

令和元年度

中小企業経営支援等対策費補助金

(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「大型で積層構成自由度の高いCFRTP

一方向連続繊維積層板の量産技術開発」

成 果 報 告 書

令 和 2 年 5 月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人ひろしま産業振興機構

目 次

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 | p. 1 |
| 1-2 | 研究体制 | p. 4 |
| 1-3 | 当該研究開発の連絡窓口 | p. 4 |
| 1-4 | 成果概要 | p. 5 |

第 2 章 本 論

| | | |
|-----|-------------------------------|-------|
| 2-1 | サブテーマⅠ：大型真空多段プレスによる積層板製造装置の開発 | p. 7 |
| (1) | はじめに | p. 7 |
| (2) | 方法、結果及び考察 | p. 7 |
| (3) | 小括 | p. 15 |
| 2-2 | サブテーマⅡ：マルチ積層装置の開発 | p. 16 |
| (1) | はじめに | p. 16 |
| (2) | 方法、結果及び考察 | p. 16 |
| (3) | 小括 | p. 23 |
| 2-3 | サブテーマⅢ：積層板に適したプレス成形技術の開発 | p. 24 |
| (1) | はじめに | p. 24 |
| (2) | 方法、結果及び考察 | p. 24 |
| (3) | 小括 | p. 33 |

第 3 章 全体総括

| | | |
|-----|-------------|-------|
| 3-1 | 研究開発の成果 | p. 34 |
| 3-2 | 今後の課題・事業化展開 | p. 35 |

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

〈環境問題から CFRP の軽量化部材としての期待〉

自動車からのCO₂排出量は、我が国全体の排出量の約15%を占めている。地球温暖化対策を推進するため、自動車からのCO₂排出量を削減することが重要な課題となっており、その対策の一つとして、自動車の燃費性能を改善させることが極めて重要となっている(図1.1.1)。

現在燃費改善の方策の一つとして車体の軽量化への取り組みが行われており、これまでの鉄鋼に代わるマルチマテリアル化が進んでいる。その中でもCFRPは軽さだけでなく強度や弾性においても鉄鋼より優れており、次世代自動車材料として注目されている(図1.1.2)。CFRP製部品の採用による軽量化効果は大きく、高級スポーツカーではすでに多くの採用例があり、今後も燃費規制が厳しくなっていく中、要素技術(材料・加工・接合等)の開発の進歩とともに大衆車でもスポーツモデル等から順次採用が拡大していくものと思われる。

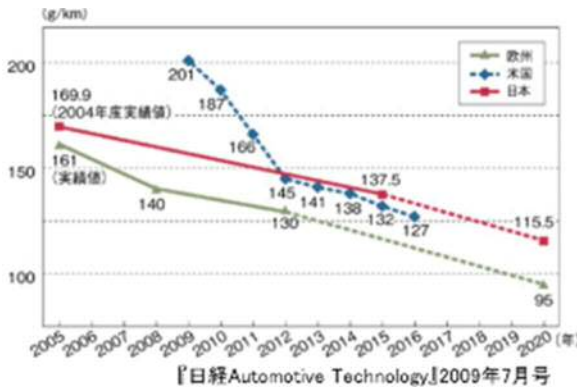


図 1.1.1: CO₂排出規制

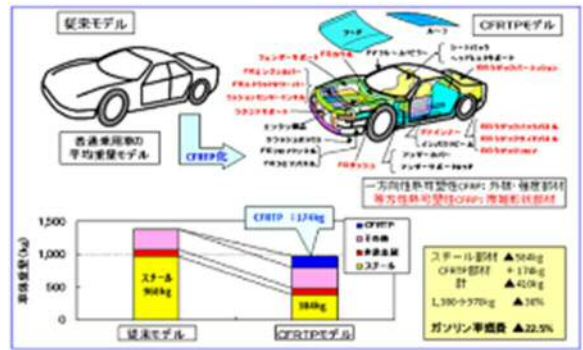


図 1.1.2: CFRP を用いた軽量化 (NEDO_HP より)

〈CFRTP 一方向連続繊維積層板の利点〉

熱可塑性樹脂をマトリックス樹脂とする CFRTP は、従来のエポキシ樹脂等の熱硬化性樹脂をマトリックス樹脂とする CFRP に比べ、硬化時間が不要で再溶融が可能であることから、短時間での成形が可能で、リサイクル性にも優れている。

CFRTP に用いられている炭素繊維には、繊維長が1mm以下の短繊維から1cm以上のチョップド・不織布、また連続繊維の織布を積層したもの等、様々な形態がある。その中でも繊維の直線性が高い一方向連続繊維は、繊維方向で強度や弾性率が高いという炭素繊維の材料特性を最大限活かすことができる。さらにその特性を利用して目的の成形物に対し必要な方向に必要な分だけ繊維を配向・積層することにより、より大きな軽量化効果を得ることができる。

薄層の CFRTP 素材を板状に積層一体化した積層板は、樹脂の融点以上に加熱することで従来の鋼板のようにプレス加工できることから、鋼板用プレス装置を所有する多くの自動車関連メーカーにとっては、既設のプレス装置を活用し膨大な設備投資を必要とせず加熱設備の追加、搬送装置の改良等の小規模な改造で CFRTP 部品開発に着手できるという大きなメリットがある。

鋼板に比べはるかに素材コストの高い炭素繊維と樹脂を用いた CFRTP で自動車部品の開発・適用を進めていくためには、より軽量化効果の大きな部品をできる限り低コストで生産する方法を開発していく必要があるが、今回の研究開発のターゲットである CFRTP 一方向連続繊維積層板(以下、積層板)のプレス成形は、図 1.1.3 に示すように力学特性と生産性の両立が図れる理想的な成形法である。

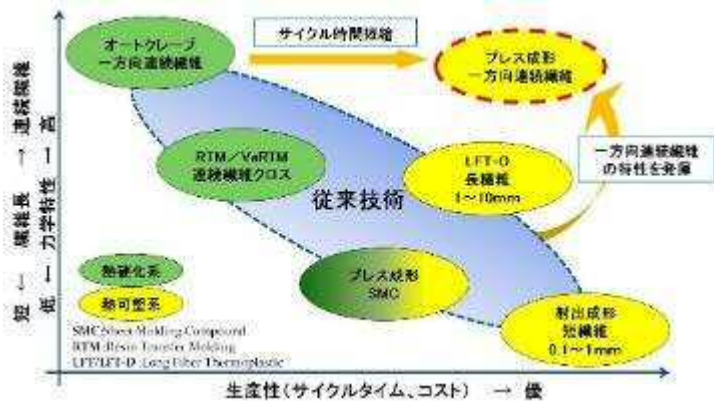


図 1.1.3: CFRP の種類別生産性と力学特性

しかしながら、積層構成に自由度を持った大型の積層板は市場に全く流通していないため、CFRTP のプレス成形の研究開発を進める上で大きな制約となっており、自動車部品メーカー等の川下事業者から、開発に必要なサイズ・性能・安定した品質を持った積層板に対する非常に高いニーズが存在する。一方で、一方向連続繊維を用いた部品開発には異方性素材の材料設計やプレス成形時の成形性を不安視する意見もあるが、積層板の成形技術だけでなく後工程のプレス成形に関する技術も同時に提供することで、中小規模の板金加工メーカー等の CFRTP 部品開発への参入をさらに促すことができる。

〈従来技術の問題点〉

CFRP が材料特性を十分に発揮する為には-脂含浸性や繊維直線性、板厚均一性等の品質を保持していなければならない(図 1.1.4、図 1.1.5)。しかしながら熱可塑性樹脂は溶融しても粘度が高く、繊維束内部への含浸が難しいことから繊維束の中心部まで完全に熱可塑性樹脂を含浸したプリプレグ素材は市場にほとんど存在していない。その為、一方向連続繊維のテープ材料(以下、UD テープ)等のプリプレグ素材から積層板を成形する工程で、繊維束内部まで樹脂を含浸させる必要があるが、含浸のために高い温度・圧力を加えると、溶融した樹脂が流動し繊維が湾曲して直線性が失われる(図 1.1.5)、また溶融した樹脂が流出するなどの品質の低下を招いてしまう。

従来の平板や金型プレス、オートクレーブでの積層板の成形技術では、この成形品質(繊維の直線性)と大型化や生産性、積層構成(繊維配向や積層数)自由度との両立が図れておらず、大型の積層板を量産することが出来ていなかった。

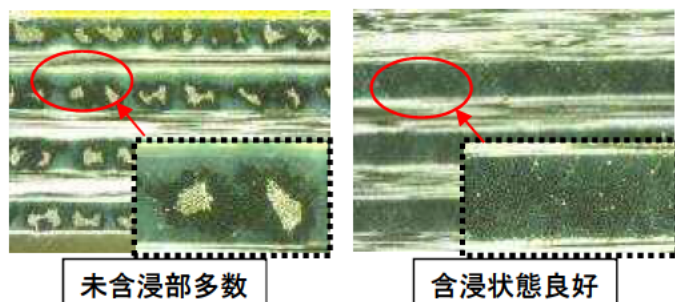


図 1.1.4: 積層板の断面拡大写真

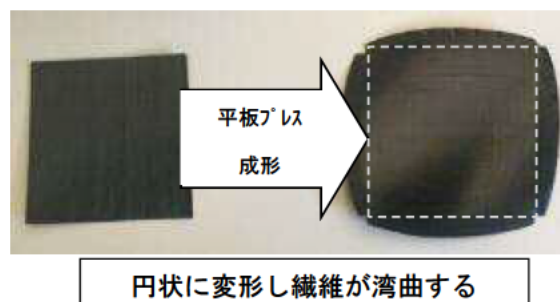


図 1.1.5: 平板プレス成形前後の積層板

また、UD テープの積層工程において、熱硬化 CFRTP で使用されているような多関節ロボット等を利用した自由度の高い自動積層装置が実用化されているが、この方式では積層速度が遅く、1x1m サイズの大型積層板の大量生産には対応できない。

さらに、積層板のプレス成形においては、積層板が市場になく十分な取り組みがなされていないこともあり、異方性素材の材料設計やプレス成形時の挙動についての解明が進んでいない。そのため、プレス成形ではより設計・解析や成形が容易な等方性の不連続繊維での取り組み事例が多くなっている。しかしながら、不連続繊維では十分な力学特性が得られず、アルミなどの金属材料に比べて十分な軽量化効果を得ることもできていなかった。

〈研究目的と解決すべき研究課題〉

そこで本研究開発では、バッチ処理ながら高い生産性を持ち、樹脂の酸化劣化抑制とボイド低減に有効な真空下での成形を可能とする、大型の真空多段プレス装置をベースに、以下のサブテーマの課題を解決することで、従来技術の問題点を克服し、品質と生産性そして高い積層構成自由度を兼ね備えた量産技術の実現を目的とした。

そして同時に、積層板に適したプレス成形技術を開発・提供することによって積層板の普及拡大そしてその量産装置の需要拡大を目指した。

○サブテーマⅠ: 大型真空多段プレスによる積層板製造装置の開発

大型真空多段プレスでの積層板成形に適用可能な、繊維の直線性を維持しながら成形物を加熱・加圧できる機構の開発と、大型真空多段プレスの成形条件を確立する。

○サブテーマⅡ: マルチ積層装置の開発

自由な構成での高速自動積層を実現するために、UD テープを任意角度で並べ、十分な速度と

強度をもって平行接合できる接合技術とハンドリング機構を開発し装置化する。

○サブテーマⅢ：積層板に適したプレス成形技術の開発

1x1m サイズの積層板にも対応できるプレス成形技術を確立するため、プレス成形時の材料の自重たわみや流入抵抗の変化を考慮した解析技術と、成形欠陥の原因となるブランクの流入抵抗を制御する金型機構を開発する。

〈中小企業の特定期ものづくり基盤技術の高度化に関する指針における課題とニーズ〉

中小企業の特定期ものづくり基盤技術の高度化に関する指針の以下の項目に対応。

(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

4) その他の川下分野に関する事項

a. 自動車分野に関する事項

①川下製造業者の特有の課題及びニーズ

ア. 構造部素材の軽量化

〈高度化目標〉

自動車用ドアパネル等の自動車用部品の材料として適用できる、サイズと品質を備えた積層板を速く安定して生産する方法及び装置を開発する。

〈技術的目標値〉

●積層板サイズ： 1x1m 以上

●成形品質：自動車用積層板として適用可能なレベル

自動車用途では物性値を含めた積層板の成形品質は極めて重要な要素である。出展展示会等における川下企業からの聞き取り結果及び過去の研究開発事例の設定目標値を参考にして、今回開発する装置で成形される積層板の品質目標値を以下の表 1.1.1 のとおり設定した。

表 1.1.1: 積層板の品質目標値

| 項目 | 品質目標値 |
|---|---|
| 繊維の直線性 | 繊維長手方向において、 繊維の偏り δ が長さ10mm当たり $\pm 1.0\text{mm}$ 以下 |
| 空隙率 | 成形品体積当たり、2.0%以下 |
| 厚み精度 | アルミニウム板厚 JIS H 4000 冷間圧延材規格と同等以上 (幅 1,000mm,t=1.2mm の場合： $\pm 0.10\text{mm}$) |
| 物性値 | |
| 厚さ 1.2mm の擬似等方性積層板 ($0/\pm 45/90^\circ$)、(炭素繊維含有率 45 体積%) | |
| ・引張り強度 | 350MPa 以上 |
| ・曲げ強度 | 400MPa 以上 |
| ・曲げ疲労強度 | 静的強度の 60%以上 (応力比 0.1、100 万回の繰返し数) |

●生産能力： 1m²以上/min.

上記条件の積層板を一連の生産ラインとして成形できることを目標とする。

(積層板は、8ply 構成を基本とする。)

●各サブテーマの目標値：

○サブテーマⅠ：大型真空多段プレスによる積層板製造装置の開発

積層板生産能力： 1m²以上/min.

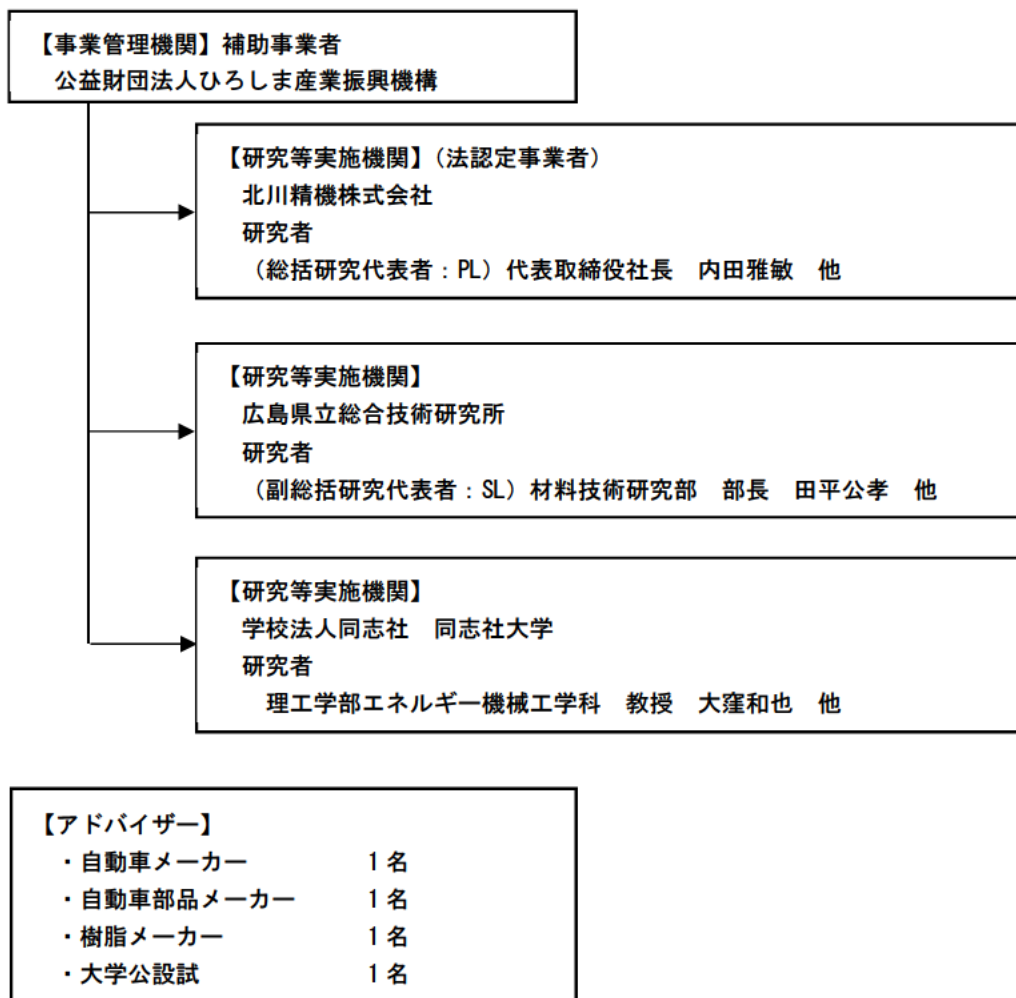
○サブテーマⅡ：マルチ積層装置の開発

接合後の広幅シート(1x1m 以上)の生産能力及び積層速度：8 枚以上/min.

