

インフュージョン成形法による GFRP 構造の特性評価
と数値計算によるシミュレーションに関する研究

2015 年 3 月

日本大学大学院生産工学研究科機械工学専攻

長見 茂

目次

第1章序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 従来の研究	3
1.3 本研究の目的と特徴	5
1.4 本論文の構成	6
第2章インフュージョン成形法	12
2.1 インフュージョン成形法の原理	12
2.2 使用材料	13
2.3 成形型	15
第3章ガラス平板の成形結果と引張強度	33
3.1 緒言	33
3.2 樹脂供給量による浸透係数の求め方	34
3.2.1 樹脂供給量の算出式	34
3.2.2 実験方法	35
3.2.3 浸透係数の求め方	35
3.2.4 実験結果	36
3.3 型の傾斜角度と樹脂の流動時間の関係	40
3.3.1 実験方法	40
3.3.2 実験結果	40
3.4 平板の傾斜角度による引張強度	42
3.4.1 実験方法	42
3.4.2 実験結果	42
3.5 結言	43
第4章楕円ドーム型の成形	64
4.1 諸言	64

4.2 楕円ドーム型の特徴	65
4.3 成形方法	66
4.3.1 フローメディアを使用しない場合の成形方法	66
4.3.2 フローメディアを使用した場合の成形方法.....	66
4.3.3 フローメディアを使用しない場合と使用した場合の比較	67
4.4 楕円ドーム型の成形結果	68
4.4.1 フローメディアを使用しない場合の成形	68
4.4.2 フローメディアを使用した場合の成形.....	69
4.5 楕円ドーム型による成形品の測定結果	70
4.6 結言	71
4.6.1 フローメディアを使用しない場合の成形	71
4.6.2 フローメディアを使用した場合の成形.....	71
第5章数値シミュレーション	82
5.1 諸言	82
5.2 ソフトウェアの概要	83
5.3 解析方法.....	84
5.3.1 メッシュの作成.....	84
5.3.2 PAM-RTM の条件設定	85
5.3 平板の実験結果との比較検討.....	92
5.4 楕円ドーム型の実験結果との比較検討	100
5.5 結言	101
第6章結論	115
6.1 本研究で得られた成果.....	115
6.2 今後の課題	117
参考文献	118
謝辞	121

Study on Evaluation of Performances for GFRP Structures with Infusion Molding Method and Their Simulation by Numerical Method

Shigeru Nagami

Graduate doctoral Program of Mechanical Engineering

Abstract

Glass fiber reinforced plastics (GFRP) are widely used in engineering structures. There are many methods for fabricating GFRP structures such as a hand lay-up method, a spray-up method, a filament winding method and so on. An infusion method is a closed molding method using vacuum pressure to draw the resin into the fiber preform, and this method can fabricate a high performance and low-cost FRP. In this study, the permeability which is one of the most important parameter in the infusion method was calculated from the resin weight and flow time curves obtained from the experimental and numerical results. Moreover, the influence of the flow time and mechanical properties were investigated when changing the inclined angle of base die and the fiber direction.

In addition, this thesis carried out the infusion molding experiments on the dome shape having an elliptical curved surface and its result was compared with the numerical simulation result. As a result, this thesis could obtain the following quite good results.

1) a simple method using weight meter could easily determine the permeability coefficient and the result of numerical simulation using this permeability coefficient showed a good agreement with the experimental result.

2) The difference in molding time for the FRP plates molded with the inclined angle of base die was smaller value of 6% and the inclined angles was not so much influenced to the molding time.

3) Tensile strength regardless of the inclined angle showed an almost same value.

4) Effects of the use of the media flow on the tensile strength and the fiber volume fraction were considered to be little.

5) The use of media flow greatly reduced the molding time but the amount of resin increased. In addition, auxiliary materials were required for molding. Therefore, the use of media flow in the infusion molding should be decided from the balance of the costs and the molding time.

6) A dome shape having an elliptical curved surface was also successfully fabricated with Infusion molding and the experimental results obtained from the flat FRP plates molded with inclined angle of base die were almost applicable. The experimental results of dome shape agreed with the numerical simulation results.

第 1 章序論

1.1 研究の背景

近年、あらゆる工業製品の設計は軽薄短小と省エネルギーを目指し地球環境に易しい設計思想が定着してきた。

製品を軽くすることによってエネルギーの消費が軽減され、小型化によるコストの削減や CO₂ の排出も減少することが可能になり、自然や生活環境への悪影響を抑えることが実現しつつある。

こうした状況の中で生産材料としては金属材料を多用してきたが、金属材料の高機能化や高強度化のための技術開発や材料の開発によって製品の軽量化や高品質・耐久性の改善によって効果が発揮されている。

一方では大量輸送やスピードアップによる人や物流の効率化が求められている。代表的な航空宇宙機^{1),2)}、鉄道車両、船舶^{3),4)}、自動車⁵⁾などへは金属材料に代って複合材料の適用が伸び、今後益々期待されている^{6),7),8)}。既に旅客機の一部、住宅機材、容器・タンクなどや風力発電用風車ブレード⁹⁾、さらにはスポーツ用品などへの複合材料の適用によって FRP (Fiber Reinforced Plastics) 製品として急速に広がっている。図 1.1 に示すように、最近の FRP 製品の用途別出荷量は約 26 万トンに達する¹⁰⁾。

世界的に見ても日本の化学繊維を基材とする複合材料の技術開発は国際競争力を発揮し、金属材料を凌ぐ勢いで進展してきた。特にガラス繊維や炭素繊維、さらには植物繊維の開発とそれらの量産能力は世界の市場を大きく伸ばしてきた。

化学繊維を用いた複合材料は機能性やデザイン性に自由度が高く柔軟性に優れており、金属材料に比較して軽くて強い材料として比強度、比剛性、耐食性、耐久性などに優れているのが大きな特徴である^{11),12)}。

複合材料の成形方法にはハンドレイアップ成形法を始めとしてオートクレーブ成形法、プレス成形法など様々な方法が用いられている。設備投資が少なく作業環境に良いクロズドモールド成形法である RTM (Resin Transfer Molding) 成形法が注目されている。図 1.2 に示すように FRP 成形法別統計資料によると過半はモールドイングコンパウンド法であるが、今後多様な成形法が実用化されるものと考えられる。

RTM 成形法の中でも簡易型を下型に使用し、真空ポンプを使って基材をシールして成形する、インフュージョン成形法は費用対効果の大きい成形法として注目されており、実用化されている。

こうした背景の中でガラス繊維を基材とした簡便なインフュージョン成形方法によってガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastic、GFRP）構造を製作し、その特性を実験によって求められている。

一方で急速に高度化され多機能化された数値解析ソフトウェアを活用することによって、成形条件決定のために試行錯誤を繰り返すことなくインフュージョン成形における最適条件を数値シミュレーションから求める試みが要求されている¹³⁾。

1.2 従来の研究

GFRP は比強度、耐食性、耐久性などに優れているため、旅客機の一部、住宅機材、容器・タンク、風車ブレードなど幅広い分野で使用されている。

GFRP 構造物の成形方法には、ハンドレイアップ法、スプレーアップ法など型に手積みするオープンモールド成形法が多く使用されてきたが、近年、GFRP 構造物の性能と品質向上、作業環境の改善、設備投資額の抑制などから成形を型内部で行うクロズドモールド成形法である、RTM 成形法が注目され、国内でも様々な研究^{14)・17)}が行われている。

RTM 成形法の一つであるインフュージョン成形法は、成形型の上にプリフォーム材を配置し、その上をバギングフィルムで覆い、フィルムと成形型内の間を真空にして、樹脂を注入する成形法である。

インフュージョン成形における樹脂の流動挙動は Darcy^{18)・20)}に従うことで知られている。Darcy 則によって浸透係数を求めるために従来、樹脂のフローフロントの変化をカメラなどで映像から求めるなどの方法が取られていたが、その精度が不安定であった。

また、樹脂の含浸時間を短縮することや成形時のボイドの低減を図るために、樹脂注入口や吸引口の配置などの成形条件を最適化する²¹⁾。

成形を繰り返しながら合理的な条件を見つけることも可能であるが、コストと時間を多く要するため、数値シミュレーションで樹脂の流れを予測し、成形条件を最適化する方法が有効と考え新たな取り組みを行う必要がある。

1960 年代から色々な成形法が開発され、1964 年には航空機構造体に対して発泡塩ビ心材やバルサ心材をサンドイッチ心材として真空成形することが米国で特許が認可された。

また、1972 年には英国の Group Lotus Car Ltd より FRP 製自動車部品を真空成形する方法の特許が認可された。1978 年には、この方法で上型にシリコンゴムを使って真空成形する方法が開発され、手積み成形に比べて熟練技能を要することなく、作業環境にも良いため、安定した品質の FRP 部品が得られたことが発表されている²²⁾。インフュージョン成形法の概念図を図 1.3 に示す。

1990 年に米国海軍の依頼を受けて Seemann Composite 社や PTI Technologies 社などが共同開発した SCRIMP (Seemann Composite Resin Infusion Molding Process) 法^{23)・25)}があり、今日に至る RTM 成形法の基礎技術を確立した。図 1.4 に概念図を示す。

この成形法の特徴は合せ型ではなくバギングフィルムを用い、液状樹脂を繊維積層部に送り込む手段として、ネット状のフローメディアとそれを硬化後に取り除くためのピールプライを用いたことである。

フローメディアはバギングフィルムを介して大気圧で押し付けてもつぶれずに空気や樹脂の通過を促進させ、樹脂が含浸する方向にフローフロントの形成と繊維の厚さ方向への含浸を促進させる方法として実用化された。

この方法は米国内での普及だけでなく、英国の掃海艇や台湾の舟艇メーカーなどにライセンス供与され、わが国でも東レが 1999 年にこの方法で建築物の屋根などに製作した実績が報告されている。

2008 年には航空機部品を製作するため、ボーイング社より CAPRI (Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion) 法が発表²⁶⁾された。図 1.5 にその概念図を示す。これは SCRIMP 法と同様であるが、樹脂供給容器にも真空圧をかけられるようにして、樹脂含浸が進行中にもバギングフィルム内に所要の負圧を維持できるようにしたものである。

樹脂含浸に先立って行うドライ積層時のプリフォーム材を配置したあとバギングフィルムをかけて負圧をかけるコンパクションを行うので、樹脂含浸時もプリフォームのスプリングバックを抑えて高い繊維含浸率の製品が得られる特徴がある。

1.3 本研究の目的と特徴

インフュージョン成形法における樹脂流動挙動は Darcy 則に従うことが知られており、数値シミュレーションにおいては、浸透係数が重要なパラメータの一つになる。浸透係数は流体の性質には無関係で浸透層の性質（繊維径・空隙率・材質）のみに関係する係数である²⁷⁾。

浸透係数を求めるための実験には、型内にプリフォーム材を設置して一方向に樹脂を流す方法²⁸⁾、プリフォーム材の端部でのエッジ効果をなくすために放射状に樹脂を流す方法²⁹⁾などが提案されており、ビデオカメラやセンサーを用いてフローフロントの位置を測定し、浸透係数を求める方法^{30),31)}が多い。

本研究では樹脂の供給量から浸透係数を求めるために、簡易的な電子天秤とコンピュータを連動して樹脂の注入量の測定値から求める方法³²⁾を提案する。

平面板の傾斜角度と樹脂の浸透時間の関係についても実験を行い、数値シミュレーションの重要なパラメータとなる値を求め、数値シミュレーションと実験結果と比較をおこなった。さらに平面板の傾斜角度が引張強度に与える影響を明らかにする。

使用したガラス繊維織物は、細い繊維と太い繊維で編み込まれているため、織り込まれたガラス繊維の方向によってその特性が異なることを解明する。

また、三次元構造体をインフュージョン成形法で成形するために、構造体を構成する幾何学的な形状が角度の変化や自由曲面など複数で構成された楕円ドーム形状の型を使用して実験を行い、楕円ドーム構造体におけるインフュージョン成形の可能性を明らかにする。

さらに、インフュージョン成形法で実用構造体を成形するときフローメディアとピールプライを使用することによって樹脂注入時間を短縮する効果と成形品の厚さを一定に保つ効果とフローメディアとピールプライを使用した場合とそうでない場合の引張強度の影響を検討する。

これらの結果から、数値シミュレーションソフトウェアを活用してインフュージョン成形における最適条件を提案することを研究の目的とした。

1.4 本論文の構成

本論文は「インフュージョン成形法による GFRP 構造の特性評価と数値計算によるシミュレーションに関する研究」と題し、全 6 章で構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第 1 章の序論では工業製品の軽薄短小化の流れにおいて RTM 成形法によって複合材料が金属材料に置換できる経緯を明らかにし、インフュージョン成形法の経験的な取り組みによって製品化されてきたことから、より簡便で省エネルギー化や作業環境の改善に効果が発揮されるインフュージョン成形法による効果について述べる。

第 2 章インフュージョン成形法の原理とインフュージョン成形法で使用する材料について概説する。平板で成形するための型とその平板に傾斜角度を変化させる方法と楕円ドーム形状型を作成する方法について述べる。

第 3 章では平板によるインフュージョン成形で傾斜角度を 0° から 90° まで 7 段階に変化させた時の樹脂注入時間と成形品の引張り強度について述べる。

更にフローメディアとピールプライを使用して成形した場合とそうでない場合の浸透係数を求め、数値シミュレーションへのパラメータ入力設定によって最適成形条件を求めた内容について述べる。

第 4 章では 3D プリンターを使って自由曲面を有する楕円ドーム型を作成し、その型を使用して異なる樹脂注入口からインフュージョン成形を行った場合とフローメディアを使用した場合とそうでない場合の実験結果についても述べる。各種成形パターンについて実験で求めた最適成形条件について述べる。

第 5 章では数値シミュレーションについて、使用したソフトウェアの機能や前提条件となるパラメータの設定を行い、インフュージョン成形実験結果と比較検証を行った結果について述べる。

第 6 章では本研究で得られた成果と今後の課題及び展望について考察した結果について述べる。

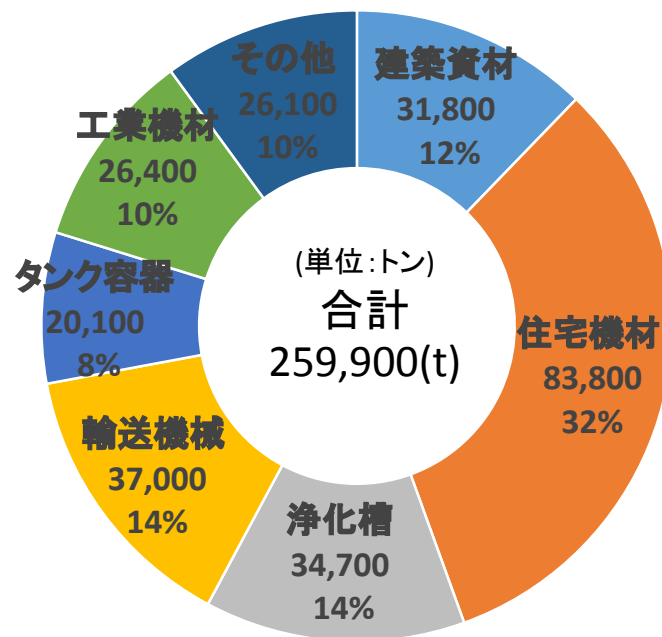


図 1.1 FRP 用途別出荷量

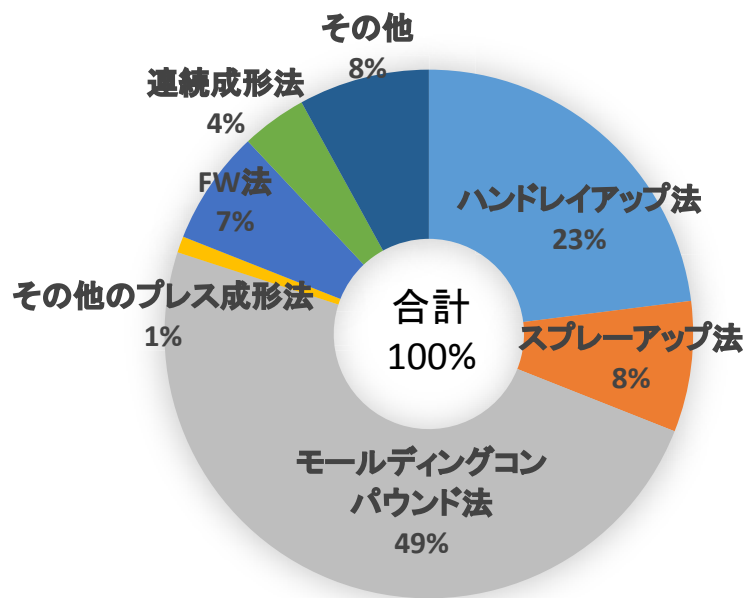


図 1.2 FRP 成形法別統計

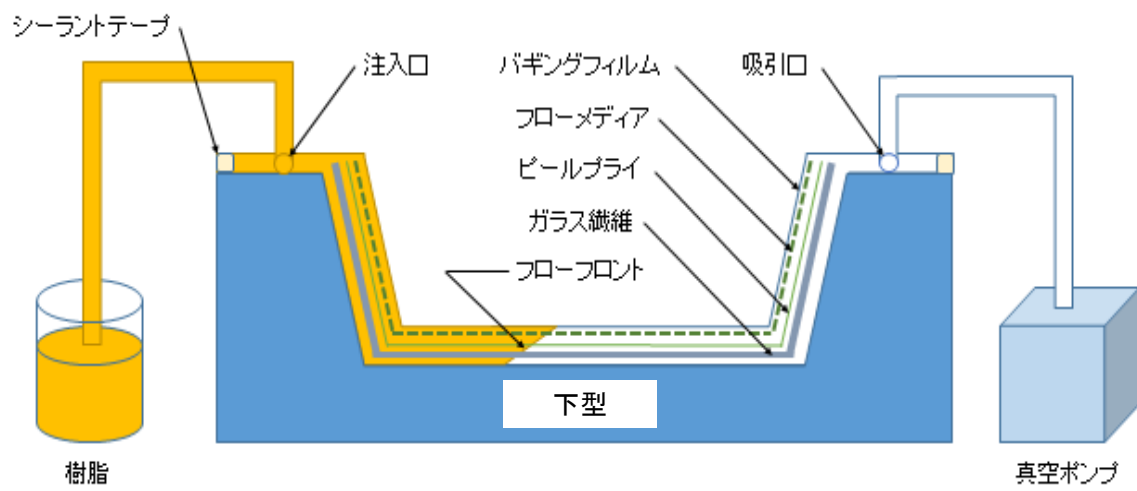


図 1.3 インフュージョン成形法の概念図

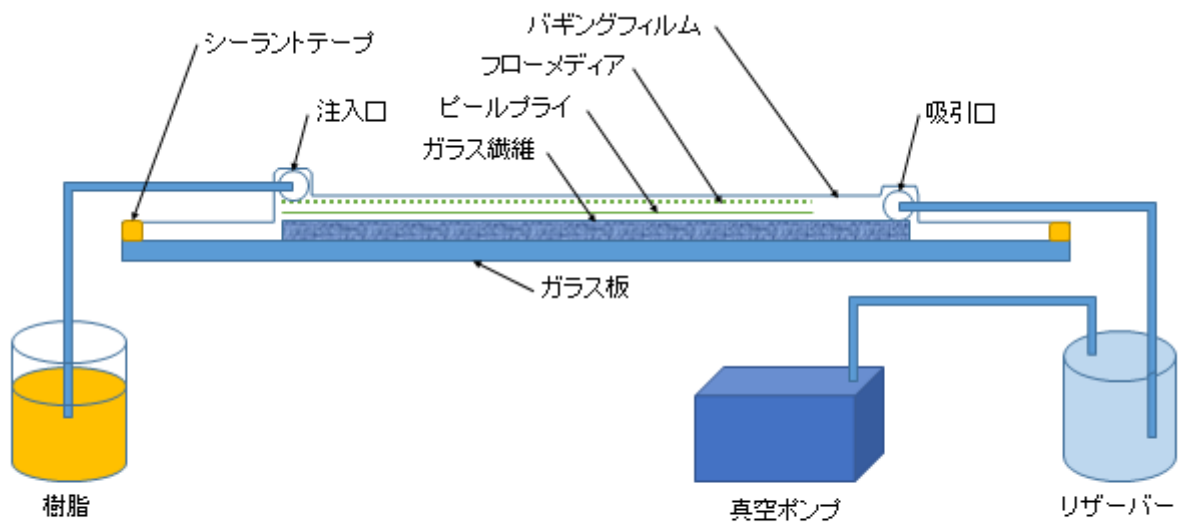


図 1.4 SCRIMP 法の概念図
 (Seemann Composite Resin Infusion Molding Process)

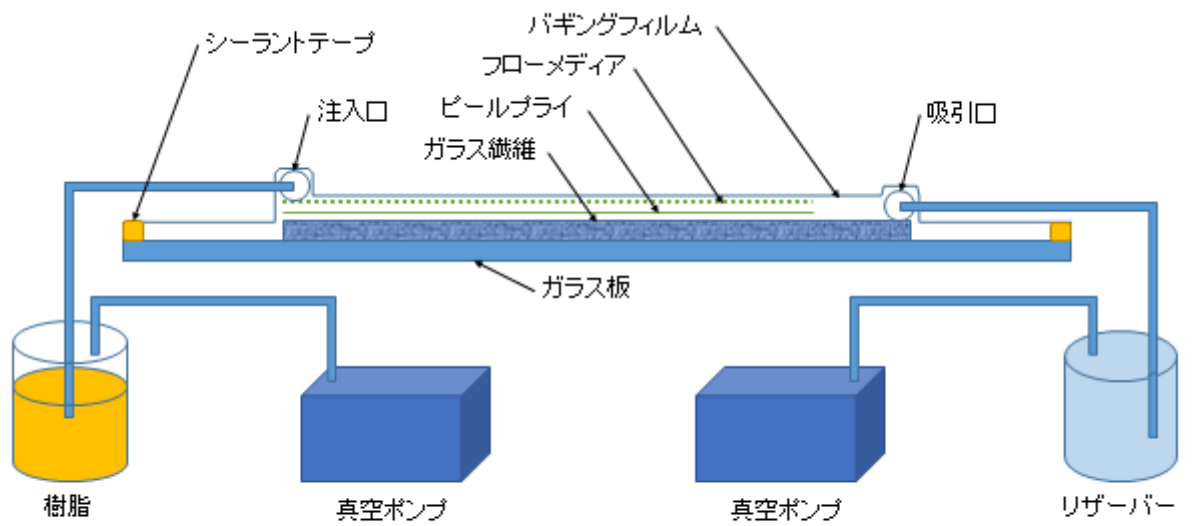


図 1.5 CAPRI 法の概念図
(Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion)

第2章インフュージョン成形法

2.1 インフュージョン成形法の原理

インフュージョン成形法の原理は前節で概要を説明したように一般的な原理は SCRIMP 法が多く使用されている^{23)・25)}。

型面にプリフォーム材の繊維織物を置き、フローメディアとピールプライを重ねてバギングフィルムで覆い、シーラントテープで密封し、真空ポンプで真空引きを行い、大気圧との圧力差で樹脂を注入する方法である。

航空機部品のように品質のレベルの高い成形品には CAPRI 法が適用される場合もあるが、必ずしも一般的とは言えない。この場合は樹脂供給容器にも真空圧をかけられるようにした方法である²⁶⁾。

本研究では、使用したインフュージョン成形実験システムを図 2.1 に示した。図ではガラス平面板を型として使用したインフュージョン成形実験システムを示した。また、楕円ドーム形状の型を使ったインフュージョン成形の場合は同様に型を置き換えてインフュージョン成形を行った。

真空ポンプ：高性能小型ツーステージ真空ポンプ TA150XB (TASCO JAPAN 社製)

電子天秤重量計：音叉振動式電子ばかり SJ-8200 (新光電子社製)

リザーバー：圧力計とリザーバータンク (AIRTECH 社製)

成形型：ガラス平面板 (厚さ 5 mm×幅 300 mm×長さ 1200 mm)

型形状が楕円ドーム形状のように複数の幾何学的な形状で構成されたものや自由曲面を有した形状型を使用する場合はシーラントテープの位置の配置や樹脂注入口の配置が重要な要素となり、併せてシーラントテープによる真空維持対策によって作業効率に大きく影響することが考えられる。

真空ポンプによる減圧状況をリザーバータンクに設置した圧力計で観測しながら所定の圧力に減圧された時点で樹脂注入を開始し、樹脂注入量と注入時間を計測した。

2.2 使用材料

1) ガラス織物

使用したガラス繊維（日東紡績(株)、型番 WEA 22F）を図 2.2 と図 2.3 に示す様に織られた繊維はロール巻にされたものをロール方向に長く切り取った供試材 A(縦糸方向)と軸方向に長く切り取った供試材 B(横糸方向)をそれぞれ 800 mm×150mm (1,200 cm²) に切断し、それを 4 層に積層して使用した。

また、楕円ドーム形状の成形に使用した供試材は型のフランジ面を含めた展開図寸法は長軸径 470 mm、短軸径 326 mm (1,203 cm²) で縦糸方向にカットしたプリフォーム材を使用した。

結果として平板形状と楕円ドーム形状のプリフォーム材の平面積はほぼ同一となった。

平板形状と楕円ドーム形状のそれぞれの成形に使用した供試材を表 2.1 に示した。表に示した値はそれぞれの形状にカットした供試材の実測値の平均値を示した。

3) フローメディアとピールプライ

フローメディアは樹脂流動を促進するために使用し、材質はポリプロピレン製（エアテック社製 GREEN FLOW 75）で図 2.4 に示す。

フローメディアは図のように菱形に織られた物を長い方向と短い方向にそれぞれガラス織物と同一の寸法でプリフォームした物を供試材とした。

また、楕円ドーム形状のプリフォームサイズはガラス織物と同一にカットしたものを供試材とした。

実験ではフローメディアの方向性についても実験を行うため両方向（縦糸方向と横糸方向）の供試材を使用して樹脂の浸透状況を比較した。

ピールプライは成形後フローメディアとバギングフィルム合せて離形するために使用した。使用したピールプライの材質はポリエステルで（ユニチカ社製 KK300）図 2.5 に示す。

使用したピールプライには方向性がないので軸方向にプリフォームと同様の寸法に切り取った物を供試材として使用した。

3) 樹脂

樹脂は不飽和ポリエステル樹脂（DH マテリアル社製のサンドーマ型番 PC-740）を使用した。そこに硬化剤（日油社製のパーメック N 型番 F00011）を重量比で 1% 添加して使用した。

4) バギングフィルム

使用したバギングフィルムの材質はナイロン製で（エアテック社製の Wrightlon6400）を使用した。

5) 樹脂注入パイプ（インジェクション用）及び吸引（ベント用）パイプ

平面板の成形には樹脂注入用ポリエチレン製パイプ 10 mm とスパイラルチューブを使用し、吸引用パイプ 6 mm とスパイラルチューブを使用した。スパイラルチューブの長さはガラス織物の幅と同一に、それぞれ 150 mm の長さで設定した。

