

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「熱可塑性CFRPによる車載用大型複雑形状製品の
成形技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構

目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的および目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
2-1 成形解析技術用材料特性の計測	8
2-2 CAE 成形解析技術によるスタンパブルシートの設計	9
2-3 大型スタンパブルシートの作製	14
2-4 複雑形状製品の金型の設計と成形条件の設定	16
第3章 全体総括	20

第1章 研究開発の概要

軽量で高強度な特徴を持つ CFRP を今後普及させていくには、成形の高効率化が急務であり、従来の金属材料と同様のプレス加工ができれば広く汎用化が進展し、環境負荷低減に有益な成形方法となる。そのため、成形性のよい大型のスタンパブルシートへの設計・製造技術を確立することを本研究開発の目的とする。

まず、強度設計の指標を得るため、炭素繊維の配向を変化させた積層サンプルについて材料特性値の計測を実施し、曲げ強度特性について検討する。また、異なる素材方向を組み合わせた基本ユニットをもつ積層材料について、材料特性の計測方法を検討する。次に、複雑 3 次元形状に成形するスタンパブルシートの積層方法を効率的に決定するために CAE 解析による積層配向、積層枚数等を変数とした成形解析および成形限界の評価方法について検討する。同時に、成形時の問題解決に有益な指針確立をするために CAE によって製品に有害な割れやしわが発生しないブランク形状についても決定する。

実験では試験片水準で得られた成形条件と品質（曲げ強度）との相関関係の知見を活用し、温度および圧力等を制御因子とした大型スタンパブルシートの成形実験を行う。成形されたシート上の各部位から試験片を切り出し、曲げ試験を実施し、成形箇所毎の曲げ強度の傾向について調査・検討する。

得られた結果を分析し、品質のばらつきを成形条件に反映させ、品質を均一化させる成形システムを構築する。また、精度良く成形するための位置決めや仮接着等の取扱い方法について検討する。

以上の成果からパンチおよびダイスのコーナー R 等を制御因子とした成形実験を行い、金型の設計基準を確立する。また、プレス成形条件を制御因子とした成形実験を行い、製品品質との関係を明確化する。さらに、スタンパブルシートの最適な加熱システムの検討および加熱温度と金型の温度の関係の明確化により、複雑 3 次元形状製品の成形に最適な成形条件を確立する。

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

自動車業界では、燃費を向上させるための軽量化が求められており、その対策として、従来の金属材料から非鉄金属を含め、他の軽量材料への置換が積極的に進められている。特に、炭素繊維強化プラスチック（以下「CFRP」という。）は、その軽量化の効果と比強度等の機械的特性から代替材料として期待されているが、従来の熱硬化性樹脂を母材とする CFRP では、設計で求められた形状を得るまでの成形サイクル時間が長くて量産性に乏しい等の課題があり、当初の予測ほど普及していない。

そこで、熱可塑性樹脂（アクリル樹脂）からなる連続繊維のプリプレグシートが開発され、それを単純積層してスタンパブルシートとし、これを金型でプレス成形することに

より高効率化を図り、上記の課題解決に向けて検討されている。この方法では、通常の鋼板をプレス成形するのと同様な設備を用いることができる等の大きなメリットはあるが、部分的に形状が複雑化し、凹凸の差の大きな形状になると、割れやしわが発生するといった問題が生じている。

本研究開発では、軽量化材料として有望な熱可塑性樹脂（アクリル樹脂）からなる CFRP のプリプレグシートを積層・組合せ構造により、最終製品形状に最適なスタンパブルシートを作製して金属材料に用いていた従来のプレス機を活用しプレス成形を可能にする『熱可塑性 CFRP による車載用大型複雑形状製品の成形技術の開発』を目的とする。今年度は、これにより外寸法 1000mm × 800mm × 80mm 程度の複雑形状製品をプレス成形することを目標とする。ここに、従来技術と新技術との比較を図 1-1 に示す。

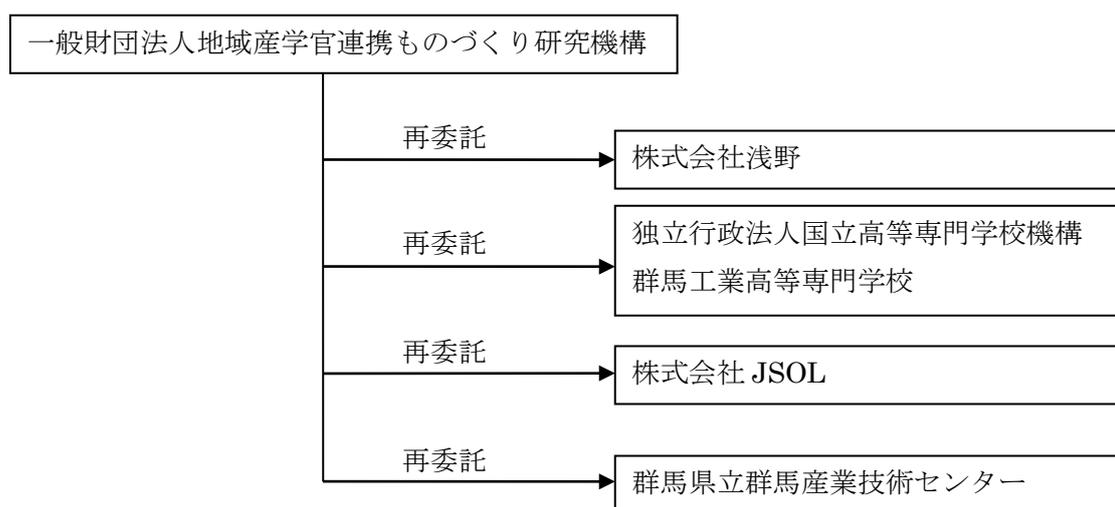


図 1-1 研究開発の概要

1-2 研究体制

研究体制は以下に示すように、産学官の連携組織である。

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)



事業管理者：清水 聖義（一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構 代表理事）

総括研究代表者：中村 仁（株式会社 浅野 技術開発部 部長）

副総括研究代表者：黒瀬 雅詞（独立行政法人国立高等専門学校機構群馬工業高等専門学校 機械工学科 教授）

【事業管理機関】

(管理員)

委託先：一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構 担当者および担当項目

石坂 之敏（事務局 次長）

佐藤 純一（総務課長）

天野 奈緒美（経理課長）

(研究員)

