

氏名	新田 悠二
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第637号
学位授与年月日	平成26年9月24日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)システム設計工学系専攻
学位論文題目	マルチセル構造を有する天然繊維の強度評価と特性発現性の解明
論文審査委員	主査 山口大学 教授 合田 公一 山口大学 教授 陳 献 山口大学 教授 堤 宏守 山口大学 准教授 大木 順司 山口大学 准教授 野田 淳二

【学位論文内容の要旨】

今日、環境問題が地球規模で顕在化しており、複合材料分野においても従来の人工繊維と熱硬化性樹脂を使用した繊維強化プラスチックの廃棄処理問題が浮上している。代表的な繊維強化材料であるガラス強化繊維プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics, 以下 GFRP と称す) や炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, 以下 CFRP と称す) は優れた機械的性質を有するだけでなく、軽量で耐熱性も優れていることから自動車・航空機・船舶など幅広い分野で使用されている。一方で、GFRP, CFRP は焼却処分が難しく、リサイクル方法も確立されていないため、廃棄物の大部分が埋立処分されており、土壌汚染や処分場不足など環境負荷を大きくする欠点も有する。このため、樹脂と繊維を分離するケミカルリサイクル等も研究もされているものの、コストの問題があり積極的に行われていないのが現状である。

このような背景から、近年、生分解性を有し、資源循環可能な亜麻、ラミー、ケナフなどの天然繊維を用いたグリーンコンポジット (Green Composites) の研究が盛んに進められている。グリーンコンポジットとは、マトリックスに生分解性樹脂、強化材に天然繊維を使用した複合材料を指し、それらは微生物によって分解されるため環境への負荷が小さい。また、焼却処理しても発生した二酸化炭素 (CO₂) は植物が成長する際に吸収されるので、カーボンニュートラルにより地球上の CO₂ の増減に影響を与えない。これまで実用化されたグリーンコンポジットは、強化形態を短繊維強化材とする射出成形品が多く、複合材料の最も基本形態である一方向繊維強化材 (単層板) を用いた例はほとんどみあたらない。これは天然繊維の多くが有限長であり、植物系繊維特有の繊維うねりを有することから、連続して一方向に揃えることが困難であるからである。さらに、短繊維、長繊維を問わず、天然繊維そのものの力学的性質を明らかにすることは構造・強度設計上重要であるが、これらに関する報告は先に述べた人工繊維に比べて格段に少ない。特にケナフ繊維に限ると、一方向繊維強化材の基礎データとなるケナフ繊維そのものの力学特性に係る報告は少なく、強度信頼性データやその信頼性モデルの扱いに至っては皆無である。

天然繊維の内部にはセルロース・マイクロファイブシル (Cellulose microfibrils, 以下, CMF と略す) と呼ばれる微小繊維束がらせん状の高次構造を形成しており、繊維の軸方向の剛性・強度は CMF のらせん角に依存することが知られている。天然繊維に引張負荷をかけると CMF らせん角等の影響で繊維が回転することも報告されている。また、天然繊維の力学評価において断面積は正確な強度を推定するための重要なパラメータであるが、天然繊維の横断面形状は複雑な形状をしている。さらに、天然繊維は繊維間だけでなく、繊維軸方向に沿っても断面積が変動していることが報告されており、断面積の推定が困難である。そのため、天然繊維の正確な断面積評価法を確立する必要がある。

一般に、天然繊維の剛性・強度はガラス繊維や炭素繊維のような人工繊維と比べ低く、使用用途が限られているのが現状である。そのため、天然繊維の特性発現性を見出す研究も進められている。

これを見出す処理の一つとしてアルカリ処理が挙げられる。天然繊維に低濃度アルカリ処理を施すことで、これを強化材とする複合材料強度の向上が報告されているが、高濃度で処理された天然繊維の機械的特性については十分に明らかにされていない。

そこで、本研究では、代表的な植物系天然繊維であるケナフを取り上げ、以下のような内容を提示している。まず、第1章において、前述の研究背景を記述するとともに、本研究の目的を述べた。第2章では、天然繊維の断面形状を考慮した断面積の推定方法を提案するとともに、天然繊維の引張特性のうち、ヤング率と引張強度についてその断面積変動の影響を調べた。さらに、繊維断面積の内部変動および繊維間変動を考慮した引張強度に関するワイブル分布を提案し、断面積変動の影響を考察した。第3章では、マルチセル型繊維において引張負荷時に繊維の回転が生じ得るかどうかなを確認するとともに、回転角度と引張強度およびヤング率との関係を調査した。続いて、CMF角を空間内でらせん状に配置できるようにモデル化するとともに、これを用いた繊維の回転現象を有限要素解析によって考察した。また、第4章では、マルチセル型繊維であるケナフに高濃度アルカリ処理を施し、マーセル化した際の引張特性に及ぼすアルカリ処理効果について調査を行った。さらに、アルカリ処理を施したケナフ繊維の断面積をより正確に評価するために新しい断面積評価方法を構築した。第5章は結言として第2,3,4章を総括するとともに、今後の展望について追記した。