また、楕円ドーム形状の成形には図 2.6 に示すように T 字形のパイプコネクタを使用した。T 字形パイプコネクタは長さ 50 mm の両端にそれぞれ 75 mm のスパイラルチューブを接合して使用した。

6) シーラントテープ

ガラス織物、フローメディアとピールプライをバギングフィルムで密閉するためにシーラントテープを使用してシールした。平面板の場合は吸引側にはフ ローブレイクを付けて樹脂の充填が完全に型内に行なわれるようにした。

2.3 成形型

1) ガラス平面板の成形型

ガラス平面板を型として使用したが、成形前の様子を図 2.7 に示す。

本研究では、型をその平面から鉛直方向に傾けた角度 0° から 15° 間隔で変化させた時の樹脂注入量の変化を重量計（新光電子製モデル SJ8200）とパソコンを連動させてサンプリングタイム 2 秒間隔で重量を連続測定し、浸透係数を求めた。

ガラス平面板を型として使用し、インフュージョン成形する場合はバギングフィルムをシーラントテープで密封が容易にできる。

また、樹脂注入口にスパイラルチューブと吸引口にフローブレークを設けその上にスパイラルチューブをセットした時の気密性を完全に維持することは容易にできる。

また、樹脂注入口であるスパイラルチューブの位置が樹脂液面との高さの差が圧力差となるので位置のバラツキが無いように配慮することが必要である。

成形時の型の温度、室温と湿度や樹脂温度によって粘度が変化するので成形時にその都度、音叉型振動式粘度計（A&D 社製モデル SV-10）で測定した。

粘度計にセットした時の初期値と時間が経過すると粘度の値が変化するので時間の経過によって変化する粘度の値を注視することが必要である。成形時毎に粘度は変化するので補正を行った。

2) 楕円ドーム形状型

多くの工業製品は幾何学的な形状諸元として複数の角度を有した平面で構成され、変化のある自由曲面の組み合わせで構成された形状であることから、それらの要素を加味して楕円ドーム形状を成形型として設計した。

本研究で使用した、楕円ドーム型は幾何学的な形状諸元を図 2.8 に 3 面図で示した。これを 3D データに処理した 3D モデルを図 2.9 に示した。

成形型は図 2.10 に示すように 3D モデルデータを 3D プリンターで造形した簡易型で、造形精度は 16 ミクロンの厚さで積層造形されたもので楕円内の自由曲面の表面粗さが加工精度に相当する階段式模様として表面粗さに表れていることが確認できる。

図 2.11 に楕円ドーム型の造形に使用した 3D プリンターを示す。造形に使用した樹脂は「アクリル系紫外線硬化樹脂」「VeroWhitePlus」（ベロホワイトプラス、白色硬質樹脂）である。

3) 楕円ドーム型の計測

3D プリンターで造形した成形型の測定は図 2.12 に示すように 3 次元測定器（東京精密社製 VA800A 型）を使用して測定している。

測定内容は図 2.13 に型の短軸上（Y 軸上）と長軸上（X 軸上）の深さ方向（Z 軸）の測定点を表示している。

また中央の球面と楕円輪郭形状と接するブレード R 部の測定点は短軸上の一方と長軸上の一方の測定点を図 2.14 に示している。

型の実測値は接触式プローブ（先端 0.5R）で長軸上と短軸上の Z 方向の測定点を計測した。

3D デジタルモデルに対する型の測定誤差の最大値、最小値と平均値をそれぞれ表 2.2 に示す。短軸上での測定誤差は小さくて長軸上の誤差がやや大きく現れているのがわかる。これは型を作成してから実験に要した期間が約 1 年半あるため、経年変化で型に僅か反りが見られることが影響しているものと考えられる。

また、ブレード R 部の測定では長軸上の R の小さい部位でやや大きく出ているが型の R 形状とプローブの先端部 R の関係で接点位置の誤差として出たのではないかと考えられる。全体的には良好な精度と評価できると考えている。

型の計測基準面は造形基準面とフランジ面の平行度を確認したところ僅かの変形が見られたので型内の球面を基準とした。同様に成形品の基準面は中心軸を中心とする球面を基準面とした。

本来は何れも同一基準面であるフランジ面を基準にすべきであると考えられるが、造形型の経年変化が僅かに見られたことと成形品のフランジ面は型から離形する面となり離形時に力がかかり成形品のフランジ面に傷や変形を生じているため基準面としなかった。

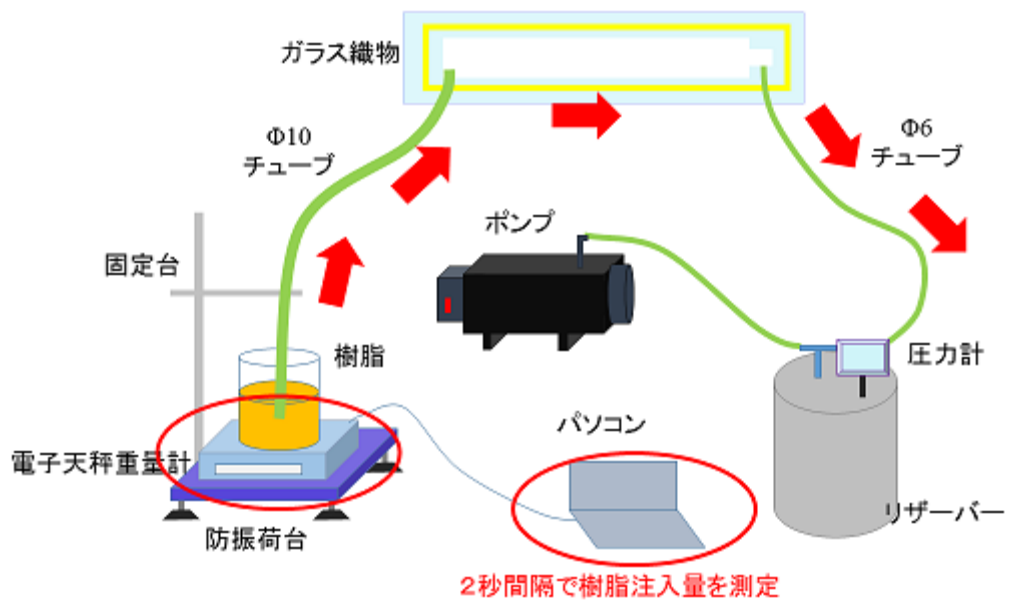


図 2.1 インフュージョン成形実験システム

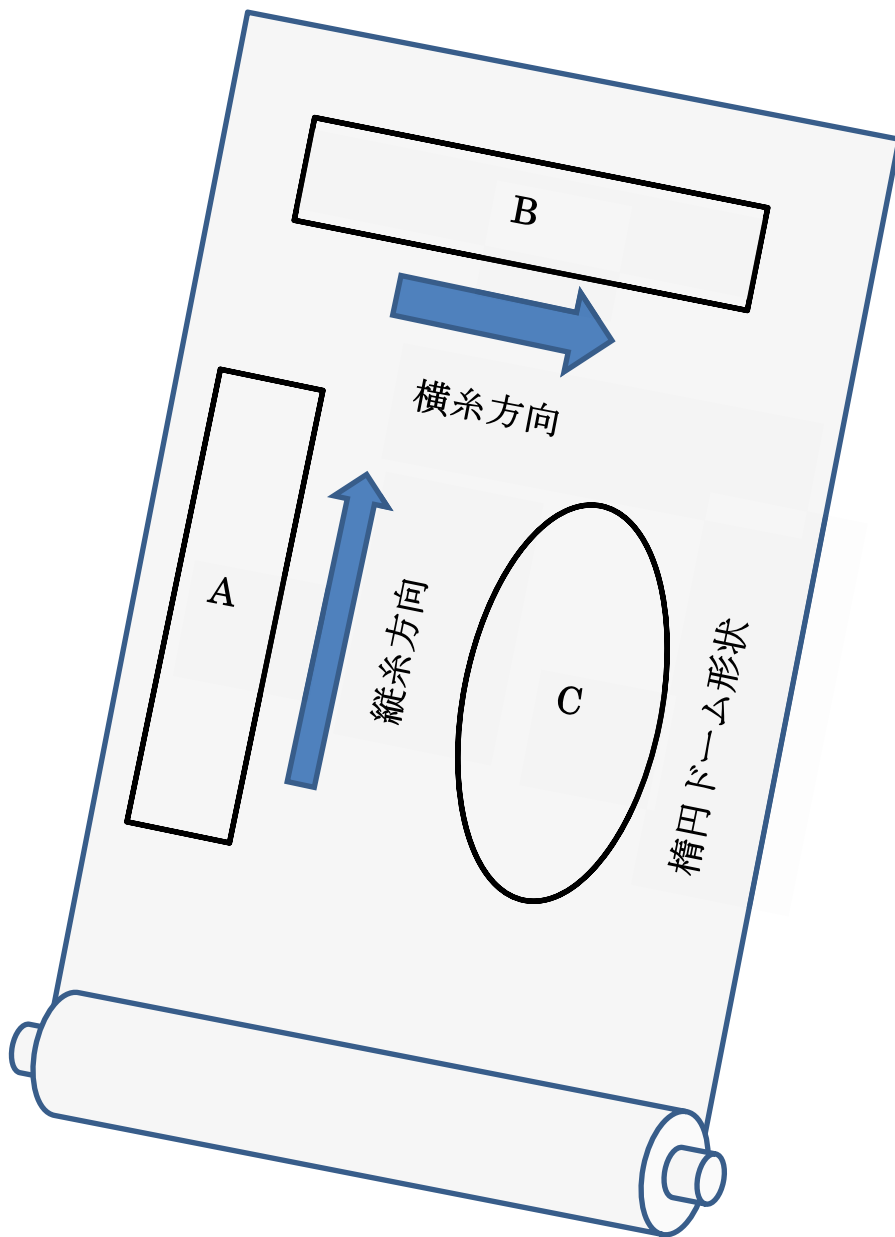
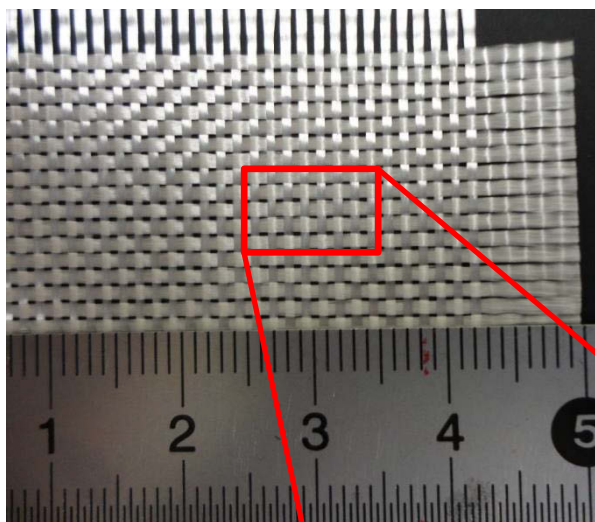


図 2.2 ガラス織物と供試材
A : 縦糸方向、B : 横糸方向、C : 楕円ドーム形状

表 2.1 供試材の諸元

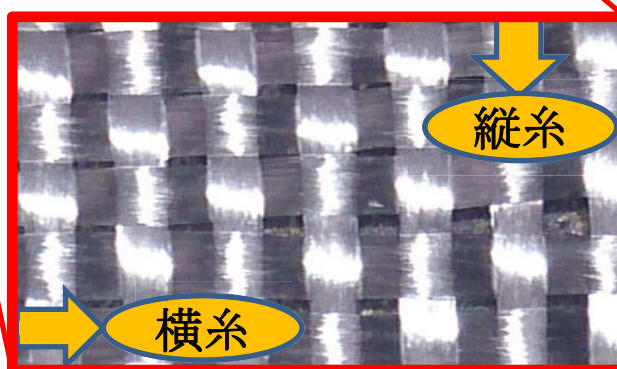
	平面積(cm ²)	ガラス織物(N)	フローメディア(N)	ピールプライ(N)
平板形状	1200	1.00	0.118	0.075
楕円ドーム形状	1203	1.02	0.121	0.076



織密度

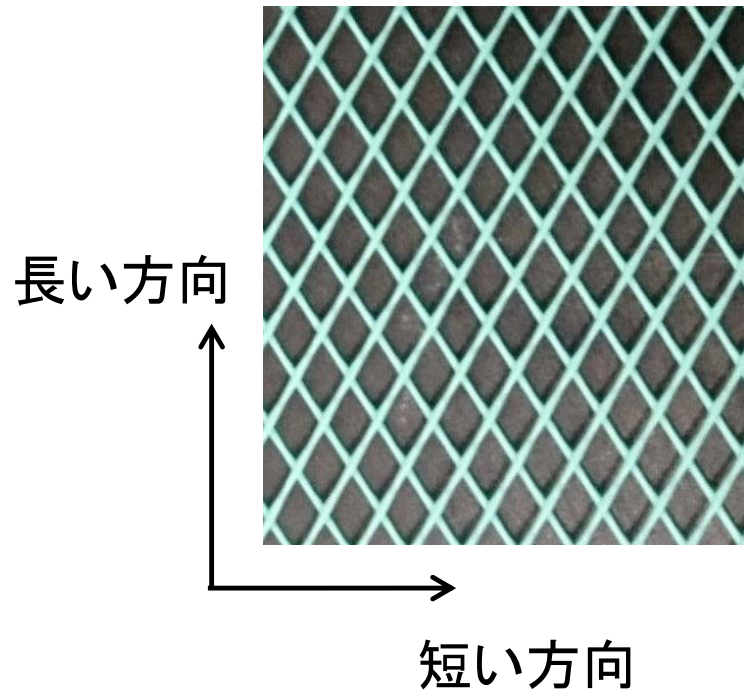
縦糸：20(本/25mm)

横糸：20(本/25mm)

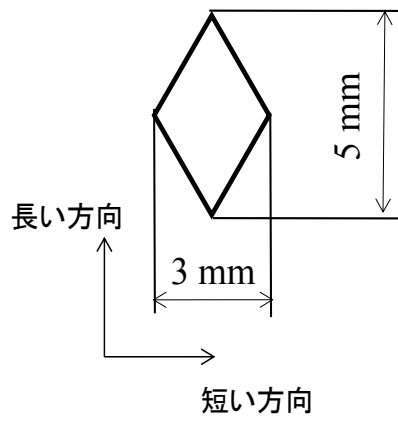


拡大写真

図 2.3 ガラス織物の平織りの平面写真



(a) フローメディアの方向



(b) 対角線の長さ

図 2.4 フローメディアの諸元



図 2.5 ピールプライ

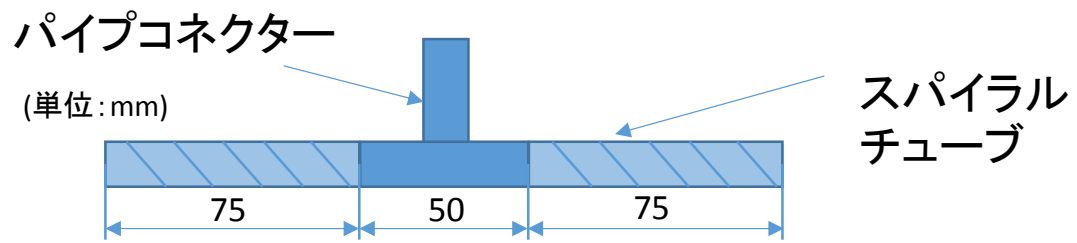


図 2.6 パイプコネクタとスパイラルチューブ

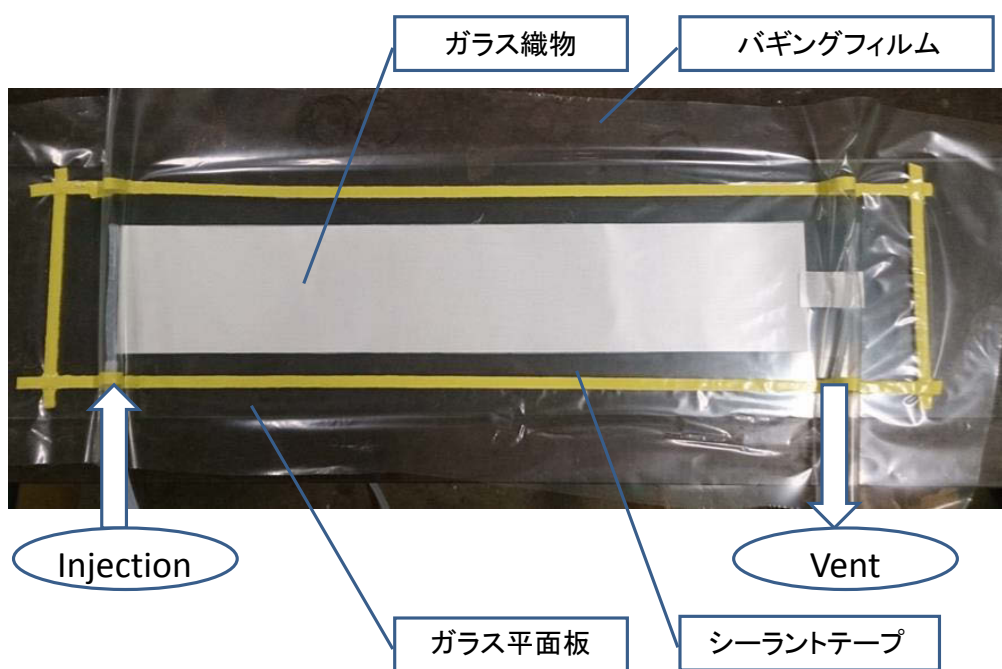


図 2.7 平面板の成形型

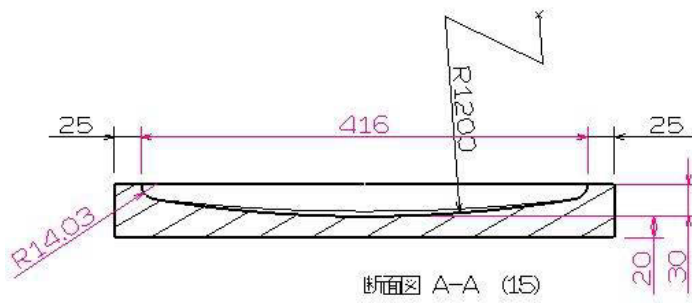
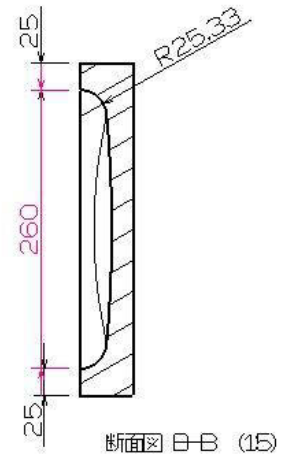
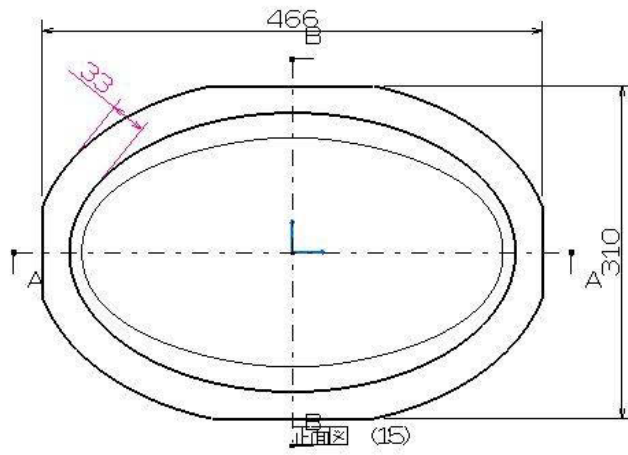


図 2.8 楕円ドーム型の形状諸元

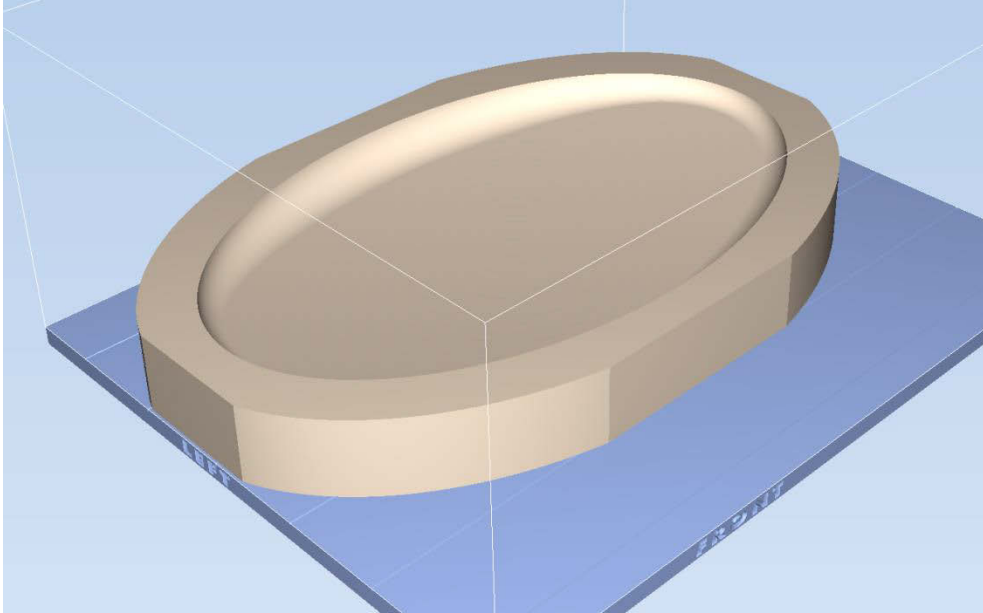


図 2.9 楕円ドーム型の 3D モデル

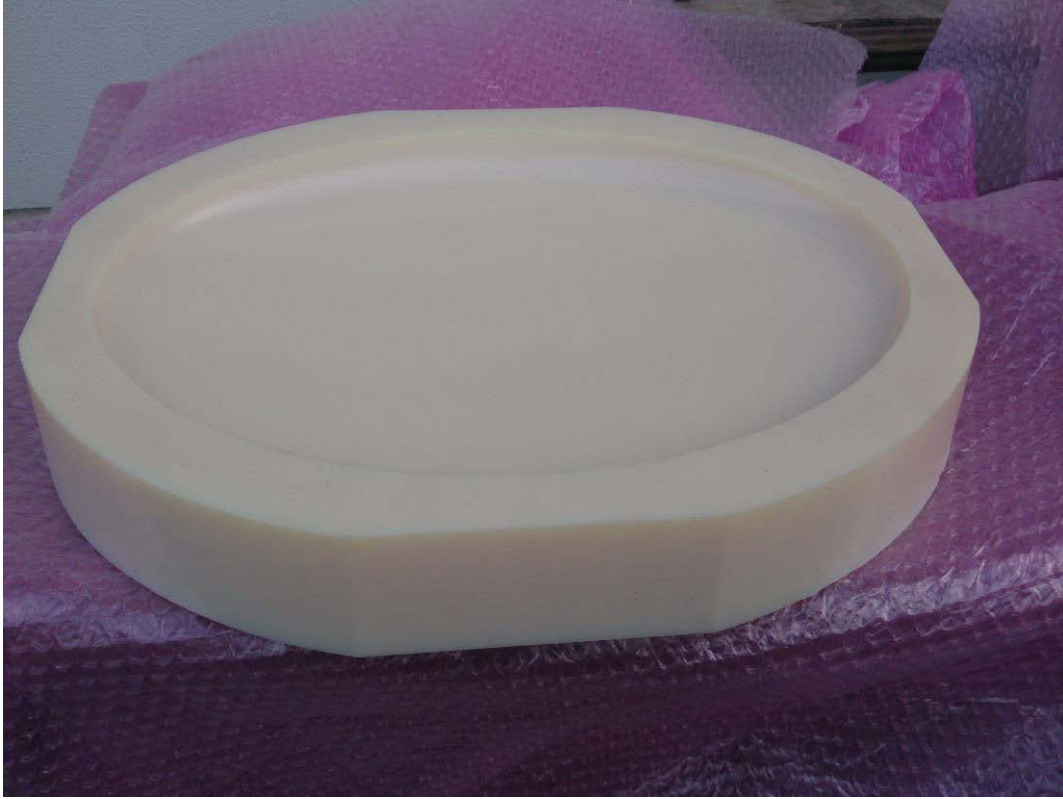


図 2.10 3D プリンターで造形した楕円ドーム型

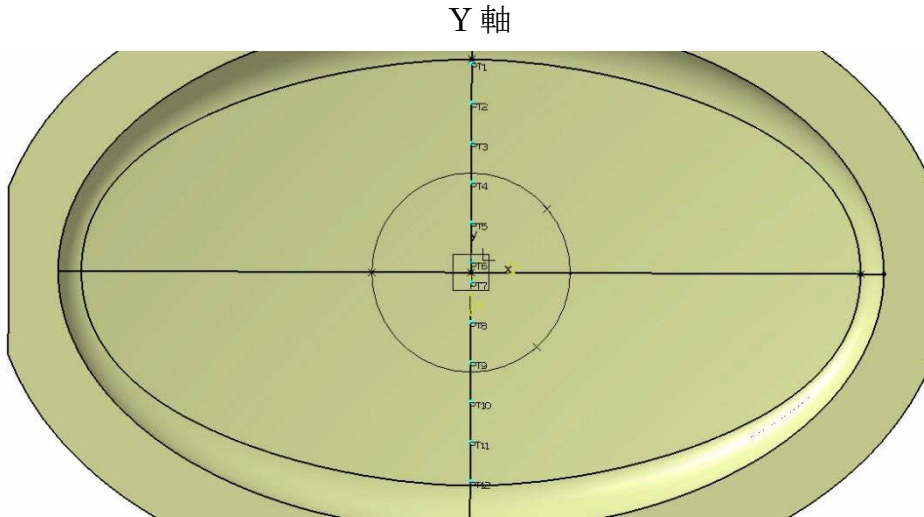


図 2.11 楕円ドーム型の造形に使用した 3D プリンター
ストラサシス社製 モデル CONNEX 500



図 2.12 楕円ドーム型の 3 次元測定器での計測

短軸上の測定位置 (Y 軸)



長軸上の測定位置(X 軸)