再委託先：株式会社 浅野 担当者および担当項目

中村 仁（技術開発部 部長）③④

小堀 晃（技術開発部）③④

篠原 立憲（技術開発部）③④

再委託先：独立行政法人国立高等専門学校機構群馬工業高等専門学校 担当者および担当項目

黒瀬 雅詞（機械工学科 教授）①②③④

再委託先：株式会社 JSOL 担当者および担当項目

平島 禎（技術営業部 部長）①②③④

小田 穂高（技術営業部 課長）①②③④、

西 正人（技術営業部）①②③④

長谷川 寛（技術営業部）①②③④

再委託先：群馬県立群馬産業技術センター 担当者および担当項目

鏑木 哲志（技術支援係 独立研究員）①③④

小谷 雄二（企画管理係 係長 独立研究員）①③④

福島 祥夫（生産システム係 係長 独立研究員）①③④

岩沢 知幸（生産システム係 技師）①③④

（協力者）

委託先：一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構

甲本 忠史（専務理事 群馬大学名誉教授）

久米原 宏之（常務理事 群馬大学名誉教授）

1-3 成果概要

①CAE 成形解析技術用材料特性の計測

熱可塑性 CFRP において従来の金属材料と同等精度で CAE 解析を可能とすることを目標として、材料特性の計測について検討を行った。熱可塑性 CFRP のプレス成形解析に適した材料モデルを設定し、常温から成形温度域における引張特性および曲げ特性等の材料特性を取得した。

②CAE 成形解析技術によるスタンパブルシートの設計

熱可塑性 CFRP において従来の金属材料における成形性予測と同等精度で割れやしわを予測可能なことを目標として、CAE 解析手法について検討を行った。S タイプレール形状の成形実験において解析精度向上の基礎的検討を行い、大型複雑形状製品において解析手法の妥当性の確認を行った。CAE 解析に成形中の材料の温度履歴を考慮することで解析精度が向上することを確認した。

③大型スタンパブルシートの作製

大型スタンパブルシートを作製における品質向上を目的として、成形条件の最適化について検討を行った。温度や圧力等の成形条件を最適化することで 1000mm×1500mm の寸法のスタンパブルシートにおいて曲げ強度 600MPa 以上の品質で成形できる技術を確立した。

④複雑形状製品の金型の設計と成形条件の設定

熱可塑性 CFRP の自動車用部品への適用を目標として、大型複雑形状製品の成形を可能とする金型設計および成形条件について検討を行った。自動車用フロア部品を対象として、60 秒以内で成形できる技術を確立した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒370-0006 群馬県伊勢崎市三和町2718-1

株式会社 浅野 技術開発部 部長 中村 仁

TEL : 0270-75-1700 FAX : 0270-75-1739

E-mail : nakamura-hitoshi@asano-japan.com

第2章 本論

2-1 成形解析技術用材料特性の計測

複合材料のプレス成形 CAE 解析のパラメータとして、代表的な材料モデルについて検討を実施した。その結果を図 2-1-1 に示す。図において、上段の弾性係数マトリックスは各材料モデルの特性を示す。熱可塑性 CFRP は異方性が強い材料であるため、直交異方性を有する斜方晶系のような弾性係数マトリックスとなる。しかしながら、成形する際には繊維方向にのみ負荷がかかる場合がないため、単斜晶系のような繊維方向と弾性の主軸が一致しないような弾性係数マトリックスを検討すべきである。マトリックスに示した数値は誇大に表記しているが、ある異方性を与えた材料モデルにおけるそれぞれの負荷方向に対する材料特性パターンの一例が図の下段である。このパターンは、文献値を基本とし一部実験結果を反映させ検討を行ったものであり、後述の CAE 解析例に適用したものの一部でもある。

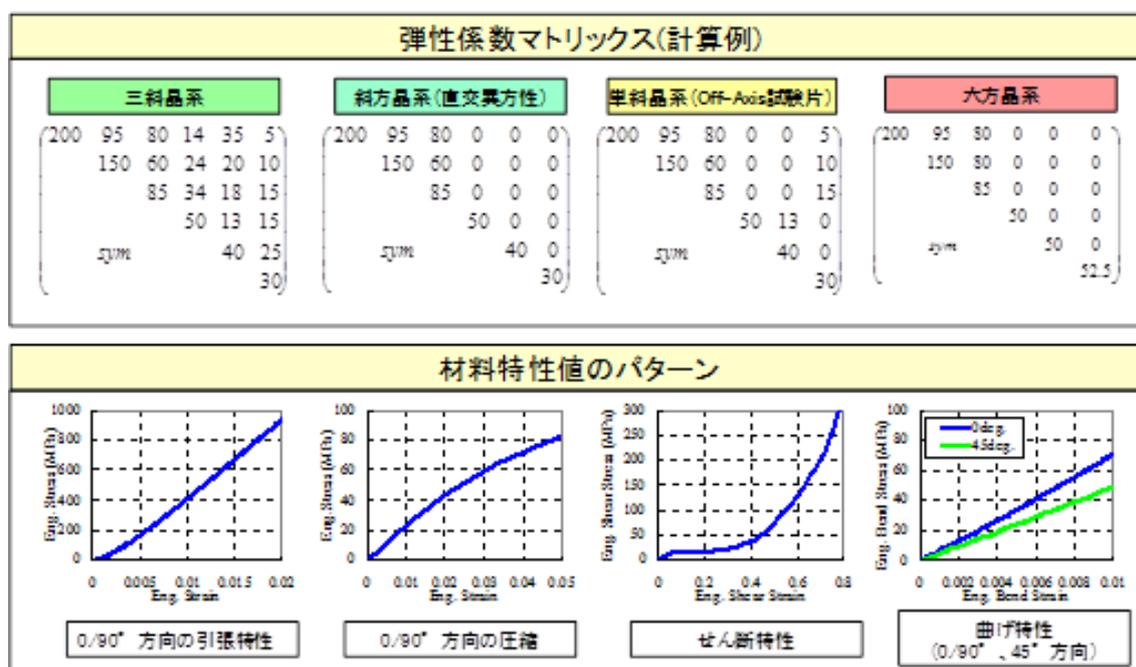


図 2-1-1 CAE 解析用パラメータの検討

CAE 解析モデルを構築するパラメータとして引張特性及び曲げ特性の計測方法について検討を実施した。基本的な試験方法は JIS 規格（引張特性：JIS K 7164、曲げ特性：JIS K 7074、など）を参考に検討を実施した。図 2-1-2 に材料特性の計測例を示す。引張特

性および曲げ特性共に試験温度の影響を受けることがわかった。曲げ特性に注目すると、100℃の試験温度において曲げ強度がほとんど表れないことから、熱可塑性 CFRP の成形では従来の金属プレス成形荷重のような過大な荷重を必要としないことが予測される。

