

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04166

研究課題名(和文)湾曲繊維配向を有するCFRPの含浸シミュレーション、および繊維配向解析法の確立

研究課題名(英文)Simulation of impregnation of CFRP with curved fiber orientation and establishment of fiber orientation analysis method

研究代表者

小山 昌志 (Koyama, Masashi)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：00453829

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において湾曲配向を考慮した構造体の設計、成形手法に関して実験的な検証において任意の繊維湾曲部を有する製織技術の確立を行った。加えて、成形時に重要となる樹脂含浸シミュレーション手法の確立に向けて、複数方向に繊維配向を有する織物において、解析モデルにて各所の繊維配向を考慮した浸透率を含浸パラメータとすることで実際の含浸挙動のシミュレーションが可能となることを示した。また、含浸時に生じる繊維配向の乱れの確認を機械特性および熱伝導特性の観点から明らかにすることで、シミュレーションによる含浸の妥当性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究から得られた結果より、学術的な意義としては、各所により繊維配向性の異なる繊維強化複合材料に対する含浸シミュレーションのパラメータに関する設定指針が明確になったといえる。また、複雑な構造、繊維配向を有するCFRPの成形時における最適な繊維配向性を考慮した製織技術の基礎および成形時において繊維配向を考慮した含浸方法の指針確立が可能となり、従来の成形技術では実現が困難と考えられていた構造体へのCFRP適用の可能性が拡大し社会的に大きな意義を有することが示された。

研究成果の概要(英文)：In this research, a weaving technology with an arbitrary fiber curved part by experimentally verifying the design of the structure considering the curved orientation and the molding method was established. Moreover, in order to establish a simulation method for resin impregnation, which is important for molding, fabrics with fiber orientation in multiple directions was investigated. As a result, the possibility to simulate the actual impregnation behavior was shown by using the impregnation parameter as the impregnation rate that takes into account the fiber orientation at each location in the analytical model. In addition, the validity of impregnation by simulation was demonstrated by clarifying the confirmation of the disturbance of fiber orientation during impregnation from the viewpoint of mechanical properties and thermal conductivity properties.

研究分野：複合材料

キーワード：CFRP 樹脂含浸 含浸シミュレーション 成形技術

1 . 研究開始当初の背景

申請者らは過去の研究において R, θ , Z の三次元方向に炭素繊維を配向する三次元強化複合材料により, 上記課題を克服し 1500m/sec の高速回転が可能であるという成果を示したが, 応力解析手法および製織技術の観点から直線的な繊維配向による検討にとどまり, これは材料設計が可能であるという複合材料の設計とはかけ離れた検討であるといえる . [1,2]

従来の複合材料の設計においては, 構造における発生応力に対して任意の湾曲部自由度を持たせる最適な繊維配向を考慮した理論的な設計手法が学術的な問いとしていまだ残っている . 加えて, 繊維を連続的に製織する手法として, 直線的な製織技術のみが確立されており, 織物構造の途中で任意の湾曲部を付与することが可能な製織技術が存在しないという課題を抱えていることも理由としてあげられる . また, CFRP の成形において炭素繊維に対しての樹脂の含浸挙動, および含浸時に生じる繊維配向の乱れに関しては種々の検討が行われているが, 樹脂の浸透係数が繊維と樹脂の種類や, 繊維の配向状態によって異なり, 含浸のシミュレーションに関しても不明瞭な状態であるという課題が残っている . 特に, 本研究のように炭素繊維が湾曲部などの複雑な繊維配向を有した場合の樹脂含浸に関しては学術的にも検討がほとんど存在しない .

