

# サステナブル社会の構築に貢献する 植物由来複合材料

## はじめに

環境保護意識の高まりを受けて、サステナブルな社会の実現に向けた取り組みがさまざまな分野で進んでいる<sup>(1)</sup>。特に、地球温暖化の原因となる物質の一つである二酸化炭素を含む温室効果ガスの排出量削減を目指した脱炭素化の取り組みが活発に行われている<sup>(2)</sup>。例えば多くのプラスチック素材は石油、石炭などの枯渇資源を原料にしているため、カーボンニュートラルな植物由来材料への転換が進んでいる。このように材料開発と環境問題は切っても切れない関係になっており、より環境負荷を低減させた材料の開発が社会から要請されている。

20世紀後半から、すでに軽量構造材料として大量に使用されてきたガラス繊維強化プラスチック (GFRP) と炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の環境負荷を低減することは、複合材料業界における解決すべき重要な課題として認識されてきた<sup>(3)</sup>。なぜなら、使用後の廃棄処理方法に問題があるからである。すなわち、廃棄後の焼却処理時に有毒ガスが発生する、焼却時に焼却炉の炉壁材とガラス繊維との反応によって燃焼炉が損傷するなどの問題点が指摘されている。このため FRP 廃材の多くは廃棄物処理場で埋め立て処理されている。

このような背景から、特に廃棄時の環境負荷を低減させた樹脂系複合材料の研究が 1990 年代中頃から始まった。初期段階では、母材に生分解性樹脂を採用し、これを天然植物繊維で補強した完全生分解性複合材料に関する研究が活発に行われた。この完全生分解性複合材料は環境に優しいという意味を込めて“グリーンコンポジット<sup>(3)</sup>” “あるいは”エココンポジット<sup>(4)</sup>” と呼ばれ、環境負荷を低減させた複合材料として注目された。本稿では、これらの植物構成材料を用いた複合材料を植物由来複合材料と呼ぶことにする。

植物由来複合材料に関する研究開発の初期段階では、競合材である GFRP に対する代替可能性を追求するために主として強度特性の向上に関する研究開発が進められ、多くの研究者がこの課題に取り組んだ<sup>(5)</sup>。その後、生分解性樹脂を母材に使用することによってもたらされる、難しい成形性、低い耐久性などの欠点を克服するために汎用樹脂を母材に使用してこれを天然繊維で補強したいわゆる天然織

維強化プラスチックに関する研究開発も活発に行われ、GFRP に匹敵する強度特性を有する植物由来複合材料が開発されている<sup>(6)(7)</sup>。

しかし 2010 年代になると、天然植物繊維の内部に存在するルーメンと呼ばれる空間構造によってもたらされる機能により植物由来複合材料がこれまでの FRP では発現できなかった、断熱性、制振性などの機能性を有することが徐々に明らかとなった<sup>(8)</sup>。本稿では、この植物由来複合材料の基本的な強度特性に加えて、各種機能性について解説する。

## 強度特性

高い強度特性を得るためには、他の繊維強化複合材料と同様に高強度繊維を使用する必要がある。天然植物繊維の中でもアバカとも呼ばれるマニラ麻は古くから高強度ロープに使用されてきたように高い強度をもっている。このマニラ麻と熱可塑性スターチ系樹脂を組み合わせた植物由来複合材料の一方強化材とクロスプライ材の引張強さはそれぞれ 363MPa、180MPa に達し、汎用 GFRP の強度に匹敵することが示されている<sup>(6)</sup>。

同じマニラ麻を熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂と組み合わせた長繊維一方強化複合材料の場合 (図 1)、さらに高強度化が達成され、繊維体積率 79% の複合材料の引張強さとヤング率はそれぞれ 520MPa、17GPa に達する。そしてこの複合材料の引張強さは複合則及び Curtin モデルで予測可能であることを示した<sup>(7)</sup>。

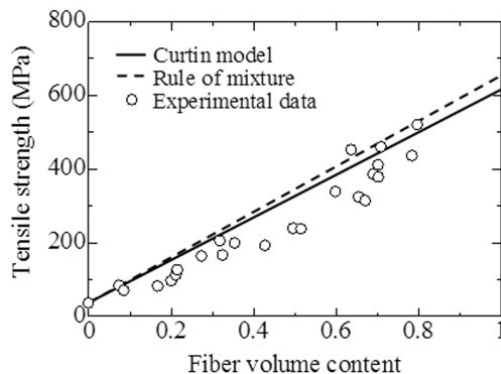


図 1 マニラ麻繊維強化エポキシ樹脂複合材料の引張強さと繊維体積率の関係<sup>(7)</sup>

上述した生分解性樹脂を天然植物繊維で補強した植物由来複合材料の場合、完全生分解性を示すことは大きなメリットであるが、母材の生分解性樹脂が高価格であるため(例えばポリ乳酸の価格は石油由来プラスチックの2倍以上<sup>(9)</sup>)、複合材料のコストが従来材よりも高くなり、複合材料の幅広い普及に対する障害の一つとなっている。

