

氏 名	さいとう たけし 齋藤 毅
学位(専攻分野)	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	博 甲 第 7 6 9 号
学位授与の日付	平成 27 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専 攻	工芸科学研究科 先端ファイブロ科学専攻
学 位 論 文 題 目	組物複合材料シャフトの内部構造および力学的特性に関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 濱田泰以 教授 西村寛之 准教授 横山敦士 三菱電機(株)伊丹製作所主席技師長 藤田章洋 岐阜大学工学部機械システム工学科教授 仲井朝美

論文内容の要旨

本論文では、組物複合材料シャフトの内部構造および力学的特性の設計手法構築に関する研究を行った。スポーツ用品に使われる複合材料の主な製法は「内圧成形」、「シートワインディング(SW)製法」であり、これらは手作業により成形している。スポーツ用品の中でゴルフシャフトは複合材料の代表的な製品であり、それらの殆どは SW 製法である。SW 製法が労働集約的な製法であるのに対し、組物複合材料は機械化・自動化が可能な製法であり、かつ、長手方向に配向する中央糸と組糸による 3 軸構造で設計自由度が高いことが特長である。しかし、組物複合材料の設計は、内部構造を決定するパラメータ、纖維束断面形状、纖維束断面積、纖維束間距離、纖維配向角度が相互に影響し変化するために難しく、さらに、シャフトのような製品表面の平滑性が必要な場合は組糸の交差により発生する複合材料表面の凹凸を研磨する必要がある。その問題を解決するため、まず熱硬化樹脂組物複合材料において、クリンプ構造および研磨量が力学的特性に及ぼす影響について検討した。次に、内部構造予測手法を確立し、ゴルフシャフトの厚さ設計、曲げ剛性設計に適用できることが明らかにした。さらに、生産の自動化、短サイクル化の可能性を有する熱可塑性樹脂組物複合材料において、熱硬化性樹脂複合材料において確立した内部構造予測手法が適用できるか検討した。本論文では全 8 章で構成されており、以下にその内容を示す。

第 1 章では、本研究の背景とその必要性を述べ、本研究を行うに至った経緯を述べた。

第 2 章では、組物複合材料パイプの中央糸の割合および組糸のクリンプ構造が力学的特性に及ぼす影響について検討した。クリンプ角度を変化させた組物複合材料のパイプを作製し、4 点曲げ試験およびねじり試験を行った。曲げ強度に関しては組糸のクリンプ角度の影響は見られず、組物パイプの強度低下は中央糸のうねりに起因していることが分かった。ここでは、組糸の構造上形成される上下方向の蛇行に関してはクリンプと称し、構造上直線的に配向している中央糸が組糸構造の影響を受け蛇行したものをうねりと称している。ねじり特性に関しては、せん断強度はクリンプ角度の増加に対し、せん断弾性率の 2.5 倍の影響を受けることを明らかにした。

第 3 章では、研磨量が組物複合材料の曲げ特性、横圧縮特性、ねじり特性に及ぼす影響を明らかにした。最外層の研磨量を最大 50% 程度とした試験片において、曲げ強度は層内の中央糸の破壊に起因

し、研磨の影響は低いことが明らかになった。横圧縮強度においては、曲げ応力とせん断応力の関係が変化するため、結果として研磨により横圧縮強度が増加することが明らかになった。また、ねじり試験については、表層の組糸の厚さが研磨により薄くなり、その部分から圧縮による座屈破壊が発生、研磨量が増加することによりせん断強度が下がることが明らかになった。

第4章では、ゴルフシャフト特有の評価手法である片持ち曲げ試験において、研磨量の影響を明らかにした。最外層の組角度をより長さ方向にした組物複合材料シャフトの片持ち曲げ試験においては、研磨量の増加により曲げ強度が低下する傾向であった。それは、最外層の連続した組糸の厚さが研磨により薄くなり、繊維束が破断し、最外層の組糸周りのはく離が発生したためである。

第5章では、熱硬化性樹脂組物複合材料における内部構造予測法の確立を目指した。テーパー状の1層の組物を設計、作製し、予測値と比較を行った。中央糸の有無による厚さ係数を求め、周期的に変化する厚さ係数を求ることにより正確な剛性予測可能であることを明らかにした。

第6章では、熱可塑性樹脂組物複合材料を対象とし、成形時間に対する樹脂の含浸メカニズムと内部構造の変化を検討した。2種類の中間材料を使用し、加圧加熱プレス製法によって試験片を作製した。その結果、熱硬化性樹脂複合材料において確立した内部構造予測手法が熱可塑性樹脂組物複合材料にも適用可能であることが示唆された。

