

平成31年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRTP を用いた複雑形状部品の圧縮成形技術の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構

目次

第1章 研究開発の概要.....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	3
1-3-1 複雑形状の成形を可能にする材料の開発	3
1-3-2 チョップド UD テープの圧縮成形技術の開発	3
1-3-3 軽量高強度な試作部品の開発	3
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 複雑形状の成形を可能にする材料の開発.....	5
2-1-1 材料特性の研究.....	5
2-1-2 材料製造装置の開発	6
2-1-3 材料物性の解析・評価	9
2-2 チョップド UD テープの圧縮成形技術の開発.....	12
2-2-1 金型技術の高度化.....	12
2-2-2 圧縮成形機の開発.....	16
2-3 軽量高強度な試作部品の開発.....	19
2-3-1 無人航空機用プロペラの試作・評価.....	19
(1) ターゲット部品の選定.....	19
(2) 要求性能	19
(3) 左右の重量バランス.....	19
(4) 試作品の製作方法	20
(5) 試作品の評価.....	21
(6) 耐衝撃性の向上	22
2-3-2 自動車部品の試作・評価.....	26
(1) ターゲット部品の選定.....	26
(2) 要求性能	26
(3) 試作品の製作.....	26
(4) 成形品内のボイド観察.....	27
(5) インサートボルトの引き抜き試験	29
(6) まとめ	30
第3章 全体総括	31
3-1 研究成果	31
3-2 研究後の課題.....	31
3-3 事業化	31

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

次世代自動車、ロボット、無人航空機などの成長分野で軽量化のニーズが高まっていることから軽量かつ高強度素材の活用が期待されている。中でも、炭素繊維強化樹脂（CFRP）は優れた特性をもち、航空機では広く使われているが、量産性やコスト、成形の難しさなどの問題があり、一般機械部品への応用は限定的である。

炭素繊維強化樹脂は、強化材に炭素繊維を用いた繊維強化複合材である。加熱すると硬化する熱硬化性樹脂を母材樹脂に用いた複合材は Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)、加熱すると軟化・融解する熱可塑性樹脂の場合は Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (CFRTP)と呼んでいるが、両者を CFRP と総称する場合もある。

CFRP(熱硬化性)は成形に数分から数時間を要するため、自動車などの量産には適していない。一方、CFRTP はプレス成形により成形時間を短縮できるが、薄い板状の中間素材を用いるために、適用する部品の形状に制約がある。肉厚が変化する複雑形状部品は、金属材料を用いて鋳造や鍛造により製造されてきたが、材料の高強度化は限界に達しており、さらなる軽量化は難しい。

軽量・高強度の繊維強化複合材料を用いて肉厚の変化する複雑形状の部品を成形する技術には、射出成形やシート・モールディング・コンパウンド(SMC)成形、バルク・モールディング・コンパウンド(BMC)成形等があるが、Vf（繊維含有率）が低く高強度を得られない。

一方向炭素繊維強化樹脂テープを短く裁断した材料と独自の圧縮成形技術を開発することで、高強度かつ形状自由度が高く、さらに低コストの CFRTP 成形技術を開発した（表 1-1）。

表 1-1 目標と達成状況

課題	目標値	達成状況
【1】複雑形状の成形を可能にする材料の開発	①炭素繊維に樹脂を含浸させる加工条件を明らかにする。	◎
	②炭素繊維束を 100g/m ² 未満に開繊する。UD テープ製造装置を 12 時間以上連続運転させる。	
	③成形材料の強度を 500MPa 以上に高める。	
【2】チョップド UD テープの圧縮成形技術の開発	④金型温度のばらつき幅を 30℃に縮小する。金型加熱時間を 3 分に、冷却時間を 1 分に短縮する。	◎
	⑤アルミ鍛造部品を超える強度を実現する。成形サイクルを 10 分以内に短縮する。	
【3】軽量高強度な試作部品の開発	⑥部品の重量を従来比 30%軽減する。大きな推力が得られるプロペラの複雑形状を実現する。	○
	⑦部品の重量を従来比 30%軽減する。アルミ合金製部品と同等の剛性を実現する。	

1-2 研究体制

① 研究組織・管理体制

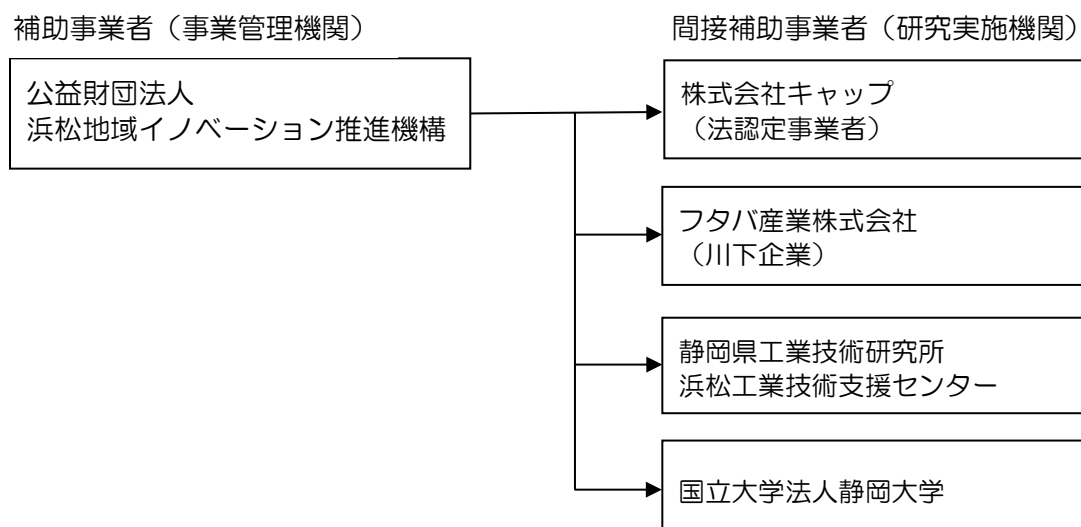


図 1-2-1 管理体制

② 研究者氏名

株式会社キャップ

氏名	所属・役職
高井 三男	取締役会長 委員長 (PL)
水谷 暢孝	代表取締役
吉田 透	開発部 部長 副委員長 (SL)
寺田 竹一	開発部 部員
小澤 映吏子	開発部 部員

フタバ産業株式会社

氏名	所属・役職
山田 勇介	生技開発部 部員
大島 佑介	生技開発部 部員

静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター

氏名	所属・役職
鈴木 一之	繊維高分子材料科 科長
鈴木 重好	繊維高分子材料科 上席研究員
森田 達弥	繊維高分子材料科 主任研究員
長房 秀幸	繊維高分子材料科 研究員

氏名	所属・役職
早川 邦夫	創造科学技術大学院教授
鈴木 航成	創造科学技術大学院工学専攻

③ 協力者（アドバイザー）

氏名	所属・役職
坂本 修	ヤマハ発動機株式会社 UMS 統括部 企画推進部 企画戦略担当 主管
小西 真	株式会社 ATOUN 取締役 CTO / 商材開発本部本部長 現在、マコトバイオニクス株式会社 代表取締役
室井 国昌	個人（浜松地域 CFRP 事業化研究会 会長）
金子 和佳	公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構 技術コーディネーター

1-3 成果概要

1-3-1 複雑形状の成形を可能にする材料の開発

炭素繊維束をポリアミド樹脂フィルムではさんで加熱圧着する実験を行い、炭素繊維束の開繊幅と加熱温度、送り速度が樹脂の含浸性に及ぼす影響を定量評価し、ボイド率が 1%程度になる加工条件を見出した。バイブレーターと超音波溶着機によって 12k 炭素繊維束（フィラメント数 12,000 本の繊維束）を 60g/m²程度に開繊し、同時に樹脂溶融と含浸を行なう UD（一方向性）テープ製造装置を開発した。UD テープをカットして繊維の向きがランダムな平板を作成して強度を測定し、繊維長 15mm 以上で 500MPa を超える曲げ強度を得た。

1-3-2 チョップド UD テープの圧縮成形技術の開発

金型構造を改良することで、急速加熱した金型温度のばらつき幅を 30 度（金型温度を 240℃から 270℃）にすることができた。ヒート＆クール熱プレス成形により、肉厚が 3mm から 17mm まで変化する複雑形状の成形を可能にした。成形サイクルを加熱工程：3 分、材料投入・圧縮：3 分、冷却・取り出し工程：3 分、合計 9 分に短縮した。

1-3-3 軽量高強度な試作部品の開発

市販の熱硬化性 CFRP 製無人航空機用プロペラに比べて、材料密度により重量軽減を図った。成形品の弾性率を高くすることにより、高速回転時にプロペラの反りを抑え、推力を向上させた。衝突時にプロペラの飛散防止のため、PBO 繊維を補強に用いることで改善の可能性を確認した。

自動車部品（ステアリングサポート）の試作では、複雑で肉厚が変化する形状を成形できた。部品内部の空隙（ボイド）は、X 線 CT スキャナで観察した結果、1%以下だった。インサートしたボルトの引き抜き強度は、他の部品を取り付けるために十分な強度だった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構
事業推進部 米谷俊一
〒432-8036 静岡県浜松市中区東伊場二丁目7番1号
浜松商工会議所8階
TEL: 053-489-8111 FAX: 053-450-2100
E-mail: kometani@hai.or.jp

法認定中小企業 株式会社キャップ
開発部 吉田透
〒437-0223 静岡県周智郡森町中川2022番地2
TEL: 0538-49-1181 FAX: 0538-49-0075
E-mail: yoshidat@cap-inc.co.jp

第2章 本論

2-1 複雑形状の成形を可能にする材料の開発

2-1-1 材料特性の研究

複雑形状の成形品を短時間で加熱プレス成形するためには、炭素繊維に熱可塑性樹脂を十分に含浸させた成形材料を用いて、成形時の樹脂含浸時間を短縮する必要がある。しかし、熱可塑性樹脂は溶融しても粘度が高く、繊維間に樹脂を含浸させることは容易ではない。そこで、図 2-1-1 に示すように繊維を薄く広げて(開織)樹脂の含浸距離を短くすることでこの課題を解決することとした。

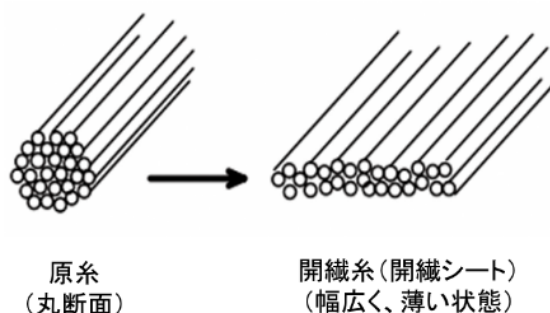


図 2-1-1 繊維の開織

使用した熱可塑性樹脂は、融点や軟化点の温度特性や溶融時の粘度、成形品の強度、入手性、原料コスト等の調査結果から、ポリアミド(PA)系樹脂を選定した(表 2-1-1)。

表 2-1-1 母材樹脂の比較

	ポリアミド (PA)	ポリカーボネート (PC)	ポリエチレン (PE)
変形温度	○	◎	×
引張強さ	◎	◎	×
圧縮強さ	◎	◎	×
曲げ強さ	◎	◎	×
成形性	◎	○	◎
原料コスト	○	×	○

成形材料の特性を明らかにするために、加熱温度や加工速度（加熱時間）の樹脂含浸に及ぼす影響を調査した。PA6 樹脂フィルムで炭素繊維（レギュラートウ：フィラメント数 12K：12,000 本）を上下から挟み込み、超音波振動を与えずに加熱圧着のみでテープ状に成形した。PA6 の融点以上の温度で加熱すると、図 2-1-2 に示すように、開織幅が広いほど、また加工速度（加熱時間）が遅いほど、UD テープ内の空隙率は小さくなった。なお、空隙率は、テープの断面写真を基にアメリカ国立衛生研究所が開発した画像処理ソフトウェア ImageJ を使って算出した。加熱圧着では、成形時間を長くとっても、空隙率は 10%程度だった。