○サブテーマⅢ：積層板に適したプレス成形技術の開発

熔融状態の物性値を取得し、成形品の剛性における実験値と解析値の差：10%以下

1-2 研究体制



1-3 当該研究開発の連絡窓口

- 公益財団法人ひろしま産業振興機構
ものづくり革新統括センター 部長 神田敏和
電話：082-240-7712 FAX：082-242-7709
e-mail：t-kanda@hiwave.or.jp
- 北川精機株式会社
経営企画室市場開発課 竹井宏行
電話：0847-40-1200 FAX：0847-40-1202
e-mail：takei-h@kitagawaseiki.co.jp

1-4 成果概要

○サブテーマⅠ大型真空多段プレスによる積層板製造装置の開発

北川精機㈱に既設の大型真空多段プレスを用いて積層板の試作検証行っており、1x1m サイズの積層板を、多ページ成形できる多段プレスの成形技術を確認し、2 段x10 ページ(20 枚)の同時成形に成功した。

●積層板サイズ:1mx1m 【目標達成】

●成形品質(表 1.4.1) 【目標達成】

表 1.4.1：積層板の品質目標値と試作した積層板の品質評価結果

| | 目標値 | 結果 |
|--------|---|-------------------|
| 繊維の直線性 | 繊維長手方向において、繊維の偏り δ が長さ 10mm 当たり $\pm 1.0\text{mm}$ 以下 | ○ 基準超過ナシ |
| 空隙率 | 成形品体積当たり、2.0%以下 (画像計測) | ○ <0.5 |
| 厚み精度 | アルミニウム板厚 JIS H 4000 冷間圧延材規格と(同等以上幅 1,000mm,t=1.2mm の場合: $\pm 0.10\text{mm}$) | ○ 全て規格内 |
| 物性値 | 厚さ 1.2mm 擬似等方性積層板 ($0/\pm 45/90^\circ$) _s , (VF=45%) | |
| | ・引張り強度 350MPa 以上 | ○ 444 - 493MPa |
| | ・曲げ強度 400MPa 以上 | ○ 836 - 873MPa |
| | ・曲げ疲労強度 静的強度の 60%以上 (応力比 0.1, 100 万回の繰返し数) | ○ すべて達成 |

●生産能力【目標達成】

10 ページ成形において上記品質を実証した成形条件は高温保持時間 60 分であり、加熱冷却時間を含め成形時間 120 分/1 サイクルとなる。目標である 1m^2 以上/min のためには、120 分で 120 枚(12 段x10 ページ)の成形を行う必要がある。この成形条件を基に、6 段の多段プレス装置 2 台をメインに、サブテーマⅡで開発した積層工程の装置を組み合わせ、生産能力 1m^2 以上/min の積層板成形装置の仕様決定と構想設計を行った。

○サブテーマⅡ：マルチ積層装置の開発

自由な構成での高速自動積層を実現するために、UD テープを任意角度で並べ、十分な速度と強度をもって平行接合できる接合技術とハンドリング機構を開発し、装置化を行った。



図 1.4.1：任意配向接合装置



図 1.4.2：積層装置

開発した装置は 2 台組で、任意配向接合装置(図 1.4.1)は 150-300 mm幅の UD テープから、設定した任意の配向角を持つ口800-1,200 mmの大判シートを製作することが出来、積層装置(図 1.4.2)は、その大判シートを 4 か所のシート供給テーブルより設定した任意の順序・回転角で積層することが出来る。検証運転の結果、目的どおり自由な配向構成で積層板の材料を積層することが出来た。また各装置の生産能力ついて、任意配向接合装置部においては、目標としていた生産能力を達成するためには複数台が必要となることが分かった。積層機においては目標値通り毎分 8 シートの積層を確認できた。また、今回開発した装置で、サブテーマ I での研究開発に使用するシート材を実際に作製し、大判サイズにおいて手作業ではできない圧倒的な生産性を有しており、大型積層板の量産には非常有効であることも実証できた。

○サブテーマⅢ：積層板に適したプレス成形技術の開発

小型金型を用いた CFRTP 成形品について、解析結果と実成形品の強度測定結果との合わせこみを行い、積層構成の異なる 3 種類の積層板すべてにおいて 10 %以下の良い一致を得ることが出来た。続いて大型金型についてその構造の検討及び設計を行い、実車スケールのインパクトバー成形品の試作を行って、成形時における搬送機構の考案や成形条件等の知見を得て、概ね 1 m サイズの積層板のプレス成形技術を確立することができた。大型成形品で実測値と解析結果との合わせこみを行った結果、疑似等方積層では実成形品の板厚を解析に反映したことで、大型成形品の剛性における実験値と解析値がよく一致し、目標値としていた 10 %以下を達成することができた。また、成形圧力を高めることによって、品質の良い成形品を得ることができた。

第2章 本論

2-1 サブテーマ I : 大型真空多段プレスによる積層板製造装置の開発

(1) はじめに

過去の取り組みにおいて平板真空プレスを用いて、繊維の直線性を維持して加熱・加圧可能な成形方法及び治具を開発(特許第 6595240 号)し、1枚ずつの単ページ成形では高品質な積層板の成形に成功している。しかしながら1枚ずつの生産では量産に適さない。そこで生産性向上と生産コスト削減のために、平板プレスであっても1回の成形で多量の積層板を成形できる、多段プレスによる多段・多ページ生産(図 2.1.1)の手法の確立をおこなった。

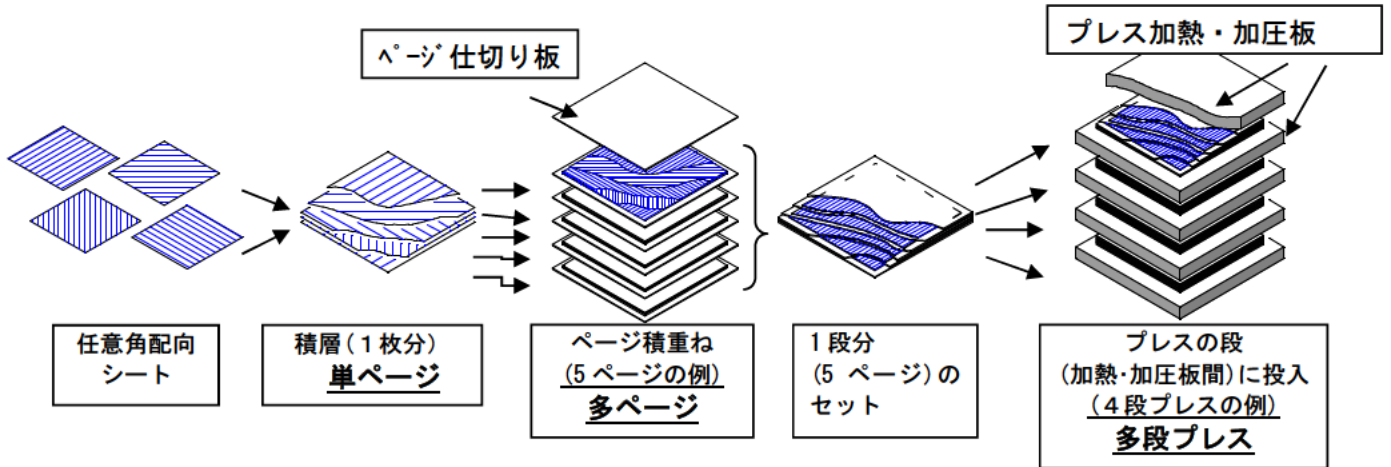


図 2.1.1: 多段・多ページ(4段x5ページ:20枚)同時成形の例

(2) 方法、結果及び考察

(2)-1 使用材料、装置及び実験方法

A) 使用材料

本研究開発で使用した積層板の材料となる CFRTP 一方向プリプレグテープ(UD テープ)には、三菱エンジニアリングプラスチックス製の CFUD テープ:レニーテープ LEX CF50(以下レクスター)を使用した。ポリアミド系樹脂の LEXTER8500 をマトリックスとし、樹脂重量比:RC=50 wt%、厚さ 0.17 mm で、幅 167 mm のテープ状の製品である。

B) 積層成形プレス装置

□500 サイズの積層板成形には、北川精機(株)製の 3 段真空プレス装置(図 2.1.2、表 2.1.1)を使用し、□1000 サイズの成形には北川精機(株)2 段真空プレス装置(図 2.1.3、表 2.1.2)を使用した。



図 2.1.2: 北川精機製 3 段真空プレス装置

表 2.1.1: 3 段真空プレス装置仕様

| | |
|--------|---------------------------|
| プレス出力 | 40~1,960 kN (4~200ton) |
| 有効寸法 | 650×650mm |
| 熱盤間隔 | 80mm (max240mm-1段) |
| 最高使用温度 | 400°C |
| 加熱方式 | サーモオイル循環、 ヒーター加熱 |



図 2.1.3：北川精機製 2 段真空プレス装置

表 2.1.2：2 段真空プレス装置仕様

| | |
|--------|-----------------------------|
| プレス出力 | 150～1,570 kN (15～160ton) |
| 有効寸法 | 1,120×1,270mm |
| 熱盤間隔 | 150mm |
| 最高使用温度 | 340℃ |
| 加熱方式 | サーモオイル循環 |

C) CFRTP 積層板の積層構成仕様

本研究で成形・評価を行った CFRTP 積層板は、特段の記載がない場合はすべて、積層構成[0° /45° /90° /-45°]s の 8 層の擬似等方性積層板、厚さ約 1.2 mm とした。

D) 測定方法

●断面観察

成形された積層板から約 10 mm 角の試験片を切り出し、樹脂埋め固定後に積層板の断面を研磨紙及び研磨材をもちいて鏡面(最終研磨材 0.1 μm)まで研磨した。研磨断面はデジタルマイクロスコープ(VHX-100:株式会社キーエンス)を用いて観察した。

●厚み

U 字形鋼板マイクロメータ (PMU300-25MB:株式会社ミットヨ)を使用して、最小計測単位 0.001mm の精度で 1 ページ当たり 25 点測定した。

●繊維の直線性

積層板表面をコピー機でスキャンしデジタルデータとして保存し、色の濃淡から表層の繊維配向を確認した。

●空隙率

【燃焼法】CFRTP 板を 15mm 角に切り出し重量と体積を測定した。CFRTP をアルミ箔で包み、マッフル炉(KDF-300PULS:株式会社デンケン)を用いて 600 度で 30 分加熱し、樹脂を完全に飛ばした。加熱後、残存した繊維の重量を測定し、空隙率を測定した。

【画像解析】断面画像からの画像解析による空洞率概算評価にはオープンソースの画像解析ソフトウェア ImageJ[1]を用いて計測した。

[1]、Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2018.

●物性値(静的 3 点曲げ強度、静的引張強度、3 点曲げ疲労強度)

・静的 3 点曲げ試験

JISK7074 に準拠して静的 3 点曲げ強度を測定した。試験には精密万能試験機 (AG-1 100kN、定格荷重 100kN:株式会社島津製作所)を用いて変位制御により静的 3 点曲げ荷重を負荷した。最外層の炭素繊維が長手方向となるようにし、試験片寸法を長さ 60mm、幅 15mm、厚み 1.2mm とした。試験片数を各条件 5 本以上、試験速度を 5mm/min、支点間距離を 48mm とした。静的 3 点曲げ強度を算出するために以下の式(1)を用いた。

$$\sigma_b = \frac{3F_c L}{2bh^2} \quad (1)$$

σ_b : 静的 3 点曲げ強度 [MPa]

F_c : 破壊荷重 [N]

L : 支点間距離 [mm]

h : 試験片の厚み [mm]

b : 試験片の幅 [mm]

・静的引張試験

JISK7164 に準拠して静的引張強度を測定した。試験には精密万能試験機(AG-1 100kN、定格荷重 100kN: 株式会社島津製作所)を用いて変位制御により静的引張荷重を負荷した。最外層の炭素繊維が長手方向となるようにし、試験片寸法を長さ 250mm、幅 15mm、厚み 1.2mm とした。試験片数を各条件 5 本以上、試験速度を 1mm/min、とした。静的引張強度を算出するために以下の式(2)を用いた。

$$\sigma = \frac{F_c}{bh} \quad (2)$$

σ : 静的引張強度 [MPa]
 F_c : 破壊荷重 [N]
 h : 試験片の厚み [mm]
 b : 試験片の幅 [mm]

・片振り 3 点曲げ疲労試験

3 点曲げ疲労強度を測定した。試験には電気油圧式材料試験機(サーボパルス: 島津製作所(株): 定格荷重: 2kN)を使用した。荷重制御により曲げ荷重を負荷した。最外層の炭素繊維が長手方向となるようにし、試験片寸法を長さ 60mm、幅 15mm、厚み 1.2mm とした。周波数を 2Hz、応力比を 0.1、支点間距離を 48mm とした。打ち切りサイクルを 100 万回とした。

(2)-2 成形枠による成形

過去の取り組みにおいて、単ページで高品質な積層板の成形に成功した成形方法(特許第 6595240 号)では、積層成形する CFRTP の外側に柔軟性のあるシール部材と、その外側にシール部材を保持する金枠を配置するもので、この簡易な 2 重構造の成形治具の使用により、精巧な金型を使用せずに平板プレスにおいて成形物を変形させることなく効果的に加圧成形することができた。今回生産性を向上させるため、この機構を積み重ねた多ページ化した機構の開発を目指して成形試作を行った。成形温度や圧力条件の他、シール部材や金枠の配置や形状を変更して試作を繰り返したが、成形した積層板の品質バラツキ(厚さ・物性のバラツキ)を目標設定値以内に収めることは出来なかった。また、成形の際にシール部材から外側へ成形物の漏出が発生する危険性があり、生産上大きな障害となることが判明した。このシール部材の使用は工程の自動化にも大きな障壁となるため、今回は多ページ成形への適用を見送り、他の方法を検討することとした。

(2)-3 融点付近での低温・低圧成形

平板プレスでの積層板成形において、成形物に高い温度・圧力を加えた場合には前章図 1.1.5 にも示したように、成形物に変形して繊維が大きく湾曲し、積層板の物性低下を引き起こしてしまう。そこで、成形物が大きく変形しない樹脂融点付近の低温成形で材料の UD テープを積層板に一体化できる成形条件を模索し試作検証を行った。

□500 mm サイズでの試作の結果、成形温度 222°C(樹脂融点約 215°C)、成形圧力 0.5MPa の条件で、成形品の変形を抑えて繊維の直線性を維持したまま、厚さ精度をすべてのページで目標値の 1.2 mm ± 0.8 mm を満足した品質で、10 ページの同時成形を行うことに成功した。成形時の温度チャートを図 2.1.4 に、成形直後の積層板の写真を図 2.1.5 に示す。

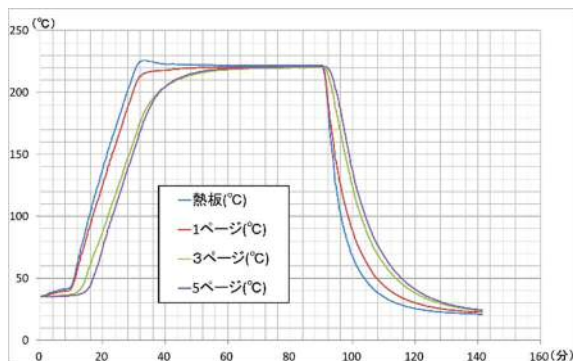


図 2.1.4: 10 ページ成形時の温度チャート

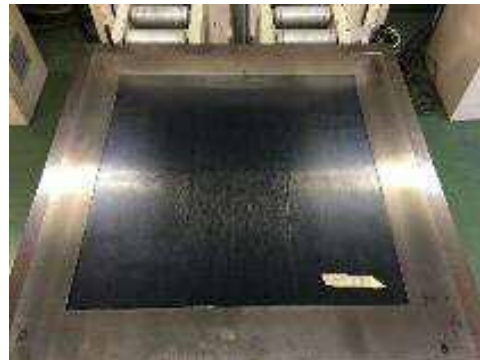


図 2.1.5: 10 ページ成形された□500 mmの積層板
(5 ページ目/10 ページ)

成形された積層板は、表及び層間の樹脂は十分に熔融して、積層板として一体化していることが確認できたが、積層板を切断して断面観察を行った結果、図 2.1.6 に示すように繊維束内部への樹脂の含浸は十分に進んでいないことが確認された。特に、プレス熱板に近い 10 ページ目と比較して中央ページにあたる 6 ページ目では明らかに未含浸の領域が広く、材料のプリプレグの状態からほとんど含浸の進行が無いように見える。断面観察を行った 6, 8, 10 ページと上下対象にあたる 1, 3, 5 ページ目の積層板より試験片を作成して 3 点曲げ試験を行った。結果を図 2.1.7 に示す。



図 2.1.6: 222°C10 ページ成形された積層板の断面写真

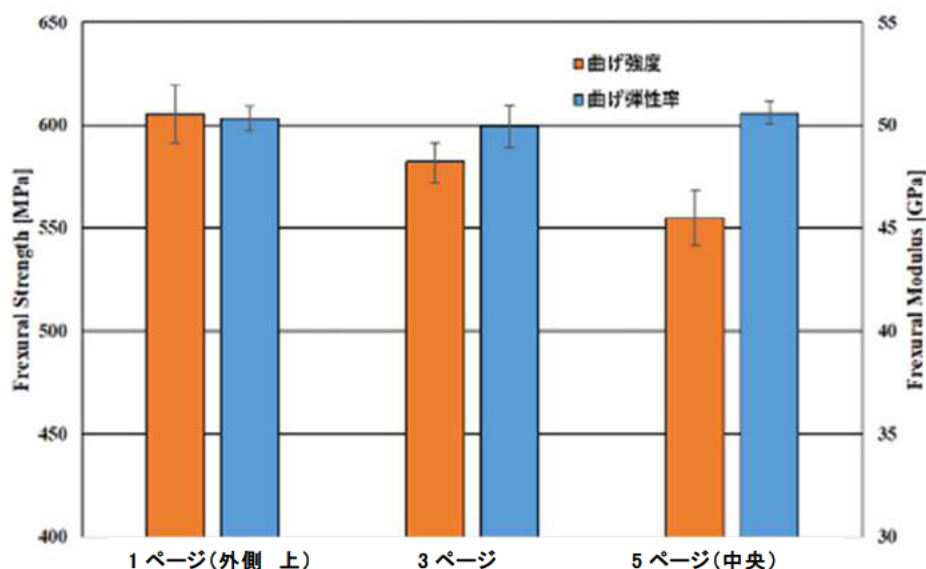


図 2.1.7: 222°C10 ページ成形された積層板の 3 点曲げ強度と弾性率

3 点曲げの弾性率が 1, 3, 5 ページのいずれも約 50GPa で一定であったのに対し、強度は 1 ページ目の約 600 MPa から中央ページの 5 ページ目で約 550 MPa へと低下していることが分かった。この強度低下は前述の図 2.1.6 に示す含浸不足によるものと推測される。3 点曲げ強度の品質目標値は表 1.1.1 にも示したように 400 MPa であったので、これらの数値は目標値をクリアしているものの、断面観察の結果から積層板の品質としては十分な品質とは言えず、融点付近での低温・低圧成形は、今回ように未含浸部分の多い UD テープ材料を使用した積層板の成形条件としては不十分と判断した。

