

修士論文

一対の直列接続誘導コイルを用いた  
C-FRP の成型方法

指導教員 牧 清二郎 教授

平成 26 年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程機械工学専攻

中野 太一

## 目次

第1章 緒言	1
第2章 提案する成形方法	3
2.1 概要	3
2.2 加熱原理	5
2.3 実験装置	8
2.4 使用材料	15
2.4.1 炭素繊維シート	15
2.4.2 樹脂シート	17
第3章 誘導加熱実験	21
3.1 コイル直下部の加熱範囲	21
3.2 コイル移動加熱実験	25
第4章 炭素繊維強化複合材料の成形	28
4.1 平面形状の成型	28
4.1.1 成型結果	28
4.1.2 未含浸部に関する考察	29
4.2 立体成型	34
4.2.1 浅溝型	34
4.2.2 深溝型	36
4.2.3 複雑形状	39
第5章 結言	41

## 第1章 緒言<sup>1)</sup>

複合材料とは、2種類以上の素材を組み合わせることで、様々な特性（強度、剛性、靱性、化学的特性）を発揮させることを目的として作られた材料であり、今日の材料界における貢献度は極めて高い。一般に広く用いられているものは母材にプラスチック、強化材に炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維などを用いた繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics:FRP）である。FRPは高弾性率、高強度をもつ繊維と耐熱性、耐侯性、耐薬品性の優れた樹脂を複合することで比強度、比弾性率を他の材料に比べて極めて高くすることができ、高性能で多機能なニーズに答える材料として発展し、様々な分野で使用されている。

強化繊維に炭素繊維を用いた炭素繊維強化複合材料（Carbon Fiber Reinforced Plastics:CFRP）は銅やガラス繊維強化プラスチックと比べ軽量であり、比強度、比弾性率にも優れた機械的特性を持っている。また、強化繊維である炭素繊維は熱膨張係数が小さく、寸法安定性に優れており、化学的安定性や導電性にも優れているため航空宇宙分野、スポーツ分野、土木・建築分野などの用途に幅広く使用されている。

CFRPの成形には様々な方法が用いられているが、最も一般的な成形方法はオートクレーブ法である<sup>2)</sup>。これは、炭素繊維を一方方向に引きそろえたシートや織物にプラスチックを含浸させて作ったプリプレグと呼ばれる中間基材を何枚か重ねて、密閉した加圧容器の中に入れ高温下で加圧して硬化させる成形方法である。この成形法は複雑で大型形状の成形品の一体成形が可能で、非常に高品質なCFRPを成形することができるが、プリプレグは材料コストが高く、オートクレーブは多額の設備投資が必要であり、加工時間が長いといった問題点がある。CFRPは年々適応範囲が拡大されており、より成形効率の高い技術が求められている。そのため近年では「脱オートクレーブ」成型に関する研究が盛んである<sup>3)</sup>。その代表的な成形法として、樹脂のついていない炭素繊維基材を積層し、真空圧と大気圧の差圧を利用して真空吸引により熱硬化性樹脂を吸引・硬化させてCFRPを低コストで成形する真空含浸法（Vacuum Assisted Resin Transfer Molding:VaRTM）が開発されており、風車の羽や民間航空機の主翼の成形に適応されている。

しかし、VaRTMでは主に室温時において低粘度の熱硬化性樹脂を使用し、真空吸引と同時に液体樹脂を注入・含浸する方法が用いられており、液体樹脂の含浸状態の把握や樹脂吸引口の最適な設置場所の選定など、未確定な部分が多く存在する<sup>4)</sup>。

先の研究<sup>5)</sup>において、炭素繊維が電磁誘導により加熱されることに着目し<sup>6)</sup>、あらかじめ炭素繊維シートと樹脂シートを交互に重ねた試験片を真空吸引により加圧し、電磁誘導によって加熱する新しい成型方法を試みた。この成型法では炭素繊維自身が加熱されるので、高価な金属製の型を用いる必要がなく、成型品の試作や多品種少量生産に適している。その際加熱に使用した誘導コイルは、パンケーキ型コイルを使用した。しかし、その加熱には炭素繊維シートを最低でも10枚積層しなければ十分に加熱できなかった。

磁束の向きに着目すると、パンケーキ型コイルを加熱に用いた場合、磁束は炭素繊維層に対して面内方向に通過すると考えられ、渦電流は板厚に水平な面内を流れると考えられる。そのため炭素繊維を複数枚積層し、ある程度の厚みを持たせる必要があると考えられる。そこで、炭素繊維層を挟み込むように配置したコイルを用いることで、磁束は炭素繊維層に対して垂直方向に通過すると考えられ、渦電流は板厚に垂直な面内を流れると考えられるので、積層枚数が少なくても十分に加熱が可能ではないかと考えた。

本研究では、炭素繊維層を挟み込むようにギャップを設けて配置した一对の直列接続誘導コイル(以下、一对型コイルと呼ぶ)を用いて、加熱範囲の調査とCFRPを成型する際の誘導コイルの移動速度を決定するため誘導コイルを移動させた加熱実験を行った。最後に、ケミカルウッドにて立体形状の型を作成し、本成型法を用いて成型をおこなった。

## 第2章 提案する成型方法

### 2.1 概要

前述のように、新たな CFRP の成型方法として開発が進められている VaRTM 法は液体樹脂の含浸状態の把握や樹脂吸引口の最適な設置場所の選定など、一般的な成型法として普及するためには未確定な部分が多く存在する。そこで本研究ではより確実に、かつ特殊な技術やノウハウを必要とせず炭素繊維に樹脂を含浸させるために、VaRTM 法とインフュージョン法を応用した新しい成型方法を提案する。

図 2.1 に本研究で提案する成型方法の概略図を示す。試験片の加圧については VaRTM 法やインフュージョン法と同様に、炭素繊維シートと樹脂シートを交互に重ねた試験片を真空バッグで覆い、真空吸引することによって加圧する。事前に圧力計を用いて真空吸引中の圧力を測定したところ、ゲージ圧で-0.1MPa を示し、完全な真空状態になっていることが確認できた。ここで、試験片として用いる炭素繊維シートの寸法は 120×240mm であるから、真空吸引により試験片に加えられる圧力  $P$  は 1 気圧を 1013hPa とすると、

$$1013 \times 100 [Pa] = \frac{P [N]}{120 \times 10^{-3} [m] \times 240 \times 10^{-3} [m]} \quad (2.1)$$

$$\therefore P = 2917.4 [N] \approx 297.7 [kgf] \quad (2.2)$$

となり、CFRP の成型に十分な圧力がかかっていることがわかる。

試験片の加熱には電磁誘導加熱装置を用いる。誘導加熱を用いる利点として制御性や操作性が良くなり局部加熱が可能で周囲が高温にならない、装置をコンパクトにできることが挙げられる。また、電磁誘導は炭素繊維自体を加熱するのでオートクレーブなどの高価な設備を必要とせず、かつ金型を加熱する必要もないので効率的に試験片を加熱することができる。

VaRTM 法では主に、室温時において低粘度の熱硬化性樹脂を使用し、真空吸引と同時に液体樹脂を注入・含浸する方法が用いられている。しかし本研究では、薄いシート状の熱可塑性樹脂を使用し、炭素繊維シートと樹脂シートを交互に重ねた試験片を電磁誘導加熱して、繊維に樹脂を含浸させる方法を採用した。この樹脂シートの採用により炭素繊維への樹脂含浸の不均一さを改善するとともに、樹脂吸引口の設置箇所や樹脂注入のタイミングの選定、真空容器への加工を最小限に抑えることができると考えた。

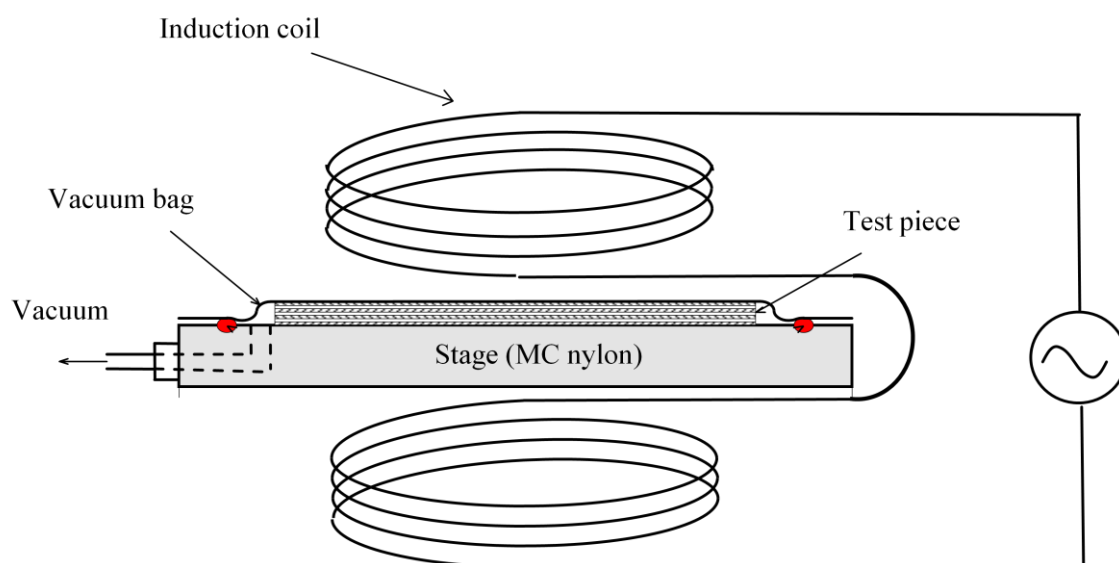


Fig.2.1 Schematic view of the experimental device

## 2.2 加熱原理

本研究で提案する加熱原理について説明する。まずパンケーキ型コイル，一対型コイルを用いて加熱を行う際の加熱対象を通過する磁束の向きを調査するため，以下の計算式を用いて，簡易的なシミュレーションを行った。

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.3)$$

H : 磁場[A/m]

r : リッツ線からの距離[mm]

I : 電流[A]

パンケーキ型コイルのシミュレーション結果を図 2.2 に示す。加熱対象に対して面内方向に磁束が通過していることが確認できる。このとき，渦電流は，板厚に水平な面内を流れると考えられるため，炭素繊維シートの積層枚数が少ないと渦電流は流れにくくなり十分に加熱することができないと考えられる。

一対型コイルのシミュレーション結果を図 2.3 に示す。加熱対象に対して垂直方向に磁束が通過していることが確認できる。この場合，渦電流は板厚に垂直な面内を流れると考えられるので，炭素繊維シートの積層枚数を少なくしても，十分に加熱できると考えられる。