これを克服するために生分解性樹脂に限らず樹脂を一切使用しない(バインダーフリー)新しい植物由来複合材料の開発が行われている。森らは爆砕法により抽出した竹繊維の周りに付着している柔細胞組織が熱可塑性を発現することに着目し、強化材に竹繊維、母材に竹の柔細胞組織となる組み合わせの植物由来複合材料(バインダーフリー竹グリーンコンポジット)をホットプレス成形により試作し、その優れた強度特性について報告している<sup>(10)</sup>。

このバインダーフリー竹グリーンコンポジットの引張強さと3点曲げ強さに及ぼすホットプレス成形時の成形圧力と成形温度の関係について調査した結果を図2に示す<sup>(10)</sup>。この複合材料の強度特性は、成形条件の影響を大きく受け、適切な成形条件を選択することが重要であることを示している。そして、引張強さと3点曲げ強さの最大値はそれぞれ638MPa、468MPaになり、完全植物由来複合材料として極めて高い強度特性を保有することが報告されている<sup>(10)</sup>。

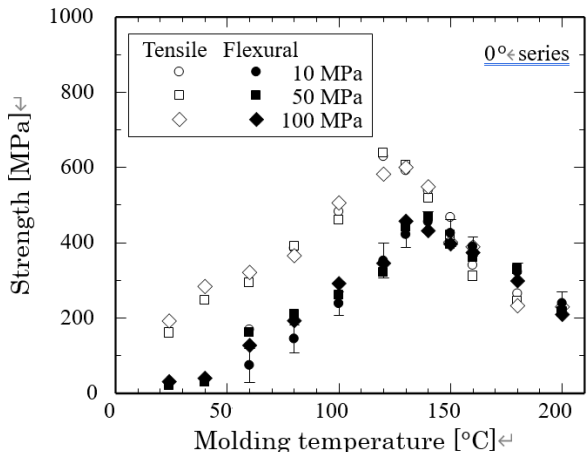


図2 バインダーフリー竹グリーンコンポジットの引張強さと3点曲げ強さに及ぼすホットプレス成形条件の影響<sup>(10)</sup>

### 生分解特性

前述したように、20世紀の後半に従来材であるGFRPの廃棄問題を解決するため、生分解性樹脂と天然植物繊維を組み合わせた完全生分解性複合材料が開発されてきた。しかし、当時は生分解性試験の手法が確立していなかったため、植物油由来複合材料の生分解特性に関する報告例は少ない。

重量率50%のマニラ麻で一方向強化したスターチ系生分解性複合材料の生分解挙動を調査するために家庭用コンポスト機を使用して生分解実験を行った報告がある<sup>(11)(12)</sup>。生分解性複合材料(グリーンコンポジット)において著しい生分解速度の促進が報告されている(図3)<sup>(12)</sup>。

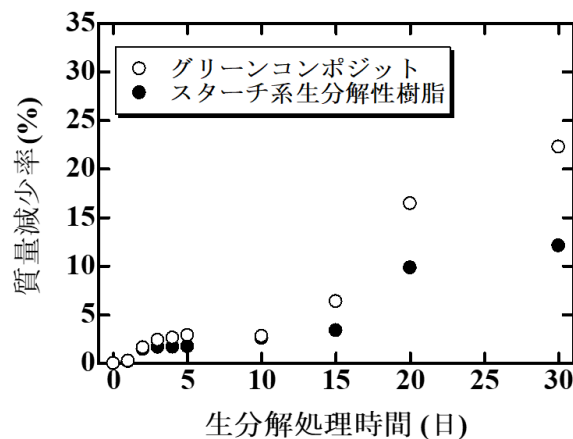


図3 マニラ麻繊維強化スターチ系生分解性複合材料の生分解挙動<sup>(12)</sup>

そして、このような生分解速度の促進メカニズムとして図4のモデルが考えられる。このモデルによると、生分解性樹脂単体材の場合、生分解はサンプル表面のみで生じる。一方、生分解性複合材料の場合、ステップ①後に表面の生分解性樹脂が分解して界面が露出するようになる。ステップ②後では、繊維/母相間の界面で優先的な生分解が進行する。最終のステップ③後になると、繊維自身の生分解反応が繊維の外表面と繊維内部のルーメン表面において進行し、生分解に寄与する表面積が劇的に増大するため、結果として生分解速度の向上がもたらされると考えられる。