2 . 研究の目的

本研究では周速 2000m/sec の高速回転を可能とする CFRP 製フライホイールにおいて発生応力を考慮にいたった設計の成形を実現可能とする製織技術, および, 複雑な繊維配向性を有する繊維織物に対して適用可能な樹脂含浸シミュレーション, 含浸後の繊維配向性を明確にする CFRP 成形技術の確立を目的とした . 本来, 三次元構造や二次元でも切り欠き周りの補強等, 多くの構造に必要な技術分野であるのにもかかわらず, 炭素繊維の弾性率が高いことで湾曲部の作製が困難であるため, 構造中に繊維が湾曲部を持つ複合材料の最適設計技術が世の中でも過去にほとんど検討がないためである . そこで, 炭素繊維を強化材とし, 任意の繊維配向を持たせた織物の製織技術に踏み込み, 製織を可能にする技術を確認することに加え, 複雑な繊維配向を有する炭素繊維織物に対する樹脂の含浸挙動を明確にする含浸パラメータはいまだ明らかになっておらず, 含浸時のリアルモニタリングと共に樹脂流動解析により含浸挙動の定量的な解明を行うことを目的とした .

3 . 研究の方法

(1) R 方向繊維の曲がりを考慮した製織技術の確立

本項では θ 方向応力および R 方向応力を広範囲にわたって材料特性に近づけることで繊維強度と繊維配向分布の関係性を解析的に算出し, 繊維湾曲箇所決定および湾曲角度の決定を行い, および湾曲部を有する R 方向繊維の 2 方向繊維配向を有する 2D-CF 織物の製織試作および検証を実施した .

(2) 樹脂含浸シミュレーション技術の確立

複雑な繊維配向性を有する繊維織物は CFRP 成形時の樹脂含浸工程で樹脂の充填が困難であり, 成形時に樹脂の未充填部が空孔として残留し, 円板構造における全体のバランスの不均一性を引き起こすとともに, 機械的特性の低下を招く . その解明に向けて, CFRP 成形において, 織物に樹脂を含浸, 硬化させる工程での繊維の配向状態と樹脂の含浸状態の関係をデジタルマイクロスコープによる可視画像, および赤外線サーモグラフィによる温度画像を用いてリアルタイムで実験的に含浸挙動の解析を定量的に行うとともに, いまだ未解明な含浸係数などの樹脂含浸パラメータを定量的に調査し, 樹脂含浸シミュレーション手法の確立を行った .

(3) 成形体の繊維乱れの確認に向けた機械特性評価による検証

CFRP は樹脂含浸時に樹脂の流動特性により, 製織時と比べ繊維配向の変化, 乱れ等が起こりうる . この成形時の繊維配向性の変化は材料の機械特性に大きく影響を及ぼす . そこで, 成形体に対して, リングバースト試験等の機械特性評価を実施し, 材料の繊維配向性, 樹脂含浸状態などの成形性を, 複合則による理論計算から算出される剛性, 強度と, 成形体の特性比較により定量的に評価した .

4 . 研究成果

(1) R 方向繊維の曲がりを考慮した製織技術の確立

従来の半径方向に配置した系 (以下, R 方向系) と円周方向に配置した系 (以下, θ 方向系) にて構成された織物について, 発生応力に対して R 方向系を所定の位置で任意の角度

に変化可能な製織技術について検討した。試織は、一般的な平織の様に θ 方向糸と R 方向糸が一本ずつ交互に交錯する織物組織にて実施した。また炭素繊維は、R 方向糸は 48K (東レ製 T700), θ 方向糸は 3K (東レ製 T300) を使用し、糸密度は、R 方向糸は 21 本/周、 θ 方向糸は 23 本/cm の織物条件にて製織試験を行った。

使用した自動織機 (関東機料(株)製 KCDM-721) の外観を図 1 に示す。織機の中心部より一般的な織物構造の経糸と同様に、一定間隔に放射線状に R 方向糸を配置し、この糸を織物組織に応じて開口した状態で、円盤形織機用糸供給装置 (図 2) にて θ 方向に糸を供給し円盤型に製織した。