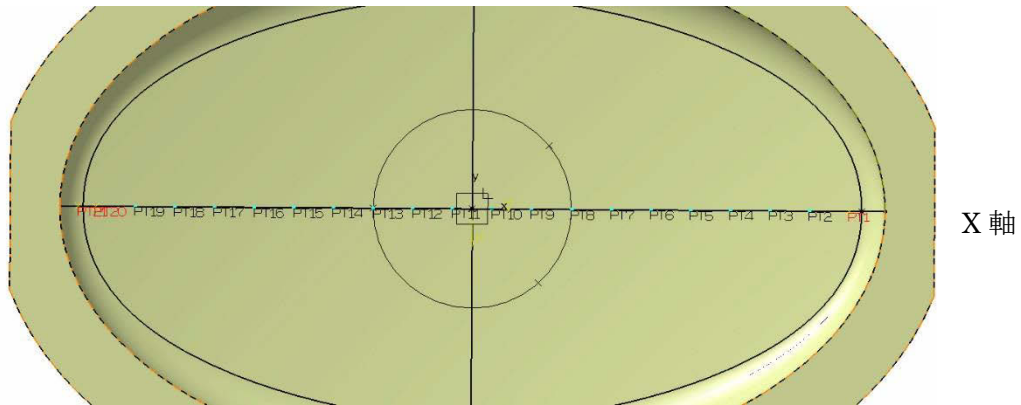
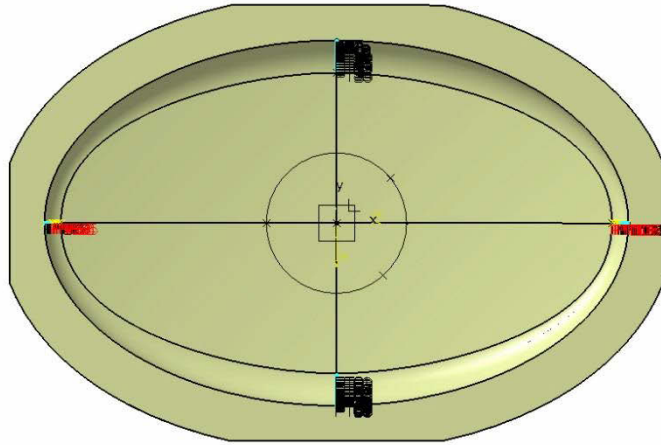
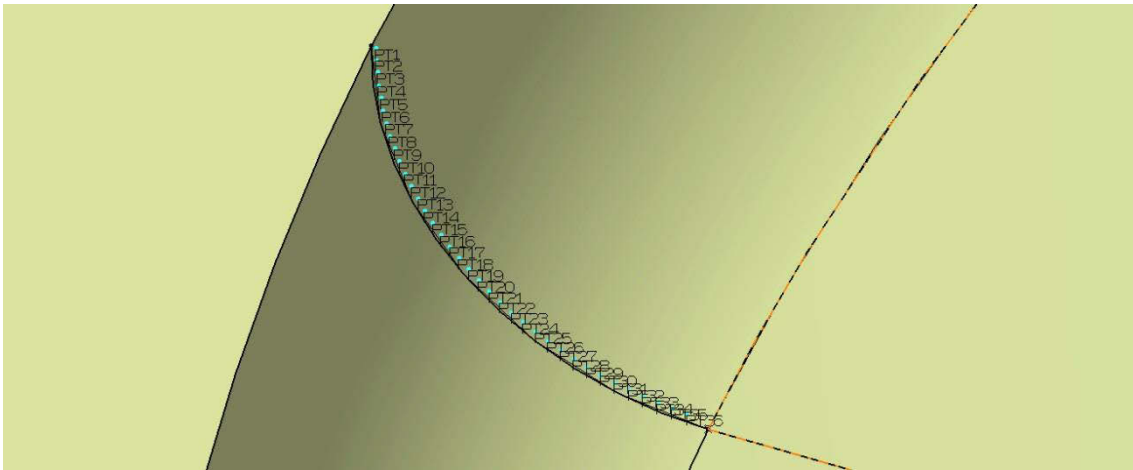


図 2.13 型の長軸上と短軸上の測定点



短軸上 (Y 軸)



長軸上 (X 軸)

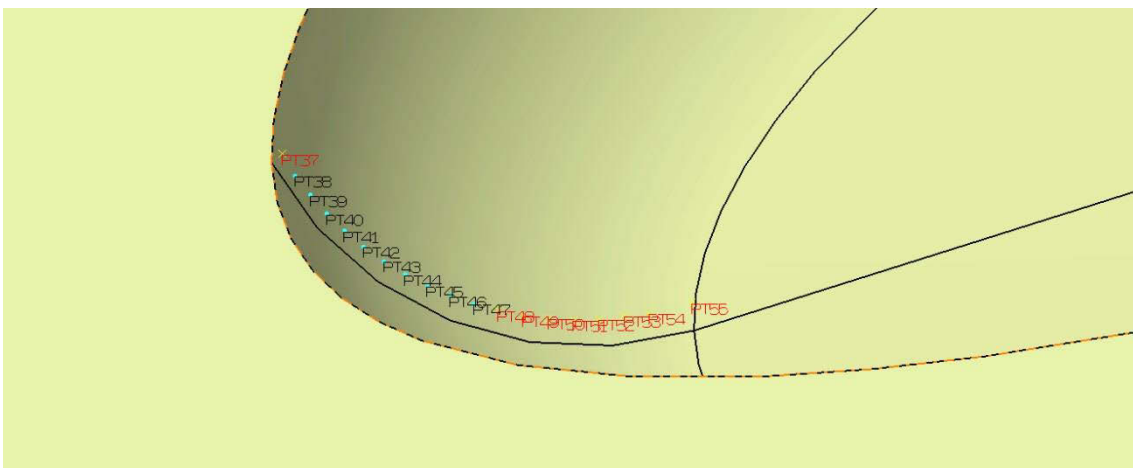


図 2.14 型のブレード R 部の測定点

表 2.2 3D デジタルモデルに対する型の寸法誤差(単位 : mm)

Y軸		
誤差	最小値	-0.05
	最大値	0.18
	平均値	0.04

X軸		
誤差	最小値	-0.05
	最大値	0.59
	平均値	0.21

Y軸(R部)		
誤差	最小値	-0.19
	最大値	0.19
	平均値	0.05

X軸(R部)		
誤差	最小値	0.01
	最大値	0.69
	平均値	0.40

第3章 ガラス平面板の成形結果と引張強度

3.1 緒言

インフュージョン成形における樹脂流動挙動は Darcy 則に従うことが知られており、数値シミュレーションにおいては、浸透係数 k が重要なパラメータの一つとなる。浸透係数 k は流体の性質には無関係で浸透層の性質（繊維径・空隙率・材質）のみに関係する係数である¹⁹⁾。

浸透係数 k を求めるための実験には、長方形の型内に強化材を置いて一方向に樹脂を流す方法²⁰⁾、強化材端部でのエッジ効果をなくすために放射状に樹脂を流す方法²¹⁾などが提案されている。フローフロントの位置は、センサーやビデオカメラを用いて測定する方法²²⁾が提案されているが、これらの方法では高価な計測装置と高度な技能が必要となる。

本章では、電子天秤重量計とパソコンを組み合わせることによって樹脂の注水量を2秒間隔で連続的に測定することによって浸透係数を簡易的に然も正確に求めることが可能となる方法を提案する。

また、今後三次元構造体をインフュージョン成形で成形するための基礎データとして、成形型をその平面から鉛直方向に傾けた傾斜角度とフローメディアが樹脂の浸透時間に与える影響を調査した結果について述べる。

さらに、成形型の傾斜角度とフローメディアが成形品の引張強度に与える影響を調査した結果について報告する。

3.2 樹脂供給量による浸透係数の求め方

3.2.1 樹脂供給量の算出式

強化材に含浸する樹脂の挙動は式(1)の Darcy 則に従うことが知られている²³)。

$$U = \frac{k}{\mu \phi} \frac{\Delta P}{x} \quad (1)$$

ここで、 U は樹脂流速、 k は浸透係数、 μ は樹脂粘度、 ϕ は空隙率、 x はフローフロントの位置、 $\Delta P/x$ は圧力勾配を示す。樹脂含浸部では、樹脂流速 U は一定のため、 t を時間とすると、式(1)は次式のようになる。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\mu \phi} \frac{\Delta P}{x} \quad (2)$$

樹脂注入口の圧力とフローフロントの圧力差である ΔP は一定のため、式(2)の両辺を積分し、初期条件 ($t = 0$ で $x = 0$) を用いると、フローフロントの位置 x は式(3)のようになる。

$$x = \sqrt{\frac{2k}{\mu \phi} \Delta P t} \quad (3)$$

したがって、強化材に含浸する樹脂量 W は、両辺に強化材の断面積 A 、樹脂密度 ρ 、空隙率 ϕ を掛けると次式のようになり、樹脂量 W は時間の平方根に比例することになる。

$$W = \sqrt{\frac{2kA^2\rho^2\phi}{\mu} \Delta P t} = C\sqrt{t} \quad (4)$$

ただし、

$$C = \sqrt{\frac{2kA^2\rho^2\phi}{\mu} \Delta P} \quad (5)$$

である。

従来は式(2)に示されるように、従来はフローフロントの速度を計測して浸透係数を求めていたが、フローフロントの速度の計測法は手間がかかる上に精度にバラツキが出易い。したがって、式(2)を式(4)で示した樹脂の重量と時間の関係に変形して、成形時間に対する重量変化を求めることによって、浸透係数を簡単に精度よく求めることが可能となった。

3.2.2 実験方法

浸透係数の測定実験のシステムを図 2.1 に示した。繊維には 800 mm×150 mm のガラス織物（日東紡、WEA 22F）を用い、ガラス製の平板の上に 4 ply 積層した。

樹脂の注入口には直径 10 mm、減圧吸引口には直径 6 mm のスパイラルチューブを設けた。

吸引側には、樹脂が繊維に完全に含浸するようにフローブレークを設け、バギングフィルムとシーラントテープを用いて減圧封入した。

樹脂にはサンドーマ (DH マテリアル社、XPC-109)、硬化剤にはパーメック N(日油社、F00011)を使用し、硬化剤の重量比は 1%とした。

樹脂を流す方向は一方向とし、樹脂量の変化はデジタル重量計（新光電子社、SJ-8200）を用いて計測し、サンプリングタイムは 2 秒とした。

使用したガラス織物は図 2.2 と図 2.3 に示すように細い繊維（縦糸方向、太さ：1 mm）と太い繊維（横糸方向、太さ：1.5 mm）で編み込まれているため、浸透係数は縦糸方向と横糸方向の両方向で測定した。

また、大型 GFRP 構造物の成形では通常、樹脂の流動を促進するためにフローメディアを使用するが、本研究で使用したフローメディアは図 2.4 に示すように対角線の長い方向で 5 mm、短い方向で 3 mm となっている。

そのため、フローメディアの対角線の長さが浸透係数に与える影響についても調査した。

3.2.3 浸透係数の求め方

浸透係数 k の値は、図 3.1 のガラス織物の縦糸方向と横糸方向にそれぞれ樹脂を流した場合の樹脂の流動時間と供給量の関係を表した結果と図 3.2 のガラス織物とフローメディアを組み合わせ使用した場合の樹脂の流動時間と樹脂量の曲線と、式(4)で計算した曲線が一致するように決定する。

そのため、まず式(5)の浸透係数 k を除く値を以下のようにして求めた。

粘度 μ は音叉型振動式粘度計で測定した値、基材の断面積 A は計測値、樹脂密度 ρ はカタログ値を用い、繊維の空隙率 φ は成形サンプルから燃焼法で求めた値を用いた。圧力差 ΔP の値は大気圧と真空圧の差となるが、樹脂は型に流れるまでにパイプ内を通るため、圧力損失を考えてハーゲン・ポワズイユの式を使用した。

さらに、パイプが垂直になっている部分では、重力の影響により圧力損失が生じていると考えられる。

そこで式(6)には樹脂の比重量にパイプの垂直部分の長さをかけた部分を加味した。

チューブ長さを l_0 (1,200 mm)、平均流速を v (0.44 mm/s)、チューブ直径を d (10 mm)、樹脂の比重量を γ (10,592 N/m²)、液面から平板までの高さを z (610 mm) とすると、注入側チューブ中での圧力損失 P_l は式(6)を用いて計算でき、6.5 kPa となるため圧力差 ΔP の値は大気圧 101 kPa から圧力損失 6.5 kPa を引いて、94.5 kPa とした。

$$P_l = \frac{32\mu l_0 v}{d^2} + \gamma z \quad (6)$$

以上の値を表 3.1 に、求めた浸透係数 k の値を表 3.2 (縦糸方向) と表 3.3 (横糸方向) に示す。

3.2.4 実験結果

(1) フローメディアを使用しない場合

ガラス織物の縦糸方向と横糸方向にそれぞれ樹脂を流した場合の樹脂の流動時間と供給量の関係を図 3.1 に示すが、成形に必要な樹脂量は約 0.69N であった。

ガラス織物の縦糸方向に樹脂を流した場合、繊維全体に樹脂が含浸するのに要した時間は 853 秒となった。

一方、ガラス織物の横糸方向に樹脂を流した場合は、繊維全体に樹脂が含浸するのに要した時間は 1,814 秒となり、縦糸方向に樹脂を流した場合の 2.1 倍と

なり、この差は縦糸方向と横糸方向の繊維の太さの比（1：1.5）より大きな値となった。

両者の浸透係数の比は 1.92 倍となり、この差は縦糸方向と横糸方向の繊維の太さの比（1：1.5）より大きな値となったが、繊維束（ロービング）の太さのばらつきを考えれば妥当な値と考えられる。

ガラス織物のロービングのばらつきについては、各製造会社の社内基準で外部に公示されていない。しかしながら、国内各繊維メーカーは JIS 規格に準拠した品質管理が行われている。ガラスクロスでは JISR3413 の「5. ガラスクロスの品質」の項で、厚みや織密度の許容値が規定されている。具体的には 0.44 mm以上の厚みのクロスでは±0.07 mmのばらつきの範囲が規定されている。また、織密度 20 本/25 mm以上の場合±2.0 本程度（約 10%）が許容値である

(2) フローメディアを使用する場合

図 3.2 にガラス織物とフローメディアを組み合わせて使用した場合の樹脂の流動時間と供給量の関係を示すが、樹脂の流動時間は図 3.1 のフローメディアなしの場合と比較して 1/11 以下に短縮された。

樹脂の流動時間が最も短くなったのはガラス織物の縦糸方向とフローメディアの長い方向との組み合わせた場合で、繊維全体に樹脂が含浸するに要した時間は 49 秒となり、フローメディアを使用しない場合に比べて 1/17 に大幅に短縮されることが解った。

また、ガラス織物の横糸方向とフローメディアの長い方向との組み合わせて樹脂の流動時間は 74 秒となりフローメディアを使用しない場合に比べて 1/25 となり、さらに短縮幅が大きいことが明らかとなった。

これはフローメディアの構造による樹脂の流動促進効果が発揮された結果と考えられる。また、フローメディアの方向性による樹脂流動時間の比較をすると短い方向に対する長い方向の比は 1.4 倍の樹脂流動時間になっている。

フローメディアの方向によって生ずる樹脂流動時間の差は同一ガラス織物の方向（横糸方向）で長い方向と短い方向では 1.37 倍となり、ガラス織物の縦糸方向で長い方向と短い方向では 1.44 倍となった。

これらの結果からガラス織物の方向性とフローメディアの使用によってそれぞれ求めた浸透係数の結果とそれぞれの成形実験による樹脂流動時間の関係は高い確率で一致していることが判明した。

(3) 樹脂注入量と成形品の厚さへの影響について

フローメディアを使用しない場合の成形では樹脂の含浸量が図 3.1 に示すように 0.69N である。フローメディアを使用した場合の成形では樹脂の含浸量は図 3.2 で示すように 1.47N であった。成形した成形品の断面図の一例を光学顕微鏡で測定した結果を図 3.10 に示した。

図で明らかなようにガラス繊維部の厚さとフローメディアとピールプライ部の厚さはほぼ均等であることが解る。

繊維の方向性とフローメディアを使用した場合、更に成形後フローメディアを離形した後の成形品の厚さを比較測定した結果を表 3.4 に示した。

各成形品について樹脂注入口付近、中央部と吸入口付近の 3 点を計測し平均値を算出した。それぞれのケースで成形品 2 枚から 6 枚を測定してケース毎の平均値を算出した。

フローメディアとピールプライを使用しない場合に比べて使用した場合の厚さはほぼ 2 倍の厚さになっていることは樹脂の含浸量に比例していることから裏付けられていることが理解される。

縦糸方向と横糸方向、フローメディアなし、フローメディアあり（フローメディアの長い方向と短い方向）、フローメディアを離形した後の成形品の厚さなどを比較してみると。

- (1) 縦糸方向が横糸方向に比べていずれの場合も極僅かであるが厚い傾向を示していることが解る。
- (2) フローメディアの方向性についても長い方向が短い方向に対して極僅か厚い傾向になっている。
- (3) フローメディアを活用して成形後に離形した後の厚さを測定した結果も (1) (2) と同様の傾向を示していることが判明した。

いずれの場合も測定値についての有意差を認めるほどの結果とは言えず測定誤差範囲内と考えるのが妥当と思われる。

フローメディアを使うことによって成形時間は大幅に短縮されるが、今回の成形実験では必要な樹脂量は、フローメディアとピールプライを使用すると約 1.47N となり、フローメディアなしの成形と比較して、成形に必要な樹脂量は約 2 倍となり、成形品の厚さを測定すると図 3.8 のようにフローメディアを使用しない場合に比較して約 2 倍の厚さになることが明らかである。

したがって、フローメディアを使用すると成形時間は大幅に改善されるが、成形に必要な樹脂量は増加し、フローメディアやピールプライ等の副資材も必要となるため材料費は高くなる。

そのため、インフュージョン成形では、成形前に成形時間と成形品の厚み、成形コストのバランスを数値シミュレーションによって検討することが、生産性の向上と低コスト化に有効となると考える。

3.3 型の傾斜角度と樹脂の流動時間の関係

3.3.1 実験方法

成型型の傾斜角度が樹脂の流動時間に及ぼす影響を調査するために、傾斜角度を 0° ～ 90° まで 15° 間隔で変化させた場合の実験を行った。

実験の一例として、傾斜角度 45° と 90° での実験の様子を図 3.4 と図 3.5 に示した。使用した材料と実験条件は 2.2 節と同じで、樹脂は横糸方向に流し、フローメディアは長い方向と短い方向の 2 通りとした。

本実験では樹脂注入口を何れの傾斜角度の場合も下から行ったが、傾斜角度 90° の実験で樹脂注入口を上から行った場合に下から行った場合と比較した実験を試みた。その状況を図 3.6 に示した。

3.3.2 実験結果

傾斜角度と繊維全体に樹脂が含浸するのに要した時間の関係を図 3.7 に示すが、樹脂の粘度は成形時の室内温度、湿度や成型型の温度などで異なってくるため、図 3.7 では傾斜角 0° の結果を基準として補正を行った。

実験開始時と終了の間で変化した粘度の平均値を算出し、その平均値が基準値に対して差異が生じた場合、実験の都度年度の補正を行っている。使用した樹脂の粘度の基準値は $0.143[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ で、Darcy 則より粘度と成形時間は線形関係にあるため、基準粘度を成形時の粘度で割った値を成形時間に掛けることによって求めている。

実験結果は、傾斜角度が高くなるに伴い、繊維全体に樹脂が浸透するのに要した時間は長くなった。

しかし、傾斜角度が 0° の場合の計測値が 1,824 秒に対し、傾斜角度が 90° の場合は 1,939 秒となり、両者は 5.9% の差となったことから、傾斜角度が樹脂の流動時間に与える影響は小さいと考えられる。

また、フローメディアを使用した場合の傾斜角度と繊維全体に樹脂が含浸するのに要した時間の関係を図 3.8 と図 3.9 に示すが、図 3.7 の結果と同様に傾斜角度が樹脂の流動時間に与える影響は小さい結果となった。

傾斜角度 90° の場合樹脂注入口を下から行った場合と上から行った場合の樹脂流動時間の実験結果を図 3.10 に示した。図で見られるように上から行った実験結果は下からの場合と 0° の結果よりやや早い傾向を示している。ガラス織物

の繊維の方向による差は明確であるが、何れの実験においても圧力差は一定になるよう設定しているため、自重による影響と考えられるが有意差と見られるほどではないと考えられる。

3.4 平面板の傾斜角度による引張強度

3.4.1 実験方法

平面板の傾斜角度が成形品の引張強度に与える影響を調査するために引張試験を行った。引張試験装置を図 3.11 に、JIS K 7054「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法」を参考に作成した引張試験片を図 3.12 に示す。

試験片形状は、厚さ：1 mm、幅：10 mm、長さ：200 mm の板状とし、図 3.12 にしめした。各条件で 5 本の試験を行なった。

3.4.2 実験結果

図 3.13 に横糸方向でフローメディアがなしの 0° 試験片の引張試験後の破壊後の様子を、図 3.14 には横糸方向でフローメディア長い方向の 0° 試験片の様子をそれぞれ示すが、ほとんどが標点間で破壊している。また、図 3.15 には、横糸方向でフローメディアが長い方向の 0° 試験片の応力-歪線図を、一例として示すが各試験片の曲線がほとんど重なって差は見られない。

傾斜角度と引張強度の関係を図 3.16 に示すが、フローメディアが引張強度に与える影響を調査するために、傾斜角度が 0°、45°、90° ではフローメディアを長い方向にして成形した試験片の結果を併記している。

また、燃焼法より求めた各角度の繊維体積含有率を表 3.5 に示す。

図 3.16 より全試験片の引張強度の平均値は 170 MPa となり、傾斜角度で引張強度に若干の差が生じているが、傾斜角度と引張強度の相関関係はないことから、これは繊維体積含有率と実験誤差の影響と考えられる。

また、表 3.5 より傾斜角度が 0° の場合、フローメディアありの繊維体積含有率はフローメディアなしの結果と比較して 5% 小さい結果となった。

一方、傾斜角度が 45° と 90° の結果では、フローメディアを使用した場合の繊維堆積含有率の方がフローメディアを使用しない場合に比べてその値は 0.5% と 0.8% 高くなった。

燃焼法による計測では±2.5%の誤差が許容されるため、それらは測定誤差の範囲と考えられる。従ってフローメディアが繊維体積含有率に与える影響はほとんどないと推察される。

3.5 結言

本3章の「ガラス平面板の成形結果と引張強度」では次の事柄が明らかになった。

- 1) 重量計を用いた簡易的で精度の高い方法で浸透係数を求めることができ、この浸透係数を用いて数値シミュレーションは可能となることが明らかとなった。
- 2) 成形型の傾斜角度が樹脂の浸透時間に与える影響は最大で5.9%と小さな値であった。
- 3) 傾斜角度の変化にかかわらず引張強度は概ね一様な値を示し、バラツキの範囲も誤差範囲と考えられる。
- 4) フローメディアの使用の有無が引張強度と繊維体積含有率に与える影響はほとんどないと考えられる。
- 5) フローメディアを使用することで、樹脂の浸透時間を大幅に短縮されることが明らかになり、浸透効果の大きいことが明らかとなった。
- 6) フローメディアの方向性についての影響は菱形の長い方向と短い方向では1.4倍の差があることが明らかとなった。その理由としてフローメディアの菱形が長い方向に対して短い方向の距離の比率が樹脂流動挙動とほぼ一致していることがその理由と考えられる。
- 7) 今回の実験ではフローメディアを使用すると成形に必要となる樹脂量は2倍となり、副資材は増加するため、インフュージョン成形では、成形時間と成形品の厚み、成形コストのバランスからフローメディアの使用を検討する必要があると考える。

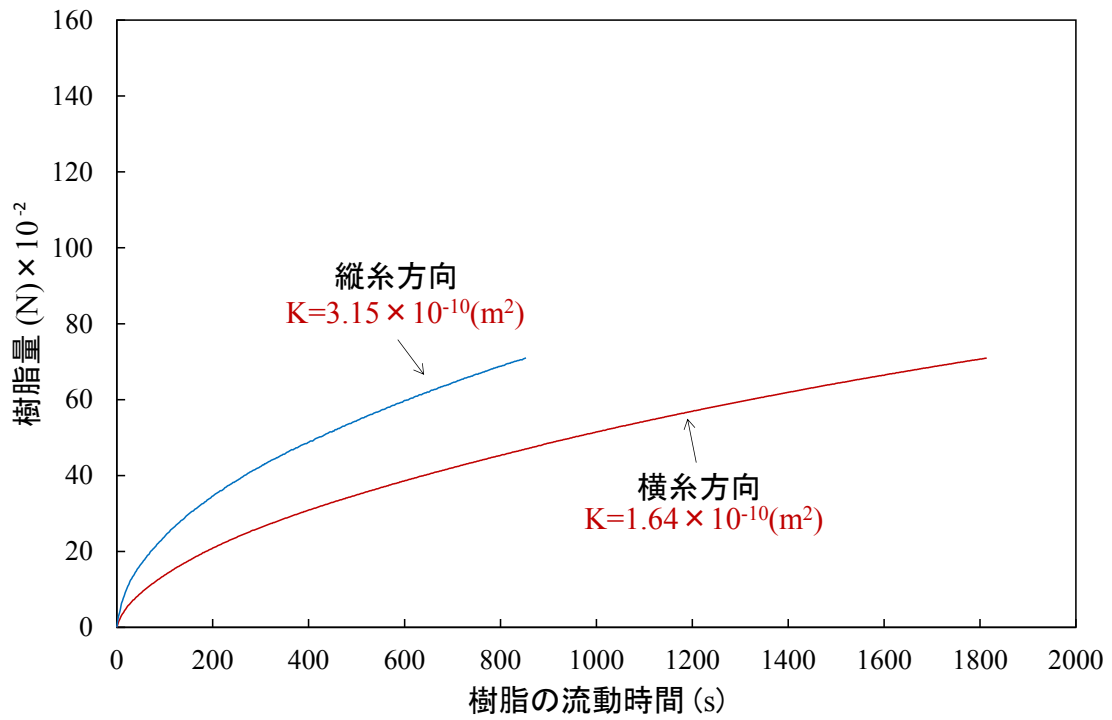


図 3.1 縦系方向と横系方向の樹脂の流動時間と供給量の関係 (フローメディアなし)