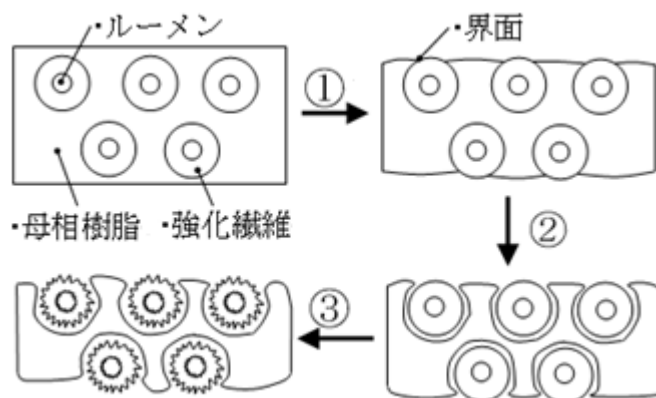


図4 天然繊維強化生分解性複合材料の生分解モデル

### 熱伝導特性

冒頭の“はじめに”で触れたように天然植物繊維の特徴の一つにルーメンと呼ばれる空洞が繊維の内部にあり、中空構造(パイプ状)になっていることである。特別な前処

理を施さない限り、通常このルーメンは空気で満たされている。空気の熱伝導率は  $0.0241\text{W/mK}$  と低いので、天然植物繊維で補強した複合材料の熱伝導率は、従来材である GFRP と CFRP の熱伝導率よりも低くなり、断熱性に優れる特徴をもつことが予想される。

植物由来複合材料の厚さ方向の熱伝導率を従来材である GFRP と CFRP 及び 2 種類の木材（栗、桐）の熱伝導率を比較した結果を図 5 に示す<sup>(12)</sup>。図中の BFGC はパルプ状の竹繊維とポリ乳酸を組み合わせた竹繊維強化グリーンコンポジット（Bamboo Fiber-Reinforced Green Composites）である。この植物由来複合材料の熱伝導率の値は、材料の密度を考慮すると、栗、桐などの木材の熱伝導率に近いことがわかる。そして従来材である GFRP と CFRP の熱伝導率と比較すると、植物由来複合材料の熱伝導率は著しく低く、断熱性に優れることがわかる。