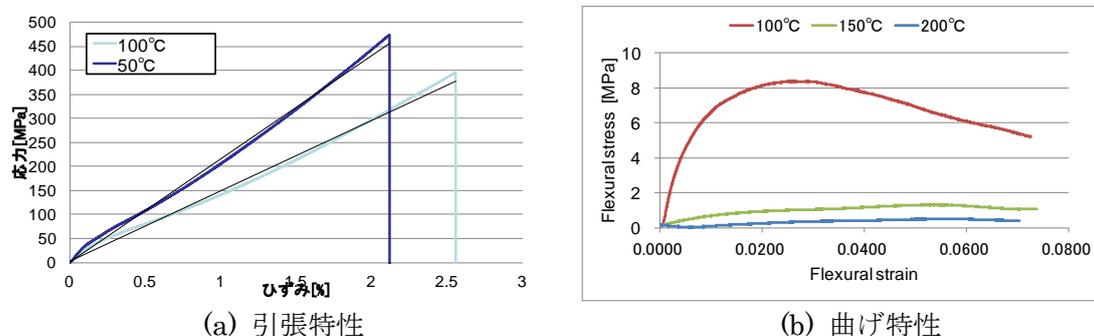


図 2-1-2 材料特性の計測例

2-2 CAE 成形解析技術によるスタンパブルシートの設計

CAE 解析精度を向上させるため、成形中のスタンパブルシートの温度変化の測定を行った。成形対象は S タイプレール形状とした。温度測定を行うため、温度センサ（熱電対）をスタンパブルシート内部に埋設した。図 2-2-1 に温度センサを埋設したスタンパブルシートを示す。この試料を用いて成形を行い、成形中の温度変化を測定した。温度の測定箇所は、平面部、立ち壁部、角 R 部およびフランジ部とし、成形後にそれぞれの部分になる箇所に温度センサを配置した。

図 2-2-2 に温度変化の測定結果と CAE 解析により予測された温度変化との比較を示す。それぞれの測定位置で CAE 解析により温度変化を良い精度で予測できることが把握できた。温度変化が大きい部分は角 R 部である。部分ごとの温度変化の違いは、金型との接触の状態の違いにより生じることも明らかになった。

解析手法の妥当性を確認するため、成形実験結果と CAE 解析結果との比較を行った。CAE 解析は、熱履歴を考慮しない従来手法と成形中の温度変化（熱履歴）を考慮した新手法にて実施した。解析精度の評価を行うため、成形後の材料の輪郭形状及び立ち壁部のせん断角度を測定し、解析結果と比較した。図 2-2-3 に実験結果と解析結果の比較を示す。輪郭形状において、熱履歴を考慮した新手法では熱履歴を考慮しない従来手法と比較して、解析結果は実験値と良く一致していることがわかる。また、せん断角においても新手法では解析結果は実験値と良く一致していることがわかる。このことから、熱履歴を考慮した材料モデルにより、温度変化の実測値と比較して適切な補正を行うことで大幅に解析精度を向上することができることを示した。

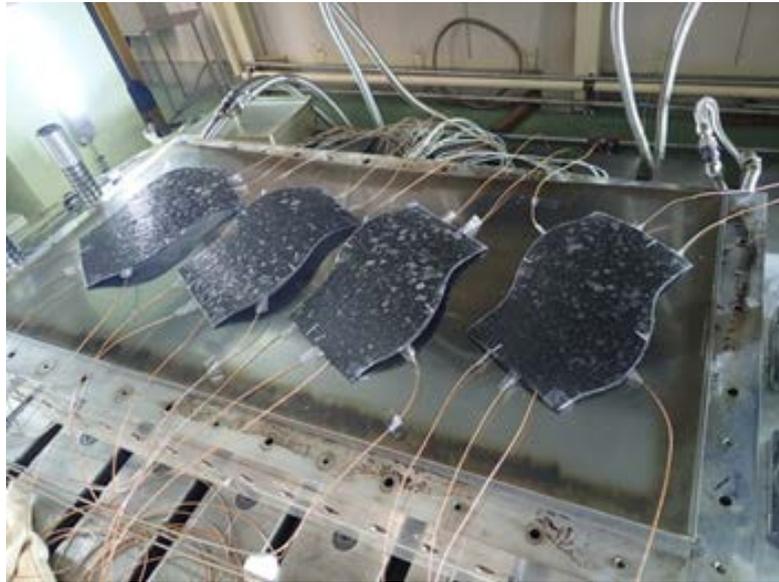


図 2-2-1 温度センサを埋設したスタンパブルシート

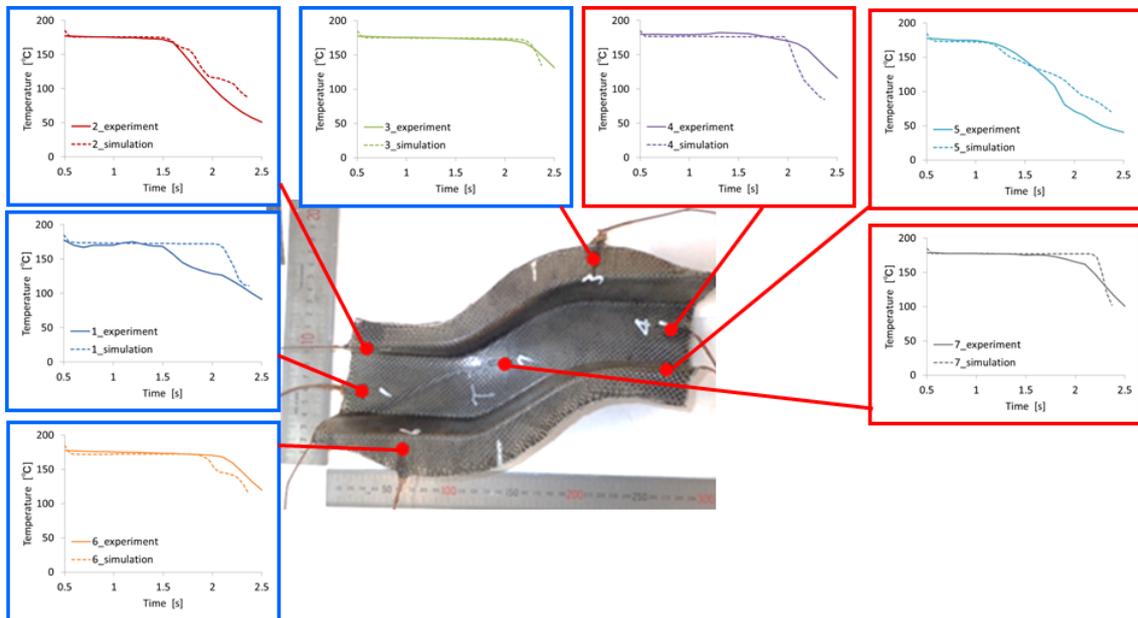


図 2-2-2 温度変化の実験と CAE 解析との比較

	成形品	従来手法	新手法
トリムラインの予測			
せん断角の予測			

図 2-2-3 実験結果と解析結果の比較

大型複雑形状部品のブランク形状の設計について検討を行った。大型複雑形状部品として、バックドアとフロアパネルを対象とした。なお大型部品に対しては熱履歴を考慮した解析を行う場合、現状の計算環境では計算コストが膨大になることから、ここではブランクの温度は一定と仮定して解析した。

