

令和元年6月14日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249109

研究課題名(和文) 熱硬化CFRPの連続薄板化・100 成形加工・塑性接合による極限軽量構造の具現化

研究課題名(英文) Manufacturing ULCs (Ultra-Lightweight constructions) of thermosetting continuous CFRP by continuous production of strip, forming at 100 degree Celsius, and joining by plastic deformation

研究代表者

柳本 潤 (Yanagimoto, Jun)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90220194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱硬化性樹脂+連続繊維からなるCFRPの高速成形と、CFRPによる極限軽量構造を実現することにある。そのために、1)連続薄板化、2)100 成形加工、3)マルチマテリアル化を研究対象として取り上げた。

1)は圧延機による熱硬化CFRPシート材の製造に取り組み、オートクレーブよりは劣るものの、ポイド率3%以下のCFRP薄板を連続的に作製することに成功した。2)成形加工および3)マルチマテリアル化については、フェースシートを金属薄板とし内部にCFRTP(熱可塑性短繊維CFRP)の3次元構造を配する、マクロ構造を制御しながら成形性と曲げ剛性が高いハイブリッド材料を提案し、製作し、評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFRP連続薄板製造法と、新たな金属FRPハイブリッド構造を提案できたことが学術的な意義の二本柱である。圧延機を使ったCFRP薄板の連続的な製造は世界で初めての事例である。フェースシートに金属を、コアにCFRPを利用したハイブリッド構造は、マクロ構造制御による機械的特性制御を可能とする。これらの学術的成果は、例えば輸送機器の軽量化などの社会的な意義を持つことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This investigation aims at realizing the Ultra-lightweight structures by forming CFRPs, which are composed of thermosetting resin and continuous carbon fibers, and the high-speed manufacturing of CFRP sheet. The application of CFRP-metal-based ultra-lightweight structures will have a marked increase in vehicles and industrial machines. High-speed manufacturing of CFRP sheets, forming of CFRP sheets and hybrid structures composed by metal sheet and CFRP were investigated to reach above goals.

Continuous production of thermosetting CFRP sheets were experimentally tried by using rolling mill and furnace. The quality of manufactured sheet is slightly inferior to those manufactured by using autoclave: however, the sheet with void fraction less than 3% were successfully manufactured. Metal face sheet with three-dimensional CFRTP core hybrid structure is newly proposed. This hybrid structure can change and optimize macrostructure to attain expected formability and flexural strength.

研究分野：工学

キーワード：CFRP薄板 超軽量構造 温間圧延・成形 連続薄板化 成形性試験法 構造最適化 金属薄板

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

超軽量構造は、輸送機器などへの適用を通して社会に、今後長きにわたり貢献し続けることが見込まれる。超軽量構造の実現には、材料と加工の両面からのアプローチが必要である。比強度あるいは比剛性を上げるため、鉄鋼材料やアルミ合金などの金属系の単一材料、CFRP（連続繊維熱硬化性炭素繊維複合材料）や CFRTP（熱可塑性炭素繊維複合材料）といった非金属系複合材料、が開発されてきた。

一方で、金属系材料の壁になる重量の問題、CF系複合材料における長い成形・製作時間およびコストの課題などがあることも事実である。故に、CFRP薄板製作の高速化・低コスト化とこれの成形、ならびに、CFRPや金属によるマルチマテリアル化による新たな材料開発が、期待されてきた。

2. 研究の目的

本研究の狙いは、熱硬化性樹脂+連続繊維からなるCFRPの高速成形と成形されたCFRPによる極限軽量構造を実現し、自動車や産業用に広く利用できる軽量構造体の概念を抜本的に変えることにある。そのために、連続繊維からなる熱硬化性CFRPを主な対象として、1) 連続薄板化、2) 100℃成形加工、マルチマテリアル化のための3) 塑性接合を研究した。

3. 研究の方法

1) CFRPの連続薄板化

予めLayupし積層したCFRPプリプレグを加熱後圧延機することで硬化させる、新たなCFRP薄板連続製造法を提案した。実験によりCFRPの製造を行い、ポイド率や機械的特性（引張特性）を評価した。図1に試験装置の概要を示す。

