

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 2 年 5 月 1 9 日現在

機関番号： 1 7 7 0 1

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2017 ~ 2019

課題番号： 1 7 K 1 4 5 7 3

研究課題名 (和文) in-situ加熱成形がCFRPの機械的特性に及ぼす影響

研究課題名 (英文) Effect of in-situ heating method on mechanical properties of CFRP

研究代表者

田淵 大介 (Tabuchi, Daisuke)

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号： 1 0 6 3 3 2 8 2

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) : FW法を用いたCFRPの成形において、in-situ加熱成形でのプロセス因子 (繊維張力、積層速度および加熱温度) がCFRPの残留応力と強度に及ぼす影響を評価した。繊維層の変形と加熱硬化および冷却による変形を表現するFW成形モデルを用いて作成したプログラムにより、繊維応力の計算を行った。また、円筒形状試験体の製作と、製作した試験体を用いたNOL引張試験による引張強度試験および残留応力測定を行った。in-situ加熱成形では残留応力が低減することが明らかとなり、繊維張力が大きい場合においては強度向上につながる可能性を見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FW法を用いたCFRPの成形において、in-situ加熱成形でのプロセス因子 (繊維張力、積層速度および加熱温度) がCFRPの残留応力と強度に及ぼす影響を明らかにした。世界中で省エネルギー化が求められており、今後産業界において製品の軽量化や高強度化のためにCFRPの適用が増加することが見込まれることから、今回その製造パラメータが機械的特性に及ぼす影響の一端を示したことで、CFRPの適用を検討する際の一助となると考えられる。

研究成果の概要 (英文) : In CFRP manufacturing using the FW method, the effects of process factors (fiber tension, laminating speed and heating temperature) with in-situ heating method on the residual stress and strength of CFRP were evaluated. The fiber stress was calculated by a program using the FW lamination model that expresses the deformation of the fiber layer and the deformation due to heat hardening and cooling. In addition, a tensile strength test and residual stress measurement were performed, using cylindrical test pieces manufactured by FW method. It was found that the application of in-situ heating method reduces the residual stress and may improve the strength when the fiber tension is high.

研究分野： 生産工学・加工学

キーワード： CFRP Filament Winding Residual stress Tensile stress

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

1．研究開始当初の背景

近年、地球温暖化や石油資源の枯渇などのエネルギーおよび環境の問題から、次世代のエネルギーインフラとして水素エネルギーが注目されている．その技術基盤の開発が現在活発に行われているが、まだ解決すべき課題も多い．それらの課題の一つが水素の貯蔵方法であり、現在高圧水素を貯蔵するための CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 複合圧力容器の開発が国内外で進んでいる．

これらの CFRP 複合圧力容器の製造に用いられるのが FW(Filament Winding)法と呼ばれる成形法である．これは熱硬化性の樹脂を含浸させた炭素繊維をライナと呼ばれる型に巻き付け、CFRP を硬化させて成形する方法である．

この方法については、製造条件による成形品の特性の評価がなされてきた．しかし近年は水素蓄圧器に代表されるように大型かつ肉厚の製品への適用が増え、積層厚さが増大することで積層時の繊維張力により内径側の繊維層によれやしわが生じ、機械的特性が低下するという問題がおきるようになった．

このような課題に対し、繊維よれを低減する方法として、応募者らは FW 法による積層と同時に樹脂の硬化を行う in-situ 加熱成形法を CFRP 複合圧力容器に適用することを提案してきたが、この方法を用いた際、強度が向上する場合と低下する場合があることがわかってきた．

in-situ 加熱成形法においては積層中に樹脂マトリクスが加熱されるが、積層速度に対し硬化反応が遅いと従来の FW 法と同様に積層中の繊維よれが発生すると考えられる．逆に硬化反応が早い場合には、余分な樹脂が繊維層間で硬化して樹脂リッチ層を形成すると考えられ、複合材料としての特性は低下することが予想される．

したがって、in-situ 加熱成形法の効果を十分に発揮するには、積層時の繊維と樹脂の挙動を明らかにすることにより、繊維よれの発生を回避することが必要である．すなわち、製造中の繊維方向応力の変化を推定できれば、プロセス因子（繊維張力、積層速度および加熱温度）の制御により、CFRP 中の繊維の状態（繊維よれ）を抑制できる、と考えた．以上の着想により、本研究を遂行した．

2．研究の目的

FW 法を用いた CFRP の成形において、in-situ 加熱成形でのプロセス因子が CFRP の機械的特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている．成形時パラメータとして特に重要と思われる、繊維張力、積層速度および加熱温度が CFRP の残留応力と強度に及ぼす影響を評価した．