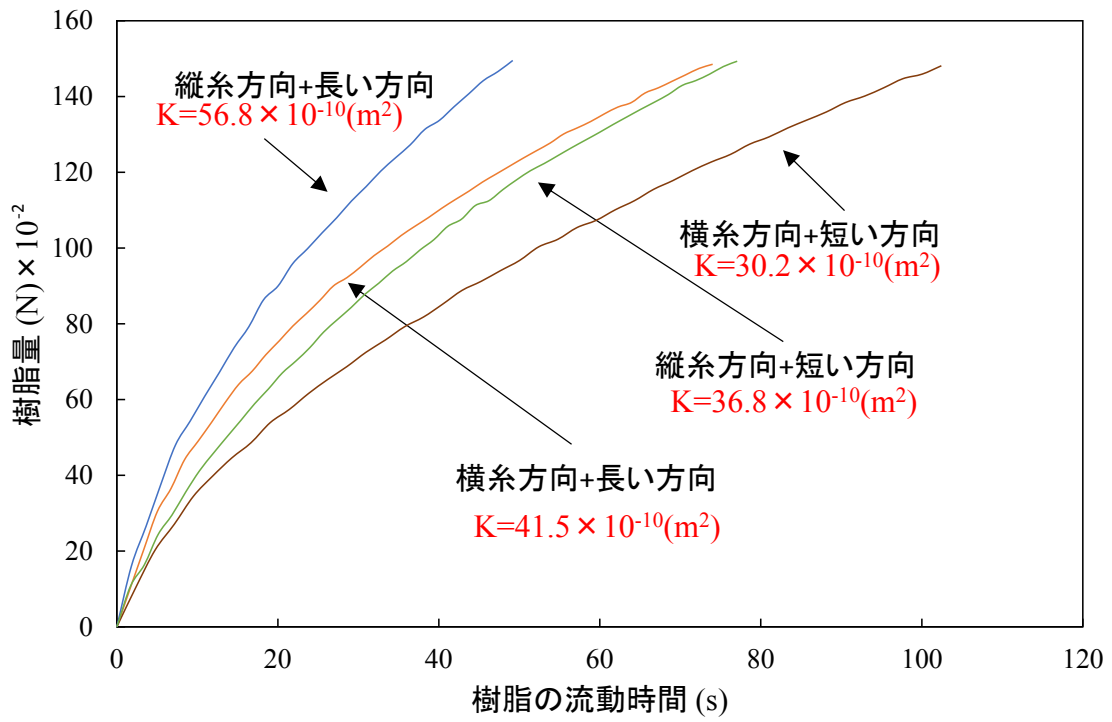


図 3.2 縦糸方向と横糸方向の樹脂の流動時間と供給量の関係 (フローメディアあり)

表 3.1 浸透係数の計算に使用した値

	フローメディアなし	フローメディアあり
空隙率 ϕ (%)	63.5	69.3
基材の断面積 A (mm ²)	138	263
樹脂粘度 μ (Pa · s)		0.143
樹脂密度 ρ (kg/m ³)		1081
樹脂比重量 γ (N/m ³)		10,593
圧力差 ΔP (kPa)		94.5

表 3.2 浸透係数(縦糸方向)

	縦糸方向		
	フローメディア なし	フローメディア 長い方向	フローメディア 短い方向
浸透係数 k (10^{-10} m^2)	3.15	56.8	36.8

表 3.3 浸透係数(横糸方向)

	横糸方向		
	フローメディア なし	フローメディア 長い方向	フローメディア 短い方向
浸透係数 k (10^{-10} m^2)	1.64	41.5	30.2

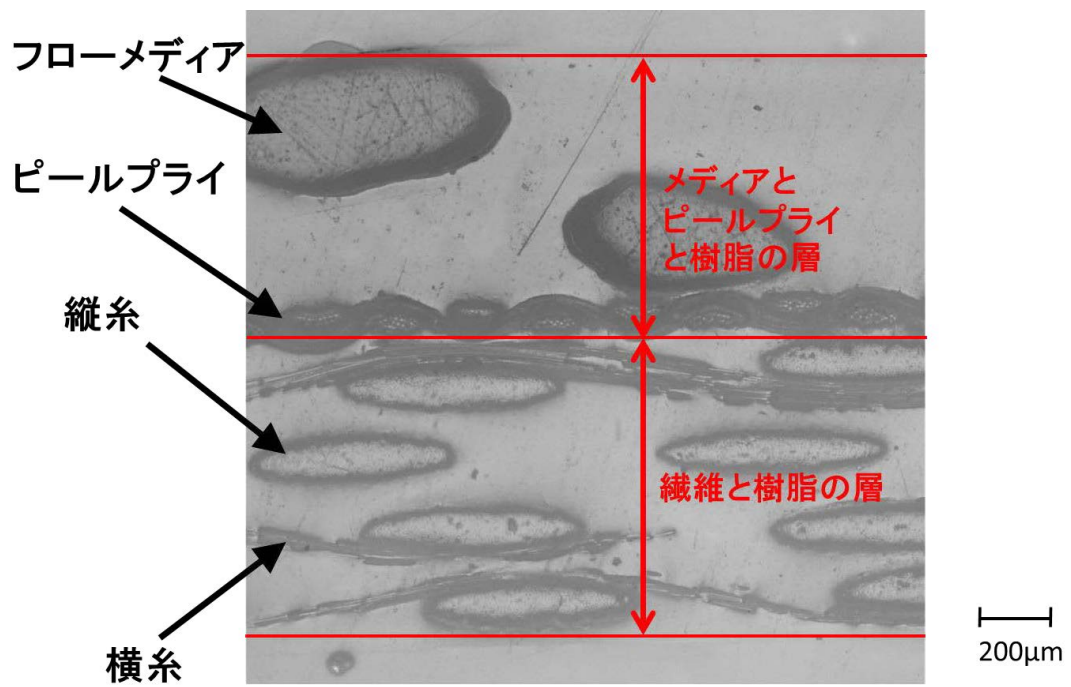


図 3.10 フローメディアを使用した成形品の厚さ

表 3.4 成形品の厚さ測定

単位：mm

	メディア無	メディア有		メディアを離形	
		短い方向	長い方向	短い方向	長い方向
縦糸方向	0.91	1.82	1.84	0.94	0.97
横糸方向	0.89	1.81	1.80	0.93	0.94

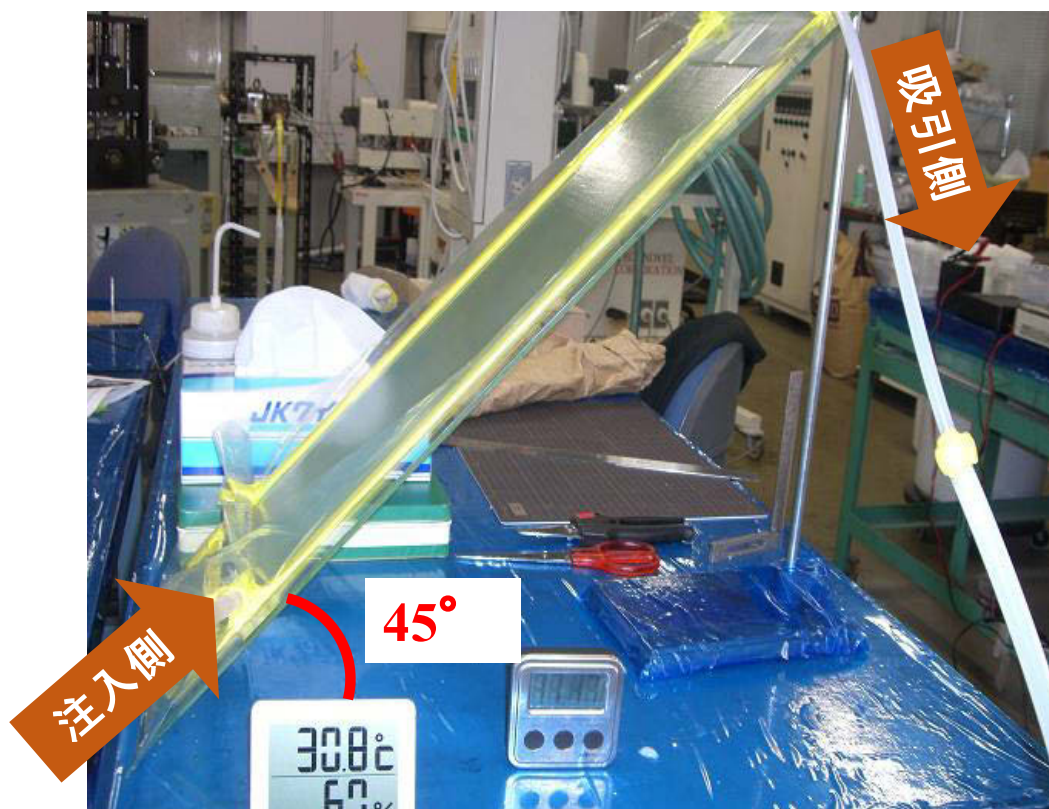


図 3.4 平板の成形実験（傾斜角度：45°）



図 3.5 平板の成形実験（傾斜角度： 90° ）



図 3.6 平面板の成形実験（樹脂注入口を上から行った成形：傾斜角度 90° ）

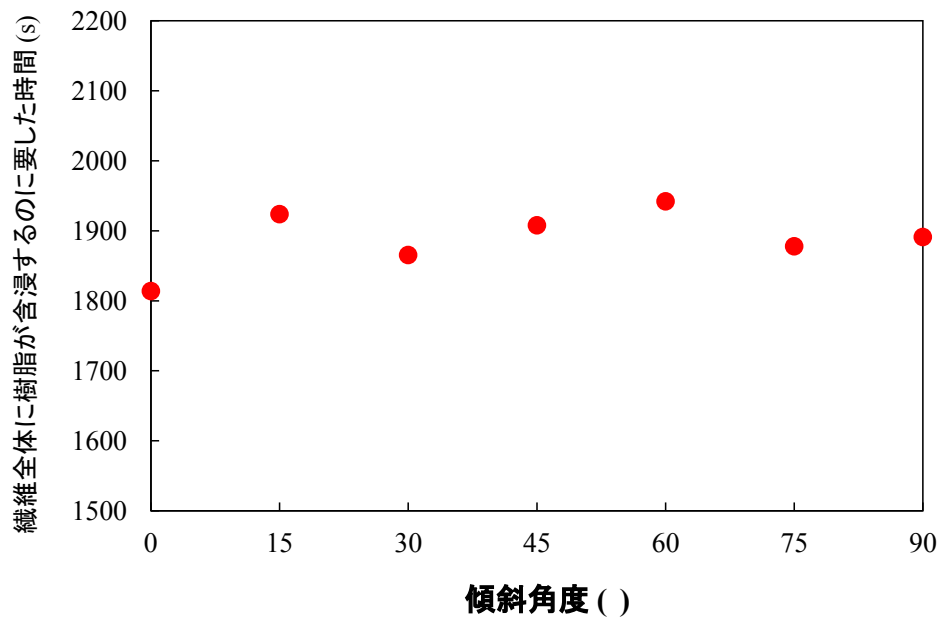


図 3.7 平板の傾斜角度と樹脂流動時間の関係 (フローメディアなし)

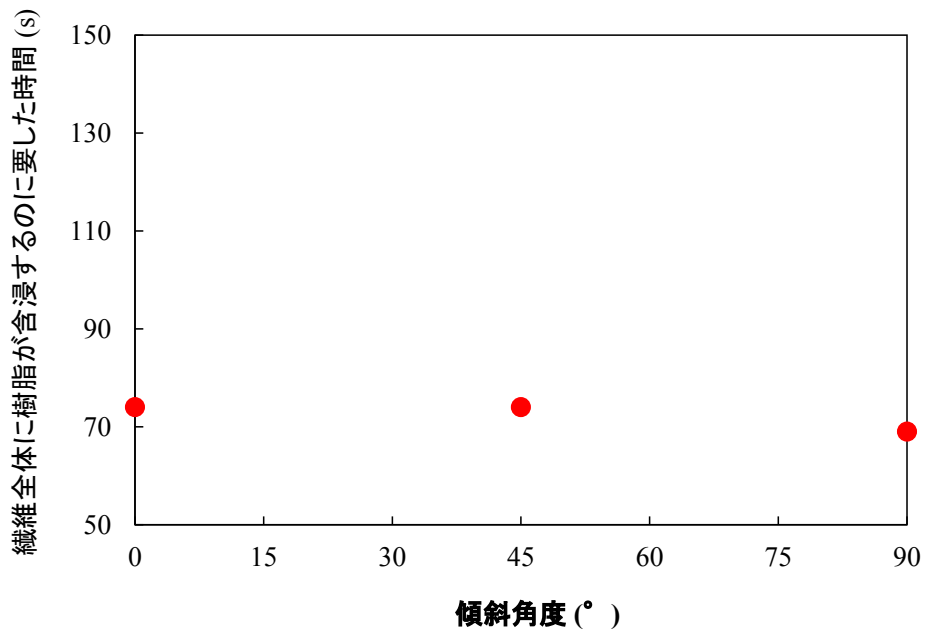


図 3.8 平板の傾斜角度と樹脂流動時間の関係 (フローメディアあり)
 (a) フローメディア : 長い方向

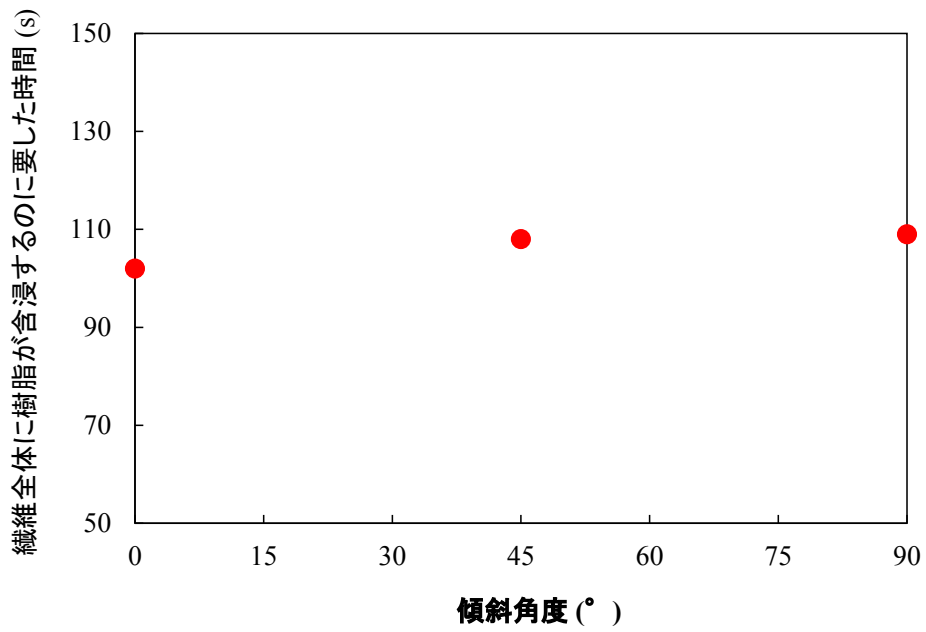


図 3.9 平板の傾斜角度と樹脂流動時間の関係 (フローメディアあり)
 (b) フローメディア : 短い方向

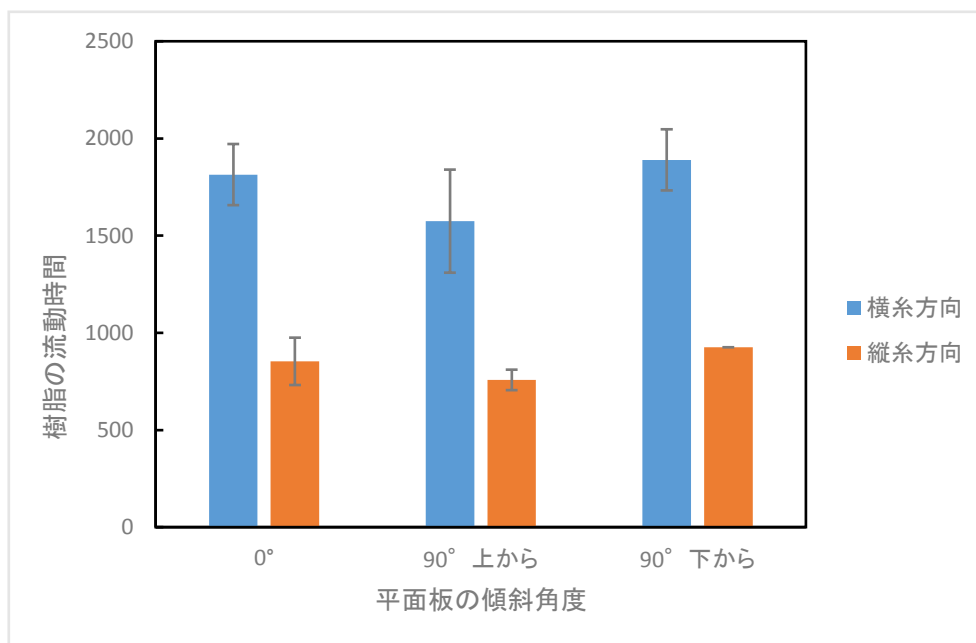


図 3.10 平板の傾斜角度と樹脂流動時間の関係
(傾斜角度 0° と 90° の樹脂注入方向と樹脂流動時間)



図 3.11 引張試験機とテスト

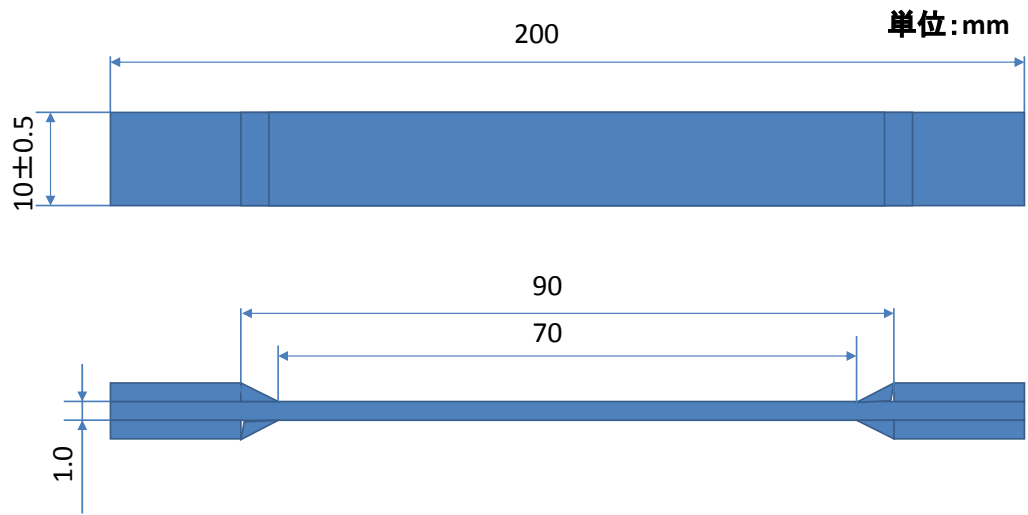


図 3.12 引張試験片 (JIS K 7054)



図 3.13 引張試験片の破断状態（横糸方向フローメディアなし傾斜角度 0° ）

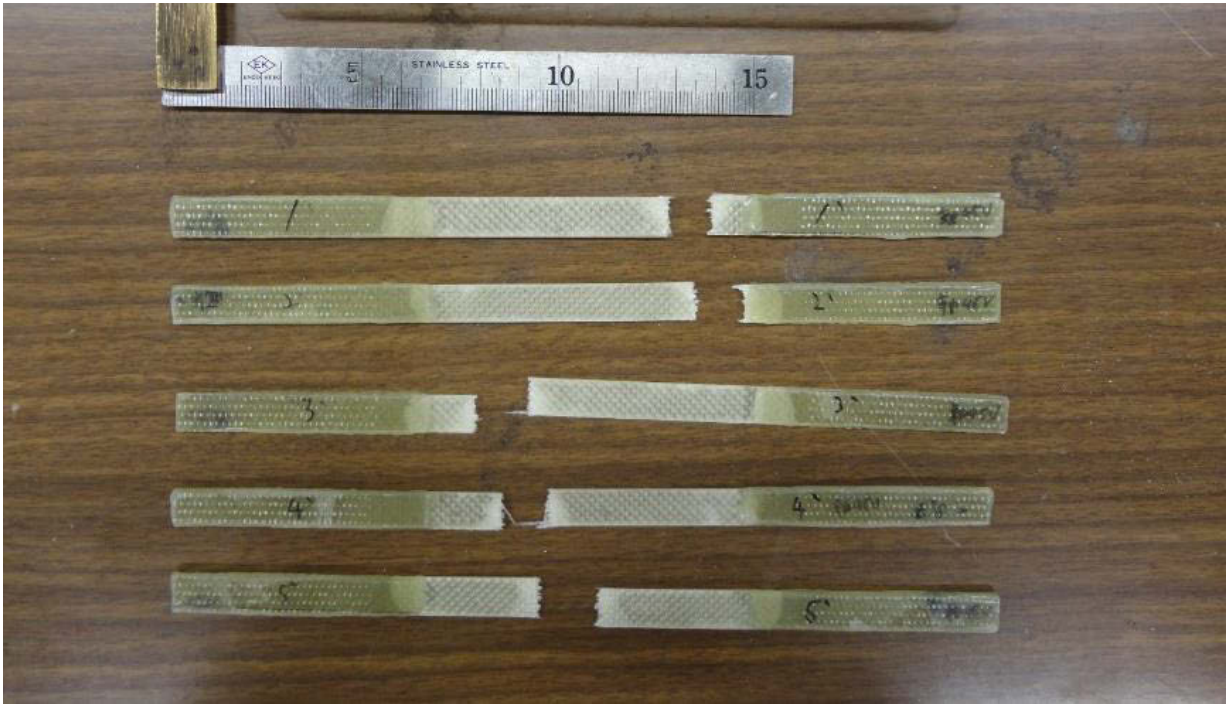


図 3.14 試験片の破断状態（横糸方向+フローメディア長い方向、傾斜角度 0°）

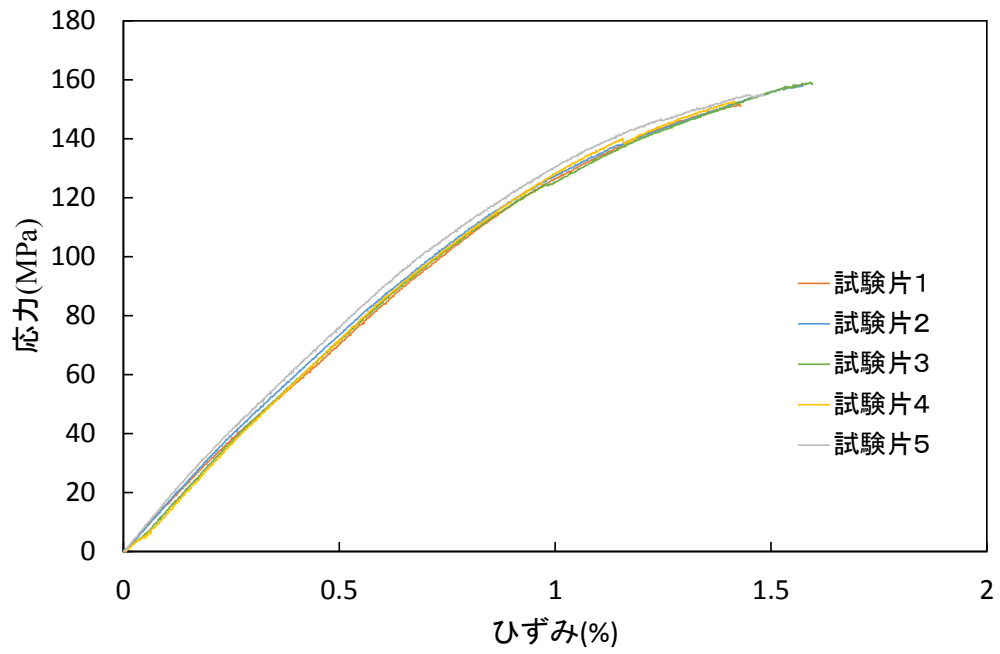


図 3.15 応力 - ひずみ線図 (横糸方向+フローメディア長い方向、型の傾斜角度 0°)

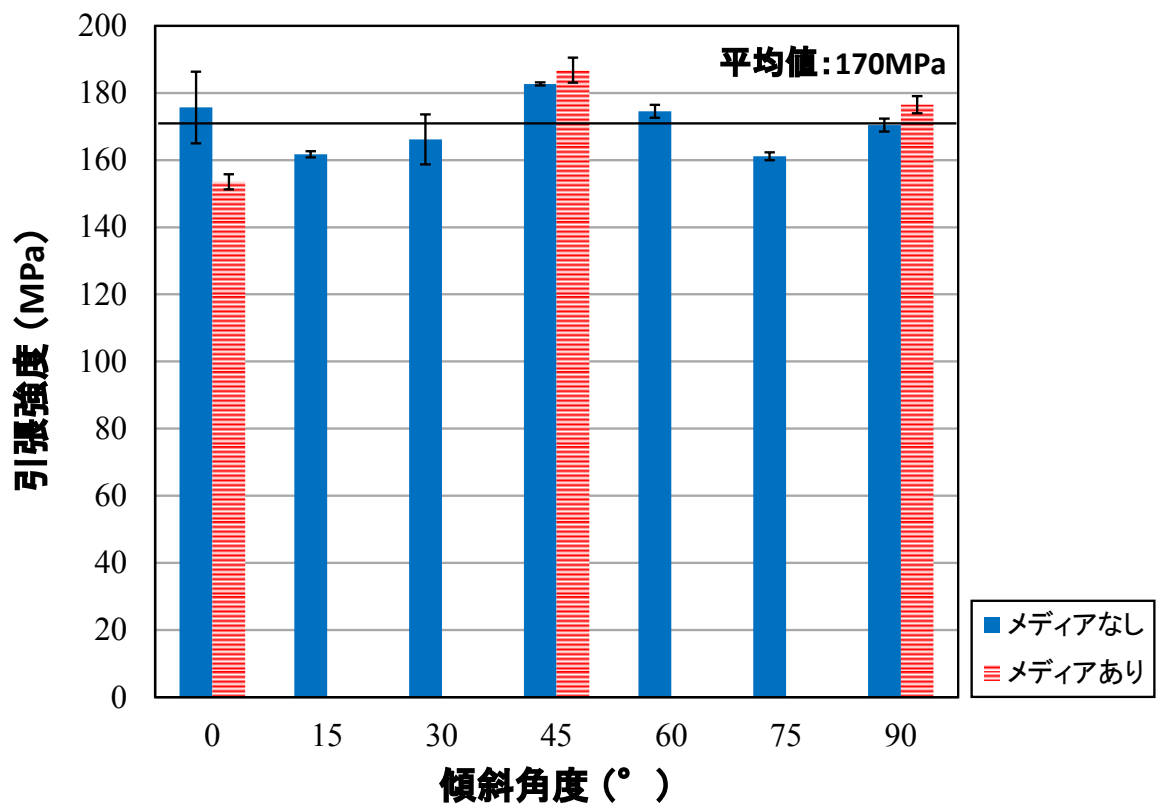


図 3.16 平板の傾斜角度と引張強度の関係

表 3.5 型の傾斜角度と繊維体積含有率の関係

傾斜角度 (°)	フローメディアなし (%)	フローメディアあり (%)
0	38.8	36.9
15	36.1	-
30	37.8	-
45	36.9	37.1
60	38.1	-
75	35.3	-
90	36.4	36.7

第4章 楕円ドーム型の成形

4.1 諸言

インフュージョン成形法で成形された GFRP 製品のほとんどは複数の幾何学的形状で構成された製品や部品である。

前章までの実験で求めた基本的な要素データを基に自由曲面で構成する楕円ドーム型でインフュージョン成形の最適条件を求めた結果を報告する。

即ち平面板による傾斜角度を変化させた成形条件に対して、自由曲面を持つ楕円ドーム形状でできた型を使って成形した場合はそれらの要素がどのように影響するかを明らかにする。