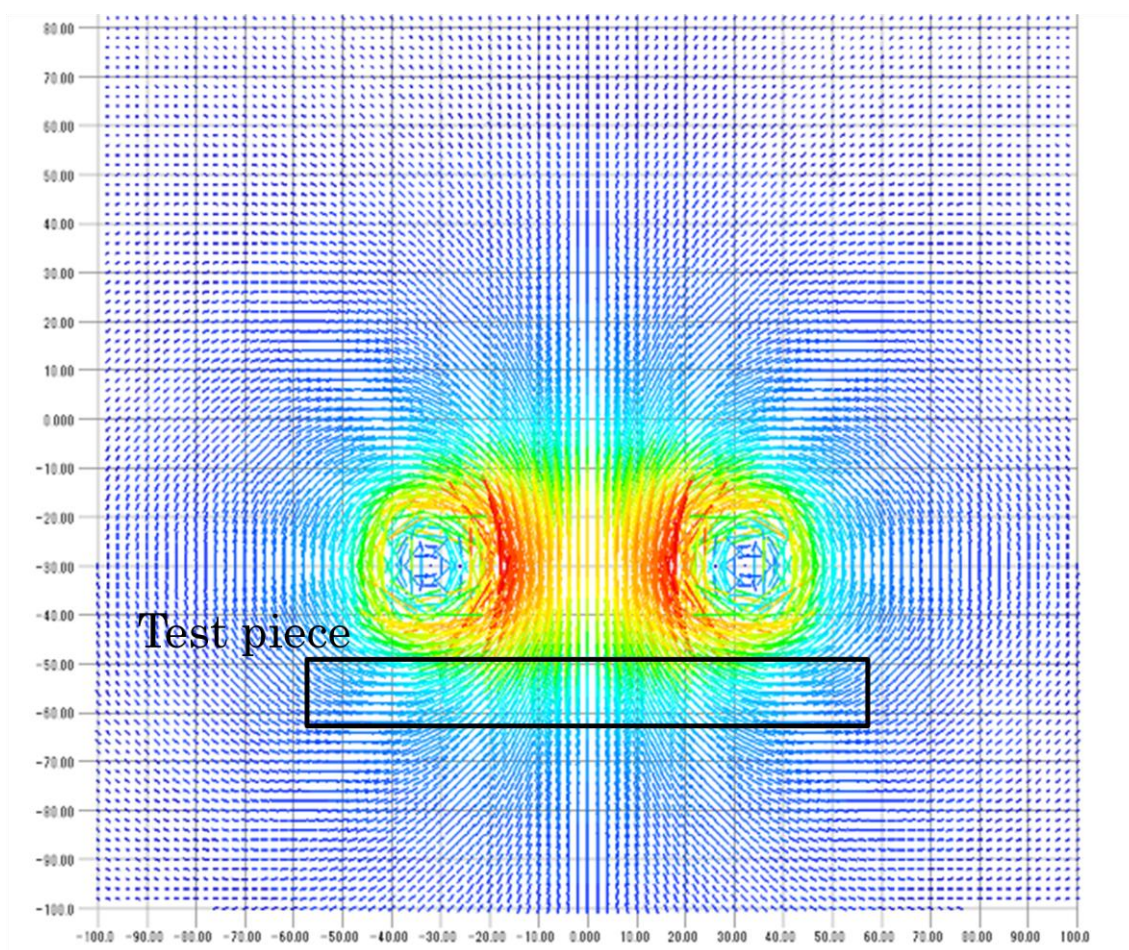


Fig .2.2 Simulation result of direction on magnetic flux using pancake coil



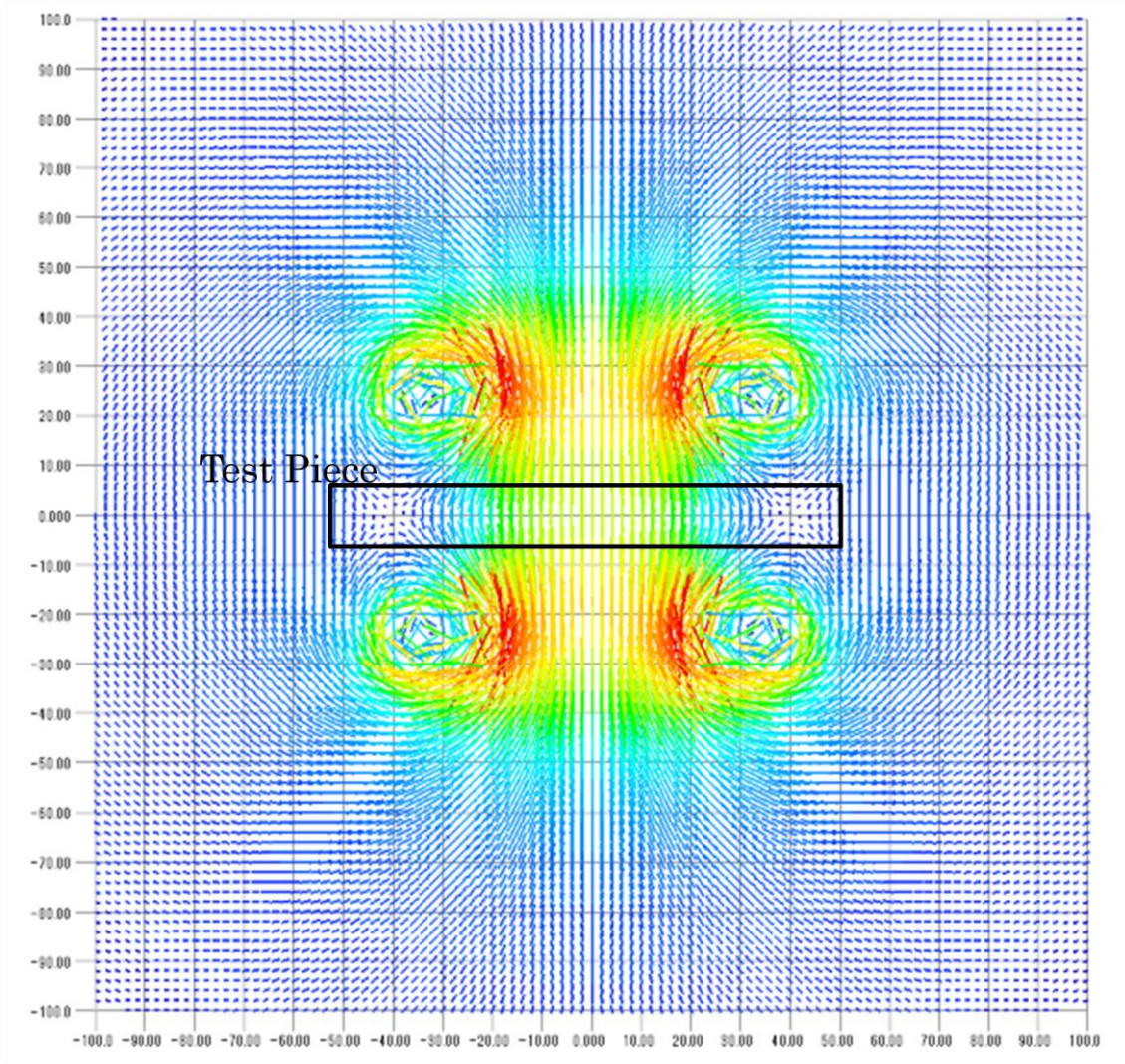


Fig .2.3 Simulation result of direction of magnetic flux using double coils

### 2.3 実験装置

図 2.4 に本研究で用いた実験装置の外観を示す。試験片を設置するステージには MC ナイロン (450×280×25 mm) を用いた。本研究では試験片を電磁誘導により加熱するため、誘導電流の影響を受ける金属製のステージは使えない。そのため、加工しやすい MC ナイロンをステージとして用いた。真空吸引装置は図 2.5 に示す、真空ポンプ (佐藤真空株式会社製 P100D) を使用した。

ここで真空吸引装置、樹脂製ステージの加工と組立工程について説明する。まずステージの平面に直径 6mm の O リングを取り付けるために角丸長方形の溝を掘り、真空ポンプから吸引をするための吸引穴をステージの側面にあけ、O リングと真空ホースをステージに取り付ける。また、ステージ中央部に 120×240×15 mm の長方形の溝を設けた。この溝部に耐熱性ケミカルウッドにて作成した成型型をはめ込むことで、平面および立体形状の製品を成型することが可能となる。図 2.6 はステージの外観である。そして成型型に取り付けた O リングに真空グリスを塗布し、その上に 500×320×1 mm のシリコンゴムシートを密着するように乗せ、真空吸引すると試験片は加圧される。

誘導加熱実験における試験片の温度測定には K 種熱電対を用いた。熱電対の取り付けにおいて、薄いシリコンゴムシートへの加工は困難であるため、ステージへの加工を施した。2 本の熱電対を予めアルメル側とクロメル側に分けておき、再び真空バッグ内で両者を撚りあわせて 1 本の熱電対として試験片の温度測定をおこなった。温度検出・記録には GRAPHTEC 社製の midi LOGGER GL200A を使用した。