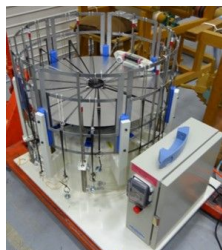


図 1 円盤型織物自動織機



図 2 θ 方向の糸供給装置

構造物に発生する応力に対して、R 方向糸の最適な繊維配向を考慮した織物設計を実施した。この構造物の実現に向け、R 方向糸を任意の位置や角度にて湾曲を付与することが可能な連続製織技術についての検討を行った。

R 方向糸を湾曲させた状態で連続製織を実施するため、金属製の支柱を設置可能な湾曲形成用治具を作製した。この治具は R 方向糸に任意の湾曲部自由度を持たせるため、箇所や角度に応じて任意の位置に支柱の設置を可能とする設計とした。本ジグの設計において炭素繊維が有する高い弾性率を考慮し、湾曲時に発生する反発力に対して十分に耐えうる支柱太さを算出し設計へ反映させた。円盤の外径 100mm、湾曲角度 45° 、湾曲は円盤の中心より外径に向かい 2 段階にて実施。1 段階目は中心より約 30mm、2 段階目は中心より 60mm の箇所にて実施した。R 方向糸を 45° に湾曲させた試織品の湾曲状態を確認するため、マルチスケール X 線 CT 装置 (Bruker 製 SkyScan 2211) にて透視検査を実施した。撮影した画像を図 4 に示す。専用ソフトには Bruker 製 CT An を使用し、R 方向糸の湾曲位置及び角度を解析したところ、概ね任意に設計した位置や角度での湾曲が可能であることが示された。

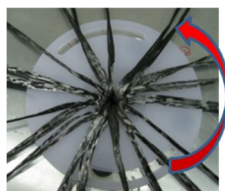


図 3 湾曲繊維製織用ジグ

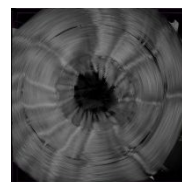


図 4 透視検査撮影画像

(2) 樹脂含浸シミュレーション技術の確立の結果

炭素繊維における樹脂含浸実験から解析パラメータの一つである浸透率の算出を行い、その浸透率を用いた樹脂流動解析と実験の比較から流動解析の妥当性の検証を行った。Darcy 則は多孔質体へ液体が含浸する際の浸透率を求める経験則であり、式(1)により表される。

$$k = \frac{\phi \mu x^2}{2Pt} \quad (1)$$

ここでの k は浸透率、 μ は粘度、 P は射出圧力、 x は含浸距離、 t は含浸時間、 ϕ は空隙率である。Darcy 測による浸透率の算出には、繊維基材に対して樹脂が含浸する際の含浸距離と含浸時間が必要である。そのため、VaRTM 法における樹脂含浸実験を行い、含浸距離と含浸時間を測定した。樹脂にはエポキシ樹脂の代替品として水あめ(粘度 $1.11\text{Pa}\cdot\text{s}$)を使用し、繊維基材は、縦 100mm、横 200mm の一方向炭素繊維を 4 枚積層、縦 100mm、横 200mm の平織の炭素繊維織物を 8 枚積層した 2 種類を用いた。また、一方向炭素繊維は樹脂の含浸方向を繊維軸方向とし、樹脂の含浸方向に対して繊維を垂直に配置した際を垂直方向、水平に配置した際を並行方向とし 2 方向で実験を行った。本実験において含浸距離が 190mm に到達した時間を含浸完了時間とし、含浸距離 10mm 間隔での含浸時間を計測し、式(1)に示した Darcy 則に代入し浸透率を算出した。この時、算出した浸透率をそれぞれ k 、 $k_{//}$ 、 k_{cross} とした。また得られた浸透率を用い、解析ソフトとして Moldex3D を使用し、平板モデルにおける樹脂流動解析を行った。解析モデルを図 5 に示す。Fig. 2 において繊維垂直方向、水平