(2)-4 積層板成形条件と物性の関係

<樹脂粘度の温度特性>

UD テープのマトリックス樹脂レクスターの粘度特性をデジタル粘度計 (DV1M: 弘精機株式会社) を用いて 220°C から 280°C の温度範囲で測定した。スピンドルの回転周波数は 1rad/s とした。粘度測定器の概要図を図 2.1.8 に、測定結果を図 2.1.9 に示す。エポキシ等の熱硬化性樹脂(粘度 5~20Pa・s 程度)と比較してレクスターは高粘度材料であるが、温度上昇とともに粘度が大きく低下することを確認した。

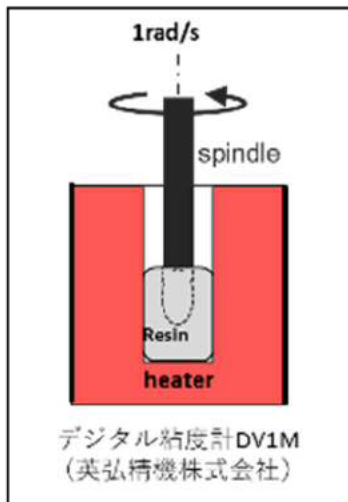


図 2.1.8: 粘度測定器の概要図

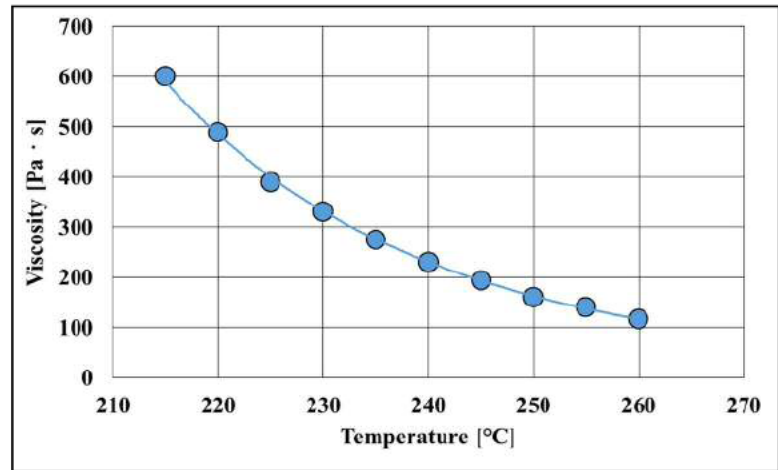


図 2.1.9: LEXTER 樹脂の粘度と温度との関係

< 積層板 3 点曲げ強度と成形温度の関係 >

積層板を 220°C から 280°C までの各成形温度で単ページ成形し、3 点曲げ強度を測定して成形温度との関係を調査した。図 2.1.10 に各成形温度条件および各雰囲気条件で作製した CFRTP 板の変化を示す。成形温度を 220°C の条件とした場合に明らかに強度の低下がみられた。断面観察の結果からも 220°C の場合のみに樹脂の未含浸の繊維束が多数観察された。

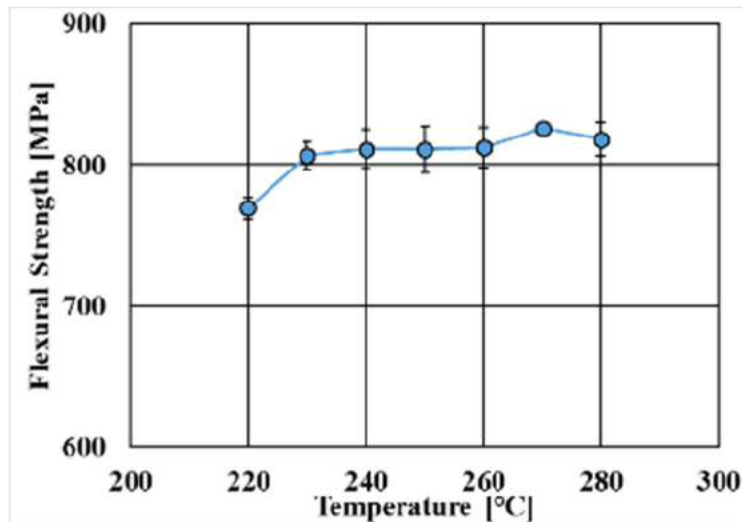


図 2.1.10 : 各成形温度で成形された積層板の 3 点曲げ強度

以上の観察結果から、成形温度が高いほど樹脂粘度が低下して成形時の含浸に有利であり、また 230°C 以上の温度で成形し繊維束内部まで樹脂が含浸できていれば、大きな強度低下は無いことが分かった。

(2)-3 冷却時加圧成形

繊維束内部への樹脂の含浸を促進させるためには、より高温で成形することが有効と判断できたため、繊維の直線性を保ったまま高温で成形が出来る方法を模索して試作検証を行った。その結果成形時に積層板を変形させないように、プレスの加圧力を極力抑えた状態で融点より十分高温まで加熱し、一定時間保持後の積層板を冷却する段階で徐々にプレスを昇圧する成形方法で良好な品質の積層板を得ることに成功した。この冷却時に加圧する成形法で、□1,000mm サイズの積層板を 2 段 10 ページの 20 枚同時成形を行った。成形の様子を図 2.1.11 に示す。積層に使用した □1,000mm の 0° 45° の接合シートは、次章サブテーマ II で開発した図 2.2.10 の装置で製作したものをを用いた。



(a): 1枚 8ply 分の接合シート



(b): 積層されたプレス成形前の接合シート



(c): プレス装置への投入(2段目:下段)



(d): プレス成形後の積層板

図 2.1.11: 口1,000 mmサイズ積層板の2段10ページ成形の様子

同時成形された積層板 20 枚すべてにおいて外観上問題はなく、図 2.1.12 に示すように断面観察の結果も中間ページの 5 ページまで良好な含浸状態であることが確認できた。

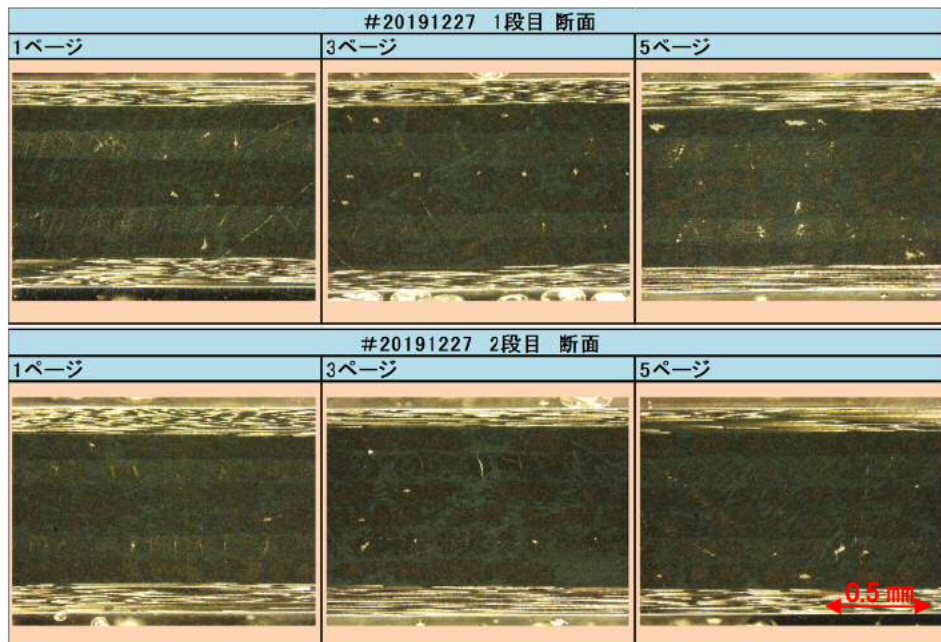


図 2.1.12: 2段10ページ成形された積層板の断面写真

(2)-4 多段多ページ積層板の品質

2段10ページ成形された積層板の各段1、3、5ページ目について、表 1.1.1 に記載した本研究の「積層板の品質目標値」各項目について測定を行った。

●繊維の直線性

積層板表面をコピー機でスキャンしたデジタルデータの色の濃淡から表層の繊維配向を確認し、品質目標値の繊維の偏り長さ10mmあたり1mm:100mmあたり10mmの基準とてらして目視判定を行った。結果すべてのページで基準角度超過は無く、目標値を満たしていることが確認できた。

図 2.1.13 に1段目1ページのスキャンデジタルデータと繊維の偏りの基準ラインを記載した。

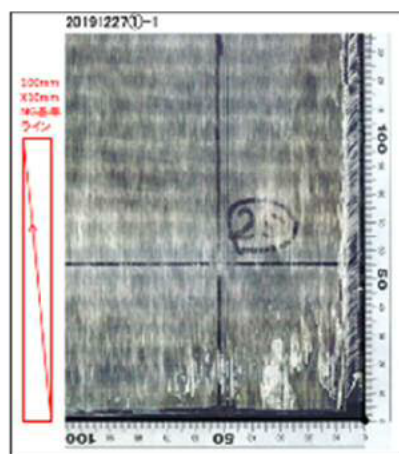


図 2.1.13: 積層板表層画像と基準線

●空隙率

燃焼法および画像解析での空隙率の測定結果を表 2.1.3 に記載した。燃焼法での測定結果は品質目標値(2.0%以下)を大きく上回る結果となった。しかしながら図 2.1.12、図 2.1.14 に示すように積層板断面の観察から合計で2%を超えるような顕著な空隙は確認できず、画像解析の結果ではすべてのページで目標を十分にクリアした値を得ることが出来た。この分析法による測定値の大きな差について、原因は特定できなかったが、断面観察の結果から空隙率が2.0%を下回っていることは確実に判断し、今回は画像解析結果を採用し、燃焼法の結果は参考値とすることとした。

表 2.1.3: 燃焼法及び画像解析での空隙率測定結果

| | 1段目 | | | 2段目 | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 1P | 3P | 5P | 1P | 3P | 5P |
| 【燃焼法】 (%) | 3.6 | 3.0 | 3.7 | 3.1 | 3.2 | 3.0 |
| | 4.3 | 4.1 | 3.4 | 3.2 | 3.2 | 4.0 |
| | 3.3 | 4.3 | 3.8 | 3.6 | 3.2 | 3.9 |
| | 3.3 | 3.3 | 3.9 | 3.1 | 4.1 | 3.9 |
| | 3.4 | 3.9 | 4.3 | 4.2 | 3.5 | 3.3 |
| 平均値 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.4 | 3.4 | 3.6 |
| 【画像解析】 (%) | 0.13 | 0.01 | 0.28 | 0.61 | 0.09 | 0.01 |
| | 0.09 | 0.00 | 0.14 | 0.30 | 0.08 | 0.20 |
| | 0.30 | 0.02 | 0.13 | 0.12 | 0.42 | 0.14 |
| | 0.19 | 0.14 | 0.44 | 0.03 | 0.33 | 0.04 |
| | 0.10 | 0.02 | 0.30 | 0.13 | 0.11 | 0.13 |
| | 0.20 | 0.04 | 0.23 | 0.08 | 0.11 | 0.12 |
| | 0.05 | 0.03 | 0.21 | 0.21 | 0.10 | 0.11 |
| | 0.01 | 0.21 | 0.21 | 0.08 | 0.18 | 0.22 |
| | - | - | 0.28 | - | 0.42 | 0.16 |
| 平均値 | 0.13 | 0.06 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.13 |

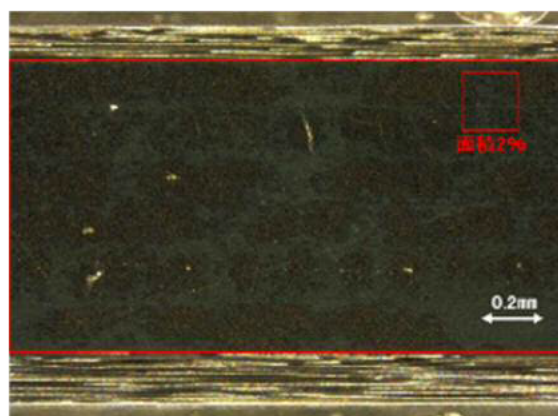


図 2.1.14: 2段3ページ目の断面写真

●厚み精度

積層板の厚みは、図 2.1.15 に示すように□1000 サイズの成形品全面から均等に25点を測定した。表 2.1.4 に測定結果を記載した。すべてのページ、測定点で品質目標の板厚平均1.23mmから±0.1mmの範囲内であることが確認できた。

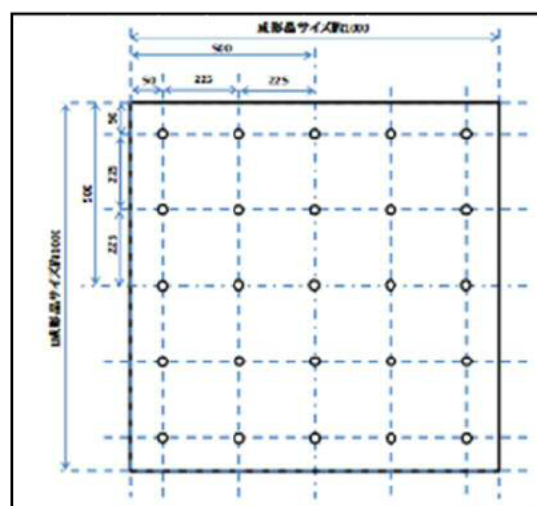


図 2.1.15: □1000 積層板の厚み測定ポイント

表 2.1.4: 積層板の厚み測定結果(左:1 段目, 右 2 段目)

| 20191227①(270℃、2段10P成形1段目) 厚み測定データ | | | | | | 20191227②(270℃、2段10P成形2段目) 厚み測定データ | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------------|
| 1ページ (mm) | | | | | | 1ページ (mm) | | | | | | | |
| 1.260 | 1.246 | 1.245 | 1.244 | 1.264 | 最大 | 1.287 mm | 1.220 | 1.233 | 1.244 | 1.238 | 1.218 | 最大 | 1.236 mm |
| 1.260 | 1.245 | 1.235 | 1.230 | 1.236 | 最小 | 1.215 mm | 1.233 | 1.250 | 1.219 | 1.252 | 1.228 | 最小 | 1.169 mm |
| 1.255 | 1.237 | 1.230 | 1.215 | 1.233 | 偏差 | 72 μ m | 1.237 | 1.256 | 1.242 | 1.254 | 1.237 | 偏差 | 87 μ m |
| 1.287 | 1.261 | 1.233 | 1.256 | 1.244 | 平均 | 1.248 mm | 1.230 | 1.247 | 1.252 | 1.252 | 1.237 | 平均 | 1.233 mm |
| 1.285 | 1.271 | 1.245 | 1.228 | 1.259 | | | 1.169 | 1.223 | 1.232 | 1.218 | 1.194 | | |
| 3ページ (mm) | | | | | | 3ページ (mm) | | | | | | | |
| 1.231 | 1.228 | 1.239 | 1.231 | 1.260 | 最大 | 1.260 mm | 1.214 | 1.212 | 1.203 | 1.237 | 1.236 | 最大 | 1.247 mm |
| 1.220 | 1.201 | 1.235 | 1.211 | 1.236 | 最小 | 1.201 mm | 1.235 | 1.238 | 1.242 | 1.221 | 1.235 | 最小 | 1.197 mm |
| 1.249 | 1.255 | 1.243 | 1.259 | 1.242 | 偏差 | 59 μ m | 1.233 | 1.231 | 1.247 | 1.213 | 1.218 | 偏差 | 50 μ m |
| 1.210 | 1.223 | 1.246 | 1.247 | 1.235 | 平均 | 1.233 mm | 1.244 | 1.241 | 1.205 | 1.208 | 1.230 | 平均 | 1.226 mm |
| 1.211 | 1.213 | 1.224 | 1.237 | 1.242 | | | 1.227 | 1.240 | 1.234 | 1.197 | 1.205 | | |
| 5ページ (mm) | | | | | | 5ページ (mm) | | | | | | | |
| 1.239 | 1.248 | 1.229 | 1.248 | 1.234 | 最大 | 1.258 mm | 1.218 | 1.247 | 1.235 | 1.224 | 1.222 | 最大 | 1.250 mm |
| 1.233 | 1.258 | 1.233 | 1.250 | 1.226 | 最小 | 1.202 mm | 1.202 | 1.220 | 1.224 | 1.213 | 1.217 | 最小 | 1.194 mm |
| 1.238 | 1.247 | 1.239 | 1.251 | 1.248 | 偏差 | 56 μ m | 1.250 | 1.226 | 1.250 | 1.210 | 1.235 | 偏差 | 56 μ m |
| 1.224 | 1.227 | 1.225 | 1.231 | 1.229 | 平均 | 1.235 mm | 1.207 | 1.233 | 1.232 | 1.248 | 1.233 | 平均 | 1.225 mm |
| 1.228 | 1.247 | 1.202 | 1.221 | 1.222 | | | 1.194 | 1.216 | 1.230 | 1.229 | 1.205 | | |
| 合算値 (mm) | | | | | | 合算値 (mm) | | | | | | | |
| 3.73 | 3.72 | 3.71 | 3.72 | 3.76 | 最大 | 3.758 mm | 3.652 | 3.714 | 3.684 | 3.699 | 3.676 | 最大 | 3.739 mm |
| 3.71 | 3.70 | 3.70 | 3.69 | 3.70 | 最小 | 3.671 mm | 3.670 | 3.708 | 3.685 | 3.686 | 3.680 | 最小 | 3.590 mm |
| 3.74 | 3.74 | 3.71 | 3.73 | 3.72 | 偏差 | 87 μ m | 3.720 | 3.713 | 3.739 | 3.677 | 3.690 | 偏差 | 149 μ m |
| 3.72 | 3.71 | 3.70 | 3.73 | 3.71 | 平均 | 3.716 mm | 3.681 | 3.721 | 3.689 | 3.708 | 3.700 | 平均 | 3.684 mm |
| 3.72 | 3.73 | 3.67 | 3.69 | 3.72 | | | 3.590 | 3.679 | 3.696 | 3.644 | 3.604 | | |