3．研究の方法

(1) FW モデルによる製造時応力の推定

FW による製造の際に発生する応力を推定するため、Springer et al.の提案したモデル^[1]をもとに、樹脂流動と繊維層の弾性変形および熱変形を考慮したモデルによる残留応力の計算プログラムの作成を行った．作成したプログラムを用いて成形時パラメータ（表 1）による残留応力への影響を評価した．

表 1 計算に用いた成形時パラメータ

	Conventional	110C-C	110C-Int15	110C-Int40
積層時温度 °C	25	110		
積層インターバル min	0	0	15	40
積層構成（層数）	[90] ₆ （3 層）, [90] ₈ （4 層）			
繊維張力 N	40			

(2) 残留応力測定実験

FW モデルにより求めた残留応力の計算値を検証するため、表 2 に示す条件で試験片（図 1）を製作し、試験片の外周から積層 CFRP を徐々に切削して応力を解放し、その際のライナひずみの変化を測定することにより残留応力の測定を行い、残留応力を求めた．

表 2 残留応力測定実験に用いた試験片の成形時パラメータ

	Conventional	110C-C
積層時温度 °C	25	110
積層インターバル min	0	0
積層構成（層数）	[90] ₈ （4 層）	
繊維張力 N	40	

(3) NOL リング試験

成形時パラメータが強度に及ぼす影響を評価するため、表 3 に示す条件で試験片（図 1）の製作を行い、NOL リング試験による引張強度試験（図 2）を行った。評価は実験結果を理論強度で除した強度発現率を用いて行った。

表 3 NOL リング試験に用いた試験片の成形時パラメータ

	Conventional	110C-C	110C-Int15	110C-Int40
強化繊維	Toray®T800SC-24K ($\sigma_B=6047\text{MPa}$, $E=295\text{GPa}$)			
母材	エポキシ樹脂			
積層時温度 $^{\circ}\text{C}$	25	110		
積層インターバル min	0	0	15	40
積層構成（層数）	[90] ₆ （3 層）			
繊維張力 N	5, 20, 40			40
積層ピッチ mm	3			

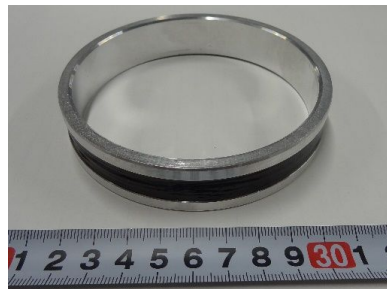


図 1 リング試験片

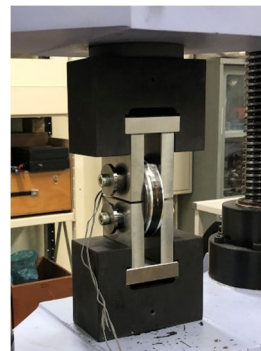


図 2 NOL リング試験

4. 研究成果

(1)FW モデルによる残留応力の推定

作成したプログラムを用いて積層時の繊維応力の計算を行った結果の一例を図 3 に示す。ここで層数はライナ側から半径方向へ Layer1, Layer2, ... と数えることとする。どの条件においても樹脂流動を考慮しない場合では巻き付け繊維張力による積層済み繊維の繊維方向の応力低下の幅は小さく、残留応力だけでは実際の強度低下を説明できないことがわかった。また、樹脂流動を考慮した場合では巻き付け繊維張力による積層済み繊維の繊維方向の応力低下の幅は比較的大きくなり、1 層目では 2 層目の積層時に一時的に応力が負となるが、上層の樹脂透過により応力は再度正の値をとる。これはいずれの条件においても同様で、樹脂が硬化するタイミングで繊維応力が負となる状態にはならないことがわかった。また、繊維体積分率を変化させて解析を行ったところ、樹脂流動を考慮した場合の最終的な残留応力には積層直後の繊維体積分率が大きく影響することがわかった。