楕円ドーム型の特徴はフランジ面から型の中央部までの間に 0° から 180° まで徐々に変化している。また、楕円ドーム型は対称で計測が容易で成形型と成形品の幾何学的形状が型の緒元に対してどのような影響を及ぼすかを容易に計測できる。

楕円ドーム型の幾何学的緒元とその3次元デジタルモデルから3Dプリンターで造形した成形型は、それを使用してインフュージョン成形された成形品の緒元測定結果との相関関係が判断しやすいことを狙って設計した型である。

樹脂の注入位置を変えることによる成形時間の変化とフローメディアを使用した場合とそうでない場合の比較により成形時間への影響を成形実験により求め、基礎実験の結果と比較を行った。

それぞれの成形条件の結果から最適成形条件を求めた結果を報告する。

4.2 楕円ドーム型の特徴

今回使用した楕円ドーム型の緒元は第 2 章の図 2.7 に三面図を示し、図 2.8 に 3D デジタルモデルと図 2.9 に 3D プリンターで造形した型を示した。

成形方法としては図 4.1 に示すように型の長軸上に樹脂注入口①を設け他の長軸上②から減圧する吸引口を設けた。

同様に③～⑤の位置を組み合わせることによって成形方法を変化させることが出来ようになっている。

本成形型はフランジ面から型の中心に向かって 0° から 180° まで変化をしているため、第 3 章で述べた傾斜角度の変化による曲面の法線が型の形状緒元に組み込まれており、その評価が可能と考えて設計した型となっている。

また、長軸、短軸を中心に左右対称となっていることと深さ方向に対しても軸中心に対して対称なため、造形した型の諸元と成形後の成形品の諸元が容易に測定可能であり、精度比較がし易いことが特徴である。

型の凹部の曲面は、3D プリンターで造形したため造形積層精度は 16 ミクロンの加工精度でできており、成形品の凸表面には忠実に型内面が転写されていることから高精度に型が造形されていることがわかる。

4.3 成形方法

4.3.1 フローメディアを使用しない場合の成形方法

(1) 図 4.2 は楕円ドーム型を使ってガラス織物を縦糸方向に 4 層で減圧して型にプリフォームした状態を示した。図に示すように楕円ドーム型の成形には全て樹脂注入口と吸引口にはそれぞれ T 字形パイプコネクタースパイラルチューブを差し込み両端長さが平面板の成形と同様になるよう 150 mm 一定にした。

成形方法は図 4.2 に示すように樹脂注入口を長軸上①から樹脂注入を行い長軸上②から吸引口を設置して成形を開始する前の状態から、樹脂のフローフロントが型の中央部に達した状態と、フローフロントが成形完了するまでの経過を示した。成形後の成形品は図 4.7 に計測している状態のものを示している。

(2) 図 4.3 は(1)の場合と同様のプリフォームで型の中央部⑤から樹脂を注入し短軸上の両側③④から吸引する方法で成形の条件を設定した。この方法は樹脂の流れる長さが最も短いので成形時間も最短で行われると予想した実験である。短軸上の両側から吸引するため T 字形パイプコネクタを接続し吸引を同期化して実施した。

図で明らかのように樹脂注入後のフローフロントが型の中央部⑤の注入口から均等に広がりを見せている状況が見られる。

4.3.2 フローメディアを使用した場合の成形方法

(1) ガラス織物は縦糸方向に 4 層とピールプライとフローメディアは長い方向を合わせて型にプリフォームして成形した。

成形方法は図 4.4 に示すように樹脂注入口を長軸上①から樹脂注入を行い長軸上②から吸引口を設置して成形を開始し、フローフロントが型の中央部に達した状態とフローフロントが成形完了まで安定した状態で成形が行われた様子が見られる。

(2) フローメディアを使用しない場合と同様 4.1 の(2)に成形時間が最も短時間で成形される条件を想定して型の中心部⑤から樹脂の注入を行い、短軸上の両側③④から吸引する成形方法でフローメディアの効果を比較した。

図 4.5 に 4.3.1 の(2)の場合と同様にガラス織物とピールプライおよびフローメディアを減圧してプリフォームした状態を示す。短軸上の③④の吸引口は T 字形パイプコネクタを使用して同期させた。

成形方法は図に示すように型の中心部⑤から樹脂注入を開始し、フローフロントがほぼ楕円形状に含浸されている状態が確認できる。

(3) 長軸上の両側①②から樹脂を注入し、中央⑤から吸引するとフローフロントが中央部分で合流する場合の成形実験を行った。図 4.6 に減圧した状態で型にプリフォームされていることが確認できる。

成形方法は長軸上の両側①②から樹脂の注入を行うため、その開始時期の同期化が重要となる。

今回の実験ではマニュアルで行ったため左右の同期化が完全でない部分フローフロントに左右の差が見られたが中央部分に達すると図に見られるようにほぼ同時合流したと見られる。

4.3.3 フローメディアを使用しない場合と使用した場合の比較

4.3.1 の(1)と 4.3.1 の(2)に比べて 4.3.2 の(1)から 4.3.2 の(2)までの実験で見られるように凹状のためガラス織物とピールプライとフローメディアを合わせた 6 層のプリフォームが吸引と同時に型に満遍なくなじむよう配慮したが、バギングフィルムによる皺が発生し易くなっているのが確認できる。

これはフローメディアを使用しない場合に比べてフローメディアを使用した場合はその厚さが増し併せてその硬さのために型になじみにくく操作上で皺が出来易くなるためである。

そのためプリフォーム寸法とバギングフィルムの寸法決めが重要になり、バギングフィルムにはシーラントテープの位置の関係で余裕を持たせることが必要であるが、その余裕部分が吸引後型の表面に皺として残ってしまう結果となる。樹脂注入時に皺による影響でフローフロントに乱れが起こる可能性があるため注意が必要である。

4.4 楕円ドーム型の成形結果

4.4.1 フローメディアを使用しない場合の成形

(1) ガラス織物の方向は長軸方向に縦糸方向を合わせて図 4.1 示すように長軸上①の方向から樹脂の注入を行い他方の長軸上②の位置で吸引口を設定して成形を行った結果、フローフロントの様子は図 4.2 に示した。

樹脂含浸完了までの成形時間は 437 秒で樹脂の含浸量は 0.84N となった。

樹脂はフランジ面から凹状の曲面に下がりながら中心部分までとその後反対側の長軸上②の吸引口に向かってほぼフローフロントが安定して樹脂の含浸が行われて成形された。

平板の成形に比べて凹状にバギングフィルムを吸着させるため曲面に余裕を持たせた部分に皺として発生する。樹脂の含浸はその皺や T 字形パイプコネクタの周辺にも余分に含浸するため樹脂量が 17%多くなっているのはこの影響と考えられる。

(2) 図 4.3 に示すように型の中央部⑤から短軸上の両側③④から吸引する方法で成形を行った結果、樹脂含浸時間は 102 秒となった。樹脂の含浸量は 0.82N となり(1)の場合と樹脂量ほとんど同じ結果となった。

樹脂注入位置⑤から短軸上の吸引口③④までの長さが最も短いことから樹脂含浸時間が最短時間となることが予想され、(1)の場合に比べて 1/4.3 になった。

図に示すように長軸方向に T 字型のパイプコネクタに接続されたスパイラルチューブから両短軸方向に樹脂の含浸が行われ、フローフロントは初期段階ではパイプコネクタを取り囲むように拡大している様子がわかる。短軸方向への含浸はフローメディアの短い方向になるため含浸速度は長い方向に比べて遅くなると思われるがその影響がほとんどみられない。

この場合の成形時間は平板の型で成形した樹脂注入時間と比較すると樹脂注入量や成形長さを考慮すると傾斜角度の変化を考慮するほど変化はなくほぼ成形長さに比例した成形時間となった。

4.4.2 フローメディアを使用した場合の成形

(1) 図 4.4 にフローメディアを使用した場合の長軸方向①からの成形で樹脂注入前と樹脂注入後型の中央部および樹脂含浸が完了するまでの様子が確認される。成形が完了するまでの樹脂含浸時間は 27 秒となった。フローメディアを使用した場合、繊維全体に樹脂が急速に含浸するため、2 秒間隔での樹脂量の測定が困難であるため、繊維全体に樹脂が含浸した時点での時間の測定を行なった。

この結果、フローメディアを使用しない場合 4.4.1 の (1) に比較すると 1/16.2 の含浸時間となり、フローメディアの効果が明確に現れた。

(2) 図 4.5 に示すように型の中心部⑤から樹脂を注入し短軸上の両側③④から吸引する方法で成形を行った。樹脂含浸時間は 7 秒となった。この結果、フローメディアを使用しない場合 4.4.1 の(2)に比較すると 1/14.6 の含浸時間となり、フローメディアの効果は前節と同様、明確に表れた。

図では樹脂注入開始後中央部のフローフロントと成形完了前のフローフロントの変化が確認できる。(B) の場合と同様に吸引口は T 字型パイプコネクタを使用して同期された吸引方法である。

いずれの成形でもバギングフィルムによる皺は発生するがその影響は全体の成形時間には影響は少ないことが解った。

(3) 図 4.6 に示すように樹脂注入口を長軸上の両側①②に設置し、吸引口を中央短軸方向⑤に設置して成形を行った。樹脂含浸時間は 9 秒となった。

樹脂注入口を 2 方向から行ったのでその同期を取る必要があると考えられるが、今回はマニュアルで行ったのでその同期が完全ではなかったが、両方向からのフローフロントはほぼ中央部分で合流していることが確認できる。

成形後に成形品での確認ではドライスポットと思われる現象は確認されていない。樹脂の含浸する距離が短いため含浸に要する時間は短時間でもあり、未含浸部分と思われる現象は見られなかった。

4.5 楕円ドーム型による成形品の測定結果

3Dプリンターで造形した成形型（凹面）の測定については第2章で報告したとおりである。成形品の測定についても同様に3次元測定器（東京精密社製VA800A型）を使用して測定している。図4.7では成形品（凸面）の測定を行っている状態を示した。

成形品の測定は型の測定方法と同様に接触式プローブ（先端0.5R）で各測定点を測定したが、成形品は型に対して凸形状となるためプローブの接点の補正を行うことによって凹形状と同様な結果が得られる。

表4.2には型に対する成形品の誤差をそれぞれの部位に付いて最小値、最大値、平均値を示している。

短軸上、長軸上の測定点については誤差が少なく成形精度は良いと評価できる。ブレードR部の測定点については第2章の型の測定結果と同様に誤差がやや大きく表れている。

この種の成形品の誤差としては実用上問題ないと考えられる範囲と思われる。

型の計測基準面は造形基準面とフランジ面の平行度を確認したところ僅かの変形が見られたので型内の球面を基準とした。同様に成形品の基準面は中心軸を中心とする球面を基準面とした。

本来は何れも同一基準面であるフランジ面を基準にすべきであると考えられるが、造形型の経年変化が僅かに見られたことと成形品のフランジ面は型から離形する面となり離形時に力がかかり成形品のフランジ面に変形を生じているため基準面としなかった。

4.6 結言

4.6.1 フローメディアを使用しない場合の成形

図 4.2 及び図 4.3 に示すようにガラス織物単体では真空引きの状態ですりフォーム材は型にほとんど皺もなく密着している様子が確認できる。

- (1) 長軸方向①から樹脂注入を開始すると T 字形パイプコネクタの両端に接続されたスパイラルチューブから樹脂の含浸が進み、安定したフローフロントで成形が行われた。樹脂の含浸量は平板形状の場合とほぼ同一量であるが楕円ドーム形状は幅の広がりのため長軸径は平板形状に比べ約 60% で樹脂注入カーブの長さに比例した成形時間となることが明らかとなった。
- (2) 長軸方向の中央部⑤に T 字形パイプコネクタを設置して樹脂注入を行い、短軸上の両端③④から吸引する場合の結果から樹脂含浸時間は前節と同様に樹脂注入カーブの長さにほぼ比例することが明らかとなった。樹脂注入口と吸引口の距離が短い程成形時間が短縮されることが明らかである。

以上 2 ケースの実験から成形時間は型の方向による角度の変化による影響よりも樹脂の注入長さが最も大きく影響すると考えられる。フローメディアを使用しない場合はバグgingフィルムに皺が発生すると樹脂が皺の部分に入る可能性があるため注意が必要である。

4.6.2 フローメディアを使用した場合の成形

図 4.4、図 4.5 及び図 4.6 に示すようにフローメディアとピールプライを使用した実験結果から供試材の厚さが大きくなるため型とガラス織物の間の密着が不十分になることが考えられるので吸引時に十分密着されるよう配慮が必要である。

- (1) 長軸上①から樹脂を注入し、長軸上②から吸引する 4.7.1 の(1)の成形方法と比較するとフローメディアを使用することによって成形時間は 1/14 になることが明らかとなった。平面板の成形の場合とほぼ同様の短縮効果が結果として確認された。

(2) 長軸上の中央部⑤から樹脂の注入を行った 4.7.1 の(2)の実験と同様の結果と比較すると。

長軸上から樹脂注入した場合の樹脂注入長さは最大約 460 mmに対し、長軸上の中心部から樹脂の注入を行い短軸上の両サイドから吸引した場合の樹脂注入長さは最大約 150 mmとなり、前者に比べて 1/3 の長さとなり、成形時間の結果はほぼ比例した結果となった。

フローメディア及びガラス織物の方向によって成形時間への影響は殆どなかった。また、バギングフィルムの皺が何れの場合も発生したが、フローフロントへの影響も見られなかった。

インフュージョン成形の特徴である凹状の下型を使用する場合は基材が型になじみやすくする必要からバギングフィルムに余裕を持たせ、曲率になじみやすくする必要がある。そのため皺の分散をさせるようシーラントテープの貼り方に工夫する必要がある。

皺が多く発生すれば樹脂の使用量も増えることが考えられるので皺の発生はできるだけ少ないことが望ましい。また、作業上はシーラントテープの貼る位置によっても皺の発生が少なくできるよう配慮することが望ましい。特に樹脂注入口と吸引口が複数個所になる場合は真空状態を保つための配慮が欠かせない。

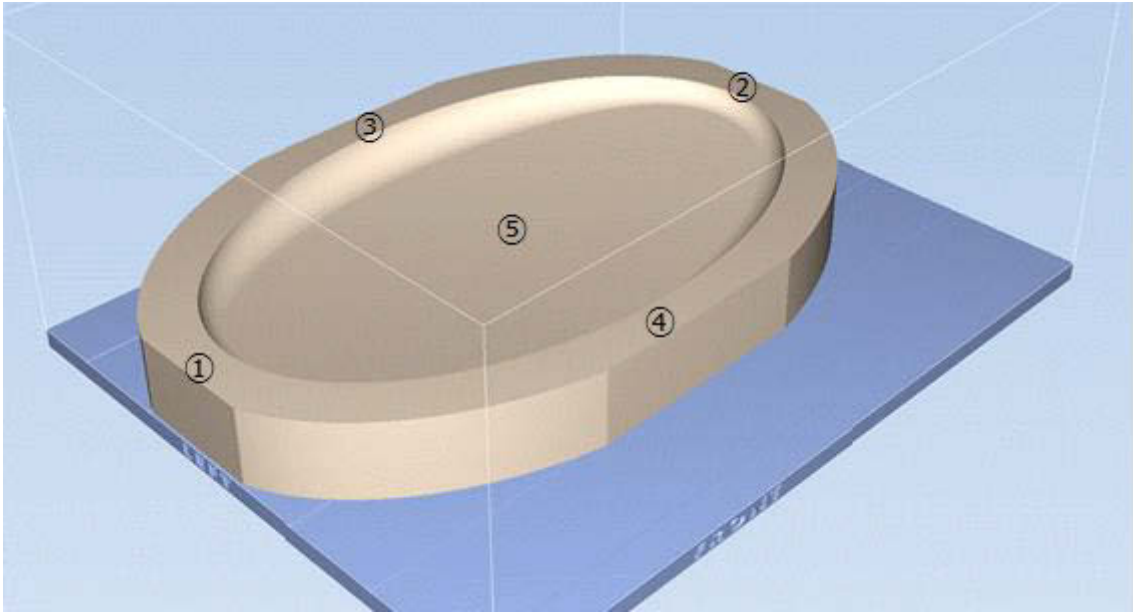


図 4.1 3D デジタルモデルによる成形位置
(長軸①② 短軸③④ 中心位置⑤)

表 4.1 樹脂注入位置による設定パターン

Pattern	①	②	③	④	⑤
I	Injection	Vent	—	—	—
II	—	—	Injection	Vent	—
III	Vent	Vent	—	—	Injection
IV	—	—	Vent	Vent	Injection
V	Injection	Injection	—	—	Vent
VI	—	—	Injection	Injection	Vent
VII	Injection	Injection	Vent	Vent	—
VIII	Vent	Vent	Injection	Injection	—

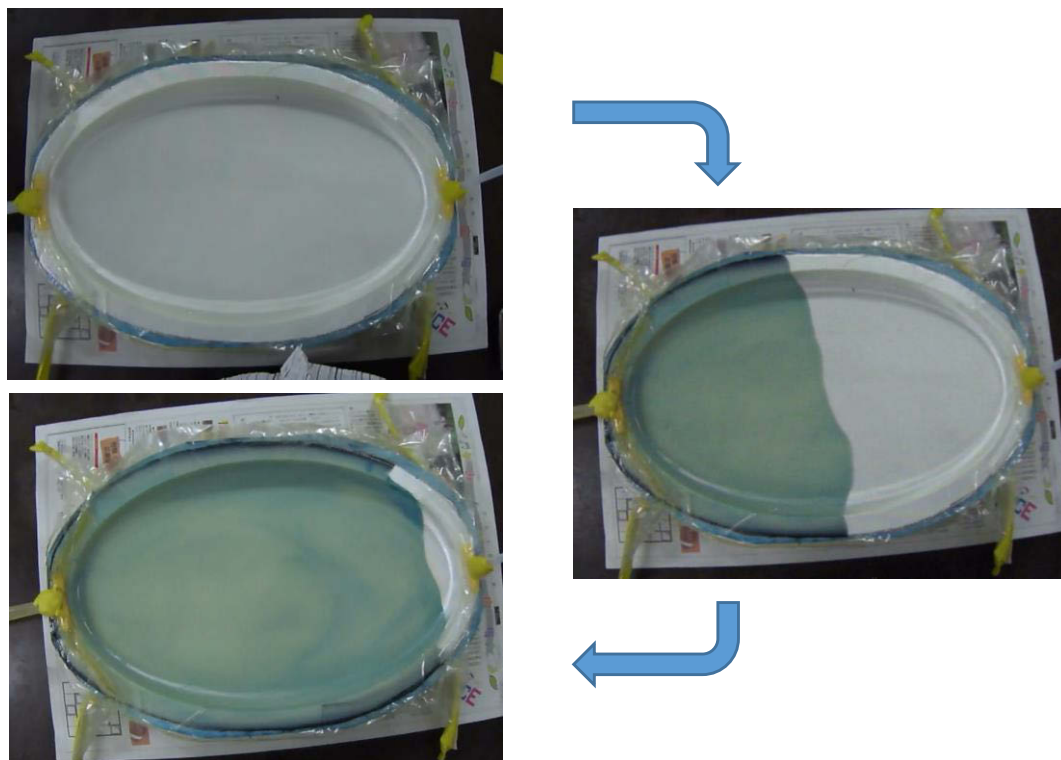


図 4.2 パターン I の成形（フローメディアなし）

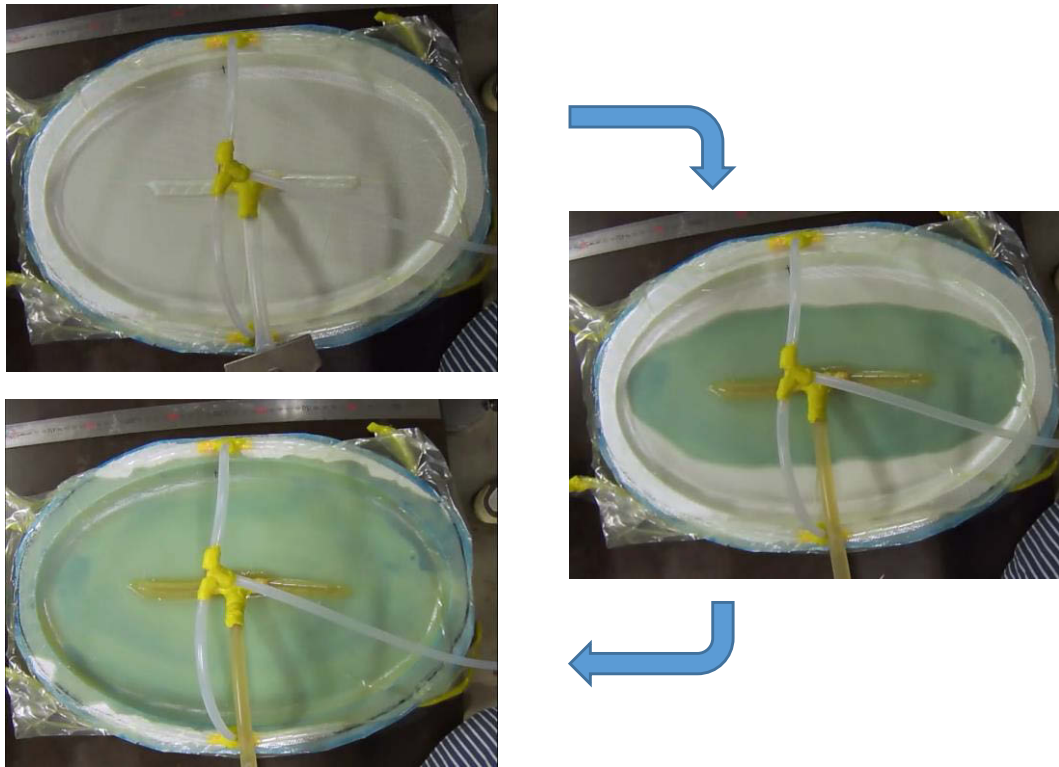


図 4.3 パターンIVの成形（フローメディアなし）

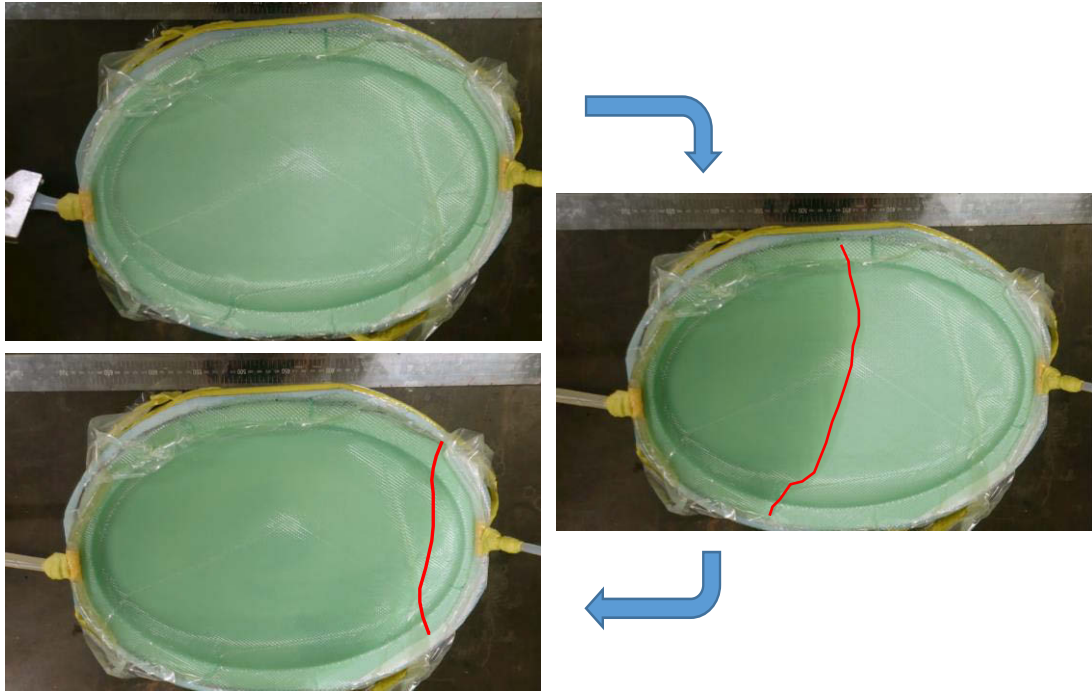


図 4.4 パターン I の成形（フローメディアあり）

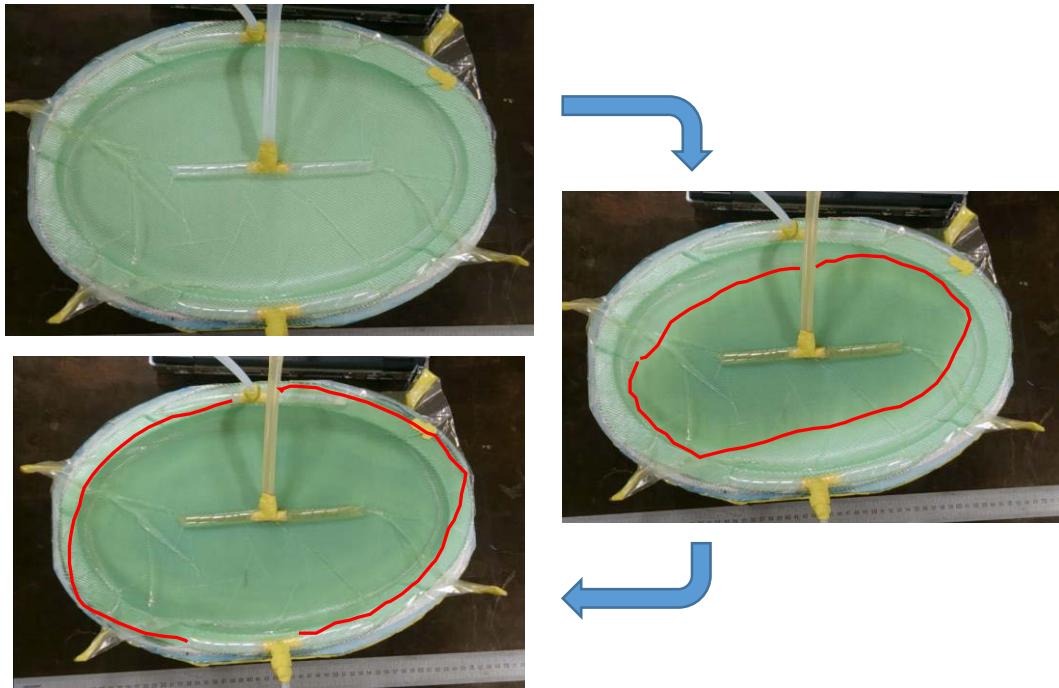


図 4.5 パターンIVの成形（フローメディアあり）

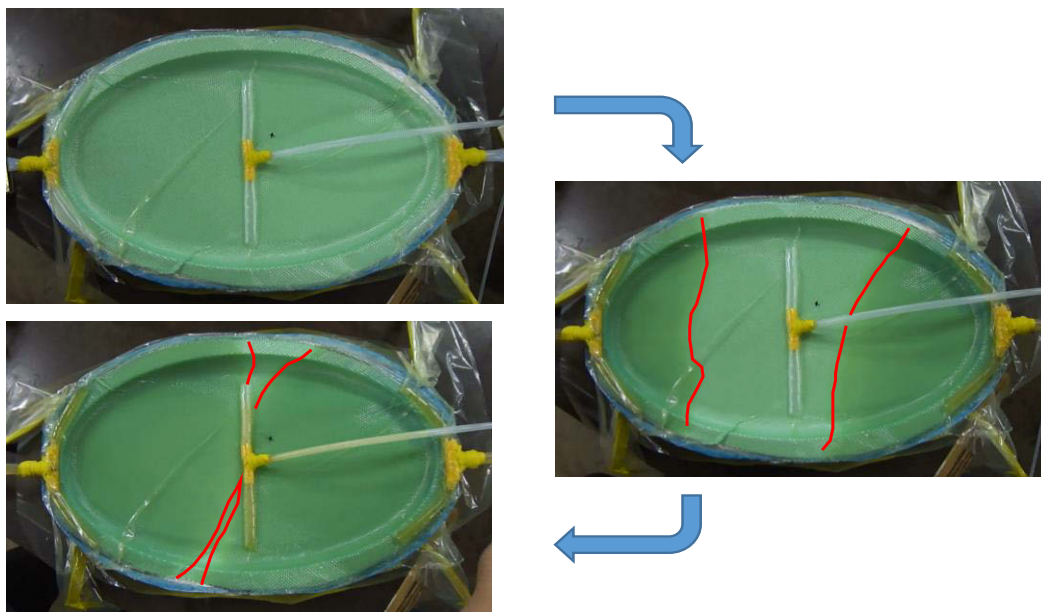


図 4.6 パターンVの成形（フローメディアあり）



図 4.7 楕円ドーム形状の成形品の計測

表 4.2 型に対する成形品の寸法誤差(単位 : mm)
パターン I の成形品

Y軸		
誤差	最小値	-0.04
	最大値	0.10
	平均値	0.02

X軸		
誤差	最小値	-0.03
	最大値	-0.11
	平均値	0.01

Y軸(R部)		
誤差	最小値	0.34
	最大値	0.15
	平均値	0.21

X軸(R部)		
誤差	最小値	-0.01
	最大値	-0.20
	平均値	-0.11

第 5 章 数値シミュレーション

5.1 諸言

近年、ものづくりのデジタル化が進化し、3DCAD/CAM/CAE の機能アップに伴い、数値シミュレーションのソフトウェアも多機能化と処理スピードの高速化が呼応し、ものづくりのプロセスで多用される状況になってきた。