まず、バックドアの解析モデルを図 2-2-4 に示す。バックドアは製品寸法がおよそ 1400mm×840mm であり、成形の難易度は並程度の部品である。図の製品図の赤線が最終的な製品の輪郭形状（トリムライン）となる。成形モデルはブランク材を上型および下型で挟み加圧するものである。ブランク設計は、成形後に最終的な製品の輪郭形状にすることが目標となる。

図 2-2-5 にバックドアのブランク解析結果を示す。解析結果は、ブランクが長方形のものと成形後にトリムラインとなる形状ブランクのものを示す。解析結果は、しわ発生の有無を強調して評価するため各部分の曲率の程度を色味で示したカラーマップである。赤色あるいは青色になるほど曲率が大きく、赤色と青色が小さな周期で交互に表示される箇所がしわの発生する可能性があることを示す。図の製品図の青色の製品ラインが成形後にトリムラインとなるよう設計された形状である。つまり、最終製品の立体形状を平面のブランクに展開した形状である。設計されたブランクの設定ラインにより従来の長方形ブランクと同様に形状ブランクもしわ解析が行われていることがわかる。従って、このしわに対して適切な判断基準を与えることにより、成形不良を事前に予測することが可能となることを示した。

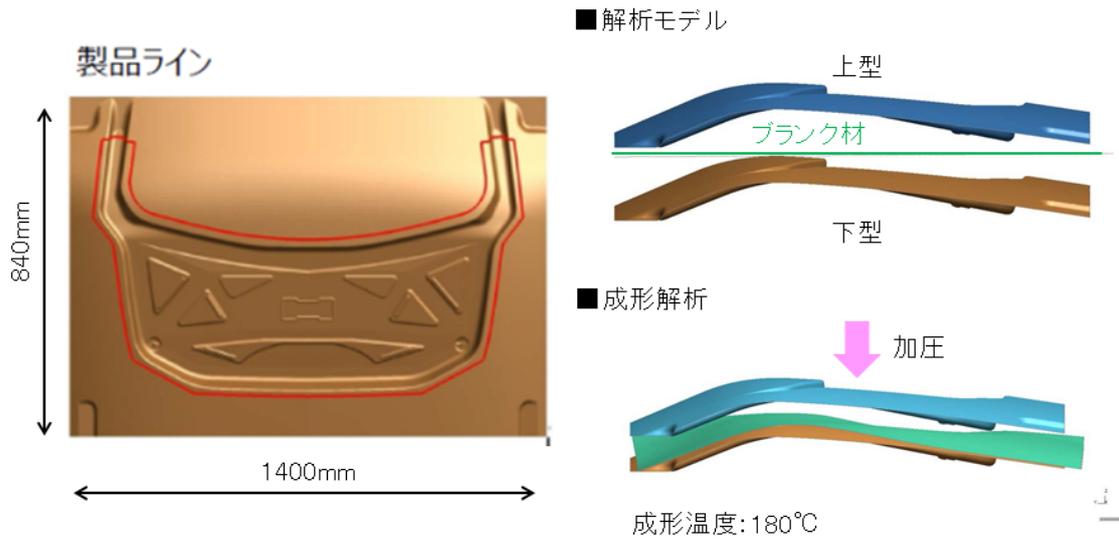


図 2-2-4 バックドアの解析モデル

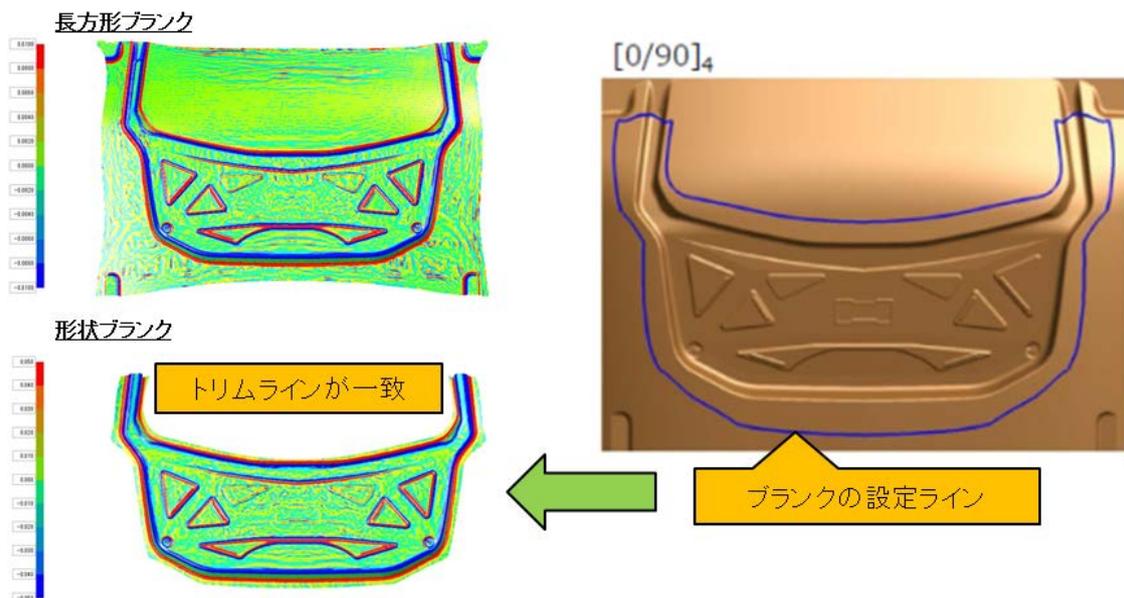


図 2-2-5 バックドアのブランク解析結果

次に、フロアパネルの解析モデルを図 2-2-6 に示す。フロアパネルは製品寸法がおよそ 710mm×970mm であり、立体的な形状が多く成形が非常に困難であることが予想される部品である。図の見方はバックドアと同様である。