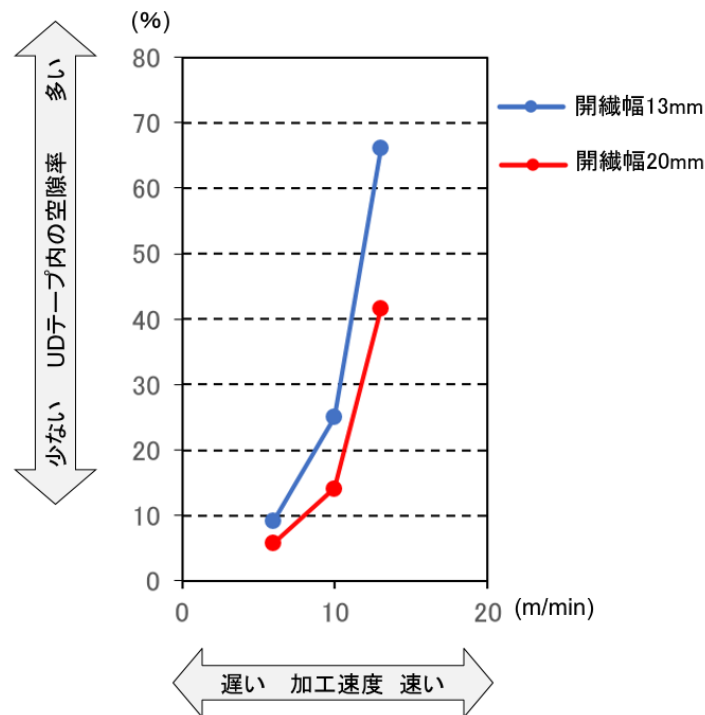


図 2-1-2 加工速度と開繊幅が空隙率に及ぼす効果

2-1-2 材料製造装置の開発

UD テープの空隙率をさらに低くするために、本研究開発では、図 2-1-3 に示すように超音波振動を応用して繊維の開繊と樹脂溶融・含浸を同時に行う成形材料(UD (一方向) テープ)製造装置を開発した。図 2-1-4 は完成した装置の写真である。UD テープを長時間・安定して製造するには、超音波溶着機の加工条件(振幅、加圧力)だけでなく、原系の送り出しや加熱・冷却等の付属機構についても検討する必要がある。12K の炭素繊維と PA6 樹脂のフィルムを用いて UD テープを作製し、超音波発信機に示されるエネルギー量とテープ内の空隙率を測定して、樹脂含浸性を評価した。

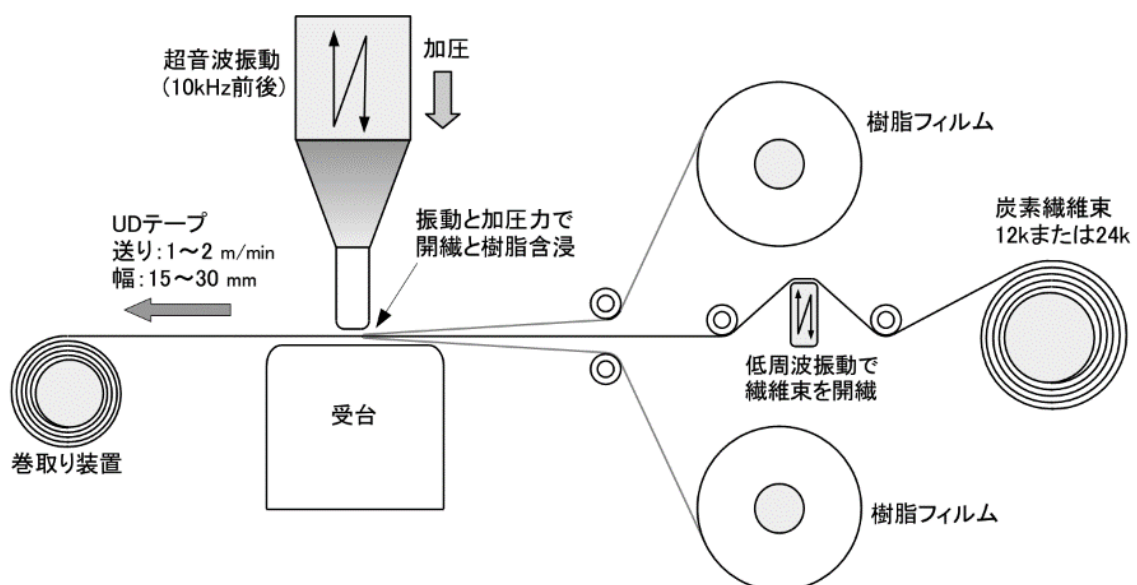


図 2-1-3 UD テープ製造装置の構造

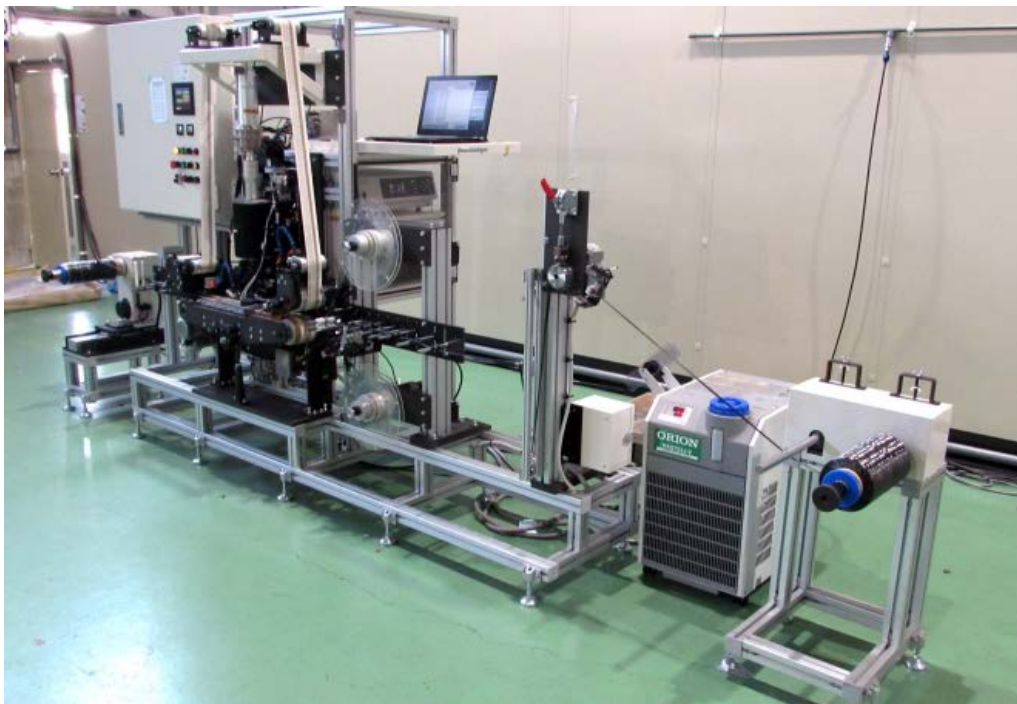


図 2-1-4 UD テープ製造装置の外観写真

樹脂含浸性の計測結果を図 2-1-5 に示す。超音波溶着機のエネルギーが 700J のとき、空隙率は 1%、エネルギーが 300J のとき空隙率は 20%弱だった。超音波エネルギーが高くなれば開繊幅が広がり(厚みは薄く)、テープ内の空隙率が低下した。図 2-1-6 は UD テープの断面写真を示す。黒い部分は樹脂が入り込まない空隙である。断面写真からも、エネルギーの増加とともに空隙率が減少したことがわかる。ただし、超音波溶着機は超音波ホーンの寿命や機能の安定性を考えると、超音波エネルギーをできるだけ低くして使用することがのぞましい。

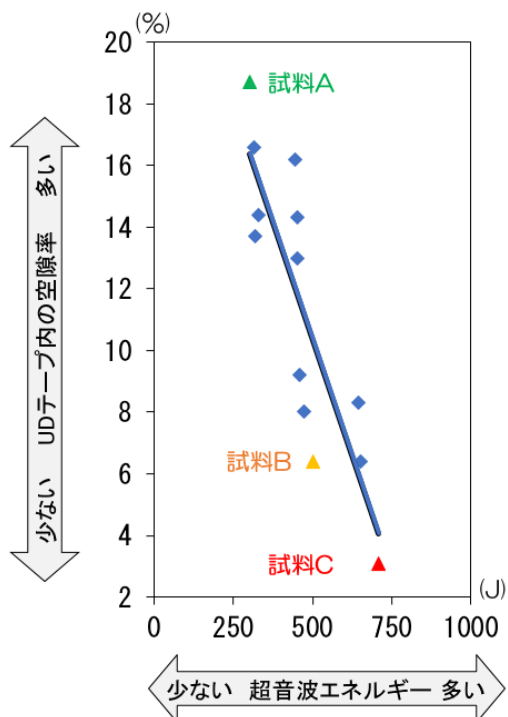


図 2-1-5 投入エネルギーと空隙率

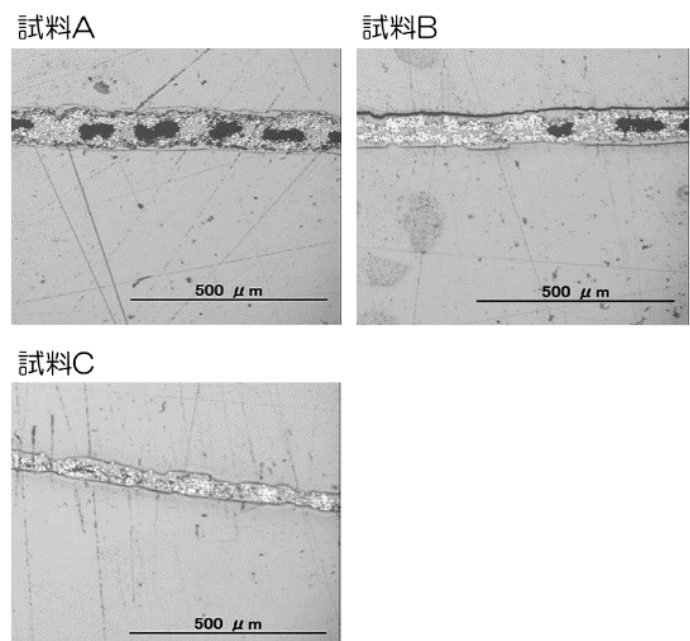


図 2-1-6 超音波溶着機で加工した UD テープ断面

耐熱性が求められる製品用途にも対応するため、熔融温度が高いポリアミド（PA9T）樹脂（PA9T の融点：306℃、PA6 の融点：225℃）を母材にして UD テープを作成した。図 2-1-7 は、PA9T 樹脂を母材に用いた UD テープ（炭素繊維は 12k）の断面写真である。

また、原料コスト低減のため、単位重量あたりの価格が比較的安い 24k（フィラメント数 24,000 本）繊維束を用いた UD テープ（母材樹脂は PA6）を作成した。図 2-1-8 はその断面写真である。24k 繊維束を用いることで、一定時間あたりに製作できる UD テープの重量が増えるため、コスト削減に有効である。図 2-1-7、図 2-1-8、いずれの UD テープの断面写真においても繊維間に樹脂が含浸していることを確認した。

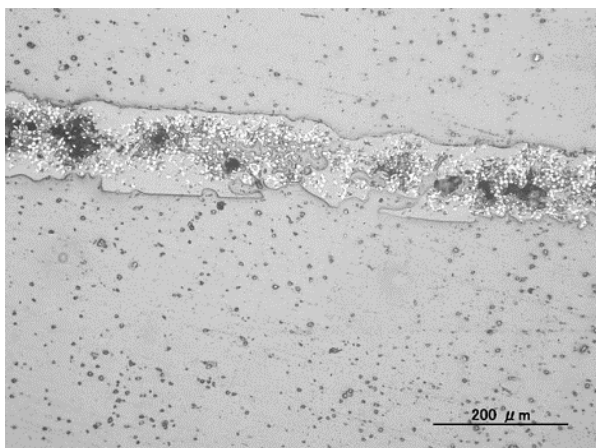


図 2-1-7 PA9T 樹脂を母材に用いた UD テープの断面

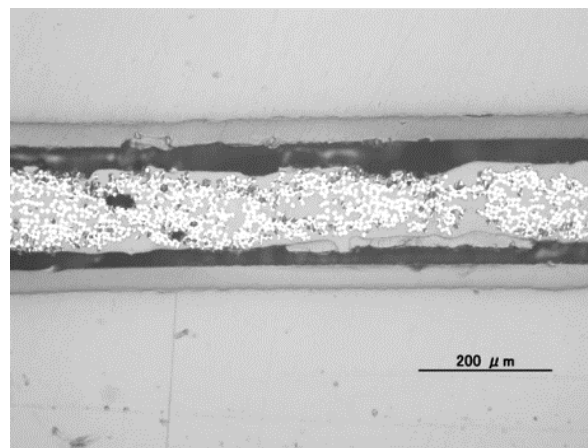


図 2-1-8 24K の炭素繊維束を用いた UD テープの断面

本数の多い 24k の炭素繊維の開繊や融点の高い PA9T 樹脂フィルムを熔融するには、PA6 樹脂のフィルム+12K の炭素繊維の UD テープ製造と比べ、必要な超音波エネルギーが大きくなる。そこで、超音波溶着機の負担を軽減して長時間の連続運転への対応を図るため、バイブレーターによる予備開繊機構とフィルムと炭素繊維の予備加熱機構を増設した。400Hz のボールバイブレーターで予備開繊し、150℃で予備加熱することにより、超音波発振器の出力が連続運転可能な 400W（約 500J）程度であっても、図 2-1-9 のように、空隙率を 10%まで改善することができた。