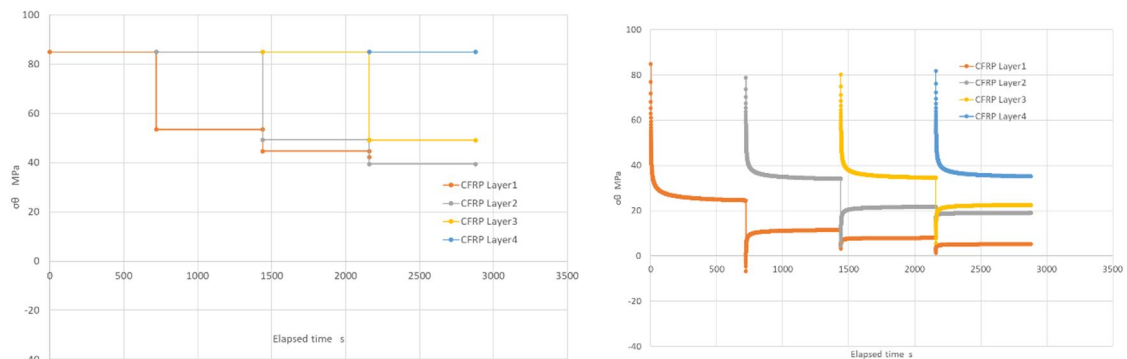


図 3 積層中の繊維方向応力の変化（110C-Int15 左：樹脂流動なし，右：樹脂流動あり）

実験での製造パラメータを用いて従来法と in-situ 加熱成形法での残留応力の比較を行った結果を図 4 に示す。in-situ 加熱成形においては CFRP の残留応力が従来法と比較して小さくなることがわかった。

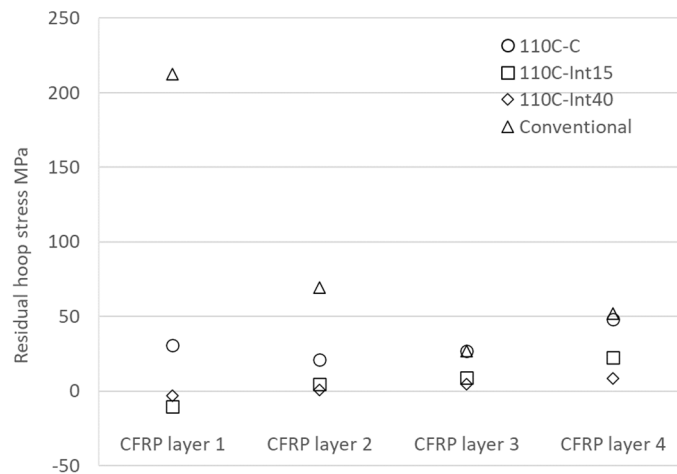


図 4 成形時パラメータによる周方向残留応力の計算結果の比較

また、繊維層での樹脂の流動測定においては、繊維に直角な方向への樹脂流動について、樹脂圧力と流速の関連を評価した。その結果、図 5 に示すように、積層時の繊維束の幅、すなわち繊維束密度が透過率に大きな影響を及ぼすことが明らかとなり、積層時の繊維幅の制御が重要であることがわかった。

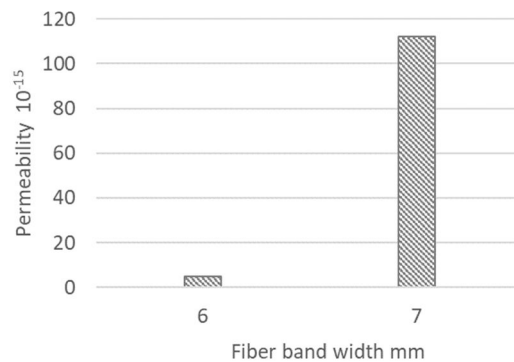


図 5 繊維幅と透過率の関係 (Toray T700SC-24K)

(2) 残留応力測定実験

実験によって求められた各層の残留応力分布と、FW モデルによる計算結果の比較を図 6 に示す。従来法 (Conventional) の条件においては比較的良好な一致が得られたことから、樹脂粘度が高い、すなわち樹脂流動を無視しうる条件においては計算結果は妥当であるといえる。一方、in-situ 加熱成形 (110C-C) の条件においては計算値よりも実験値が小さい結果となった。特に最外層における残留応力が小さくなったことから、実際には積層直後の樹脂透過による応力緩和が大きいものと考えられる。従来法と in-situ 加熱成形の実験結果を比較すると、in-situ 加熱成形においては CFRP の残留応力が従来法と比較して小さくなることがわかった。