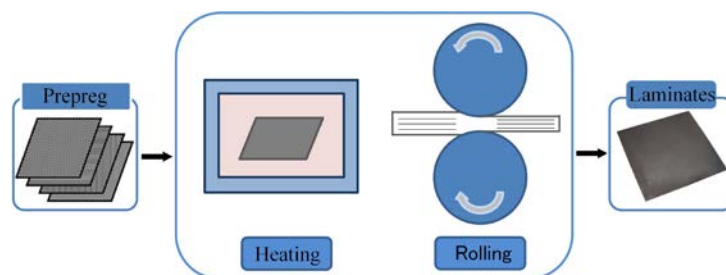


図1 試験装置

2) 成形及びマルチマテリアル化

CFRPの高い比強度、金属材料の延性や耐環境性を利用することを目的に、フェースシートに金属薄板（ステンレスやアルミ合金薄板）を配し、中に3次元構造を持つCFRPを接着接合することによる、ハイブリッド構造を提案した。この構造の利点は、内部のCFRPのマクロ構造を設計および最適化することで、成形性や比曲げ剛性を制御できることにある。このような構造を設計した後に図2に示す試験装置により製作し、製作されたハイブリッド構造の機械的特性を調査した。

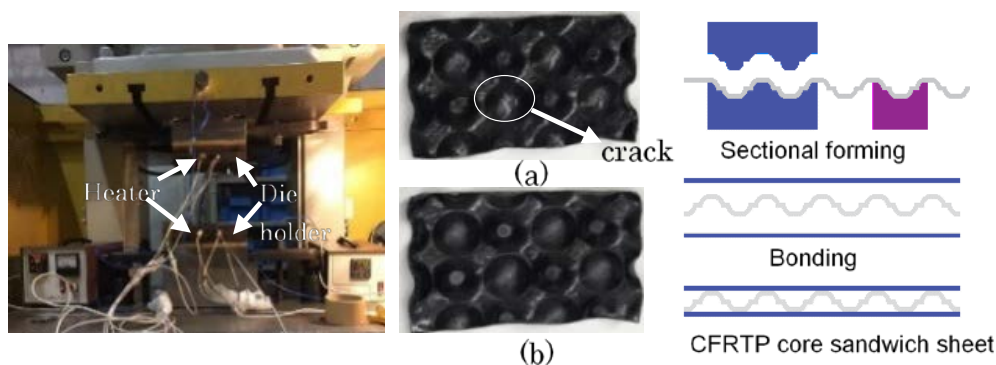


図2 ハイブリッド構造に利用される3次元構造を持つCFRPの逐次成形装置

4. 研究成果

1) CFRPの連続薄板化

図3は、プリプレグ積層の状況である。0.1mmのプリプレグを積層し、SUS304薄板と離型シートを挟んで圧延を行った。図4は圧延機に設置した雰囲気制御ユニットである。図5は薄板の断面写真と、製造された薄板の絞り試験の結果である。オートクレーヴでの製造には若干劣るが、十分な絞りストローク（横軸、延性に対応）と強度（縦軸）を有していることがわかる。