方向どちらも樹脂の含浸方向には実験により得られた浸透率を設定し，含浸方向に対して垂直の方向には，お互いのもう一方の実験で得られた浸透率を設定した．樹脂含浸実験から得られた含浸距離と含浸時間を式(1)に代入し浸透率を算出した結果，浸透率は $k_{\perp}=2.50\times 10^{11}\text{m}^2$ ， $k_{//}=2.85\times 10^{11}\text{m}^2$ ， $k_{\text{cross}}=2.22\times 10^{11}\text{m}^2$ と算出された．この浸透率を用いて流動解析を行い，それぞれの繊維ごとの実験と解析で得られた含浸距離と含浸時間のグラフを作成し，実験結果と解析結果の比較を行った．それぞれの繊維の実験結果と解析結果のグラフを図6に示す．図6より，一方向繊維と平織の炭素繊維織物の実験結果と解析結果は概ね同じ値を示すことが確認された．これらの結果から Darcy 則により算出した浸透率を導入した流動解析結果と実験結果が概ね同じ値を示したことから流動解析の妥当性が確認された．

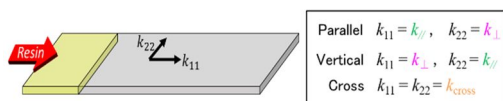


図5 流動解析モデル

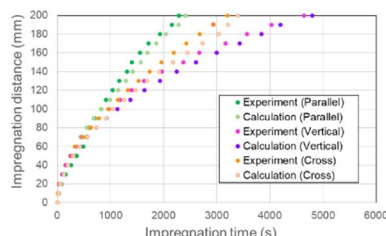


図6 含浸距離-時間の結果

また，FEM による応力解析により，樹脂流動時の樹脂流入圧力および，樹脂流動時に発生するせん断応力が繊維の配向性（繊維乱れ）に及ぼす影響を確認した結果，繊維乱れの主要因は樹脂流入圧力（0.1MPa）であることが明らかとなった．そのことから，前述の樹脂流動解析手法を基に，円板型繊維織物の繊維配向性への樹脂流入圧力の影響の低減を目的とした樹脂流動経路の考案を行った．その一案として樹脂含浸用ジグにおいて樹脂流入後の樹脂流動経路として渦状の溝を付与する方法について，解析および樹脂流動試験を実施した．RhinoCeros を用いて解析モデルを作成し，前述と同様に解析ソフト Moldex3D を使用して流動解析を行った．また，円盤状の繊維織物モデルは，周方向と半径方向の2方向に繊維を配向した炭素繊維織物を模擬し，周方向のみに繊維を配向した箇所と周方向と半径方向に繊維を配向した箇所にそれぞれ別の浸透率を設定した．解析条件は導入圧力 0.1MPa で一定，樹脂の粘度を $1.11\text{Pa}\cdot\text{s}$ とし，浸透率は周方向のみに繊維を配向した箇所に $k_{//}$ ，周方向と半径方向に繊維を配向した箇所に k_{cross} の浸透率を導入した．渦状の流動経路モデルに対する流動解析の結果を図7に示す．図7より全体への流入圧力抑制が確認された．円盤モデルに流動経路を加えたモデルの流動解析の結果を図8(a)，(b)に示す．図8(a)に示すように円盤全体の樹脂含浸が確認され，図8(b)では円盤の部分的な圧力抑制が確認された．これは図7の流動経路の解析結果と同様に経路内を樹脂の圧力損失が生じ，繊維が受ける圧力も低下したと示唆された．また，流動経路を用いることにより，圧力が集中する箇所を無くし円盤全体に圧力がかかっていることも確認された．そのため，繊維にかかる圧力の集中も避けられたといえる．これらの結果より，円盤作製の際に渦状の流動経路を用いて樹脂の含浸を行うことにより円盤成形時に繊維にかかる圧力の集中を避け，円盤全体への樹脂含浸が実現出来ることが明らかになった．