数値シミュレーションのソフトウェアは製品開発のフロントローディングや製造プロセスのコンカレント化を実現可能にすべく、機能の拡大と処理能力の迅速化を備えてきた。

数値シミュレーションソフトウェアは FRP 成形の最適条件設定に欠かせないアプリケーションとなってきた。効果的に活用すればこれまでの試行錯誤によるプロセスを大幅に省略させることが可能であり、樹脂の未含浸部の欠陥予測が可能で品質向上とコスト削減に効果が期待される。

今回、インフュージョン成形で使用したソフトウェアはこの分野でも多く活用されている PAM-RTM2010（日本イーエスアイ販売）を使用して最適成形条件を設定し、実験結果と比較検討することにした。

楕円ドーム型の成形方法を予め 8 パターンの成形条件で数値シミュレーションを行い、成形時間が最も短いと思われる最適条件を明らかにした。

5.2 ソフトウェアの概要

数値シミュレーションを適用する条件は予めガラス織物の繊維の構成と樹脂の材料特性やフローメディアとピールプライの構成から樹脂注入口と真空引き吸引口の配置などからなるパラメータを算出設定し、最適成形条件を数値シミュレーションから求めることが可能である。

複数箇所から樹脂注入を行う場合はフローフロントが合流すると思われる部位にドライスポットが現れることが予測され、真空引き吸引口の配置を考慮することによって未然に防ぐことも可能となる。

また、含浸時間の予測をすることにより、硬化時間内に成形が完了するか否かの検討も行うことが可能である。

今回使用したソフトウェア PAM-RTM は異なる 3DCAD/CAM/CAE とのユーザーインターフェイスも可能となり、データの一元管理に対応できる。

今回楯円ドーム型のモデルは CATIA 上で作成した 3D モデルを 3D プリンターと PAM-RTM にユーザーインターフェイスを介して一元的に処理が可能となった。

使用したソフトウェアの処理プロセスは図 5.3 に示すように成形品の図形諸元を定義し、Solid Works 2012 にモデルを IGES ファイルに変換し、ANSYS ICEM CFD14.0 でメッシュデータを Nastran ファイルで出力した結果、PAM-RTM 2010 で含浸時間とフローフロントの挙動画像を出力した。

5.3 解析方法

5.3.1 メッシュの作成

PAM-RTMは、CADデータを読み込み、メッシュを作成することができない。ESIでは、メッシュ作成ソフトとしてVisual MESHを販売しているが、Nastran format の読み込みが可能であるため、ANSYS ICEM CFD14.0を用いてCADデータからメッシュを作成し、PAM-RTMへと入力した。

メッシュ要素は三角形要素の使用をメーカーが推奨しているため、三角形要素でメッシュ作成を行った。

平面板モデルはSolid works2012で作成し、楕円ドームのモデルは3Dプリンターの作成で用いたCATIAのデータを用いた。

平面板モデルはSolid works2012でプリフォームと同じ形状になるように作成し、楕円ドームモデルもプリフォームと同じ形状となるよう、モデルのフランジ部の幅を20mmとし、作成し直した。

作成した平面板モデルと楕円ドームモデルのどちらも、IGESファイルへと変換し、ANSYS ICEM CFD14.0へとインポートした。インポートしたモデルをシェル化し、メーカー推奨の三角形要素のメッシュ作成を行った。

平面板モデルはオートメッシュ機能を使用してメッシュ作成を行い、メッシュサイズは6.6mm、節点数は2928個、要素数は5566個となった。

楕円ドーム型は、モデルの形状を実際の型に近づけるために細かくメッシュ切りを行った。オートメッシュ機能を使用しメッシュ作成を行い、メッシュサイズは3.5mm、節点数は11738個、要素数は23122個となった。

メッシュ作成を行った平面板のモデルを図5.1に、楕円ドームのモデルを図5.2に示す。

5.3.2 PAM-RTM の条件設定

ANSYS ICEM CFD14.0 で作成したメッシュデータを Nastran format で出力し、PAM-RTM へと読み込ませた。

データが読み込まれたら、まずは材料の物性値を入力していく必要がある。必要な材料の物性値と、実際に入力した値を表 5.1 に示す。また、平板と楕円ドームそれぞれの場合の、入力した浸透係数の値を表 5.2 に示す。

樹脂の粘性は第 3 章で紹介した方法で求め、樹脂の密度はカタログ値を使用した。繊維の浸透係数、空隙率、厚さも第 3 章で紹介した方法で求めた値を入力した。

浸透係数は $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ と三種類の浸透係数の入力を行うことが可能で、 $K1$ 、 $K2$ は面内方向の浸透係数で、 $K3$ は板厚方向の浸透係数となる。

シェル要素のモデルを入力しているため $K3$ の値は考慮されず、 $K1$ は X 軸方向、 $K2$ は Y 軸方向と設定を行った。

平板モデルでの解析の場合は X 軸方向に樹脂を流す一次元流れであるため $K1$ の浸透係数が支配的であり、 $K2$ の影響をほとんど受けないが、楕円ドームモデルでは樹脂を流す場所、流す方向により、どちらの浸透係数の影響を受けやすくなるかが変わる。

一例として、平板で横糸方向(フローメディアなし)に樹脂を流すときには浸透係数 $K1$ に $1.64 \times 10^{-10} [m^2]$ と入力し、それと直角に交わる縦糸方向の浸透係数 $K2$ は $3.15 \times 10^{-10} [m^2]$ と入力した。また、楕円ドームモデルの場合は、繊維の方向とフローメディアの方向を固定して、樹脂注入口と吸引口の位置の変化による脂含侵時間やフローフロントの比較を行ったため、フローメディアを使用しない時に型の長軸方向に縦糸方向が来るように $K1$ を $3.15 \times 10^{-10} [m^2]$ 、 $K2$ に $1.64 \times 10^{-10} [m^2]$ と入力した。さらに、フローメディアを使用した場合は型の長軸方向に縦糸方向とフローメディアの長い方向が来るように $K1$ を $56.8 \times 10^{-10} [m^2]$ 、 $K2$ に $30.2 \times 10^{-10} [m^2]$ と入力した。

次に外力条件の入力を行った。外力条件は注入口と吸引口に生じる圧力差である。第 3 章で求めた圧力差をシミュレーション上で再現するため、樹脂注入口に $94.5 [kPa]$ 、吸引口に $0 [kPa]$ と入力した。注入口と吸引口の位置は図 5.1 の線分 AB 上の節点と線分 CD 上の節点を選択し、外力条件とした。

楕円ドームモデルの場合はパターン I を例にあげると、実験では図 4.1 の①の注入口と②の吸引口のどちらも T 字形パイプコネクターを使用するが、T 字形パイプコネクターからは樹脂の供給が行われない。そこで、図 2.6 のように幅

50mm の隙間を開けて、その両端から 75mm ずつの長さで注入口と吸引口を設定した。平板と同じように節点を選択し、注入口と吸引口とした。

重力の境界条件はソフト上で既に与えられており、重力加速度(9.8m/s^2)がどの方向に加わるのかという条件の設定を行った。

すべての設定を行うと、解析を開始することができる。出力事項を以下に示す。

- ・ 静止画像
- ・ アニメーション画像
- ・ 充填時間コンター
- ・ 充填率コンター

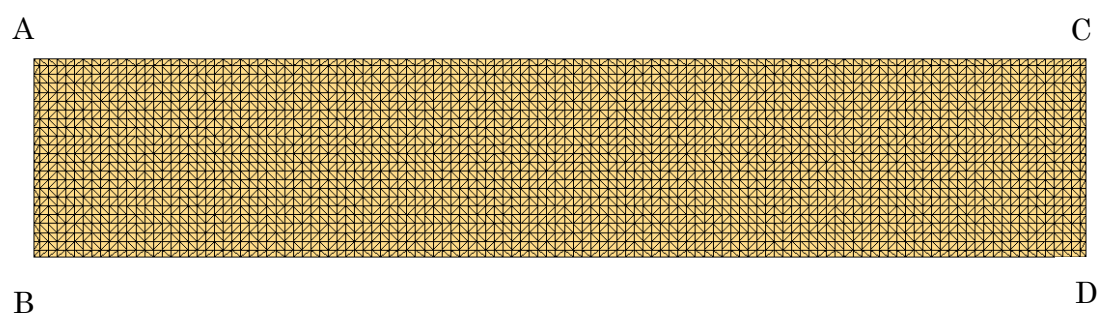


図 5.1 メッシュ作成を行った平板モデル

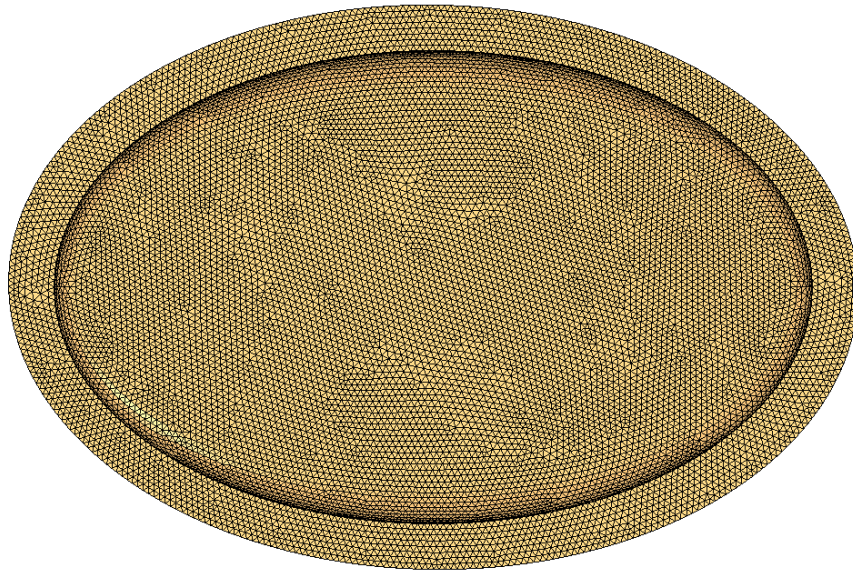


図 5.2 メッシュ作成を行った楕円ドームモデル

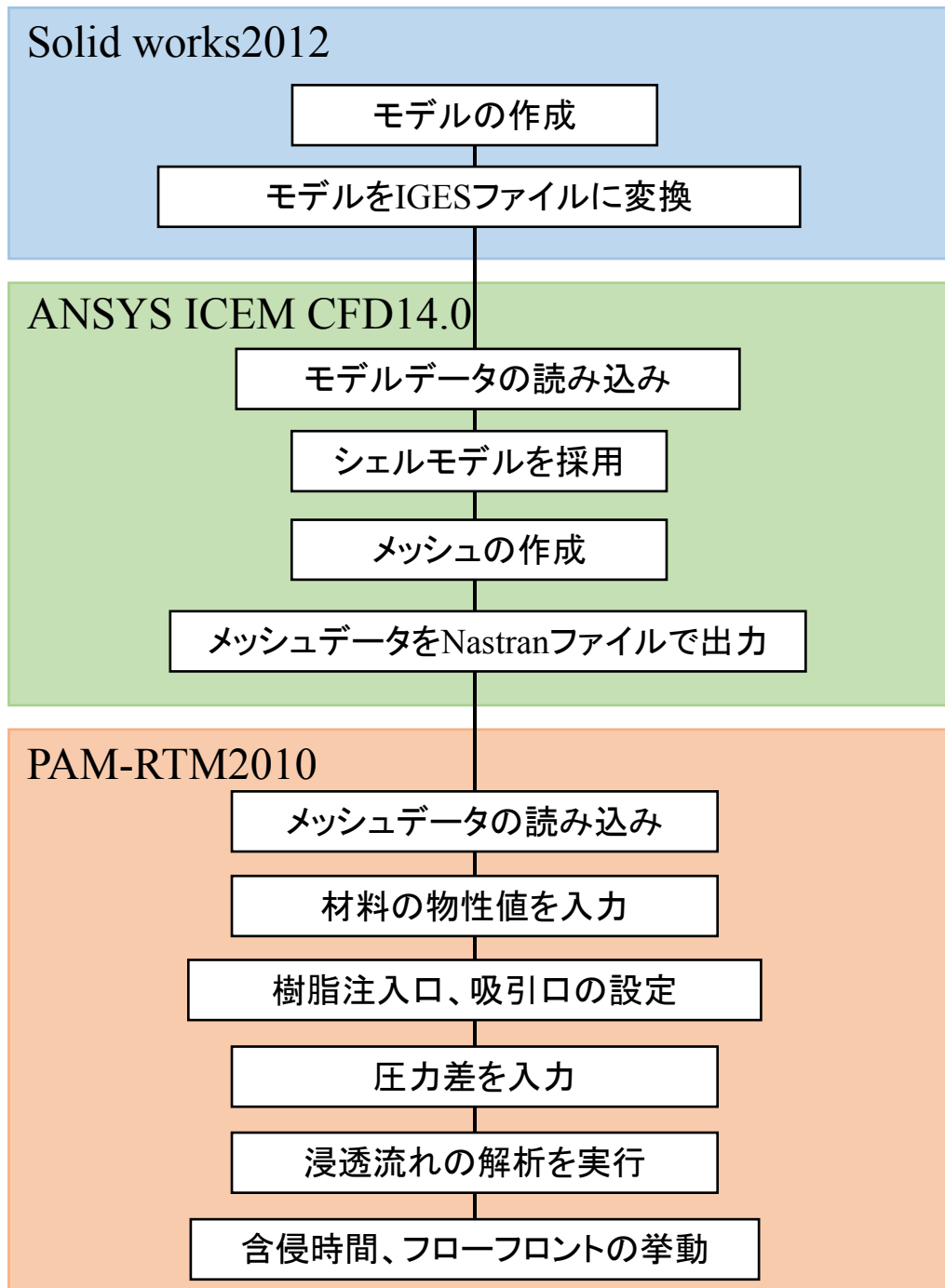


図 5.3 シミュレーション計算のフローチャート

表 5.1 数値シミュレーションで入力したパラメータ

	フローメディアなし	フローメディアあり
空隙率 ϕ (%)	63.5	69.3
厚さ t (m)	0.92×10^{-3}	1.75×10^{-3}
樹脂粘度 μ (Pa \cdot s)		0.143
樹脂密度 ρ (kg/m ³)		1081
圧力差 ΔP (kPa)		94.5

表 5.2 入力した浸透係数

(a) 平板の場合

	平板の型		
	フローメディア なし	フローメディア 長い方向	フローメディア 短い方向
浸透係数 k_1 (10^{-10} m^2)	1.64	41.5	30.2
浸透係数 k_2 (10^{-10} m^2)	3.15	36.8	56.8

(b) 楕円ドーム型の場合

	楕円ドーム型	
	フローメディア なし	フローメディア 長い方向
浸透係数 k_1 (10^{-10} m^2)	3.15	56.8
浸透係数 k_2 (10^{-10} m^2)	1.64	30.2

5.3 平面板の実験結果との比較検討

平面板の傾斜角度を 0° から 15° 間隔で 90° まで 7 段階に変化させて樹脂注入時間を数値シミュレーションの値を図 5.4 に、実験結果とシミュレーション結果を比較したグラフを図 5.5 に示した。また、フローメディアの対角線の長い方向を使用した際のシミュレーション結果を図 5.6 に、実験結果とシミュレーション結果を比較した結果を図 5.7 に示し、フローメディアの対角線の短い方向を使用した際のシミュレーション結果を図 5.8 に、実験結果とシミュレーション結果を比較したグラフを図 5.9 に示す。

図 5.4 でも解るように傾斜角度の変化による樹脂注入時間の変化は数値シミュレーションの結果でも約 5.9% と少ないことが確認できた。

図 5.5 を見ると解析値と実験値がばらついてるように見えるが、誤差は最大で 3.6% に収まった。実験による成形時間を計測した結果は傾斜角度の変化に完全には一致していないが、ほぼ数値シミュレーションの値と同様の傾向を示すことが確認できた。

傾斜角度毎の実験結果のバラツキの原因として考えられる要素は傾斜角度を変化させると樹脂注入口に取り付けるスパイラルチューブの位置や曲りが都度多少の変化が生じるため圧力損失の誤差などが考えられる。

傾斜角度の実験ではフローフロントの形が傾斜角度によっても変化することが確認され必ずしも一定に保たれるわけでもない。これらのことが影響しているものと考えられる。

実験とシミュレーションの比較の一例として、横糸方向フローメディアなし、傾斜角度 90° 、上から流した場合のフローフロントの比較を図 5.10 に示す。

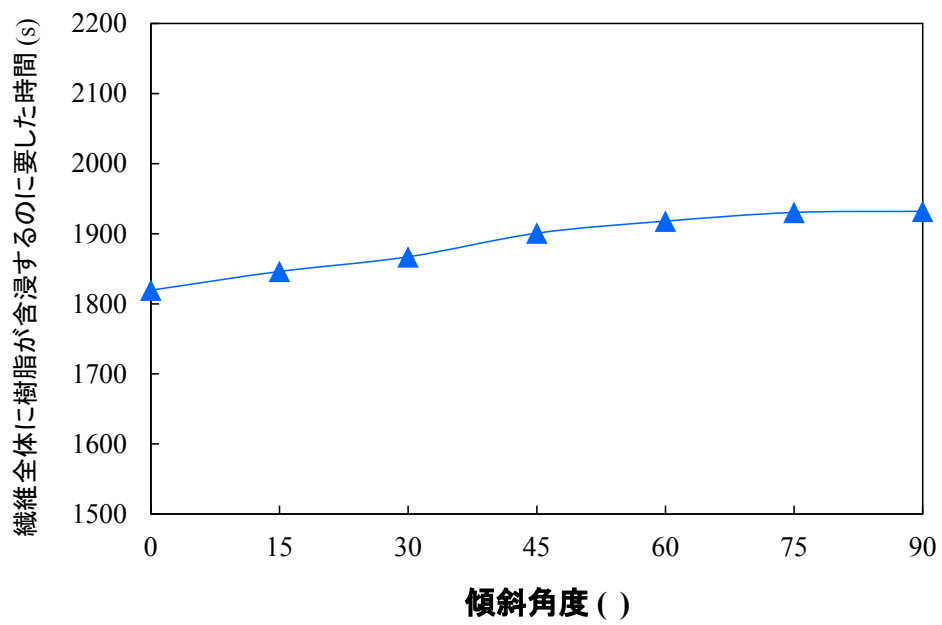


図 5.4 傾斜角度ごとのシミュレーション結果(フローメディアなし)

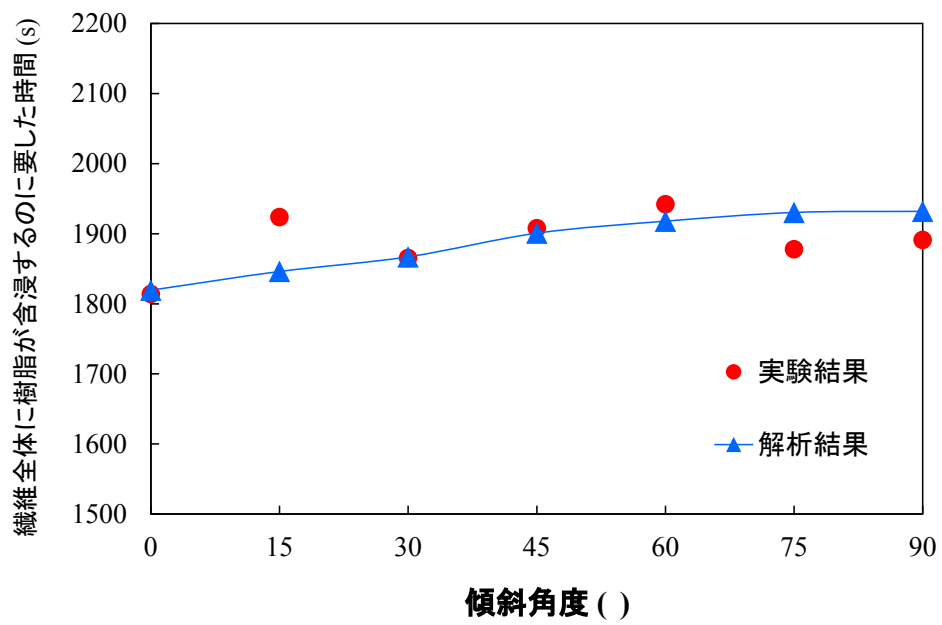


図 5.5 傾斜角度ごとの実験結果とシミュレーション結果(フローメディアなし)

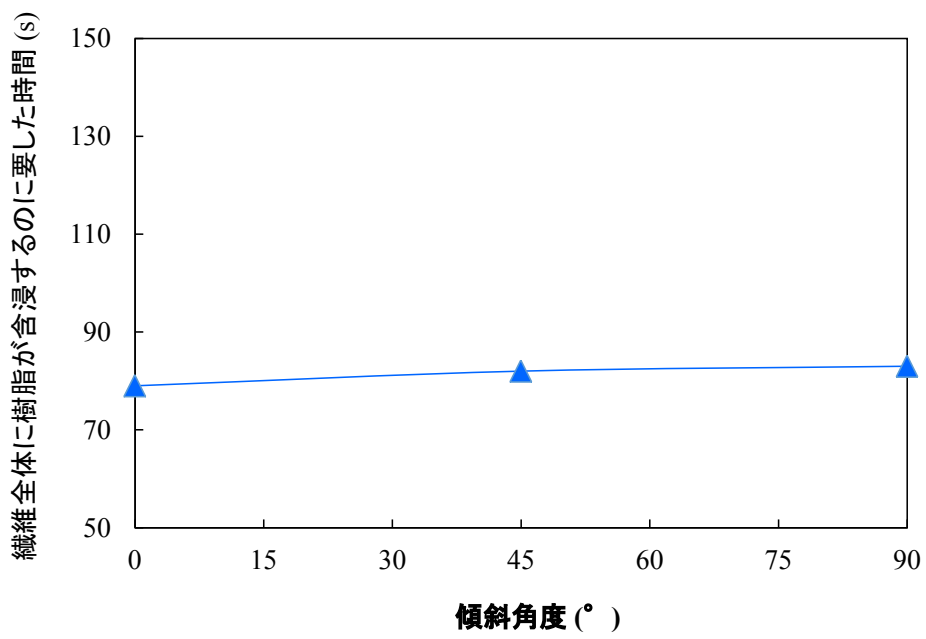


図 5.6 傾斜角度ごとのシミュレーション結果(フローメディア長い方向)

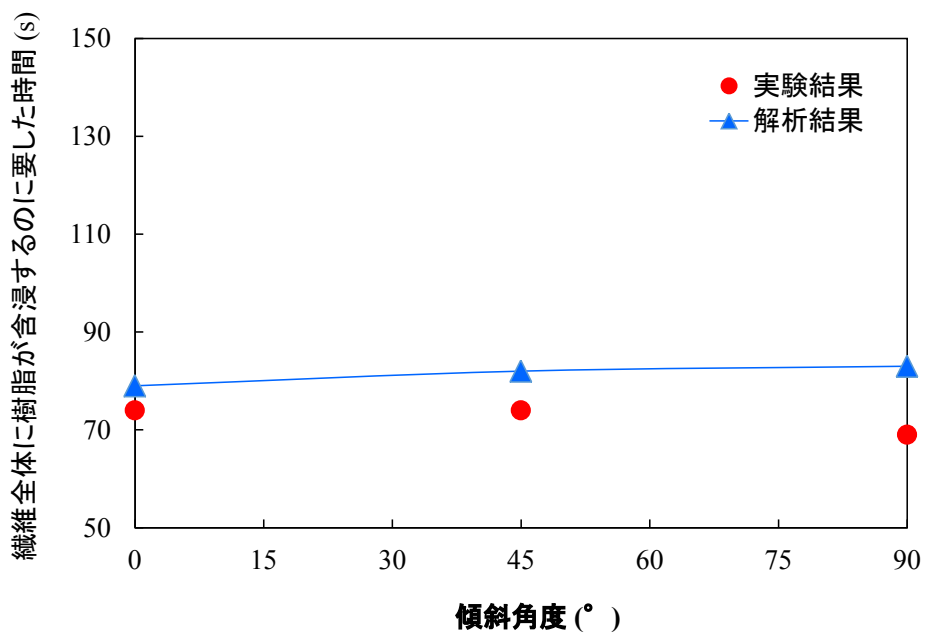


図 5.7 傾斜角度ごとの実験結果とシミュレーション結果
(フローメディア長い方向)