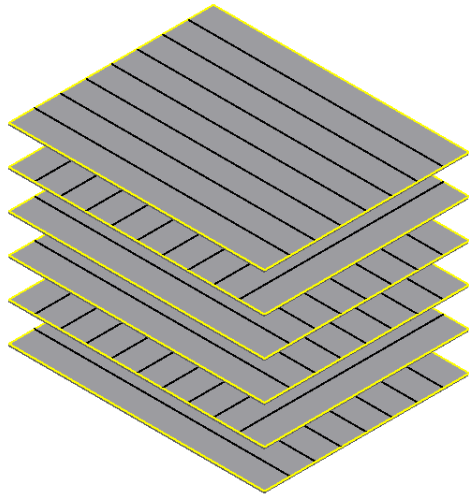


図3 プリプレグ積層体

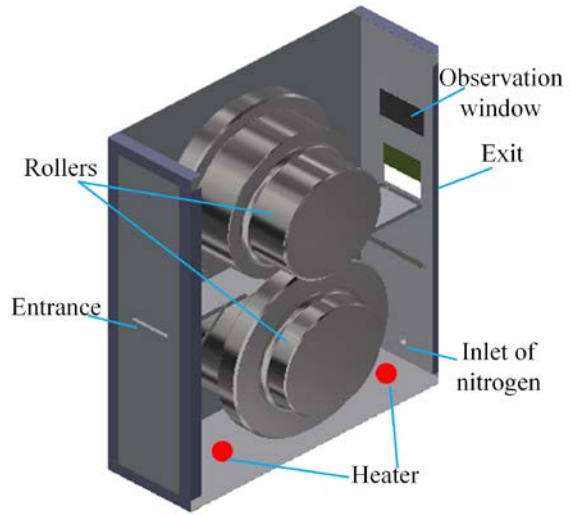


図4 雰囲気制御ユニット

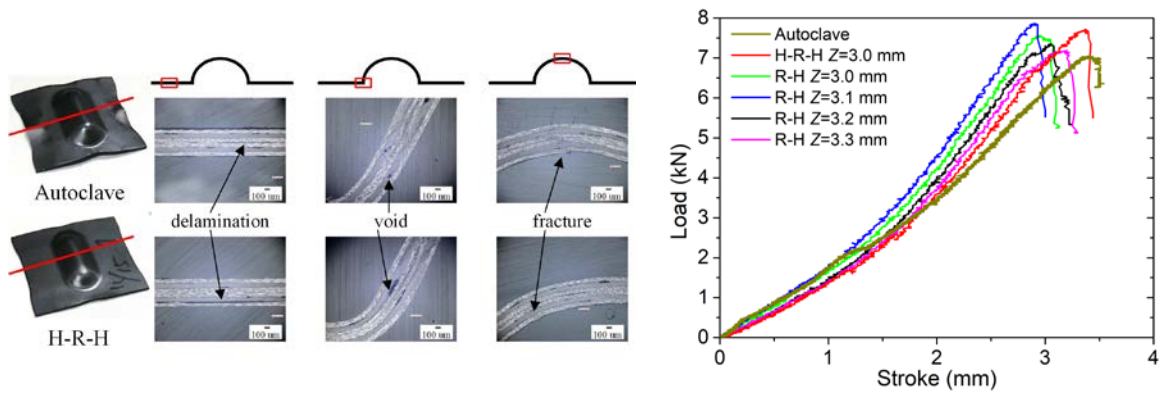


図5 薄板断面と絞り試験結果

2) 成形及びマルチマテリアル化

図6に本研究で提案したハイブリッド構造を示す。FEMでの解析を行った結果、図6に示す通り、ドーム形状が連続する形状をコア形状として選択した。

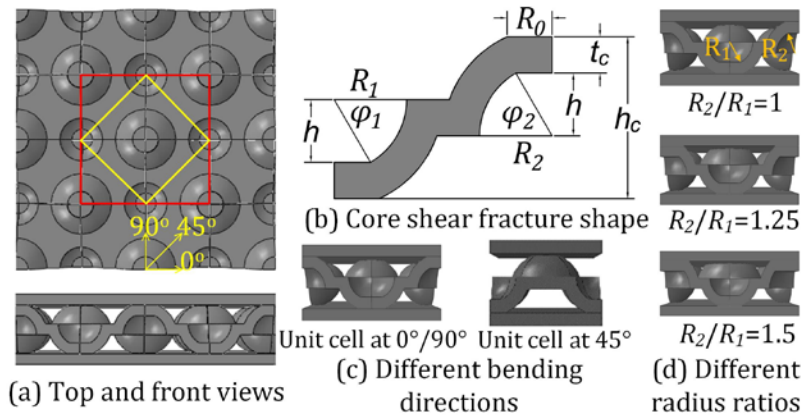


図6 コアの形状

このコア形状について、曲げ剛性をFEMにて評価した結果を図7に示す。計算には秋季境界条件を利用して、計算負荷の低減を図っている。半径比が増加するにつれて、比曲げモーメントは減少傾向を示す。異方性曲げ挙動は、45°での比曲げモーメントが0°/90°の曲げモーメントよりも大きいときに示される。

本研究では、図2に示す方案にて、CFRTPコアとA2017フェースシートからなる半球ドーム型サンドイッチシートを作製した。図7に示す通り、剛性の解析は周期的境界条件を用いて数値的に行われ、最適ドーム半径比は1であることが判明した。曲げ剛性には異方性があり、45°での曲げが0°/90°より高い曲げ剛性を有する。逐次成形時のマルチストロークスタンピングは、シングルストロークスタンピングと比較して表面ひび割れがなくなるので、CFRTP材料

のコアへの成形性を大幅に改善する。本研究で製作したシートは、曲げ剛性が著しく増加し、コアフェースシート剥離が解決できれば屈曲変位が 27mm に達するまで良好な曲げ性が観察できた。