●静的 3 点曲げ強度

段多ページ積層板の各段における 1, 3, 5 ページのそれぞれの静的 3 点曲げ強度の違いを図 2. 1. 16 に示す。図より、いずれのページについても約 850 MPa と測定値は目標値である 400MPa を達成していた。前記の融点付近での低温・低圧成形の結果(図 2. 1. 7)での約 600-550 MPa と比べ大幅な強度上昇で、外側から中央ページへの顕著な強度低下も見られなかった。

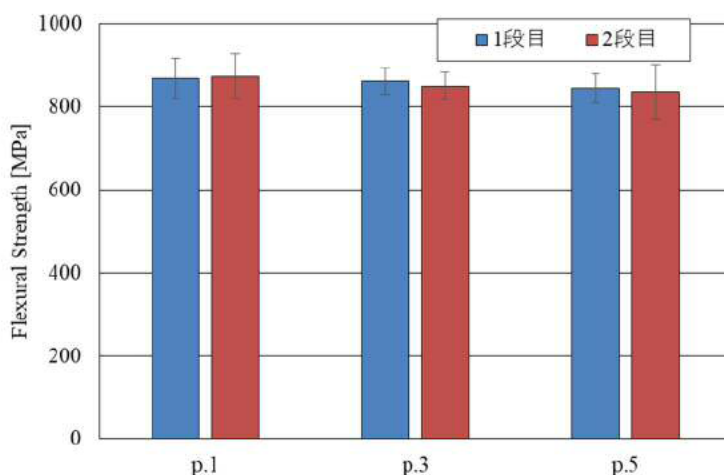


図 2.1.16: 2 段 10 ページ成形された積層板の 1, 3, 5 ページ目の静的 3 点曲げ強度

●静的引張強度

多段多ページ積層板の各段における 1, 3, 5 ページのそれぞれの静的引張強度の違いを図 2. 1. 17 に示す。図より、いずれのページについても実験値は目標値である 350MPa を達成していた。測定値のばらつきの範囲内ではあるが、外側から中央ページへわずかに強度低下が見られる。

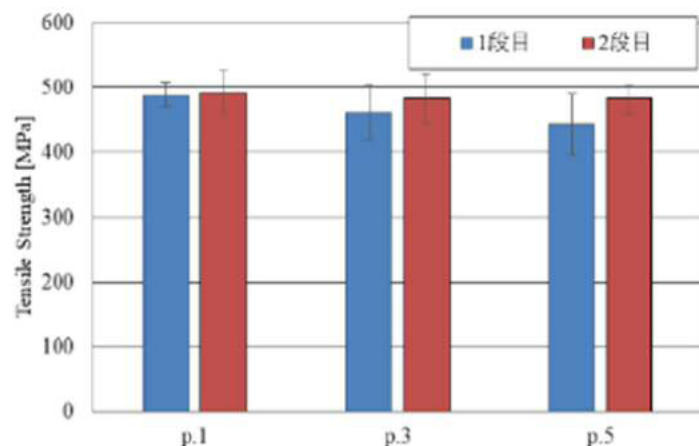


図 2.1.17: 2 段 10 ページ成形された積層板の 1, 3, 5 ページ目の静的引張強度

●3 点曲げ疲労強度

いずれのページについても実験値は目標値である繰返し最大負荷応力レベル 60%(100 万回の繰返し数)を達成した。

●2 段 10 ページ試作評価値まとめ

2 段 10 ページ成形品の各段 1,3,5 ページ目について、品質測定結果を行った結果を品質目標値と併せて表 2.1.5 にまとめて記載した。結果、すべての項目について目標値を満たしており、「多段・多ページの成形」を確立することが出来たと考える。

表 2.1.5 : 2 段 10 ページ成形した積層板の品質評価結果まとめ

| | 目標値 | 1段目 | | | 2段目 | | |
|--------|---|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 1ページ(P) | 3P | 5P | 1P | 3P | 5P |
| 繊維の直線性 | 繊維長手方向において、繊維の歪りδが長さ10mm当たり±1.0mm以下 | ○ 基準超過 ナシ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 空隙率 | 成形品体積当たり、2.0%以下 (画像計測) | ○ <0.5 | ○ <0.5 | ○ <0.5 | ○ <0.5 | ○ <0.5 | ○ <0.5 |
| 厚み精度 | アルミニウム板厚 JIS H 4000 冷間圧延材規格と同等以上 (幅1,000mm,t=1.2mmの場合: ±0.10mm) | ○ AVE. 1.25 MAX△0.04 | ○ 1.23 0.03 | ○ 1.24 0.03 | ○ 1.23 0.06 | ○ 1.23 0.03 | ○ 1.22 0.03 |
| 物性値 | 厚さ1.2mm擬似等方性積層板 (0±45/90°) s, (VF=45%) | | | | | | |
| | ・引張り強度 350MPa以上 | ○ AVE. 489 | ○ 461 | ○ 444 | ○ 493 | ○ 483 | ○ 482 |
| | ・曲げ強度 400MPa以上 | ○ AVE. 868 | ○ 862 | ○ 844 | ○ 873 | ○ 850 | ○ 836 |
| | ・曲げ疲労強度 静的強度の60%以上 (応力比0.1, 100万回の繰り返し数) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

(2)-5 多段多ページ成形条件

前述のように 10 ページまでの試作において、中間ページまで品質目標値を満たす成形ができることが確認できた。生産性の観点からは、この同時成形のページ数が多い方が効率がよいが、中間ページは図 2.1.4 に示したように熱板に近い外側ページに比べ昇温が遅れてしまう。この熱履歴の差が含ま浸などの積層板の品質の差となってくるが、高温保持時間を延ばすことである程度解消できる。成形品質をどこまで許容するかでこのページ数と保持時間の最も効率的な組み合わせは変わってくる。含ま浸は使用する材料の初期状態や成形品の積層数、厚さにも大きく影響される。そのため一概に最適な組み合わせを決定することは出来ないが、今回試作に必要な材料コストや研究時間の制約から限られた試行での検証ではあるが、本研究で使用した材料、厚さ 1.2 mm の積層板では、この 10 ページで 60 分保持が適していると判断した。図 2.1.4 に示したように加熱と冷却に各約 30 分を要し、この時間を合わせると約 120 分の成形時間となる。

(3)小括

1x1m サイズの積層板を 2 段・10 ページの多段多ページで成形試作を行い、測定したすべてのページで品質目標値を満たしていることが確認できた。今回の 10 ページ成形で 120 分の成形時間の場合、生産能力の目標値 1m²以上/min.を達成するためには 120 分で 120 枚を成形する 12 段分のプレスが必要となるが、12 段プレス 1 台もしくは 6 段プレス 2 台であっても大型の多段プレスでの量産ラインとしては現実的な仕様であり、目標値の 1m²以上/min.を満たす積層板の成形条件の確立は達成できたと考える。

2-2 サブテーマⅡ：マルチ積層装置の開発

(1)はじめに

量産に対応できる生産性と、自由な積層構成を両立できるマルチ積層技術を開発し装置化した。図 2.2.1 に示すように、UD テープを任意角度で引き出し平行に並べていく機構と、テープ側端部の樹脂を溶かすことで並べられたテープ間を接合していく機構、さらにこの接合され幅広化したプリプレグを、目的の積層板のサイズにカットする機構を有し CFRTP-UD プリプレグの任意角配向シートを作製する任意配向接合装置と、この任意角配向シートを指定の構成で積層できる積層装置を開発することで、自由な積層構成を実現する。

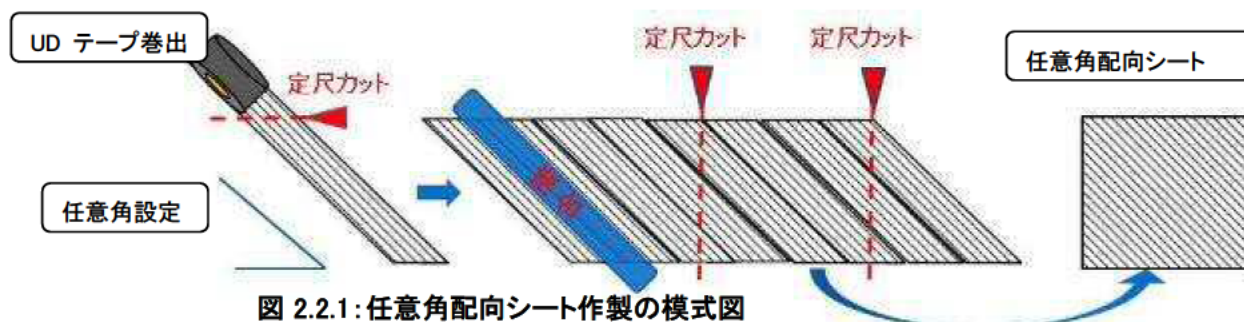


図 2.2.1: 任意角配向シート作製の模式図

(2)方法、結果及び考察

(2)-1 接合技術の確立と装置化

UD テープの側端部を平行に接合する際に、図 2.2.2 上段のように接合するテープを重ね合わせた状態で樹脂を溶融させて接合すれば、容易に高い接合強度を得ることができる。しかし、この重なり部分が、その後に積層成形した積層板の厚みムラや平坦度(表面の凹凸)に影響を及ぼすことを確認している。そのため接合部は重ね合わせることができず、単に突き合わせただけの状態で接合しなければならない。樹脂を溶かして溶着する接合方法には、超音波やレーザーを利用した方式もあるが、今回は図 2.2.3 のように単に突き合わせただけの状態でも確実に接合するために、ある程度の平面を持った加熱治具で加熱・圧着する熱溶着方法が良いと判断した。そこで初めに溶着方法の確立と装置への適用のために、検証用の試験装置を製作し、溶着の検証実験を行って加熱治具の形状、加熱・加圧条件、機械的機構等の決定を行った。

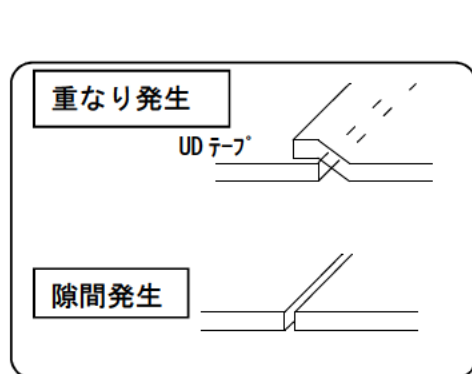


図 2.2.2: 接合部位置合わせ不具合の例

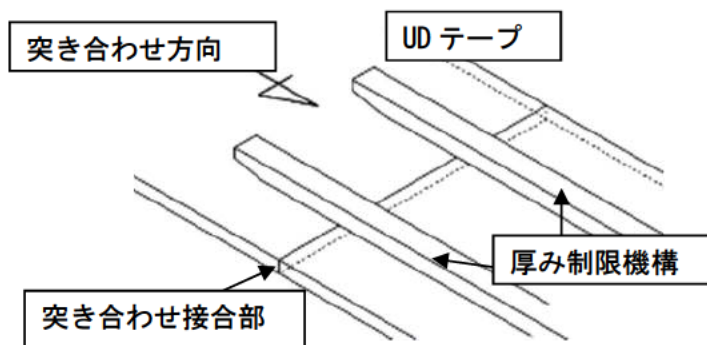


図 2.2.3 接合部位置合わせ方式の模式図

A) 超音波ウェルダによる接合試験

2本の UD テープの側端面を突き合わせた部分に超音波ウェルダを押し当て、接合の可否について接合部への超音波ウェルダの押し当て荷重と溶着時間の関係を調べた。試験の様子を図 2.2.4 に結果を表 2.2.1 に示した。押し当て荷重が 5kg 以上で接合が良くなっていく傾向にあったが、発振時間を短くしないと樹脂が溶けすぎ、繊維の乱れと強い溶着痕が残り良好な接着とは言えなかった。また、わずかでも 2本のテープ間に隙間があると接合が出来ないことがわかった。一方で樹脂溶融までの時間が非常に短く、溶着を短時間で実施出来ることが分かった。接合面の形状については、ウェルダ先端形状が格子目になっていると、超音波の伝わりが良く短時間で溶着できるが、溶着部分に繊維の乱れが発生した。先端形状がフラットの場合、溶着した部分の繊維の乱れはほぼ無いが、面をきれいに当てないと超音波がうまく伝わらず、位置ズレや未溶着が頻発することが分かった。



図 2.2.4: 超音波ウェルダ－による溶着試験の様子

表 2.2.1: 荷重と溶着時間の関係

| | | 荷重kg | | | |
|-----------|-----|------|-----|----|----|
| | | 1.3 | 2.5 | 5 | 7 |
| 時間 sec | 0.8 | NG | NG | △ | △ |
| | 1 | NG | NG | NG | △ |
| | 1.5 | NG | NG | NG | NG |

細幅の UD テープから大型のシート化を行うためには、例えば□1,000 mmで 45 度配向の場合、最長 1,414 mmの長さを接合する必要がある。ウェルダ－によるスポットでの溶着とすると溶着点数を多くする必要があり現実的ではなく、コストが大幅に増えてしまう。ウェルダ－を移動させ、接合部を連続的に溶着する方法としても、接合部全幅を溶着するには時間を要することが予測される。よって、超音波による接合は、スポットでは短時間での溶着が可能であるが長尺部分の接合には不向きと判断した。

B) 加熱バー方式(加熱治具での加熱圧着)による接合試験

短時間で長尺部分を接合するために、加熱バーによる圧着接合方法の可否を図 2.2.5 に示すような簡易試験で確認・検証した。短冊状の UD テープの端面を付き合わせ、接合部分を加熱バーの下に配置し固定、所定の温度に加熱された加熱バーを押し付けることで接合部分(UD テープ端部)の樹脂を溶融させ溶着を行った。

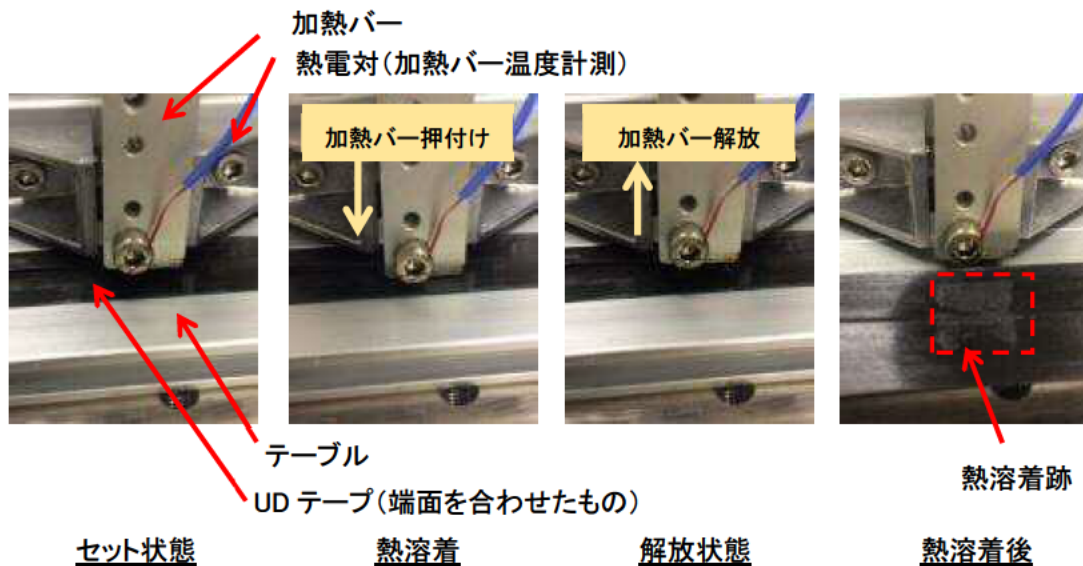


図 2.2.5: 加熱バー方式による溶着試験の様子

接合条件として、溶着温度(加熱バー設定温度)、溶着時間、加圧荷重の関係を調べ、その結果を表 2.2.2 にまとめた。接合条件は、マトリックス樹脂のポリアミド(PA6)の融点約 225°Cに対して、溶着温度 250°C、260°C、270°C、280°C、溶着時間を 1~5sec、面圧 1kg/cm²、2kg/cm²と設定した。

溶着温度 250°C、面圧 1kg/cm² の条件では、PA6 の融点より十分に高い温度にもかかわらず、UD テープ表面に樹脂の溶融痕が確認できたのみで接合には至らなかった。溶着温度 260°C以上、面圧 2kg/cm² の条件であれば、溶着時間 2~3sec で溶着が可能であった。図 2.2.6 に示すように加熱バーを押し当てた部分で UD テープ表面の樹脂が四角く溶融し、隣り合う UD テープ端部の接合をしている。超音波ウェルダ－での接合に比べ、溶着に要する時間はかかるものの、溶融部分の繊維の乱れは少ない。また、溶着状態は加熱バーを押し当てた側のみで、裏面までは溶融していなかった。