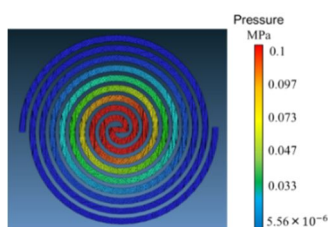
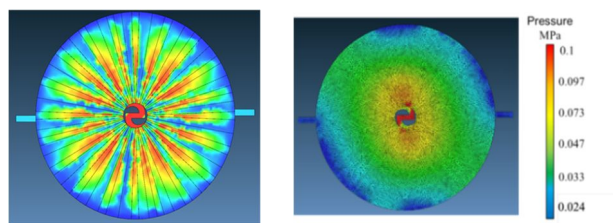


図7 樹脂含浸時の圧力解析結果



(a) 樹脂含浸解析結果 (b) 圧力分布

図8 含浸解析の結果

(3) 繊維乱れの機械特性への影響及び渦状樹脂流入経路による繊維乱れ抑制の検証

繊維乱れはCFRPの強度に影響を及ぼす．[3]しかし，検討しているCFRP製円盤は，半径方向と周方向に繊維を配向させた極めて特殊な仕様のCFRP製品となっているため，繊維乱れの有無が円盤の機械特性に与える影響は明確にされていない．そのため，繊維乱れがCFRP製円盤の機械特性に及ぼす影響を確認する必要がある．CFRP製円盤の機械特性評価

として、リングバースト試験を実施した。試験片は、周方向にのみ繊維を配向させた UD-CFRP リングの繊維乱れを有したものと繊維乱れを抑制したリング、周方向と半径方向に繊維を配向させた 2D-CFRP のリングの 3 種類を用いて行った。試験片の寸法は、いずれの試験片も内径 61mm、外径 67mm、厚さ 3mm にとし、繊維乱れを有している UD-CFRP リングを Ring A、繊維乱れを抑制した UD-CFRP リングを Ring B、2D-CFRP リングを Ring C とした。ひずみの計測には、ひずみゲージ (KFRPB-2-120-C1-1, KYOWA) を用いた。また加えて、前述の渦状樹脂流動経路を用いて作製した円盤成形体に対しても同様の試験を行い、繊維乱れの発生についての確認を行った。

リングバースト試験の結果を図 9 (a), (b), (c) に示す。また図中に弾性率の理論値を併記した。Ring A の結果では、測定箇所により弾性率が異なることが確認された。また、Strain 1 のひずみゲージで測定したひずみを用いて算出した弾性率は理論値と比較して約 60% 低いことが確認された。Ring B の結果では試験より算出した弾性率と理論値が概ね同じ値となった。Ring C でも Ring A と同様に測定箇所により弾性率が異なることが確認された。また、Strain 1 のひずみゲージで測定したひずみを用いて算出した弾性率は理論値と比較して約 40% 低いことが確認された。これらの結果より、繊維乱れは CFRP 製円盤の弾性率に影響を及ぼすことが確認された。渦状樹脂流動経路を用いて成形をした円盤型成形体に対するリングバースト試験の結果を図 10 に示す。本円盤型成形体において成形後の円盤は、円盤状の繊維織物全体に樹脂が含浸し、円盤の表面には繊維乱れは確認されなかった。これは、渦状の流動経路を用いることにより、円盤成形時に繊維にかかる部分的な圧力の集中が抑制されたため、目視レベルの観察においては繊維乱れが抑制されたと示唆された。図 10 より、円盤の 4 方の測定箇所による弾性率の違いは確認されなかった。加えて試験より得られたデータを基に算出した弾性率と理論値が概ね同じ値となった。すなわち、本成形体において、繊維配向の大きな乱れはなく、この結果より、渦状の溝を掘った成形型を用いることにより、繊維乱れを抑制した CFRP 製円盤を作製が可能であることが示された。

