

氏名	たういーさく びやたつくさなのん TAWESAK PIYATUCHSANANON
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第673号
学位授与年月日	平成27年9月30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	EFFECT OF FIBER WAVINESS ON TENSILE STRENGTH OF A FLAX FIBER-REINFORCED COMPOSITE
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 中村 秀明 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】

Fibrous composite materials such as GFRP (glass fiber-reinforced plastics) and CFRP (carbon fiber-reinforced plastics) have effectively been applied for the high demand in industrial use, because their advantages are light weight, high strength and corrosion resistance. However, the disposal problem after use of these materials has also surfaced as a serious environmental problem. As a means to solve this problem, many researchers have tried to use plant-based natural fibers instead of artificial fibers. However, a problem of using natural fiber is fiber waviness that affects the mechanical properties. Fiber waviness is the fluctuation in fiber orientation, inherent in sliver morphology of plant-based natural fibers. Therefore, the fiber orientation in a produced composite lamina is not perfectly unidirectional. The purpose of this study is thus to clarify the relation between fiber waviness and the composite's tensile strengths by identifying the degree of fiber waviness (Chapter 1).

In Chapter 2, the composite laminates were first produced using flax sliver and biodegradable thermoplastic resin, and next the fiber orientation angles were measured at fine segments on the both surfaces of the composite laminate. Then, two spatial autocorrelation analyses, Local Moran's I and Local Geary's c , were carried out for quantification of the fiber waviness. In other words, these two analyses were used to express the degree of disorder in fiber orientation. Using an image analysis software, we calculated various area ratios by changing the range of Local Moran's I and Local Geary's c . The results showed that Local Moran's I was correlated well with tensile strength of the composite laminate specimens when appropriate threshold levels are selected. On the other hand, Local Geary's c is not well correlated with tensile strength. Normally, finite element analysis is a well-known method for finding mechanical behavior of composite materials, such as stress and strain distributions. On the other hand, this study using the spatial autocorrelation analysis has less number of equations and does not take a long time for developing the program code. Thus, we conclude that the method proposed in this study is an effective tool of predicting roughly the tensile strength of natural-fiber-sliver-based composite laminates (Chapter 2).

In Chapter 3, stress distributions in the composite laminate were numerically analyzed by a three-dimensional finite element analysis (3D-FEA) based on the orthotropic theory, in which measured fiber orientation angles were substituted for the finite elements. Results showed that σ_y distribution was much larger than σ_x and σ_z , because the specimen was reinforced along the loading axis (y -axis). Regarding shear stresses, τ_{xy} was much higher than the others. Shear stress τ_{yz} slightly occurred in the specimen, while τ_{zx} components were negligibly small. For these results, the maximum stress criterion was applied, in which the on-axis stresses, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{12}, \tau_{23}$, and τ_{31} , (Where, 1 and 3 are the transverse direction of the fiber-axis, and 2 is the fiber-axis.) were divided by the failure stresses, respectively. As a result, the normalized maximum stress was found in τ_{12} . It means that the damage or failure will occur in τ_{12} . The fiber-axial stress, σ_2 , also occupied a relatively large stress area. Thus, two-dimensional Tsai-Hill criterion was selected as a failure criterion of the composite laminate (Chapter 3).

Two-dimensional Tsai-Hill (TH) criterion was applied to predict risky damage areas in the composite laminate, based on the stress analysis results by 3D-FEA. This criterion can predict the degree of damage caused by interaction between fiber orientations. On the other hand, TH distribution without 3D-FEA was also estimated by giving an applied stress to each element, to which only a measured fiber orientation angle was respectively assigned. To differentiate the two kinds of Tsai-Hill criterion distribution, the subtraction of the latter value from the former was taken for each element. In the negative subtraction (angle-based TH dominant), risky Tsai-Hill distributions were estimated, in case there was an area consisting of a cluster of inclined fibers in the composite laminate. In the positive subtraction (FEA-based TH dominant), on the other hand, risky Tsai-Hill distributions appear with dispersion and small-scale level. From the comparison with the specimens' fracture paths, the fracture initiation was estimated to occur from the cluster, but not from FEA-based TH dominant area. Finally, we concluded that, the fracture was not initiated from the cluster, but it was caused by fibers breakage on the counterpart in the laminate because of tensile stress enhancement induced by the cluster of inclined fibers (Chapter 4).

In Chapter 5, the above contents were summarized, and future subjects were describes.