表 2.2.2:加熱バー方式による溶着試験結果

| 250°C | 荷重 | |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| | 面圧 1 kg/cm ² | 面圧 2 kg/cm ² |
| 1sec | × | △ |
| 2sec | × | ○ |
| 3sec | △ | ○ |
| 4sec | △ | ○ |
| 5sec | △ | ○ |

| 260°C | 荷重 | |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| | 面圧 1 kg/cm ² | 面圧 2 kg/cm ² |
| 1sec | △ | △ |
| 2sec | △ | ○ |
| 3sec | ○ | ○ |
| 4sec | ○ | ○ |
| 5sec | ○ | ○ |

| 270°C | 荷重 | |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| | 面圧 1 kg/cm ² | 面圧 2 kg/cm ² |
| 1sec | ○ | ○ |
| 2sec | ○ | ○ |
| 3sec | ○ | ○ |
| 4sec | ○ | ○ |
| 5sec | ○ | ○ |

| 280°C | 荷重 | |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| | 面圧 1 kg/cm ² | 面圧 2 kg/cm ² |
| 1sec | ○ | ○ |
| 2sec | ○ | ○ |
| 3sec | ○ | ○ |
| 4sec | ○ | ○ |
| 5sec | ○ | ○ |



図 2.2.6:加熱バー方式による UD テープ溶着の様子

また、図 2.2.7 に示すように、加熱バーを接合する UD テープに押し当て後、繊維方向にスライドさせることで、繊維の直線性を乱すことなく接合部の樹脂を流動させ、より接合強度の向上が図れることがわかったため、溶着温度 260°C、270°C、280°C、溶着時間(スライド時間含む)3sec、面圧 1kg/cm²、2kg/cm²、の条件で検証試験を行った。溶着された UD テープ状態を図 2.2.8 に、試験結果を表 2.2.3 にまとめた。260°C、面圧 1kg/cm² では、溶着状態に不安があるが、単純に押し当てた場合と比べて、明らかに溶着の確度は向上がみられた。

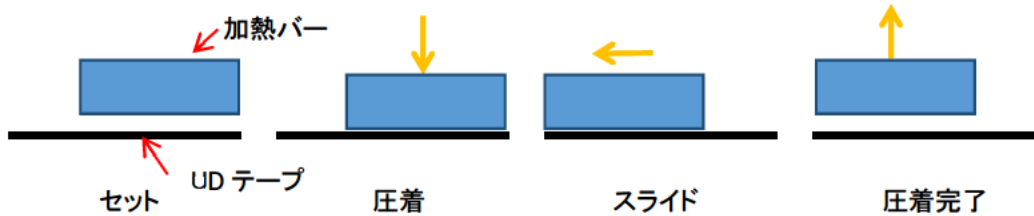


図 2.2.7:加熱バースライド方式の模式図

スライドした溶着部 圧着時の溶着部分



図 2.2.8:加熱バースライド方式の溶着状態

表 2.2.3:加熱バースライド方式の溶着試験結果

| | 加圧荷重 | |
|-------|------------------------|------------------------|
| | 面圧 1kg/cm ² | 面圧 2kg/cm ² |
| 280°C | ○ | ○ |
| 270°C | ○ | ○ |
| 260°C | △ | ○ |

以上の結果より、UD グテープ端面の接合方法について、加熱治具で加熱・圧着する熱溶着の方が超音波ウェルダでの溶着より確実で、さらにスライド機構を持たせること溶着の確実性がより向上することが判明した。これをマルチ積層装置の接合機構として採用することに決定した。

(2)-2 任意配向接合装置

確立した接合機構を取り入れ、図 2.2.9 に示すような構想で任意配向接合部を開発した。完成した装置の写真を図 2.2.10 に示す。

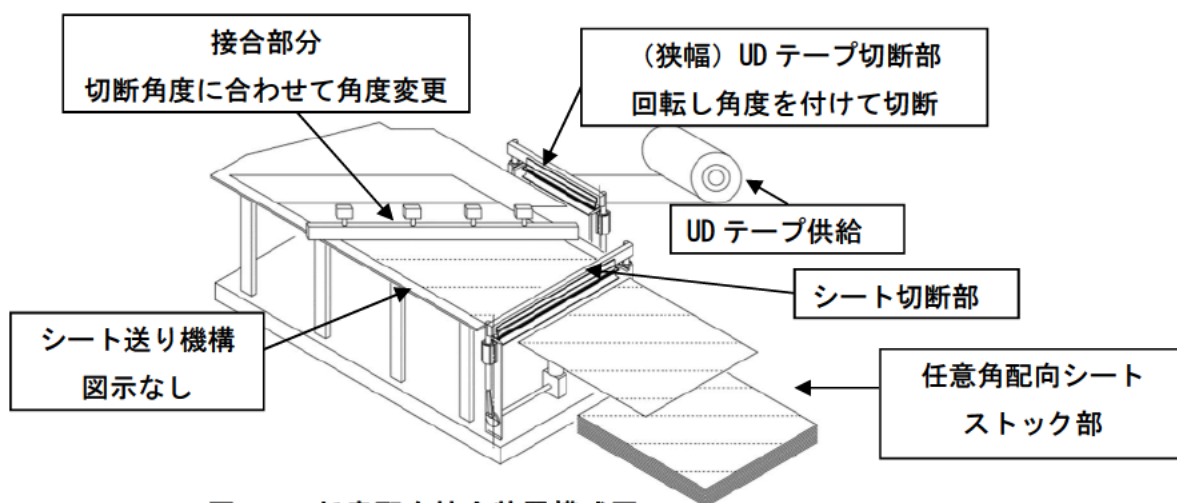


図 2.2.9: 任意配向接合装置模式図



図 2.2.10: 任意配向接合装置(左: UD テープ供給・切断部, 中: 接合部分及び接合シート, 右: シート切断部)

<任意配向接合装置の生産能力>

幅 165mm の UD テープから□1000 サイズの 45° シートと 0° シートを連続生産した場合のタクト時間を確認した。表 2.2.4 にその結果を示した。50 シート製作際の 1 シートあたりの平均値は、45° シートで 50sec、0° シートで 71sec となった。

表 2.2.4 : シワ発生状態

| Number | Time | Number | Time | 条件 Size: □1000mm Angle: 45° PP Wide: 165mm 平均 50sec/Sheet | Number | Time | Number | Time | 条件 Size: □1000mm Angle: 0° PP Wide: 165mm 平均 71sec/Sheet |
|--------|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--------|--|
| | | | | | | | | | |
| 1 | 46 sec | 26 | 56 sec | [45° Sheet Diagram] | 1 | 70 sec | 26 | 70 sec | [0° Sheet Diagram] |
| 2 | 56 sec | 27 | 46 sec | | 2 | 70 sec | 27 | 70 sec | |
| 3 | 46 sec | 28 | 46 sec | | 3 | 70 sec | 28 | 70 sec | |
| 4 | 46 sec | 29 | 56 sec | | 4 | 70 sec | 29 | 78 sec | |
| 5 | 46 sec | 30 | 46 sec | | 5 | 70 sec | 30 | 70 sec | |
| 6 | 56 sec | 31 | 56 sec | | 6 | 71 sec | 31 | 70 sec | |
| 7 | 46 sec | 32 | 46 sec | | 7 | 70 sec | 32 | 71 sec | |
| 8 | 46 sec | 33 | 46 sec | | 8 | 71 sec | 33 | 70 sec | |
| 9 | 56 sec | 34 | 46 sec | | 9 | 70 sec | 34 | 70 sec | |
| 10 | 46 sec | 35 | 56 sec | | 10 | 71 sec | 35 | 70 sec | |
| 11 | 46 sec | 36 | 46 sec | | 11 | 70 sec | 36 | 71 sec | |
| 12 | 56 sec | 37 | 46 sec | | 12 | 70 sec | 37 | 70 sec | |
| 13 | 46 sec | 38 | 56 sec | | 13 | 80 sec | 38 | 71 sec | |
| 14 | 46 sec | 39 | 46 sec | | 14 | 70 sec | 39 | 70 sec | |
| 15 | 46 sec | 40 | 46 sec | | 15 | 71 sec | 40 | 71 sec | |
| 16 | 56 sec | 41 | 46 sec | | 16 | 70 sec | 41 | 70 sec | |
| 17 | 46 sec | 42 | 56 sec | | 17 | 70 sec | 42 | 71 sec | |
| 18 | 46 sec | 43 | 46 sec | | 18 | 70 sec | 43 | 70 sec | |
| 19 | 56 sec | 44 | 46 sec | | 19 | 71 sec | 44 | 71 sec | |
| 20 | 46 sec | 45 | 56 sec | | 20 | 71 sec | 45 | 70 sec | |
| 21 | 46 sec | 46 | 46 sec | | 21 | 70 sec | 46 | 71 sec | |
| 22 | 56 sec | 47 | 46 sec | | 22 | 71 sec | 47 | 70 sec | |
| 23 | 46 sec | 48 | 56 sec | | 23 | 71 sec | 48 | 71 sec | |
| 24 | 46 sec | 49 | 46 sec | | 24 | 70 sec | 49 | 80 sec | |
| 25 | 46 sec | 50 | 46 sec | | 25 | 70 sec | 50 | 71 sec | |
| Ave. | | | | 49 sec | Ave. | | | | 70.9 sec |

□1000 の擬似等方 8PLY シート 1 枚を目標値の 1 分間で生産するためには、1 分間に 0° シート 4 枚と 45° シート 4 枚を生産する必要がある。0° 用と 45° 用とに接合装置をそれぞれ用意する場合は、1 シート当たり 15 秒となる。上記検証結果から 45° シートは平均 50 秒かかっており、15 秒で生産するには $50/15=3.33\cdots$ で 4 台の接合装置が必要となる。0° シートは平均 71 秒かかっていることから、 $71/15=4.73\cdots$ で 5 台必要となる。

上記例は材料幅 165mm 時での検証結果からであり、材料幅 300mm の UD テープを使用した場合には、45° の□1,000mm 分の接合には、 $1,000/(300 \times \sqrt{2})=2.35$ 回の接合となる。1 回の接合に 12sec 弱必要なので約 28sec/sheet となり 4 枚の処理に 112sec が必要となり接合装置は 2 台となる。図 2.2.11 にその場合の接合状態を模式的に示した。

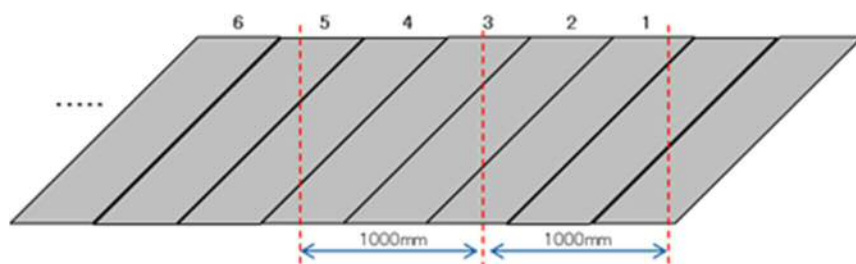


図 2.2.11 : 300 mm UD テープから□1000 の 45° シートを接合する場合の模式図

0° シートの接合については、図 2.2.12 のような 0° 専用の連続接合装置を構想しているが、その開発は本事業には含まれていない。処理能力は 4,000mm/分以上を想定しており、その場合毎分 4 シートの製造はこの装置 1 台で足りる事となる。ただし供給される材料幅の倍数幅となるため、細かなサイズ変更対応には不向きである。

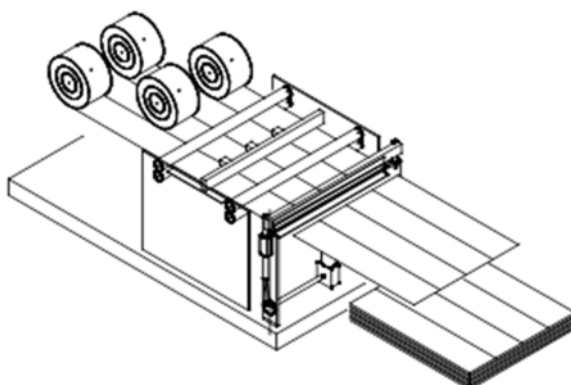


図 2.2.12 : UD テープ 0° 連続接合装置

(2)-3 積層装置部

積層装置部の設計に当たり、積層後の移載時に位置ズレの危険性があるため、任意配向シート積層時に仮止めを行う方法として、短時間での溶着が可能な超音波ウェルダが有効と考え、溶着試験を実施した。

超音波ウェルダは、比較検討のため精電舎製と AVIO 製のメーカーデモ機を使用した。発振周波: 39.50kHz, 先端形状: $\phi 8$ mm 格子目ありの材料はレクスターのほか TENCATE 社 TC910 も対象とした。

表 2.2.5 に、超音波の発振時間と積層枚数変更して試験した結果をまとめた。

0.3sec 以上の発振時間で 8 層を一括で仮止めでき、接着強度も問題ないことが分かった。

表 2.2.5: 超音波ウェルダによる任意配向シート仮止め試験結果

| | | 積層枚数(枚) | | | | | | |
|-------------|-----|---------|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 時間 (sec) | 0.2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ |
| | 0.3 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 0.4 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 0.6 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

次に、仮止め溶着痕が積層板の表面品質に影響があるか検証を行った。積層板は8層で0.2、0.3、0.4、0.6secでそれぞれ数点仮止めを行い、多ページ成形条件にて成形を行った。図 2.2.13 に示すように、仮止め状態で明確に確認できていた溶着痕も積層板成形後には、ほぼ消えることがわかった。0.4、0.6secでの仮止め部分はわずかに痕が判別できるが成形板としては問題ないレベルと判断した。

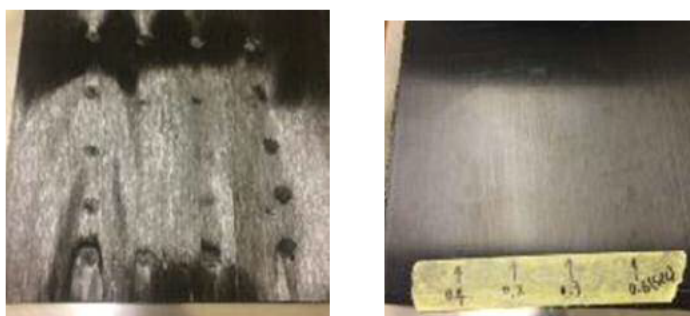


図 2.2.13: 溶着痕の積層板表層への影響(左:溶着後, 右:積層板成形後)

上記の積層シート仮止めの機構を含めた、積層機の設計と製作を行った。図 2.2.14 に積層装置部の構想図を、図 2.2.15 に完成した装置の写真を示す。装置構想設計は、積層板成形後の解体(製品の取り出し)、トレイ板の回流までを含めて行ったが、今回の研究開発での装置製作は図中の着色部分のプレス投入前の仕組み部分までとした。

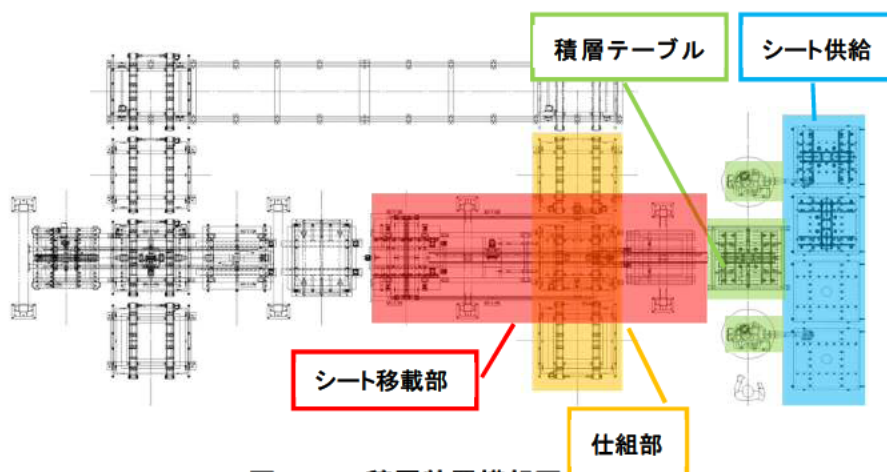


図 2.2.14: 積層装置構想図



図 2.2.15: 積層装置写真(左:シート移載部側, 右:シート供給部側)

<積層装置の生産能力>

□1000 サイズ 0° 及び 45° の接合シートを用いて、本研究の基準である疑似等方 8 層を 10 ページ分積層し、仕組み完了までのタクトタイムを計測した。接合シートの供給方法を変更した 2 種類の可動方法で速度検証を行った。

・積層パターン [0/-45/90/45/45/90/-45/0] ・ロボット稼働率 85%

各テストの条件と、各ページ毎のタクトタイムと仕組み完了タイムを下記に示す。

- テスト1: 45°、90° のシートを供給する 2 つの供給テーブルのみを使用
0° と 90°、45° と -45° は共用 (図 2.2.16 参照)
供給テーブル B:45° C:90°

1 ページ目 ⇒ 78sec
 2 ページ目 ⇒ 133sec
 3 ページ目 ⇒ 189sec
 4 ページ目 ⇒ 243sec
 5 ページ目 ⇒ 299sec
 6 ページ目 ⇒ 355sec
 7 ページ目 ⇒ 408sec
 8 ページ目 ⇒ 463sec
 9 ページ目 ⇒ 518sec
 10 ページ目 ⇒ 574sec
 完了 ⇒ 585sec
ページ平均 = 58.5sec