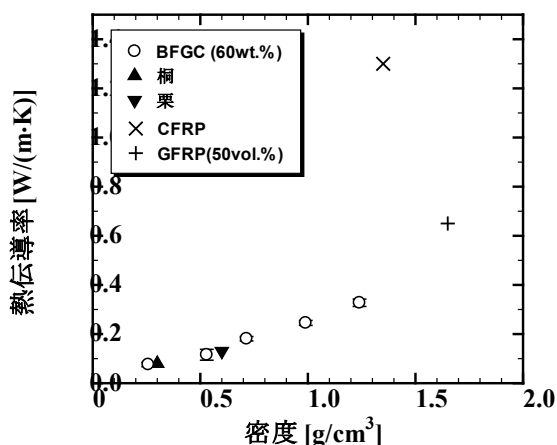


図 5 植物由来複合材料の熱伝導率と密度の関係<sup>(12)</sup>

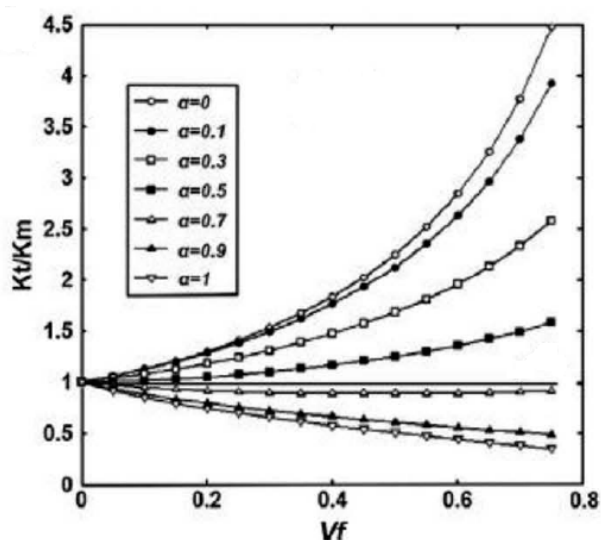


図 6 モデル複合材料の規格化熱伝導率と体積率との関係（繊維の熱伝導率が母相の熱伝導率の 10 倍の場合）<sup>(13)</sup>

このように植物由来複合材料の熱伝導率が低くなる報告例は多いが、その原因については不明な点が多かった。Liu らは、天然植物繊維のルーメン形状を考慮したモデル複合材料の熱伝導解析と実験による検証を行って、ルーメンの大きさ ( $\alpha$  =ルーメン径と繊維径の比)、繊維の熱伝導率の値などの因子に依存してモデル複合材料の熱伝導率が複雑に変化することを示した (図 6)<sup>(13)(14)</sup>。この結果からわかる重要な点は、繊維の熱伝導率が母材よりも大きい場合であっても、ルーメンサイズの大きい (高い  $\alpha$  値) 繊維を使用した場合、複合材料の熱伝導率は繊維強化材体積率の増加とともに減少する。しかし、ルーメンサイズの小さい (低い  $\alpha$  値) 繊維を使用した場合、複合材料の熱伝導率は逆に増加することである。

例えば、ルーメンサイズの大きいマニラ麻繊維と小さい竹繊維で補強した植物由来複合材料の熱伝導率の繊維体積率に対する依存性を確認すると<sup>(14)</sup>、解析結果と同様にルーメンサイズの大きさによって熱伝導率の繊維体積率に対する依存性が逆転することがわかる。つまり、天然植物繊維のルーメンの大きさは植物の種類によって異なるため、植物由来複合材料の熱伝導特性がキーポイントとなる場合は、天然植物繊維の選択が重要になることを意味する。

また、セルロースナノファイバー (CNF) の場合、ルーメンは存在しないため ( $\alpha=0$ )、母材の熱伝導率がセルロースの熱伝導率よりも大きい場合、CNF 強化複合材料の熱伝導率は繊維強化材体積率の増加とともに大きくなり<sup>(15)</sup>、高い熱伝導材料としての応用が可能になると考えられる。

### 振動減衰特性

機械構造物の振動は騒音の発生源となるばかりでなく、しばしば重要な破壊現象を引き起こす重要な問題である。たとえば航空機が大きな迎角で飛行した際に尾翼が振動（バフエット現象）することによって構造材料の疲労損傷を促進する現象が報告されている<sup>(16)</sup>。このような背景から強度特性のみならず振動減衰能に優れた構造材料の開発の重要性が高まっている。

植物由来複合材料の振動減衰特性に関する研究は少なく、まだ解決されていない問題点も多い。しかし、天然植物繊維はガラス繊維や炭素繊維などの無機繊維よりも粘弾性特性が高いことが知られているため<sup>(17)</sup>、天然植物繊維強化複合材料の振動減衰特性は従来材である CFRP よりも優れていることが報告されている (図 7)<sup>(18)</sup>。

植物由来複合材料はこのような振動減衰機能があるため、楽器の共鳴板あるいは自転車のフレームに応用されている<sup>(8)</sup>。特に自転車のフレームに適用した場合、道路の凹凸によりもたらされるフレームの振動が抑えられ乗り心地が良くなることが報告されている<sup>(19)</sup>。

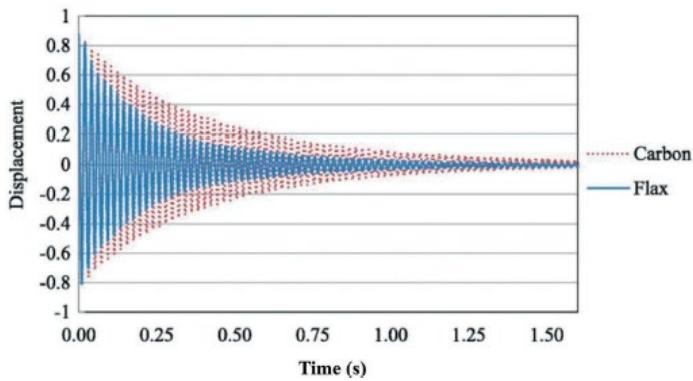


図7 亜麻 (Flax) 繊維強化複合材料と CFRP の制振特性の比較<sup>(18)</sup>

## おわりに

本稿では、植物由来材料の強度特性のみならず各種機能性について解説した。単一の特性に限定すると、例えば強度特性の場合、植物由来材料はCFRPよりも劣ることは明らかである。しかし、植物由来材料の注目すべき特徴は、適度の強度特性が発現することに加えて、例えば断熱性あるいは制振性などの複数の機能性を同時に付与させることができる点である。このような多機能性（マルチ・ファンクショナリティ）を発揮できることが従来の複合材料には見られない特徴と言える。しかし、まだ未開発の機能性も多く残されているため、植物由来材料の機能性発現に関する研究が今後ますます進展することを期待する。