【論文審査結果の要旨】

環境問題が深刻化する現在、環境適合型材料として、生分解性樹脂を高強度天然繊維によって強化した材料、いわゆるグリーンコンポジット(Green Composites)の研究開発が注目を浴びている。グリーンコンポジットの荷重の大半は強化材である天然繊維によって支えられるので、ガラス繊維や炭素繊維のような人工繊維と同様、その強度やヤング率などの基本力学特性を正確に把握することが重要となる。また、天然繊維を力学的、化学的に負荷するとき、従来の人工繊維では見られない特性が発現されることがある。そのため、天然繊維の内部構造を把握した上で、特性向上に資するメカニズムを把握することも重要となる。

本論文は、以上の背景に基づき、代表的なマルチセル型天然繊維であるケナフを用いて、①その断面形状や断面積変動を近似的に評価する手法を提案するとともに、断面積変動を加味した強度分布関数(ワイブルモデル)を新たに提案し、これらの有効性の検討を図っている。続いて、②シングルセル型天然繊維における膨潤や引張負荷の際に生じる繊維軸周りの回転現象が、マルチセル型繊維においても同様に生じるかどうかを、ケナフを題材として調査を試みている。またその現象の解析的検証も試みている。さらに、③化学的処理による特性発現性を見出すことを目的に、高濃度アルカリ処理によるマルチセル型繊維の特性改善を追究している。

内容は、まず緒言(第1章)で本研究の必要性を述べた上で、以下のように要約されている。

1. ケナフ繊維の断面積評価方法として多角形近似法を用いると、従来の真円や楕円仮定に比べて実断面積分布との相関が高くなることを見出した。この相関関係を利用した断面積評価法(DB基準法)を提案し、ヤング率や引張強度をより正確に推定できることを示した。また、従来なされている断面積の繊維間変動のみならず繊維内変動にも適用できる修正ワイブル分布関数を新たに提案し、これを用いれば従来の関数形より実験結果をより正しく評価できることを明らかにした(第2章)。

2. ケナフ繊維の引張負荷による回転現象の有無を実験的に見出した。回転の確認された繊維の引張強度は、回転が確認されないものに比べてやや低くなるものの、ヤング率はさほど変わらないことを明らかにした。さらに、マイクロフィブリルの配向角を考慮した回転現象の解析モデルを提示するとともに、これを有限要素法に組み込むことによって回転の発現性を検証した。さらに、セルの絡み合いを考慮した有限要素についても検討し、回転が発現しない条件や、回転が時計回りおよび反時計回りで起こる条件について考察を加えた(第3章)。

3. ケナフ繊維の高濃度アルカリ処理によって破断ひずみが大きく改善される特性発現性を明らかにした。また、同処理によってケナフ繊維の断面形状が変わることを見出し、未処理繊維による DB 基準法の使用が困難であることを明らかにするとともに、アルカリ処理繊維用の DB 基準法に別途拡張した。さらに、高濃度アルカリ処理された繊維特有の断面形状に着目し、新たな断面積評価法を提案するとともにその有用性についても検討を加えた。(第4章)。

4. 以上の総括を行なった(第5章)。

以上のように、本研究はマルチセル構造を有する天然繊維(ケナフ繊維)の強度推定のための断面積測定方法を提案し、その有効性を見出すとともに、信頼性工学的見地から新しい確率モデルの提案を行っている。また、ケナフ繊維の微視構造を踏まえた力学挙動を実験的・理論的視点から明らかにしている。さらに、ケナフ繊維の新たな特性発現性を化学的処理を通して見出し、実用化への指針提示を行なっている。このように、マルチセル構造を有する天然繊維においてこれまで不明であった幾つかの点を学術的に明らかにするとともに、新たな特性評価法や理論解析を提案していることからその独創性を評価できるものであり、今後の当該分野の発展に大いに貢献できるものと判断される。

本審査会では、予備審査会で指摘された不十分な箇所の訂正、追加を行うとともに、質問事項に対する明確な回答があった。また、公聴会における主要な質問内容は、アルカリ処理後のケナフ繊維の形状測定法や直接的断面積評価法、FEMの適用性等について、およびシングルセル断面積データによるマルチセル繊維への応用展開についての可能性、さらにはケナフ繊維の回転挙動が複合材中で及ぼす影響等に関するものであったが、いずれの質問に対しても的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。