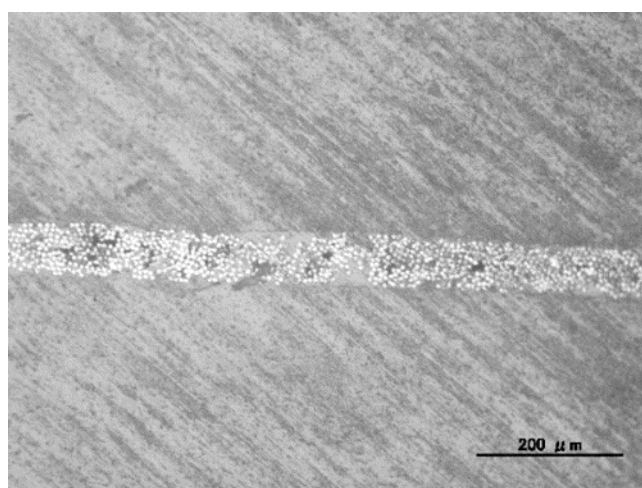


図 2-1-9 改良型製造装置で試作した 24K の炭素繊維を用いた UD テープの断面(空隙率 10%程度)

2-1-3 材料物性の解析・評価

開発目標の 3 点曲げ強度 500MPa 以上の複雑形状部品の圧縮成形を達成するため、裁断された UD テープを材料とした成形品の試作と評価を行った。UD テープ製造装置で作製した UD テープを用いて図 2-1-10 のように一方向性成形品を試作し、3 点曲げ試験(JIS K7074)と断面の観察から成形材料や成形条件等について検討した。

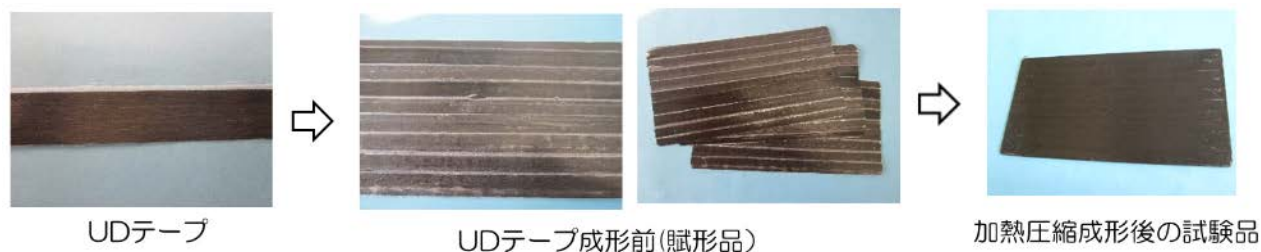


図 2-1-10 材料物性測定試験片の作製(一方向性成形品)

まず、成形材料の空隙率が異なる材料が成形品にどのような影響を与えるかについて確認した。異なる空隙率の UD テープごとに一方向性の成形品を同一条件で作製し、3 点曲げ試験による評価を行った(図 2-1-11)。

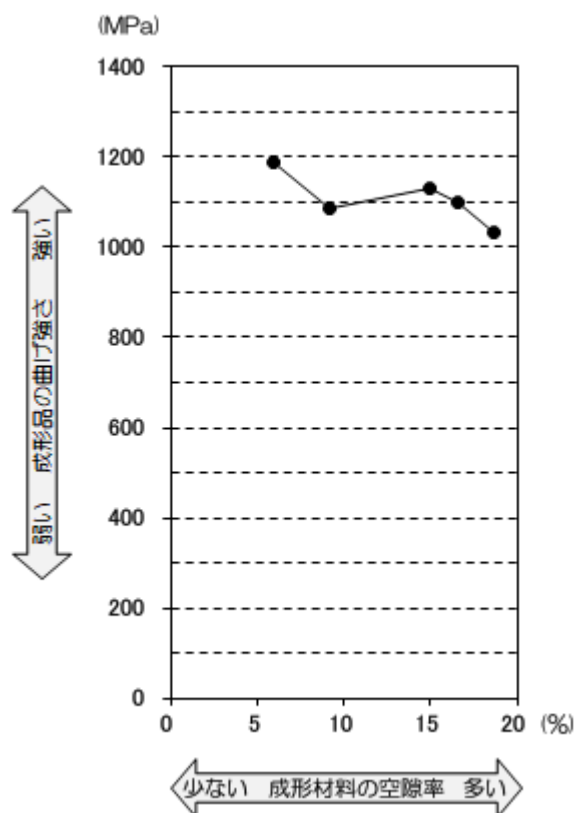


図 2-1-11 成形材料の空隙が成形品強度に与える影響

UD テープの空隙率が低いほど、最大点曲げ応力が高い傾向にあり、高強度の成形品を成形するには、繊維間に樹脂が十分に含浸した成形材料を作ることが望ましいことがわかる。ただし、空隙率が 20%程度であったとしても、成形時間を 1 時間程度かけることで、図 2-1-12 に示すように成形品に空隙がほとんど観察されなくなった。

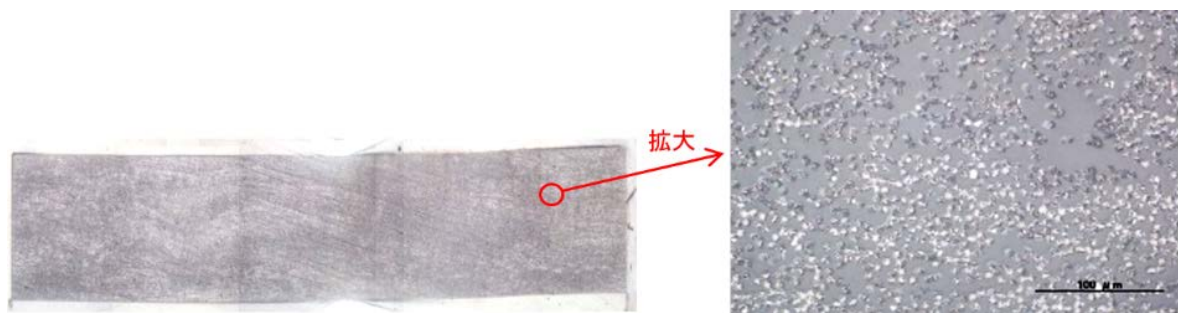


図 2-1-12 一方向成形による成形品の断面（空隙率 0.008%）
（粒子状のものは炭素繊維の断面、灰色部分は樹脂）

成形時の加圧力と加熱温度が成形品に与える影響を検討した。空隙率 20%の UD テープを用いて、加熱温度と加圧力を変えて一方向性の試験片を作製し、3 点曲げ試験による評価を行った(図 2-1-13、図 2-1-14)。1MPa から 4MPa の加圧力で試験片を作成したが、いずれも高い強度が得られることがわかった。また、この試験で使用した PA6 樹脂の場合は、融点の 225℃より高い 240℃以上かつ、分解温度に達しない 280℃以下の温度領域であれば高い強度が得られることがわかった。

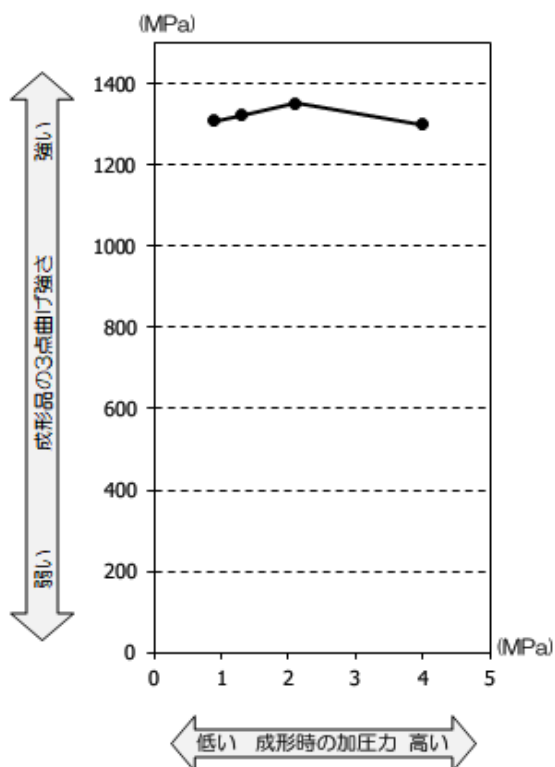


図 2-1-13 成形圧力と成形品強度

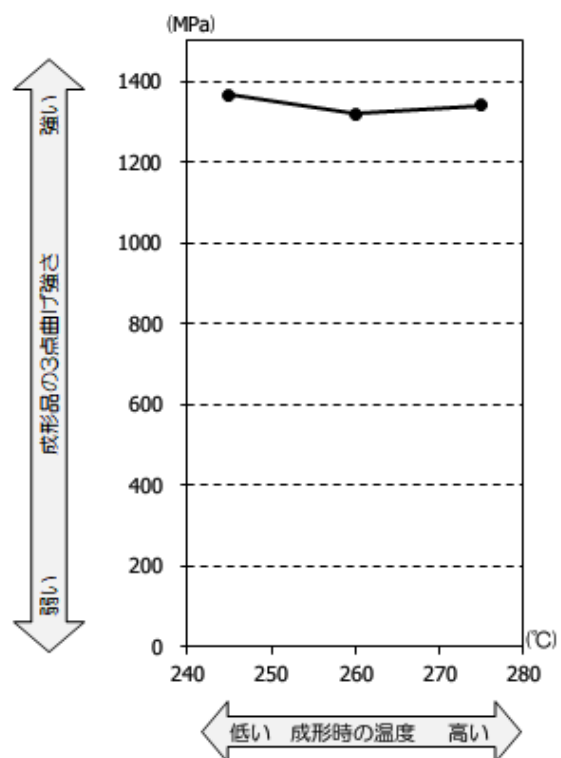
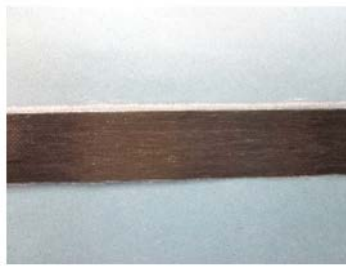
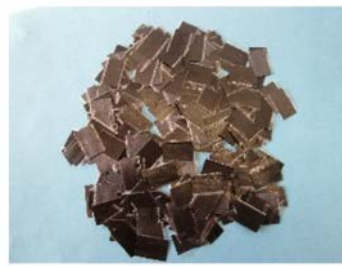


図 2-1-14 成形温度と成形品強度

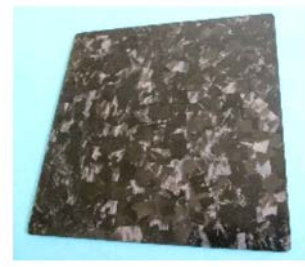
繊維強化複合材は繊維長が成形品の強度を大きく左右する。本研究開発では裁断した UD テープを用いることで複雑形状の成形性向上に対応する。そこで、成形品の目標強度を達成するために、裁断する UD テープの切断長と 3 点曲げ強度の関係を確認した。UD テープを裁断機で一定長に切断し、同一の圧力と温度条件で試験片を作製して(図 2-1-15)、3 点曲げ試験を行った。図 2-1-16 のように、繊維の長さ 15 mm以上で 550MPa の曲げ強度を達成した。成形した試験片の断面観察した結果を図 2-1-17 に示す。成形品の空隙率は 0.002%で成形性も良好であった。



UD テープ
幅：15mm



UD テープの成形前(裁断品)
長さ：5mm から 30mm



加熱圧縮成形後の試験品
成形条件：2MPa、240℃

図 2-1-15 材料物性測定試験片の作製

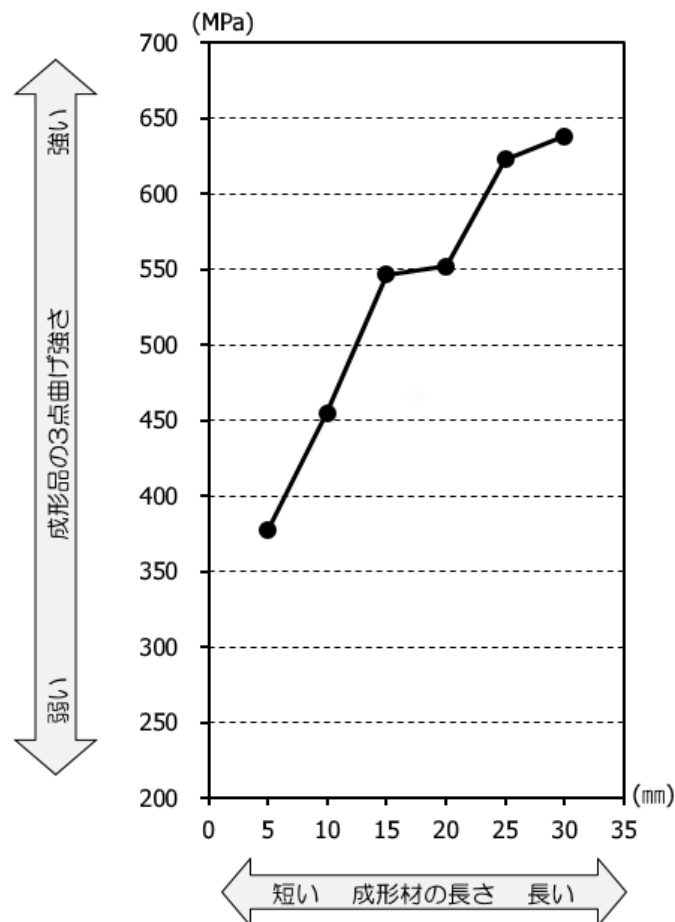


図 2-1-16 成形材料の長さと成形品強度

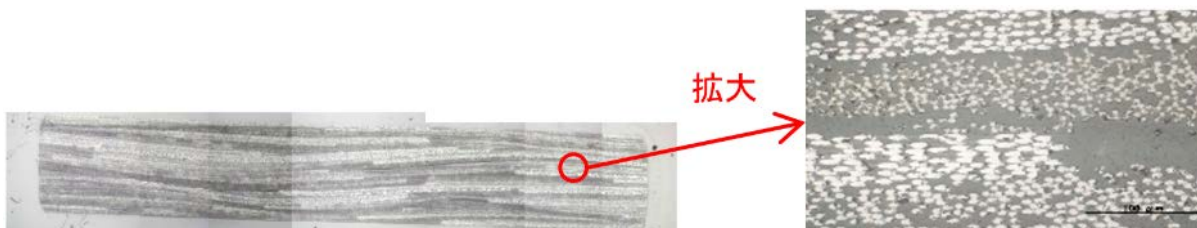


図 2-1-17 ランダム成形による成形品の断面
(空隙率 0.002%、空隙の黒い部分はほぼ見当たらない)