図 2.7 に本研究で使用した電磁誘導加熱装置 (ナビオ株式会社 IH-1M) を示す。この装置の発振周波数は 20kHz, 出力は 1kW である。

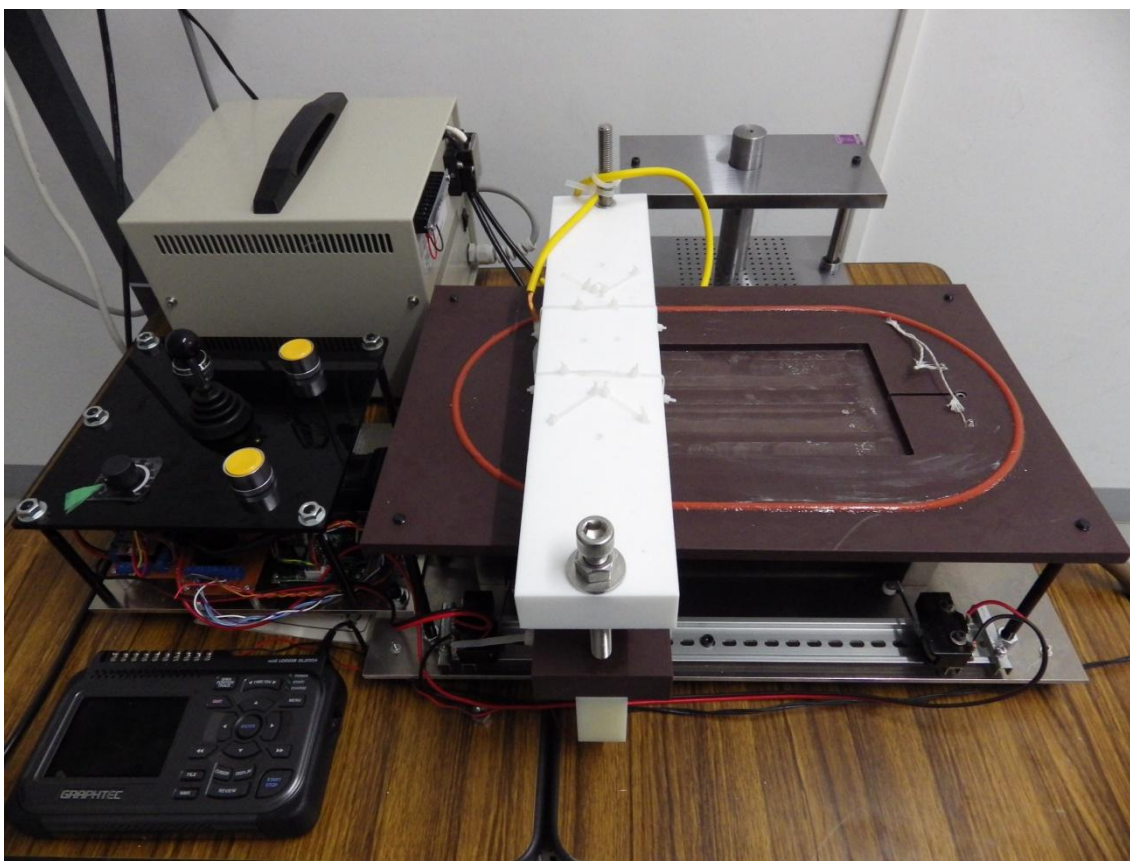


Fig.2.4 Experiment device



Fig.2.5 Vacuum pump

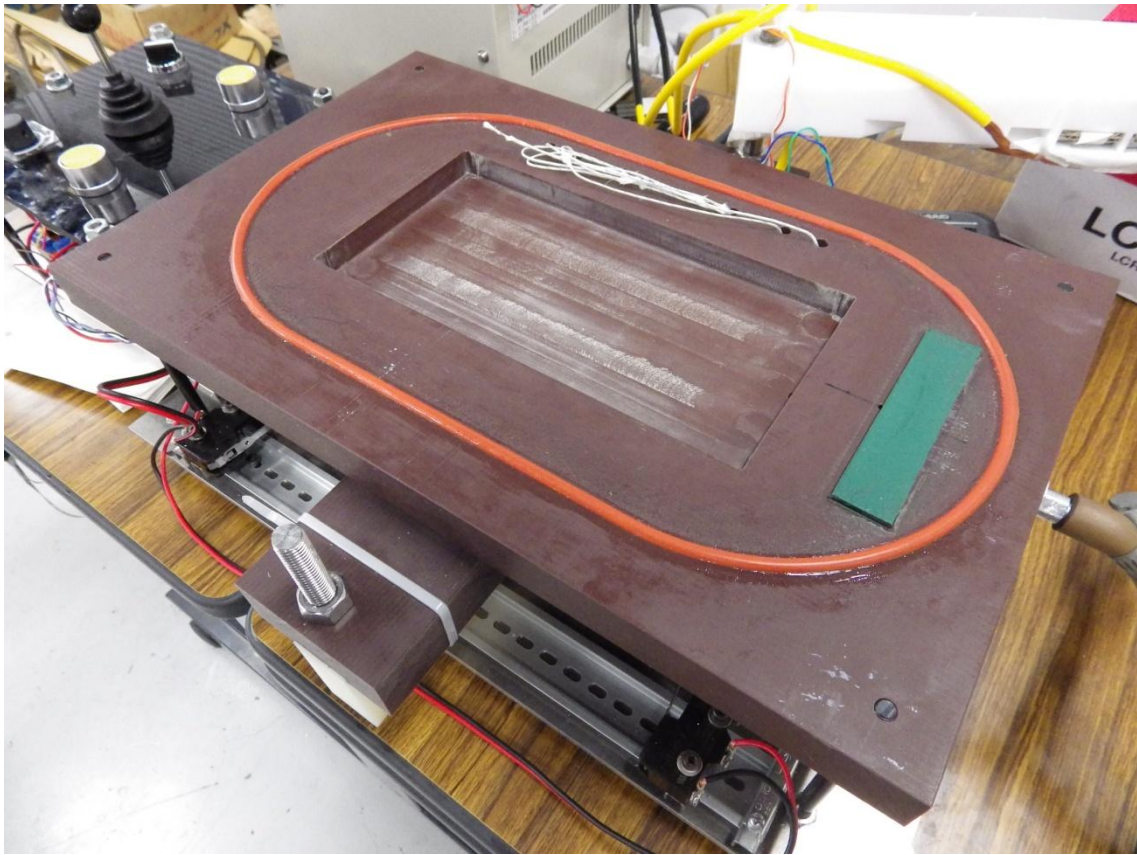


Fig.2.6 Stage for molding



Fig.2.7 Electromagnetic induction heating apparatus

図 2.8 に本研究で用いた誘導コイルの片面を示す。誘導コイルは直径 3.2mm、長さ 13m のリッツ線を角丸長形状に片側 18 巻し、ギャップを約 40 mm 設け配置したものをを用いた。配置した誘導コイルを図 2.9 に示す。リッツ線とはエナメルコーティングされた細い銅線を複数本撚り合わせた導線であり、単一の導線と比べて表面積が増加する。一般的に高周波電流が導体に流れるとき、電流は導体表面付近に集中し、導体内部の電流密度が低下してしまう表皮効果が発生する。この電流の流れる深さ（表皮深さ）は周波数に反比例するため、電流が高周波になるほど導体内部に電流が流れにくくなる。そのためリッツ線では導線の細分化により、表皮効果の影響を低減することができる。そこで本研究で用いる条件において、炭素繊維の電磁誘導加熱時における表皮深さがどの程度になるかを検討する。ここで、表皮深さ  $\delta$  [m] は次式で表される。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.4)$$

$\omega$  : 角周波数 =  $2\pi f$  [Hz]

$\mu$  : 透磁率 [H/m]

$\sigma$  : 導電率 [S/m]

式(2.4)に本研究における条件である発振周波数  $f=20\text{kHz}$  と炭素繊維の導電率  $\sigma_c = 5.56 \times 10^4 \text{S/m}$  を代入すると、

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \times 20 \times 10^3 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.56 \times 10^4}} \quad (2.5)$$

$$\delta = 0.015[m] \quad (2.6)$$

$$\delta = 15[mm] \quad (2.7)$$

となり、周波数が 20kHz の場合における表皮深さ  $\delta$  は 15mm となる。ここで、この表皮深さは炭素繊維をバルク金属のように十分大きな塊と仮定した場合の値であることに留意する。また、図 2.10 は周波数  $f$  を 1kHz から 1MHz まで変化させたときの表皮深さの変化を示したグラフであり、成型する炭素繊維強化複合材料に応じて周波数をどの程度変化させる必要があるかを知ることができる。

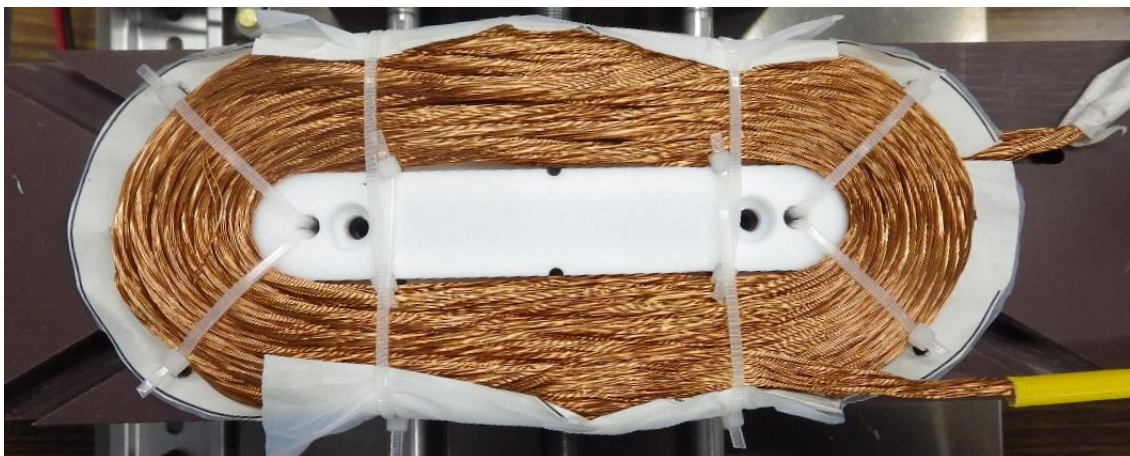


Fig.2.8 Induction coil(one side)