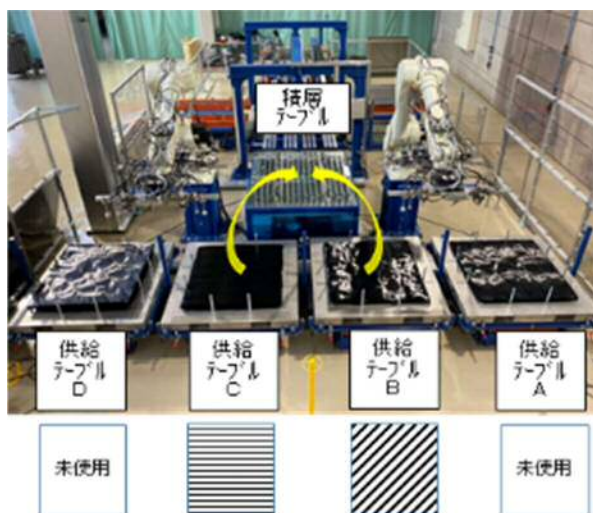


図 2.2.16 : 2 テーブル使用の場合

- テスト2: 4 つの供給テーブルを使用し、それぞれ 0°、45°、90°、-45° のシートを供給 (図 2.2.17 参照)
供給テーブル A:0° B:45° C:90° D:-45°

1 ページ目 ⇒ 73sec
 2 ページ目 ⇒ 123sec
 3 ページ目 ⇒ 173sec
 4 ページ目 ⇒ 224sec
 5 ページ目 ⇒ 274sec
 6 ページ目 ⇒ 324sec
 7 ページ目 ⇒ 374sec
 8 ページ目 ⇒ 424sec
 9 ページ目 ⇒ 474sec
 10 ページ目 ⇒ 524sec
 完了 ⇒ 535sec
ページ平均 = 53.5sec

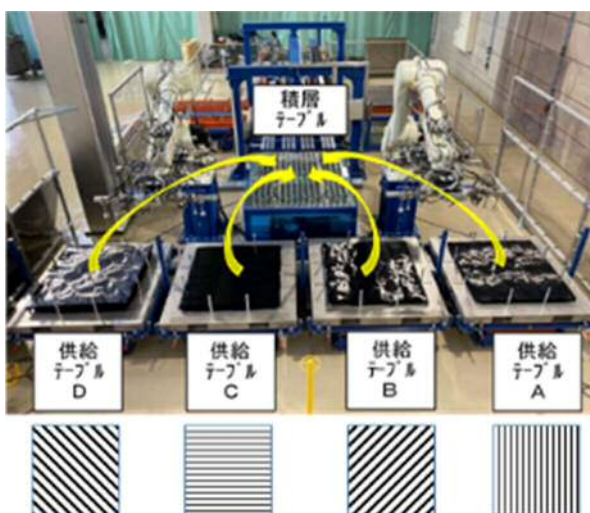


図 2.2.17 : 4 テーブル使用の場合

最小の供給ステージ使用の場合(2 ステージ使用)、ロボットの稼働ロスを少なくする供給側の最適配置(4 ステージ使用)においても同一プログラムで疑似等方構成の積層が出来ることおよび、いずれの場合でも生産能力の目標値:接合後の幅広シート(1×1m サイズ)の積層速度 8 枚以上/min をクリアできていることが確認できた。

(2)-4 UDテープの品質が接合シートの品質へ与える影響について

UDテープの接合においては、接合部分に厚み差がなく、直線で隙間なく接していることが理想である。(図 2.2.18) しかしながら実際には本研究で使用したレクスターテープに限らず、市販の UD テープ材料には、幅方向の厚み差や側端部の蛇行・テープ幅の変動(図 2.2.19) が存在し、この変動がある一定以上となった場合には、接合不良を頻発させることとなった。

また、UDテープはカットした際にある程度の反りがあり、(図 2.2.20 左) これを接合してシート化した場合にシートのシワとなって、積み重ねてストックする場合に嵩張りや裂けの原因となったり、次工程の搬送や積層で位置ずれを引き起こしたりした。さらに UD テープには延伸方向の湾曲(図 2.2.20 右) している場合もあり、これによって接合位置が安定せず接合不良の原因となった。

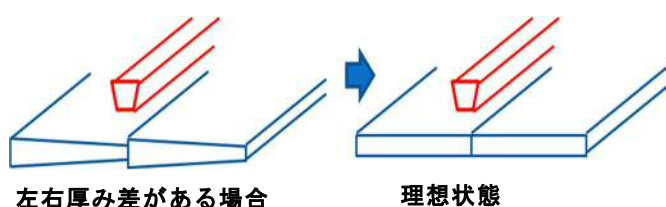


図 2.2.18 : テープ接合時の厚み差の影響

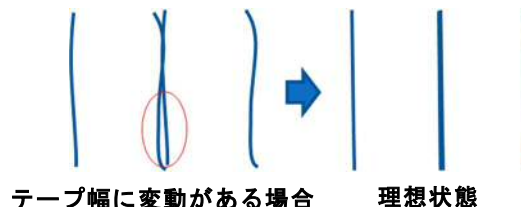


図 2.2.19 : テープ接合時の幅変動の影響

現状では接合の確実性は、UDテープの品質に大きく影響されてしまう。上記のテープの厚さ、幅、反り、湾曲の他、UDテープには裂けや樹脂未含浸部が頻発する製品やロットも存在した。安定した品質の材料を使用した場合には、安定して接合シートを製作できるが、このような材料を使用した場合は、接合不良が多発してしまう場合があった。

現在ほとんどの材料メーカーの UD テープは、開発品や少量生産品で、量産用の購買品に適用されるような厳密な納入仕様は規定されていない。今後 CFRTP の需要拡大、生産量の増加に伴って UD テープの品質向上や仕様の明確化がなされてくるとは思うが、ある程度の変動は必ず発生すること予期される。

今後装置の実用販売に向けての開発課題として、使用材料の許容幅を広げる工夫改良が必要となる。

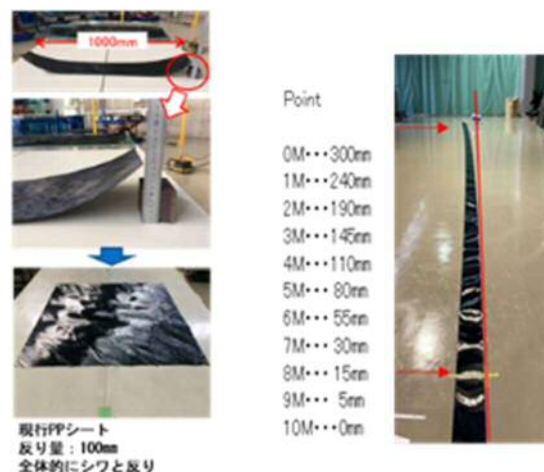


図 2.2.20 : UDテープの反り・湾曲の状況

(3)小括

本節サブテーマⅡでは、量産に対応できる生産性と、自由な積層構成を両立したマルチ積層の装置の開発を行った。目標とした生産速度の検証をおこない、積層装置部は目標通りの十分な生産能力があることが実証できたが、任意配向接合装置部においては、目標としていた生産能力を達成するためには複数台が必要となることが分かった。今回開発したマルチ積層装置の任意配向接合装置部では自由な角度に対応できる反面、同一面積のシート接合には 0° 方向は 45° 方向に比べ 1.4 倍の時間が必要となる。生産量が必要な場合には、0° 方向のシートは他の角度のシート製造装置とは共有せず 0° のみを接合する別装置で対応する方が賢明と考えられる。また供給される材料幅によっても生産性が大きく変化することが改めて明らかとなった。

また接合の確実性も UD テープの品質に大きく左右されることが明らかとなったが、材料品質が安定していれば安定して接合シートを製作できることが実証できた。今後の実用化に向けては装置の使用材料に対する許容幅を広げる工夫改良のほか材料メーカーの協力も不可欠となる。今後は新たな仕様の材料でのトライも含め、デモ稼働を通してのユーザー要求の収集を行って、装置の改良実用化を進めて、受注・販売へとつなげていきたい。

2-3 サブテーマⅢ：積層板に適したプレス成形技術の開発

(1)はじめに

積層板のプレス成形において、一方向材は平織などの織物に比べ成形の際に繊維の乱れ（繊維の直線性が維持されない“しわ”や湾曲・開きなど）が発生しやすく、それらが積層板の機械的特性の低下を招いている。

図 2.3.1 に示すように広島県立総合技術研究所では数値解析（CAE 解析）技術を用いて二次元形状の積層板から三次元形状へ賦形する際の繊維の動きを事前に予測し、成形上欠陥となりうる繊維の乱れが起こる場所をある程度特定する成形解析と、この結果をもとに欠陥を抑制する積層板の積層構成や形状、金型方案やプレス条件等を導き出す最適化設計に取り組んでいる。物性値に仮定を含んでいるなどの課題があるが、これまでに実施した CFRTP 自動車用部品（トランスバースメンバー）の試作開発等の研究では成果をあげてきた。

また、ブランクホルダー（積層板を把持する機構）を成形金型に設置し、金型クリアランス設計や金型の一部を可動させることによって積層板に張力を与える積層板引張機構を開発した（図 2.3.2）。これにより金型内への積層板の流入抵抗を変化させ、繊維の乱れが起こる場所や程度を制御することを可能とする積層板に適した成形金型を開発した（特許 5967644）。

しかしながら、本技術は A4 サイズで厚み 1 mm 程度の積層板までしか適用実績がなく、本研究開発で用いる 1x1 m サイズの積層板に適用した場合、熔融時の自重たわみによる積層板の流入抵抗や移動量の変化が発生し、成形性に大きく影響することが想定される。

そのため、大型サイズにおける課題として、積層板の自重たわみを考慮した CAE 解析技術の開発及び、1x1m の積層板を成形可能とする成形技術の開発を行う。

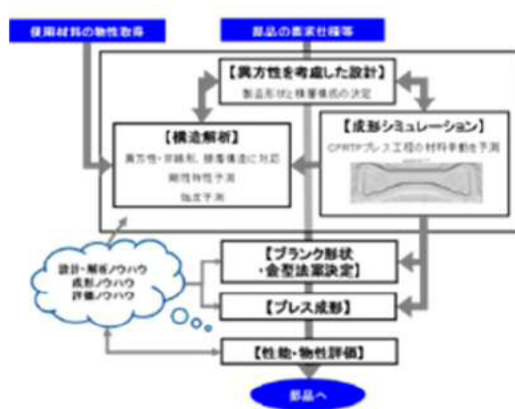


図 2.3.1：CAE 解析を用いた設計

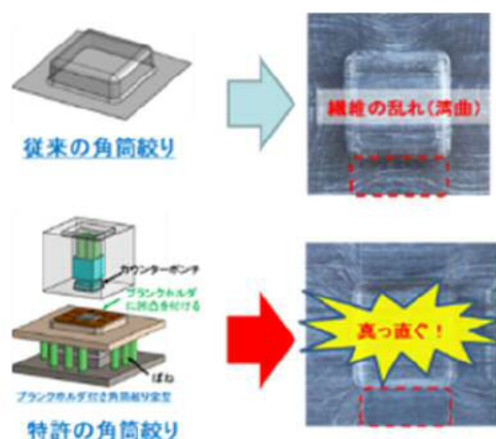


図 2.3.2：積層板引張機構を有する金型

まずは 150×150mm 程度の金型を用いた小型成形品について構造解析を行い、解析結果と小型成形品の剛性値等を比較する。必要に応じて各パラメータの再検討を行い精度の高い CAE 解析技術を確立する。

続いて小型金型及びその成形品で確立した CAE 解析技術を 1x1m サイズの大型積層板に適用し、積層板の把持機構や引張機構を含めた大型積層板に適した成形技術の確立すること、さらに大型成形品から剛性値等の取得と構造解析結果との比較を行い、目標値を達成するべく、CAE 解析の妥当性について検証をおこなって精度の高い CAE 解析技術確立を目指した。

(2)方法、結果及び考察

(2)-1 小型金型を用いた成形品についての検討

大型成形品では、図 2.3.3 に示すドアサイドインパクトプロテクションビーム（以下「インパクトバー」という。）を作成することとした。図 2.3.4 に示すように、ほぼ周長のそろった2つのハット形状を有する形状とした。その際のハット高さは 20mm とした。

ブランクの積層構成は成形品長手方向を 0° とした場合に
 I : $0^\circ / 90^\circ$ の2種類で14Plyになるように構成した(0/90)
 II : $45^\circ / -45^\circ$ の2種類で14Plyになるように構成した(45/-45)
 III : $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ$ の4種類で14Plyになるように構成した(疑似等方)
 上記3種類とした。



図 2.3.3: インパクトビーム

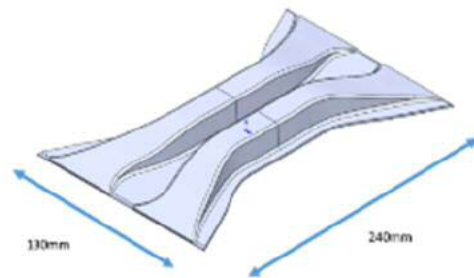


図 2.3.4: 小型金型成形品形状

(2)-2 小型金型成形品の解析

構造解析には MSC 社の Marc を用いた。その際に使用した解析用物性値直交異方性パラメータには、サブテーマ I で検討された単段多ページで作成された積層板より試験片を作成して、引張試験を行ってデータ取得したものをを用いた。

また、拘束条件は図 2.3.5 に示す。支点間距離 145mm で 0.5mm の強制変位を与えた際の反力とその変位での主軸方向のひずみ分布を評価した。図 2.3.6 に各積層における主軸方向ひずみ分布を示す。

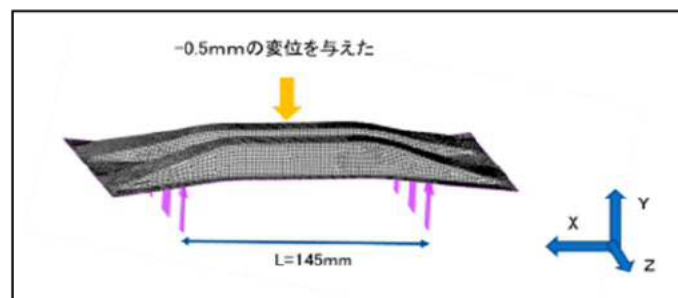


図 2.3.5: 構造解析の拘束条件

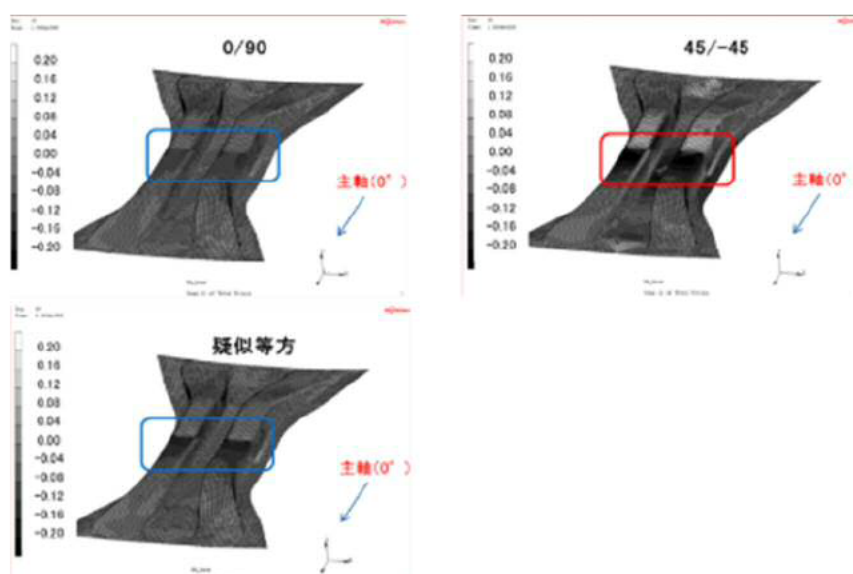


図 2.3.6 : 解析結果 (主軸方向ひずみ分布)

図 2.3.6 の結果より、どの積層構成においても圧子直下に大きなひずみが生じており、特に 45/-45 ではそれが顕著なことが判明した。次に圧子直下の要素にかかる荷重と変位の関係を図 2.3.1.7 に示す。0.5mm 変位時の荷重は疑似等方 > 0/90 > 45/-45 の順であることが分かる。

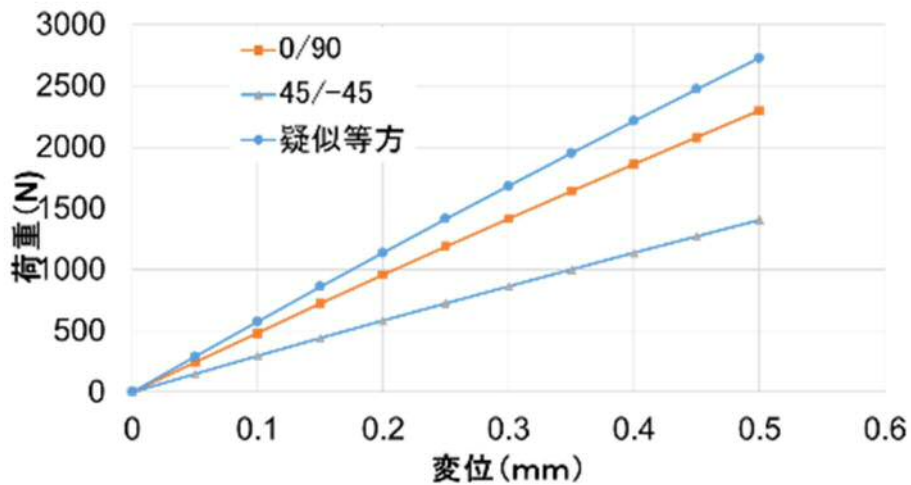


図 2.3.7：解析結果（荷重－変位線図）

(2)-3 小型金型実成形品の評価

図 2.3.8 の成形品端部をトリミングし、図 2.3.9 に示す治具を用いて 3 点曲げ試験を行った。試験条件は表 2.3.1 に示した。各積層構成の成形品の 3 点曲げ試験結果を図 2.3.10 に示す。