2-2 チョップド UD テープの圧縮成形技術の開発

2-2-1 金型技術の高度化

熱可塑性樹脂を用いた CFRTP 材料は、加熱して樹脂の融点を超えれば熔融して金型で形状を付与できる。一方、金型を冷却すれば、熔融した材料は直ちに固化して成形品を金型から脱型できる。今回の研究開発では、金型温度を通电加熱または水冷により制御し、成形材料を加熱または冷却した。

PA6 樹脂の一般的な成形条件は、成形温度が 260℃、脱型温度が 60℃である。常温から 200℃までの温度上昇を短時間で行うために、金型のヒートアンドクール技術を用いた。図 2-2-1 はヒートアンドクール金型の概念図である。高周波電源を金型に接続し、通电することで金型は電気抵抗のジュール熱によって発熱する。一方、冷却水が金型に触れて金型は冷却される。

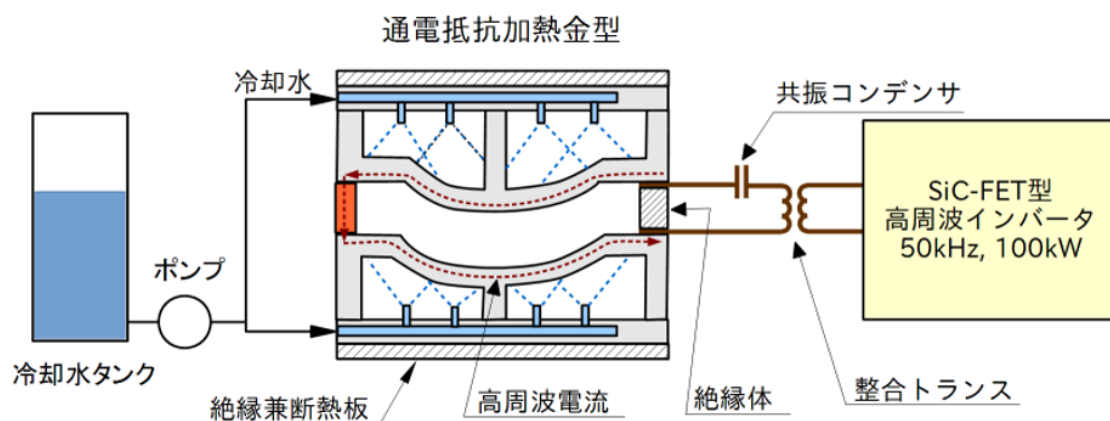


図 2-2-1 ヒートアンドクール金型の概念図

金型は高価な設備であり、型修正や作り直しは容易ではない。そのため、金型の温度分布がどのようになるか、時間の経過によって温度がどのように変化するかを、事前に確認して金型を設計したい。そこで、電磁界解析ソフトウェアの JMAG を用いて金型の温度予測を試みた。図 2-2-2 の左図のように金型をモデル化して、45kHz、2,300A の高周波電流を流すことでジュール熱が発生し、金型の温度が上がる現象をシミュレートした。さらに、金型表面から空気中への熱放射現象も含めた連成解析を行った。金型の冷却に関しては、図 2-2-2 の右図のように、金型の裏側に設けた空洞の表面に冷却水が触れることで熱が伝達する現象をシミュレートした。金型から流水への熱伝達率は $2,500\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ とした。

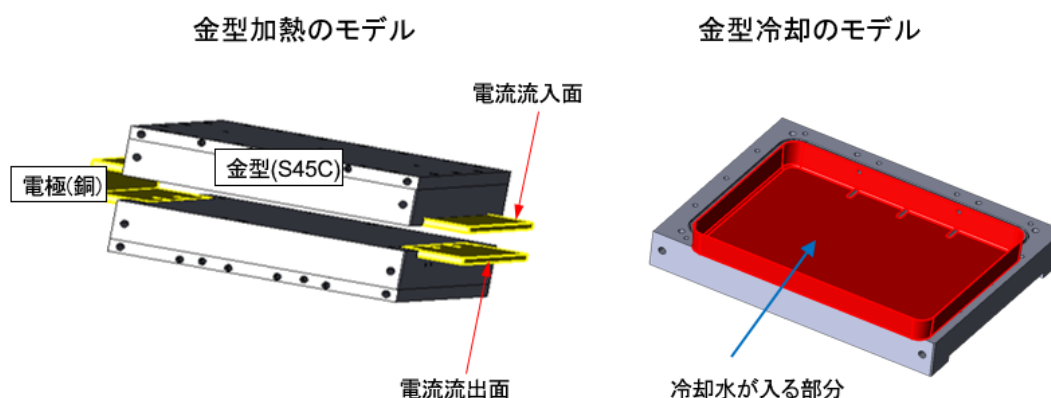


図 2-2-2 金型の加熱・冷却モデル

JMAG で平板の金型の温度分布をシミュレートしたところ、図 2-2-3 のような結果が得られた。右の解析結果は、左の実際の金型の測定結果をかなり正確に再現していると言える。このことから、高周波電流の電磁解析と熱伝導と熱放射を含めた熱解析の連成解析によって、通電抵抗加熱金型の温度分布を予測できることが分かった。

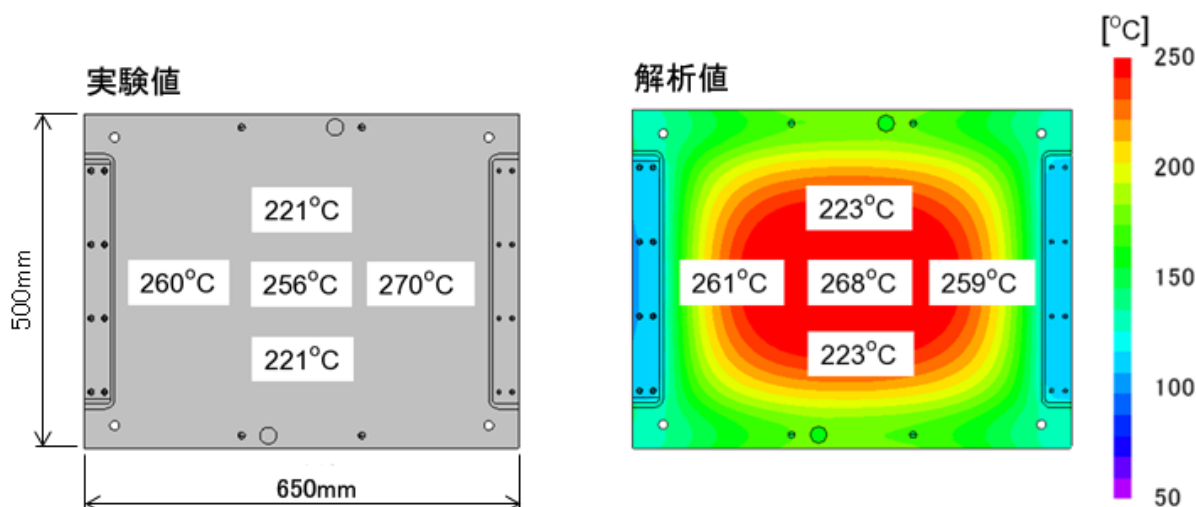


図 2-2-3 平板金型の温度分布、実験値と解析値の比較

さらに、JMAG 解析による時間経過による温度の推移と実際の金型の温度推移を比較した(図 2-2-4)。赤い線が解析結果で、青い線が実際の金型の測定結果である。左が上型の中央、右が下型中央の温度の推移である。温度の推移が正確にシミュレートできていることが分かる。これらの結果から、通電抵抗加熱金型の物理的現象のモデル化が正しく、JMAG は正確にこの物理現象を解析できているものと考えられる。

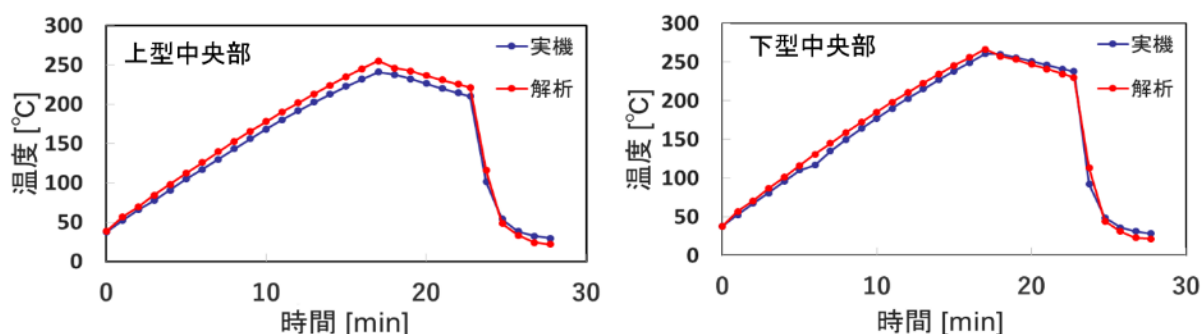


図 2-2-4 平板金型の加熱・冷却工程の時間による温度の推移

平板形状の金型においては、図 2-2-3 のように金型上の位置による温度のばらつきは少ない。しかし、複雑な形状では高周波電流密度の分布や高周波電流によって生じる磁場の影響が加わり、温度のばらつきが生じる。温度のばらつきを減らす方法について、コンピュータ上で実験を行った。今回の試みでは図 2-2-5 に示した型間距離 H を変化させて、その影響を JMAG の解析によって確認した。近接した導電体に電流が流れると、電流によって生じた磁場が電流密度に影響を与えることがあり、近接効果と呼ばれている。

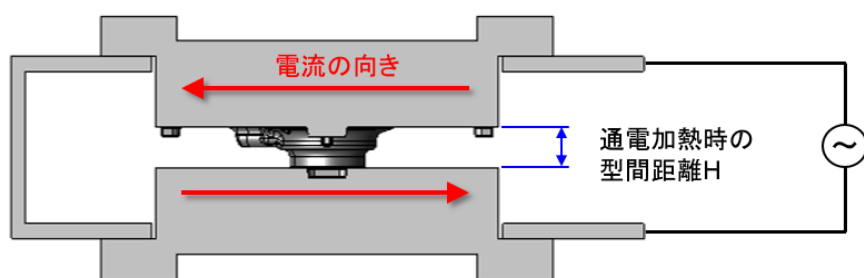


図 2-2-5 通電抵抗加熱金型の電流の向きと型間距離

型間距離 H が 40mm の時の解析による温度分布を図 2-2-6 に示す。凸部の温度は約 350°C 、一方、凹部は約 230°C であることが分かる。この 2 箇所の温度差は 120°C 程度ある。例えば PA6 樹脂の成形のために金型の目標平均温度を 260°C にすると、凸部は 310°C 、凹部は 210°C になる。 310°C は PA6 樹脂が熱分解し始める温度であり、 210°C では PA6 樹脂は個体のままであり、これでは熱プレス成形ができない。