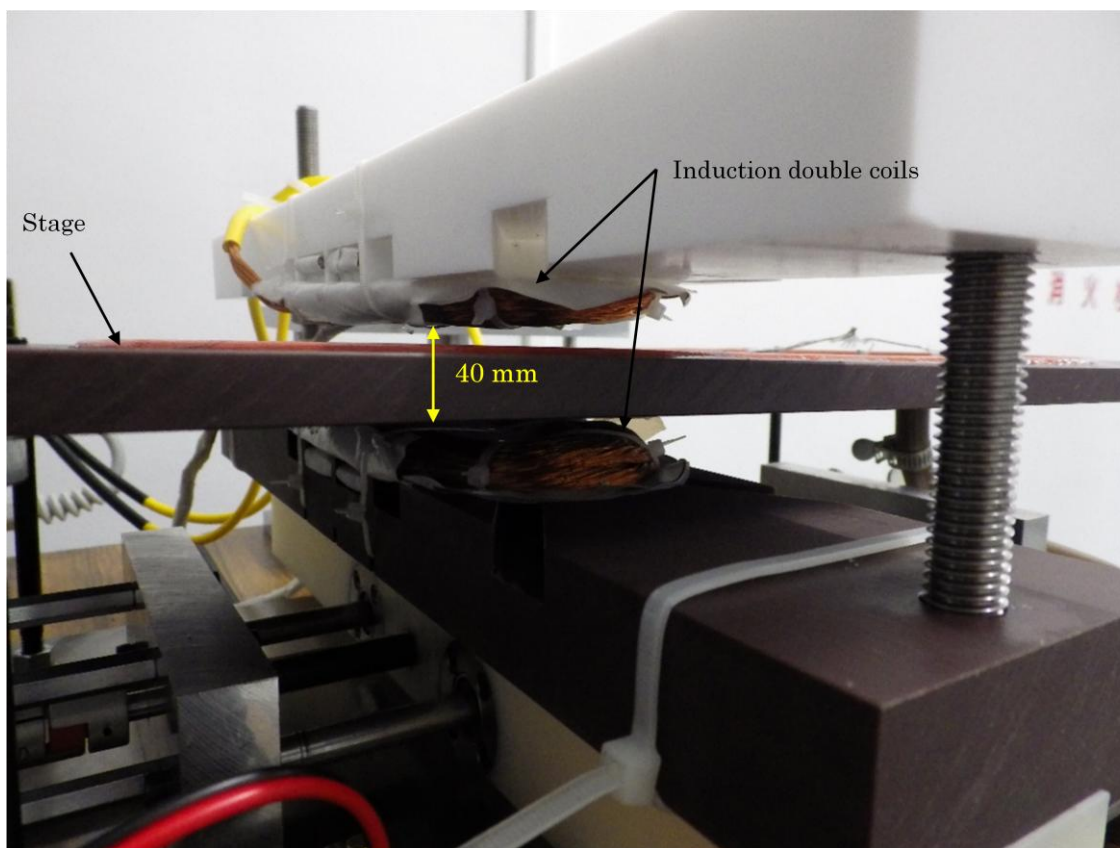


Fig.2.9 Induction double coils

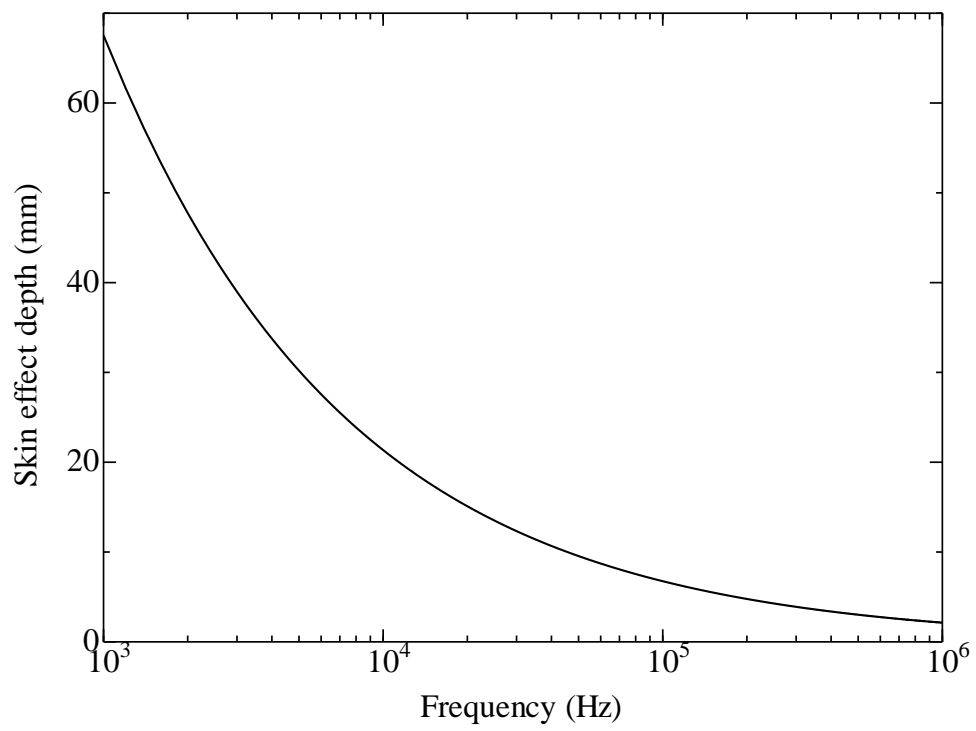


Fig.2.10 Skin effect depth of the carbon fiber

本研究で用いた誘導コイルは直動レールに取り付け、長手方向への移動を可能にした。また、誘導コイルを操作するためマイクロコンピュータ(ATmega32)搭載のコイル操作コントローラを作成した<sup>78)</sup>。図 2.11 にコントローラを示す。左上部のスイッチがコントローラの電源となっており、パネル中央部のレバーを左右に倒すことで、その向きに対応し誘導コイルが移動する。速度はパネル左下部のダイヤルにより速度の調節を行う。また、右上部のスイッチはそれぞれ、ストップスイッチ、最大速度移動スイッチとなっている。



Fig.2.11 Controller to operate a coil



## 2.4 使用材料

### 2.4.1 炭素繊維シート<sup>9),10)</sup>

炭素繊維とは炭素の含有量が 90%以上の繊維状の炭素材料のことであり、高強度、高弾性率、高剛性率などの優れた機械的特性を持ち、低密度、低膨張率、耐熱性、化学的安定性、電気・熱伝導性などの特性も併せ持っている。また、繊維状に賦与することにより柔軟性を得ることができるため、炭素繊維は物質としての炭素と形態としての繊維に由来する様々な特性を併せ持つ特異な材料である。

本研究では図 2.12 に示す 3K の炭素繊維シート（120×240mm と 140×240mm , 200g/m<sup>2</sup>）を使用した。ここで、K とはシートを形成している繊維束 1 本あたりの炭素フィラメントの本数の意味し、1K（1000 本）、3K（3000 本）、6K（6000 本）などの種類がある<sup>9)</sup>。表 2.1<sup>9)</sup> に炭素フィラメントの材料特性を示す。また、炭素繊維の織り方の種類には平織り、綾織り（斜紋織り）、朱子織りなどがあるが、本研究では炭素繊維シートと樹脂シートを交互に重ねた試験片を真空吸引した際になるべく隙間ができにくいように平織り（縦、横ともに密度 12.5 本/25mm）の炭素繊維を採用した。



Fig.2.12 Carbon fiber sheet

Table2.1 Properties of carbon filament

Filament count	3000
Filament diameter[ $\mu\text{m}$ ]	7.0
Thermal Conductivity[W/m $\cdot$ K]	11
Electrical Conductivity[S/m]	$5.56 \times 10^4$
Tensile Strength[GPa]	3.53
Tensile Modulus[GPa]	230
Elongation[%]	1.5

#### 2.4.2 樹脂シート

一般的に、炭素繊維強化複合材料の母材には熱硬化性樹脂であるエポキシが用いられてきたが、層間剥離（デラミネーション）や繊維方向割れ（スプリッティング）に対する破壊靱性が低いことが指摘されている。そこで母材を熱可塑性樹脂に置き換えることで破壊靱性の改善とともに成形時間の長さ、リサイクルの難しさ、成形品が高価であるということから量産には不向きとされていた炭素繊維強化複合材料の問題点を改善することができる<sup>11)</sup>。

VaRTM 法やインフュージョン法では主に室温時において低粘度の熱硬化性樹脂を使用し、真空吸引と同時に液体樹脂を注入・含浸する方法が用いられている。しかし本研究では熱可塑性樹脂であるシート状のポリエチレン（融点 120°C）を用い、炭素繊維シートと樹脂シートを交互に積み重ねた試験片を電磁誘導加熱して、繊維に樹脂を含浸させる方法を採用した。この樹脂シートの採用により、繊維への樹脂含浸の不均一さを改善するとともに、樹脂吸引口の設置箇所や樹脂注入のタイミングの選定、さらに真空容器への加工を最小限に抑えることができると考えた。

本研究では 1 種類の樹脂シートを使用するが、炭素繊維シートと樹脂シートを交互に積み重ねた中間素材において、炭素繊維シートに接する層には粘度の低い樹脂を使用することで繊維層への含浸が向上し、それ以外の層には比強度の高い樹脂を使用することで機械的特性に優れた炭素繊維強化複合材料の作成が可能となる。

先の研究において、炭素繊維シートと樹脂シートを交互に重ねた試験片を電磁誘導加熱する場合、炭素繊維同士が接触していなければ十分な渦電流が流れず、試験片がサセプタとして作用しないことがわかっている。そのため樹脂シートには直径 5mm の円孔を設け、真空吸引時に全ての炭素繊維シート同士が接触している状態にした。図 2.13 は円孔を設けたポリエチレン製樹脂シート（120×240×0.1mm と 140×240×0.1mm、円孔面積比：20%）であり、表 2.2<sup>12)</sup> に物性値を示す。なお円孔の位置は図 2.14 の (1) と (2) に示すように縦、横方向にそれぞれ 5 mm ずらしてあり、これは 2 種類の樹脂シートを交互に積層することで樹脂シートの熔融後に樹脂が過多、過小となる部分を減らすためである。