第7章では、熱可塑性樹脂組物複合材料の引抜成形法における含浸メカニズムと内部構造の変化を検討した。その結果、第6章で提案した熱可塑樹脂組物複合材料の内部構造予測手法が異なった成形方法においても適用可能であることが明らかになった。

第8章では、本研究で得られた知見をまとめた。

論文審査の結果の要旨

本論文では、組物複合材料シャフトの内部構造および力学的特性の設計手法構築に関する研究を行った。まず、組物構造の特徴であるクリンプ構造が力学的特性に及ぼす影響を明確化にし、次に、組物複合材料シャフトに対する研磨量が力学的特性に及ぼす影響を検討した。研磨したパイプの力学的特性に関する研究は過去には例が無く、複合材料を製品で使用する際に必ず必要となる研磨が力学的特性に及ぼす影響を検討したことは工業的な価値が高いと言える。テーパ形状を有するゴルフシャフトに応用した場合は、パイプの曲げ試験とは異なる知見を得ることができ、今後のゴルフシャフトなどの長尺パイプの強度設計に活かせるものとなる。次に、組物複合材料の内部構造について、詳細な断面観察を実施し定量化したうえで、組物の幾何学的形状を決定する因子である内部構造パラメータの相互関係を明らかにした。組物複合材料シャフトにおける繊維束の形状や配向状態および製品の厚さを予測する寸法設計、さらには予測した内部構造を用いて曲げ剛性を決定する一連の設計指針を確立した。最後に、熱可塑性樹脂を用いた組物複合材料について、樹脂含浸メカニズムと内部構造の変化を検討し、上述の内部構造予測法が適用可能であることを明確にした。その結果、内部構造予測式は、SW 製法、加圧加温プレス製法および引き抜き製法に適用可能であり、熱硬化性樹脂および熱可塑性樹脂複合材料について、幅広い範囲で適用可能であることが示唆された。内部構造パラメータが相互に影響を及ぼす組物複合材料シャフトの設計は難しいとされている現状において、本研究は非常に重要な知見となりうる。以上の結果より、組物複合材料シャフトの厚さおよび剛性設計が可能となり、より良いスポーツ品を通じて産業資材への用途展開により社会に貢献するものと期待できる。

本論文の内容は次の8報に報告されている。

1. **DIMENSIONAL AND INTERNAL STRUCTURAL DESIGN FOR BRAIDED FABRIC REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITE**
Takeshi Saito, Ryo Morinaga, Masaru Imamura, Akio Ohtani, Asami Nakai
Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,
Paper ID IMECE2013-64416, pp.1-7, 2013
2. **PREDICTION METHOD OF INTERNAL STRUCTURE FOR DESIGNING BRAIDED COMPOSITES WITH THERMOPLASTIC RESIN** TAKESHI SAITO
Proceedings of 13TH JAPAN INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, pp.1-5, 2013
3. **Dimensional and Internal Structural Design for Braided Composites**
T. SAITO, A. OHTANI, A. NAKAI, *Proceedings of SAMPE CHINA 2014 CONFERENCE & EXHIBITION, 2014*
4. **MECHANICAL PROPERTIES OF FRP WITH BRAIDED STRUCTURE LATERAL COMPRESSIVE BEHAVIOR OF GROUND TUBE** T. Saito, A. Ohtani, A. Nakai
Proceedings of 20th International Conference on Composite Materials, P-ID 3311-4 (2015)
5. 炭素繊維強化組物円筒パイプの研磨による曲げ強度への影響
齋藤毅, 大谷章夫, 仲井朝美, 科学・技術研究, 第4巻, 第2号(2015), 掲載予定
6. 炭素繊維強化組物円筒パイプの繊維構造による力学的特性への影響
齋藤毅, 蘆田浩規, 広瀬将也, 魚住忠司, 大谷章夫, 仲井朝美, 日本機械学会論文集(投稿中)
7. **Impregnation and Deformation Process of Braided Composites by Pultrusion System with Thermoplastic** Takeshi Saito, Toshihiro Motochika, Akio Ohtani, Asami Nakai, *Journal of Thermoplastic Composite Materials, (投稿中)*
8. **Dimensional and internal structural design for braided composites**
Takeshi Saito, Akio Ohtani, Asami Nakai, *Journal of Reinforced Plastics and Composites, (投稿中)*

以上の結果より、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらに工業的な意義があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。