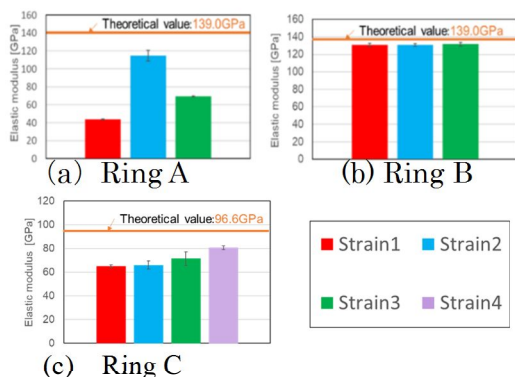


図 9 リングバースト試験結果

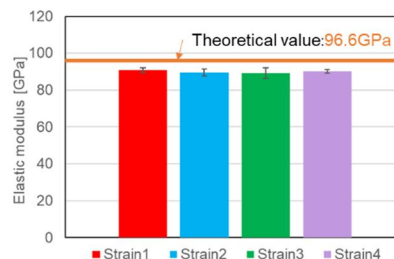


図 10 渦状流動経路成形体の結果

(4) 結言

本研究では、構造体の使用条件に応じて発生する応力状態を考慮した任意の繊維配向を有する繊維強化複合材料の成形技術のなかでも重要な製織、成形において製織技術の確立および成形時の樹脂含浸のシミュレーション手法の確立に向けて検証を行った。その結果、繊維の弾性率を考慮した引張力を有した糸供給装置と共に R 方向の湾曲を可能とする一案を確立した。

流動解析においては、Darcy 則により算出した浸透率を導入した流動解析結果と実験結果が概ね同じ値を示したことから流動解析の妥当性が確認された。本流動解析を用いて繊維織物への流入圧力の抑制を考慮した渦状樹脂流動経路を導入した樹脂含浸により繊維乱れの抑制可能な樹脂含浸が可能であることを示した。機械特性の評価により得られた結果からも繊維乱れの抑制が可能であることが示された。これらの結果から、任意の繊維配向性を有する炭素繊維織物に対する樹脂含浸シミュレーションにおける樹脂流入プロセスの指針が可能となることが示され、学術的、工学的にも重要な成果が挙げられた。

参考文献

- [1] N. Hiroshima, H. Hatta, M. Koyama, K. Goto, Y. Kogo, Spin test of three-dimensional composite rotor for flywheel energy storage system, *Compos. Structures*, 136 (2016) 626-634
- [2] N. Hiroshima, H. Hatta, M. Koyama, K. Goto, Y. Kogo, Optimization of flywheel rotor made of three-dimensional composites, *Compos. Structures*, 131 (2015) 304-311.
- [3] N.M. Hsiao, I.M. Daniel, Effect of fiber Waviness on stiffness and strength reduction of unidirectional composites under compressive loading, *Composites Science and Technology*, Volume 56, Issue 5, 1996, 581-593

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐野寛、小山昌志、窪寺健吾
2. 発表標題 次元炭素繊維強化プラスチック製フライホイール作製に向けた樹脂流動解析
3. 学会等名 日本設計工学会 2021年度春季大会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野寛、小山昌志、窪寺健吾
2. 発表標題 CFRP製フライホイール成形に向けた一方向炭素繊維の含浸特性調査
3. 学会等名 日本設計工学会 2021年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須崎亮太、小山昌志
2. 発表標題 VaRTM成形法における母材樹脂の流動解析の基礎検討
3. 学会等名 第13回 大学コンソーシアム 八王子学生発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野寺潤、小山昌志、窪寺健吾、黒田茂男
2. 発表標題 3次元繊維強化フライホイール構造実現に向けての検討
3. 学会等名 2020年繊維学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺潤、小山昌志、窪寺健吾、黒田茂男
2. 発表標題 3次元繊維強化プラスチック製フライホイールの繊維配向設計および成形検討
3. 学会等名 日本設計工学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	武田 浩司 (Takeda Koji) (20560163)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・技術支援本部多摩テクノプラザ複合素材技術グループ・副主任研究員 (82670)	
研究分担者	窪寺 健吾 (Kubodera Kengo) (40463004)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・技術支援本部多摩テクノプラザ複合素材技術グループ・主任研究員 (82670)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------