樹脂への穴開け加工は、図 2.15 に示す専用の装置を製作し、使用した。

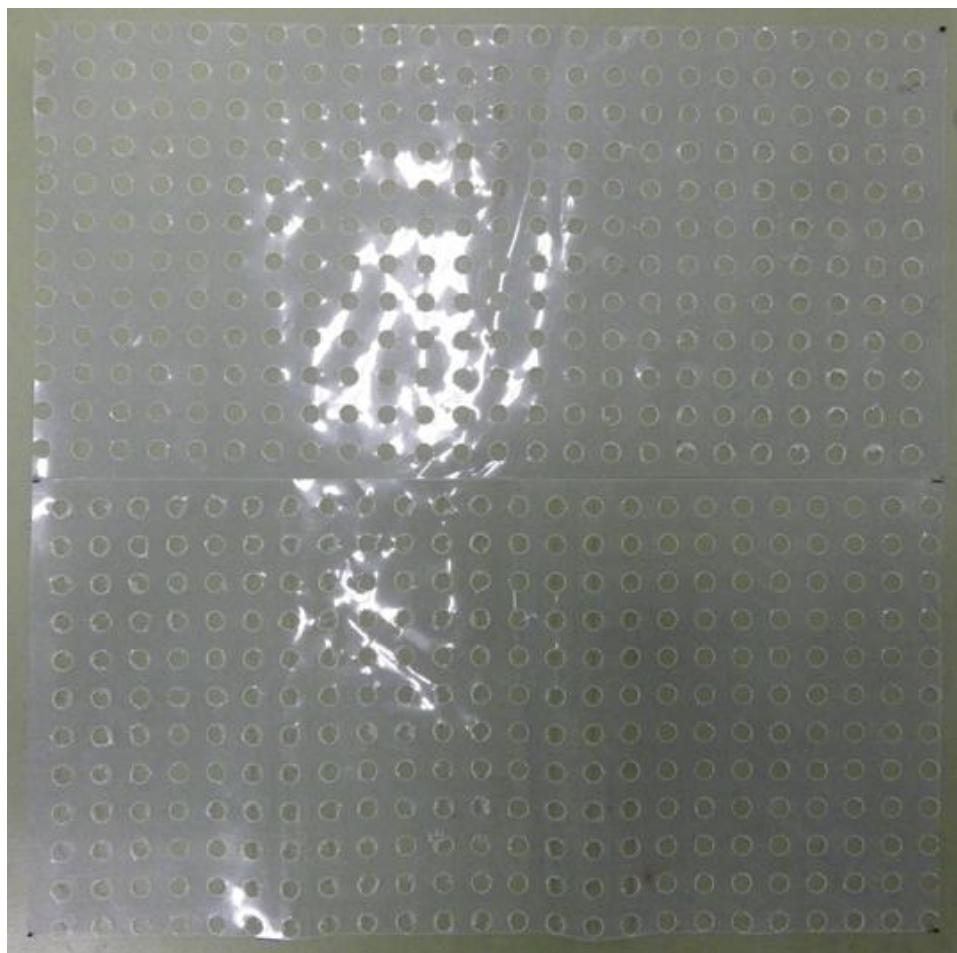


Fig.2.13 Polyethylene resin sheets

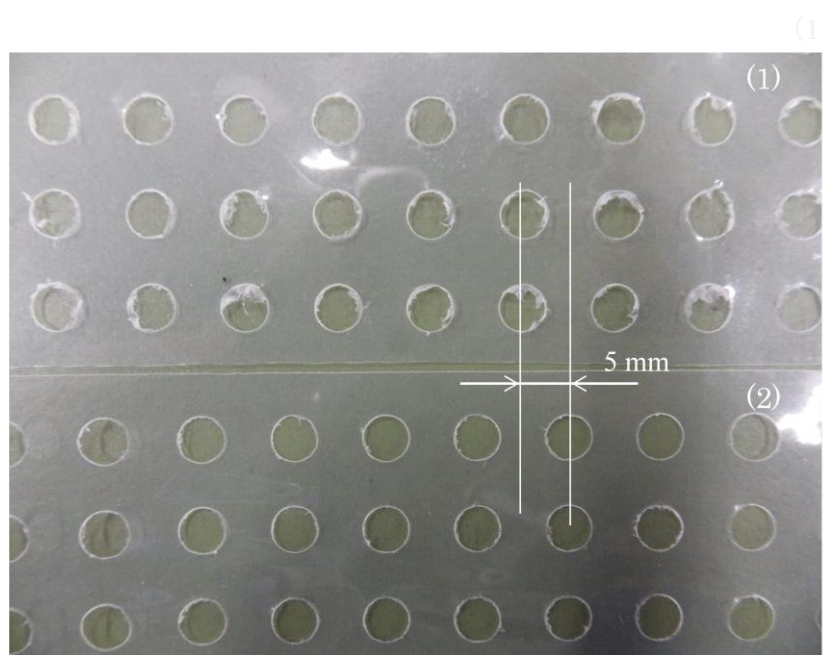


Fig.2.14 Holes on polyethylene resin sheets



Fig.2.15 Device for punching holes on polyethylene resin sheets

Table2.2 Properties of polyethylene

Density[g/cm <sup>2</sup> ]	0.92
Melting point[°C]	120
Thermal Conductivity[W/m · K]	0.33
Specific Resistance[Ω · cm]	>10 <sup>16</sup>
Tensile Strength[MPa]	8-31
Tensile Modulus[MPa]	180-280

## 第3章 誘導加熱実験

### 3.1 コイル直下部の加熱範囲

本研究で提案する加熱方法により炭素繊維シートを5枚重ねて加熱し、樹脂融点まで加熱が可能か実験を行った。コイル間のギャップは約40mmとし、その中間位置にて加熱を行った。図3.1に示すように炭素繊維シートに温度測定点をコイルの横方向にコイル中心部、コイル巻線内側、巻線中心部、巻線外側にそれぞれ1~4、縦方向にコイル中心部から15mm間隔でそれぞれ1'~4'設けた。

図3.2に、コイル横方向の温度分布を示す。コイルの巻線中心部である点3では、120°Cに加熱されており、コイル中心部である点1では加熱が最も弱く、その温度差は66°Cである。この結果から、コイルの巻線中心の位置が最も加熱されていることがわかった。

図3.3にコイル縦方向の温度分布を示す。コイルの巻線に近づくにつれ加熱速度が増加していることが確認できる。また、点4'では加熱が最も強く、2分で184°Cまで加熱された。

以上の結果より、コイル巻線直下での加熱効率は極めて良いと考えられる。また、図3.4に示すように実験に使用した炭素繊維を封入していたポリエチレン製の袋がコイルの形状に沿って熔融していることがわかる。そこで、コイルの巻線中心の直下部の温度分布について図3.4に示すように炭素繊維シートに温度測定点を3点設け、120°Cに達するまでの時間を測定した。図3.5に結果を示す。図3.4の測定点の色と図3.5の線色が対応している。最も加熱が遅かった点2において約140秒で120°Cまで加熱されていることが確認できた。これらのことから、コイルを横方向に移動させることで、CFRPの成型が可能であるということが示唆された。