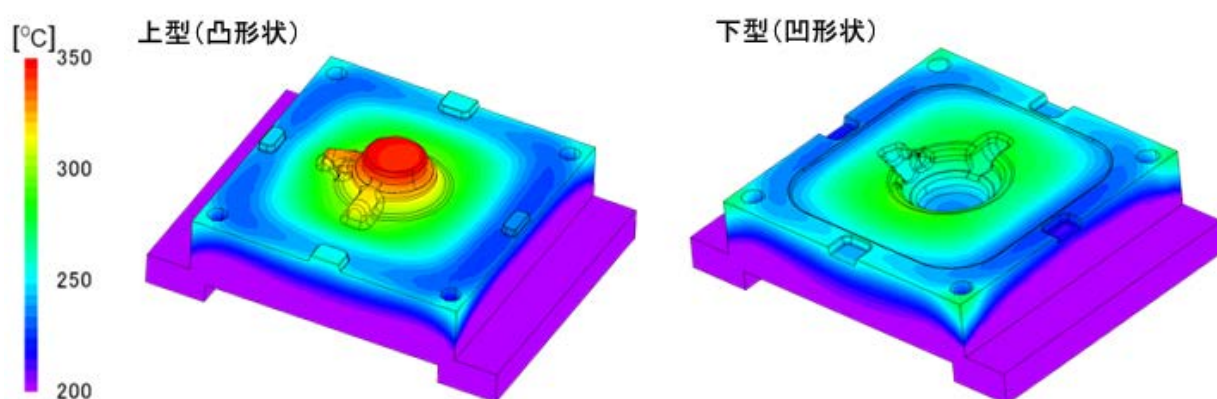


図 2-2-6 型間距離 H が 40mm のときの金型の温度分布

次に型間距離 H を 5mm まで狭めた時の温度分布を図 2-2-7 に示す。5mm 未満にすると、上型と下型が電氣的に短絡する恐れがあり、これ以上、近づけることは困難である。 H が 5mm の時、凸部は約 350°C 、凹部は約 270°C となり、凸部と凹部の温度差は 50°C 程度まで少なくなる。実物の金型を使った実験においても同様の結果が得られており、近接効果を利用することで、通電抵抗加熱金型の温度のばらつきを大幅に改善できることが明らかになった。

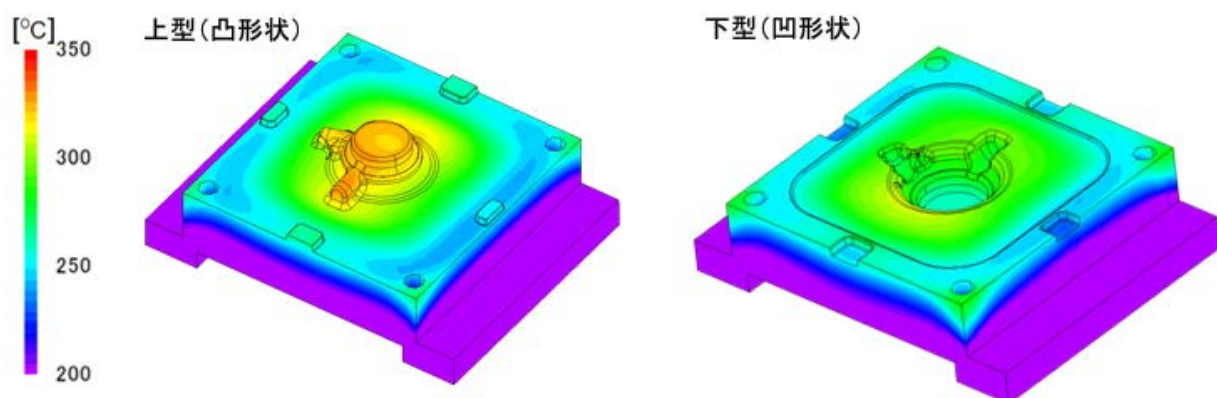


図 2-2-7 型間距離 H が 5mm のときの金型の温度分布

課題 3 の自動車部品の成形金型を設計する際には、得られた近接効果の知見を活かした。次の図 2-2-8 は近接効果を使わない状態の金型の温度分布である。下型の凹部の温度が 150℃程度しかなく、この状態では樹脂が溶融しないため熱プレス成形ができない。コンター図のレンジを超えているが、上型のエッジ部の温度は 300℃に達している。

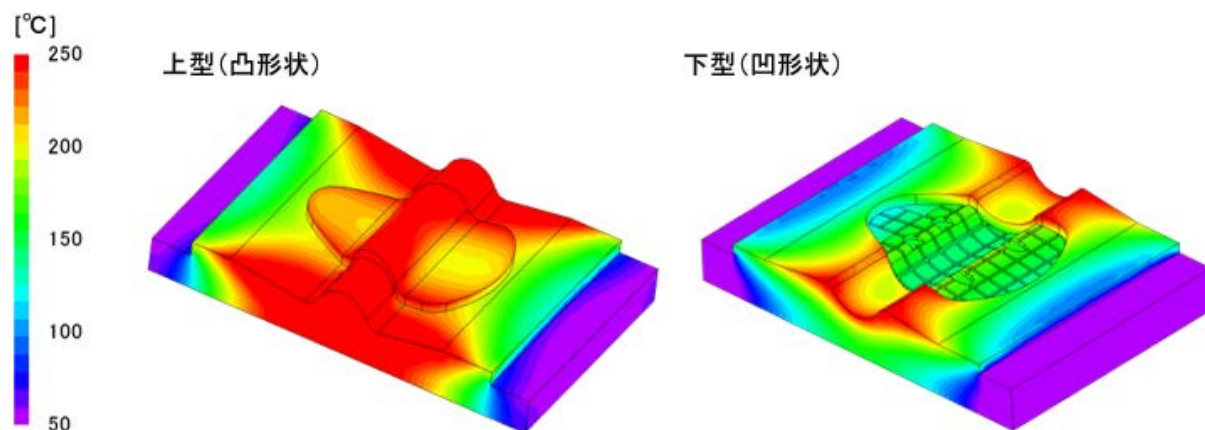


図 2-2-8 近接効果を使わない自動車部品の金型の温度分布

一方、図 2-2-9 の金型では、製品形状部分が金型から飛び出た形状になっており、上型と下型の距離が小さく、近接効果が期待できる。この金型では、上型、下型ともに温度のばらつきを減少させることができた。温度が高い部分は下がり、温度が低い部分は上がるという傾向が確認できる。下型の 150℃の部分は概ね 200℃程度になっている。上型の 300℃近い部分は 250℃程度まで下がっており、温度差は 50℃まで減少している。

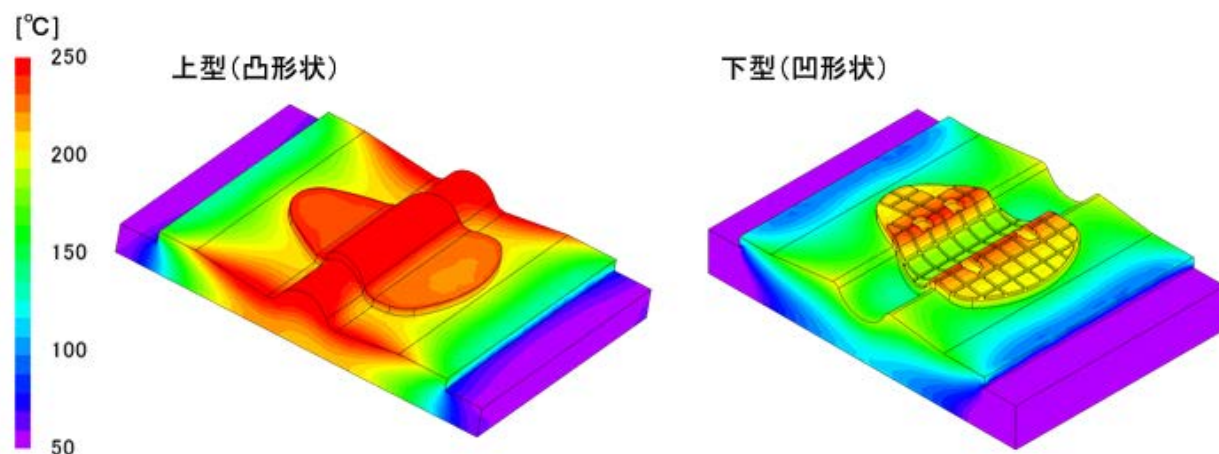


図 2-2-9 近接効果を活かした金型の温度分布（下型の中央部がせりあがっている）

実物の成形金型の表面温度を赤外線サーモグラフィで測定し、温度の傾向を確認した。図 2-2-10 は温度の測定結果である。上型と下型の温度はほぼ同程度になっており、狙った温度になっていることが確認できる。赤外線による温度測定は、対象が金属の場合には精度が低いため、熱電対を用いた温度計でも確認した。その結果、製品部分は 240℃から 270℃の範囲であり、温度のばらつきの幅は 30℃まで減少したことが分かった。

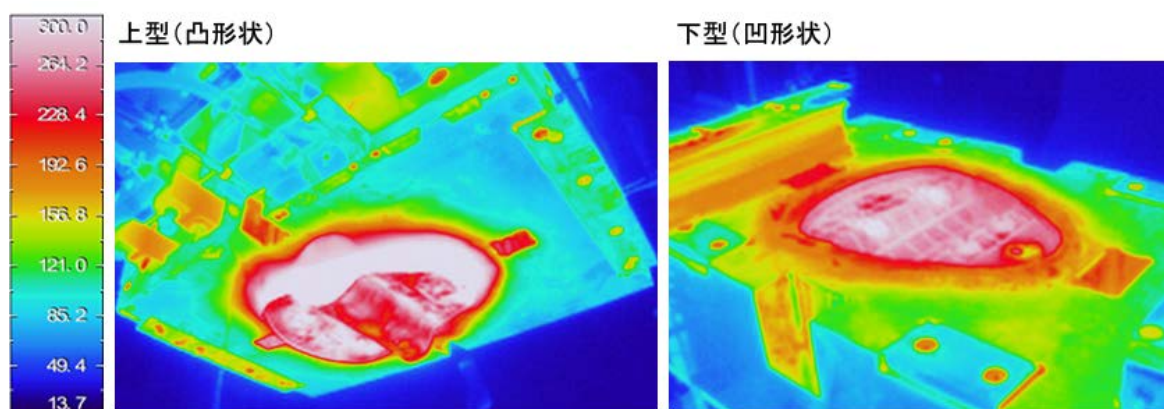


図 2-2-10 金型の赤外線サーモグラフィ画像

2-2-2 圧縮成形機の開発

図 2-2-11 に示す圧縮成形機を開発した。油圧成形機を中心に高周波電源、金型に冷却水を送る金型冷却装置などから構成される。各々の装置のおもな仕様を表 2-2-1 に示す。

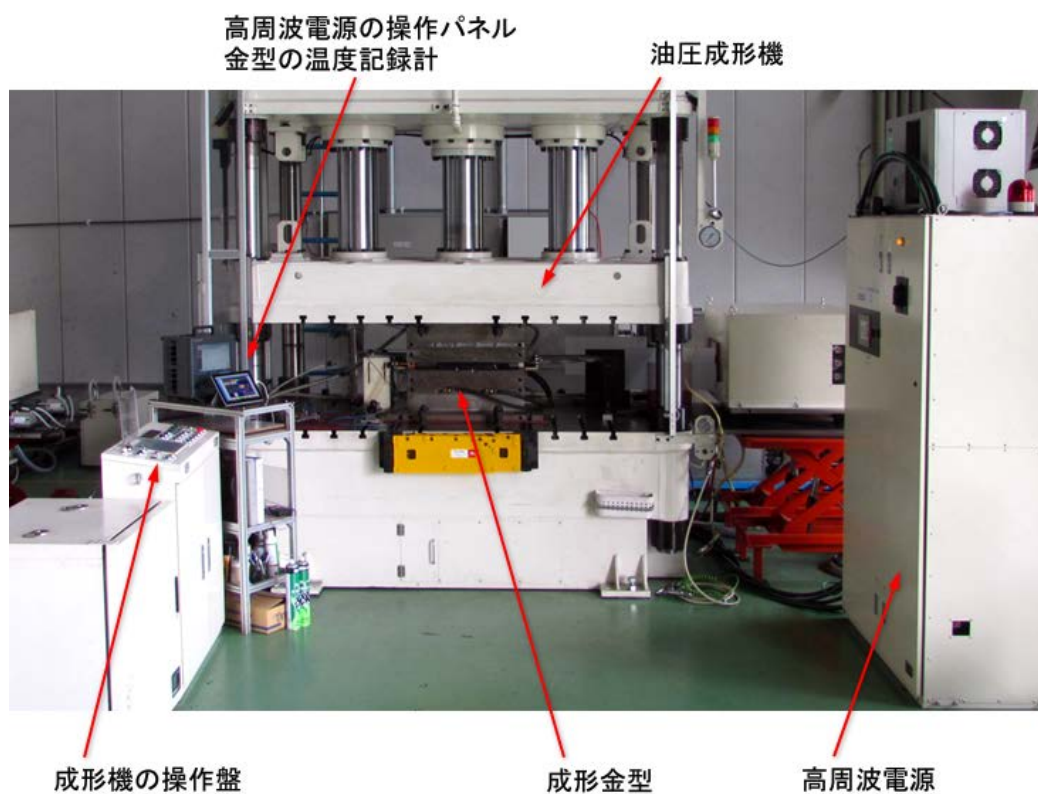


図 2-2-11 圧縮成形機

表 2-2-1 圧縮成形機のおもな仕様

名称	おもな仕様
油圧成形機	型締力 3,000kN、有効盤面 2m×1.4m、ストローク 0.8m
油圧成形機制御盤	シーケンサにより高周波電源及び金型冷却装置の操作が可能
高周波電源	最大出力 200kW、周波数 40kHz – 60kHz、遠隔操作機能あり
金型冷却装置	冷却水タンク容量 0.3 m ³ 、吐出量 0.1 m ³ /min

