRTP) に対して、ダイヤモンドコーティングの工具や冷却性のよいジグ板を選択することで、熱可塑性樹脂を溶融させることなく切断・後加工できることがわかった。これにより、加工形状の製作可能範囲を広げることが可能となった。

超軽量構造体の試作では、エポキシ樹脂を母材としたCF/Epoxy擬似等方性薄層積層板をスキン材、発泡材をコア材に用いた超軽量サンドイッチ材の試作とその力学特性の評価を行った。その結果、板厚約 0.3mmのCF/Epoxy擬似等方性積層板[45/0/-45/90]s は、厚さ 0.7mmの汎用的な自動車用外板に使用される鋼板と同等の引張り強度があることがわかった。これを外板部材に代替すれば、重量を約 1/10 にすることができる。さらに、試作した超軽量サンドイッチ材は、平均密度 0.165~0.199 g/cm<sup>3</sup>、端部方向の圧縮試験による比強度は 12.4~14.9 [10<sup>6</sup> cm] となり、超軽量かつ高強度という面で、十分期待できる材料であるということがわかった。

また、擬似等方性薄層積層板の衝撃損傷後の断面観察を行った結果、擬似等方性薄層積層板の衝撃による内部損傷は、特定の層間に層間はく離が集中して板厚方向には広がらないという特徴があることがわかった。さらに、内部損傷の 3D モデルの構築を行い、衝撃損傷のメカニズムが解明された。また、衝撃後圧縮試験により、衝撃に対する薄層積層板の優位性が証明された。

## 2 成果今後の課題及び事業化展開

### (1) 今後の課題

本研究開発では、薄層多軸プリプレグシート製造装置、熱可塑性薄層プリプレグシート製造装置、クイックプレス成形装置、複合材料切断機を新規に開発、または導入、各種試験を行うことで、自動車の外板部材等の構造部材の中間基材として期待される幅 1,000mm の薄層多軸プリプレグシートの実現と、その短時間成形技術、切断・後加工技術の確立を行ったが、装置開発に時間がかかったことから当初の目的を 100% 達成したとは言えない。それぞれの技術はまだ発展途上であり、伸びしろは十分に残されている。今後は、それぞれの要素技術の高度化を行い、確立させていくことが重要であろう。

### (2) 事業化計画

本研究開発で想定しているユーザー（自動車メーカー等）に向け、自動車外板部材等の中間素材である熱硬化性・熱可塑性薄層多軸プリプレグシート、および、それら中間素材を成形加工したクイックプレス成形による成型品の事業展開を図る。

熱硬化性・熱可塑性薄層多軸プリプレグシートは、長繊維強化の炭素繊維強化複合材料の基本となるものであり、幅も 1,000mm あることから、自動車用外板部材以外にも様々な分野において事業展開が可能である。まずは、(株) ミツヤと (有) JASTY が中心となって将来の量産に向けた加工速度の高速化に取り組み、加工速度 5m/min で各種薄層多軸プリプレグシートを安定した品質で加工できるようにする。その後、自動車用外板部材等の中間素材として各種薄層多軸プリプレグシートを大手の自動車メーカー向けに安定供給できるようにする。また、(有) JASTY は、薄層多軸プリプレグシート製造装置の販売体制を整え、事業化を図る。丸八(株) は、開発した幅 1,000mm の熱可塑性薄層プリプレグシートを量産、安定供給できるよう、加工速度の高速化(加工速度 10m/min)に取り組み、自動車の外板部材だけでなくそれ以外にも汎用性が高い各種成型品の中間素材としての事業展開を図る。

クイックプレス成形技術については、フクビ化学工業(株)が中心となって、まず、成形時間の短縮と成型品品質の向上に取り組む。また、ナイロン系の樹脂だけでなく、カンボウプラス(株)が開発した短時間硬化型エポキシ樹脂を使用したプリプレグシートを使った成形技術の確立や、大型の構造体の成形に対応するための成形技術のスケールアップに取り組んでクイックプレス成形のノウハウを構築し、それによっても、薄層多軸プリプレグシートを使用した各種成型品の製造販売の事業化を図る。また、(有) ミキ・ファイバーでは、フクビ化学工業(株)において各種素材・成形条件・各種形状でクイックプレス成形された成型品の切断・後加工技術の研究をさらに行ってノウハウを構築し、超軽量炭素繊維強化複合材料成型品の加工専門メーカーとしての事業展開を図る。

クイックプレス成形によって得られた構造部材の各種試作品は、福井県工業技術センターと金沢工業大学で品質や基礎的な力学物性等の評価を行うとともに、ユーザーである大手自動車メーカーとも協力をしながら、衝撃試験や安全性など、実際に自動車用構造部材等として適用していくための試験を行っていく。

付録

1. 参考文献・引用文献

- (1) Ishikawa et al., Composites Sci. Tech., 55(4) (1995) 349-363
- (2) Soutis et al., Composites Sci. Tech., 56 (1996) 677-684

2. 専門用語の解説

専門用語	解説
炭素繊維強化 複合材料	強化繊維として炭素繊維束を用い、それを樹脂で固化させたもの。比重が鉄の 1/5 程度と軽く、強度が鉄よりも非常に大きいのが特徴。
熱硬化性	加熱により重合して、硬化性を示す合成樹脂。フェノール樹脂・尿素樹脂・ケイ素樹脂など、網状に結合することのできる高分子化合物。本研究では、エポキシ樹脂を対象としており、常温では粘性の高い液状でありながら、ある程度的高温（120～180℃）で加熱することにより固化する性質をいう。
熱可塑性	常温では弾性をもち、変形しにくいですが、加熱により軟化して種々な形に成形加工することができる合成樹脂。ナイロン・ポリエチレン・ポリスチレン・ポリ塩化ビニルなどはこれにあたる。本研究では、特にナイロン 6 や 12 を使った繊維強化複合材料に取り組んでいる。
強化繊維束の 開繊技術	束状になっている強化繊維束を、連続して幅広く薄い状態にする技術。 
プリプレグシート	炭素繊維を引き揃えて並べたシートや織物に樹脂を含浸させた積層用のシート状材料のこと。 
セミプレグシート	炭素繊維等の繊維束を幅方向に並べて開繊し、幅広く薄くシート状としたものに、熱可塑性樹脂を張り合わせるなどして一体化させたシート状のもの。樹脂を完全に含浸させていないので、クイックプレス成形に適している。