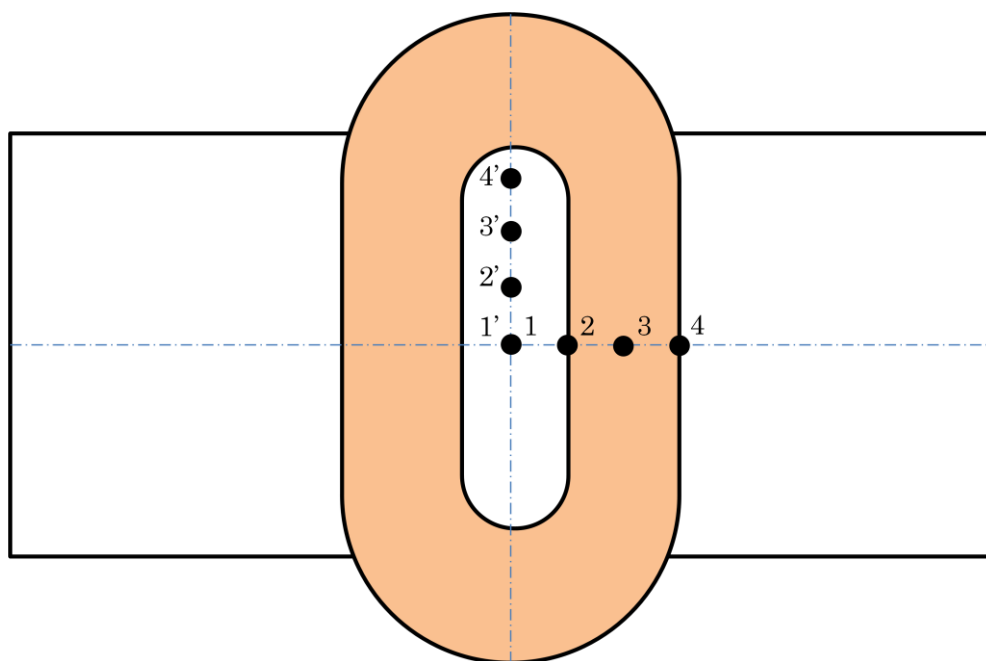


Fig.3.1 Measurement point under the coil

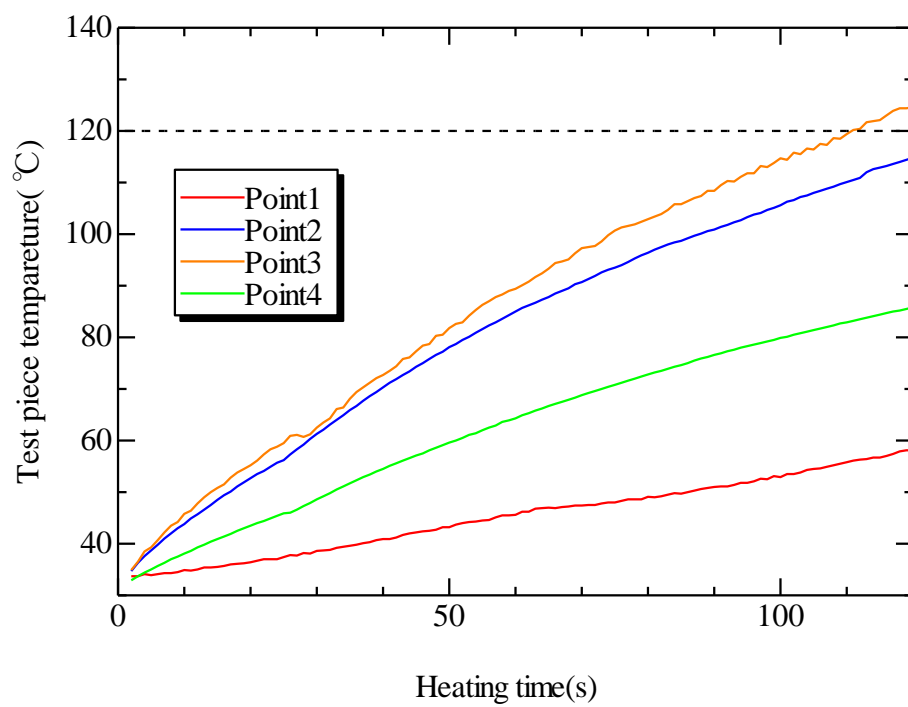


Fig.3.2 Temperature distribution on the horizontal direction



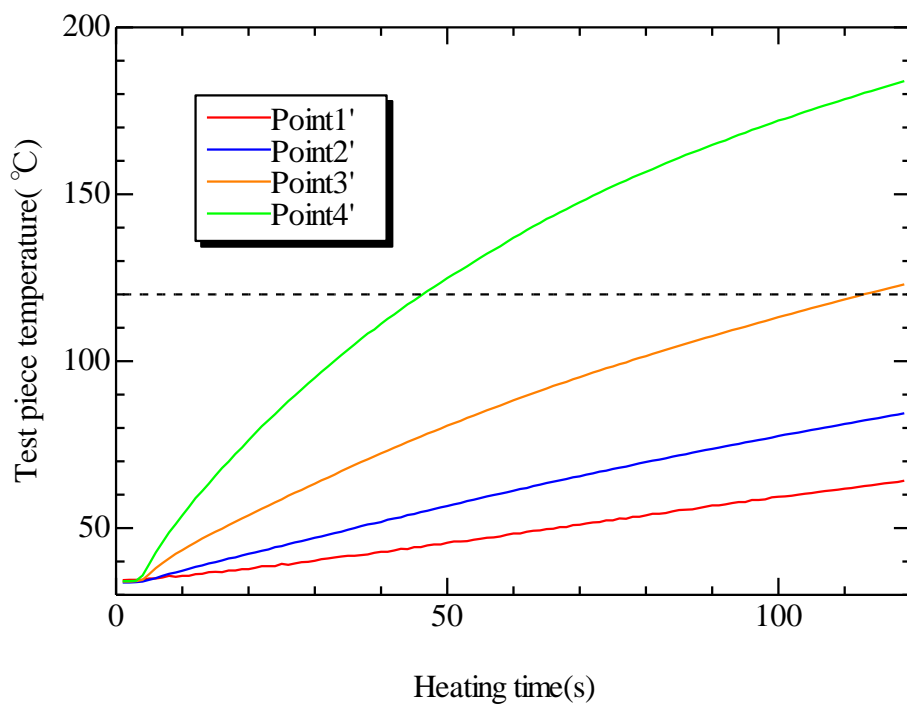


Fig.3.3 Temperature distribution on the vertical direction

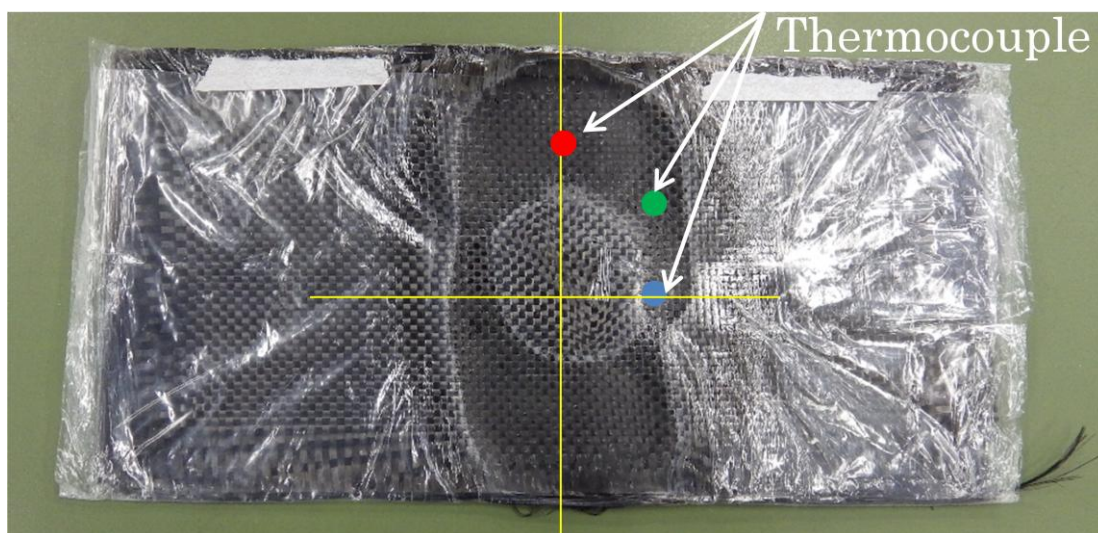


Fig.3.4 Carbon fiber sheet after heating and Measurement point

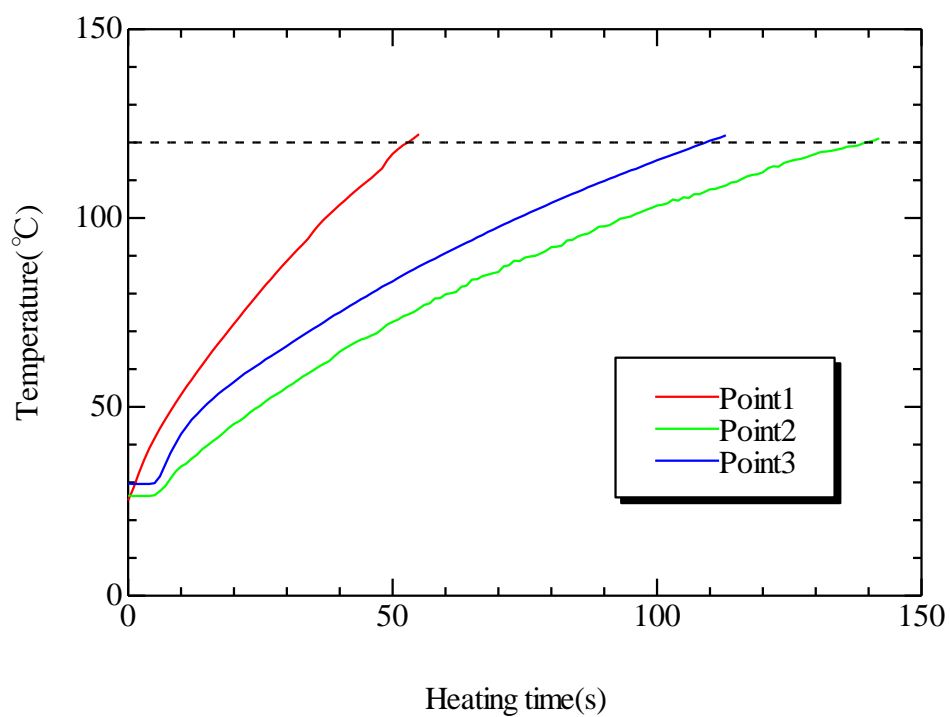


Fig.3.5 Temperature distribution under the coil

### 3.2 コイル移動加熱実験

一対型コイルを使用して CFRP を成型する際、最適なコイルの移動速度を決定するため、コイルを移動させながら、加熱実験を行った。温度測定点は図 3.6 に示すように試験片中央部から 20 mm 間隔で 1~3 点設けた。コイルの移動速度は 0.5, 0.7 mm/s とした。コイルは右端を始点とし、左方向へ移動させた。また今回用いた実験装置では、詳細に移動速度を調節することができなかつたため、0.6 mm/s では実験を実施していない。

0.7 mm/s での加熱実験の結果を図 3.7 に示す。各点で 120°C に達していないことが確認できる。温度履歴に着目すると、各点で①加熱過程→②冷却過程→③加熱過程という傾向が見られた。①ではコイル巻線左側による加熱、③はコイル巻線右側による加熱であると考えられる。3.1 項の実験結果より、コイル中央部はほとんど加熱されないことがわかっているため、②はコイル中央部を通過し加熱されなかつたため、冷却されたと考えられる。このコイルを移動させて成型を行った場合、巻線左側が通過した後、巻線右側が通過し終えた時点から、樹脂が含浸すると考えられる。

次に、0.5 mm/s にて加熱実験を行った。実験結果を図 3.8 に示す。各点で 120°C まで加熱されていることが確認できた。以上の結果から、0.5 mm/s で成型を行った場合、広範囲に含浸すると考えられるため、以降の成型ではコイルの移動速度を 0.5 mm/s とした。

また、3.1 項の実験結果よりコイル縦方向で最も加熱速度が速かつた位置の横方向に図 3.6 に示すように 1'~3' に熱電対を 3 点設置し、0.5 mm/s でコイルを移動させた加熱実験結果を図 3.9 に示す。温度履歴に着目すると加熱過程のみとなっており、120°C への到達時間が短くなっている。したがって、この位置では試験片中心位置に比べより広範囲に樹脂が含浸すると考えられる。