## 執筆者プロフィール

<正員>

高木 均

◎徳島大学大学院社会産業理工学研究部 教授

(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1

E-mail: takagi@tokushima-u.ac.jp)

◎専門：複合材料工学、エコマテリアル工学

## 参考文献

- (1) A. Nakamura, Future perspectives and challenges for realizing sustainable societies—In terms of program management, *Journal of International Association of P2M*, Vol. 11, No. 1(2016), pp. 11-21.
- (2) 奥山祐矢, 脱炭素社会の構築に向けた環境省の取組について, *風力エネルギー*, Vol. 43, No. 1(2019), pp. 65-68.
- (3) 高木均, グリーンコンポジット～循環型社会の実現に不可欠なバイオマス材料～, *日本機械学会誌*, Vol. 110, No. 1059(2007), p. 140.
- (4) 田中達也, 平野康雄, 長繊維ペレット製造装置 天然複合材(エココンポジット)への応用, *R&D神戸製鋼技報*, Vol. 51, No. 2(2001), pp. 62-66.
- (5) 藤井透, 西野孝, 合田公一, 岡本忠, 環境調和複合材料の開発と応用(2005).
- (6) 越智真治, 高木均, 田中秀行, マニラ繊維強化クロスプライ・グリー

- ンコンポジットの引張特性, *材料*, Vol. 52, No. 8(2003), pp. 916-921.
- (7) H. Takagi, A. N. Nakagaito, K. Itotani, Y. Fukubayashi, Development and characterization of thermoset green composites reinforced by unidirectional abaca fibers, *J Materials: Design and Applications*, Vol. 230, No. 5(2016), pp. 934-938.
- (8) H. Takagi, Review of functional properties of natural fiber-reinforced polymer composites: Thermal insulation, biodegradation and vibration damping properties, *Advanced Composite Materials*, Vol. 28, No. 5(2019), pp. 525-543.
- (9) 辻本敬, 元木浩二, 尹一男, 宇山浩, 船岡正光, リグノフェノールをコアとする分岐状ポリ乳酸の開発, *ネットワークポリマー*, Vol. 29, No. Supplement(2008), pp. 239-240.
- (10) 森浩司, 高木均, 竹繊維を用いたバインダフリーグリーンコンポジットの機械的特性, *材料*, Vol. 58, No. 5(2009), pp. 362-367.
- (11) 越智真治, 高木均, 一方向強化グリーンコンポジットの生分解挙動, *材料*, Vol. 53, No. 4(2004), pp. 454-458.
- (12) 高木均, 機能性グリーンコンポジットの開発とその評価方法, *ポリファイル*, Vol. 45, No. 528(2008), pp. 40-45.
- (13) K. Liu, H. Takagi, R. Osugi, Z. Yang, Effect of lumen size on the effective transverse thermal conductivity of unidirectional natural fiber composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 5(2012), pp. 633-639.
- (14) K. Liu, H. Takagi, R. Osugi, Z. Yang, Effect of physicochemical structure of natural fiber on transverse thermal conductivity of unidirectional abaca/bamboo fiber composites, *Composites Part A*, Vol. 43, No. 8(2012), pp. 1234-1241.
- (15) K. Uetani, T. Okada, H. T. Oyama, Thermally conductive and optically transparent flexible films with surface-exposed nanocellulose skeletons. *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4(2016), pp. 9697-9703.
- (16) 高木清嘉, 加茂宗太, 藤田清孝, 梓澤直人, 小林利章, 楠戸一正, 振動減衰特性に優れた“ベクトラン®”複合材を用いた先進航空機構造の開発, *三菱重工技報*, Vol. 56, No. 1(2019), pp. 1-6.
- (17) S. H. Hanipah, M. A. P. Mohammed, A. S. Baharuddin. Non-linear mechanical behaviour and bio-composite modelling of oil palm mesocarp fibres. *Composite Interfaces*. Vol. 23, No. 1(2015), pp. 37-49.
- (18) J. Flynn, A. Amiri, C. Ulven. Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance. *Materials & Design*, Vol. 102(2016), pp. 21-29.
- (19) A. Amiri, T. Krosbakken, W. Schoen, D. Theisen, C. A. Ulven, Design and manufacturing of a hybrid flax/carbon fiber composite bicycle frame, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, Vol. 232, No. 1(2018), pp. 28-38.