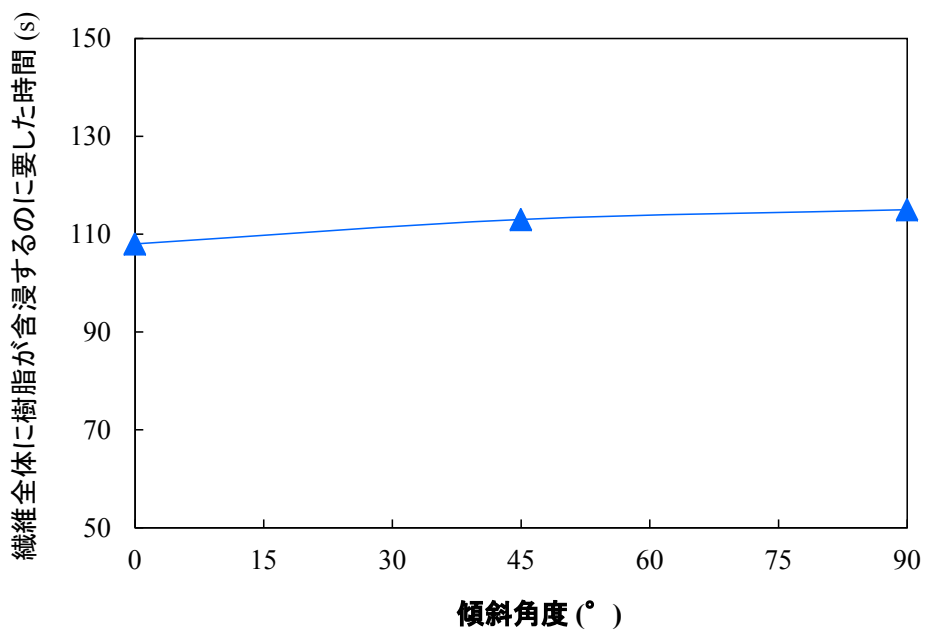


図 5.8 傾斜角度ごとのシミュレーション結果(フローメディア短い方向)

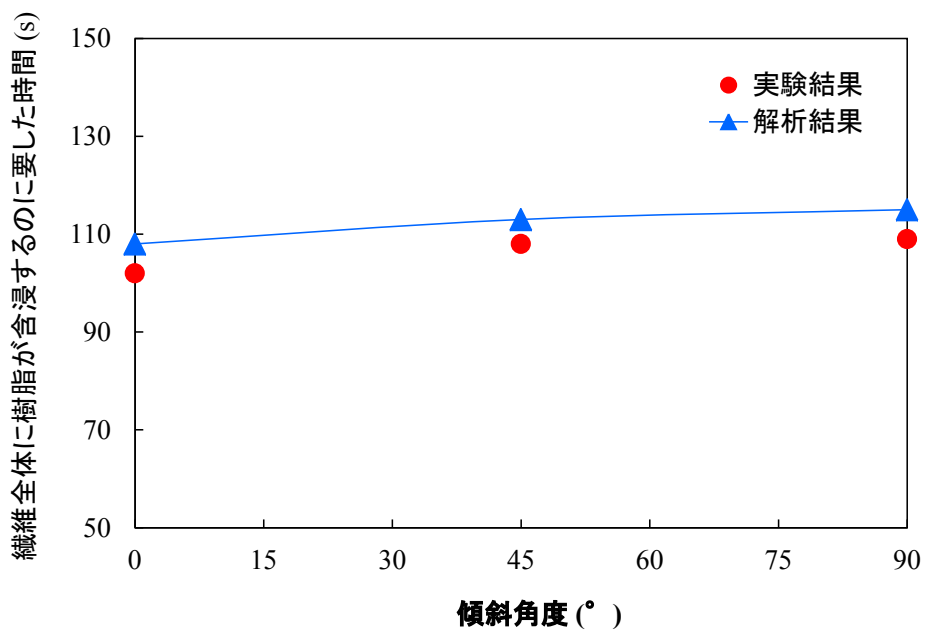


図 5.9 傾斜角度ごとの実験結果とシミュレーション結果
(フローメディア短い方向)

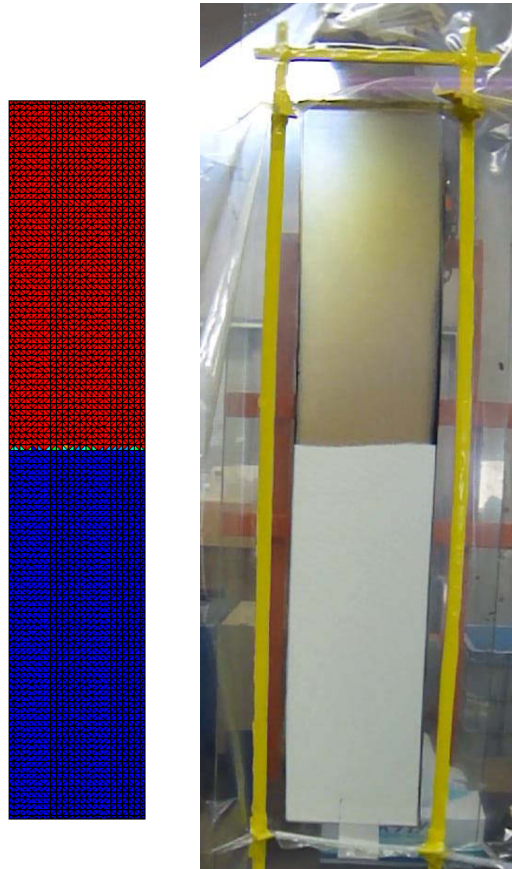


図 5.10 411sec 時のフローフロントの比較

5.4 楕円ドーム型の実験結果との比較検討

第4章の図4.1に示す楕円ドーム型の成形方法として樹脂注入口と真空吸引口の配置を8パターン考え図5.11と表5.3に示した。それぞれの数値シミュレーションを行った結果を表5.4に示すが、に樹脂注入口を1ヶ所にしたパターンIの場合、フローメディアを使用した場合は29秒となり、初期時、中間時、完了直前時のそれぞれのフローフロントは図5.12で示す。これに対して実験の結果は27秒となり、数値シミュレーションの結果とほぼ一致することが確認された。実験とシミュレーションのフローフロントの比較を図5.13に示す。

また、パターンIVのフローメディアを使用した場合の数値シミュレーションの結果では6秒となり、初期時、中間時、完了直前のそれぞれのフローフロントは図5.14で示す。これに対して実験の結果7秒となり、数値シミュレーションの結果とほぼ一致することが確認された。このパターンの場合は中心から短軸方向には角度の変化が大きく、バギングフィルムの皺が出易いことやガラス織物の繊維の方向とフローメディアの方向が樹脂の流動時間がかかる方向であり、その影響が表れたのではないかと考えられる。実験とシミュレーションのフローフロントの比較を図5.15に示す。パターンIIとパターンIIIの初期時、中間時、完了直前時のそれぞれのフローフロントの比較を図5.16と図5.17に示し、パターンV～VIIIは図5.18～図5.21に示す。

パターンV～VIIIは樹脂注入口が2カ所からとなるがそれぞれの方向からのフローフロントが合流するため、図5.18～図5.21に示すように合流する付近でドライスポットが発生する可能性が考えられる。

今回の実験では2カ所の樹脂注入口からの注入を手動で行ったため、フローフロントの合流位置に若干のずれが生じている。

5.5 結言

- (1) 実験による成形時間を計測した結果は傾斜角度の変化に完全には一致していないが、ほぼ数値シミュレーションの値と同様の傾向を示しており、シミュレーション値と解析値の誤差は最大で 3.6% と小さなものであった。
- (2) 樹脂の供給量から求めた浸透係数を用いて、ドーム形状の樹脂流動実験と数値シミュレーションを行った結果、実験ではバギングフィルムの皺の影響を受けたが、両者の含浸時間は概ね一致した。樹脂の注入口と吸引口の組み合わせを 8 パターン想定し、それぞれの実験結果と数値シミュレーションの結果はほぼ一致した。
- (3) 成形時間を短縮するため全ての実験でフローメディアとピールプライを使用し、数値シミュレーションの結果、成形時間が最短でドライスポットの発生がない条件は、中央部から樹脂注入を行い、短軸側 2 箇所から減圧吸引するパターンIVで、成形時間は 6 秒であった。

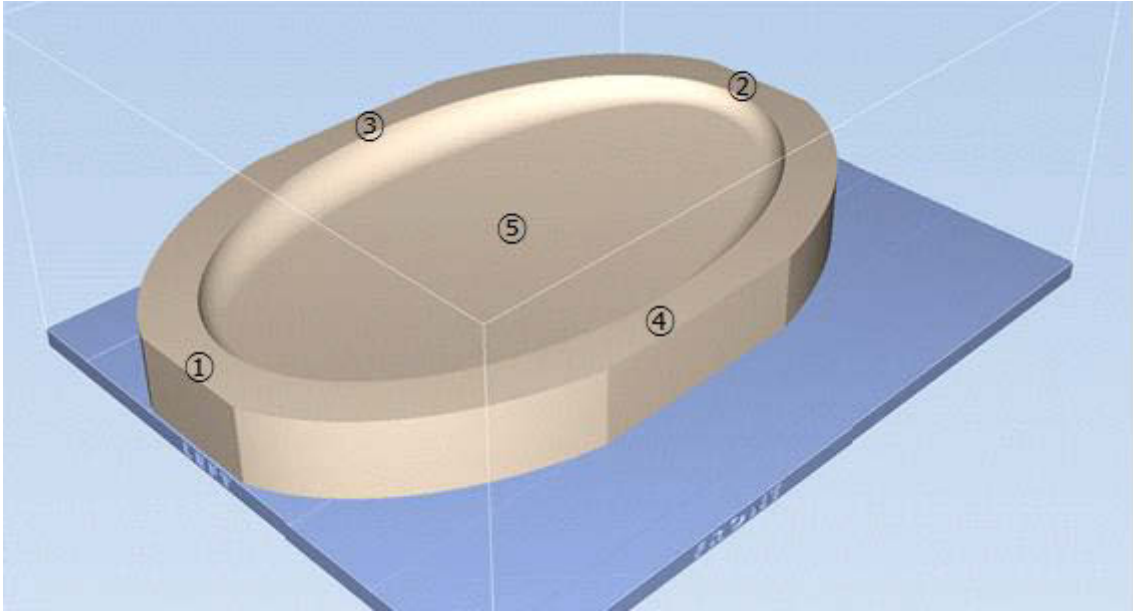


図 5.11 3D デジタルモデルによる成形位置
(長軸①② 短軸③④ 中心位置⑤)

表 5.3 樹脂注入位置による設定パターン

Pattern	①	②	③	④	⑤
I	Injection	Vent	—	—	—
II	—	—	Injection	Vent	—
III	Vent	Vent	—	—	Injection
IV	—	—	Vent	Vent	Injection
V	Injection	Injection	—	—	Vent
VI	—	—	Injection	Injection	Vent
VII	Injection	Injection	Vent	Vent	—
VIII	Vent	Vent	Injection	Injection	—

表 5.4 フローメディアの有無によるパターン毎の成形時間

Pattern	With flow media(sec)	Without flow media(sec)
I	29 (27 sec)	485 (437sec)
II	18	302
III	8	137
IV	6 (7 sec)	99 (102 sec)
V	9 (9 sec)	143
VI	8	136
VII	10	178
VIII	8	137

()は成形実験値

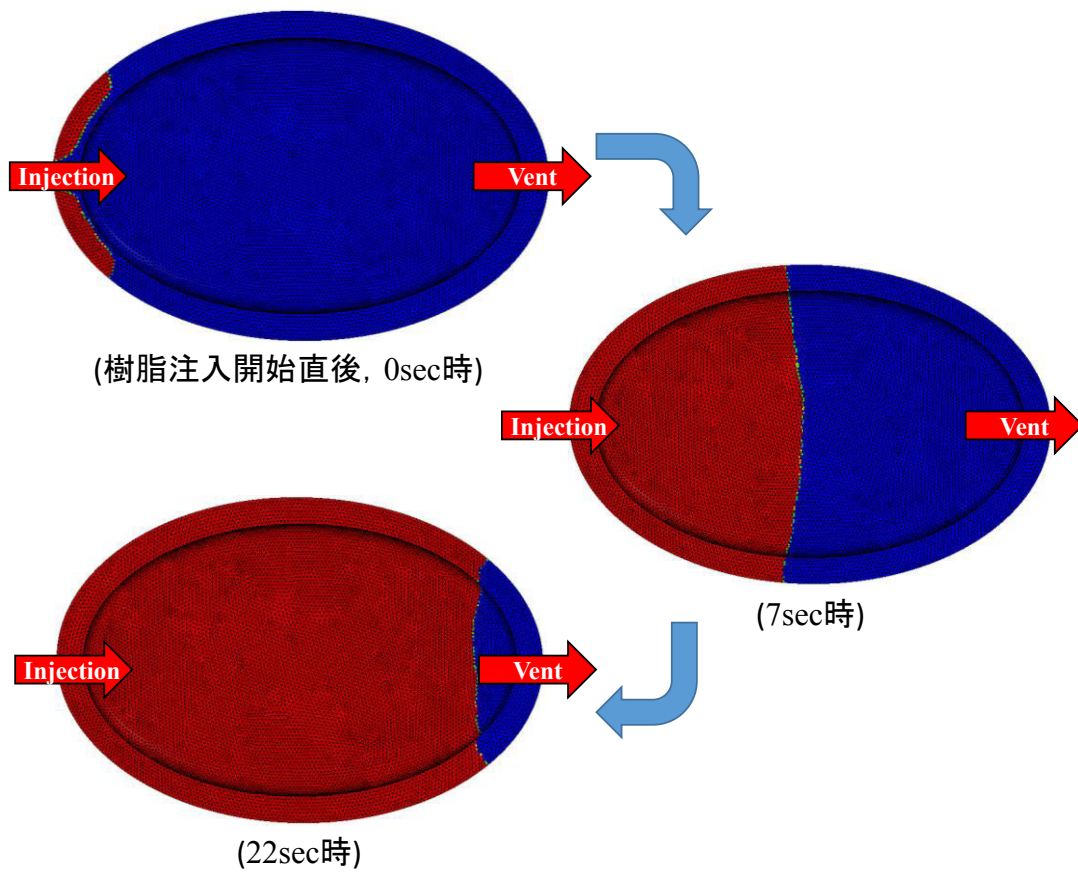


図 5.12 数値シミュレーションのフローフロント(パターン I)

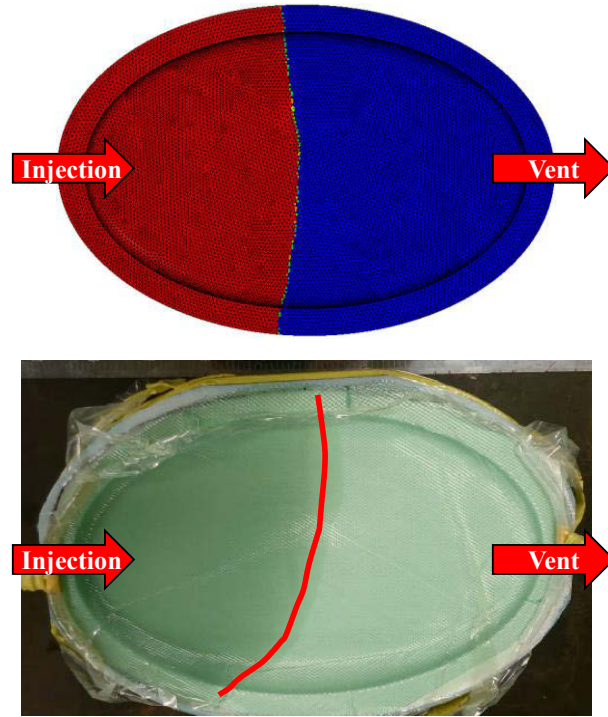


図 5.13 フローフロント 7sec 時の比較(パターン I)

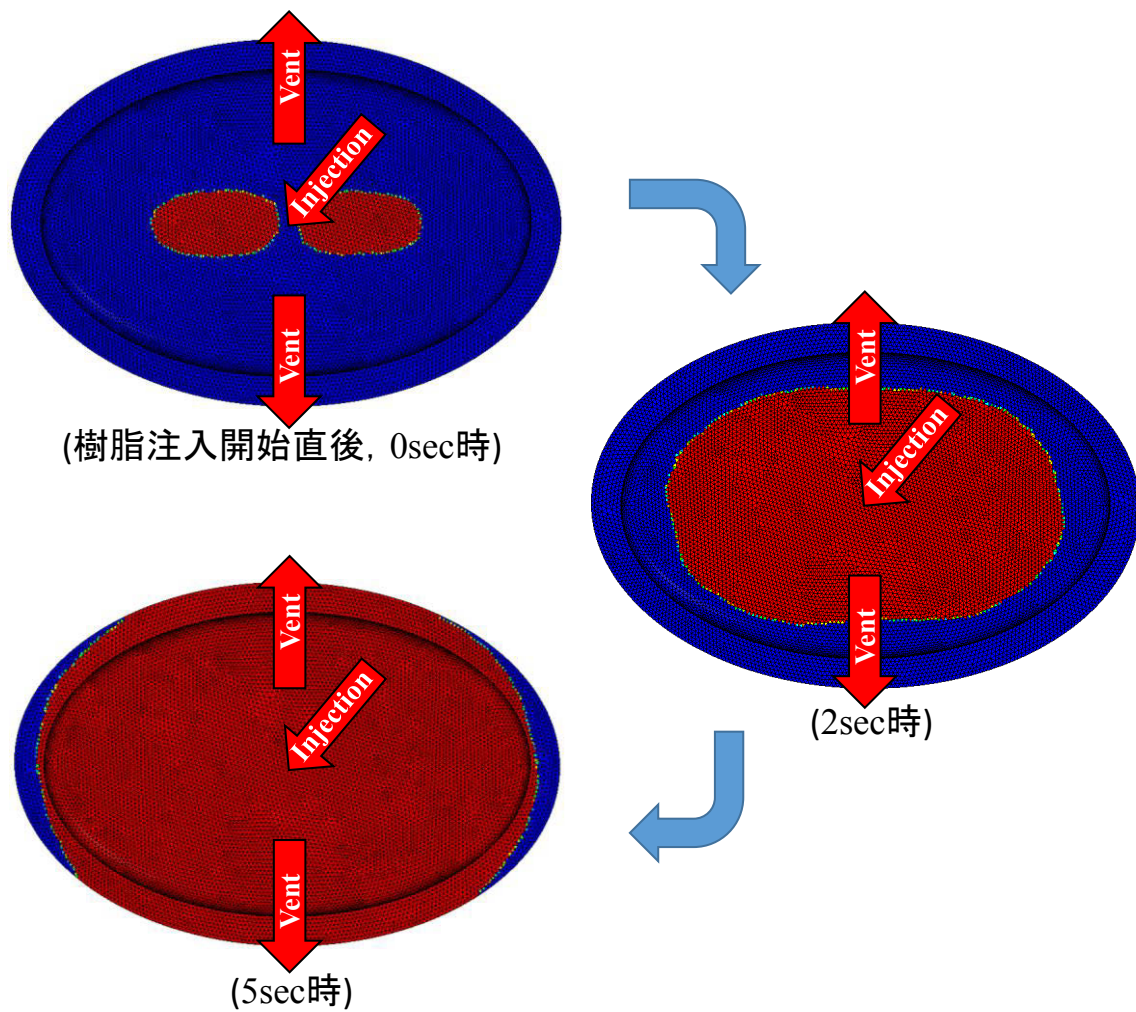


図 5.14 数値シミュレーションのフローフロント(パターンIV)

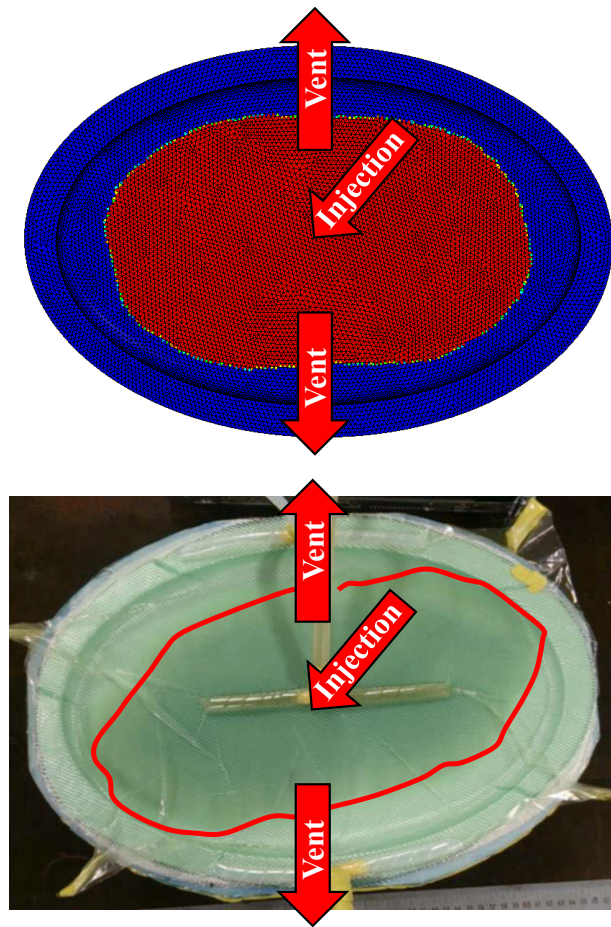


図 5.15 フローフロント 2sec 時の比較(パターンIV)

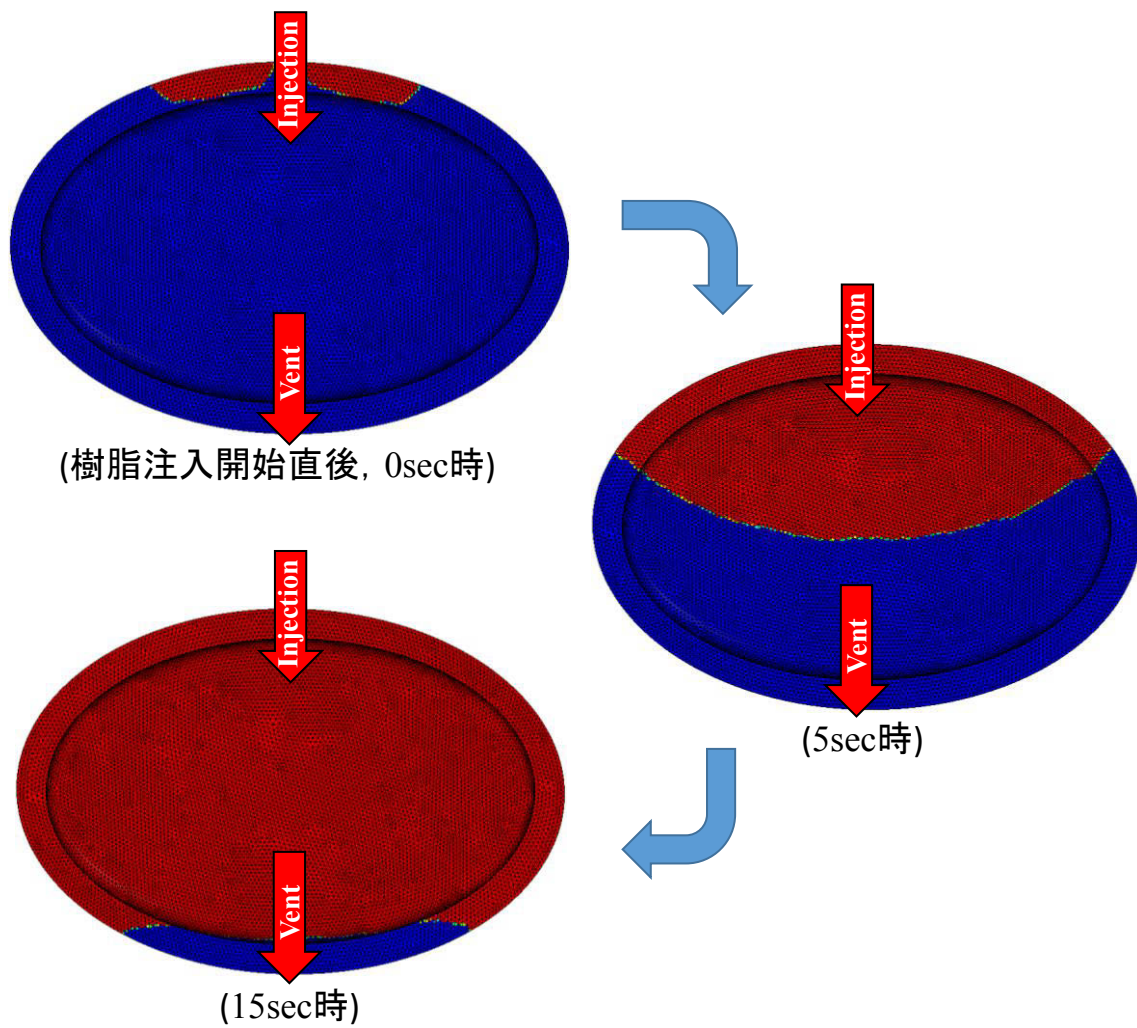


図 5.16 数値シミュレーションのフローフロント(パターンII)