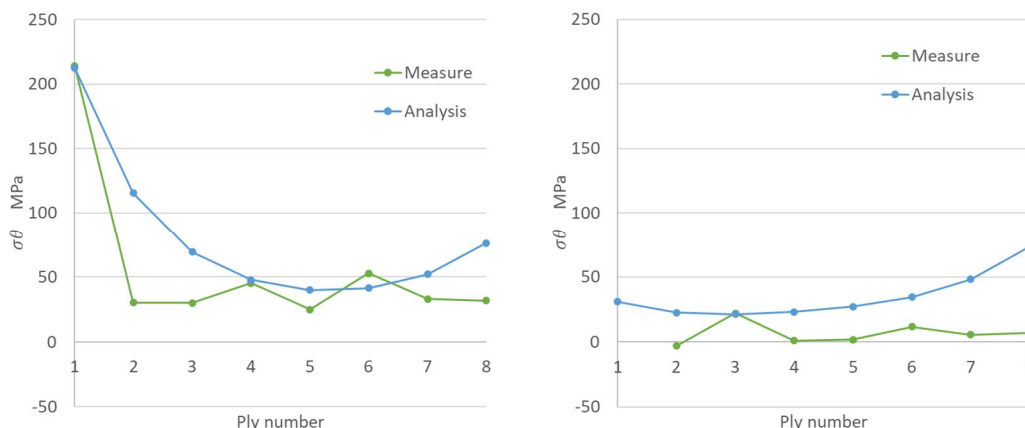


図 6 微少切削による残留応力測定の結果と FW モデルによる計算結果の比較 (左: 従来法 (Conventional) 右: in-situ 加熱成形 (110C-C))

(3) NOL 引張試験

NOL リングによる引張試験の結果を図 7 に示す。従来法と in-situ 加熱成形法の両方で、繊維張力が大きいほど強度発現率も大きくなった。また、従来法と比較して in-situ 加熱成形法では繊維張力が小さい場合の強度が低下し、そのばらつきも大きくなることがわかった。なお、110-C の繊維張力 20N の結果のみ強度が大きいですが、試験数が不足しているため、この結果については今後追加で実験を行う予定である。

積層インターバルが 15min の条件 (110C-Int15) では、繊維張力が 40N の場合において強度が他のどの条件よりも大きくなった。今回用いたマトリクス樹脂の硬化時間は 110 においておよそ 24 分であり、この条件は積層中の層より 2 層下の層が硬化している状態で積層を行う条件であることから、内部の層は硬化済みでかつ表面の層は未硬化という状態での積層が強度向上に有効である可能性がある。積層インターバルが 40min の条件 (110C-Int40) では、層ごとに加熱硬化することになり、繊維よれが最も少ないと考えられるが、その強度は著しく低下した。これらのことから、繊維よれの発生よりも層間樹脂やボイドの存在の強度への影響が大きいと考えられる。

これらの結果から、繊維張力が大きい場合においては in-situ 加熱成形法が強度向上に有効である可能性を見いだした。一方で、計算で求めた残留応力との相関は見いだせなかった。また、従来法と比較して強度の差が小さく、本手法は単純なフープ積層のみでは大きな効果を得ることが難しいとも考えられるため、今後ヘリカル層を含んだ実際の CFRP 複合圧力容器の層構成に近い条件で実験を行う予定である。

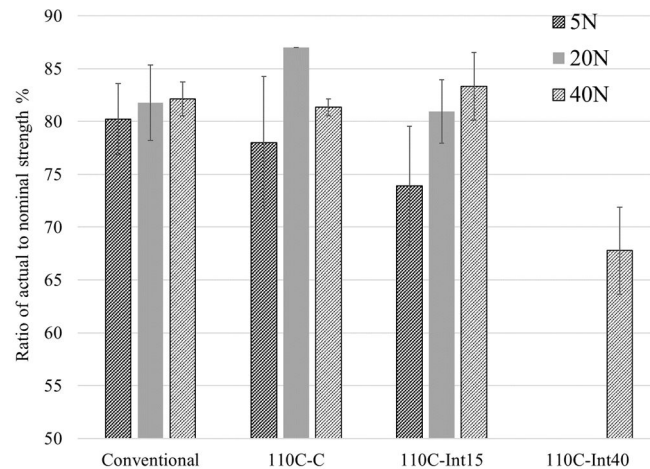


図 7 NOL 引張試験結果

以上の(1)～(3)より、in-situ 加熱成形法を適用した際の CFRP の機械的特性への影響を明らかとした。残された課題については今後も研究を継続し、CFRP 複合圧力容器をはじめとした CFRP 製品の高強度化および低コスト化等を通じて産業に貢献し、成果を社会に還元する。

< 引用文献 >

- (1) S.Y.Lee, G.S.Springer, "Filament Winding Cylinders: I. Process Model", Journal of Composite Materials, Vol.24, pp.1270-1298,1990.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1 . 発表者名 Daisuke Tabuchi, Takao Sajima, Eiji Kondo, Takeshi Tane and Naoki Noguchi
2 . 発表標題 Effect of manufacturing method on the strength of FW-CFRP
3 . 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 野口尚暉, 田淵大介, 近藤英二, 佐島隆生, 種健
2 . 発表標題 同時加熱成形法を用いたCFRPの機械的特性の評価
3 . 学会等名 2019年度精密工学会九州支部・中国四国支部共催 佐世保地方講演会
4 . 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----