図 2-2-12 に圧縮成形の概念図を示す。成形材料は図 2-2-13 に示したように空気を含んだ低密度なものであり、圧縮成形によって空気を排出する必要がある。体積が大きな成形材料を金型で圧縮する成形方法であり、圧縮率が 3:1 程度と大きい。成形品を金型から取り出すため、概念図のように金型の製品形状部分が突き出しピンで摺動する構造の金型が必要である。

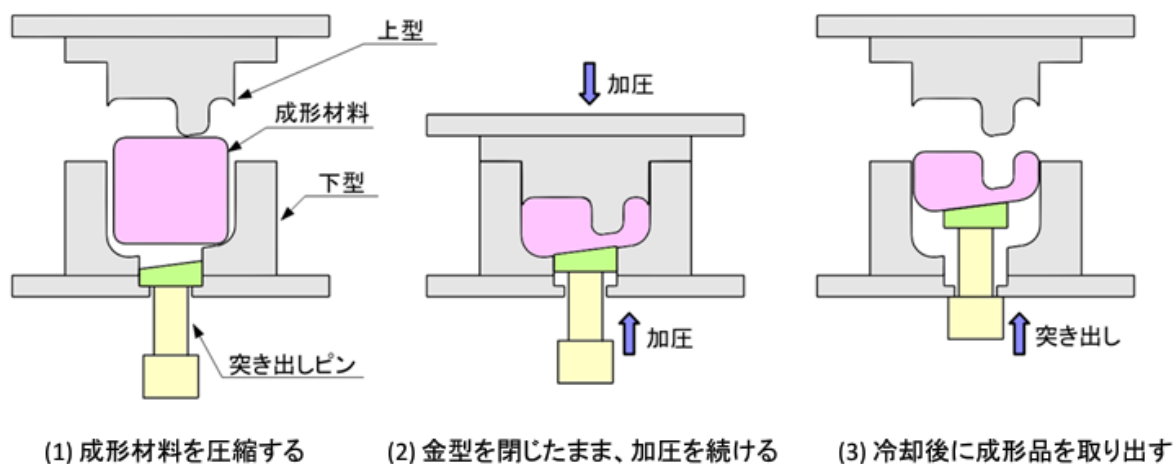


図 2-2-12 圧縮成形の概念図

図 2-2-12 では、極端に成形材料を大きく描いている。ここまで体積が大きいと金型が大きくなりコスト面で不利なこと、材料を金型にセットする作業が困難であることから、実際には図 2-2-13 に示すような予備成形の工程を設けた。成形の前段階で最終的な密度の約 1/3 に相当する $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 程度まで予備圧縮した。

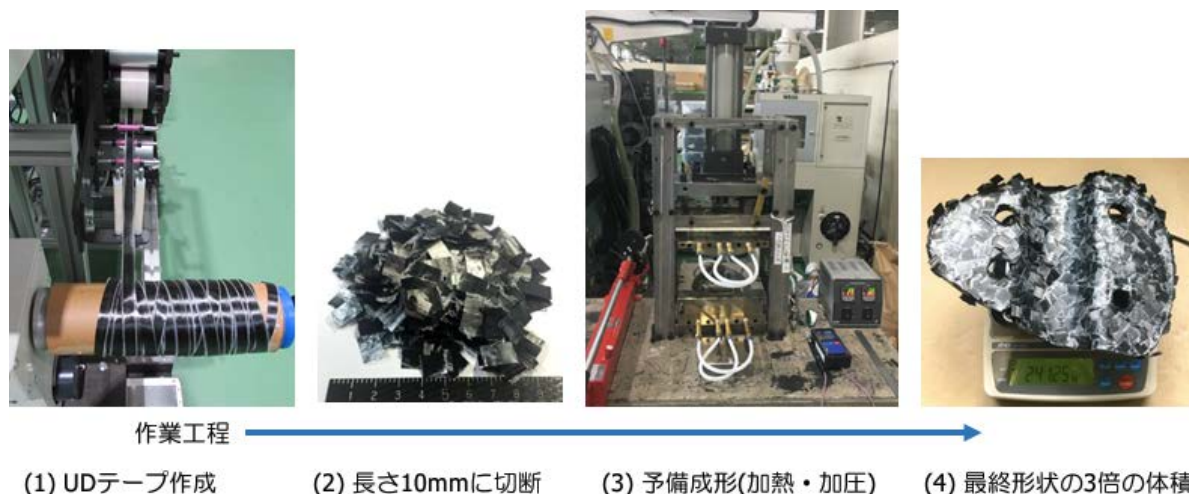


図 2-2-13 成形材料の作成から予備成形までの工程

図 2-2-13 の(4)の状態まで成形材料の準備ができれば、次にヒートアンドクール金型を用いた圧縮成形を行う。図 2-2-14 にヒートアンドクール金型を用いた圧縮成形の手順を示す。金型の温度が樹脂の融点より高い状態で圧縮成形するため、樹脂を十分に含浸させることができる。

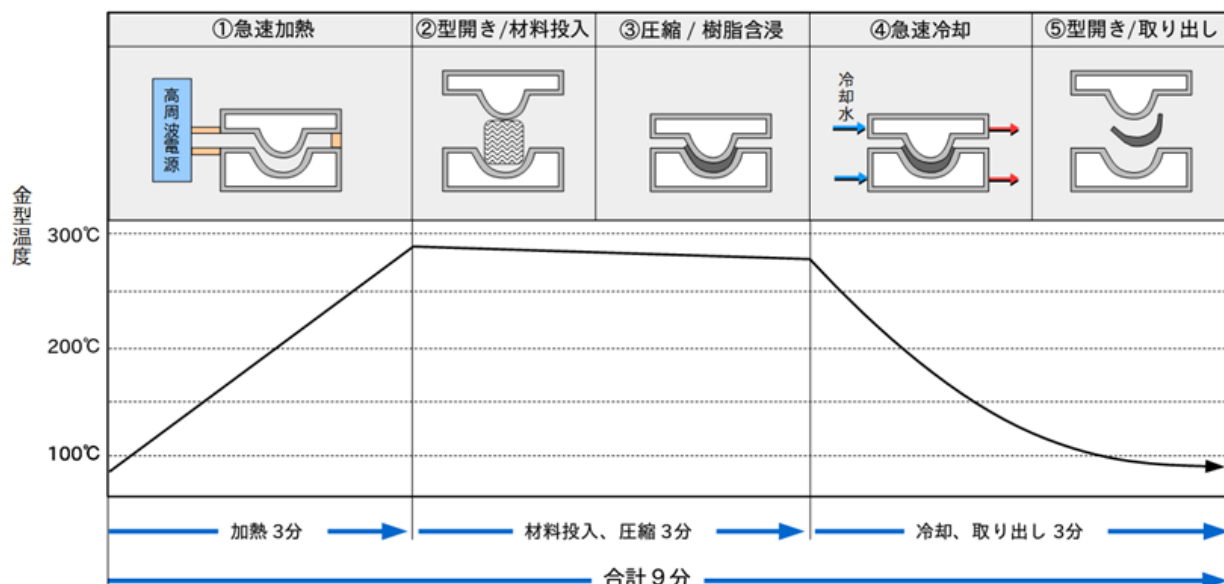
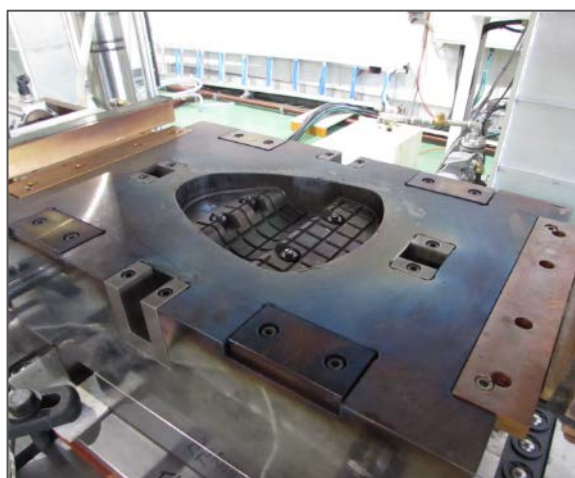
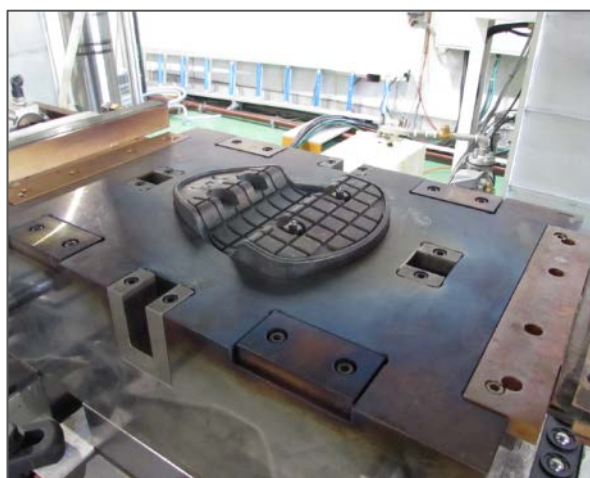


図 2-2-14 ヒートアンドクール金型を用いた圧縮成形の手順

図 2-2-15 は課題 3 の自動車部品を成形した金型の写真である。金型表面は 300℃近い高温になるため黒く酸化していること、成形機の突き出し機能を使って金型の中心部分が上下に動くことなどが分かる。



(1) 成形材料をセットする状態



(2) 成形後、型の一部がせりあがった状態

図 2-2-15 自動車部品のヒートアンドクール金型（下型）

2-3 軽量高強度な試作部品の開発

2-3-1 無人航空機用プロペラの試作・評価

(1) ターゲット部品の選定

近年、ドローンと呼ばれる無人航空機の利用が盛んになりつつある。図 2-3-1 は農薬散布用に使われるヤマハ発動機製の産業用マルチローターYMR-08 である。ドローン本体が軽量化できれば、1 回の農薬の搭載量と農薬散布面積が増えるため、軽量化は極めて重要な課題である。

このドローンは、1 機あたり 8 枚のプロペラを使用するマルチローター型である。プロペラは肉厚が変化することから、熱硬化性材料の積層では大量生産が難しい、また、射出成形では強度と剛性が不足する。今回の研究開発では CFRTP の軽量、高強度、高剛性といった特性を維持したまま、肉厚が変化するプロペラの形状を成形する技術を開発した。



図 2-3-1 農薬散布用無人航空機とそのプロペラ（直径 26 インチ(660mm)）

(2) 要求性能

ドローン用プロペラの開発に当たって、次のような要件を考慮しつつ、試作品を開発した。

- ① 左右の重量バランスが取れていること
- ② 重量が連続繊維 CFRP の製品と同等かもっと軽量であること
- ③ 高回転領域でも変形が少ないこと
- ④ 衝突事故を起こしても、大きな破片が飛散しにくいこと

(3) 左右の重量バランス

要件(1)の左右の重量バランスを取るために、図 2-3-2 のように成形材料を 3 個に分割して予備圧縮を行い、左右の重量を管理した。このことで、重量バランスをほぼ正確に整えることができた。



図 2-3-2 3 分割して準備したプロペラの成形材料

ドローン用プロペラを成形するために図 2-2-13 の(2)の写真のような長さ 10mm に裁断した成形材料を用いた。プロペラは細長い形状のため、成形材料の長さを比較的短く設定した。成形品の体積繊維含有率は 50%、比重は 1.46 になる。事業開始前は、アルミ合金製のプロペラが主流だったが、現在市場のドローンのほとんどすべてが CFRP 製プロペラを採用している。連続繊維の CFRP 材料の比重は 1.5 から 1.55 程度であり、CFRTP は CFRP に対して数%程度の軽量化が見込まれる。

(4) 試作品の製作方法

図 2-3-3 と図 2-3-4 は開発した試作型である。成形材料のマトリックス樹脂は PA6 で吸湿しやすいため、作業の準備段階では 100℃の熱風乾燥機に保管しており、そこから材料を金型に移して成形作業を行った。成形の手順は図 2-2-14 に示したとおりである。



図 2-3-3 プロペラ成形金型（図 2-2-12 の（2）の状態）



図 2-3-4 プロペラ成形金型（図 2-2-12 の（3）の状態）

(5) 試作品の評価

完成した試作品を図 2-3-5 に示す。実際に回転させて評価実験を行うため、成形したプロペラをモーターに取り付けた。



図 2-3-5 モーターに取り付けた試作品のプロペラ

図 2-3-6 は、実際にプロペラを回転させて推力などを測定する実験装置のブロック図である。この実験装置では、回転数と電圧を入力し、トルクと推力を測定することができる。モーターの出力はトルクと回転数から計算で求められる。