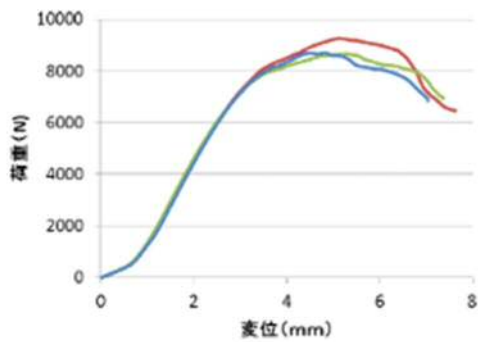
図 2.3.8：小型金型成形品（トリミング前）



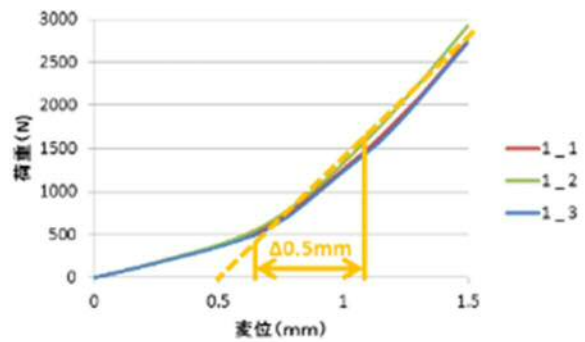
図 2.3.9：3点曲げ試験治具

表 2.3.1：3点曲げ試験条件

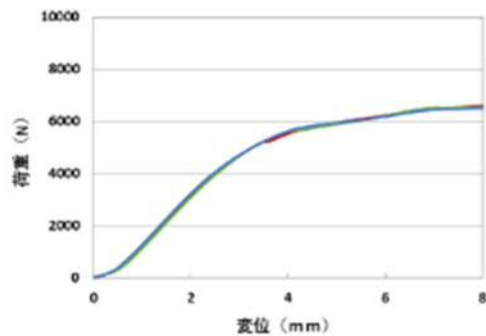
| | |
|-------|---------|
| 試験速度 | 5mm/min |
| 支点間距離 | 145mm |



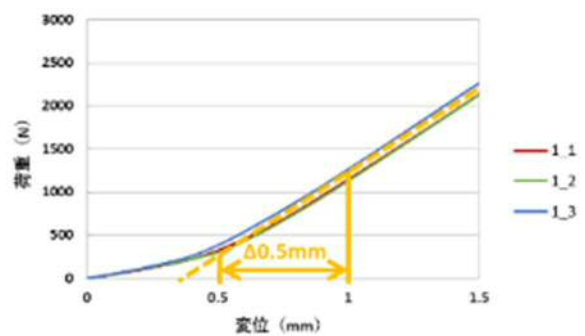
(a)荷重変位曲線(0/90, 全体)



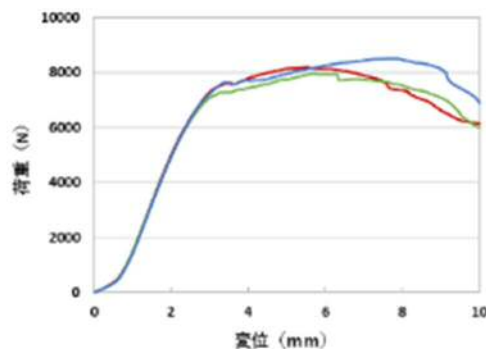
(b)荷重変位曲線(0/90, 拡大)



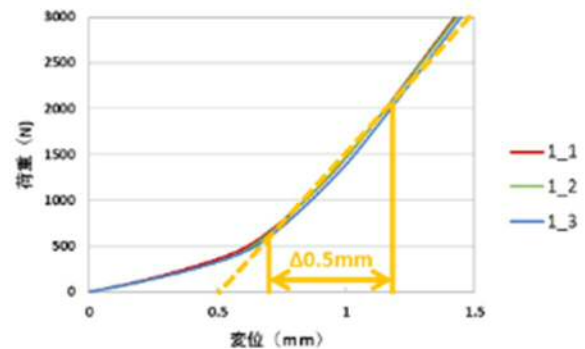
(c)荷重変位曲線(45/-45, 全体)



(d)荷重変位曲線(45/-45, 拡大)



(e)荷重変位曲線(疑似等方積層, 全体)



(f)荷重変位曲線(疑似等方積層, 拡大)

図 2.3.1.10: 3点曲げ試験で得られた荷重変位曲線

図 2.3.10(a) (c) 及び (e) より、3本の試験片の初期勾配(～3 mm)は非常に再現が良いことが判明した。また、積層構成 45/-45 では 0.5 mm 付近に、0/90 及び疑似等方積層では 0.7 mm 付近に変曲点が同様に確認された。最終成形品をトリミングした際に発生したスプリングバックにより、試験体が反り返ったため、本来治具と接するべき点が接しておらず、変位 0.5 mm 又は 0.7 mm 付近から、治具と完全に接したため、変曲点となって表れたと考えられる。そこで、治具と完全に接触した変位 0.5 mm から 1.0 mm 又は 0.7 mm から 1.2 mm の 0.5 mm 間の傾き(S_{exp})を算出し、解析結果(S_{CAE})と比較することとした。なお、実験値と解析値の差は $1 - S_{diff}(S_{diff} = S_{exp} / S_{CAE})$ とした。結果を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 より、実験値の平均値及び解析値を比較したところ、実験値、解析値とも同様に疑似等方積層が最大となり、次いで積層構成 0/90、積層構成 45/-45 となった。

試験体 1-3 および平均値と解析の結果を比較したところ、その差は積層構成 0/90 では最大で 5.3% であり、平均値では 2.7% となり非常に良い一致を示したが、積層構成 45/-45 では最大で 25.9% であり、平均値では 22.8%、疑似等方積層では最大で 29.8% であり、平均値では 17.4% となった。

表 2.3.2 : 実験値と解析値の比較 (上図 : 0/90, 左図 : 45/-45, 右図 : 疑似等方積層)

| | δ 0.5mm | 差 (AVE vs CAE) (%) |
|-----|----------------|--------------------|
| 1_1 | 2324.168 | 2.1 |
| 1_2 | 2489.694 | 5.3 |
| 1_3 | 2276.389 | -1.1 |
| AVE | 2363.417 | 2.7 |
| CAE | 2300.561 | |

| | 傾き S (δ 0.5mm) | 差 $(1-S_{diff}) \times 100$ (%) (AVE vs CAE) | | 傾き S (δ 0.5mm) | 差 $(1-S_{diff}) \times 100$ (%) (AVE vs CAE) |
|------------------|---------------------------|---|------------------|---------------------------|---|
| 1_1 | 1770 | 25.9 | 1_1 | 3022 | 10.7 |
| 1_2 | 1650 | 17.3 | 1_2 | 3048 | 11.7 |
| 1_3 | 1762 | 25.3 | 1_3 | 3545 | 29.8 |
| AVE(S_{exp}) | 1727 | 22.8 | AVE(S_{exp}) | 3205 | 17.4 |
| CAE(S_{CAE}) | 1406 | | CAE(S_{CAE}) | 2730 | |

圧子直下の要素にかかる荷重と変位の関係について、実験値と解析値の比較を図 2.3.11 に示す。実験値及び解析値の差は、積層構成 45/-45 が最大となり、次いで疑似等方積層、積層構成 0/90 となった。実験値及び解析値の差について、積層構成 45/-45 が最大となったのは、成形により 45° 方向の繊維が変化したためと考えられる。

目標としていた小型金型を用いた成形品の剛性における実験値と解析値の差は 10 % 以下であることから、小型金型を用いた成形品の剛性について再解析を行うこととした。

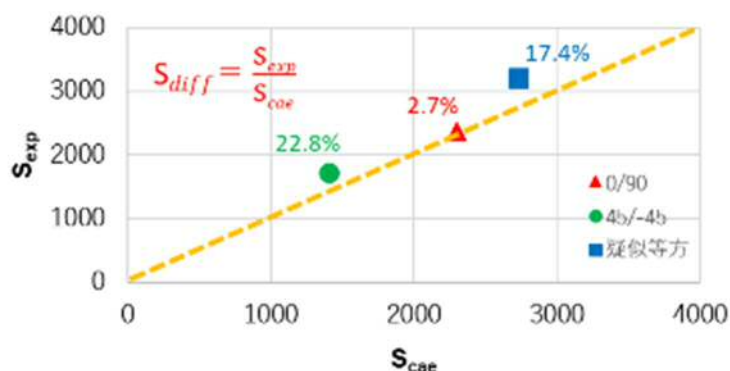


図 2.3.11 : 各積層構成における実験値と解析値の比較

小型金型を用いた成形品の剛性について、再解析後の圧子直下の要素にかかる荷重と変位の関係を図 2.3.12 に示す。再解析では、拘束条件を適切に設定することで、実験値及び解析値の差は、積層構成 45/-45 において -10.1 %、積層構成 0/90 において -7.4 %、疑似等方積層において -1.6 % となり、目標としていた小型金型を用いた成形品の剛性における実験値と解析値の差 10 % 以下をほぼ達成した。

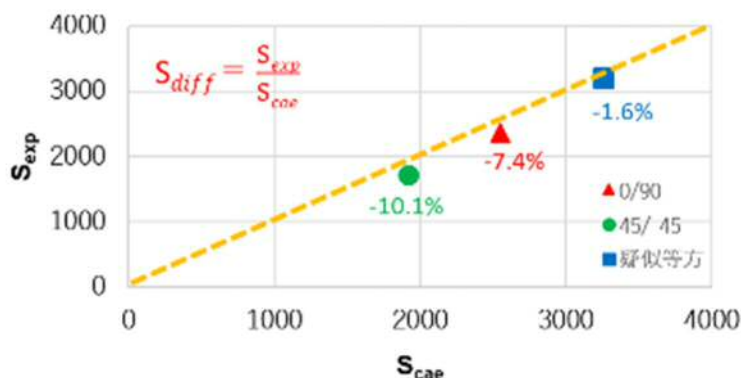


図 2.3.12 : 各積層構成における実験値と解析値の比較 (再解析後)

(2)-4 大型金型の構造の検討及び設計

大型金型についてその構造の検討及び設計、大型金型による試作成形並びに解析との合わせこみを行った。成形品形状は、小型金型と同様にインパクトバーを想定したものとし、サイズ及び締結位置は出来る限り実車スケールで行う計画とした。オリジナルで実装されているハイテン鋼のインパクトバーの曲げ強度の再現を念頭に設計し、**図 2.3.13** に示す形状および板厚に決定した。

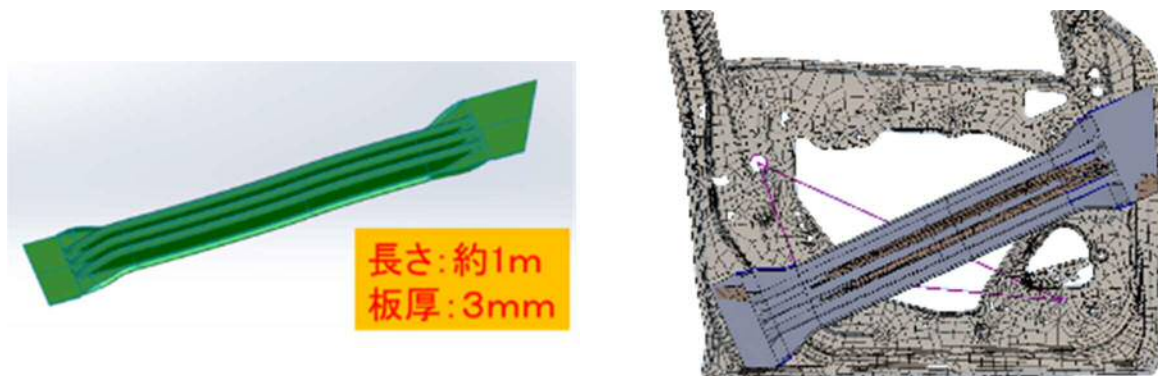


図 2.3.13: 大型金型による成形品 (左図: インパクトバー、右図: 取付けイメージ)

今回成形するインパクトバーの形状は、**図 2.3.13** に示すように表面(圧縮側)に3つの凸、裏面(引張側)に4つの凸があるため、成形時にブランク材を一度にプレスしてしまうと、金型中央部への引き込みが少なくなり、十分に樹脂が充填されないままプレスされることとなり、樹脂の充填が不足することが考えられる。このため、**図 2.3.14** に示すようにまず金型の当りはじめは、ブランク材中央部から先に行う機構とするため、中央部が突出した形状とした。中央部から挟持することでブランク材を中心へ引き込みやすくなる。次いで両端をプレスするが、このとき、突出した中央部は可動するため上型の下降と共に各々上下金型内部へ収まる機構となっている。これによって、中心部の樹脂の充填不足を防ぐことが可能となる。

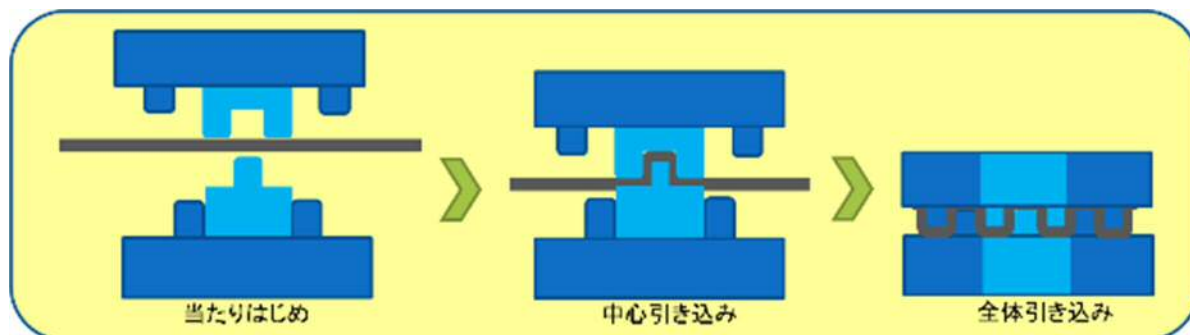


図 2.3.14: 大型成形品の金型機構

(2)-5 大型金型成形品の解析

インパクトバーは、22 ply の積層により 3 mm の板厚とした。CFRP 成形品は積層構成により剛性と強度は異なる特性となる。大型成形品の成形前に、MSC 社の Marc2010 を用いて、次の3種類の積層構成について剛性と強度の検討を行った。

- | | |
|-----------------|---|
| ① 0° Main | $[0^{\circ}_3/45^{\circ}/0^{\circ}_3/-45^{\circ}/0^{\circ}_3]_s$ |
| ② QUASI(擬似等方積層) | $[(0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ})_2/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ |
| ③ 45° Main | $[(45^{\circ}/-45^{\circ})_8/45^{\circ}/0^{\circ}_3/45^{\circ}/-45^{\circ}]$ |

結果を図 2.3.15 に示す。①0° Main は、最も高いピーク荷重を狙った積層構成であり、解析によりその値は 13.8 kN と予測し、圧縮側を起点に脆性的な破壊を予測した。②QUASI は、いわゆる疑似等方積層であり、ベンチマークとしての比較対象としてピーク荷重が 10 kN を超えることを目標に試作品形状を決定しており、解析ではピーク荷重 10.5 kN を予測した。③45° Main は変形を伴いながらも大きな吸収エネルギーとなることを狙った積層構成であり、解析でピーク荷重 8.6 kN と低めにはなるものの、ピーク荷重後に穏やかな荷重低下を予測した。

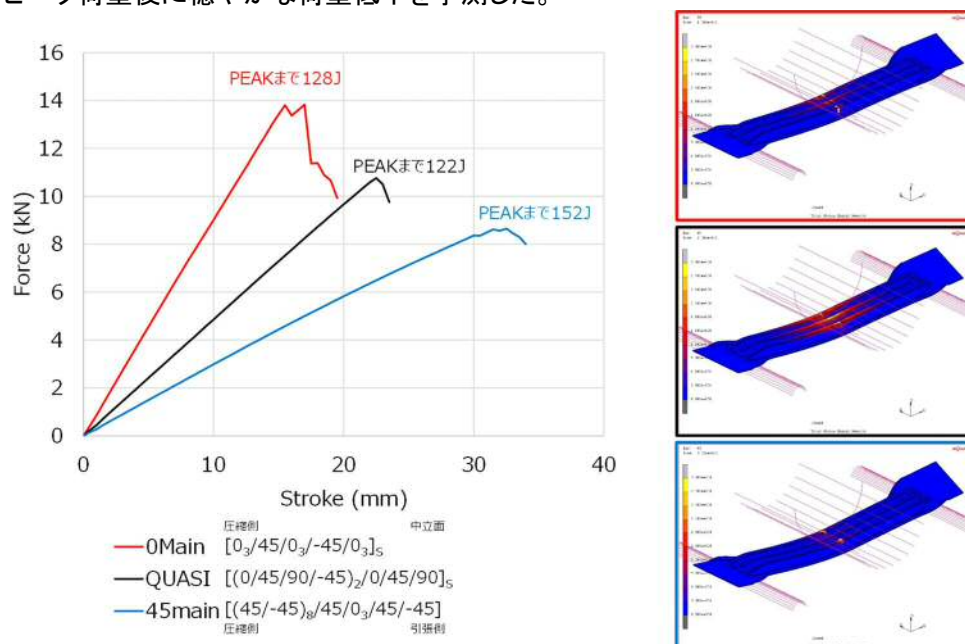


図 2.3.15: 大型成形品の解析

(2)-6 大型金型実成形品の評価

大型金型によって成形されたインパクトバーのプレス成形品から端部をトリミングし、図 2.3.16 に示すような成形品を得た。



図 2.3.16: プレス成形後の成形品（トリミング後）

トリミングした成形品は、図 2.3.17 に示す治具を用いて3点曲げ試験を行った。試験条件は表 2.3.3 に示す条件で行った。

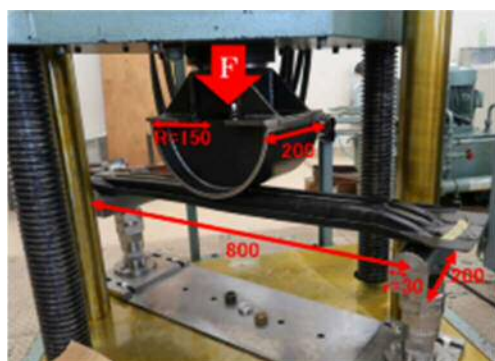


図 2.3.17: 50t 万能試験機による 3 点曲げ試験の様子

表 2.3.3 : 3 点曲げ試験条件

| | |
|-------|-----------|
| 試験速度 | 30 mm/min |
| 支点間距離 | 800 mm |
| 圧子半径R | 150 mm |
| 支点半径r | 30 mm |