図 2-2-7 にフロアパネルの解析結果を示す。解析結果の見方はバックドアと同様である。設計されたブランクの設定ラインにより適切に解析が行われることを確認した。従って、フロアパネルも同様にこのしわに対して適切な判断基準を与えることにより、成

形不良を事前に予測することが可能となった。

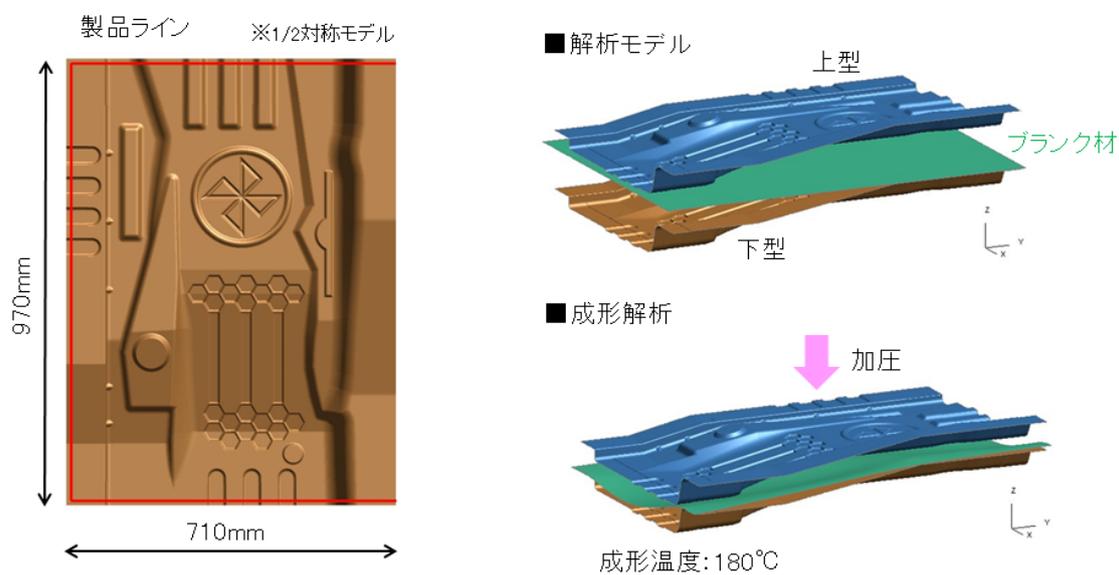


図 2-2-6 フロアパネルの解析モデル

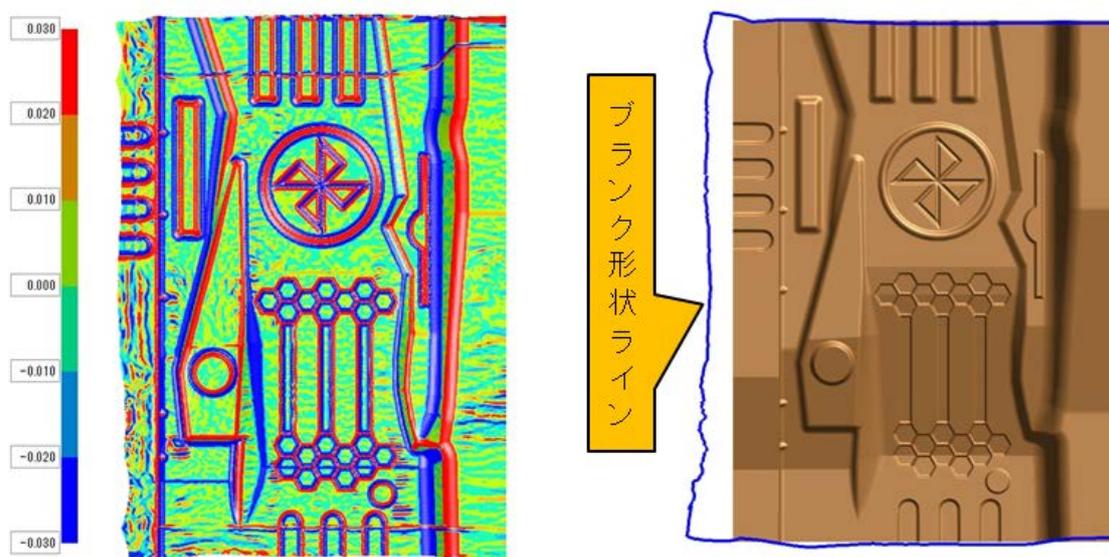


図 2-2-7 フロアパネルのブランク解析結果

2-3 大型スタンプブルシートの作製

目標とする大型複雑形状の成形を行うためには、1000mm×1500mm 寸法のスタンプブルシートが必要になる。寸法が大型化する際に成形温度や圧力のばらつきにより成形品質がばらつくことが予想される。そこで、大型スタンプブルシートを成形するための基礎検討として、500mm 角の成形を行い、成形品質の確認を行った。

図2-3-1に500mm角の成形品の例を示す。成形品の品質を確認するため、スタンプブルシートの全域から試験片を切り出し、曲げ試験を行った。図2-3-2に曲げ試験結果を示す。曲げ試験はスタンプブルシートを図に示す9つの領域に分割し、それぞれの領域から切り出した試験片に対して行った。曲げ試験結果から、スタンプブルシートの各領域において目標とする600MPa以上の曲げ強度が得られた。