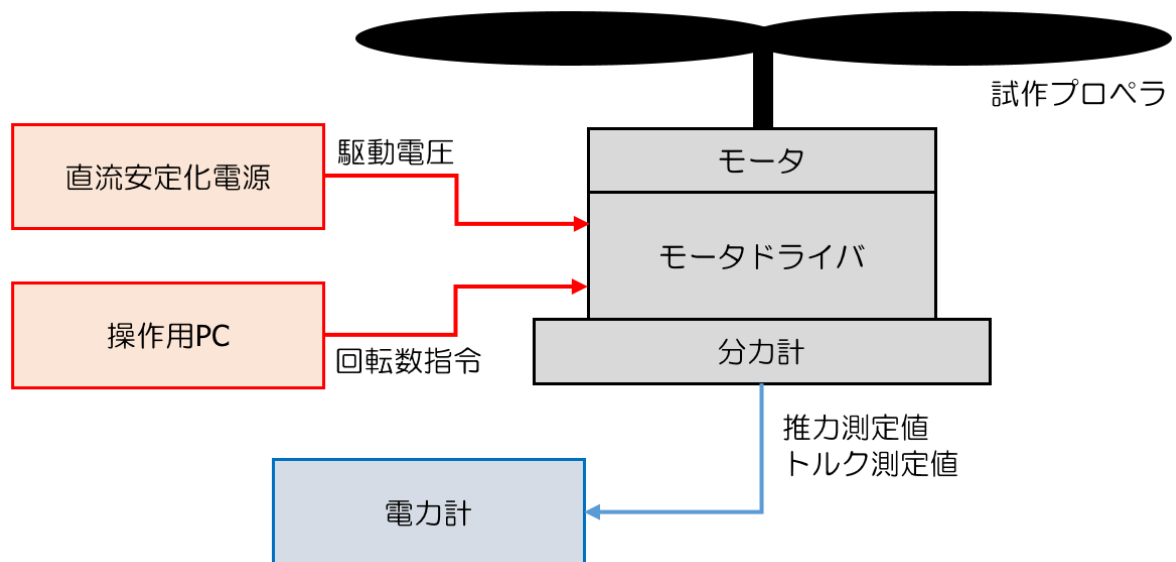


図 2-3-6 プロペラの評価実験装置のダイアグラム図

図 2-3-7 は回転数を変えて推力を測定した結果のグラフである。今回の試作品は高回転領域において量産品より大きな推力が得られている。これは試作品が量産品よりも剛性が高く、高回転時の変形が少なかったからと推測できる。「高回転領域でも変形が少ない」という要件は、高回転時の推力向上とともに、変形が大きいとプロペラが機体に干渉する危険性があるためでもある。

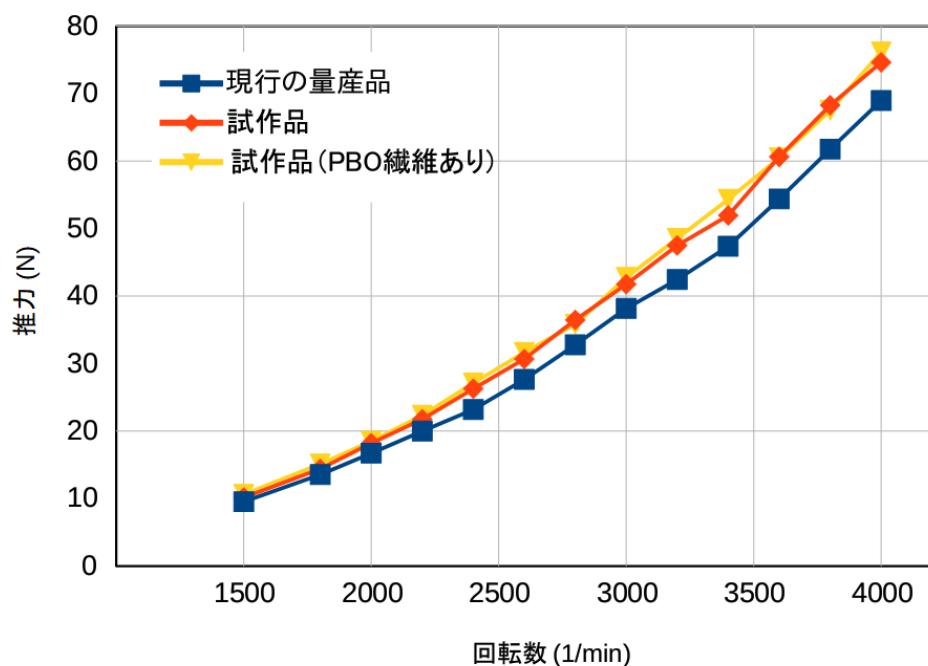


図 2-3-7 回転数と推力の関係

(6) 耐衝撃性の向上

マルチローター型ドローンは、農薬散布作業中にプロペラを樹木などに衝突させたとき、破片が飛び散らないことが求められる。繊維強化樹脂は塑性変形しにくく、衝撃に対して脆性破壊に近い挙動を示すことが知られている。繊維強化樹脂自体の耐衝撃性を大幅に高めることは困難であり、繊維強化樹脂の耐衝撃性を向上させる手法として、下記のような方法が知られている。

- (A) エラストマーをマトリックス樹脂に添加して延性を与える
大きく延性変形する材料を加えて衝撃吸収エネルギーを高めることで靱性を高める。ただし、全体的に分散させるため剛性が低下する。
- (B) 柔軟性がある有機繊維を混ぜる
ポリアミド繊維やポリエステル繊維などの柔軟な有機繊維を混ぜることで、エラストマーと同様に耐衝撃性が高まる。
- (C) 高強度・高弾性有機繊維で補強する
炭素繊維の2倍近い引張強度を持ち、耐熱性にも優れたポリパラフェニレンベンズオキサゾール（PBO）繊維（商品名ザイロン、ザイロンは東洋紡(株)の登録商標である）を補強に用いる。PBO 繊維は熱プレス成形で加熱しても問題ない耐熱性を持ち、耐衝撃性にも優れていることが知られている。
- 参考文献 野村幸弘: 日本複合材料学会誌, 33 巻, 5 号(2007), 191-195

上記3つの方法から(C)を選択し、PBO 繊維を補強に用いて試作品を作り、補強のないものと比較実験を行った。ザイロンはボビンに巻かれた繊維束として販売されている。構造部材として使うには炭素繊維と同様に樹脂を含浸する必要がある。そこで、サブテーマ1で開発したUD テープ製造装置を使って、図2-3-8のようなPBO 繊維 UD テープを作成した。マトリックス樹脂も炭素繊維 UD テープと同じPA6 樹脂を使っている。



図 2-3-8 PBO 繊維 UD テープ

図 2-3-9 に示すようにプロペラの断面中央部に PBO 繊維 UD テープを配置して補強した。断面中央部に配置しているのは、衝突時にクラックが入るのはいたし方ないが、バラバラになって飛散しないようにという意図からである。

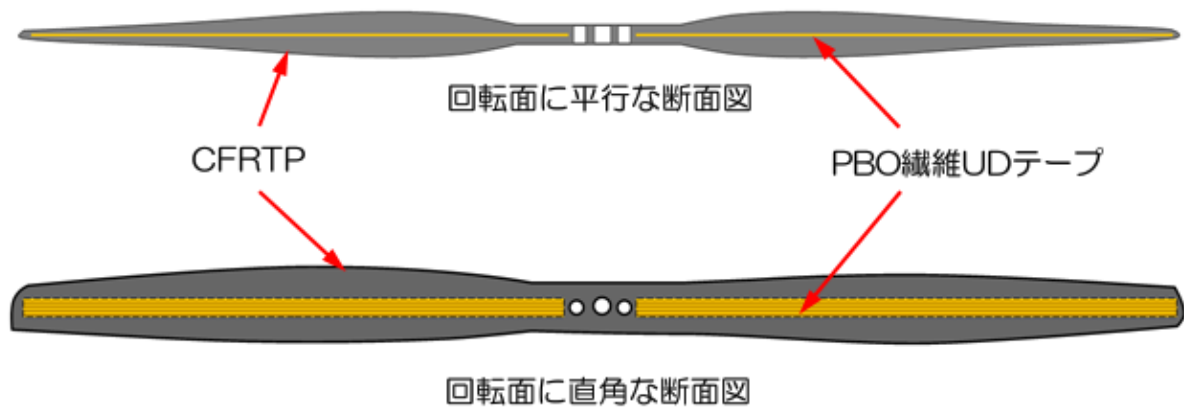


図 2-3-9 PBO 繊維による補強構造

衝突時の破壊特性を調査するために、図 2-3-6 の実験装置を使って、最大出力でプロペラが回転しているところに、900g 重の鉄製錘を衝突させた。高速度カメラを使って衝突時のプロペラの破壊形態を撮影した。図 2-3-10 は衝突時の動画から取り出した静止画である。破片が飛んでいく様子が確認した。

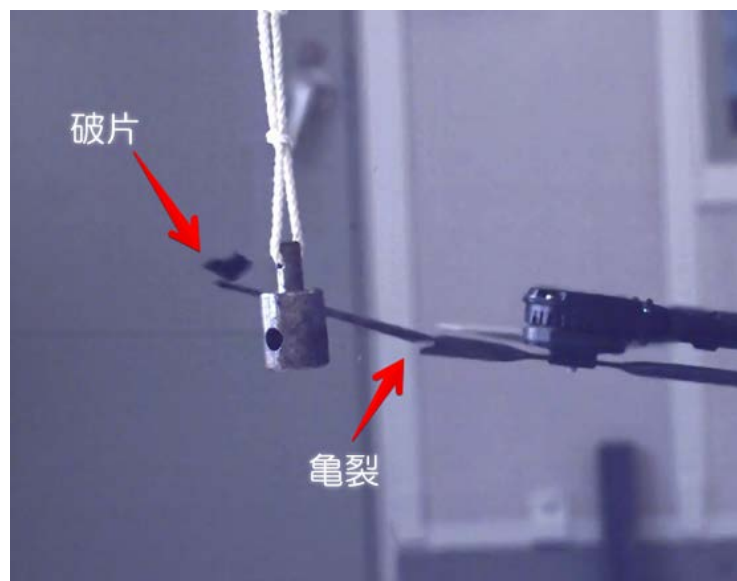


図 2-3-10 衝突時の高速度カメラ画像

PBO 繊維を含まないものを 2 回、PBO 繊維を含むものを 2 回、合計 4 回の衝突試験を実施した。試験後の状態を図 2-3-11 に示す。衝突により生じた破片の大きさの大小はあるものの、破壊形態はすべて脆性破壊であった。細かな破片ができたのは(2)の PBO 繊維による補強をしていないものだけだった。熱硬化性 CFRP や射出成形の製品では細かな破片がたくさん生じる破壊形態と言われており、今回の CFRTP の試作品はいずれも耐衝撃性に優れている。細かな破片は生じにくい結果であったが、大きなかたまりの破片が生じた。大きな破片は遠くまで飛んでいく危険性があり、今後の開発課題として次のようなことが考えられる。

(ア) PBO 繊維をより広い範囲に入れることで補強効果を高める。

今回は幅 10mm の PBO 繊維 UD テープが 1 本、埋め込まただけなので、PBO 繊維の量を

増やすことで補強効果が高まる。

(イ) エラストマーをマトリックス樹脂に用いた UD テープを混合する。

普通のポリアミド樹脂の UD テープとエラストマーの UD テープとを混合する。エラストマーを混ぜると剛性が低下するため、混ぜる割合は剛性と耐衝撃性のバランスを考慮して決定する。



(1) PBO繊維なし - 1



(2) PBO繊維なし - 2



(3) PBO繊維あり - 1



(4) PBO繊維あり - 2

図 2-3-11 衝突試験後のプロペラの形状

2-3-2 自動車部品の試作・評価

(1) ターゲット部品の選定

ステアリングサポート(図 2-3-12)は、インストルメントパネル（計器盤）の中にあるアルミ合金製の部品で、ステアリングカラムと呼ばれる足回りを制御する部品を吊り下げ、走行時の路面振動を抑制する等の機能が要求される。ステアリングサポートの軽量化のために材料をアルミ合金から CFRTP への置き換えるに当たって、部品機能を満足させるために必要な要素を抽出して、図 2-3-13 に示す試作品を設計、製作した。



図 2-3-12 ステアリングサポート(アルミ合金製)



図 2-3-13 ステアリングサポート（CFRTP 製）

(2) 要求性能

今回、材料をアルミ合金から CFRTP に置換した際に要求される性能を以下に示す。

- ① CFRTP 製のステアリングサポートの重量はアルミ合金製よりも 30% 軽くする。
- ② 製品剛性の向上、ばらつきを抑制するため、ボイドの体積率を 1% 未満とする。
- ③ ステアリングカラムを吊るために、インサートされたボルトが引き抜き強度を保有している。