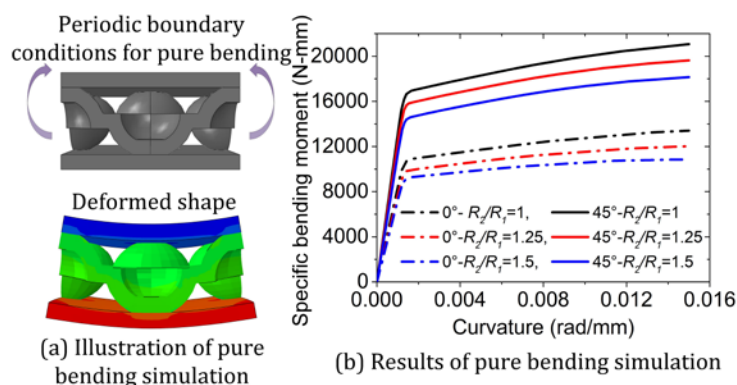


図7 比曲げ剛性とコアの幾何学的形状との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

①Jingwei Zhang and Jun Yanagimoto, Design and fabrication of formable CFRTP core sandwich sheets, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 査読有, Vol.68/1, 2019,1-4.

DOI:10.1016/j.cirp.2019.04.060

②Nishino Akihiro and Tetsuo Oya, Multiscale analysis of the formability of CFRP sheets subjected to warm forming with a temperature-dependent epoxy model, International Journal of Material Forming, 査読有, 巻なし, 2018, 1-8.

DOI: 10.1007/s12289-018-1449-9

③Hayashi Takahiro and Tetsuo Oya, Analyses of press formability of CFRP sheet considering the fiber kinking and the ductile behavior of resin, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 1063, 2018, 1-6.

DOI: 10.1088/1742-6596/1063/1/012184

④Ho Yu-Chien, Jun Yanagimoto, Effect of unidirectional prepreg size on punching of pseudo-ductile CFRP laminates and CFRP/metal hybrid composites, Composite Structures, 査読有, Vol. 186, 2018, 246-255.

DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.042

⑤Takahiro Hayashi and Tetsuo Oya, Tensile and Compression Analyses to Investigate the Mesoscale Mechanical Characteristics Influential for Press Formability of CFRP Sheets, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 920, 2017, 217-222.

DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.920.217

⑥Yu-Chien Ho, H. Sasayama and Jun Yanagimoto, Mechanical Properties and Drawing Process of Multilayer Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Sheet with Various Prepreg Thickness, Advances in Mechanical Engineering, 査読有, Vol.9-3, 2017, 1-12.

DOI:10.1177/1687814017692695

⑦Yuma Takahashi, Yu Uriya and Jun Yanagimoto, Optimum Design of Formable CFRP Sheets by Generic Algorithm and FE Analysis by Homogenization of Multilayered Structure with Macroscopic Anisotropy, International Journal of Material Forming, 査読有, Vol.9-5, 2016, 697-703.

DOI:10.1007/s12289-015-1260-9.

⑧Yu Uriya and Jun Yanagimoto, Suitable Structure of Thermosetting CFRP Sheet for Cold/Warm Forming, International Journal of Material Forming, 査読有, Vol.9-2, 2016, 243-252.

DOI:10.1007/s12289-015-1227-x

⑨Yu Uriya, Katsuyoshi Ikeuchi and Jun Yanagimoto, Enhanced Formability of Thin Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheets in Cold/Warm Embossing with Ductile Dummy Sheets of Different Thickness, International Journal of Material Forming, 査読有, Vol.8-3, 2015, 415-421.

DOI: 10.1007/s12289-014-1184-9.

⑩Zhequn Huang, Sumio Sugiyama and Jun Yanagimoto, Applicability of adhesive-embossing hybrid joining process to glass-fiber-reinforced plastic and metallic thin sheets, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.214, 2014, 2018-2028.

DOI:10.1016/j.matprotec.2013.11.020

⑪池内 健義、柳本 潤, CFRP 薄板の冷間・温間 V 曲げ成形、塑性と加工、査読有、54 巻, 2013, 973-977. DOI:10.9773/sosei.54.973

⑫Zhequn Huang, S. Sugiyama and Jun Yanagimoto, Hybrid Joining Process for Carbon Fiber

Reinforced Thermosetting Plastic and Metallic Thin Sheets by Chemical Bonding and Plastic Deformation, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, Vol.213, 2013, 1864-1874.
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.015

〔その他〕

ホームページ等 <http://www.cem.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：大家 哲朗

ローマ字氏名：Oya Tetsuo

所属研究機関名：慶應義塾大学

部局名：理工学部（矢上）

職名：講師

研究者番号（8桁）：10410846

※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。