【論文審査結果の要旨】

今日、複合材料分野では環境適合型材料の研究が進んでおり、中でも高強度天然繊維と熱可塑性樹脂を組み合わせた天然繊維強化複合材料の研究動向に関心が寄せられている。天然繊維の強化形態は短繊維型と長繊維型に分類されるが、耐荷能を効率的に発現できる長繊維型は構造材料としてのポテンシャルが高い。長繊維型として、紡績工程の最終状態である紡績糸を用いることもあるが、その初期工程の段階である粗紡糸 (スライバー, sliver) を用いるならば、以降の工程を省くことができるため、最近ではスライバーを使った複合材料研究が注目されている。スライバーの問題点として、天然繊維特有のランダムな繊維うねりを有しており、その特異な形状が強度・剛性の低下を引き起こすと考えられている。繊維うねりのモデリングは、当初は炭素繊維等の人工繊維を対象に扱われてきたが、うねりの形状を三角関数等により決定論的に与えており、スライバーが有するランダムなうねりを表現できるものではない。一方、これを表現したものとして、繊維配向を Peason 型相関係数で定量化した報告がみられる。この論文によると、一方向に配列した繊維領域の比率で強度の大小が論じられているが、元来、強度は構造に敏感な材料定数であり、構造の欠陥部を定量化して相関を論じる必要がある。

以上の背景を踏まえ、本研究は亜麻繊維強化複合材料積層材の引張強度に及ぼす繊維うねりの影響を明らかにすることを目的としている。まず、局所的空間解析を用いてランダムな繊維うねりを定量化することを試み、さらに同材料の引張強度との相関を見出すことを試みている。また、直交異方性理論に基づく3次元有限要素解析により同材料の応力分布を明らかにするとともに、破壊基準則を流用することによってその損傷・破壊の要因を追究している。

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. 空間解析手法である Local Moran's I および Local Geary's c を用い、亜麻繊維強化複合材料積層材の繊維配向の良否を定量化している。前者は繊維配向の平均値からの偏差を、後者は近隣との繊維配向との偏差を定量化するものであるが、ここでは偏差の基準値をそれぞれ設け、基準値を上回る領域の全体に対する割合（領域比）を算出し、引張強度との相関を調査している。その結果、Local Moran's I による領域比が大きいほど強度と相関付くことを明らかにしている（第2章）。

2. 有限要素解析によりランダムな繊維配向を有する亜麻繊維強化複合材料積層材の応力分布を明らかにしている。この材料は二層積層材であり、層内（面内）に比べて2層間の相互干渉によって生じる応力成分の程度は極めて小さく、一方で層内における繊維軸方向の垂直応力および繊維軸を基準とする面内せん断応力が支配していることを明らかにしている（第3章）。

3. 第3章の結果を踏まえ、繊維強化型複合材料の代表的な破壊基準則である Tsai-Hill 則を用い、試験片内で要素破壊（または損傷）が生成する領域を2種類の方法（FEMを使う方法と使わない方法）で予測している。このうち、繊維配向が負荷方向から大きく傾く領域に面した相方の層に繊維主軸方向の引張応力が比較的大きく集中し、破壊はその箇所合致して生じる。本章ではこのことを、FEMを使わずとも繊維配向角情報から予測できることを見出している（第4章）。

4. 以上の総括を行なっている（第5章）。

以上のように、本研究はランダムな繊維うねりを有する天然繊維強化複合材料の繊維うねりに対する定量化を新しい手法を用い、強度および破壊と関連付けることに成功している。また、FEMを使わなくとも強度や破壊が大まかではあるが、予想できることを見出した意義は大きい。今後、非破壊検査装置等の導入により、本手法はスライバー状プリプレグの品質を瞬時に判断できる手法として進展する可能性があり、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、質問事項に対する回答があった。また、公聴会における主要な質問内容は、配向角の精度や繊維うねりの異方性、FEMにおける境界条件と主要応力成分、Tsai-Hill 基準則の導出方法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、発展性、工学的価値に優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。論文内容及び本審査会、公聴会での質問に対する応答などから総合的に判断し、最終試験を合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は以下のとおりである。

※査読付き論文（1編）

1. [Taweesak Piyatuchsananon](#), Akira Furuya, Baosheng Ren and Koichi Goda, Effect of Fiber Waviness on Tensile Strength of a Flax-Silver-Reinforced Composite Material, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol.2015, Article ID 345398, 8 pages (2015)

※査読のある国際会議の会議録 (2 編)

1. Taweesak Piyatuchsananon, Akira Furuya and Koichi Goda, Relation between fiber waviness and tensile properties of flax fiber composites, The 9th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-9) USB 配布, 11pages, 2014.10 発行 (Suzhou, China)
2. Taweesak Piyatuchsananon, Akira Furuya and Koichi Goda, Effect of fiber waviness on tensile strength of flax-reinforced composites, 20th International Conference on Composite Materials (ICCM-20) USB 配布, 10pages, 2015.7 発行 (Copenhagen, Denmark)