45° Main の積層構成の成形品について、成形圧力の影響を検討した3点曲げ試験結果を図 2. 3. 18 に、各成形圧力における成形品の板厚平均を表 2. 3. 4 に示す。

45° Main の積層構成では、いずれも概ね最大荷重は変わらないが、表 2. 3. 4 に示すように、成形時の圧力条件が高くなるにつれ成形品の板厚が薄くなったため、曲げ剛性が低くなったと考えられる。

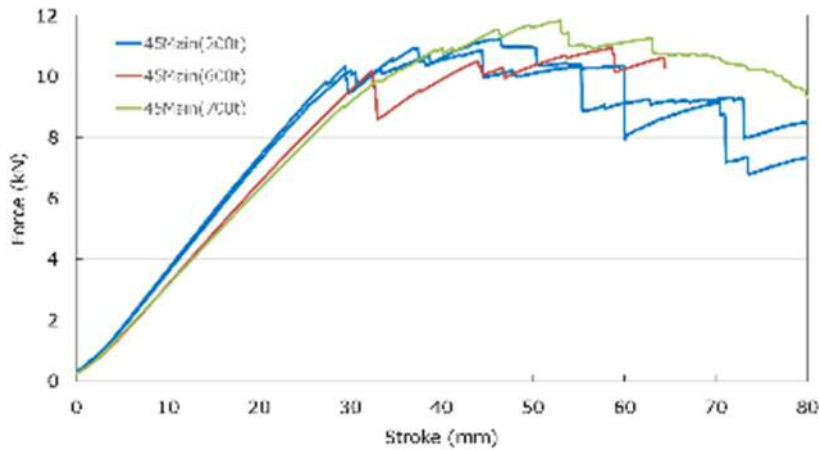


表 2. 3. 4 : 各成形圧力における板厚平均 (45° Main)

| 成形圧力 (t) | 板厚平均 (mm) |
|----------|-----------|
| 200 | 4.25 |
| 600 | 3.68 |
| 700 | 3.63 |

図 2. 3. 18: 3点曲げ試験で得られた荷重変位曲線 (45° Main)

次に、成形品の断面を評価するため、図 2. 3. 219 に示す部分について、45° Main の積層構成の断面観察を行った。断面画像を図 2. 3. 20 に示す。成形圧力 200 t では、600 t で成形した場合と比較して板厚も大きく、成形品に樹脂が充填されていない部分があり、十分にblank材を押しきれていないことが考えられる。

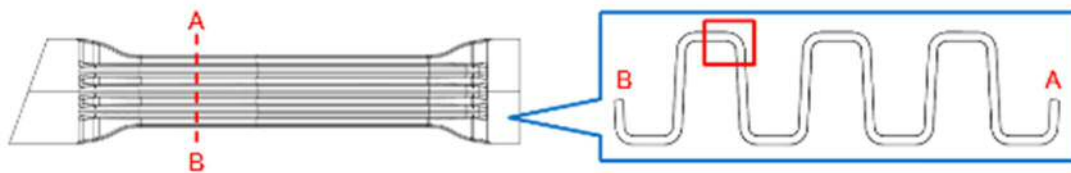


図 2. 3. 19: 断面観察の断面部及び観察箇所

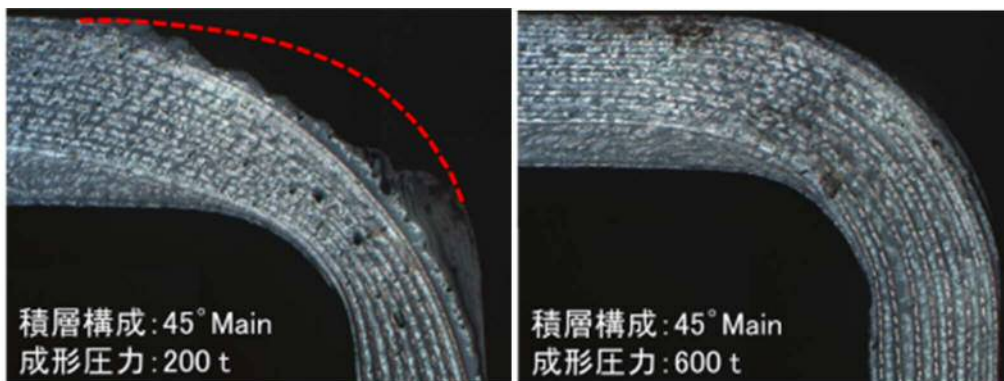


図 2. 3. 20: 成形品の断面の比較

次に、積層構成の違いによる影響について検討した結果を図 2. 3. 21 に示す。前述の積層構成以外に次の積層構成についても成形した。

[45°/-45°/(15°/-15°)₄/0°]_s の積層構成 (以下「15° Main+45°」という。)

[(30°/-30°)₈/30°/0°₃/30°/-30°] の積層構成 (以下「30° Main」という。)

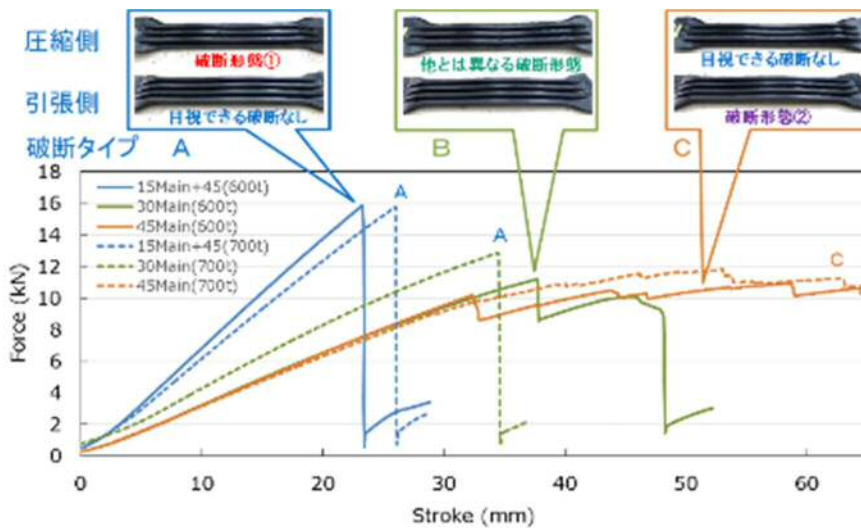


図 2.3.21: 成形品の積層構成の違いによる影響

積層構成 15° Main+45°、30° Main 及び 45° Main について、各々成形圧力 600 t 又は 700 t で成形した成形品について比較した。15° Main+45° では圧縮側を中心に破断し、45° Main では引張側を中心に破断している。30° Main は圧縮側を中心として破断した場合と、引張側に初期破断が生じ、次いで圧縮側に破断が生じた場合がある。ここで、15° Main+45° のように圧縮側を中心に破断するタイプをA、45° Main のように引張側を中心に破断するタイプをC、さらに引張側に初期破断が生じ、次いで圧縮側に破断が生じるタイプをBとすると、30° Main ではAとBの破断タイプがあり、AとCの破断タイプの中間の位置付けで、閾値にあると考えられる。

(2)-7 インパクトバーの評価に係る実験値と解析値の比較

今年度の目標である大型金型を用いた成形品の剛性における実験値と解析値の差が 10 % 以下であるかどうか検証するために、実験値と解析値を比較した結果を図 2.3.22 に示す。成形品は疑似等方積層及び 45° Main の積層構成で比較した。

インパクトバーの板厚については 3 mm として設計したが、実際の成形品の板厚を計測すると 4.2 mm であった。板厚は成形に使用したプレス機の成形圧力に依存し、板厚を設計値の 3 mm とするため成形圧力を高める調整も試みたが、金型強度の問題があり板厚 3 mm での成形は断念した。

解析モデルに実際の成形品の板厚 4.2 mm を反映したところ、疑似等方積層 15 mm 変位時において実験値 8.1 kN に対し解析値 8.3 kN、解析誤差 2.5 % と目標の 10 % 以内を達成した。ピーク荷重においても、試験体のバラツキの中に納まっている。

ただし、45° Main については、実際の板厚を解析モデルに反映しても実験よりも低い剛性にとどまっている。45° 方向を主体として積層構成では成形中に繊維の方向が長手方向に近くなるような変形挙動をとるためと考察する。

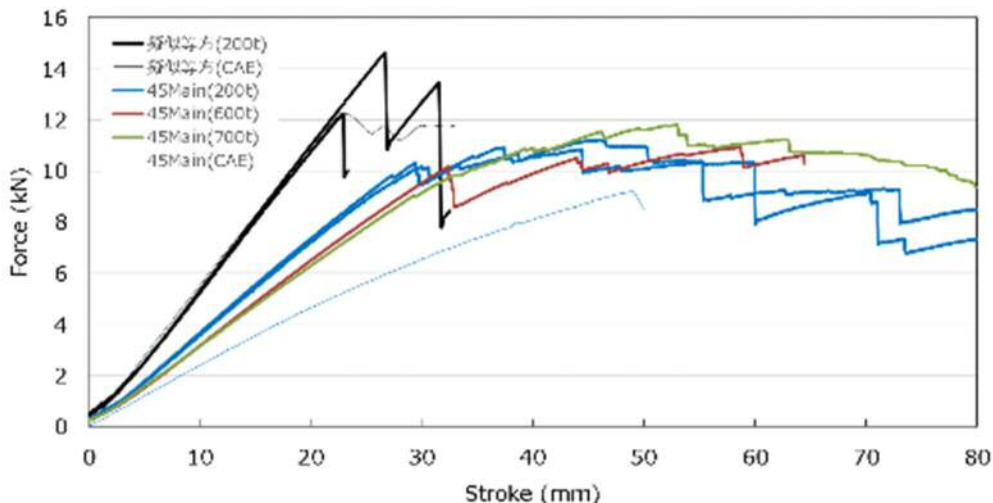


図 2.3.22: 成形品の剛性における実験値と解析値の比較

(2)-7 インパクトバーの品質評価

成形品は、図 2.3.20 に示すように成形圧力が低い条件の場合、十分にブランク材を押しきれておらず樹脂が充填されていない部分が多くみられたが、成形圧力が高い条件の場合には、樹脂が充填されており、樹脂枯れ部分はほとんどない表面がきれいな成形品を得ることができた。トリミングした成形品は、図 2.3.23 に示すように展示会に出展することができ、来場者の高い関心を集めることができた。



図 2.3.23: 第 10 回クルマの軽量化技術展 北川精機(株)ブース

(3) 小括

以上より、サブテーマⅢでは小型金型を用いた成形品について、解析結果と実成形品の強度測定結果との合わせこみを行い、積層構成の異なる 3 種類の成形品すべてについて 10 %以下の良い一致を得ることが出来た。大型金型を用いた実車スケールのインパクトバー成形品においては、大型金型についてその構造の検討及び設計、成形時における搬送機構の考案や成形条件等の知見を得るなど、概ね 1 m サイズの積層板のプレス成形技術を確立することができた。大型成形品と解析との合わせこみを行った結果、疑似等方積層では実成形品の板厚を解析に反映したことで、大型成形品の剛性における実験値と解析値がよく一致し、目標値としていた 10 %以下を達成することができた。また、成形圧力を高めることによって、展示会に出展できる品質の成形品を得ることができた。

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果

以上のように3年間の研究開発によって、各サブテーマでそれぞれの目標値をほぼ達成することが出来、全体として研究目的である「品質と生産性そして高い積層構成自由度を兼ね備えたCFRTP積層板の量産技術の確立と、積層板に適したプレス成形技術の開発」を実現することができた。

具体的には、サブテーマⅡにおいて材料のUDテープから、設定した任意の配向角を持つ口800-1,200mmの大判シートを製作することが出来る任意配向接合装置(図1.4.1)、その大判シートを4か所のシート供給テーブルより設定した任意の順序・回転角で積層することが出来る積層装置(図1.4.2)を完成させ、高い積層構成の自由度を達成できた。

そしてこれらの装置によって準備された口1mサイズの積層体をもちいて、サブテーマⅠにおいて既設の大型多段プレスを用いて積層板の2段10ページ、20枚の同時成形を成功させることが出来た。成形された積層板の品質はすべて目標値をクリアしており、段数を増やすことで大量生産可能な成形技術を確立することが出来た。

これらの結果をもとに、図3.1.1に1x1mサイズの8ply積層板を毎分1枚量産する生産ラインの構想例を示す。投入するUDテープの幅は300mmで任意配向接合装置を2台、多段プレスは6段プレスを2台の仕様としている。

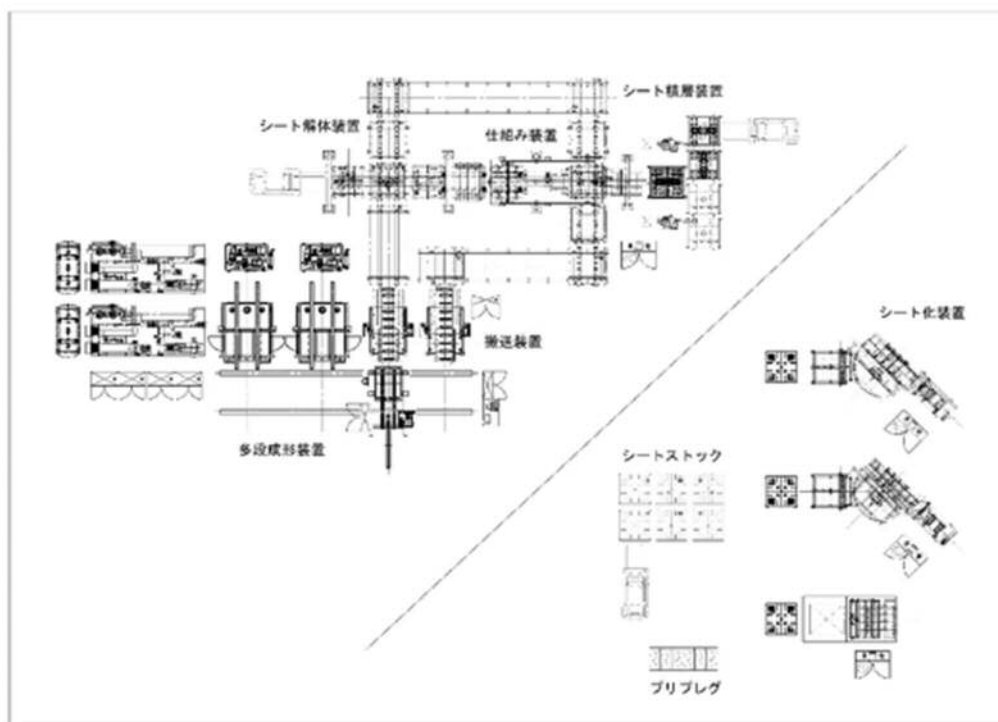


図 3.1.1: 積層板製造ラインの構想例

また、サブテーマⅢにおいては、大型金型についてその構造の検討及び設計、成形時における搬送機構の考案や成形条件等の知見を得るなど、概ね1mサイズの積層板のプレス成形技術・解析技術を確立することができ、大型金型を用いた実車スケールのインパクトバー成形品において、展示会に出展できる品質の成形品を得ることができた。

3-2 今後の課題・事業化展開

本研究初で確立した成形条件や装置仕様は、あくまで今回使用した UD テープと 8ply の疑似等方積層板での研究結果に基づいて決定したもとなっている。ある程度の許容幅を持つように考慮しているものの、UD テープや積層板の仕様が変更になった場合は、都度調整試行、場合によっては大幅な改良が必要になってくる。

現在、本研究で開発した任意配向接合装置や積層装置および既設の多段プレス装置は、積層板の生産・設備導入に興味のある顧客向けのデモ機として使用している。顧客の使用したい UD テープが薄層であったり、細幅であったりした場合には対応できていない。また積層数が多い厚い積層板は高多ページでの成形は難しい。今後は、デモ稼働を通じて顧客ニーズを取り入れた装置改良を行って、顧客獲得を目指していく。

前章(2)-7 節 図 2.3.23 に示したように、今回の成果を出品した展示会では、来場者より非常に高い関心を得ることができ、装置見学やデモの実施希望者を多数得ることが出来た。残念ながら今春は世界的なウイルスの流行による外出自粛で、その後の営業活動やデモの実施を十分に行うことが出来ていないが、設備導入に前向きな顧客向けに試作を開始している案件も出てきている。

今後も CFRP 関連の展示会やシンポジウムでの出展・プレゼンを計画しており、引き続き装置見学やデモ実施希望者が獲得できるものと見込んでいる。その中からデモ稼働、積層板の試作を通じて今回開発した設備・技術を PR できれば、実際の設備導入につながる事案が出てくるものと期待している。