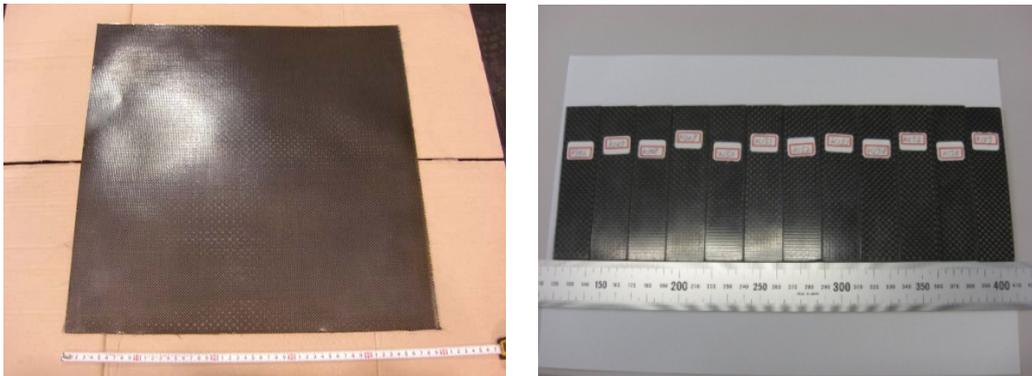


図2-3-1 □500mm角のスタンプブルシート切り出された試験片の例

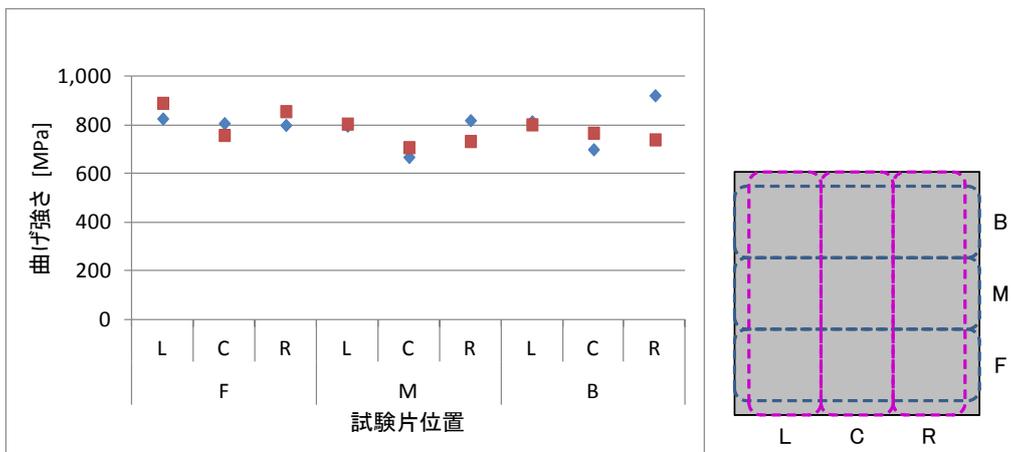


図2-3-2 曲げ試験結果と試験片位置

500mm 角のスタンパブルシートの成形結果を活用し、1000mm×1500mm 寸法のスタンパブルシートの成形を行った。図2-3-3に大型スタンパシートの成形品を示す。重要な成形品質である曲げ強度は板厚に依存することを把握したため、スタンパブルシートの各領域から試験片を切り出し、板厚の測定を行った。図2-3-4に大型スタンパブルシートの板厚の測定例を示す。スタンパブルシート全域で板厚のばらつきが0.1mm以下であり非常に良い精度で成形できることを確認した。また、この品質は後の成形工程において全く問題無い水準であることを確認した。

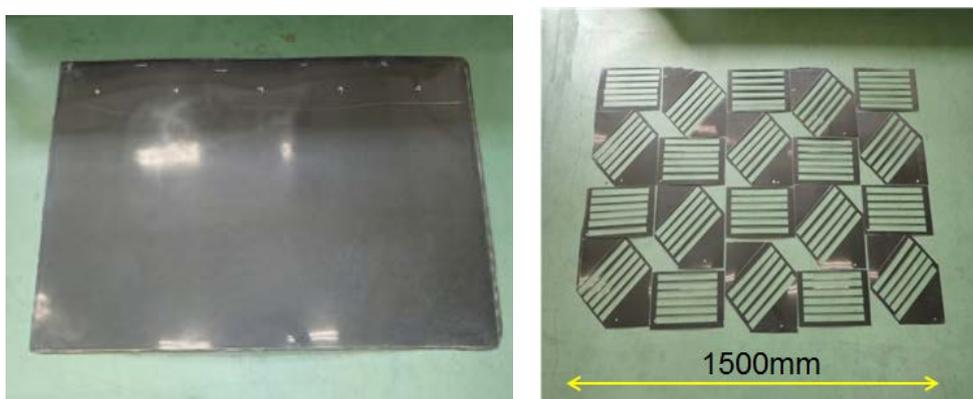


図2-3-3 大型スタンパブルシートと試料の切り出しの様子

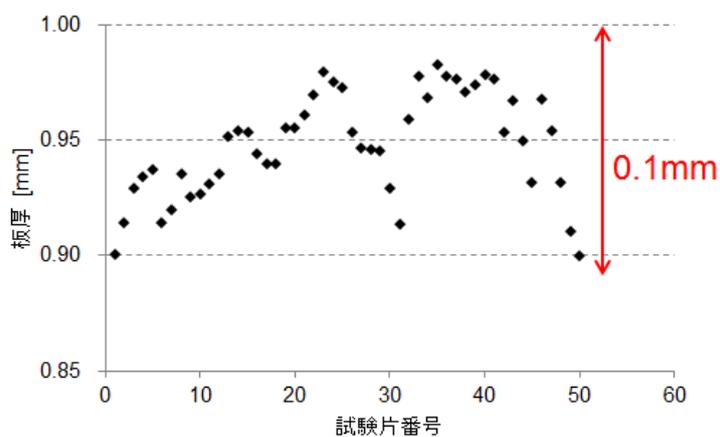


図2-3-4 大型スタンパブルシートの板厚の測定例

2-4 複雑形状製品の金型の設計と成形条件の設定

CAE 解析の金型設計への適用の妥当性を確認するため、2-2 節でブランク設計を行った大型複雑形状製品であるバックドアおよびフロアパネルの成形における検証を行った。

図2-4-1にバックドアの実験および解析結果の比較を示す。図の解析結果に注目すると、赤色の曲線①のように材料の深く絞られる側がよく金型に引き込まれている結果が得られ、成形が十分に行われる可能性が高いことを把握した。この方案にて実際の成形を行ったところ、解析結果と良い一致を示した。

図2-4-2にフロアパネルの実験および解析結果の比較を示す。この解析ではバックドアでの解析結果とは異なり、フロアパネルの長手方向のひずみの分布を示す。実験に使用したスタンパブルシートの繊維配向は図に示すとおりは長手方向と繊維の経糸の方向が同一のものである。解析結果に着目すると赤色のひずみの大きな箇所が存在することがわかる。実験において割れが生じた箇所と解析によりひずみが大きい箇所とは良い一致を示している。実験の写真の右側の割れ発生箇所は解析結果におけるひずみの大きな箇所とは厳密に合っていないが、おおよその成形不良の予測という観点では十分な予測精度である。この解析結果と実験結果とに差異が生じる要因として、大型部品に対しては計算コストの問題から熱履歴を考慮した解析を実施することが困難であったため、成形中の温度一定を仮定して解析したことが考えられる。前述のとおり、材料は金型が接触すると短時間で冷却される。プレス機の精度や金型の幾何精度、材料のたわみ等により金型の材料への接触が均一に行われなため局所的に材料の冷却が進み、特に割れの生じた立ち壁部でその現象が顕著となり、CAE 解析と厳密な一致を示さなかったことが考えられる。