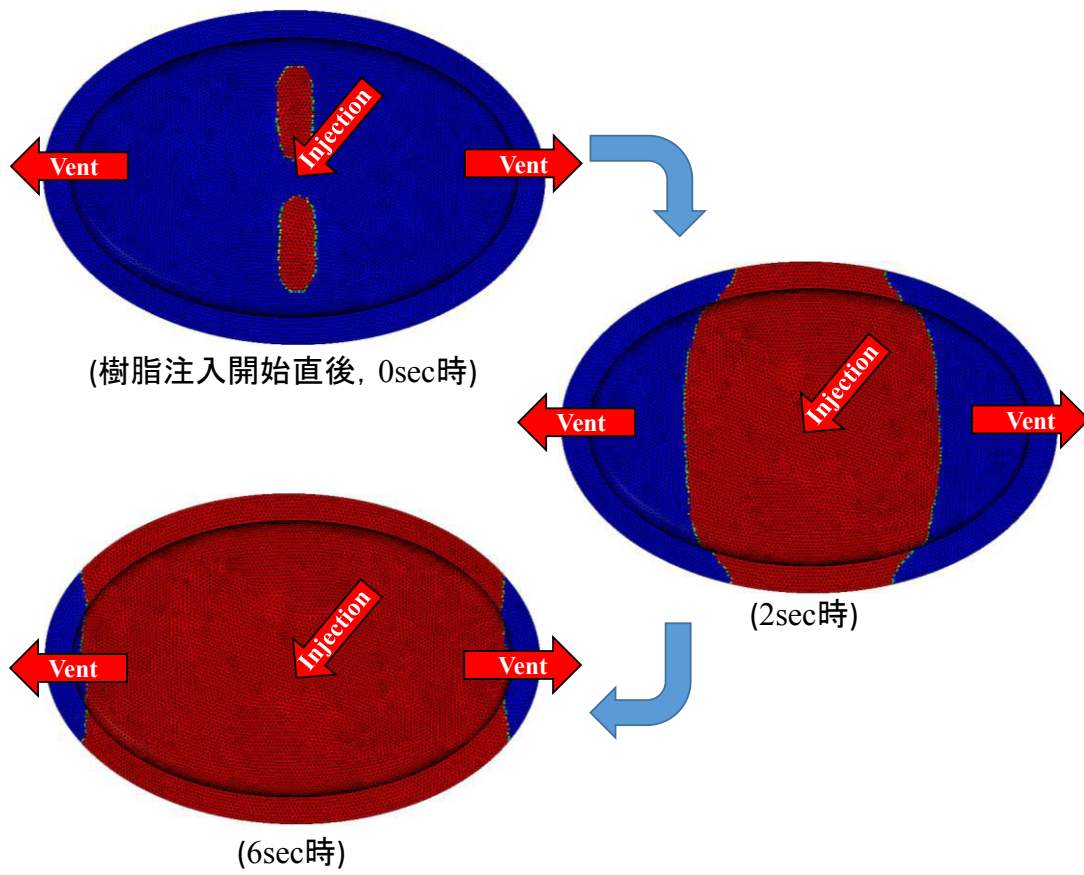


図 5.17 数値シミュレーションのフローフロント(パターンⅢ)

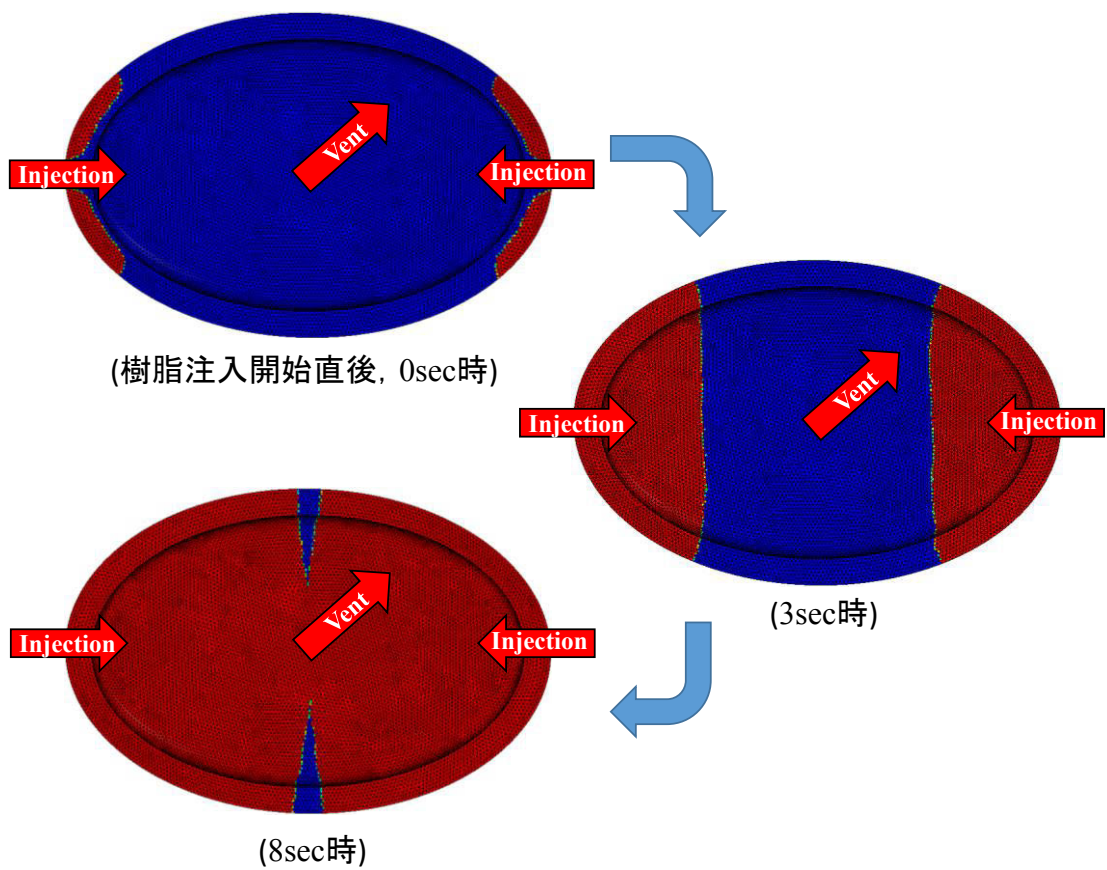


図 5.18 数値シミュレーションのフローフロント(パターンV)

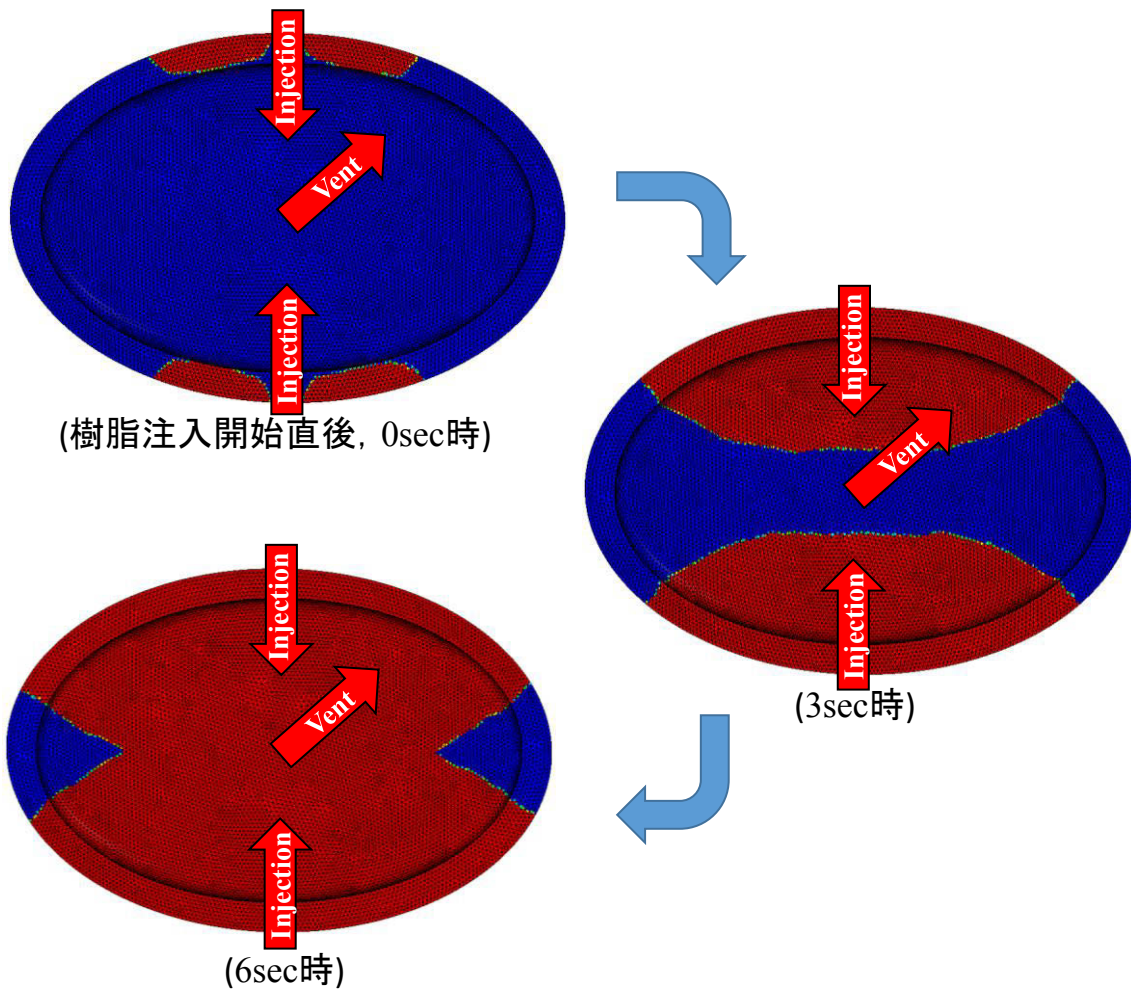


図 5.19 数値シミュレーションのフローフロント(パターンVI)

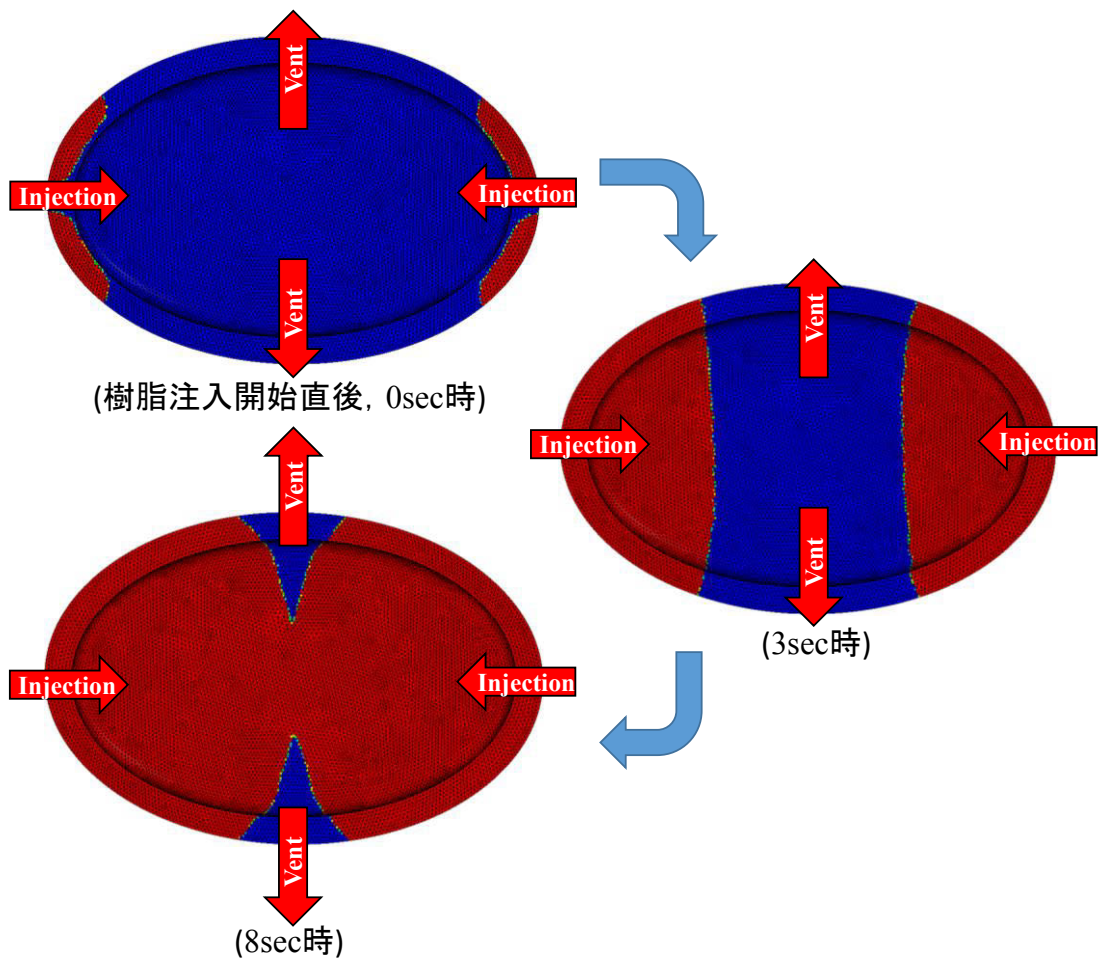


図 5.20 数値シミュレーションのフローフロント(パターンVII)

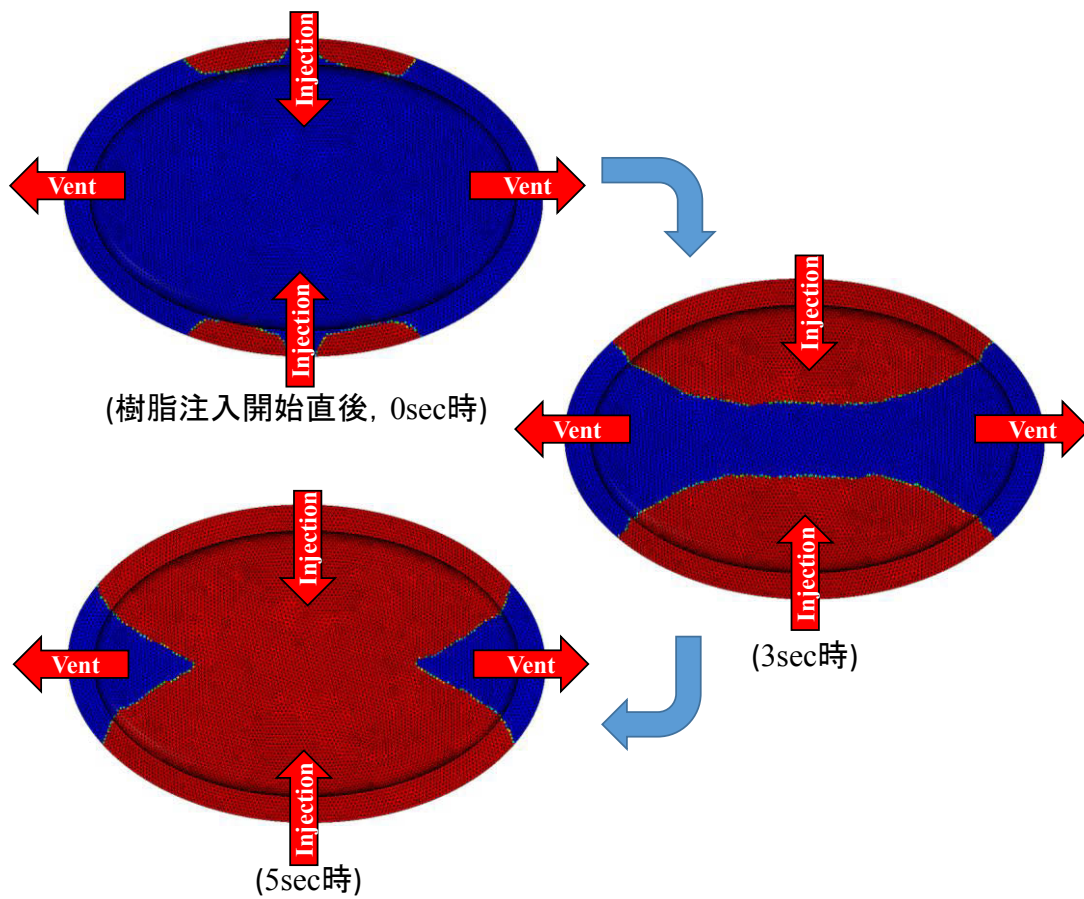


図 5.21 数値シミュレーションのフローフロント(パターンⅧ)

第 6 章結論

6.1 本研究で得られた成果

本論文では、**GFRP** のインフュージョン成形法における平面板の角度変化による流動挙動と浸透係数を簡便で正確に測定する方法から得た値を用いて数値シミュレーションを行った。また、平面板の傾斜角度の変化により成形品の機械的強度の変化を明らかにした。

楕円ドーム形状を 3D プリンターで造形した型を製作し、複合した形状に対して樹脂の流動挙動を明らかにし、型と成形品の形状測定からそれらの実用性を明らかにした。併せて数値シミュレーションによって成形条件の最適方法を求めた。

これらの実験分析結果から下記の結論を得たので報告する。

- ① インフュージョン成形法によって平面板による樹脂の供給量を電子天秤とコンピュータを連動させ連続的に樹脂重量を計測することによって簡便な方法で浸透係数を求めることが出来た。この方法によって求めた浸透係数を用いた流動解析の結果は成形実験結果と良好な一致を示した。
- ② 平面板によるインフュージョン成形で型の傾斜角度を変化させたことによる樹脂流動時間の変化は数値シミュレーションでは最大 5.9%で少なく、実験結果では傾斜角度の変化と傾向は概ね良好な一致が得られた。
- ③ 傾斜角度別に成形した平面板の引張強度を測定した結果、角度変化による強度の変化の傾向はほとんどないことが明らかになった。成形品の部位によって目視でボイドの発生が見られたが引張強度に影響するほどの変化は見られなかった。
- ④ カラス織物の方向性によって樹脂流動時間は繊維の縦糸方向に対して横糸方向の流動時間は 2.1 倍に変化することが明らかとなった。このことはそれぞれの浸透係数の値と一致していることから裏付けられている。
- ⑤ フローメディアを使用すると樹脂流動時間は同一条件でフローメディアを使用しない場合に比べて 1/15 以上に短縮されることが明らかとなった。ま

た、フローメディアの方向によって長い方向に対して短い方向では 2 倍の樹脂流動時間を要することも明らかとなった。

- ⑥ 今回の実験結果ではフローメディアとピールプライを使用した場合、樹脂の注入量は 2 倍になったが製品の厚さを必要とする場合は樹脂の注入量の増加より成形時間への短縮効果が大きいことが明らかである。
- ⑦ 楕円ドーム形状のインフュージョン成形では型の内面、特にブレード R 部の R が小さい部位ではプリフォーム材が型に密着し難いことが予想されるのでこうした形状物に対しては機械的に補助対策を取る必要があると思われる。
- ⑧ 楕円ドーム形状の成形で 8 パターンの成形条件について数値シミュレーションを行った結果、樹脂に注入口と吸引口の配置によって成形時間において 4.7 倍以上の差があることが予測された。フローメディアを使用した場合も使用しない場合もほぼ同一の GFRP 成形品を得ることができた。
- ⑨ 楕円ドーム形状の成形で同時に 2 カ所から樹脂を注入する場合の数値シミュレーションでは両側からのフローフロントが合流する部位でドライスポットが予想されたが、実験の結果ではそうした現象は見られなかった。
- ⑩ 楕円ドーム形状の成形においては全ての場合、樹脂注入口と吸引口に T 字形パイプコネクタを使用したところ、それぞれの部位の密封度を維持するための機械的な対策が重要であると思われる。
- ⑪ 楕円ドーム形状の成形では平面板の成形と異なり、ガラス織物とピールプライ及びフローメディアが型にプリフォームされる時に形状に沿って伸びや皺が発生し易くなるため樹脂の浸透時間はばらつきが大きくなることが判明した。
- ⑫ 楕円ドーム形状に類する成形ではガラス繊維、フローメディアの基本的な構造形態が型の形状に沿って変形が伴う関係から平面板の条件で求めた浸透係数の値を直接適用するのは困難と思われる。

6.2 今後の課題

本研究を行った結果、さらに研究で明らかにする課題は以下のような課題と考えている。

- ① ガラス織物の繊維の方向の組合せとフローメディアの方向の組合せによって成形品への機械的特性がどのように変化するか製品設計上重要な要素と考えられるので今後の課題とした。
- ② 平面板の成形時に樹脂注入口付近とそうでない部位とにおいて目視でボイドの発生に差が見られたが、今回の実験結果ではボイドの発生が機械的強度に影響しなかったがさらに究明が必要と考えられる。
- ③ 傾斜角度が異なる複数の平面で構成された構造物を成形する場合に異なる浸透係数を適用して数値シミュレーションを行う必要があると考えられるがその場合の最適条件の求めか方について検討する必要がある。
- ④ 楕円ドーム形状の成形方法で複数箇所からの樹脂注入口と吸引口を設置した場合の気密性の維持や方法の検討、プリフォーム材が型に完全に密着しているか否かの実験的な補助方法の考案による成形作業の精度向上策の検討。
- ⑤ 楕円ドーム形状での成形時に数値シミュレーションの結果では、樹脂注入口を複数箇所から行う場合、それぞれの注入口からのフローフロントが合流する部位でドライスポットが発生する可能性があるためその対策が必要である。

参考文献

- 1) 半田邦夫著、航空機生産工学、7.3 複合材料成形加工 p182～p198、オフィスハンズ (2002)
- 2) 武田文人、西山茂、林賢吾、子守康裕、須賀康雄、浅原信雄、航空機複合材一次構造への VaRTM 適用化研究、三菱重工技報 Vol.42 No.5 (2005-12)
- 3) 米田尚弘、大倉雄一、松尾和彦、FRP 大型船舶：FRP サンドイッチ製掃海艇の建造技術の確立、
<https://www.bsk-z.or.jp/kenkyucenter/pdf/25jyapamariteddo1125.pdf>
- 4) ユニバーサル造船、FRP 製品の紹介 - 掃海艇への FRP 製品の適用 - 、テクニカルレビューNo.6 2010 年 10 月
- 5) 浜素紀、FRP ボディとその成形法、VI. FRP 成形の材料 p75～p89、グランプリ出版(1998)
- 6) 岩堀豊、FRP の成形技術、第 5 章 VaRTM 成形技術、1.航空機構造製造、日本複合材料学会誌、37-3、p79-92 (2011)
- 7) 日本複合材料学会編、複合材料のはなし、第 8 話機能と複合材料 p117～p137 (1997)
- 8) 小野昌孝、小川弘正、複合材料のおはなし、2.4 輸送機器としての複合材料 p57～p65 日本規格協会(2002)LCM 技術各論、SCRIMI 関戸俊英、強化プラスチック Vol.51.No.11(2005)
- 9) 新藤健太郎、川節望、田北勝彦、加藤英司、VaRTM(真空含浸工法)による大型複合材製造技術、三菱重工技報 Vol.43 No.1、2006
- 10) 一般社団法人強化プラスチック協会ホームページ、<http://www.jrps.or.jp>
- 11) 福田博、邊吾一、複合材料の力学序説、第 1 章複合材料の特質 p1～p8、古今書院 (2005)
- 12) 植村益次、福田博、ハイブリッド複合材料、1.3 ガラス繊維 p30～p43
- 13) 尾崎毅志、樹脂流動解析、強化プラスチック Vol.51、No.11(2005 年 11 月号)
- 14) 小林やよい、青木隆平、吉田大志朗、平田拓也、ポーラス型を用いた VaRTM 複合材料、日本複合材料学会誌、39-1 (2013)
- 15) 松崎亮介、瀬戸大悟、轟章、水谷義弘、樹脂注入成形におけるボイド含有率のその場計測、日本複合材料学会誌、40-1、p25-35 (2014)
- 16) 松崎亮介、瀬戸大悟、轟章、水谷義弘、樹脂注入成形における幾何学的異方性織物繊維材のボイド形成、日本複合材料学会誌、40-2 (2014) p62-70

- 1 7) 堀正芳、森内重徳、宮内靖、樹脂型における RTM 成形システムのハイサイクル化、強化プラスチック 60—4、p143—148 (2014)
- 1 8) Vacuum Infusion Processing with DIAB core materials, DIAB 社パンフレット
- 1 9) N.K.Naik, M. Sirisha, A. Inani : Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM, Progress in aerospace sciences, 65(2014), 22-40.
- 2 0) A Two-layer Model for the Simulation of the VARTM Process with Resin Distribution Layer, Wen—Bin Young Appl Compos Mater (2013)
- 2 1) Modelling and Simulation of Resin Transfer Molding (RTM) —gate control, venting and dry spot prediction, Baichen Liu, Simon Bickerton, Suresh G. Advani : Composite Part A: Applied science and Manufacturing, 27, 2(1996), 135-141
- 2 2) 森本尚夫、特別企画・FRP50年の歩み、成形法 成形法の変遷、強化プラスチック Vol.5, No.4, 2005
- 2 3) 織田政信、LCM(Liquid Composite Molding)の最新技術動向「LCM 成形概論、強化プラスチック Vol.5, No.11 (2005)
- 2 4) 関戸俊英、LCM 技術各論 SCRIMI、強化プラスチック Vol.51. No.11(2005)
- 2 5) 塚本貴史、LCM 技術用原材料、LCM 用樹脂、強化プラスチック Vol.51. No.11(2005)
- 2 6) M. Robinson, Simulation of the vacuum assisted Resin Transfer Molding Process and the Development of Light-Weight Composite Bridging, UCSD, 2008
- 2 7) 平山紀夫、RTM プロセスシミュレーション日本複合材料学会誌、27—1 p67 (2001)
- 2 8) Ferland Pierre, Dominique Guittard and François Trochu, Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding, Polymer composites, 17, 1 (1996), 149-158.
- 2 9) J.R Weitzenböck, R.A Sheno, P.A Wilson, Radial flow permeability measurement. Part B: Application, Composites part A: applied science and manufacturing, 30, 6 (1999), 797-813.
- 3 0) E. Poodts, FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process, Composites: Part B, 53(2013), 179-186.
- 3 1) Gabriel. Rowe, Jun H. Yi, Kevin G. Chiu, Jason Tan, Alexander V. Mamishev, Bob Minaie, FILL-FRONT AND CURE PROGRESS

MONITORING FOR VARTM WITH AUTO-CALIBRATING

DIELECTRIC SENSORS, SAMPE 2005 symposium and exhibition

- 3 2) 長見茂、平山悠斗、坂田憲泰、邊吾一、ガラス織物の楕円ドーム形状の成形と数値シミュレーションの比較、第 47 回学術講演会前刷、(日本大学生産工学部、2014)

謝辞

ベンチャー企業を立ち上げて 28 年余、平成 24 年 4 月世代交代を機に半世紀ぶりに入学を許されて邊教授の研究室の一大学院生となりました。

研究室で最初に目にしたのが、次の詞書一枚でした。「本気であれば大抵のことができる、本気であれば何でもおもしろい、本気でしていると誰かが助けてくれる」と美しい草書で書かれています。

邊教授の「研究者の心と指導者の怒」を感じる言葉です。この言葉に勇気もらってバックグラウンドの無い異分野の研究テーマに取り組みました。本論文を纏めるに当っては邊先生の温かい心と怒のある示唆に富んだご指導の賜物です。心から感謝とお礼を申し上げます。

また、助教の坂田憲泰先生と平林明子先生の親切で丁寧な指導を仰ぎ数々のご助言に深く感謝の意を表します。

本論文の審査に対しましては多くのご助言を頂きました日本大学教授高橋進先生、松島均先生、東京工業大学教授轟章先生に深く感謝いたします。

実験にご協力いただきました株式会社コンポジットプラン代表者の山田直樹様、平和産業株式会社代表者の八尾泰弘様に感謝いたします。

日本大学大学院生の金子裕己君、平山悠斗君と学部生の淡路智貴君らの手際の良い支援と邊研究室の皆さんの協力を感謝いたします。

最後になりましたが快く送り出してくれた株式会社ファソテックの役員各位、関係者の皆さんと温かく見守ってくれた家内・紀子に感謝いたします。