(3) 試作品の製作

「2-2-2 圧縮成形機の開発」に記載した方法で試作品を成形した。図 2-3-14 は熱プレス成形の前に予備圧縮した成形材料である。この段階で、最終的な形状の 3 倍程度の体積まで圧縮した。裁断した UD テープはポリ袋に入れて攪拌することで、繊維方向がランダムになるように、注意した。



図 2-3-14 予備成形した成形材料

図 2-3-15 のように成形金型の下型に予備成形した成形材料をセットして熱プレス成形した。この段階でボルトも金型にセットされており、インサート成形になっている。

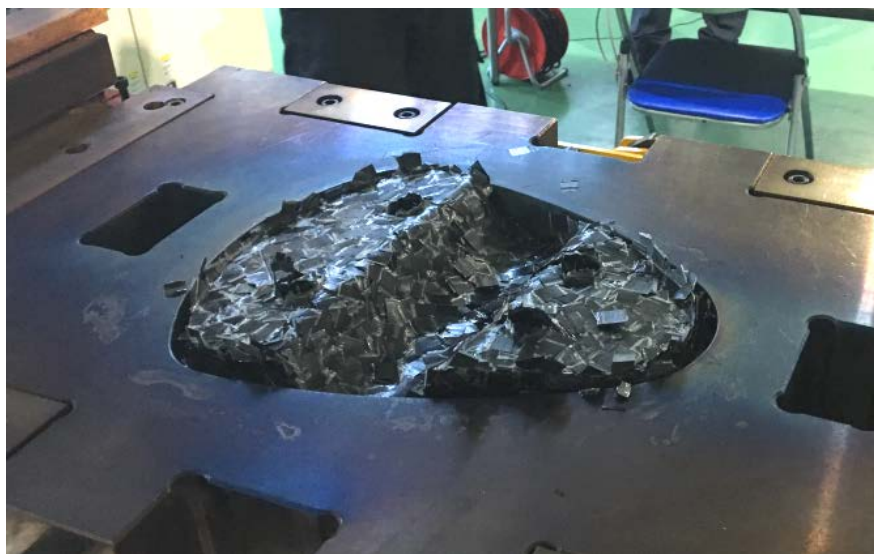


図 2-3-15 成形金型への成形材料とボルトのセット

図 2-3-16 は成形直後の試作品である。周辺にバリが生じているが、無駄になった材料はごく少量であり、歩留まりが優れた成形方法と言える。



図 2-3-16

(4) 成形品内のボイド観察

成形品の形状が立体かつ複雑形状であるため、従来行われている断面観察では 2 次元的にしか評価が出来なく、正確にボイドを捉えることが困難である。そのため、CFRTP 製ステアリングサポートの評価では、X 線 CT 装置を使用して成形品内部のボイド観察を実施した。分解能を向上させるため、成形品を図 2-3-17 に示すように A、B、C、D と 4 分割にして撮影した。また、CFRTP に埋まっていないインサートボルトのネジ部や金属リブがあると撮影時に X 線が減衰し、感度が低下するため、CFRTP から出ている金属部分を切断した。そして、撮影後にボイド率を算出した。

図 2-3-18 から 2-3-20 に A 部の解析結果およびボイド率を記載する。図 2-3-18 と図 2-3-19 は断面画像であり、この画像からは特定の場所のボイド率が計算できる。一方、図 2-3-20 では 3 次

元的に解析して試作品全体のボイド率を計算した。

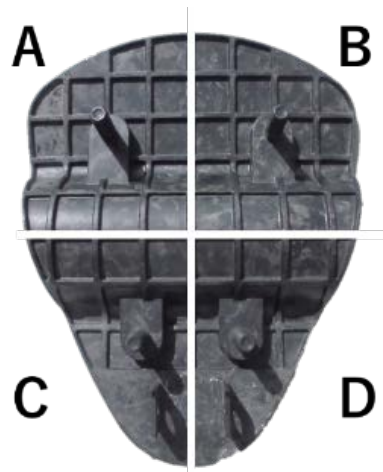


図 2-3-17 成形品の分割名称

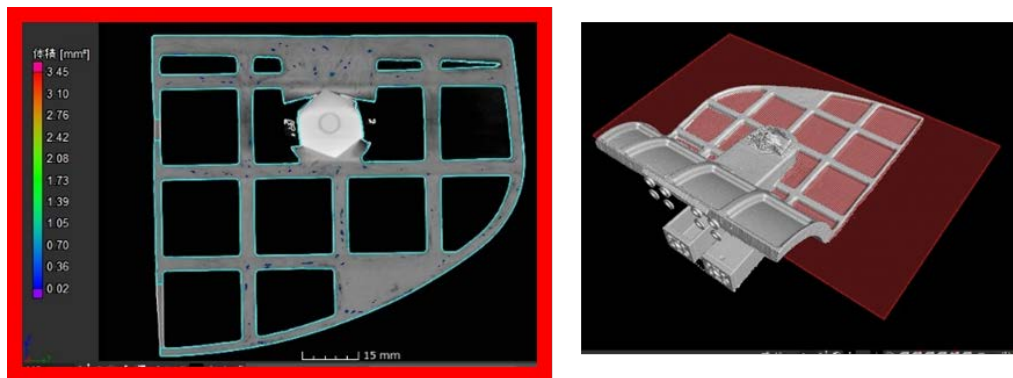


図 2-3-18 断面画像(水平)

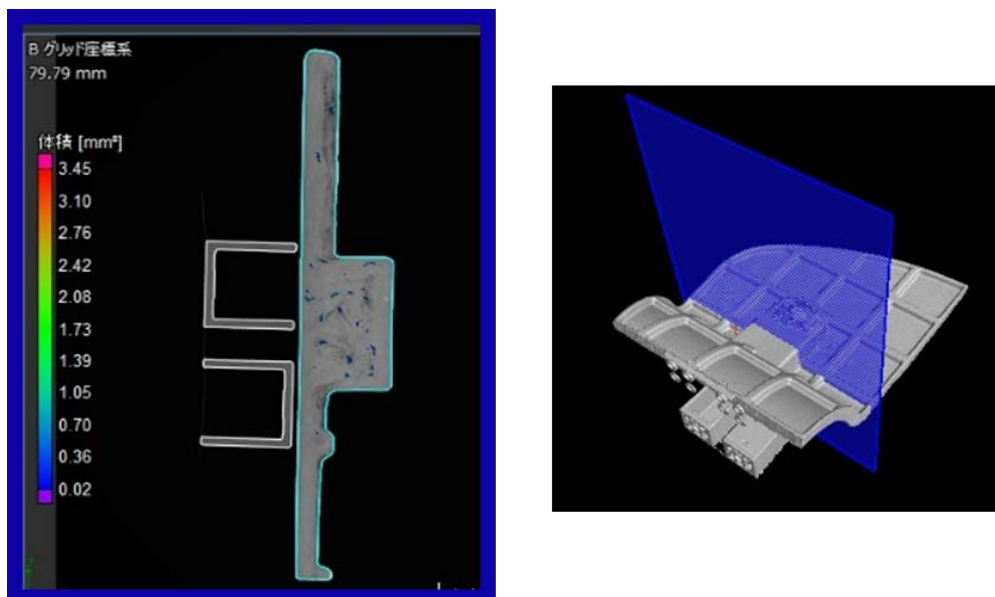


図 2-3-19 断面画像(垂直)

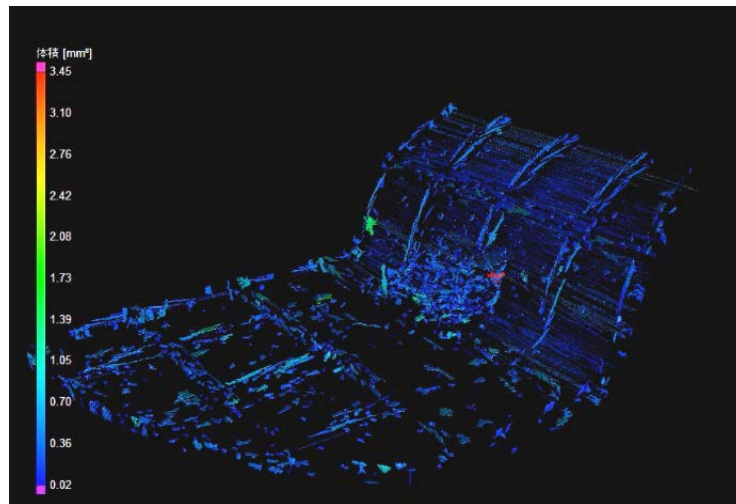


図 2-3-20 ボイドの 3 次元画像

A、B、C、D のボイド率を平均した成形品全体のボイド率は 0.98%であった。インサートボルト周辺の肉厚のある部位やリブ周辺等に細かいボイドは残留しているが、全体的にはボイド率 1% 未満であるため、成形性が非常に高いことが分かった。チョップド UD テープを材料として圧縮成形技術を用いて試作したステアリングサポートを観察した結果、ボイド率は 1%程度で 3mm^3 を超す大きな空隙の数は非常に限られ、本製法が複雑形状部品の成形に有効であることが示唆された。

(5) インサートボルトの引き抜き試験

成形時にボルトをインサートすることで、接合時の部品点数削減を図った。インサートボルトの引き抜き強度を測定して、ボルト締結に十分な強度を有しているのかを確認した。成形品のインサート部周辺を切り出し、図 2-3-21 に示す治具で切り出した成形品を固定し、引き抜き試験を実施した。試験結果を図 2-3-22 に示す。



図 2-3-21 引張試験治具

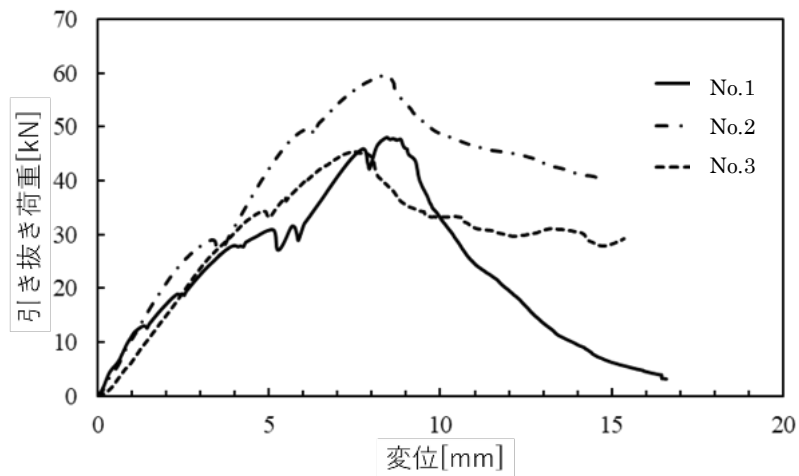


図 2-3-22 インサートボルト 引き抜き試験結果

インサートボルト 1 本あたりの引き抜き荷重は 45.4kN であり、約 4627kg までの部品であれば支えることが可能となる。ハンドル周りの部品は複数のボルトで固定するため、安全率を考慮しても今回の結果は十分な強度を有していると考えられる。そのため、ボルト周りの薄肉化やボルトの径を縮小するなどさらなる軽量化が可能である。動荷重については検証できていないため、形状の再検討後に評価をする。

(6) まとめ

試作品はアルミ合金製のステアリングサポートから形状を大きく変更したため、剛性評価や強度評価等、一部実施が困難なところがあった。アルミ合金製の重量は 1.27kg、今回、試作した CFRTP 製は 0.48kg だった。両者を単純に比較することはできないが、材料をアルミから CFRTP に変えることにより、大幅な軽量化が見込める。成形品内のポイド率は 1% 未満と成形性が良いため、強度や剛性等はランダム材料の成形試験片の結果と同等だと推測される。インサートボルトの引き抜き強度は十分に確保できており、組付け時の部品点数削減に貢献できる。

今後の展望として、インサートボルト周辺の肉厚を薄くして軽量化や、機能を満足できるような形状を再検討する。また、今回成形品を他部品に組み付けて強度や剛性の評価が出来なかったため、接合する相手部品の形状も変更して評価する。

第3章 全体総括

3-1 研究成果

UD テープと呼ばれる一方向の炭素繊維に熱可塑性樹脂を含浸した材料の製造装置を開発した。肉厚が変化する複雑形状を軽量・高強度に作るため、短くチョップされた UD テープを圧縮成形する技術を開発した。チョップした材料をランダムに混ぜて圧縮成形した試験片を作成し 500MPa 以上の曲げ強度を実現した。小型無人航空機のプロペラと自動車のステアリングサポートの 2 種類の部品を試作し評価した。

3-2 研究後の課題

小型無人航空機のプロペラでは、衝突時の飛散防止対策が十分にできなかった。川下企業とも協力して、さらなる改良をしていく。自動車部品のステアリングサポートは、非常に複雑な形状のため、組み合わせる相手部品の形状などを考慮して剛性などの評価を継続する。

3-3 事業化

川下企業との協力関係を継続し、小型無人航空機や自動車部品の分野で事業化を進める。他に、アシストロボットのような新たな分野についても事業化の可能性を探りたい。