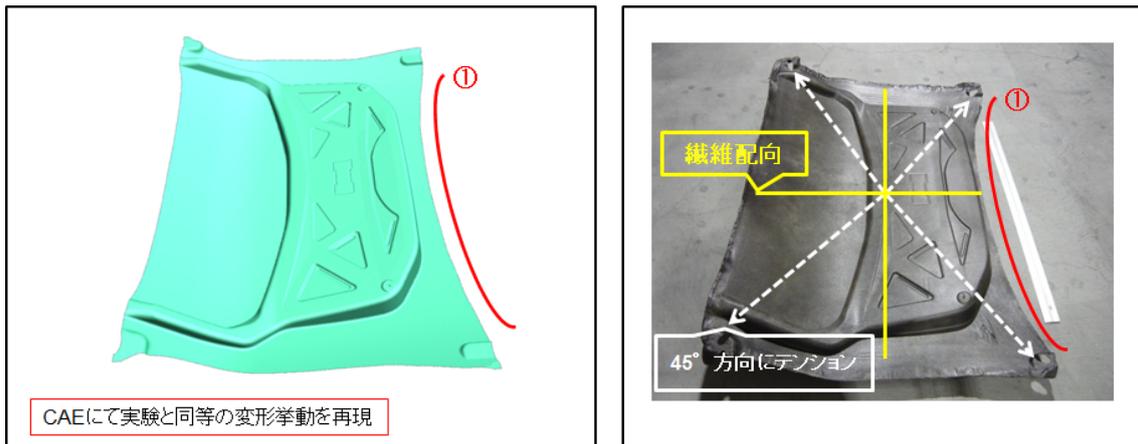


図2-4-1 バックドアの実験および解析結果の比較

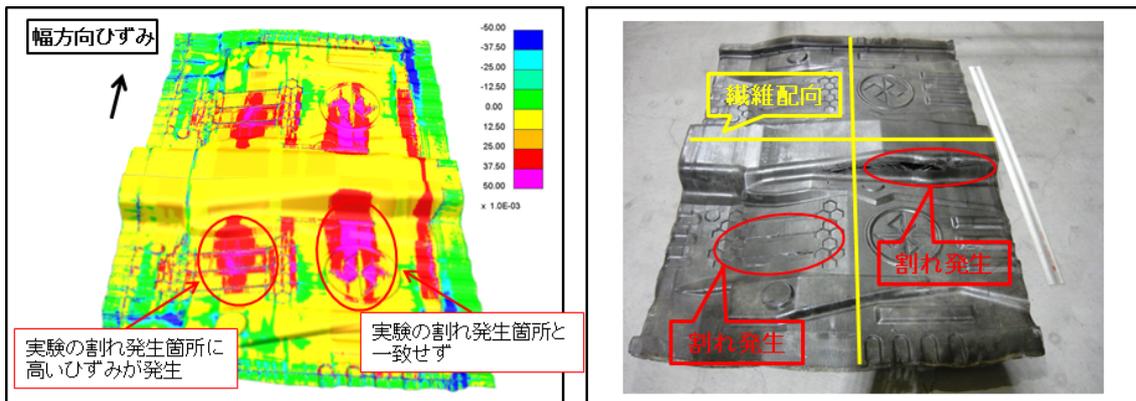


図 2-4-2 フロアパネルの実験および解析結果の比較

フロアパネルを割れが生じることがなく成形するため、繊維配向を長手方向に対して 45° としたスタンパブルシートの適用について検討を行った。 0° の配向での割れは深絞り部分において材料が長手方向に十分に流れ込みあるいは伸びなかったことが原因として考えられる。そこで、配向に依存した成形条件の確立に有益な指針が得られた。

図 2-4-3 に実験および解析結果の比較を示す。この解析では、まずしわの発生を予測するしわコンターの解析を行う。これは成形後の材料の曲率の大きさをカラーマップで示している。カラーマップにおいて、平面では曲率が 0 を示す緑色となり、角 R 部は凹凸でそれぞれ青色及び赤色を示す。理想的な形状である場合、平明及び R 部において一定の曲率であることからそれぞれ一定の色が示される。しわが生じる場合、色味にばらつきが生じる。解析結果を見ると、平面部は緑色、角 R 部はそれぞれの曲率に応じて同一の色となっており、しわが発生しないことが予測される。幅方向のひずみについては、 0° の配向に見られた赤色の大きなひずみが認められなかった。つまり、割れが起らず成形できる可能性を示している。図の実験結果を見ると不具合無く成形できていることがわかる。従って、成形条件の確立に CAE 解析の有効性が確認でき、また、 45° 配向の成形の有効性も確認することができた。

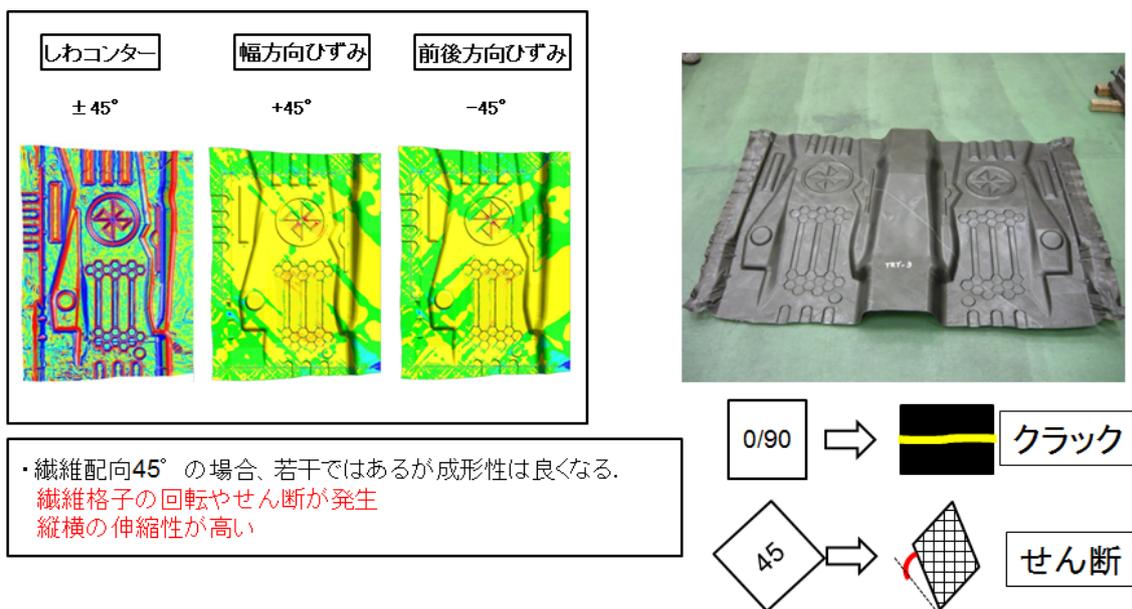


図 2-4-3 フロアパネルの実験および解析結果の比較 (45° 配向)