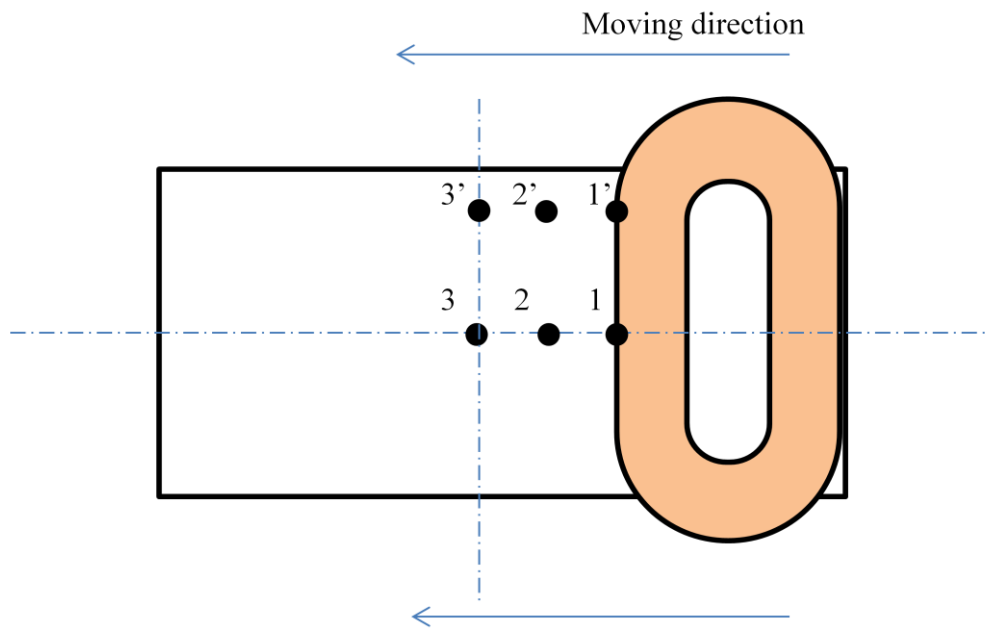


Fig.3.6 Measurement point

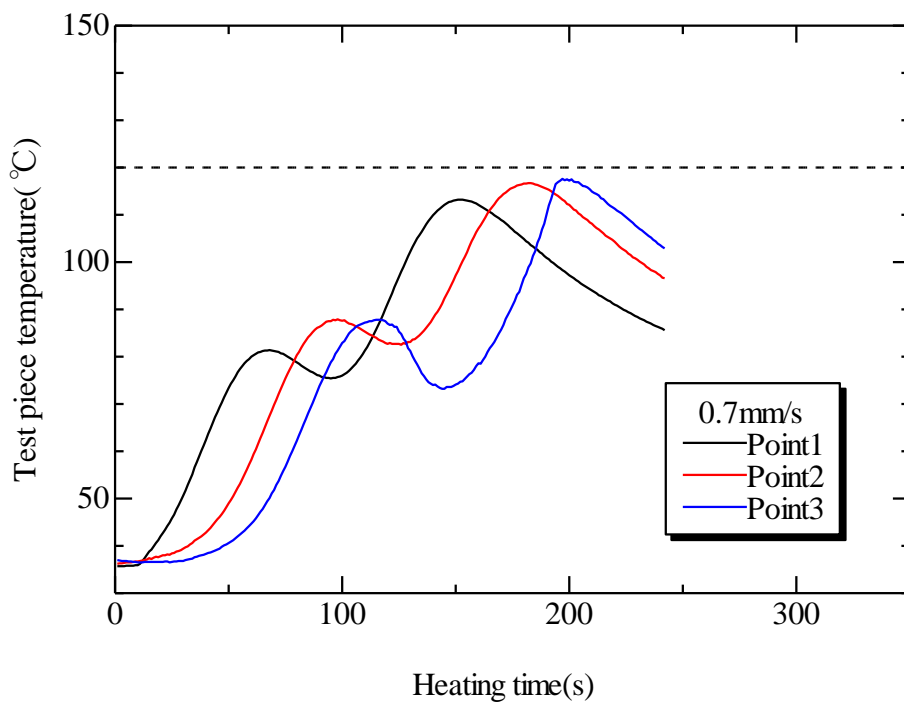


Fig.3.7 Temperature distribution when coil was moved at 0.7 mm/s

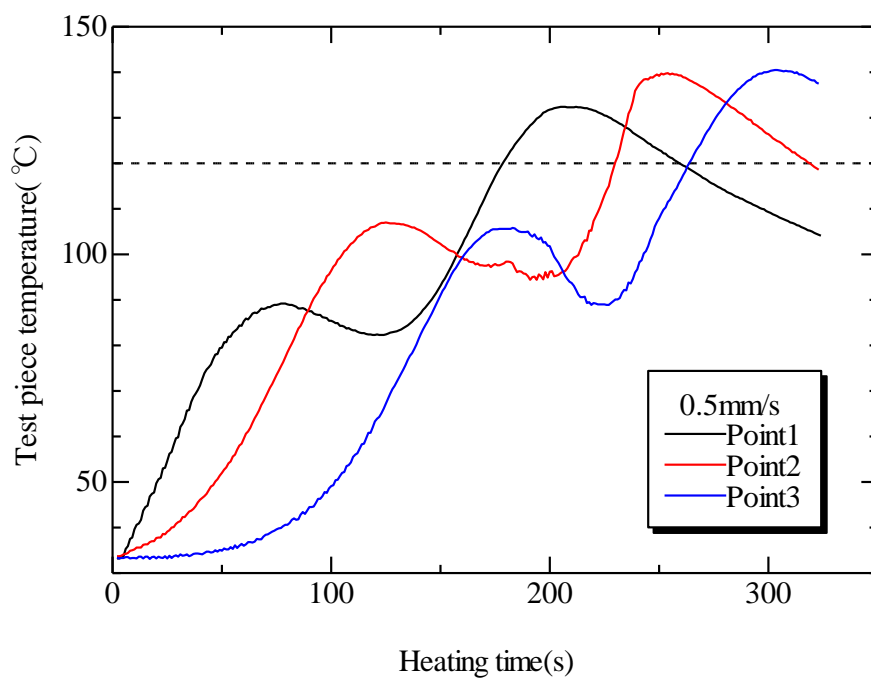


Fig.3.8 Temperature distribution when coil was moved at 0.5mm/s

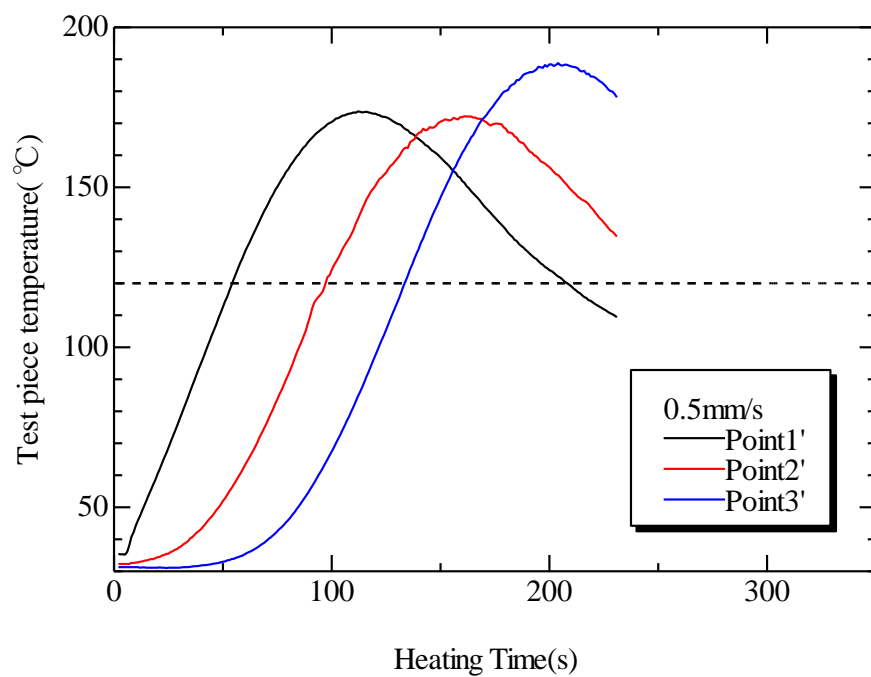


Fig.3.9 Temperature distribution on the high temperature point when coil was moved at 0.5 mm/s

## 第4章 炭素繊維強化複合材料の成型

本章では3.2項の結果より決定したコイルの移動速度で平面、および立体形状のCFRPの成型を行った。また、コイルの初期位置はコイル右端部を試験片右端部に合わせた位置とし、左方向へ移動させた。これは加熱装置の制御上、一対型コイルの中間層に加熱対象が存在しない場合、作動しないためである。

平面、立体形状ともに炭素繊維シートを5枚用い、その間に樹脂シートを3枚1組としたものを交互に重ね、この積層した試験片の最上面・最下面に円孔のない樹脂シートを積層したものを誘導加熱した。なお、この積層方法での繊維質量含有率は53.7 wt%となる。

### 4.1 平面形状の成型

#### 4.1.1 成型結果

図4.1に本研究で提案する方法で成型したCFRPであり、上図が型側、下図が真空バッグ側である。成型に要した時間は約5分であった。型に接している面は凹凸のないきれいな成型面が得られた。一方、真空バッグ側の試験片表面への加圧が弱いためか、樹脂シートの円孔による小さな凹凸が確認された。

3.3項で述べたように、図4.1に示す①試験片中心位置ではコイル巻線左側が通過し右側が通過し終えた位置から含浸しており、②試験片上側、下側では加熱速度が速いためより広範囲に含浸し、このような形状に含浸したと考えられる。加熱装置の都合上、試験片上を始点として成型した。120×240 mmの製品を成型する場合、コイルの幅の2倍だけ長い試験片を使用することで成型が可能になると考えられる。本研究では、120×240 mmの試験片を使用して120×240 mmの製品を作成するため、試験片の両端部でコイルを2分間停止させる制御を加え、成型を試みた。

図4.2に試験片両端部でコイルを2分間停止させ成型したCFRPの型側、真空バッグ側を示す。成型に要した時間は、約9分であった。図と比較すると、試験片両端を含み、良好な含浸結果を得ることができた。しかし、試験片左端部に楕円状の未含浸部が確認された。

#### 4.1.2 未含浸部に関する考察

試験片左端部に未含浸部が確認された際、コイルは右から左へ移動させ成型した。そこで、コイルの移動方向の影響を調査するため、左から右へ移動させ成型した。図 4.3 に製品を示す。未含浸部が試験片右端に確認できる。以上のことから、コイル移動の終点位置に未含浸部ができることがわかった。これは、始点と終点で温度履歴に差があるためと考えられる。

試験片両端部の未含浸部中央位置に熱電対を取り付け、移動方向の違いによる温度履歴への影響を調査した。実験結果を図 4.4, 4.5 に示す。コイルの始点、終点で温度履歴に差があることが確認できる。コイル終点部では、加熱過程の後、冷却過程が確認された。そのため、始点では 2 分で 120°C まで到達したが、終点は 2 分で 120°C まで加熱できなかったと考えられる。以上のことから、終点では 2 分以上停止するか、2 分停止後コイルを逆方向に移動させることで、未含浸部が抑制できると考えられる。

そこで、終点で 2 分停止させた後、さらに逆方向に 1 分間 0.5mm/s で移動させる制御を加え、成型を試みた。成型した製品を図 4.6 に示す。コイル終点部の未含浸部は改善され全体に良好な含浸が得られた。先の研究では、120×240 mm の製品を成型する場合、約 50 分必要であったが、一対型コイルを使用することにより約 10 分で同形状の製品を成型することが可能である。



Fig.4.1 Planer shaped C-FRP





Fig.4.2 C-FRP molded by starting from right



Fig.4.3 C-FRP molded by starting from left

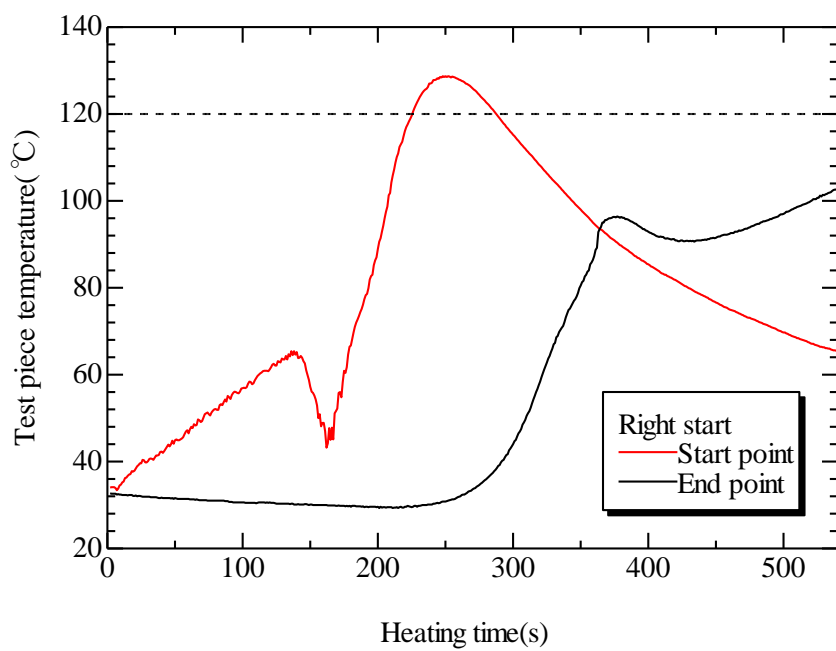


Fig.4.4 Temperature distribution when coil was moved from right

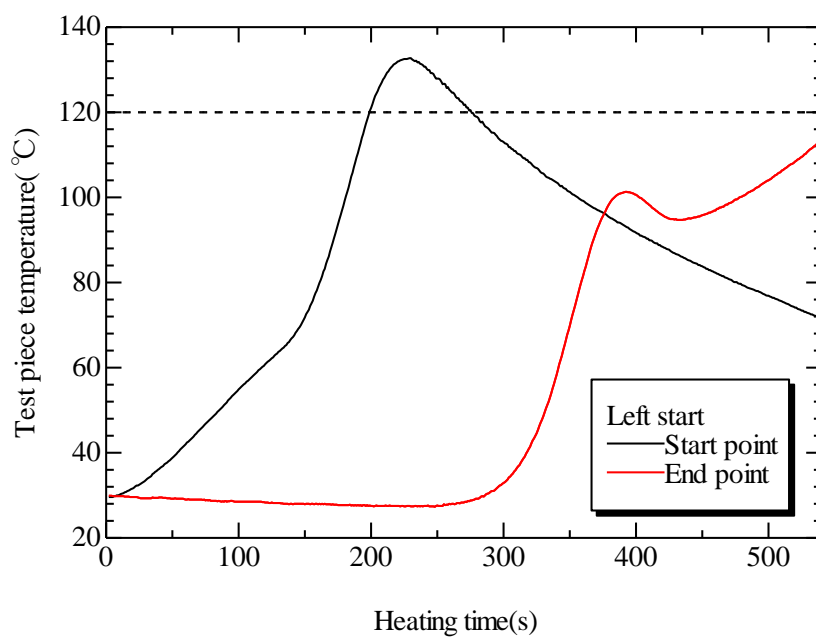


Fig.4.5 Temperature distribution when coil was moved from left



Fig.4.6 C-FRP molded by stopping for two minutes in a test piece both ends and moving one minute to the opposite direction

## 4.2 立体成型

本項では立体形状を持つ CFRP の成型を行った。誘導コイルの移動速度は 0.5 mm/s とし、試験片両端で 2 分間停止させた。また、誘導コイルは右から左へ移動させる。

本成型法では真空バッグを真空吸引することによって試験片を加圧するので、一般的な成型法のように上型・下型を必要とせず、どちらか一方の型を用いることで CFRP の成型が可能となる。そこで本研究では加工しやすく比較的安価な耐熱性ケミカルウッドを用いて凹凸のある成形型を作成し、CFRP の成型を行った。