大型複雑形状製品の成形条件を最適化するため、スタンパブルシートの加熱温度と加熱時間および搬送からプレス成形されるまでの時間と温度変化を、温度センサを埋設したスタンパブルシートを用いた成形実験により測定した。

図 2-4-4 に成形工程を示す。成形は、まずスタンパブルシートを加熱炉内に配置し所定の温度に到達するまで放置する。次に、加熱炉内から材料を手作業で取り出し搬送し、金型に配置する。最後に金型でプレスし成形が完了する。図 2-4-5 に温度測定結果を示す。加熱炉からスタンパブルシートを取り出して金型が材料に接触した瞬間から毎秒数十度もの温度変化が起こることがわかる。したがって、材料の成形性が良い状態である材料の温度が高い状態で成形するためには、短時間でプレスする必要がある。プレス時間はプレス機のストローク速度の能力により決定される。フロアパネルの製品形状を成形するためには金型が材料に接触してから下死点まで到達するには約 1 秒の時間を要する。また、下死点到達後、材料の形状を凍結するためには材料の温度が常温付近まで冷却される必要がある。温度測定結果から、約 45 秒で材料の全ての測定点で温度が常温付近で安定に到達した。

本研究において大型複雑形状の成形時間は 60 秒以内が目標である。本研究の成果では成形時間は 45 秒であり、目標を十分に達成することができた。



(a) スタンパブルシートの加熱



(b) スタンパブルシートの搬送



(c) スタンパブルシートの金型への設置



(d) 成形完了

図 2-4-4 成形工程

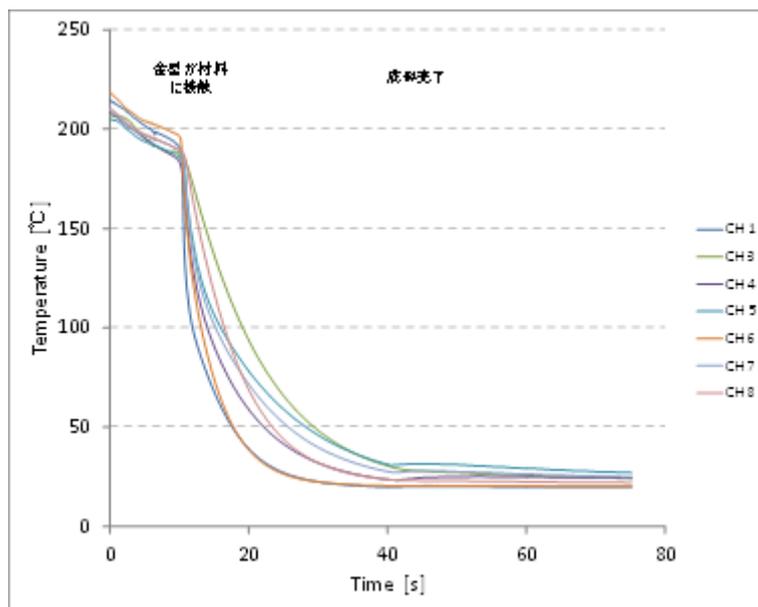


図 2-4-5 温度測定結果

第3章 全体総括

本事業では、「熱可塑性 CFRP による車載用大型複雑形状製品の成形技術の開発」と題し、従来の熱硬化性 CFRP に変わる軽量化部品を成形するための新技術開発に取り組んだ。

新技術を実現するための研究課題は次のとおりである。

- ①CAE 成形解析に必要な材料特性の決定と計測技術
- ②素材パラメータを用いた CAE 成形解析によるスタンパブルシートの設計技術
- ③成形性が良好で高強度が得られる大型スタンパブルシートの製造技術
- ④複雑形状製品の超高速成形が可能となる金型設計技術と成形技術

使用する CFRP の母材は熱可塑性樹脂であるアクリル樹脂であり、強化材は平織りの炭素繊維織布である。成形機は従来の金属プレスに使用した既存のプレス機を活用することで大がかりな設備投資を必要とせず CFRP の成形を可能とする。また、従来の金属材料と同等に CFRP が扱えるよう CAE 解析により金型設計プロセスの短縮を図る。

成果の総括を表 3-1 に示す。全ての研究課題において所期の目標を達成することができた。

表 3-1 研究開発成果の総括

研究課題	技術目標値	達成内容
① CAE解析技術用材料特性の計測	従来の金属材料と同等水準でCAE解析可能	達成 従来の金属材料と同水準でCAE解析を可能とする材料特性の計測技術を確立した。
② CAE成形解析技術によるスタンパブルシートの設計	80%の精度で割れやしわを予測可能	達成 引き続き、複雑形状製品成形にてCAE解析の実施と実機での成形結果との比較を行い、CAE解析の高度化を目指す。
③ 大型スタンパブルシートの作製	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げ強度…600MPa以上 ・最大寸法…1000×1500 ・5枚以上 / ショットで成形する 	達成 スペーサにステンレス鋼板を用い、離形シートの使用をなくしたことで、大幅な作業性の向上とコストダウンが見込まれる技術を確立した。
④ 複雑形状製品の金型の設計と成形条件の設定	<ul style="list-style-type: none"> ・800mm×1200mm×80mm相当の大型複雑形状製品を成形する ・成形サイクル…60秒以内 ・品質歩留まり…90%以上 	達成 自動車用バックドアとフロアパネルの大型複雑形状製品の成形に成功した。

CFRP の市場展開は大きく 4 つの段階があると考えられる。それは、導入期、成長期、拡大期および本格拡大期である。現状は、導入期から成長期へ移行する段階であると考えている。本研究成果により、熱可塑性 CFRP の大型複雑形状部品が市場に投入できることによ

り、自動車分野だけでなく航空宇宙分野やロボット分野への市場の拡大、つまり、拡大期への転換が期待できる。

一方、本研究開発の成果を活用した熱可塑性 CFRP 製品開発を行う上で、次のことが研究課題として挙げられる。

- ①射出成形によりリブおよびボス形状を形成する複合成形技術の大型成形品への適用技術
- ②熱可塑性 CFRP 部品を金属部品の置換材料として適用するための信頼性（強度、衝撃および耐久性等）を確認および向上する技術
- ③金属部品と同様に穴加工あるいはトリム加工が可能な金型の設計製作技術
- ④熱可塑性 CFRP の内部欠陥を簡易的に評価する技術

以上のような研究課題を解決し、熱可塑性 CFRP 製品の市場拡大を目指し産業界ならびに地域の発展に貢献したいと考える。