### 4.2.1 浅溝型

図 4.7 に成型に用いた成形型を示す。幅 20mm、深さ 3mm の溝を 2 本設けた凹凸形状の型である。成型した製品を図 4.8 に示す。上図が型側、下図が真空バッグ側である。凹凸部を含めて樹脂の含浸は良好な結果が得られたが、平面形状同様、試験片左端に未含浸部が確認された。3mm の高低差を持つ製品でも成型可能であることが確認された。



Fig.4.7 mold which has two grooves



Fig.4.8 C-FRP molded by using mold which is showed Fig.4.7

#### 4.2.1 深溝型

図 4.9 に成型に用いた成形型を示す。幅 20mm、深さ 8mm の溝を設けた凹凸形状の型である。溝の深さを考慮し、深溝型では 140×240mm の炭素繊維シート、および樹脂シートを使用した。成型した製品を図 4.10 に示す。溝部が丸みを帯びた形状となり、角部を再現することができなかった。これは溝の深さに対して、溝幅が狭かったためであると考えられる。

そこで溝の深さを変えずに、溝幅を 70mm とし成型した。製品を図 4.11 に示す。真空バッグ側は良好な含浸結果が得られたが、型側は溝中央部に多くの未含浸部が確認された。さらに、型側溝角部では樹脂が繊維の隙間から染み出していることが確認された。これらの要因として、溝底まで十分に加圧されていなかったということが考えられる。本研究では、試験片上面から吸引されるように真空吸引口を設けた。凹型を使用する場合、型の凹部から吸引されるように真空吸引口を設置することで凹部が加圧されやすくなると考えられる。また近年ではポラス型を使用した研究が行われている<sup>3)</sup>。ポラス型とは、型として必要な剛性を有し樹脂は通過せず脱気可能なものである。この型を用いることでより加圧されやすくなると考えられる。十分加圧されていた点に関しては良好な含浸が得られたので、深さ 8mm の高低差を有している製品でも加熱可能であるということがわかった。

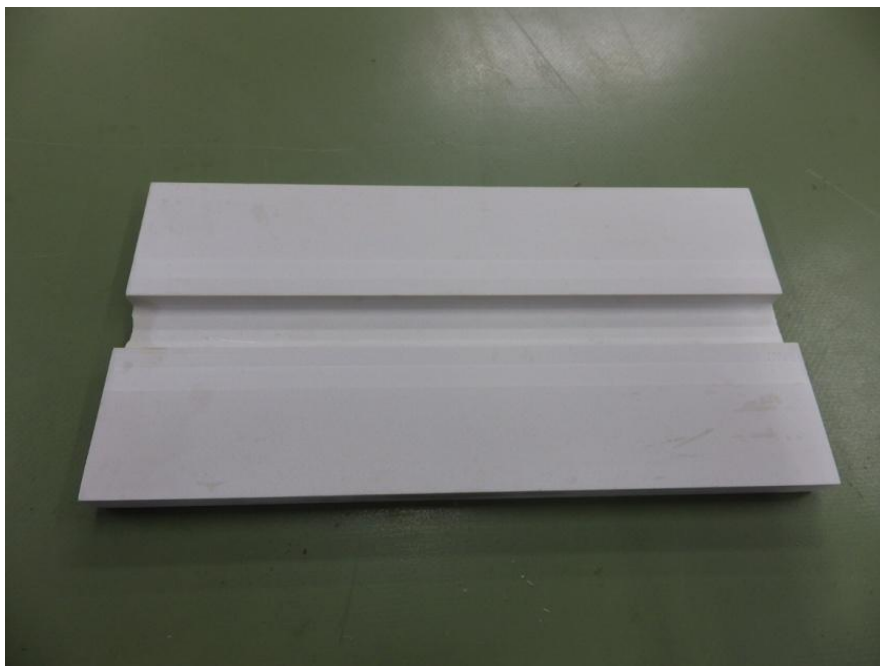


Fig.4.9 mold which has deep groove



Fig.4.10 C-FRP molded by using mold which is showed Fig.4.9



Fig.4.11 C-FRP molded by using mold which has wide width groove



#### 4.2.3 複雑な形状

図 4.12 に成型に使用した型を示す。90×200×3 mm の角丸長方形に削り出したもの(図の①)に深さ 2 mm の文字(図の②)を削ったプレート形状とした。また、文字の幅は 10 mm であり、底面の角部はすべて R1 とした。この成型では、未含浸部を抑制するために、4.1.2 項に示す、コイル終点で 2 分停止した後、1 分間逆方向に 0.5 mm/s 移動させる制御を加えた。成型した製品を図 4.13 に示す。パネル部平面は良好な含浸結果が得られたが、文字全体およびパネル角部に未含浸部が確認された。これは、深溝形状同様に十分な加圧がなされていなかったことに起因すると考えられる。しかし、図に示す赤丸位置は加圧されていたために樹脂が含浸していることが確認できた。加圧が十分なされていればこのように複雑な構造を持つ製品でも成型可能であるということが示唆された。

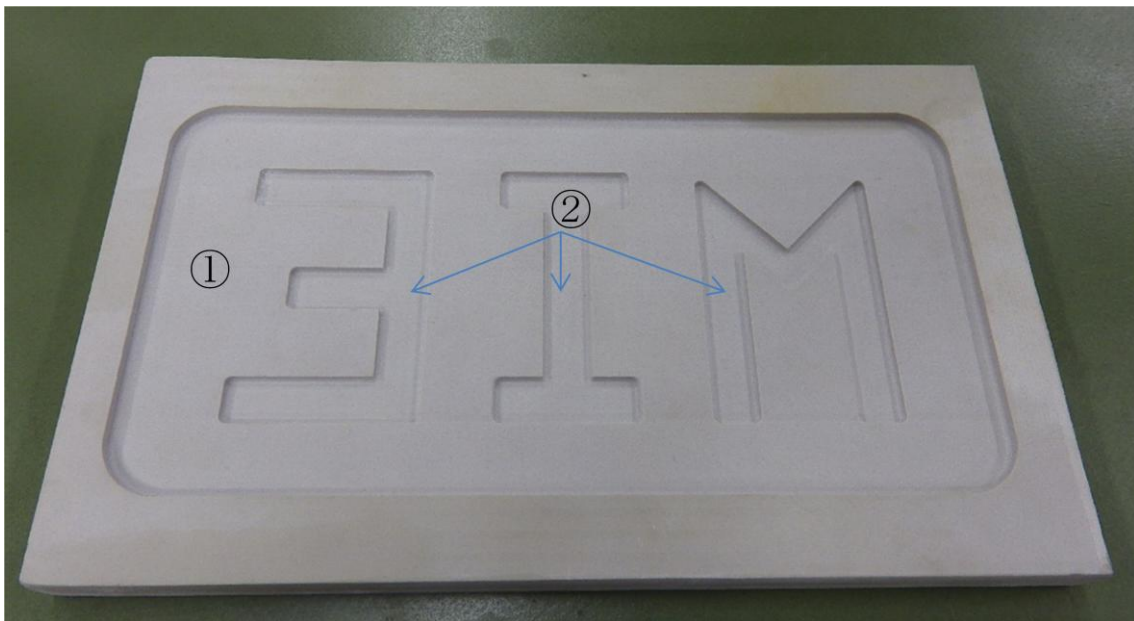


Fig.4.12 mold of name plate



Fig.4.13 C-FRP of name plate

## 第5章 結言

本研究ではギャップを設けて配置した一对の直列接続誘導コイルを使用し、炭素繊維シートと円孔を設けた熱可塑性樹脂シートを交互に積み重ねた試験片を真空吸引により加圧、電磁誘導により加熱する CFRP の成型方法を提案し、以下の知見を得た。

(1) 先の研究において、炭素繊維シートを最低でも 10 枚積層しなければ加熱できなかったが、炭素繊維に対し磁束を垂直に通過させることで炭素繊維を 5 枚積層したのもでも十分加熱されることがわかった。

(2) 一对型コイルは巻線中心部での発熱率が最も良く、約 2 分で 120°C に加熱可能であることがわかった。

(3) 120×240 mm の C-FRP は約 10 分で成型可能である。これは先の研究に比べ約 1/5 の時間短縮である。

(4) 5mm 程度の起伏を持つ CFRP は凹部が十分加圧されていなかったために、綺麗に成型することができなかった。しかし、加圧がなされていた位置では樹脂の含浸を確認することができたので、真空吸引口の位置決めや、型材の選定により成型が可能であるということが示唆された。

## 参考文献

- 1) 福田 博, 邊 吾一, 末益 博志: “新板 複合材料・技術総覧”, 社団法人 強化プラスチック協会 創立 55 周年記念, 日本複合材料学会 創立 35 周年記念, (2011), p.27, pp.75-89
- 2) 福田 博: “複合材料ハンドブック”, 日本複合材料学会, (2011), pp.35-39, pp.112-124, pp.303-307, pp.550-552
- 3) ポーラス型を用いた VaRTM 複合成形, 日本複合材料学会誌, (2013), p.31-35
- 4) 山下 満広, 坂川 亨, 武田 文人, 木俣 文雄, 子守 康裕: “MRJ 尾翼桁間構造適用に向けた A-VaRTM 技術開発”, 三菱重工技報 VOL.45 NO.4, (2008)
- 5) 松本 哲宣: “熱可塑性樹脂シートを用いた炭素繊維強化複合材料の高機能な成形方法の開発” 修士論文, 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 集積加工システム研究室, 平成 24 年度
- 6) R.J. Johnson, R.Pitchumani: “Flow control using localized induction heating in a VARTM process”, Composites Science and Technology 67, (2007), pp.669-684
- 7) 株式会社ベストテクノロジーホームページ: <http://www.besttechnology.co.jp/>
- 8) 浅草ギ研ホームページ: <http://www.robotsfx.com/>
- 9) 奥田 謙介: “炭素繊維と複合材料”, 共立出版株式会社, (1992), pp.1-6
- 10) 炭素繊維協会ホームページ: <http://www.carbonfiber.gr.jp/>
- 11) 東郷 敬一郎, 平子 豊, 石井 仁, “一方向 CFRP のスプリッティング破壊靱性に及ぼすマトリックス樹脂の影響”, 日本機械学会論文集 (A 編) 61 巻 585 号, (1995), pp.595-596
- 12) KDA 株式会社ホームページ: <http://www.kda1969.com/>

## 謝辞

初めに、多大な御協力、御助言を頂いた三重工熱株式会社の皆様に対し深く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、終始親切丁寧なる御指導を賜りました 牧 清二郎 教授に深く感謝致します。また、論文作成にあたり多大なる御助言を賜りました 中西 栄徳 助教、ならびに論文作成にあたり御査読いただきました 川上 博士 准教授に深く感謝致します。

さらに、実験を遂行するにあたり多くの御協力をいただきました 中川 浩希 技術職員ならびに集積加工システム研究室の皆様方に深く感謝致します。

最後に、幾多の御協力をいただきながら、ここに御氏名を掲載できなかった方々に対し、その失礼を御詫びすると共に、謹んで御礼申し上げます。